

陈沛霖 岳孝芳 主编

# 空调与制冷技术手册



同济大学出版社

## 内 容 提 要

本手册是一本空调和制冷技术专业的工具书。书中系统地介绍了空调和制冷的基本原理和有关应用问题,内容分空调和制冷两大部分。取材原则以实用为主,宗旨是使读者借助本手册能独立解决空调和制冷领域中有关系统运行和测定及设备维护的常见技术问题。此外,有关运行和管理工程技术人员在本手册的帮助下也能作一般的工程设计计算。

本手册供空调和制冷工程技术人员参考,也可作为专业培训用教材和大专学校有关专业学生的教学参考书。

责任编辑:姜富明 张平官

封面设计:李志云

### 空调与制冷技术手册

陈沛霖 岳孝方 主编

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

上虞科技外文印刷厂排版

常熟市印刷二厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张: 31 插页: 25 字数: 957 千字

1990 年 7 月第一版 1990 年 10 月第二次印刷

印数: 4501-6000 定价: 15.00 元

ISBN7-5608-0594-9/TB·17

# 前 言

近年来我国的空调事业取得了迅速的发展，目前已形成了一支庞大的从事空调和制冷设备及系统的设计、生产、安装和运行管理的专业队伍。本手册的编写目的是向他们提供一本实用而方便的工具书。

本手册的内容侧重于介绍夏季空调的有关问题，编排上分空调和制冷两大部分。编写的宗旨是：

1. 注重“新”和“实用”。所谓“新”，就是要尽量反映近年来出现的、并得到应用的新技术和新方法。对尚属于发展中的最新动向也作简要的介绍。所谓“实用”，就是重点介绍的是常遇的应用技术问题。对每一问题首先是简明扼要地说明其基本原理，而更注重的是介绍它们的解决方法。凡涉及要作计算的，尽量使之图表化，以避免读者作繁复的计算。此外，还注意通过实例来介绍各种计算方法的具体应用。

2. 对不属于空调范畴，但是在原理上相同的内容，也视可能条件列入书中，如冷藏、家用电冰箱。

3. 许多基层单位常要求空调、制冷技术人员懂得基本的电工知识，为此在手册中专列一章“空调与制冷常用电工设备”以介绍空调、制冷装置中必要的电动机和其他有关电气设备的技术知识。目的是使读者参考本章后能独立解决一些基本的电气问题。

4. 书中全部应用国际制单位（除了个别地方由于资料来源问题，有些数据的单位没有完全符合国际制单位体系的规定）。考虑到我国有相当多的技术工作者目前还比较习惯于米制单位，有些数据后面用括号列出以米制单位表达的数值。此外，在书首附有国际制、米制和英制单位换算表。

本书是作者们在多年的教学、科研和其他的实践工作的基础上编写出来的，由陈沛霖和岳孝方主编。各编写者所承担的章次为绪论、第1,2和3章陈沛霖；第4章和第10章的部分内容张恩泽；第5,6和第8章刘传聚；第7和第9章秦慧敏；第10章的部分内容和第11章注文晃；第12,14,16,17,19,20章和第18章部分内容岳孝方；第13,15,21章和第18章部分内容陈汝东。

姜富明和赵建明两位同志也参加了编写工作。

本书是第一次出版，有待于今后的使用过程中发现问题，再作修改和提高，故热忱欢迎读者们提出改进意见。

编者

1989年3月

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球



# 目 录

|             |   |
|-------------|---|
| 基本符号表 ..... | 1 |
| 单位换算表 ..... | 3 |

## 第一篇 空气调节

|                                 |          |
|---------------------------------|----------|
| <b>第1章 湿空气的性质</b> .....         | <b>3</b> |
| 1.1 湿空气的组成 .....                | 3        |
| 1.2 湿空气的状态 .....                | 4        |
| 1.3 湿空气参数的计算和焓湿图 .....          | 10       |
| 1.3.1 已知空气的温度和相对湿度,求其他参数 .....  | 10       |
| 1.3.2 已知空气的温度和含湿量,求其他参数 .....   | 11       |
| 1.3.3 已知空气的焓和含湿量,求温度和相对湿度 ..... | 11       |
| 1.3.4 已知空气的温度和焓,求含湿量和相对湿度 ..... | 12       |
| 1.4 湿空气焓湿图 .....                | 12       |
| 1.5 焓湿图的应用 .....                | 14       |
| 1.5.1 热湿比 .....                 | 14       |
| 1.5.2 等湿加热或等湿冷却 .....           | 15       |
| 1.5.3 等焓加湿 .....                | 16       |
| 1.5.4 等温加湿 .....                | 17       |
| 1.5.5 减焓减湿 .....                | 17       |
| 1.5.6 两种不同状态空气的混合 .....         | 18       |
| 1.5.7 应用实例 .....                | 20       |
| 1.6 湿球温度和露点温度 .....             | 23       |
| 1.6.1 湿球温度 .....                | 23       |
| 1.6.2 露点温度 .....                | 25       |
| 1.7 湿空气的密度 .....                | 26       |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 1.8        | 湿空气参数的表格 .....   | 27        |
| 1.8.1      | 已知空气的温度 $t$ 和含湿量 $x$ , 查空气的焓 $h$ .....                             | 27        |
| 1.8.2      | 已知空气的温度 $t$ 和所在地区, 查饱和空气的焓 $h_b$ .....                             | 27        |
| 1.8.3      | 已知空气的温度 $t$ 和所在地区, 查饱和空气的含湿量 $d_b$ ( $d_b = 0.001 x_b$ ) .....     | 34        |
| 1.8.4      | 已知空气的温度 $t$ 和相对湿度 $RH$ , 查湿空气的含湿量 $d$ ( $d = 0.001 x$ ) .....      | 36        |
| 1.8.5      | 已知空气的温度 $t$ 和含湿量 $d$ ( $d = 0.001 x$ ), 查相对湿度 $RH$ .....           | 36        |
| 1.8.6      | 已知干球温度 $t$ 和干湿球温差 $\Delta t$ , 求空气的含湿量 $d$ ( $d = 0.001 x$ ) ..... | 36        |
| 1.8.7      | 已知空气的温度 $t$ 和相对湿度 $RH$ , 查空气的湿球温度 $t_s$ .....                      | 37        |
| 1.8.8      | 已知空气的温度 $t$ 和含湿量 $d$ ( $d = 0.001 x$ ), 查湿空气的密度 $\rho$ .....       | 37        |
| <b>第2章</b> | <b>室内和室外空气设计参数</b> .....   | <b>88</b> |
| 2.1        | 室内空气设计参数 .....   | 88        |
| 2.1.1      | 舒适性空调的室内空气设计参数 .....   | 88        |
| 2.1.2      | 工艺性空调的室内空气设计参数 .....   | 89        |
| 2.2        | 室外空气设计参数 .....   | 92        |
| <b>第3章</b> | <b>空调热湿负荷和送风量的确定</b> .....   | <b>99</b> |
| 3.1        | 计算空调热湿负荷的目的 .....  | 99        |
| 3.2        | 空调房间送风量和送风状态参数的确定 .....  | 100       |
| 3.3        | 送风中的新风量 .....  | 104       |
| 3.4        | 室内热源造成的负荷 .....  | 106       |
| 3.4.1      | 人体散热和散湿 .....  | 106       |
| 3.4.2      | 照明灯具散热 .....   | 106       |
| 3.4.3      | 用电设备的散热 .....  | 108       |
| 3.4.4      | 其他设备散热 .....   | 109       |

|            |                   |            |
|------------|-------------------|------------|
| 3.5        | 室外热源造成的负荷         | 109        |
| 3.5.1      | 关于太阳的基本知识         | 109        |
| 3.5.2      | 关于室外空气温度          | 111        |
| 3.5.3      | 通过玻璃窗进入室内的太阳辐射热   | 112        |
| 3.5.4      | 通过外墙和屋顶从室外传进室内的热量 | 130        |
| 3.6        | 新风负荷和制冷系统负荷       | 139        |
| 3.7        | 空调负荷的概算指标         | 140        |
| 附录         | 热传系数的计算方法         | 141        |
| <b>第4章</b> | <b>空调设备</b>       | <b>146</b> |
| 4.1        | 空气的热、湿处理设备        | 146        |
| 4.1.1      | 空气热、湿处理的途径及使用的设备  | 146        |
| 4.1.2      | 喷水室               | 147        |
| 4.1.3      | 表面式换热器            | 169        |
| 4.1.4      | 空气热、湿处理的其他设备      | 196        |
| 4.2        | 空气的净化处理设备         | 201        |
| 4.3        | 常用的空调设备           | 214        |
| <b>第5章</b> | <b>空气调节系统</b>     | <b>219</b> |
| 5.1        | 全空气空调系统的原理及组成     | 219        |
| 5.1.1      | 系统的组成             | 220        |
| 5.1.2      | 系统的工作原理           | 221        |
| 5.2        | 全空气空调系统的运行管理      | 230        |
| 5.2.1      | 新风状态变化时的运行调节方法    | 231        |
| 5.2.2      | 室内负荷变化时的运行调节方法    | 232        |
| 5.2.3      | 空调系统运行中的故障及排除     | 234        |
| 5.3        | 风机盘管空调系统的原理及组成    | 236        |
| 5.3.1      | 系统布置、新风供给方式及水管系统  | 236        |
| 5.3.2      | 风机盘管机组的选择计算       | 240        |
| 5.4        | 风机盘管空调系统的运行管理     | 242        |
| 5.4.1      | 风机盘管机组的局部调节方法     | 243        |
| 5.4.2      | 风机盘管空调系统的全年运行调节   | 243        |

|            |                   |            |
|------------|-------------------|------------|
| 5.4.3      | 维护管理              | 244        |
| 5.5        | 诱导器空调系统           | 245        |
| 5.5.1      | 诱导系统的设计           | 247        |
| 5.5.2      | 诱导器空调系统的调节及管理     | 248        |
| 5.6        | 空调系统的气流组织         | 249        |
| <b>第6章</b> | <b>风管系统</b>       | <b>253</b> |
| 6.1        | 风管系统的设计           | 253        |
| 6.1.1      | 风管系统设计的原则         | 253        |
| 6.1.2      | 风管阻力计算            | 258        |
| 6.1.3      | 风管系统设计中的几个问题      | 263        |
| 6.2        | 风管系统的保温           | 267        |
| 6.2.1      | 保温层厚度的计算          | 268        |
| 6.2.2      | 保温材料的选择           | 271        |
| 6.3        | 空调工程中常用通风机        | 272        |
| 6.3.1      | 离心式通风机            | 272        |
| 6.3.2      | 轴流式通风机            | 274        |
| 6.3.3      | 通风机的性能            | 275        |
| 6.3.4      | 通风机在管路系统中的工作      | 279        |
| 附录 6.1, a) | 圆形标准风管规格          | 281        |
| 附录 6.1, b) | 矩形标准风管规格          | 282        |
| 附录 6.2     | 莫迪图               | 284        |
| 附录 6.3     | 薄钢板风管的比摩阻线解图      | 285        |
| 附录 6.4     | 矩形风管流量当量直径表       | 287        |
| 附录 6.5     | 局部阻力系数            | 293        |
| <b>第7章</b> | <b>水管系统</b>       | <b>315</b> |
| 7.1        | 水管系统的形式           | 315        |
| 7.1.1      | 开式系统和闭式系统         | 315        |
| 7.1.2      | 定水量系统和变水量系统       | 316        |
| 7.1.3      | 单式水泵供水系统和复式水泵供水系统 | 317        |
| 7.1.4      | 同程式回水方式和异程式回水方式   | 318        |



|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 7.2        | 水管系统的设计计算               | 319        |
| 7.2.1      | 能量方程式                   | 319        |
| 7.2.2      | 管段的阻力计算                 | 321        |
| 7.2.3      | 系统的水力计算原理和水压分布图         | 337        |
| 7.2.4      | 水泵选择及其应用                | 340        |
| 7.3        | 空调水管系统的布置方法             | 351        |
| 7.3.1      | 表冷器的配管布置                | 351        |
| 7.3.2      | 喷水室的配管布置                | 353        |
| 7.3.3      | 冷却塔的配管布置                | 356        |
| 7.3.4      | 水泵的配管布置                 | 357        |
| 7.3.5      | 膨胀水箱的配管布置               | 358        |
| 7.4        | 设备和附件的配管设计方法            | 360        |
| 7.4.1      | 冷却塔                     | 360        |
| 7.4.2      | 喷水室                     | 363        |
| 7.4.3      | 回水箱和回水泵                 | 364        |
| 7.4.4      | 膨胀水箱                    | 366        |
| 7.4.5      | 集水器和分水器                 | 368        |
| 7.4.6      | 除污器和水过滤器                | 369        |
| 7.5        | 管材、管件和保温                | 369        |
| 7.5.1      | 管材                      | 369        |
| 7.5.2      | 管道连接件                   | 372        |
| 7.5.3      | 管道保温                    | 372        |
| 7.6        | 管道系统试验                  | 376        |
| <b>第8章</b> | <b>空调系统的消声、隔振与防火、排烟</b> | <b>378</b> |
| 8.1        | 空调系统的消声                 | 378        |
| 8.1.1      | 噪声的基本概念与评价标准            | 378        |
| 8.1.2      | 空调系统的噪声源                | 388        |
| 8.1.3      | 噪声控制                    | 393        |
| 8.2        | 空调装置的减振                 | 398        |
| 8.3        | 空调系统的防火                 | 402        |

|              |                   |            |
|--------------|-------------------|------------|
| 8.4          | 民用建筑的防烟、排烟        | 406        |
| 8.4.1        | 自然排烟              | 407        |
| 8.4.2        | 机械排烟              | 408        |
| 8.4.3        | 防烟加压系统            | 409        |
| 8.4.4        | 密闭防烟              | 411        |
| 8.5          | 防火规范简介            | 411        |
| 附录 8.1       | 金属风管内的噪声衰减量[dB/m] | 414        |
| 附录 8.2       | 支通道的噪声衰减量         | 414        |
| 附录 8.3       | 弯头的噪声衰减量[dB]      | 415        |
| 附录 8.4       | 单变径管的噪声衰减量        | 415        |
| 附录 8.5       | 风口反射损失计算图         | 416        |
| 附录 8.6 a)    | 直角弯头(贴吸声材料)的消声量   | 416        |
| 附录 8.6 b)    | 消声弯头的消声量          | 417        |
| 附录 8.6 c)    | 共振型消声弯头           | 417        |
| 附录 8.6 d)    | 消声静压箱的消声量计算图      | 418        |
| 附录 8.6 e)    | 微穿孔板消声器           | 418        |
| 附录 8.7 a)    | 风冷式窗式空调器噪声声功率级    | 419        |
| 附录 8.7 b)    | 风机盘管机组及诱导器噪声声功率级  | 419        |
| 附录 8.7 c)    | 水冷式室内空调机噪声声功率级    | 419        |
| <b>第 9 章</b> | <b>空调节能技术</b>     | <b>420</b> |
| 9.1          | 与空调节能有关的建筑因素和环境因素 | 420        |
| 9.1.1        | 空调能耗的构成           | 420        |
| 9.1.2        | 与空调节能有关的诸建筑因素     | 422        |
| 9.1.3        | 计算空调能量需要量用的室外空气参数 | 423        |
| 9.2          | 减少新风负荷、降低新风能耗     | 428        |
| 9.2.1        | 新风负荷的计算           | 428        |
| 9.2.2        | 降低新风负荷的措施         | 430        |
| 9.2.3        | 空调系统新风负荷的计算实例     | 434        |
| 9.3          | 经济能源在空调中的利用       | 435        |
| 9.3.1        | 室外新风供冷            | 435        |

|               |                          |            |
|---------------|--------------------------|------------|
| 9.3.2         | 间接蒸发冷却供冷                 | 436        |
| 9.4           | 空调系统设计和运行管理中的节能技术        | 438        |
| 9.4.1         | 选定合理的空气处理方法              | 438        |
| 9.4.2         | 提高输能效率,利用变流量技术降低运行能<br>耗 | 441        |
| 9.4.3         | 应用蓄能技术                   | 451        |
| 9.5           | 空调排风能量回收装置               | 455        |
| 9.5.1         | 空气-空气全热(或显热)交换器          | 455        |
| 9.5.2         | 热管换热器                    | 465        |
| <b>第 10 章</b> | <b>空调系统的测试与调整</b>        | <b>470</b> |
| 10.1          | 空调测试常用仪器                 | 470        |
| 10.1.1        | 温度的测量                    | 470        |
| 10.1.2        | 相对湿度的测量                  | 504        |
| 10.1.3        | 压力的测量                    | 508        |
| 10.1.4        | 流速的测量                    | 514        |
| 10.1.5        | 流量的测量                    | 520        |
| 10.1.6        | 其他参数的测量                  | 528        |
| 10.2          | 空调系统的测定与调整               | 528        |
| 10.2.1        | 空调系统风量的测定与调整             | 528        |
| 10.2.2        | 空气热湿处理过程的测定              | 537        |
| 10.2.3        | 室内空气参数的测定                | 541        |
| 10.2.4        | 测定与调整中问题的分析和改进方法         | 543        |
| <b>第 11 章</b> | <b>空调与制冷常用电工设备</b>       | <b>547</b> |
| 11.1          | 三相异步电动机                  | 547        |
| 11.1.1        | 异步电动机的转动原理               | 547        |
| 11.1.2        | 三相异步电动机的构造               | 548        |
| 11.1.3        | 三相异步电动机的工作原理             | 562        |
| 11.1.4        | 三相异步电动机的转差率              | 565        |
| 11.1.5        | 三相异步电动机的电磁转矩             | 565        |
| 11.1.6        | 三相异步电动机的机械特性             | 577        |

|        |                               |     |
|--------|-------------------------------|-----|
| 11.1.7 | 三相异步电动机的功率选择 .....            | 577 |
| 11.2   | 三相变极多速异步电动机 .....             | 579 |
| 11.2.1 | YD系列变极多速异步电动机 .....           | 580 |
| 11.2.2 | YD-F系列变极多速异步电动机 .....         | 598 |
| 11.3   | 电磁调速三相异步电动机 .....             | 598 |
| 11.3.1 | JZT(或YCT)系列电磁调速异步电动机 .....    | 601 |
| 11.3.2 | YCTD系列电磁调速异步电动机 .....         | 607 |
| 11.3.3 | YCTT(JZTT)系列变极电磁调速异步电动机 ..... | 615 |
| 11.4   | 三相异步电动机的起动及其电器和导线的选用 .....    | 615 |
| 11.4.1 | 直接起动法(包括导线的选用与敷设) .....       | 615 |
| 11.4.2 | 降压起动法 .....                   | 652 |
| 11.4.3 | 变极异步电动机的控制电路 .....            | 660 |
| 11.5   | 三相异步电动机的使用与注意 .....           | 661 |
| 11.6   | 电加热器及其使用 .....                | 663 |
| 11.6.1 | 单相交流电阻负载电路 .....              | 663 |
| 11.6.2 | 对称三相交流电阻负载电路 .....            | 668 |
| 11.6.3 | 管状电加热元件 .....                 | 671 |
| 11.7   | 交流电基本参数的测量 .....              | 681 |
| 11.7.1 | 电工仪表的一般知识 .....               | 681 |
| 11.7.2 | 交流电压与电流的测量 .....              | 682 |
| 11.7.3 | 交流电功率的测量 .....                | 683 |

## 第二篇 制冷技术

|               |                             |            |
|---------------|-----------------------------|------------|
| <b>第 12 章</b> | <b>蒸汽压缩式制冷循环 .....</b>      | <b>693</b> |
| 12.1          | 蒸汽压缩式制冷的主要设备 .....          | 693        |
| 12.2          | 蒸汽压缩式理论制冷循环 .....           | 694        |
| 12.2.1        | 制冷剂的 $\lg P-h$ 图 .....      | 695        |
| 12.2.2        | 蒸汽压缩式理论制冷循环在 $\lg P-h$ 图上的表 |            |



|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 示 .....                              | 697 |
| 12.3 蒸汽压缩式理论制冷循环的热力计算 .....          | 698 |
| 12.3.1 热力计算的基本公式 .....               | 698 |
| 12.3.2 液态制冷剂过冷和吸气过热的制冷循环 .....       | 700 |
| 12.3.3 回热制冷循环 .....                  | 702 |
| 12.3.4 双级制冷循环 .....                  | 704 |
| 12.3.5 复叠式蒸汽压缩制冷循环 .....             | 713 |
| <b>第 13 章 制冷剂和载冷剂</b> .....          | 716 |
| 13.1 制冷剂 .....                       | 716 |
| 13.1.1 对制冷剂的要求 .....                 | 716 |
| 13.1.2 制冷剂的种类 .....                  | 717 |
| 13.1.3 常用制冷剂的性质 .....                | 721 |
| 13.2 载冷剂 .....                       | 730 |
| 13.2.1 对载冷剂的要求 .....                 | 730 |
| 13.2.2 常用的载冷剂 .....                  | 731 |
| <b>第 14 章 制冷压缩机</b> .....            | 740 |
| 14.1 活塞式制冷压缩 .....                   | 740 |
| 14.1.1 活塞式制冷压缩机的分类 .....             | 740 |
| 14.1.2 活塞式制冷压缩机的总体结构和主要零<br>部件 ..... | 741 |
| 14.1.3 活塞式制冷压缩机的工作性能 .....           | 752 |
| 14.2 螺杆式制冷压缩机 .....                  | 764 |
| 14.2.1 螺杆式制冷压缩机的结构和工作原理 .....        | 764 |
| 14.2.2 螺杆式制冷压缩机的运行调节 .....           | 768 |
| 14.3 偏心滚动转子式制冷压缩机 .....              | 770 |
| 14.4 涡旋(涡线)式制冷压缩机 .....              | 771 |
| 14.5 离心式制冷压缩机 .....                  | 772 |
| 14.5.1 离心式制冷压缩机的构造和工作原理 .....        | 772 |
| 14.5.2 离心式制冷压缩机的调节 .....             | 773 |
| <b>第 15 章 冷凝器和蒸发器</b> .....          | 775 |

|               |                  |            |
|---------------|------------------|------------|
| 15.1          | 冷凝器              | 775        |
| 15.1.1        | 冷凝器的构造及特点        | 775        |
| 15.1.2        | 冷凝器的传热系数         | 780        |
| 15.1.3        | 冷凝器的选择计算         | 786        |
| 15.2          | 蒸发器              | 790        |
| 15.2.1        | 蒸发器的构造及特点        | 791        |
| 15.2.2        | 蒸发器的传热系数         | 795        |
| 15.2.3        | 蒸发器的选择计算         | 799        |
| <b>第 16 章</b> | <b>制冷剂的节流机构</b>  | <b>802</b> |
| 16.1          | 手动调节阀            | 802        |
| 16.2          | 浮球调节阀            | 802        |
| 16.3          | 热力膨胀阀            | 801        |
| 16.3.1        | 内平衡热力膨胀阀工作原理     | 805        |
| 16.3.2        | 外平衡热力膨胀阀工作原理     | 807        |
| 16.3.3        | 热力膨胀阀的安装         | 808        |
| 16.4          | 热电膨胀阀            | 809        |
| 16.5          | 毛细管              | 810        |
| <b>第 17 章</b> | <b>辅助设备和自控装置</b> | <b>812</b> |
| 17.1          | 辅助设备             | 812        |
| 17.1.1        | 油分离器             | 812        |
| 17.1.2        | 贮液器              | 813        |
| 17.1.3        | 过滤干燥器            | 814        |
| 17.1.4        | 热交换器             | 815        |
| 17.1.5        | 熔塞               | 815        |
| 17.2          | 自控装置             | 816        |
| 17.2.1        | 自动控制阀            | 816        |
| 17.2.2        | 继电器              | 823        |
| <b>第 18 章</b> | <b>制冷系统</b>      | <b>832</b> |
| 18.1          | 制冷设备的选择计算        | 832        |
| 18.2          | 制冷机房和设备布置        | 833        |

|             |                   |     |
|-------------|-------------------|-----|
| 18.3        | 制冷剂管道的设计          | 839 |
| 18.3.1      | 管道材料及连接           | 839 |
| 18.3.2      | 管径的确定方法           | 842 |
| 18.3.3      | 制冷剂管道的布置原则        | 853 |
| 18.4        | 制冷机组              | 861 |
| 18.4.1      | 活塞式冷水机组           | 861 |
| 18.4.2      | 活塞式冷、热水机组         | 864 |
| 18.4.3      | 螺杆式冷水机组           | 869 |
| 18.4.4      | 离心式冷水机组           | 869 |
| 18.4.5      | 空调机组              | 871 |
| <b>第19章</b> | <b>制冷系统的调试和维护</b> | 882 |
| 19.1        | 调试前的准备工作          | 882 |
| 19.2        | 制冷系统的试漏           | 883 |
| 19.2.1      | 压力检漏              | 883 |
| 19.2.2      | 真空检漏              | 888 |
| 19.3        | 制冷剂的充加和制冷系统的调试    | 890 |
| 19.3.1      | 制冷剂的充加            | 890 |
| 19.3.2      | 制冷系统的调试           | 892 |
| 19.4        | 制冷装置的常见故障和排除方法    | 893 |
| 19.4.1      | 电路系统的常见故障和排除方法    | 893 |
| 19.4.2      | 制冷系统的常见故障和排除方法    | 894 |
| 19.5        | 制冷装置的维护和保养        | 897 |
| <b>第20章</b> | <b>食品冷</b>        | 900 |
| 20.1        | 食品冷藏库             | 900 |
| 20.2        | 食品冷加工和冷藏条件        | 902 |
| 20.3        | 食品的冻结和冷藏方法        | 904 |
| 20.3.1      | 空气自然对流法           | 905 |
| 20.3.2      | 强制空气循环法           | 905 |
| 20.3.3      | 半接触冻结法            | 906 |
| 20.3.4      | 带式流态床冻结法          | 906 |

|               |                     |            |
|---------------|---------------------|------------|
| 20.4          | 气调冷库和夹套式冷库          | 908        |
| 20.4.1        | 气调冷库                | 908        |
| 20.4.2        | 夹套式冷库               | 909        |
| 20.5          | 食品的冷藏运输             | 910        |
| 20.5.1        | 保温车                 | 910        |
| 20.5.2        | 机械冷藏车或冷藏船           | 910        |
| 20.5.3        | 蓄冷板冷藏车              | 910        |
| 20.5.4        | 冷藏集装箱               | 911        |
| 20.6          | 冷藏陈列柜               | 911        |
| 20.7          | 家用电冰箱               | 911        |
| 20.7.1        | 家用电冰箱的结构            | 912        |
| 20.7.2        | 家用电冰箱的分类            | 915        |
| 20.7.3        | 家用电冰箱的使用和保养         | 917        |
| <b>第 21 章</b> | <b>溴化锂吸收式制冷</b>     | <b>920</b> |
| 21.1          | 溴化锂水溶液的性质及图表        | 921        |
| 21.1.1        | 溴化锂水溶液的性质           | 921        |
| 21.1.2        | 溴化锂水溶液的图表           | 922        |
| 21.2          | 溴化锂吸收式制冷机的工作原理      | 923        |
| 21.3          | 溴化锂吸收式制冷机的热工计算      | 928        |
| 21.3.1        | 热力计算                | 928        |
| 21.3.2        | 设备传热面积的计算           | 932        |
| 21.3.3        | 加热蒸汽的消耗量及泵的流量计算     | 934        |
| 21.4          | 溴化锂吸收式制冷机的辅助设备和附加措施 | 940        |
| 21.4.1        | 辅助设备                | 940        |
| 21.4.2        | 附加措施                | 943        |
| 21.5          | 溴化锂吸收式制冷机的性能        | 943        |
| 21.6          | 冷量的自动调节             | 947        |
| 21.7          | 两效溴化锂吸收式制冷机         | 948        |
| 21.8          | 其他型式的溴化锂吸收式制冷机      | 951        |



# 第一篇 空气调节

空气调节是一门维持室内良好的热环境的技术。这里所谓的热环境是指室内空气的温度、湿度、空气流动速度、洁净度、新鲜度等。空气调节(简称空调)系统的作用是根据使用对象的要求使上述参数部分或全部达到规定的指标。

空调可以有各种各样的对象,但是总起来说可以分成两类:

1. 舒适性空调 其目的是造成室内空气具有良好的参数,以向人们提供一个适宜的工作或生活环境,从而有利于提高工作效率或维持良好的健康水平。

2. 工艺性空调 空调的作用是满足室内的生产、科研等工艺过程所要求的空气参数。如果这些参数要求得不到满足,室内的工作就无法进行,或者产品(或科研)的质量得不到保证。

根据空调的作用时间,还可分为季节性空调和全年空调。季节性空调只是在一年的部分时间中工作,比如夏季空调只是在炎热季节工作以保持室内空气的温湿度。全年空调是全年要工作的,即全年要保证室内空气维持规定的状态,恒温恒湿空调系统就属这一类型。

典型的空调方法是将经过空调设备处理到一定参数的空气送入室内(送风),同时从室内排除相应量的空气(排风)。在这送排风的同时作用下,就能使室内空气保持要求的状态。

由此可见,空调系统应当包括以下几个组成部分:

1. 空气处理设备 其作用是将送风空气处理到一定的状态。

2. 冷源或热源 这是空气处理过程所必须的。热源是用来提供热能来加热送风空气的。常用的热源有提供蒸汽或热水的锅炉或直接加热空气的电热设备。一般,向空调建筑物(或建筑群)供热的锅炉房,同时也向生产工艺设备和生活设施供热,所以它不

是专门为空调配套的。冷源则是用来提供“冷能”来冷却送风空气的,目前用得较多的是蒸气压缩式和吸收式制冷装置,而且这些制冷装置往往也是专门为空调的需要而建立的。所以制冷与空调常常是不可分的。

3. 空调风系统 其作用是将送风空气从空气处理设备通过风管系统送到空调房间内,同时将相应量的排风从室内通过另一风管系统送至空气处理设备作重复使用,或者排至室外。输送空气的动力设备是通风机。

4. 空调水系统 它包括将冷冻水从制冷系统输送至空气处理设备的水管系统和制冷系统的冷却水系统(包括冷却塔和冷却水水管系统)。输送水的动力设备是水泵。

5. 控制、调节装置 由于空调、制冷系统的工况应随室外空气状态和室内情况的变化而变化,所以要经常对它们的有关装置进行调节。这一调节可以是人工进行的,也可以是自动控制的。不论是哪一种方式,都要配以一定的设备和装置。

只有通过正确的设计,合理地确定了上述五个部分的装置,而且能科学地进行运行管理,这一空调、制冷系统才能取得满意的工作效果。

还有一点要特别强调的是空调和制冷属十分耗能(电)的技术领域。近年来,在空调事业取得迅速发展的同时,怎样节能(电)已提上议事日程。目前情况是,由于耗电过多,而供电量不能满足需要而使空调、制冷设备不能正常运行的例子是不少的。故空调、制冷技术中的节能(电)要引起各个方面的重视。这一问题解决不好,势必会影响空调事业在今后的发展。

空调、制冷系统的消音、减振、防火排烟等也是十分重要的问题。这些方面如果处理不好,空调系统不可能取得满意的工作效果。

为了进行工程验收,或是为了科学的运行管理,掌握测试技术是十分重要的。

# 第 1 章 湿空气的性质

## 1.1 湿空气的组成

空调的对象是空气。我们日常接触的不论是室内空气或室外空气都是湿空气，即包含有水蒸汽的空气。这表明湿空气由两个部分组成：干空气和水蒸汽。干空气自身也是包含有多种气体的混合气体，其中主要成分是氮 ( $N_2$ ) 和氧 ( $O_2$ )。此外还有氩 (Ar)、二氧化碳 ( $CO_2$ )、氦 (Ne)、氖 (He) 等 10 多种微量甚至痕量气体存在。干空气中各组成成分是比较稳定的。如以体积百分含量表示，氮占 78%，氧占 21%，其他的所有气体占 1%。

湿空气中水蒸汽的含量是不多的，通常占千分之几到千分之二十几(质量比)。但是，这样少量的含量对人类的活动带来很大的影响，也为空调技术带来了丰富的内容。

空气中水蒸汽的含量可以用多种方式来表达，常用的是“相对湿度”。人的感觉舒适与否不仅与空气的温度有关，而且与空气的相对湿度也有关系(当然还与一些其他因素如空气流动速度、人体遭受到的辐射热强度等也有关系，这里暂且不谈)。相对湿度过大或过小，不论在什么温度条件下，人都不会感到舒适。举例来说，在正常穿衣条件下作轻微劳动的人，如处于温度为  $25[^\circ C]$ 、相对湿度为 60% 的空气环境中，是会感到舒适的。但是在同样的温度下，若相对湿度提高到 90%，人就会觉得闷热、不舒服。对以上两种空气条件，每公斤干空气中包含的水蒸汽量仅相差 6 [g] (即  $0.006[kg]$ )。这样微量的差别带来的影响却是十分大的。

相对湿度对生产过程的影响也是很大的。钢铁的腐蚀现象随空气相对湿度的增加而有明显的增强。过低的相对湿度使生产设

备易于积聚静电，有时，这会带来极大的危害，至少要影响产品质量。所以有些工业(如纺织、烟草工业)的生产工艺过程要求高湿环境。但是，也有一些工艺过程(如胶片生产)则要求接近于干燥的空气。

## 1.2 湿空气的状态

在作空调分析时，经常用到的湿空气参数有四个：温度( $t$ )、焓( $h$ )、含湿量( $x$ )和相对湿度( $RH$ )。此外，湿空气还具有一定的压力 $P$ (大气压)。正如湿空气由于空气和水蒸汽两部分组成一样， $P$ 也由两部分组成：干空气的分压力 $P_g$ 和水蒸汽的分压力 $P_q$ ，它们之间的关系是

$$P = P_g + P_q \quad (1.1)$$

压力的单位用[Pa]或[mbar](1[mbar]=100[Pa])\*。

空气温度用摄氏度[℃]来表示。

含湿量 $x$ 的定义是每1kg干空气中所含的水蒸汽量(kg)，所以 $x$ 的单位是[kg/kg干空气]，有时将它改为[g/kg干空气]，这时含湿量用符号 $d$ 来表示。显然，

$$x[\text{kg/kg干空气}] = \frac{1}{1000} d[\text{g/kg干空气}] \quad (1.2)$$

为了简化表达，以后都用“kg干”替代“kg干空气”。

$x$ 的计算式是：

$$x = \frac{0.622 P_q}{P - P_q} [\text{kg/kg干}]^* \quad (1.3)$$

【例1.11】已知大气压 $P=101325[\text{Pa}]$ ，空气中的水蒸汽分压力 $P_q=1700[\text{Pa}]$ 。求含湿量。

【解】按(1.3)式

\* 过去习用的米制压力单位有[mm H<sub>2</sub>O]、[mm Hg]、大气压等，它们与[Pa]或[mbar]的换算关系见单位换算1。

\*\* 式中的0.622，其准确数应是0.62198。



$$x = \frac{0.622 \times 1700}{101325 - 1700} = 0.01061 [\text{kg}/\text{kg干}]$$

焓是用来表示物质系统能量状态的一个参数，其数值等于定压比热  $c_p$  乘温度  $t$ ，即

$$h = c_p t \quad (1.4)$$

定压比热的含义是在压力不变的条件下，1[kg] 物质升高温度 1[°C] 所需要的热量。干空气的定压比热  $c_{p,a} = 1.005$  [kJ/kg°C] (0.24 [kcal/kg°C])，故干空气的焓是

$$\begin{aligned} h_a &= 1.005t \quad [\text{kJ}/\text{kg}] \\ (h_a &= 0.24t \quad [\text{kcal}/\text{kg}]) \end{aligned} \quad (1.5)$$

水蒸汽的定压比热  $c_{p,g} = 1.84$  [kJ/kg°C] (0.44 [kcal/kg°C])，故水蒸汽的焓是

$$\begin{aligned} h_g &= 2500 + 1.84t \quad [\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}] \\ (h_g &= 597.3 + 0.44t \quad [\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}]) \end{aligned} \quad (1.6)$$

这里，2500 [kJ/kg] (597.3 [kcal/kg]) 是 0[°C] 的水变成 0[°C] 的水蒸汽所需要的汽化热。

湿空气的焓一般以 1[kg] 干空气作为基数进行计算的，这时伴随着 1[kg] 干空气的还有  $x$  [kg] 水蒸汽。因此，包含 1[kg] 干空气的湿空气的焓应是：

$$\begin{aligned} h &= h_a + x h_g \\ &= 1.005t + x(2500 + 1.84t) \quad [\text{kJ}/\text{kg干}] \\ (h &= 0.24t + x(597.3 + 0.44t) \quad [\text{kcal}/\text{kg干}]) \end{aligned} \quad (1.7)$$

以后，焓的单位也简化成 [kJ/kg干]。

【例 1.2】空气的温度  $t = 20.0$  [°C]，含湿量  $x = 0.010$  [kg/kg干]。求它的焓。

【解】根据(1.7)式可算得

$$\begin{aligned} h &= 1.005 \times 20.0 + 0.010(2500 + 1.84 \times 20.0) = 45.47 \quad [\text{kJ}/\text{kg干}] \\ & \quad (\text{或 } 10.86 \quad [\text{kcal}/\text{kg干}]) \end{aligned}$$

在空调工程中，参数焓很有用处。我们可以根据空气处理过程中空气的焓的变化来判断空气是得热还是失热。空气的焓升高了，这必是得热过程；反之，如果焓下降了，这必是失热过

程。按这原理，我们可以利用焓的变化值来计算空气流经热交换器后得到的或失去的热量。现以  $h_1$  表示进入空气加热器前空气的焓， $h_2$  表示离开空气加热器的空气的焓， $G$  表示空气的流量（以 [kg 干/s] 计\*）。那末，空气得到的热量是：

$$Q = G(h_2 - h_1), \quad [\text{kJ/s}] \text{ (或 } [\text{kW}]) \quad (1.8)$$

假如空气流经的是空气冷却器，那末必定是  $h_2 < h_1$ ，即空气失去了热量（换句通俗的话来说，空气得到了冷量）。这一冷量的计算式应写成

$$Q = G(h_1 - h_2), \quad [\text{kJ/s}] \text{ (或 } [\text{kW}]) \quad (1.9)$$

这里要说明的是：对湿空气来说，焓的增加（或减少）并不一定反映在温度的增加（或减少）上。有时空气的焓是增加了，但是温度却是下降了，这一问题将在下一节中详细讨论。

【例 1.3】空气流经一空气冷却器，其焓值从  $h_1 = 70.0$  [kJ/kg 干] 下降到  $h_2 = 55.0$  [kJ/kg 干]。已知空气的流量  $G = 10.0$  [kg/s]。试计算该空气冷却器提供的冷量值。

【解】按(1.9)式可以直接算得这一冷量值是：

$$\begin{aligned} Q &= 10.0(70.0 - 55.0) = 150.0 \text{ [kJ/s]} \\ &= 150.0 \text{ [kW]} \text{ (35.83 [kcal/s] 或 129000 [kcal/h])} \end{aligned}$$

下面我们来解释相对湿度的含义。在公式(1.1)中出现的水蒸汽分压力  $P_q$ ，它有一最大值，称为水蒸汽饱和压力，以  $P_{q,b}$  表示之。 $P_{q,b}$  值不是常数，而是一个与温度有关的数值，它随温度的升高而增加。表 1.1 中列出的就是在不同的温度下的  $P_{q,b}$  值。如果空气中的水蒸汽分压力较大，而且已经等于  $P_{q,b}$  ( $P_q = P_{q,b}$ )，那末我们称这空气为饱和空气。如果实际的水蒸汽分压力小于水蒸汽饱和压力 ( $P_q < P_{q,b}$ )，那末该空气是非饱和的。由此可见， $P_q$  与  $P_{q,b}$  二值间的关系反映了湿空气的饱和程度（也即潮湿程度）。我们就将  $P_q$  与  $P_{q,b}$  的比值称为相对湿度值 ( $RH$ )：

\* 为简化，以后空气流量的单位都表达为 [kg/s]，省去“干空气”三字。

水蒸汽饱和压力  $P_{\text{sat}}$  (水面), [Pa]

表 1.1

| $t$ [°C] | 0      | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| -20      | 125.37 | 134.20 | 143.24 | 152.50 | 161.97 | 171.65 | 181.54 | 191.65 | 201.98 | 212.54 |
| -19      | 136.61 | 145.44 | 154.24 | 163.00 | 171.83 | 180.73 | 189.79 | 199.01 | 208.39 | 217.93 |
| -18      | 148.74 | 157.49 | 166.14 | 174.78 | 183.49 | 192.26 | 201.09 | 209.97 | 218.91 | 227.91 |
| -17      | 161.83 | 170.47 | 179.00 | 187.51 | 196.00 | 204.55 | 213.15 | 221.81 | 230.52 | 239.29 |
| -16      | 179.94 | 188.43 | 196.80 | 205.14 | 213.44 | 221.70 | 229.92 | 238.10 | 246.33 | 254.52 |
| -15      | 191.14 | 199.57 | 207.96 | 216.30 | 224.59 | 232.83 | 241.03 | 249.18 | 257.28 | 265.34 |
| -14      | 207.50 | 215.81 | 224.08 | 232.30 | 240.47 | 248.60 | 256.68 | 264.72 | 272.72 | 280.68 |
| -13      | 225.11 | 233.29 | 241.42 | 249.50 | 257.53 | 265.51 | 273.45 | 281.34 | 289.19 | 297.00 |
| -12      | 244.04 | 252.08 | 260.08 | 268.03 | 275.93 | 283.78 | 291.58 | 299.34 | 307.05 | 314.72 |
| -11      | 263.38 | 271.28 | 279.14 | 286.95 | 294.71 | 302.43 | 310.10 | 317.73 | 325.31 | 332.85 |
| -10      | 286.22 | 293.96 | 301.65 | 309.29 | 316.88 | 324.43 | 331.93 | 339.39 | 346.81 | 354.19 |
| -9       | 309.65 | 317.23 | 324.76 | 332.24 | 339.67 | 347.05 | 354.38 | 361.67 | 368.92 | 376.13 |
| -8       | 334.78 | 342.19 | 349.54 | 356.84 | 364.09 | 371.29 | 378.44 | 385.54 | 392.60 | 399.62 |
| -7       | 361.71 | 368.93 | 376.10 | 383.22 | 390.29 | 397.31 | 404.28 | 411.21 | 418.10 | 424.95 |
| -6       | 390.55 | 397.57 | 404.54 | 411.46 | 418.33 | 425.15 | 431.92 | 438.64 | 445.32 | 451.95 |
| -5       | 421.42 | 428.23 | 434.99 | 441.70 | 448.36 | 454.97 | 461.53 | 468.05 | 474.52 | 480.95 |
| -4       | 454.43 | 461.03 | 467.58 | 474.08 | 480.53 | 486.93 | 493.28 | 499.58 | 505.83 | 512.04 |
| -3       | 489.73 | 496.10 | 502.42 | 508.69 | 514.91 | 521.08 | 527.20 | 533.27 | 539.30 | 545.29 |
| -2       | 527.45 | 533.56 | 539.62 | 545.63 | 551.59 | 557.50 | 563.36 | 569.17 | 574.93 | 580.65 |
| -1       | 567.72 | 573.57 | 579.37 | 585.12 | 590.82 | 596.47 | 602.07 | 607.62 | 613.13 | 618.60 |
| 0        | 610.69 | 616.27 | 621.80 | 627.28 | 632.71 | 638.09 | 643.42 | 648.70 | 653.94 | 659.14 |

續表 1.1

| $t [^{\circ}\text{C}]$ | 0       | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.5     | 0.6     | 0.7     | 0.8     | 0.9     |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0                      | 610.09  | 619.14  | 619.62  | 624.13  | 628.67  | 633.24  | 637.84  | 642.46  | 647.12  | 651.81  |
| 1                      | 656.52  | 661.27  | 666.05  | 670.85  | 675.69  | 680.56  | 685.46  | 690.39  | 695.36  | 700.36  |
| 2                      | 706.38  | 710.34  | 715.52  | 720.65  | 725.80  | 730.99  | 736.21  | 741.46  | 746.75  | 752.07  |
| 3                      | 757.42  | 762.81  | 768.23  | 773.68  | 779.17  | 784.70  | 790.25  | 795.85  | 801.48  | 807.14  |
| 4                      | 812.84  | 818.57  | 824.34  | 830.15  | 835.99  | 841.87  | 847.78  | 853.73  | 859.72  | 865.74  |
| 5                      | 871.81  | 877.91  | 884.04  | 890.22  | 896.43  | 902.69  | 908.98  | 915.31  | 921.67  | 928.08  |
| 6                      | 934.53  | 941.01  | 947.54  | 954.10  | 960.71  | 967.36  | 974.04  | 980.77  | 987.54  | 994.35  |
| 7                      | 1001.20 | 1008.09 | 1015.03 | 1022.00 | 1029.02 | 1036.09 | 1043.18 | 1050.33 | 1057.52 | 1064.76 |
| 8                      | 1072.03 | 1079.35 | 1086.72 | 1094.13 | 1101.58 | 1109.08 | 1116.62 | 1124.21 | 1131.85 | 1139.53 |
| 9                      | 1147.25 | 1155.02 | 1162.84 | 1170.71 | 1178.62 | 1186.58 | 1194.58 | 1202.64 | 1210.74 | 1218.89 |
| 10                     | 1227.03 | 1235.33 | 1243.63 | 1251.97 | 1260.36 | 1268.81 | 1277.30 | 1285.84 | 1294.43 | 1303.08 |
| 11                     | 1311.77 | 1320.52 | 1329.31 | 1338.16 | 1347.06 | 1356.01 | 1365.02 | 1374.07 | 1383.18 | 1392.34 |
| 12                     | 1401.56 | 1410.83 | 1420.15 | 1429.53 | 1438.96 | 1448.45 | 1457.99 | 1467.59 | 1477.24 | 1486.95 |
| 13                     | 1496.71 | 1506.53 | 1516.41 | 1526.35 | 1536.34 | 1546.39 | 1556.49 | 1566.66 | 1576.88 | 1587.16 |
| 14                     | 1597.50 | 1607.90 | 1618.36 | 1628.88 | 1639.45 | 1650.09 | 1660.78 | 1671.55 | 1682.37 | 1693.26 |
| 15                     | 1704.20 | 1715.21 | 1726.28 | 1737.41 | 1748.60 | 1759.86 | 1771.18 | 1782.57 | 1794.02 | 1805.53 |
| 16                     | 1817.11 | 1828.75 | 1840.46 | 1852.24 | 1864.08 | 1875.99 | 1887.98 | 1900.00 | 1912.11 | 1924.29 |
| 17                     | 1936.53 | 1948.84 | 1961.22 | 1973.67 | 1986.19 | 1998.78 | 2011.44 | 2024.17 | 2036.97 | 2049.84 |
| 18                     | 2062.78 | 2075.79 | 2088.88 | 2102.03 | 2115.26 | 2128.56 | 2141.94 | 2155.39 | 2168.91 | 2182.51 |
| 19                     | 2195.18 | 2209.93 | 2223.75 | 2237.65 | 2251.62 | 2265.67 | 2279.80 | 2294.00 | 2308.20 | 2322.64 |
| 20                     | 2337.08 | 2351.60 | 2366.19 | 2380.86 | 2395.62 | 2410.45 | 2425.36 | 2440.36 | 2455.43 | 2470.59 |

续表1.

| [t] | 0       | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.5     | 0.6     | 0.7     | 0.8     | 0.9     |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 21  | 2485.93 | 2501.15 | 2516.55 | 2532.04 | 2544.60 | 2553.26 | 2578.99 | 2594.81 | 2610.72 | 2626.71 |
| 22  | 2642.79 | 2658.95 | 2675.20 | 2691.54 | 2707.96 | 2724.47 | 2741.09 | 2757.75 | 2774.53 | 2791.39 |
| 23  | 2808.34 | 2825.39 | 2842.52 | 2859.75 | 2877.05 | 2894.47 | 2911.97 | 2929.56 | 2947.24 | 2965.02 |
| 24  | 2982.89 | 3000.85 | 3019.91 | 3037.08 | 3055.31 | 3073.65 | 3092.10 | 3110.63 | 3129.27 | 3148.00 |
| 25  | 3166.83 | 3185.75 | 3204.78 | 3223.90 | 3243.13 | 3262.45 | 3281.87 | 3301.40 | 3321.03 | 3340.75 |
| 26  | 3360.58 | 3380.51 | 3400.55 | 3420.69 | 3440.93 | 3461.28 | 3481.73 | 3502.29 | 3522.95 | 3543.72 |
| 27  | 3564.56 | 3585.57 | 3605.66 | 3627.96 | 3649.17 | 3670.58 | 3692.11 | 3713.74 | 3735.48 | 3757.34 |
| 28  | 3779.31 | 3801.38 | 3823.57 | 3845.98 | 3868.29 | 3890.82 | 3913.47 | 3936.23 | 3959.10 | 3982.09 |
| 29  | 4005.19 | 4028.41 | 4051.75 | 4075.21 | 4098.78 | 4122.48 | 4146.29 | 4170.22 | 4194.27 | 4218.44 |
| 30  | 4242.73 | 4257.15 | 4291.63 | 4316.34 | 4341.12 | 4366.03 | 4391.06 | 4416.21 | 4441.49 | 4466.90 |
| 31  | 4192.43 | 4518.09 | 4543.87 | 4569.78 | 4595.82 | 4621.99 | 4548.29 | 4674.72 | 4701.28 | 4727.97 |
| 32  | 4754.79 | 4781.75 | 4808.83 | 4835.05 | 4863.40 | 4890.89 | 4918.51 | 4946.27 | 4974.16 | 5002.19 |
| 33  | 5030.36 | 5058.66 | 5087.10 | 5115.68 | 5144.40 | 5173.26 | 5202.26 | 5231.40 | 5260.68 | 5290.11 |
| 34  | 5319.67 | 5349.38 | 5379.24 | 5409.24 | 5439.38 | 5469.57 | 5500.10 | 5530.69 | 5561.48 | 5592.28 |
| 35  | 5623.31 | 5654.48 | 5685.81 | 5717.28 | 5748.90 | 5780.68 | 5812.60 | 5844.68 | 5876.92 | 5909.30 |
| 36  | 5941.85 | 5974.54 | 6007.39 | 6040.40 | 6073.57 | 6106.89 | 6140.37 | 6174.01 | 6207.81 | 6241.77 |
| 37  | 6275.89 | 6310.17 | 6344.01 | 6379.22 | 6413.98 | 6448.92 | 6484.01 | 6519.27 | 6554.70 | 6590.30 |
| 38  | 6626.06 | 6661.98 | 6698.08 | 6734.35 | 6770.78 | 6807.39 | 6844.16 | 6881.11 | 6918.23 | 6955.52 |
| 39  | 6992.90 | 7030.63 | 7068.45 | 7106.44 | 7144.61 | 7182.95 | 7221.47 | 7260.18 | 7299.06 | 7338.11 |
| 40  | 7377.35 | 7416.77 | 7456.38 | 7495.16 | 7536.13 | 7576.28 | 7616.62 | 7657.14 | 7697.85 | 7738.74 |
| 41  | 7779.82 | 7821.03 | 7862.55 | 7904.20 | 7946.04 | 7988.06 | 8030.28 | 8072.70 | 8115.30 | 8158.10 |
| 42  | 8201.10 | 8244.29 | 8287.67 | 8331.25 | 8375.03 | 8416.01 | 8453.18 | 8501.58 | 8552.14 | 8596.92 |

获取更多资料

$$RH = \frac{P_q}{P_{q,s}} \quad (1.10)$$

$RH$  值愈高,表明空气愈潮湿。如果  $RH = 0$ , 则空气中不含水蒸汽,属干空气;如果  $RH = 1$  (或 100%), 则空气包含的水蒸汽达最大值而成为饱和空气。

【例 1.4】 已知空气的温度  $t = 28.0 [^{\circ}\text{C}]$ , 相对湿度  $RH = 0.60 = 60\%$ 。求该空气中的水蒸汽分压力。

【解】 从表 1.1 中查得  $t = 28.0 [^{\circ}\text{C}]$  时的饱和水蒸汽压力是

$$P_{q,s} = 3779.31 \text{ [Pa]}$$

按(1.10)式可以算得空气中的水蒸汽分压力是

$$P_q = RH \times P_{q,s} = 0.6 \times 3779.31 = 2267.59 \text{ [Pa]}$$

### 1.3 湿空气参数的计算和焓湿图

上一节介绍了四个湿空气参数:  $t, x, h$  和  $RH$ , 事实上, 这四个参数中只有两个是独立的。换句话说, 只要已知任意两个参数 (在某一大气压  $P$  下), 其他两个参数的数值也就确定。下面分几种情况作进一步的阐明。

#### 1.3.1 已知空气的温度和相对湿度, 求其他参数

首先利用(1.10)式计算出空气中的水蒸汽分压力  $P_q$ , 然后将有关数据代入(1.3)式和(1.7)式, 可以分别求得空气的含湿量  $x$  和焓  $h$ 。

【例 1.5】 已知空气的温度  $t = 26.0 [^{\circ}\text{C}]$ , 相对湿度  $RH = 0.55$  (或 55%), 大气压  $P = 101325 \text{ [Pa]}$ 。求空气的含湿量。

【解】 从表 1.1 查得温度为  $26.0 [^{\circ}\text{C}]$  时的水蒸汽饱和压力  $P_{q,s} = 3360.58 \text{ [Pa]}$ 。根据(1.10)式可算得实际的水蒸汽分压力是

$$P_q = RH \times P_{q,s} = 0.55 \times 3360.58 = 1848.32 \text{ [Pa]}$$

将有关数据代入(1.3)式, 可计算出含湿量为

$$x = \frac{0.622 \times 1848.32}{101325 - 1848.32} = 0.01156 \text{ [kg/kg 干]}$$

再根据(1.7)式, 便可得到焓值:

$$\begin{aligned} h &= 1.005 \times 26.0 + 0.01156 (2500 + 1.84 \times 26.0) \\ &= 55.58 \text{ [kJ/kg 干]} \quad (13.28 \text{ [kcal/kg 干]}) \end{aligned}$$

### 1.3.2 已知空气的温度和含湿量,求其他参数

这时可用(1.3)式求空气的相对湿度。当然,公式的形式应略作变换。由于  $P_g = RH \times P_{g,b}$ ,故(1.3)式可写成:

$$x = \frac{0.662 \times RH \times P_{g,b}}{P - RH \times P_{g,b}}$$

稍加变换后可以得到:

$$RH = \frac{xP}{(0.622 + x)P_{g,b}} \quad (1.11)$$

至于焓值,还是利用(1.7)式计算。

【例 1.6】 已知空气的温度  $t=22.0$  [°C], 含湿量  $x=0.00822$  [kg/kg 干], 大气压  $P=101325$  [Pa] (760 [mmHg])。求空气的相对湿度和焓。

【解】 从表 1.1 查得温度等于 22.0 [°C] 时的水蒸汽饱和压力  $P_{g,b}=2642.79$  [Pa]。将有关数值代入(1.11)式,可得:

$$RH = \frac{0.00822 \times 101325}{(0.622 + 0.00822) \times 2642.79} = 0.50 = 50\%$$

按(1.7)式可以算得焓值:

$$h = 1.005 \times 22.0 + 0.00822(2500 + 1.84 \times 22.0) = 42.99 \text{ [kJ/kg 干]} \\ (10.27 \text{ [kcal/kg 干]})$$

### 1.3.3 已知空气的焓和含湿量,求温度和相对湿度

为求温度,要将(1.7)式变换成:

$$t = \frac{h - 2500x}{1.005 + 1.84x} \quad [^\circ\text{C}] \quad (1.12)$$

$$\text{(用米制单位时 } t = \frac{h - 597.3x}{0.24 + 0.44x} \quad [^\circ\text{C}])$$

一旦算得温度后,就可利用(1.11)式计算相对湿度。

【例 1.7】 已知空气的焓  $h=61.00$  [kJ/kg 干](14.57 [kcal/kg 干]), 含湿量  $x=0.0100$  [kg/kg 干], 大气压  $P=101325$  [Pa] (760 [mmHg])。求其他参数。

【解】 将有关数据代入(1.12)式以计算温度:

$$t = \frac{61.00 - 2500 \times 0.0100}{1.005 + 1.84 \times 0.0100} = 35.2 \quad [^\circ\text{C}]$$

求得  $t$  后,就可以用(1.11)式进一步计算相对湿度。从表 1.1 查得温度等于 35.2 [°C] 时水蒸汽饱和压力  $P_{g,b}=5685.81$  [Pa], 则

$$RH = \frac{0.01000 \times 101325}{(0.622 + 0.01000) \times 5685.81} = 0.282 = 28.2\%$$

### 1.3.4 已知空气的温度和焓，求含湿量和相对湿度

首先，可按(1.7)式计算出含湿量：

$$x = \frac{h - 1.005t}{2500 + 1.84t} \quad [\text{kg/kg干}] \quad (1.13)$$

$$\left( \text{用米制单位时 } x = \frac{h - 0.24t}{597.3 + 0.44t} [\text{kg/kg干}] \right)$$

然后，利用(1.11)式计算出相对湿度。

【例 1.8】 已知空气的温度  $t = 25.5$  [°C]，焓  $h = 51.30$  [kJ/kg 干] (12.25 [kcal/kg 干]，大气压  $P = 101325$  [Pa] (760 [mmHg])。求其他参数。

【解】 将有关数据代入(1.13)式：

$$x = \frac{51.30 - 1.005 \times 25.5}{2500 + 1.84 \times 25.5} = 0.01008 \quad [\text{kg/kg干}]$$

从表 1.1 查得  $t = 25.5$  [°C] 时  $P_{g,s} = 3262.45$  [Pa]，然后利用(1.11)式，有

$$RH = \frac{0.01008 \times 101325}{(0.622 + 0.01008) \times 3262.45} = 0.495 = 49.5\%$$

## 1.4 湿空气焓湿图

1.3 节举了一些典型的实例来说明湿空气参数的计算方法。当然，还有一些其他的计算情况（如已知焓和相对湿度，要求其他参数），由于计算原理是一样的，这里不再一一介绍。从以上的例子还可以看出，湿空气参数的计算不是一件复杂的事，但是，在实际工作中，如果频繁地进行计算，终究还是不方便的。于是有人想出一种方法，将前述的湿空气四个参数按公式绘制成图——湿空气焓湿图 ( $h-x$  图或  $h-d$  图)，将所有的计算工作都转化为查图的工作，这样一来计算工作大为简化，而获得的数据的准确度也可以满足一般工程的需要。本书后附有两张根据不同的大气压  $P$  绘制的湿空气焓湿图。初看之下，图中有很多线条，似很复杂。其实其中只有四种基本线条：等  $h$  线、等  $x$  线、等  $t$  线和等  $RH$  线。图 1.1 是焓湿图的示意图。图上一系列水平线是等温



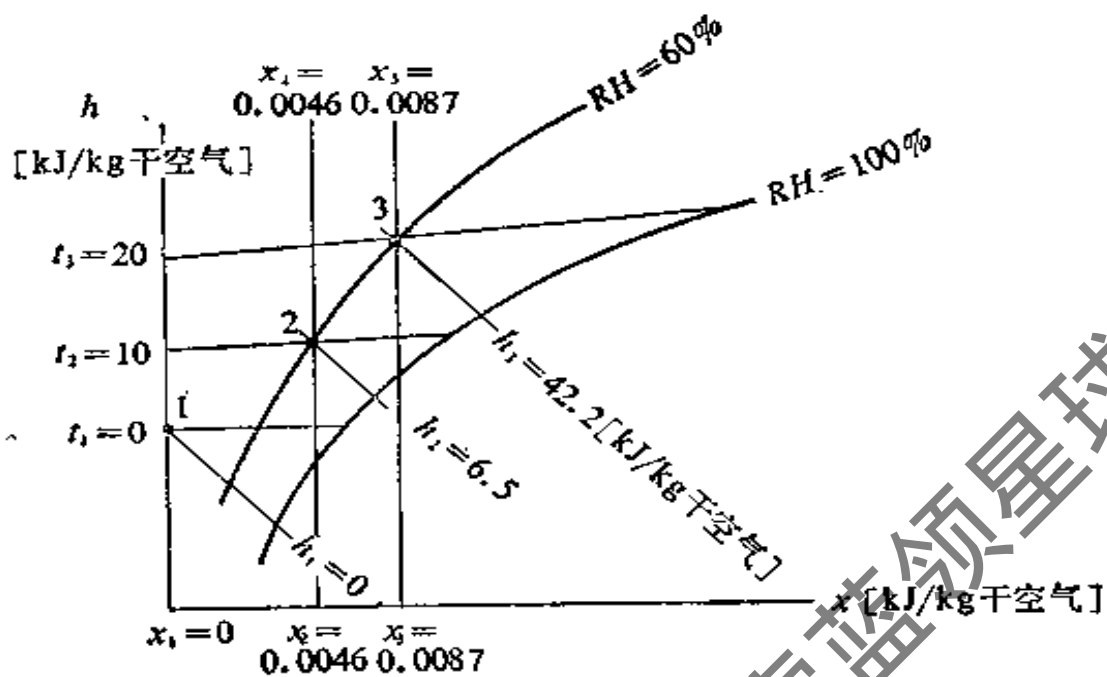


图 1.1 湿空气焓湿图

线，每条线代表一温度。如果仔细看一下，可以发现这些等温线并不平行。只有  $t=0$  [°C] 的等温线是真正水平的，而在它上面的或下面的等温线都偏离水平，离开愈远，倾斜得愈显著。图中一系列垂直线条是等湿线，每条线代表一含湿量。等湿线之间都是平行的。此外，还有一系列与垂直线成  $45^\circ$  的、相互平行的斜线，这是等焓线，每条线代表一焓值。最后，还有一组曲率在变化着的曲线，称为等相对湿度线，每条线代表一相对湿度值，最低的一根曲线表示  $RH=100\%$ ，通常称它为饱和线。图中任一点代表一空气状态。饱和线以下的空气状态是不存在的，因为空气的相对湿度不可能大于  $100\%$ 。饱和线以上的区域内任一点都是可能存在的，每一点都有四个参数： $t, x, h$  和  $RH$ 。为确定任一点的位置，只要知道两个参数就够了，其他两个可以从图上查得（正如前面已交待过的，四个参数中只有两个是独立的，已知两个，就能算得另外两个）。还要强调的一点是，每张焓湿图都是根据某一大气压绘制的，因此在计算时应当选用压力相符的焓湿图。

【例 1.9】 已知下列三种空气状态：

1—— $t_1 = 0 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $x_1 = 0$

2—— $t_2 = 10 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $RH_2 = 60\%$

3—— $t_3 = 20 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $RH_3 = 60\%$

求它们的其他参数。 $P = 101325 [\text{Pa}]$ 。

【解】从附表中选用  $P = 101325 [\text{Pa}]$  的焓湿图，并将上述三点分别定位于图中（即图 1.1 中的 1、2 和 3 三点）。这样，即可从图中读得这三点各自的另外两个参数是：

1—— $t_1 = 0$ ,  $RH_1 = 0$ ;

2—— $x_2 = 0.0046 [\text{kg}/\text{kg 干}]$ ,  $h_2 = 21.5 [\text{kJ}/\text{kg 干}]$ ;

3—— $x_3 = 0.0037 [\text{kg}/\text{kg 干}]$ ,  $h_3 = 42.2 [\text{kJ}/\text{kg 干}]$ ;

用上节介绍的公式来计算，可获得同样的结果，读者不妨试一下。计算结果与查图结果可能会有些误差，这是由于绘图误差和查图误差引起的。通常这一误差不大，对工程应用完全是允许的。

## 1.5 焓湿图的应用

焓湿图不仅能用来确定空气的状态参数，人们还广泛应用它作空调过程的分析和计算。这些工作如果借助于公式进行，有时是十分不方便的，既费事又费时。利用焓湿图进行分析和计算工作还有直观性强的优点。下面分几种常见的情况进行介绍。

### 1.5.1 热湿比

由于各种原因，空气状态会发生变化。比如说，空气的状态原来是  $A$ ，当它流经一空气处理设备后，状态变成  $B$ 。现将这两个状态表示在焓湿图中（图 1.2）。显然，不能仅用温度的变化值来反映这一过程的特征。从图 1.2 可看出从  $A$  变化到  $B$  或  $C$ ，二者具有相同的温度变化值，而  $B$  和  $C$  两点的状态却有很大的差异。确定空气的状态必须要有两个参数，所以反映空气状态变化的特征也必须要有两个参数的变化值。从  $A$  变到  $B$ ，如果知道了焓的变化  $\Delta h$  和含湿量的变化  $\Delta x$ ，那末  $B$  点的位置就确定了。此外， $B$  点是唯一的，不可能存在其他的、同时具有相同的  $\Delta h$  和  $\Delta x$  值的点。故  $\Delta h$  与  $\Delta x$  的比值描绘了空气状态变化的方向，

这一比值称为热湿比(用  $e$  表示), 即:

$$e = \frac{\Delta h}{\Delta x}, \text{ [kJ/kg] ([kcal/kg])} \quad (1.14)$$

$\Delta h$  和  $\Delta x$  有正值或负值之分, 故  $e$  也有正负之分。一定的热湿比值体现了一定的空气状态变化方向。

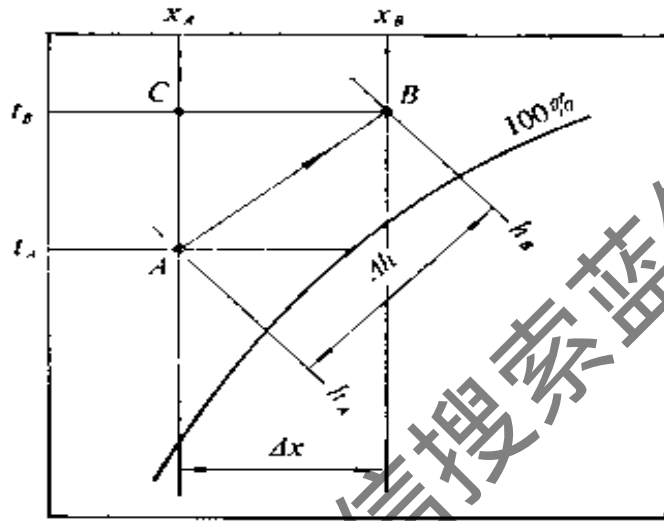


图 1.2 热湿比

### 1.5.2 等湿加热或等湿冷却

这是在空调中常见的空气状态变化过程。空气通过加热器温度升高, 由于没有额外水分加入, 其含湿量是不变的。因此, 空气状态变化过程是沿着等  $x$  线上升的。同理, 空气通过冷却器, 如果在冷却器表面不发生结露现象, 空气温度的下降是沿着等  $x$  线进行的。图 1.3 是在焓湿图上表示的等湿加热和等湿冷却过程。对等湿加热过程, 空气由状态  $A$  加热到状态  $B$ , 焓值升高了  $\Delta h_1$ , 但是含湿量差  $\Delta x_1 = 0$ , 故

$$e_1 = \frac{\Delta h_1}{\Delta x_1} = \frac{h_B - h_A}{0} = +\infty \quad (1.15)$$

对等湿冷却过程, 焓值降低了  $\Delta h_2$  (即焓差是负值), 而  $\Delta x_2 = 0$ , 则此过程的热湿比是

$$e_2 = \frac{\Delta h_2}{\Delta x_2} = \frac{h_C - h_A}{0} = -\infty \quad (1.16)$$

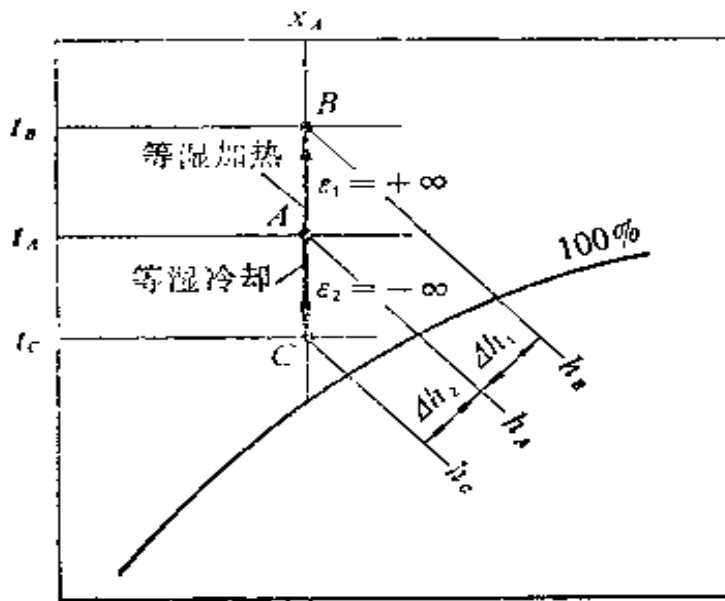


图 1.3 等湿加热和等湿冷却过程

### 1.5.3 等焓加湿

用循环水喷淋空气，当到达稳定状态时，水的温度等于空气的湿球温度\*，且维持不变。这时水与空气之间没有(最终的)热交换，所以空气状态的变化是等焓的。但是，湿交换是存在的，即空气在这过程中被加湿。可见，空气由初状态A向终状态B变化是沿着等焓线下降的(图 1.4)。

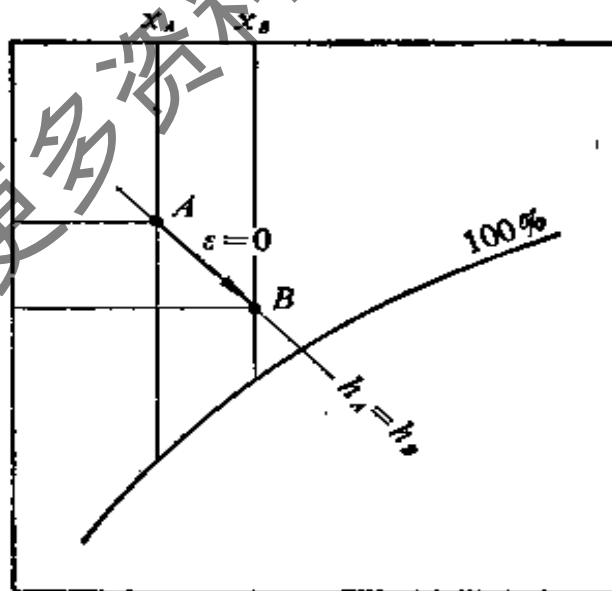


图 1.4 喷循环水加湿空气

\* 湿球温度的概念将在 1.6 节中介绍。

这一过程的热湿比值

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{0}{x_B - x_A} = 0 \quad (1.17)$$

#### 1.5.4 等温加湿

将蒸汽喷入空气，只要控制住蒸汽量，不使空气含湿量超出饱和状态，那末空气状态的变化接近于等温度过程。其原因可说明如下：如果对每 1[kg] 干空气加入  $\Delta x$  (kg) 水蒸汽，那末空气含湿量的增值也是  $\Delta x$  [kJ/kg 干]。在这同时，空气的焓也增加了，其值为：

$$\Delta h = \Delta x(2500 + 1.84t_g) \quad [\text{kJ/kg 干}] \quad (1.18)$$

所以，表示空气状态变化过程特征的热湿比值等于：

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{\Delta x(2500 + 1.84t_g)}{\Delta x} = 2500 + 1.84t_g \quad (1.19)$$

这里， $t_g$  是水蒸汽的温度。 $t_g$  值总是有限的，比如说喷射的是低压蒸汽，其温度  $t_g$  如为 100[°C] 左右，那么  $\varepsilon = 2684$  左右。在焓湿图上这样的热湿比线大致与等温线平行。图 1.5 表示了这一过程。

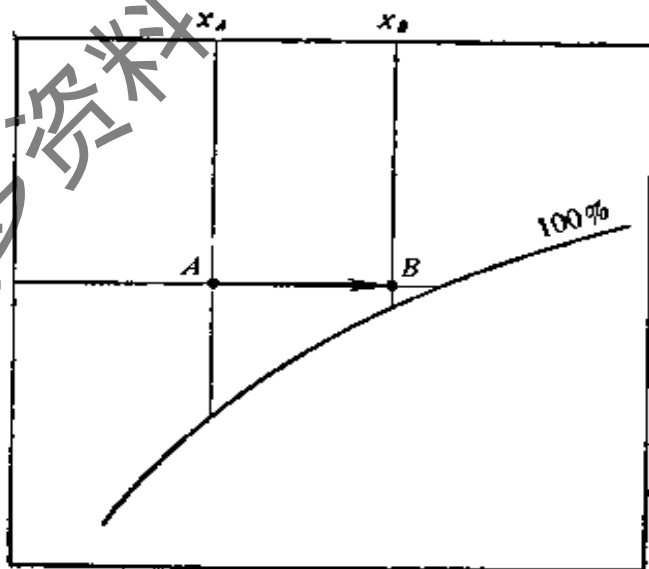


图 1.5 喷蒸汽加湿空气

#### 1.5.5 减焓减湿

这也是在夏季空调中常用的空气处理过程。如果用低于空气

露点温度的水喷淋空气，或用低温水通入空气冷却器，使其表面上发生结露现象，都能出现减焓减湿过程，即空气的焓和含湿量都下降了。图 1.6 定性地表达了这一过程。其热湿比值是：

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{h_B - h_A}{x_B - x_A} \quad (1.20)$$

由于(1.20)式中的分子和分母都是负值，结果得到的  $\epsilon$  是正值。当然，对这一过程没有固定的  $\epsilon$  值，它随空气状态变化过程的不同而不同。

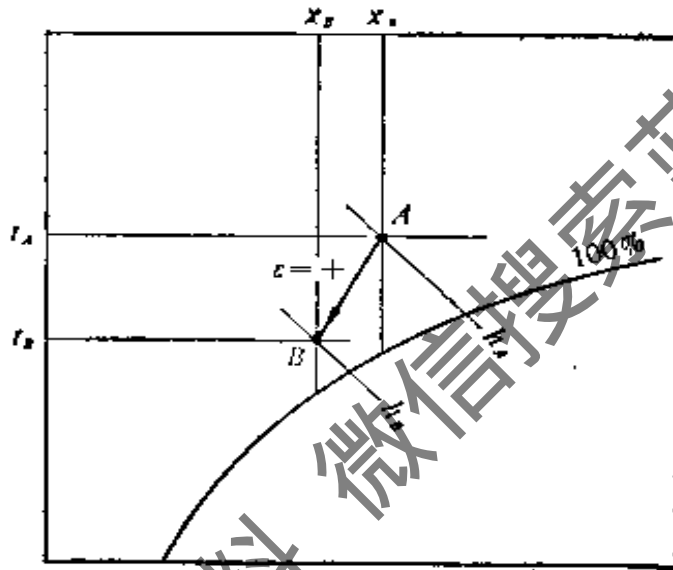


图 1.6 空气的减焓减湿过程

在书后附的焓湿图的右下角给出了一个半圆形，圆弧上的刻度就是热湿比值  $[kJ/kg]$  ( $[kcal/kg]$ )。热湿比线的具体作法如下：通过圆心和表示在圆弧上的热湿比值的点作一直线，将这直线平移到焓湿图中，使通过所要分析的状态点，这条线就是热湿比线。

### 1.5.6 两种不同状态空气的混合

在空调中，常有这样的做法，将两种空气（如室内回风与新风）按一定的比例混合，然后将混合空气送入空气处理室。通常室内回风与新风具有不同的状态，而混合后的空气必具有第三种状态。这里要讨论的是怎样求出混合后空气状态的参数。

现有状态  $A$  和状态  $B$  两种空气混合，它们的流量、焓和含

湿量分别是： $G_A, h_A, x_A$  和  $G_B, h_B, x_B$ 。如果在混合过程中与外界没有热湿交换，则根据热平衡的原理可以写出：

$$G_A h_A + G_B h_B = (G_A + G_B) h_C \quad (1.21)$$

根据湿平衡的原理可以写出：

$$G_A x_A + G_B x_B = (G_A + G_B) x_C \quad (1.22)$$

上两式中  $h_C$  和  $x_C$  表示混合后空气状态的焓和含湿量。从(1.21)式和(1.22)式可分别导出：

$$\frac{G_A}{G_B} = \frac{h_B - h_C}{h_C - h_A} \quad (1.23)$$

$$\frac{G_A}{G_B} = \frac{x_B - x_C}{x_C - x_A} \quad (1.24)$$

(1.23)和(1.24)两式相等，可得：

$$\frac{h_B - h_C}{h_C - h_A} = \frac{x_B - x_C}{x_C - x_A} \quad (1.25)$$

(1.25)式表示的是一直线方程。换句话说，在焓湿图上通过  $A$  和  $B$  绘一条直线，混合空气  $C$  的状态一定是这直线上的某一点(图 1.7)。

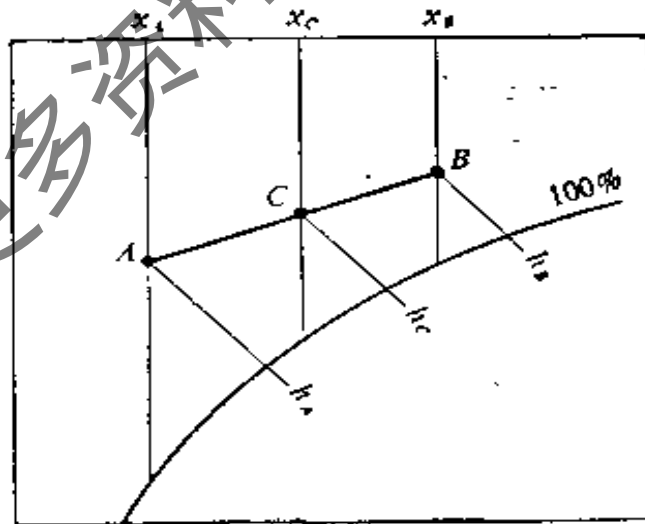


图 1.7 两种空气的混合

$C$  点在直线上的具体位置取决于  $G_A/G_B$  的比值。只要从 (1.23) 式[或(1.24)式]算得  $h_C$  值(或  $x_C$  值)， $h_C$  (或  $x_C$ ) 等值线与直线

A-B 线的交点即为 C。

### 1.5.7 应用实例

【例 1.10】 已知空气流量  $G=2.5$  [kg/s]，其参数为  $t_1=10.0$  [°C]， $RH_1=50\%$ 。现使之通过空气加热器加热到  $t_2=25.0$  [°C]，求空气加热器的供热量，大气压  $P=101325$  [Pa]。

【解】 在  $P=101325$  [Pa] 的焓湿图上，根据  $t_1=10.0$  [°C] 和  $RH_1=50\%$ ，可以确定空气的初始状态 1，并读得其他参数： $h_1=19.6$  [kJ/kg 干] (4.68 [kcal/kg 干]) 和  $x_1=0.0038$  [kg/kg 干] (图 1.8)。加热后空气的含湿量与加热前相同，即  $x_2=x_1=0.0038$  [kg/kg 干]。因此，根据  $t_2$  和  $x_2$  可确定状态 2 的位置及其参数。它们是  $h_2=34.7$  [kJ/kg 干] (8.288 [kcal/kg 干])， $RH_2=19\%$ 。按(1.8)式计算空气加热器的供热量是：

$$Q = G(h_2 - h_1) = 2.5(34.7 - 19.6) = 37.75 \text{ [kW]} \quad (32480 \text{ [kcal/h]})$$

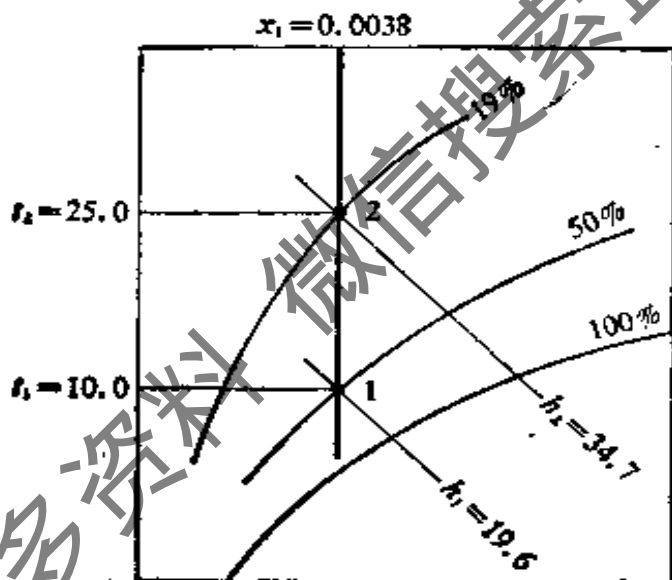


图 1.8 例 1.10 附图

【例 1.11】 使空气流经喷水室进行循环水喷淋加湿。空气的初状态  $t_1=18.0$  [°C]， $RH_1=55\%$ ，空气量  $G=1.5$  [kg/s]。循环水向空气的蒸发量  $W=0.003$  [kg/s]。求加湿后的空气状态。已知  $P=101325$  [Pa]。

【解】 在相应的焓湿图上定出空气初状态 1 的位置，并读得相应参数： $h_1=36.0$  [kJ/kg 干] 和  $x_1=0.007$  [kg/kg 干]。在 1.5.3 中已经阐明用循环水喷淋空气时，所得到的空气状态变化是等焓过程，故  $h_2=h_1=36.0$  [kJ/kg 干]。在喷淋过程中空气含湿量增值是：

$$\Delta x = \frac{W}{G} = \frac{0.003}{1.5} = 0.002 \text{ [kg/kg 干]}$$



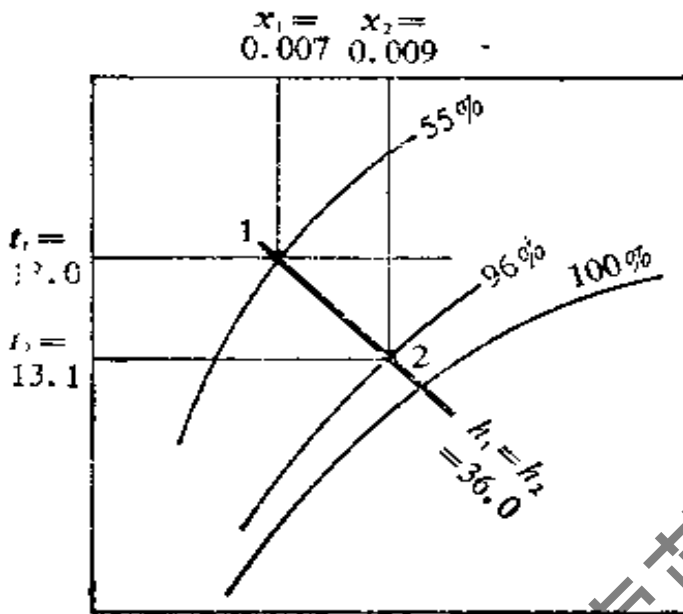


图 1.9 例 1.11 附图

所以,加湿后的空气含湿量是:

$$x_2 = x_1 + \Delta x = 0.007 + 0.002 = 0.009 \text{ [kg/kg 干]}$$

根据  $h_2$  和  $x_2$  可以确定状态 2 的位置,并读得其他参数是:  $t_2 = 13.1$  [°C],  $RH_2 = 96\%$ 。

【例 1.12】 空气的初状态和流量同上例,不过采用喷蒸汽的方法加湿空气。如果将空气处理到饱和状态,需要喷多少蒸汽?  $P = 101325$  [Pa]。

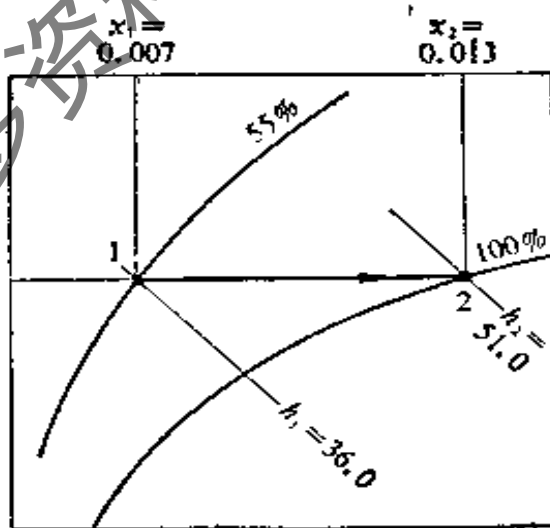


图 1.10 例 1.12 附图

【解】 在 1.5.4 中已说明用蒸汽直接加湿空气时,空气状态的变化近似地是等温过程。所以,通过初状态点 1 作一等温线与饱和线 ( $RH = 100\%$ ) 相交于 2,这就是蒸

汽加湿空气至饱和的状态点。从图上读得此点的其他参数是： $x_2 = 0.013$  [kg/kg干]， $h_2 = 51.0$  [kJ/kg干]。空气总的含湿量增值是：

$$W = G(x_2 - x_1) = 1.5(0.013 - 0.007) = 0.009 \text{ [kg/s]} \quad (32.4 \text{ [kg/h]})$$

显然，根据湿平衡原理，蒸汽喷入量也应是  $W$ 。

【例 1.13】 空气的初状态是  $t_1 = 30.0$  [°C]， $RH_1 = 60\%$ ，要求通过空气冷却器将它处理到  $t_2 = 21$  [°C]， $RH_2 = 95\%$ 。求空气冷却器的供冷量和空气状态变化的热湿比值。已知： $G = 3.0$  [kg/s]， $P = 101325$  [Pa]。

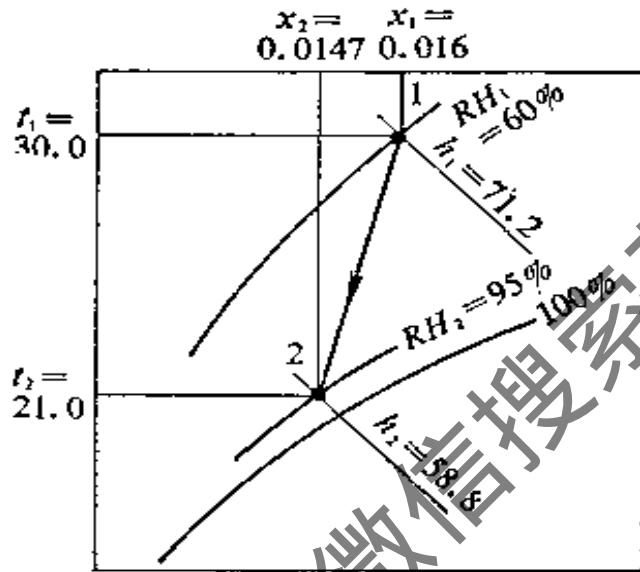


图 1.11 例 1.13 附图

【解】 在焓湿图上确定状态 1 和 2 的位置并读出它们的其他参数： $h_1 = 71.2$  [kJ/kg干] (17.01 [kcal/kg干])， $x_1 = 0.016$  [kg/kg干]， $h_2 = 58.8$  [kJ/kg干] (14.04 [kcal/kg干])， $x_2 = 0.0147$  [kg/kg干] (图 1.11)。根据(1.9)式，空气冷却器的供冷量是：

$$Q = G(h_1 - h_2) = 3.0(71.2 - 58.8) = 37.2 \text{ [kW]} \quad (31992 \text{ [kcal/h]})$$

热湿比值是[按(1.14)式]：

$$\varepsilon = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} = \frac{58.8 - 71.2}{0.0147 - 0.016} = 9533 \text{ [kJ/kg]}$$

【例 1.14】 将下列两种空气混合：

状态 1—— $t_1 = 26.0$  [°C]， $RH_1 = 60\%$ ， $G_1 = 10.8$  [kg/s]

状态 2—— $t_2 = 35.0$  [°C]， $RH_2 = 70\%$ ， $G_2 = 1.2$  [kg/s]

求混合后空气的状态。 $P = 101325$  [Pa]。

【解】 在焓湿图上定出 1 和 2，并读得它们的其他参数： $h_1 = 58.4$  [kJ/kg干]， $x_1 = 0.0126$  [kg/kg干]， $h_2 = 100.0$  [kJ/kg干]， $x_2 = 0.0252$  [kg/kg干]。根据 1.5.6 所交待的原理，通过 1 和 2 作一直线，混合后的空气状态必在此直线上。当然，

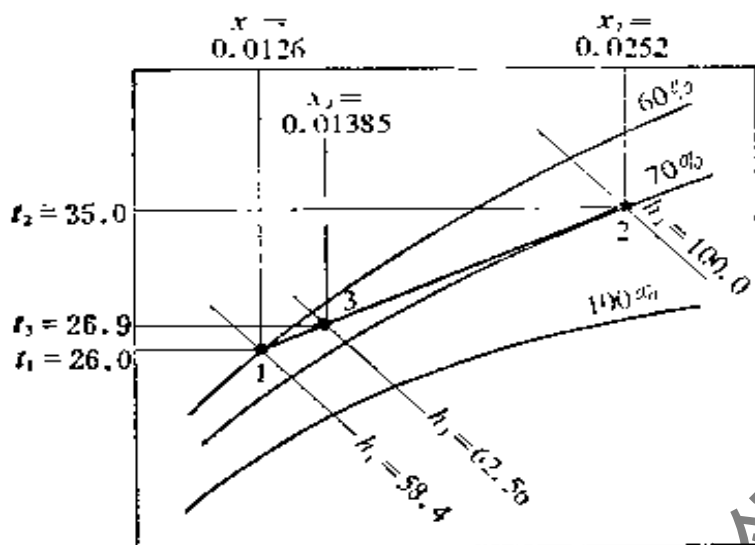


图 1.12 例 1.14 附图

要确定此点的具体位置还应当加一条线。现用(1.23)式来确定混合空气的焓:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1}$$

3 表示混合空气状态。将有关数据代入:

$$\frac{10.0}{1.2} = \frac{100.0 - h_3}{h_3 - 58.4}$$

求得

$$h_3 = 62.56 [\text{kJ/kg 干}]$$

在直线 1—2 上找取焓值为 62.56 [kJ/kg 干] 的点即为所要求的混合状态点 3。从图上可读得该点的  $t_3 = 26.9 [^\circ\text{C}]$ ,  $x_3 = 0.01385 [\text{kg/kg 干}]$ 。也可用(1.24)式来计算  $x_3$ , 结果应是一样的。

## 1.6 湿球温度和露点温度

本节介绍利用焓湿图确定空气的湿球温度和露点温度的方法。

### 1.6.1 湿球温度

在温度计的温包上包扎湿纱布, 过了一个短一段时间后对这温度计读数, 可以发现其温度指示值低于不包湿纱布时的数值。一般, 将不包湿纱布的温度计测得的称为干球温度, 包有湿纱布的温度计测得的称为湿球温度 ( $t_s$ )。干球温度与湿球温度之差值 (简称为干湿球温差) 的大小反映了空气湿度的大小。也就是说,

对同一干球温度的空气，干湿球温差愈小，空气的湿度愈大。当空气到达饱和时 ( $RH = 100\%$ )，干湿球温差等于零，也即干球温度与湿球温度相等。换一种方式来表达的话，除了对饱和空气以外，湿球温度总是小于干球温度。

根据热湿交换的原理得知，湿球表面层的空气属饱和空气 (温度等于湿球温度)，湿球表面与周围空气间的总热交换量近似地为零。所以在焓湿图上表示的话，湿球表面的空气状态与周围空气的状态近似地处于等焓线上。

在空调工程中，广泛地应用干湿球温度计来测量空气的湿度，具体的仪器和测试方法将在第 10 章中介绍。下面通过实例来介绍其计算方法。

【例 1.15】 已知空气的干球温度  $t = 26.0[^\circ\text{C}]$ ，相对湿度  $RH = 60\%$ 。求其湿球温度  $t_s$  值。已知大气压  $P = 101325[\text{Pa}]$ 。

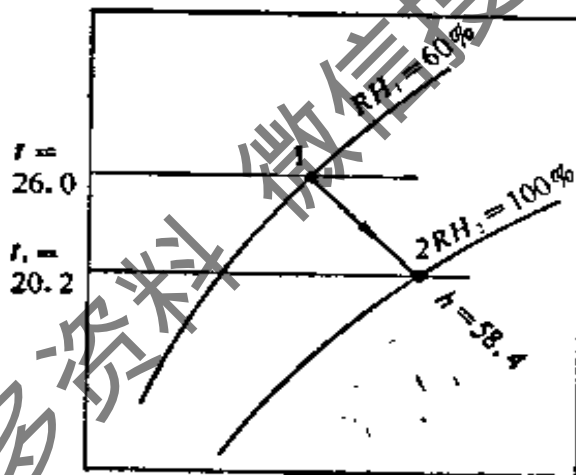


图 1.13 例1.15附图

【解】 在图上按  $t = 26.0[^\circ\text{C}]$  和  $RH = 60\%$  确定空气的状态点 1，并读得其焓值  $h = 58.4[\text{kJ}/\text{kg 干}]$  (图 1.13) 接着找出这条等焓线与饱和线 ( $RH = 100\%$ ) 的交点 2，该点的温度即为湿球温度。从图上读得  $t_s = 20.2[^\circ\text{C}]$ 。

【例 1.16】 用干湿球温度计测量空气，读得干球温度  $t = 28.0[^\circ\text{C}]$ 、湿球温度  $t_s = 24.0[^\circ\text{C}]$ ，求该空气的相对湿度。  $P = 101325[\text{Pa}]$ 。

【解】 根据  $t_s = 24.0[^\circ\text{C}]$  和  $RH = 100\%$  在焓湿图上定出点 1，这就是湿球表面饱和空气的状态点，其焓值  $h = 72.0[\text{kJ}/\text{kg 干}]$ 。然后，找出此等焓线与  $t = 28.0[^\circ\text{C}]$  的等温线的交点 2，这就是要求的空气的状态点。从图上读得该点的相对湿度  $RH = 72\%$ 。

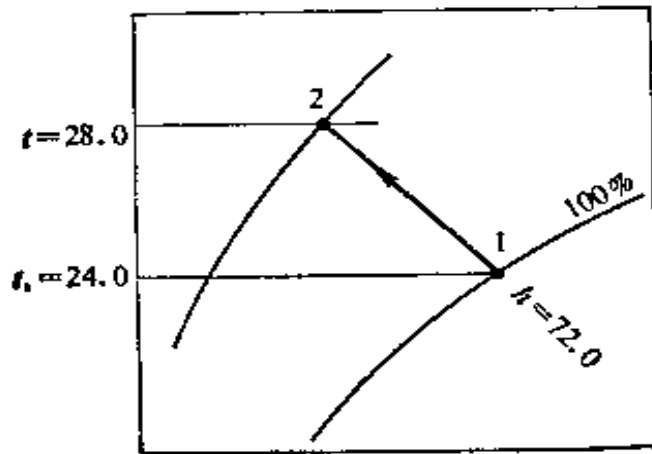


图 1.14 例1.16附图

### 1.6.2 露点温度

从焓湿图上可以看出，将任一状态的空气  $A$  (具有  $t$  和  $RH$ ) 作等湿冷却，冷却后的空气相对湿度是要提高的。冷却后的温度愈低，其相对湿度愈高。例如将空气分别从  $A$  冷却到  $1$  或  $2$ ，(图 1.15) 由于  $t_2 < t_1$ ，故  $RH_2 > RH_1$ 。将空气一直冷却到饱和线上

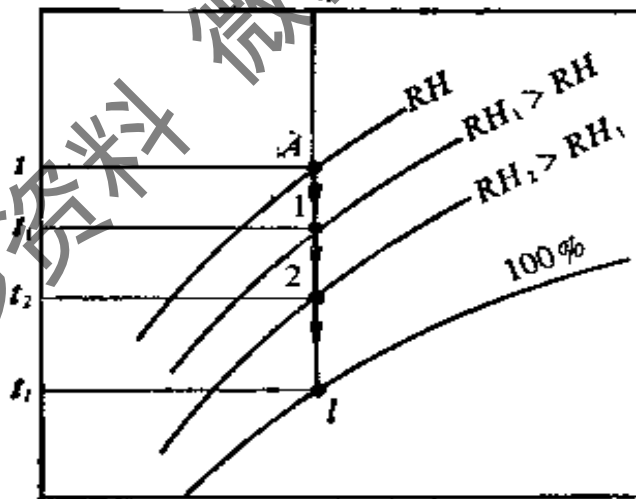


图 1.15 露点温度

的  $l$  点的话，这将是一个极限点。如果再进一步冷却，由于空气的相对湿度不能大于 100%，这时空气中的水蒸汽将会有一部分凝结成水。换句话说，这时的冷却不可能继续保持等湿冷却。 $l$  点的温度  $t_1$  就称为露点温度。冬季玻璃窗的玻璃内表面有结露现象，就是由于玻璃温度低于室内空气露点温度所致。

【例 1.17】 求状态为  $t=26.0[^\circ\text{C}]$ ,  $RH=60\%$  的空气中的露点温度  $t_1$ ,  $P=101325[\text{Pa}]$ 。

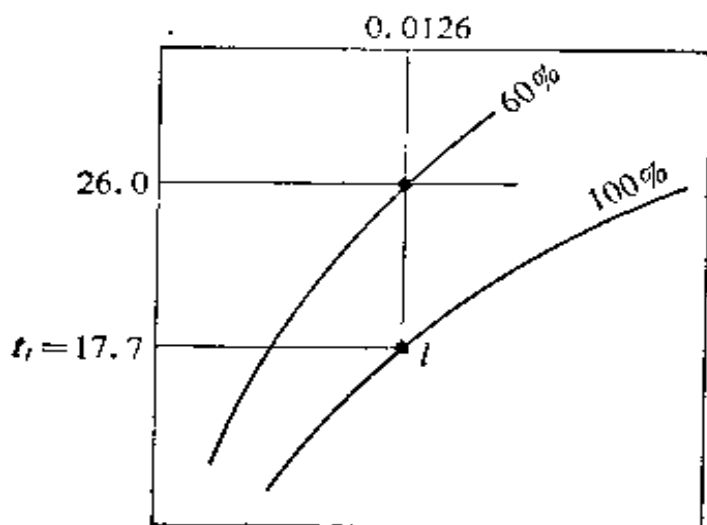


图 1.16 例 1.17 附图

【解】 在焓湿图上确定该空气的状态点,其含湿量是  $0.0126[\text{kg}/\text{kg 干}]$ 。接着找出该等湿线与饱和线的交点  $l$ , 在图上读得  $t_1=17.7[^\circ\text{C}]$ 。

如使这空气与低于  $17.7[^\circ\text{C}]$  的表面接触, 则空气中的水蒸汽必定有一部分要凝结在这表面上。

## 1.7 湿空气的密度

所谓密度是单位体积的质量  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 。

干空气的密度可用下式计算:

$$\rho_a = \frac{0.003484 P}{273.15 + t} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (1.26)$$

式中  $P$ ——空气压力,  $[\text{Pa}]$ ;

$t$ ——空气的温度,  $[^\circ\text{C}]$ 。

湿空气的密度可用下式计算:

$$\rho = \frac{P(1+x)}{461.5(273.15+t)(0.622+x)} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (1.27)$$

【例 1.17】 求  $t=26.0[^\circ\text{C}]$  的干空气的密度。  $P=101325[\text{Pa}]$ 。

【解】 根据(1.26)式

$$\rho_a = \frac{0.003484 \times 101325}{273.15 + 26} = 1.164 \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

【例 1.18】求  $t=26.0$  [°C],  $RH=60\%$  的湿空气的密度。  $P=101325$  [Pa]。

【解】从焓湿图上查得空气的含湿量  $x=0.0126$  [kg/kg 干], 则根据(1.27)式

$$\rho = \frac{101325(1+0.0126)}{461.5(273.15+26)(0.622+0.0126)} = 1.171 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

从上面两个例题可见, 空气温度相同, 但是含湿量不同 (对干空气  $x=0$ ), 空气的密度也有差异。不过这差异不太大, 如果不要求十分准确的计算, 可以不考虑含湿量的影响, 简单采用干空气的密度替代湿空气的密度。

## 1.8 湿空气参数的表格

利用焓湿图来查取湿空气的参数是很方便的, 但是由于作图时难免有误差, 查得的结果也会有误差。如果要求有较高的准确度, 就不得不用公式计算, 但是这太麻烦。本节提供一系列表格, 其中都是按公式算得的数据, 有足够的准确度。需要时可按已知条件直接查取有关参数, 十分方便。

### 1.8.1 已知空气的温度 $t$ 和含湿量 $x$ , 查空气的焓 $h$

根据温度  $t$  和含湿量  $d$  ( $d=0.001x$ ) 从表 1.2 直接查得焓  $h$ 。

【例 1.19】空气的温度  $t=25.0$  [°C], 含湿量  $d=15.0$  [g/kg 干], 求该空气的焓。

【解】从表 1.2 查得空气的焓  $h=63.44$  [kJ/kg 干]。

【例 1.20】空气的温度  $t=20.5$  [°C], 含湿量  $d=10.0$  [g/kg 干], 求该空气的焓。

【解】对  $d=10.0$  [g/kg 干], 从表 1.2 查得, 当  $t=20.0$  [°C] 时,  $h=45.57$  [kJ/kg 干]; 当  $t=21.0$  [°C] 时,  $h=46.60$  [kJ/kg 干]。则当  $t=20.5$  [°C] 时, 其焓  $h=(45.57+46.60)/2=46.09$  [kJ/kg 干]

### 1.8.2 已知空气的温度 $t$ 和所在地区, 查饱和空气的焓 $h_s$

先按表 1.5 确定所在城市属地区类别, 然后用表 1.3 查得饱和空气的焓  $h_s$ 。

【例 1.21】试确定北京地区温度为  $t=24.0$  [°C], 相对湿度为  $RH=100\%$  的空气的焓。

【解】该空气即为饱和空气。从表 1.5 查得北京属第 2 类地区, 故温度为  $24.0$  [°C] 的饱和空气的焓是  $h_s=73.12$  [kJ/kg 干] (从表 1.3 查得)

表1.2

湿空气的焓  $h$ , [kJ/kg干]

| $t$ | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10  | 22.69 | 25.21 | 27.73 | 30.25 | 32.77 | 35.29 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 11  | 23.71 | 26.23 | 28.75 | 31.27 | 33.79 | 36.31 | 38.83 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 12  | 24.73 | 27.25 | 29.78 | 32.30 | 34.82 | 37.34 | 39.86 | 42.39 |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 13  | 25.75 | 28.27 | 30.80 | 33.32 | 35.85 | 38.37 | 40.89 | 43.42 |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 14  | 26.77 | 29.30 | 31.82 | 34.35 | 36.87 | 39.40 | 41.92 | 44.45 | 46.98 |       |       |       |       |       |       |       |
| 15  | 27.79 | 30.32 | 32.84 | 35.37 | 37.9  | 40.43 | 42.96 | 45.48 | 48.01 | 50.54 |       |       |       |       |       |       |
| 16  | 28.81 | 31.34 | 33.87 | 36.4  | 38.93 | 41.46 | 43.99 | 46.52 | 49.04 | 51.57 | 54.10 |       |       |       |       |       |
| 17  | 29.83 | 32.36 | 34.89 | 37.42 | 39.95 | 42.49 | 45.02 | 47.55 | 50.08 | 52.61 | 55.14 | 57.67 |       |       |       |       |
| 18  | 30.85 | 33.38 | 35.91 | 38.45 | 40.98 | 43.51 | 46.05 | 48.58 | 51.11 | 53.65 | 56.18 | 58.71 | 61.25 |       |       |       |
| 19  | 31.87 | 34.40 | 36.94 | 39.47 | 42.01 | 44.54 | 47.09 | 49.61 | 52.15 | 54.68 | 57.22 | 59.75 | 62.29 | 64.82 |       |       |
| 20  | 32.89 | 35.42 | 37.96 | 40.50 | 43.03 | 45.57 | 48.11 | 50.64 | 53.18 | 55.72 | 58.26 | 60.79 | 63.33 | 65.87 | 68.40 |       |
| 21  | 33.90 | 36.44 | 38.98 | 41.52 | 44.06 | 46.60 | 49.14 | 51.69 | 54.22 | 56.76 | 59.29 | 61.83 | 64.37 | 66.91 | 69.45 | 71.99 |
| 22  | 34.92 | 37.46 | 40.00 | 42.55 | 45.09 | 47.63 | 50.17 | 52.71 | 55.25 | 57.79 | 60.33 | 62.87 | 65.41 | 67.95 | 70.49 | 73.03 |
| 23  | 35.94 | 38.49 | 41.03 | 43.57 | 46.11 | 48.66 | 51.20 | 53.74 | 56.28 | 58.83 | 61.37 | 63.91 | 66.45 | 69.00 | 71.54 | 74.08 |
| 24  | 36.96 | 39.51 | 42.05 | 44.60 | 47.14 | 49.68 | 52.23 | 54.77 | 57.32 | 59.86 | 62.41 | 64.95 | 67.49 | 70.04 | 72.58 | 75.13 |
| 25  | 37.98 | 40.53 | 43.07 | 45.62 | 48.17 | 50.71 | 53.26 | 55.81 | 58.35 | 60.90 | 63.44 | 65.99 | 68.54 | 71.09 | 73.63 | 76.18 |



續表 1.2

| $t$ | $d$ | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 10  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 11  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 12  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 13  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 14  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 15  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 16  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 17  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 18  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 19  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 20  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 21  |     |       |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 22  |     | 75.57 | 78.12 |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 23  |     | 76.62 | 79.17 | 81.71 |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 24  |     | 77.67 | 80.22 | 82.76 | 85.31 | 87.85 |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 25  |     | 78.72 | 81.27 | 83.81 | 86.36 | 88.91 | 91.45 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

續表 1.2

| $t$ | $d$   | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26  | 39.00 | 41.55 | 44.10 | 46.64 | 49.19 | 51.74 | 54.29 | 56.84 | 59.39 | 61.93 | 64.48 | 67.03 | 69.58 | 72.13 | 74.67 | 77.22 |
| 27  | 40.02 | 42.57 | 45.12 | 47.67 | 50.22 | 52.77 | 55.32 | 57.87 | 60.42 | 62.97 | 65.52 | 68.07 | 70.62 | 73.17 | 75.72 | 78.27 |
| 28  | 41.04 | 43.59 | 46.14 | 48.69 | 51.25 | 53.80 | 56.35 | 58.90 | 61.45 | 64.01 | 66.56 | 69.11 | 71.66 | 74.21 | 76.76 | 79.32 |
| 29  | 42.06 | 44.61 | 47.17 | 49.72 | 52.27 | 54.83 | 57.38 | 59.93 | 62.49 | 65.04 | 67.59 | 70.15 | 72.70 | 75.25 | 77.81 | 80.36 |
| 30  | 43.09 | 45.63 | 48.19 | 50.74 | 53.30 | 55.85 | 58.41 | 60.97 | 63.52 | 66.08 | 68.63 | 71.19 | 73.74 | 76.30 | 78.85 | 81.41 |
| 31  | 44.10 | 46.65 | 49.21 | 51.77 | 54.33 | 56.88 | 59.44 | 62.00 | 64.56 | 67.11 | 69.67 | 72.23 | 74.78 | 77.34 | 79.80 | 82.43 |
| 32  | 45.12 | 47.68 | 50.23 | 52.79 | 55.35 | 57.91 | 60.47 | 63.03 | 65.59 | 68.15 | 70.71 | 73.27 | 75.83 | 78.39 | 80.95 | 83.59 |
| 33  | 46.14 | 48.70 | 51.26 | 53.82 | 56.38 | 58.94 | 61.50 | 64.05 | 66.62 | 69.18 | 71.75 | 74.31 | 76.87 | 79.43 | 81.99 | 84.55 |
| 34  | 47.15 | 49.72 | 52.28 | 54.84 | 57.41 | 59.97 | 62.53 | 65.09 | 67.66 | 70.22 | 72.78 | 75.35 | 77.91 | 80.47 | 83.04 | 85.60 |
| 35  | 48.17 | 50.74 | 53.30 | 55.87 | 58.43 | 61.00 | 63.56 | 66.13 | 68.69 | 71.26 | 73.82 | 76.39 | 78.95 | 81.52 | 84.09 | 86.65 |
| 36  | 49.19 | 51.76 | 54.33 | 56.89 | 59.46 | 62.03 | 64.59 | 67.16 | 69.73 | 72.29 | 74.86 | 77.43 | 79.99 | 82.56 | 85.13 | 87.69 |
| 37  | 50.21 | 52.78 | 55.35 | 57.92 | 60.49 | 63.05 | 65.62 | 68.19 | 70.76 | 73.33 | 75.90 | 78.47 | 81.04 | 83.60 | 86.17 | 88.74 |
| 38  | 51.23 | 53.80 | 56.37 | 58.94 | 61.51 | 64.08 | 66.65 | 69.22 | 71.79 | 74.36 | 76.93 | 79.50 | 82.07 | 84.65 | 87.22 | 89.79 |
| 39  | 52.25 | 54.82 | 57.40 | 59.97 | 62.54 | 65.11 | 67.69 | 70.26 | 72.83 | 75.40 | 77.97 | 80.54 | 83.12 | 85.69 | 88.26 | 90.83 |
| 40  | 53.27 | 55.84 | 58.42 | 60.99 | 63.57 | 66.14 | 68.71 | 71.29 | 73.86 | 76.44 | 79.01 | 81.58 | 84.16 | 86.73 | 89.31 | 91.88 |

表注:  $t[^\circ\text{C}]$ ,  $d[\text{g}/\text{kg干}]$

续表1.2

| <i>t</i> | <i>d</i> | 21    | 22    | 23    | 24     | 25     | 26     | 27     | 28     | 29     | 30     | 31     | 32     | 33     | 34     | 35     | 36     |
|----------|----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 26       |          | 79.77 | 82.32 | 84.87 | 87.41  | 89.95  | 92.51  | 95.06  | 97.61  |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 27       |          | 80.82 | 83.37 | 85.92 | 88.47  | 91.02  | 93.57  | 96.12  | 98.67  | 101.22 | 103.77 |        |        |        |        |        |        |
| 28       |          | 81.87 | 84.42 | 86.97 | 89.52  | 92.07  | 94.62  | 97.17  | 99.72  | 102.27 | 104.82 | 107.37 |        |        |        |        |        |
| 29       |          | 82.92 | 85.47 | 88.02 | 90.57  | 93.12  | 95.67  | 98.22  | 100.77 | 103.32 | 105.87 | 108.42 | 111.01 | 113.55 |        |        |        |
| 30       |          | 83.97 | 86.52 | 89.07 | 91.62  | 94.17  | 96.72  | 99.27  | 101.82 | 104.37 | 106.92 | 109.47 | 112.02 | 114.56 | 117.11 | 119.74 |        |
| 31       |          | 85.01 | 87.57 | 90.13 | 92.69  | 95.24  | 97.80  | 100.36 | 102.92 | 105.47 | 108.03 | 110.59 | 113.15 | 115.70 | 118.26 | 120.82 | 123.37 |
| 32       |          | 86.05 | 88.62 | 91.18 | 93.74  | 96.30  | 98.86  | 101.42 | 103.98 | 106.54 | 109.10 | 111.66 | 114.21 | 116.77 | 119.33 | 121.89 | 124.45 |
| 33       |          | 87.11 | 89.67 | 92.23 | 94.80  | 97.36  | 99.92  | 102.48 | 105.04 | 107.60 | 110.16 | 112.72 | 115.28 | 117.84 | 120.41 | 122.97 | 125.53 |
| 34       |          | 88.16 | 90.72 | 93.29 | 95.85  | 98.41  | 100.97 | 103.53 | 106.09 | 108.65 | 111.21 | 113.77 | 116.33 | 118.89 | 121.45 | 124.01 | 126.56 |
| 35       |          | 89.21 | 91.77 | 94.34 | 96.90  | 99.47  | 102.03 | 104.60 | 107.16 | 109.73 | 112.29 | 114.86 | 117.42 | 119.99 | 122.55 | 125.12 | 127.68 |
| 36       |          | 90.26 | 92.82 | 95.39 | 97.96  | 100.53 | 103.10 | 105.66 | 108.23 | 110.79 | 113.36 | 115.92 | 118.49 | 121.06 | 123.62 | 126.19 | 128.76 |
| 27       |          | 31.31 | 93.88 | 36.44 | 99.51  | 101.53 | 104.15 | 106.72 | 109.29 | 111.85 | 114.42 | 116.99 | 119.56 | 122.13 | 124.70 | 127.27 | 129.83 |
| 38       |          | 92.36 | 94.93 | 97.50 | 100.07 | 102.64 | 105.21 | 107.78 | 110.35 | 112.92 | 115.49 | 118.06 | 120.63 | 123.20 | 125.77 | 128.34 | 130.91 |
| 39       |          | 93.41 | 95.98 | 98.55 | 101.12 | 103.69 | 106.27 | 108.84 | 111.41 | 113.98 | 116.55 | 119.12 | 121.69 | 124.26 | 126.84 | 129.41 | 131.99 |
| 40       |          | 94.45 | 97.03 | 99.60 | 102.18 | 104.75 | 107.32 | 109.89 | 112.47 | 115.05 | 117.62 | 120.19 | 122.77 | 125.34 | 127.92 | 130.49 | 133.06 |

饱和空气的焓  $h_s$ , [kJ/kg 干]

表 1.3

| 地区<br>$t$ | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10.0      | 29.27 | 29.67 | 30.07 | 30.50 | 30.94 | 32.57 | 34.47 |
| 10.5      | 30.45 | 30.85 | 31.27 | 31.71 | 32.17 | 33.85 | 35.82 |
| 11.0      | 31.64 | 32.06 | 32.49 | 32.95 | 33.42 | 35.17 | 37.21 |
| 11.5      | 32.85 | 33.29 | 33.74 | 34.21 | 34.70 | 36.50 | 38.61 |
| 12.0      | 34.09 | 34.54 | 35.01 | 35.49 | 36.00 | 37.87 | 40.05 |
| 12.5      | 35.35 | 35.81 | 36.30 | 36.80 | 37.33 | 39.26 | 41.52 |
| 13.0      | 36.63 | 37.11 | 37.61 | 38.13 | 38.68 | 40.69 | 43.01 |
| 13.5      | 37.93 | 38.43 | 38.95 | 39.49 | 40.05 | 42.12 | 44.54 |
| 14.0      | 39.26 | 39.78 | 40.31 | 40.87 | 41.45 | 43.59 | 46.10 |
| 14.5      | 40.62 | 41.15 | 41.70 | 42.28 | 42.88 | 45.10 | 47.69 |
| 15.0      | 42.00 | 42.55 | 43.12 | 43.72 | 44.34 | 46.63 | 49.31 |
| 15.5      | 43.40 | 43.97 | 44.57 | 45.18 | 45.83 | 48.20 | 50.97 |
| 16.0      | 44.84 | 45.43 | 46.04 | 46.68 | 47.34 | 49.79 | 52.66 |
| 16.5      | 46.30 | 46.91 | 47.54 | 48.20 | 48.89 | 51.43 | 54.39 |
| 17.0      | 47.79 | 48.42 | 49.07 | 49.76 | 50.47 | 53.09 | 56.16 |
| 17.5      | 49.31 | 49.96 | 50.64 | 51.34 | 52.08 | 54.79 | 57.96 |
| 18.0      | 50.86 | 51.53 | 52.23 | 52.96 | 53.72 | 56.52 | 59.80 |
| 18.5      | 52.44 | 53.13 | 53.86 | 54.61 | 55.40 | 58.30 | 61.69 |
| 19.0      | 54.05 | 54.77 | 55.52 | 56.30 | 57.11 | 60.10 | 63.61 |
| 19.5      | 55.70 | 56.44 | 57.21 | 58.02 | 58.86 | 61.95 | 65.58 |
| 20.0      | 57.38 | 58.14 | 58.94 | 59.77 | 60.64 | 63.84 | 67.59 |
| 20.5      | 59.09 | 59.88 | 60.71 | 61.57 | 62.47 | 65.77 | 69.64 |
| 21.0      | 60.84 | 61.66 | 62.51 | 63.40 | 64.33 | 67.74 | 71.74 |
| 21.5      | 62.62 | 63.47 | 64.35 | 65.27 | 66.23 | 69.75 | 73.89 |
| 22.0      | 64.44 | 65.32 | 66.23 | 67.18 | 68.17 | 71.81 | 76.09 |
| 22.5      | 66.30 | 67.21 | 68.15 | 69.13 | 70.15 | 73.92 | 78.33 |
| 23.0      | 68.20 | 69.13 | 70.11 | 71.12 | 72.18 | 76.07 | 80.63 |
| 23.5      | 70.14 | 71.11 | 72.11 | 73.15 | 74.25 | 78.27 | 82.98 |
| 24.0      | 72.12 | 73.12 | 74.15 | 75.23 | 76.36 | 80.51 | 85.39 |
| 24.5      | 74.15 | 75.17 | 76.24 | 77.36 | 78.53 | 82.81 | 87.85 |
| 25.0      | 76.21 | 77.27 | 78.38 | 79.53 | 80.74 | 85.16 | 90.36 |

续表1.3

| 地区<br>t | 地区     |        |        |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|         | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      |
| 25.5    | 78.33  | 79.42  | 80.56  | 81.75  | 82.99  | 87.57  | 92.94  |
| 26.0    | 80.48  | 81.61  | 82.79  | 84.02  | 85.30  | 90.03  | 95.58  |
| 26.5    | 82.69  | 83.85  | 85.07  | 86.34  | 87.67  | 92.54  | 98.27  |
| 27.0    | 84.94  | 86.15  | 87.40  | 88.71  | 90.08  | 95.12  | 101.04 |
| 27.5    | 87.24  | 88.49  | 89.78  | 91.14  | 92.55  | 97.75  | 103.86 |
| 28.0    | 89.60  | 90.88  | 92.22  | 93.62  | 95.08  | 100.45 | 106.76 |
| 28.5    | 92.00  | 93.33  | 94.71  | 96.15  | 97.65  | 103.20 | 109.72 |
| 29.0    | 94.46  | 95.85  | 97.26  | 98.75  | 100.30 | 106.03 | 112.76 |
| 29.5    | 96.98  | 98.39  | 99.86  | 101.40 | 103.00 | 108.92 | 115.87 |
| 30.0    | 99.55  | 101.01 | 102.53 | 104.11 | 105.77 | 111.87 | 119.05 |
| 30.5    | 102.18 | 103.68 | 105.25 | 106.89 | 108.60 | 114.90 | 122.31 |
| 31.0    | 104.87 | 106.42 | 108.04 | 109.73 | 111.49 | 118.00 | 125.65 |
| 31.5    | 107.62 | 109.22 | 110.89 | 112.64 | 114.46 | 121.17 | 129.07 |
| 32.0    | 110.44 | 112.09 | 113.81 | 115.61 | 117.49 | 124.42 | 132.58 |
| 32.5    | 113.32 | 115.02 | 116.80 | 118.65 | 120.59 | 127.75 | 136.17 |
| 33.0    | 116.26 | 118.02 | 119.85 | 121.77 | 123.77 | 131.16 | 139.86 |
| 33.5    | 119.27 | 121.09 | 122.98 | 124.96 | 127.03 | 134.65 | 143.63 |
| 34.0    | 122.36 | 124.23 | 126.18 | 128.22 | 130.36 | 138.22 | 147.50 |
| 34.5    | 125.51 | 127.45 | 129.46 | 131.57 | 133.77 | 141.89 | 151.46 |
| 35.0    | 128.74 | 130.74 | 132.82 | 134.99 | 137.26 | 145.64 | 155.52 |
| 35.5    | 132.05 | 134.10 | 136.25 | 138.49 | 140.84 | 149.49 | 159.69 |
| 36.0    | 135.43 | 137.55 | 139.77 | 142.08 | 144.50 | 153.43 | 163.96 |
| 36.5    | 138.89 | 140.08 | 143.37 | 145.75 | 148.25 | 157.46 | 168.34 |
| 37.0    | 142.44 | 144.70 | 147.06 | 149.52 | 152.09 | 161.60 | 172.84 |
| 37.5    | 146.07 | 148.40 | 150.83 | 153.37 | 156.03 | 165.85 | 177.44 |
| 38.0    | 149.79 | 152.19 | 154.70 | 157.32 | 160.06 | 170.20 | 182.17 |
| 38.5    | 153.59 | 156.07 | 158.66 | 161.37 | 164.20 | 174.65 | 187.02 |
| 39.0    | 157.49 | 160.05 | 162.72 | 165.51 | 168.43 | 179.23 | 191.99 |
| 39.5    | 161.49 | 164.12 | 166.88 | 169.76 | 172.77 | 183.91 | 197.10 |
| 40.0    | 165.58 | 168.30 | 171.14 | 174.11 | 177.22 | 188.72 | 202.33 |

表注: t[℃]

1.8.3 已知空气的温度  $t$  和所在地区, 查饱和空气的含湿量  $d_s$  ( $d_s = 0001x_s$ )

按地区类别(从表 1.5 查得)和温度  $t$  从表 1.4 直接查得。

饱和空气的含湿量  $d_s$ , [g/kg 干]

表 1.4

| 地区<br>$t$ | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10        | 7.62  | 7.78  | 7.94  | 8.11  | 8.29  | 8.93  | 9.69  |
| 11        | 8.16  | 8.32  | 8.50  | 8.68  | 8.87  | 9.58  | 10.37 |
| 12        | 8.72  | 8.90  | 9.09  | 9.28  | 9.48  | 10.22 | 11.09 |
| 13        | 9.33  | 9.52  | 9.71  | 9.92  | 10.14 | 10.93 | 11.86 |
| 14        | 9.96  | 10.17 | 10.38 | 10.60 | 10.83 | 11.68 | 12.67 |
| 15        | 10.64 | 10.86 | 11.09 | 11.32 | 11.57 | 12.49 | 13.54 |
| 16        | 11.36 | 11.59 | 11.83 | 12.09 | 12.35 | 13.32 | 14.46 |
| 17        | 12.12 | 12.37 | 12.63 | 12.90 | 13.18 | 14.22 | 15.43 |
| 18        | 12.93 | 13.19 | 13.47 | 13.76 | 14.06 | 15.17 | 16.46 |
| 19        | 13.78 | 14.06 | 14.36 | 14.67 | 14.99 | 16.17 | 17.56 |
| 20        | 14.68 | 14.99 | 15.30 | 15.63 | 15.98 | 17.24 | 18.72 |
| 21        | 15.64 | 15.97 | 16.30 | 16.65 | 17.02 | 18.37 | 19.95 |
| 22        | 16.65 | 17.00 | 17.36 | 17.74 | 18.13 | 19.56 | 21.25 |
| 23        | 17.73 | 18.10 | 18.48 | 18.88 | 19.30 | 20.83 | 22.63 |
| 24        | 18.87 | 19.26 | 19.67 | 20.09 | 20.54 | 22.17 | 24.09 |
| 25        | 20.07 | 20.48 | 20.92 | 21.37 | 21.85 | 23.59 | 25.64 |
| 26        | 21.34 | 21.78 | 22.24 | 22.73 | 23.23 | 25.09 | 27.28 |
| 27        | 22.68 | 23.15 | 23.65 | 24.16 | 24.70 | 26.68 | 29.01 |
| 28        | 24.10 | 24.60 | 25.13 | 25.68 | 26.25 | 28.36 | 30.84 |
| 29        | 25.60 | 26.13 | 26.69 | 27.28 | 27.89 | 30.14 | 32.78 |
| 30        | 27.18 | 27.75 | 28.35 | 28.97 | 29.62 | 32.02 | 34.84 |
| 31        | 28.86 | 29.46 | 30.10 | 30.76 | 31.45 | 34.01 | 37.01 |
| 32        | 30.62 | 31.27 | 31.95 | 32.65 | 33.39 | 36.11 | 39.31 |
| 33        | 32.49 | 33.18 | 33.90 | 34.65 | 35.44 | 38.33 | 41.74 |
| 34        | 34.46 | 35.20 | 35.96 | 36.76 | 37.60 | 40.68 | 44.31 |
| 35        | 36.55 | 37.33 | 38.14 | 38.99 | 39.88 | 43.16 | 47.03 |
| 36        | 38.75 | 39.58 | 40.44 | 41.35 | 42.29 | 45.79 | 49.91 |
| 37        | 41.07 | 41.95 | 42.87 | 43.83 | 44.84 | 48.56 | 52.95 |
| 38        | 43.52 | 44.46 | 45.44 | 46.46 | 47.53 | 51.49 | 56.17 |
| 39        | 46.11 | 47.11 | 48.15 | 49.24 | 50.38 | 54.60 | 59.59 |
| 40        | 48.84 | 49.90 | 51.01 | 52.17 | 53.39 | 57.88 | 63.19 |

表注: [℃]

【例 1.22】 同例 1.21 求该饱和空气的含湿量  $d_s$ 。

【解】 对第 2 类地区，当  $t=24.0$  [°C] 时，从表 1.4 查得

$$d_s = 19.26 \text{ [g/kg干]}。$$

地区分类

表 1.5

| 地区类别 | 城市名称  | 制表时使用的大气压<br>[Pa]     |
|------|---|-----------------------|
| 1    | 天津、青岛、上海、连云港、扬州、南通、南京、常州、无锡、苏州、嘉兴、温州、汕头   | 101325<br>(760[mmHg]) |
| 2    | 齐齐哈尔、四平、吉林、沈阳、抚顺、大连、北京、唐山、保定、石家庄、烟台、德州、济南、徐州、蚌埠、合肥、杭州、宁波、金华、九江、南昌、萍乡、南平、三明、福州、厦门、焦作、开封、郑州、洛阳、许昌、宜昌、武汉、黄石、岳阳、常德、长沙、株洲、衡阳、韶关、广州、湛江、海口、桂林、柳州、南宁、北海 | 99325<br>(745[mmHg])  |
| 3    | 哈尔滨、长春、怀化、郴州、重庆、宜宾  | 97325<br>(730[mmHg])  |
| 4    | 西安、克拉玛依、石河子、绵阳、德阳、成都  | 95326<br>(715[mmHg])  |
| 5    | 乌鲁木齐、宝鸡、太原、遵义、伊宁  | 93326<br>(700[mmHg])  |
| 6    | 兰州、银川、包头、呼和浩特、大同、贵阳、蒙自  | 86660<br>(650[mmHg])  |
| 7    | 西宁、大理、昆明  | 79993<br>(600[mmHg])  |

### 1.8.4 已知空气的温度 $t$ 和相对湿度 $RH$ , 查湿空气的含湿量 $d(d = 0.001x)$

对一般空气(不仅是饱和空气)的含湿量,应根据温度  $t$ 、相对湿度  $RH$  和大气压来确定。表 1.6.1~1.6.7 分别适用于 7 个地区,对每一地区按  $t$  和  $RH$  可查得  $d(d = 0.001x)$  值。

【例 1.23】试确定南京地区温度为  $t = 34.0 [^{\circ}\text{C}]$ , 相对湿度为  $RH = 70\%$  的湿空气的含湿量。

【解】从表 1.5 查得南京属第 1 类地区。从表 1.6.1 (对第 1 类地区)按  $t = 34.0 [^{\circ}\text{C}]$  和  $RH = 70\%$  查得  $d = 23.23 [\text{g}/\text{kg 干}]$ 。

### 1.8.5 已知空气的温度 $t$ 和含湿量 $d(d = 0.001x)$ , 查相对湿度 $RH$

表 1.7 列出了对第 1 类地区的查取相对湿度  $RH$  的表。对其他地区则要乘以从表 1.8 查得的修正系数  $K$ 。

| 地 区 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| $K$ | 1.00 | 0.98 | 0.96 | 0.94 | 0.92 | 0.86 | 0.79 |

【例 1.24】试确定哈尔滨地区温度  $t = 26.0 [^{\circ}\text{C}]$ , 含湿量  $d = 20.6 [\text{g}/\text{kg 干}]$  的湿空气的相对湿度。

【解】在该空气条件下对第 1 类地区,从表 1.7 查得相对湿度为 0.94。从表 1.5 可知哈尔滨属第 3 类地区,根据表 1.8 可知  $K = 0.96$ 。故真正的相对湿度应是

$$RH = 0.94 \times 0.96 = 0.902 \text{ (或 } 90.2\%)$$

### 1.8.6 已知干球温度 $t$ 和干湿球温差 $\Delta t$ , 求空气的含湿量 $d(d = 0.001x)$

对第 1 至第 7 类地区可以分别应用表 1.9.1 至表 1.9.7 来查取。

【例 1.25】试确定成都地区干球温度  $t = 30.0 [^{\circ}\text{C}]$ 、湿球温度  $t_s = 24.0 [^{\circ}\text{C}]$  的湿空气的含湿量  $d$ 。

【解】从表 1.5 查得成都属第 4 类地区。干湿球温差  $\Delta t = 30.0 - 24.0 = 6.0 [^{\circ}\text{C}]$ 。根据  $t = 30.0 [^{\circ}\text{C}]$  和  $\Delta t = 6.0 [^{\circ}\text{C}]$  从表 1.9.4 查得  $d = 17.53 [\text{g}/\text{kg 干}]$ 。



**1.8.7 已知空气的温度  $t$  和相对湿度  $RH$ ，查空气的湿球温度  $t_s$ 。**

对第 1 类至第 7 类地区，可以分别应用表 1.10.1 至表 1.10.7 来查取  $t_s$ 。

【例 1.25】 试确定上海地区温度为  $t=18.0$  [°C]，相对湿度为  $RH=50\%$  的空气的湿球温度。

【解】 从表 1.5 查得上海属第 1 类地区，于是从表 1.10.1 按  $t=18.0$  [°C] 和  $RH=50\%$  查得湿球温度  $t_s=12.15$  [°C]。

**1.8.8 已知空气的温度  $t$  和含湿量  $d$  ( $d=0001x$ )，查湿空气的密度  $\rho$**

表 1.11 列出了对第 1 类地区查取密度  $\rho$  的表。对其他地区则要乘以从表 1.8 查得的修正系数  $K$ 。

【例 1.26】 试确定广州地区温度  $t=19.0$  [°C]，含湿量  $d=12.0$  [g/kg 干] 的空气的密度。

【解】 对第 1 类地区，从表 1.11 查得当  $t=19.0$  [°C]， $d=12.0$  [g/kg 干] 时空气的密度为  $1.200$  [kg/m<sup>3</sup>]。现从表 1.5 可知广州属第 2 类地区，对该地区  $K=0.98$  (表 1.8)，故真正的空气密度是

$$\rho=1.200 \times 0.98=1.176 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

获取更多资料

湿空气的含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 1 类地区)

表 1.6.1

| $t$ | RH   |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 15%  | 20%  | 25%  | 30%  | 35%  | 40%  | 45%  | 50%  | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 10  | 1.13 | 1.51 | 1.89 | 2.27 | 2.65 | 3.03 | 3.41 | 3.79 | 4.17  | 4.55  | 4.93  | 5.32  | 5.70  | 6.08  | 6.47  | 6.85  | 7.24  | 7.62  |
| 11  | 1.21 | 1.61 | 2.02 | 2.43 | 2.83 | 3.24 | 3.64 | 4.05 | 4.46  | 4.87  | 5.28  | 5.69  | 6.10  | 6.51  | 6.92  | 7.33  | 7.74  | 8.15  |
| 12  | 1.29 | 1.73 | 2.16 | 2.59 | 3.03 | 3.46 | 3.90 | 4.33 | 4.77  | 5.21  | 5.64  | 6.08  | 6.52  | 6.96  | 7.40  | 7.84  | 8.28  | 8.72  |
| 13  | 1.38 | 1.84 | 2.31 | 2.77 | 3.23 | 3.70 | 4.16 | 4.63 | 5.09  | 5.55  | 6.03  | 6.50  | 6.97  | 7.44  | 7.91  | 8.38  | 8.85  | 9.33  |
| 14  | 1.47 | 1.97 | 2.46 | 2.96 | 3.46 | 3.95 | 4.44 | 4.94 | 5.44  | 5.94  | 6.44  | 6.94  | 7.44  | 7.95  | 8.45  | 8.95  | 9.46  | 9.96  |
| 15  | 1.57 | 2.10 | 2.63 | 3.15 | 3.68 | 4.21 | 4.74 | 5.27 | 5.81  | 6.34  | 6.87  | 7.41  | 7.95  | 8.48  | 9.02  | 9.55  | 10.10 | 10.64 |
| 16  | 1.68 | 2.24 | 2.80 | 3.36 | 3.93 | 4.49 | 5.06 | 5.63 | 6.20  | 6.77  | 7.34  | 7.91  | 8.48  | 9.05  | 9.63  | 10.20 | 10.78 | 11.36 |
| 17  | 1.79 | 2.39 | 2.99 | 3.59 | 4.19 | 4.79 | 5.40 | 6.00 | 6.61  | 7.22  | 7.82  | 8.43  | 9.05  | 9.66  | 10.29 | 10.89 | 11.50 | 12.12 |
| 18  | 1.91 | 2.54 | 3.18 | 3.82 | 4.46 | 5.11 | 5.75 | 6.40 | 7.04  | 7.69  | 8.34  | 8.99  | 9.64  | 10.30 | 10.95 | 11.61 | 12.27 | 12.93 |
| 19  | 2.03 | 2.71 | 3.39 | 4.07 | 4.75 | 5.44 | 6.13 | 6.81 | 7.50  | 8.20  | 8.89  | 9.58  | 10.28 | 10.98 | 11.67 | 12.37 | 13.08 | 13.78 |
| 20  | 2.16 | 2.88 | 3.61 | 4.33 | 5.06 | 5.79 | 6.52 | 7.26 | 7.99  | 8.73  | 9.47  | 10.21 | 10.95 | 11.69 | 12.44 | 13.19 | 13.93 | 14.68 |
| 21  | 2.30 | 3.07 | 3.84 | 4.61 | 5.39 | 6.16 | 6.94 | 7.72 | 8.51  | 9.29  | 10.07 | 10.87 | 11.66 | 12.45 | 13.25 | 14.04 | 14.84 | 15.64 |
| 22  | 2.44 | 3.25 | 4.08 | 4.91 | 5.73 | 6.56 | 7.39 | 8.22 | 9.05  | 9.89  | 10.71 | 11.57 | 12.41 | 13.25 | 14.10 | 14.95 | 15.80 | 16.66 |
| 23  | 2.60 | 3.47 | 4.34 | 5.22 | 6.09 | 6.97 | 7.86 | 8.74 | 9.63  | 10.52 | 11.41 | 12.31 | 13.20 | 14.10 | 15.01 | 15.91 | 16.82 | 17.73 |
| 24  | 2.76 | 3.68 | 4.61 | 5.54 | 6.48 | 7.41 | 8.35 | 9.29 | 10.24 | 11.18 | 12.13 | 13.13 | 14.04 | 15.00 | 15.96 | 16.93 | 17.90 | 18.87 |
| 25  | 2.93 | 3.91 | 4.90 | 5.89 | 6.88 | 7.87 | 8.87 | 9.87 | 10.88 | 11.89 | 12.90 | 13.91 | 14.93 | 15.95 | 16.97 | 18.00 | 19.03 | 20.07 |

續表1.6.1

| RH | f    |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 15%  | 20%  | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 26 | 3.11 | 4.15 | 5.20  | 6.25  | 7.30  | 8.36  | 9.42  | 10.49 | 11.56 | 12.63 | 13.70 | 14.78 | 15.87 | 16.95 | 18.04 | 19.14 | 20.23 | 21.34 |
| 27 | 3.30 | 4.41 | 5.52  | 6.63  | 7.75  | 8.88  | 10.00 | 11.14 | 12.27 | 13.41 | 14.56 | 15.70 | 16.86 | 18.01 | 19.17 | 20.34 | 21.51 | 22.68 |
| 28 | 3.50 | 4.67 | 5.85  | 7.04  | 8.23  | 9.42  | 10.62 | 11.82 | 13.03 | 14.24 | 15.45 | 16.67 | 17.90 | 19.13 | 20.36 | 21.60 | 22.85 | 24.10 |
| 29 | 3.71 | 4.98 | 6.21  | 7.46  | 8.73  | 9.99  | 11.26 | 12.54 | 13.82 | 15.11 | 16.40 | 17.70 | 19.00 | 20.31 | 21.62 | 22.94 | 24.27 | 25.60 |
| 30 | 3.93 | 5.25 | 6.58  | 7.91  | 9.25  | 10.59 | 11.94 | 13.30 | 14.66 | 16.03 | 17.40 | 18.78 | 20.17 | 21.56 | 22.95 | 24.36 | 25.77 | 27.18 |
| 31 | 4.15 | 5.56 | 6.97  | 8.38  | 9.80  | 11.23 | 12.68 | 14.10 | 15.55 | 17.00 | 18.46 | 19.92 | 21.39 | 22.87 | 24.36 | 25.85 | 27.35 | 28.86 |
| 32 | 4.41 | 5.89 | 7.33  | 8.88  | 10.39 | 11.90 | 13.42 | 14.94 | 16.48 | 18.02 | 19.57 | 21.12 | 22.69 | 24.26 | 25.84 | 27.43 | 29.02 | 30.62 |
| 33 | 4.67 | 6.24 | 7.82  | 9.40  | 11.00 | 12.60 | 14.21 | 15.83 | 17.46 | 19.10 | 20.74 | 22.39 | 24.05 | 25.72 | 27.40 | 29.09 | 30.79 | 32.49 |
| 34 | 4.94 | 6.60 | 8.27  | 9.95  | 11.64 | 13.34 | 15.05 | 16.77 | 18.50 | 20.23 | 21.98 | 23.73 | 25.49 | 27.27 | 29.05 | 30.85 | 32.65 | 34.46 |
| 35 | 5.22 | 6.98 | 8.75  | 10.53 | 12.32 | 14.12 | 15.93 | 17.75 | 19.58 | 21.42 | 23.28 | 25.14 | 27.01 | 28.90 | 30.79 | 32.70 | 34.62 | 36.55 |
| 36 | 5.52 | 7.38 | 9.25  | 11.14 | 13.03 | 14.94 | 16.86 | 18.79 | 20.72 | 22.68 | 24.64 | 26.62 | 28.28 | 30.13 | 32.02 | 33.94 | 35.86 | 37.81 |
| 37 | 5.83 | 7.80 | 9.78  | 11.78 | 13.78 | 15.80 | 17.83 | 19.88 | 21.94 | 24.01 | 26.09 | 28.19 | 30.30 | 32.42 | 34.54 | 36.67 | 38.81 | 41.07 |
| 38 | 6.16 | 8.24 | 10.34 | 12.45 | 14.57 | 16.71 | 18.86 | 21.02 | 23.21 | 25.40 | 27.61 | 29.84 | 32.08 | 34.34 | 36.61 | 38.90 | 41.20 | 43.52 |
| 39 | 6.51 | 8.71 | 10.92 | 13.15 | 15.40 | 17.66 | 19.94 | 22.24 | 24.56 | 26.87 | 29.21 | 31.57 | 33.95 | 36.36 | 38.76 | 41.19 | 43.64 | 46.11 |
| 40 | 6.87 | 9.19 | 11.53 | 13.89 | 16.28 | 18.66 | 21.07 | 23.50 | 25.95 | 28.41 | 30.90 | 33.40 | 35.92 | 38.47 | 41.03 | 43.61 | 46.22 | 48.84 |

表注: [f']

湿空气的含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 2 类地区)

表 1.6.2

| $t$ | RH   | 15%  | 20%  | 25%  | 30%  | 35%  | 40%  | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100% |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|     |      | 10   | 1.54 | 1.98 | 2.31 | 2.70 | 3.09 | 3.48  | 3.87  | 4.26  | 4.64  | 5.04  | 5.43  | 5.82  | 6.21  | 6.60  | 6.99  | 7.39  | 7.78 |
| 11  | 1.23 | 1.65 | 2.06 | 2.47 | 2.89 | 3.30 | 3.72 | 4.13  | 4.55  | 4.97  | 5.39  | 5.80  | 6.22  | 6.64  | 7.03  | 7.48  | 7.90  | 8.32  |      |
| 12  | 1.32 | 1.76 | 2.20 | 2.64 | 3.09 | 3.53 | 3.97 | 4.42  | 4.85  | 5.31  | 5.76  | 6.20  | 6.65  | 7.10  | 7.55  | 8.00  | 8.45  | 8.90  |      |
| 13  | 1.41 | 1.83 | 2.35 | 2.82 | 3.30 | 3.77 | 4.25 | 4.72  | 5.20  | 5.67  | 6.15  | 6.63  | 7.11  | 7.59  | 8.07  | 8.55  | 9.03  | 9.52  |      |
| 14  | 1.50 | 2.01 | 2.51 | 3.02 | 3.52 | 4.03 | 4.53 | 5.04  | 5.55  | 6.05  | 6.57  | 7.09  | 7.59  | 8.11  | 8.62  | 9.14  | 9.65  | 10.17 |      |
| 15  | 1.60 | 2.14 | 2.68 | 3.22 | 3.76 | 4.30 | 4.84 | 5.38  | 5.93  | 6.47  | 7.01  | 7.56  | 8.11  | 8.65  | 9.21  | 9.76  | 10.31 | 10.86 |      |
| 16  | 1.71 | 2.28 | 2.86 | 3.43 | 4.01 | 4.59 | 5.16 | 5.74  | 6.32  | 6.90  | 7.49  | 8.07  | 8.65  | 9.21  | 9.82  | 10.41 | 11.00 | 11.59 |      |
| 17  | 1.82 | 2.43 | 3.05 | 3.68 | 4.27 | 4.89 | 5.51 | 6.12  | 6.74  | 7.36  | 7.98  | 8.61  | 9.23  | 9.85  | 10.48 | 11.11 | 11.74 | 12.37 |      |
| 18  | 1.94 | 2.59 | 3.25 | 3.90 | 4.55 | 5.21 | 5.87 | 6.53  | 7.19  | 7.85  | 8.51  | 9.18  | 9.84  | 10.51 | 11.18 | 11.85 | 12.52 | 13.19 |      |
| 19  | 2.07 | 2.76 | 3.46 | 4.15 | 4.85 | 5.55 | 6.25 | 6.95  | 7.66  | 8.36  | 9.07  | 9.78  | 10.49 | 11.20 | 11.91 | 12.63 | 13.35 | 14.05 |      |
| 20  | 2.20 | 2.94 | 3.69 | 4.42 | 5.16 | 5.91 | 6.66 | 7.40  | 8.15  | 8.91  | 9.65  | 10.42 | 11.17 | 11.93 | 12.69 | 13.46 | 14.22 | 14.99 |      |
| 21  | 2.34 | 3.13 | 3.92 | 4.71 | 5.50 | 6.29 | 7.08 | 7.88  | 8.68  | 9.48  | 10.29 | 11.09 | 11.90 | 12.71 | 13.52 | 14.33 | 15.15 | 15.97 |      |
| 22  | 2.49 | 3.33 | 4.17 | 5.00 | 5.85 | 6.69 | 7.54 | 8.39  | 9.24  | 10.09 | 10.95 | 11.80 | 12.66 | 13.53 | 14.39 | 15.26 | 16.13 | 17.00 |      |
| 23  | 2.65 | 3.54 | 4.43 | 5.32 | 6.22 | 7.11 | 8.02 | 8.92  | 9.83  | 10.73 | 11.64 | 12.56 | 13.48 | 14.39 | 15.32 | 16.24 | 17.17 | 18.10 |      |
| 24  | 2.81 | 3.76 | 4.71 | 5.65 | 6.61 | 7.56 | 8.52 | 9.48  | 10.45 | 11.41 | 12.38 | 13.36 | 14.33 | 15.31 | 16.29 | 17.28 | 18.27 | 19.26 |      |
| 25  | 2.99 | 3.99 | 5.00 | 6.01 | 7.02 | 8.03 | 9.05 | 10.08 | 11.10 | 12.13 | 13.15 | 14.18 | 15.21 | 16.24 | 17.28 | 18.33 | 19.38 | 20.43 |      |

續表1.6.2

| RH | t    |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 15%  | 20%  | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 26 | 3.17 | 4.24 | 5.31  | 6.38  | 7.45  | 8.53  | 9.62  | 10.70 | 11.79 | 12.89 | 13.99 | 15.09 | 16.19 | 17.30 | 18.42 | 19.53 | 20.66 | 21.78 |
| 27 | 3.37 | 4.50 | 5.63  | 6.77  | 7.91  | 9.05  | 10.21 | 11.36 | 12.52 | 13.69 | 14.86 | 16.03 | 17.20 | 18.39 | 19.57 | 20.76 | 21.95 | 23.15 |
| 28 | 3.57 | 4.77 | 5.97  | 7.18  | 8.39  | 9.61  | 10.81 | 12.06 | 13.29 | 14.53 | 15.77 | 17.02 | 18.27 | 19.53 | 20.79 | 22.05 | 23.33 | 24.60 |
| 29 | 3.79 | 5.06 | 6.33  | 7.62  | 8.90  | 10.20 | 11.49 | 12.80 | 14.11 | 15.42 | 16.74 | 18.07 | 19.40 | 20.73 | 22.08 | 23.42 | 24.78 | 26.13 |
| 30 | 4.01 | 5.38 | 6.71  | 8.07  | 9.44  | 10.81 | 12.19 | 13.57 | 14.96 | 16.35 | 17.76 | 19.17 | 20.57 | 22.01 | 23.43 | 24.87 | 26.31 | 27.75 |
| 31 | 4.25 | 5.68 | 7.11  | 8.56  | 10.00 | 11.46 | 12.92 | 14.39 | 15.87 | 17.35 | 18.84 | 20.34 | 21.84 | 23.35 | 24.87 | 26.39 | 27.93 | 29.46 |
| 32 | 4.50 | 6.01 | 7.53  | 9.06  | 10.60 | 12.14 | 13.69 | 15.25 | 16.82 | 18.39 | 19.98 | 21.56 | 23.16 | 24.77 | 26.38 | 28.00 | 29.63 | 31.27 |
| 33 | 4.76 | 6.36 | 7.98  | 9.60  | 11.22 | 12.86 | 14.51 | 16.17 | 17.84 | 19.51 | 21.19 | 22.88 | 24.58 | 26.29 | 28.01 | 29.74 | 31.48 | 33.23 |
| 34 | 5.04 | 6.73 | 8.44  | 10.16 | 11.88 | 13.63 | 15.38 | 17.15 | 18.93 | 20.72 | 22.52 | 24.34 | 26.16 | 28.00 | 29.85 | 31.71 | 33.58 | 35.45 |
| 35 | 5.33 | 7.12 | 8.93  | 10.75 | 12.57 | 14.41 | 16.26 | 18.12 | 19.99 | 21.87 | 23.76 | 25.67 | 27.58 | 29.51 | 31.44 | 33.39 | 35.35 | 37.33 |
| 36 | 5.63 | 7.53 | 9.44  | 11.37 | 13.30 | 15.25 | 17.21 | 19.18 | 21.16 | 23.15 | 25.16 | 27.18 | 29.21 | 31.26 | 33.33 | 35.39 | 37.46 | 39.53 |
| 37 | 5.95 | 7.96 | 9.98  | 12.02 | 14.07 | 16.13 | 18.20 | 20.28 | 22.37 | 24.47 | 26.58 | 28.70 | 30.83 | 32.97 | 35.13 | 37.29 | 39.46 | 41.63 |
| 38 | 6.29 | 8.41 | 10.55 | 12.70 | 14.87 | 17.05 | 19.25 | 21.46 | 23.69 | 25.93 | 28.18 | 30.44 | 32.71 | 35.00 | 37.30 | 39.61 | 41.92 | 44.23 |
| 39 | 6.64 | 8.88 | 11.14 | 13.42 | 15.71 | 18.02 | 20.35 | 22.69 | 25.05 | 27.43 | 29.83 | 32.24 | 34.66 | 37.09 | 39.54 | 42.00 | 44.45 | 46.90 |
| 40 | 7.01 | 9.38 | 11.77 | 14.18 | 16.60 | 19.04 | 21.51 | 23.99 | 26.49 | 29.01 | 31.55 | 34.11 | 36.69 | 39.29 | 41.91 | 44.54 | 47.17 | 49.80 |

表注: t[°C]

湿空气的含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 3 类地区)

表 1.6.5

| $t$ | 15%  | 20%  | 25%  | 30%  | 35%  | 40%  | 45%  | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10  | 1.18 | 1.57 | 1.97 | 2.38 | 2.78 | 3.15 | 3.55 | 3.95  | 4.34  | 4.74  | 5.14  | 5.54  | 5.94  | 6.34  | 6.74  | 7.14  | 7.54  | 7.94  |
| 11  | 1.26 | 1.68 | 2.10 | 2.53 | 2.95 | 3.37 | 3.80 | 4.22  | 4.65  | 5.07  | 5.50  | 5.92  | 6.35  | 6.78  | 7.21  | 7.64  | 8.07  | 8.50  |
| 12  | 1.35 | 1.80 | 2.25 | 2.70 | 3.15 | 3.60 | 4.06 | 4.51  | 4.97  | 5.42  | 5.89  | 6.33  | 6.79  | 7.25  | 7.71  | 8.17  | 8.62  | 9.09  |
| 13  | 1.44 | 1.92 | 2.40 | 2.88 | 3.37 | 3.85 | 4.33 | 4.82  | 5.31  | 5.79  | 6.28  | 6.77  | 7.26  | 7.75  | 8.24  | 8.73  | 9.22  | 9.71  |
| 14  | 1.54 | 2.05 | 2.56 | 3.08 | 3.59 | 4.11 | 4.63 | 5.15  | 5.67  | 6.19  | 6.71  | 7.23  | 7.75  | 8.28  | 8.80  | 9.33  | 9.85  | 10.38 |
| 15  | 1.64 | 2.19 | 2.73 | 3.28 | 3.81 | 4.39 | 4.94 | 5.49  | 6.03  | 6.60  | 7.16  | 7.72  | 8.28  | 8.84  | 9.40  | 9.96  | 10.52 | 11.09 |
| 16  | 1.75 | 2.33 | 2.92 | 3.50 | 4.03 | 4.68 | 5.25 | 5.86  | 6.45  | 7.05  | 7.64  | 8.24  | 8.83  | 9.43  | 10.03 | 10.62 | 11.23 | 11.83 |
| 17  | 1.86 | 2.49 | 3.11 | 3.74 | 4.36 | 4.99 | 5.62 | 6.25  | 6.88  | 7.52  | 8.15  | 8.79  | 9.42  | 10.06 | 10.70 | 11.34 | 11.98 | 12.63 |
| 18  | 1.98 | 2.65 | 3.31 | 3.98 | 4.65 | 5.32 | 5.99 | 6.66  | 7.34  | 8.01  | 8.69  | 9.37  | 10.05 | 10.73 | 11.41 | 12.10 | 12.78 | 13.47 |
| 19  | 2.11 | 2.82 | 3.53 | 4.24 | 4.95 | 5.67 | 6.38 | 7.10  | 7.82  | 8.54  | 9.26  | 9.98  | 10.71 | 11.43 | 12.16 | 12.89 | 13.63 | 14.36 |
| 20  | 2.25 | 3.00 | 3.76 | 4.51 | 5.27 | 6.03 | 6.79 | 7.58  | 8.32  | 9.09  | 9.86  | 10.63 | 11.41 | 12.18 | 12.96 | 13.74 | 14.52 | 15.30 |
| 21  | 2.39 | 3.19 | 4.00 | 4.80 | 5.61 | 6.42 | 7.23 | 8.05  | 8.86  | 9.69  | 10.50 | 11.32 | 12.15 | 12.97 | 13.80 | 14.63 | 15.47 | 16.30 |
| 22  | 2.54 | 3.40 | 4.25 | 5.11 | 5.97 | 6.83 | 7.69 | 8.56  | 9.43  | 10.30 | 11.17 | 12.05 | 12.93 | 13.81 | 14.70 | 15.58 | 16.47 | 17.36 |
| 23  | 2.70 | 3.61 | 4.52 | 5.43 | 6.35 | 7.26 | 8.18 | 9.11  | 10.03 | 10.96 | 11.89 | 12.82 | 13.76 | 14.70 | 15.64 | 16.58 | 17.53 | 18.48 |
| 24  | 2.87 | 3.84 | 4.80 | 5.77 | 6.74 | 7.72 | 8.70 | 9.68  | 10.66 | 11.65 | 12.64 | 13.63 | 14.63 | 15.63 | 16.64 | 17.64 | 18.65 | 19.67 |
| 25  | 3.03 | 4.07 | 5.10 | 6.13 | 7.17 | 8.20 | 9.24 | 10.29 | 11.33 | 12.38 | 13.44 | 14.50 | 15.56 | 16.62 | 17.69 | 18.76 | 19.84 | 20.92 |

续表 1.6.3

| RH | t    |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 18%  | 20%  | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 26 | 3.24 | 4.33 | 5.42  | 6.51  | 7.61  | 8.71  | 9.82  | 10.93 | 12.04 | 13.16 | 14.28 | 15.41 | 16.54 | 17.67 | 18.81 | 19.95 | 21.09 | 22.24 |
| 27 | 3.44 | 4.59 | 5.73  | 6.91  | 8.08  | 9.25  | 10.42 | 11.60 | 12.79 | 13.98 | 15.17 | 16.37 | 17.57 | 18.77 | 19.99 | 21.20 | 22.42 | 23.65 |
| 28 | 3.64 | 4.87 | 6.10  | 7.33  | 8.57  | 9.81  | 11.06 | 12.32 | 13.57 | 14.84 | 16.11 | 17.38 | 18.66 | 19.94 | 21.23 | 22.52 | 23.82 | 25.13 |
| 29 | 3.86 | 5.16 | 6.47  | 7.77  | 9.09  | 10.41 | 11.74 | 13.07 | 14.40 | 15.75 | 17.09 | 18.45 | 19.81 | 21.17 | 22.55 | 23.92 | 25.31 | 26.69 |
| 30 | 4.09 | 5.47 | 6.86  | 8.24  | 9.64  | 11.04 | 12.45 | 13.86 | 15.28 | 16.71 | 18.14 | 19.58 | 21.02 | 22.48 | 23.93 | 25.40 | 26.87 | 28.35 |
| 31 | 4.34 | 5.80 | 7.26  | 8.73  | 10.21 | 11.70 | 13.19 | 14.69 | 16.20 | 17.72 | 19.24 | 20.77 | 22.30 | 23.85 | 25.40 | 26.96 | 28.53 | 30.10 |
| 32 | 4.59 | 6.14 | 7.69  | 9.25  | 10.82 | 12.40 | 13.98 | 15.57 | 17.17 | 18.78 | 20.40 | 22.02 | 23.66 | 25.30 | 26.95 | 28.61 | 30.27 | 31.95 |
| 33 | 4.86 | 6.50 | 8.14  | 9.80  | 11.46 | 13.14 | 14.81 | 16.50 | 18.20 | 19.91 | 21.62 | 23.35 | 25.08 | 26.83 | 28.58 | 30.34 | 32.12 | 33.90 |
| 34 | 5.14 | 6.87 | 8.62  | 10.37 | 12.13 | 13.90 | 15.68 | 17.49 | 19.31 | 21.15 | 23.01 | 24.87 | 26.76 | 28.64 | 30.53 | 32.44 | 34.36 | 36.31 |
| 35 | 5.43 | 7.27 | 9.12  | 10.97 | 12.84 | 14.71 | 16.60 | 18.50 | 20.41 | 22.34 | 24.28 | 26.24 | 28.21 | 30.19 | 32.18 | 34.19 | 36.21 | 38.24 |
| 36 | 5.75 | 7.69 | 9.64  | 11.60 | 13.58 | 15.57 | 17.57 | 19.58 | 21.61 | 23.65 | 25.70 | 27.77 | 29.85 | 31.94 | 34.04 | 36.16 | 38.29 | 40.44 |
| 37 | 6.07 | 8.13 | 10.19 | 12.27 | 14.36 | 16.47 | 18.59 | 20.72 | 22.87 | 25.03 | 27.20 | 29.39 | 31.61 | 33.83 | 36.07 | 38.32 | 40.59 | 42.87 |
| 38 | 6.42 | 8.59 | 10.77 | 12.97 | 15.18 | 17.41 | 19.66 | 21.92 | 24.20 | 26.50 | 28.81 | 31.13 | 33.47 | 35.83 | 38.20 | 40.58 | 43.01 | 45.44 |
| 39 | 6.78 | 9.07 | 11.38 | 13.70 | 16.05 | 18.41 | 20.78 | 23.18 | 25.60 | 28.04 | 30.50 | 32.97 | 35.45 | 37.94 | 40.44 | 42.95 | 45.48 | 48.05 |
| 40 | 7.15 | 9.57 | 12.01 | 14.47 | 16.95 | 19.45 | 21.97 | 24.50 | 27.05 | 29.61 | 32.19 | 34.78 | 37.38 | 39.99 | 42.61 | 45.24 | 47.88 | 50.51 |

表注: t [°C]

湿空气的含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 4 类地区)

表 1.6.4

| $t$ | $RH$ |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 15%  | 20%  | 25%  | 30%  | 35%  | 40%  | 45%  | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 10  | 1.20 | 1.61 | 2.01 | 2.41 | 2.81 | 3.22 | 3.62 | 4.03  | 4.43  | 4.84  | 5.25  | 5.65  | 6.05  | 6.47  | 6.88  | 7.29  | 7.70  | 8.11  |
| 11  | 1.29 | 1.72 | 2.15 | 2.58 | 3.01 | 3.44 | 3.88 | 4.31  | 4.74  | 5.18  | 5.61  | 6.05  | 6.49  | 6.92  | 7.36  | 7.80  | 8.24  | 8.68  |
| 12  | 1.37 | 1.83 | 2.29 | 2.76 | 3.22 | 3.68 | 4.14 | 4.61  | 5.07  | 5.54  | 6.00  | 6.47  | 6.91  | 7.40  | 7.87  | 8.34  | 8.81  | 9.28  |
| 13  | 1.47 | 1.96 | 2.45 | 2.94 | 3.44 | 3.93 | 4.43 | 4.92  | 5.42  | 5.92  | 6.41  | 6.91  | 7.41  | 7.91  | 8.41  | 8.92  | 9.42  | 9.92  |
| 14  | 1.57 | 2.09 | 2.62 | 3.14 | 3.67 | 4.20 | 4.73 | 5.26  | 5.79  | 6.32  | 6.85  | 7.38  | 7.92  | 8.45  | 8.99  | 9.52  | 10.05 | 10.60 |
| 15  | 1.67 | 2.23 | 2.79 | 3.35 | 3.92 | 4.48 | 5.04 | 5.61  | 6.18  | 6.74  | 7.31  | 7.88  | 8.45  | 9.02  | 9.60  | 10.17 | 10.75 | 11.32 |
| 16  | 1.78 | 2.38 | 2.98 | 3.58 | 4.18 | 4.78 | 5.38 | 5.99  | 6.59  | 7.20  | 7.80  | 8.41  | 9.02  | 9.63  | 10.24 | 10.86 | 11.47 | 12.09 |
| 17  | 1.90 | 2.54 | 3.17 | 3.81 | 4.45 | 5.10 | 5.74 | 6.38  | 7.03  | 7.67  | 8.32  | 8.97  | 9.62  | 10.28 | 10.93 | 11.58 | 12.24 | 12.90 |
| 18  | 2.03 | 2.70 | 3.38 | 4.06 | 4.75 | 5.43 | 6.12 | 6.80  | 7.49  | 8.18  | 8.87  | 9.57  | 10.26 | 10.96 | 11.65 | 12.35 | 13.05 | 13.76 |
| 19  | 2.16 | 2.88 | 3.60 | 4.33 | 5.03 | 5.79 | 6.52 | 7.26  | 7.99  | 8.72  | 9.46  | 10.20 | 10.94 | 11.68 | 12.42 | 13.17 | 13.92 | 14.67 |
| 20  | 2.30 | 3.06 | 3.84 | 4.67 | 5.38 | 6.16 | 6.94 | 7.72  | 8.50  | 9.29  | 10.07 | 10.86 | 11.65 | 12.44 | 13.24 | 14.03 | 14.83 | 15.63 |
| 21  | 2.44 | 3.26 | 4.05 | 4.90 | 5.73 | 6.58 | 7.39 | 8.22  | 9.05  | 9.89  | 10.72 | 11.56 | 12.41 | 13.25 | 14.10 | 14.95 | 15.80 | 16.65 |
| 22  | 2.60 | 3.47 | 4.34 | 5.22 | 6.09 | 6.97 | 7.86 | 8.74  | 9.63  | 10.52 | 11.41 | 12.30 | 13.19 | 14.11 | 15.01 | 15.92 | 16.82 | 17.74 |
| 23  | 2.76 | 3.69 | 4.61 | 5.55 | 6.48 | 7.42 | 8.36 | 9.30  | 10.24 | 11.19 | 12.13 | 13.07 | 14.01 | 15.01 | 15.93 | 16.94 | 17.91 | 18.88 |
| 24  | 2.93 | 3.92 | 4.90 | 5.89 | 6.89 | 7.88 | 8.88 | 9.89  | 10.89 | 11.90 | 12.91 | 13.93 | 14.94 | 15.97 | 17.00 | 18.02 | 19.03 | 20.09 |
| 25  | 3.11 | 4.16 | 5.21 | 6.26 | 7.32 | 8.38 | 9.44 | 10.51 | 11.58 | 12.65 | 13.73 | 14.81 | 15.89 | 16.98 | 18.07 | 19.17 | 20.27 | 21.37 |



续表 1.6.4

| RH | t    |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 15%  | 20%  | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 26 | 3.31 | 4.42 | 5.53  | 6.65  | 7.77  | 8.90  | 10.03 | 11.16 | 12.30 | 13.44 | 14.59 | 15.74 | 16.89 | 18.05 | 19.21 | 20.38 | 21.55 | 22.73 |
| 27 | 3.51 | 4.69 | 5.87  | 7.06  | 8.25  | 9.44  | 10.65 | 11.85 | 13.06 | 14.28 | 15.49 | 16.72 | 17.95 | 19.18 | 20.42 | 21.66 | 22.91 | 24.16 |
| 28 | 3.72 | 4.97 | 6.23  | 7.49  | 8.75  | 10.02 | 11.30 | 12.59 | 13.88 | 15.18 | 16.48 | 17.78 | 19.08 | 20.37 | 21.67 | 22.97 | 24.27 | 25.58 |
| 29 | 3.94 | 5.27 | 6.60  | 7.94  | 9.28  | 10.63 | 11.99 | 13.35 | 14.71 | 16.09 | 17.46 | 18.83 | 20.21 | 21.59 | 22.97 | 24.35 | 25.73 | 27.12 |
| 30 | 4.18 | 5.59 | 7.00  | 8.42  | 9.84  | 11.27 | 12.71 | 14.16 | 15.61 | 17.07 | 18.53 | 20.00 | 21.48 | 22.96 | 24.45 | 25.93 | 27.42 | 28.91 |
| 31 | 4.43 | 5.92 | 7.42  | 8.92  | 10.43 | 11.95 | 13.48 | 15.01 | 16.55 | 18.10 | 19.65 | 21.22 | 22.79 | 24.37 | 25.95 | 27.53 | 29.11 | 30.70 |
| 32 | 4.69 | 6.27 | 7.85  | 9.45  | 11.05 | 12.66 | 14.28 | 15.91 | 17.54 | 19.20 | 20.82 | 22.45 | 24.10 | 25.75 | 27.41 | 29.07 | 30.73 | 32.40 |
| 33 | 4.96 | 6.63 | 8.32  | 10.00 | 11.70 | 13.41 | 15.13 | 16.86 | 18.60 | 20.34 | 22.09 | 23.83 | 25.58 | 27.34 | 29.11 | 30.88 | 32.65 | 34.43 |
| 34 | 5.25 | 7.02 | 8.80  | 10.59 | 12.39 | 14.20 | 16.02 | 17.85 | 19.69 | 21.55 | 23.41 | 25.28 | 27.17 | 29.07 | 30.97 | 32.88 | 34.79 | 36.71 |
| 35 | 5.55 | 7.43 | 9.31  | 11.21 | 13.11 | 15.03 | 16.96 | 18.90 | 20.86 | 22.82 | 24.80 | 26.79 | 28.78 | 30.80 | 32.82 | 34.85 | 36.88 | 38.93 |
| 36 | 5.87 | 7.85 | 9.85  | 11.85 | 13.87 | 15.90 | 17.95 | 20.00 | 22.08 | 24.17 | 26.27 | 28.38 | 30.50 | 32.64 | 34.78 | 36.93 | 39.09 | 41.25 |
| 37 | 6.20 | 8.30 | 10.41 | 12.53 | 14.67 | 16.82 | 18.99 | 21.17 | 23.37 | 25.58 | 27.81 | 30.05 | 32.31 | 34.58 | 36.86 | 39.15 | 41.45 | 43.75 |
| 38 | 6.55 | 8.77 | 11.00 | 13.25 | 15.51 | 17.79 | 20.08 | 22.39 | 24.72 | 27.07 | 29.43 | 31.81 | 34.21 | 36.62 | 39.04 | 41.47 | 43.91 | 46.36 |
| 39 | 6.92 | 9.26 | 11.62 | 14.00 | 16.39 | 18.80 | 21.23 | 23.68 | 26.15 | 28.64 | 31.14 | 33.66 | 36.19 | 38.74 | 41.31 | 43.89 | 46.48 | 49.08 |
| 40 | 7.31 | 9.78 | 12.27 | 14.76 | 17.32 | 19.87 | 22.44 | 25.04 | 27.65 | 30.29 | 32.95 | 35.63 | 38.34 | 41.07 | 43.81 | 46.56 | 49.32 | 52.09 |

表注: t[℃]

湿空气的含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 5 类地区)

表 1.6.5

| $t$ | RH   |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 15%  | 20%  | 25%  | 30%  | 35%  | 40%  | 45%  | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 10  | 1.23 | 1.64 | 2.05 | 2.46 | 2.86 | 3.29 | 3.70 | 4.12  | 4.53  | 4.95  | 5.36  | 5.78  | 6.19  | 6.61  | 7.03  | 7.45  | 7.87  | 8.29  |
| 11  | 1.31 | 1.75 | 2.19 | 2.63 | 3.07 | 3.52 | 3.96 | 4.40  | 4.84  | 5.29  | 5.73  | 6.18  | 6.59  | 7.07  | 7.52  | 7.97  | 8.42  | 8.87  |
| 12  | 1.40 | 1.87 | 2.34 | 2.81 | 3.29 | 3.76 | 4.23 | 4.71  | 5.18  | 5.66  | 6.13  | 6.61  | 7.03  | 7.56  | 8.04  | 8.52  | 9.01  | 9.49  |
| 13  | 1.50 | 2.00 | 2.50 | 3.01 | 3.51 | 4.02 | 4.52 | 5.03  | 5.54  | 6.04  | 6.55  | 7.06  | 7.57  | 8.03  | 8.60  | 9.11  | 9.62  | 10.14 |
| 14  | 1.60 | 2.14 | 2.67 | 3.21 | 3.75 | 4.29 | 4.83 | 5.37  | 5.91  | 6.45  | 7.00  | 7.54  | 8.09  | 8.64  | 9.18  | 9.73  | 10.28 | 10.83 |
| 15  | 1.71 | 2.28 | 2.85 | 3.43 | 4.00 | 4.58 | 5.15 | 5.73  | 6.31  | 6.89  | 7.47  | 8.05  | 8.64  | 9.22  | 9.81  | 10.39 | 10.98 | 11.57 |
| 16  | 1.82 | 2.43 | 3.04 | 3.65 | 4.27 | 4.88 | 5.50 | 6.11  | 6.73  | 7.35  | 7.97  | 8.59  | 9.22  | 9.84  | 10.47 | 11.09 | 11.72 | 12.35 |
| 17  | 1.94 | 2.59 | 3.24 | 3.90 | 4.55 | 5.21 | 5.86 | 6.52  | 7.18  | 7.84  | 8.50  | 9.17  | 9.84  | 10.50 | 11.17 | 11.84 | 12.51 | 13.19 |
| 18  | 2.07 | 2.76 | 3.46 | 4.15 | 4.85 | 5.55 | 6.25 | 6.95  | 7.65  | 8.36  | 9.07  | 9.77  | 10.48 | 11.20 | 11.91 | 12.62 | 13.34 | 14.05 |
| 19  | 2.20 | 2.94 | 3.68 | 4.42 | 5.17 | 5.91 | 6.66 | 7.41  | 8.16  | 8.91  | 9.66  | 10.42 | 11.17 | 11.93 | 12.68 | 13.44 | 14.20 | 14.95 |
| 20  | 2.35 | 3.13 | 3.92 | 4.71 | 5.50 | 6.29 | 7.09 | 7.88  | 8.69  | 9.49  | 10.29 | 11.10 | 11.91 | 12.72 | 13.53 | 14.34 | 15.15 | 15.93 |
| 21  | 2.50 | 3.33 | 4.17 | 5.01 | 5.85 | 6.70 | 7.55 | 8.40  | 9.25  | 10.10 | 10.96 | 11.82 | 12.68 | 13.54 | 14.41 | 15.28 | 16.15 | 17.02 |
| 22  | 2.65 | 3.54 | 4.43 | 5.33 | 6.23 | 7.13 | 8.03 | 8.93  | 9.84  | 10.75 | 11.66 | 12.58 | 13.50 | 14.42 | 15.34 | 16.27 | 17.20 | 18.13 |
| 23  | 2.82 | 3.77 | 4.71 | 5.67 | 6.62 | 7.58 | 8.54 | 9.50  | 10.47 | 11.44 | 12.41 | 13.38 | 14.36 | 15.34 | 16.33 | 17.31 | 18.30 | 19.30 |
| 24  | 3.00 | 4.00 | 5.01 | 6.02 | 7.04 | 8.05 | 9.05 | 10.10 | 11.13 | 12.16 | 13.20 | 14.23 | 15.28 | 16.32 | 17.37 | 18.42 | 19.48 | 20.54 |
| 25  | 3.18 | 4.25 | 5.32 | 6.40 | 7.48 | 8.56 | 9.64 | 10.73 | 11.83 | 12.93 | 14.03 | 15.13 | 16.24 | 17.36 | 18.47 | 19.59 | 20.72 | 21.85 |

续表 1.6.5

| RH | t    |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 15%  | 20%  | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 26 | 3.38 | 4.51 | 5.65  | 6.79  | 7.94  | 9.09  | 10.24 | 11.49 | 12.57 | 13.73 | 14.91 | 16.03 | 17.25 | 18.45 | 19.64 | 20.83 | 22.03 | 23.23 |
| 27 | 3.53 | 4.79 | 6.00  | 7.21  | 8.43  | 9.65  | 10.88 | 12.13 | 13.35 | 14.59 | 15.83 | 17.09 | 18.31 | 19.60 | 20.87 | 22.14 | 23.42 | 24.70 |
| 28 | 3.80 | 5.08 | 6.36  | 7.65  | 8.94  | 10.24 | 11.54 | 12.85 | 14.17 | 15.49 | 16.81 | 18.15 | 19.49 | 20.82 | 22.17 | 23.53 | 24.89 | 26.25 |
| 29 | 4.03 | 5.33 | 6.75  | 8.14  | 9.48  | 10.86 | 12.25 | 13.64 | 15.04 | 16.44 | 17.85 | 19.23 | 20.69 | 22.11 | 23.55 | 24.99 | 26.44 | 27.89 |
| 30 | 4.27 | 5.71 | 7.15  | 8.60  | 10.06 | 11.52 | 12.99 | 14.47 | 15.95 | 17.44 | 18.94 | 20.44 | 21.93 | 23.47 | 25.00 | 26.53 | 28.07 | 29.62 |
| 31 | 4.52 | 6.03 | 7.58  | 9.11  | 10.66 | 12.21 | 13.77 | 15.34 | 16.91 | 18.50 | 20.09 | 21.69 | 23.23 | 24.91 | 26.53 | 28.17 | 29.81 | 31.45 |
| 32 | 4.79 | 6.40 | 8.02  | 9.65  | 11.29 | 12.94 | 14.59 | 16.26 | 17.93 | 19.61 | 21.30 | 23.02 | 24.71 | 26.43 | 28.18 | 29.93 | 31.64 | 33.39 |
| 33 | 5.07 | 6.73 | 8.50  | 10.22 | 11.96 | 13.71 | 15.46 | 17.23 | 19.00 | 20.79 | 22.58 | 24.39 | 26.20 | 28.03 | 29.88 | 31.71 | 33.57 | 35.44 |
| 34 | 5.36 | 7.17 | 8.99  | 10.82 | 12.68 | 14.51 | 16.37 | 18.25 | 20.13 | 22.02 | 23.93 | 25.85 | 27.78 | 29.72 | 31.67 | 33.63 | 35.61 | 37.60 |
| 35 | 5.67 | 7.59 | 9.51  | 11.45 | 13.40 | 15.36 | 17.33 | 19.32 | 21.32 | 23.33 | 25.35 | 27.39 | 29.44 | 31.50 | 33.58 | 35.66 | 37.76 | 39.83 |
| 36 | 6.00 | 8.02 | 10.03 | 12.11 | 14.18 | 16.25 | 18.35 | 20.45 | 22.57 | 24.70 | 26.85 | 29.01 | 31.19 | 33.33 | 35.59 | 37.81 | 40.04 | 42.29 |
| 37 | 6.34 | 8.45 | 10.64 | 12.81 | 14.99 | 17.19 | 19.41 | 21.64 | 23.89 | 26.15 | 28.43 | 30.73 | 33.04 | 35.36 | 37.71 | 40.07 | 42.44 | 44.84 |
| 38 | 6.70 | 8.90 | 11.24 | 13.54 | 15.85 | 18.19 | 20.53 | 22.89 | 25.27 | 27.67 | 30.07 | 32.49 | 34.94 | 37.41 | 39.89 | 42.46 | 44.99 | 47.53 |
| 39 | 7.07 | 9.45 | 11.87 | 14.30 | 16.75 | 19.22 | 21.70 | 24.21 | 26.73 | 29.28 | 31.84 | 34.43 | 37.04 | 39.66 | 42.31 | 44.98 | 47.60 | 50.28 |
| 40 | 7.46 | 9.99 | 12.54 | 15.11 | 17.70 | 20.31 | 22.94 | 25.60 | 28.27 | 30.97 | 33.68 | 36.43 | 39.19 | 41.99 | 44.80 | 47.64 | 50.50 | 53.39 |

表注: [t]

湿空气的含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 6 类地区)

表 1.6.6

| RH | t    |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 15%  | 20%  | 25%  | 30%  | 35%  | 40%  | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 10 | 1.32 | 1.77 | 2.24 | 2.65 | 3.10 | 3.54 | 3.99  | 4.43  | 4.83  | 5.33  | 5.78  | 6.23  | 6.68  | 7.13  | 7.58  | 8.03  | 8.43  | 8.93  |
| 11 | 1.42 | 1.89 | 2.36 | 2.84 | 3.31 | 3.79 | 4.27  | 4.74  | 5.22  | 5.70  | 6.18  | 6.66  | 7.14  | 7.62  | 8.11  | 8.59  | 9.07  | 9.53  |
| 12 | 1.51 | 2.02 | 2.53 | 3.03 | 3.54 | 4.05 | 4.56  | 5.07  | 5.58  | 6.09  | 6.61  | 7.12  | 7.64  | 8.15  | 8.67  | 9.19  | 9.71  | 10.22 |
| 13 | 1.62 | 2.16 | 2.70 | 3.24 | 3.78 | 4.33 | 4.87  | 5.42  | 5.96  | 6.51  | 7.03  | 7.51  | 8.16  | 8.71  | 9.27  | 9.82  | 10.38 | 10.93 |
| 14 | 1.72 | 2.30 | 2.87 | 3.46 | 4.04 | 4.62 | 5.20  | 5.79  | 6.37  | 6.96  | 7.54  | 8.13  | 8.72  | 9.31  | 9.90  | 10.49 | 11.09 | 11.68 |
| 15 | 1.84 | 2.46 | 3.07 | 3.69 | 4.31 | 4.93 | 5.55  | 6.18  | 6.80  | 7.43  | 8.03  | 8.68  | 9.31  | 9.94  | 10.57 | 11.21 | 11.84 | 12.43 |
| 16 | 1.96 | 2.62 | 3.23 | 3.84 | 4.46 | 5.08 | 5.69  | 6.31  | 6.92  | 7.53  | 8.14  | 8.75  | 9.36  | 9.97  | 10.58 | 11.19 | 11.80 | 12.41 |
| 17 | 2.08 | 2.79 | 3.49 | 4.20 | 4.90 | 5.61 | 6.32  | 7.03  | 7.74  | 8.45  | 9.17  | 9.88  | 10.60 | 11.32 | 12.04 | 12.77 | 13.49 | 14.22 |
| 18 | 2.23 | 2.98 | 3.72 | 4.47 | 5.23 | 5.98 | 6.73  | 7.49  | 8.25  | 9.01  | 9.77  | 10.54 | 11.31 | 12.07 | 12.84 | 13.62 | 14.39 | 15.17 |
| 19 | 2.37 | 3.17 | 3.97 | 4.78 | 5.57 | 6.37 | 7.17  | 7.98  | 8.79  | 9.60  | 10.42 | 11.23 | 12.05 | 12.87 | 13.69 | 14.52 | 15.34 | 16.17 |
| 20 | 2.53 | 3.37 | 4.22 | 5.07 | 5.93 | 6.78 | 7.64  | 8.50  | 9.36  | 10.23 | 11.10 | 11.97 | 12.84 | 13.71 | 14.59 | 15.47 | 16.35 | 17.24 |
| 21 | 2.69 | 3.59 | 4.49 | 5.40 | 6.31 | 7.22 | 8.13  | 9.05  | 9.97  | 10.89 | 11.82 | 12.74 | 13.68 | 14.61 | 15.54 | 16.48 | 17.42 | 18.37 |
| 22 | 2.86 | 3.82 | 4.78 | 5.74 | 6.71 | 7.68 | 8.65  | 9.63  | 10.61 | 11.59 | 12.58 | 13.57 | 14.56 | 15.55 | 16.55 | 17.55 | 18.56 | 19.56 |
| 23 | 3.04 | 4.06 | 5.03 | 6.11 | 7.14 | 8.17 | 9.20  | 10.24 | 11.29 | 12.33 | 13.38 | 14.44 | 15.49 | 16.55 | 17.62 | 18.69 | 19.76 | 20.83 |
| 24 | 3.23 | 4.31 | 5.40 | 6.49 | 7.58 | 8.68 | 9.79  | 10.89 | 12.00 | 13.12 | 14.24 | 15.36 | 16.48 | 17.61 | 18.75 | 19.88 | 21.03 | 22.17 |
| 25 | 3.43 | 4.58 | 5.73 | 6.89 | 8.06 | 9.23 | 10.40 | 11.58 | 12.76 | 13.94 | 15.13 | 16.33 | 17.53 | 18.73 | 19.94 | 21.15 | 22.37 | 23.59 |

续表 1.6.6

| RH | t    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 15%  | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 26 | 3.64 | 4.86  | 6.09  | 7.32  | 8.56  | 9.80  | 11.05 | 12.30 | 13.55 | 14.82 | 16.08 | 17.35 | 18.63 | 19.91 | 21.20 | 22.49 | 23.79 | 25.09 |
| 27 | 3.86 | 5.16  | 6.46  | 7.77  | 9.09  | 10.40 | 11.73 | 13.03 | 14.40 | 15.74 | 17.08 | 18.43 | 19.80 | 21.16 | 22.53 | 23.91 | 25.29 | 26.68 |
| 28 | 4.10 | 5.47  | 6.86  | 8.25  | 9.64  | 11.04 | 12.45 | 13.86 | 15.29 | 16.71 | 18.13 | 19.59 | 21.03 | 22.48 | 23.94 | 25.41 | 26.88 | 28.36 |
| 29 | 4.34 | 5.80  | 7.27  | 8.75  | 10.23 | 11.72 | 13.21 | 14.71 | 16.22 | 17.74 | 19.26 | 20.82 | 22.33 | 23.88 | 25.43 | 26.99 | 28.56 | 30.14 |
| 30 | 4.60 | 6.15  | 7.71  | 9.27  | 10.84 | 12.42 | 14.01 | 15.61 | 17.21 | 18.82 | 20.44 | 22.07 | 23.71 | 25.35 | 27.01 | 28.67 | 30.34 | 32.02 |
| 31 | 4.87 | 6.52  | 8.17  | 9.83  | 11.49 | 13.17 | 14.86 | 16.57 | 18.29 | 19.97 | 21.69 | 23.42 | 25.16 | 26.93 | 28.70 | 30.48 | 32.24 | 34.01 |
| 32 | 5.16 | 6.90  | 8.65  | 10.41 | 12.13 | 13.96 | 15.75 | 17.57 | 19.42 | 21.23 | 23.09 | 24.98 | 26.89 | 28.83 | 30.79 | 32.76 | 34.71 | 36.66 |
| 33 | 5.46 | 7.31  | 9.16  | 11.02 | 12.90 | 14.78 | 16.68 | 18.61 | 20.56 | 22.54 | 24.54 | 26.56 | 28.61 | 30.68 | 32.76 | 34.86 | 36.93 | 39.03 |
| 34 | 5.78 | 7.73  | 9.69  | 11.67 | 13.68 | 15.66 | 17.67 | 19.71 | 21.78 | 23.88 | 25.97 | 28.09 | 30.23 | 32.39 | 34.56 | 36.75 | 38.92 | 41.10 |
| 35 | 6.11 | 8.18  | 10.26 | 12.35 | 14.45 | 16.57 | 18.71 | 20.88 | 23.07 | 25.29 | 27.53 | 29.79 | 32.06 | 34.36 | 36.68 | 39.01 | 41.36 | 43.71 |
| 36 | 6.46 | 8.65  | 10.85 | 13.06 | 15.29 | 17.54 | 19.80 | 22.08 | 24.37 | 26.69 | 29.01 | 31.36 | 33.73 | 36.13 | 38.54 | 40.97 | 43.41 | 45.79 |
| 37 | 6.83 | 9.14  | 11.47 | 13.81 | 16.18 | 18.55 | 20.96 | 23.37 | 25.80 | 28.23 | 30.70 | 33.19 | 35.70 | 38.23 | 40.78 | 43.33 | 45.88 | 48.56 |
| 38 | 7.22 | 9.66  | 12.12 | 14.60 | 17.10 | 19.62 | 22.13 | 24.72 | 27.27 | 30.29 | 32.53 | 35.17 | 37.84 | 40.52 | 43.21 | 45.91 | 48.61 | 51.49 |
| 39 | 7.62 | 10.20 | 12.81 | 15.43 | 18.08 | 20.75 | 23.44 | 26.16 | 28.91 | 31.65 | 34.43 | 37.24 | 40.07 | 42.92 | 45.79 | 48.69 | 51.61 | 54.54 |
| 40 | 8.05 | 10.77 | 13.53 | 16.30 | 19.10 | 21.93 | 24.78 | 27.67 | 30.59 | 33.53 | 36.49 | 39.48 | 42.48 | 45.48 | 48.51 | 51.54 | 54.57 | 57.88 |

表注: [t]°C

湿空气的含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 7 类地区)

表 1.6.7

| $t$ | RH   |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 15%  | 20%  | 25%  | 30%  | 35%  | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 10  | 1.43 | 1.91 | 2.39 | 2.86 | 3.36 | 3.84  | 4.32  | 4.81  | 5.29  | 5.78  | 6.26  | 6.75  | 7.24  | 7.73  | 8.22  | 8.71  | 9.20  | 9.69  |
| 11  | 1.53 | 2.05 | 2.56 | 3.08 | 3.59 | 4.11  | 4.62  | 5.14  | 5.66  | 6.18  | 6.70  | 7.22  | 7.74  | 8.27  | 8.79  | 9.32  | 9.84  | 10.37 |
| 12  | 1.64 | 2.19 | 2.74 | 3.29 | 3.84 | 4.39  | 4.94  | 5.50  | 6.05  | 6.61  | 7.17  | 7.72  | 8.28  | 8.84  | 9.40  | 9.97  | 10.53 | 11.09 |
| 13  | 1.75 | 2.34 | 2.92 | 3.51 | 4.10 | 4.69  | 5.28  | 5.87  | 6.47  | 7.07  | 7.66  | 8.25  | 8.85  | 9.45  | 10.05 | 10.65 | 11.26 | 11.86 |
| 14  | 1.87 | 2.49 | 3.12 | 3.75 | 4.38 | 5.01  | 5.64  | 6.27  | 6.91  | 7.54  | 8.18  | 8.82  | 9.46  | 10.10 | 10.74 | 11.38 | 12.03 | 12.67 |
| 15  | 1.99 | 2.66 | 3.33 | 4.00 | 4.67 | 5.35  | 6.02  | 6.70  | 7.37  | 8.05  | 8.73  | 9.42  | 10.1  | 10.78 | 11.47 | 12.16 | 12.85 | 13.54 |
| 16  | 2.13 | 2.84 | 3.55 | 4.27 | 4.98 | 5.70  | 6.42  | 7.15  | 7.87  | 8.59  | 9.32  | 10.05 | 10.78 | 11.51 | 12.25 | 12.98 | 13.72 | 14.46 |
| 17  | 2.27 | 3.03 | 3.79 | 4.55 | 5.32 | 6.08  | 6.85  | 7.62  | 8.39  | 9.17  | 9.94  | 10.72 | 11.50 | 12.28 | 13.07 | 13.85 | 14.64 | 15.43 |
| 18  | 2.42 | 3.22 | 4.04 | 4.85 | 5.66 | 6.48  | 7.30  | 8.12  | 8.95  | 9.77  | 10.60 | 11.42 | 12.27 | 13.10 | 13.94 | 14.78 | 15.62 | 16.46 |
| 19  | 2.57 | 3.43 | 4.30 | 5.17 | 6.03 | 6.91  | 7.78  | 8.66  | 9.54  | 10.42 | 11.30 | 12.19 | 13.08 | 13.97 | 14.86 | 15.76 | 16.66 | 17.56 |
| 20  | 2.74 | 3.66 | 4.58 | 5.50 | 6.43 | 7.35  | 8.29  | 9.22  | 10.16 | 11.10 | 12.04 | 12.99 | 13.93 | 14.89 | 15.84 | 16.80 | 17.76 | 18.72 |
| 21  | 2.91 | 3.89 | 4.87 | 5.85 | 6.84 | 7.83  | 8.82  | 9.82  | 10.82 | 11.82 | 12.82 | 13.83 | 14.84 | 15.86 | 16.87 | 17.90 | 18.92 | 19.95 |
| 22  | 3.10 | 4.14 | 5.18 | 6.23 | 7.28 | 8.33  | 9.39  | 10.45 | 11.51 | 12.58 | 13.65 | 14.72 | 15.80 | 16.89 | 17.97 | 19.06 | 20.15 | 21.25 |
| 23  | 3.29 | 4.40 | 5.51 | 6.62 | 7.74 | 8.86  | 9.98  | 11.11 | 12.25 | 13.38 | 14.52 | 15.67 | 16.82 | 17.97 | 19.13 | 20.29 | 21.46 | 22.63 |
| 24  | 3.50 | 4.67 | 5.85 | 7.04 | 8.22 | 9.42  | 10.62 | 11.82 | 13.02 | 14.23 | 15.45 | 16.67 | 17.90 | 19.13 | 20.36 | 21.60 | 22.84 | 24.09 |
| 25  | 3.72 | 4.96 | 6.22 | 7.48 | 8.74 | 10.01 | 11.28 | 12.56 | 13.84 | 15.13 | 16.43 | 17.73 | 19.03 | 20.34 | 21.66 | 22.98 | 24.31 | 25.64 |

续表 1.6.7

| t  | RH   | 15%   | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    |      | 26    | 3.64  | 5.27  | 6.160 | 7.94  | 9.28  | 10.63 | 11.99 | 13.35 | 14.71 | 16.03 | 17.45 | 18.85 | 20.24 | 21.62 | 23.03 | 24.44 | 25.86 |
| 27 | 4.19 | 5.59  | 6.01  | 8.43  | 9.85  | 11.29 | 12.73 | 14.17 | 15.63 | 17.09 | 18.55 | 20.03 | 21.51 | 22.99 | 24.49 | 25.99 | 27.49 | 28.99 | 30.49 |
| 28 | 4.44 | 5.93  | 6.33  | 8.94  | 10.46 | 11.99 | 13.51 | 15.05 | 16.59 | 18.15 | 19.71 | 21.27 | 22.85 | 24.43 | 26.02 | 27.62 | 29.23 | 30.84 | 32.45 |
| 29 | 4.71 | 6.29  | 6.68  | 9.49  | 11.09 | 12.71 | 14.34 | 15.97 | 17.61 | 19.26 | 20.92 | 22.59 | 24.27 | 25.95 | 27.65 | 29.35 | 31.06 | 32.78 | 34.51 |
| 30 | 4.99 | 6.57  | 6.95  | 10.01 | 11.76 | 13.43 | 15.21 | 16.94 | 18.69 | 20.44 | 22.21 | 23.93 | 25.77 | 27.56 | 29.36 | 31.18 | 33.00 | 34.81 | 36.64 |
| 31 | 5.28 | 7.07  | 7.44  | 10.66 | 12.47 | 14.28 | 16.13 | 17.97 | 19.82 | 21.69 | 23.57 | 25.45 | 27.35 | 29.29 | 31.23 | 33.18 | 35.13 | 37.01 | 38.91 |
| 32 | 5.60 | 7.43  | 7.81  | 11.29 | 13.21 | 15.15 | 17.11 | 19.05 | 21.02 | 23.00 | 25.00 | 27.00 | 29.02 | 31.05 | 33.10 | 35.15 | 37.22 | 39.31 | 41.41 |
| 33 | 5.92 | 7.92  | 8.31  | 11.96 | 14.00 | 16.05 | 18.12 | 20.22 | 22.34 | 24.48 | 26.65 | 28.83 | 31.03 | 33.25 | 35.48 | 37.72 | 39.97 | 42.24 | 44.51 |
| 34 | 6.27 | 8.38  | 8.78  | 12.66 | 14.82 | 17.00 | 19.21 | 21.45 | 23.72 | 26.02 | 28.35 | 30.71 | 33.09 | 35.49 | 37.91 | 40.35 | 42.81 | 45.28 | 47.74 |
| 35 | 6.63 | 8.87  | 9.28  | 13.40 | 15.69 | 18.00 | 20.32 | 22.66 | 25.02 | 27.41 | 29.82 | 32.25 | 34.71 | 37.19 | 39.69 | 42.21 | 44.74 | 47.29 | 49.84 |
| 36 | 7.01 | 9.33  | 9.75  | 14.18 | 16.60 | 19.05 | 21.51 | 24.00 | 26.51 | 29.04 | 31.60 | 34.18 | 36.78 | 39.40 | 42.04 | 44.70 | 47.38 | 50.07 | 52.77 |
| 37 | 7.41 | 9.92  | 10.35 | 14.93 | 17.56 | 20.20 | 22.85 | 25.53 | 28.24 | 30.97 | 33.73 | 36.51 | 39.31 | 42.13 | 44.97 | 47.83 | 50.71 | 53.61 | 56.52 |
| 38 | 7.83 | 10.48 | 10.92 | 15.75 | 18.58 | 21.41 | 24.26 | 27.13 | 29.99 | 32.88 | 35.79 | 38.72 | 41.67 | 44.64 | 47.63 | 50.64 | 53.67 | 56.72 | 59.79 |
| 39 | 8.26 | 11.07 | 11.52 | 16.59 | 19.63 | 22.54 | 25.47 | 28.43 | 31.41 | 34.41 | 37.43 | 40.47 | 43.53 | 46.61 | 49.71 | 52.83 | 55.97 | 59.13 | 62.31 |
| 40 | 8.72 | 11.69 | 12.15 | 17.70 | 20.90 | 23.78 | 26.69 | 29.63 | 32.60 | 35.59 | 38.61 | 41.65 | 44.71 | 47.79 | 50.89 | 54.01 | 57.15 | 60.31 | 63.49 |

表注: [t]

第1类地区的相对湿度  $RH, (P = 101325[\text{Pa}])$

表1.7

| $d$ | $t$ | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   |  |
|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| 10  | 10  | 0.62 | 0.79 | 0.92 | 1.05 | 1.18 | 1.31 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|     | 11  | 0.62 | 0.74 | 0.86 | 0.98 | 1.10 | 1.22 | 1.34 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|     | 12  | 0.58 | 0.69 | 0.80 | 0.92 | 1.03 | 1.14 | 1.26 | 1.37 |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|     | 13  | 0.54 | 0.65 | 0.75 | 0.85 | 0.97 | 1.07 | 1.18 | 1.28 |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|     | 14  | 0.51 | 0.61 | 0.71 | 0.81 | 0.90 | 1.00 | 1.10 | 1.20 | 1.30 |      |      |      |      |      |      |      |  |
|     | 15  | 0.47 | 0.57 | 0.66 | 0.76 | 0.85 | 0.94 | 1.03 | 1.13 | 1.22 | 1.31 |      |      |      |      |      |      |  |
| 16  | 16  | 0.44 | 0.53 | 0.62 | 0.71 | 0.80 | 0.88 | 0.97 | 1.06 | 1.14 | 1.23 | 1.31 |      |      |      |      |      |  |
|     | 17  | 0.42 | 0.50 | 0.58 | 0.66 | 0.75 | 0.83 | 0.91 | 0.99 | 1.07 | 1.15 | 1.23 | 1.31 |      |      |      |      |  |
|     | 18  | 0.39 | 0.47 | 0.55 | 0.62 | 0.70 | 0.78 | 0.85 | 0.93 | 1.01 | 1.09 | 1.16 | 1.23 | 1.31 |      |      |      |  |
|     | 19  | 0.37 | 0.44 | 0.51 | 0.59 | 0.66 | 0.73 | 0.80 | 0.87 | 0.94 | 1.02 | 1.09 | 1.16 | 1.23 | 1.30 |      |      |  |
|     | 20  | 0.35 | 0.41 | 0.48 | 0.55 | 0.62 | 0.69 | 0.75 | 0.82 | 0.89 | 0.95 | 1.02 | 1.09 | 1.15 | 1.22 | 1.29 |      |  |
|     | 21  | 0.33 | 0.39 | 0.45 | 0.52 | 0.58 | 0.64 | 0.71 | 0.77 | 0.83 | 0.89 | 0.96 | 1.02 | 1.08 | 1.15 | 1.21 | 1.27 |  |
| 22  | 22  | 0.31 | 0.37 | 0.43 | 0.49 | 0.55 | 0.61 | 0.67 | 0.73 | 0.78 | 0.84 | 0.90 | 0.96 | 1.02 | 1.08 | 1.14 | 1.19 |  |
|     | 23  | 0.29 | 0.34 | 0.40 | 0.46 | 0.51 | 0.57 | 0.63 | 0.68 | 0.74 | 0.79 | 0.85 | 0.90 | 0.96 | 1.01 | 1.07 | 1.12 |  |
|     | 24  | 0.27 | 0.32 | 0.38 | 0.43 | 0.47 | 0.54 | 0.59 | 0.64 | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1.01 | 1.06 |  |
|     | 25  | 0.26 | 0.31 | 0.36 | 0.41 | 0.46 | 0.51 | 0.56 | 0.61 | 0.66 | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1.01 |  |
|     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |



续表 1.7

| $d$ | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
|-----|------|------|------|------|------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $t$ |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 10  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 11  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 12  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 13  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 14  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 15  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 16  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 17  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 18  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 19  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 20  |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 21  | 1.25 |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 22  | 1.18 | 1.31 |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 23  | 1.11 | 1.23 | 1.29 |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 24  | 1.04 | 1.16 | 1.21 | 1.25 | 1.31 |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 25  |      | 1.09 | 1.14 | 1.19 | 1.24 | 1.28 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

續表 1.7

| $d$ | $t$ | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   |      |
|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 26  | 26  | 0.24 | 0.29 | 0.34 | 0.39 | 0.43 | 0.48 | 0.52 | 0.57 | 0.62 | 0.66 | 0.71 | 0.76 | 0.80 | 0.85 | 0.89 | 0.94 |
|     | 27  | 0.23 | 0.27 | 0.32 | 0.36 | 0.41 | 0.45 | 0.49 | 0.54 | 0.59 | 0.63 | 0.67 | 0.71 | 0.76 | 0.80 | 0.84 | 0.89 |
|     | 28  | 0.21 | 0.26 | 0.30 | 0.34 | 0.38 | 0.42 | 0.47 | 0.51 | 0.55 | 0.59 | 0.63 | 0.67 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.84 |
|     | 29  | 0.20 | 0.24 | 0.28 | 0.32 | 0.36 | 0.40 | 0.44 | 0.48 | 0.52 | 0.56 | 0.60 | 0.64 | 0.67 | 0.71 | 0.75 | 0.79 |
|     | 30  | 0.19 | 0.23 | 0.27 | 0.30 | 0.34 | 0.38 | 0.42 | 0.45 | 0.49 | 0.53 | 0.58 | 0.60 | 0.64 | 0.67 | 0.71 | 0.74 |
| 31  | 31  | 0.18 | 0.22 | 0.25 | 0.29 | 0.32 | 0.35 | 0.39 | 0.43 | 0.46 | 0.50 | 0.53 | 0.57 | 0.60 | 0.63 | 0.67 | 0.70 |
|     | 32  | 0.17 | 0.20 | 0.24 | 0.27 | 0.30 | 0.34 | 0.37 | 0.40 | 0.44 | 0.47 | 0.50 | 0.53 | 0.57 | 0.60 | 0.63 | 0.66 |
|     | 33  | 0.16 | 0.19 | 0.22 | 0.26 | 0.29 | 0.32 | 0.35 | 0.38 | 0.41 | 0.44 | 0.47 | 0.51 | 0.54 | 0.57 | 0.60 | 0.63 |
|     | 34  | 0.15 | 0.18 | 0.21 | 0.24 | 0.27 | 0.29 | 0.32 | 0.36 | 0.39 | 0.42 | 0.45 | 0.48 | 0.51 | 0.54 | 0.56 | 0.59 |
|     | 35  | 0.14 | 0.17 | 0.20 | 0.23 | 0.26 | 0.29 | 0.31 | 0.34 | 0.37 | 0.40 | 0.42 | 0.45 | 0.48 | 0.51 | 0.52 | 0.56 |
| 36  | 36  | 0.14 | 0.16 | 0.19 | 0.22 | 0.24 | 0.27 | 0.30 | 0.32 | 0.35 | 0.38 | 0.40 | 0.43 | 0.45 | 0.48 | 0.51 | 0.53 |
|     | 37  | 0.13 | 0.15 | 0.18 | 0.21 | 0.23 | 0.25 | 0.28 | 0.31 | 0.33 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.43 | 0.45 | 0.48 | 0.50 |
|     | 38  | 0.12 | 0.15 | 0.17 | 0.19 | 0.22 | 0.24 | 0.27 | 0.29 | 0.31 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.41 | 0.43 | 0.45 | 0.48 |
|     | 39  | 0.12 | 0.14 | 0.16 | 0.18 | 0.21 | 0.23 | 0.25 | 0.27 | 0.30 | 0.32 | 0.34 | 0.36 | 0.39 | 0.41 | 0.43 | 0.45 |
|     | 40  | 0.11 | 0.13 | 0.15 | 0.17 | 0.20 | 0.22 | 0.24 | 0.26 | 0.28 | 0.30 | 0.32 | 0.34 | 0.37 | 0.39 | 0.41 | 0.43 |

表注:  $t$ [°C],  $d$ [g/kg 干]

表 1.7

|    | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   | 31   | 32   | 33   | 34   | 35   | 36   |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 26 | 0.98 | 1.03 | 1.08 | 1.12 | 1.17 | 1.21 | 1.25 | 1.30 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 27 | 0.93 | 0.97 | 1.01 | 1.06 | 1.10 | 1.14 | 1.18 | 1.22 | 1.27 |      |      |      |      |      |      |      |
| 28 | 0.88 | 0.92 | 0.96 | 1.00 | 1.04 | 1.08 | 1.12 | 1.15 | 1.19 | 1.23 | 1.27 |      |      |      |      |      |
| 29 | 0.83 | 0.86 | 0.90 | 0.94 | 0.98 | 1.02 | 1.05 | 1.09 | 1.13 | 1.16 | 1.20 | 1.24 |      |      |      |      |
| 30 | 0.78 | 0.82 | 0.85 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.99 | 1.03 | 1.06 | 1.10 | 1.13 | 1.17 | 1.20 | 1.24 | 1.27 |      |
| 31 | 0.74 | 0.77 | 0.80 | 0.84 | 0.87 | 0.90 | 0.94 | 0.97 | 1.00 | 1.04 | 1.07 | 1.10 | 1.14 | 1.17 | 1.2  | 1.23 |
| 32 | 0.70 | 0.73 | 0.76 | 0.79 | 0.82 | 0.85 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.98 | 1.01 | 1.04 | 1.07 | 1.10 | 1.14 | 1.17 |
| 33 | 0.65 | 0.69 | 0.72 | 0.75 | 0.78 | 0.81 | 0.84 | 0.87 | 0.90 | 0.93 | 0.96 | 0.99 | 1.01 | 1.04 | 1.07 | 1.10 |
| 34 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.76 | 0.79 | 0.82 | 0.85 | 0.88 | 0.90 | 0.93 | 0.96 | 0.99 | 1.01 | 1.04 |
| 35 | 0.59 | 0.62 | 0.64 | 0.67 | 0.70 | 0.72 | 0.75 | 0.78 | 0.80 | 0.83 | 0.86 | 0.88 | 0.91 | 0.93 | 0.95 | 0.99 |
| 36 | 0.53 | 0.58 | 0.61 | 0.63 | 0.66 | 0.68 | 0.71 | 0.73 | 0.76 | 0.78 | 0.81 | 0.83 | 0.86 | 0.88 | 0.91 | 0.93 |
| 37 | 0.51 | 0.55 | 0.58 | 0.60 | 0.62 | 0.65 | 0.67 | 0.70 | 0.72 | 0.74 | 0.77 | 0.79 | 0.81 | 0.84 | 0.85 | 0.88 |
| 38 | 0.50 | 0.52 | 0.55 | 0.57 | 0.59 | 0.61 | 0.64 | 0.66 | 0.68 | 0.70 | 0.73 | 0.75 | 0.77 | 0.79 | 0.81 | 0.84 |
| 39 | 0.47 | 0.50 | 0.52 | 0.54 | 0.55 | 0.57 | 0.60 | 0.62 | 0.65 | 0.67 | 0.69 | 0.71 | 0.73 | 0.75 | 0.77 | 0.79 |
| 40 | 0.45 | 0.47 | 0.49 | 0.51 | 0.53 | 0.55 | 0.57 | 0.59 | 0.61 | 0.63 | 0.65 | 0.67 | 0.69 | 0.71 | 0.73 | 0.75 |

湿空气含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 1 类地区)

表 1.9.1

| $t$ | $\Delta t$ |       | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5  | 8    |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|     | 0.5        | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5  | 8    |
| 10  | 7.16       | 6.71  | 6.27  | 5.83  | 5.40  | 4.98  | 4.56  | 4.15  | 3.75  | 3.36  | 2.97  | 2.59  | 2.21  | 1.84  | 1.47 | 1.12 |
| 11  | 7.68       | 7.21  | 6.75  | 6.3   | 5.85  | 5.42  | 4.99  | 4.57  | 4.15  | 3.74  | 3.34  | 2.95  | 2.56  | 2.18  | 1.80 | 1.43 |
| 12  | 8.23       | 7.74  | 7.27  | 6.80  | 6.34  | 5.89  | 5.44  | 5.01  | 4.53  | 4.13  | 3.74  | 3.34  | 2.94  | 2.54  | 2.16 | 1.78 |
| 13  | 8.81       | 8.31  | 7.82  | 7.35  | 6.85  | 6.39  | 5.93  | 5.48  | 5.03  | 4.60  | 4.17  | 3.75  | 3.34  | 2.93  | 2.53 | 2.14 |
| 14  | 9.43       | 8.91  | 8.40  | 7.90  | 7.40  | 6.92  | 6.44  | 5.98  | 5.52  | 5.07  | 4.62  | 4.19  | 3.76  | 3.34  | 2.93 | 2.52 |
| 15  | 10.09      | 9.55  | 9.02  | 8.49  | 7.98  | 7.48  | 6.99  | 6.51  | 6.03  | 5.56  | 5.11  | 4.66  | 4.22  | 3.76  | 3.36 | 2.94 |
| 16  | 10.78      | 10.22 | 9.67  | 9.13  | 8.6   | 8.09  | 7.57  | 7.07  | 6.58  | 6.09  | 5.62  | 5.15  | 4.70  | 4.25  | 3.81 | 3.37 |
| 17  | 11.52      | 10.94 | 10.37 | 9.81  | 9.26  | 8.72  | 8.19  | 7.67  | 7.16  | 6.66  | 6.17  | 5.68  | 5.21  | 4.75  | 4.29 | 3.84 |
| 18  | 12.31      | 11.70 | 11.11 | 10.52 | 9.95  | 9.39  | 8.84  | 8.30  | 7.77  | 7.25  | 6.74  | 6.24  | 5.75  | 5.27  | 4.8  | 4.34 |
| 19  | 13.14      | 12.51 | 11.89 | 11.28 | 10.69 | 10.1  | 9.53  | 8.97  | 8.43  | 7.89  | 7.36  | 6.84  | 6.33  | 5.83  | 5.34 | 4.86 |
| 20  | 14.01      | 13.36 | 12.72 | 12.03 | 11.47 | 10.86 | 10.27 | 9.69  | 9.12  | 8.56  | 8.01  | 7.47  | 6.95  | 6.43  | 5.92 | 5.42 |
| 21  | 14.95      | 14.26 | 13.59 | 12.94 | 12.30 | 11.67 | 11.05 | 10.45 | 9.85  | 9.27  | 8.70  | 8.14  | 7.60  | 7.05  | 6.53 | 6.02 |
| 22  | 15.93      | 15.22 | 14.52 | 13.84 | 13.17 | 12.52 | 11.88 | 11.25 | 10.63 | 10.03 | 9.44  | 8.86  | 8.29  | 7.73  | 7.18 | 6.65 |
| 23  | 16.97      | 16.23 | 15.51 | 14.80 | 14.10 | 13.42 | 12.75 | 12.11 | 11.46 | 10.83 | 10.22 | 9.61  | 9.02  | 8.44  | 7.87 | 7.32 |
| 24  | 18.08      | 17.30 | 16.55 | 15.81 | 15.09 | 14.37 | 13.68 | 13.00 | 12.33 | 11.68 | 11.03 | 10.37 | 9.80  | 9.20  | 8.61 | 8.03 |
| 25  | 19.24      | 18.44 | 17.65 | 16.88 | 16.12 | 15.38 | 14.66 | 13.95 | 13.26 | 12.58 | 11.91 | 11.26 | 10.62 | 10.00 | 9.38 | 8.78 |

续表1.9.1

| $t$ | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5   | 8     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26  | 20.48 | 19.64 | 18.82 | 18.01 | 17.22 | 16.45 | 15.70 | 14.96 | 14.24 | 13.53 | 12.84 | 12.16 | 11.49 | 10.84 | 10.21 | 9.58  |
| 27  | 21.78 | 20.91 | 20.05 | 19.21 | 18.39 | 17.59 | 16.80 | 16.03 | 15.28 | 14.54 | 13.82 | 13.11 | 12.42 | 11.74 | 11.09 | 10.43 |
| 28  | 23.16 | 22.25 | 21.35 | 20.48 | 19.62 | 18.78 | 17.96 | 17.16 | 16.38 | 15.61 | 14.85 | 14.12 | 13.40 | 12.69 | 12.00 | 11.32 |
| 29  | 24.62 | 23.67 | 22.73 | 21.82 | 20.92 | 20.05 | 19.19 | 18.36 | 17.54 | 16.74 | 15.95 | 15.18 | 14.43 | 13.70 | 12.98 | 12.27 |
| 30  | 26.16 | 25.16 | 24.19 | 23.23 | 22.30 | 21.39 | 20.49 | 19.62 | 18.77 | 17.93 | 17.11 | 16.31 | 15.53 | 14.76 | 14.01 | 13.28 |
| 31  | 27.79 | 26.75 | 25.73 | 24.73 | 23.75 | 22.80 | 21.87 | 20.96 | 20.07 | 19.19 | 18.34 | 17.50 | 16.69 | 15.83 | 15.11 | 14.34 |
| 32  | 29.51 | 28.42 | 27.35 | 26.31 | 25.29 | 24.30 | 23.32 | 22.37 | 21.44 | 20.53 | 19.64 | 18.77 | 17.91 | 17.03 | 16.26 | 15.47 |
| 33  | 31.32 | 30.18 | 29.07 | 27.98 | 26.92 | 25.88 | 24.86 | 23.86 | 22.89 | 21.94 | 21.01 | 20.10 | 19.21 | 18.34 | 17.49 | 16.68 |
| 34  | 33.24 | 32.15 | 30.88 | 29.75 | 28.63 | 27.54 | 26.48 | 25.44 | 24.43 | 23.43 | 22.46 | 21.51 | 20.59 | 19.67 | 18.79 | 17.92 |
| 35  | 35.27 | 34.02 | 32.80 | 31.61 | 30.45 | 29.31 | 28.20 | 27.11 | 26.05 | 25.01 | 23.99 | 23.00 | 22.03 | 21.03 | 20.15 | 19.25 |
| 36  | 37.41 | 36.10 | 34.82 | 33.58 | 32.36 | 31.17 | 30.01 | 28.87 | 27.76 | 26.67 | 25.61 | 24.58 | 23.56 | 22.57 | 21.60 | 20.65 |
| 37  | 39.67 | 38.30 | 36.95 | 35.66 | 34.38 | 33.14 | 31.92 | 30.73 | 29.57 | 28.43 | 27.32 | 26.24 | 25.18 | 24.14 | 23.13 | 22.14 |
| 38  | 42.05 | 40.62 | 39.22 | 37.85 | 36.52 | 35.21 | 33.94 | 32.69 | 31.48 | 30.29 | 29.13 | 28.00 | 26.89 | 25.81 | 24.75 | 23.71 |
| 39  | 44.57 | 43.07 | 41.60 | 40.17 | 38.77 | 37.41 | 36.07 | 34.77 | 33.50 | 32.25 | 31.04 | 29.85 | 28.69 | 27.56 | 26.45 | 25.37 |
| 40  | 47.23 | 45.65 | 44.12 | 42.62 | 41.15 | 39.72 | 38.32 | 36.96 | 35.63 | 34.33 | 33.06 | 31.81 | 30.60 | 29.42 | 28.26 | 27.13 |

表注: [°C]

表 1.9.2 湿空气含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 2 类地区)

| $t$ | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5  | 8    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 10  | 7.31  | 6.86  | 6.41  | 5.99  | 5.53  | 5.10  | 4.68  | 4.27  | 3.86  | 3.47  | 3.07  | 2.69  | 2.31  | 1.93  | 1.57 | 1.20 |
| 11  | 7.84  | 7.37  | 6.90  | 6.42  | 5.99  | 5.55  | 5.12  | 4.69  | 4.27  | 3.86  | 3.45  | 3.03  | 2.67  | 2.28  | 1.90 | 1.53 |
| 12  | 8.40  | 7.91  | 7.43  | 6.95  | 6.49  | 6.03  | 5.58  | 5.14  | 4.71  | 4.28  | 3.87  | 3.45  | 3.05  | 2.65  | 2.23 | 1.88 |
| 13  | 8.98  | 8.49  | 7.99  | 7.50  | 7.02  | 6.54  | 6.08  | 5.62  | 5.17  | 4.73  | 4.30  | 3.88  | 3.46  | 3.05  | 2.64 | 2.25 |
| 14  | 9.63  | 9.10  | 8.58  | 8.07  | 7.57  | 7.08  | 6.60  | 6.13  | 5.67  | 5.21  | 4.76  | 4.32  | 3.89  | 3.47  | 3.05 | 2.64 |
| 15  | 10.30 | 9.75  | 9.21  | 8.68  | 8.17  | 7.66  | 7.16  | 6.67  | 6.19  | 5.72  | 5.26  | 4.80  | 4.35  | 3.92  | 3.49 | 3.05 |
| 16  | 11.01 | 10.44 | 9.88  | 9.33  | 8.80  | 8.27  | 7.75  | 7.25  | 6.75  | 6.26  | 5.78  | 5.31  | 4.85  | 4.39  | 3.95 | 3.51 |
| 17  | 11.76 | 11.17 | 10.59 | 10.02 | 9.47  | 8.92  | 8.38  | 7.86  | 7.34  | 6.83  | 6.34  | 5.85  | 5.37  | 4.90  | 4.44 | 3.98 |
| 18  | 12.56 | 11.95 | 11.35 | 10.75 | 10.18 | 9.61  | 9.05  | 8.50  | 7.97  | 7.44  | 6.93  | 6.42  | 5.93  | 5.44  | 4.96 | 4.49 |
| 19  | 13.41 | 12.77 | 12.14 | 11.53 | 10.93 | 10.34 | 9.75  | 9.19  | 8.64  | 8.09  | 7.56  | 7.03  | 6.52  | 6.01  | 5.52 | 5.03 |
| 20  | 14.31 | 13.64 | 12.99 | 12.35 | 11.72 | 11.11 | 10.51 | 9.92  | 9.34  | 8.78  | 8.22  | 7.68  | 7.14  | 6.62  | 6.10 | 5.60 |
| 21  | 15.26 | 14.56 | 13.83 | 13.22 | 12.57 | 11.93 | 11.31 | 10.69 | 10.09 | 9.50  | 8.93  | 8.33  | 7.81  | 7.26  | 6.73 | 6.21 |
| 22  | 16.26 | 15.54 | 14.84 | 14.14 | 13.46 | 12.80 | 12.15 | 11.51 | 10.89 | 10.28 | 9.69  | 9.09  | 8.51  | 7.95  | 7.39 | 6.85 |
| 23  | 17.33 | 16.58 | 15.84 | 15.12 | 14.41 | 13.72 | 13.04 | 12.38 | 11.73 | 11.09 | 10.47 | 9.86  | 9.23  | 8.67  | 8.10 | 7.53 |
| 24  | 18.46 | 17.67 | 16.90 | 16.15 | 15.42 | 14.70 | 13.99 | 13.30 | 12.62 | 11.96 | 11.31 | 10.67 | 10.05 | 9.44  | 8.85 | 8.26 |
| 25  | 19.65 | 18.83 | 18.03 | 17.25 | 16.48 | 15.73 | 14.99 | 14.27 | 13.67 | 12.88 | 12.21 | 11.54 | 10.90 | 10.23 | 9.54 | 8.93 |

续表1.9.2

| $t$ | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5   | 8     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26  | 20.91 | 20.06 | 19.22 | 18.40 | 17.60 | 16.82 | 16.06 | 15.31 | 14.57 | 13.85 | 13.15 | 12.46 | 11.79 | 11.13 | 10.48 | 9.84  |
| 27  | 22.24 | 21.35 | 20.48 | 19.66 | 18.89 | 18.13 | 17.38 | 16.64 | 15.93 | 15.23 | 14.55 | 13.88 | 13.23 | 12.64 | 12.07 | 11.51 |
| 28  | 23.65 | 22.72 | 21.81 | 20.92 | 20.07 | 19.23 | 18.37 | 17.55 | 16.75 | 15.97 | 15.21 | 14.46 | 13.73 | 13.01 | 12.31 | 11.62 |
| 29  | 25.14 | 24.17 | 23.22 | 22.29 | 21.38 | 20.49 | 19.62 | 18.77 | 17.94 | 17.13 | 16.33 | 15.55 | 14.79 | 14.04 | 13.31 | 12.59 |
| 30  | 26.72 | 25.70 | 24.71 | 23.74 | 22.79 | 21.83 | 20.95 | 20.06 | 19.20 | 18.35 | 17.51 | 16.70 | 15.91 | 15.13 | 14.37 | 13.62 |
| 31  | 28.38 | 27.32 | 26.28 | 25.27 | 24.27 | 23.30 | 22.36 | 21.43 | 20.52 | 19.64 | 18.77 | 17.92 | 17.09 | 16.29 | 15.48 | 14.71 |
| 32  | 30.14 | 29.03 | 27.94 | 26.89 | 25.85 | 24.83 | 23.84 | 22.87 | 21.93 | 21.00 | 20.09 | 19.21 | 18.34 | 17.50 | 16.67 | 15.85 |
| 33  | 31.99 | 30.83 | 29.70 | 28.59 | 27.51 | 26.45 | 25.41 | 24.40 | 23.41 | 22.44 | 21.50 | 20.57 | 19.67 | 18.78 | 17.92 | 17.07 |
| 34  | 33.95 | 32.74 | 31.55 | 30.39 | 29.26 | 28.15 | 27.07 | 26.01 | 24.98 | 23.97 | 22.98 | 22.01 | 21.07 | 20.14 | 19.24 | 18.39 |
| 35  | 36.02 | 34.75 | 33.51 | 32.30 | 31.11 | 29.95 | 28.82 | 27.72 | 26.63 | 25.58 | 24.55 | 23.54 | 22.55 | 21.58 | 20.64 | 19.72 |
| 36  | 38.21 | 36.88 | 35.53 | 34.31 | 33.07 | 31.86 | 30.67 | 29.52 | 28.39 | 27.28 | 26.20 | 25.14 | 24.11 | 23.10 | 22.12 | 21.15 |
| 37  | 40.52 | 39.13 | 37.77 | 36.44 | 35.14 | 33.87 | 32.63 | 31.42 | 30.23 | 29.08 | 27.95 | 26.85 | 25.77 | 24.71 | 23.63 | 22.67 |
| 38  | 42.96 | 41.50 | 40.07 | 38.68 | 37.32 | 35.99 | 34.69 | 33.43 | 32.19 | 30.99 | 29.80 | 28.64 | 27.51 | 26.41 | 25.33 | 24.28 |
| 39  | 45.54 | 44.01 | 42.51 | 41.05 | 39.63 | 38.23 | 36.87 | 35.55 | 34.25 | 32.93 | 31.75 | 30.54 | 29.36 | 28.21 | 27.08 | 25.98 |
| 40  | 48.28 | 46.65 | 45.08 | 43.55 | 42.06 | 40.60 | 39.18 | 37.79 | 36.43 | 35.10 | 33.81 | 32.54 | 31.31 | 30.10 | 28.92 | 27.77 |

表注:  $t$  [°C]

湿空气含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第3类地区)

表 1.9.3

| $t$ | $\Delta t$ | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5  | 8    |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 10  |            | 7.47  | 7.01  | 6.55  | 6.10  | 5.66  | 5.23  | 4.81  | 4.39  | 3.93  | 3.53  | 3.18  | 2.79  | 2.41  | 2.03  | 1.66 | 1.30 |
| 11  |            | 8.01  | 7.53  | 7.06  | 6.59  | 6.14  | 5.69  | 5.25  | 4.82  | 4.40  | 3.98  | 3.57  | 3.17  | 2.78  | 2.39  | 2.00 | 1.63 |
| 12  |            | 8.58  | 8.08  | 7.60  | 7.12  | 6.65  | 6.18  | 5.73  | 5.28  | 4.85  | 4.42  | 3.99  | 3.59  | 3.17  | 2.77  | 2.37 | 1.98 |
| 13  |            | 9.14  | 8.67  | 8.17  | 7.67  | 7.18  | 6.70  | 6.23  | 5.77  | 5.32  | 4.87  | 4.44  | 4.01  | 3.58  | 3.17  | 2.76 | 2.38 |
| 14  |            | 9.83  | 9.30  | 8.77  | 8.26  | 7.75  | 7.26  | 6.77  | 6.29  | 5.82  | 5.36  | 4.91  | 4.47  | 4.03  | 3.60  | 3.18 | 2.76 |
| 15  |            | 10.52 | 9.96  | 9.42  | 8.88  | 8.36  | 7.84  | 7.34  | 6.84  | 6.36  | 5.83  | 5.41  | 4.95  | 4.50  | 4.06  | 3.62 | 3.19 |
| 16  |            | 11.24 | 10.67 | 10.10 | 9.55  | 9.00  | 8.47  | 7.94  | 7.43  | 6.93  | 6.43  | 5.95  | 5.47  | 5.00  | 4.51  | 4.09 | 3.65 |
| 17  |            | 12.01 | 11.41 | 10.83 | 10.25 | 9.69  | 9.13  | 8.59  | 8.05  | 7.53  | 7.02  | 6.52  | 6.02  | 5.54  | 5.03  | 4.59 | 4.14 |
| 18  |            | 12.83 | 12.21 | 11.60 | 11.00 | 10.41 | 9.83  | 9.27  | 8.72  | 8.17  | 7.64  | 7.12  | 6.61  | 6.10  | 5.61  | 5.13 | 4.65 |
| 19  |            | 13.70 | 13.05 | 12.41 | 11.79 | 11.18 | 10.58 | 9.99  | 9.42  | 8.85  | 8.30  | 7.76  | 7.23  | 6.71  | 6.20  | 5.69 | 5.20 |
| 20  |            | 14.61 | 13.94 | 13.28 | 12.63 | 11.99 | 11.37 | 10.76 | 10.16 | 9.59  | 9.00  | 8.44  | 7.89  | 7.35  | 6.82  | 6.30 | 5.78 |
| 21  |            | 15.58 | 14.88 | 14.19 | 13.52 | 12.86 | 12.21 | 11.57 | 10.95 | 10.34 | 9.76  | 9.16  | 8.59  | 8.03  | 7.47  | 6.93 | 6.40 |
| 22  |            | 16.61 | 15.88 | 15.16 | 14.46 | 13.77 | 13.10 | 12.44 | 11.79 | 11.16 | 10.53 | 9.93  | 9.33  | 8.75  | 8.17  | 7.61 | 7.05 |
| 23  |            | 17.70 | 16.94 | 16.19 | 15.46 | 14.74 | 14.04 | 13.35 | 12.68 | 12.02 | 11.37 | 10.74 | 10.12 | 9.51  | 8.92  | 8.33 | 7.76 |
| 24  |            | 18.85 | 18.05 | 17.27 | 16.51 | 15.76 | 15.03 | 14.32 | 13.62 | 12.93 | 12.26 | 11.60 | 10.95 | 10.32 | 9.70  | 9.10 | 8.50 |
| 25  |            | 20.07 | 19.24 | 18.42 | 17.63 | 16.85 | 16.09 | 15.34 | 14.61 | 13.90 | 13.19 | 12.51 | 11.84 | 11.18 | 10.54 | 9.91 | 9.29 |



續表1.9.3

| $\Delta t$ | $t$   | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5   | 8     |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            |       | 26    | 21.36 | 20.49 | 19.64 | 18.91 | 18.00 | 17.20 | 16.42 | 15.66 | 14.92 | 14.19 | 13.47 | 12.78 | 12.01 | 11.42 | 10.76 |
| 27         | 22.72 | 21.81 | 20.93 | 20.06 | 19.21 | 18.38 | 17.57 | 16.78 | 16.00 | 15.24 | 14.50 | 13.77 | 13.05 | 12.36 | 11.67 | 11.00 |       |
| 28         | 24.16 | 23.21 | 22.29 | 21.38 | 20.50 | 19.63 | 18.79 | 17.96 | 17.15 | 16.35 | 15.58 | 14.82 | 14.03 | 13.35 | 12.64 | 11.94 |       |
| 29         | 25.68 | 24.69 | 23.73 | 22.78 | 21.85 | 20.95 | 20.07 | 19.21 | 18.36 | 17.53 | 16.72 | 15.93 | 15.16 | 14.40 | 13.65 | 12.93 |       |
| 30         | 27.29 | 26.26 | 25.25 | 24.26 | 23.30 | 22.35 | 21.43 | 20.53 | 19.64 | 18.78 | 17.93 | 17.11 | 16.30 | 15.51 | 14.73 | 13.93 |       |
| 31         | 28.99 | 27.91 | 26.86 | 25.82 | 24.82 | 23.83 | 22.86 | 21.92 | 21.00 | 20.10 | 19.22 | 18.35 | 17.51 | 16.68 | 15.83 | 15.09 |       |
| 32         | 30.79 | 29.66 | 28.56 | 27.48 | 26.42 | 25.39 | 24.38 | 23.40 | 22.43 | 21.43 | 20.57 | 19.67 | 18.79 | 17.93 | 17.09 | 16.26 |       |
| 33         | 32.69 | 31.51 | 30.35 | 29.22 | 28.12 | 27.04 | 25.99 | 24.96 | 23.95 | 22.97 | 22.00 | 21.03 | 20.14 | 19.24 | 18.36 | 17.50 |       |
| 34         | 34.70 | 33.46 | 32.25 | 31.07 | 29.91 | 28.79 | 27.68 | 26.51 | 25.55 | 24.53 | 23.52 | 22.54 | 21.58 | 20.64 | 19.72 | 18.82 |       |
| 35         | 36.81 | 35.52 | 34.25 | 33.02 | 31.81 | 30.63 | 29.48 | 28.35 | 27.25 | 26.17 | 25.12 | 24.09 | 23.09 | 22.11 | 21.15 | 20.21 |       |
| 36         | 39.05 | 37.69 | 36.37 | 35.07 | 33.81 | 32.57 | 31.37 | 30.19 | 29.04 | 27.91 | 26.81 | 25.74 | 24.69 | 23.66 | 22.66 | 21.68 |       |
| 37         | 41.42 | 39.99 | 38.60 | 37.25 | 35.92 | 34.63 | 33.37 | 32.13 | 30.93 | 29.75 | 28.60 | 27.43 | 26.38 | 25.31 | 24.26 | 23.23 |       |
| 38         | 43.91 | 42.42 | 40.97 | 39.55 | 38.16 | 36.80 | 35.43 | 34.19 | 32.93 | 31.69 | 30.49 | 29.31 | 28.17 | 27.04 | 25.95 | 24.87 |       |
| 39         | 46.55 | 44.99 | 43.46 | 41.97 | 40.52 | 39.10 | 37.71 | 36.36 | 35.04 | 33.75 | 32.49 | 31.26 | 30.05 | 28.88 | 27.73 | 26.61 |       |
| 40         | 49.33 | 47.69 | 46.09 | 44.53 | 43.01 | 41.52 | 40.07 | 38.65 | 37.27 | 35.91 | 34.59 | 33.31 | 32.05 | 30.82 | 29.62 | 28.44 |       |

表注：[℃]

湿空气含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 4 类地区)

表 1.9.4

| $t$ | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5  | 8    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 10  | 7.63  | 7.16  | 6.70  | 6.25  | 5.81  | 5.37  | 4.94  | 4.52  | 4.11  | 3.70  | 3.30  | 2.90  | 2.52  | 2.13  | 1.76 | 1.39 |
| 11  | 8.18  | 7.70  | 7.22  | 6.75  | 6.29  | 5.84  | 5.40  | 4.96  | 4.53  | 4.11  | 3.70  | 3.29  | 2.89  | 2.50  | 2.11 | 1.73 |
| 12  | 8.77  | 8.26  | 7.77  | 7.28  | 6.81  | 6.34  | 5.88  | 5.43  | 4.99  | 4.55  | 4.12  | 3.70  | 3.29  | 2.88  | 2.49 | 2.09 |
| 13  | 9.39  | 8.87  | 8.35  | 7.85  | 7.36  | 6.87  | 6.40  | 5.93  | 5.47  | 5.02  | 4.58  | 4.14  | 3.72  | 3.30  | 2.89 | 2.48 |
| 14  | 10.05 | 9.51  | 8.97  | 8.45  | 7.94  | 7.44  | 6.94  | 6.46  | 5.99  | 5.52  | 5.06  | 4.61  | 4.17  | 3.74  | 3.31 | 2.89 |
| 15  | 10.75 | 10.18 | 9.63  | 9.09  | 8.56  | 8.04  | 7.53  | 7.02  | 6.53  | 6.05  | 5.57  | 5.11  | 4.65  | 4.20  | 3.76 | 3.33 |
| 16  | 11.49 | 10.90 | 10.33 | 9.77  | 9.22  | 8.68  | 8.14  | 7.62  | 7.11  | 6.61  | 6.12  | 5.64  | 5.17  | 4.70  | 4.24 | 3.80 |
| 17  | 12.28 | 11.67 | 11.07 | 10.49 | 9.91  | 9.35  | 8.80  | 8.26  | 7.73  | 7.21  | 6.70  | 6.20  | 5.71  | 5.23  | 4.76 | 4.29 |
| 18  | 13.11 | 12.48 | 11.86 | 11.25 | 10.65 | 10.07 | 9.50  | 8.94  | 8.39  | 7.85  | 7.32  | 6.80  | 6.29  | 5.79  | 5.30 | 4.82 |
| 19  | 13.99 | 13.34 | 12.69 | 12.06 | 11.44 | 10.83 | 10.24 | 9.65  | 9.08  | 8.52  | 7.97  | 7.43  | 6.91  | 6.39  | 5.89 | 5.38 |
| 20  | 14.93 | 14.25 | 13.57 | 12.92 | 12.27 | 11.64 | 11.02 | 10.41 | 9.82  | 9.24  | 8.67  | 8.11  | 7.56  | 7.02  | 6.49 | 5.93 |
| 21  | 15.92 | 15.21 | 14.51 | 13.82 | 13.15 | 12.50 | 11.85 | 11.22 | 10.60 | 10.00 | 9.41  | 8.82  | 8.25  | 7.70  | 7.15 | 6.61 |
| 22  | 16.97 | 16.23 | 15.50 | 14.79 | 14.09 | 13.40 | 12.73 | 12.08 | 11.43 | 10.80 | 10.19 | 9.58  | 8.99  | 8.41  | 7.84 | 7.28 |
| 23  | 18.09 | 17.31 | 16.55 | 15.81 | 15.08 | 14.36 | 13.67 | 12.98 | 12.31 | 11.66 | 11.02 | 10.39 | 9.77  | 9.17  | 8.58 | 8.00 |
| 24  | 19.28 | 18.45 | 17.63 | 16.87 | 16.13 | 15.39 | 14.66 | 13.94 | 13.25 | 12.53 | 11.80 | 11.08 | 10.36 | 9.67  | 9.05 | 8.45 |
| 25  | 20.51 | 19.66 | 18.84 | 18.01 | 17.24 | 16.46 | 15.70 | 14.96 | 14.23 | 13.52 | 12.78 | 12.04 | 11.28 | 10.52 | 9.85 | 9.15 |

续表 1.9.4

| $t$ | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5   | 8     |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26  | 21.93 | 20.94 | 20.08 | 19.24 | 18.41 | 17.60 | 16.81 | 16.04 | 15.23 | 14.54 | 13.81 | 13.10 | 12.41 | 11.73 | 11.05 | 10.41 |
| 27  | 23.22 | 22.30 | 21.40 | 20.51 | 19.65 | 18.81 | 17.93 | 17.18 | 16.39 | 15.61 | 14.88 | 14.12 | 13.39 | 12.68 | 11.99 | 11.31 |
| 28  | 24.59 | 23.73 | 22.78 | 21.87 | 20.97 | 20.09 | 19.22 | 18.38 | 17.56 | 16.75 | 15.96 | 15.19 | 14.44 | 13.70 | 12.97 | 12.23 |
| 29  | 25.25 | 24.24 | 23.50 | 22.56 | 21.44 | 20.54 | 19.68 | 18.80 | 17.96 | 17.13 | 16.33 | 15.54 | 14.77 | 14.02 | 13.23 | 12.43 |
| 30  | 27.90 | 26.84 | 25.81 | 24.51 | 23.83 | 22.87 | 21.93 | 21.01 | 20.11 | 19.23 | 18.37 | 17.53 | 16.71 | 15.91 | 15.12 | 14.35 |
| 31  | 29.64 | 28.53 | 27.46 | 26.41 | 25.58 | 24.78 | 23.40 | 22.44 | 21.59 | 20.58 | 19.68 | 18.81 | 17.95 | 17.11 | 16.29 | 15.48 |
| 32  | 31.47 | 30.32 | 29.20 | 28.10 | 27.02 | 25.97 | 24.95 | 23.94 | 22.96 | 22.01 | 21.07 | 20.15 | 19.26 | 18.38 | 17.52 | 16.68 |
| 33  | 33.42 | 32.21 | 31.03 | 29.88 | 28.73 | 27.66 | 26.60 | 25.54 | 24.52 | 23.51 | 22.53 | 21.53 | 20.64 | 19.72 | 18.83 | 17.95 |
| 34  | 35.47 | 34.21 | 32.97 | 31.77 | 30.60 | 29.45 | 28.32 | 27.23 | 26.15 | 25.11 | 24.08 | 23.08 | 22.10 | 21.15 | 20.21 | 19.30 |
| 35  | 37.64 | 36.32 | 35.03 | 33.77 | 32.53 | 31.33 | 30.16 | 29.01 | 27.89 | 26.79 | 25.72 | 24.67 | 23.65 | 22.65 | 21.68 | 20.72 |
| 36  | 39.93 | 38.54 | 37.19 | 35.87 | 34.53 | 33.32 | 32.09 | 30.89 | 29.72 | 28.57 | 27.45 | 26.36 | 25.29 | 24.24 | 23.22 | 22.22 |
| 37  | 42.35 | 40.90 | 39.45 | 38.10 | 36.75 | 35.43 | 34.14 | 32.88 | 31.65 | 30.45 | 29.25 | 28.14 | 27.02 | 25.92 | 24.86 | 23.81 |
| 38  | 44.90 | 43.38 | 41.90 | 40.45 | 39.03 | 37.65 | 36.30 | 34.98 | 33.70 | 32.44 | 31.21 | 30.02 | 28.85 | 27.20 | 26.58 | 25.49 |
| 39  | 47.60 | 46.01 | 44.45 | 42.93 | 41.45 | 40.00 | 38.59 | 37.21 | 35.86 | 34.54 | 33.26 | 32.00 | 30.78 | 29.53 | 28.41 | 27.27 |
| 40  | 50.46 | 48.78 | 47.15 | 45.53 | 44.00 | 42.48 | 41.00 | 39.55 | 38.14 | 36.76 | 35.42 | 34.10 | 32.82 | 31.53 | 30.34 | 29.14 |

表注:  $t$  [°C]

表 1.9.5

湿空气含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 5 类地区)

| $t$ | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5   | 8    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 10  | 7.80  | 7.33  | 6.86  | 6.40  | 5.95  | 5.51  | 5.08  | 4.65  | 4.23  | 3.82  | 3.42  | 3.02  | 2.63  | 2.24  | 1.86  | 1.49 |
| 11  | 8.37  | 7.87  | 7.39  | 6.92  | 6.45  | 5.99  | 5.54  | 5.10  | 4.67  | 4.24  | 3.83  | 3.41  | 3.01  | 2.61  | 2.22  | 1.84 |
| 12  | 8.95  | 8.45  | 7.95  | 7.45  | 6.98  | 6.50  | 6.04  | 5.58  | 5.13  | 4.69  | 4.25  | 3.84  | 3.42  | 3.01  | 2.60  | 2.21 |
| 13  | 9.50  | 9.07  | 8.55  | 8.04  | 7.54  | 7.05  | 6.57  | 6.09  | 5.63  | 5.17  | 4.73  | 4.29  | 3.85  | 3.43  | 3.01  | 2.60 |
| 14  | 10.27 | 9.72  | 9.18  | 8.65  | 8.13  | 7.63  | 7.13  | 6.64  | 6.15  | 5.68  | 5.22  | 4.76  | 4.32  | 3.88  | 3.45  | 3.02 |
| 15  | 10.99 | 10.41 | 9.85  | 9.31  | 8.77  | 8.24  | 7.72  | 7.21  | 6.71  | 6.22  | 5.74  | 5.27  | 4.81  | 4.36  | 3.91  | 3.47 |
| 16  | 11.74 | 11.15 | 10.57 | 10.00 | 9.44  | 8.89  | 8.35  | 7.83  | 7.31  | 6.80  | 6.30  | 5.81  | 5.33  | 4.86  | 4.40  | 3.95 |
| 17  | 12.55 | 11.93 | 11.33 | 10.73 | 10.15 | 9.58  | 9.02  | 8.48  | 7.94  | 7.41  | 6.90  | 6.39  | 5.89  | 5.40  | 4.93  | 4.46 |
| 18  | 13.40 | 12.76 | 12.13 | 11.51 | 10.91 | 10.32 | 9.74  | 9.17  | 8.61  | 8.05  | 7.53  | 7.00  | 6.48  | 5.98  | 5.48  | 4.99 |
| 19  | 14.31 | 13.64 | 12.98 | 12.34 | 11.71 | 11.10 | 10.49 | 9.90  | 9.32  | 8.75  | 8.20  | 7.65  | 7.11  | 6.59  | 6.07  | 5.57 |
| 20  | 15.26 | 14.57 | 13.88 | 13.22 | 12.58 | 11.92 | 11.29 | 10.68 | 10.09 | 9.48  | 8.91  | 8.34  | 7.78  | 7.24  | 6.70  | 6.18 |
| 21  | 16.23 | 15.55 | 14.84 | 14.15 | 13.46 | 12.80 | 12.14 | 11.50 | 10.88 | 10.26 | 9.63  | 9.07  | 8.49  | 7.92  | 7.37  | 6.82 |
| 22  | 17.35 | 16.60 | 15.85 | 15.13 | 14.42 | 13.72 | 13.04 | 12.38 | 11.72 | 11.09 | 10.46 | 9.85  | 9.24  | 8.66  | 8.08  | 7.51 |
| 23  | 18.49 | 17.70 | 16.93 | 16.17 | 15.43 | 14.71 | 14.00 | 13.30 | 12.62 | 11.95 | 11.31 | 10.67 | 10.04 | 9.43  | 8.83  | 8.24 |
| 24  | 19.69 | 18.87 | 18.05 | 17.28 | 16.50 | 15.75 | 15.01 | 14.29 | 13.58 | 12.83 | 12.21 | 11.54 | 10.89 | 10.25 | 9.63  | 9.02 |
| 25  | 20.97 | 20.11 | 19.27 | 18.44 | 17.64 | 16.85 | 16.08 | 15.33 | 14.59 | 13.83 | 13.16 | 12.47 | 11.79 | 11.12 | 10.47 | 9.84 |

续表1.9.5

| $M$ | $t$   | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5   | 8     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26  | 26    | 22.82 | 21.42 | 20.54 | 19.68 | 18.84 | 18.02 | 17.21 | 16.43 | 15.66 | 14.90 | 14.17 | 13.44 | 12.74 | 12.05 | 11.37 | 10.71 |
|     | 27    | 23.74 | 22.80 | 21.88 | 20.99 | 20.11 | 19.25 | 18.41 | 17.59 | 16.79 | 16.00 | 15.23 | 14.48 | 13.75 | 13.03 | 12.32 | 11.63 |
|     | 28    | 25.25 | 24.27 | 23.31 | 22.37 | 21.46 | 20.53 | 19.68 | 18.83 | 17.99 | 17.17 | 16.37 | 15.58 | 14.81 | 14.03 | 13.33 | 12.61 |
|     | 29    | 25.84 | 25.82 | 24.81 | 23.83 | 22.88 | 21.94 | 21.03 | 20.13 | 19.26 | 18.40 | 17.56 | 16.74 | 15.94 | 15.16 | 14.39 | 13.64 |
|     | 30    | 23.53 | 27.45 | 26.41 | 25.38 | 24.38 | 23.40 | 22.45 | 21.51 | 20.60 | 19.70 | 18.83 | 17.97 | 17.14 | 16.32 | 15.52 | 14.74 |
| 31  | 31    | 30.31 | 29.18 | 28.09 | 27.02 | 25.97 | 24.95 | 23.95 | 22.97 | 22.02 | 21.03 | 20.17 | 19.28 | 18.40 | 17.55 | 16.71 | 15.90 |
|     | 32    | 32.19 | 31.01 | 29.87 | 28.75 | 27.65 | 26.58 | 25.54 | 24.52 | 23.52 | 22.54 | 21.59 | 20.66 | 19.74 | 18.85 | 17.98 | 17.13 |
|     | 33    | 34.18 | 32.95 | 31.75 | 30.58 | 29.43 | 28.31 | 27.22 | 26.15 | 25.11 | 24.09 | 23.09 | 22.11 | 21.16 | 20.23 | 19.32 | 18.43 |
|     | 34    | 36.28 | 34.99 | 33.73 | 32.51 | 31.31 | 30.14 | 28.99 | 27.88 | 26.78 | 25.72 | 24.67 | 23.65 | 22.66 | 21.68 | 20.73 | 19.80 |
|     | 35    | 38.50 | 37.15 | 35.83 | 34.55 | 33.29 | 32.07 | 30.87 | 29.70 | 28.55 | 27.44 | 26.35 | 25.28 | 24.24 | 23.22 | 22.23 | 21.26 |
| 36  | 36    | 40.85 | 39.43 | 38.05 | 36.71 | 35.39 | 34.11 | 32.85 | 31.63 | 30.43 | 29.26 | 28.12 | 27.01 | 25.92 | 24.85 | 23.81 | 22.79 |
|     | 37    | 43.32 | 41.84 | 40.40 | 38.98 | 37.61 | 36.26 | 34.95 | 33.66 | 32.41 | 31.19 | 29.99 | 28.83 | 27.69 | 26.57 | 25.48 | 24.42 |
|     | 38    | 45.84 | 44.39 | 42.87 | 41.39 | 39.95 | 38.54 | 37.16 | 35.82 | 34.51 | 33.22 | 31.97 | 30.75 | 29.55 | 28.39 | 27.25 | 26.14 |
|     | 39    | 48.71 | 47.08 | 45.48 | 43.94 | 42.42 | 40.94 | 39.50 | 38.09 | 36.72 | 35.37 | 34.06 | 32.78 | 31.53 | 30.31 | 29.12 | 27.96 |
| 40  | 51.63 | 49.92 | 48.25 | 46.63 | 45.04 | 43.49 | 41.97 | 40.50 | 39.05 | 37.65 | 36.27 | 34.93 | 33.62 | 32.34 | 31.10 | 29.88 |       |

注：t [°C]

表 1.9.6

湿空气含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 6 类地区)

| $t$ | $\Delta t$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 0.5        | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5   | 8     |
| 10  | 8.43       | 7.93  | 7.44  | 6.97  | 6.50  | 6.04  | 5.58  | 5.14  | 4.70  | 4.28  | 3.85  | 3.44  | 3.03  | 2.63  | 2.24  | 1.86  |
| 11  | 9.03       | 8.52  | 8.01  | 7.52  | 7.03  | 6.55  | 6.09  | 5.63  | 5.17  | 4.73  | 4.3   | 3.87  | 3.45  | 3.03  | 2.63  | 2.23  |
| 12  | 9.68       | 9.14  | 8.62  | 8.11  | 7.60  | 7.11  | 6.62  | 6.14  | 5.68  | 5.22  | 4.77  | 4.32  | 3.89  | 3.46  | 3.04  | 2.63  |
| 13  | 10.36      | 9.81  | 9.26  | 8.73  | 8.21  | 7.69  | 7.19  | 6.69  | 6.21  | 5.73  | 5.27  | 4.81  | 4.36  | 3.92  | 3.49  | 3.06  |
| 14  | 11.09      | 10.51 | 9.95  | 9.39  | 8.85  | 8.32  | 7.79  | 7.28  | 6.78  | 6.28  | 5.8   | 5.32  | 4.86  | 4.40  | 3.95  | 3.51  |
| 15  | 11.86      | 11.26 | 10.67 | 10.1  | 9.53  | 8.98  | 8.44  | 7.90  | 7.38  | 6.87  | 6.37  | 5.87  | 5.39  | 4.92  | 4.45  | 3.99  |
| 16  | 12.68      | 12.06 | 11.45 | 10.85 | 10.26 | 9.68  | 9.12  | 8.56  | 8.02  | 7.49  | 6.97  | 6.45  | 5.95  | 5.46  | 4.98  | 4.51  |
| 17  | 13.55      | 12.90 | 12.26 | 11.64 | 11.03 | 10.43 | 9.84  | 9.27  | 8.70  | 8.15  | 7.61  | 7.08  | 6.56  | 6.05  | 5.55  | 5.05  |
| 18  | 14.47      | 13.80 | 13.15 | 12.48 | 11.85 | 11.22 | 10.61 | 10.01 | 9.43  | 8.85  | 8.29  | 7.74  | 7.20  | 6.67  | 6.15  | 5.64  |
| 19  | 15.45      | 14.74 | 14.05 | 13.38 | 12.71 | 12.06 | 11.43 | 10.81 | 10.20 | 9.6   | 9.01  | 8.44  | 7.88  | 7.33  | 6.79  | 6.26  |
| 20  | 16.49      | 15.75 | 15.03 | 14.32 | 13.63 | 12.96 | 12.29 | 11.65 | 11.01 | 10.39 | 9.78  | 9.18  | 8.6   | 8.03  | 7.45  | 6.91  |
| 21  | 17.58      | 16.81 | 16.06 | 15.33 | 14.61 | 13.90 | 13.21 | 12.54 | 11.88 | 11.25 | 10.59 | 9.97  | 9.37  | 8.77  | 8.19  | 7.61  |
| 22  | 18.74      | 17.94 | 17.16 | 16.39 | 15.64 | 14.90 | 14.19 | 13.48 | 12.79 | 12.12 | 11.46 | 10.81 | 10.18 | 9.55  | 8.95  | 8.36  |
| 23  | 19.97      | 19.14 | 18.32 | 17.52 | 16.73 | 15.97 | 15.22 | 14.48 | 13.77 | 13.06 | 12.37 | 11.70 | 11.04 | 10.40 | 9.76  | 9.14  |
| 24  | 21.28      | 20.40 | 19.55 | 18.71 | 17.89 | 17.09 | 16.31 | 15.54 | 14.80 | 14.06 | 13.35 | 12.64 | 11.96 | 11.28 | 10.62 | 9.96  |
| 25  | 22.66      | 21.74 | 20.85 | 19.98 | 19.12 | 18.29 | 17.47 | 16.67 | 15.89 | 15.12 | 14.37 | 13.61 | 12.93 | 12.23 | 11.54 | 10.87 |

续表1.9.6

| $t$ | $\Delta t$ | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5   | 8     |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26  |            | 24.12 | 23.16 | 22.23 | 21.31 | 20.42 | 19.55 | 18.69 | 17.86 | 17.04 | 16.25 | 15.47 | 14.70 | 13.95 | 13.22 | 12.51 | 11.81 |
| 27  |            | 25.66 | 24.66 | 23.68 | 22.73 | 21.80 | 20.88 | 19.99 | 19.12 | 18.27 | 17.44 | 16.62 | 15.82 | 15.04 | 14.28 | 13.53 | 12.80 |
| 28  |            | 27.29 | 26.25 | 25.23 | 24.23 | 23.25 | 22.30 | 21.37 | 20.46 | 19.57 | 18.7  | 17.84 | 17.01 | 16.2  | 15.40 | 14.62 | 13.86 |
| 29  |            | 29.02 | 27.93 | 26.86 | 25.81 | 24.79 | 23.80 | 22.82 | 21.87 | 20.94 | 20.03 | 19.14 | 18.27 | 17.42 | 16.59 | 15.78 | 14.93 |
| 30  |            | 30.85 | 29.70 | 28.58 | 27.49 | 26.42 | 25.38 | 24.36 | 23.37 | 22.39 | 21.44 | 20.51 | 19.60 | 18.72 | 17.85 | 17.00 | 16.17 |
| 31  |            | 32.78 | 31.58 | 30.41 | 29.26 | 28.15 | 27.06 | 25.99 | 24.95 | 23.93 | 22.94 | 21.96 | 21.01 | 20.09 | 19.18 | 18.29 | 17.42 |
| 32  |            | 34.82 | 33.56 | 32.34 | 31.14 | 29.97 | 28.83 | 27.71 | 26.62 | 25.56 | 24.52 | 23.50 | 22.51 | 21.54 | 20.59 | 19.66 | 18.75 |
| 33  |            | 36.95 | 35.56 | 34.38 | 33.12 | 31.90 | 30.70 | 29.53 | 28.39 | 27.28 | 26.19 | 25.12 | 24.08 | 23.07 | 22.03 | 21.11 | 20.16 |
| 34  |            | 39.26 | 37.88 | 36.54 | 35.22 | 33.94 | 32.68 | 31.46 | 30.26 | 29.10 | 27.96 | 26.84 | 25.76 | 24.69 | 23.65 | 22.64 | 21.65 |
| 35  |            | 41.66 | 40.23 | 38.82 | 37.44 | 36.09 | 34.78 | 33.50 | 32.23 | 31.02 | 29.83 | 28.66 | 27.52 | 26.41 | 25.32 | 24.26 | 23.22 |
| 36  |            | 44.23 | 42.71 | 41.23 | 39.78 | 38.37 | 36.99 | 35.65 | 34.34 | 33.06 | 31.80 | 30.58 | 29.39 | 28.23 | 27.09 | 25.98 | 24.89 |
| 37  |            | 46.93 | 45.33 | 43.78 | 42.26 | 40.78 | 39.34 | 37.93 | 36.55 | 35.21 | 33.9  | 32.62 | 31.37 | 30.15 | 28.95 | 27.79 | 26.65 |
| 38  |            | 49.78 | 48.10 | 46.47 | 44.88 | 43.33 | 41.81 | 40.33 | 38.89 | 37.48 | 36.1  | 34.77 | 33.46 | 32.18 | 30.93 | 29.71 | 28.52 |
| 39  |            | 52.79 | 51.04 | 49.32 | 47.65 | 46.02 | 44.43 | 42.88 | 41.35 | 39.89 | 38.44 | 37.04 | 35.66 | 34.32 | 33.02 | 31.74 | 30.49 |
| 40  |            | 55.98 | 54.13 | 52.33 | 50.58 | 48.87 | 47.20 | 45.57 | 43.98 | 42.43 | 40.92 | 39.44 | 38.00 | 36.59 | 35.22 | 33.88 | 32.58 |

表注: [°C]

湿空气含湿量  $d$ , [g/kg 干] (第 7 类地区)

表 1.9 7

| $t$ | $\Delta t$ | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5   | 8     |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10  |            | 8.16  | 8.54  | 8.92  | 9.30  | 9.68  | 10.06 | 10.44 | 10.82 | 11.20 | 11.58 | 11.96 | 12.34 | 12.72 | 13.10 | 13.48 | 13.86 |
| 11  |            | 9.52  | 9.90  | 10.28 | 10.66 | 11.04 | 11.42 | 11.80 | 12.18 | 12.56 | 12.94 | 13.32 | 13.70 | 14.08 | 14.46 | 14.84 | 15.22 |
| 12  |            | 10.52 | 10.90 | 11.28 | 11.66 | 12.04 | 12.42 | 12.80 | 13.18 | 13.56 | 13.94 | 14.32 | 14.70 | 15.08 | 15.46 | 15.84 | 16.22 |
| 13  |            | 11.26 | 11.64 | 12.02 | 12.40 | 12.78 | 13.16 | 13.54 | 13.92 | 14.30 | 14.68 | 15.06 | 15.44 | 15.82 | 16.20 | 16.58 | 16.96 |
| 14  |            | 12.05 | 12.43 | 12.81 | 13.19 | 13.57 | 13.95 | 14.33 | 14.71 | 15.09 | 15.47 | 15.85 | 16.23 | 16.61 | 16.99 | 17.37 | 17.75 |
| 15  |            | 12.89 | 13.27 | 13.65 | 14.03 | 14.41 | 14.79 | 15.17 | 15.55 | 15.93 | 16.31 | 16.69 | 17.07 | 17.45 | 17.83 | 18.21 | 18.59 |
| 16  |            | 13.78 | 14.16 | 14.54 | 14.92 | 15.30 | 15.68 | 16.06 | 16.44 | 16.82 | 17.20 | 17.58 | 17.96 | 18.34 | 18.72 | 19.10 | 19.48 |
| 17  |            | 14.73 | 15.11 | 15.49 | 15.87 | 16.25 | 16.63 | 17.01 | 17.39 | 17.77 | 18.15 | 18.53 | 18.91 | 19.29 | 19.67 | 20.05 | 20.43 |
| 18  |            | 15.73 | 16.11 | 16.49 | 16.87 | 17.25 | 17.63 | 18.01 | 18.39 | 18.77 | 19.15 | 19.53 | 19.91 | 20.29 | 20.67 | 21.05 | 21.43 |
| 19  |            | 16.79 | 17.17 | 17.55 | 17.93 | 18.31 | 18.69 | 19.07 | 19.45 | 19.83 | 20.21 | 20.59 | 20.97 | 21.35 | 21.73 | 22.11 | 22.49 |
| 20  |            | 17.92 | 18.30 | 18.68 | 19.06 | 19.44 | 19.82 | 20.20 | 20.58 | 20.96 | 21.34 | 21.72 | 22.10 | 22.48 | 22.86 | 23.24 | 23.62 |
| 21  |            | 19.11 | 19.49 | 19.87 | 20.25 | 20.63 | 21.01 | 21.39 | 21.77 | 22.15 | 22.53 | 22.91 | 23.29 | 23.67 | 24.05 | 24.43 | 24.81 |
| 22  |            | 20.38 | 20.76 | 21.14 | 21.52 | 21.90 | 22.28 | 22.66 | 23.04 | 23.42 | 23.80 | 24.18 | 24.56 | 24.94 | 25.32 | 25.70 | 26.08 |
| 23  |            | 21.72 | 22.10 | 22.48 | 22.86 | 23.24 | 23.62 | 24.00 | 24.38 | 24.76 | 25.14 | 25.52 | 25.90 | 26.28 | 26.66 | 27.04 | 27.42 |
| 24  |            | 23.14 | 23.52 | 23.90 | 24.28 | 24.66 | 25.04 | 25.42 | 25.80 | 26.18 | 26.56 | 26.94 | 27.32 | 27.70 | 28.08 | 28.46 | 28.84 |
| 25  |            | 24.64 | 25.02 | 25.40 | 25.78 | 26.16 | 26.54 | 26.92 | 27.30 | 27.68 | 28.06 | 28.44 | 28.82 | 29.20 | 29.58 | 29.96 | 30.34 |



續表1.9.7

| $\Delta t$ | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 2.5   | 3     | 3.5   | 4     | 4.5   | 5     | 5.5   | 6     | 6.5   | 7     | 7.5   | 8     |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26         | 26.23 | 25.21 | 24.21 | 23.23 | 22.26 | 21.34 | 20.43 | 19.54 | 18.67 | 17.82 | 16.99 | 16.19 | 15.38 | 14.50 | 13.84 | 13.10 |
| 27         | 27.91 | 26.84 | 25.80 | 24.77 | 23.78 | 22.80 | 21.85 | 20.92 | 20.01 | 19.12 | 18.25 | 17.40 | 16.57 | 15.75 | 14.96 | 14.18 |
| 28         | 29.69 | 28.57 | 27.48 | 26.41 | 25.35 | 24.34 | 23.34 | 22.37 | 21.42 | 20.49 | 19.58 | 18.69 | 17.82 | 16.97 | 16.14 | 15.33 |
| 29         | 31.58 | 30.40 | 29.26 | 28.14 | 27.04 | 25.97 | 24.93 | 23.91 | 22.92 | 21.94 | 20.99 | 20.03 | 19.15 | 18.27 | 17.40 | 16.55 |
| 30         | 33.58 | 32.34 | 31.14 | 29.97 | 28.82 | 27.70 | 26.61 | 25.54 | 24.50 | 23.48 | 22.49 | 21.51 | 20.56 | 19.64 | 18.73 | 17.84 |
| 31         | 35.69 | 34.39 | 33.13 | 31.90 | 30.70 | 29.53 | 28.39 | 27.27 | 26.18 | 25.11 | 24.07 | 23.05 | 22.03 | 21.09 | 20.14 | 19.21 |
| 32         | 37.92 | 36.56 | 35.24 | 33.95 | 32.69 | 31.47 | 30.27 | 29.09 | 27.95 | 26.83 | 25.74 | 24.63 | 23.64 | 22.62 | 21.63 | 20.66 |
| 33         | 40.28 | 38.86 | 37.47 | 36.12 | 34.80 | 33.51 | 32.26 | 31.03 | 29.83 | 28.63 | 27.52 | 26.40 | 25.31 | 24.25 | 23.21 | 22.19 |
| 34         | 42.78 | 41.29 | 39.83 | 38.42 | 37.03 | 35.68 | 34.36 | 33.07 | 31.82 | 30.53 | 29.39 | 28.22 | 27.08 | 25.97 | 24.83 | 23.82 |
| 35         | 45.42 | 43.86 | 42.33 | 40.84 | 39.39 | 37.97 | 36.59 | 35.24 | 33.92 | 32.63 | 31.38 | 30.15 | 28.96 | 27.79 | 26.65 | 25.54 |
| 36         | 48.22 | 46.58 | 44.97 | 43.41 | 41.88 | 40.39 | 38.94 | 37.53 | 36.14 | 34.80 | 33.48 | 32.20 | 30.94 | 29.72 | 28.52 | 27.35 |
| 37         | 51.16 | 49.45 | 47.77 | 46.12 | 44.52 | 42.96 | 41.43 | 39.95 | 38.50 | 37.09 | 35.70 | 34.33 | 33.04 | 31.76 | 30.51 | 29.28 |
| 38         | 54.31 | 52.49 | 50.72 | 49.00 | 47.31 | 45.67 | 44.07 | 42.51 | 40.99 | 39.50 | 38.05 | 36.64 | 35.26 | 33.92 | 32.60 | 31.32 |
| 39         | 57.62 | 55.71 | 53.85 | 52.04 | 50.27 | 48.54 | 46.86 | 45.22 | 43.62 | 42.06 | 40.54 | 39.06 | 37.61 | 36.20 | 34.82 | 33.48 |
| 40         | 61.13 | 59.12 | 57.16 | 55.25 | 53.39 | 51.58 | 49.81 | 48.09 | 46.41 | 44.77 | 43.17 | 41.61 | 40.10 | 38.61 | 37.17 | 35.76 |

表注: [t]

湿球温度  $t_s$  [°C] (第 I 类地区)

表 1.10.1

| $t$ | RH    |       | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 10  | 2.55  | 3.06  | 3.58  | 4.09  | 4.58  | 5.07  | 5.54  | 6.02  | 6.49  | 6.95  | 7.41  | 7.86  | 8.29  | 8.73  | 9.13  | 9.59  | 10.00 | 10.57 | 11.00 |
| 11  | 3.24  | 3.78  | 4.32  | 4.85  | 5.37  | 5.88  | 6.38  | 6.87  | 7.35  | 7.84  | 8.31  | 8.77  | 9.24  | 9.69  | 10.13 | 10.57 | 11.00 | 11.53 | 12.00 |
| 12  | 3.94  | 4.50  | 5.06  | 5.62  | 6.16  | 6.68  | 7.21  | 7.72  | 8.23  | 8.72  | 9.21  | 9.70  | 10.17 | 10.61 | 11.1  | 11.53 | 12.00 | 12.54 | 13.03 |
| 13  | 4.62  | 5.21  | 5.79  | 6.38  | 6.93  | 7.49  | 8.04  | 8.57  | 9.09  | 9.61  | 10.12 | 10.62 | 11.12 | 11.59 | 12.07 | 12.54 | 13.03 | 13.52 | 14.03 |
| 14  | 5.3   | 5.92  | 6.53  | 7.13  | 7.72  | 8.29  | 8.85  | 9.42  | 9.96  | 10.50 | 11.02 | 11.54 | 12.05 | 12.55 | 13.05 | 13.52 | 14.03 | 14.51 | 15.00 |
| 15  | 5.98  | 6.62  | 7.28  | 7.89  | 8.50  | 9.11  | 9.69  | 10.26 | 10.83 | 11.38 | 11.93 | 12.47 | 12.99 | 13.50 | 14.02 | 14.51 | 15.00 | 15.48 | 16.00 |
| 16  | 6.64  | 7.32  | 7.99  | 8.64  | 9.26  | 9.90  | 10.51 | 11.11 | 11.69 | 12.27 | 12.83 | 13.38 | 13.93 | 14.47 | 14.99 | 15.50 | 16.00 | 16.48 | 17.00 |
| 17  | 7.31  | 8.02  | 8.72  | 9.39  | 10.05 | 10.70 | 11.34 | 11.96 | 12.58 | 13.16 | 13.73 | 14.31 | 14.87 | 15.42 | 15.95 | 16.48 | 17.00 | 17.46 | 18.00 |
| 18  | 7.98  | 8.72  | 9.43  | 10.13 | 10.82 | 11.50 | 12.15 | 12.80 | 13.42 | 14.03 | 14.64 | 15.23 | 15.80 | 16.37 | 16.93 | 17.46 | 18.00 | 18.45 | 19.00 |
| 19  | 8.64  | 9.40  | 10.15 | 10.89 | 11.59 | 12.29 | 12.97 | 13.64 | 14.28 | 14.92 | 15.54 | 16.15 | 16.75 | 17.33 | 17.90 | 18.45 | 19.00 | 19.44 | 20.00 |
| 20  | 9.30  | 10.09 | 10.87 | 11.63 | 12.37 | 13.08 | 13.79 | 14.49 | 15.18 | 15.81 | 16.45 | 17.07 | 17.69 | 18.28 | 18.87 | 19.44 | 20.00 | 20.43 | 21.00 |
| 21  | 9.95  | 10.78 | 11.59 | 12.38 | 13.14 | 13.89 | 14.61 | 15.33 | 16.02 | 16.69 | 17.35 | 17.99 | 18.62 | 19.24 | 19.84 | 20.43 | 21.00 | 21.41 | 22.00 |
| 22  | 10.6  | 11.47 | 12.31 | 13.12 | 13.92 | 14.69 | 15.44 | 16.17 | 16.98 | 17.58 | 18.26 | 18.92 | 19.56 | 20.19 | 20.81 | 21.41 | 22.00 | 22.40 | 23.00 |
| 23  | 11.25 | 12.14 | 13.02 | 13.86 | 14.68 | 15.48 | 16.26 | 17.02 | 17.75 | 18.46 | 19.16 | 19.84 | 20.50 | 21.15 | 21.77 | 22.40 | 23.00 | 23.39 | 24.00 |
| 24  | 11.89 | 12.83 | 13.73 | 14.61 | 15.46 | 16.28 | 17.09 | 17.86 | 18.61 | 19.35 | 20.06 | 20.74 | 21.41 | 22.11 | 22.75 | 23.39 | 24.00 | 24.37 | 25.00 |
| 25  | 12.53 | 13.51 | 14.44 | 15.35 | 16.22 | 17.09 | 17.90 | 18.7  | 19.46 | 20.24 | 20.97 | 21.68 | 22.38 | 23.06 | 23.75 | 24.37 | 25.00 | 25.37 | 26.00 |

续表1.10.1

| RH | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26 | 13.18 | 14.18 | 15.15 | 16.09 | 16.99 | 17.87 | 18.73 | 19.54 | 20.31 | 21.13 | 21.88 | 22.62 | 23.33 | 24.02 | 24.7  | 25.39 | 26.00 |
| 27 | 13.82 | 14.86 | 15.86 | 16.84 | 17.76 | 18.67 | 19.55 | 20.39 | 21.21 | 22.01 | 22.79 | 23.53 | 24.26 | 24.98 | 25.67 | 26.35 | 27.00 |
| 28 | 14.46 | 15.53 | 16.57 | 17.57 | 18.54 | 19.46 | 20.37 | 21.24 | 22.08 | 22.90 | 23.7  | 24.46 | 25.2  | 25.94 | 26.64 | 27.33 | 28.00 |
| 29 | 15.10 | 16.21 | 17.28 | 18.31 | 19.31 | 20.26 | 21.2  | 22.09 | 22.95 | 23.79 | 24.61 | 25.39 | 26.15 | 26.90 | 27.61 | 28.32 | 29.00 |
| 30 | 15.73 | 16.88 | 17.99 | 19.05 | 20.08 | 21.07 | 22.02 | 22.94 | 23.82 | 24.68 | 25.51 | 26.31 | 27.10 | 27.85 | 28.58 | 29.30 | 30.00 |
| 31 | 16.37 | 17.56 | 18.7  | 19.80 | 20.85 | 21.87 | 22.84 | 23.78 | 24.69 | 25.57 | 26.42 | 27.24 | 28.04 | 28.82 | 29.56 | 30.29 | 31.00 |
| 32 | 17.00 | 18.23 | 19.41 | 20.54 | 21.62 | 22.67 | 23.67 | 24.63 | 25.56 | 26.47 | 27.33 | 28.17 | 28.99 | 29.76 | 30.54 | 31.27 | 32.00 |
| 33 | 17.63 | 18.90 | 20.12 | 21.29 | 22.40 | 23.47 | 24.50 | 25.48 | 26.43 | 27.35 | 28.24 | 29.10 | 29.93 | 30.73 | 31.51 | 32.27 | 33.00 |
| 34 | 18.26 | 19.58 | 20.83 | 22.02 | 23.18 | 24.28 | 25.32 | 26.33 | 27.31 | 28.25 | 29.15 | 30.03 | 30.87 | 31.69 | 32.49 | 33.25 | 34.00 |
| 35 | 18.90 | 20.25 | 21.54 | 22.78 | 23.95 | 25.07 | 26.15 | 27.18 | 28.16 | 29.13 | 30.06 | 30.95 | 31.82 | 32.65 | 33.46 | 34.24 | 35.00 |
| 36 | 19.53 | 20.92 | 22.25 | 23.52 | 24.73 | 25.88 | 26.98 | 28.04 | 29.06 | 30.04 | 30.98 | 31.89 | 32.77 | 33.61 | 34.43 | 35.23 | 36.00 |
| 37 | 20.16 | 21.60 | 22.95 | 24.27 | 25.51 | 26.69 | 27.82 | 28.90 | 29.93 | 30.93 | 31.89 | 32.81 | 33.72 | 34.57 | 35.4  | 36.22 | 37.00 |
| 38 | 20.79 | 22.28 | 23.68 | 25.01 | 26.28 | 27.49 | 28.64 | 29.76 | 30.81 | 31.83 | 32.81 | 33.75 | 34.65 | 35.54 | 36.38 | 37.21 | 38.00 |
| 39 | 21.42 | 22.95 | 24.39 | 25.76 | 27.07 | 28.29 | 29.49 | 30.61 | 31.70 | 32.73 | 33.72 | 34.68 | 35.61 | 36.50 | 37.36 | 38.19 | 39.00 |
| 40 | 22.06 | 23.63 | 25.11 | 26.52 | 27.84 | 29.11 | 30.31 | 31.47 | 32.57 | 33.63 | 34.64 | 35.62 | 36.58 | 37.45 | 38.33 | 39.18 | 40.00 |

表注: t [°C]

表 1.10.2

湿球温度  $t_w$ , [°C] (第 2 类地区)

| RH | 湿球温度 $t_w$ , [°C] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 20%               | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 10 | 2.47              | 2.99  | 3.51  | 4.02  | 4.52  | 5.01  | 5.50  | 5.98  | 6.46  | 6.92  | 7.38  | 7.83  | 8.28  | 8.72  | 9.15  | 9.58  | 10.00 |
| 11 | 3.16              | 3.71  | 4.25  | 4.78  | 5.31  | 5.82  | 6.34  | 6.83  | 7.32  | 7.80  | 8.28  | 8.75  | 9.22  | 9.67  | 10.12 | 10.56 | 11.00 |
| 12 | 3.85              | 4.43  | 4.99  | 5.55  | 6.09  | 6.63  | 7.16  | 7.68  | 8.19  | 8.70  | 9.19  | 9.68  | 10.15 | 10.63 | 11.1  | 11.55 | 12.00 |
| 13 | 4.53              | 5.13  | 5.72  | 6.31  | 6.87  | 7.43  | 7.98  | 8.52  | 9.05  | 9.58  | 10.10 | 10.60 | 11.10 | 11.58 | 12.07 | 12.54 | 13.00 |
| 14 | 5.21              | 5.84  | 6.46  | 7.07  | 7.65  | 8.24  | 8.81  | 9.37  | 9.92  | 10.46 | 11.00 | 11.52 | 12.03 | 12.54 | 13.03 | 13.52 | 14.00 |
| 15 | 5.88              | 6.54  | 7.19  | 7.82  | 8.44  | 9.04  | 9.64  | 10.22 | 10.79 | 11.35 | 11.90 | 12.44 | 12.97 | 13.49 | 14.00 | 14.50 | 15.00 |
| 16 | 6.55              | 7.24  | 7.91  | 8.57  | 9.21  | 9.84  | 10.46 | 11.08 | 11.65 | 12.23 | 12.81 | 13.36 | 13.91 | 14.44 | 14.98 | 15.49 | 16.00 |
| 17 | 7.22              | 7.94  | 8.63  | 9.32  | 9.99  | 10.64 | 11.28 | 11.91 | 12.52 | 13.21 | 13.71 | 14.28 | 14.85 | 15.40 | 15.95 | 16.47 | 17.00 |
| 18 | 7.88              | 8.63  | 9.36  | 10.07 | 10.76 | 11.44 | 12.10 | 12.75 | 13.39 | 14.01 | 14.61 | 15.21 | 15.79 | 16.36 | 16.92 | 17.47 | 18.00 |
| 19 | 8.54              | 9.32  | 10.08 | 10.81 | 11.54 | 12.24 | 12.92 | 13.59 | 14.26 | 14.90 | 15.51 | 16.13 | 16.73 | 17.31 | 17.89 | 18.45 | 19.00 |
| 20 | 9.20              | 10.01 | 10.80 | 11.58 | 12.30 | 13.04 | 13.75 | 14.44 | 15.11 | 15.78 | 16.42 | 17.05 | 17.67 | 18.27 | 18.85 | 19.44 | 20.00 |
| 21 | 9.85              | 10.69 | 11.51 | 12.30 | 13.08 | 13.83 | 14.57 | 15.29 | 15.98 | 16.66 | 17.33 | 17.98 | 18.61 | 19.22 | 19.84 | 20.42 | 21.00 |
| 22 | 10.50             | 11.38 | 12.22 | 13.05 | 13.85 | 14.63 | 15.39 | 16.12 | 16.84 | 17.55 | 18.23 | 18.90 | 19.54 | 20.18 | 20.81 | 21.41 | 22.00 |
| 23 | 11.15             | 12.06 | 12.94 | 13.79 | 14.62 | 15.42 | 16.21 | 16.97 | 17.71 | 18.43 | 19.13 | 19.82 | 20.49 | 21.13 | 21.77 | 22.39 | 23.00 |
| 24 | 11.79             | 12.74 | 13.64 | 14.53 | 15.39 | 16.22 | 17.03 | 17.81 | 18.57 | 19.31 | 20.04 | 20.74 | 21.43 | 22.10 | 22.74 | 23.38 | 24.00 |
| 25 | 12.44             | 13.41 | 14.38 | 15.28 | 16.16 | 17.02 | 17.85 | 18.66 | 19.44 | 20.20 | 20.95 | 21.66 | 22.37 | 23.06 | 23.71 | 24.37 | 25.00 |

續表1.10.2

| RH<br>t | RH    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 26      | 13.08 | 14.09 | 15.07 | 16.01 | 16.93 | 17.82 | 18.68 | 19.51 | 20.31 | 21.09 | 21.85 | 22.59 | 23.31 | 24.01 | 24.69 | 25.35 | 26.00 |
| 27      | 13.72 | 14.77 | 15.78 | 16.75 | 17.70 | 18.61 | 19.50 | 20.35 | 21.18 | 21.98 | 22.76 | 23.52 | 24.25 | 24.97 | 25.66 | 26.34 | 27.00 |
| 28      | 14.36 | 15.44 | 16.49 | 17.50 | 18.48 | 19.41 | 20.32 | 21.20 | 22.05 | 22.87 | 23.67 | 24.45 | 25.19 | 25.92 | 26.64 | 27.33 | 28.03 |
| 29      | 14.99 | 16.11 | 17.20 | 18.24 | 19.25 | 20.22 | 21.14 | 22.04 | 22.91 | 23.76 | 24.58 | 25.36 | 26.13 | 26.89 | 27.61 | 28.32 | 29.00 |
| 30      | 15.63 | 16.79 | 17.91 | 18.98 | 20.02 | 21.01 | 21.97 | 22.89 | 23.79 | 24.65 | 25.48 | 26.29 | 27.07 | 27.84 | 28.58 | 29.31 | 30.00 |
| 31      | 16.26 | 17.47 | 18.61 | 19.72 | 20.79 | 21.81 | 22.80 | 23.74 | 24.66 | 25.54 | 26.40 | 27.22 | 28.02 | 28.81 | 29.55 | 30.29 | 31.00 |
| 32      | 16.90 | 18.14 | 19.39 | 20.47 | 21.56 | 22.61 | 23.63 | 24.59 | 25.53 | 26.44 | 27.29 | 28.14 | 28.97 | 29.77 | 30.53 | 31.27 | 32.00 |
| 33      | 17.53 | 18.81 | 20.04 | 21.21 | 22.34 | 23.42 | 24.45 | 25.45 | 26.40 | 27.32 | 28.21 | 29.08 | 29.91 | 30.72 | 31.50 | 32.26 | 33.00 |
| 34      | 18.15 | 19.49 | 20.76 | 21.95 | 23.11 | 24.22 | 25.27 | 26.29 | 27.27 | 28.21 | 29.12 | 30.01 | 30.86 | 31.69 | 32.48 | 33.26 | 34.00 |
| 35      | 18.79 | 20.16 | 21.46 | 22.70 | 23.88 | 25.02 | 26.10 | 27.15 | 28.16 | 29.13 | 30.04 | 30.94 | 31.81 | 32.64 | 33.46 | 34.23 | 35.00 |
| 36      | 19.42 | 20.83 | 22.18 | 23.45 | 24.66 | 25.83 | 26.93 | 28.01 | 29.02 | 30.01 | 30.95 | 31.86 | 32.75 | 33.60 | 34.42 | 35.23 | 36.00 |
| 37      | 20.06 | 21.51 | 22.89 | 24.20 | 25.44 | 26.63 | 27.77 | 28.86 | 29.90 | 30.90 | 31.87 | 32.81 | 33.70 | 34.56 | 35.41 | 36.22 | 37.00 |
| 38      | 20.69 | 22.18 | 23.60 | 24.94 | 26.22 | 27.44 | 28.60 | 29.72 | 30.79 | 31.80 | 32.78 | 33.73 | 34.65 | 35.52 | 36.38 | 37.21 | 38.00 |
| 39      | 21.32 | 22.86 | 24.32 | 25.70 | 27.00 | 28.25 | 29.44 | 30.58 | 31.65 | 32.70 | 33.70 | 34.66 | 35.59 | 36.49 | 37.35 | 38.19 | 39.00 |
| 40      | 21.95 | 23.54 | 25.03 | 26.45 | 27.79 | 29.06 | 30.28 | 31.43 | 32.55 | 33.59 | 34.62 | 35.60 | 36.54 | 37.45 | 38.34 | 39.18 | 40.00 |

表注: t[°C]

湿球温度  $t_w$ , [°C](第 3 类区)

表 1.10.3

| RH | $t$   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 10 | 2.38  | 2.92  | 3.44  | 3.95  | 4.47  | 4.96  | 5.45  | 5.94  | 6.42  | 6.89  | 7.35  | 7.81  | 8.27  | 8.71  | 9.14  | 9.57  | 10.00 |
| 11 | 3.07  | 3.63  | 4.18  | 4.72  | 5.25  | 5.77  | 6.28  | 6.79  | 7.28  | 7.78  | 8.26  | 8.74  | 9.20  | 9.56  | 10.11 | 10.56 | 11.00 |
| 12 | 3.76  | 4.35  | 4.91  | 5.46  | 6.03  | 6.58  | 7.12  | 7.64  | 8.15  | 8.67  | 9.16  | 9.65  | 10.14 | 10.62 | 11.09 | 11.55 | 12.00 |
| 13 | 4.44  | 5.05  | 5.65  | 6.24  | 6.82  | 7.38  | 7.94  | 8.49  | 9.03  | 9.55  | 10.06 | 10.58 | 11.08 | 11.57 | 12.06 | 12.53 | 13.00 |
| 14 | 5.12  | 5.75  | 6.38  | 6.99  | 7.60  | 8.19  | 8.76  | 9.33  | 9.89  | 10.43 | 10.97 | 11.50 | 12.02 | 12.53 | 13.03 | 13.52 | 14.00 |
| 15 | 5.79  | 6.45  | 7.11  | 7.75  | 8.37  | 8.99  | 9.58  | 10.17 | 10.76 | 11.32 | 11.88 | 12.42 | 12.96 | 13.48 | 14.00 | 14.50 | 15.00 |
| 16 | 6.45  | 7.16  | 7.83  | 8.50  | 9.15  | 9.78  | 10.41 | 11.02 | 11.62 | 12.20 | 12.78 | 13.34 | 13.89 | 14.44 | 14.96 | 15.49 | 16.00 |
| 17 | 7.13  | 7.85  | 8.56  | 9.25  | 9.92  | 10.59 | 11.23 | 11.87 | 12.48 | 13.09 | 13.69 | 14.27 | 14.83 | 15.39 | 15.94 | 16.47 | 17.00 |
| 18 | 7.78  | 8.54  | 9.28  | 10.00 | 10.70 | 11.38 | 12.06 | 12.74 | 13.35 | 13.97 | 14.58 | 15.18 | 15.77 | 16.34 | 16.91 | 17.46 | 18.00 |
| 19 | 8.44  | 9.23  | 10.00 | 10.75 | 11.48 | 12.18 | 12.87 | 13.56 | 14.24 | 14.86 | 15.49 | 16.11 | 16.71 | 17.31 | 17.88 | 18.45 | 19.00 |
| 20 | 9.09  | 9.92  | 10.72 | 11.49 | 12.24 | 12.98 | 13.70 | 14.40 | 15.08 | 15.74 | 16.40 | 17.03 | 17.65 | 18.26 | 18.85 | 19.44 | 20.00 |
| 21 | 9.75  | 10.60 | 11.43 | 12.23 | 13.01 | 13.78 | 14.52 | 15.24 | 15.95 | 16.63 | 17.30 | 17.96 | 18.59 | 19.21 | 19.83 | 20.42 | 21.00 |
| 22 | 10.40 | 11.28 | 12.14 | 12.98 | 13.79 | 14.57 | 15.34 | 16.08 | 16.81 | 17.52 | 18.20 | 18.88 | 19.53 | 20.17 | 20.79 | 21.41 | 22.00 |
| 23 | 11.05 | 11.96 | 12.85 | 13.72 | 14.55 | 15.37 | 16.16 | 16.93 | 17.68 | 18.41 | 19.11 | 19.80 | 20.47 | 21.13 | 21.77 | 22.39 | 23.00 |
| 24 | 11.69 | 12.65 | 13.57 | 14.46 | 15.33 | 16.17 | 16.98 | 17.77 | 18.54 | 19.29 | 20.01 | 20.72 | 21.41 | 22.09 | 22.74 | 23.38 | 24.00 |
| 25 | 12.34 | 13.32 | 14.27 | 15.20 | 16.10 | 16.97 | 17.80 | 18.62 | 19.41 | 20.18 | 20.92 | 21.65 | 22.35 | 23.04 | 23.71 | 24.36 | 25.00 |

表 1.10.3

| RH | t     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 26 | 12.97 | 14.00 | 14.99 | 15.94 | 16.87 | 17.76 | 18.62 | 19.46 | 20.28 | 21.07 | 21.82 | 22.58 | 23.30 | 24.00 | 24.69 | 25.36 | 26.00 |
| 27 | 13.61 | 14.67 | 15.69 | 16.69 | 17.64 | 18.55 | 19.45 | 20.31 | 21.14 | 21.95 | 22.74 | 23.50 | 24.24 | 24.95 | 25.66 | 26.34 | 27.00 |
| 28 | 14.25 | 15.35 | 16.41 | 17.43 | 18.41 | 19.36 | 20.27 | 21.16 | 22.02 | 22.84 | 23.64 | 24.43 | 25.17 | 25.91 | 26.63 | 27.32 | 28.00 |
| 29 | 14.88 | 16.02 | 17.12 | 18.17 | 19.18 | 20.16 | 21.10 | 22.00 | 22.88 | 23.74 | 24.56 | 25.35 | 26.12 | 26.87 | 27.61 | 28.31 | 29.00 |
| 30 | 15.52 | 16.70 | 17.83 | 18.92 | 19.95 | 20.93 | 21.92 | 22.86 | 23.75 | 24.62 | 25.46 | 26.28 | 27.07 | 27.83 | 28.57 | 29.29 | 30.00 |
| 31 | 16.15 | 17.37 | 18.53 | 19.65 | 20.72 | 21.76 | 22.75 | 23.70 | 24.62 | 25.52 | 26.37 | 27.21 | 28.02 | 28.79 | 29.54 | 30.28 | 31.00 |
| 32 | 16.78 | 18.05 | 19.25 | 20.40 | 21.49 | 22.55 | 23.58 | 24.59 | 25.49 | 26.40 | 27.28 | 28.13 | 28.95 | 29.75 | 30.52 | 31.27 | 32.00 |
| 33 | 17.42 | 18.72 | 19.96 | 21.15 | 22.27 | 23.36 | 24.41 | 25.41 | 26.37 | 27.30 | 28.20 | 29.08 | 29.89 | 30.71 | 31.50 | 32.26 | 33.00 |
| 34 | 18.05 | 19.39 | 20.67 | 21.89 | 23.05 | 24.16 | 25.24 | 26.26 | 27.24 | 28.19 | 29.11 | 29.99 | 30.84 | 31.67 | 32.47 | 33.24 | 34.00 |
| 35 | 18.69 | 20.07 | 21.38 | 22.63 | 23.82 | 24.97 | 26.07 | 27.11 | 28.12 | 29.08 | 30.02 | 30.92 | 31.79 | 32.63 | 33.44 | 34.24 | 35.00 |
| 36 | 19.32 | 20.75 | 22.10 | 23.38 | 24.60 | 25.78 | 26.90 | 27.96 | 28.99 | 29.98 | 30.93 | 31.85 | 32.74 | 33.60 | 34.43 | 35.22 | 36.00 |
| 37 | 19.95 | 21.42 | 22.81 | 24.13 | 25.39 | 26.58 | 27.73 | 28.83 | 29.87 | 30.87 | 31.85 | 32.78 | 33.68 | 34.53 | 35.40 | 36.22 | 37.00 |
| 38 | 20.58 | 22.09 | 23.52 | 24.88 | 26.17 | 27.39 | 28.56 | 29.67 | 30.75 | 31.78 | 32.77 | 33.74 | 34.69 | 35.52 | 36.37 | 37.20 | 38.00 |
| 39 | 21.22 | 22.77 | 24.24 | 25.63 | 26.95 | 28.20 | 29.40 | 30.54 | 31.63 | 32.67 | 33.69 | 34.64 | 35.58 | 36.48 | 37.35 | 38.18 | 39.00 |
| 40 | 21.84 | 23.45 | 24.95 | 26.38 | 27.73 | 29.02 | 30.23 | 31.39 | 32.51 | 33.57 | 34.60 | 35.58 | 36.52 | 37.44 | 38.32 | 39.17 | 40.00 |

表注: t[°C]

表 1.10.4

湿球温度  $t_s$ , [°C] (第 4 类地区)

| $t$ | RH | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
|-----|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10  |    | 2.29  | 2.83  | 3.36  | 3.88  | 4.40  | 4.90  | 5.41  | 5.90  | 6.39  | 6.86  | 7.33  | 7.79  | 8.24  | 8.70  | 9.11  | 9.58  | 10.00 |
| 11  |    | 2.98  | 3.55  | 4.10  | 4.65  | 5.18  | 5.72  | 6.24  | 6.75  | 7.25  | 7.74  | 8.23  | 8.71  | 9.18  | 9.65  | 10.11 | 10.56 | 11.00 |
| 12  |    | 3.67  | 4.26  | 4.81  | 5.41  | 5.97  | 6.52  | 7.07  | 7.59  | 8.12  | 8.64  | 9.14  | 9.64  | 10.12 | 10.6  | 11.07 | 11.55 | 12.00 |
| 13  |    | 4.35  | 4.97  | 5.58  | 6.17  | 6.75  | 7.30  | 7.89  | 8.45  | 8.98  | 9.51  | 10.04 | 10.56 | 11.06 | 11.56 | 12.05 | 12.53 | 13.00 |
| 14  |    | 5.02  | 5.67  | 6.3   | 6.93  | 7.53  | 8.13  | 8.72  | 9.29  | 9.85  | 10.41 | 10.95 | 11.48 | 12.00 | 12.51 | 13.02 | 13.51 | 14.00 |
| 15  |    | 5.70  | 6.37  | 7.03  | 7.67  | 8.31  | 8.93  | 9.54  | 10.13 | 10.72 | 11.28 | 11.85 | 12.40 | 12.94 | 13.47 | 13.99 | 14.50 | 15.00 |
| 16  |    | 6.36  | 7.06  | 7.76  | 8.43  | 9.08  | 9.73  | 10.36 | 10.97 | 11.59 | 12.18 | 12.75 | 13.32 | 13.88 | 14.42 | 14.96 | 15.49 | 16.00 |
| 17  |    | 7.03  | 7.76  | 8.47  | 9.18  | 9.86  | 10.53 | 11.18 | 11.83 | 12.46 | 13.08 | 13.66 | 14.24 | 14.81 | 15.38 | 15.93 | 16.47 | 17.00 |
| 18  |    | 7.69  | 8.45  | 9.20  | 9.93  | 10.63 | 11.32 | 12.00 | 12.66 | 13.31 | 13.94 | 14.56 | 15.17 | 15.75 | 16.34 | 16.90 | 17.46 | 18.00 |
| 19  |    | 8.34  | 9.14  | 9.91  | 10.67 | 11.41 | 12.12 | 12.82 | 13.51 | 14.18 | 14.83 | 15.47 | 16.09 | 16.7  | 17.29 | 17.88 | 18.44 | 19.00 |
| 20  |    | 8.99  | 9.83  | 10.63 | 11.42 | 12.18 | 12.92 | 13.65 | 14.35 | 15.04 | 15.72 | 16.37 | 17.00 | 17.64 | 18.24 | 18.84 | 19.43 | 20.00 |
| 21  |    | 9.65  | 10.51 | 11.35 | 12.16 | 12.95 | 13.72 | 14.47 | 15.19 | 15.90 | 16.60 | 17.27 | 17.93 | 18.58 | 19.2  | 19.82 | 20.42 | 21.00 |
| 22  |    | 10.29 | 11.19 | 12.05 | 12.90 | 13.72 | 14.52 | 15.28 | 16.04 | 16.77 | 17.49 | 18.18 | 18.85 | 19.51 | 20.13 | 20.78 | 21.40 | 22.00 |
| 23  |    | 10.94 | 11.87 | 12.78 | 13.65 | 14.49 | 15.31 | 16.11 | 16.89 | 17.64 | 18.37 | 19.09 | 19.78 | 20.46 | 21.11 | 21.76 | 22.38 | 23.00 |
| 24  |    | 11.58 | 12.54 | 13.49 | 14.39 | 15.26 | 16.10 | 16.93 | 17.72 | 18.50 | 19.25 | 19.99 | 20.7  | 21.40 | 22.08 | 22.73 | 23.37 | 24.00 |
| 25  |    | 12.22 | 13.23 | 14.19 | 15.13 | 16.03 | 16.91 | 17.75 | 18.58 | 19.37 | 20.15 | 20.89 | 21.63 | 22.33 | 23.03 | 23.7  | 24.39 | 25.00 |



续表1.10.4

| $t$ | RH | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
|-----|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26  |    | 12.86 | 13.91 | 14.90 | 15.87 | 16.80 | 17.71 | 18.57 | 19.2  | 20.23 | 21.04 | 21.80 | 22.55 | 23.28 | 23.99 | 24.67 | 25.34 | 26.00 |
| 27  |    | 13.51 | 14.58 | 15.61 | 16.61 | 17.57 | 18.50 | 19.40 | 20.17 | 21.11 | 21.92 | 22.71 | 23.48 | 24.22 | 24.95 | 25.65 | 26.33 | 27.00 |
| 28  |    | 14.14 | 15.25 | 16.32 | 17.35 | 18.35 | 19.30 | 20.22 | 21.11 | 21.93 | 22.81 | 23.62 | 24.40 | 25.16 | 25.90 | 26.62 | 27.32 | 28.00 |
| 29  |    | 14.77 | 15.93 | 17.04 | 18.10 | 19.12 | 20.10 | 21.05 | 21.96 | 22.84 | 23.7  | 24.53 | 25.33 | 26.11 | 26.86 | 27.60 | 28.31 | 29.00 |
| 30  |    | 15.41 | 16.60 | 17.74 | 18.84 | 19.89 | 20.90 | 21.88 | 22.81 | 23.72 | 24.59 | 25.44 | 26.26 | 27.06 | 27.82 | 28.57 | 29.30 | 30.00 |
| 31  |    | 16.04 | 17.28 | 18.45 | 19.58 | 20.66 | 21.7  | 22.7  | 23.67 | 24.59 | 25.48 | 26.34 | 27.19 | 27.99 | 28.78 | 29.55 | 30.28 | 31.00 |
| 32  |    | 16.67 | 17.95 | 19.18 | 20.32 | 21.44 | 22.50 | 23.53 | 24.51 | 25.46 | 26.38 | 27.28 | 28.11 | 28.93 | 29.75 | 30.51 | 31.27 | 32.00 |
| 33  |    | 17.31 | 18.63 | 19.87 | 21.01 | 22.21 | 23.31 | 24.38 | 25.47 | 26.54 | 27.27 | 28.17 | 29.04 | 29.89 | 30.70 | 31.50 | 32.25 | 33.00 |
| 34  |    | 17.94 | 19.30 | 20.58 | 21.81 | 22.98 | 24.11 | 25.19 | 26.21 | 27.20 | 28.17 | 29.03 | 29.98 | 30.83 | 31.67 | 32.47 | 33.25 | 34.00 |
| 35  |    | 18.57 | 19.97 | 21.30 | 22.56 | 23.76 | 24.92 | 26.01 | 27.08 | 28.08 | 29.06 | 30.00 | 30.91 | 31.78 | 32.62 | 33.44 | 34.23 | 35.00 |
| 36  |    | 19.2  | 20.65 | 22.02 | 23.31 | 24.54 | 25.73 | 26.85 | 27.92 | 28.96 | 29.93 | 30.91 | 31.87 | 32.72 | 33.59 | 34.41 | 35.22 | 36.00 |
| 37  |    | 19.84 | 21.32 | 22.72 | 24.06 | 25.32 | 26.52 | 27.68 | 28.79 | 29.84 | 30.85 | 31.82 | 32.77 | 33.67 | 34.54 | 35.39 | 36.21 | 37.00 |
| 38  |    | 20.47 | 21.99 | 23.44 | 24.80 | 26.10 | 27.34 | 28.51 | 29.64 | 30.71 | 31.75 | 32.75 | 33.70 | 34.62 | 35.50 | 36.37 | 37.19 | 38.00 |
| 39  |    | 21.10 | 22.68 | 24.16 | 25.56 | 26.89 | 28.15 | 29.35 | 30.50 | 31.60 | 32.66 | 33.68 | 34.68 | 35.58 | 36.47 | 37.34 | 38.19 | 39.00 |
| 40  |    | 21.74 | 23.35 | 24.87 | 26.32 | 27.67 | 28.96 | 30.19 | 31.35 | 32.48 | 33.55 | 34.59 | 35.56 | 36.52 | 37.43 | 38.31 | 39.18 | 40.00 |

表注: t[°C]

表 1.10.3

湿球温度  $t_s$ , [°C] (第 6 类地区)

| RH<br>t | RH    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 10      | 2.20  | 2.75  | 3.29  | 3.82  | 4.34  | 4.86  | 5.36  | 5.85  | 6.35  | 6.83  | 7.30  | 7.77  | 8.23  | 8.68  | 9.13  | 9.57  | 10.00 |
| 11      | 2.89  | 3.46  | 4.03  | 4.58  | 5.12  | 5.68  | 6.19  | 6.70  | 7.21  | 7.71  | 8.21  | 8.69  | 9.17  | 9.64  | 10.1  | 10.55 | 11.00 |
| 12      | 3.57  | 4.17  | 4.76  | 5.34  | 5.91  | 6.47  | 7.01  | 7.55  | 8.08  | 8.6   | 9.11  | 9.62  | 10.1  | 10.59 | 11.07 | 11.54 | 12.00 |
| 13      | 4.25  | 4.86  | 5.49  | 6.09  | 6.69  | 7.26  | 7.84  | 8.39  | 8.94  | 9.49  | 10.01 | 10.53 | 11.04 | 11.55 | 12.04 | 12.53 | 13.00 |
| 14      | 4.93  | 5.58  | 6.22  | 6.85  | 7.47  | 8.07  | 8.66  | 9.24  | 9.81  | 10.37 | 10.92 | 11.46 | 11.98 | 12.50 | 13.01 | 13.51 | 14.00 |
| 15      | 5.60  | 6.28  | 6.95  | 7.61  | 8.24  | 8.87  | 9.49  | 10.09 | 10.68 | 11.25 | 11.82 | 12.38 | 12.92 | 13.46 | 13.98 | 14.49 | 15.00 |
| 16      | 6.27  | 6.98  | 7.67  | 8.35  | 9.02  | 9.67  | 10.31 | 10.93 | 11.54 | 12.14 | 12.73 | 13.30 | 13.86 | 14.41 | 14.95 | 15.48 | 16.00 |
| 17      | 6.92  | 7.67  | 8.40  | 9.1   | 9.79  | 10.47 | 11.13 | 11.77 | 12.41 | 13.03 | 13.63 | 14.23 | 14.80 | 15.36 | 15.93 | 16.47 | 17.00 |
| 18      | 7.58  | 8.36  | 9.11  | 9.85  | 10.56 | 11.27 | 11.95 | 12.62 | 13.27 | 13.91 | 14.53 | 15.14 | 15.73 | 16.33 | 16.89 | 17.45 | 18.00 |
| 19      | 8.24  | 9.05  | 9.83  | 10.59 | 11.33 | 12.07 | 12.77 | 13.47 | 14.14 | 14.79 | 15.43 | 16.07 | 16.68 | 17.27 | 17.86 | 18.44 | 19.00 |
| 20      | 8.89  | 9.73  | 10.54 | 11.34 | 12.11 | 12.87 | 13.59 | 14.31 | 15.01 | 15.69 | 16.34 | 16.99 | 17.62 | 18.23 | 18.84 | 19.43 | 20.00 |
| 21      | 9.54  | 10.42 | 11.26 | 12.09 | 12.88 | 13.66 | 14.42 | 15.15 | 15.87 | 16.57 | 17.25 | 17.91 | 18.56 | 19.2  | 19.80 | 20.41 | 21.00 |
| 22      | 10.19 | 11.1  | 11.97 | 12.82 | 13.65 | 14.46 | 15.23 | 15.99 | 16.73 | 17.45 | 18.15 | 18.84 | 19.50 | 20.15 | 20.78 | 21.39 | 22.00 |
| 23      | 10.83 | 11.77 | 12.67 | 13.57 | 14.43 | 15.25 | 16.06 | 16.85 | 17.60 | 18.34 | 19.06 | 19.76 | 20.44 | 21.10 | 21.75 | 22.38 | 23.00 |
| 24      | 11.47 | 12.46 | 13.39 | 14.31 | 15.20 | 16.05 | 16.88 | 17.69 | 18.47 | 19.22 | 19.96 | 20.68 | 21.38 | 22.06 | 22.72 | 23.37 | 24.00 |
| 25      | 12.12 | 13.13 | 14.11 | 15.05 | 15.96 | 16.85 | 17.7  | 18.53 | 19.33 | 20.11 | 20.87 | 21.61 | 22.32 | 23.02 | 23.7  | 24.35 | 25.00 |

續表1.10.5

| RH | t     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
| 26 | 12.75 | 13.81 | 14.82 | 15.79 | 16.73 | 17.65 | 18.53 | 19.37 | 20.2  | 21.00 | 21.78 | 22.53 | 23.26 | 23.98 | 24.67 | 25.34 | 26.00 |
| 27 | 13.39 | 14.48 | 15.53 | 16.54 | 17.51 | 18.44 | 19.35 | 20.22 | 21.07 | 21.90 | 22.69 | 23.45 | 24.21 | 24.93 | 25.64 | 26.32 | 27.00 |
| 28 | 14.03 | 15.15 | 16.24 | 17.28 | 18.28 | 19.24 | 20.17 | 21.07 | 21.94 | 22.78 | 23.60 | 24.38 | 25.14 | 25.89 | 26.62 | 27.32 | 28.00 |
| 29 | 14.66 | 15.83 | 16.94 | 18.02 | 19.05 | 20.04 | 21.00 | 21.92 | 22.81 | 23.67 | 24.50 | 25.31 | 26.10 | 26.86 | 27.58 | 28.31 | 29.00 |
| 30 | 15.30 | 16.50 | 17.65 | 18.76 | 19.82 | 20.85 | 21.82 | 22.77 | 23.69 | 24.57 | 25.41 | 26.23 | 27.04 | 27.81 | 28.57 | 29.30 | 30.00 |
| 31 | 15.93 | 17.18 | 18.37 | 19.51 | 20.60 | 21.65 | 22.65 | 23.62 | 24.56 | 25.45 | 26.33 | 27.17 | 27.98 | 28.77 | 29.54 | 30.28 | 31.00 |
| 32 | 16.56 | 17.85 | 19.08 | 20.25 | 21.37 | 22.45 | 23.48 | 24.48 | 25.42 | 26.35 | 27.24 | 28.10 | 28.93 | 29.74 | 30.51 | 31.27 | 32.00 |
| 33 | 17.2  | 18.52 | 19.79 | 20.99 | 22.15 | 23.25 | 24.30 | 25.33 | 26.30 | 27.24 | 28.15 | 29.02 | 29.87 | 30.69 | 31.49 | 32.26 | 33.00 |
| 34 | 17.83 | 19.2  | 20.50 | 21.74 | 22.93 | 24.05 | 25.14 | 26.18 | 27.17 | 28.13 | 29.07 | 29.95 | 30.82 | 31.65 | 32.46 | 33.25 | 34.00 |
| 35 | 18.47 | 19.87 | 21.22 | 22.49 | 23.7  | 24.86 | 25.97 | 27.04 | 28.06 | 29.03 | 29.98 | 30.88 | 31.76 | 32.62 | 33.43 | 34.23 | 35.00 |
| 36 | 19.09 | 20.55 | 21.93 | 23.42 | 24.48 | 25.67 | 26.81 | 27.89 | 28.94 | 29.93 | 30.89 | 31.82 | 32.71 | 33.58 | 34.41 | 35.21 | 36.00 |
| 37 | 19.73 | 21.23 | 22.65 | 23.99 | 25.27 | 26.48 | 27.64 | 28.75 | 29.81 | 30.82 | 31.81 | 32.75 | 33.65 | 34.54 | 35.39 | 36.20 | 37.00 |
| 38 | 20.36 | 21.90 | 23.36 | 24.73 | 26.05 | 27.29 | 28.47 | 29.61 | 30.69 | 31.72 | 32.75 | 33.68 | 34.61 | 35.50 | 36.35 | 37.19 | 38.00 |
| 39 | 20.99 | 22.58 | 24.08 | 25.49 | 26.83 | 28.10 | 29.31 | 30.47 | 31.57 | 32.63 | 33.65 | 34.61 | 35.55 | 36.45 | 37.33 | 38.18 | 39.00 |
| 40 | 21.62 | 23.26 | 24.79 | 26.25 | 27.61 | 28.90 | 30.14 | 31.32 | 32.45 | 33.53 | 34.56 | 35.55 | 36.51 | 37.42 | 38.32 | 39.17 | 40.00 |

表注: t[°C]

湿球温度  $t_w$  [°C] (第 6 类地区)

表 1.10.6

| $t$ | RH    |       | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 10    | 1.89  | 2.46  | 3.03  | 3.57  | 4.12  | 4.68  | 5.18  | 5.71  | 6.22  | 6.71  | 7.21  | 7.69  | 8.17  | 8.64  | 9.10  | 9.56  | 10.00 | 10.00 |
| 11  | 2.56  | 3.17  | 3.76  | 4.34  | 4.90  | 5.46  | 6.01  | 6.55  | 7.08  | 7.60  | 8.11  | 8.62  | 9.11  | 9.60  | 10.07 | 10.54 | 11.00 | 11.00 | 11.00 |
| 12  | 3.24  | 3.87  | 4.49  | 5.09  | 5.69  | 6.27  | 6.84  | 7.40  | 7.95  | 8.49  | 9.02  | 9.54  | 10.05 | 10.55 | 11.04 | 11.52 | 12.00 | 12.00 | 12.00 |
| 13  | 3.92  | 4.58  | 5.22  | 5.85  | 6.47  | 7.07  | 7.66  | 8.24  | 8.82  | 9.37  | 9.92  | 10.45 | 10.99 | 11.50 | 12.01 | 12.51 | 13.00 | 13.00 | 13.00 |
| 14  | 4.59  | 5.27  | 5.94  | 6.60  | 7.24  | 7.87  | 8.49  | 9.09  | 9.68  | 10.26 | 10.82 | 11.38 | 11.92 | 12.46 | 12.98 | 13.50 | 14.00 | 14.00 | 14.00 |
| 15  | 5.25  | 5.97  | 6.66  | 7.35  | 8.02  | 8.67  | 9.31  | 9.93  | 10.54 | 11.14 | 11.73 | 12.30 | 12.86 | 13.41 | 13.95 | 14.48 | 15.00 | 15.00 | 15.00 |
| 16  | 5.91  | 6.66  | 7.38  | 8.10  | 8.79  | 9.47  | 10.13 | 10.78 | 11.41 | 12.03 | 12.63 | 13.22 | 13.80 | 14.37 | 14.92 | 15.47 | 16.00 | 16.00 | 16.00 |
| 17  | 6.57  | 7.35  | 8.11  | 8.85  | 9.57  | 10.27 | 10.95 | 11.62 | 12.27 | 12.91 | 13.54 | 14.15 | 14.74 | 15.33 | 15.89 | 16.46 | 17.00 | 17.00 | 17.00 |
| 18  | 7.22  | 8.03  | 8.82  | 9.59  | 10.34 | 11.07 | 11.78 | 12.47 | 13.14 | 13.79 | 14.43 | 15.07 | 15.68 | 16.28 | 16.85 | 17.44 | 18.00 | 18.00 | 18.00 |
| 19  | 7.88  | 8.71  | 9.54  | 10.33 | 11.11 | 11.86 | 12.59 | 13.30 | 14.00 | 14.68 | 15.35 | 15.99 | 16.62 | 17.24 | 17.84 | 18.43 | 19.00 | 19.00 | 19.00 |
| 20  | 8.52  | 9.40  | 10.26 | 11.08 | 11.87 | 12.66 | 13.42 | 14.16 | 14.87 | 15.57 | 16.25 | 16.92 | 17.58 | 18.20 | 18.81 | 19.41 | 20.00 | 20.00 | 20.00 |
| 21  | 9.17  | 10.08 | 10.96 | 11.82 | 12.65 | 13.45 | 14.23 | 15.00 | 15.74 | 16.46 | 17.16 | 17.84 | 18.50 | 19.15 | 19.78 | 20.40 | 21.00 | 21.00 | 21.00 |
| 22  | 9.81  | 10.76 | 11.67 | 12.56 | 13.43 | 14.26 | 15.06 | 15.84 | 16.60 | 17.35 | 18.08 | 18.76 | 19.44 | 20.10 | 20.76 | 21.38 | 22.00 | 22.00 | 22.00 |
| 23  | 10.46 | 11.44 | 12.39 | 13.30 | 14.19 | 15.05 | 15.88 | 16.68 | 17.46 | 18.23 | 18.97 | 19.69 | 20.44 | 21.03 | 21.72 | 22.37 | 23.00 | 23.00 | 23.00 |
| 24  | 11.10 | 12.11 | 13.10 | 14.05 | 14.95 | 15.85 | 16.71 | 17.53 | 18.33 | 19.12 | 19.88 | 20.61 | 21.33 | 22.02 | 22.70 | 23.35 | 24.00 | 24.00 | 24.00 |
| 25  | 11.74 | 12.79 | 13.81 | 14.79 | 15.73 | 16.65 | 17.52 | 18.38 | 19.21 | 20.00 | 20.79 | 21.56 | 22.27 | 22.98 | 23.68 | 24.35 | 25.00 | 25.00 | 25.00 |

續表1.10.9

| $R/H$ | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26    | 12.37 | 13.47 | 14.52 | 15.53 | 16.50 | 17.45 | 18.35 | 19.23 | 20.08 | 20.89 | 21.70 | 22.47 | 23.2  | 23.94 | 24.64 | 25.33 | 26.00 |
| 27    | 13.00 | 14.15 | 15.22 | 16.27 | 17.27 | 18.21 | 19.18 | 20.08 | 20.94 | 21.78 | 22.60 | 23.39 | 24.15 | 24.90 | 25.62 | 26.31 | 27.00 |
| 28    | 13.64 | 14.82 | 15.93 | 17.01 | 18.06 | 19.04 | 20.00 | 20.93 | 21.81 | 22.68 | 23.51 | 24.31 | 25.10 | 25.85 | 26.60 | 27.30 | 28.00 |
| 29    | 14.27 | 15.49 | 16.65 | 17.76 | 18.82 | 19.85 | 20.83 | 21.77 | 22.69 | 23.57 | 24.42 | 25.24 | 26.05 | 26.81 | 27.57 | 28.29 | 29.00 |
| 30    | 14.91 | 16.17 | 17.36 | 18.50 | 19.60 | 20.65 | 21.66 | 22.63 | 23.56 | 24.46 | 25.33 | 26.17 | 26.98 | 27.78 | 28.53 | 29.29 | 30.00 |
| 31    | 15.54 | 16.84 | 18.07 | 19.25 | 20.37 | 21.45 | 22.49 | 23.48 | 24.44 | 25.35 | 26.24 | 27.10 | 27.93 | 28.73 | 29.51 | 30.27 | 31.00 |
| 32    | 16.17 | 17.51 | 18.79 | 19.99 | 21.15 | 22.26 | 23.32 | 24.34 | 25.31 | 26.25 | 27.15 | 28.04 | 28.87 | 29.70 | 30.48 | 31.25 | 32.00 |
| 33    | 16.81 | 18.19 | 19.49 | 20.74 | 21.93 | 23.08 | 24.14 | 25.19 | 26.19 | 27.15 | 28.07 | 28.97 | 29.83 | 30.66 | 31.47 | 32.24 | 33.00 |
| 34    | 17.44 | 18.86 | 20.21 | 21.49 | 22.70 | 23.86 | 24.98 | 26.05 | 27.07 | 28.04 | 28.99 | 29.90 | 30.77 | 31.63 | 32.45 | 33.23 | 34.00 |
| 35    | 18.08 | 19.53 | 20.92 | 22.24 | 23.48 | 24.68 | 25.81 | 26.90 | 27.94 | 28.94 | 29.91 | 30.82 | 31.71 | 32.58 | 33.42 | 34.21 | 35.00 |
| 36    | 18.71 | 20.21 | 21.63 | 22.98 | 24.27 | 25.48 | 26.64 | 27.75 | 28.82 | 29.84 | 30.82 | 31.77 | 32.67 | 33.54 | 34.39 | 35.20 | 36.00 |
| 37    | 19.33 | 20.90 | 22.36 | 23.74 | 25.05 | 26.30 | 27.49 | 28.62 | 29.70 | 30.74 | 31.74 | 32.69 | 33.62 | 34.51 | 35.36 | 36.19 | 37.00 |
| 38    | 19.97 | 21.58 | 23.07 | 24.49 | 25.84 | 27.11 | 28.32 | 29.48 | 30.58 | 31.64 | 32.65 | 33.63 | 34.58 | 35.47 | 36.34 | 37.18 | 38.00 |
| 39    | 20.60 | 22.26 | 23.79 | 25.25 | 26.62 | 27.92 | 29.16 | 30.33 | 31.46 | 32.55 | 33.57 | 34.57 | 35.52 | 36.43 | 37.32 | 38.17 | 39.00 |
| 40    | 21.25 | 22.94 | 24.52 | 26.00 | 27.31 | 28.75 | 30.00 | 31.20 | 32.34 | 33.44 | 34.48 | 35.50 | 36.47 | 37.40 | 38.29 | 39.16 | 40.00 |

表注:  $t$  [°C]

表 1.10.7

湿球温度  $t_w$  [°C] (第 7 类地区)

| $t$ | RH    |       | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95% | 100% |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|------|
|     | $t_w$ | $t_w$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |      |
| 10  | 1.54  | 2.14  | 2.74  | 3.34  | 3.89  | 4.25  | 5.00  | 5.54  | 6.07  | 6.60  | 7.10  | 7.61  | 8.11  | 8.59  | 9.07  | 9.54  | 10.00 |     |      |
| 11  | 2.21  | 2.85  | 3.46  | 4.07  | 4.67  | 5.25  | 5.83  | 6.39  | 6.94  | 7.43  | 8.01  | 8.54  | 9.04  | 9.55  | 10.04 | 10.52 | 11.00 |     |      |
| 12  | 2.89  | 3.54  | 4.19  | 4.83  | 5.45  | 6.06  | 6.65  | 7.23  | 7.81  | 8.36  | 8.91  | 9.46  | 9.98  | 10.50 | 11.01 | 11.51 | 12.00 |     |      |
| 13  | 3.55  | 4.24  | 4.92  | 5.58  | 6.22  | 6.85  | 7.47  | 8.08  | 8.67  | 9.25  | 9.82  | 10.37 | 10.92 | 11.45 | 11.96 | 12.49 | 13.00 |     |      |
| 14  | 4.22  | 4.94  | 5.64  | 6.33  | 7.00  | 7.65  | 8.30  | 8.92  | 9.53  | 10.14 | 10.72 | 11.30 | 11.86 | 12.42 | 12.95 | 13.48 | 14.00 |     |      |
| 15  | 4.87  | 5.63  | 6.36  | 7.08  | 7.77  | 8.45  | 9.11  | 9.77  | 10.40 | 11.02 | 11.63 | 12.22 | 12.80 | 13.37 | 13.92 | 14.46 | 15.00 |     |      |
| 16  | 5.53  | 6.32  | 7.08  | 7.82  | 8.54  | 9.26  | 9.94  | 10.62 | 11.27 | 11.91 | 12.53 | 13.14 | 13.74 | 14.32 | 14.89 | 15.46 | 16.00 |     |      |
| 17  | 6.18  | 7.00  | 7.79  | 8.56  | 9.31  | 10.05 | 10.76 | 11.46 | 12.14 | 12.79 | 13.43 | 14.07 | 14.68 | 15.28 | 15.87 | 16.44 | 17.00 |     |      |
| 18  | 6.83  | 7.69  | 8.50  | 9.30  | 10.08 | 10.84 | 11.58 | 12.30 | 13.00 | 13.68 | 14.34 | 14.98 | 15.62 | 16.24 | 16.84 | 17.42 | 18.00 |     |      |
| 19  | 7.48  | 8.37  | 9.23  | 10.05 | 10.86 | 11.65 | 12.40 | 13.14 | 13.87 | 14.56 | 15.25 | 15.91 | 16.55 | 17.19 | 17.80 | 18.41 | 19.00 |     |      |
| 20  | 8.12  | 9.05  | 9.93  | 10.79 | 11.63 | 12.44 | 13.23 | 13.99 | 14.73 | 15.44 | 16.15 | 16.83 | 17.50 | 18.15 | 18.78 | 19.40 | 20.00 |     |      |
| 21  | 8.77  | 9.72  | 10.65 | 11.54 | 12.40 | 13.24 | 14.05 | 14.83 | 15.60 | 16.34 | 17.06 | 17.76 | 18.44 | 19.10 | 19.75 | 20.39 | 21.00 |     |      |
| 22  | 9.42  | 10.40 | 11.36 | 12.28 | 13.17 | 14.03 | 14.87 | 15.68 | 16.46 | 17.23 | 17.97 | 18.69 | 19.38 | 20.07 | 20.73 | 21.37 | 22.00 |     |      |
| 23  | 10.05 | 11.08 | 12.07 | 13.03 | 13.94 | 14.83 | 15.70 | 16.52 | 17.33 | 18.11 | 18.87 | 19.61 | 20.33 | 21.02 | 21.70 | 22.36 | 23.00 |     |      |
| 24  | 10.69 | 11.75 | 12.78 | 13.76 | 14.71 | 15.63 | 16.52 | 17.37 | 18.21 | 19.01 | 19.78 | 20.53 | 21.26 | 21.98 | 22.67 | 23.34 | 24.00 |     |      |
| 25  | 11.33 | 12.43 | 13.49 | 14.51 | 15.49 | 16.43 | 17.34 | 18.22 | 19.07 | 19.89 | 20.69 | 21.47 | 22.21 | 22.93 | 23.64 | 24.33 | 25.00 |     |      |



續表1.10.7

| $t$ | $RH$ | 20%   | 25%   | 30%   | 35%   | 40%   | 45%   | 50%   | 55%   | 60%   | 65%   | 70%   | 75%   | 80%   | 85%   | 90%   | 95%   | 100%  |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26  |      | 11.96 | 13.10 | 14.20 | 15.25 | 16.26 | 17.23 | 18.17 | 19.08 | 19.94 | 20.78 | 21.60 | 22.40 | 23.15 | 23.90 | 24.62 | 25.32 | 26.00 |
| 27  |      | 12.60 | 13.78 | 14.91 | 15.99 | 17.04 | 18.03 | 18.99 | 19.92 | 20.82 | 21.68 | 22.51 | 23.32 | 24.09 | 24.86 | 25.59 | 26.31 | 27.02 |
| 28  |      | 13.23 | 14.45 | 15.62 | 16.73 | 17.80 | 18.83 | 19.83 | 20.77 | 21.69 | 22.56 | 23.42 | 24.24 | 25.04 | 25.82 | 26.56 | 27.29 | 28.00 |
| 29  |      | 13.86 | 15.13 | 16.34 | 17.48 | 18.58 | 19.64 | 20.65 | 21.62 | 22.55 | 23.46 | 24.33 | 25.17 | 25.99 | 26.78 | 27.55 | 28.27 | 29.00 |
| 30  |      | 14.50 | 15.80 | 17.05 | 18.22 | 19.36 | 20.44 | 21.48 | 22.48 | 23.44 | 24.36 | 25.24 | 26.10 | 26.94 | 27.74 | 28.52 | 29.27 | 30.00 |
| 31  |      | 15.12 | 16.48 | 17.76 | 18.97 | 20.14 | 21.25 | 22.32 | 23.34 | 24.31 | 25.25 | 26.16 | 27.04 | 27.88 | 28.71 | 29.48 | 30.26 | 31.00 |
| 32  |      | 15.76 | 17.15 | 18.47 | 19.72 | 20.92 | 22.05 | 23.14 | 24.19 | 25.19 | 26.15 | 27.07 | 27.95 | 28.82 | 29.66 | 30.46 | 31.24 | 32.00 |
| 33  |      | 16.39 | 17.83 | 19.18 | 20.47 | 21.70 | 22.87 | 23.98 | 25.04 | 26.06 | 27.05 | 27.99 | 28.90 | 29.78 | 30.62 | 31.43 | 32.23 | 33.00 |
| 34  |      | 17.03 | 18.50 | 19.90 | 21.23 | 22.47 | 23.66 | 24.81 | 25.90 | 26.94 | 27.95 | 28.90 | 29.83 | 30.73 | 31.58 | 32.42 | 33.22 | 34.00 |
| 35  |      | 17.66 | 19.18 | 20.61 | 21.98 | 23.26 | 24.49 | 25.65 | 26.77 | 27.83 | 28.84 | 29.82 | 30.77 | 31.67 | 32.54 | 33.40 | 34.21 | 35.00 |
| 36  |      | 18.30 | 19.87 | 21.33 | 22.73 | 24.05 | 25.29 | 26.48 | 27.62 | 28.71 | 29.75 | 30.74 | 31.71 | 32.62 | 33.51 | 34.36 | 35.20 | 36.00 |
| 37  |      | 18.93 | 20.54 | 22.05 | 23.49 | 24.83 | 26.12 | 27.33 | 28.48 | 29.58 | 30.64 | 31.66 | 32.64 | 33.58 | 34.48 | 35.35 | 36.18 | 37.00 |
| 38  |      | 19.57 | 21.22 | 22.78 | 24.23 | 25.62 | 26.93 | 28.16 | 29.35 | 30.48 | 31.56 | 32.58 | 33.57 | 34.53 | 35.44 | 36.33 | 37.18 | 38.00 |
| 39  |      | 20.20 | 21.91 | 23.50 | 24.99 | 26.41 | 27.74 | 29.01 | 30.21 | 31.36 | 32.45 | 33.51 | 34.50 | 35.48 | 36.40 | 37.31 | 38.16 | 39.00 |
| 40  |      | 20.84 | 22.59 | 24.23 | 25.76 | 27.20 | 28.55 | 29.84 | 31.07 | 32.25 | 33.36 | 34.43 | 35.45 | 36.43 | 37.36 | 38.28 | 39.16 | 40.00 |

表注:  $t$  [°C]

表 1.11

湿空气的密度  $\rho$ , [kg/m<sup>3</sup>] (第 I 类地区)

| $d$ | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10  | 1.243 | 1.242 | 1.241 | 1.241 | 1.240 | 1.239 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 11  | 1.239 | 1.238 | 1.237 | 1.236 | 1.236 | 1.235 | 1.234 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 12  | 1.234 | 1.233 | 1.233 | 1.232 | 1.231 | 1.231 | 1.230 | 1.229 |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 13  | 1.230 | 1.229 | 1.228 | 1.228 | 1.227 | 1.226 | 1.225 | 1.225 |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 14  | 1.226 | 1.225 | 1.224 | 1.223 | 1.223 | 1.222 | 1.221 | 1.221 | 1.220 |       |       |       |       |       |       |       |
| 15  | 1.221 | 1.221 | 1.220 | 1.219 | 1.218 | 1.218 | 1.217 | 1.216 | 1.216 | 1.215 |       |       |       |       |       |       |
| 16  | 1.217 | 1.216 | 1.216 | 1.215 | 1.214 | 1.213 | 1.213 | 1.212 | 1.211 | 1.211 | 1.210 |       |       |       |       |       |
| 17  | 1.213 | 1.212 | 1.211 | 1.211 | 1.210 | 1.209 | 1.209 | 1.208 | 1.207 | 1.206 | 1.206 | 1.205 |       |       |       |       |
| 18  | 1.209 | 1.208 | 1.207 | 1.207 | 1.206 | 1.205 | 1.204 | 1.203 | 1.203 | 1.202 | 1.202 | 1.201 | 1.200 |       |       |       |
| 19  | 1.205 | 1.204 | 1.203 | 1.202 | 1.202 | 1.201 | 1.200 | 1.200 | 1.199 | 1.198 | 1.198 | 1.197 | 1.196 | 1.195 |       |       |
| 20  | 1.201 | 1.200 | 1.199 | 1.198 | 1.198 | 1.197 | 1.196 | 1.196 | 1.195 | 1.194 | 1.193 | 1.193 | 1.192 | 1.191 | 1.191 |       |
| 21  | 1.195 | 1.196 | 1.195 | 1.194 | 1.194 | 1.193 | 1.192 | 1.191 | 1.191 | 1.190 | 1.189 | 1.189 | 1.188 | 1.187 | 1.187 | 1.186 |
| 22  | 1.192 | 1.192 | 1.191 | 1.190 | 1.190 | 1.189 | 1.188 | 1.187 | 1.187 | 1.186 | 1.185 | 1.185 | 1.184 | 1.183 | 1.183 | 1.182 |
| 23  | 1.188 | 1.188 | 1.187 | 1.186 | 1.185 | 1.185 | 1.184 | 1.183 | 1.183 | 1.182 | 1.181 | 1.181 | 1.18  | 1.179 | 1.179 | 1.178 |
| 24  | 1.184 | 1.184 | 1.183 | 1.182 | 1.182 | 1.181 | 1.180 | 1.179 | 1.179 | 1.178 | 1.177 | 1.177 | 1.176 | 1.175 | 1.175 | 1.174 |
| 25  | 1.180 | 1.180 | 1.179 | 1.178 | 1.178 | 1.177 | 1.176 | 1.175 | 1.175 | 1.174 | 1.173 | 1.173 | 1.172 | 1.171 | 1.171 | 1.170 |



表 1.11

| $d \backslash t$ | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 10               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 11               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 12               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 13               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 14               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 15               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 16               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 17               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 18               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 19               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 20               |       |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 21               | 1.185 |       |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 22               | 1.181 | 1.181 |       |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 23               | 1.177 | 1.177 | 1.176 |       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 24               | 1.173 | 1.173 | 1.172 | 1.171 |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 25               | 1.169 | 1.169 | 1.168 | 1.167 | 1.166 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

| $d$ | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 26  | 1.176 | 1.176 | 1.175 | 1.174 | 1.174 | 1.173 | 1.172 | 1.172 | 1.171 | 1.170 | 1.169 | 1.169 | 1.168 | 1.167 | 1.167 | 1.166 |
| 27  | 1.173 | 1.172 | 1.171 | 1.170 | 1.170 | 1.169 | 1.168 | 1.168 | 1.167 | 1.166 | 1.166 | 1.165 | 1.164 | 1.164 | 1.163 | 1.162 |
| 28  | 1.168 | 1.168 | 1.167 | 1.166 | 1.166 | 1.165 | 1.164 | 1.164 | 1.163 | 1.162 | 1.162 | 1.161 | 1.160 | 1.160 | 1.159 | 1.158 |
| 29  | 1.165 | 1.164 | 1.163 | 1.163 | 1.162 | 1.161 | 1.161 | 1.160 | 1.159 | 1.159 | 1.158 | 1.157 | 1.157 | 1.156 | 1.155 | 1.155 |
| 30  | 1.161 | 1.160 | 1.160 | 1.159 | 1.158 | 1.157 | 1.157 | 1.156 | 1.155 | 1.155 | 1.154 | 1.153 | 1.153 | 1.152 | 1.151 | 1.151 |
| 31  | 1.157 | 1.156 | 1.156 | 1.155 | 1.154 | 1.154 | 1.153 | 1.152 | 1.152 | 1.151 | 1.150 | 1.150 | 1.149 | 1.148 | 1.148 | 1.147 |
| 32  | 1.153 | 1.152 | 1.152 | 1.151 | 1.151 | 1.150 | 1.149 | 1.148 | 1.148 | 1.147 | 1.146 | 1.146 | 1.145 | 1.144 | 1.144 | 1.143 |
| 33  | 1.150 | 1.149 | 1.148 | 1.147 | 1.147 | 1.146 | 1.145 | 1.145 | 1.144 | 1.143 | 1.143 | 1.142 | 1.141 | 1.141 | 1.140 | 1.139 |
| 34  | 1.146 | 1.145 | 1.144 | 1.144 | 1.143 | 1.142 | 1.142 | 1.141 | 1.140 | 1.140 | 1.139 | 1.138 | 1.138 | 1.137 | 1.136 | 1.135 |
| 35  | 1.142 | 1.141 | 1.141 | 1.140 | 1.139 | 1.139 | 1.138 | 1.137 | 1.137 | 1.136 | 1.135 | 1.135 | 1.134 | 1.133 | 1.133 | 1.132 |
| 36  | 1.138 | 1.138 | 1.137 | 1.136 | 1.136 | 1.135 | 1.134 | 1.134 | 1.133 | 1.132 | 1.132 | 1.131 | 1.130 | 1.130 | 1.129 | 1.128 |
| 37  | 1.135 | 1.134 | 1.133 | 1.133 | 1.132 | 1.131 | 1.131 | 1.130 | 1.129 | 1.129 | 1.128 | 1.127 | 1.127 | 1.126 | 1.125 | 1.125 |
| 38  | 1.131 | 1.130 | 1.130 | 1.129 | 1.128 | 1.128 | 1.127 | 1.126 | 1.126 | 1.125 | 1.124 | 1.124 | 1.123 | 1.122 | 1.122 | 1.121 |
| 39  | 1.127 | 1.127 | 1.126 | 1.125 | 1.125 | 1.124 | 1.123 | 1.123 | 1.122 | 1.121 | 1.121 | 1.120 | 1.119 | 1.119 | 1.118 | 1.118 |
| 40  | 1.124 | 1.123 | 1.122 | 1.122 | 1.121 | 1.120 | 1.120 | 1.119 | 1.119 | 1.118 | 1.117 | 1.117 | 1.116 | 1.115 | 1.115 | 1.114 |

表注  $t$  [°C],  $d$  [g/kg干]

附录1.11

| $d$ | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    | 31    | 32    | 33    | 34    | 35    | 36    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 26  | 1.165 | 1.165 | 1.163 | 1.163 | 1.163 | 1.162 | 1.161 | 1.161 |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 27  | 1.162 | 1.161 | 1.160 | 1.160 | 1.159 | 1.158 | 1.158 | 1.157 | 1.156 | 1.156 |       |       |       |       |       |       |
| 28  | 1.158 | 1.157 | 1.156 | 1.156 | 1.155 | 1.154 | 1.154 | 1.153 | 1.152 | 1.152 | 1.151 |       |       |       |       |       |
| 29  | 1.154 | 1.153 | 1.152 | 1.152 | 1.151 | 1.151 | 1.150 | 1.149 | 1.149 | 1.148 | 1.147 | 1.147 | 1.146 |       |       |       |
| 30  | 1.150 | 1.149 | 1.148 | 1.148 | 1.147 | 1.147 | 1.146 | 1.145 | 1.145 | 1.144 | 1.144 | 1.143 | 1.142 | 1.142 | 1.141 |       |
| 31  | 1.146 | 1.146 | 1.145 | 1.144 | 1.144 | 1.143 | 1.142 | 1.142 | 1.141 | 1.140 | 1.140 | 1.139 | 1.139 | 1.138 | 1.137 | 1.137 |
| 32  | 1.143 | 1.142 | 1.141 | 1.141 | 1.140 | 1.139 | 1.138 | 1.138 | 1.137 | 1.137 | 1.136 | 1.135 | 1.135 | 1.134 | 1.133 | 1.133 |
| 33  | 1.139 | 1.138 | 1.137 | 1.137 | 1.136 | 1.136 | 1.135 | 1.134 | 1.134 | 1.133 | 1.132 | 1.132 | 1.131 | 1.130 | 1.130 | 1.129 |
| 34  | 1.135 | 1.134 | 1.133 | 1.133 | 1.132 | 1.132 | 1.131 | 1.130 | 1.130 | 1.129 | 1.129 | 1.128 | 1.127 | 1.127 | 1.126 | 1.125 |
| 35  | 1.131 | 1.131 | 1.130 | 1.129 | 1.129 | 1.128 | 1.128 | 1.127 | 1.126 | 1.126 | 1.125 | 1.124 | 1.124 | 1.123 | 1.122 | 1.122 |
| 36  | 1.128 | 1.127 | 1.126 | 1.126 | 1.125 | 1.125 | 1.124 | 1.123 | 1.123 | 1.122 | 1.121 | 1.121 | 1.120 | 1.119 | 1.119 | 1.118 |
| 37  | 1.124 | 1.123 | 1.122 | 1.122 | 1.122 | 1.121 | 1.120 | 1.120 | 1.119 | 1.118 | 1.118 | 1.117 | 1.116 | 1.116 | 1.115 | 1.115 |
| 38  | 1.120 | 1.120 | 1.119 | 1.119 | 1.118 | 1.117 | 1.117 | 1.116 | 1.115 | 1.115 | 1.114 | 1.114 | 1.113 | 1.112 | 1.112 | 1.111 |
| 39  | 1.117 | 1.116 | 1.115 | 1.115 | 1.114 | 1.114 | 1.113 | 1.112 | 1.112 | 1.111 | 1.110 | 1.110 | 1.109 | 1.109 | 1.108 | 1.107 |
| 40  | 1.113 | 1.113 | 1.112 | 1.111 | 1.111 | 1.110 | 1.110 | 1.109 | 1.108 | 1.108 | 1.107 | 1.106 | 1.106 | 1.105 | 1.105 | 1.104 |

## 第2章 室内和室外空气设计参数

空调的作用是维持室内空气具有一定的状态参数，人们根据这一状态参数对空调设备进行运行管理。对一筹建中的空调系统进行设计时，也要按规定的室内空气状态进行计算，这一规定的状态下的参数称为室内空气设计参数。

室外空气参数对空调设备的工作也有影响。比如，在最炎热的季节，空调的供冷系统要满负荷工作；而在不太热的季节，或许供冷系统只要部分负荷工作就能满足要求。在进行空调系统设计时，要按照规定的室外空气状态进行计算，这一规定的状态下的参数称为室外空气设计参数。

### 2.1 室内空气设计参数

根据空调的目的，可分为两种类型的空调：舒适性空调和工艺性空调。

适应性空调的作用是维持室内空气具有合适的状态，使室内人员处于舒适状态，以保证良好的工作条件和生活条件。

工艺性空调的作用是满足生产工艺过程对空气状态的要求，以保证生产过程得以顺利进行。

#### 2.2.1 舒适性空调的室内空气设计参数

上面已提到，这一类空调的目的是使人感到舒适。从生理上讲，所谓舒适就是人体能维持正常的散热量和散湿量。通常反映舒适与否的首先是冷热感觉，人感觉过冷或过热都是不舒适的。这要求保持室内空气一定要具有合适的温度。温度过低，人体散热过多，会产生“冷”感；反之，温度过高，人体热散发不出，会产生“热”感。其次，室内空气的湿度对人的感觉也有重大影响。即使空气的温度是合适的，但是空气的湿度过高或过低，人也会觉得

不舒服。湿度过高,身上出的汗不易蒸发,人会觉得闷,这时即使气温不高,但是人会觉得热;湿度过低,则皮肤表面汗分蒸发过快,人体会缺水,甚至导致嘴唇开裂。因此,在规定室内温度的同时还必须规定合适的室内空气的湿度(通常规定适宜的相对湿度)。还有,空气流动速度也影响人的舒适感。在静止的或流速非常小的空气环境中,人体产生的热量和湿量都得不到正常的散发,结果也会使人觉得“沉闷”;流速过大,则会促使人体散热散湿过多,从而产生“吹风”的冷感。因此,室内空气的流速也应作为室内空气设计参数予以规定。

除了以上的三者外,空气的新鲜程度、衣着情况、室内各表面的温度高低等对人的感觉也有影响。为了保持室内空气新鲜,空调系统一定要向室内输送一定量的室外空气。一般采用的室内空气设计参数都是对正常衣着而言,对非正常衣着,则要根据情况调整有关参数。室内各表面(墙面、家具表面等)温度影响它们与人体间的辐射热交换,这些温度过高(或过低)使人体不易散热(或散热过多),从而要维持较低(或较高)的室内空气温度,以维持适宜的人体热平衡。

根据我国国家标准《采暖通风与空气调节设计规范》的规定,对于舒适性空调,室内设计参数可按表 2.1 规定的数值选用:

舒适性空调室内空气设计参数

表 2.1

| 季 节 | 温 度[℃] | 相对湿度[%] | 风速[m/s] |
|-----|--------|---------|---------|
| 夏 季 | 24~28  | 40~85   | <0.3    |
| 冬 季 | 18~22  | 40~60   | <0.2    |

表 2.1 给出的数据是概括性的,对不同类型的公共建筑的空调室内空气设计温湿度可参照表 2.2 选用。

### 2.1.2 工艺性空调的室内空气设计参数

工艺性空调的室内空气设计参数是由生产工艺过程的要求来确定,表 2.3 提供一些常见的情况供选用。这里要注意的是多数

部分公共建筑的室内空气设计温湿度

表 2.2

| 建筑名称     | 夏 季   |         | 冬 季   |         |
|----------|-------|---------|-------|---------|
|          | 温度[℃] | 相对湿度[%] | 温度[℃] | 相对湿度[%] |
| 剧 场      | 26~28 | 50~65   | 20~22 | 40~65   |
| 病 房      | 26~27 | 45~65   | 22~23 | 40~60   |
| 诊 室      | 26~27 | 45~65   | 21~22 | 40~60   |
| 候 诊 室    | 26~27 | 45~65   | 20~21 | 40~60   |
| 手 术 室    | 23~26 | 50~60   | 24~26 | 50~60   |
| 产 房      | 24~26 | 50~60   | 22~24 | 50~60   |
| 婴 儿 室    | 25~27 | 55~65   | 25~27 | 50~65   |
| 药 房      | 26~27 | 45~50   | 21~22 | 40~50   |
| 饭店: 客房部分 | 24~26 | 50~65   | 22~25 | 40~55   |
| 公用部分     | 24~26 | 50~65   | 20~25 | 40~55   |
| 百货商店     | 25~27 | 55~65   | 20~22 | 40~50   |

部分生产车间要求的空气温湿度

表 2.3

| 工 作 类 别         | 温度[℃]      |      | 相对湿度<br>[%] |
|-----------------|------------|------|-------------|
|                 | 夏 季        | 冬 季  |             |
| 1. 机械工业         |            |      |             |
| I 级坐标镗床         | 20±1       | 20±1 | 40~65       |
| II 级坐标镗床        | 23±1       | 17±1 | 40~65       |
| 精密轴承精加工         | 16~27      |      | 40~65       |
| 高精度外圆磨床、高精度平面磨床 | 16~24      |      | 40~65       |
| 高精度刻线机: 机械刻划法   | 20±0.1~0.2 |      | 40~65       |
| 光电瞄准并联机械刻划法     | 18~22      |      | 40~65       |
| 2. 各种计量室        |            |      |             |
| 热学计量室: 标准热电偶    | 20±1~2     |      | <70         |
| 压力计、真空表         | 20±2~5     |      | <70         |

续表 2.3

| 工 作 类 别                 | 温度[℃]     |       | 相对<br>温度<br>[%] |
|-------------------------|-----------|-------|-----------------|
|                         | 夏季        | 冬季    |                 |
| 力学计量室: 检定 1~3 级天平, 一等砝码 | 17~23±0.5 |       | 50~60           |
| 检定 4~6 级天平, 二等砝码        | 17~23±2   |       | 50~60           |
| 电学计量室: 检定一、二等标准电池       | 20±2      |       | <70             |
| 检定直流高阻, 低阻电位计           | 20±1      |       | <70             |
| 检定 0.01~0.02 级电桥        | 20±1      |       | <70             |
| 长度计量室: 检定一等量块           | 20±0.2    |       | 50~60           |
| 检定三等量块                  | 20±1      |       | 50~60           |
| 检定五等量块                  | 20±4      |       | 50~60           |
| 检定一级精度千分尺式内卡规           | 20±2      |       | 50~60           |
| 检定二级精度千分尺式内卡规           | 20±3      |       | 50~60           |
| 3. 电子工业                 |           |       |                 |
| 电解电容器、薄膜电容器车间           | ≤26~28    | 16~18 | 40~60           |
| 精缩间、翻版间、光刻间             | 22±1      | 22±1  | 50~60           |
| 扩散间、蒸发、钝化、外延间           | 23±5      | 23±5  | 60~70           |
| 4. 棉纺织工业                |           |       |                 |
| 清    棉                  | 29~31     | 20~22 | 60~65           |
| 梳    棉                  | 29~31     | 22~25 | 55~60           |
| 并    粗                  | 29~31     | 22~24 | 60~65           |
| 细    纱                  | 30~32     | 24~27 | 55~60           |
| 拈    线                  | 30~32     | 24~26 | 60~65           |
| 织布准备                    | 29~31     | 20~23 | 65~70           |
| 织    布                  | 28~30     | 23~26 | 70~75           |
| 整    理                  | 28~30     | 22~24 | 60~65           |
| 5. 涤棉混纺织工业              |           |       |                 |
| 清    棉                  | 28~30     | 20~22 | 60~65           |
| 梳    棉                  | 28~30     | 21~23 | 55~60           |

续表 2.3

| 工 作 类 别                                 | 温度[°C]            |               | 相对湿度<br>[%] |
|---|-------------------|---------------|-------------|
|   | 夏 季               | 冬 季           |             |
| 并 粗                                     | 28~30             | 21~23         | 55~60       |
| 细 纺                                     | 30~32             | 23~25         | 50~55       |
| 拈 线                                     | 30~32             | 23~25         | 55~60       |
| 织布准备                                    | 27~30             | 20~23         | 55~60       |
| 织 布                                     | 27~30             | 23~25         | 70~75       |
| 整 理                                     | 27~30             | 20~22         | 55~60       |
| 6. 医药工业                                 |                   |               |             |
| 抗菌素无菌分装车间, 青霉素、链霉素分装, 菌落试验, 无菌鉴定, 无菌更衣室 | ≤22 (盖瓶塞的工艺操作)    | 20            | ≤55         |
|   | ≤25 (灌装安瓿等发热量较大的) |               |             |
| 针剂及大输液车间, 调配、灌装等属于半无菌操作的房间              | 25                | 18            | ≤65         |
| 青霉素片剂车间                                 | 一般                | 一般            | ≤55         |
| 7. 电子计算机房                               |                   |               |             |
| 电子计算机房                                  | 20~23<br>±1~2     | 20~22<br>±1~2 | 50±10       |
| 卡片、磁带、纸带贮存                              | 18~24             | 18左右          | 40~60       |

的工艺过程是要求恒温恒湿的, 即不仅规定了温湿度的基数, 还规定了它们的允许波动值。例如, 室内温度规定为  $20 \pm 1 [^{\circ}\text{C}]$ , 意即室内空气应严格维持为  $20 [^{\circ}\text{C}]$ , 而在空调运行过程中可能出现的室温偏差不能超出  $\pm 1 [^{\circ}\text{C}]$

## 2.2 室外空气设计参数

室外空气通过墙、窗等与室内空气有热量交换, 从而影响空调系统的冷热负荷。然而, 室外空气状态在一年中、一月中甚至在一天中也是一直在变化着的, 采用怎样的状态作为设计依据就成为



问题。以夏季空调为例，采用当地的最高的室外空气干球温度和湿球温度似乎是最安全的，由此确定的空调设备容量必然是最大的。但是这样做是很不合理的，因为最高干湿球温度往往很多年才出现一次，而且即使出现，它们的延续时间也很短（甚至只有几小时）。其结果是按最高温湿度确定的设备容量偏大，往往在长时间内不能发挥作用。所以通常不是按最不利条件来确定室外空气设计参数，如果偶尔真的出现超出设计条件的室外参数时，可以采取一些临时措施来降低空调负荷（如暂时减少新风量、错开室内发热设备的使用时间等）。

暖通设计规范是这样确定室外空气设计参数的：

1. 夏季空气调节室外计算干球温度，应采用历年平均不保证50小时的干球温度\*。
2. 夏季空气调节室外计算湿球温度，应采用历年平均不保证50小时的湿球温度。
3. 冬季空气调节室外计算温度，应采用历年平均不保证一天的日平均温度。
4. 冬季空气调节室外计算相对湿度，应采用累年最冷月平均相对湿度。
5. 夏季室外平均风速，应采用累年最热三个月各月平均风速的平均值。
6. 冬季室外平均风速，应采用累年最冷三个月各月平均风速的平均值。
7. 夏季室外大气压力，应采用累年最热三个月各月平均大气压力的平均值。
8. 冬季室外大气压力，应采用累年最冷三个月各月平均大气压力的平均值。

表 2.4 列出了按以上原则确定的若干城市的空调室外空气设计参数。

\* 即每年中存在一个干球温度，超出这一温度的时间有50小时，然后取近若干年中每年的这一温度值的平均值。

表 2.4

空调室外空气设计参数

| 地名      | 站 位 置  |         | 大气压 [Pa]<br>[mmHg] |                | 室外计算干球温度 [°C] |        | 夏季室外<br>计算湿球<br>温度 [°C] | 冬季室外<br>计算湿度<br>[%] | 室外平均风速<br>[m/s] |        |
|---------|--------|---------|--------------------|----------------|---------------|--------|-------------------------|---------------------|-----------------|--------|
|         | 北<br>纬 | 东<br>经  | 冬<br>季             | 夏<br>季         | 冬<br>季        | 夏<br>季 |                         |                     | 冬<br>季          | 夏<br>季 |
| 齐 齐 哈 尔 | 47°23' | 123°55' | 100391<br>(753)    | 93792<br>(741) | -28           | 30.6   | 22.9                    | 71                  | 2.8             | 3.2    |
| 哈 尔 滨   | 45°41' | 126°37' | 100125<br>(751)    | 93392<br>(738) | -29           | 30.3   | 23.4                    | 74                  | 3.8             | 3.5    |
| 长 春     | 43°54' | 125°13' | 99453<br>(743)     | 91725<br>(733) | -26           | 30.5   | 24.2                    | 68                  | 4.2             | 3.5    |
| 沈 阳     | 41°46' | 123°26' | 102125<br>(765)    | 99392<br>(750) | -22           | 31.4   | 25.4                    | 64                  | 3.1             | 2.9    |
| 大 连     | 38°54' | 121°38' | 101325<br>(760)    | 99453<br>(746) | -14           | 28.4   | 25.0                    | 58                  | 5.8             | 4.3    |
| 乌 鲁 木 齐 | 43°54' | 87°28'  | 95192<br>(714)     | 93459<br>(701) | -27           | 34.1   | 18.5                    | 80                  | 1.7             | 3.1    |
| 西 宁     | 36°35' | 101°55' | 77460<br>(591)     | 77327<br>(590) | -15           | 25.9   | 16.4                    | 48                  | 1.7             | 1.9    |
| 兰 州     | 36°03' | 103°53' | 85059<br>(638)     | 84260<br>(632) | -13           | 30.5   | 20.2                    | 53                  | 0.5             | 1.3    |
| 银 川     | 38°29' | 106°13' | 89859<br>(674)     | 88392<br>(668) | -18           | 30.6   | 22.0                    | 58                  | 1.7             | 1.7    |

续表 2.4

| 地名   | 台站位置   |         |           | 大气压[Pa]<br>[mmHg] |                 | 室外计算干球温度[℃] |        | 夏季室外<br>计算湿度<br>[℃] | 冬季室外<br>计算湿度<br>[%] | 室外平均风速<br>[m/s] |        |
|------|--------|---------|-----------|-------------------|-----------------|-------------|--------|---------------------|---------------------|-----------------|--------|
|      | 北<br>纬 | 东<br>经  | 海<br>拔[m] | 冬<br>季            | 夏<br>季          | 冬<br>季      | 夏<br>季 |                     |                     | 冬<br>季          | 夏<br>季 |
| 西安   | 34°18' | 108°56' | 395.9     | 97858<br>(734)    | 95859<br>(719)  | -9          | 35.2   | 26.0                | 67                  | 1.8             | 2.2    |
| 呼和浩特 | 40°49' | 111°41' | 1063.0    | 90425<br>(676)    | 88926<br>(667)  | -22         | 29.9   | 20.8                | 53                  | 1.6             | 1.5    |
| 包头   | 40°36' | 109°50' | 1044.2    | 90392<br>(678)    | 89059<br>(668)  | -22         | 30.9   | 21.0                | 55                  | 3.2             | 3.2    |
| 太原   | 37°47' | 112°33' | 777.9     | 93325<br>(700)    | 91859<br>(689)  | -15         | 31.2   | 23.4                | 51                  | 2.6             | 2.1    |
| 北京   | 39°43' | 116°28' | 31.2      | 102391<br>(768)   | 100125<br>(751) | -12         | 33.2   | 26.4                | 45                  | 2.8             | 1.9    |
| 天津   | 39°08' | 117°10' | 3.3       | 102858<br>(770)   | 100525<br>(754) | -11         | 33.4   | 26.9                | 53                  | 3.1             | 2.6    |
| 石家庄  | 38°04' | 114°26' | 81.8      | 101725<br>(763)   | 99592<br>(747)  | -11         | 35.1   | 26.6                | 52                  | 1.8             | 1.5    |
| 济南   | 36°41' | 116°59' | 51.6      | 101991<br>(765)   | 99858<br>(749)  | -10         | 34.8   | 26.7                | 54                  | 3.2             | 2.8    |
| 青岛   | 36°09' | 120°25' | 16.8      | 102525<br>(769)   | 100391<br>(753) | -9          | 29.0   | 26.0                | 64                  | 5.7             | 4.9    |

续表 2.4

| 地名 | 站位置    |         | 大气压 [Pa] (mmHg) |                              | 室外计算干球温度 [°C] |      | 夏季室外计算温度 [°C] | 冬季相对湿度 [%] | 室外平均风速 [m/s] |     |
|----|--------|---------|-----------------|------------------------------|---------------|------|---------------|------------|--------------|-----|
|    | 北 纬    | 东 经     | 冬 季             | 夏 季                          | 冬 季           | 夏 季  |               |            | 冬 季          | 夏 季 |
| 上海 | 31°10' | 121°26' | 102658<br>(770) | 100525 <sup>1</sup><br>(754) | -4            | 34.0 | 28.2          | 75         | 3.1          | 3.2 |
| 徐州 | 34°17' | 117°18' | 102258<br>(767) | 100125<br>(751)              | -8            | 34.8 | 27.4          | 64         | 2.8          | 2.9 |
| 南京 | 32°00' | 118°48' | 102525<br>(769) | 100391<br>(753)              | -6            | 35.0 | 28.3          | 73         | 2.6          | 2.6 |
| 无锡 | 31°35' | 120°19' | 102791<br>(771) | 100391<br>(753)              | -4            | 33.4 | 28.4          | 74         | 4.1          | 3.8 |
| 合肥 | 31°51' | 117°17' | 102391<br>(768) | 100258<br>(752)              | -7            | 35.0 | 28.2          | 75         | 2.5          | 2.6 |
| 杭州 | 30°19' | 120°12' | 102525<br>(769) | 100258<br>(752)              | -4            | 35.7 | 28.5          | 77         | 2.3          | 2.2 |
| 宁波 | 29°55' | 121°35' | 101325<br>(760) | 99992<br>(750)               | -3            | 34.5 | 28.5          | 78         | 2.9          | 2.9 |
| 南昌 | 28°40' | 115°58' | 101358<br>(764) | 99858<br>(749)               | -3            | 35.6 | 27.9          | 74         | 3.8          | 2.7 |
| 福州 | 26°05' | 119°17' | 101325<br>(760) | 99592<br>(747)               | 4             | 35.2 | 28.0          | 74         | 2.7          | 2.9 |

续表 2.4

| 地名  | 台 站 位 置 |         | 大气压 [Pa]<br>(mmHg) |                 | 室外计算干球温度 [°C] |      | 夏季室外计<br>算湿球温度<br>[°C] | 冬季室外<br>计算相对<br>湿度 [%] | 室外平均风速<br>[m/s] |     |
|-----|---------|---------|--------------------|-----------------|---------------|------|------------------------|------------------------|-----------------|-----|
|     | 北 纬     | 东 经     | 冬 季                | 夏 季             | 冬 季           | 夏 季  |                        |                        | 冬 季             | 夏 季 |
|     |         | 海拔 [m]  |                    |                 |               |      |                        |                        |                 |     |
| 厦 门 | 24°27'  | 118°04' | 101458<br>(761)    | 99992<br>(750)  | 6             | 33.4 | 27.6                   | 73                     | 3.5             | 3.0 |
| 郑 州 | 34°43'  | 113°39' | 101325<br>(760)    | 99192<br>(744)  | -7            | 35.6 | 27.4                   | 60                     | 3.4             | 2.6 |
| 洛 阳 | 34°40'  | 112°25' | 100925<br>(757)    | 98792<br>(743)  | -7            | 35.9 | 27.5                   | 57                     | 2.5             | 2.1 |
| 武 汉 | 30°38'  | 114°04' | 102891<br>(768)    | 100125<br>(751) | -5            | 35.2 | 28.2                   | 76                     | 2.7             | 2.6 |
| 长 沙 | 28°12'  | 113°04' | 101591<br>(762)    | 99458<br>(746)  | -3            | 35.8 | 27.7                   | 81                     | 2.8             | 2.6 |
| 汕 头 | 23°24'  | 116°41' | 101658<br>(764)    | 100525<br>(754) | 6             | 32.8 | 27.7                   | 79                     | 2.9             | 2.5 |
| 广 州 | 23°06'  | 113°19' | 101325<br>(760)    | 99992<br>(750)  | 5             | 33.5 | 27.7                   | 70                     | 2.4             | 1.8 |
| 海 口 | 20°02'  | 110°21' | 101591<br>(762)    | 100259<br>(752) | 10            | 34.5 | 27.9                   | 85                     | 3.4             | 2.8 |
| 桂 林 | 25°20'  | 110°18' | 100259<br>(762)    | 98525<br>(739)  | 0             | 33.9 | 27.0                   | 71                     | 3.2             | 1.6 |

续表 2.4

| 地名  | 台站位置   |         | 大气压 [Pa]<br>[mmHg] |                | 室外计算干球温度 [°C] |      | 夏季室外计算相对湿度 [%] | 室外平均风速 [m/s] |     |
|-----|--------|---------|--------------------|----------------|---------------|------|----------------|--------------|-----|
|     | 北 纬    | 东 经     | 冬 季                | 夏 季            | 冬 季           | 夏 季  |                | 冬 季          | 夏 季 |
| 南 宁 | 22°49' | 108°21' | 101191<br>(759)    | 99592<br>(747) | 5             | 34.2 | 75             | 1.8          | 1.6 |
| 成 都 | 30°40' | 104°04' | 96392<br>(723)     | 94792<br>(711) | 1             | 31.6 | 80             | 0.9          | 1.1 |
| 重 庆 | 29°31' | 106°29' | 97992<br>(735)     | 96392<br>(723) | 2             | 36.5 | 82             | 1.2          | 1.4 |
| 贵 阳 | 26°35' | 103°43' | 89726<br>(673)     | 88792<br>(669) | -3            | 30.0 | 78             | 2.2          | 2.0 |
| 昆 明 | 25°01' | 102°41' | 81193<br>(609)     | 80793<br>(606) | 1             | 25.8 | 68             | 2.5          | 1.8 |
| 拉 萨 | 29°42' | 91°08'  | 66061<br>(488)     | 65194<br>(489) | -8            | 22.8 | 28             | 2.2          | 1.8 |

球取奥多设计 诚信搜索蓝领星球

## 第 3 章 空调热湿负荷和送风量的确定

### 3.1 计算空调热湿负荷的目的

空调的目的是要保持室内的一定温度和湿度。对建筑物来说,客观上总存在一些干扰因素使室内温度和湿度发生变化,而空调系统的作用就是平衡这些干扰因素的作用,使室内温湿度维持为要求的数值。在空调技术中将上述的干扰因素对室内的影响称为负荷。以温度为例,当室外空气温度高于室内空气温度时,就有热量从室外通过墙、屋顶和窗传入室内。如不采取措施消除这一热量,室内空气温度就会升高。当室外温度低于室内时,热量从室内传向室外。如果不向室内补充相应的热量,室内温度会降低。空调房间在太阳照射下也会产生负荷,因为太阳辐射热会通过玻璃窗直接进入室内,或者太阳照射了墙和屋顶表面,使之温度提高,从而间接地增加了传入室内的热量。以上两种是室外因素造成的负荷。室内也有造成负荷的因素,如人体、灯光、室内用电设备等都会向室内散发热量。使空调房间有热量增减的负荷称为热负荷。如果由各种因素造成的热负荷总量使房间得到热量(例如在夏季),则称它为“供冷负荷”,或简称“冷负荷”\*,这时需要由空调系统向室内提供冷量来平衡房间的得热量。如果综合各种因素的作用使空调房间失去热量(例如在冬季),则这一负荷称为“供热负荷”,这时空调系统应向室内提供热量以补偿热损失。向室内空气散发的湿量称为湿负荷,如果不将湿负荷去除,就不能使室内空气保持有规定的湿度值。人体发湿、室内湿表面发湿等都属湿

---

\* 根据现代空调的概念,房间的得热量与房间的冷负荷是两个不同的概念,房间的冷负荷是由房间的得热量引起的,二者在数值上不一定相等。

负荷。空调系统的作用是在排除室内热负荷的同时排除室内湿负荷，使室内同时维持要求的温度和湿度。

由以上分析可知热湿负荷的大小对空调系统的规模有决定性的影响。所以为了设计一个空调系统，第一步要做的工作是计算其热湿负荷。另外，确定空调系统的送风量或送风参数，也必须依据空调房间的热湿负荷值，因为空调是通过向室内送入一定量的空气（称送风）来带走室内的热湿负荷而实现其功能的。如果送风量一定，则负荷值决定了送风参数；如果送风参数一定，则负荷值决定了送风量。

空调负荷还可以分为房间负荷和系统负荷两种。发生在空调房间内的负荷称为房间负荷。还有一些发生在空调房间以外的负荷，如新风状态与室内空气状态不同所引起的新风负荷、风管传热造成的负荷等，它们不直接作用于室内，但是最终也是要由空调系统来承担。将以上两种负荷合在一起就称为系统负荷。应当根据系统负荷来选择空气处理设备。

### 3.2 空调房间送风量和送风状态参数的确定

以  $\Sigma Q$  表示一空调房间的冷负荷， $\Sigma W$  表示其湿负荷， $G$  表示向该房间的送风量， $h_0$  和  $x_0$  为送风空气的焓和含湿量。通常采用的空调方法是在向室内送风的同时，自室内排除相应量的空气。后者称为排风。当人们重复利用排风，使之成为送风的一部分时，这一部分排风称为回风。显然，排风或回风具有的参数即为室内参数，焓为  $h_n$ ，含湿量为  $x_n$ 。由于送风和排风的参数不同，使在送排风过程中从室内带走了热量和湿量。根据热湿平衡的原理，如果室内空气状态维持不变，上述送排风所带走的热量和湿量必等于室内的热负荷和湿负荷。于是可以写出下面的式子：

$$G(h_n - h_0) = \Sigma Q \quad (3.1)$$

$$G(x_n - x_0) = \Sigma W \quad (3.2)$$



$$\text{或} \quad G = \frac{\Sigma Q}{h_n - h_0} \quad (3.3)$$

$$G = \frac{\Sigma W}{x_n - x_0} \quad (3.4)$$

如果给定了送风状态参数  $h_n$  和  $x_n$ , 就可用(3.3)式或(3.4)式计算出送风量  $G$ 。这里要讨论的问题是怎样正确地选定  $h_n$  和  $x_n$ , 使(3.3)式或(3.4)式算得的是同一送风量。这时, 该两式等号右方的部分是相等的, 即

$$\frac{\Sigma Q}{h_n - h_0} = \frac{\Sigma W}{x_n - x_0} \quad (3.5)$$

上式又可写成:

$$\frac{h_n - h_0}{x_n - x_0} = \frac{\Sigma Q}{\Sigma W} \quad (3.6)$$

(3.6) 式中等号左方的项目表示一根通过室内空气状态点  $n$  和送风状态点  $o$  的直线, 这也就是在第1章中所提到的热湿比线  $\epsilon$ 。而等号右方表示热湿比值等于室内冷负荷和湿负荷的比值, 即

$$\epsilon = \frac{\Sigma Q}{\Sigma W} \quad (3.7)$$

于是, 可以按以下步骤确定送风状态点: 在焓湿图上定出室内空气状态点  $n$ 。然后, 通过  $n$  点作一条数值为  $\epsilon = \frac{\Sigma Q}{\Sigma W}$  的热湿比线(图 3.1)。在这一热湿比上的任一点都能作为送风状态点, 而且代入(3.3)式或(3.4)式, 计算必能获得相同的送风量  $G$ 。这里要注意一点, 就是热湿比线的方向要符合这样的原则:  $\Sigma Q$  是正的话(即房间得热),  $h_0$  总是小于  $h_n$ ;  $\Sigma W$  是正的话(即房间得湿),  $x_0$  总是小于  $x_n$ 。 $\Sigma Q$ (或  $\Sigma W$ )是负的话, 方向相反。

从图 3.1 和(3.3)式[或(3.4)式]可以看出, 如果选择的送风点  $o$  离  $n$  愈远的话,  $h_n - h_0$ (或  $x_n - x_0$ )将愈大, 从(3.3)式或(3.4)式可以看出, 其结果是送风量愈小(对相同的  $\Sigma Q$  和  $\Sigma W$ )。

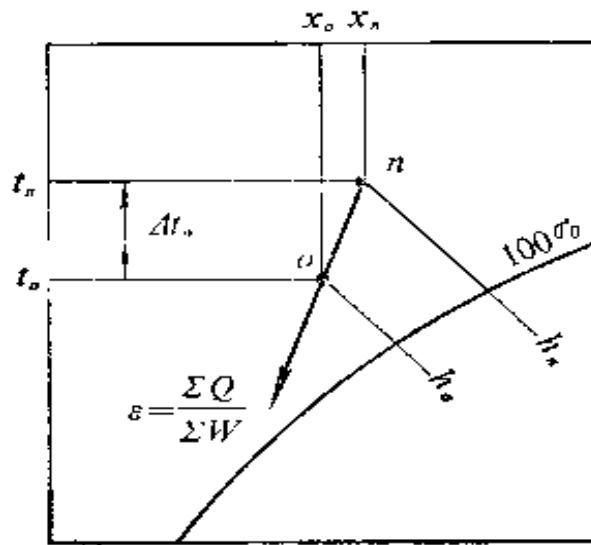


图 3.1 送风状态点的确定

对空调系统来说，当然是风量愈小愈经济。但是  $o$  点与  $n$  点的距离是有限度的。 $o$  点温度  $t_o$  过低，使送风量太小，从而有可能使室内温湿度分布不均匀。另外， $t_o$  过低（也就是送风温度过低），有时会使室内人员感到“吹冷风”而觉得不舒服。还有一点要注意的是，在一般情况下  $t_o$  不能低于室内空气露点温度，否则在送风口上会有结露现象。人们根据实践经验按不同的使用对象规定了合适的送风温差  $\Delta t_o = t_n - t_o$ （见表 3.1 和表 3.2）。根据选定的送风温差就可确定送风温度  $t_o = t_n - \Delta t_o$ 。在焓湿图上  $t_o$  线与  $\varepsilon$  线的交点就是送风状态点  $o$ 。

按室温允许波动值确定送风温差

表 3.1

| 室温允许波动值 [°C]                   | 送风温差 $\Delta t_o$ [°C] |
|--------------------------------|------------------------|
| $\pm 0.1 \sim \pm 0.2$         | 2~3                    |
| $\pm 0.5$                      | 3~5                    |
| $\pm 1.0$                      | 6~10                   |
| $\pm \Delta t, \Delta t > 1.0$ | $\leq 15$              |

按送风口形式确定送风温差

表 3.2

| 送风口安装高度[m] | 3    | 4    | 5    | 6    |
|------------|------|------|------|------|
| 散流器：圆形     | 16.5 | 17.5 | 18.0 | 18.0 |
| 方形         | 14.5 | 15.5 | 16.0 | 16.0 |
| 普通侧送风口：风量  |      |      |      |      |
| 大          | 8.5  | 10.0 | 12.0 | 14.0 |
| 小          | 11.0 | 13.0 | 15.0 | 16.5 |

【例 3.1】某房间要求维持  $t_n = 26.0 \pm 1.0 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $RH_n = 60\%$ , 经计算有冷负荷  $\Sigma Q = 10 [\text{kW}]$  ( $8600 [\text{kcal/h}]$ ) 和湿负荷  $\Sigma W = 0.00272 [\text{kg/s}]$  ( $9.8 [\text{kg/h}]$ )。试确定空调送风量。  $P = 101325 [\text{Pa}]$ 。

【解】该房间的热湿比值是

$$\varepsilon = \frac{\Sigma Q}{\Sigma W} = \frac{10}{0.00272} = 3670 [\text{kJ/kg}]$$

$$(\text{或 } \varepsilon = \frac{8600}{9.8} = 878 [\text{kcal/kg}])$$

在焓湿图上定出室内状态点  $n$  (图 3.2), 然后在右下角的半圆中找出数值为 3670  $[\text{kJ/kg}]$  ( $1194 [\text{kcal/kg}]$ ) 的热湿比线, 并平移至通过  $n$  点的位置。也可以在  $n$  点用作图法直接绘出此线, 方法如下:

任选一点, 其  $x = x_n - \Delta x$ , 如果此点在热湿比线上, 则此点的焓值  $h$  必能满足下式:

$$x_n = 0.0073$$

$$0.0096 \quad x_1 = 0.0126$$

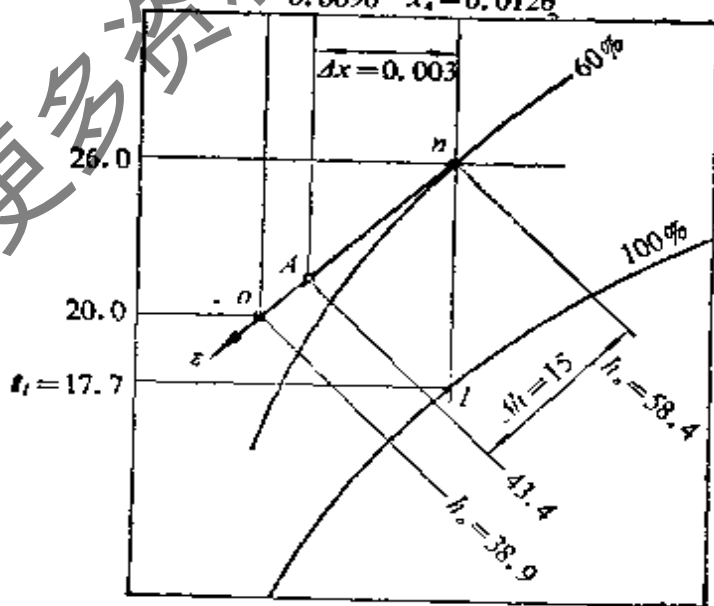


图 3.2 例 3.1 附图

$$\frac{h_n - h}{x_n - x} = \frac{\Delta h}{\Delta x} = e$$

$$\Delta h = e \Delta x$$

现任意采用  $\Delta x = 0.003 [\text{kg}/\text{kg干}]$ , 则

$$\Delta h = 3670 \times 0.003 = 11.0 [\text{kJ}/\text{kg干}]$$

该任意点的焓和湿量是:

$$h = h_n - \Delta h = 58.4 - 11 = 47.4 [\text{kJ}/\text{kg干}]$$

$$x = x_n - \Delta x = 0.0123 - 0.003 = 0.0096 [\text{kg}/\text{kg干}]$$

按上述  $h$  和  $x$ , 在图上确定  $A$  点, 连接  $n$  和  $A$  点的直线即是热湿比线(图 3.2)。参照表 3.1 选定送风温差为  $\Delta t_0 = 6.0 [^\circ\text{C}]$ , 则送风温度应是

$$t_0 = t_n - \Delta t_0 = 26.0 - 6.0 = 20.0 [^\circ\text{C}]$$

在图上找到等温线  $t_0 = 20.0 [^\circ\text{C}]$  与热湿比线  $e$  的交点, 这就是送风点  $o$ , 该点的参数  $h_0 = 38.9 [\text{kJ}/\text{kg}]$ ,  $x_0 = 0.0073 [\text{kg}/\text{kg干}]$ 。这样, 就可以计算送风量:

$$G = \frac{\Sigma Q}{h_n - h_0} = \frac{10}{58.4 - 38.9} = 0.535 [\text{kg}/\text{s}]$$

$$(2400 [\text{kg}/\text{h}])$$

或

$$G = \frac{\Sigma W}{x_n - x_0} = \frac{0.00212}{0.0123 - 0.0073} = 0.513 [\text{kg}/\text{s}]$$

两种方法算得的风量是相等的, 表明作图无误。

室内空气的露点温度从图上读得是  $t_0 = 17.7 [^\circ\text{C}]$ 。送风温度高于露点温度, 满足要求。

### 3.3 送风中的新风量

上一节介绍了确定空调送风量的方法。一般情况下送风空气由新风和回风组成(图 3.3)。由于空调系统中新风的热湿处理是非常耗能的, 所以在设计时应尽量减少新风量, 增加回风量。当

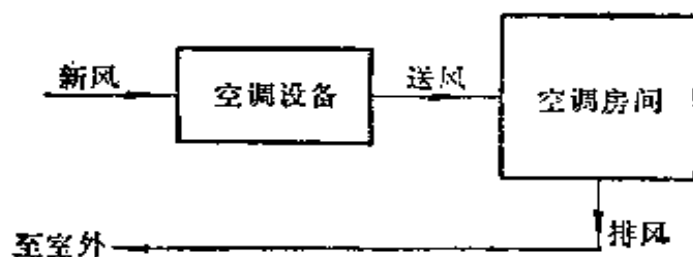


图 3.3 新风“+”回风系统

然，减少新风量是有限度的。新风量太少，会使室内空气品质不能满足卫生要求。对一般空调，可按如下原则选定新风量：

1. 对工业空调，每人所需新风量不小于  $30[\text{m}^3/\text{h}]$ 。如果室内有局部排风系统时，空调新风量不应小于局部排风量。此外，在设计空调送排风系统时应使室内维持正压。

2. 对民用空调，每人最小新风量  $([\text{m}^3/\text{h}])$  为：

|         |      |         |
|---------|------|---------|
| 影 剧 院   | 8.5  | 不 吸 烟   |
| 体 育 馆   | 8.0  | 不 吸 烟   |
| 百 货 商 店 | 8.5  | 不 吸 烟   |
| 高 级 客 房 | 30.0 | 少 量 吸 烟 |
| 餐 厅     | 20.0 | 少 量 吸 烟 |
| 办 公 室   | 25.0 | 不 吸 烟   |
| 会 议 室   | 50.0 | 大 量 吸 烟 |
| 一 般 病 房 | 17.0 | 不 吸 烟   |

对某些特殊空调，则要根据室内的生产工艺要求来确定新风量。比如说，某些生产或工作过程会发散出有害气体、细菌等污染物，这时为防止交叉污染，空调送风中不能含有回风，其结果是新风量必须等于送风量，尽管这时每人所得新风量已超出通常的标准。这时的空调过程示意图如图 3.4 所示。

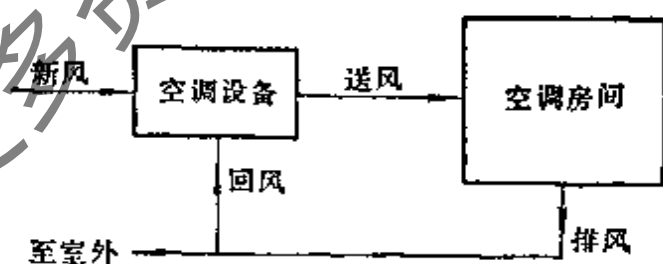


图 3.4 全新风系统

以上讨论的是最少新风量。在设计工作中和运行管理工作中为了节能，实际新风量也不希望超出这一最少新风量。当然有一例外情况，即一年中总有一段时间，那时新风量愈多愈节能，甚至可以用全部新风作为送风空气。在第 5 章和第 9 章中将对这一问题

作详细介绍。

## 3.4 室内热源造成的负荷

### 3.4.1 人体散热和散湿

人体散热和散湿有时会形成主要的空调负荷,会场、剧院和电影院的观众厅都属这一情况。人体向室内空气同时散发热量和湿量。散发的热量有显热和潜热两种形式。前者通过对流、传导或辐射等方式散发出来,它们能直接影响空气的温度,所以称为显热。所谓潜热是指人体散发的湿量——水蒸汽所包含的汽化潜热。

人体的散热和散湿量的大小取决于下列诸因素:性别、年龄、活动程度和环境温度。具体数值可以按表 3.3 选用。

**【例 3.2】** 某一会场能容纳 400 人,现用空调系统维持会场内空气温度为 27.0[°C],求该会场内的人体散热量和散湿量。

**【解】** 现认为该会场属表 3.3 中的第 2 类“静坐,有轻微活动”,于是可查得每人的散热和散湿量:显热 54[W],潜热 57[W],湿  $23.6 \times 10^{-3}$ [g/s]。总量应是:

$$\text{显热:} \quad Q_{\text{显}} = 400 \times 54 = 21600[\text{W}] = 21.6[\text{kW}]$$

$$\text{潜热:} \quad Q_{\text{潜}} = 400 \times 57 = 22800[\text{W}] = 22.8[\text{kW}]$$

$$\text{散热总量} \quad Q_{\text{总}} = 21.6 + 22.8 = 44.4[\text{kW}]$$

$$\text{散湿:} \quad W = 400 \times 23.6 \times 10^{-3} = 9.44[\text{g/s}]$$

### 3.4.2 照明灯具散热

照明灯具在使用时消耗电能,这些电能最终都转化为热能散发在室内。所以只要知道照明灯具的电功率,也就知道其散发的热量。

**【例 3.3】** 房间内有 100[W] 的白炽灯 20 盏,如果它们同时使用,求其散热量。

**【解】** 这些白炽灯的总散热量为

$$Q = 20 \times 100 = 2000[\text{W}] = 2[\text{kW}]$$

对荧光灯,给出的是灯管的输入功率,实际上镇流器还消耗一些额外的能量。如果镇流器与灯管是在同一房间内,则将灯管功率乘以 1.2 即为总消耗功率。

**【例 3.4】** 房间内有 60[W] 的荧光灯 30 盏,如果它们同时使用,求其散热量。设镇流器在同一房间内。

**【解】** 这些荧光灯的总散热量是:

每个人的散热量[W]和散湿量[ $\times 10^{-3}$ g/s]

表3.3

| 活 动 程 度           | 室 温 [°C] |     |      |     |     |       |      |     |       |     |     |       |     |     |       |
|-------------------|----------|-----|------|-----|-----|-------|------|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|
|                   | 21       |     |      | 24  |     |       | 25.5 |     |       | 27  |     |       | 28  |     |       |
|                   | 显热       | 潜热  | 湿    | 显热  | 潜热  | 湿     | 显热   | 潜热  | 湿     | 显热  | 潜热  | 湿     | 显热  | 潜热  | 湿     |
| 1. 静 坐            | 72       | 25  | 10.6 | 64  | 34  | 13.9  | 53   | 40  | 16.1  | 55  | 43  | 17.8  | 49  | 49  | 20.0  |
| 2. 静坐,有轻微活动       | 76       | 35  | 11.2 | 63  | 44  | 18.1  | 59   | 51  | 21.1  | 54  | 57  | 23.8  | 50  | 61  | 24.7  |
| 3. 普通事务工作         | 78       | 47  | 18.9 | 67  | 57  | 23.3  | 59   | 65  | 26.7  | 55  | 70  | 28.6  | 50  | 74  | 30.6  |
| 4. 站立工作或坐时站立,有步行  | 79       | 59  | 24.2 | 71  | 67  | 27.5  | 61   | 78  | 31.9  | 55  | 84  | 34.4  | 50  | 88  | 36.4  |
| 5. 轻作业            | 84       | 62  | 25.0 | 74  | 77  | 29.2  | 64   | 81  | 33.3  | 58  | 88  | 35.8  | 52  | 93  | 38.3  |
| 6. 一般作业           | 100      | 111 | 45.0 | 81  | 129 | 52.8  | 67   | 143 | 53.6  | 61  | 150 | 61.7  | 54  | 157 | 64.4  |
| 7. 步行(速度1.3[m/s]) | 127      | 150 | 61.1 | 105 | 172 | 70.3  | 91   | 196 | 76.4  | 83  | 194 | 79.7  | 74  | 202 | 83.3  |
| 8. 重作业            | 167      | 234 | 95.3 | 145 | 253 | 104.7 | 131  | 267 | 109.7 | 123 | 273 | 112.5 | 124 | 276 | 113.9 |

注:表中数据已按常见情况,考虑了男性、女性和儿童的百分数。

$$Q = 30 \times 60 \times 1.2 = 2160 \text{ [W]} = 2.16 \text{ [kW]}$$

如果荧光灯在空调房间内,而镇流器放置在房间外,则在计算该空调房间的灯光散热时,不应计入镇流器散热,即不应乘系数1.2。

房间内有时有各种不同作用的照明,如局部照明、全室照明。计算时应按同时使用的总量来计算它们的散热量。

### 3.4.3 用电设备的散热

#### 1. 电热设备的散热

电热设备消耗的电能最终也变成热能散发给空气。如果没有局部通风设备将这些热量排除,那末电能转化的热量全部散发在室内,即

$$Q = N \text{ [kW]} \quad (3.8)$$

式中  $Q$ ——电热设备散热量, [kW];

$N$ ——室内同时使用的电热设备的实际使用功率的总和, [kW]。

应注意以下两点:

(1) 如果室内所有电热设备不同时使用,不能计算所有电热设备耗电量的总和,只能计算同时使用的电热设备的总和。

(2) 电热设备的安装功率通常大于实际使用功率,(3.8)式中的 $N$ 应是实际使用功率。

#### 2. 电动设备的散热量

这里的电动设备是指由电机拖动的生产工艺设备。不论这些生产工艺设备是怎样工作的,电动机消耗的电能最终也必全都变成热能。如果电动机与生产工艺设备都在空调房间内,这些热量也就全部散在房间内。计算公式同(3.8)式,式中的 $N$ 应是同时使用的电动机的实际输入功率(不是铭牌功率)的总和。

如果生产工艺设备在空调房间内,而电动机在房间外,则生产工艺设备在空调房间内的散热为

|           | 电动机效率 $\mu$ |         |         |         |       |       |
|-----------|-------------|---------|---------|---------|-------|-------|
|           | 表 3.4       |         |         |         |       |       |
| 电动机功率[kW] | 0.25~1.1    | 1.5~2.2 | 3.0~4.0 | 5.5~7.5 | 10~13 | 17~22 |
| 电动机效率     | 0.76        | 0.80    | 0.83    | 0.85    | 0.87  | 0.88  |



$$Q = \eta N \quad (3.9)$$

式中  $\eta$ ——电动机效率,其数值可按表 3.4 选用。

#### 3.4.4 其他设备散热

应由工艺部门提供。

### 3.5 室外热源造成的负荷

有两个因素会造成热量自室外传向室内:一是太阳辐射,二是室外和室内空气的温度差。太阳辐射对建筑物有两种类型作用。一种是太阳辐射通过玻璃窗直接进入室内,这时,不论冬夏,室内总是得到太阳辐射造成的热量。另一种作用是外墙或屋顶在太阳的照射下提高了外表面的温度。对夏季,由于室外空气温度高于室内,本来热量是从室外通过外墙或屋顶传向室内,现在外表面受到太阳照射,其温度提高,结果是使室外向室内的传热量增加。对冬季,由于室内空气温度高于室外,热量是从室内传向室外。现在外墙或屋顶受到太阳照射,外表面温度升高,使向室外的传热量减少。本节对太阳辐射和室内外温差造成的室内得热量进行研究。

#### 3.5.1 关于太阳的基本知识

1. 太阳是太阳系的中心,它的直径是  $1.39 \times 10^6$  [km]。太阳是一温度极高的气体球,其表面温度即达  $6000$  [K]\*左右。

2. 太阳不断地向地球辐射热量,在地球大气层上部,这一辐射强度的平均值为  $1353$  [W/m<sup>2</sup>] ( $1163$  [kcal/m<sup>2</sup>h])。太阳辐射透过大气层时,其强度会被减弱,减弱程度与大气层厚度、空气的湿度、空气的污染程度、大气中的云量等因素有关。

3. 太阳辐射能有两部分组成:光辐射与热辐射。光辐射表现为可见光,热辐射只能感觉,却不可见。

4. 在地表面,太阳辐射有两种的形式:直射辐射和散射辐射。透过大气层直接射向地面的太阳辐射称为直接辐射。直射辐射的方向取决于太阳的位置。大气层对太阳辐射的散射作用使整个天

\* [K] 是热力学温度的单位,与摄氏温度的关系是:热力学温度 = 摄氏温度 + 273.15。

空变成一个辐射源,它向地球也发出辐射热,这一辐射热没有方向性,称为散射辐射。不论直射辐射还是散射辐射都包含有光辐射和热辐射两部分。如果太阳照射在南向窗面上,而北向房间的窗即使未被照射,房间内也不会漆黑一团,这就是散射辐射作用的结果。

5. 众所周知,地球既有自转,又围绕太阳公转。现为分析问题方便,可相对地认为地球不动,太阳围绕地球旋转。这时太阳在天空中的位置可用高度角和方位角来表示。

太阳高度角  $\alpha$ ——太阳直射光线与它在水平面上的投影线间的夹角(图 3.5)。

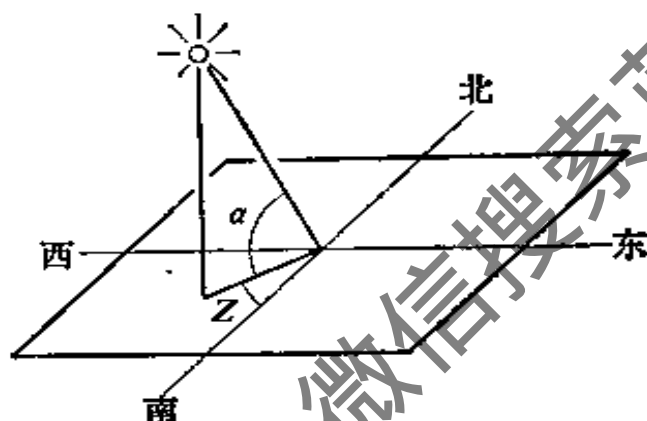


图 3.5 太阳的位置

太阳方位角  $Z$ ——太阳光线的水平投影线与正南向间的夹角。

6. 高度角和方位角随季节和时刻而变化。一天中,在中午时刻高度角  $\alpha$  最大,而同样在中午时刻,夏季的高度角要大于冬季的高度角。所以对南向墙面,冬季比夏季更容易照射到太阳。不论在什么季节,中午时刻太阳的方位角总是为零。而早上太阳升起(或黄昏太阳落下)时的方位角却随季节而变,在春分(约 3 月 21 日)或秋分(约 9 月 21 日),太阳升起或落下时的方位角正好是  $90^\circ$ ,即太阳从正东升起,在正西落下。从春分到夏至(6 月 21 日),日升或日落的位置向北移(即方位角增加),到夏至那一天日升或日落的位置处于最北端,该天白天时间最长。从夏至到秋分,日出或日落位置又南移,在秋分那一天又恢复到正东和正西日

出和日落。所以从春分到秋分这一段时间内北向外墙能有一段时  
间被太阳直射光照射。秋分以后太阳升起和落下位置继续向南移  
动,到冬至(12月21日),处于最南端,那一天白天时间最短。过了  
冬至,日出日落位置又向北移,直到春分,这一位置又在正东和正  
西。接着重复上述循环。由以上分析可知,东-南-西等朝向范围  
内的墙面,全年都能同时受直射辐射和散射辐射的作用。而东-北-  
西等朝向范围内的墙面,只有在春分到秋分期间同时有直射和散  
射照射,而从秋分到春分期间没有直射照射,只有散射照射。

太阳的直射和散射辐射强度值与地理位置有关,具体数据由  
气象部门提供

### 3.5.2 关于室外空气温度

第2章中给出了各地区的夏季室外空气计算温度,这是设计  
日的最高温度,在夏季可以认为这一最高温度出现在下午3时。  
如果要求知道设计日的其他时刻的温度,可以用下式计算:

$$t_{w,\tau} = t_{w,\max} - \alpha_{\tau} \Delta t_w \quad (3.10)$$

$\Delta t_w$  值 [°C]

表 3.5

| 地 名     | $\Delta t_w$ | 地 名   | $\Delta t_w$ | 地 名 | $\Delta t_w$ | 地 名 | $\Delta t_w$ |
|---------|--------------|-------|--------------|-----|--------------|-----|--------------|
| 齐齐哈尔    | 10.0         | 包 头   | 13.3         | 合 肥 | 7.5          | 汕 头 | 6.0          |
| 哈 尔 滨   | 9.1          | 太 原   | 11.7         | 杭 州 | 7.3          | 广 州 | 7.0          |
| 长 春     | 9.4          | 北 京   | 9.6          | 宁 波 | 7.8          | 海 口 | 8.0          |
| 沈 阳     | 8.9          | 天 津   | 7.9          | 南 昌 | 8.0          | 桂 林 | 8.9          |
| 大 连     | 6.6          | 石 家 庄 | 9.8          | 福 州 | 8.8          | 南 宁 | 8.8          |
| 乌 鲁 木 齐 | 12.0         | 济 南   | 9.1          | 厦 门 | 6.7          | 成 都 | 7.8          |
| 西 宁     | 13.0         | 青 岛   | 6.7          | 郑 州 | 9.9          | 重 庆 | 8.1          |
| 兰 州     | 12.7         | 上 海   | 7.1          | 洛 阳 | 9.6          | 贵 阳 | 8.0          |
| 银 川     | 11.5         | 徐 州   | 8.3          | 武 汉 | 8.1          | 昆 明 | 7.1          |
| 西 安     | 11.3         | 南 京   | 7.7          | 长 沙 | 8.5          | 拉 萨 | 11.8         |
| 呼 和 浩 特 | 12.5         | 无 锡   | 7.2          |     |              |     |              |

式中  $t_{w,\tau}$ ——设计日在时刻  $\tau$  的室外空气温度, [°C];  
 $t_{w,\max}$ ——室外空气计算温度, [°C], 从表 2.4 查得;  
 $\Delta t_w$ ——设计日最高气温与最低气温之差(又名日较差), 可从表 3.5 查得;  
 $\alpha_\tau$ ——与时刻  $\tau$  有关的系数, 可从表 3.6 查得。

$\alpha_\tau$  值 表 3.6

|               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\tau$        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
| $\alpha_\tau$ | 0.88 | 0.92 | 0.96 | 0.99 | 1.00 | 0.95 | 0.85 | 0.70 | 0.54 | 0.39 | 0.25 | 0.14 |
| $\alpha_\tau$ | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
| $\alpha_\tau$ | 0.07 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.10 | 0.20 | 0.33 | 0.46 | 0.57 | 0.66 | 0.74 | 0.81 |

【例 3.5】求上海的夏季空调设计日中午 12 时室外空气温度。

【解】从表 2.4 查得上海的设计日最高温度(即室外计算干球温度),  $t_{w,\max} = 34.0$  [°C], 从表 3.5 查得  $\Delta t_w = 7.1$  [°C], 从表 3.6 查得中午 12 时的  $\alpha_\tau = 0.14$ 。将有关数值代入(3.10)式, 算得该时刻的室外空气温度应是:

$$t_{w,12} = 34.0 - 0.14 \times 7.1 = 33.01 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### 3.5.3 通过玻璃窗进入室内的太阳辐射热

太阳光照射在玻璃表面上, 有相当一部分能直接透过玻璃进入室内, 有小部分被玻璃外表面反射到室外环境中去。太阳辐射热透过玻璃的过程中有一部分被玻璃吸收。这三部分太阳辐射热(透过、吸收和反射)与玻璃的性质和玻璃的层数有关。所以, 进入室内的太阳辐射热的多少取决于许多因素, 如玻璃外表面的太阳辐射强度、玻璃的性质和层数、遮阳设施特性等, 这使得计算过程甚为繁复。为简化计算, 将有关数据事先算好, 制成表格(表 3.7), 这使得实际运算甚为方便。该表数据适用于 3[mm] 厚的单层普通窗玻璃, 对其他情况应当乘以修正系数  $c_s$ 。  $c_s$  的数值按表 3.8 选用。如果在窗的室内侧还有遮阳设施, 则还应乘以修正系数  $c_n$ 。  $c_n$  的数值见表 3.9。

表 3.7

厚普通玻璃进入室内的太阳辐射热 [W/m<sup>2</sup>]

| 地名  | 方位 | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|     |    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 15  | 17  | 18  |
| 北 京 | 南  | 26  | 54  | 80  | 144 | 226 | 288 | 310 | 288 | 226 | 144 | 80  | 54  | 26  |
|     | 东  | 179 | 328 | 482 | 474 | 443 | 381 | 229 | 127 | 113 | 98  | 78  | 54  | 25  |
|     | 北  | 373 | 530 | 586 | 543 | 415 | 288 | 123 | 121 | 113 | 98  | 78  | 54  | 26  |
|     | 东  | 341 | 426 | 401 | 293 | 162 | 121 | 123 | 121 | 113 | 98  | 78  | 54  | 26  |
|     | 北  | 91  | 73  | 78  | 98  | 113 | 121 | 123 | 121 | 113 | 98  | 78  | 54  | 91  |
|     | 西  | 28  | 54  | 78  | 98  | 113 | 121 | 123 | 121 | 162 | 293 | 401 | 73  | 341 |
| 天 津 | 南  | 26  | 54  | 78  | 98  | 113 | 121 | 123 | 233 | 415 | 543 | 586 | 426 | 373 |
|     | 东  | 26  | 54  | 78  | 98  | 113 | 121 | 123 | 381 | 448 | 474 | 482 | 328 | 179 |
|     | 北  | 26  | 54  | 78  | 98  | 113 | 121 | 123 | 819 | 737 | 605 | 436 | 246 | 61  |
|     | 东  | 81  | 246 | 436 | 605 | 737 | 819 | 846 | 819 | 737 | 605 | 436 | 246 | 61  |
|     | 北  | 19  | 41  | 62  | 117 | 194 | 253 | 275 | 253 | 194 | 117 | 62  | 41  | 19  |
|     | 西  | 182 | 325 | 420 | 453 | 420 | 330 | 193 | 100 | 88  | 77  | 61  | 41  | 19  |
| 西 水 | 南  | 391 | 539 | 581 | 533 | 393 | 209 | 99  | 97  | 88  | 77  | 61  | 41  | 19  |
|     | 东  | 357 | 430 | 395 | 219 | 142 | 97  | 99  | 97  | 88  | 77  | 61  | 41  | 19  |
|     | 北  | 91  | 63  | 61  | 77  | 88  | 97  | 99  | 97  | 88  | 77  | 61  | 41  | 19  |
|     | 北  | 19  | 41  | 61  | 77  | 88  | 97  | 99  | 97  | 142 | 279 | 395 | 430 | 357 |
|     | 西  | 19  | 41  | 61  | 77  | 88  | 97  | 99  | 209 | 393 | 538 | 581 | 539 | 391 |
|     | 水  | 19  | 41  | 61  | 77  | 88  | 100 | 198 | 330 | 420 | 153 | 420 | 325 | 182 |
| 平   | 72 | 229 | 414 | 576 | 702 | 779 | 806 | 779 | 702 | 576 | 414 | 229 | 72  |     |

续表 3.7

| 地名    | 方位 | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|       |    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |
| 石 家 庄 | 南  | 22  | 48  | 70  | 121 | 191 | 130 | 267 | 130 | 191 | 121 | 70  | 48  | 22  |
|       | 南  | 170 | 321 | 403 | 455 | 408 | 333 | 198 | 111 | 101 | 87  | 70  | 48  | 22  |
|       | 东  | 361 | 512 | 530 | 518 | 391 | 215 | 112 | 108 | 101 | 87  | 70  | 48  | 22  |
|       | 东  | 331 | 413 | 392 | 288 | 158 | 103 | 112 | 108 | 101 | 87  | 70  | 48  | 22  |
|       | 北  | 88  | 71  | 70  | 87  | 101 | 108 | 112 | 108 | 101 | 87  | 70  | 48  | 22  |
|       | 北  | 22  | 48  | 70  | 87  | 101 | 108 | 112 | 108 | 158 | 87  | 70  | 48  | 88  |
|       | 西  | 22  | 48  | 70  | 87  | 101 | 108 | 112 | 108 | 391 | 288 | 392 | 413 | 331 |
|       | 西  | 22  | 48  | 70  | 87  | 101 | 108 | 112 | 215 | 403 | 518 | 560 | 512 | 361 |
|       | 南  | 22  | 48  | 70  | 87  | 101 | 108 | 198 | 333 | 403 | 438 | 403 | 321 | 170 |
|       | 平  | 72  | 230 | 413 | 575 | 700 | 779 | 804 | 779 | 700 | 575 | 413 | 230 | 72  |
| 太 原   | 南  | 22  | 48  | 70  | 121 | 193 | 250 | 211 | 260 | 193 | 121 | 70  | 48  | 22  |
|       | 南  | 150 | 325 | 424 | 456 | 424 | 331 | 200 | 111 | 101 | 88  | 70  | 48  | 22  |
|       | 东  | 384 | 542 | 591 | 542 | 408 | 222 | 112 | 109 | 101 | 88  | 70  | 48  | 22  |
|       | 东  | 353 | 439 | 413 | 302 | 161 | 109 | 112 | 109 | 101 | 88  | 70  | 48  | 22  |
|       | 北  | 94  | 73  | 70  | 83  | 101 | 109 | 112 | 109 | 101 | 88  | 70  | 48  | 22  |
|       | 北  | 22  | 48  | 70  | 86  | 101 | 109 | 112 | 109 | 164 | 88  | 70  | 48  | 94  |
|       | 西  | 22  | 48  | 70  | 86  | 101 | 109 | 112 | 222 | 408 | 302 | 413 | 439 | 353 |
|       | 西  | 22  | 48  | 70  | 88  | 101 | 109 | 112 | 222 | 424 | 542 | 591 | 542 | 381 |
|       | 南  | 22  | 48  | 70  | 88  | 101 | 111 | 200 | 331 | 424 | 456 | 424 | 325 | 180 |
|       | 平  | 74  | 240 | 431 | 600 | 736 | 813 | 839 | 813 | 730 | 600 | 431 | 240 | 74  |

续表 37

| 地名      | 方位 | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
|---------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|--|--|
|         |    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |  |  |  |  |
| 呼 和 浩 特 | 南  | 28  | 58  | 84  | 153 | 244 | 308 | 333 | 308 | 244 | 153 | 84  | 56  | 28  |  |  |  |  |
|         | 南  | 193 | 347 | 455 | 496 | 470 | 130 | 244 | 130 | 114 | 100 | 80  | 56  | 28  |  |  |  |  |
|         | 东  | 399 | 546 | 607 | 550 | 428 | 125 | 125 | 122 | 114 | 100 | 80  | 56  | 23  |  |  |  |  |
|         | 东  | 363 | 442 | 409 | 293 | 159 | 122 | 125 | 122 | 114 | 100 | 80  | 56  | 23  |  |  |  |  |
|         | 北  | 97  | 74  | 80  | 100 | 111 | 122 | 125 | 122 | 114 | 100 | 80  | 74  | 97  |  |  |  |  |
|         | 北  | 23  | 54  | 80  | 109 | 114 | 122 | 125 | 122 | 158 | 293 | 409 | 442 | 363 |  |  |  |  |
|         | 西  | 28  | 51  | 80  | 100 | 114 | 122 | 125 | 238 | 426 | 560 | 607 | 546 | 399 |  |  |  |  |
|         | 西  | 28  | 56  | 80  | 100 | 114 | 130 | 244 | 380 | 470 | 496 | 455 | 347 | 193 |  |  |  |  |
|         | 南  | 28  | 56  | 80  | 100 | 114 | 835 | 865 | 835 | 753 | 621 | 451 | 260 | 90  |  |  |  |  |
|         | 平  | 90  | 260 | 451 | 621 | 753 | 835 | 865 | 835 | 753 | 621 | 451 | 260 | 90  |  |  |  |  |
| 沈 阳     | 南  | 23  | 49  | 76  | 145 | 229 | 291 | 313 | 291 | 229 | 145 | 76  | 49  | 23  |  |  |  |  |
|         | 南  | 168 | 304 | 404 | 438 | 428 | 351 | 228 | 122 | 104 | 90  | 72  | 49  | 23  |  |  |  |  |
|         | 东  | 343 | 484 | 534 | 497 | 380 | 214 | 114 | 112 | 104 | 90  | 72  | 49  | 23  |  |  |  |  |
|         | 东  | 311 | 383 | 356 | 255 | 137 | 112 | 114 | 112 | 104 | 90  | 72  | 49  | 23  |  |  |  |  |
|         | 北  | 81  | 63  | 72  | 90  | 104 | 112 | 114 | 112 | 104 | 90  | 72  | 63  | 81  |  |  |  |  |
|         | 北  | 23  | 49  | 72  | 90  | 104 | 112 | 114 | 112 | 137 | 255 | 356 | 383 | 311 |  |  |  |  |
|         | 西  | 23  | 49  | 72  | 90  | 104 | 112 | 114 | 112 | 380 | 497 | 534 | 484 | 343 |  |  |  |  |
|         | 西  | 23  | 49  | 72  | 90  | 104 | 112 | 114 | 112 | 428 | 436 | 404 | 304 | 23  |  |  |  |  |
|         | 南  | 23  | 49  | 72  | 90  | 104 | 122 | 228 | 228 | 428 | 436 | 404 | 304 | 168 |  |  |  |  |
|         | 平  | 79  | 228 | 397 | 551 | 670 | 744 | 770 | 770 | 670 | 551 | 397 | 228 | 79  |  |  |  |  |

續表3.7

| 地名  | 時刻  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|--|--|--|
|     | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |  |  |  |  |  |
| 南   | 28  | 54  | 85  | 168 | 263 | 331 | 122 | 331 | 263 | 168 | 85  | 54  | 28  |  |  |  |  |  |
| 南   | 192 | 337 | 441 | 487 | 460 | 385 | 256 | 193 | 107 | 94  | 76  | 54  | 28  |  |  |  |  |  |
| 东   | 385 | 523 | 567 | 523 | 397 | 222 | 117 | 115 | 107 | 94  | 76  | 54  | 28  |  |  |  |  |  |
| 北   | 346 | 403 | 368 | 252 | 133 | 115 | 117 | 115 | 107 | 94  | 76  | 54  | 28  |  |  |  |  |  |
| 北   | 88  | 65  | 76  | 94  | 107 | 115 | 117 | 115 | 107 | 94  | 76  | 65  | 88  |  |  |  |  |  |
| 西   | 28  | 54  | 76  | 94  | 107 | 115 | 117 | 115 | 133 | 252 | 368 | 408 | 346 |  |  |  |  |  |
| 西   | 28  | 54  | 76  | 94  | 107 | 115 | 117 | 222 | 397 | 523 | 567 | 523 | 385 |  |  |  |  |  |
| 南   | 28  | 54  | 76  | 94  | 107 | 133 | 255 | 385 | 468 | 487 | 441 | 337 | 192 |  |  |  |  |  |
| 平   | 94  | 249 | 423 | 574 | 670 | 767 | 792 | 797 | 670 | 574 | 423 | 249 | 94  |  |  |  |  |  |
| 南   | 28  | 52  | 88  | 180 | 281 | 354 | 379 | 394 | 281 | 180 | 88  | 52  | 28  |  |  |  |  |  |
| 南   | 189 | 335 | 210 | 493 | 478 | 400 | 269 | 141 | 305 | 92  | 74  | 52  | 28  |  |  |  |  |  |
| 东   | 376 | 512 | 558 | 518 | 395 | 220 | 116 | 114 | 106 | 92  | 74  | 52  | 28  |  |  |  |  |  |
| 北   | 337 | 393 | 351 | 238 | 124 | 114 | 116 | 114 | 706 | 92  | 74  | 52  | 28  |  |  |  |  |  |
| 北   | 84  | 61  | 74  | 92  | 106 | 114 | 115 | 114 | 106 | 92  | 74  | 61  | 84  |  |  |  |  |  |
| 西   | 28  | 52  | 74  | 92  | 106 | 114 | 116 | 114 | 124 | 239 | 351 | 393 | 337 |  |  |  |  |  |
| 西   | 28  | 52  | 74  | 92  | 106 | 114 | 116 | 220 | 395 | 518 | 558 | 512 | 376 |  |  |  |  |  |
| 南   | 28  | 52  | 74  | 92  | 106 | 114 | 116 | 400 | 478 | 193 | 210 | 335 | 189 |  |  |  |  |  |
| 平   | 94  | 244 | 413 | 582 | 682 | 753 | 779 | 753 | 682 | 582 | 413 | 244 | 94  |  |  |  |  |  |
| 哈尔滨 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |  |



续表3.7

| 地名  | 方位  | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|--|--|--|
|     |     | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |    |  |  |  |
| 上 海 | 南   | 15  | 41  | 66  | 87  | 127 | 163 | 176 | 163 | 127 | 87  | 65  | 41  | 15  |    |  |  |  |
|     | 南   | 133 | 251 | 350 | 376 | 99  | 107 | 146 | 107 | 99  | 81  | 65  | 41  | 15  |    |  |  |  |
|     | 东   | 298 | 471 | 536 | 504 | 99  | 213 | 111 | 107 | 99  | 84  | 65  | 41  | 15  |    |  |  |  |
|     | 东   | 279 | 399 | 409 | 331 | 205 | 114 | 111 | 107 | 99  | 84  | 65  | 41  | 15  |    |  |  |  |
|     | 北   | 79  | 80  | 71  | 84  | 99  | 107 | 111 | 107 | 99  | 84  | 71  | 80  | 79  |    |  |  |  |
|     | 北   | 15  | 41  | 65  | 84  | 99  | 107 | 111 | 114 | 206 | 331 | 409 | 399 | 279 |    |  |  |  |
|     | 西   | 15  | 41  | 65  | 84  | 99  | 107 | 111 | 213 | 386 | 504 | 536 | 471 | 298 |    |  |  |  |
|     | 西   | 15  | 41  | 65  | 84  | 99  | 107 | 111 | 250 | 341 | 376 | 350 | 251 | 133 |    |  |  |  |
|     | 平   | 47  | 198 | 391 | 566 | 703 | 787 | 813 | 787 | 703 | 566 | 391 | 198 | 47  |    |  |  |  |
|     | 南 京 | 南   | 15  | 42  | 63  | 94  | 140 | 179 | 194 | 179 | 140 | 94  | 63  | 42  | 15 |  |  |  |
| 南   |     | 133 | 267 | 361 | 391 | 360 | 298 | 158 | 114 | 105 | 88  | 63  | 42  | 15  |    |  |  |  |
| 东   |     | 296 | 472 | 544 | 517 | 397 | 222 | 117 | 114 | 105 | 88  | 63  | 42  | 15  |    |  |  |  |
| 东   |     | 275 | 397 | 412 | 334 | 205 | 118 | 117 | 114 | 105 | 88  | 63  | 42  | 15  |    |  |  |  |
| 北   |     | 78  | 79  | 72  | 88  | 105 | 114 | 117 | 117 | 105 | 88  | 72  | 79  | 78  |    |  |  |  |
| 北   |     | 15  | 42  | 63  | 88  | 105 | 114 | 117 | 118 | 206 | 334 | 412 | 397 | 275 |    |  |  |  |
| 西   |     | 15  | 42  | 63  | 88  | 105 | 114 | 117 | 222 | 397 | 517 | 544 | 472 | 296 |    |  |  |  |
| 西   |     | 15  | 42  | 63  | 88  | 105 | 114 | 158 | 203 | 360 | 391 | 361 | 267 | 133 |    |  |  |  |
| 平   |     | 48  | 203 | 400 | 591 | 722 | 813 | 843 | 813 | 722 | 591 | 400 | 203 | 48  |    |  |  |  |

蝶表3.7

| 地名 | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |
| 南  | 16  | 44  | 70  | 92  | 127 | 153 | 171 | 158 | 127 | 92  | 70  | 44  | 16  |
| 南  | 121 | 245 | 332 | 357 | 326 | 242 | 146 | 114 | 105 | 91  | 70  | 44  | 16  |
| 东  | 269 | 439 | 509 | 484 | 316 | 214 | 117 | 114 | 105 | 91  | 70  | 44  | 16  |
| 北  | 252 | 376 | 395 | 323 | 211 | 122 | 117 | 114 | 105 | 91  | 70  | 44  | 16  |
| 北  | 74  | 83  | 77  | 91  | 105 | 114 | 117 | 114 | 105 | 91  | 77  | 83  | 74  |
| 西  | 16  | 44  | 70  | 81  | 105 | 114 | 117 | 122 | 211 | 328 | 395 | 376 | 352 |
| 西  | 16  | 44  | 70  | 91  | 105 | 114 | 117 | 214 | 376 | 484 | 509 | 433 | 263 |
| 南  | 16  | 44  | 70  | 91  | 105 | 114 | 146 | 242 | 326 | 357 | 332 | 245 | 121 |
| 平  | 44  | 192 | 380 | 552 | 684 | 769 | 797 | 769 | 634 | 552 | 380 | 192 | 44  |
| 南  | 15  | 42  | 68  | 94  | 140 | 180 | 197 | 180 | 140 | 94  | 68  | 42  | 15  |
| 南  | 142 | 283 | 379 | 415 | 373 | 275 | 159 | 113 | 104 | 88  | 68  | 42  | 15  |
| 东  | 320 | 504 | 577 | 542 | 414 | 229 | 116 | 113 | 104 | 88  | 68  | 42  | 15  |
| 北  | 298 | 425 | 434 | 319 | 213 | 117 | 116 | 113 | 104 | 83  | 68  | 42  | 15  |
| 北  | 83  | 83  | 72  | 88  | 101 | 113 | 115 | 113 | 104 | 88  | 72  | 83  | 83  |
| 西  | 15  | 42  | 68  | 88  | 104 | 113 | 116 | 117 | 213 | 349 | 434 | 425 | 283 |
| 西  | 15  | 42  | 68  | 88  | 104 | 113 | 116 | 228 | 414 | 542 | 577 | 574 | 320 |
| 南  | 15  | 42  | 68  | 88  | 104 | 113 | 159 | 275 | 373 | 415 | 379 | 283 | 142 |
| 平  | 49  | 210 | 418 | 606 | 753 | 848 | 879 | 848 | 753 | 606 | 418 | 210 | 49  |

续表3.7

| 地名 | 方位 | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|    |    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |
| 福州 | 南  | 14  | 43  | 71  | 92  | 102 | 132 | 141 | 132 | 112 | 92  | 71  | 43  | 14  |
|    | 南  | 112 | 239 | 320 | 341 | 290 | 117 | 130 | 117 | 108 | 92  | 71  | 43  | 14  |
|    | 东  | 253 | 444 | 523 | 500 | 388 | 221 | 121 | 117 | 108 | 92  | 71  | 43  | 14  |
|    | 北  | 245 | 390 | 425 | 367 | 253 | 145 | 121 | 117 | 108 | 92  | 71  | 43  | 14  |
|    | 北  | 73  | 94  | 91  | 93  | 108 | 121 | 121 | 117 | 108 | 93  | 91  | 94  | 73  |
|    | 北  | 14  | 43  | 71  | 92  | 108 | 121 | 121 | 145 | 253 | 367 | 425 | 390 | 245 |
|    | 西  | 14  | 43  | 71  | 92  | 108 | 121 | 121 | 221 | 389 | 500 | 523 | 444 | 253 |
|    | 西  | 14  | 43  | 71  | 92  | 108 | 121 | 121 | 211 | 299 | 341 | 320 | 239 | 112 |
|    | 南  | 14  | 43  | 71  | 92  | 108 | 121 | 121 | 211 | 299 | 341 | 320 | 239 | 112 |
|    | 平  | 36  | 186 | 385 | 539 | 710 | 800 | 831 | 800 | 710 | 539 | 385 | 186 | 36  |
| 南昌 | 南  | 13  | 35  | 63  | 84  | 113 | 142 | 153 | 142 | 113 | 84  | 63  | 35  | 13  |
|    | 南  | 134 | 267 | 354 | 376 | 332 | 107 | 133 | 107 | 98  | 83  | 63  | 267 | 13  |
|    | 东  | 309 | 496 | 567 | 531 | 403 | 220 | 111 | 107 | 98  | 83  | 63  | 496 | 13  |
|    | 北  | 291 | 427 | 444 | 366 | 233 | 122 | 111 | 107 | 98  | 83  | 63  | 427 | 13  |
|    | 北  | 83  | 88  | 76  | 83  | 93  | 107 | 111 | 111 | 98  | 83  | 76  | 88  | 83  |
|    | 北  | 13  | 38  | 63  | 83  | 98  | 107 | 111 | 122 | 233 | 268 | 444 | 427 | 291 |
|    | 西  | 13  | 38  | 63  | 83  | 98  | 107 | 111 | 111 | 403 | 531 | 576 | 496 | 309 |
|    | 西  | 13  | 38  | 63  | 83  | 98  | 107 | 111 | 220 | 332 | 376 | 354 | 267 | 131 |
|    | 西  | 13  | 38  | 63  | 83  | 98  | 107 | 111 | 235 | 332 | 376 | 354 | 267 | 131 |
|    | 水  | 41  | 198 | 404 | 593 | 740 | 832 | 863 | 863 | 740 | 593 | 404 | 198 | 41  |

续表 3.7

| 地名 | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |
| 南  | 21  | 49  | 73  | 116 | 155 | 239 | 258 | 239 | 185 | 113 | 73  | 49  | 21  |
| 南  | 169 | 311 | 409 | 443 | 423 | 321 | 195 | 115 | 107 | 92  | 73  | 49  | 21  |
| 东  | 362 | 523 | 578 | 530 | 407 | 226 | 117 | 115 | 107 | 92  | 73  | 49  | 21  |
| 北  | 333 | 423 | 412 | 310 | 175 | 115 | 117 | 115 | 107 | 92  | 73  | 49  | 21  |
| 北  | 91  | 77  | 73  | 92  | 137 | 115 | 117 | 115 | 107 | 92  | 73  | 77  | 91  |
| 西  | 21  | 49  | 73  | 92  | 137 | 115 | 117 | 115 | 175 | 310 | 412 | 428 | 333 |
| 西  | 21  | 49  | 73  | 92  | 137 | 115 | 117 | 226 | 407 | 536 | 578 | 523 | 362 |
| 南  | 21  | 49  | 73  | 92  | 137 | 115 | 195 | 321 | 413 | 443 | 409 | 311 | 169 |
| 平  | 70  | 234 | 427 | 599 | 732 | 815 | 843 | 815 | 732 | 599 | 427 | 234 | 70  |
| 南  | 17  | 44  | 69  | 104 | 153 | 203 | 220 | 203 | 153 | 104 | 69  | 44  | 17  |
| 南  | 132 | 261 | 354 | 389 | 365 | 261 | 172 | 114 | 105 | 90  | 69  | 44  | 17  |
| 东  | 230 | 424 | 511 | 485 | 375 | 214 | 117 | 114 | 105 | 90  | 69  | 44  | 17  |
| 北  | 264 | 370 | 374 | 295 | 150 | 111 | 117 | 114 | 105 | 90  | 69  | 44  | 17  |
| 北  | 74  | 72  | 79  | 90  | 105 | 114 | 117 | 114 | 105 | 90  | 70  | 72  | 74  |
| 西  | 17  | 44  | 69  | 90  | 105 | 114 | 117 | 114 | 130 | 298 | 374 | 370 | 264 |
| 西  | 17  | 44  | 69  | 90  | 105 | 114 | 117 | 214 | 376 | 485 | 511 | 444 | 256 |
| 南  | 17  | 44  | 69  | 90  | 105 | 114 | 172 | 281 | 355 | 309 | 354 | 251 | 132 |
| 平  | 54  | 200 | 383 | 518 | 679 | 762 | 733 | 762 | 679 | 518 | 383 | 200 | 54  |

续表 3.7

| 地名  | 方位  |     | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|--|--|--|
|     | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |  |  |  |  |  |
| 武 汉 | 14  | 40  | 63  | 85  | 121 | 154 | 168 | 154 | 121 | 85  | 63  | 40  | 14  |  |  |  |  |  |
|     | 129 | 257 | 343 | 368 | 333 | 105 | 140 | 105 | 97  | 83  | 63  | 40  | 14  |  |  |  |  |  |
|     | 292 | 485 | 531 | 500 | 381 | 246 | 108 | 105 | 97  | 83  | 63  | 40  | 14  |  |  |  |  |  |
|     | 273 | 595 | 407 | 332 | 207 | 118 | 108 | 105 | 97  | 83  | 63  | 40  | 14  |  |  |  |  |  |
|     | 78  | 80  | 70  | 83  | 97  | 105 | 108 | 105 | 97  | 83  | 70  | 80  | 78  |  |  |  |  |  |
|     | 14  | 40  | 63  | 83  | 97  | 105 | 108 | 113 | 207 | 332 | 407 | 395 | 273 |  |  |  |  |  |
|     | 14  | 40  | 63  | 83  | 97  | 105 | 108 | 210 | 381 | 509 | 531 | 465 | 292 |  |  |  |  |  |
|     | 14  | 40  | 63  | 83  | 97  | 105 | 108 | 242 | 333 | 368 | 343 | 257 | 129 |  |  |  |  |  |
|     | 14  | 40  | 63  | 83  | 97  | 105 | 140 | 242 | 333 | 368 | 343 | 257 | 129 |  |  |  |  |  |
|     | 43  | 193 | 385 | 560 | 697 | 783 | 813 | 783 | 697 | 560 | 385 | 193 | 43  |  |  |  |  |  |
| 长 沙 | 13  | 40  | 65  | 86  | 113 | 140 | 151 | 140 | 113 | 86  | 65  | 40  | 13  |  |  |  |  |  |
|     | 125 | 256 | 339 | 363 | 321 | 111 | 133 | 111 | 101 | 86  | 65  | 40  | 13  |  |  |  |  |  |
|     | 290 | 473 | 536 | 516 | 395 | 220 | 114 | 111 | 101 | 86  | 65  | 40  | 13  |  |  |  |  |  |
|     | 272 | 409 | 467 | 361 | 235 | 128 | 114 | 111 | 101 | 86  | 65  | 40  | 13  |  |  |  |  |  |
|     | 79  | 88  | 70  | 86  | 101 | 111 | 114 | 111 | 101 | 86  | 79  | 88  | 79  |  |  |  |  |  |
|     | 13  | 40  | 65  | 86  | 101 | 111 | 114 | 126 | 235 | 381 | 430 | 409 | 272 |  |  |  |  |  |
|     | 13  | 40  | 65  | 86  | 101 | 111 | 114 | 220 | 395 | 518 | 536 | 473 | 290 |  |  |  |  |  |
|     | 13  | 40  | 65  | 86  | 101 | 111 | 114 | 229 | 321 | 368 | 339 | 256 | 125 |  |  |  |  |  |
|     | 13  | 40  | 65  | 86  | 101 | 111 | 133 | 133 | 321 | 368 | 339 | 256 | 125 |  |  |  |  |  |

续表 3.7

| 地名  | 方位  |     | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|--|--|--|--|
|     | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |    |  |  |  |  |
| 广 州 | 南   | 44  | 74  | 98  | 114 | 125 | 132 | 125 | 114 | 98  | 74  | 44  | 13  |    |  |  |  |  |
|     | 东   | 97  | 293 | 310 | 269 | 191 | 129 | 124 | 114 | 98  | 74  | 44  | 13  |    |  |  |  |  |
|     | 东   | 224 | 495 | 481 | 378 | 222 | 128 | 124 | 114 | 98  | 74  | 44  | 13  |    |  |  |  |  |
|     | 北   | 214 | 415 | 374 | 275 | 165 | 129 | 124 | 114 | 93  | 74  | 44  | 13  |    |  |  |  |  |
|     | 北   | 68  | 102 | 105 | 114 | 124 | 128 | 124 | 114 | 105 | 102 | 99  | 66  |    |  |  |  |  |
|     | 西   | 13  | 74  | 98  | 114 | 124 | 128 | 128 | 165 | 275 | 374 | 415 | 214 |    |  |  |  |  |
|     | 西   | 13  | 44  | 74  | 98  | 114 | 123 | 123 | 222 | 378 | 461 | 495 | 224 |    |  |  |  |  |
|     | 南   | 13  | 44  | 74  | 98  | 114 | 124 | 129 | 191 | 269 | 310 | 293 | 97  |    |  |  |  |  |
|     | 平   | 30  | 174 | 370 | 552 | 692 | 781 | 810 | 781 | 692 | 552 | 370 | 174 | 30 |  |  |  |  |
|     | 南 宁 | 南   | 50  | 81  | 106 | 123 | 135 | 141 | 136 | 123 | 103 | 81  | 50  | 14 |  |  |  |  |
| 南   |     | 91  | 291 | 315 | 274 | 199 | 139 | 134 | 123 | 103 | 81  | 50  | 14  |    |  |  |  |  |
| 东   |     | 216 | 493 | 485 | 392 | 232 | 137 | 134 | 123 | 103 | 81  | 50  | 14  |    |  |  |  |  |
| 东   |     | 206 | 420 | 333 | 285 | 176 | 137 | 134 | 123 | 103 | 81  | 50  | 14  |    |  |  |  |  |
| 北   |     | 66  | 111 | 114 | 123 | 134 | 137 | 134 | 123 | 114 | 104 | 104 | 66  |    |  |  |  |  |
| 北   |     | 14  | 81  | 106 | 123 | 134 | 137 | 176 | 235 | 383 | 420 | 366 | 206 |    |  |  |  |  |
| 西   |     | 14  | 81  | 106 | 123 | 134 | 137 | 232 | 392 | 465 | 496 | 407 | 216 |    |  |  |  |  |
| 南   |     | 14  | 81  | 103 | 123 | 134 | 139 | 198 | 274 | 315 | 297 | 216 | 94  |    |  |  |  |  |
| 平   |     | 33  | 179 | 379 | 532 | 704 | 793 | 825 | 793 | 704 | 562 | 379 | 33  |    |  |  |  |  |

续表 3.1

| 地名  | 方位  | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|     |     | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |
| 成 都 | 南   | 16  | 47  | 76  | 101 | 139 | 172 | 185 | 172 | 139 | 101 | 76  | 47  | 16  |
|     | 东   | 130 | 244 | 333 | 355 | 397 | 255 | 159 | 125 | 115 | 99  | 76  | 47  | 16  |
|     | 北   | 264 | 431 | 504 | 485 | 381 | 225 | 129 | 125 | 115 | 99  | 76  | 47  | 16  |
|     | 西   | 246 | 368 | 391 | 328 | 217 | 133 | 129 | 125 | 115 | 99  | 76  | 47  | 16  |
|     | 北   | 73  | 84  | 81  | 99  | 115 | 125 | 129 | 125 | 115 | 99  | 81  | 84  | 73  |
|     | 西   | 16  | 47  | 76  | 99  | 115 | 125 | 129 | 133 | 217 | 328 | 391 | 368 | 246 |
|     | 南   | 16  | 47  | 76  | 99  | 115 | 125 | 129 | 225 | 381 | 485 | 504 | 431 | 264 |
|     | 平   | 16  | 47  | 76  | 99  | 115 | 125 | 125 | 255 | 337 | 365 | 333 | 244 | 130 |
|     | 水   | 45  | 194 | 384 | 553 | 693 | 779 | 808 | 779 | 693 | 538 | 384 | 194 | 45  |
|     | 贵 阳 | 南   | 17  | 58  | 91  | 120 | 145 | 172 | 178 | 172 | 145 | 120 | 91  | 56  |
| 东   |     | 101 | 229 | 321 | 354 | 323 | 245 | 168 | 152 | 140 | 120 | 91  | 58  | 17  |
| 北   |     | 226 | 412 | 505 | 499 | 403 | 250 | 156 | 152 | 140 | 120 | 91  | 56  | 17  |
| 西   |     | 213 | 362 | 413 | 372 | 272 | 174 | 156 | 152 | 140 | 120 | 91  | 56  | 17  |
| 北   |     | 68  | 100 | 108 | 120 | 140 | 152 | 156 | 174 | 272 | 372 | 108 | 100 | 68  |
| 西   |     | 17  | 56  | 91  | 120 | 140 | 152 | 155 | 250 | 403 | 490 | 413 | 362 | 213 |
| 南   |     | 17  | 56  | 91  | 120 | 140 | 152 | 156 | 245 | 323 | 354 | 505 | 412 | 226 |
| 平   |     | 17  | 56  | 91  | 120 | 140 | 152 | 168 | 245 | 323 | 354 | 321 | 229 | 101 |
| 水   |     | 41  | 195 | 399 | 588 | 735 | 828 | 861 | 828 | 735 | 588 | 399 | 195 | 41  |

续表 3.7

| 地名  | 方位 |     | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|--|--|
|     | 8  | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |     |  |  |  |  |
| 昆 明 | 南  | 50  | 78  | 100 | 117 | 134 | 141 | 134 | 117 | 100 | 78  | 50  | 16  |     |  |  |  |  |
|     | 南  | 106 | 309 | 330 | 237 | 206 | 135 | 126 | 116 | 100 | 78  | 50  | 16  |     |  |  |  |  |
|     | 东  | 242 | 508 | 488 | 381 | 225 | 129 | 125 | 116 | 100 | 78  | 50  | 16  |     |  |  |  |  |
|     | 东  | 230 | 379 | 368 | 253 | 156 | 129 | 125 | 116 | 100 | 78  | 50  | 16  |     |  |  |  |  |
|     | 北  | 72  | 100 | 104 | 116 | 125 | 129 | 125 | 125 | 116 | 104 | 101 | 100 | 72  |  |  |  |  |
|     | 北  | 16  | 50  | 100 | 116 | 125 | 129 | 129 | 156 | 263 | 368 | 419 | 379 | 230 |  |  |  |  |
| 明   | 东  | 16  | 50  | 100 | 116 | 125 | 129 | 225 | 381 | 488 | 508 | 430 | 242 |     |  |  |  |  |
|     | 西  | 16  | 50  | 100 | 116 | 125 | 129 | 206 | 287 | 330 | 309 | 232 | 106 |     |  |  |  |  |
|     | 西  | 16  | 50  | 100 | 116 | 125 | 135 | 206 | 287 | 330 | 309 | 232 | 106 |     |  |  |  |  |
|     | 南  | 16  | 50  | 100 | 116 | 125 | 135 | 206 | 287 | 330 | 309 | 232 | 106 |     |  |  |  |  |
|     | 平  | 38  | 188 | 384 | 560 | 698 | 813 | 813 | 783 | 698 | 560 | 384 | 188 | 38  |  |  |  |  |
|     |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 拉 萨 | 南  | 22  | 49  | 90  | 125 | 160 | 174 | 106 | 125 | 90  | 71  | 49  | 22  |     |  |  |  |  |
|     | 南  | 217 | 376 | 462 | 396 | 273 | 145 | 113 | 101 | 88  | 71  | 49  | 22  |     |  |  |  |  |
|     | 东  | 497 | 693 | 647 | 471 | 244 | 111 | 108 | 101 | 86  | 71  | 49  | 22  |     |  |  |  |  |
|     | 东  | 466 | 593 | 430 | 253 | 122 | 111 | 108 | 101 | 88  | 71  | 49  | 22  |     |  |  |  |  |
|     | 北  | 133 | 115 | 88  | 101 | 108 | 111 | 111 | 108 | 88  | 84  | 115 | 133 |     |  |  |  |  |
|     | 北  | 22  | 49  | 88  | 101 | 108 | 111 | 111 | 122 | 253 | 430 | 560 | 466 |     |  |  |  |  |
| 萨   | 西  | 22  | 49  | 88  | 101 | 108 | 111 | 244 | 471 | 647 | 727 | 693 | 491 |     |  |  |  |  |
|     | 西  | 22  | 49  | 88  | 101 | 108 | 111 | 273 | 396 | 482 | 458 | 376 | 217 |     |  |  |  |  |
|     | 南  | 22  | 49  | 88  | 101 | 108 | 145 | 273 | 396 | 482 | 458 | 376 | 217 |     |  |  |  |  |
|     | 平  | 89  | 272 | 711 | 865 | 959 | 991 | 959 | 865 | 711 | 509 | 272 | 89  |     |  |  |  |  |
|     |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
|     |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |



续表 3.7

| 地名  | 方位 | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|     |    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |
| 西 安 | 南  | 20  | 50  | 78  | 113 | 165 | 209 | 225 | 209 | 165 | 113 | 78  | 50  | 20  |
|     | 南  | 132 | 260 | 353 | 389 | 116 | 127 | 181 | 127 | 116 | 100 | 78  | 50  | 20  |
|     | 东  | 281 | 431 | 508 | 485 | 116 | 127 | 129 | 127 | 116 | 100 | 78  | 50  | 20  |
|     | 东  | 261 | 356 | 378 | 306 | 192 | 127 | 129 | 127 | 116 | 100 | 78  | 50  | 20  |
|     | 北  | 76  | 79  | 79  | 100 | 116 | 127 | 129 | 127 | 116 | 100 | 79  | 79  | 76  |
|     | 北  | 20  | 50  | 78  | 100 | 116 | 127 | 129 | 127 | 192 | 306 | 378 | 353 | 261 |
|     | 西  | 20  | 50  | 78  | 100 | 116 | 127 | 129 | 127 | 380 | 485 | 508 | 431 | 281 |
|     | 西  | 20  | 50  | 78  | 100 | 116 | 127 | 129 | 127 | 367 | 389 | 508 | 431 | 281 |
|     | 南  | 20  | 50  | 78  | 100 | 116 | 127 | 129 | 127 | 367 | 389 | 508 | 431 | 281 |
|     | 平  | 57  | 207 | 391 | 558 | 686 | 770 | 797 | 797 | 686 | 558 | 391 | 207 | 57  |
| 兰 州 | 南  | 20  | 45  | 69  | 111 | 174 | 227 | 246 | 227 | 174 | 111 | 69  | 45  | 20  |
|     | 南  | 171 | 313 | 408 | 439 | 401 | 109 | 186 | 109 | 401 | 87  | 408 | 45  | 20  |
|     | 东  | 372 | 532 | 586 | 539 | 401 | 109 | 113 | 109 | 401 | 87  | 586 | 45  | 20  |
|     | 东  | 342 | 436 | 418 | 314 | 107 | 109 | 113 | 109 | 107 | 87  | 418 | 45  | 20  |
|     | 北  | 92  | 76  | 69  | 87  | 101 | 109 | 113 | 109 | 101 | 87  | 69  | 45  | 20  |
|     | 北  | 20  | 45  | 69  | 87  | 101 | 109 | 113 | 109 | 175 | 314 | 418 | 45  | 20  |
|     | 西  | 20  | 45  | 69  | 87  | 101 | 109 | 113 | 109 | 407 | 539 | 586 | 436 | 20  |
|     | 西  | 20  | 45  | 69  | 87  | 101 | 109 | 113 | 109 | 407 | 539 | 586 | 436 | 20  |
|     | 南  | 20  | 45  | 69  | 87  | 101 | 109 | 113 | 109 | 408 | 439 | 408 | 45  | 20  |
|     | 平  | 66  | 230 | 426 | 599 | 732 | 816 | 844 | 844 | 732 | 599 | 426 | 230 | 66  |

续表 3.7

| 地名  | 时 刻  |  |  |   |   |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----|--|--|--|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|
|     | 6  | 7  | 8  | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16   | 17   | 18   |  |  |  |  |  |
| 西 宁 | 24<br>205<br>442<br>407<br>109<br>24<br>24<br>24<br>81 | 51<br>357<br>606<br>484<br>84<br>51<br>51<br>51<br>262 | 73<br>454<br>646<br>453<br>73<br>73<br>73<br>73<br>466 | 119<br>479<br>583<br>333<br>91<br>91<br>91<br>91<br>645 | 138<br>438<br>434<br>179<br>104<br>104<br>104<br>104<br>779 | 244<br>334<br>232<br>111<br>111<br>111<br>111<br>111<br>865 | 265<br>197<br>114<br>114<br>111<br>114<br>114<br>197<br>893 | 244<br>112<br>111<br>111<br>111<br>111<br>232<br>334<br>865 | 188<br>104<br>104<br>104<br>104<br>179<br>434<br>438<br>779 | 118<br>91<br>91<br>91<br>91<br>333<br>583<br>479<br>645 | 73<br>73<br>73<br>73<br>73<br>458<br>646<br>454<br>466 | 51<br>51<br>51<br>51<br>84<br>494<br>606<br>357<br>262 | 24<br>24<br>24<br>24<br>109<br>407<br>442<br>205<br>81 |  |  |  |  |  |
| 银 川 | 22<br>193<br>412<br>377<br>99<br>22<br>22<br>22<br>79  | 48<br>345<br>572<br>462<br>74<br>48<br>48<br>48<br>251 | 72<br>448<br>621<br>430<br>71<br>71<br>71<br>71<br>451 | 129<br>484<br>569<br>310<br>91<br>91<br>91<br>91<br>625 | 209<br>449<br>427<br>165<br>104<br>104<br>104<br>104<br>763 | 271<br>354<br>232<br>113<br>113<br>113<br>113<br>115<br>543 | 293<br>214<br>115<br>115<br>115<br>115<br>115<br>214<br>878 | 271<br>115<br>113<br>113<br>113<br>113<br>232<br>354<br>848 | 209<br>104<br>104<br>104<br>104<br>185<br>421<br>419<br>763 | 129<br>91<br>91<br>91<br>91<br>310<br>569<br>484<br>625 | 72<br>71<br>71<br>71<br>71<br>430<br>621<br>448<br>451 | 48<br>48<br>48<br>48<br>74<br>462<br>572<br>345<br>251 | 22<br>22<br>22<br>22<br>399<br>377<br>412<br>193<br>79 |  |  |  |  |  |

续表 3.7

| 地名 | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |
| 南  | 26  | 48  | 78  | 167 | 268 | 342 | 368 | 342 | 268 | 167 | 78  | 48  | 25  |
| 南  | 218 | 374 | 482 | 523 | 494 | 402 | 257 | 123 | 95  | 84  | 68  | 48  | 26  |
| 东  | 448 | 589 | 624 | 564 | 419 | 221 | 105 | 102 | 95  | 84  | 68  | 48  | 25  |
| 北  | 403 | 456 | 396 | 261 | 124 | 102 | 105 | 102 | 95  | 84  | 68  | 48  | 26  |
| 北  | 98  | 61  | 68  | 84  | 95  | 102 | 105 | 102 | 95  | 84  | 68  | 61  | 98  |
| 西  | 26  | 48  | 68  | 84  | 95  | 102 | 105 | 102 | 124 | 261 | 396 | 456 | 403 |
| 西  | 26  | 48  | 68  | 84  | 96  | 102 | 105 | 221 | 419 | 564 | 624 | 589 | 448 |
| 南  | 26  | 48  | 68  | 84  | 95  | 123 | 267 | 402 | 494 | 523 | 482 | 374 | 218 |
| 平  | 98  | 263 | 446 | 605 | 730 | 806 | 833 | 808 | 730 | 605 | 416 | 263 | 98  |
| 南  | 13  | 44  | 72  | 95  | 112 | 124 | 130 | 124 | 112 | 95  | 72  | 44  | 13  |
| 南  | 108 | 237 | 316 | 333 | 285 | 197 | 128 | 121 | 112 | 95  | 72  | 44  | 13  |
| 东  | 255 | 454 | 540 | 517 | 401 | 229 | 125 | 121 | 112 | 95  | 72  | 44  | 13  |
| 东  | 242 | 403 | 450 | 397 | 286 | 155 | 125 | 121 | 112 | 95  | 72  | 44  | 13  |
| 北  | 73  | 104 | 104 | 102 | 112 | 121 | 125 | 121 | 112 | 102 | 104 | 104 | 73  |
| 北  | 13  | 44  | 72  | 95  | 112 | 121 | 125 | 165 | 286 | 397 | 450 | 403 | 242 |
| 西  | 13  | 44  | 72  | 95  | 112 | 121 | 125 | 229 | 401 | 517 | 540 | 454 | 255 |
| 西  | 13  | 44  | 72  | 95  | 112 | 121 | 125 | 197 | 285 | 333 | 316 | 237 | 108 |
| 水  | 31  | 123 | 393 | 587 | 737 | 831 | 863 | 831 | 737 | 587 | 393 | 183 | 31  |

续表 3.7

| 地名  | 方位 | 时 刻 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|     |    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |     |     |
| 桂 林 | 南  | 14  | 45  | 74  | 98  | 116 | 134 | 142 | 134 | 142 | 134 | 116 | 98  | 74  | 45  | 14  |
|     | 南  | 107 | 235 | 318 | 336 | 297 | 211 | 135 | 211 | 135 | 124 | 114 | 98  | 74  | 45  | 14  |
|     | 东  | 250 | 439 | 523 | 501 | 392 | 223 | 128 | 124 | 128 | 124 | 114 | 98  | 74  | 45  | 14  |
|     | 东  | 237 | 388 | 428 | 374 | 265 | 155 | 128 | 124 | 128 | 124 | 114 | 98  | 74  | 45  | 14  |
|     | 北  | 72  | 98  | 79  | 100 | 114 | 124 | 128 | 128 | 124 | 124 | 114 | 100 | 97  | 98  | 72  |
|     | 北  | 14  | 45  | 74  | 98  | 114 | 124 | 128 | 128 | 155 | 155 | 265 | 374 | 428 | 388 | 237 |
|     | 西  | 14  | 45  | 74  | 98  | 114 | 124 | 128 | 128 | 228 | 228 | 392 | 501 | 523 | 439 | 250 |
|     | 西  | 14  | 45  | 74  | 98  | 114 | 124 | 135 | 135 | 211 | 211 | 297 | 338 | 318 | 235 | 107 |
|     | 南  | 30  | 186 | 389 | 574 | 717 | 598 | 339 | 339 | 803 | 803 | 717 | 574 | 389 | 186 | 30  |
|     | 平  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 宜 庆 | 南  | 14  | 40  | 65  | 86  | 118 | 151 | 162 | 151 | 162 | 151 | 118 | 86  | 65  | 40  | 14  |
|     | 南  | 128 | 256 | 342 | 367 | 328 | 239 | 139 | 111 | 139 | 111 | 101 | 86  | 65  | 40  | 14  |
|     | 东  | 292 | 469 | 536 | 506 | 389 | 218 | 114 | 114 | 114 | 114 | 101 | 86  | 65  | 40  | 14  |
|     | 东  | 274 | 401 | 418 | 344 | 221 | 122 | 114 | 111 | 111 | 111 | 101 | 86  | 65  | 40  | 14  |
|     | 北  | 78  | 84  | 74  | 86  | 101 | 111 | 111 | 111 | 111 | 111 | 101 | 86  | 74  | 84  | 78  |
|     | 北  | 14  | 40  | 65  | 86  | 101 | 111 | 114 | 114 | 122 | 122 | 211 | 344 | 418 | 401 | 14  |
|     | 西  | 14  | 40  | 65  | 86  | 101 | 111 | 114 | 114 | 216 | 216 | 389 | 506 | 536 | 469 | 292 |
|     | 西  | 14  | 40  | 65  | 86  | 101 | 111 | 114 | 114 | 239 | 239 | 328 | 469 | 342 | 256 | 128 |
|     | 南  | 14  | 40  | 65  | 86  | 101 | 111 | 139 | 139 | 239 | 239 | 328 | 469 | 342 | 256 | 128 |
|     | 平  | 41  | 193 | 390 | 570 | 709 | 798 | 328 | 328 | 798 | 798 | 709 | 570 | 390 | 193 | 41  |

单位换算:  $1[W/m^2] = 0.8598[kcal/hm^2]$   
 $1[kcal/hm^2] = 1.163[W/m^2]$

c<sub>s</sub>值

表 3.8

| 玻 璃 类 型         | c <sub>s</sub> |
|-----------------|----------------|
| 单层 5[mm] 厚普通玻璃  | 0.93           |
| 单层 6[mm] 厚普通玻璃  | 0.89           |
| 双层 3[mm] 厚普通玻璃  | 0.86           |
| 双层 5[mm] 厚普通玻璃  | 0.78           |
| 双层 6[mm] 厚普通玻璃  | 0.74           |
| 单层 3[mm] 厚浅蓝色玻璃 | 0.96           |
| 单层 5[mm] 厚浅蓝色玻璃 | 0.88           |
| 单层 6[mm] 厚浅蓝色玻璃 | 0.83           |
| 单层 3[mm] 厚茶色玻璃  | 0.84           |
| 单层 6[mm] 厚茶色玻璃  | 0.71           |

c<sub>n</sub>值

表 3.9

| 内 遮 阳 类 型  | 颜 色   | c <sub>n</sub> |
|------------|-------|----------------|
| 白布帘        | 浅 色   | 0.50           |
| 浅蓝布帘       | 中 间 色 | 0.60           |
| 深黄、紫红、深绿布帘 | 深 色   | 0.65           |
| 活动百叶帘      | 中 间 色 | 0.60           |

【例 3.6】 求在北京地区对夏季设计条件上午 10 时通过面积为 2[m<sup>2</sup>] 的单层玻璃窗进入室内的太阳辐射热。玻璃厚度是 5[mm]。设：① 该窗为南向；② 该窗为东向；③ 该窗为东向，且有活动百叶帘作为内遮阳设施。

【解】 从表 3.7 查得对北京地区在夏季设计条件下上午 10 时通过玻璃进入室内的太阳辐射热为

|    |                         |
|----|-------------------------|
| 南向 | 226 [W/m <sup>2</sup> ] |
| 东向 | 415 [W/m <sup>2</sup> ] |

1. 表 3.7 查得的数据仅适用于 3[mm] 厚的普通窗玻璃。现玻璃厚度是 5[mm]，应乘以 c<sub>s</sub> 值。从表 3.8 查得 c<sub>s</sub> = 0.93。故通过南向玻璃窗进入室内的太阳辐射热是：

$$Q = 226 \times 2 \times 0.93 = 420 \text{ [W]}$$

2. 通过东向窗进入室内的热量是:

$$Q = 415 \times 2 \times 0.93 = 772 \text{ [W]}$$

3. 从表 3.9 查得活动百叶帘的  $c_n = 0.60$ , 则当东向窗内用它来遮阳时, 上午 10 时进入室内的热量是

$$Q = 415 \times 2 \times 0.93 \times 0.6 = 483 \text{ [W]}$$

从上例可以看出东向窗(事实上也包括西向窗)造成的太阳辐射得热远大于南向窗, 仔细分析表 3.7 中的数据也能看出这一现象。所以应当尽可能避免空调房间处于朝东或朝西的方向。在万不得已这样做时, 东向(或西向)窗内一定要设遮阳措施, 这样可以大幅度地降低进入室内的太阳辐射热。

根据现代理论, 房间本身对进入室内的热量有一定的调节作用, 使得室内空气得到的热量不等于进入室内的热量。从名词上区分, 进入室内的热量称为“得热量”, 室内空气得到的热量称为“冷负荷”。对直接进入室内的太阳辐射热来说, 可作以下的近似估算:

对没有内遮阳的玻璃窗

$$\text{最大冷负荷} = (0.6 \sim 0.7) \times \text{最大得热量}$$

对有内遮阳的玻璃窗

$$\text{最大冷负荷} = (0.8 \sim 0.85) \times \text{最大得热量}$$

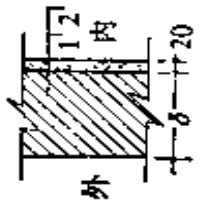
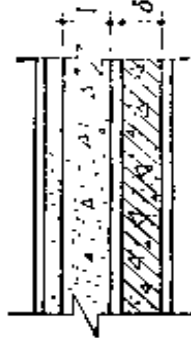
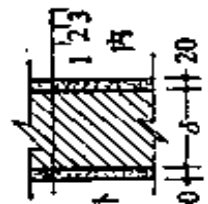
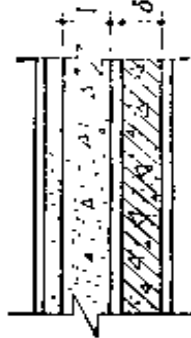
对设有内遮阳的玻璃窗, 最大冷负荷出现时间比最大得热量出现时间推迟约一小时。例如, 对东向窗, 最大得热量出现在上午 8 时, 而它造成的室内最大冷负荷大约出现在上午 9 时。

### 3.5.4 通过外墙和屋顶从室外传进室内的热量

在自然界热量总是从高温处传向低温处。当室外空气温度高于室内空气温度时, 热量就从室外通过外墙或屋顶传入室内。这一传热量的大小除了与室内外空气温度差成比例外, 还与外墙或屋顶的构造情况(包括厚度、材料性质、内外表面空气流动强弱等)有关。后者包含了许多影响因素, 我们可以用一个综合性的指标——传热系数( $K$ )——来表明它对传热过程的影响。在本章附录中对  $K$  的含义作进一步的阐述。表 3.10 列出了若干种构造在稳

表 3.10

几种构造的传热系数 K

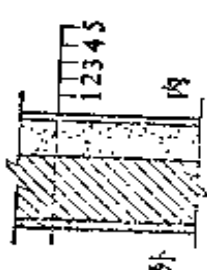
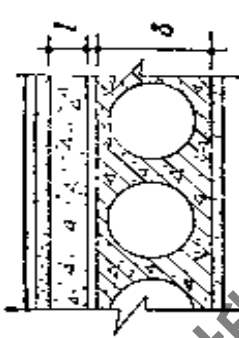
| 类别     | 构造   | 壁厚 $\delta$<br>[mm] | 保温层 |              | 传热系数<br>[W/m <sup>2</sup> ·°C] | 类别  | 构造   | 壁厚 $\delta$<br>[mm] | 保温层     |   | 传热系数<br>[W/m <sup>2</sup> ·°C]                               |  |
|--------|--|---------------------|-----|--------------|--------------------------------|-----|--|---------------------|---------|---|--|--|
|        |  |                     | 材料  | 厚度 l<br>[mm] |                                |     |  |                     | 材料      | 厚度 l<br>[mm]                                      |  |  |
| 外墙 (1) |  <p>外 内</p> <p>1. 砖墙<br/>2. 白灰粉刷</p>              | 240                 |     |              | 2.05                           | 屋 面 |  <p>1. 砾砂外表层5[mm]<br/>2. 卷材防水层<br/>3. 水泥砂浆找平层<br/>4. 保温层<br/>5. 隔汽层<br/>6. 水泥砂浆找平层<br/>7. 预制钢筋混凝土屋面板<br/>8. 内粉刷</p> | 95                  | 水泥膨胀珍珠岩 | 25<br>50<br>75<br>120<br>125<br>150<br>175<br>200 | 1.86<br>1.33<br>1.04<br>0.85<br>0.72<br>0.62<br>0.55<br>0.49 |  |
|        |  | 370                 |     |              | 1.55                           |     |  |                     |         |   |  |  |
|        |  | 490                 |     |              | 1.25                           |     |  |                     |         |   |  |  |
| 外墙 (2) |  <p>外 内</p> <p>1. 水泥砂浆<br/>2. 砖墙<br/>3. 白灰粉刷</p> | 240                 |     |              | 1.97                           | (1) |  <p>1. 砾砂外表层5[mm]<br/>2. 卷材防水层<br/>3. 水泥砂浆找平层<br/>4. 保温层<br/>5. 隔汽层<br/>6. 水泥砂浆找平层<br/>7. 预制钢筋混凝土屋面板<br/>8. 内粉刷</p> | 95                  | 卵石膨胀珍珠岩 | 25<br>50<br>75<br>100<br>125<br>150<br>175<br>200 | 1.59<br>1.07<br>0.80<br>0.64<br>0.53<br>0.47<br>0.41<br>0.36 |  |
|        |  | 370                 |     |              | 1.50                           |     |  |                     |         |   |  |  |
|        |  | 490                 |     |              | 1.22                           |     |  |                     |         |   |  |  |

续表 3.10

| 类别     | 构造  | 壁厚 $\delta$<br>[mm] | 保温层 |                     | 传热系数 $K$<br>[W/m <sup>2</sup> ·°C] | 类别 | 构造 | 壁厚 $\delta$<br>[mm] | 保温层 |                     | 传热系数<br>[W/m <sup>2</sup> ·°C] |     |       |      |      |
|--------|---|---------------------|-----|---------------------|------------------------------------|----|----|---------------------|-----|---------------------|--------------------------------|-----|-------|------|------|
|        |   |                     | 材料  | 厚度 $\delta$<br>[mm] |                                    |    |    |                     | 材料  | 厚度 $\delta$<br>[mm] |                                |     |       |      |      |
| 外墙 (3) | <p>外 20 1 23 4 5 内<br/>25</p> <p>1. 水泥砂浆<br/>2. 砖墙<br/>3. 油毡<br/>4. 空气层<br/>5. 夹板</p> | 370                 |     |                     | 1.16                               | 屋面 |    | 35                  |     |                     | 1.78                           |     |       |      |      |
|        |   |                     |     |                     | 0.99                               |    |    |                     |     |                     | 25                             | 沥青  | 25    | 1.24 |      |
|        |   |                     |     |                     |                                    |    |    |                     |     |                     | 50                             | 蛭石  | 75    | 0.97 |      |
|        |   |                     |     |                     |                                    |    |    |                     |     |                     | 100                            | 石板  | 100   | 0.87 |      |
|        |   |                     |     |                     |                                    |    |    |                     |     |                     | 125                            |     | 125   | 0.66 |      |
| 外墙 (4) |   | 490                 |     |                     | 0.93                               | 屋面 |    | 120                 |     |                     | 1.64                           |     |       |      |      |
|        |   |                     |     |                     |                                    |    |    |                     |     |                     |                                | 25  | 水泥    | 25   | 1.21 |
|        |   |                     |     |                     |                                    |    |    |                     |     |                     |                                | 140 | 膨胀珍珠岩 | 75   | 0.97 |
|        |   |                     |     |                     |                                    |    |    |                     |     |                     |                                | 110 |       | 100  | 0.79 |
|        |   |                     |     |                     |                                    |    |    |                     |     |                     |                                | 80  |       | 125  | 0.67 |
|        | 60  |                     | 119 | 0.59                |                                    |    |    |                     |     |                     |                                |     |       |      |      |
|        | 50  |                     | 175 | 0.52                |                                    |    |    |                     |     |                     |                                |     |       |      |      |
|        | 40  |                     | 200 | 0.48                |                                    |    |    |                     |     |                     |                                |     |       |      |      |



续表 3.10

| 类别     | 构造   | 壁厚 $\delta$<br>[mm] | 保温层     |                | 传热系数<br>[W/<br>m <sup>2</sup> ·°C] | 类别     | 构造  | 壁厚 $\delta$<br>[mm] | 保温层     |                | 传热系数<br>[W/<br>m <sup>2</sup> ·°C] |     |      |
|--------|--|---------------------|---------|----------------|------------------------------------|--------|---|---------------------|---------|----------------|------------------------------------|-----|------|
|        |  |                     | 材料      | 厚度 $l$<br>[mm] |                                    |        |   |                     | 材料      | 厚度 $l$<br>[mm] |                                    |     |      |
| 外<br>墙 |  <p>20 123 45 20<br/>外 内</p> <p>1. 水泥砂浆抹灰、喷浆<br/>2. 岩棉<br/>3. 防潮层 (用于炎热潮湿地区)<br/>4. 保温层<br/>5. 水泥砂浆抹灰或加油漆</p> | 370                 | 水泥膨胀珍珠岩 | 120            | 0.57                               | 屋<br>面 |  <p>1. 外表层5[mm]的厚白色小石子<br/>2. 毡贴防水层<br/>3. 找平层10[mm]水泥砂浆<br/>4. 保温层<br/>5. 隔汽层<br/>6. 水泥砂浆找平层<br/>7. 预制钢筋混凝土板<br/>8. 内粉刷</p> | 150                 | 沥青膨胀珍珠岩 | 25             | 1.42                               |     |      |
|        |  |                     |         | 50             | 0.99                               |        |   |                     |         | 75             | 0.76                               | 100 | 0.62 |
| (4)    |  | 370                 | 水泥膨胀珍珠岩 | 120            | 0.57                               |        |   | 150                 | 沥青蛭石板   | 25             | 1.57                               |     |      |
|        |  |                     |         | 50             | 1.14                               |        |   |                     |         | 75             | 0.90                               |     |      |
|        |  |                     |         | 100            | 0.74                               |        |   |                     |         | 125            | 0.63                               |     |      |
|        |  |                     |         | 150            | 0.55                               |        |   |                     |         | 175            | 0.49                               | 200 | 0.43 |

续表 3.10

| 类别  | 构造  | 壁厚 $\delta$<br>[mm] | 保温层     |                | 传热系数<br>[W/m <sup>2</sup> ·°C] | 类别            | 构造 | 壁厚 $\delta$<br>[mm] | 保温层     |                | 传热系数<br>[W/m <sup>2</sup> ·°C] |
|-----|-----|---------------------|---------|----------------|--------------------------------|---------------|----|---------------------|---------|----------------|--------------------------------|
|     |     |                     | 材料      | 厚度 $l$<br>[mm] |                                |               |    |                     | 材料      | 厚度 $l$<br>[mm] |                                |
| 外 墙 | (4) | 370                 | 沥青膨胀珍珠岩 | 100            | 0.56                           | 属<br>面<br>(2) |    | 150                 | 水泥膨胀珍珠岩 | 25             | 1.58                           |
|     |     |                     |         | 70             | 0.69                           |               |    |                     | 25      | 1.17           |                                |
|     |     |                     |         | 50             | 0.80                           |               |    |                     | 50      | 0.98           |                                |
|     |     |                     |         | 40             | 0.87                           |               |    |                     | 100     | 0.58           |                                |
|     |     |                     |         |                |                                |               |    |                     | 150     | 0.47           |                                |
| 外 墙 | (4) | 370                 | 沥青膨胀珍珠岩 | 100            | 0.56                           | 属<br>面<br>(2) |    | 150                 | 水泥膨胀珍珠岩 | 25             | 1.38                           |
|     |     |                     |         | 70             | 0.69                           |               |    |                     | 50      | 0.97           |                                |
|     |     |                     |         | 50             | 0.80                           |               |    |                     | 100     | 0.60           |                                |
|     |     |                     |         | 40             | 0.87                           |               |    |                     | 150     | 0.44           |                                |
|     |     |                     |         |                |                                |               |    |                     | 200     | 0.35           |                                |
| 外 墙 | (4) | 370                 | 沥青膨胀珍珠岩 | 100            | 0.56                           | 属<br>面<br>(2) |    | 150                 | 水泥膨胀珍珠岩 | 25             | 1.52                           |
|     |     |                     |         | 70             | 0.69                           |               |    |                     | 50      | 1.12           |                                |
|     |     |                     |         | 50             | 0.80                           |               |    |                     | 100     | 0.73           |                                |
|     |     |                     |         | 40             | 0.87                           |               |    |                     | 150     | 0.53           |                                |
|     |     |                     |         |                |                                |               |    |                     | 200     | 0.43           |                                |

定传热条件(即室内空气和室外空气温度都不变)下的传热系数 $K$ 值。对表中没有的构造可以用附录中的方法计算 $K$ 值。

当已知结构物的 $K$ 值时,对稳定传热可以用下式计算通过该结构物室内外的传热量:

$$Q = KF(t_w - t_n) \quad (3.11)$$

式中  $t_w$ ——室外空气温度, [°C];

$t_n$ ——室内空气温度, [°C];

$K$ ——结构物(外墙或屋顶)的传热系数, [W/m<sup>2</sup>°C];

$F$ ——该结构物的传热面积, [m<sup>2</sup>];

$Q$ ——通过该结构物自室外传入室内的热量, [W]。

在实际应用中是不能用(3.11)式计算的, 因为该式只能用于 $t_w$ 和 $t_n$ 都不变的条件。 $t_n$ 是室内要求的温度, 通过空调系统的调节作用, 是可以做到这一点的。但是要使 $t_w$ 不变, 事实上是不可能的, 这是由于:

1. 室外空气温度逐时逐刻都有变化。对设计日, 它是按(3.10)式的规律变化。对非设计日(即平时的运行季节), 这一变化更是没有固定的规律。

2. 前面已提到过, 太阳照射在墙面或屋面上, 对室内外的传热有甚大的影响, 而太阳照射的强度不但逐时逐刻有变化, 而且在同一时刻对不同朝向的墙面也不同。

以上两点表明室外环境条件的变化十分复杂, 再加上墙体和屋顶自身的蓄热或放热作用, 使得这一传热的计算变得相当繁琐。

为了简化实用计算, 事先考虑了上述诸复杂因素, 通过计算机作了详细的计算, 然后用一个当量室外温度——冷负荷计算温度 $t_{lf}$ ——来概括所有的室外因素(包括太阳辐射)的作用。只要知道了 $t_{lf}$ , 就可以用类似(3.10)式的形式来计算外墙或屋顶造成的室内冷负荷:

$$Q = KF(t_{lf} - t_n) \quad (3.12)$$

式中  $Q$ ——在太阳辐射和室外空气综合作用下通过外墙或屋顶造成的室内冷负荷, [W];

外墙(中等热容)冷负荷计算温度  $t_{e,r}$  [°C]

表 3.11

| 时 间 \ 朝 向 | 南    | 西南   | 西    | 西 北  | 北    | 东 北  | 东    | 东 南  |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0         | 36.1 | 38.2 | 38.5 | 36.0 | 33.1 | 35.2 | 38.5 | 38.1 |
| 1         | 36.2 | 38.5 | 38.9 | 36.3 | 33.2 | 36.1 | 38.4 | 38.1 |
| 2         | 36.2 | 38.6 | 39.1 | 36.5 | 33.2 | 36.0 | 38.2 | 37.9 |
| 3         | 36.1 | 38.6 | 39.2 | 36.5 | 33.2 | 35.8 | 38.0 | 37.7 |
| 4         | 35.9 | 38.4 | 39.1 | 36.5 | 33.1 | 35.6 | 37.6 | 37.4 |
| 5         | 35.6 | 38.2 | 38.9 | 36.3 | 33.0 | 35.3 | 37.3 | 37.0 |
| 6         | 35.3 | 37.9 | 38.6 | 36.1 | 32.8 | 35.0 | 36.9 | 36.6 |
| 7         | 35.0 | 37.5 | 38.2 | 35.8 | 32.6 | 34.7 | 36.4 | 36.2 |
| 8         | 34.6 | 37.1 | 37.8 | 35.4 | 32.3 | 34.3 | 36.0 | 35.8 |
| 9         | 34.2 | 36.6 | 37.3 | 35.1 | 32.1 | 33.9 | 35.5 | 35.3 |
| 10        | 33.9 | 36.1 | 36.8 | 34.7 | 31.8 | 33.6 | 35.2 | 34.9 |
| 11        | 33.5 | 35.7 | 36.3 | 34.3 | 31.6 | 33.5 | 35.0 | 34.6 |
| 12        | 33.2 | 35.2 | 35.9 | 33.9 | 31.4 | 33.5 | 35.0 | 34.5 |
| 13        | 32.9 | 34.9 | 35.5 | 33.6 | 31.3 | 33.7 | 35.2 | 34.6 |
| 14        | 32.8 | 34.6 | 35.2 | 33.4 | 31.2 | 33.9 | 35.6 | 34.8 |
| 15        | 32.9 | 34.4 | 34.9 | 33.2 | 31.2 | 34.3 | 36.1 | 35.2 |
| 16        | 33.1 | 34.3 | 34.8 | 33.2 | 31.3 | 34.6 | 36.6 | 35.7 |
| 17        | 33.4 | 34.4 | 34.8 | 33.2 | 31.4 | 34.9 | 37.1 | 36.2 |
| 18        | 33.9 | 34.7 | 34.9 | 33.3 | 31.6 | 35.2 | 37.5 | 36.7 |
| 19        | 34.4 | 35.2 | 35.3 | 33.5 | 31.8 | 35.4 | 37.9 | 37.2 |
| 20        | 34.9 | 35.8 | 35.8 | 33.9 | 32.1 | 35.7 | 38.2 | 37.5 |
| 21        | 35.3 | 36.5 | 36.5 | 34.4 | 32.4 | 35.9 | 38.4 | 37.8 |
| 22        | 35.7 | 37.2 | 37.3 | 35.0 | 32.6 | 36.1 | 38.5 | 38.0 |
| 23        | 36.0 | 37.7 | 38.0 | 35.5 | 32.9 | 36.2 | 38.6 | 38.1 |

$F$ ——外墙或屋顶的传热面积, [m<sup>2</sup>];

$t_{if}$ ——冷负荷计算温度, [°C];

$t_n$ ——室内空气温度, [°C]。

$t_{if}$  值可从表 3.11 和表 3.12 查取。此两表的数据适用于具有中等质量和中等保温情况的结构。另外, 此两表是按北京地区的室外条件计算得到的, 对其他地区应当按表 3.13 的数据  $t_d$  对表 3.11 或 3.12 的数据进行修正。这样, (3.12) 式应改写成

$$Q = KF[(t_{if} + t_d) - t_n] \quad (3.13)$$

屋顶(中等热容)冷负荷计算温度  $t_{if}$  [°C]

表 3.12

| 时 间      | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t_{if}$ | 47.2 | 46.4 | 45.4 | 44.3 | 43.1 | 41.8 | 40.6 | 39.3 | 38.1 | 37.0 | 36.1 | 35.6 |
| 时 间      | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   |
| $t_{if}$ | 35.6 | 36.0 | 37.0 | 38.4 | 40.1 | 41.9 | 43.7 | 45.4 | 46.7 | 47.5 | 47.8 | 47.7 |

冷负荷计算温度  $t_{if}$  的修正值  $t_d$  [°C]

表 3.13

| 编 号 | 城 市     | 南    | 西南   | 西    | 西北   | 北    | 东北   | 东    | 东南   | 水平   |
|-----|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1   | 北 京     | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
| 2   | 天 津     | -0.4 | -0.3 | -0.1 | -0.1 | -0.2 | -0.3 | -0.1 | -0.3 | -0.5 |
| 3   | 石 家 庄   | 0.5  | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 1.0  | 0.9  | 0.8  | 0.6  | 0.4  |
| 4   | 太 原     | -3.3 | -3.0 | -2.7 | -2.7 | -2.8 | -2.8 | -2.7 | -3.0 | -2.8 |
| 5   | 呼 和 浩 特 | -4.3 | -4.3 | -4.4 | -4.5 | -4.6 | -4.7 | -4.4 | -4.3 | -4.2 |
| 6   | 沈 阳     | -1.4 | -1.7 | -1.9 | -1.9 | -1.6 | -2.0 | -1.9 | -1.7 | -2.7 |
| 7   | 长 春     | -2.3 | -2.7 | -3.1 | -3.3 | -3.1 | -3.4 | -3.1 | -2.7 | -3.6 |
| 8   | 哈 尔 滨   | -2.2 | -2.5 | -3.4 | -3.7 | -3.4 | -3.8 | -3.4 | -2.8 | -4.1 |
| 9   | 上 海     | -0.8 | -0.2 | 0.5  | 1.2  | 1.2  | 1.0  | 0.5  | -0.2 | 0.1  |

续表 3.13

| 编号 | 城市   | 南     | 西南    | 西     | 西北    | 北     | 东北    | 东     | 东南    | 水平   |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 10 | 南 京  | 1.0   | 1.5   | 2.1   | 2.7   | 2.7   | 2.5   | 2.1   | 1.5   | 2.0  |
| 11 | 杭 州  | 1.0   | 1.4   | 2.1   | 2.9   | 3.1   | 2.7   | 2.1   | 1.4   | 1.5  |
| 12 | 合 肥  | 1.0   | 1.7   | 2.5   | 3.0   | 2.8   | 2.8   | 2.4   | 1.7   | 2.7  |
| 13 | 福 州  | -0.8  | 0.0   | 1.1   | 2.1   | 2.2   | 1.9   | 1.1   | 0.0   | 0.7  |
| 14 | 南 昌  | 0.4   | 1.3   | 2.4   | 3.2   | 3.0   | 3.1   | 2.4   | 1.3   | 2.4  |
| 15 | 济 南  | 1.6   | 1.9   | 2.2   | 2.4   | 2.3   | 2.3   | 2.2   | 1.9   | 2.2  |
| 16 | 郑 州  | 0.8   | 0.9   | 1.3   | 1.8   | 2.1   | 1.6   | 1.3   | 0.9   | 0.7  |
| 17 | 武 汉  | 0.4   | 1.0   | 1.7   | 2.4   | 2.2   | 2.3   | 1.7   | 1.0   | 1.3  |
| 18 | 长 沙  | 0.5   | 1.3   | 2.4   | 3.2   | 3.1   | 3.0   | 2.4   | 1.3   | 2.2  |
| 19 | 广 州  | -1.9  | -1.2  | 0.0   | 1.3   | 1.7   | 1.2   | 0.0   | -1.2  | -0.5 |
| 20 | 南 宁  | -1.7  | -1.0  | 0.2   | 1.5   | 1.9   | 1.3   | 0.2   | -1.0  | -0.3 |
| 21 | 成 都  | -3.0  | -2.6  | -2.0  | -1.1  | -0.9  | -1.3  | -2.0  | -2.6  | -2.5 |
| 22 | 贵 阳  | -4.9  | -4.3  | -3.4  | -2.3  | -2.0  | -2.5  | -3.5  | -4.3  | -3.5 |
| 23 | 昆 明  | -8.5  | -7.8  | -6.7  | -5.5  | -5.2  | -5.7  | -6.7  | -7.8  | -7.2 |
| 24 | 拉 萨  | -13.5 | -11.8 | -10.2 | -10.0 | -11.0 | -10.1 | -10.2 | -11.8 | -8.9 |
| 25 | 西 安  | 0.5   | 0.5   | 0.9   | 1.5   | 1.8   | 1.4   | 0.9   | 0.5   | 0.4  |
| 26 | 兰 州  | -4.5  | -4.4  | -4.0  | -3.8  | -3.9  | -4.0  | -4.0  | -4.4  | -4.0 |
| 27 | 西 宁  | -9.6  | -8.9  | -8.4  | -8.5  | -8.9  | -8.6  | -8.4  | -8.9  | -7.9 |
| 28 | 银 川  | -3.8  | -3.5  | -3.2  | -3.3  | -3.6  | -3.4  | -3.2  | -3.5  | -2.4 |
| 29 | 乌鲁木齐 | 0.7   | 0.5   | 0.2   | -0.3  | -0.4  | -0.4  | 0.2   | 0.5   | 0.1  |
| 30 | 汕 头  | -1.9  | -0.9  | 0.5   | 1.7   | 1.8   | 1.5   | 0.5   | -0.9  | 0.4  |
| 31 | 海 口  | -1.5  | -0.6  | 1.0   | 2.4   | 2.9   | 2.3   | 1.9   | -0.6  | 1.0  |
| 32 | 桂 林  | -1.9  | -1.1  | 0.0   | 1.1   | 1.3   | 0.9   | 0.0   | -1.1  | -0.2 |
| 33 | 重 庆  | 0.4   | 1.1   | 2.0   | 2.7   | 2.8   | 2.6   | 2.0   | 1.1   | 1.7  |

**【例 3.7】** 一空调房间位于上海地区。它有一南向外墙，厚为一砖半，内表面有 20[mm] 的白灰粉刷。墙的面积是 28.0[m<sup>2</sup>]。试计算由于室外温度和太阳辐射热引起的向室内传热造成的冷负荷。室内温度要求维持为  $t_n = 24.0[^\circ\text{C}]$ 。计算时刻为设计日的下午 3 时。

**【解】** 从表 3.10 查得该外墙的传热系数  $K = 1.55[\text{W}/\text{m}^2\text{C}]$ ，从表 3.11 查得南向外墙下午 3 时的冷负荷计算温度  $t_{if} = 32.9[^\circ\text{C}]$ 。从表 3.12 查得上海地区南向墙冷负荷计算温度的修正值  $t_d = -0.8[^\circ\text{C}]$ 。将上述数据代入(3.13)式可算得要求时刻该外墙造成的负荷：

$$Q = KF[(t_{if} + t_d) - t_n] = 1.55 \times 28.0 \times [(32.9 - 0.8) - 24.0] \\ = 351.5[\text{W}]$$

### 3.6 新风负荷和制冷系统负荷

上以介绍的是空调房间内的负荷值的计算方法。将各种负荷分别计算后予以相加，即得室内负荷的总值。对制冷系统来说，其供冷能力除了要补偿室内负荷外，还要补偿空调系统的再热负荷和新风负荷。用公式表达，它们的关系是：

$$\text{制冷系统负荷} = \text{室内负荷} + \text{再热负荷} + \text{新风负荷} \quad (3.14)$$

关于再热负荷将在第 5 章作介绍。新风负荷可按下列式计算：

$$Q_w = G_w(h_w - h_n) \quad (3.15)$$

式中  $Q_w$ ——新风负荷，[kW]；

$G_w$ ——新风量，[kg/s]；

$h_n$ ——室内空气的焓，[kJ/kg干]；

$h_w$ ——室外空气的焓，[kJ/kg干]。

在 3.3 节中已介绍了确定新风量的方法。 $h_n$  和  $h_w$  是已知值。这样， $Q_w$  就不难算得。

**【例 3.8】** 一餐厅，同时在室的最多人数为 40 人。室内要求维持温度  $t_n = 26.0[^\circ\text{C}]$ ，相对湿度  $RH_n = 60\%$ 。室外空气温度  $t_w = 34.0[^\circ\text{C}]$ ，相对湿度  $RH_w = 70\%$ 。大气压为 101325[Pa]。试计算新风负荷。

**【解】** 从大气压为 101325[Pa] 的焓湿图中查得

$$h_n = 59.0[\text{kJ}/\text{kg干}]$$

$$h_w = 96.5[\text{kJ}/\text{kg干}]$$

按 3.3 节中的介绍，选用每人新风量为 20.0[m<sup>3</sup>/h]。设在常温条件下空气的密度是 1.2[kg/m<sup>3</sup>] 则以 [kg] 计的总新风量是：

$$G_w = \frac{20.0 \times 40 \times 1.2}{3600} = 0.27 [\text{kg/s}]$$

用(3.15)式计算,得到新风负荷为:

$$Q_w = 0.27(98.5 - 59.0) = 10.1 [\text{kW}]$$

### 3.7 空调负荷的概算指标

有时要求知道建筑物空调负荷的估计值(比如,要求事先估计空调的设备费用),而时间上又不允许按以上几节介绍的方法——计算,这时可根据在实际工作中积累起来的空调负荷概算指标作粗略估算。所谓空调负荷概算指标是指折算到建筑物中每一平方米空调面积所需的制冷系统或供热系统的负荷值。以下是一些有关公共建筑的参考数据:

夏季空调制冷系统负荷的概算指标:

|          |                             |
|----------|-----------------------------|
| 办公楼(全部)  | 95~115 [W/m <sup>2</sup> ]  |
| 超高层办公楼   | 105~145 [W/m <sup>2</sup> ] |
| 旅馆(全部)   | 70~95 [W/m <sup>2</sup> ]   |
| 旅馆中的餐厅   | 290~350 [W/m <sup>2</sup> ] |
| 百货商店(全部) | 210~240 [W/m <sup>2</sup> ] |
| 医院(全部)   | 105~130 [W/m <sup>2</sup> ] |
| 剧场(观众厅)  | 230~350 [W/m <sup>2</sup> ] |

冬季采暖负荷的概算指标:

|        |                             |
|--------|-----------------------------|
| 办公楼、学校 | 60~80 [W/m <sup>2</sup> ]   |
| 医院     | 65~80 [W/m <sup>2</sup> ]   |
| 旅馆     | 60~70 [W/m <sup>2</sup> ]   |
| 餐厅     | 115~140 [W/m <sup>2</sup> ] |
| 剧场     | 95~115 [W/m <sup>2</sup> ]  |

将负荷概算指标乘上建筑物内的空调或采暖面积,即得制冷系统或供热系统总负荷的估算值。

**【例 3.9】** 一旅馆餐厅面积为 400[m<sup>2</sup>],现欲增设空调系统,试估算为此将增设的制冷系统的容量。

**【解】** 从前面介绍的数据中选取冷负荷概算指标值为 300[W/m<sup>2</sup>],则制冷系统的



估算容量为:

$$\begin{aligned} & 300[\text{W}/\text{m}^2] \times 400[\text{m}^2] = 120000[\text{W}] \\ & = 120[\text{kW}] (103200[\text{kcal}/\text{h}]) \end{aligned}$$

### 附录: 传热系数的计算方法

在自然条件下热量总是从高温传向低温。对建筑物来说, 外墙和屋顶隔离了室外环境和室内环境。现将外墙和屋顶统称为围护结构。当室内外空气温度不相等时, 必然有热量从高温侧通过围护结构传向低温侧。图 3.6 表示一围护结构, 其两侧的空气温度分别是  $t_1$  和  $t_2$ 。设  $t_1 > t_2$ , 则必然有热量  $Q$  从  $t_1$  侧传向  $t_2$  侧。如果  $t_1$  和  $t_2$  以及两侧的环境条件维持不变, 传热  $Q$  也不变。这就是稳定传热。

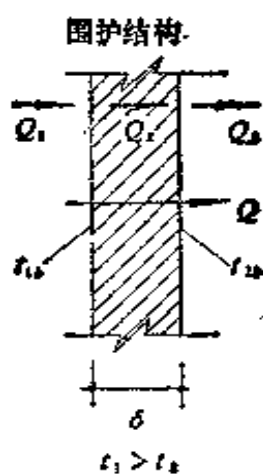


图 3.6 单层围护结构

现以  $t_{1b}$  和  $t_{2b}$  分别表示该围护结构两侧的表面温度, 则在稳定传热的条件下必定存在着以下的关系:

$$t_1 > t_{1b} > t_{2b} > t_2 \quad (1)$$

根据这一情况, 我们可以将整个传热过程分解成三个阶段:

1. 从  $t_1$  侧空气传向表面(温度为  $t_{1b}$ )的热量  $Q_1$

$Q_1$  的大小与温差  $(t_1 - t_{1b})$  成正比, 它们的关系可表达成:

$$Q_1 = \alpha_1 F (t_1 - t_{1b}) \quad (2)$$

式中  $\alpha_1$  —— 表面传热系数,  $[\text{W}/\text{m}^2\text{°C}]$

$F$  —— 传热面积,  $[\text{m}^2]$ 。

表面传热系数包括对流传热和辐射传热两部分的作用, 具体数值与该表面的周围环境条件有关。

2. 从一侧表面(温度为  $t_{1b}$ )传向另一侧表面(温度为  $t_{2b}$ )的热量  $Q_2$

这是一热量传导过程。  $Q_2$  值也是与温差  $(t_{1b} - t_{2b})$  成比例, 并可用下式描绘其关系:

$$Q_2 = \frac{\lambda}{\delta} F(t_{1b} - t_{2b}) \quad (3)$$

式中  $\lambda$ ——组成该围护结构的材料的导热系数, [W/m°C]。  $\lambda$  值可从表 3.14 中查得;

$\delta$ ——围护结构的厚度, [m]。

3. 从温度为  $t_{2b}$  的表面传向  $t_2$  侧空气的热量  $Q_3$ ,

这一传热量可以用与(2)式相同的方式表达, 只是用  $\alpha_2$  来替代  $\alpha_1$ :

$$Q_3 = \alpha_2 F(t_{2b} - t_2) \quad (4)$$

在稳定传热的条件下, 必定是

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q \quad (5)$$

于是将(2)、(3)和(4)式中的  $Q_1$ 、 $Q_2$  和  $Q_3$  都用  $Q$  表示:

$$\begin{cases} Q = \alpha_1 F(t_1 - t_{1b}) & (6) \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q = \frac{\lambda}{\delta} F(t_{1b} - t_{2b}) & (7) \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q = \alpha_2 F(t_{2b} - t_2) & (8) \end{cases}$$

(6)、(7)和(8)三式又可改写成

$$\begin{cases} t_1 - t_{1b} = \frac{Q}{\alpha_1 F} & (9) \end{cases}$$

$$\begin{cases} t_{1b} - t_{2b} = \frac{Q}{\frac{\lambda}{\delta} F} & (10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} t_{2b} - t_2 = \frac{Q}{\alpha_2 F} & (11) \end{cases}$$

将(9)、(10)和(11)三式相加, 得

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{F} \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (12)$$

或

$$Q = \frac{F(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (13)$$

令

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (14)$$

则

$$Q = KF(t_1 - t_2) \quad (15)$$

(15)式中的  $K$  称为传热系数,其单位是  $[W/m^2\text{°C}]$ 。

对夏季,室外温度( $t_w$ )高于室内温度( $t_n$ ),那末(15)式可改写成:

$$Q = KF(t_w - t_n) \quad (16)$$

热量是从室外传向室内。

对冬季,室内温度高于室外温度,则

$$Q = KF(t_n - t_w) \quad (17)$$

热量是从室内传向室外。

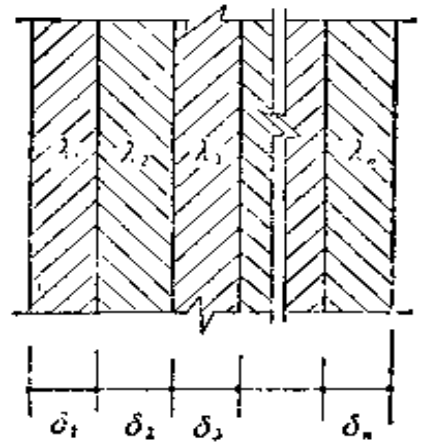
以  $\alpha_w$  表示围护结构外表面的表面传热系数,  $\alpha_n$  表示内表面的表面传热系数,则(14)式可表达成:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_n}} \quad (18)$$

以上研究的是围护结构用单一材料组成的情况。在实际工程中更多遇见的是多层由不同材料组成的围护结构。图3.7所示是由  $n$  层组成的围护结构,每一层的厚度是  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ , 每一层材料的导热系数相应是  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ 。对这种情况, (16)式或(17)式还是适用的,只是传热系数应用下式计算:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\lambda_1}{\delta_1} + \frac{\lambda_2}{\delta_2} + \frac{\lambda_3}{\delta_3} + \dots + \frac{\lambda_n}{\delta_n} + \frac{1}{\alpha_n}}$$

(19) 图 3.7 多层围护结构



在实用计算中,  $\alpha_w$  值可从表 3.15 中选用。  $\alpha_n$  值可采取为

8.7[W/m<sup>2</sup>°C]。

若干种材料的物理性质

表 3.14

| 材 料 名 称         | 密 度<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 比 热<br>[kJ/<br>[kg·°C] | 导热系数<br>[W/<br>m <sup>2</sup> ·°C] |
|-----------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------------|
| 石棉水泥板           | 1900                        | 0.84                   | 0.35                               |
|                 | 500                         | 0.84                   | 0.13                               |
|                 | 300                         | 0.84                   | 0.09                               |
| 水泥砂浆            | 1800                        | 0.84                   | 0.93                               |
| 混合砂浆(砂、灰、水泥)    | 1700                        | 0.84                   | 0.87                               |
| 实心砖,用重砂浆砌       | 1800                        | 0.88                   | 0.81                               |
| 多孔砖(105孔),用重砂浆砌 | 1300                        | 0.88                   | 0.52                               |
| 多孔砖(60孔),用重砂浆砌  | 1300                        | 0.88                   | 0.59                               |
| 多孔砖(31孔),用重砂浆砌  | 1380                        | 0.88                   | 0.84                               |
| 矿渣砖             | 1400                        | 0.75                   | 0.53                               |
| 矿渣棉             | 350                         | 0.75                   | 0.07                               |
| 松木,枞木,垂直木纹      | 550                         | 0.60                   | 0.17                               |
| 松木,枞木,顺木纹       | 550                         | 0.60                   | 0.35                               |
| 胶合板             | 600                         | 0.60                   | 0.17                               |
| 玻璃棉             | 100                         | 0.84                   | 0.05                               |
| 钢筋混凝土           | 2500                        | 0.84                   | 1.63                               |
| 硬泡沫塑料板          | 42                          | 0.84                   | 0.05                               |
| 软泡沫塑料板          | 62                          | 0.84                   | 0.05                               |

$\alpha_w$  值[W/m<sup>2</sup>°C]

表 3.15

| 室外平均风速[m/s] | 1.0  | 1.5  | 2.0  | 2.5  | 3.0  | 3.5  | 4.0  |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\alpha_w$  | 14.0 | 17.4 | 19.8 | 22.1 | 24.4 | 25.6 | 27.9 |

注：各城市的冬夏室外平均风速可在表 2.4 中查得。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

## 第4章 空调设备

在空气调节系统中,用于对空气进行热、湿处理和净化处理以满足空调房间送风要求的设备,称为空调设备。

### 4.1 空气的热、湿处理设备

在空气调节工程中,用作对空气进行热、湿处理的设备,依其作用不同,常用的有以下一些设备:

1. 加热:表面式换热器作加热用(称为加热器),传热介质为蒸汽或热水;电加热器。

2. 冷却:喷水室、表面式换热器作冷却用(称为表面式冷却器),传热介质为冷水,当冷水温度高于空气的露点温度而低于空气的干球温度时,能使空气等湿冷却。当冷水温度低于空气的露点温度时,能使空气减湿冷却。

3. 加湿:喷水室作加湿用(对空气喷循环水,能使空气等焓加湿)、蒸汽加湿器、局部加湿装置。

4. 减湿:冷冻减湿装置、使用液体吸湿剂和固体吸湿剂的减湿装置。

#### 4.1.1 空气热、湿处理的途径及使用的设备

空调工程中,欲将空气的初状态(例:室外空气的夏季状态 $w$ 和冬季状态 $w'$ )处理至送风状态点 $o$ ,可以有許多不同的处理途径和使用相应的空气处理设备,如图4.1和表4.1。

但是究竟应采用何种空气处理途径和处理设备,应根据空调工程的具体情况,结合各种空气处理设备的特点来确定。所以必须了解和掌握各种空气处理设备的特点和用途。空调工程实践中喷水室和表面式换热器的应用最广,本章主要介绍这两种空气处理设备。

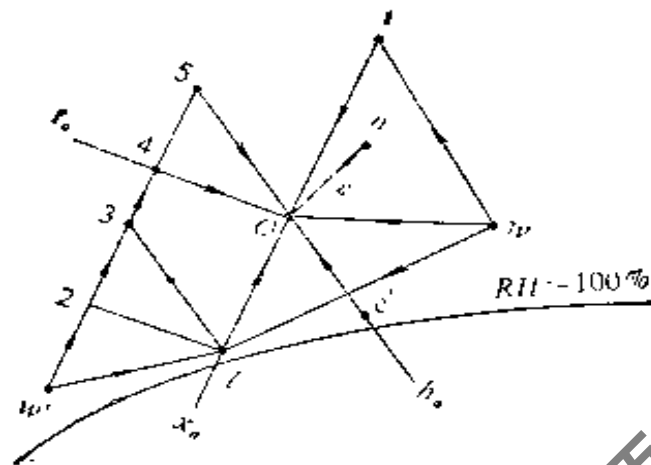


图 4.1 空气处理的各种途径

空气处理各种途径的方案及使用设备说明

表 4.1

| 季节 | 空气处理途径  | 处理方案及使用设备                                |
|----|---|--|
| 夏季 | 1. $w \rightarrow l \rightarrow o$  | 减湿冷却(喷水室喷冷水或表面冷却器)→加热(加热器)               |
|    | 2. $w \rightarrow 1 \rightarrow o$  | 等焓减湿(固体吸湿剂)→等湿冷却(表冷器)                    |
|    | 3. $w \rightarrow o$  | 减湿冷却(液体吸湿剂)                              |
| 冬季 | 1. $w' \rightarrow 2 \rightarrow l \rightarrow o$                                       | 加热(加热器)→等温加湿(蒸汽加湿器)→加热(加热器)              |
|    | 2. $w' \rightarrow 2 \rightarrow l \rightarrow o$                                       | 加热(加热器)→绝热加湿(喷水室喷循环水)→加热(加热器)            |
|    | 3. $w' \rightarrow 4 \rightarrow o$   | 加热(加热器)→等温加湿(蒸汽加湿器)                      |
|    | 4. $w' \rightarrow l \rightarrow o$   | 焓焓加湿(喷水室喷热水)→加热(加热器)                     |
|    | 5. $w' \rightarrow 5 \left\{ \begin{matrix} l \\ 5 \end{matrix} \right\} \rightarrow o$ | 加热(加热器)→一部分空气绝热加湿(喷水室喷循环水)混合→(另一部分未加湿空气) |

#### 4.1.2 喷水室

喷水室能实现多种空气处理,对空气具有一定的净化能力,在结构上易于现场加工制造,且金属耗量少,在空调工程中得以广泛

使用。但它对水质卫生要求高,占地面积大,水系统复杂,运行费用较高等缺点。

### 1. 喷水室的类型、构造

喷水室的型式通常有卧式、立式,又有单级和双级,而且还有低速(风速为  $2\sim 3$  [m/s])和高速(风速为  $3.5\sim 6.5$  [m/s])。本节主要介绍低速喷水室。其类型和构造如图 4.2。

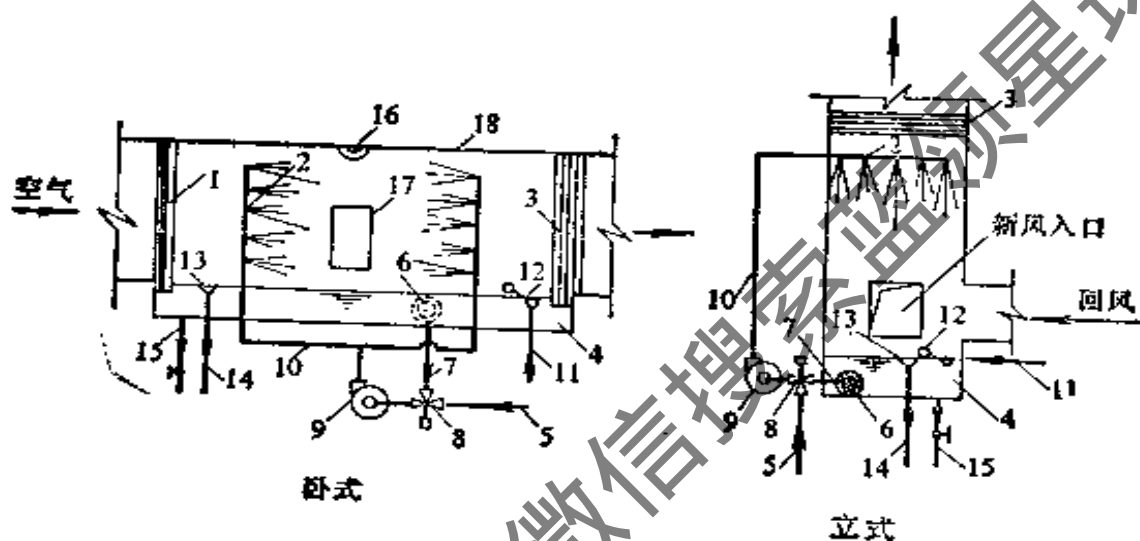


图 4.2 喷水室的构造

- 1—前挡水板; 2—喷嘴与排管; 3—后挡水板; 4—底池; 5—冷水管;  
 6—滤水器; 7—循环水管; 8—三通混合阀; 9—水泵; 10—供水管;  
 11—补水管; 12—浮球阀; 13—溢水器; 14—溢水管; 15—泄水管;  
 16—防水灯; 17—检查门; 18—外壳

喷水室主要由喷嘴、喷嘴排管、挡水板、外壳、底池和管路系统等组成。

空气经前挡水板进入喷水空间,与喷嘴喷出的水直接接触后,经后挡水板流出。水则落入底池,一部分由回水口(经溢水器)回至蒸发水箱,另一部分经滤水器流至三通调节阀与从蒸发水箱来的水混合再经喷嘴喷出。当喷水室用作加湿使用时,喷循环水,喷出的水落入底池经滤水器由水泵再喷出,由于加湿过程底池的水位将降低,则应由补水管向底池补水。

### 2. 喷水室的主要部件

#### (1) 喷嘴及喷嘴排管



喷嘴主要由喷嘴本体和顶盖组成，如图 4.3。其作用是使喷出的水雾化，增加水与空气接触的面积。

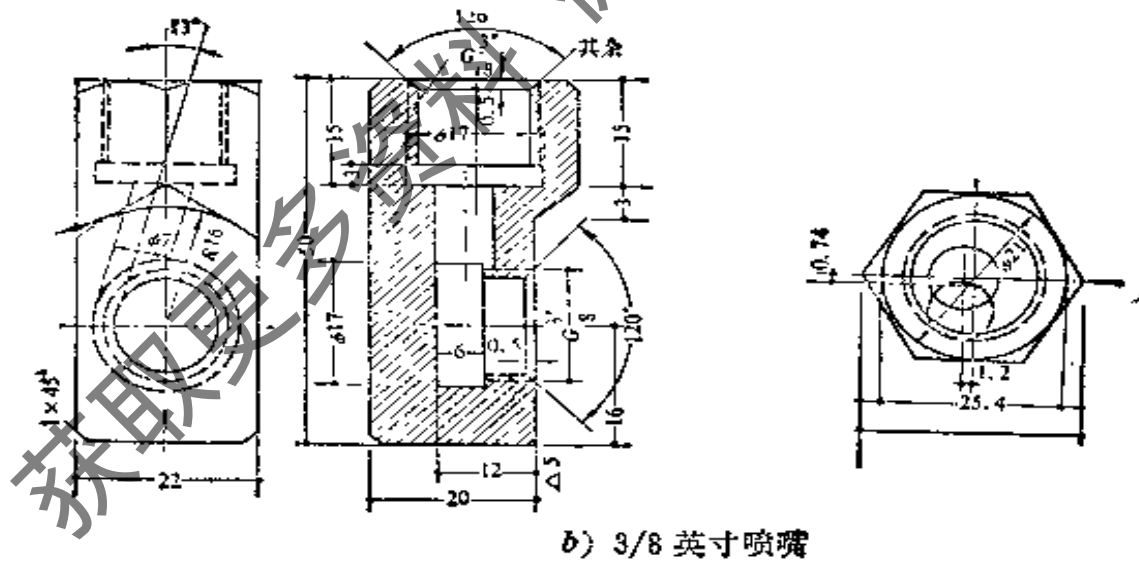
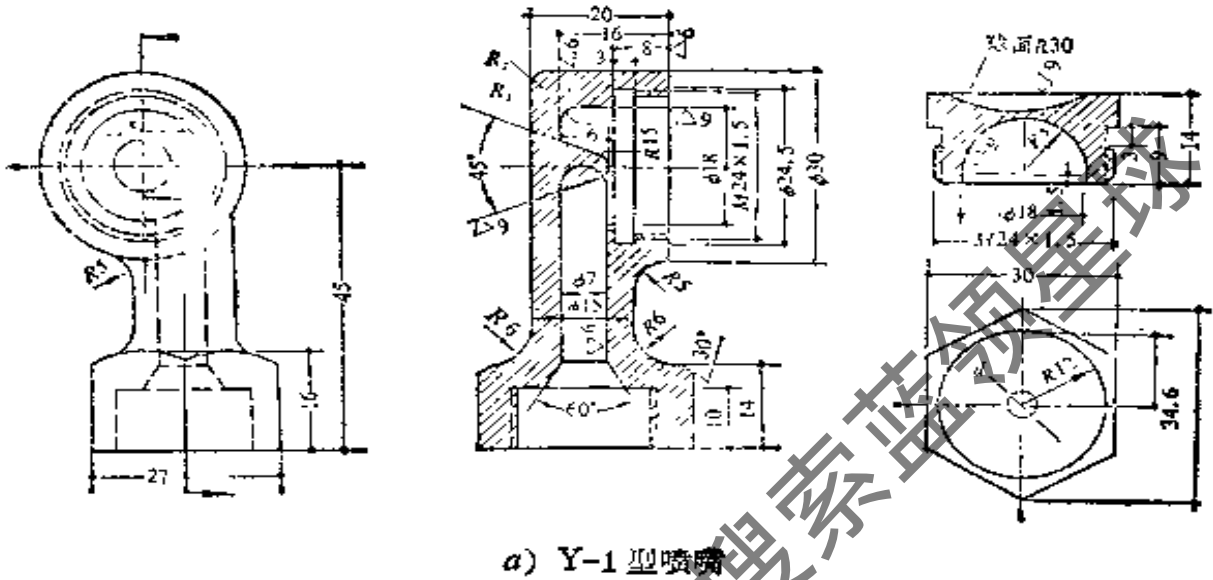


图 4.3 喷嘴

喷嘴喷出的水滴直径、水量、喷射角度和作用距离是喷水室热工性能的主要影响因素，与喷水压力和喷嘴孔径及喷嘴结构有

Y-1型喷嘴的喷水量 [kg/s] 与喷嘴孔径  $d_0$ 、喷水压力  $P$  的关系

表4.2a

| 喷水压力 $P$<br>(表压) [kPa] | 122.6 | 147.1 | 171.6 | 198.1 | 220.7 | 245.2 | 269.7 | 294.2 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.0                    | 0.034 | 0.042 | 0.045 | 0.049 | 0.051 | 0.055 | 0.058 | 0.061 |
| 2.5                    | 0.042 | 0.050 | 0.055 | 0.061 | 0.064 | 0.067 | 0.071 | 0.075 |
| 3.0                    | 0.051 | 0.063 | 0.067 | 0.072 | 0.077 | 0.081 | 0.086 | 0.089 |
| 3.5                    | 0.058 | 0.072 | 0.078 | 0.085 | 0.089 | 0.096 | 0.100 | 0.106 |
| 4.0                    | 0.066 | 0.082 | 0.090 | 0.097 | 0.104 | 0.110 | 0.118 | 0.125 |
| 4.5                    | 0.073 | 0.092 | 0.100 | 0.106 | 0.114 | 0.125 | 0.132 | 0.139 |
| 5.0                    | 0.083 | 0.101 | 0.111 | 0.119 | 0.128 | 0.138 | 0.144 | 0.153 |
| 5.5                    | 0.092 | 0.113 | 0.125 | 0.133 | 0.142 | 0.153 | 0.160 | 0.167 |

表 4.2b

3/8 英寸喷嘴的喷水量 [kg/s] 与喷嘴孔径  $d_0$ 、喷水压力  $P$  的关系

| 喷水压力 $P$<br>表压 [kPa] | 98.1  | 122.6 | 147.1 | 171.6 | 196.1 | 220.7 | 245.2 | 269.7 | 294.2 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.5                  | 0.035 | 0.038 | 0.042 | 0.044 | 0.047 | 0.050 | 0.052 | 0.054 | 0.056 |
| 3.0                  | 0.047 | 0.052 | 0.056 | 0.061 | 0.064 | 0.068 | 0.072 | 0.074 | 0.077 |
| 3.5                  | 0.058 | 0.064 | 0.069 | 0.076 | 0.079 | 0.083 | 0.088 | 0.094 | 0.099 |
| 4.0                  | 0.068 | 0.075 | 0.081 | 0.088 | 0.092 | 0.098 | 0.103 | 0.107 | 0.111 |
| 4.5                  | 0.080 | 0.088 | 0.096 | 0.102 | 0.108 | 0.114 | 0.119 | 0.124 | 0.129 |
| 5.0                  | 0.093 | 0.103 | 0.109 | 0.119 | 0.126 | 0.135 | 0.140 | 0.146 | 0.151 |
| 5.5                  | 0.106 | 0.117 | 0.126 | 0.136 | 0.144 | 0.151 | 0.158 | 0.164 | 0.169 |

关。表 4.2 列出 Y-1 型喷嘴与 3/8 英寸喷嘴的喷水量与喷嘴孔径、喷水压力的关系。表 4-3 列出了 Y-1 型喷嘴的喷出水滴直径与喷嘴孔径、喷水压力的关系。

Y-1 型喷嘴喷出水滴直径与孔径  $d_0$ 、喷水压力  $P$  的关系 表 4.3

| 喷射细度 | 水滴直径 [mm] | 喷嘴孔径 [mm] | 喷水压力 (表压) [kPa] | 适用条件 |
|------|-----------|-----------|-----------------|------|
| 细 喷  | 0.05~0.20 | 2.0~2.5   | >245.2          | 绝热加湿 |
| 中 喷  | 0.15~0.25 | 2.5~3.5   | 198.1           | 减湿冷却 |
| 粗 喷  | 0.20~0.50 | 4.0~6.0   | 49.0~147.1      | 减湿冷却 |

不同形式喷嘴的以上性能可参阅喷嘴的产品样本等有关资料。

喷嘴一般采用铜、不锈钢和尼龙、塑料等耐腐蚀和耐磨材料制作。喷嘴的排列以保证喷出的水滴能均匀地覆盖喷水室横断面为原则，一般按梅花形排列，如图 4.4。排列密度为  $13\sim 24$  [个/ $m^2$  排]。

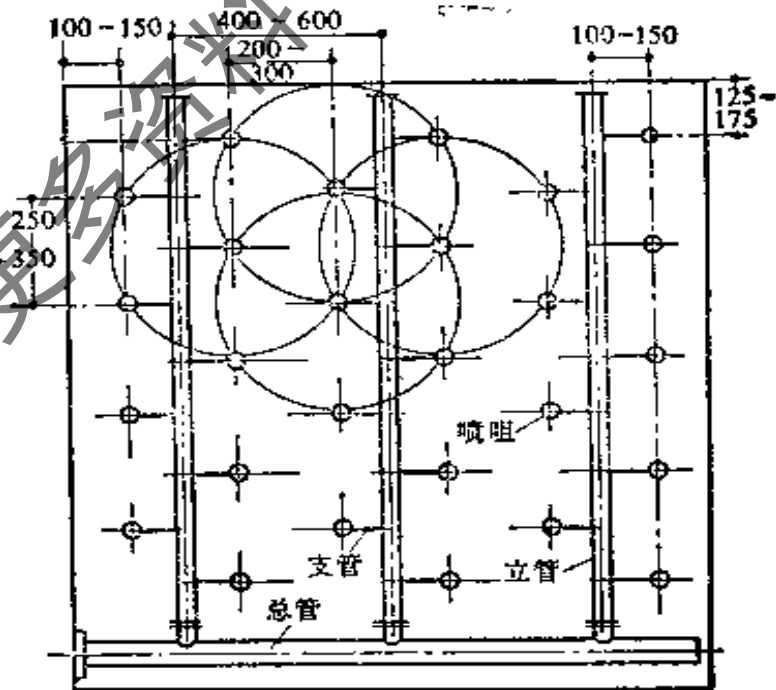


图 4.4 喷嘴在喷水室横断面上的布置

喷嘴排管一般采用上分式和下分式，喷水室断面较大时可采用中分式或环式，如图 4.5。排管的最低点应设泄水阀。

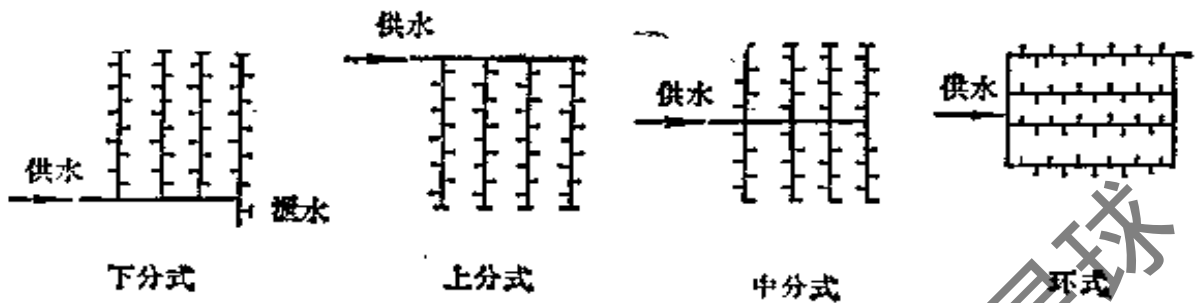


图 4.5 喷嘴排管的联接方式

## (2) 挡水板

挡水板为直立的折板或波形板组成，如图 4.6。一般采用镀锌薄钢板或塑料等材料制成。

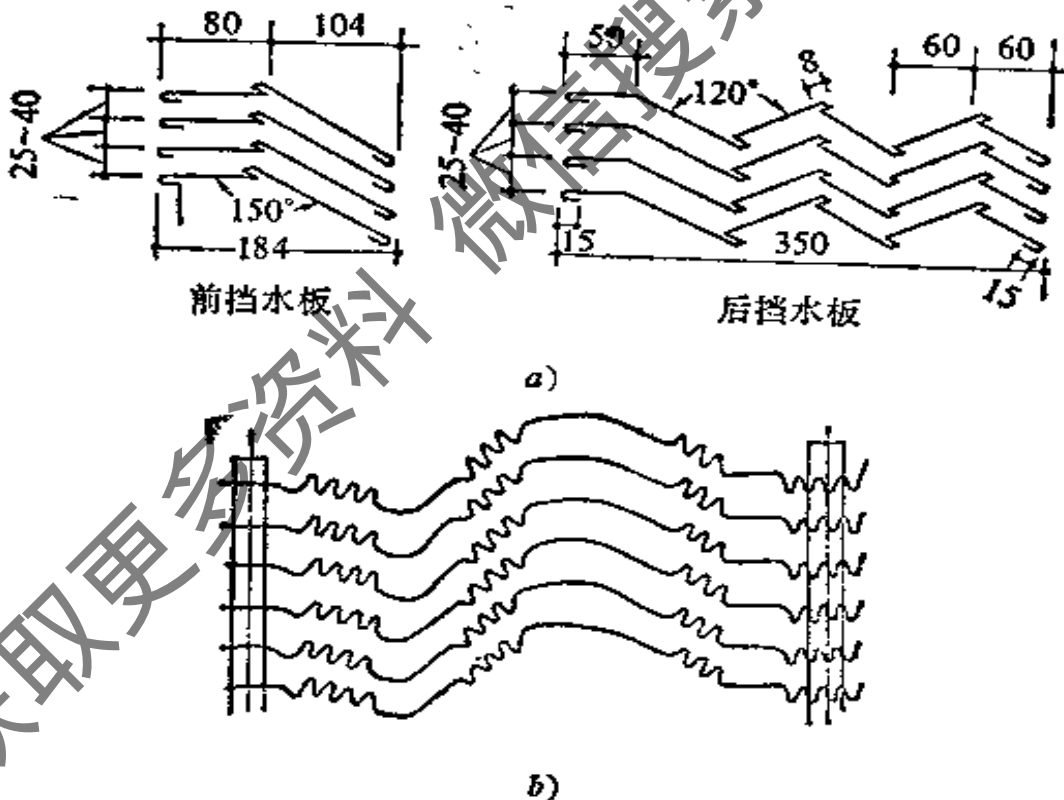


图 4.6 挡水板

前挡水板，其作用是阻挡喷水室中飞溅出来的水滴和使空气均匀进入喷水空间。后挡水板起滞留空气中的水滴使其不被空气带出喷水室的作用。

挡水板的安装除应按图 4.6 的要求外, 还应保证不得与喷水室内壁有隙缝, 板面应无阻挡物, 还应插入底池的运行水面之下。

### 3. 喷水室外壳

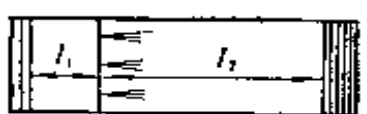
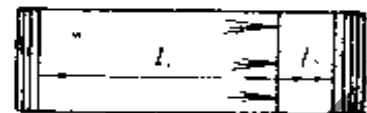
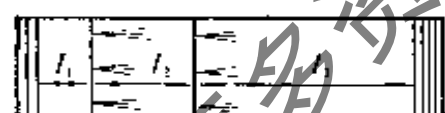
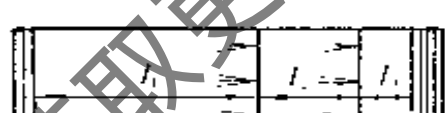
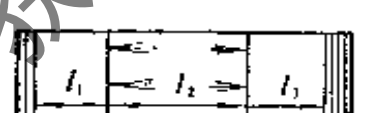
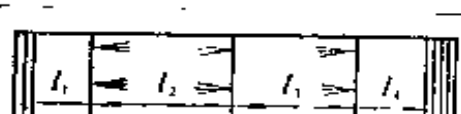
喷水室外壳一般以 1.5~2[mm]厚度的钢板制作, 亦可用水泥、砖等材料制作, 外壳应有保温措施, 不得有漏风和渗水。

喷水室外壳应设保温检修门和观测孔, 内装防水灯。

喷水室断面大小按设计风量和风速确定, 对于低速喷水室, 其断面风速为 2~3[m/s]。长度按喷嘴排管的间距和喷嘴排管与挡水板的间距确定, 见表 4.4。

喷水室的长度尺寸

表 4.4

| 喷嘴排列形式(空气流向→)   | 间 距 尺 寸 [mm] |           |       |       |
|---|--------------|-----------|-------|-------|
|   | $l_1$        | $l_2$     | $l_3$ | $l_4$ |
|  | 200          | 1000~1500 |       |       |
|  | 1000         | 250       |       |       |
|  | 200          | 600       | 1200  |       |
|  | 1000         | 600       | 250   |       |
|  | 200          | 600~1000  | 250   |       |
|  | 200          | 600~1000  | 600   | 250   |

#### (4) 底池及附属装置

1) 底池的容积按 3~5% 的总喷水量设计。

2) 滤水器, 常用铜丝网或尼龙网制作, 选用滤网可参考表 4.5。

选用滤水网参考数据

表 4.5

| 喷嘴孔径 [mm] | 网孔尺寸 [mm] | 滤水能力 [kg/m <sup>2</sup> s] | 滤网阻力 [Pa] |
|-----------|-----------|----------------------------|-----------|
| 2.0~2.5   | 0.5×0.5   | 2.778                      | 980       |
| 2.5~3.5   | 0.9×0.9   | 3.333~8.944                | 980       |
| 4.0~5.5   | 1.25×1.25 | 8.944~8.333                | 950       |

3) 溢水器, 一般做成喇叭形口, 上加水封罩, 水封高度应大于喷水室内运行压力, 溢水口周边按 8.33[kg/sm]设计。

4) 补水管和泄水管, 补水管的补水量按 2~4% 的喷水量设计, 并配置浮球阀控制补水。泄水管设在底池的最低点。

喷水室的供水管道, 按水量和管内允许流速 1~2[m/s]确定管径。泄水管、溢水管等自流管道应按一定流量下造成的阻力不超过有效压头(上下水位差)确定管径。

喷水室的供水管应设置温度计和压力表。

工程实践中, 常直接根据工程实际要求的空气处理状态选用工厂生产的定型喷水室, 有关定型喷水室的技术数据, 可参阅有关设计手册和产品样本等技术资料。

#### 3. 喷水室的热工计算

##### (1) 喷水室中空气和水直接接触时的状态变化过程

空气流过喷水室与水进行热湿交换的过程实际上是一部分与水直接接触的空气和另一部分未与水接触的空气不断混合的过程。如果喷水室的喷水量无限大, 且空气流过喷水室的时间无限长, 即所谓的理想条件下, 空气与水接触和混合的最终结果将使空气的终状态与水温相等, 并达到饱和状态。但是实际上, 用喷水室

处理空气不可能使用无限大的喷水量，喷水的温度随空气的接触过程不断变化。而且空气流过喷水室的时间也不可能无限长。因此用喷水室处理空气的实际过程与理想过程存在一定的区别。

(2) 喷水室的热交换效率系数和接触系数

从以上分析可知，喷水室处理空气的实际过程与理想过程是有区别的。为了说明实际过程接近理想过程的程度，把实际过程与理想过程进行比较，将比较的结果用热交换效率系数和接触系数(也是一种效率)表示，并用这两个效率系数来评价喷水室的热工性能。

以减湿冷却(喷水温度低于空气的露点温度)过程为例，如图4.7。在空气与水接触时，若热湿交换充分，则空气将由初状态1( $t_1, t_{s1}, h_1, \dots$ )变到终状态3( $t_3, t_{s3}, h_3, \dots$ )，但实际过程中，空气的终状态只能达到终状态2( $t_2, t_{s2}, h_2, \dots$ )。进入喷水室的水的初温为 $t_{w1}$ ，因为喷水量有限，与空气接触后水温将升高。在理想条件下，水温将达到点3，而实际上水的终温只能达到 $t_{w2}$ 。

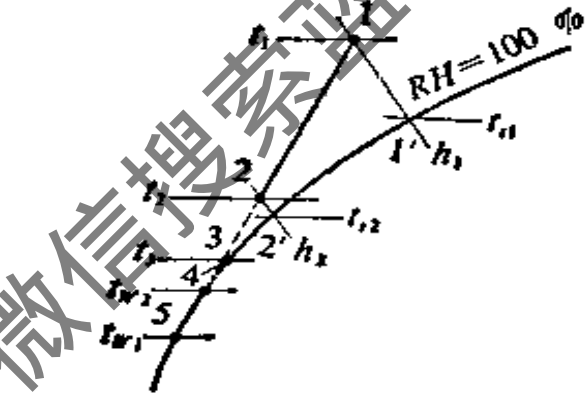


图4.7 减湿冷却过程空气与水的状态变化

将以上实际过程与理想过程进行比较可以得出：当综合考虑空气和水的实际变化过程时，以热交换效率系数 $\eta_1$ (或称第一热交换效率或全热效率)来表示这一实际过程与理想过程的比较结果。通过 $h-x$ 图(图4.7)上的分析可以很方便地推得：

$$\eta_1 = 1 - \frac{t_{s2} - t_{w1}}{t_{s1} - t_{w1}} \quad (4.1)$$

当仅考虑空气状态的实际变化时，以接触系数 $\eta_2$ (或称第二热交换效率或通用热交换效率)来表示这一比较结果。同样以 $h-x$ 图(图4.7)上的分析可以推得：



$$\eta_2 = 1 - \frac{t_2 - t_{s2}}{t_1 - t_{s1}} \quad (4.2)$$

对于绝热加湿过程(用循环水喷淋空气),即等焓加湿过程。其特点是空气初终状态的湿球温度相等,且水温不变等于空气的湿球温度,此时热交换效率系数 $\eta_1$ 已无意义。喷水室的效率仅用接触系数 $\eta_2$ 表示,即:

$$\eta_2 = 1 - \frac{t_2 - t_{s2}}{t_1 - t_{s1}}$$

由于 $t_{s2} = t_{s1}$ ,则

$$\eta_2 = 1 - \frac{t_2 - t_{s1}}{t_1 - t_{s1}} \quad (4.31)$$

### (3) 影响喷水室热交换效果的因素及两个系数的实验公式

影响喷水室热交换效果的因素很多,对于一定的空气处理过程而言,主要可归纳为以下几点:

1) 喷水室的结构特性,主要包括:喷嘴排数、密度、排管间距、喷嘴型式、喷嘴孔径、喷水方向等。实验证明:

a. 喷嘴排数一般采用双排,只在喷水量较大时,如用双排喷嘴须用较高的喷水压力,才改用三排喷嘴。

b. 喷嘴密度一般采用 $n = 13 \sim 24$ [个/ $m^2$ 排]。

c. 喷水方向,对于单排喷水室宜采用逆喷,双排喷水室采用对喷,三排喷水室采用一顺二逆的喷水方向。

d. 排管间距,对于使用Y-1型喷嘴的喷水室,宜采用600[mm]的间距。

e. 喷嘴孔径,考虑到孔径过小易堵塞,一般应优先考虑采用孔径较大的喷嘴。

2) 空气质量流速

$$v\rho = \frac{G}{f} \quad [\text{kg}/\text{m}^2\text{s}] \quad (4.4)$$

式中  $G$ ——通过喷水室的空气质量流量,[kg/s]

$f$ ——喷水室的横断面积,  $[\text{m}^2]$ 。

实验证明: 增大  $v\rho$  可以加强喷水室的热交换效果, 但  $v\rho$  过大会使挡水板的过水量和喷水室的阻力增大。故对于低速喷水室, 常用  $v\rho = 2.5 \sim 3.5 [\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ 。

### 3) 喷水系数

$$\mu = \frac{W}{G} \quad (4.5)$$

式中  $W$ ——喷水室的喷水量,  $[\text{kg}/\text{s}]$ ;

$G$ ——通过喷水室的空气质量流量,  $[\text{kg}/\text{s}]$ 。

实验证明: 在一定的范围内加大喷水系数  $\mu$ , 可增强喷水室的热交换效果。不同的空气处理过程, 采用的喷水系数不同, 对于空气的减湿冷却过程, 一般  $\mu = 1.0 \sim 1.5$ , 对于绝热加湿过程, 一般  $\mu = 0.5 \sim 1.0$ 。

喷水室的热交换效果由热交换效率系数  $\eta_1$  和接触系数  $\eta_2$  来衡量, 通常这两个系数都是通过实验的方法确定, 并将实验结果整理成以下的形式:

热交换效率系数

$$\eta_1 = A(v\rho)^m \mu^n \quad (4.6)$$

接触系数

$$\eta_2 = A'(v\rho)^{m'} \mu^{n'} \quad (4.7)$$

以上两式中

$A, A'$ ——实验系数;

$m, m', n, n'$ ——实验指数。

表 4.6 列出了常用结构特性喷水室的热交换效率系数和接触系数的实验公式的实验系数和指数。对于不同结构特性的喷水室的热交换效率的实验公式可查阅有关资料。

### (4) 喷水室的热工计算方法

喷水室的热工计算主要分为以下两种类型, 即设计性计算和校核性计算, 见表 4.7。

喷水室热交换效率实验公式的系数和指数  
 实验条件: 离心喷嘴 喷嘴直径  $d = 13$  [个/ $m^2$  排];  $v_p = 1.5 \sim 39$  [ $m^2/s$ ]; 喷水压力 =  $98 \sim 245$  [kPa] (表压) 表 4.6 (上)

| 喷嘴排数 | 喷水直径 (mm) | 喷水方向     | 热交换效率                |               | 冷却干燥          |                | 减焓冷却加湿        |               | 绝热加湿           |               |               |
|------|-----------|----------|----------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
|      |           |          | $\eta_1$<br>$\eta_2$ | $A$<br>或 $A'$ | $m$<br>或 $m'$ | $n$<br>或 $n'$  | $A$<br>或 $A'$ | $m$<br>或 $m'$ | $n$<br>或 $n'$  | $A$<br>或 $A'$ | $m$<br>或 $m'$ |
| 1    | 5         | 顺喷       | 0.635<br>0.662       | 0.245<br>0.23 | 0.42<br>0.67  | —<br>—         | —<br>—        | —<br>—        | 0.8<br>0.8     | 0.25<br>0.25  | 0.4<br>0.4    |
|      |           | 逆喷       | 0.73<br>0.88         | 0<br>0        | 0.35<br>0.38  | —<br>—         | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—         | —<br>—        | —<br>—        |
|      | 顺喷        | —<br>—   | —<br>—               | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—         | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—         | —<br>—        | —<br>—        |
|      | 逆喷        | —<br>—   | —<br>—               | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—         | —<br>—        | 1.05<br>1.05  | 0.1<br>0.1     | 0.4<br>0.4    |               |
| 2    | 5         | 一顺<br>一逆 | 0.745<br>0.755       | 0.07<br>0.12  | 0.265<br>0.27 | 0.124<br>0.04  | 0.234<br>0.23 | 0.76<br>0.865 | 0.75<br>0.75   | 0.15<br>0.15  | 0.29<br>0.29  |
|      |           | 两逆       | 0.56<br>0.73         | 0.29<br>0.15  | 0.46<br>0.25  | 0.35<br>0.3    | 0.41<br>0.44  | 0.54<br>0.62  | —<br>—         | —<br>—        | —<br>—        |
|      | 一顺<br>一逆  | —<br>—   | —<br>—               | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—         | —<br>—        | —<br>—        | 0.783<br>0.783 | 0.1<br>0.1    | 0.3<br>0.3    |
|      | 两逆        | —<br>—   | —<br>—               | —<br>—        | 0.33<br>0.18  | 0.655<br>0.783 | 0.33<br>0.18  | —<br>—        | —<br>—         | —<br>—        | —<br>—        |

注:  $\eta_1 = A(v_p)^m \mu^n$ ;  $\eta_2 = A'(v_p)^{m'} \mu^{n'}$

噴水室熱交換效率實驗公式的系數和指數

實驗條件：离心噴嘴；噴嘴密度  $n = 13$  [个/m<sup>2</sup>排]； $\rho = 1.5 \sim 3.0$  [kg/m<sup>2</sup>s]；噴水壓力 = 98~245 [kPa] (表壓) 表 4.6 (下)

| 等温 加温         |               | 增焓冷却加温        |               | 加热加湿          |               | 逆流双级喷水室的冷却干燥  |               |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $A$<br>或 $A'$ | $m$<br>或 $m'$ | $A$<br>或 $A'$ | $m$<br>或 $m'$ | $A$<br>或 $A'$ | $m$<br>或 $m'$ | $A$<br>或 $A'$ | $m$<br>或 $m'$ |
| 0.87<br>0.89  | 0<br>0.06     | 0.855<br>0.8  | 0<br>0.13     | 0.86<br>1.05  | 0<br>0        | —<br>—        | —<br>—        |
| —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        |
| —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | 0.875<br>1.01 | 0.06<br>0.06  | —<br>—        | —<br>—        |
| —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | 0.923<br>1.24 | 0<br>0        | —<br>—        | —<br>—        |
| 0.81<br>0.86  | 0.1<br>0.93   | 0.82<br>0.84  | 0.09<br>0.05  | —<br>—        | —<br>—        | 0.915<br>1    | 0.1<br>0      |
| —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        |
| —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | 0.931<br>0.89 | 0<br>0.95     | —<br>—        | —<br>—        |
| —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        |
| —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        |

无论是哪种类型的计算,均应满足以下要求:

喷水室的计算类型

表4.7

| 计算类型  | 已知条件  | 求解内容   |
|-------|---|--|
| 设计性计算 | 空气量 $G$<br>空气的初、终状态<br>$t_1, t_{s1}, (h_1, \dots)$<br>$t_2, t_{s2}, (h_2, \dots)$     | 喷水室结构<br>喷水量 $W$<br>水的初、终温度<br>$t_{w1}, t_{w2}$        |
| 校核性计算 | 空气量 $G$<br>空气的初状态<br>$t_1, t_{s1}, (h_1, \dots)$<br>喷水室结构<br>喷水量 $W$<br>水的初温 $t_{w1}$ | 空气的终参数<br>$t_2, t_{s2}, (h_2, \dots)$<br>水的终温 $t_{w2}$ |

- 1) 喷水室能达到的  $\eta_1$  应该等于空气处理过程需要的  $\eta_1$ ;
- 2) 喷水室能达到的  $\eta_2$  应该等于空气处理过程需要的  $\eta_2$ ;
- 3) 喷水室喷出的水吸收(或放出)的热量应该等于被处理空气失去(或得到)的热量。即:

$$\eta_1 = A(v\rho)^m \mu^n = 1 - \frac{t_{s2} - t_{w2}}{t_{s1} - t_{w1}} \quad (4.8)$$

$$\eta_2 = A'(v\rho)^{m'} \mu^{n'} = 1 - \frac{t_2 - t_{s2}}{t_1 - t_{s2}} \quad (4.9)$$

$$Q = WC(t_{w2} - t_{w1}) = G(h_1 - h_2) \quad [\text{W}] \quad (4.10)$$

由于  $W/G = \mu$ , 所以

$$Q = h_1 - h_2 = \mu c(t_{w2} - t_{w1}) \quad [\text{W}] \quad (4.11)$$

式中

$c$ ——水的定压比热, 常温下  $c = 4.19 [\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}]$

在以上的计算中, 为了计算方便, 常用湿球温度  $t_s$ , 而不用焓  $h$ , 故将式(4.11), 改写为如下形式:

$$Q = a_1 t_{s1} - a_2 t_{s2} = \mu c (t_{w2} - t_{w1}) \quad (4.12)$$

式中 $a$ 为空气的焓与湿球温度的比值,见表4.8。

空气焓与湿球温度的比值 $\alpha$

表 4.3

| 大气压力   | 湿 球 温 度 $t_s$ [℃] |      |      |      |      |      |
|--------|-------------------|------|------|------|------|------|
| [Pa]   | 5                 | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |
| 101325 | 3.73              | 2.93 | 2.81 | 2.87 | 3.00 | 3.21 |
| 99325  | 3.77              | 2.98 | 2.84 | 2.90 | 3.05 | 3.23 |
| 97325  | 3.80              | 3.01 | 2.91 | 2.97 | 3.11 | 3.28 |
| 95325  | 3.94              | 3.06 | 2.94 | 2.99 | 3.13 | 3.31 |

#### 4. 喷水室的空气流动阻力计算

喷水室的空气流动阻力由前、后挡水板阻力、喷嘴排管阻力和喷水阻力组成。

$$\Delta H = \Delta H_d + \Delta H_p + \Delta H_m \quad [\text{Pa}] \quad (4.13)$$

式中 $\Delta H_d$ ——前、后挡水板阻力,

$$\Delta H_d = (\xi_q + \xi_h) \frac{v_d^2}{2} \rho \quad [\text{Pa}]; \quad (4.14)$$

$\Delta H_p$ ——喷嘴排管阻力,

$$\Delta H_p = 0.1 z \frac{v^2}{2} \rho \quad [\text{Pa}]; \quad (4.15)$$

$\Delta H_m$ ——喷水阻力,

$$\Delta H_m = 1.18 b \mu P \quad [\text{Pa}]. \quad (4.16)$$

式(4.14), (4.15), (4.16)中

$\xi_q, \xi_h$ ——分别为前、后挡水板的局部阻力系数。对于图4.6a形式的挡水板,  $\xi_q = 8, \xi_h = 11$ ;

$v_a$ ——空气在挡水板断面上的迎面风速，一般  $v_a = (1.1 \sim 1.3)v$  [m/s]。 $v$  为空气在喷水室断面上的风速；

$Z$ ——喷嘴排管排数；

$b$ ——喷水方向修正系数，单排顺喷  $b = -0.22$ ，单排逆喷  $b = 0.13$ ，双排对喷  $b = 0.075$ ；

$P$ ——喷水压力，[kPa]（表压）。

对于定型喷水室的空气流动阻力，可查阅有关产品的阻力性能特性。

下面以例题说明喷水室的计算方法和步骤。

【例 4.1】 已知空气量  $G = 6.0$  [kg/s]，当地大气压  $P = 101325$  [Pa]，

空气的初状态参数：

$$t_1 = 28.0 [^{\circ}\text{C}], t_{s1} = 22.5 [^{\circ}\text{C}], h_1 = 65.8 [\text{kJ}/\text{kg 干}],$$

处理后的空气终状态参数：

$$t_2 = 16.6 [^{\circ}\text{C}], t_{s2} = 15.9 [^{\circ}\text{C}], h_2 = 44.4 [\text{kJ}/\text{kg 干}]$$

要求确定喷水室结构，喷水量  $W$ ，喷水压力  $P$ ，水的初、终温度  $t_{w1}, t_{w2}$ ，冷冻水量及循环水量、空气流动阻力。

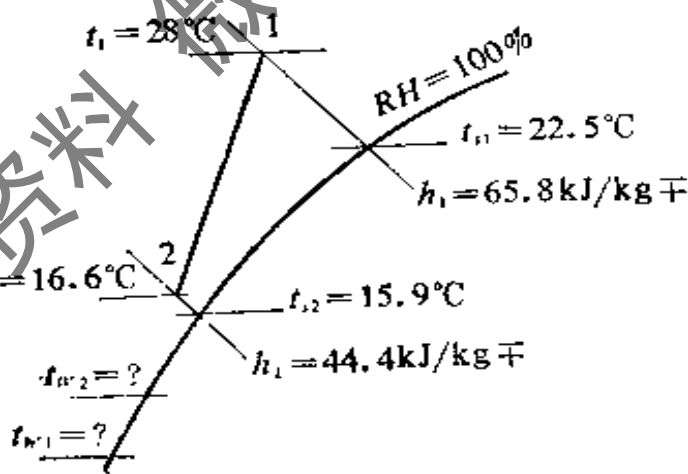


图 4.8 例 4.1 附图

【解】 本例热工计算为设计性计算，解题步骤及方法如下：

1) 选择喷水室结构

依表 4.6 的条件，确定喷水室结构为 Y-1 型喷嘴， $d_0 = 50$  [mm]， $n = 13$  [个/ $\text{m}^2$  管]，双排对喷。取  $\nu\rho = 3.0$  [kg/ $\text{m}^2\text{s}$ ]。

2) 求空气处理过程需要的喷水室的接触系数  $\eta_2$  和喷水量。

a. 由已知的空气初终状态参数求得：

$$\eta_2 = 1 - \frac{t_2 - t_{s2}}{t_1 - t_{s1}} = 1 - \frac{18.6 - 15.9}{28.0 - 22.5} = 0.873$$

b. 本例空气处理过程为减湿冷却过程,由表4.6查得所确定的喷水室 $\eta_2$ 的实验公式为:

$$\eta_2 = 0.755(v\rho)^{0.12}\mu^{0.27}$$

c. 依热工计算应满足的要求,即应满足式(4.9),得

$$\eta_2 = 0.755(v\rho)^{0.12}\mu^{0.27} = 0.873$$

d. 将 $v\rho = 3.0[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ 代入上式求得喷水系数

$$\mu = 1.05$$

e. 喷水量可求得为:

$$W = \mu G = 1.05 \times 6.0 = 6.3[\text{kg}/\text{s}]$$

3) 求热交换效率系数 $\eta_1$ 和水的初终温度 $t_{w1}, t_{w2}$ ,

a. 查表4.6得:

$$\eta_1 = 0.745(v\rho)^{0.07}\mu^{0.265} = 1 - \frac{t_{s2} - t_{w2}}{t_{s1} - t_{w1}}$$

将已知的 $t_{s1} = 22.5[^\circ\text{C}]$ ,  $t_{s2} = 15.9[^\circ\text{C}]$ ,  $v\rho = 3.0[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ ,  $\mu = 1.05$ 代入上式,求得:

$$\eta_1 = 1 - \frac{15.9 - t_{w2}}{22.5 - t_{w1}} = 0.745 \times 3.0^{0.07} \times 1.05^{0.265} = 0.815$$

$$\frac{15.9 - t_{w2}}{22.5 - t_{w1}} = 0.185 \quad (1)$$

b. 由热平衡式(4.11),并代入已知参数得:

$$\begin{aligned} h_1 - h_2 &= \mu c(t_{w1} - t_{w2}) \\ 65.8 - 44.4 &= 1.05 \times 4.19 \times (t_{w1} - t_{w2}) \\ t_{w1} - t_{w2} &= 4.86[^\circ\text{C}] \end{aligned} \quad (2)$$

c. 联解本例式(1)和(2)得:

$$t_{w1} = 8.45[^\circ\text{C}]$$

$$t_{w2} = 4.86 + 8.45 = 13.31[^\circ\text{C}]$$

4) 求喷水压力

a. 由已知风量 $G$ 及所取质量流速 $v\rho$ ,求得喷水室断面积为:

$$f = \frac{G}{v\rho} = \frac{6.0}{3.0} = 2[\text{m}^2]$$

b. 依所确定喷水室的结构(双排对喷, $n = 13[\text{个}/\text{m}^2\text{排}]$ ),求得所用喷嘴总数为:

$$N = 2 \times 13 \times 2 = 52[\text{个}]$$

c. 由已求得的总喷水量可求得每个喷嘴的喷水量



$$\frac{W}{N} = \frac{6.3}{52} = 0.121 \quad [\text{kg/s}]$$

d. 由每个喷嘴喷水量及喷嘴孔径  $d_0 = 5.0 [\text{mm}]$ , 查表 4.2 求得喷水压力为  
 $P = 176.5 [\text{kPa}]$

5) 求冷冻水量及循环水量

a. 由已求得水初温  $t_{w1} = 8.46 [^\circ\text{C}]$  和冷冻水温度 (一般冷冻水温度  $t_s = 5.0 [^\circ\text{C}]$ ), 则可依下式求得所需冷冻水量为:

$$W_i = \frac{G(h_1 - h_2)}{c(t_{w2} - t_i)} = \frac{6.0(65.8 - 44.4)}{4.19(13.31 - 5)} = 3.69 [\text{kg/s}]$$

b. 所需循环水量

$$W_x = W - W_i = 6.3 - 3.69 = 2.61 [\text{kg/s}]$$

6) 求喷水室空气流动阻力

a. 求喷水室断面风速 (空气密度, 常温下取  $\rho = 1.2 [\text{kg/m}^3]$ )

$$v = \frac{G}{f \times \rho} = \frac{6.0}{2 \times 1.2} = 2.5 [\text{m/s}]$$

b. 将有关数据代入式 (4.13)~(4.16) 求得喷水室空气流动阻力为:

$$\begin{aligned} \Delta H = & (8 + 11) \cdot \frac{(1.2 \times v)^2 \times 1.2}{2} + 0.1 \times 2 \times \frac{v^2}{2} \times 1.2 \\ & + 1.18 \times 0.075 \times 1.05 \times 176.5 = 120.5 [\text{Pa}] \end{aligned}$$

【例 4.2】已知空气  $G = 6.0 [\text{kg/s}]$ , 当地大气压  $P = 101325 [\text{Pa}]$

空气的初状态参数:

$$t_1 = 28.0 [^\circ\text{C}], \quad t_{d1} = 22.5 [^\circ\text{C}], \quad t_l = 20.4 [^\circ\text{C}] \quad (\text{空气露点温度})$$

采用与例 4.1 同样的喷水室结构, 但是喷水初温变成  $t_{w1} = 10 [^\circ\text{C}]$ 。如果处理后要达到的空气状态参数与例 4.1 相同。试确定应有的喷水系数。

【解】本例的热工计算为校核性计算, 其目的是在例 4.1 求解得出的喷水初温提高的情况下 (例如可利用天然冷源, 如深井水、山涧水等)。又要求喷水室处理空气有与例 4.1 有相同的处理结果, 则应采用何种方法的问题。根据研究表明, 在一定范围内采用不同的喷水温度, 可以获得同样的空气处理结果, 只要配以相应的喷水系数。当然喷水温度的最高值和所相应的喷水系数应使接触系数  $\eta_s$  不大于 1 为限, 在新的喷水温度下, 所需的喷水系数可依以下关系式求得:

$$\frac{\eta}{\mu^f} = \frac{t_{l1} - t_{w1}}{t_{l1} - t_{w1}} \quad (4.17)$$

式中  $t_{l1}$  —— 被处理空气的露点温度;

$t_{w1}, \mu$ ——计算的喷水温度、喷水系数；

$t_{w'1}, \mu'$ ——实际使用的喷水温度、喷水系数。

依以上方法，将例 4.1 所求的参数及本例所给条件，求得本例所需喷水系数为：

$$\mu' = \frac{\mu(t_{s1} - t_{w1})}{t_{s1} - t_{w'1}} = \frac{1.05 \times (20.4 - 8.45)}{(20.4 - 10)} = 1.2$$

求得喷水量为：

$$W = \mu' \cdot G = 1.2 \times 6.0 = 7.2 [\text{kg/s}]$$

下面按校核性计算方法和步骤进行。

求喷水室能达到的空气终状态参数与水的终温

由热交换效率系数公式

$$\eta_1 = 1 - \frac{t_{s2} - t_{w2}}{t_{s1} - t_{w'1}} = 0.745 (\nu\rho)^{3.007} \mu^{0.263}$$

代入已知数据得：

$$\eta_1 = 1 - \frac{t_{s2} - t_{w2}}{22.5 - 10} = 0.745 \times 3.0^{0.07} \times 1.2^{0.263} = 0.85$$

求得

$$t_{s2} - t_{w2} = 1.88 [^\circ\text{C}] \quad (1)$$

由式(4.12)

$$a_1 t_{s1} - a_2 t_{s2} = \mu' c (t_{w2} - t_{w'1})$$

查表 4.8，当  $t_{s1} = 22.5 [^\circ\text{C}]$  时， $a_1 = 2.94$ 。由于  $t_{s2}$  待求，故暂设  $a_2 = 2.81$ 。将  $a_1, a_2$  代入式(4.12)得：

$$2.94 \times 22.5 - 2.81 \times t_{s2} = 1.2 \times 4.19 \times (t_{w2} - 10)$$

整理得：

$$t_{w2} + 0.56 t_{s2} = 23.15 \quad (2)$$

联解(1)和(2)式，得：

$$t_{s2} = 16.0 [^\circ\text{C}], \quad t_{w2} = 14.1 [^\circ\text{C}]$$

由接触系数公式

$$\eta_2 = 1 - \frac{t_2 - t_{s2}}{t_1 - t_{s1}} = 0.755 (\nu\rho)^{0.12} \mu'^{0.27}$$

代入已知数据得：

$$\eta_2 = 1 - \frac{t_2 - 16.0}{28.0 - 22.5} = 0.755 \times 3.0^{0.12} \times 1.2^{0.27}$$

求得：

$$t_2 = 16.6 [^\circ\text{C}]$$

由  $t_{s2} = 16.0 [^\circ\text{C}]$  查表 4.8，得  $a_2 = 2.82$ ，与所设相符。

所求空气终状态参数与例 4.1 基本相同。

## 5. 双级喷水室

典型的双级喷水室如图 4.9 所示。空气先进入第 I 级喷水室，再进入第 II 级喷水室，而水则先进入第 II 级喷水室，然后再由第 II 级喷水室的底池抽出进入第 I 级喷水室。双级喷水的主要特点有：

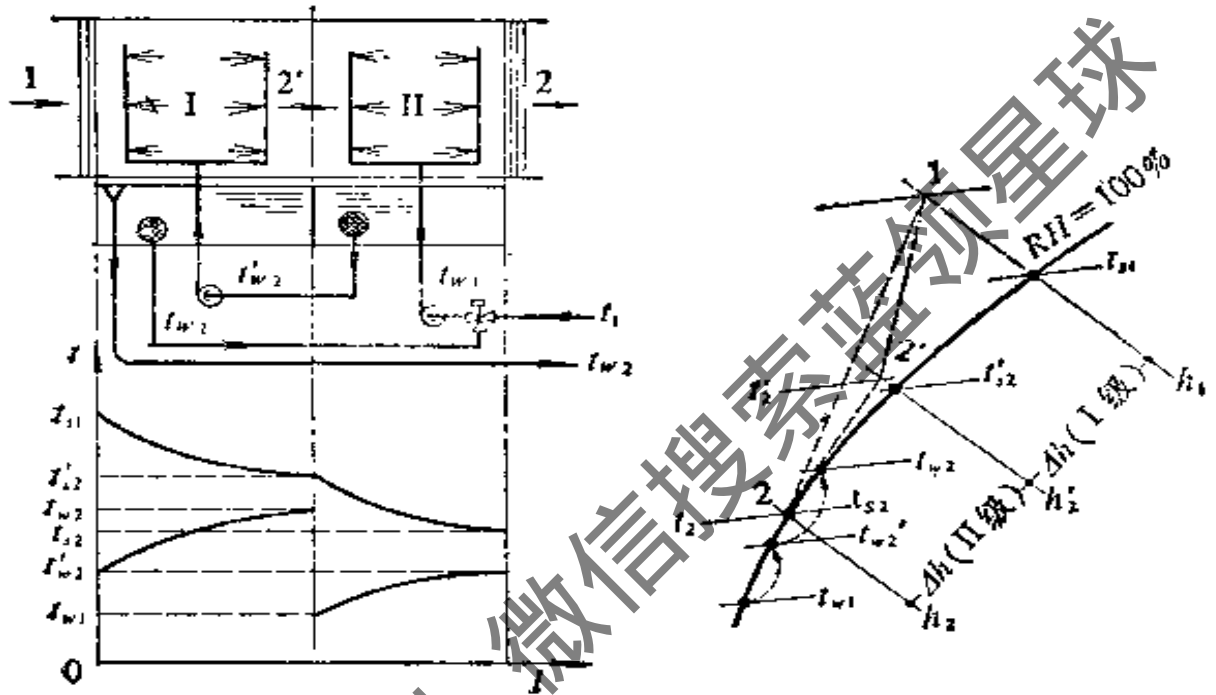


图 4.9 双级喷水室及空气与水的状态变化

- 1) 空气在第 I 级喷水室中主要为降温降焓，在第 II 级中主要为降湿降焓。
- 2) 被处理的空气焓降大，温降也大，空气终状态一般能达到饱和。
- 3) 水温降较单级喷水室大，在吸收同样的空气热量时可节省水量。
- 4) 由于可能出现  $t_{w2} > t_{s2}$  的情况，所以热交换效率系数可能大于 1，接触系数  $\eta_2$  可能等于 1，所以双级喷水室更适用于处理空气焓降大和采用天然冷源的情况。

双级喷水室的热工计算与单级喷水室相同，相应的热交换效率系数  $\eta_1$  和接触系数  $\eta_2$  的实验公式可查表 4.6。计算中不必求空气

在两级喷水室之间的状态参数。

### 6. 高速喷水室

高速喷水室的断面风速比低速喷水室高一倍左右，一般  $v = 3.5 \sim 6.5$  [m/s]。为了克服喷水室断面风速高而带来的空气与水的接触时间少、空气流动阻力大和挡水板过水量增大的问题，这种喷水室在结构上采用了以下几点与低速喷水室不同的做法。如图 4.10。

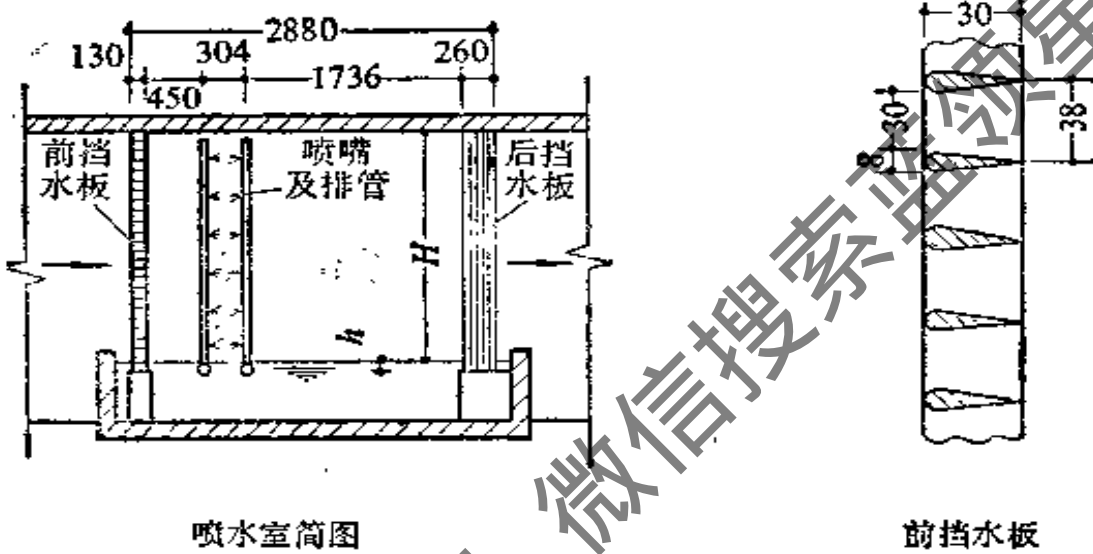


图 4.10 高速喷水室

1) 喷水室喷嘴排管至后挡水板的间距较长，保证了空气与水有相当充分的接触时间。

2) 采用机翼形前挡水板和双波纹形后挡水板(见图 4.6 b)，具有气流分布均匀，挡水效果好和空气流动阻力小的特点。

3) 喷嘴为离心式喷嘴，但与 Y-1 型离心喷嘴比较，具有喷射扩散角大，雾化效果好、且喷水量小等优点。这种喷嘴的性能见表 4.9。

高速喷水室与低速喷水室比较，具有以下特点：

1) 喷水室断面风速高，当处理相同空气量时，可用较小的断面尺寸，节省占地面积。

2) 喷水室总空气流动阻力小，总流动阻力系数为 6.2 左右，当处理相同空气量时。虽然断面风速比低速喷水量高一倍，

高速喷水室用离心喷嘴喷水量 $[kg/s]$ 和喷嘴孔径 $d_0$  喷水压力 $P$ 的关系 表 4.9

| 喷水压力<br>(表压) $[kPa]$      |     | 98.1  | 147.1 | 196.1 | 245.2 |
|---------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 喷嘴<br>孔径<br>$d_0$<br>[mm] | 2.5 | 0.021 | 0.025 | 0.031 | 0.034 |
|                           | 3.0 | 0.027 | 0.033 | 0.039 | 0.040 |
|                           | 4.0 | 0.036 | 0.042 | 0.049 | 0.053 |

喷射扩散角 $>100^\circ$

但总空气流动阻力与低速喷水室基本相等。

3) 喷水室水气比 $\mu$ 较小( $\mu = 0.6$ )、喷嘴密度较大( $n = 38 \sim 41$  [个/ $m^2$ 排])。可以较少的喷水量处理较大的空气量，且喷水压力较小，节省水泵运行费用。

4) 高速喷水室的热交换效果较低速喷水室高。

高速喷水室在工程实践中已得到广泛应用，亦有定型产品。有关高速喷水室的技术性能，可参阅有关产品技术资料。

#### 4.1.3 表面式换热器

表面式换热器是冷热介质通过金属表面(如光管、肋片管)使空气加热、冷却、甚至减湿的设备。常用的表面式换热器有空气加热器和表面冷却器。

空气加热器以热水或蒸汽为热媒。

表面冷却器以冷水和冷剂为冷媒。以冷剂为冷媒的表面冷却器称为直接蒸发式表面冷却器，有关直接蒸发式表面冷却器部分内容见第2篇制冷部分，本章主要介绍以冷水为冷媒的表面冷却器。

与喷水室比较，表面式换热器具有设备结构紧凑，水系统简单，水与空气不直接接触，故对水质无卫生要求。在处理相同空气量时能实现较大的空气焓降和较高的水温升，从而节约水量。该设备由专门工厂定型生产，有选择方便、安装简单等优点。所以广泛应用于空调工程中。但有耗用有色金属材料多、只能对空气

进行加热、等湿冷却和减湿冷却、对空气净化作用差等局限性。

### 1. 表面式换热器的构造和类型

表面式换热器主要由肋管、联箱和护板组成，如图 4.11。冷(热)媒进入联箱 1 后均匀地流过肋管，然后汇集入联箱 2 流出。空气则在肋管外流过。根据处理空气的要求不同，可选用不同的肋管排数。根据水温升的要求和吸收(或放出)热量的不同，联箱与肋管可有不同的连接方法。

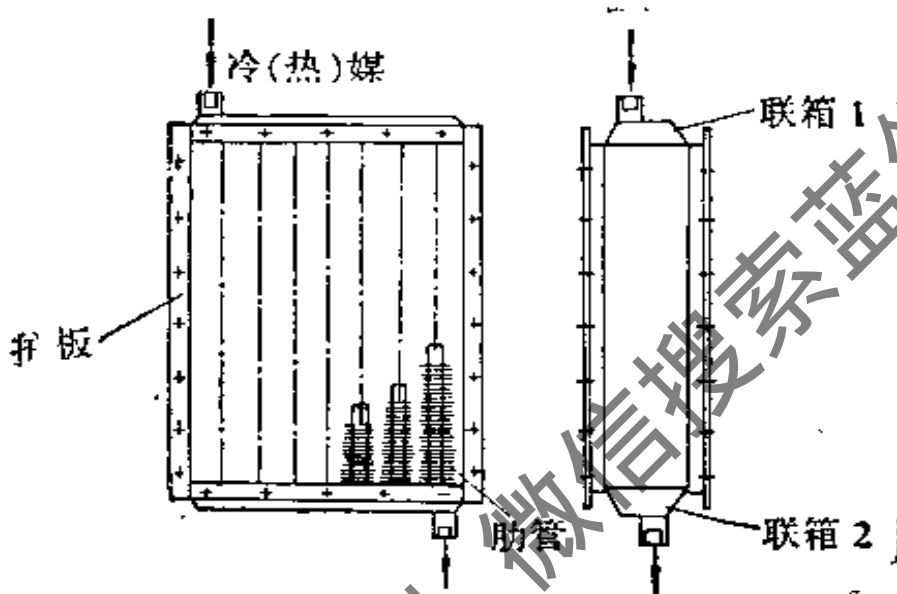


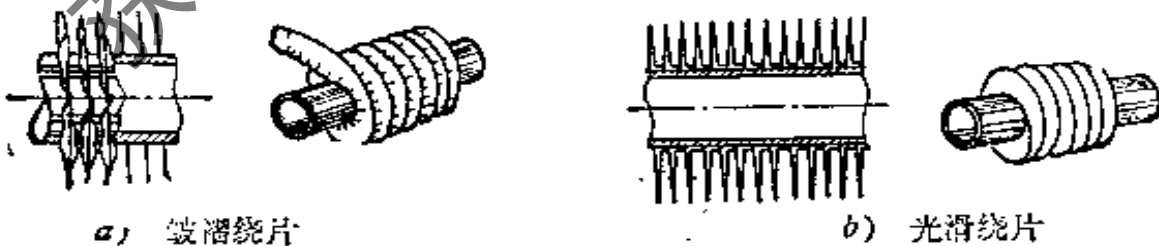
图 4.11 表面式换热器

常用的表面式换热器主要有以下两大类型：

#### (1) 圆形肋管型

在管子外加圆形肋片，根据加工工艺的不同，又有以下几种圆形肋管，如图 4.12。

1) 绕片型。将金属带绕制在管子上，片形有皱褶型和 L、I 型(光滑片)。GL, S, UI 型表面式换热器均为皱褶绕片肋管，皱



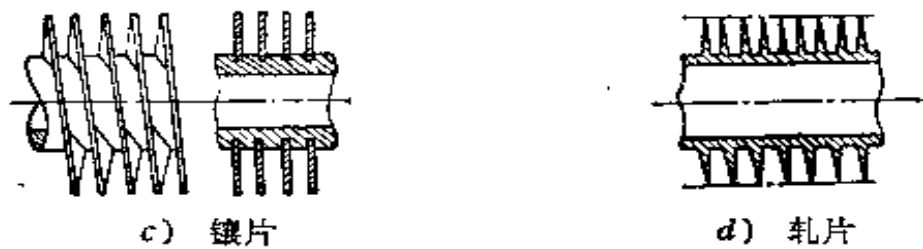


图 4.12 圆形肋片管

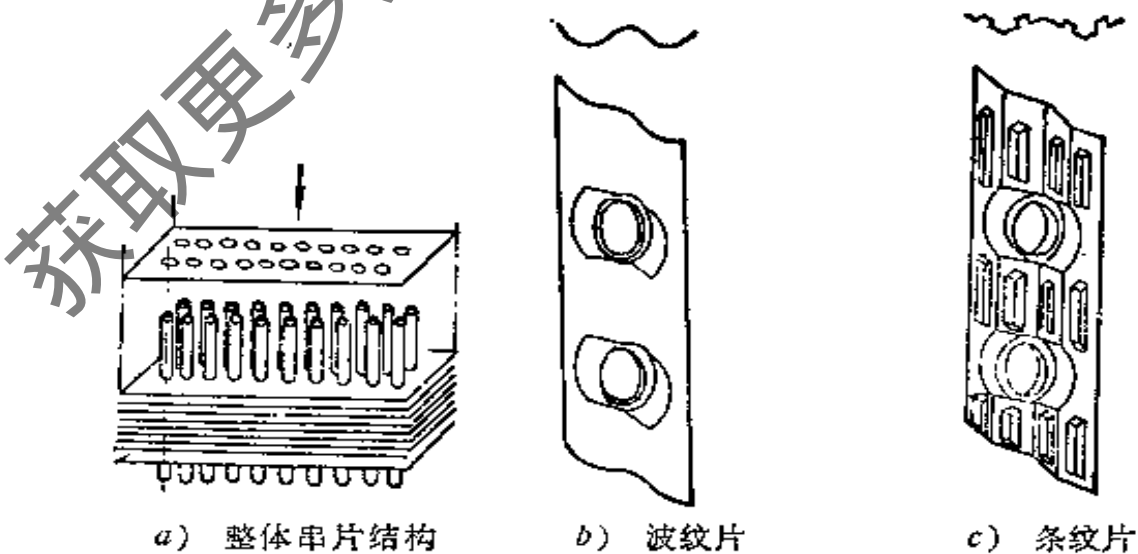
褶形肋可增加传热面积和增强空气扰动，且绕制后的肋管经搪锡或锌处理，增强肋片与管子的接触程度，所以此类型换热器具有较好的传热效果。JW，SRL 型表面式换热器为 L 和 I 型肋管，由于肋片平滑，具有较小的空气阻力。

2) 镶片型。将金属带绕在有螺旋槽管子的槽内，再经挤压使金属带紧密地镶嵌在槽内，SXL 型表面式换热器的肋管为此种类型。

3) 轧片型。用专门的轧管机直接将管子轧制成圆形肋片管，KL 型表面式换热器的肋管为轧片管。由于肋片和管子间无接触热阻，所以具有较好的传热效果。

## 2. 整体串片型

在肋片上事先冲好相应的孔，然后将肋片与管子串穿在一起，经对管子进行机械或液压扩管使与肋片紧密结合。肋片形式有平片、折皱片、波纹片及条缝片等形式。如图 4.13。



a) 整体串片结构

b) 波纹片

c) 条纹片

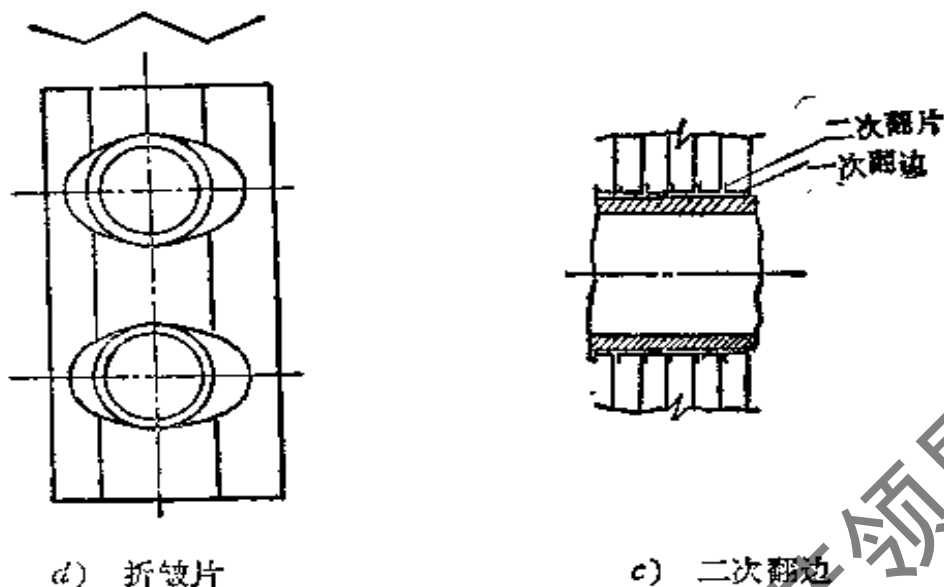


图 4.13 整体串片型肋片管

这类换热器与圆形肋管换热器相比，具有结构紧凑，在相同排数和相同迎风面积的条件下有较大的传热面积、传热效果好、空气阻力小、耗用材料省和加工工艺先进等优点。尤其使用专用模具加工肋片，实现肋片冲孔的二次翻边，如图 4.13e，保证了肋片的间距和肋片与管子的接触强度，进一步增强了传热效果。此类换热器在空调工程中已广泛应用。

常用表面式换热器的主要型号及结构参数、技术数据见表 4.10。

常用表面式换热器的型号及结构参数

表 4.10 a

| 型号及名称 |          | JW 型  | UII 型 | GL 型  | SXL-B 型 | KL-2 型 | CR 型  |
|-------|----------|-------|-------|-------|---------|--------|-------|
|       |          | 表面冷却器 | 表面换热器 | 表面换热器 | 表面换热器   | 表面冷却器  | 表面换热器 |
| 肋片特性  | 形式       | 光滑绕片  | 皱折绕片  | 皱折绕片  | 镶片      | 轧片     | 整体穿片  |
|       | 材料       | 铝     | 紫铜    | 钢     | 铝       | 铝      | 铝     |
|       | 平均片厚[mm] | 0.3   | 0.2   | 0.3   | 0.4     | 0.3    | 0.2   |
|       | 片高[mm]   | 8     | 10    | 10    | 16      | 9      |       |
|       | 片距[mm]   | 3.0   | 3.2   | 3.2   | 2.32    | 2.5    | 3.2   |



续表 4.10 a

| 型号及名称                              |             | JW型                    | UH型       | GL型       | SL-B型     | KL-2型     | CR型       |      |
|------------------------------------|-------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|
|                                    |             | 表面<br>冷却器              | 表面<br>换热器 | 表面<br>换热器 | 表面<br>换热器 | 表面<br>冷却器 | 表面<br>换热器 |      |
| 管子特性                               |             | 材料                     | 钢         | 紫铜        | 钢         | 钢         | 铝         | 紫铜   |
|                                    |             | 外径[mm]                 | 16        | 16        | 18        | 25        | 20        | 16   |
|                                    |             | 内径[mm]                 | 12        | 14        | 14        | 19        | 16        | 15   |
|                                    |             | 内截面积[cm <sup>2</sup> ] | 1.13      | 1.54      | 1.54      | 2.83      | 2.01      | 1.77 |
| 每米肋管<br>表面积<br>[m <sup>2</sup> /m] | 总外表面积 $F_w$ | 0.453                  | 0.55      | 0.84      | 1.825     | 0.775     |           |      |
|                                    | 内表面积 $F_n$  | 0.033                  | 0.014     | 0.044     | 0.060     | 0.0503    | 0.047     |      |
| 肋化系数 $F_w/F_n$                     |             | 11.9                   | 12.3      | 14.56     | 30.4      | 15.4      |           |      |
| 肋通系数 $a$                           |             | 12.52                  | 15.8      | 15.8      | 28.5      | 19.3      |           |      |

- 注: 1. 肋通系数  $a$ —每排肋管外表面积/迎风面积。  
 2. 管簇排列方式均为叉排。  
 3. 肋管总外表面积, 即其每米管长的散热面积。

GL II 型表面式换热器技术数据

表 4.10 b

| 表面<br>管数 | B<br>[mm] | 通水管<br>断面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 表面管长(英寸)                       |       |       |       |       |       |
|----------|-----------|---------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          |           |                                 | A[mm]                          | 24    | 30    | 42    | 54    | 78    |
| 6        | 318       | 0.00092                         | 二排散热面积 $F$ [m <sup>2</sup> ]   | 4.7   | 5.84  | 8.12  |       |       |
|          |           |                                 | 四排散热面积 $F$ [m <sup>2</sup> ]   | 9.4   | 11.68 | 16.24 |       |       |
|          |           |                                 | 迎风面积 $F_v$ [m <sup>2</sup> ]   | 0.157 | 0.196 | 0.273 |       |       |
|          |           |                                 | 通风净截面积 [m <sup>2</sup> ]       | 0.083 | 0.104 | 0.145 |       |       |
| 10       | 474       | 0.00154                         | 二排散热面积 $F$ [m <sup>2</sup> ]   | 7.82  | 9.72  | 13.56 | 17.42 | 25.08 |
|          |           |                                 | 四排散热面积 $F_v$ [m <sup>2</sup> ] | 15.64 | 19.44 | 27.12 | 34.84 | 50.16 |
|          |           |                                 | 迎风面积 $F$ [m <sup>2</sup> ]     | 0.253 | 0.315 | 0.438 | 0.563 | 0.812 |
|          |           |                                 | 通风净截面积 [m <sup>2</sup> ]       | 0.134 | 0.167 | 0.233 | 0.298 | 0.430 |

续表 4.10 b

| 表面管数 | B [mm] | 通水管断面积 [m <sup>2</sup> ] | 表面管长 [英寸]                    | 24    | 30    | 42    | 54    | 78     |
|------|--------|--------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
|      |        |                          | A [mm]                       | 700   | 850   | 1150  | 1450  | 2050   |
| 15   | 669    | 0.00231                  | 二排散热面积 $F$ [m <sup>2</sup> ] | 11.72 | 14.58 | 20.34 | 26.12 | 37.62  |
|      |        |                          | 四排散热面积 $F$ [m <sup>2</sup> ] | 23.44 | 29.16 | 40.68 | 52.24 | 75.24  |
|      |        |                          | 迎风面积 $F_y$ [m <sup>2</sup> ] | 0.372 | 0.463 | 0.645 | 0.826 | 1.192  |
|      |        |                          | 通风净截面积 [m <sup>2</sup> ]     | 0.197 | 0.245 | 0.342 | 0.438 | 0.632  |
| 24   | 1020   | 0.00370                  | 二排散热面积 $F$ [m <sup>2</sup> ] | 18.8  | 23.32 | 32.54 | 41.80 | 60.20  |
|      |        |                          | 四排散热面积 $F$ [m <sup>2</sup> ] | 37.6  | 46.64 | 65.08 | 83.60 | 120.40 |
|      |        |                          | 迎风面积 $F_y$ [m <sup>2</sup> ] | 0.585 | 0.729 | 1.016 | 1.307 | 1.881  |
|      |        |                          | 通风净截面积 [m <sup>2</sup> ]     | 0.310 | 0.386 | 0.538 | 0.693 | 0.998  |

注: 表面管数为 6, 10 时, 进出水管接头为 1°;

表面管数为 15, 24 时, 进出水管接头为 2°

U II 型表面式换热器技术数据

表 4.10 c

| 表面管数 | B [mm] | 通水管断面积 [m <sup>2</sup> ] | 表面管长 (英寸)                      | 24    | 30    | 42    | 54     | 78     |
|------|--------|--------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|
|      |        |                          | A [mm]                         | 700   | 850   | 1150  | 1450   | 2050   |
| 4    | 224    | 0.00062                  | 每排散热面积 $F_s$ [m <sup>2</sup> ] | 1.5   | 1.88  | 2.63  |        |        |
|      |        |                          | 迎风面积 $F_y$ [m <sup>2</sup> ]   | 0.087 | 0.109 | 0.155 |        |        |
|      |        |                          | 通风净截面积 [m <sup>2</sup> ]       | 0.058 | 0.073 | 0.102 |        |        |
| 8    | 366    | 0.00123                  | 每排散热面积 $F_s$ [m <sup>2</sup> ] | 3     | 3.75  | 5.25  |        |        |
|      |        |                          | 迎风面积 $F_y$ [m <sup>2</sup> ]   | 0.174 | 0.217 | 0.303 |        |        |
|      |        |                          | 通风净截面积 [m <sup>2</sup> ]       | 0.104 | 0.13  | 0.182 |        |        |
| 12   | 510    | 0.00185                  | 每排散热面积 $F_s$ [m <sup>2</sup> ] | 4.5   | 5.63  | 7.875 | 10.125 | 14.625 |
|      |        |                          | 迎风面积 $F_y$ [m <sup>2</sup> ]   | 0.26  | 0.325 | 0.455 | 0.585  | 0.845  |
|      |        |                          | 通风净截面积 [m <sup>2</sup> ]       | 0.144 | 0.18  | 0.252 | 0.324  | 0.468  |

续表4.10e

| 表面管数 | B<br>[mm] | 通水管断面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 表面管长[in]                       |       |       |        |       |       |
|------|-----------|-----------------------------|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|
|      |           |                             | 24                             | 30    | 40    | 54     | 78    |       |
|      |           |                             | A[mm]                          | 700   | 850   | 1150   | 1450  | 2050  |
| 18   | 722       | 0.00277                     | 每排散热面积 $F_s$ [m <sup>2</sup> ] | 6.75  | 8.44  | 11.815 | 15.19 | 21.94 |
|      |           |                             | 迎风面积 $F_v$ [m <sup>2</sup> ]   | 0.39  | 0.488 | 0.634  | 0.88  | 1.272 |
|      |           |                             | 通风净截面积[m <sup>2</sup> ]        | 0.216 | 0.27  | 0.378  | 0.486 | 0.702 |
| 24   | 934       | 0.00370                     | 每排散热面积 $F_s$ [m <sup>2</sup> ] | 9     | 11.25 | 15.75  | 20.25 | 29.25 |
|      |           |                             | 迎风面积 $F_v$ [m <sup>2</sup> ]   | 0.52  | 0.65  | 0.91   | 1.17  | 1.69  |
|      |           |                             | 通风净截面积[m <sup>2</sup> ]        | 0.288 | 0.36  | 0.504  | 0.648 | 0.936 |

注：表面管数为4,8时,进出水管接头为1";  
表面管数为12,18,24时,进出水管接头为2".

SR Z型空气加热器技术数据

表4.10d

| 规格     | 散热面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 通风有效截面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 热媒流通截面<br>[m <sup>2</sup> ] | 管排数 | 管根数 | 连接管径<br>[in] | 质量<br>[kg] |
|--------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----|-----|--------------|------------|
| 5×5 D  | 10.13                     | 0.154                        |                             |     |     |              | 54         |
| 5×5 Z  | 8.78                      | 0.155                        |                             |     |     |              | 43         |
| 5×5 X  | 6.23                      | 0.158                        |                             |     |     |              | 45         |
| 10×5 D | 19.92                     | 0.302                        | 0.0043                      | 3   | 23  | 1+           | 93         |
| 10×5 Z | 17.26                     | 0.306                        |                             |     |     |              | 84         |
| 10×5 X | 12.22                     | 0.312                        |                             |     |     |              | 76         |
| 12×5 D | 24.86                     | 0.378                        |                             |     |     |              | 113        |
| 6×6 D  | 15.33                     | 0.231                        |                             |     |     |              | 77         |
| 6×6 Z  | 13.29                     | 0.234                        |                             |     |     |              | 69         |
| 6×6 X  | 9.43                      | 0.239                        | 0.0055                      | 3   | 29  | 1+           | 63         |
| 10×6 D | 25.13                     | 0.381                        |                             |     |     |              | 115        |
| 10×6 Z | 21.77                     | 0.385                        |                             |     |     |              | 103        |

续表 4.10d

| 规格      | 散热面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 通风有效截面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 热媒流通截面<br>[m <sup>2</sup> ] | 管排数 | 管根数 | 连接管径<br>[in] | 质量<br>[kg] |
|---------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----|-----|--------------|------------|
| 10×6 X  | 16.42                     | 0.393                        |                             |     |     |              | 93         |
| 12×6 D  | 31.35                     | 0.475                        |                             |     |     |              | 139        |
| 15×6 D  | 37.73                     | 0.572                        | 0.0053                      | 3   | 23  | 1+           | 164        |
| 15×6 Z  | 32.67                     | 0.579                        |                             |     |     |              | 146        |
| 15×6 X  | 23.13                     | 0.591                        |                             |     |     |              | 139        |
| 7×7 D   | 20.31                     | 0.320                        |                             |     |     |              | 97         |
| 7×7 Z   | 17.60                     | 0.324                        |                             |     |     |              | 87         |
| 7×7 X   | 12.48                     | 0.329                        |                             |     |     |              | 79         |
| 10×7 D  | 28.59                     | 0.450                        |                             |     |     |              | 129        |
| 10×7 Z  | 24.77                     | 0.456                        |                             |     |     |              | 115        |
| 10×7 X  | 17.55                     | 0.464                        |                             |     |     |              | 104        |
| 12×7 D  | 35.67                     | 0.553                        | 0.0063                      | 3   | 33  | 2            | 156        |
| 15×7 D  | 42.93                     | 0.678                        |                             |     |     |              | 183        |
| 15×7 Z  | 37.18                     | 0.685                        |                             |     |     |              | 164        |
| 15×7 X  | 26.32                     | 0.698                        |                             |     |     |              | 145        |
| 17×7 D  | 49.90                     | 0.788                        |                             |     |     |              | 210        |
| 17×7 Z  | 43.21                     | 0.797                        |                             |     |     |              | 187        |
| 17×7 X  | 30.58                     | 0.812                        |                             |     |     |              | 169        |
| 22×7 D  | 62.75                     | 0.991                        |                             |     |     |              | 260        |
| 15×10 D | 61.14                     | 0.921                        |                             |     |     |              | 255        |
| 15×10 Z | 52.95                     | 0.932                        |                             |     |     |              | 227        |
| 15×10 X | 37.48                     | 0.951                        |                             |     |     |              | 203        |
| 17×10 D | 71.05                     | 1.072                        | 0.0089                      | 3   | 47  | 2+           | 293        |
| 17×10 Z | 61.54                     | 1.085                        |                             |     |     |              | 260        |
| 17×10 X | 43.56                     | 1.106                        |                             |     |     |              | 232        |
| 20×10 D | 81.27                     | 1.226                        |                             |     |     |              | 331        |

## 2. 表面式换热器的安装

表面式换热器可以垂直、水平和倾斜安装。以蒸汽为热媒的空气加热器水平安装时应有  $1/100$  的坡度，以利排出凝结水。表面冷却器垂直安装时，应使肋片垂直，以利凝结水从肋片上顺利排出。且在其下部设置滴水盘和排水管。表面式换热器可以串联和并联安装。

对空气流动方向而言，当处理空气量大时，宜用并联。当要求空气温升(或温降)大时，宜用串联。

对冷(热)媒管路而言，当以蒸汽为热媒时，管路与各台换热器之间只能用并联。当以冷(热)水为热媒时，一般就空气流动方向而言，并联的换热器，管路应并联。

一般空气和冷(热)介质按逆流安排。

表面式换热器的进出管路上应设截止阀、温度计和压力表。对蒸汽系统，加热器出口应设疏水器。为了换热器能正常工作，在其最高点应设排气阀，最低点设泄水阀。表面式换热器的安装见图 4.14。

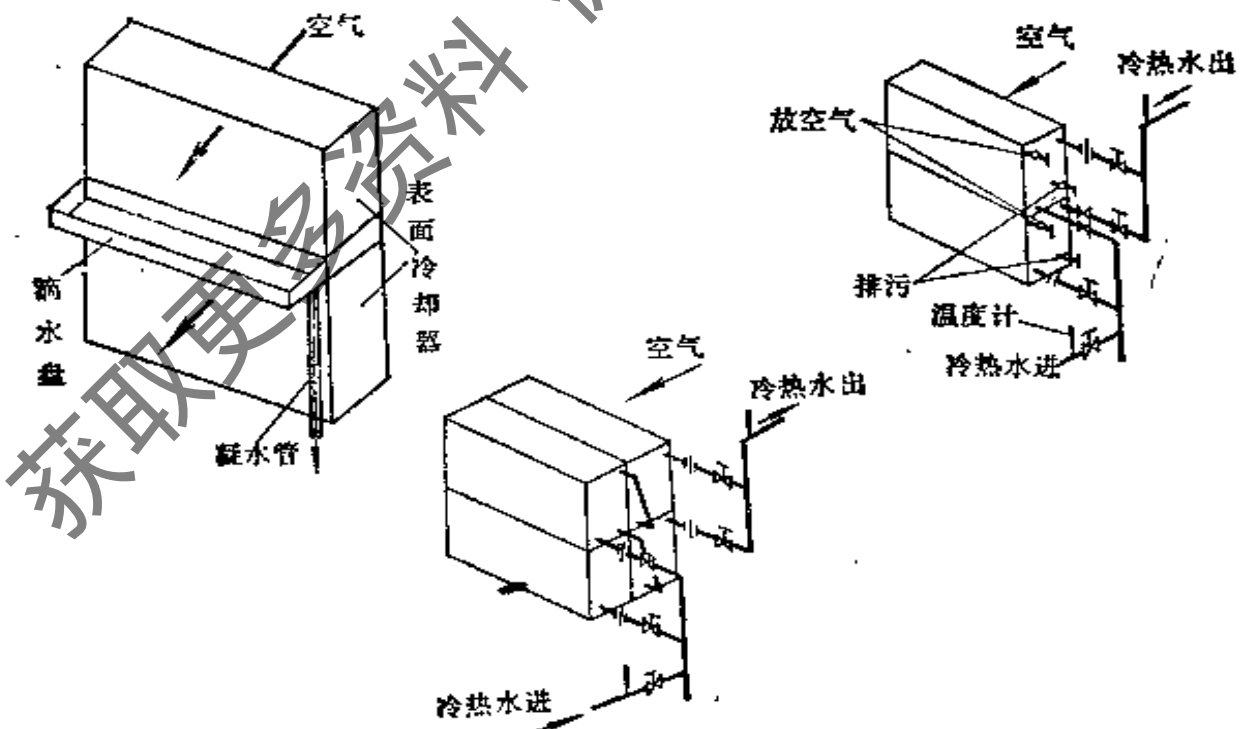


图 4.14 表面式换热器的安装

### 3. 表面式换热器的性能

#### (1) 传热系数

由传热学可知，表面式换热器的热交换能力，在传热面积和交换介质间的温差一定时，主要取决于传热系数的大小。传热系数是衡量表面式换热器热工性能的主要指标。

表面式换热器的传热系数常以以下形式表示：

$$K = \left[ \frac{1}{\alpha_n \phi_0 \xi} + \frac{\tau \delta}{\lambda} + \frac{\tau}{\alpha_n} \right]^{-1} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (4.18)$$

式中：

$\alpha_n, \alpha_w$ ——内、外表面传热系数， $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}]$ ；

$\delta$ ——管壁厚度， $[\text{m}]$ ；

$\lambda$ ——管壁导热系数， $[\text{W}/\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}]$ ；

$\tau$ ——肋化系数， $\tau = F_w / F_n$ ；

$F_n, F_w$ ——单位管长肋管的内、外表面积， $[\text{m}^2]$ ；

$\phi_0$ ——肋表面全效率，与肋管结构特性和外表面传热系数有关；

$\xi$ ——析湿系数，其定义式为  $\xi = \frac{h_1 - h_2}{c_p(t_1 - t_2)}$ ，下标1为空气初

状态，2为空气终状态； $c_p$ 为空气的定压比热。 $\xi$ 的大小直接反映在减湿冷却过程中，空气中凝结水析出的程度，又是反映由于湿交换存在使得传热量增大的程度。

显然，对于加热和等湿冷却过程， $\xi = 1$ 。

由式(4.18)可知，对于已定结构型式的表面式换热器，传热系数的大小，主要取决于空气的流速、水的流速和析湿系数。

实际工作中，对已定结构型式的表面式换热器的传热系数，均通过实验来确定，并将实验结果整理成以下实验公式的形式：

$$K = \left[ \frac{1}{A v_a^m \xi \rho} + \frac{1}{B v_w^n} \right]^{-1} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (4.19)$$

对于以热水为热媒的空气加热器，则一般整理成以下形式：

$$K = A' (v \rho)^{m'} v_w^{n'} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (4.20)$$

对于以蒸汽为热媒的空气加热器，因不考虑蒸汽流速的影响常整理成以下形式

$$K = A''(v\rho)^{m''} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{°C}] \quad (4.21)$$

以下三式中

$A, A', A'', B$ ——实验系数；

$m, m', m'', n, n', p$ ——实验指数；

$v_a$ ——表面式换热器的迎面风速，一般  $v_a = 2 \sim 3 [\text{m}/\text{s}]$ ；

$v\rho$ ——表面式换热器的通风有效截面上的质量风速，对于空气加热器，一般  $v\rho = 8.0 [\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$  左右；

$v_w$ ——表面式换热器的管内水速，一般  $v_w = 0.6 \sim 1.8 [\text{m}/\text{s}]$ ，对于高温水为热媒的空气加热器，水速应更小。

下面对表面式换热器几个面积概念作说明：

迎风面积——换热器迎风的断面积，即断面尺寸长和宽的乘积，

通风有效截面积——迎风断面积减去肋管所占的截面积。

传热面积——肋管的总外表面积，包括管子外表面和肋片表面。

管子内截面积——若管内径为  $d$ ，则内截面积为  $\frac{\pi}{4} d^2$ 。

管内表面积——若肋管内径为  $d$ ，长为  $l$ ，则内表面积为  $\pi dl$ 。

常用表面式换热器的传热系数的实验公式见表 4.11。

表 4.11a 为空气加热器的实验公式

表 4.11b 为表面冷却器的实验公式。

## (2) 热交换效率系数和接触系数

表面式换热器的热工性能除用传热系数衡量外，还应以另一些指标衡量，即热交换效率系数和接触系数（空气加热器不用接触系数）。

与喷水室一样，表面式换热器的热交换效率系数和接触系数是将空气和水的实际状态变化过程与理想过程进行比较的结果。

以表面冷却器为例，如图 4.15。

部分空气加热器的传热系数和阻力计算公式

表 4.11a

| 加热器型号         | 传热系数 $K$ [W/m <sup>2</sup> °C] |                       | 空气阻力 $\Delta H$<br>[Pa]               | 热水阻力<br>[kPa]                       |                               |
|---------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
|               | 蒸 汽                            | 热 水                   |                                       |                                     |                               |
| 5,6,10 D      | $13.6(v\rho)^{0.48}$           |                       | $1.76(v\rho)^{1.392}$                 |                                     |                               |
| 5,6,10 Z      | $13.6(v\rho)^{0.49}$           |                       | $1.47(v\rho)^{0.38}$                  | D型                                  |                               |
| SRZ型 5,6,10 X | $14.5(v\rho)^{0.532}$          |                       | $0.88(v\rho)^{2.12}$                  | $15.2w^{1.94}$                      |                               |
| 7 D           | $14.3(v\rho)^{0.51}$           |                       | $2.06(v\rho)^{1.17}$                  | Z, X型                               |                               |
| 7 Z           | $14.3(v\rho)^{0.51}$           |                       | $2.94(v\rho)^{1.54}$                  | $19.3w^{1.93}$                      |                               |
| 7 X           | $15.1(v\rho)^{0.571}$          |                       | $1.37(v\rho)^{1.017}$                 |                                     |                               |
| SRL型          | B×A/2                          | $15.2(v\rho)^{0.40}$  | $16.5(v\rho)^{0.24*}$                 | $1.71(v\rho)^{1.87}$                |                               |
|               | B×A/3                          | $15.1(v\rho)^{0.43}$  | $14.5(v\rho)^{0.29*}$                 | $3.03(v\rho)^{1.62}$                |                               |
| SYA型          | D                              | $15.4(v\rho)^{0.297}$ | $16.6(v\rho)^{0.36}$<br>$w^{0.226}$   | $0.86(v\rho)^{1.98}$                |                               |
|               | Z                              | $15.4(v\rho)^{0.297}$ | $16.6(v\rho)^{0.36}$<br>$w^{0.226}$   | $0.82(v\rho)^{19.4}$                |                               |
|               | X                              | $15.4(v\rho)^{0.297}$ | $16.6(v\rho)^{0.36}$<br>$w^{0.228}$   | $0.78(v\rho)^{1.87}$                |                               |
| I型            | 2 C                            | $25.7(v\rho)^{0.375}$ |                                       | $0.80(v\rho)^{1.985}$               |                               |
|               | 1 C                            | $26.3(v\rho)^{0.423}$ |                                       | $0.40(v\rho)^{1.935}$               |                               |
| GL或GL-II型     |                                | $19.8(v\rho)^{0.602}$ | $31.9(v\rho)^{0.46}$<br>$w^{0.6}$     | $0.84(v\rho)^{1.862}$               | $10.8w^{1.854}$<br>$\times N$ |
| B, U或型 U-II型  |                                | $19.8(v\rho)^{0.608}$ | $25.5(v\rho)^{0.556}$<br>$w^{0.0115}$ | $0.84(v\rho)^{1.862}$<br>$\times N$ | $10.8w^{1.854}$<br>$\times N$ |

注: (1)  $v\rho$ —空气质量流速, [kg/m<sup>2</sup>s];  $w$ —水流速, [m/s];  $N$ —排数;

(2) \*—用 13[°C] 过热水,  $w=0.023\sim 0.037$  [m/s].



部分水冷式表面冷却器的传热系数和阻力试验公式

表 4.11 b

| 型号              | 排数 | 作为冷却用之传热系数<br>$K[W/m^2\text{°C}]$   | 干冷时空气阻力 $\Delta H_g$ 和湿<br>冷时空气阻力 $\Delta H_s$ [Pa]                  | 水阻力<br>[kPa]                      | 作为热水加热用之传热系数<br>$K[W/m^2\text{°C}]$  |
|-----------------|----|---|--|-----------------------------------|--------------------------------------|
| B 或<br>U-II 型   | 2  | $K = \left[ \frac{1}{34.3 V_y^{0.78} \omega^{1.04}} + \frac{1}{207 \omega^{0.8}} \right]^{-1}$    | $\Delta H_g = 20.97 V_y^{1.39}$                                      |                                   |                                      |
| B 或<br>U-II 型   | 6  | $K = \left[ \frac{1}{31.4 V_y^{0.857} \omega^{0.87}} + \frac{1}{281.7 \omega^{0.8}} \right]^{-1}$ | $\Delta H_g = 29.75 V_y^{1.98}$<br>$\Delta H_s = 38.98 V_y^{1.84}$   | $\Delta h = 64.68 \omega^{1.854}$ |                                      |
| GL 或<br>GL-II 型 | 6  | $K = \left[ \frac{1}{21.1 V_y^{0.845} \omega^{1.15}} + \frac{1}{16.6 \omega^{0.8}} \right]^{-1}$  | $\Delta H_g = 19.30 V_y^{1.862}$<br>$\Delta H_s = 32.05 V_y^{1.695}$ | $\Delta h = 64.68 \omega^{1.854}$ |                                      |
| JW              | 2  | $K = \left[ \frac{1}{42.1 V_y^{0.52} \omega^{1.03}} + \frac{1}{332.6 \omega^{0.8}} \right]^{-1}$  | $\Delta H_g = 5.68 V_y^{0.89}$<br>$\Delta H_s = 25.28 V_y^{1.895}$   | $\Delta h = 8.18 \omega^{1.93}$   | $K = 34.77 V_y^{0.4} \omega^{0.079}$ |

注:  $B_g, B_s$  为排数修正系数, 当排数为 1 时, 修正系数为 1, 当排数大于 1 时, 修正系数大于 1。

续表 4.11b

| 型号    | 非数 | 作为冷却用之传热系数<br>$K[W/m^2C]$  | 干冷时空气阻力 $\Delta H_s$ [Pa]<br>空气阻力 $\Delta H_s$ 和 湿冷时                         | 水阻力<br>[kPa]                | 作为热水加热用之传热系数<br>$K[W/m^2C]$  |
|-------|----|--|--|-----------------------------|--|
| JW    | 4  | $K = \left[ \frac{1}{39.7 V_y^{0.52} l^{1.03}} + \frac{1}{332.6 w^{0.8}} \right]^{-1}$ | $\Delta H_g = 11.96 V_y^{1.72}$<br>$\Delta H_s = 42.8 V_y^{0.992}$           | $h = 12.54 w^{1.98}$        | $K = 31.87 V_y^{0.43} w^{0.08}$  |
| JW    | 6  | $K = \left[ \frac{1}{41.5 V_y^{0.52} l^{1.04}} + \frac{1}{325.6 w^{0.8}} \right]^{-1}$ | $\Delta H_g = 16.66 V_y^{1.75}$<br>$\Delta H_s = 62.23 V_y^{1.11}$           | $\Delta h = 14.5 w^{1.93}$  | $K = 30.7 V_y^{0.495} w^{0.09}$  |
| JW    | 8  | $K = \left[ \frac{1}{35.5 V_y^{0.53} l^{1.0}} + \frac{1}{353.6 w^{0.8}} \right]^{-1}$  | $\Delta H_g = 23.8 V_y^{1.74}$<br>$\Delta H_s = 70.58 V_y^{1.21}$            | $\Delta h = 20.19 w^{1.93}$ | $K = 27.3 V_y^{0.58} w^{0.075}$  |
| SXL-B | 2  | $K = \left[ \frac{1}{27 V_y^{0.425} l^{0.74}} + \frac{1}{157 w^{0.8}} \right]^{-1}$    | $\Delta H_g = 17.35 V_y^{1.54}$<br>$\Delta H_s = 35.29 V_y^{1.46} l^{0.193}$ | $\Delta h = 15.48 w^{1.93}$ | $K = \left[ \frac{1}{21.5 V_y^{0.526}} + \frac{1}{319.8 w^{0.8}} \right]^{-1}$ |

续表 4.11b

| 型号   | 排数 | 作为冷却用之传热系数<br>$K [W/m^2 \cdot ^\circ C]$   | 干冷时空气阻力 $\Delta H_g$ 和湿冷时<br>空气阻力 $\Delta H_s$ [Pa]  | 水阻力<br>[kPa]                 | 作为热水加热用之传热系数<br>$K [W/m^2 \cdot ^\circ C]$                                     |
|------|----|--|--|------------------------------|--|
| KL-1 | 4  | $K = \left[ \frac{1}{32.6 V_y^{0.57} \xi^{0.88}} + \frac{1}{550.1 w^{0.8}} \right]^{-1}$       | $\Delta H_g = 21.21 V_y^{1.825}$<br>$\Delta H_s = 21.01 V_y^{1.913}$                               | $\Delta h = 18.03 w^{2.1}$   | $K = \left[ \frac{1}{23.6 V_y^{0.556}} + \frac{1}{286.1 w^{0.8}} \right]^{-1}$ |
| KL-2 | 4  | $K = \left[ \frac{1}{29 V_y^{0.622} \xi^{0.753}} + \frac{1}{385 w^{0.8}} \right]^{-1}$         | $\Delta H_g = 27 V_y^{1.43}$<br>$\Delta H_s = 42.2 V_y^{1.52} w^{0.18}$                            | $\Delta h = 22.5 w^{1.8}$    | $K = 11.16 V_y + 15.54 w^{0.976}$  |
| KL-3 | 6  | $K = \left[ \frac{1}{27.5 V_y^{0.778} \xi^{0.819}} + \frac{1}{480.5 w^{0.8}} \right]^{-1}$     | $\Delta H_g = 23.3 V_y^{1.75}$<br>$\Delta H_s = 63.3 V_y^{1.2} \xi^{0.15}$                         | $\Delta h = 27.9 w^{1.81}$   | $K = 12.97 V_y + 15.08 w^{0.13}$   |
| CR   | 1  | $K = B \left[ \frac{1}{37.03 v_a^{0.422} \xi^{0.602}} + \frac{1}{289. v_w^{0.8}} \right]^{-1}$ | $\Delta H_g = B_g \cdot 6.53 v_g^{1.742}$<br>$\Delta H_s = B_s \cdot 6.88 v_s^{1.753} \xi^{0.256}$ | $\Delta h = 18.8 v_w^{1.23}$ |  |

表面式换热器的热交换效率是同时考虑空气和水的状态变化，而接触系数仅考虑空气的状态变化。由  $h-x$  图(图 4.15) 可以很方便地推得两个系数的定义式：

热交换效率系数  $\epsilon_1$

$$\epsilon_1 = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{w1}} \quad (4.22)$$

接触系数  $\epsilon_2$

$$\epsilon_2 = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_3}$$

式中

$t_1, t_2$ ——空气的初、终状态温度，[°C]；

$t_{w1}$ ——水的初温，[°C]；

$t_3$  表面式换热器在理想条件下(空气与其接触时间充分长)工作时空气的终状态(饱和状态)温度，[°C]。

热交换效率系数  $\epsilon_1$  实质上是换热器实际换热量与最大可能换热量的比值。由传热原理可知，当水与空气的流动为逆流时(通常都属这一情况)， $\epsilon_1$  可表达成：

$$\epsilon_1 = \frac{1 - e^{-\beta(1-\gamma)}}{1 - \gamma e^{-\beta(1-\gamma)}} \quad (4.23)$$

式中

$\beta$ ——传热单元数， $\beta = KF/\xi Gc_p$ ；

$\gamma$ ——两流体的水当量比， $\gamma = \xi Gc_p/Wc_o$ 。

由式(4.23)可知，热交换效率系数  $\epsilon_1$  主要与换热器的结构型式，空气和水的流速及析湿系数有关，为了简化计算，将式(4.23)制成线算图(图 4.16)。  $\epsilon_1$  也可通过实验得到，实验结果常整理成  $\epsilon_1 = f(v_a, v_w, \xi)$  的形式。

接触系数  $\epsilon_2$  与喷水室的接触系数  $\eta_2$  有相同的意义，由图 4.15 作进一步分析可推得：

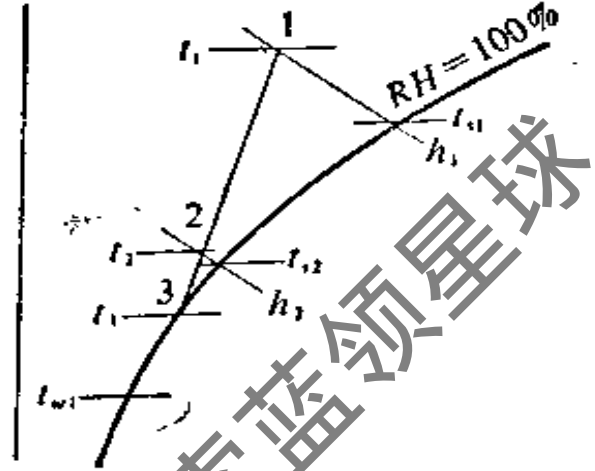


图 4.15 表面冷却器处理空气时的各个参数

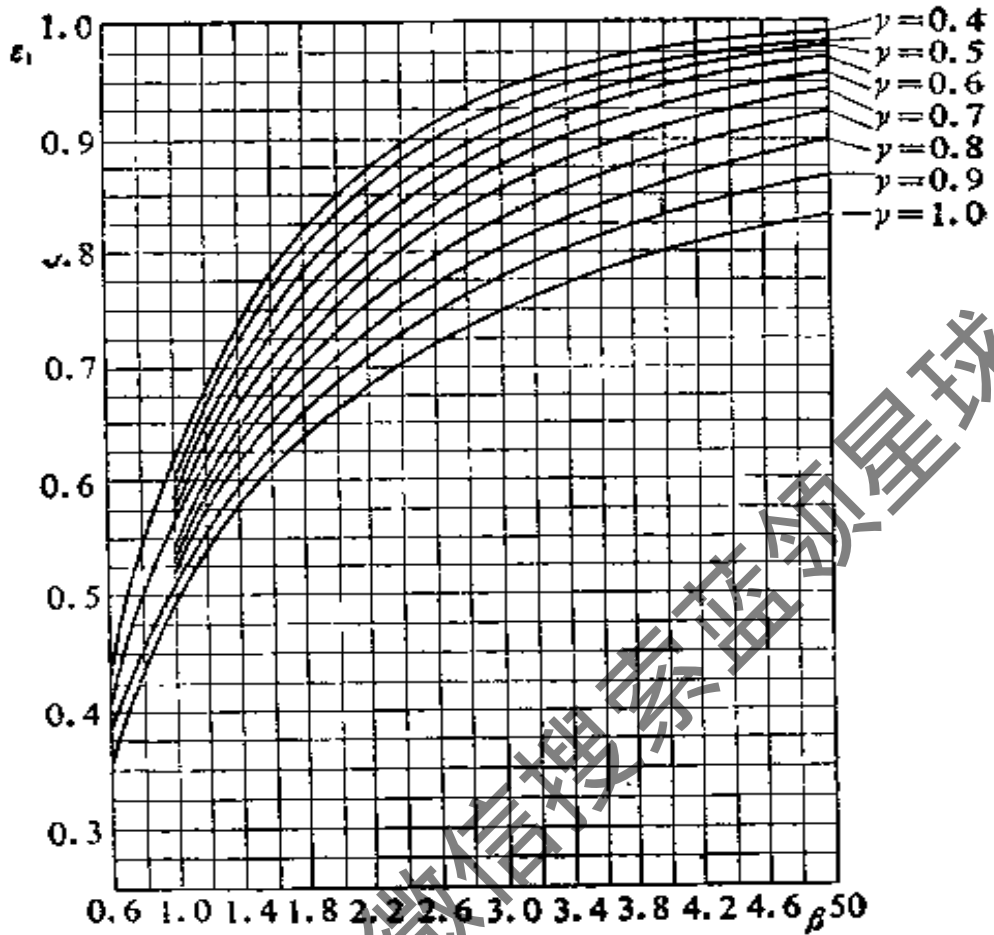


图 4.16  $\epsilon_1$  值线算图(适用于排数  $\geq 4$  排)

$$\epsilon_2 = 1 - \frac{t_2 - t_{s2}}{t_1 - t_{s1}} \quad (4.24)$$

$\epsilon_2$  的理论公式表达成:

$$\epsilon_2 = 1 - e^{-\frac{\alpha_w a N}{v \rho c_p}} \quad (4.25)$$

式中

$\alpha_w$ ——换热器外表面传热系数,  $[\text{W}/\text{m}^2\text{°C}]$ ;

$a$ ——换热器的肋通系数,  $a = F/NF_a$ ;

$F$ ——换热器的传热面积,  $[\text{m}^2]$ ;

$F_a$ ——换热器的迎风面积,  $[\text{m}^2]$ ;

$N$ ——换热器的管排数。

由式(4.25)可知, 接触系数  $\epsilon_2$  主要取决于其结构型式和空

气流速。虽然  $\varepsilon_2$  值有如式(4.25)的理论公式,但由于  $\alpha_{10}$  通常由实验确定。所以不同结构型式的换热器的接触系数  $\varepsilon_2$  值均由实验确定,并将实验结果整理成  $\varepsilon_2 = f(v_a, N)$  的形式。

常用表面式换热器的  $\varepsilon_2$  值见表(4.12)。

水冷式表面冷却器的  $\varepsilon_2$  值

表 4.12

| 冷却器型号                      | 排数 | 迎面风速 $V_v$ [m/s] |       |       |       |
|----------------------------|----|------------------|-------|-------|-------|
|                            |    | 1.5              | 2.0   | 2.5   | 3.0   |
| B 或 U-II 型<br>GL 或 GL-II 型 | 2  | 0.513            | 0.518 | 0.499 | 0.484 |
|                            | 4  | 0.791            | 0.767 | 0.748 | 0.733 |
|                            | 6  | 0.905            | 0.887 | 0.875 | 0.863 |
|                            | 8  | 0.957            | 0.946 | 0.937 | 0.930 |
| JW 型                       | 2  | 0.590            | 0.545 | 0.515 | 0.490 |
|                            | 4  | 0.841            | 0.797 | 0.768 | 0.740 |
|                            | 6  | 0.940            | 0.911 | 0.888 | 0.872 |
|                            | 8  | 0.977            | 0.964 | 0.954 | 0.945 |
| SXL-B 型                    | 2  | 0.826            | 0.440 | 0.423 | 0.408 |
|                            | 4  | 0.97             | 0.688 | 0.665 | 0.649 |
|                            | 6  | 0.995            | 0.800 | 0.806 | 0.792 |
|                            | 8  | 0.999            | 0.824 | 0.887 | 0.877 |
| KL-1 型                     | 2  | 0.466            | 0.440 | 0.423 | 0.408 |
|                            | 4  | 0.715            | 0.688 | 0.665 | 0.649 |
|                            | 6  | 0.848            | 0.800 | 0.806 | 0.792 |
|                            | 8  | 0.917            | 0.824 | 0.887 | 0.877 |
| KL-2 型                     | 2  | 0.553            | 0.530 | 0.511 | 0.493 |
|                            | 4  | 0.800            | 0.780 | 0.762 | 0.743 |
|                            | 6  | 0.909            | 0.896 | 0.886 | 0.870 |
| KL-3 型                     | 2  | 0.450            | 0.439 | 0.429 | 0.418 |
|                            | 4  | 0.700            | 0.685 | 0.672 | 0.660 |
|                            | 6  | 0.834            | 0.823 | 0.813 | 0.802 |
| CR 型                       | 2  | 0.732            | 0.696 | 0.661 | 0.625 |
|                            | 4  | 0.879            | 0.868 | 0.857 | 0.848 |
|                            | 6  | 0.949            | 0.940 | 0.936 | 0.932 |
|                            | 8  | 0.962            | 0.959 | 0.957 | 0.956 |

(3) 表面式换热器的阻力

表面式换热器的阻力包括空气阻力和水阻力。不同结构型式的表面式换热器的阻力均由实验得出，常将实验结果整理成以下实验公式的形式：

$$\text{空气阻力：加热 } \Delta H = B(v\rho)^p, [\text{Pa}] \quad (4.26)$$

$$\text{等湿冷却 } \Delta H_g = B'v_a^{p'}, [\text{Pa}] \quad (4.27)$$

$$\text{减湿冷却 } \Delta H_s = B''v_a^{p''}\xi^q, [\text{Pa}] \quad (4.28)$$

$$\text{水阻力： } \Delta h = cv_w^{q'}, [\text{kPa}] \quad (4.29)$$

以上四式中

$B, B', B'', C$ ——实验系数；

$p, p', p'', q, q'$ ——实验指数。

以蒸汽为热媒的空气加热器，只要使进口蒸汽的压力不小于 2.95 [kPa] (表压)，就能正常工作。

常用表面式换热器的空气阻力和水阻力的实验公式见表 4.11。

#### 4. 表面式换热器的热工计算方法

##### (1) 空气加热器的热工计算方法

空气加热器的热工计算分为两种类型，即设计性计算和校核计算见表(4.13)。

设计性计算只要满足加热器供给的热量  $Q'$  等于加热空气需要的热量  $Q$ 。即：

$$Q = GC_p(t_2 - t_1) \quad (4-30)$$

$$Q' = KF \Delta t_m \quad (4-31)$$

式中

$t_1, t_2$ ——空气的初终温度，[°C]；

$\Delta t_m$ ——传热温差，[°C]；

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}}, \quad [^\circ\text{C}]. \quad (4-32)$$

式中

$\Delta t_{\max}$ ——空气与冷(热)媒的大值温差，[°C]；

加热器的热工计算类型

表 4.13

| 计算类型  | 已知条件  | 计算内容  |
|-------|---|---|
| 设计性计算 | 空气量 $G$<br>空气初、终温度 $t_1, t_2$<br>蒸汽参数 $p(t_g)$                                | 加热器型号, 台数, 排数(加热面积 $F$ )                                  |
|       | 空气量 $G$<br>空气初、终温度 $t_1, t_2$<br>热水量 $W$                                      | 加热器型号, 台数, 排数(加热面积 $F$ )<br>热水初温 $t_{w1}$ , 热水终温 $t_{w2}$ |
|       | 空气量 $G$<br>空气初、终温度 $t_1, t_2$<br>热水初温 $t_{w1}$                                | 加热器型号, 台数, 排数(加热面积 $F$ )<br>热水终温 $t_{w2}$<br>热水量 $W$      |
|       | 空气量 $G$<br>空气初温 $t_1$<br>加热器型号, 台数, 排数(加热面积 $F$ )<br>热水初温 $t_{w1}$<br>热水量 $W$ | 空气终温 $t_2$<br>热水终温 $t_{w2}$                               |

$\Delta t_{min}$ ——空气与冷(热)媒的小值温差, [°C]。

当  $\Delta t_{max}/\Delta t_{min} < 2$  时, 可以采用

$$\Delta t_m = \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} - \frac{t_1 + t_2}{2}, \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.33)$$

$t_{w1}, t_{w2}$ ——冷(热)媒的进出口温度, [°C]。

对于以蒸汽为热媒时,



$$\Delta t_m = t_g - \frac{t_1 + t_2}{2}, \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.34)$$

$t_g$ ——蒸汽温度, [°C]。蒸汽温度与压力的关系见表 4.14。

饱和水蒸汽压力与温度关系 表 4.14

|                   |       |     |     |     |     |     |     |     |      |
|-------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 压力[kPa]<br>(绝对压力) | 101.3 | 143 | 199 | 270 | 362 | 476 | 618 | 792 | 1003 |
| 温度[°C]            | 100   | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180  |

校核性计算则还应满足加热器能达到的热交换效率系数  $\epsilon_1$  应该等于空气处理过程需要的热交换效率系数  $\epsilon_1$ 。此时  $\epsilon_1$  的定义式应为:

$$\epsilon_1 = \frac{t_2 - t_1}{t_{N1} - t_1} = \frac{1 - e^{-\beta(1-\gamma)}}{1 - \gamma e^{-\beta(1-\gamma)}} = f(v_a, v_w) \quad (4.35)$$

### (2) 表面冷却器的热工计算方法

同空气加热器一样, 表面冷却器的热工计算亦分为设计性和校核性计算, 见表 4.15。

表面冷却器的热工计算类型 表 4.15

| 计算类型     | 已知条件   | 计算内容  |
|----------|--|---|
| 设计性计算(1) | 空气量 $G$<br>空气初状态 $t_1, t_{s1}(h_1, \dots)$<br>空气终状态 $t_2, t_{s2}(h_2, \dots)$<br>冷水量 $W$           | 冷却器型号, 台数, 排数(冷却面积 $F$ )<br>冷水初温 $t_{w1}$ , 终温 $t_{w2}$ |
| 设计性计算(2) | 空气量 $G$<br>空气初状态 $t_1, t_{s1}(h_1, \dots)$<br>空气终状态 $t_2, t_{s2}(h_2, \dots)$<br>冷水初温 $t_{w1}$     | 冷却器型号, 台数, 排数(冷却面积 $F$ )<br>冷水终温 $t_{w2}$<br>冷水量 $W$    |
| 校核性计算    | 空气量 $G$<br>空气初状态 $t_1, t_{s1}(h_1, \dots)$<br>冷却器型号, 台数, 排数(冷却面积 $F$ )<br>冷水初温 $t_{w1}$<br>冷水量 $W$ | 空气量 $t_2, t_{s2}(h_2, \dots)$<br>空气终温 $t_{w2}$          |

无论是设计性还是校核性计算，均应满足以下要求：

- 1) 表面冷却器能达到的  $\varepsilon_1$  应等于空气处理过程需要的  $\varepsilon_1$ ；
- 2) 表面冷却器能达到的  $\varepsilon_2$  应等于空气处理过程需要的  $\varepsilon_2$ ；
- 3) 表面冷却器能吸收的热量应等于空气放出的热量。

即：

$$\varepsilon_1 = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{w1}} = \frac{1 - e^{-\beta(1-\gamma)}}{1 - \gamma e^{-\beta(1-\gamma)}} = f(v_a, v_w, \xi) \quad (4.36)$$

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{t_2 - t_{s2}}{t_1 - t_{s1}} = 1 - e^{-\frac{a_w F}{G c_p}} = f(v_a N), \quad (4.37)$$

$$Q = G(h_1 - h_2) = Wc(t_{w2} - t_{w1}) \quad (4.38)$$

### (3) 表面式换热器的安全系数

表面式换热器，无论是空气加热器或表面冷却器，在运行后内外表面积垢，将影响传热效果。所以为安全考虑，在选择表面式换热器时应考虑一定的安全系数。

空气加热器一般采用增加传热面积的方法，实际传热面积应为计算面积的 1.1~1.2 倍。

表面冷却器则采用降低一些计算进口水温的方法考虑安全系数。

下面以例题说明在常用情况下表面式换热器的计算方法和步骤。

**【例 4.3】** 需要将  $G = 16.67$  [kg/s] 的空气从  $t_1 = -32.0$  [°C] 加热到  $t_2 = 31$  [°C]，热媒是  $P = 2.94$  [kPa] (表压) 的蒸汽，要求选择合适的空气加热器。

**【解】** 本例为空气加热器的设计性计算，解题方法步骤如下：

#### 1) 初选加热器型号

a. 根据空气加热器空气流速要求，先定  $v\rho' = 8.0$  [kg/m<sup>2</sup>s]，求得需要的加热器的通风有效截面积为：

$$f' = \frac{G}{v\rho'} = \frac{16.7}{8.0} = 2.08 \text{ [m}^2\text{]}$$

b. 根据  $f' = 2.08$  [m<sup>2</sup>]，查表 4.10 d，SRZ 15×10 Z 型空气加热器的通风有效截面积为 0.932 [m<sup>2</sup>]，传热面积为 52.96 [m<sup>2</sup>]。采用两台并联。求得实际的空气质量流速为：

$$v\rho = \frac{G}{2f} = \frac{16.7}{2 \times 0.932} = 8.9 \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$

2) 求加热器的传热系数

从表 4.11 a 查得 SRZ-10 Z 型加热器的传热系数的实验公式为:

$$K = 13.6(v\rho)^{0.49} \text{ [W/m}^2\text{°C]}$$

将实际的  $v\rho = 8.9 \text{ [kg/m}^2\text{°C]}$  代入, 得:

$$K = 13.6 \times 8.9^{0.49} = 39.7 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$$

3) 计算加热器传热面积

a. 计算加热空气需要的热量

$$Q = Gc_p(t_2 - t_1) = 16.67 \times 1.01 \times [31 - (-32)] = 1062 \times 10^3 \text{ [W]}$$

b. 由加热器供给的热量  $Q'$  等于加热空气需要的热量  $Q$ , 求需要的加热器的传热面积

$$Q' = Q = KF\Delta t_m = 1062 \times 10^3 \text{ [W]}$$

$$\Delta t_m = t_q - \frac{t_1 + t_2}{2}$$

根据蒸汽压力(绝对压力 = 表压 + 101.325 [kPa], 查表 4.14 得  $t_q = 143 \text{ [°C]}$

$$\Delta t_m = 143 - \frac{31 + (-32)}{2} = 142.5 \text{ [°C]}$$

代入有关数据得:

$$F = \frac{1062 \times 10^3}{39.7 \times 142.5} = 188 \text{ [m}^2\text{]}$$

c. 求需要的加热器台数

$$N = \frac{188}{52.95} = 3.5 \text{ 取 } N = 4 \text{ 台}$$

安装方式为两台串联和两台并联。则实际传热面积为:

$$F' = 52.95 \times 4 = 212 \text{ [m}^2\text{]}$$

4) 检查安全系数

$$\frac{F'}{F} = \frac{212}{188} = 1.13$$

满足安全系数要求, 所选择加热器合适。

5) 计算空气阻力

由表 4.11 a 查得, SRZ-10Z 型空气加热器的空气阻力实验公式为:

$$\Delta H = 1.47 (v\rho)^{1.98} \text{ [Pa]}$$

将  $v\rho = 8.9$  代入, 且空气加热器为两台串联安装, 求得

$$\Delta H = 1.47 \times 8.9^{1.98} \times 2 = 223.0 [\text{Pa}]$$

【例 4.4】已知空气量  $G = 1.33 [\text{kg/s}]$ , 空气初温  $t_1 = 21.0 [^\circ\text{C}]$ , 加热器为 U II -4-18-21 型, 以热水为热媒, 进水温度  $t_{w1} = 60.0 [^\circ\text{C}]$ , 水量  $W = 2.22 [\text{kg/s}]$ . 求空气的终温  $t_2$  和出水温度  $t_{w2}$ .

【解】本例为空气加热器的校核计算, 解题方法步骤如下:

1) 求加热器的传热系数

a. 由表 4.10 c 查 U II -4-18-30 的结构参数得

通风有效截面积  $f = 0.216 [\text{m}^2]$ ; 通水管断面积  $f_w = 0.00277 [\text{m}^2]$ ; 传热面积 (排数 4)  $F = 6.75 \times 4 = 27.0 [\text{m}^2]$

b. 求空气质量流速  $v\rho$ 、管内水流速  $v_w$ .

$$v\rho = \frac{G}{f} = \frac{1.33}{0.216} = 6.17 [\text{kg/m}^2\text{s}]$$

$$v_w = \frac{W}{f_w \cdot \rho_w} = \frac{2.22}{0.00277 \times 1000} = 0.802 [\text{m/s}] \quad (\text{采用 } \rho_w = 1000 [\text{kg/m}^3])$$

c. 由表 4.11 a, 查得 U II 型空气加热器的传热系数实验公式为:

$$\text{以热水为热媒: } K = 25.5(v\rho)^{0.556} v_w^{0.0115} [\text{W/m}^2\text{C}]$$

$$\text{代入 } v\rho, v_w \text{ 求得: } K = 25.5 \times 6.17^{0.556} \times 0.802^{0.0115} = 69.96 [\text{W/m}^2\text{C}]$$

2) 求加热器的热交换效率系数  $e_1$

a. 求传热单元数  $\beta$  及两流体的水当量比  $\gamma$

$$\beta = \frac{KF}{Gc_p}, \quad \gamma = \frac{Gc_p}{Wc}$$

代入已知数据, 求得:

$$\beta = \frac{69.96 \times 27}{1.33 \times 1.01 \times 10^3} = 1.405, \quad \gamma = \frac{1.33 \times 1.01}{2.22 \times 4.19} = 0.144$$

b. 求热交换效率系数  $e_1$  值

$$e_1 = \frac{1 - e^{-\beta(1-\gamma)}}{1 - \gamma e^{-\beta(1-\gamma)}} = \frac{1 - e^{-1.405 \times (1-0.144)}}{1 - 0.144 e^{-1.405 \times (1-0.144)}} = 0.731$$

3) 求空气终温  $t_2$

由式(4.35)得

$$e_1 = \frac{t_2 - t_1}{t_{w1} - t_1} = 0.731$$

$$\text{则} \quad t_2 = t_1 + 0.731(t_{w1} - t_1)$$

代入已知数据求得:

$$t_2 = 21 + 0.731 \times (60 - 21) = 49.5 [^\circ\text{C}]$$

4) 求加热空气需要热量  $Q$

$$Q = Gc_p(t_2 - t_1) = 1.33 \times 1.01 \times (49.5 - 21) = 38.28 \times 10^3 \text{ [W]}$$

5) 求出水温度  $t_{w2}$

由热平衡式  $GC_p(t_2 - t_{s2}) = Wc(t_{w2} - t_{w1}) = Q$

得

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{Q}{Wc} = 60 - \frac{38.28 \times 10^3}{2.22 \times 4.19 \times 10^3} = 56.9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

【例 4.5】 已知空气量  $G = 1.33 \text{ [kg/s]}$ , 当地大气压  $P = 101325 \text{ [Pa]}$ 。空气初状态参数为  $t_1 = 27 \text{ [}^\circ\text{C]}$ ,  $t_{s1} = 19.5 \text{ [}^\circ\text{C]}$ ,  $h_1 = 55.5 \text{ [kJ/kg 干]}$ , 要求的空气终状态参数  $t_2 = 13.7 \text{ [}^\circ\text{C]}$ ,  $t_{s2} = 12.7 \text{ [}^\circ\text{C]}$ ,  $h_2 = 35.0 \text{ [kJ/kg 干]}$ 。试选择合适的 U II 型表面冷却器, 并确定水温水量。

【解】 本例为表面冷却器的设计性计算, 解题方法步骤如下:

1) 计算空气处理过程需要的接触系数  $e_2$ , 确定表面冷却器排数

a. 由本例所给条件求得

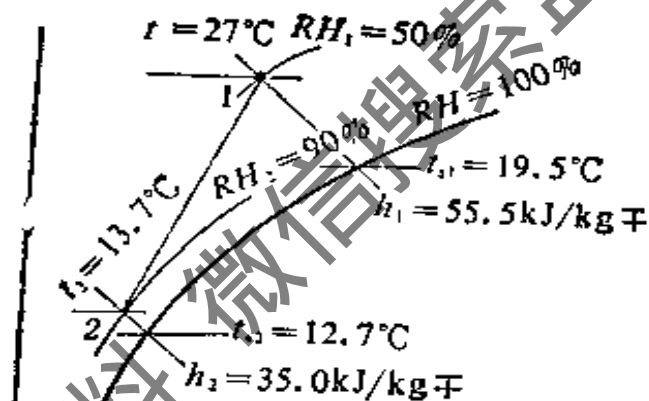


图 4.17 例题 4.5 附图

$$e_2 = 1 - \frac{t_2 - t_{s2}}{t_1 - t_{s1}} = 1 - \frac{13.7 - 12.7}{27 - 19.5} = 0.867$$

b. 由表 4.12 查得在表面冷却器常用的迎面风速范围内 ( $v_a = 2 \sim 3 \text{ [m/s]}$ ) U II 型表面冷却器排数为 6 排时能满足需要接触系数  $e_2 = 0.867$  的要求, 所以确定排数为 6 排。

2) 确定表面冷却器的型号

a. 根据表面冷却器常用迎面风速, 先假定迎面风速算出所需表面冷却器的迎风面积  $F'_a$ 。现假定迎面风速  $v'_a = 2.5 \text{ [m/s]}$ , 求得:

$$F'_a = \frac{G}{v'_a \rho} = \frac{1.33}{2.5 \times 1.2} = 0.44 \text{ [m}^2\text{]},$$

b. 查表 4.10 c, 选择与  $F'_a$  相近迎风面积的表面冷却器的型号为 U II -6-18-24 型。其迎风面积  $F_a = 0.39 \text{ [m}^2\text{]}$ 。求得实际的迎面风速为:

$$v_a = \frac{G}{F_a \rho} = \frac{1.33}{0.39 \times 1.2} = 2.85 [\text{m/s}]$$

c. 再查表 4.12, 当  $v_a = 2.85 [\text{m/s}]$ , U II -6-18-24 型表面冷却器实际的  $e_2 = 0.867$ , 满足需要, 故所选表面式冷却器合适。若两者相差太大则应重新选择。由表 4.10c 查得: U II -6-18-24 型表面冷却器的传热面积  $F = 0.75 \times 6 = 40.5 [\text{m}^2]$ 。通水管断面积  $f_w = 0.00277 [\text{m}^2]$ 。

3) 求析湿系数  $\xi$

将已知数据代入  $\xi$  的定义式求得:

$$\xi = \frac{h_1 - h_2}{c_p(t_1 - t_2)} = \frac{55.5 - 35.0}{1.01 \times (27 - 13.7)} = 1.53$$

4) 求传热系数  $K$ :

a. 根据表面冷却器常用水流速范围 ( $v_w = 0.5 \sim 1.5 [\text{m/s}]$ ), 确定  $v_w = 1.0 [\text{m/s}]$

s]

b. 查表 4.11 b, U II 型表面冷却器的传热系数实验公式为:

$$K = \left[ \frac{1}{31.4 v_w^{0.857} \xi^{0.87}} + \frac{1}{281.7 v_w^{0.9}} \right]^{-1} [\text{W/m}^2\text{°C}]$$

代入已知数据求得:

$$K = \left[ \frac{1}{31.4 \times 2.85^{0.857} \times 1.53^{0.87}} + \frac{1}{281.7 \times 1.0^{0.9}} \right]^{-1} = 79.77 [\text{W/m}^2\text{°C}]$$

5) 求冷水量  $W$

$$W = f_w \cdot v_w \cdot \rho_w = 0.00277 \times 1.0 \times 1000 = 2.77 [\text{kg/s}]$$

6) 求表面冷却器能达到的热交换率系数  $e_1$

a. 求传热单元数  $\beta$  和两流体水当量比  $\gamma$

$$\beta = \frac{KF}{\xi G c_p} = \frac{79.77 \times 40.5}{1.53 \times 1.33 \times 1.01 \times 10^3} = 1.57$$

$$\gamma = \frac{\xi G c_p}{W c} = \frac{1.53 \times 1.33 \times 1.01}{2.77 \times 4.19} = 0.18$$

b. 求得  $e_1$  值为

$$e_1 = \frac{1 - e^{-\beta(1-\gamma)}}{1 - \gamma e^{-\beta(1-\gamma)}} = \frac{1 - e^{-1.57 \times (1-0.18)}}{1 - 0.18 e^{-1.57 \times (1-0.18)}} = 0.763$$

7) 求水温  $t_{w1}, t_{w2}$

a. 由  $e_1 = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{w1}}$ , 求得水的初温为

$$t_{w1} = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\varepsilon_1} = 27 - \frac{27 - 13.7}{0.763} = 9.56 [^{\circ}\text{C}]$$

b. 由  $G(h_1 - h_2) = Wc(t_{w2} - t_{w1})$ , 求得水的终温为:

$$t_{w2} = t_{w1} + \frac{G(h_1 - h_2)}{Wc} = 9.56 + \frac{1.33 \times (55.5 - 35.0)}{2.77 \times 4.19} = 11.9 [^{\circ}\text{C}]$$

8) 求表面冷却器的空气阻力和水阻力

查表 4.16, U II 型(排数 6 排)表面冷却器的阻力实验公式为:

空气阻力(减湿冷却):

$$\Delta H_s = 38.93 v_a^{1.84} [\text{Pa}]$$

水阻力:

$$\Delta h = 64.68 v_w^{1.854} [\text{kPa}]$$

代入  $v_a$  及  $v_w$  值得:

$$\Delta H = 38.93 \times 2.85^{1.84} = 267.4 [\text{Pa}]$$

和

$$\Delta h = 64.68 \times 1.0^{1.854} = 64.68 [\text{kPa}]$$

【例 4.6】已知空气量  $G = 1.33 [\text{kg/s}]$ , 当地大气压  $P = 101325 [\text{Pa}]$ 。空气的初状态参数为  $t_1 = 34.0 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $t_{s1} = 28.3 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $h_1 = 91.2 [\text{kJ/kg}]$ , 冷水量  $W = 2.77 [\text{kg/s}]$ , 冷水初温  $t_{w1} = 12.0 [^{\circ}\text{C}]$ 。求用 U II-6-18-24 型表面冷却器处理空气所能达到的空气终态和冷水终温。

【解】本例为校核性计算, 计算方法步骤如下:

1) 确定空气终状态参数

a. 由于空气终状态参数待求, 可先假定空气终温  $t_2$  (一般可根据  $t_2 = t_{w1} + 4 \sim 8 [^{\circ}\text{C}]$  假设) 进行计算, 然后根据计算结果来检验这一假定值是否正确。现设空气终温  $t'_2 = t_{w1} + 6 = 12 + 6 = 18 [^{\circ}\text{C}]$ 。

b. 根据  $\varepsilon_2 = 1 - \frac{t_2 - t_{s2}}{t_1 - t_{s1}}$  求  $t_{s2}$ 。由例 4.5 已知  $\varepsilon_2 = 0.867$ , 则求得:

$$t'_{s2} = t'_2 - (t_1 - t_{s1})(1 - \varepsilon_2) = 18 - (34 - 28.3) \times (-0.867) = 17.2 [^{\circ}\text{C}]$$

查  $h-x$  图得:  $h'_2 = 48.2 [\text{kJ/kg 干}]$

2) 求析湿系数

$$\xi = \frac{h_1 - h'}{c_p(t_1 - t'_2)} = \frac{91.2 - 48.2}{1.01 \times (34 - 18)} = 2.66$$

3) 求传热系数  $K'$

将例 4.5 中已得的  $v_a = 2.85 [\text{m/s}]$ ,  $v_w = 1.0 [\text{m/s}]$  及  $\xi = 2.66$  代入 U II-6-18-24 型表面冷却器的传热系数实验公式得:

$$K' = \left[ \frac{1}{31.4 \times 2.85^{0.857} \times 2.66^{0.87}} + \frac{1}{281.7 \times 1.0^{0.8}} \right]^{-1}$$

$$= 110.0 [\text{W}/\text{m}^2\text{°C}]$$

4) 求表面冷却器能达到的  $e_1'$  值

$$\beta' = \frac{K'F}{\xi'Gc_p} = \frac{110.0 \times 40.5}{2.66 \times 1.33 \times 1.01 \times 10^3} = 1.25$$

$$\gamma' = \frac{\xi'Gc_p}{Wc} = \frac{2.66 \times 1.33 \times 1.01}{2.77 \times 4.19} = 0.308$$

$$e_1' = \frac{1 - e^{-\beta'(1-\gamma')}}{1 - \gamma'e^{-\beta(1-\gamma')}} = \frac{1 - e^{-1.25 \times (1-0.308)}}{1 - 0.308e^{-1.25 \times (1-0.308)}} = 0.665$$

5) 检验假设空气终温  $t_2'$

由  $e_1' = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{w1}}$  求  $t_2$  得:

$$t_2 = t_1 - e_1'(t_1 - t_{w1}) = 34 - 0.665 \times (34 - 12) = 19.4 [\text{°C}]$$

所求空气终温  $t_2$  与假设值  $t_2'$  相差太大,故应重新计算。重新计算  $t_2'$  可依  $t_2' =$

$$\frac{t_2 + t_2'}{2} \text{ 假设。}$$

本例经以上计算求得空气终参数为

$$t_2 = 19.1 [\text{°C}], t_{w2} = 18.5 [\text{°C}], h_2 = 51.8 [\text{kJ}/\text{kg干}]$$

6) 求冷水终温  $t_{w2}$

由热平衡式:  $G(h_1 - h_2) = Wc(t_{w2} - t_{w1})$  求得冷水终温为

$$t_{w2} = \frac{G(h_1 - h_2)}{Wc} + t_{w1} = \frac{1.33 \times (91.2 - 51.8)}{2.77 \times 4.19} + 12 = 16.5 [\text{°C}]$$

#### 4.1.4 空气热、湿处理的其他设备

在空调工程中,除了用喷水室和表面式换热器作为空气的热湿处理设备外,在某些场合还常用电加热器和蒸汽加湿器作为空气的加热和加湿设备。有时还用一些减湿设备,如常见的冷却减湿机和固体或液体吸湿装置等。

##### 1. 电加热器

电加热器是电流通过电热丝或电热管来加热空气的设备,具有加热均匀、热量稳定、效率高,结构紧凑,且易于实现温度自动控制等优点。因此在小型空调系统和小型空调装置中应用较广。对于



温度控制精度要求较高的大型空调系统，有时也将电加热器装在各送风支管中以实现温度的分区控制。

电加热器按其构造不同大致可分为两种类型：

(1) 裸线式电加热器，见图 4.18。具有热惰性小、加热迅速、结构简单等优点，但其安全性差。此外裸线电热丝表面温度太高，会使粘附其上的杂质分解，产生异味、影响空调效果。

(2) 管式电加热器，见图 4.19。具有加热均匀、热量稳定，耐用和安全等优点。但其加热热惰性大，结构复杂。

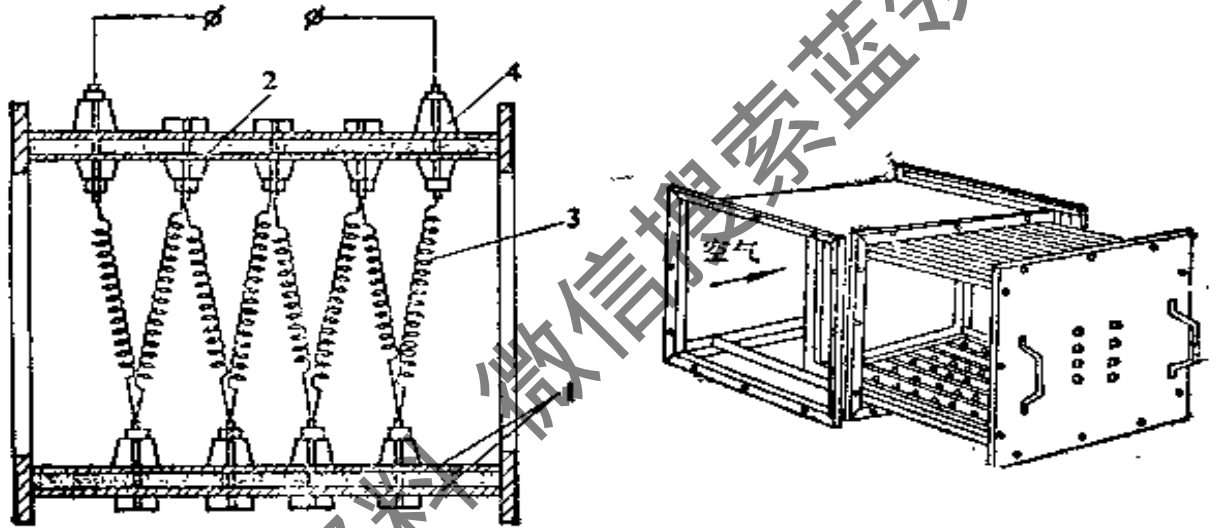


图 4.18 裸线式电加热器

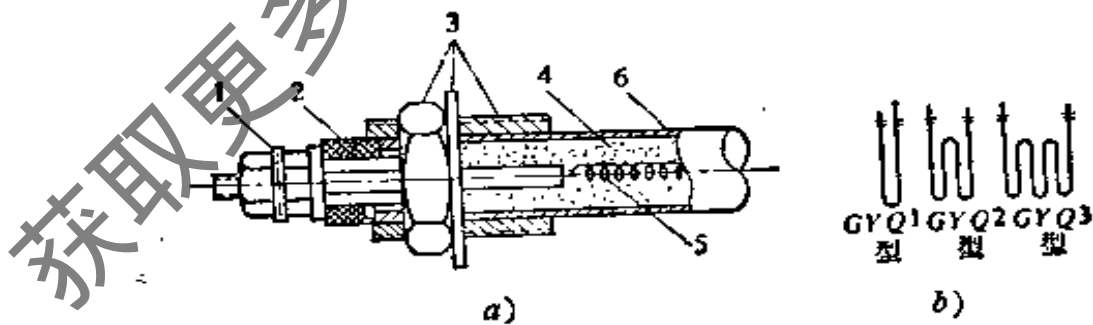


图 4.19 管状电热元件

电加热器的选择比较简单，直接按加热空气需要的热量选择加热器的功率。管式电加热器均为专门工厂定型生产，以便于选择和安装。通常将所选的电加热器的总功率分为多档，以便实现分

档调节控制,亦可用调压设备,通过电压的调节控制所需的加热功率。

通过电加热器的风速应在  $8\sim 12[\text{m/s}]$ ,以免风速过低造成加热器表面温度过高。

## 2. 蒸汽加湿设备

在使用表面式换热器作为冷、热交换设备的空调系统中,可用蒸汽加湿设备直接向空气混进蒸汽来实现空气的加湿。在这种空气加湿过程中空气的显热变化甚少,温度只有少量变化(如图4.20中的1-2-3)。所以可近似地当作等温加湿过程。

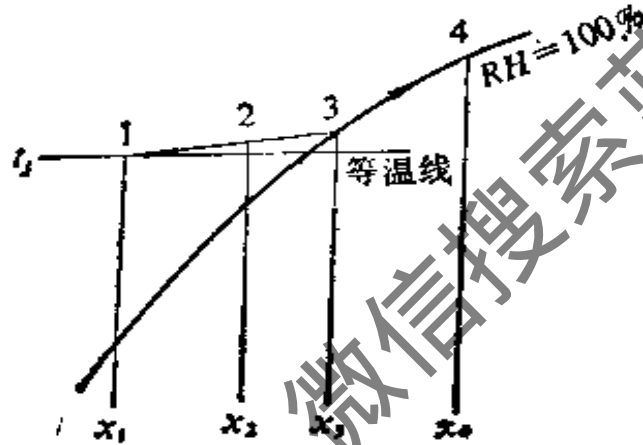


图 4.20 蒸汽加湿时空气状态的变化

蒸汽加湿设备依工作原理不同可分为以下两种:

### (1) 蒸汽喷管

在管子上开若若干个小孔,使蒸汽从小孔喷出,与流过的空气混合,达到加湿空气的目的。

为了避免由于蒸汽在管子中凝结而使喷出的蒸汽带水,常用图4.21形式的干式蒸汽加湿器。其流程为:蒸汽先进入喷管外套加热喷管壁,再经导流板进入加湿器筒体,使凝结水分离,再经干燥室进入喷管喷出干蒸汽。从而保证了空气等温加湿效果的控制。

### (2) 电加湿器

电加湿器是用电能直接加热水以产生蒸汽。用短管将蒸汽喷入空气中或将电加湿装置直接装在风道内,使蒸汽直接混入流过的空气。其产生蒸汽所用的加热元件可以用管状电热元件或电

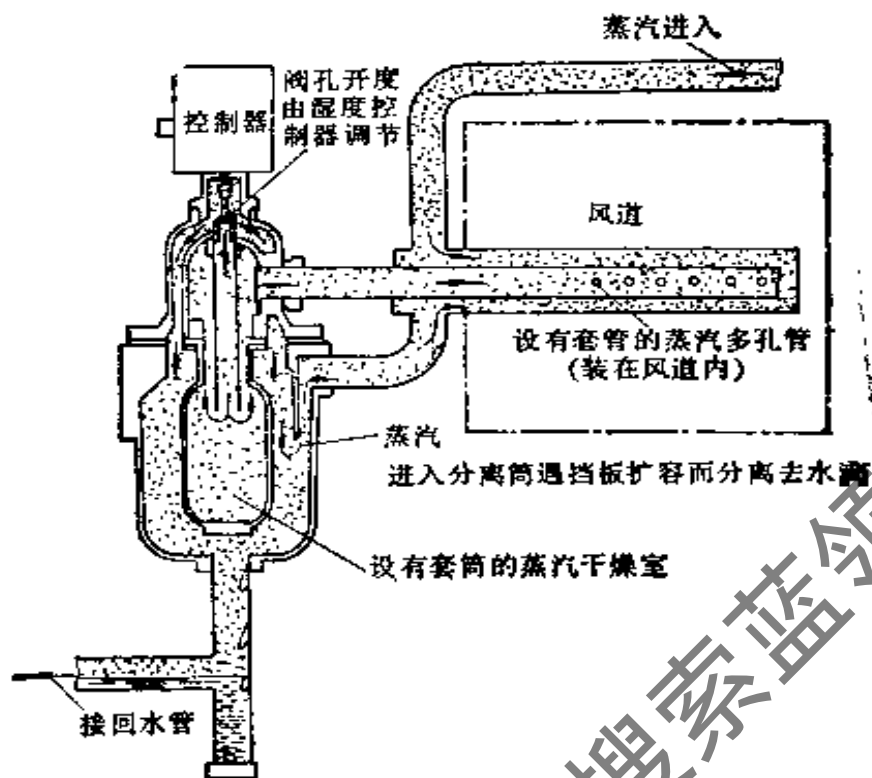


图 4.21 干式蒸汽加湿器

极, (如图 4.22)。

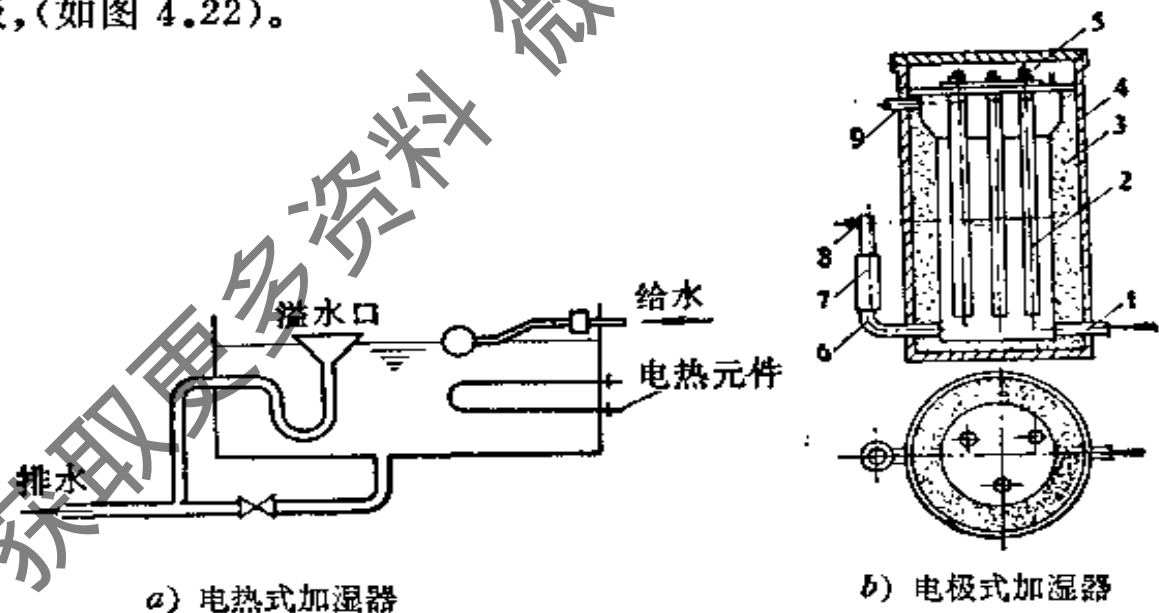


图 4.22 电加湿器

蒸汽加湿设备, 应按加湿空气需要的蒸汽量来选择。由图 4.20 分析可知, 若空气的初含湿量为  $x_1$  [kg/kg干], 终含湿量为  $x_2$

[kg/kg干], 空气量为  $G$  [kg/s]。则加湿空气所需的加湿量(蒸汽量)为:

$$W = G(x_2 - x_1) \text{ [kg/s]} \quad (4.39)$$

蒸汽喷管的喷量可由表 4.16 查得的每个喷孔的喷量  $g$  计算。

喷孔的蒸汽喷量  $g \times 10^4$  [kg/s] 表 4.16

| 喷孔直径<br>[mm] | 蒸汽工作压力[kPa] |       |       |       |       |       |
|--------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | 29.4        | 49.0  | 68.6  | 98.1  | 147.1 | 196.1 |
| 2.0          | 6.69        | 7.68  | 8.67  | 10.15 | 12.61 | 15.05 |
| 2.5          | 10.45       | 12.00 | 13.55 | 15.87 | 19.70 | 23.51 |
| 3.0          | 15.04       | 17.28 | 19.51 | 22.85 | 28.37 | 33.96 |
| 3.5          | 20.47       | 23.52 | 26.56 | 31.10 | 38.61 | 46.03 |
| 4.0          | 26.74       | 30.73 | 34.69 | 40.62 | 50.43 | 60.19 |
| 4.5          | 33.85       | 38.89 | 43.91 | 51.40 | 63.93 | 76.17 |
| 5.0          | 41.79       | 48.01 | 54.21 | 63.46 | 78.80 | 94.04 |

图 4.21 形式的干式蒸汽加湿器有定型产品, 实际选择时可按产品技术资料选择。

电加湿器应确定产生蒸汽量所需的电功率, 由下式计算:

$$N = W h_g \text{ [W]} \quad (4.40)$$

式中:  $W$ ——蒸汽产生量, 即加湿量, [kg/s];

$h_g$ ——蒸汽的焓, 取  $h_g = 2690$ , [kJ/kg]。

### 3. 冷却减湿设备

冷却减湿设备是由制冷系统和风机等组成。其装置和减湿过程空气的状态变化, 见图 4.23。

空气先流过制冷系统的蒸发器, 由于蒸发器表面温度低于空气露点温度, 空气被减湿冷却, 其含湿量降低, 但相对湿度增

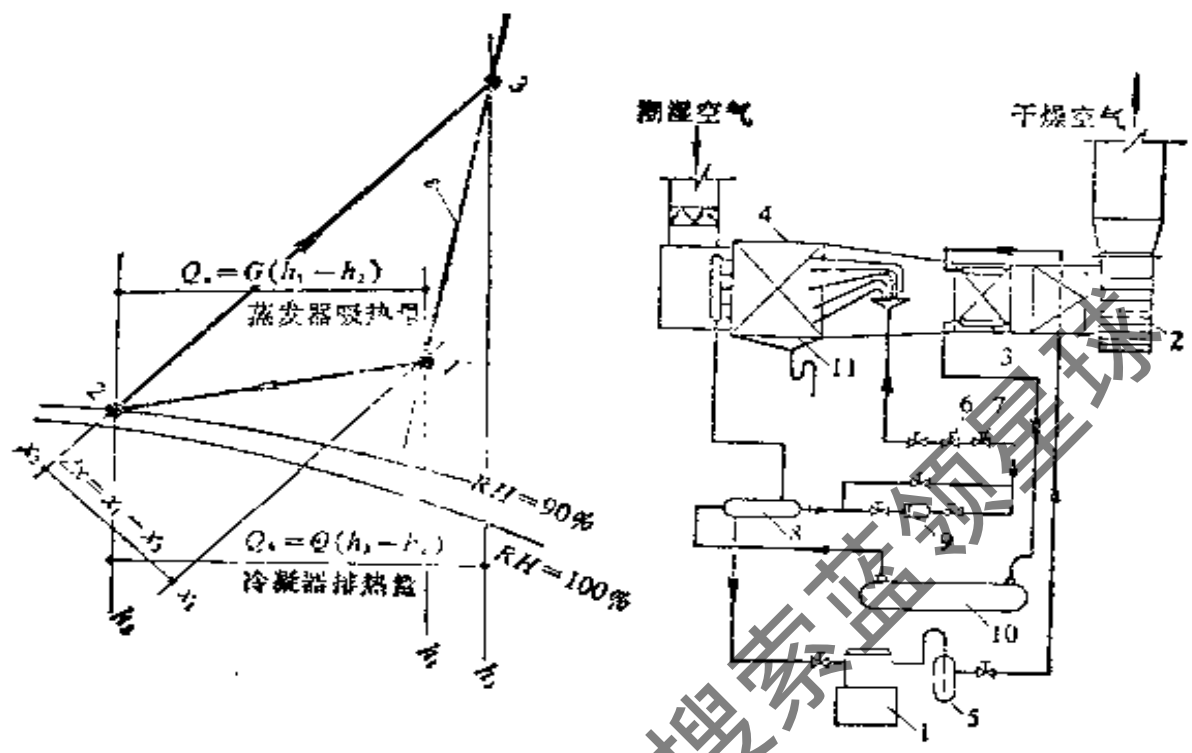


图 4.23 冷却减湿设备及空气状态变化

大。然后再经冷凝器被等湿加热,相对湿度减小,但温度和焓都比空气初状态增高。所以,空气经过这类减湿设备处理后,含湿量和相对湿度是下降了,但是温度和焓却都提高了。

## 4.2 空气的净化处理设备

空气中的灰尘对人体的健康和产品的质量都有影响,尤其是精密仪器、电子、制药工业等对空气的洁净度要求极高。

空调房间的灰尘来源有两个途径:一是由空调系统的新风、漏风带入和由回风中所含灰尘又回入房间。二是由人和工件设备等带入室内或在室内活动过程中产生的灰尘。为了保证空调房间的洁净度要求,必须对空气净化处理。

空气的净化处理,就是在空调系统中设置空气净化设备,除去带入室内的空气所含的灰尘,使空气的洁净度达到规定的要求。

### 1. 室内空气的净化标准

根据空调房间对洁净度的不同要求,空气的净化标准分为:

(1) 一般净化,对净化无具体要求,对空气的净化一般只需采用粗效过滤器作一次处理。

(2) 中等净化,对室内空气的含尘量有一定要求,室内空气含尘浓度以质量浓度  $[mg/m^3]$  表示,一般规定室内含尘浓度为  $0.15 \sim 0.25 [mg/m^3]$ 。并应过滤掉  $\geq 10 [\mu m]$  的尘粒。这类净化一般除采用粗效过滤器外,还应采用中效过滤器。

(3) 超净净化,这类净化要求甚高,室内空气的含尘浓度均以颗粒计数浓度  $[粒/升]$  表示。表 4.17 所列为不同超净净化的级别标准。

超净净化级别

表 4.17

| 洁净级别   | 尘粒径 $[\mu m]$ | 平均含尘浓度 $[粒/升]$ | 温度范围 $[^{\circ}C]$ | 相对湿度范围 $[\%]$ | 正压值 $[Pa]$ | 噪声(A声级) $[dB]$ |
|--------|---------------|----------------|--------------------|---------------|------------|----------------|
| 3级     | $\geq 0.5$    | $\leq 3$       | 18~26              | 40~60         | $\geq 5.0$ | $\leq 65$      |
| 30级    | $\geq 0.5$    | $\leq 30$      |                    |               |            |                |
| 300级   | $\geq 0.5$    | $\leq 300$     |                    |               |            |                |
| 3000级  | $\geq 0.5$    | $\leq 3000$    |                    |               |            |                |
| 30000级 | $\geq 0.5$    | $\leq 30000$   |                    |               |            |                |

## 2. 过滤器的主要特性和分类

净化空调中,空气的净化均采用过滤的方法。下面对过滤器作简要介绍。

### (1) 空气过滤器的特性

1) 过滤效率,过滤效率是过滤器的主要特性指标,其定义为:在额定的风量下,过滤器前后空气含尘浓度之差与过滤器前空气含尘浓度之比的百分数,即:

$$\eta = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right) \times 100\% \quad (4.41)$$

式中  $c_1, c_2$ ——过滤器前、后空气的含尘浓度。

当含尘浓度以计重浓度 $[\text{mg}/\text{m}^3]$ 表示时,效率为计重效率。含尘浓度以大于某一粒径的颗粒数(粒/升)表示时,效率为计数效率。目前检测过滤器效率的方法有:质量法、比色法、特殊测尘法和粒子计数法等。(有关检测方法可参阅有关过滤器检测的专著)。对于用不同的检测方法得出的效率是不同的。一般粗、中效过滤器多以质量法和比色法检测,高效过滤器多以特殊测尘法和粒子计数法检测。

过滤器的过滤能力还可以用穿透率来衡量,其定义为过滤器后空气的含尘浓度与过滤器前空气的含尘浓度之比的百分数,即:

$$K = \frac{c_2}{c_1} \times 100\% = 1 - \eta \quad (4.42)$$

利用穿透率可以明确地表示过滤器后空气的含尘情况,因此对高效过滤器,常以穿透率来衡量其性能。

2) 过滤器的阻力,过滤器的阻力一般以两个阻力表示,即初阻力和终阻力。

初阻力为过滤器未沾尘时的阻力。过滤器的初阻力一般由实验得出,常将实验结果整理成以下的形式:

$$P = cv^n \quad [\text{Pa}] \quad (4.43)$$

式中

$P$ ——过滤器的初阻力, $[\text{Pa}]$ ;

$v$ ——过滤器的迎面风速, $[\text{m}/\text{s}]$ ;

$c, n$ ——实验系数和指数。

终阻力为过滤器使用一定时间后,其沾尘量达到一定数量时的阻力。一般允许终阻力为初阻力的2~4倍。终阻力反映了过滤器的容尘量。所谓容尘量是过滤器允许沾尘量的最大值,也是过滤器性能的衡量指标。如果沾尘量超过允许沾尘量,会使过滤器的阻力过大。因此以过滤器在一定风量下阻力达到规定值的终阻力时的积尘量作为允许容尘量。

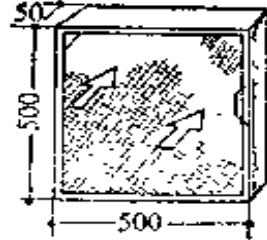
## (2) 空气过滤器的分类

按过滤器的过滤效率,空气过滤器可分为:

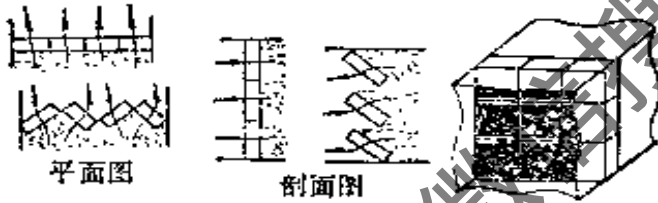
1) 粗效过滤器, 主要用于过滤  $10\sim 100[\mu\text{m}]$  的大颗粒灰尘。一般采用粗、中孔泡沫塑料和无纺布等为滤料, 通过的过滤风速一般以  $[\text{m}/\text{s}]$  计。常将滤料做成块状过滤器以便更换, 也可做成自动(或手动)卷绕过滤器, 如图 4.24。



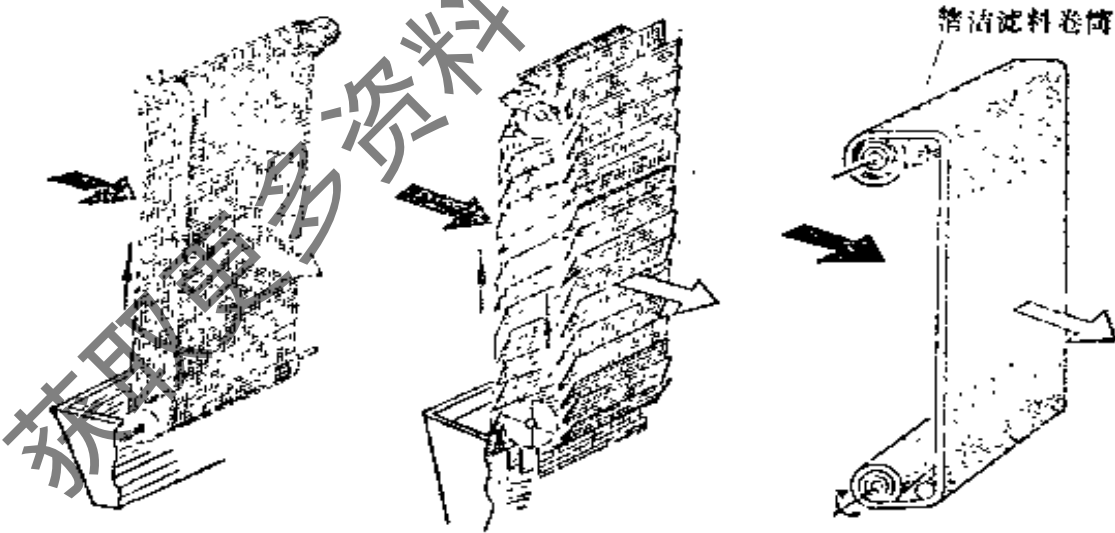
滤料结构之一



过滤器外框



过滤器的安装方式



几种卷绕型过滤器

图 4.24 粗效过滤器

2) 中效过滤器, 主要用于过滤  $1\sim 10[\mu\text{m}]$  的灰尘, 一般采用



细孔泡沫塑料,玻璃纤维和无纺布等为滤料。过滤风速以[dm/s]计,常将滤料做成抽屉式和袋式等形式的过滤器,以增大过滤面积和便于更换滤料,如图 4.25。

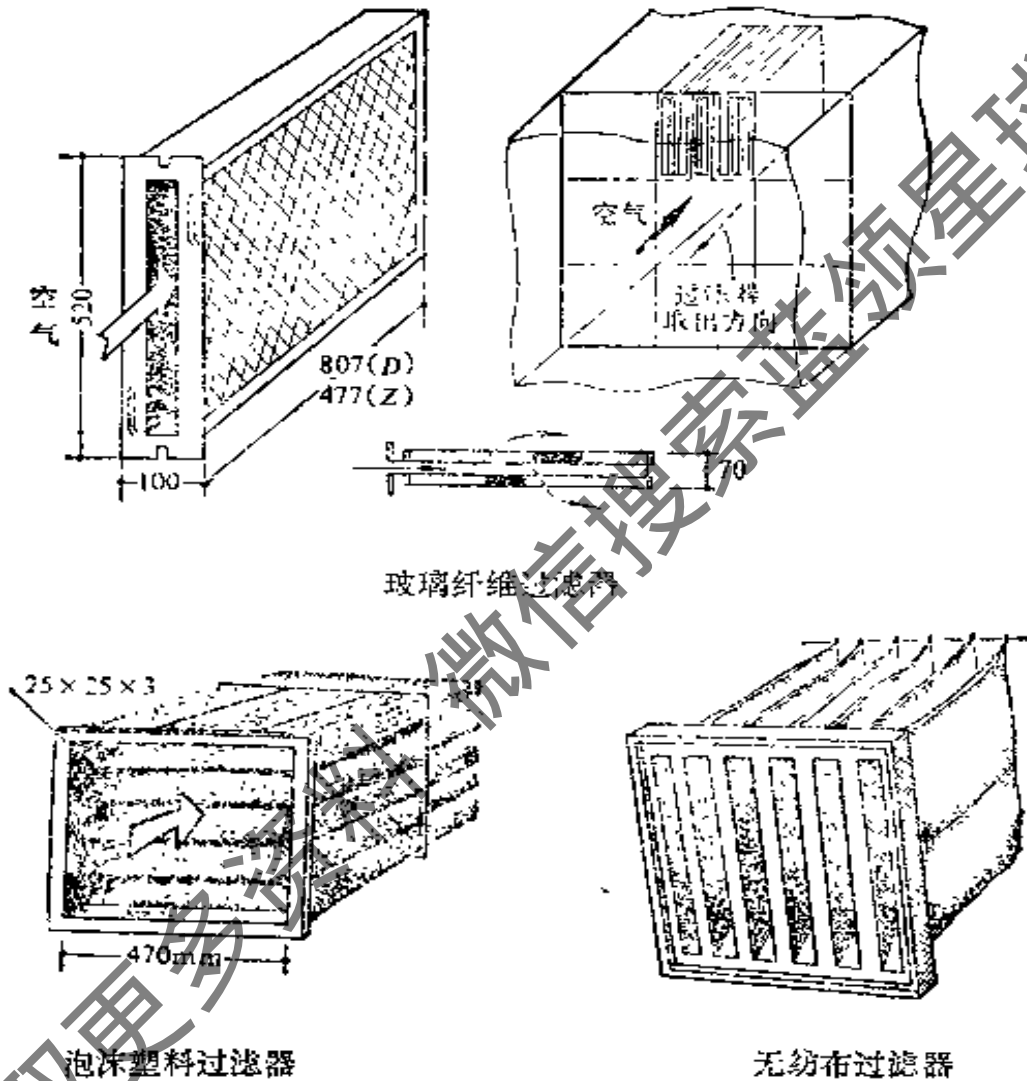


图 4.25 中效过滤器

3) 高效过滤器,主要用于过滤微小颗粒灰尘,常用玻璃纤维和合成纤维滤纸,过滤风速以[cm/s]计。将滤纸多次折叠在两层折叠滤纸之间用波纹板分离,所做成的过滤器具有较大的过滤面积,如图 4.26。

表 4.18 列出了各类空气过滤器的主要性能。

表 4.19 列出了国产部分空气过滤器器的主要性能。

表 4.18

空气过滤的分类及主要性能

| 空气过滤器性能分类 | 过滤器型式                         | 有效的捕集尘粒直径 [μm] | 适应的尘浓度① | 压力损失 [Pa] | 过滤效率(%) |       |       | 容尘量 [g/m <sup>2</sup> ] | 备注                                 |
|-----------|-------------------------------|----------------|---------|-----------|---------|-------|-------|-------------------------|------------------------------------|
|           |                               |                |         |           | 质量法     | 比色法   | DOP法  |                         |                                    |
| 粗效过滤器     | 块式玻璃纤维过滤器<br>(干式或浸油)          | >5             | 中—大     | 30~200    | 70~90   | 15~40 | 5~10  | 500~2000                | 作高效、亚高效、中效过滤器前的预过滤器(滤速以[m/s]计)     |
|           | 自净油过滤器<br>网格式过滤器(干或浸油)        |                |         |           |         |       |       |                         |                                    |
| 中效过滤器     | 粗、中孔泡沫塑料块状过滤器                 | >1             | 中       | 80~250    | 90~96   | 50~80 | 15~50 | 300~800                 | 滤材实际面积与迎风面积之比在10~20倍以上(滤速以[dm/s]计) |
|           | 滤材折叠(或袋式)的中细孔泡沫塑料、无纺布、玻璃纤维过滤器 |                |         |           |         |       |       |                         |                                    |

续表4.18

| 气<br>空<br>过<br>滤<br>器<br>能<br>力<br>分<br>类 | 过滤器型式                                | 有效的<br>捕集尘<br>粒直径<br>[ $\mu\text{m}$ ] | 适应的<br>含尘<br>浓度① | 压力损失<br>[Pa] | 过滤效率(%)     |        |                 | 容尘量<br>[ $\text{g}/\text{m}^2$ ] | 备<br>注  |
|---|--------------------------------------|--|------------------|--------------|-------------|--------|-----------------|----------------------------------|---|
|   |                                      |  |                  |              | 质量法         | 比色法    | DOP法            |                                  |   |
| 亚高效                                       | 超细石棉玻璃纤维滤<br>纸(或合成纤维滤布)过滤材<br>料做成多折型 | $<1$                                   | 小                | 150~350      | $>99$       | 80~95  | 50~90           | 70~250                           | 同上<br>但20~40倍以上<br>(滤速以[ $\text{cm}/\text{s}$ ]计) |
| 高效  | 超细石棉、玻璃纤维<br>滤纸类过滤材料做成<br>多折型        | $<1$                                   | 小                | 250~490      | 无法鉴别(无标准鉴别) | ~99.99 | (一般指<br>~99.97) | 50~70                            | 同上<br>50~60倍以上<br>(同上)                            |
| 静电<br>过滤器                                 | 二段电过滤器,能定<br>期清洗                     | $<1$                                   | 小                | 80~100       | $>99$       | 80~95  | 60~95           | 80~75                            | —   |

①粉尘浓度:大-0.4~7.0[ $\text{mg}/\text{m}^3$ ],中-0.1~0.6[ $\text{mg}/\text{m}^3$ ],小-0.3[ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]以下。

表4.19

国产部分过滤器的主要性能

| 类别                    | 系列       | 型号      | 滤料种类        | 外型尺寸<br>(宽×高×深)<br>[mm] | 额定风量<br>[m <sup>3</sup> /h] | 过滤效率       |             | 初阻力<br>[Pa] | 终阻力<br>[Pa] | 容尘量<br>(g)                | 适用条件   |
|-----------------------|----------|---------|-------------|-------------------------|-----------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|--|
|                       |          |         |             |                         |                             | 测方         | (%)         |             |             |                           |  |
| 粗<br>效<br>过<br>滤<br>器 | 自动<br>绕式 | ZJK-I-1 | DV化纤<br>组合毡 | 1124×1574×700           | 3000~12000                  | 工业尘<br>计重法 | 99~<br>99.5 | 90          | 220         | 1500 g<br>/m <sup>2</sup> | -40~+55[°C] φ=80%;<br>配 T 703-5              |
|                       |          | ZJK-I-2 |             | 1624×1574×700           | 12000~18000                 |            |             |             |             |                           | -40~+35[°C] φ=80%;                           |
|                       |          | ZJK-I-3 |             | 1624×1574×700           | 18000~24000                 |            |             |             |             |                           | -40~+55[°C] φ=80%;                           |
|                       |          | ZJK-I-4 |             | 1624×2034×700           | 24000~34000                 |            |             |             |             |                           | -40~+55[°C], φ=30%;                          |
|                       |          | ZJK-I-5 |             | 2154×2034×700           | 34000~44000                 |            |             |             |             |                           | -40~55[°C], φ=80%;<br>配 T 703-8<br>配 T 703-9 |
| 中<br>效<br>过<br>滤<br>器 | YP       | YP-X    | 泡沫塑料        | 496×477×110             | 200                         | 大气尘<br>计重  | ≥40         | 65          | 130         | >50                       | 用于温度 -30~+80                                 |
|                       |          | YP-D    |             | 496×807×110             | 200                         |            |             | 50          | 100         | >90                       | [°C], 常湿、含微量酸、碱的                             |
|                       |          | YP-D    |             | 496×807×110             | 300                         |            |             | 90          | 180         | >90                       | 空气净化过滤                                       |
| 中<br>效<br>过<br>滤<br>器 | M        | M-III   | 玻璃纤维        | 520×520×610             | 2000                        | 大气尘<br>计重  | ≥60         | 100         | 200         | 1400                      | 用于常温、常湿及含有<br>微量酸碱有机溶剂的空气净<br>化过滤            |
|                       |          | YB-X    |             | 496×477×110             | 200                         |            |             | 90          | 180         | 50                        |  |
|                       |          | YB-D    |             | 496×807×110             | 200                         |            |             | 60          | 120         | 90                        |  |
|                       |          | YB-D    |             | 496×807×110             | 300                         |            |             | 105         | 210         | 90                        |  |

续表 4.10

| 类别     | 系列  | 型号          | 滤料种类        | 外型尺寸<br>(宽×高×深)<br>(mm) | 额定风量<br>[m <sup>3</sup> /h] | 过滤效率<br>测试法 (%) | 初阻力<br>[Pa] | 终阻力<br>[Pa] | 容尘量<br>[g] | 适用条件                   |
|--------|-----|-------------|-------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------|-------------|------------|------------------------|
| 过滤器    | M   | M-I         |             | 520×520×610             | 2000                        |                 |             |             | 300        |                        |
|        |     | M-II        |             | 470×440×400             | 2000                        | 大气尘<br>≥70      | 40          | 200         |            | 同YP系列                  |
|        |     | M-W         | 泡沫塑料        | 470×440×400             | 1600                        | 计重              |             |             | 500        |                        |
| 过滤器    | ZX  | ZX-1        |             | 500×500×500             | 3000                        | ≥66             | 60          | 200         | 300        |                        |
|        |     | WV          | 涤纶          | 500×500×500             | 2000                        | 人工尘<br>80       | 40          |             | 460        | 常温,常湿,一般酸、碱<br>及有机溶剂气体 |
|        |     | WZ-1        | 无纺布         | 500×500×500             | 2000                        | 计重法             | 38          | 200         | 575        |                        |
| WD-1   |     | 500×500×500 | 2000        |                         |                             |                 | 600         |             |            |                        |
| 亚高效过滤器 | ZKL | ZKL-01      | 棉短绒         | 484×484×220             | 1000                        |                 | ≤100        |             |            | 同YP系列                  |
|        |     | ZKL-03      | 纤维滤纸        | 600×500×300             | 1500                        |                 | <80         |             |            |                        |
|        | GZH | GZH-01      | 玻璃          | 484×484×220             | 1000                        |                 |             |             |            |                        |
| GZH-30 |     | 纤维滤纸        | 630×630×220 | 1750                    |                             | ≥95             | ≤120        |             |            | 相对湿度小于80%条件下           |

续表4.19

| 类别  | 系列 | 型号       | 滤料种类        | 外型尺寸<br>(宽×高×深)<br>[mm] | 额定风量<br>[m <sup>3</sup> /h] | 过滤效率        |        | 初阻力<br>[Pa] | 终阻力<br>[Pa] | 容尘量<br>(g) | 适用条件                  |
|-----|----|----------|-------------|-------------------------|-----------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|------------|-----------------------|
|     |    |          |             |                         |                             | 测试方法        | (%)    |             |             |            |                       |
| GBD |    | GBD-04 Z |             | 500×500×180             | 330                         |             | 99.96  | 58          |             |            |                       |
|     |    | GBD-01   |             | 484×484×220             | 1000                        | 大气尘         |        | ~140        |             | ~500       |                       |
|     |    | GBD-03   |             | 630×630×220             | 1500                        | 计数          | ≥99.91 | ~120        |             | ~750       |                       |
| GB  |    | GB-01    |             | 484×484×220             | 1000                        |             | ≥99.91 | 200~300     |             | >500       | 用于常温、常温及含有            |
|     |    | GB-03    | 玻璃纤维<br>维滤纸 | 630×630×220             | 1500                        | 油雾法或<br>钠焰法 |        | 150~250     |             | >750       | 微量酸、碱、有机溶剂的空气<br>净化过滤 |
| GX  |    | GX-0 B   |             | 484×484×180             |                             |             | ≥96.96 | ~200        |             | >500       |                       |
|     |    | GX-0 C   |             | 484×484×220             | 1000                        |             |        |             |             |            |                       |
|     |    | GX-I     |             | 500×500×180             |                             | 钠焰法         |        | 251         |             |            |                       |
|     |    | GX-III   |             | 630×630×220             | 1500                        |             | 99.97  | 200         |             |            |                       |

续表4.19

| 类别     | 系列          | 型号      | 滤种类         | 外型尺寸<br>(宽×高×深)<br>[mm] | 额定风量<br>[m <sup>3</sup> /h] | 过滤效率        |        | 初阻力<br>[Pa] | 终阻力<br>[Pa] | 容尘量<br>(g) | 适用条件        |
|--------|-------------|---------|-------------|-------------------------|-----------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|------------|-------------|
|        |             |         |             |                         |                             | 测方          | (%)    |             |             |            |             |
| 高效过滤器  | GS          | GS-01   | 石棉纤维滤纸      | 484×484×220             | 1000                        | 油雾法或<br>钠焰法 | ≥99.95 | ~300        |             | ~500       |             |
|        |             | GS-03   |             | 630×630×220             | 1500                        |             | ~200   |             | ~750        |            |             |
|        |             | JX-20   | 515×515×300 | 1600                    | 油雾法                         | ≥99.9       | ~250   |             | ~700        |            |             |
|        | GNF         | GNF-01  | 玻璃纤维        | 484×484×220             | 1000                        | 大气尘         | ≥99.91 | ~200        |             | >500       | 主要用于含有腐蚀性气  |
|        |             | GNF-03  |             | 630×630×220             | 1500                        |             | ~150   |             | >750        | 体的过滤       |             |
|        |             | GNW     | GNW-01      | 维滤纸                     | 484×484×220                 | 1000        | 计      | ≥99.91      | ~200        |            | >500        |
| GNW-03 | 630×630×220 |         | 1500        |                         | ~150                        |             |        | >750        | 固酸碱有机溶剂的空气  |            |             |
| 静电过滤器  | JKG         | JKG-2 A | 静电离         | 670×375×1019            | 2400                        | 大气尘         | ~90    | 70          |             |            | 常温,         |
|        |             | JKG-8   |             | 1385×425×1480           | 8000                        |             |        | 70~80       |             |            | φ ≤ 70% 的空气 |

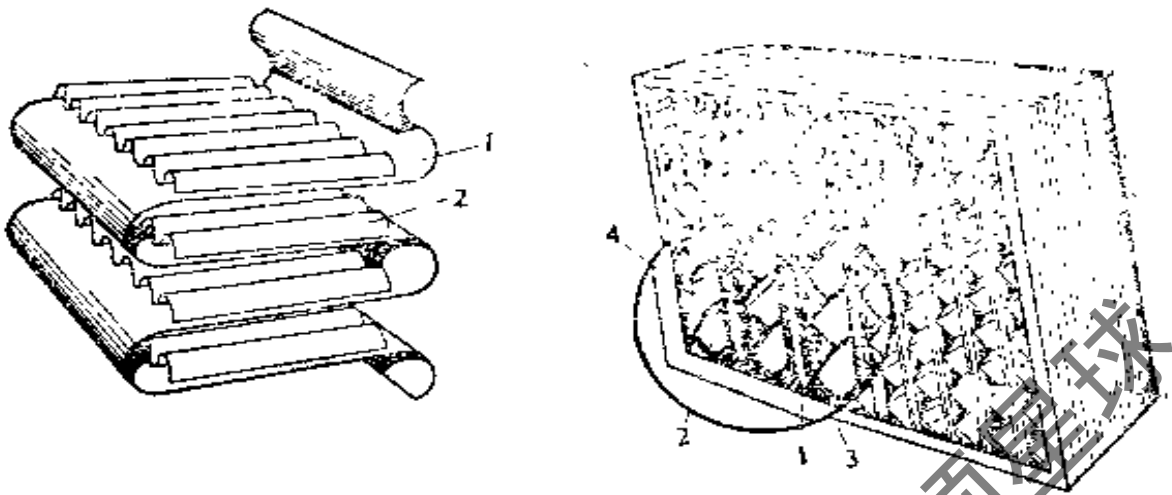


图 4.26 高效过滤器

### 3. 空气过滤器的应用

#### (1) 过滤器净化能力计算

为了在空调系统中正确地设置过滤器，首先应根据空调房间的洁净度要求来确定过滤器应具备的净化能力。

图 4.27 是装有一级空气过滤装置的空调系统，有新风、排风和回风再循环，图中， $L_w$  为新风量 [ $m^3/s$ ]， $L$  是房间送风量 [ $m^3/s$ ]， $r$  为回风率，则回风量  $L' = rL$  [ $m^3/s$ ]， $L''$  为房间排风量 [ $m^3/s$ ]， $c$  为室内空气允许含尘浓度 [ $mg/m^3$ ] 或 [粒/升]。  $M$  为室内发尘量 [ $mg/s$ ] 或 [粒/秒] (其值可查阅有关资料)。

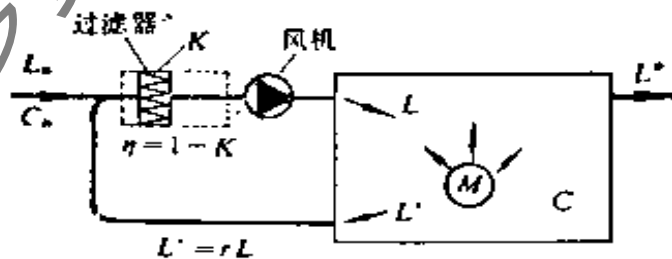


图 4.27 空调净化系统净化能力的分析

当空调系统处于稳定情况下，进入室内的灰尘量应等于流出房间的灰尘量。由图 4.27 分析可知：

$$K(L_w C_w + rLc) + M = c(rL + L'') \quad (4.44)$$

整理：



采用三级空气过滤器的洁净室设计要求

| 级别                 | 推荐气流型式 | 推荐送风方式  | 推荐回风方式  | 通风量           |         | 备注   |
|--------------------|--------|---|---|---------------|---------|--|
|                    |        |   |   | 按房间断面风速 [m/s] | 按换气次数   |  |
| 3级<br>(100级)       | 垂直平行流  | 推荐送风方式<br>1. 顶棚满布高效过滤器(面积 $\geq 60\%$ )<br>2. 侧布高效过滤器<br>3. 侧孔密集流送风 | 推荐回风方式<br>1. 格栅地板回风口(满布或均匀分布)<br>2. 四周侧墙下部均匀布置回风口 | $\geq 0.25$   | 300~500 | 1. 阻尼层材料有尼龙布、泡沫塑料等<br>2. 侧布高效过滤器一般安装数量较少,可节约初投资,但运转费用较大<br>3. 密集流送风器适用于4[m]以上的车间                       |
|                    |        | 1. 送风墙满布高效过滤器<br>2. 送风器水平送风(高效过滤器占 $\geq 40\%$ )                    | 1. 回风墙满布回风口<br>2. 回风器局部回风口                        | $\geq 0.35$   | 300~300 | 1. 在第一工作区可达100级,随着长度增加,级别下降<br>2. 局部布置高效过滤器时,局部地区有涡流   |
|                    |        | 1. 孔板顶送<br>2. 间隔布置高效过滤器<br>3. 密集散流器送风                               | 1. 相对两侧墙下部均匀布置回风口<br>2. 洁净室面积大时,可用地板均匀布置回风口       | —             | 50~80   | 1. 侧送管道布置简单,有利于旧厂房的净化改造<br>2. 用走廊集中回风方式时,回风口风速应小于4[m/s]<br>3. 扩散孔板可减小风口下部风速,并增加洁净气流的作用范围,但间隙工作时,板内可能积尘 |
| 500级<br>10000级     | 乱流     | 1. 侧送风(同侧下回)<br>2. 局部孔板顶送   | 1. 单侧墙下部回风口<br>2. 走廊集中回风口                         | —             | 20~40   |  |
| 3000级<br>(100000级) |        | 1. 侧送(同侧下回)<br>2. 带扩散板高效过滤器顶送                                       | 1. 单侧墙下部回风口<br>2. 走廊集中回风口                         | —             | 10~20   |  |

\* 为插入的洁净度级别。

$$K = \frac{c(rL + L'') - M}{L_u c_w + rLc} \quad (4.45)$$

由式(4.45)可知,如果已知过滤器效率,即可求得室内空气的含尘浓度。

## (2) 过滤器在洁净工程中的应用

空气过滤器在净化空调中是必不可少的设备。但为了使室内的洁净度满足要求,除了设置合适的过滤器外,还应采取以下措施:

1) 当洁净室的末级过滤器是高效过滤器时,为了延长其使用寿命,应在其前面设置粗、中效过滤器。

2) 采用粗、中、高三级过滤的净化系统中,根据经验应按室内含尘浓度的要求来确定换气次数和送回风方式。具体见表 4.20。

3) 洁净室必须补充一定量的新风,以保持室内正压比室外高 10~20[Pa],且洁净度要求高的房间的正压值应大于相邻的洁净度要求低的房间。

4) 三级过滤的净化空调系统的中、高效过滤器必须设在系统的正压段,且高效过滤器应装在系统的末端(送风口处)。

5) 除设置净化装置外,洁净室还应考虑建筑的布局、使用的建筑材料,以及生产工艺流程的合理性等因素。

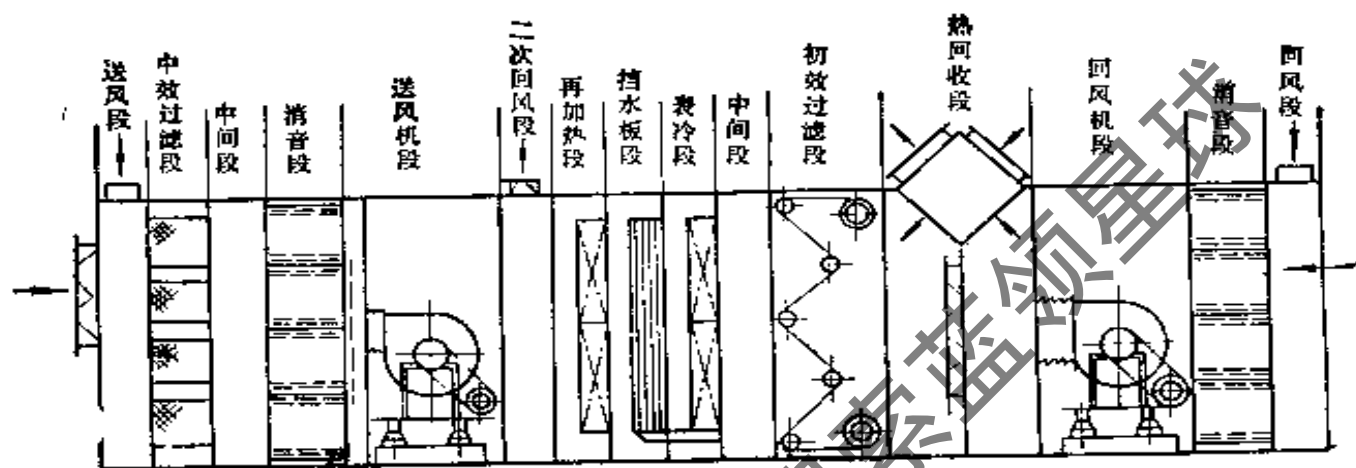
## 4.3 常用的空调设备

在空调工程实践中,为了满足各种空气处理的需要和便于设计、施工安装,常将各种空气处理设备、根据空气处理的不同需要,以不同的方式组合,构成空调工程实践中常用的一些空调设备。这些设备均由专门工厂按照产品系列要求生产,具有较完整的技术数据供设计施工安装使用。

### 1. 组合式空调箱

组合式空调箱就是将各种空气处理设备(例:加热、冷却、加湿、净化、消声等设备)和风机、阀门等制成单元体(带箱体),这些单元体可根据需要进行组合,成为一个能实现各种空气处理要求

的设备。这些单元体一般有过滤段(包括粗效和中效过滤段)、消声段、风机段(包括送风机和回风机段)。加热段(包括一次和二次加热段)冷却段(表面冷却器或喷水室)、加湿段(喷水室或蒸汽加湿器)和新风、回风、排风及送风阀门。有的还设置能量回收装置,如图4.28。



4.28 组合式空调箱

组合式空调箱一般以每小时处理的空气量来定系列,一般型号表示方法为:举例说 WJK-4 型,其中 WJK 表示空调箱的设计型号、4 表示空调箱处理空气的额定风量为  $4000[\text{m}^3/\text{h}]$ 。常见的该产品系列的每小时额定风量从几千  $[\text{m}^3]$  到几万甚至几十万  $[\text{m}^3]$ 。

选用组合式空调箱的基本依据主要以额定风量来确定空调箱的大小。而其中的其他设备则应根据空气处理的实际需要进行选择。

图 4.28 为典型的组合式空调箱,它具有较完整的功能段。实际工程中应根据工程的需要增减各种功能段以满足工程要求。

## 2. 变风量空调机组

变风量空调机组主要由表面式换热器(一般为冷、热两用)和风机(一般采用变风量风机)组成,如图 4.29。其主要特点为可根据季节的变化和实际需要任意改变风量来达到冷、热量的调节,由于该机组所用风机一般为低噪声风机、故机组噪声小。此设备是近年来空调工程中应用较广的一种设备,主要在使用风机盘管内

空调系统中用于新风处理。由于其热交换设备与风机组成一体,体积小。尤其适用于对建筑空间要求较紧的场合,如宾馆、饭店等。

这种机组的选择依据主要为额定风量。一般此种产品的风量范围为  $2000\sim 15000[\text{m}^3/\text{h}]$ 。

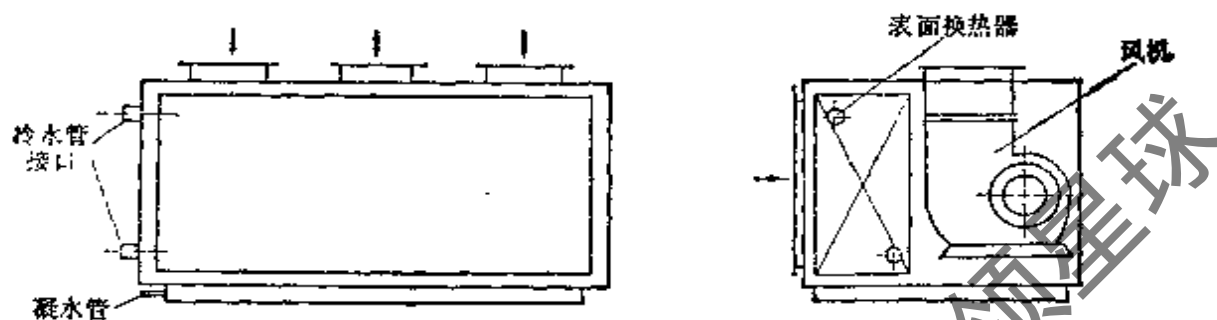


图 4.23 变风量机组

### 3. 风机盘管和诱导器

风机盘管主要由风机(采用多速电机)和表面换热器(称盘管)组成,如图 4.31。根据型式不同,分为:立式、卧式、吸顶式。按安装方式,又分明装和暗装。该设备由于风机的转速分为多挡,从而可以根据需要调节风机的风量,以实现冷、热量的调节。所以该设备尤其适用于多房间、不等负荷的空调系统中,例如宾馆客房、医院病房等。该设备在实际使用中,一般以处理室内热湿负荷为主,新风负荷常由其他设备集中处理。

该种设备的产品规格按风量确定。国产风机盘管的型号格式为  $\text{FP}-\times\times$ ,其中  $\text{FP}$  表示为风机盘管, $\times\times$  表示风量(高档转速条件下)。例如  $\text{FP}-6.3$ ,表示为风量为  $630[\text{m}^3/\text{h}]$  的风机盘管。风机盘管的规格已有统一规定,见表 4.21。

诱导器是利用高速气流诱导同周围空气的一种设备,如图 4.32 主要由静压箱、喷嘴和表面式换热器(盘管)组成。其工作原理为:由集中空气处理设备送来的空气(全新风,称为一次风)首先进入静压箱,然后通过静压箱上的喷嘴以较高的速度( $20\sim 30[\text{m}/\text{s}]$ )喷出,由于喷出气流的引射作用、在诱导器内造成负压、室内空气(称二次风)被吸入诱导器与一次风混合而形成诱导器的送风。

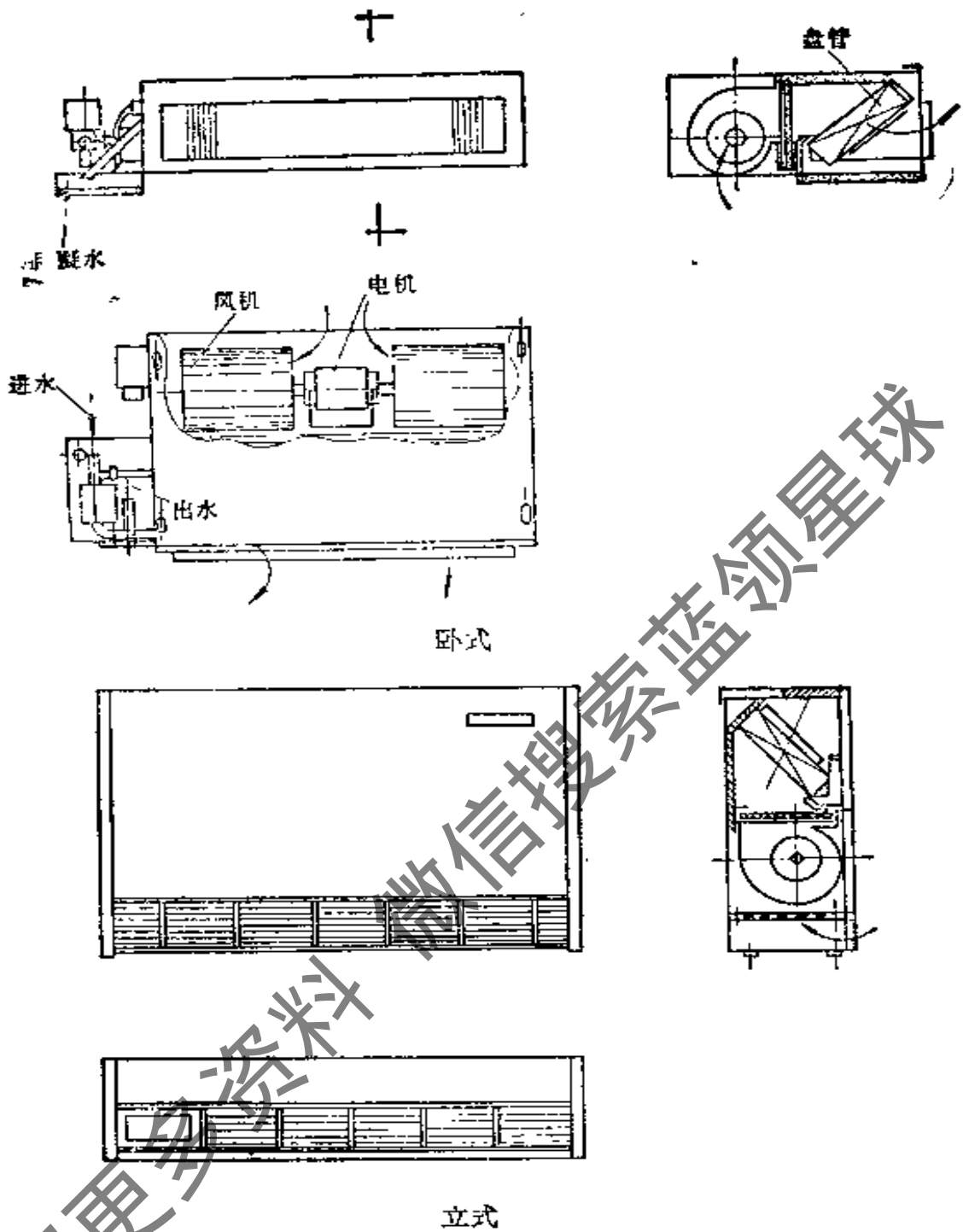


图 4.30 风机盘管

空调系统二次风进口处一般被装有盘管可对二次风进行冷却或加热处理。

与风机盘管比较,诱导器有噪声大的缺点,故近年来在噪声要求高的场合,已基本由风机盘管所取代。

风机盘管的基本参数

表4.21

| 型 号     | 名义风量<br>[m <sup>3</sup> /h] | 名义供冷量<br>[W] | 名义供热量<br>[W] | 名义输入功率<br>[W] | 声压级(A)<br>[dB] |
|---------|-----------------------------|--------------|--------------|---------------|----------------|
| FP-2.5  | 250                         | 1395         | 2093         | 35            | ≤33            |
| FP-5    | 500                         | 2674         | 4011         | 60            | ≤36            |
| FP-6.3  | 630                         | 3488         | 5233         | 70            | ≤37            |
| FP-8    | 800                         | 4419         | 6628         | 80            | ≤39            |
| FP-10   | 1000                        | 5233         | 7849         | 120           | ≤42            |
| FP-12.5 | 1250                        | 6512         | 9767         | 200           | ≤46            |
| FP-16   | 1600                        | 8372         | 12558        | 250           | ≤50            |
| FP-20   | 2000                        | 10465        | 15698        | 400           | ≤54            |
| FP-25   | 2500                        | 13023        | 19535        | 500           | ≤58            |

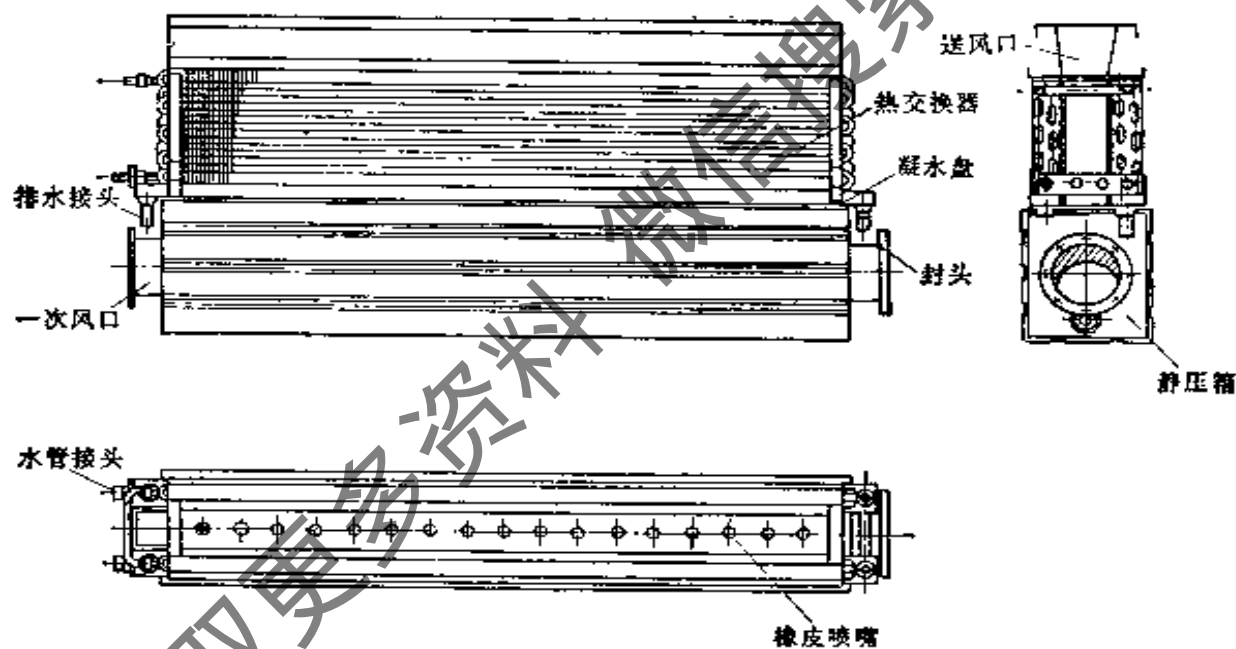


图 4.31 诱导器

有关利用风机盘管和诱导器的空调系统的工作原理详见第5章。

## 第5章 空气调节系统

空气调节系统的作用是建立和保持建筑物内的人工环境，其目的是为了室内人员的舒适和健康。为了生产过程的正常进行，提高生产效率，保证产品质量，或是为了保持贮藏物品的质量。有些空气调节系统能同时控制室内空气的干球温度和相对湿度、流动速度，以及它的洁净度，即通常所说的“四度”。有些空调系统除了能控制室内空气的新鲜度以外，还能根据需要控制其自身的噪声水平，控制围护结构内表面的温度等。要达到温湿度控制的目的，空调系统中必须采用的基本措施是加热、加湿、冷却或(和)去湿。实现上述要求的空气处理设备，已在上一章中讨论过，本章着重讨论这些设备所组成的空调系统的特性，至于噪声和振动控制以及有关安全问题将在第8章中介绍。

空气调节系统一般均由空气处理设备、风机、风道和送风装置等组成。根据需要，它们能组成不同形式的系统。在工程上应从建筑物的用途和性质、热湿负荷特性、空调机房的面积和位置、初投资和运行维修费用等许多方面来考虑，选定合理的空调系统。空气调节系统按向室内输送冷量和热量的方法，可分为全空气系统，空气-水系统和制冷剂直接蒸发系统。常见的窗式空调器就是一种通过制冷剂在室内直接蒸发来提供冷量的空调装置。空气调节系统按空气处理设备的设置情况可以分为集中式系统，半集中式系统和全分散式系统。窗式空调器及带冷源的柜式空调机组就属于全分散式空调系统。

### 5.1 全空气空调系统的原理及组成

全空气系统是指空调房间的室内负荷全部由经过处理的空气来承担的空调系统。当夏季空调房间内有余热量和余湿量时，用

低于室内空气温度、低于室内空气含湿量的空气送入房间,吸收室内余热、余湿后排出,就可以使室内空气的温度、湿度保持恒定。由于空气的比热较小,需要用大量的空气才能达到消除余热余湿的目的,因此全空气系统通常要求有较大断面的风道。全空气系统适用于舒适性或工艺性的各类空调工程,它可以应用于要求分别控制室内空气状态参数的多区域的大型建筑物中,如办公楼、学校、医院、商店、旅馆和轮船中。也可用于像洁净室、计算机室、医院手术室、纺织厂和烟草厂等有特殊要求的场合。

全空气空调系统是最基本的集中式系统。

### 5.1.1 系统的组成

集中式空调系统是指空气处理设备都集中布置在专设的空调机房内,它服务的空调房间相对较分散。

集中式空调系统一般由下列部分组成(见图 5.1):

1. 空气处理设施 室外空气经过过滤器清除空气中的灰尘,再经过喷水室(或表面式冷却器)、加热器、加湿器等设备的处理,使空气达到要求的温度和湿度。

2. 空气输送设施 送风机是把经过处理达到要求状态的空气,通过风管(道)系统送到空调房间内。同时,要求从房间里排出相应量的室内空气,以保持室内空气平衡。对大型系统,为此目的,有时要专设一排风机。除了送风机和风管(道)外,风道中还要有开关或调节风量的阀门装置。有时为了消除风机的噪声和进一步净化送风空气,在风管(道)系统上装有消声器、过滤器等设备。在某些建筑中,常常利用走廊作为排风道的一部分。

3. 送排风装置 主要包括设置在不同位置的各种类型的送风口、排风口。它们的作用是保证合理地组织室内的气流,使空调房间内工作区的空气状态均匀,防止造成对人和生产有不良影响的气流速度。

除了空调系统本身的这三个主要组成部分外,还应有为空气处理服务的冷源、热源、冷媒和热媒管道系统、自动控制系统等。

图 5.1 为集中式空调系统的示意图。



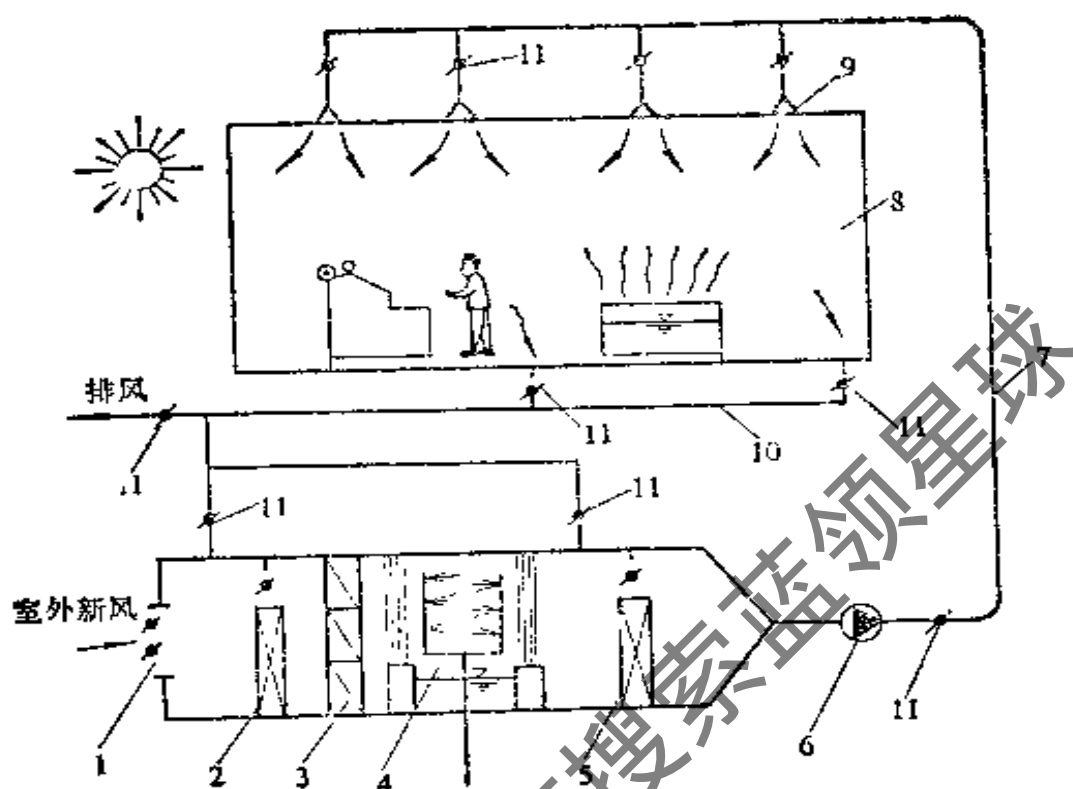


图 5.1 集中式空调系统的示意图

- 1—新风量调节阀； 2—预热器； 3—过滤器； 4—喷水室； 5—再热器；  
6—送风机； 7—送风管道； 8—空调房间； 9—送风装置； 10—回风管道；  
11—风量调节阀

### 5.1.2 系统的工作原理

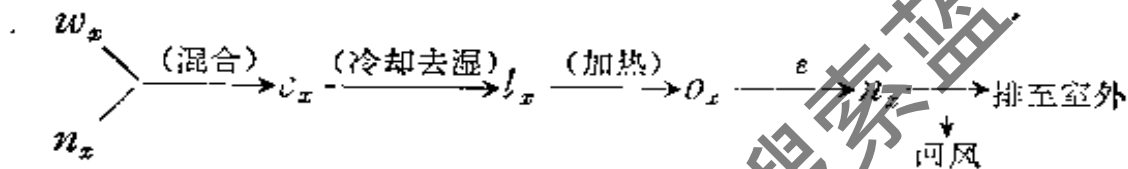
如前所述,当空调房间内存在着余热(冷)量和余湿量时,为了维持所要求的室内空气状态,可以向室内送入具有一定状态和一定数量的空气,吸收室内的余热(冷)量和余湿量。同时,将相应量的室内空气排走。送入室内的空气可以全部采用室外新鲜空气。也可以部分采用新鲜空气,部分采用室内排出的空气(称为回风)。在一般情况下,后者可以节省空调系统的运行费用。所以,只要能满足室内的卫生要求,通常都采用后一种形式。

工程上常见的采用部分回风的空调系统有两种形式,一种是空调房间的回风在喷水室或表面式冷却器前与新风进行混合,叫做一次回风系统。一种是分别与经过喷水室或表冷器处理前后的空气进行混合,叫做二次回风系统。在喷水室前与新风混合的叫

一次回风，在喷水室后进入系统的回风叫二次回风。图 5.1 就是二次回风式系统的示意图。

### 1. 一次回风系统的夏季处理方案

在图 5.1 中关掉二次回风的风门，就成为一次回风系统了。室外空气状态  $w_x$  的空气与来自室内的回风(状态点  $n_x$ ) 混合后，进入喷水室冷却去湿达到机器露点状态（习惯上称喷水室后的相对湿度为 90~95% 的空气状态为“机器露点”状态） $l_x$ ，然后经过再热器加热至所需的送风状态点  $o_x$ ，送入室内。送风在空调房间吸热吸湿后到达状态  $n_x$ ，然后部分排至室外，部分进入空气处理室与室外新鲜空气混合。如此循环。整个处理过程可以写为：



上述处理过程在  $h-x$  (或  $h-d$ ) 图上的表示，见图 5.2。系统新风量、送风量及送风状态点  $o_x$ ，按第 3 章的方法确定。

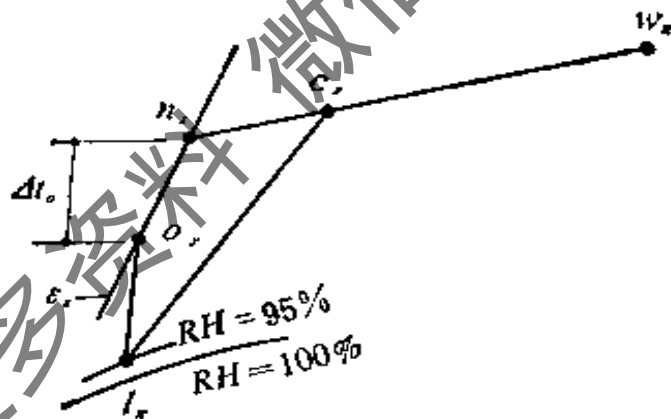


图 5.2 一次回风系统夏季空气处理过程

对一次回风式系统在喷水室内处理空气所需的冷量  $Q_0$  为：

$$Q_0 = G(h_{c_x} - h_{l_x}) \quad (5.1)$$

式中  $Q_0$ ——处理室所需冷量，[kW]；

$G$ ——系统送风量，[kg/s]；

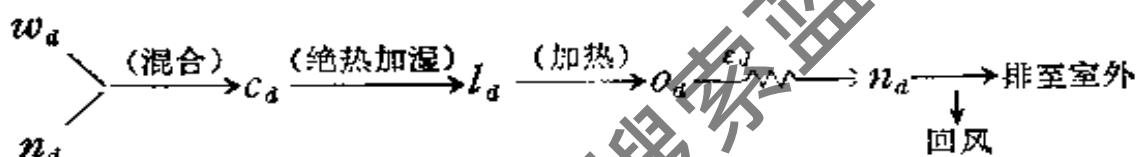
$h_{c_x}$ ——混合后的空气的焓，[kJ/kg]；

$h_{l_x}$ ——喷水室后空气状态的焓，[kJ/kg]。

### 2. 一次回风系统的冬季处理方案

目前,在工程上采用的大多数空调系统中,冬、夏季是使用同一送风机的,也就是说,冬、夏季的风量是相等的。当然,从节能的角度看,最好是冬季送风量小于夏季送风量,有关空调节能的内容,见本书第9章。空调系统的送风机是按照满足夏季所需送风量为前提来确定的。

冬季室外空气状态  $w_d$ , 室内空气状态  $n_d$ , 新风与回风混合到状态点  $c_d$ , 然后进入喷水室绝热加湿(喷循环水)到状态点  $l_d$ , 再经再热器加热到送风状态  $o_d$ , 送入室内。送入室内的空气放热吸湿后达到室内设计的空气状态点  $n_d$ , 然后部分排至室外, 部分进入空气处理室与室外空气混合, 如此循环。冬季空气处理过程可表示为:



上述空气处理过程在  $h-x$ (或  $h-d$ ) 图上的表示, 见图 5.3。

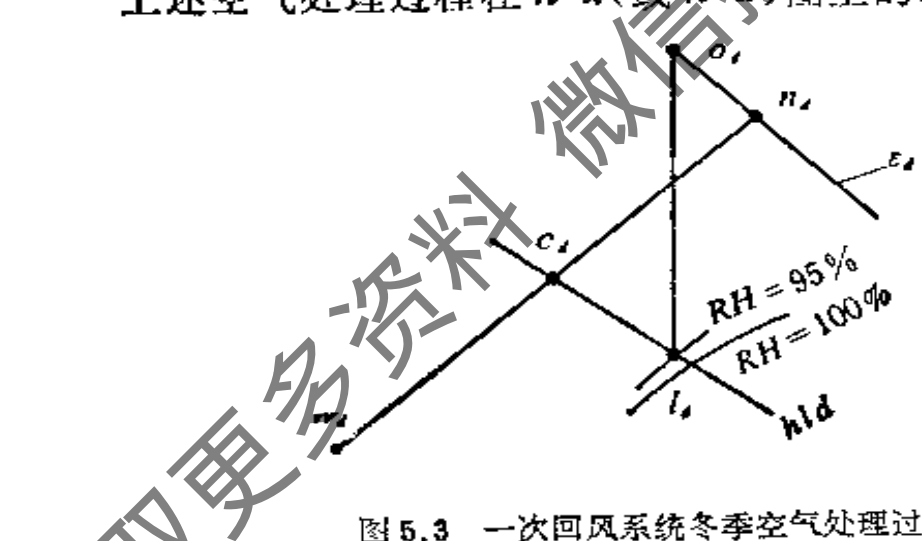


图 5.3 一次回风系统冬季空气处理过程

在我国长江以南地区, 冬季室外室气温度和焓较高, 如按夏季规定的最小新风量来确定混合状态点  $c_d$ , 则  $c_d$  点的焓将高于或等于机器露点状态的焓(即  $h_{c_d} > h_{l_d}$ ), 这时可改用改变新风和回风混合比, 加大新风量的办法进行调节, 使  $h_{o_d} = h_{l_d}$ 。

在严寒地区, 应将室外空气用预热器加热后再与回风混合, 加热后的温度由计算确定, 但不应低于  $5[^\circ\text{C}]$ 。否则, 可能出现混合后的空气达到饱和, 产生水雾或凝结水。其处理过程参见图 5.7、图



13.1[°C]。

(3) 计算送风量:

$$G = \frac{Q_i}{h_n - h_o} = \frac{11.3}{47.6 - 39.8} = 1.45[\text{kg/s}](5220[\text{kg/h}])$$

(4) 确定混合空气的状态:

$$h_c = \frac{G_w h_w + (G - G_w) h_n}{G} = \frac{0.22 \times 85.1 + (1.45 - 0.22) \times 47.6}{1.45} \\ = 53.3[\text{kJ/kg}]$$

(5) 空调系统喷水室所需冷量  $Q_o$ :

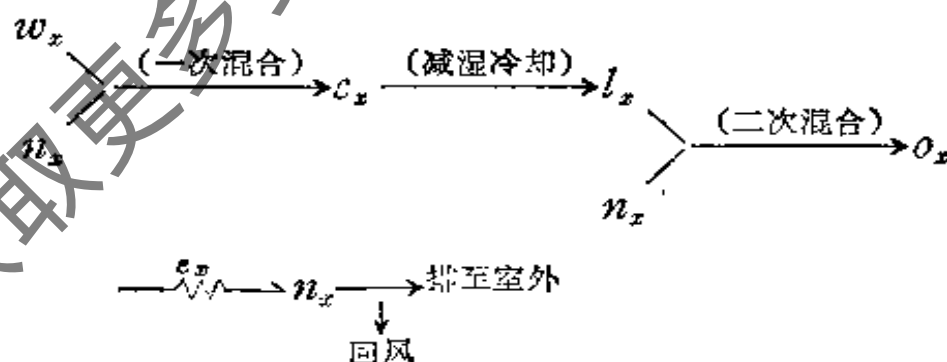
由公式 5.1 得:

$$Q_o = G(h_c - h_i) = 1.45 \times (53.3 - 35.9) = 25.2[\text{kW}]$$

### 3. 二次回风系统的夏季处理方案

在分析一次回风系统夏季处理方案时, 我们已经看到了这样一种情况: 一方面将状态为  $c_x$  的混合空气冷却干燥到机器露点状态  $l_x$ , 另一方面又要用再热器将  $l_x$  状态的空气升温到送风状态  $o_x$ , 方能送入空调房间。这种“一冷一热”冷热抵消的处理方法是一种能量浪费, 特别是在夏季, 要为此烧锅炉或用电加热, 很不经济, 很不合理。下面要介绍的二次回风系统, 采用喷水室后的二次回风代替再热器, 克服了上述缺点, 节约冷量和热量。

图 5.1 为一典型的二次回风系统的装置示意图。二次回风系统的夏季空气处理过程为:



上述空气处理过程在  $h-x$  图上的表示, 见图 5.5。先在  $h-x$  图上确定室内状态点  $n_x$ , 过该点画一条热湿比

$$e_x = \frac{Q_i}{W}$$

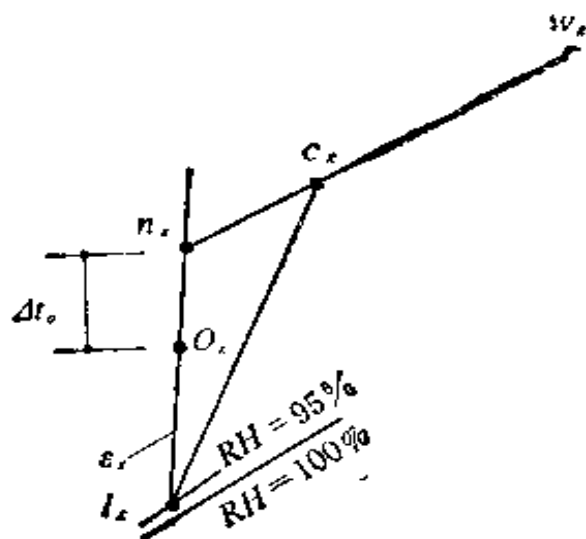


图 5.5 两次回风系统夏季空气处理过程

的过程线,并与  $RH = 90 \sim 95\%$  的曲线相交于  $l_x$  点,该点就是空气经喷水室后的机器露点。然后按照规定的送风温差,在  $e_x$  线上确定送风状态  $o_x$ , 这点也就是第二次回风与经喷水室处理后的空气进行混合得到的状态。

由本书第 3 章可知,空调房间的送风量为:

$$G = \frac{Q_i}{h_{n_x} - h_{o_x}} = \frac{W}{x_{n_x} - x_{o_x}}$$

根据两种不同状态空气混合规律可知,代替再热器的二次回风量  $G_2$  应为:

$$G_2 = \frac{O_x l_x}{n_x l_x} \cdot G = \frac{(h_{o_x} - h_{l_x})}{(h_{n_x} - h_{l_x})} \cdot G \quad (5.3)$$

于是,通过喷水室的风量  $G_1$  为:

$$G_1 = G - G_2 \quad (5.4)$$

或

$$G_1 = \frac{n_x O_x}{n_x l_x} G = \frac{(h_{n_x} - h_{o_x})}{(h_{n_x} - h_{l_x})} G = \frac{Q_i}{h_{n_x} - h_{l_x}} \quad (5.5)$$

因为通过喷水室的风量等于新风量  $G_w$  与一次回风量  $G_1$  的和,所以  $G_1 = G_i - G_w$ 。这样,一次混合点  $c_x$  就很容易确定了。

喷水室处理空气所需的冷量为:

$$Q_o = G_1 (h_{l_x} - h_{l_x}) \quad (5.6)$$

【例 5.2】 已知条件同例 5.1, 试计算该空调系统采用二次回风处理方式时, 夏季喷水室处理空气所需的冷量。

【解】 (1) 由室内热、湿负荷计算室内热湿比  $\epsilon$  值:

$$\epsilon = \frac{Q_1}{W} = \frac{11.3}{0.0011} = 10300 [\text{kJ/kg}]$$

(2) 确定空气处理过程各状态参数:

在大气压为 101325[Pa] 的  $h-x$  图上, 过  $n_x$  点作  $\epsilon$  线与等温线  $t_o = 17[^\circ\text{C}]$  ( $t_o = t_{n_x} - \Delta t_o = 23 - 6 = 17[^\circ\text{C}]$ ) 交于  $O$  点 (送风状态点,  $h_{ox} = 39.8[\text{kJ/kg}]$ ,  $x_{ox} = 8.9[\text{g/kg}]$ ), 与  $RH = 95\%$  的曲线交于  $l_x$  点 (机器露点,  $h_{lx} = 33.0[\text{kJ/kg}]$ ,  $t_{lx} = 12.0[^\circ\text{C}]$ )。

由公式 5.5 得:

$$G_l = - \frac{Q_1}{h_{n_x} - h_{l_x}} = \frac{11.3}{47.6 - 33.0} = 0.77 [\text{kg/s}]$$

因此,  $G_1 = G_l - G_w = 0.77 - 0.22 = 0.55 [\text{kg/s}]$ , 一次混合后的焓  $h_{c_x}$  为

$$h_{c_x} = \frac{G_1 h_{n_x} + G_w h_{wx}}{G_1} = \frac{0.55 \times 47.6 + 0.22 \times 85.1}{0.77} = 58.3 [\text{kJ/kg}]$$

(3) 计算送风量  $G$ :

$$G = \frac{Q_1}{h_{n_x} - h_{ox}} = \frac{11.3}{47.6 - 39.8} = 1.45 [\text{kg/s}]$$

(4) 夏季喷水室处理空气所需的冷量  $Q_c$

由公式(5.6)得:

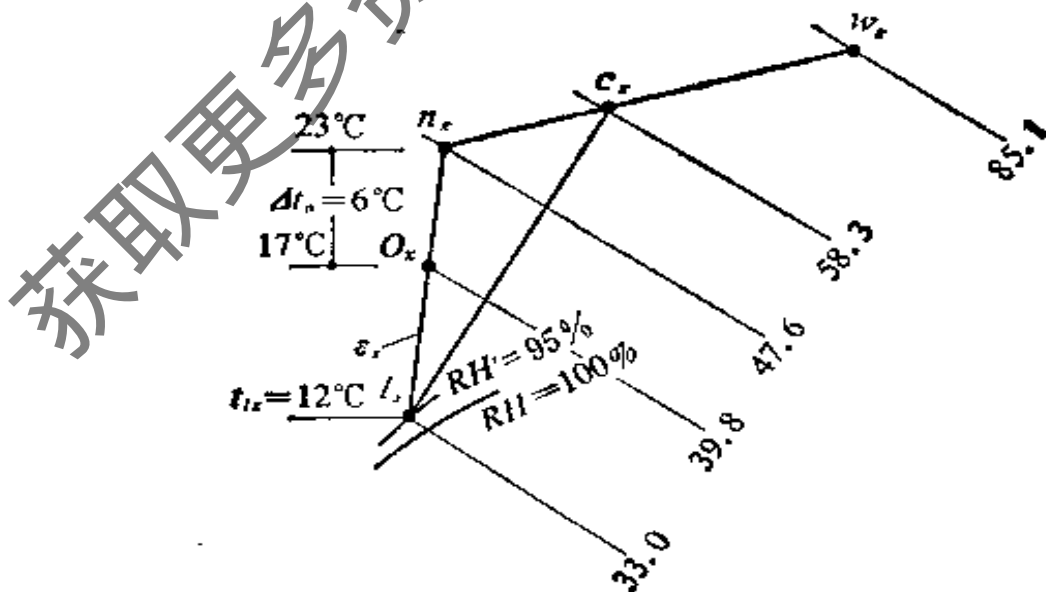


图 5.6 例 5.2 附图

$$Q_0 = G_1(h_{1,x} - h_{2,x}) = 0.77 \times (58.3 - 33.0) = 19.5 [\text{kW}]$$

比较二次回风系统与一次回风系统, 不难看出:

(1) 二次回风系统节省了再热器的加热量, 同时通过喷水室的风量不是总风量  $G$  而是  $G_1$ , 它比一次回风省冷量, 其数值相当于用来抵消再热器加热量的那一部分冷量。此外, 喷水室的尺寸也可缩小。

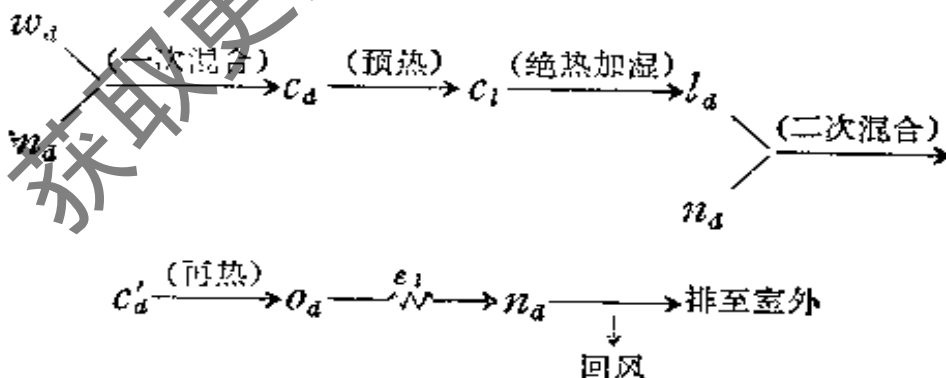
(2) 二次回风系统的机器露点温度  $t_{1,x}$  要比一次回风系统的机器露点温度低一些, 而第一次混合状态点  $c_x$  的焓要比一次回风系统  $h_{0,x}$  的大一些。机器露点低, 就要求进入喷水室的冷水温度也低, 这样会降低冷冻机的制冷效率, 也可能使天然冷源的使用受到限制。特别是当室内散湿量大时, 室内热湿比  $e_x = \frac{Q}{W}$  就小, 机器露点就会更低。

#### 4. 二次回风系统的冬季处理方案

如前所述, 对一般的系统, 冬季送风量与夏季相同, 因此新风量  $G_w$ 、一次回风量  $G_1$  和二次回风量  $G_2$  也与夏季相同。

在冬季较寒冷的地区, 冬季室外新风与回风按最小新风比混合后, 其焓值仍低于送风所需的机器露点的焓值  $h_{1,d}$  时, 就要使用预热器加热混合后的空气, 使其焓值等于  $h_{1,d}$ 。在  $h-x$  图上确定混合状态点  $c_d$  后, 过该点作等湿线与机器露点  $l_d$  所作的等焓线相交于  $c_1$  点, 即混合空气经预热后必须达到的状态点。

冬季空气处理过程为:



上述过程在  $h-x$  图上的表示见图 5.7。

预热器的加热量  $Q_1$  为:



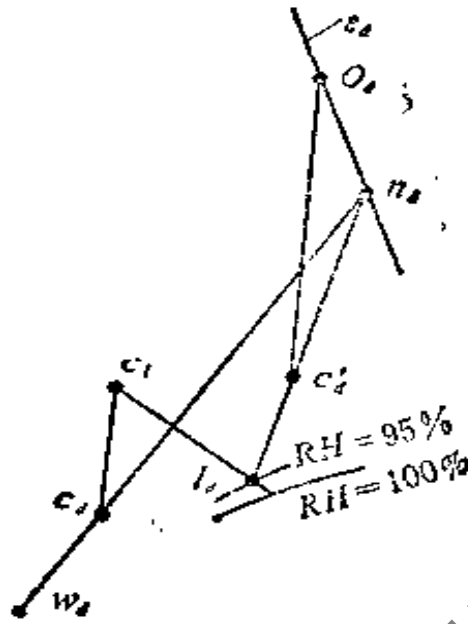


图 5.7 二次回风系统冬季空气处理过程(一)

$$Q_1 = G_1(h_{1a} - h_{ca}) \quad (5.7)$$

再热器的加热量  $Q_2$  为:  $Q_2 = G(h_{2a} - h_{ca}) \quad (5.8)$

如果在严寒地区, 需要采用先加热后混合的系统(图 5.8)。这种方案送风状态  $o_s$ 、机器露点  $l_a$  的确定方法与上面相同, 不同之处在于要调节空气预热器的加热量, 使预热后的新风状态为  $w'$ , 以保证混合后空气状态的焓值  $h_{o_s}$  等于机器露点状态的焓值  $h_{l_a}$ 。这种方案的空气处理过程为:

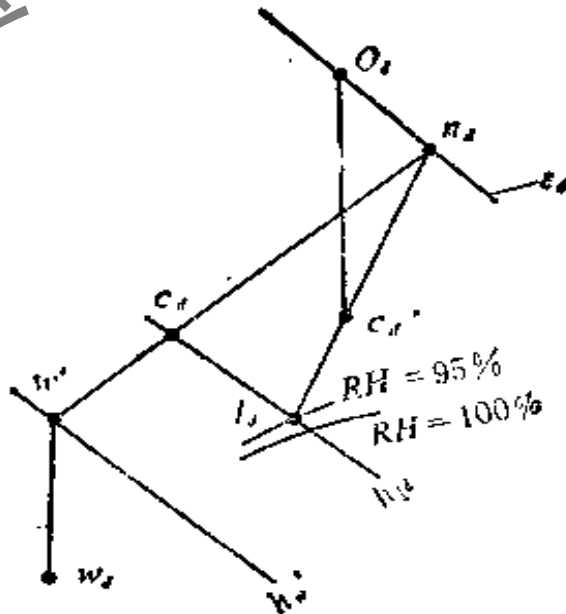
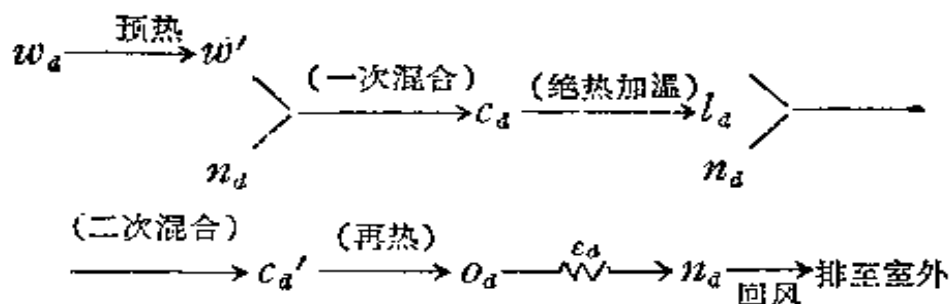


图 5.8 二次回风系统冬季空气处理过程(二)



现在的问题是，如何确定新风预热后的状态  $w'$ 。根据第3章中两种不同状态空气混合的规律， $w'$  点应满足下式：

$$\frac{G_w}{G} = \frac{c_d n_d}{w' n_d} = \frac{h_{n_d} - h_{i_d}}{h_{n_d} - h_{w'}}$$

即：

$$h_{w'} = h_{n_d} - \frac{h_{n_d} - h_{i_d}}{G_w/G} \quad (5.9)$$

求得  $h_{w'}$  后，自新风状态点  $w_d$  沿等湿线向上作垂线与  $h_{w'}$  线交于  $w'$  点。这时，预热器的加热量  $Q_1$  为：

$$Q_1 = G_w (h_{w'} - h_{i_d}) \quad (5.10)$$

再热器的加热量  $Q_2$  为：

$$Q_2 = G (h_{o_d} - h_{i_d}) \quad (5.11)$$

### 5. 关于一次风系统和二次风系统的选择

从夏季工况来看，二次回风和一次回风系统节省能量，尤其是可以不用热源。但由于二次回风机器露点较低，影响了它在某些场合的应用。二次回风系统在空气处理设备构造和运行调节方面要比一次回风系统复杂一些。对于夏季只作降温用的空调系统，如果对送风温差没有限制，不必采用再热器或二次风来保证送风温差，这时采用一次回风系统就更合理。

## 5.2 全空气系统的运行管理

室外空气状态一年四季都在变化，这使得空调房间的热湿负荷也是在不断变化着。通过围护结构的传热量随着室外空气状态的变化而变化，室内工艺设备的散热和散湿量，室内人员的散热和

散湿量也因工作情况的变化有所变化。因此，空调系统需要相应地进行调整，以便保证室内空气参数稳定在要求的范围内。

为了经济合理地使用空调系统，满足生产工艺对室内温湿度的要求，运行管理人员必须掌握全年运行调节规律。

### 5.2.1 新风状态变化时的运行调节方法

先假定室内负荷不变，全年要求维持的室内状态不变，以及要求的送风状态和送风量也不变。通过上一节的分析，我们知道，只要机器露点不变，送风含湿量就不变，这样也就满足了室内空气含湿量的要求。

现以工程上最常见的一次回风系统为例进行分析。由于空气的焓是以空气具有的热量多少为标志的（它可用干湿球温度计测得），为了在理论分析和实际操作中使用方便，我们在讨论空调工况时，以焓作为空气状态的指标。通常将全年室外空气状态分为四个阶段进行分析。

1. 第一阶段，新风的焓小于或等于  $h_w'$ 。在这个阶段，使用满足卫生要求的最少新风量，即保持最小新风比  $m\%$  不变，随着室外空气焓值的升高，不断减少预热器的加热量，使加热后的室外空气的焓始终为  $h_w'$ ，也即使混合后的状态点始终处于  $h_i$  线上（图 5.9）。这样在喷水室中喷循环水便可控制机器露点不变。当室外空气焓值升高到  $h_w$  时，便可停止使用预热器。

2. 第二阶段，新风焓值处于  $h_w' \sim h_i$  之间。随着室外空气焓值的增加，不断地增加新风量，使混合点正好处于  $h_i$  线上。这样也只要喷循环水就可以达到要求了。当室外空气的焓  $h_w = h_i$  时，关闭一次回风阀，全部采用新风。在设计新风进风口和新风管道时，必须考虑全部使用新风送风的可能性。与此同时，回风系统（或排风系统）应能把全部风量排至室外。

3. 第三阶段，新风焓值处于  $h_i \sim h_o$  之间。这时采用绝热加湿已无法使空气处理到  $l$  点，而必须在喷水室中用温度低于机器露点温度的冷水喷淋。若再采用回风，将增加喷水室中的冷量消耗。所以，在这个阶段中，用全新风经处理后送入空调房间，喷水

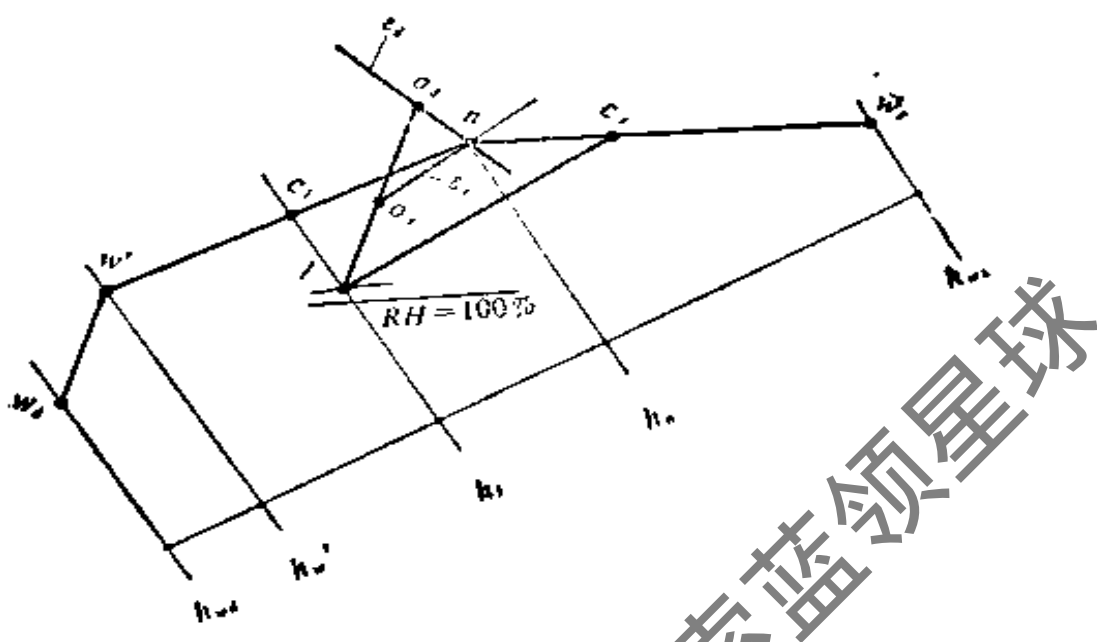


图 5.9 一次回风系统全年调节工况

室中喷冷水,随着新风焓值的增加,逐步降低喷淋过程中的冷水温度,就可以保证所要求的  $l$  点。调节喷淋水温通常是通过调节冷水三通阀或双通阀,改变来自冷源的冷水与喷水室底池回水的比例来实现的。

4. 第四阶段,新风的焓在  $h_n \sim h_{wz}$  之间。 $h_{wz}$  是夏季室外空气设计状态的焓,由于新风的焓高于回风的焓  $h_n$ ,为了节省冷量,应该按卫生要求的最小新风量与回风混合。这一阶段中,喷水室的空气处理过程是降温减湿过程,喷水温度随着室外空气焓值的升高而下降,一直降到夏季设计条件下的数值。

综上所述,可将具有冬季预热器的一次回风喷水空调系统全年运行调节方法列入表 5.1。

对于二次回风系统,由于二次回风量是固定不变的,在只有新风状态变化时,冬季的再热器加热量也是不变的,它的全年运行调节工况与一次回风系统基本相似,这里就不再重复了。

### 5.2.2 室内负荷变化时的运行调节方法

本节研究的是比较常见的室内余热量变化而余湿量不变的情况。在以工艺过程散湿或以人员散湿为主的空调房间,这种情况

| 阶段 | 调节内容       | 新风焓<br>变化范围       | 新风量             | 预热器         | 喷水室          | 调节方法                           |
|----|------------|-------------------|-----------------|-------------|--------------|--------------------------------|
| 一  | 预热器<br>加热量 | $h_{w0} \sim h_w$ | 固定最小新风          | 加热量逐<br>渐减少 | 喷循环水<br>绝热加湿 | 调节加热器的旁通风<br>门或调节热媒流量,<br>热媒温度 |
| 二  | 新回风<br>比 例 | $h_w \sim h_i$    | 由最小新风量<br>增至全新风 | 关闭          | 喷循环水<br>绝热加湿 | 调节新风和回风风<br>门, 逐渐增加新风          |
| 三  | 喷水温度       | $h_c \sim h_n$    | 全新风             | 关闭          | 喷冷水          | 调节三通阀, 改变<br>喷水温度              |
| 四  | 喷水温度       | $h_n \sim h_{w0}$ | 固定最小<br>新风量     | 关闭          | 喷冷水          | 调节三通阀, 改变<br>喷水温度              |

是普遍的。由于室内余热量  $Q$  发生变化, 而余湿量不变, 室内热湿比  $e = \frac{Q}{W}$  也就发生变化, 如图 5.10 所示。随着室内余热量的减

少,  $e$  值也逐渐变小 (即由  $e \rightarrow e' \rightarrow e''$ )。由于一般空调系统全年送风量不变, 室内空气状态不变, 室内余湿量不变, 因而送风状态的含湿量

$$x_0 = x_n - \frac{W}{G}$$

也是不变的。所以, 尽管  $e$  值在不断变化, 其相应的送风状态点必然位于各自的  $e$  线与  $x_0$  线的交点上, 如  $o, o', o''$  点等。可见, 这时仍可控制机器露点不变, 只要调节再热器的加热量, 就可实现所需要的送风状态  $o, o', o''$ 。

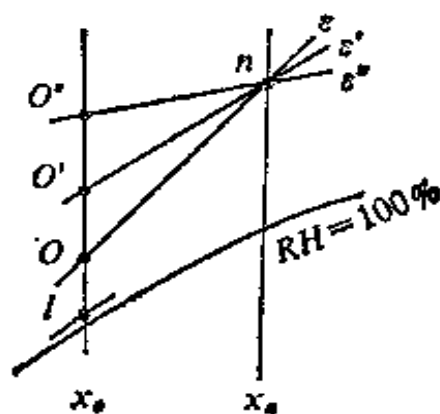


图 5.10 室内余热量发生变化时的调节工况

如果空调房间内余湿量很小, 使得热湿比线接近于无穷大, 此时送风状态几乎处于通过  $n$  点所作的等湿线  $x_n$  上, 其调节方法也

是调节再热器的加热量。

对于余热、余湿量同时有变化的情况，其调节方法比较复杂，不能笼统介绍，不过读者可以根据上面介绍的原则，根据具体情况作分析，问题是不难解决的。

顺便指出，不同地区的气候变化情况不同，系统采用的冷却去湿设备不同，调节阶段的划分也可以有所不同。例如，对较小的空调系统，有时可以采用全年新、回风混合比不变的方案，取消上述方法中的第二阶段，虽然必须提早使用冷源，但调节管理方便。又如，对某些室外空气相对湿度较大的地区，过渡季节（特别是梅雨季）不宜采用全新风。否则，有时甚至会提前开冷冻机，以免室内相对湿度过大。总之，采用什么调节方法，除了考虑技术上合理外，还应考虑运行费用、控制设备的初投资以及设备维修保养费用等各种因素。

### 5.2.3 空调系统运行中的故障及排除

空调系统运行中，常会遇到两类情况，一种是室内送风量不足，另一种是室内空气状态参数达不到要求。

1. 室内送风量不足，可以考虑是否是下列故障引起的：

(1) 通风机性能变差。由于风机安装不良，防振措施较差，长期运行后，使风机壳变形，离心风机叶轮与吸风口接管间的轴向及径向间隙超过叶轮直径的1%，轴流风机叶片与机壳间的间隙超过叶轮直径的1~2%，都会使风量大幅度下降。排除的办法是重新安装风机，采取有效的防振措施，防止送风总管及回风总管的重力作用在风机上，用皮带传动的通风机，皮带松弛或打滑会使转速下降而造成送风量减少。

(2) 送风系统漏风。由于长期使用或施工时质量不合格，风管法兰联结不严密，风管检查孔和空气处理室的人孔结构不良等都会造成漏风。应经常检查所有接缝处的密封性能，更换不合格的垫圈，进行堵漏。

(3) 过滤器积灰超过额定值。过滤器积灰过量，其通风阻力超过允许值，使系统空气阻力增大，使风机工作点变化而减少了送

风量。排除的办法是定期清洗或更换过滤器。

(4) 采取以上措施后,如果风量仍达不到要求值,则要考虑风机的选型是否有问题。

2. 室内空气状态参数达不到要求。除了系统送风量不足,是一个可能的原因外,还可能由下列故障引起:

(1) 风管温升(或温降)超过设计值 这会使送风温度偏高(或偏低)。风管保温层质量差会导致这一结果。即使是在系统刚建成时保温层是符合要求的,但是经长期使用后部分保温层可能会出现开裂、脱落等现象。在夏季,这使得毡类、纤维类保温层内发生结露,导致导热系数急剧增大,失去保温作用。所以应定期检修保温层,保证保温层完好有效。水管保温也会有类似问题。另外,风机效率过低和风机保温不良,也会造成风机温升增加,使夏季送风温度过高。

(2) 喷水室喷嘴堵塞 由于长期使用,新风及回风中的灰尘沉积在喷水室底池,随回水进入喷嘴,使喷嘴堵塞,喷水量减少,喷水室出口空气温度、湿度达不到要求,影响了送风状态及室内空气温湿度。应经常更换底池存水,更换已堵塞的喷嘴,或采取更有效的回水过滤措施。表冷器和空气加热器被灰尘堵塞,或它们的旁通风门(如果有的话)漏风,也会使送风参数达不到要求。

(3) 挡水板过水量超过设计值 挡水板加工及安装质量不良,如挡水板下部未插入水面,挡水板与喷水室边壁有较大间距等,都会使挡水板过水量增大,通过喷水室的风速过高也会造成大量过水。结果引起送风状态含湿量过高,室内空气湿度过大。应检查挡水板的质量,控制通过喷水室的风速。当采用表冷器冷却干燥空气时,还会出现由于凝结水盘下部排水管水封高度不够,在风机负压的抽吸作用下,有少量空气通过凝结水排放管进入表冷器小室,造成表冷器后空气带水。

(4) 处于负压的空气处理室漏风 这会使未经处理的空气进入送风系统,改变了送风状态参数。比如,夏季喷水室的检查门关闭不严,机房中热湿空气被吸入,使机器露点不能满足设计要求,

送风状态参数也就不能保证。应检查并堵塞漏洞,加强管理。

### 5.3 风机盘管空调系统的原理及组成

所谓风机盘管空调系统,是将由风机和盘管组成的机组直接放在空调房间内,风机把室内空气吸进机组,经过过滤后再经盘管冷却或加热,就地进入空调房间,以达到空调的目的。房间所需的新鲜空气通常是将室外空气经新风处理机组集中处理后由管道送入,风机盘管所用的冷媒、热媒也是集中供应的,所以风机盘管空调系统是半集中式空调系统。在这种系统中,冷量(或热量)分别由空气和水带入空调房间,所以属空气-水系统。

风机盘管机组空调系统在国外已广泛用于旅馆、公寓、医院和办公楼等高层多室的建筑物中,同时也用于小型多室住宅建筑的大面积空调。对于需要增设空调的小面积、多房间的旧建筑来说,采用这种空调方式也是比较合适的,因为它占地面积小,所占空间也小(因风管系统比全空气系统小),不需要大拆大改,易于安装施工。

#### 5.3.1 系统布置、新风供给方式及水管系统

风机盘管机组的选型及布置与空调房间的使用性质、建筑形式有关。对于宾馆的客房,一般布置在进门的过道顶棚内(图 5.11),采用卧式暗装形式机组。这种布置形式美观,不占用房间有效面积,噪声小。从室内气流组织和温度分布均匀角度来看,风机盘管的这种安装方式,特别适用于夏季使用和以夏季使用为主的南方地区。对于办公室、医院病房、门诊室等,如顶棚无安装位置时,采用立式机组布置在外墙窗下较好(图 5.12)。机组立式安装,多用于空间较大的房间,冬季和夏季室内温度均匀性较好,特别是用于冬季送风效果好。立式安装维修较方便,但要占用房间的有效使用面积。

近年来,国内开始生产和使用吊顶卧式暗装机组,主要优点是不占用或很少占用建筑面积,但安装检修困难。有时为便于安装,要求平顶内有一定高度的空间,这使得建筑高度增加,从而增加建



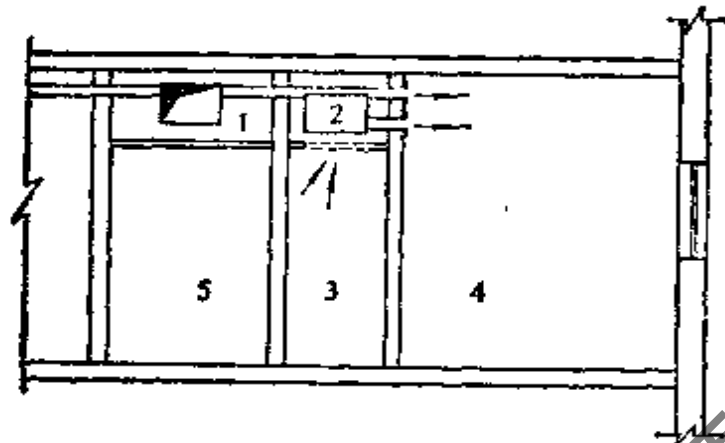


图 5.11 卧式风机盘管机组和独立新风系统

1—新风管；2—风机盘管；3—过道；4—客房；5—走廊

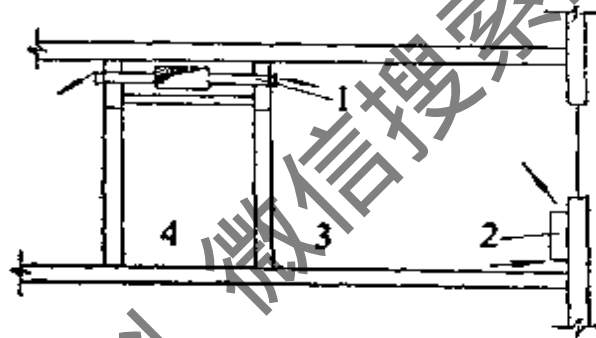


图 5.12 立式风机盘管机组和独立新风系统

1—新风口；2—机组；3—病房；4—走廊

筑造价。但这种安装方式在冬季室内温度梯度大，一般不宜用于以冬季采暖为主的场所。

风机盘管机组空调系统的新风供给方式有多种。

1. 室外空气靠房间的缝隙自然渗入和从室内浴厕机械排风这时机组处理的是循环空气。这种方案，初投资和运行费都较低，但新风供给不是绝对保证的，故室内卫生条件较差。此外，无组织的渗漏风使室内空气温度分布也难以均匀。因此，这种方式只适用于人员少的情况。特别适用于旧建筑物增设风机盘管空调系统且布置新风管有困难时。

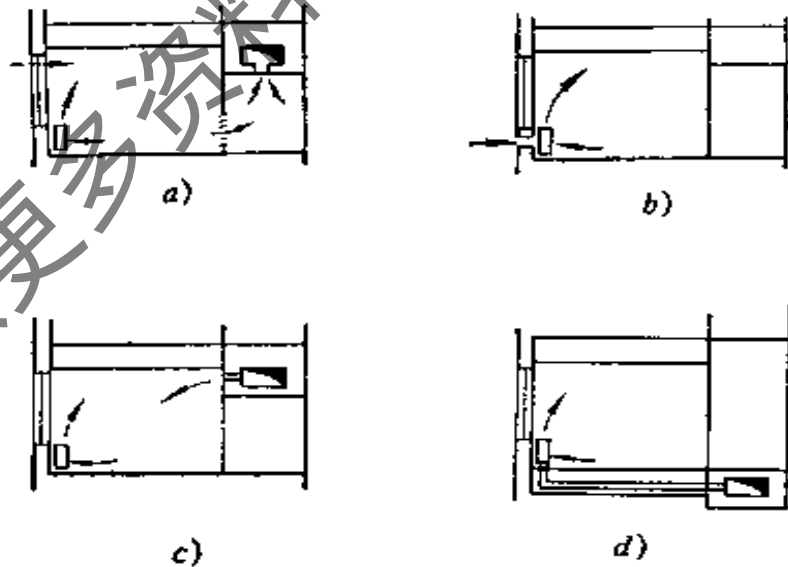
2. 墙洞引入新风直接进入机组 新风口做成可调节的，冬、

夏季按最小新风量运行,过渡季尽量多采用新风。这种方式虽然新风得到比较好的保证,但室内空气参数受室外空气参数的变化影响较大,它不适用于高建筑物,而只适用于对室内空气参数要求不太严格的建筑物。它还有一个缺点,就是室外噪声会从新风口直接进入室内。此外,建筑物立面上有许多进风孔也是一个问题。

3. 由独立的新风系统供给室内新风,经处理过的新风从进风总风管通过支风管送入各房间。对卫生条件较严格的空调建筑,采用单独的新风系统是合适的。我国近年来新建的宾馆大都采用这种方式向客房等空调房间供应新风。单独设置的新风机组,可随室外空气状态参数的变化进行调节,保证室内空气状态参数稳定,房间的新风量全年都可以有保证。但投资较大一些。还要占用一定的空间。

风机盘管机组的供水系统分为双水管系统、三水管系统和四水管系统三种。

1. 双水管系统 这种系统冬季供热水、夏季供冷水都在同一管路中进行(图 5.14)。其特点是系统简单,投资省。双管系统的缺点是,在过渡季节,有些房间要求供冷而有些房间要求供热时,就



a) 室外渗入新风; b) 新风从墙洞引入; c) 独立的新风系统;  
d) 独立的新风系统

图 5.13 风机盘管空调系统的新风供给方式

不能全部满足要求。对这种情况往往采取整个建筑物按朝向分几个区，用分区供水的办法来满足要求。不同区域通过各自的区域热交换站控制供水温度，进行调节。

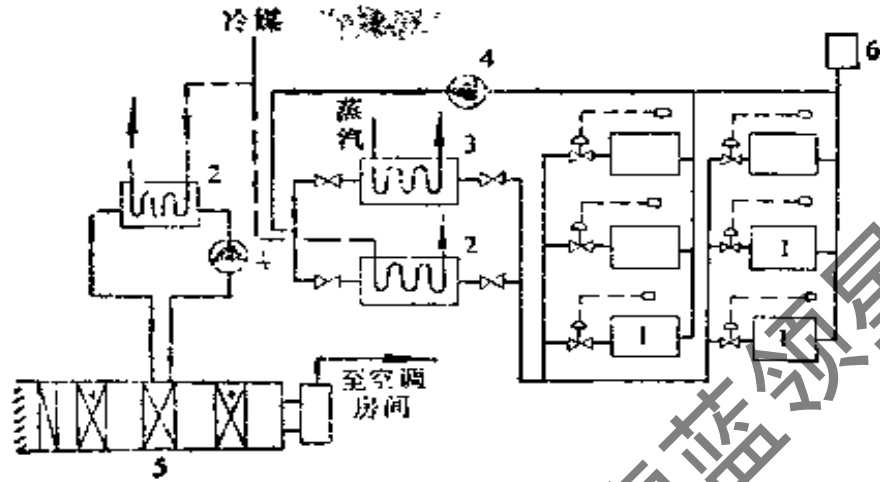


图 5.14 双水管风机盘管系统

- 1—风机盘管；2—冷冻机的蒸发器；3—蒸汽-水换热器；  
4—水泵；5—集中空调器的表冷器；6—膨胀水箱

2. 三水管系统 这种系统每个风机盘管在全年内都可使用热水或冷水(图 5.15)。它由一根供冷水管，一根供热水管和一根公共的回水管组成。由温度调节器自动控制每个机组水阀的转换，

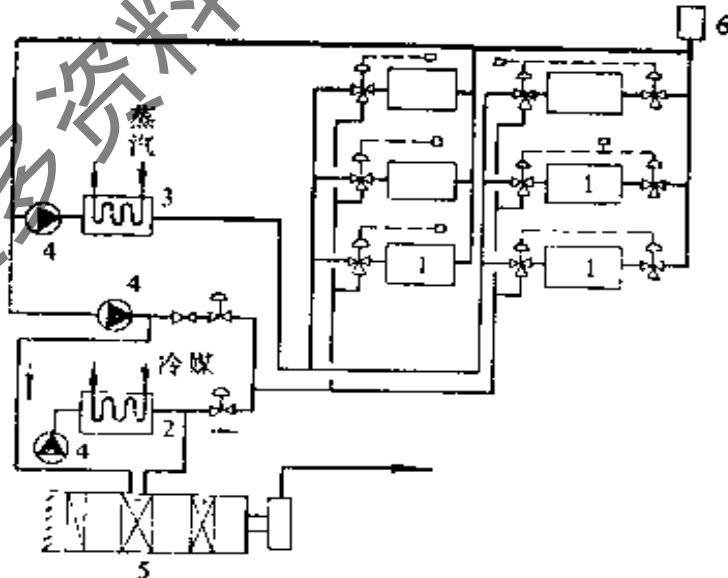


图 5.15 三水管风机盘管空调系统

- 1—风机盘管；2—冷冻机的蒸发器；3—蒸汽-水换热器；4—水  
泵；5—集中空调器的表冷器；6—膨胀水箱

使机组根据需要接通冷水或热水。但这种系统由于回水管中可能产生的冷水与热水相混合,造成冷热量的混合损失,故实际工程中很少采用这种形式。

3. 四水管系统 这种系统的冷水和热水由两根管道分别输送,回水管也是冷热水各一根管道(图5.16)。因此,这种系统既可以全年内同时供给冷水和热水,对房间温度实现灵活调节,又克服了三水管系统存在的回水管冷热混合损失。它的缺点是一次投资大,管道占用建筑空间也多。

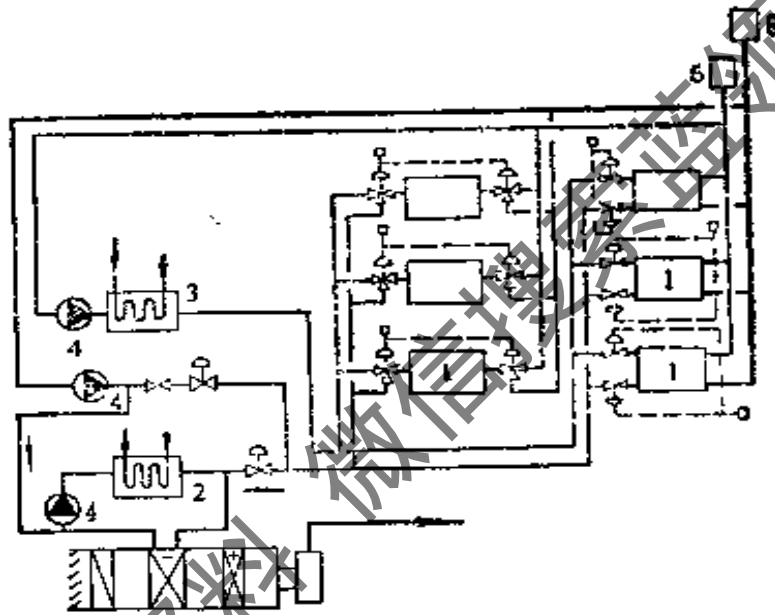


图 5.16 四水管风机盘管系统

1—风机盘管; 2—冷冻机的蒸发器; 3—蒸汽-水换热器;  
4—水泵; 5—集中空调器表冷器; 6—膨胀水箱

在选择风机盘管空调的水管系统时,要对以上三种系统作全面综合比较。目前,在我国的旅游宾馆空调工程中,多采用双水管系统的风机盘管空调方式。对舒适要求很高的建筑物,在有可靠的自控元件时,也有少数采用四水管系统的。

### 5.3.2 用机盘管机组的选择计算

在设计风机盘管系统时,首先根据使用要求及建筑情况,选定风机盘管的形式及系统布置方式。然后确定新风供给方式和水管系统类型。风机盘管机组的选择计算目的是在已知的风量、进风

参数和水初温、水流量的条件下,确定满足所需要的空气出口参数和冷量的机组。

1. 选择高档风量能满足计算所需风量的风机盘管机组,如果一台不够则选两台或两台以上的机组共同负担室内负荷。

2. 选定机组后,应使机组的全冷量和显冷量均能满足房间的要求。如果产品不能同时满足两个方面的要求,则应进行室内空气状态参数的校核。目前国内风机盘管生产厂家绝大多数均未提供全冷量和显冷量的特性曲线或选用表,有的甚至只有标准工况下的全冷量,这种产品样本不能满足设计计算的需要。

需要指出,不同的新风供给方式,不同的新风处理终参数,风机盘管机组负担的全冷量、显冷量也不同。当通过渗漏或墙洞引入新风时,新风不经热湿处理直接进入室内,风机盘管机组的冷量应等于室内冷负荷及新风冷负荷之和。当设立独立的新风的系统时,若新风经新风机处理后的焓等于室内空气的焓,则风机盘管机组提供的全冷量应等于室内全冷负荷,而其显冷量应等于室内显冷负荷与新风提供的显冷量之差。

【例 5.3】 已知一房间夏季室内冷负荷  $Q = 5.38$  [kW], 湿负荷  $W = 0.22$  [g/s] (0.00022 [kg/s]), 室内空气温度  $t_n = 27.0$  [°C], 相对湿度  $RH_n = 60\%$ 。室外空气干球温度  $t_w = 34$  [°C], 相对湿度  $RH_w = 65\%$ 。新风机组的风机及风管的温升  $\Delta t = 0.5$  [°C], 该房间要求的新风量  $G_w = 0.08$  [kg/s] (300 [kg/h])。拟采用风机盘管机组加独立新风系统, 试确定风机盘管的型号、数量及主要运行参数。

【解】 采用新风不负担室内全热冷负荷的方案, 即送入室内新风的焓等于  $h_n$ 。

$$\text{室内热湿比 } \epsilon = \frac{Q}{W} = \frac{5.38}{0.00022} = 24500 \text{ [kJ/kg]}$$

采用可能达到的最低参数送风(图 5.17 中的  $o$  点), 则:

$$\text{总送风量 } G = \frac{Q}{h_n - h_o} = \frac{5.38}{61.5 - 51.5} = 0.533 \text{ [kg/s]}$$

要求的新风量  $G_w = 0.08$  [kg/s], 则

$$\text{风机盘管风量 } G_f = G - G_w = 0.533 - 0.08 = 0.453 \text{ [kg/s]}$$

风机盘管机组出口空气的焓  $h_s$ :

$$h_s = \frac{Gh_o - G_w h_n}{G_f} = \frac{0.533 \times 51.5 - 0.08 \times 61.5}{0.453} = 49.8 \text{ [kJ/kg]}$$

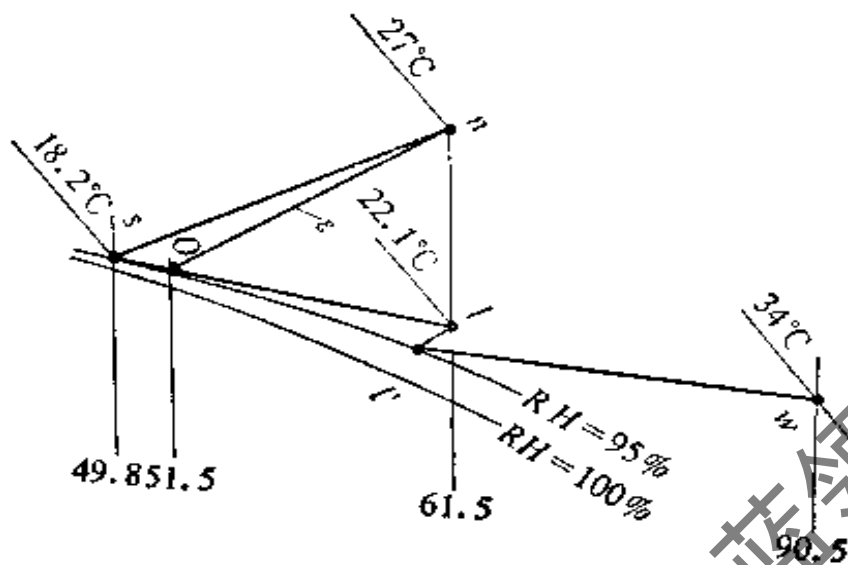


图5.17 例5.3附图

或者可用另一种算法,当风机盘管的全冷量等于室内全热冷负荷时,可以写出:

$$h_s = h_n - \frac{Q}{G_f} = 61.5 - \frac{5.38}{0.458} = 49.8 \quad [\text{kJ/kg}]$$

查  $h-x$  图得:  $t_s = 18.2 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $RH_s = 95\%$  (认为风机盘管出口空气只能接近饱和,  $RH_s = 95\%$  是根据经验予以确定的)。

$$\begin{aligned} \text{风机盘管显冷量 } Q_s &= G_f c_a (t_n - t_s) = 0.458 \times 1.01 \times (27.0 - 18.2) \\ &= 4.07 \quad [\text{kW}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{或者 } Q_s &= G_c c_a (t_n - t_s) - G_w c_w (t_n - t_w) = 0.538 \times 1.01 \\ &\times (27.0 - 18.8) - 0.08 \times 1.01 \times (27.0 - 22.1) = 4.06 \quad [\text{kW}] \end{aligned}$$

选用通惠-开利42 CM-003型风机盘管机组三台,每台机组高档风量  $0.142 \text{ [m}^3/\text{s]} (510 \text{ [m}^3/\text{h]})$ 。在进水温度  $t_{w1} = 10.0 [^{\circ}\text{C}]$ , 水流量  $0.1 \text{ [kg/s]} (360 \text{ [kg/h]})$  时,每台机组的全冷量  $1.99 \text{ [kW]} (1710 \text{ [kcal/h]})$ , 显热冷量  $1.67 \text{ [kW]} (1350 \text{ [kcal/h]})$  均能满足要求。并且,高档风量、全冷量、显冷量分别有11%、11%、16%的富余量。

## 5.4 风机盘管空调系统的运行管理

风机盘管机组的风机转速可分为高、中、低三档,冷热水系统可以调节水温和水量,因此可以灵活调节各房间的温度。室内无人时,机组可以停止运行且并不影响其他房间的正常使用,节省运行费用。它与全空气系统比较,具有占用空间少的特点,与诱导器

系统(在第 5.5 节中介绍)比较,又具有噪声小的优势。其缺点是一般需与新风系统合用,过渡季节不能使用全部新风通风,机组机械动作部分(如风机、电机)对加工质量和维修工作要求较高,机组分散设置,如质量不高,造成维修工作量大。为了降低噪声,风机盘管机组的风机转速不能太高,所以机组余压头很小,气流分布受到限制,一般只适用于进深小于 6[m] 的房间。

#### 5.4.1 风机盘管机组的局部调节方法

为了适应空调房间瞬变负荷的变化,风机盘管机组通常有三种局部调节(手动或自动)方法,即调节水量,调节风量和调节旁通风门。由于国内没有设旁通风门的风机盘管机组产品,故这里只介绍前两种调节方法。

1. 水量调节 当室内冷负荷减少时,通过直通或三通调节阀减少进入盘管的水量,盘管中冷水平均温度随之上升,冷水在盘管内吸收的热量减少。由于风机盘管机组出口空气的含湿量增大,房间相对湿度将增加。

2. 风量调节 这种调节方法应用较为广泛。通常分高、中、低三档调节风机转速以改变通过盘管的风量,也有实行无级调速的。当室内冷负荷减少时,降低风机转速,空气在盘管中的放热量减少,盘管内冷水的平均温度下降。另外,随着风机转速的降低,室内气流分布将变差。当人员离开房间时,还可将风机关掉,以节省冷、热量及电耗。

#### 5.4.2 风机盘管空调系统的全年运行调节

当系统的新风不承担室内显冷负荷时,只将新风处理到室温,新风对室温不起调节作用,而由盘管承担全部室内显热冷负荷。靠风机盘管局部调节满足室内温湿度的要求。

当新风系统承担围护结构温差传热造成的冷(热)负荷、盘管承担其他室内冷(热)负荷时,可随着室外空气温度的  $t_w$  的下降(或上升),用新风处理设备中的再热器(或冷却器)集中升高(或降低)新风的温度,使新风温度  $t_1$  满足下式:

$$t_1 = t_n - 0.99 T (t_w - t_n + m) \quad (5.12)$$

式中  $T$ ——对应于  $1[\text{kg/s}]$  新风量在室内外温差为  $1[^\circ\text{C}]$  时围护结构的温差传热量,  $[\text{kg}/\text{kg}^\circ\text{C}]$ ;

$0.99$ ——空气的定压比热  $c_p$  的倒数,  $c_p = 1.01[\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}]$ ;

$m$ ——当量温差,  $[^\circ\text{C}]$ 。全年中,除围护结构传热外的室内最小显热负荷所相当的围护结构传热温差,即  $Q_{s,\text{min}} = m \sum(KF)$ , 通常取  $m = 5$ 。

双水管系统的风机盘管在同一时间内只能供应所有风机盘管同一温度的水(冷水或热水),夏季运行时,随着室外空气温度的降低,集中调节新风再热量,逐渐升高新风温度,以抵消传热负荷的变化,进入盘管的水温仍保持不变,靠调节水量以消除室内的瞬变负荷(室内照明、设备、人员散热和太阳辐射)的影响。室外空气温度低到某一温度时,只用新风就能吸收室内的显热冷负荷,向盘管内送热水,即实行季节转换。此后,随着显热冷负荷的进一步减少,只需调节盘管的加热量(提高供水温度),就可保持要求的室温。

#### 5.4.3 维护管理

由于盘管的水管直径较小(内径大多为  $6\sim 16[\text{mm}]$ ),系统安装好后,必须注意做好进出水管的清洗工作,初次使用前冲洗干管,污水不应通过盘管,为此要安装旁通管。水泵出口应安装过滤器,以免水中污物堵塞盘管。

为了防止盘管内结水垢,最好使用软化水。冬季禁止盘管使用高温热水或蒸汽作为热媒,热水温度最好不超过  $60[^\circ\text{C}]$ ,以免因管内积水垢,而降低传热量。

必须经常做好风机盘管回风口空气过滤器的清洗工作,已经不能再使用时就要更换新的过滤器。盘管使用一段时间后,视盘管外表面积灰程度及时做好清洗工作,以保证较好的传热效果。当过滤器或盘管本身积灰过多时,其通风阻力就会大于设计允许值,使风机盘管的送风量减少,风机盘管的供冷(热)量会进一步减少。

夏季初次启用风机盘管系统时,要控制冷水温度,使其逐步降



至设计水温，避免因立即送入温度较低的冷水而使机壳产生结露滴水现象。经过室内的冷水管也应保温，以防其表面产生凝结水。

当风机轴承为含油轴承时，要定期加油，否则使用一定时间（比如说一年）后，噪声就会明显变大。使用滚珠轴承，噪声稍高，但不需经常加油。

为了便于调节，供回水管尽量做成同程式，连接盘管的支管上应装阀门。盘管上虽有排气装置，但为了集中排气，还应注意水管坡度和设置集中排气装置。为了保证表冷器上产生的凝结水的顺利排除，防止发生溢水事故，应注意凝结水盘和凝结水管的坡度，保持泄水孔的清洁。

## 5.5 诱导器空调系统

诱导器空调系统也是一种半集中式空调系统。它是由经过处理的一次空气（新风或主要是新风）在诱导器内通过喷嘴高速喷射造成箱内负压，从而诱导入室内空气（称为二次空气）。二次空气通过诱导器内的热交换器（相当于风机盘管机组中的盘管，有时称为二次盘管）时被冷却或加热，然后与一次空气混合进入室内，以满足空调的要求。

图 5.18 是诱导器空调系统的工作原理图，图 5.19 是诱导器空调系统的空气状态变化过程在  $h-x$  图上的表示。

一次空气（新风、状态点  $w$ ）在集中空气处理箱中被处理到机器露点状态  $l$ ，然后再用风机输送到安装在各空调房间内的诱导器。一次风经过风机和风管有温升，所以进入诱导器时它的实际状态是  $1$ 。一次风（风量为  $G_1$ ）通过诱导器静压箱的喷嘴高速喷出，形成诱导能力，使状态为  $n$  的室内空气（即二次风，风量为  $G_2$ ）经过冷（热）盘管处理成状态  $2$ ，并与一次风混合。比值

$$n_0 = \frac{G_2}{G_1}$$

称为诱导器的诱导比，它与诱导器的型式、规格及结构状况有关。

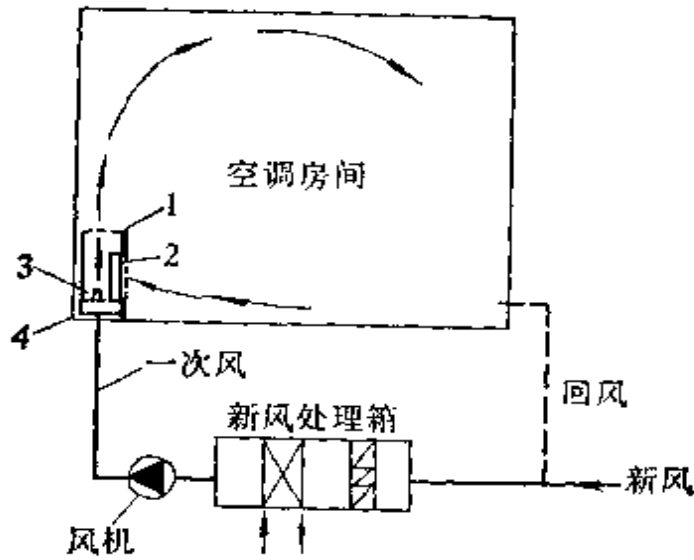


图 5.18 诱导器系统原理图

1—诱导器； 2—二次盘管； 3—喷嘴； 4—静压箱

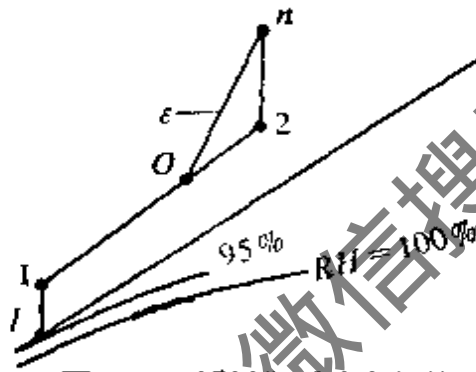


图 5.19 诱导器系统空气处理过程

对于一定结构及安装方式的诱导器，在一定风量范围内，诱导比是一定值，即一次风量变化，二次风量随之变化，而诱导比  $n_0$  不变。一次风和二次风混合后为状态  $o$ ，送入室内（送风量  $G = G_1 + G_2$ ），吸收房间的余热余湿达到室内空气状态  $n$ 。在这种空调系统中，诱导器也起到了送风口的作用。

诱导器空调系统的一次风通常就是新风，在必要时也可使用部分回风。但采用回风后就使诱导器空调系统的风管复杂了，初投资也增大了，所以使用回风的经济意义并不明显，大多数工程上不设回风管。

诱导器空调系统适用于多层、多房间且是同时使用的公共建筑（如办公楼、医院、商场、旅馆等）及某些工业建筑。它也可

用于空间有限的改建工程、地下工程、船仓和客机空调系统。诱导系统和风机盘管系统一样,具有房间的空气不会相互串通的特点,这有利于防止房间之间有害物(如果有的话)的交叉污染。诱导系统的新风一般采用高速风道(管内风速约 $15\sim 25$ [m/s]),其风道断面仅为普通风道的三分之一左右,节约建筑空间。房间同时使用性小和室内局部排风量小时,不宜采用诱导系统。由于二次风只能进行粗过滤,诱导系统不宜用于净化要求较高的房间。诱导系统的缺点是初投资较高,在过渡季节,难以利用室外新风自然供冷通风。

诱导器的噪声取决于制造质量,又喷嘴出口噪声频率较高,使人的主观感觉响度就较大。而风机盘管的噪声也取决于制造质量,但可多档变速,使噪声有选择性,即需要较安静时开低档风速。而风机盘管配用的电机噪声主要是低频噪声。在噪声要求严格的房间不宜采用诱导器系统。

#### 5.5.1 诱导系统的设计

设计诱导系统应遵循以下原则:(1)诱导系统的一次风量 $G_1$ 必须满足房间卫生要求,正压要求和补充排风所要求的风量。(2)必须满足房间热湿平衡。(3)诱导器所产生的噪声应低于房间允许噪声级。(4)诱导器的工作压力 $P$ (即诱导器入口处的一次风压力)和水阻力 $\Delta H_w$ 必须适当,同一系统中各诱导器的 $P$ 值、 $\Delta H_w$ 值应相近,如果风机和水泵压头已定, $P$ 值、 $\Delta H_w$ 值则应与之相适应。对于新设计的诱导系统,一般以取 $P=500$ [Pa]左右为宜。(5)合理地划分系统或分区,即将用途和负荷性质相同或相近的房间合并于同一个一次风系统,以便于设计和运行调节。

根据夏季二次冷却盘管中是否有水析出,可分为干冷却和湿冷却两种情况计算。现在以干冷却为例说明诱导器的选用步骤。

(1)已知室内状态 $n$ ,室内热湿比 $e$ 及允许的送风温差,确定送风状态 $o$ ,则室内送风量 $G$ 为:

$$G = \frac{Q}{h_n - h_o} = \frac{W}{x_n - x_o}$$

(2) 根据卫生要求或补充室内排风量的要求, 确定一次风量

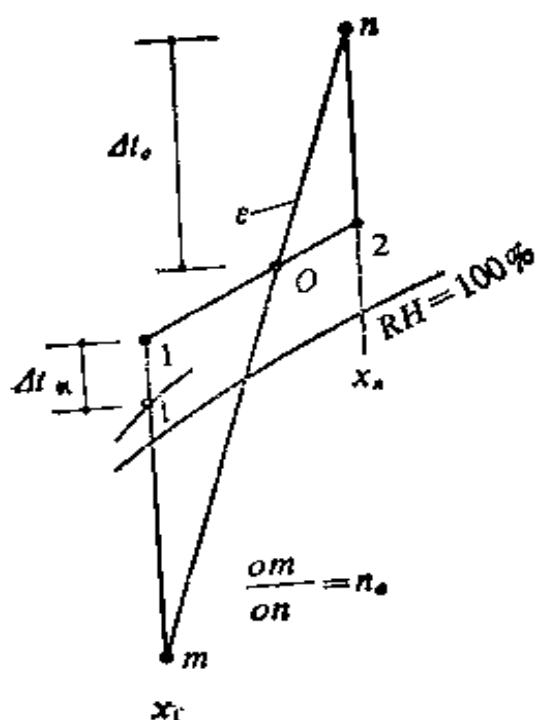


图 5.20 诱导器干冷工况

$G_1$ 。由于二次空气经过二次冷却盘管时为干冷, 对消除室内余湿不起作用, 室内余湿全部由一次空气带走, 所以, 一次风的含湿量  $x_1$  应为:

$$x_1 = x_n - \frac{W}{G} \quad (5.14)$$

(3) 根据  $x_1$  及一次空气经冷却处理后的相对湿度  $RH = 95\%$ , 确定状态点 1。考虑风机和管道温升后得到状态点 1, 即进入诱导器的空气状态。

(4) 联结 1、o 两点延长交等湿线  $x_n$  得状态点 2, 即二次冷却

盘管出口空气状态。

(5) 所需诱导比  $n_0$  可以用下式求得:

$$n_0 = \frac{x_o - x_1}{x_n - x_o} = \frac{\overline{1o}}{\overline{o2}} = \frac{\overline{mo}}{\overline{on}} \quad (5.15)$$

(6) 根据制造厂提供的样本, 选择诱导器, 以便使一次风量  $G_1$ 、诱导比  $n_0$ 、二次盘管的冷量、工作压力及噪声等都符合要求。必要时可以加大送风量或加大一次风量, 重新计算。直至选择到满意的诱导器为止。

### 5.5.2 诱导器空调系统的调节及管理

诱导器系统的全年运行调节也可以从两个方面进行, 当室外空气状态发生变化时, 一次风处理设备的调节规律和方法, 与一般集中式空调系统相类似。室内负荷发生变化时, 系统的运行调节与风机盘管系统室内负荷变化时的调节相类似。

## 5.6 空调系统的气流组织

在民用、工业建筑的空调、恒温工程中，合理地组织空调房间内的气流(也即送排风方式)是一个十分重要的环节，它直接影响着空调系统的使用效果，尤其是在要求室温分布均匀，且允许波动范围较小，或洁净度要求较高时，或在高大空间的空调中，合理的气流组织具有更重要的作用。只有合理的气流组织才能充分发挥送风的冷却或加热作用，均匀地消除室内热量，并能更有效地排除有害物和悬浮在空气中的灰尘。一般的空调房间，主要是要求在工作区域内保持比较均匀而稳定的温湿度和适当的空气流动速度。高大空间的空调，则要通过合适的气流组织，只消除工作区的余热和余湿，以保证该区的温湿度和风速的要求，而工作区以外的空气不必维持特定要求，从而达到节能的要求。

空调房间气流流型主要取决于送风射流，而送风口型式将直接影响送风射流，而回风口的位置对室内气流流型影响较小，对区域温差的影响较小。

国内空调房间气流组织的常用送风方式，主要有侧送(图

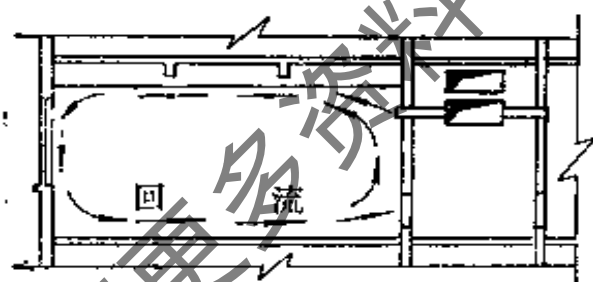


图 5.21 侧送

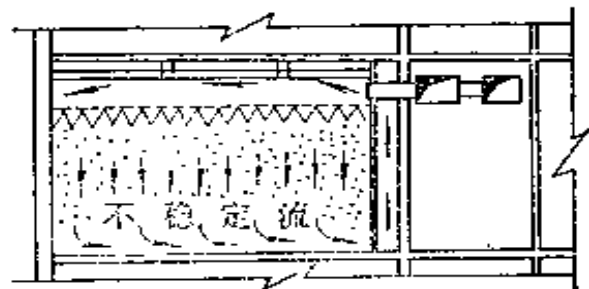
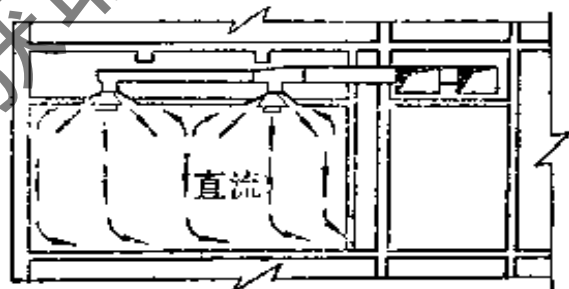
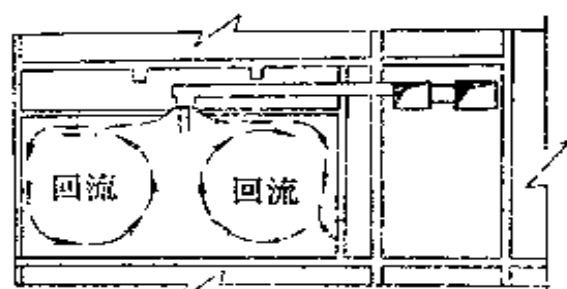


图 5.22 孔板送风



下送



平送

图 5.23 散流器送风(平送和下送)

5.21)、孔板送风(图 5.22)、散流器送风(图 5.23)、条缝送风(图 5.24)、喷口送风(图 5.25) 等五种。对室温波动范围要求严格的空调大多采用前三种送风方式,其主要性能见表5.2。

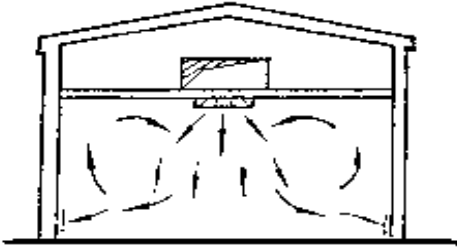


图 5.24 条缝送风

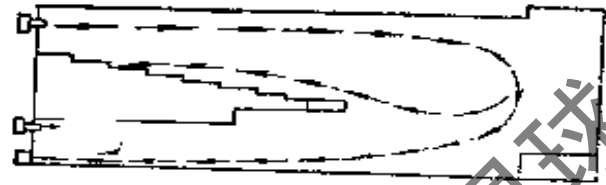


图 5.25 喷口送风

三种主要气流组织方式的性能

表 5.2

| 项 目      | 单 位   | 侧 送       | 散流器送风      |           | 孔板送风      |
|----------|-------|-----------|------------|-----------|-----------|
|          |       |           | 平 送        | 下 送       |           |
| 送风口位置    | /     | 侧上方       | 顶棚         | 顶棚        | 顶棚        |
| 回风口位置    | /     | 侧下方或上方    | 侧下方, 下方或顶棚 | 侧下方或下方    | 侧下方或地板    |
| 工作区应有的流型 | /     | 回 流       | 回 流        | 平行流       | 不稳定流或平行流  |
| 混合层高度    | [m]   | 0.3~0.5   | 0.2~0.5    | 1.0~3.0   | 0.15~0.30 |
| 房间高度下限   | [m]   | 2.5~3.0   | 2.5~3.0    | 3.0~4.0   | 2.2~2.5   |
| 区域温差     | [°C]  | 较 小       | 较 小        | 较 大       | 很 小       |
| 工作区平均风速  | [m/s] | 0.05~0.40 | 0.05~0.40  | 0.02~0.20 | 0.02~0.10 |

1. 侧送 这是空调工程中最常用的一种气流组织方式。一般以贴附射流形式出现,工作区通常是回流。对于室温允许波动范围要求不太高的空调房间,一般能满足工作区温度分布(区域温差)的要求。因此,除了区域温差或工作区风速要求很严格,或送风射程很短,不能满足射流扩散和温差衰减的要求外,宜采用这种方式。

2. 孔板送风 它的特点是射流的扩散和混合较好,射流的混合过程很短,温差和风速衰减快,因而工作区温度和速度分布均

匀。按照送冷风还是送热风、送风温差和单位面积送风量大小等条件,在工作区域内气流流型有时是不稳定流,有时是平行流。孔板送风时,风速均匀而较小,区域温差亦很小。因此,对于区域温差和工作区风速要求严格、单位面积送风量比较大、室温允许波动范围较小的空调房间,宜采用孔板送风的方式。

3. 散流器平送和下送 散流器平送和侧送一样,工作区总是处于回流区,只是送风射流的射程和回流的流程都比侧送短。空气由散流器送出时,通常沿着顶棚和墙面形成贴附射流,射流扩散较好,区域温差一般能够满足要求。由于应用散流器平送时应设置顶棚,管道暗装在顶棚内,这就导致建筑物层高的增加。一般都在建筑上已经考虑设置或可以设置顶棚(或技术层)的一些空调工程中应用。对散流器下送的方式,当采用顶棚密集布置向下送风时,有可能形成平行流使工作区风速分布均匀。这可用于有洁净度要求的房间,其单位面积送风量一般都比较大大。由于下送射流流程短,工作区内有较大的横向区域温差,又由于顶棚密集布置散流器,使管道布置较复杂。因此,仅适用于少数工作区要求保持平行流和建筑层较高的一些空调房间。

4. 喷口送风 这是大型建筑(如体育馆、礼堂、剧院、通用大厅)以及高大空间(如工业厂房,地铁站)常用的一种送风方式。由高速喷口送出的射流带动室内空气进行强烈混合,使射流流量成倍地增加,射流截面积不断扩大,速度逐渐衰减,室内形成大的回旋气流,工作区一般是回流。这种送风方式具有射程远、送风系统简单、投资较省、一般能够满足工作区舒适条件的特点。它在高大空间空调中用得较多。

5. 条缝送风 条缝送风属于扁平射流,它与喷口送风相比,射程较短,温差和速度衰减较快。一些散热量大的、只要求降温的房间可采用这种送风方式。在我国的纺织厂,目前绝大部分采用条缝型均匀送风方式,在民用和公共建筑中,还可采用与灯具配合布置的条缝送风方式。

由于空调房间回风口的位置对气流流型、区域温差影响较小,

除了高大空间或面积大而有较高区域温差要求的空调房间外，一般可仅在一侧集中布置回风口。回风口不应设在射流区内，防止气流短路。对于侧送方式，一般设在送风口同侧下方。下部回风易使热风送下。如果采用孔板或散流器送风形成平行流型时，回风口也应设在下侧。高大厂房上部有一定余热量时，宜在上部增设排风口或回风口以利于排除余热量。有走廊的多房间的空调工程，如果对消声、洁净度要求不高，室内又不产生有害气体时，可在走廊端部布置回风口，集中回风，而在各房间与走廊邻接的内墙或内门下部，设置可调节百叶格栅，使室内回风通入走廊后再被排除。走廊两端应设密封性能较好的门。调节回风风量的阀门，可设在回风支管上或就设在回风口中。回风口的大小根据回风量与回风口风速确定，一般回风口风速宜按表 5.3 确定。

回风口风速 [m/s] 表5.3

| 回 风 口 位 置 |         | 回风口风速[m/s] | 备 注                  |
|-----------|---------|------------|----------------------|
| 房 间 上 部   |         | 4.0~5.0    | * 回风口离操作位置较远时，还可再提高些 |
| 房间下部      | 不靠近操作位置 | 3.0~4.0*   |                      |
|           | 靠近操作位置  | 1.5~2.0    |                      |
|           | 用于走廊回风  | 1.0~1.5    |                      |



# 第6章 风管系统

## 6.1 风管系统的设计

### 6.1.1 风管系统设计的原则

通风管道是空调系统的主要组成之一，正确地设计风管系统是非常重要的，它关系到整个空调系统的造价、运行的经济性以及运行的效果。风管设计计算总的要求是，要兼顾制作管道的材料耗量、管道保温用料、管道所占的空间体积、风机所耗功率以及满足噪声允许值的风管内风速等。

风管系统设计的步骤为：

1. 确定送风口或吸风口的形式、位置、个数和必要风量；
2. 确定风机及其他空调设备的位置，划分空调区域，布置最合理的送、回风管线；
3. 进行管道阻力系统的计算；
4. 选择风机；
5. 绘图。

进行设计时，首先要选定系统最不利管路（即阻力最大的一条管路）作为计算的出发点。最不利管路一般是某一空调系统中最长管路或局部构件最多的管路。然后根据风量和所选定的管内风速计算这一最不利管路各管段的断面尺寸，并尽可能采用标准管径（见附录 6.1）。接着就可以计算出各管段阻力和系统总阻力，并选定风机。最后，按系统阻力平衡的原则，确定其他分支管段的管径，且使各并联支管间的阻力平衡（通常它们的阻力差不要大于 15%），在不可能通过调整分支管管径使阻力平衡时，则利用风阀进行调节。

### 6.1.2 风管阻力计算

流体在管内流动时,符合下面的伯努里定律:

$$P_1 + \frac{v_1^2 \rho}{2} + z_1 \rho g = P_2 + \frac{v_2^2 \rho}{2} + z_2 \rho g + \Delta H \quad (6.1)$$

式中  $P_1, P_2$ ——断面 1 和断面 2 处的压力, [Pa];  
 $v_1, v_2$ ——断面 1 和断面 2 处的流速, [m/s];  
 $z_1, z_2$ ——断面 1 和断面 2 处的管道中心线高度, [m];  
 $\rho$ ——流体的密度, [kg/m<sup>3</sup>];  
 $\Delta H$ ——由于摩擦阻力和局部阻力所造成的流动阻力, [Pa];  
 $g$ ——重力加速度, [m/s<sup>2</sup>].

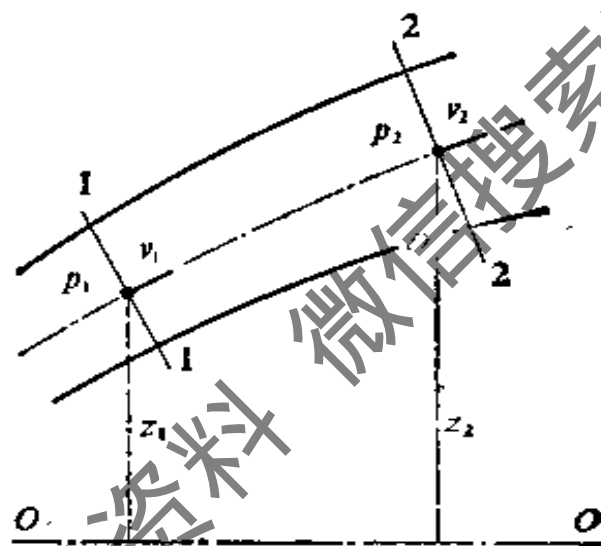


图 6.1 管内流动示意图

对于通风管道,常常用风管所在高度管外空气的(密度为  $\rho_0$ ) 压力(通常即当地的大气压)作为压力的基准,由于  $\rho$  和  $\rho_0$  值相差甚小,可以认为  $(z_1 - z_2)(\rho - \rho_0) \approx 0$ , 则公式 6.1 简化为:

$$P_1 + \frac{v_1^2 \rho}{2} = P_2 + \frac{v_2^2 \rho}{2} + \Delta H \quad (6.2)$$

$P_1, P_2$  称为静压,  $\frac{v_1^2 \rho}{2}, \frac{v_2^2 \rho}{2}$  称为动压,  $P_1 + \frac{v_1^2 \rho}{2}, P_2 + \frac{v_2^2 \rho}{2}$  称为全压。公式 6.2 中的  $\Delta H$  是风管内的流动阻力,它是

直风管的摩擦阻力  $h_f$  和弯管、三通等局部阻力  $h_d$  之和, 即  $\Delta H = h_f + h_d$ 。流动阻力也就是全压损失, 流体从 1 流到 2, 由于  $\Delta H$  的存在, 断面 2 的全压一定小于断面 1 的全压。

### 1. 圆形风管的摩擦阻力计算

当空气通过直风管时, 由于空气的粘滞性和管壁的粗糙不平对空气流动产生阻力, 这种阻力称为摩擦阻力(又称长度阻力)。在单位长度所产生的摩擦阻力称为比摩阻  $R$ , 则全部管长  $l$  上的摩擦阻力为  $h_f = Rl$  [Pa]。比摩阻可用流体力学中的公式计算:

$$R = \frac{\lambda}{4 R_s} \cdot \frac{v^2 \rho}{2} \quad (6.3)$$

式中  $R$ ——比摩阻, [Pa/m];

$\lambda$ ——摩擦阻力系数, 无因次;

$v$ ——风管内空气的平均速度, [m/s];

$\rho$ ——风管内空气的密度, [kg/m<sup>3</sup>];

$R_s$ ——风管的水力半径, [m]。

$$R_s = f/U$$

式中  $f$ ——管道中充满流体部分的横断面积, [m<sup>2</sup>]。对风管来说, 就是风管的横断面积。

$U$ ——湿周长, [m]。对风管来说, 就是风管横断面的周长。

对圆形风管:

$$R_s = f/U = \frac{\pi D^2}{4} / (\pi D) = \frac{D}{4}$$

这样, 公式 6.3 可写成

$$R = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{v^2 \rho}{2} \quad [\text{Pa/m}] \quad (6.4)$$

式中  $D$ ——圆形风管直径, [m]。

摩擦阻力系数  $\lambda$  与空气在风管内的流动状态和风管管壁粗糙度有关。计算  $\lambda$  的公式很多, 下面列出的公式适用范围较大, 目前

得到广泛的应用。

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{e}{3.71D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (6.5)$$

式中  $e$ ——风管内壁粗糙度, [m];

$D$ ——风管直径, [m]。

公式 6.5 是隐函数形式, 计算时不太方便, 利用附录 6.2 的莫迪图, 可以根据雷诺数  $Re$  和管道相对粗糙度  $e/D$  直接查出  $\lambda$  值, 使用时既简便, 又准确。

在实际工作中, 为了避免繁锁的计算, 可以根据公式 6.4 和 6.5 制成比摩阻  $R$  的计算表或线算图, 附录 6.3 为圆形钢板风道比摩阻线算图。只要已知流量、管径、流速、比摩阻四个参数中任意两个, 就可以利用该图求得其余的两个参数。应注意的是这类计算图表很多, 它们都是在一定条件下作出的, 使用时必须遵守所规定的条件。附录 6.3 的使用条件是每 30[m] 管道中大约有 40 个接头, 气流充分稳定, 大气压力 101325 [Pa], 管内空气温度 20[°C], 空气密度 1.2[kg/m<sup>3</sup>], 运动粘度  $\nu = 15.06 \times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s], 管壁粗糙度  $e$  为 0.15[mm]。对于温度范围为 10~40[°C] 的空气, 可以不必对粘滞性和密度的变化进行修正。

【例 6.1】已知镀锌薄钢板风管的长度为  $l=30$  [m], 直径  $D=700$  [mm]=0.70[m], 在温度 20[°C] 的情况下, 空气流量为  $L=2.5$  [m<sup>3</sup>/s], 试求风管的沿程阻力  $\Delta H$ 。

【解】由  $D=0.7$  [m],  $L=2.5$  [m<sup>3</sup>/s], 查附录 6.3 得:

$$R = 0.6 \text{ [Pa/m]}$$

所以  $\Delta H = Rl = 0.6 \times 30 = 18$  [Pa]

风管粗糙度是影响  $\lambda$  值的一个较为重要的因素。当雷诺数  $Re$  大于  $1000 \frac{D}{e}$  时,

建议用公式 6.6 进行修正:

$$\lambda = \lambda' (\epsilon \nu)^{0.25}$$

式中  $\lambda'$ ——按附录 6.2 查得的摩擦阻力系数;

$\epsilon$ ——风管的绝对粗糙度, [mm], 见表 6.1;

$\nu$ ——风管内平均流速, [m/s]。

各种材料所做风管的绝对粗糙度

表 6.1

| 风 管 材 料   | 绝对粗糙度, $\epsilon$ [mm] |
|-----------|------------------------|
| 薄钢板或镀锌薄钢板 | 0.15~0.18              |
| 塑料板       | 0.01~0.05              |
| 矿渣石膏板     | 1.0                    |
| 矿渣混凝土板    | 1.5                    |
| 胶合板       | 1.0                    |
| 砖砌体       | 3.0~6.0                |
| 混凝土       | 1.0~2.0                |
| 木板        | 0.2~1.0                |

## 2. 矩形风管的摩擦阻力计算

附录 6.3 是圆形风管的比摩阻线算图, 但当计算矩形风管的比摩阻时, 利用有关当量直径的概念, 把矩形风管换算成圆形风管, 则该图也能应用。当量直径有两种:

(1) 流速当量直径。假想有一圆形风管, 当其中的空气流速与矩形风管的空气流速相等, 并且比摩阻也相等时, 这时的圆形风管的直径称为矩形风管的流速当量直径, 以  $D_{d,v}$  表示。

由公式 6.3 可以看出, 不论风管的横断面的形状如何, 在管内流速相同的条件下, 只要它们的水力半径相同, 比摩阻就相同。对于圆形风管,  $R_h = \frac{D}{4}$ 。对于边长为  $a$  和  $b$  的矩形风管, 由于  $f =$

$ab$ ,  $U = 2(a+b)$ , 则其水力半径为  $R_h = f/U = \frac{ab}{2(a+b)}$ 。使圆形风管与矩形风管水力半径相等, 则:

$$\frac{D}{4} = \frac{ab}{2(a+b)}$$

$$D = \frac{2ab}{a+b} = D_{d,v} \quad (6.7)$$

(2) 流量当量直径。假想有一圆形风管,当其中的空气流量与矩形风管中空气流量相等,并且比摩阻也相等时,这时圆形风管的直径称为矩形风管的流量当量直径,以  $D_{d,t}$  表示。公式 6.8 是计算流量当量直径的近似公式:

$$D_{d,t} = 1.30 \left[ \frac{(ab)^5}{(a+b)^2} \right]^{\frac{1}{8}} = 1.30 (ab)^{0.625} (a+b)^{-0.25} \quad (6.8)$$

为了简化流量当量直径的计算过程,将上式制作成专门的计算表,如附录 6.4 利用此表可直接查取矩形风管流量当量直径。

【例 6.2】 有一矩形镀锌钢板风管,断面尺寸为  $0.40 \times 0.60$  [m],风量  $L = 0.69$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] ( $2500$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]),求风管的比摩阻。

【解】 1. 用流速和流速当量直径求比摩阻:

$$v = \frac{L}{a \times b} = \frac{0.69}{0.40 \times 0.60} = 2.9 [\text{m/s}]$$

$$D_{d,v} = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2 \times 0.40 \times 0.60}{0.40 + 0.60} = 0.48 [\text{m}]$$

由附录 6.3 查得  $R = 0.2$  [ $\text{Pa}/\text{m}$ ]

2. 用流量和流量当量直径求比摩阻:

由附录 6.4 查得流量当量直径  $D_{d,t} = 0.533$  [m]

根据流量  $L = 0.69$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] 和  $D_{d,t} = 0.533$  [m],由附录 6.3 查得

$$R = 0.2 [\text{Pa}/\text{m}]。$$

可见,两种计算方法所得的结果是一致的。

### 3. 局部阻力计算

当空气流经风道中的管件及设备时,由于空气流动条件的急剧改变,使得流体中出现旋涡区和断面速度的重新分布,这些情况也会造成流体压力,能的损失称为局部阻力。局部阻力可按下式计算:

$$h_d = \xi \frac{v^2 \rho}{2} \quad (6.9)$$

式中  $h_d$ ——局部阻力, [Pa];

$v$ ——管内平均风速, [m/s];

$\xi$ ——局部阻力系数,它的数值与管件或设备的构造有关。

在通风空调系统中,局部阻力所造成的能量损失通常占风管系统中压力损失的主要部分,在计算中必须予以重视。局部阻力的种类繁多,引起局部阻力的构件形体各异,各种管件边壁变化又比较复杂,所以大多数局部阻力只能按实验得到的经验公式和系数进行计算。

附录 6·5 列出了常用的通风构件的局部阻力系数。某些空调设备,如加热器、过滤器、冷却器等局部阻力或阻力系数可在它们的产品说明书中找到。

用实验方法确定局部阻力系数时,往往很难将风道部件本身的摩擦阻力和局部阻力分开,因此局部阻力系数一般包括了这两者的作用,计算时不必再另行考虑这些部件的摩擦阻力。

在计算流通截面积发生变化或流量发生变化的局部构件阻力时,要注意局部阻力系数表中  $\xi$  值所对应的流速  $v$ 。

由于局部阻力常占主导地位,在设计管路系统时应尽量避免或减少局部阻力。例如,增加弯头的曲率半径,在矩形风管弯头内加装导流板,增加圆形弯头的节数,采用较小的三通管夹角,三通分支管具有一定的曲率,使三通管中的三个流速尽量接近或相等,用渐扩(缩)管代替突扩(缩)管,用流线型叶片蝶阀代替普通叶片的蝶阀,等等。

#### 4. 风管系统的阻力计算

由前述可知,通风管道中空气流动的压力损失有两种,即摩擦阻力  $h_f$  和局部阻力  $h_a$ ,所以,风道的总阻力  $\Delta H$  为:

$$\Delta H = h_f + h_a \quad (6.10)$$

风道阻力计算方法很多,在一般的通风空调系统中,用得最多的是等压损法和假定速度法。

等压损法是以单位长度风管有相等的压力损失(阻力)为前提的。在已知风机的总作用压力的情况下,将总压力值按风管长度平均分配给风管的各部分,再根据各部分的风量和分配到的作用压力确定风管的尺寸。

假定速度法是以风管内空气流速作为控制指标,用它来确定风管的断面尺寸和压力损失。

通风管道阻力计算的目的是确定风管断面尺寸及阻力,从而确定风机的型号和动力消耗。通常按以下步骤进行:

(1) 绘制通风系统的轴测图(或管道走向示意图)对各管段(不同管段对应不同流量)进行编号,标注长度和风量。管段长度一般可按两管件间中心线长度计算,忽略构件(三通、变径管、弯头等)本身的长度。

(2) 选择风管内的空气流速。对于钢板或塑料风管,干管内风速为 $6\sim 14$ [m/s],支管内风速为 $2\sim 8$ [m/s]。对于砖或混凝土风道,干管为 $4\sim 12$ [m/s],支管为 $2\sim 6$ [m/s]。若选用的风管内的空气流速大,风管断面小,材料耗用少,建造费用小;但系统阻力大,动力消耗增加,运行费用增加。过大的风速还会产生附加噪声。若选用的风速低,风管阻力就小,动力消耗少;但风管断面大,材料消耗和建造费用大,风管占用的空间也会增大。因此,必须全面考虑各种因素来选定适当的风速。

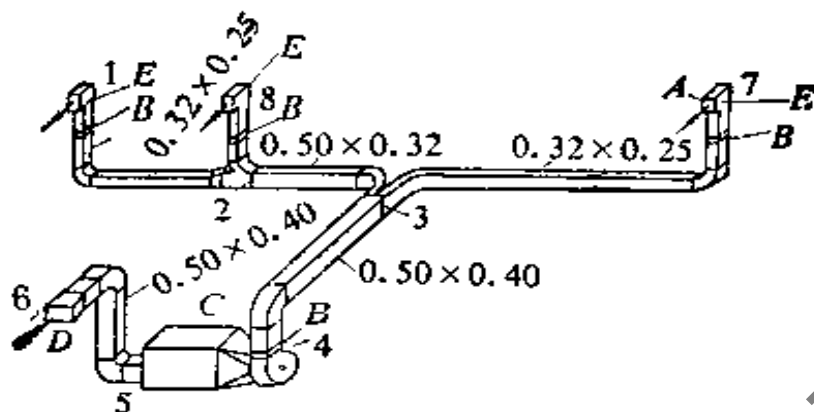
(3) 根据各管段的风量和选定的流速确定各管段的断面尺寸,并计算摩擦阻力和局部阻力。确定风管尺寸时,应尽量采用通风管道标准规格(见附录 6.1),以利于工业化加工制作及节约板材。风管断面尺寸确定后,应按管内实际流速计算阻力。阻力计算应从最不利管路开始。最不利管路的阻力就是该系统的总阻力。

(4) 对并联管段进行阻力平衡。

**【例 6.3】** 某一风机盘管空调系统的新风处理系统,如图 6.2 所示。风管全部用镀锌钢板制作,每个送风口的风量为 $0.30$ [m<sup>3</sup>/s]( $1080$ [m<sup>3</sup>/h]),空气处理箱的阻力为 $295$ [Pa](包括出口渐缩管阻力)。试确定风管系统的风管断面尺寸和选用风机所需的风量和风压。

**【解】** 首先划分管段,每管段对应一流量。进管段编号,并将各管段的流量、管长列入风管阻力计算表(表 6.2)。选取管路 1-2-3-4-5-6(其中包括空调箱)为最不利管路进行阻力计算。然后逐段选定管内风速,计算出相应的截面面积。然后按附录 6.1b 的标准规格选定矩形风管断面尺寸,再计算管内实际流速。以上所有数





A—活动百叶风口；B—风量调节阀；C—空气处理室；  
D—固定百叶风格；E—变径弯头

图 6.2 例 6.3 附图

据都填入表 6.2 的有关项目内。接着进行各管段的阻力计算，并检查各并联支管平衡情况。具体计算如下：

### 1. 断面选择和摩擦阻力计算

现以管段 1-2 为例：

初选风速为  $4[\text{m/s}]$ ，风量为  $0.3[\text{m}^3/\text{s}]$ ，由此可知风管断面面积应为：

$$F' = \frac{0.3}{4} = 0.075[\text{m}^2]$$

参照附录 6.1 b，选取断面尺寸为  $0.32 \times 0.25[\text{m}]$ ，实际面积应为  $F = 0.08[\text{m}^2]$ ，实

际风速为  $\frac{0.3}{0.08} = 3.75[\text{m/s}]$ 。由附录 6.4 查得流量当量直径  $D_{a_1} = 0.309[\text{m}]$ 。

根据风量  $0.3[\text{m}^3/\text{s}]$  和当量直径  $0.309[\text{m}]$ ，由附录 6.3 查得比摩阻

$$R = 0.65 [\text{Pa/m}]。$$

其他各管段均用同样方法进行计算，将计算结果列入表 6.2 中。

### 2. 确定局部构件尺寸和进行局部阻力计算

管段 1-2：

送风口采用活动百叶送风口(国标 T282—1)，4 号风口的尺寸为  $0.50 \times 0.25[\text{m}]$ ，有效面积为  $0.12[\text{m}^2]$ 。当风口风速为  $2.5[\text{m/s}]$  时，局部阻力系数为  $\zeta_1 = 2.0$  (对应于出风口处的动压)。

变径弯头( $90^\circ$ )，沿气流方向由断面  $0.32 \times 0.25[\text{m}]$  变为  $0.50 \times 0.25[\text{m}]$ ，从附录 6.5 序号 14，按  $a_0/b_0 = 0.25/0.32 = 0.78$ ， $b_1/b_0 = 0.50/0.32 = 1.56$ ，查得  $\zeta_2 = 0.91$  (对应于进口管  $a_0 \times b_0$  处的动压)。

矩形风量调节阀 B，选用国标 T303—2，3 号对开多叶阀，从附录 6.5 序号 32，按  $n = 2$ ， $\theta = 0^\circ$ ，查得  $\zeta_3 = 0.52$ 。

表6.2

风管阻力计算表

| 管段<br>编号       | 风量<br>$L$<br>[m <sup>3</sup> /<br>s] | 初选<br>风速<br>$v'$<br>[m/<br>s] | 风管面积<br>$F_v$<br>[m <sup>2</sup> ] | 风管尺寸<br>$a \times b$<br>[m] | 实际<br>面积<br>$F$<br>[m <sup>2</sup> ] | 实际<br>风速<br>$v$<br>[m/<br>s] | 流<br>当<br>量<br>直<br>径<br>$D_{al}$<br>[m] | 量<br>管<br>段<br>长<br>度<br>$l$<br>[m] | 单<br>位<br>摩<br>擦<br>阻<br>力<br>$R$<br>[Pa/m] | 位<br>阻<br>力<br>$Rl$<br>[Pa] | 局<br>部<br>阻<br>力<br>系<br>数<br>$\xi$             | 动<br>压<br>$\rho v^2/2$<br>[Pa] | 局<br>部<br>阻<br>力<br>$k_s$<br>[Pa] | 每<br>段<br>总<br>阻<br>力<br>$\Delta H$<br>[Pa] | 注  |                                |
|----------------|--------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--|-------------------------------------|---|-----------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------------|---|----|--------------------------------|
| 1              | 2                                    | 3                             | 4                                  | 5                           | 6                                    | 7                            | 8  | 9                                   | 10  | 11                          | 12  | 13                             | 14                                | 15  | 16 |                                |
| 1-20.30        |                                      | 4                             | 0.075                              | 0.32×0.25                   | 0.08                                 | 3.75                         | 0.309                                    | 8                                   | 0.65  | 5.20                        | 0.91+0.52+<br>0.20+0.37+<br>0.48=2.48           | 8.44                           | 20.93                             |   |    |                                |
| 2-30.60        |                                      | 4                             | 0.15                               | 0.32×0.50                   | 0.16                                 | 3.75                         | 0.435                                    | 5                                   | 0.44  | 2.20                        | 0.19  | 8.44                           | 1.60                              | 3.80  |    |                                |
| 3-40.90        |                                      | 5                             | 0.18                               | 0.50×0.40                   | 0.20                                 | 4.5                          | 0.488                                    | 8                                   | 0.52  | 4.16                        | 0.21+0.52+<br>0.73                              | 12.15                          | 8.87                              | 13.03                                       |    |                                |
| 4-50.90        |                                      |                               |                                    |                             |                                      |                              |  |                                     |   |                             |   |                                |                                   | 295   |    | 空调箱<br>阻力                      |
| 5-60.90        |                                      | 5                             | 0.18                               | 0.50×0.40                   | 0.20                                 | 4.5                          | 0.488                                    | 6                                   | 0.52  | 3.12                        | 0.02+0.20<br>+0.23+0.28<br>=0.71                | 12.15                          | 8.63                              | 13.68                                       |    | 管段1-6<br>总阻力<br>359.14<br>[Pa] |
| 分支<br>管<br>7-3 |                                      | 4                             | 0.075                              | 0.32×0.25                   | 0.08                                 | 3.75                         | 0.309                                    | 13                                  | 0.65  | 8.45                        | 0.91+0.52+<br>0.20+0.15+<br>1.73<br>0.50<br>2.0 | 8.44<br>12.15<br>3.75          | 15.02<br>6.03<br>7.50             | 37.06                                       |    |                                |
| 8-20.30        |                                      | 4                             | 0.075                              | 0.32×0.25                   | 0.08                                 | 3.75                         | 0.309                                    | 3                                   | 0.65  | 1.95                        | 0.91+0.52+<br>0.48=1.91                         | 8.44                           | 16.12                             |   |    |                                |
|                |                                      |                               |                                    |                             |                                      | 2.5                          |  |                                     |   |                             | 2.0   | 3.75                           | 7.50                              | 25.57                                       |    |                                |

弯头(90°), 取  $r/b = 1.0, a/b = 0.32/0.25 = 1.28$ , 从附录 6.5 序号 2, 查得  $\zeta_1 = 0.20$ 。

渐缩管, 断面由  $0.32 \times 0.50$  [m] 变为  $0.32 \times 0.50$  [m] 采用单面缩小, 角度为  $30^\circ$ , 从附录 6.5 序号 10, 按  $\theta = 60^\circ, A_1/A_0 = 0.16/0.08 = 2.0$  查得  $\zeta_2 = 0.37$  (对应于小断面处的动压)。

矩形风管 Y 形分流三通的主通道, 从附录 6.5 序号 21, 按  $A_3/A_2 = 0.08/0.16 = 0.5; A_3/A_1 = 0.08/0.16 = 0.5, L_3/L_1 = 0.10/0.60 = 0.5$ , 查得  $\zeta_3 = 0.48$  (对应于直通管 1-2 中的动压)。

其他各管段均用同样的方法进行计算, 这里不再一一重复。计算情况列入局部阻力系数计算表(表 6.3)。

### 3. 检查各并联支管阻力平衡情况

节点 3 有两根并联支管, 即管段 1-2-3 ( $\Delta H_{1-2-3} = 33.63 + 3.80 = 37.43$  [Pa]) 和管段 7-3 ( $\Delta H_{7-3} = 37.05$  [Pa])。两者的阻力为

$$\frac{37.43 - 37.05}{37.43} = 1.0\% < 15\%$$

符合要求。

节点 2 有两根并联支管, 即管段 1-2 ( $\Delta H_{1-2} = 33.63$  [Pa]) 和管段 8-2 ( $\Delta H_{8-2} = 25.57$  [Pa])。两者的阻力为

$$\frac{33.63 - 25.57}{33.63} = 24\% > 15\%$$

不符合要求。如改变送风口的风量调节阀的开启角度为  $\theta = 10^\circ$ , 根据叶片数  $n = 2$ , 按

$$\frac{nb}{2(a+b)} = \frac{2 \times 0.25}{2 \times (0.32 + 0.25)} = 0.44, \text{从附录 6.5 的序号 31 查得 } \zeta = 0.95. \text{ 管段 8-2}$$

的阻力将增加  $0.41 \times 8.44 = 3.46$  [Pa], 这时, 节点 2 的并联管段阻力为:

$$\frac{33.63 - (25.57 + 3.46)}{33.63} = 14\% < 15\%$$

符合要求。

### 4. 计算选用风机所需的风量和风压

管段 1-2-3-4-5-6 的总阻力为  $359.14$  [Pa], 考虑安全因素, 增加 15%, 则选风机所需的风压为:

$$P = 1.15 \times 359.14 \approx 413 \text{ [Pa]}.$$

设计系统总送风量为  $0.90$  [m<sup>3</sup>/s], 考虑系统可能漏风, 增加 10%, 则选用风机所需风量为:

$$L = 1.10 \times 0.90 = 0.99 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

## 6.1.3 风管系统设计中的几个问题

### 1. 通风管道所用材料和断面选择

局部阻力系数计算表

| 管段号 | 构件名称               | 主要参数  | 局部阻力系数      | 对应动压        | 来源           |
|-----|--------------------|---|-------------|-------------|--------------|
| 1-2 | 活动百叶进风口            | $v_0 = 2.5 [m/s]$ , $a \times b = 0.50 \times 0.25 [m]$   | 2.0         | 出风口动压       | 国标 T201-1    |
|     | 变径弯头( $90^\circ$ ) | $0.42 \times 0.25 / 0.50 \times 0.25 [m]$ , $a_0/b_0 = 0.25/0.32 = 0.78$ , $b_1/b_0 = 0.50/0.32 = 1.55$                 | 0.01        | 弯头前管内动压     | 附录 6.5 序号 14 |
| 2-3 | 调节阀                | 国标 T308-2, 3 号对开多叶阀, $n = 2, \theta = 0^\circ$  | 0.52        | 管内动压        | 附录 6.5 序号 32 |
|     | 弯头( $90^\circ$ )   | $r/b = 1.0, a/b = 0.32/0.25 = 1.28$   | 0.20        | 管内动压        | 附录 6.5 序号 2  |
|     | 渐缩管                | $0.22 \times 0.50 / 0.32 \times 0.25 [m]$ , 单面 $\theta = 30^\circ$ , 按 $\theta = 60^\circ$ 查表 $A_1/A_0 = 0.16/0.03 = 2$ | 0.37        | 小断面动压       | 附录 6.5 序号 10 |
| 3-4 | 分流三通(主通道)          | $A_2/A_3 = 0.08/0.16 = 0.5, A_3/A_1 = 0.08/0.16 = 0.5, L_2/L_1 = 0.99/0.60 = 0.5$                                       | 0.43        | 管段 1-2 中的动压 | 附录 6.5 序号 21 |
|     | 分流三通(主通道)          | 直通管 $0.50 \times 0.32 [m]$ , 支接管 $0.50 \times 0.16 [m]$<br>总管 $0.50 \times 0.40 [m]$ , $v_2/v_1 = 3.5/4.5 = 0.78$       | $\approx 0$ |             | 附录 6.5 序号 23 |
| 4-5 | 弯头( $90^\circ$ )   | $r/b = 1.0, a/b = 0.50/0.32 = 1.56$   | 0.19        | 管内动压        | 附录 6.5 序号 2  |
|     | 弯头( $90^\circ$ )   | $r/b = 1.0, a/b = 0.40/0.50 = 0.90$   | 0.24        | 管内动压        | 附录 6.5 序号 2  |
|     | 调节阀                | T308-2, 17 号对开多叶阀, $\theta = 0^\circ$   | 0.12        | 管内动压        | 附录 6.5 序号 32 |
|     | 空调箱                |   |             |             |              |

续表 6.3

| 管段号 | 构件名称      | 主要参数   | 局部阻力系数 $\xi$ | 对应动压    | 来源           |
|-----|-----------|--|--------------|---------|--------------|
| 5-6 | 新风入口      | 固定百叶窗 $0.63 = 0.50[m]$ , 有效面积系数80%,<br>$v_0 = 3.57[m/s]$   | 0.90         | 进风口动压   | 附录 6.5 序号 37 |
|     | 渐缩管       | $0.63 \times 0.50 / 0.50 \times 0.40 = 1.25, \theta = 30^\circ$ 两面收缩                             | 0.02         | 小断面处动压  | 附录 6.5 序号 8  |
|     | 弯头(90°)   | $r/b = 1.0, a/b = 0.50 / 0.40 = 1.25,$   | 0.20         | 管内动压    | 附录 6.5 序号 2  |
|     | 弯头(90°)   | $r/b = 1.0, a/b = 0.40 / 0.50 = 0.80,$   | 0.23         | 管内动压    | 附录 6.5 序号 2  |
|     | 突然扩大      | $A_1/A_2 = (0.50 \times 0.40[m]) / 0.40[m^2] = 0.5$  | 0.26         | 小断面处动压  | 附录 6.5 序号 6  |
|     | 活动百叶送风口   | $v_0 = 2.5[m/s], a \times b = 0.50 \times 0.25[m]$   | 2.0          | 出风口动压   | 国标 T201-1    |
| 7-3 | 变径弯头(90°) | $0.32 \times 0.25 / 0.50 \times 0.25[m], a_0/b_0 = 0.25/0.32 = 0.78, b_1/b_0 = 0.50/0.32 = 1.56$ | 0.91         | 弯头前内动压  | 附录 6.5 序号 14 |
|     | 调节阀       | 国标 T308-2, 3 号对开多叶调节阀, $\theta = 2, \theta = 0^\circ$  | 0.52         | 管内动压    | 附录 6.5 序号 32 |
|     | 弯头(90°)   | $r/b = 1.0, a/b = 0.32 / 0.25 = 1.28$  | 0.20         | 管内动压    | 附录 6.5 序号 2  |
|     | 变形管       | $0.50 \times 0.16[m] / 0.25 \times 0.32[m], \theta < 14^\circ,$                                  | 0.15         | 管前动压    | 附录 6.5 序号 11 |
|     | 分流三通(支接管) | $x = (v_3/v_1) \times (a/b)^{0.25} = (3.75/4.5) \times (0.50/0.16)^{0.25} = 1.1$                 | 0.50         | 总管内动压   | 附录 6.5 序号 23 |
|     | 活动百叶送风口   | $v_0 = 2.5[m/s], a \times b = 0.50 \times 0.25[m]$   | 2.0          | 出风口动压   | 国标 T 201-1   |
| 8-2 | 变径弯头(90°) | $0.32 \times 0.25 / 0.50 \times 0.25[m], a_0/b_0 = 0.25/0.32 = 0.78, b_1/b_0 = 0.50/0.32 = 1.56$ | 0.91         | 弯头前管内动压 | 附录 6.5 序号 14 |
|     | 调节阀       | 国标 T308-2, 3 号对开多叶调节阀 $n = 2, \theta = 0^\circ$  | 0.52         | 管内动压    | 附录 6.5 序号 32 |
|     | 分流三通(支接管) | $A_3/A_2 = 0.08/0.15 = 0.50, A_3/A_1 = 0.08/0.16 = 0.50, L_3/L_1 = 0.3/0.6 = 0.5$                | 0.48         | 支管道内动压  | 附录 6.5 序号 21 |

除了最常用的薄钢板(镀锌的或不镀锌的)风管外,在空调工程中有时也采用砖或混凝土做风道材料,利用建筑空间组合成通风管道,在大型民用建筑和体育馆、剧院、隧道、纺织厂等建筑的空调工程中,常采用这种方法。这时往往可以获得较大断面的风道,导致低的风速,这使得风道的阻力降低。有时还在风道内壁衬贴吸声材料达到消声的目的。

硬聚氯乙烯塑料板,玻璃钢材料也可做成通风管道。它们的表面光滑,制作方便,耐腐蚀,但是造价较高。这类材料多用于对防腐蚀要求严格的场合。国外还有采用玻璃纤维板做风道的,同时收到吸声与保温的效果。

关于通风管道的断面形状,在空调工程中,大多采用矩形风道。其原因是矩形风道容易和建筑结构、室内装修相配合。一般空调风道中风速较低,风道断面较大,这时矩形风管较圆形风管易于制作。但当风管断面较小时,圆形风管的制作则较容易。在断面积相等时,矩形风管的周边较长,耗费材料多。其摩擦阻力也比圆形风管的大。当矩形风管的边长比  $n = b/a = 1.0 \sim 3.5$  时,它和流通面积相等的圆形风管相比,比摩阻大  $16 \sim 45\%$ ,管道用料多  $13 \sim 36\%$ 。所以在高速空调系统中,出于减少阻力、易于制作的考虑,多用圆形风管。

## 2. 风管布置

布置风管时要考虑的因素有:尽量缩短管线,避免复杂的局部构件、减少分支管线,节省材料,减少系统阻力。此外,还应便于施工,以及运行调节和检修方便。

风机进出口处的动压很大,要正确处理通风机进出口处的接管,否则会引起很大的压力损失。风机出口最好有长度为出口边长  $1.5 \sim 2.5$  倍的直管段,以减少涡流。如果受空间限制不能满足上述要求时,出口管的转弯方向应顺着风机叶轮转动的方向,或在弯管中加装导流叶片。风机进口管段也要注意减少涡流。通常也要在进口弯管(或进风箱)中加装导流叶片。风机叶轮轴线应与空气处理室断面的中心线对准,以免气流偏心造成风速不均匀。

风机出口调节风阀应装在帆布软接头之后，以免风机震动使阀门产生附加噪声。

### 3. 预留测量孔及检修孔

为了便于系统调节，干管上分支节点前后一般应预留测压孔，测孔断面距前后局部构件应分别不小于5倍及2倍的风管直径（或矩形风管的长边）。在通风机出口处气流较稳定的管段上亦应留有测量孔（测压孔及测温孔）。

当风管设在吊顶、阁楼、技术层内，或金属风道装设在地下时，应考虑必要的人孔和足够宽的检修通道。

### 4. 在进行风管设计时，还应注意：

弯管部分应尽量采用大的曲率半径 $r$ ，最常用的是 $r/b = 1.5 \sim 2.0$ （ $b$ 是风管的宽度或圆形风管直径）。在 $r/b$ 小于1.0时，要装导流叶片，使阻力减少。

风道断面扩大时的渐扩管，其扩张角应尽量小于 $20^\circ$ ，风道断面缩小时的渐缩管，其收缩角应尽量小于 $45^\circ$ 。

矩形风管断面的长宽比尽量小于3.5，任何时候都不要大于8。

## 6.2 风管系统的保温

空调管道和设备在下列情况下需要保温：（1）不保温，冷、热量损耗大，且不经济时；（2）由于冷、热损耗大，使管内介质温度达不到要求时；（3）当管道通过室内空气参数要求严格控制的房间，而且由于管道散出的冷、热量使室内参数不易达到规定值时；（4）管道的冷表面可能结露时。

一般情况下，需保温的管道设备有：空调器，空调的送、回风机，冷水箱，不在空调房间通过的送、回风管，可能在外表面结露的新风管，冷水的供、回水管道，供热管道，制冷机的吸气管道，膨胀阀至蒸发器的液体管道、蒸发水箱，大型氨制冷系统中不凝性气体分离器等。在空调房间内的风管如果太长，不保温可能影响室内参

数时,也应保温。

### 6.2.1 保温层厚度的计算

冷管道或设备的保温层厚度应取防止外表面结露的最小厚度和经济厚度二者中的较大值。热管道除计算经济厚度外,还应考虑其外表面温度不致影响所在房间的室内参数和满足防火要求。对冷、热媒的温升和温降有严格要求时,还应校核其是否满足要求。

#### 1. 按防止结露计算的保温层厚度

防止结露是指要求绝大多数时间不结露。如果要求与天气有良好接触的房间内的冷管道,当室外相对湿度达到95%以上且温度较高时,不结露是很难办到的,也是不必要的。

对于矩形管道、设备,可按平面保温考虑。按下式计算其最小保温层厚度:

$$\delta = \frac{\lambda}{\alpha_{wg}} \left( \frac{t_i - t_{ng}}{t_{wg} - t_i} \right) = \frac{\lambda}{\alpha_{wg}} \left( \frac{t_{wg} - t_{ng}}{t_{wg} - t_i} - 1 \right) \quad (6.11)$$

对于圆形管道可按下式计算:

$$(d + 2\delta) \ln \left( \frac{d + 2\delta}{d} \right) = \frac{2\lambda}{\alpha_{wg}} \left( \frac{t_i - t_{ng}}{t_{wg} - t_i} \right) \quad (6.12)$$

式中  $\delta$ ——防止管道外表面结露的保温层最小厚度, [m];

$t_{wg}$ ——保温层外的空气温度, [°C]。需保温的管道或设备不在空调房间内或在室外时,取当地最热月历年平均温度;

$t_i$ ——保温层外的空气露点温度, [°C]。不在空调房间内或在室外时,按  $t_{wg}$  和室外最热月历年平均相对湿度确定;

$t_{ng}$ ——管内流体温度, [°C];

$\lambda$ ——保温材料的导热系数, [W/m°C];

$\alpha_{wg}$ ——保温层外表面换热系数, [W/m<sup>2</sup>°C]。一般为 5~10,可取  $\alpha_{wg} = 8$ 。室外管道的  $\alpha_{wg}$  值,要考虑风速的影响;



$d$ ——保温前管道外径, [m]。

室外最热月历年平均温度和平均相对湿度, 可以从《采暖通风与空气调节设计规范》(GBJ19—87)中查到。当缺乏上述资料时, 可以用  $t_{w\sigma} = 30[^\circ\text{C}]$  和  $RH = 85\%$  对应的露点温度  $t_l = 27.4[^\circ\text{C}]$  来计算这一最小厚度。

由于公式(6.12)是一超越方程, 不能用普通四则运算求解, 只能用近似计算方法, 如迭代法、牛顿法等方法求解, 这些方法比较

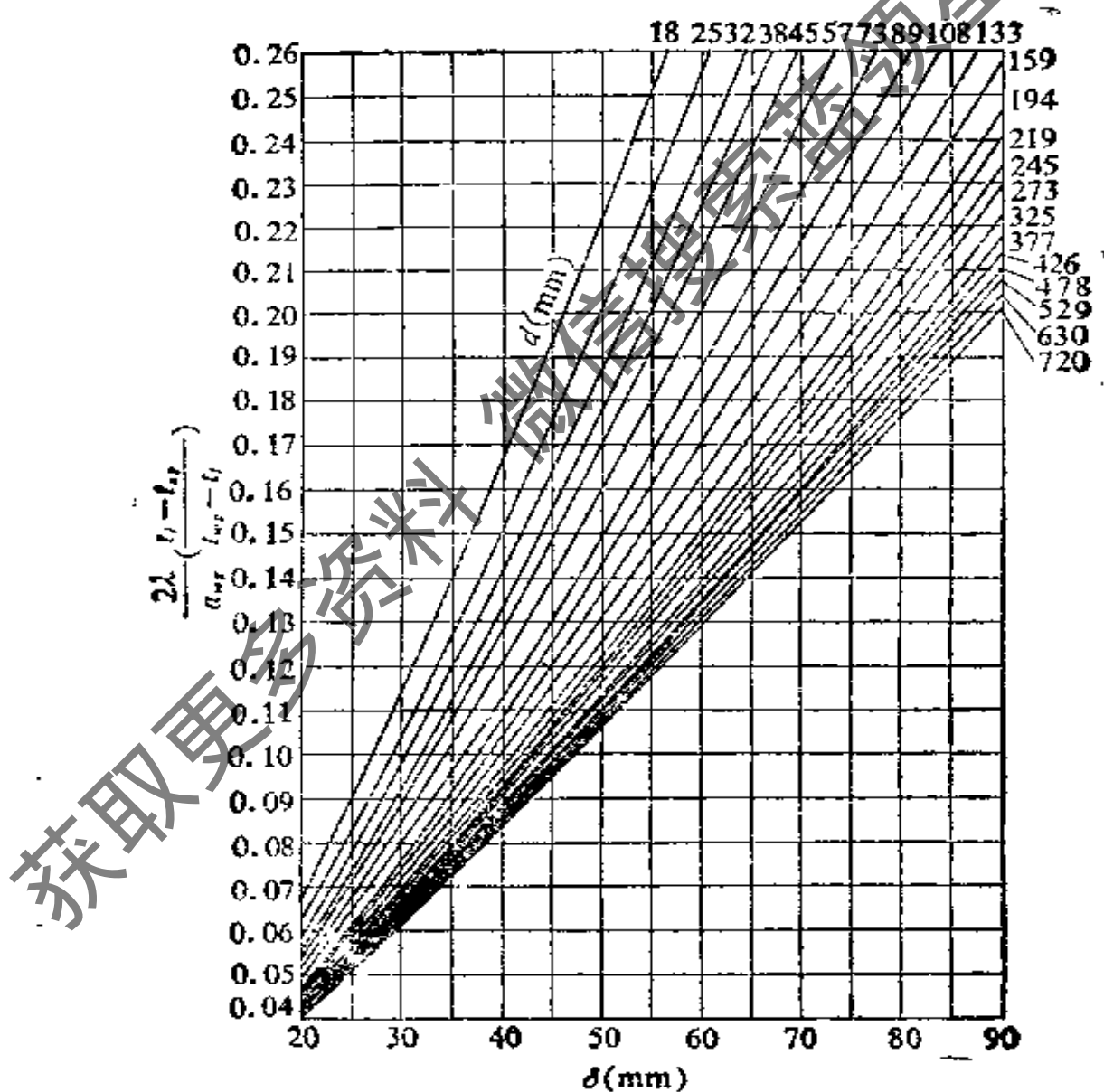


图 6.3 防止保温层外表面结露的保温层厚度

复杂，不便于手算。实际上常用图解法计算，可以利用图6.3直接查找 $\delta$ 值。先算出 $\frac{2\lambda}{\alpha_{w_0}} \left( \frac{t_i - t_{n_0}}{t_{w_0} - t_i} \right)$ 值，按所给管道的外径 $d$ ，在

图的横坐标上就可读出保温层的最小厚度值。通常采用较计算结果大一些的整数值作为实际的保温厚度。推荐采用如下的整数值：20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100[mm]。

【例6.4】已知管外空气温度 $t_{w_0} = 30[^\circ\text{C}]$ ， $RH_{w_0} = 85\%$ ，相应的露点温度 $t_d = 27.4[^\circ\text{C}]$ ，管内流体温度 $0[^\circ\text{C}]$ ，保温材料的导热系数 $\lambda = 0.04[\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}]$ ， $\alpha_{w_0} = 8[\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}]$ 。求防止结露的矩形管道的最小保温层厚度和当管外径为 $d = 100[\text{mm}]$ 时的圆管所需最小保温层厚度。

【解】

(1) 矩形管道按公式(6.11)计算：

$$\delta = \frac{\lambda}{\alpha_{w_0}} \left( \frac{t_i - t_{n_0}}{t_{w_0} - t_i} \right) = \frac{0.04}{8} \left( \frac{27.4 - 0}{30 - 27.4} \right) = 0.053[\text{m}]$$

取实际保温层厚度为 $0.06[\text{m}]$ ( $60[\text{mm}]$ )。

(2) 圆管按公式(6.12)计算：

$$(d + 2\delta) \ln \left( \frac{d + 2\delta}{d} \right) = \frac{2\lambda}{\alpha_{w_0}} \left( \frac{t_i - t_{n_0}}{t_{w_0} - t_i} \right)$$

$$(0.1 + 2\delta) \ln \frac{0.1 + 2\delta}{0.1} = \frac{2 \times 0.04}{8} \left( \frac{27.4 - 0}{30 - 27.4} \right) = 0.105$$

可以用试算法，即先假设一 $\delta$ 值，代入上式等于的左边，看其计算结果是否与等号右方的数值(0.105)相等。如果不等，重新假设 $\delta$ 值进行计算，一直到相等为止。

先设 $\delta = 0.05[\text{m}]$ ，

$$(0.1 + 2 \times 0.05) \ln \frac{0.1 + 2 \times 0.05}{0.1} = 0.139 \neq 0.105$$

重设 $\delta = 0.04[\text{m}]$ ，

$$(0.1 + 2 \times 0.04) \ln \frac{0.1 + 2 \times 0.04}{0.1} = 0.106 \approx 0.105$$

故取得保温层厚度 $\delta = 0.04[\text{m}]$ ( $40[\text{mm}]$ )。

也可查图6.3，按 $\frac{2\lambda}{\alpha_{w_0}} \left( \frac{t_i - t_{n_0}}{t_{w_0} - t_i} \right) = 0.105$ ， $d = 100[\text{mm}]$ ，查得 $\delta =$

$40[\text{mm}]$ 。与用公式计算的结果相符。

## 2. 保温层的经济厚度

在保温层的寿命期内有一“年总费用”，它是年折旧费和冷、热损失费之和。保温材料的年折旧费用随保温层厚度的增加而增加，其冷热损失费用随保温层厚度的增加而减少，年总费用有一个最小值，即保温层有一个最经济厚度。对于矩形风管，可按平面保温计算，其经济保温层厚度由下式求得：

$$\delta_1 = \left( \frac{\lambda \Delta t n \beta}{b y} \right)^{0.5} - \frac{\lambda}{\alpha_{vg}} \quad (6.13)$$

式中： $\delta_1$ ——保温层经济厚度，[m]；  
 $n$ ——全年输送冷媒或热媒的小时数，[h]；  
 $\beta$ ——冷媒或热媒的单价，[元/kJ]；  
 $y$ ——保温材料的价格。包括保温材料的施工安装费用等，[元/m<sup>3</sup>]；  
 $b$ ——保温材料的年折旧率，按小数取值，一般为0.1~0.2；  
 $\Delta t$ ——运行期的管外空气平均温度与管内流体温度的温差，[℃]。其余符号同前。

圆形管道的保温层经济厚度计算，可查阅有关的设计手册。

### 6.2.2 保温材料的选择

保温材料应根据因地制宜，就地取材的原则，选取来源广泛、价格低廉、保温性能好、易于施工、耐用的材料。具体有以下要求：

1. 导热系数小，价格低。空调工程中常用的保温材料，其导热系数应在以下范围内： $\lambda = 0.025 \sim 0.15$  [W/m℃]，并尽量选用 $\lambda$ 值小的材料。同时考虑导热系数和价格时，一般说来，二者的乘积最小的材料较经济，在二者的乘积相差不大时，导热系数小的更经济些。

2. 尽量采用密度小的多孔材料。这类材料不但导热系数小，而且保温后的管道重量轻，便于施工，风管支架的荷重也小。

3. 保温材料的吸水率低且耐水性能好。若吸水率高，则保温材料极易受潮，导致导热系数增大，保温性能大大恶化。此外，

还要求材料即使吸收水分后,其机械强度不能降低,也不应出现松散或腐烂现象。

4. 抗水蒸汽渗透性能好。如果材料有小孔,则应为封闭型的。一般保温层表面致密、光滑。目前常用的材料中,硬质聚氨脂泡沫塑料就是抗蒸汽渗透性较好的材料。

5. 保温后不易变形并具有一定的抗压强度。最好采用板状或毡状等成型材料。采用散状材料时,要采取措施防止其由于压缩等原因变形。

6. 保温材料不宜采用有机物和易燃物,以免发生虫蛀、腐烂、生菌、引鼠或发生火灾。

保温结构要合理。冷管道在保温层外应设防潮层,防止空气中的水蒸汽渗入保温层内部面结露。设在室内的管道应注意保温结构外表面光滑和美观。隐蔽在吊顶内的管道可以在外表面涂沥青作为防潮层,不加保护层。室外管道尽量避免露天敷设。如必须露天敷设,应有防止太阳直接照射的措施。

常用的保温结构由管壁防腐层(一般刷防腐漆)、保温层、防潮层(包油毡、油纸或刷沥青)和保护层组成。保护层随敷设地点和当地材料供应情况不同可采用水泥保护层、铁皮保护层、玻璃布或塑料布保护层、木板或胶合板保护层等。

## 6.3 空调工程中常用通风机

在空调工程中常用的通风机,根据作用原理可分为离心式,轴流式和贯流式三种。贯流式风机目前仅用于各种机组设备中,如风机盘管、风幕等。在工程中大量使用的是离心式和轴流式通风机。

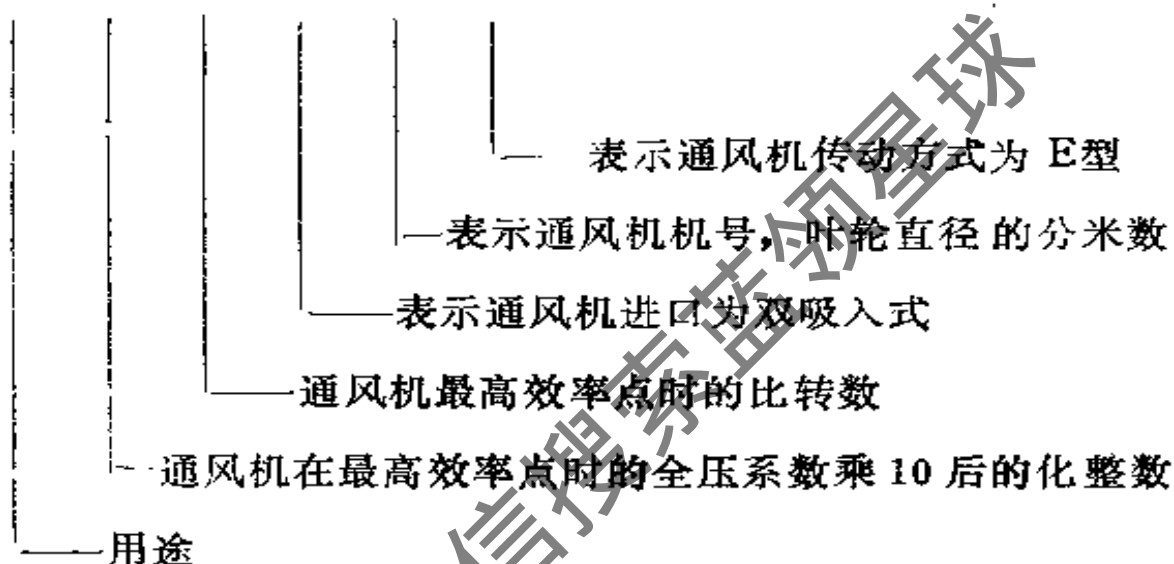
### 6.3.1 离心式通风机

离心式通风机主要有叶轮、机壳、进风口、出风口及电机等组成。叶轮上有一定数量的叶片,叶片可以根据气流出口的角度不同,分为向前弯的,向后弯的或径向的叶片。叶轮固定在轴上

由电机带动旋转。风机的机壳为一个对数螺旋线形蜗壳。当叶轮旋转时，叶片间的气体也随叶轮旋转而获得离心力。在离心力作用下，气体经过叶片不断地流入与流出，叶片将外力传递给气体而做功，气体则获得动能和势能(压力能)。

离心通风机的全称包括：名称、机号、传动方式、旋转方向和出口位置计六个部分。一般书写顺序举例如下：

通风(或T)4-72 No.2- 10 E



离心通风机的传动方式共有六种，A 型，叶轮装在电机轴上；B 型，叶轮悬臂，皮带轮在两轴承中间；C 型，叶轮悬臂，皮带轮悬臂；D 型，叶轮悬臂，联轴器直联传动；E 型，叶轮在两轴承中间，皮带轮悬臂传动；F 型，叶轮在两轴承中间，联轴器直联传动。

通风机的旋转方向系指叶轮的旋转方向，用“右”、“左”表示。“右”表示从主轴轮槽或电动机位置看叶轮旋转方向为顺时针，“左”表示为逆时针。

通风机出口位置用“右”或“左”及角度表示。

在空调工程中常用的离心通风机有 4-68 型、T 4-72 型、4-72 型、4-79 型、11-62 型等。

4-68 型离心通风机是节能型的新型离心通风机。风机为单吸入式，机号有 No.2.8, 3.15, 3.55, 4, 4.5, 5, 6.3, 8, 10, 12.5, 16,

20等12种。每种风机又有右旋转和左旋转两种型式。风机的出口角度，“左”、“右”均有 $0^{\circ}\sim 225^{\circ}$ ，间隔 $45^{\circ}$ ，共六种角度。传动方式有A、B、C、D四种，No.2.8~5采用A式，No.6.3~12.5有C式和D式两种传动方式，No.16,20则为B式传动。最高空气效率(参见本书第6.3.3节)为93%。

T4-72型离心通风机是原QDG型离心通风机的改进型，机号有3,3.5,4,4.5,5,6,7,8,10,12,14,16,18,20等14种，其中机号为10~20的六种有双进风型。其风量范围为 $0.24\sim 113\text{ [m}^3\text{/s]}$ ( $850\sim 408000\text{ [m}^3\text{/h]}$ )，全压为 $3200\sim 180\text{ [Pa]}$ ，配用电动机功率为 $0.75\sim 310\text{ [kW]}$ 。最高空气效率为91%。

11-62型离心通风机是变转速、低噪声的离心通风机。采用前弯弧型多叶型叶片，机号有No.2.5,3.5,4等三种，均为双吸入式。配用三相无级变速电机，电机功率为 $0.25\sim 2.2\text{ [kW]}$ ，风量范围为 $0.36\sim 2.4\text{ [m}^3\text{/s]}$ ( $1310\sim 8600\text{ [m}^3\text{/h]}$ )，全压范围为 $78\sim 637\text{ [Pa]}$ ，噪声级(参见本书第8章)为 $54\sim 71\text{ [dB(A)]}$ 。最高空气效率为64%。

### 6.3.2 轴流式通风机

在轴流式通风机中，空气是沿轴向流过风机的，装有叶片的叶轮安装在圆形风筒内，另有一个钟罩形入口，用来避免进风的突然收缩。当叶轮由电机带动旋转时，空气由钟罩形入口(集流器)进入叶轮在叶片的作用下，空气压力增加，并沿轴向流动，至排出口排出。

轴流通风机的叶片通常采用机翼型的，也有板型的。有些风机，叶片的安装角度是可以调整的，调整叶片安装角度能改变风机的性能。

轴流通风机产生的风压没有离心通风机那样高，但可以在低压下输送大量的空气。轴流通风机产生的噪声通常比离心通风机要高。

与离心式通风机相似，轴流式通风机的全称包括：名称、型号、机号、传动方式、气流方向、风口位置六个部分。例如有一轴流式

通风机的名称为  $K70 B_2-11Na18D$ , 表示该风机为矿井用的轴流通风机, 其轮毂比 (轮毂外径与叶轮外径之比) 为 0.70, 叶片为机翼型非扭曲叶片, 第二次设计, 叶轮为一级, 第一次结构设计, 叶轮直径为 1800[mm], 采用悬臂支承联轴器传动。

空调工程中, 使用轴流式通风机较使用离心式通风机为少。在通风空调工程中使用的轴流式通风机有 T40-11 型、FZ 40-11 型等。

T 40-11 型轴流通风机为一般通风用风机, 是原 30 K 4 型 (又称 03-11 型) 通风机的改进型。本系列产品有 No. 2.5~10 等十种机号。每一种机号叶片, 又可安装成  $15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$  等五种角度。风机均采用叶轮直接装在电机轴上的直联结构, 三种转速 (2900, 1450, 960[r/min]) 的电机供选用。面对进风口方向看, 叶轮为逆时针转动。风量范围为  $0.16\sim 13.4 [m^3/s]$  ( $516\sim 48200 [m^3/h]$ ), 风压范围为  $32\sim 474 [Pa]$ , 配用电动机功率为  $0.04\sim 7.5 [kW]$ , 最高空气效率为 84%。

FZ 40-11 型轴流通风机, 是节能型的新产品, 主要用于纺织厂空调。叶片为机翼型扭曲叶片, 叶片材质为 ZL 104 高强度铸造铝合金, 叶轮的叶片角度可根据需要任意调节。叶轮与电机直联, 配用双速电机。该系列风机的机号有 No. 8~22.4 等十种, 每种机号的叶片数有 5, 8, 10 三种, 叶片可安装成  $8^\circ, 11^\circ, 14^\circ, 17^\circ, 20^\circ$  等五种角度, No. 16 以上风机还配有可调节的进口导风叶 (静叶), 调节范围为  $0^\circ\sim 40^\circ$ 。风量范围为  $2.08\sim 139 [m^3/s]$  ( $7500\sim 500000 [m^3/h]$ ), 全压范围  $66\sim 800 [Pa]$ , 配用电动机功率范围为  $1.1\sim 7.5 [kW]$ , 最高空气效率为 84%。

### 6.3.3 通风机的性能

#### 1. 通风机性能的主要指标

选择通风机, 主要依据使用要求的流量、压力以及要求达到的通风机效率和轴功率。

(1) 风量  $L$ : 通常指的是在工作状态下, 通风机单位时间内所输送的气体的体积,  $[m^3/s]$  或  $[m^3/h]$ 。

(2) 风压  $P$ : 通风机产生的总压头(全压)[Pa]。包括静压与动压两部分。

通风机的风量和风压一般是用实验法测得的。

(3) 功率  $N_v$ : 通风机在单位时间内传给空气的能量, 称为通风机的有效功率, [kW]。可以用下式计算:

$$N_v = LP \quad (6.14)$$

式中  $N_v$ ——通风机的有效功率, [W];

$L$ ——通风机输送的风量, [m<sup>3</sup>/s];

$P$ ——通风机所产生的风压, [Pa]。

(4) 效率  $\eta$ : 由于通风机在运行过程中有能量损失, 通风机的有效功率  $N_v$  与通风机的输入功率(轴功率)  $N$  之比, 称为通风机的全压效率(又称空气效率)。

$$\eta = \frac{N_v}{N} \quad (6.15)$$

后向式叶片的离心通风机效率一般为 80~90%, 前向式叶片的离心通风机的效率一般为 60~65%。

通风机实际消耗的功率, 还应考虑电机与通风机机械传动的能量损失, 以及电动机的安全系数。通风机配用电机的功率可按下列下式计算:

$$N_m = \frac{LP}{\eta\eta_t} m \quad (6.16)$$

式中  $N_m$ ——通风机配用电机的额定功率, [W];

$\eta_t$ ——机械效率。电动机直联传动时,  $\eta_t = 1.0$ ; 联轴器直联传动时,  $\eta_t = 0.98$ ; 减速器传动时,  $\eta_t = 0.95$ ; 三角皮带传动时,  $\eta_t = 0.92$ 。

$m$ ——电动机容量安全系数, 可根据电动机容量, 按表

6.4 选用。

其余符号同前。

(5) 比转数  $n_s$ : 通风机的比转数是用来表明通风机在标准状况下(大气压 101325[Pa], 温度 20[°C], 相对湿度 50%) 的流量



电动机容量安全系数

表 6.4

| 电动机功率 $N$ , [kW] | $\eta$ |
|------------------|--------|
| $< 0.5$          | 1.5    |
| 0.5 ~ 1.0        | 1.4    |
| 1.0 ~ 2.0        | 1.3    |
| 2.0 ~ 5.0        | 1.2    |
| $\geq 5.0$       | 1.15   |

$L$  [m<sup>3</sup>/s], 风压  $P$  [Pa] 以及转速  $n$  [r/min] 之间的关系的数值。

$$n_s = \frac{nL^{0.5}}{P^{0.75}} \quad (6.17)$$

同一类型的通风机, 其比转数必然相等, 不同类型的通风机, 其比转数一般不同。比转数大, 表明通风机的流量大, 压力低; 比转数小, 表明通风机的流量小, 压力高。离心式通风机的比转数  $n_s$  一般小于 80, 轴流式通风机的比转数  $n_s$  一般大于 80。当风机转速不变时, 对比转数  $n_s$  大的通风机来说, 较小的全压变化会引起较大的流量变化; 对比转数  $n_s$  小的通风机来说, 较小的流量变化会引起较大的全压变化。

## 2. 通风机的特性曲线

为了全面评定通风机的性能, 就必须了解在各种工况下通风机的全压和风量, 以及功率、效率与风量的关系。不同转速下的这些关系 ( $P-L$ ,  $N-L$ ,  $\eta-L$ ) 就形成了通风机的特性曲线。由于同类型通风机具有几何相似、运动相似和动力相似的特性, 因此可以

通风机各参数的无因次量 ( $\bar{P} = \frac{P}{\rho u^2}$ ,  $\bar{L} = \frac{L}{\frac{\pi}{4} D_2^3 u}$ ,  $\bar{N} =$

$\frac{N}{\frac{\pi}{4} D_2^2 \rho u^3}$ ) 来表示其特性 (无次特性), 各型号的同类型通风

机具有同一的无因次特性曲线。

通风机的特性曲线，全面地反映了通风机的性能，是我们选择通风机的最好依据。通常通风机制造厂总是在给出通风机性能表以外，还要提供通风机无因次特性曲线。当所需要的性能参数在两种机号之间时，最好利用无因次特性曲线来验算，以避免出现不合理的选择，造成资金和能源的浪费。

### 3. 通风机性能的换算

通风机制造厂提供的通风机性能是在标准状况下的性能，我们在实际使用通风机时，由于用途不同，使用的地区不同，输送的气体不同，使得通风机的实际工作状态不同于标准状况，这就必须对通风机的性能进行换算，以确定通风机的实际性能参数。

通风机输送的气体的密度、温度以及压力（也可认为是大气压）的变化，最终都反映到空气密度的变化，这时通风机的性能也发生变化（见表（6.5）。

通风机性能换算表

表 6.5

| 条件           | 换算公式   | 条件                   | 换算公式   |
|--------------|--|----------------------|--|
| 输送气体<br>密度变化 | $L_2 = L_1$<br>$P_2 = P_1(\rho_2/\rho_1)$<br>$N_2 = N_1(\rho_2/\rho_1)$<br>$\eta_2 = \eta_1$ | 风机叶轮<br>直径变化         | $L_2 = L_1(D_2/D_1)^3$<br>$P_2 = P_1(D_2/D_1)^2$<br>$N_2 = N_1(D_2/D_1)^5$<br>$\eta_2 = \eta_1$  |
| 风机转速<br>变化   | $L_2 = L_1(n_2/n_1)$<br>$P_2 = P_1(n_2/n_1)$<br>$N_2 = N_1(n_2/n_1)^3$<br>$\eta_2 = \eta_1$  | $\rho, n, D$<br>同时变化 | $L_2 = L_1(n_2/n_1)(D_2/D_1)^3$<br>$P_2 = P_1(n_2/n_1)(\rho_2/\rho_1)(D_2/D_1)^2$<br>$N_2 = N_1(\rho_2/\rho_1)(n_2/n_1)^3(D_2/D_1)^5$<br>$\eta_2 = \eta_1$ |

值得指出的是，气体密度改变时，虽然通风机的全压发生了变化，但通风机工作的管路系统阻力也随之发生变化。当气体密度大于标准状况下的密度时，通风机全压增加，管路系统阻力也相应增加。因此，在实际工作中，当气体密度、温度及大气压力发生变化时，管路系统的阻力不必修正，通风机的流量和压力也不必修正，只修正通风机所需功率。

当通风机叶轮转速发生变化时，通风机性能的变化见表6.5。

当通风机的几何形状相似，叶轮转速不变时，随叶轮直径的改变，通风机性能也发生变化(见表 6.5)。

#### 6.3.4 通风机在管路系统中的工作

我们知道，管路系统的阻力是随着管内风速的变化而变化的，对于一定的管路系统，风速是由流经管路系统的流量来决定的。从流体力学可知，管路阻力与流量之间近似地存在下述关系：

$$P = P_0 + kL^2 \quad (6.18)$$

式中  $P$ ——管路系统的阻力，[Pa]；

$P_0$ ——排气空间与吸气空间的压力差，[Pa]。当由大气中吸入空气，最后又排入大气时，这一压力差为零；

$k$ ——管路系统的阻力系数；

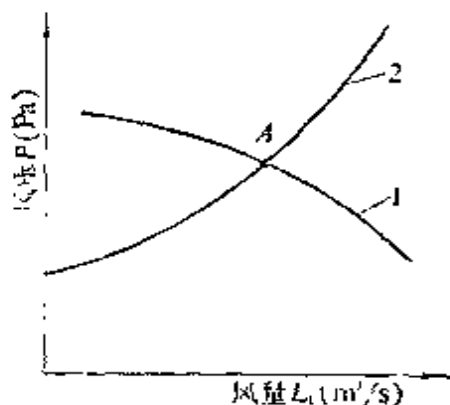
$L$ ——通过管路的流量，[m<sup>3</sup>/s]。

上式说明，当管路一定，即  $k$  为定值时，管路阻力随流量的平方而变。我们把管路阻力与流量之间的关系曲线称为管路特性曲线。

在管路系统中，工作的通风机所提供的流量也就是管路中的流量，空气在风机中获得的能量(全压)也正是空气流经管路系统所消耗的能量。因此，当通风机在管路系统中工作时，必须同时满足通风机性能曲线与管路特性曲线。也就是说，通风机在管路系统中的实际工作状况，是由通风机性能曲线与管路特性曲线联合确定的。在  $L-P$  坐标中，通风机性能曲线与管路特性曲线的交点  $A$  (如图 6.4)，就是通风机在管路系统中的实际工作点。

在实际工作中，还往往会遇到下列情况，由于风机制造质量问题，风机的全压达不到设计性能值，或由于施工质量差导致管路系统的阻力大于设计阻力值，这时通风机的实际工作点就会偏离设计的最佳工作点。为了满足设计的送风量，就必须对通风机的的工作点进行调整。

当计算管路阻力时，阻力系数选用偏大，或者确定管路阻力时，安全系数偏大，以致使设计工作点  $A$  的压力大于实际工作



1—通风机特性曲线;  
2—管路特性曲线

图 6.4 通风机在管路中的工作点

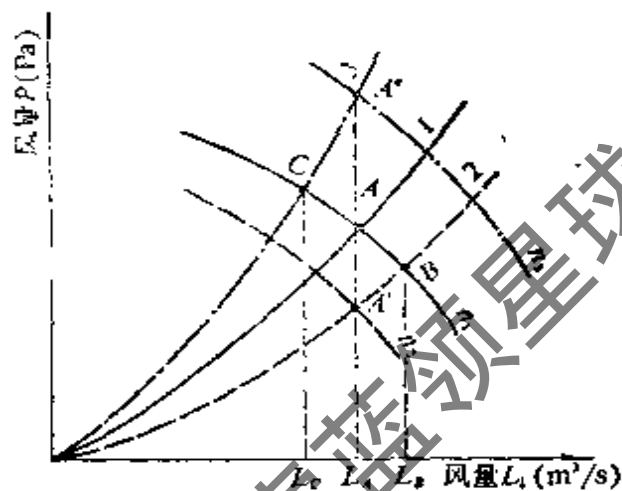


图 6.5 通风机在管路中的工况分析

点  $B$  的压力(图 6.5)。调整的办法是在管路中加设挡板, 提高管路阻力, 使实际的管路特性曲线从 2 变为曲线 1, 使工作点  $B$  移到设计工作点  $A$ 。或者降低通风机转速, 风机转速由  $n_1$  降为  $n_2$ , 这时管路曲线 2 与风机特性曲线  $n_2$  的交点  $A'$ , 满足使用要求  $L_A = L_{A'}$ 。反之, 当设计工作点  $A$  的压力小于实际工作点  $C$  的压力时, 可以采取减少管路阻力的措施, 把实际管路阻力降下来, 使管路特性曲线变为曲线 1, 使工作点  $C$  改变为  $A$ 。或者提高风机转速(更换皮带轮或电动机), 使通风机特性曲线由  $n_1$  变为  $n_3$ , 工作点由  $A$  变到  $A'$ 。满足系统对风量的要求,  $L_{A''} = L_A$ 。必须注意, 当采用提高风机转速进行风量调整时, 应验算通风机是否超过最高转速和电机是否过载。

当系统中要求的风量很大而一台风机的风量又不够时, 可以在系统中并联设置两台或多台风机。同一管网系统中, 风机也可以串联使用。但是, 通风机的联合工作(并联或串联), 只有在不得已的情况下才采用。因为通风机联合工作时, 破坏了通风机的经济使用条件, 在技术上、经济上都难做到合理。

圆形标准风管规格

附录表6.1a

| 序号 | 标准风管直径<br>[mm] | 风管壁厚<br>[mm] | 法兰用料<br>规格 | 螺栓规格   | 螺直<br>孔径 | 螺栓<br>数量 | 铆钉规格  | 铆<br>孔<br>径 | 铆<br>钉<br>数 | 铆<br>钉<br>盘 |
|----|----------------|--------------|------------|--------|----------|----------|-------|-------------|-------------|-------------|
| 1  | φ100           | δ=0.5        | -20×4      | M6×20  | φ7.5     | 6        |       |             |             |             |
| 2  | φ120           | δ=0.5        | -20×4      | M6×20  | φ7.5     | 6        |       |             |             |             |
| 3  | φ140           | δ=0.5        | -20×4      | M6×20  | φ7.5     | 6        |       |             |             |             |
| 4  | φ160           | δ=0.5        | -20×4      | M6×20  | φ7.5     | 8        |       |             |             |             |
| 5  | φ180           | δ=0.5        | -20×4      | M6×20  | φ7.5     | 8        |       |             |             |             |
| 6  | φ200           | δ=0.5        | -20×4      | M6×20  | φ7.5     | 8        |       |             |             |             |
| 7  | φ220           | δ=0.75       | -25×4      | M6×20  | φ7.5     | 8        |       |             |             |             |
| 8  | φ250           | δ=0.75       | -25×4      | M6×20  | φ7.5     | 8        |       |             |             |             |
| 9  | φ280           | δ=0.75       | L25×4      | M6×20  | φ7.5     | 8        | φ5×14 | φ5.3        | 8           |             |
| 10 | φ320           | δ=0.75       | L25×4      | M6×20  | φ7.5     | 10       | φ5×14 | φ5.3        | 10          |             |
| 11 | φ350           | δ=0.75       | L25×4      | M6×20  | φ7.5     | 10       | φ5×14 | φ5.3        | 10          |             |
| 12 | φ400           | δ=0.75       | L25×4      | M6×20  | φ7.5     | 12       | φ5×14 | φ5.3        | 12          |             |
| 13 | φ450           | δ=0.75       | L25×4      | M6×20  | φ7.5     | 12       | φ5×14 | φ5.3        | 12          |             |
| 14 | φ500           | δ=0.75       | L25×4      | M6×20  | φ7.5     | 12       | φ5×14 | φ5.3        | 14          |             |
| 15 | φ560           | δ=1.0        | L30×4      | M8×25  | φ9.5     | 14       | φ5×14 | φ5.3        | 16          |             |
| 16 | φ630           | δ=1.0        | L30×4      | M8×25  | φ9.5     | 16       | φ5×14 | φ5.3        | 18          |             |
| 17 | φ700           | δ=1.0        | L30×4      | M8×25  | φ9.5     | 18       | φ5×14 | φ5.3        | 18          |             |
| 18 | φ800           | δ=1.0        | L30×4      | M8×25  | φ9.5     | 20       | φ5×14 | φ5.3        | 20          |             |
| 19 | φ900           | δ=1.0        | L30×4      | M8×25  | φ9.5     | 22       | φ5×14 | φ5.3        | 22          |             |
| 20 | φ1000          | δ=1.0        | L40×4      | M8×25  | φ9.5     | 24       | φ5×14 | φ5.3        | 24          |             |
| 21 | φ1120          | δ=1~1.5      | L40×4      | M8×25  | φ9.5     | 26       | φ5×14 | φ5.3        | 26          |             |
| 22 | φ1250          | δ=1~1.5      | L40×4      | M8×25  | φ9.5     | 28       | φ5×14 | φ5.3        | 30          |             |
| 23 | φ1400          | δ=1~1.5      | L40×4      | M8×25  | φ9.5     | 32       | φ5×14 | φ5.3        | 32          |             |
| 24 | φ1600          | δ=1~1.5      | L50×5      | M10×25 | φ12      | 36       | φ6×16 | φ6.1        | 36          |             |
| 25 | φ1800          | δ=1~1.5      | L50×5      | M10×25 | φ12      | 40       | φ6×16 | φ6.1        | 40          |             |
| 26 | φ2000          | δ=1~1.5      | L50×5      | M10×25 | φ12      | 44       | φ6×16 | φ6.1        | 44          |             |

矩形标准风管规格

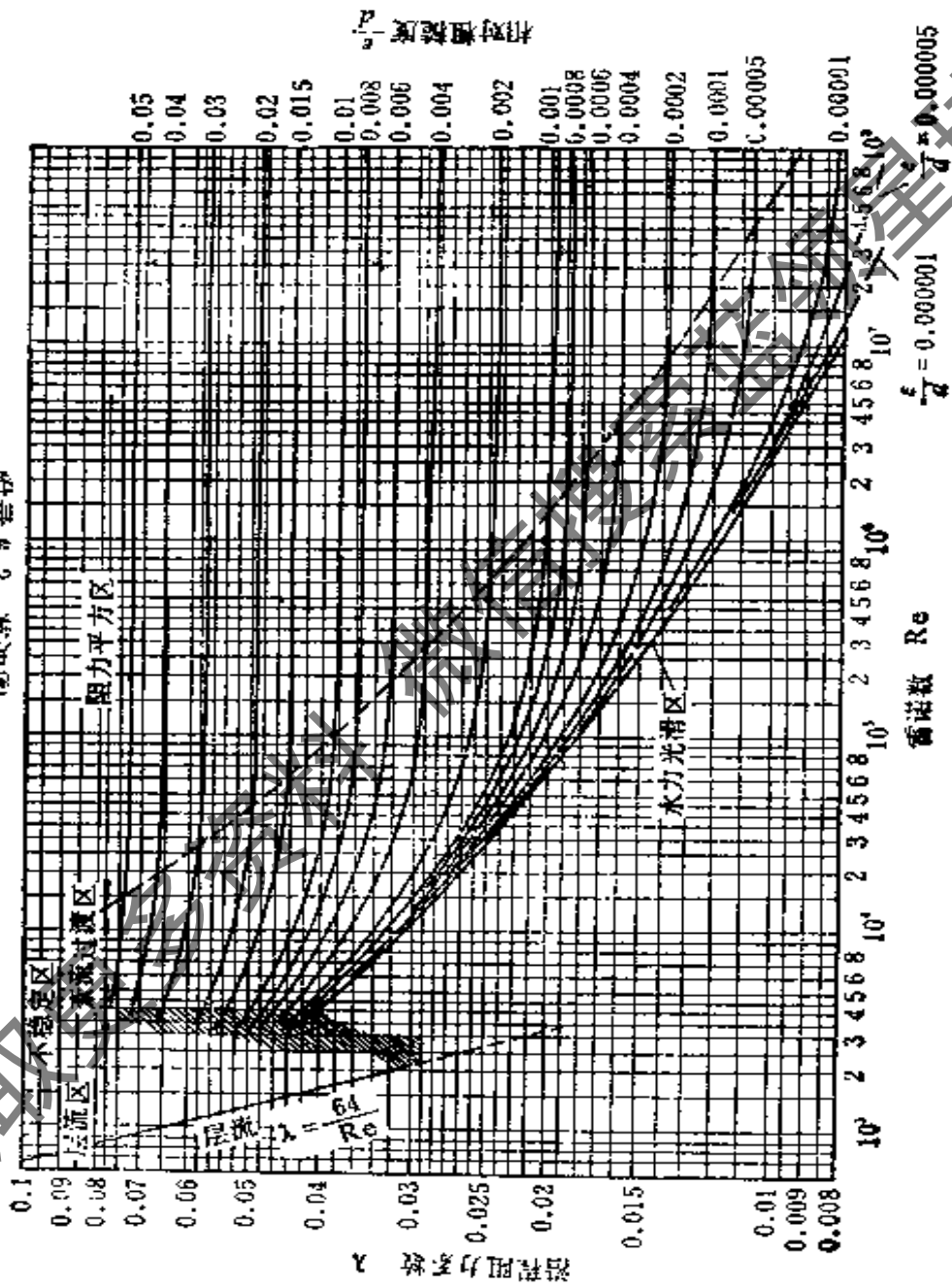
附录表6.1b

| 序号 | 标准风管规格<br>$a \times b$<br>[mm] | 法兰用料  | 风管壁厚          | 螺栓规格  | 螺栓<br>数量 | 螺孔直径       | 铆钉规格               | 铆钉孔径       | 铆钉<br>数量 |
|----|--------------------------------|-------|---------------|-------|----------|------------|--------------------|------------|----------|
| 1  | 120×120                        | L25×4 | $\delta=0.5$  | M6×20 | 6        | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 8        |
| 2  | 160×120                        | L25×4 | $\delta=0.5$  | M6×20 | 6        | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 8        |
| 3  | 160×160                        | L25×4 | $\delta=0.5$  | M6×20 | 8        | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 8        |
| 4  | 200×120                        | L25×4 | $\delta=0.5$  | M6×20 | 8        | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 8        |
| 5  | 200×160                        | L25×4 | $\delta=0.5$  | M6×20 | 8        | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 8        |
| 6  | 200×200                        | L25×4 | $\delta=0.5$  | M6×20 | 8        | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 8        |
| 7  | 250×120                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 8        | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 8        |
| 8  | 250×160                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M8×20 | 8        | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 8        |
| 9  | 250×200                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 8        | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 8        |
| 10 | 250×250                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 8        | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 8        |
| 11 | 320×160                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 10       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 10       |
| 12 | 320×200                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 10       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 10       |
| 13 | 320×250                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 10       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 10       |
| 14 | 320×320                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 12       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 12       |
| 15 | 400×200                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 10       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 10       |
| 16 | 400×250                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 10       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.2$ | 10       |
| 17 | 400×320                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 12       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 12       |
| 18 | 400×400                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 12       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 12       |
| 19 | 500×200                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 12       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 12       |
| 20 | 500×250                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 12       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 12       |
| 21 | 500×320                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 14       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 14       |
| 22 | 500×400                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 16       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 16       |
| 23 | 500×500                        | L25×4 | $\delta=0.75$ | M6×20 | 16       | $\phi 7.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 16       |
| 24 | 630×250                        | L30×4 | $\delta=0.75$ | M8×25 | 16       | $\phi 9.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 16       |
| 25 | 630×320                        | L30×4 | $\delta=0.75$ | M8×25 | 16       | $\phi 9.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 16       |
| 26 | 630×400                        | L30×4 | $\delta=0.75$ | M8×25 | 16       | $\phi 9.5$ | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 16       |

续表 9.13

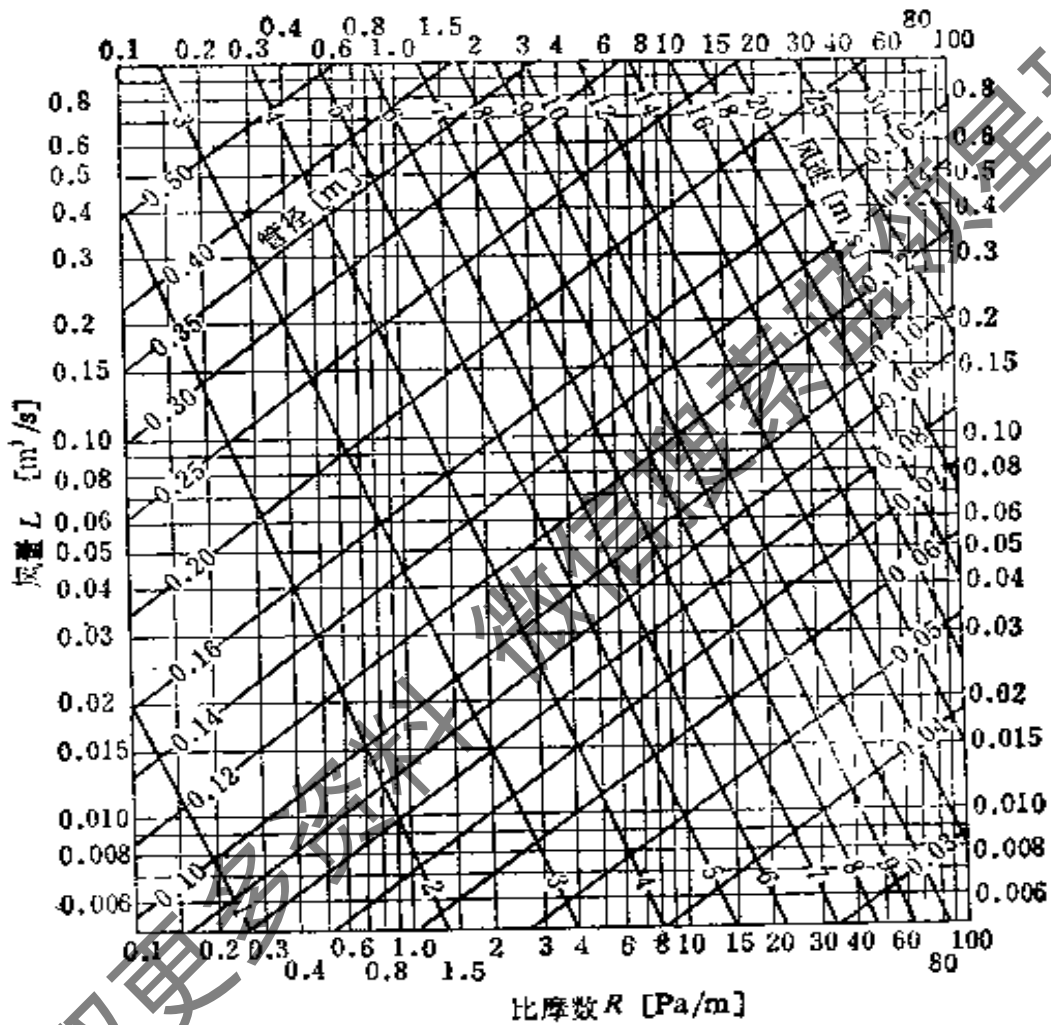
| 序号 | 标准风管规格<br>$a \times b$<br>[mm] | 法兰用料  | 风管壁厚          | 螺栓规格   | 螺栓数量 | 螺孔直径        | 铆钉规格               | 铆钉孔径       | 铆钉数量 |
|----|--------------------------------|-------|---------------|--------|------|-------------|--------------------|------------|------|
| 27 | 630×500                        | L30×4 | $\delta=0.75$ | M8×25  | 18   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 11$ | $\phi 5.3$ | 18   |
| 28 | 630×630                        | L30×4 | $\delta=0.75$ | M8×25  | 18   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 18   |
| 29 | 800×320                        | L30×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 18   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 18   |
| 30 | 800×400                        | L30×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 18   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 11$ | $\phi 5.3$ | 18   |
| 31 | 800×500                        | L30×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 20   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 20   |
| 32 | 800×630                        | L30×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 22   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 22   |
| 33 | 800×800                        | L30×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 24   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 24   |
| 34 | 1000×320                       | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 20   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 20   |
| 35 | 1000×400                       | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 20   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 20   |
| 36 | 1000×500                       | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 22   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 11$ | $\phi 5.3$ | 22   |
| 37 | 1000×630                       | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 24   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 24   |
| 38 | 1000×800                       | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 26   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 26   |
| 39 | 1000×1000                      | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 28   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 28   |
| 40 | 1250×400                       | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 26   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 26   |
| 41 | 1250×500                       | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 26   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 26   |
| 42 | 1250×630                       | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 28   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 28   |
| 43 | 1250×800                       | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 28   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 28   |
| 44 | 1250×1000                      | L40×4 | $\delta=1.0$  | M8×25  | 30   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 30   |
| 45 | 1600×500                       | L40×4 | $\delta=1.2$  | M8×25  | 30   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 30   |
| 46 | 1600×630                       | L40×4 | $\delta=1.2$  | M8×25  | 32   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 32   |
| 47 | 1600×800                       | L40×4 | $\delta=1.2$  | M8×25  | 34   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 34   |
| 48 | 1600×1000                      | L40×4 | $\delta=1.2$  | M8×25  | 36   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 36   |
| 49 | 1600×1250                      | L40×4 | $\delta=1.2$  | M8×25  | 38   | $\phi 9.5$  | $\phi 5 \times 14$ | $\phi 5.3$ | 38   |
| 50 | 2000×800                       | L50×5 | $\delta=1.2$  | M10×30 | 40   | $\phi 11.5$ | $\phi 6 \times 16$ | $\phi 6.1$ | 40   |
| 51 | 2000×1000                      | L50×5 | $\delta=1.2$  | M10×30 | 44   | $\phi 11.5$ | $\phi 6 \times 16$ | $\phi 6.1$ | 44   |
| 52 | 2000×1250                      | L50×5 | $\delta=1.2$  | M10×30 | 48   | $\phi 11.5$ | $\phi 6 \times 16$ | $\phi 6.1$ | 48   |

图 6.2 英迪图

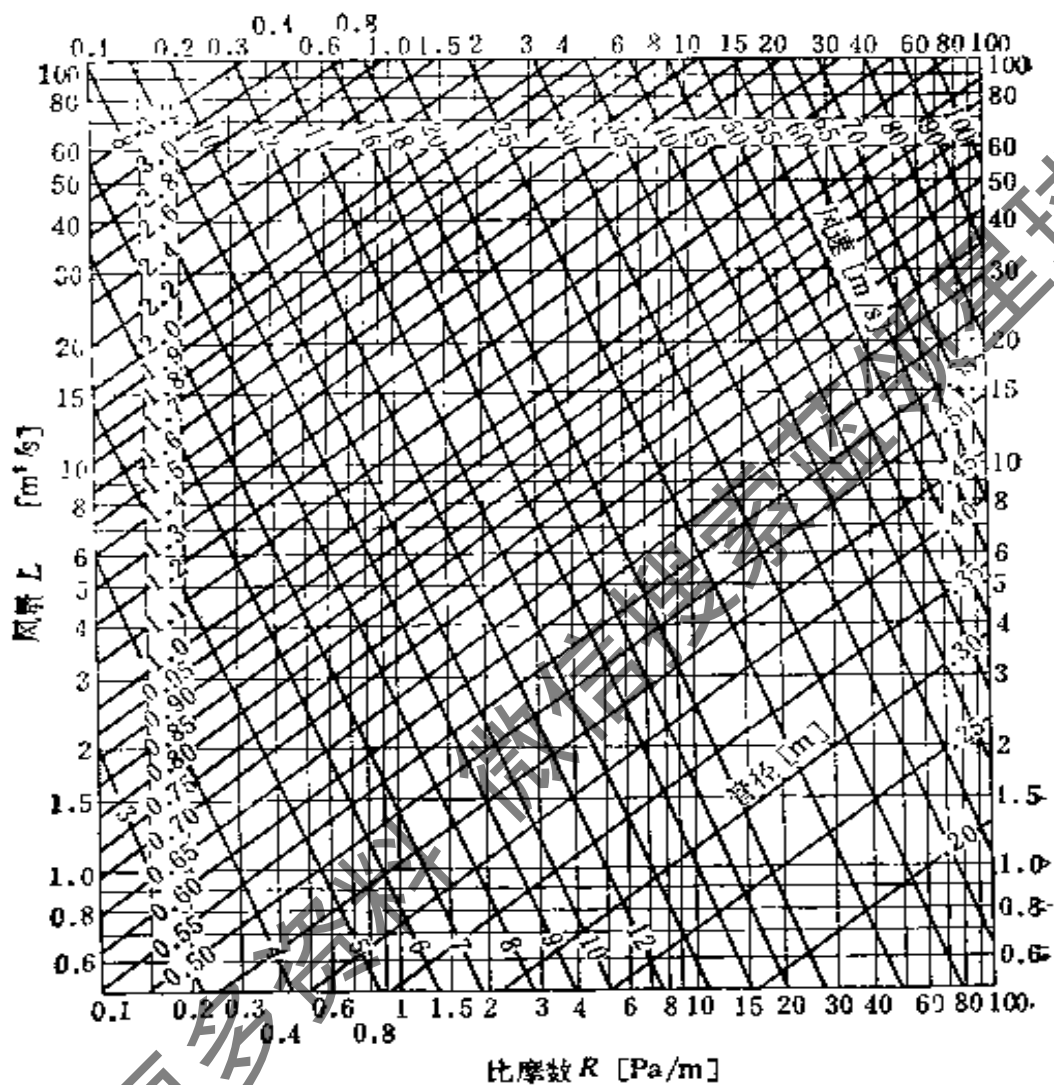


附录 6.2 英迪图





附录 6.3 薄钢板风管的比摩阻线解图



附录 6.3 薄钢板风管的比摩阻线解图

矩形风管流量当量直径表

附表6.4

| $b$ | $a$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|     | 100 | 120 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 220 | 240 | 250 | 260 | 280 | 300 | 320 | 340 | 360 | 380 | 400 | 420 | 440 | 450 | 480 | 500 |  |
| 100 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 120 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 140 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 160 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 180 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 200 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 220 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 240 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 250 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 260 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 280 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 300 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 320 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |

附录表 6.4

| $a$ | $b$ | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 | 250 | 260 | 280 | 300 | 320 | 340 | 360 | 380 | 400 | 420 | 440 | 460 | 480 | 500 |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 340 | 193 | 214 | 233 | 251 | 267 | 283 | 297 | 310 | 313 | 323 | 336 | 348 | 360 | 372 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 360 | 198 | 219 | 239 | 258 | 274 | 290 | 305 | 320 | 327 | 338 | 346 | 358 | 370 | 382 | 394 |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 380 | 203 | 225 | 245 | 264 | 281 | 298 | 314 | 328 | 335 | 342 | 353 | 367 | 380 | 392 | 404 | 416 |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 400 | 207 | 230 | 251 | 270 | 288 | 305 | 321 | 336 | 343 | 351 | 364 | 376 | 390 | 402 | 414 | 423 | 438 |     |     |     |     |     |     |  |
| 420 | 211 | 234 | 256 | 276 | 294 | 312 | 328 | 344 | 351 | 359 | 373 | 386 | 399 | 411 | 424 | 436 | 448 | 459 |     |     |     |     |     |  |
| 440 | 215 | 239 | 261 | 282 | 300 | 319 | 335 | 352 | 360 | 367 | 381 | 395 | 408 | 420 | 434 | 446 | 458 | 469 | 481 |     |     |     |     |  |
| 460 | 219 | 243 | 267 | 287 | 306 | 325 | 342 | 359 | 368 | 374 | 389 | 403 | 417 | 430 | 443 | 456 | 468 | 479 | 491 | 503 |     |     |     |  |
| 480 | 223 | 248 | 272 | 292 | 312 | 331 | 349 | 366 | 374 | 382 | 397 | 412 | 426 | 439 | 452 | 465 | 478 | 489 | 502 | 513 | 526 |     |     |  |
| 500 | 227 | 252 | 276 | 298 | 318 | 337 | 355 | 373 | 381 | 389 | 404 | 420 | 435 | 448 | 461 | 474 | 488 | 498 | 512 | 523 | 536 | 547 |     |  |
| 520 | 231 | 255 | 281 | 303 | 324 | 343 | 362 | 380 | 388 | 396 | 412 | 428 | 443 | 457 | 471 | 483 | 497 | 508 | 522 | 533 | 545 | 558 |     |  |
| 540 | 234 | 261 | 285 | 308 | 329 | 349 | 368 | 387 | 395 | 403 | 420 | 436 | 450 | 465 | 480 | 494 | 506 | 518 | 532 | 543 | 556 | 568 |     |  |
| 560 | 239 | 265 | 289 | 312 | 334 | 355 | 374 | 393 | 401 | 410 | 427 | 443 | 458 | 473 | 488 | 501 | 515 | 527 | 541 | 553 | 565 | 578 |     |  |
| 580 | 242 | 268 | 293 | 317 | 339 | 360 | 380 | 398 | 407 | 417 | 434 | 450 | 466 | 481 | 493 | 510 | 524 | 537 | 550 | 562 | 576 | 588 |     |  |

续附表 6.4

| a<br>b | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 | 250 | 260 | 280 | 300 | 320 | 340 | 360 | 380 | 400 | 420 | 440 | 460 | 480 | 500 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | 600 | 245 | 273 | 298 | 322 | 345 | 365 | 385 | 404 | 414 | 423 | 440 | 458 | 473 | 489 | 504 | 518 | 533 | 548 | 559 | 571 | 585 |
| 620    | 248 | 276 | 302 | 326 | 350 | 371 | 392 | 410 | 420 | 429 | 447 | 465 | 480 | 497 | 512 | 526 | 542 | 555 | 568 | 580 | 594 | 607 |
| 630    | 250 | 278 | 304 | 328 | 352 | 373 | 394 | 414 | 423 | 432 | 450 | 466 | 481 | 500 | 516 | 530 | 545 | 558 | 573 | 586 | 599 | 612 |
| 640    | 252 | 279 | 306 | 331 | 355 | 376 | 397 | 416 | 426 | 435 | 454 | 472 | 487 | 504 | 520 | 534 | 550 | 564 | 577 | 590 | 603 | 616 |
| 660    | 255 | 283 | 310 | 335 | 359 | 381 | 402 | 422 | 432 | 441 | 460 | 478 | 495 | 511 | 528 | 542 | 558 | 572 | 586 | 599 | 612 | 625 |
| 680    | 258 | 287 | 314 | 339 | 363 | 386 | 407 | 428 | 437 | 446 | 466 | 484 | 502 | 518 | 535 | 550 | 566 | 580 | 595 | 608 | 621 | 634 |
| 700    | 261 | 291 | 318 | 343 | 368 | 391 | 413 | 433 | 443 | 453 | 472 | 490 | 509 | 525 | 542 | 558 | 573 | 588 | 603 | 617 | 630 | 643 |
| 720    | 264 | 294 | 323 | 348 | 373 | 396 | 418 | 438 | 448 | 458 | 478 | 497 | 515 | 532 | 549 | 565 | 580 | 596 | 611 | 626 | 639 | 652 |
| 740    | 267 | 297 | 325 | 352 | 376 | 400 | 423 | 444 | 454 | 464 | 484 | 503 | 521 | 539 | 556 | 572 | 588 | 604 | 619 | 633 | 648 | 661 |
| 760    | 269 | 300 | 330 | 356 | 381 | 405 | 428 | 449 | 459 | 470 | 490 | 508 | 527 | 546 | 563 | 579 | 595 | 612 | 627 | 641 | 656 | 670 |
| 780    | 273 | 305 | 333 | 360 | 385 | 409 | 433 | 455 | 465 | 475 | 495 | 515 | 533 | 552 | 570 | 586 | 603 | 620 | 634 | 649 | 664 | 679 |
| 800    | 276 | 307 | 336 | 362 | 389 | 413 | 438 | 460 | 470 | 480 | 501 | 520 | 539 | 556 | 576 | 593 | 610 | 627 | 641 | 657 | 672 | 687 |

续附表 6.4

|          | 500 | 550 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850  | 900  | 950  | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 |  |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| <i>b</i> |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| <i>a</i> |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 500      | 547 |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 550      | 573 | 601 |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 600      | 598 | 628 | 657 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 650      | 612 | 643 | 672 | 689 |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 700      | 622 | 653 | 683 | 699 | 711 |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 750      | 643 | 677 | 707 | 726 | 737 | 765 |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 800      | 658 | 700 | 732 | 751 | 763 | 792 | 820 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 850      | 687 | 722 | 754 | 775 | 787 | 818 | 847 | 875  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 900      | 707 | 743 | 777 | 797 | 810 | 842 | 873 | 902  | 929  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 950      | 726 | 751 | 799 | 820 | 833 | 866 | 897 | 927  | 956  | 984  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 1000     | 744 | 783 | 820 | 841 | 855 | 889 | 921 | 925  | 982  | 1010 | 1040 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 1050     | 762 | 802 | 840 | 852 | 876 | 911 | 944 | 976  | 1010 | 1040 | 1070 | 1090 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|          | 779 | 820 | 859 | 882 | 897 | 932 | 967 | 1000 | 1030 | 1070 | 1090 | 1120 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |

续附录表 6.4

|      | 500  | 550  | 600  | 650  | 700  | 750  | 800  | 850  | 900  | 950  | 1000 | 1100 | 1200 | 1250 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 |  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| a    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| b    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 1100 | 796  | 838  | 878  | 901  | 916  | 958  | 988  | 1020 | 1060 | 1080 | 1120 | 1140 | 1200 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 1150 | 812  | 855  | 896  | 920  | 932  | 973  | 1010 | 1040 | 1080 | 1110 | 1140 | 1170 | 1230 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 1200 | 827  | 872  | 914  | 938  | 955  | 993  | 1030 | 1070 | 1100 | 1130 | 1170 | 1190 | 1250 | 1310 |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 1250 | 843  | 888  | 931  | 955  | 973  | 1010 | 1050 | 1090 | 1120 | 1160 | 1190 | 1220 | 1280 | 1340 | 1370 |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 1300 | 858  | 904  | 948  | 973  | 990  | 1020 | 1070 | 1110 | 1140 | 1180 | 1200 | 1240 | 1300 | 1360 | 1400 | 1420 |      |      |      |      |      |      |  |
| 1350 | 872  | 919  | 964  | 990  | 1010 | 1050 | 1090 | 1130 | 1160 | 1200 | 1230 | 1270 | 1330 | 1390 | 1420 | 1450 |      |      |      |      |      |      |  |
| 1400 | 886  | 934  | 980  | 1010 | 1020 | 1070 | 1110 | 1150 | 1180 | 1220 | 1260 | 1290 | 1350 | 1420 | 1450 | 1470 | 1530 |      |      |      |      |      |  |
| 1450 | 900  | 949  | 996  | 1020 | 1040 | 1080 | 1130 | 1160 | 1200 | 1240 | 1280 | 1310 | 1380 | 1440 | 1470 | 1500 | 1560 |      |      |      |      |      |  |
| 1500 | 913  | 963  | 1010 | 1040 | 1060 | 1100 | 1140 | 1180 | 1220 | 1260 | 1300 | 1330 | 1400 | 1460 | 1500 | 1530 | 1640 |      |      |      |      |      |  |
| 1600 | 939  | 991  | 1040 | 1070 | 1090 | 1140 | 1180 | 1220 | 1260 | 1300 | 1340 | 1370 | 1440 | 1510 | 1540 | 1630 | 1690 | 1750 |      |      |      |      |  |
| 1700 | 965  | 1020 | 1070 | 1100 | 1120 | 1170 | 1210 | 1250 | 1300 | 1340 | 1380 | 1410 | 1490 | 1550 | 1590 | 1630 | 1740 | 1800 | 1860 |      |      |      |  |
| 1800 | 989  | 1040 | 1100 | 1130 | 1150 | 1190 | 1240 | 1290 | 1330 | 1370 | 1410 | 1450 | 1530 | 1600 | 1630 | 1730 | 1850 | 1910 | 1970 |      |      |      |  |
| 1900 | 1010 | 1070 | 1120 | 1150 | 1170 | 1220 | 1260 | 1320 | 1360 | 1410 | 1450 | 1490 | 1560 | 1640 | 1670 | 1780 | 1840 | 1900 | 1960 | 2020 | 2080 |      |  |

续录附表 6.4

| a    | b    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      | 500  | 550  | 600  | 630  | 650  | 700  | 750  | 800  | 850  | 900  | 950  | 1000 | 1100 | 1200 | 1250 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 |
| 2000 | 1030 | 1090 | 1150 | 1180 | 1200 | 1250 | 1300 | 1350 | 1390 | 1440 | 1480 | 1520 | 1590 | 1680 | 1720 | 1750 | 1820 | 1890 | 1950 | 2010 | 2070 | 2180 | 2190 |
| 2100 | 1060 | 1110 | 1180 | 1210 | 1230 | 1280 | 1330 | 1380 | 1430 | 1470 | 1520 | 1560 | 1630 | 1720 | 1760 | 1790 | 1870 | 1930 | 2000 | 2060 | 2120 | 2130 | 2240 |
| 2200 | 1080 | 1140 | 1200 | 1230 | 1250 | 1310 | 1360 | 1410 | 1460 | 1500 | 1550 | 1590 | 1670 | 1760 | 1800 | 1830 | 1910 | 1970 | 2040 | 2100 | 2170 | 2280 | 2290 |
| 2300 | 1100 | 1160 | 1220 | 1250 | 1280 | 1330 | 1380 | 1430 | 1500 | 1530 | 1580 | 1620 | 1710 | 1790 | 1830 | 1870 | 1950 | 2020 | 2090 | 2160 | 2220 | 2280 | 2340 |
| 2400 | 1120 | 1180 | 1240 | 1270 | 1300 | 1360 | 1410 | 1460 | 1510 | 1560 | 1610 | 1650 | 1740 | 1830 | 1870 | 1910 | 1960 | 2030 | 2100 | 2170 | 2240 | 2330 | 2390 |
| 2500 | 1140 | 1200 | 1260 | 1300 | 1320 | 1380 | 1430 | 1480 | 1540 | 1590 | 1640 | 1680 | 1780 | 1860 | 1900 | 1940 | 2020 | 2100 | 2170 | 2240 | 2330 | 2380 | 2440 |
| 2600 | 1150 | 1220 | 1280 | 1320 | 1340 | 1400 | 1460 | 1510 | 1560 | 1620 | 1660 | 1740 | 1810 | 1900 | 1940 | 1990 | 2060 | 2140 | 2210 | 2280 | 2360 | 2420 | 2490 |
| 2700 | 1170 | 1240 | 1300 | 1340 | 1370 | 1430 | 1480 | 1540 | 1590 | 1640 | 1690 | 1740 | 1840 | 1930 | 1970 | 2010 | 2100 | 2180 | 2250 | 2330 | 2400 | 2470 | 2530 |
| 2800 | 1190 | 1260 | 1320 | 1360 | 1390 | 1450 | 1510 | 1560 | 1620 | 1670 | 1720 | 1770 | 1860 | 1960 | 2010 | 2050 | 2130 | 2210 | 2290 | 2370 | 2440 | 2510 | 2580 |
| 2900 | 1210 | 1280 | 1340 | 1380 | 1410 | 1470 | 1530 | 1590 | 1640 | 1700 | 1750 | 1800 | 1900 | 1990 | 2040 | 2080 | 2170 | 2250 | 2330 | 2410 | 2480 | 2550 | 2620 |
| 3000 | 1220 | 1290 | 1360 | 1400 | 1430 | 1490 | 1550 | 1610 | 1670 | 1720 | 1770 | 1830 | 1930 | 2020 | 2070 | 2110 | 2200 | 2280 | 2370 | 2440 | 2520 | 2590 | 2660 |






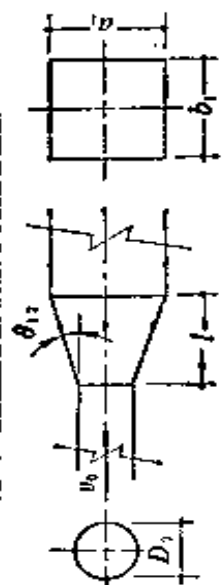
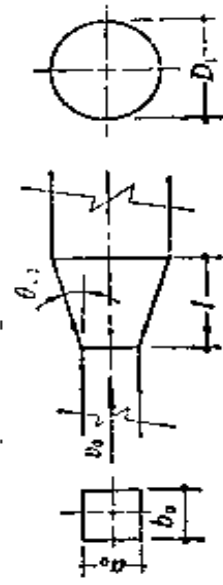
局部阻力系数

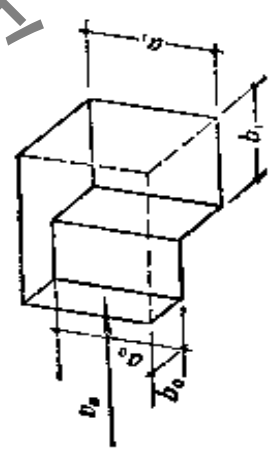
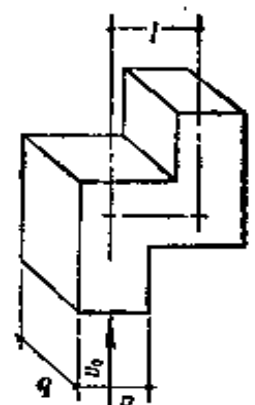
附表 5.5

| 序号  | 名称           | 形图   | 局部阻力系数 $\xi$ | 备                             | 注    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|--------------|------|--------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1   | 矩形风道<br>斜接弯头 |      | 0.25         | 0.5                           | 0.75 | 1.0  | 1.5  | 2.0  | 3.0  | 4.0  | 5.0  | 6.0  | 8.0  |      |      |      |      |
|     |              |      | 20           | 0.08                          | 0.08 | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.05 |      |      |
|     |              |      | 30           | 0.18                          | 0.17 | 0.17 | 0.16 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.11 |      |      |
|     |              |      | 45           | 0.38                          | 0.37 | 0.36 | 0.34 | 0.33 | 0.31 | 0.28 | 0.27 | 0.26 | 0.25 | 0.24 |      |      |      |
|     |              |      | 60           | 0.60                          | 0.59 | 0.57 | 0.55 | 0.52 | 0.49 | 0.45 | 0.43 | 0.41 | 0.39 | 0.38 |      |      |      |
|     |              |      | 75           | 0.89                          | 0.87 | 0.84 | 0.81 | 0.77 | 0.73 | 0.67 | 0.63 | 0.61 | 0.58 | 0.57 |      |      |      |
|     |              |      | 90           | 1.3                           | 1.3  | 1.2  | 1.2  | 1.1  | 1.1  | 0.98 | 0.92 | 0.89 | 0.85 | 0.83 |      |      |      |
|     |              |      | 2            | 矩形弯头<br>( $\theta=90^\circ$ ) |      | 0.25 | 0.5  | 0.75 | 1.0  | 1.5  | 2.0  | 3.0  | 4.0  | 5.0  | 6.0  | 8.0  |      |
|     |              |      |              |                               |      | 0.5  | 1.5  | 1.4  | 1.3  | 1.2  | 1.1  | 1.0  | 1.1  | 1.1  | 1.1  | 1.2  | 1.2  |
|     |              |      |              |                               |      | 0.75 | 0.57 | 0.52 | 0.49 | 0.44 | 0.40 | 0.39 | 0.39 | 0.40 | 0.42 | 0.43 | 0.44 |
| 1.0 | 0.27         | 0.25 |              |                               |      | 0.23 | 0.21 | 0.19 | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0.21 |      |      |      |
| 1.5 | 0.22         | 0.20 |              |                               |      | 0.19 | 0.17 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.17 |      |      |      |
| 2.0 | 0.20         | 0.18 |              |                               |      | 0.16 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.15 |      |      |      |

| 序号    | 名称               | 形 式     | 局部阻力系数 $\zeta$  | 备 注   |         |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |
|-------|------------------|---------|---|-------|---------|---------|---------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|--|
| 3     | 带导流片的矩形弯头(小形导流片) |         | 单片式导流片 $\zeta = 0.35$<br>流线型导流片 $\zeta = 0.10$  |       |         |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |
| 4     | 带导流片的矩形弯头        |         | <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>R/W</math></th> <th><math>R_1/W</math></th> <th><math>R_2/W</math></th> <th><math>\zeta</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.5</td> <td>0.2</td> <td>0.4</td> <td>0.45</td> </tr> <tr> <td>0.75</td> <td>0.4</td> <td>0.7</td> <td>0.12</td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>0.7</td> <td>1.0</td> <td>0.10</td> </tr> <tr> <td>1.5</td> <td>1.3</td> <td>1.6</td> <td>0.15</td> </tr> </tbody> </table> | $R/W$ | $R_1/W$ | $R_2/W$ | $\zeta$ | 0.5 | 0.2 | 0.4 | 0.45 | 0.75 | 0.4  | 0.7  | 0.12 | 1.0 | 0.7 | 1.0  | 0.10 | 1.5  | 1.3  | 1.6 | 0.15 |      |      |      |      |  |
| $R/W$ | $R_1/W$          | $R_2/W$ | $\zeta$   |       |         |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |
| 0.5   | 0.2              | 0.4     | 0.45  |       |         |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |
| 0.75  | 0.4              | 0.7     | 0.12  |       |         |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |
| 1.0   | 0.7              | 1.0     | 0.10  |       |         |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |
| 1.5   | 1.3              | 1.6     | 0.15  |       |         |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |
| 5     | 圆形风道的弯头          |         | <table border="1"> <thead> <tr> <th>节数</th> <th>0.5</th> <th>0.75</th> <th>1.0</th> <th>1.5</th> <th>2.0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>—</td> <td>0.46</td> <td>0.33</td> <td>0.24</td> <td>0.19</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>—</td> <td>0.50</td> <td>0.37</td> <td>0.27</td> <td>0.23</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.98</td> <td>0.54</td> <td>0.42</td> <td>0.34</td> <td>0.33</td> </tr> </tbody> </table>                    | 节数    | 0.5     | 0.75    | 1.0     | 1.5 | 2.0 | 5   | —    | 0.46 | 0.33 | 0.24 | 0.19 | 4   | —   | 0.50 | 0.37 | 0.27 | 0.23 | 3   | 0.98 | 0.54 | 0.42 | 0.34 | 0.33 |  |
| 节数    | 0.5              | 0.75    | 1.0   | 1.5   | 2.0     |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |
| 5     | —                | 0.46    | 0.33  | 0.24  | 0.19    |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |
| 4     | —                | 0.50    | 0.37  | 0.27  | 0.23    |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |
| 3     | 0.98             | 0.54    | 0.42  | 0.34  | 0.33    |         |         |     |     |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |  |

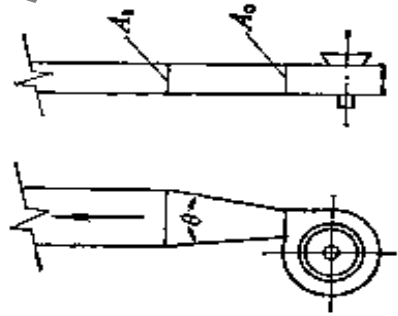
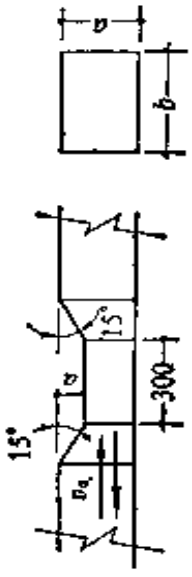
| 序号                | 名称           | 图 形  | 局部阻力系数 $\zeta$   | 备 注                           |              |      |      |      |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|-------------------|--------------|------|--|-------------------------------|--------------|------|------|------|---------|---------|------|------|------|-------------------------------|------|-------------------------------|-----|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| 6                 | 突然扩大         |      | <table border="1"> <tr> <td><math>\frac{A_1}{A_2}</math></td> <td>0.1</td> <td>0.2</td> <td>0.4</td> <td>0.6</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>0.81</td> <td>0.64</td> <td>0.36</td> <td>0.16</td> <td>0.04</td> </tr> </table>   | $\frac{A_1}{A_2}$             | 0.1          | 0.2  | 0.4  | 0.6  | 0.8     | $\zeta$ | 0.81 | 0.64 | 0.36 | 0.16                          | 0.04 | $h_s = \zeta \frac{v_1^2}{2}$ |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| $\frac{A_1}{A_2}$ | 0.1          | 0.2  | 0.4  | 0.6                           | 0.8          |      |      |      |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| $\zeta$           | 0.81         | 0.64 | 0.36   | 0.16                          | 0.04         |      |      |      |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 7                 | 突然缩小         |      | <table border="1"> <tr> <td><math>\frac{A_2}{A_1}</math></td> <td>0.1</td> <td>0.2</td> <td>0.4</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>0.34</td> <td>0.32</td> <td>0.25</td> <td>0.16</td> </tr> </table>  | $\frac{A_2}{A_1}$             | 0.1          | 0.2  | 0.4  | 0.6  | $\zeta$ | 0.34    | 0.32 | 0.25 | 0.16 | $h_s = \zeta \frac{v_2^2}{2}$ |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| $\frac{A_2}{A_1}$ | 0.1          | 0.2  | 0.4  | 0.6                           |              |      |      |      |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| $\zeta$           | 0.34         | 0.32 | 0.25   | 0.16                          |              |      |      |      |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 8                 | 逐渐缩小         |      | $\theta = 30^\circ \quad 45^\circ \quad 60^\circ$<br>$\zeta = 0.02 \quad 0.04 \quad 0.07$  | $h_d = \zeta \frac{v_2^2}{2}$ |              |      |      |      |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 9                 | 逐渐扩大         |      | <table border="1"> <tr> <td rowspan="2"><math>A_1/A_0</math></td> <td colspan="6"><math>\theta</math> (度)</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>20</td> <td>30</td> <td>45</td> <td>60</td> <td>90</td> <td>120</td> <td>180</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.18</td> <td>0.22</td> <td>0.25</td> <td>0.29</td> <td>0.31</td> <td>0.32</td> <td>0.33</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.36</td> <td>0.43</td> <td>0.50</td> <td>0.56</td> <td>0.51</td> <td>0.63</td> <td>0.63</td> <td>0.63</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>0.42</td> <td>0.47</td> <td>0.58</td> <td>0.58</td> <td>0.72</td> <td>0.76</td> <td>0.76</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td><math>\geq 8</math></td> <td>0.42</td> <td>0.49</td> <td>0.59</td> <td>0.70</td> <td>0.80</td> <td>0.87</td> <td>0.85</td> <td>0.86</td> </tr> </table> | $A_1/A_0$                     | $\theta$ (度) |      |      |      |         |         | 16   | 20   | 30   | 45                            | 60   | 90                            | 120 | 180 | 2 | 0.18 | 0.22 | 0.25 | 0.29 | 0.31 | 0.32 | 0.33 | 0.30 | 4 | 0.36 | 0.43 | 0.50 | 0.56 | 0.51 | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 6 | 0.42 | 0.47 | 0.58 | 0.58 | 0.72 | 0.76 | 0.76 | 0.75 | $\geq 8$ | 0.42 | 0.49 | 0.59 | 0.70 | 0.80 | 0.87 | 0.85 | 0.86 |  |
| $A_1/A_0$         | $\theta$ (度) |      |  |                               |              |      |      |      |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|                   | 16           | 20   | 30   | 45                            | 60           | 90   | 120  | 180  |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 2                 | 0.18         | 0.22 | 0.25   | 0.29                          | 0.31         | 0.32 | 0.33 | 0.30 |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 4                 | 0.36         | 0.43 | 0.50   | 0.56                          | 0.51         | 0.63 | 0.63 | 0.63 |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 6                 | 0.42         | 0.47 | 0.58   | 0.58                          | 0.72         | 0.76 | 0.76 | 0.75 |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| $\geq 8$          | 0.42         | 0.49 | 0.59   | 0.70                          | 0.80         | 0.87 | 0.85 | 0.86 |         |         |      |      |      |                               |      |                               |     |     |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |          |      |      |      |      |      |      |      |      |  |

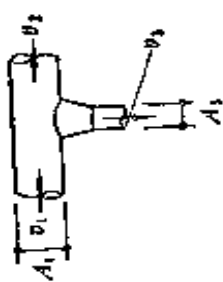
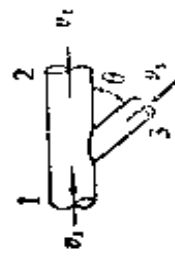
| 序号 | 名称                        | 图形  | 局部阻力系数 $\zeta$  | 备注   |      |      |      |    |     |    |     |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|----|---------------------------|---|---|--|------|------|------|----|-----|----|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|--|
| 10 | 矩形风道                      |    | <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>A_1/A_0</math></th> <th>14</th> <th>20</th> <th>30</th> <th>45</th> <th>60</th> <th>90</th> <th>180</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>0.09</td> <td>0.12</td> <td>0.20</td> <td>0.34</td> <td>0.37</td> <td>0.38</td> <td>0.35</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.16</td> <td>0.25</td> <td>0.42</td> <td>0.60</td> <td>0.68</td> <td>0.70</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>0.19</td> <td>0.29</td> <td>0.48</td> <td>0.65</td> <td>0.73</td> <td>0.83</td> <td>0.80</td> </tr> </tbody> </table> | $A_1/A_0$  | 14   | 20   | 30   | 45 | 60  | 90 | 180 | 2 | 0.09 | 0.12 | 0.20 | 0.34 | 0.37 | 0.38 | 0.35 | 4 | 0.16 | 0.25 | 0.42 | 0.60 | 0.68 | 0.70 | 0.65 | 6 | 0.19 | 0.29 | 0.48 | 0.65 | 0.73 | 0.83 | 0.80 |  |
|    | $A_1/A_0$                 | 14  |   | 20   | 30   | 45   | 60   | 90 | 180 |    |     |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 2  | 0.09                      | 0.12  | 0.20  | 0.34   | 0.37 | 0.38 | 0.35 |    |     |    |     |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 4  | 0.16                      | 0.25  | 0.42  | 0.60   | 0.68 | 0.70 | 0.65 |    |     |    |     |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 6  | 0.19                      | 0.29  | 0.48  | 0.65   | 0.73 | 0.83 | 0.80 |    |     |    |     |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|    | 平面扩散管                     |    |   |  |      |      |      |    |     |    |     |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 11 | 矩形变形管                     |    | $\theta < 14^\circ$ $\zeta = 0.15$  |  |      |      |      |    |     |    |     |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 12 | 天圆地儿<br>(从矩形<br>变至矩<br>形) |   | (根据 $\theta$ 从序号 10 中的表查 $\zeta$ 值)   | $\tan(\theta/2)$<br>$= (1.13\sqrt{a_1b_1 - D_0})/2l$ |      |      |      |    |     |    |     |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|    |                           |  |   | $\tan(\theta/2)$<br>$= (D_1 - 1.13\sqrt{a_0b_0})/2l$ |      |      |      |    |     |    |     |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |  |

| 序号名称                | 图形   | 局部阻力系数 $\zeta$   | 备注              |                   |     |     |     |     |      |          |      |          |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
|---------------------|--|--|-----------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|------|----------|------|----------|---------|---------|-----|------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|------|----------|-----|-----|------|-----|--|
| 14 矩形风道<br>缩小或扩大的弯头 |   | <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"><math>\frac{a_1}{a}</math></th> <th colspan="4"><math>\frac{b_1}{b_0}</math></th> </tr> <tr> <th>0.8</th> <th>1.2</th> <th>1.4</th> <th>1.6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.25</td> <td>1.8</td> <td>1.4</td> <td>1.1</td> <td>1.1</td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>1.7</td> <td>1.4</td> <td>1.0</td> <td>0.95</td> </tr> <tr> <td>4.0</td> <td>1.5</td> <td>1.1</td> <td>0.81</td> <td>0.72</td> </tr> <tr> <td><math>\infty</math></td> <td>1.5</td> <td>1.0</td> <td>0.69</td> <td>0.6</td> </tr> </tbody> </table> | $\frac{a_1}{a}$ | $\frac{b_1}{b_0}$ |     |     |     | 0.8 | 1.2  | 1.4      | 1.6  | 0.25     | 1.8     | 1.4     | 1.1 | 1.1  | 1.0  | 1.7 | 1.4 | 1.0 | 0.95 | 4.0 | 1.5 | 1.1 | 0.81 | 0.72 | $\infty$ | 1.5 | 1.0 | 0.69 | 0.6 |  |
|                     |  | $\frac{a_1}{a}$  |                 | $\frac{b_1}{b_0}$ |     |     |     |     |      |          |      |          |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
| 0.8                 | 1.2  |  | 1.4             | 1.6               |     |     |     |     |      |          |      |          |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
| 0.25                | 1.8  | 1.4  | 1.1             | 1.1               |     |     |     |     |      |          |      |          |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
| 1.0                 | 1.7  | 1.4  | 1.0             | 0.95              |     |     |     |     |      |          |      |          |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
| 4.0                 | 1.5  | 1.1  | 0.81            | 0.72              |     |     |     |     |      |          |      |          |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
| $\infty$            | 1.5  | 1.0  | 0.69            | 0.6               |     |     |     |     |      |          |      |          |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
| 15 矩形风道<br>90°Z形弯头  |   | <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>l/a</math></th> <th>0</th> <th>0.4</th> <th>0.6</th> <th>0.8</th> <th>1.0</th> <th>1.2</th> <th>1.4</th> <th>1.6</th> <th>1.8</th> <th>2.0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>0</td> <td>0.62</td> <td>0.90</td> <td>1.6</td> <td>2.6</td> <td>3.6</td> <td>4.6</td> <td>4.2</td> <td>4.2</td> <td>4.2</td> </tr> </tbody> </table>  | $l/a$           | 0                 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2  | 1.4      | 1.6  | 1.8      | 2.0     | $\zeta$ | 0   | 0.62 | 0.90 | 1.6 | 2.6 | 3.6 | 4.6  | 4.2 | 4.2 | 4.2 |      |      |          |     |     |      |     |  |
|                     |  | $l/a$  | 0               | 0.4               | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4  | 1.6      | 1.8  | 2.0      |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
| $\zeta$             | 0  | 0.62   | 0.90            | 1.6               | 2.6 | 3.6 | 4.6 | 4.2 | 4.2  | 4.2      |      |          |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
|                     | <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>l/a</math></th> <th>2.4</th> <th>2.8</th> <th>3.2</th> <th>4.0</th> <th>5.0</th> <th>6.0</th> <th>7.0</th> <th>8.0</th> <th>10.0</th> <th><math>\infty</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>3.7</td> <td>3.3</td> <td>3.2</td> <td>3.1</td> <td>2.9</td> <td>2.8</td> <td>2.7</td> <td>2.6</td> <td>2.5</td> <td>2.3</td> </tr> </tbody> </table> | $l/a$  | 2.4             | 2.8               | 3.2 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0  | 8.0      | 10.0 | $\infty$ | $\zeta$ | 3.7     | 3.3 | 3.2  | 3.1  | 2.9 | 2.8 | 2.7 | 2.6  | 2.5 | 2.3 |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
| $l/a$               | 2.4  | 2.8  | 3.2             | 4.0               | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 10.0 | $\infty$ |      |          |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |
| $\zeta$             | 3.7  | 3.3  | 3.2             | 3.1               | 2.9 | 2.8 | 2.7 | 2.6 | 2.5  | 2.3      |      |          |         |         |     |      |      |     |     |     |      |     |     |     |      |      |          |     |     |      |     |  |

| 序号 | 名称                                    | 形<br>图 | 局部阻力系数 $\zeta$   | 备<br>注 |      |      |      |      |      |      |      |      |          |     |         |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |                              |     |     |     |     |     |     |     |     |      |          |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|----|---------------------------------------|--------|--|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|-----|---------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 16 | 矩形风道<br>不在同一<br>平面的 2<br>个 90° 弯<br>头 |        | <table border="1"> <tr> <td><math>l/b</math></td> <td>0</td> <td>0.4</td> <td>0.6</td> <td>0.8</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> <td>1.4</td> <td>1.6</td> <td>1.8</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>1.2</td> <td>2.4</td> <td>2.9</td> <td>3.3</td> <td>3.4</td> <td>3.4</td> <td>3.4</td> <td>3.3</td> <td>3.2</td> <td>3.1</td> </tr> <tr> <td><math>l/b</math></td> <td>2.4</td> <td>2.8</td> <td>3.2</td> <td>4.0</td> <td>5.0</td> <td>6.0</td> <td>7.0</td> <td>9.0</td> <td>10.0</td> <td><math>\infty</math></td> </tr> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>3.2</td> <td>3.2</td> <td>3.2</td> <td>3.0</td> <td>2.9</td> <td>2.8</td> <td>2.7</td> <td>2.5</td> <td>2.4</td> <td>2.3</td> </tr> </table> | $l/b$  | 0    | 0.4  | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 1.2  | 1.4  | 1.6  | 1.8      | 2.0 | $\zeta$ | 1.2  | 2.4  | 2.9  | 3.3 | 3.4  | 3.4  | 3.4  | 3.3  | 3.2  | 3.1  | $l/b$                        | 2.4 | 2.8 | 3.2 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 9.0 | 10.0 | $\infty$ | $\zeta$ | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.0 | 2.9 | 2.8 | 2.7 | 2.5 | 2.4 | 2.3 |  |
|    |                                       |        | $l/b$  | 0      | 0.4  | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 1.2  | 1.4  | 1.6  | 1.8  | 2.0      |     |         |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |                              |     |     |     |     |     |     |     |     |      |          |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|    |                                       |        | $\zeta$  | 1.2    | 2.4  | 2.9  | 3.3  | 3.4  | 3.4  | 3.4  | 3.3  | 3.2  | 3.1      |     |         |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |                              |     |     |     |     |     |     |     |     |      |          |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|    |                                       |        | $l/b$  | 2.4    | 2.8  | 3.2  | 4.0  | 5.0  | 6.0  | 7.0  | 9.0  | 10.0 | $\infty$ |     |         |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |                              |     |     |     |     |     |     |     |     |      |          |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|    |                                       |        | $\zeta$  | 3.2    | 3.2  | 3.2  | 3.0  | 2.9  | 2.8  | 2.7  | 2.5  | 2.4  | 2.3      |     |         |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |                              |     |     |     |     |     |     |     |     |      |          |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|    |                                       |        | <table border="1"> <tr> <td><math>a/b</math></td> <td>0.25</td> <td>0.50</td> <td>0.75</td> <td>1.0</td> <td>1.5</td> <td>2.0</td> <td>3.0</td> <td>4.0</td> <td>6.0</td> <td>8.0</td> </tr> <tr> <td><math>e</math></td> <td>1.10</td> <td>1.07</td> <td>1.04</td> <td>1.0</td> <td>0.95</td> <td>0.90</td> <td>0.83</td> <td>0.78</td> <td>0.72</td> <td>0.70</td> </tr> </table>  | $a/b$  | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1.0  | 1.5  | 2.0  | 3.0  | 4.0  | 6.0      | 8.0 | $e$     | 1.10 | 1.07 | 1.04 | 1.0 | 0.95 | 0.90 | 0.83 | 0.78 | 0.72 | 0.70 | 当 $a \neq b$ 时乘上下表的修正值 $e$ 。 |     |     |     |     |     |     |     |     |      |          |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|    |                                       |        | $a/b$  | 0.25   | 0.50 | 0.75 | 1.0  | 1.5  | 2.0  | 3.0  | 4.0  | 6.0  | 8.0      |     |         |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |                              |     |     |     |     |     |     |     |     |      |          |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|    |                                       |        | $e$  | 1.10   | 1.07 | 1.04 | 1.0  | 0.95 | 0.90 | 0.83 | 0.78 | 0.72 | 0.70     |     |         |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |                              |     |     |     |     |     |     |     |     |      |          |         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |

续附录表 6.5

| 序号 | 名称                          | 图 形   | 局部阻力系数 $\zeta$ |           | 备 注     |      |      |      |      |      |      |
|----|-----------------------------|---|----------------|-----------|---------|------|------|------|------|------|------|
|    |                             |   | $\theta$ (度)   | $A_1/A_0$ |         |      |      |      |      |      |      |
| 17 | 风机出口<br>接风道的<br>平面对称<br>扩散管 |    | 10             | 0.05      | 0.07    | 0.09 | 0.10 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |      |
|    |                             |   | 15             | 0.06      | 0.09    | 0.11 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 |
|    |                             |   | 20             | 0.07      | 0.10    | 0.13 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 |
|    |                             |   | 25             | 0.08      | 0.13    | 0.16 | 0.19 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.21 |
|    |                             |   | 30             | 0.16      | 0.24    | 0.29 | 0.32 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 |
|    |                             |   | 35             | 0.21      | 0.34    | 0.39 | 0.44 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 |
| 18 | 矩形风道<br>压低以避<br>开阻挡物        |  | $b/a$          |           | $\zeta$ |      |      |      |      |      |      |
|    |                             |   | 0.125          |           | 0.15    | 0.25 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |      |
|    |                             |   | 1.0            |           | 0.26    | 0.30 | 0.33 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |      |
|    |                             |   | 4.0            |           | 0.10    | 0.14 | 0.22 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |      |

| 序号  | 名称   | 图 形   | 局部阻力系数 $\zeta$  | 备 注   |   |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
|---|--|---|---|---|---|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|---------------|------|------|------|------|------|-----|---------------------|-----|------|------|------|-----|---|-----------|------|------|-----|-----|-----|--|---------------|------|------|
| 19  | 圆形风道<br>分流三通<br>(四锥接<br>出)                       |    | 主 通 道 $\zeta_{1-2}$   | $h_d = \zeta_{12} \frac{v_1^2 \rho}{2}$ $h_d = \zeta_{13} \frac{v_1^2 \rho}{2}$ |   |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
|   |  |   | <table border="1"> <tr> <td><math>v_2/v_1</math></td> <td>0.3</td> <td>0.4</td> <td>0.5</td> <td>0.6</td> <td>0.8</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td><math>\zeta_{1-2}</math></td> <td>0.28</td> <td>0.15</td> <td>0.10</td> <td>0.03</td> <td>0.02</td> <td>0</td> </tr> </table><br><table border="1"> <tr> <td>支 通 道 <math>\zeta_{3-1}</math></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>v_3/v_1</math></td> <td>0.6</td> <td>0.7</td> <td>0.8</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>\zeta_{1-3}</math></td> <td>1.90</td> <td>1.27</td> <td>0.83</td> <td>0.50</td> <td>0.37</td> <td></td> </tr> </table> |   | $v_2/v_1$   | 0.3       | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | $\zeta_{1-2}$ | 0.28 | 0.15 | 0.10 | 0.03 | 0.02 | 0   | 支 通 道 $\zeta_{3-1}$ |     |      |      |      |     |   | $v_3/v_1$ | 0.6  | 0.7  | 0.8 | 1.0 | 1.2 |  | $\zeta_{1-3}$ | 1.90 | 1.27 |
| $v_2/v_1$   | 0.3  | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.8   | 1.0       |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
| $\zeta_{1-2}$   | 0.28   | 0.15  | 0.10  | 0.03  | 0.02  | 0         |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
| 支 通 道 $\zeta_{3-1}$   |  |   |   |   |   |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
| $v_3/v_1$   | 0.6  | 0.7   | 0.8   | 1.0   | 1.2   |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
| $\zeta_{1-3}$   | 1.90   | 1.27  | 0.83  | 0.50  | 0.37  |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
| <p>上述是 <math>A_1/A_3 = 3.2</math> 的情况, <math>A_1/A_2 = 2</math> 时比上述增加约 30%</p> |  |   |   |   |   |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
| 20  | 圆形风道<br>分流三通<br>(斜接出)<br><br>$\theta = 45^\circ$ |  | 主 通 道 $\zeta_{1-2} = 0.05 \sim 0.06$  | $h_d = \zeta_{12} \frac{v_1^2 \rho}{2}$ $h_d = \zeta_{13} \frac{v_1^2 \rho}{2}$ |   |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
|   |  |   | 支 通 道 $\zeta_{1-3}$   |   | <table border="1"> <tr> <td><math>v_3/v_1</math></td> <td>0.1</td> <td>0.5</td> <td>0.8</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> </tr> <tr> <td><math>A_1/A_3 = 1</math></td> <td>3.2</td> <td>1.02</td> <td>0.52</td> <td>0.47</td> <td>0.42</td> </tr> <tr> <td>3.0</td> <td>3.7</td> <td>1.4</td> <td>0.75</td> <td>0.51</td> <td>0.41</td> </tr> <tr> <td>8.2</td> <td>—</td> <td>0.79</td> <td>0.57</td> <td>0.41</td> <td>—</td> </tr> </table> | $v_3/v_1$ | 0.1 | 0.5 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | $A_1/A_3 = 1$ | 3.2  | 1.02 | 0.52 | 0.47 | 0.42 | 3.0 | 3.7                 | 1.4 | 0.75 | 0.51 | 0.41 | 8.2 | — | 0.79      | 0.57 | 0.41 | —   |     |     |  |               |      |      |
| $v_3/v_1$   | 0.1  | 0.5   | 0.8   | 1.0   | 1.2   |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
| $A_1/A_3 = 1$   | 3.2  | 1.02  | 0.52  | 0.47  | 0.42  |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
| 3.0   | 3.7  | 1.4   | 0.75  | 0.51  | 0.41  |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |
| 8.2   | —  | 0.79  | 0.57  | 0.41  | —   |           |     |     |     |     |     |               |      |      |      |      |      |     |                     |     |      |      |      |     |   |           |      |      |     |     |     |  |               |      |      |



局部阻力系数  $\zeta$

形图

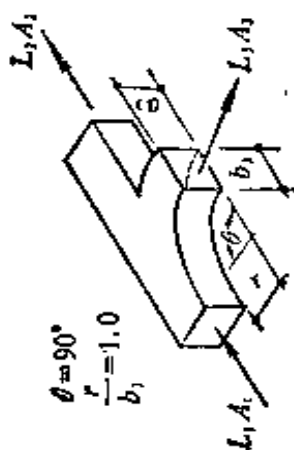
序号 名称

支 通 道  $\zeta_{19}$

矩形风  
道Y形分  
流三通

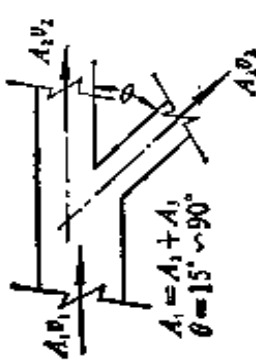
$L_2/L_1$

$A_3$   
 $A_1$   
 $A_2$



| $A_3$<br>$A_1$<br>$A_2$ | $L_2/L_1$ |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                         | 1.0       | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  |
| 0.25                    | 0.55      | 0.50 | 0.50 | 0.55 | 1.2  | 1.8  | 3.1  | 4.4  | 6.0  |
| 0.25                    | 0.35      | 0.35 | 0.50 | 0.50 | 1.3  | 2.0  | 2.8  | 3.8  | 5.0  |
| 0.5                     | 0.62      | 0.48 | 0.48 | 0.40 | 0.48 | 0.60 | 0.78 | 1.1  | 1.5  |
| 0.5                     | 0.52      | 0.40 | 0.32 | 0.30 | 0.34 | 0.44 | 0.62 | 0.92 | 1.4  |
| 0.5                     | 0.44      | 0.33 | 0.33 | 0.41 | 0.52 | 0.63 | 0.92 | 1.2  | 1.6  |
| 1.0                     | 0.67      | 0.53 | 0.45 | 0.37 | 0.32 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.37 |
| 1.0                     | 0.70      | 0.60 | 0.51 | 0.42 | 0.34 | 0.28 | 0.26 | 0.26 | 0.29 |
| 2.0                     | 0.60      | 0.52 | 0.43 | 0.33 | 0.24 | 0.17 | 0.15 | 0.17 | 0.21 |

| 序号 | 名称                 | 图 形 | 局部阻力系数 $\zeta$     |       |       |       |       |       |      |      |      |      |
|----|--------------------|-----|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
|    |                    |     | 主 通 道 $\zeta_{12}$ |       |       |       |       |       |      |      |      |      |
|    | 矩形风<br>道Y形分<br>流三通 |     | $L_3/L_1$          |       |       |       |       |       |      |      |      |      |
|    |                    |     | $\frac{A_2}{A_3}$  | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  |
|    |                    |     | $\frac{A_2}{A_1}$  | 0.25  | 0.25  | 0.25  | 0.25  | 0.25  | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
|    |                    |     | $\frac{A_3}{A_1}$  | 0.25  | 0.33  | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  |
|    |                    |     |                    | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.05  | 0.13 | 0.21 | 0.29 | 0.38 |
|    |                    |     |                    | 0.06  | 0     | -0.02 | -0.01 | 0.02  | 0.03 | 0.16 | 0.24 | 0.34 |
|    |                    |     |                    | -0.03 | -0.06 | -0.05 | 0     | 0.06  | 0.12 | 0.19 | 0.27 | 0.35 |
|    |                    |     |                    | 0.04  | -0.02 | -0.04 | -0.03 | -0.01 | 0.04 | 0.12 | 0.23 | 0.37 |
|    |                    |     |                    | 0.72  | 0.43  | 0.23  | 0.13  | 0.05  | 0.01 | 0.09 | 0.18 | 0.30 |
|    |                    |     |                    | -0.02 | -0.01 | -0.04 | -0.04 | 0.06  | 0.13 | 0.22 | 0.30 | 0.38 |
|    |                    |     |                    | 0.10  | 0.01  | -0.03 | -0.03 | -0.01 | 0.03 | 0.10 | 0.20 | 0.30 |
|    |                    |     |                    | 0.62  | 0.38  | 0.23  | 0.13  | 0.08  | 0.05 | 0.06 | 0.10 | 0.20 |

| 局部阻力系数 $\zeta$ |              | 主 通 道 $\zeta_{13}$   |           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|----------------|--------------|--|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 序号             | 名称           | 图 形  | $v_3/v_1$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|                |              |  | 0.1       | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 1.2  | 1.4  | 1.6  | 1.8  | 2.0  |     |
| 22             | 矩形风道 Y 形分流三通 |  <p> <math>A_1 v_1 = A_2 v_2 + A_3 v_3</math><br/> <math>A_1 = A_2 + A_3</math><br/> <math>\theta = 15^\circ \sim 90^\circ</math> </p> | (度)       | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 1.2  | 1.4  | 1.6  | 1.8  | 2.0 |
|                |              |  | 15        | 0.81 | 0.65 | 0.51 | 0.38 | 0.28 | 0.20 | 0.11 | 0.06 | 0.14 | 0.30 | 0.51 | 0.76 | 1.0 |
|                |              |  | 30        | 0.84 | 0.69 | 0.56 | 0.44 | 0.34 | 0.26 | 0.19 | 0.15 | 0.15 | 0.30 | 0.51 | 0.76 | 1.0 |
|                |              |  | 45        | 0.87 | 0.74 | 0.63 | 0.54 | 0.45 | 0.38 | 0.29 | 0.24 | 0.23 | 0.30 | 0.51 | 0.76 | 1.0 |
|                |              |  | 60        | 0.90 | 0.82 | 0.79 | 0.66 | 0.59 | 0.53 | 0.49 | 0.36 | 0.39 | 0.39 | 0.51 | 0.76 | 1.0 |
| 90             | 1.0          | 1.0  | 1.0       | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  |      |     |

| 序号  | 名称         | 图 | 局部阻力系数 $\zeta$ |           | 主通道 $\zeta_{12}$ |           |
|-----|------------|---|----------------|-----------|------------------|-----------|
|     |            |   | $\theta$ (度)   | $A_2/A_1$ | $\theta$ (度)     | $A_2/A_1$ |
|     | 矩形风道Y形分流三通 |   | 0~1.0          | 0.5       | 15~60            | 90        |
| 0   |            |   | 0              | 1.0       | 0~3.4            | 0.6       |
| 0.1 |            |   | 0.81           | 0.81      | 1.0              | 1.0       |
| 0.2 |            |   | 0.61           | 0.61      | 0.81             | 0.81      |
| 0.3 |            |   | 0.50           | 0.50      | 0.61             | 0.61      |
| 0.4 |            |   | 0.36           | 0.36      | 0.50             | 0.50      |
| 0.5 |            |   | 0.25           | 0.25      | 0.36             | 0.36      |
| 0.6 |            |   | 0.16           | 0.16      | 0.25             | 0.25      |
| 0.8 |            |   | 0.04           | 0.04      | 0.16             | 0.16      |
| 1.0 |            |   | 0              | 0         | 0.04             | 0.04      |
| 1.2 |            |   | 0.07           | 0.07      | 0                | 0         |
| 1.4 |            |   | 0.39           | 0.39      | 0.07             | 0.07      |
| 1.6 |            |   | 0.90           | 0.90      | 0.39             | 0.39      |
| 1.8 |            |   | 1.8            | 1.8       | 0.90             | 0.90      |
| 2.0 |            |   | 3.2            | 3.2       | 1.8              | 1.8       |
|     |            |   |                |           | 3.2              | 4.0       |
|     |            |   |                |           |                  | 2.5       |
|     |            |   |                |           |                  | 1.4       |
|     |            |   |                |           |                  | 0.79      |
|     |            |   |                |           |                  | 0.36      |
|     |            |   |                |           |                  | 0.20      |
|     |            |   |                |           |                  | 0.10      |
|     |            |   |                |           |                  | 0.28      |
|     |            |   |                |           |                  | 0.38      |
|     |            |   |                |           |                  | 0.52      |
|     |            |   |                |           |                  | 0.64      |
|     |            |   |                |           |                  | 0.81      |
|     |            |   |                |           |                  | 1.0       |
|     |            |   |                |           |                  | 0.7       |
|     |            |   |                |           |                  | >0.6      |

获取更多资料

微信搜索 蓝球星球

| 序号           | 名称   | 图   | 局部阻力系数  | 备注                                 |      |     |      |     |      |              |     |     |     |     |      |                                    |
|--------------|------|-----|---|------------------------------------|------|-----|------|-----|------|--------------|-----|-----|-----|-----|------|------------------------------------|
|              | 矩形风道 |     | 主通道 $\zeta_{12}$<br>$v_2/v_1 < 1.0$ 时, 大致可以不计<br>$v_2/v_1 \geq 1.0$ 时,<br>$\zeta_{12} = 0.46 - 1.24x + 0.93x^2$<br>$x = \left( \frac{v_2}{v_1} \right) \times \left( \frac{a}{b} \right)^{1/4}$   | $h_d = \zeta_{12} \frac{v_1^2}{2}$ |      |     |      |     |      |              |     |     |     |     |      |                                    |
| 23           | 分流三通 |     | 支通道 $\zeta_{13}$<br><table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td><math>x</math></td> <td>0.25</td> <td>0.5</td> <td>0.75</td> <td>1.0</td> <td>1.25</td> </tr> <tr> <td><math>\zeta_{13}</math></td> <td>0.3</td> <td>0.2</td> <td>0.3</td> <td>0.4</td> <td>0.55</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">表中 <math>x = \left( \frac{v_3}{v_1} \right) \times \left( \frac{a}{b} \right)^{1/4}</math></p> | $x$                                | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1.0 | 1.25 | $\zeta_{13}$ | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.55 | $h_d = \zeta_{13} \frac{v_1^2}{2}$ |
| $x$          | 0.25 | 0.5 | 0.75  | 1.0                                | 1.25 |     |      |     |      |              |     |     |     |     |      |                                    |
| $\zeta_{13}$ | 0.3  | 0.2 | 0.3   | 0.4                                | 0.55 |     |      |     |      |              |     |     |     |     |      |                                    |


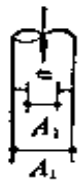
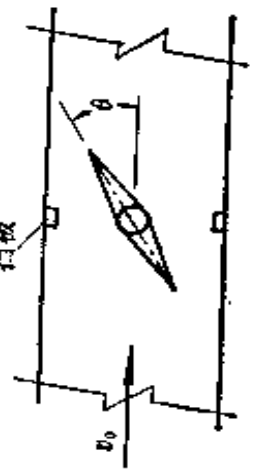
| 序号 | 名称   | 形   | 局部阻力系数 $\zeta$   | 备注   |                   |      |      |      |      |      |      |                                       |      |      |      |
|----|--|---|------------------|--|-------------------|------|------|------|------|------|------|---------------------------------------|------|------|------|
| 24 | T形分流<br>三通主通<br>道为锥形<br>支通道<br>45°斜口<br>接出 | <p> <math>0.5 \leq A_2/A_1 \leq 1.0</math><br/> <math>0.5 \leq A_3/A_1 \leq 1.0</math> </p> | 支 通 道            | $k_d = \zeta_{13} \frac{v_3^2 \rho}{2}$<br><br>$k_d = \zeta_{12} \frac{v_2^2 \rho}{2}$ |                   |      |      |      |      |      |      |                                       |      |      |      |
|    |  |   | $L_3/L_1$        |  | 0                 | 0.1  | 0.2  | 0.5  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.6                                   | 0.8  | 0.9  | 1.0  |
|    |  |   | $\zeta_{13}$     |  | 1.4               | 1.2  | 0.96 | 0.82 | 0.68 | 0.58 | 0.49 | 0.47                                  | 0.48 | 0.50 | 0.54 |
|    |  |   | 主 通 道            |  |                   |      |      |      |      |      |      |                                       |      |      |      |
|    |  |   | $L_2/L_1$        |  | 0                 | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7                                   | 0.8  | 0.9  | 1.0  |
|    |  |   | $2L_2$           |  | 0.22              | 0.21 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.02 | 0.20 | 0.22                                  | 0.25 | 0.35 | 0.53 |
|    |  |   | 分通道 $\zeta_{32}$ |  |                   |      |      |      |      |      |      |                                       |      |      |      |
|    |  |   | 分通道(3→2)         |  | $v_3/v_2$         | 0.4  | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 1.2  |      |                                       |      |      |      |
|    |  |   |                  |  | $\frac{A_1}{A_3}$ | 1.0  | 0    | 0.25 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.20                                  |      |      |      |
|    |  |   |                  |  |                   | 3.0  | 0.36 | 0.48 | 0.56 | 0.40 | 0.75 |                                       |      |      |      |
|    |  | 8.2   | 0.56             | 0.32   | 0.05              | 0.24 | 0.55 |      |      |      |      |                                       |      |      |      |
| 25 | 圆形风道<br>Y形合流<br>( $\theta = 45^\circ$ )    |   |                  |  |                   |      |      |      |      |      |      | $k_d = \zeta_{32} \frac{v_2 \rho}{2}$ |      |      |      |
|    |  |   |                  |  |                   |      |      |      |      |      |      |                                       |      |      |      |

| 序号              | 名称                                    | 图         | 局部阻力系数 $\zeta$  | 备注                                      |           |           |           |      |      |      |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
|-----------------|---------------------------------------|-----------|---|---|-----------|-----------|-----------|------|------|------|-----------------|-------|------|------|------|------|-----------------|-------|-------|-------|------|-----|-----------------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|------|-----|----|------|------|------|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-------|-------|---|------|------|-----|---|-----|-----|------|-----|------|-------|-------|------|------|-----|---|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|-------|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|------|-----|-----|------|------|------|-----|------|-------|-------|-------|---|---|------|------|------|-----|-----|------|------|-------|-------|-------|
| 25              | 圆形风道<br>Y形合流<br>( $\theta=45^\circ$ ) |           | 主通道 $\zeta_{12}$  | $h_d = \zeta_{12} \frac{v_2^2 \rho}{2}$ |           |           |           |      |      |      |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
|                 |                                       |           | <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>v_1/v_2</math></th> <th>0.2</th> <th>0.4</th> <th>0.6</th> <th>1.2</th> <th>1.0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>A_2/A_1 = 1.0</math></td> <td>-0.17</td> <td>0.06</td> <td>0.19</td> <td>0.17</td> <td>0.04</td> </tr> <tr> <td><math>A_2/A_1 = 3.0</math></td> <td>-1.50</td> <td>-0.70</td> <td>-0.20</td> <td>0.10</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td><math>A_2/A_1 = 8.2</math></td> <td>-5.70</td> <td>-2.90</td> <td>-0.10</td> <td>-0.10</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>  |   | $v_1/v_2$ | 0.2       | 0.4       | 0.6  | 1.2  | 1.0  | $A_2/A_1 = 1.0$ | -0.17 | 0.06 | 0.19 | 0.17 | 0.04 | $A_2/A_1 = 3.0$ | -1.50 | -0.70 | -0.20 | 0.10 | 0   | $A_2/A_1 = 8.2$ | -5.70 | -2.90 | -0.10 | -0.10 | 0   |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| $v_1/v_2$       | 0.2                                   | 0.4       | 0.6   | 1.2                                     | 1.0       |           |           |      |      |      |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| $A_2/A_1 = 1.0$ | -0.17                                 | 0.06      | 0.19  | 0.17                                    | 0.04      |           |           |      |      |      |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| $A_2/A_1 = 3.0$ | -1.50                                 | -0.70     | -0.20   | 0.10                                    | 0         |           |           |      |      |      |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| $A_2/A_1 = 8.2$ | -5.70                                 | -2.90     | -0.10   | -0.10                                   | 0         |           |           |      |      |      |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| 26              | 矩形风道<br>Y形合流<br>三通                    |           | 主通道 $\zeta_{13}$  | $h_d = \zeta_{13} \frac{v_2^2 \rho}{2}$ |           |           |           |      |      |      |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
|                 |                                       |           | <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"><math>A_3/A_2</math></th> <th rowspan="2"><math>A_3/A_1</math></th> <th colspan="7"><math>L_3/L_1</math></th> </tr> <tr> <th>0.1</th> <th>0.2</th> <th>0.3</th> <th>0.4</th> <th>0.5</th> <th>0.6</th> <th>0.7</th> <th>0.8</th> <th>0.9</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.25</td> <td>0.25</td> <td>-0.50</td> <td>0</td> <td>0.50</td> <td>1.2</td> <td>2.2</td> <td>2.7</td> <td>0.58</td> <td>8.4</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td>0.33</td> <td>0.25</td> <td>-1.2</td> <td>-0.40</td> <td>0.40</td> <td>1.6</td> <td>3.0</td> <td>4.8</td> <td>5.8</td> <td>8.9</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>0.5</td> <td>-0.50</td> <td>-0.20</td> <td>0</td> <td>0.25</td> <td>0.15</td> <td>0.1</td> <td>0</td> <td>1.5</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>0.67</td> <td>0.5</td> <td>-1.0</td> <td>-0.60</td> <td>-0.20</td> <td>0.10</td> <td>0.30</td> <td>0.1</td> <td>0</td> <td>1.5</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>0.5</td> <td>-2.2</td> <td>-1.3</td> <td>-0.95</td> <td>-0.50</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>3.1</td> <td>3.8</td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>-0.60</td> <td>-0.30</td> <td>-0.10</td> <td>-0.04</td> <td>0.13</td> <td>0.2</td> <td>0.2</td> <td>0.36</td> <td>0.42</td> </tr> <tr> <td>1.33</td> <td>1.0</td> <td>-1.2</td> <td>-0.80</td> <td>-0.40</td> <td>-0.20</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0.16</td> <td>0.24</td> <td>0.28</td> </tr> <tr> <td>2.0</td> <td>1.0</td> <td>-2.1</td> <td>-1.4</td> <td>-0.90</td> <td>-0.50</td> <td>-0.20</td> <td>0</td> <td>0.20</td> <td>0.27</td> <td>0.30</td> </tr> </tbody> </table> |   | $A_3/A_2$ | $A_3/A_1$ | $L_3/L_1$ |      |      |      |                 |       |      | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4             | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8  | 0.9 | 0.25            | 0.25  | -0.50 | 0     | 0.50  | 1.2 | 2.2 | 2.7 | 0.58 | 8.4 | 11 | 0.33 | 0.25 | -1.2 | -0.40 | 0.40 | 1.6 | 3.0 | 4.8 | 5.8 | 8.9 | 11 | 0.5 | 0.5 | -0.50 | -0.20 | 0 | 0.25 | 0.15 | 0.1 | 0 | 1.5 | 2.0 | 0.67 | 0.5 | -1.0 | -0.60 | -0.20 | 0.10 | 0.30 | 0.1 | 0 | 1.5 | 2.0 | 1.0 | 0.5 | -2.2 | -1.3 | -0.95 | -0.50 | 0 | 0 | 0 | 3.1 | 3.8 | 1.0 | 1.0 | -0.60 | -0.30 | -0.10 | -0.04 | 0.13 | 0.2 | 0.2 | 0.36 | 0.42 | 1.33 | 1.0 | -1.2 | -0.80 | -0.40 | -0.20 | 0 | 0 | 0.16 | 0.24 | 0.28 | 2.0 | 1.0 | -2.1 | -1.4 | -0.90 | -0.50 | -0.20 |
| $A_3/A_2$       | $A_3/A_1$                             | $L_3/L_1$ |   |   |           |           |           |      |      |      |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
|                 |                                       | 0.1       | 0.2   | 0.3                                     | 0.4       | 0.5       | 0.6       | 0.7  | 0.8  | 0.9  |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| 0.25            | 0.25                                  | -0.50     | 0   | 0.50                                    | 1.2       | 2.2       | 2.7       | 0.58 | 8.4  | 11   |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| 0.33            | 0.25                                  | -1.2      | -0.40   | 0.40                                    | 1.6       | 3.0       | 4.8       | 5.8  | 8.9  | 11   |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| 0.5             | 0.5                                   | -0.50     | -0.20   | 0                                       | 0.25      | 0.15      | 0.1       | 0    | 1.5  | 2.0  |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| 0.67            | 0.5                                   | -1.0      | -0.60   | -0.20                                   | 0.10      | 0.30      | 0.1       | 0    | 1.5  | 2.0  |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| 1.0             | 0.5                                   | -2.2      | -1.3  | -0.95                                   | -0.50     | 0         | 0         | 0    | 3.1  | 3.8  |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| 1.0             | 1.0                                   | -0.60     | -0.30   | -0.10                                   | -0.04     | 0.13      | 0.2       | 0.2  | 0.36 | 0.42 |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| 1.33            | 1.0                                   | -1.2      | -0.80   | -0.40                                   | -0.20     | 0         | 0         | 0.16 | 0.24 | 0.28 |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |
| 2.0             | 1.0                                   | -2.1      | -1.4  | -0.90                                   | -0.50     | -0.20     | 0         | 0.20 | 0.27 | 0.30 |                 |       |      |      |      |      |                 |       |       |       |      |     |                 |       |       |       |       |     |     |     |      |     |    |      |      |      |       |      |     |     |     |     |     |    |     |     |       |       |   |      |      |     |   |     |     |      |     |      |       |       |      |      |     |   |     |     |     |     |      |      |       |       |   |   |   |     |     |     |     |       |       |       |       |      |     |     |      |      |      |     |      |       |       |       |   |   |      |      |      |     |     |      |      |       |       |       |

| 序号 | 名称             | 局部阻力系数 $\zeta$     |           |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
|----|----------------|--------------------|-----------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    |                | 主 通 道 $\zeta_{12}$ |           |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
|    |                | $L_3/L_1$          |           |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
|    |                | $A_2/A_1$          | $A_3/A_1$ | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   |
| 26 | 矩形风道<br>Y形合流三通 | 0.75               | 0.25      | 0.30 | 0.30 | 0.20 | -0.1 | -0.45 | -0.92 | -1.5  | -2.0  | -2.6  |
|    |                | 1.0                | 0.5       | 0.17 | 0.18 | 0.10 | 0    | -0.08 | -0.18 | -0.27 | -0.37 | -0.46 |
|    |                | 0.75               | 0.5       | 0.27 | 0.35 | 0.32 | 0.25 | 0.12  | -0.03 | -0.23 | -0.42 | -0.58 |
|    |                | 0.5                | 0.5       | 1.2  | 1.1  | 0.90 | 0.85 | 0.35  | 0     | -0.40 | -0.80 | -1.3  |
|    |                | 1.0                | 1.0       | 0.18 | 0.24 | 0.27 | 0.26 | 0.23  | 0.18  | 0.10  | 0     | -0.12 |
|    |                | 0.75               | 1.0       | 0.75 | 0.36 | 0.38 | 0.35 | 0.27  | 0.18  | 0.05  | -0.08 | -0.22 |
|    |                | 0.5                | 1.0       | 0.80 | 0.67 | 0.80 | 0.68 | 0.55  | 0.40  | 0.25  | 0.08  | -0.10 |



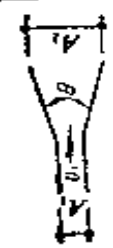
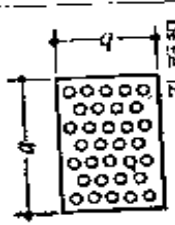
| 序号           | 名称          | 图 形   | 局部阻力系数：  | 备 注       |      |     |     |     |     |     |              |       |       |      |     |      |     |                                       |      |      |      |     |      |     |  |      |      |      |     |     |     |                                       |
|--------------|-------------|-------|--|-----------|------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|-------|-------|------|-----|------|-----|---------------------------------------|------|------|------|-----|------|-----|--|------|------|------|-----|-----|-----|---------------------------------------|
| 27           | 矩形风道<br>的合流 |       | <p>主通道 <math>\zeta_{13}</math></p> <table border="1"> <tr> <td><math>v_1/v_2</math></td> <td>0.4</td> <td>0.6</td> <td>0.3</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td><math>A_1</math></td> <td>-0.75</td> <td>-0.8</td> <td>0.5</td> <td>0.8</td> <td>1.1</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td><math>A_2</math></td> <td>0.67</td> <td>-1.7</td> <td>-0.3</td> <td>0.1</td> <td>0.45</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.60</td> <td>-2.1</td> <td>-1.3</td> <td>0.4</td> <td>0.1</td> <td>0.2</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><math>k_{13} = \zeta_{13} \frac{v_1^2}{2}</math></p> | $v_1/v_2$ | 0.4  | 0.6 | 0.3 | 1.0 | 1.2 | 1.5 | $A_1$        | -0.75 | -0.8  | 0.5  | 0.8 | 1.1  | —   | $A_2$                                 | 0.67 | -1.7 | -0.3 | 0.1 | 0.45 | 0.7 |  | 0.60 | -2.1 | -1.3 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | $k_{13} = \zeta_{13} \frac{v_1^2}{2}$ |
|              |             |       | $v_1/v_2$  | 0.4       | 0.6  | 0.3 | 1.0 | 1.2 | 1.5 |     |              |       |       |      |     |      |     |                                       |      |      |      |     |      |     |  |      |      |      |     |     |     |                                       |
| $A_1$        | -0.75       | -0.8  | 0.5  | 0.8       | 1.1  | —   |     |     |     |     |              |       |       |      |     |      |     |                                       |      |      |      |     |      |     |  |      |      |      |     |     |     |                                       |
| $A_2$        | 0.67        | -1.7  | -0.3   | 0.1       | 0.45 | 0.7 |     |     |     |     |              |       |       |      |     |      |     |                                       |      |      |      |     |      |     |  |      |      |      |     |     |     |                                       |
|              | 0.60        | -2.1  | -1.3   | 0.4       | 0.1  | 0.2 |     |     |     |     |              |       |       |      |     |      |     |                                       |      |      |      |     |      |     |  |      |      |      |     |     |     |                                       |
|              |             |       | <p>支通道 <math>\zeta_{23}</math></p> <table border="1"> <tr> <td><math>v_2/v_1</math></td> <td>0.4</td> <td>0.6</td> <td>0.8</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td><math>\zeta_{23}</math></td> <td>-1.39</td> <td>-0.90</td> <td>-0.5</td> <td>0.1</td> <td>0.55</td> <td>1.4</td> </tr> </table>  | $v_2/v_1$ | 0.4  | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.5 | $\zeta_{23}$ | -1.39 | -0.90 | -0.5 | 0.1 | 0.55 | 1.4 | $k_{23} = \zeta_{23} \frac{v_2^2}{2}$ |      |      |      |     |      |     |  |      |      |      |     |     |     |                                       |
| $v_2/v_1$    | 0.4         | 0.6   | 0.8  | 1.0       | 1.2  | 1.5 |     |     |     |     |              |       |       |      |     |      |     |                                       |      |      |      |     |      |     |  |      |      |      |     |     |     |                                       |
| $\zeta_{23}$ | -1.39       | -0.90 | -0.5   | 0.1       | 0.55 | 1.4 |     |     |     |     |              |       |       |      |     |      |     |                                       |      |      |      |     |      |     |  |      |      |      |     |     |     |                                       |

| 序号           | 名称                  | 形   | 局部阻力系数 $\zeta$  | 备            | 注    |     |     |     |     |         |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |
|--------------|---------------------|---|---|--------------|------|-----|-----|-----|-----|---------|------|---------|------|------|------|-----|-----|----|----|--|--|
| 28           | 圆形风道<br>内单叶片<br>的风阀 |    | <table border="1"> <tr> <td><math>\theta</math>(度)</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>20</td> <td>30</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>0.52</td> <td>0.95</td> <td>1.54</td> <td>3.80</td> <td>10.8</td> </tr> </table>   | $\theta$ (度) | 10   | 15  | 20  | 30  | 40  | $\zeta$ | 0.52 | 0.95    | 1.54 | 3.80 | 10.8 |     |     |    |    |  |  |
|              |                     |   | $\theta$ (度)  | 10           | 15   | 20  | 30  | 40  |     |         |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |
| $\zeta$      | 0.52                | 0.95  | 1.54  | 3.80         | 10.8 |     |     |     |     |         |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |
|              |                     |   | <table border="1"> <tr> <td><math>\theta</math>(度)</td> <td>45</td> <td>50</td> <td>60</td> <td>70</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>20</td> <td>35</td> <td>113</td> <td>751</td> <td></td> </tr> </table>   | $\theta$ (度) | 45   | 50  | 60  | 70  |     | $\zeta$ | 20   | 35      | 113  | 751  |      |     |     |    |    |  |  |
| $\theta$ (度) | 45                  | 50  | 60  | 70           |      |     |     |     |     |         |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |
| $\zeta$      | 20                  | 35  | 113   | 751          |      |     |     |     |     |         |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |
| 29           | 管内孔板                |   | <table border="1"> <tr> <td><math>A_2/A_1</math></td> <td>0.2</td> <td>0.4</td> <td>0.6</td> <td>0.8</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>47.8</td> <td>7.80</td> <td>1.80</td> <td>0.29</td> <td>0</td> </tr> </table>   | $A_2/A_1$    | 0.2  | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | $\zeta$ | 47.8 | 7.80    | 1.80 | 0.29 | 0    |     |     |    |    |  |  |
|              |                     |   | $A_2/A_1$   | 0.2          | 0.4  | 0.6 | 0.8 | 1.0 |     |         |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |
| $\zeta$      | 47.8                | 7.80  | 1.80  | 0.29         | 0    |     |     |     |     |         |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |
|              |                     |   |   |              |      |     |     |     |     |         |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |
| 30           | 矩形风道<br>流线型叶<br>片蝶阀 |  | <table border="1"> <tr> <td><math>\theta</math>(度)</td> <td>0</td> <td>10</td> <td>20</td> <td>30</td> <td>40</td> <td>50</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>0.50</td> <td>0.65</td> <td>1.6</td> <td>4.0</td> <td>9.4</td> <td>24</td> <td>67</td> </tr> </table> | $\theta$ (度) | 0    | 10  | 20  | 30  | 40  | 50      | 60   | $\zeta$ | 0.50 | 0.65 | 1.6  | 4.0 | 9.4 | 24 | 67 |  |  |
|              |                     |   | $\theta$ (度)  | 0            | 10   | 20  | 30  | 40  | 50  | 60      |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |
| $\zeta$      | 0.50                | 0.65  | 1.6   | 4.0          | 9.4  | 24  | 67  |     |     |         |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |
|              |                     |   |   |              |      |     |     |     |     |         |      |         |      |      |      |     |     |    |    |  |  |

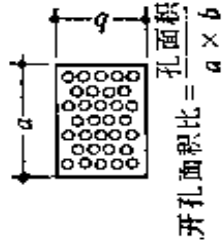
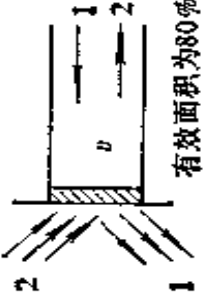
| 序号 | 名称                 | 形图 | 局部阻力系数 $\zeta$      |     |     |    |     |     |     |     |      |      |  |
|----|--------------------|----|---------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|------|------|--|
|    |                    |    | $\theta$ (度)        |     |     |    |     |     |     |     |      |      |  |
|    |                    |    | $\frac{nb}{2(a+b)}$ | 80  | 70  | 60 | 50  | 40  | 30  | 20  | 10   | 0    |  |
| 31 | 矩形风道<br>平行式多<br>叶阀 |    | 0.3                 | 116 | 32  | 14 | 9.0 | 5.0 | 2.3 | 1.4 | 0.79 | 0.52 |  |
|    |                    |    | 0.1                 | 152 | 38  | 16 | 9.0 | 6.0 | 2.4 | 1.5 | 0.85 | 0.52 |  |
|    |                    |    | 0.5                 | 188 | 45  | 18 | 9.0 | 6.0 | 2.4 | 1.5 | 0.92 | 0.52 |  |
|    |                    |    | 0.6                 | 245 | 45  | 21 | 9.0 | 5.4 | 2.4 | 1.5 | 0.92 | 0.52 |  |
|    |                    |    | 0.3                 | 284 | 55  | 22 | 9.0 | 5.4 | 2.5 | 1.5 | 0.92 | 0.52 |  |
|    |                    |    | 1.0                 | 361 | 65  | 24 | 10  | 5.4 | 2.6 | 1.6 | 1.0  | 0.52 |  |
|    |                    |    | 1.5                 | 576 | 102 | 28 | 10  | 5.4 | 2.7 | 1.6 | 1.0  | 0.52 |  |

| 序号 | 名称                          | 形 | 局部阻力系数 $\zeta$      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|----|-----------------------------|---|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
|    |                             |   | $\theta$ (度)        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|    |                             |   | $\frac{nb}{2(a+b)}$ |      | 80   | 70   | 60   | 50   | 40   | 30   | 20   | 10   | 0    |     |
| 32 | 矩形风道<br>对开式多<br>叶闸          |   | 0.3                 | 807  | 284  | 73   | 21   | 9.0  | 4.1  | 2.1  | 0.55 | 0.52 |      |     |
|    |                             |   | 0.4                 | 915  | 332  | 100  | 23   | 11   | 5.0  | 2.2  | 0.92 | 0.52 |      |     |
|    |                             |   | 0.5                 | 1045 | 377  | 122  | 33   | 13   | 5.4  | 2.3  | 1.0  | 0.52 |      |     |
|    |                             |   | 0.6                 | 1121 | 411  | 148  | 38   | 14   | 6.0  | 2.3  | 1.0  | 0.52 |      |     |
|    |                             |   | 0.8                 | 1299 | 495  | 188  | 54   | 18   | 6.6  | 2.4  | 1.1  | 0.52 |      |     |
|    |                             |   | 1.0                 | 1524 | 547  | 245  | 65   | 21   | 7.3  | 2.7  | 1.2  | 0.52 |      |     |
|    |                             |   | 1.5                 | 1554 | 617  | 361  | 107  | 28   | 9.0  | 3.2  | 1.4  | 0.52 |      |     |
| 33 | 风道中安<br>有网格的<br>矩形和圆<br>形风道 |   | #                   | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.65 | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.90 | 1.0 |
|    |                             |   | $\zeta$             | 6.2  | 3.0  | 1.7  | 1.3  | 0.97 | 0.75 | 0.58 | 0.44 | 0.32 | 0.14 | 0   |

$\zeta$ ——网格的迎风面积比

| 序号  | 名称                 | 图 形  | 局部阻力系数 $\zeta$ |                   |      |      |      | 备 注                                      |     |
|-----|--------------------|--|----------------|-------------------|------|------|------|--|-----|
|     |                    |  | $A_1/A_2$      | $\theta=10^\circ$ | 20   | 30   | 40   |  |     |
| 34  | 风管出口<br>(渐扩)       |   | 0.7            | 0.64              | 0.72 | 0.70 | 0.66 |  |     |
|     |                    |  | 0.6            | 0.55              | 0.64 | 0.74 | 0.83 |  |     |
|     |                    |  | 0.5            | 0.48              | 0.53 | 0.70 | 0.79 |  |     |
|     |                    |  | 0.4            | 0.40              | 0.53 | 0.63 | 0.76 |  |     |
|     |                    |  | 0.3            | 0.34              | 0.43 | 0.62 | 0.73 |  |     |
| 35  | 穿孔板<br>(钢板)<br>送风口 | <br>穿孔面积比 = $\frac{\text{孔面积}}{a \times b}$ | 穿孔面积比          |                   |      |      |      | $h_f = \zeta \frac{v^2 \rho}{2}$ (v—面风速) |     |
|     |                    |  | $\theta$       | 0.2               | 0.4  | 0.6  | 0.8  |  | 0.9 |
|     |                    |  | 0.5            | 30                | 60   | 6.0  | 2.3  |  |     |
|     |                    |  | 1.0            | 33                | 6.3  | 2.7  |      |  |     |
|     |                    |  | 1.5            | 36                | 7.4  | 3.0  |      |  |     |
|     |                    |  | 2.0            | 39                | 7.8  | 3.2  |      |  |     |
| 2.5 | 40                 | 8.3  | 3.4            |                   |      |      |      |  |     |
| 3.0 | 41                 | 8.6  | 3.7            |                   |      |      |      |  |     |

续附表 6.5

| 序号                             | 名称                             | 图 形  | 局部阻力系数 $\zeta$   | 备 注   |       |                                |                                |                                  |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |
|--------------------------------|--------------------------------|--|--|-------|-------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----|--|--|---------|----|-----|-----|-----|--|---|
| 36                             | 穿孔板<br>(钢板)<br>吸风口             |  <p>穿孔面积比 = <math>a \times b</math></p> | <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td colspan="2">穿孔面积比</td> </tr> <tr> <td>0.2</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td>0.6</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> </td> </tr> <tr> <td><math>\zeta</math></td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>7.6</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>1.2</td> <td></td> </tr> </table> | 穿孔面积比 |       | 0.2                            | 0.4                            | 0.6                              | 0.8 |  |  | $\zeta$ | 35 | 7.6 | 3.0 | 1.2 |  | $h_d = \zeta \frac{v^2 \rho}{2}$ <p>(面风速)</p> |
| 穿孔面积比                          |                                |  |  |       |       |                                |                                |                                  |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |
| 0.2                            | 0.4                            |  |  |       |       |                                |                                |                                  |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |
| 0.6                            | 0.8                            |  |  |       |       |                                |                                |                                  |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |
|                                |                                |  |  |       |       |                                |                                |                                  |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |
| $\zeta$                        | 35                             |  |  |       |       |                                |                                |                                  |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |
| 7.6                            | 3.0                            |  |  |       |       |                                |                                |                                  |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |
| 1.2                            |                                |  |  |       |       |                                |                                |                                  |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |
| 37                             | 百叶风格                           |  <p>有效面积为80%</p>                      | <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">活动百叶格</td> <td style="text-align: center;">固定百叶格</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><math>\zeta_1 = 3.5, \zeta_2 = 1.4</math></td> <td style="text-align: center;"><math>\zeta_1 = 2.7, \zeta_2 = 0.9</math></td> </tr> </table>                       | 活动百叶格 | 固定百叶格 | $\zeta_1 = 3.5, \zeta_2 = 1.4$ | $\zeta_1 = 2.7, \zeta_2 = 0.9$ | $h_1 = \zeta \frac{v^2 \rho}{2}$ |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |
| 活动百叶格                          | 固定百叶格                          |  |  |       |       |                                |                                |                                  |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |
| $\zeta_1 = 3.5, \zeta_2 = 1.4$ | $\zeta_1 = 2.7, \zeta_2 = 0.9$ |  |  |       |       |                                |                                |                                  |     |  |  |         |    |     |     |     |  |   |

## 第7章 水管系统

水管系统的功能是输配冷热能量，满足末端设备或机组的负荷要求。其配置原则应该是：①具备足够的输送能力，经济合理的选定管材、管径以及水泵台数、型号、规格；②具有良好的水力工况稳定性，重视并联环路间的阻力平衡；③满足部分负荷时的调节要求；④实现空调运行期间的节能运行要求；⑤便于管理维修保养工作。

### 7.1 水管系统的形式

#### 7.1.1 开式系统和闭式系统

从管路和设备的布局上分，空调水系统可分为开式系统和闭式系统两种形式。它们的主要区别在于，开式系统的末端水管是与大气相通的，而闭式系统的管路并不与大气相通。所以凡连接冷却塔、喷水室和水箱等设备的管路均构成开式系统，如图 7.1、7.2 所示。图 7.3 中的水循环管路中没有开口处，所以它是闭式系统。

由于开式系统的管路与大气相通，所以循环水中含氧量高，容易腐蚀管路和设备，而且空气中的污染物如尘土、杂物、细菌、可溶性气体等易进入水循环，使微生物大量繁殖，形成生物污泥，所以管路容易堵塞并产生水锤现象。与闭式系统相比，开式系统中的水泵压头比较高，它不但要克服管路沿程的摩擦阻力和局部压力损失，还必须有一个把水提升高度  $z$  所需的压头（见图 7.1 图 7.2 所示）。因此，水泵的能耗大。此外，开式系统中的水箱或水池等设备不可避免地会造成无效的能量损耗。所以，近年来在空调工程领域，特别是冷冻水环路中，已经很少采用开式系统。

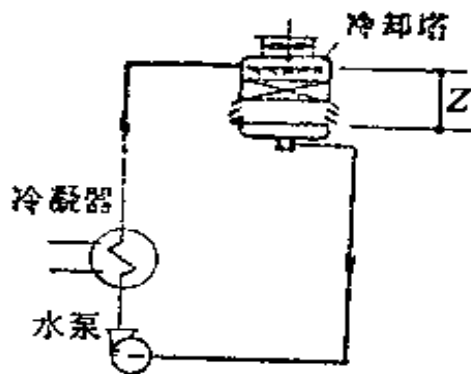


图 7.1 开式系统图式



图 7.2 开式系统图式

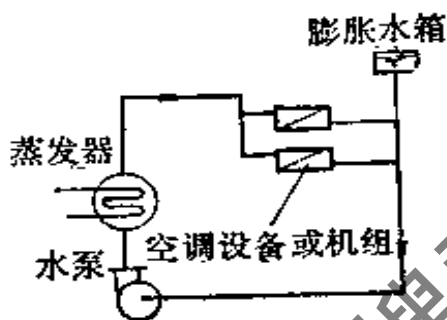


图 7.3 闭式系统图式

为了节约水泵的能耗，冷却水池最好紧接冷却塔，或者就采用如图 7.1 所示方式，不专门设水池，系统的管路直接与冷却塔出水口相接。

与开式系统相比，闭式系统的水泵能耗小，管路和设备的腐蚀可能性小，水处理费用便宜。但由于系统的补给水需要以及给予系统内的水在温度变化时有体积膨胀的余地等原因，所以闭式系统需设膨胀水箱。

### 7.1.2 定水量系统和变水量系统

从调节特征上分：空调水系统可分为定水量系统和变水量系统两种形式。前者通过改变供回水温差来适应房间的负荷变化要求，系统中的水流量是不变的；后者则通过改变水流量（供回水温度不变）来适应房间负荷变化要求。所以，变水量系统要求空调负荷侧的供水量随负荷增减而变化，故输送能耗也将随之变化。

在定水量系统中，负荷侧（末端设备或风机盘管机组）大部分采用三通阀进行调节，如图 7.4 所示。这种三通阀进行双位控



制，当室温没有达到设计值时，室温控制器使三通阀的直通阀座打开，旁通阀座关断，这时系统供水全部流经末端空调设备或风机盘管机组；当室温达到或超出设计值时，室温控制器使直通阀座关闭，旁通阀座开启，这时系统供水全部经旁通流入回水管系。在变水量系统中，负荷侧通常采用双通调节阀进行调节，如

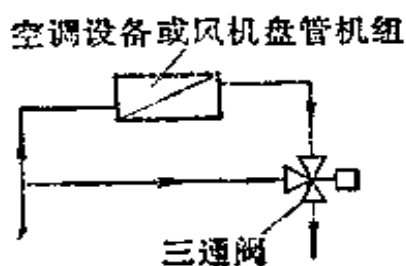


图 7.4 用三通阀调节

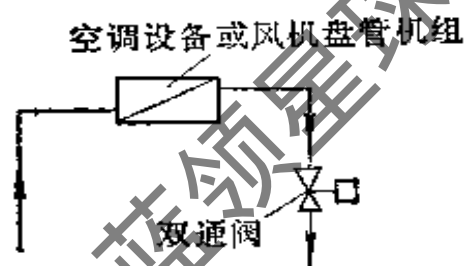


图 7.5 用双通调节阀调节

图 7.5 所示。常用的两通阀也是双位控制的，当室温没有达到设计值时，两通阀开启，系统供水按设计值全部流经风机盘管机组；当室温达到或超出设计值时，由室温控制器作用使两通阀关闭，这时系统停止向该负荷点供水。由于变水量系统的管路内流量是随负荷变化而变化的，因此，系统中水泵的配置和流量的控制必须采取相应措施。

### 7.1.3 单式水泵供水系统和复式水泵供水系统

从水泵的配置状况看，空调水系统有冷、热源侧（制冷机、热交换器）和负荷侧（空调设备）合用水泵的单式环路和分别设置水泵的复式环路之分。前者称为单式水泵供水系统方式，适用于中小型建筑物和投资少的场合；后者称为复式水泵供水系统方式，适用于大型建筑物，对于各空调分区负荷变化规律不一和供水作用半径相差悬殊的场合尤其适合，它有利于提高调节品质和减少输送能耗。

单式水泵供水系统图式见图 7.6 所示。如果负荷侧（空调设备或风机盘管机组）设置三通阀，则通过制冷机的流量是一定的。但是如果设置两通阀，那末系统中的水流量将会减少。为要防

止流过制冷机的水量过少，以致发生故障，应在供回水干管间设置旁通管路，如图 7.6 中点划线所示。在旁通管路上应装上差压控制阀，当流量过小，旁通管两端压差太大时，在压差传感器作用下打开此阀以维持供回水干管间的压差在允许的波动范围以内。如果供冷或供热用同一管路，那末管路中还应接入换热器  $H$ （供热水时用），如图 7.6 中虚线所示。

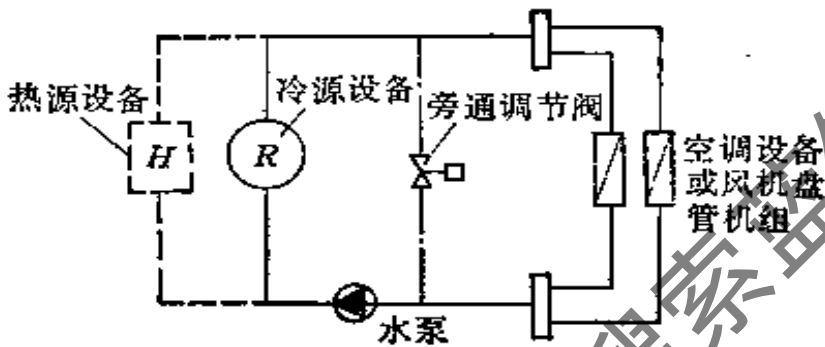


图 7.6 单式水泵供水系统图式

复式水泵供水系统图式如图 7.7 所示。冷热源侧设置一次泵，一般选用定流量水泵以维持一次环路内水流量基本不变。在负荷侧设置二次泵构成二次环路。各二次环路互相并联，并独立于一次环路。二次环路的划分取决于空调的分区要求。

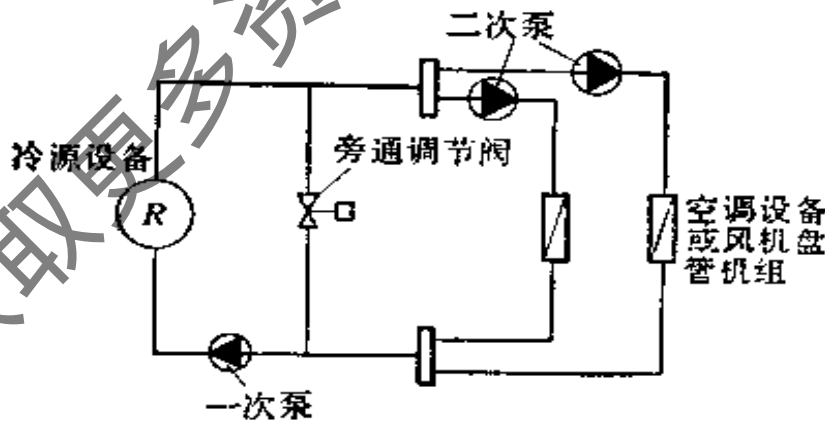


图 7.7 复式水泵供水系统图式

#### 7.1.4 同程式回水方式和异程式回水方式

在大型建筑物中，空调水系统的回水管布置方式可分为两

类：同程式回水方式和异程式回水方式。对于同程式回水方式(如图 7.8 所示)，在各机组的水阻力大致相等时，由于各并联环路

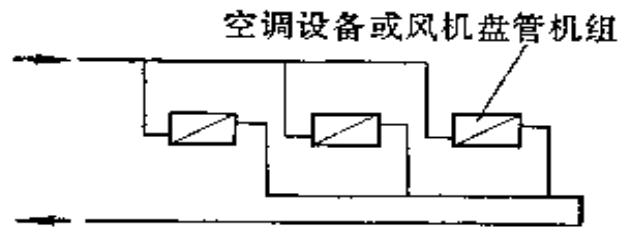


图 7.8 同程式回水方式图式

的管路总长度基本相等，所以系统的水力稳定性好，流量分配均衡；而异程式回水方式(如图 7.9 所示)的优点是管路配置简单，管材省，但是由于各并联环路的管路总长度不相等，存在着各环路间阻力不平衡现象，从而导致了流量分配不均的可能性。可是，如果在水管设计时采取适当措施，使公共管路的阻力小一些；或者在各并联支管上安装流量调节装置，增大并联支管的阻力，那末异程式回水方式也是可以达到令人满意的效果的。

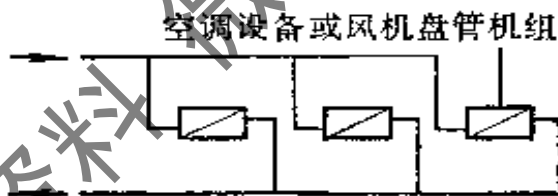


图 7.9 异程式回水方式图式

## 7.2 水管系统的设计计算

### 7.2.1 能量方程式

根据能量守恒定律，理想流体(没有粘性)在管内流动时，各处的能量应该是不变的，可以用能量方程式表示如下：

$$E = P_s + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g z = \text{常数} \quad (7.1)$$

式中  $E$ ——单位体积流量流体具有的总能量，[Pa]；

$P_s$ ——单位体积流量流体具有的压能，亦称静压，[Pa]；

$\rho$ ——流体的密度, [kg/m<sup>3</sup>];

$v$ ——流体在断面上的平均流速, [m/s];

$\frac{\rho v^2}{2}$ ——单位体积流量流体具有的动能, 亦称动压, [Pa];

$g$ ——重力加速度, [m/s<sup>2</sup>];

$z$ ——在流动断面上任一点相对于选定基准面的高程, [m];

$\rho g z$ ——单位体积流量流体具有的位能, [Pa]。

也就是说, 如果有图 7.10 所示流段, 沿流向取 1, 2 两断面, 那末根据能量方程式就存在以下关系:

$$\rho_{j1} + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g z_1 = P_{j2} + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g z_2 \quad (7.2)$$

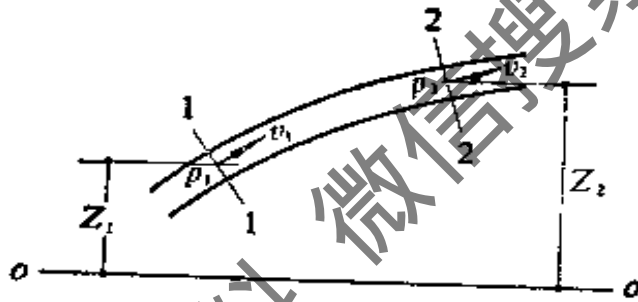


图 7.10 公式 7.2 的说明

但是, 实际流体是具有粘性的, 因此它在管内流动时就有阻力。因为克服阻力就必定有能量损耗, 如果用  $H$  表示单位体积流量实际流体在从断面 1 流向断面 2 时所损失的能量, 那末实际流体在管内流动时的能量方程式应为

$$E = P_{j1} + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g z_1 = P_{j2} + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g z_2 + H \quad (7.3)$$

另一方面, 为了维持水管系统正常的输配作用, 系统中必须配置水泵以提供克服阻力  $H$  所必要的能量  $P$  (单位常用 [kPa])。

在各种使用场合下水泵应具备的压头(扬程)按下述确定:

1. 水泵在开式系统中工作时

当水泵连接的上下水池面足够大时，可以认为  $v_1 = v_2 \approx 0$ ，这样

$$\Delta P = P_0 + \rho g z + \Sigma(H) \quad (7.4)$$

式中  $P_0$ ——供水管末端所需的工作压强(力)[kPa]；

$z$ ——上下两水池液面间的高差；当水泵从水池吸水向高位的空调箱喷水室供水时，它应该是水池出水口与最高供水点间的高差，[m]；

$\Sigma(H)$ ——整个水管系统的阻力损失，[kPa]  $\Sigma(H) = H_1 + H_2$ ，其中  $H_1$  和  $H_2$  分别为水泵吸入段和压出的段阻力，[kPa]。

## 2. 水泵向压力容器供水时

当水泵向压力容器如锅炉或闭式膨胀水箱补水时(见图 7.11)，如果补给水箱的液面压强为大气压  $P_a$  (单位为[kPa])，压力容器的液面压强为  $P$  (单位为[kPa])，那末

$$P = (P_1 - P_a) + \rho g z + \Sigma(H) \quad (7.5)$$

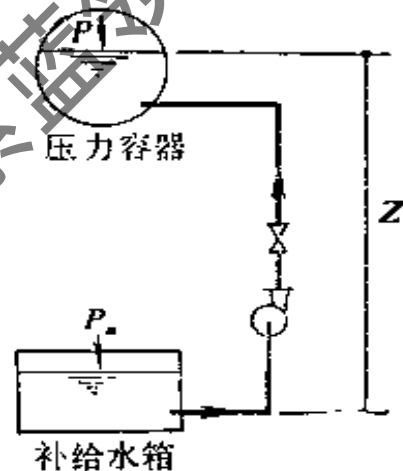


图 7.11 水泵向压力容器补水

## 3. 水泵在闭式系统中工作时

从图 7.3 可见，当水泵在闭式系统中工作时，水泵的压头(扬程)只需克服管系(包括管路、管配件、设备)的阻力就足够了，所以

$$P = \Sigma(H) \quad (7.6)$$

### 7.2.2 管段的阻力计算

#### 1. 直管段的摩擦阻力

和风道阻力计算一样，水管的摩擦阻力也是用下式计算的：

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} \text{ 或者 } h_f = Rl, \quad (7.7)$$

式中  $h_f$ ——长度为  $l$ [m] 的直管段的摩擦阻力，[Pa]；

$\lambda$ ——水与管内壁间的摩擦阻力系数，无因次量；

$l$ ——直管段的长度, [m];

$d$ ——管内径, [m];

$\rho$ ——水的密度, [kg/m<sup>3</sup>]; 标准大气压时, 4[°C]纯水的密度是 1000[kg/m<sup>3</sup>];

$R$ ——长度为 1[m] 的直管段的摩擦阻力, 简称比摩阻, [Pa/m]。

一般水管系统的管内水流速可以参考表 7.1 的推荐值取用;

管内水流速推荐值[m/s]

表 7.1

| 公称直径 $D_g$ [mm] | <250    | >250    |
|-----------------|---------|---------|
| 吸入管             | 1.0~1.2 | 1.2~1.6 |
| 压出管             | 1.5~2.0 | 2.0~2.5 |

摩擦阻力系数  $\lambda$  与流体的性质、流速、管内径大小和管内表面的粗糙度有关, 可以用下式计算:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \lg \left( \frac{\varepsilon}{3.71d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (7.8)$$

式中  $\varepsilon$ ——管内表面的当量绝对粗糙度, [m];

推荐水管的  $\varepsilon$  值如下: 对于开式系统, 取 0.0005[m];

对于闭式系统, 取 0.0002[m];

$$Re \text{——雷诺数, } Re = \frac{vd}{\nu}$$

其中  $\nu$  是水的运动粘滞系数, 与水温有关, 在标准大气压时, 水的运动粘滞系数可以从表 7.2 查得。

表 7.3 就是根据公式(7.7)和(7.8)计算得到的。制表所取定的水温是 20[°C], 表中  $R_1$  和  $R_2$  是管内表面当量绝对粗糙度  $\varepsilon$  值分别是 0.0002[m] 和 0.0005[m] 条件下计算得到的每 1[m] 管长的摩擦阻力。对于闭式系统用  $R_1$  值, 对于开式系统用  $R_2$  值。

标准大气压时水的运动粘滞系数

表 7.2

| 温度[°C]                    | 0                | 5                | 10               | 15               | 20               | 30               | 40               | 60               | 80               |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $\nu$ [m <sup>2</sup> /s] | 1.792            | 1.520            | 1.307            | 1.139            | 1.004            | 0.801            | 0.658            | 0.475            | 0.365            |
|                           | $\times 10^{-6}$ | $\times 10^{-6}$ | $\times 10^{-6}$ | $\times 10^{-6}$ | $\times 10^{-6}$ | $\times 10^{-6}$ | $\times 10^{-6}$ | $\times 10^{-6}$ | $\times 10^{-6}$ |

【例 7.1】求水在流过长度为 20[m]、等径为 150[mm]的直管段时的摩擦阻力,如果管内水流速取 1.8[m/s],管内表面的当量绝对粗糙度  $\varepsilon = 0.0005$ [m]。

【解】本题应用公式 7.7 和表 7.3 进行计算。

由题意,由于  $\varepsilon = 0.0005$ [m], 所以比摩阻应该查表 7.3 中  $R_2$  一项, 根据管径 50[mm]和流速 1.8[m/s]的已知条件,即可查得  $R_2 = 295$ [Pa]

这样,直管段的摩擦阻力

$$h_f = R_2 l \\ = 295 \times 20 = 5900 \text{ [Pa]} \quad (\text{即 } 602 \text{ [mmH}_2\text{O)})$$

水温对阻力是有影响的。从计算结果分析,当  $\varepsilon$  值为 0.2[mm]、流速在 1[m/s]和水温在  $20 \pm 10$ [°C]范围变化时,阻力值的误差在  $\pm 2\%$ 以内;当  $\varepsilon$  值为 0.5[mm],在上述同样条件下阻力值的误差只在  $\pm 1\%$ 以内。因此,一般情况下可以忽略水温对阻力的影响。但是当水温较高或流速甚小时,则误差就会增大。这时可以参考图 7.12 在阻力计算中引进水温修正系数  $K_t$ ,即

$$h_{f(t)} = K_t \cdot h_{f(20)} \quad (7.9)$$

式中  $h_{f(t)}$ ——水温  $t$  时长度为 1[m] 的直管段的摩擦阻力, [Pa];

$K_t$ ——水温修正系数,从图 7.12 或图 7.13 查得;

$h_{f(20)}$ ——水温 20[°C]时长度为 1[m] 的直管段的摩擦阻力 [Pa]。从表 7.3 查得。

## 2. 配件的局部阻力

当流体流经局部配件如弯头,阀类和其他连接件时,会发生流向改变和速度场重新分布等现象,因而造成能量损失。这种能量损失就是局部阻力,可以用下式表示:

$$h_d = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (7.10)$$

水管摩擦阻力计算表

表 7.3

| 动压<br>$P_e$<br>[Pa] | 水流速<br>$v$<br>[m/s] | 公 称 管 径 $D_0$ [mm] |      |      |      |      |      |      |      |      |      | L—流量, [l/s] |      |      |      |      |      |
|---------------------|---------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|
|                     |                     | 13                 | 20   | 25   | 32   | 40   | 50   | 65   | 80   | 100  | 125  | 150         | 200  | 250  | 300  | 350  | 400  |
| 20                  | L                   | 0.04               | 0.07 | 0.11 | 0.20 | 0.25 | 0.44 | 0.73 | 1.03 | 1.57 | 2.45 | 3.53        | 6.72 | 10.5 | 15.0 | 21.2 | 28.1 |
|                     | $R_1$               | 68                 | 45   | 33   | 23   | 19   | 11   | 10   | 8    | 6    | 5    | 4           | 2    | 2    | 1    | 1    | 1    |
|                     | $R_2$               | 65                 | 56   | 40   | 27   | 23   | 16   | 11   | 9    | 7    | 5    | 4           | 3    | 2    | 2    | 1    | 1    |
| 45                  | L                   | 0.06               | 0.11 | 0.17 | 0.30 | 0.40 | 0.66 | 1.03 | 1.54 | 2.35 | 3.63 | 5.29        | 10.1 | 15.3 | 22.5 | 31.9 | 39.2 |
|                     | $R_1$               | 143                | 95   | 69   | 48   | 40   | 29   | 21   | 17   | 13   | 19   | 8           | 5    | 4    | 3    | 3    | 2    |
|                     | $R_2$               | 133                | 120  | 86   | 59   | 49   | 35   | 25   | 20   | 15   | 11   | 9           | 6    | 4    | 4    | 3    | 3    |
| 80                  | L                   | 0.09               | 0.14 | 0.23 | 0.40 | 0.53 | 0.88 | 1.45 | 2.06 | 3.14 | 4.90 | 7.06        | 13.4 | 21.0 | 29.9 | 42.5 | 52.2 |
|                     | $R_1$               | 244                | 193  | 111  | 82   | 63   | 49   | 36   | 28   | 22   | 16   | 13          | 9    | 7    | 5    | 4    | 4    |
|                     | $R_2$               | 319                | 209  | 150  | 102  | 85   | 60   | 43   | 34   | 26   | 20   | 15          | 10   | 8    | 6    | 5    | 4    |
| 125                 | L                   | 0.10               | 0.18 | 0.29 | 0.50 | 0.65 | 1.10 | 1.81 | 2.57 | 3.92 | 6.13 | 8.82        | 16.8 | 26.3 | 37.4 | 53.1 | 65.3 |
|                     | $R_1$               | 371                | 248  | 180  | 125  | 104  | 75   | 54   | 43   | 33   | 25   | 20          | 13   | 10   | 8    | 7    | 6    |



| 动压<br>$P_d$<br>[Pa] | 水流速<br>$v$<br>[m/s] | 公 称 管 径 $D_g$ [mm] |      |      |      |      |      |      |      |      |      | $L$ —流量, [l/s] | $R_1, R_2$ —每米长水管的摩擦阻力 [Pa/m] |      |      |      |      |       |
|---------------------|---------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------------|-------------------------------|------|------|------|------|-------|
|                     |                     | 15                 | 20   | 25   | 32   | 40   | 50   | 65   | 80   | 100  | 125  |                |                               | 150  | 200  | 250  | 300  | 350   |
| 125                 | 0.5                 | $R_2$              | 492  | 323  | 231  | 158  | 131  | 67   | 53   | 40   | 30   | 24             | 16                            | 12   | 10   | 8    | 7    |       |
|                     |                     | $L$                | 0.12 | 0.21 | 0.34 | 0.50 | 0.79 | 1.32 | 2.18 | 3.09 | 4.70 | 7.35           | 10.6                          | 20.2 | 31.6 | 41.9 | 63.7 | 78.3  |
| 180                 | 0.6                 | $R_1$              | 525  | 351  | 255  | 176  | 147  | 109  | 77   | 61   | 47   | 37             | 28                            | 19   | 14   | 11   | 9    | 8     |
|                     |                     | $R_2$              | 702  | 460  | 330  | 225  | 187  | 132  | 95   | 70   | 57   | 43             | 34                            | 22   | 17   | 14   | 11   | 10    |
| 245                 | 0.7                 | $L$                | 0.14 | 0.25 | 0.40 | 0.70 | 0.92 | 1.54 | 2.54 | 3.80 | 5.49 | 8.53           | 12.4                          | 23.5 | 36.6 | 52.4 | 74.3 | 91.4  |
|                     |                     | $R_1$              | 705  | 471  | 343  | 237  | 198  | 142  | 103  | 82   | 63   | 48             | 38                            | 25   | 19   | 15   | 12   | 11    |
|                     |                     | $R_2$              | 948  | 622  | 446  | 304  | 233  | 179  | 129  | 102  | 78   | 59             | 46                            | 30   | 23   | 18   | 15   | 13    |
| 319                 | 0.8                 | $L$                | 0.16 | 0.28 | 0.45 | 0.80 | 1.05 | 1.76 | 2.90 | 4.12 | 6.27 | 9.90           | 14.1                          | 23.9 | 42.1 | 59.9 | 84.9 | 104.4 |
|                     |                     | $R_1$              | 911  | 609  | 445  | 303  | 256  | 183  | 133  | 105  | 81   | 61             | 49                            | 33   | 25   | 20   | 16   | 14    |
|                     |                     | $R_2$              | 1232 | 808  | 580  | 395  | 323  | 233  | 167  | 133  | 101  | 75             | 60                            | 40   | 30   | 24   | 19   | 17    |

| 动压<br>$P_d$ | 流速<br>$v$ | [Pa]                | 公称管径 $D_n$ [mm] |      |      |      |      |      |      |      |      |      | L—流量, [l/s] |      |      |      |      |     |
|-------------|-----------|---------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|-----|
|             |           |                     | 15              | 20   | 25   | 32   | 40   | 50   | 65   | 80   | 100  | 125  | 150         | 200  | 250  | 300  | 350  | 400 |
| 404         | 0.9       | L<br>$R_1$<br>$R_2$ | 0.18            | 0.32 | 0.51 | 0.90 | 1.19 | 1.98 | 3.23 | 4.63 | 7.08 | 11.0 | 15.9        | 30.2 | 47.3 | 67.4 | 95.6 | 117 |
|             |           |                     | 1142            | 764  | 555  | 384  | 323  | 230  | 167  | 134  | 102  | 77   | 61          | 41   | 31   | 25   | 20   | 18  |
|             |           |                     | 1553            | 1019 | 731  | 498  | 414  | 293  | 210  | 167  | 127  | 95   | 75          | 50   | 37   | 30   | 24   | 21  |
| 499         | 1.0       | L<br>$R_1$<br>$R_2$ | 0.19            | 0.35 | 0.57 | 1.00 | 1.32 | 2.20 | 3.63 | 5.14 | 7.84 | 12.3 | 17.6        | 33.6 | 52.6 | 74.9 | 106  | 131 |
|             |           |                     | 1400            | 936  | 681  | 471  | 394  | 282  | 205  | 164  | 125  | 95   | 75          | 50   | 38   | 31   | 25   | 22  |
|             |           |                     | 1912            | 1254 | 900  | 613  | 509  | 361  | 259  | 206  | 153  | 117  | 92          | 61   | 46   | 37   | 30   | 28  |
| 604         | 1.1       | L<br>$R_1$<br>$R_2$ | 0.21            | 0.39 | 0.63 | 1.10 | 1.45 | 2.42 | 3.99 | 5.66 | 8.52 | 13.5 | 19.4        | 37.0 | 57.9 | 82.3 | 117  | 144 |
|             |           |                     | 1685            | 1123 | 819  | 566  | 473  | 339  | 246  | 197  | 151  | 114  | 90          | 61   | 46   | 37   | 30   | 26  |
|             |           |                     | 2307            | 1513 | 1086 | 739  | 614  | 435  | 313  | 246  | 183  | 141  | 112         | 74   | 56   | 44   | 36   | 31  |
| 719         | 1.2       | L<br>$R_1$          | 0.23            | 0.42 | 0.69 | 1.20 | 1.53 | 2.64 | 4.35 | 6.17 | 9.41 | 14.7 | 21.2        | 40.3 | 63.1 | 89.8 | 127  | 157 |
|             |           | 1995                | 1334            | 970  | 671  | 561  | 402  | 292  | 233  | 179  | 135  | 107  | 72          | 54   | 44   | 35   | 31   |     |

續表 7.3

| 动压<br>$P_d$<br>[Pa] | 水流速<br>$v$<br>[m/s] | 公 称 管 径 $D_n$ [mm] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | $L$ —流量, [l/s] | $R_1, R_2$ —每米长水管的摩擦阻力, [Pa·m] |      |     |     |     |
|---------------------|---------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------------|--------------------------------|------|-----|-----|-----|
|                     |                     | 15                 | 20   | 25   | 32   | 40   | 50   | 65   | 80   | 100  | 125  | 150  |                | 200                            | 250  | 300 | 350 | 400 |
|                     | $R_2$               | 2739               | 1797 | 1289 | 878  | 729  | 517  | 371  | 295  | 224  | 168  | 132  | 88             | 66                             | 953  | 42  | 37  |     |
|                     | $L$                 | 0.25               | 0.46 | 0.74 | 1.30 | 1.71 | 2.86 | 4.71 | 6.60 | 10.2 | 15.9 | 22.9 | 43.7           | 68.4                           | 97.3 | 138 | 170 |     |
| 844                 | $R_1$               | 2331               | 1559 | 1134 | 784  | 655  | 470  | 341  | 273  | 209  | 157  | 125  | 84             | 63                             | 51   | 41  | 36  |     |
|                     | $R_2$               | 3208               | 2105 | 1510 | 1029 | 854  | 605  | 435  | 345  | 262  | 196  | 155  | 103            | 77                             | 62   | 50  | 44  |     |
|                     | $L$                 | 0.27               | 0.50 | 0.80 | 1.40 | 1.85 | 3.08 | 5.08 | 7.20 | 11.0 | 17.2 | 24.7 | 47.0           | 73.5                           | 105  | 149 | 183 |     |
| 978                 | $R_1$               | 2693               | 1801 | 1310 | 906  | 757  | 543  | 394  | 315  | 241  | 182  | 145  | 97             | 73                             | 59   | 48  | 42  |     |
|                     | $R_2$               | 3714               | 2437 | 1718 | 1191 | 989  | 701  | 503  | 400  | 304  | 227  | 180  | 119            | 90                             | 72   | 58  | 51  |     |
|                     | $L$                 | 0.29               | 0.53 | 0.86 | 1.50 | 1.98 | 3.30 | 5.44 | 7.72 | 11.8 | 18.4 | 26.5 | 50.4           | 78.9                           | 112  | 159 | 196 |     |
| 1123                | $R_1$               | 3082               | 2081 | 1499 | 1036 | 867  | 621  | 451  | 361  | 276  | 208  | 166  | 111            | 84                             | 67   | 54  | 48  |     |
|                     | $R_2$               | 4258               | 2793 | 2004 | 1365 | 1134 | 803  | 577  | 458  | 348  | 260  | 206  | 136            | 103                            | 82   | 66  | 58  |     |

| 动压<br>$P_d$<br>[Pa] | 水流速<br>$v$<br>[m/s] | 公 称 管 径 $D_0$ [mm] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | $L$ —流量, [l/s] |      |     |     |     |
|---------------------|---------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------------|------|-----|-----|-----|
|                     |                     | 15                 | 20   | 25   | 32   | 40   | 50   | 60   | 65   | 80   | 100  | 125  |                | 150  | 200 | 250 | 300 |
| 1278                | $L$                 | 0.31               | 0.57 | 0.91 | 1.50 | 2.11 | 3.52 | 5.80 | 8.23 | 12.5 | 19.6 | 28.2 | 53.8           | 84.2 | 120 | 170 | 209 |
|                     | $R_1$               | 3496               | 2338 | 1701 | 1176 | 983  | 705  | 512  | 403  | 313  | 236  | 188  | 126            | 95   | 77  | 62  | 54  |
|                     | $R_2$               | 4838               | 3174 | 2277 | 1551 | 1282 | 913  | 656  | 521  | 395  | 296  | 234  | 155            | 117  | 93  | 75  | 66  |
| 1442                | $L$                 | 0.33               | 0.60 | 0.97 | 1.70 | 2.24 | 3.74 | 6.16 | 8.74 | 13.3 | 20.8 | 30.0 | 57.1           | 89.4 | 127 | 180 | 222 |
|                     | $R_1$               | 3937               | 2533 | 1915 | 1324 | 1107 | 794  | 576  | 461  | 353  | 266  | 212  | 142            | 107  | 86  | 70  | 61  |
|                     | $R_2$               | 5456               | 3579 | 2558 | 1749 | 1453 | 1029 | 739  | 587  | 446  | 334  | 264  | 175            | 132  | 105 | 85  | 74  |
| 1617                | $L$                 | 0.35               | 0.64 | 1.03 | 1.80 | 2.37 | 3.96 | 6.53 | 9.26 | 14.1 | 22.1 | 31.8 | 60.5           | 94.7 | 135 | 191 | 235 |
|                     | $R_1$               | 4404               | 2945 | 2142 | 1481 | 1238 | 886  | 644  | 516  | 394  | 299  | 237  | 158            | 120  | 96  | 78  | 69  |
|                     | $R_2$               | 6110               | 4009 | 2876 | 1959 | 1627 | 1153 | 828  | 658  | 499  | 374  | 295  | 196            | 147  | 113 | 95  | 83  |
| 1802                | $L$                 | 0.37               | 0.67 | 1.09 | 1.90 | 2.50 | 4.18 | 6.89 | 9.77 | 14.9 | 23.3 | 33.6 | 63.8           | 99.9 | 142 | 201 | 248 |
|                     | $R_1$               | 4896               | 3274 | 2382 | 1647 | 1377 | 987  | 717  | 573  | 439  | 331  | 263  | 176            | 133  | 107 | 87  | 76  |

续表 7.3

| 动压<br>$P_d$ | 水流速<br>$v$ | 公称管径 $D_o$ [mm] |      |      |      |      |      |      |      |      |      | $L$ —流量, [l/s] |      |      |     |     | $R_1, R_2$ —每米长水管的摩擦阻力, [Pa/m] |     |
|-------------|------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------------|------|------|-----|-----|--------------------------------|-----|
|             |            | 15              | 20   | 25   | 32   | 40   | 50   | 65   | 80   | 100  | 125  | 150            | 200  | 250  | 300 | 350 |                                | 400 |
| 1996        | $R_2$      |                 | 4462 | 3202 | 2181 | 1372 | 1284 | 922  | 732  | 556  | 416  | 329            | 218  | 164  | 131 | 105 | 93                             |     |
|             |            | $L$             | 0.39 | 0.71 | 1.14 | 2.00 | 2.64 | 4.40 | 7.25 | 10.3 | 15.7 | 24.5           | 35.3 | 67.2 | 105 | 150 | 212                            | 251 |
|             | $R_1$      | 5415            | 3621 | 2634 | 1821 | 1523 | 1092 | 793  | 634  | 485  | 366  | 291            | 195  | 148  | 119 | 96  | 84                             |     |
|             | $R_2$      | 7531            | 4940 | 3545 | 2415 | 2006 | 1421 | 1021 | 811  | 615  | 461  | 364            | 241  | 182  | 145 | 117 | 103                            |     |
| 2201        | $L$        |                 | 0.41 | 0.74 | 1.20 | 2.10 | 2.77 | 4.62 | 7.61 | 10.8 | 16.5 | 25.7           | 37.0 | 70.6 | 110 | 157 | 223                            | 274 |
|             |            | $R_1$           | 5360 | 3985 | 2899 | 2004 | 1676 | 1202 | 872  | 696  | 534  | 403            | 320  | 214  | 162 | 131 | 105                            | 93  |
|             | $R_2$      | 8297            | 5449 | 3905 | 2660 | 2210 | 1666 | 1124 | 893  | 678  | 506  | 401            | 266  | 200  | 160 | 129 | 113                            |     |
|             | $L$        | 0.43            | 0.78 | 1.26 | 2.20 | 2.90 | 4.85 | 7.98 | 11.3 | 17.3 | 27.0 | 38.8           | 79.9 | 116  | 165 | 234 | 287                            |     |
| 2416        | $R_1$      | 6531            | 4367 | 3177 | 2196 | 1837 | 1317 | 956  | 765  | 585  | 441  | 351            | 235  | 178  | 143 | 115 | 102                            |     |
|             | $R_2$      | 9099            | 5969 | 4283 | 2918 | 2423 | 1717 | 1233 | 979  | 744  | 557  | 440            | 292  | 219  | 176 | 141 | 124                            |     |

$L$ —流量, [l/s]

公 称 管 径  $D_g$  [mm]

$R_1, R_2$ —每米长水管的摩擦阻力, [Pa/m]

| 动压<br>$P_d$<br>[Pa] | 水流速<br>$v$<br>[m/s] | $L$ —流量, [l/s] |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |
|---------------------|---------------------|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
|                     |                     | 15             | 20    | 25   | 32   | 40   | 50   | 65   | 80   | 100  | 125  | 150  | 200  | 250  | 300 | 350 | 400 |     |
| 2640                | 2.3                 | $L$            | 0.45  | 0.81 | 1.31 | 2.30 | 3.63 | 5.07 | 8.34 | 11.8 | 18.0 | 28.2 | 40.6 | 77.3 | 121 | 172 | 244 | 300 |
|                     |                     | $R_1$          | 7128  | 4766 | 3458 | 2397 | 2005 | 1437 | 1043 | 835  | 639  | 482  | 383  | 256  | 194 | 156 | 126 | 111 |
|                     |                     | $R_2$          | 9939  | 6520 | 4678 | 3187 | 2647 | 1875 | 1347 | 1070 | 812  | 608  | 481  | 318  | 240 | 192 | 154 | 135 |
| 2875                | 2.4                 | $L$            | 0.47  | 0.85 | 1.37 | 2.40 | 3.16 | 6.29 | 8.70 | 12.4 | 18.8 | 29.4 | 42.3 | 80.6 | 126 | 180 | 255 | 313 |
|                     |                     | $R_1$          | 7751  | 5183 | 3771 | 2607 | 2180 | 1563 | 1135 | 907  | 634  | 524  | 417  | 279  | 211 | 170 | 137 | 121 |
|                     |                     | $R_2$          | 10816 | 7096 | 5091 | 3468 | 2881 | 2041 | 1466 | 1164 | 884  | 662  | 523  | 347  | 261 | 209 | 168 | 147 |
| 3119                | 2.5                 | $L$            | 0.49  | 0.89 | 1.43 | 2.51 | 3.29 | 5.51 | 9.06 | 12.9 | 19.6 | 30.6 | 44.1 | 84.0 | 131 | 187 | 265 | 326 |
|                     |                     | $R_1$          | 8400  | 5617 | 4087 | 2825 | 2363 | 1694 | 1230 | 984  | 756  | 568  | 452  | 302  | 229 | 184 | 149 | 131 |
|                     |                     | $R_2$          | 11730 | 7695 | 5522 | 3761 | 3124 | 2214 | 1590 | 1263 | 959  | 718  | 567  | 376  | 283 | 226 | 182 | 160 |
| 3374                | 2.6                 | $L$            | 0.51  | 0.92 | 1.49 | 2.61 | 3.43 | 5.73 | 9.43 | 13.4 | 20.4 | 31.9 | 45.9 | 87.3 | 137 | 195 | 276 | 339 |
|                     |                     | $R_1$          | 9075  | 6069 | 4415 | 3052 | 2553 | 1830 | 1329 | 1063 | 813  | 614  | 488  | 327  | 247 | 192 | 161 | 141 |
|                     |                     | $R_2$          | 12681 | 8319 | 5969 | 4066 | 3377 | 2393 | 1719 | 1365 | 1036 | 776  | 613  | 406  | 306 | 245 | 195 | 173 |

续表 7.3

| 动压<br>$P_d$ |     | 公 称 管 径 $D_g$ [mm] |                |       |       |      |      |      |      |      |      |      | $R_1, R_2$ —每米长水管的摩擦阻力, [Pa/m] |      |     |     |     |     |     |
|-------------|-----|--------------------|----------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
|             |     | 15                 | 20             | 25    | 32    | 40   | 50   | 65   | 80   | 100  | 125  | 150  |                                |      | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| 3639        | 2.7 | L                  | 0.53           | 0.96  | 1.54  | 2.71 | 3.56 | 5.95 | 9.79 | 13.9 | 21.2 | 33.1 | 47.6                           | 90.7 | 142 | 202 | 287 | 362 |     |
|             |     |                    | R <sub>1</sub> | 9776  | 6538  | 4756 | 3288 | 2757 | 1972 | 1431 | 1145 | 876  | 661                            | 526  | 352 | 266 | 214 | 173 | 152 |
|             |     |                    | R <sub>2</sub> | 13669 | 8968  | 6434 | 4383 | 3641 | 2630 | 1853 | 1471 | 1117 | 836                            | 661  | 438 | 330 | 264 | 212 | 186 |
| 3913        | 2.8 | L                  | 0.54           | 0.99  | 1.60  | 2.81 | 3.69 | 6.17 | 10.2 | 14.4 | 22.0 | 34.3 | 49.4                           | 94.1 | 147 | 210 | 297 | 365 |     |
|             |     |                    | R <sub>1</sub> | 10504 | 7024  | 5110 | 3533 | 2955 | 2118 | 1538 | 1230 | 94.1 | 710                            | 565  | 378 | 286 | 230 | 186 | 164 |
|             |     |                    | R <sub>2</sub> | 14695 | 9640  | 6917 | 4712 | 3914 | 2773 | 1992 | 1582 | 1201 | 899                            | 711  | 471 | 354 | 281 | 228 | 200 |
| 4198        | 2.9 | L                  | 0.56           | 1.03  | 1.66  | 2.91 | 3.82 | 6.39 | 10.5 | 14.9 | 22.7 | 35.5 | 51.2                           | 97.4 | 153 | 217 | 303 | 378 |     |
|             |     |                    | R <sub>1</sub> | 11257 | 7528  | 5477 | 3786 | 3167 | 2270 | 1648 | 1318 | 1009 | 761                            | 605  | 405 | 307 | 247 | 199 | 175 |
|             |     |                    | R <sub>2</sub> | 15757 | 1033  | 7417 | 5052 | 4197 | 2973 | 2136 | 1696 | 1288 | 964                            | 762  | 505 | 380 | 304 | 244 | 215 |
| 4492        | 3.0 | L                  | 0.58           | 1.06  | 1.71  | 3.01 | 3.95 | 6.61 | 10.9 | 15.4 | 23.5 | 36.6 | 52.9                           | 101  | 158 | 225 | 310 | 392 |     |
|             |     |                    | R <sub>1</sub> | 12037 | 8049  | 5856 | 4049 | 3386 | 2428 | 1752 | 1409 | 1079 | 814                            | 647  | 433 | 328 | 264 | 213 | 188 |
|             |     |                    | R <sub>2</sub> | 16856 | 11058 | 7934 | 5405 | 4439 | 3181 | 2285 | 1815 | 1378 | 1031                           | 815  | 540 | 403 | 325 | 261 | 230 |

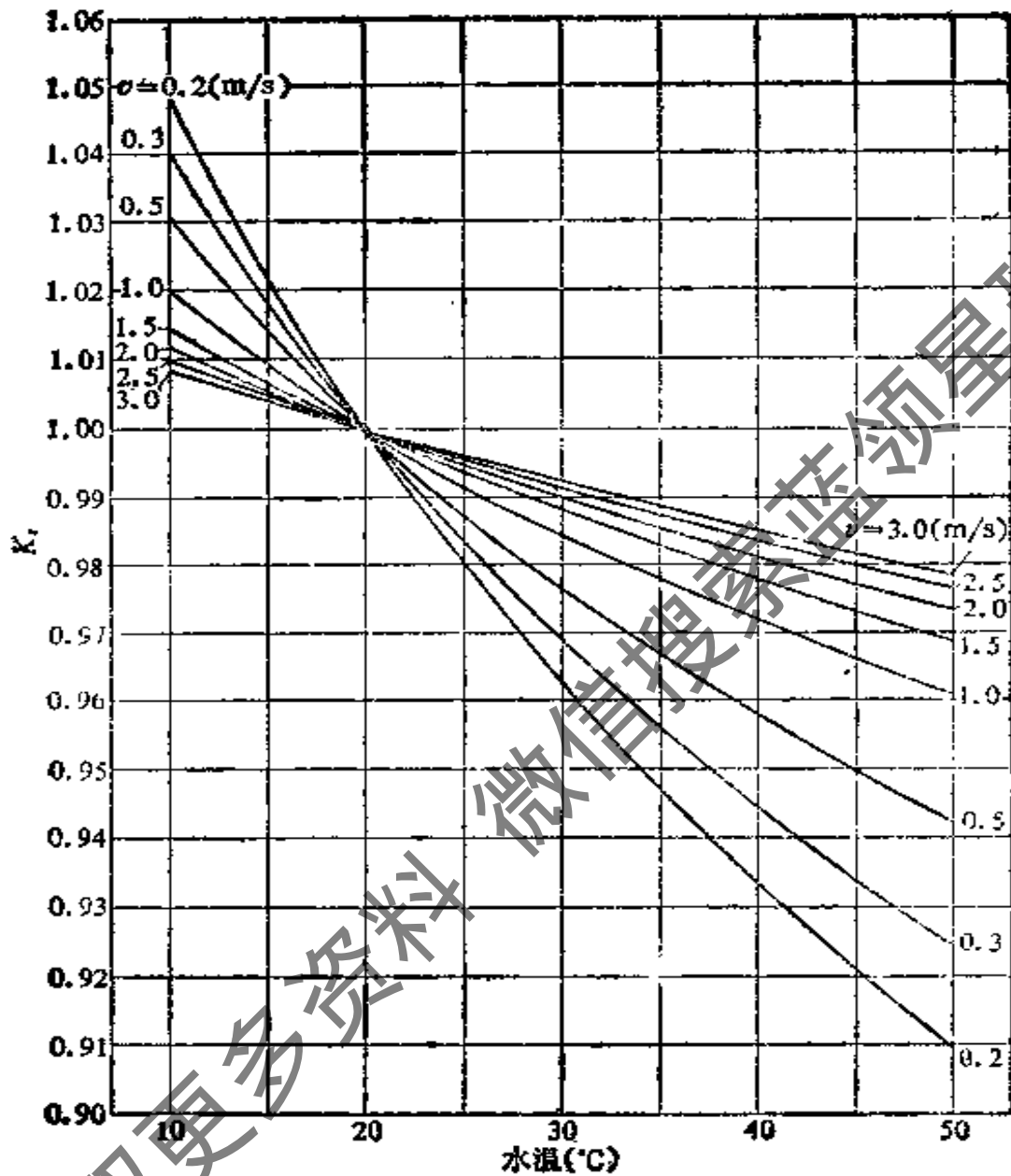


图 7.12 摩阻计算中的水温修正系数  $K_t$  ( $\varepsilon = 0.2[\text{mm}]$ )

式中  $\xi$ ——配件的局部阻力系数。

配件的局部阻力系数均由实验方法获取。与 $\lambda$ 值一样， $\xi$ 系数值也与流体的性质、流速和配件的有效通径等因素有关。常用水管配件的局部阻力系数见表 7.4。



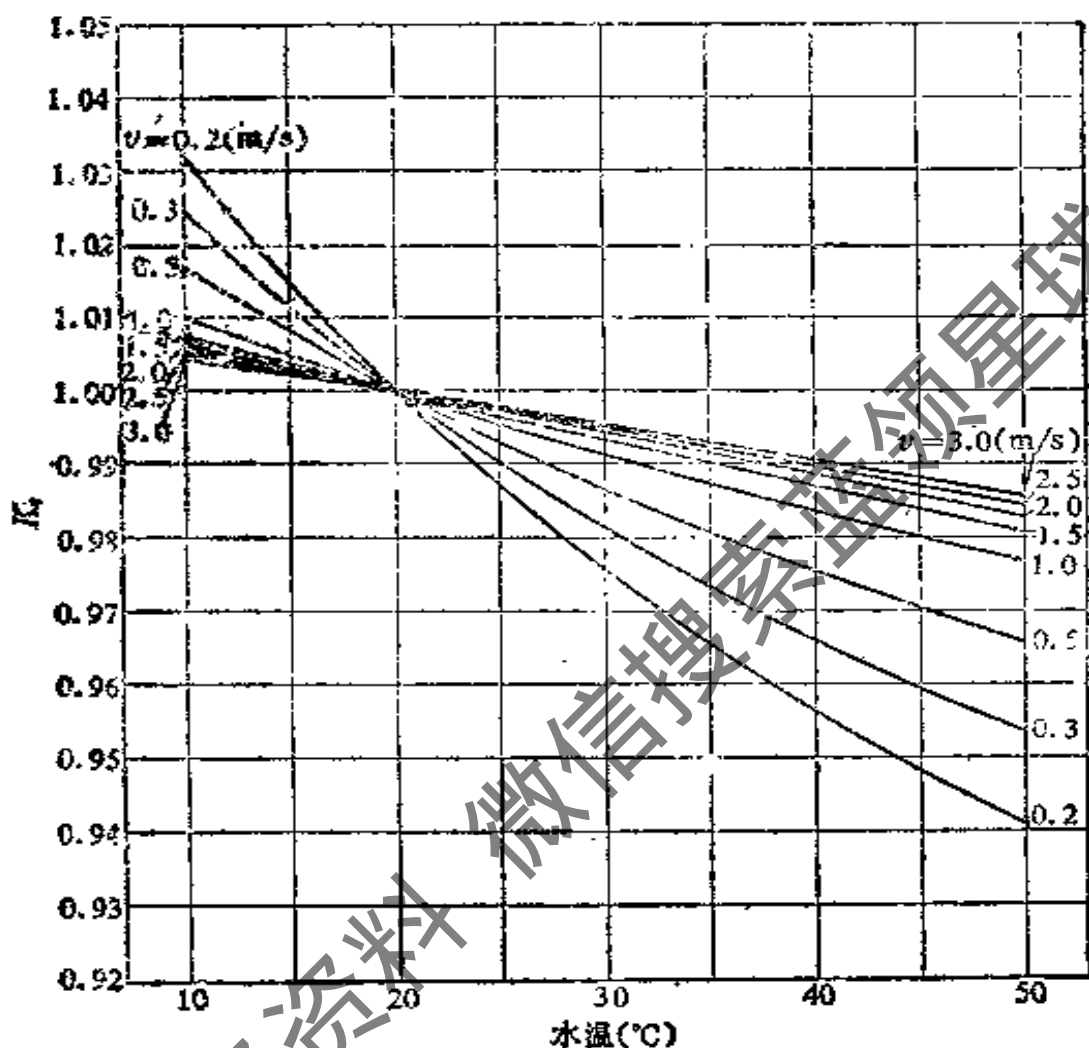


图 7.13 摩阻计算中的水温修正系数  $K_t$  ( $e=0.5[\text{mm}]$ )

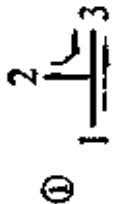
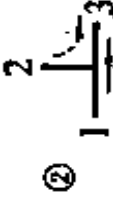
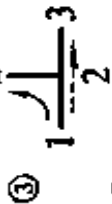
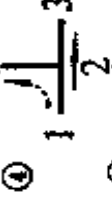
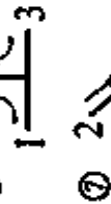


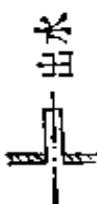

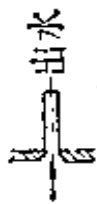
流经设备的水阻力可以直接从生产厂的产品样本中查取，此处提供的图 7.14 和表 7.5 中的资料可供设计参考。目前市售的供冷量在  $3[\text{kW}]$  ( $2500 \text{ kcal/h}$ ) 左右的风机盘管机组，其水阻力大致在  $23.5 \sim 26.5[\text{kPa}]$  ( $2.4 \sim 2.7[\text{m}]$ ) 范围。

由于  $\zeta$  值由实验数据整理所得，因此在进行配件的局部阻力计算时，必须辨明  $\zeta$  值所对应的动压值。

水管系统上喷嘴的工作压力即是其局部阻力，其中包括喷嘴出口的动压损失。冷却塔的喷雾压力可以从生产厂的产品样本中

水管系统配件的局部阻力系数  $\zeta$  值

表 7.4

| 配件名称  | $\zeta$ | 配件名称          | $\zeta$ | 说明  |  |
|---|---------|---------------|---------|---|--|
| 渐缩变径管(对应小断面 $\phi$ )  | 0.1     | 合流三通—旁支①, 2→3 | 1.6     |        |  |
| 渐扩变径管(对应小断面 $\phi$ )  | 0.3     | 合流三通—直通②, 1→3 | 0.5     |   |  |
| <br><br> | 0.5     | 分流三通—旁支③, 1→2 | 1.5     |   |  |
|   | 0.75    | 分流三通—直通④, 1→3 | 0.1     |   |  |
|   | 0.1     | 合流三通⑤, 1→2    | 3.0     |   |  |
| 有网底阀  | 1.0     | 分流三通⑥, 1→2    | 1.5     |   | <p>1. 局部阻力系数均对应图中总管中总管的动压值;</p> <p>2. 三通配件的局部阻力系数<math>\zeta</math>与流流经三通配件时流量、面积变化率有关,需要仔细计算水管系统阻力时应查阅相关专业手册。</p> |
|   | 7.0     | 合流三通⑦, 2→3    | 0.5     |   |  |
| 无网滤水阀   | 3.0     | 分流三通⑧, 3→2    | 1.0     |   |  |

续表 7.3

| 配件名称       | 公称直径 $D_n$ [mm] |      |     |     |     |           |
|------------|-----------------|------|-----|-----|-----|-----------|
|            | 15              | 20   | 25  | 32  | 40  | $\geq 50$ |
| 45° 弯头     | 1.0             | 1.0  | 0.8 | 0.8 | 0.5 | 0.5       |
| 90° 弯头     | 2.0             | 2.0  | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0       |
| 90° 煨弯及乙字管 | 1.5             | 1.5  | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5       |
| 截止阀        | 16.0            | 10.0 | 9.0 | 9.0 | 8.0 | 7.0       |
| 闸阀         | 1.5             | 0.5  | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5       |
| 斜杆式截止阀     | 3.0             | 3.0  | 3.0 | 2.5 | 2.5 | 2.0       |
| 旋塞         | 4.0             | 2.0  | 2.0 | 2.0 | —   | —         |
| 升降式回阀      | 16.0            | 10.0 | 9.0 | 9.0 | 8.0 | 7.0       |
| 旋启式回阀      | 5.1             | 4.5  | 4.1 | 4.1 | 3.9 | 3.4       |

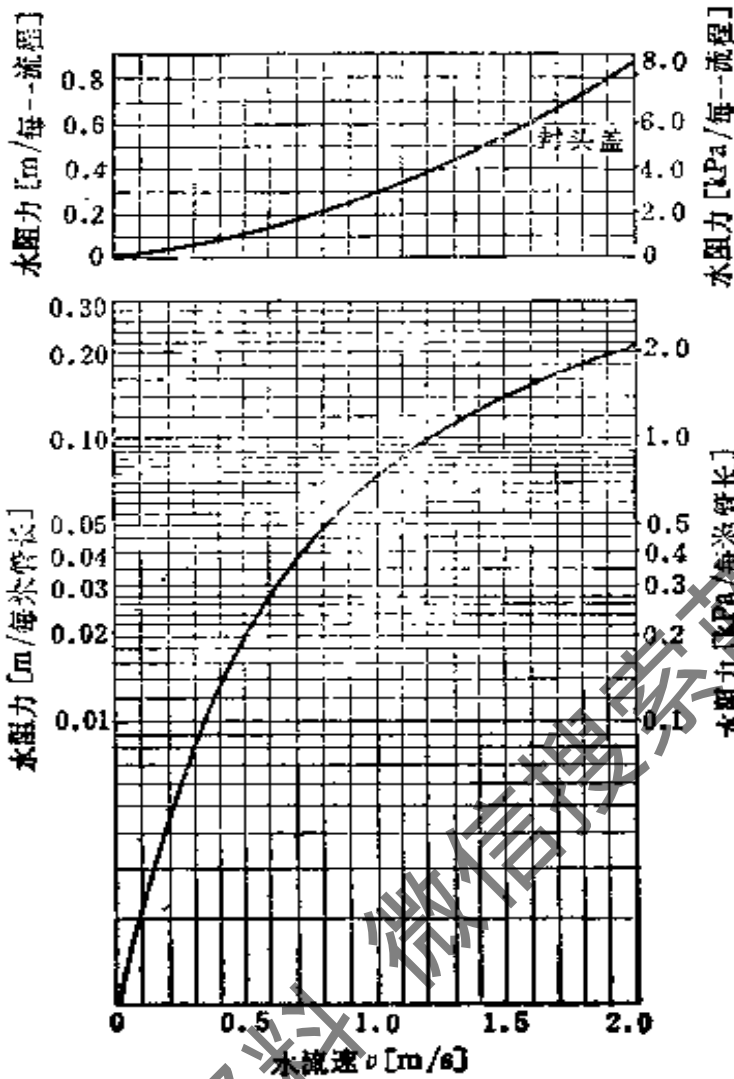


图 7.14 卧式蒸发器与冷凝器的水阻力

各种型号表冷器的水阻力计算公式(单位[kPa]) 续表 7.5

| 型 号       | 排数 | 计算公式            | 型号    | 排数 | 计算公式           |
|-----------|----|-----------------|-------|----|----------------|
| B(或 UII)  | 1  | $10.8v^{1.854}$ | JW    | 8  | $20.2v^{1.93}$ |
| B(或 UII)  | 6  | $64.7v^{1.854}$ | SXL-B | 4  | $15.5v^{1.97}$ |
| GI(或 GLK) | 6  | $64.7v^{1.854}$ | KL-1  | 4  | $18.0v^{2.1}$  |
| JW        | 4  | $12.6v^{1.93}$  | KL-2  | 4  | $22.0v^{1.89}$ |
| JW        | 6  | $14.5v^{1.93}$  | KL-3  | 4  | $27.3v^{1.81}$ |

查到一般情况下可以按49[kPa]计算。

【例 7.2】求水流过 90°弯头的局部阻力，已知管径为 50[mm]，管内水流速为 1.5[m/s]。

【解】本题应用公式 7.10 进行计算。

首先，从表 7.4 查得 90°弯头的局部阻力系数  $\zeta = 1.0$ ；再从表 7.3 最左边一栏查得水流速为 1.5[m/s]时的动压  $P_d = 1123[\text{Pa}]$

这样，90°弯头的局部阻力

$$h_f = \zeta P_d = 1.0 \times 1123 = 1123[\text{Pa}] \quad (\text{即} 115[\text{mmHg}])$$

### 7.2.3 系统的水力计算原理和水压分布图

#### 1. 系统的水力计算原理

从直管段的摩擦阻力计算式 7.7 和配件的局部阻力计算式 7.10，可以得出任意管段的总阻力计算式如下：

$$\begin{aligned} H &= h_f + \sum h_d = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} + (\sum \zeta) \frac{\rho v^2}{2} \\ &= \left[ \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{\rho}{2} \right] v^2 \end{aligned}$$

因为  $v = \frac{L}{F}$ ，此处  $L$  为水的体积流量，[m<sup>3</sup>/s]； $F$  为管子的

截面积，[m<sup>2</sup>]，所以

$$H = \left[ \frac{\rho}{2F} \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \right] L^2$$

设

$$\frac{\rho}{2F} \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) = K,$$

则

$$H = K L^2 \quad (7.11)$$

式 7.11 中的  $K$  称为管路特性系数。当管段的长度、管径和配件阻力为已知时， $K$  即为定值。于是从公式 7.11 可知，流体流经已知管路时所产生的阻力是与流量的平方成正比的\*。如果表示在直角坐标图上，就是一条通过原点的抛物线，见图 7.15 所示。如果增加阻力，那末  $K$  值增大 ( $K \rightarrow K'$ )，抛物线将变陡些，如果减少阻力，那末  $K$  值也减小，抛物线变平坦些。

\* 这里近似地认为摩擦阻力系数不受流速的影响。

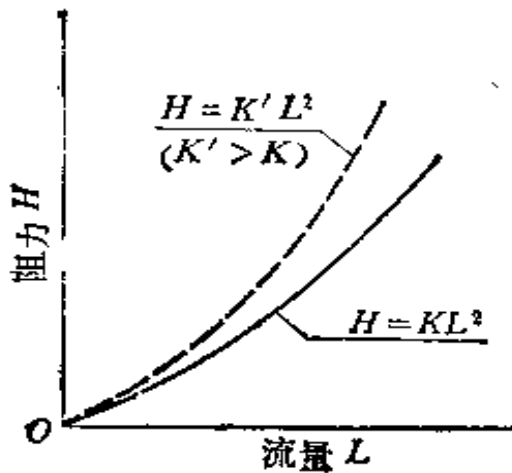


图 7.15 管路的阻力特性曲线

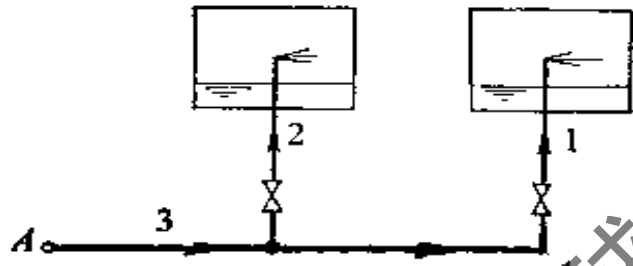


图7.16 管路的串联和并联图式

在配置水管系统时,各管段可互为并联或串联。由图 7.16 所示,管段 1 和管段 2 互为并联,它们又各与管段 3 串联。这样在 A 点为输送流量  $L$ ,到支管 1、2 的负荷点上需要具备的压力  $P_A$  和贮备的能量  $E_A$  可如下计算:

$$E_A = L_1 \cdot H_1 + L_2 \cdot H_2 + L_3 \cdot H_3$$

式中,  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$  分别为管段 1、2、3 的阻力。因为  $L_1 + L_2 = L_3 = L_A$ , 又并联管段的阻力必须相等  $H_1 = H_2$ , 所以上式可以改写为

$$E_A = (L_1 + L_2)(H_1 + H_3)$$

也就是

$$E_A = L_A P_A \tag{7.12}$$

其中

$$P_A = H_1 + H_3 = H_2 + H_3 \tag{7.13}$$

上式说明,管段内 A 处必须具有的流量  $L_A = L_1 + L_2$ , 即等于并联支管的流量之和; 同时必须具备能克服串联管段阻力 ( $H_1 + H_3$ ) 或 ( $H_2 + H_3$ ) 的压头  $P_A$ 。

根据以上推理,当进行水系统的设计时,水泵必需的流量是系统中各并联支管的流量之和;必需的压头(扬程)应满足克服最不利(即阻力最大)串联管段的阻力需要。

## 2. 系统的水压分布图

在选择设备和管配件时,对它们各自在系统的水静压强作用

下和运行时的承压状况分析是十分重要的。

从静止流体压强分布规律可以知道,当系统内充满水之后,构成系统的各个部件、设备均受到水静压强  $P$  的作用,而且  $P = \rho gh$  [Pa], 这说明它们所受到的水静压强的大小是与所在位置的水深  $h$  [m] 成直线变化的,在水深愈深的地方压强愈大。按此规律,就可以对图 7.17 所示闭式系统图作出水静压强分布线,如图中实线所示。任何水平管段上的设备和管配件所承受的水静压强都是相等的,图中上部水平管段受到的水静压强  $P_1 = \rho gh_1$ , 底部水平管段受到的水静压强  $P_2 = \rho gh_2$ , 那末立管上的水静压强就在  $\rho gh_1$  和  $\rho gh_2$  之间变化了,图上表示为  $ab$  斜线。从以上分析可知,当系统未运行时,任何水系统其底部的设备和管配件承受着最大的水静压强。举例,某水系统,其底部水平管与膨胀水箱水面高差有

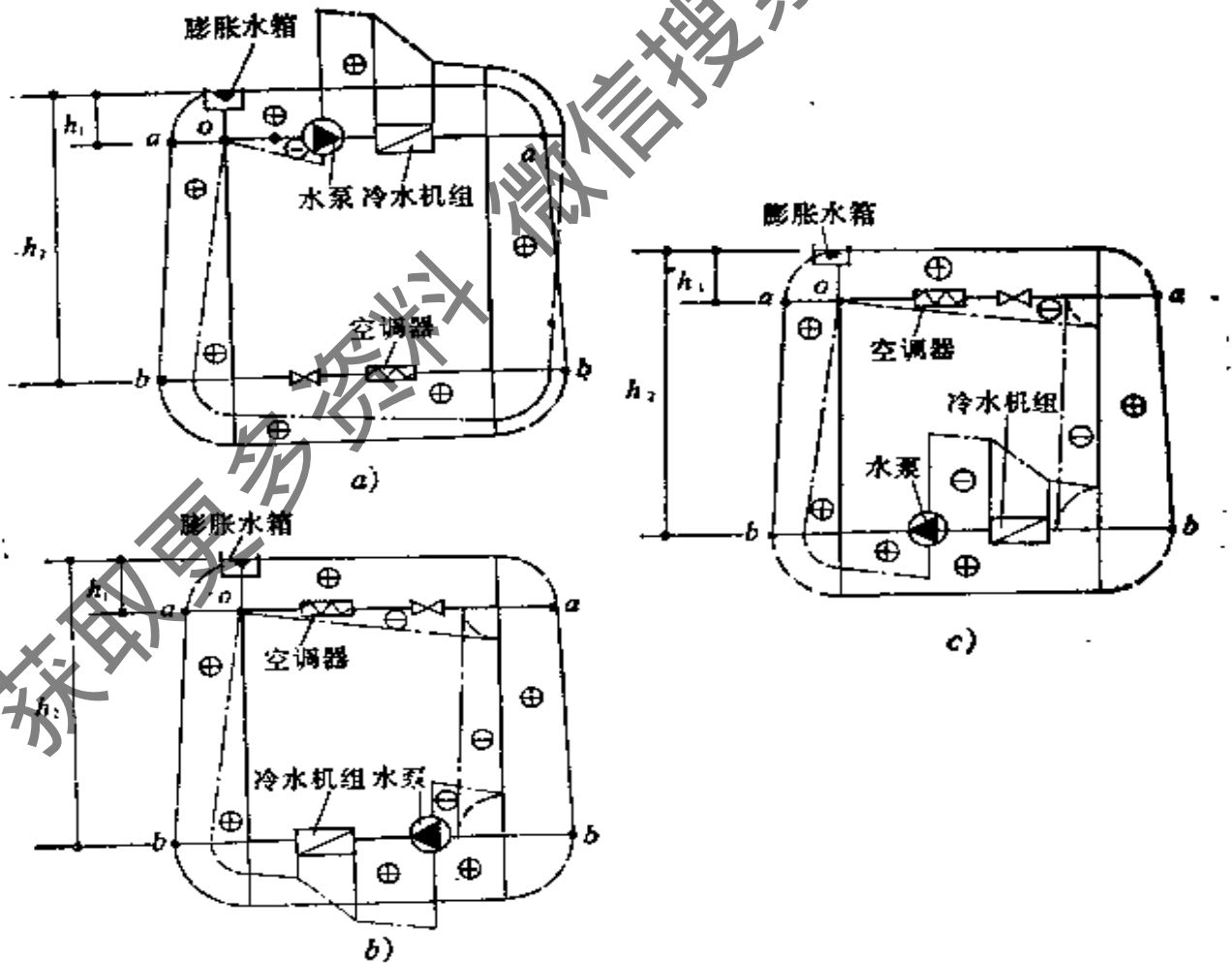


图 7.17 闭式系统的压力分布图

50[m],那末水平管上受到的水静压强就有 490[kPa]。

待系统运行时,由于管路与膨胀水箱的连接点是恒压点(即水泵运行和不运行时该处的水静压强不变),当把管线作为作压力分布图的基准线时,由水泵压头(扬程)所造成的静压强分布线就必定通过图示  $o$  点。此外,由于管路的摩擦阻力和局部阻力的关系,沿管线的压强逐渐减少,其变化状况大致如图中点划线所示。水泵的压头(即吸入端与压出端的压差)就是整个管路的总阻力值。这样,水泵运行时的静压力分布线就是实线和点划线座标值的叠加了(合成的压力分布线在图中没有表示出来)。

通过这样的技术分析,就可以清楚地知道水系统上各处的承压状况、对正确选用设备和管配件以及对运行调试很有指导意义。图 7.17 上表示了三种图式,说明由于水泵和冷水机组在系统上的位置不同以及它的相互之间的位置变更,会造成管路上静压强分布线有很大不同,可供具体工程分析时参考。

#### 7.2.4 水泵选择及其应用

##### 1. 空调系统中常用的水泵型式

水泵型式的选择与水管系统的特点、安装条件、运行调节要求和经济性等有关。就空调系统而言,使用比转数  $n_s$  在 30~150 的离心水泵最为合适,因为它在流量和压头的变化特性上容易满足空调系统的使用需要。在常用的离心水泵中,根据对流量和压头的不同要求,可以分别选用单级泵或多级泵。除此,离心水泵还有单吸和双吸之分,在相同流量和压头的运行条件下,从吸水性能、消除轴向不平衡力和运行效率方面比较,双吸泵均优于单吸泵,在流量较大时更明显;然而,双吸泵结构复杂,且一次投资较大。

空调工程中常用的高效节能型离心水泵见表 7.5 所列。

##### 2. 水泵的性能曲线

性能曲线是液体在泵内运动规律的外部表现形式,它反映着一定转速下水泵的流量  $L$ 、压头  $P$ 、功率  $N$  及效率  $\eta$  之间的关系。

- 关于比转数,见本节第 5 点。



| 结构形式      | 系列   | 流量范围      |                     | 扬程范围     |          | 取代的系列 |
|-----------|------|-----------|---------------------|----------|----------|-------|
|           |      | [l/s]     | [m <sup>3</sup> /h] | [kPa]    | [m]      |       |
| 单级、单吸、悬臂式 | IS   | 1.75~111  | 6.3~400             | 49~1225  | 5~125    | BA    |
| 单级、双吸、中开式 | S    | 38.9~561  | 140~2020            | 98~931   | 10~95    | SH    |
| 单吸、多级、分段式 | TSWA | 4.17~53.1 | 15~191              | 165~2865 | 16.8~292 | TSW   |

每一种型号的水泵,制造厂都通过性能试验给出如图 7.18 所示的三条基本性能曲线:  $L-P$  曲线、 $L-N$  曲线和  $L-\eta$  曲线。

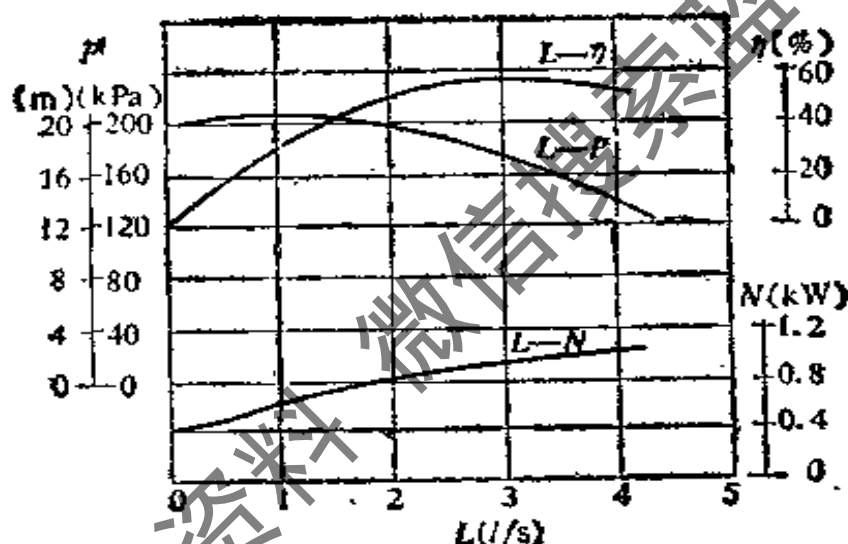


图 7.18 单级离心水泵的性能曲线

各种型号水泵的  $L-P$  曲线随水泵压头(扬程)和比转数而不同,一般有三种类型:(1)平坦型;(2)陡降型;(3)驼峰型(如图 7.19 所示)。具有平坦型  $L-P$  曲线的水泵,当流量变化很大时压头变化较小;具有陡降型  $L-P$  曲线的水泵,当流量稍有变化时压头就有较大变化。具有以上两种性能的水泵可以分别应用于不同调节要求的水系统中。至于具有驼峰型  $L-P$  曲线的水泵,当流

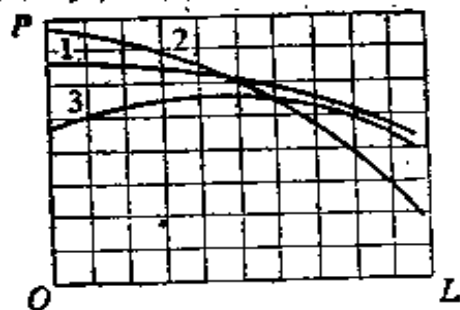


图 7.19 三种不同类型的  $L-P$  曲线

量从零逐渐增加时压头相应上升；当流量达到某一数值时压头会出现最大值；当流量再增加时压头反而逐渐减小，因此  $L-P$  曲线形成驼峰状。当水泵的工作参数介于驼峰曲线范围时，系统的流量就可能出现忽大忽小的不稳定情况，使用时应注意避免。

各种系列水泵都有如图 7.20 所示的性能曲线图，这对全面了解该系列产品的适用范围很有帮助（编著者注：图 7.20 复制于产品样本，坐标的单位系用米制单位表示）。

### 3. 水泵选择

选择水泵所依据的流量  $L$  和压头（或扬程） $P$  如下确定：

$$L = (1.1 \text{ 或 } 1.2) L_{\max} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \text{ 或 } [\text{m}^3/\text{h}] \quad (7.14)$$

式中  $L_{\max}$ ——设计的最大流量， $[\text{m}^3/\text{s}]$  或  $[\text{m}^3/\text{h}]$ ；

1.1 或 1.2——附加系数，当水泵单台工作时取 1.1；两台并联工作时取 1.2。

$$P = (1.1 \sim 1.2) H_{\max}, [\text{kPa}] \quad (7.15)$$

式中  $H_{\max}$ ——管网最不利环路总阻力计算值， $[\text{kPa}]$ ；

1.1~1.2——附加系数。

已知  $L$ 、 $P$  值后，就可以按水泵特性曲线选择水泵型号，并从样本查知其效率、功率和配套电机型号等。当需要自行选配电机时，其功率的确定分法可参见下节。

【例 7.3】选择水泵型号。已知水系统的最大设计流量为  $6[\text{l/s}]$  ( $21.6[\text{m}^3/\text{h}]$ )，最不利环路总阻力为  $147[\text{kPa}]$  ( $15[\text{mH}_2\text{O}]$ )。

【解】用公式 7.14 和公式 7.15 计算水泵必需具有的流量和压头（扬程）。流量附加系数取 1.1；压头（扬程）附加系数取 1.15。这样，

$$L = 1.1 L_{\max} = 1.1 \times 6 = 4.6[\text{l/s}], \quad (\text{即 } 23.76[\text{m}^3/\text{h}])$$

$$P = 1.15 H_{\max} = 1.15 \times 147 = 169[\text{kPa}], \quad (\text{即 } 16.6[\text{mH}_2\text{O}])$$

从图 7.20 表示的 IS 系列离心水泵性能曲线图，根据上述  $L$  和  $P$  的计算值，可以知道有两种型号是可以满足要求的，即 IS 65-50-125 型和 IS 80-50-250 型。前者转速  $2900[\text{r}/\text{min}]$ ，后者转速  $1450(\text{r}/\text{min})$ 。根据这样初步选择，再查 IS 系列水泵样本，即可知道各自的效率和配用电机型号、功率等。

### 4. 水泵的轴功率和配用电机选择

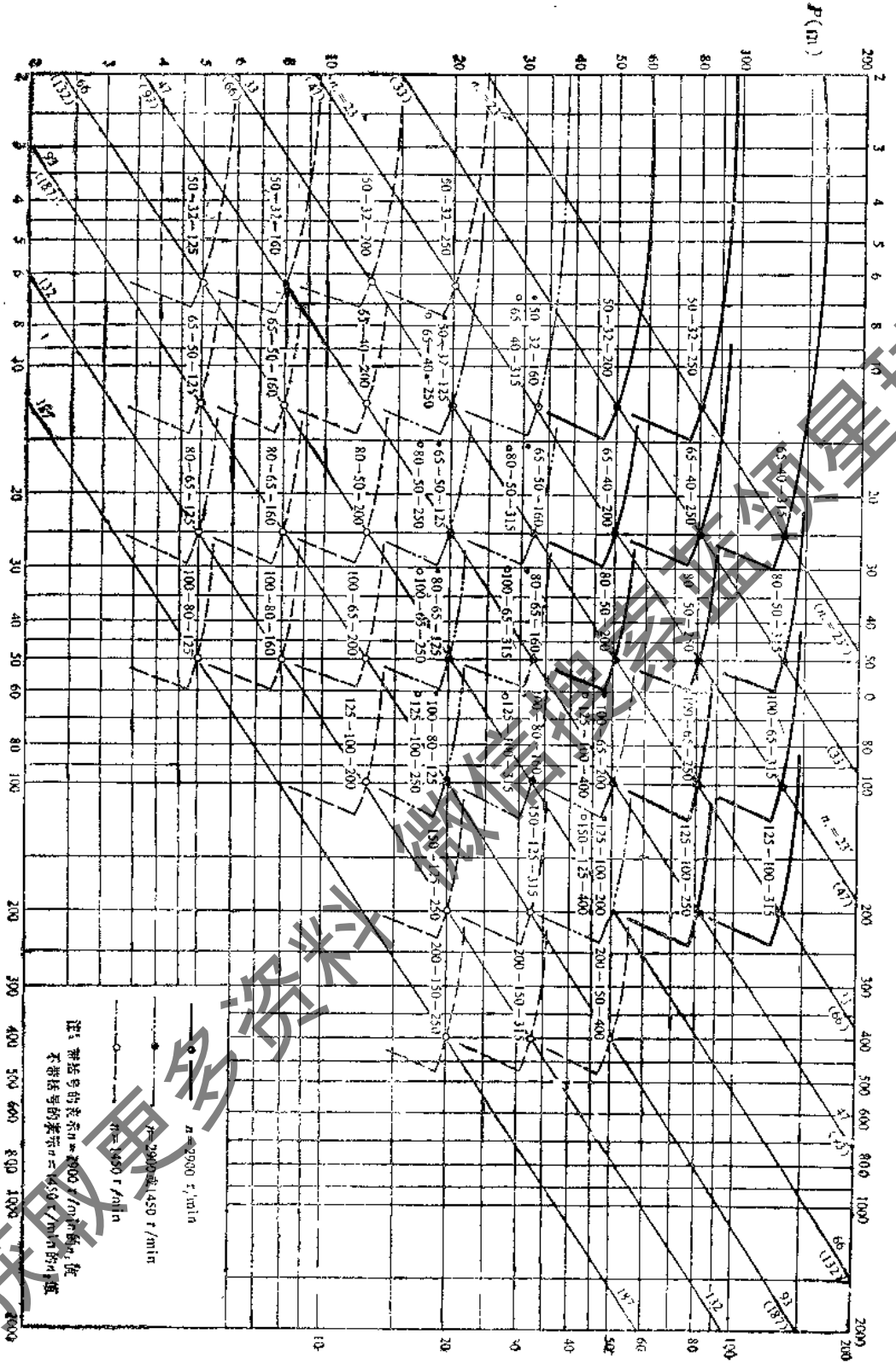


图7.20 IS系列离心水泵性能曲线图

注: 带括号的表示  $n=2900$  r/min 的曲线,  
不带括号的表示  $n=1450$  r/min 的曲线

单位:  $m^3/h$

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

水泵所需的轴功率  $N_s$  用下式计算：

$$N_s = \frac{LP}{\eta} \text{ [kW]} \quad (7.16)$$

式中  $L$ ——水泵流量, [m<sup>3</sup>/s];

$\eta$ ——水泵在工作点的总效率。

一般情况下, 电机的额定功率  $N_d$  可以根据水泵轴功率  $N_s$  再增加下列富裕量来确定。

$$N_d = K_A N_s \text{ [kW]} \quad (7.17)$$

式中  $K_A$ ——电机容量安全系数, 根据水泵轴功率从表 7.6 选用。

电机容量安全系数  $K_A$

表 7.6

| 水泵轴功率<br>[kW] | <1   | 1~2           | 2~5           | 5~10          | 10~25         | 25~60         | 60~100        | >100          |
|---------------|------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $K_A$         | 1.70 | 1.70~<br>1.50 | 1.50~<br>1.30 | 1.30~<br>1.25 | 1.25~<br>1.15 | 1.15~<br>1.10 | 1.10~<br>1.08 | 1.08~<br>1.05 |

应该注意的是, 在选择并联水泵的电机容量时, 应考虑到单台运行时超流量的影响, 而水泵的功率是随水量增加而增加的, 因此电机容量应按单台运行时所需的功率配置。

由于在实际运行的空调工程中, 水泵的功耗较大(在一般情况下, 水泵与电动式制冷机的功耗比大致为 1:3), 所以必须重视运行期, 即在非峰值空调负荷时水泵的运行工作点的分析研究, 并应使其尽量处于最高效率区工作。

### 5. 泵的比转数

相同型号的泵必定是相似的。对于离心水泵, 这种相似性主要表现在叶轮的几何相似和运动相似。表示相似的特征值是比转数, 用  $n_s$  表示。

我国计算水泵比转数的公式是:(对于单吸单级式)

$$n_s = 20.24 n \frac{L^{0.15}}{P^{0.75}}$$

(用米制单位表示时,  $n_s = 3.65 n \frac{L^{0.5}}{P^{0.75}}$ )

式中  $L$ ——水泵流量,  $[\text{m}^3/\text{s}]$ , 当水泵型式为双吸时, 以  $\frac{L}{2}$  计;

$P$ ——水泵压头(扬程),  $[\text{kPa}]$ (用米制单位表示时, 单位为  $[\text{mH}_2\text{O}]$ ), 对于多级泵, 以  $\frac{P}{i}$  代入,  $i$  为级数;

$n$ ——水泵转速,  $[\text{r}/\text{min}]$ 。

从公式 7.18 可以看出, 比转数  $n_s$  是表示水泵的工作参数  $L$ 、 $P$  和  $n$  之间关系的一个综合特性数据。也就是说, 当水泵处在最高效率状态下运行时, 如果通过的流量是  $L = 0.075 [\text{m}^3/\text{s}]$ , 产生的压头(扬程)是  $P = 9.807 [\text{kPa}]$  (或者  $1 [\text{mH}_2\text{O}]$ ), 这时, 水泵的比转数在数值上等于其自身的转速, 即  $n_s = n$ 。

比转数  $n_s$  是有单位的, 但通常都不写出来。

在进行工程设计时, 可以根据计算的  $n_s$  值初步选定泵的类型。表 7.7 中列出了离心水泵的几何形状及其性能与比转数的关系。

## 6. 水泵的变速计算关系

水泵的性能参数是针对某一定转速  $n_0$  而言的。当实际运行转速  $n$  与  $n_0$  不同时, 可用相似律求出其新的性能参数。在工程应用中, 相似律被简化为:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{n}{n_0}$$

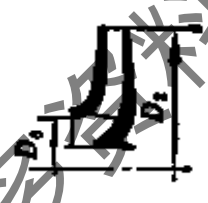

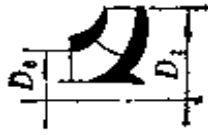

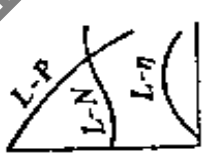
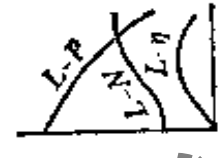
$$\frac{P}{P_0} = \left( \frac{n}{n_0} \right)^2$$

$$\frac{N}{N_0} = \left( \frac{n}{n_0} \right)^3$$

式中  $L$ 、 $P$ 、 $N$ ——分别为当水泵转速为  $n$  时它的流量  $[\text{m}^3/\text{s}]$ 、

离心水泵的叶轮形状及其性能与比转数的关系

表 7.7

| 类别                    | 低比转数  | 中比转数  | 高比转数  |
|-----------------------|---|---|---|
| 比转数 $n_s$             | $30 < n_s < 80$   | $80 < n_s < 150$  | $150 < n_s < 300$   |
| 叶轮形状                  |    |   |    |
| 尺寸比 $\frac{D_2}{D_0}$ | $\approx 3$   | $\approx 2.3$   | $\approx 1.8 \sim 1.4$  |
| 叶片形状                  | 圆柱形叶片   | 入口处扭曲<br>出口处圆柱形   | 扭曲叶片  |
| 性能曲线形状                |  |  |  |

压头[kPa]和功率[kW];

$L_0, P_0, N_0$ ——分别为当水泵转速为 $n_0$ 时它的流量[m<sup>3</sup>/s]、压头[kPa]和功率[kW]。

以上三个公式可写成下列更实用的综合公式:

$$\frac{L}{L_0} = \sqrt{\frac{P}{P_0}} = \sqrt[3]{\frac{N}{N_0}} = \frac{n}{n_0} \quad (7.19)$$

这个综合式的重要性在于, 这些关系式必须同时成立。这就指出, 当用增加转速来提高流量的同时, 不要忘记, 电机的功率要同时增加, 而且它的增加倍数要比流量增加的倍数大得多。

### 7. 水泵的工作点

从公式 7.18 可知, 当水泵转速选定时, 对于一定类型的水泵, 其流量和压头是存在一定关系的, 在图 7.21 上表示为  $L-P$  性能曲线。当该水泵被装置在管路系统中工作时, 由于水泵工作时所产生的流量和压头必须同时满足管路系统特性的要求, 因此在  $L-P$  图上, 只有水泵  $L-P$  性能曲线与管路特性曲线的交点的参数才能满足上述要求, 该交点被称为水泵的工作点, 如图 7.21 中  $A, A'$  点所示。 $A$  为该水泵在阻力特性系数为  $K$  的管路中运行时的工作点;  $A'$  为该水泵在阻力特性系数为  $K'$  (而  $K' > K$ ) 的管路中运行时的工作点。这说明当水泵在系统中运行时, 如果管网的阻力因

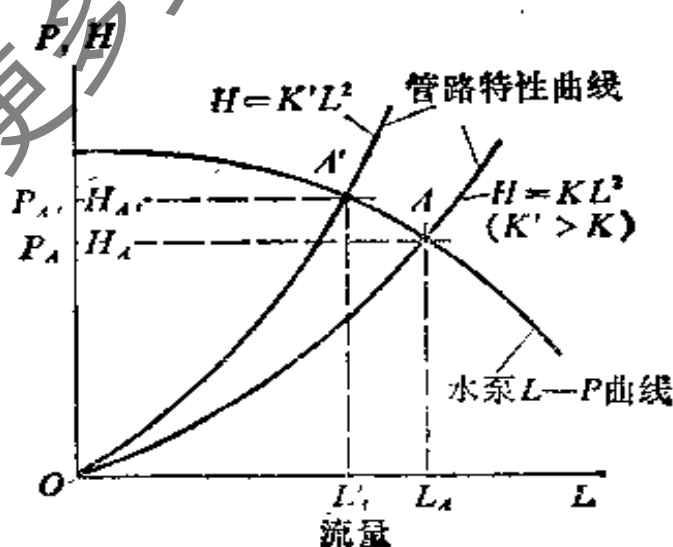


图 7.21 闭式系统中水泵的运行工作点



某种原因增加，那末工作点将会变化，同时使系统的流量也减小。

如果水泵运行在开式系统中，那末管路特性曲线不从  $L-P$  坐标图的原点  $O$  开始，而应该从  $O'$  点开始见图 7.22 所示。这是因为在这种情况下系统中的水不仅要具备克服流动阻力所必要的压头，而且要具备提升到  $z$  高度所必须压头  $\rho g z$  以及克服上、下容器的压差  $P_2 - P_1$  (这里  $P_2 > P_1$ ) 所必需的压头。当系统需要  $L_A$  流量时，要求的水泵工作点就是  $A$  点。这就是说，被认为合适的水泵，它在某转速下的  $L-P$  曲线必须通过  $A$  点。如果水泵连接的上、下容器都是敞开式的，不存在压差，即  $P_2 - P_1 = 0$ ，那末水泵的工作点就必须是  $A'$  点，原先选定的水泵就不能满足需要了。

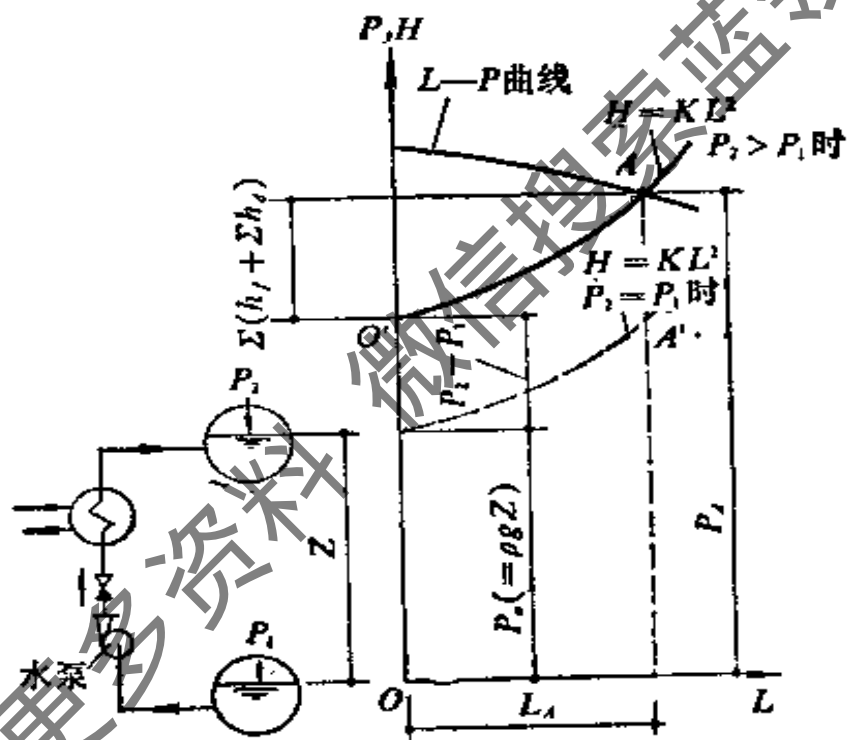


图 7.22 开式系统中水泵的运行工作点

(1) 当管路系统中两台同类型水泵并联工作时

两台同类型水泵并联工作时，其合成的性能特征(压头)不变、流量加倍，见图 7.23 中  $L-P_{(I+II)}$  曲线所示。它与管路特性曲线的交点 1 即为并联水泵的工作点，此时，每台水泵的工作参数由 2 点表示，它们的工作压头(扬程)即并联水泵的工作压头(扬程)， $P_2 = P_1 = P_{(I+II)}$  工作流量是系统流量的一半， $L_2 = L_1$

$$= \frac{1}{2} L_{(I+II)}$$

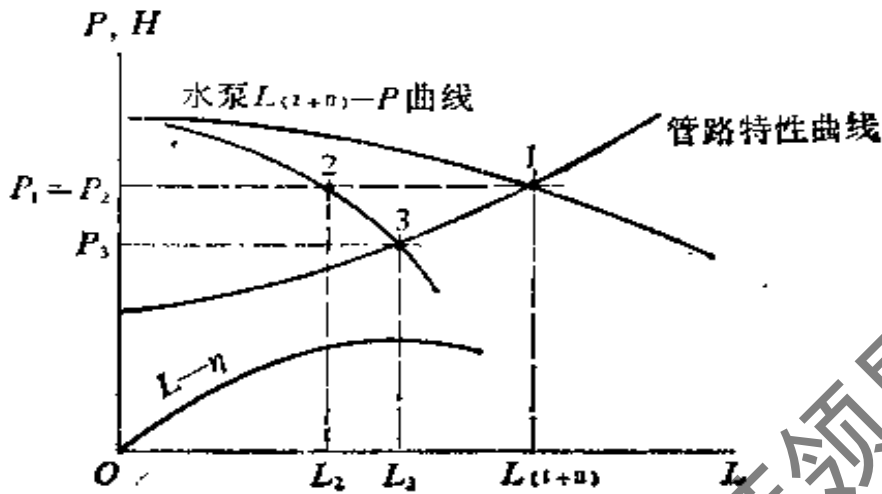


图 7.23 两合同类型水泵并联工作时

当两台并联安装的水泵只开一台时，其工作点变为 3 点。此时， $L_3 > L_2$ ，但  $L_3 < L_{(I+II)}$ 。这说明水泵并联工作时，每一台水泵工作流量降低了。这是因为水泵并联工作后，系统内水的流量增加，因而水阻力加大，这导致水泵必须具备高压头，使其工作流量减低。并联工作的台数愈多，工作流量的降低也愈多。从节能运行考虑，一般并联工作的水泵台数不要大于三台。

#### (2) 当管路系统中两合同类型水泵串联工作时

两台同类型水泵串联工作时，其合成的性能特征是流量不变，压头加倍，见图 7.24 中  $L-P_{(I+II)}$  曲线所示。它与管路特性曲线的交点 1 即为串联水泵的工作点，此时，每台水泵的工作参数由 2 点表示，它们的工作流量即串联水泵的工作流量  $L_2 = L_1 = L_{(I+II)}$ ，工作压头(扬程)是串联工作时的一半， $P_2 = \frac{1}{2} P_{(I+II)}$ 。

当两台串联安装的水泵只开一台时，其工作点变为 3 点。此时， $P_3 > P_2$ ，但  $P_3 < P_{(I+II)}$ 。这说明水泵串联工作时，每一台水泵的工作流量有些增加，但同时压头降低了。其降低的程度也随串联台数的增加而加骤，所以一般情况下不希望采用串联方式，而可以选用多级泵。

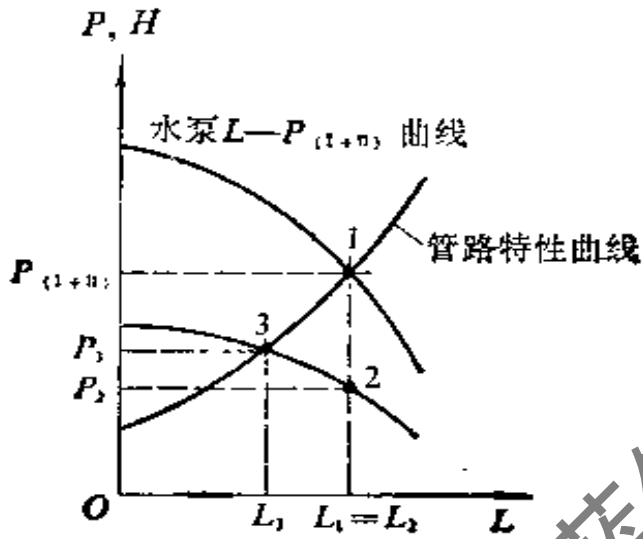


图 7.24 两台同类型水泵串联工作时

值得注意的是，联合工作的水泵的类型以相同型号规格为好，如果采用不同特性的水泵联合工作，那末，必须仔细分析联合工作时各水泵的工作点，以利其各自发挥充分作用。

### 7.3 空调水管系统的布置方法

#### 7.3.1 表冷器的配管布置(见图 7.25 和图 7.26)

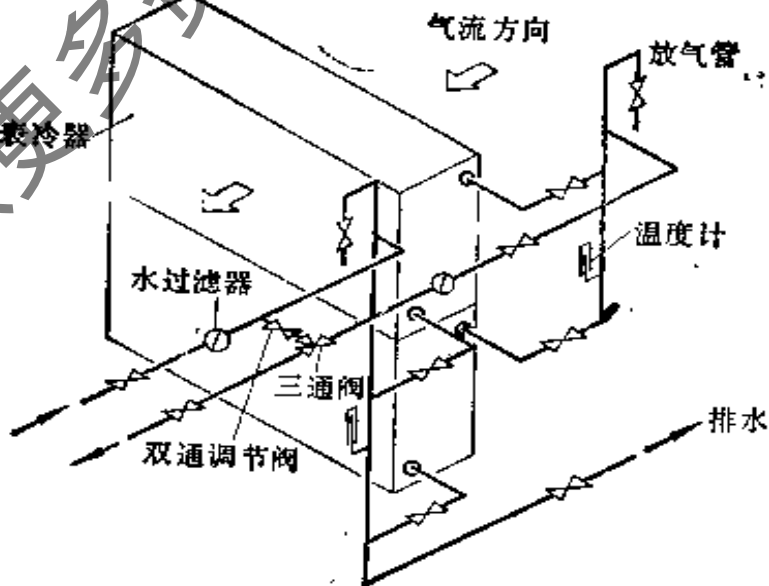


图 7.25 表冷器的配管布置

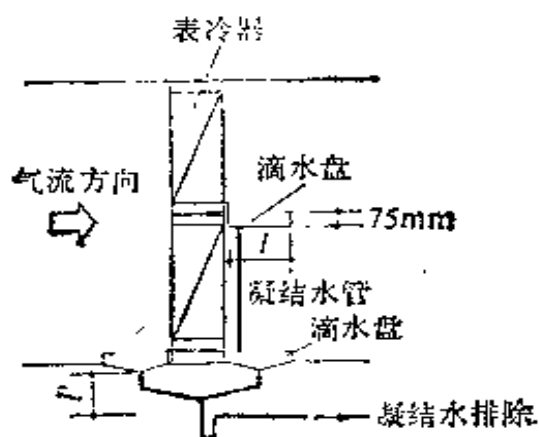


图 7.26 表冷器凝结水管的布置方法

冷水管与表冷器的连接法应有利于提高表冷器与空气的热交换效果,因此,冷水供水管应在气流方向的下游侧接入,冷水回水管在上游侧接出;当表冷器并列设置时,管路应用并联方式连接,在供、回水接管上应分别装有阀门,以便调节和关闭。

为有利于表冷器供冷量的调节,可以在供回水管路上安装三通阀,并在旁通管上设置两通调节阀,以调节旁通管的阻力,使之与表冷器环路的阻力平衡。

为保证表冷器环路的水流循环通畅和系统充水时排放空气,管路上应设置放气管和水过滤器;冷水供水管接在表冷器的下部,冷水回水管接在表冷器的上部;此外,要保证水平管路有  $1/100$  的坡度,以利排水。

在连接表冷器的供、回水管路上应装有温度计,以供检测之用。

当表冷器使用于降温减湿处理过程时,其周围的管路布置应有利于凝结水的收集和及时排除,所以图 7.26 中所示的滴水盘和凝结水管的设置是必要的。滴水盘的进深  $l$  和通过表冷器的气流速度有关,当其面风速为  $2\sim 3$  [m/s] 时,可相应采用  $150\sim 300$  [mm]。

凝结水管接出表冷器的箱体时应设水封,水封高度  $l'$  取决于系统工作时箱体内的空气压力。举例说,如果表冷器所在段处于送

风机的负压段,且表冷器下游侧的箱内空气静压为  $300[\text{Pa}]$ ,那末  $l \geq 30[\text{mm}]$ 。这一点应该特别引起工程设计人员的重视,当空调设备在现场安装时应留出足够的余量,否则凝结水排出口可能成为吸风口,凝结水排水不畅,且使空调送风的带水现象加骤。如果表冷器的所在段处在送风机的正压段,那末应该根据该处的正压值设计水封高度。但是,这种把空气处理设备设置在送风机正压段的作法,除了洁净空调工程,一般很少采用。

图 7.25 所示的管路布置方式也适用于向换热器输送热水的情况,但不适用于使用蒸汽的情况。为提高管路和设备的使用寿命,热水供水温度不要高于  $65[^\circ\text{C}]$ 。

### 7.3.2 喷水室的配管布置

本节叙述的是使用人工冷源的管路布置方式。

根据制冷系统制备冷水的方式、冷水箱与喷水室的相对位置以及不同使用要求等,喷水室的配管方式很多,现列举几种如下:

#### 1. 重力自流回水方式

如果制冷系统的蒸发水箱比喷水室底池低,那末,回水可以靠重力自流回到蒸发水箱,在蒸发水箱冷却后的冷水再用喷水泵供给喷水室使用(见图 7.27)。这种方式的水系统很简单,而且也比较经济。

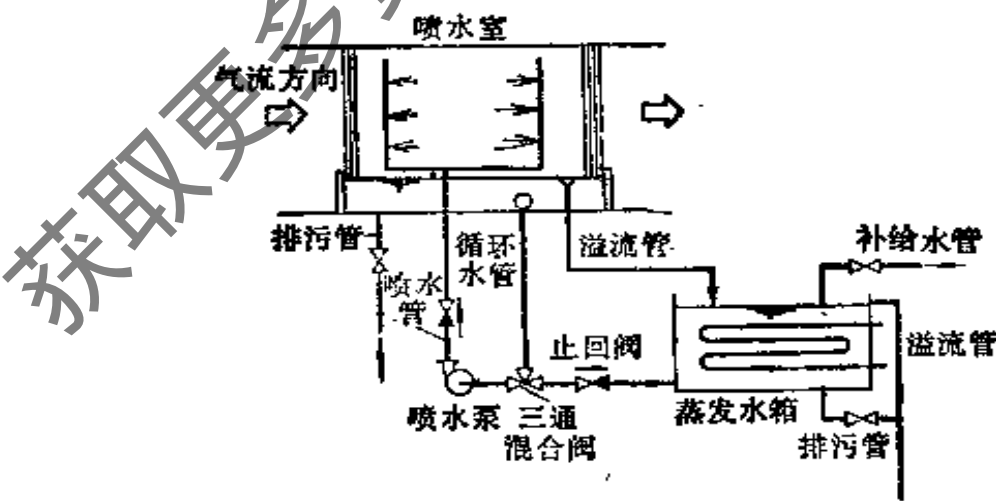


图 7.27 重力回水式喷水室水管系统

如果蒸发水箱位于地坪以下，那末在敷设重力回水管道时可以采用直接埋地的方式，但在管路转弯处、跌水处、交接处及管径变化处均宜设置检查井。为了防止冷量损失和冷冻水受污染、应做成封闭式检查井，井内并设有检查口和放气管，见图 7.28。

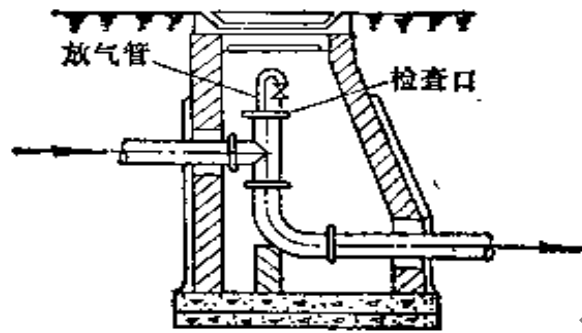


图 7.28 重力回水管道检查井

如果制冷系统用的是壳管式蒸发器，则应另设冷冻水箱和回水箱。容积较大的冷冻水箱可起蓄冷作用以保证不间断地向喷水室供应冷水，而且也可以起到缓解用电高峰的作用。这时，蒸发器的位置可以高于喷水室底池，也可以低于喷水室底池(见图 7.29)。

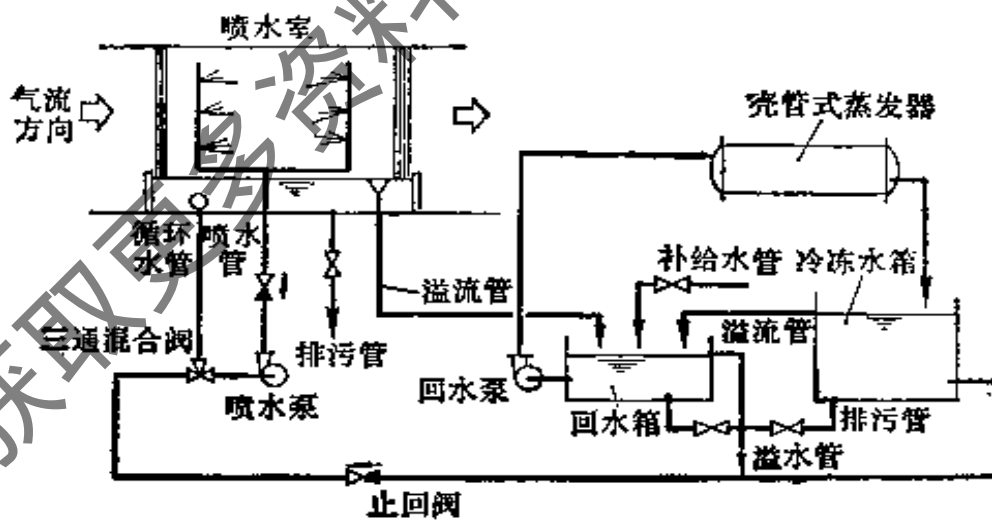


图 7.29 自流回水式带中间水箱的喷水室水管系统

## 2. 压力回水方式

如果蒸发水箱高于喷水室底池，则不能采用重力回流回水方

式而必须另设回水泵,将喷水室的回水抽回蒸发水箱(图 7.30)。

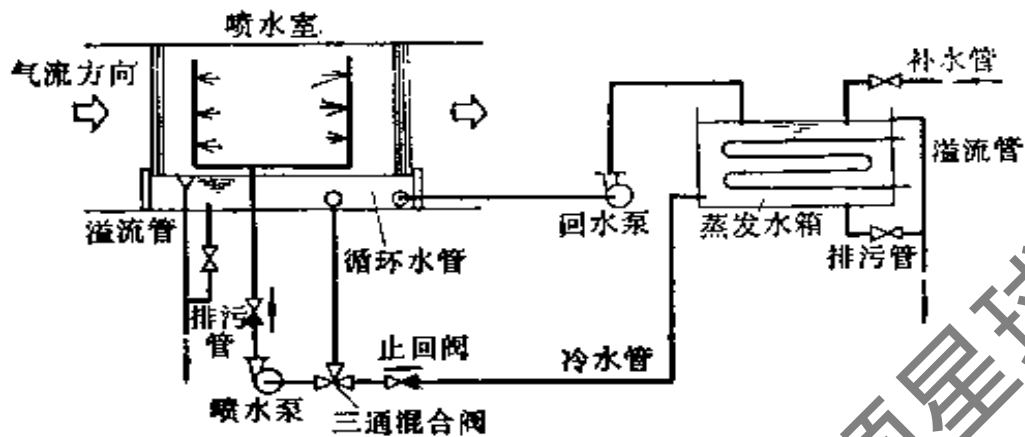


图 7.30 压力回水式喷水室水管系统

如果几个喷水室共用一套制冷系统,且蒸发水箱共用,那末就需要增设一个低位集水箱,使各喷水室的回水自流回入该水箱,然后用回水泵把回水箱内的水送回蒸发水箱,见图 7.31。此时回水泵的停、开可根据集水池水位通过行程开关自动控制。选用的回水泵流量应大于各喷水室的最大回水量之和。

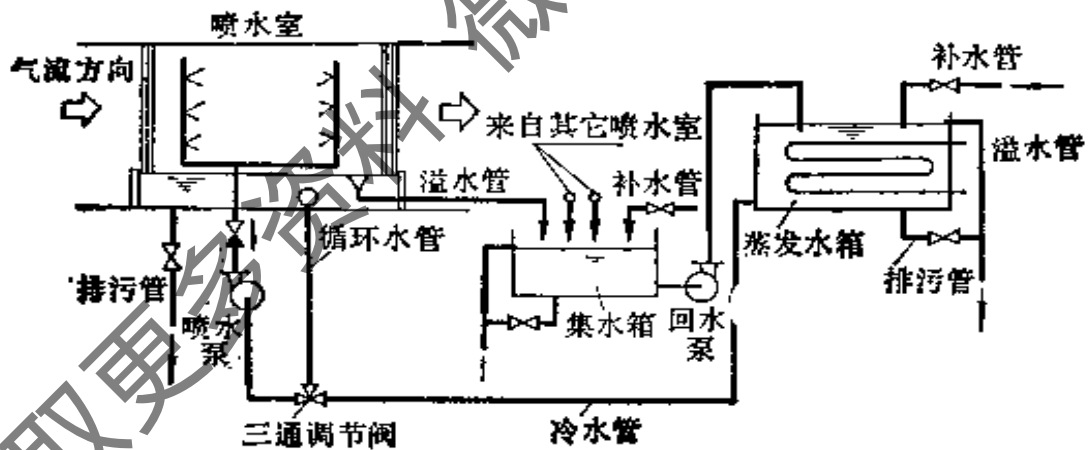


图 7.31 蒸发水箱共用的喷水室水管系统

当喷水室同时需要满足冬季使用时,管路系统上还应该安装一些必要的阀件等,使得喷水室中能用循环水喷淋。这时,为了保持水质并及时补充喷水量,喷水室的底池内必须设置自动和手动控制的补给水系统。一般,喷水室的水泵仅设置一台,但也可以设置容量大小不同的两台,因为冬季加湿时可能不需要像夏季

那么大的喷水量，如果此时使用小功率的水泵，则可节约运行能耗。

喷水温度最好使用三通混合阀自动调节。如果不用三通混合阀，可以在冷水管和循环水管上分别设两通阀进行调节。

喷水管上必须安装压力表和温度计，以便于操作管理。

水系统中的止回阀是用来防止停泵时高位水箱的水向低位水箱自流，最后从低位水箱的溢流管流入下水道引起冷量的无益流失。如果采用与泵联动的自动启闭阀，那末，可以取代止回阀。一

般认为，它比止回阀更可靠。

### 3. 使用壳管式蒸发器的喷水室水管系统

在不设置水箱的场合，可以采用壳管式蒸发器。由制冷系统制备的冷水从壳管式蒸发器内出来，在喷水室作用下直接向喷水室供水，回水由水泵抽吸，再压送入壳管式蒸发器，见图 7.32。采用这种方式

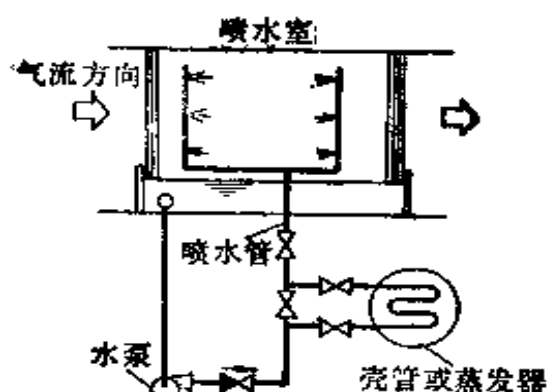


图 7.32 使用壳管式蒸发器的喷水室水管系统

时，喷水室的底池内应设置自动和手动控制的补给水系统。

### 7.3.3 冷却塔的配管布置

图 7.32 所示为安装一台冷却塔的冷却水系统管路布置图式。为保证制冷系统的运行安全可靠，又利于维护保养，最好把制冷系统的冷凝器设置在水泵的压出段上。在冷却塔下方不另设水池的场合，其底池内应设有自动控制的补给水管和溢水管，并注意，把底池内的排污管接入下水道或就近雨水管（当安装在屋顶平台时）。

当多台冷却塔并联使用时，要特别注意避免因并联管路阻力不平衡造成水量分配不均或者冷却塔底池的水发生溢流的现象。为此，各进水管上都必须设置阀门，借以调节进水量；同时在各冷却塔的底池之间，用与进水干管相同管径的均压管（即平衡管）连接。此外，为使各冷却塔的出水量均衡，出水干管宜采用比进水干



管大两号（见表 7.12）的集管并用  $45^\circ$  弯管与冷却塔各出水管连接，见图 7.34。

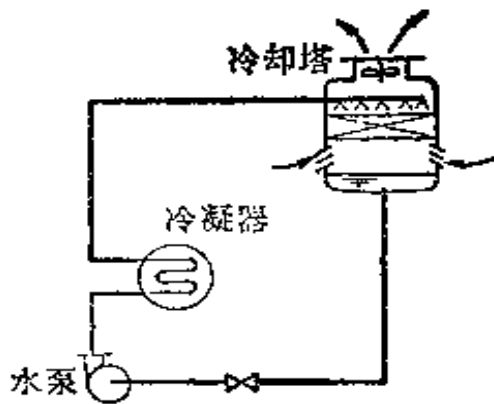


图 7.33 冷却塔的配管布置

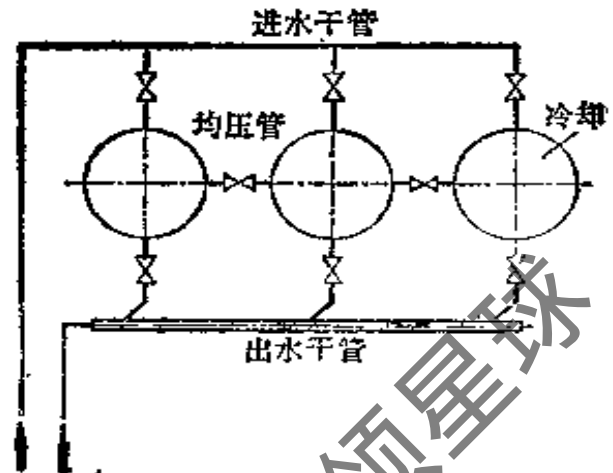


图 7.34 多台冷却塔并联时的管路布置

### 7.3.4 水泵的配管布置（见图

7.35）。

为降低和减弱水泵的振动和噪声传递，在连接水泵的吸入管和压出管上应安装软性接管。

水泵压出管上的止回阀是为了防止水泵突然断电时水逆流使水泵叶轮受阻而设的。就冷冻水系统而言，因其扬程不高，一般可以采用普通的止回阀（如旋启式、升降式等）；当然，也可以采用防水击性能较好的缓闭式止回阀。当水泵在闭式系统中应用时，其出口是毋需要安装止回阀的。对于冷却水系统，如果水箱设置在水泵标高以下，则希望采用缓闭式止回阀。

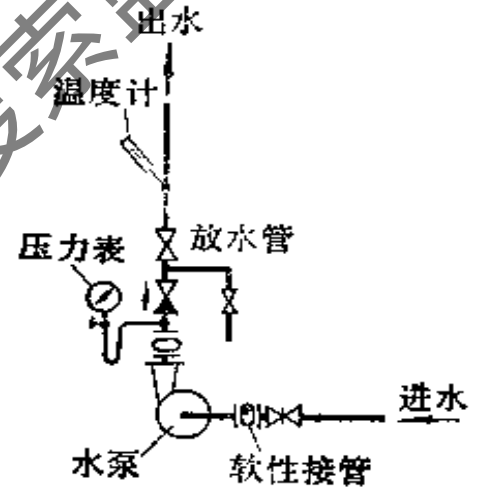


图 7.35 水泵的配管布置

为便于水泵在不运行时能不排空系统内的存水而进行检修，在水泵的吸入管和压出管上应分别设置进口阀和出口阀，以利关断用。对于进口阀，在通常情况下，它是全开的，因此，最好用价廉的、流动阻力小的闸阀。在水泵有吸水高度的开式系统中，此阀绝对不能作调节用，否则水泵有产生气蚀的危险。对于出口阀，除了水泵在检修时的关断作用外，它还应该有调节流量的作用。因此，出口阀还需要有较好的调节特性，而且要有稳定可靠的结构。对

空调水系统而言,采用截止阀或蝶阀,从技术经济上看被认为是比较合理的,因为这种阀门在系统启动时能缓缓打开,可以防止因水快速流动而造成整个管路系统发生颤振现象。

为有利于管道的清洗和污水排空,当止回阀安装在立管上时,其下游侧要安装放水管。

此外,水泵的出水管上还应装有压力表和温度计,以利检测。要注意,它们应该被安装在便于观察和维修的位置上,并注意周围对其测量的准确度有影响的环境条件。如果水泵从低位水箱吸水,那末在吸水管上还应安装真空表。

### 7.3.5 膨胀水箱的配管布置

当空调水系统采用闭式环路循环时,为给于系统中存水因温度变化而引起的体积膨胀余地并有利于系统内空气的排除,应该在管路系统上连接膨胀水箱。在空调工程中应用时,一般都采用开启式膨胀水箱。

为保证膨胀水箱的作用,必须重视它与系统的正确连接。在机械循环系统中,膨胀水箱应该接在水泵的吸入侧,而且装置的标高至少要高出水管系统最高点 1[m]。

膨胀水箱的配管(图 7.36)主要包括膨胀管、信号管、补给水管(有手动和自动控制)、溢流管、排污管等。箱体应该保温并加盖板,盖板上连接的透气管一般可以选用公称直径为 100[mm]的钢管制作。当膨胀水箱兼用于供冷和供暖两种工况时,特别要重视膨胀水箱的安置条件,以防冬季供暖时因水箱内的水结冰造

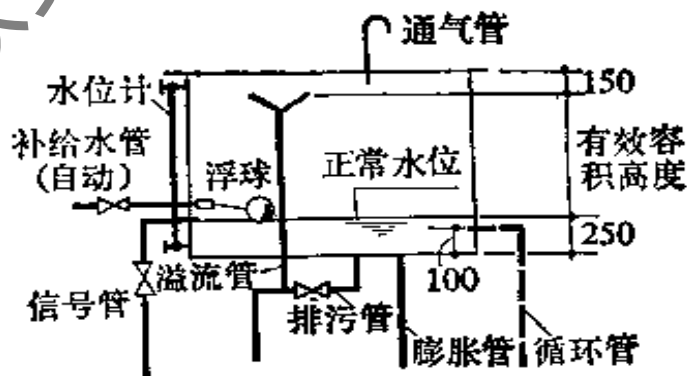


图 7.36 膨胀水箱的配管布置

成箱体结构破坏，甚至酿成事故。工程上的另一种做法是在膨胀水箱上再接出一根循环管，如图 7.35 中虚线所示。在水系统中，循环管与膨胀管要接在同一条管路上，其连接点之间应保持一定距离(见图 7.37)。使膨胀水箱中的水在两连接点压差的作用下处于缓慢流动状态，这样做是可以避免结冰现象出现的。循环管和膨胀管的连接点间距可以从阻力计算确定，一般可以取  $1.5\sim 3.0$ [m]。要注意的是，这种连接循环管的办法，在夏季使用时会增加系统的无效冷量损失。

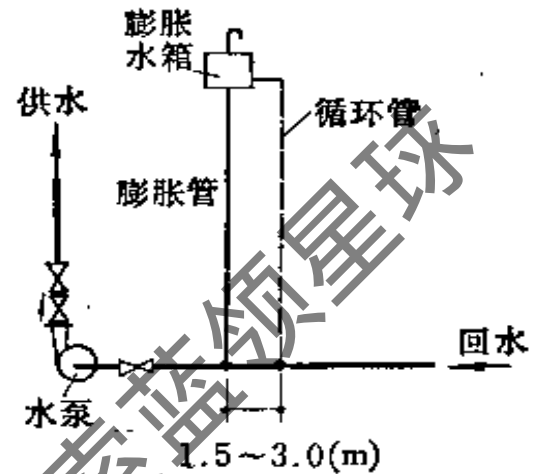


图 7.37 膨胀水箱与机械循环的系统连接

为使水系统运行正常，及时排除系统内的空气是很重要的。通常的做法是在管路上装置集气罐，集气罐一般是用公称直径为  $100\sim 150$ [mm] 的短的钢管制成的。它与系统的连接方法可见图 7.38 所示。集气罐的放气管可选用公称直径为  $15$ [mm] 的钢管制作。放气管上应装放气阀，供系统充水时和运行时定期放气之用。为保证集气罐的排放空气功能，它的安装高度必须低于膨胀水箱。

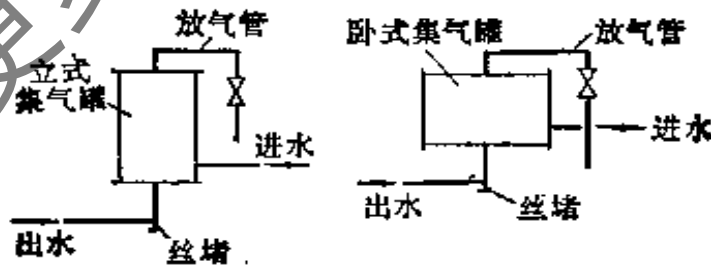


图 7.38 集气罐与系统管路的连接

由于立式集气罐容纳的空气比卧式的多，所以在大多数情况下都选用立式集气罐；只在干管距顶棚的距离很小不能设置立式集气罐时，才使用卧式集气罐。

## 7.4 设备和附件的配管设计方法

### 7.4.1 冷却塔

冷却塔的作用是使水在塔内与空气进行热湿交换而得到降温。

近年来,为了减低城市供水管网的负荷,空调工程中制冷系统冷凝器用的冷却水基本上都是采用冷却塔处理而循环使用的。

冷却塔多为开放式并配用风机,使空气与待处理的冷却水强制对流,以提高水的降温效果。塔内装有高密度的亲水性填充材料。常用的冷却塔有逆流型和直交流型两种(见图7.39)。

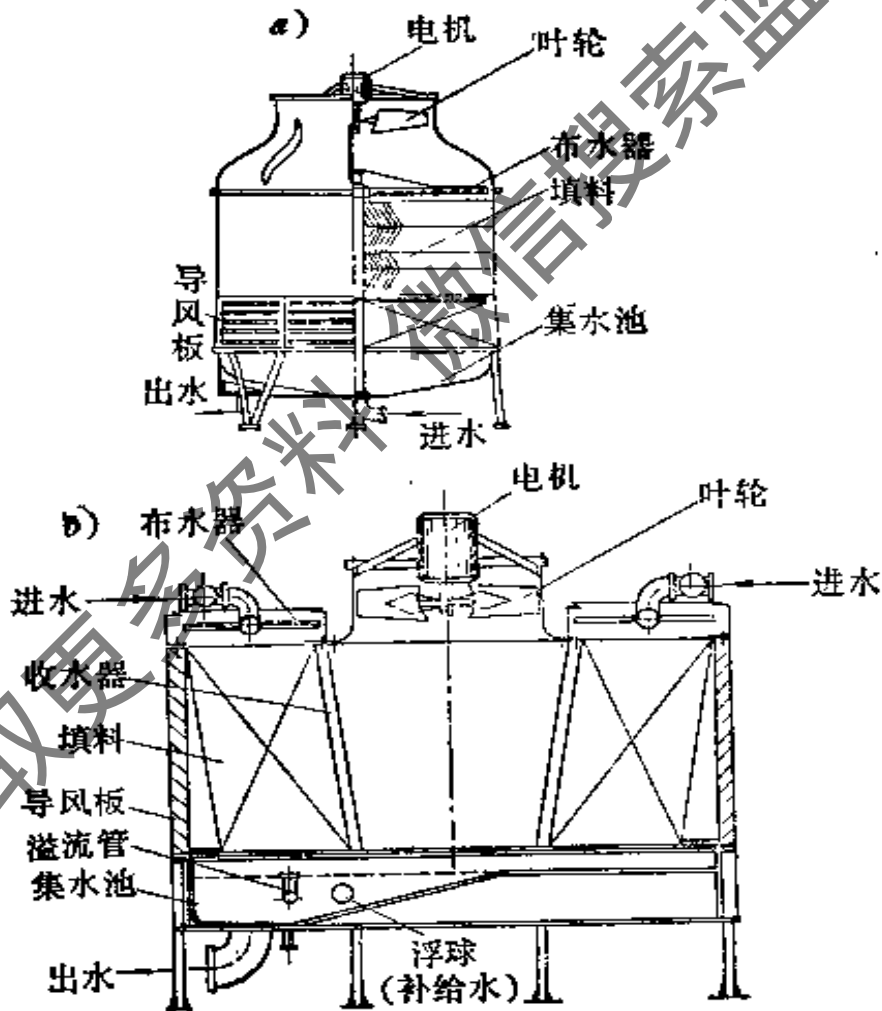


图 7.39 冷却塔的型式

a) 逆流型      b) 直交流型

空调中常用的逆流式水膜型填充物冷却塔的热工计算是一个

比较复杂的问题，表示其热工特性的重要参数——以焓为基准的总容积传热系数与填充料的材质特性、冷却塔的结构形式、淋水密度、水气比、塔断面风速……等许多因素有关。因此，在工程中使用一般都按市售产品的样本提供的热工性能数据进行选择。

在选择冷却塔的型号和规格前，首先应根据工程设计资料计算需要的冷却水量  $W$ 。计算公式如下：

$$W = \frac{Q_c}{c(t_{w1} - t_{w2})} \quad [\text{kg/s}] \quad (7.20)$$

式中  $Q_c$ ——冷却塔排走的热量，[kW]；

对于压缩式制冷机，取制冷机负荷的 1.3 倍左右；

对于吸收式制冷机，取制冷机负荷的 2.5 倍左右。

$c$ ——水的比热，[kJ/kg℃]。常温时  $c = 4.1868$  [kJ/kg℃]。

$t_{w1} - t_{w2}$ ——冷却塔的进出水温差，[℃]。

对于压缩式制冷机，取 4~5 [℃]；

对于吸收式制冷机，取 6~9 [℃]。

然后，根据  $W$  值从产品样本选择型号和规格。当设计条件与制造厂提供的产品性能表所列条件不同时，应考虑按设计条件予以修正。

在冷却塔型号规格选定时，尚需复核所选冷却塔的结构尺寸（指占地面积和高度）是否适合现场的安装条件，要根据冷却塔的运行重量核算冷却塔安装位置的楼板（或屋面板）结构的承受能力；同时要重视所选冷却塔在运行时的噪声水平，使满足环境噪声要求。选择理想的冷却塔还要重视它的能耗指标和价格。

冷却塔的安装位置应选在不受日照之处，空气要流畅且不能受污染（指热、废气和尘埃等）。当冷却塔采用有叶窗围挡时，则百叶窗的开口面积要取得足够大，以便使空气有小于 2 [m/s] 的速度流经百叶格。机械通风式冷却塔在运行时难免会有水滴飞溅现象，在冷却塔选址时也要注意。

因为冷却水在塔内处理过程中不断蒸发，因此水循环系统需

要不断补给水。冷却塔补给水管的管径选择时应考虑高架水箱水位的高度，根据可资利用的压头进行配管设计。补给水量可依据产品样本提供的数据确定，一般，可取冷却塔循环水量的1~3%。当高架水箱处于比冷却塔略低的位置时，可用补给水泵补水，该水泵的水量取冷却塔补给水量的两倍。

在冷却塔的运行管理方面，保持冷却水系统的水质是一个极为重要的问题。由于冷却水系统与大气相通，空气中的污染物如尘土、杂物、细菌、可溶性固体等随时都有可能进入循环水系统，使微生物大量繁殖，造成生物粘泥，与此同时，如果系统的补给水未经软化处理，在冷却塔中蒸发的那部分水的盐分将滞留在冷却水系统中，所以随着蒸发过程的进行，循环冷却水的溶解盐类不断被浓缩，故而水的硬度不断增高；此外，还有水中的溶解氧的作用，使金属管道结垢、腐蚀。由于以上诸原因，水系统的流通断面会逐渐减小，换热器的热效率降低，系统的输配能力降低，能耗增加，最终还可能发生水流阻塞现象，甚至发生事故。所以要重视冷却水的水处理问题。冷冻水系统因为多为闭式循环，不与大气接触，而且水温低，所以结垢和粘泥不严重，但是因为补给水管阀件、管道接口和水泵轴封漏气等原因会给循环水带入溶解氧，所以电化学腐蚀情况也存在，因此也要重视水处理问题。

下列冷却水水质控制指标可供工程管理参考：

pH值：6.5~8.5；

浑浊度：最大容许含量 $\leq 200$ [mg/l]；

碳酸盐硬度：8~30度(指德国度)。

实用中最有效的水处理方法是化学清洗方法，即根据水质的情况定期向系统内投入清洗药剂进行水处理，使水质达到指标要求。

使用经过水处理的软水作为补给水是冷却水系统最理想的水源。如果现场不具备上述条件，为了改善水质指标可以采用下述简易方法，即调节冷却塔底池的排污阀在某一开度，使维持连续少量的排水，借以使冷却水系统内的水的硬度保持在极限值以下。

补给水量可以从水系统的水量平衡和盐度平衡进行计算，请参阅有关工业冷却水处理技术资料。

#### 7.4.2 喷水室

喷水室的配管设计随其功能不同而异，下面就一般常用喷水室作一介绍。

**喷水管** 喷水管径的选择取决于喷水量（由喷水热工计算确定）。为取得满意的热湿交换效果，喷嘴型号的选择以及它的排列方式，布置密度和喷水压力的正确确定都是重要的。喷水系统中的水泵必须有足够的压头（扬程）以确保喷嘴前工作压力要求。

**循环水管** 也称滤水管。作为冬季等焓加湿时从底池内抽出循环水和夏季非高峰负荷时抽一部分循环水调节喷水温度之用。为了防止循环水中杂质堵塞喷嘴孔口，在循环水管的吸水口上应设置滤水网。滤水网通常做成圆筒形，其直径约为循环水管直径的两倍左右。滤水网常用铜丝网制作，其规格与滤水能力可参考表 7.8 选用。

滤水网规格及其滤水能力

表 7.8

| 喷嘴孔径<br>[mm] | 网孔尺寸<br>[mm]    | 滤水能力<br>[kg/m <sup>2</sup> s] | 滤网阻力<br>[kPa] |
|--------------|-----------------|-------------------------------|---------------|
| 2.0~2.5      | 0.5×0.5         | 2.8                           | 0.98          |
| 2.5~3.5      | 0.6×0.6~1.0×1.0 | 3.3~4.2                       | 0.98          |
| 4.0~5.5      | 1.0×1.0~1.5×1.5 | 4.2~8.3                       | 0.98          |

滤水网的构造应便于拆卸和安装，所以在工程实际中，也有把滤水网制作成隔板状的，这样可以减少加工和安装工作量，而且也便于清洗。

**溢流管** 在喷水室与冷冻水箱间采用重力返水方式时，溢流管又作回水管之用，同时，它可使空气在夏季的冷却干燥处理过程中析出的水随时排除（在水管系统设计时应重视这部分冷水的利用）。当喷水室只用于循环加湿时可以不设溢流管。溢流管管口

上的溢水器通常做成矩形或圆形的喇叭口,上加水封罩,防止喷水直接进入溢流管排走。应用时,罩的四周要浸没在喷水室底池的水面以下,使既保证溢流作用,又不让喷水室内外空气贯通。溢水器的尺寸可按溢水口周边每米长溢水量为  $8.3\sim 11.1[\text{kg}/\text{sm}]$  设计。

**补给水管** 为保持喷水室底池的最低水位而设。因为当喷水室用作空气加湿处理时,挡水板有过水现象时或者其他漏水原因时,喷水室底池内的水量将会减少。补给水量一般按喷水量的  $2\sim 4\%$  考虑,用浮球阀自动控制。

**加速充水管** 为更换底池内的水和冲洗底池之用。其管径按使水充满水池所需的时间计算,一般取  $0.5\sim 1.0[\text{h}]$ 。有些场合可以不另设加速充水管,但补给水管的管径宜适当放大。

**排水管** 应从底池的最低处接出(注意,喷水室底池的底面应有坡度),排水管上应装闸阀,其水平管段应坡向下水道或排水地漏。

喷水室各种管道尺寸的确定原则是:对于喷水管等有压力管道,按水量和管内水流速为  $1\sim 2[\text{m}/\text{s}]$  确定管径;对于排水管等自流管道,应根据一定流量下造成的阻力不超过有效压头(上、下水位差)来确定管径。

定型喷水室的各技术数据可查阅有关样本或产品说明书。

### 7.4.3 回水箱和回水泵

回水箱的容积  $V$  一般根据循环水量和水泵启动方式确定:

$$V = 3.6 KV_c [\text{m}^3] \quad (7.21)$$

式中  $V_c$ ——回水系统的循环水量,  $[\text{l}/\text{s}]$ ;

$K$ ——系数。水泵采用人工充水启动时,  $K$  取  $0.10\sim 0.16$ ;

水泵采用自动充水启动时,  $K$  取  $0.05\sim 0.10$ 。

回水箱溢水口的标高应按下式计算确定(见图 7.40):

$$H_2 \leq H_1 - 0.1 \Delta H + 0.1 P_0 [\text{m}] \quad (7.22)$$



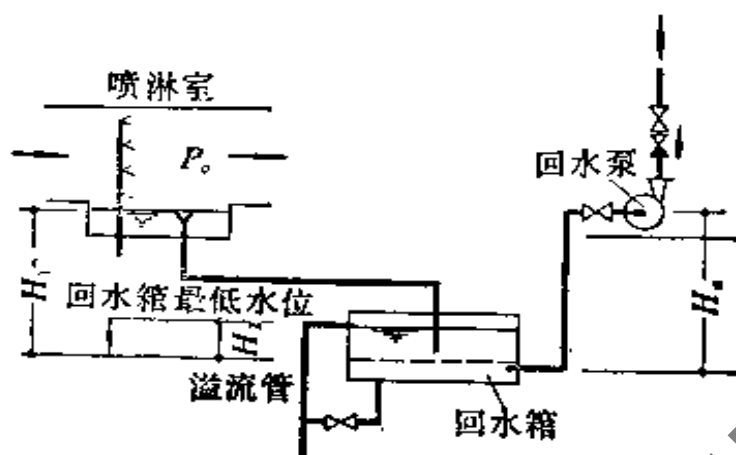


图 7.40 回水箱溢水口标高和回水泵允许安装高度的确定

- 式中  $H_2$ ——回水箱溢水口中心线与回水箱最低水位的标高差，  
[m]；
- $H_1$ ——喷水室底池溢水口与回水箱最低水位的标高差，  
[m]；
- $H$ ——溢(回)水管路的阻力，[kPa]；
- $P_0$ ——喷水室内空气的静压值，[kPa]。当喷水室处在送风机的负压段时，此值为负。

当回水箱设置在回水泵标高以下时，应该用下式校核回水泵的安装高度：

$$H_a \leq H_s - 0.1H - H_a - \frac{v^2}{2g} \quad [m] \quad (7.23)$$

- 式中  $H_a$ ——水泵安装高度，[m]，指水泵叶轮中心与回水箱最低水位最大高差；
- $H_s$ ——水泵的吸水高度，[m]；
- $H$ ——吸水管段的阻力，[kPa]；
- $H_a$ ——当地海拔高度影响的水头，[m]见表 7.8；

当地海拔高度影响水头  $H_a$

表 7.8

| 海拔高度[m] | 0    | 100  | 200  | 300 | 400 | 500 |
|---------|------|------|------|-----|-----|-----|
| 影响水头[m] | -0.3 | -0.2 | -0.1 | 0   | 0.2 | 0.3 |

$\frac{v^2}{2g}$ ——水泵吸水口处的流速水头, [m]。

#### 7.4.4 膨胀水箱

膨胀水箱的容积是由系统中水容量和最大的水温变化幅度决定的, 可以用下式计算确定:

$$V_F = \alpha \Delta t v, \quad [\text{m}^3] \quad (7.24)$$

式中  $V_F$ ——膨胀水箱有效容积(即由信号管到溢流管之间高差内的容积, 见图 7.36), [m<sup>3</sup>];

$\alpha$ ——水的体积膨胀系数,  $\alpha = 0.0006$ , [1/°C];

$\Delta t$ ——最大的水温变化值, [°C];

$V_s$ ——系统内的水容量, [m<sup>3</sup>], 即系统中管道和设备内存水量的总和。

系统的水容量可以在设计完成后, 从各管络和设备逐个计算求得。也可以参考表 7.9 所提供的数据来确定。表 7.9 是 15 个办公楼建筑的统计值。

系统内的水容量 [l/m<sup>2</sup> 建筑面积]

表 7.9

|       | 全空气方式     | 与机组结合使用的方式 |
|-------|-----------|------------|
| 供 冷 时 | 0.40~0.55 | 0.70~1.30  |
| 供 暖 时 | 1.25~2.00 | 1.20~1.90  |

注: 与机组结合使用的方式是指诱导机组或风机盘管机组与全空气系统相结合的方式, 表中供暖时的数值是指使用热水锅炉的情况; 当使用热交换器时可以取供冷时的数值。

从以上计算得到膨胀水箱的有效容积后, 即可从采暖通风标准图集 T 905(一)、(二)进行配管管径选择, 从而选定规格型号。表 7.10 是该标准图集中的有关资料, 可供选用参考。

膨胀水箱的规格尺寸及配管的公称直径

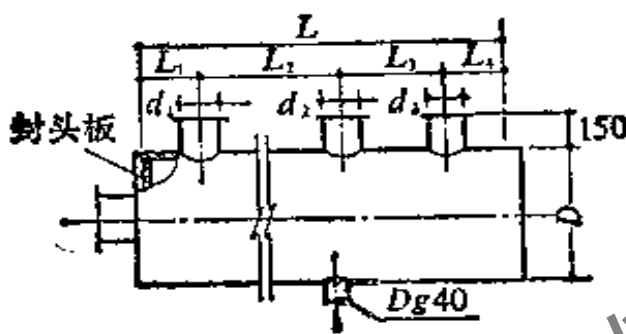
表 7.10

| 水箱形式 | 型号 | 公称容积<br>[m <sup>3</sup> ] | 有效容积<br>[m <sup>3</sup> ] | 外形尺寸[mm]                          |        | 水箱配管的公称直径 D <sub>g</sub> [mm] |     |     |     |     | 水箱自重<br>[kg] | 采暖通风标准<br>图集图号 |
|------|----|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------------|----------------|
|      |    |                           |                           | 长×宽(或内径)<br>L×B(或d <sub>0</sub> ) | 高<br>H | 溢流管                           | 排水管 | 膨胀管 | 信号管 | 循环管 |              |                |
| 方 形  | 1  | 0.5                       | 0.61                      | 900×900                           | 900    | 40                            | 32  | 25  | 20  | 20  | 158.3        | T905<br>(一)    |
|      | 2  | 0.5                       | 0.63                      | 1200×700                          | 900    | 40                            | 32  | 25  | 20  | 20  | 164.4        |                |
|      | 3  | 1.0                       | 1.15                      | 1100×1100                         | 1100   | 40                            | 32  | 25  | 20  | 20  | 242.3        |                |
|      | 4  | 1.0                       | 1.20                      | 1400×900                          | 1100   | 40                            | 32  | 25  | 20  | 20  | 255.1        |                |
| 圆 形  | 1  | 0.3                       | 0.35                      | 900                               | 700    | 40                            | 32  | 25  | 20  | 20  | 127.0        | T905<br>(二)    |
|      | 2  | 0.3                       | 0.33                      | 800                               | 800    | 40                            | 32  | 25  | 20  | 20  | 119.4        |                |
|      | 3  | 0.5                       | 0.54                      | 900                               | 1000   | 40                            | 32  | 25  | 20  | 20  | 153.6        |                |
|      | 4  | 0.5                       | 0.59                      | 1000                              | 900    | 40                            | 32  | 25  | 20  | 20  | 163.4        |                |
|      | 5  | 0.8                       | 0.83                      | 1000                              | 1200   | 50                            | 32  | 32  | 20  | 25  | 193.0        |                |
|      | 6  | 0.8                       | 0.81                      | 1100                              | 1000   | 50                            | 32  | 32  | 20  | 25  | 193.8        |                |
|      | 7  | 1.0                       | 1.10                      | 1100                              | 1300   | 50                            | 32  | 32  | 20  | 25  | 238.4        |                |
|      | 8  | 1.0                       | 1.20                      | 1200                              | 1200   | 50                            | 32  | 32  | 20  | 25  | 253.1        |                |

### 7.4.5 集水器和分水器

在采用集中供冷、供暖方式的工程中,为有利于各空调分区流量分配和调节灵活方便,常常在供、回水干管上分别设置分水器 and 集水器,再从分水器 and 集水器分别连接各空调分区的供水管和回水管。这样的连接方式使得各分区供,回水管上的截止阀的安装和维修操作都十分方便。

分水器 and 集水器实际上是一段大管径的管子,只是在其上按设计要求焊接上若干不同管径的管接头(图7.41)。



|       |                   |
|-------|-------------------|
| $L_1$ | $d_2 + 60$        |
| $L_2$ | $d_1 + d_2 + 120$ |
| $L_3$ | $d_2 + d_3 + 120$ |
| $L_4$ | $d_3 + 60$        |

图 7.41 分水器或集水器的构造简图

确定分水器 and 集水器管径的原则是使水量通过时的流速大致控制在  $0.5 \sim 0.8$  [m/s]。举例,如果要从分水器上接出 6 根公称管径为  $D_{80}$  的供水管,而且该供水管的设计流速为  $2.0$  [m/s],那末分水器的管径应该选多大才合适呢?

先从表 7.11 查得  $D_{80}$  水煤气输送钢管的内径为  $80.5$  [mm],算得其断面积为  $51.9$  [cm<sup>2</sup>],这样,6 根  $D_{80}$  管道的总流通断面积为  $311.4$  [cm<sup>2</sup>].如果分水器内流速取  $0.8$  [m/s],那末分水器的流通断面积应为  $311.4 \times (2.0/0.8) = 778.5$  [cm<sup>2</sup>],于是就可以算出分水器的内径应为  $315$  [mm]。对照我国在空调水系统中常用的钢管规格(表 7.12),可以认为,选用  $D325 \times 8$  无缝钢管是合适的。由于  $D 325 \times 8$  无缝钢管的内径为  $309$  [mm],所以实际管内水流速稍稍大于  $0.8$  [m/s]。

分水器 and 集水器上各配管的间距可参照图 7.41 中的表格确定。

分水器 and 集水器都用无缝钢管制作。选用的管壁和封头板的厚度以及焊缝作法应按耐压要求确定。分水器 and 集水器的底部应有排污管接口,一般选用  $D_040$ 。

#### 7.4.6 除污器和水过滤器

为防止水管系统阻塞和保证各类设备和阀件的正常功能,在管路中应安装除污器或水过滤器,用以清除和过滤水中的杂物和粘混水垢。一般,除污器或水过滤器安装在水泵的吸入管和热交换设备的进水管上。其他如供暖系统上的减压阀和自动排气阀等小通径阀件前的管路上都应安装。

工程上常用的除污器有立式直通式、卧式直通式和卧式角通式几种,可视现场安装条件选用。

除污器和水过滤器的型号都是按连接管管径选定的。连接管的管径应该与干管的管径相同。在进行阻力计算时,目前工程上常用的除污器的局部阻力系数可取  $4\sim 6$ ,水过滤器的局部阻力系数可取  $2.2$ 。它们都对应于连接管的动压。

在选定除污器和水过滤器时应重视它的耐压要求和安装检修的场地要求。除污器和水过滤器的前后,应该设置闸阀,供它们在定期检修时与水系统切断之用(平时处于全开状态);安装时必须注意水流方向;在系统运转和清洗管路的初期,宜把其中的滤芯卸下,以免损坏。

### 7.5 管材、管件和保温

#### 7.5.1 管材

空调水系统中常用的管材是水、煤气输送钢管和无缝钢管。水、煤气输送钢管是按照(原)冶金工业部技术标准《水、煤气输送钢管》(YB 234-63)用碳素软钢制造的,俗称熟铁管。它有镀锌管(俗称白铁管)和不镀锌管(俗称黑铁管)之分。它的管壁纵向有一条焊缝,一般用炉焊法或高频电焊法焊成。钢管管端有带螺纹的和不带螺纹的两种。根据管壁的不同厚度,水、煤气输送钢管又可分为普通管(适用于公称压力  $P_0 \leq 1.0$  [MPa]) 和加厚管(适

用于公称压力  $P_g \leq 1.6$  [MPa])。这两种壁厚都可用手动工具或套丝机在管端加工管螺纹,以便采用螺纹连接。

水、煤气输送管的规格是用公称直径( $D_g$ )表示的。如公称直径为 50 [mm] 的水、煤气输送钢管,则表示为  $D_g 50$ 。空调水系统上常用的规格见表 7.11 所列,表中理论重量是指不镀锌钢管(黑铁管)的理论重量。镀锌钢管比不镀锌钢管重约 3~6%。

水、煤气输送钢管的规格表(摘自 YB234-63)

表 7.11

| 公称直径<br>$D_g$<br>[mm] | 外径<br>[mm] | 普通管        |                          | 加厚管        |                          | 每米钢管分配的管<br>接头重量(以每6[m]<br>一个管接头计算)<br>[kg] |
|-----------------------|------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|---|
|                       |            | 壁厚<br>[mm] | 不计管接头<br>的理论重量<br>[kg/m] | 壁厚<br>[mm] | 不计管接头<br>的理论重量<br>[kg/m] |   |
| 8                     | 13.50      | 2.25       | 0.62                     | 2.75       | 0.73                     | —   |
| 10                    | 17.00      | 2.25       | 0.82                     | 2.75       | 0.93                     | —   |
| 15                    | 21.25      | 2.75       | 1.25                     | 3.25       | 1.44                     | 0.01  |
| 20                    | 26.75      | 2.75       | 1.63                     | 3.50       | 2.01                     | 0.02  |
| 25                    | 33.50      | 3.25       | 2.42                     | 4.00       | 2.91                     | 0.03  |
| 32                    | 42.25      | 3.25       | 3.13                     | 4.00       | 3.77                     | 0.04  |
| 40                    | 48.00      | 3.50       | 3.84                     | 4.25       | 4.58                     | 0.06  |
| 50                    | 59.00      | 3.50       | 4.88                     | 4.50       | 6.16                     | 0.08  |
| 65                    | 75.50      | 3.75       | 6.64                     | 4.50       | 7.83                     | 0.13  |
| 80                    | 89.50      | 4.00       | 8.34                     | 4.75       | 9.81                     | 0.20  |
| 100                   | 114.00     | 4.00       | 10.85                    | 5.00       | 13.44                    | 0.40  |

常用的无缝钢管是按照(原)冶金工业部技术标准《无缝钢管》(YB231-70)用普通碳素钢、优质碳素钢、普通低合金钢和合金结构钢制造的。习惯用英文字母  $D$  后续外径乘壁厚来表示,如外径为 108[mm]、壁厚为 4[mm] 的无缝钢管,应表示为  $D108 \times 4$ ,它相当于公称直径 100[mm]。

无缝钢管按制造方法分为热轧管和冷拔(轧)管。冷拔(轧)管的最大公称直径为 200[mm],热轧管的最大公称直径为 600[mm]。在管道工程中,管径超过 57[mm](指外径)时常选用热轧管,管径小于 57[mm]时常用冷拔(轧)管。

无缝钢管按外径和壁厚供货。在同一外径中有多种壁厚,承受的压力范围较大,但各有异。空调水系统中常用的规格见表 7.12

空调水系统中常用的一般无缝钢管规格表(摘自 YB231-70) 表 7.12

| 公称直径[mm] | 外径[mm] | 壁厚[mm] | 重量[kg/m] |
|----------|--------|--------|----------|
| 10       | 14     | 3.0    | 0.814    |
| 15       | 18     | 3.0    | 1.11     |
| 20       | 25     | 3.0    | 1.63     |
| 25       | 32     | 3.5    | 2.46     |
| 32       | 38     | 3.5    | 2.98     |
| 40       | 45     | 3.5    | 3.58     |
| 50       | 57     | 3.5    | 4.62     |
| 65       | 76     | 4.0    | 7.10     |
| 80       | 89     | 4.0    | 8.38     |
| 100      | 108    | 4.0    | 10.26    |
| 125      | 133    | 4.0    | 12.73    |
| 150      | 159    | 4.5    | 17.15    |
| 200      | 219    | 6.0    | 31.54    |
| 250      | 273    | 7.0    | 45.92    |
| 300      | 325    | 8.0    | 62.54    |
| 400      | 426    | 9.0    | 92.55    |
| 500      | 530    | 9.0    | 105.50   |

所示。

钢管一般按实际重量交货，也可按理论重量(密度 $7.85[\text{kg}/\text{m}^3]$ )交货。钢管的实际重量与理论重量偏差，每根钢管为 $\pm 12\%$ ，每批钢管为 $\pm 8\%$ 。

### 7.5.2 管道连接件

管道连接方法有螺纹接，法兰接和焊接三种，应按所选管材和最大工作压力选定。

当选择与设备(或阀件)相连接的法兰时，应按设备和阀件的公称压力(注：对于空调工程范畴的水管，最大工作压力可以当作公称压力考虑来选择，否则会造成所选择的法兰与设备(或阀件)上的法兰尺寸不相符合的情况。当采用凹凸式或榫槽式法兰连接时，在一般情况下，设备和阀件上的法兰制成凹面或槽面，而配制的法兰制成凸面或榫面。

在选用法兰时应优先选用标准法兰，非标准法兰是需要自行设计的。我国现行法兰技术标准的公称压力( $P_g$ )系列为 $0.1, 0.25, 0.6, 1.0, 1.6, 2.5, 4.0, 6.4$  [MPa]。在水系统管道上使用的法兰，当公称压力小于 $0.6$  [MPa]时，一般应按 $0.6$  [MPa]等级选用。

系统上使用的阀门，在安装前应作耐压强度试验。试验应以每批(同牌号、同规格、同型号)数量中抽查 $10\%$ ，但不少于一个；如有漏、裂不合格的，应再抽查 $20\%$ ；仍有不合格的则必须逐个试验。对于安装在主干管上起切断作用的阀门，应逐个按有关规程作强度和严密性试验，强度和严密性试验压力应为阀门出厂规定的压力。

### 7.5.3 管道保温

为了减少管道的能量损失，防止冷水管道表面结露以及保证进入空调设备和末端空调机组的供水温度，管道及其附件均应采用保温措施，保温层的经济厚度的确定与很多因素有关，如材料的热物理特性，材料和保温结构的投资及其偿还年限、能价(还应包括上涨率因素)、系统的运行小时数……等，需要详细计算时可以查阅有关技术资料。一般情况下可以参考表 7.13 选用。



保温层厚度选用参考表

表7.13

| 冷水管(或热水管)的公称直径<br>$D_0$ [mm] |           | $\leq 32$ | 40~65 | 80~150 | 200~300 | $> 300$ |
|------------------------------|-----------|-----------|-------|--------|---------|---------|
| 保温层厚度                        | 聚苯乙烯(自熄型) | 40~45     | 45~50 | 55~60  | 60~65   | 70      |
| [mm]                         | 玻璃棉       | 35        | 40    | 45     | 50      | 50      |

注: 其他管道如冷凝水管、室外明装的冷却塔出水管以及膨胀水箱的保温层厚度取25[mm]。

目前, 空调工程中常用的保温材料及其主要技术特性列于表7.14。

常用保温材料及其主要技术特性

表7.14

| 材料名称          | 密度<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 导热系数<br>[W/(mK)] | 适用温度<br>[°C] | 备 注                              |
|---------------|----------------------------|------------------|--------------|----------------------------------|
| 可发性聚苯乙烯塑料板、管壳 | 18~25                      | 0.041~<br>0.044  | -40~70       | 此类材料有自熄型和非自熄型两种, 订货时需明确指出        |
| 软质聚氨酯泡沫塑料制品   | 30~36                      | 0.040            | -30~30       | 它可以现场发泡浇注成型, 强度较高, 但成本也高         |
| 酚醛树脂矿渣棉管壳     | 150~180                    | 0.042~<br>0.049  | $< 300$      | 难燃, 价廉、货源广, 施工时刺激皮肤且尘土大          |
| 岩棉保温管壳        | 100~200                    | 0.052~<br>0.058  | -268~<br>350 | 适用温度范围大, 施工简易, 但需注意岩棉对人体的危害      |
| 水泥珍珠岩管壳       | 250~400                    | 0.058~0.087      | $\leq 600$   | 不燃、不腐蚀、化学稳定性好, 且价廉               |
| 玻璃棉管壳         | 120~150                    | 0.035~0.058      | $\leq 250$   | 耐腐蚀、耐火、吸水性很小, 有良好的化学稳定性。但施工时刺激皮肤 |
| 沥青玻璃棉毡        | 85                         | 0.035~0.058      | $\leq 200$   | 同 上                              |

保温结构的设计和施工质量直接影响到保温效果、投资费用和使用寿命，应予以重视。

管道和设备的保温结构一般由保温层和保护层组成。对于敷设在地沟内的管道和输送低温水的管道还需加防潮层。

管道保温结构的施工应在管道系统试压和涂漆合格后进行。在施工前要先清除管子表面的脏物和铁锈，涂上防锈漆两道，要保护管道外表面的清洁并使其干燥。在冬、雨季进行室外管道施工时应有防冻和防雨的措施。

保温结构的形式甚多，视选用的保温材料、管径大小和管道的外界环境条件而异。目前，空调工程中水管大多用管壳式保温材料，并采用绑扎式结构，其大致做法如下：

在预制管壳施工前，一般，先在管道上抹一层厚度为 5 [mm] 的胶泥（石棉水泥胶泥或石棉硅藻土胶泥）作底层。在把管壳合上管道时应把结合缝错开，对于水平敷设的管道，应把管壳的接缝放在管道的侧面。预制管壳的缝隙一般应小于下列值，热保温 5 [mm]；冷保温 2 [mm]；缝隙用胶泥填实，然后进行捆扎。对于外径小于 200 [mm] 的预制管壳（一般每段长度 < 1 [m]），最少应该有两道镀锌铁丝或箍带将其缠牢，不可采用螺旋形连续捆扎方式；对于外径大于 200 [mm] 的管壳，要用网格 30 × 30 ~ 50 × 50 [mm] 的镀锌铁丝网捆扎。

在管壳的外面应包裹油毡玻璃丝布保护层或者涂抹石棉水泥保护壳。注意：当采用矿渣棉或玻璃棉制的管壳做保温层时，宜使用油毡玻璃丝布保护层，而不宜选用石棉水泥保护壳。

油毡玻璃丝布保护层的施工方法如下：

先把 350 号石油沥青油毡剪成一定宽度的条块，其宽度为保温层外圆周长加 50 ~ 60 [mm]，然后把它包在保温层的外侧。油毡纵横搭接长度约 50 [mm]。横的接缝用沥青封口，纵的接缝放在管子的侧面，使缝口朝下。油毡外面用  $\phi 1 \sim 1.6$  [mm] 的镀锌铁丝捆扎，每隔 250 ~ 300 [mm] 一道。然后再用厚度为 0.1 [mm] 的玻璃丝布作螺旋形缠绕在油毡的外面，每隔 3 [m] 用  $\phi 1$  [mm] 镀锌

铁丝捆扎一道。玻璃丝布的宽度视保温层外径大小取 150~250 [mm]。玻璃丝布保护层的外表面必须涂刷沥青或油漆当管道在室内架空敷设时,玻璃丝布保护层外表面涂刷醇酸树脂磁漆两道,为区别不同用途的管道,在面漆上面还要加包环。面漆所取的颜色以及色环的宽度、条数、间隔、颜色等均应按有关规定选定;当管道在室外架空敷设时,在玻璃丝布保护层的外表面要先刷一道冷底子油,然后刷两道 5 号热沥青。

石棉水泥保护壳的做法很容易,只须把石棉水泥胶泥直接涂抹在保温层外面就可以了。如果保温层外径是大于 200 [mm] 的,那末覆盖在保温层上的镀锌铁丝网的外面再用  $\phi 1.8$  [mm] 镀锌铁丝网捆扎,然后再涂抹石棉水泥胶泥。

石棉水泥胶泥由 72~77% 的水泥(300 号以上)、20~25% 的 4 级石棉和 3% 的防水粉与水搅拌而成。

石棉水泥保护壳的厚度:当保温层的管道外径小于 350 [mm] 时,取 10 [mm];当保温层的管道外径大于 350 [mm] 时,取 15 [mm]。

室内外架空管道的石棉水泥保护壳外面应涂刷油性调和漆两道,色漆的颜色等也应根据管道的用途等按有关的规定选定。

管道保温结构的施工方法甚多,以上仅为一般常用作法的说明,更完整的内容可参阅施工规范和有关手册。

管道支、吊、托架的作法和使用材料可参阅采暖通风标准图集(N112)。间距可以根据管段的负载计算确定。一般情况下,可以参考表 7.15 选定。

钢管管道支、吊、托架的最大间距 [m]

表 7.15

| 公称直径<br>$D_g$ [mm] | 16  | 20  | 25  | 32  | 40  | 50  | 65  | 80  | 100 | 125 | 150 | 200 | 250  | 300  |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 最大间距 [m]<br>保温管道   | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.0 | 4.0 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 6.5 | 7.0 | 8.0  | 8.5  |
| 最大间距 [m]<br>不保温管道  | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 6.0 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 8.0 | 9.5 | 11.0 | 12.0 |

## 7.6 管道系统试验

管道安装完毕后，应按设计规定对管道系统进行强度和严密性的试验，以检查管道系统及各连接部位的工程质量。

空调工程水管系统的试验用水作介质。

对于管线较长的或者管线高低标高差很大的，可以分段或分层作水压试验，这时要用临时盲板把受试段的管道与系统其他部分隔断。图 7.42 为水压试验装置示意图。

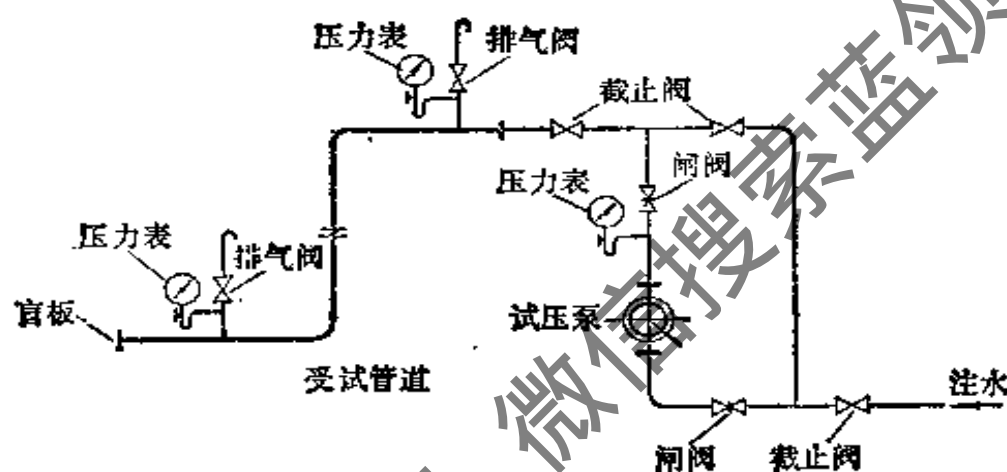


图 7.42 水压试验装置示意图

试验是这样进行的：

首先，用压缩空气清除管内杂物，需要时用水冲洗，水流速度取  $1.0 \sim 1.5 [m/s]$ ，直到排出的水干净为止（注意：在冲洗的同时要用小锤敲打管道），然后向管道系统内注水，此时，应把管道系统各高处的排气阀全部打开，让系统内空气排尽，待水灌满后关闭排气阀和进水阀。接着，用临时连接在管道中作试验用的手摇试压泵或电动试压泵加压，压力应逐渐升高，当压力加到一定值时，应停下来对管道进行检查。无问题时再继续加压，一般分  $2 \sim 3$  次升到试验压力；待压力表的指示压力达到试验压力时即停止加压，在该压力下保持  $10 \text{ min}$ ，如果在这段时间里未发现管道有渗漏或者变形的现象，且压力表的指示压力也不下降，则认为强度试验合格。强度试验压力取工作压力的  $1.25$  倍，但不可小于工作压力加

0.3[MPa]。

然后,把强度试验压力降至工作压力进行严密性试验(严密性试验压力等于工作压力)。在工作压力下对钢管进行全面检查,并且用质量为1.5[kg]以下的小锤在距焊缝15~20[mm]处沿焊缝方向轻轻敲击,到检查完毕时,如果压力表指示的压力值不下降,又管道的焊缝和法兰连接处均未发现有渗漏现象,即可认为严密性试验合格。

注意:试验用的压力表应预先经过校验并合格,精度不低于1.5级,表的满刻度值为最大被测压力的1.5~2.0倍,而且压力表不可少于两个。

获取更多资料

微信搜索蓝岛蓝岛

## 第 8 章 空调系统的消声、隔振与防火、排烟

### 8.1 空调系统的消声

空调工程中主要的噪声源是通风机、制冷机、机械通风冷却塔等。空调送排风系统中的噪声，又主要是由通风机在运转时产生的，它由空气动力噪声、机械噪声、电磁噪声组成，其中以空气动力噪声为主，经过风管传入室内。

#### 8.1.1 噪声的基本概念与评价标准

##### 1. 基本概念

噪声是声波的一种，它具有声波的一切物理特性。

##### ① 声压与声压级

声波传播时，由于空气受到了振动而引起了疏密变化，在原来大气压强上叠加了一个变化的压强。这个叠加的压强称为声压，用  $P$  表示，单位为  $[\text{Pa}]$ 。正常人耳刚刚能听到的微弱声音的声压（称为听阈声压）是  $2 \times 10^{-5} [\text{Pa}]$ ，能使人耳产生疼痛感觉的声压（称为痛阈声压）是  $20 [\text{Pa}]$ ，这两个声压的绝对值相差 100 万倍。可见，用声压的绝对值来表示声音的强弱是很不方便的。为此，人们便引出了一个成倍比关系的对数量——级，来表示声音的大小，这就是声压级。这正如风按级分，地震按级算一样。

声压级的单位是分贝  $[\text{dB}]$ ，它的数学定义表达式为：

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right)^2 = 20 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (8.1)$$

式中  $L_p$ ——声压级， $[\text{dB}]$ ；

$P$ ——声压， $[\text{Pa}]$ ；

$P_0$ ——基准声压。 $P_0 = 2 \times 10^{-5} [\text{Pa}]$ ，是  $1000 [\text{Hz}]$  纯音的听阈声压。

对应于听阈声压、痛阈声压的声压级分别为0[dB]和120[dB]。可见引出声压级的概念后,就把声压的数百万倍的变化范围,改变为的0~120[dB]的变化范围,从而大大提高了声压计量的简明程度。

## ② 声功率与声功率级

声波作为一种波动形式,当然具有一定的能量,我们有时也用声能量的大小来表示声音的强弱,通常用声强和声功率两个物理量。

声强是在声音传播的方向上单位时间内通过单位面积的声能量。通常用 $I$ 表示,单位是 $[W/m^2]$ 。

声功率是声源在单位时间内辐射出来的总声能量,通常用 $W$ 来表示,单位是 $[W]$ 。

与声压一样,声强与声功率也用级来表示,这就是声强级和声功率级,其单位也是[dB],它们的数学表达式分别为:

$$\text{声强级 } L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} [\text{dB}] \quad (8.2)$$

$$\text{声功率级 } L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} [\text{dB}] \quad (8.3)$$

式中  $I$ ——声场(媒质中有声波存在的区域)中某点的声强, $[W/m^2]$ ;

$I_0$ ——基准声强,听阈值。 $I_0 = 10^{-12} [W/m^2]$ ;

$W$ ——噪声源的声功率, $[W]$ ;

$W_0$ ——基准声功率。 $W_0 = 10^{-12} [W]$ 。

声场中某点的声强与该点的声压的平方成正比。比较公式8.2和8.1可知,声场中某点的声强级与声压级数值相等。

为了对声功率和声功率级有更直观的了解,下面举几个例子来说明。小电钟的声功率为 $10^{-8} [W]$ ,声功率级是40[dB];普通谈话的声音,声功率大约为 $10^{-5} [W]$ ,对应的声功率级是70[dB];气锤、球磨机噪声的声功率是1[W],声功率级120[dB];喷气式飞机噪声的声功率是10000[W],声功率级为160[dB]。

### ③ 多声源的叠加

噪声常常是由多个声源叠加的总效果,因此需要有一个计算若干个声源各自在声场中的某点所造成的声压级的总声压级的方法。由于声压级以 [dB] 为单位,几个声源造成的总声压级不能按普通的自然数那样将它们简单地相加。例如两个声压级各为 80[dB] 的声音叠加在一起,合成后的声压级决不是 160[dB]。两个不同来源的声音的叠加应按照能量法则进行。设两个互相独立的声音的声压分别为  $P_1$  和  $P_2$ , 声压级分别为  $L_{P_1}$  和  $L_{P_2}$ , 叠加后的总声压为  $P$ , 声压级为  $L_P$ 。由于声场中某点的总声强(注意:不是总声强级)等于各个声源到达该点的声强之和,即  $I = I_1 + I_2$ 。又因为某一点的声强与该点的声压的平方成正比,所以,

$$P^2 = P_1^2 + P_2^2$$

根据公式 8.1

$$L_P = 10 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right)^2 = 10 \lg \left( \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_0^2} \right) \quad (8.4)$$

$$L_{P_1} = 10 \lg \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^2 = 10 \lg \left( \frac{P_1^2}{P_0^2} \right)$$

或

$$\frac{P_1^2}{P_0^2} = 10^{0.1L_{P_1}} \quad (8.5)$$

同理可得:

$$\frac{P_2^2}{P_0^2} = 10^{0.1L_{P_2}} \quad (8.6)$$

将公式 8.5 和 8.6 代入公式 8.4, 得

$$L_P = 10 \lg (10^{0.1L_{P_1}} + 10^{0.1L_{P_2}})$$

设  $L_{P_1} \geq L_{P_2}$ ,  $L_{P_1} - L_{P_2} = D$ ,  $L_P - L_{P_1} = \Delta L$  则上式可写为:

$$L_P = L_{P_1} + \Delta L = L_{P_1} + 10 \lg (1 + 10^{-0.1D}) \quad (8.7)$$

在实际运算中,为了避免对数运算,可以利用分贝和的增值表(表 8.1)进行计算。



分贝和的增值表[dB]

表 8.1

|                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 分贝差, $D$       | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 16  |
| 增值, $\Delta L$ | 3.0 | 2.5 | 2.1 | 1.8 | 1.5 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |

如果是两个以上的声源相叠加,通常先将各个声压级从大到小依次排列,然后从两个最大的声压级开始计算。使第一个与第二个叠加,得到合成声压级。再用这个合成声压级与第三个叠加,依此类推,直到要叠加的两个声压级相差 15[dB] 以上为止。因为从表 8.1 可以看出,当声压级差大于 15[dB] 时,增值  $\Delta L$  几可忽略。

#### ④ 声谱

工程上,有时只要知道噪声的总声压级就行了。可是有时还要了解噪声主要是低频的,中频的,还是高频的,因为人耳对不同频率的声音的敏感程度是不同的,在人耳不易感觉到的频率范围内,即使声压级很高也可能没有什么害处。人耳可闻声音的频率范围为 20~20000[Hz],有 1000 倍的变化范围。为了方便起见,人们把如此宽广的声频范围划分为几个频段,即所谓的频段或频带。在噪声计算中,常用的倍频段,各频段的中心频率成倍增加,即为 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 [Hz], 这十个倍频段可以把耳闻声音全部包括在内大大简化了测量。实际上,在噪声控制工程中,只要用 63~8000[Hz] 八个倍频段也就足够了。

我们以频率(频带)为横坐标,以声压级(声强级、声功率级)为纵坐标,画出噪声的折线图,就是噪声的频谱。

#### ⑤ 声压级与声源声功率级的关系

在工程实践中,经常会遇到已知声源的声功率,要求确定在声场中的某一点的声强或声压值。我们知道,声波在媒质中传播时,伴随着声能量的传播,而声能量是由声源发散出来的。当声波由声源向周围辐射时,波前的面积随着传播距离的增加而不断扩大,

分布在单位面积上的声能量相应减少。声源周围的物体对声的传播也有显著影响,当声源装置在空旷的广场上时,只有从声源向周围发射出去的声波。而如果声源布置在封闭的房间内,从声源发射出来的声波将在有限空间内来回多次反射,叠加后形成复杂的声场。为了便于分析研究,通常把房间内的声场按照声场性质的不同分解为两个部分:一部分是由声源直接到达听者的直达声所形成的直达声场,另一部分是经过壁面一次或多次反射后到达听者的反射声所形成的混响声场。

直达声场是自由声场,声场内只有从声源向周围辐射出来的声波而没有反射回来的声波。设自由声场内某一点声源(声源的几何尺寸小于声源到听者的距离的二分之一,称为点声源)的声功率为  $W$ ,在距声源声学中心为  $r$ [m]处,与直达声相对应的声强为

$$I_D = \frac{QW}{4\pi r^2}, [\text{W/m}^2] \quad (8.8)$$

式中,系数  $Q$  叫做指向系数,是当声波不是沿整个球面扩散时引入的修正系数,可以理解为球面面积  $4\pi r^2$  与声波实际扩散面积之比。对自由空间  $Q=1$ ,对  $\frac{1}{2}$  自由空间,  $Q=2$ ,对  $\frac{1}{4}$  自由空间,  $Q=4$ ,对  $\frac{1}{8}$  自由空间,  $Q=8$ 。

在空气中传播的与直达声相对应的声压级  $L_{PD}$ ,由公式 8.8、8.2 和 8.1 可推得:

$$L_{PD} = L_W + 10 \lg \left( \frac{Q}{4\pi r^2} \right) \quad (8.9)$$

在通常情况下,混响声场可以近似看成是传播方向各向同性而且声场各处声强均匀的声场。同样可以推得,在空气中,与混响声相对应的声压级  $L_{PR}$  为:

$$L_{PR} = L_W + 10 \lg \left( \frac{4}{R} \right) \quad (8.10)$$

式中,  $R$  为反映房间声学特性的常数。  $R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\alpha}$  [m<sup>2</sup>]。  $S$  为房

间内表面的总面积, [m<sup>2</sup>];  $\bar{\alpha}$  为房间的平均吸声系数, 由房间各壁面的吸声系数按面积加权平均。 房间平均吸声系数见表 8.2。

房间平均吸声系数  $\bar{\alpha}$

表 8.2

| 房间的表面装修 | 平均吸声系数 $\bar{\alpha}$ | 举 例                           |
|---------|-----------------------|-------------------------------|
| 硬       | 0.10                  | 工厂车间、体育馆、室内游泳馆、教室、大教堂         |
| 中等      | 0.20                  | 演讲厅、商店、办公室、会议室、旅馆客房、医院病房、住宅卧室 |
| 软       | 0.40                  | 电台和电视台的播音室、剧场、音乐厅             |

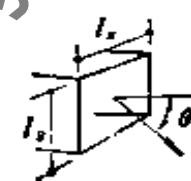
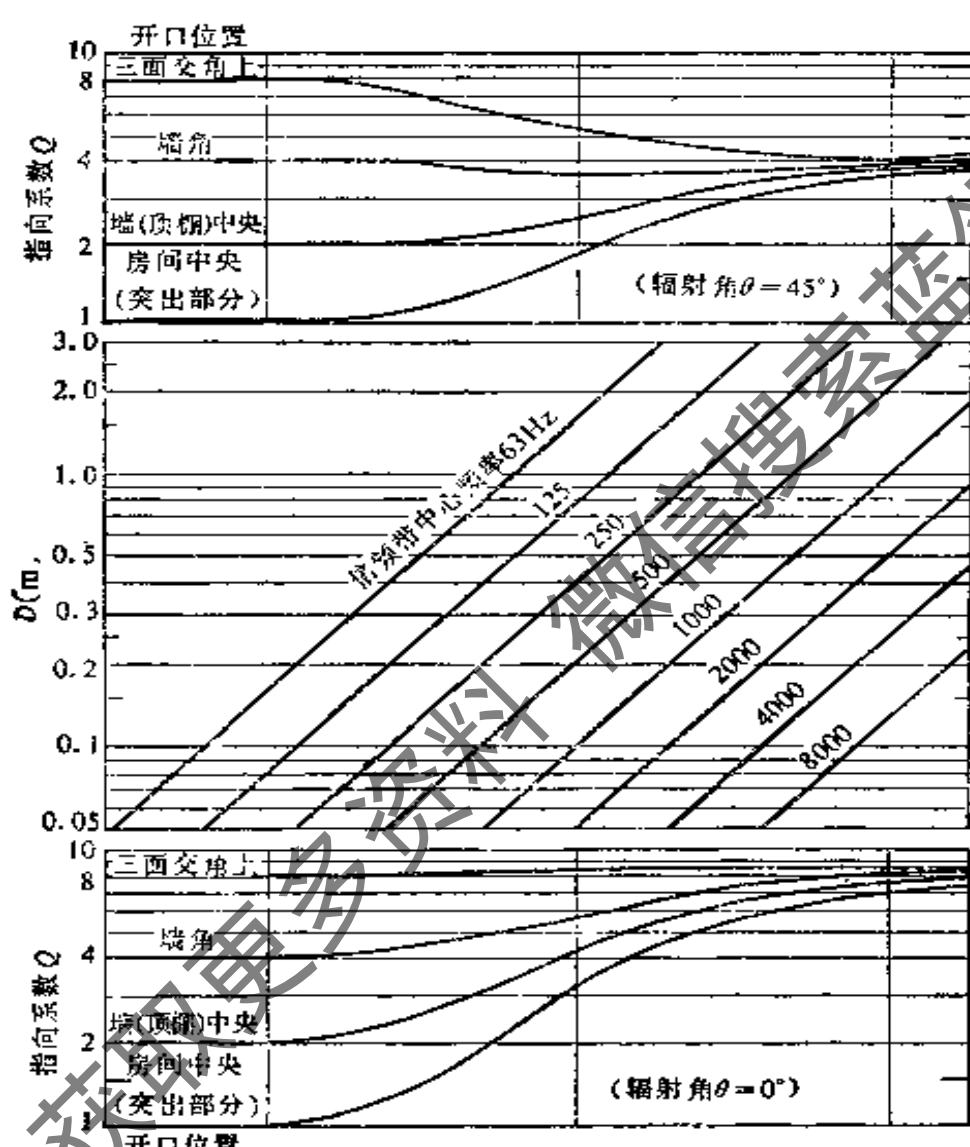
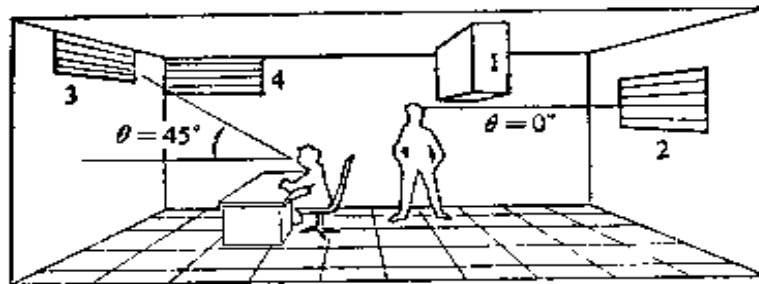
把直达声场与混响声场叠加在一起, 就得到实际的总声场。在空气中, 总声场的声压级  $L_p$  为:

$$L_p = L_w + 10 \lg \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (8.11)$$

从公式 8.11 可以看出, 由于声源的声功率级是给定的, 因此房间中各处声压级的相对变化就由等号右边第二项  $10 \lg \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$  所决定。

对一般房间, 指向系数  $Q$  随送风口(声源)位置、尺寸和人员(听者)的位置等变化, 可用图 8.1 求出。图中提供了辐射角  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 45^\circ$  的两种情况, 实际声场中  $\theta$  与上述两个角度的哪一个数值接近就取哪一个, 不必用插值法计算。风口位置与顶棚或墙面相对位置, 以距离 1[m] 为界来分类, 如 1 类风口(房间中央突出的风口)与顶棚距离不足 1[m], 则应认为是 2 类风口, 其他依此类推。

## 2. 噪声的评价标准



圆形开口  $D = \text{直径(m)}$   
 矩形开口  $D = \sqrt{l_x \cdot l_y} \text{ (m)}$   
 $\theta$ : 辐射角(受音区与开口所成的角度)  
 $Q$ : 指向系数

图 3.1 开口的指向系数

对噪声的评价,除上述客观物理量外,还与人耳对声压、频率

的主观感受有关。声压级相同而频率不同的声音听起来是不一样的。例如高频噪声的干扰比具有相同声压级的低频噪声的干扰更为严重。根据人耳听感试验特性,取 1000[Hz] 纯音的声压级为听响基准,以各频率的纯音作测听信号,测出与 1000[Hz] 纯音等响时的声压级,绘出系列的等响曲线,纯音 1000[Hz] 时的声压级代表该曲线的响度级数值。噪声评价标准就是在此基础上引伸出来的。但由于响度级是涉及噪声主观评价的量,使得它的计算不但麻烦而且在逻辑上也不够严密,通常不用响度级作为噪声评价标准,下面介绍两种常用的评价方法。

### ① 声级(A 声级)

参考等响曲线,在一般测量声压级的仪器即声级计中,设置计权网络 A、B、C,使它所接受的声音按不同的程度滤波,将测得的结果分别称作 A 声级、B 声级、C 声级。A 网络使声级计对高频敏感对低频不敏感,这正与人耳对噪声的感觉一样。目前,广泛采用 A 声级作为噪声评价的主要指标。我们通常所说噪声级,如果不加特别说明,指的就是 A 声级。在不致发生混淆的情况下,其单位记作 [dB], 不必记作 [dB(A)]。

### ② 噪声评价曲线

A 声级是单一的数值,是噪声的所有频率成分的综合反映,如果我们要较细致地评价各倍程的噪声,就应采用噪声评价曲线。图 8.2 中的 NR 曲线就是国际标准化组织(ISO) 提出和推荐的。它是各国最常采用的标准曲线。表 8.3 是它的各倍频程声压级的对应值。

噪声评价曲线按噪声级由低到高的顺序进行编号,它的号数 NR 叫做噪声评价数,且规定 NR 值等于中心频率为 1000[Hz] 的倍频程声压级的分贝整数。噪声评价数 NR 与 A 声级  $L_A$  值之间有一定的相关性,  $L_A = 0.8 NR + 18$ 。由于在实际问题中声源产生的噪声频谱不会刚好与评价曲线一致,通常规定在保证噪声频谱不超出评价曲线的条件下,以最靠近噪声频谱的评价曲线来决定该噪声的噪声评价数。

$N(NR)$ 噪声评价曲线倍频程声压级

表 8.3

| 评价曲线<br>号数 $N$ | 倍频程声压级对应值[dB] |     |     |     |     |      |      |      |      | [dB(A)]   |
|----------------|---------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----------|
|                | 31.5          | 63  | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | $0.8N+18$ |
| 0              | 55            | 36  | 22  | 12  | 5   | 0    | -4   | -6   | -7   | 18        |
| 5              | 59            | 40  | 26  | 16  | 9   | 5    | 1    | -1   | -2   | 22        |
| 10             | 62            | 48  | 30  | 21  | 14  | 10   | 6    | 1    | 3    | 26        |
| 15             | 65            | 47  | 35  | 26  | 19  | 15   | 11   | 9    | 8    | 30        |
| 20             | 69            | 51  | 39  | 30  | 24  | 20   | 16   | 14   | 13   | 34        |
| 25             | 72            | 55  | 43  | 35  | 29  | 25   | 21   | 18   | 18   | 38        |
| 30             | 76            | 59  | 48  | 40  | 34  | 30   | 26   | 25   | 23   | 42        |
| 35             | 79            | 63  | 52  | 44  | 39  | 35   | 32   | 30   | 28   | 46        |
| 40             | 82            | 67  | 57  | 49  | 44  | 40   | 37   | 35   | 33   | 50        |
| 45             | 86            | 71  | 61  | 54  | 48  | 45   | 42   | 40   | 38   | 54        |
| 50             | 89            | 75  | 65  | 58  | 53  | 50   | 47   | 45   | 44   | 58        |
| 55             | 93            | 79  | 70  | 63  | 58  | 55   | 52   | 50   | 49   | 62        |
| 60             | 96            | 83  | 74  | 68  | 63  | 60   | 57   | 55   | 54   | 66        |
| 65             | 100           | 87  | 78  | 72  | 68  | 65   | 62   | 60   | 59   | 70        |
| 70             | 103           | 91  | 83  | 77  | 73  | 70   | 67   | 65   | 64   | 74        |
| 75             | 106           | 95  | 87  | 82  | 78  | 75   | 72   | 70   | 69   | 78        |
| 80             | 110           | 97  | 92  | 86  | 82  | 80   | 77   | 76   | 74   | 82        |
| 85             | 113           | 103 | 96  | 91  | 87  | 85   | 82   | 81   | 79   | 86        |
| 90             | 117           | 107 | 100 | 96  | 92  | 90   | 87   | 86   | 84   | 90        |
| 95             | 120           | 111 | 105 | 100 | 97  | 95   | 92   | 91   | 89   | 94        |
| 100            | 123           | 115 | 109 | 105 | 102 | 100  | 97   | 96   | 95   | 98        |
| 105            | 127           | 119 | 113 | 110 | 107 | 105  | 103  | 101  | 100  | 102       |
| 110            | 130           | 122 | 118 | 115 | 112 | 110  | 108  | 106  | 105  | 106       |
| 115            | 134           | 126 | 122 | 119 | 117 | 115  | 113  | 111  | 110  | 110       |
| 120            | 137           | 130 | 127 | 124 | 121 | 120  | 118  | 116  | 115  | 114       |

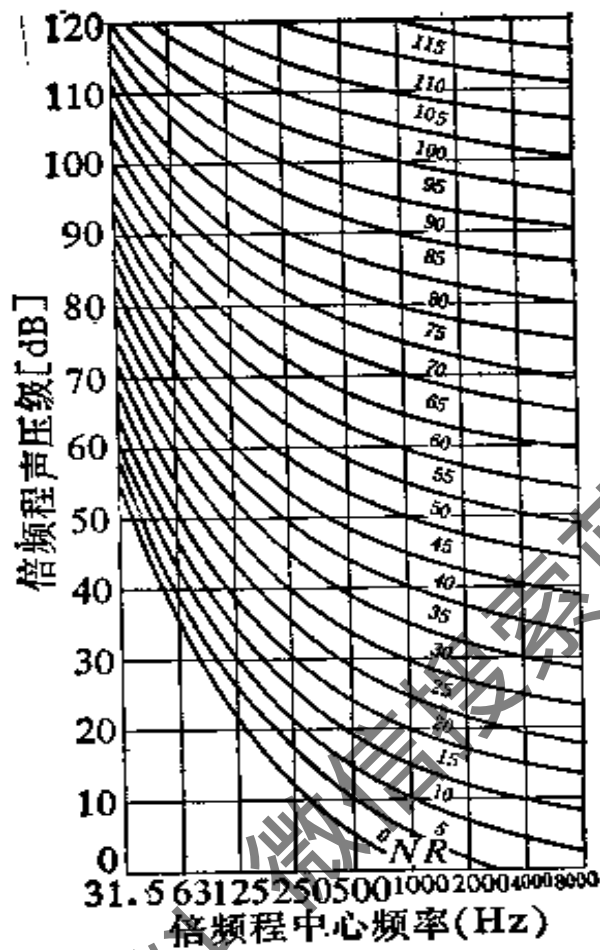


图 8.2 噪声评价数  $N(NR)$  曲线

### 3. 空调房间的允许噪声标准

空调房间的噪声标准主要是考虑保护人的听力和保证交谈和通讯的质量，达到能不费力地听清对方的讲话。噪声对听觉的危害与噪声的强度、频率以及持续时间等因素有关。根据国际标准组织统计，在不同噪声级下长期工作（40 年以上）噪声性耳聋的发病率分别为：80[dB]——0；85[dB]——10%；90[dB]——21%；95[dB]——29%；100[dB]——41%。国际标准组织提出的噪声容许标准规定：每天工作 8 小时，容许连续噪声的噪声级为 90 [dB]；根据作用时间减半，容许噪声能量可加倍的原则，每天工作 4 小时，容许噪声级为 93[dB]。但任何情况下，不得超过 115[dB]。

有消声要求的空调房间大致可分为两类：一类是生产或工作

过程对噪声有严格要求,如广播电台和电视台的演播室、录音室。这类房间的噪声标准应根据使用需要由工艺设计人员提出,经有关方面协商确定。另一类是在生产或工作过程中要求给操作人员创造适宜的声学环境。民用建筑允许噪声标准见表 8.4, 生产厂房及辅助建筑物允许噪声标准见表 8.5。对应的频谱特性曲线可由图 8.2 或表 8.3 查得。

民用建筑允许噪声标准[dB(A)] 表 8.4

| 建筑类别         | 建筑等级 |    |    |
|--------------|------|----|----|
|              | 高级   | 中级 | 普通 |
| 文娱建筑的音乐厅、剧院等 | 30   | 35 | 40 |
| 福利卫生建筑       | 35   | 40 | 45 |
| 居住类、办公类建筑    | 40   | 45 | 50 |
| 集会建筑、科研建筑    | 45   | 50 | 55 |

生产厂房及辅助建筑物允许噪声标准 表 8.5

| 建筑物类别         | 噪声级[dB(A)] |      |
|---------------|------------|------|
|               | 不宜大于       | 不得大于 |
| 一般生产厂房        | 85         | 90   |
| 精密加工、装配等轻作业厂房 | 65         | 70   |
| 控制室计算机房       | 55         | 65   |
| 厂房办公室         | 65         | 70   |
| 实验室、化验室       | 50         | 60   |

### 8.1.2 空调系统的噪声源

通风空调系统中,影响空调房间的主要噪声源是通风机。其他噪声源,如水泵、制冷压缩机等,也是很强的,但它们不与送排风系统直接接通,不会直接以空气噪声的形式影响空调房间。通风



机噪声由空气动力噪声、机械噪声和电磁噪声组成。通常以空气动力噪声为主要成分。空气动力噪声由气流涡旋噪声、撞击噪声和回转噪声组成。涡流噪声是气流在吸入口和叶轮中脱流形成的，它与风机的进风口，前盘结构以及其相互配合有关，当叶轮线速度增大时，涡流噪声也增加。撞击噪声是气流进入或离开叶片时产生的，它和风机的流量，叶片的入口、出口角度有关。当流量增加，风机工作点偏离最佳工作点时，撞击声随之增加。回转噪声又称叶片噪声，是旋转叶片对气流发出周期性的压力，引起气体压力和速度的脉动变化产生的。它与风机的转速高低，叶轮直径大小有关，当转速增高或叶轮直径增大（即线速度增大）时回转噪声随之增大。一般来讲，对称间距的叶片噪声的基频是由叶片数和每分钟转速的乘积决定：

$$f_s = \frac{nm}{60} \quad (8.12)$$

式中  $f_s$ ——叶片噪声的基频，[Hz]；

$n$ ——叶轮转速，[r/min]；

$m$ ——叶片数。

机械噪声是轴承摩擦，传动件加工安装不良和旋转部分的不平衡产生的。

电磁噪声是由于电机的空气隙中交变力相互作用而产生的。

控制空调通风系统中噪声的最有效的措施是降低通风机的噪声。首先要选择高效节能，低噪声型的通风机，在满足风量风压的前提下，适当选择转数低的风机，降低其空气动力噪声。其次是选用合理的轴承，提高装配精度，严格检验叶轮的动平衡和静平衡，降低风机的机械噪声。

### 1. 通风机的噪声及其估算公式

通风机的噪声随着不同系列或同系列的不同型号，不同转数而变化。即使同一型号的通风机，其噪声也会因装配精度的不同而不同。因此，在工程设计中最好能对选用通风机的声功率级和频带声功率级进行实测。如缺乏资料时，一般可根据经验公式来估计。

国内空调工程中常用通风机的噪声数据,见表 8.6。

实测通风机比声功率级

表 8.6

| T4-72 型(原 QDG) |                     |               | 4-79 型(原 HDG) |                     |               | 4-72 型    |                     |               |
|----------------|---------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|-----------|---------------------|---------------|
| 流量系数           | 比声功率级               | 效率            | 流量系数          | 比声功率级               | 效率            | 流量系数      | 比声功率级               | 效率            |
| $\bar{L}$      | $\bar{L}_w$<br>[dB] | $\eta$<br>[%] | $\bar{L}$     | $\bar{L}_w$<br>[dB] | $\eta$<br>[%] | $\bar{L}$ | $\bar{L}_w$<br>[dB] | $\eta$<br>[%] |
| 0.10           | 27                  | 68            | 0.12          | 35                  | 78            | 0.05      | 40                  | 60            |
| 0.14           | 23                  | 77            | 0.16          | 34                  | 82            | 0.10      | 32                  | 70            |
| 0.18           | 22                  | 84            | 0.20          | 26                  | 85            | 0.15      | 22.5                | 81            |
| 0.20           | 22                  | 86            | 0.25          | 21                  | 87            | 0.20      | 19                  | 91            |
| 0.24           | 23                  | 86            | 0.30          | 23                  | 85            | 0.25      | 21                  | 87            |
| 0.28           | 28                  | 75            | 0.35          | 29                  | 74            | 0.30      | 27                  | 76            |

已知风机的比声功率级,可以用下式计算某一运转工况下的声功率级:

$$L_w = \bar{L}_w + 10 \log(LH^2) + 16 [\text{dB}] \quad (8.13)$$

式中  $\bar{L}_w$ ——通风机的比声功率级, [dB]。由表 8.6 查得,或查通风机噪声特性曲线;

$L, H$ ——通风机的风量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] 和风压 [Pa]。

在缺乏通风机比声功率级实测数据的情况下,一般中低压离心通风机的比声功率级,在接近最高效率点时为 40 [dB], 这时通风机的声功率级可按下式估算(与实测的误差小于  $\pm 4$  [dB]):

$$L_w = 40 + 10 \lg(LH^2) [\text{dB}] \quad (8.14)$$

在求出通风机的声功率级后,可按下式计算通风机各频带声功率级  $L_{w \cdot \text{Hz}}$ :

$$L_{w \cdot \text{Hz}} = L_w + \Delta b [\text{dB}] \quad (8.15)$$

式中  $L_w$ ——通风机的(总)声功率级, [dB];

$\Delta b$ ——通风机各频带声功率级修正值, [dB]。见表 8.7。

通风机各频带声功率修正值  $\Delta b$  [dB]

表 8.7

| 通风机类型    | 中心频率 [Hz] |     |     |     |      |      |      |      |
|----------|-----------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|          | 63        | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| 离心风机叶片前向 | -2        | -7  | -12 | -17 | -22  | -27  | -32  | -37  |
| 离心风机叶片后向 | -5        | -6  | -7  | -12 | -17  | -22  | -26  | -33  |
| 轴流风机     | -9        | -8  | -7  | -7  | -8   | -10  | -14  | -18  |

空调工程中常用的 4-68 型、T 4-72 型、4-79 型均为后向叶片, 11-62 型为前向式叶片。

轴流式通风机产生的声功率级可按下列式估算:

$$L_w = 55 + 10 \lg L + 25 \lg H + \delta \text{ [dB]} \quad (8.16)$$

式中  $L$ ——风量, [m<sup>3</sup>/s];

$H$ ——风压, [Pa];

$\delta$ ——工况修正值, [dB]。见表 8.8, 表中  $L_{\max}$  为最高效率时的风量,  $m$  为叶片数,  $\theta$  为叶片倾斜角度。

轴流通风机噪声工况修正值  $\delta$  [dB]

表 8.8

| 叶片数 $m$ | 叶片角度 | $L/L_{\max}$ |      |      |      |      |     |     |      |
|---------|------|--------------|------|------|------|------|-----|-----|------|
|         |      | 0            | 0.4  | 0.6  | 0.8  | 0.9  | 1.0 | 1.1 | 1.2  |
| 4       | 15°  | —            | —    | 3.4  | 3.2  | 2.7  | 2   | 2.3 | 4.6  |
| 8       | 15°  | —3.4         | —    | 5    | 5    | 4.8  | 5.2 | 7.4 | 10.6 |
| 4       | 20°  | -1.4         | -2.5 | -4.5 | -5.2 | -2.4 | 1.4 | 2   | —    |
| 8       | 20°  | 4            | 2.5  | 1.8  | 1.9  | 2.2  | 3   | —   | —    |
| 4       | 25°  | 4.5          | 2    | 1.6  | 2    | 2    | 4   | —   | —    |
| 8       | 25°  | 9            | 8    | 6.4  | 6.2  | 8    | 6.4 | —   | —    |

## 2. 空调设备的噪声

整体式空调设备的噪声, 也主要来自其中的通风机, 因此只有

降低配用通风机的噪声，整体式空调设备的噪声才能相应降低。整体空调设备的噪声数据，一般可以在有关产品样本中查到。

立柜式空调机组的噪声较大，除通风机噪声外，机组下部压缩机的噪声也不可忽视。

窗式空调器的噪声，主要来自送风机及排风机(扇)，制冷压缩机的噪声也是噪声源之一。

风机盘管空调器的噪声，来自所配通风机及电动机。通常制造厂家给出高、中、低三档风速条件下的噪声功率级或声级。风机盘管的噪声级通常为  $20\sim 40[\text{dB}(\text{A})]$ 。

顺便指出，空调设备样本中提供的噪声数据，现在很不统一。有的厂家给出声源的声功率级，有的则给出距声源一定距离的声压级。使用时应注意，必要时可进行换算。

### 3. 风管部件中的噪声衰减

通风机噪声经过风管及其部件传播的过程中，由于管壁的摩擦，将部分声能转换为热能。此外，管道流通面积的变大、变小、管道分支，弯头以及其他部件，在其界面处阻抗不匹配，一部分声能透射过去，另一部分声能被反射回声源处，因而使噪声有所衰减。另一方面，上述风管局部构件增加了系统的阻力，引起气流的涡旋，也就可能引起再生噪声。随着风速的增加，再生噪声的影响也随之增大。

通常，对于直风管，当风速小于  $5[\text{m/s}]$  时，可以不计气流的再生噪声，风速大于  $8[\text{m/s}]$  时，可不计算管道中噪声的衰减量。

有消声要求的空气调节系统，其风管内的风速宜按表 8.9 选

风管内风速  $[\text{m/s}]$  表 8.9

| 室内容许噪声级 $[\text{dB}]$ | 主管风速 | 支管风速     |
|-----------------------|------|----------|
| 25~35                 | 3~4  | $\leq 2$ |
| 35~50                 | 4~6  | 2~3      |
| 50~65                 | 6~8  | 3~5      |
| 65~85                 | 8~10 | 5~8      |

用。

直管道的噪声衰减量见附录 8.1。弯头的噪声衰减量见附录 8.2。三通或四通的支管道噪声衰减量见附录 8.3,图中的衰减量适用于各种频率。管道截面积的突扩和突缩的构件,其噪声衰减量见附录 8.4 查得的衰减量适用于各倍频程。风口反射的噪声衰减量见附录 8.5。

### 8.1.3 噪声控制

#### 1. 降低系统噪声的措施

降低噪声一般应注意到声源、传声途径和工作场所的吸声处理三个方面,但以在声源处将噪声降低为最有效。为了降低通风机的噪声,首先要选用高效率低噪声的风机。尽可能采用叶片后向的离心式风机,应使其工作点位于或接近于风机的最高效率点,此时风机产生的噪声功率最小。其次,当系统风量一定时,选用风机压头安全系数不宜过大,必要时选用送风机和回风机共同负担系统的总阻力。第三,通风机进出口处的管道不得急剧转弯,通风机尽量采用直联或联轴器传动。第四,通风机进出口处的管道应装设柔性接管,其长度一般为 100~150[mm],且不宜超过 150[mm]。

设计空调工程的送、回风管路时,每个送回风系统的总风量和阻力不宜过大。必要时可以把大风量系统分成几个小系统。尽可能加大送风温差,以降低风机风量,从而降低风机叶轮外周的线速度,降低风机的噪声。应尽可能避免管道急剧转弯产生涡流引起再生噪声。风管上的调节阀不仅会增加阻力,也会增加噪声,应尽可能少装。风管内的空气流速应按表 8.9 选用,从通风机到使用房间的管内流速应逐渐降低。消声器后面的流速不能大于消声器前的流速。必要时,弯头和三通支管等处,应装设导流片。

当采取上述措施并考虑了管道系统的自然衰减作用后,如还不能满足空调房间对噪声的要求,应考虑采用消声器消声。

#### 2. 消声器

管道系统的消声器是系统噪声控制的重要措施,消声器的作

用是降低和消除通风机噪声沿通风管道传入室内或传向周围环境。

### (1) 消声器原理及性能指标

空调系统所用的消声器有多种形式,但根据消声的原理的不同大致可分为阻性和抗性两大类。阻性消声器的消声原理是借助装置在通风管道内壁上或在管道中按一定方式排列的吸声材料或吸声结构的吸声作用,使沿管道传播的声能部分地转化为热能而消耗掉,达到消声的目的。抗性消声器并不直接吸收声能,它的消声原理是借助管道截面的突然扩张或收缩或旁接共振腔,使沿管道传播的某些特定频率或频段的噪声,在突变处向声源反射回去而不再向前传播,从而达到消声的目的。

评价一个消声器性能的好坏,必须从它的声学性能、空气动力性能、几何形状、结构性能以及经济等方面综合考虑。

消声器的声学性能主要是指声压级差(噪声降低),即在消声器的进口管段测得的声压级  $L_{P_1}$  与在消声器出口管段测得的声压级  $L_{P_2}$  的差,  $L_{P_1} - L_{P_2}$  [dB]。

消声器的空气动力性能主要是指阻力,即给定温度和空气流量时,通过消声器的空气压力降。有的产品给出消声器的阻力系数。

在几何形状方面,要求消声器形状尽量简单,便于施工。同时要求消声器结构可靠,以减少维修。

附录 8.6 给出了几种常用消声器的声学性能参数。

### (2) 管道系统消声设计的步骤

首先,根据噪声源的频谱、管道系统的噪声衰减量和实际的室内容许噪声标准,确定消声器所需的消声量。要特别注意,噪声源的声功率级,噪声自然衰减量,室内容许噪声均应分别按各倍频程确定。

其次,根据给定的管道空气流量,选择适当的流速从而确定消声器的有效流通截面积。选择流速时应注意兼顾消声器的消声性能,空气动力性能以及气流再生噪声。一般地说,通过室式消

声器的风速不宜大于  $5[\text{m/s}]$ ；通过消声弯头的风速，不宜大于  $8[\text{m/s}]$ ；通过其他类型的消声器风速不宜大于  $10[\text{m/s}]$ 。

### (3) 消声器使用中应注意的问题

1) 消声器宜设置在靠近通风机房气流稳定的管道上，当消声器直接布置在机房内时，消声器检修门及消声器后的风管应具有良好的隔声能力。若主风管内风速太大，消声器靠近通风机设置，势必增加消声器的气流再生噪声，这时以分别在气流速度较低的分支管上设置消声器为宜。

2) 选择消声器时，宜根据系统所需的消声量、噪声源频率特性和消声器的声学性能及空气动力性能等因素，经技术经济比较，分别采用阻性、抗性或阻抗复合式消声器。

3) 在消声设计时，一般多选用消声弯头这类阻性消声器。抗性消声器使用条件要求严格，结构较复杂，体积较大，费用也高。多用于吸收某一范围的低频噪声，但它的消声范围很窄。室式消声器的消声量一般比较小，要达到较大的消声量则要多个室式消声器串联，这时气流阻力会较大，应尽量少用这种形式的消声器。

4) 近年来国内开始采用微穿孔板消声器。微孔板上的孔径小于  $1[\text{mm}]$ ，板厚小于  $1[\text{mm}]$ ，微孔有足够大的声阻，从而具有良好的吸声性能。与一般穿孔板结构比较，可省掉板后的多孔吸声材料，并可用不同穿孔率和不同后腔的双层微孔板使消声频带范围变宽。同时由于这种消声器的流动阻力小，又没有填料，不起灰尘，因此适合在高温高速风管和超净车间或防尘车间的通风管道中使用。附录 8.6 e) 所示的微穿孔板消声器风速在  $15[\text{m/s}]$  以下，具有良好的消声性能，在  $125\sim 8000[\text{Hz}]$  范围内，消声量在  $10[\text{dB}]$  以上。

【例 8.1】对图 8.3 所示的会议室送风管道系统进行消声设计。通风机型号为 T4-72 No. 7C，风量  $2.3[\text{m}^3/\text{s}]$  ( $8400[\text{m}^3/\text{h}]$ )，风压  $560[\text{Pa}]$  ( $57[\text{mmH}_2\text{O}]$ )，转速  $n=900[\text{r}/\text{min}]$ ，配用电动机功率  $N=2.2[\text{kW}]$ 。会议室的长×宽×高 =  $12\times 8\times 3[\text{m}]$ ，侧墙上部设三个相同尺寸的百叶送风口，尺寸为  $0.40\times 0.15[\text{m}]$ 。人员离送风口的最小距离为  $3\text{m}$ ，风口噪声至听者的辐射角  $\theta=4.2^\circ$ 。

【解】 1. 计算通风机频带声功率级

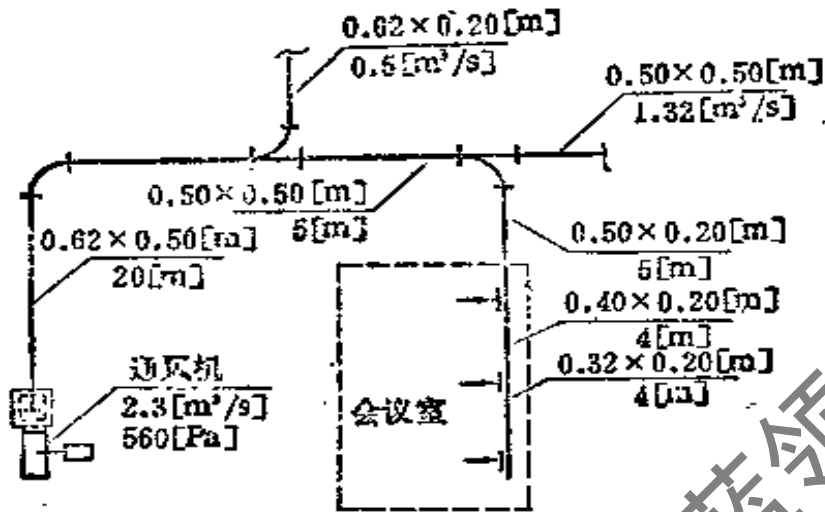


图 8.3 例 8.1 风管系统示意图

(1) 根据叶轮直径  $D=0.7$  [m], 无因次风量  $L=0.18$ , 查表 8.6 得风机比声功率级  $\bar{L}_w = 22$  [dB]。

(2) 用公式 8.13 计算通风机声功率级  $L_w$  :

$$L_w = \bar{L}_w + 10 \lg(LH^2) + 16 = 22 + 58.6 + 16 = 96.6 \text{ [dB]}$$

(3) 根据离心通风机后向叶片, 查表 8.7 得风机声功率修正值。

(4) 用公式 8.15 计算通风机倍频程声功率级。

## 2. 计算风管及风口的噪声自然衰减量

(1) 直风管的自然衰减量: 根据矩形风管最大边长为  $0.4 \sim 0.8$  [m], 查附录 8.1 得每 [m] 长风管噪声自然衰减量, 到第一个送风口的直管总长度为  $20 + 5 + 5 = 30$  [m]。

(2) 弯头自然衰减量: 根据风管宽度  $0.5$  [m], 查附录 8.2。

(3) 三通自然衰减量: 根据支管或直通管截面积与总管截面积之比分别为  $0.8$  和  $0.4$  查附录 8.3, 得两个三通的噪声自然衰减量分别为  $1.0$  [dB] 和  $4.0$  [dB]。

(4) 风口末端反射自然衰减量: 根据风口尺寸  $0.40 \times 0.15$  [m],  $D = \sqrt{0.40 \times 0.15} = 0.24$  [m], 按 III 类风口安装方式, 查附录 8.5 得各倍频程衰减量。

## 3. 计算送风口处声功率级及室内声压级

(1) 风口处的声功率级  $L_w$  为表 8.10 中序号 1 的值减去序号 2.6 的值之差。



(2) 根据  $\theta = 45^\circ$ ,  $D = 0.24$  [m], 风口在墙角 (第 3 种安装方式), 查图 8.1 得各倍频程指向系数  $Q = 4$ 。各频程基本相同。

(3) 查表 8.2, 会议室的平均吸声系数  $\bar{\alpha} = 0.20$ , 房间声学特性常数  $R =$

$$\frac{S \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{312 \times 0.20}{1 - 0.20} = 78。$$

(4) 将  $R, Q$  值代入公式 8.11, 得到一个风口在室内指定地点造成的声压级  $L_{P1} = L_w - 10.6$  [dB]。

(5) 风口个数修正: 按每个风口的声功率级相同, 由表 8.1 查得 3 个风口叠加时分贝和的增值  $\Delta L = 3.0 + 1.8 = 4.8$  [dB]。

#### 4. 室内容许噪声级

查表 8.4 中“集会建筑”为 50 [dB(A)], 对应于表 8.3 的的评价曲线号数  $N = 50 - 5 = 45$  的倍频程声压级。

#### 5. 需要的消声量

表 8.10 中序号 3.4 的值减去序号 4 的值。

#### 6. 消声弯头的消声量

(1) 消声弯头的消声量: 根据风管宽度 0.5 [m], 弯头前后均贴吸声材料, 由附录 8.6 a) 查得各倍频程消声量。

(2) 消声弯头的净增消声量: 从表 8.10 中序号 6.1 的值中减去序号 2.2 中值的一半 (即一个普通弯头的噪声自然衰减量)。

计算结果表明, 系统中设置一个消声弯头, 即可满足要求。

例 8.1 消声计算汇总表

表 8.10

| 计算<br>步骤 | 计算项目         | 倍频带中心频率, [Hz] |      |      |      |      |      |      |      | 备注 |
|----------|--------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|----|
|          |              | 63            | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |    |
| 1.       | 通风机声功率级      | 91.8          | 90.6 | 89.6 | 84.6 | 79.6 | 74.8 | 70.6 | 63.3 |    |
| 2.       | 风口及风管噪声自然衰减  |               |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 2.1      | 直风管(30[m])   | 18.0          | 18.0 | 9.0  | 4.5  | 4.5  | 4.5  | 4.5  | 4.5  |    |
| 2.2      | 90° 直角弯头(2个) | —             | —    | 12.0 | 16.0 | 8.0  | 6.0  | 6.0  | 6.0  |    |
| 2.3      | 三通(直通)       | 1.0           | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0  |    |
| 2.4      | 三通(分支)       | 4.0           | 1.0  | 4.0  | 4.0  | 4.0  | 4.0  | 4.0  | 4.0  |    |
| 2.5      | 送风口末端反射      | 13.0          | 8.0  | 4.0  | 2.0  | —    | —    | —    | —    |    |
| 2.6      | 风道及风口总衰减     | 36.0          | 31.0 | 30.0 | 27.5 | 17.5 | 15.5 | 15.5 | 15.5 |    |

续表 8.10

| 计算<br>步骤 | 计算项目                | 倍频带中心率(Hz) |      |      |      |      |      |      |       | 备注 |
|----------|---------------------|------------|------|------|------|------|------|------|-------|----|
| 3.       | 送风口处噪声功率级及室内<br>声压级 |            |      |      |      |      |      |      |       |    |
| 3.1      | 送风口处的噪声功率级          | 55.6       | 59.6 | 59.6 | 57.1 | 62.1 | 59.1 | 55.1 | 47.1  |    |
| 3.2      | 一个送风口形成的声压级         | 45.0       | 49.0 | 49.0 | 46.5 | 51.5 | 43.5 | 44.5 | 27.2  |    |
| 3.3      | 风口个数修正(三个风口)        | 4.8        | 4.8  | 4.8  | 4.8  | 4.8  | 4.8  | 4.8  | 4.8   |    |
| 3.4      | 室内计算声压级             | 49.8       | 53.8 | 53.8 | 51.3 | 56.3 | 53.3 | 49.3 | 42.0  |    |
| 4        | 室内容许噪声级             | 71.0       | 61.0 | 54.0 | 48.0 | 45.0 | 42.0 | 40.0 | 38.0  |    |
| 5.       | 需要的消声量              | -21.5      | -7.2 | -0.2 | 3.3  | 11.3 | 11.3 | 9.3  | 4.0   |    |
| 6.       | 消声器选择计算             |            |      |      |      |      |      |      |       |    |
| 6.1      | 消声弯头消声量             | —          | —    | 6.0  | 12.0 | 12.5 | 14.5 | 18.0 | 18.0  |    |
| 6.2      | 消声弯头净增消声量           | —          | —    | 0    | 4.0  | 8.5  | 11.5 | 15.0 | 15.0  |    |
| 6.3      | 校核(6.2-5)           | -21.5      | -7.2 | -0.2 | -0.7 | +2.8 | -0.2 | -5.7 | -11.0 |    |

## 8.2 空调装置的隔振

空调装置产生的振动,除了以噪声形式通过空气传播到空调房间,还可能通过建筑物的结构和基础进行传播。例如运转中的通风机所产生的振动可能传给基础,再以弹性波的形式从通风机基础沿房屋结构传到其他房间去,又以噪声的形式把能量传给了空气,这种传声被称为固体声。在振源和它的基础之间安装弹性构件,可以减轻振动力通过基础传出,被称作积极隔振。也可以在仪器和它的基础之间安装弹性构件,来减轻外界振动对仪器的影响,被称作消极隔振。

评价隔振效果的物理量中,最常用的是振动传递率  $K$ ,它表示通过隔振元件传递的力与振源的总干扰力之比值。 $K$  值越小,隔振效果越好。

振动传递率与振源的扰动频率  $f$  [Hz]、振源与减振器组成的系统的固有频率  $f_0$  [Hz]、隔振材料的阻尼比  $D$  有关, 如图 8.4 所示。一般橡胶减振器,  $D = 0.07 \sim 0.15$ ; 金属弹簧减振器,  $D = 0.005 \sim 0.015$ 。在工程设计中, 有时为了简化起见, 只需粗略估计隔振效果, 常将阻尼比  $D$  的影响忽略。当忽略阻尼比  $D$  的影响后, 振动传递率  $K$  的数学表达式为:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1} \quad (8.17)$$

式中  $K$ ——振动传递率;

$f$ ——振源的振动频率, [Hz],  $f = \frac{n}{60}$ ;

$f_0$ ——弹性减振系统的固有频率, [Hz],  $f_0 = \frac{5}{\sqrt{x_{cm}}}$ ;

$n$ ——通风机或其他振源的转速, [r/min]。

$x_{cm}$ ——振源不振动时, 弹性构件(或隔振材料)的静态压缩量, [cm]。

从图 8.4 可以看出, 要得到好的隔振效果, 就必须使固有频率  $f_0$  比振源的干扰频率  $f$  小得多, 通常在工程上选用  $f/f_0 = 2.0 \sim 5.0$ 。

在设计隔振时, 可以根据工程性质确定其减振标准, 即确定  $K$  值(表 8.11), 然后选择减振材料或减振器。

利用  $f_0$  与  $x_{cm}$  的关系, 可以进行减振器的选择和计算。将  $f_0 = \frac{5}{\sqrt{x_{cm}}}$ ,  $f = \frac{n}{60}$  代入公式 8.17 得到:

$$x_{cm} = \frac{a \times 10^4}{K n^2} \text{ [cm]} \quad (8.18)$$

式中  $K$ ——允许的振动传递率;

$n$ ——振源(如通风机)的转速, [r/min]。

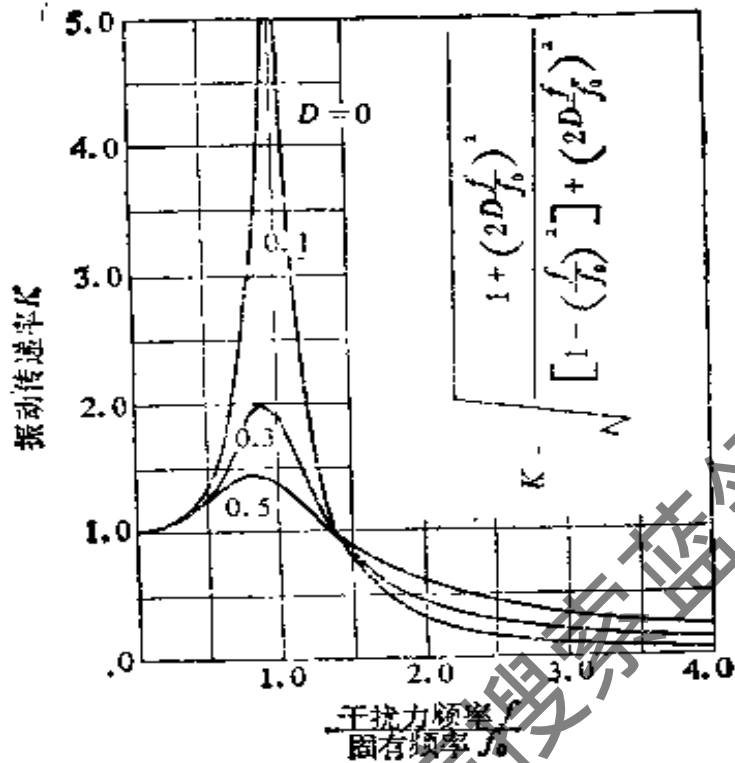


图 8.4 振动传递率  $K$  与  $f/f_0$  的关系

减振参考标准

表 8.11

| 允许振动传递率 $K$ | $f/f_0$ | 隔振评价 | 应用举例                                   |
|-------------|---------|------|--|
| 0.01~0.05   | 15~5    | 极好   | 设备装在播音室、音乐厅的楼板上；高层建筑上层                 |
| 0.05~0.10   | 5~3.3   | 很好   | 设备装在楼层，其下层为办公室、图书馆、会议室及病房等，其他要求严格隔振的房间 |
| 0.10~0.20   | 3.3~2.5 | 好    | 设备装在广播电台、办公室、图书馆及病房等安静房间附近             |
| 0.20~0.40   | 2.5~2.0 | 较好   | 设备装在地下室，周围为上述情况以外的一般性房间                |
| 0.40~0.50   | <2.0    | 不良   | 设备装在远离使用地点或一般车间                        |

按上述公式做成的线解图，如图 8.5。在工程实践中，有许多系列化的减振器产品可供选用。如橡胶减振垫，橡胶剪切减振器，弹簧减振器。这些减振器的样本都分别给出了隔振计算所必

须的技术参数。

【例 8.2】已知通风机的转速为  $n = 960[r/min]$ ，安装在楼层上，其下层为办公室。求所需的减振材料静态压缩量。

【解】由表 8.11 查得允许的振动传递率为  $K = 0.10$ 。根据  $K, n$  值查图 8.5，得  $s_{0.10} = 10[mm]$ 。

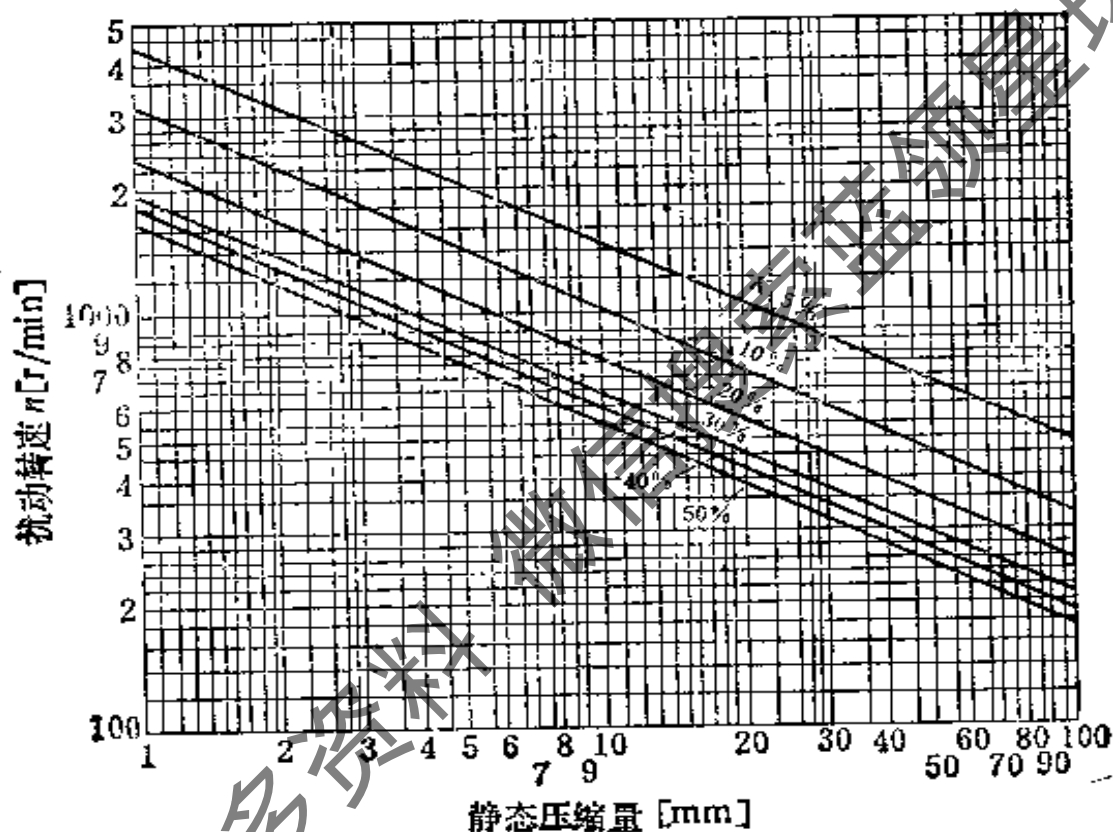


图 8.5 扰动转速  $n$  静态压缩量和传递率  $K$  的关系

在设计和选用减振器时，应注意以下几个问题：

1. 当设备转速  $n > 1500[r/min]$  时，宜选用橡胶、软木等弹性材料垫块或橡胶减振器；设备转速  $\leq 1500[r/min]$  时，宜选用弹簧减振器。

2. 减振器承受的荷载应大于允许工作荷载的 5~10%，但不应超过允许工作荷载。

3. 选择橡胶减振器时，应考虑环境温度对减振器压缩变形量

的影响, 计算压缩变形量宜按制造厂提供的极限压缩量的  $\frac{1}{3} \sim$

$\frac{1}{2}$  采用。设备的旋转频率  $f$  与橡胶减振器垂直方向的自振频率  $f_0$  之比应大于或等于 3.0。橡胶减振器应尽量避免太阳直接照射或与油类接触。

4. 选择弹簧减振器时, 设备的旋转频率  $f$  与弹簧减振器垂直方向的自振频率之比应大于或等于 2.0。当其共振振幅较大时, 宜与阻尼比大的材料联合使用。

5. 使用减振器时, 设备重心不宜太高, 否则容易发生摇晃。当设备重心偏高时, 或设备重心偏离几何中心较大且不易调整时, 或减振要求严格时, 宜加大减振台座的重量及尺寸, 使体系重心下降, 确保机器运转平稳。

6. 支承点数目不应少于 4 个。机器较重或尺寸较大时, 可用 6~8 个。

7. 为了减少设备的振动通过管道的传递量, 通风机和水泵的进出口宜通过隔振软管与管道连接。例如, K-ST 型可曲挠双球体合成橡胶接头(公称直径  $D_g$  20~65[mm]), K-XT 型可曲挠橡胶接头(公称直径  $D_g$  32~500[mm]), 球形接头耐腐蚀低压不锈钢软管(公称直径  $D_g$  6~32[mm])等。

8. 在自行设计减振器时, 为了保证稳定, 对弹簧减振器, 弹簧应尽量做得短胖些。一般地说, 对于压缩性荷载, 弹簧的自由高度不应大于直径的两倍。橡胶、软木类的减振垫, 其静态压缩量  $X_{cm}$  不能过大, 一般在 10[mm] 以内, 这些材料的厚度也不宜过大, 一般在几十毫米以内。

### 8.3 空调系统的防火

空调系统的风管是火灾蔓延的重要途径。尤其在设有空气调节的高层建筑中更为突出, 为了建筑及人员安全, 必须十分重视空调系统的防火问题。我国在 1982 年颁布了《高层民用建筑设计防火

规范(GBJ45-82)(试行)》，首次写入了有关通风和空气调节的条文。设计通风和空气调节系统时，从防火的角度来看，应注意以下一些问题。

1. 通风与空气调节系统，横向应按每个防火分区设置，竖向不宜超过10层。当排风道上有防止回流的措施，且各层设有自动喷水灭火设备时，新风管道可不受此限制。目前，旅游宾馆、医院、办公楼等建筑，大多采用风机盘管加新风或诱导式空调系统，其风管断面小，如排风采取防回流措施，其新风管道竖向穿越可超过10层。

防止回流的方法有：(1) 加大各层垂直排风支管的穿越高度，使各层排风支管穿越两层楼板，见图 8.6 a)。 (2) 把排风竖管分成大小两个管道，总竖管直通屋面，见图 8.6 b)。 (3) 将支管顺气流方向插入排气竖管道(支管到支管出口的高度不应小于 600 [mm])，见图 8.6 c)。 (4) 在支管上安装止回阀。 (5) 在支管上装防火阀。

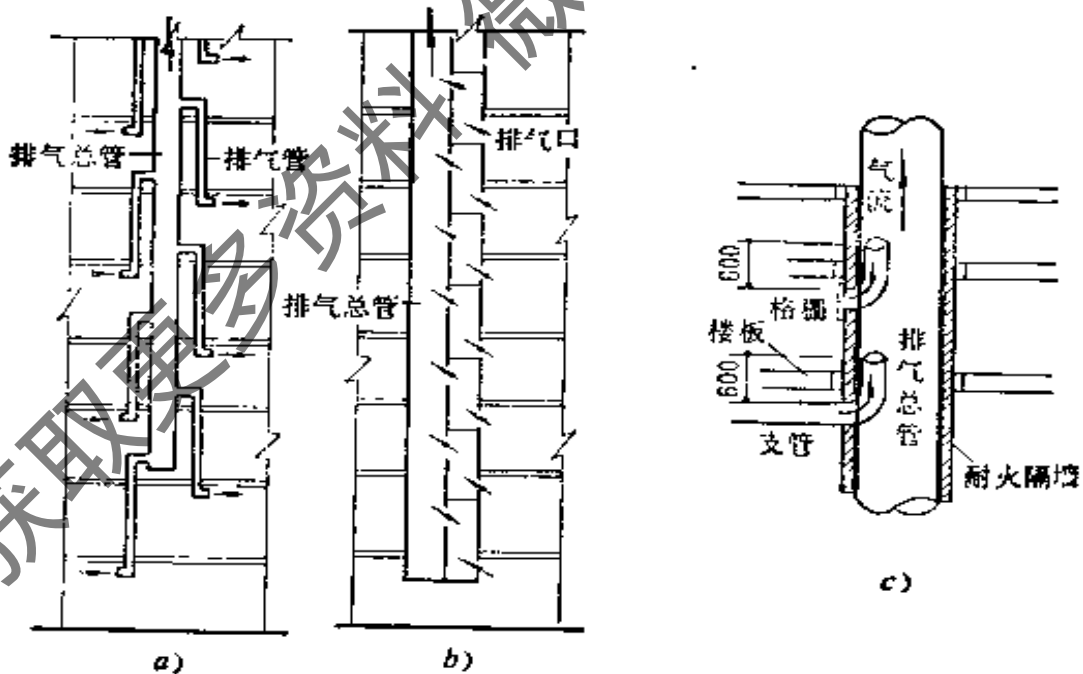


图 8.6 排气管防止回流构造示意图

2. 垂直风管应设在管道井内，该井壁应为耐火极限不低于 1

小时的非燃烧体，井壁上的检查门应采用丙级防火门。管道井应在每隔 2~3 层楼板处用相当于楼板耐火等级的非燃烧体做防火分隔。

3. 通风及空气调节系统的风管不宜穿过防火墙和变形缝，如必须穿过时，应在风管上设防火阀。穿过变形缝时，应在变形缝两侧的风管上设防火阀。防火阀的阀板应顺气流方向能自行严密关闭，防火阀处应有独立的支架、吊架，应有防止风管变形而影响关闭的措施。如图 8.7 所示。防火阀易熔环的作用温度宜为  $70[^\circ\text{C}]$ 。

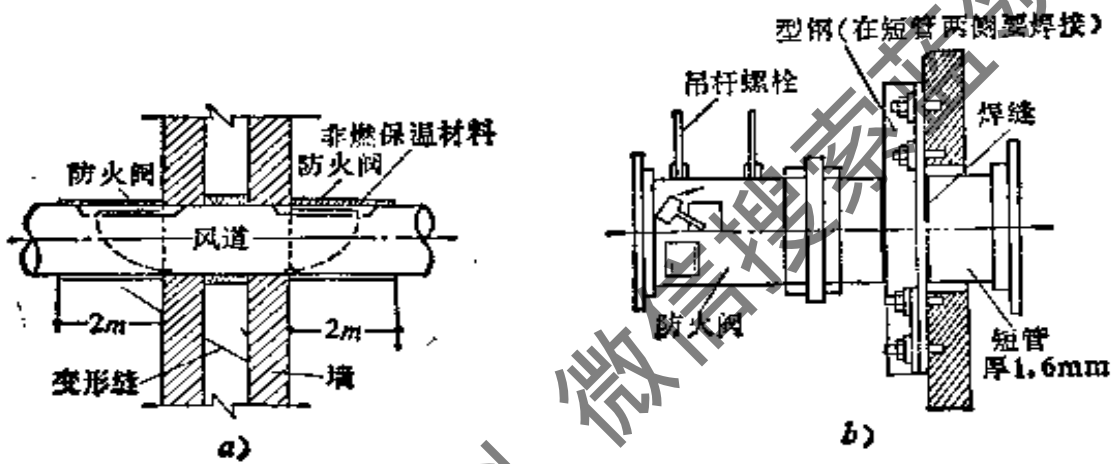


图 8.7 防火阀在变形缝处的安装

4. 通风和空气调节系统的送、回风总管，在穿越机房和重要的或火灾危险性较大的房间的隔墙、楼板处，以及垂直风管与每层水平风管交接处的水平支管上，均应设防火阀。参见图 8.8。

5. 厨房、浴室和厕所等的排风管道与竖井相连接时，应有防止回流的措施。

6. 风管内设有电加热器时，电加热器前后各  $800[\text{mm}]$  范围内的风管和穿过有火源等容易发生火灾房间的风管均应采用非燃烧保温材料(包括粘结剂)进行保温。电加热器应设置无风断电保护装置。目前，非燃保温材料、消声材料有矿渣棉、超细玻璃棉、玻璃纤维、膨胀珍珠岩制品、泡沫玻璃、石棉制品等。



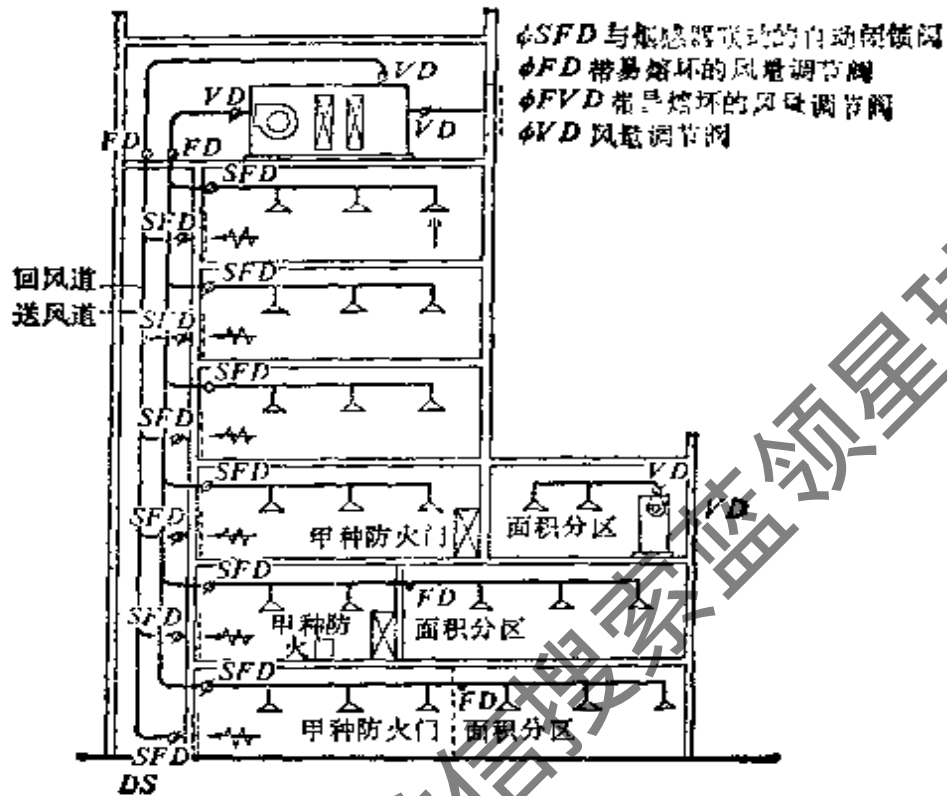


图 8.8 各种阀门设置示例

7. 通风与空调系统的风管,应采用非燃材料制作,保温或消声材料应采用非燃或阻燃材料。若采用阻燃材料作保温材料时,则风管穿越防火墙和楼板处的一段管道(前后各 2[m])应采用非燃材料,其穿墙和楼板处的空隙应采用非燃材料填塞。目前,阻燃的保温材料有自熄性聚氨脂泡沫塑料,自熄性聚苯乙烯泡沫塑料等。

8. 通风与空气调节的进风口应设在不受火灾威胁的安全部位。

9. 通风与空气调节机房应与其他部分隔开。并分别采用耐火极限不低于3小时和2小时的隔墙和楼板,门应采用耐火极限不小于0.9 小时的防火门。高层民用建筑的空调机房应设火灾自动报警装置。

10. 风管应考虑可靠的接地措施,防止静电积聚。

11. 防火阀及排烟阀、排烟风机等均应定期检修和运行,以备紧急情况下使用。

## 8.4 民用建筑的防烟、排烟

在民用建筑设计中,不仅需要妥善处理防火方面的问题,而且必须慎重考虑防烟排烟问题。防、排烟设施对减少人员的伤亡,有效控制火灾的扩大和蔓延,保证人员的安全疏散和扑救工作的进行等,是非常重要的。《高层民用建筑设计防火规范》规定,凡建筑物高度大于24[m]设有防烟楼梯及消防电梯的建筑物均应有防、排烟设施。

需要设置防烟、排烟的部位有:(1)防烟楼梯间及其前室、消防电梯前室和合用前室。防烟楼梯间和消防电梯设置前室的目的是阻挡烟气进入防烟楼梯和消防电梯;作为人员临时避难场所;降低建筑物本身由于热压差而产生的烟囱效应,以减慢烟火垂直蔓延的速度。据国外资料介绍,发生火灾时,烟气水平方向流动的速度为 $0.3\sim 0.8$ [m/s],垂直方向的扩散速度为 $3\sim 4$ [m/s]。当烟气无阻挡时,只要一分钟左右,就可以通过楼梯扩散到几十层高的楼面。(2)一类建筑和建筑高度超过32[m]的二类建筑的下列走道或房间:无直接天然采光和自然通风,且长度超过20[m]的内走道或虽有直接采光和自然通风,但长度超过60[m]的内走道;面积超过 $100$ [m<sup>2</sup>];且经常有人停留或可燃物较多的无窗房间、设固定窗扇的房间和地下室的房间。按上述《规范》(GBJ45—82)规定,一类建筑包括高级住宅(建筑标准高、可燃装修多、设有空调的住宅),19层及19层以上的普通住宅、医院、百货楼、展览楼、财贸金融楼、电信楼、广播楼、省级邮政楼、高级旅馆(建筑标准高、功能复杂、可燃装修多、设有空调的旅馆)以及重要的办公楼、科研楼、图书楼、档案楼,建筑高度超过50[m]的教学楼和普通的旅馆、办公楼、科研楼、图书楼、档案楼等。二类建筑包括10~18层的普通住宅,建筑高度不超过50[m]的教学楼和普通的旅馆、办公楼、科研楼、图书楼、档案楼,省级以下的邮政楼等。

在高层建筑物内,为了把火灾控制在一定范围内,防止火势蔓延扩大,减少火灾危害,用防火墙和楼板分成若干个分区,称为防火分区。而为了着火时将烟气控制在一定范围内,需设排烟设施的走道、净高不超过 6[m] 的房间,应当用挡烟垂壁、隔墙或从顶棚下突出不少于 500[mm] 的梁在防火区内划分几个分区,称为防烟分区。每个防烟分区的建筑面积不宜超过 500[m<sup>2</sup>] 且防烟分区不应跨越防火分区。

通常的防排烟方式有下列四种:自然排烟、机械排烟、防烟加压送风和密闭防烟。

#### 8.4.1 自然排烟

自然排烟就是利用与室外相邻的窗、阳台、凹廊或专用排烟口将室内的烟气排出。自然排烟不使用动力,结构简单,运行可靠,但是当火势猛烈时,火焰有可能从开口部喷出,从而使火势向上层蔓延。自然排烟还容易受室外风力的影响。

自然排烟口的面积,一般可取地板面积的 2%。排烟口应设置在防烟分区顶棚上或靠近顶棚的墙面上,距顶棚 800[mm] 以内。因为,不管窗的高度有多高,起排烟作用的有效高度是顶棚以下的 800[mm]。排烟口的平面位置应使防烟分区内的任何地点至排烟口的水平距离在 30[m] 以内。

不靠外墙的防烟楼梯间前室、消防电梯前室和合用前室或虽靠外墙但不能开窗者,可采用排烟竖井进行自然排烟。这时必须同时设置竖井进风风道,以便直接将室外空气引入室内(图 8.9)。

自然排烟竖井的断面积不宜小于 6[m<sup>2</sup>],合用前室时不宜小于 9[m<sup>2</sup>]。排烟口的开口面积不宜小于 4[m<sup>2</sup>],合用前室时不宜小于 6[m<sup>2</sup>]。

采用自然进风时,竖井的面积不宜小于 2[m<sup>2</sup>],合用前室不宜小于 3[m<sup>2</sup>]。进风口有效面积不宜小于 1[m<sup>2</sup>],合用前室不宜小于 1.5[m<sup>2</sup>]。进风口应设在前室靠近地面的墙上。

自然排烟的排烟量,按热压作用下的自然通风量计算方法来计算。

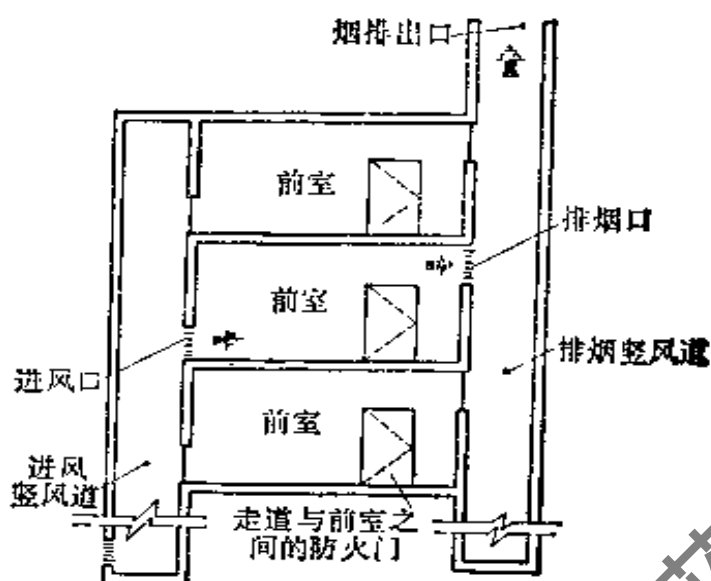


图 8.9 利用排烟竖井排烟

#### 8.4.2 机械排烟

机械排烟就是使用排烟风机进行强制排烟。它由挡烟垂壁(活动式或固定式)、排烟口(或带有排烟阀门的排烟口)、防火排烟阀门、排烟风机和排烟出口组成。机械排烟可分为局部排烟和集中排烟两种。局部排烟方式是在每个房间内设置风机直接进行排烟；集中排烟方式是将建筑物划分为若干区，在每个区内设置排烟风机，通过风道排出各房间的烟气。

挡烟垂壁应用非燃材料制作，如钢板，夹丝玻璃、钢化玻璃等。活动挡烟垂壁从顶棚垂下不小于 500[mm](地下室不小于 800[mm])。活动挡壁应由烟感探测器控制，或与排烟口联动，或受消防控制中心控制，但同时应能就地手动控制。活动挡烟垂壁落下时，其下端距地面的高度应大于 1.8[m]。

走道或房间采用机械排烟时，排烟风机的风量按下述方法确定。当排烟风机负担一个防烟分区时(包括不划分防烟分区的大空间房间)，应该按防烟分区面积每平方米不少于 0.017[m<sup>3</sup>/s] (1[m<sup>3</sup>/min]) 计算；当负担两个或两个以上防烟分区时，应按最大防烟分区面积每平方米不少于 0.03 ([m<sup>3</sup>/s] (2[m<sup>3</sup>/min])) 计算。一个排烟风机可以负担几个防烟分区，其最大排烟量为

16.7[m<sup>3</sup>/s](60000[m<sup>3</sup>/h]),最小为 2[m<sup>3</sup>/s](7200[m<sup>3</sup>/h])。

选择排烟风机时,应附加漏风系数,一般采用 10~30%。排烟风道应按最不利条件考虑,即按最大两个排烟口同时开启的条件计算。机械排烟管道内的风速,采用金属管道时,不应大于 20 [m/s];采用内表面光滑的混凝土等非金属风道时,不应大于 15[m/s]。排烟口风速不宜大于 10[m<sup>3</sup>/s]。

防烟楼梯间前室、消防电梯前室和合用前室的机械排烟,其排烟风机的排烟量不宜小于 4[m<sup>3</sup>/s] (合用前室时不宜小于 6[m<sup>3</sup>/s])。

### 8.4.3 防烟加压系统

楼梯间及其前室,对火灾时疏散人员、灭火救护工作有重要意义,为了保证火灾时烟气不侵入楼梯间及其前室,用风机向楼梯间送风,使其压力高于防烟楼梯间前室或消防电梯前室,而前室的压力又比走道和火灾房间要高些,这种防止烟气侵入的方式,称为防烟加压方式(图 8.10)。

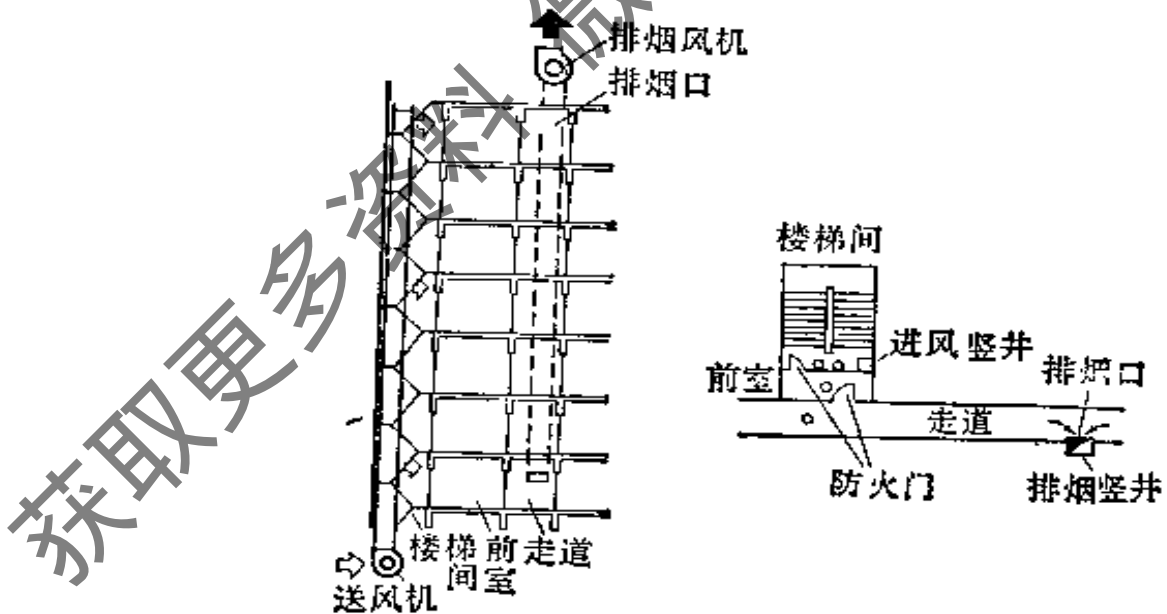


图 8.10 防烟加压送风示意图

对加压空间的送风,通常是依靠通风机通过管道送入被加压空间。这种空气必须吸自室外,并不应受到到烟气污染。这种空

气不需作过滤、消声或加热等任何处理。

加压送风时，防烟楼梯间与室外空间的设计压差，可采用 25~50[Pa]。

加压空气从建筑物排出的方式，通常有：(1) 建筑物周边设置专用的排风口。在正常状态时，排风口阀门处于关闭状态，发生火灾时加压系统开始运行，同时将火灾层的排风口打开。(2) 竖风道自然排风。供加压系统排风用的风道，不允许安装防火阀，所有楼层上的排风口经常处于关闭状态。当火灾发生时，只打开失火那层的排风口。(3) 竖风道机械排风。着火层的排风量应大于该层的加压送风量。排风口经常处于关闭状态。(4) 外窗排风。利用房间或走道的可开启外窗排风。

防烟加压系统送风量计算，通常有以下三种方法：

1. 按防烟楼梯间服务层数计算。一般每层送风量不少于 0.47[m<sup>3</sup>/s](1700[m<sup>3</sup>/h])。

2. 按保持防烟楼梯间内正压值 25[Pa] 所需的送风量计算。考虑除着火层以外的所有楼梯间的门均是关闭状态，按下式计算：

$$L = 7 + 0.1 N [\text{m}^3/\text{s}] \quad (8.19)$$

式中  $N$ ——建筑物的层数。

3. 按加压空间的漏风量确定送风量。可以按所有防烟楼梯间的门都关闭，保持一定压差值时，通过全部漏风面积的总漏风量确定送风量，也可以按通往楼梯间的门开启时，保持门洞断面上的空气流速来确定送风量。当所有楼梯门关闭时：

$$L = 0.827 A (\Delta P)^{\frac{1}{N}} \times 1.25 = A (\Delta P)^{\frac{1}{N}} \quad (8.20)$$

式中  $L$ ——楼梯间送风量，[m<sup>3</sup>/s]；

0.827——漏风系数；

$A$ ——总有效漏风面积，[m<sup>2</sup>]；

$\Delta P$ ——楼梯间与前室之间的压差，[Pa]。通常取为 25~50[Pa]；

$N$ ——指数。对门缝，取 2；对窗缝，取 1.6；

1.25——其他不严密处的附加系数。

防烟楼梯间及其前室,宜分别设置送风竖井(管)。为了使楼梯间压力趋向均匀,减少超压现象,楼梯间的送风竖井(管),宜每隔2~3层设一个送风口,前室送风竖井应每层设一个送风口。送风口的面积大小,根据风速要求经计算确定。送风口的风速不宜大于7[m/s]。

#### 8.4.4 密闭防烟

这种防烟方式,一般适用于面积较小,且其墙体、楼板耐火性能较好,密封性好并采用防火门的房间。在发生火灾时,人员很快疏散出来,并立即用防火门将着火房间关闭起来与周围隔绝,使之缺氧而达到灭火的目的。目前国内尚无先例,在国外有少数建筑、局部房间采用过此种防烟方式。

### 8.5 防火规范简介

近年来,我国颁布的有关建筑防火方面的法则主要有三个:一是1987年颁布的《建筑设计防火规范》GBJ16—87。一个是1982年颁布的《高层民用建筑设计防火规范》GBJ 45—82 另一个是1987年颁布的《人民防空工程设计防火规范》GBJ 98—87。

《建筑设计防火规范》GBJ16—87是在1974年颁布的《建筑设计防火规范》TJ16—74(试行)的基础上修订后形成的国家规范,该规范共10章241条5个附录。其中第9章为采暖通风和空气调节,该章包括24条。规范GBJ 16—87适用于9层及9层以下住宅和建筑高度不超过24[m]的其他民用建筑以及建筑高度不超过24[m]的单层公共建筑;适用于单层、多层和高层工业建筑。

《高层民用建筑设计防火规范》GBJ 45—82,适用于10层及10层以上的住宅和建筑高度超过24[m]的其他民用建筑,包括底层设置商业服务网点的住宅,但不适用于建筑高度超过100[m]的民用建筑和单层主体建筑高度超过24[m]的体育馆、会堂、剧院等公共建筑以及高层民用建筑中的人民防空地下室。该规范共有8

章和 3 个附录。其内容包括:总则,建筑分类和耐火等级,总平面布局 and 平面布置,防火、防烟分区和建筑构造,安全疏散和消防电梯,消防给水和固定灭火装置,防烟、排烟和通风、空气调节,电气等。

现将该规范第7章防烟、排烟和通风、空气调节的主要内容(除本书已引用的部分外)简介如下:

### 1. 防烟楼梯间、消防电梯及它们的前室

防烟楼梯间及其前室、消防电梯前室和合用前室,应设独立的防烟、排烟设施。因它们是防火救灾所必需的重点部位,其排烟系统要重点保证,不应与其他部位的防、排烟系统合用。

靠外墙的防烟楼梯间前室,消防电梯前室和合用前室,宜采用自然排烟方式。这种自然排烟方式具有投资少,效果较好,维护管理简单等优点。鉴于目前我国的经济技术和管理水平都较低,这种方式值得推广。采用自然排烟方式时,应设阳台、凹廊或在外墙的上部设置有便于开启装置的排烟窗,其开窗面积不宜小于  $2[m^2]$ ,合用前室不宜小于  $3[m^2]$ 。

采用机械排烟的防烟楼梯间前室、消防电梯前室和合用前室,其排烟量不宜小于  $4[m^3/s]$ (合用前室不宜小于  $6[m^3/s]$ )。

采用机械加压送风的防烟楼梯间及其前室、消防电梯前室和合用前室,应保持正压,且楼梯间的压力应略高于前室的压力。

### 2. 排烟风机

排烟风机宜采用离心式风机,并应保证在  $280[^\circ C]$  时能连续工作 30 分钟。排烟风机应与排烟口设联锁装置,当任何一个排烟口开启时,排烟风机即能自动启动。排烟风机应有备用电源,并能自动切换。

排烟风机的入口处,应设当烟气温度超过  $280[^\circ C]$  时能自动关闭的装置。因为当烟道内的烟气温度达到  $280[^\circ C]$  时,在一般情况下,房间人员已疏散完毕。而且,这时烟气中已带火,如不停止排烟,烟火就有扩大到其上层的危险,造成新的危害。而这时只关掉排烟风机并不能阻止烟火的垂直蔓延,排烟风机入口管上装自



动关闭装置就起到不使烟火蔓延到排烟风机所在层(通常在顶层)的作用。

### 3. 排烟管道材料

排烟口、排烟阀门、排烟管道等与烟气接触的部分,必须采用非燃材料制成,并应与可燃物保持不小于 150[mm]的距离。

### 4. 机械排烟系统与通风空调系统

机械排烟系统宜与通风、空气调节系统分开独立设置。有可能利用通风、空气调节系统进行排烟时,必须采取可靠的安全措施,并应设有在火灾时将通风机、空气调节系统自动切换为排烟系统的装置。

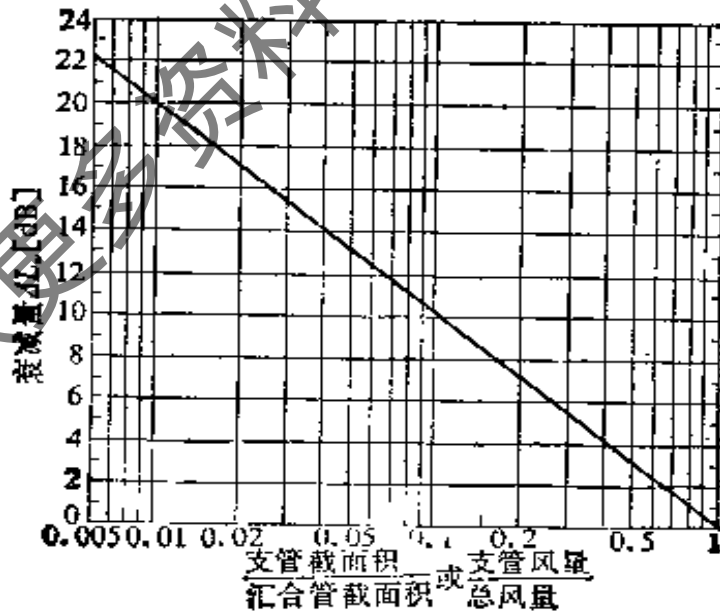
如利用空气调节系统作为排烟用时,要把风管与风机连接位置改变,需要装旁通管烟自动切换阀,平常运行时,增大漏风量和阻力。另外,空气调节系统的风口都是开的,而作为排烟口在火灾时只有起火处的排烟口开启排烟,其他都要关闭,这就要求空气调节系统每个风口上都装设自动控制阀门,才能满足排烟的要求。根据我国目前自动化水平,设备生产情况,排烟系统宜与通风、空气调节系统分开独立设置。

此外,我国目前高层建筑中采用全而通风的不多,而空气调节系统又多采用风机盘管加新风系统,客房每人的新风量只有 $0.008 \sim 0.014[\text{m}^3/\text{s}]$ ( $30 \sim 50[\text{m}^3/\text{h}]$ ),作为排风量是太小了。故在大多数情况下,排烟系统与通风空调系统合用也是不可能的。

金属风管内的噪声衰减量 [dB/m]

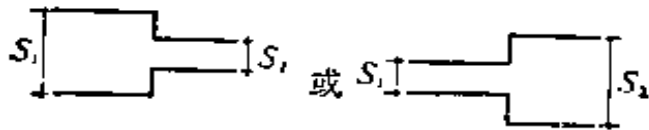
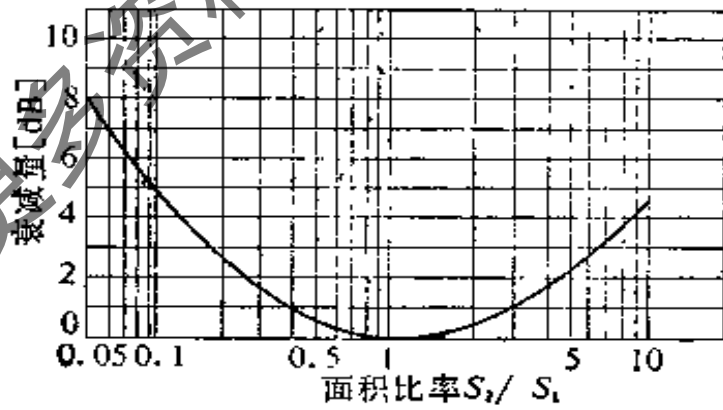
附录表 8.1

| 最大边尺寸或直径<br>[m] |         | 倍频带中心频率[Hz] |      |      |      |       |
|-----------------|---------|-------------|------|------|------|-------|
|                 |         | 63          | 125  | 250  | 500  | ≥1000 |
| 矩形风管            | <0.2    | 0.60        | 0.60 | 0.45 | 0.30 | 0.30  |
|                 | 0.2~0.4 | 0.60        | 0.60 | 0.45 | 0.30 | 0.20  |
|                 | 0.4~0.8 | 0.60        | 0.60 | 0.30 | 0.15 | 0.15  |
|                 | 0.8~1.6 | 0.45        | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 0.06  |
| 圆形风管            | <0.2    | 0.10        | 0.10 | 0.15 | 0.15 | 0.30  |
|                 | 0.2~0.4 | 0.06        | 0.10 | 0.10 | 0.15 | 0.20  |
|                 | 0.4~0.8 | 0.03        | 0.06 | 0.06 | 0.10 | 0.15  |
|                 | 0.8~1.6 | 0.03        | 0.03 | 0.03 | 0.06 | 0.06  |

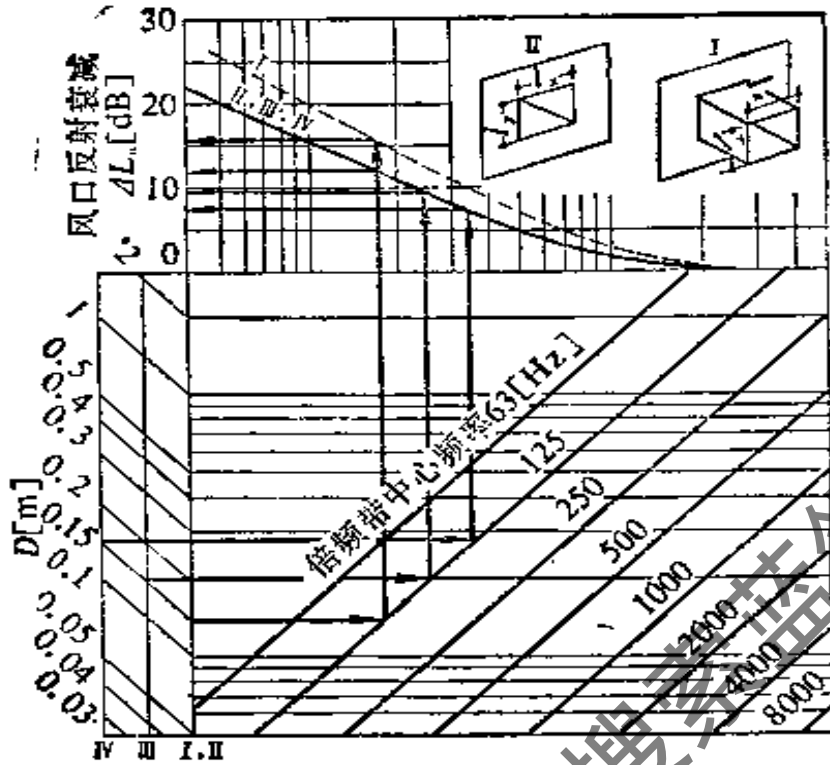


附录 8.2 支通道的噪声衰减量

| 风管宽度或直径<br>[m] |       | 信频率中心频率 [Hz] |     |     |      |      |      |      |
|----------------|-------|--------------|-----|-----|------|------|------|------|
|                |       | 125          | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| 矩形风管           | 0.13  | —            | —   | —   | 6    | 8    | 3    | 3    |
|                | 0.25  | —            | —   | 6   | 8    | 4    | 4    | 3    |
|                | 0.50  | —            | 6   | 8   | 4    | 3    | 3    | 3    |
|                | 1.00  | 6            | 8   | 4   | 3    | 3    | 3    | 3    |
| 圆形风管           | ≤0.25 | —            | —   | —   | 1    | 2    | 3    | 3    |
|                | 0.28~ | —            | —   | —   | —    | —    | —    | —    |
|                | 0.50  | —            | —   | 1   | 2    | 2    | 3    | 3    |
|                | 0.53~ | —            | —   | —   | —    | —    | —    | —    |
|                | 1.00  | —            | 1   | 2   | 3    | 3    | 3    | 3    |
|                | 1.05~ | —            | —   | —   | —    | —    | —    | —    |
|                | 2.00  | 1            | 2   | 3   | 3    | 3    | 3    | 3    |

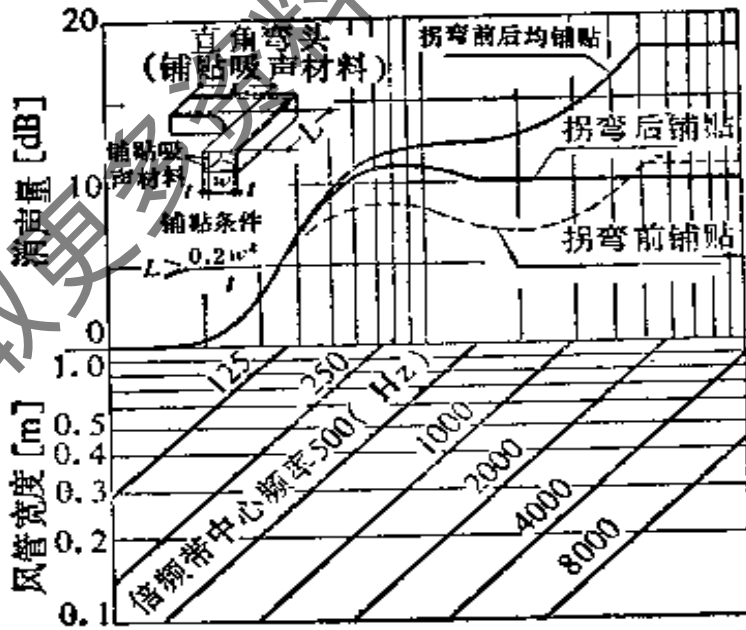


附录 8.4 单变径管的噪声衰减量

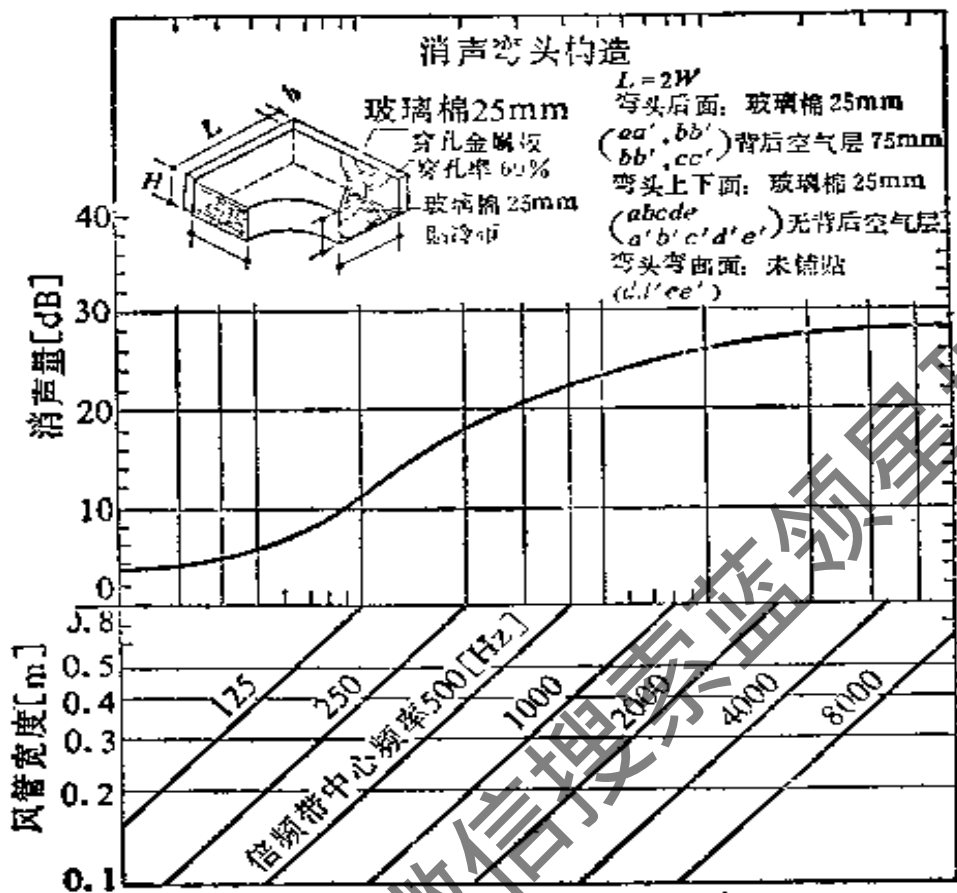


附录 8.5 风口反射损失计算图

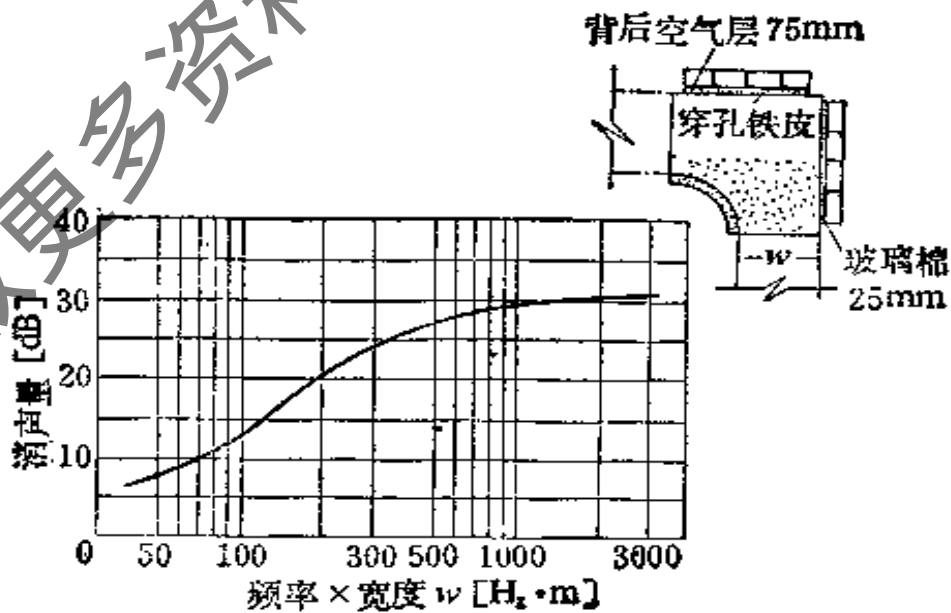
I—房间中央(突出部分), II—墙(顶棚)中央; III—墙角; IV—三面交角上圆形开口;  $D$  = 直径(m); 矩形开口:  $D = \sqrt{l_x + l_y}$  (m)



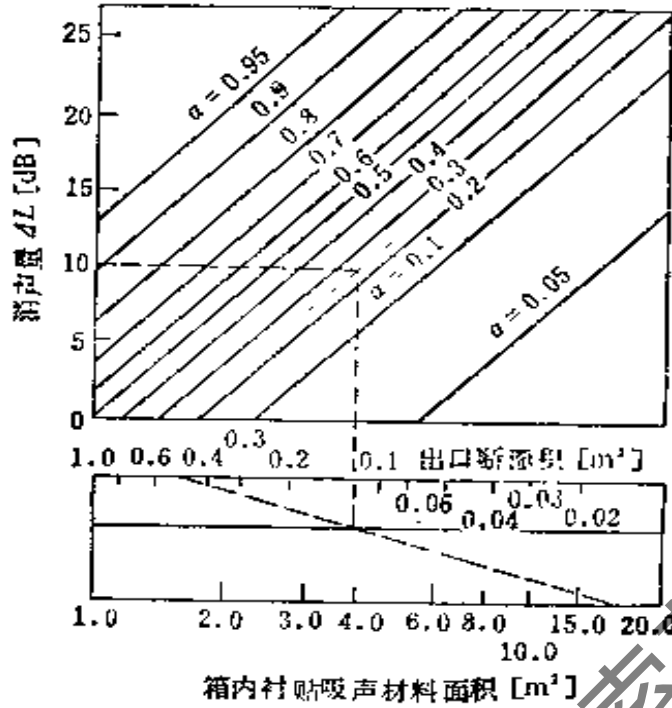
附录 8.6 a) 直角弯头(铺贴吸声材料)的消声量



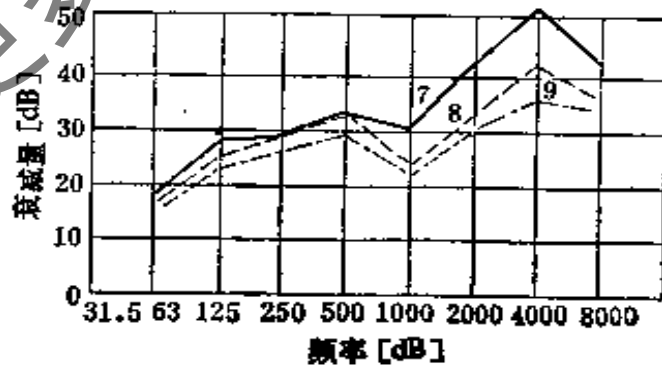
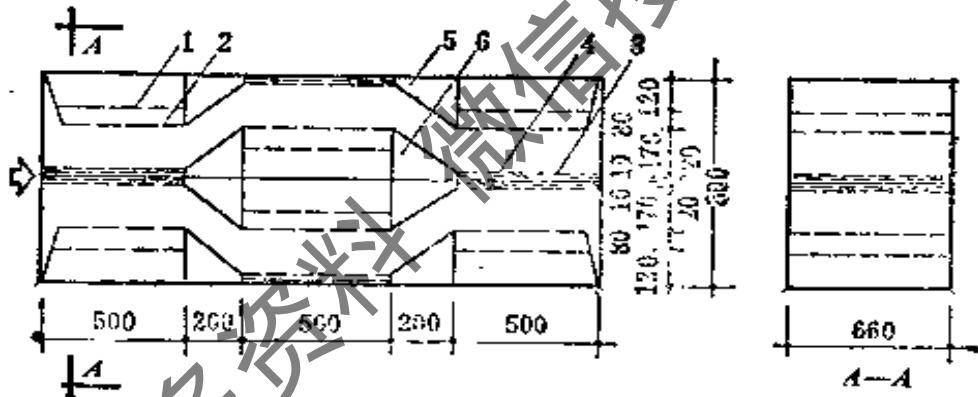
附录 8.6 b) 消声弯头的消声量



附录 8.6 c) 共振型消声弯头

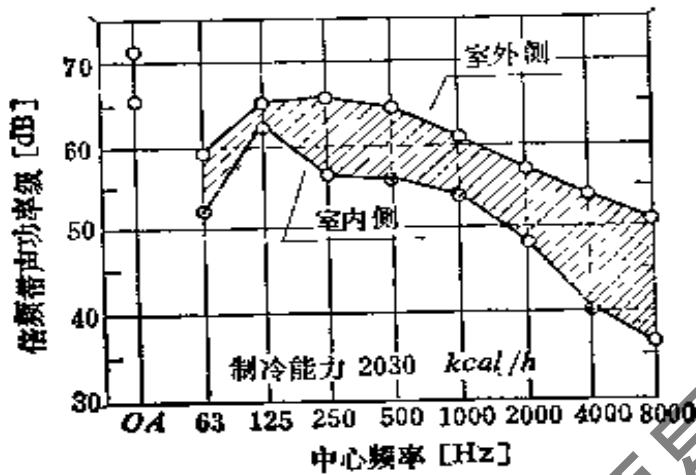


附 8.6 消声压箱的消声量线算图

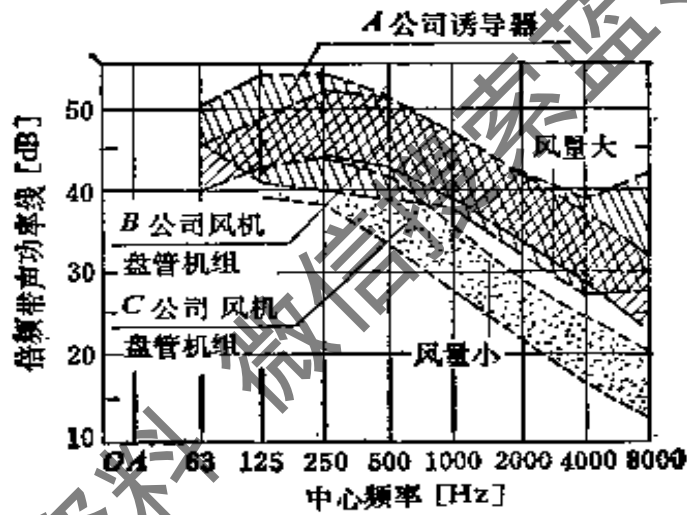


附录 8.6 e) 微穿孔板消声器

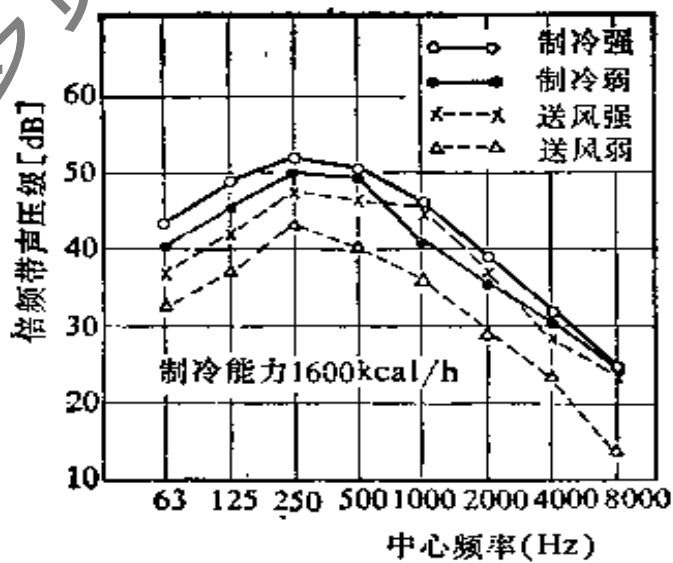
- 1—微穿孔板,  $P=1\%$ ; 2—微穿孔板,  $P=2.5\%$ ; 3—微穿孔板,  $P=3\%$ ; 4—微穿孔板,  $P=5\%$ ; 5—共振腔,  $P=1\%$ ; 6—共振腔,  $P=2\%$ ; 7—白噪声;  
8— $v=7[m/s]$ ; 9— $v=10[m/s]$



附录 8.7a) 风冷式窗式空调器噪声声功率级



附录 8.7b) 风机盘管机组及诱导器噪声声功率级



附录 8.7c) 水冷式室内空调机噪声声功率级

## 第9章 空调节能技术

### 9.1 与空调节能有关的建筑因素和环境因素

#### 9.1.1 空调能耗的构成

任何产品的总能耗应该理解为该产品在从原料采集、加工、产品形成、使用乃至解体整个寿命周期内全过程的总能耗。就此意义上讲,建筑物空调工程的总能耗就表现在它的建设投资和全部运行期的能耗上,前者以价值的形式反应了空调设备和管系等在施工安装期间以及这些设备和管系等在取材、生产等过程中所投入的总能耗;除上述两者外,还应包括空调工程在寿命周期终了时解体所投入的能量和解体后一些设备、材料等再转化成能量的那部分。

因此,空调的节能问题不能仅注目于运行期的效益,而要着眼于整个寿命周期。所以,要最大限度地降低空调工程的能耗,首先应在满足使用要求的前提下设计最小的空调负荷,确定合适的空调工程规模,从而降低建设投资;同时,在规划空调工程时要从整个运行期考虑,使在各个运行期投入使用的设备的能源利用率最高,能量消费量最小;再者,要尽可能地回收利用系统舍弃的能量,如空调系统的排风能量、冷却水系统中冷却水塔的排风能量和锅炉废热等。

下面,从空调负荷的形成可以知道空调工程能耗所表现的各个方面,从而得知与空调能耗相关的各种因素和技术领域。

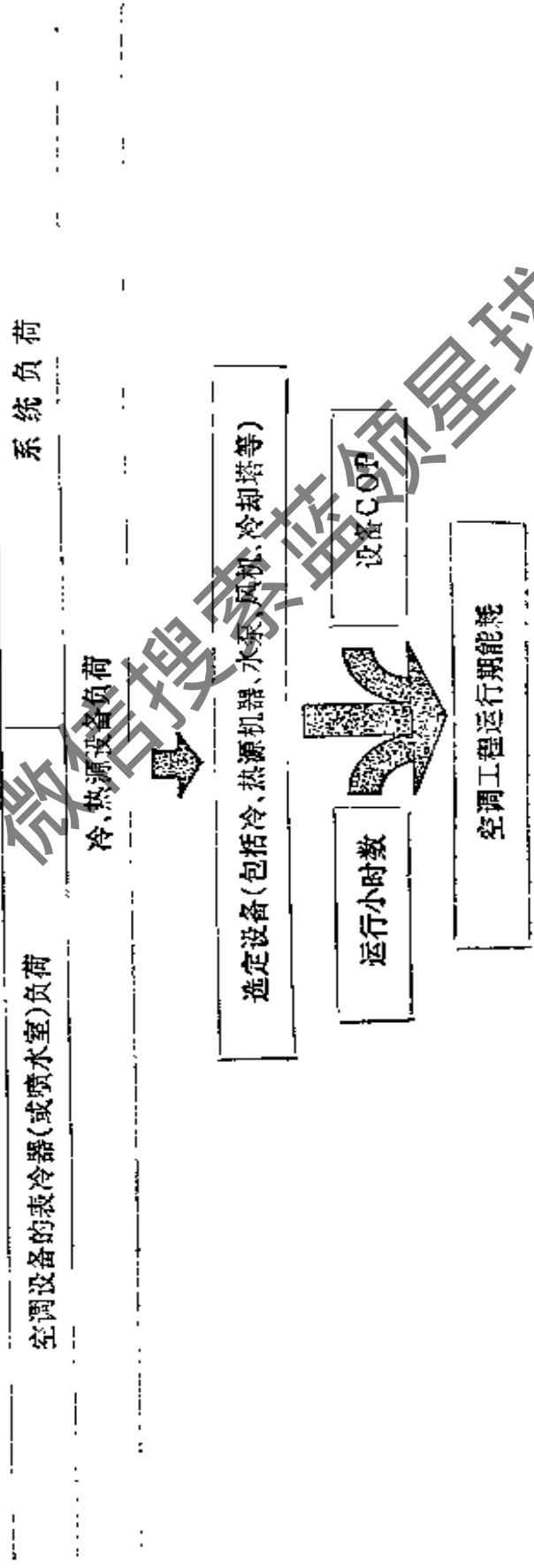
表9.1用图解形式表示空调工程运行期能耗构成。从表可见,决定工程规模大小的设备负荷是由空调设备的表冷器(或喷水室)负荷和系统负荷组成的。它们关系着许多建筑因素和环境因



表 9.1

空调工程运行能耗的构成

|                  |       |         |     |         |    |    |        |            |      |          |         |      |           |        |          |           |      |
|------------------|-------|---------|-----|---------|----|----|--------|------------|------|----------|---------|------|-----------|--------|----------|-----------|------|
| 外墙与顶等传热          | 玻璃窗传热 | 玻璃窗透射日射 | 渗透风 | 建筑物蓄热负荷 | 照明 | 人体 | 室内发热设备 | 再热负荷(混合损失) | 新风负荷 | 风管传热泄漏损失 | 风机动力转化热 | 水管传热 | 冷冻水泵动力转化热 | 水箱热损失  | 制冷机动力转化热 | 冷却水泵动力转化热 | 锅炉废热 |
| 外区负荷             |       |         |     | 内部负荷    |    |    |        | 风管系统负荷     |      |          | 水管系统负荷  |      |           | 冷源系统负荷 |          |           |      |
| 室内负荷             |       |         |     |         |    |    |        |            |      |          |         |      |           |        |          |           |      |
| 空调设备的表冷器(或喷水室)负荷 |       |         |     |         |    |    |        |            |      |          |         |      |           |        |          |           |      |



索,也关系着各类设备的性能和管道系统的输配效率等,重要的是要合适地选定参数和准确地设计计算。为了使运行期投入的能量消费量最少,在选定各动力设备时不仅要满足空调设计工况下峰值负荷的要求,而且还要从整个运行期非峰值负荷变化考虑,使选定设备的台数和它们的容量组合能跟踪这种变化的调节要求。这是获得节能效益的十分重要的方面,在现时尤其应该引为重视。

### 9.1.2 与空调整节能有关的诸建筑因素

节能型的建筑设计是减少空调能耗的重要保证,因此,在进行建筑规划时,在选址和确定建筑物的形、色、方位时都要仔细研究。原则上,建筑物的建址应选在绿化条件好,远离噪声源、空气质量好的环境场地;建筑物的外形以立方体为最理想,因为在满足相同使用空间的前提下其外表面积最小;从降低最大建筑负荷考虑,建筑物方位应取南北为主立面;建筑物的外表颜色与日辐射的吸收和反射有关,一般情况下,对于供暖负荷大而供冷负荷小的建筑物,其外表颜色以采用深色为好,对于供暖负荷小而供冷负荷大的建筑物,则以采用浅色为好;建筑物的内壁面、天花板和家具颜色与采光和照明的反射有关,如果采用表面反射率大的材料,那末有利于提高照度而且可以使照明负荷减小。

在空调的外区负荷中,由窗玻璃的日射和传热形成的负荷一般都占了其中的大部分,因此,在节能空调工程中应该重视窗的构造形式并限制窗墙面积比。从一般理解,窗的功能是供采光、通风、观景和火灾时避难排烟用的;但是,从节能方面考虑,窗构造应能起控制日射的作用,借以达到减少空调负荷的目的。对于一般空调建筑物,应该采用双层玻璃窗的构造形式(对于特别寒冷的地区,也可以采用三层玻璃的)。对于窗面积比例大的建筑物应考虑采用吸热玻璃、热反射玻璃或遮阳设施,如遮阳板、屋檐、挑檐、挑阳台、百叶板、窗帘等。把双层窗的两层玻璃间隙设计成空调排气通道的一种窗的构造形式应该受到重视。因为在冬季空调时,这种窗构造可以防止窗的内表面结露,改善冷辐射作用,并能防止人

在窗面附近有吹冷风感；在夏季时可以减少窗的传热量。为了减少窗的缝隙渗透引起的冷、热能量损失，还应该强调窗构造的气密性。在节能空调技术中十分重视在室外空气温度较低时直接利用室外空气供冷，将大自然作为一种经济能源，因此，窗构造应是能开启的或在其上设有可开启的自然通风口，以便需要时用于换气通风。

在进行建筑物外围护层的构造设计时，应强调外围护层的热特性要求：防止外墙内部结露、减小内表面温度波动，降低蓄热负荷。

关于蓄热负荷，它是间歇空调的一种负荷特征，是在非空调时间内流入并利用围护结构的热容量蓄存，而在空调时间里徐徐散热给室内空气的负荷，其值大小与室内外温差和建筑材料的蓄热性能有关。在夏季时，空调间歇期间的室外气温大致与室内温度相近，甚至还低，所以夏季的夜间蓄热负荷可以视作为零；基于这一情况，如果建筑设计考虑到利用这部分经济能源，还可以延迟空调始运行时间、节省空调运行能耗。在冬季时，空调间歇期间的夜间温度无例外地都比室温低，其最低值出现在黎明——非空调时，因此冬季的蓄热负荷不容忽视。这样，为了使空调系统在开始运行时室内温度的偏差在一定的允许值以内，空调设备就必须增加供热容量，并提前供暖。总之，在设计建筑构造时要重视空调蓄热负荷的问题。根据建筑物的热特性要求应把热容量大的材料布置在外围护层的室内侧，而把热容量小的保温材料放在其室外侧是有利的。

### 9.1.3 计算空调能量需要量用的室外空气参数

在空调设计计算中取用的室外空气参数分两类：其一，是用于计算设备容量和确定系统规模大小的，即室外空调设计参数，已经在第2.2节中述及；其二，是用于计算空调运行期间逐时空调负荷或者运行期间累计空调负荷（以下简称“期间负荷”）的，可以称之为“计算空调能量需要量用的室外空气参数”。因为它必须具有典型性，因此需要从历年气象参数中进行大量统计分析，一般以“气

象年”的数据形式应用于工程计算。我国的“气象年”资料尚待建立。只有使用由计算空调能量需要量用的室外空气参数算出的运行期间逐时空调负荷或期间负荷，才能对设备运行状况和系统输能管理进行全面计划，或者再进一步估算出空调能量需要量，从而对各种节能措施和节能技术进行经济效益分析，所以，在进行空调节能技术研究时，获得空调运行期的室外空气参数计算资料是十分重要的。

为了估算空调能量需要量，研究解决期间负荷的计算方法也是它的重要的一个方面。在我国现有条件下，应用温度频率法计算由室内外温差引起的负荷，如建筑外围护层传热负荷、新风负荷、冷风渗透负荷等的运行期间累计值，即它们各自的期间负荷是具备条件的。

所谓温度频率法，是把空调运行期间各整点时的室外空气温度按  $1[^\circ\text{C}]$  差的间隔统计出累计小时数，并算出期间温度频率值  $f_x\%$ ，而后根据某物理模型的负荷与相应气象参数之间的关系即可算出期间负荷值。

对于由室内外温差引起的负荷，当室内温度设定在  $t_n[^\circ\text{C}]$  值时，可以写出在任意室外温度  $t_{wx}[^\circ\text{C}]$  时的通用计算式，即

$$Q_x = q(t_n - t_{wx})[\text{kW}] \quad (9.1)$$

式中  $Q_x$ ——在任意室外温度  $t_{wx}[^\circ\text{C}]$  时的负荷， $[\text{kW}]$ ；

$q$ ——室内外温差  $1[^\circ\text{C}]$  时的负荷， $[\text{kW}/^\circ\text{C}]$

如果知道在运行期内出现温度  $t_{wx}$  的累计小时数  $N_x$ ，也知道  $t_{wx}$  的变化范围，并把该变化范围用  $1[^\circ\text{C}]$  间隔分组，设  $m$  为分组数，那末运行期间的负荷总累计值，即期间负荷就可以通过下式计算出来。

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{x=1}^m Q_x \\ &= q \sum_{x=1}^m (t_n - t_{wx}) N_x \quad [\text{kWh}] \end{aligned} \quad (9.2)$$

式中  $Q$ ——运行期间的负荷总累计值， $[\text{kWh}]$ ；

$m$ ——在  $t_{w\tau}$  变化范围内,每 1[°C] 间隔的分组数。

表 9.2 和 9.3 是根据上海 1971~1980 年气象资料作出的温度频率统计表,可供上海地区使用。

上海地区室外空气干球温度年频率统计表

表 9.2

| 干球温度范围<br>[°C] | 温度年频率<br>[h] | 干球温度范围<br>[°C] | 温度年频率<br>[h] |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| <-4.00         | 30           | 15.00~15.99    | 243          |
| -4.00~-3.01    | 31           | 16.00~16.99    | 298          |
| -3.00~-2.01    | 59           | 17.00~17.99    | 298          |
| -2.00~-1.01    | 103          | 18.00~18.99    | 315          |
| -1.00~-0.01    | 116          | 19.00~19.99    | 326          |
| 0.00~0.99      | 164          | 20.00~20.99    | 307          |
| 1.00~1.99      | 167          | 21.00~21.99    | 315          |
| 2.00~2.99      | 208          | 22.00~22.99    | 295          |
| 3.00~3.99      | 211          | 23.00~23.99    | 325          |
| 4.00~4.99      | 239          | 24.00~24.99    | 314          |
| 5.00~5.99      | 261          | 25.00~25.99    | 332          |
| 6.00~6.99      | 299          | 26.00~26.99    | 348          |
| 7.00~7.99      | 295          | 27.00~27.99    | 314          |
| 8.00~8.99      | 287          | 28.00~28.99    | 255          |
| 9.00~9.99      | 278          | 29.00~29.99    | 149          |
| 10.00~10.99    | 248          | 30.00~30.99    | 124          |
| 11.00~11.99    | 250          | 31.00~31.99    | 97           |
| 12.00~12.99    | 242          | 32.00~32.99    | 52           |
| 13.00~13.99    | 220          | 33.00~33.99    | 21           |
| 14.00~14.99    | 266          | ≥34.00         | 49           |

下面介绍一种更简捷方便于计算期间负荷值的方法,即把峰值与非峰值条件下的全部负荷折算为相当于峰值负荷出现  $\tau$  小时造成的负荷的方法,这就是当量峰值小时数法。它也只适用于由

上海地区室外空气湿球温度年频率统计表

表 9.3

| 湿球温度范围<br>[°C] | 温度年频率<br>[h] | 湿球温度范围<br>[°C] | 温度年频率<br>[h] |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| <-5.00         | 33           | 12.00~12.99    | 266          |
| -5.00~-4.01    | 33           | 13.00~13.99    | 248          |
| -4.00~-3.01    | 67           | 14.00~14.99    | 293          |
| -3.00~-2.01    | 125          | 15.00~15.99    | 329          |
| -2.00~-1.01    | 139          | 16.00~16.99    | 295          |
| -1.00~-0.01    | 163          | 17.00~17.99    | 325          |
| 0.00~0.99      | 214          | 18.00~18.99    | 323          |
| 1.00~1.99      | 214          | 19.00~19.99    | 301          |
| 2.00~2.99      | 247          | 20.00~20.99    | 319          |
| 3.00~3.99      | 272          | 21.00~21.99    | 312          |
| 4.00~4.99      | 271          | 22.00~22.99    | 265          |
| 5.00~5.99      | 302          | 23.00~23.99    | 283          |
| 6.00~6.99      | 299          | 24.00~24.99    | 371          |
| 7.00~7.99      | 301          | 25.00~25.99    | 456          |
| 8.00~8.99      | 251          | 26.00~26.99    | 384          |
| 9.00~9.99      | 285          | 27.00~27.99    | 173          |
| 10.00~10.99    | 275          | ≥28.00         | 57           |
| 11.00~11.99    | 237          |                |              |

室内外温差引起的负荷。

期间负荷的计算通式为：

$$Q = Q_y \tau \quad [\text{kWh}] \quad (9.3)$$

式中  $Q$ ——运行期间负荷总累计值，即期间负荷，[kWh]；

$Q_y$ ——空调室外设计条件时的负荷，即峰值负荷，[kW]；

$\tau$ ——当量峰值小时数，[h]。对应不同类型的负荷，有当量干球温度峰值小时数  $\tau_d$  和当量湿球温度峰值小时数

$\tau_s$  之分。表 9.4 和表 9.5 是根据上海地区气象资料统计归纳的当量峰值小时数计算公式。表中还提出推荐应用场合。

当量干球温度峰值小时数计算公式及推荐应用场合 表 9.4

| 运行期 | 空调运行时间<br>(点钟) | 当量干球温度峰值小时数计算公式                     | 推荐应用场合    |
|-----|----------------|-------------------------------------|-----------|
| 夏季  | 08~17          | $\tau_g = 1799.29 - 58.29 t_{n_g}$  | 工厂空调(一班制) |
|     | 07~23          | $\tau_g = 2706.79 - 88.21 t_{n_g}$  | 工厂空调(两班制) |
|     | 00~23          | $\tau_g = 3688.11 - 125.03 t_{n_g}$ | 工厂空调(三班制) |
|     | 06~24          | $\tau_g = 2909.61 - 95.61 t_{n_g}$  | 旅馆、宾馆空调   |
|     | 08~20          | $\tau_g = 2278.11 - 72.68 t_{n_g}$  | 办公楼空调     |
|     | 08~19          | $\tau_g = 2109.46 - 66.55 t_{n_g}$  | 百货大楼空调    |
| 冬季  | 08~17          | $\tau_g = 199.13 + 17.49 t_{n_g}$   | 工厂空调(一班制) |
|     | 07~23          | $\tau_g = 463.92 + 28.17 t_{n_g}$   | 工厂空调(两班制) |
|     | 00~23          | $\tau_g = 808.58 + 36.33 t_{n_g}$   | 工厂空调(三班制) |
|     | 06~24          | $\tau_g = 588.26 + 29.73 t_{n_g}$   | 旅馆、宾馆空调   |
|     | 08~20          | $\tau_g = 260.95 + 23.60 t_{n_g}$   | 办公楼空调     |

注: 1. 表中  $t_{n_g}$  为室内干球温度设计值, [°C];

2. 公式适用范围: 夏季,  $t_{n_g} = 22 \sim 28$  [°C]; 冬季  $t_{n_g} = 18 \sim 25$  [°C]。

当量湿球温度峰值小时数计算公式及推荐应用场合 表 9.5

| 运行期 | 空调运行时间<br>[点钟] | 当量湿球温度峰值小时数计算公式                     | 推荐应用场合    |
|-----|----------------|-------------------------------------|-----------|
| 夏季  | 08~17          | $\tau_s = 1637.84 - 51.52 t_{n_s}$  | 工厂空调(一班制) |
|     | 07~23          | $\tau_s = 2776.79 - 80.70 t_{n_s}$  | 工厂空调(两班制) |
|     | 00~23          | $\tau_s = 3896.84 - 130.74 t_{n_s}$ | 工厂空调(三班制) |
|     | 06~24          | $\tau_s = 3097.32 - 102.16 t_{n_s}$ | 旅馆、宾馆空调   |
|     | 08~20          | $\tau_s = 2129.24 - 67.82 t_{n_s}$  | 办公大楼空调    |
|     | 08~19          | $\tau_s = 1988.64 - 62.32 t_{n_s}$  | 百货大楼空调    |

续表 9.5

| 运行期 | 空调运行时间<br>[点钟] | 当量湿球温度峰值小时数计算公式                  | 推荐应用场合    |
|-----|----------------|----------------------------------|-----------|
| 冬季  | 08~17          | $\tau_s = 238.92 + 20.68 t_{ns}$ | 工厂空调(一班制) |
|     | 07~23          | $\tau_s = 476.82 + 33.33 t_{ns}$ | 工厂空调(两班制) |
|     | 00~23          | $\tau_s = 767.69 + 44.71 t_{ns}$ | 工厂空调(三班制) |
|     | 06~24          | $\tau_s = 567.97 + 36.43 t_{ns}$ | 旅馆、宾馆空调   |
|     | 08~20          | $\tau_s = 315.27 + 26.73 t_{ns}$ | 办公楼空调     |

注: 1. 表中  $t_{ns}$  为室内湿球温度设计值, [°C];

2. 公式适用范围: 夏季,  $t_{ns} = 14 \sim 23$  [°C]; 冬季,  $t_{ns} = 13 \sim 22$  [°C].

## 9.2 减少新风负荷, 降低新风能耗

由于室内环境中存在着污染物发生源, 因此空调系统中摄入室外新鲜空气量(简称新风)是必要的。为此, 必须消耗能量, 从大量工程实例可以知道, 空调工程中为处理新风所需能耗大致要占到总能耗的 25~30%, 对于高级宾馆和办公室建筑可能更高达 40%。所以, 研究空调节能技术和如何降低新风能耗是有重大实际意义的。

### 9.2.1 新风负荷的计算

新风负荷的计算在空调中分两种情况: 其一, 作为空调设计工况下空调负荷的一部分, 用于确定空调设备容量, 已经在 3.7 节中述及; 其二, 作为空调运行期逐时负荷计算, 用于分析运行期的能耗。

表 9.6 是根据上海气象资料计算得到的对应不同室内空调设定值的新风冷负荷值, 可供工程设计者使用。

图 9.1 是根据上海气象资料制作的空调运行期间新风负荷计算用图。纵坐标表示室内空气设计焓 [kJ/kg], 横坐标表示处理 1[m<sup>3</sup>/h] 新风的期间负荷 [kWh/(期间·m<sup>3</sup>/h)]。图中曲线①、



各种室内空调设定值时处理  $1[\text{m}^3/\text{h}]$  新风造成的冷负荷值

表 9.6

| 室内空调设计值                            |            | 为空调夏季设计工况时           | 为计算空调夏季运行期负荷用 $[\text{kWh}]$ |          |
|------------------------------------|------------|----------------------|------------------------------|----------|
| $t_{n0}$<br>[ $^{\circ}\text{C}$ ] | $RH_n$ [%] | 选择空调装置用 $[\text{W}]$ | 适用于旅游旅馆                      | 适用于办公楼建筑 |
| 24                                 | 50         | 14.3                 | 19.9                         | 14.3     |
|                                    | 55         | 13.5                 | 17.7                         | 12.0     |
|                                    | 60         | 12.7                 | 15.5                         | 11.3     |
| 25                                 | 50         | 13.4                 | 17.5                         | 12.6     |
|                                    | 55         | 12.6                 | 15.4                         | 11.2     |
|                                    | 60         | 11.7                 | 13.1                         | 9.8      |
| 26                                 | 50         | 12.3                 | 15.2                         | 11.1     |
|                                    | 55         | 11.6                 | 13.1                         | 9.5      |
|                                    | 60         | 10.7                 | 11.0                         | 8.1      |
|                                    | 65         | 9.9                  | 9.3                          | 6.9      |
| 28                                 | 60         | 8.6                  | 7.2                          | 5.4      |

注：1. 表列数据仅用于上海地区；

2. 表中所列室内空调设定值的范围是按《旅游旅馆设计暂行标准》选定的；

3. 与工程单位制的换算关系： $1[\text{kWh}] = 860[\text{kcal}]$ ； $1[\text{W}] = 0.86[\text{kcal/h}]$ 。

② 适用于全年运行空调；曲线 ③ 适用于冬季连续空调；曲线 ④ 适用于夏季旅馆空调。

【例 9.1】某旅游宾馆，地处上海，取室内温湿度设计值  $t_n = 25[^{\circ}\text{C}]$ ， $RH_n = 55\%$ ，每人新风量标准为  $50[\text{m}^3/\text{h}]$ ，求由 600 个人造成的在夏季室外空调设计条件时的新风负荷和夏季运行期间负荷。

【解】从表 9.6 查出，在室内温湿度设计值  $t_n = 25[^{\circ}\text{C}]$ 、 $RH_n = 55\%$  时，在夏季设计条件下，处理  $1[\text{m}^3/\text{h}]$  新风冷负荷是  $12.6[\text{W}]$ ，夏季运行期间负荷为  $15.4[\text{kWh}]$ 。从每人新风量标准计算，那末 600 个人造成的新风负荷就是  $600 \times 50 \times 12.6 = 378000[\text{W}]$ ，即  $378[\text{kW}]$ ；在整个夏季运行期处理的总冷负荷就是  $600 \times 50 \times 15.4 = 462 \times 10^3[\text{kWh}]$ 。

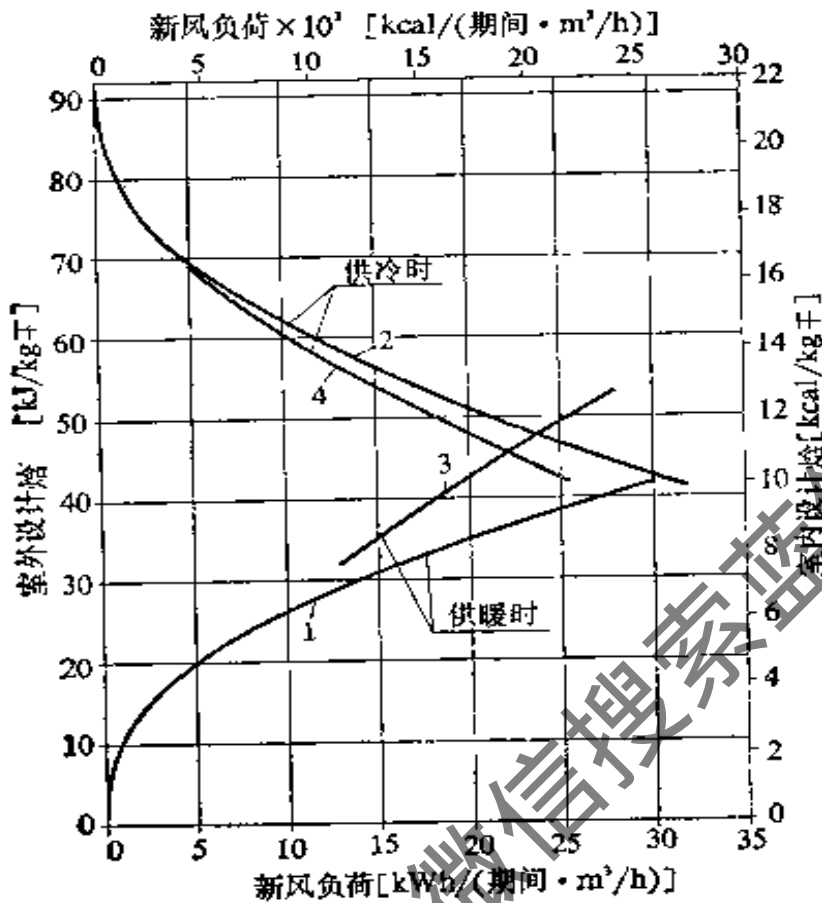


图 9.1 空调运行期间新风负荷计算用图

### 9.2.2 降低新风负荷的措施

#### 1. 空调系统中取用最小必要新风量

空调系统中摄入新风量的作用是调节室内空气质量，使室内环境中的各种污染物浓度保持在卫生标准所容许的浓度值以下。因此，要根据室内发生的污染物性质及其发生量和容许浓度以及送入室内空气中的污染物浓度来决定摄入新风量的多寡。经过研究分析，在以人为主要污染源的空调环境中，除了由人体发生的和伴随人体活动所产生的污染物以外，还有建筑材料表面散发的，它们种类甚多，如一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化合物、硫氧化合物、光化学氧化剂和悬浮的粒状物质等。它们对人体的影响是很复杂的，有的独立起作用、有的发生相加作用或相乘作用，有的还会产生相抵消起作用。因此，这种对人体的影响实际上是这些污染物质综合作用的结果。限于各种条件限制，目前国内外还没有研究

出一种全面评价室内空气质量的方法或指标以反映众多污染物对人体影响综合作用的程度,实用上还沿用单一的  $\text{CO}_2$  浓度值作为室内空气的污染指标。

人们知道, $\text{CO}_2$ 浓度在 10000[ppm]以下是不会对人体产生有害的作用的。但是有关研究工作表明,可以认为二氧化碳在空气中的占有率在一定程度上与其他污染物的发生量有关,所以  $\text{CO}_2$  浓度也可以反映空气的物化特性。为了确定室内的人体所必需的新风量,就需要去计算室内的  $\text{CO}_2$  发生量,了解引入空调系统的新风中的  $\text{CO}_2$  浓度和室内  $\text{CO}_2$  容许浓度的标准值。目前,一般场合  $\text{CO}_2$  的容许浓度取 1000[ppm]。然而,迄今为止关于室内  $\text{CO}_2$  容许浓度的标准,世界各国还正在研究探讨之中,因此,人体必需新风量尚无定论。但是从发展趋势看,为了节能,空调系统的新风量取值都在逐渐减少,而代之以更讲究进入室内的新风的质量和室内污染源的控制。考虑了节能要求以后的每人新风量标准已经在第 3.3 节中列出。

为把系统中的新风量减小到最少程度,禁止在空调环境内吸烟是关键。从一个人吸烟引起的  $\text{CO}_2$  气体发生量实验可以知道,当吸烟者按正常速度连续吸烟时,从吸烟者自身并伴随其动作而发生的平均  $\text{CO}_2$  气体发生量几乎是非吸烟者的一倍,而且烟气中还有其他有毒成分,它们的多寡未必能用相应的  $\text{CO}_2$  气体浓度来反映,然而它们对人体危害程度却很大,有的可能还极大。因此,为保障非吸烟者和吸烟者的健康,在不得不允许吸烟的场合,空调系统中的新风量就要增加很多。如有些规范中原规定每人最少新风量为  $8.5[\text{m}^3/\text{h}]$  的场合,当有吸烟情况时就要增加到  $30[\text{m}^3/\text{h}]$  这使能量消耗大为增加。所以在空调房间中不得抽烟是应当尽力做到的。

## 2. 使用能量回收装置,回收利用空调排风中的能量

在空调系统的新风引入管道上安装排风能量回收装置(关于该装置的构造、性能特点和选用方法将在本章第 9.5 节中叙述),并连接上空调系统的排风管道,使排风通过该装置与新风进行热

交换,利用排风的能量预冷(或预热)新风,达到减少新风负荷的目的。

图 9.2 所示为安装排风能量回收装置的一种系统图式。这里应用的是一种全热交换器。当利用它回收排风中的“冷”能时,只有在室内排风的焓值低于室外空气的焓值时才有效;当利用它回收“热”能时只有在室内排风的焓值高于室外空气的焓值时才有效。因此该装置只在空调系统取用最小新风量时才启用,而不是全年投入运行的。当室外空气焓值介于冬、夏季室内空调设计焓值之间时,应把该装置的两侧通道切断,使新风旁通直接导入系统。所以,旁通风道应该具备在必要时使送风空气全部使用新风的可能性。当然,这时室内回风也必须绕道全热交换器,径直排向室外。旁通阀可以手动操作,也可以通过新风道和室内回风风道上的温湿度传感器作用进行自动切换控制。

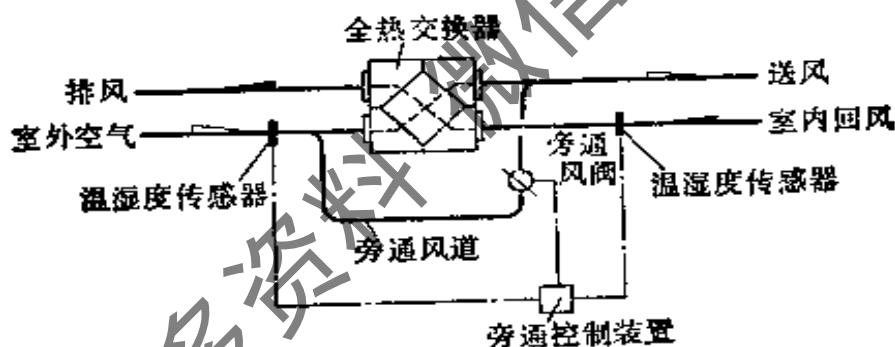


图 9.2 全热交换器周围二风管布置

现时,用于工程上的排风能量回收装置主要有两类:全热交换型和显热交换型,选用时不可盲目,应核算实际回收效益进行选择。如上海地区的空调工程,由于该地区具有海洋性气候特征,夏季室外空气比较潮湿。根据气象参数统计值进行计算,对于室内空调设计值 $t_n$ 为 $25[^\circ\text{C}]$ 、 $RH_n$ 为 $55\%$ 的旅馆建筑夏季空调,新风(全热)负荷中显冷负荷占的比例不足 $10\%$ ,即使室内设计值 $t_n$ 为 $20[^\circ\text{C}]$ 、 $RH_n = 60\%$ ,显冷负荷所占的比例也只有 $18\%$ ,因此使用显热交换型的装置回收空调排风能量,效益不佳,从经济上核

算还可能得不偿失。这种情况下，应用全热交换型的装置就要合理得多。一般，这种装置的全热效率有 50~70%，如果一个空调工程的新风冷负荷占总空调负荷的 40%，那末使用该装置后就可以使总空调负荷减少 25% 左右。虽然会增加能量回收装置及其配用管道附件的造价，也要增加一些新风空调机房的面积和造价，但是它却使制冷系统规模减小很多，而且大大节省运行能耗，尤其在夏季时对削减峰值负荷、平衡电网负载有重要作用。

### 3. 加强运行期空调系统中新风的质和量的管理

从卫生要求，空调系统中必须导入尽量多的新风量以保证送风空气的品质；但是从节约能量要求，又必须把新风量控制在最低程度。为满足这两方面要求，工程设计者在进行工程的设计规划时，首先应该从卫生要求确定最小新风量；在选定新风入口的位置时要重视采气的质量；要考虑运行期非峰值负荷时的调节使用要求；应配置必要的风管附件和控制装置，并为此留出必要的操作部位。这些是获取节省新风能耗的必要条件，起保证作用的还是加强运行期管理。在运行期的管理措施方面，大致有以下几种做法：

(1) 对于间歇运行空调，系统在预冷或预热时切断新风量。但是在夏季时，如果室外空气参数对房间供冷有效，这时就应采用相反的做法，使空调系统尽量多地使用室外空气送风以预冷空调房间；

(2) 根据房间温湿度和洁净度的不同要求，合理组织气流，使空调空气多次被利用；

(3) 在夜间或过渡季，使用室外空气供冷；

(4) 对于人员密集的会场、体育馆、影剧院等公共场合和允许吸烟的办公室建筑，空调系统的新风量多少应根据污染物发生状况改变。在有可能的条件下，应使用  $\text{CO}_2$  浓度检测器，配置手动或自动的调节装置，使按回风中的  $\text{CO}_2$  浓度控制调节系统的最小新风量。

(5) 新风系统上的过滤净化装置应经常保持清洁，使维持其

一定的过滤效率和正常的通过能力；对于活性炭过滤装置还应定期再生，使提高其对有毒气体的吸附能力。

### 9.2.3 空调系统新风负荷的计算实例

有一旅馆建筑，位于上海。室外空调设计干球温度为 $34[^\circ\text{C}]$ 、湿球温度为 $28.3[^\circ\text{C}]$ ；室内空调设计干球温度为 $26[^\circ\text{C}]$ ，相对湿度为 $60\%$ 。试计算夏季空调设计工况时的峰值新风负荷、夏季运行期的新风负荷以及使用全热交换型排风能量回收装置后可以节省的新风负荷。空调系统的新风量为 $13.9[\text{m}^3/\text{s}]$  ( $50000[\text{m}^3/\text{h}]$ )。能量回收装置的全热回收效率假设为 $60\%$ 。

首先，从湿空气焓湿图或第1章的湿空气参数计算表格查知：

室外空调设计参数在 $t_{n0} = 34[^\circ\text{C}]$ 、 $t_{n1} = 28.3[^\circ\text{C}]$ 时，其焓 $h_w = 91.04[\text{kJ}/\text{kg 干}]$ ；

室内空调设计参数在 $t_{n0} = 26[^\circ\text{C}]$ 、 $RH_n = 60\%$ 时，其焓 $h_n = 58.54[\text{kJ}/\text{kg 干}]$ 、 $t_{n1} = 20.34[^\circ\text{C}]$ 。

#### 1. 计算夏季空调设计工况时的峰值新风负荷

$$\begin{aligned} Q_w &= \rho L (h_w - h_n) \\ &= 1.2 \times 13.9 \times (91.04 - 58.54) \\ &= 542[\text{kW}], \quad (46.6 \times 10^4[\text{kcal}/\text{h}]) \end{aligned}$$

#### 2. 计算夏季运行期的新风负荷

对于旅馆建筑(一般夏季空调运行时间从6点到24点)，当量湿球温度峰值小时数的计算公式可以从表9.4查得，当室内湿球温度设计值为 $20.34[^\circ\text{C}]$ 时，

$$\begin{aligned} \tau_s &= 3097.32 - 102.16 t_{n1} \\ &= 3097.32 - 102.16 \times 20.34 = 1019[\text{h}] \end{aligned}$$

于是，夏季运行期的新风负荷为

$$\Sigma Q_w = 542 \times 1019 = 552 \times 10^3[\text{kWh}], \quad (475 \times 10^6[\text{kcal}])$$

3. 从题意，如果系统中使用全热交换型能量回收装置，假设其全热回收效率 $\eta_h = 60\%$ ，那末在夏季空调设计条件时可以节省的新风负荷就是

$$\begin{aligned}\Delta Q_w &= Q_w \eta_t \\ &= 542 \times 0.6 = 325.2 [\text{kW}] \quad (280 \times 10^3 [\text{kcal/h}])\end{aligned}$$

在整个夏季运行期可以节省的新风负荷是

$$\begin{aligned}\Sigma \Delta Q_w &= \eta_t \Sigma Q_w \\ &= 0.6 \times (552 \times 10^3) = 331.2 \times 10^3 [\text{kWh}] \\ &\quad (285 \times 10^6 [\text{kcal}])\end{aligned}$$

## 9.3 经济能源在空调中的利用

### 9.3.1 室外新风供冷

除高洁净度,高精度空调工程外,一般空调工程均应设计成在过渡季使用尽可能多的室外新风来供冷的系统方式。

新风供冷范围的控制,依据控制参数可分下列三种方式:

1. 冬、夏季向过渡季演变时用干球温度参数判别;
2. 冬、夏季向过渡季演变时用焓或湿球温度参数判别;
3. 冬季向过渡季演变时用干球温度判别、夏季向过渡季演变时用焓式或湿球温度参数判别。

它们各自的得益程度取决于工程所在地的气象条件和冬、夏季的室内设计参数。

图 9.3 所示是三种不同控制参数时可利用室外风供冷的气象

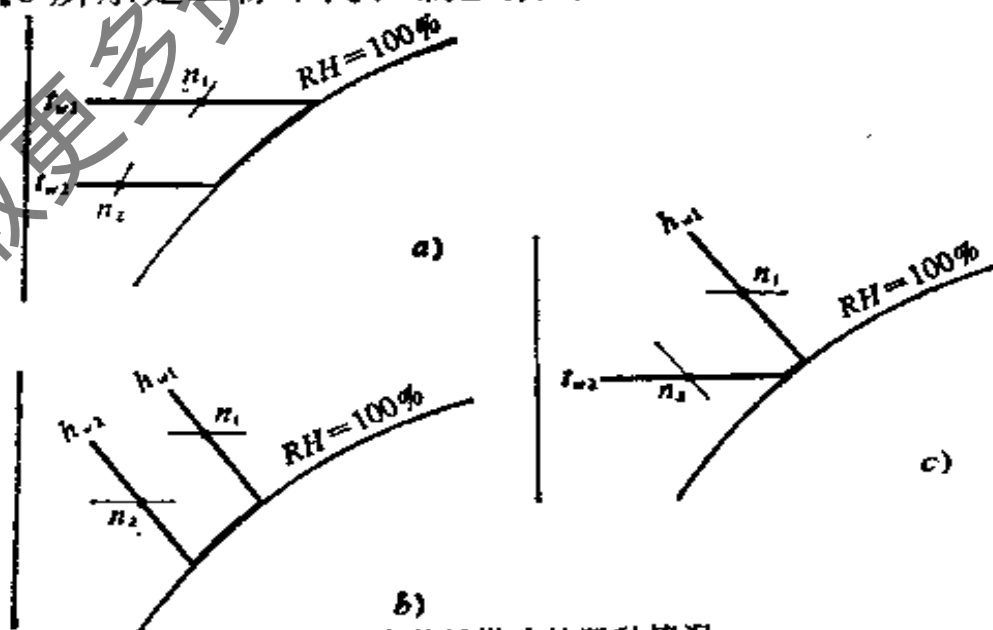


图 9.3 室外风供冷的三种情况

区在湿空气焓湿图上的表示。图中  $n_1$ 、 $n_2$  分别为夏、冬季室内空调设计参数,粗实线包络的范围为可利用室外风供冷的气象区,图 9.3 a) 表示该区上下限的控制均采用干球温度参数;图 9.3 b) 表示该区上下限的控制均采用焓或湿球温度参数;图 9.3 c) 表示该区的上限控制采用焓或湿球温度参数,而下限控制采用干球温度参数。

为扩展室外风的供冷能力,在室内空调参数允许有一定波动时,夏季时把温湿度值设定在上限、冬季时把温湿度值设定在下限都是有利的。

为适应过渡季室外风供冷控制,空调的新风系统必须有相应的设计和管理。

1. 根据利用室外风供冷的可能性和有效性进行空调系统分区;

2. 确保最小新风量和全新风时有足够的进风口尺寸、风管尺寸和空气过滤装置;必要之处要设调节风阀。风阀可以采用手动操作或者远距离控制操作,在现场应为风阀的操作和检修留出足够的部位;

3. 对于装有排风能量回收装置的系统,在使用室外风供冷时可以让大量新风以至全新风通过旁通风道进入空气处理装置;旁通风道上应安装气密性好的风阀以利提高能量回收装置的回收效益;

4. 对于低湿高温地区,采用喷水法处理空调空气对扩大室外风供冷的效果是有利的;

5. 为防止室内正压值过高,全新风运行的系统还应配置回风机,并与送风机连锁。

### 9.3.2 间接蒸发冷却供冷

如果用空气与雾化的水直接接触(直接蒸发冷却),由于水的蒸发现象,空气和水的温度都会降低,但空气的含湿量将有所增加。如果把在直接蒸发冷却过程中降低了温度的空气和水通过热交换顺序冷却待处理空气,那么就可以得到降低了温度,但是含湿



量不增加的送风空气,这就是间接蒸发冷却。

把直接蒸发冷却中用的空气称二次空气,待处理的空气称一次空气,那末就可以画出利用间接蒸发冷却技术得到低温的送风空气的装置原理图式,如图 9.4 所示。图中  $a$  是直接蒸发冷却装置(它可以是冷却塔、喷水室或其他绝热加湿设备),  $b$  是空气-空气换热器,  $c$  是水-空气换热器。

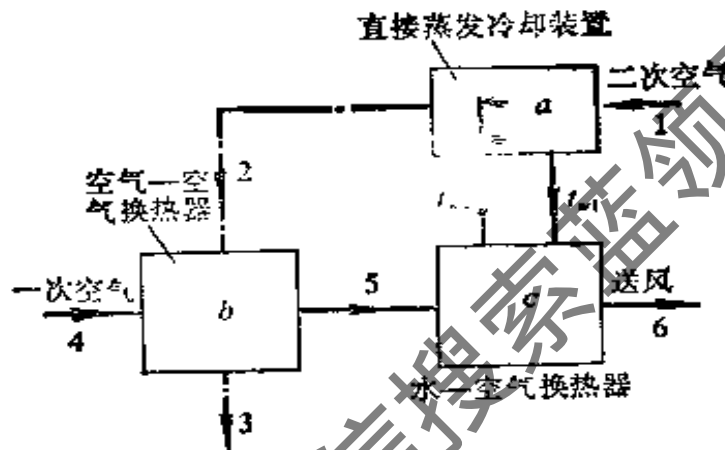


图 9.4 间接蒸发冷却装置原理图

图 9.5 是间接蒸发冷却过程在  $h-d$  图上的表示。如果一次空气和二次空气都是室外空气,它们的初状态 1 和 4 点在图中表示在同一位置上,当二次空气流经直接蒸发冷却装置  $a$  时,空气状态从 1 变为 2; 一次空气在空气-空气换热器  $b$  内与状态 2 的空气只进行显热交换,状态从 4 变为 5,另一侧的空气从状态 2 变为状

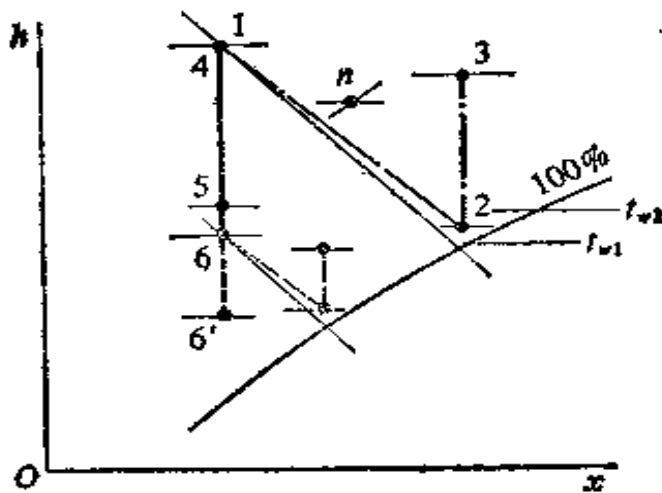


图 9.5 间接蒸发冷却过程在  $h-d$  图上的表示

态3, 然后被排出。从 $b$ 装置内出来的一次空气在 $c$ 装置内被从 $a$ 装置内流出的冷却了的水(水温 $t_{w1}$ )再次冷却, 使状态从5变为6, 在热交换过程中, 水的温度从 $t_{w1}$ 上升到 $t_{w2}$ , 此时, 水再回到 $a$ 装置, 在那里借直接蒸发冷却过程降温, 然后再返回 $c$ 装置……, 如此不断循环。所以在间接蒸发冷却过程中, 一次空气只可能等湿冷却, 即从 $t_1$ 降到 $t_0$ 。对应房间参数 $n$ , 状态6的空气就已经具备降温减湿的作用了。

如果把状态6的空气再分别作为一次空气和二次空气, 组成另一级间接蒸发冷却装置, 使之与前一级串联工作, 那么状态6的空气将被继续冷却直至状态6', 如图9.5中的虚线所示。由此看来, 如果串联的级数愈多, 那么得到的一次空气温度就愈低, 对空调房间来说, 它的降温效果就愈好。

从理论上分析, 借间接蒸发冷却过程可获得的一次空气的最低温度可趋近于它的露点温度, 而借直接蒸发冷却过程可获得的一次空气的最低温度则趋近于它的湿球温度, 这是两者的又一明显区别。

从以上分析可以得到这样一个结论: 空气干燥的地区使用间接蒸发冷却技术提供低温空气, 要比空气潮湿地区有利得多。

如果二次空气利用空调系统的排风, 那么一次空气不仅可以增大降温的幅度, 而且还可能减湿干燥(此现象出现在排风, 即二次空气的湿球温度低于一次空气的露点温度时)。

在潮湿地区, 间接蒸发冷却系统还可与其他设备如直接蒸发冷却设备, 固体去湿机等组成复合式系统, 实现以热制冷的新型空调系统。这种复合式系统可以取代机械制冷, 而且COP值又比其高出数倍, 节能效益显著, 因此在国外已经引起重视, 应用技术也得到发展。我国正在研究开发之中。

## 9.4 空调系统设计和运行管理中的节能技术

### 9.4.1 选定合理的空气处理方式

1. 防止空调房间在供冷时过冷、过干燥; 在供暖时过热、过湿

对于多房间建筑物，如果是采用一个机器露点送风的集中式空调系统，那么由于各室不同的负荷特征会造成某些空调房间在供冷时过冷、过干燥，在供暖时过热、过湿的现象，这些都将造成不必要的能量浪费。因此，规划系统时应将空调房间合理分区，出现下列情况者不能组合在一个空调送风区中：

- (1) 室内温、湿度的设定值和精度值不相同的房间；
- (2) 日射情况和围护结构传热负荷相差悬殊的房间；
- (3) 内部负荷密度和负荷变化规律不相同的房间；
- (4) 房间热湿比值相差悬殊的房间；
- (5) 空调使用时间不同的房间。

在不得已必须合并在一个分区的情况下，必须设有随负荷变动的自控装置。控制用的传感器应放在空调区有代表性的位置上，要避免放在发热、发湿设备的近旁，并防止日射等影响。

需要指出，如果设计中取用过小的风量或者运行时关小通过表冷器的风量，则在室温控制器的作用下，空调房间容易出现过干燥的现象（即  $RH_n \rightarrow RH_n'$ ）。在图 9.6 上说明了过程。

## 2. 防止再热损失等

设计和运行中应防止冷却后再加热、加热后再冷却、除湿后再加湿、加湿后再除湿等重复的、互相抵消的空气处理手段。

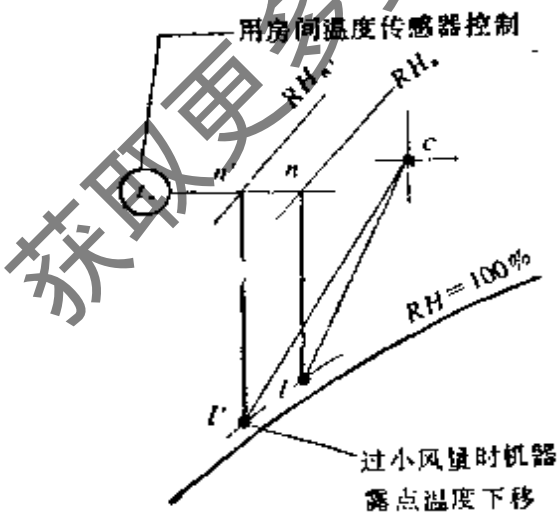


图 9.6 风量过小引起室内过干燥的例子

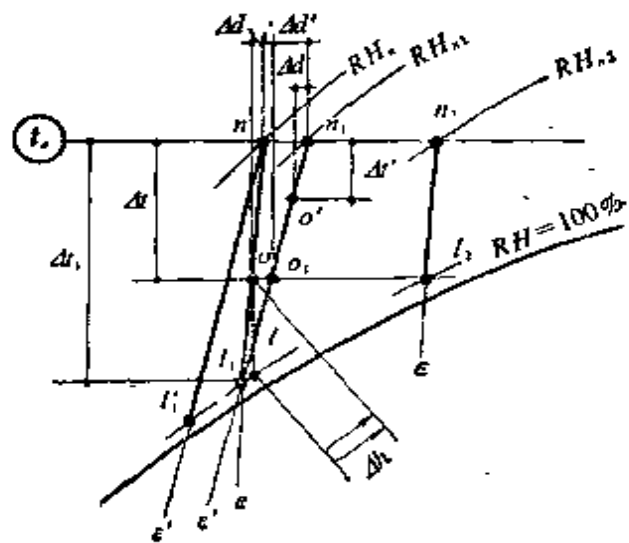


图 9.7 防止再热损失的各种措施例

原则上应避免在夏季供冷时采用再热方式。如图 9.7 所示,空气被冷却处理到  $l$ , 然后又被加热至  $o$ , 这样, 在空气处理过程中有相当于  $\Delta h$  的冷量和热量是相互抵消的。为避免发生这种情况, 在工程设计时应该充分研究部分负荷特性, 使选用合适的设计风量。在运行时可以考虑下列措施:

- (1) 调整室内温、湿度波动的设定范围;
- (2) 改变空调房间的送风量;
- (3) 使部分空气旁通表冷器而后与通过表冷器的空气混合, 旁通风量的比例用房间湿度传感器控制。

举例说明:(见图 9.7)当室内设定温度为  $t_n$ , 要避免采用冷却后再加热方案运行的话, 可以采用以下方法:

- (1) 把机器露点参数从  $l$  调整为  $l_1$ , 采用二次回风方式, 使二次混合的状态维持在原来的  $o$  点, 此时送风温差为  $\Delta t$ , 房间的状态参数维持在设计值  $n$ , 相对湿度为  $RH_n$ ;

- (2) 如果房间相对湿度可以有较大的波动, 直至  $RH_n$ , 也是被允许的话, 那么可以设法把机器露点  $l$  调整到  $l_2$ , 此时房间的状态将维持在  $n_2$ 。

当空调系统的实际负荷为非峰值时, 房间热湿比由  $e$  变化为  $e'$ , 运行时有两种措施可以考虑采用:

- (1) 机器露点仍维持为  $l_1$ , 改变二次风混合比, 使送风状态跟踪负荷变化而变动。分两种情况: 一是, 当热湿比的减小是由显热负荷的减少引起时, 如果维持房间送风量不变, 那么送风状态点变为  $o'$ , 送风温度从  $\Delta t$  改变为  $\Delta t'$ ,  $\Delta t' = \Delta t(Q'/Q)$ , 此处  $Q$  和  $Q'$  分别为峰值和非峰值条件时的负荷; 其二是, 当热湿比的减小是由室内湿负荷的增加引起时, 如果维持房间送风量不变, 那末送风状态变为  $o_1$ , 此时  $\Delta d' = \Delta d(W'/W)$ , 其中  $W$  和  $W'$  分别为变化前后的湿负荷。采用以上方式运行时, 室内状态维持在  $n_1$ 。

- (2) 把机器露点调整为  $l_1$ , 如上述一样, 通过改变二次风混合比来满足负荷变化要求, 那么室内状态可以维持在设计条件  $n$ 。

如果送风量和送风温差没有严格限制, 那么采用改变送风量

方法来满足负荷变化要求就是比较理想的调节方法了。不过，变风量值由温度传感器控制时，房间的湿度可能会有较大变化；变风量值由湿度传感器控制时，房间的温度会有较大的变化。最理想的调节方式是变风量辅以变露点控制。

#### 9.4.2 提高输能效率，利用变流量技术降低运行能耗

从风机和水泵的轴功率计算公式  $N_s = (LP)/\eta$  可以知道，要减少功耗可以从三方面来考虑：减小流量、降低系统阻力和提高风机、水泵的效率。在工程实践中可以采纳以下措施：

##### 1. 采用大温差

如果系统中输送冷、热能用的水（或空气）的供回水（或送回风）温差采用大温差，那么当它与原有温差的比值为  $m$  时，从流量计算公式知道，采用大温差时的流量将为原来流量的  $1/m$ 。这时，水泵或风机要求的功率将减小到原来的  $1/m^3$ 。可见，加大温差的节能效益是明显的，在实用中尚需顾及与温差有关的其他因素，使选用恰当。

选定合适的送风温差要考虑的因素有：气流场分布、温度场分布、湿度场分布、送风口结露的可能性、除尘效果和热交换器的投资等；

选定合适的水温差要考虑的因素有：热交换器的造价和供冷时制冷设备的效率等。

在工程应用中，选用具有高诱导比特性的送风口时，可以把送风温差提高到  $14\sim 15[^\circ\text{C}]$ ，这时要重视低温风管的保温质量，以避免风管壁面结露和减小传热损失。

##### 2. 采用低流速

因为水泵和风机要求的功耗大致与管路系统中流速的平方成正比关系，因此，要取得节能的运行效果，在设计和运行时不要采用高流速。此外，干管中采用低流速还有利于系统的水力工况稳定性。

##### 3. 采用输送效率高的载能介质

一般情况下，用水输送冷、热能的耗能量比用空气输能要小，

而且输送相同冷、热能,所用水管的管径要比风管小得多,所以又能节省建筑空间。

以输送 $3.5[\text{kW}]$ ( $3010[\text{kcal/h}]$ )冷量所需的风管和水管的管径予以比较。用工程上常用的设计资料计算,可以知道,用水输送这些能量(取供回水温差 $5[^\circ\text{C}]$ 、水流速 $1.5[\text{m/s}]$ )时只需要管径为 $15[\text{mm}]$ 的配管;而用空气输送(取送回风温差 $6\sim 8[^\circ\text{C}]$ 、热湿比 $8000[\text{kJ/kg}]$ 、送风速度 $8\sim 10[\text{m/s}]$ )时,需要的风管直径却为 $250[\text{mm}]$ 。这里,从管径上比较就相差了十几倍,而且,要求输送的冷量愈大,则相差愈甚。此外,从功耗方面比较,对于具有一定规模的建筑物,可以从实例验算证明,用水输送能量的方式所需的功耗也要比用空气输送能量的方式省得多。这就是近年来水-空气空调方式发展迅速的主要原因之一。

因此,对于集中冷冻方式,原则上应该把在机房制备的冷冻水尽量输送到各空调分区的附近或使用点上,通过末端机组(如柜式空调机组、风机盘管机组)处理空调空气,就地或供附近房间使用。

#### 4. 选用效率高、部分负荷时调节特性好的动力设备

因为风机和水泵的运行工作点不仅决定于其自身的特性,而且也取决于它们所在管道系统的阻力特性,因此,在选型时应该同时研究管路的阻力特性。为使运行期获得节能效益,还要研究在部分负荷时管道阻力变化情况,使风机和水泵的性能与其匹配。

由于空调系统中的设备大部分时间在部分负荷状况下运行,因此,在节能研究中,常常把设备的最高效率点选在峰值负荷的 $70\sim 80\%$ 状态时。

在非峰值负荷时常常采用改变空调系统的流量以满足其调节要求的,常用的调节方法有下列:

(1) 通过改变管路性能曲线,使风机或水泵的工作点满足运行要求(见图 9.8)。

图中 A 点为风机或水泵的设计工作点,此时流量 $L_d$ 和压头

$P_A$  满足空调设计工况的要求。当空调负荷减小, 只需要流量  $L_B$  时, 如果系统不予调整, 从原管网阻力特性曲线可以知道此时系统因阻力减小, 只需要风机或水泵具备压头  $P_B$ , 显然, 原有的风机或水泵的工作特性是难以满足该工况要求的。实用中最多采用的方法是借助于阀门进行调节(注意: 风机的进口阀和出口阀均可起调节作用; 而水泵只有出口阀可起此作用)。当阀门关小时, 管路阻力增加, 阻力特性系数由  $K$  变为  $K'$ , 而  $K' > K$ , 管路阻力特性曲线也由 1 → 2。这样, 风机或水泵的新的工作点  $B'$  就满足了部分负荷时的要求。此时, 管路增加的阻力  $\Delta H = H_{B'} - H_B$ , 显然是由阀门的节流所引起的, 这使风机或水泵必须具备压头  $P_B$  外还要附加  $\Delta P$  压头。这种调节方法, 虽然设备费用低、维护保养方便, 但阀门的调节造成额外能耗。

阀门调节引起的功率消耗

$$\Delta N = \frac{L_B \cdot \Delta H}{\eta} \quad [\text{kW}] \quad (9.4)$$

式中  $\eta$ ——电机和风机(或水泵)还包括传动装置的总效率;  
 $\Delta H$ ——因阀门调节引起的附加阻力值, [kPa]。

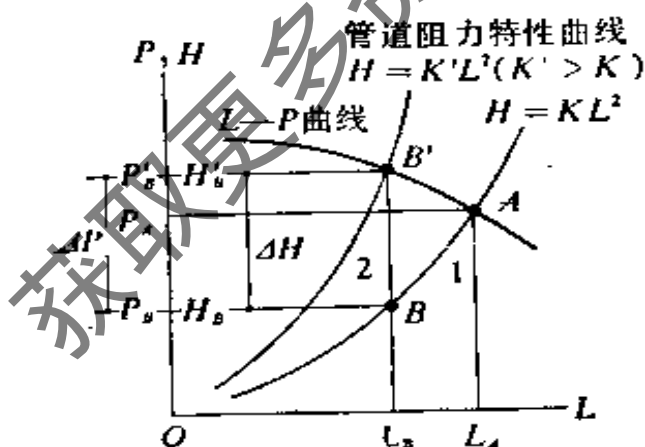


图 9.8 出口阀门调节

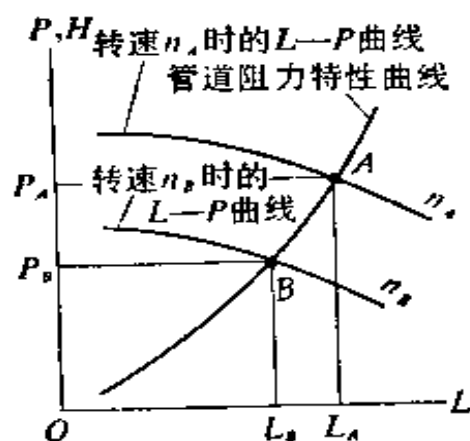


图 9.9 变速调节

(2) 改变风机和水泵的性能,满足变流量要求。

### 1) 改变风机或水泵的转速

风机和水泵的性能参数都是针对某一定转速  $n_0$  而言的。当实际运行转速  $n$  与  $n_0$  不同时,可用公式(7.19)所示的相似律求出新的性能参数。

在  $L-P$  图上表示各种转速时的  $L-P$  曲线就是一组平行曲线,见图 9.9 所示。如果空调系统处在部分负荷状态,需要从设计流量  $L_A$  调节到  $L_B$ ,那末通过改变风机或水泵的转速,使改变后的转速  $n_B$  时的性能参数正好能满足工作点  $B$  的要求,这就达到了调的目的。

变速调节没有节流损失,而且存在着功耗减小是流量减小倍数的立方关系,所以运行调节时,节能效果十分显著,而且调节稳定性好,风量调节幅度大,但是设备费用较大。

通常,变速调节时最低转速不小于额定转速的 50%,一般取在 100~70% 之间,否则设备的效率太低。此外,在确定调速范围时应注意避开机组的机械临界共振转速,否则,当调速至该谐振频率时,将有可能损坏机组。

### 2) 用入口导流器调节,改变风机性能

在风机叶轮进风口处设置导流器,通过改变导流器的叶片角度,使进入叶轮的气流方向发生变化,从而改变风机的性能,其性能曲线随导叶片角度而变化的情况见图 9.10 所示。当需要把风

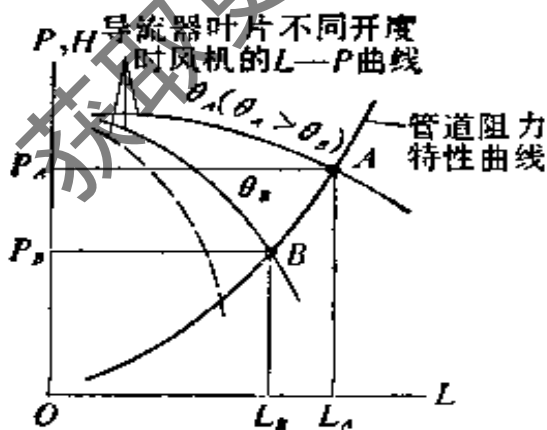


图 9.10 风机入口导流器调节

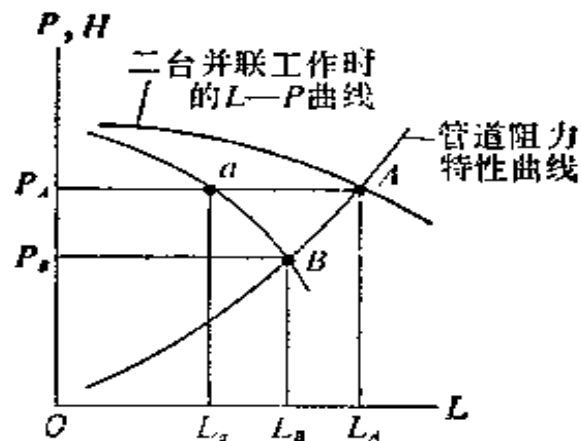


图 9.11 并联运行调节



机风量从设计值  $L_A$  减小到  $L_B$  时, 只要把风机的入口导流器的叶片角度从  $Q_A$  调整到  $Q_B$  就可以满足调节要求了, 此时  $B$  点就是风机的新的运行工作点。这种调节方法结构简单, 调节方便。

### (3) 使多台风机(或水泵)并联运行, 采用台数调节方法

设图 9.11 中  $A$  点是风机(或水泵)的设计工作点, 它表示两台风机(或水泵)并联运行时的工作参数。这时每台风机(或水泵)的工作参数是流量  $L_a$ 、压头  $P_a$ , 工作点用  $a$  表示。如果系统的流量需要从  $L_A$  减小到  $L_B$ , 那末, 只要把并联运行中的风机(或水泵)关掉一台, 使一台风机(或水泵)投入系统运行就能够满足要求了。因为, 当只有一台风机(或水泵)在工作时, 由于受管路阻力特性的制约, 风机(或水泵)的工作点就必定出现在风机特性曲线和管道阻力特性曲线的交点上, 这就是  $B$  点。此时流量  $L_B$  比两台风机并联运行时的流量  $L_a$  有所增加, 但是工作压头降低了, 这样也正好满足了克服系统阻力的要求。

图 9.12 和图 9.13 所示是几种变流量调节方法中风机和水泵的流量和轴功率的变化特性。

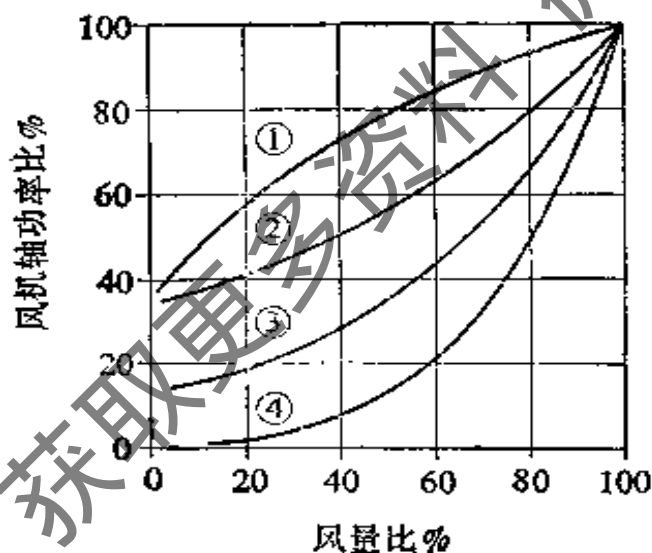


图 9.12 风机风量与轴功率特性

- ① 阀门调节
- ② 风机入口导流器调节
- ③ 变速调节(有压力检测)
- ④ 变速调节(无压力检测)

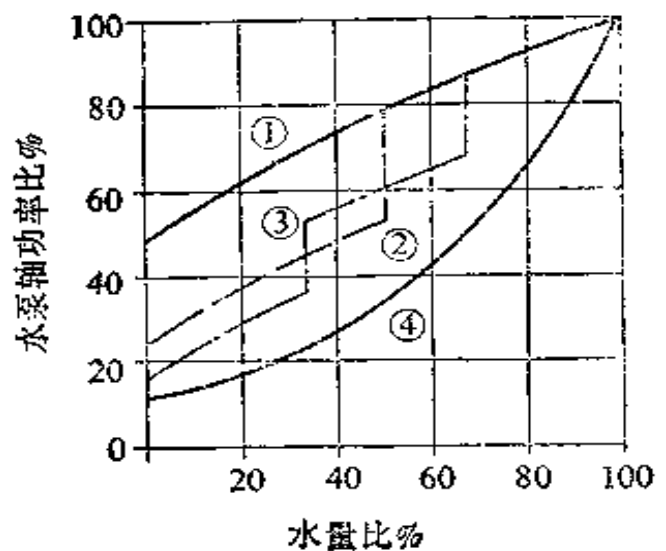


图 9.13 水泵水量与轴功率特性

- ① 两通阀调节(1台水泵)
- ② 两通阀调节(2台水泵)
- ③ 两通阀调节(3台水泵)
- ④ 变速调节

## 5. 应用变流量调节技术

对在运行期间负荷变化大和部分负荷时间多的空调分区应该采用变风量方式。

采用的变风量方法要与风道的阻力特性相配合。具有平坦型  $L-P$  曲线的风机比较适用于变风量系统；如果再配以阻力特性曲线较陡的管系，那末运行期调节时节约的能量就会更多些。见图 9.14、图 9.15 说明。对于部分负荷调节特性差的风机或水泵，可以采用多台并联运行方式改善其特性。

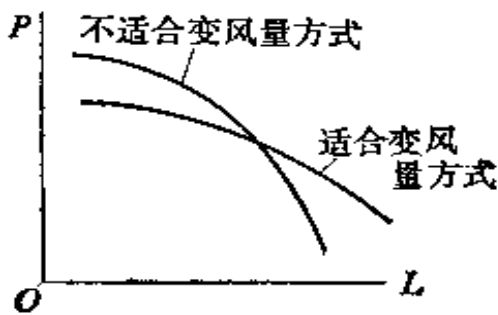


图 9.14 风机的全压特性

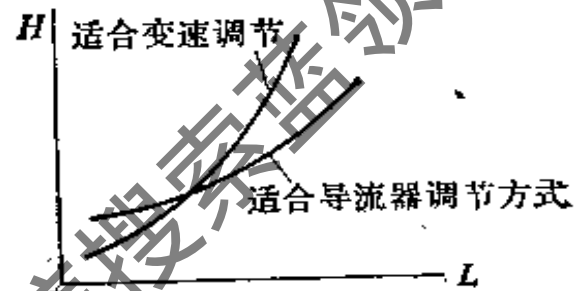


图 9.15 风道的阻力特性

当变流量系统采用压力给定控制时，压力检测器在系统上安装的位置对运行的稳定性和功耗节省的程度有很大关系，其部分负荷时的节能量比不设压力给定控制的要差些。如果给定压力的控制点位置愈接近管系的末端，那么这种相差的程度就愈小些。换句话说，在采用压力给定控制方式时，控制点位置愈接近管系末端，其节能效果就愈好。

从上述分析可以知道，在各种改变风机(或水泵)流量的调节方式中，采用电机变速调节方式，在运行期可望获得最好的节能效果。在实现变速调节的各种措施中，一般认为，采用直流电机用可控硅调速是最方便可靠的，但其价格昂贵，在工程上大量应用的可能性不大。

目前，空调工程中的风机和水泵普遍采用交流异步电动机作原动机。这是因为异步电动机结构简单、运行可靠、维修方便、价格便宜。但是异步电动机本身调速困难。不过，近 20 年来，由于电力

电子器件和交流技术、控制技术的发展和,已经逐步发展了异步电动机的工业化调速装置;更由于高技术发展和节能管理的形势需要,各种调速型异步电动机正在得到愈来愈广泛的应用,也促进了它的各种系列的发展。目前,异步电动机选用的调速装置主要有电磁调速电动机调速、液力耦合器调速和串级调速。近期还发展出变频调速装置等(有关调速装置的工作原理和基本结构将在第11章叙述)。

为了正确合理地选用调速装置,首先必须掌握风机和水泵的运行规律——主要指其流量的变化范围和变化规律。一般认为,若流量在额定流量的90%以上变化时,不建议采用调速装置。因为调速装置本身效率也在90%左右,不会产生多大的节能效益,在接近100%流量运行时反而会增大能耗。此外,由于电动机配用调速装置后会增加设备的总投资,因此,对于小容量的风机和水泵是否有必要选用调速装置,应该进行经济分析,仔细计算初投资的回收年限。一般认为,在两年内能从节电效益中回收投资就可以了。

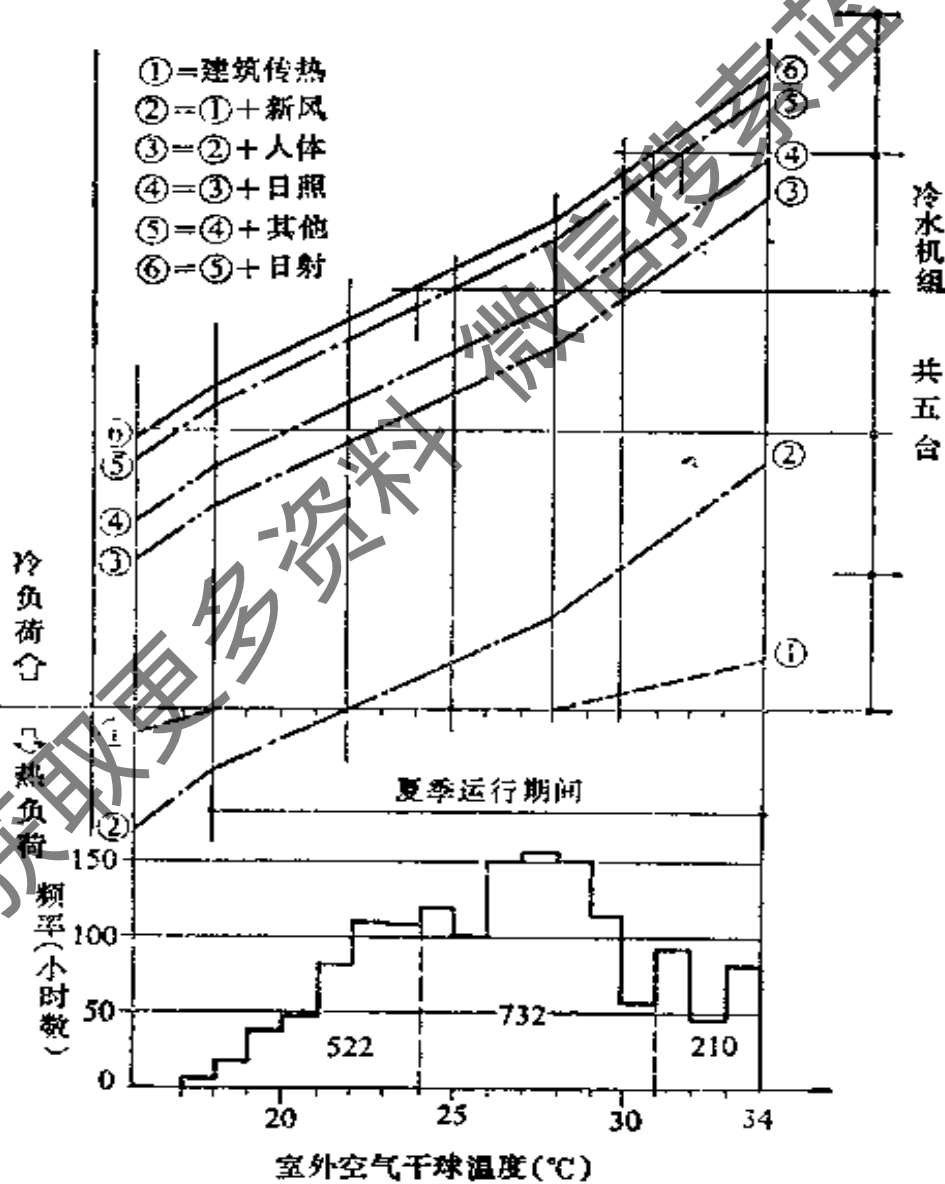
在当前,应用双速电机调速改变系统流量的做法是很有现实意义的。因为系统上的设备容量是按设计工况条件配置的,而且选定的设备都有一定余量,所以在运行时设备均处于部分负荷状态。从设备的最有效利用和管路系统的阻力特性分析,一般认为在空调系统中为风机和水泵配用的双速电机其高低速的转速比取 $1:2/3$ 为最有利,即应选用6/4极电机。但是,我国生产的YD系列双速电机是按功率与极数成反比例(即功率与转速成正比例)的关系来设计的,它适用于恒转矩负载,在低速和高速两种工况运行时,出现电动机的输出功率不能与负载功率同时匹配的现象,这说明这种单绕组6/4极双速电机是不适用于空调系统的。

考虑到在实际使用时低速运行时间一般要比高速运行时间长,为了有效地节约电能,新开发的YD-F系列6/4极双速电机,其定子设计为两套绕组,这种电机在低转速运行时也有较高效率。YD-F系列6/4极双速电机的功率匹配选为 $1:3\sim 1:3.5$ ,

其力能指标也高,而且振动值和噪声都比原有的系列低,在空调工程上应用已经取得良好效果(关于 YD-F 系列 6/4 极双速电机的技术规格和主要参数参见第 11 章)。

### 6. 双速水泵变流量技术的应用实例

某建筑物,典型空调负荷图列于图9.16的上方。图的下方表示空调系统在夏季运行期间不同室外温度时出现的频率(小时数),它是根据建筑物的空调时间间隔和建筑物所在的气象资料统计确定的。负荷图的右侧表示夏季设计工况时冷源设备的配置状况。按图 9.16 所示典型例,在峰值负荷时应选用规格相同的冷水机组五



9.16 典型空 负荷图

台,然而只在室外空气温度高于 $31[^\circ\text{C}]$ 时才需要五台同时运行,累计运行小时数为 $210[\text{h}]$ ;当室外空气温度为 $24[^\circ\text{C}]$ 以下的所有运行时间,开动三台冷水机组就可以了,累计运行小时数为 $522[\text{h}]$ ;其他夏季运行期间则要求四台机组同时工作,累计运行小时数为 $722[\text{h}]$ 。从以上分析可知,需要五台机组同时运行的时间只占夏季运行期间总小时数的 $1/7$ 。所以,为有效利用设备,并尽可能节省运行期能耗,在配置水系统时,不仅要考虑五台机组同时运行时的工作点,还要研究当三台和四台机组运行时水泵工作点。

水泵并联工作后管网的阻力取决于并联水泵的运行台数,他对单台水泵的工作参数有影响。在使用双速水泵的场合还要详细研究水泵改变转速之后流量、压头、轴功率和效率等特性的变化。应该找出最适合于水系统阻力特性的水泵特性参数。

在本例中,为考虑部分负荷运行期间节能的可能性,选择四台冷却水泵并联工作。水泵并联工作特性和工作点随变流量控制而变化的情况见图 9.17。图中注有记号 $n[4]$ 的曲线表示在转速为

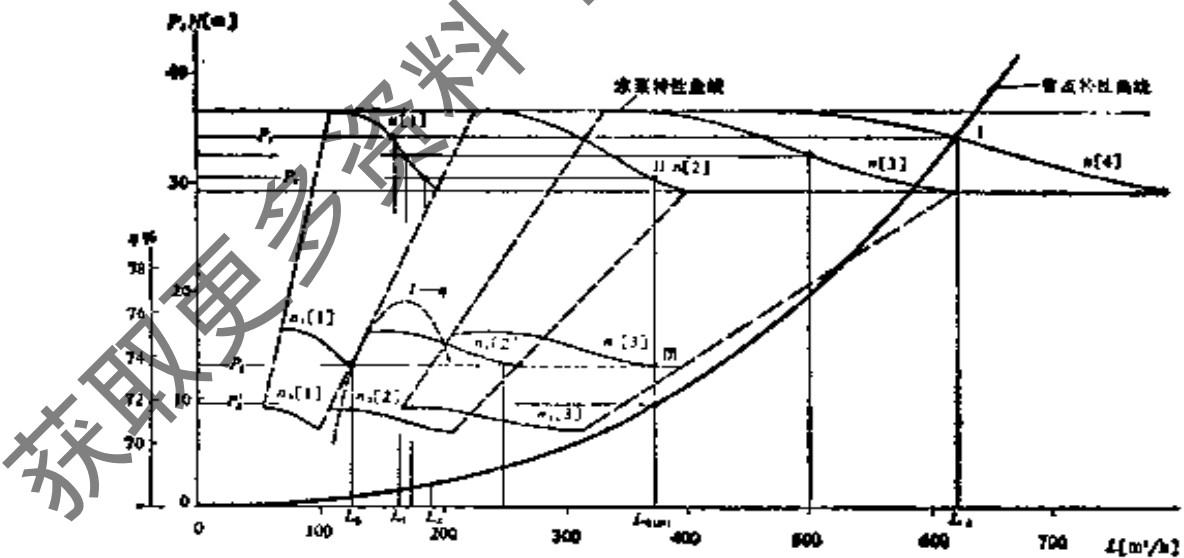


图 9.17 水泵并联工作特性和工作点随变流量控制而变化的情况

$n$  时四台水泵的并联工作特性;注有记号 $n_1[3]$ 的曲线表示在转速为 $n_1$ (即 $n_1 = \frac{2}{3}n$ )时三台水泵的并联工作特性;注有 $n_2[2]$

的曲线表示在转速  $n_2$  (即  $n_2 = \frac{1}{2}n$ ) 时两台水泵的并联工作特性; 注有记号  $n[1]$ 、 $n_1[1]$ 、 $n_2[1]$  的曲线分别表示单台水泵在三种不同转速  $n$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  时的工作特性。图上其他记号依此类推。

在空调额定工况时设计的联合运行的水泵工作点为  $I$ , 这时每台水泵的流量为  $L_1$ 、扬程为  $P_1$ , 从水泵的  $L-\eta$  曲线说明它们均运行在高效率区 ( $\eta = 76\%$  左右)。四台水泵并联工作时的总水量  $L$ , 即五台机组所需要的总冷却水量。当三台机组工作时, 要求水系统有  $L_2$  流量, 这时, 如果水泵以高速(转速  $n$ ) 运行, 那末并联两台水泵就能满足要求了, 这样, 就要求并联运行水泵的工作点为  $II$ , 这时, 每台水泵的流量为  $L_2$ 、压头为  $P_2$ 。但是, 从管道的阻力特性曲线知道, 为克服管道阻力, 实际上只需要水泵扬程  $P'_2$ , 如果用阀门进行调节, 那末就有  $[(P_2 - P'_2) \times L_2] / \eta$  这一部分能量浪费了(式中  $\eta$  为电机或水泵, 还包括传动装置的总效率)。这时, 如果选用三台 YD-F 系列 6/4 极双速异步电动机(其同步转速比为 1000/1500)驱动的水泵, 并使其低速运行, 那末并联运行的水泵工作点就可以在注有  $n_1[3]$  的  $L-P$  曲线上找到, 即  $III$  点。其时, 每台水泵的流量为  $L_3$ 、扬程为  $P_3$ 、效率约为 73%。对照管网水力工况的要求, 可知流量达到了, 扬程还略有富裕。显然, 从图中就可以看出, 如果双速水泵的同步转速比取  $1 : \frac{1}{2}$ , 那么水泵在低速运行时就难以满足要求了。

以上分析可以说明, 如果空调的水系统采用多台水泵并联(一般认为取三四台为合理), 并且把配用的电机定子设计为两套绕组的 6/4 极双速电动机, 那么运行期可以取得明显的节能效益, 这已经在实践中得到证明。据本例计算, 为满足机组的冷却水量要求, 应选用的 YD-F 系列 6/4 极双速电动机在高、低转速时其额定功率应该是 27[kW] 和 8.5[kW], 这样, 单从三台机组运行期间节省电能来看, 由于三台水泵在低速运行时要求功率为 25.5[kW],

而并联两台高速运行时要求功率达  $54[\text{kW}]$ ，所以每小时就可以节电  $28.5[\text{kWh}]$ 。该工况的运行累计小时数有  $522[\text{h}]$ ，总共可以节省电能  $28.5 \times 522 = 14877 = [\text{kWh}]$ 。

除上述很可观的节能效益外，还由于双速水泵可以在低速启动，电气线路中可以省却启动装置，使得电气设备投资也可以降低。这不仅补偿了恒速电动机改为双速电动机时所增加的设备费用，而且还有富裕。所以采用双速水泵变流量调节方式不仅减小了运行期能耗，而且降低了设备费用。此外，由于水泵由原来的  $2900[\text{r}/\text{min}]$  恒速电动机配套改为具有同步转速比为  $1000/1500$  双速电动机配套，无论是高速运行还是低速运行，效率都很高，性能也很稳定，而且使水泵的噪声和振动状况大为改观。

#### 9.4.3 应用蓄能技术

空调建筑物的冷、热负荷是随季节、时刻、室内条件和使用要求变化而变化的，一般，高峰和低谷时的负荷有较大差异，尤其对于间歇运行的空调。如果按峰值负荷选择设备，势必造成初投资大、设备利用率不高的情况，而且运行期间峰谷用电量极不平衡。在空调系统中应用蓄能技术是解决上述问题的极为重要的措施之一。结合我国国情，该类技术应该得到重视并予以开发应用。

##### 1. 冰蓄冷和水蓄冷

空调中应用的蓄能技术，其通常的做法是按小于峰值负荷的某一负荷选用冷、热源设备，同时利用蓄冷(热)装置把冷(热)源设备在非空调时间和空调负荷非高峰时设备多余的冷(热)量蓄存下来，供空调负荷大于设备能力时使用。最合适的蓄能介质是水，他无色、无臭、无味、无害、热容量大，又易于获得。可以利用蓄水箱中水的温度的变化蓄能(即显热蓄能)，构成蓄冷(热)水系统；对于蓄冷的情况，如果在前述显热蓄能基础上再利用水的相变(使水结冰)蓄能(即潜热蓄能)可以构成蓄冰水系统。

常温下，水的质量比热是  $4.187[\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}]$ ，冰的融解潜热是  $335[\text{kJ}/\text{kg}]$ 。这样，当利用温差为  $5[^\circ\text{C}]$  (即水温在  $7[^\circ\text{C}]$  和

12[°C]之间变化)时,质量为 1[kg] 的水的蓄热量为 21[kJ/kg],而当质量为 1[kg] 的冰融化并升温至 12[°C]时,其蓄热量是 386[kJ/kg],两者相比,后者约是前者的 18 倍。这说明蓄存数量相同的冷能,以冰水形式蓄存比以冷水形式蓄存所需的水箱容积要小得多,其两者间的相差程度与冰水箱内制冰率(即冰水箱中冰所占的容积比例)有关。对上述的使用温差,两者的关系如图 9.18 所示,从图中看出,如果制冰率为 10%,那末冰水箱的容积  $V_P$  约为冷水箱的容积  $V_C$  的 32%。制冰率一般控制在 10~40%。

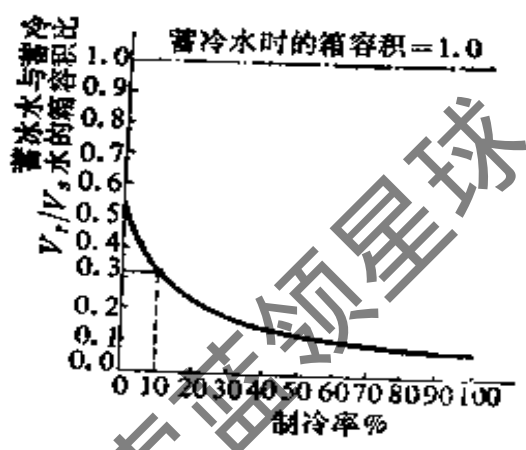


图 9.18 各种制冷率条件下,蓄冰水箱与蓄冷水箱的容积比(典型例)

随制冷和融冰的方法不同,冰水箱的结构形式是多种多样的。常见的一种形式与冷水箱相仿,在箱内配置蛇形管,一般用  $D_32$  钢管,其中充满制冷剂或乙醇水溶液(浓度大约为 25%)或二元混合物液体(如盐水等),箱内灌满冷水。结冰厚度约为 150[mm] 左右。蛇形管的间距要考虑到防止冰和冰之间连成块以致大大减少冰与冷水之间的接触面积而影响换热。一般,尺寸为  $3 \times 3 \times 12$ [m] 的冰水箱的供冷能力可达 4200[kW]。为保证冰与水之间充分而均匀的换热,通常在箱底设有螺旋搅拌器或采用压缩空气搅动。回水在水箱的下部均匀流入。由于冰的导电性较差,一般要在某些具有代表性的位置上安设冰层厚度探测仪以探明盘管上的结冰厚度。冰水箱内的盘管在耐腐蚀、耐压方面有较高要求。有些冰水箱内的盘管是采用耐高压的塑料管(如架桥聚乙烯管)制作的。塑料管的导热系数与通常制作热交换器用的铜管、铝管相比,约为它们的千分之一,但是当管壁上有相当厚度的冰层时,由于冰的导热系数很小,因此管材的导热系数影响不大。

与在热交换器表面结冰的蓄冷技术不同的另一种方法,即冰



晶蓄冷技术引起人们的重视。这是在制冷系统中采用一种特殊的蒸发器,使在水溶液中生成粒径约为 $50\sim 150[\mu\text{m}]$ 的细小冰屑。由于冰不附着在传热面上,又具有流动性,所以具有传热效率高、制冰率高的优点。当空调冷冻水系统配用这种制冰系统时,因为水管中输送的是冰、水混合液体,所以单位体积流体输送的冷量比用水输送的冷量要高出很多倍,这使冷冻水系统的规模大为减小。

除了上述冰水箱的容积比冷水箱的容积小很多的特点以外,冰蓄冷系统可以制备较低温度的冷冻水,一般为 $1.5\sim 2.5[^\circ\text{C}]$ ,所以输送冷量的效率高,风机和水泵的功耗低;此外,由于冰水箱容积小而使其外表面积大幅度减小,因此,冰水箱的热损失也小。但是,因为蒸发温度低,致使制冷机的COP值降低,而且系统控制管理较为复杂。

在冰蓄冷系统中,制冷机一般限于采用往复式压缩机或螺杆式压缩机。

## 2. 地下含水层蓄能

在地质结构中具有含水层的地区,如果地下水的水质、水量和水的参数能够满足空调工程应用要求,在可能条件下应该优先考虑用地下水作为空调能源。这种天然冷源成本低、效果好、管理方便。

随着工业生产的发展,在某些抽用地下水的地区,如果使用含水层的层次和时间高度集中,万一含水层中地下水的天然补给量不能弥补开采量,就会使地下水位逐年下降,深井的出水量也相应减少,甚至还造成严重的地面沉降。因此,近年来有些地区普遍采用了人工补给地下水的回灌技术,并在此基础上发展了地下含水层的蓄能技术。

在采用深井回灌时,一般在冬季向地下灌入温度较低的冷水,到夏季时从地下抽出作为空调的冷源,即所谓“冬灌夏用”;在夏季向地下灌入温度较高的水,到冬季时从地下抽出作为空调的热源,即所谓“夏灌冬用”。回灌后抽上来使用的水的温度是与灌水

的含水层深度、回灌水量和回灌时的水温有关的。例如，上海地区在使用“冬灌夏用”回灌技术后，夏季空调用水的平均水温有明显下降，其降低幅度在 $7\sim 9[^\circ\text{C}]$ 左右。这样，不但可以提高夏用水在空气处理时的降温效果；有时还可以起到使处理空气减湿的作用；更重要的是，还能大量节省深井水的用量。上海地区回灌后夏季可利用的水的平均温度大致为 $13\sim 14[^\circ\text{C}]$ 。

深井回灌，除了要有回灌水源外，尚必须具备四个条件：(1)含水层要有渗透能力；(2)回灌水质要符合卫生要求；(3)有水位差，促使地下水能流动；(4)回灌设备应有密封装置，以防止空气进入到砂砾层中造成堵塞，影响回灌。目前采用的回灌水源一般为自来水，或者是将地下水抽至地面经冷却塔喷淋冷却和净化处理后再进行回灌。

深井回灌的方法有真空回灌和压力回灌两种，它们分别适用于不同条件和使用要求。图 9.19 为利用自来水管网压力 ( $100\sim 200[\text{kPa}]$ ) 进行正压回灌的深井水泵配管装置图。该装置主要由出水管路、进水管路、回流水管路和扬水(抽水)管路等四个系统组成。

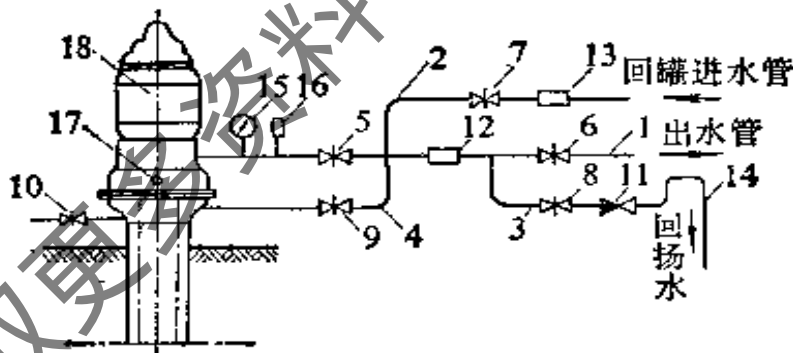


图 9.19 深井水泵正压回灌配管装置图

- 1—出水管；2—灌水管；3—扬水管；4—回流管；5—出水阀；  
6—出水阀；7—进水阀；8—回扬阀；9—回流阀；10—放气阀；  
11—止回阀；12—出水表；13—回灌表；14—U形管；15—真空压力表；16—温度表；17—测水位孔；18—深井水泵

上述利用深井“冬灌夏用”技术在我国南方地区，尤其是在上海的纺织行业已经得到了广泛的应用，并取得了很成功的经验。

在实践中,有的取代了机械制冷,有的至少也可以作为一种辅助冷源,在降低空调的峰值用电负荷方面起着重要的作用。

但是这种回灌技术将增加水系统在非空调运行期的能耗,所以必须在合理的条件下使用。从制造单位冷量所需要的能量进行核算并与机械制冷的单位能耗比较,可以知道,冬灌夏用水只有在利用温差小于  $4[^\circ\text{C}]$  时,其单位冷量的能耗才大于离心式气体压缩制冷的能耗,但仍比双效溴化锂制冷的能耗小;当冬灌夏用水的利用温差达到  $10[^\circ\text{C}]$  时,其单位能耗将比离心式气体压缩制冷能耗减少  $62\%$ ,比双效溴化锂制冷能耗减少  $83\%$ 。可见,为要提高深井回灌“冬灌夏用”技术的优越性,必须加大夏用水的利用温差。

## 9.5 空调排风能量回收装置

### 9.5.1 空气-空气全热(或显热)交换器

目前,广泛用于空调排风能量回收的空气-空气全热(或显热)交换器根据构造不同大致可分为回转型和静止型两类。回转型全热交换器(又称转轮)是一种蓄热蓄湿型的热交换器,其构造原理见图 9.20 所示,新风和回风分别在两个半部对向通过回转着的转轮的转芯部分,转芯是用特殊材质制作的,呈蜂窝状(其中波纹板的峰高大致在  $1.6\sim 2.6[\text{mm}]$ ),它蓄存着从回风中获得的能量,当转向另一侧时,这些能量为新风所带走。静止型全热交换器

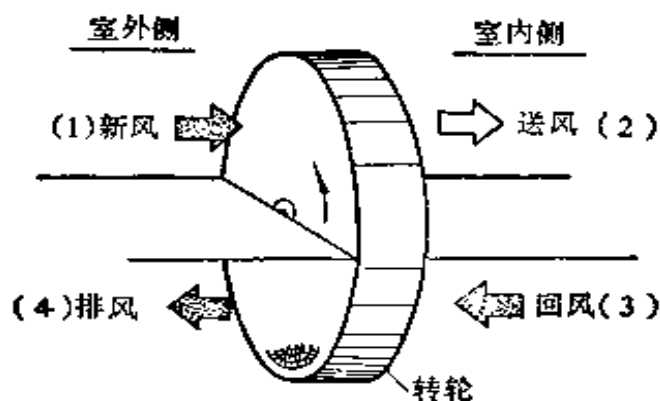


图 9.20 回转型全热交换器(转轮)的构造原理图

形式有多种,图 9.21 所示的全热交换器为板翅式结构,两股气流交叉流过,隔板是由经过处理的、具有较好传热透湿特性的材料构成,当隔板两侧气流存在温差和水蒸气分压力差时,两股气流之间就出现了全热交换,所以它是一种透过型的热交换器。当这两种热交换器采用不含吸湿作用的材料(只有传热,没有传湿能力)制作时,就构成空气-空气显热交换器。

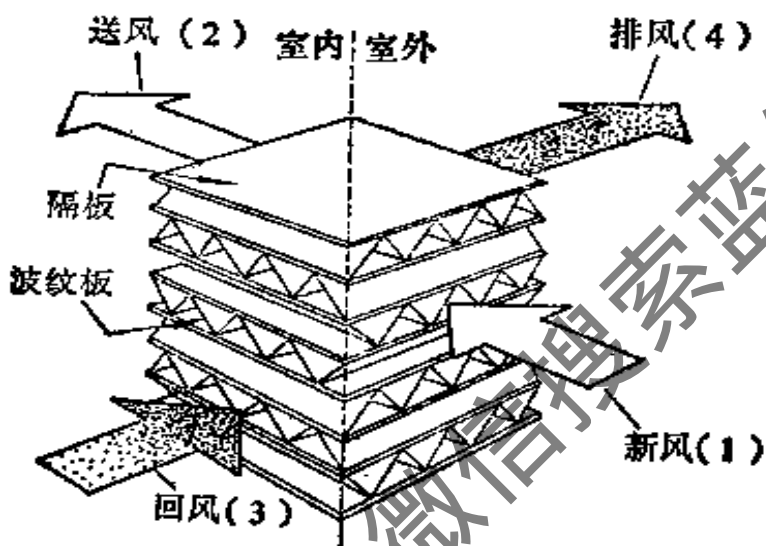


图 9.21 静止型板翅式全热交换器的构造原理图

空气-空气全热交换器的特性主要用热、湿交换效率和空气通过压力降来衡量。

全热交换器的热、湿交换效率计算公式为(对进风侧而言);  
 显热交换效率

$$\eta_t = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_3} \times 100\% \quad (9.5)$$

湿交换效率

$$\eta_x = \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3} \times 100\% \quad (9.6)$$

全热交换效率

$$\eta_h = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \times 100\% \quad (9.7)$$

式中  $t$ 、 $x$  和  $h$  分别表示空气的干球温度[°C]、含湿量[kg/kg干]

和焓 [kJ/kg 干];

下标 1、2 和 3 分别表示新风、送风和回风。

全热交换器的空气压力降(即空气阻力)计算公式;

对进风侧

$$H_{1-2} = H_1 - H_2 \quad [\text{Pa}] \quad (9.8)$$

对排风侧

$$H_{3-4} = H_3 - H_4 \quad [\text{Pa}] \quad (9.9)$$

式中  $H$ ——全热交换器连接风管断面上的空气静压 [Pa];

下标 4 表示排风。

下面分别说明这两类空气-空气全热交换器的特性和应用注意点:

### 1. 回转型全热交换器(又称转轮)

回转型全热交换器的构造,除了主要元件——转芯外,尚有金属外壳体、传动装置及其他附件组成。转芯的材料通常是用经过表面处理的铝箔制作的,也有用浸渍过氯化锂的特殊纸或合成纤维质材料制作的。为了提高空气和材质的接触面积,转芯的材质都呈蜂窝状,其比表面积(指每  $1[\text{m}^3]$  转芯容积中包含的以  $[\text{m}^2]$  计的传热面积)大致在  $330 \sim 3300[\text{m}^2/\text{m}^3]$  范围。

从实验研究得知,对于一定材质和结构型式的转轮,其热、湿

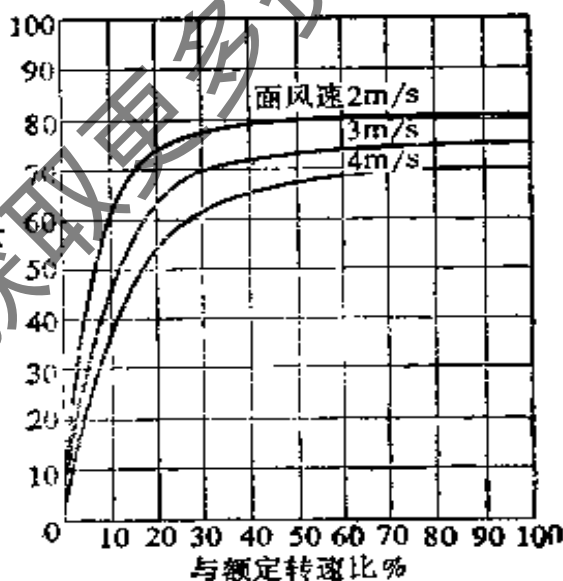


图 9.22 转轮转数与效率的关系

交换效率是与通过转芯的空气流速和转轮的转速有关的,而且当面风速一定时,转轮的转速存在着某极限值,其时,转轮的  $\eta_t = \eta_x = \eta_n$ 。当实际转速低于极限转速时  $\eta_x$  将小于  $\eta_t$ ,其相差程度随转速的减小而增大。图 9.22 表示某型号转轮的显热交换效率  $\eta_t$  与面风速、转速之间的关系,他的设计的极限转速为  $15[\text{r}/\text{min}]$ 。从

图中曲线变化趋势可见，当转轮的转速大致在  $7\sim 10[r/min]$  时，效率已接近于定值；而且效率随空气通过转轮面风速的减小而增大。合适的面风速范围取  $2\sim 4[m/s]$ 。

空气通过转轮的压力降与转芯的结构，此表面积和面风速等因素有关。对于各种材质，当面风速在  $2.5[m/s]$  时，其压力降大致在  $100\sim 175[Pa]$  ( $10\sim 18[mmH_2O]$ )。

通过转轮的进、排风量的比值对热、湿交换效率是有影响的。从进风侧效率考虑，当排风量小于进风量时，热、湿交换效率降低；当排风量大于进风量时，热、湿交换效率提高。图 9.23 所示为不同风量比(指送风量与排风量之比)对效率的影响程度的一个实例。对于大多数转轮装置，在进、排风量相等时其全热交换效率大致在  $70\sim 80\%$  范围。

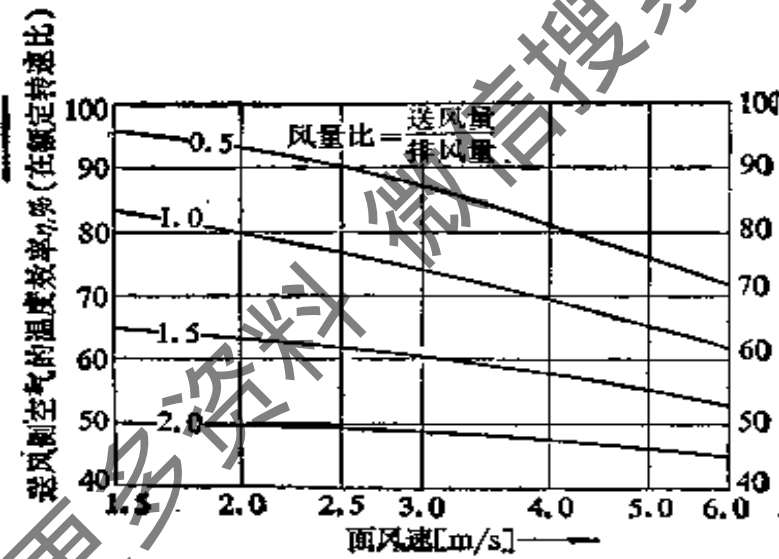


图 9.23 各种面风速时转轮的送排风量比对效率的影响关系

已知新风和室内回风的状态参数，又知道选定的转轮的效率，就可以在湿空气焓湿图上表示出空气通过转轮时的状态变化过程。当转轮在极限转速时，存在着  $\eta_t = \eta_s = \eta_h$  的关系，此时送风状态点 2 (或 2') 必定落在 1-3 (或 1'-3') 连线上 (见图 9.24)，其所在位置取决于热、湿交换效率的大小，它应该满足  $(h_1 - h_2) / (h_1 - h_3) = \eta_h$  (或者  $(h'_1 - h'_2) / (h'_1 - h'_3) = \eta_h'$ ) 的关系式。当实际转速小于极限转速时，因为有  $\eta_s < \eta_t$  的情况，所以送风参数会出现

如图 9.25 所示的偏离现象。在图上表示为状态从 2→(2), 状态从 2'→(2')。

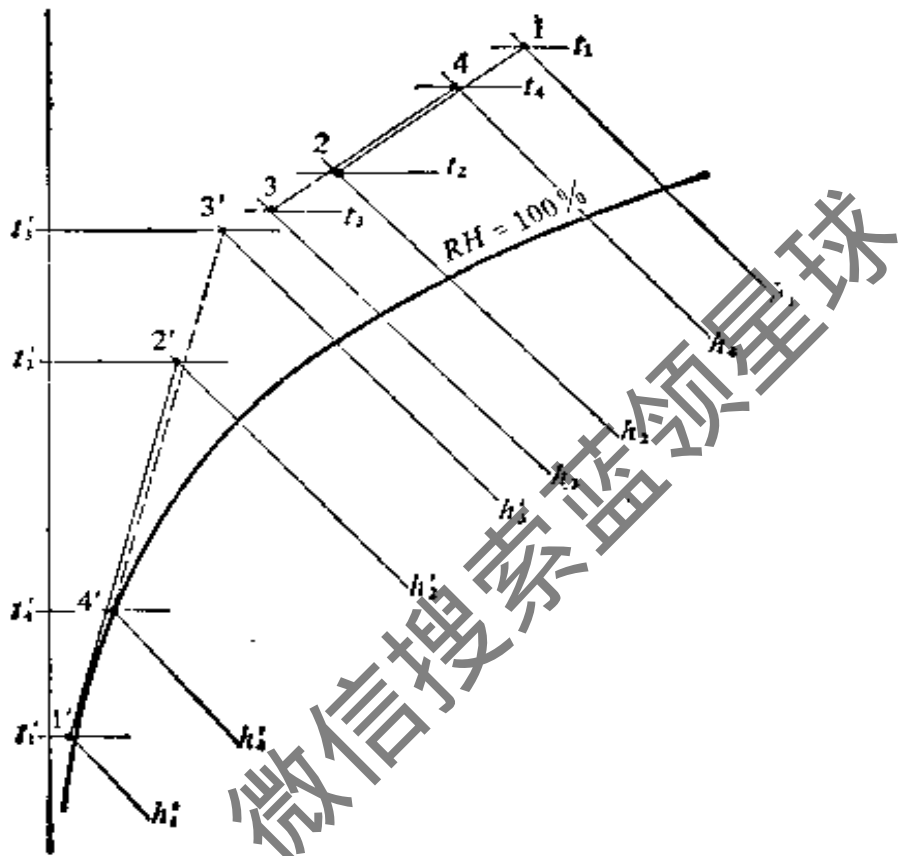


图 9.24 经转轮后的送风状态点在  $h-d$  图上的表示

下面讨论关于转轮的交叉污染问题。虽然转轮的箱体、支撑件与回转的转芯之间有气密性很好的密封材料填充，致使两股气流不可能混合，但是由于：(1)滞留在转芯蜂窝状空间(约占转芯容积的 70~95%)内的空气随转轮的回转而转嫁给另一股气流；(2)由两股气流间的静压差而引起的缝隙渗漏等原因，使得两股气流间发生交叉污染，其程度随转速和压差的增大而增大。因此当使用在对进风有清洁要求的场合，应该选用带有清洗扇的装置。清洗扇的作用可见图 9.26 说明，其弧度角大小和清洗风量与转芯的结构尺寸——在气流方向上的转芯的深度、面风速、转速和两股气流间的压差有关，应该根据实际应用场合的条件正确选择。

带有清洗扇的转轮在现场安装时尤其要注意其接口与相应风管的正确连接，在选用风机和进行风管水力计算时，应使转轮两侧

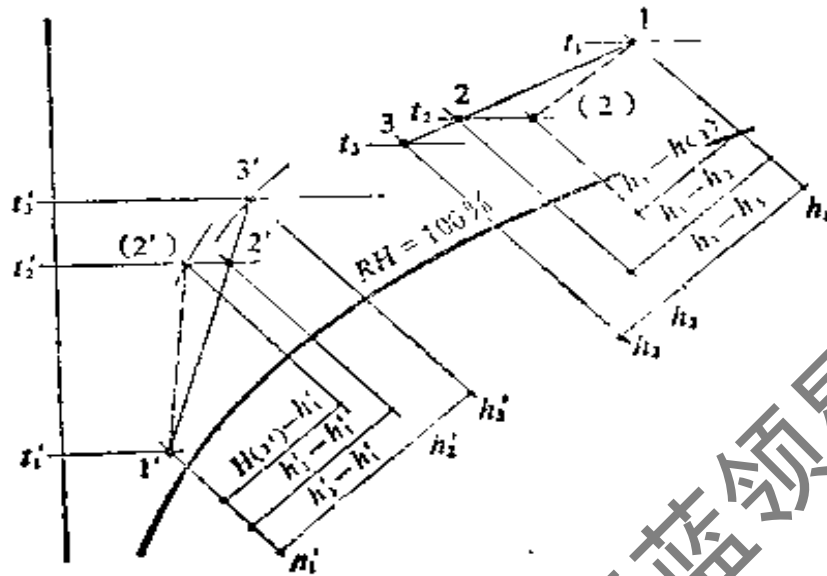


图 9.25 当转轮的转数小于极限转数时,送风状态点(2')在  $h-x$  图上的表示

连接风管间的静压差保持在  $P_1 > P_2$ ,  $P_2 > P_3$  的状态。清洗风量大致可以按送风量的 5% 考虑。

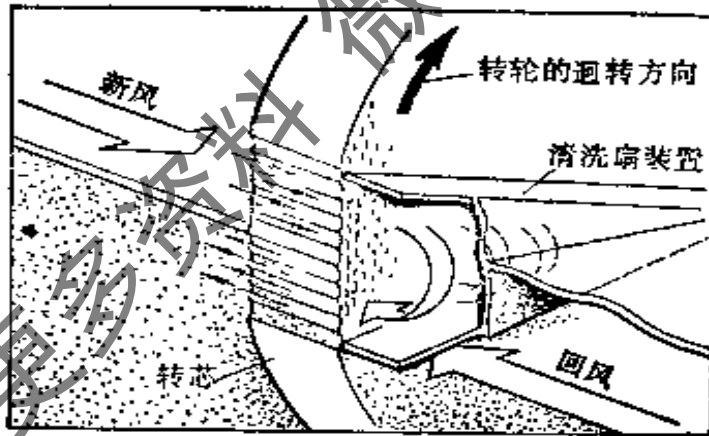


图 9.26 转轮上清洗扇作用的图解

设备选择是根据设计工况进行的。当对送风参数或回收能量有调节要求时可以采用下述两种方法：(1)改变转轮转速；(2)调节旁通风道上的阀门开度，调节可以是手动操作或者用设在送风道上的温度传感元件进行自动控制。

因为转轮两半部的空气是对向流通的，故具有自净作用，转芯中空气通道不易被尘埃等阻塞，新风道和回风道上的过滤器是否



需要安装,可以根据风源的清洁程度而定,一般认为,安装粗过滤器还是必要的。如果对送风空气的品质有较高要求,那么送风道上还应安装过滤器,其过滤效率视使用要求而定。

## 2. 静止型板翅式全热交换器

与转轮不同的是,静止型全热交换器不带回转装置和传动部件,所以其构造简单、造价便宜。

静止型板翅式全热交换器由如图 9.21 所示的单体,另加外壳体组成。一般,外壳体用薄钢板制作,其上有四个风管接口,可以分别与新风管、送风管、回风管和排风管连接。为便于单体的定位和安装取出(为了清洁和更换),外壳体的内侧壁上设有定位导轨,并衬有密封填料,以防两股气流短路混合造成交叉污染。单体是用特殊纸或经过处理的其他纤维性多孔质材料制作的。新风和室内回风以交叉流形式流经单体,当两者间存在温差和水蒸汽分压力差时,经过隔板进行热、湿交换。由于隔板自身的热阻与其两侧空气的换热热阻相比要小得多,所以隔板使用的材质的导热性能对显热交换效率就显得无关紧要。从实验和理论分析已经证明,用特殊纸制作隔板时,其显热交换效率与用导热性能很好的铜、铝等制作的差不多,然而,纸系多孔质材料,当其两侧间存在水蒸汽分压力差时能透湿,故而能利用来作为全热交换的介质,而金属材料却没有这种可能。但是,纸的气密性差,为了提高它的气密性并使之具有较好的透湿性能,必须对纸进行对气体有选择性的特殊加工处理。当然,对纸的特殊处理还包括耐燃、耐腐蚀等要求。

研究表明,用纤维性多孔质材料作为基材的全热交换器,其进风参数对全热交换效率是有影响的。因此,当其他条件相同时,全热交换器使用在冬季供暖工况和夏季供冷工况时,他们的全热(或焓)交换效率却不相等,前者较高于后者。这可以从该类产品的特性图中直接看出(图 9.27)。

新风经全热交换器后的送风参数可以根据室内外空气状态参数和选定的设备的显热交换效率 $\eta_s$ 、全热交换效率 $\eta_t$ ,经过计算或

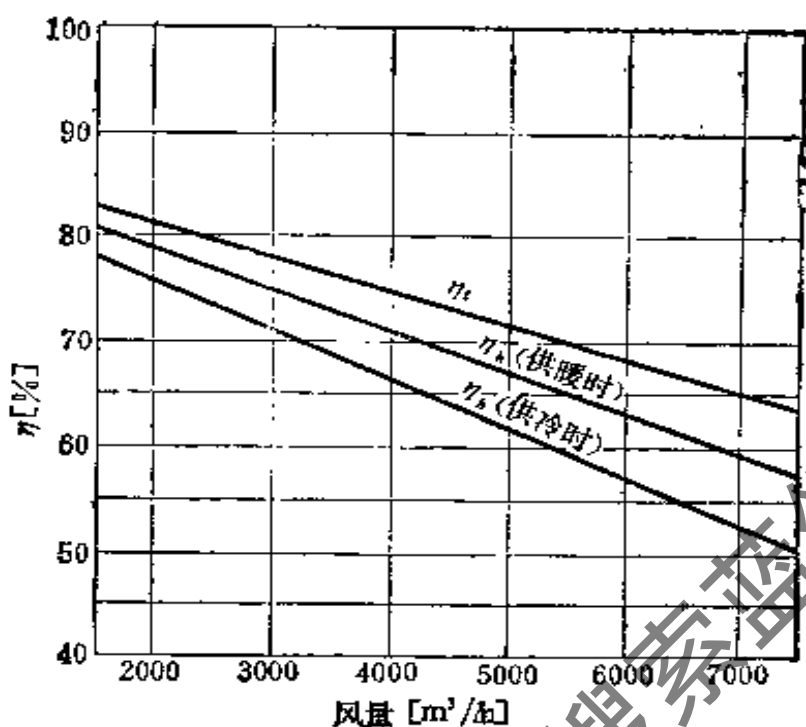


图 9.27 静止型板翅式全热交换器的特性图(典型例)

作图得出。图 9.28 上线段 1、2 和 1'、2' 分别为夏、冬季时新风经过静止型板翅式全热交换器的状态变化过程线。在夏季工况时，如果全热交换器的显热交换效率和全热交换效率分别设为  $\eta_t$  和  $\eta_h$ ，那么，夏季工况时新风经全热交换器后的送风参数 2 可以由下列两关系式确定：

$$t_2 = t_1 - \eta_t(t_1 - t_3) \quad (9.10)$$

$$h_2 = h_1 - \eta_h(h_1 - h_3) \quad (9.11)$$

同样，在冬季工况时，如果全热交换器的显热交换效率和全热交换效率分别设为  $\eta_t'$  和  $\eta_h'$ ，那么冬季工况时新风经全热交换器后的送风参数 2' 可以由下列两关系式确定：

$$t_2' = t_1' - \eta_t'(t_1' - t_3') \quad (9.12)$$

$$h_2' = h_1' - \eta_h'(h_1' - h_3') \quad (9.13)$$

此外，静止型全热交换器的热、湿交换效率还与通过风量和风量比（指排风量到新风量之比）有关。它们随通过风量的增大而减小。但随风量比的增大而增大。

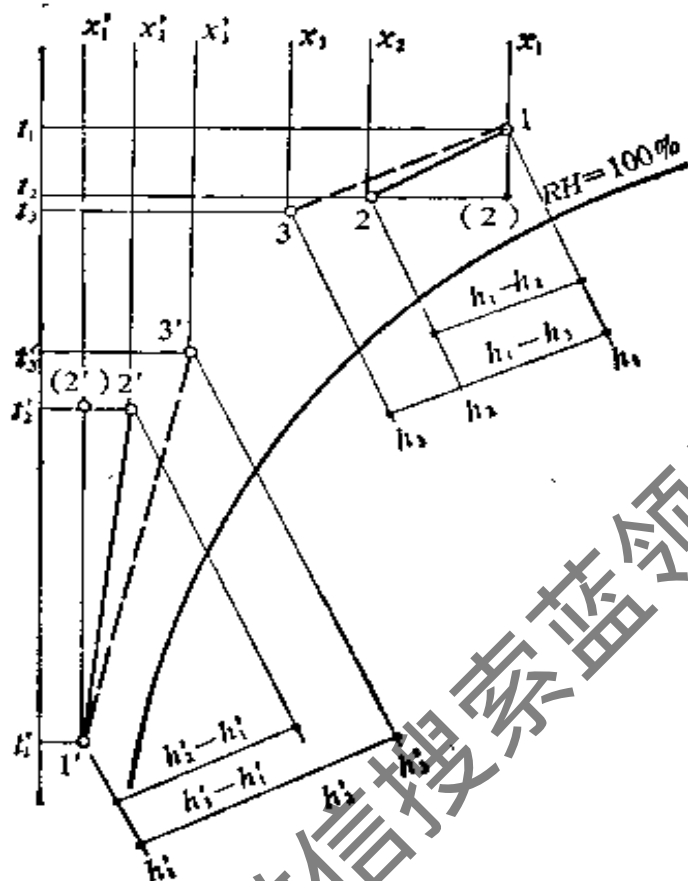


图 9.28 经静止型板式全热交换器后的送风状态点在  $h-x$  图上的表示

在冬季使用静止型全热交换器时，如果进入全热交换器的两股空气参数出现如下情况，即在焓湿图上 1 和 3 两状态点的连线切割  $RH = 100\%$  的饱和曲线，这时，为避免在全热交换器内（主要是排风侧）有结露或结霜的可能，

可以采用把低温侧空气先进行预热的方法。如图 9.29 所示，在进入全热交换器之前先把新风从状态 1 预热到状态 1'。

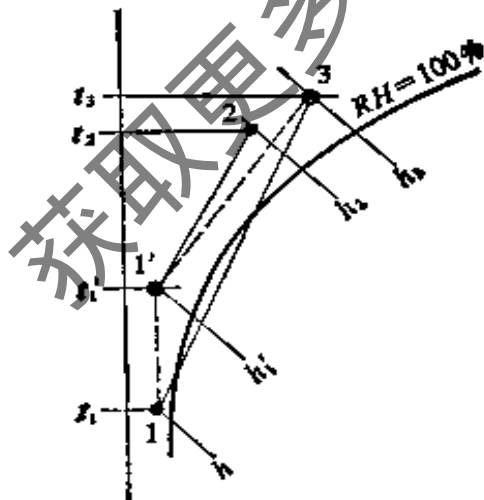


图 9.29 新风预热后进入全热交换器的状态变化

静止型全热交换器的空气阻力是随通过流量变化的，与单体的结构尺寸也有很大关系。目前在工程中应用的此类产品在额定风量时其空气阻力在  $140 \sim 310$  [Pa]。

由于单体中空气通路的当量直径比较小，一般在1.5~2.5 [mm] 为防止通路堵塞、静止型全热交换器的进风侧是必须安装空气过滤器的；当用于含有油雾的排风时，在回风侧需要安装高效过滤器。由于空气在通路中的流动呈层流流态，气流基本上都在通路的中央流动，因此不必担心气流中的尘埃会附着在壁面上，不过在单体的入口处，因为出现乱流，所以有可能集尘，用吸尘机等可以方便地将其除去。

为静止型全热交换器配用送、排风机时，一般有如图9.30所示四种形式：

- (1) 全热交换器设置在送、排风机的吸入段上，称双吸送式；
- (2) 全热交换器设置在送、排风机的压出段上，称双压送式；
- (3) 全热交换器设置在送风机的压出段、排风机的吸入段上；
- (4) 全热交换器设置在送风机的吸入段、排风机的压出段上。

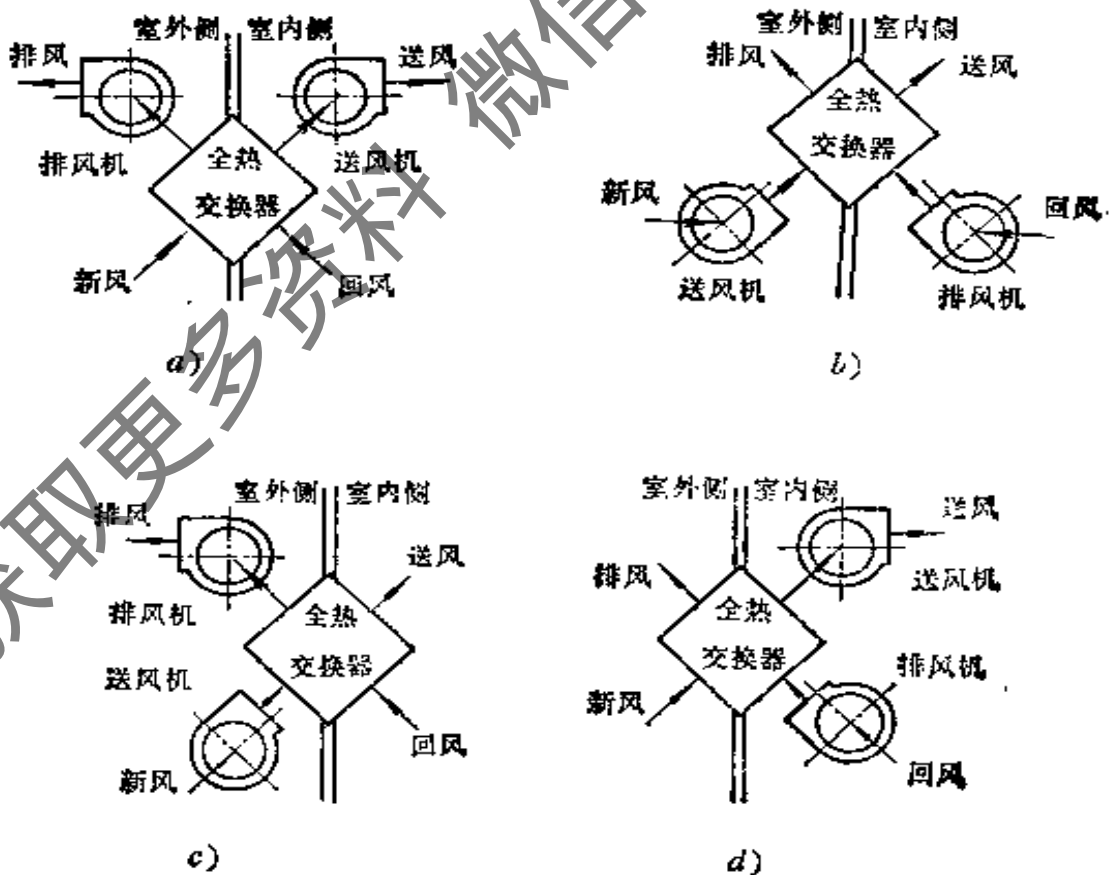


图 9.30 全热交换器与送、排风机的各种连接形式

从减少漏风、保证换气量和减少排风侧的有害气体、臭气对送风污染的可能性方面讲,采用图 9.30 中 *a* 和 *b* 两种连接方式较为有利,尤其 *a* 式最合适;但是对医院空调要求讲,一般建议用 *c* 式,但此时从新风侧向排风侧的漏风量较大,在选择送风机型号规格时要留足余量。

在工程上应用时,全热交换器可以与新、排风管道、风机组合成系统,集中回收空调的排风能量并预冷或预热新风,而后把经过预冷或预热的新风送至各层空调机组,系统图例见图 9.31 所示。全热交换器也可以做成机组形式与空调机组或风机盘管机组等配合使用,图 9.32 中列出了三种应用图例。

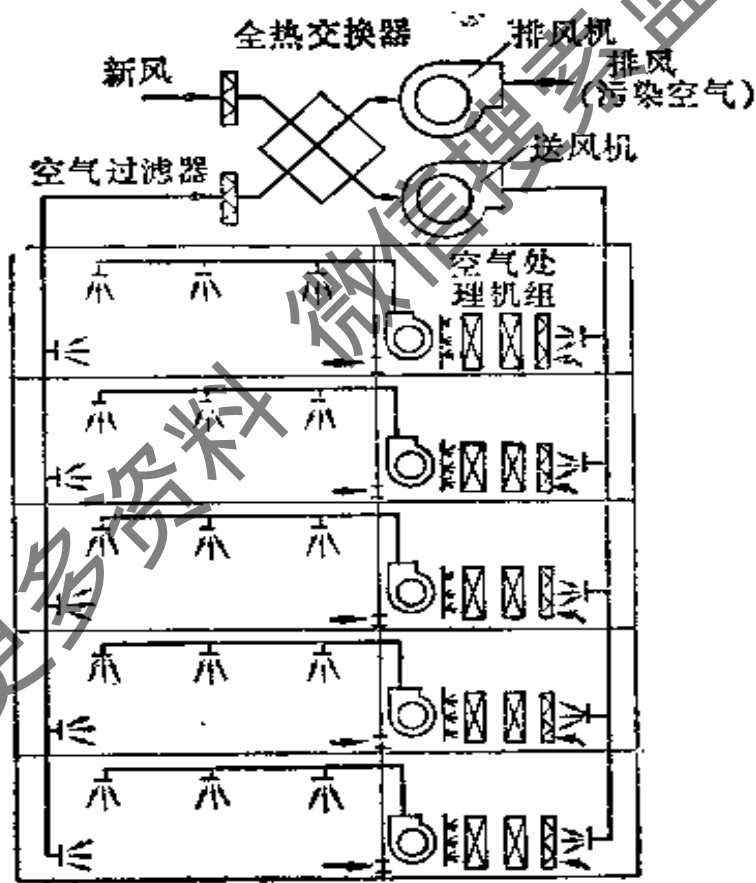
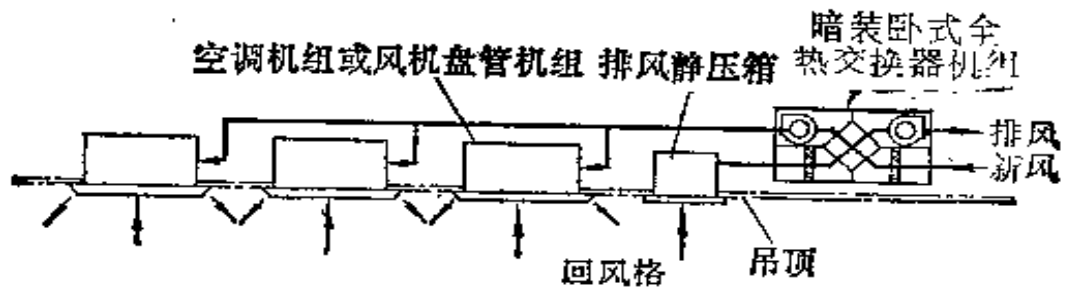


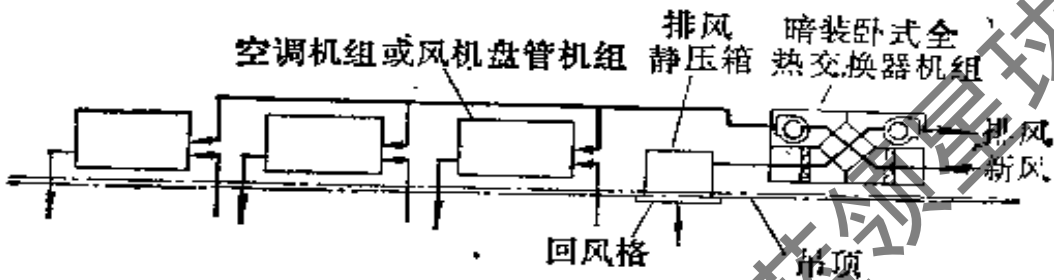
图 9.31 全热交换器的应用例——分层式空调

### 9.5.2 热管换热器

热管换热器是一种回收显热量(或显冷量)的空气-空气能量回收装置。其外形(如图 9.33 所示)与普通的空气换热器很相似,



a) 与明装卧式空调机组组合运行方式



b) 全热交换器机组独立运行方式



c) 与暗装卧式空调机组组合运行方式

图 9.32 全热交换器的应用例——分散式空调

但是有两个主要的本质区别：其一，热管换热器的每一条管子是一个独立的传热元件——热管；其二，热管换热器中有分隔板使每根

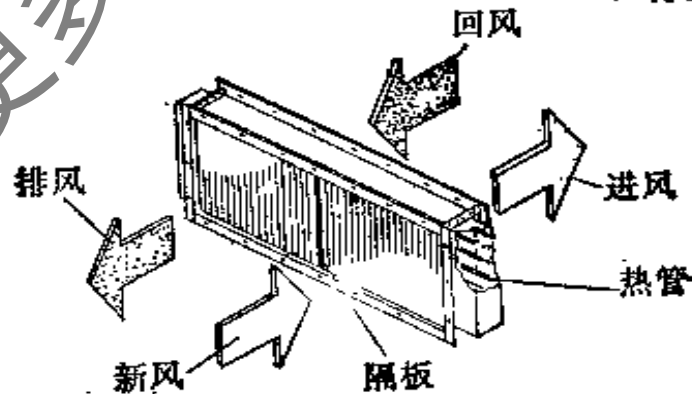


图 9.33 热管换热器

管子同时处于两个空气通路中，流经热管换热器的一侧空气被加热而另一侧空气被冷却。因此，热管换热器可以被利用来回收空气中的能量。

1. 热管的构造和作用原理(见图 9.34) 热管是利用管内工作液体的相态变化和吸液芯多孔材料的毛细作用而起热传递作用的一种传热元件。主要由五个部分组成：(1) 管壳，(2) 吸液芯，(3) 工作液体，(4) 端盖，(5) 充液管。

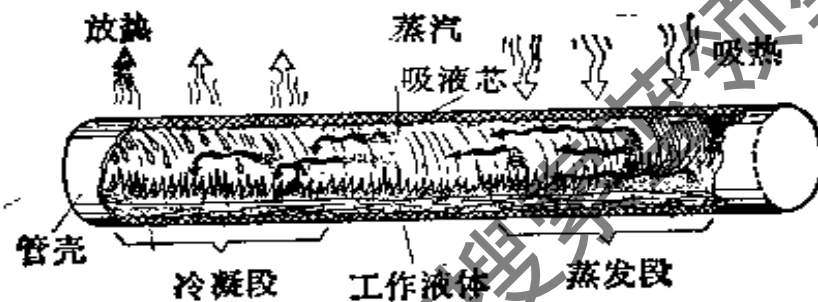


图 9.34 热管的作用原理

热管内工作液体的选择取决于热管所处的冷源和热源的情况以及工作温度，还要考虑到它与管材的相容性。工作液体在热管的热端蒸发而在冷端冷凝，在热管的长度方向形成两个工作段，即蒸发段和冷凝段。工作液体在蒸发段通过管壁从热气流(热源)中吸热而成为蒸汽，蒸汽在管中央迅速流向冷凝段，在冷凝段通过管壁把热传递给管外侧的冷气流(冷源)，于是工作液体被冷凝，变成液态的工作液体借助于吸液芯的毛细压作用流回蒸发段，再从热气流吸热蒸发……，如此循环，就可以把热气流中的热能传递给冷气流，或者把冷气流中的“冷”能传递给热气流，起着能量回收的作用。应用于空调方面的常用的工作液体有水、氟里昂、氨等。

热管的倾斜度对传热特性有很大影响。当热管的冷凝段高于蒸发段时，对液态工作液体的回流产生有利的作用，因此热管的吸放热效应正常，但是当热管的冷凝段低于蒸发段，并低到某程度即使吸液芯的毛细压作用也难以使工作液体返回蒸发段时，热管的吸放热效应就停止了。

## 2. 热管换热器的特性

热管换热器的热交换效率是与其面风速、换热面积和两侧气流的流量比等因素有关的。图 9.35 是有代表性的热管换热器的热交换效率与其面风速、排深的关系曲线。此图的试验条件是两侧气流为逆流且流量相等；肋片管的片间距为  $1.8[\text{mm}]$ 。由图可见，当排深增加时，效率也增长，但增长率趋于缓慢。例如，在面风速为  $3[\text{m/s}]$  时，如果排深为 6 排，热交换效率为 60%；而当排深增加到 12 排时，热交换效率只提高到 75%。此外，在其他条件相同时，面风速增加将会使效率降低。一般，设计面风速取在  $2\sim 4[\text{m/s}]$  范围内。

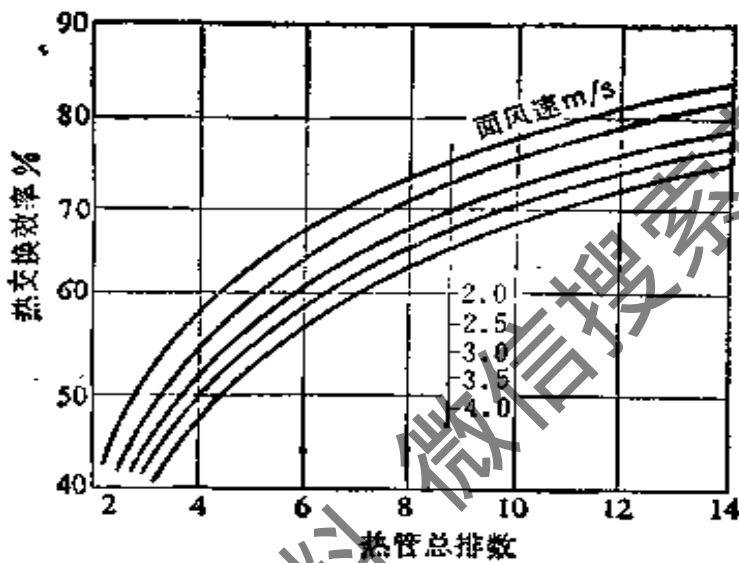


图 9.35 热管换热器的热交换效率与面风速、排深的关系(典型例)

评价热管换热器的另一重要特性是空气阻力，与一般通风设备一样，在结构特征确定的情况下，它取决于面风速的大小。然而在设计热管换热器时发现，要想取得高的热交换效率，则空气阻力就必然增大，因此，应进行优化的结构设计。目前在工程上应用的热管换热器，当具有热交换效率 60% 时，在面风速为  $2.0[\text{m/s}]$  时其空气阻力约为  $100\sim 175[\text{Pa}]$ ；而面风速为  $4.1[\text{m/s}]$ ，空气阻力上升到  $375\sim 500[\text{Pa}]$ 。

## 3. 热管换热器的应用



(1) 在空调的风管系统中连接热管换热器时，热管换热器必须水平安装，即让热管保持在水平状态或按设计所指定的倾斜度安装（如图 9.33 中所示的方式）；绝对不能把热管放置呈垂直状态。

(2) 热管换热器的两侧分别连接新风管/送风管和回风管/排风管，为提高其换热效率，应该使两侧气流呈逆流流动状态；

(3) 当流经热管换热器的两股气流温差大并且其中有一股气流的含湿量较大时，在换热器表面上将可能出现结露现象（这主要是指冬季供暖时的排风侧）。当凝结量适中时可以提高换热效果，但是在更多的情况下将会有凝结水析出，因此使用热管换热器时应该设法把凝结水收集排走；

(4) 通常，热管换热器的换热效果是借助控制热管的倾斜度来调节的，在实用中也有用旁通方法调节的。为便于热管换热器的倾斜度控制设备的安装，换热器和风管连接处应设置软性接管；

(5) 一般说，热管换热器对冬季热回收比较有利，而在夏季效率较差些。如果换热器中分隔板与热管连接处没有缝隙的话，那么经过热管换热器的两股气流间是不存在交叉污染问题的。

获取更多资料

## 第 10 章 空调系统的测试与调整

施工后的空调系统能否达到设计要求,在使用过程中系统又能否做到节能运行,这是每个空调专业技术人员所关心的问题。经空调设备处理前、后的空气状态和风量等参数的测试,以及系统冷、热媒、水量和风量等参数的调整,都是使系统符合设计要求进行节能运转的重要环节。本章就这一环节所使用的仪器和测试、调整等方面作一基本叙述。有些方面还应综合运用其他章节所述内容全面考虑。

### 10.1 空调测试常用仪器

在空调系统的运行调试或设备的性能测试中,必须对空气状态参数及冷、热媒参数和电参数等进行测定。通过这些参数测定所得的数据进行计算与分析,从而得出科学的评价,或作为进一步工作的依据。因此,对常用仪表构造原理和正确的使用方法需要有一定的了解,才能使所得到的原始数据比较可靠。本节主要介绍空调工程中常用的温度、相对湿度、压力、流速、流量等测量仪器。

#### 10.1.1 温度的测量

温度是表征物体冷热程度的一个状态参数。当测温仪表的感应部分(传感器)浸入被测介质后,传感器与介质间产生热交换(传导与对流),使两者的冷热程度逐渐趋向于一致。这时,根据传感器所产生的物理效应制成各种不同类型的测温仪表。

##### 1. 玻璃管液体温度计

玻璃管液体温度计简称液体温度计,如图 10.1 所示。它由温包、毛细管、膨胀泡及标尺组成。当温包浸入被测介质后,温包中的液体(水银或酒精)受热膨胀或受冷收缩产生体积变化,致使与

温包相通的毛细管中液位发生变化。通过由温度值定标的标尺上所示液面位置，可确定该介质的温度值。当温度略超出测量范围的上限值时，液体进入膨胀泡，这样可避免温包破裂而损坏温度计。

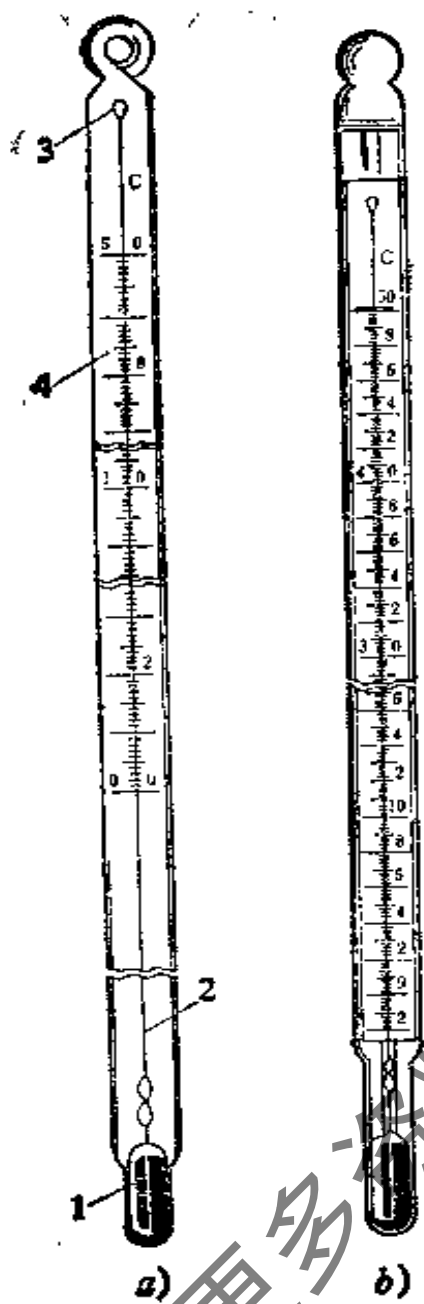
液体温度计在构造上有棒式和内标式两种。前者的标尺直接刻在玻棒上(图 10.1 a)，后者的乳白色玻璃板标尺是嵌装在玻璃套(图 10.1 b)或金属套管中。液体温度计的测量范围，水银温度计一般为  $-30 \sim +600$  [°C]，酒精温度计则为  $-100 \sim +75$  [°C]。分度值有  $2^\circ$ ， $1^\circ$ ， $0.5^\circ$ ， $0.2^\circ$  和  $0.1$  [°C] 数种。在空调工程中，一般选用  $0 \sim 50$  [°C] 及  $0 \sim 100$  [°C] 的水银温度计。并根据测试需要确定相应的分度与准确度。

为了避免温度测量过程中的热干扰，特别在使用这类温度计测量室内温度时，应防止温包受人体及口部呼吸所带来的影响。此外，在读数时应尽快先读出小数分度值，然后再读整数，而且视线应与水银液面及标尺线平行。否则易产生读数误差。若测温点附近有辐射热源时，应采用遮挡物以消除其对温度计的影响。

另一种液体温度计，通称金属液体温度计或压力式温度计。它的温包和毛细管系用金属制成，毛细管的另一端与波登管压力计相连，三者的空腔内充满液体(或气体)，如图 10.2 所示。当温包感受的温度发生变化时，液体体积膨胀或收缩，因为仪器盛液的容积不变，迫使波登管受压变形，并籍指针指示出温度读数。这种温度计的特点是温包坚固，且可根据需要，确定毛细管长度进行远距离测量。但在使用中应绝对防止毛细管折裂。

## 2. 双金属温度计

双金属温度计是一种固体膨胀式温度计。它的温度感应部分是由两种线膨胀系数不一样的金属材料复合组成的金属带构成。当传感器所处介质的温度发生变化时，线膨胀系数大的金属伸长(或缩短)得较多，迫使复合金属带(双金属片)产生弯曲变形。利用形变位移的大小与温度变化成正比的关系，通过一定的放大机构指示出温度值，从而组成双金属温度计(图 10.3)。不少室温



a) 棒式      b) 内标式

图 10.1 流体温度计

- 1—温包； 2—毛细管； 3—膨胀泡；
- 4—标尺

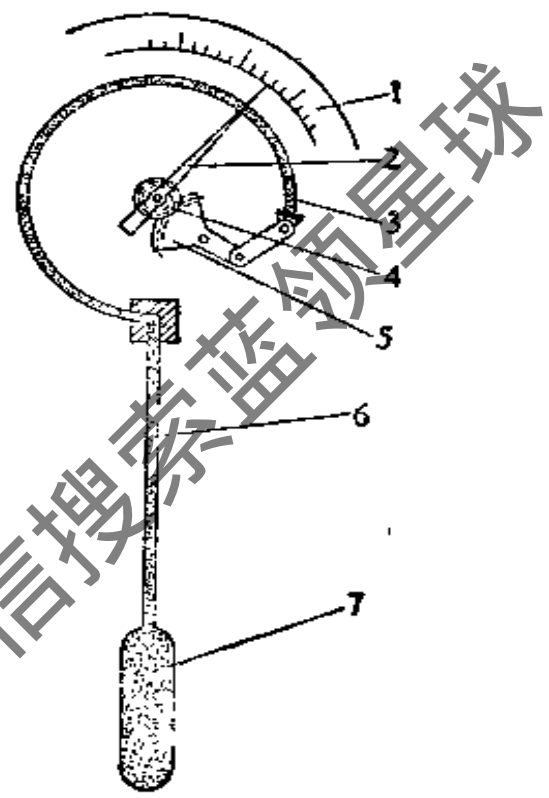


图 10.2 金属液体式温度计

- 1—标尺； 2—指针； 3—波登管；
- 4—中心齿轮； 5—扇形齿轮；
- 6—毛细管； 7—温包

自记温度计（图 10.4）及指示或兼控制用的温度计都是利用这一原理制成。

这类温度计由于放大机构的特殊性，在使用时，仪器应严格按

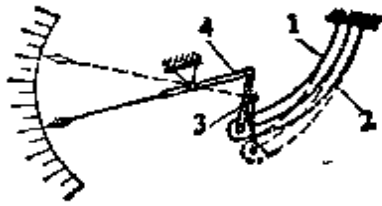


图 10.3 双金属温度计原理图

1—金属片(有较大膨胀系数); 2—  
金属片(有较小膨胀系数); 3—杠杆;  
4—记录笔

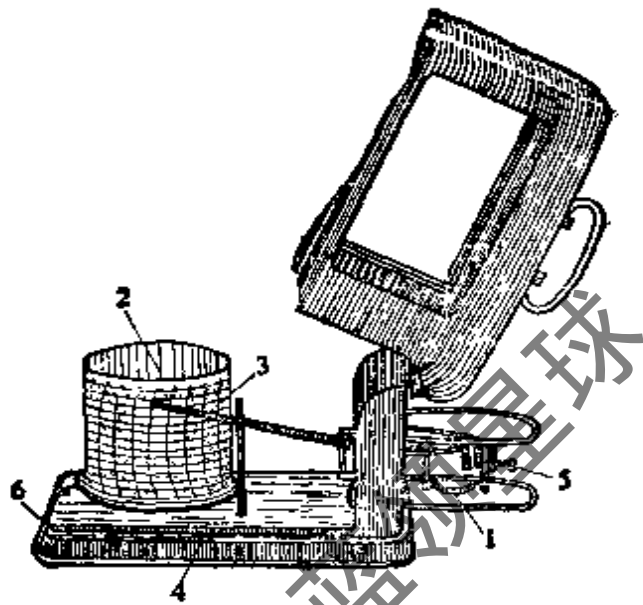


图 10.4 室温自记温度计

1—双金属片; 2—自记钟; 3—  
记录笔; 4—笔档手柄; 5—调  
节螺丝; 6—按钮

说明书要求放置。仪器中除规定的可调螺丝外，放大机构中其他任何部位的螺丝均不得任意旋动。当仪器放在测温位置后，应定时用 $0.1[^\circ\text{C}]$ 分度的水银温度计测出所在位置的温度值，并按仪器说明书所提供的方法用可调螺丝将指针校正至相同示值。使用中应注意仪器指针在温度变化过程中是否平稳移动，不应见到有明显的跳动和停滞现象。对带有自记钟的仪器，应先上紧自记钟发条，并将记录纸平整地紧贴于钟的外围。记录笔不应过紧地压在纸上。启用时笔尖中应盛有足够的墨水，并利用笔尖在纸的时间坐标线上轻划一时间标记，作为记录的起始时间，同时填好测量的日期。

### 3. 电阻温度计

电阻温度计是一种温度的电测仪表。它以热电阻作为传感器（作为一次仪表），并用导线与检测仪表（作为二次仪表）相连，组成电阻温度计。二次仪表可指示电阻值或温度值。一次仪表与二次仪表可以相隔很长距离，是这种仪表特点之一。

目前,常用的热电阻有金属热电阻与半导体热敏电阻两大类。金属热电阻常用铂或铜,其测温范围,金属铂热电阻是 $-200\sim+650[^\circ\text{C}]$ ;铜热电阻是 $-50\sim+150[^\circ\text{C}]$ 。有时空调系统中也用镍热电阻,它的测温范围介于铂与铜之间。金属热电阻的电阻值随温度而变,当温度升高时电阻增大,反之则减小,即具有正的电阻温度系数。半导体热敏电阻是由某些金属(如镁、镍、铜、钴等)的氧化物的混合物烧结而成。它具有很高的负电阻温度系数,因此在相同温度变化范围内,其电阻值变化比金属热电阻大得多,所以配用的二次仪表精度可以降低。更由于它的热惯性小,作为控制元件具有独特的优点。但其化学稳定性、温度与电阻值间的线性关系以及互换性等远不及金属热电阻。因此作为测温元件,选用金属热电阻更为恰当。金属热电阻的电阻与温度的关系一般可以用下式表示:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3 + \dots) \quad (10.1)$$

式中  $R_0$ —— $0[^\circ\text{C}]$ 时热电阻的电阻值,  $[\Omega]$ ;

$R_t$ —— $t[^\circ\text{C}]$ 时热电阻的电阻值,  $[\Omega]$ ;

$t$ ——被测介质的温度,  $[\text{C}]$ ;

$A, B, C$ ——有关的分度常数。

纯铂丝的电阻与温度关系可用下式表示:

测温范围为 $0\sim+650[^\circ\text{C}]$ 时

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (10.2)$$

测温范围为 $-200\sim 0[^\circ\text{C}]$ 时

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3) \quad (10.3)$$

对于纯铂丝,  $A = 3.96847 \times 10^{-3}[^\circ\text{C}^{-1}]$ ,  $B = -5.847 \times 10^{-7}[^\circ\text{C}^{-2}]$ ,

$$C = -4.22 \times 10^{-12}[^\circ\text{C}^{-4}]。$$

对于纯铜丝,在 $-50\sim+150[^\circ\text{C}]$ 范围内电阻与温度的关系基本上是线性的,即

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (10.4)$$

式中,  $\alpha$ 为电阻温度系数,对分度号  $C_u$ ,  $\alpha = 4.28 \times 10^{-3}[^\circ\text{C}^{-1}]$ ,对

分度号  $G$ ,  $\alpha = 4.25 \times 10^{-3}[^\circ\text{C}^{-1}]$

根据国家标准，热电阻在 100[°C] 和 0[°C] 的电阻比值及准确度等级为：

$$\begin{array}{l}
 \text{铂热电阻：分度号 BA1； } R_0 = 46 \pm 0.046 [\Omega] \\
 \left. \begin{array}{l} \\ \frac{R_{100}}{R_0} = 1.391 \pm 0.001 \end{array} \right\} \text{ ( I、II 级 )} \\
 \text{分度号 BA2； } R_0 = 100 \pm 0.100 [\Omega] \\
 \left. \begin{array}{l} \\ \frac{R_{100}}{R_0} = 1.391 \pm 0.001 \end{array} \right\} \text{ ( I、II 级 )} \\
 \text{铜热电阻：分度号 G； } R_0 = 53 \pm 0.053 [\Omega] \\
 \left. \begin{array}{l} \\ \frac{R_{100}}{R_0} = 1.425 \pm 0.002 \end{array} \right\} \text{ ( II、III 级 )} \\
 \text{分度号 Cu 100； } R_0 = 100 \pm 0.100 [\Omega] \\
 \left. \begin{array}{l} \\ \frac{R_{100}}{R_0} = 1.428 \pm 0.002 \end{array} \right\} \text{ ( III 级 )} \\
 \text{分度号 Cu 50； } R_0 = 50 \pm 0.050 [\Omega] \\
 \left. \begin{array}{l} \\ \frac{R_{100}}{R_0} = 1.428 \pm 0.002 \end{array} \right\} \text{ ( III 级 )}
 \end{array}$$

各种金属热电阻的温度与电阻间的关系见表 10.1 和表 10.2。

分度号：BA1 铂电阻  $R_t = f(t)$

表 10.1 a

| $t$ [°C] | 0.0       | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | $R_t$ [Ω] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 0        | 46.00     | 46.018 | 46.037 | 46.055 | 46.073 | 46.091 | 46.110 | 46.128 | 46.146 | 46.164 |
| 1        | 46.183    | 46.201 | 46.219 | 46.237 | 46.256 | 46.274 | 46.292 | 46.310 | 46.329 | 46.347 |
| 2        | 46.365    | 46.383 | 46.401 | 46.420 | 46.438 | 46.456 | 46.474 | 46.493 | 46.511 | 46.529 |
| 3        | 46.547    | 46.566 | 46.584 | 46.602 | 46.620 | 46.639 | 46.657 | 46.675 | 46.693 | 46.712 |
| 4        | 46.730    | 46.748 | 46.766 | 46.784 | 46.803 | 46.821 | 46.839 | 46.857 | 46.876 | 46.894 |
| 5        | 46.912    | 46.930 | 46.949 | 46.967 | 46.985 | 47.003 | 47.021 | 47.040 | 47.058 | 47.076 |
| 6        | 47.094    | 47.113 | 47.131 | 47.149 | 47.167 | 47.185 | 47.204 | 47.222 | 47.240 | 47.258 |
| 7        | 47.277    | 47.295 | 47.313 | 47.331 | 47.349 | 47.368 | 47.386 | 47.404 | 47.422 | 47.440 |
| 8        | 47.459    | 47.477 | 47.495 | 47.513 | 47.532 | 47.550 | 47.568 | 47.586 | 47.604 | 47.623 |

续表 10.1a

| $t$ [°C] | 0.0       | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | $R_t$ [Ω] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 9        | 47.641    | 47.659 | 47.677 | 47.695 | 47.714 | 47.732 | 47.750 | 47.768 | 47.786 | 47.805 |
| 10       | 47.823    | 47.841 | 47.859 | 47.877 | 47.896 | 47.914 | 47.932 | 47.950 | 47.968 | 47.987 |
| 11       | 48.005    | 48.023 | 48.041 | 48.059 | 48.078 | 48.096 | 48.114 | 48.132 | 48.150 | 48.169 |
| 12       | 48.187    | 48.205 | 48.223 | 48.241 | 48.259 | 48.278 | 48.296 | 48.314 | 48.332 | 48.350 |
| 13       | 48.369    | 48.387 | 48.405 | 48.423 | 48.441 | 48.460 | 48.478 | 48.496 | 48.514 | 48.532 |
| 14       | 48.550    | 48.569 | 48.587 | 48.605 | 48.623 | 48.641 | 48.659 | 48.678 | 48.696 | 48.714 |
| 15       | 48.732    | 48.750 | 48.769 | 48.787 | 48.805 | 48.823 | 48.841 | 48.859 | 48.878 | 48.896 |
| 16       | 48.914    | 48.932 | 48.950 | 48.968 | 48.987 | 49.005 | 49.023 | 49.041 | 49.059 | 49.077 |
| 17       | 49.096    | 49.114 | 49.132 | 49.150 | 49.168 | 49.186 | 49.205 | 49.223 | 49.241 | 49.259 |
| 18       | 49.277    | 49.295 | 49.313 | 49.332 | 49.350 | 49.368 | 49.386 | 49.404 | 49.422 | 49.441 |
| 19       | 49.459    | 49.477 | 49.495 | 49.513 | 49.531 | 49.549 | 49.568 | 49.586 | 49.604 | 49.622 |
| 20       | 49.640    | 49.658 | 49.677 | 49.695 | 49.713 | 49.731 | 49.749 | 49.767 | 49.785 | 49.804 |
| 21       | 49.822    | 49.840 | 49.858 | 49.876 | 49.894 | 49.912 | 49.931 | 49.949 | 49.967 | 49.985 |
| 22       | 50.003    | 50.021 | 50.039 | 50.057 | 50.076 | 50.094 | 50.112 | 50.130 | 50.148 | 50.166 |
| 23       | 50.184    | 50.203 | 50.221 | 50.239 | 50.257 | 50.275 | 50.293 | 50.311 | 50.329 | 50.348 |
| 24       | 50.366    | 50.384 | 50.402 | 50.420 | 50.438 | 50.456 | 50.474 | 50.493 | 50.511 | 50.529 |
| 25       | 50.547    | 50.565 | 50.583 | 50.601 | 50.619 | 50.638 | 50.656 | 50.674 | 50.692 | 50.710 |
| 26       | 50.728    | 50.746 | 50.764 | 50.782 | 50.801 | 50.819 | 50.837 | 50.855 | 50.873 | 50.891 |
| 27       | 50.909    | 50.927 | 50.945 | 50.964 | 50.982 | 51.000 | 51.018 | 51.036 | 51.054 | 51.072 |
| 28       | 51.090    | 51.108 | 51.127 | 51.145 | 51.163 | 51.181 | 51.199 | 51.217 | 51.235 | 51.253 |
| 29       | 51.271    | 51.289 | 51.308 | 51.326 | 51.344 | 51.362 | 51.380 | 51.398 | 51.416 | 51.434 |
| 30       | 51.452    | 51.470 | 51.488 | 51.507 | 51.525 | 51.543 | 51.561 | 51.579 | 51.597 | 51.615 |
| 31       | 51.633    | 51.651 | 51.669 | 51.687 | 51.706 | 51.724 | 51.742 | 51.760 | 51.778 | 51.796 |
| 32       | 51.814    | 51.832 | 51.850 | 51.868 | 51.886 | 51.904 | 51.922 | 51.941 | 51.959 | 51.977 |
| 33       | 51.995    | 52.013 | 52.031 | 52.049 | 52.067 | 52.085 | 52.103 | 52.121 | 52.139 | 52.158 |
| 34       | 52.176    | 52.194 | 52.212 | 52.230 | 52.248 | 52.266 | 52.284 | 52.302 | 52.320 | 52.338 |



续表10.1a

| $t$ [°C] | 0.0       | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | $R_t$ [Ω] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 35       | 52.356    | 52.374 | 52.392 | 52.410 | 52.429 | 52.447 | 52.465 | 52.483 | 52.501 | 52.519 |
| 36       | 52.537    | 52.555 | 52.573 | 52.591 | 52.609 | 52.627 | 52.645 | 52.663 | 52.681 | 52.699 |
| 37       | 52.718    | 52.736 | 52.754 | 52.772 | 52.790 | 52.808 | 52.826 | 52.844 | 52.862 | 52.880 |
| 38       | 52.898    | 52.916 | 52.934 | 52.952 | 52.970 | 52.988 | 53.006 | 53.024 | 53.042 | 53.060 |
| 39       | 53.079    | 53.097 | 53.115 | 53.133 | 53.151 | 53.169 | 53.187 | 53.205 | 53.223 | 53.241 |
| 40       | 53.259    | 53.277 | 53.295 | 53.313 | 53.331 | 53.349 | 53.367 | 53.385 | 53.403 | 53.421 |
| 41       | 53.439    | 53.457 | 53.475 | 53.493 | 53.511 | 53.529 | 53.548 | 53.566 | 53.584 | 53.602 |
| 42       | 53.620    | 53.638 | 53.656 | 53.674 | 53.692 | 53.710 | 53.728 | 53.746 | 53.764 | 53.782 |
| 43       | 53.800    | 53.818 | 53.836 | 53.854 | 53.872 | 53.890 | 53.908 | 53.926 | 53.944 | 53.962 |
| 44       | 53.980    | 53.998 | 54.016 | 54.034 | 54.052 | 54.070 | 54.088 | 54.106 | 54.124 | 54.142 |
| 45       | 54.160    | 54.178 | 54.196 | 54.214 | 54.232 | 54.250 | 54.268 | 54.286 | 54.304 | 54.322 |
| 46       | 54.340    | 54.358 | 54.376 | 54.394 | 54.412 | 54.430 | 54.448 | 54.466 | 54.484 | 54.502 |
| 47       | 54.520    | 54.538 | 54.556 | 54.574 | 54.592 | 54.610 | 54.628 | 54.646 | 54.664 | 54.682 |
| 48       | 54.700    | 54.718 | 54.736 | 54.754 | 54.772 | 54.790 | 54.808 | 54.826 | 54.844 | 54.862 |
| 49       | 54.880    | 54.898 | 54.916 | 54.934 | 54.952 | 54.970 | 54.988 | 55.006 | 55.024 | 55.042 |
| 50       | 55.060    | 55.078 | 55.096 | 55.114 | 55.132 | 55.150 | 55.168 | 55.186 | 55.204 | 55.222 |

| $t$ [°C] | 0         | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | $R_t$ [Ω] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 50       | 55.060    | 55.240 | 55.420 | 55.600 | 55.779 | 55.959 | 56.138 | 56.318 | 56.497 | 56.677 |
| 60       | 56.856    | 57.035 | 57.215 | 57.394 | 57.573 | 57.752 | 57.931 | 58.110 | 58.289 | 58.468 |
| 70       | 58.647    | 58.825 | 59.004 | 59.183 | 59.361 | 59.540 | 59.718 | 59.897 | 60.075 | 60.254 |
| 80       | 60.432    | 60.610 | 60.788 | 60.966 | 61.144 | 61.322 | 61.500 | 61.678 | 61.856 | 62.034 |
| 90       | 62.212    | 62.389 | 62.567 | 62.744 | 62.922 | 63.099 | 63.277 | 63.454 | 63.632 | 63.809 |
| 100      | 63.986    | 64.163 | 64.340 | 64.517 | 64.694 | 64.871 | 65.048 | 65.225 | 65.402 | 65.578 |

分度号: BA 2 铂电阻  $R_t = f(t)$ 

表 10.1b

| $t$ [°C] | 0.0       | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.5     | 0.6     | 0.7     | 0.8     | 0.9     |
|----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | $R_t$ [Ω] |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 0        | 100.000   | 100.040 | 100.079 | 100.119 | 100.159 | 100.193 | 100.238 | 100.278 | 100.317 | 100.357 |
| 1        | 100.397   | 100.436 | 100.476 | 100.516 | 100.555 | 100.595 | 100.635 | 100.674 | 100.714 | 100.754 |
| 2        | 100.793   | 100.833 | 100.873 | 100.912 | 100.952 | 100.992 | 105.031 | 101.071 | 101.111 | 101.150 |
| 3        | 101.19    | 101.230 | 101.269 | 101.309 | 101.349 | 101.388 | 101.428 | 101.468 | 101.507 | 101.547 |
| 4        | 101.588   | 101.626 | 101.666 | 101.705 | 101.745 | 101.785 | 101.824 | 101.864 | 101.904 | 101.943 |
| 5        | 101.983   | 102.022 | 102.062 | 102.102 | 102.141 | 102.181 | 102.221 | 102.260 | 102.300 | 102.339 |
| 6        | 102.373   | 102.419 | 102.458 | 102.498 | 102.537 | 102.577 | 102.617 | 102.656 | 102.696 | 102.735 |
| 7        | 102.775   | 102.815 | 102.854 | 102.894 | 102.933 | 102.973 | 103.013 | 103.052 | 103.092 | 103.131 |
| 8        | 103.171   | 103.211 | 103.250 | 103.290 | 103.329 | 103.369 | 103.409 | 103.448 | 103.488 | 103.527 |
| 9        | 103.567   | 103.606 | 103.646 | 103.686 | 103.725 | 103.765 | 103.804 | 103.844 | 103.883 | 103.923 |
| 10       | 103.963   | 104.002 | 104.042 | 104.081 | 104.121 | 104.160 | 104.200 | 104.240 | 104.279 | 104.319 |
| 11       | 104.358   | 104.398 | 104.437 | 104.477 | 104.516 | 104.556 | 104.596 | 104.635 | 104.675 | 104.714 |
| 12       | 104.754   | 104.793 | 104.833 | 104.872 | 104.912 | 104.951 | 104.991 | 105.031 | 105.070 | 105.110 |
| 13       | 105.149   | 105.189 | 105.228 | 105.268 | 105.307 | 105.347 | 105.386 | 105.426 | 105.465 | 105.505 |
| 14       | 105.544   | 105.584 | 105.623 | 105.663 | 105.702 | 105.742 | 105.782 | 105.821 | 105.861 | 105.900 |
| 15       | 105.940   | 105.979 | 106.019 | 106.058 | 106.098 | 106.137 | 106.177 | 106.216 | 106.256 | 106.295 |
| 16       | 106.335   | 106.374 | 106.414 | 106.453 | 106.493 | 106.532 | 106.572 | 106.611 | 106.651 | 106.690 |
| 17       | 106.730   | 106.769 | 106.808 | 106.848 | 106.887 | 106.927 | 106.966 | 107.006 | 107.045 | 107.085 |
| 18       | 107.124   | 107.164 | 107.203 | 107.243 | 107.282 | 107.322 | 107.361 | 107.401 | 107.440 | 107.480 |
| 19       | 107.519   | 107.558 | 107.598 | 107.637 | 107.677 | 107.716 | 107.756 | 107.795 | 107.835 | 107.874 |
| 20       | 107.914   | 107.953 | 107.992 | 108.032 | 108.071 | 108.111 | 108.15  | 108.190 | 108.229 | 108.269 |

续表 10.1b

| $R_1[\Omega]$ | 0.0           | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.5     | 0.6     | 0.7     | 0.8     | 0.9     |  |
|---------------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
|               | $R_2[\Omega]$ |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
| 21            | 108.308       | 108.347 | 108.337 | 108.426 | 108.466 | 108.505 | 108.545 | 108.534 | 108.525 | 108.563 |  |
| 22            | 108.702       | 108.742 | 108.781 | 108.821 | 108.860 | 108.899 | 108.939 | 108.978 | 109.018 | 109.057 |  |
| 23            | 109.097       | 109.136 | 109.175 | 109.215 | 109.254 | 109.294 | 109.333 | 109.372 | 109.412 | 109.451 |  |
| 24            | 109.491       | 109.530 | 109.569 | 109.609 | 109.648 | 109.688 | 109.727 | 109.766 | 109.806 | 109.845 |  |
| 25            | 109.885       | 109.924 | 109.963 | 110.003 | 110.042 | 110.082 | 110.121 | 110.160 | 110.200 | 110.239 |  |
| 26            | 110.276       | 110.318 | 110.357 | 110.397 | 110.436 | 110.475 | 110.515 | 110.554 | 110.594 | 110.633 |  |
| 27            | 110.672       | 110.712 | 110.751 | 110.790 | 110.830 | 110.869 | 110.908 | 110.948 | 110.987 | 111.027 |  |
| 28            | 111.066       | 111.105 | 111.145 | 111.184 | 111.223 | 111.263 | 111.302 | 111.341 | 111.381 | 111.420 |  |
| 29            | 111.459       | 111.499 | 111.538 | 111.577 | 111.617 | 111.656 | 111.695 | 111.735 | 111.774 | 111.813 |  |
| 30            | 111.853       | 111.892 | 111.931 | 111.971 | 112.010 | 112.049 | 112.089 | 112.128 | 112.167 | 112.207 |  |
| 31            | 112.246       | 112.285 | 112.325 | 112.364 | 112.403 | 112.443 | 112.482 | 112.521 | 112.561 | 112.600 |  |
| 32            | 112.639       | 112.679 | 112.718 | 112.757 | 112.796 | 112.836 | 112.875 | 112.914 | 112.954 | 112.993 |  |
| 33            | 113.032       | 113.072 | 113.111 | 113.150 | 113.189 | 113.229 | 113.268 | 113.307 | 113.347 | 113.386 |  |
| 34            | 113.425       | 113.464 | 113.504 | 113.543 | 113.582 | 113.622 | 113.661 | 113.700 | 113.739 | 113.779 |  |
| 35            | 113.818       | 113.857 | 113.897 | 113.936 | 113.975 | 114.014 | 114.054 | 114.093 | 114.132 | 114.171 |  |
| 36            | 114.211       | 114.250 | 114.289 | 114.329 | 114.368 | 114.407 | 114.446 | 114.486 | 114.525 | 114.564 |  |
| 37            | 114.603       | 114.643 | 114.682 | 114.721 | 114.760 | 114.800 | 114.839 | 114.878 | 114.917 | 114.957 |  |
| 38            | 114.996       | 115.035 | 115.074 | 115.113 | 115.153 | 115.192 | 115.231 | 115.270 | 115.310 | 115.349 |  |
| 39            | 115.388       | 115.427 | 115.467 | 115.506 | 115.545 | 115.584 | 115.623 | 115.663 | 115.702 | 115.741 |  |
| 40            | 115.780       | 115.820 | 115.859 | 115.898 | 115.937 | 115.976 | 116.016 | 116.055 | 116.094 | 116.133 |  |

| t[°C] | R <sub>t</sub> [Ω] |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | 0.0                | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.5     | 0.6     | 0.7     | 0.8     | 0.9     |
| 41    | 116.172            | 116.212 | 116.251 | 116.290 | 116.329 | 116.368 | 116.408 | 116.447 | 116.486 | 116.525 |
| 42    | 116.564            | 116.604 | 116.643 | 116.682 | 116.721 | 116.760 | 116.800 | 116.839 | 116.878 | 116.917 |
| 43    | 116.956            | 116.995 | 117.035 | 117.074 | 117.113 | 117.152 | 117.191 | 117.231 | 117.270 | 117.309 |
| 44    | 117.348            | 117.387 | 117.426 | 117.466 | 117.505 | 117.544 | 117.583 | 117.622 | 117.661 | 117.701 |
| 45    | 117.740            | 117.779 | 117.818 | 117.857 | 117.895 | 117.935 | 117.975 | 118.014 | 118.053 | 118.092 |
| 46    | 118.131            | 118.170 | 118.210 | 118.249 | 118.293 | 118.327 | 118.365 | 118.405 | 118.444 | 118.484 |
| 47    | 118.523            | 118.562 | 118.601 | 118.640 | 118.679 | 118.718 | 118.757 | 118.797 | 118.836 | 118.875 |
| 48    | 118.914            | 118.953 | 118.992 | 119.031 | 119.070 | 119.110 | 119.149 | 119.188 | 119.227 | 119.266 |
| 49    | 119.305            | 119.344 | 119.383 | 119.422 | 119.462 | 119.501 | 119.540 | 119.579 | 119.618 | 119.657 |
| 50    | 119.696            | 119.735 | 119.774 | 119.813 | 119.853 | 119.892 | 119.931 | 119.970 | 120.009 | 120.048 |

| t[°C] | R <sub>t</sub> [Ω] |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | 0                  | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       |
| 50    | 119.696            | 120.087 | 120.478 | 120.869 | 121.259 | 121.650 | 122.040 | 122.430 | 122.820 | 123.210 |
| 60    | 123.600            | 123.990 | 124.380 | 124.769 | 125.159 | 125.548 | 125.937 | 126.326 | 126.715 | 127.104 |
| 70    | 127.493            | 127.881 | 128.270 | 128.658 | 129.046 | 129.435 | 129.823 | 130.211 | 130.598 | 130.986 |
| 80    | 131.874            | 131.761 | 132.148 | 132.535 | 132.923 | 133.310 | 133.696 | 134.083 | 134.470 | 134.855 |
| 90    | 135.243            | 135.629 | 136.015 | 136.401 | 136.787 | 137.173 | 137.558 | 137.944 | 138.329 | 138.715 |
| 100   | 139.100            | 139.485 | 139.870 | 140.255 | 140.640 | 141.024 | 141.409 | 141.793 | 142.177 | 142.562 |

分度号: Cu50 铜电阻  $R_t = f(t)$ 

表 10.1c

| $t$ [°C] | $R_t$ [Ω] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | 0.0       | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
| 0        | 50.000    | 50.021 | 50.043 | 50.064 | 50.086 | 50.107 | 50.128 | 50.150 | 50.171 | 50.193 |
| 1        | 50.214    | 50.235 | 50.257 | 50.278 | 50.300 | 50.321 | 50.342 | 50.364 | 50.385 | 50.407 |
| 2        | 50.428    | 50.449 | 50.471 | 50.492 | 50.514 | 50.535 | 50.556 | 50.578 | 50.599 | 50.621 |
| 3        | 50.642    | 50.663 | 50.685 | 50.706 | 50.728 | 50.749 | 50.770 | 50.792 | 50.813 | 50.835 |
| 4        | 50.856    | 50.877 | 50.899 | 50.920 | 50.942 | 50.963 | 50.984 | 51.006 | 51.027 | 51.049 |
| 5        | 51.070    | 51.091 | 51.113 | 51.134 | 51.155 | 51.177 | 51.198 | 51.220 | 51.241 | 51.263 |
| 6        | 51.284    | 51.305 | 51.327 | 51.348 | 51.370 | 51.391 | 51.412 | 51.434 | 51.455 | 51.477 |
| 7        | 51.498    | 51.519 | 51.541 | 51.562 | 51.584 | 51.605 | 51.627 | 51.648 | 51.669 | 51.691 |
| 8        | 51.712    | 51.733 | 51.755 | 51.776 | 51.798 | 51.819 | 51.840 | 51.862 | 51.883 | 51.905 |
| 9        | 51.926    | 51.947 | 51.969 | 51.990 | 52.012 | 52.033 | 52.054 | 52.076 | 52.097 | 52.119 |
| 10       | 52.140    | 52.161 | 52.183 | 52.204 | 52.225 | 52.247 | 52.268 | 52.290 | 52.311 | 52.333 |
| 11       | 52.354    | 52.375 | 52.397 | 52.418 | 52.440 | 52.461 | 52.482 | 52.504 | 52.525 | 52.547 |
| 12       | 52.568    | 52.589 | 52.611 | 52.632 | 52.654 | 52.675 | 52.696 | 52.718 | 52.739 | 52.761 |
| 13       | 52.810    | 52.831 | 52.853 | 52.874 | 52.896 | 52.917 | 52.938 | 52.960 | 52.981 | 53.003 |
| 14       | 52.996    | 53.017 | 53.039 | 53.060 | 53.082 | 53.103 | 53.124 | 53.146 | 53.167 | 53.189 |
| 15       | 53.210    | 53.231 | 53.253 | 53.274 | 53.295 | 53.317 | 53.338 | 53.360 | 53.381 | 53.403 |
| 16       | 53.424    | 53.445 | 53.467 | 53.488 | 53.510 | 53.531 | 53.552 | 53.574 | 53.595 | 53.617 |
| 17       | 53.638    | 53.659 | 53.681 | 53.702 | 53.724 | 53.745 | 53.766 | 53.788 | 53.809 | 53.831 |
| 18       | 53.852    | 53.873 | 53.895 | 53.916 | 53.938 | 53.959 | 53.980 | 54.002 | 54.023 | 54.045 |
| 19       | 54.066    | 54.087 | 54.109 | 54.130 | 54.152 | 54.173 | 54.194 | 54.216 | 54.237 | 54.259 |
| 20       | 54.260    | 54.281 | 54.303 | 54.324 | 54.346 | 54.367 | 54.388 | 54.410 | 54.431 | 54.453 |
| 21       | 54.494    | 54.515 | 54.537 | 54.558 | 54.580 | 54.601 | 54.622 | 54.644 | 54.665 | 54.687 |
| 22       | 54.708    | 54.729 | 54.751 | 54.772 | 54.794 | 54.815 | 54.836 | 54.858 | 54.879 | 54.901 |
| 23       | 54.922    | 54.943 | 54.965 | 54.986 | 55.008 | 55.029 | 55.050 | 55.072 | 55.093 | 55.115 |
| 24       | 55.136    | 55.157 | 55.179 | 55.200 | 55.222 | 55.243 | 55.264 | 55.286 | 55.307 | 55.329 |
| 25       | 55.350    | 55.371 | 55.393 | 55.414 | 55.436 | 55.457 | 55.478 | 55.500 | 55.521 | 55.543 |
| 26       | 55.564    | 55.585 | 55.607 | 55.628 | 55.650 | 55.671 | 55.692 | 55.714 | 55.735 | 55.757 |
| 27       | 55.778    | 55.799 | 55.821 | 55.842 | 55.864 | 55.885 | 55.906 | 55.928 | 55.949 | 55.971 |
| 28       | 55.992    | 56.013 | 56.035 | 56.056 | 56.078 | 56.099 | 56.120 | 56.142 | 56.163 | 56.185 |
| 29       | 56.208    | 56.227 | 56.249 | 56.270 | 56.292 | 56.313 | 56.334 | 56.356 | 56.377 | 56.399 |
| 30       | 56.420    | 56.441 | 56.463 | 56.484 | 56.506 | 56.527 | 56.548 | 56.570 | 56.591 | 56.613 |
| 31       | 56.634    | 56.655 | 56.677 | 56.698 | 56.720 | 56.741 | 56.762 | 56.784 | 56.805 | 56.827 |
| 32       | 56.848    | 56.869 | 56.891 | 56.912 | 56.934 | 56.955 | 56.976 | 56.998 | 57.019 | 57.041 |
| 33       | 57.062    | 57.083 | 57.105 | 57.126 | 57.148 | 57.169 | 57.190 | 57.212 | 57.233 | 57.255 |

续表 10.1c

| $t$ [°C] | 0.0       | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | $R_t$ [Ω] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 34       | 57.276    | 57.297 | 57.319 | 57.340 | 57.362 | 57.383 | 57.404 | 57.426 | 57.447 | 57.469 |
| 35       | 57.490    | 57.511 | 57.533 | 57.554 | 57.576 | 57.597 | 57.618 | 57.640 | 57.661 | 57.683 |
| 36       | 57.704    | 57.725 | 57.747 | 57.768 | 57.790 | 57.811 | 57.832 | 57.854 | 57.875 | 57.897 |
| 37       | 57.918    | 57.939 | 57.961 | 57.982 | 58.004 | 58.025 | 58.046 | 58.068 | 58.089 | 58.111 |
| 38       | 58.132    | 58.153 | 58.175 | 58.196 | 58.218 | 58.239 | 58.260 | 58.282 | 58.303 | 58.325 |
| 39       | 58.346    | 58.367 | 58.389 | 58.410 | 58.432 | 58.453 | 58.474 | 58.496 | 58.517 | 58.539 |
| 40       | 58.560    | 58.581 | 58.603 | 58.624 | 58.646 | 58.667 | 58.688 | 58.710 | 58.731 | 58.753 |
| 41       | 58.774    | 58.795 | 58.817 | 58.838 | 58.860 | 58.881 | 58.902 | 58.924 | 58.945 | 58.967 |
| 42       | 58.988    | 59.009 | 59.031 | 59.052 | 59.074 | 59.095 | 59.116 | 59.138 | 59.159 | 59.181 |
| 43       | 59.202    | 59.223 | 59.245 | 59.266 | 59.288 | 59.309 | 59.330 | 59.352 | 59.373 | 59.395 |
| 44       | 59.416    | 59.437 | 59.459 | 59.480 | 59.502 | 59.523 | 59.544 | 59.566 | 59.587 | 59.609 |
| 45       | 59.630    | 59.651 | 59.673 | 59.694 | 59.716 | 59.737 | 59.758 | 59.780 | 59.801 | 59.823 |
| 46       | 59.844    | 59.865 | 59.887 | 59.908 | 59.930 | 59.951 | 59.972 | 59.994 | 60.015 | 60.037 |
| 47       | 60.058    | 60.079 | 60.101 | 60.122 | 60.144 | 60.165 | 60.186 | 60.208 | 60.229 | 60.251 |
| 48       | 60.272    | 60.293 | 60.315 | 60.336 | 60.358 | 60.379 | 60.400 | 60.422 | 60.443 | 60.465 |
| 49       | 60.486    | 60.507 | 60.529 | 60.550 | 60.572 | 60.593 | 60.614 | 60.636 | 60.657 | 60.679 |
| 50       | 60.700    | 60.721 | 60.743 | 60.764 | 60.786 | 60.807 | 60.828 | 60.850 | 60.871 | 60.893 |

| $t$ [°C] | 0         | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | $R_t$ [Ω] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 50       | 60.700    | 60.914 | 61.128 | 61.342 | 61.556 | 61.770 | 61.984 | 62.198 | 62.412 | 62.626 |
| 60       | 62.840    | 63.054 | 63.268 | 63.482 | 63.696 | 63.910 | 64.124 | 64.338 | 64.552 | 64.766 |
| 70       | 64.980    | 65.194 | 65.408 | 65.622 | 65.836 | 66.050 | 66.264 | 66.478 | 66.692 | 66.906 |
| 80       | 67.120    | 67.334 | 67.548 | 67.762 | 67.976 | 68.190 | 68.404 | 68.618 | 68.832 | 69.046 |
| 90       | 69.260    | 69.474 | 69.688 | 69.902 | 70.116 | 70.330 | 70.544 | 70.758 | 70.972 | 71.186 |
| 100      | 71.400    | 71.614 | 71.828 | 72.042 | 72.256 | 72.470 | 72.684 | 72.898 | 73.112 | 73.326 |

表 10.1d

分度号: Cu 100 铂电阻  $R_t = f(t)$ 

| $t$ [°C] | $R_t$ [Ω] |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 0.0       | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.5     | 0.6     | 0.7     | 0.8     | 0.9     |
| 0        | 100.000   | 100.043 | 100.086 | 100.128 | 100.171 | 100.214 | 100.257 | 100.300 | 100.342 | 100.385 |
| 1        | 100.428   | 100.471 | 100.514 | 102.555 | 100.599 | 100.642 | 100.685 | 100.728 | 100.770 | 100.813 |
| 2        | 100.856   | 100.899 | 100.942 | 100.984 | 101.027 | 101.070 | 101.113 | 101.156 | 101.198 | 101.241 |
| 3        | 101.284   | 101.327 | 101.370 | 101.412 | 101.455 | 101.498 | 101.541 | 101.584 | 101.626 | 101.669 |
| 4        | 101.712   | 101.755 | 101.798 | 101.840 | 101.883 | 101.926 | 101.969 | 102.012 | 102.054 | 102.097 |
| 5        | 102.140   | 102.183 | 102.226 | 102.268 | 102.311 | 102.354 | 102.397 | 102.440 | 102.482 | 102.525 |
| 6        | 102.568   | 102.611 | 102.654 | 102.696 | 102.739 | 102.782 | 102.825 | 102.868 | 102.910 | 102.953 |
| 7        | 102.996   | 103.039 | 103.082 | 103.124 | 103.167 | 103.210 | 103.253 | 103.296 | 103.338 | 103.381 |
| 8        | 103.424   | 103.467 | 103.510 | 103.552 | 103.595 | 103.638 | 103.681 | 103.724 | 103.766 | 103.809 |
| 9        | 103.852   | 103.895 | 103.938 | 103.980 | 104.023 | 104.066 | 104.109 | 104.152 | 104.194 | 104.237 |
| 10       | 104.280   | 104.323 | 104.366 | 104.408 | 104.451 | 104.494 | 104.537 | 104.580 | 104.622 | 104.665 |
| 11       | 104.708   | 104.751 | 104.794 | 104.836 | 104.879 | 104.922 | 104.965 | 105.008 | 105.050 | 105.093 |
| 12       | 105.136   | 105.179 | 105.222 | 105.264 | 105.307 | 105.350 | 105.393 | 105.436 | 105.478 | 105.521 |
| 13       | 105.564   | 105.607 | 105.650 | 105.692 | 105.735 | 105.778 | 105.821 | 105.864 | 105.906 | 105.949 |
| 14       | 105.992   | 106.035 | 106.078 | 106.120 | 106.163 | 106.206 | 106.249 | 106.292 | 106.334 | 106.377 |
| 15       | 106.420   | 106.463 | 106.506 | 106.548 | 106.591 | 106.634 | 106.677 | 106.720 | 106.762 | 106.805 |
| 16       | 106.848   | 106.891 | 106.934 | 106.976 | 107.019 | 107.062 | 107.105 | 107.148 | 107.190 | 107.233 |
| 17       | 107.276   | 107.319 | 107.362 | 107.404 | 107.447 | 107.490 | 107.533 | 107.576 | 107.618 | 107.661 |
| 18       | 107.704   | 107.747 | 107.790 | 107.832 | 107.875 | 107.918 | 107.961 | 108.004 | 108.046 | 108.089 |
| 19       | 108.132   | 108.175 | 108.218 | 108.260 | 108.303 | 108.346 | 108.389 | 108.432 | 108.474 | 108.517 |
| 20       | 108.560   | 108.603 | 108.646 | 108.688 | 108.731 | 108.774 | 108.817 | 108.860 | 108.902 | 108.945 |

| t [°C] | R <sub>t</sub> [Ω] |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        | 0.0                | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.5     | 0.6     | 0.7     | 0.8     | 0.9     |
| 21     | 109.988            | 109.931 | 109.874 | 109.816 | 109.759 | 109.702 | 109.645 | 109.588 | 109.530 | 109.473 |
| 22     | 109.416            | 109.459 | 109.502 | 109.544 | 109.587 | 109.630 | 109.673 | 109.716 | 109.758 | 109.801 |
| 23     | 109.844            | 109.887 | 109.930 | 109.972 | 110.015 | 110.058 | 110.101 | 110.144 | 110.186 | 110.229 |
| 24     | 110.272            | 110.315 | 110.358 | 110.400 | 110.443 | 110.486 | 110.529 | 110.572 | 110.614 | 110.657 |
| 25     | 110.709            | 110.743 | 110.786 | 110.828 | 110.871 | 110.914 | 110.957 | 111.000 | 111.042 | 111.085 |
| 26     | 111.128            | 111.171 | 111.214 | 111.256 | 111.299 | 111.342 | 111.385 | 111.428 | 111.470 | 111.513 |
| 27     | 111.556            | 111.599 | 111.642 | 111.684 | 111.727 | 111.770 | 111.813 | 111.856 | 111.898 | 111.941 |
| 28     | 111.934            | 112.027 | 112.070 | 112.112 | 112.155 | 112.199 | 112.241 | 112.284 | 112.326 | 112.369 |
| 29     | 112.412            | 112.455 | 112.498 | 112.540 | 112.583 | 112.626 | 112.669 | 112.712 | 112.754 | 112.797 |
| 30     | 112.840            | 112.883 | 112.926 | 112.968 | 113.011 | 113.054 | 113.097 | 113.140 | 113.182 | 113.225 |
| 31     | 113.268            | 113.311 | 113.354 | 113.396 | 113.439 | 113.482 | 113.525 | 113.568 | 113.610 | 113.653 |
| 32     | 113.696            | 113.739 | 113.782 | 113.824 | 113.867 | 113.910 | 113.953 | 113.996 | 114.038 | 114.081 |
| 33     | 114.124            | 114.167 | 114.210 | 114.252 | 114.295 | 114.338 | 114.381 | 114.424 | 114.466 | 114.509 |
| 34     | 114.552            | 114.595 | 114.638 | 114.680 | 114.723 | 114.766 | 114.809 | 114.852 | 114.894 | 114.937 |
| 35     | 114.980            | 115.023 | 115.066 | 115.108 | 115.151 | 115.194 | 115.237 | 115.280 | 115.322 | 115.365 |
| 36     | 115.408            | 115.451 | 115.494 | 115.536 | 115.579 | 115.622 | 115.665 | 115.708 | 115.750 | 115.793 |
| 37     | 115.836            | 115.879 | 115.922 | 115.964 | 116.007 | 116.050 | 116.093 | 116.136 | 116.178 | 116.221 |
| 38     | 116.264            | 116.307 | 116.350 | 116.392 | 116.435 | 116.478 | 116.521 | 116.564 | 116.606 | 116.649 |
| 39     | 116.692            | 116.735 | 116.778 | 116.820 | 116.863 | 116.906 | 116.949 | 116.992 | 117.034 | 117.077 |
| 40     | 117.120            | 117.163 | 117.206 | 117.248 | 117.291 | 117.334 | 117.377 | 117.420 | 117.462 | 117.505 |



續表 10. 1d

| t [°C] | R <sub>t</sub> [Ω] |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        | 0.0                | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.5     | 0.6     | 0.7     | 0.8     | 0.9     |
| 41     | 117.548            | 117.591 | 117.634 | 117.676 | 117.719 | 117.762 | 117.805 | 117.848 | 117.890 | 117.933 |
| 42     | 117.976            | 118.019 | 118.062 | 118.104 | 118.147 | 118.190 | 118.233 | 118.276 | 118.318 | 118.361 |
| 43     | 118.404            | 118.447 | 118.490 | 118.532 | 118.575 | 118.618 | 118.661 | 118.704 | 118.746 | 118.789 |
| 44     | 118.832            | 118.875 | 118.918 | 118.960 | 119.003 | 119.046 | 119.089 | 119.132 | 119.174 | 119.217 |
| 45     | 119.260            | 119.303 | 119.346 | 119.388 | 119.431 | 119.474 | 119.517 | 119.560 | 119.602 | 119.645 |
| 46     | 119.688            | 119.731 | 119.774 | 119.816 | 119.859 | 119.902 | 119.945 | 119.988 | 120.030 | 120.073 |
| 47     | 120.116            | 120.159 | 120.202 | 120.244 | 120.287 | 120.330 | 120.373 | 120.416 | 120.458 | 120.501 |
| 48     | 120.544            | 120.587 | 120.630 | 120.672 | 120.715 | 120.758 | 120.801 | 120.844 | 120.886 | 120.929 |
| 49     | 120.972            | 121.015 | 121.058 | 121.100 | 121.143 | 121.186 | 121.229 | 121.272 | 121.314 | 121.357 |
| 50     | 121.400            | 121.443 | 121.486 | 121.528 | 121.571 | 121.614 | 121.657 | 121.700 | 121.742 | 121.785 |

| t [°C] | R <sub>t</sub> [Ω] |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        | 0                  | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       |
| 50     | 121.400            | 121.828 | 122.256 | 122.684 | 123.112 | 123.540 | 123.968 | 124.396 | 124.824 | 125.252 |
| 60     | 125.680            | 126.108 | 126.536 | 126.964 | 127.392 | 127.820 | 128.248 | 128.676 | 129.104 | 129.532 |
| 70     | 129.960            | 130.388 | 130.816 | 131.244 | 131.672 | 132.100 | 132.528 | 132.956 | 133.384 | 133.812 |
| 80     | 134.240            | 134.668 | 135.096 | 135.524 | 135.952 | 136.380 | 136.808 | 137.236 | 137.664 | 138.092 |
| 90     | 138.520            | 138.948 | 139.376 | 139.804 | 140.232 | 140.660 | 141.088 | 141.516 | 141.944 | 142.372 |
| 100    | 142.800            | 143.228 | 143.656 | 144.084 | 144.512 | 144.940 | 145.368 | 145.796 | 146.224 | 146.652 |

分度号: G 铂电阻  $R_t = f(t)$ 

表 10.7e

| $t/^\circ\text{C}$ | 0.0            | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
|--------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | $R_t/[\Omega]$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 0                  | 53.000         | 53.023 | 53.045 | 53.068 | 53.090 | 53.113 | 53.135 | 53.158 | 53.180 | 53.203 |
| 1                  | 53.225         | 53.248 | 53.270 | 53.293 | 53.315 | 53.338 | 53.360 | 53.383 | 53.405 | 53.428 |
| 2                  | 53.451         | 53.473 | 53.496 | 53.518 | 53.541 | 53.563 | 53.586 | 53.608 | 53.631 | 53.653 |
| 3                  | 53.676         | 53.698 | 53.721 | 53.743 | 53.766 | 53.788 | 53.811 | 53.833 | 53.856 | 53.878 |
| 4                  | 53.901         | 53.924 | 53.946 | 53.969 | 53.991 | 54.014 | 54.036 | 54.059 | 54.081 | 54.104 |
| 5                  | 54.126         | 54.149 | 54.171 | 54.194 | 54.216 | 54.239 | 54.261 | 54.284 | 54.306 | 54.329 |
| 6                  | 54.352         | 54.374 | 54.397 | 54.419 | 54.442 | 54.464 | 54.487 | 54.509 | 54.532 | 54.554 |
| 7                  | 54.577         | 54.599 | 54.622 | 54.644 | 54.667 | 54.689 | 54.712 | 54.734 | 54.757 | 54.779 |
| 8                  | 54.802         | 54.825 | 54.847 | 54.870 | 54.892 | 54.915 | 54.937 | 54.960 | 54.982 | 55.005 |
| 9                  | 55.027         | 55.050 | 55.072 | 55.095 | 55.117 | 55.140 | 55.162 | 55.185 | 55.207 | 55.230 |
| 10                 | 55.253         | 55.275 | 55.298 | 55.320 | 55.343 | 55.365 | 55.388 | 55.410 | 55.433 | 55.455 |
| 11                 | 55.478         | 55.500 | 55.523 | 55.545 | 55.568 | 55.590 | 55.613 | 55.635 | 55.658 | 55.680 |
| 12                 | 55.703         | 55.726 | 55.748 | 55.771 | 55.793 | 55.816 | 55.838 | 55.861 | 55.883 | 55.906 |
| 13                 | 55.928         | 55.951 | 55.973 | 55.996 | 56.018 | 56.041 | 56.063 | 56.086 | 56.108 | 56.131 |
| 14                 | 56.154         | 56.176 | 56.199 | 56.221 | 56.244 | 56.266 | 56.289 | 56.311 | 56.334 | 56.356 |
| 15                 | 56.379         | 56.401 | 56.424 | 56.446 | 56.469 | 56.491 | 56.514 | 56.536 | 56.559 | 56.581 |
| 16                 | 56.604         | 56.627 | 56.649 | 56.672 | 56.694 | 56.717 | 56.739 | 56.762 | 56.784 | 56.807 |
| 17                 | 56.829         | 56.852 | 56.874 | 56.897 | 56.919 | 56.942 | 56.964 | 56.987 | 57.009 | 57.032 |
| 18                 | 57.055         | 57.077 | 57.100 | 57.122 | 57.145 | 57.167 | 57.190 | 57.212 | 57.235 | 57.257 |
| 19                 | 57.28          | 57.302 | 57.325 | 57.347 | 57.370 | 57.392 | 57.415 | 57.437 | 57.460 | 57.482 |
| 20                 | 57.505         | 57.528 | 57.550 | 57.573 | 57.595 | 57.618 | 57.640 | 57.663 | 57.685 | 57.708 |
| 21                 | 57.730         | 57.753 | 57.775 | 57.798 | 57.820 | 57.843 | 57.865 | 57.888 | 57.910 | 57.933 |
| 22                 | 57.955         | 57.978 | 58.001 | 58.023 | 58.046 | 58.068 | 58.091 | 58.113 | 58.136 | 58.158 |
| 23                 | 58.181         | 58.203 | 58.226 | 58.248 | 58.271 | 58.293 | 58.316 | 58.338 | 58.361 | 58.383 |
| 24                 | 58.406         | 58.429 | 58.451 | 58.474 | 58.496 | 58.519 | 58.541 | 58.564 | 58.586 | 58.609 |
| 25                 | 58.631         | 58.654 | 58.676 | 58.699 | 58.721 | 58.744 | 58.766 | 58.789 | 58.811 | 58.834 |
| 26                 | 58.857         | 58.879 | 58.902 | 58.924 | 58.947 | 58.969 | 58.992 | 59.014 | 59.037 | 59.059 |
| 27                 | 59.082         | 59.104 | 59.127 | 59.149 | 59.172 | 59.194 | 59.217 | 59.239 | 59.262 | 59.284 |
| 28                 | 59.307         | 59.330 | 59.352 | 59.375 | 59.397 | 59.420 | 59.442 | 59.465 | 59.487 | 59.510 |
| 29                 | 59.532         | 59.555 | 59.577 | 59.600 | 59.622 | 59.645 | 59.667 | 59.690 | 59.712 | 59.735 |
| 30                 | 59.758         | 59.780 | 59.803 | 59.825 | 59.848 | 59.870 | 59.893 | 59.915 | 59.938 | 59.960 |
| 31                 | 59.983         | 60.005 | 60.028 | 60.050 | 60.073 | 60.095 | 60.118 | 60.140 | 60.163 | 60.185 |
| 32                 | 60.208         | 60.231 | 60.253 | 60.276 | 60.298 | 60.321 | 60.343 | 60.366 | 60.388 | 60.411 |
| 33                 | 60.433         | 60.456 | 60.478 | 60.501 | 60.523 | 60.546 | 60.568 | 60.591 | 60.613 | 60.636 |

续表 10.1e

| $t$ [°C] | 0.0       | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | $R_t$ [Ω] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 34       | 60.653    | 60.681 | 60.704 | 60.726 | 60.749 | 60.771 | 60.794 | 60.816 | 60.839 | 60.861 |
| 35       | 60.884    | 60.906 | 60.929 | 60.951 | 60.974 | 60.996 | 61.019 | 61.041 | 61.064 | 61.086 |
| 36       | 61.109    | 61.132 | 61.154 | 61.177 | 61.199 | 61.222 | 61.244 | 61.267 | 61.289 | 61.312 |
| 37       | 61.334    | 61.357 | 61.379 | 61.402 | 61.424 | 61.447 | 61.469 | 61.492 | 61.514 | 61.537 |
| 38       | 61.560    | 61.582 | 61.605 | 61.627 | 61.650 | 61.672 | 61.695 | 61.717 | 61.740 | 61.762 |
| 39       | 61.785    | 61.807 | 61.830 | 61.852 | 61.875 | 61.897 | 61.920 | 61.942 | 61.965 | 61.987 |
| 40       | 62.010    | 62.033 | 62.055 | 62.078 | 62.100 | 62.123 | 62.145 | 62.168 | 62.190 | 62.213 |
| 41       | 62.235    | 62.258 | 62.280 | 62.303 | 62.325 | 62.348 | 62.370 | 62.393 | 62.415 | 62.438 |
| 42       | 62.461    | 62.483 | 62.506 | 62.528 | 62.551 | 62.573 | 62.596 | 62.618 | 62.641 | 62.663 |
| 43       | 62.686    | 62.709 | 62.731 | 62.753 | 62.776 | 62.798 | 62.821 | 62.843 | 62.866 | 62.888 |
| 44       | 62.911    | 62.934 | 62.956 | 62.979 | 63.001 | 63.024 | 63.046 | 63.069 | 63.091 | 63.114 |
| 45       | 63.136    | 63.159 | 63.181 | 63.204 | 63.226 | 63.249 | 63.271 | 63.294 | 63.316 | 63.339 |
| 46       | 63.362    | 63.384 | 63.407 | 63.429 | 63.452 | 63.474 | 63.497 | 63.519 | 63.542 | 63.564 |
| 47       | 63.587    | 63.609 | 63.632 | 63.654 | 63.677 | 63.699 | 63.722 | 63.744 | 63.767 | 63.789 |
| 48       | 63.812    | 63.835 | 63.857 | 63.880 | 63.902 | 63.925 | 63.947 | 63.970 | 63.992 | 64.015 |
| 49       | 64.037    | 64.060 | 64.082 | 64.105 | 64.127 | 64.150 | 64.172 | 64.195 | 64.217 | 64.240 |
| 50       | 64.262    | 64.285 | 64.308 | 64.330 | 64.353 | 64.375 | 64.398 | 64.420 | 64.443 | 64.465 |

| $t$ [°C] | 0         | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | $R_t$ [Ω] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 50       | 64.262    | 64.488 | 64.713 | 64.938 | 65.163 | 65.389 | 65.614 | 65.839 | 66.065 | 66.290 |
| 60       | 66.515    | 66.740 | 66.966 | 67.191 | 67.416 | 67.641 | 67.867 | 68.092 | 68.317 | 68.542 |
| 70       | 68.768    | 68.993 | 69.218 | 69.443 | 69.669 | 69.894 | 70.119 | 70.344 | 70.570 | 70.795 |
| 80       | 71.020    | 71.245 | 71.471 | 71.696 | 71.921 | 72.146 | 72.372 | 72.597 | 72.822 | 73.047 |
| 90       | 73.273    | 73.498 | 73.723 | 73.948 | 74.174 | 74.399 | 74.624 | 74.849 | 75.075 | 75.300 |
| 100      | 75.525    | 75.750 | 75.976 | 76.201 | 76.426 | 76.651 | 76.877 | 77.102 | 77.327 | 77.552 |

分度号: BA 2 铂电阻  $t = f(R_t)$

表10.2a

| $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  | $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |
| 46.0               | 0.00                       | 0.11  | 0.22  | 0.33  | 0.44  | 50.1               | 22.53                      | 22.64 | 22.76 | 22.87 | 22.93 |
| 46.1               | 0.55                       | 0.66  | 0.77  | 0.88  | 0.99  | 50.2               | 23.09                      | 23.20 | 23.31 | 23.42 | 23.53 |
| 46.2               | 1.10                       | 1.21  | 1.31  | 1.42  | 1.53  | 50.3               | 23.64                      | 23.75 | 23.86 | 23.97 | 24.08 |
| 46.3               | 1.64                       | 1.75  | 1.86  | 1.97  | 2.08  | 50.4               | 24.19                      | 24.30 | 24.41 | 24.52 | 24.63 |
| 46.4               | 2.19                       | 2.30  | 2.41  | 2.52  | 2.63  | 50.5               | 24.74                      | 24.85 | 24.96 | 25.07 | 25.18 |
| 46.5               | 2.74                       | 2.85  | 2.96  | 3.07  | 3.18  | 50.6               | 25.29                      | 25.40 | 25.51 | 25.62 | 25.73 |
| 46.6               | 3.29                       | 3.40  | 3.51  | 3.62  | 3.73  | 50.7               | 25.84                      | 25.96 | 26.07 | 26.18 | 26.29 |
| 46.7               | 3.84                       | 3.95  | 4.06  | 4.17  | 4.28  | 50.8               | 26.40                      | 26.51 | 26.62 | 26.73 | 26.84 |
| 46.8               | 4.39                       | 4.49  | 4.60  | 4.71  | 4.82  | 50.9               | 26.95                      | 27.06 | 27.17 | 27.28 | 27.39 |
| 46.9               | 4.93                       | 5.04  | 5.15  | 5.26  | 5.37  | 51.0               | 27.50                      | 27.61 | 27.72 | 27.83 | 27.94 |
| 47.0               | 5.48                       | 5.59  | 5.70  | 5.81  | 5.92  | 52.1               | 28.05                      | 28.16 | 28.27 | 28.38 | 28.50 |
| 47.1               | 6.03                       | 6.14  | 6.25  | 6.36  | 6.47  | 51.2               | 28.61                      | 28.72 | 28.83 | 28.94 | 29.05 |
| 47.2               | 6.58                       | 6.69  | 6.80  | 6.91  | 7.02  | 51.3               | 29.16                      | 29.27 | 29.38 | 29.49 | 29.60 |
| 47.3               | 7.13                       | 7.24  | 7.35  | 7.46  | 7.57  | 51.4               | 29.71                      | 29.82 | 29.93 | 30.04 | 30.15 |
| 47.4               | 7.68                       | 7.79  | 7.90  | 8.01  | 8.12  | 51.5               | 30.26                      | 30.37 | 30.48 | 30.60 | 30.71 |
| 47.5               | 8.23                       | 8.34  | 8.45  | 8.56  | 8.67  | 51.6               | 30.82                      | 30.93 | 31.04 | 31.15 | 31.26 |
| 47.6               | 8.78                       | 8.89  | 9.00  | 9.11  | 9.22  | 51.7               | 31.37                      | 31.48 | 31.59 | 31.70 | 31.81 |
| 47.7               | 9.33                       | 9.44  | 9.55  | 9.65  | 9.76  | 51.8               | 31.92                      | 32.03 | 32.14 | 32.25 | 32.36 |
| 47.8               | 9.87                       | 9.98  | 10.09 | 10.20 | 10.31 | 51.9               | 32.48                      | 32.59 | 32.70 | 32.81 | 32.92 |
| 47.9               | 10.42                      | 10.53 | 10.64 | 10.75 | 10.86 | 52.0               | 33.03                      | 33.14 | 33.25 | 33.36 | 33.47 |
| 48.0               | 10.97                      | 11.08 | 11.19 | 11.30 | 11.41 | 52.1               | 33.58                      | 33.69 | 33.80 | 33.91 | 34.02 |
| 48.1               | 11.52                      | 11.63 | 11.74 | 11.85 | 11.96 | 52.2               | 34.14                      | 34.25 | 34.36 | 34.47 | 34.58 |
| 48.2               | 12.07                      | 12.18 | 12.29 | 12.40 | 12.51 | 52.3               | 34.69                      | 34.80 | 34.91 | 35.02 | 35.13 |
| 48.3               | 12.62                      | 12.73 | 12.84 | 12.95 | 13.06 | 52.4               | 35.24                      | 35.35 | 35.46 | 35.57 | 35.68 |
| 48.4               | 13.17                      | 13.28 | 13.39 | 13.50 | 13.61 | 52.5               | 35.80                      | 35.91 | 36.02 | 36.13 | 36.24 |
| 48.5               | 13.72                      | 13.83 | 13.94 | 14.05 | 14.16 | 52.6               | 36.35                      | 36.46 | 36.57 | 36.68 | 36.79 |
| 48.6               | 14.27                      | 14.38 | 14.49 | 14.60 | 14.71 | 52.7               | 36.90                      | 37.01 | 37.12 | 37.23 | 37.35 |
| 48.7               | 14.82                      | 14.93 | 15.04 | 15.15 | 15.26 | 52.8               | 37.46                      | 37.57 | 37.68 | 37.79 | 37.90 |
| 48.8               | 15.37                      | 15.48 | 15.59 | 15.70 | 15.81 | 52.9               | 38.01                      | 38.12 | 38.23 | 38.34 | 38.45 |
| 48.9               | 15.92                      | 16.03 | 16.14 | 16.25 | 16.36 | 53.0               | 38.56                      | 38.68 | 38.79 | 38.90 | 39.01 |
| 49.0               | 16.47                      | 16.58 | 16.69 | 16.80 | 16.91 | 53.1               | 39.12                      | 39.23 | 39.34 | 39.45 | 39.56 |
| 49.1               | 17.02                      | 17.13 | 17.24 | 17.35 | 17.46 | 53.2               | 39.67                      | 39.78 | 39.89 | 40.01 | 40.12 |
| 49.2               | 17.57                      | 17.69 | 17.80 | 17.91 | 18.02 | 53.3               | 40.23                      | 40.34 | 40.45 | 40.56 | 40.67 |
| 49.3               | 18.13                      | 18.24 | 18.35 | 18.46 | 18.57 | 53.4               | 40.78                      | 40.89 | 41.00 | 41.11 | 41.23 |
| 49.4               | 18.68                      | 18.79 | 18.90 | 19.01 | 19.12 | 53.5               | 41.34                      | 41.45 | 41.56 | 41.67 | 41.79 |
| 49.5               | 19.23                      | 19.34 | 19.45 | 19.56 | 19.67 | 53.6               | 41.89                      | 42.00 | 42.11 | 42.22 | 42.33 |
| 49.6               | 19.78                      | 19.89 | 20.00 | 20.11 | 20.22 | 53.7               | 42.45                      | 42.56 | 42.67 | 42.78 | 42.89 |
| 49.7               | 20.33                      | 20.44 | 20.55 | 20.66 | 20.77 | 53.8               | 43.00                      | 43.11 | 43.22 | 43.33 | 43.44 |
| 49.8               | 20.88                      | 20.99 | 21.10 | 21.21 | 21.32 | 53.9               | 43.56                      | 43.67 | 43.78 | 43.89 | 44.00 |
| 49.9               | 21.43                      | 21.54 | 21.65 | 21.76 | 21.87 | 54.0               | 44.11                      | 44.22 | 44.33 | 44.44 | 44.55 |
| 5.00               | 21.98                      | 22.09 | 22.20 | 22.31 | 22.42 |                    |                            |       |       |       |       |

续表 10.2a

| $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  | $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |
| 54.1               | 44.87                      | 44.78 | 44.89 | 45.00 | 45.11 | 54.6               | 47.44                      | 47.55 | 47.66 | 47.78 | 47.89 |
| 54.2               | 45.22                      | 45.33 | 45.44 | 45.55 | 45.66 | 54.7               | 48.00                      | 48.11 | 48.22 | 48.33 | 48.44 |
| 54.3               | 45.78                      | 45.89 | 46.00 | 46.11 | 46.22 | 54.8               | 48.55                      | 48.66 | 48.78 | 48.89 | 49.00 |
| 54.4               | 46.33                      | 46.44 | 46.55 | 46.66 | 46.78 | 54.9               | 49.11                      | 49.22 | 49.33 | 49.44 | 49.55 |
| 54.5               | 46.89                      | 47.00 | 47.11 | 47.22 | 47.33 | 55.0               | 49.67                      | 49.78 | 49.89 | 50.00 | 50.11 |
|                    |                            |       |       |       |       | 55.1               | 50.22                      | 50.33 | 50.44 | 50.55 | 50.67 |
|                    |                            |       |       |       |       | 55.2               | 50.78                      | 50.89 | 51.00 | 51.11 | 51.22 |

分度号: BA2 铂电阻  $t = f(R_t)$ 

表 10.2b

| $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.08 | $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|--------------------|----------------------------|------|------|------|------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |      |      |      |      |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |
| 100.0              | 0.00                       | 0.03 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 102.6              | 6.56                       | 6.61  | 6.66  | 6.71  | 6.76  |
| 100.1              | 0.25                       | 0.3  | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 102.7              | 6.81                       | 6.86  | 6.91  | 6.96  | 7.01  |
| 100.2              | 0.50                       | 0.55 | 0.60 | 0.66 | 0.71 | 102.8              | 7.06                       | 7.11  | 7.16  | 7.21  | 7.26  |
| 100.3              | 0.76                       | 0.81 | 0.86 | 0.91 | 0.96 | 102.9              | 7.32                       | 7.37  | 7.42  | 7.47  | 7.52  |
| 100.4              | 1.01                       | 1.06 | 1.11 | 1.16 | 1.21 | 103.0              | 7.57                       | 7.62  | 7.67  | 7.72  | 7.77  |
| 100.5              | 1.26                       | 1.31 | 1.36 | 1.41 | 1.46 | 103.1              | 7.82                       | 7.87  | 7.92  | 7.97  | 8.02  |
| 100.6              | 1.51                       | 1.56 | 1.61 | 1.66 | 1.71 | 103.2              | 8.07                       | 8.12  | 8.17  | 8.22  | 8.28  |
| 100.7              | 1.76                       | 1.81 | 1.87 | 1.92 | 1.97 | 103.3              | 8.33                       | 8.38  | 8.43  | 8.48  | 8.53  |
| 100.8              | 2.02                       | 2.07 | 2.12 | 2.17 | 2.22 | 103.4              | 8.58                       | 8.63  | 8.68  | 8.73  | 8.78  |
| 100.9              | 2.27                       | 2.32 | 2.37 | 2.42 | 2.47 | 103.5              | 8.83                       | 8.88  | 8.93  | 8.98  | 9.03  |
| 101.0              | 2.52                       | 2.57 | 2.62 | 2.67 | 2.72 | 103.6              | 9.08                       | 9.13  | 9.18  | 9.24  | 9.29  |
| 101.1              | 2.77                       | 2.82 | 2.87 | 2.92 | 2.97 | 103.7              | 9.34                       | 9.39  | 9.44  | 9.49  | 9.54  |
| 101.2              | 3.03                       | 3.08 | 3.13 | 3.18 | 3.23 | 103.8              | 9.59                       | 9.64  | 9.69  | 9.74  | 9.79  |
| 101.3              | 3.28                       | 3.33 | 3.38 | 3.43 | 3.48 | 103.9              | 9.84                       | 9.89  | 9.94  | 9.99  | 10.04 |
| 101.4              | 3.53                       | 3.58 | 3.63 | 3.68 | 3.78 | 104.0              | 10.09                      | 10.15 | 10.20 | 10.25 | 10.30 |
| 101.5              | 3.78                       | 3.83 | 3.88 | 3.93 | 3.98 | 104.1              | 10.35                      | 10.40 | 10.45 | 10.5  | 10.55 |
| 101.6              | 4.03                       | 4.08 | 4.14 | 4.19 | 4.24 | 104.2              | 10.60                      | 10.65 | 10.70 | 10.75 | 10.80 |
| 101.7              | 4.29                       | 4.34 | 4.39 | 4.44 | 4.49 | 104.3              | 10.85                      | 10.90 | 10.95 | 11.00 | 11.06 |
| 101.8              | 4.54                       | 4.59 | 4.64 | 4.69 | 4.74 | 104.4              | 11.11                      | 11.16 | 11.21 | 11.26 | 11.31 |
| 101.9              | 4.79                       | 4.84 | 4.89 | 4.94 | 4.99 | 104.5              | 11.36                      | 11.41 | 11.46 | 11.51 | 11.56 |
| 102.0              | 5.04                       | 5.09 | 5.14 | 5.19 | 5.25 | 104.6              | 11.61                      | 11.66 | 11.71 | 11.76 | 11.81 |
| 102.1              | 5.30                       | 5.35 | 5.40 | 5.45 | 5.50 | 104.7              | 11.86                      | 11.91 | 11.97 | 12.02 | 12.07 |
| 102.2              | 5.55                       | 5.60 | 5.65 | 5.70 | 5.75 | 104.8              | 12.12                      | 12.17 | 12.22 | 12.27 | 12.32 |
| 102.3              | 5.80                       | 5.85 | 5.90 | 5.95 | 6.00 | 104.9              | 12.37                      | 12.42 | 12.47 | 12.52 | 12.57 |
| 102.4              | 6.05                       | 6.10 | 6.15 | 6.20 | 6.26 | 105.0              | 12.62                      | 12.67 | 12.72 | 12.77 | 12.83 |
| 102.5              | 6.31                       | 6.36 | 6.41 | 6.46 | 6.51 |                    |                            |       |       |       |       |

续表 10.2b

| $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00 0.02 0.04 0.06 0.08   |       |       |       |       | $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00 0.02 0.04 0.06 0.08   |       |       |       |       |
|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |
| 105.1              | 12.88                      | 12.93 | 12.98 | 13.03 | 13.08 | 109.1              | 23.01                      | 23.06 | 23.11 | 23.16 | 23.21 |
| 105.2              | 13.13                      | 13.18 | 13.23 | 13.28 | 13.33 | 109.2              | 23.26                      | 23.31 | 23.36 | 23.41 | 23.47 |
| 105.3              | 13.38                      | 13.43 | 13.48 | 13.53 | 13.58 | 109.3              | 23.52                      | 23.57 | 23.62 | 23.67 | 23.72 |
| 105.4              | 13.63                      | 13.69 | 13.74 | 13.79 | 13.84 | 109.4              | 23.77                      | 23.82 | 23.87 | 23.92 | 23.97 |
| 105.5              | 13.89                      | 13.94 | 13.99 | 14.04 | 14.09 | 109.5              | 24.02                      | 24.07 | 24.13 | 24.18 | 24.23 |
| 105.6              | 14.14                      | 14.19 | 14.24 | 14.29 | 14.34 | 109.6              | 24.28                      | 24.33 | 24.38 | 24.43 | 24.48 |
| 105.7              | 14.39                      | 14.44 | 14.49 | 14.55 | 14.60 | 109.7              | 24.53                      | 24.58 | 24.63 | 24.68 | 24.73 |
| 105.8              | 14.65                      | 14.70 | 14.75 | 14.80 | 14.85 | 109.8              | 24.79                      | 24.84 | 24.89 | 24.94 | 24.99 |
| 105.9              | 14.99                      | 14.95 | 15.00 | 15.05 | 15.10 | 109.9              | 25.04                      | 25.09 | 25.14 | 25.19 | 25.24 |
| 106.0              | 15.15                      | 15.20 | 15.25 | 15.30 | 15.36 | 110.0              | 25.29                      | 25.34 | 25.39 | 25.45 | 25.50 |
| 106.1              | 15.41                      | 15.46 | 15.51 | 15.56 | 15.61 | 110.1              | 25.55                      | 25.60 | 25.65 | 25.70 | 25.75 |
| 106.2              | 15.66                      | 15.71 | 15.76 | 15.81 | 15.86 | 110.2              | 25.80                      | 25.85 | 25.90 | 25.95 | 26.00 |
| 106.3              | 15.91                      | 15.96 | 16.01 | 16.06 | 16.11 | 110.3              | 26.05                      | 26.11 | 26.16 | 26.21 | 26.26 |
| 106.4              | 16.17                      | 16.22 | 16.27 | 16.32 | 16.37 | 110.4              | 26.31                      | 26.36 | 26.41 | 26.46 | 26.51 |
| 106.5              | 16.42                      | 16.47 | 16.52 | 16.57 | 16.62 | 110.5              | 26.56                      | 26.61 | 26.66 | 26.71 | 26.77 |
| 106.6              | 16.67                      | 16.72 | 16.77 | 16.82 | 16.87 | 110.6              | 26.82                      | 26.87 | 26.92 | 26.97 | 27.02 |
| 106.7              | 16.93                      | 16.98 | 17.03 | 17.08 | 17.13 | 110.7              | 27.07                      | 27.12 | 27.17 | 27.22 | 27.27 |
| 106.8              | 17.18                      | 17.23 | 17.28 | 17.33 | 17.38 | 110.8              | 27.32                      | 27.38 | 27.43 | 27.48 | 27.53 |
| 106.9              | 17.43                      | 17.48 | 17.53 | 17.58 | 17.63 | 110.9              | 27.58                      | 27.63 | 27.68 | 27.73 | 27.78 |
| 107.0              | 17.69                      | 17.74 | 17.79 | 17.84 | 17.89 | 111.0              | 27.83                      | 27.88 | 27.93 | 27.99 | 28.04 |
| 107.1              | 17.94                      | 17.99 | 18.04 | 18.09 | 18.14 | 111.1              | 28.09                      | 28.14 | 28.19 | 28.24 | 28.29 |
| 107.2              | 18.19                      | 18.24 | 18.29 | 18.34 | 18.39 | 111.2              | 28.34                      | 28.39 | 28.44 | 28.49 | 28.54 |
| 107.3              | 18.45                      | 18.50 | 18.55 | 18.60 | 18.65 | 111.3              | 28.59                      | 28.65 | 28.70 | 28.75 | 28.80 |
| 107.4              | 18.70                      | 18.75 | 18.80 | 18.85 | 18.90 | 111.4              | 28.85                      | 28.90 | 28.95 | 29.00 | 29.05 |
| 107.5              | 18.95                      | 19.00 | 19.05 | 19.10 | 19.15 | 111.5              | 29.10                      | 29.15 | 29.20 | 29.26 | 29.31 |
| 107.6              | 19.21                      | 19.26 | 19.31 | 19.36 | 19.41 | 111.6              | 29.36                      | 29.41 | 29.46 | 29.51 | 29.56 |
| 107.7              | 19.46                      | 19.51 | 19.56 | 19.61 | 19.66 | 111.7              | 29.61                      | 29.66 | 29.71 | 29.76 | 29.81 |
| 107.8              | 19.71                      | 19.76 | 19.81 | 19.86 | 19.91 | 111.8              | 29.87                      | 29.92 | 29.97 | 30.02 | 30.07 |
| 107.9              | 19.97                      | 20.02 | 20.07 | 20.12 | 20.17 | 111.9              | 30.12                      | 30.17 | 30.22 | 30.27 | 30.32 |
| 108.0              | 20.22                      | 20.27 | 20.32 | 20.37 | 20.42 | 112.0              | 30.37                      | 30.43 | 30.48 | 30.53 | 30.58 |
| 108.1              | 20.47                      | 20.52 | 20.57 | 20.62 | 20.68 | 112.1              | 30.63                      | 30.68 | 30.73 | 30.78 | 30.83 |
| 108.2              | 20.73                      | 20.78 | 20.83 | 20.88 | 20.93 | 112.2              | 30.88                      | 30.93 | 30.98 | 31.04 | 31.09 |
| 108.3              | 20.98                      | 21.03 | 21.08 | 21.13 | 21.18 | 112.3              | 31.14                      | 31.19 | 31.24 | 31.29 | 31.34 |
| 108.4              | 21.23                      | 21.28 | 21.33 | 21.38 | 21.44 | 112.4              | 31.39                      | 31.44 | 31.49 | 31.54 | 31.59 |
| 108.5              | 21.49                      | 21.54 | 21.59 | 21.64 | 21.69 | 112.5              | 31.65                      | 31.70 | 31.75 | 31.80 | 31.85 |
| 108.6              | 21.74                      | 21.79 | 21.84 | 21.89 | 21.94 | 112.6              | 31.90                      | 31.95 | 32.00 | 32.05 | 32.10 |
| 108.7              | 21.99                      | 22.04 | 22.10 | 22.15 | 22.20 | 112.7              | 32.15                      | 32.21 | 32.26 | 32.31 | 32.36 |
| 108.8              | 22.25                      | 22.30 | 22.35 | 22.40 | 22.45 | 112.8              | 32.41                      | 32.46 | 32.51 | 32.56 | 32.61 |
| 108.9              | 22.50                      | 22.55 | 22.60 | 22.65 | 22.70 | 112.9              | 32.66                      | 32.71 | 32.77 | 32.82 | 32.87 |
| 109.0              | 22.76                      | 22.81 | 22.86 | 22.91 | 22.96 | 113.0              | 32.92                      | 32.97 | 33.02 | 33.07 | 33.12 |

续表 10.2b

| $R_t$ [Ω] | 0.00     | 0.02  | 0.004 | 0.06  | 0.08  | $R_t$ [Ω] | 0.00     | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
|           | $t$ [°C] |       |       |       |       |           | $t$ [°C] |       |       |       |       |
| 113.1     | 33.17    | 33.22 | 33.27 | 33.33 | 33.38 | 116.6     | 42.09    | 42.14 | 42.19 | 42.25 | 42.29 |
| 113.2     | 33.43    | 33.48 | 33.53 | 33.58 | 33.63 | 116.7     | 42.35    | 42.40 | 42.45 | 42.50 | 42.55 |
| 113.3     | 33.68    | 33.73 | 33.78 | 33.83 | 33.88 | 116.8     | 42.60    | 42.65 | 42.70 | 42.75 | 42.81 |
| 113.4     | 33.94    | 33.99 | 34.04 | 34.09 | 34.14 | 116.9     | 42.86    | 42.91 | 42.96 | 43.01 | 43.06 |
| 113.5     | 34.19    | 34.24 | 34.29 | 34.34 | 34.39 | 117.0     | 43.11    | 43.16 | 43.21 | 43.26 | 43.32 |
| 113.6     | 34.44    | 34.50 | 34.55 | 34.60 | 34.65 | 117.1     | 43.37    | 43.42 | 43.47 | 43.52 | 43.57 |
| 113.7     | 34.70    | 34.75 | 34.80 | 34.85 | 34.90 | 117.2     | 43.62    | 43.67 | 43.72 | 43.78 | 43.83 |
| 113.8     | 34.95    | 35.01 | 35.06 | 35.11 | 35.16 | 117.3     | 43.88    | 43.93 | 43.98 | 44.03 | 44.08 |
| 113.9     | 35.21    | 35.26 | 35.31 | 35.36 | 35.41 | 117.4     | 44.13    | 44.18 | 44.23 | 44.29 | 44.34 |
| 114.0     | 35.46    | 35.51 | 35.57 | 35.62 | 35.67 | 117.5     | 44.39    | 44.44 | 44.49 | 44.54 | 44.59 |
| 114.1     | 35.72    | 35.77 | 35.82 | 35.87 | 35.92 | 117.6     | 44.64    | 44.69 | 44.75 | 44.80 | 44.85 |
| 114.2     | 35.97    | 36.02 | 36.07 | 36.13 | 36.18 | 117.7     | 44.90    | 44.95 | 45.00 | 45.05 | 45.10 |
| 114.3     | 36.23    | 36.28 | 36.33 | 36.38 | 36.43 | 117.8     | 45.15    | 45.21 | 45.26 | 45.31 | 45.36 |
| 114.4     | 36.48    | 36.53 | 36.58 | 36.63 | 36.69 | 117.9     | 45.41    | 45.46 | 45.51 | 45.56 | 45.61 |
| 114.5     | 36.74    | 36.79 | 36.84 | 36.89 | 36.94 | 118.0     | 45.66    | 45.72 | 45.77 | 45.82 | 45.87 |
| 114.6     | 36.99    | 37.04 | 37.09 | 37.14 | 37.20 | 118.1     | 45.92    | 45.97 | 46.02 | 46.07 | 46.12 |
| 114.7     | 37.25    | 37.30 | 37.35 | 37.40 | 37.45 | 118.2     | 46.18    | 46.23 | 46.28 | 46.33 | 46.38 |
| 114.8     | 37.50    | 37.55 | 37.60 | 37.65 | 37.71 | 118.3     | 46.43    | 46.48 | 46.53 | 46.58 | 46.64 |
| 114.9     | 37.76    | 37.81 | 37.86 | 37.91 | 37.96 | 118.4     | 46.69    | 46.74 | 46.79 | 46.84 | 46.89 |
| 115.0     | 38.01    | 38.06 | 38.11 | 38.16 | 38.21 | 118.5     | 46.94    | 46.99 | 47.04 | 47.10 | 47.15 |
| 115.1     | 38.27    | 38.32 | 38.37 | 38.42 | 38.47 | 118.6     | 47.20    | 47.25 | 47.30 | 47.35 | 47.40 |
| 115.2     | 38.52    | 38.57 | 38.62 | 38.67 | 38.72 | 118.7     | 47.45    | 47.50 | 47.56 | 47.61 | 47.66 |
| 115.3     | 38.78    | 38.83 | 38.88 | 38.93 | 38.98 | 118.8     | 47.71    | 47.76 | 47.81 | 47.86 | 47.91 |
| 115.4     | 39.03    | 39.08 | 39.13 | 39.18 | 39.23 | 118.9     | 47.96    | 48.02 | 48.07 | 48.12 | 48.17 |
| 115.5     | 39.29    | 39.34 | 39.39 | 39.44 | 39.49 | 119.0     | 48.22    | 48.27 | 48.32 | 48.37 | 48.42 |
| 115.6     | 39.54    | 39.59 | 39.64 | 39.69 | 39.74 | 119.1     | 48.48    | 48.53 | 48.58 | 48.63 | 48.68 |
| 115.7     | 39.80    | 39.85 | 39.90 | 39.95 | 40.00 | 119.2     | 48.73    | 48.78 | 48.83 | 48.88 | 48.94 |
| 115.8     | 40.05    | 40.10 | 40.15 | 40.20 | 40.25 | 119.3     | 48.99    | 49.04 | 49.09 | 49.14 | 49.19 |
| 115.9     | 40.31    | 40.36 | 40.41 | 40.46 | 40.51 | 119.4     | 49.24    | 49.29 | 49.34 | 49.40 | 49.45 |
| 116.0     | 40.56    | 40.61 | 40.66 | 40.71 | 40.76 | 119.5     | 49.50    | 49.55 | 49.60 | 49.65 | 49.70 |
| 116.1     | 40.82    | 40.87 | 40.92 | 40.97 | 41.02 | 119.6     | 49.75    | 49.81 | 49.86 | 49.91 | 49.96 |
| 116.2     | 41.07    | 41.12 | 41.17 | 41.22 | 41.27 | 119.7     | 50.01    | 50.06 | 50.11 | 50.16 | 50.21 |
| 116.3     | 41.33    | 41.38 | 41.43 | 41.48 | 41.53 | 119.8     | 50.27    | 50.32 | 50.37 | 50.42 | 50.47 |
| 116.4     | 41.58    | 41.63 | 41.68 | 41.73 | 41.78 | 119.9     | 50.52    | 50.57 | 50.62 | 50.67 | 50.73 |
| 116.5     | 41.84    | 41.89 | 41.94 | 41.99 | 42.04 | 120.0     | 50.78    | 50.83 | 50.88 | 50.93 | 50.98 |

| $R_t$ [Ω] | 0.00     | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  | $R_t$ [Ω] | 0.00     | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
|           | $t$ [°C] |       |       |       |       |           | $t$ [°C] |       |       |       |       |
| 50.0      | 0.00     | 0.09  | 0.19  | 0.28  | 0.37  | 54.1      | 19.16    | 19.25 | 19.35 | 19.44 | 19.53 |
| 50.1      | 0.47     | 0.56  | 0.65  | 0.75  | 0.84  | 54.2      | 19.63    | 19.72 | 19.81 | 19.91 | 20.00 |
| 50.2      | 0.93     | 1.03  | 1.12  | 1.21  | 1.31  | 54.3      | 20.09    | 20.19 | 20.28 | 20.37 | 20.47 |
| 50.3      | 1.40     | 1.50  | 1.59  | 1.68  | 1.78  | 54.4      | 20.56    | 20.65 | 20.75 | 20.84 | 20.93 |
| 50.4      | 1.87     | 1.96  | 2.06  | 2.15  | 2.24  | 54.5      | 21.03    | 21.12 | 21.21 | 21.31 | 21.40 |
| 50.5      | 2.34     | 2.43  | 2.52  | 2.62  | 2.71  | 54.6      | 21.50    | 21.59 | 21.68 | 21.78 | 21.87 |
| 50.6      | 2.80     | 2.90  | 2.99  | 3.08  | 3.18  | 54.7      | 21.96    | 22.06 | 22.15 | 22.24 | 22.34 |
| 50.7      | 3.27     | 3.36  | 3.46  | 3.55  | 3.64  | 54.8      | 22.43    | 22.52 | 22.62 | 22.71 | 22.80 |
| 50.8      | 3.74     | 3.83  | 3.93  | 4.02  | 4.11  | 54.9      | 22.90    | 22.99 | 23.08 | 23.18 | 23.27 |
| 50.9      | 4.21     | 4.30  | 4.39  | 4.49  | 4.58  | 55.0      | 23.35    | 23.46 | 23.55 | 23.64 | 23.74 |
| 51.0      | 4.67     | 4.77  | 4.86  | 4.95  | 5.05  | 55.1      | 23.83    | 23.93 | 24.02 | 24.11 | 24.21 |
| 51.1      | 5.14     | 5.23  | 5.33  | 5.42  | 5.51  | 55.2      | 24.30    | 24.39 | 24.49 | 24.58 | 24.67 |
| 51.2      | 5.61     | 5.70  | 5.79  | 5.89  | 5.98  | 55.3      | 24.77    | 24.86 | 24.95 | 25.05 | 25.14 |
| 51.3      | 6.07     | 6.17  | 6.26  | 6.36  | 6.45  | 55.4      | 25.23    | 25.33 | 25.42 | 25.51 | 25.61 |
| 51.4      | 6.54     | 6.64  | 6.73  | 6.82  | 6.92  | 55.5      | 25.70    | 25.79 | 25.89 | 25.98 | 26.07 |
| 51.5      | 7.01     | 7.10  | 7.20  | 7.29  | 7.38  | 55.6      | 26.17    | 26.26 | 26.36 | 26.45 | 26.54 |
| 51.6      | 7.48     | 7.57  | 7.66  | 7.76  | 7.85  | 55.7      | 26.64    | 26.73 | 26.82 | 26.92 | 27.01 |
| 51.7      | 7.94     | 8.04  | 8.13  | 8.22  | 8.32  | 55.8      | 27.10    | 27.20 | 27.29 | 27.38 | 27.48 |
| 51.8      | 8.41     | 8.50  | 8.6   | 8.69  | 8.79  | 55.9      | 27.57    | 27.66 | 27.76 | 27.85 | 27.94 |
| 51.9      | 8.88     | 8.97  | 9.07  | 9.16  | 9.25  | 56.0      | 28.04    | 28.13 | 28.22 | 28.32 | 28.41 |
| 52.0      | 9.35     | 9.44  | 9.53  | 9.63  | 9.72  | 56.1      | 28.50    | 28.60 | 28.69 | 28.79 | 28.88 |
| 52.1      | 9.81     | 9.91  | 10.00 | 10.09 | 10.19 | 56.2      | 28.97    | 29.07 | 29.16 | 29.25 | 29.35 |
| 52.2      | 10.28    | 10.37 | 10.47 | 10.56 | 10.65 | 56.3      | 29.44    | 29.53 | 29.63 | 29.72 | 29.81 |
| 52.3      | 10.75    | 10.84 | 10.93 | 11.03 | 11.12 | 56.4      | 29.91    | 30.00 | 30.09 | 30.19 | 30.28 |
| 52.4      | 11.21    | 11.31 | 11.40 | 11.50 | 11.59 | 56.5      | 30.37    | 30.47 | 30.56 | 30.65 | 30.75 |
| 52.5      | 11.68    | 11.78 | 11.87 | 11.96 | 12.06 | 56.6      | 30.84    | 30.93 | 31.03 | 31.12 | 31.21 |
| 52.6      | 12.15    | 12.24 | 12.34 | 12.43 | 12.52 | 56.7      | 31.31    | 31.40 | 31.50 | 31.59 | 31.68 |
| 52.7      | 12.62    | 12.71 | 12.80 | 12.90 | 12.99 | 56.8      | 31.78    | 31.87 | 31.96 | 32.06 | 32.15 |
| 52.8      | 13.08    | 13.18 | 13.27 | 13.36 | 13.46 | 56.9      | 32.24    | 32.34 | 32.43 | 32.52 | 32.62 |
| 52.9      | 13.55    | 13.64 | 13.74 | 13.83 | 13.93 | 57.0      | 32.71    | 32.80 | 32.90 | 32.99 | 33.09 |
| 53.0      | 14.02    | 14.11 | 14.21 | 14.30 | 14.39 | 57.1      | 33.18    | 33.27 | 33.36 | 33.46 | 33.55 |
| 53.1      | 14.49    | 14.58 | 14.67 | 14.77 | 14.86 | 57.2      | 33.64    | 33.74 | 33.83 | 33.93 | 34.02 |
| 53.2      | 14.95    | 15.05 | 15.14 | 15.23 | 15.33 | 57.3      | 34.11    | 34.21 | 34.30 | 34.39 | 34.49 |
| 53.3      | 15.42    | 15.51 | 15.61 | 15.70 | 15.79 | 57.4      | 34.58    | 34.67 | 34.77 | 34.86 | 34.95 |
| 53.4      | 15.89    | 15.98 | 16.07 | 16.17 | 16.26 | 57.5      | 35.05    | 35.14 | 35.23 | 35.33 | 35.42 |
| 53.5      | 16.36    | 16.45 | 16.54 | 16.64 | 16.73 | 57.6      | 35.51    | 35.61 | 35.70 | 35.79 | 35.89 |
| 53.6      | 16.82    | 16.92 | 17.01 | 17.10 | 17.20 | 57.7      | 35.98    | 36.07 | 36.17 | 36.26 | 36.36 |
| 53.7      | 17.29    | 17.38 | 17.48 | 17.57 | 17.66 | 57.8      | 36.45    | 36.54 | 36.64 | 36.73 | 36.82 |
| 53.8      | 17.76    | 17.85 | 17.94 | 18.04 | 18.13 | 57.9      | 36.92    | 37.01 | 37.10 | 37.20 | 37.29 |
| 53.9      | 18.22    | 18.32 | 18.41 | 18.50 | 18.60 | 58.0      | 37.38    | 37.48 | 37.57 | 37.66 | 37.76 |
| 54.0      | 18.69    | 18.79 | 18.88 | 18.97 | 19.07 |           |          |       |       |       |       |



续表 10.2c

| $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  | $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |
| 58.1               | 37.85                      | 37.94 | 38.04 | 38.13 | 38.22 | 59.6               | 44.86                      | 44.95 | 45.05 | 45.14 | 45.23 |
| 58.2               | 38.32                      | 38.41 | 38.50 | 38.60 | 38.69 | 59.7               | 45.33                      | 45.42 | 45.51 | 45.61 | 45.70 |
| 58.3               | 38.79                      | 38.88 | 38.97 | 39.07 | 39.16 | 59.8               | 45.79                      | 45.89 | 45.98 | 46.07 | 46.17 |
| 58.4               | 39.25                      | 39.35 | 39.44 | 39.53 | 39.63 | 59.9               | 46.26                      | 46.36 | 46.45 | 46.54 | 46.64 |
| 58.5               | 39.72                      | 39.81 | 39.91 | 40.00 | 40.09 | 60.0               | 46.73                      | 46.82 | 46.92 | 47.01 | 47.10 |
| 58.6               | 40.19                      | 40.28 | 40.37 | 40.47 | 40.56 | 60.1               | 47.20                      | 47.29 | 47.38 | 47.48 | 47.57 |
| 58.7               | 40.65                      | 40.75 | 40.84 | 40.93 | 41.03 | 60.2               | 47.66                      | 47.76 | 47.85 | 47.94 | 48.04 |
| 58.8               | 41.12                      | 41.21 | 41.31 | 41.40 | 41.50 | 60.3               | 48.13                      | 48.22 | 48.32 | 48.41 | 48.50 |
| 58.9               | 41.59                      | 41.68 | 41.78 | 41.87 | 41.96 | 60.4               | 48.60                      | 48.69 | 48.79 | 48.88 | 48.97 |
| 59.0               | 42.06                      | 42.15 | 42.24 | 42.34 | 42.43 | 60.5               | 49.07                      | 49.16 | 49.25 | 49.35 | 49.44 |
| 59.1               | 42.42                      | 42.62 | 42.71 | 42.80 | 42.90 | 60.6               | 49.53                      | 49.63 | 49.72 | 49.81 | 49.91 |
| 59.2               | 42.99                      | 43.08 | 43.18 | 43.27 | 43.36 | 60.7               | 50.00                      | 50.09 | 50.19 | 50.28 | 50.37 |
| 59.3               | 43.46                      | 43.55 | 43.64 | 43.74 | 43.83 | 60.8               | 50.47                      | 50.56 | 50.65 | 50.75 | 50.84 |
| 59.4               | 43.92                      | 44.02 | 44.11 | 44.21 | 44.30 | 60.9               | 50.93                      | 51.03 | 51.12 | 51.21 | 51.31 |
| 59.5               | 44.39                      | 44.49 | 44.58 | 44.67 | 44.77 |                    |                            |       |       |       |       |

分度号: Cu100  $t = f(R_t)$ 

表 10.2d

| $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.08 | $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.08 |
|--------------------|----------------------------|------|------|------|------|--------------------|----------------------------|------|------|------|------|
|                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |      |      |      |      |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |      |      |      |      |
| 100.0              | 0.000                      | 0.05 | 0.09 | 0.14 | 0.19 | 101.6              | 3.74                       | 3.79 | 3.85 | 3.88 | 3.93 |
| 100.1              | 0.23                       | 0.28 | 0.33 | 0.37 | 0.42 | 101.7              | 3.97                       | 4.02 | 4.07 | 4.11 | 4.16 |
| 100.2              | 0.47                       | 0.51 | 0.56 | 0.61 | 0.65 | 101.8              | 4.21                       | 4.25 | 4.30 | 4.35 | 4.39 |
| 100.3              | 0.70                       | 0.75 | 0.79 | 0.84 | 0.89 | 101.9              | 4.44                       | 4.49 | 4.53 | 4.58 | 4.63 |
| 100.4              | 0.93                       | 0.98 | 1.03 | 1.07 | 1.12 | 102.0              | 4.67                       | 4.72 | 4.77 | 4.81 | 4.86 |
| 100.5              | 1.17                       | 1.21 | 1.26 | 1.31 | 1.36 | 102.1              | 4.91                       | 4.95 | 5.00 | 5.05 | 5.09 |
| 100.6              | 1.4                        | 1.45 | 1.50 | 1.54 | 1.59 | 102.2              | 5.14                       | 5.19 | 5.23 | 5.28 | 5.33 |
| 100.7              | 1.64                       | 1.68 | 1.73 | 1.78 | 1.82 | 102.3              | 5.37                       | 5.42 | 5.47 | 5.51 | 5.56 |
| 100.8              | 1.87                       | 1.92 | 1.96 | 2.01 | 2.06 | 102.4              | 5.61                       | 5.65 | 5.70 | 5.75 | 5.79 |
| 100.9              | 2.10                       | 2.15 | 2.20 | 2.24 | 2.29 | 102.5              | 5.84                       | 5.89 | 5.93 | 5.98 | 6.03 |
| 101.0              | 2.34                       | 2.38 | 2.43 | 2.48 | 2.52 | 102.6              | 6.07                       | 6.12 | 6.17 | 6.21 | 6.26 |
| 101.1              | 2.57                       | 2.62 | 2.66 | 2.71 | 2.76 | 102.7              | 6.31                       | 6.36 | 6.40 | 6.45 | 6.50 |
| 101.2              | 2.80                       | 2.85 | 2.90 | 2.94 | 2.99 | 102.8              | 6.54                       | 6.59 | 6.64 | 6.68 | 6.73 |
| 101.3              | 3.04                       | 3.08 | 3.13 | 3.18 | 3.22 | 102.9              | 6.78                       | 6.82 | 6.87 | 6.92 | 6.96 |
| 101.4              | 3.27                       | 3.32 | 3.36 | 3.41 | 3.46 | 103.0              | 7.01                       | 7.06 | 7.10 | 7.15 | 7.20 |
| 101.5              | 3.50                       | 3.55 | 3.60 | 3.64 | 3.69 |                    |                            |      |      |      |      |

续表10.2d

| $R_1[\Omega]$ | 0.00                | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  | $R_2[\Omega]$ | 00.0                | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|---------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|---------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
|               | $t[^\circ\text{C}]$ |       |       |       |       |               | $t[^\circ\text{C}]$ |       |       |       |       |
| 103.1         | 7.24                | 7.29  | 7.34  | 7.38  | 7.43  | 107.1         | 16.59               | 16.64 | 16.63 | 16.73 | 16.78 |
| 103.2         | 7.48                | 7.52  | 7.57  | 7.62  | 7.66  | 107.2         | 16.82               | 16.87 | 16.92 | 16.96 | 17.01 |
| 103.3         | 7.71                | 7.76  | 7.80  | 7.85  | 7.90  | 107.3         | 17.05               | 17.10 | 17.15 | 17.20 | 17.24 |
| 103.4         | 7.94                | 7.99  | 8.04  | 8.08  | 8.13  | 107.4         | 17.29               | 17.34 | 17.38 | 17.43 | 17.48 |
| 103.5         | 8.18                | 8.22  | 8.27  | 8.32  | 8.36  | 107.5         | 17.52               | 17.57 | 17.62 | 17.66 | 17.71 |
| 103.6         | 8.41                | 8.48  | 8.50  | 8.55  | 8.60  | 107.6         | 17.76               | 17.80 | 17.85 | 17.90 | 17.94 |
| 103.7         | 8.64                | 8.69  | 8.74  | 8.79  | 8.83  | 107.7         | 17.99               | 18.04 | 18.08 | 18.13 | 18.18 |
| 103.8         | 8.88                | 8.93  | 8.97  | 9.02  | 9.07  | 107.8         | 18.22               | 18.27 | 18.32 | 18.36 | 18.41 |
| 103.9         | 9.11                | 9.16  | 9.21  | 9.25  | 9.30  | 107.9         | 18.46               | 18.50 | 18.55 | 18.60 | 18.64 |
| 104.0         | 9.35                | 9.39  | 9.44  | 9.49  | 9.53  | 108.0         | 18.69               | 18.74 | 18.79 | 18.83 | 18.88 |
| 104.1         | 9.58                | 9.63  | 9.67  | 9.72  | 9.77  | 108.1         | 18.93               | 18.97 | 19.02 | 19.07 | 19.11 |
| 104.2         | 9.81                | 9.86  | 9.91  | 9.95  | 10.00 | 108.2         | 19.16               | 19.21 | 19.25 | 19.30 | 19.35 |
| 104.3         | 10.05               | 10.09 | 10.14 | 10.19 | 10.23 | 108.3         | 19.39               | 19.44 | 19.49 | 19.53 | 19.58 |
| 104.4         | 10.28               | 10.33 | 10.37 | 10.42 | 10.47 | 108.4         | 19.63               | 19.67 | 19.72 | 19.77 | 19.81 |
| 104.5         | 10.51               | 10.56 | 10.61 | 10.65 | 10.70 | 108.5         | 19.86               | 19.91 | 19.95 | 20.00 | 20.05 |
| 104.6         | 10.75               | 10.79 | 10.84 | 10.89 | 10.93 | 108.6         | 20.09               | 20.14 | 20.19 | 20.23 | 20.28 |
| 104.7         | 10.98               | 11.03 | 11.07 | 11.12 | 11.17 | 108.7         | 20.33               | 20.37 | 20.42 | 20.47 | 20.51 |
| 104.8         | 11.21               | 11.26 | 11.31 | 11.36 | 11.40 | 108.8         | 20.56               | 20.61 | 20.65 | 20.70 | 20.75 |
| 104.9         | 11.45               | 11.50 | 11.54 | 11.59 | 11.64 | 108.9         | 20.79               | 20.84 | 20.89 | 20.93 | 20.98 |
| 105.0         | 11.68               | 11.73 | 11.78 | 11.82 | 11.87 | 109.0         | 21.03               | 21.07 | 21.12 | 21.17 | 21.21 |
| 105.1         | 11.92               | 11.96 | 12.01 | 12.06 | 12.10 | 109.1         | 21.26               | 21.31 | 21.36 | 21.40 | 21.45 |
| 105.2         | 12.15               | 12.20 | 12.24 | 12.29 | 12.34 | 109.2         | 21.50               | 21.54 | 21.59 | 21.64 | 21.68 |
| 105.3         | 12.38               | 12.43 | 12.48 | 12.52 | 12.57 | 109.3         | 21.73               | 21.78 | 21.82 | 21.87 | 21.92 |
| 105.4         | 12.62               | 12.66 | 12.71 | 12.76 | 12.80 | 109.4         | 21.96               | 22.01 | 22.06 | 22.10 | 22.15 |
| 105.5         | 12.85               | 12.90 | 12.94 | 12.99 | 13.04 | 109.5         | 22.20               | 22.24 | 22.29 | 22.34 | 22.38 |
| 105.6         | 13.08               | 13.13 | 13.18 | 13.22 | 13.27 | 109.6         | 22.43               | 22.48 | 22.52 | 22.57 | 22.62 |
| 105.7         | 13.32               | 13.36 | 13.41 | 13.46 | 13.50 | 109.7         | 22.67               | 22.71 | 22.76 | 22.80 | 22.85 |
| 105.8         | 13.55               | 13.60 | 13.64 | 13.69 | 13.74 | 109.8         | 22.90               | 22.94 | 22.99 | 23.04 | 23.08 |
| 105.9         | 13.79               | 13.83 | 13.88 | 13.93 | 13.97 | 109.9         | 23.13               | 23.18 | 23.22 | 23.27 | 23.32 |
| 106.0         | 14.02               | 14.07 | 14.11 | 14.16 | 14.21 | 110.0         | 23.36               | 23.41 | 23.46 | 23.50 | 23.55 |
| 106.1         | 14.25               | 14.30 | 14.35 | 14.39 | 14.44 | 110.1         | 23.60               | 23.64 | 23.69 | 23.74 | 23.79 |
| 106.2         | 14.49               | 14.53 | 14.58 | 14.63 | 14.67 | 110.2         | 23.83               | 23.88 | 23.93 | 23.97 | 24.02 |
| 106.3         | 14.72               | 14.77 | 14.81 | 14.86 | 14.91 | 110.3         | 24.07               | 24.11 | 24.16 | 24.21 | 24.25 |
| 106.4         | 14.95               | 15.00 | 15.05 | 15.09 | 15.14 | 110.4         | 24.30               | 24.35 | 24.39 | 24.44 | 24.49 |
| 106.5         | 15.19               | 15.23 | 15.28 | 15.33 | 15.37 | 110.5         | 24.53               | 24.58 | 24.63 | 24.67 | 24.72 |
| 106.6         | 15.42               | 15.47 | 15.51 | 15.56 | 15.61 | 110.6         | 24.77               | 24.81 | 24.86 | 24.91 | 24.95 |
| 106.7         | 15.65               | 15.70 | 15.75 | 15.79 | 15.84 | 110.7         | 25.00               | 25.05 | 25.09 | 25.14 | 25.19 |
| 106.8         | 15.89               | 15.93 | 15.98 | 16.03 | 16.07 | 110.8         | 25.23               | 25.28 | 25.33 | 25.37 | 25.42 |
| 106.9         | 16.12               | 16.17 | 16.21 | 16.26 | 16.31 | 110.9         | 25.47               | 25.51 | 25.56 | 25.61 | 25.65 |
| 107.0         | 16.36               | 16.40 | 16.45 | 16.50 | 16.54 | 111.0         | 25.70               | 25.75 | 25.79 | 25.84 | 25.89 |

续表 10.2d

| $R_1$ [ $\Omega$ ] | 0.00                         | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  | $R_2$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|--------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | $R_1$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |
| 111.1              | 25.93                        | 25.98 | 26.03 | 26.07 | 26.12 | 115.1              | 35.23                      | 35.33 | 35.37 | 35.42 | 35.47 |
| 111.2              | 26.17                        | 26.21 | 26.26 | 26.31 | 26.36 | 115.2              | 35.51                      | 35.56 | 35.61 | 35.65 | 35.70 |
| 111.3              | 26.40                        | 26.45 | 26.50 | 26.54 | 26.59 | 115.3              | 35.75                      | 35.79 | 35.84 | 35.89 | 35.93 |
| 111.4              | 26.64                        | 26.68 | 26.73 | 26.78 | 26.82 | 115.4              | 35.98                      | 36.03 | 36.07 | 36.12 | 36.17 |
| 111.5              | 26.87                        | 26.92 | 26.96 | 27.01 | 27.06 | 115.5              | 36.21                      | 36.26 | 36.31 | 36.36 | 36.40 |
| 111.6              | 27.10                        | 27.15 | 27.20 | 27.24 | 27.29 | 115.6              | 36.45                      | 36.50 | 36.54 | 36.59 | 36.61 |
| 111.7              | 27.34                        | 27.38 | 27.43 | 27.48 | 27.52 | 115.7              | 36.68                      | 36.73 | 36.78 | 36.82 | 36.87 |
| 111.8              | 27.57                        | 27.62 | 27.66 | 27.71 | 27.76 | 115.8              | 36.92                      | 36.96 | 37.01 | 37.06 | 37.10 |
| 111.9              | 27.80                        | 27.85 | 27.90 | 27.94 | 27.99 | 115.9              | 37.15                      | 37.20 | 37.24 | 37.29 | 37.34 |
| 112.0              | 28.04                        | 28.08 | 28.13 | 28.18 | 28.22 | 116.0              | 37.38                      | 37.43 | 37.48 | 37.52 | 37.57 |
| 112.1              | 28.27                        | 28.32 | 28.36 | 28.41 | 28.46 | 116.1              | 37.62                      | 37.66 | 37.71 | 37.76 | 37.80 |
| 112.2              | 28.50                        | 28.55 | 28.60 | 28.64 | 28.69 | 116.2              | 37.85                      | 37.90 | 37.94 | 37.99 | 38.04 |
| 112.3              | 28.74                        | 28.79 | 28.83 | 28.88 | 28.93 | 116.3              | 38.08                      | 38.13 | 38.18 | 38.22 | 38.27 |
| 112.4              | 28.97                        | 29.02 | 29.07 | 29.11 | 29.16 | 116.4              | 38.32                      | 38.36 | 38.41 | 38.46 | 38.50 |
| 112.5              | 29.21                        | 29.25 | 29.30 | 29.35 | 29.39 | 116.5              | 38.55                      | 38.60 | 38.64 | 38.69 | 38.74 |
| 112.6              | 29.44                        | 29.49 | 29.53 | 29.58 | 29.63 | 116.6              | 38.79                      | 38.83 | 38.88 | 38.93 | 38.97 |
| 112.7              | 29.67                        | 29.72 | 29.77 | 29.81 | 29.86 | 116.7              | 39.02                      | 39.07 | 39.11 | 39.16 | 39.21 |
| 112.8              | 29.91                        | 29.95 | 30.00 | 30.05 | 30.09 | 116.8              | 39.25                      | 39.30 | 39.35 | 39.39 | 39.44 |
| 112.9              | 30.14                        | 30.19 | 30.23 | 30.28 | 30.33 | 116.9              | 39.49                      | 39.53 | 39.58 | 39.63 | 39.67 |
| 113.0              | 30.37                        | 30.42 | 30.47 | 30.51 | 30.56 | 117.0              | 39.72                      | 39.77 | 39.81 | 39.86 | 39.91 |
| 113.1              | 30.61                        | 30.65 | 30.70 | 30.75 | 30.79 | 117.1              | 39.95                      | 40.00 | 40.05 | 40.09 | 40.14 |
| 113.2              | 30.84                        | 30.89 | 30.93 | 30.98 | 31.03 | 117.2              | 40.19                      | 40.23 | 40.28 | 40.33 | 40.37 |
| 113.3              | 31.07                        | 31.12 | 31.17 | 31.21 | 31.26 | 117.3              | 40.42                      | 40.47 | 40.51 | 40.56 | 40.61 |
| 113.4              | 31.31                        | 31.36 | 31.40 | 31.45 | 31.50 | 117.4              | 40.65                      | 40.70 | 40.75 | 40.79 | 40.84 |
| 113.5              | 31.54                        | 31.59 | 31.64 | 31.68 | 31.73 | 117.5              | 40.89                      | 40.93 | 40.98 | 41.03 | 41.07 |
| 113.6              | 31.78                        | 31.82 | 31.87 | 31.92 | 31.96 | 117.6              | 41.12                      | 41.17 | 41.21 | 41.26 | 41.31 |
| 113.7              | 32.01                        | 32.06 | 32.10 | 32.15 | 32.20 | 117.7              | 41.36                      | 41.40 | 41.45 | 41.50 | 41.54 |
| 113.8              | 32.24                        | 32.29 | 32.34 | 32.38 | 32.43 | 117.8              | 41.59                      | 41.64 | 41.68 | 41.73 | 41.78 |
| 113.9              | 32.48                        | 32.52 | 32.57 | 32.62 | 32.66 | 117.9              | 41.82                      | 41.87 | 41.92 | 41.96 | 42.01 |
| 114.0              | 32.71                        | 32.76 | 32.80 | 32.85 | 32.90 | 118.0              | 42.06                      | 42.10 | 42.15 | 42.20 | 42.24 |
| 114.1              | 32.94                        | 32.99 | 33.04 | 33.08 | 33.13 | 118.1              | 42.29                      | 42.34 | 42.38 | 42.43 | 42.48 |
| 114.2              | 33.18                        | 33.22 | 33.27 | 33.32 | 33.36 | 118.2              | 42.52                      | 42.57 | 42.62 | 42.66 | 42.71 |
| 114.3              | 33.41                        | 33.46 | 33.50 | 33.55 | 33.60 | 118.3              | 42.76                      | 42.80 | 42.85 | 42.90 | 42.94 |
| 114.4              | 33.64                        | 33.69 | 33.74 | 33.79 | 33.83 | 118.4              | 42.99                      | 43.04 | 43.08 | 43.13 | 43.18 |
| 114.5              | 33.88                        | 33.93 | 33.97 | 34.02 | 34.07 | 118.5              | 43.22                      | 43.27 | 43.32 | 43.36 | 43.41 |
| 114.6              | 34.11                        | 34.16 | 34.21 | 34.25 | 34.30 | 118.6              | 43.46                      | 43.50 | 43.55 | 43.60 | 43.64 |
| 114.7              | 34.35                        | 34.39 | 34.44 | 34.49 | 34.53 | 118.7              | 43.69                      | 43.74 | 43.79 | 43.83 | 43.88 |
| 114.8              | 34.58                        | 34.63 | 34.67 | 34.72 | 34.77 | 118.8              | 43.93                      | 43.97 | 44.02 | 44.07 | 44.11 |
| 114.9              | 34.81                        | 34.86 | 34.91 | 34.95 | 35.00 | 118.9              | 44.16                      | 44.21 | 44.25 | 44.3  | 44.35 |
| 115.0              | 35.05                        | 35.09 | 35.14 | 35.19 | 35.23 | 119.0              | 44.39                      | 44.44 | 44.49 | 44.53 | 44.58 |

续表 10 2d

| $R_i$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  | $R_i$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |
| 119.1              | 44.63                      | 44.67 | 44.72 | 44.77 | 44.81 | 120.6              | 48.13                      | 48.18 | 48.22 | 48.27 | 48.32 |
| 119.2              | 44.86                      | 44.91 | 44.95 | 45.00 | 45.05 | 120.7              | 48.36                      | 48.41 | 48.46 | 48.50 | 48.55 |
| 119.3              | 45.09                      | 45.14 | 45.19 | 45.23 | 45.28 | 120.8              | 48.60                      | 48.64 | 48.69 | 48.74 | 48.79 |
| 119.4              | 45.33                      | 45.37 | 45.42 | 45.47 | 45.51 | 120.9              | 48.83                      | 48.88 | 48.93 | 48.97 | 49.02 |
| 119.5              | 45.56                      | 45.61 | 45.65 | 45.70 | 45.75 | 121.0              | 49.07                      | 49.11 | 49.15 | 49.21 | 49.25 |
| 119.6              | 45.79                      | 45.84 | 45.89 | 45.93 | 45.98 | 121.1              | 49.30                      | 49.35 | 49.39 | 49.44 | 49.49 |
| 119.7              | 46.03                      | 46.07 | 46.12 | 46.17 | 46.21 | 121.2              | 49.53                      | 49.58 | 49.63 | 49.67 | 49.72 |
| 119.8              | 46.26                      | 46.31 | 46.36 | 46.40 | 46.45 | 121.3              | 49.77                      | 49.81 | 49.86 | 49.91 | 49.95 |
| 119.9              | 46.50                      | 46.54 | 46.59 | 46.64 | 46.68 | 121.4              | 50.00                      | 50.05 | 50.09 | 50.14 | 50.19 |
| 120.0              | 46.73                      | 46.78 | 46.82 | 46.87 | 46.92 | 121.5              | 50.23                      | 50.28 | 50.33 | 50.37 | 50.42 |
| 120.1              | 46.96                      | 47.01 | 47.06 | 47.10 | 47.15 | 121.6              | 50.47                      | 50.51 | 50.56 | 50.61 | 50.65 |
| 120.2              | 47.20                      | 47.24 | 47.29 | 47.34 | 47.38 | 121.7              | 50.70                      | 50.75 | 50.79 | 50.84 | 50.89 |
| 120.3              | 47.43                      | 47.48 | 47.52 | 47.57 | 47.62 | 121.8              | 50.93                      | 50.98 | 51.03 | 51.07 | 51.12 |
| 120.4              | 47.66                      | 47.71 | 47.76 | 47.80 | 47.85 | 121.9              | 51.17                      | 51.21 | 51.26 | 51.31 | 51.36 |
| 120.5              | 47.90                      | 47.94 | 47.99 | 48.04 | 48.08 | 122.0              | 51.40                      | 51.45 | 51.50 | 51.54 | 51.59 |

分度号: G 铜电阻  $t = f(R_i)$ 

表 10.2e

| $R_i$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.08 | $R_i$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|--------------------|----------------------------|------|------|------|------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |      |      |      |      |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |
| 53.0               | 0.00                       | 0.09 | 0.18 | 0.27 | 0.36 | 54.6               | 7.10                       | 7.19  | 7.28  | 7.37  | 7.46  |
| 53.1               | 0.44                       | 0.53 | 0.62 | 0.71 | 0.80 | 54.7               | 7.55                       | 7.64  | 7.72  | 7.81  | 7.90  |
| 53.2               | 0.89                       | 0.98 | 1.07 | 1.15 | 1.24 | 54.8               | 7.99                       | 8.08  | 8.17  | 8.26  | 8.35  |
| 53.3               | 1.33                       | 1.42 | 1.51 | 1.60 | 1.69 | 54.9               | 8.44                       | 8.52  | 8.61  | 8.70  | 8.79  |
| 53.4               | 1.78                       | 1.86 | 1.95 | 2.04 | 2.13 | 55.0               | 8.88                       | 8.97  | 9.05  | 9.15  | 9.23  |
| 53.5               | 2.22                       | 2.31 | 2.40 | 2.49 | 2.57 | 55.1               | 9.32                       | 9.41  | 9.50  | 9.59  | 9.68  |
| 53.6               | 2.66                       | 2.75 | 2.84 | 2.93 | 3.02 | 55.2               | 9.77                       | 9.86  | 9.94  | 10.03 | 10.12 |
| 53.7               | 3.11                       | 3.20 | 3.29 | 3.37 | 3.46 | 55.3               | 10.21                      | 10.30 | 10.39 | 10.48 | 10.57 |
| 53.8               | 3.55                       | 3.64 | 3.73 | 3.82 | 3.91 | 55.4               | 10.65                      | 10.74 | 10.83 | 10.92 | 11.01 |
| 53.9               | 4.00                       | 4.08 | 4.17 | 4.26 | 4.35 | 55.5               | 10.10                      | 11.19 | 11.28 | 11.37 | 11.45 |
| 54.0               | 0.44                       | 4.53 | 4.62 | 4.71 | 4.79 | 55.6               | 11.54                      | 11.63 | 11.72 | 11.81 | 11.90 |
| 54.1               | 4.88                       | 4.97 | 5.05 | 5.15 | 5.24 | 55.7               | 11.99                      | 12.08 | 12.16 | 12.25 | 12.34 |
| 54.2               | 5.33                       | 5.42 | 5.50 | 5.59 | 5.68 | 55.8               | 12.43                      | 12.52 | 12.61 | 12.70 | 12.79 |
| 54.3               | 5.77                       | 5.86 | 5.95 | 6.04 | 6.13 | 55.9               | 12.87                      | 12.96 | 13.05 | 13.14 | 13.23 |
| 54.4               | 6.22                       | 6.30 | 6.39 | 6.48 | 6.57 | 56.0               | 13.32                      | 13.41 | 13.50 | 13.58 | 13.67 |
| 54.5               | 6.66                       | 6.75 | 6.84 | 6.93 | 7.01 |                    |                            |       |       |       |       |

续表10.2e

| $R_1$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  | $R_2$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |
| 56.1               | 13.76                      | 13.85 | 13.94 | 14.03 | 14.12 | 60.1               | 31.52                      | 31.61 | 31.70 | 31.79 | 31.88 |
| 56.2               | 14.21                      | 14.30 | 14.38 | 14.47 | 14.56 | 60.2               | 31.96                      | 32.05 | 32.14 | 32.23 | 32.32 |
| 56.3               | 14.66                      | 14.74 | 14.83 | 14.92 | 15.01 | 60.3               | 32.41                      | 32.50 | 32.59 | 32.67 | 32.76 |
| 56.4               | 15.09                      | 15.18 | 15.27 | 15.36 | 15.45 | 60.4               | 32.85                      | 32.94 | 33.03 | 33.12 | 33.21 |
| 56.5               | 15.54                      | 15.63 | 15.72 | 15.80 | 15.89 | 60.5               | 33.30                      | 33.39 | 33.47 | 33.56 | 33.65 |
| 56.6               | 15.98                      | 16.07 | 16.16 | 16.25 | 16.34 | 60.6               | 34.74                      | 33.83 | 33.92 | 34.01 | 34.10 |
| 56.7               | 16.43                      | 16.51 | 16.60 | 16.69 | 16.78 | 60.7               | 34.18                      | 34.27 | 34.36 | 34.45 | 34.54 |
| 56.8               | 16.87                      | 16.96 | 17.05 | 17.14 | 17.23 | 60.8               | 34.63                      | 34.72 | 34.81 | 34.89 | 34.98 |
| 56.9               | 17.31                      | 17.40 | 17.49 | 17.58 | 17.67 | 60.9               | 35.07                      | 35.16 | 35.25 | 35.34 | 35.43 |
| 57.0               | 17.76                      | 17.85 | 17.94 | 18.02 | 18.11 | 61.0               | 35.52                      | 35.60 | 35.69 | 35.78 | 35.87 |
| 57.1               | 18.20                      | 18.29 | 18.38 | 18.47 | 18.56 | 61.1               | 35.96                      | 36.05 | 36.14 | 36.23 | 36.32 |
| 57.2               | 18.65                      | 18.73 | 18.82 | 18.91 | 19.00 | 61.2               | 36.40                      | 36.49 | 36.58 | 36.67 | 36.76 |
| 57.3               | 19.09                      | 19.18 | 19.27 | 19.36 | 19.45 | 61.3               | 36.85                      | 36.94 | 37.03 | 37.11 | 37.20 |
| 57.4               | 19.53                      | 19.62 | 19.71 | 19.80 | 19.89 | 61.4               | 37.29                      | 37.38 | 37.47 | 37.56 | 37.65 |
| 57.5               | 19.98                      | 20.07 | 20.16 | 20.24 | 20.33 | 61.5               | 37.74                      | 37.82 | 37.91 | 38.00 | 38.09 |
| 57.6               | 20.42                      | 20.51 | 20.60 | 20.69 | 20.78 | 61.6               | 38.18                      | 38.27 | 38.36 | 38.45 | 38.53 |
| 57.7               | 20.87                      | 20.95 | 21.04 | 21.13 | 21.22 | 61.7               | 38.62                      | 38.71 | 38.80 | 38.89 | 38.98 |
| 57.8               | 21.31                      | 21.40 | 21.49 | 21.58 | 21.66 | 61.8               | 39.07                      | 39.16 | 39.25 | 39.33 | 39.42 |
| 57.9               | 21.76                      | 21.84 | 21.93 | 22.02 | 22.11 | 61.9               | 39.51                      | 39.60 | 39.69 | 39.78 | 39.87 |
| 58.0               | 22.20                      | 22.29 | 22.38 | 22.46 | 22.55 | 62.0               | 39.96                      | 40.04 | 40.13 | 40.22 | 40.31 |
| 58.1               | 22.64                      | 22.73 | 22.82 | 22.91 | 23.00 | 62.1               | 40.40                      | 40.49 | 40.58 | 40.67 | 40.75 |
| 58.2               | 23.09                      | 23.17 | 23.26 | 23.35 | 23.44 | 62.2               | 40.84                      | 40.93 | 41.02 | 41.11 | 41.20 |
| 58.3               | 23.53                      | 23.62 | 23.71 | 23.80 | 23.88 | 62.3               | 41.29                      | 41.38 | 41.47 | 41.55 | 41.64 |
| 58.4               | 23.97                      | 24.06 | 24.15 | 24.24 | 24.33 | 62.4               | 41.73                      | 41.82 | 41.91 | 42.00 | 42.09 |
| 58.5               | 24.42                      | 24.51 | 24.59 | 24.68 | 24.77 | 62.5               | 42.18                      | 42.26 | 42.35 | 42.44 | 42.53 |
| 58.6               | 24.86                      | 24.95 | 25.04 | 25.13 | 25.22 | 62.6               | 42.62                      | 42.71 | 42.80 | 42.89 | 42.97 |
| 58.7               | 25.31                      | 25.39 | 25.48 | 25.57 | 25.66 | 62.7               | 43.06                      | 43.15 | 43.24 | 43.33 | 43.42 |
| 58.8               | 25.75                      | 25.84 | 25.93 | 26.02 | 26.10 | 62.8               | 43.51                      | 43.60 | 43.68 | 43.77 | 43.86 |
| 58.9               | 26.19                      | 26.28 | 26.37 | 26.46 | 26.55 | 62.9               | 43.95                      | 44.04 | 44.13 | 44.22 | 44.31 |
| 59.0               | 26.64                      | 26.73 | 26.81 | 26.90 | 26.99 | 63.0               | 44.40                      | 44.48 | 44.57 | 44.66 | 44.75 |
| 59.1               | 27.08                      | 27.17 | 27.26 | 27.35 | 27.44 | 63.1               | 44.84                      | 44.93 | 45.02 | 45.11 | 45.19 |
| 59.2               | 27.52                      | 27.61 | 27.70 | 27.79 | 27.88 | 63.2               | 45.28                      | 45.37 | 45.46 | 45.55 | 45.64 |
| 59.3               | 27.97                      | 28.06 | 28.15 | 28.24 | 28.32 | 63.3               | 45.73                      | 45.82 | 45.90 | 45.99 | 46.08 |
| 59.4               | 28.41                      | 28.50 | 28.59 | 28.68 | 28.77 | 63.4               | 46.17                      | 46.26 | 46.35 | 46.44 | 46.53 |
| 59.5               | 28.86                      | 28.95 | 29.03 | 29.12 | 29.21 | 63.5               | 46.61                      | 46.70 | 46.79 | 46.88 | 46.97 |
| 59.6               | 29.30                      | 29.39 | 29.48 | 29.57 | 29.66 | 63.6               | 47.06                      | 47.15 | 47.24 | 47.33 | 47.41 |
| 59.7               | 29.74                      | 29.83 | 29.92 | 30.01 | 30.10 | 63.7               | 47.50                      | 47.59 | 47.68 | 47.77 | 47.86 |
| 59.8               | 30.19                      | 30.28 | 30.37 | 30.46 | 30.54 | 63.8               | 47.95                      | 48.04 | 48.12 | 48.21 | 48.30 |
| 59.9               | 30.63                      | 30.72 | 30.81 | 30.90 | 30.99 | 63.9               | 48.39                      | 48.48 | 48.57 | 48.66 | 48.75 |
| 60.0               | 31.08                      | 31.17 | 31.26 | 31.34 | 31.43 | 64.0               | 48.83                      | 48.92 | 49.01 | 49.10 | 49.19 |

续表 10.2e

| $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  | $R_t$ [ $\Omega$ ] | 0.00                       | 0.02  | 0.04  | 0.06  | 0.08  |
|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |                    | $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |       |       |       |       |
| 64.1               | 49.28                      | 49.37 | 49.46 | 49.54 | 49.63 | 64.4               | 50.61                      | 50.70 | 50.79 | 50.88 | 50.97 |
| 64.2               | 49.72                      | 49.81 | 49.90 | 49.99 | 50.08 | 64.5               | 51.05                      | 51.14 | 51.23 | 51.32 | 51.41 |
| 64.3               | 50.17                      | 50.26 | 50.34 | 50.43 | 50.52 |                    |                            |       |       |       |       |

图 10.5a 是测室温热电阻的外形。图 10.5b 是带有套管的热电阻的外形之一，它用于测量管内或容器内的介质温度，选用这类热电阻时，还应根据被测介质的性质工作压力和套管埋入深度等，对套管提出相应要求。

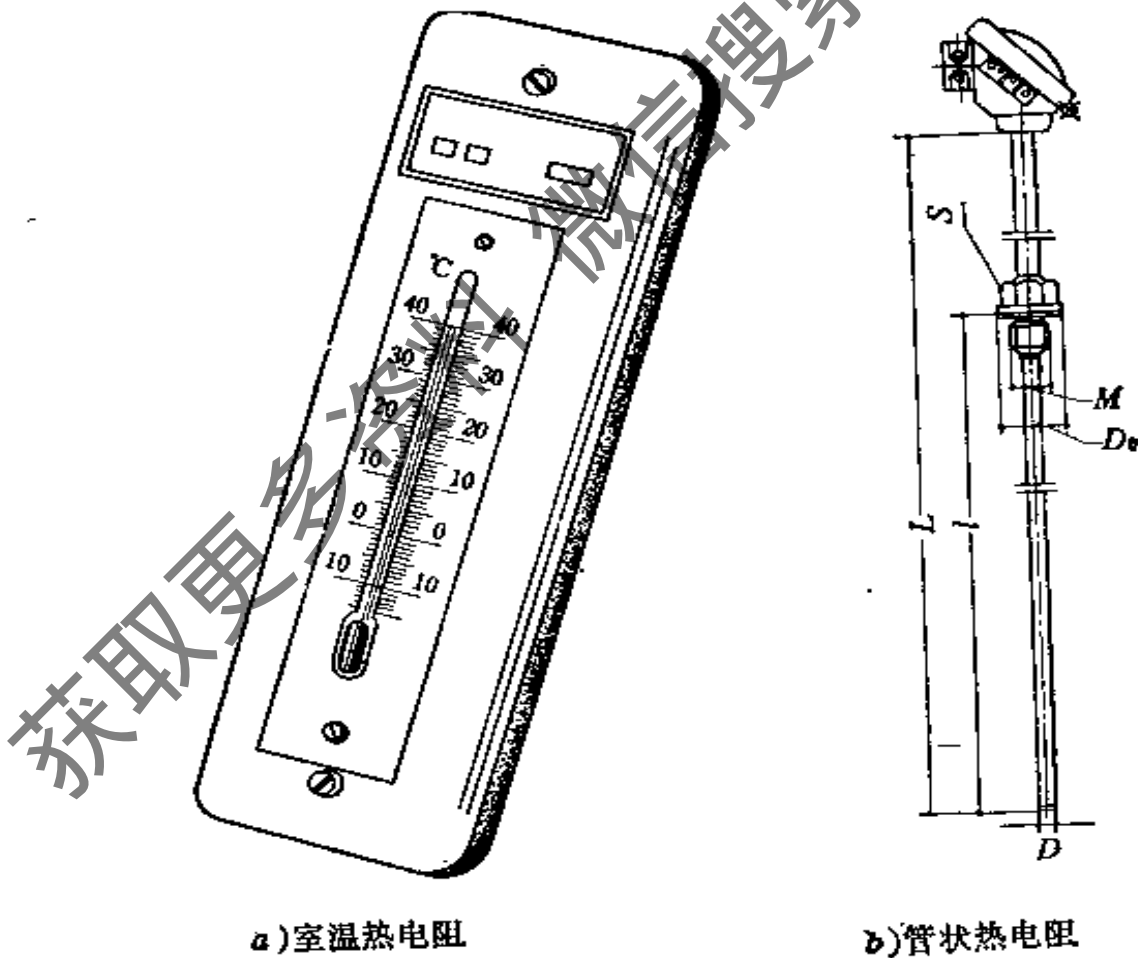


图 10.5 热电阻外形

热电阻温度计的二次仪表，可以用直流平衡电桥测出其电阻值，但通过热电阻的电流最大不得超过 5 [mA]。然后，按其分度号用公式算出相应的被测介质温度，或按由公式计算制作的表格查得温度。也可配置与热电阻相匹配的动圈式温度指示仪表，或配置带有温度记录的单笔、双笔或多点打印自动平衡电桥等。在选用时应提出仪表型号、测温范围、热电阻分度号以及记录的点数、有些仪表还带有温度调节装置。

为了消除热电阻与二次仪表连接时，由于连接导线的长度及周围环境温度的影响带来的误差，一般采用如图 10.6 所示的三线制进行连接。

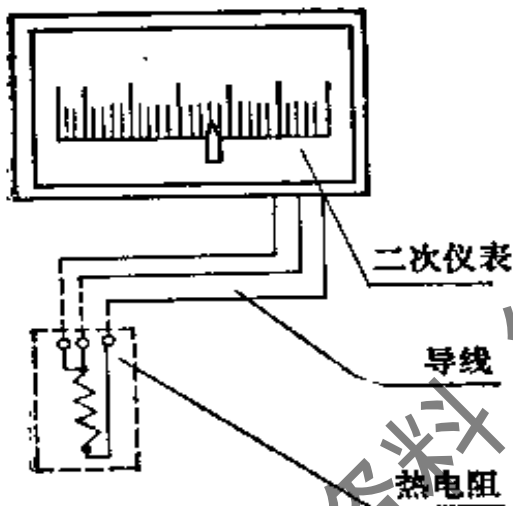


图 10.6 热电阻与二次仪表的三线制连接

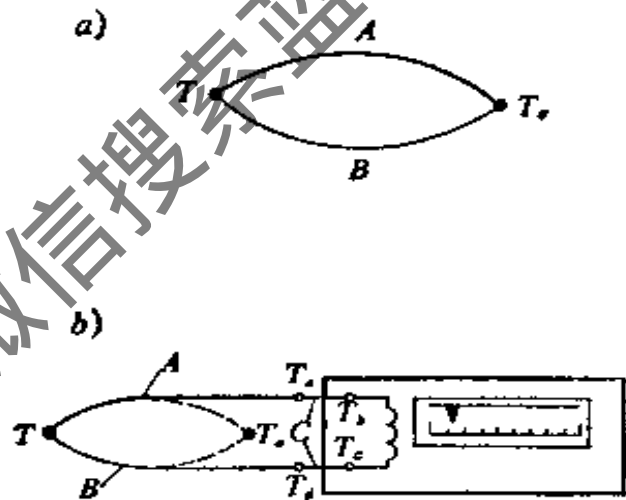


图 10.7 热电偶原理图

#### 4. 热电偶温度计

热电偶温度计也是一种温度的电测仪表。由物理知识可知，当两根自由电子密度不同的金属丝焊接成一回路时（如图 10.7a），若两个焊点温度不同，将产生热电势。热电势的大小仅与选用的两种材料和接点温度有关，而与材料截面的大小与长度以及沿热电偶长度的温度分布无关。而且当冷接点  $T_0$ （如图 10.7b 所示）被测点仪表的铜导线 C 所替代，使引入带有温度为  $T_c$ 、 $T_b$ 、 $T_a$ 、 $T_0$  的新接点。如果这些接点的温度与原来冷接点的温度  $T_0$  相

热电偶技术数据

表 10.3a

| 热电偶名称                | 分度号  | 热电材料 |  | 电阻率<br>20[°C]时<br>[ $\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$ ] | 100[°C]时电势<br>(参考点为<br>0[°C])<br>[mV] | 使用温度<br>[°C] |      | 允许误差 [°C]  |      |            |             |  |              |
|----------------------|------|------|--|---|---------------------------------------|--------------|------|------------|------|------------|-------------|--|--------------|
|                      |      | 极性   | 识别<br>化学成分                                   |   |                                       | 长期           | 短期   | 温度<br>[°C] | 允许误差 | 温度<br>[°C] | 允许误差        |  |              |
| 铂铑-铂                 | LB-3 | 正    | 较硬<br>90% Pt,<br>10% Rh                      | 0.24  | 0.643                                 | 1300         | 1600 | $\leq 600$ |      | $> 600$    | $\pm 2.4\%$ |  | $\pm 0.4\%$  |
|                      |      | 负    | 较软<br>100% Pt                                | 0.16  |                                       |              |      |            |      |            |             |  |              |
| 镍铬-镍<br>硅(镍铬-<br>镍铝) | EU-2 | 正    | 不杂质<br>9~10% Cr<br>0.4% Si, 其余 Ni            | 0.68  | 4.10                                  | 1000         | 1300 | $\leq 400$ |      | $< 400$    | $\pm 4\%$   |  | $\pm 0.75\%$ |
|                      |      | 负    | 稍杂质<br>2.5~3% Si<br>Co $\leq 0.6\%$<br>其余 Ni | 0.25~0.33   |                                       |              |      |            |      |            |             |  |              |



續表 10.3a

| 热电偶名称     | 分度号   | 蒸电极材料 |     | 电阻率<br>20°C 时<br>$[\frac{\Omega \cdot m^2}{m}]$ | 100[°C]<br>时电势<br>(参考接<br>点为<br>[°C])<br>[mV] | 使用温度<br>[°C] |        | 允许误差 [°C]  |            |                    |              |
|-----------|-------|-------|-----|---|---|--------------|--------|------------|------------|--------------------|--------------|
|           |       | 极性    | 识别  |   |   | 化学成分         | 长<br>期 | 短<br>期     | 温度<br>[°C] | 允许误差               | 温度<br>[°C]   |
| 镍铬-考<br>铜 | EA-2  | 正     | 色较暗 | 9~10% Cr<br>0.4% Si,<br>其余 Ni                   | 6.45  | 600          | 800    | $\leq 400$ | $\pm 1\%$  | $> 400$            | $\pm 1\%$    |
|           |       | 负     | 银白色 | 58% Cu,<br>44% Ni                               | 0.47  |              |        |            |            |                    |              |
| 铜-康铜      | CK(I) | 正     | 红色  | 100% Cu,  | 4.277   | 200          | 300    | $\sim 200$ | $\pm 1\%$  | $\sim 40 \sim 400$ | $\pm 0.75\%$ |
|           |       | 负     | 银白色 | 55% Cu,<br>45% Ni                               | 0.49  |              |        |            |            |                    |              |

获取更多资料 微信搜索 索蓝领星球

分度号: CK 铜-康铜热电偶分度表(参考端温度为0[°C]) ·表 10.3b

| 温 度   | 0          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t[°C] | 热 电 势 [mV] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 0     | 0.000      | 0.039 | 0.078 | 0.117 | 0.156 | 0.195 | 0.234 | 0.273 | 0.312 | 0.351 |
| 10    | 0.391      | 0.430 | 0.470 | 0.510 | 0.549 | 0.589 | 0.629 | 0.669 | 0.709 | 0.749 |
| 20    | 0.789      | 0.830 | 0.870 | 0.911 | 0.951 | 0.992 | 1.032 | 1.073 | 1.114 | 1.155 |
| 30    | 1.196      | 1.237 | 1.279 | 1.320 | 1.361 | 1.403 | 1.444 | 1.486 | 1.528 | 1.569 |
| 40    | 1.611      | 1.653 | 1.695 | 1.738 | 1.780 | 1.822 | 1.865 | 1.907 | 1.950 | 1.992 |
| 50    | 2.035      | 2.078 | 2.121 | 2.164 | 2.207 | 2.250 | 2.294 | 2.337 | 2.380 | 2.424 |
| 60    | 2.467      | 2.511 | 2.555 | 2.599 | 2.643 | 2.687 | 2.731 | 2.775 | 2.819 | 2.864 |
| 70    | 3.908      | 2.953 | 2.997 | 3.042 | 3.087 | 3.131 | 3.176 | 3.221 | 3.226 | 3.312 |
| 80    | 3.357      | 3.402 | 3.447 | 3.493 | 3.538 | 3.584 | 3.630 | 3.676 | 3.721 | 3.767 |
| 90    | 3.813      | 3.859 | 3.906 | 3.952 | 3.998 | 4.044 | 4.091 | 4.137 | 4.184 | 4.231 |
| 100   | 4.277      | 4.324 | 4.371 | 4.418 | 4.465 | 4.512 | 4.559 | 4.607 | 4.654 | 4.701 |

同, 则总的热电势不变。

常用热电偶的主要技术数据见表 10.3。

在选用热电偶时, 应根据需要提出热电偶名称、分度号、总长、埋入深度以及外套管材料等要求。

根据热电偶的测温原理可知, 仅当热电偶冷端温度不变时, 热电势是被测温度的单值函数。因此在实验室条件下常将冷端置于冰点恒温器中使冷端温度恒处于 0[°C] 进行测温。在工业中常用冷端温度补偿器与热电偶匹配使用。冷端温度补偿器是一个外

电源，用它所产生的电势以补偿由于冷端温度偏离  $0[^\circ\text{C}]$  时所产生的误差。因此连接时，它的输出端应有极性地与热电偶回路串联连接，如图 10.8 所示。当用贵金属热电偶(铂铑-铂)测温时，往往使用在  $0\sim 100[^\circ\text{C}]$  范围内具有与被连接的热电偶相同热电特性的廉价金属(如镍铬-考铜)作为导线，将冷端引伸至较远且温度较稳定的场所与二次仪表相连。从而极大地减小贵金属使用量。使用这种补偿导线时应注意极性，而且热电偶与补偿导线连接处的温度不应超过  $100[^\circ\text{C}]$ 。

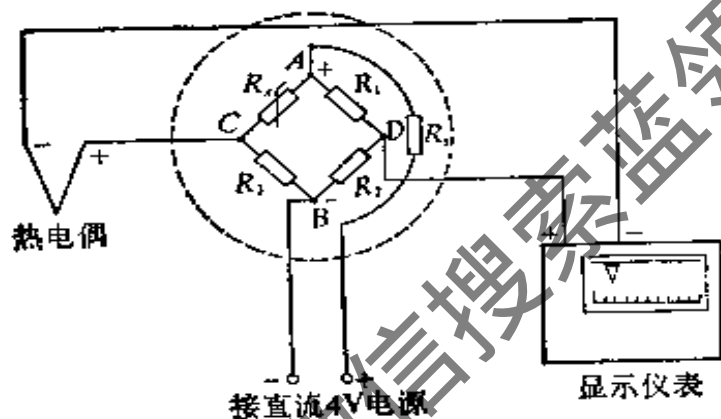


图 10.8 冷端温度补偿器线路及其与热电偶的连接

热电偶温度计所使用的二次仪表，可采用电位差计以测出热电偶所产生的热电势。根据这热电势的值查出该分度号热电偶分度表中所示的温度值，应注意的是表中自由端温度为  $0[^\circ\text{C}]$ 。使用不同等级的电位差计可以得出不同的测温准确度。自动电子电位差计可供单点或多点测量、记录和调节温度或电势参数。工业中常用高阻动圈式仪表或数字式毫伏计测热电势或直接显示温度值。

如二次仪表以温度定标，而冷端温度不为  $0[^\circ\text{C}]$  时，简单地可以根据实测的冷端温度对示值进行修正。不论采用何种以温度标示的二次代表，都必须与所选用的热电偶分度号相匹配。

#### 5. 测温一次仪表的安装

在测量室内、外空气温度时，应将一次仪表安置在空气流通

且有代表性的测温点，并应注意防止周围的冷、热辐射等影响。

在管内测温时，应尽可能减小一次仪表本身与外界的热交换（即应将露出部分用绝热材料保温），为了使一次仪表与被测介质间能充分地进行热交换，应将它安置在介质流速较大处为妥，感温部分必须全部插入管内。其一般安装方式可参阅图 10.9。

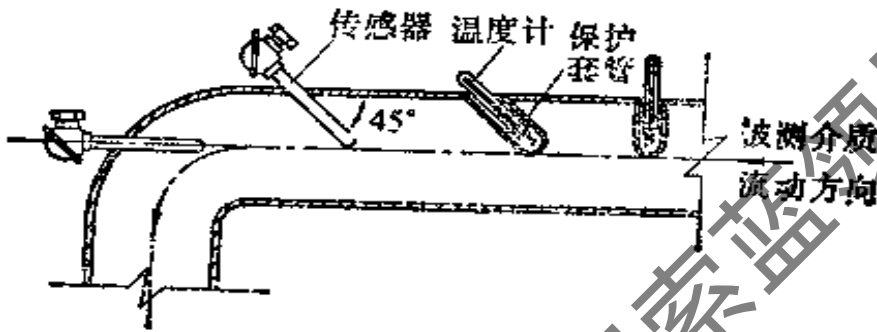


图 10.9 传感器的安装方式

## 6. 温度计的示值校验

温度计出厂时一般都按国家计量检定规程作了相应的检定。有时为了某种需要或对自制铜-康铜热电偶的示值进行标定时，要自己做这一工作，这时应参考有关计量检定规程（如对铜-康铜热电偶可参照JJG368—84）的要求进行。通常的做法是：将被校温度计与比被校温度计高一等级（不是分度值高一等级）有修正值的温度计放在恒温源（如恒温水槽、冰瓶等）的相同位置，迅速读出两者的稳定温度，进行对比校验，并要改变几个温度，以获取几个对比数据。对铜-康铜热电偶，则可按测温范围等分若干个温度点，用二次仪表（电位差计或数字式毫伏计）测出在对比温度下的热电势，并整理成温度与热电势的关系曲线，供以后用热电偶测温时使用。所有温度计都应按照规程要求定期复检。

### 10.1.2 相对湿度的测量

空气相对湿度这一参数，在空调工程中与空气温度一样具有重要意义。对它的测量，目前有以下几种常用的方法。

#### 1. 固定式干湿球温度计

用干湿球温度计测量空气湿度的原理在第1章中已作了叙述。普通的固定式干湿球温度计是将两支相同的水银温度计固定在一块平板上,其中一支的温包上缠有一直保持润湿状态的纱布,作为湿球温度计,另一支不包纱布的作为干球温度计(见图 10.10)。一般将固定式干湿球温度计悬挂在某一固定位置上进行测量。

对于这种置于“静止”空气中的仪器,由于通过湿球温包处的风速通常很小(小于  $0.5$  [m/s]),因此不能根据干球和湿球温度直接从焓湿图查取空气的湿度,而必须使用专门制作的相对湿度查算表。图 10.10 所示的仪器系将表格附在板面上供使用。

对于这种干湿球温度计,只有湿球表面具有良好的蒸发才能得出正确的湿球温度示值。为此必须使湿球纱布紧贴温度计温包并保持湿润和清洁。纱布与水杯间的距离不少于  $20\sim 30$  [mm],以使杯的上沿不影响空气流动。同时,杯上应置一使纱布能浸入水杯的带孔盖板。

## 2. 通风式干湿球温度计

通风干湿球温度计(图 10.11)与普通固定式干湿球温度计的主要差别是仪器中装有机或电机驱动的风扇,通过导管使干湿球温度计温包处保持  $\geq 2.5$  [m/s] 的空气流速。而且,两支温度计分别装在两个隔热辐射的金属防护套管中,由此提高了测量准确度。对通风式干湿球温度计可根据干、湿球温度值用焓湿图或计算表查出空气的相对湿度值。

使用这种仪器时,也应保持湿球纱布清洁,在润湿纱布时水量不要加得太多,特别对用机械驱动的风扇,由于其转速的不均匀性(起动及终止时的转速慢),如达到湿球温度所需的稳定时间过长则有可能使通过温包的风速低于  $2.5$  [m/s],从而造成测量误差。更应防止对湿球加水时不慎将水滴通过风道沾在干球上而造成难以估计的错误。因此润湿纱布时应避免将仪器倾斜至不适当的角度,绝不可将仪器倒置。

## 3. 毛发湿度计

经脱脂处理的毛发长度会随着空气的湿度变化而变化,利用

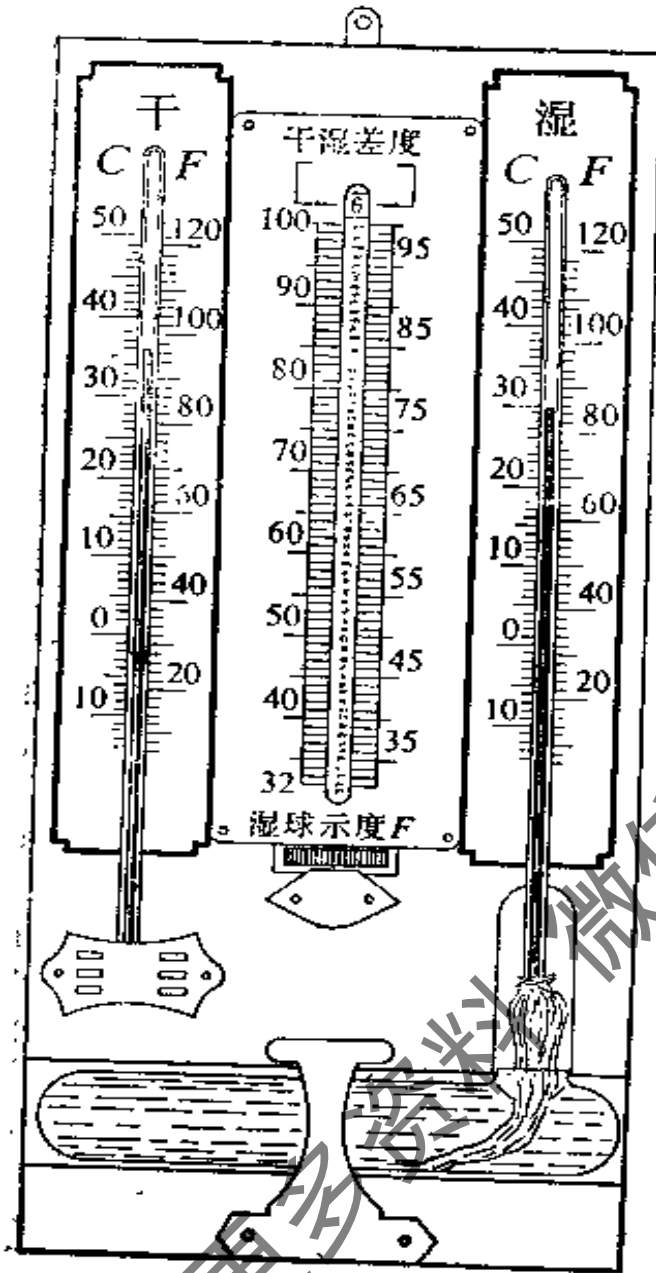


图10.10 普通干湿球温度计

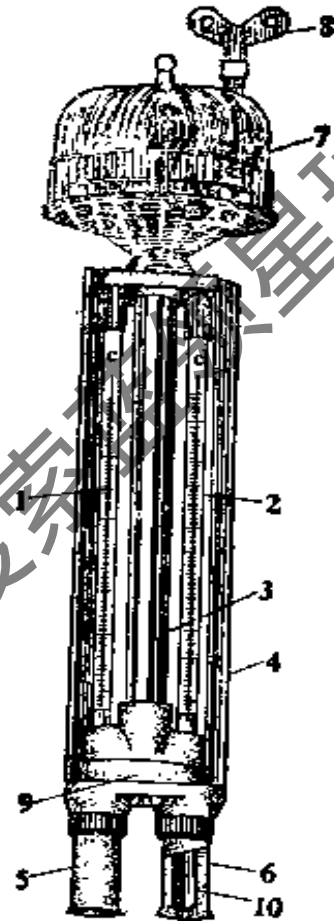


图10.11 通风干湿球温度计

1, 2—水银温度计； 3—金属总管；  
4—护板； 5, 6—外护管； 7—风扇  
外壳； 8—钥匙； 9—塑料篮；  
10—内管

这一特性将毛发作为感湿元件制成的相对湿度计称为毛发湿度计。

图10.12是指针式毛发湿度计，一根(或一束)脱脂毛发的一

端固定在金属架上与调节机构相连的杆上，另一端与杠杆相连。当毛发因空气相对湿度不同而长度发生变化时牵动扛杆。并使指针沿弧形刻度盘移动，直接指示出空气的相对湿度值。在用插入法估计读数时应注意仪器刻度的非等距性。也有利用毛发制成带有自记钟的自记湿度计，用以记录相对湿度的日(或周)变化。

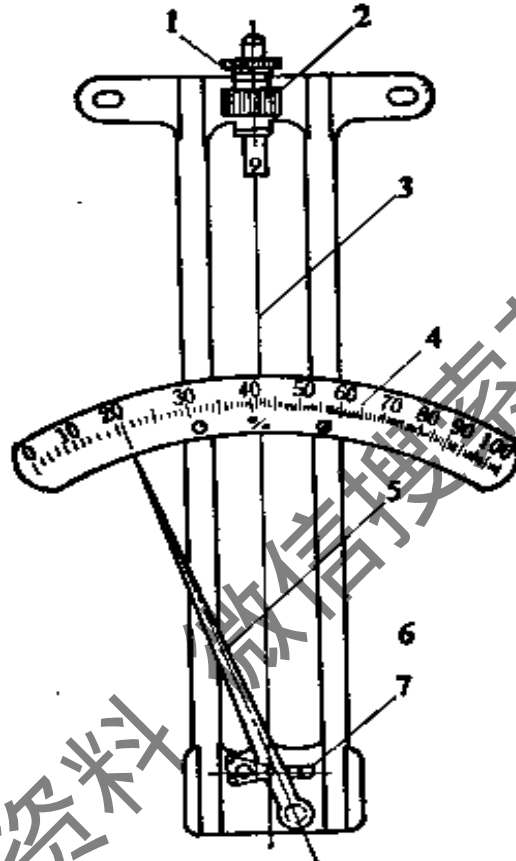


图 10.12 毛发湿度计

- 1—紧固螺母； 2—调整螺丝； 3—毛发； 4—刻度尺；  
5—指针； 6—弧块； 7—重锤

在与毛发相连的机构存在轴摩擦时均会影响仪器读数。因此在使用时，要试将指针推向使毛发放松的状态，再让它自然复位以视其示值的复现性。虽然毛发湿度计使用方便，但应注意的是，它不是绝对仪器，其示值没有独立意义。因此，经常要用干湿球温度计所测得的值对它进行订正。平时应保持毛发清洁，更不可人为地拉伸。移动仪器时应使毛发处于放松状态。

#### 4. 湿敏电阻湿度计

湿敏电阻是利用某些金属盐（如氯化锂）具有很强的吸湿特性，而且吸湿后的导电性与空气湿度存在一定函数关系而制成的感湿元件。一般的做法是：将吸湿剂氯化锂均匀地分布在水溶性粘合剂（如聚乙烯醇）中，组成感湿物质，并把它均匀地涂布在图 10.13 所示的板形（或柱形）电极体上，成为一个氯化锂湿敏电阻测头。

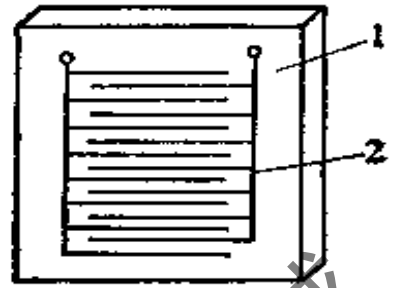


图 10.13 氯化锂湿度计的电极体(板状)

1—绝缘板：  
2—金属箔

测头置于被测空气中，当空气的相对湿度发生变化时，板形电极体上的梳状电极间（或柱形电极体上的平行铂丝或铱丝间）氯化锂电阻值随之发生改变。用测量电阻的二次仪表测出电阻值的变化，并标以相对湿度示值，则成为一个氯化锂湿度计。

除湿度外，温度变化对氯化锂湿度计也产生影响。制造厂在测量线路中一般都设置了温度补偿电路。因此，在选用时应考虑温度补偿范围。另外，因测头的量程较小，所以在相对湿度 5~95% 范围内分档次做成几种测头，配套供选用。这种仪器的优点是结构简单、体积小、吸湿与放湿反应均比毛发快。但每个测头的量程较小、互换性差、长时间使用后易老化，故须定期进行复标。

### 10.1.3 压力的测量

在空调与制冷工程中，经常需要对工质的压力参数进行测量。弹簧管式压力表（又称波登管压力表）常用于制冷及汽、水系统中，可以按照所需量程和准确度等级（0.5, 1.0, 1.5, 2.5）选用。本节主要介绍平衡法压力测量仪器。

#### 1. 液柱压力计

如图 10.14 所示，在 U 形玻璃管内贮放工作液体（水、汞或其他液体），管间放置标尺，即构成既简单、通用性又强的液柱压力计。它是以流体静力学原理为基础进行正、负压力或压差测量。

根据流体静力学原理，从图中可看出，当 U 形管两侧压力



$P_1 = P_2$  时,管中工作液处于 0-0 位置。如  $P_1 > P_2$ ,管内左侧液面必会下降一个高度  $h_1$ ,右侧液面必会上升高度  $h_2$ 。若以下降后的左侧液面  $o'-o'$  为基线,则相当于右侧液面上升高度为  $h = h_1 + h_2$ 。设工作液体密度为  $\rho$ ,左侧液面上的介质密度为  $\rho_1$ ,右侧为  $\rho_2$ ,则在液面  $o'-o'$  上可列出流体静力学关系为:

$$\begin{aligned} P_1 + (H + \Delta H + h)\rho_1 g &= P_2 + H\rho_2 g + h\rho g \\ P_1 - P_2 &= (\rho - \rho_1)hg + (\rho_2 - \rho_1)Hg - \Delta H\rho_1 g \quad [\text{N/m}^2] \end{aligned} \quad (10.5)$$

式中  $g$ ——重力加速度,标准情况取  $g = 9.80665 [\text{m/s}^2]$ ;  
 $\Delta H$ ——两侧测压导管接至液柱压力计处存在的安装垂直高差, [m];

$H$ ——U形管右侧工作液液面至管顶的高度, [m]。

从压力差计算公式可看出:

(1) 如果 10.5 式中的安装垂直高度差  $\Delta H = 0$ ,则

$$P_1 - P_2 = (\rho - \rho_1)hg + (\rho_2 - \rho_1)Hg \quad (10.6)$$

(2) 10.5 式中,若  $\Delta H = 0$ ,且 U 形管工作液面上两侧工作液相同,即  $\rho_1 = \rho_2$ ,则

$$P_1 - P_2 = (\rho - \rho_1)hg \quad (10.7)$$

(3) 若  $\Delta H = 0$ , $\rho_2$  与  $\rho_1$  相比可忽略不计,则

$$P_1 - P_2 = \rho hg - (H + h)\rho_1 g \quad (10.8)$$

(4) 若  $\Delta H = 0$ ,且  $\rho_2$  及  $\rho_1$  与  $\rho$  相比都可忽略不计,则

$$P_1 - P_2 = \rho hg \quad (10.9)$$

上面对静压力平衡关系推导结果的几点假设,反映了应用液柱压力计和计算中应注意的问题。

在自制 U 形管时,应选直径均匀而相同的玻璃管配对使用;为了减小毛细管现象,管内径一般不小于 6 [mm]。常用介质在 20 [°C] 时的密度值见表 10.4。

## 2. 单管液柱压力计

由于上述 U 形管中的工作液面高差  $h$ ,需要分别读取两个液位值相加后得到,这非但不方便,而且存在二次读数误差。如果将

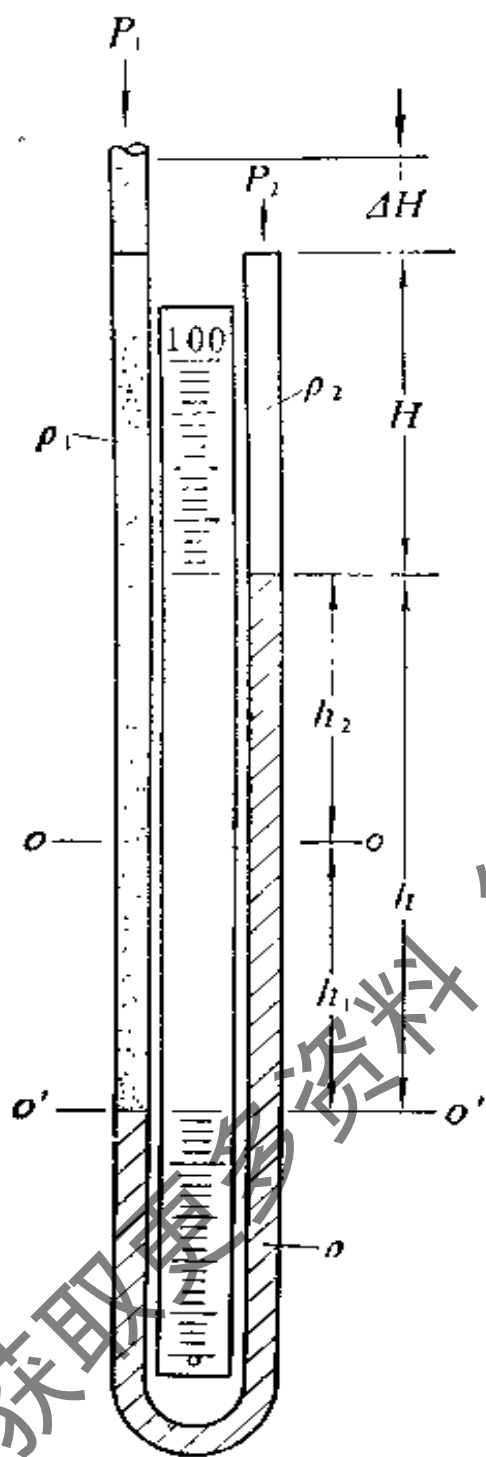


图 10.14 液柱压力计

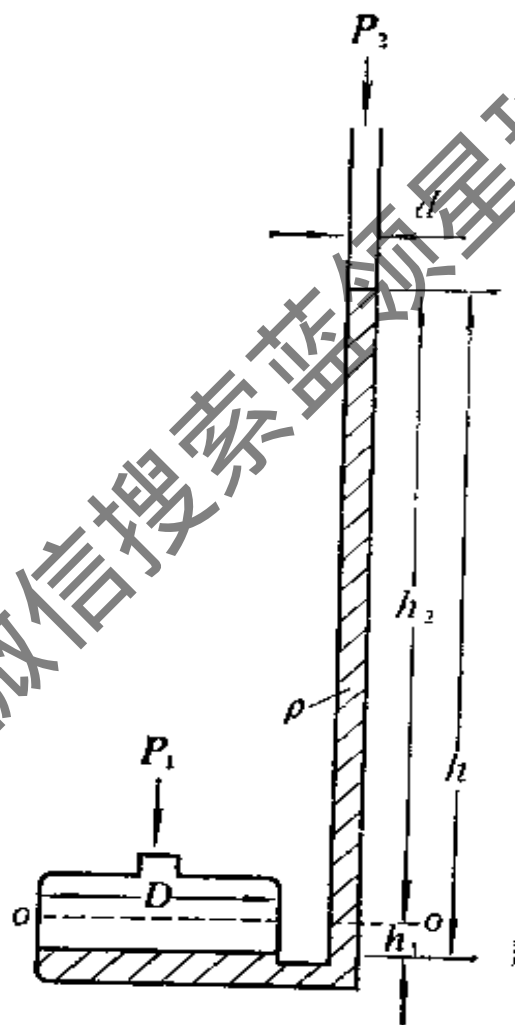


图 10.15 单管液柱压力计

U 形管左侧管面积增大(图 10.15), 使成为一杯形容器, 就成为一个单管液柱压力计。当不考虑工作液面上的介质密度等影响, 且  $P_1 > P_2$  时, 工作液面在细管中上升高度为  $h_2$ , 杯中下降高度为

| 介 质     | 密度 [kg/m <sup>3</sup> ] |
|---------|-------------------------|
| 水       | 998                     |
| 空 气     | 1.205                   |
| 乙 醇     | 790                     |
| 四 氯 化 碳 | 1588                    |
| 甘 油     | 1258                    |
| 煤 油     | 809                     |
| 水 银     | 13550                   |

$h_1$ 。密度为  $\rho$  的工作液在细管中增加的体积  $\frac{\pi}{4} d^2 h_2$  等于杯中减少的体积  $\frac{\pi}{4} D^2 h_1$ ，由此可得出液位在杯中下降高度  $h_1$  与细管中上升高度  $h_2$  的关系为：

$$h_1 = h_2 \left( \frac{d}{D} \right)^2 \quad (10.10)$$

因此，由液柱压力计算公式得出

$$P_1 - P_2 = \rho g (h_1 + h_2) = \rho g \left( 1 + \frac{d^2}{D^2} \right) h_2 \quad (10.11)$$

由式 (10.11) 可见，只要读一个液位高度并考虑仪器常数  $\left( 1 + \frac{d^2}{D^2} \right)$ ，即可得出  $P_1 - P_2$  的值。当杯子直径设计得足够大，则在一定精度下  $h_1$  的下降高度可忽略不计。此时  $P_1 - P_2 = \rho g h_2$ 。

### 3. 倾斜式微压计

由于空调系统压力不高，特别是在测定系统流速、流量时，被测的动压值更小。为了提高测量灵敏度，可将单管液柱压力计的细管根据需要如图 10.16 所示倾斜放置，使成为一台倾斜式微压计。这时在相同的液柱高度  $h$  下，斜管中的液位刻度  $l$  变化将

增大。

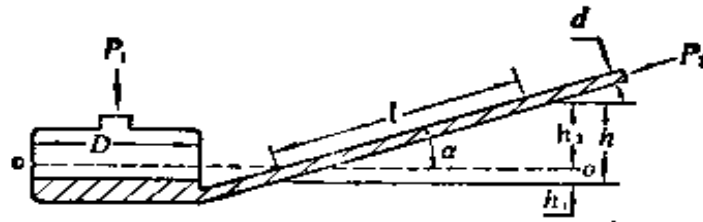


图 10.16 倾斜式微压计

从图中可以看出,表示压差的液柱升高为  $h = h_1 + h_2$ 。其中  $h_2 = l \sin \alpha$ ,  $h_1 = l \frac{d^2}{D^2}$ 。

由此,压差为:

$$P_1 - P_2 = (h_1 + h_2) \rho g = l \left( \sin \alpha + \frac{d^2}{D^2} \right) \rho g \quad (10.12)$$

对规定  $\alpha$ 、 $d^2/D^2$  及  $\rho$  上式可写成:

$$P_1 - P_2 = K l \quad (10.13)$$

式中  $K = \left( \sin \alpha + \frac{d^2}{D^2} \right) \rho g$  称为微压计常数。一般国内仪器在工作液使用  $\rho = 0.81 [\text{g}/\text{cm}^3]$  的酒精时,设计成各种  $\alpha$  值,使  $K = 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8$ 。

倾斜式微压计的准确度等级有 0.5, 1.0 和 1.5 级。对 0.5 级微压计应具有游标读数装置。微压计在使用中应确保杯与玻璃管的连接管中不存在气泡及畅通。

#### 4. 补偿式微压计

图 10.17 所示的补偿式微压计,是根据 U 形管连通器的原理,用提升可动容器的高度以补偿处于正压力的固定容器中液面的下降,借助光学观察器观察到顶针与倒影的尖端保持尖对尖的影像,然后通过仪器上的标尺和旋转游标的示值读出可动容器的提升高度值,根据  $P_1 - P_2 = h \rho g$  即表示了所测的压差值。测试时较高的压力接在固定容器接头上,较低压力接在可动容器的接头上。

使用时,光学观察器的反射镜中可能出现的三种影像如图

10.18 所示。

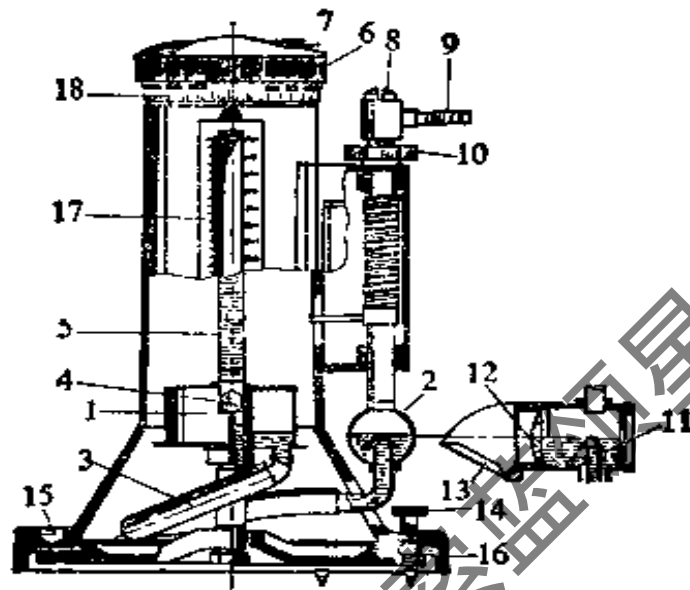


图 10.17 补偿式微压计结构图

1—可动容器； 2—固定容器； 3—橡皮管； 4—负压接头； 5—微调螺杆； 6—旋转头； 7—圆顶塞头； 8—封闭螺丝； 9—正压接头； 10—调零螺帽； 11—顶针； 12—透镜； 13—反射镜； 14—底脚螺丝； 15—水准泡； 16—底座； 17—标尺； 18—游标尺

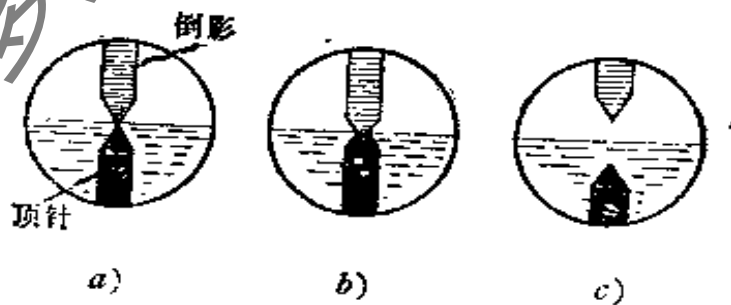


图 10.18 补偿微压计反射镜中可能出现的三种影像

(1) 顶针与倒影的针尖恰好对准(图 10.18 a)。说明零位已调好(或可动容器的提升高度正好补偿被测压力)。此时可进行读数。

(2) 顶针与倒影的接触超过了针尖。说明固定容器中的压力过高,使液位下降,针尖露出液面。此时应缓慢提升可动容器高度,直至出现图 10.18 a 中的像形;

(3) 顶针与倒影的针尖分离。说明可动容器提升得太高,固定容器中液位升高,液体将针尖浸没。此时应缓慢降低可动容器的高度,直至出现图 10.18 a 中的像形。

补偿式微压计测压精度高。目前,其量程有  $0\sim 150$  [mm] 和  $0\sim 250$  [mm] 两种,分辨率均为  $0.01$  [mm]。它可做成一等与二等标准器,其相应误差在  $0\sim 150$  [mm] 时为  $\pm 0.04$  与  $0.08$  [mm],在  $150\sim 250$  [mm] 时为  $\pm 0.08$  与  $0.13$  [mm]。可用补偿式微压计来检定其他微压计。但这种仪器惰性较大、反应慢。又因它是采用手动补偿方法,因此在被测压力存在波动时,往往难以跟踪,如果操作不熟练极易产生读数误差。所以它适用于稳态测量,用于静态计量则更可显示其优越性。

#### 5. 倾斜式微压计的校验

倾斜式微压计的正规检定,应按国家计量检定规程 JJG172—84 进行。如有条件,可根据需要参照该规程自己做使用中的校验。一般应先检查被校仪器的外观,再用 1.2 倍最大工作压力维持 10 分钟进行气密性试验。对示值检验可将它和一台基本误差绝对值小于或等于被校仪器的  $1/3$  的微压计共同连在一个可调压力的气源上(如手风琴气盒)在几个压力下作对比校验,得出对应压力的修正值。

### 10.1.4 流速的测量

流体流动速度是空调工程中经常需要测试的基本参数之一。通过它可以了解流体运动的一些规律,经过计算还可得出流体的体积流量、质量流量等实测数据。测速仪器的构成原理,按采用的测量方法通常可分为机械型、散热率型和动力测压型等。

#### 1. 机械型风速仪

机械型风速仪是利用流动的空气推动仪器上的一个用轻金属制成的转轮,转轮转速的快慢与风速成正比,根据单位时间里转轮

的转数,通过机械计数装置,在表盘上显示风速值。

这类仪器根据转轮的构造可分为叶轮式与杯式风速仪两大类。

(1) 叶轮式风速仪 它的转轮叶片由几片扭成一定角度的薄片组成。转轴与表盘平行或垂直,见图10.19。使用时使转轴与气流平行,这种风速仪的测速范围为  $0.5\sim 10$ [m/s]。

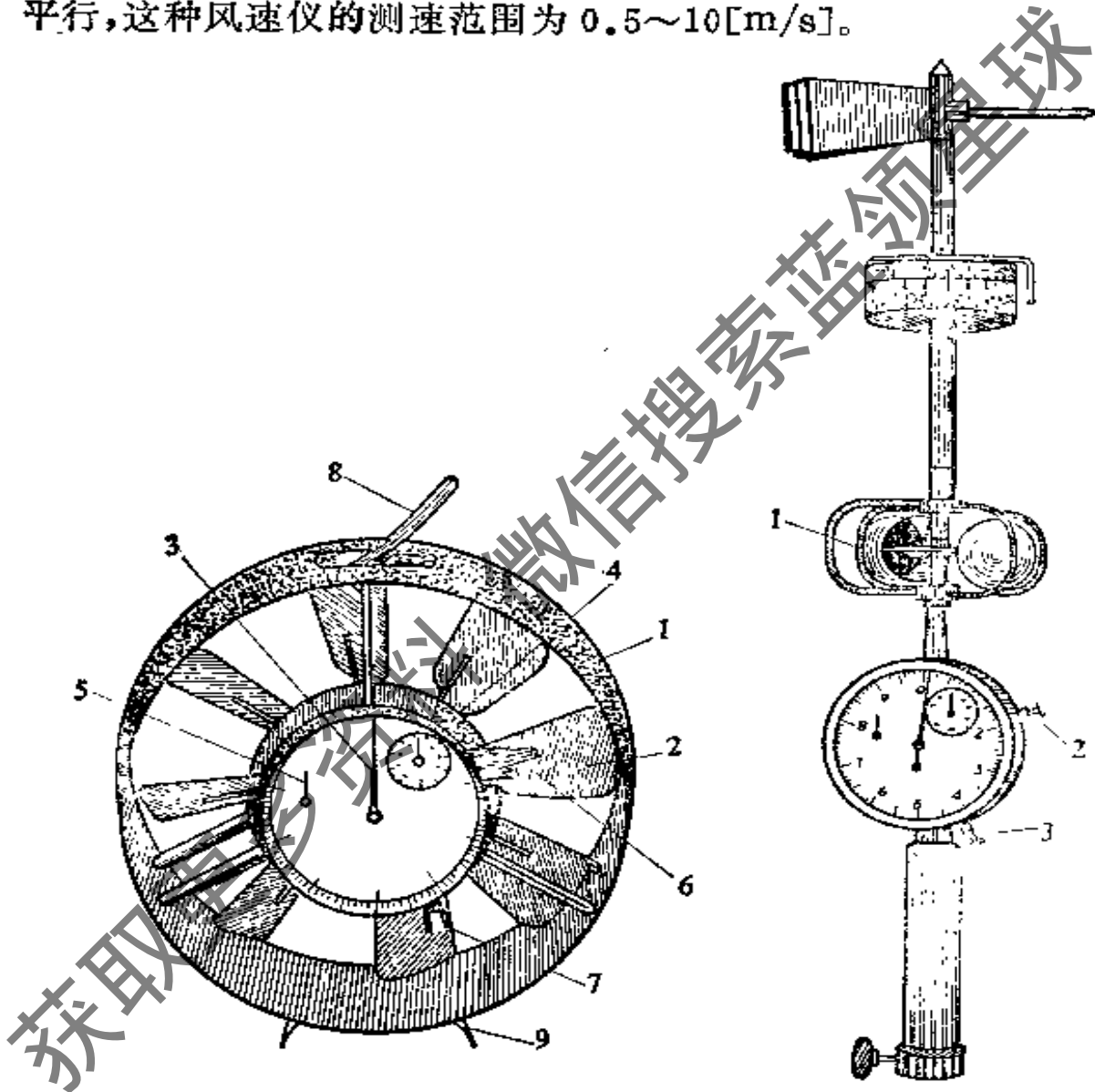


图 10.19 自记式叶轮风速仪

- 1—圆形框架(外壳); 2—叶轮; 3—长指针;  
4—短指针; 5—记时红针; 6—回零压杆;  
7—启动压杆; 8—提环; 9—座架

图 10.20 转杯式风速风向仪

- 1—风杯; 2—回零压杆;  
3—启动压杆

(2) 杯式风速仪 在它的转轴上装有三个半球形杯(杯面与

轴平行)组成转轮。转轴与表盘平行。这种风速仪使用时,转轮的旋转平面应平行于气流。它的测速范围为  $1\sim 40$  [m/s]。有的仪表还带有风标,用以指示风向(图 10.20)。

在使用不带记时机构的风速仪时,应记录表盘初、终读数和两者间的时间值。初、终读数差被时间值除,即得所测定的风速值。由于仪器需要有一定的风速才能使转轮或转杯转动并带动计数机构而造成误差,因此要求对仪表读数进行订正。其订正值是在风洞中标定后确定。使用时应将仪表显示风速值订正到实际风速值。

## 2. 热球风速仪

热球风速仪是根据流体中热物体的散热率与流速存在一定函数关系而制成的风速测量仪表。

热球风速仪的基本工作原理见图 10.21。从图中可看出仪器由两个独立回路组成。其一是以测头(由玻璃球、电热线圈与热电偶共同组成)中电热线圈为主体的加热电路,另一是以测头中热电偶为主体的测温电路。在恒定的加热条件下,流体通过测头,使玻璃球在流体中散热。随着流速变化,玻璃球的温度也变化,测温电路中的二次仪表从玻璃球温度间接地反映出相应的气流速度值。除此以外,仪器还应有风温补偿电路,以消除风温对测头的影响。这类仪表热惰性小,反应快,测速范围为  $0.05\sim 30$  [m/s],对低速测量尤为优越。但是这种测头结构娇嫩、易损。测头一旦受污,这将影响它的散热性能,从而使标示的风速值发生变化。又因测头散热受风向的影响,而其标定是在一定的测头散热条件下进行,所

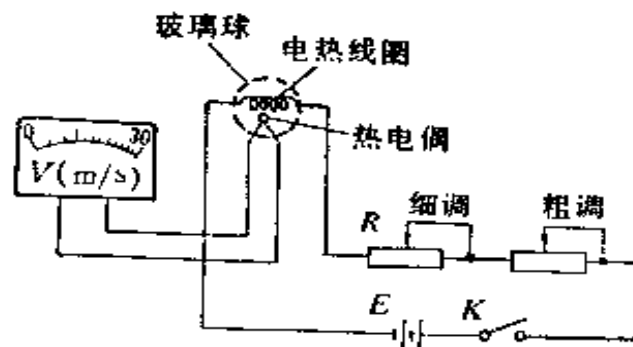


图 10.21 热球式热电风速仪原理图



以使用中必须注意仪器安置的方向性因素。测头互换性差也是这种仪表的严重缺陷。

### 3. 皮托静压管(皮托管)

利用微压计测出皮托静压管在流体中感受到的动压，通过计算得出测点的流速，是流体力学中测速的经典方法。这一方法需用仪器简单、使用方便，更由于它具有较强的理论基础。因此，至今，国际上的认为，不论在工程实践中或风速标准的传递中，皮托管测速是一种可靠的方法，特别在管内流速和流量测定中应用得极为广泛。

皮托静压管的构造见图 10.22。它由外管、内管、端部、水

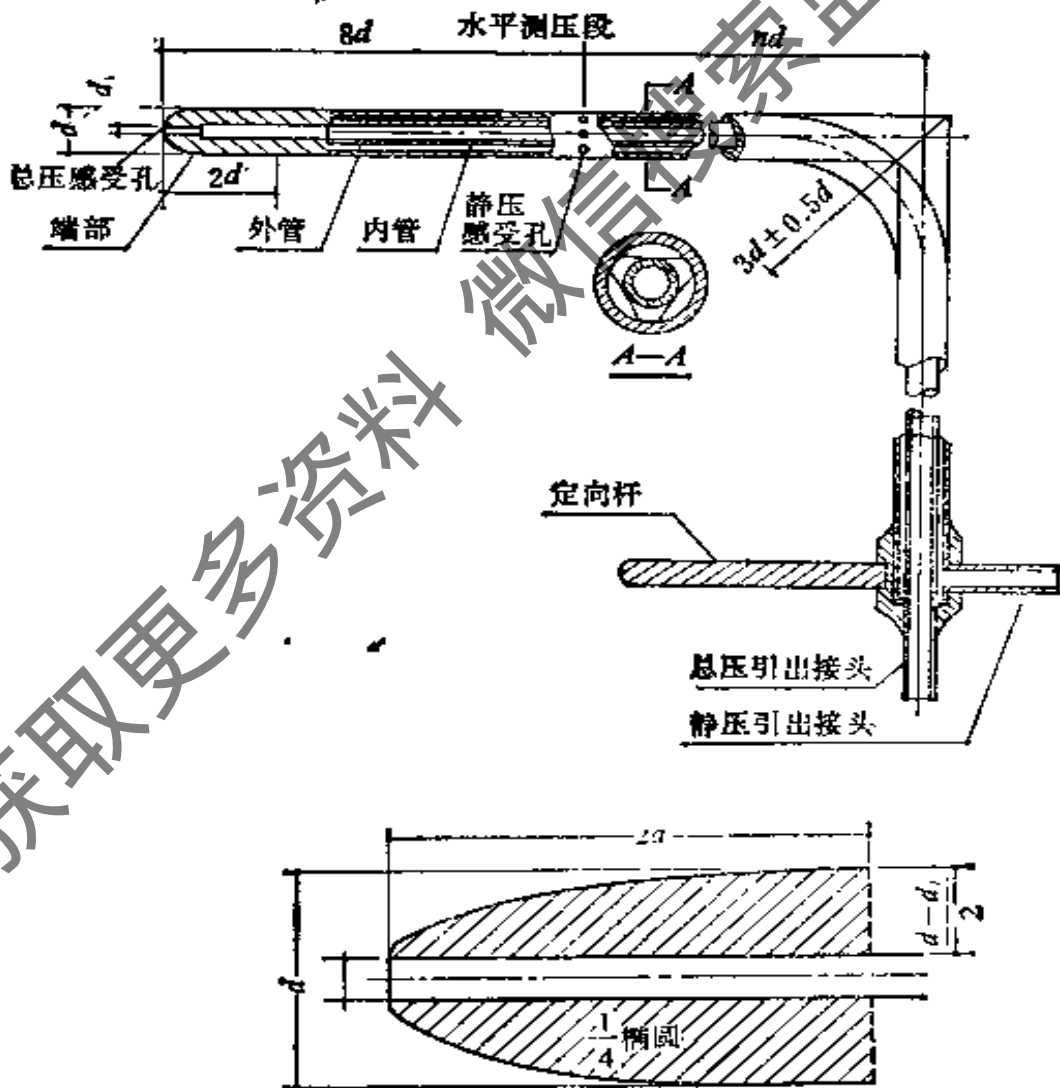


图 10.22 标准皮压静压管

平测压段(测头)、引出接头、定向杆等部分组成。在皮托管测头的适当位置钻有静压感受孔,它感受的静压通过内外管间的空腔作为导管通向静压引出接头。内管的一头与端部开口处(即总压感受孔)相连,另一端与总压引出接头相接。使用时可根据需要测定的参数(总压、静压或动压)将相应引出接头用导管与微压计正确联接,即可从微压计上读出所需测定的压力值。

根据流体力学理论,我们知道,对不可压缩流在流管任一截面上的静压( $P_s$ )与动压( $P_d$ )之和为总压( $P_o$ )。因此,总压与静压之差即为动压,可以表示为:

$$P_o - P_s = P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (10.14)$$

式中, $\rho$ 为流体密度, $v$ 为流体流速。

由于皮托静压管结构上种种因素的影响,它所感受的动压与测点实际动压存在差异。因此,必须用一系数对所测动压进行修正。常用的有三种修正方法:

$$\xi P_d = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \xi P_d} \quad (\text{我国标准采用的定义式}) \quad (10.15)$$

$$P_d = \frac{1}{2} c \rho v^2, \quad v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{1}{c} P_d} \quad (\text{英国标准采用的定义式}) \quad (10.16)$$

$$\alpha^2 P_d = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad v = \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho} P_d} \quad (\text{国际标准采用的定义式}) \quad (10.17)$$

三种定义式中皮托静压管的校准系数间的关系为  $\xi = \alpha^2 = \frac{1}{c}$ , 使用资料时应予以注意。

测定时必须将皮托静压管的总压孔迎向气流,水平测压段应与气流平行。应按图 10.23 的方法,根据所需测定的压力,将皮托静压管与微压计正确相连,就可测出相应的压力值。

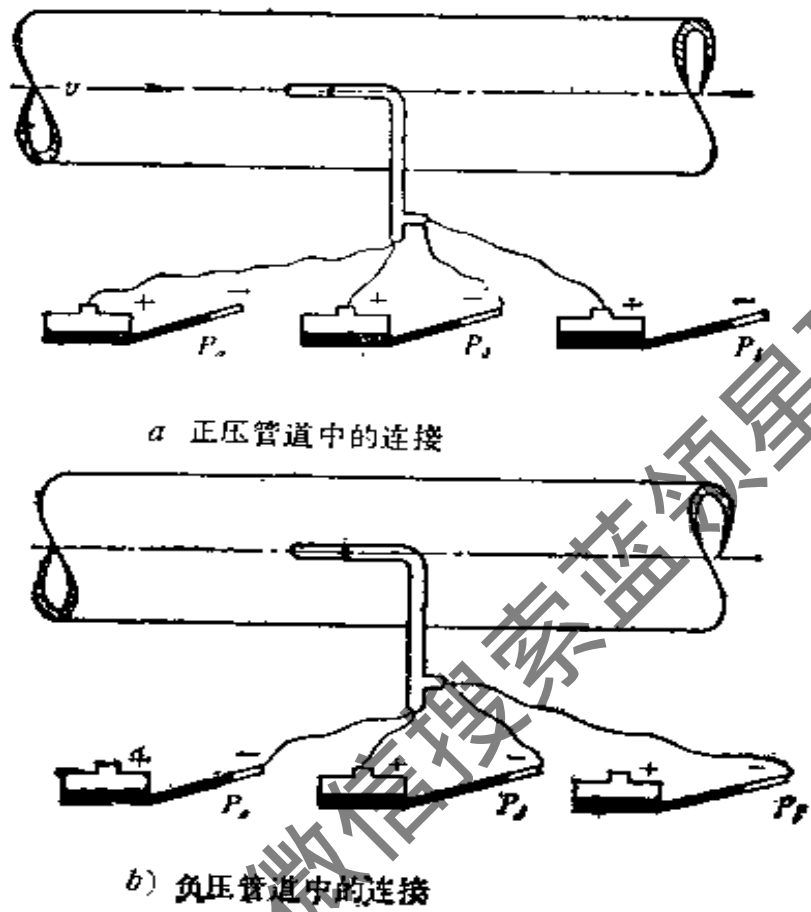


图10.23 皮托静压管与微压计的连接

例如：将皮托静压管放置在风管内某一测点，从微压计上测得动压为  $150[\text{Pa}]$ 。已知空气密度  $\rho = 1.2[\text{kg}/\text{m}^3]$ ，皮托静压管校准系数  $\xi = 1.002$ ，则可计算出该点流速：

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \xi P_d} = \sqrt{\frac{2}{1.2} \times 1.002 \times 150} = 15.83[\text{m}/\text{s}]$$

用于管内流速测定的皮托静压管，其测头直径与所测管道直径之比一般可选为  $\frac{1}{25}$ 。柄长可根据实际需要确定。测点应选在气流平直段处。操作时应注意勿使皮托静压管颤振；所有测压导管中绝不应有堵塞、漏气、以及不易发现的小段液塞现象。

我国已将皮托静压管列为计量器具，并制订了工业级、仪器的

计量检定规程 (JJG 518—88)。同济大学根据国际标准研制的 TKS 型标准皮托静压管已被我国国家气象局(国家风速计量传递单位) 采纳作为二等标准皮托静压管, 用以在风洞中检定二等标准以下的皮托静压管以及各种风速仪器。

### 10.1.5 流量的测量

测量流量的仪表统称流量计。通常以单位时间里流体流过的体积数(体积流量  $L$ ) 或质量数(质量流量  $G$ ) 表示。两者的关系为  $G = \rho L$ 。  $\rho$  为介质密度, 它随流体的状态参数而变。对于气体, 当用体积流量表示时, 由于体积随温度和压力而变, 所以必须同时指明流体的状态参数, 或将工作状态下的体积流量换算为标准状态下的体积流量, 以资比较。

流量测量方法有直接测量法与间接测量法。直接测量法是直接计量单位时间里所得到的流体总量。对于液体这种方法只要具备一定容量的容器、衡器和计时仪器即可进行。在器具条件好的情况下, 它可作为标准计量方法, 用它标定基于间接测量方法的流量计, 而在实践工作中有时也是一种较好而易行的方法。

流量间接测量法是通过测量与流量有对应关系的物理量而得出。制冷与空调工程中常用的有:

#### 1. 皮托静压管-速度面积法

这种方法用于封闭管道中流体流量的测量。我们知道通过管道截而的体积流量  $L$  是管道截面上的平均流速( $v$ ) 与管道截面积( $f$ ) 的乘积, 即

$$L = v f \quad (10.18)$$

由上式可知, 这一方法的关键是如何准确测出管道截面上的平均流速与该截而的面积, 因为它们直接决定测量准确度的高低。对于求取平均速度时, 由于截面上速度分布不均匀, 为此可按国际标准规定的布点方法放置皮托静压管, 测出各点的速度  $v_i$  值, 然后计算出平均速度  $v$ 。具体方法如下:

(1) 对圆形横截而的管道, 可按表 10.5 a 确定测点位置。必须在两根相互垂直的直径上布置这些测点。表 10.5 a 中所列为

相对半径 ( $r_i/R$ ) 及其对应于管内壁的相对距离 ( $y_i/D$ ) 值。

(a) 对圆形管道

管道截面上的测点位置

表 10.5

| 每个半径上的测点数 | $r_i/R$             | $y_i/D$             |
|-----------|---------------------|---------------------|
| 3         | $0.3754 \pm 0.0100$ | $0.3123 \pm 0.0050$ |
|           | $0.7252 \pm 0.0100$ | $0.1374 \pm 0.0050$ |
|           | $0.9358 \pm 0.0032$ | $0.0921 \pm 0.0016$ |
| 4         | $0.3314 \pm 0.0100$ | $0.3343 \pm 0.0050$ |
|           | $0.6124 \pm 0.0100$ | $0.1938 \pm 0.0050$ |
|           | $0.8000 \pm 0.0100$ | $0.1000 \pm 0.0050$ |
|           | $0.9524 \pm 0.0024$ | $0.0233 \pm 0.0012$ |
| 5         | $0.2866 \pm 0.0100$ | $0.3567 \pm 0.0050$ |
|           | $0.5700 \pm 0.0100$ | $0.2150 \pm 0.0050$ |
|           | $0.6892 \pm 0.0100$ | $0.1554 \pm 0.0050$ |
|           | $0.8172 \pm 0.0076$ | $0.0764 \pm 0.0033$ |
|           | $0.9622 \pm 0.0018$ | $0.0189 \pm 0.0009$ |

注:  $R, D$ —圆形截面的半径和直径;  $r_i$ —测点至管轴的距离;  
 $y_i$ —测点至管内壁的距离。

(b) 对矩形管道

| 每条边上的测点数 | $X_i/L$ 或 $Y_i/H$ 的值 |             |                             |
|----------|----------------------|-------------|-----------------------------|
| 5        | 0                    | $\pm 0.212$ | $\pm 0.426$                 |
| 6        | $\pm 0.063$          | $\pm 0.265$ | $\pm 0.439$                 |
| 7        | 0                    | $\pm 0.134$ | $\pm 0.297 \quad \pm 0.447$ |

注:  $L, H$ —矩形截面的边长;  $X_i, Y_i$ —横坐标、纵坐标(以管轴为原点)。

(2) 对矩形横截面的管道,可按表 10.5 b 确定测点位置。整个截面的测点数应为所确定的矩形两条边上测点数的乘积。图 10.24 为  $L$  边取 6 个测点,  $H$  边取 5 个测点, 总数为  $6 \times 5 = 30$  时各测点的位置。表 10.5b 中所列的测点位置值是以矩形管道轴线为坐标原点表示的相对于边长的距离, 对称布置。

根据以上两种截面形状的布点方法确定各测点位置后, 测出各点速度 ( $v_i$ )。取各点速度的算术平均值作为该管道的截面平均速度 ( $v$ )。即

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (10.19)$$

或

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\xi P_i}}{n}} \quad (10.20)$$

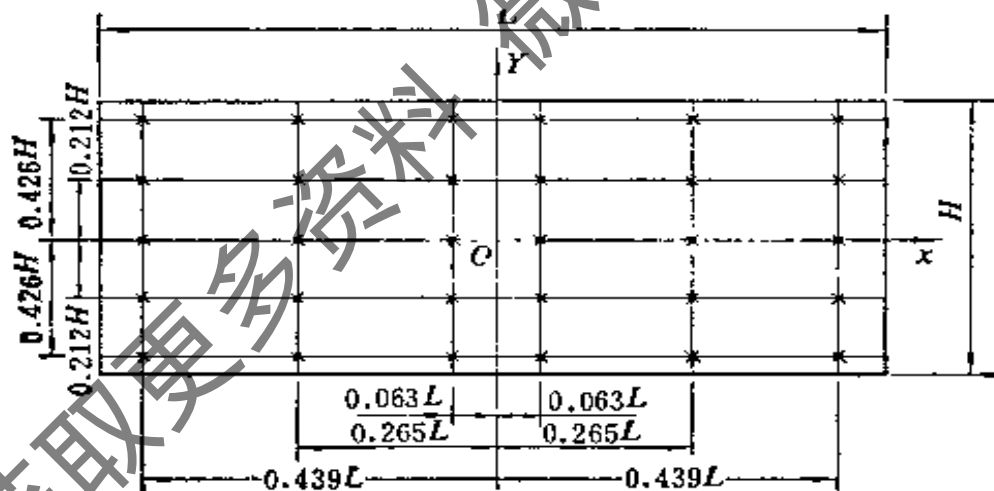


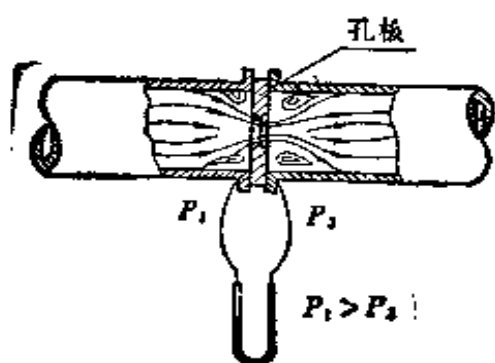
图 10.24 矩形横截面管道中各测点的位置  
( $L$  边取 6 点,  $H$  边取 5 点时)

## 2. 差压流量计

流体通过节流装置——孔板或喷嘴(一次仪表)后, 在它的前后端产生压差的大小与流量成比例地变化。通过测量压差来确定

流量的流量计,称为差压流量计。用它可以测量气体、蒸汽和液体的流量。

图 10.25 所示的是孔板流量计。因为孔板的流通截面小于管道。



当流体通过时,由于流通截面的突然缩小与扩大,使流体的静压产生变化,造成孔板的前后有一静压差。这一静压差与体积流量存在一定的关系。对不可压缩流,它可表示为:

$$L = \alpha f_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad [\text{m}^3\text{s}^{-1}]$$

图 10.25 差压流量计原理

(10.21)

式中  $\alpha$ ——节流装置的流量系数;

$f_0$ ——节流装置的通道面积 $[\text{m}^2]$ ;

$\rho$ ——流体密度 $[\text{kgm}^{-3}]$ ;

$P_1, P_2$ ——节流装置前后的静压值 $[\text{Nm}^{-2}]$ 。

压差  $P_1 - P_2$  可以用液柱压力计或别的二次仪表测出。二次仪表也可以用流量刻度标示。

将图 10.25 中的孔板换成喷嘴就成为喷嘴流量计。

常用的节流装置,国内外均已标准化。选用时只要将所测介质参数,量程范围、二次仪表型式、刻度标示要求及管道内径等具体数据提供制造厂,即可根据需要配制成套仪器。使用时只要按照规定的装置方式按装后即可使用。

### 3. 浮子流量计

浮子流量计是一个垂直的锥形玻璃管与管内的浮子组成。锥形管的面积上大下小。流体通过锥形玻璃管时,浮子能随流量大小沿管轴方向上下浮动。被测介质是

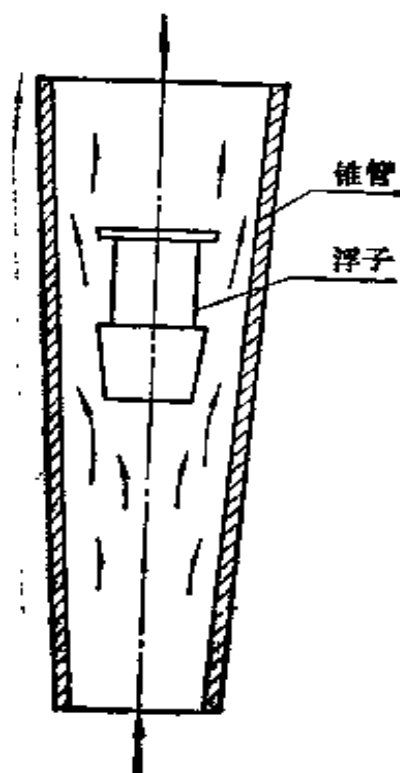


图 10.26 浮子流量计

自下而上通过锥形管的，若作用于浮子的上升力大于处于介质中浮子的重量，浮子即向上浮动，随着浮子的升高，使它与锥形管间的环隙面积增大，介质的升力也随之减小，直至上升力仍等于处于介质中的浮子重量时，浮子即稳定在某一高度上。因此，可根据浮子的位置高度，在锥形玻璃管上刻示流量标尺。

浮子流量计用于测量非混浊液体、气体等单相介质的流量。它具有结构简单、维修方便、压力损失小等优点。由于结构上的原因，仪器必须垂直安装，它的量程不可能从零开始。定型仪器常做成量程比为 1:5 或 1:10。它的最大量程对水为 130~670 [ml/min]，对空气为 3300~16700 [ml/min]。最小量程对水为 0.6~6 [ml/min]，对空气为 4~40 [ml/min]。浮子流量计的准确度等级一般为 2.5 级，最高不超过 1.0 级。选用时还要注意仪器的工作压力。也有些远传式浮子流量计可供选用。

使用时必须保证浮子不沾污或有杂物停在顶面。由于仪器出厂时，对用于气体的系用空气标定，用于液体的则用水标定。当被测介质的粘度和密度与标定时介质有差异时，必须重标，在无标定条件时，可用下式作近似修正。

$$L = L_0 \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho)}{(\rho_f - \rho_0)} \frac{\rho_0}{\rho}} \quad (10.22)$$

式中  $L_0$ ——用水或空气标定时流量；  
 $L$ ——修正后的流量；  
 $\rho_f$ ——浮子的材料密度；  
 $\rho_0$ ——标定时水或空气的密度；  
 $\rho$ ——使用时被测介质的密度。

#### 4. 涡轮流量计

涡轮流量计是由涡轮的流量变送器与二次仪表组合而成的流量测试仪表。它可以实现流量的指示与积算。

涡轮流量变送器的结构见图 10.27。管内流体通过前导流器 3，推动由磁性材料制成的涡轮叶片 5 绕轴旋转，再经后导流器 8 流出变送器。叶片的旋转使仪器磁路中的磁阻发生周期性变化，



并由磁-电转换器 6 发生电脉冲信号，该信号的频率 ( $f$ ) 与被测流体的体积流量 ( $L$ ) 成正比。如以  $K$  表示仪器常数，则  $K = f/L$ 。

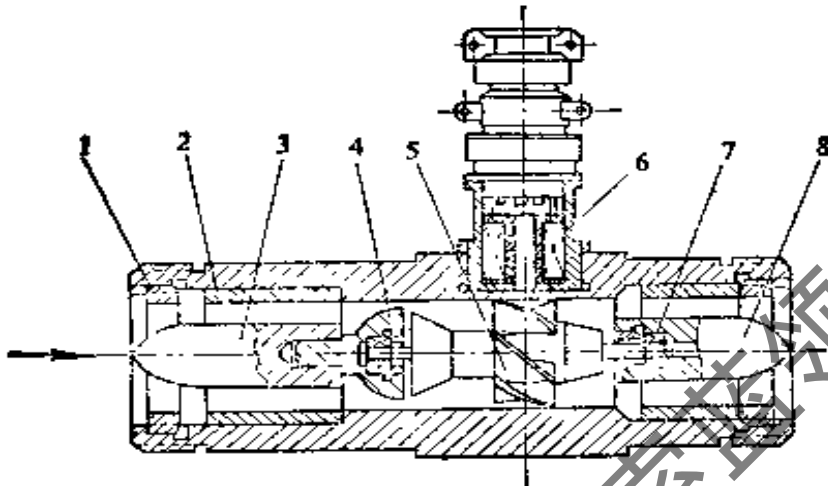


图 10.27 涡轮流量变送器结构图

1—紧固环； 2—壳体； 3—前导流器； 4—止推片； 5—  
涡轮叶片； 6—磁-电转换器； 7—轴承； 8—后导流器

当涡轮流量变送器的仪器常数  $K$  为已知时，则可用脉冲计数器作为二次仪表，测出由磁-电转换器发出并经放大后的脉冲信号个数。此时所表示的流量  $L = \frac{1}{K} f$ ，是流量积算体积数。如果脉冲信号以频率计数（即单位时间里的脉冲信号数）则所计算的结果就是体积流量值。

由于变送器的流体通道中存在各种阻力矩，使仪器常数  $K$  在小流量时产生较大的不稳定。因此，变送器最好在流量上限的 50% 以上工作。涡轮变送器必须水平安装，前后接管应有 15 倍变送器公称直径的直管段，仪表前应装过滤器，必要时还应装流束导直器。

涡轮流量计的测量准确度较高，一般为 0.5~1.0 级，其复现性为  $\pm 0.2\%$ ，它能耐较高的压力 ( $64 \times 10^5 \sim 160 \times 10^5$  [Pa]) 和较高的工作温度 ( $120$  [°C])，而且压力损失小，量程较宽。由于脉冲信号在远距离传送中的优越性也是本仪器的又一特点。

这种流量计由于准确度高，所以它有时可作为在线检测中的标准仪器，用以检验其他流量计。

### 5. 集气口流量计

图 10.28 所示的集气口流量计是用于从大气取气的风管端面上的流量测量装置。当空气从大气进入风管时，先通过具有渐缩型面的集气口而逐步加速，因此静压  $P_s$  逐步降低。这一静压降低值与流量成正比，测点处的静压小于大气压，所以它也是差压流量计的一种。由图 10.28 可列出截面  $o-o$  和  $I-I$  间的伯努利方程为：

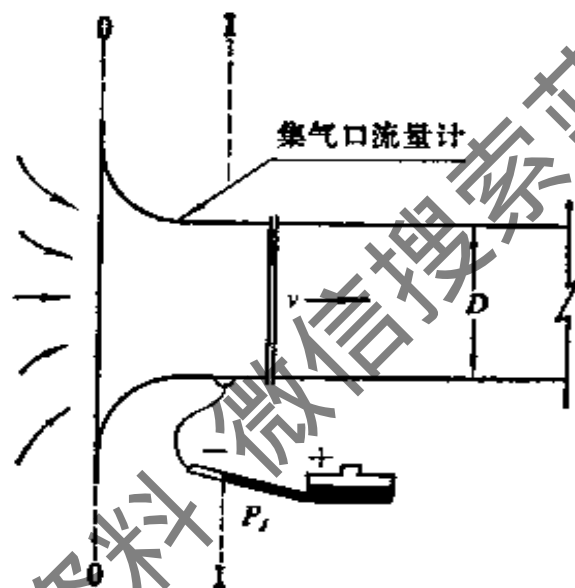


图 10.28 集气口流量装置

$$P = P_s + \frac{\rho v^2}{2} + \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (10.23)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P - P_s)} \quad (10.24)$$

其流量方程则为：

$$\begin{aligned} L &= \frac{\pi}{4} D^2 \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P - P_s)} \\ &= \frac{\pi}{4} D^2 \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho} (P - P_s)} \end{aligned} \quad (10.25)$$

式中  $P$ ——大气压力, [Pa];  
 $P_i$ ——测点静压, [Pa];  
 $v$ ——集气口喉部流速, [ $\text{ms}^{-1}$ ];  
 $\rho$ ——空气密度, [ $\text{kgm}^{-3}$ ];  
 $D$ ——集气口喉部内径, [m];  
 $\xi$ ——集气口的阻力系数;

$$\alpha \text{——集气口的流速系数, } \alpha = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}}$$

流速系数  $\alpha$  随集气口的构造不同而异, 并且与以喉部内径计算的雷诺数  $Re$  有关。

图10.29 表示的弧形集气口, 适用于喉部气流雷诺数  $Re \geq 5.5 \times 10^4$ 。其流速系数  $\alpha = 0.99$ 。但气流速度不应超过  $50[\text{m/s}]$ 。加工时型线应对称, 弧面部分要用样板检查, 在法线方向弧面上相对于样板的误差不得大于  $0.002D$ 。喉部应是圆柱体, 弧面应与喉部圆柱面相切, 不得有明显的凹凸不平。在压力测孔截面上, 每间隔约  $45^\circ$ , 所测量 4 个喉部直径  $D_i$  的算术平均值  $D$  与公称直径之差不得大于  $0.002D$ , 而且  $D_i$  与  $D$  之差不得大于  $0.002D$ 。

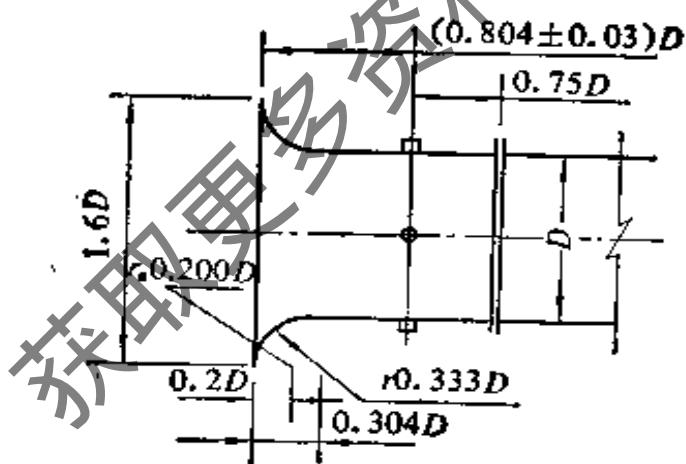


图 10.29 圆弧形集合口

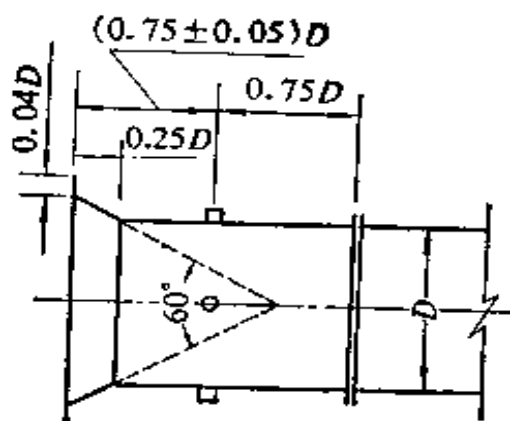


图 10.30 圆锥形集合口

图 10.30 表示的锥形集口, 其锥角应使用样板检查, 偏差不得大于  $\pm 1^\circ$ 。在喉部雷诺数  $Re$  在  $2 \times 10^4$  至  $3 \times 10^5$  范围内, 流速系

数  $\alpha = 1 - 0.5 Re^{-0.2}$ 。  $Re \geq 3 \times 10^5$  时  $\alpha$  值取 0.96。制作时型线应对称，圆锥与圆柱体接合处不得有明显凹凸和尖锐棱边。压力测孔截面上的直径与圆弧形集气口有相同要求。

由于这种流量计结构简单，阻力损失小。因此在一定条件下应用甚广。为了提高测量准确度，可增高喉部雷诺数，允许集气口喉径小于测试管路直径。此时，其连接管应有良好的过渡。

### 10.1.6 其他参数的测量

制冷与空调工程中除了以上的主要参数外，有时还要对电参数和风机、水泵或压缩机等动力设备的转速进行测量。关于电参数的测量，将在第11章中叙述，实际工程中转速的测量多用离心式转速计。它是一种利用仪器中的离心器在动力设备的轴动力带动下同速旋转。仪器是用离心器在旋转后产生的惯性离心力与起反作用拉簧的力相平衡的原理制成。仪表用指针标示离心器处于平衡状态下的转速值。使用时可先将仪表拨盘置于额定的转速范围，然后将软尖轴套于仪表的转轴上，并将软性轴尖顶住动力设备的轴心，使它们同速旋转，待指针示值稳定后即可进行读数。这种仪表使用方便，但在测量微小动力源的转速时，如果离心器转动所耗的功会使主轴转速产生不可忽略的变化，则应采用无接触的光电或闪光测速仪器。

## 10.2 空调系统的测定与调整

空调系统测定与调整的目的，是检查空调系统的设计是否达到预期效果。通过测定与调整发现系统的设计、施工和设备存在的问题，从而采取相应的改进措施，保证系统的使用要求。

空调系统测定与调整的内容主要包括以下内容：风量的测定与调整；空气处理设备的测定与调整；空调房间空气的状态参数；气流组织及消声；净化等效果的测定与调整。

### 10.2.1 空调系统风量的测定与调整

空调系统风量的测定与调整的目的是使系统的风量，包括送风量、新风量、回风量、排风量及各分支管的风量符合设计和使用

要求。此项工作是空调系统的测定与调整首先要做的工作。由于系统的风量主要与系统的空气动力特性(如风机风管和空气处理设备等的空气动力特性)有关,而且系统其他项目的测定与调整均应以风量得到满足要求为前提。所以系统风量的测定与调整是十分重要的。

空调系统风量测定与调整应满足下列要求:

1. 测量通风机的风量、风压和转数。若无条件做这一工作,则可测定空调箱出口的送风量和风压(常称此风压为机外余压)。
2. 使系统风量与分支管风量或送回风口风量平衡。
3. 比较实测风量与设计风量(偏差应小于10%)。

对于新建系统,应先将系统中的风门,包括各支分管或各风口的调节风门等呈全开位置,三通调节阀则应处于中间位置。经测定和作必要的调整后再确定其最后的开启位置。

对于回系统、测定与调整的主要任务是调查风量是否满足使用要求,根据测定结果分析后,再进行调整。

#### 1. 系统风量的测定

系统风量的测定内容主要为:送风量、回风量、排风量、新风量和各分支管风量的测定。可以在送风管道,回风管道,排风和新风管道及各分支管上测定。

系统风量在风管内测定一般宜采用皮托静压管并配以测压仪器(一般用微压计)。当管内风速小于4[m/s]时,可视情况采用热球式风速仪或叶轮风速计。

根据风管内风量的计算式:

$$L = Fv[\text{m}^3/\text{s}] \quad (10.26)$$

式中  $F$ ——风管测定断面面积, [m<sup>2</sup>];

$v$ ——风管测定断面上的平均风速, [m/s]。

故,系统风量的测定,实质上是测定风管的断面面积  $F$  [m<sup>2</sup>]和该断面上的平均风速  $v$  [m/s]。为了准确测定风管内的风量,应正确选择测定断面和测定断面上的测定点。

测定断面原则上应选择气流均匀而稳定的直管段上,即尽

可能地选在远离产生涡流的局部构件(如三通、风门、弯头,风口等)的地方。即按气流方向,一般应选在局部构件后大于或等于4倍管道直径(或矩形管道的大边尺寸),以及在局部构件前大于或等于1.5倍管道直径(或矩形管道的大边尺寸)的直管段上,如图10.31。

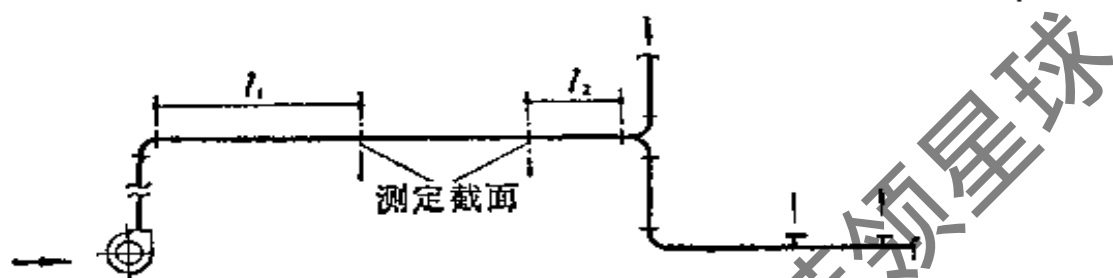


图 10.31 风管测定断面位置图

当现场条件受限以上要求不能满足时,上述距离可适当缩小,但也应使测定断面到前局部构件的距离大于测定断面到后局部构件的距离,同时应适当增加测定断面上测定点的数目。

测定断面上测定点的确定应按10.1.5节中所介绍的方法来确定测定点的数目、位置和计算平均风速。

按以上方法测定的风管内的平均风速,按下式计算:

$$v = \sqrt{\frac{2\xi P}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (10.27)$$

式中  $P$ ——风管内的平均动压, [Pa];

$\xi$ ——测定用皮托静压管的仪器系数;

$\rho$ ——风管内空气的密度, [kg/m<sup>3</sup>].

为了方便使用,将风速与动压的关系式(10.27)计算后列于表10.6。表中的仪器系数 $\xi = 1$ ,  $\rho = 1.2$  [kg/m<sup>3</sup>]. 当 $\xi \neq 1$ ,  $\rho \neq 1.2$  [kg/m<sup>3</sup>]时,实际的风速 $v'$ 应按表中所查的风速 $v$ 由下式修正:

$$v' = v \cdot \sqrt{\xi \frac{\rho}{\rho'}} \quad [\text{m/s}] \quad (10.28)$$

式中 $\rho'$ ——风管内实际的空气密度, [kg/m<sup>3</sup>].

在现场测定中,由于气流的涡流作用,测得的动压值可能为负

动压  $P_d$ [Pa] 与风速  $v$ [m/s] 对照表

表 10.6

| $v$  | 0.0   | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4.0  | 9.6   | 10.1  | 10.6  | 11.1  | 11.6  | 12.2  | 12.7  | 13.3  | 13.8  | 14.4  |
| 5.0  | 15.0  | 15.6  | 16.2  | 16.9  | 17.5  | 18.2  | 18.8  | 19.5  | 20.2  | 20.9  |
| 6.0  | 21.6  | 22.3  | 23.1  | 23.8  | 24.6  | 25.4  | 26.1  | 26.9  | 27.7  | 28.6  |
| 7.0  | 29.4  | 30.2  | 31.1  | 32.0  | 32.9  | 33.8  | 34.7  | 35.6  | 36.5  | 37.4  |
| 8.0  | 38.4  | 39.4  | 40.3  | 41.3  | 42.3  | 43.4  | 44.4  | 45.4  | 46.5  | 47.5  |
| 9.0  | 48.6  | 49.7  | 50.8  | 51.9  | 53.0  | 54.2  | 55.3  | 56.6  | 57.6  | 58.8  |
| 10.0 | 60.0  | 61.2  | 62.4  | 63.7  | 64.9  | 66.2  | 67.4  | 68.7  | 70.0  | 71.3  |
| 11.0 | 72.6  | 73.9  | 75.3  | 76.6  | 78.0  | 79.4  | 80.7  | 82.1  | 83.5  | 85.0  |
| 12.0 | 86.4  | 87.8  | 89.3  | 90.8  | 92.3  | 93.8  | 95.3  | 96.8  | 98.3  | 99.8  |
| 13.0 | 101.4 | 102.9 | 104.5 | 106.1 | 107.7 | 109.4 | 111.0 | 112.6 | 114.3 | 115.9 |
| 14.0 | 117.6 | 119.3 | 121.0 | 122.7 | 124.4 | 126.2 | 127.9 | 129.7 | 131.4 | 133.2 |
| 15.0 | 135.0 | 136.8 | 138.6 | 140.5 | 142.3 | 144.2 | 146.0 | 147.9 | 149.8 | 151.7 |
| 16.0 | 153.6 | 155.5 | 157.5 | 159.4 | 161.4 | 163.4 | 165.3 | 167.3 | 169.3 | 171.4 |
| 17.0 | 173.4 | 175.4 | 177.5 | 179.6 | 181.7 | 183.8 | 185.9 | 188.0 | 190.1 | 192.2 |
| 18.0 | 194.4 | 196.6 | 198.7 | 200.9 | 203.1 | 205.4 | 207.6 | 209.8 | 212.1 | 214.3 |
| 19.0 | 216.6 | 218.9 | 221.2 | 223.5 | 225.8 | 228.2 | 230.5 | 232.9 | 235.2 | 237.6 |
| 20.0 | 240.0 | 242.4 | 244.8 | 247.3 | 249.7 | 252.2 | 254.6 | 257.1 | 259.6 | 262.1 |

值。在计算管内平均动压时，应将所测的负值当作为零值。但测点的总数应包括该测点在内。

## 2. 送、回风口风量测定

为了得知空调房间的风量或各个风口的风量，如果无法在各分支管上测定风量时，可以在送、回风口处直接测定风量。

在送、回风口处直接测定风量，一般可用热球式风速仪和叶轮风速仪。

当在送风口处测定送风量时，由于该处气流比较复杂，通常可采用以下方法测定：

(1) 风口系数法，这种方法就是对系统中所装设的风口在专门的实验装置上进行测定，求得风口的系数，再将现场条件实测的风量乘以风口的修正系数而求得风量的方法。如在专门的实验装置上测定得风口的实际风量为  $L_{实}$ ，而在此装置上模拟现场测定条件测定得风口的风量为  $L_{现}$ ，则风口的修正系数为  $K = \frac{L_{实}}{L_{现}}$ 。

由于此法在实际中常常难以实现，又由于系统的风口和现场条件又有各异，所以在实际运用中，此法虽然较为准确，但很难得到运用。

(2) 从风口直接测出实际风量，一般采用加罩法从风口直接测出实际风量，即在风口外直接加一罩子，罩子与风口的接缝处不得漏风。在风口外加罩子的作用主要是使气流稳定，便于准确测量。

在风口外加罩子会使气流阻力增加，造成所测风量小于实际风量。但对于风管系统阻力较大的场合（例：风口加装高效过滤器的系统），风口加罩对风量影响很小。如果风管系统阻力不大，则应采用如图 10.32 所示的罩子，因为这种罩子对风量影响很小，使用简便，且又能保证足够的准确性，故在风口风量的测定中常用此法。

回风口的风量测定，由于回风口处气流均匀，所以可以直接在贴近回风口格栅或网格处用测量仪器测定风量。



### 3. 空调系统风量的调整

空调系统风量的调整是通过调正系统中的风门来实现的，调整是根据以下原理进行的。

由流体力学可知，风管系统的阻力和风量有以下关系：

$$H = KL^2 \quad [\text{Pa}] \quad (10.29)$$

式中  $H$ ——风管系统的阻力， $[\text{Pa}]$ ；

$L$ ——风管内风量， $[\text{m}^3/\text{s}]$ ；

$K$ ——风管系统的阻力特性系数，与风管系统的局部阻力和摩擦阻力有关。

对图 10.33 的风管系统，管段 1 的风量为  $L_1$ ，阻力特性系数为  $K_1$ 、阻力为  $H_1$ 。管段 2 的风量为  $L_2$ ，阻力特性系数为  $K_2$ ，阻力为  $H_2$ 。依式 10.29：

$$H_1 = K_1 L_1^2; \quad H_2 = K_2 L_2^2$$

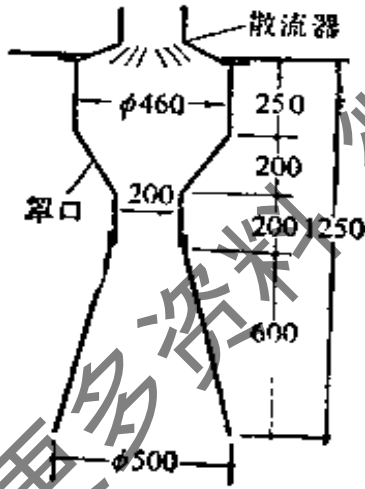


图 10.32 加罩法测定风口风量

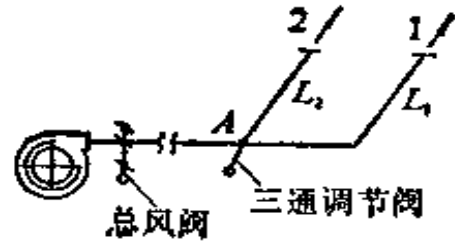


图 10.33 送风管道风量分配图

由于管段 1 和 2 为并联管段，因此：

$$H_1 = H_2$$

所以

$$K_1 L_1^2 = K_2 L_2^2$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{L_2^2}{L_1^2} \quad (10.30)$$

如果图中 A 点处的三通调节阀的位置不变，仅改变送风机出口处的总调节阀，使总风量改变了，管段 1 和 2 的风量相应地变为

$L'_1$  和  $L'_2$ 。但由于阻力特性系数  $K_1$  和  $K_2$  不变, 还是写出如下的关系式:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{L_2'^3}{L_1'^2} \quad (10.31)$$

比较式 10.30 和式 10.31 可知

$$\frac{L_3^3}{L_1^2} = \frac{L_2'^2}{L_1'^2}$$

即:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{L_2'}{L_1'} \quad (10.32)$$

公式 10.32 表明, 只要三通调节阀的位置不变, 即系统的阻力特性系数  $K$  不变, 无论总风量如何变化, 管段 1 和 2 的风量总是按固定的比例进行分配。也就是说, 若已知各风口的设计风量的比值, 就可以不管此时总风量是否满足设计要求, 只要先调整好各风口的实际风量, 使它们的比值与设计风量的比值相等, 然后调整总风量至要求值, 则各风口的送风量必按设计比值分配, 并等于各风口的设计风量。

根据此原理, 实际调整中又分为流量等比分配法, 基准风口调整法和逐段分支调整法。

(1) 流量等比分配法, 这种调整方法, 一般要以系统的最远管段, 即最不利的风口开始, 逐步调到风机。

例如图 10.34 所示的系统中, 1 号风口为最不利风口, 因此最不利管段为 1—3—5—9, 测定和调整从支管 1 开始。为了便于调整, 一般使用两套仪器分别测定支管 1 和 2 的风量, 并不断调整, 使两支管的实测风量(带下标  $c$ )比值与设计风量(带下标  $s$ )

比值相等, 即  $\frac{L_{1c}}{L_{1s}} = \frac{L_{2c}}{L_{2s}}$ 。用同样方法测定和调整其他支管的风量, 使满足  $\frac{L_{4c}}{L_{4s}} = \frac{L_{3c}}{L_{3s}}$ , ...。虽然实测风量可能并不等于设计风量, 但根据风量分配原理, 只要将系统的总风量调整到设计

风量，那么以上各支管的风量必将按各自的设计风量比值等比分配，而达到设计风量值。

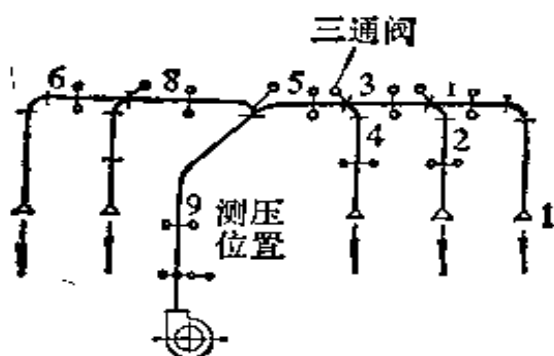


图 10.34 送风系统图

(2) 基准风口调整法 这种方法就是在系统风量调整前先对全部风口的风量初测一遍，并计算出各个风口的初测风量与设计风量的比值，将其进行比较后找出比值最小的风口。将这个比值最小的风口作为基准风口，由此风口开始进行调整。

例如图 10.35 所示的系统，经初测后将其结果列于表 10.7 中。经比较可知风口 1, 7, 9 的比值最小。所以风口 1, 7, 9 为各支管上的基准风口。测定调整也用两套仪器。先调整支管 I 上的各风口，以风口 1 为基准风口，调整风口 1 和其他风口使其实测风量（下标  $c$ ）和设计风量（下标  $s$ ）的比值相等，即  $\frac{L_{2c}}{L_{2s}} = \frac{L_{1c}}{L_{1s}}$ 、

$\frac{L_{3c}}{L_{3s}} = \frac{L_{1c}}{L_{1s}}$ 、 $\frac{L_{4c}}{L_{4s}} = \frac{L_{1c}}{L_{1s}}$ 。其他支管以同样的方法调整使

$\frac{L_{5c}}{L_{5s}} = \frac{L_{7c}}{L_{7s}}$ ，... 和  $\frac{L_{10c}}{L_{10s}} = \frac{L_{9c}}{L_{9s}}$ 。系统上各风口按以上要

求调整好后，再利用系统中各支管的最近风口。如图 10.35 中的风口 4, 8, 12。仍依以上方法、调整各支管的风量，使

$\frac{L_{4c}}{L_{4s}} = \frac{L_{8c}}{L_{8s}}$ ， $\frac{L_{12c}}{L_{12s}} = \frac{L_{8c}}{L_{8s}}$ 。此时虽然各风口的实测风量和

各分支管的风量并不一定等于设计风量。但是要调整系统的总风量则各支管和各风口的风量将按以上调整后的比值分配。

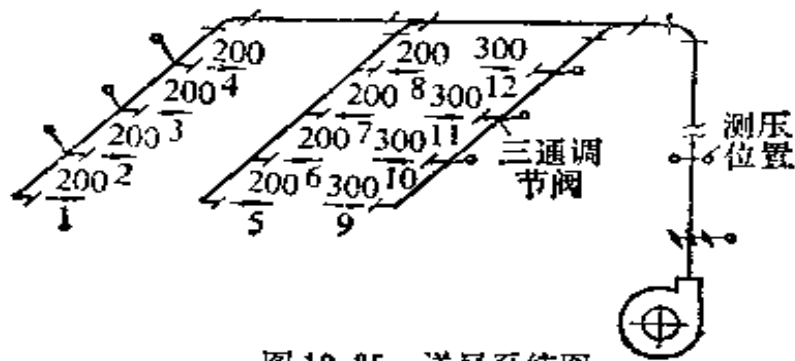


图 10.35 送风系统图

送风系统初测结果

表 10.7

| 风门编号 | 设计风量<br>[m <sup>3</sup> /s] | 最初实测风量<br>[m <sup>3</sup> /s] | 最初实测风量<br>设计风量 × 100% |
|------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1    | 0.056                       | 0.045                         | 80                    |
| 2    | 0.056                       | 0.050                         | 90                    |
| 3    | 0.056                       | 0.062                         | 110                   |
| 4    | 0.056                       | 0.07                          | 126                   |
| 5    | 0.056                       | 0.059                         | 105                   |
| 6    | 0.056                       | 0.064                         | 115                   |
| 7    | 0.056                       | 0.053                         | 95                    |
| 8    | 0.056                       | 0.067                         | 120                   |
| 9    | 0.083                       | 0.066                         | 80                    |
| 10   | 0.083                       | 0.075                         | 90                    |
| 11   | 0.083                       | 0.091                         | 110                   |
| 12   | 0.083                       | 0.100                         | 120                   |

## 10.2.2 空气热湿处理过程的测定

空气热湿处理过程测定的目的是检查空气热湿处理设备的实际能力(一般指空调器整机的热湿处理能力)。空气热湿处理过程是由加热、冷却(和减湿冷却)和加湿等单项处理过程组成的。减湿冷却和加热的测定是一般性空气调节的基本测定内容。

### 1. 空气冷却装置的测定

空气冷却装置的测定,主要是它的冷却能力的测定,一般要求应在设计工况条件下进行,但是实际上往往难以做到,有时是因为工程还未投入使用,或者已投入使用但并未在设计工况条件下运行。但是依冷却装置的冷却能力  $Q = G(h_1 - h_2)$  来看,它与风量  $G$  和处理前后的空气焓差  $(h_1 - h_2)$  有关。当然,根据第4章所介绍的,冷却设备的冷却能力  $Q$  与空气的进口焓  $h_1$  和进口水温  $t_{w1}$  等有关。所以实际冷却能力的测定中,若能使进口空气的焓值  $h_1$  事先处理到与设计工况空气的进口焓值相等,并保证其他参数,如风量  $G$ ,水量  $W$ ,水温  $t_w$  与设计相符,则实际测得冷却装置的冷却能力  $Q$  就为设计冷量。如图 10.36,当室外空气状态为  $w'$  时,由于此时与冷却装置进口空气设计参数  $w$  不等 ( $h_{w'} \neq h_w$ ) 可以调节一次回风混合比使混合点  $c'$  与设计工况条件下的混合点  $c$  等焓,即  $h_{c'} = h_c$ 。将风量、水量,进口水温调整到与设计工况条件相同,若测定结果  $h_{c'} - h_{1'} = h_c - h_1$ ,则说明冷却装置的冷却能力达到了设计要求。

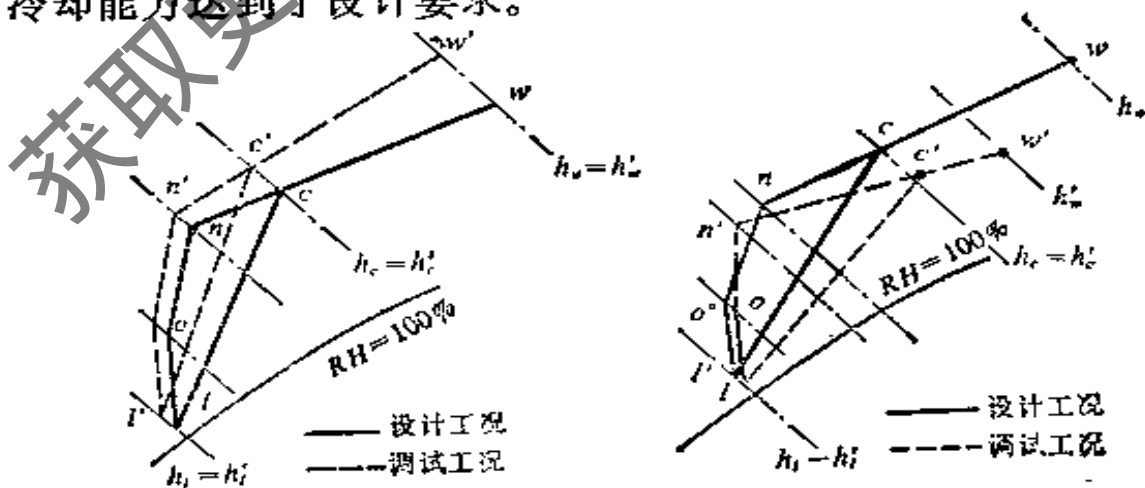


图 10.36 冷却装置测定条件分析

冷却装置能力的测定，需要测定冷却装置的进出口空气的干、湿球温度，这些参数的测定一般使用经校正的水银玻璃温度计（分度  $1/10[^\circ\text{C}]$ ，量程  $0\sim 50[^\circ\text{C}]$ ）或用热电偶、铂电阻等测温仪器。用水银玻璃温度计测定空气的湿球温度，湿球温度计应按图 10.37 的要求。

测定时应将选定的测定断面划分为若干个等面积的小方块，在小方块中心分别设置温度计来测空气的干、湿球温度，并同时测出风速。在该测定断面上温度和风速分布有可能是非均匀的，则断面平均风速应取各测点风速的平均值，而断面的平均温度可按下式计算，

$$t_p = \frac{t_1 v_1 + t_2 v_2 + \dots + t_n v_n}{v_1 + v_2 + \dots + v_n} [^\circ\text{C}] \quad (10.33)$$

式中  $t_1, t_2, \dots, t_n$  —— 各测点的温度值，  
[ $^\circ\text{C}$ ];

$v_1, v_2, \dots, v_n$  —— 各测点的风速值，[m/s]。

每一点的温度和风速都应作多次测量，然后取平均值按式 (10.33) 计算。

若现场条件许可，还可以用“取样法”测定断面的平均温度，所谓取样法就是将测定断面上各点的空气经一取样风机抽到风道外然后再进行温度测量的方法。如图 10.38 为取样管和取样装置。具体的方法为在测定温度（干球和湿球）的断面上设一取样管，此管上开有许多直径为  $5\sim 6[\text{mm}]$  的小孔，由连接管将其与设置在风道外的取样器连接起来，干、湿球温度计置于取样器内，连接管和取样器外壁均应有较好的保温措施。由取样风机将空气经取样管从测定断面抽出进入取样器分别流过干、湿球温度计。此时在取样器中干、湿球湿度计上测得的温度即为测定断面的空气的平均温度。

空气冷却装置的冷却能力按下式计算：

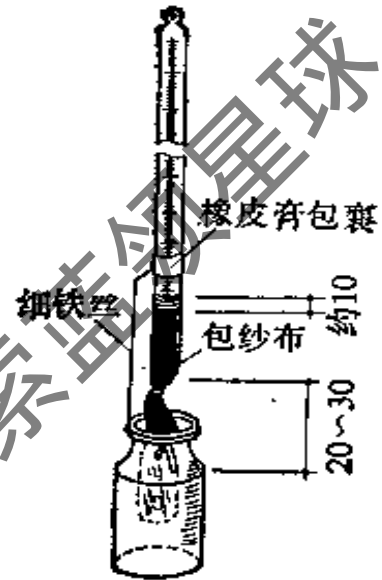
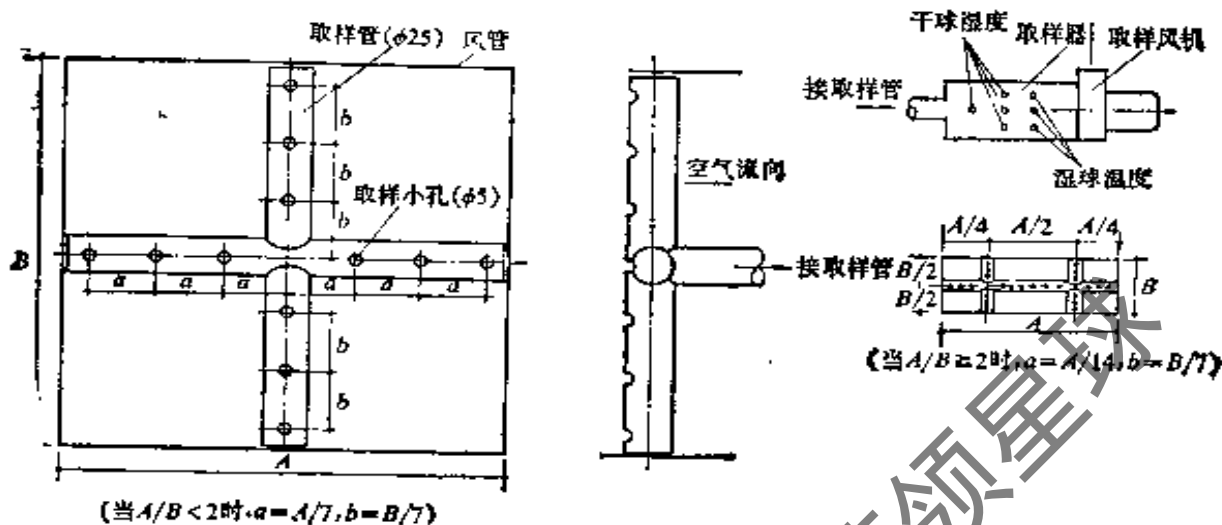


图 10.37 湿球温度计



(当  $A/B < 2$  时,  $a = A/7, b = B/7$ )

图 10.38 空气取样装置

$$Q = G(h_1 - h_2) \quad [\text{W}] \quad (10.34)$$

式中  $G$ ——通过冷却装置的风量,  $[\text{kg/s}]$ ;

$h_1, h_2$ ——冷却装置进、出口空气的焓值,  $[\text{kJ/kg}]$ 。

冷却装置的冷却能力除用以上方法测定和按式 (10.34) 计算外。还可以从冷却装置水系统一侧来测定其冷却能力, 并按下式计算冷却能力

$$Q' = Wc(t_{w2} - t_{w1}) \quad [\text{W}] \quad (10.35)$$

式中  $W$ ——通过冷却装置的水量,  $[\text{kg/s}]$ ;

$c$ ——水的定压比热, 常压下  $c = 4.19 [\text{kJ/kg}^\circ\text{C}]$ ;

$t_{w1}, t_{w2}$ ——冷却装置进、出口水的温度,  $[\text{C}]$ 。

从式 (10.35) 可知, 这时的测定内容有冷却水量及冷却装置的进、出口水温。

在测定现场若冷却水系统中已装有测水量的流量计, 则测定水量可以直接用流量计。但往往现场不具备此条件, 这时只能利用可能条件, 例如喷水室的底池或蒸发水箱。利用容积法测定水量, 即在一定的时间  $\tau$  内, 通过测定喷水室底池或蒸发水箱水位变化的高度  $\Delta h$  和已知的喷水室底池或蒸发水箱的截面积  $F$ , 就能计算出通过冷却装置的水量:

$$W = \frac{\Delta h F}{\tau} \rho_w, \quad [\text{kg/s}] \quad (10.36)$$

式中  $\rho_w$ ——水的密度,  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 。

进、出口水温一般在冷却装置的进、出口水管上测量。

## 2. 空气加热装置的测定

空气加热装置的测定, 主要是测定它的加热能力。测定工作一般应在设计工况下进行, 当实际测定条件无法与设计工况一致时, 则在实际测定条件下测得的加热能力可以通过下列关系推算至设计工况条件下的加热能力。

设计工况条件下的加热能力为:

$$Q = KF \left( \frac{t_o + t_s}{2} - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \quad [\text{W}] \quad (10.37)$$

实际测定条件下的加热能力为:

$$Q' = KF \left( \frac{t'_o + t'_s}{2} - \frac{t'_1 + t'_2}{2} \right) \quad [\text{W}] \quad (10.38)$$

以上两式中

$K$ ——加热器的传热系数,  $[\text{W}/\text{m}^2\text{°C}]$ ;

$F$ ——加热器的传热面积,  $[\text{m}^2]$ ;

$t_o, t_s$ ——设计工况条件的热媒的初、终温度,  $[\text{°C}]$ 。当以蒸汽为热媒时  $t_o = t_s$ ;

$t_1, t_2$ ——设计工况条件的空气的初、终温度,  $[\text{°C}]$ ;

$t'_o, t'_s$ ——实测条件下的热媒的初、终温度,  $[\text{°C}]$ , 当以蒸汽为热媒时  $t'_o = t'_s$ ;

$t'_1, t'_2$ ——实测条件下的空气的初、终温度,  $[\text{°C}]$ 。

测定中使风量和热媒流量与设计工况相等, 将式(10.37)与式(10.38)相除得:

$$Q' = Q \frac{(t'_o + t'_s) - (t'_1 + t'_2)}{(t_o + t_s) - (t_1 + t_2)} \quad [\text{W}] \quad (10.39)$$

加热能力的测定内容包括通过加热装置的风量、空气和热媒的进、出口温度(热媒为蒸汽时还应测定蒸汽压力)。

空气温度的测定应按本节第1点介绍的方法。有一点要特别注意的是加热器表面温度一般较高, 应对温度计设防辐射装



置，如图 10.39。

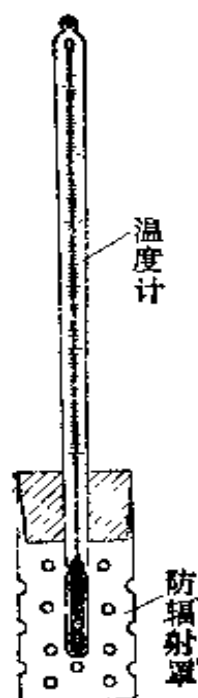


图10.39 温度计防辐射装置

加热器加热能力亦可在热媒一侧测定，其方法与冷却装置冷却能力测定方法一样。当热媒为热水时可在加热器进、出口接管上粘贴热电偶（并在外保温）来测定热水的进、出口水温。而热媒为蒸汽时，可在加热器进口设一较高精度的压力表，测定进入加热器的蒸汽压力，相应的饱和蒸汽温度即为热媒平均温度。蒸汽量可以通过加热器后的疏水器的凝结水量的测定来得到，为了防止由疏水器排出的凝结水汽化，应在疏水器后设置一冷却装置。

### 10.2.3 室内空气参数的测定

室内空气参数测定的内容主要有室内空气的温度、相对湿度，气流组织，洁净度及噪声等。测定应在系统风量和空气处理设备都调整完毕，且送风状态参数符合设计要求和室内热湿负荷及室外气象条件接近设计工况的条件下进行。

#### 1. 室内温度和相对湿度的测定

室内温度和相对湿度的测定，可以用水银玻璃温度计（分度  $0.1[^\circ\text{C}]$  量程  $0\sim 50[^\circ\text{C}]$ ），热电偶、通风干湿球温度计，相对湿度计等测温测湿仪器。

测点应布置在按设计要求确定的工作区。对于恒温恒湿房间测点应布置在离房间围护结构  $0.5[\text{m}]$ ，离地高度  $0.5\sim 1.5[\text{m}]$  的范围内，并将该区域按纵断面（立面）和横断面（平面）分格布置测点。纵断面上的测点间隔一般为  $0.5[\text{m}]$ ，横断面上的测点按面积等分格（每一分格常为  $1.0[\text{m}^2]$ ）。在系统运行达到稳定后，分别测定纵、横断面上的温度和相对湿度值，并按断面绘制温度和相对湿度分布图。

对于一般空调房间，测点只要选择在工作区和工作面及人员经常活动的范围。

当无条件测定室内温度和相对湿度的分布时，可以在回风口处测定温度和相对湿度。一般空调区域均为回流区，所以可认为回风口的空气参数为室内空气的平均参数。

测定时系统必须连续稳定运行，每隔半小时至一小时测定一遍，一般应连续一个白天或者一昼夜（应依实际房间使用情况而决定）。

## 2. 室内气流组织的测定

室内气流组织的测定包括：室内气流速度和气流流型（气流方向）的测定。

由于室内的气流速度较小，所以一般使用热球式风速仪或卡他温度计作测定。气流流型测定一般用轻细的纤维丝，或烟雾来观察气流的方向，然后人工描绘下来。

室内气流组织测定的测点布置基本同室内空气温湿度测定的测点布置相同。同样，应将测定结果绘制成速度分布图和气流流型图。

室内气流组织的测定仅对下列要求的空调房间进行：

- (1) 恒温精度等级高于 $\pm 0.5$  [°C] 的房间；
- (2) 洁净房间；
- (3) 有气流组织要求的房间。

## 3. 超净空调系统空气含尘浓度的测定

超净空调系统空气含尘浓度的测定应包括系统中各级空气过滤器效率和室内空气含尘浓度的测定。同时也应对室外环境空气含尘浓度进行测定，并绘出其随时间的变化曲线。

测定应在系统清扫干净和调整完毕，并经渗漏检验和堵漏后，再经连续运行一段时间（自净）后进行。

空气含尘浓度的测定一般采用粒子计数器。

室内空气含尘浓度测定的结果，应按下列条件乘以不同的系数，才是实际工作条件的含尘浓度。

(1) 测定时室内无生产，并无人员的情况。

1) 平行流净化系统，系数为 3；

2) 乱流高效过滤器空气净化系统、系数为 5；

(2) 测定时室内已处在实际生产(工作)条件、系数为 1。

有关室内空气含尘浓度测定的具体规定，详见《空气洁净技术措施》或有关资料。

#### 4. 室内正压的测定与调整

室内正压值是指室内的压力应高于室外压力的数值，一般空调房间应有 5~10 [Pa] 的正压值。超净房间与相邻房间的关系应满足：净化级别高的房间的正压 > 级别低的房间的正压 > 走廊的正压 > 生活区的正压 > 室外正压。

室内正压值宜采用微压计测定。

测定应在系统送、回风量调整完毕后进行。测定时关闭门窗，将微压计的正、负压接口用橡皮管接至室内和室外（应避免管口迎风），此时微压计的压差值，即为室内外压差值。若正压值不满足要求，一般通过调整房间回风口的风门（调整回风量）来调整室内正压值。

室内正压值的调整应在室内空气含尘浓度测定之前进行，以保证室内空气含尘浓度的测定。

#### 10.2.4 测定与调整中问题的分析和改进方法

在对空调系统进行测定与调整中，必然会发现系统中存在的问题，对系统存在的问题应根据情况作详细的分析，并采取相应的改进方法。

##### 1. 风量不符合设计要求

(1) 实测风量过多地大于设计风量

可能的主要原因有：

1) 系统的实际阻力小于设计计算阻力，风机在比设计风压低的情况下运行，风量增加。

2) 设计时风机选得不合适，风量或风压偏大，使得实际风量增大。

解决的方法：

1) 按风机特性，改变风机转速；

2) 当无条件改变风机转速时，用调节阀调节风量。这样做是不得已的，因为运行不经济。

(2) 实测风量过多地小于设计风量

可能的主要原因有：

1) 系统的实际阻力大于设计计算阻力，风机在此条件下运行，使风量减小。

2) 送风系统向外漏风。

3) 风机的质量不好(风量和风压与风机铭牌不符)，安装及运行不善，如风机转向不对，转速未达到设计转速等。

解决的方法：

1) 若条件许可，应改善系统特性，如对管道的局部构件(弯头、三通、调节阀等)进行改进，减小系统阻力。

2) 对送风管道及空调箱等空气处理装置堵漏。

3) 若风机的风量和风压与铭牌不符，则应调换风机。转速不符，应检查皮带(电机与风机的连接用皮带时)是否松动，或采取相应措施使转速符合设计转速要求。另外应检查风机转向是否正确，必要时还应测定电机的输入功率，检查电机的运行是否正常。

## 2. 送风状态参数与设计工况不符

送风状态参数与设计工况不符一般有几个可能的原因：

(1) 在选择空气处理设备时，热工计算有错误，所选择的空气处理设备的能力与实际需要值偏差较大。

(2) 所选择的空气处理设备质量不好(如传热性能达不到要求)和安装质量不良(如漏风等)。

(3) 冷、热媒参数与流量不符合设计要求。

(4) 空气冷却设备出口带水(如喷水室后挡水板过水量，表面冷却器出口凝结水被空气带出等)产生再蒸发，影响出口空气参数。

(5) 风机和管道温升(或温降)超过设计值，影响送风温度。

(6) 处于负压下的空气处理装置和回风管道漏风。未经处理

的空气直接漏入送风系统，改变了送风状态参数。

解决的方法：

1) 空气处理设备能力过大或过小都可以通过调节冷、热媒的进口参数和流量来调节，以满足送风状态参数。但对能力过小的设备，如果调节冷、热媒的进口参数和流量不能解决问题，则应更换设备或增加设备(例如加热器加热量过小可以增加排数)。

2) 当冷、热媒参数和流量不符合设计要求时，则应检查冷冻系统或热源系统(锅炉或热交换器)的能力是否满足要求。另外还应检查水泵的流量和扬程是否有问题，以及冷、热媒管道的保温措施及管道系统是否堵塞等。并应采取相应措施，以保证冷、热媒参数及流量满足设计要求。

3) 冷却设备出口处空气带水，若为表面冷却器，可在其后增设挡水板。若已装有挡水板，则应提高挡水板的挡水效果(改用挡水效果好的挡水板或增加挡水板的折数)。对于喷水室，除了挡水板要有良好的挡水效果外，还应检查挡水板是否插入底池，挡水板与空调箱内壁间是否漏风等。

4) 风机和管道温升(或温降)过大时，若风机的运行风压超过设计要求则可能造成风机温升过大，应采取措施降低风机运行风压(降低管道的阻力等)。管道温升(或温降)过大，应检查管道的保温措施是否满足设计要求，并做好管道的保温。

5) 应采取措施避免系统的漏风。

### 3. 室内空气参数不符合设计要求

(1) 室内空气参数不符合设计要求，可能的原因是实际的热、湿负荷与设计计算负荷有出入，或送风参数不满足设计要求。

一般解决的方法是：

1) 若送风参数不满足设计要求，则首先解决送风参数方面存在的问题(见本节第2点)。若送风参数满足设计要求，则可以根据通风机及空气处理设备的能力来改变送风量和送风参数，以满足室内空气参数。

2) 若条件允许，可采取措施减少建筑围护结构的传热量及室

内产生的热量。如对建筑围护结构加设保温层，玻璃窗加设遮阳措施等。尽量减少室内设备等的散热和排除室内局部热源产生的热量等。

### (2) 室内气流速度超过允许值

室内气流速度过大，主要原因是送风口速度过大，或系统总风量过大。可以通过增大送风口面积来减小送风口速度或减少送风量(以满足室内换气次数为前提)。以及改变送风口的型式，(增加风口的紊流系数)的方法解决。

### (3) 室内空气品质不良

室内空气品质主要指洁净度和清洁度。

洁净度不符设计要求，主要原因为：过滤器本身效率未达到要求和施工安装质量不好以及系统运行管理(室内清扫，清洁等)不善和室内生产工艺流程与设计不符。解决以上问题，首先应保证过滤器的效率，若过滤器本身质量不行则应更换。若由于施工安装质量则应采取措施提高施工安装质量(例堵漏等)。其次可增加室内换气次数和增加室内正压值。以及完善运行管理，采取相应措施使生产工艺流程满足设计要求。

清洁度不符设计要求，主要是新风量不足或室内人员超过设计人数。主要采取增加新风量的方法解决。

现场的测定与调整可能碰到的问题是多种多样的。实际工作中应对具体问题进行分析，找出问题的原因，提出合理的解决方法。

## 第 11 章 空调与制冷常用电工设备

用电动机作为动力拖动制冷压缩机、风机或水泵,用电加热器作为热源加热空气或水,是空气调节工程中常见的用电设备。怎样运用好这些设备应是空调专业技术人员必不可少的基础知识之一。为此,本章对空调工程中最常用的这类电气设备的原理、特性及使用等方面从实用出发作些基本介绍。

### 11.1 三相异步电动机

电动机,是根据电磁原理将电能转换为机械能的设备。根据它所使用电源的电流种类,可分为交流电动机与直流电动机两大类。交流电动机中,异步电动机与其他电动机比较,具有结构简单,牢固、制造费用低廉、操作维护方便、重量轻、运行可靠等优点。工程中常用的异步电动机,按电源相数不同,多为三相异步电动机与单相异步电动机,但它们的基本运转原理都是由旋转的定子磁场与转子中感应电流间相互作用而工作。由于转子的转速与定子磁场的旋转速度必须保持一定的转速差(不同步)才能使电动机正常运转,故而这类电动机就统称为异步电动机。在空调工程中除特殊情况需要应用直流电动机外,以三相异步电动机使用得最为广泛。

#### 11.1.1 异步电动机的转动原理

图 11.1 是异步电动机转动原理示意图。其中图 a 表示一个可以在轴架上自由转动的鼠笼形短路绕组,将它放置在一个可旋转的马蹄形磁铁中,磁铁的磁力线与绕组的平行导线垂直相交。由物理学知识可知,当磁铁转动后,它的磁力线切割鼠笼中的导线使导线中产生感应电势  $E = Blv$  ( $B$ ——磁通密度,  $l$ ——导线长度,  $v$ ——导线运动速度),它的方向可由右手定则确定,因为导线

是逆磁铁旋转方向而运动，而且导线两端用环形导线短路。因此鼠笼上半部导线中感应电动势所产生的电流流入图面（以符号 $\otimes$ 表示），而下半部则流出图面（以符号 $\odot$ 表示）如图 b 所示。与此同时，导线中的感应电流存在于磁场中，这对导线将产生作用力  $F = BII$  ( $I$ ——电流值)，它的方向可由左手定则决定。从图 b 中可看出鼠笼上半部和下半部所受的力大小相等，方向相反，形成了电磁转矩。在磁铁不断旋转的情况下，鼠笼就顺着磁铁旋转方向转动。因为磁铁与鼠笼间必须存在转速差才能使导线中产生感应电流，故鼠笼的转速永远小于磁铁的转速，这就是异步电动机的转动基本原理。其关键是需要建立旋转磁场。

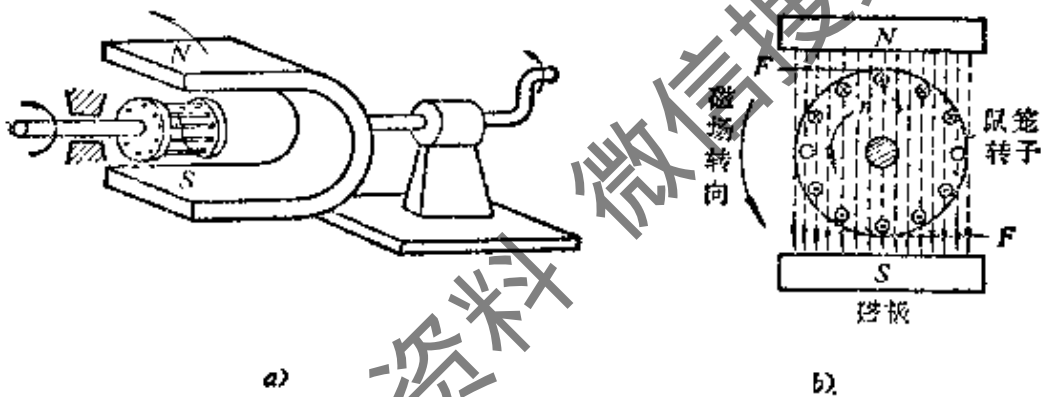


图 11.1 异步电动机转动原理示意图

### 11.1.2 三相异步电动机的构造

三相异步电动机的结构主体是由鼠笼式(或绕线式)转子和按一定规律排列三相绕组的定子以及支承转子使能自由转动的一些附件组成。图 11.2 是鼠笼式转子异步电动机的结构分解图。电动机三相绕组的引出线通过机座上的接线盒与电源连接。通常接线盒内侧有标示该电动机的接线图。一般三相绕组出线始、末端的标志是：如各相不连接时，第一相指标示  $D_1$ 、 $D_4$ ，第二相标示  $D_2$ 、 $D_5$ ，第三相指示  $D_3$ 、 $D_6$ ，三相绕组可根据需要接成星形(Y)或三



电动机的铭牌

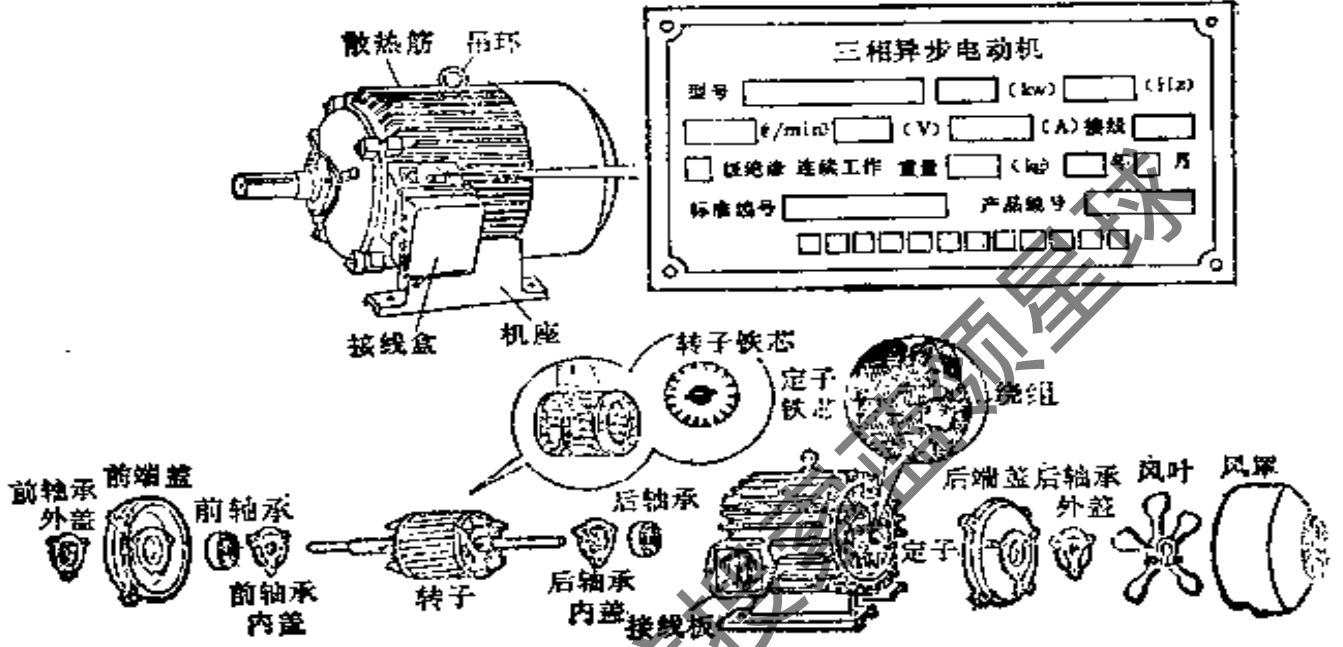


图 11.2 封闭式鼠笼转子异步电动机的结构分解图

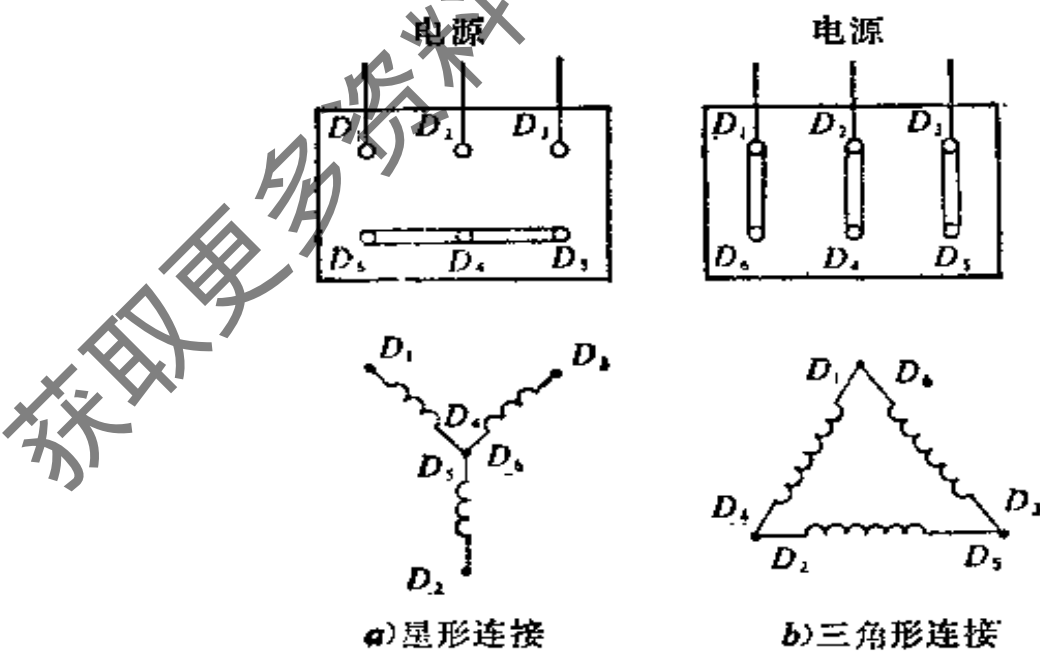


图 11.3 三相绕组的连接法

| 级 别 | 极限工作温度[°C] |
|-----|------------|
| Y   | 90         |
| A   | 105        |
| E   | 120        |
| B   | 130        |
| F   | 155        |
| H   | 180        |
| C   | >180       |

| 基本结构型式        | $E_2$<br>(机座带底脚, 端盖有凸缘) |       |        |       |       |       |
|---------------|-------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 安装结构型式        | $E_2$                   | $E_0$ | $E_T$  | $E_N$ | $V_3$ | $V_0$ |
| 示意图           |                         |       |        |       |       |       |
| 制造范围<br>(中心高) | 80~315                  |       | 80~160 |       |       |       |

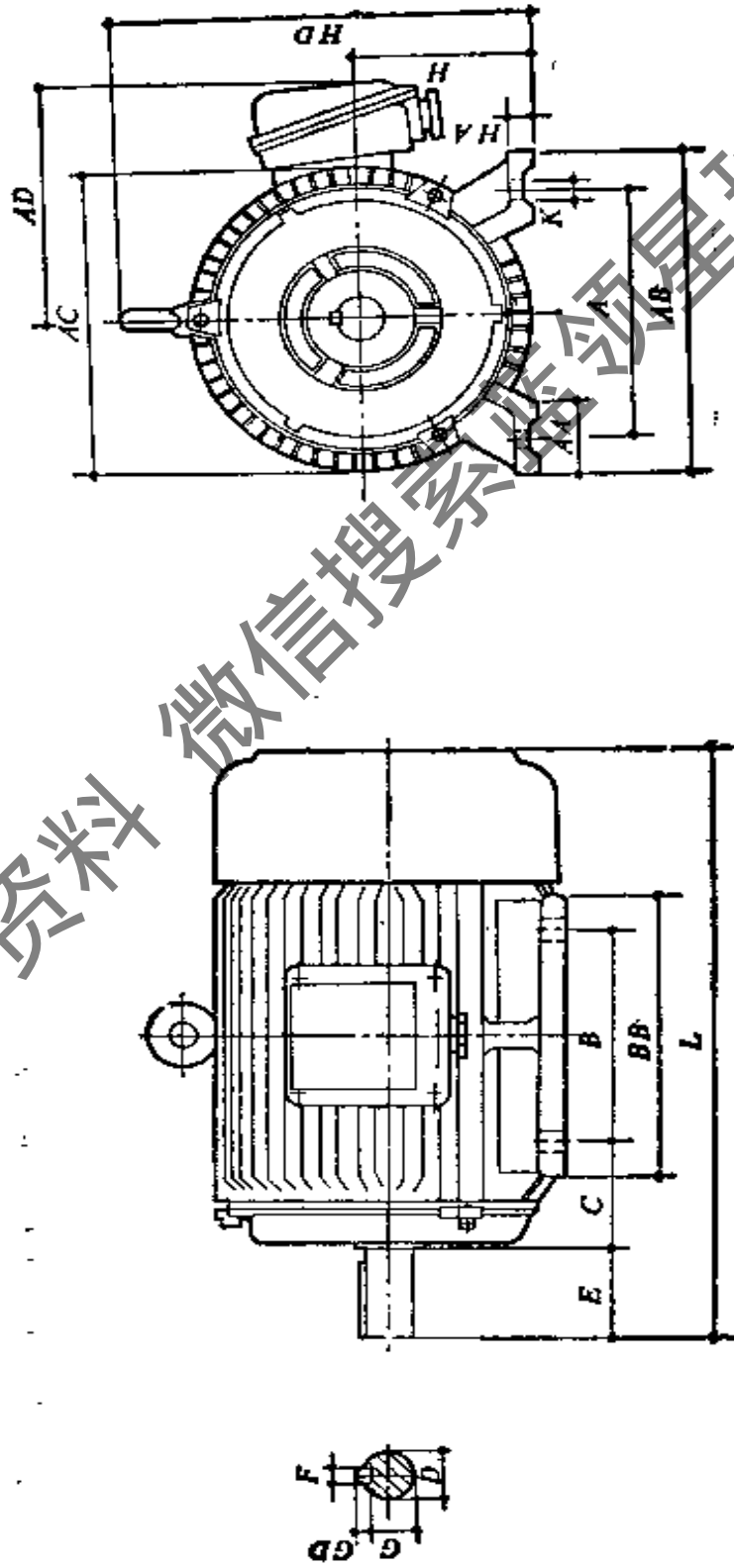
| 基本结构型式        | $E_0$<br>(机座不带底座, 端盖有凸缘) |        |        | $E_{2L}$<br>(机座带底脚, 端盖有凸缘) |          |          |
|---------------|--------------------------|--------|--------|----------------------------|----------|----------|
|               | 安装结构型式                   | $E_0$  | $V_L$  | $V_B$                      | $B_{2L}$ | $V_{2L}$ |
| 示意图           |                          |        |        |                            |          |          |
| 制造范围<br>(中心高) | 80~225                   | 80~315 | 80~160 | 80~315                     | 80~160   |          |

图 11.4 Y系列三相异步电动机的基本结构和安装结构型式

Y 系列三相异步电动机 B<sub>3</sub> 结构的安装及外型尺寸

B<sub>3</sub> B<sub>6</sub> B<sub>7</sub> B<sub>8</sub> V<sub>5</sub> V<sub>6</sub>

机座带底脚, 端盖无凸缘



续表 11.2

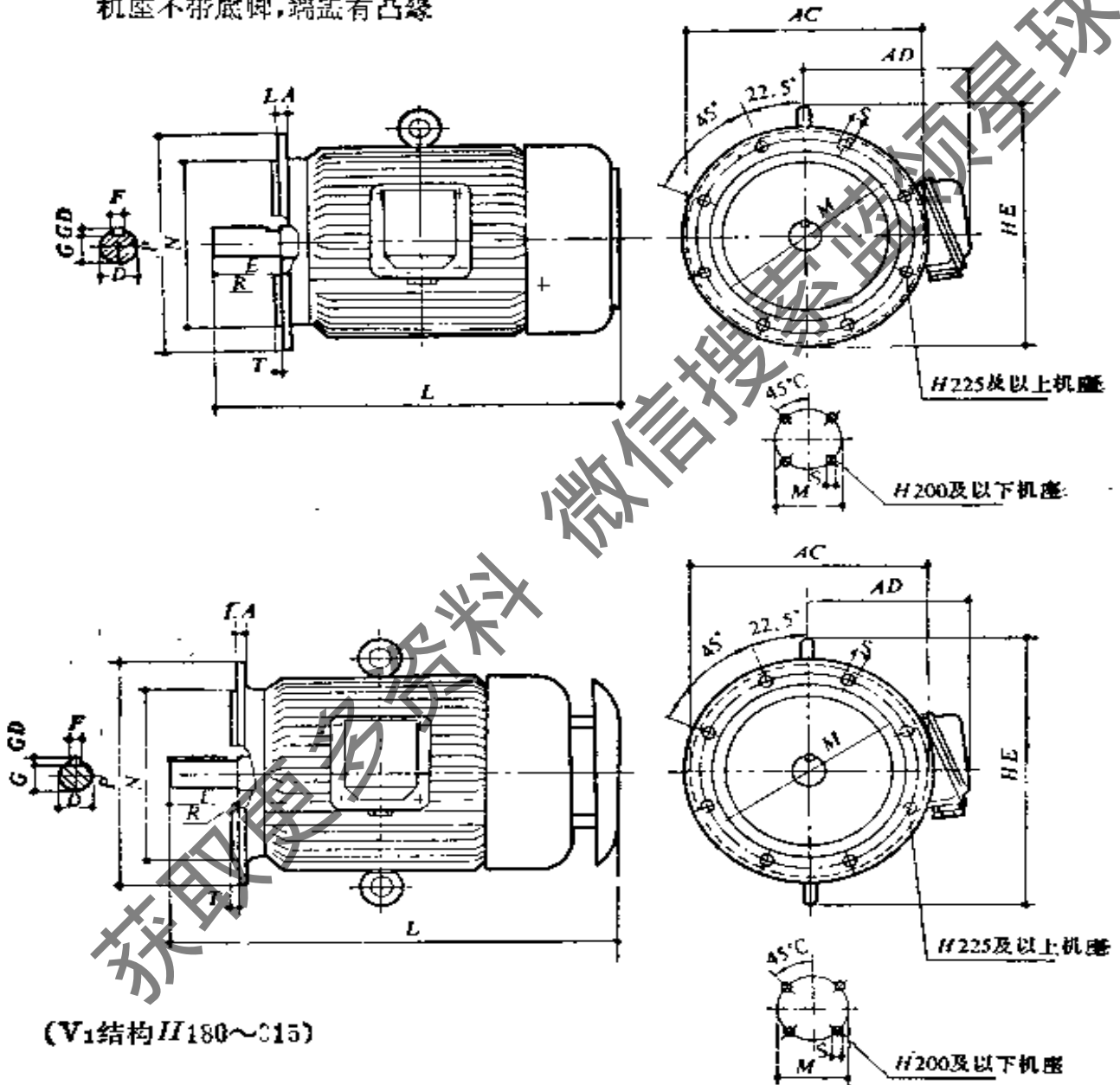
| 型 号     | 尺 寸 [mm] |     |     |     |             |             |        |              |              |     |     |     |     | 制造范围 |     |    |     |    |   |                |  |
|---------|----------|-----|-----|-----|-------------|-------------|--------|--------------|--------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|----|-----|----|---|----------------|--|
|         | H        | A   | B   | C   | D           |             | E      | F × G × D    |              | G   | K   | AB  | AC  | AD   | HD  | AA | BB  | HA | L | B <sub>9</sub> | B <sub>6</sub> , B <sub>7</sub> ,<br>B <sub>8</sub> , V <sub>6</sub> ,<br>V <sub>8</sub> |
|         |          |     |     |     | 2, 4, 6, 8极 | 2, 4, 6, 8极 |        | 2   4, 6, 8极 | 2   4, 6, 8极 |     |     |     |     |      |     |    |     |    |   |                |  |
| Y 80    | 80       | 125 | 100 | 50  | 19          | 40          | 6 × 6  | 15.5         | 10           | 105 | 105 | 165 | 170 | 84   | 130 | 10 | 285 |    |   |                |  |
| Y 90 S  | 90       | 140 | 100 | 56  | 24          | 50          | 8 × 7  | 20           | 10           | 160 | 175 | 155 | 190 | 38   | 130 | 12 | 310 |    |   |                |  |
| Y 90 L  | 90       | 140 | 125 | 56  | 24          | 50          | 8 × 7  | 20           | 10           | 190 | 175 | 155 | 190 | 36   | 155 | 12 | 335 |    |   |                |  |
| Y 100 L | 100      | 160 | 140 | 63  | 28          | 60          | 8 × 7  | 24           | 12           | 265 | 205 | 180 | 245 | 40   | 176 | 14 | 380 |    |   |                |  |
| Y 112 M | 112      | 190 | 140 | 70  | 28          | 60          | 8 × 7  | 24           | 12           | 245 | 230 | 190 | 265 | 50   | 180 | 15 | 400 |    |   |                |  |
| Y 132 S | 132      | 216 | 140 | 89  | 38          | 80          | 10 × 8 | 33           | 12           | 280 | 270 | 210 | 315 | 60   | 200 | 18 | 475 |    |   |                |  |
| Y 132 M | 132      | 216 | 178 | 89  | 38          | 80          | 10 × 8 | 33           | 12           | 290 | 270 | 210 | 315 | 70   | 238 | 18 | 515 |    |   |                |  |
| Y 160 M | 160      | 254 | 210 | 108 | 42          | 110         | 12 × 8 | 37           | 15           | 330 | 325 | 265 | 355 | 50   | 270 | 20 | 600 |    |   |                |  |
| Y 160 L | 160      | 254 | 254 | 108 | 42          | 110         | 12 × 8 | 37           | 15           | 330 | 325 | 255 | 385 | 70   | 314 | 20 | 615 |    |   |                |  |
| Y 100 M | 130      | 279 | 241 | 121 | 48          | 110         | 14 × 9 | 42.5         | 15           | 355 | 360 | 285 | 430 | 70   | 311 | 22 | 670 |    |   |                |  |

| 型号          | 尺寸 [mm] |     |     |     |    |     |       |      |    |     |     | L   | 制造范围<br>B <sub>1</sub> , B <sub>7</sub> ,<br>B <sub>3</sub> , B <sub>3</sub> , V <sub>5</sub> ,<br>V <sub>n</sub> |     |    |      |             |
|-------------|---------|-----|-----|-----|----|-----|-------|------|----|-----|-----|-----|---|-----|----|------|-------------|
|             | H       | A   | B   | C   | D  | E   | F×GD  | G    | K  | AC  | AD  |     |   | HD  | AA | BB   | HA          |
| Y 180 L 190 | 279     | 279 | 279 | 121 | 48 | 110 | 14×9  | 42.5 | 15 | 335 | 360 | 450 | 70  | 349 | 22 | 710  | 2, 4, 6, 8极 |
| Y 200 L 200 | 318     | 305 | 305 | 133 | 55 | 110 | 16×10 | 49   | 19 | 395 | 400 | 475 | 70  | 379 | 25 | 775  | 2, 4, 6, 8极 |
| Y 225 S 225 | 356     | 283 | 149 | 55  | 60 | 110 | 16×10 | 49   | 17 | 405 | 450 | 530 | 75  | 369 | 28 | 820  | 2, 4, 6, 8极 |
| Y 225 M 225 | 356     | 311 | 149 | 55  | 60 | 110 | 16×10 | 49   | 19 | 435 | 450 | 530 | 75  | 399 | 23 | 815  | 2, 4, 6, 8极 |
| Y 250 M 250 | 406     | 349 | 168 | 60  | 65 | 140 | 18×11 | 53   | 21 | 480 | 495 | 575 | 90  | 455 | 30 | 930  | 2, 4, 6, 8极 |
| Y 280 S 280 | 457     | 368 | 190 | 65  | 75 | 140 | 18×11 | 58   | 24 | 560 | 555 | 640 | 85  | 530 | 35 | 1000 | 2, 4, 6, 8极 |
| Y 280 M 280 | 457     | 419 | 190 | 65  | 75 | 140 | 18×11 | 58   | 24 | 550 | 555 | 640 | 85  | 581 | 35 | 1050 | 2, 4, 6, 8极 |
| Y 315 S 315 | 508     | 406 | 216 | 65  | 80 | 140 | 18×11 | 58   | 28 | 632 | 640 | 770 | 125   | 670 | 50 | 1220 | 2, 4, 6, 8极 |
| Y 315 M 315 | 508     | 457 | 216 | 65  | 80 | 140 | 18×11 | 58   | 28 | 632 | 640 | 770 | 125   | 670 | 50 | 1220 | 2, 4, 6, 8极 |

注: 80 及 90 机座无吊攀, HD 尺寸是从机座底脚平面至机壳外圆顶部。

B<sub>5</sub>、V<sub>1</sub>、V<sub>3</sub>

机座不带底脚,端盖有凸缘



附表 11.3

| 型号      | 尺寸 [mm]       |               |               |               |               |               |     |     |   |         |     | 制造范围 |           |           |    |    |               |  |                |                |                |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----|-----|---|---------|-----|------|-----------|-----------|----|----|---------------|--|----------------|----------------|----------------|
|         | D             |               | E             |               | F × GD        |               | G   | T   | M | N       | P   | R    | S         | ACAD      | LA | HE | L             |  | B <sub>s</sub> | V <sub>1</sub> | V <sub>3</sub> |
|         | 2   4,6,   8极 | 2   4,6,   8极 | 2   4,6,   8极 | 2   4,6,   8极 | 2   4,5,   8极 | 2   4,6,   8极 |     |     |   |         |     |      |           |           |    |    | 2   4,6,   8极 |  |                |                |                |
| Y 80    | 19            | 40            | 6 × 6         | 15.5          | 3.5           | 165           | 130 | 200 | 0 | 4 × φ12 | 150 | 12   | 185       | 285       |    |    |               |  |                |                |                |
| Y 90 S  | 24            | 50            | 8 × 7         | 20            | 3.5           | 165           | 130 | 200 | 0 | 4 × φ12 | 175 | 12   | 195       | 310       |    |    |               |  |                |                |                |
| Y 90 L  | 24            | 50            | 8 × 7         | 20            | 3.5           | 165           | 130 | 200 | 0 | 4 × φ12 | 175 | 12   | 195       | 335       |    |    |               |  |                |                |                |
| Y 100 L | 28            | 60            | 8 × 7         | 24            | 4             | 215           | 180 | 250 | 0 | 4 × φ15 | 205 | 14   | 245       | 380       |    |    |               |  |                |                |                |
| Y 112 M | 28            | 60            | 8 × 7         | 24            | 4             | 215           | 180 | 250 | 0 | 4 × φ15 | 230 | 14   | 235       | 400       |    |    |               |  |                |                |                |
| Y 132 S | 38            | 80            | 10 × 8        | 33            | 4             | 265           | 230 | 300 | 0 | 4 × φ18 | 270 | 14   | 315       | 475       |    |    |               |  |                |                |                |
| Y 132 M | 38            | 80            | 10 × 8        | 33            | 4             | 265           | 230 | 300 | 0 | 4 × φ18 | 270 | 14   | 315       | 515       |    |    |               |  |                |                |                |
| Y 160 M | 42            | 110           | 12 × 8        | 37            | 5             | 300           | 250 | 350 | 0 | 4 × φ19 | 325 | 16   | 335       | 600       |    |    |               |  |                |                |                |
| Y 180 L | 42            | 110           | 12 × 9        | 37            | 5             | 300           | 250 | 350 | 0 | 4 × φ19 | 325 | 16   | 335       | 645       |    |    |               |  |                |                |                |
| Y 180 M | 48            | 110           | 11 × 9        | 42.5          | 5             | 300           | 250 | 350 | 0 | 4 × φ19 | 360 | 18   | 430 (500) | 670 (730) |    |    |               |  |                |                |                |

续表 11.3

| 型号      | 尺寸 [mm] |            |             |             |        |            |        |            |     |   |       |     |     |    | 制造范围         |     |              |    |        |            |                |                |                |  |
|---------|---------|------------|-------------|-------------|--------|------------|--------|------------|-----|---|-------|-----|-----|----|--------------|-----|--------------|----|--------|------------|----------------|----------------|----------------|--|
|         | D       |            | E           |             | F×GD   |            | G      |            | T   | M | N     | P   | R   | S  | AC           | AD  | LA           | HE | L      |            | B <sub>5</sub> | V <sub>1</sub> | V <sub>3</sub> |  |
|         | 2<br>极  | 4,6,<br>8极 | 2<br>极      | 4,6,<br>8极  | 2<br>极 | 4,6,<br>8极 | 2<br>极 | 4,6,<br>8极 |     |   |       |     |     |    |              |     |              |    | 2<br>极 | 4,6,<br>8极 |                |                |                |  |
| Y 160 L | 43      | 110        | 13×9        | 13×9        | 42.5   | 5          | 300    | 250        | 350 | 0 | 4×φ19 | 360 | 285 | 19 | 430<br>(520) | 710 | (770)        |    |        |            |                |                |                |  |
| Y 200 L | 55      | 110        | 18×10       | 18×10       | 49     | 5          | 350    | 300        | 400 | 0 | 4×φ19 | 400 | 310 | 18 | 480<br>(550) | 775 | (850)        |    |        |            |                |                |                |  |
| Y 225 S | 55      | 110        | 140         | 16×10-18×11 | 49     | 5          | 400    | 350        | 450 | 0 | 8×φ19 | 450 | 345 | 20 | 555<br>(610) |     | 820<br>(910) |    |        |            |                |                |                |  |
| Y 225 M | 55      | 110        | 140         | 16×10-18×11 | 49     | 5          | 400    | 350        | 450 | 0 | 8×φ19 | 450 | 345 | 20 | 535<br>(610) |     | 815<br>(905) |    |        |            |                |                |                |  |
| Y230M   | 60      | 140        | 18×11       | 18×11       | 53     | 5          | 500    | 450        | 470 | 0 | 8×φ19 | 495 | 365 | 22 | 650          |     | (1035)       |    |        |            |                |                |                |  |
| Y 280 S | 65      | 140        | 18×11-20×12 | 18×11-20×12 | 58     | 5          | 500    | 450        | 570 | 0 | 8×φ19 | 555 | 410 | 22 | 720          |     | (1120)       |    |        |            |                |                |                |  |
| Y 290 M | 65      | 140        | 18×11-20×12 | 18×11-20×12 | 58     | 5          | 500    | 450        | 570 | 0 | 8×φ19 | 555 | 410 | 22 | 720          |     | (1170)       |    |        |            |                |                |                |  |
| Y 315 S | 65      | 140        | 170         | 18×11-22×14 | 58     | 6          | 600    | 550        | 660 | 0 | 8×φ24 | 640 | 500 | 25 | 800<br>(900) |     | (1270)       |    |        |            |                |                |                |  |
| Y 315 M | 65      | 140        | 170         | 18×11-22×14 | 58     | 6          | 600    | 550        | 660 | 0 | 8×φ24 | 640 | 530 | 25 | 800<br>(890) |     | (1320)       |    |        |            |                |                |                |  |

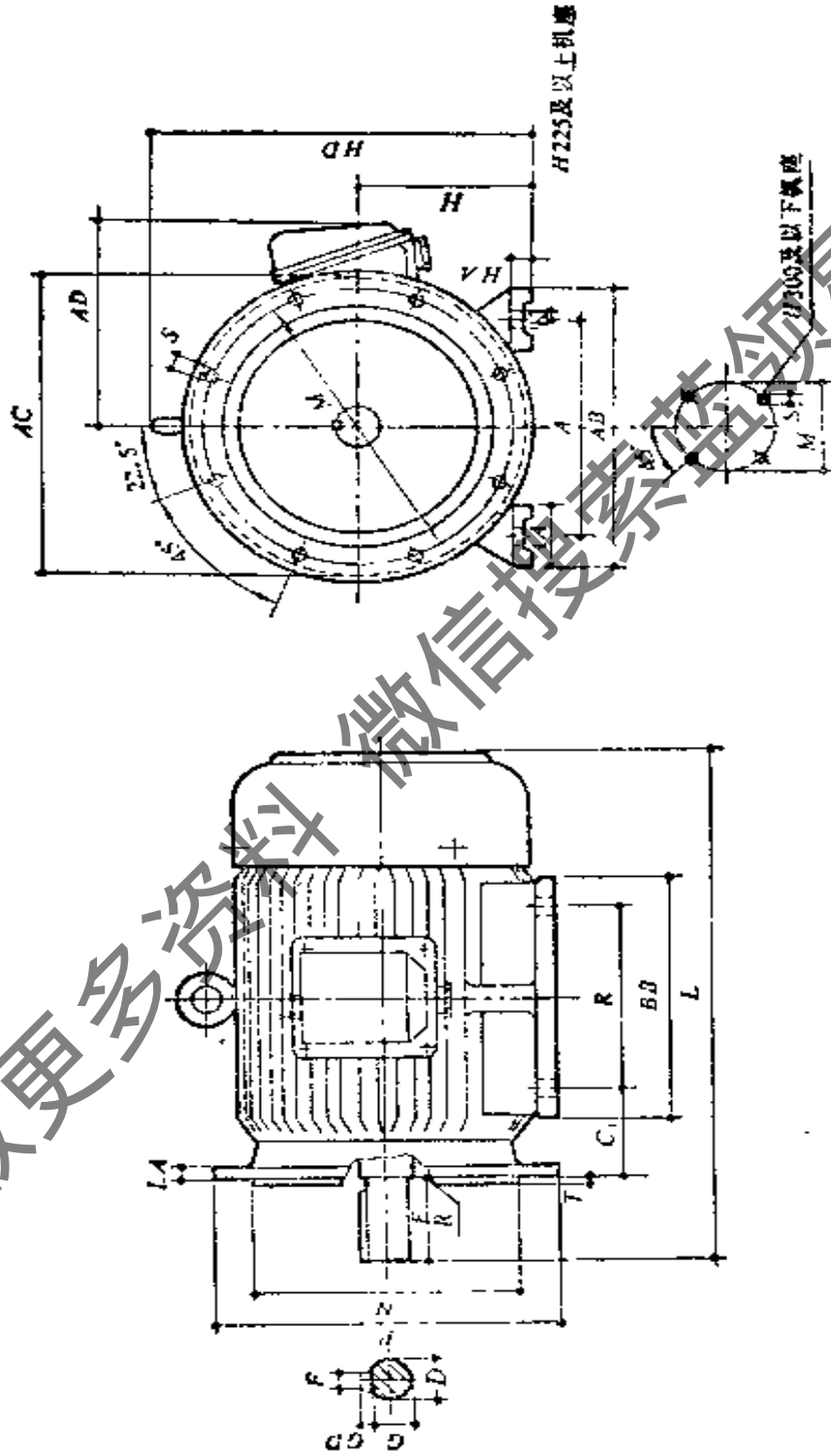
注: ① 括号内尺寸仅用于 V<sub>1</sub> 结构, (H 180~315)。② R 为凸缘安装平面至轴伸台阶平面距离。③ S0 及 90 机座无吊攀



Y 系列三相异步电动机 B<sub>30</sub> 结构的安装及外形尺寸

表 11.4

B<sub>30</sub>, V<sub>100</sub>, V<sub>30</sub>  
 机座带底脚, 端盖有凸缘



| 型号      | H   | A   | B   | C <sub>1</sub> | D      |            | E      |            | F×GD   |            | G      |            | K | T | M | N |
|---------|-----|-----|-----|----------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|---|---|---|---|
|         |     |     |     |                | 2<br>极 | 4,6,<br>8极 | 2<br>极 | 4,6,<br>8极 | 2<br>极 | 4,6,<br>8极 | 2<br>极 | 4,6,<br>8极 |   |   |   |   |
| Y 80    | 80  | 125 | 100 | 50             | 19     | 40         | 6×6    | 15.5       | 10     | 3.5        | 165    | 130        |   |   |   |   |
| Y 90 S  | 90  | 140 | 100 | 56             | 24     | 50         | 8×7    | 20         | 16     | 3.5        | 165    | 130        |   |   |   |   |
| Y 90 L  | 90  | 140 | 125 | 56             | 24     | 50         | 8×7    | 20         | 10     | 3.5        | 165    | 130        |   |   |   |   |
| Y 100 L | 100 | 160 | 140 | 63             | 28     | 60         | 8×7    | 24         | 12     | 4          | 215    | 130        |   |   |   |   |
| Y 112 M | 112 | 190 | 140 | 70             | 28     | 60         | 8×7    | 24         | 12     | 4          | 215    | 180        |   |   |   |   |
| Y 132 S | 132 | 216 | 140 | 89             | 38     | 80         | 10×8   | 33         | 12     | 4          | 265    | 230        |   |   |   |   |
| Y 132 M | 132 | 216 | 178 | 89             | 38     | 80         | 10×8   | 33         | 12     | 4          | 265    | 230        |   |   |   |   |
| Y 160 M | 160 | 254 | 210 | 108            | 42     | 110        | 12×8   | 37         | 15     | 5          | 300    | 250        |   |   |   |   |
| Y 160 L | 160 | 254 | 54  | 108            | 42     | 110        | 12×8   | 37         | 15     | 5          | 300    | 250        |   |   |   |   |
| Y 180 M | 180 | 279 | 241 | 121            | 48     | 110        | 14×9   | 42.5       | 15     | 5          | 300    | 250        |   |   |   |   |

续表 11.4

| 形号      | 尺寸 [mm] |     |     |                |    |     |       |      |    |   |     |     |
|---------|---------|-----|-----|----------------|----|-----|-------|------|----|---|-----|-----|
|         | H       | A   | B   | C <sub>1</sub> | D  | E   | F×GD  | G    | K  | T | M   | N   |
| Y 180 L | 180     | 279 | 279 | 121            | 48 | 110 | 14×9  | 42.5 | 15 | 5 | 300 | 250 |
| Y 200 L | 200     | 318 | 305 | 133            | 55 | 110 | 16×10 | 49   | 19 | 5 | 350 | 300 |
| Y 225 S | 225     | 356 | 286 | 149            | 55 | 110 | 16×10 | 53   | 19 | 5 | 400 | 350 |
| Y 225 M | 225     | 356 | 311 | 149            | 55 | 110 | 16×10 | 53   | 19 | 5 | 400 | 350 |
| Y 250 M | 250     | 406 | 349 | 168            | 60 | 140 | 18×11 | 58   | 24 | 5 | 500 | 450 |
| Y 280 S | 250     | 457 | 358 | 190            | 65 | 140 | 18×11 | 67.5 | 24 | 5 | 500 | 450 |
| Y 280 M | 280     | 457 | 419 | 190            | 65 | 140 | 18×11 | 67.5 | 24 | 5 | 500 | 450 |
| Y 315 S | 315     | 508 | 408 | 216            | 65 | 140 | 18×11 | 71   | 28 | 6 | 600 | 550 |
| Y 315 M | 315     | 508 | 457 | 216            | 65 | 170 | 22×14 | 71   | 28 | 6 | 600 | 550 |

注: ① R为凸缘安装平面至轴伸台阶平面的距离; ② 80及90机座无吊攀, HD尺寸从机座底脚平面至机壳外圆顶部,

续表 11.4

| 型号      | P   | R | S     | AB  | AC  | AD  | HD  | AA | BB  | HA | LA | L   |             | B35 | V16<br>V36 |
|---------|-----|---|-------|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|-----|-------------|-----|------------|
|         |     |   |       |     |     |     |     |    |     |    |    | 2 极 | 4,6,<br>8 极 |     |            |
| Y 80    | 200 | 0 | 4×φ12 | 165 | 165 | 150 | 170 | 24 | 130 | 10 | 12 | 285 |             |     |            |
| Y 90 S  | 200 | 0 | 4×φ12 | 150 | 175 | 155 | 170 | 26 | 130 | 12 | 12 | 310 |             |     |            |
| Y 90 L  | 200 | 0 | 4×φ12 | 180 | 175 | 155 | 190 | 36 | 155 | 12 | 12 | 335 |             |     |            |
| Y 100 L | 250 | 0 | 4×φ15 | 205 | 205 | 180 | 245 | 40 | 173 | 14 | 14 | 380 |             |     |            |
| Y 112 M | 250 | 0 | 4×φ15 | 245 | 230 | 190 | 265 | 50 | 150 | 15 | 14 | 400 |             |     |            |
| Y 132 S | 300 | 0 | 4×φ15 | 280 | 270 | 210 | 315 | 60 | 200 | 18 | 14 | 475 |             |     |            |
| Y 132 M | 300 | 0 | 4×φ15 | 280 | 270 | 210 | 315 | 60 | 238 | 18 | 14 | 515 |             |     |            |
| Y 160 M | 350 | 0 | 4×φ19 | 330 | 325 | 255 | 385 | 70 | 270 | 20 | 16 | 600 |             |     |            |
| Y 160 L | 350 | 0 | 4×φ19 | 330 | 325 | 255 | 385 | 70 | 314 | 20 | 16 | 645 |             |     |            |
| Y 180 M | 350 | 0 | 4×φ19 | 355 | 360 | 285 | 430 | 70 | 311 | 22 | 18 | 670 |             |     |            |

续表 11.4

| 型号      | P   | R | S     | AB  | AC  | AD  | HD  | AA  | BB  | HA | LA | L    |            | B36 | V15<br>V36 |
|---------|-----|---|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|------------|-----|------------|
|         |     |   |       |     |     |     |     |     |     |    |    | 2极   | 4、6、<br>8极 |     |            |
| Y 180 L | 350 | 0 | 4×φ19 | 335 | 360 | 285 | 430 | 70  | 343 | 22 | 18 | 710  |            |     |            |
| Y 200 L | 400 | 0 | 4×φ19 | 395 | 400 | 310 | 475 | 70  | 379 | 25 | 18 | 775  |            |     |            |
| Y 225 S | 450 | 0 | 8×φ19 | 435 | 450 | 345 | 530 | 75  | 388 | 28 | 20 | 820  |            |     |            |
| Y 225 M | 450 | 0 | 8×φ19 | 435 | 450 | 345 | 530 | 75  | 393 | 28 | 20 | 815  |            |     |            |
| Y 250 M | 550 | 0 | 8×φ19 | 490 | 495 | 385 | 575 | 80  | 455 | 30 | 22 | 930  |            |     |            |
| Y 280 S | 550 | 0 | 8×φ19 | 550 | 555 | 410 | 640 | 85  | 580 | 35 | 22 | 1000 |            |     |            |
| Y 280 M | 550 | 0 | 8×19  | 550 | 555 | 410 | 640 | 85  | 581 | 35 | 22 | 1050 |            |     |            |
| Y 315 S | 650 | 0 | 8×φ24 | 635 | 640 | 530 | 770 | 25  | 620 | 50 | 25 | 1170 |            |     |            |
| Y 315 M | 650 | 0 | 8×φ24 | 635 | 640 | 530 | 770 | 125 | 670 | 50 | 25 | 1220 |            |     |            |

角形( $\Delta$ ),如图11.3所示。如果仅有3根引出线端,则标示 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ ,这3根引出线应直接与符合电动机额定电压的三相电源连接。

在电动机铭牌上标明的绝缘等级是说明该电动机电绝缘结构所用材料的耐热等级。不同等级的极限工作温度见表11.1。

Y系列三相异步电动机的基本结构型式及安装结构型式见图11.4。其安装及外形尺寸见表11.2、表11.3和表11.4。

### 11.1.3 三相异步电动机的工作原理

从异步电动机转动原理可知电动机转子所以能够转动的原因是存在旋转磁场。但在静止的三相绕组定子中是怎样建立旋转磁场的呢?现以定子铁芯圆周上(机械角为 $360^\circ$ )将三相绕组按规律排列成一对磁极的两极电动机的三相定子绕组为例说明两极旋转磁场的建立。

如图11.5a和b所示。两极电动机中星形连接的对称三相定子绕组A-X、B-Y和C-Z在空间彼此相隔 $120^\circ$ 布置。设三相对称电流 $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ 在某瞬时处于正值时,电流从A、B、C端流入并从X、Y、Z端流出绕组,处于负值时则从相反端流入与流出绕组。

我们知道相序为A、B、C的三相电源流入各相绕组的电流,其中 $i_A$ 的初相角为零时, $i_B$ 较 $i_A$ 滞后 $120^\circ$ 电气角, $i_C$ 又较 $i_B$ 滞后 $120^\circ$ 电气角。这些电流的大小和方向随电角频率 $\omega = 2\pi f$ ( $f$ 为电源频率)及时间 $t$ 而变。在交流电变化一周的时间内电气角变化为 $360^\circ = 2\pi$ ,如图11.5c所示。由于进入各绕组是相位各差 $120^\circ$ 的脉动电流,这三个电流将在定子铁芯中各自产生一个脉动磁场。

我们试看图11.5c的瞬间(1), $i_A = 0$ 、 $i_B$ 为负、 $i_C$ 为正。如前所述,绕组A-X中电流 $i_A = 0$ ,绕组B-Y中电流 $i_B$ 由Y端流入B端流出,绕组C-Z中电流 $i_C$ 由C端流入Z端流出。用流入、流出符合 $\otimes$ 和 $\odot$ 注各绕组端后即可根据物理学中的右手螺旋定则确定各相电流在相应绕组中产生的磁场方向。图11.5d中的虚线及箭头表示合成磁场方向。

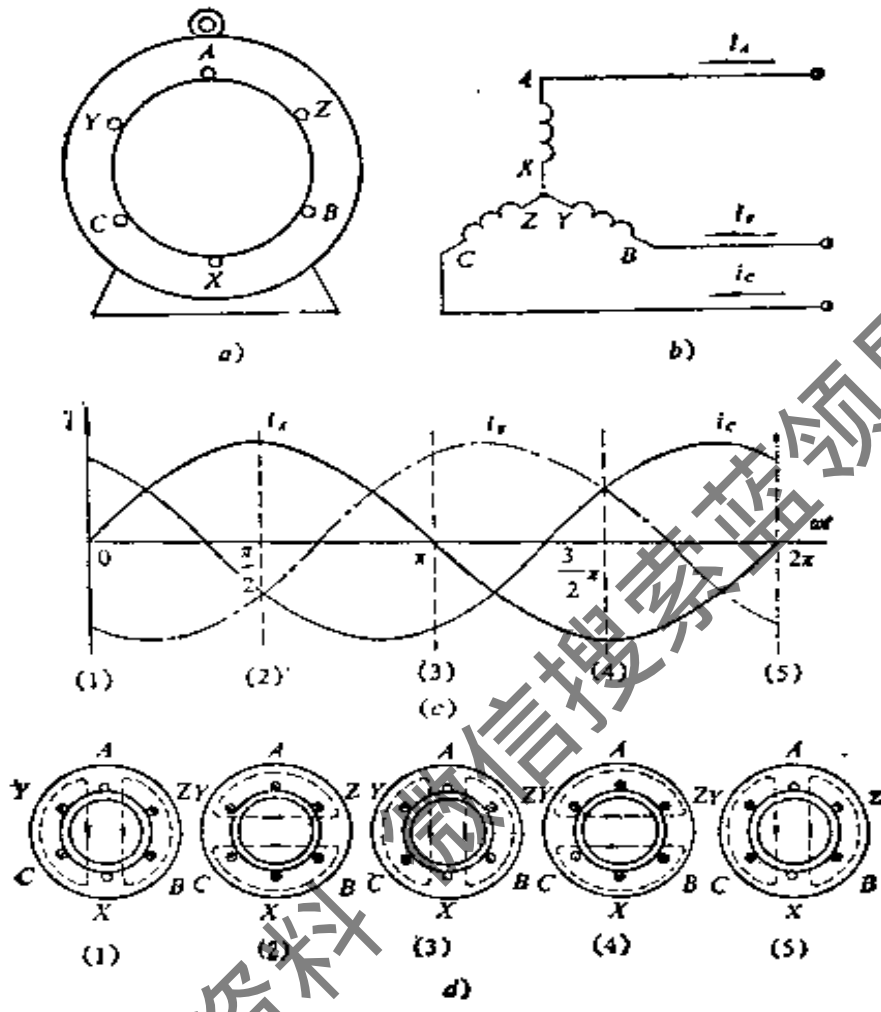


图 11.5 三相两极定子绕组旋转磁场的建立

在瞬间(2)  $\omega t = \frac{\pi}{2}$  时,  $i_A$  由零变为正的最大值, 并由 A 端流入 X 端流出,  $i_B$  仍为负值, 它仍由 Y 端流入 B 端流出;  $i_C$  已变为负值, 它由 Z 端流入 C 端流出。从图 11.5 d 中可看出, 同样方法用箭头确定的合成磁场方向比瞬时(1)顺时针转过了  $90^\circ$  机械角。

在(3)、(4)和(5)瞬间,  $\omega t = \pi, \frac{3}{2}\pi$  和  $2\pi$ 。用上述方法确定

的合成磁场方向与瞬间(1)相比,顺时针转动  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  和  $360^\circ$  机械角。

由上可见,在对称三相绕组  $A-X$ 、 $B-Y$ 、 $C-Z$  中,当通入对称三相交流电时,其合成磁势将是一个振幅恒定不变的旋转磁势,因而得到一个振幅恒定不变的旋转磁场。在两极电动机(极对数  $p=1$ )中,旋转磁场旋转  $360^\circ$  机械角恰好等于电流变化一个周期( $360^\circ$  电气角),即旋转磁场每秒钟的转数等于电流每秒钟变化的周期数,也即等于交流电流的频率  $f$ 。通常把旋转磁场在空间的转速称为同步转速  $n_0$ 。

如果把三相定子绕组在空间排列成 4 极(即极对数  $p=2$ ),则其旋转磁场的转速将比排列成 2 极时慢一半。同步转速  $n_0$  与交流电频率  $f$  和极对数  $p$  之间的关系可用下式表示:

$$n_0 = \frac{60 f}{p} \quad [\text{r/min}] \quad (11.1)$$

上式表明了改变电源频率或极对数时可以改变异步电动机的转速,当电源频率为  $50$  [Hz] 时,不同极数异步电动机的同步转速见表 11.5。

异步电动机极数与同步转速的关系

表 11.5

|                    |      |      |      |     |
|--------------------|------|------|------|-----|
| 极 数 $2p$           | 2    | 4    | 6    | 8   |
| 极 对 数 $p$          | 1    | 2    | 3    | 4   |
| 同步转速 $n_0$ [r/min] | 3000 | 1500 | 1000 | 750 |

图 11.5 中电动机的三相绕组  $A-X$ 、 $B-Y$ 、 $C-Z$  的始端引出线  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别接在三相交流电源的  $A$ 、 $B$ 、 $C$  端,这时旋转磁场是顺时针旋转。读者可以试将绕组  $B-Y$  中流入  $i_B$ , 绕组  $C-Z$  中流入  $i_C$  并按前述方法绘出各瞬间的合成磁场。这时可以看出旋转



磁场已逆时针旋转了。用同样方法可以证明，三相异步电动机的三根引出线中任意对换两根与三相电源连接，则会改变旋转磁场原来的旋转方向，也就是说旋转磁场的转动方向与三相电流的相序有关。使三相异步电动机倒、顺转的原理也在于此。

#### 11.1.4 三相异步电动机的转差率

从异步电动机的转动原理可知，电动机的转子转速 $n$ 永远小于旋转磁场的转速(即同步转速 $n_0$ )。通常我们将同步转速与转子转速之差与同步转速的比值称之为转差率 $S$ ：

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (11.2 a)$$

$$n = n_0(1 - S) \quad (11.2 b)$$

在电动机刚起动而转子尚未转动时， $n = 0$ ，此时 $S = 1$ 。若转子转速 $n$ 等于同步转速 $n_0$ ，则 $S = 0$ 。事实上在运行中的转子转速不可能等于同步转速。因此电动机在运行过程中的转差率在 $0 \rightarrow 1$ 之间变化，而且 $0 < S \leq 1$ 。转差率的变化反映了电动机转速的变化，它是分析异步电动机运行时的一个重要参数。

【例 11.1】 已知电源频率为 50[Hz]时 4极异步电动机在额定功率为 0.55[kW]时的转速为 1390[r/min]，求该电动机的转差率 $S$ 。

【解】 从表 11.5 可查得4极电动机的同步转速 $n_0 = 1500$ [r/min]，由式(11.2)可算出该电动机在额定功率运行时的转差率为：

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1390}{1500} = 0.073$$

反之，如已知转差率 $S = 0.073$ ，则可用式(11.2 b)求出该电动机的转速为

$$n = n_0(1 - S) = 1500(1 - 0.073) = 1390 \text{ [r/min]}$$

#### 11.1.5 三相异步电动机的电磁转矩

异步电动机的电磁转矩 $M$ ，产生于转子电流与旋转磁场相互作用的结果。理论与实践证明，它的大小与转子电流的有功分量 $I_2 \cos \varphi_2$ 和旋转磁场的每极磁通 $\Phi$ 成正比，并可用下式表示：

$$M = C_m \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (11.3)$$

式中  $C_m$ ——决定于电动机构造的转矩常数；

$\cos \varphi_2$ ——转子电路的功率因数。

我们知道,转子电流  $I_2$  的大小系由欧姆定律所确定,即

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} \quad (11.4)$$

式中,  $Z_2$  为转子电路的阻抗,它由电阻  $R_2$  与电抗  $X_2$  组成。  $E_2$  为转子电路中的感应电势,它由旋转磁场的磁通以一定转速切割转子绕组而产生。当转子不动时,转差率  $S = \frac{n_0 - 0}{n_0} = 1$ , 旋转磁

场以同步转速  $n_0 = \frac{60f}{p}$  切割转子绕组并产生感应电动势  $E_{20}$ , 切

割频率  $f_{20} = \frac{n_0 p}{60} = f$  (电源频率)。在电动机运行中,旋转磁场

切割转子绕组的转速不再是  $n_0$ , 而是转差  $n_0 - n = Sn_0$ 。在其他条件不变时,产生的  $E_2$  仅为  $E_{20}$  的  $S$  倍 ( $S \leq 1$ ), 感应电动势的频率  $f_2$  也仅为电源频率  $f$  的  $S$  倍, 即:

$$E_2 = SE_{20} \quad (11.5)$$

$$f_2 = \frac{p(n - n_0)}{60} = \frac{n_0 - n}{n_0} \times \frac{pn_0}{60} = Sf \quad (11.6)$$

而转子电路的电抗  $X_2$ , 在起动时为  $X_2 = 2\pi fL = X_{20}$ , ( $L$  为转子绕组的电感值)。起动后, 则为

$$X_2 = 2\pi f_2 L = 2\pi SfL = SX_{20} \quad (11.7)$$

转子电路的阻抗  $Z_2$  和转子电路的功率因数  $\cos \varphi_2$  分别为

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{R_2^2 + (SX_{20})^2} \quad (11.8)$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{20})^2}} \quad (11.9)$$

因此,由公式(11.3)所确定的电磁转矩可写成:

$$\begin{aligned} M &= C_m \Phi I_2 \cos \varphi_2 \\ &= C_m \Phi \frac{SE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{20})^2}} \times \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{20})^2}} \\ &= C_m \Phi E_{20} \frac{SR_2}{R_2^2 + (SX_{20})^2} \end{aligned} \quad (11.10)$$

对一台已定结构的电动机，可以认为每相绕组的  $R_2$  与  $X_{20}$  值基本不变。所以在额定电压下工作的异步电动机，它的电磁转矩是转差率  $S$  的函数，由此  $S$  值是分析异步电动机运行时的一个重要参数。

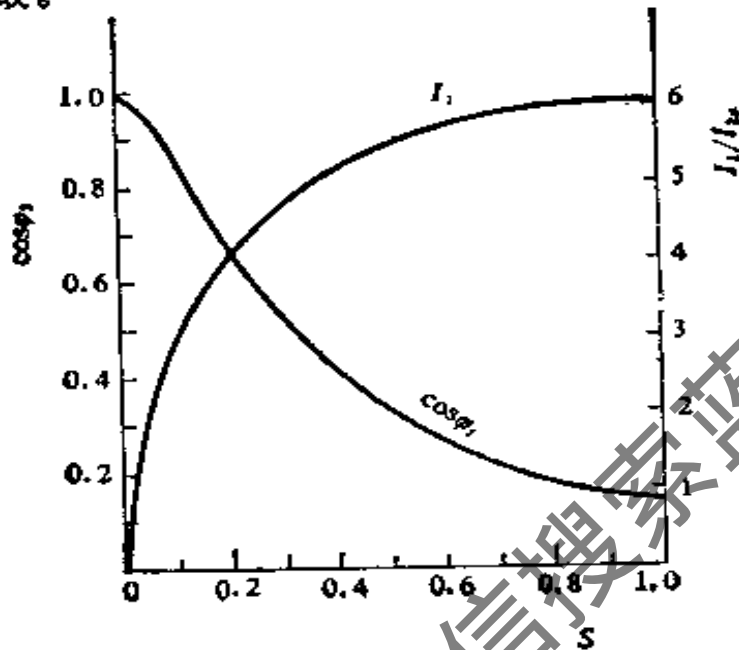


图 11.6  $I_2 = f(S), \cos \varphi_2 = f(S)$  曲线

转子电路中的电流  $I_2$  及功率因数  $\cos \varphi_2$  随  $S$  的变化见图 11.6。在图中可看出，当  $S=1$  时，虽然起动电流  $I_2$  高出额定电流 6 倍，但因  $R_2 \ll X_{20}$ ，所以  $\cos \varphi_2$  很小。当  $S=0$  时， $SX_{20} \approx 0$ ， $\cos \varphi_2 = 1$ 。在  $S$  变化范围内  $I_2$  与  $\cos \varphi_2$  的变化如图所示。由  $I_2$  与  $\cos \varphi_2$  的乘积成比例而确定的电磁转矩  $M$  随  $S$  变化的曲线，称之为异步电动机的转矩特性曲线，如图 11.7 所示。它的形状可以联系图 11.6 来分析。因为转矩  $M$  是与  $I_2$  和  $\cos \varphi_2$  的乘积成正比，在起动时  $S=1$ ， $I_2$  虽大但  $\cos \varphi_2$  甚小，堵转转矩  $M_{st}$  不大。而在  $S=0$  时，虽然  $\cos \varphi_2 = 1$  但  $I_2 = 0$ ，此时转矩等于零。在  $S$  在  $0 \rightarrow 1$  之间出现一个临界转差率  $S_m$ ，对应的转子转矩  $M_m$  达到最大值称为临界转矩，它是电动机能够提供的极限转矩。将曲线以  $S=0 \sim S_m$  和  $S$  在  $S_m \sim 1$  分为两段，当恒转矩负载所需的转矩  $M_L$  小于堵转转矩  $M_{st}$  时，转子加速，即  $S$  减小，电磁转矩沿曲线  $L-b-m$  段逐渐增加，直至临界转矩  $M_m$  的  $m$  点后进入另一段，转

速继续上升，直至电动机产生的电磁转矩与负载转矩相等时达到平衡，电动机就在曲线上的  $a$  点工作。如果原来在  $a$  点运行的电动机，其负载转矩突然从  $M_L$  增大至  $M'_L$ ，则转速减小， $S$  增大，电磁转矩增大直至在  $C$  点与  $M'_L$  平衡，在新的工作点  $C$  继续运行。因此，在运行中只要负载的最大转矩小于临界转矩  $M_m$ ，电动机总能平衡地运转，但其转速则有变化。所以  $S = 0 \sim S_m$  段称为稳定运行区。如运行中的负载转矩超过  $M_m$ ，电动机转矩特性进入  $S = S_m \sim 1$  段。在这段中  $S$  增大，转速降低，但电磁转矩减小，直至  $S = 1$  转子停止转动，它将导致电动机烧毁。因此，运行中应避免出现这一现象，并应采用相应过载保护措施。

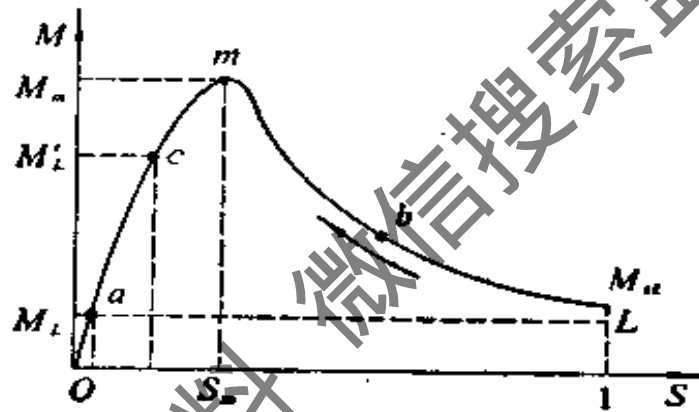


图 11.1 异步电动机的转矩特性曲线

由此可见，在使用电动机时应注意转矩曲线上存在的三个重要转矩：

1.  $S = S_e$  时的额定转矩  $M_e$ 。

电动机的额定转矩  $M_e$  是指它在额定负载运行时的转矩。这时的转差率称为额定转差率  $S_e$ ，转速  $n_e$  称为额定转速。额定转矩可根据电动机的铭牌数据由下式求得：

$$M_e = \frac{N_e \times 10^3}{\frac{2\pi n_e}{60}} = 9550 \frac{N_e}{n_e} \text{ [Nm]} \quad (11.11)$$

或

$$M_e = 974 \frac{N_e}{n_e} \text{ [kgfm]} \quad (11.12)$$

式中  $N_e$  为电动机的额定功率[kW]。

## 2. $S = S_m$ 时的临界转矩 $M_m$

临界转矩是电动机使用中的一个重要数据，在电动机的技术数据中常给出临界转矩（即最大转矩）与额定转矩之比  $\lambda_m$ ，表示该电动机的过载能力。 $\lambda_m$  越大，说明过载能力越强。

$$\lambda_m = \frac{M_m}{M_e} \quad (11.13)$$

因为旋转磁场的磁通  $\Phi$  及感应电动势  $E_{20}$  正比于电源电压  $U$ ，所以式(11.10)可写成：

$$M = CU^2 \frac{SR_2}{R_2^2 + (SX_{20})^2} \quad (11.14)$$

按(11.14)式对  $S$  求导数，并令其为零，可求得临界转差率  $S_m = R_2/X_{20}$ 。再将它代入(11.14)式得临界转矩：

$$\begin{aligned} M_m &= CU^2 \frac{S_m R_2^2}{R_2^2 + (S_m X_{20})^2} \\ &= CU^2 \frac{1}{2 X_{20}} \end{aligned} \quad (11.15)$$

因此可知，在  $X_{20}$  为定值时， $M_m$  与  $R_2$  无关，而与  $U^2$  成正比。而  $S_m$  与  $R_2$  成正比变化。图 11.8 和图 11.9 表示了它们对  $M(S)$  曲线的影响。图 11.8 说明一旦电源电压降低会使临界转矩成平方地减小，此时若临界转矩小于负载转矩则会导致转子堵转。所以对一般异步电动机采用改变定子绕组的电压进行调速受到了电动机特性的限制。用降压起动法减小起动电流也是有条件的。图 11.9 表示  $U$  不变而  $R_2$  值不同时，具有的  $M_m$  值不变。但  $R_2$  越大，曲线越向右移，使  $0 \sim S_m$  段增长。因此在同一负载转矩  $M_L$  下对应的转差率  $S$  增大，也就是转子转速减小。这一特性提供了改变异步电动机转速的方法。绕线式异步电动机就是通过这一方法进行

调速或增高堵转转矩以利于起动，但它将消耗一部分能量在附加电阻上。

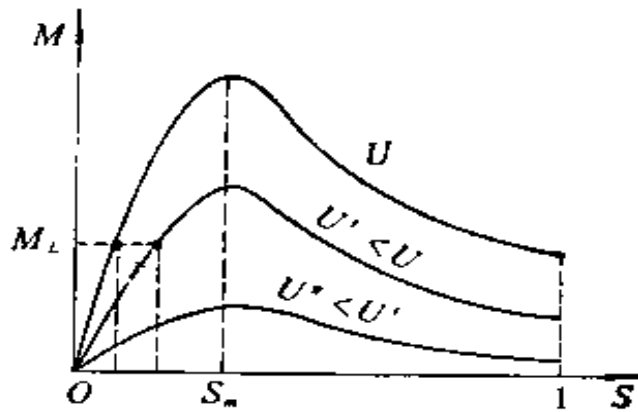


图 11.8  $U$ 对 $M(s)$ 的影响

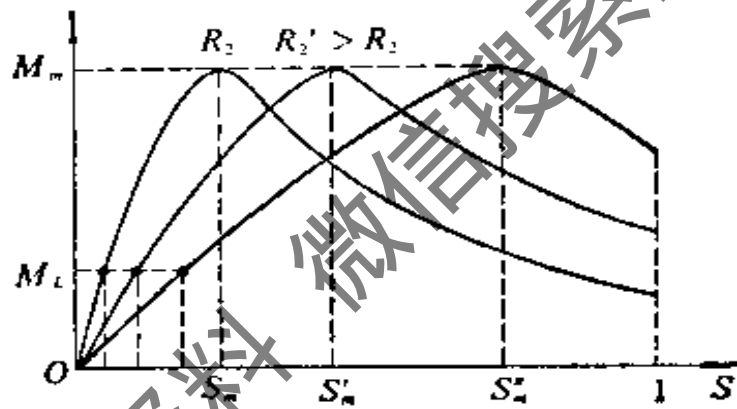


图 11.9  $R_2$ 对 $M(s)$ 的影响

### 3. $S=1$ 时的堵转转矩 $M_{st}$

堵转转矩是刚起动  $S=1$  或  $n=0$  时的转矩。在异步电动机中常给出堵转转矩与额定转矩之比  $\lambda_{st}$ ，并称为起动能力。此值越大，表示该电动机带负载起动的能力越强。

$$\lambda_{st} = \frac{M_{st}}{M_e} \quad (11.16)$$

若将  $S=1$  代入式(11.14)可得

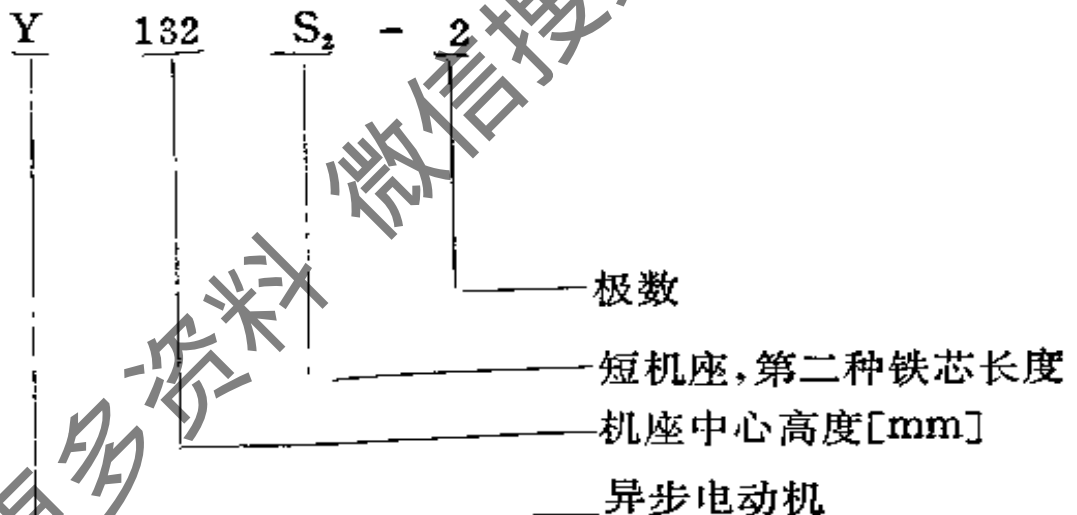
$$M_{st} = CU^2 \frac{R_2}{R_2 + X_{20}^2}$$

又因  $f_2 = Sf$ ,  $X_{20} = 2\pi SfL$  和  $X_{20} \gg R_2$ , 所以

$$M_{st} \approx CU^2 \frac{R_2}{X_{20}^2} \quad (11.17)$$

从上式可见堵转转矩与  $U^2$  及  $R_2$  有关。从图 11.8 及图 11.9 中也可看出  $S=1$  时,  $U$  值降低, 堵转转矩按  $U$  值的平方下降, 如果负载起动转矩中大于它则不能起动。当  $U$  值不变, 在一定范围内  $R_2$  越大,  $M_{st}$  越大, 其原因是, 虽然  $R_2$  增大使转子电流  $I_2$  减小但转子电路的功率因数  $\cos \varphi_2$  得到提高而使转子电流的有功分量得到增大。绕线式异步电动机通过滑环在转子电路中串接可调电阻是提高堵转转矩降低起动电流的实际应用。

Y 系列三相异步电动机的技术数据见表 11.6。它的噪声与振动数据见表 11.7。表中型号的组成说明如下:



例如需要订购一台 5.5[kW] 2 极, 机座带底脚, 端盖无凸缘的标准电动机则应标注如下:

Y 132S<sub>1</sub>-2、5.5[kW]、3000[r/min]、380[V]、 $\Delta$  接、50[Hz]、B 3。

如有特殊要求, 将接线盒置于左侧, 双轴伸等则应加注“左出线, 双轴伸”。并事先与制造厂联系。

Y 系列三相异步电动机的技术数据

表 11.6

| 型 号                         | 额 定 数 据    |           |    |                   |           |           |                    | 倍转<br>电流 | 堵转<br>转矩 | 最大<br>转矩 |
|-----------------------------|------------|-----------|----|-------------------|-----------|-----------|--------------------|----------|----------|----------|
|                             | 功率<br>[kW] | 电压<br>[V] | 接法 | 转速<br>[r/<br>min] | 电流<br>[A] | 效率<br>(%) | 功率<br>因数<br>(cosφ) |          |          |          |
| 同 步 转 速: 3000 [r/min] (2 极) |            |           |    |                   |           |           |                    |          |          |          |
| Y-801-2                     | 0.75       |           |    |                   | 1.9       | 73        | 0.84               |          |          |          |
| Y-802-2                     | 1.1        |           |    | 2825              | 2.6       | 76        | 0.86               |          |          |          |
| Y-90S-2                     | 1.5        |           | Y  |                   | 3.4       | 79        | 0.85               |          |          |          |
| Y-90L-2                     | 2.2        |           |    | 2840              | 4.7       | 82        | 0.86               |          |          | 2.2      |
| Y-100L-2                    | 3          |           |    | 2880              | 6.4       |           | 0.87               |          |          |          |
| Y-112M-2                    | 4          |           |    | 2890              | 8.2       |           | 85.5               |          |          |          |
| Y-132S <sub>1</sub> -2      | 5.5        |           |    | 2900              | 11.1      |           |                    |          |          |          |
| Y-132S <sub>2</sub> -2      | 7.5        |           |    |                   | 15        | 86.2      | 0.88               |          |          |          |
| Y-160M <sub>1</sub> -2      | 11         |           |    |                   | 21.9      | 87.2      | 0.89               |          |          |          |
| Y-160M <sub>2</sub> -2      | 15         |           |    | 2930              | 29.4      | 88.2      |                    |          |          |          |
| Y-160L-2                    | 18.5       |           |    |                   | 35.5      |           |                    |          |          |          |
| Y-180M-2                    | 22         | 380       |    | 2940              | 42.2      | 89        |                    | 80       | 7.0      | 2.2      |
| Y-200L <sub>1</sub> -2      | 30         |           |    | 2950              | 56.9      | 90        |                    |          |          | 2.0      |
| Y-200L <sub>2</sub> -2      | 37         |           |    | 2950              | 70.4      | 90.5      |                    |          |          |          |
| Y225M-2                     | 45         |           | Δ  |                   | 83.9      | 91.5      | 0.89               |          |          |          |
| Y-250M-2                    | 55         |           |    |                   | 102.7     | 91.4      |                    |          |          |          |
| Y-280S-2                    | 75         |           |    |                   | 140.1     |           |                    |          |          |          |
| Y-280M-2                    | 90         |           |    | 2970              | 167       | 92        |                    |          |          |          |
| Y-315S-2                    | 110        |           |    |                   | 206.4     | 91        |                    |          |          |          |
| Y-315M <sub>1</sub> -2      | 132        |           |    |                   | 247.6     |           |                    |          |          |          |
| Y-315M <sub>2</sub> -2      | 160        |           |    |                   | 298.5     |           |                    |          |          | 1.6      |
| Y-355M <sub>1</sub> -2      | 200        |           |    |                   | 339       | 91.5      | 0.90               |          |          |          |
| Y-355M <sub>2</sub> -2      | 250        |           |    | 2975              | 461.2     |           |                    |          |          |          |



续表 11.6

| 型号                        | 额定数据       |           |    |                   |           |           |                    | 堵转<br>电流 | 堵转<br>转矩 | 最大<br>转矩 |            |
|---------------------------|------------|-----------|----|-------------------|-----------|-----------|--------------------|----------|----------|----------|------------|
|                           | 功率<br>[kW] | 电压<br>[V] | 接法 | 转速<br>[r/<br>min] | 电流<br>[A] | 效率<br>(%) | 功率<br>因数<br>(cosφ) |          |          |          | 温升<br>[°C] |
| 同 步 转 速 1500 [r/min](4 极) |            |           |    |                   |           |           |                    |          |          |          |            |
| Y-801-4                   | 0.55       |           |    | 1390              | 1.6       | 70.5      |                    |          |          |          |            |
| Y-802-4                   | 0.75       |           |    |                   | 2.1       | 72.5      |                    |          |          |          |            |
| Y-90S-4                   | 1.1        |           |    | 1400              | 2.7       | 79        |                    |          |          |          |            |
| Y-90L-4                   | 1.5        |           |    |                   | 3.7       |           |                    |          |          |          |            |
| Y100L <sub>1</sub> -4     | 2.2        |           |    | 1420              | 5.0       | 81        |                    |          |          |          | 2.2        |
| Y-100L <sub>2</sub> -4    | 3          |           |    |                   | 6.8       | 82.5      |                    |          |          |          |            |
| Y-112M-4                  | 4          |           |    |                   | 8.8       | 84.5      |                    |          |          |          |            |
| Y-132S-4                  | 5.5        |           |    | 1440              | 11.6      | 85.5      |                    |          |          |          |            |
| Y-132M-4                  | 7.5        |           |    |                   | 15.4      | 87        |                    |          |          |          |            |
| Y-160M-4                  | 11         |           |    | 1460              | 22.6      | 88        |                    |          |          |          |            |
| Y-160L-4                  | 15         |           |    |                   | 30.3      | 88.5      |                    |          |          |          |            |
| Y-180M-4                  | 13.5       |           |    |                   | 35.9      | 91        |                    |          |          |          |            |
| Y-180L-4                  | 22         | 380       |    | 1470              | 42.5      | 91.5      |                    | 75       |          |          | 2.0        |
| Y-200L-4                  | 30         |           |    |                   | 56.8      | 92.2      |                    |          |          |          |            |
| Y-225S-4                  | 37         |           |    |                   | 69.8      | 91.8      |                    |          |          |          |            |
| Y225M-4                   | 45         |           | △  |                   | 84.2      | 92.3      |                    |          |          |          | 2.0        |
| Y-250M-4                  | 55         |           |    |                   | 102.5     | 92.6      |                    |          |          |          | 1.9        |
| Y-280S-4                  | 75         |           |    |                   | 139.7     | 92.7      |                    |          |          |          |            |
| Y-280M-4                  | 90         |           |    | 1480              | 164.3     | 93.5      |                    |          |          |          |            |
| Y-315S-4                  | 110        |           |    |                   | 201.9     |           |                    |          |          |          |            |
| Y-315M <sub>1</sub> -4    | 132        |           |    |                   | 242.3     |           |                    |          |          |          |            |
| Y-315M <sub>2</sub> -4    | 150        |           |    |                   | 293.7     |           |                    |          |          |          | 1.8        |
| Y-355M <sub>1</sub> -4    | 200        |           |    |                   | 367.1     |           | 93                 | 0.89     |          |          |            |
| Y-355M <sub>2</sub> -4    | 250        |           |    |                   | 458.9     |           |                    |          |          |          |            |
| Y355M <sub>3</sub> -4     | 315        |           |    |                   | 578.2     |           |                    |          |          |          |            |

续表 11.6

| 型 号                     | 额 定 数 据    |           |    |                   |           |           |                               | 堵转<br>电流 | 堵转<br>转矩 | 最大<br>转矩 |            |
|-------------------------|------------|-----------|----|-------------------|-----------|-----------|-------------------------------|----------|----------|----------|------------|
|                         | 功率<br>[kW] | 电压<br>[V] | 接法 | 转速<br>[r/<br>min] | 电流<br>[A] | 效率<br>(%) | 功率<br>因数<br>( $\cos\varphi$ ) |          |          |          | 温升<br>[°C] |
| 同 步 转 速 1000[r/min](8极) |            |           |    |                   |           |           |                               |          |          |          |            |
| Y-90S-6                 | 0.75       | 380       | Y  | 910               | 2.3       | 72.5      | 0.70                          | 75       | 6.0      | 2.0      |            |
| Y90L-6                  | 1.1        |           |    |                   | 3.2       | 73.5      | 0.72                          |          |          |          |            |
| Y-100L-6                | 1.5        |           |    |                   | 940       | 4.0       | 77.5                          |          |          |          | 0.74       |
| Y-112M-6                | 2.2        |           |    |                   |           | 5.6       | 80.5                          |          |          |          | 0.74       |
| Y-132S-6                | 3          |           |    |                   | 950       | 7.2       | 83                            |          |          |          | 0.76       |
| Y132M <sub>1</sub> -6   | 4          |           |    |                   |           | 9.4       | 84                            |          |          |          | 0.77       |
| Y132M <sub>2</sub> -6   | 5.5        |           |    |                   |           | 12.0      | 85.3                          |          |          |          |            |
| Y-160M-6                | 7.5        |           |    |                   | 970       | 17        | 86                            |          |          |          | 0.78       |
| Y-160L-6                | 11         |           |    |                   |           | 24.6      | 87                            |          |          |          |            |
| Y-180L-6                | 15         |           |    |                   |           | 31.5      | 89.5                          |          |          |          | 0.81       |
| Y-200L <sub>1</sub> -6  | 18.5       |           |    |                   |           | 37.7      | 89.8                          |          |          |          | 0.83       |
| Y-200L <sub>2</sub> -6  | 22         |           |    |                   | 44.6      | 90.2      |                               |          |          |          |            |
| Y-225M-6                | 30         |           |    |                   | 59.5      | 90.2      | 0.85                          |          |          |          |            |
| Y-250M-6                | 37         |           |    |                   | 72        | 90.8      | 0.86                          |          |          |          |            |
| Y-280S-6                | 45         |           |    |                   | 85.4      | 92        |                               |          |          |          |            |
| Y-280M-6                | 55         |           |    |                   | 104.9     | 91.6      |                               |          |          |          |            |
| Y-315S-6                | 75         |           |    |                   | 98        | 142.4     | 92                            |          |          |          | 0.87       |
| Y-315M <sub>1</sub> -6  | 90         |           |    |                   |           | 170.8     | 92                            |          |          |          |            |
| Y-315M <sub>2</sub> -6  | 100        |           |    |                   |           | 207.7     | 92.5                          |          |          |          |            |
| Y-315M <sub>3</sub> -6  | 132        |           |    |                   |           | 249.2     | 92.5                          |          |          |          |            |
| Y-355M <sub>1</sub> -6  | 160        | 297       | 93 |                   |           |           |                               |          |          |          |            |
| Y-355M <sub>2</sub> -6  | 200        | 371.3     | 93 | 0.88              |           |           |                               |          |          |          |            |
| Y-355M <sub>3</sub> -6  | 250        | 464.1     | 93 |                   |           |           |                               |          |          |          |            |

续表11.8

| 型 号                      | 额 定 数 据    |           |    |                   |           |           |                    | 堵转<br>电流 | 堵转<br>转矩 | 最大<br>转矩 |            |          |          |
|--------------------------|------------|-----------|----|-------------------|-----------|-----------|--------------------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|
|                          | 功率<br>[kW] | 电压<br>[V] | 接法 | 转速<br>[r/<br>min] | 电流<br>[A] | 效率<br>(%) | 功率<br>因数<br>(cosφ) |          |          |          | 温升<br>[°C] | 额定<br>电流 | 额定<br>转矩 |
| 同 步 转 速 750[r/min](8 极)  |            |           |    |                   |           |           |                    |          |          |          |            |          |          |
| Y-132S-8                 | 2.2        | 380       | Y  | 710               | 5.8       | 81        | 0.71               | 75       | 5.5      | 2.0      |            |          |          |
| Y-132M-8                 | 3          |           |    |                   | 7.7       | 82        | 0.72               |          |          |          |            |          |          |
| Y-160M <sub>1</sub> -8   | 4          |           |    |                   | 720       | 8.9       | 84                 |          |          |          | 0.73       |          |          |
| Y-160M <sub>2</sub> -8   | 5.5        |           |    |                   |           | 13.3      | 85                 |          |          |          | 0.74       |          |          |
| Y-160L-8                 | 7.5        |           |    |                   | 17.7      | 86        | 0.75               |          |          |          |            |          |          |
| Y-180L-8                 | 11         |           |    |                   | 25.1      | 86.5      | 0.77               |          |          |          | 1.7        |          |          |
| Y-200L-8                 | 15         |           |    |                   | 34.1      | 88        | 0.76               |          |          |          |            |          |          |
| Y-225S-8                 | 18.5       |           |    |                   | 730       | 41.3      | 89.5               |          |          |          | 1.7        |          |          |
| Y-225M-8                 | 22         |           |    |                   |           | 47.6      | 90                 |          |          |          | 0.78       |          |          |
| Y-250M-8                 | 30         |           |    |                   | 63        | 90.5      | 0.80               |          |          |          | 6.0        | 1.8      | 2.0      |
| Y-280S-8                 | 37         |           |    |                   | 78.2      | 91        | 0.79               |          |          |          |            |          |          |
| Y-280M-8                 | 45         |           |    |                   | 93.2      | 91.7      | 0.80               |          |          |          |            |          |          |
| Y-315S-8                 | 55         |           |    |                   | 740       | 112.1     | 92                 |          |          |          | 0.81       |          |          |
| Y-315M <sub>1</sub> -8   | 75         |           |    |                   |           | 152.8     |                    |          |          |          |            |          |          |
| Y-315M <sub>2</sub> -8   | 90         |           |    |                   | 180.3     | 0.82      |                    |          |          |          |            |          |          |
| Y-315M <sub>3</sub> -8   | 110        |           |    |                   | 220.3     | 92.5      | 0.83               |          |          |          | 6.5        | 1.6      |          |
| Y-355M <sub>1</sub> -8   | 132        |           |    |                   | 261.2     |           |                    |          |          |          |            |          |          |
| Y-355M <sub>2</sub> -8   | 160        |           |    |                   | 316.6     |           |                    |          |          |          |            |          |          |
| Y-355M <sub>3</sub> -8   | 200        |           |    |                   | 395.9     |           |                    |          |          |          |            |          |          |
| 同 步 转 速 600[r/min](10 极) |            |           |    |                   |           |           |                    |          |          |          |            |          |          |
| Y-315S-10                | 45         | 380       | △  | 585               | 100.2     | 91        | 0.75               | 75       | 5.5      | 1.4      | 2.0        |          |          |
| Y-315M <sub>1</sub> -10  | 55         |           |    |                   | 121.6     | 91.5      |                    |          |          |          |            |          |          |
| Y-315M <sub>2</sub> -10  | 75         |           |    |                   | 163.9     |           | 0.76               |          |          |          |            |          |          |
| Y-355M <sub>1</sub> -10  | 90         |           |    |                   | 185.8     | 92        | 0.80               |          |          |          |            |          |          |
| Y-355M <sub>2</sub> -10  | 110        |           |    |                   | 227       |           |                    |          |          |          |            |          |          |
| Y-355M <sub>3</sub> -10  | 132        |           |    |                   | 272.5     |           |                    |          |          |          |            |          |          |

Y 系列三相异步电动机的噪声和振动数据

表 11.7

1. 噪声: 电动机空载运转时的噪声见下表

| 同步转速<br>[r/min] | 3000          | 1500 | 1000 | 750 |
|-----------------|---------------|------|------|-----|
| 功率[kW]          | 声 压 级 [dB(A)] |      |      |     |
| 0.55            | —             | 58   | —    | —   |
| 0.75            | 62            | 58   | 56   | —   |
| 1.1             | 62            | 58   | 56   | —   |
| 1.5             | 66            | 58   | 57   | —   |
| 2.2             | 66            | 60   | 57   | 56  |
| 3               | 69            | 60   | 61   | 58  |
| 4               | 69            | 64   | 61   | 59  |
| 5.5             | 73            | 68   | 61   | 59  |
| 7.5             | 73            | 68   | 65   | 62  |
| 11              | 77            | 71   | 65   | 62  |
| 15              | 77            | 71   | 67   | 64  |
| 18.5            | 77            | 71   | 67   | 64  |
| 22              | 82            | 71   | 67   | 64  |
| 30              | 84            | 73   | 70   | 67  |
| 37              | 84            | 73   | 70   | 67  |
| 45              | 86            | 73   | 73   | 67  |

续表11.7

| 同步转速<br>[r/min] | 3000         | 1500 | 1000 | 750 |
|-----------------|--------------|------|------|-----|
| 功率[kW]          | 声 压 级[dB(A)] |      |      |     |
| 55              | 86           | 75   | 73   | 71  |
| 75              | 88           | 78   | 75   | 73  |
| 90              | 88           | 78   | 75   | 73  |
| 110             | 89           | 81   | 76   | 73  |
| 132             | 90           | 83   | 77   | —   |
| 160             | 91           | 84   | —    | —   |

注：噪声容差为+3[dB(A)]。

2. 振动：电机的振动速度(有效值)见下表(轴伸带有半键测量)

| 中心高 [mm]   | 80~132 | 160~225 | 250~315 |
|------------|--------|---------|---------|
| 振动速度[mm/s] | 1.8    | 2.8     | 4.5     |

### 11.1.6 三相异步电动机的机械特性

根据转差率的定义，转差率  $S$  与转子转速间有着确定的关系，当  $S=1$  时， $n=0$ ，当  $S=0$  时， $n=n_0$ 。因此可把  $M=f(S)$  曲线变换为  $n=f(M)$  形式，它表达了转速随转矩而变的关系，称为电动机的机械特性，如图 11.10 所示。电动机的机械特性对于电力拖动具有重要意义，图中所示的特性表明该电动机在稳定区运行时，负载变化所引起的转速变化是很小的，这样的机械特性称为硬特性。对于负载起动转矩较小，并要求恒速运行的离心式水泵和风机，这类负载是适宜的。

### 11.1.7 三相异步电动机的功率选择

在空调工程中，电动机所拖动的负载主要是风机、水泵和制冷

压缩机。它们在不同运行工况时所需的轴功率是有差异的。对于

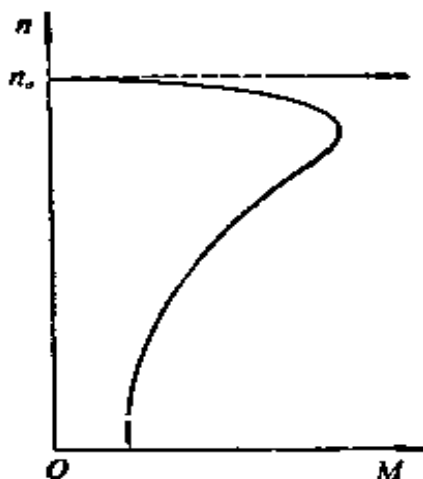


图 11.10 三相异步电动机机械特性曲线

在一定转速工作下的风机或水泵，它所需的轴功率与管路特性有关。对不同特性的风机，在不同管路特性下，它的差别很大，而对确定的制冷压缩机，所需的轴功率则与运行工况点制冷剂的蒸发压力与冷凝压力有关。因此电动机额定功率的选择除满足设计工况要求的最大轴功率外，还应考虑空调系统运行条件下的因素。如果配置的额定功率过小，则可能使设备不能起动或由于电动机长期过载运行而缩短使用寿命，甚至会烧毁。如果配置过大，则会使整个设备费用增加，而且由于电动机轻载工作时其效率与功率因数均低，极不利于节能。所以空调工程中除了合理设计系统、选用高效率的设备，以及考虑最佳运行方案外，配置适宜的电动机是当前节能工作中已引起重视的问题。

一般长期工作的风机、水泵与制冷压缩机所需配置电动机的功率  $N_D$  可按下式计算：

$$N_D = \frac{K \times N_z}{\eta_z} \quad (11.18)$$

式中  $N_z$ ——风机、水泵或制冷压缩机在运行工况范围内所需的最大轴功率；

$\eta_z$ ——传动效率。当设备与电动机直接联接时  $\eta_z = 1$ ，而用皮带传动时  $\eta_z = 0.95$ ；

$K$ ——安全系数，见表 11.8。

确定电动机轴功率时的安全系数

表 11.8

| $N_z$ [kW] | <0.5 | 0.5~1     | 1~2      | 2~5       | 5~50      | 50~100    | >100 |
|------------|------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|------|
| $K$        | 1.50 | 1.30~1.40 | 1.2~1.30 | 1.15~1.20 | 1.10~1.15 | 1.08~1.05 | 1.05 |

由此，可以根据计算的  $N_D$  查阅所需结构类型与安装方式的电动机产品目录中的技术数据，选择对应额定功率  $N_e$  等于或略大于  $N_D$  值的电动机。值得注意的是，按照以上方法确定的  $N_e$  应满足运行工况所需的最大轴功率。对大型设备，它并不能完全满足如离心式风机全风量或轴流式风机零风量时的起动要求。这时必须遵循风机正确起动的操作要求，以避开设备高负载起动，而不能以增大电动机的额定功率作为手段来解决问题。

## 11.2 三相变极多速异步电动机

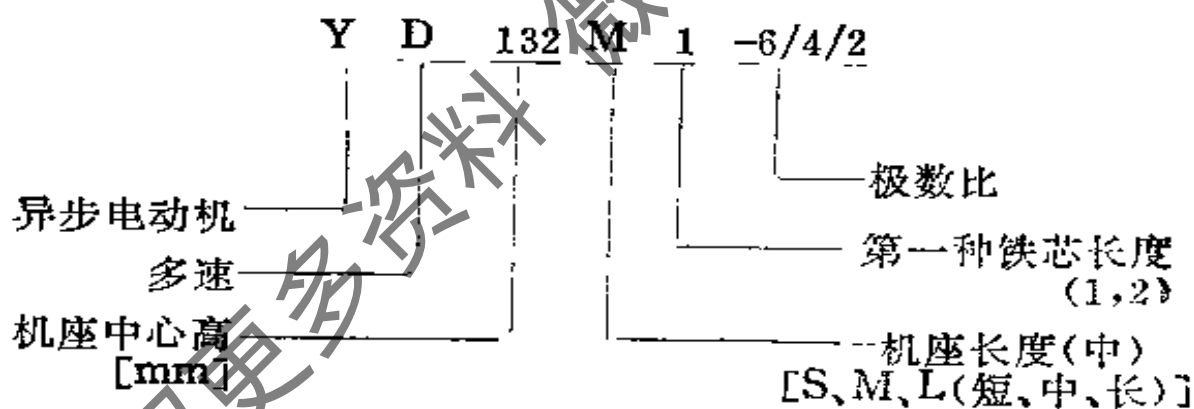
根据前述的异步电动机工作原理可知，它的同步转速与电源频率成正比，而与极对数成反比，即  $n_0 = 60 f / p$ 。因此可以用改变异步电动机定子端输入电源的频率  $f$ ，且使之连续可调来做到平滑无级地改变它的同步转速，从而实现电动机调速。这种调速方法称之为变频调速，它只要在原有的异步电动机与所连接的三相电源间增加一套相应的变频装置即可实现调速的目的。这种方法的调速范围可达 20 : 1，且可保持异步电动机固有机特性硬、转差率小的特点。所以这是一种高效的交流调速方案。但变频装置

技术复杂、价格高,对维护人员技术水平要求也较高。此外,由于装置产生的高次谐波使电网电压波形畸变的污染问题需要在技术上采取措施。因此目前国内应用尚不广泛,更未形成定型的系列产品。

三相变极多速异步电动机,则是用改变电动机三相定子绕组的接线方法,使所产生旋转磁场的极对数  $p$  发生变化,从而有级地改变同步转速  $n_0$ ,实现电动机转速有级变化。这种调速电动机没有附加的转差损耗、机械特性硬,也是一种高效调速方案。更由于它的控制电路简单、占地少、维修方便、价格低廉(为单速电动机的 1.50~1.25 倍左右),所以应用较普遍,也有定型系列产品供选用。

### 11.2.1 YD 系列变极多速异步电动机

YD 系列异步电动机是 Y 系列三相异步电动机的主要派生系列之一。其型号及含义如下:



YD 系列异步电动机的结构,除定子绕组及引出线外,其主要部件均与 Y 系列通用。此系列的绕组在双速时采用一套绕组(单绕组),三速、四速时采用两套绕组(双绕组)分别置于定子槽的上下层。它可以通过转换装置改变绕组接法,来实现逐级调速。其规格及技术数据见表 11.9 a、b。



YD 系列变频多速电动机的规格总表

表 11.9a

| 机座号                      | 同 步 转 速 [r/min] |           |           |           |          |                        |                       |                       |                       |
|--------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                          | 1500/3000       | 1000/1500 | 750/1500  | 750/1000  | 500/1020 | 1000/<br>1500/<br>3000 | 750/<br>1500/<br>3000 | 750/<br>1500/<br>1500 | 500/750/<br>1000/1500 |
| 1<br>YD 80               | 0.45/0.55       |           |           |           |          |                        |                       |                       |                       |
| 2                        | 0.55/0.75       |           |           |           |          |                        |                       |                       |                       |
| S<br>YD 90               | 0.85/1.1        | 0.65/0.85 |           | 0.35/0.45 |          |                        |                       |                       |                       |
| L                        | 1.5/1.8         | 0.95/1.1  | 0.45/0.75 | 0.45/0.65 |          |                        |                       |                       |                       |
| L <sub>1</sub><br>YD 100 | 2/2.4           | 1.3/1.8   |           |           |          | 0.75/<br>1.3/<br>1.8   | 0.4/<br>0.55/<br>0.75 |                       |                       |
| L <sub>2</sub>           | 2.4/3           | 1.5/2.2   |           |           |          |                        |                       |                       |                       |
| YD 112 M                 | 3.3/4           | 2.2/2.8   | 15/2.4    | 1.3/1.8   |          | 1.1/2/2.4              | 0.65/2/2.4            | 0.65/1/1.5            |                       |

同 步 转 速 [r/min]

|  |           |           |          |          |                        |                       |                       |
|--|-----------|-----------|----------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
|  | 1500/3000 | 1000/1500 | 750/1000 | 500/1000 | 1000/<br>1500/<br>3000 | 750/<br>1000/<br>1500 | 500/750/<br>1000/1500 |
|--|-----------|-----------|----------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|

机座号

功率[kW]

|                |         |       |         |         |           |              |                       |
|----------------|---------|-------|---------|---------|-----------|--------------|-----------------------|
| YD 132 S       | 1.5/5.5 | 3/4   | 2.2/3.3 | 1.8/2.4 | 1.8/2.6/3 | 1/2.6/3      | 1.1/1.5/1.8           |
| M <sub>1</sub> |         |       |         |         |           |              |                       |
| YD 132         | 6.5/8   | 4/5.5 | 3/4.5   | 2.5/3.7 | 2.2/3.3/4 | 1.3/<br>3.7/ | 1.5/2/2.2             |
| M <sub>2</sub> |         |       |         |         | 2.6/4/5   | 4.5          | 1.8/2.6/3             |
| M              | 9/11    | 6.5/8 | 5/7.5   | 4.5/6   | 3.7/5/6   | 2.2/5/6      | 3.3/4/5.5             |
| YD 160         |         |       |         |         |           |              |                       |
| L              | 11/14   | 9/11  | 7/11    | 6/8     | 4.5/7/9   | 2.6/7/9      | 4.5/6/7.5             |
| M              | 15/18.5 | 11/14 |         | 7.5/10  |           |              |                       |
| YD 180         |         |       |         |         |           |              |                       |
| L              | 18.5/22 | 13/16 | 11/17   | 9/12    | 5.5/10    |              | 7/9/12<br>3.3/5/6.5/9 |

续表 11.9a

| 机座号                      | 同 步 转 速 [r/min] |           |          |          |          |                        |                       |                       |                           |               |
|--------------------------|-----------------|-----------|----------|----------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------|
|                          | 1500/3000       | 1000/1500 | 750/1500 | 750/1000 | 500/1000 | 1000/<br>1500/<br>3000 | 750/<br>1500/<br>3000 | 750/<br>1000/<br>1500 | 500/750/<br>1000/<br>1500 | 1000/1500     |
| L <sub>1</sub><br>YD 200 |                 |           | 14/22    | 12/17    | 7.5/13   |                        |                       |                       | 10/13/17                  | 4.5/7/8/11    |
| L <sub>2</sub>           |                 | 18.5/22   | 17/26    | 16/20    | 9/15     |                        |                       |                       |                           | 5.5/8/10/13   |
| S<br>YD 225              |                 | 22/28     |          |          |          |                        |                       |                       | 14/18.5/24                |               |
| M                        |                 | 26/34     | 24/34    |          | 12/20    |                        |                       |                       | 17/22/28                  | 7/11/13/20    |
| YD 250                   |                 | 32/42     | 30/42    |          | 15/24    |                        |                       |                       | 24/26/34                  | 9/14/16/26    |
| M                        |                 | 4/55      | 40/55    |          | 20/30    |                        |                       |                       | 30/34/42                  | 11/18.5/20/34 |
| YD 280                   |                 | 55/72     | 47/67    |          | 24/37    |                        |                       |                       | 34/37/50                  | 13/22/24/40   |
| M                        |                 |           |          |          |          |                        |                       |                       |                           |               |

YD 系列变极多速电动机的技术数据

表 11.9b

| 型 号                   | 功率<br>[kW] | 极 数<br>2 p | 额定电<br>流<br>[A] | 同步转<br>速<br>[r/<br>min] | 效率<br>[%] | 功率因<br>数<br>cosφ | 堵转       | 堵转               | 最大<br>转矩         | 声功率<br>级<br>[dB<br>(A)] |    |
|-----------------------|------------|------------|-----------------|-------------------------|-----------|------------------|----------|------------------|------------------|-------------------------|----|
|                       |            |            |                 |                         |           |                  | 转矩       | 电流               |                  |                         |    |
|                       |            |            |                 |                         |           |                  | 额定<br>转矩 | 额<br>定<br>确<br>定 | 额<br>定<br>转<br>矩 |                         |    |
| YD 801                | 0.45       | 4          | 1.4             | 1500                    | 66        | 0.74             | 1.50     | 6.5              | 1.8              | 79                      |    |
|                       | 0.55       | 2          | 1.5             | 3000                    | 65        | 0.85             | 0.7      | 7.0              |                  |                         |    |
| YD 802                | 0.55       | 4          | 1.65            | 1500                    | 68        | 0.74             | 1.6      | 6.5              | 1.8              | 79                      |    |
|                       | 0.75       | 2          | 2.03            | 3000                    | 66        | 0.85             | 1.8      | 7.0              |                  |                         |    |
| YD 90 S               | 0.85       | 4          | 2.27            | 1500                    | 74        | 0.77             | 1.8      | 6.5              | 1.8              | 81                      |    |
|                       | 0.11       | 2          | 2.73            | 3000                    | 72        | 0.85             | 1.9      | 7.0              |                  |                         |    |
|                       | 0.85       | 6          | 2.27            | 1000                    | 64        | 0.68             | 1.6      | 6.0              | 1.8              | 76                      |    |
|                       | 0.85       | 4          | 2.34            | 1500                    | 70        | 0.79             | 1.4      | 6.5              |                  |                         |    |
|                       | 0.35       | 8          | 1.58            | 750                     | 58        | 0.60             | 1.8      | 5.0              | 1.3              | 74                      |    |
|                       | 0.45       | 6          | 1.88            | 1000                    | 70        | 0.72             | 2.0      | 6.0              |                  |                         |    |
|                       | YD 90 L    | 1.5        | 4               | 3.84                    | 1500      | 76               | 0.78     | 1.8              | 6.5              | 1.3                     | 84 |
|                       |            | 1.8        | 2               | 4.35                    | 3000      | 74               | 0.85     | 2.0              | 7.0              |                         |    |
| 0.85                  |            | 6          | 2.80            | 1000                    | 66        | 0.70             | 1.6      | 6.0              | 1.8              | 78                      |    |
| 1.1                   |            | 4          | 2.98            | 1500                    | 71        | 0.79             | 1.5      | 6.5              |                  |                         |    |
| 0.45                  |            | 8          | 1.87            | 750                     | 58        | 0.63             | 1.6      | 5.5              | 1.8              | 78                      |    |
| 0.75                  |            | 4          | 1.82            | 1500                    | 72        | 0.87             | 1.4      | 6.5              |                  |                         |    |
| 0.45                  |            | 8          | 1.93            | 750                     | 59        | 0.60             | 1.7      | 5.0              | 1.8              | 74                      |    |
| 0.65                  |            | 6          | 1.91            | 1000                    | 71        | 0.73             | 1.8      | 6.0              |                  |                         |    |
| YD 100 L <sub>1</sub> |            | 2.0        | 4               | 4.81                    | 1500      | 78               | 0.81     | 1.7              | 6.5              | 1.8                     | 88 |
|                       |            | 2.4        | 2               | 5.58                    | 3000      | 76               | 0.86     | 1.9              | 7                |                         |    |

续表11.9b

| 型号                    | 功率      | 极数<br>$2p$ | 额定电<br>流<br>[A] | 同步转<br>速<br>[r/<br>min] | 效率<br>[%] | 功率因<br>数<br>$\cos\phi$ | 堵转         | 转堵         | 最大<br>转矩 | 声功<br>级率<br>[dB<br>(A)] |    |
|-----------------------|---------|------------|-----------------|-------------------------|-----------|------------------------|------------|------------|----------|-------------------------|----|
|                       | [kW]    |            |                 |                         |           |                        | 转矩         | 电流         |          |                         | 转矩 |
| YD100L <sub>1</sub>   | 1.3     | 6          | 3.81            | 1000                    | 74        | 0.70                   | 1.7        | 6.0        | 1.8      | 88                      |    |
|                       | 1.8     | 4          | 4.44            | 1500                    | 77        | 0.80                   | 1.4        | 6.5        |          |                         |    |
| YD 100 L <sub>2</sub> | 2.4     | 4          | 5.58            | 1500                    | 79        | 0.83                   | 1.6        | 6.5        | 1.8      | 88                      |    |
|                       | 3.0     | 2          | 6.65            | 3000                    | 77        | 0.89                   | 1.7        | 7.0        |          |                         |    |
|                       | 1.5     | 6          | 4.34            | 1000                    | 75        | 0.70                   | 1.6        | 6.0        | 1.8      | 82                      |    |
|                       | 2.2     | 4          | 5.43            | 1500                    | 77        | 0.80                   | 1.4        | 6.5        |          |                         |    |
| YD 100 L              | 0.85    | 8          | 3.05            | 750                     | 67        | 0.63                   | 1.6        | 5.5        | 1.8      | 82                      |    |
|                       | 1.5     | 4          | 3.50            | 1500                    | 74        | 0.83                   | 1.4        | 6.5        |          |                         |    |
|                       | 0.75    | 6          | 2.92            | 750                     | 65        | 0.60                   | 1.8        | 5.0        | 1.8      | 75                      |    |
|                       | 1.1     | 6          | 3.05            | 1000                    | 75        | 0.73                   | 1.9        | 6.0        |          |                         |    |
|                       | 0.75    | 6          | 0.75            | 1000                    | 67        | 0.65                   | 1.8        | 5.5        | 1.8      | 88                      |    |
|                       | 1.3     | 4          | 1.3             | 1500                    | 72        | 0.75                   | 1.6        | 6.0        |          |                         |    |
|                       | 1.8     | 2          | 1.8             | 3000                    | 71        | 0.85                   | 1.8        | 7.0        |          |                         |    |
|                       | YD 112M | 0.4        | 8               | 2.01                    | 750       | 56                     | 0.24       | 1.2        | 4.0      | 1.8                     | 84 |
|                       |         | 0.55       | 4               | 2.58                    | 1000      | 55                     | 0.59       | 1.3        | 6.0      |                         |    |
|                       |         | 0.75       | 2               | 2.83                    | 3000      | 61                     | 0.66       | 1.5        | 7.0      |                         |    |
|                       | YD 112M | 3.3        | 4               | 7.37                    | 1500      | 82                     | 0.83       | 1.9        | 6.5      | 1.8                     | 88 |
|                       |         | 4          | 2               | 8.64                    | 3000      | 79                     | 0.89       | 2.0        | 7.0      |                         |    |
| 2.2<br>2.8            |         | 6<br>4     | 5.71<br>6.74    | 1000<br>1500            | 78<br>77  | 0.75<br>0.82           | 1.8<br>1.5 | 6.0<br>6.5 | 1.8      | 82                      |    |

续表 11.9b

| 型号       | 功率   | 极数<br>$2p$ | 额定电<br>流<br>[A] | 同步转<br>速<br>[r/<br>min] | 效率<br>[%] | 功率因<br>数   | 堵转  | 堵矩  | 最大<br>转矩 | 声功<br>级率<br>[dB<br>(A)] |
|----------|------|------------|-----------------|-------------------------|-----------|------------|-----|-----|----------|-------------------------|
|          | [kW] |            |                 |                         |           | $\cos\phi$ | 转矩  | 电流  |          |                         |
| YD112M   | 1.5  | 8          | 5.02            | 750                     | 72        | 0.63       | 1.7 | 5.5 | 1.8      | 82                      |
|          | 2.4  | 4          | 5.31            | 1500                    | 78        | 0.88       | 1.7 | 6.5 |          |                         |
|          | 1.3  | 8          | 4.50            | 750                     | 72        | 0.61       | 1.7 | 5.0 | 1.8      | 75                      |
|          | 1.8  | 6          | 4.80            | 1000                    | 78        | 0.73       | 1.9 | 6.0 |          |                         |
|          | 1.1  | 6          | 3.52            | 1000                    | 73        | 0.65       | 1.7 | 5.5 | 1.8      | 88                      |
|          | 2    | 4          | 5.14            | 1500                    | 73        | 0.81       | 1.4 | 6.0 |          |                         |
|          | 2.4  | 2          | 5.80            | 3000                    | 74        | 0.85       | 1.6 | 7.0 |          |                         |
|          | 0.65 | 8          | 2.66            | 750                     | 59        | 0.63       | 1.4 | 4.5 | 1.8      | 88                      |
|          | 2    | 4          | 5.14            | 1500                    | 73        | 0.81       | 1.3 | 6.0 |          |                         |
|          | 2.4  | 2          | 5.80            | 3000                    | 74        | 0.85       | 1.2 | 7.0 |          |                         |
|          | 0.85 | 8          | 3.72            | 750                     | 62        | 0.56       | 1.7 | 5.5 | 1.8      | 82                      |
|          | 1    | 6          | 3.08            | 1000                    | 68        | 0.73       | 1.3 | 6.5 |          |                         |
| 1.5      | 4    | 3.53       | 1500            | 75                      | 0.86      | 1.5        | 7.0 |     |          |                         |
| 4.5      | 4    | 9.8        | 1500            | 83                      | 0.84      | 1.7        | 6.5 | 1.8 | 90       |                         |
| 5.5      | 2    | 11.9       | 3000            | 79                      | 0.89      | 1.8        | 7   |     |          |                         |
| 3        | 6    | 7.7        | 1000            | 79                      | 0.75      | 1.8        | 6   | 1.8 | 82       |                         |
| 4        | 4    | 9.5        | 1500            | 78                      | 0.82      | 1.7        | 6.5 |     |          |                         |
| YD 132 S | 2.2  | 8          | 6.9             | 750                     | 75        | 0.64       | 1.5 | 5.5 | 1.8      | 82                      |
|          | 3.3  | 4          | 7.1             | 1500                    | 80        | 0.88       | 1.7 | 6   |          |                         |

续表11.9b

| 型 号                 | 功率                    | 极数<br>2p | 额定电<br>流<br>[A] | 同步转<br>速<br>[r/<br>min] | 效率<br>[%] | 功率因<br>数<br>cosφ | 堵转       | 堵转     | 最大<br>转矩 | 声功率<br>级<br>[dB<br>(A)] |
|---------------------|-----------------------|----------|-----------------|-------------------------|-----------|------------------|----------|--------|----------|-------------------------|
|                     | [kW]                  |          |                 |                         |           |                  | 额定<br>转矩 | 电<br>流 |          |                         |
| YD132S              | 1.8                   | 8        | 5.8             | 750                     | 78        | 0.62             | 1.6      | 5      | 1.8      | 79                      |
|                     | 2.4                   | 6        | 6.2             | 1000                    | 80        | 0.73             | 1.9      | 6      |          |                         |
|                     | 1.8                   | 6        | 5.1             | 1000                    | 75        | 0.71             | 1.4      | 5.5    | 1.8      | 92                      |
|                     | 2.6                   | 4        | 6.1             | 1500                    | 78        | 0.83             | 1.3      | 6      |          |                         |
|                     | 3                     | 2        | 7.4             | 3000                    | 71        | 0.87             | 1.7      | 7      |          |                         |
|                     | 1                     | 8        | 3.6             | 750                     | 69        | 0.61             | 1.4      | 4.5    | 1.8      | 92                      |
|                     | 2.6                   | 4        | 6.1             | 1500                    | 78        | 0.83             | 1.2      | 6      |          |                         |
|                     | 3                     | 2        | 7.1             | 3000                    | 74        | 0.87             | 1.4      | 7      |          |                         |
|                     | 1.1                   | 8        | 4.1             | 750                     | 68        | 0.60             | 1.4      | 5.5    | 1.8      | 82                      |
|                     | 1.5                   | 6        | 4.2             | 1000                    | 74        | 0.73             | 1.3      | 6      |          |                         |
|                     | 1.8                   | 4        | 4               | 1500                    | 76        | 0.87             | 1.3      | 7      |          |                         |
|                     | YD 132 M <sub>1</sub> | 2.2      | 6               | 6                       | 1000      | 77               | 0.72     | 1.3    | 5.5      | 1.8                     |
| 3.3                 |                       | 4        | 7.5             | 1500                    | 80        | 0.84             | 1.3      | 6      |          |                         |
| 4                   |                       | 2        | 8.8             | 3000                    | 76        | 0.91             | 1.7      | 7      |          |                         |
| 1.5                 |                       | 8        | 4.8             | 750                     | 77        | 0.62             | 1.3      | 5.5    | 1.8      | 86                      |
| 2                   |                       | 6        | 5.4             | 1000                    | 77        | 0.73             | 1.5      | 6.5    |          |                         |
| 2.2                 |                       | 4        | 4.8             | 1500                    | 79        | 0.87             | 1.4      | 7      |          |                         |
| YD132M <sub>2</sub> | 2.6                   | 6        | 6.9             | 1000                    | 80        | 0.72             | 1.5      | 5.5    | 1.8      | 92                      |
|                     | 4                     | 4        | 9               | 1500                    | 80        | 0.84             | 1.4      | 6      |          |                         |
|                     | 5                     | 2        | 10.6            | 3000                    | 77        | 0.91             | 1.7      | 7      |          |                         |
|                     | 1.8                   | 8        | 6.1             | 750                     | 72        | 0.62             | 1.5      | 5.5    | 1.8      | 86                      |
|                     | 2.6                   | 6        | 6.8             | 1000                    | 78        | 0.74             | 1.7      | 6.5    |          |                         |
|                     | 3                     | 4        | 6.6             | 1500                    | 80        | 0.87             | 1.5      | 7      |          |                         |
| YD132M              | 6.5                   | 4        | 19.8            | 1500                    | 84        | 0.85             | 1.7      | 6.5    | 1.8      | 92                      |
|                     | 8                     | 2        | 17.1            | 3000                    | 80        | 0.89             | 1.8      | 7      |          |                         |
|                     | 4                     | 6        | 9.8             | 1000                    | 82        | 0.76             | 1.6      | 6      | 1.8      | 86                      |
|                     | 5.5                   | 4        | 12.3            | 1500                    | 80        | 0.85             | 1.4      | 6.5    |          |                         |

續表11.9b

| 型号       | 功率   | 极数<br>2p | 额定电<br>流<br>[A] | 同步转<br>速<br>[r/<br>min] | 效率<br>[%] | 功率因<br>数<br>cosφ | 堵转       | 堵转       | 最大<br>转矩 | 声功<br>率级<br>[dB<br>(A)] |
|----------|------|----------|-----------------|-------------------------|-----------|------------------|----------|----------|----------|-------------------------|
|          | [kW] |          |                 |                         |           |                  | 额定<br>转矩 | 额定<br>电流 |          |                         |
| YD 132 M | 3    | 8        | 9               | 750                     | 78        | 0.65             | 1.5      | 5.5      | 1.8      | 86                      |
|          | 4.5  | 4        | 9.4             | 1500                    | 82        | 0.89             | 1.6      | 6.5      |          |                         |
|          | 2.6  | 8        | 8.2             | 750                     | 78        | 0.62             | 1.9      | 5        | 1.8      | 79                      |
|          | 3.7  | 6        | 9.4             | 1000                    | 82        | 0.73             | 1.9      | 9        |          |                         |
|          | 1.3  | 8        | 4.6             | 750                     | 71        | 0.61             | 1.5      | 4.5      | 1.8      | 92                      |
|          | 3.7  | 4        | 8.4             | 1500                    | 80        | 0.84             | 1.9      | 6        |          |                         |
| 4.5      | 2    | 10       | 3000            | 76                      | 0.91      | 1.4              | 7        |          |          |                         |
| YD 160M  | 9    | 4        | 18.5            | 1500                    | 81        | 0.85             | 1.6      | 6.5      | 1.8      | 92                      |
|          | 11   | 2        | 22.9            | 3000                    | 82        | 0.89             | 1.8      | 7        |          |                         |
|          | 6.5  | 6        | 15.1            | 1000                    | 84        | 0.78             | 1.5      | 6        | 1.8      | 86                      |
|          | 8    | 4        | 17.4            | 1500                    | 83        | 0.84             | 1.6      | 6.5      |          |                         |
|          | 5    | 8        | 13.3            | 750                     | 83        | 0.63             | 1.5      | 5.5      | 1.8      | 86                      |
|          | 7.5  | 4        | 15.2            | 1500                    | 84        | 0.69             | 1.6      | 6.5      |          |                         |
|          | 4.5  | 8        | 13.9            | 750                     | 83        | 0.62             | 1.6      | 5        | 1.8      | 83                      |
|          | 6    | 6        | 14.7            | 1500                    | 85        | 0.73             | 1.9      | 6        |          |                         |
|          | 2.6  | 12       | 11.6            | 500                     | 74        | 0.46             | 1.2      | 4        | 1.8      | 83                      |
|          | 5    | 6        | 11.9            | 1000                    | 84        | 0.76             | 1.4      | 6        |          |                         |
|          | 3.7  | 6        | 9.5             | 1000                    | 82        | 0.72             | 1.5      | 5.5      | 1.8      | 92                      |
|          | 5    | 4        | 11.2            | 1500                    | 81        | 0.84             | 1.3      | 6        |          |                         |
| 6        | 2    | 13.2     | 3000            | 76                      | 0.91      | 1.4              | 7        |          |          |                         |



续表11.9b

| 型 号    | 功率   | 功率   | 额定电     | 同步转       | 效率   | 功率因           | 堵转  | 堵转  | 最大  | 声功率  |
|--------|------|------|---------|-----------|------|---------------|-----|-----|-----|------|
|        | [kW] | $2p$ | 流 [(A)] | 速 [r/min] | [%]  | $\cos\varphi$ | 转矩  | 电流  | 转矩  |      |
|        |      |      |         |           |      |               | 额定  | 额定  | 额定  | [dB  |
|        |      |      |         |           |      |               | 转矩  | 电流  | 转矩  | (A)] |
| YD160M | 2.2  | 8    | 7.6     | 750       | 75   | 0.59          | 1.4 | 4.5 | 1.8 | 92   |
|        | 5    | 4    | 11.2    | 1500      | 81   | 0.84          | 1.3 | 6   |     |      |
|        | 6    | 2    | 13.2    | 3000      | 76   | 0.91          | 1.4 | 7   |     |      |
|        | 3.3  | 8    | 10.2    | 750       | 79   | 0.62          | 1.7 | 5.5 | 1.8 | 86   |
|        | 4    | 6    | 9.9     | 1000      | 81   | 0.76          | 1.4 | 6.5 |     |      |
|        | 5.5  | 4    | 11.6    | 1500      | 83   | 0.87          | 1.5 | 7   |     |      |
| YD160L | 11   | 4    | 22.3    | 1500      | 87   | 0.86          | 1.7 | 6.5 | 1.8 | 96   |
|        | 14   | 2    | 28.8    | 3000      | 82   | 0.90          | 1.9 | 7   |     |      |
|        | 9    | 6    | 20.6    | 1000      | 85   | 0.78          | 1.6 | 6   | 1.8 | 91   |
|        | 11   | 4    | 23.4    | 1500      | 84   | 0.85          | 1.7 | 6.5 |     |      |
|        | 7    | 8    | 18.9    | 750       | 85   | 0.66          | 1.5 | 5.5 | 1.8 | 91   |
|        | 11   | 4    | 21.8    | 1500      | 86   | 0.89          | 1.6 | 6.5 |     |      |
|        | 6    | 8    | 17.5    | 750       | 84   | 0.62          | 1.6 | 5   | 1.8 | 83   |
|        | 8    | 6    | 19.4    | 1000      | 86   | 0.73          | 1.9 | 6   |     |      |
|        | 3.7  | 12   | 10.6    | 500       | 76   | 0.46          | 1.2 | 4   | 1.8 | 83   |
|        | 7    | 6    | 15.8    | 1000      | 85   | 0.79          | 1.4 | 6   |     |      |
|        | 4.5  | 6    | 14.4    | 1000      | 83   | 0.72          | 1.5 | 5.5 | 1.8 | 90   |
|        | 7    | 4    | 15.1    | 1500      | 83   | 0.85          | 1.2 | 6   |     |      |
| 9      | 2    | 18.8 | 3000    | 79        | 0.92 | 1.3           | 7   |     |     |      |
| 2.8    | 8    | 0.2  | 750     | 77        | 0.60 | 1.3           | 4.5 | 1.8 | 96  |      |
| 7      | 4    | 15.1 | 1500    | 83        | 0.85 | 1.2           | 6   |     |     |      |
| 9      | 2    | 18.8 | 3000    | 79        | 0.92 | 1.3           | 7   |     |     |      |

续表11.9b

| 型 号                 | 功率     | 极数<br>$2p$ | 额定电<br>流<br>[A] | 同步转<br>速<br>[r/<br>min] | 效率<br>[%] | 功率因<br>数<br>$\cos\varphi$ | 堵转<br>转矩 | 堵转<br>电流 | 最大<br>转矩 | 声功率<br>级<br>[dB<br>(A)] |
|---------------------|--------|------------|-----------------|-------------------------|-----------|---------------------------|----------|----------|----------|-------------------------|
|                     | [kW]   |            |                 |                         |           |                           | 额定<br>转矩 | 额定<br>电流 | 额定<br>转矩 |                         |
| YD200L <sub>2</sub> | 15     | 8          | 40              | 750                     | 87        | 0.65                      | 1.5      | 5        | 1.8      | 88                      |
|                     | 20     | 6          | 45              | 1000                    | 88        | 0.76                      |          | 6        |          |                         |
|                     | 9      | 12         | 28.9            | 500                     | 83        | 0.57                      | 1.2      | 4        | 1.8      | 88                      |
|                     | 15     | 6          | 30              | 1000                    | 87        | 0.87                      | 1.3      | 6        |          |                         |
|                     | 5.5    | 12         | 20              | 500                     | 74        | 0.56                      | 1.3      | 5        | 1.8      | 92                      |
|                     | 8      | 8          | 22.4            | 750                     | 81        | 0.67                      |          | 6        |          |                         |
|                     | 10     | 6          | 20.8            | 1000                    | 83        | 0.88                      |          | 6        |          |                         |
|                     | 13     | 4          | 26.7            | 1500                    | 84        | 0.88                      |          | 7        |          |                         |
| YD200L              | 26     | 4          | 49.9            | 1500                    | 89        | 0.89                      | 1.4      | 6.5      | 1.8      | 98                      |
|                     | 30     | 2          | 58              | 3000                    | 85        | 0.92                      | 1.4      | 7        |          |                         |
|                     | 18.5   | 8          | 41.4            | 1000                    | 87        | 0.78                      | 1.4      | 6.5      | 1.8      | 92                      |
|                     | 22     | 4          | 41.7            | 1500                    | 87        | 0.89                      | 1.3      | 7        |          |                         |
|                     | 10     | 4          | 26.9            | 750                     | 83        | 0.68                      | 1.6      | 6.5      | 1.8      | 92                      |
|                     | 13     | 6          | 28.7            | 1000                    | 85        | 0.81                      | 1.5      | 7        |          |                         |
|                     | 17     | 4          | 33.4            | 1500                    | 86        | 0.90                      | 1.4      | 7        |          |                         |
|                     | YD225S | 32         | 1               | 60.7                    | 1500      | 90                        | 0.89     | 1.4      | 6.5      | 1.8                     |
| 37                  |        | 2          | 71              | 3000                    | 86        | 0.92                      | 1.4      | 7        |          |                         |
| 22                  |        | 6          | 44              | 1000                    | 88        | 0.86                      | 1.4      | 6.5      | 1.8      | 92                      |
| 28                  |        | 4          | 56              | 1500                    | 87        | 0.87                      | 1.3      | 7        |          |                         |
| 14                  |        | 8          | 35              | 750                     | 86        | 0.70                      | 1.6      | 6.5      | 1.8      | 92                      |
| 18.5                |        | 6          | 39.9            | 1000                    | 87        | 0.81                      | 1.5      | 7        |          |                         |
| 24                  |        | 4          | 46.6            | 1500                    | 87        | 0.90                      | 1.4      | 7        |          |                         |

续表11.9b

| 型 号                 | 功率                  | 极数<br>2p | 额定电<br>流<br>[A] | 同步转<br>速<br>[r/<br>min] | 功率<br>[%] | 功率因<br>数<br>cosφ | 堵转<br>转矩 | 堵转<br>电<br>流 | 最大<br>转矩 | 声功率<br>级<br>[dB<br>(A)] |              |
|---------------------|---------------------|----------|-----------------|-------------------------|-----------|------------------|----------|--------------|----------|-------------------------|--------------|
|                     | [kW]                |          |                 |                         |           |                  | 额定<br>转矩 | 额定<br>电<br>流 |          |                         | 额定<br>转<br>矩 |
| YD180L              | 7                   | 8        | 20.2            | 750                     | 81        | 0.65             | 1.7      | 6.5          | 1.8      | 91                      |              |
|                     | 9                   | 6        | 20.6            | 1000                    | 83        | 0.80             | 1.7      | 7            |          |                         |              |
|                     | 12                  | 4        | 24.1            | 1500                    | 84        | 0.90             | 1.5      | 7            |          |                         |              |
|                     | YD180L              | 3.3      | 12              | 12.6                    | 500       | 72               | 0.55     | 1.6          | 5        | 1.8                     | 91           |
|                     |                     | 5        | 8               | 15.5                    | 750       | 79               | 0.62     | 1.5          | 6        |                         |              |
|                     |                     | 6.5      | 6               | 13.7                    | 1000      | 82               | 0.88     | 1.3          | 6        |                         |              |
|                     |                     | 9        | 4               | 18.5                    | 1500      | 83               | 0.89     | 1.3          | 7        |                         |              |
| YD200L <sub>1</sub> | 14                  | 8        | 33              | 750                     | 81        | 0.74             | 1.5      | 6            | 1.8      | 92                      |              |
|                     | 22                  | 4        | 41              | 1500                    | 88        | 0.92             |          | 7            |          |                         |              |
|                     | YD200L <sub>1</sub> | 12       | 8               | 32.6                    | 750       | 86               | 0.65     | 1.5          | 5        | 1.8                     | 88           |
|                     |                     | 17       | 6               | 25                      | 1000      | 87               | 0.76     |              | 6        |                         |              |
|                     | YD200L <sub>1</sub> | 57.5     | 12              | 24.8                    | 500       | 82               | 0.56     | 1.2          | 4        | 1.8                     | 88           |
|                     |                     | 13       | 6               | 26.4                    | 1000      | 87               | 0.86     | 1.3          | 6        |                         |              |
|                     | YD200L <sub>1</sub> | 4.5      | 12              | 16.7                    | 500       | 73               | 0.56     | 1.3          | 5        | 1.8                     | 92           |
|                     |                     | 7        | 8               | 19.6                    | 750       | 81               | 0.67     |              | 6        |                         |              |
|                     |                     | 8        | 6               | 16.6                    | 1000      | 83               | 0.88     |              | 6        |                         |              |
|                     |                     | 11       | 4               | 22.6                    | 1500      | 84               | 0.88     |              | 7        |                         |              |
| YD200L <sub>2</sub> | 17                  | 8        | 40              | 750                     | 87        | 0.74             | 1.5      | 6            | 1.8      | 92                      |              |
|                     | 26                  | 4        | 48.8            | 1500                    | 88        | 0.92             |          | 7            |          |                         |              |

续表11.95

| 型 号      | 功率   | 极数<br>$2p$ | 额定电      | 同步转              | 效率<br>[%] | 功率因             | 堵转  | 堵转  | 最大  | 声功率<br>级<br>[dB<br>(A)] |
|----------|------|------------|----------|------------------|-----------|-----------------|-----|-----|-----|-------------------------|
|          | [kW] |            | 流<br>[A] | 速<br>[r/<br>min] |           | 数<br>$\cos\phi$ | 转矩  | 电   | 转矩  |                         |
|          |      |            |          |                  |           |                 | 额定  | 额定  | 额定  |                         |
|          |      |            |          |                  |           |                 | 转矩  | 电流  | 转矩  |                         |
| YD160L   | 4.5  | 6          | 13.8     | 750              | 80        | 0.62            | 1.6 | 5.5 | 1.8 | 91                      |
|          | 6    |            | 14.5     | 1000             | 83        | 0.76            | 1.6 | 6.5 |     |                         |
|          | 7.5  | 4          | 15.6     | 1500             | 84        | 0.87            | 1.5 | 7   |     |                         |
| YD 180 M | 15   | 4          | 29.4     | 1500             | 89        | 0.87            | 1.8 | 6.5 | 1.8 | 96                      |
|          | 18.5 | 2          | 36.7     | 3000             | 85        | 0.90            | 1.9 | 7   |     |                         |
|          | 11   | 6          | 26.9     | 1000             | 85        | 0.76            | 1.6 | 6   | 1.8 | 91                      |
|          | 14   | 4          | 29.8     | 1500             | 85        | 0.85            | 1.7 | 6.5 |     |                         |
|          | 7.5  | 8          | 21.9     | 750              | 84        | 0.62            | 1.9 | 5   | 1.8 | 88                      |
|          | 10   | 6          | 24.2     | 1000             | 86        | 0.73            | 1.9 | 6   |     |                         |
| YD108L   | 18.5 | 4          | 35.9     | 1500             | 89        | 0.88            | 1.6 | 6.5 | 1.8 | 96                      |
|          | 22   | 2          | 42.7     | 3000             | 86        | 0.91            | 1.8 | 7   |     |                         |
|          | 13   | 6          | 29.4     | 1000             | 86        | 0.78            | 1.7 | 6   | 1.8 | 91                      |
|          | 16   | 4          | 33.6     | 1500             | 85        | 0.85            | 1.7 | 6.5 |     |                         |
|          | 11   | 8          | 26.7     | 750              | 87        | 0.72            | 1.5 | 6   | 1.8 | 91                      |
|          | 17   | 4          | 33.3     | 1500             | 88        | 0.91            | 1.5 | 7   |     |                         |
|          | 9    | 6          | 24.7     | 750              | 85        | 0.65            | 1.8 | 5   | 1.8 | 88                      |
|          | 12   | 6          | 28.3     | 1000             | 86        | 0.75            | 1.8 | 6   |     |                         |
|          | 5.5  | 12         | 19.6     | 500              | 79        | 0.54            | 1.3 | 4   | 1.8 | 88                      |
|          | 10   | 6          | 20.5     | 1000             | 86        | 0.86            | 1.3 | 6   |     |                         |

续表11.8b

| 型 号    | 功率       | 极数<br>2p | 额定电<br>流<br>[A] | 同步转<br>速<br>[r/<br>min] | 效率<br>[%] | 功率因<br>数<br>$\cos\phi$ | 堵转       | 堵转       | 最大<br>转矩 | 声功率<br>级<br>[dB<br>(A)] |          |
|--------|----------|----------|-----------------|-------------------------|-----------|------------------------|----------|----------|----------|-------------------------|----------|
|        | [kW]     |          |                 |                         |           |                        | 额定<br>转矩 | 额定<br>电流 |          |                         | 额定<br>转矩 |
| YD225M | 37       | 4        | 69              | 1500                    | 91        | 0.89                   | 1.4      | 6.5      | 1.8      | 100                     |          |
|        | 45       | 2        | 88.4            | 3000                    | 88        | 0.92                   | 1.4      | 7        |          |                         |          |
|        | 28       | 6        | 52              | 1000                    | 88        | 0.88                   | 1.4      | 6.5      | 1.8      | 94                      |          |
|        | 34       | 4        | 66              | 1500                    | 87        | 0.90                   | 1.4      | 7        |          |                         |          |
|        | 24       | 8        | 53              | 750                     | 89        | 0.77                   | 1.5      | 6        | 1.8      | 94                      |          |
|        | 34       | 4        | 66.7            | 1500                    | 88        | 0.88                   | 1.5      | 7        |          |                         |          |
|        | 12       | 12       | 35              | 500                     | 85        | 0.61                   | 1.2      | 4        | 1.8      | 90                      |          |
|        | 20       | 6        | 39.7            | 1000                    | 88        | 0.87                   | 1.3      | 6        |          |                         |          |
|        | YD 225 M | 17       | 8               | 42.4                    | 750       | 87                     | 0.70     | 1.6      | 6.5      | 1.8                     | 94       |
|        |          | 22       | 6               | 45                      | 1000      | 87                     | 0.85     | 1.5      | 7        |                         |          |
| 28     |          | 4        | 54              | 1500                    | 87        | 0.90                   | 1.4      | 7        |          |                         |          |
| 7      |          | 12       | 20.8            | 500                     | 81        | 0.63                   | 1.3      | 5        | 1.8      | 94                      |          |
| 11     |          | 8        | 27.6            | 750                     | 81        | 0.72                   |          | 6        |          |                         |          |
| 13     |          | 6        | 28.4            | 1000                    | 85        | 0.88                   |          | 6        |          |                         |          |
| 20     | 4        | 40.6     | 1500            | 86                      | 0.90      | 7                      |          |          |          |                         |          |
| YD250M | 45       | 4        | 94.8            | 1500                    | 91        | 0.89                   | 1.4      | 6.5      | 1.8      | 100                     |          |
|        | 55       | 2        | 103             | 3000                    | 88        | 0.92                   | 1.4      | 7        |          |                         |          |
|        | 32       | 6        | 62              | 1000                    | 90        | 0.87                   | 1.4      | 6.5      | 1.8      | 94                      |          |
|        | 42       | 4        | 79.7            | 1500                    | 88        | 0.91                   | 1.3      | 7        |          |                         |          |

续表11.9b

| 型 号      | 功率       | 极数 | 额定电<br>流 | 同步转<br>速 | 效率   | 功率因<br>数 | 堵转               | 堵转               | 最大               | 声功率         |             |
|----------|----------|----|----------|----------|------|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|
|          | [kW]     |    |          |          |      |          | $2p$             | [A]              |                  |             | [r/<br>min] |
|          |          |    |          |          |      |          | 额<br>定<br>转<br>矩 | 额<br>定<br>电<br>流 | 额<br>定<br>转<br>矩 | [dB<br>(A)] |             |
| YD 250 M | 30       | 8  | 64.9     | 750      | 90   | 0.78     | 1.5              | 6                | 1.8              | 94          |             |
|          | 42       | 4  | 78.8     | 1500     | 89   | 0.91     |                  | 7                |                  |             |             |
|          | 15       | 12 | 42       | 500      | 86   | 0.63     | 1.2              | 4                | 1.8              | 90          |             |
|          | 24       | 6  | 47.6     | 1000     | 88   | 0.87     | 1.3              | 6                |                  |             |             |
|          | 24       | 8  | 55       | 750      | 88   | 0.75     | 1.2              | 6.5              | 1.8              | 94          |             |
|          | 28       | 6  | 52.8     | 1000     | 88   | 0.85     | 1.5              | 7                |                  |             |             |
|          | 34       | 4  | 63       | 1500     | 89   | 0.92     | 1.4              | 7                |                  |             |             |
|          |          | 9  | 12       | 26.5     | 500  | 82       | 0.63             | 1.3              | 5                | 1.8         | 94          |
|          | 14       | 6  | 34.3     | 750      | 85   | 0.73     | 6                |                  |                  |             |             |
|          | 16       | 6  | 32.5     | 1000     | 85   | 0.88     | 6                |                  |                  |             |             |
|          | 26       | 4  | 49.4     | 1500     | 87   | 0.92     | 7                |                  |                  |             |             |
|          | YD 280 S | 60 | 4        | 111.3    | 1500 | 91       | 0.90             | 1.4              | 6.5              | 1.8         | 102         |
| 72       |          | 2  | 135      | 3000     | 88   | 0.92     | 1.4              | 7                |                  |             |             |
| 42       |          | 6  | 81.5     | 1000     | 90   | 0.87     | 1.4              | 6.5              | 1.8              | 99          |             |
| 55       |          | 4  | 104.3    | 1500     | 89   | 0.90     | 1.3              | 7                |                  |             |             |
| 40       |          | 8  | 83.5     | 750      | 91   | 0.80     | 1.5              | 6                | 1.8              | 99          |             |
| 55       |          | 4  | 102      | 1500     | 90   | 0.91     |                  | 7                |                  |             |             |
| 20       |          | 12 | 54.8     | 500      | 88   | 0.63     | 1.2              | 4                | 1.8              | 92          |             |
| 30       |          | 6  | 58.9     | 1000     | 89   | 0.87     | 1.3              | 6                |                  |             |             |

续表 11.9 b

| 型 号      | 功率       | 极数<br>2 p | 额定电<br>流<br>[A] | 同步转<br>速<br>[r/<br>min] | 效率<br>[%] | 功率因<br>数<br>cosφ | 堵转       | 堵转       | 最大<br>转矩<br>额定<br>转矩 | 声功率<br>级<br>[dB<br>(A)] |     |    |
|----------|----------|-----------|-----------------|-------------------------|-----------|------------------|----------|----------|----------------------|-------------------------|-----|----|
|          | [kW]     |           |                 |                         |           |                  | 额定<br>转矩 | 额定<br>电流 |                      |                         |     |    |
| YD 280S  | 30       | 8         | 68.3            | 750                     | 89        | 0.75             | 1.2      | 6.5      | 1.8                  | 99                      |     |    |
|          | 4        | 6         | 67.5            | 1000                    | 89        | 0.86             | 1.5      | 7        |                      |                         |     |    |
|          | 42       | 4         | 77.9            | 1500                    | 89        | 0.92             | 1.4      | 7        |                      |                         |     |    |
|          | YD 280S  | 11        | 12              | 32                      | 12        | 83               | 0.63     | 1.3      | 5                    | 1.8                     | 99  |    |
|          |          | 18.5      | 8               | 43                      | 8         | 87               | 0.75     |          | 6                    |                         |     |    |
|          |          | 20        | 6               | 40.6                    | 6         | 85               | 0.88     |          | 6                    |                         |     |    |
|          |          | 34        | 4               | 64.5                    | 4         | 87               | 0.92     |          | 7                    |                         |     |    |
|          | YD 280 M | 72        | 4               | 133.6                   | 1500      | 91               | 0.90     | 1.4      | 6.5                  | 1.8                     | 102 |    |
|          |          | 82        | 2               | 152                     | 3000      | 89               | 0.93     | 1.4      | 7                    |                         |     |    |
|          |          | YD 280 M  | 55              | 6                       | 106.7     | 1000             | 90       | 0.87     | 1.4                  | 6.5                     | 1.8 | 99 |
|          |          |           | 72              | 4                       | 138       | 1500             | 89       | 0.89     | 1.5                  | 7                       |     |    |
|          |          | YD 280 M  | 47              | 8                       | 96.9      | 750              | 91       | 0.81     | 1.5                  | 6                       | 1.8 | 99 |
| 67       |          |           | 4               | 122.9                   | 1500      | 90               | 0.92     | 7        |                      |                         |     |    |
| YD 280 M |          | 24        | 12              | 63.7                    | 500       | 88               | 0.65     | 1.2      | 4                    | 1.8                     | 92  |    |
|          |          | 37        | 6               | 72.6                    | 1500      | 89               | 0.87     | 1.3      | 6                    |                         |     |    |
|          |          | YD 280 M  | 34              | 8                       | 77.4      | 500              | 89       | 0.75     | 1.2                  | 6.5                     | 1.8 | 99 |
| 37       |          |           | 6               | 79.4                    | 1000      | 89               | 0.86     | 1.5      | 7                    |                         |     |    |
| 50       |          |           | 4               | 91.7                    | 1500      | 90               | 0.92     | 1.4      | 7                    |                         |     |    |
| YD 280 M |          | 13        | 12              | 37.3                    | 500       | 84               | 0.63     | 1.3      | 5                    | 1.8                     | 99  |    |
|          | 22       | 8         | 51              | 750                     | 87        | 0.75             | 6        |          |                      |                         |     |    |
|          | 24       | 6         | 48.7            | 1000                    | 86        | 0.88             | 6        |          |                      |                         |     |    |
|          | 40       | 4         | 75              | 1500                    | 88        | 0.92             | 7        |          |                      |                         |     |    |

注：200~280 机座的产品，全国统一设计组在调整设计，需重新试制。上述系列数据未最后确定，仅供参考。

YD-F 系列变极异步电动机的技术数据

表 11.10

| 型 号                          | 功率<br>[kW] | 同步转速<br>[r/min] | 效 率<br>[%] | 功 率 因 数<br>$\cos\varphi$ | 堵 转 转 矩  |          | 堵 转 电 流   |           | 最大<br>转矩 | 声功率级<br>[dB(A)] | 重 量<br>[kg] |
|------------------------------|------------|-----------------|------------|--------------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------------|-------------|
|                              |            |                 |            |                          | 堵转<br>转矩 | 额定<br>转矩 | 堵转<br>电 流 | 额定<br>电 流 |          |                 |             |
| YD 200 L-6/4-F               | 7          | 1000            | 82         | 0.78                     | 1.3      | 1.8      | 7         | 7         | 1.8      | 86              | 255         |
|                              | 22         | 1500            | 88         | 0.88                     | 1.4      | 1.8      | 7         | 7         | 1.8      |                 |             |
| YD 225 M-6/4-F               | 8.5        | 1000            | 82         | 0.80                     | 1.5      | 2        | 7         | 7         | 2        | 85              | 310         |
|                              | 27         | 1500            | 87         | 0.84                     | 1.5      | 2        | 7         | 7         | 2        |                 |             |
| YD 250 M <sub>1</sub> -6/4-F | 11         | 1000            | 84         | 0.78                     | 1.4      | 1.8      | 7         | 7         | 1.8      | 95              | 405         |
|                              | 37         | 1500            | 88         | 0.88                     | 1.4      | 1.8      | 7         | 7         | 1.8      |                 |             |
| YD250M <sub>2</sub> -8/4-F   | 14         | 1000            | 85         | 0.78                     | 1.4      | 1.8      | 7         | 7         | 1.8      | 95              | 435         |
|                              | 45         | 1500            | 89         | 0.80                     | 1.4      | 1.8      | 7         | 7         | 1.8      |                 |             |



Y0TS、Y0TY 系列变频异步电动机的技术数据

表 11.11

| 型号                | 功率<br>[kW] | 额定负载时         |           |           |           |              |         | 堵转<br>转矩 | 堵转<br>电流 | 最大<br>转矩<br>额定<br>转矩 | 声功<br>率级<br>[dB<br>(A)] | 重量<br>[kg] |
|-------------------|------------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------------|---------|----------|----------|----------------------|-------------------------|------------|
|                   |            | 转速<br>[r/min] | 电压<br>[V] | 电流<br>[A] | 效率<br>[%] | 功率因数<br>cosφ | 转矩      |          |          |                      |                         |            |
| Y 2 TS 132-4/2    | 0.8/3.0    | 1390/2906     | 380       | 1.5/8.1   | 75/80     | 0.86/0.91    | 1.5/1.6 | 7.0/7.0  | 1.8      | 89                   | 80                      |            |
| Y 4 TS 132M-4/2   | 1.4/7.0    | 1450/2910     | 380       | 2.97/14   | 76/79     | 0.85/0.88    | 1.5/1.6 | 7.0/7.0  | 1.8      | 93                   | 160                     |            |
| Y 6 TS 160 M-6/4  | 2.5/7.5    | 945/1450      | 380       | 6.5/16.6  | 78/82     | 0.75/0.84    | 1.4/1.3 | 6.0/6.5  | 1.8      | 88                   | 145                     |            |
| Y 8 TS 160 M 6/4  | 3.0/10     | 970/1460      | 380       | 7.6/21.2  | 80/84     | 0.75/0.85    | 1.4/1.3 | 6.0/6.5  | 1.8      | 88                   | 160                     |            |
| Y 10 TS 180 M-8/4 | 4.5/14     | 980/1460      | 380       | 11/28     | 81/85     | 0.76/0.86    | 1.4/1.3 | 6.0/6.5  | 1.8      | 91                   | 175                     |            |
| Y 2 TY 130 M-8/4  | 2.2/7.5    | 669/1410      | 330       | 5.4/15    | 76/81     | 0.80/0.90    | 1.5/1.5 | 6.5/7.0  | 1.8      | 81                   | 135                     |            |
| Y 4 TY 160 L-8/4  | 3.1/18.5   | 730/1460      | 380       | 12.4/36.3 | 70/83     | 0.60/0.80    | 1.5/1.5 | 6.5/7.0  | 1.8      | 84                   | 195                     |            |

### 11.2.2 YD-F 系列变极多速异步电动机

由于离心风机和水泵这类设备的轴功率与转速关系是  $\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$ 。对于 4/6 极变速时其轴功率比为 3.4 左右, 在 2/4 或

4/8 极变速时则为 8。而 YD 系列电动机的功率比不能与此相匹配, 致使电动机在低速时处于低负载运行而效率降低, 不能很好实现空调系统变速运行的节能目的。YD-F 系列异步电动机对此作了改进, 使其功率比在 4/6 极运行时为 1:3 左右, 基本上满足了离心风机和水泵所需的轴功率比, 由此可进一步提高节能效果。

YD-F 系列异步电动机也是 Y 系列三相异步电动机的派生系列之一。其型号与含义与 YD 系列相同, F 表示风机专用。目前生产的规格与技术数据见表 11.10。

另外, 为工业锅炉送风机与引风机配套而设计的 Y□TS、Y□TY 系列工业锅炉用变极电动机, 其命名中 □T 表示锅炉吨位数, S 或 Y 表示送风机或引风机, 它除定子绕组属专门设计外, 其他均与 Y 系列异步电动机相同。其功率比在 4/6 极时为 1:3 左右, 也可供空调工程中选用。其技术数据见表 11.11。

## 11.3 电磁调速三相异步电动机

电磁调速异步电动机(俗称滑差电动机)是一种简单可靠的交流无级调速设备。电机采用组合式结构, 由拖动电动机、电磁转差离合器和测速发电机等组成, 如图 11.11 所示。拖动电动机是 Y 系列或 YD 系列 B<sub>3</sub> 结构三相异步电动机, 借助端盖上的凸缘装在离合器机座的一侧成一整体。测速发电机是作为转速反馈信号源供控速用。这类电动机的无级调速是通过电磁转差离合器来实现的。

电磁转差离合器的工作原理见图 11.12。其主要构件为电枢、磁极和静止励磁部分。当拖动电动机带动电枢以  $n_1$  的转速旋转, 并在励磁线圈中通以直流电流  $I$ , 此时沿工作气隙圆周表面产

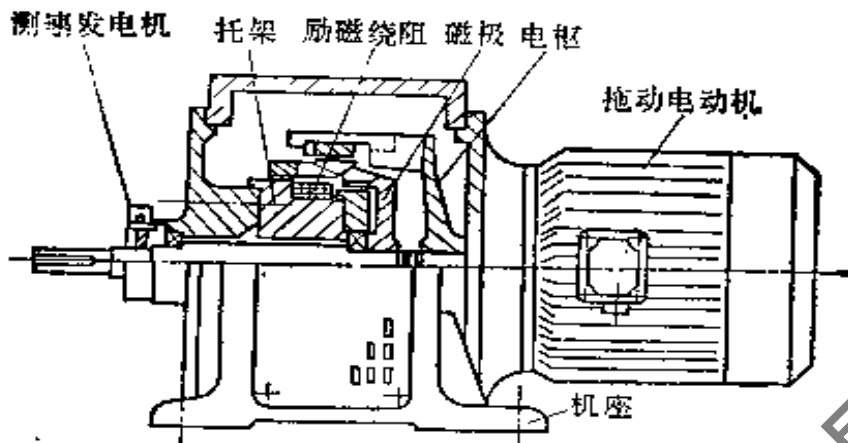


图 11.11 电磁调速异步电动机的结构

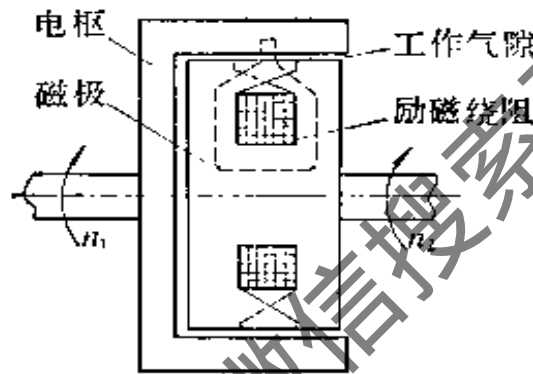


图 11.12 电磁转差离合器原理图

生极性交替的空间磁场。由于兼有导磁与导电材料制成的电枢与磁场间存在相对位移，即转速差，使电枢内产生涡流。此涡流与磁极磁通相互作用产生转矩，结果带动有磁极的从动转子以转速 $n_2$ 与电枢同方向旋转。又因电枢与磁极转子系借工作气隙分开，它们都能自由转动而没有机械连接，所以从动转子转速 $n_2$ 永远低于电枢转速 $n_1$ 。如果改变励磁电流 $I$ 的大小以调整磁场强弱，则在磁场强时磁极与电枢可在较小转差下产生足够的涡流转矩带动负载，所以转速 $n_2$ 较高；反之，当励磁电流小、磁场弱时，必须有较大的转差才能感应产生能带动负载的涡流转矩，所以转速 $n_2$ 较低。这样改变励磁电流的大小可达到对负载转速进行调节。

电磁调速电动机的机械特性系拖动电动机与离合器机械特性合成的结果。如果采用机械特性较硬的 Y 系列三相异步电动机作为拖动电动机，则它的机械特性主要取决于离合器。在不同励磁

电流  $I$  时离合器输出转速  $n_2$  与转矩的关系见图 11.13, 称为离合

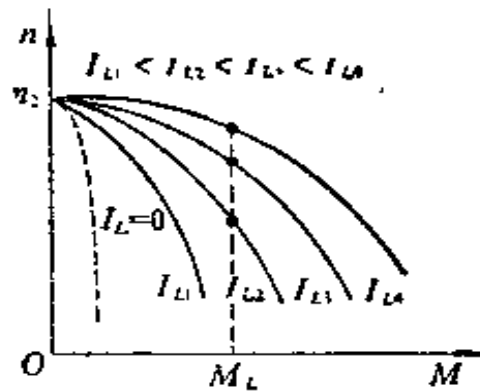


图 11.13 电磁转差离合器的机械特性

器的机械特性, 也就是电磁调速电动机的开环机械特性。从此图可看出, 在拖动电动机转速不变时, 改变励磁电流可改变转速  $n_2$ 。但是在励磁电流较小的情况下, 负载转矩的增大会使转速  $n_2$  急剧下降, 这就是说电磁调速电动机的开环机械特性很软。通常利用该电机输出轴端的测速发电机配置专用控制器(如 ZLK 系列控制器)组成闭环调速系统可获得较硬的特性。

如果不考虑离合器的损耗(如风摩擦等), 离合器的输出转矩等于输入转矩  $M$ 。由于电枢转速  $n_1$  与磁极转速  $n_2$  不同, 因此它的输入功率  $N_1$  与输出功率  $N_2$  不同, 而  $N = \frac{nM}{9550}$ , 则离合器的

效率  $\eta_L$  可表示为:

$$\eta_L = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\frac{n_2 M}{9550}}{\frac{n_1 M}{9550}} = \frac{n_2}{n_1} = 1 - S_L \quad (11.19)$$

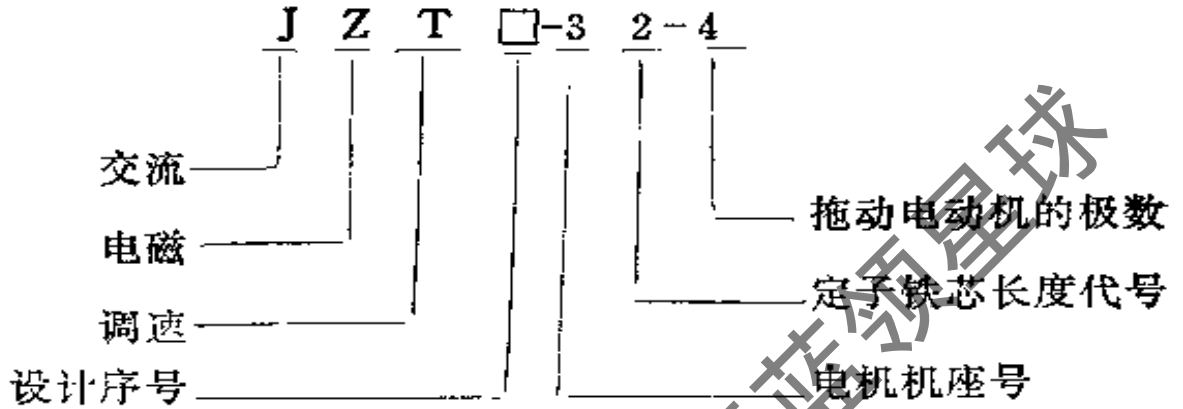
式中  $S_L$  为离合器的转差率,  $S_L = (n_1 - n_2)/n_1$ 。

由上可知, 电磁调速电动机的效率是拖动电动机与电磁转差离合器两者效率之乘积。这类电动机的结构简单、控制装置容量小、价格便宜, 易于操作掌握, 适用于中小容量电动机的调速。现有系列产品供选用。但根据离合器工作原理, 必然存在着转差, 这使输出轴的最高转速仅为拖动电动机轴转速的 80~90%, 由此

存在转差损耗。

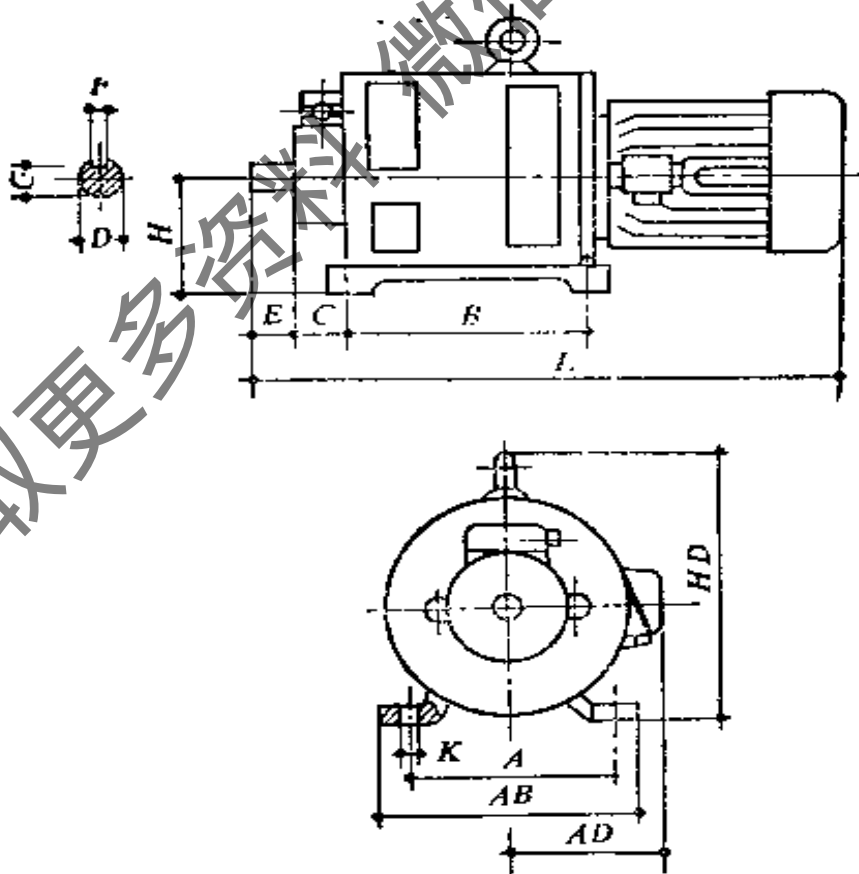
### 11.3.1 JZT (或 YCT) 系列电磁调速异步电动机

JZT 和 JZT 2 (统一设计后的型号将为 YCT) 系列电磁调速异步电动机的型号及含义如下:



它们的外形、安装尺寸及技术数据见表 11.12、表 11.13、表 11.14 及表 11.15。

JZT 系列电磁调速异步电动机的外形及安装尺寸 表 11.12



JZT 系列电磁调速异步电动机的技术数据

续表11.12

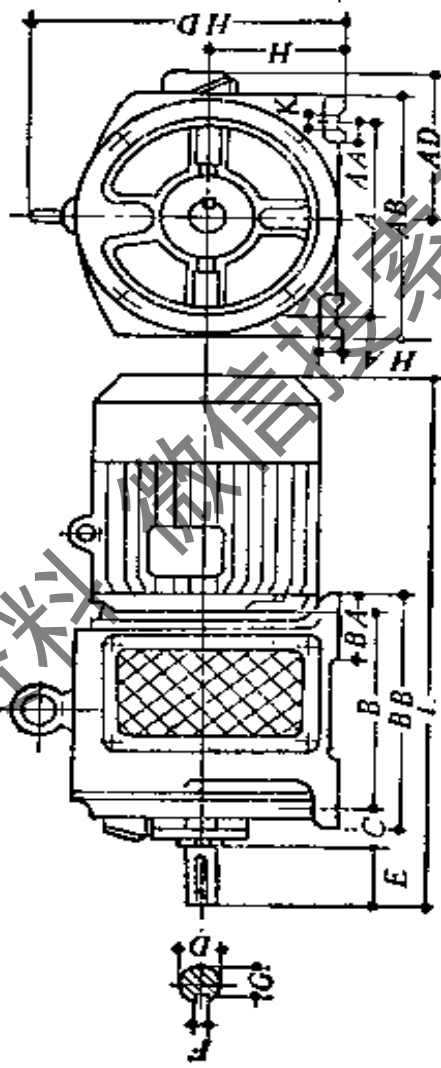
| 型 号              | 安装尺寸[mm] |     |    |    |     |    |      |     |    |     | 外形尺寸[mm] |              |     |
|------------------|----------|-----|----|----|-----|----|------|-----|----|-----|----------|--------------|-----|
|                  | A        | B   | C  | D  | E   | F  | G    | H   | K  | AB  | HD       | L            | AD  |
| JZT-<br>11<br>12 | 190      | 230 | 37 | 18 | 40  | 5  | 14.8 | 112 | 12 | 230 | 275      | 550<br>570   | 140 |
| JZT-<br>21<br>22 | 216      | 238 | 45 | 22 | 50  | 6  | 18.2 | 132 | 12 | 285 | 325      | 600<br>630   | 155 |
| JZT-<br>31<br>32 | 254      | 265 | 4  | 28 | 60  | 8  | 23.5 | 160 | 15 | 310 | 370      | 680<br>700   | 180 |
| JZT-<br>41<br>42 | 279      | 325 | 39 | 32 | 80  | 10 | 28.8 | 180 | 15 | 360 | 415      | 825<br>855   | 210 |
| JZT-<br>51<br>52 | 318      | 340 | 39 | 38 | 80  | 12 | 32.8 | 200 | 19 | 380 | 455      | 910<br>940   | 220 |
| JZT-<br>61<br>62 | 368      | 319 | 40 | 42 | 110 | 12 | 36.8 | 225 | 20 | 475 | 535      | 950<br>990   | 275 |
| JZT-<br>71<br>72 | 457      | 470 | 52 | 48 | 110 | 14 | 42.2 | 280 | 23 | 590 | 685      | 1120<br>1145 | 310 |

JZT 系列电磁调速电动机的技术规格和主要参数

表11.13

| 型 号                | 电动机<br>功率<br>[kW] | 离合器额定转矩 |         | 调速范围<br>[r/min] | 转速变化率<br>不大于<br>[%] | 重 量<br>[kg] |
|--------------------|-------------------|---------|---------|-----------------|---------------------|-------------|
|                    |                   | [N·m]   | [kgf·m] |                 |                     |             |
| JZT-<br>11-4<br>12 | 0.6               | 3.82    | 0.36    | 1200~120        | 2.5                 | 65          |
|                    | 0.8               | 5.10    | 0.52    |                 |                     | 70          |
| JZT-<br>21-4<br>22 | 1.1               | 6.91    | 0.72    | 1200~120        | 2.5                 | 90          |
|                    | 1.5               | 9.60    | 0.98    |                 |                     | 100         |
| JZT-<br>31-4<br>32 | 2.2               | 14.01   | 1.43    | 1200~120        | 2.5                 | 110         |
|                    | 3.0               | 19.11   | 1.95    |                 |                     | 150         |
| JZT-<br>41-4<br>42 | 4.0               | 25.5    | 2.6     | 1200~120        | 2.5                 | 205         |
|                    | 5.5               | 35.08   | 3.58    |                 |                     | 215         |
| JZT-<br>51-4<br>52 | 7.5               | 47.73   | 4.87    | 1200~120        | 2.5                 | 235(275)    |
|                    | 10                | 63.7    | 6.5     | (1250~250)      |                     | 250(290)    |
| JZT-<br>61-4<br>62 | 13                | 82.81   | 8.45    | 1200~120        | 2.5                 | 380         |
|                    | 17                | 108.8   | 11.1    |                 |                     | 400         |
| JZT-<br>71-4<br>72 | 22                | 140.1   | 14.3    | 1200~120        | 2.5                 | 730         |
|                    | 30                | 191.1   | 19.5    |                 |                     | 750         |

JZF 2系列电磁调速电动机的外形及安装尺寸





续表 11.14

| 型号              | 安装尺寸 [mm] |     |     |    |     |    |      |     |    |  | 外形尺寸 [mm] |     |    |    |     |     | 重量   |     |     |
|-----------------|-----------|-----|-----|----|-----|----|------|-----|----|--|-----------|-----|----|----|-----|-----|------|-----|-----|
|                 | A         | B   | C   | D  | E   | F  | G    | H   | K  |  | AB        | AD  | AA | HA | HD  | BB  |      | L   | BA  |
| JZT 2-<br>31-32 | 254       | 265 | 44  | 28 | 60  | 8  | 23.5 | 160 | 16 |  | 320       | 175 | 65 | 20 | 380 | 925 | 630  | 105 | 120 |
|                 |           |     |     |    |     |    |      |     |    |  |           |     |    |    |     |     | 660  |     | 125 |
| JZT 2-<br>41-42 | 279       | 325 | 46  | 32 | 80  | 10 | 26.8 | 180 | 16 |  | 360       | 195 | 70 | 30 | 430 | 385 | 765  | 120 | 180 |
|                 |           |     |     |    |     |    |      |     |    |  |           |     |    |    |     |     | 780  |     | 190 |
| JZT 2-<br>51-52 | 316       | 355 | 48  | 38 | 80  | 12 | 32.8 | 200 | 20 |  | 400       | 250 | 75 | 32 | 480 | 425 | 830  | 150 | 270 |
|                 |           |     |     |    |     |    |      |     |    |  |           |     |    |    |     |     | 900  |     | 285 |
| JZT 2-61        | 380       | 585 | 70  | 42 | 110 | 12 | 36.8 | 225 | 20 |  | 460       | 270 | 80 | 35 | 540 | 445 | 1020 | 150 | 430 |
|                 |           |     |     |    |     |    |      |     |    |  |           |     |    |    |     |     |      |     |     |
| JZT 2-<br>71-72 | 510       | 470 | 110 | 48 | 110 | 14 | 42.2 | 230 | 25 |  | 600       | 315 | 40 | 40 | 690 | 550 | 1320 | 165 | 770 |
|                 |           |     |     |    |     |    |      |     |    |  |           |     |    |    |     |     |      |     | 185 |

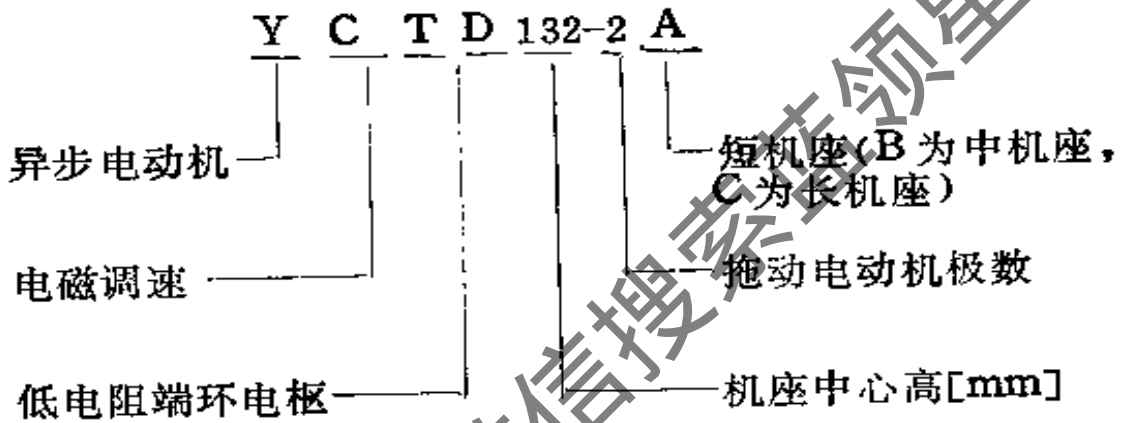
表 11.15

JZT 2 系列电磁调速电动机的技术数据

| 型 号                 | 离合器额定转矩 |         |       | 调速范围[r/min] |          | 转速变化率不大于[%] | 拖 动 电 动 机<br>型 号                 | [kW] |
|---------------------|---------|---------|-------|-------------|----------|-------------|----------------------------------|------|
|                     | 60[Hz]  |         |       | 50[Hz]      | 60[Hz]   |             |                                  |      |
|                     | [N·m]   | [kgf·m] | [N·m] | [kgf·m]     |          |             |                                  |      |
| JZT 2-4<br>31<br>32 | 13.7    | 1.4     | 11.8  | 1.2         | 1500~116 | 1500~150    | JO 3-100<br>L -4 T 2             | 2.2  |
|                     | 19.6    | 2.0     | 15.7  | 1.6         |          |             |                                  | 3.0  |
| JZT 2-4<br>41<br>42 | 25.5    | 2.6     | 21.6  | 2.2         | 1150~115 | 1500~150    | JO 3-112<br>L -4 T 2             | 4.0  |
|                     | 35.3    | 3.6     | 29.4  | 3.0         |          |             |                                  | 5.5  |
| JZT 2-4<br>51<br>52 | 47.0    | 4.8     | 39.2  | 4.0         | 1200~120 | 1500~150    | JO 3-140<br>M -4 T 2             | 7.5  |
|                     | 70.6    | 7.2     | 56.8  | 5.0         |          |             |                                  | 11   |
| JZT 2-61-4          | 94.1    | 9.6     | 76.4  | 7.8         | 1200~120 | 1500~150    | JO 3-160S-4 T 2                  | 15   |
| JZT 2-4<br>71<br>72 | 132.5   | 13.5    | 102.9 | 10.5        | 1200~120 | 1500~150    | JO 3-180M <sup>1</sup><br>-4 T 2 | 22   |
|                     | 184.2   | 18.8    | 147.0 | 15          |          |             |                                  | 30   |

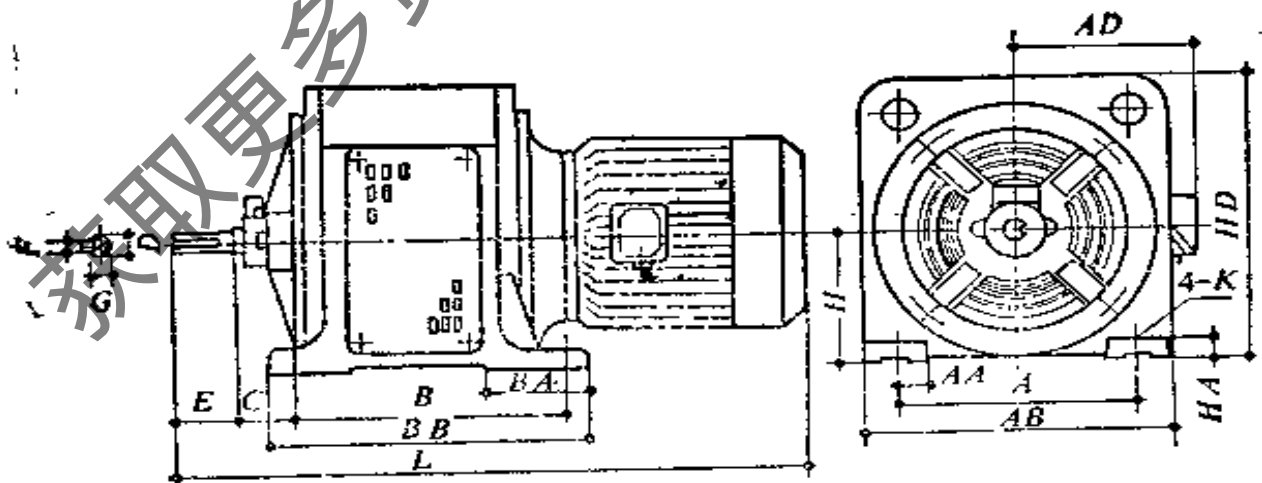
### 11.3.2 YCTD 系列电磁调速异步电动机

YCTD 系列电磁调速异步电动机系由 Y 系列 B<sub>3</sub> 结构派生的异步电动机、电磁转差离合器、测速发电机和控制器组成。除控制器外前三者连成一个整体。它适用于恒转矩负载和离心风机、离心泵等平方转矩负载，在规定的调速范围内能均匀连续地无级调速。对于负载的变动可借助控制器的速度反馈系统使输出轴转速达到规定调速精度。其型号及含义如下：



它的外形、安装尺寸及技术数据见表 11.16 及表 11.17。

YCTD 系列电磁调速异步电动机的外形及安装尺寸 表 11.16



续表 11.16

| 型 号      | 安 装 尺 寸 [mm] |     |    |    |     |    |      |     |    |     | 外 形 尺 寸 [mm] |    |     |     |      |            |  |
|----------|--------------|-----|----|----|-----|----|------|-----|----|-----|--------------|----|-----|-----|------|------------|--|
|          | A            | B   | C  | D  | E   | F  | G    | H   | K  | AB  | AD           | AH | HD  | BB  | L    | BA         |  |
| YCTD 100 | 160          | 228 | 45 | 19 | 40  | 6  | 15.5 | 100 | 10 | 200 | 40           | 14 | 210 |     |      | 75<br>85   |  |
| YCTD 112 | 190          | 241 | 50 | 24 | 50  | 8  | 20   | 112 | 10 | 250 | 50           | 15 | 245 |     |      | 90<br>95   |  |
| YCTD 132 | 254          | 279 | 63 | 28 | 60  | 8  | 24   | 132 | 12 | 315 | 60           | 20 | 285 | 330 | 690  | 100        |  |
| YCTD 160 | 279          | 311 | 70 | 38 | 80  | 10 | 33   | 160 | 15 | 340 | 60           | 20 | 355 | 345 | 825  | 110        |  |
| YCTD 180 | 318          | 368 | 70 | 42 | 110 | 12 | 37   | 180 | 15 |     | 70           | 25 |     |     |      |            |  |
| YCTD 200 | 366          | 457 | 88 | 48 | 110 | 14 | 42.5 | 200 | 19 | 410 | 80           | 30 | 440 | 517 | 1170 | 120<br>150 |  |
| YCTD 225 | 406          | 500 | 89 | 55 | 110 | 16 | 49   | 225 | 19 | 486 | 80           | 30 | 495 | 570 |      | 150<br>180 |  |

YCTD 系列电磁调速电动机的技术数据

表11.17

| 型 号                            | 离合器额定转矩 |         | 调速范围<br>[r/min] | 拖动电动机                |      |
|--------------------------------|---------|---------|-----------------|----------------------|------|
|                                | [N·m]   | [kgf·m] |                 | 型 号                  | [kW] |
| YCTD 100-<br>2 A<br>2 B        | 2.35    | 0.24    | 2600~260        | Y 80 1               | 0.75 |
|                                | 3.43    | 0.35    |                 | Y 80 2               | 1.1  |
| YCTD 112-<br>2 A<br>2 B        | 4.61    | 0.47    | 2600~260        | Y 90 S               | 1.5  |
|                                | 6.86    | 0.7     |                 | Y 90 L               | 2.2  |
| YCTD 132-<br>2 A<br>2 B        | 9.12    | 0.93    | 2700~270        | Y 100 L              | 3    |
|                                | 12.2    | 1.24    |                 | Y 112 M              | 4    |
| YCTD 160-<br>2 A<br>2 B        | 16.9    | 1.72    | 2700~270        | Y 132 S <sub>1</sub> | 5.5  |
|                                | 23      | 2.35    |                 | Y 132 S <sub>2</sub> | 7.5  |
| YCTD 160-<br>2 A<br>2 B<br>2 C | 33.4    | 3.4     | 2700~270        | Y 160 M <sub>1</sub> | 11   |
|                                | 45.5    | 4.64    |                 | Y 160 M <sub>2</sub> | 15   |
|                                | 56.2    | 5.73    |                 | L                    | 18.5 |
| YCTD 200-2 A                   | 66.6    | 6.78    | 2800~280        | Y 180 M              | 22   |
| YCTD 225-<br>2 A<br>-2 B       | 91.4    | 9.32    | 2800~280        | Y 200 L <sub>1</sub> | 30   |
|                                | 113     | 11.5    |                 | Y 200 L <sub>2</sub> | 37   |
| YCTD 250-2 A                   | 136     | 13.9    | 2800~280        | Y 225 M              | 45   |
| YCTD 280-2 A                   | 167     | 17      | 2800~280        | Y 250 M              | 55   |
| YCTD 315-<br>2 A<br>2 B        | 227     | 23.1    | 2800~280        | Y 280 S              | 75   |
|                                | 273     | 27.8    |                 | Y 280 M              | 90   |
| YCTD 90-<br>4 A<br>4 B         | 1.28    | 0.13    | 1200~100        |                      | 0.2  |
|                                | 2.55    | 0.26    |                 |                      | 0.4  |

续表11.17

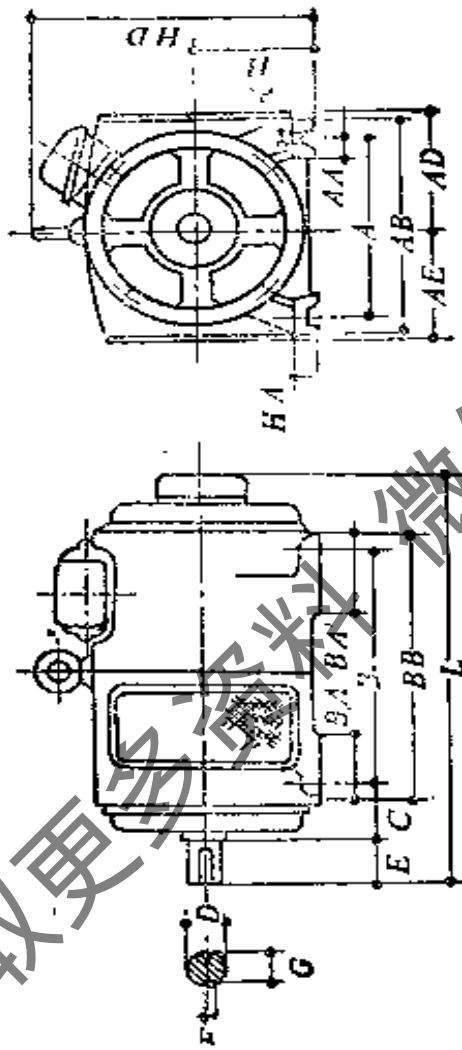
| 型 号          | 离合器额定转矩 |         | 调速范围<br>[r/min] | 拖动电动机   |                       |
|--------------|---------|---------|-----------------|---------|-----------------------|
|              | [N·m]   | [kgf·m] |                 | 型 号     | [kW]                  |
| YCTD 100-    | 4 A     | 3.63    | 1200~100        | Y 80    | 1<br>0.55             |
|              | 4 B     | 4.91    |                 |         | 2<br>0.75             |
| YCTD 112-    | 4 A     | 7.14    | 1200~100        | Y 90    | S<br>1.1              |
|              | 4 B     | 9.73    |                 |         | L<br>1.5              |
| YCTD 132-    | 4 A     | 14.1    | 1300~100        | Y 100   | L <sub>1</sub><br>2.2 |
|              | 4 B     | 19.2    |                 |         | L <sub>2</sub><br>3   |
|              | 4 C     | 25.2    |                 |         | M<br>4                |
| YCTD 160-    | 4 A     | 35.3    | 1350~100        | Y 132   | S<br>5.5              |
|              | 4 B     | 47.3    |                 |         | M<br>7.5              |
| YCTD 180-    | 4 A     | 68.6    | 1350~100        | Y 160   | M<br>11               |
|              | 4 B     | 94.2    |                 |         | L<br>15               |
| YCTD 200-    | 4 A     | 114     | 1375~100        | Y 180   | M<br>18.5             |
|              | 4 B     | 136     |                 |         | L<br>22               |
| YCTD 225-4 A | 189     | 19      | 1375~100        | Y 200 L | 30                    |
| YCTD 250-    | 4 A     | 231     | 1375~100        | Y 225   | S<br>37               |
|              | 4 B     | 276     |                 |         | M<br>45               |
| YCTD 280-4 A | 338     | 34.5    | 1375~100        | Y 250 M | 55                    |
| YCTD 315-    | 4 A     | 461     | 1375~100        | Y 280   | S<br>75               |
|              | 4 B     | 552     |                 |         | M<br>90               |

续表11.17

| 型 号                            | 离合器额定转矩              |                         | 调速范围<br>[r/min] | 拖动电动机  |                   |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|--|-------------------|
|                                | [N·m]                | [kgf·m]                 |                 | 型 号  | [kW]              |
| YCTD 355-<br>4 A<br>4 B<br>4 C | 682<br>815<br>992    | 69.6<br>83.1<br>101.2   | 1400~100        | S<br>Y 315M <sub>1</sub><br>M <sub>2</sub>               | 110<br>132<br>160 |
| YCTD 400-<br>4 A<br>4 B<br>4 C | 1240<br>1552<br>1954 | 126.5<br>158.2<br>199.2 | 1400~100        | M <sub>1</sub><br>Y 355 M <sub>2</sub><br>M <sub>3</sub> | 200<br>250<br>315 |
| YCTD 112-<br>6 A<br>6 B        | 7.4<br>10.8          | 0.75<br>1.1             | 840~100         | S<br>Y 90<br>L   | 0.75<br>1.1       |
| YCTD 132-<br>6 A<br>6 B        | 14.3<br>20.6         | 1.48<br>2.1             | 840~100         | 100 L<br>Y<br>112 M                                      | 1.5<br>2.2        |
| YCTD 160-<br>6 A<br>6 B<br>6 C | 28<br>37.2<br>52     | 2.86<br>3.8<br>5.3      | 860~100         | S<br>Y 132 M <sub>1</sub><br>M <sub>2</sub>              | 3<br>4<br>5.5     |
| YCTD 180-<br>6 A<br>6 B        | 69.6<br>103          | 7.1<br>10.5             | 860~100         | M<br>Y 160<br>L  | 7.5<br>11         |
| YCTD 200-6 A                   | 140                  | 14.3                    | 880~100         | Y 180 L  | 15                |
| YCTD 225-<br>6 A<br>6 B        | 172<br>206           | 17.6<br>21              | 880~100         | L <sub>1</sub><br>Y 200<br>L <sub>2</sub>                | 18.5<br>22        |
| YCTD 250-6 A                   | 280                  | 28.6                    | 880~100         | Y 225 M  | 30                |
| YCTD 280-6 A                   | 346                  | 35.3                    | 880~100         | Y 250 M  | 37                |
| YCTD 315-<br>6 A<br>6 B        | 422<br>515           | 43<br>52.5              | 880~100         | S<br>Y 280<br>M  | 45<br>55          |

YCTT(JZTT) 系列变极电磁调速异步电动机的外形及安装尺寸

表 11.16



| 型 号                | 安 装 尺 寸 [mm] |     |    |    |    |   |      | 外 形 尺 寸 [mm] |    |     |     |     |    |    |     |     |     |    |     |
|--------------------|--------------|-----|----|----|----|---|------|--------------|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|----|-----|
|                    | A            | B   | C  | D  | E  | F | G    | H            | HA | AB  | AD  | AE  | AA | HA | HD  | BB  | L   | BA | BA' |
| YCTT <sup>11</sup> | 190          | 230 | 37 | 18 | 40 | 5 | 14.8 | 112          | 13 | 230 | 140 | 115 | 45 | 16 | 275 | 310 | 570 | 70 |     |
| YCTT <sup>12</sup> |              |     |    |    |    |   |      |              |    |     |     |     |    |    |     |     |     |    | 90  |



续表11.18

| 型号         | 安装尺寸 [mm] |     |     |    |     |    |      |     |    |     |     | 外形尺寸 [mm] |     |    |     |     |      |     |     |
|------------|-----------|-----|-----|----|-----|----|------|-----|----|-----|-----|-----------|-----|----|-----|-----|------|-----|-----|
|            | A         | B   | C   | D  | E   | F  | G    | H   | K  | AB  | AD  | AE        | AA  | HA | HD  | BB  | L    | BA  | BA' |
| 21<br>YCTT | 216       | 238 | 42  | 22 | 50  | 6  | 18.2 | 132 | 13 | 286 | 155 | 141       | 50  | 16 | 325 | 325 | 600  | 80  | 100 |
| 22<br>YCTT | 254       | 265 | 44  | 28 | 60  | 8  | 23.5 | 160 | 16 | 320 | 175 | 175       | 52  | 20 | 400 | 325 | 680  | 65  | 100 |
| 41<br>YCTT | 279       | 325 | 48  | 32 | 80  | 10 | 26.8 | 180 | 16 | 360 | 195 | 195       | 70  | 25 | 430 | 379 | 850  | 65  | 145 |
| 42<br>YCTT | 318       | 355 | 48  | 38 | 80  | 12 | 32.6 | 200 | 20 | 400 | 250 | 215       | 75  | 32 | 485 | 430 | 885  | 100 | 130 |
| 51<br>YCTT | 380       | 385 | 70  | 42 | 110 | 12 | 36.8 | 225 | 20 | 465 | 270 | 245       | 80  | 35 | 550 | 470 | 970  | 115 | 160 |
| 61<br>YCTT | 510       | 470 | 110 | 48 | 110 | 14 | 42.2 | 280 | 30 | 600 | 315 | 315       | 90  | 45 | 685 | 550 | 1100 | 160 | 160 |
| 71<br>YCTT | 580       | 790 | 110 | 60 | 110 | 18 | 52.9 | 315 | 30 | 390 | 445 | 365       | 120 | 50 | 750 | 860 | 1190 | 160 | 160 |
| 81<br>YCTT | 650       | 960 | 194 | 75 | 140 | 20 | 57.2 | 355 | 36 | 790 | 495 | 410       | 135 | 50 | 870 | 980 | 1440 | 200 | 200 |

YCTT(JZTT)系列变极电磁调速电动机的技术数据

表 11.13

| 型 号                   | 离合器额定转矩 |         |        |         | 调速范围       |            | 转速变<br>化率不<br>大于<br>[%] | 拖动电<br>动机容量<br>[kW] |
|-----------------------|---------|---------|--------|---------|------------|------------|-------------------------|---------------------|
|                       | [50 Hz] |         | 60[Hz] |         | [r/min]    |            |                         |                     |
|                       | [N·m]   | [kgf·m] | [N·m]  | [kgf·m] | 50<br>[Hz] | 60<br>[Hz] |                         |                     |
| YCTT 11<br>-6/4<br>12 | 3.8     | 0.39    | 3.1    | 0.32    |            |            | 2.5                     | 0.4/0.6             |
|                       | 5.1     | 0.52    | 4.0    | 0.41    |            |            |                         | 0.55/0.8            |
| YCTT 21<br>-6/4<br>22 | 7.1     | 0.72    | 5.7    | 0.58    |            |            | 2.5                     | 0.75/1.1            |
|                       | 9.6     | 0.98    | 7.8    | 0.8     |            |            |                         | 1.0/1.5             |
| YCTT 31<br>-6/4<br>32 | 13.7    | 1.4     | 11.8   | 1.2     | 1200       | 1440       | 2.5                     | 1.5/2.2             |
|                       | 19.5    | 2.0     | 15.7   | 1.6     | ~700       | ~840       |                         | 2.0/3.0             |
| YCTT 41<br>-6/4<br>42 | 25.5    | 2.6     | 21.6   | 2.2     |            |            | 2.5                     | 2.7/4.0             |
|                       | 35.3    | 3.6     | 29.4   | 3.0     |            |            |                         | 3.7/5.5             |
| YCTT 51<br>-6/4<br>52 | 47.0    | 4.8     | 39.2   | 4.0     |            |            | 2.5                     | 5.0/7.5             |
|                       | 70.6    | 7.2     | 56.8   | 6.0     |            |            |                         | 7.5/11              |
| YCTT 61-8/1           | 94.1    | 9.6     | 76.4   | 7.8     |            |            | 2.5                     | 10/15               |
| YCTT 71<br>-6/4<br>72 | 137.2   | 14      | 107.8  | 11      | 1800       | 1560       | 2.5                     | 15/22               |
|                       | 186.2   | 49      | 151.9  | 15.5    | ~700       | ~840       |                         | 20/30               |
| YCTT 81<br>-6/4<br>82 | 245.0   | 25      |        | 20      | 1320       | 1580       | 2.5                     | 26/40               |
|                       | 343.0   | 35      |        | 28      | 800        | ~960       |                         | 37/55               |
| YCTT 91<br>-6/4<br>92 | 470     | 48      |        | 38.5    |            |            | 2.5                     | 50/75               |
|                       | 627.2   | 64      |        | 51.2    |            |            |                         | 67/100              |

### 11.3.3 YCTT(JZTT)系列变极电磁调速异步电动机

由于电磁离合器的传递效率  $\eta_L = n_2/n_1$ , 因此普通型电磁调速异步电动机在低速运转时传递效率低, 如将拖动电动机改用变极异步电动机并配置有自动换极的控制器, 使电机输出轴转速低于某一范围时, 自动将变极电动机切换至低速级运行, 从而提高离合器的传递效率, 达到进一步的节能运行效果。YCTT(JZTT)系列变极电磁调速电动机即为此目的而设计。它的外形与安装尺寸见表11.18, 技术数据见表11.19。在订货时应提出对控制器的性能要求。

## 11.4 三相异步电动机的起动及其电器和导线的选用

电动机接通电源后, 电机转子从静止状态开始转动, 转速逐渐增高。从零转速到正常的运行转速为止的一段过程称之为起动过程。在起动过程中应考虑电动机的起动电流、起动转矩、起动时间及其可靠性等主要因素。从异步电动机的转矩特性曲线可以看出, 它在  $s=1$  时起动电流大而转矩小。如起动电流过大将使线路电压降落大, 引起电网电压产生较大的波动而影响其他电气设备的正常运行。如果电动机的起动转矩较小使起动时间过长甚至不能起动, 大电流较长时间存在于定子绕组中会引起绕组过度发热, 加速绝缘材料老化, 缩短电动机的使用寿命, 甚至直接烧毁。而且在较大冲击电流产生的电磁力作用下也易使绕组变形甚至发生短路故障。因此起动过程的可靠性包含了电动机特性和所选用的起动方法与设备等方面。电动机主要特性可在技术数据中查得, 下而将叙述几种三相异步电动机的起动方法和基本控制电路与使用的电器。

### 11.4.1 直接起动法(包括导线的选用与敷设)

直接起动又称为全电压起动, 即用合适的电器将电动机直接与电源接通起动运行。由于此时电动机的起动电压高, 起动电流虽大但时间短, 如果供电变压器的容量足够大, 则不致过分影响电

网电压的波动,而且操作简便,起动迅速、电器设备费用低。这种方法用于小功率异步电动机是适宜的。允许直接起动的三相异步电动机的最大功率,一般规定:第一,起动时供电变压器的母线电压降不应超过允许值(经常起动时,母线最大允许电压降为10%,不经常起动时为15%);第二,起动时,供电变压器的短时过载也不应超过最大允许值。根据经验,允许直接起动的三相异步电动机可参考下列经验公式来确定:

$$\frac{\text{电源变压器总容量, [kVA]}}{4 \times \text{电动机功率, [kW]}} + \frac{3}{4} \geq \frac{\text{堵转电流 [A]}}{\text{额定电流 [A]}} \quad (11.20)$$

【例11.2】 Y-132M-4型7.5[kW]三相异步电动机,在容量为180的伊电变压器下是否可直接起动?

【解】 查 Y-132 M-4 型 7.5[kW] 电动机技术数据中堵转电流/额定电流 = 7.0, 由式(11.20)算得

$$\frac{180}{4 \times 7.5} + \frac{3}{4} = 6.75 < 7.0$$

该电动机不允许直接起动。

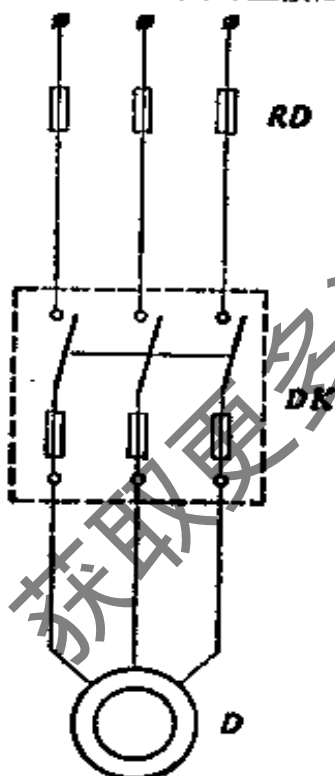


图 11.14 用刀开关的直接开停电路

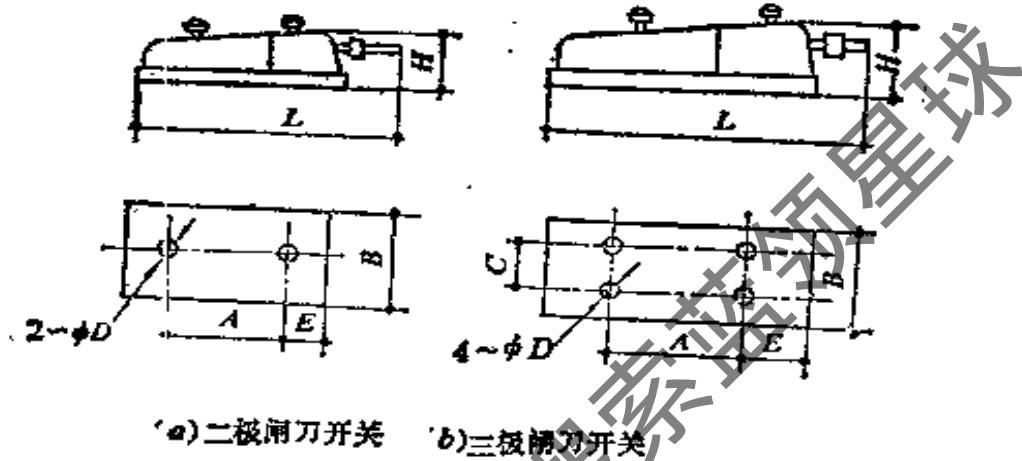
随着电网的发展及控制系统的完善,允许直接起动的异步电动机的功率也在提高。有的地方规定允许直接起动的异步电动机功率可达供电变压器容量的20~30%。

1. 用开关类手控电器的直接开停电路  
刀开关(DK)是一种手动控制电器,它与电动机(D)的连接见图11.14。根据规定,除易燃、易爆、潮湿、腐蚀和有导电屑末飞溅的场所外,容量等于或小于3[kW]的电动机作不频繁操作的开关可用瓷底胶盖闸刀开关,但其额定电流应等于或大于电动机额定电流的2.5倍。这种开关结构简单。它要求垂直安装并必须使刀片夹座置于上端与电源连接,在反向设置时可能会发生的在断开电路后操作手柄自行落下引起误合闸。这也有利于闸刀断开时灭弧。HK系列闸刀开关的外形尺寸及主要技术数

据见表 11.20a, b.

HK 系列负荷开关(闸刀开关)外形及安装尺寸

表 11.20a



| 型 号                    | 额定<br>电流<br>[A] | 外形安装尺寸 [mm] |    |     |     |    |   |    |
|------------------------|-----------------|-------------|----|-----|-----|----|---|----|
|                        |                 | L           | H  | B   | A   | C  | D | E  |
| HK 2-10/2              | 10              | 133         | 68 | 55  | 64  | —  | 5 | 18 |
| HK <sup>22</sup> -15/2 | 15              | 166         | 66 | 62  | 89  | —  | 5 | 18 |
| HK 2-30/2              | 30              | 190         | 90 | 63  | 106 | —  | 5 | 20 |
| HK 2-15/3              | 15              | 135         | 67 | 83  | 95  | 25 | 5 | 23 |
| HK 2-30/3              | 30              | 230         | 82 | 110 | 130 | 35 | 5 | 35 |
| HK 2-60/3              | 60              | 280         | 90 | 130 | 142 | 40 | 5 | 35 |

HK 系列负荷开关(闸刀开关)的主要技术数据

表11.20b

| 型 号       | 额定电压<br>[V] | 额定电流<br>[A] | 控制相应的<br>电动机功率<br>[kW] | 熔 丝 规 格          |                   |
|-----------|-------------|-------------|------------------------|------------------|-------------------|
|           |             |             |                        | 含铜量不<br>少<br>[%] | 线径不小<br>于<br>[mm] |
| HK 2-10/2 | 250         | 10          | 1.1                    | 99.9             | 0.25              |
| HK 2-15/2 | 250         | 15          | 1.5                    | 99.9             | 0.41              |
| HK 2-30/2 | 250         | 30          | 3.0                    | 99.9             | 0.55              |
| KH 2-15/3 | 500         | 15          | 2.2                    | 99.9             | 0.45              |
| HK 2-30/3 | 500         | 30          | 4.0                    | 99.9             | 0.71              |
| HK 2-60/3 | 500         | 60          | 5.5                    | 99.9             | 1.12              |

图 11.14 中跨接电源与闸刀开关间的熔断器(RD)是作为短路保护与装换闸刀开关时安全保护用。熔断器一般采用瓷插式或螺旋式,它应完整无损、接触紧密可靠。瓷插式内熔体应采用合格的铅合金熔丝(软铅丝)或铜熔丝。它们应垂直安装。螺旋式的进线应接在底座的中心端上,出线应接在螺纹壳上。作为短路保护熔断器的熔体必须比上一级的额定电流小,以免在短路保护时影响其他支线正常工作。熔体的选择方法如下:

(一)照明和电热线路

熔体额定电流  $\geq$  所有电具额定线电流之和

(二)电动机线路

单台电动机:

熔体额定电流  $\geq (1.5 \sim 2.5) \times$  电动机的额定电流

多台电动机:

熔体额定电流  $\geq (1.5 \sim 2.5) \times$  (容量最大的电动机的额定电流) + (其余电动机的计算负荷电流)

(注:系数 1.5~2.5,在供电变压器容量较大,且电动机是轻载起动时可选小些,反之则选大些。在个别情况下,取 2.5 后尚不能满足起动要求时,可适当放大,但不能超过 3。)

常用的 RC 1 A 系列瓷插式熔断器、RL 1 系列螺旋式熔断器的主要技术数据见表 11.21 和表 11.22。铅熔丝与铜熔丝的额定电流见表 11.23 和表 11.24。

RC 1 A 系列瓷插式熔断器主要技术数据

表 11.21

| 型 号        | 熔断器<br>额定<br>电流<br>[A] | 熔体额定<br>电流等级<br>[A] | 额 定<br>电 压<br>[V]     | 极限分断能力          |               |            | 外形尺寸<br>[mm] |    |     |
|------------|------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|---------------|------------|--------------|----|-----|
|            |                        |                     |                       | 分断<br>电流<br>[A] | $\cos\varphi$ | 允许断<br>开次数 | 长            | 宽  | 高   |
| RC 1 A-5   | 5                      | 1,2,3,5             | 三相 380<br>或<br>单相 220 | 300             | 0.8           | 2          | 50           | 28 | 43  |
| RC 1 A-10  | 10                     | 2,4,6,10            |                       | 750             |               |            | 62           | 30 | 54  |
| RC 1 A-15  | 15                     | 12,15               |                       | 1000            | 77            |            | 38           | 53 |     |
| RC 1 A-30  | 30                     | 20,25,30            |                       | 2000            | 0.7           |            | 95           | 42 | 60  |
| RC 1 A-60  | 60                     | 40,50,60            |                       | 4000            | 0.5           |            | 124          | 50 | 70  |
| RC 1 A-100 | 100                    | 80,100              |                       | 5000            |               |            | 160          | 58 | 80  |
| RC 1 A 200 | 200                    | 120,150,200         |                       | 10000           |               |            | 231          | 64 | 105 |

RL1 系列螺旋式熔断器主要技术数据

表 11.22

| 型 号      | 熔断器<br>额定电流<br>[A] | 熔体额定电流等级<br>[A]      | 额定电压<br>[V]           | 外形尺寸[mm] |     |     |
|----------|--------------------|----------------------|-----------------------|----------|-----|-----|
|          |                    |                      |                       | 长        | 宽   | 高   |
| RL 1-15  | 15                 | 2,4,5,6,10,15        | 交流 380<br>或<br>直流 440 | 62       | 39  | 62  |
| RL 1-60  | 60                 | 20,25,30,35,40,50,60 |                       | 78       | 55  | 77  |
| RL 1-100 | 100                | 60,80,100            |                       | 118      | 82  | 110 |
| RL 1-200 | 200                | 100,125,150,200      |                       | 156      | 108 | 116 |

续表11.22

| 熔体额定电流<br>[A] | 额定电流的倍数 |        |
|---------------|---------|--------|
|               | 1小时不熔断  | 1小时必熔断 |
| ≤10           | 1.5     | 2.1    |
| >10~30        | 1.4     | 1.75   |
| >30           | 1.3     | 1.6    |

铅熔丝的额定电流表

表 11.23

| 直径<br>[mm] | 截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 近似英<br>规线号 | 额定电流<br>[A] | 熔断电流<br>[A] |
|------------|--------------------------|------------|-------------|-------------|
| 0.08       | 0.005                    | 44         | 0.25        | 0.5         |
| 0.15       | 0.018                    | 38         | 0.5         | 1.0         |
| 0.20       | 0.031                    | 36         | 0.75        | 1.5         |
| 0.22       | 0.038                    | 35         | 0.8         | 1.6         |
| 0.25       | 0.049                    | 33         | 0.9         | 1.8         |
| 0.28       | 0.062                    | 32         | 1           | 2           |
| 0.28       | 0.066                    | 31         | 1.05        | 2.1         |
| 0.32       | 0.080                    | 30         | 1.1         | 2.2         |
| 0.35       | 0.096                    | 29         | 1.25        | 2.5         |
| 0.38       | 0.112                    | 28         | 1.35        | 2.7         |
| 0.40       | 0.128                    | 27         | 1.5         | 3           |



续表11.23

| 直径<br>[mm] | 截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 近似英规线号 | 额定电流<br>[A] | 熔断电流<br>[A] |
|------------|--------------------------|--------|-------------|-------------|
| 0.46       | 0.166                    | 26     | 1.85        | 3.7         |
| 0.52       | 0.212                    | 25     | 2           | 4           |
| 0.54       | 0.229                    | 24     | 2.25        | 4.5         |
| 0.60       | 0.293                    | 23     | 2.5         | 5           |
| 0.71       | 0.40                     | 22     | 3           | 6           |
| 0.81       | 0.52                     | 21     | 3.75        | 7.5         |
| 0.98       | 0.75                     | 20     | 5           | 10          |
| 1.02       | 0.82                     | 19     | 6           | 12          |
| 1.25       | 1.23                     | 13     | 7.5         | 15          |
| 1.51       | 1.79                     | 17     | 10          | 20          |
| 1.67       | 2.19                     | 16     | 11          | 22          |
| 1.76       | 2.41                     | 15     | 12          | 24          |
| 1.98       | 3.08                     | 14     | 15          | 30          |
| 2.40       | 4.52                     | 13     | 20          | 40          |
| 2.73       | 6.07                     | 12     | 25          | 50          |
| 2.95       | 6.84                     | 11     | 27.5        | 55          |

续表11.23

| 直径<br>[mm] | 截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 近似美规线号 | 额定电流<br>[A] | 熔断电流<br>[A] |
|------------|--------------------------|--------|-------------|-------------|
| 3.14       | 7.74                     | 10     | 30          | 60          |
| 3.81       | 11.40                    | 9      | 40          | 80          |
| 4.12       | 13.33                    | 8      | 45          | 90          |
| 4.44       | 15.48                    | 7      | 50          | 100         |
| 4.91       | 18.93                    | 6      | 60          | 120         |
| 5.24       | 21.57                    | 4      | 70          | 140         |

铜熔丝的额定电流表

表 11.24

| 直径<br>[mm] | 截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 近似美<br>规线号 | 额定电流<br>[A] | 熔断电流<br>[A] |
|------------|--------------------------|------------|-------------|-------------|
| 0.234      | 0.043                    | 34         | 4.7         | 9.4         |
| 0.254      | 0.051                    | 33         | 5           | 10          |
| 0.271      | 0.059                    | 32         | 5.5         | 11          |
| 0.285      | 0.068                    | 31         | 6.1         | 12.2        |
| 0.315      | 0.078                    | 30         | 6.9         | 13.8        |
| 0.345      | 0.093                    | 29         | 8           | 16          |
| 0.376      | 0.111                    | 28         | 9.2         | 18.4        |
| 0.417      | 0.137                    | 27         | 11          | 22          |

续表11.24

| 直径<br>[mm] | 截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 近似英规线号 | 额定电流<br>[A] | 熔断电流<br>[A] |
|------------|--------------------------|--------|-------------|-------------|
| 0.457      | 0.164                    | 26     | 12.5        | 25          |
| 0.508      | 0.203                    | 25     | 15          | 29.5        |
| 0.559      | 0.245                    | 24     | 17          | 34          |
| 0.60       | 0.283                    | 23     | 20          | 39          |
| 0.70       | 0.385                    | 22     | 25          | 50          |
| 0.80       | 0.5                      | 21     | 29          | 58          |
| 0.90       | 0.6                      | 20     | 37          | 74          |
| 1.00       | 0.8                      | 19     | 44          | 88          |
| 1.13       | 1.0                      | 18     | 52          | 104         |
| 1.37       | 1.5                      | 17     | 63          | 125         |
| 1.60       | 2                        | 16     | 80          | 160         |
| 1.76       | 2.5                      | 15     | 95          | 190         |
| 2.00       | 3                        | 14     | 120         | 240         |
| 2.24       | 4                        | 13     | 140         | 280         |
| 2.50       | 5                        | 12     | 170         | 340         |
| 2.73       | 6                        | 11     | 200         | 400         |

塑料绝缘线

| 截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 固定敷线用线芯             |          | 明线装置 |     | 钢管布线 |     |     |     |     |     | 塑料管 |     |     |     |
|--------------------------|---------------------|----------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                          | 根数/单<br>根直径<br>[mm] | 近似<br>英规 |      |     | 二根   |     | 三根  |     | 四根  |     | 二根  |     | 三根  |     |
|                          |                     |          | 铜    | 铝   | 铜    | 铝   | 铜   | 铝   | 铜   | 铝   | 铜   | 铝   | 铜   | 铝   |
| 0.50                     |                     |          |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.75                     |                     |          |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0.80                     |                     |          |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 1.00                     | 1/1.13              | 1/18     | 17   |     | 12   |     | 11  |     | 10  |     | 10  |     | 10  |     |
| 1.50                     | 1/1.37              | 1/17     | 21   | 16  | 17   | 13  | 15  | 11  | 14  | 10  | 14  | 11  | 13  | 10  |
| 2.00                     | 1/1.60              | 1/16     |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 2.50                     | 1/1.76              | 1/15     | 28   | 22  | 23   | 17  | 21  | 16  | 19  | 13  | 21  | 15  | 18  | 14  |
| 4                        | 1/2.24              | 1/13     | 37   | 28  | 30   | 23  | 27  | 21  | 24  | 19  | 27  | 21  | 24  | 19  |
| 6                        | 1/2.73              | 1/11     | 48   | 37  | 41   | 30  | 36  | 28  | 32  | 24  | 36  | 27  | 31  | 23  |
| 10                       | 7/1.33              | 7/17     | 65   | 51  | 56   | 42  | 49  | 38  | 43  | 33  | 49  | 36  | 42  | 33  |
| 16                       | 7/1.70              | 7/16     | 91   | 69  | 71   | 55  | 64  | 49  | 56  | 43  | 62  | 48  | 56  | 42  |
| 25                       | 7/2.12              | 7/14     | 120  | 91  | 93   | 70  | 82  | 61  | 74  | 57  | 82  | 63  | 74  | 56  |
| 35                       | 7/2.50              | 7/12     | 147  | 113 | 115  | 87  | 100 | 78  | 91  | 70  | 104 | 78  | 91  | 69  |
| 50                       | 19/1.82             | 19/15    | 187  | 143 | 143  | 108 | 127 | 95  | 113 | 87  | 130 | 99  | 114 | 88  |
| 70                       | 19/2.14             | 19/14    | 230  | 178 | 177  | 135 | 159 | 121 | 143 | 110 | 160 | 126 | 145 | 113 |
| 95                       | 19/2.50             | 19/12    | 282  | 216 | 216  | 165 | 196 | 148 | 173 | 132 | 199 | 151 | 178 | 137 |
| 120                      | 37/2.00             | 37/14    | 324  | 246 | 250  | 190 | 224 | 168 | 198 | 148 | 233 | 173 | 207 | 155 |
| 150                      | 37/2.24             | 37/13    | 371  | 281 | 285  | 215 | 259 | 194 | 229 | 173 | 263 | 198 | 237 | 179 |
| 185                      | 37/2.50             | 37/12    | 423  | 328 | 328  | 246 | 294 | 220 | 259 | 198 | 307 | 229 | 268 | 203 |
| 240                      | 61/2.24             | 61/13    |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 300                      | 61/2.50             | 61/12    |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 400                      | 61/2.85             | 61/11    |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 500                      | 91/2.62             | 91/12    |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

| 布线  |     | 护套线 |    |      |    | 软 线 |      | 50[°C]时有效电阻 |        | 明线装置满载,<br>电压降压 1[V]<br>的长度[m]* |       |
|-----|-----|-----|----|------|----|-----|------|-------------|--------|---------------------------------|-------|
| 四根  |     | 二芯  |    | 三芯四芯 |    | 单 芯 | 双芯   | [Ω/km]      |        |                                 |       |
| 铜   | 铝   | 铜   | 铝  | 铜    | 铝  | 铜   | 铝    | 铜           | 铝      | 铜                               | 铝     |
|     |     | 7   |    | 4    |    | 8   | 7    |             |        |                                 |       |
|     |     |     |    |      |    | 13  | 10.5 |             |        |                                 |       |
|     |     | 11  |    | 9    |    | 14  | 11   |             |        |                                 |       |
| 9   |     | 13  |    | 9.6  |    | 17  | 13   | 20.520      |        | 2.86                            |       |
| 11  | 9   | 17  | 13 | 10   | 8  | 21  | 17   |             | 23.000 | 3.45                            | 2.72  |
|     |     | 19  |    | 13   |    | 25  | 18   |             |        |                                 |       |
| 17  | 12  | 23  | 17 | 17   | 14 | 29  | 21   | 8.2432      | 13.888 | 4.33                            | 3.28  |
| 22  | 17  | 30  | 23 | 23   | 19 |     |      | 5.1520      | 8.680  | 5.25                            | 4.10  |
| 28  | 22  | 37  | 29 | 28   | 22 |     |      | 3.4347      | 5.788  | 6.10                            | 4.66  |
| 38  | 29  | 57  | 44 | 45   | 35 |     |      | 2.0608      | 3.172  | 7.45                            | 5.62  |
| 49  | 38  |     |    |      |    |     |      | 1.2880      | 2.170  | 8.45                            | 6.68  |
| 65  | 50  |     |    |      |    |     |      | 0.8243      | 1.390  | 10.10                           | 7.90  |
| 81  | 61  |     |    |      |    |     |      | 0.5888      | 0.990  | 11.60                           | 8.95  |
| 102 | 79  |     |    |      |    |     |      | 0.4122      | 0.690  | 13.00                           | 10.13 |
| 128 | 100 |     |    |      |    |     |      | 0.2944      | 0.495  | 14.80                           | 11.30 |
| 160 | 121 |     |    |      |    |     |      | 0.2169      | 0.3655 | 16.30                           | 12.67 |
| 185 | 136 |     |    |      |    |     |      | 0.1717      | 0.2893 |                                 |       |
| 216 | 150 |     |    |      |    |     |      | 0.1374      | 0.2314 |                                 |       |
| 242 | 183 |     |    |      |    |     |      | 0.1114      | 0.1876 |                                 |       |
|     |     |     |    |      |    |     |      | 0.0859      | 0.1446 |                                 |       |

橡皮绝

| 截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 固定敷线用线芯             |          | 明线<br>装置 |     | 钢管布线 |     |     |     |     |      | 塑料管 |     |     |     |
|--------------------------|---------------------|----------|----------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
|                          | 根数/单<br>根直径<br>[mm] | 近似<br>类规 |          |     | 二根   |     | 三根  |     | 四根  |      | 二根  |     | 三根  |     |
|                          |                     |          | 铜        | 铝   | 铜    | 铝   | 铜   | 铝   | 铜   | 铝    | 铜   | 铝   |     |     |
| 0.50                     |                     |          |          |     |      |     |     |     |     |      |     |     |     |     |
| 0.75                     |                     |          |          |     |      |     |     |     |     |      |     |     |     |     |
| 0.80                     |                     |          |          |     |      |     |     |     |     |      |     |     |     |     |
| 1.00                     | 1/1.13              | 1/18     | 18       |     | 13   |     | 12  |     | 10  |      | 11  |     | 10  |     |
| 1.50                     | 1/1.37              | 1/17     | 23       | 16  | 17   | 13  | 16  | 12  | 15  | 10   | 15  | 12  | 14  | 11  |
| 2.00                     | 1/1.60              | 1/16     |          |     |      |     |     |     |     |      |     |     |     |     |
| 2.50                     | 1/1.78              | 1/15     | 30       | 24  | 24   | 18  | 22  | 17  | 20  | 14   | 22  | 17  | 19  | 15  |
| 4                        | 1/2.24              | 1/13     | 39       | 30  | 32   | 24  | 29  | 22  | 26  | 20   | 29  | 22  | 26  | 20  |
| 6                        | 1/2.73              | 1/11     | 50       | 39  | 43   | 32  | 37  | 30  | 34  | 26   | 37  | 29  | 33  | 25  |
| 10                       | 7/1.33              | 7/17     | 74       | 57  | 59   | 45  | 52  | 40  | 46  | 34.5 | 51  | 38  | 45  | 35  |
| 16                       | 7/1.70              | 7/16     | 93       | 74  | 75   | 57  | 67  | 51  | 60  | 45   | 66  | 50  | 59  | 45  |
| 25                       | 7/2.12              | 7/14     | 126      | 96  | 98   | 75  | 87  | 66  | 78  | 59   | 87  | 67  | 78  | 59  |
| 35                       | 7/2.50              | 7/12     | 156      | 120 | 121  | 92  | 108 | 82  | 95  | 72   | 109 | 83  | 96  | 73  |
| 50                       | 19/1.83             | 19/15    | 200      | 152 | 151  | 115 | 134 | 102 | 119 | 91   | 139 | 104 | 121 | 94  |
| 70                       | 19/2.14             | 19/14    | 247      | 191 | 186  | 143 | 167 | 130 | 150 | 115  | 169 | 133 | 152 | 117 |
| 95                       | 19/2.50             | 19/12    | 300      | 230 | 225  | 171 | 203 | 156 | 182 | 139  | 208 | 160 | 186 | 143 |
| 120                      | 37/2.00             | 37/14    | 346      | 268 | 260  | 200 | 233 | 182 | 212 | 165  | 242 | 182 | 217 | 165 |
| 150                      | 37/2.24             | 37/13    | 407      | 312 | 294  | 226 | 268 | 208 | 243 | 191  | 277 | 217 | 252 | 197 |
| 185                      | 37/2.50             | 37/12    | 468      | 365 |      |     |     |     |     |      |     |     |     |     |
| 240                      | 61/2.24             | 61/13    | 570      | 442 |      |     |     |     |     |      |     |     |     |     |
| 300                      | 61/2.50             | 61/12    | 668      | 520 |      |     |     |     |     |      |     |     |     |     |
| 400                      | 61/2.85             | 61/11    | 815      | 632 |      |     |     |     |     |      |     |     |     |     |
| 500                      | 91/2.62             | 91/12    | 950      | 738 |      |     |     |     |     |      |     |     |     |     |

注 ① 1980年10月机械工业部上海电缆研究所编写的《电线电缆连续负荷载流》前一次按照部颁标准工作温度65[°C]，而这次是以70[°C]计算的。由伏油浸纸绝缘电力电缆及500伏橡皮，塑料绝缘电线长期连续负荷下允当地最热月份的平均最高温度)为35[°C]在实际空气温度超过35[°C]的地

|            |     |      |
|------------|-----|------|
| 周围空气温度[°C] | 35  | 40   |
| 校正系数       | 1.0 | 0.91 |

② 市场有英规7/20导线，其载流量可按表11.25或表11.26中的截面4mm查阅。

③ \*指只计线路有效电阻不计电抗时，在一根导线上降低电压1V的长度。

导线安全流量[A]

表 11.26

| 布线  |     | 护套线 |      |          |    | 软 线 |          | 50[°C]时有效电阻:<br>[Ω/km] |        | 明线装置满载<br>电压降低 1V<br>的长度[m]* |       |
|-----|-----|-----|------|----------|----|-----|----------|------------------------|--------|------------------------------|-------|
| 四根  |     | 二芯  |      | 三芯<br>四芯 |    | 单芯  | 双芯       |                        |        |                              |       |
| 铜   | 铝   | 铜   | 铝    | 铜        | 铝  | 铜   | 铝        | 铜                      | 铝      | 铜                            | 铝     |
|     |     | 7   |      | 4        |    |     | 7<br>9.5 |                        |        |                              |       |
| 10  |     | 10  |      | 9        |    |     | 10       | 20.520                 |        | 2.70                         |       |
| 12  | 10  | 11  |      | 10       |    |     | 11       | 13.7387                | 23.000 | 3.20                         | 2.70  |
|     |     | 14  | 12   | 10       | 8  |     | 14       |                        |        |                              |       |
|     |     | 17  |      | 12       | 12 |     | 17       | 8.2423                 | 13.888 | 4.03                         | 3.00  |
| 17  | 13  | 18  | 14   | 16       | 16 |     | 18       | 5.1520                 | 8.680  | 5.00                         | 3.85  |
| 23  | 17  | 28  | 21.8 | 21       |    |     |          | 3.4334                 | 5.786  | 5.80                         | 4.45  |
| 30  | 23  |     |      |          |    |     |          | 2.6608                 | 3.472  | 6.56                         | 5.05  |
| 40  | 30  |     |      |          |    |     |          | 1.2880                 | 2.170  | 8.20                         | 6.20  |
| 52  | 40  |     |      |          |    |     |          | 0.8243                 | 1.390  | 9.60                         | 7.50  |
| 69  | 52  |     |      |          |    |     |          | 0.5888                 | 0.990  | 10.90                        | 8.40  |
| 85  | 64  |     |      |          |    |     |          | 0.4122                 | 0.690  | 12.20                        | 9.50  |
| 107 | 82  |     |      |          |    |     |          | 0.2944                 | 0.496  | 13.80                        | 10.50 |
| 135 | 104 |     |      |          |    |     |          | 0.2169                 | 0.3655 | 15.40                        | 11.90 |
| 169 | 130 |     |      |          |    |     |          | 0.1717                 | 0.2893 | 16.80                        | 13.00 |
| 197 | 147 |     |      |          |    |     |          | 0.1374                 | 0.2314 | 18.00                        | 13.80 |
| 230 | 178 |     |      |          |    |     |          | 0.1114                 | 0.8876 | 19.50                        | 14.60 |
|     |     |     |      |          |    |     |          | 0.0859                 | 0.1446 | 20.50                        | 15.70 |

流量> 内载流量数值与该所前一次发表的数值略有不同：例如聚氯乙烯绝缘电力电  
子部颁标准没有更改，本表内所列安全载流量仍系根据该所 1973 年 11 月 <1~35千  
许载流量修正报告>计算而得。线芯最高允许工作温度为 85[°C]，周围空气温度（指  
方，安全载流量应乘以下表中的校正系数。

|      |      |      |
|------|------|------|
| 15   | 50   | 55   |
| 0.82 | 0.71 | 0.58 |

铜芯导线及电缆(三相 380[V] 每 1 安-公里的电压损失(%) 表 11.27

| 截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 铜芯导线明敷(线间距离 150 mm) |      |      |      |      |      | 铜芯电缆或铜芯导线穿管 |      |      |      |      |      |
|--------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|
|                          | 功 率 因 数             |      |      |      |      |      | 功 率 因 数     |      |      |      |      |      |
|                          | 0.5                 | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  | 0.5         | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  |
| 1.5                      |                     |      |      |      |      |      | 3.18        | 3.80 | 4.43 | 5.05 | 5.67 | 6.26 |
| 2.5                      |                     |      |      |      |      |      | 1.92        | 2.23 | 2.66 | 2.98 | 3.45 | 3.76 |
| 4                        | 1.30                | 1.53 | 1.75 | 1.95 | 2.19 | 2.35 | 1.21        | 1.44 | 1.69 | 1.91 | 2.14 | 2.35 |
| 6                        | 0.91                | 1.05 | 1.20 | 1.36 | 1.47 | 1.57 | 0.82        | 0.97 | 1.18 | 1.28 | 1.43 | 1.57 |
| 10                       | 0.58                | 0.67 | 0.75 | 0.83 | 0.92 | 0.94 | 0.50        | 0.59 | 0.69 | 0.77 | 0.86 | 0.94 |
| 16                       | 0.40                | 0.45 | 0.50 | 0.55 | 0.58 | 0.59 | 0.32        | 0.38 | 0.43 | 0.49 | 0.54 | 0.59 |
| 25                       | 0.29                | 0.32 | 0.35 | 0.37 | 0.39 | 0.39 | 0.21        | 0.25 | 0.29 | 0.32 | 0.36 | 0.38 |
| 35                       | 0.23                | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.27 | 0.16        | 0.19 | 0.21 | 0.23 | 0.25 | 0.27 |
| 50                       | 0.19                | 0.20 | 0.21 | 0.22 | 0.21 | 0.19 | 0.12        | 0.14 | 0.15 | 0.17 | 0.18 | 0.19 |
| 70                       | 0.16                | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.16 | 0.14 | 0.09        | 0.10 | 0.11 | 0.13 | 0.13 | 0.14 |
| 95                       | 0.13                | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.13 | 0.10 | 0.07        | 0.08 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| 120                      | 0.12                | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.08 | 0.06        | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.09 |
| 150                      | 0.11                | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.06 | 0.05        | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.06 |
| 185                      | 0.10                | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.08 | 0.05 | 0.05        | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| 240                      | 0.09                | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.04 | 0.04        | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.40 |

注：导线工作温度为 50[℃]



铝芯导线及电缆(三相 380[V])每 1 安-公里的电压损失(%) 表11.23

| 截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 铝芯导线明敷(线间距离 150 mm) |      |      |      |      |      | 铝芯电缆或铝芯导线穿管 |      |      |      |      |      |
|--------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|
|                          | 功率因数                |      |      |      |      |      | 功率因数        |      |      |      |      |      |
|                          | 0.5                 | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  | 0.5         | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  |
| 2.5                      | 3.3                 | 3.93 | 4.54 | 5.17 | 5.80 | 6.34 | 3.2         | 3.84 | 4.47 | 5.1  | 5.76 | 6.34 |
| 4                        | 2.10                | 2.49 | 2.87 | 3.25 | 3.62 | 3.96 | 2.02        | 2.41 | 2.80 | 3.18 | 3.57 | 3.96 |
| 6                        | 1.42                | 1.70 | 1.95 | 2.20 | 2.43 | 2.64 | 1.36        | 1.62 | 1.88 | 2.13 | 2.38 | 2.64 |
| 10                       | 0.91                | 1.06 | 1.20 | 1.35 | 1.54 | 1.58 | 0.82        | 0.96 | 1.13 | 1.29 | 1.50 | 1.58 |
| 16                       | 0.60                | 0.69 | 0.78 | 0.87 | 0.94 | 0.99 | 0.52        | 0.63 | 0.72 | 0.81 | 0.90 | 0.99 |
| 25                       | 0.42                | 0.47 | 0.53 | 0.58 | 0.64 | 0.65 | 0.31        | 0.40 | 0.47 | 0.53 | 0.58 | 0.63 |
| 35                       | 0.32                | 0.36 | 0.40 | 0.43 | 0.45 | 0.45 | 0.25        | 0.30 | 0.34 | 0.38 | 0.42 | 0.45 |
| 50                       | 0.27                | 0.30 | 0.33 | 0.35 | 0.37 | 0.36 | 0.20        | 0.25 | 0.27 | 0.31 | 0.34 | 0.36 |
| 70                       | 0.20                | 0.22 | 0.23 | 0.24 | 0.25 | 0.23 | 0.14        | 0.16 | 0.18 | 0.20 | 0.22 | 0.23 |
| 95                       | 0.17                | 0.18 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.17 | 0.11        | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.17 |
| 120                      | 0.15                | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.13 | 0.09        | 0.10 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.13 |
| 150                      | 0.14                | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.13 | 0.11 | 0.08        | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.11 | 0.11 |
| 185                      | 0.12                | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.07        | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 |
| 240                      | 0.11                | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.07 | 0.06        | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |

注：导线工作温度为 50[°C]。

电 线 管 规 格

表11.29a

| 标 称 直 径 |                               | 外径×壁厚[mm]  | 内径[mm] | 重量[kg/mm] |
|---------|-------------------------------|------------|--------|-----------|
| [mm]    | [mm]                          |            |        |           |
| 10      | 3/8                           | 9.5×1.24   | 7.03   | 0.261     |
| 12      | 1/2                           | 12.7×1.60  | 9.5    | 0.451     |
| 15      | 5/8                           | 15.87×1.60 | 12.67  | 0.562     |
| 20      | 3/4                           | 19.05×1.80 | 15.45  | 0.765     |
| 25      | 1                             | 25.4×1.80  | 21.80  | 1.035     |
| 32      | 1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> | 31.75×1.80 | 28.15  | 1.335     |
| 40      | 1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> | 38.1×1.80  | 34.5   | 1.611     |
| 50      | 2                             | 50.8×2.00  | 45.8   | 2.400     |
| 70      | 2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> | 63.5×2.50  | 58.5   | 3.760     |
| 80      | 3                             | 76.2×3.20  | 69.5   | 5.750     |

有缝钢管(黑、白铁管)规格

表11.29b

| 标 称 直 径 |                               | 外径×壁厚[mm]  | 内径[mm] | 重量[kg/mm] |
|---------|-------------------------------|------------|--------|-----------|
| [mm]    | [mm]                          |            |        |           |
| 10      | 3/8                           | 17×2.25    | 12.5   | 0.82      |
| 15      | 1/2                           | 21.25×2.75 | 15.75  | 1.25      |
| 20      | 3/4                           | 26.75×2.75 | 21.25  | 1.63      |
| 25      | 1                             | 33.5×3.25  | 27     | 2.42      |
| 32      | 1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> | 42.25×3.25 | 35.75  | 3.13      |
| 40      | 1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> | 48×3.50    | 41     | 3.84      |
| 50      | 2                             | 60×3.50    | 53     | 4.83      |
| 70      | 2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> | 75.5×3.75  | 68     | 6.64      |
| 80      | 3                             | 88.5×4     | 80.5   | 8.34      |
| 100     | 4                             | 114×4      | 106    | 10.85     |
| 125     | 5                             | 140×4.5    | 131    | 15.04     |
| 150     | 6                             | 165×4.5    | 156    | 17.81     |

导线穿电线管的标称直径选择表

表11.31a

| 导线标称截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 导 线 根 数        |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------------------|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                              | 2              | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|                              | 电线管的最小标称直径[mm] |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 1                            | 12             | 15 | 15 | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 1.5                          | 12             | 15 | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 2                            | 15             | 15 | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 2.5                          | 15             | 15 | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 32 |
| 3                            | 15             | 15 | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 | 32 | 32 |
| 4                            | 15             | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 | 32 | 32 | 32 |
| 5                            | 15             | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 | 32 | 32 | 32 |
| 6                            | 15             | 20 | 25 | 25 | 25 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| 8                            | 20             | 25 | 25 | 32 | 32 | 32 | 40 | 40 | 40 |
| 10                           | 25             | 25 | 32 | 32 | 40 | 40 | 40 | 50 | 50 |
| 16                           | 25             | 32 | 32 | 40 | 40 | 50 | 50 | 50 | 70 |
| 20                           | 25             | 32 | 40 | 40 | 50 | 50 | 50 | 70 | 70 |
| 25                           | 32             | 40 | 40 | 50 | 50 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| 35                           | 32             | 40 | 50 | 50 | 70 | 70 | 70 | 70 | 80 |
| 50                           | 40             | 50 | 70 | 70 | 70 | 70 | 80 | 80 | 80 |
| 70                           | 50             | 50 | 70 | 70 | 80 | 80 | 80 |    |    |
| 95                           | 50             | 70 | 70 | 80 | 80 |    |    |    |    |
| 120                          | 70             | 70 | 80 | 80 |    |    |    |    |    |

导线穿有缝钢管的标称直径选择表

表11.30b

| 导线标称截面<br>[mm <sup>2</sup> ] | 导 线 根 数          |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------------------|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                              | 2                | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|                              | 有缝钢管的最小标称直径 [mm] |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 1                            | 10               | 10 | 10 | 15 | 15 | 20 | 20 | 25 | 25 |
| 1.5                          | 10               | 15 | 15 | 20 | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 |
| 2                            | 10               | 15 | 15 | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 2.5                          | 15               | 15 | 15 | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 3                            | 15               | 15 | 20 | 20 | 20 | 25 | 25 | 32 | 32 |
| 4                            | 15               | 20 | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 | 32 | 32 |
| 5                            | 15               | 20 | 20 | 20 | 25 | 25 | 32 | 32 | 32 |
| 6                            | 20               | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 | 32 | 32 | 32 |
| 8                            | 20               | 25 | 25 | 25 | 32 | 25 | 32 | 32 | 40 |
| 10                           | 20               | 25 | 25 | 32 | 32 | 32 | 40 | 50 | 50 |
| 16                           | 25               | 25 | 32 | 32 | 40 | 40 | 50 | 50 | 50 |
| 20                           | 25               | 32 | 32 | 40 | 50 | 50 | 50 | 70 | 70 |
| 25                           | 32               | 32 | 40 | 40 | 50 | 50 | 70 | 70 | 70 |
| 35                           | 32               | 40 | 50 | 50 | 50 | 70 | 70 | 70 | 80 |
| 50                           | 40               | 50 | 50 | 70 | 70 | 70 | 80 | 80 | 80 |
| 70                           | 50               | 50 | 70 | 70 | 80 | 80 |    |    |    |
| 95                           | 50               | 70 | 70 | 80 | 80 |    |    |    |    |
| 120                          | 70               | 70 | 80 | 80 |    |    |    |    |    |
| 150                          | 70               | 70 | 80 |    |    |    |    |    |    |
| 185                          | 70               | 80 |    |    |    |    |    |    |    |

关于与异步电动机连接的导线。可选适用于交流电压为500[V]的布电线。常用铜芯橡皮绝缘线(BX型)、铝芯橡皮绝缘线(BLX型)、铜芯塑料绝缘线(BV型)或铝芯塑料绝缘线(BLV型)穿管敷设。塑料绝缘线的安全载流量见表11.25,橡皮绝缘线的安全载流量见表11.26。

对于电动机类负荷导线截面大小的选择,一般可先确定所用导线和布线类型,再从表11.25或表11.26中查出与电动机额定电流相近安全载流量所对应的导线截面积。然后参考表11.27或表11.28校核由该截面导线敷设后保证在额定电流运行下,电动机端的工作电压不低于额定电压的95%(即不超过额定电压值5%的导线电压损失),而且还必须满足决定于机械强度所需的最小截面(除控制和信号回路的导线外规定穿管铜芯线为1[mm<sup>2</sup>],铝芯线为2.5[mm<sup>2</sup>])。另外,导线的安全载流量与保护该导线所用的熔断器的熔体额定电流之间的关系,一般规定:

(一) 照明与电热线路

导线安全载流量 $\geq$ 熔体额定电流

(二) 电动机线路

导线安全载流量 $\times(1.5\sim 1.8)\geq$ 熔体额定电流

导线所穿钢管,多采用电线管(标注DG)或有缝钢管(标注G)。一般规定,明、暗管线用的钢管必须经过防锈处理。装于潮湿、腐蚀场所的明管和埋在地下的暗管应采用管壁厚度不小于2.5[mm]的钢管。钢管内所有导线的总截面(包括绝缘层)不应大于管子有效截面的40%。管子的最小内径不应小于9.5[mm]。电线管与有缝钢管的规格见表11.29a、b。管内所穿导线根数一般不得超过10根,对一台电动机包括控制和信号回路的所有导线或同一设备多台电动机的线路,如导线数超过10根时,允许穿在同一根管内,但同一管内所有导线的绝缘等级应满足管内最高一级的电压要求。导线穿电线管或有缝钢管的标称直径可参考表11.30a或表11.30b选择。穿在管内的导线不得有接头,必须有接头时应加装接线盒。钢管应尽可能沿最短路线且减少弯曲

次数敷设。敷设在含有对导线绝缘有害的蒸汽、气体或多尘埃处以及有可能进入油、水等液体场所的钢管，其连接处应密封。明管敷设时应采用管卡支持，管卡间的距离不应大于表 11.31 的规定。

室内电气管线、配电设备与其他管道、设备之间应保持的最小距离参见表 11.32。

明敷钢管管卡间最大距离[m]

表 11.31

| 管壁厚度<br>[mm] | 钢管标称直径 [mm]                                 |                                    |                                    |                                    |
|--------------|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|              | 12~20<br>( $\frac{1}{2} \sim \frac{3}{4}$ ) | 25~32<br>( $1 \sim 1\frac{1}{4}$ ) | 40~50<br>( $1\frac{1}{2} \sim 2$ ) | 70~80<br>( $2\frac{1}{2} \sim 3$ ) |
| ≥2.5         | 1.5   | 2.0                                | 2.5                                | 3.5                                |
| <2.5         | 1.0   | 1.5                                | 2.0                                | —                                  |

HH 系列负荷开关（铁壳开关）是带有速断弹簧的刀开关，它的刀闸和熔断器串连在一起装在盒中，然后通过传动装置用手柄操作。其构造特点是当盒盖打开时不能合闸，因此较 HK 系列闸刀开关安全。适用于不频繁接通与分断负载电路或作为线路末端短路保护。它的主要技术数据及外形安装尺寸见表 11.33。

DZ 5-20、DZ 9-30 和 DZ 10 自动空气断路器（简称自动开关或空气开关）是一种有线路故障时能自动切断和手动复位的保护电器。它有供选择的不同电流等级脱扣器作为电动机过载保护及短路保护用。自动开关是手操作开关，它适用于不频繁直接起动电动机和作为线路通、断及短路保护。主要技术数据见表 11.34、表 11.35 及表 11.36。

室内电气管线、配电设备与其他管道设备之间的最小距离[mm] 表 11.32

| 布线方式    |    | 导线穿金属管        | 电 缆           | 明设绝缘导线        | 裸母线  | 天车滑触线 | 配电设备 |
|---------|----|---------------|---------------|---------------|------|-------|------|
| 煤 气 管   | 平行 | 100           | 500           | 1000          | 1000 | 1500  | 1500 |
|         | 交叉 | 100           | 300           | 300           | 500  | 500   |      |
| 乙 炔 管   | 平行 | 100           | 1000          | 1000          | 2000 | 3000  | 3000 |
|         | 交叉 | 100           | 500           | 500           | 500  | 500   |      |
| 氧 气 管   | 平行 | 100           | 500           | 500           | 1000 | 1500  | 1500 |
|         | 交叉 | 100           | 300           | 300           | 500  | 500   |      |
| 蒸 汽 管   | 平行 | 1000<br>(500) | 1000<br>(600) | 1000<br>(500) | 1000 | 1000  | 500  |
|         | 交叉 | 300           | 300           | 300           | 500  | 500   |      |
| 暖 热 水 管 | 平行 | 300<br>(200)  | 500           | 300<br>(200)  | 1000 | 1000  | 100  |
|         | 交叉 | 100           | 100           | 100           | 500  | 500   |      |

续表11.82

| 布线方式  |    | 导线穿金属管 | 电  缆 | 明设绝<br>缘导线 | 裸母线  | 天车滑<br>触线 | 配电设备 |
|-------|----|--------|------|------------|------|-----------|------|
| 通 风 管 | 平行 |        | 200  | 100        | 1000 | 1000      | 100  |
|       | 交叉 |        | 100  | 100        | 500  | 500       |      |
| 上、下水管 | 平行 |        | 200  | 100        | 1000 | 1000      | 100  |
|       | 交叉 |        | 100  | 100        | 500  | 500       |      |
| 压缩空气管 | 平行 |        | 200  | 100        | 1000 | 1000      | 100  |
|       | 交叉 |        | 100  | 100        | 500  | 500       |      |
| 工艺设备  | 平行 |        |      |            | 1500 | 1500      |      |
|       | 交叉 |        |      |            | 1500 | 1500      |      |

注：1. 表内无括号数字为电管线在管道上面时的数据；有括号数字为电管线在管道下面的数据。

2. 在不能满足表中所列距离时，应采取以下措施：

(1) 电管线与蒸汽管线不能保持表中距离时，应在蒸汽管或电管线外包以绝热层，此时，平行净距可减为200[mm]，交叉处仅需考虑施工操作和便于维护的距离；

(2) 电管线与暖水管不能保持表中距离时，可在暖水管外包绝热层；

(3) 裸母线与其他管道交叉不能保持表中距离，应在交叉处的裸母线外，装保护网或罩。

3. 当上水管与电管线平行敷设且在同一垂直面时，应将电管线敷设于水管之上。



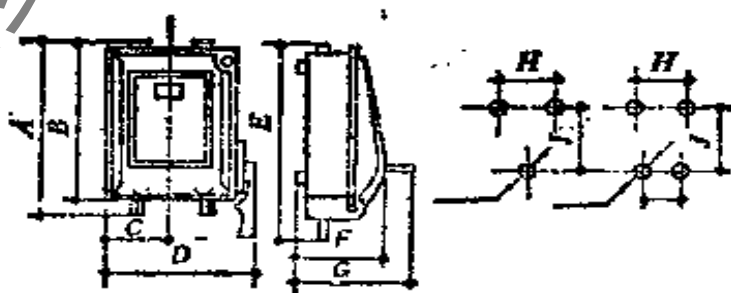
HH 系列铁壳开关的主要技术数据和外形安装尺寸

表 11.33

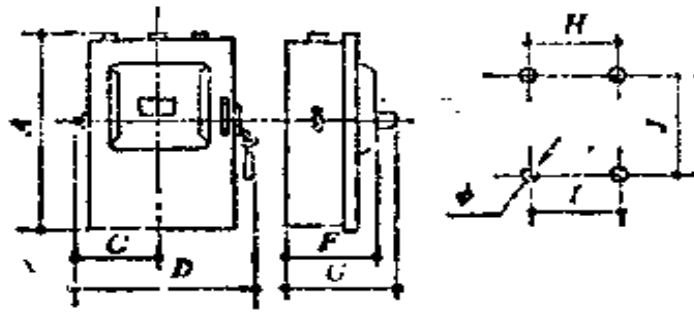
a) HH 系列铁壳开关主要技术数据

| 型 号                      | 额定<br>电流<br>[A] | 刀开关极限通断能力<br>(在110%额定电压时) |          |                 | 熔断器极限分断<br>能力   |          |          | 控制电<br>动机最<br>大功率<br>[kW] |
|--------------------------|-----------------|---------------------------|----------|-----------------|-----------------|----------|----------|---------------------------|
|                          |                 | 通断<br>电流<br>[A]           | 功率<br>因数 | 通断<br>次数<br>[A] | 分断<br>电流<br>[A] | 功率<br>因数 | 分断<br>次数 |                           |
| HH 3-15/3                | 15              | 60                        | 0.4      | 10              | 750             | 0.4      | 2        | 3.0                       |
| HH 3-30/3                | 30              | 120                       |          |                 | 1500            |          |          | 7.5                       |
| HH 3-60/3                | 60              | 240                       | 3000     | 13              |                 |          |          |                           |
| HH 3-100/3               | 100             | 250                       | 0.5      | 10              | 750             | 0.8      | 2        | 3.0                       |
| HH 3-200/3               | 200             | 300                       |          |                 |                 |          |          |                           |
| HH 4-15/3<br>HH 4-15/3 Z | 15              | 60                        | 0.5      | 10              | 750             | 0.7      | 2        | 3.0                       |
| HH 4-30/3<br>HH 4-30/3 Z | 30              | 120                       | 0.4      | 10              | 1500            | 0.6      | 2        | 7.5                       |
| HH 4-60/3<br>HH 4-60/3 Z | 60              | 240                       | 0.4      | 10              | 3000            | 0.6      | 2        | 13                        |

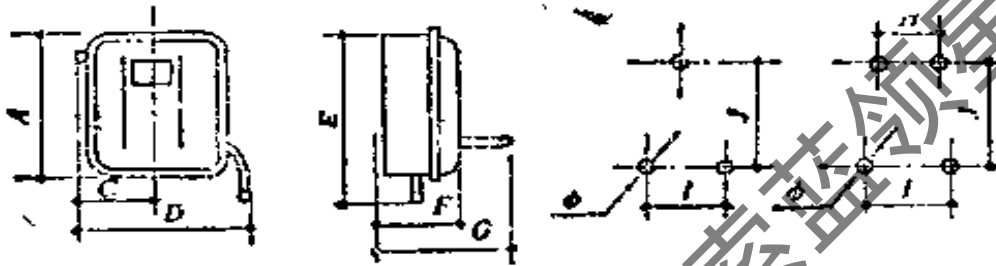
b) HH 系列铁壳开关外形安装尺寸 [mm]



HH 3-15, 30, 60



HH 3-100, 200



HH 4-15, 30, 60

| 型 号         | 外形尺寸 |     |     |     |     |     |     | 安装孔及孔距 |     |     |   |
|-------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|---|
|             | A    | B   | C   | D   | E   | F   | G   | H      | I   | J   | φ |
| HH 3-15/3   | 220  | 205 | 90  | 206 | 255 | 90  | 110 | 110    | —   | 160 | 6 |
| HH 3-30/3   | 270  | 250 | 108 | 238 | 312 | 106 | 125 | 110    | —   | 210 | 6 |
| HH 3-60/3   | 387  | 354 | 145 | 314 | 468 | 130 | 198 | 220    | 160 | 294 | 7 |
| HH 3-100/3  | 440  | —   | 158 | 360 | —   | 195 | 245 | 240    | 240 | 382 | 9 |
| HH 3-200/3  | 520  | —   | 158 | 360 | —   | 205 | 260 | 265    | 265 | 450 | 9 |
| HH 4-15/3   | 204  | —   | 90  | 225 | 270 | 91  | 150 | —      | 80  | 165 | 6 |
| HH 4-15/3 Z | 224  | —   | 90  | 225 | 290 | 91  | 150 | —      | 80  | 180 | 6 |
| HH 4-30/3   | 235  | —   | 103 | 252 | 302 | 101 | 150 | —      | 120 | 190 | 7 |
| HH 4-30/3 Z | 255  | —   | 103 | 252 | 322 | 101 | 150 | —      | 120 | 200 | 7 |
| HH 4-60/3   | 310  | —   | 131 | 310 | 403 | 131 | 203 | 110    | 150 | 250 | 9 |
| HH 4-60/3 Z | 340  | —   | 131 | 310 | 433 | 131 | 203 | 110    | 150 | 275 | 9 |

注：型号中末尾“Z”表示有中性接线柱。

DZ 5-20 自动开关的技术数据及外形安装尺寸

b) 外形安装尺寸

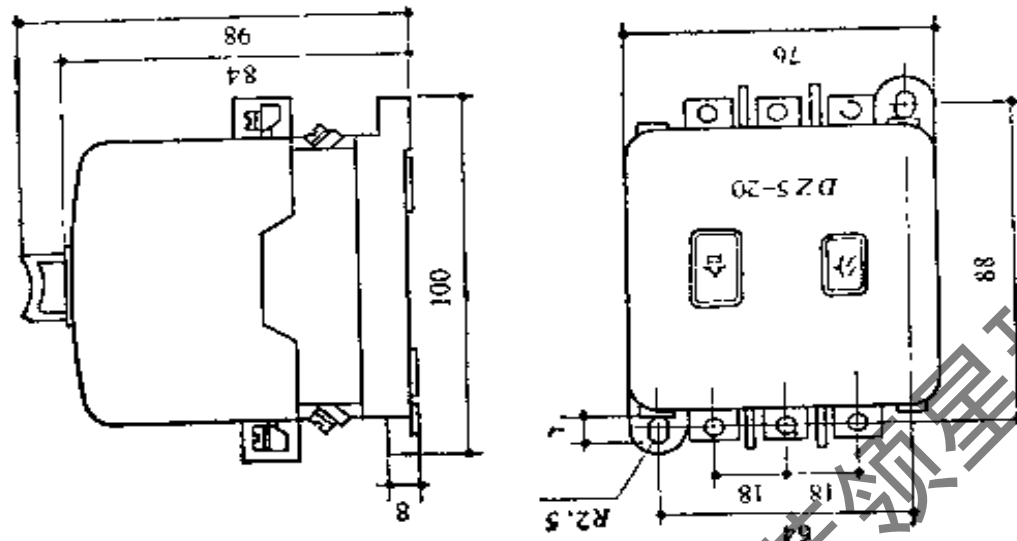
| 主要技术数据      |            | 外形安装尺寸     |    |           |             |                 |              |
|-------------|------------|------------|----|-----------|-------------|-----------------|--------------|
| 型号          | 主头额定电流 [A] | 主头额定电压 [V] | 极数 | 脱扣器型式     | 脱扣器额定电流 [A] | 辅助触头型式          | 辅助触头额定电流 [A] |
| DZ 5-20/330 | 20         | 交流         | 3  | 复式        | 0.15, 0.2   | —常分<br>及<br>—常合 | 5            |
| DZ 5-20/230 |            |            | 2  | 电磁式       | 0.3, 0.43   |                 |              |
| DZ 5-20/320 |            |            | 3  |           | 0.65, 1     |                 |              |
| DZ 5-20/220 |            |            | 2  | 热脱扣<br>磁式 | 1.5, 2, 3   |                 |              |
| DZ 5-20/310 |            |            | 3  |           | 4.5, 6.5    |                 |              |
| DZ 5-20/210 |            |            | 2  | 无脱扣器式     | 10, 15, 20  |                 |              |
| DZ 5-20/300 |            |            | 3  |           |             |                 |              |
| DZ 2-20/200 |            |            | 2  |           |             |                 |              |

| 整定电流 [A] |     | 保护电动机用 |     |
|----------|-----|--------|-----|
| 配        | 电   | 配      | 电   |
| 1.5      | 1.5 | 1.8    | 1.8 |
| 2        | 2   | 2.1    | 2.1 |
| 3        | 3   | 3.6    | 3.6 |
| 1.5      | 1.5 | 5.4    | 5.4 |
| 6.5      | 6.5 | 7.8    | 7.8 |
| 10       | 10  | 12     | 12  |
| 15       | 15  | 18     | 18  |
| 20       | 20  | 24     | 24  |
| 30       | 30  | 36     | 36  |
| 45       | 45  | 54     | 54  |
| 65       | 65  | 78     | 78  |
| 100      | 100 | 120    | 120 |
| 150      | 150 | 180    | 180 |
| 200      | 200 | 240    | 240 |

| 配 电 用   |             | 保 护 电 动 机 用 |             |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| 试验电流    | 动作时间        | 试验电流        | 不动作         |
| 脱扣器额定电流 | 不动作         | 脱扣器额定电流     | 不动作         |
| 1       | < 1[h]      | 1           | 动作时间        |
| 1.3     | < 4[min]    | 1.2         | < 20[min]   |
| 2       | < 4[min]    | 1.5         | < 3[min]    |
| 3       | 可返回时间 ≥ [s] | 6           | 可返回时间 ≥ [s] |



DZ 10 自动开关技术数据

表 11.38

| 型 号       | 额定电<br>流 [A] | 额定<br>电压 [V]           | 极数  | 脱扣器类别          | 复 式 脱 扣 器    |                                 | 电 磁 脱 扣 器      |                    | 电 流 极 限 分 断 值 (安) |                |                | 允 许<br>切 断<br>次 数 |
|-----------|--------------|------------------------|-----|----------------|--------------|---------------------------------|----------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------|-------------------|
|           |              |                        |     |                | 额定电<br>流 [A] | 电 磁 脱 扣 器<br>动 作 电 流 整<br>定 倍 数 | 额 定 电 流<br>[A] | 动 作 电 流<br>整 定 倍 数 | 直 流<br>220 [V]    | 交 流<br>380 [V] | 交 流<br>500 [V] |                   |
| DZ 10-100 | 100          | 直流<br>220<br>交流<br>500 | 2~3 | 复式、电磁式、热脱扣或无脱扣 | 15           | 10                              | 15             | 10                 | 7000              | 7000           | 6000           | 2                 |
|           |              |                        |     |                | 20           |                                 | 20             |                    | 9000              | 9000           | 7000           |                   |
| DZ 10-250 | 250          | 直流<br>220<br>交流<br>500 | 2~3 | 复式、电磁式、热脱扣或无脱扣 | 100          | 3~10                            | 100            | 6~10               | 20000             | 30000          | 25000          | 2                 |
|           |              |                        |     |                | 120          |                                 | 250            |                    | 20000             | 30000          | 25000          |                   |
| DZ 10-600 | 600          | 直流<br>220<br>交流<br>500 | 2~3 | 复式、电磁式、热脱扣或无脱扣 | 200          | 3~10                            | 400            | 2~7                | 25000             | 50000          | 40000          | 2                 |
|           |              |                        |     |                | 250          |                                 | 500            |                    | 25000             | 50000          | 40000          |                   |

DZ 9-30 自动开关的技术数据

表 11.55

| 型 号     | 额定电流<br>[A] | 额定电压<br>[V] | 极数 | 过电流脱扣器 | 脱扣器额定电流                     |
|---------|-------------|-------------|----|--------|-----------------------------|
|         |             |             |    | 型式     | [A]                         |
| DZ 9-30 | 30          | 380         | 3  | 液压式    | 5, 6, 10, 15, 20,<br>25, 30 |

| 脱扣器<br>额定电流<br>[A]            | 动 作 时 间                    |                            |                          |                          |                   |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
|                               | 1.05倍脱扣器<br>额定电流<br>(冷态开始) | 1.3 倍脱扣器<br>额定电流<br>(热态开始) | 2 倍脱扣器<br>额定电流<br>(热态开始) | 6 倍脱扣器<br>额定电流<br>(冷态开始) | 10 倍脱扣器<br>额定电流   |
| 5, 6, 10<br>15, 20,<br>25, 30 | 2 小时内<br>不动作               | 小于 20 分钟<br>内动作            | 小于 2 分钟<br>内动作           | 大于 2~3 秒<br>内动作          | 0.01~0.2 秒<br>内动作 |

注: DZ9-30无辅助触点, DZ9-30F1带有1常开、1常闭辅助触点, 辅助触点额定电流5[A].

## 2. 用接触器类控制电器的直接停开电路



用开关类电器直接起动电动机, 一般能满足与被拖动设备就近安装而能观察到设备运行情况的要求, 但达不到频繁起动或远距离操作与自动控制的要求。用接触器类控制电器的控制电路解决了这方面的问题。

接触器是由触点、电磁铁和反作用力机构等主要部件组成。当有外信号作用时使电磁铁通电, 产生的电磁力吸合触点而接通电路。反之, 信号消失时, 电磁力消失, 在反作用力机构的作用下触点迅速分开而切断电路。由此可利用控制电磁铁线圈是否通电来操纵主电路, 实现远距离操作或自动控制。接触器的触点可分为与主电路连接的主触点及连接控制电路的辅助触点两类, 在电磁铁作用下主、辅触点同时动作。在电磁铁未通电时, 触点处于分开状态的称为常开(动合)触点, 用符号  $\text{—}| \text{—}$  表示; 处于闭合状态的称

表 11.37

CJ10 系列技术数据

| 项 目       | 主 触 头                 |                       | 辅助触头                   |                 | 380[V] 时控制电动机最大功率 | 接通与分断能力 |           |                 | 电寿命<br>命次数<br>(万次) | 机械寿命<br>次数<br>(万次) | 操作频率 | 吸引线圈在<br>380[V]电压<br>下消耗功率 |            |                   | 动作时间<br>[ms] |        |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------|-------------------|---------|-----------|-----------------|--------------------|--------------------|------|----------------------------|------------|-------------------|--------------|--------|
|           | 额定<br>工作<br>电压<br>[V] | 额定<br>工作<br>电流<br>[A] | 额定<br>电压<br>[V]        | 额定<br>电流<br>[A] |                   | 数量      | 电压<br>[V] | 接通<br>电流<br>[A] |                    |                    |      | 分断<br>电流<br>[A]            | 启动<br>[VA] | 吸<br>持<br>[VA][W] | 接<br>通       | 断<br>开 |
| CJ 10-5   | 5                     | 5                     |                        |                 | 一常分               | 2.2     | 60        | 50              |                    |                    |      | 35                         | 6          | 2                 |              |        |
| CJ 10-10  | 10                    | 10                    |                        |                 |                   | 4       | 120       | 100             |                    |                    |      | 65                         | 11         | 5                 | 17           | 21     |
| CJ 10-20  | 20                    | 20                    |                        |                 |                   | 10      | 240       | 200             |                    |                    |      | 140                        | 22         | 9                 | 16           | 18     |
| CJ 10-40  | 40                    | 40                    | 380                    | 3               | 二常分               | 20      | 480       | 100             | JK 3 类             | 300                | 600  | 230                        | 32         | 12                | 23           | 22     |
| CJ 10-60  | 60                    | 60                    | 交流<br>380<br>直流<br>220 | 5               | 二常分               | 30      | 720       | 600             | 60                 |                    |      | 485                        | 95         | 26                | 65           | 40     |
| CJ 10-100 | 100                   | 100                   |                        |                 | 二常合               | 50      | 1200      | 1000            |                    |                    |      | 760                        | 105        | 27                | 66           | 35     |
| CJ 10-150 | 150                   | 150                   |                        |                 |                   | 75      | 1800      | 1500            |                    |                    |      | 950                        | 110        | 28                | 75           | 38     |

为常闭(动断)触点,用符号表示。通常一个接触器只有一付常开的主触点而有一对或数对常开、常闭辅助触点供控制电路使用。一般电磁铁线圈用符号表示。常用的 CJ 10 系列交流接触器适用于起动及控制交流电动机。它的主要技术数据及外形尺寸见表 11.37。

电气线路图是采用原理图形式表达的。在读图时要注意的,图中每一电器的各个单独元件可以标示在不同地方,但属同一电器的各单独元件均用相同的字符和数字表示。还有一点是所有电器触点都用电器处于没有任何动作(即静态)时的位置来标示。若该电器产生动作,则与该电器有联系的元件同时或延时改变原来的状态。

图 11.15 是最常用的电动机单方向运转的基本控制电路。三

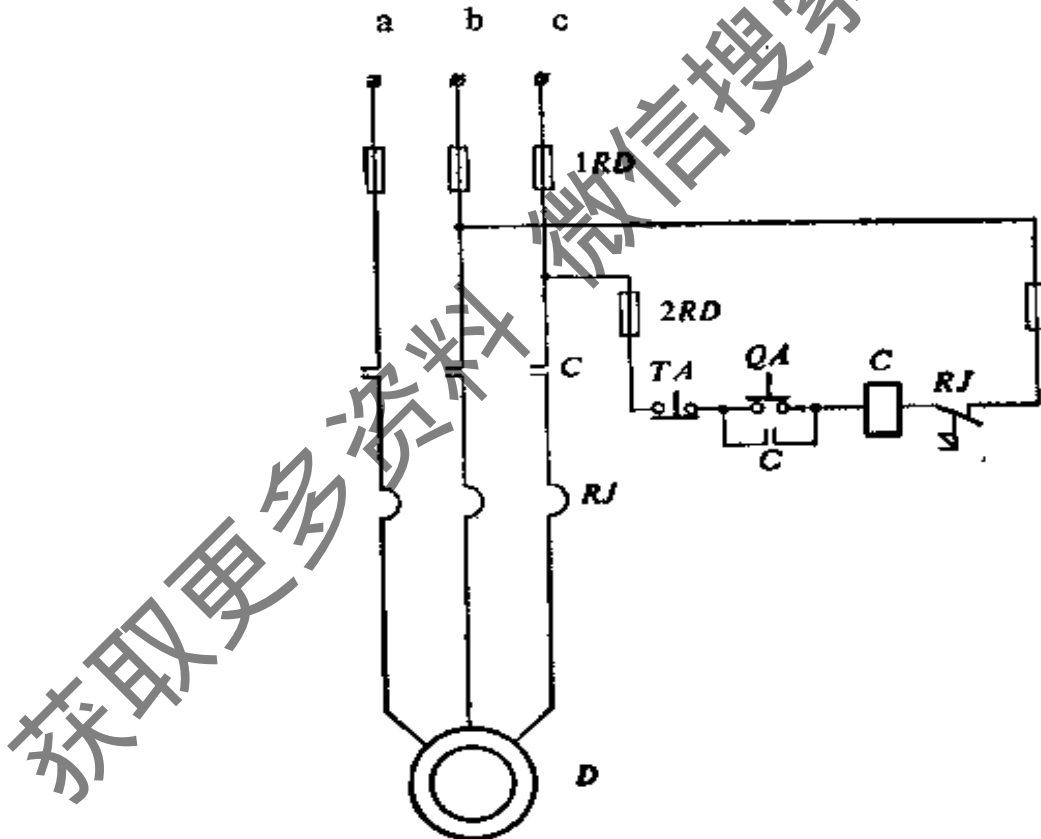


图 11.15 单向起动控制电路

相电源 A、B、C 通过主电路中的熔断器 1 RD、接触器的主触点 C 及热继电器的热元件 RJ 与电动机相接。控制电路由熔断器 2 RD、停止按钮 TA、起动按钮 QA、接触器电磁线圈 C、接触器常开辅

助触点  $C$  和热继电器的常闭触点  $RJ$  组成。控制电路的电源由 2  $RD$  的上端跨接在 1  $RD$  的下端任意两相上。在较复杂的电路图上,为使图面清晰,有时将控制电路单独绘在图纸的另一位置(右侧),而在熔断器 2  $RD$  的上端注明接到主电路的位置。两种画法作用是一样的。

从主电路中可看出,只要主触点  $C$  闭合或断开,可使电动机启动或停止运转。主触点的闭合与否取决于控制电路中接触器的电磁线圈  $C$  是否通电。从控制电路中可看出  $TA$  及  $RJ$  均处于常闭状态,若按下  $QA$ ,则控制电路接通,线圈  $C$  中有电流通过,主触点  $C$  闭合,电动机启动运转。因为控制电路中接触器的常开辅助触点  $C$  同时闭合,所以虽然放开  $QA$  后控制电路仍处于接通状态,这一动作称之为自锁。如果没有常开辅助触点跨接在  $QA$  两端,则在放开  $QA$  时控制电路即断开,电动机停转。不用触点  $C$  自锁和没有  $TA$  的控制电路称之为点动控制电路,也即按下  $QA$  电动机运转,放开则停转,这种功能有时也是需要的。在电动机启动后,按下停止按钮。 $TA$  断开控制电路,线圈  $C$  失电,与接触器有关的触点均恢复到电路图所示位置,电动机停止转动。

熔断器 1  $RD$  与 2  $RD$  分别作为主电路与控制电路的短路保护用。热断路器  $RJ$  则作为电动机的过载保护用,它的工作原理是利用主电路中的电流加热它的双金属热元件,使双金属片产生不同程度的弯曲,当通过的电流在它所整定的电流值以内时,它的弯曲程度不足以推动热继电器的触点改变位置。如通过的电流超出所整定的电流值以内时,它的弯曲程度不足以推动热继电器的触点改变位置。如通过的电流超出所整定电流值的某一倍数时,则在一定时间内双金属片将推动接在控制电路中的常闭触点  $RJ$  从而断开控制电路,切断电动机的电源。常用的 JR 0 系列热继电器是根据上述动作原理制成的,它带有一对单点双投式常开、常闭触点,所需的整定电流值可在额定电流的 62~100% 范围内自行调节。型号中带 3  $D$  符号的是具有断相保护机构,它动作后的复位方式有自动与手动两种,出厂时均调整在自动方式。如需改为



手动复位可将热继电器侧面孔内螺丝倒转三四圈即可。在此情况下，热继电器动作后必须按下复位键才能工作。它的技术数据和保护性能见表 11.38。

用接触器的停开电路可以方便地对电动机进行两地操作。此时只要将另一对控制按钮  $2TA$ 、 $2QA$  根据需要放置在另一操作地点，然后将图 11.15 中的控制电路部分按图 11.16 的虚线加入按钮  $2TA$  及  $2QA$  即可达到要求。

$LA$ 控制按钮是常用的主合电器的一种，它用来远距离接通或分断控制电路。可根据控制电路设计需要的结构型式和触点对数从表 11.39 中选用对应的型号。

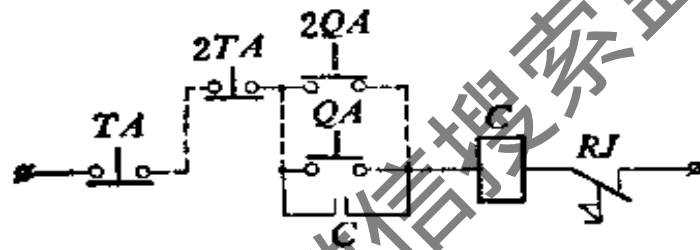


图 11.16 两地操作的控制电路部分

JR0 系列热继电器的技术数据

表 11.38

| 型 号         | 额定电流<br>[A] | 热 元 件 等 级 |                 |
|-------------|-------------|-----------|-----------------|
|             |             | 额定电流      | 刻度电流调节范围<br>[A] |
| JR0-20/3    | 20          | 0.35      | 0.25~0.35       |
|             |             | 0.50      | 0.32~0.50       |
|             |             | 0.72      | 0.45~0.72       |
|             |             | 1.1       | 0.68~1.1        |
|             |             | 1.6       | 1.0~1.6         |
|             |             | 2.4       | 1.5~2.4         |
|             |             | 3.5       | 2.2~3.5         |
|             |             | 5         | 3.2~5           |
| JR 0-20/3 D | 20          | 7.2       | 4.5~7.2         |
|             |             | 11        | 6.9~11          |
|             |             | 18        | 10~18           |
|             |             | 22        | 14~22           |

续表 11.38

| 型 号                    | 额定电流<br>[A]         | 热 元 件 等 级   |   |
|------------------------|---------------------|---|---|
|                        |                     | 额定电流  | 刻度电流调节范围  |
| JR 0-40                | 40                  | 0.64<br>1<br>1.6<br>2.5<br>4<br>6.4<br>10<br>16<br>25<br>40 | 0.4~0.64<br>0.64~1<br>1~1.6<br>1.6~2.5<br>2.5~4<br>4~6.4<br>6.4~10<br>10~16<br>16~25<br>25~40 |
| JR0-60/3<br>JR0-60/3 D | 60                  | 22<br>32<br>45<br>63  | 14~22<br>20~32<br>28~45<br>40~63  |
| JR0-150/3<br>JR0-150/3 | 150                 | 63<br>85<br>120<br>160                                      | 40~63<br>53~85<br>75~120<br>100~160   |
| 刻度电流倍数                 | 三相(不带断相保护的)<br>动作时间 |   | 附 注   |
| 1                      | 长期不动作               |   |   |
| 1.2                    | <20[min]            |   | 从热态开始   |
| 1.5                    | <3[min]             |   | 从热态开始   |
| 6                      | >5[s]               |   | 从冷态开始   |

### 3. 用接触器联锁的次序控制电路

[若主电路中接有两台设备,且它们必须按规定次序起动运转,则控制电路中的电器也必须按这一要求进行动作]。

对在风管中置有电加热器的空调系统,必须先起动风机,然后才能使电加热器工作。现以此为例如将用接触器联锁的次序控制电

表 11.39

LA 控制按钮的技术数据

| 型号         | 电压[V]                  | 电流[A] | 结构型式 | 触点对数 |           | 按钮数       | 按钮颜色      | 外形尺寸[mm]<br>宽×厚×深 |
|------------|------------------------|-------|------|------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
|            |                        |       |      | 常开   | 常闭        |           |           |                   |
| LA 2       | 交流<br>500<br>直流<br>440 | 5     | 元件   | 1    | 1         | 1         | 黑、绿、红     | 40×40×55          |
| LA 10-1 K  |                        |       | 开启式  | 2    | 2         | 2         | 黑红或绿红     | 28×30×55          |
| LA 10-1 K  |                        |       |      | 3    | 3         | 3         | 黑、绿、红     | 62×72×71          |
| LA 10-2 K  |                        |       |      | 1    | 1         | 1         | 黑红或绿红     | 62×108×71         |
| LA 10-3 K  |                        |       |      | 2    | 2         | 2         | 黑、绿、红     | 62×144×71         |
| LA 10-1 H  |                        |       |      | 3    | 3         | 3         | 黑红或绿红     | 58×69×60          |
| LA 10-2 H  |                        |       |      | 1    | 1         | 1         | 黑、绿、红     | 58×105×60         |
| LA 10-3 H  |                        |       |      | 2    | 2         | 2         | 黑红或绿红     | 58×141×60         |
| LA 10-1 S  |                        |       |      | 3    | 3         | 3         | 黑、绿、红     | 67×100×82         |
| LA 10-2 S  |                        |       |      | 1    | 1         | 1         | 黑红或绿红     | 67×136×82         |
| LA 10-3 S  | 2                      | 2     |      | 2    | 黑、绿、红     | 67×172×82 |           |                   |
| LA 10-2 F  | 3                      | 3     | 3    | 防腐式  | 2         | 2         | 黑红或绿红     | 67×136×82         |
| LA 18-22   | 交流<br>500<br>直流<br>440 | 5     | 元件   | 2    | 2         | 1         | 红、绿、黑、白   | 35×47×64          |
| LA 18-44   |                        |       | 4    | 4    | 4         | 红         | 35×47×100 |                   |
| LA 18-66   |                        |       | 6    | 6    | 6         | 金属        | 35×47×136 |                   |
| LA 18-22 J |                        |       | 2    | 2    | 2         | 红         | 35×47×76  |                   |
| LA 18-44 J |                        |       | 4    | 4    | 4         | 红         | 35×47×112 |                   |
| LA 18-66 J |                        |       | 6    | 6    | 6         | 红         | 35×47×148 |                   |
| LA 18-22 Y |                        |       | 2    | 2    | 2         | 红         | 35×47×80  |                   |
| LA 18-44 Y |                        |       | 4    | 4    | 4         | 红         | 35×47×116 |                   |
| LA 18-66 Y | 6                      | 6     | 6    | 红    | 35×47×152 |           |           |                   |

续表 11.39

| 型号  | 电压[V]                  | 电流[A] | 结构型式  | 触点数                               |                                   | 按钮             |   | 外形尺寸[mm]<br>宽×厚×深   |
|---|------------------------|-------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------|---|---|
|   |                        |       |   | 常开                                | 常闭                                | 按钮数            | 颜色  |   |
| LA 18-22 X 2<br>LA 18-22 X 3<br>LA 18-44 X<br>LA 18-66 X  | 交流<br>500<br>直流<br>440 | 5     | 旋钮二位置<br>旋钮三位置<br><br>旋钮式   | 2<br>2<br>4<br>6                  | 2<br>2<br>4<br>6                  | 1              | 黑   | 35×47×80<br>35×47×80<br>35×47×116<br>35×47×152  |
| LA 19-11<br>LA 19-11 J<br>LA 19-11 D<br>LA 19-11 DJ   | 交流<br>500<br>直流<br>44  | 5     | 元件式<br>带指示灯<br>带指示灯<br>带指示灯   | 1                                 | 1                                 | 1              | 红、绿、黄、蓝、白<br>红<br>红、绿、黄、蓝、白<br>红            | 28×42×52<br>35×42×62<br>28×42×58<br>35×42×68  |
| LA 20-11<br>LA 20-11 J<br>LA 20-11 D<br>LA 20-11 DJ<br>LA 20-22<br>LA 11-20 J<br>LA 20-22 D<br>LA 20-22 DJ<br>LA 20-2 K<br>LA 20-3K<br>LA 20-2 H<br>LA 20-3 H | 交流<br>500<br>直流<br>400 | 5     | 元件式<br>带指示灯<br>带指示灯<br>带指示灯<br>元件式<br>带指示灯<br>带指示灯<br>元件式<br>带指示灯<br>带指示灯<br>开启式<br>保护式 | 1<br><br><br>2<br><br>3<br>3<br>2 | 1<br><br><br>2<br><br>3<br>2<br>3 | 1<br><br><br>1 | 红、绿、黄、蓝、白<br>红<br>红<br><br>白、红或绿、红<br>白、绿、红 | 30×42×65<br>30×42×75<br>30×42×65<br>30×42×75<br>30×41×90<br>30×41×100<br>30×41×90<br>30×41×100<br>50×68×42<br>50×91×42<br>50×78×45<br>50×101×45 |

示于图 11.17。

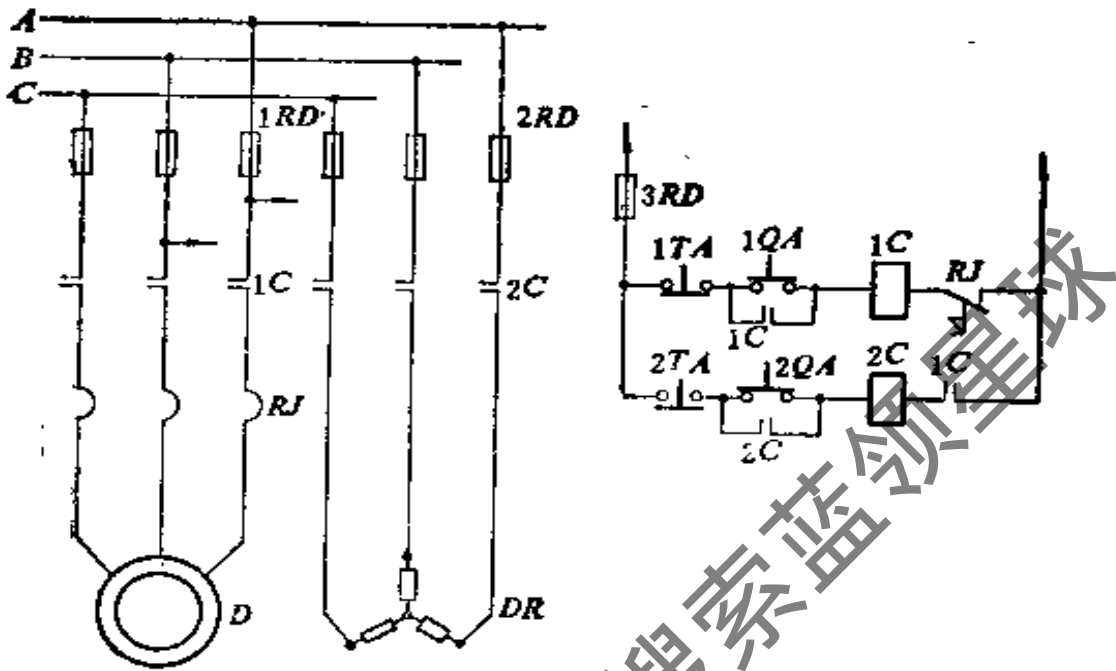


图 11.17 接触器联锁的次序控制电路

控制电路中的两个接触器  $1C$  与  $2C$  分别控制主电路中的风机电动机  $D$  与电加热器  $DR$ 。电动机需要有热继电器  $RJ$  进行过载保护和用熔断器  $1RD$  进行短路保护。电加热器仅需用  $2RD$  进行短路保护。为了使电动机运行以前电热器无法工作，将控制电路中接触器  $1C$  的常开辅助触点  $1C$  串接在接触器电磁线圈  $2C$  回路中。这样，只有在  $1C$  工作后该触点闭合时，才有可能按下  $2QA$  使  $2C$  工作。当  $1C$  断开则同时切断  $2C$ ，保证了电加热器只在风管中有空气流动时进行工作。但这仅是一个基本电路，如对温度控制或超温报警、断电等其他要求时，则可将所用的继电器触点组合在控制电路的相应环节中。

在各种接触控制线路中还可以加入表示动作的各种信号及有关电气参数的仪表等。如果线路中接触器辅助触点的数量不够，则可添置中间继电器以增加辅助触点对数。

用接触器及热继电器组成的 QC12 系列磁力起动器是一种可用于远距离直接控制三相异步电动机起动、停止或正、反转可逆运行的系列产品。它的主要技术数据见表 11.40 选用时应根据所控

制电动机功率指明热继电器的电流等级及操作功能。尚有 QZ 73 系列综合起动器可以将熔断器及 LA 按钮等电器组合在同一箱体中供选择使用。其主要技术数据及箱内配置的电器见表 11.41。

QC 12 系列磁力起动器技术数据

表 11.40

| 型 号     | 热元件额定电流 [A]  | 热继电器<br>整定电流<br>调节范围<br>[A] | 电动机的最大容量   |            |            | 吸引线圈的<br>额定电压 [V] |
|---------|--|-----------------------------|------------|------------|------------|-------------------|
|         |  |                             | 220<br>[V] | 380<br>[V] | 500<br>[V] |                   |
| QC 12-1 | 0.35, 0.5, 0.72, 1.1,<br>1.6, 2.4, 3.5, 5          | 0.25~5                      | 1.2        | 2.2        | 2.2        | 交流 50 [Hz]        |
| QC 12-2 | 0.35, 0.5, 0.72, 1.1,<br>1.6, 2.4, 3.5, 5, 7.2, 11 | 0.25~11                     | 2.2        | 4          | 4          | 36, 110, 220,     |
| QC 12-3 | 11, 16, 22   | 6.8~22                      | 5.5        | 10         | 10         | 380 四种,           |
| QC 12-4 | 22, 32, 45   | 14~45                       | 11         | 20         | 20         | 交流 50 [Hz] 分      |
| QC 12-5 | 45, 63   | 28~63                       | 17         | 30         | 30         | 36, 220, 380, 440 |
| QC 12-6 | 25, 120  | 53~120                      | 29         | 50         | 50         | 四种                |
| QC 12-7 | 120, 160   | 75~160                      | 47         | 75         | 75         |                   |

QZ 73 系列综合磁力起动器技术数据

表 11.41a

| 型 号            | 主触点<br>额定电流<br>[A] | 辅助触点 |             | 电动机容量 [kW] |         |         |         |
|----------------|--------------------|------|-------------|------------|---------|---------|---------|
|                |                    | 数量   | 额定电流<br>[A] | 12 [V]     | 220/3.0 | 380 [V] | 500 [V] |
| QZ 73-1        | 6.4                | 2 常开 | 5           | 1          | 1.8     | 3.2     | 4       |
| QZ 73-2        | 6.1                |      |             | —          | —       | 3.2     | —       |
| QZ 73-3        | 20                 | 2 常闭 | 5           | —          | —       | 10      | —       |
| QZ 73-4, 6     | 6.4                |      |             | 1          | 1.8     | 3.2     | 4       |
| QZ 73-5, 7     | 20                 |      |             | 3.2        | 5.8     | 10      | —       |
| QZ 73-8, 9, 10 | 25                 |      |             | 4          | 7       | 12.5    | 15      |

QZ 73 系列综合磁力起动器的热继电器及熔断器的配合

表 11.41b

| 型 号                | 热继电器额定电流 | 整定电流调节范围 | 熔断器额定电流     |
|--------------------|----------|----------|-------------|
|                    | [A]      | [A]      | [A]         |
| QZ 73-1,2,4,6      | 1        | 0.64~1   | 2,4         |
|                    | 1.6      | 1~1.6    | 4,5,6       |
|                    | 2.5      | 1.6~2.5  | 6,10        |
|                    | 4.0      | 2.5~4    | 10,15       |
|                    | 6.4      | 4~6.4    | 51          |
| QZ 73-3,5,7        | 10       | 6.4~10   | 20,25,30,35 |
|                    | 16       | 10~16    | 35,40,50    |
| QZ 73-3,5,7,8,9,10 | 25       | 16~25*   | 50,60       |

注:\*表示额定电流为25[V]之热继电器在使用于 QZ 73-3,5,7 起动器时,其整定电流不得大于 20[A].

QZ 73 系列综合磁力起动器内装置元件种类及数量

表 11.41c

| 数 量            | 型 号     |         |         |         |         |         |         |         |         |          |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                | QZ 73-1 | QZ 73-2 | QZ 73-3 | QZ 73-4 | QZ 73-5 | QZ 73-6 | QZ 73-7 | QZ 73-8 | QZ 73-9 | QZ 73-10 |
| 元件名称           | QZ 73-1 | QZ 73-2 | QZ 73-3 | QZ 73-4 | QZ 73-5 | QZ 73-6 | QZ 73-7 | QZ 73-8 | QZ 73-9 | QZ 73-10 |
| CJ 10-40 交流接触器 | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | 1       | 1       | 1        |
| CJ 10-20 交流接触器 | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | —       | —       | —        |
| JR 0-40 热继电器   | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1        |
| RL 1-15 熔断器    | 3       | 5       | 2       | 3       | —       | 3       | —       | 2       | —       | —        |
| RL 1-60 熔断器    | —       | —       | 3       | —       | 3       | —       | 3       | 3       | 3       | 3        |
| HZ 1-10/2 组合开关 | —       | 1       | 1       | —       | —       | —       | —       | 1       | —       | —        |
| HZ 3-133 组合开关  | 1       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —        |
| BK-50 变压器      | —       | 1       | 1       | —       | —       | —       | —       | 1       | —       | —        |
| LA-10 控制按钮     | —       | —       | —       | —       | —       | 2       | 2       | —       | —       | 2        |

### 11.4.2 降压起动法

虽然全压起动时电动机的起动转矩大、时间短、设备简单，但大功率电动机往往受到供电变压器的容量限制而不宜采用。降压起动，对三相鼠笼式电动机就是借助起动设备降低加在定子绕组上的电压而减小起动电流，但电动机的转矩与加在定子绕组上电压的平方成正比，因而起动电压降低后起动转矩也相应减小。所以这种方法对起动转矩要求不高或允许空载起动的离心式风机与水泵等设备是适宜的。

根据不同降压措施，常用的降压起动方法有以下几种：

#### 1. Y- $\Delta$ 起动法

任何三相异步电动机，它的每相定子绕组的额定电压为 380 [V]，如在接线盒上有 6 根引出线端，运行时必须用  $\Delta$  接法与三相电源相连的这类电动机都有可能采用 Y- $\Delta$  起动法进行起动。其起动原理见图 11.18。

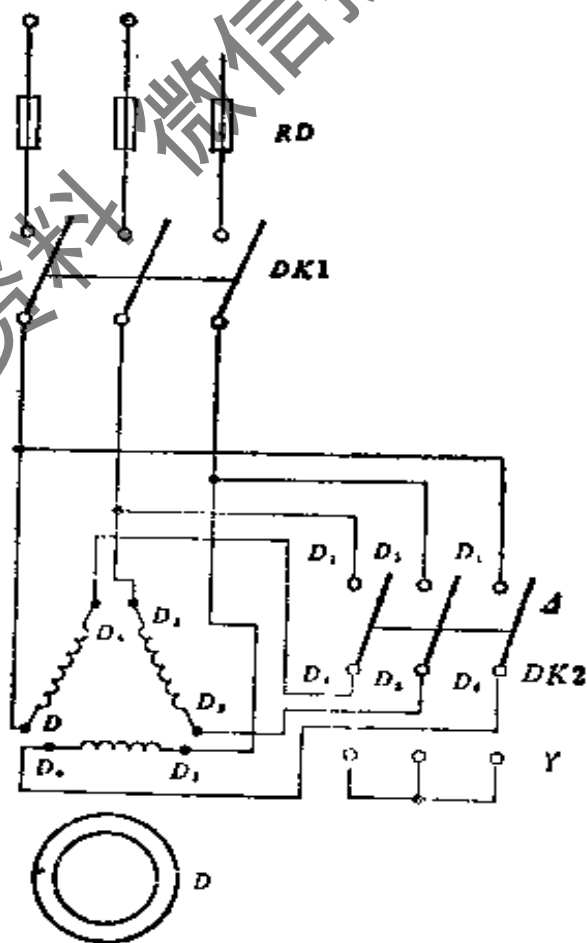


图 11.18 Y- $\Delta$  起动原理图



所谓 Y- $\Delta$  起动法,就是三相定子绕组以 Y 形接法起动,待电动机达到一定转速时用  $\Delta$  接法运行。从图中可见,在合上 DK 1 后再将 DK 2 投向起动位置(Y),此时三相绕组连成星形( $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  分别与电源相连, $D_4$ 、 $D_5$ 、 $D_6$  连成一点)。对这种情况可以算得各相定子绕组的电压为电源电压的  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ , 线路电流为用  $\Delta$  形接法起动时的  $\frac{1}{3}$ , 起动转矩也仅是  $\Delta$  接法的  $\frac{1}{3}$ 。起动完毕后将 DK 2 投向运行位置( $\Delta$ ), 三相绕组连成  $\Delta$  形( $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  分别连成三点与电源连接), 电动机处于额定电压下运行。这种方法设备简单、动作可靠,所以在允许轻载或空载起动情况下得到广泛应用。QX 1 系列手动空气式 Y- $\Delta$  起动器可代替图中的 DK 2,但它对所控制的电动机不具有任何保护装置。其主要技术数据见表 11.42。

QX 1 系列手动空气式 Y- $\Delta$  起动器技术数据

表 11.42

| 型号      | 容量等级<br>(380<br>[V]<br>kWh) | 触点<br>额定<br>电流<br>[A] | 允许接通负载    |           |                | 允许分断负载     |            |                | 电源接<br>线端允<br>许电流<br>[A] |
|---------|-----------------------------|-----------------------|-----------|-----------|----------------|------------|------------|----------------|--------------------------|
|         |                             |                       | 电压<br>[V] | 电流<br>[A] | $\cos \varphi$ | 电 压<br>[V] | 电 流<br>[V] | $\cos \varphi$ |                          |
| QX 1-13 | 13                          | 13                    | 380       | 18×4      | $\geq 0.4$     | 380×0.25   | 18         | $\geq 0.4$     | 26                       |
| QX 1-30 | 30                          | 40                    | 380       | 40×4      | $\geq 0.4$     | 380×0.25   | 40         | $\geq 0.4$     | 60                       |

用按钮操作实现 Y- $\Delta$  起动的电路见图 11.19。当按下 QA 时, C 与 YC 吸合,主电路中相应触点闭合,电动机处于 Y 接法的起动状态。由于复合按钮  $\Delta A$  对线圈 YC 与  $\Delta C$  互锁,再加 YC 与  $\Delta C$  的常用触头对  $\Delta C$  与 YC 互锁,又因复合按钮  $\Delta A$  的常闭触点与 YC 串接,所以在 QA 按钮按下后通过 C 自锁只能使

线圈  $YC$  工作而使电动机在  $Y$  接法起动。起动后为使电动机投入  $\Delta$  接法运行,只须按下复合按钮  $\Delta A$ ,此时  $YC$  线圈失电,常闭辅助触点  $YC$  恢复原状,在  $\Delta A$  的常开触点接通情况下,线圈  $\Delta C$  接通并通过常开辅助触点  $\Delta C$  自锁,这样电动机在主触点  $YC$  断开, $\Delta C$  闭合下进入  $\Delta$  接法正常运行。这时虽然放开按钮  $\Delta A$  后常闭触点恢复原状,但在线圈  $YC$  这一支路中常闭触点  $\Delta C$  已断开,因此线圈  $YC$  与  $\Delta C$  不可能同时工作。

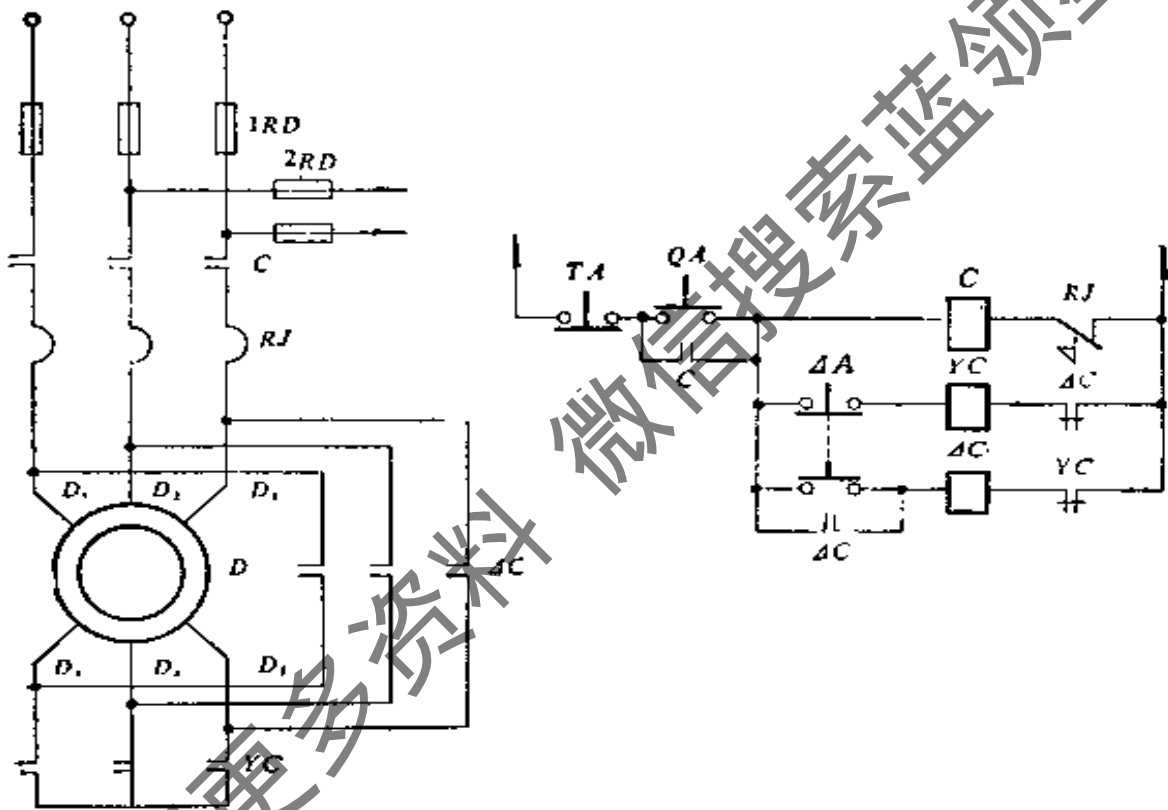


图 11.19 用按钮操作的  $Y-\Delta$  起动电路

**QX 3** 系列自动  $Y-\Delta$  起动器由三个 **CJ 10** 系列接触器、一个 **JR 0** 系列热继电器和一个双金属时间继电器组成。起动器在起动过程中,通过双金属时间继电器调整在  $4\sim 16[s]$  内能自动将所控制的电动机定子绕组由星形连接起动后换接至三角形连接。热继电器是作为过载保护用。其主要技术数据见表 11.43。

QX 3 系列自动Y-△起动机主要技术数据

表11.43

| 型 号       | 可控制电动机的最大功率[kW] |            |            | 吸引线圈电压[V]  |            | 热元件             |             | 外形尺寸<br>高×宽×厚<br>[mm] | 重量<br>[kg] |
|-----------|-----------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|-------------|-----------------------|------------|
|           | 220<br>[V]      | 380<br>[V] | 500<br>[V] | 50<br>[Hz] | 60<br>[Hz] | 额定<br>电流<br>[A] | 调节范围<br>[A] |                       |            |
| QX 3-13/K | 7.5             | 13         | 13         | 220        | 220        | 11              | 6.8~11      | 199×292×116           | 4.3        |
| QX 3-13/H |                 |            |            |            |            | 16              | 10~16       |                       |            |
| QX 3-30/K | 17              | 30         | 30         | 500        | 440        | 22              | 14~22       | 229×340×135           | 6.8        |
| QX 3-30/H |                 |            |            |            |            | 32              | 20~32       |                       |            |
|           |                 |            |            |            |            | 46              | 28~45       | 395×365×178           | 10.6       |

### 2. 自耦减压起动法

利用三相自耦变压器(俗称补偿器)降低电动机定子绕组电压进行起动,称之为自耦减压起动法,其起动线路原理见图 11.20。

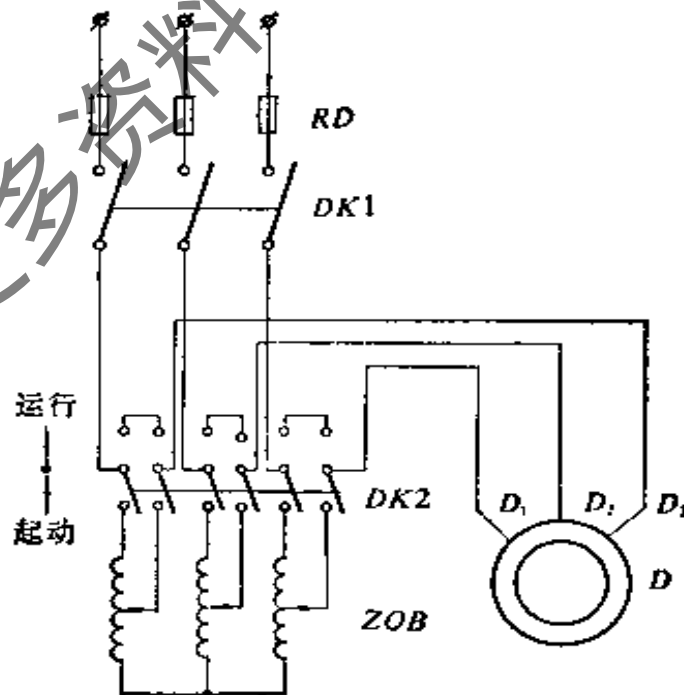


图 11.20 自耦减压起动原理图

启动时,将开关  $DK 2$  推向启动侧,此时补偿器的高压侧与电源相连,低于电源电压的抽头点(低压侧)与电动机相连实现减压启动。待电动机达到一定转速时,将  $DK 2$  迅速投向运行位置,从图中可看出此时电动机已处于全电压运行。

一般启动器中的三相自耦变压器备有几个抽头点,该点电压与电源电压之比值  $k$  多为  $0.65$  和  $0.8$  (有的为  $0.4, 0.6$  和  $0.8$ ),供使用者自行调整选用。使用减压启动时的启动电流与启动转矩均与  $k^2$  成正比。如选取  $k=0.8$  启动,则启动电流将减低到全电压启动时的  $64\%$ , 而启动转矩同样也将为全电压启动时的  $64\%$ 。

$QJ 3$  系列手动自耦减压启动器适用于  $10 \sim 75$  [kW] 异步电动机作不频繁减压启动,它带有过载和失压脱扣等保护装置,其主触点应浸没在变压器油中。又因自耦变压器是按短时间工作设计,所以一次或数次连续启动的总时间不得超过规定的最大启动时间 [s],在超过规定的启动时间后应等它充分冷却后才能继续使用。其主要技术数据见表 11.44。

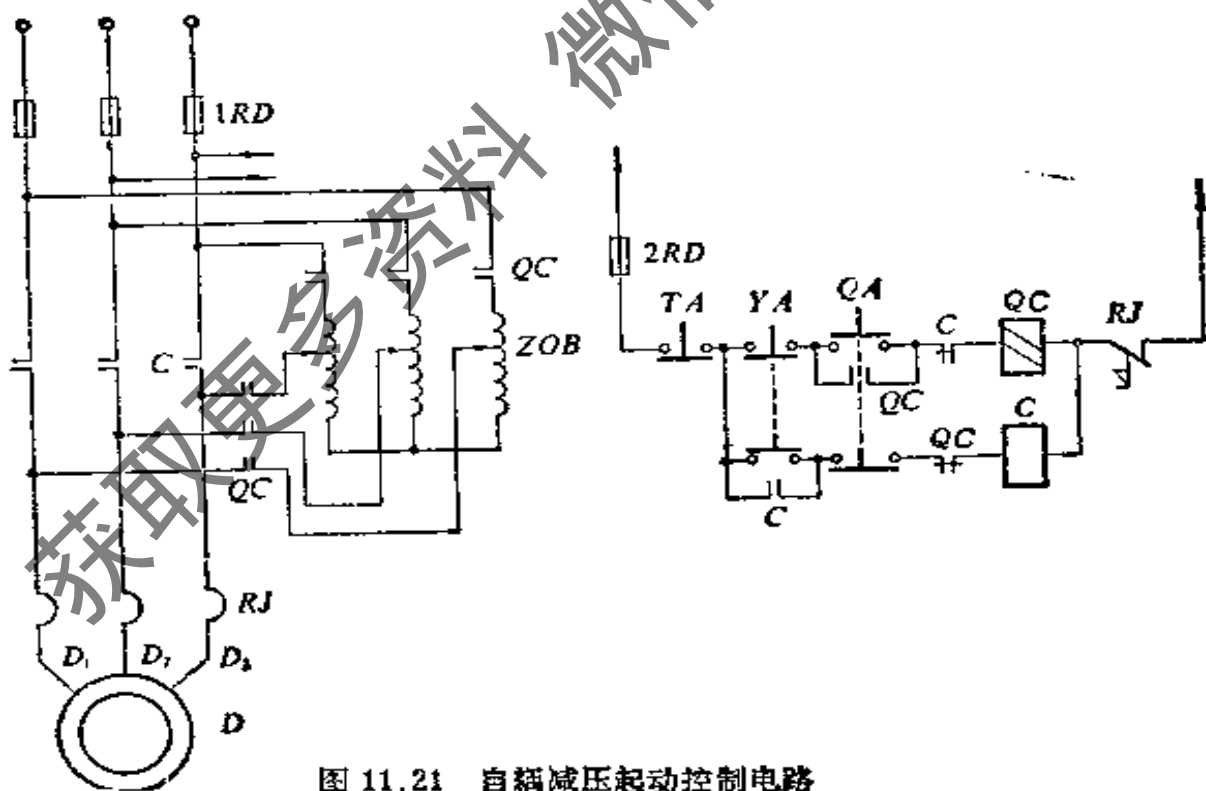



图 11.21 自耦减压启动控制电路

QJ 3 系列手动自耦减压起动器的主要技术数据

| 型 号     | 220 [kW]            |                         |  | 330 [kW]            |                         |  | 440 [V]             |                         |  | 最大起<br>动时间<br>[s] | 外形尺寸<br>[mm]<br>高×宽×厚 |
|---------|---------------------|-------------------------|--|---------------------|-------------------------|--|---------------------|-------------------------|--|-------------------|-----------------------|
|         | 制<br>电<br>功<br>[kW] | 额<br>定<br>电<br>流<br>[A] | 热<br>保<br>护<br>额<br>定<br>电<br>流<br>[A] | 制<br>电<br>功<br>[kW] | 额<br>定<br>电<br>流<br>[A] | 热<br>保<br>护<br>额<br>定<br>电<br>流<br>[A] | 制<br>电<br>功<br>[kW] | 额<br>定<br>电<br>流<br>[A] | 热<br>保<br>护<br>额<br>定<br>电<br>流<br>[A] |                   |                       |
| QJ 3-10 |                     |                         | 25                                     | 10                  | 22                      | 25                                     | 10                  | 19                      | 25                                     | 30                | 440×440×330           |
| QJ 3-14 | 8                   | 29                      | 32                                     | 14                  | 30                      | 32                                     | 14                  | 26                      | 32                                     |                   |                       |
| QJ 3-17 | 10                  | 37                      | 40                                     | 17                  | 38                      | 40                                     | 17                  | 33                      | 40                                     | 40                | 500×480×340           |
| QJ 3-20 | 11                  | 40                      | 45                                     | 20                  | 43                      | 45                                     | 20                  | 37                      | 45                                     |                   |                       |
| QJ 3-22 | 14                  | 51                      | 63                                     | 22                  | 48                      | 63                                     | 22                  | 42                      | 63                                     | 60                | 550×530×370           |
| QJ 3-28 | 15                  | 54                      | 63                                     | 28                  | 59                      | 63                                     | 28                  | 51                      | 63                                     |                   |                       |
| QJ 3-30 |                     |                         |  | 30                  | 63                      | 63                                     | 30                  | 56                      | 63                                     |                   |                       |
| QJ 3-40 | 20                  | 72                      | 85                                     | 40                  | 85                      | 85                                     | 40                  | 74                      | 85                                     |                   |                       |
| QJ 3-45 | 25                  | 91                      | 120                                    | 45                  | 130                     | 120                                    | 45                  | 86                      | 120                                    |                   |                       |
| QJ 3-55 | 30                  | 108                     | 120                                    | 55                  | 120                     | 160                                    | 55                  | 104                     | 160                                    |                   |                       |
| QJ 3-75 | 40                  | 145                     | 160                                    | 75                  | 145                     | 160                                    | 75                  | 125                     | 160                                    |                   |                       |


自耦减压起动也可用接触器与按钮操作,其控制电路见图 11.21。图中起动按钮  $QA$  与运行按钮  $YA$  均用复合按钮以防线圈  $QC$  与  $C$  同时工作。——符号表示的线圈  $QC$  是两个并联的接触器的线圈,控制电路中的常闭触点  $C$  及  $QC$  是起互锁作用。使用时必须先操作  $QA$  按钮。

XJ 01 系列自耦减压起动箱是由自耦变压器,交流接触器、中间继电器、热继电器、时间继电器等元件组成的起动设备,可用于  $14\sim 300$  [kW] 三相鼠笼式电动机降压起动。

由于自耦变压器重量大、费用较贵,随着电动机工业的发展自耦减压起动的使用已逐渐减少。

### 3. 延边三角形起动法

自耦减压起动可以根据条件决定抽头电压的高低而获得需要的起动转矩和所控制的起动电流,但起动设备价格较贵。 $Y-\Delta$  起动虽然设备价格较廉、方法简单、操作可靠,但起动转矩仅为全电压起动转矩的  $\frac{1}{3}$ 。为了适当提高起动转矩,在  $Y-\Delta$  起动法的

基础上,对电动机定子绕组作了改进。即将三角形运转的电动机每相绕组中间抽出一根引出线,在电动机起动时使定子绕组的一部分接成  $Y$  形,而另一部分接成  $\Delta$  形,从图形上看好像是将一个三角形的三条边对称地延长一段,因此称为“延边三角形”,并用符号  表示。

在起动过程中,延长边的阻抗占每相绕组的比例越大,则起动电压越低,起动电流越小,起动转矩也小。反之,则起动电压高,起动电流大,起动转矩也大。因此不同抽头比可以改变电动机的起动特性,各种抽头比的起动特性见表 11.45。

这类电动机有 9 根引出线,它的起动与运行接线原理见图 11.22。延边三角形起动一般可采用 XJ 1 系列低压起动控制箱,也可按图 11.23 自行组合制造。

从控制电路图可看出,当按下  $QA$  时,  $C$  吸合并自锁,主电路中电动机的引出线  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  分别通过主触点  $C$  与电源接通。与

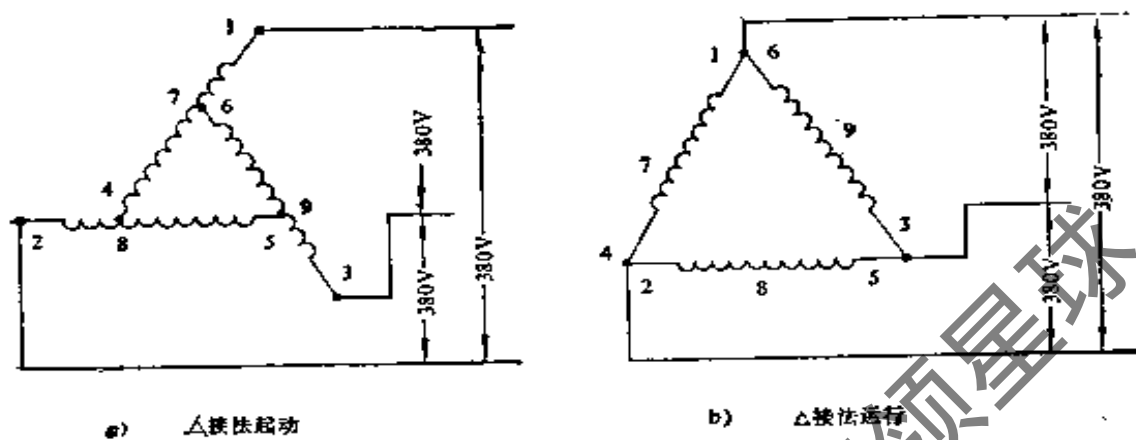


图 11.22 延边三角形绕组的连接

$\Delta$ 电动机绕组各种抽头比的启动特性

表 11.45

| 电动机定子绕组的抽头比   | 相当于自耦变压器的抽头比 | 启动电流<br>额定电流 |
|---------------|--------------|--------------|
| 1:1           | 71%          | 3~3.5        |
| 1:2           | 78%          | 3.6~4.2      |
| 2:1           | 66%          | 2.6~3.1      |
| Y- $\Delta$ 法 | 58%          | 2~2.3        |

此同时  $QC$  也吸合, 它的三对主触点闭合, 并将  $D_6$  和  $D_7$ 、 $D_4$  和  $D_5$ 、 $D_2$  和  $D_3$  分别接通, 电动机处于延边三角形启动。启动完毕后, 只需按下运转按钮  $YA$  则同时断开  $QC$  而接通  $YC$ , 主电路中的主触点  $QC$  断开,  $YC$  闭合并将  $D_1$  和  $D_6$ 、 $D_2$  和  $D_4$ 、 $D_3$  和  $D_5$  接通, 电动机呈三角形连接进入正常运行。控制电路中的常闭触点  $YC$  与  $QC$  互锁,  $TA$  为停止按钮。

因为正常运行时  $YC$  仅通过相电流, 可选用容量等于或略小于电动机额定电流的接触器。接触器  $QC$  的容量约为电动机额定

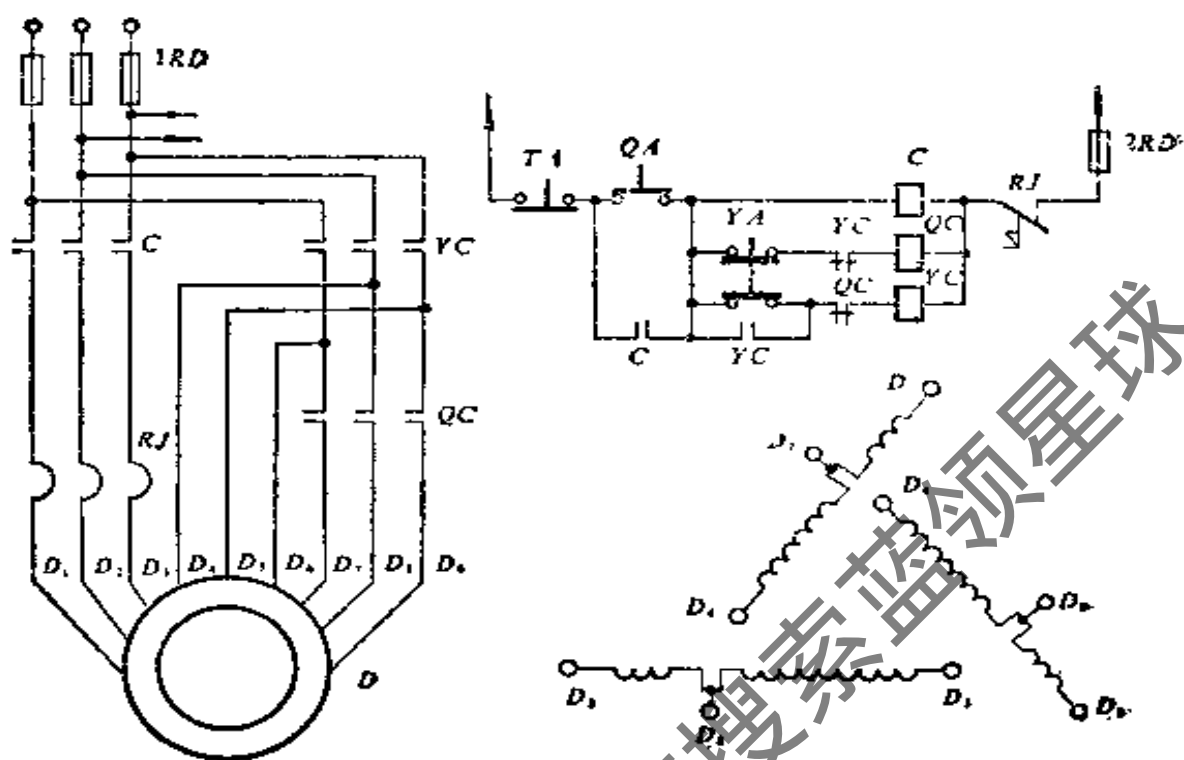


图 11.23 延边三角形启动控制电路

电流的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$  即可。

### 11.4.3 变极异步电动机的控制电路

变极调速异步电动机是改变定子绕组的极对数进行有级调速的。这类由电动机的定子绕组根据要求设计成可以通过引出线的不同接法使每相的几个绕组串联或并联工作，从而改变极对数。一般每相绕组在串联工作时产生的磁极对数多，电动机处于低速运行。并联时处于高速运行。对不同变极电动机可以设计成 6, 9 或 12 根引出线，因此应按照每台电动机规定的接法组合成不同极对数工作。

图 11.24 为最常见的双速变极电动机在低速运行时为  $\Delta$  接法，在高速运行时为  $YY$  接法用接触器的切换电路。

在图中，当按下低速按钮  $DA$  时， $DC$  吸合，三相电源通过主触点  $DC$  分别与电动机的  $D_1, D_2, D_3$  连接，电动机进行低速运



转。当按下  $GA$  按钮时,低速接触器线圈  $DC$  释放,高速双接触线圈  $GC$  吸合,主触点  $GC$  中的一付触点将  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  连成一点,另一付分别将引出线  $D_4$ 、 $D_5$ 、 $D_6$  与电源相接,形成两个并联的  $Y$  形接法进入高速运行。控制电路中用复合按钮  $DA$  和  $GA$  以及常闭辅助触点  $DC$  和  $GC$  保证了两个接触器不会同时工作,  $TA$  为停止按钮,它可以在任意一种转速运行下停车。接触器的容量及热继电器的整定电流可分别按照电动机容量选择。

这类电动机在允许条件下,可用低速起动、高速运行而不必设置起动设备。

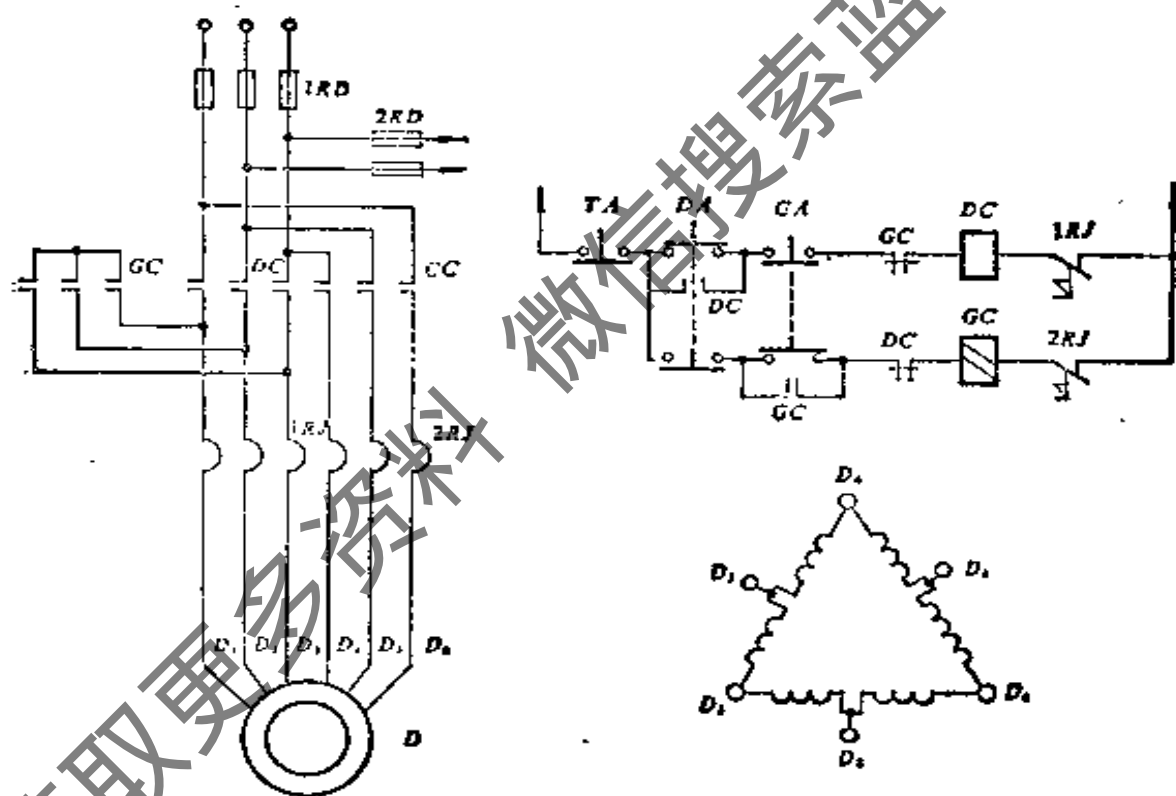


图 11.24 双速变极电动机  $\Delta/YY$  的切换电路

## 11.5 三相异步电动机的使用与注意事项

电动机是空调系统的动力源。对它在运用前的检查及运行中的监视是保证空调系统正常工作的前提。为了保证电动机正常运行,每台电动机在运用前必须进行下列检查:

1. 机械检查 查看电动机外壳有无损坏,转动时有无卡死或碰撞现象,轴承转动声是否正常。如有故障应事先消除。

2. 电气检查 电动机长久停用、新安装或拆修后都必须用兆欧表测量绕组对机壳和绕组间的绝缘电阻。它们的绝缘电阻均应在 $0.5[M\Omega]$ 以上。

3. 接线检查 电动机定子绕组的接法必须与铭牌标示的一致,在接有起动或转换电器设备时应同时检查其接线是否正确,各个接线端是否接紧,机壳、管线及有关电气设备的接地保护是否良好。

只有经过上述检查并确认无误时才能投入使用。在与设备连接前,应使电动机的转向与设备要求的转向一致。在运行中还应经常注意的几个问题是:

1. 电动机发热情况是否正常,如用指背经触机壳时已感很烫,则应进一步查看。

2. 电动机运行中有无异常声音,如突然产生异常则可从机械与电气两方面去检查;

3. 如装有监视的电流表和电压表,则可通过它们观察其电流值不应超过电动机的额定值。电压波动也不应太大。

4. 还应注意电动机不受水汽及尘埃的侵袭。

三相异步电动机运行中的常见故障及可能原因 见表 11.46。

三相异步电动机的常见故障及可能原因

表 11.46

| 常见故障 | 可 能 原 因                      |
|------|------------------------------|
| 不能起动 | 1. 电源断相或开关接触不良               |
|      | 2. 负载太重或有机械卡死                |
|      | 3. 定子绕组电压太低,或将 $\Delta$ 误接成Y |
|      | 4. 定子电路断开,或绕组相间短路            |
|      | 5. 热继电器未复位或非电参数继电器触点处于断开状态   |

| 常见故障 | 可能原因   |
|------|--|
| 过热   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 超负载运行</li> <li>2. 两相运转</li> <li>3. 冷却风扇损坏或风道阻塞</li> <li>4. 环境温度过高</li> <li>5. 电源电压过低或过高</li> <li>6. 定子绕组匝间短路或通地</li> <li>7. 轴承损坏或过紧,过松</li> <li>8. 皮带过紧或联轴器装得不好</li> </ol> |
| 声音异常 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 两相运行</li> <li>2. 定子与转子相擦</li> <li>3. 严重过载或定子绕组匝间短路</li> <li>4. 轴承损坏</li> </ol>   |

## 11.6 电加热器及其使用

空调工程中采用蒸汽或热水作为热源,通过表面式热交换器对水或空气进行加热是最常见的处理过程。但在系统支管或末端对加热量进行平衡或调节中往往用电加热器作为辅助或控温的热源。在小型空调机中把它作为主热源或兼作控温加热源也不鲜见。因此,电加热器也是空调工程中主要用电设备之一,所以对它的使用知识有基本了解也是有必要的。

### 11.6.1 单相交流电阻负载电路

电流通过电阻产生热量是加热器的基本工作原理。我们知道市供单相电源是由一根相线与一根中线组成并按正弦规律变化的交变电源。交流电的有效值是根据它的热效应确定的,如某

一变交电流  $i$  通过某一电阻  $R$  在一个周期时间里产生的热量与一直流电流  $I$  通过同一电阻  $R$  在相同时间内产生的热量相等,则这个直流电流  $I$  的数值就是交流电流  $i$  的有效值。也即交流电流的有效值就是和它热效应相等的直流电流值。而且电加热器在交流电路中可以看成是纯电阻 根据推导可以得出,交流电路中纯电阻电路的电压( $U$ )与电流( $I$ )关系符合欧姆定律。电压与电流同相(即  $\cos \varphi = 1$ ),平均功率( $N$ )的表达式和直流电路完全相同。即:

$$U = IR[\text{V}] \quad (11.21)$$

$$N = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R[\text{W}] \quad (11.22)$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{N}{U} [\text{A}] \quad (11.23)$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U^2}{N} [\Omega] \quad (11.24)$$

根据上面的公式,如已知电加热器的任意两个参数,则可方便地求出需要知道的其他参数。

### 1. 电阻的串联电路

几个电阻串接在一起,在电源作用下通过它们的是同一电流,则这些电阻的联接称为串联,图 11.25a 所示是有  $n$  个电阻串联的电路,外加电压为  $U$  通过电流为  $I$ 。如果图 b 中所示的只有一个电阻的电路,在与图 a 相同电压作用下通过电流也为  $I$ ,那么此两电路等效,对图 a:

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots \\ &\quad + IR_n = I(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) \end{aligned} \quad (11.25)$$

对图 b,  $U = IR$ 。两电路等效必定

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad (11.26)$$

如式 11.25 所示,各电阻上的分电压之和等于总电压,分电压与总电压的关系可以表示为:

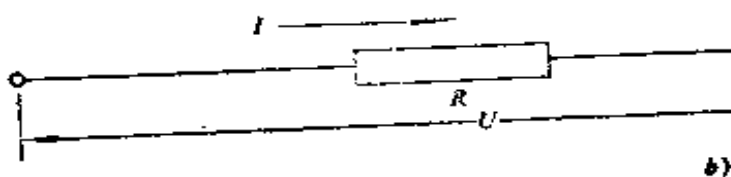
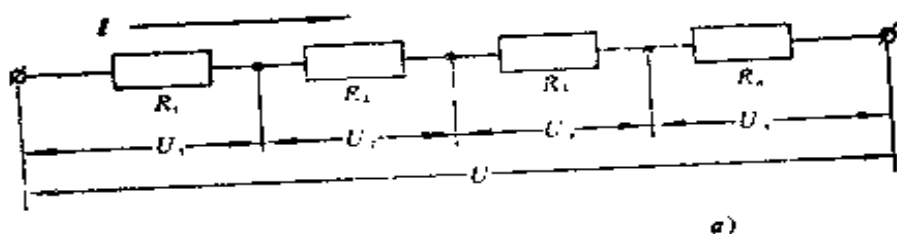


图 11.25 电阻的串联

$$U_i = \frac{R_i}{R} U \quad (11.27)$$

【例 11.31】 选用额定电压  $U$  为 110[V] 额定功率  $N$  为 500[W] 和 1000[W] 的两支电热器串联后接至 220[V] 电源使用, 试求各参数。

【解】 根据两支电热器的额定值按式(11.24)可求出它们的电阻及串联后的总电阻分别为:

$$R_1 = \frac{U^2}{N_1} = \frac{110^2}{500} = 24.2[\Omega]$$

$$R_2 = \frac{U^2}{N_2} = \frac{110^2}{1000} = 12.1[\Omega]$$

$$R = R_1 + R_2 = 24.2 + 12.1 = 36.3[\Omega]$$

将它们接至 220[V] 电源时, 通过电路的电流及总功率为:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{36.3} = 6.08[\text{A}]$$

$$N = UI = 220 \times 6.08 = 1333.2[\text{W}] \text{ (不是 } 500 + 1000 = 1500[\text{W}] \text{)}$$

串联工作时, 两个电热器上的分电压与分功率为:

$$U_1 = \frac{R_1}{R} U = \frac{24.2}{36.3} \times 220 = 147[\text{V}] \text{ (超出额定电压 } 33.3\%)$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R} U = \frac{12.1}{36.3} \times 220 = 73[\text{V}] \text{ (低于额定电压 } 33.3\%)$$

$$N_1 = U_1 I = I^2 R_1 = 6.08^2 \times 24.2 = 899[\text{W}] \text{ (比额定功率大)}$$

$$N_2 = U_2 I = I^2 R_2 = 6.06^2 \times 12.1 = 444 [\text{W}] (\text{比额定功率小})$$

上例表明，两支不同功率的电热器串联后在总电压作用下的电压分配与功率分配情况。显然110[V]、500[W]的这支电热器是超出额定值运行，必然导致迅速烧毁。这是使用电热器中应该注意校核的问题。

## 2. 电阻的并联电路

几个电阻并排连接，在电源作用下，各电路两端具有同一电压，则这些电阻的连接称为并联。图11.26中a所示是有n个电阻并联的电路。当此电路与图b的电路等效时可得：

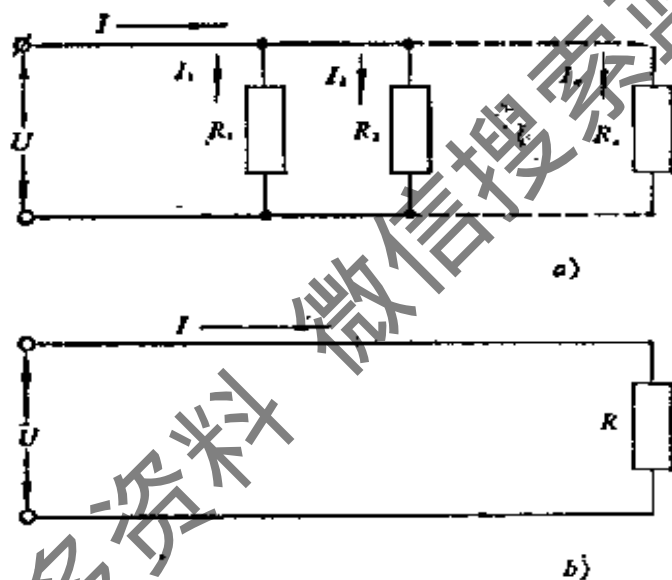


图 11.26 电阻的并联

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + \dots + I_n = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n} \\ &= U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) \end{aligned} \quad (11.28)$$

对图b电路有  $I = U \cdot \frac{1}{R}$ ，因此等效条件是

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (11.29)$$

$$\text{或 } R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (11.29b)$$

由式(11.28)可知,各电阻上的分电流之和等于总电流。分电流与总电流之间的关系可表示为

$$I_i = \frac{R}{R_i} I \quad (11.30)$$

【例11.4】 选用额定电压  $U$  为 220[V], 额定功率  $N$  为 500[W] 和 1000[W] 两支电热器并联后接至 220[V] 电源使用。试求各参数。

【解】 两支电热器的电阻及并联后的总电阻分别为:

$$R_1 = \frac{U^2}{N_1} = \frac{220^2}{500} = 96.8[\Omega]$$

$$R_2 = \frac{U^2}{N_2} = \frac{220^2}{1000} = 48.4[\Omega]$$

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{96.8 \times 48.4}{96.8 + 48.4} = 32.3[\Omega]$$

接至 220[V] 电源时,通过电路的总电流与总功率为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{32.3} = 6.82[\text{A}]$$

$$N = I^2 R = UI = 220 \times 6.82 = 1500[\text{W}] \text{ (等于两支电热器功率之和)}$$

其分电流与分功率为:

$$I_1 = \frac{R}{R_1} I = \frac{32.3}{96.8} \times 6.82 = 2.27[\text{A}];$$

$$N_1 = UI_1 = 220 \times 2.27 = 500[\text{W}] \text{ (与额定功率相等)}$$

$$I_2 = \frac{R}{R_2} I = \frac{32.3}{48.4} \times 6.82 = 4.55[\text{A}];$$

$$N_2 = UI_2 = 220 \times 4.55 = 1000[\text{W}] \text{ (与额定功率相等)}$$

从此例可以看出,只要电热器的额定电压与电源电压相同就可以并联使用。其总功率、总电流为各电热器分功率、分电流的总和。

另外,我们知道电热器散发的热量其功率成正比,而电热器的功率与施加在它两端电压的平方成正比 ( $N = U^2/R$ )。因此也可

以通过电压调节设备改变电热器的端电压进行热量调节。

### 11.6.2 对称三相交流电阻负载电路

市供三相交流电源是相序各差 $120^\circ$ 并以同频率按正弦规律变化的交变电源。所谓相序就是三个相同量的电动势达到最大值或零值的先后次序,在配电系统中各个相习惯用 $A$ (黄色)、 $B$ (绿色)和 $C$ (红色)表示。它的供电方式有三相三线制和三相四线制两种,三相四线制方式除 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 三根相线外,另有一根中线(零线),每根相线对中线的电压称之为相电压,相线与相线间的电压称为线电压。根据三相交变电源的特点,用矢量关系分析可以得到其线电压 $U$ 与相电压 $U_\phi$ 之间的关系为:

$$U = \sqrt{3} U_\phi \quad (11.31)$$

通常市供三相交流电源的相电压为 $220[V]$ ,其线电压则为 $\sqrt{3} \times 220 = 380[V]$ 经分析可以知道,对于如三相异步电动机等任何对称三相负载,其中线电流是三相电流的矢量和,并等于零,因此只须以三相三线制供电,而日常的 $220[V]$ 单相电源则是由三相四线制式供电。

在线电压为 $380[V]$ 的三相交流供电系统中,当单个单相负载的额定电压为 $220[V]$ 时,应将负载跨接在任意一相线与中线间,若额定电压为 $380[V]$ 则跨接在任意两相线间,而取得与它相符的供电电压这种接法的电路分析与计算与上节单相交流电路相同。对于多个单相负载则应将它们均分为三组分别接在三相电源上。

#### 1. 三相对称电阻负载的星形连接

三相对称负载的星形连接适用于单相负载的额定电压为 $220[V]$ 时使用。其接线见图11.27。三相对称负载作星形连接时的特点是,线路电流 $I$ 等于相电流 $I_\phi$ ,线电压 $U$ 等于 $\sqrt{3}$ 乘相电压 $U_\phi$ ,即

$$I = I_\phi \quad (11.32)$$

$$U = \sqrt{3} U_\phi \quad (11.33)$$

其电源提供的电功率 $N$ 为:



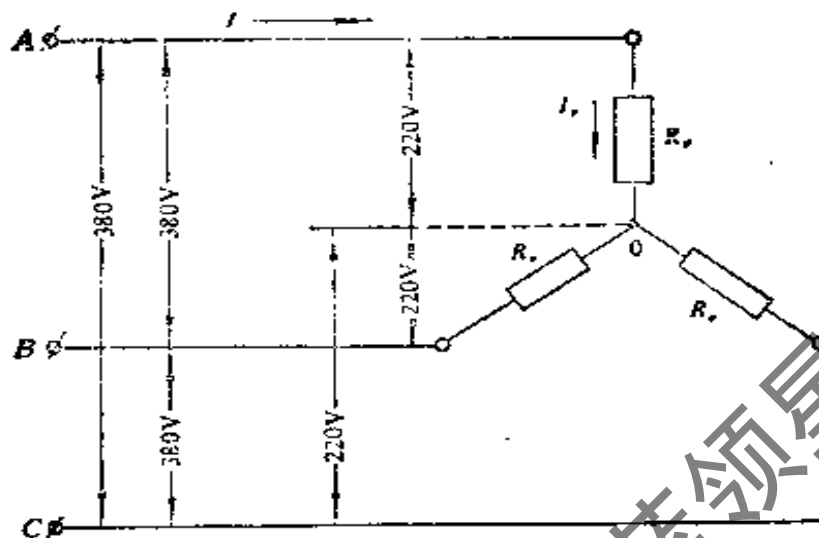


图 11.27 三相对称电阻负载的星形连接

$$N = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad (11.34 a)$$

对于电热器可看成是纯电阻负载,其功率因数  $\cos \varphi = 1$ ,因此可写成

$$N = \sqrt{3} U I \quad (11.34 b)$$

【例 11.5】三组额定电压为 220[V], 额定功率为 1000[W] 的电热器按图 11.27 的星形接法与线电压为 380[V] 的三相电源连接。试求线路电流与电功率。

【解】由于对称三相电路的第一个特点是,在负载对称的情况下,无论有无中线,负载中点 O 的电位与电源中点电位相同,所以各相负载的两端电压都等于电源的各相电压。其二是,在三相对称电路中,只要计算出其中任一相的电流其他两相电流都与此相同,因此,对称三相电路可以作为单相电路计算。

本例系三相对称负载可以只计算一相。首先求出相电压  $U_{\phi}$ 。

$$U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220[\text{V}] \quad (\text{等于电热器的额定电压})$$

每相电阻  $R_{\phi}$  及电流  $I_{\phi}$

$$R_{\phi} = \frac{U_{\phi}^2}{N} = \frac{220^2}{1000} = 48.4[\Omega]$$

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{R_{\phi}} = \frac{220}{48.4} = 4.55[\text{A}]$$

因为星形连接时线电流等于相电流,所以

$$I = I_{\phi} = 4.55[\text{A}]$$

三相负载消耗的总功率  $N$  为:

$$N = \sqrt{3} UI \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 4.55 \times 1 = 3000 [\text{W}] \text{ (等于各相额定电功率之和)}$$

如将本例中的三个电热器并联后接至 220[V] 单相电源线路上, 则其线路电流将是本例的 3 倍。因此三相负载的星形接法可以减少线路设备费用和能耗。

## 2. 三相对称电阻负载的三角形连接

三相对称负载的三角形连接适用于单相负载的额定电压为 380[V] 时使用。其接线法见图 11.28。它的特点是:

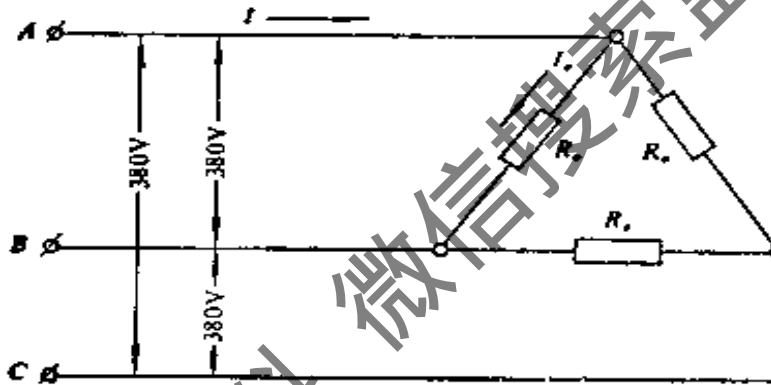


图 11.28 三相对称电阻负载的三角形连接

$$I = \sqrt{3} I_{\phi} \quad (11.35)$$

$$U = U_{\phi} \quad (11.36)$$

电功率的计算与星形连接相同。

**【例 11.6】** 三组额定电压为 380[V], 额定功率 1000[W] 的电热器按图 11.28 的三角形接法与线电压为 380[V] 的三相电源连接。试求线路电流与电功率。

**【解】** 三相对称负载接成三角形时, 各相负载都接在电源两相线间, 所以负载的相电压等于电源的线电压。而三相电流是对称的, 因此计算其中一相的相电流就可以了。因为  $U_{\phi} = U = 380 [\text{V}]$  (与电热器额定电压相符)。负载电阻  $R_{\phi}$  为

$$R_{\phi} = \frac{U_{\phi}^2}{N} = \frac{380^2}{1000} = 144.4 [\Omega]$$

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{R} = \frac{380}{144.4} = 2.63 [\text{A}]$$

根据式(11.35)

$$I = \sqrt{3} UI_r = \sqrt{3} \times 2.63 = 4.55[\text{A}]$$

$$N = \sqrt{3} UI \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 4.55 \times 1 = 3000[\text{W}] \text{ (等于各相额定电功率之和)}$$

从两种不同接法的例子中可看出,相同功率的三组电热器,不论是Y连接还是△连接,其线电流不变,大致为1.5[A/kW]。如果三相中有一相断开,它们仍能运行,但功率将减小,因此在空调系统运行中,若发现电加热器的热量减少时应从这一方面去检查。

电加热器可参考三相异步电动机的控制电路进行线路设计。在线路设计中,应该注意的是,风管电加热器必须在风机启动后才能投入工作。两者可按图11.17所示的次序控制电路考虑。此外,电加热器的支路中一般不会产生过载,因此只须对它进行短路保护而不必设置过载保护。

### 11.6.3 管状电加热元件

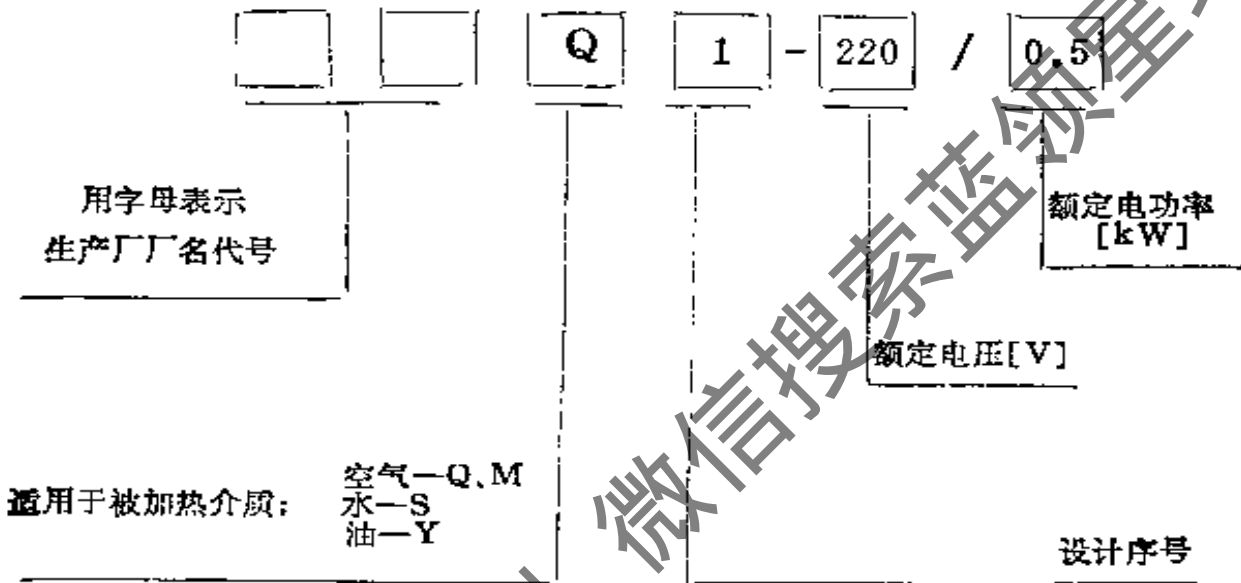
电加热器的发热体所用材料,除具有一般机械、物理性能外,还必须具有电和热方面的要求。例如,一般希望在通过一定电流时能产生较高的热量和稳定的功率,这要求所用材料有较高的电阻率和稳定而较小的电阻温度系数值。另外,材料在高温下工作时应具有足够的机械强度、抗氧化性和耐腐蚀性,在加工时应能满足不同成形的需要。铁铬铝与镍铬合金丝和带是常用的发热体材料。

通过计算,用一定长度的电热合金丝绕成裸露的螺旋形发热体盘放在兼有热绝缘与电绝缘的风管段中作为加热元件,是加热空气的一种电加热设备。这种电加热器的优点是制作简单、价格低廉、热惰性小,但它的安全性和机械强度差。当用于加热液体时还需一定的防护措施。

目前生产的管状电热元件是以铁铬铝或镍铬合金丝作为发热体,外套以金属护套并以导热性与电绝缘性良好的结晶氧化镁压实充填于中间空隙部而组成的发热元件。它可安装在风管中加热空气或浸没在水或其他液体中加热液体。以金属管(钢、铜或不锈

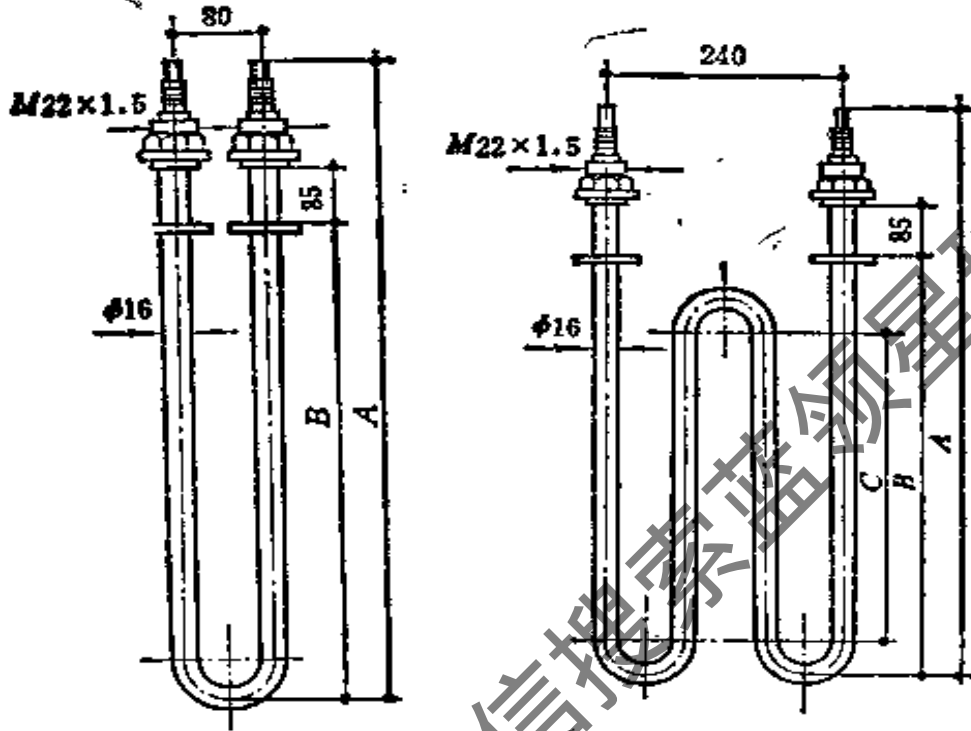
钢)作为护套的通称为管状电热元件。这类电热元件的安全性与机械强度均比裸丝强,又能弯制成各种形状,因此得到广泛采用。近来国内、外还有一些在管状电热元件外侧套上或绕上翅片,以降低外侧表面温度。用于加热空气的翅片型电热元件。这类电热元件目前尚未定型,但可按要求制作。

管状电热元件的型号含义表示如下:



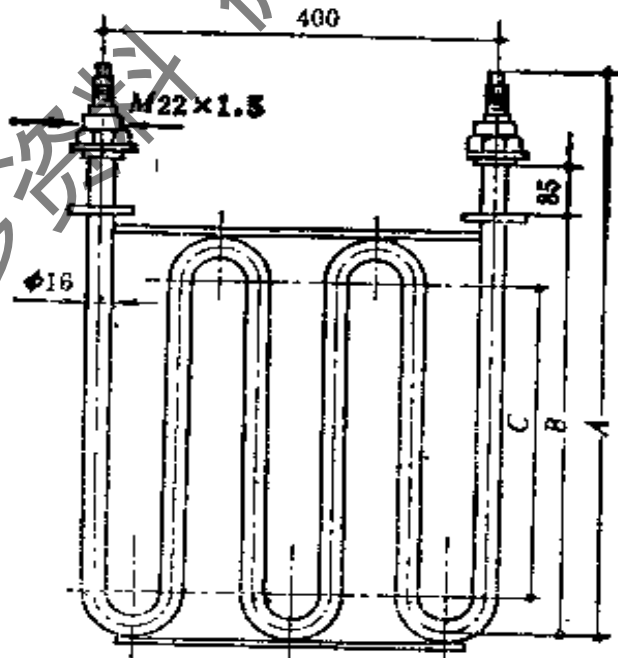
这类电热元件的最高使用温度,对空气为 300[°C]、对水为 05[°C]、对油为 300[°C],选用时应根据被加热介质与加热条件选型,在安装中应使其发热体部分全部浸没在被加介质中。在管道中加热空气时,元件宜错列布置,两元件间的距离应大于 40[mm]管内风速一般取 8~12[m/s]。为减小热损失,放置元件的管道四周应有绝热层,元件的接线柱应在绝热层外面。由于元件发热设计是有条件的,因此不同使用条件的元件不能随意互换。使用中还应经常清除元件表面的积尘与积垢。若元件的绝缘电阻小于 1[MΩ]时,可在 200[°C]左右的烘箱中干燥数小时(或将元件用低电压通电数小时),待绝缘电阻增高后仍可继续使用。另外,由元件组成的电加热器应有效接地。

电热元件的规格可按需要定制。已定型的型号与规格见表 11.47~表11.50。



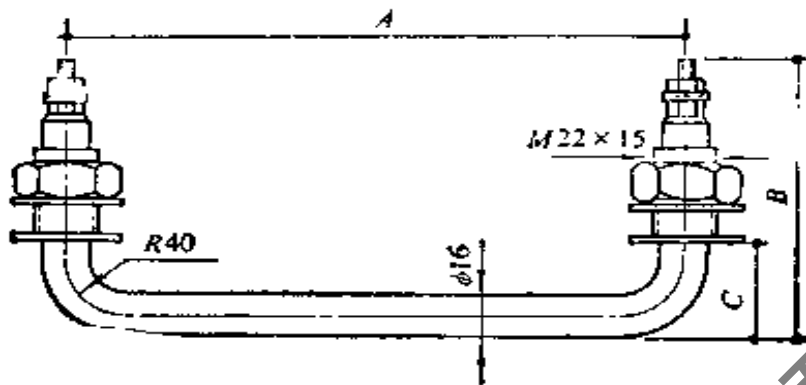
□□Q1型外形及安装尺寸图

□□Q2型外形及安装尺寸图

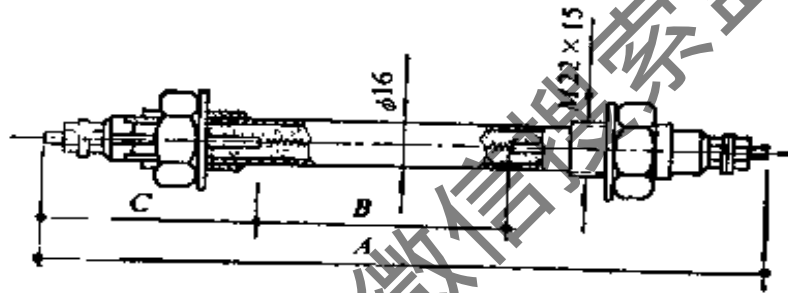


□□Q3型外形及安装尺寸图

获取更多资料 微信搜索 蓝球星球



□□Q 4 型外形及安装尺寸图



□□Q 5 型外形及安装尺寸图

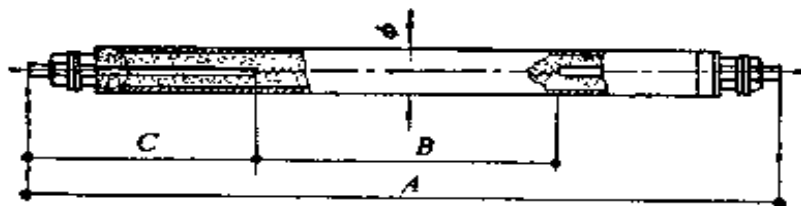
| 型 号            | 电 压<br>[V] | 功 率<br>[kW] | 外形及安装尺寸[mm] |     |     | 重 量<br>[kg] |
|----------------|------------|-------------|-------------|-----|-----|-------------|
|                |            |             | A           | B   | C   |             |
| □□Q 1-220/0.5  | 220        | 0.5         | 490         | 330 |     | 1.25        |
| □□Q 1-220/0.75 | 220        | 2.55        | 690         | 530 |     | 1.80        |
| □□Q 2-220/1.0  | 220        | 1.0         | 490         | 330 | 200 | 1.83        |
| □□Q 2-220/1.5  | 220        | 1.5         | 690         | 530 | 400 | 2.62        |
| □□Q 3-380/2.0  | 380        | 2.0         | 590         | 430 | 300 | 3.43        |
| □□Q 3-380/2.5  | 380        | 2.5         | 690         | 530 | 400 | 4.00        |

续表 11.47

| 型 号           | 电 压<br>[V] | 功 率<br>[kW] | 外形及安装尺寸[mm] |      |     | 重 量<br>[kg] |
|---------------|------------|-------------|-------------|------|-----|-------------|
|               |            |             | A           | B    | C   |             |
| □□Q 3-380/3.0 | 380        | 3.0         | 790         | 630  | 500 | 4.50        |
| □□Q 4-220/0.8 | 220        | 0.8         | 800         | 128  | 50  | 1.20        |
| □□Q 4-220/1.0 | 220        | 1.0         | 1000        | 128  | 53  | 1.42        |
| □□Q 4-220/1.2 | 220        | 1.2         | 1200        | 128  | 53  | 1.65        |
| □□Q 4-220/1.4 | 220        | 1.4         | 1400        | 128  | 53  | 1.87        |
| □□Q 5-220/0.7 | 220        | 0.7         | 860         | 660  | 100 | 0.97        |
| □□Q 5-220/0.8 | 220        | 0.8         | 1260        | 860  | 200 | 1.40        |
| □□Q 5-220/0.9 | 220        | 0.9         | 1560        | 960  | 300 | 1.72        |
| □□Q 5-220/1.1 | 220        | 1.1         | 1860        | 1160 | 350 | 2.04        |
| □□Q 5-220/1.2 | 220        | 1.2         | 2060        | 1260 | 400 | 2.26        |
| □□Q 5-220/1.3 | 220        | 1.3         | 2260        | 1260 | 500 | 2.48        |
| □□Q 5-220/1.5 | 220        | 1.5         | 2560        | 1560 | 500 | 2.80        |

□□M型管状电加热元件

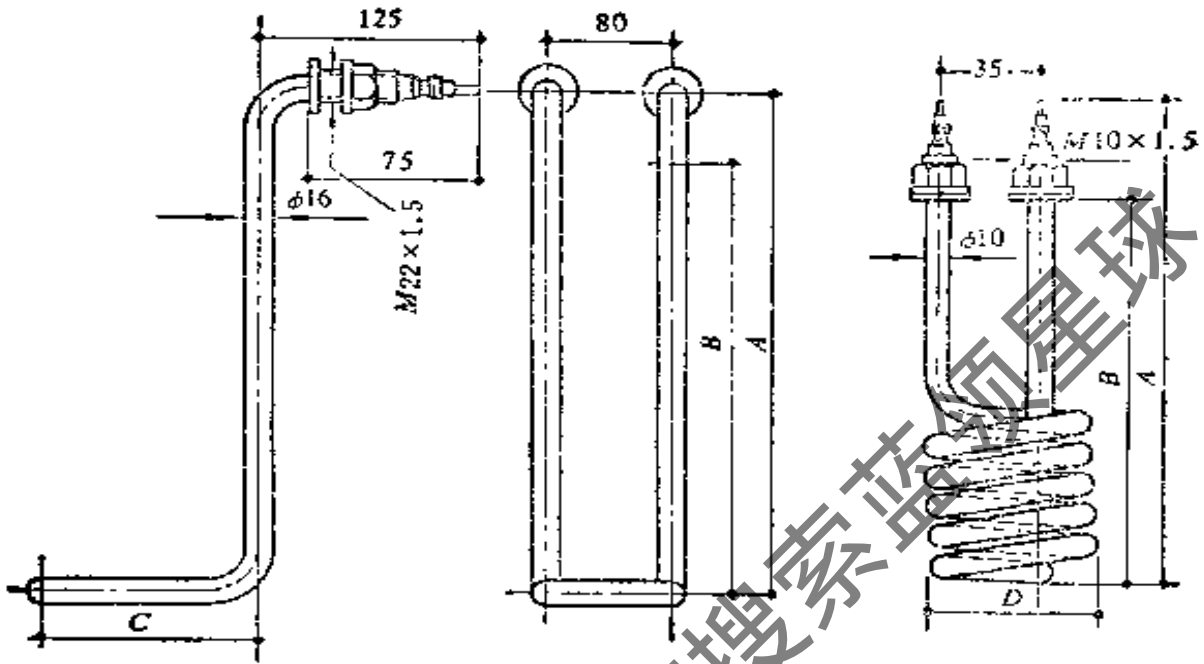
表 11.48

□□M<sub>1</sub>型外形及安装尺寸图  
□□M<sub>2</sub>

续表 11.48

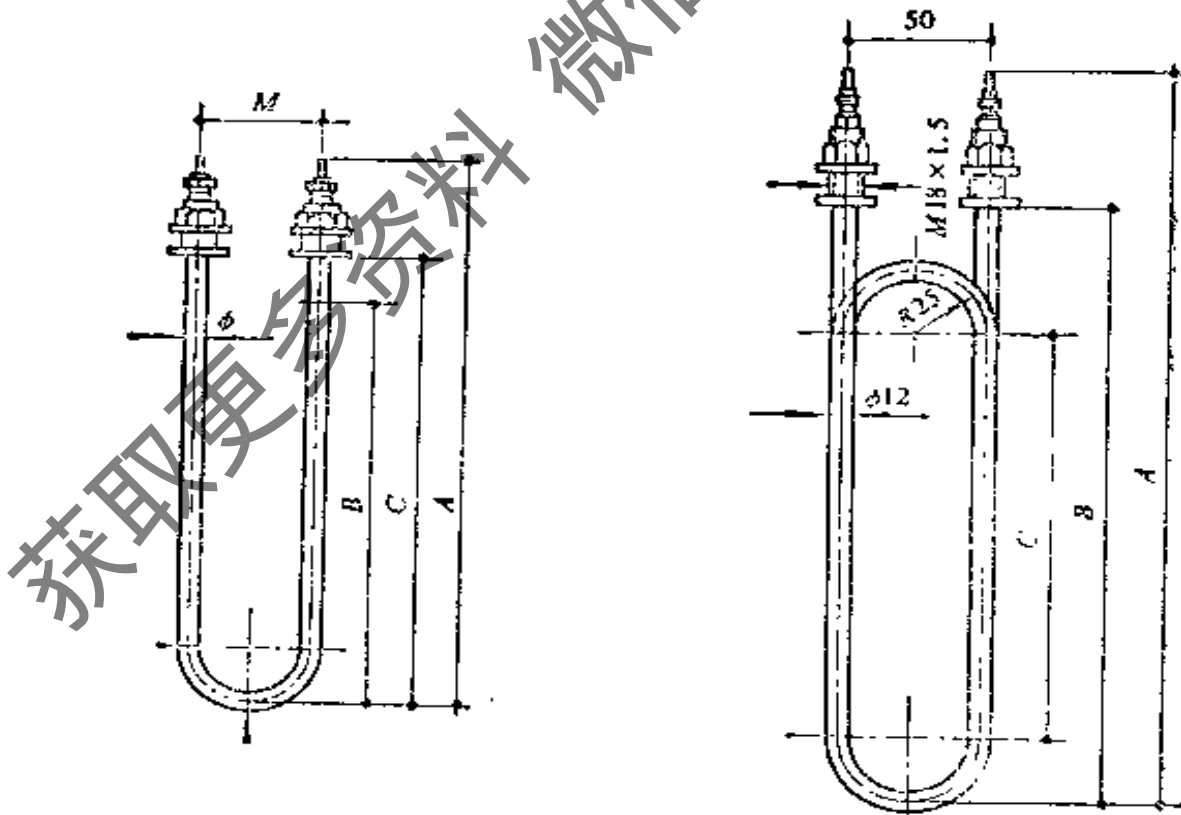
| 型 号           | 电压<br>[V] | 功率<br>[kW] | 外形及安装尺寸 |     |     |    | 重量<br>[kg] |
|---------------|-----------|------------|---------|-----|-----|----|------------|
|               |           |            | A       | B   | C   |    |            |
| □□M 1-36/0.25 | 36        | 0.25       | 260     | 120 | 70  | 16 | 0.22       |
| □□M 1-55/0.25 | 55        | 0.25       | 260     | 120 | 70  | 16 | 0.22       |
| □□M 1-55/0.3  | 55        | 0.3        | 310     | 200 | 70  | 16 | 0.30       |
| □□M 1-110/0.4 | 110       | 0.4        | 390     | 250 | 70  | 16 | 0.35       |
| □□M 1-110/0.5 | 110       | 0.5        | 440     | 300 | 70  | 16 | 0.41       |
| □□M 1-220/0.6 | 220       | 0.6        | 560     | 500 | 70  | 16 | 0.64       |
| □□M 2-110/0.8 | 110       | 0.8        | 390     | 210 | 90  | 20 | 0.63       |
| □□M 2-110/1.0 | 110       | 1.0        | 440     | 260 | 90  | 20 | 0.71       |
| □□M 2-220/1.2 | 220       | 1.2        | 580     | 400 | 90  | 20 | 0.85       |
| □□M 2-220/1.5 | 220       | 1.5        | 630     | 450 | 90  | 20 | 1.01       |
| □□M 2-220/1.8 | 220       | 1.8        | 730     | 530 | 100 | 20 | 1.17       |
| □□M 2-220/2.2 | 220       | 2.2        | 830     | 630 | 100 | 20 | 1.33       |
| □□M 2-220/2.6 | 220       | 2.6        | 950     | 750 | 100 | 20 | 1.52       |
| □□M 2-220/3.0 | 220       | 3.0        | 1080    | 880 | 100 | 20 | 1.73       |





□□ S1型外形及安装尺寸图

□□ S3型外形及安装尺寸图



□□ S4型外形及安装尺寸图

□□ S5型外形及安装尺寸图

表11.49

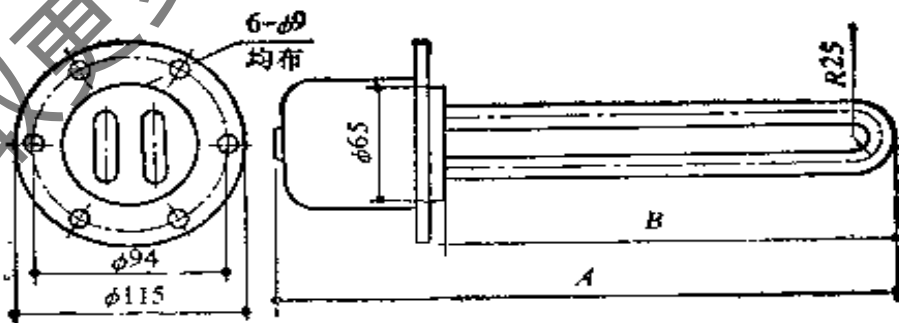
| 型 号           | 电压<br>[V] | 功率<br>[kW] | 外形及安装尺寸[mm] |             |     |    | 重量<br>[kg] |
|---------------|-----------|------------|-------------|-------------|-----|----|------------|
|               |           |            | A           | B 最低<br>液 面 | C   | D  |            |
| □□S 1-380/1   | 380       | 1          | 440         | 360         | 340 | —  | 2.00       |
| □□S 1-380/2   | 380       | 2          | 480         | 400         | 380 | —  | 2.25       |
| □□S 1-380/3   | 380       | 3          | 580         | 500         | 480 | —  | 2.53       |
| □□S 1-380/4   | 380       | 4          | 675         | 575         | 490 | —  | 2.80       |
| □□S 1-380/5   | 380       | 5          | 775         | 675         | 540 | —  | 3.08       |
| □□S 1-380/6   | 380       | 6          | 870         | 770         | 580 | —  | 3.33       |
| □□S 1-380/7   | 220       | 7          | 875         | 755         | 660 | —  | 3.50       |
| □□S 3-220/0.5 | 220       | 0.5        | 145         | 100         | —   | 60 | 0.40       |
| □□S 3-220/1   | 220       | 1          | 175         | 130         | —   | 60 | 0.48       |
| □□S 3-220/1.5 | 220       | 1.5        | 200         | 155         | —   | 60 | 0.65       |
| □□S 3-220/2   | 220       | 2          | 250         | 205         | —   | 60 | 0.70       |
| □□S 3-220/2.5 | 220       | 2.5        | 120         | 75          | —   | 80 | 0.55       |
| □□S 5-220/1   | 220       | 1          | 330         | 275         | —   | —  | 0.50       |
| □□S 5-220/2   | 220       | 2          | 480         | 425         | —   | —  | 0.67       |
| □□S 5-220/3   | 220       | 3          | 390         | 335         | 250 | —  | 0.83       |
| □□S 5-220/4   | 220       | 4          | 515         | 460         | 375 | —  | 1.13       |
| □□S 5-220/5   | 220       | 5          | 640         | 585         | 500 | —  | 1.43       |

续表 11.49

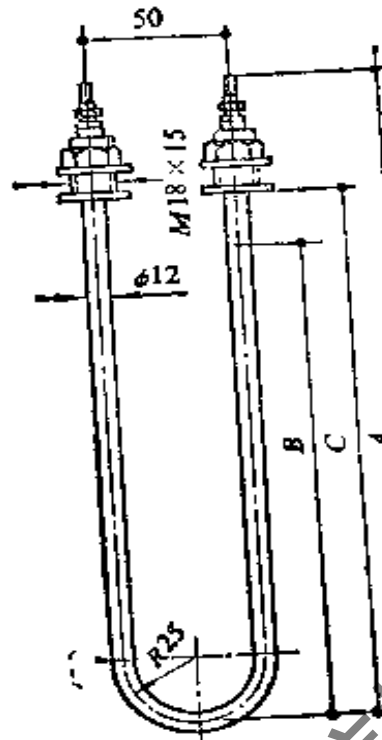
| 型 号         | 电压<br>[V] | 功率<br>[kW] | 外形及安装尺寸[mm] |               |      |    |    | 重 量<br>[kg] |
|-------------|-----------|------------|-------------|---------------|------|----|----|-------------|
|             |           |            | A           | B<br>最低液<br>面 | C    | D  | H  |             |
| □□S 4-220/1 | 220       | 1          | 135         | 235           | 380  | 12 | 50 | 0.61        |
| □□S 4-220/2 | 220       | 2          | 585         | 385           | 530  | 12 | 50 | 0.73        |
| □□S 4-220/3 | 220       | 3          | 785         | 585           | 730  | 12 | 50 | 0.98        |
| □□S 4-380/4 | 380       | 1          | 700         | 480           | 625  | 16 | 80 | 1.60        |
| □□S 4-380/5 | 380       | 5          | 850         | 630           | 775  | 16 | 80 | 1.92        |
| □□S 4-380/6 | 380       | 6          | 1015        | 825           | 1000 | 16 | 80 | 2.41        |
| □□S 4-380/7 | 380       | 7          | 1225        | 975           | 1150 | 16 | 80 | 2.73        |

□□Y 型管状电加热元件

表 11.50



□□Y2  
□□Y4 型外形及安装尺寸图



□□Y3型外型及安装尺寸图

| 型 号         | 电压 [V] | 功率 [kW] | 外形及安装尺寸 [mm] |            |      | 重量 [kg] |
|-------------|--------|---------|--------------|------------|------|---------|
|             |        |         | A            | B浸入油中<br>长 | C    |         |
| □□Y 2-220/1 | 220    | 1       | 307          | 230        | —    | 1.45    |
| □□Y 2-220/2 | 220    | 2       | 507          | 430        | —    | 1.90    |
| □□Y 2-220/3 | 220    | 3       | 707          | 630        | —    | 2.35    |
| □□Y 2-220/4 | 220    | 4       | 922          | 845        | —    | 2.83    |
| □□Y 3-220/1 | 220    | 1       | 625          | 375        | 570  | 0.77    |
| □□Y 3-220/2 | 220    | 2       | 825          | 575        | 770  | 1.01    |
| □□Y 3-220/3 | 220    | 3       | 925          | 675        | 870  | 1.13    |
| □□Y 3-220/4 | 220    | 4       | 1125         | 875        | 1070 | 1.37    |

续表 11.50

| 型 号       | 电流<br>[V] | 功率<br>[kW] | 外形及安装尺寸 [mm] |            |   | 重量<br>[kg] |
|-----------|-----------|------------|--------------|------------|---|------------|
|           |           |            | A            | B浸入油中<br>长 | C |            |
| Y 4-220/5 | 220       | 5          | 697          | 620        | — | 2.45       |
| Y 4-220/6 | 220       | 6          | 807          | 730        | — | 2.70       |
| Y 4-220/8 | 220       | 8          | 1607         | 930        | — | 3.05       |

注：□□Y2、□□Y4型的安装孔为 $\phi 72$ [mm]。

## 11.7 交流电基本参数的测量

对空调工程的运行监视和耗能情况的了解，从而使系统的运行方式能有所控制和调整，是空调节能运行的一个重要手段。在这过程中对电气设备运行参数的检测也是一个重要方面。为此，本节就交流电流，电压和电功率等主要参数的测量方法与常用仪表作些基本介绍。

### 11.7.1 电工仪表的一般知识

仪表的级别是表示仪表准确度的等级。一般分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 级等。工程中常用仪表的等级数字 $\geq 1.5$ ，所谓几级仪表是指该仪表可能产生的误差为满标度的百分之几，并用带圈符号表示在表面上，比如 1.5 圈内所用数字表示仪表的级别。因此级别数字越小，其准确度就越高。有些检测工作中规定了所用仪表的级别就是为了控制参数测量的误差。如 0.1 级和 2.5 级满标度为 10[A] 的电流表，它们在整个量程范围内的绝对误差分别为  $10 \times 0.001 = 0.01$ [A] 和  $10 \times 0.025 = 0.25$ [A]。可见 0.1 级表的准确度比 2.5 级的要高得多。由于这类仪表的绝对误差是一常数，所以在低量程测量时所得参数的相对误差（即绝对误差与读数之比）比高量程时大。因此通常选择仪表量程时应使读数在满标度 2/3 以上为宜。

一般准确度高的仪表做成携带式作为标准或实验用，而工程中的仪表多为安装式(或称面板式)，且有不同外形尺寸可与操作屏面配合，以便于直视，这也是选择仪表中考虑的因素之一。

### 11.7.2 交流电压与电流的测量

#### 1. 交流电压的测量

在作电压测量时，测量仪表的工作线圈必须与所测线路并联，其接线方法见图 11.29。图 a 为电压表并联于所测线路，图 b 为用一个电压表和一个电压换相开关与三相电路的连接法，这种连接用于需要测量各相间电压时可减少两个电压表。熔断器  $RD$  是测量线路的短路保护。测量线路宜用多股绝缘导线连接。

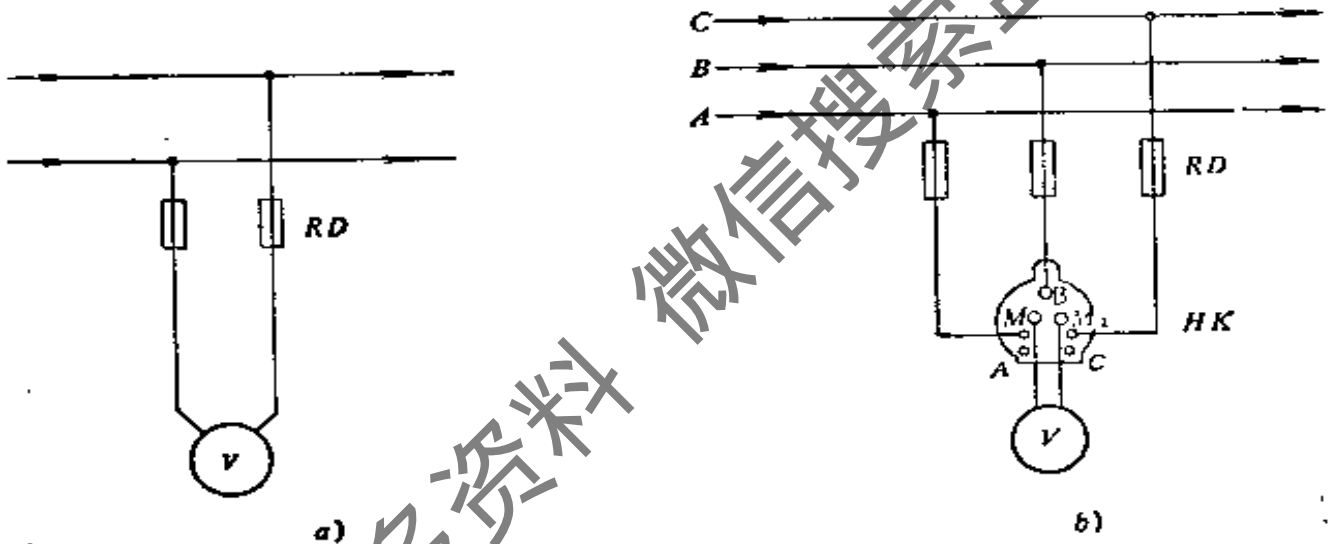


图 11.29 线路电压的测量

#### 2. 交流电流的测量

在作电流测量时，测量仪表的线圈必须与所测线路串联。其接线方法见图 11.30。图 a 为电流表直接串联在所测线路。图 b 为电流互感器的一次侧串联在线路中，它的二次侧线圈与电流表相连。图 c 为用两个电流互感器、一个电流换相开关和一个电流表分别测量三相线路电流的连接法。

电流互感器实际上是一种专用升压变压器。根据不同匝数比可以使一次侧的大电流在二次侧产生不同比例的高电压与小电流

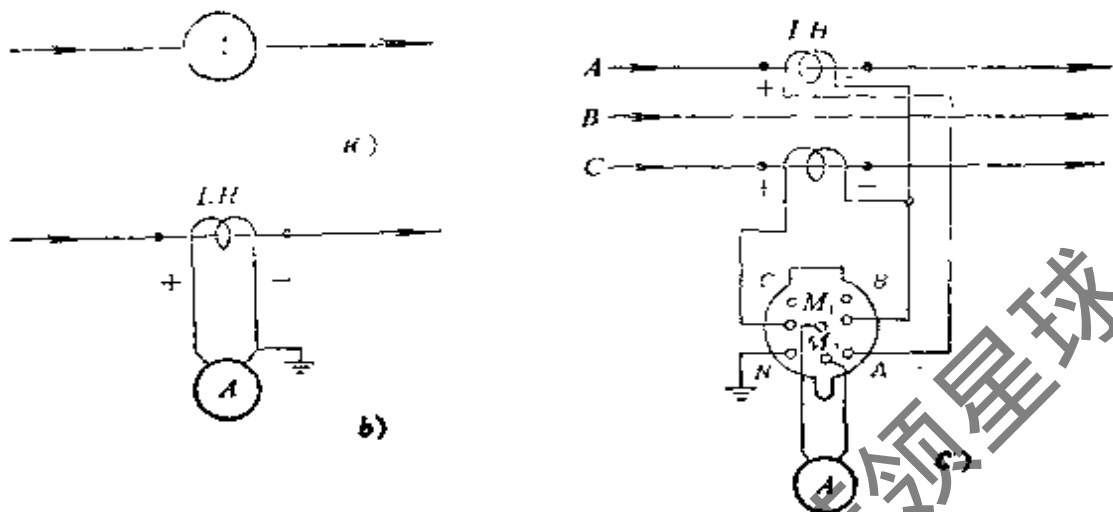


图 11.30 线路电流的测量

(一般为  $5[A]$ )。选用时,可根据线路电流的大小提出要求的电流比,如  $100[A]/5[A]$  表示一次侧电流为  $100[A]$  时二次侧输出为  $5[A]$ 。在使用时,其二次侧绕组不允许开路,否则将引起高电压,对人身及设备带来危险。同时二次侧还必须接地。在带负载情况下装拆仪表时,必须先将电流互感器的二次侧绕组短路后才能拆断仪表连接线,连接线截面采用  $1.5[\text{mm}^2]$  电流互感器二次侧电路中的仪表必须串联连接,而且所串联的仪表一般不多于 3 个。工程中可选用 LQG-0.5 型电流互感器,它的额定电压为  $500[V]$  电流比规格为  $5[A]/5[A] \sim 800[A]/5[A]$ , 准确度等级为 0.5 ~ 1 级。

钳形电流表是电流互感器与电流表组合在一起的交流电流表。测量时只要放开钳夹,将被测载流导线串在钳孔的中央并使钳夹开口处恢复到紧密结合的状态即可读数,不必拆开被测线路。如果仪表的量程过大又无法改变时,若有条件可将载流导线绕几圈放进钳孔,这样就可缩小量程,此时的实际电流值应为读数除以放进钳孔内的导线根数。有的钳形电表还可兼测电压,因此它是一种常用的现场检测仪表。

### 11.7.3 交流电功率的测量

在交流纯电阻负载电路中,电源输出的能量全部被电阻消耗,也就是电阻吸收有功功率( $N$ ),在纯电感负载电路中电感与电源间进行着能量互换而不消耗能量,但线路却有电流通过,即电感吸收无功功率( $Q$ ),而在电阻与电感串联的电路中(如电动机负载)电源与负载既有能量消耗又有能量互换,即既存在有功功率又有无功功率。在直流电路中,用电压与电流的乘积得到的电功率在交流电路中称之为视在功率( $S$ )。对于负载来说,其有功功率与视在功率的比值称之为功率因数  $\cos \varphi$  ( $\varphi$  为交流电流与电压间的相位差角),有功功率是视在功率的有功分量。

对于单相交流电路,它们间的关系可以表达为:

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{N}{S} = \frac{N}{UI} \\ N &= UI \cos \varphi \quad [\text{W}] \\ Q &= UI \sin \varphi \quad [\text{Var}] \\ S &= UI \quad [\text{VA}] \end{aligned} \right\} \quad (11.37)$$

对于对称三相交流电路,不论负载作 Y 或  $\Delta$  形连接,它们间的关系可以表达为:

$$\left. \begin{aligned} N &= 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi \\ S &= \sqrt{3} UI \\ Q &= \sqrt{3} UI \sin \varphi \\ \cos \varphi &= \frac{N}{\sqrt{3} UI} \end{aligned} \right\} \quad (11.38)$$

式中相位角  $\varphi$  是一相负载的相电压与相电流间的相位差,而不是线电压与线电流间的相位差。

在对交流电路的参数测量中,通常只要测出电压,电流和有功功率,则可算出其他各个参数。

有功功率通过功率表(或称瓦特表)进行测定,它有电流和电压两组线圈,电流线圈应串联在被测电路中,电压线圈则应并联在被测线路。仪表的指针偏转(即读数)与电压、电流及它们间相角差的余弦的乘积成正比。因为它的偏转与相角差有关,因此两个



线圈必须按照规定方式接线，仪表中两个线圈标有\*或±号的接线端应接在一起。对于大电流电路，则可用电流互感器的二次侧与仪表相连。此时应将读数乘以电流互感器一、二次侧的电流比。

### 1. 单相交流负载电功率的测量

单相交流负载电功率的测量线路见图 11.31。图 a 为功率表的电流线圈直接与电路相连。图 b 是通过电流互感器与仪表电流线圈相连接。

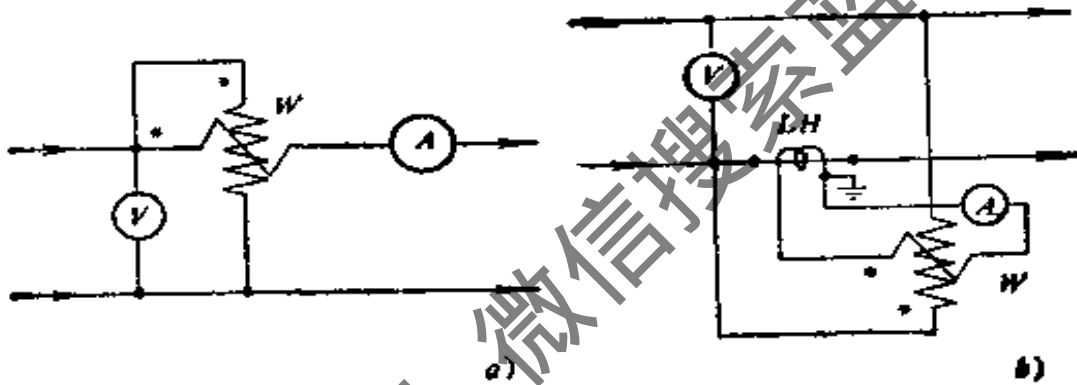


图 11.31 单相交流电路电功率的测量

### 2. 三相对称负载电功率的测量

根据三相对称负载的有功功率  $N = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$ ，可以知道三相电功率是一相电功率的 3 倍。故只要将一个单相功率表的电流线圈串联在任意一相负载中，电压线圈则并联在该相负载的两端即可测出该相的电功率。这种方法称之为“一瓦”法。对称三相负载作星形或三角形连接时用“一瓦”法的接线见图 11.32。当使用“一瓦”法测量三相电功率负载作星形连接时，负载中点必须能引出接线，在三角形连接时，其中一个顶端必须能断开，因此不具备上述条件时就不能采用“一瓦”法。

理论证明：对于三相三线供电制的电路中，不管负载是星形或三角形接法，不论三相负载是否对称，都可用“两瓦”法测量三相总

功率。但不能用于负载不对称的三相四线制供电线路中。

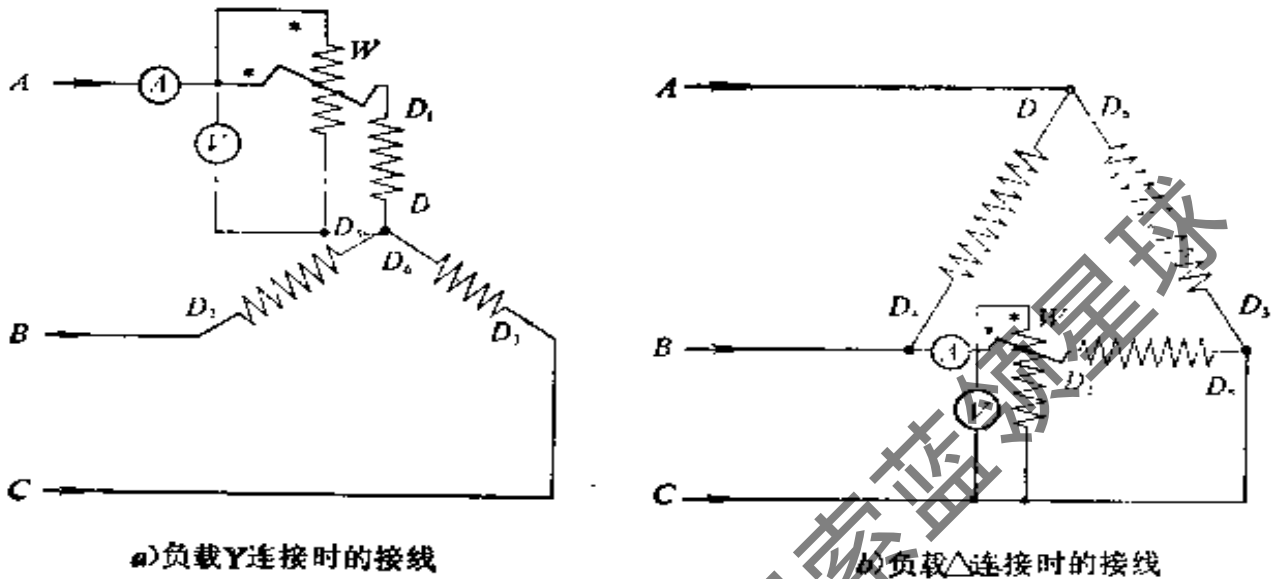


图 11.32 用“一瓦”法测量三相对称负载的电功率

所谓“两瓦”法就是用两个单相功率表，将它们的电流线圈分别串联在三相供电线路的任意两相中，其电压线圈则分别并联在这两相与另一相的线路上。其接线见图 11.33。三相交流的总功率等于两台功率计读数的代数和 ( $N = N_1 + N_2$ )。有时由于负载的特性关系，出现一台的指针反偏转而无法读数，此时只要将它的电流线圈反接（切不可将电压线圈接头反接以免引起静电误差甚至导致仪表损坏），这时就可以读得该仪表的读数，但此读数应是负值。总功率等于这两台仪表的读数差。因此在用“两瓦”法时应特别注意电流线圈与电压线圈有 \* 号处应接在同一端才有可能判别读数的正或负值。功率表的接线换接应如图 11.34 所示。

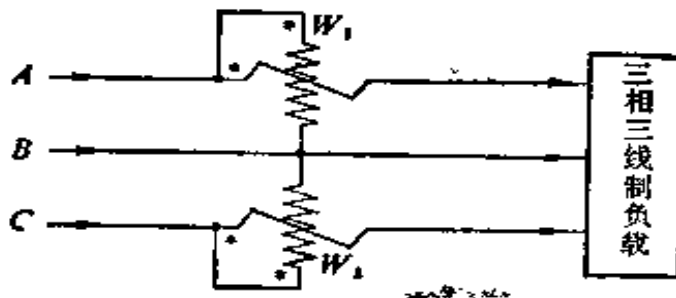


图 11.33 用“两瓦”法测量三相三线制负载的电功率

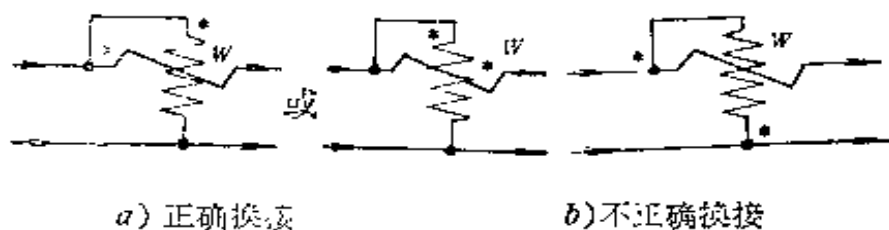


图 11.34 功率表接线的换接

三相有功功率表实际上相当于用“两瓦”法将两个单相功率表组合在一起的仪表,但它的指示值是两个单相功率表的代数和,即三相总功率。但仅适用于三相三线制或负载对称的三相四线制供电线路测量三相总功率。大量程电流则须配置电流互感器,它的外部接线见图 11.35。

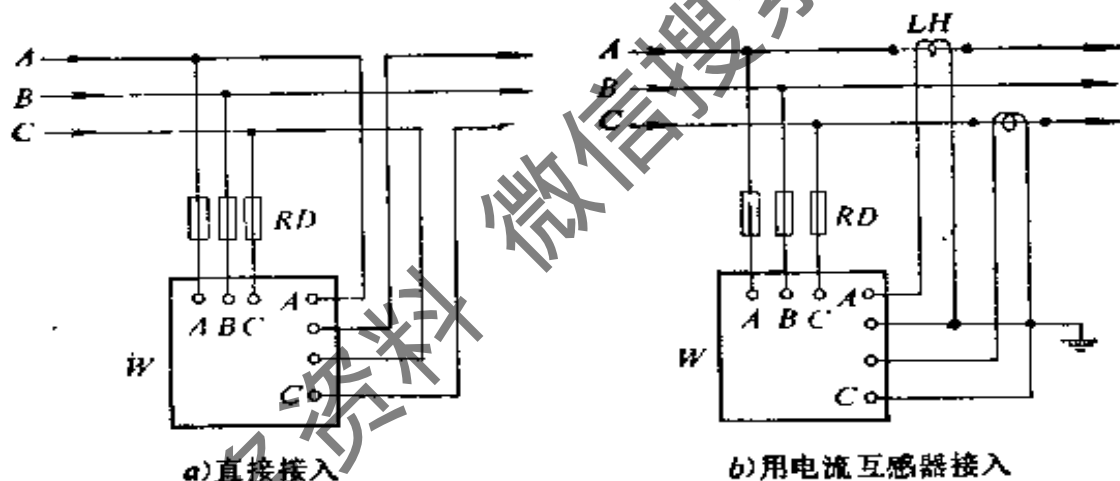


图 11.35 三相有功功率表的接线

在交流电路中有功率与时间的乘积为有功电能常说的 1 度电(1 [kwh])是表示有功功率为 1000[W]在 1 小时中所消耗的电能,它是供电部门的计费单位。有功电度表(或称瓦时表)是用积算器标示负载消耗有功电能的仪表,有单相、三相三线和三相四线有功电度表供不同线路中选用。接线时应按不同仪表规定的接线图接线。当与电流互感器配合使用时,实际消耗的电能应是积算器读数乘以电流互感器一、二次侧的电流比。

部分常用电表型号与规格见表 11.5'。

部分常用电表的型号与规格

表 11.51

| 名称    | 型 号               | 规 格  | 外形尺寸[mm]    | 准确度等级 |
|-------|-------------------|--|-------------|-------|
| 交流电压表 | 1 T 1-V<br>(安装式)  | 15; 30; 50; 75; 100;<br>150; 250; 300; 450; 500;<br>600[V] | 160×160     | 1.5   |
|       | 59 L 1-V<br>(安装式) | 3; 5; 7.5; 10; 15; 20<br>30; 50; 75; 100; 150              | 120×100     | 1.5   |
|       | 44 L 1-V<br>(安装式) | 200; 250; 300; 450<br>500; 600[V]                          | 100×80      |       |
|       | D 26-V<br>(携带式)   | 75/150/300;<br>125/250/500;<br>150/300/600[V]              | 266×193×133 | 0.5   |
| 交流电流表 | 1 T 1-A<br>(安装式)  | 0.5; 1; 2; 3; 5; 10;<br>15; 20; 30; 50 [A]                 | 160×160     | 1.5   |
|       | 59 L 1-A<br>(安装式) | 0.5; 2; 5; 10; 20 [A]<br>大于20[A]配用电流互<br>感器                | 120×100     | 1.5   |
|       | 44 L 1-A<br>(安装式) |  | 100×80      |       |
|       | D 26-A<br>(携带式)   | 0.5/1; 1/2; 2.5/5;<br>5/10; 10/20[A]                       | 266×193×133 | 0.5   |
| 钳形电表  | T-301-250 A       | 10/25/50/100/250[A]  |             | 2.5   |
|       | T-302-500 V       | 10/50/250/100[A];<br>250/500[V]                            |             |       |

续表11.51

| 名称      | 型号                | 规格  | 外形尺寸[mm]    | 准确度等级 |
|---------|-------------------|---|-------------|-------|
| 钳形电表    | MG 24-50 A        | 5/25/50[A];<br>300/600[V]   |             |       |
|         | MG 24-250A        | 5/50/250[A];<br>300/600[V]  |             |       |
| 单相有功功率表 | 42 L 6-W<br>(安装式) | 50:100:220 [V]<br>0.5:5[A]  | 120×120     | 2.5   |
|         | 44 L 1-W<br>(安装式) | 大于 5[A]配用电流互<br>感器  | 100×80      |       |
|         | 59 L 2-W<br>(安装式) |   | 120×100     |       |
|         | D 26-W<br>(携带式)   | 75/150/300<br>125/250/500<br>150/300/600[V]<br>0.5/1/1/2/2.5/5<br>5/10/10/20[A] | 266×193×133 | 0.5   |
| 三相有功功率表 | 42 L 6-W<br>(安装式) | 50:100:380[V]<br>0.5:5 [A]  | 120×120     | 2.5   |
|         | 44 L 1-W<br>(安装式) | 大于 5[A]配用电流互<br>感器  | 100×80      |       |
|         | 59 L 2-W<br>(安装式) |   | 120×100     |       |
|         | D 33-W<br>(携带式)   | 125/250/500<br>150/300/600[V]<br>0.5/1/2/2.5/5/10[A]                            | 266×193×167 | 1.0   |

| 名称            | 型号       | 规格  | 外形尺寸[mm]    | 准确度等级 |
|---------------|----------|---|-------------|-------|
| 单相有功<br>电度表   | DD 862-4 | 220[V]<br>5;10;20[A]                          | 167×113×118 | 2.0   |
| 三相三线<br>有功电度表 | DS 862-4 | 380[V];<br>5~20;10~40[A]<br>3~6[A]配用电流互感<br>器 | 273×172×124 | 2.0   |
| 三相四线<br>有功电度表 | DT 862-4 | 380[V]<br>5~20;10~40;<br>30~100[A]            | 273×172×124 | 2.0   |

获取更多资料 微信搜索 索蓝领星球

## 第二篇 制冷技术

所谓制冷，就是使某一空间或物体的温度降低到低于周围环境温度，并维持在规定的低温状态。实现制冷必须要有冷源，冷源有两类：天然冷源和人工冷源。天然冷源主要是指冬季贮藏的冰和夏季使用的低温深井水。

公元前 1000 多年，我国劳动人民已懂得采用天然冰进行食品冷藏和防暑降温。《诗经》就有“二之日凿冰冲冲，三之日纳于凌阴”的诗句。公元前 5 世纪，埃及人在尼罗河谷地把盛水陶罐放在屋顶上，利用地面对空间的辐射使水结冰。3000 年前，埃及有一幅壁画上画了一个奴隶在盛水土罐前挥动扇子使多孔土罐中的水加速蒸发，以获得较低温度的水。古代人获得天然冷源的简单操作，实际上完全符合现代热工理论的基本知识，为后来出现人工制冷奠定了基础。

由于人工制冷的能耗量极大，节省制冷能耗已成为当今世界各国节能工作中的重大课题。因此，在有条件的地区如何开发和利用天然冷源正日益受到重视。目前我国上海等地区，对深井水的利用已从原来的单纯抽吸而改为“冬灌夏用”，即冬季向井内充灌自来水或河水，夏季再抽出来作为空调冷源使用。“冬灌夏用”的合理充吸不但能防止上海地层的逐年下沉，而且能得到比天然深井水更低的温度，这一技术已引起各国重视。

天然冷源虽然具有较高的省能性和经济性，但是它的数量和温度毕竟有一定限度，使用场合也有一定条件，随着社会生产力的不断发展以及人民生活水平的日趋提高，用冷范围日益广泛，对温度要求也越来越低，天然冷源已远不能满足社会发展的要求。

1748年,一位苏格兰科学家观察到乙醚的蒸发会引起温度下降。1755年,他又在真空罩下制得了少量冰,同时发表了《液体蒸发制冷》的论文,因此人们通常把1755年作为人工制冷史的起点。从此以后,经过许多科学家的努力和热力学理论的发展,使人工制冷技术的应用逐步得到发展并开始进入商业市场。目前,制冷技术已发展成为一门独立学科,在国民经济各部门和人们日常生活中得到了广泛应用。

制冷技术的应用主要有以下几方面。

1. 空气调节。制冷装置可以用来降低空气的温度和含湿量,使车间保持所要求的温度和湿度,以利于电子元件、精密仪表、光学仪器等各种产品的制造和提高质量。制冷装置还用来为人们的工作和生活创造舒适环境,如高温车间降温,医院、会堂、宾馆、住宅、火车、轮船、飞机内的空气调节。

2. 食品冷藏。蔬菜、水果、鲜蛋等的低温保鲜贮存,肉、鱼、禽类等食品的冻结冷藏,以防食品变质和平衡食品的季节性生产与全年耗用之间的矛盾。

3. 生产工艺。某些产品,例如合成橡胶,合成纤维,气体液化,石油裂解和脱脂,以及许多重要化工原料的低温提取都需要有一定的冷源条件,以保证生产过程的顺利进行。

到目前为止,人工制冷已有许多种方法,不同的方法适用于不同的使用场合和制取不同的低温。在普通制冷范围内(即“普冷”范围内,约为 $10\sim-120[^\circ\text{C}]$ ),使用最普遍的是液体气体制冷法,利用该方法制冷的装置有三种形式:蒸气压缩式(简称压缩式);吸收式和蒸气喷射式(简称蒸喷式)。由于蒸喷制冷能耗量较大,目前已很少应用,本篇主要介绍蒸气压缩式和吸收式两种制冷方法的循环原理、设备、系统运行和调试等方面的知识。



## 第 12 章 蒸气压缩式制冷循环

由热力学实验知道,任何液体在沸腾过程中将要吸收热量,而且液体的沸腾温度(即饱和温度)随液体所处的压力而变化,压力越低,液体的饱和温度也越低。例如,1[kg]液态氟利昂22(R22),在5.84[bar]压力时的沸腾温度为5[°C],吸热量(单位质量潜热)为200.62[kJ/kg];当压力为2.96[bar]时,其沸腾温度降为-15[°C],吸热量变为217.00[kJ/kg]。而且不同液体的沸腾温度与压力、吸热量等数值也各不相同,这些数值可通过各种液体的饱和蒸气图表查得(见图13.1和表13.6~13.8)。因此,只要根据制冷所用液体(称制冷剂)的热力性质,并创造一定的压力条件,就可获得所要求的低温。

### 12.1 蒸气压缩式制冷循环的主要设备

实际用冷场合需要连续和稳定地供给冷量,为此必须使制冷剂进行循环,因为液态制冷剂在吸热制冷后即变为气态,只有使气态制冷剂全部重新回复到液态,上述目的才能实现。由制冷压缩机、冷凝器、膨胀阀(或毛细管)和蒸发器四大主件以及管路等组成的压缩式制冷系统,就是实现蒸气压缩式制冷循环,达到连续、稳定提供冷量的一套制冷装置,四大主件和制冷剂也就成为实现制冷所必须具备的条件。

图12.1是由四大主件构成的最简单的蒸气压缩式制冷装置,装置内充有一定质量的制冷剂。当压缩机在电机驱动下运行时,就能从蒸发器中吸入制冷剂,并使蒸发器中保持制冷所需要的相应压力 $P_0$ ,制冷剂在该压力下蒸发(实际上为沸腾),制冷剂的蒸发温度 $t_0$ 即为该压力下的饱和温度。压缩机吸入的气态制冷剂经在气缸内压缩后排入冷凝器,由于压缩后气态制冷剂的压力和温度

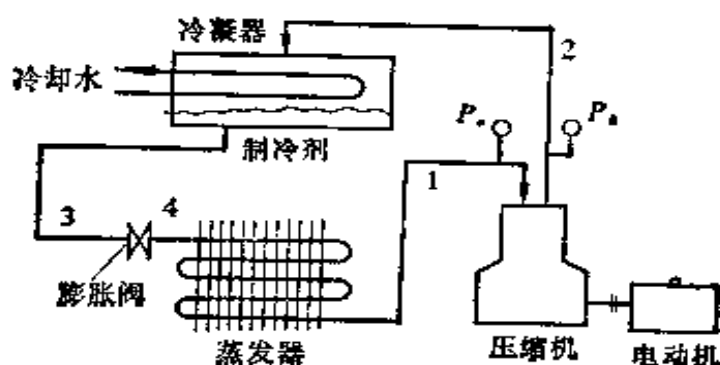


图 12.1 蒸气压缩式制冷装置

均相应提高,制冷剂在冷凝器中就可利用常温条件的水或空气冷凝,冷凝时的温度称为制冷剂的冷凝温度 $t_k$ ,冷凝温度与压缩机的排气压力 $P_k$ 也成饱和关系。当冷凝后的液态制冷剂流经膨胀阀时,由于该阀的孔径极小,使液态制冷剂在阀中由高压 $P_k$ 节流至低压 $P_0$ ,制冷剂的温度也降至相应压力下的饱和温度(即蒸发温度) $t_0$ 。经膨胀阀节流后的制冷剂绝大部分仍为液态,这些低温液态制冷剂在蒸发器中蒸发时就能从其周围的介质中吸收热量,并使用冷场合得到了相应的冷量和需要保持的低温。蒸发器的制冷剂完成制冷过程后又成为气态,然后再由压缩机吸入、压出,在冷凝器中再次冷凝。由上述制冷剂的流动过程可知,只要制冷装置正常运行,则在蒸发器周围就能获得连续和稳定的冷量,而这些冷量的取得必须以消耗能量(例如电机耗电)作为补偿。

## 12.2 蒸气压缩式理论制冷循环

利用液体气化制冷原理,使制冷剂从某一初态流经压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器后仍回复到初态的制冷循环,称为蒸气压缩式理论制冷循环(简称压缩式制冷循环)。最简单的压缩式制冷循环有四个热力过程组成(制冷剂流经每一个主件将产生一次状态变化,即为一个热力过程)。这些过程可以绘制在制冷剂的压力-焓图( $\lg P-h$ 图)和温-熵图( $T-S$ 图)上。只有将这些过程绘制在有关图上后,才能对制冷装置运行工况进行理论分析和热力计算。

因此，熟悉制冷剂的有关状态参数图以及热力过程的表示方法和变化，将成为学习压缩式制冷理论最重要的内容之一。

### 12.2.1 制冷剂的 $\lg P-h$ 图

制冷剂的  $\lg P-h$  图是用来分析和计算压缩式理论制冷循环最广泛的状态参数图之一。该图以制冷剂的焓( $h$ )值作为横坐标，绝对压力( $P$ )为纵坐标(图 12.2)。为了缩小图面，纵坐标压力采用  $\lg P$  分格(注意：从图上读得的数值仍为绝对压力值，而不是压力的对数值)。图中的  $c$  点为制冷剂的临界点， $c$  点左侧的粗实线为各个压力下的饱和液体线，该线上任何点的干度  $x=0$  (即全部为液体)。  $c$  点右侧粗实线为干饱和蒸气线，该线上任何点的干度  $x=1$  (即全部为蒸气)。这两条饱和线将图面分为三个区域：饱和液体线的左侧为过冷液体区(液体温度低于同压力下的饱和温度)；干饱和蒸气线的右侧为过热蒸气区(蒸气温度高于同压力下的饱和温度)；两条饱和线之间为湿蒸气区，制冷剂在湿蒸气区内处于气液两相混合状态，它的温度等于所处压力状态下的饱和温度，各点的  $x$  值反映了湿蒸气在该状态下蒸气含量的百分比。这样，制冷剂在某一压力下可能出现五种状态：即过冷液体、饱和液体、湿蒸气、干饱和蒸气和过热蒸气。制冷剂的五种状态在压缩式制冷循环中均会出现。

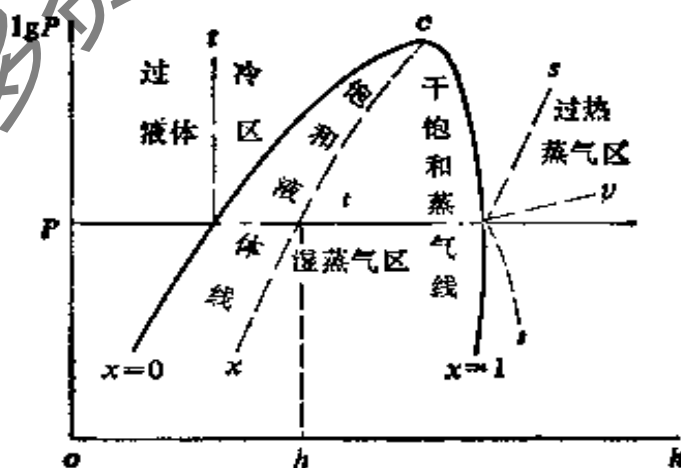


图 12.2 制冷剂的  $\lg P-h$  图

$\lg P-h$  图上还绘制了六种等状态线簇，即等压( $P$ )、等焓( $h$ )、

等温( $t$ )、等容( $v$ )、等熵( $s$ )和等干度 $x$ 线(图 12.2),线簇的详细分布和具体数值可参阅各制冷剂的  $\lg P-h$  图。应该指出,制冷剂在循环过程中所处的状态在图中均可以找到其状态点,状态点是根  
据制冷剂的状态参数确定的。当制冷剂处在过冷、湿蒸气和过热  
状态时,均要求知道两个状态参数才能确定,当处于饱和液体或气  
体状态时,仅需知道一个状态参数便能确定,在实际应用中,通  
常已知饱和压力  $P$  或饱和温度  $t$ ,因为各种制冷剂在饱和状态下的  
 $P-t$  关系早已由实验求得。当饱和状态点确定后,在该状态下的  
其他参数就可在  $\lg P-h$  图上查得,如果需要精确的数值,则可以  
查阅制冷剂饱和液体或蒸气的热力性质表现。以 R12 制冷剂为  
例说明如下:

【例 12.1】已知氟利昂 12(R12)制冷剂的饱和温度  $t = -5[^\circ\text{C}]$ ,则相应的饱和压  
力  $P = 2.612[\text{bar}]$ ,R12 在该状态下的其他参数见下表(摘自表 13.7)。

氟利昂 12 (R12)制冷剂在饱和温度为  $-5[^\circ\text{C}]$ 时的各种状态参数 表 12.1

| 饱和温度<br>[ $^\circ\text{C}$ ] | 饱和压力<br>[bar] | 比容<br>[l/kg] |        | 焓<br>[kJ/kg] |        | 潜热<br>[kJ/kg]               | 熵<br>[kJ/kg $^\circ\text{C}$ ] |        |
|------------------------------|---------------|--------------|--------|--------------|--------|-----------------------------|--------------------------------|--------|
|                              |               | 液态 $v'$      | 气态 $v$ | 液态 $h'$      | 气态 $h$ |                             | 液态 $s'$                        | 气态 $s$ |
| -5                           | 2.612         | 0.708        | 66.29  | 195.38       | 350.32 | 350.32 - 195.38<br>= 154.94 | 0.9330                         | 1.5609 |

【例 12.2】已知氟利昂 12(R12)制冷剂的饱和压力  $P = 9.634[\text{bar}]$ ,则相应的饱  
和温度  $t = 40[^\circ\text{C}]$ ,R12 在该状态下的其他参数见下表。

氟利昂 12 制冷剂在饱和压力  $P = 9.634[\text{bar}]$ 时的各状态参数 表 12.2

| 饱和温度<br>[ $^\circ\text{C}$ ] | 饱和压力<br>[bar] | 比容<br>[l/kg] |        | 焓<br>[kJ/kg] |        | 潜热<br>[kJ/kg]               | 熵<br>[kJ/kg $^\circ\text{C}$ ] |        |
|------------------------------|---------------|--------------|--------|--------------|--------|-----------------------------|--------------------------------|--------|
|                              |               | 液态 $v'$      | 气态 $v$ | 液态 $h'$      | 气态 $h$ |                             | 液态 $s'$                        | 气态 $s$ |
| 40                           | 9.634         | 0.799        | 18.26  | 238.52       | 368.60 | 368.60 - 238.62<br>= 129.98 | 1.1301                         | 1.5447 |

应该强调指出，制冷剂饱和液体和蒸气表中的数值仅反映两条饱和线上的状态参数，过冷液体、湿蒸气和过热蒸气则必须利用两个已知的状态参数在  $\lg P-h$  图上才能求得该状态下的其他参数(详见例 12.3)。

### 12.2.2 蒸气压缩式理论制冷循环在 $\lg P-h$ 图上的表示

熟悉蒸气压缩式制冷循环和制冷剂的  $\lg P-h$  图后，理论制冷循环在该图上的表示就十分容易。

在理论制冷循环中，制冷压缩机吸入干饱和蒸气，制冷剂状态点为1(见图 12.1和图12.3)，吸入压力为  $P_0$ 。(即蒸发压力)，温度为  $t_0$ 。(压力  $P_0$  下的饱和温度)，吸入蒸气经压缩机绝热压缩(沿等熵线  $s$  进行)后压力升至冷凝压力  $P_k$ ，由于气体压缩过程在过热区进行，压缩机排出气体状态为过热蒸气点2，理论排气温度为  $t_2$ 。当过热蒸气进入冷凝器后，受到冷却水或空气的冷却，制冷剂将逐渐放出热量，温度开始降低。当温度由  $t_2$  降至  $t_k$  (压力  $P_k$  下的饱和温度)时，制冷剂将开始冷凝、液化，整个冷凝过程在等压  $P_k$  和等温  $t_k$  下进行，直至制冷剂放出全部潜热，冷凝为饱和液体结束(状态点3)。当液体流经膨胀阀时，将产生绝热节流过程，压力由  $P_k$  降至  $P_0$ 。由于制冷剂在绝热节流前后的焓值不变，因此该过程可假设为沿等焓线进行，膨胀阀出口的制冷剂状态为点4(压力  $P_0$ ，温度  $t_0$ )。显然该状态的制冷剂处于湿蒸气区，说明制冷剂在节流过程中已有部分气化，成为气液两相的共存的湿蒸气状态 当这些湿蒸

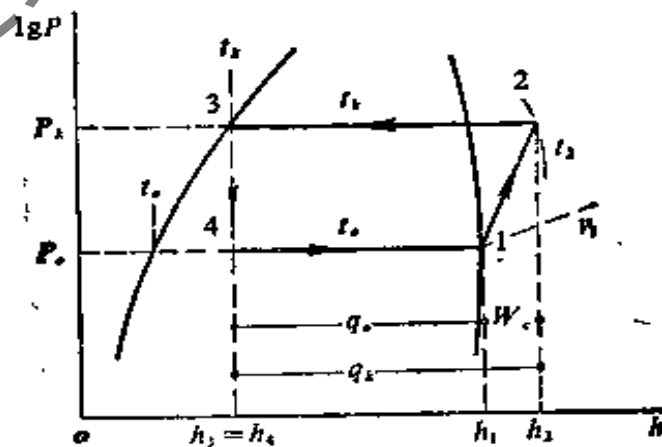


图 12.3 理论制冷循环在  $\lg P-h$  图上的表示

气进入蒸发器后，其中的液态制冷剂便在蒸发器中等压  $P$  下蒸发、吸热，从而达到了制冷目的。当蒸发器中的液态制冷剂全部蒸发结束，又回复到干饱和蒸气状态点 1 时，再次被压缩机吸入而进行循环。根据以上介绍可以知道，蒸气压缩式理论制冷循环实际上由四个过程组成：即绝热压缩过程 1-2（压缩机）；等压冷凝过程 2-3（冷凝器）；绝热节流过程 3-4（膨胀阀）和等压蒸发过程 4-1（蒸发器）。这四个过程依靠制冷装置中的四大主件完成。蒸气压缩式制冷装置中的四大主件可以有各种不同的结构和形式，有关详情在以后章节中介绍。

### 12.3 蒸气压缩式理论制冷循环的热力计算

进行蒸气压缩机理论制冷循环的热力计算有两个目的：

1. 设计计算。根据制冷装置设计运行工况和所需冷量，通过热力计算，为确定装置中各主要设备的容量提供数据。因为只有制冷装置中的各主要设备容量相互匹配时，才有可能保证制冷装置正常和经济地运行，并提供设计所需要的冷量；

2. 校核计算。根据制冷装置已有设备和运行工况，校核装置中各主要设备是否匹配，以及在该工况下能提供的冷量。

#### 12.3.1 热力计算的基本公式

在图 12.3 所示的蒸气压缩式理论制冷循环中，制冷剂的各种状态点已经确定，通过该工况在  $\lg P-h$  图上的状态点就可以方便地求得制冷剂的有关状态参数，并通过以下一些基本公式（根据制冷剂的稳定流动能量方程式导出）进行理论循环的热力计算。

蒸发器中为等压吸热过程，制冷剂的单位质量制冷量  $q_0$  为流出和进入蒸发器的制冷剂焓差

$$q_0 = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (12.1)$$

冷凝器中为等压放热过程，制冷剂的单位质量放热量  $q_k$  为

进、出冷凝器的制冷剂焓差

$$q_k = h_2 - h_3 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (12.2)$$

压缩机为绝热压缩过程，制冷剂的单位质量压缩功  $W_o$  为压缩机排出和吸入的制冷剂焓差

$$W_o = h_2 - h_1 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (12.3)$$

膨胀阀为绝热节流过程，制冷剂进、出膨胀阀的焓值不变

即

$$h_3 = h_4 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (12.4)$$

制冷剂的单位容积制冷量，即压缩机吸入  $1[\text{m}^3]$  制冷剂蒸气所产生的冷量为

$$q_v = \frac{q_o}{v_1} = \frac{h_1 - h_4}{v_1} \quad [\text{kJ/m}^3] \quad (12.5)$$

式中  $v_1$ ——压缩机吸入蒸气的比容， $[\text{m}^3/\text{kg}]$ 。

若制冷装置在上述工况  $(t_k, t_o)$  下运行时的总冷量为  $Q_o$   $[\text{kW}]$ ，则制冷装置中制冷剂的质量流量  $M_r$ （即制冷剂在单位时间内流经四大主件的质量流量）和压缩机每秒吸入的气态制冷剂体积量  $V_r$  为

$$M_r = \frac{Q_o}{q_o} = \frac{Q_o}{h_1 - h_4} \quad [\text{kg/s}] \quad (12.6)$$

$$V_r = M_r v_1 = \frac{Q_o}{q_o} v_1 = \frac{Q_o}{q_v} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (12.7)$$

冷凝器的热负荷（即制冷剂在冷凝器中的总放热量）为

$$Q_k = M_r (h_2 - h_3) \quad [\text{kW}] \quad (12.8)$$

压缩机的理论耗功率为

$$N_{th} = M_r (h_2 - h_1) \quad [\text{kW}] \quad (12.9)$$

制冷装置的理论制冷系数（或 COP 值）为

$$\varepsilon_{th} = \frac{Q_o}{N_{th}} = \frac{q_o}{W_o} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (12.10)$$

理论制冷系数表明制冷压缩机每消耗  $1[\text{kW}]$  理论功率时，制冷装置所能提供的冷量。显然， $\varepsilon_{th}$  越大，制冷装置运行的省能性

和经济性越好。

### 12.3.2 液态制冷剂过冷和吸气过热的理论制冷循环

应该指出，在制冷循环过程中，膨胀阀前的液态制冷剂温度通常低于它的冷凝温度  $t_k$ ，即液态制冷剂处于过冷状态。制冷剂的冷凝温度  $t_k$  与过冷温度  $t_u$  之差称为液体的过冷度。制冷剂的过冷可通过增大冷凝器传热面积或者用增设过冷器的方法获得。膨胀阀前液态制冷剂过冷不但能降低进入蒸发器的制冷剂焓值  $h_3$ ，增加单位质量制冷量  $\Delta q_0$ （图 12.4），而且能防止阀前出现闪发气体，影响制冷装置的正常运行。

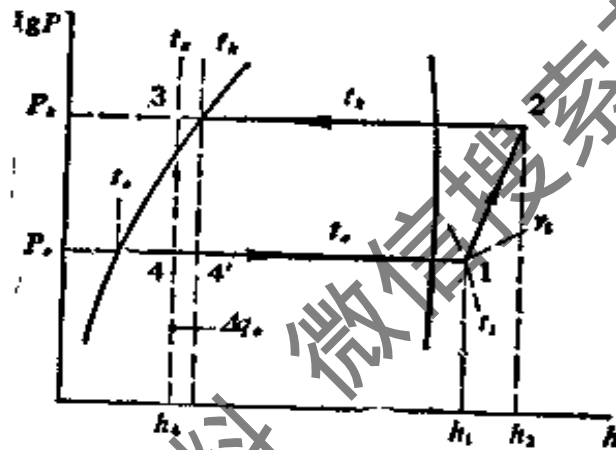


图 12.4 具有液态过冷和吸气过热的理论循环

另外，压缩机吸入的制冷剂通常为过热蒸气，而不是干饱和蒸气，因为干饱和蒸气接近湿蒸气状态，如果制冷装置运行工况稍有变化，压缩机就可能吸入湿蒸气，湿蒸气中的液滴将使压缩机气缸产生液击（即冲缸），损坏阀片。特别是对于往复式压缩机，尤应重视。压缩机吸入过热蒸气温度  $t_1$  与蒸发温度  $t_0$  之差称为吸气过热度，压缩机在实际运行时的吸气过热度与制冷装置的工况和所用制冷剂种类有关，对于氟利昂制冷剂约为  $10[^\circ\text{C}]$ ，对于氨制冷剂约为  $5[^\circ\text{C}]$ 。

由图 12.4 可知，确定制冷循环过程必须知道四个温度，即冷凝温度  $t_k$ 、蒸发温度  $t_0$ 、过冷温度  $t_u$  和吸气温度  $t_1$ ，这四个温度称为压缩式制冷装置运行（或制冷循环）的工况参数。



为了进一步理解和掌握蒸气压缩式理论制冷循环的计算方法,现举例如下:

**【例 12.3】** 某空调制冷装置(制冷剂为 R 12) 的制冷量  $Q_0 = 50$  [kW] (43000 [kcal/h]), 制冷剂的冷凝温度  $t_k = 40$  [°C], 蒸发温度  $t_0 = 3$  [°C], 过冷温度  $t_{c3} = 36$  [°C], 吸气温度  $t_1 = 13$  [°C], 试进行该工况下的理论制冷循环热力计算。

**【解】** 根据四个工况温度, 在 R12 制冷剂的 1g  $P-h$  图上画出理论制冷循环过程并求得各状态点的有关参数值, 然后进行热力计算。

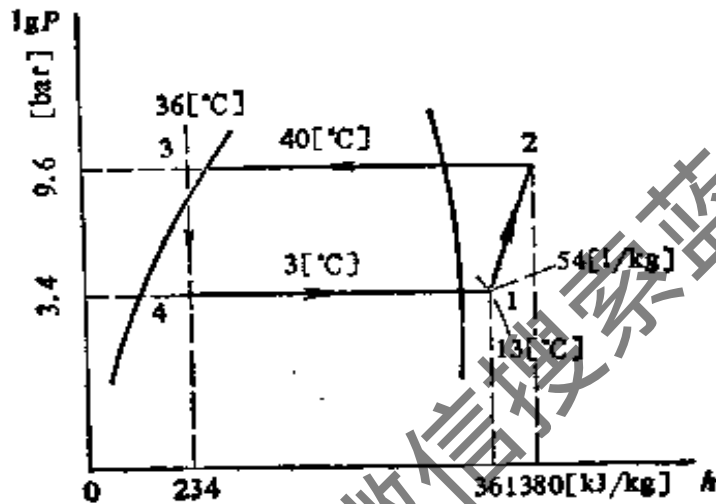


图 12.5 循环过程和状态点参数值

制冷剂的单位质量制冷量  $q_0$  和单位容积制冷量  $q_v$

$$q_0 = h_1 - h_4 = 361 - 234 = 127 \text{ [kJ/kg]}$$

$$q_v = \frac{q_0}{v_1} = \frac{127}{0.054} = 2351.9 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

制冷剂的质量流量  $M_r$  和压缩机的吸气量  $V_r$

$$M_r = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{50}{127} = 0.394 \text{ [kg/s]}$$

$$V_r = M_r v_1 = 0.394 \times 0.054 = 0.021 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

冷凝器热负荷  $Q_k$

$$Q_k = M_r (h_2 - h_3) = 0.394 (380 - 234) = 57.52 \text{ [kW]} (49467.2 \text{ [kcal/h]})$$

压缩机的理论耗功率  $N_{th}$

$$N_{th} = M_r (h_2 - h_1) = 0.394 (380 - 361) = 7.49 \text{ [kW]}$$

理论制冷系数  $\varepsilon_{th}$

$$\varepsilon_{th} = \frac{q_0}{h_2 - h_1} = \frac{127}{380 - 361} = 6.68$$

### 12.3.3 回热制冷循环

如果制冷剂在循环过程中的膨胀阀前过冷和压缩机吸气过热不是通过与外界介质的热交换，而主要是利用流出蒸发器的低温制冷剂蒸气与流出冷凝器的液体制冷剂进行热交换，这种循环称为回热制冷循环。回热制冷循环流程及其在  $\lg P-h$  图上的表示如图 12.6 和图 12.7 所示。为了实现这种循环，在制冷系统中通常增设一只热交换器(在小型制冷装置中，也可把压缩机吸气管与冷凝器出液管紧箍在一起，外加保温材料)以实现换热过程。

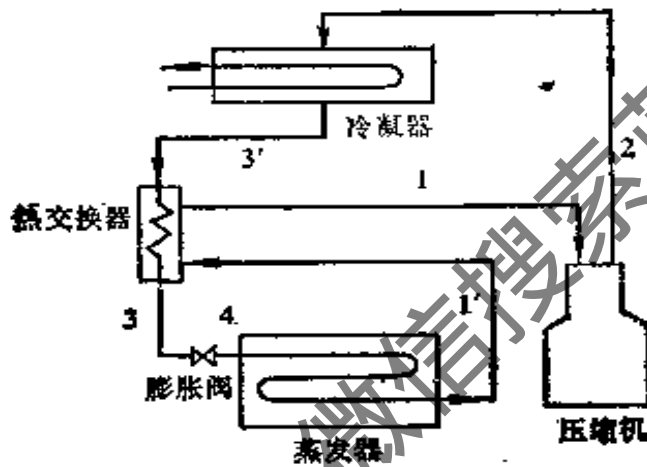


图 12.6 回热循环流程

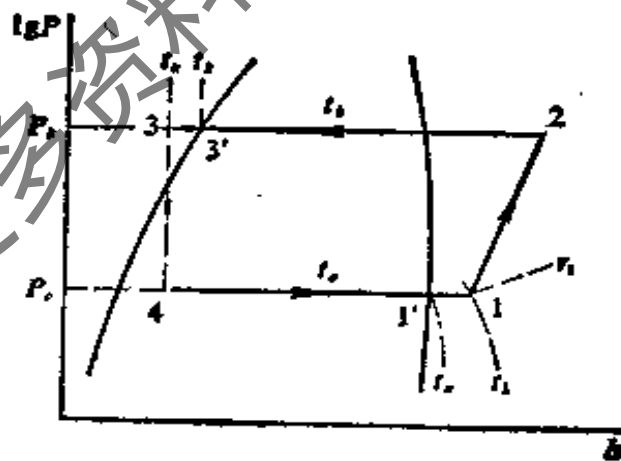


图 12.7 回热循环在  $\lg P-h$  图上的表示

在图 12.7 所示的回热循环中可以看到，制冷剂的过冷为  $3'-3$ ，过热为  $1'-1$ ，如果不考虑两者在传热过程中的热量损失，则

$$h_3 - h_3 = h_1 - h_1' [\text{kJ/kg}] \quad (12.11)$$

或者

$$c(t_k - t_u) = c'(t_1 - t_o) [\text{kJ/kg}] \quad (12.12)$$

式中  $c$  为制冷剂的液体比热,  $c'$  为气体比热。因为制冷剂的液体比热总大于气体比热, 所以回热循环中的气体过热度总大于液体过冷度。

【例12.4】某氟利昂12回热制冷循环的工况条件如下:

冷凝温度  $t_k = 35[^\circ\text{C}]$ , 冷凝器出口的制冷剂为饱和液体;

蒸发温度  $t_o = 5[^\circ\text{C}]$ , 蒸发器出口为干饱和蒸气;

膨胀阀前液态制冷剂的过冷温度  $t_u$  为  $30[^\circ\text{C}]$ ;

试求该回热循环的压缩机吸气温度  $t_1$  和理论制冷系数。

【解】根据  $t_k = 35[^\circ\text{C}]$  和  $t_o = 5[^\circ\text{C}]$ , 在 R 12 制冷剂的  $\lg P-h$  图上(图 12.8)可画出  $P_k = 8.5[\text{bar}]$  和  $P_o = 3.6[\text{bar}]$  两条等压线, 在饱和液体线上找出  $30[^\circ\text{C}]$  点, 并通过该点作横坐标的垂直线, 与  $P_k$  和  $P_o$  线交 3 和 4 两点。显然, 点 3 表示膨胀阀前过冷液体制冷剂的状态。通过  $P_k$  线与饱和液体线的交点 3' 作横坐标的垂直线, 显然点 3' 表示流出冷凝器的饱和液体制冷剂状态。然后通过  $P_o$  线与饱和蒸气线的交点 1' 作横坐标的垂直线, 则点 1' 为流出蒸发器的干饱和制冷剂状态。这样, 通过三条垂直线与焓( $h$ )轴的交点可查得

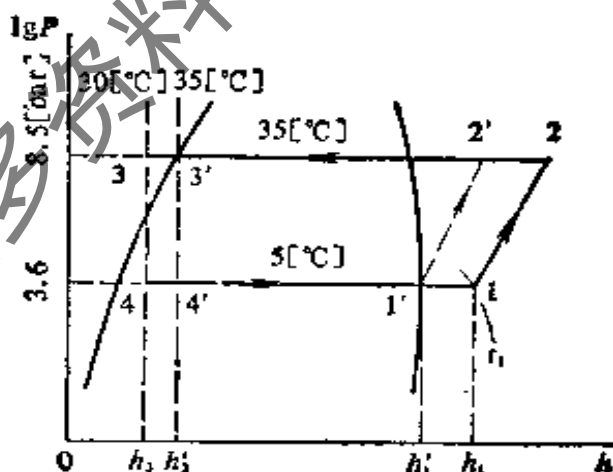


图 12.8 回热循环

$$h_3 = h_3 = 229 [\text{kJ/kg}];$$

$$h_2 = 234 [\text{kJ/kg}];$$

$$h_1 = 354 [\text{kJ/kg}].$$

由公式(12.11)可求得  $h_1$  为

$$h_1 = (h_3' - h_3) + h_{1'} = (234 - 229) + 354 = 359 [\text{kJ/kg}]$$

根据  $h_1$  等焓线  $359 [\text{kJ/kg}]$  与  $P_0$  等压线的交点得压缩机吸入状态点 1, 然后通过该点查得吸入蒸气温度  $t_1$  约为  $13 [^\circ\text{C}]$ 。该回热循环的过冷度为  $(35 - 30) = 5 [^\circ\text{C}]$ , 而吸气过热度为  $(13 - 5) = 8 [^\circ\text{C}]$ , 显然过热度大于过冷度。

当确定状态点 1 后, 再通过点 1 沿等熵线向上与  $P_k$  等压线交点 2, 则点 2 即为压缩机排出的过热蒸气。该点焓值  $h_2 = 374 [\text{kJ/kg}]$ 。这样, 就可求得制冷剂的单位压缩功  $W_c$  为

$$W_c = 374 - 359 = 15 [\text{kJ/kg}]$$

单位质量制冷量  $q_0$  为

$$q_0 = h_1 - h_4 = 354 - 229 = 125 [\text{kJ/kg}]$$

(或者  $q_0 = h_1 - h_4 = 359 - 234 = 125 [\text{kJ/kg}]$ , 但不能用  $(h_1 - h_4)$  焓差值计算)。

回热制冷循环的理论制冷系数为

$$e_{th} = \frac{q_0}{W_c} = \frac{125}{15} = 8.33$$

【例 12.5】若冷凝温度  $t_k = 35 [^\circ\text{C}]$ , 蒸发温度  $t_0 = 5 [^\circ\text{C}]$ , 膨胀阀前液体制冷剂无过冷 ( $t_3 = t_k$ ), 压缩机吸气也不过热 ( $t_1 = t_0$ ), 试求该制冷循环的理论制冷系数, 并与例 12.4 回热循环进行比较 (制冷剂均为 R12)。

【解】根据本题给出的制冷循环工况温度, 在图 12.8 上可用循环过程  $4'1'2'3'4'$  表示, 该循环的理论制冷系数为

$$e_{th'} = \frac{q_0'}{W_c'} = \frac{h_1' - h_4'}{h_2' - h_1'} = \frac{354 - 234}{369 - 354} = 8.00$$

比较例 12.5 和例 12.4 两种制冷循环的理论制冷系数可以发现, 回热制冷循环的理论制冷系数将提高

$$\frac{e_{th} - e_{th'}}{e_{th'}} = \frac{8.33 - 8.00}{8.33} \times 100\% = 4.0\%$$

理论计算和实验均可证明, 在实际应用中是否应采用回热循环, 以及回热循环对理论制冷系数能提高多少, 与制冷剂性质和制冷装置运行工况有关, 对于 R12、R22 和 R502 等制冷剂是有利的, 而对于氨 ( $\text{NH}_3$ )、R11 等制冷剂是不利的。

#### 12.3.4 双级制冷循环

上述介绍的蒸气压缩式制冷循环均属单级制冷循环, 即来自蒸发器的蒸气经压缩机一次压缩后便送入冷凝器中冷凝。单级制冷循环仅适应于  $-25 \sim -30 [^\circ\text{C}]$  以上的蒸发温度, 如果需要获得

更低的温度，则单级循环将对制冷装置的运行产生许多有害因素。

图 12.9 表示了蒸发温度由  $t_0$  降至  $t'_0$  的制冷循环变化过程 (为了方便起见,  $t_k$  和  $t_u$  保持不变), 由图中循环过程变化可见, 当蒸发温度降低时:

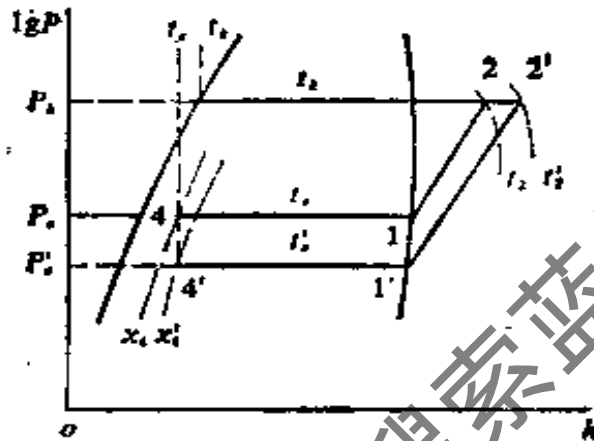


图 12.9 蒸发温度变化对制冷循环的影响

1) 压缩机的排气温度由  $t_2$  增至  $t'_2$ 。过高的排气温度不但会使润滑油碳化, 而且会降低粘度, 这些因素均可能影响压缩机的寿命和正常运行。特别是对于封闭式压缩机, 过高的排气温度还会危及电机的使用寿命;

2) 压力比增大。压缩机的排气压力与吸气压力之比称之为压缩机的压力比, 在理论制冷循环中, 压力比可用  $P_k/P_0$  表示。当蒸发温度下降时, 压力比由  $P_k/P_0$  增至  $P_k/P'_0$ 。压力比是压缩机的重要运行参数, 当压力比增大时, 压缩机的容积效率下降 (第 14 章介绍), 实际吸气量减少 (即制冷剂的循环质量减少), 制冷量下降;

3) 节流损失增加。当蒸发温度由  $t_0$  降至  $t'_0$  时, 制冷剂的单位质量压缩功增大, 进入蒸发器的制冷剂蒸气干度由  $x_1$  增至  $x'_1$ , 干度增加, 意味着进入蒸发器中的制冷剂蒸气含量增加, 而这些蒸气在蒸发器中已失去吸热、制冷能力, 从而使制冷装置的制冷量和制冷系数均相应下降。

因此, 当蒸发温度低于  $-25 \sim -30 [^{\circ}\text{C}]$  时, 采用双级制冷循

环能使上述的不利影响得到改善。双级制冷循环通常采用以下两种形式,现分述如下。

1. 一次节流、完全中间冷却的双级制冷循环

图 12.10 a 为该循环的流程图,它与单级制冷循环的主要区别是:制冷剂蒸气分别在高、低压气缸中进行两次压缩;增设了一只中间冷却器和一只膨胀阀;高、低压气缸中的制冷剂循环量不相同,高压级气缸的质量流量大于低压缸流量。制冷剂的循环过程如下所述。

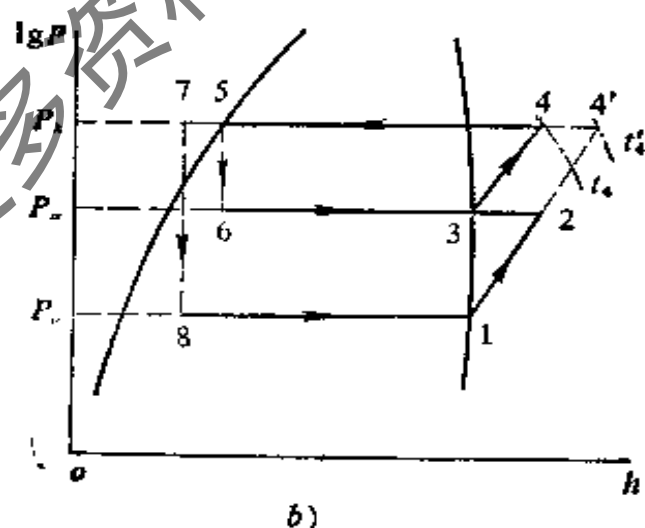
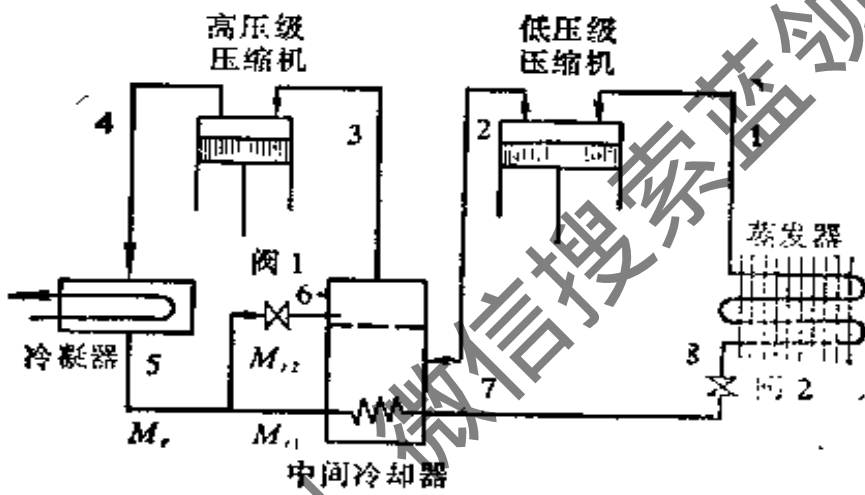


图 12.10 一次节流、完全中间冷却的双级制冷循环

高压级气缸吸入来自中间冷却器中状态3的干饱和蒸气,经绝

冷凝液体分为两部分,其中少部分经膨胀阀②节流至状态6(中间压力 $P_m$ ),这部分低温湿蒸气用来冷却大部分经未经节流的饱和液体5,以及由低压级气缸排入中间冷却器中的过热蒸气2,它们的状态变化分别为5-7和2-3过程。过冷液体7经节流阀①一次节流为状态8的低压湿蒸气,然后进入蒸发器中吸热、制冷并气化为状态1,这部分蒸气再由低压级气缸吸入和压缩后(状态2)排入中间冷却器中冷却为状态3的干饱和蒸气。从图12.10b中的制冷循环可以知道,当 $t_k$ 和 $t_0$ 一定后,双级制冷循环可以达到以下目的:

- 1) 降低排气温度( $t_4 < t'_4$ );
- 2) 降低压力比(高压级气缸 $P_k/P_m$ ,低压级气缸 $P_m/P_0$ ,均小于单级压力比 $P_k/P'_0$ );
- 3) 减少节流损失(因为膨胀阀①前的制冷剂已充分过冷,节流后的 $x_8$ 较小)。

如果已知一次节流,完全中间冷却双级制冷循环的冷凝温度为 $t_k$ (或冷凝压力 $P_k$ ),蒸发温度为 $t_0$ (或蒸发压力为 $P_0$ ),则该循环的热力计算步骤和计算公式如下:(各状态参数参照图12.10)

中间压力

$$P_m = \sqrt{P_k P_0} \text{ [bar]} \quad (12.13)$$

通过蒸发器的制冷剂质量流量

$$M_{r1} = \frac{Q_0}{h_1 - h_8} \text{ [kg/s]} \quad (12.14)$$

经过膨胀阀②的制冷剂质量 $M_{r2}$ 可用中间冷却器热平衡式求得。进入中间冷却器的制冷剂放热量为

$$M_{r1}(h_2 - h_3) + M_{r1}(h_5 - h_7)$$

中间冷却器中制冷剂的吸热量为

$$M_{r2}(h_3 - h_6)$$

若中间冷却器外壳有较好的绝热,不考虑与外界的热交换

$$\text{则 } M_{r1}(h_2 - h_3) + M_{r1}(h_5 - h_7) = M_{r2}(h_3 - h_6)$$

$$M_{r2} = M_{r1} \frac{(h_2 - h_3) + (h_5 - h_7)}{(h_3 - h_6)}$$

$$= Q_0 \frac{(h_2 - h_3) + (h_5 - h_7)}{(h_1 - h_2)(h_3 - h_6)} \quad [\text{kg/s}] \quad (12.15)$$

高压级气缸吸入的制冷剂质量为

$$M_r = M_{r1} + M_{r2} \quad [\text{kg/s}] \quad (12.16)$$

冷凝器的热负荷为

$$Q_k = M_r (h_4 - h_5) \quad [\text{kW}] \quad (12.17)$$

低压级压缩机吸入的制冷剂体积量为

$$V_{r1} = M_{r1} v_1 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (12.18)$$

高压级压缩机吸入的制冷剂体积量为

$$V_{r2} = M_{r2} v_3 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (12.19)$$

低压级压缩机的理论耗功率为

$$N_{t,1} = M_{r1} (h_2 - h_1) \quad [\text{kW}] \quad (12.20)$$

高压级压缩机的理论耗功率为

$$N_{t,2} = M_{r2} (h_4 - h_3) \quad [\text{kW}] \quad (12.21)$$

理论制冷系数为

$$\varepsilon_{th} = \frac{Q_0}{N_{t,1} + N_{t,2}} \quad (12.22)$$

## 2. 一次节流、不完全中间冷却的双级蒸气压缩式制冷循环

该循环(图 12.11)与上述双级制冷循环的主要区别在于低压级气缸排出的气体(状态 2)不进入中间冷却器冷却,而直接与来自中间冷却器的干饱和蒸气(状态 3')相混合(状态 3),然后再由高压级气缸吸入并压缩。同时在系统中增设了回热热交换器,使流出蒸发器的低温蒸气由  $t_0$  升至  $t_1$ ,而流出中间冷却器的过冷液体(状态 7)再进一步过冷至状态 8。显然这种制冷循环特别适用于 R 12、R 22 等氟利昂制冷系统,而一次节流、完全中间冷却的双级制冷循环主要用于大型氨制冷系统。

如果该循环的冷凝温度为  $t_k$ ,蒸发温度为  $t_0$ ,流出中间冷却器的制冷剂过冷温度为  $t_7$ ,中间冷却器中的传热温差  $\Delta t = t_7 - t_0$ ,



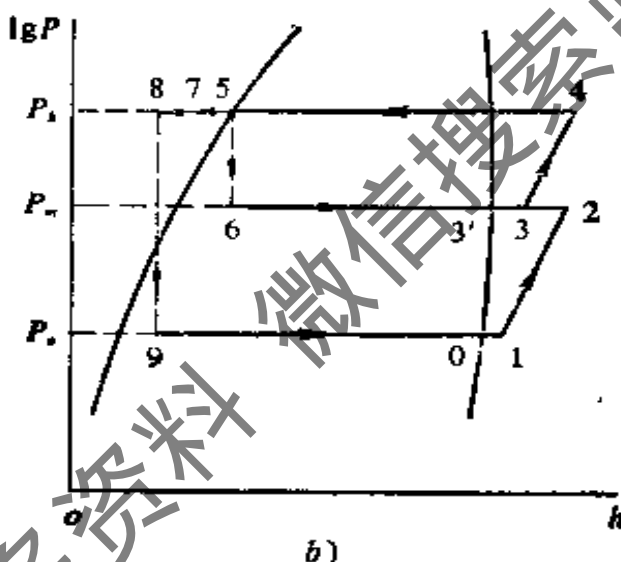
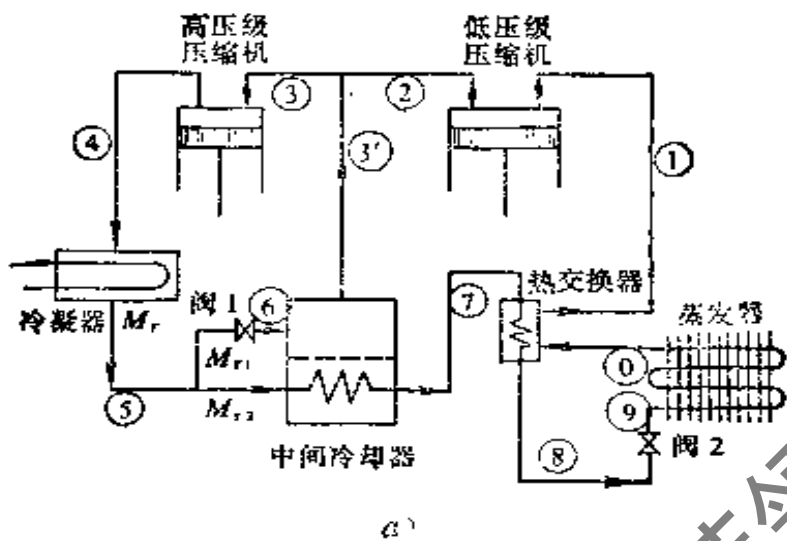


图 12-11 一次节流、不完全中间冷却的双级制冷循环

低压级气缸吸入蒸气的过热度  $\Delta t' = t_1 - t_o$ ，制冷量为  $Q_o$ ，则一次节流、不完全中间冷却的双级制冷循环可按下述步骤进行热力计算。

首先根据已知的  $t_k$  和  $t_o$  ( $P_k, P_o$ )，求得双级循环的中间压力

$$P_m = \sqrt{P_k \cdot P_o} \quad [\text{bar}]$$

然后在制冷剂的  $\lg P-h$  图上画出  $P_k, P_o$  和  $P_m$  三条等压线，利用等压线与饱和液体或蒸气线的交点可求出有关状态的参数值。由图 12-11 可知， $h_o$  (等于  $h_5$ ) 可直接从  $\lg P-h$  图中查得， $t_o$  为中间压力  $P_m$  的饱和温度。这样，流出中间冷却器的过冷液体温度

$t_7 = t_6 + \Delta t$  就已确定 ( $h_7$  也可查得)。由于采用回热热交换器, 则制冷剂在热交换器中的单位质量换热量为

$$(h_1 - h_0) = (h_7 - h_8)$$

所以

$$h_8 = h_7 + h_0 - h_1 \quad [\text{kJ}/\text{kg}] \quad (12.23)$$

由于低压级气缸吸入蒸气的焓值  $h_1$  可根据  $P_0$  和  $(t_1 + \Delta t)$  求得, 而  $h_0$  可根据  $P_0$  和饱和蒸气线的交点查得 ( $h_1$  已经在前而查得), 这样  $h_8$  就可用公式 (12.23) 算出。

通过蒸发器的制冷剂质量流量为

$$M_{r1} = \frac{Q_0}{h_0 - h_8} = \frac{Q_0}{h_0 - h_8} \quad [\text{kg}/\text{s}]$$

中间冷却器的热平衡式为

$$M_{r1}(h_3' - h_6) = M_{r2}(h_5 - h_7) \quad [\text{kW}]$$

通过膨胀阀 ② 的制冷剂质量流量为

$$M_{r2} = M_{r1} \frac{h_5 - h_7}{h_6 - h_8} \quad [\text{kg}/\text{s}]$$

高压级气缸吸入的蒸气来自中间冷却器 (状态 3') 和低压级气缸直接排出的中压蒸气 (状态 2), 根据这两部分蒸气混合前后的热平衡关系可求得焓值  $h_3$ ,

$$\text{即} \quad M_{r1}h_2 + M_{r2}h_{3'} = (M_{r1} + M_{r2})h_3 = M_r h_3 \quad [\text{kW}]$$

所以

$$h_3 = \frac{M_{r1}h_2 + M_{r2}h_{3'}}{M_r} \quad [\text{kJ}/\text{kg}] \quad (12.24)$$

冷凝器的热负荷为

$$Q_c = (M_{r1} + M_{r2})(h_4 - h_5) \quad [\text{kW}]$$

低压级压缩机吸入的制冷剂体积量为

$$V_{r1} = M_{r1}v_1 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

高压级压缩吸入的制冷剂体积量为

$$V_{r2} = M_{r2}v_3 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

热压缩后为状态 4 的过热蒸气, 并排入冷凝器中冷凝。状态 5 的

低压级压缩机的理论耗功率为

$$N_{th1} = M_{r1}(h_2 - h_1) \text{ [kW]}$$

高压级压缩机的理论耗功率为

$$N_{th2} = M_r(h_4 - h_3) \text{ [kW]}$$

理论制冷系数为

$$\epsilon_{th} = \frac{Q_0}{N_{th1} + N_{th2}}$$

【例 12.4】一次节流、不完全中间冷却的双级蒸气压缩式制冷循环（制冷剂为 R 22），其运行工况为  $t_k = 40[^\circ\text{C}]$ ， $t_0 = -40[^\circ\text{C}]$ ，中间冷却器中制冷剂的传热温差  $\Delta t = 6[^\circ\text{C}]$ ，低压级气缸吸入蒸气的过热度为  $30[^\circ\text{C}]$ （设回热热交换器）。当制冷量  $Q_0$  为  $15[\text{kW}]$ （ $12900[\text{kcal/h}]$ ）时，试进行该循环的热力计算，并与工况为  $t_k = 40[^\circ\text{C}]$ ， $t_0 = -40[^\circ\text{C}]$ 、 $t_m = 35[^\circ\text{C}]$  和  $t_1 = -10[^\circ\text{C}]$  的单级制冷循环进行比较。

【解】制冷循环流程如图 12.11 a 所示，各状态点和有关数值示于图 12.12。根据已知条件，按下述步骤进行计算。

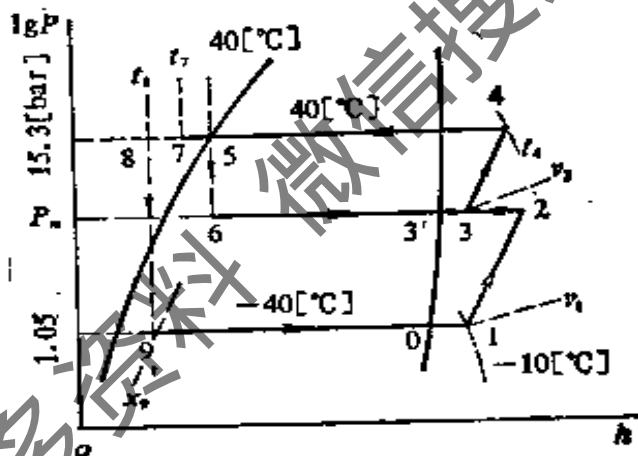


图 12.12 循环过程和状态点

1) 冷凝压力  $P_k = 15.3[\text{bar}]$  ( $t_k = 40[^\circ\text{C}]$ )

蒸发压力  $P_0 = 1.05[\text{bar}]$  ( $t_0 = -40[^\circ\text{C}]$ )

中间压力  $P_m = \sqrt{15.3 \times 1.05} = 4.0[\text{bar}]$

$t_6 = 6[^\circ\text{C}]$  (中间压力  $4.0[\text{bar}]$  的饱和温度)

2) 在 R 22  $\lg P-h$  图上查得的有关状态参数

$h_1 = 406[\text{kJ/kg}]$ ;  $v_1 = 0.23[\text{m}^3/\text{kg}]$ , (根据  $P_0 = 1.05[\text{bar}]$  和  $t_1 = 30 - 40 = -10[^\circ\text{C}]$  查得)

$h_2 = 437[\text{kJ/kg}]$  (由点 1 沿等熵线与中间压力  $4.0[\text{bar}]$  的交点查得  $h_2$ )

$h_5 = h_6 = 249[\text{kJ/kg}]$  (冷凝压力  $15.3[\text{bar}]$  的饱和液体焓)

$h_{3'} = 402[\text{kJ/kg}]$  (中间压力  $4.0[\text{bar}]$  的饱和气体焓)

$h_5 = 386$  [kJ/kg] (蒸发压力 1.05 [bar] 的饱和气体焓)

$h_7 = 200$  [kJ/kg] (根据  $P_k = 15.3$  [bar] 和  $t_7 = t_6 + 6 = -6 + 6 = 0$  [°C]) 查得)

$h_8 = h_5 = h_7 + h_6 - h_1 = 200 + 388 - 406 = 182$  [kJ/kg] (根据公式 (12.23) 计

算)

### 3) 热力计算

通过蒸发器的制冷剂质量流量

$$M_{r1} = \frac{Q_0}{h_5 - h_8} = \frac{15}{388 - 182} = 0.073 \text{ [kg/s]}$$

通过膨胀阀②的制冷剂质量流量

$$M_{r2} = M_{r1} \frac{h_5 - h_7}{h_{3'} - h_6} = 0.073 \frac{249 - 200}{402 - 249} = 0.023 \text{ [kg/s]}$$

高压级气缸吸入制冷剂蒸气的焓

$$h_3 = \frac{M_{r1} h_2 + M_{r2} h_{3'}}{M_{r1} + M_{r2}} = \frac{(0.073 \times 437) + (0.023 \times 402)}{0.073 + 0.023} = 428 \text{ [kJ/kg]}$$

$v_3 = 0.068$  [m<sup>3</sup>/kg] (根据中间压力 4.0 [bar] 和  $h_3 = 428$  [kJ/kg] 查得)

高压级气缸排出蒸气的焓

$h_4 = 466$  [kJ/kg] (由点 3 沿等熵线与排气压力 15.3 [bar] 的交点查得)

冷凝器的热负荷

$$Q_k = (M_{r1} + M_{r2})(h_4 - h_5) = (0.073 + 0.023)(466 - 249) = 20.8 \text{ [kW]}$$

低压级压缩机吸入的制冷剂体积量

$$V_{r1} = M_{r1} v_1 = 0.073 \times 0.23 = 0.0168 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

高压级压缩机吸入的制冷剂体积量

$$V_{r2} = (M_{r1} + M_{r2}) v_3 = (0.073 + 0.023) 0.068 = 0.0083 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

低压级压缩机的理论耗功率

$$N_{th1} = M_{r1} (h_2 - h_1) = 0.073(437 - 406) = 2.26 \text{ [kW]}$$

高压级压缩机的理论耗功率

$$N_{th2} = (M_{r1} + M_{r2})(h_4 - h_3) = (0.073 + 0.023)(466 - 428) = 3.65 \text{ [kW]}$$

理论制冷系数

$$e_{th} = \frac{Q_0}{N_{th1} + N_{th2}} = \frac{15}{2.26 + 3.65} = 2.54$$

高压级压缩机的理论排气温度  $t_4 = 98$  [°C], 进入蒸发器的制冷剂干度  $x_6$  为 0.11.

若采用单级制冷循环(如图 12.13 所示), 则压缩机的理论排气温度  $t_2 = 120$  [°C],

进入蒸发器的制冷剂干度  $x_1 = 0.41$ , 理论制冷系数

$$e_{th} = \frac{406 - 245}{485 - 406} = 2.04$$

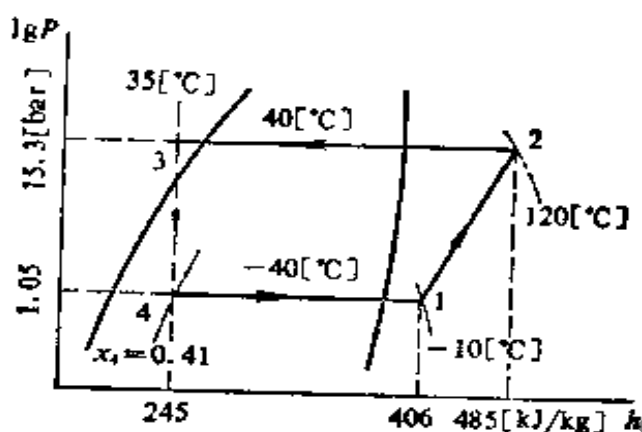


图 12.13 单级制冷循环

显然,当蒸发温度较低时,双级制冷循环的各项性能指标均优于单级循环。

### 12.3.5 复叠式蒸气压缩制冷循环(串级制冷循环)

双级或多级制冷循环虽然可以克服压缩机运行时因压力比过大而产生的许多问题,但是,由于受制冷剂物性和各设备结构条件限制,目前多级制冷循环通常用来制取  $-30 \sim -60 [^{\circ}\text{C}]$  之间的低温,如果需要得到更低的温度,多级制冷循环又将产生许多难以克服的困难。例如:

1. 任何制冷剂,蒸发温度越低,则蒸发压力越低,当压缩机的吸气压力过低时,甚至可能无法克服吸气阀片的阻力而进入气缸;

2. 蒸发压力降低,气体的比容越大,制冷剂的质量流量越小,冷量大大下降。为了获得所需冷量,必须增大气缸容积,使压缩机体积过于庞大。

3. 当蒸发温度过低时,某些制冷剂已达凝固温度,例如,氨的凝固温度为  $-77.7 [^{\circ}\text{C}]$ ,因此,当制取温度低于  $-77.7 [^{\circ}\text{C}]$  时,氨就无法作为制冷剂使用。

复叠式蒸气压缩制冷循环是由两个或两个以上的单级制冷循环组成,在每个单级制冷系统中充有不同性质的制冷剂,它可以克服多级制冷循环难以克服的困难。复叠式制冷循环通常可制得  $-60 \sim -120 [^{\circ}\text{C}]$  的低温。

图 12.14 是由两个单级循环组成的复叠式制冷循环,左侧单级制冷系统与常规的单级制冷机组相同,它的冷凝器仍用常温冷

却水或空气冷却，制得的冷量用来冷凝右侧单级制冷机组中的制冷剂。左侧制冷系统运行时的温度较高，称为高温级，常用的制冷剂为 R12 和 R 22，右侧制冷系统运行时的温度较低，称低温级，常用的的制冷为 R 13(或 R 503)和 R 14。按图 12.14 所示的复叠式制冷系统和充加的制冷剂种类，在低温级蒸发器可获得约  $-80 \sim -90[^\circ\text{C}]$  左右的低温。为了更清楚地理解该循环的原理和特点，现举例说明如下：

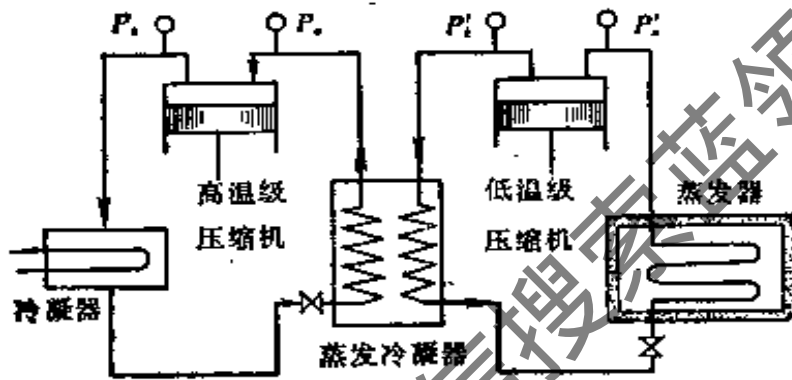


图 12.14 复叠式制冷循环流程

若高温级的冷凝温度  $t_k = 35[^\circ\text{C}]$ ，则 R 22 的冷凝压力  $P_k = 13.5[\text{bar}]$ ，若蒸发温度  $t_0 = -30[^\circ\text{C}]$ ，则蒸发压力  $P_0 = 1.64[\text{bar}]$ 。

高温级压力比  $P_k/P_0 = 13.5/1.64 = 8.23$

低温级 (R 13) 的冷凝温度  $t'_k = t_0 + 5 = -30 + 5 = -25[^\circ\text{C}]$

(R 22 和 R 13 在蒸发冷凝器中的传热温差为  $5[^\circ\text{C}]$ )，冷凝压力  $P'_k = 9.89[\text{bar}]$ ，当蒸发温度  $t'_0$  要求达  $-80[^\circ\text{C}]$  时，则蒸发压力  $P'_0 = 1.09[\text{bar}]$ 。

低温级压力比  $P'_k/P'_0 = 9.89/1.09 = 9.07$

由于复叠式制冷循环采用了互相独立的单级制冷循环，它可以根据各自的运行温度区间选择不同热力特性的制冷剂，这不但可以控制高、低温级压缩机的压力比 (如上例中的压力比均在  $8 \sim 10$  之间) 使压缩机保持较高的吸气效率，排温不是很高，而且可以使低温级蒸发器中获得极低温度时，其蒸发压力仍保持在大气压力之上 (同压力低于大气压时空气可能进入系统，影响制冷装置正

常运行),吸气比容也不是很大。若采用多级制冷循环是无法满足这些要求的。

当制取的温度低于 $-90[^\circ\text{C}]$ 时,可采用三级复叠式制冷循环,各级选用的制冷剂为R 22(或R 12)、R 13、R 14,能达到的最低温度约为 $-120[^\circ\text{C}]$ 。如果要求获得低于 $-120[^\circ\text{C}]$ 的低温,通常将采用其他制冷方法,这已不属于蒸气压缩式制冷的范畴。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

## 第13章 制冷剂 and 载冷剂

制冷剂又称制冷工质，它是制冷系统中完成制冷循环的工作介质。制冷剂在蒸发器内气化吸收被冷却物的热量而制冷，又在高温下把热量放给周围介质，重新成为液态制冷剂，不断进行制冷循环。蒸气压缩式制冷装置是利用制冷剂的集态变化来达到制冷的目的，因此，制冷剂的性能直接影响制冷循环的技术经济指标。

### 13.1 制冷剂

制冷剂的种类有几十种，但工业上常用的不过 10 余种。

#### 13.1.1 对制冷剂的要求

1. 用常温的水或空气作冷却介质，使制冷剂冷凝时其冷凝压力不太高，以减少制冷装置的承受压力。在工作温度范围内其相应的蒸发压力不低于大气压力，避免制冷系统的低压部分出现负压，使外界空气渗入系统。
2. 通常要求制冷剂的单位容积制冷量要大，这样就可以缩小压缩机的尺寸。
3. 制冷剂的临界温度要高，便于用一般的冷却水或空气进行冷凝。压缩终了温度不太高，以免压缩机的润滑条件恶化。
4. 制冷剂的粘度和密度应尽可能小，这样可以减少制冷剂在系统中的流动阻力。
5. 导热系数大，这样可以提高热交换设备的传热系数，减少传热面积。
6. 对制冷装置所用的材料无腐蚀性。
7. 对人体无毒，无燃烧和爆炸危险，使用安全。
8. 易于取得，价格便宜。



完全满足上述所有要求的制冷剂是不存在的，目前所采用的制冷剂都存在一些缺点，因此在选用制冷剂时，应根据实际情况，主要条件符合即可选用。

### 13.1.2 制冷剂的种类

目前常用的制冷剂按其化学组成主要有无机化合物、氟利昂和碳氢化合物等。

#### 1. 无机化合物

这类制冷剂很早就被采用，氨和水仍然是当前常用的制冷剂，见表13.1。

为了书写方便，目前国际上采用的简写符号包括字母“R”和它后面的一组数字，对于无机化合物类的制冷剂，“R”后的第一位数字为7，后面的数字是该物质分子量的整数部分。例如氨，分子式为 $\text{NH}_3$ ，分子量的整数部分是17，其简写符号为R 717。

#### 2. 氟利昂

这类制冷剂是本世纪30年代出现并逐渐开始采用的，其种类较多，它们的热力性质区别也较大，可分别适用于不同情况的制冷机。

氟利昂是饱和碳氢化合物的卤族衍生物的总称，目前用作制冷剂的主要是甲烷和乙烷的衍生物。在这些衍生物中是用氟、

无机化合物制冷剂

表13.1

| 制冷剂代号 | 制冷剂  | 化学分子式                | 分子量    | 标准大气压下沸点[°C] | 临界温度[°C] | 临界压力[bar] | 临界比容[m <sup>3</sup> /kg] | 凝固温度[°C] | 绝热指数κ |
|-------|------|----------------------|--------|--------------|----------|-----------|--------------------------|----------|-------|
| R 717 | 氨    | $\text{NH}_3$        | 17.032 | -33.35       | 132.4    | 115.2     | 4.13                     | -77.7    | 1.30  |
| R 718 | 水    | $\text{H}_2\text{O}$ | 18.016 | 100.00       | 374.12   | 221.2     | 3.09                     | 0.0      | 1.33  |
| R 744 | 二氧化碳 | $\text{CO}_2$        | 44.011 | -78.52       | 31.0     | 73.8      | 2.456                    | -56.6    | 1.30  |
| R 764 | 二氧化硫 | $\text{SO}_2$        | 64.066 | -10.01       | 157.6    | 78.8      | 1.920                    | -75.2    | 1.26  |

氯和溴的原子代替原来化合物中的全部或部分氢原子，这样就

使化合物的性质起了很大的变化。

饱和碳氢化合物的分子通式为  $C_mH_{2m+2}$ ，氟利昂的化学分子式为  $C_mH_nF_xCl_yBr_z$ ，其原子数  $m, n, x, y, z$  之间应有下列关系：

$$2m + 2 = n + x + y + z$$

氟利昂简写符号在字母“R”后的数字依次为  $(m-1)(n+1)x$ ，若化合物中含有溴原子时，则再在后面加字母“B”和溴原子数，例如：

| 化合物名称  | 分子式           | 代 号                                 |
|--------|---------------|-------------------------------------|
| 二氟二氯甲烷 | $CF_2Cl_2$    | $R_{12}[m-1=0, n+1=1, x=2]$         |
| 二氟一氯乙烷 | $C_2H_5F_2Cl$ | $R_{142}[m-1=1, n+1=4, x=2]$        |
| 三氟一溴甲烷 | $CF_3Br$      | $R_{13B_1}[m-1=0, n+1=1, x=3, z=1]$ |

在这类制冷剂中，最常用的有 R12、R22、R11 和 R13 等，见表 13.2。

### 3. 共沸溶液

共沸溶液制冷剂是由两种（或两种以上）不同制冷剂按一定比例相互溶解而成的一种混合物。它和单一的化合物一样，在一定压力下，其蒸发温度也一定。目前作为共沸溶液制冷剂的有 R 500、R 502 等。其组成见表 13.3。

共沸溶液制冷剂

表 13.3

| 制冷剂代号 | 分子量   | 标准大气压下<br>沸点[°C] | 组分       | 组分的重量百分数    |
|-------|-------|------------------|----------|-------------|
| R 500 | 99.3  | -33.3            | R12/R152 | 73.8%/26.2% |
| R 502 | 111.6 | -45.6            | R22/R115 | 48.8%/51.2% |
| R 503 | 87.5  | -68.7            | R23/R13  | 59.9%/40.1% |
| R 504 | 79.2  | -57.2            | R32/R115 | 48.2%/51.8% |

### 4. 碳氢化合物

碳氢化合物制冷剂有甲烷、乙烷、丙烷、乙烯和丙烯等。其性

表 13.2

氟利昂制冷剂

| 制冷剂<br>代号 | 制冷剂    | 化学分子式                                 | 分子量    | 标准大气压<br>下沸点 [°C] | 临界温度<br>[°C] | 临界压力<br>[bar] | 临界比容<br>[m <sup>3</sup> /kg] | 凝固温度<br>[°C] | 绝热指数<br>$\kappa$ |
|-----------|--------|---------------------------------------|--------|-------------------|--------------|---------------|------------------------------|--------------|------------------|
| R 10      | 四氯化碳   | CCl <sub>4</sub>                      | 153.8  | 76.7              | 283.14       | 45.6          | 1.792                        | -22.9        | 1.18             |
| R 11      | 一氟三氯甲烷 | CFCl <sub>3</sub>                     | 137.39 | 23.7              | 198.0        | 43.7          | 1.805                        | -111.0       | 1.13             |
| R 12      | 二氟二氯甲烷 | CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>       | 120.92 | -29.8             | 112.04       | 41.2          | 1.793                        | -155.0       | 1.14             |
| R 13      | 三氟一氯甲烷 | CF <sub>3</sub> Cl                    | 104.47 | -81.5             | 28.78        | 38.6          | 1.721                        | -180.0       | —                |
| R13B1     | 三氟一溴甲烷 | CF <sub>3</sub> Br                    | 148.9  | -58.7             | 67.5         | 40.5          | 1.943                        | -143.2       | 1.116            |
| R 14      | 四氟甲烷   | CF <sub>4</sub>                       | 88.01  | -128.0            | -45.5        | 37.5          | 1.580                        | -184.0       | 1.22             |
| R 21      | 一氟二氯甲烷 | CHFC1 <sub>2</sub>                    | 102.92 | 8.90              | 173.5        | 51.66         | 1.915                        | -135.0       | 1.16             |
| R 22      | 二氟一氯甲烷 | CHF <sub>2</sub> Cl                   | 86.46  | -40.8             | 98.0         | 49.86         | 1.905                        | -160.0       | 1.16             |
| R 23      | 三氟甲烷   | CHF <sub>3</sub>                      | 70.01  | -82.2             | 25.9         | 47.7          | 1.905                        | -160.0       | 1.19             |
| R 30      | 二氯甲烷   | CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>       | 84.94  | 40.7              | 245          | 60.7          | 2.12                         | -96.7        | 1.18             |
| R 40      | 氯甲烷    | CH <sub>3</sub> Cl                    | 50.49  | -23.74            | 143.1        | 66.8          | 2.70                         | -97.6        | 1.20             |
| R 113     | 三氟三氯乙烷 | CF <sub>3</sub> -CCl <sub>3</sub>     | 187.39 | 47.68             | 214.1        | 34.16         | 1.735                        | -36.6        | 1.09             |
| R 114     | 四氟二氯乙烷 | CF <sub>2</sub> Cl-CF <sub>2</sub> Cl | 170.91 | 3.5               | 145.8        | 32.75         | 1.715                        | -94.0        | 1.107            |
| R 115     | 五氟一氯乙烷 | CF <sub>2</sub> Cl-CF <sub>3</sub>    | 154.48 | -36.0             | 80           | 32.4          | 1.630                        | -106.0       | 1.09             |
| R 142     | 二氟一氯乙烷 | CH <sub>3</sub> -CF <sub>2</sub> Cl   | 100.48 | -9.25             | 136.45       | 41.5          | 2.349                        | -130.8       | 1.135            |
| R 143     | 三氟乙烷   | CH <sub>3</sub> -CF <sub>3</sub>      | 84.04  | -47.6             | 73.1         | 37.76         | 2.303                        | -111.3       | —                |
| R 152     | 二氟乙烷   | CH <sub>3</sub> -CHF <sub>2</sub>     | 66.05  | -25.0             | 113.5        | 44.9          | 2.740                        | —            | —                |
| R 160     | 氟乙烷    | CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> Cl   | 64.52  | 12.2              | 187.2        | 52.46         | 3.030                        | -138.7       | 1.16             |
| R 216     | 八氟丙烷   | C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>         | 188.03 | -36.7             | 71.9         | 26.79         | 1.59                         | —            | —                |

质见表 13.4。它主要用于石油化工工业，其优点是易于获得，价格低廉，凝固点低。但安全性差，易燃烧和爆炸。

碳氢化合物制冷剂

表 13.4

| 制冷剂代号 | 制冷剂 | 化学分子式                         | 分子量   | 标准大气压下沸点 [°C] | 临界温度 [°C] | 临界压力 [bar] | 临界比容 [m <sup>3</sup> /kg] | 凝固温度 [°C] | 绝热指数 κ |
|-------|-----|-------------------------------|-------|---------------|-----------|------------|---------------------------|-----------|--------|
| R 50  | 甲烷  | CH <sub>4</sub>               | 16.04 | -161.6        | -82.5     | 46.2       | —                         | -182.8    | —      |
| R 170 | 乙烷  | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 30.06 | -88.6         | 32.1      | 49.83      | 4.7                       | -183.2    | 1.25   |
| R 290 | 丙烷  | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | 44.1  | -42.17        | 96.8      | 42.56      | 4.46                      | -187.1    | 1.13   |
| R1150 | 乙烯  | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 28.05 | -103.7        | 9.5       | 50.6       | 4.62                      | -169.5    | —      |
| R1270 | 丙烯  | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | 42.08 | -47.7         | 91.4      | 46.0       | 4.28                      | -185.0    | —      |

部分制冷剂的饱和温度和压力的关系见图 13.1。从图中可以看出，在同一温度下，标准大气压力下饱和温度低的制冷剂，其饱和蒸气压力高。根据这一规律，我们可以把制冷剂划分为三类，如表 13.5 所示。

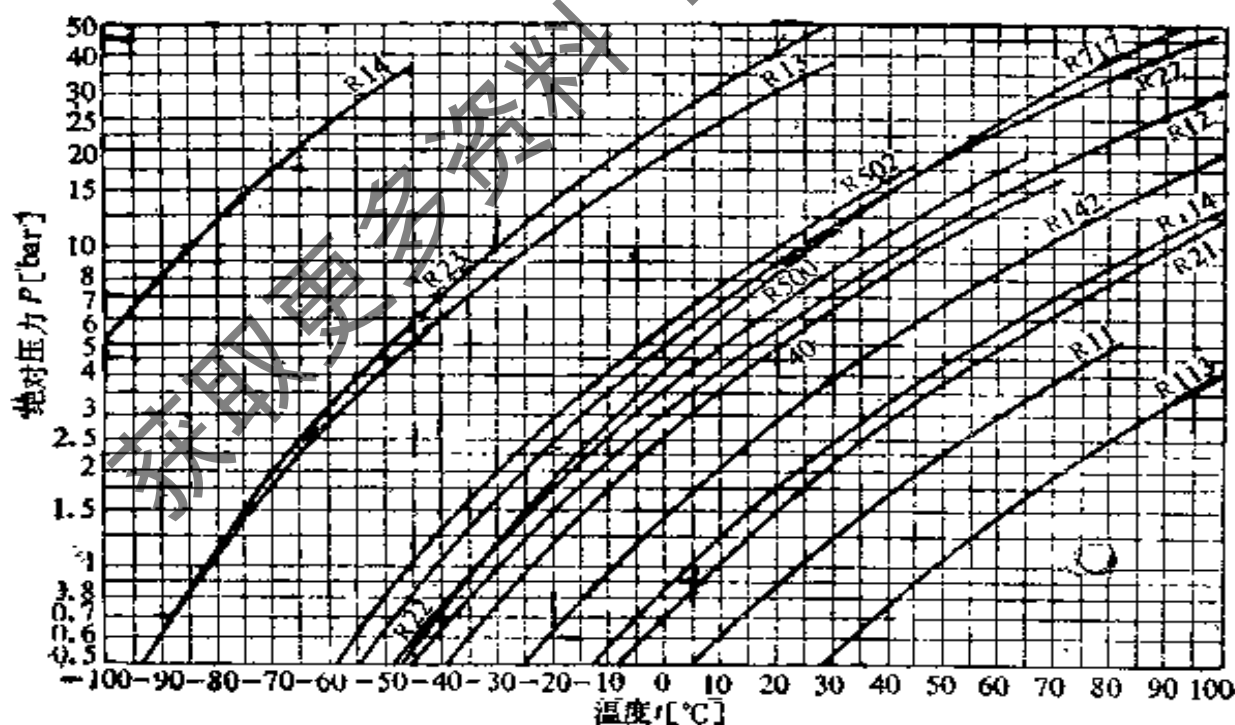


图 13.1 部分制冷剂的饱和温度和压力的关系

制冷剂的分类

表 13.5

| 类 别          | 制 冷 剂                      | 标准大气压力下<br>沸点<br>[°C] | 30[°C]时的冷凝压力<br>[bar] |
|--------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 高温制冷剂(低压制冷剂) | R11, R21, R113, R 114<br>等 | >0                    | ≤3                    |
| 中温制冷剂(中压制冷剂) | R717, R12, R22, R 502<br>等 | -60~0                 | 3~20                  |
| 低温制冷剂(高压制冷剂) | R13, R14, R23, R 503<br>等  | ≤-60                  | 10~70                 |

高温制冷剂主要用于空气调节用制冷装置和热泵装置中，中温制冷剂用于一般的单级及双级压缩制冷机中，而低温制冷剂则用于复叠式制冷装置的低温级部分。

### 13.1.3 常用制冷剂的性质

目前，常用的制冷剂为氨、氟利昂 12 和氟利昂 22 等。其饱和液体和蒸气的热力性质见表 13.6~表 13.8。

#### 1. 氨

氨具有良好的热力性能，单位容积制冷量大，压力适中，常温下冷凝压力不超过 15[bar]，只要蒸发温度不低于 -33.4[°C]，蒸发压力总大于 1 个大气压。

氨与水可以任何比例互相溶解，组成氨水溶液，但氨中有水分时会使蒸发温度升高，并对铜及铜合金（磷青铜除外），有腐蚀作用。

氨是典型的难溶于润滑油的制冷剂，因此，氨制冷系统中的管道和换热器的传热表面上会积有油膜，影响传热效果。

氨蒸气无色，有强烈的刺激性臭味。氨与空气混合的容积浓度在 11~14% 时即可点燃，在 16~25% 时遇明火就会有爆炸危险，目前规定氨在空气中的浓度不应超过 20 [mg/m<sup>3</sup>]。氨的绝热指数较高，因此，排气温度也较高。

氨容易获得，价格便宜。

氨饱和液体及蒸气的热力性质

表 13.6

| 温度<br>$t$ [°C] | 绝对压力<br>$P$ [bar] | 比 容            |                               | 比焓(kJ/kg) |         | 比潜热 $r$<br>[kJ/kg] | 比 熵<br>[kJ/kgK] |        |
|----------------|-------------------|----------------|-------------------------------|-----------|---------|--------------------|-----------------|--------|
|                |                   | $v'$<br>[1/kg] | $v''$<br>[m <sup>3</sup> /kg] | $h'$      | $h''$   |                    | $s'$            | $s''$  |
| -75            | 0.0760            | 1.3675         | 12.81183                      | 169.26    | 1647.27 | 1478.01            | 0.5904          | 8.0495 |
| -70            | 0.1094            | 1.3789         | 9.00904                       | 188.77    | 1656.56 | 1467.79            | 0.6876          | 7.9127 |
| -65            | 0.1563            | 1.3893         | 6.45252                       | 210.11    | 1665.58 | 1455.48            | 0.7314          | 7.7838 |
| -60            | 0.2190            | 1.4008         | 4.69999                       | 233.20    | 1674.31 | 1441.11            | 0.9010          | 7.6620 |
| -55            | 0.3015            | 1.4122         | 3.48642                       | 254.31    | 1683.02 | 1428.71            | 0.9988          | 7.5480 |
| -50            | 0.4085            | 1.4242         | 2.82526                       | 276.05    | 1691.48 | 1415.44            | 1.0973          | 7.4402 |
| -45            | 0.5450            | 1.4364         | 2.00436                       | 298.38    | 1699.69 | 1401.31            | 1.1961          | 7.3382 |
| -40            | 0.7171            | 1.4491         | 1.55124                       | 320.24    | 1707.70 | 1387.46            | 1.2908          | 7.2417 |
| -35            | 0.9312            | 1.4621         | 1.21508                       | 342.37    | 1715.44 | 1373.07            | 1.3846          | 7.1502 |
| -30            | 1.1946            | 1.4755         | 0.96244                       | 364.76    | 1722.89 | 1359.14            | 1.4775          | 7.0631 |
| -25            | 1.5150            | 1.4893         | 0.77048                       | 386.99    | 1730.08 | 1343.09            | 1.5678          | 6.9802 |
| -20            | 1.9011            | 1.5036         | 0.62275                       | 409.43    | 1736.95 | 1327.52            | 1.6571          | 6.9011 |
| -15            | 2.3620            | 1.5184         | 0.50790                       | 431.94    | 1743.51 | 1311.57            | 1.7449          | 6.8255 |
| -10            | 2.9075            | 1.5337         | 0.41770                       | 454.56    | 1749.72 | 1295.17            | 1.8313          | 6.7531 |
| -9             | 3.0277            | 1.5368         | 0.40206                       | 459.07    | 1750.63 | 1291.85            | 1.8484          | 6.7390 |
| -8             | 3.1517            | 1.5399         | 0.38712                       | 463.63    | 1752.11 | 1288.49            | 1.8656          | 6.7250 |
| -7             | 3.2797            | 1.5431         | 0.37286                       | 468.16    | 1753.29 | 1285.13            | 1.8825          | 6.7111 |
| -6             | 3.4117            | 1.5463         | 0.35923                       | 472.67    | 1754.46 | 1281.78            | 1.8993          | 6.6973 |
| -5             | 3.5479            | 1.5495         | 0.34619                       | 477.22    | 1755.60 | 1278.38            | 1.9162          | 6.6837 |
| -4             | 3.6883            | 1.5527         | 0.33372                       | 481.80    | 1756.72 | 1274.92            | 1.9332          | 6.6701 |
| -3             | 3.8331            | 1.5560         | 0.32179                       | 486.36    | 1757.84 | 1271.48            | 1.9500          | 6.6566 |
| -2             | 3.9822            | 1.5593         | 0.31038                       | 490.90    | 1758.94 | 1268.04            | 1.9667          | 6.6433 |
| -1             | 4.1359            | 1.5226         | 0.29945                       | 495.47    | 1760.03 | 1264.55            | 1.9835          | 6.6300 |
| 0              | 4.2941            | 1.5659         | 0.28899                       | 500.02    | 1761.10 | 1261.08            | 2.0001          | 6.6169 |
| 1              | 4.4571            | 1.5693         | 0.27896                       | 504.61    | 1762.15 | 1257.54            | 2.0168          | 6.6038 |
| 2              | 4.6248            | 1.5727         | 0.26935                       | 509.18    | 1763.19 | 1254.02            | 2.0333          | 6.5909 |
| 3              | 4.7974            | 1.5761         | 0.26016                       | 513.72    | 1764.22 | 1250.50            | 2.0497          | 6.5780 |
| 4              | 4.9750            | 1.5795         | 0.25132                       | 518.33    | 1765.23 | 1246.90            | 2.0662          | 6.5652 |
| 5              | 5.1576            | 1.5830         | 0.24285                       | 522.91    | 1766.22 | 1243.31            | 2.0326          | 6.5526 |
| 6              | 5.3454            | 1.5865         | 0.23472                       | 527.50    | 1767.20 | 1239.70            | 2.0990          | 6.5400 |
| 7              | 5.5385            | 1.5900         | 0.22693                       | 532.07    | 1768.17 | 1236.09            | 2.1152          | 6.5275 |
| 8              | 5.7370            | 1.5936         | 0.21944                       | 536.68    | 1769.11 | 1232.43            | 2.1315          | 6.5151 |
| 9              | 5.9409            | 1.5972         | 0.21225                       | 541.33    | 1770.04 | 1228.75            | 2.1478          | 6.5027 |
| 10             | 6.1503            | 1.6008         | 0.20535                       | 545.88    | 1770.96 | 1225.08            | 2.1639          | 6.4905 |
| 12             | 6.5864            | 1.6081         | 0.19293                       | 555.10    | 1772.74 | 1217.63            | 2.1962          | 6.4663 |
| 14             | 7.0459            | 1.6155         | 0.18030                       | 564.35    | 1774.45 | 1210.09            | 2.2232          | 6.4423 |
| 16             | 7.5298            | 1.6231         | 0.16917                       | 573.60    | 1776.09 | 1202.49            | 2.2600          | 6.4187 |
| 18             | 8.0388            | 1.6308         | 0.15868                       | 582.90    | 1777.66 | 1194.77            | 2.2913          | 6.3954 |
| 20             | 8.5737            | 1.6386         | 0.14930                       | 592.19    | 1779.17 | 1186.97            | 2.3233          | 6.3723 |
| 22             | 9.1356            | 1.6466         | 0.14042                       | 601.51    | 1780.60 | 1179.03            | 2.3547          | 6.3485 |
| 24             | 9.7252            | 1.6547         | 0.13217                       | 610.85    | 1781.96 | 1171.12            | 2.3858          | 6.3270 |
| 26             | 10.3434           | 1.6630         | 0.12450                       | 620.20    | 1783.25 | 1163.05            | 2.4169          | 6.3047 |
| 28             | 10.9911           | 1.6717         | 0.11736                       | 629.60    | 1784.46 | 1154.86            | 2.4478          | 6.2826 |
| 30             | 11.6693           | 1.6800         | 0.11070                       | 639.01    | 1785.59 | 1146.57            | 2.4786          | 6.2608 |

续表13.6

| 温度<br>$t$ [°C] | 绝对压力<br>$P$ [bar] | 比 容            |                               | 比焓 [kJ/kg] |         | 比潜热 $r$<br>(kJ/kg) | 比 焓<br>[kJ/kgK] |        |
|----------------|-------------------|----------------|-------------------------------|------------|---------|--------------------|-----------------|--------|
|                |                   | $v'$<br>[1/kg] | $v''$<br>[m <sup>3</sup> /kg] | $h'$       | $h''$   |                    | $s'$            | $s''$  |
| 32             | 12.3788           | 1.6888         | 0.10419                       | 648.46     | 1786.64 | 1138.18            | 2.5093          | 6.2392 |
| 34             | 13.1205           | 1.6978         | 0.09869                       | 657.93     | 1787.61 | 1129.69            | 2.5338          | 6.2177 |
| 36             | 13.8955           | 1.7069         | 0.09327                       | 667.42     | 1788.50 | 1121.08            | 2.5702          | 6.1965 |
| 38             | 14.7074           | 1.7162         | 0.8820                        | 676.95     | 1789.31 | 1112.35            | 2.6004          | 6.1754 |
| 40             | 15.5489           | 1.7257         | 0.8345                        | 686.51     | 1790.03 | 1103.52            | 2.6308          | 6.1545 |
| 42             | 16.4923           | 1.7355         | 0.07900                       | 696.51     | 1790.66 | 1094.53            | 2.6607          | 6.1338 |
| 44             | 27.3477           | 1.7454         | 0.07483                       | 705.76     | 1791.20 | 1085.44            | 2.6907          | 6.1332 |
| 46             | 18.3022           | 1.7556         | 0.07092                       | 715.44     | 1791.64 | 1076.21            | 2.7206          | 6.0927 |
| 48             | 19.2968           | 1.7660         | 0.06724                       | 725.15     | 1791.99 | 1066.84            | 2.7504          | 6.0723 |
| 50             | 20.3314           | 1.7767         | 0.06378                       | 734.92     | 1792.25 | 1057.33            | 2.7801          | 6.0521 |

## 2. 氟利昂

氟利昂的性能随其所含的氟、氯、氢的原子数而变化。当氟利昂中的氢原子数减少时,其可燃性也减少;氟原子数增加,对人体越无害,对金属的腐蚀性越小;含有氯原子的氟利昂与明火接触时能分解出有毒的光气( $\text{COCl}_2$ )。

氟利昂的优点是:无毒,不燃烧,对金属不腐蚀;绝热指数小,因而排气温度低;具有较大的分子量,适用于离心压缩机。其缺点是:部分氟利昂制冷剂(如R12)单位容积制冷量较小,因而制冷剂的循环量大;密度大,流动阻力较大;吸水性能差,所以系统必须保持干燥;价格较贵,极易渗漏又不易被发现。

氟利昂制冷剂主要用于中小型制冷装置、低温装置及其他特殊要求的装置。

目前常用氟利昂制冷剂有氟利昂12、氟利昂22、氟利昂11和氟利昂13等。

### (1) 氟利昂12( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ )

氟利昂12的标准蒸发温度为 $-29.8$  [°C]。当温度相同时,氟利昂12的压力低于氨和氟利昂22,采用风冷式冷凝器时,其冷凝压力也只有 $12$  [bar]左右。

氟利昂 12 饱和液体及蒸气的热力性质

表 13.7

| 温度<br>$t$ [°C] | 绝对压力<br>$P$ [bar] | 比容 [l/kg] |         | 比焓 [kJ/kg] |        | 比潜热 $r$<br>[kJ/kg] | 比 熵<br>[kJ/kgK] |        |
|----------------|-------------------|-----------|---------|------------|--------|--------------------|-----------------|--------|
|                |                   | $v'$      | $v''$   | $h'$       | $h''$  |                    | $s'$            | $s''$  |
| -80            | 0.082             | 0.615     | 2140.00 | 129.14     | 315.10 | 185.95             | 0.8946          | 1.6574 |
| -75            | 0.088             | 0.620     | 1539.19 | 133.43     | 317.44 | 184.01             | 0.7165          | 1.6451 |
| -70            | 0.123             | 0.625     | 1128.72 | 137.73     | 319.79 | 182.06             | 0.7379          | 1.6341 |
| -65            | 0.168             | 0.630     | 842.50  | 142.03     | 322.15 | 180.12             | 0.7589          | 1.6242 |
| -60            | 0.226             | 0.636     | 639.13  | 146.36     | 324.53 | 178.17             | 0.7794          | 1.6153 |
| -55            | 0.300             | 0.641     | 492.11  | 150.70     | 326.91 | 176.21             | 0.7995          | 1.6072 |
| -50            | 0.392             | 0.647     | 384.11  | 155.06     | 329.30 | 174.24             | 0.8192          | 1.6000 |
| -45            | 0.507             | 0.653     | 303.59  | 159.45     | 331.69 | 172.24             | 0.8386          | 1.5936 |
| -40            | 0.642             | 0.659     | 242.72  | 163.85     | 334.07 | 170.22             | 0.8576          | 1.5877 |
| -35            | 0.807             | 0.665     | 196.12  | 168.27     | 336.44 | 168.17             | 0.8764          | 1.5825 |
| -30            | 1.005             | 0.672     | 160.01  | 172.72     | 338.80 | 166.08             | 0.8948          | 1.5779 |
| -25            | 1.237             | 0.678     | 131.73  | 177.20     | 341.15 | 163.95             | 0.9130          | 1.5737 |
| -20            | 1.510             | 0.685     | 109.34  | 181.70     | 343.48 | 161.78             | 0.9309          | 1.5699 |
| -15            | 1.827             | 0.693     | 91.45   | 186.23     | 345.78 | 159.55             | 0.9485          | 1.5666 |
| -10            | 2.193             | 0.700     | 77.03   | 190.78     | 348.06 | 157.28             | 0.9659          | 1.5636 |
| -9             | 2.272             | 0.702     | 74.49   | 191.71     | 348.52 | 156.81             | 0.9693          | 1.5630 |
| -8             | 2.354             | 0.703     | 72.05   | 192.62     | 348.97 | 156.35             | 0.9728          | 1.5625 |
| -7             | 2.437             | 0.705     | 69.70   | 193.51     | 349.42 | 155.88             | 0.9762          | 1.5619 |
| -6             | 2.523             | 0.706     | 67.46   | 194.46     | 349.87 | 155.41             | 0.9796          | 1.5614 |
| -5             | 2.612             | 0.708     | 65.29   | 195.38     | 350.32 | 154.94             | 0.9830          | 1.5609 |
| -4             | 2.702             | 0.710     | 63.22   | 196.30     | 350.76 | 154.46             | 0.9865          | 1.5604 |
| -3             | 2.795             | 0.711     | 61.22   | 197.22     | 351.21 | 153.99             | 0.9899          | 1.5599 |
| -2             | 2.891             | 0.713     | 59.30   | 198.15     | 351.65 | 153.50             | 0.9932          | 1.5594 |
| -1             | 2.989             | 0.715     | 57.45   | 199.07     | 352.09 | 153.02             | 0.9966          | 1.5589 |
| 0              | 3.089             | 0.716     | 55.68   | 200.00     | 352.54 | 152.54             | 1.0000          | 1.5584 |
| 1              | 3.192             | 0.718     | 53.97   | 200.92     | 352.97 | 152.05             | 1.0034          | 1.5580 |
| 2              | 3.297             | 0.720     | 52.32   | 201.86     | 353.41 | 151.55             | 1.0067          | 1.5575 |
| 3              | 3.405             | 0.721     | 50.74   | 202.79     | 353.85 | 151.06             | 1.0101          | 1.5571 |
| 4              | 3.516             | 0.723     | 49.21   | 203.72     | 354.28 | 150.56             | 1.0134          | 1.5567 |
| 5              | 3.629             | 0.725     | 47.74   | 204.66     | 354.72 | 150.06             | 1.0168          | 1.5563 |
| 6              | 3.746             | 0.727     | 46.32   | 205.59     | 355.15 | 149.56             | 1.0201          | 1.5559 |
| 7              | 3.865             | 0.728     | 44.95   | 206.53     | 355.58 | 149.05             | 1.0234          | 1.5555 |
| 8              | 3.986             | 0.730     | 43.63   | 207.47     | 356.01 | 148.54             | 1.0267          | 1.5551 |
| 9              | 4.111             | 0.732     | 42.36   | 208.42     | 356.44 | 148.02             | 1.0300          | 1.5547 |
| 10             | 4.238             | 0.734     | 41.13   | 209.35     | 356.86 | 147.51             | 1.0333          | 1.5543 |
| 12             | 4.502             | 0.738     | 38.80   | 211.25     | 357.71 | 146.46             | 1.0399          | 1.5536 |
| 14             | 4.778             | 0.741     | 36.63   | 213.14     | 358.54 | 145.40             | 1.0465          | 1.5529 |
| 16             | 5.067             | 0.745     | 34.61   | 215.05     | 359.37 | 144.32             | 1.0530          | 1.5522 |
| 18             | 5.368             | 0.749     | 32.71   | 216.97     | 360.20 | 143.23             | 1.0595          | 1.5515 |
| 20             | 5.682             | 0.753     | 30.94   | 218.88     | 361.01 | 142.13             | 1.0660          | 1.5509 |



续表 13.7

| 温度<br>$t$ [°C] | 绝对压力<br>$P$ [bar] | 比容 [1/kg] |       | 比焓 [kJ/kg] |        | 比潜热<br>[kJ/kg] | 比 熵<br>[kJ/kgK] |        |
|----------------|-------------------|-----------|-------|------------|--------|----------------|-----------------|--------|
|                |                   | $v'$      | $v''$ | $h'$       | $h''$  |                | $s'$            | $s''$  |
| 22             | 6.011             | 0.757     | 29.29 | 220.81     | 361.81 | 141.00         | 1.0725          | 1.5502 |
| 24             | 6.352             | 0.762     | 27.78 | 222.75     | 362.61 | 139.86         | 1.0790          | 1.5496 |
| 26             | 6.709             | 0.766     | 26.23 | 224.69     | 363.39 | 138.70         | 1.0854          | 1.5491 |
| 28             | 7.080             | 0.770     | 24.91 | 226.65     | 364.17 | 137.52         | 1.0918          | 1.5485 |
| 30             | 7.465             | 0.775     | 23.63 | 228.62     | 364.94 | 136.32         | 1.0982          | 1.5479 |
| 32             | 7.867             | 0.779     | 22.42 | 230.59     | 365.69 | 135.10         | 1.1046          | 1.5474 |
| 34             | 8.284             | 0.784     | 21.29 | 232.59     | 366.44 | 133.86         | 1.1110          | 1.5468 |
| 36             | 8.717             | 0.789     | 20.22 | 234.59     | 367.17 | 132.58         | 1.1174          | 1.5463 |
| 38             | 9.167             | 0.794     | 19.21 | 236.60     | 367.89 | 131.29         | 1.1238          | 1.5457 |
| 40             | 9.634             | 0.799     | 18.26 | 238.62     | 368.60 | 129.98         | 1.1301          | 1.5452 |
| 42             | 10.118            | 0.804     | 17.36 | 240.66     | 369.29 | 128.63         | 1.1365          | 1.5447 |
| 44             | 10.620            | 0.810     | 16.55 | 242.71     | 369.97 | 127.26         | 1.1429          | 1.5441 |
| 46             | 11.140            | 0.815     | 15.72 | 244.78     | 370.64 | 125.88         | 1.1492          | 1.5436 |
| 48             | 11.679            | 0.821     | 14.96 | 246.86     | 371.29 | 124.43         | 1.1556          | 1.5431 |
| 50             | 12.236            | 0.827     | 14.24 | 248.96     | 371.92 | 122.96         | 1.1620          | 1.5425 |

氟利昂 22 饱和液体及蒸气的热力性质

表 13.8

| 温度<br>$t$ [°C] | 绝对压力<br>$P$ [bar] | 比容 [1/kg] |         | 比焓 [kJ/kg] |        | 比潜热<br>[kJ/kg] | 比 熵<br>[kJ/kgK] |        |
|----------------|-------------------|-----------|---------|------------|--------|----------------|-----------------|--------|
|                |                   | $v'$      | $v''$   | $h'$       | $h''$  |                | $s'$            | $s''$  |
| -90            | 0.049             | 0.649     | 3556.81 | 104.61     | 362.77 | 258.16         | 0.5825          | 1.9921 |
| -80            | 0.105             | 0.659     | 1757.88 | 113.62     | 367.85 | 254.23         | 0.6304          | 1.9466 |
| -75            | 0.149             | 0.665     | 1273.99 | 118.27     | 370.41 | 252.14         | 0.6541          | 1.9266 |
| -70            | 0.205             | 0.671     | 940.11  | 123.02     | 372.97 | 249.95         | 0.6778          | 1.9081 |
| -65            | 0.281             | 0.667     | 705.32  | 127.88     | 375.53 | 247.65         | 0.7013          | 1.8911 |
| -60            | 0.376             | 0.683     | 537.29  | 132.84     | 378.07 | 245.23         | 0.7249          | 1.8754 |
| -55            | 0.497             | 0.689     | 415.07  | 137.92     | 380.69 | 242.68         | 0.7483          | 1.8608 |
| -50            | 0.646             | 0.695     | 324.82  | 143.10     | 383.09 | 239.99         | 0.7718          | 1.8473 |
| -45            | 0.830             | 0.702     | 257.23  | 148.40     | 385.55 | 237.15         | 0.7952          | 1.8347 |
| -40            | 1.053             | 0.709     | 205.95  | 153.80     | 387.97 | 234.17         | 0.8186          | 1.8229 |
| -35            | 1.321             | 0.717     | 166.57  | 159.30     | 390.34 | 231.04         | 0.8418          | 1.8119 |
| -30            | 1.640             | 0.724     | 135.98  | 164.89     | 392.65 | 227.76         | 0.8649          | 1.8016 |
| -25            | 2.016             | 0.732     | 111.97  | 170.58     | 394.90 | 224.32         | 0.8880          | 1.7919 |
| -20            | 2.455             | 0.740     | 92.93   | 176.33     | 397.07 | 220.74         | 0.9108          | 1.7827 |
| -15            | 2.964             | 0.749     | 77.70   | 182.17     | 399.17 | 217.00         | 0.9335          | 1.7740 |
| -10            | 3.556             | 0.758     | 65.40   | 188.06     | 401.18 | 213.12         | 0.9559          | 1.7658 |

续表 13.8

| 温度<br>$t$ [°C] | 绝对压力<br>$P$<br>[bar] | 比容 [1/kg] |       | 比焓 [kJ/kg] |        | 比潜热 $r$<br>[kJ/kg] | 比 熵<br>[kJ/kgK] |        |
|----------------|----------------------|-----------|-------|------------|--------|--------------------|-----------------|--------|
|                |                      | $v'$      | $v''$ | $h'$       | $h''$  |                    | $s'$            | $s''$  |
| 9              | 3.677                | 0.760     | 63.23 | 189.24     | 491.57 | 212.33             | 0.9603          | 1.7642 |
| 8              | 3.807                | 0.762     | 61.15 | 190.43     | 491.96 | 211.53             | 0.9648          | 1.7626 |
| 7              | 3.941                | 0.764     | 59.16 | 191.61     | 492.34 | 210.73             | 0.9692          | 1.7610 |
| 6              | 4.078                | 0.766     | 57.24 | 192.81     | 492.73 | 209.92             | 0.9736          | 1.7594 |
| 5              | 4.219                | 0.768     | 55.39 | 194.00     | 493.10 | 209.10             | 0.9781          | 1.7579 |
| 4              | 4.364                | 0.770     | 53.62 | 195.20     | 493.48 | 208.28             | 0.9825          | 1.7563 |
| 3              | 4.512                | 0.772     | 51.92 | 196.40     | 493.85 | 207.45             | 0.9869          | 1.7548 |
| 2              | 4.664                | 0.774     | 50.28 | 197.59     | 494.21 | 206.62             | 0.9912          | 1.7533 |
| 1              | 4.820                | 0.776     | 48.70 | 198.79     | 494.57 | 205.78             | 0.9956          | 1.7517 |
| 0              | 4.980                | 0.778     | 47.18 | 200.00     | 494.93 | 204.93             | 1.0000          | 1.7502 |
| 1              | 5.143                | 0.780     | 45.72 | 201.20     | 495.28 | 204.08             | 1.0043          | 1.7488 |
| 2              | 5.311                | 0.782     | 44.32 | 202.41     | 495.63 | 203.22             | 1.0087          | 1.7473 |
| 3              | 5.483                | 0.784     | 42.96 | 203.62     | 495.98 | 202.36             | 1.0130          | 1.7458 |
| 4              | 5.659                | 0.786     | 41.66 | 204.83     | 496.32 | 201.49             | 1.0174          | 1.7444 |
| 5              | 5.839                | 0.788     | 40.40 | 206.03     | 496.65 | 200.62             | 1.0218          | 1.7429 |
| 6              | 6.023                | 0.790     | 39.19 | 207.25     | 496.99 | 199.74             | 1.0259          | 1.7415 |
| 7              | 6.211                | 0.793     | 38.02 | 208.45     | 497.31 | 198.86             | 1.0302          | 1.7400 |
| 8              | 6.404                | 0.795     | 36.89 | 209.67     | 497.64 | 197.97             | 1.0345          | 1.7386 |
| 9              | 6.601                | 0.797     | 35.80 | 210.89     | 497.96 | 197.07             | 1.0387          | 1.7372 |
| 10             | 6.803                | 0.799     | 34.75 | 212.10     | 498.27 | 196.17             | 1.0430          | 1.7358 |
| 12             | 7.220                | 0.804     | 32.76 | 214.54     | 498.88 | 194.34             | 1.0515          | 1.7330 |
| 14             | 7.656                | 0.809     | 30.91 | 216.98     | 499.48 | 192.50             | 1.0599          | 1.7302 |
| 16             | 8.112                | 0.814     | 29.17 | 219.44     | 410.06 | 190.62             | 1.0682          | 1.7275 |
| 18             | 8.586                | 0.819     | 27.56 | 221.88     | 410.61 | 188.73             | 1.0765          | 1.7248 |
| 20             | 9.081                | 0.824     | 26.04 | 224.34     | 411.15 | 186.81             | 1.0848          | 1.7220 |
| 22             | 9.597                | 0.829     | 24.62 | 226.80     | 411.66 | 184.86             | 1.0930          | 1.7194 |
| 24             | 10.135               | 0.835     | 23.29 | 229.26     | 412.15 | 182.89             | 1.1012          | 1.7167 |
| 26             | 10.694               | 0.840     | 22.05 | 231.74     | 412.62 | 180.88             | 1.1093          | 1.7140 |
| 28             | 11.275               | 0.846     | 20.88 | 234.21     | 413.06 | 178.85             | 1.1174          | 1.7113 |
| 30             | 11.880               | 0.852     | 19.78 | 236.70     | 413.49 | 176.79             | 1.1255          | 1.7086 |
| 32             | 12.508               | 0.858     | 18.74 | 239.18     | 413.88 | 174.70             | 1.1335          | 1.7060 |
| 34             | 13.160               | 0.864     | 17.77 | 241.68     | 414.25 | 172.57             | 1.1414          | 1.7033 |
| 36             | 13.837               | 0.871     | 16.85 | 244.18     | 414.59 | 170.41             | 1.1494          | 1.7006 |
| 38             | 14.540               | 0.877     | 15.99 | 246.69     | 414.91 | 168.22             | 1.1572          | 1.6979 |
| 40             | 15.269               | 0.884     | 15.17 | 249.21     | 415.19 | 165.98             | 1.1651          | 1.6952 |
| 42             | 16.024               | 0.891     | 14.40 | 251.74     | 415.44 | 163.76             | 1.1730          | 1.6924 |
| 44             | 16.807               | 0.899     | 13.67 | 254.28     | 415.66 | 161.37             | 1.1808          | 1.6896 |
| 46             | 17.618               | 0.906     | 12.98 | 256.85     | 415.85 | 159.00             | 1.1886          | 1.6868 |
| 48             | 18.458               | 0.914     | 12.33 | 259.43     | 416.00 | 156.57             | 1.1964          | 1.6840 |
| 50             | 19.327               | 0.923     | 11.70 | 262.03     | 416.11 | 154.08             | 1.2043          | 1.6811 |
| 55             | 21.635               | 0.945     | 10.29 | 268.62     | 416.20 | 147.58             | 1.2238          | 1.6736 |
| 60             | 24.146               | 0.970     | 9.03  | 275.40     | 415.99 | 140.59             | 1.2436          | 1.6656 |

氟利昂 12 在水中的溶解度很小,而且温度越低,溶解度越小。当氟利昂12的含水量超过其溶解度时,易发生冰塞现象。

氟利昂12能够与润滑油以任意比例互相溶解,因此在热交换器传热表面不会形成油膜而影响传热,在贮液器中,氟利昂 12 与润滑油也不会分离;在蒸发器中由于氟利昂 12 液体中溶解有油,会使蒸发温度提高,并随着氟利昂12不断蒸发,润滑油越积越多,影响传热;在压缩机的曲轴箱中,由于润滑油中溶解有氟利昂12,使润滑油粘度变低,同时,当蒸发压力和曲轴箱内的温度变化时,油中溶解氟利昂 12 的量也会发生变化,这将引起曲轴箱油位的改变。

氟利昂12极易渗漏且不易被发现。

氟利昂12是我国目前应用最广的制冷剂之一,它广泛应用于中小型制冷装置中,如电冰箱、空调器和去湿机等。

#### (2) 氟利昂 22( $\text{CHF}_2\text{Cl}$ )

氟利昂 12 的标准蒸发温度为  $-40.8[^\circ\text{C}]$ 。在常温下,其冷凝压力和单位容积制冷量与氨差不多。

与氟利昂 12 相比,在相同的温度下,氟利昂 22 的饱和压力约高 65%,单位容积制冷量约大 50% 左右。

氟利昂 22 在水中的溶解度比氟利昂 12 大,但含水量超过溶解度时间同样会发生冰塞现象。

氟利昂22与润滑油能部分溶解,其溶解度亦随温度的变化而变化,润滑油在氟利昂22的制冷系统中所产生的影响和氟利昂12系统基本相同。

目前,氟利昂22已广泛应用于中小型空调和冷藏制冷装置中。

#### (3) 氟利昂 11 ( $\text{CFCl}_2$ )

氟利昂 11 的标准蒸发温度为  $23.7[^\circ\text{C}]$ 。

氟利昂 11 的溶水性、溶油性以及对金属的作用与氟利昂 12 相似。氟利昂11的分子量大,单位容积制冷量小。目前,在空调用单级离心式冷水机组中使用较多。

#### (4) 氟利昂 13( $\text{CF}_2\text{Cl}$ )

氟利昂 13 的标准蒸发温度为  $-81.5[^\circ\text{C}]$ ，凝固温度为  $-180[^\circ\text{C}]$ 。

氟利昂 13 的临界温度较低，常温下压力很高。适用于复叠式制冷系统，作为低温级的制冷剂。

#### (5) 氟利昂 142( $\text{C}_2\text{H}_3\text{F}_2\text{Cl}$ )

氟利昂 142 的标准蒸发温度较高，为  $-9.25[^\circ\text{C}]$ 。

即使在高温时，氟利昂 142 的饱和压力也较低，因此适用于热泵装置和在高环境温度下使用的制冷装置，例如钢铁厂高温车间行车驾驶室使用的冷风机组，就是用氟利昂 142 作为制冷剂的，即使环境温度高达  $80[^\circ\text{C}]$ ，行车驾驶室内可降温至  $30[^\circ\text{C}]$ 。

### 3. 共沸溶液

应用共沸溶液是制冷剂发展的方向之一，它的应用将促进制冷技术的发展。

共沸溶液制冷剂的热力性质和组成它的组分相比，具有一些明显的优点。

(1) 共沸溶液制冷剂的标准蒸发温度一般比组成其组分的低。例如氟利昂 502 的标准蒸发温度为  $-45.6[^\circ\text{C}]$ ，而组成其组分的氟利昂 22 和氟利昂 115 分别为  $-40.8[^\circ\text{C}]$  和  $-38[^\circ\text{C}]$ 。

(2) 在同一蒸发温度下，由于共沸溶液制冷剂的蒸发压力高于其组成组分，所以其单位容积制冷量比其任一组分的都大，使同一制冷压缩机的制冷量提高了。例如与氟利昂 22 相比，采用氟利昂 502 的单级压缩机，制冷量可增加  $5\sim 30\%$ ，在低温下制冷量增加较大。

(3) 压缩机排气温度降低。例如，在相同工况下，氟利昂 502 的排气温度约比氟利昂 22 低  $10\sim 25[^\circ\text{C}]$ ，与氟利昂 12 相近。由于排气温度低，使曲轴箱内油温、电机绕组温度均有明显下降，改善了机器的工作条件。

氟利昂 502 虽然具有较好的热力学特性，但目前价格较高，仅在制取  $-40\sim -45[^\circ\text{C}]$  低温的封闭式制冷机组中使用。

部分制冷剂的一般使用范围见表 13.9。

部分制冷剂的一般使用范围

表 13.9

| 适 用 范 围 |          |             |   |
|---------|----------|-------------|---|
| 制冷剂     | 温度[℃]    | 制冷压缩机型式     | 特 点 和 用 途   |
| R 717   | 10~-60   | 活塞式、回转式、离心式 | 压力适中,用于制冰、冷藏、化学工业及其他工业,由于有毒,人多的地方最好不用                                     |
| R 11    | 10~-5    | 离心式         | 沸点较高(23.7[℃]),无毒,不燃烧,用于大型空调及其他工业  |
| R 12    | 10~-60   | 活塞式、回转式、离心式 | 压力适中,压缩终温低,化学性能稳定,无毒,用于冷藏、空调、化学工业及其他工业,从家用电冰箱到大型离心式制冷机都适用                 |
| R 13    | -60~-100 | 活塞式、离心式     | 沸点低,临界温度低,低温下蒸气比容小,无毒,不燃烧,用于低温化学工业和低温研究。使用于复叠式制冷装置的低温部分                   |
| R 14    | -60~-120 | 活塞式         |   |
| R 21    | 10~-20   | 活塞式、离心式、回转式 | 即使在70[℃],冷凝压力也不高。用于空调、化学工业小型制冷机,特别适用于高温车间,起重机控制室的风冷式降温设备                  |
| R 22    | 0~-80    | 活塞式、离心式、回转式 | 压力和制冷能力与R717的相同,制冷能力比R12高,排气温度比R12高,广泛用于冷藏、空调、化学工业及其他工业                   |
| R 113   | 10~0     | 离心式         | 分子量较大,运输和贮存方便(可装在铁桶中)。主要用于小型空调离心式制冷机中                                     |
| R 114   | 10~-20   | 离心式、回转式、活塞式 | 沸点为3.6[℃]比R21低,介于R12和R11之间,主要用于小型制冷装置。当用作高温车间或起重机控制室的风冷式降温设备时,其电气性能比R21优越 |

| 适 用 范 围 |        |         |  |
|---------|--------|---------|--|
| 制冷制     | 温度[°C] | 制冷压缩机型式 | 特点和用途  |
| R 500   | 10~-60 | 活塞式、离心式 | 它是氟利昂的共沸混合物,无毒,不燃烧,制冷能力比R12高。用于空调、冷藏   |
| R 502   | 0~-80  | 活塞式、离心式 | 它是氟利昂的共沸混合物,热力学特性比R12好,压力和制冷能力与R22差不多,电气性能和R12一样优良,排气温度比R22低,无毒,不燃烧,是一种良好的制冷剂,特别适用于封闭式制冷装置 |
| R 50    | -60以下  | 活塞式、离心式 | 可燃烧,有爆炸危险,用于低温化学和低温研究,作复叠式制冷装置低温部分的制冷剂   |
| R 170   |        |         |  |
| R 1150  |        |         |  |
| R 290   | -40~   | 活塞式、离心式 | 可燃烧,有爆炸危险,用于低温化学和低温研究  |
| R 1270  | -60    |         |  |

## 13.2 载 冷 剂

载冷剂是指在间接制冷系统中用来传递冷量的中间介质。在间接制冷系统中制冷剂可以在较小的制冷系统内循环,冷量通过载冷剂传递给被冷却对象。

### 13.2.1 对载冷剂的要求

载冷剂应具备下列性质:

1. 在使用温度范围内不凝固、不汽化。
2. 比热要大。在传送一定冷量时,载冷剂比热大的,其流量就小,可减少输送载冷剂的循环泵功率。
3. 密度小,粘度小,可以减少流动阻力。

4. 导热系数大,以减少热交换设备的传热面积。
5. 不腐蚀设备、管道及其他附件;无毒,化学稳定性好。
6. 价格便宜,易于购买。

### 13.2.2 常用的载冷剂

#### 1. 水

在空气调节系统中,广泛用水做载冷剂。由于水的凝固温度为 $[0^{\circ}\text{C}]$ ,因而只能用做制取 $[0^{\circ}\text{C}]$ 以上的载冷剂。

#### 2. 无机盐水溶液

在中低温场合,一般用盐水溶液作为载冷剂。常用的有氯化钙( $\text{CaCl}_2$ )水溶液和氯化钠( $\text{NaCl}$ )水溶液等。

盐水溶液的性质与溶液中盐的浓度有关,见图 13.2。

图中曲线为不同浓度盐水溶液的析冰线和析盐线,盐水溶液的浓度低时,凝固温度随浓度增加而降低,溶液降温凝固时,析出冰;当浓度高于  $E$  点所对应的浓度时,凝固温度随浓度增加反而升高。 $E$  点称为盐水的共晶点,处于共晶点的盐水溶液其温度和浓度分别称为共晶温度和共晶浓度。当温度降至共晶温度时,全部溶液冻结成固体。氯化钠水溶液的共晶温度为 $-21.2[^{\circ}\text{C}]$ ,共晶浓度为 $23.1\%$ (质量浓度);氯化钙水溶液的共晶温度为 $-55[^{\circ}\text{C}]$ ,共晶浓度为 $29.9\%$ (质量浓度)。

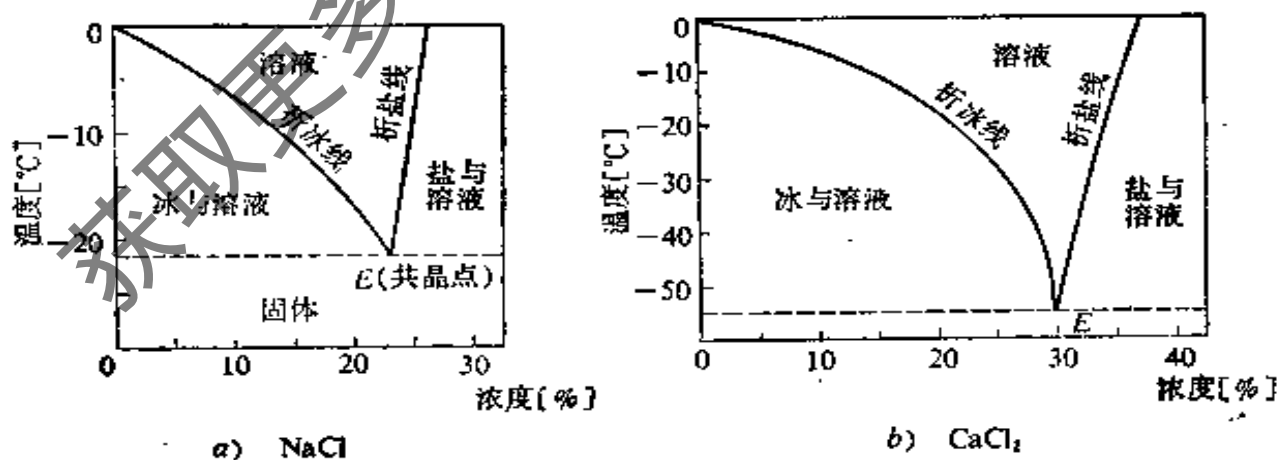


图 13.2 盐水溶液温度-浓度图

盐水溶液的浓度越大,其密度增大,流动阻力将增大;同时,浓

度大,其比热小,输送一定冷量所需盐水溶液的流量将增加,造成泵消耗的功增大。因此,配制盐水溶液时,只要使其浓度所对应的凝固温度不低于系统中可能出现的最低温度即可,一般使凝固温度比制冷剂的蒸发温度低 $5\sim 8[^\circ\text{C}]$ 。

盐水溶液对金属有腐蚀性,尤其是略带酸性并与空气相接触的盐水溶液,其腐蚀性更强。为了降低盐水对金属的腐蚀作用,可在盐水溶液中加入一定量的防腐剂,一般采用氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )和重铬酸钠( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )。通常的做法是: $1[\text{m}^3]$ 的氯化钙水溶液中应加 $1.6[\text{kg}]$ 的重铬酸钠和 $0.432[\text{kg}]$ 氢氧化钠; $1[\text{m}^3]$ 的氯化钠水溶液中加入 $3.2[\text{kg}]$ 的重铬酸钠和 $0.864[\text{kg}]$ 氢氧化钠。

氯化钠和氯化钙盐水溶液的物性值见表13.10、表13.11。

氯化钠水溶液的物性值

表 13.10

| 15[ $^\circ\text{C}$ ]<br>比重 | 质量浓度<br>① [%]  | 凝固<br>温度<br>[ $^\circ\text{C}$ ] | 溶液<br>温度<br>[ $^\circ\text{C}$ ] | 比热<br>[kJ/<br>kgK] | 导热系数<br>[W/<br>mK] | 动力粘度<br>$10^4[\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$ | 运动粘度<br>$10^6[\text{m}^2/\text{s}]$ | 导热系数<br>$10^4[\text{m}^2/\text{h}]$ | 普兰<br>特数 |
|------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|----------|
| 1.050                        | 7<br>(7.5)     | -4.4                             | 20                               | 3.843              | 0.593              | 10.79  | 1.03                                | 5.31                                | 6.95     |
|                              |                |                                  | 10                               | 3.835              | 0.576              | 14.12  | 1.34                                | 5.16                                | 9.4      |
|                              |                |                                  | 0                                | 3.827              | 0.559              | 18.73  | 1.78                                | 5.02                                | 12.7     |
|                              |                |                                  | -4                               | 3.818              | 0.558              | 21.57  | 2.06                                | 5.00                                | 14.8     |
| 1.080                        | 11<br>(12.3)   | -7.5                             | 20                               | 3.697              | 0.593              | 11.47  | 1.06                                | 5.33                                | 7.2      |
|                              |                |                                  | 10                               | 3.684              | 0.570              | 15.20  | 1.41                                | 5.15                                | 9.9      |
|                              |                |                                  | 0                                | 3.676              | 0.558              | 20.20  | 1.87                                | 5.08                                | 13.4     |
|                              |                |                                  | -5                               | 3.672              | 0.549              | 24.42  | 2.26                                | 4.98                                | 16.4     |
|                              |                |                                  | -7.5                             | 3.672              | 0.545              | 26.48  | 2.45                                | 4.96                                | 17.8     |
| 1.100                        | 13.6<br>(15.7) | -9.8                             | 20                               | 3.609              | 0.593              | 12.26  | 1.12                                | 5.40                                | 7.4      |
|                              |                |                                  | 10                               | 3.601              | 0.568              | 16.18  | 1.47                                | 5.15                                | 10.3     |
|                              |                |                                  | 0                                | 3.588              | 0.554              | 21.48  | 1.95                                | 5.07                                | 13.0     |
|                              |                |                                  | -5                               | 3.584              | 0.547              | 26.09  | 2.37                                | 5.00                                | 17.1     |
|                              |                |                                  | -9.8                             | 3.580              | 0.540              | 34.32  | 3.13                                | 4.94                                | 22.9     |



续表13.10

| $t$ [°C] | 质量浓度<br>比重     | 凝固<br>温度<br>[°C] | 溶液<br>温度<br>[°C] | 比热<br>[kJ/kg<br>·K] | 导热系数<br>[W/<br>mK] | 动力粘度<br>$10^4$ [N·<br>s/m <sup>2</sup> ] | 运动粘度<br>$10^6$ [m <sup>2</sup> /<br>s] | 导热系数<br>$10^4$ [m <sup>2</sup> /<br>h] | 普朗<br>特数 |
|----------|----------------|------------------|------------------|---------------------|--------------------|--|--|--|----------|
| 1.120    | 16.2<br>(19.3) | -12.2            | 20               | 3.534               | 0.573              | 13.11                                    | 1.20                                   | 5.21                                   | 8.3      |
|          |                |                  | 10               | 3.525               | 0.569              | 17.26                                    | 1.57                                   | 5.18                                   | 10.9     |
|          |                |                  | 0                | 3.513               | 0.552              | 22.26                                    | 2.02                                   | 5.07                                   | 15.1     |
|          |                |                  | -5               | 3.509               | 0.544              | 28.34                                    | 2.58                                   | 5.00                                   | 18.6     |
|          |                |                  | -10              | 3.504               | 0.535              | 34.91                                    | 3.18                                   | 4.93                                   | 23.2     |
|          |                |                  | -12.2            | 3.500               | 0.533              | 42.17                                    | 3.84                                   | 4.90                                   | 28.3     |
| 1.140    | 18.8<br>(23.1) | -15.1            | 20               | 3.462               | 0.582              | 14.32                                    | 1.26                                   | 5.32                                   | 8.5      |
|          |                |                  | 10               | 3.454               | 0.566              | 18.53                                    | 1.63                                   | 5.17                                   | 11.4     |
|          |                |                  | 0                | 3.442               | 0.555              | 25.60                                    | 2.25                                   | 5.05                                   | 16.1     |
|          |                |                  | -5               | 3.433               | 0.542              | 31.19                                    | 2.74                                   | 5.00                                   | 19.8     |
|          |                |                  | -10              | 3.429               | 0.533              | 38.74                                    | 3.40                                   | 4.92                                   | 24.8     |
|          |                |                  | -15              | 3.425               | 0.525              | 47.78                                    | 4.19                                   | 4.86                                   | 31.0     |
| 1.160    | 21.2<br>(26.9) | -18.2            | 20               | 3.395               | 0.579              | 15.49                                    | 1.33                                   | 5.27                                   | 9.1      |
|          |                |                  | 10               | 3.383               | 0.563              | 20.10                                    | 1.73                                   | 5.17                                   | 12.1     |
|          |                |                  | 0                | 3.375               | 0.547              | 28.24                                    | 2.44                                   | 5.03                                   | 17.5     |
|          |                |                  | -5               | 3.366               | 0.538              | 34.42                                    | 2.96                                   | 4.96                                   | 21.5     |
|          |                |                  | -10              | 3.362               | 0.530              | 43.05                                    | 3.70                                   | 4.90                                   | 27.1     |
|          |                |                  | -15              | 3.358               | 0.522              | 52.76                                    | 4.55                                   | 4.85                                   | 33.9     |
|          |                |                  | -18              | 3.354               | 0.518              | 60.80                                    | 5.24                                   | 4.80                                   | 39.4     |
| 1.175    | 23.1<br>(30.1) | -21.2            | 20               | 3.345               | 0.565              | 16.67                                    | 1.42                                   | 5.30                                   | 9.6      |
|          |                |                  | 10               | 3.337               | 0.549              | 21.77                                    | 1.84                                   | 5.05                                   | 13.1     |
|          |                |                  | 0                | 3.324               | 0.544              | 30.40                                    | 2.59                                   | 5.02                                   | 18.6     |
|          |                |                  | -5               | 3.320               | 0.536              | 37.46                                    | 3.20                                   | 4.95                                   | 23.3     |
|          |                |                  | -10              | 3.312               | 0.528              | 47.07                                    | 4.02                                   | 4.89                                   | 29.5     |
|          |                |                  | -15              | 3.308               | 0.520              | 57.47                                    | 4.90                                   | 4.83                                   | 36.5     |
|          |                |                  | -21              | 3.303               | 0.514              | 77.47                                    | 6.60                                   | 4.77                                   | 60.0     |

① 括号中的数值为100[kg]水中氯化钠质量的千克数。

氯化钙水溶液的物性值

表 13.11

| 15[°C] | 质量浓度<br>比重 $\rho$ [%] | 凝固温度<br>[°C] | 溶液<br>温度 [°C] | 比热<br>[kJ/kg<br>· K] | 导热系数<br>[W/<br>mK] | 动力粘度<br>$10^4$ [N·<br>s/m <sup>2</sup> ] | 运动粘度<br>$10^6$ [m <sup>2</sup> /<br>s] | 导温系数<br>$10^4$ [m <sup>2</sup> /<br>h] | 普兰<br>特数 |
|--------|-----------------------|--------------|---------------|----------------------|--------------------|--|--|--|----------|
| 1.080  | 9.4<br>(10.4)         | -5.2         | 20            | 3.643                | 0.584              | 12.36                                    | 1.15                                   | 5.35                                   | 7.75     |
|        |                       |              | 10            | 3.634                | 0.570              | 15.49                                    | 1.44                                   | 5.23                                   | 9.88     |
|        |                       |              | 0             | 3.626                | 0.556              | 21.57                                    | 2.00                                   | 5.11                                   | 14.1     |
|        |                       |              | -5            | 3.601                | 0.549              | 25.50                                    | 2.36                                   | 5.08                                   | 16.7     |
| 1.130  | 14.7<br>(17.3)        | -10.2        | 20            | 3.362                | 0.576              | 14.91                                    | 1.82                                   | 5.46                                   | 8.7      |
|        |                       |              | 10            | 3.349                | 0.563              | 18.63                                    | 1.81                                   | 5.35                                   | 11.05    |
|        |                       |              | 0             | 3.329                | 0.549              | 25.60                                    | 2.27                                   | 5.26                                   | 15.6     |
|        |                       |              | -5            | 3.316                | 0.542              | 30.40                                    | 2.70                                   | 5.20                                   | 18.7     |
|        |                       |              | -10           | 3.308                | 0.534              | 40.60                                    | 3.60                                   | 5.15                                   | 25.3     |
| 1.170  | 18.9<br>(23.3)        | -15.7        | 20            | 3.148                | 0.572              | 17.95                                    | 1.54                                   | 5.69                                   | 9.9      |
|        |                       |              | 10            | 3.410                | 0.558              | 22.36                                    | 1.91                                   | 5.47                                   | 12.6     |
|        |                       |              | 0             | 3.128                | 0.544              | 29.91                                    | 2.56                                   | 5.37                                   | 17.2     |
|        |                       |              | -5            | 3.098                | 0.537              | 34.32                                    | 2.94                                   | 5.34                                   | 19.8     |
|        |                       |              | -10           | 3.086                | 0.529              | 46.68                                    | 4.00                                   | 5.29                                   | 27.3     |
|        |                       |              | -15           | 3.065                | 0.523              | 61.49                                    | 5.27                                   | 5.28                                   | 35.9     |
| 1.190  | 20.9<br>(26.5)        | -19.2        | 20            | 3.077                | 0.569              | 20.01                                    | 1.68                                   | 5.59                                   | 10.9     |
|        |                       |              | 10            | 3.056                | 0.555              | 24.52                                    | 2.06                                   | 5.50                                   | 13.6     |
|        |                       |              | 0             | 3.044                | 0.542              | 32.75                                    | 2.76                                   | 5.38                                   | 18.5     |
|        |                       |              | -5            | 3.014                | 0.536              | 38.25                                    | 3.22                                   | 5.35                                   | 21.5     |
|        |                       |              | -10           | 3.014                | 0.527              | 50.70                                    | 4.25                                   | 5.30                                   | 28.9     |
|        |                       |              | -15           | 3.014                | 0.521              | 65.90                                    | 5.53                                   | 5.23                                   | 38.2     |
| 1.220  | 23.8<br>(31.2)        | -25.7        | 20            | 2.998                | 0.565              | 23.54                                    | 1.94                                   | 5.62                                   | 12.5     |
|        |                       |              | 10            | 2.952                | 0.551              | 28.73                                    | 2.35                                   | 5.50                                   | 15.4     |

续表 13.11

| 15[°C] | 质量浓度<br>比重     | 凝固温度<br>[°C] | 溶液<br>温度<br>[°C] | 比<br>热<br>[kJ/kg<br>· K] | 导热系数<br>[W/m<br>· K] | 动力粘度<br>$10^4$ [N·<br>s/m <sup>2</sup> ] | 运动粘度<br>$10^6$ [m <sup>2</sup><br>/s] | 导热系数<br>$10^4$ [m <sup>2</sup><br>/h] | 普朗<br>特数 |
|--------|----------------|--------------|------------------|--------------------------|----------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|
| 1.220  | 23.8<br>(31.2) | -25.7        | 0                | 2.931                    | 0.538                | 38.15                                    | 3.13                                  | 5.43                                  | 20.8     |
|        |                |              | -10              | 2.910                    | 0.523                | 59.23                                    | 4.87                                  | 5.32                                  | 33.0     |
|        |                |              | -15              | 2.910                    | 0.518                | 75.51                                    | 6.20                                  | 5.27                                  | 42.5     |
|        |                |              | -20              | 2.889                    | 0.511                | 94.73                                    | 7.77                                  | 5.20                                  | 53.8     |
|        |                |              | -25              | 2.889                    | 0.504                | 115.7                                    | 9.48                                  | 5.15                                  | 66.5     |
|        |                |              | 20               | 2.889                    | 0.562                | 26.28                                    | 2.12                                  | 5.66                                  | 13.5     |
| 1.240  | 25.7<br>(34.6) | -31.2        | 10               | 2.889                    | 0.548                | 32.17                                    | 2.51                                  | 5.50                                  | 16.5     |
|        |                |              | 0                | 2.868                    | 0.535                | 42.56                                    | 3.43                                  | 5.43                                  | 22.7     |
|        |                |              | -10              | 2.847                    | 0.521                | 66.78                                    | 5.40                                  | 5.32                                  | 36.6     |
|        |                |              | -15              | 2.847                    | 0.514                | 83.65                                    | 6.76                                  | 5.25                                  | 46.3     |
|        |                |              | -20              | 2.805                    | 0.508                | 105.6                                    | 8.52                                  | 5.26                                  | 56.5     |
|        |                |              | -25              | 2.805                    | 0.501                | 129.2                                    | 10.40                                 | 5.20                                  | 72.0     |
|        |                |              | -30              | 2.763                    | 0.494                | 148.1                                    | 12.00                                 | 5.21                                  | 83.0     |
| 1.260  | 27.5<br>(37.9) | -38.6        | 20               | 2.847                    | 0.558                | 29.32                                    | 2.33                                  | 5.63                                  | 14.9     |
|        |                |              | 10               | 2.826                    | 0.545                | 36.09                                    | 2.87                                  | 5.50                                  | 18.8     |
|        |                |              | 0                | 2.809                    | 0.531                | 48.05                                    | 3.81                                  | 5.41                                  | 25.3     |
|        |                |              | -10              | 2.784                    | 0.519                | 75.22                                    | 5.97                                  | 5.33                                  | 40.3     |
|        |                |              | -20              | 2.763                    | 0.506                | 118.7                                    | 9.45                                  | 5.24                                  | 65.0     |
|        |                |              | -25              | 2.742                    | 0.499                | 147.1                                    | 11.70                                 | 5.20                                  | 80.7     |
|        |                |              | -30              | 2.742                    | 0.492                | 171.6                                    | 13.60                                 | 5.12                                  | 95.6     |
|        |                |              | -35              | 2.721                    | 0.486                | 215.8                                    | 17.10                                 | 5.12                                  | 120.0    |
| 1.270  | 28.4<br>(39.7) | -43.6        | 20               | 2.805                    | 0.557                | 31.38                                    | 2.47                                  | 5.62                                  | 15.8     |
|        |                |              | 0                | 2.780                    | 0.529                | 51.19                                    | 4.02                                  | 5.40                                  | 26.7     |
|        |                |              | -10              | 2.763                    | 0.518                | 80.22                                    | 6.32                                  | 5.31                                  | 42.7     |

续表 13.11

| 15[°C] 质量浓度<br>比 重 <sup>①</sup> [%] | 凝固温度<br>[°C] | 溶液<br>温度<br>[°C] | 比 热<br>[kJ/kg<br>· K] | 导热系数<br>[W/m<br>· K] | 动力粘度<br>10 <sup>4</sup> N ·<br>s/m <sup>2</sup> | 运动粘度<br>10 <sup>6</sup> [m <sup>2</sup> /<br>s] | 导温系数<br>10 <sup>4</sup> [m <sup>2</sup> /<br>h] | 普兰<br>特数 |
|-------------------------------------|--------------|------------------|-----------------------|----------------------|---|---|---|----------|
| 1.270<br>28.4<br>(39.7)             | -13.6        | -20              | 2.721                 | 0.505                | 126.5   | 10.00   | 5.25  | 68.8     |
|                                     |              | -25              | 2.721                 | 0.498                | 169.9   | 12.60   | 5.18  | 87.5     |
|                                     |              | -30              | 2.700                 | 0.491                | 188.3   | 14.90   | 5.16  | 103.5    |
|                                     |              | -35              | 2.700                 | 0.484                | 245.2   | 19.30   | 5.10  | 136.5    |
|                                     |              | -40              | 2.680                 | 0.478                | 304.0   | 24.0  | 5.07  | 171.0    |
| 1.280<br>29.4<br>(41.6)             | -50.1        | 20               | 2.805                 | 0.555                | 34.03   | 2.65  | 5.57  | 17.2     |
|                                     |              | 0                | 2.755                 | 0.528                | 54.92   | 4.30  | 5.40  | 28.7     |
|                                     |              | -10              | 2.721                 | 0.516                | 86.30   | 6.75  | 5.35  | 45.4     |
|                                     |              | -20              | 2.680                 | 0.504                | 138.3   | 10.8  | 5.28  | 73.4     |
|                                     |              | -30              | 2.659                 | 0.490                | 212.8   | 16.6  | 5.19  | 115.0    |
|                                     |              | -40              | 2.638                 | 0.477                | 323.6   | 25.3  | 5.10  | 179.0    |
|                                     |              | -45              | 2.617                 | 0.470                | 402.1   | 31.4  | 5.06  | 223.0    |
|                                     |              | -50              | 2.617                 | 0.464                | 490.33  | 38.3  | 4.98  | 235.0    |
| 1.286<br>28.9<br>(42.7)             | -55          | 20               | 2.784                 | 0.554                | 35.11   | 2.75  | 5.58  | 17.8     |
|                                     |              | 0                | 2.738                 | 0.528                | 56.88   | 4.43  | 5.40  | 29.5     |
|                                     |              | -10              | 2.700                 | 0.515                | 90.42   | 7.04  | 5.34  | 47.5     |
|                                     |              | -20              | 2.680                 | 0.502                | 144.2   | 11.23   | 5.25  | 77.0     |
|                                     |              | -30              | 2.659                 | 0.488                | 225.6   | 17.6  | 5.16  | 123.0    |
|                                     |              | -35              | 2.638                 | 0.483                | 284.4   | 22.1  | 5.10  | 156.5    |
|                                     |              | -40              | 2.638                 | 0.476                | 353.0   | 27.5  | 5.06  | 196.0    |
|                                     |              | -45              | 2.617                 | 0.470                | 431.5   | 33.5  | 5.02  | 240.0    |
|                                     |              | -50              | 2.617                 | 0.463                | 509.9   | 39.7  | 4.96  | 290.0    |
| -55                                 | 2.596        | 0.456            | 647.2                 | 50.2                 | 4.91  | 368.0   |   |          |

① 括号中的数值为 100 [kg] 水中氯化钙质量的千克数。

### 3. 有机物载冷剂

在一些不允许使用有腐蚀性的载冷剂场合,可采用甲醇、乙二醇等水溶液。

#### (1) 甲醇水溶液

甲醇的凝固点为  $-97.5[^\circ\text{C}]$ 。甲醇具有燃烧性,使用时应采取防火措施。

#### (2) 乙二醇水溶液

纯乙二醇溶液无色、无味、不燃烧。虽略带毒性,但无危害。不同使用温度下,常用的几种载冷剂物理性质比较,见表 13.12。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

表13.12

几种载冷剂的物理性质比较

| 使用温度<br>[°C] | 载冷剂名称  | 质量浓度<br>[%] | 密度<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 比热<br>[kJ/kg·°C] | 导热系数<br>[W/mK] | 粘度×10 <sup>3</sup><br>[Pas] | 凝固点<br>[°C] |
|--------------|--------|-------------|----------------------------|------------------|----------------|-----------------------------|-------------|
| 0            | 氯化钙水溶液 | 12          | 1111                       | 3.462            | 0.528          | 2.5                         | -7.2        |
|              | 甲醇水溶液  | 15          | 979                        | 4.1888           | 0.493          | 6.9                         | -10.5       |
|              | 乙二醇水溶液 | 25          | 1030                       | 3.831            | 0.511          | 3.8                         | -10.6       |
| -10          | 氯化钙水溶液 | 20          | 1168                       | 3.035            | 0.500          | 4.9                         | -15.0       |
|              | 甲醇水溶液  | 22          | 970                        | 4.061            | 0.461          | 7.7                         | -17.8       |
|              | 乙二醇水溶液 | 35          | 1053                       | 3.559            | 0.472          | 7.3                         | -17.8       |
| -20          | 氯化钙水溶液 | 25          | 1253                       | 2.809            | 0.475          | 10.6                        | -29.4       |
|              | 甲醇水溶液  | 30          | 949                        | 3.810            | 0.387          | -                           | -23         |
|              | 乙二醇水溶液 | 45          | 1080                       | 3.308            | 0.441          | 21                          | -26.6       |
| -35          | 氯化钙水溶液 | 30          | 1312                       | 2.638            | 0.441          | 27.2                        | -50         |
|              | 甲醇水溶液  | 40          | 963                        | 3.496            | 0.326          | 12.2                        | -42         |
|              | 乙二醇水溶液 | 55          | 1097                       | 2.973            | 0.372          | 90.0                        | -41.6       |

续表13.12

| 使用温度<br>[°C] | 制冷剂名称        | 质量浓度<br>[%] | 密度<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 比热<br>[kJ/kg·°C] | 导热系数<br>[W/mK] | 粘度×10 <sup>3</sup><br>[Pas] | 凝固点<br>[°C] |
|--------------|--------------|-------------|----------------------------|------------------|----------------|-----------------------------|-------------|
| -35          | 二氟甲烷(R 30)   | 100         | 1423                       | 1.147            | 0.204          | 0.80                        | -96.7       |
|              | 三氟乙烯         | 100         | 1549                       | 0.996            | 0.150          | 1.13                        | -88         |
|              | 三氟一氟甲烷(R 11) | 100         | 1608                       | 0.816            | 0.131          | 0.88                        | -111        |
| -50          | 二氟甲烷         | 100         | 1450                       | 1.147            | 0.190          | 1.04                        | -96.7       |
|              | 三氟乙烯         | 100         | 1578                       | 0.929            | 0.171          | 1.90                        | -88         |
|              | 三氟一氟甲烷       | 100         | 1641                       | 0.812            | 0.136          | 1.25                        | -111        |
| -70          | 二氟甲烷         | 100         | 1478                       | 1.147            | 0.221          | 1.37                        | -96.7       |
|              | 三氟乙烯         | 100         | 1590                       | 0.456            | 0.195          | 3.40                        | -88         |
|              | 三氟一氟甲烷       | 100         | 1660                       | 0.833            | 0.150          | 2.15                        | -111        |

注:引自《制冷工程设计手册》。

## 第 14 章 制冷压缩机

在蒸气压缩式制冷装置中,为把制冷剂蒸气从低压提升为高压,并使它在制冷系统中不断循环流动,采用了各种类型的制冷压缩机。

制冷压缩机根据其工作原理可分容积型和速度型两大类。在容积型压缩机中,气体压力的提高是靠吸入气体的体积被强行缩小,使单位容积内气体分子数增加来达到。容积型压缩机有两种结构形式:往复式(简称活塞式)和回转式。在速度型压缩机中,气体压力提高是靠气体的速度转化而来,即先使气体获得一定高速度,然后再由速度能变成气体位能。制冷装置中应用的速度型压缩机主要是离心式制冷压缩机。

所有制冷压缩机。根据其结构特点和工作原理,均有其最佳冷量使用范围,因此,当使用的冷量和条件不同时,应选用不同型式的压缩机,以获得最佳运行效果。

### 14.1 活塞式制冷压缩机

活塞式制冷压缩机是问世最早的压缩机,几乎和机械制冷方法同时出现,在 100 多年的使用过程中,得到了广泛发展和深入研究,直到目前为止,虽然其地位受到其他类型压缩机的挑战,但其产量仍然在各类压缩机中占主要地位。

#### 14.1.1 活塞式制冷压缩机的分类

1. 按压缩机气缸分布形式分类。可分为直立式、V 型、W 型、S(形扇形)、Y 型(星形)等。
2. 按使用的制冷剂种类分类。可分为氟利昂、氨等制冷压缩机。
3. 按压缩机与电动机的组合形式分类。可分为开启式和封



闭式(其中又可分为全封闭式和半封闭式)两种。

4. 按压缩机的级数分类。可分为单机单级和单机双级压缩机。

制冷压缩机通常用一定的数字和符号表示,以便于用户选用(见表14.1)。

活塞式制冷压缩机型号表示法

表 14.1

| 压缩机型号     | 气缸数<br>[只] | 制冷剂    | 气缸排列形式 | 气缸直径<br>[cm] | 结构形式   |
|-----------|------------|--------|--------|--------------|--------|
| 8 AS 12.5 | 8          | 氨(A)   | S形(扇形) | 12.5         | 开启式    |
| 6 FW 7 B  | 6          | 氟利昂(F) | W形     | 7            | 半封闭(B) |
| 3 FY 5 Q  | 3          | 氟利昂(F) | Y形(星形) | 5            | 全封闭(Q) |

### 14.1.2 制冷压缩机的总体结构和主要零部件

为了保证制冷压缩机的正常运行,压缩机本体是用许多零部件组成,对于一台较典型的大型活塞式制冷压缩机,这些零部件可以分为以下几个部分:

1) 机体。它是压缩机的机身,用来安装和支承其他零部件以及容纳润滑油。

2) 传动机构。压缩机借助该机构传递动作,对气体做功,它包括曲轴、连杆、活塞等。

3) 配气机构。它是保证压缩机实现吸气、压缩、排气过程的配气部件,它包括吸、排气阀后,阀板和气阀弹簧等。

4) 润滑油系统。它是对压缩机各传动摩擦偶合件进行润滑的输油系统,它包括油泵、油过滤器和油压调节部件等。

5) 卸载装置。它是对压缩机气缸进行卸载、调节冷量、便于启动的传动机构,它包括卸载油缸、油活塞、推杆和顶针、转环等零件。

6) 轴封装置。在开启式压缩机中,轴封装置用来密封曲轴穿出机体处的间隙,防止泄漏,它包括托板、弹簧、橡胶圈和石墨环

等。

### 1. 开启式制冷压缩机

图 14.1 为 8FS10 型开启式制冷压缩机的机体图，机体通常为整体铸造，压缩机的各个零部件按一定顺序装在其固定部位。零部件的组合和安装必须由熟练的工人或技术人员承担，特别是大、中型制冷压缩机，尤应重视。

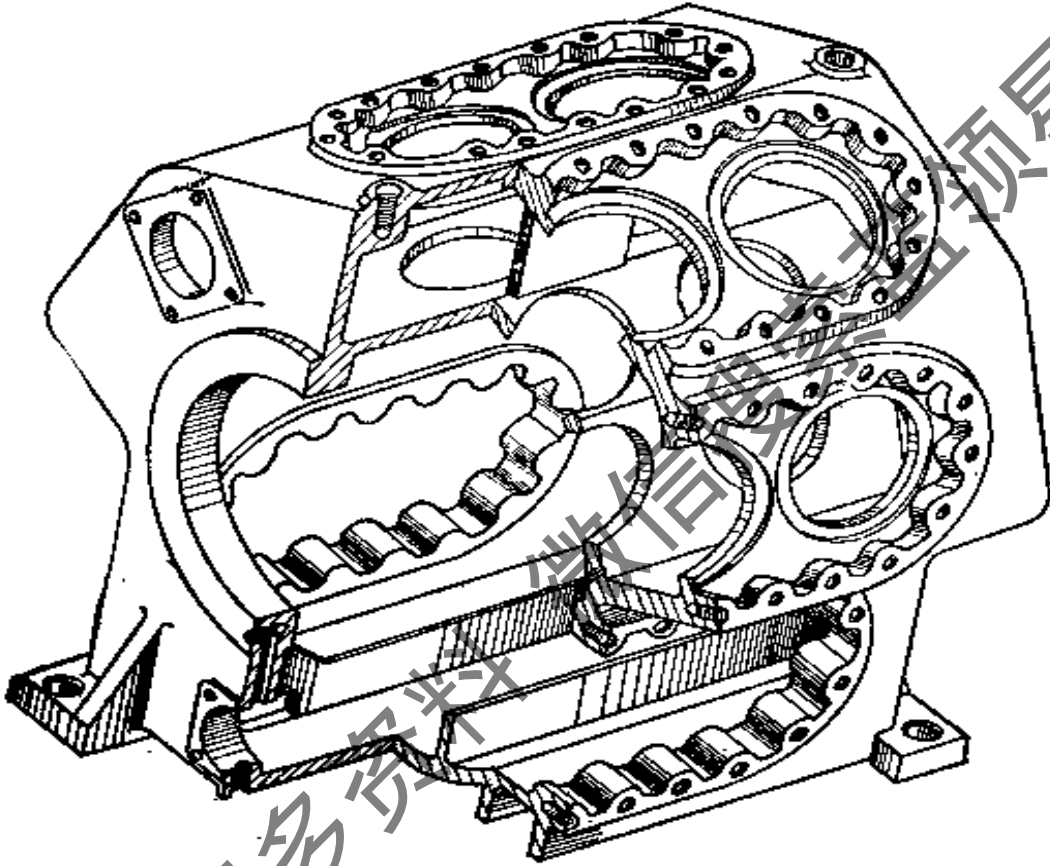


图 14.1 8FS10 型制冷压缩机机体

图 14.2 为一台完整的 8FS10 型制冷压缩机总体结构。为了进一步熟悉压缩机中各个零部件的结构和工作过程，现分述如下。

#### (一) 传动机构

图 14.3 为八缸制冷压缩机的传动机构，图中展示了该机构中的曲轴、连杆、活塞三个主要部件的构造以及它们之间的连接。

曲轴前后的两个主轴承分别压配在轴承座上，作为轴承的两

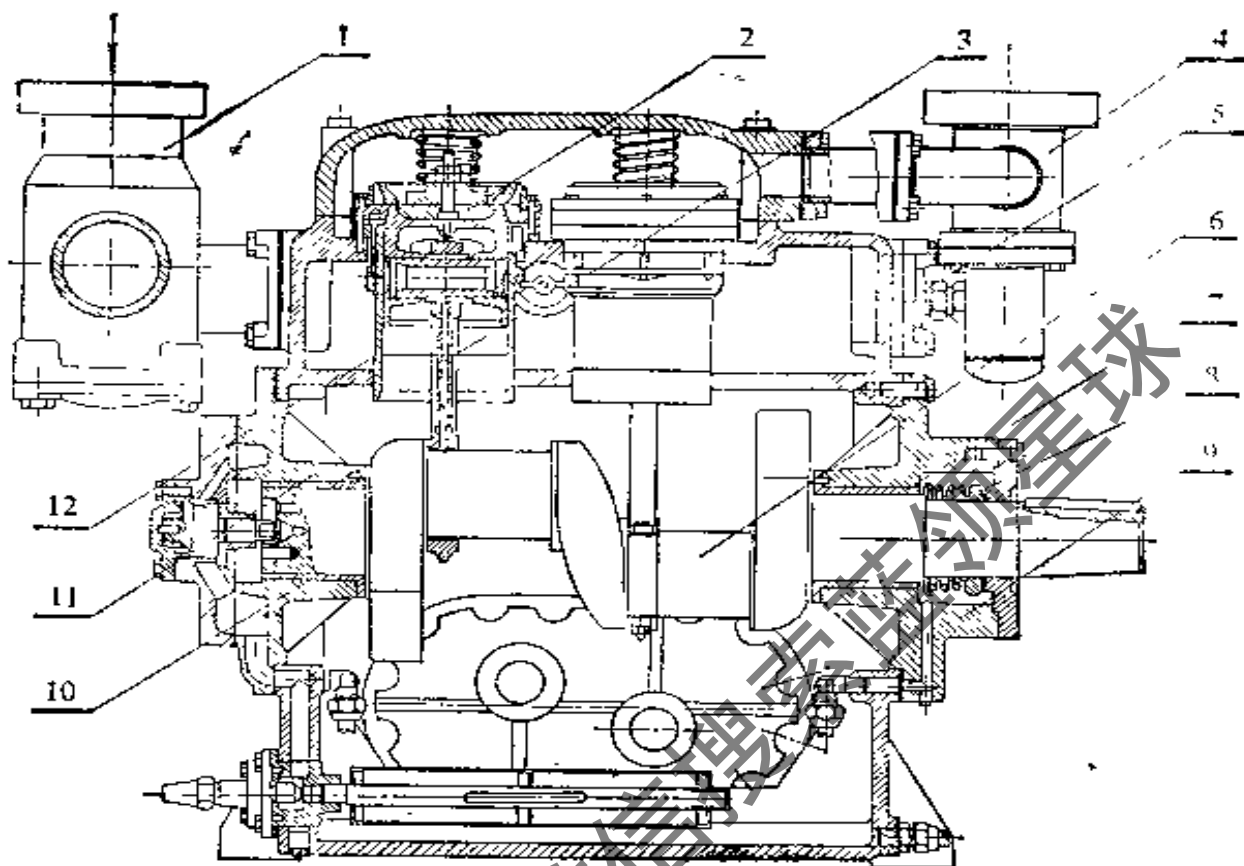


图 14.2 8FS10 型制冷压缩机的总体结构

- 1—吸气管; 2—假盖; 3—连杆; 4—排气管; 5—气缸体;  
 6—曲轴; 7—前轴承; 8—轴封; 9—前轴承盖; 10—后轴承;  
 11—后轴承盖; 12—活塞

个支撑点支撑着曲轴。曲轴的轴颈与连杆大头连接，连杆小头通过活塞销与活塞连接。当曲轴在皮带轮或电动机直接驱动下旋转时，活塞将通过连杆的传递作用在气缸(或气缸套)内作往复运动(图中仅以一只活塞代表)。为了防止活塞在压气过程中的高压气体向曲轴箱泄漏，活塞上装有几道气环(活塞环)，气环外圆面依靠其本身的弹力和气体压力紧贴在气缸壁上，随着活塞的往复运动，气环的一个端面与环槽端面相贴，当几道环连在一起时，造成了层层阻挡的曲折途径，从而达到了密封要求。活塞上还装有一道油环(在最后一道活塞环的下面)，用来收刮气缸壁上的润滑油，使其重新回流到曲轴箱中。

用油泵供油润滑的压缩机，其曲轴内部钻有油道，连杆内部也

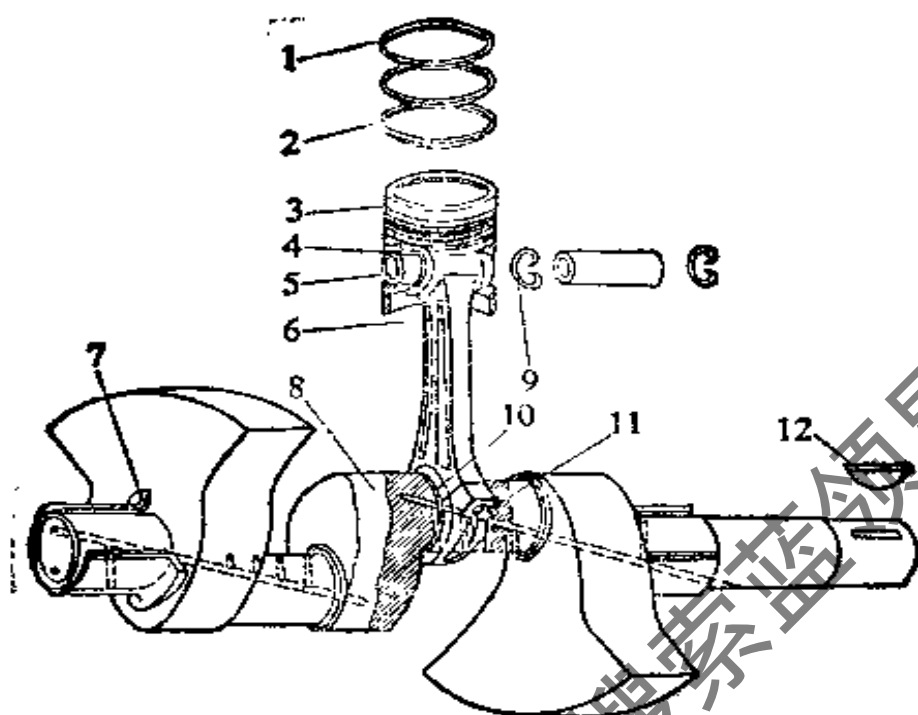


图 14.3 八缸制冷压缩机的传动机构

- 1—气环；2—油环；3—活塞；4—连杆小头；5—活塞销；  
6—连杆；7—主轴承；8—曲轴；9—活塞销挡圈；10—连杆大头；  
11—连杆螺栓；12—键

有油孔，润滑油借助油泵的供油压力经油道或油孔向主轴承、轴颈和活塞销等各个摩擦件供应润滑油。

润滑油泵装在曲轴的后轴承端(图 14.3 曲轴的左端)，油泵的转轴嵌在曲轴槽中，当曲轴转动时，油泵也随之旋转、供油。

## (二) 配气机构

制冷压缩机的配气机构随压缩机的型式和大小有较大区别，目前使用中比较典型的有以下三种形式：

1) 月牙形和舌形阀片阀板组(图 14.4)。这种形式的配气机构主要应用在小形封闭式制冷压缩机中，月牙形的排气阀片和阀片升高限制器装在阀板的排气侧，控制呈月牙形布置的四个排气孔启闭。舌形吸气阀片装在

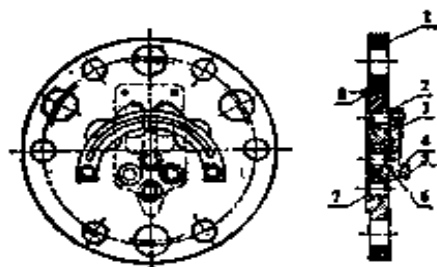


图 14.4 月牙形和舌形  
阀片阀板组

阀板和气缸之间（图中用虚线画出），一端用两只销钉固定在气缸壁上，控制四个呈菱形布置的吸气孔启闭。这种阀片阀板组的结构简单，工作噪声低，但阀片承受挠曲和气体冲击作用，因此常用优质带钢制作。

2) 环形阀片阀板组(图 14.5)。这种形式的配气机构在老式的 2F10 和 4F10 制冷压缩机中采用。环形排气阀片、限位器、排气阀片、弹簧等，通过螺栓连接而组合在一起(为了清楚展示，阀板组已分解)。吸气阀片和弹簧安放在阀板和吸气阀片限位器之间，限位器用过盈配合压在气缸口周围，它既是限位器，又是吸气阀片的弹簧座。环形阀片的工作条件优于月牙形和舌形，只要不发生严重液击现象，使用寿命较长。

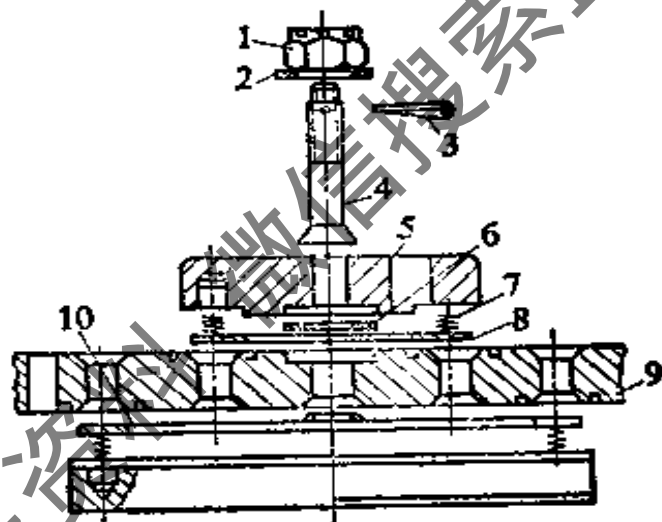


图 14.5 环形阀片阀板组

1—螺母；2—垫圈；3—开口销；4—螺栓；5—限位器；6—排气阀片限位器；7—弹簧；8—排气阀片；9—阀板；10—吸气阀片

3) 带有能量调节的配气和卸载机构(图 14.6)。这是一套组合式配气和卸载机构，它不但包括环形吸、排气阀片，弹簧等零件，而且还包括气缸套、吸气阀片顶开机构和安全缓冲装置，这些零件组装成整体后，直接安装在机体上。气缸体的外侧与吸气腔和曲轴箱相通，而装在气缸套上的假盖(内装有排气阀片和弹簧)通过假盖弹簧和气缸盖紧压在气缸套上部，并与排气腔相通。当缸内活塞下行时，缸套外侧的低压制冷剂蒸气经过吸气孔并冲开吸

气阀片进入气缸。当活塞上行时，气缸中的气体被压缩，压力升高，吸气阀片降落在吸气孔上，把全部吸气孔关闭。当缸内压力升至排气压力时，气缸中的高压气体将冲开排气阀片，经假盖上的排气孔进入排气腔，这样压缩机就完成了—次工作过程。

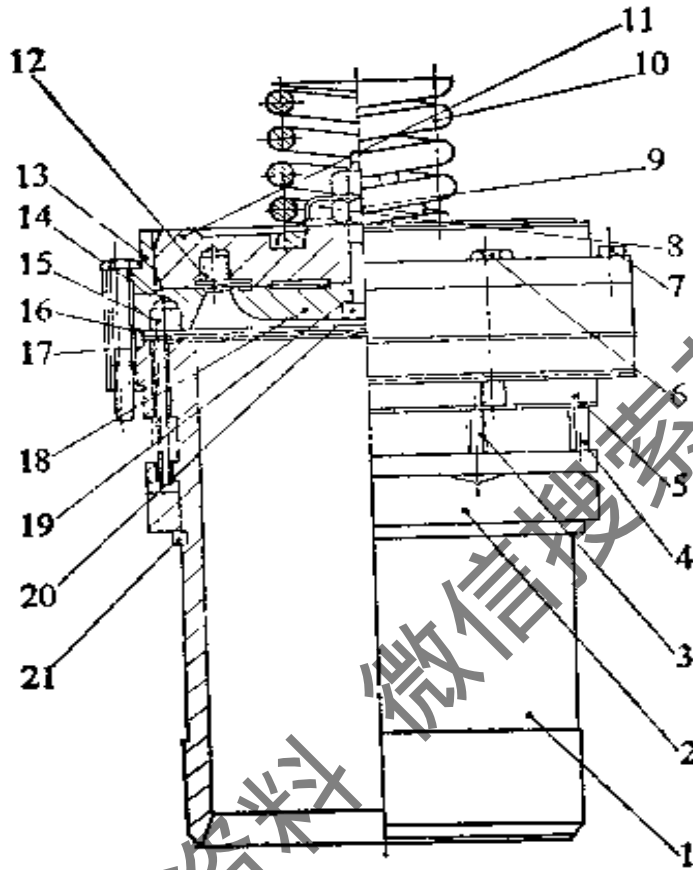


图 14.6 组合式气阀和气缸套

- 1—气缸套；2—转动环；3—顶杆；4—开口销；5—顶杆弹簧；6—弹簧垫圈；7—内六角螺栓；8—套圈；9—六角螺母；10—假盖弹簧；11—假盖；12—排气阀片；13—导向环；14—阀片弹簧；15—排气阀外阀座；16—吸气阀片；17—气缸套垫片；18—排气阀内阀座；19—垫圈；20—螺栓；21—止推环

当压缩机在运行过程中需要调节其制冷量时，对于小型制冷压缩机可用温度继电器直接控制压缩机的停开，但是由于中、大型压缩机的电动机容量较大，停机后启动过程较复杂，而且因启动电流过大对整个供电线路带来不良影响。因此，中、大型压缩机只能在不停机的条件下对其制冷量（实际上为压缩机的吸气量）进行调节，根据活塞式制冷压缩机的工作过程和目前的技术水平，比较方

便和有效的办法是把部分气缸的吸气阀片顶开，使这部分气缸的吸气量为零(即卸载)，这样，制冷系统中的制冷剂循环量就减少，冷量也就减少。

制冷压缩机的能量卸载机构由装在气缸套外侧的转动环、顶杆和顶杆弹簧(见图 14.6)以及推动转动环转动的卸载油缸、推杆等部件。卸载机构动作的动力是具有一定压力的润滑油(见图 14.8)。当转动环位于图 14.6 所示位置时，顶杆的下端处在转环的凹槽中，环形吸气阀片在阀座中能自由启闭。当卸载油缸中失去一定压力的润滑油时，油缸中的油活塞便带动推杆推动转环转动，使顶杆下端沿凹槽斜面移动，顶杆升起，上端触及吸气阀片并把它强行顶开，使该气缸处于卸载状态。当接通油缸的供油，则油压升高，转动环在油活塞弹簧和推杆的拉动下，向相反方向转动，顶杆又移至转环的凹槽中，吸气阀片恢复自由状态，气缸又投入了正常工作。另外，从卸载机构的工作过程可知，当压缩机刚启动时，由于润滑油压尚未达到正常压力，无法推动油缸中的油活塞动作，则气缸均处于卸载状态(吸气阀片被顶开)，这就有利于大型制冷压缩机的启动。

### (三) 润滑油系统

制冷压缩机的润滑方法通常有以下三种形式。

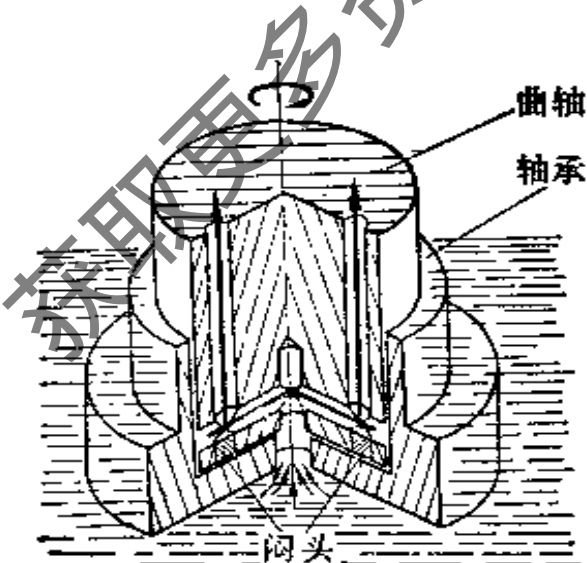


图 14.7 离心供油润滑

1) 飞溅润滑。它是利用曲轴旋转时接触油面(或曲轴设置的附件)，使润滑油飞溅而使各摩擦偶合件得到润滑，这种润滑方法一般用在小型开启式或半封闭压缩机中。

2) 离心供油润滑(图14.7)。这种供油润滑方式目前均用在曲轴呈垂直安装的全封闭压缩机中。在正常运行时，曲轴顶端和中心孔应浸没在润滑油中，由于

曲轴高速旋转时产生离心力，中心孔中的润滑油将在离心力作用下沿油道向两侧和上部流动，使各摩擦件得到润滑。由于离心供油能沿曲轴的两侧油道流动，因此它与曲轴的旋转方向无关，对曲轴旋转方向难以判别的封闭式压缩机特别适用。

3) 机械油泵供油润滑。它是利用各种机械式油泵（如齿轮泵、月牙形泵和转子泵等）抽吸和压送润滑油。对于中、大型和带有能量卸载的制冷压缩机，一定要采用机械油泵供油。因为中、大型压缩机的油道阻力较大，具有能量卸载机构中的油活塞动作时需要较高的油压，只有采用机械油泵才能满足上述要求。

图 14.8 是带有能量调节卸载装置的压缩机润滑油流程示意

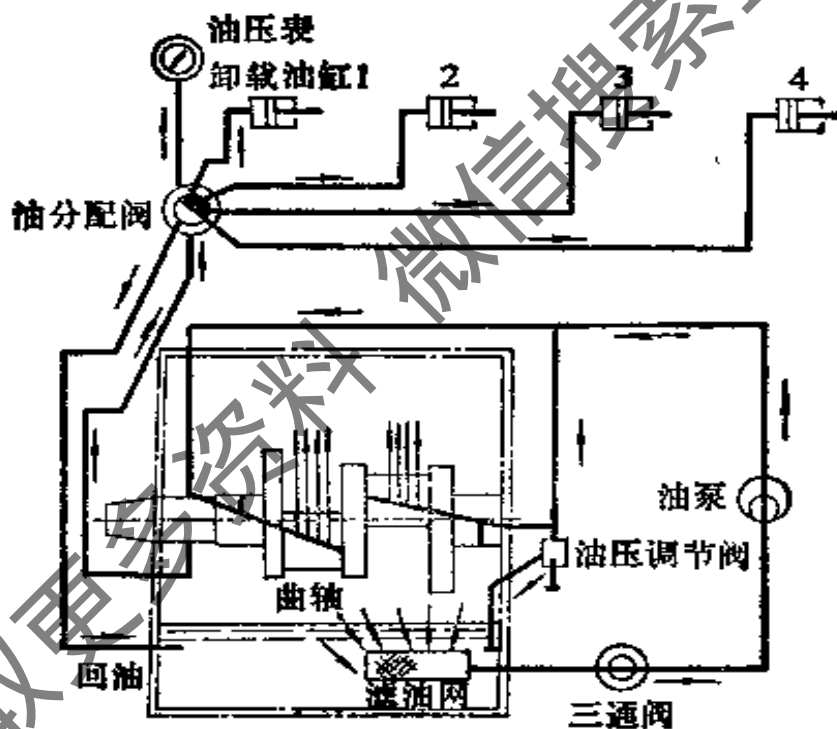


图 14.8 压缩机润滑油流程图

图，图中的油泵实际上应装在曲轴的右端，与曲轴连接，由曲轴带动旋转。当油泵转动时，由于曲轴箱中的油面压力处在吸气压力作用下，润滑油便能通过滤油网进入油泵，然后经油泵升压后送往各处润滑。在带有能量调节卸载机构的压缩机中，部分润滑油将进入油分配阀，然后根据外界对冷量的需求量，用人工方法控制其



进入卸载油卸(也可以不经过油分配阀而用电磁阀控制)。前已介绍,当油缸中进入压力润滑油时,属该油缸控制的压缩机气缸(一只或两只)便投入正常运行。切断油缸供油时,该油缸控制的气缸便停止输气,处在卸载状态。

#### (四)轴封装置

对于开启式制冷压缩机,曲轴均需伸出机体(曲轴箱)与动力机械连接。由于曲轴箱内充满了低压制冷气体,因此在曲轴伸出机体的部位应安装密封装置,以防系统内制冷剂向外泄漏,或者因曲轴箱内气体压力过低而使外界空气进入制冷系统。曲封装置通常是开启式制冷压缩机易于损坏,并造成泄漏的重要部件。

图 14.9 是目前广泛使用的弹簧式轴封装置结构图,由图可知,该装置由托板、弹簧、紧套在轴上的橡胶圈、石墨环以及轴封外盖压板等零部件组成。整个轴封装置套装在伸出机体的曲轴段,轴封外盖压板用螺栓紧固在机体上,使弹簧处在被压缩状态。轴

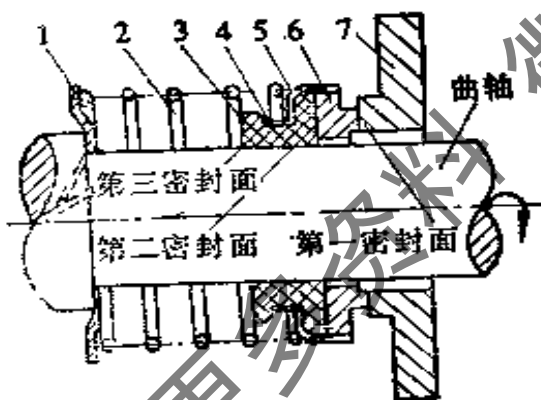


图 14.9 轴封器密封原理图  
1—托板;2—轴封弹簧;3—轴封橡胶圈;4—紧圈;5—钢壳;  
6—石墨环;7—轴封外盖压板

封装置有三个密封面,保证了曲轴与机体之间的密封。第一密封面是石墨环与外盖压板之间的密封,由于石墨环随曲轴一起旋转,因此它是一个动密封面。第二密封面是石墨环与橡胶端面之间靠弹簧紧压的密封面。第三密封面是橡胶圈和曲轴之间的密封。如果这三个径向和轴向密封面都能保持密封状态,则曲封装置就不会产生泄漏。

弹簧式轴封装置的易损部件是石墨环和橡胶圈,当石墨环被磨损或橡胶圈老化、发胀时,均可能危及密封作用,产生泄漏现象,到时必须拆下检修。

#### 2. 封闭式制冷压缩机

电机与压缩机组装成整体结构的制冷压缩机,称为封闭式制冷压缩机。这种机型在 60 多年前已经出现,它的出现是对开启式

压缩机结构形式的一次重大改革。但是，由于当时尚未发现氟利昂制冷剂和高分子绝缘漆，一直未能得到广泛使用。它的迅速发展和推广实际上是在二次大战以后，由于封闭式制冷压缩机中的电机与压缩机已组装成整体结构，这样就不存在轴封泄漏问题，因此也就不必设置轴封装置。与开启式压缩机相比较，它具有结构紧凑、体积小、重量轻等一系列优点，对中、小型制冷装置特别适用。

### (一)半封闭式制冷压缩机

图 14.10 为半封闭式制冷压缩机的总体结构图。由图可知，来自蒸发器的制冷剂蒸气经吸气阀和吸气滤网后首先进入电机腔，由于电机腔和压缩机曲轴箱之间是连通的。所以吸入气体将立即由曲轴箱经吸气阀片进入气缸。根据半封闭式压缩机的结构和制冷剂的吸气流动过程可以知道，压缩机的电机全部浸没在制冷剂气体中，而且直接与润滑油接触，因此电机必须使用耐氟利昂的漆包线(氨压缩机无封闭式结构)，对制冷系统内部的清洁和干燥也提出了更高要求。因为系统内部的金属屑、砂粒等杂质不但会堵塞节流机构和润滑油道，而且可能损坏电机的漆包线，使其短路

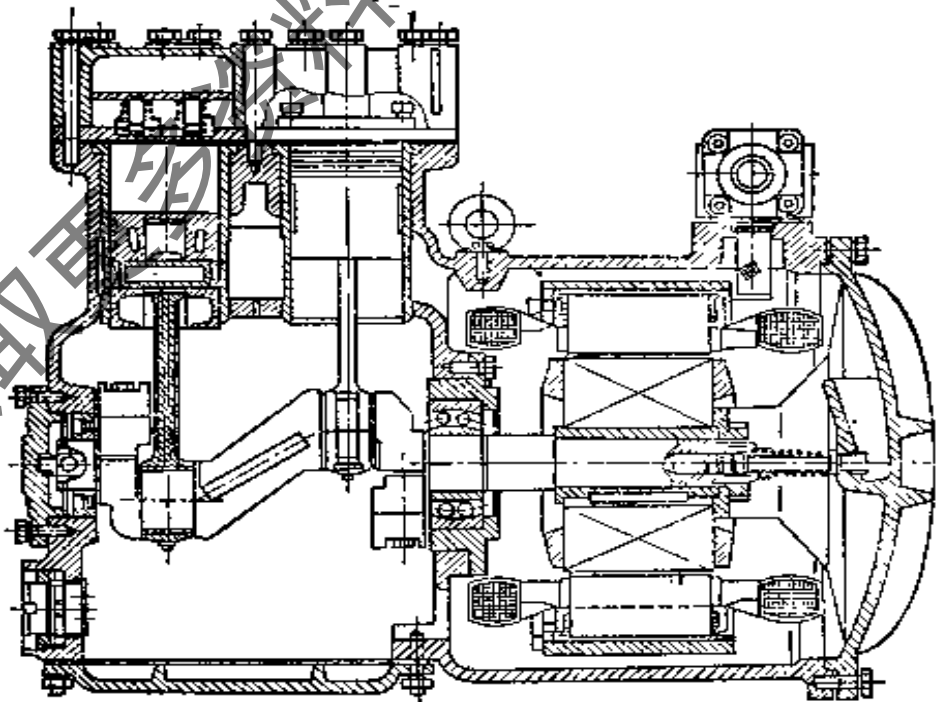
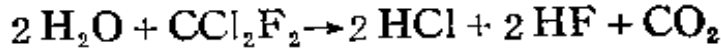


图 14.10 半封闭式制冷压缩机

烧毁。制冷系统中若含有过量水分,不但会产生冰塞,而且会与氟利昂制冷剂起化学反应而生成酸,当酸值超过一定值时,将会剥落漆包线的绝缘漆,同样危及电机的使用寿命。现以 R 12 (CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) 与水(H<sub>2</sub>O)的化学反应举例如下:



上述反应式中的盐酸(HCl)对金属零件和电机漆包线有强烈的腐蚀作用。制冷系统中所含酸量主要集中在润滑油中,系统中的含酸量可通过测量油的酸度(或全酸值)加以鉴别。所谓酸度,即对 1[g]油中的酸进行中和时所需加入的氢氧化钾(KOH)毫克数。当润滑油中的酸度达到 0.045 时,电机将有烧毁的危险,须更换新的润滑油。

### (二)全封闭式制冷压缩机

图 14.11 为全封闭制冷压缩机的结构图。由图可知,压缩机

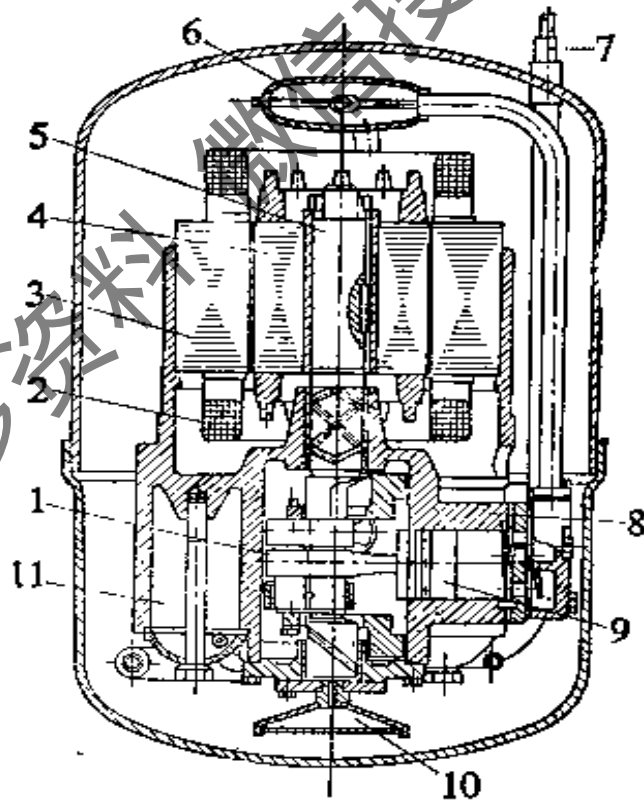


图 14.11 全封闭式制冷压缩机

- 1—连杆; 2—电机绕组; 3—电机定子; 4—电机转子;  
5—曲轴; 6—吸气管; 7—排气管; 8—气缸体; 9—活塞;  
10—滤油网; 11—稳压室

和电机组成的整体封闭在钢板冲制的机壳内。机壳分上、下两部分，中间接缝处用电焊焊接。因此全封闭压缩机比半封闭压缩机具更好的密封性。但是当机壳内的压缩机或电机的零部件产生故障时，必须将机壳沿焊缝剖开后才能检修，因此检修比较麻烦。

在全封闭制冷压缩机中，来自蒸发器的制冷剂蒸气由吸气管直接进入机壳内腔，然后通过吸气包分别进入各个气缸，在气缸中经活塞压缩后的高压气体先进入稳压室，然后由稳压室用铜管直接排出。由于全封闭压缩机的机壳内腔处于低压吸气状态，因此处于高压状态的排气管、稳压室一定要具有可靠的密封性，绝不可产生泄漏，否则将可能出现制冷剂蒸气在机壳内部循环，影响制冷装置正常运行。

全封闭压缩机的气缸通常为卧式排列（如图 14.11），润滑油通过曲轴下端的偏心孔，在曲轴高速旋转时的离心力作用下送往各个摩擦面。

全封闭压缩机与半封闭压缩机一样，同属于封闭式压缩机，因此，它对制冷系统内部的清洁、干燥具有同样的要求。而且由于全封闭压缩机的容量较小，检修困难，它对清洁、干燥的要求甚至比半封闭压缩机更高。

### 14.1.3 活塞制冷压缩机的工作性能

活塞式制冷压缩机的工作性能主要是指它的容积效率、吸气量、制冷量、耗功率等，这些性能参数对每一台压缩机均不是定值，而是随所用制冷剂的性质、运行工况等许多因素而变化。熟悉和掌握制冷压缩机工作性能的变化规律，对正确选用压缩机以及运行工况分析和故障排除等都是十分重要的。

#### 1. 活塞式制冷压缩机的工作过程

活塞式制冷压缩机的工作过程包括吸气、压缩、排气三个过程，理想工作过程在  $P-V$  图上的表示如图 14.12 所示。由图可知，当气缸中的活塞向右移动时，缸内容积增大，压力降低，在理想过程中，当气缸内压力降至吸气压力  $P_1$  时，则吸气阀片开启，压缩机在等压状态下吸气（1-2 过程）。当活塞由右端向左移动时，缸

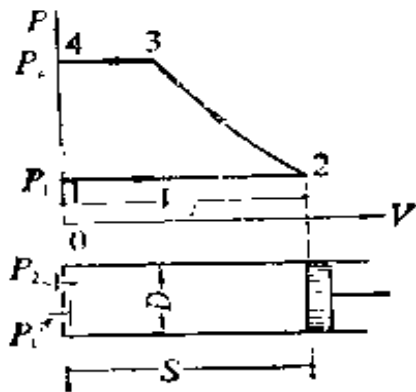


图 14.12 理想工作过程

内压力升高,吸气阀片关闭,气体在气缸内进行绝热压缩(2-3 过程),当缸内压力升至排气压力  $P_2$  时,排气阀片开启,气体在等压下排出气缸(3-4 过程)。当活塞移至左端阀板处时,缸内气体全部排出,并将重复上述过程。

活塞式制冷压缩机的曲轴每旋转一圈,压缩机即进行一次吸气、压缩和排气过程。每只气缸吸入的低压气体体积(或称气缸工作容积)为

$$V_0 = \frac{\pi D^2}{4} s \quad [\text{m}^3] \quad (14.1)$$

式中  $D$ ——气缸直径[m];

$s$ ——活塞行程[m]。

若压缩机的气缸数为  $Z$ , 转数为  $n$  [r/min], 则压缩机每秒钟吸入气体的体积  $V_a$  为

$$V_a = \frac{V_0 n Z}{60} = \frac{\pi D^2}{240} s n Z \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (14.2)$$

$V_a$  通常称为压缩机的活塞排量或理论吸气量,该值仅与压缩机的结构参数有关,而与压缩机的运行工况和使用的制冷剂性质无关。

## 2. 压缩机的容积效率

压缩机的实际工作过程比理想工作过程复杂,它的实际吸气量  $V_r$  小于活塞排量  $V_a$ , 两者之比称为压缩机的容积效率  $\eta_v$ 。

即

$$\eta_v = \frac{V_r}{V_a} \quad (14.3)$$

显然,  $\eta_v$  总小于 1, 它的大小反映了压缩机气缸容积的有效利用程度。影响压缩机容积效率的主要因素有气缸的余隙容积(活塞在排气结束时与阀板及排气孔之间形成的空隙容积)  $V_c$ , 吸、排气阀片阻力 ( $\Delta P_1$ 、 $\Delta P_2$ ), 气缸内部的泄漏以及吸入气缸的低温制

冷剂遇到热的气缸壁引起的热膨胀等。有关这些影响的进一步分析如下所述。

### (一) 余隙容积的影响

图 14.13 为活塞式制冷压缩机的实际工作过程在  $P-V$  图上的表示。图中的  $V_0$  为气缸的余隙容积。余隙容积可以缓冲气缸中的液击以及防止活塞和阀板之间可能产生直接撞击，使压缩机安全可靠地运行。但是，由于余隙容积的存在，气缸在排气过程结束时，缸内仍留有  $V_0$  体积的高压气体，当活塞作吸气运动时，由于缸内气体压力较高，吸气阀片无法立即开启，只有当高压气体膨胀至吸气压力  $P_1$  时，吸气阀片才能开启并进行吸气，该过程在图中以 3-4 过程表示， $\Delta V_1$  就是因余隙容积存在而减少的吸气体积量。 $V_1$  与  $V_0$  之比称为余隙系数  $\lambda_0$ 。

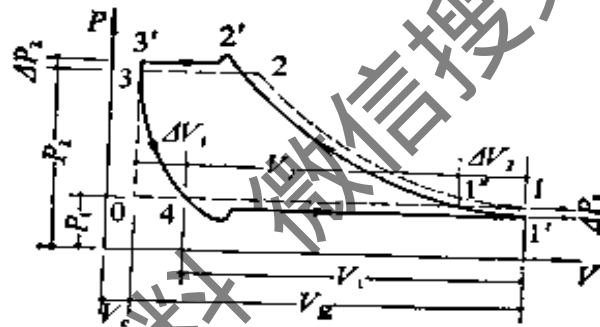


图 14.13 压缩机的实际工作过程

即

$$\lambda_0 = \frac{V_1}{V_0} = \frac{V_0 - \Delta V_1}{V_0}$$

$\lambda_0$  值的大小，反映了余隙容积对压缩机吸气量的影响。由图 14.13 可知，减少的吸气量  $\Delta V_1$  不但与余隙容积  $V_0$  的大小有关，而且与压缩机运行时的压力比  $P_2/P_0$  有关，压力比增大， $\Delta V_1$  也增大，余隙系数下降。

### (二) 吸、排气阀片阻力的影响

当制冷剂蒸气流经吸、排气阀孔和阀片时，均存在流动阻力  $\Delta P_1$  和  $\Delta P_2$  (见图 14.13)，) 这些阻力也影响压缩机吸气量，特别是吸气阻力  $\Delta P_1$  影响较大。这是因为余隙容积中的高压气体沿

3-4 膨胀到吸气压力  $P_1$  时,吸气阀片仍不能开启,只有当气缸中的气体压力降至  $P_1 - \Delta P_1$  时,吸气阀片才会打开(由于阀片的惯性作用,刚开启时缸内压力更低),气缸开始吸气。由于吸气压力以  $P_1$  为基准,则气缸的吸气量为  $V_2$ , 损失吸气量为  $\Delta V_1$ ,  $V_2$  和  $V_1$  之比称为节流系数  $\lambda_p$

$$\text{即} \quad \lambda_p = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_1 - \Delta V_1}{V_1}$$

$\lambda_p$  值的大小,反映了吸、排气阀片阻力对压缩机吸气量的影响。由图可知,损失的吸气量  $\Delta V_1$  主要与  $P_1$  和  $\Delta P_1$  有关,吸气压力  $P_1$  越低,吸气阀片阻力  $\Delta P_1$  越大,则损失的吸气量  $\Delta V_1$  越大,节流系数  $\lambda_p$  越小。

### (三) 吸入蒸气的热膨胀

当流出蒸发器的低温制冷剂蒸气进入气缸时,由于受到热的气缸壁影响,其温度升高,比容增大,压缩机实际吸入的蒸气质量减少。减少量与气缸壁和低温蒸气的温度有关。这两个温度实际上取决于制冷剂的冷凝温度  $t_k (P_k)$  和蒸发温度  $t_0 (P_0)$ , 因为  $t_k$  越高,气缸壁温也越高。 $\lambda_t$  越低,吸入蒸气的温度也越低,蒸气加热后比容变化也越大,吸入制冷的质量损失也越多。这一损失用预热系数  $\lambda_t$  表示。对于开启式制冷压缩机,可用下述经验公式计算

$$\lambda_t = \frac{T_0}{T_k} = \frac{273 + t_0}{273 + t_k}$$

对于封闭式制冷压缩机,制冷剂在进入气缸之前还吸收了电机热量,因此它的预热系数也就较开启式制冷压缩机低。

### (四) 压缩机内部的泄漏

由于制冷压缩机的吸、排气阀片以及活塞与气缸壁之间并非绝对严密,压缩机运行时,总有少量蒸气从高压部分向低压部分泄漏。泄漏损失用气密系数  $\lambda_l$  表示。压缩机的气密系数不但与它的阀片等有关部件的结构、加工、磨损等因素有关,而且与它的运行压力比有关。显然,压力比越大,泄漏的可能性和泄漏量也越大,气密系数就越小。正常情况时  $\lambda_l$  值通常为 0.95~0.98。

通过以上分析可知,压缩机运行时的容积效率  $\eta_v$  与上述四个系数有关,而且可用四个系数的乘积表示

即 
$$\eta_v = \lambda_v \lambda_p \lambda_t \lambda_i$$

对于一台结构型式已经确定的制冷压缩机,影响容积效率  $\eta_v$  的主要因素实际上是它的压力比和所用制冷剂性质。开启式制冷压缩机的容积效率  $\eta_v$  通常用下述经验公式直接计算

$$\eta_v = 0.98 - 0.085 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right] \quad (14.4)$$

式中  $m$  为制冷剂的多变指数。对于 R12,  $m = 1.13$ ; R22,  $m = 1.18$ ; R717,  $m = 1.28$ 。  $P_2$  和  $P_1$  为压缩机的排气和吸气压力,如果排气和吸气管路阻力较小,可忽略不计,则  $P_2$  和  $P_1$  可近似地用制冷剂的冷凝压力  $P_k$  和蒸发压力  $P_0$  代入计算。

制冷压缩机的实际吸气量  $V_r$  为

$$V_r = \eta_v V_h [\text{m}^3/\text{s}] \quad (14.5)$$

由于制冷压缩机的容积效率  $\eta_v$  随压力比的增大而下降,因此为了不使  $\eta_v$  过低,通常规定单级制冷压缩机的运行压力比不大于 8~10。

### 3. 压缩机的制冷量和耗功率

#### (一) 制冷量

压缩机在某一工况下的制冷量等于它的实际吸气量  $V_r$  与制冷剂的单位容积制冷量  $q_v$  的乘积

即

$$Q_0 = V_r q_v = \eta_v V_h q_v = \frac{\eta_v V_h}{v_1} q_v \quad [\text{kW}] \quad (14.6)$$

#### (二) 轴功率

压缩机的轴功率是指它在某一工况下运行时轴上所需要的输入功率。轴功率主要耗用在直接压缩制冷剂蒸气和克服机械摩擦两方面。压缩制冷剂蒸气耗用的功率称为指示功率  $N_i$ , 克服机械摩擦(包括驱动油泵)耗用的功率为摩擦功率  $N_m$ , 因此轴功率



$N_s$  为

$$N_b = N_i + N_m \quad [\text{kW}]$$

通过制冷循环热力计算求得压缩机的理论功率  $N_{th}$  后, 即可用下式计算压缩机的指示功率  $N_i$ ,

$$N_i = \frac{N_{th}}{\eta_i} \quad [\text{kW}]$$

式中  $\eta_i$  —— 压缩机的指示效率

压缩机的轴功率  $N_b$

$$N_b = \frac{N_i}{\eta_m} = \frac{N_{th}}{\eta_i \eta_m} \quad [\text{kW}]$$

式中  $\eta_m$  —— 压缩机的机械效率

当确定压缩机的电动机功率时(压缩机与电动机直接连接), 还应适当考虑余量, 以防止出现意外过载。选配电机的功率  $N_s$  为

$$N_s = (1.10 \sim 1.15) N_b$$

制冷压缩机的  $\eta_i$  和  $\eta_m$  值均随其运行时的压力比和转速变化, 这两个效率值可通过图 14.14 和图 14.15 查得。

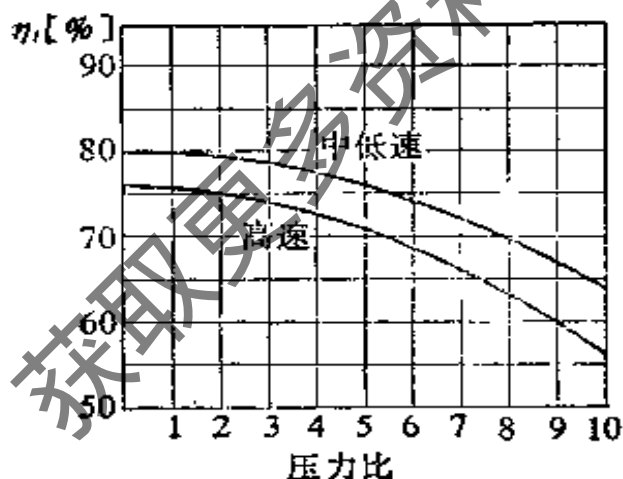


图 14.14 压缩机的指示效率

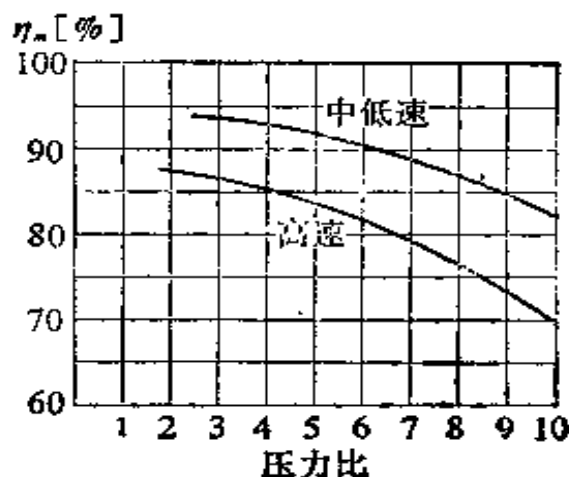


图 14.15 压缩机的机械效率

应该指出, 压缩机的容积效率  $\eta_v$ , 制冷剂的单位容积制冷量  $q_v$ 、单位质量理论压缩功  $W_{th}$  以及指示效率  $\eta_i$  和机械效率  $\eta_m$  均

随运行工况变化，因此每台压缩机的制冷量  $Q_0$  和它的轴功率也随其运行工况而变化。图 14.16 绘制了 4FV10 型制冷压缩机的冷量和轴功率随冷凝温度  $t_k$  和蒸发温度  $t_0$  而变的性能曲线。由图中曲线可知，当  $t_k$  上升或  $t_0$  降低时，压缩机的制冷量将减少。

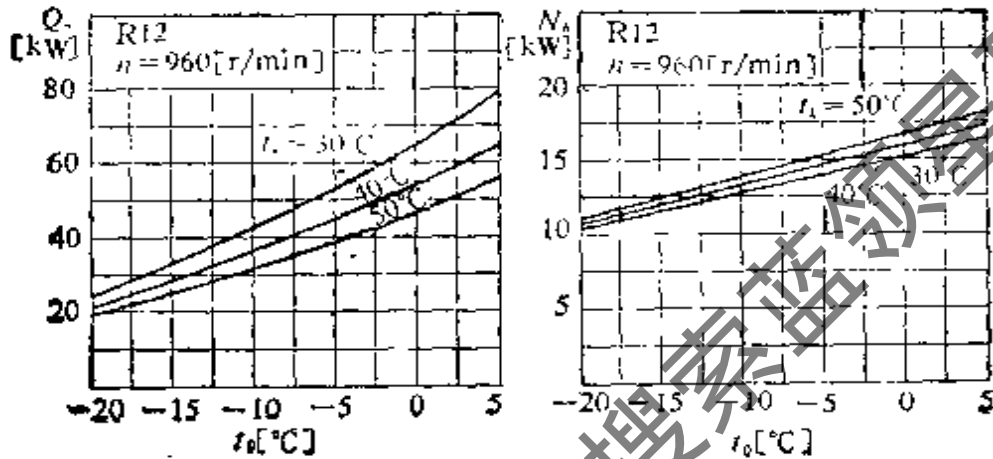


图 14.16 4FV10 型制冷压缩机性能曲线

### (三) 压缩机的能耗指标

制冷压缩机的能耗指标通常用两种方法表示。

1) 单位轴功率制冷量  $K_e$  值，它表示压缩机每耗用 1[kW] 轴功率所能制的冷量  
即

$$K_e = \frac{Q_0}{N_b} \text{ [kW/kW]} \quad (14.7)$$

2) 能效比 EER 值，它表示压缩机电机每输入 1[kW] 功率压缩机所能制得的冷量  
即

$$\text{EER} = \frac{Q_0}{N_{in}} = \frac{Q_0}{N_b} \eta_e \text{ [kW/kW]} \quad (14.8)$$

式中， $\eta_e$ ——电动机效率(见图 14.17)。

目前， $K_e$  值通常作为考核开启式制冷压缩机的能耗指标，而 EER 值则作为封闭式制冷压缩机的能耗考核指标。由于制冷压缩

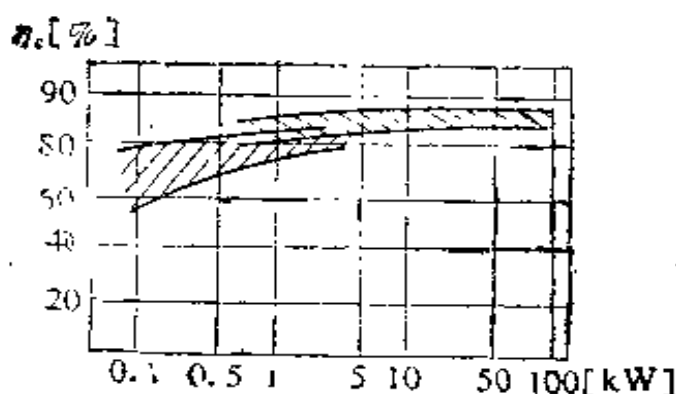


图 14.17 电动机效率

A 工况:  $t_0 = 5[^\circ\text{C}]$  ( $p_0 = 3.4[\text{bar}]$ );  $t_k = 40[^\circ\text{C}]$  ( $p_k = 9.6[\text{bar}]$ );  $t_m = 35[^\circ\text{C}]$ ,  $t_1 = 13[^\circ\text{C}]$ 。

B 工况:  $t_0 = -5[^\circ\text{C}]$  ( $p_0 = 2.6[\text{bar}]$ );  $t_k = 45[^\circ\text{C}]$  ( $p_k = 8.5[\text{bar}]$ );  $t_m = 3[^\circ\text{C}]$ ;  $t_1 = 10[^\circ\text{C}]$ 。

8 FS 10 型制冷压缩机的缸数  $Z = 8$ , 气缸直径  $D = 100[\text{mm}]$ ; 活塞行程  $s = 70[\text{mm}]$ , 转数  $n = 1440[\text{r}/\text{min}]$ 。计算结果见表 14.2。

制冷压缩机在各种不同工况下的冷量可按表 14.2 所示方法计算, 也可用换算系数进行估算。当已知压缩机在标准工况(见表 14.5)的标准制冷量  $Q_{0,s}$  时, 在其他工况下的制冷量可用下式直接换算。

$$Q_0 = K_t Q_{0,s} \quad [\text{kW}] \quad (14.9)$$

式中,  $K_t$ ——制冷量换算系数(见表 14.3 和表 14.4)。

【例 14.2】已知某氟利昂 12(R 12)制冷压缩机的标准制冷量  $Q_{0,s}$  为 150 [kW] (129000[kcal/h]), 试求该压缩机在冷凝温度  $t_k = 40[^\circ\text{C}]$ , 蒸发温度  $t_0 = 5[^\circ\text{C}]$  工况下运行时的制冷量。

【解】根据  $t_k = 40[^\circ\text{C}]$  和  $t_0 = 5[^\circ\text{C}]$ , 在表 14.4 中查得冷量换算系数,  $K_t = 2.14$  则制冷压缩机在  $t_k = 40[^\circ\text{C}]$  和  $t_0 = 5[^\circ\text{C}]$  工况下运行时的制冷量  $Q_0$  为

$$Q_0 = K_t Q_{0,s} = 2.14 \times 150 = 321 \quad [\text{kW}] \quad (276060[\text{kcal}/\text{h}])$$

应该指出, 用计算或换算方法所求得的制冷压缩机的冷量, 通常均为近似值, 有时误差较大, 只能在缺少压缩机性能曲线或现场估计冷量时使用。

#### 4. 活塞式制冷压缩机的设计和使用条件

由于制冷压缩机的性能随运行工况变化, 它的使用条件也有一定限制, 因此用户在选择和使用制冷压缩机时, 必须熟悉和遵守我国有关部门作出的规定, 确保制冷装置正常、安全地运行。

机的制冷量和轴功率随运行工况变化, 因此它的  $K_t$  值或 EER 值也同样随工况变化。在比较各台压缩机的上述两个能耗指标时, 一定要取相同工况下的  $K_t$  值或 EER 值进行比较才能作出正确评价。

【例 14.1】试计算 8 FS 10 型制冷压缩机 (R12) 在下列两种工况下的制冷量  $Q_0$ 、轴功率  $N_0$  和单位轴功率制冷量  $K_t$  值。

8FS10 型制冷压缩机在 A、B 两工况下运行时的  $Q_0$ 、 $N_b$ 、 $K_c$  值

表 14.2

| 计算项目                       | 计算公式   | A 工况   | B 工况   |
|----------------------------|--|--|--|
| $V_h$ [m <sup>3</sup> /s]  | $\frac{\pi D^3}{240} \frac{3600}{\eta_v}$                          | $\frac{\pi(0.1)^2}{240} \cdot 0.07 \times 1440 \times 8 = 0.106$               | $\frac{\pi(0.1)^2}{240} \cdot 0.07 \times 1440 \times 8 = 0.106$               |
| $\eta_v$                   | $0.98 - 0.085 \left[ \left( \frac{P_k}{P_0} \right)^m - 1 \right]$ | $0.98 - 0.085 \left[ \left( \frac{9.6}{3.4} \right)^{1.13} - 1 \right] = 0.85$ | $0.98 - 0.085 \left[ \left( \frac{9.5}{2.6} \right)^{1.17} - 1 \right] = 0.74$ |
| $q_v$ [kJ/m <sup>3</sup> ] | $\frac{q_0}{v_1} = \frac{h_1 - h_4}{v_1}$                          | $\frac{359 - 233}{0.054} = 2333$   | $\frac{358 - 228}{0.068} = 1926$   |
| $Q_0$ [kW]                 | $\eta_v V_h q_v$   | $0.85 \times 0.106 \times 2333 = 210$  | $0.74 \times 0.106 \times 1926 = 151$  |
| $N_b$ [kW]                 | $\frac{Q_0}{q_0} (h_1 - h_4)$                                      | $\frac{210}{359 - 233} (379 - 359) = 33.5$                                     | $\frac{151}{358 - 228} (382 - 359) = 28.5$                                     |
| $\eta_i$                   | 根据 $\frac{P_k}{P_0}$ 查图 14.14                                      | 0.74   | 0.73   |
| $\eta_m$                   | 根据 $\frac{P_k}{P_0}$ 查图 14.15                                      | 0.88   | 0.85   |
| $N_b$ [kW]                 | $\frac{N_b}{\eta_i \eta_m}$  | $\frac{33.5}{0.74 \times 0.88} = 51.2$   | $\frac{26.5}{0.73 \times 0.85} = 42.7$   |
| $K_c$ [kW / kW]            | $\frac{Q_0}{N_b}$  | $\frac{210}{51.2} = 4.1$   | $\frac{151}{42.7} = 3.5$   |

表 14.3

立式和 V 型氟压缩机冷量换算系数 K<sub>1</sub>

| 蒸发温度<br>$t_0$ [°C] | 凝 霜 度 $t_k$ [°C] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                    | 25               | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   | 31   | 32   | 33   | 34   | 35   | 36   | 37   | 38   | 39   | 40   |
| -15                | 1.07             | 1.06 | 1.04 | 1.03 | 1.01 | 1    | 0.99 | 0.98 | 0.96 | 0.95 | 0.91 | 0.93 | 0.91 | 0.90 | 0.88 | 0.87 |
| -14                | 1.13             | 1.12 | 1.10 | 1.09 | 1.07 | 1.05 | 1.05 | 1.04 | 1.02 | 1.01 | 1.00 | 0.98 | 0.97 | 0.95 | 0.94 | 0.92 |
| -13                | 1.19             | 1.18 | 1.16 | 1.15 | 1.13 | 1.12 | 1.11 | 1.09 | 1.08 | 1.06 | 1.05 | 1.03 | 1.02 | 1.00 | 0.99 | 0.97 |
| -12                | 1.26             | 1.24 | 1.23 | 1.21 | 1.20 | 1.18 | 1.17 | 1.15 | 1.14 | 1.12 | 1.11 | 1.09 | 1.08 | 1.06 | 1.05 | 1.03 |
| -11                | 1.32             | 1.30 | 1.29 | 1.27 | 1.25 | 1.24 | 1.22 | 1.21 | 1.19 | 1.18 | 1.16 | 1.14 | 1.13 | 1.11 | 1.10 | 1.08 |
| -10                | 1.38             | 1.36 | 1.35 | 1.33 | 1.32 | 1.30 | 1.28 | 1.27 | 1.25 | 1.24 | 1.22 | 1.20 | 1.18 | 1.17 | 1.15 | 1.13 |
| -9                 | 1.46             | 1.44 | 1.42 | 1.41 | 1.39 | 1.37 | 1.35 | 1.34 | 1.32 | 1.31 | 1.29 | 1.27 | 1.25 | 1.24 | 1.22 | 1.20 |
| -8                 | 1.53             | 1.51 | 1.49 | 1.48 | 1.46 | 1.44 | 1.42 | 1.41 | 1.39 | 1.38 | 1.36 | 1.34 | 1.32 | 1.30 | 1.28 | 1.26 |
| -7                 | 1.61             | 1.59 | 1.57 | 1.56 | 1.54 | 1.52 | 1.50 | 1.48 | 1.46 | 1.44 | 1.42 | 1.40 | 1.38 | 1.37 | 1.35 | 1.33 |
| -6                 | 1.68             | 1.66 | 1.64 | 1.63 | 1.61 | 1.59 | 1.57 | 1.56 | 1.53 | 1.51 | 1.49 | 1.47 | 1.45 | 1.43 | 1.41 | 1.39 |
| -5                 | 1.76             | 1.74 | 1.72 | 1.70 | 1.68 | 1.66 | 1.64 | 1.62 | 1.60 | 1.58 | 1.56 | 1.54 | 1.52 | 1.50 | 1.48 | 1.46 |
| -4                 | 1.85             | 1.83 | 1.81 | 1.79 | 1.77 | 1.75 | 1.73 | 1.71 | 1.68 | 1.66 | 1.64 | 1.62 | 1.60 | 1.58 | 1.56 | 1.54 |
| -3                 | 1.94             | 1.92 | 1.90 | 1.88 | 1.86 | 1.84 | 1.82 | 1.80 | 1.77 | 1.75 | 1.73 | 1.71 | 1.68 | 1.66 | 1.63 | 1.61 |
| -2                 | 2.04             | 2.02 | 1.99 | 1.97 | 1.94 | 1.92 | 1.90 | 1.89 | 1.85 | 1.83 | 1.81 | 1.79 | 1.76 | 1.74 | 1.71 | 1.69 |
| -1                 | 2.13             | 2.11 | 2.08 | 2.06 | 2.03 | 2.01 | 1.99 | 1.97 | 1.94 | 1.92 | 1.90 | 1.87 | 1.84 | 1.82 | 1.79 | 1.76 |
| ±0                 | 2.22             | 2.20 | 2.17 | 2.15 | 2.12 | 2.10 | 2.08 | 2.05 | 2.03 | 2.00 | 1.98 | 1.95 | 1.92 | 1.90 | 1.87 | 1.84 |
| +1                 | 2.33             | 2.31 | 2.28 | 2.26 | 2.23 | 2.21 | 2.18 | 2.16 | 2.13 | 2.11 | 2.03 | 2.05 | 2.02 | 2.00 | 1.97 | 1.94 |
| +2                 | 2.44             | 2.41 | 2.39 | 2.36 | 2.34 | 2.31 | 2.28 | 2.26 | 2.23 | 2.21 | 2.18 | 2.15 | 2.12 | 2.10 | 2.07 | 2.04 |
| +3                 | 2.56             | 2.53 | 2.50 | 2.48 | 2.45 | 2.42 | 2.39 | 2.36 | 2.34 | 2.31 | 2.28 | 2.25 | 2.22 | 2.19 | 2.16 | 2.13 |
| +4                 | 2.67             | 2.64 | 2.61 | 2.58 | 2.55 | 2.52 | 2.49 | 2.46 | 2.44 | 2.41 | 2.38 | 2.35 | 2.32 | 2.29 | 2.26 | 2.23 |
| +5                 | 2.78             | 2.75 | 2.72 | 2.69 | 2.66 | 2.63 | 2.60 | 2.57 | 2.54 | 2.51 | 2.48 | 2.45 | 2.42 | 2.39 | 2.36 | 2.33 |
| +6                 | 2.91             | 2.88 | 2.85 | 2.82 | 2.79 | 2.76 | 2.73 | 2.70 | 2.65 | 2.63 | 2.60 | 2.57 | 2.54 | 2.50 | 2.47 | 2.44 |
| +7                 | 3.05             | 3.02 | 2.96 | 2.95 | 2.91 | 2.88 | 2.85 | 2.82 | 2.78 | 2.75 | 2.72 | 2.69 | 2.65 | 2.62 | 2.59 | 2.56 |
| +8                 | 3.18             | 3.15 | 3.11 | 3.08 | 3.04 | 3.01 | 2.98 | 2.94 | 2.91 | 2.87 | 2.84 | 2.81 | 2.77 | 2.74 | 2.70 | 2.67 |
| +9                 | 3.32             | 3.28 | 3.24 | 3.21 | 3.17 | 3.13 | 3.10 | 3.06 | 3.03 | 2.99 | 2.96 | 2.93 | 2.89 | 2.86 | 2.82 | 2.73 |
| +10                | 3.45             | 3.41 | 3.37 | 3.34 | 3.30 | 3.26 | 3.22 | 3.19 | 3.15 | 3.12 | 3.08 | 3.04 | 3.01 | 2.97 | 2.94 | 2.90 |

表 14.4

立式和 V 型氟利昂压缩机冷量换算系数  $k_t$ 

| 蒸发温度<br>$t$ [°C] | 冷 凝 温 度 $t_k$ (°C) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                  | 26                 | 27   | 23   | 29   | 30   | 31   | 32   | 33   | 34   | 35   | 36   | 37   | 38   | 39   | 40   |
| -15              | 1.03               | 1.05 | 1.03 | 1.02 | 1    | 0.98 | 0.97 | 0.95 | 0.94 | 0.92 | 0.90 | 0.89 | 0.87 | 0.86 | 0.84 |
| -14              | 1.14               | 1.14 | 1.09 | 1.03 | 1.03 | 1.04 | 1.02 | 1.01 | 0.99 | 0.97 | 0.95 | 0.93 | 0.92 | 0.90 | 0.88 |
| -13              | 1.20               | 1.16 | 1.15 | 1.13 | 1.11 | 1.09 | 1.07 | 1.06 | 1.04 | 1.02 | 1.00 | 0.99 | 0.97 | 0.95 | 0.93 |
| -12              | 1.27               | 1.23 | 1.21 | 1.19 | 1.17 | 1.15 | 1.13 | 1.11 | 1.09 | 1.07 | 1.05 | 1.03 | 1.01 | 0.99 | 0.97 |
| -11              | 1.33               | 1.29 | 1.26 | 1.24 | 1.22 | 1.20 | 1.18 | 1.16 | 1.14 | 1.12 | 1.10 | 1.08 | 1.06 | 1.04 | 1.02 |
| -10              | 1.39               | 1.35 | 1.32 | 1.30 | 1.28 | 1.26 | 1.24 | 1.21 | 1.19 | 1.17 | 1.15 | 1.13 | 1.10 | 1.08 | 1.06 |
| -9               | 1.46               | 1.42 | 1.39 | 1.37 | 1.35 | 1.33 | 1.31 | 1.28 | 1.26 | 1.24 | 1.22 | 1.19 | 1.17 | 1.14 | 1.12 |
| -8               | 1.54               | 1.49 | 1.47 | 1.44 | 1.42 | 1.40 | 1.37 | 1.35 | 1.32 | 1.30 | 1.28 | 1.25 | 1.23 | 1.20 | 1.18 |
| -7               | 1.61               | 1.56 | 1.54 | 1.51 | 1.49 | 1.47 | 1.44 | 1.42 | 1.39 | 1.37 | 1.35 | 1.32 | 1.30 | 1.27 | 1.25 |
| -6               | 1.69               | 1.64 | 1.61 | 1.59 | 1.57 | 1.55 | 1.51 | 1.48 | 1.45 | 1.43 | 1.41 | 1.38 | 1.36 | 1.33 | 1.31 |
| -5               | 1.76               | 1.71 | 1.68 | 1.66 | 1.63 | 1.60 | 1.58 | 1.55 | 1.53 | 1.50 | 1.47 | 1.45 | 1.42 | 1.40 | 1.37 |
| -4               | 1.85               | 1.79 | 1.77 | 1.74 | 1.71 | 1.68 | 1.66 | 1.63 | 1.61 | 1.58 | 1.55 | 1.52 | 1.49 | 1.47 | 1.44 |
| -3               | 1.91               | 1.83 | 1.85 | 1.82 | 1.79 | 1.76 | 1.73 | 1.70 | 1.68 | 1.65 | 1.62 | 1.59 | 1.56 | 1.54 | 1.51 |
| -2               | 2.02               | 1.97 | 1.94 | 1.91 | 1.88 | 1.85 | 1.82 | 1.79 | 1.76 | 1.73 | 1.70 | 1.67 | 1.64 | 1.61 | 1.58 |
| -1               | 2.11               | 2.05 | 2.02 | 1.99 | 1.95 | 1.92 | 1.89 | 1.85 | 1.83 | 1.80 | 1.77 | 1.74 | 1.71 | 1.68 | 1.65 |
| ±0               | 2.20               | 2.13 | 2.10 | 2.07 | 2.04 | 2.00 | 1.97 | 1.94 | 1.91 | 1.88 | 1.84 | 1.81 | 1.78 | 1.75 | 1.72 |
| +1               | 2.31               | 2.23 | 2.21 | 2.17 | 2.14 | 2.10 | 2.07 | 2.03 | 2.00 | 1.97 | 1.93 | 1.89 | 1.86 | 1.83 | 1.80 |
| +2               | 2.42               | 2.34 | 2.31 | 2.28 | 2.24 | 2.20 | 2.16 | 2.13 | 2.10 | 2.06 | 2.02 | 1.98 | 1.95 | 1.92 | 1.89 |
| +3               | 2.52               | 2.44 | 2.41 | 2.38 | 2.34 | 2.30 | 2.26 | 2.23 | 2.20 | 2.16 | 2.11 | 2.07 | 2.03 | 2.00 | 1.97 |
| +4               | 2.63               | 2.54 | 2.51 | 2.48 | 2.44 | 2.40 | 2.36 | 2.32 | 2.29 | 2.25 | 2.20 | 2.16 | 2.12 | 2.09 | 2.06 |
| +5               | 2.74               | 2.66 | 2.62 | 2.58 | 2.54 | 2.50 | 2.46 | 2.42 | 2.38 | 2.34 | 2.30 | 2.26 | 2.22 | 2.18 | 2.14 |
| +6               | 2.87               | 2.82 | 2.77 | 2.70 | 2.66 | 2.61 | 2.57 | 2.53 | 2.49 | 2.44 | 2.40 | 2.36 | 2.32 | 2.28 | 2.24 |
| +7               | 3.00               | 2.95 | 2.89 | 2.82 | 2.78 | 2.73 | 2.68 | 2.64 | 2.60 | 2.55 | 2.51 | 2.47 | 2.43 | 2.39 | 2.35 |
| +8               | 3.12               | 3.07 | 2.99 | 2.91 | 2.90 | 2.85 | 2.80 | 2.76 | 2.72 | 2.67 | 2.63 | 2.58 | 2.54 | 2.49 | 2.45 |
| +9               | 3.25               | 3.20 | 3.10 | 3.03 | 3.02 | 2.97 | 2.92 | 2.87 | 2.83 | 2.78 | 2.74 | 2.69 | 2.64 | 2.60 | 2.56 |
| +10              | 3.38               | 3.33 | 3.23 | 3.18 | 3.14 | 3.09 | 3.04 | 2.99 | 2.95 | 2.90 | 2.85 | 2.80 | 2.75 | 2.71 | 2.66 |

现将一些规定中的主要内容列在表 14.5 至表 14.8 中, 供参考。

开启式和半封闭式制冷压缩机的设计, 使用条件

表 14.5

| 制 冷 剂  |             | R 717 | R 22  | R 12  |
|--------|-------------|-------|-------|-------|
| 工<br>况 | 最高冷凝温度[°C]  | 40    | 40    | 50    |
|        | 最大压力差 [bar] | 13.72 | 13.72 | 11.72 |
|        | 最高蒸发温度[°C]  | 5     | 5     | 10    |
|        | 最高排气温度[°C]  | 150   | 150   | 130   |

开启式和半封闭式制冷压缩机的两个规定工况

表 14.6

| 工况   | 制冷剂   | 冷凝温度[°C] | 蒸发温度[°C] | 过冷温度[°C] | 吸气温度[°C] |
|------|-------|----------|----------|----------|----------|
| 标准工况 | R 717 |          |          |          | -10      |
|      | R 12  | +30      | -15      | +25      | +15      |
|      | R 22  |          |          |          | +15      |
| 空调工况 | R 717 |          |          |          | +10      |
|      | R 12  | +40      | +5       | +35      | +15      |
|      | R 22  |          |          |          | +15      |

制冷压缩机在标准工况下运行的制冷量称为标准制冷量, 而在空调工况下运行的制冷量称为空调制冷量。压缩机出厂时标出的铭牌制冷量(或名义制冷量)通常为标准制冷量。

我国的活塞式制冷压缩机按气缸直径的毫米数分成系列, 目前有 40, 50, 70, 100, 125, 170 六种系列产品(40, 50, 70[mm]直径以封闭式压缩机为主)。每一种系列产品可以有不同气缸数, 使用不同制冷剂和转数, 因此六种系列产品可组成 100 多种名义制冷量, 基本满足选用要求。

| 制冷剂         |     | R 12      | R 22     | R 402     |
|-------------|-----|-----------|----------|-----------|
| 最高冷凝温度 [°C] | 高温用 | —         | 55       | —         |
|             | 低温用 | 50        | 45       | 49        |
| 最大压力差 [bar] |     | 11.76     | 15.89    |           |
| 最高排气温度 [°C] |     | 130       | 150      |           |
| 蒸发温度 [°C]   | 高温用 | —         | +5 ~ +10 |           |
|             | 低温用 | -30 ~ -15 |          | -45 ~ -15 |

全封闭制冷压缩机名义制冷量工况

表 14.8

| 类型  | 蒸发温度 [°C] | 吸气温度 [°C] | 冷凝温度 [°C] | 过冷温度 [°C] | 环境温度 [°C] |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 高温用 | +5        | 15        | 40        | 35        | 30 ± 3    |
| 低温用 | -15       |           | 30        | 25        |           |

## 14.2 螺杆式制冷压缩机

螺杆式制冷压缩机与活塞式、离心式压缩机相比较,属于发展较晚的一种机型,迄今不过 20 多年,虽然尚待开发和研究的领域十分广阔,潜力很大,但已显示出许多优点,占有了大容量活塞制冷压缩机的使用范围,而且正在向中等容量范围延伸。

### 14.2.1 螺杆式制冷压缩机的结构和工作原理

图 14.8 为螺杆式压缩机的结构,为清楚地展示气缸中螺杆的形状和位置,已将上部气缸打开。由图可知,螺杆式压缩机的气缸呈“∞”字型,气缸中配置两个按一定传动比反向旋转的螺旋



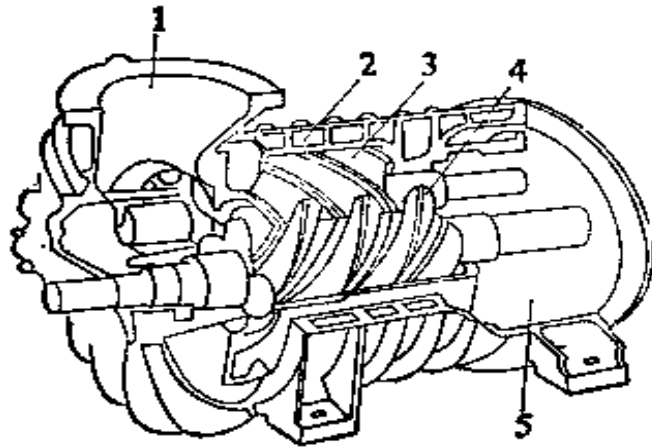


图 14.18 螺杆式压缩机结构图

1—吸气口;2—机壳;3—阴转子;4—阳转子;5—排气口

形转子，其中一个有凸齿，称阳转子，另一个具有齿槽，称阴转子。螺杆压缩机两端分别设有有一定形状和大小的吸气和排气口，气缸中的阴、阳转子与气缸壁之间的容积(称基元容积)和位置随转子的旋转而变动(图 14.19)，当基元容积与吸气口相通时，压缩机开始吸气(图 14.19 a)，随着转子反向旋转，基元容积与吸气口隔开，又因齿槽的相互挤入使基元容积内气体进行压缩(图 14.19 b)，当气体压至基元容积与排气口相通时，被压缩气体开始排出(图 14.19 c)。随着转子继续旋转，上述过程连续，重复地进行。

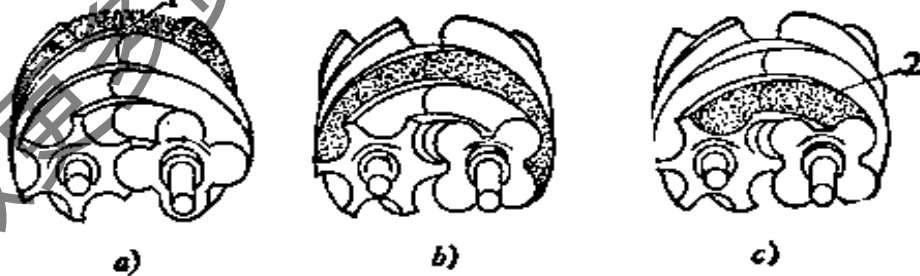


图 14.19 螺杆式压缩机的工作原理

1—吸气口;2—排气口

制冷剂蒸气在螺杆压缩机内部压缩终了时的压力与吸气压力之比称为螺杆式压缩机的内压比，由螺杆式压缩机的工作过程可知，当压缩机的结构和被压缩气体的种类确定后，其内压比为定

值，气体在基元容积内压缩终了的压力  $P_2$  与排气管内压力  $P_a$ （或冷凝压力  $P_k$ ）无关， $P_2$  不一定等于  $P_a$ 。可分为三种情况（见图 14.19）：在  $P_1$  吸气压力下，基元容积内的气体压力  $P_2$  已压至高于排气管中的压力  $P_a$  时才与排气口相通，并进行排出过程，由于  $P_2 > P_a$ ，多消耗的压缩功如图 14.20 a 中的阴影面积所示；基元容积内被压缩气体的压力  $P_2$  尚小于  $P_a$  时就与排气口相通，此时排气管中气体倒流入基元容积，使容积中的气体压力  $P_2$  突然升至  $P_a$ ，然后再进行排出过程，多消耗的排气功如图 14.20 b 中的阴影面积所示；图 14.20 c 中所示的过程为基元容积排气压力  $P_2$  等于排气管中的压力  $P_a$ ，只有在这种情况下，压缩机未消耗额外功。因此，螺杆式压缩机只有当气体在机内压缩终了时的压力  $P_2$  等于  $P_a$ ，或者说内压比等于外压比时，效率最高。

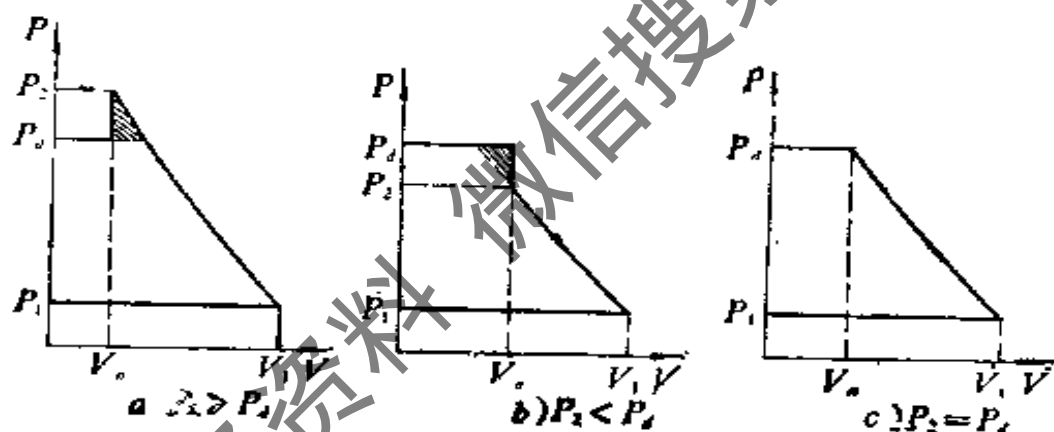


图 14.20 螺杆压缩机的  $P$ - $V$  图

目前，螺杆式制冷压缩机的转子与机壳以及转子相互之间的间隙均靠喷油密封。因此，螺杆式制冷压缩机排出的气体中含有较多的润滑油，为了不使这些油进入冷凝器，影响传热效果，螺杆压缩机组上均装有高效油分离器（图 14.21），同时，为了使分离的油能重新使用，机组还装有一套油冷却、过滤和油泵等设备。

在螺杆压缩机的发展史中，螺杆型线一直是人们的研究核心，因为它与压缩机的性能有极大关系。70 年代著名的 SRM 齿形——双边不对称齿形曾风行全球，被称为螺杆压缩机齿形的第

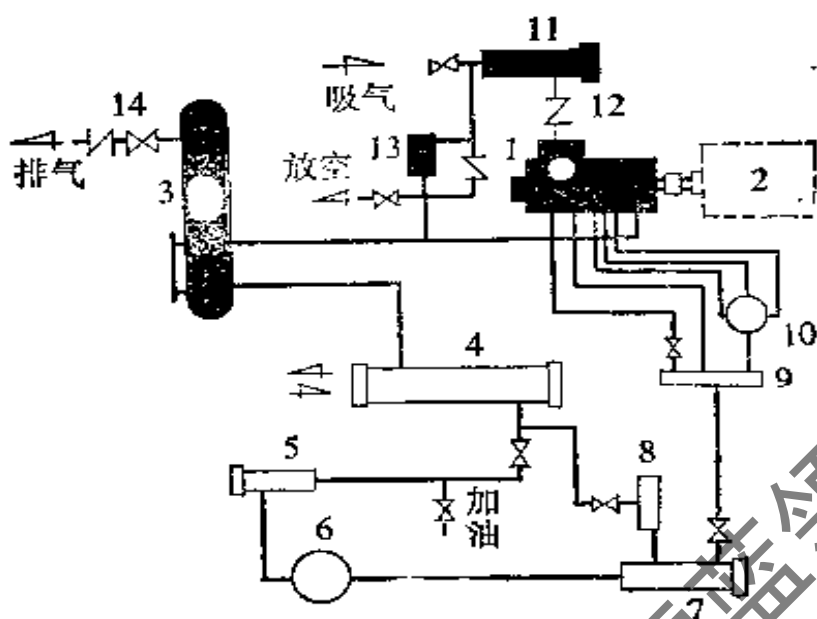


图 14.21 螺杆式制冷压缩机机组示意图

1—螺杆压缩机;2—电动机;3—油分离器;4—油冷却器;5—油温  
过滤器;6—油泵;7—油精过滤器;8—油压调节阀;9—油分配器;  
10—四通阀;11—吸气过滤器;12—吸气止逆阀;13—安全阀;  
14—排气止逆阀

一次飞跃。1979年,联邦德国GHH公司设计试验了另一种效率更高的不对称齿形——GHH齿形(图14.22),据称其效率比目前的齿形提高14%。随着GHH齿形的不断发展和研究,并配以高精度加工、运转参数和机器几何参数的合理选用,可望实现螺杆压缩机高效型线的第二次飞跃。

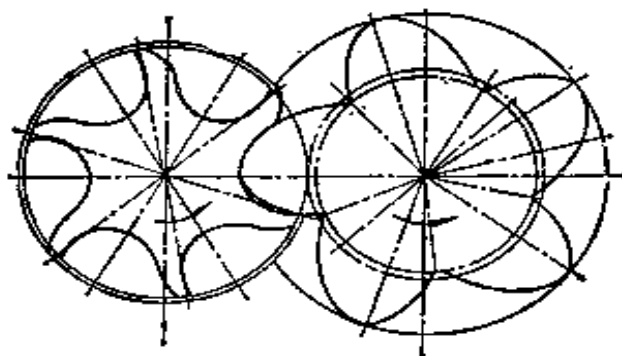


图 14.22 GHH 齿形

螺杆式与活塞式制冷压缩机相比较,由于气缸内无余隙容积和吸、排气阀片,因此具有较高的容积效率 $\eta_v$ (图14.23)。单级

活塞式制冷压缩机的压力比通常不大于 8~10，而螺杆式的压力比可达 20，因此在制取较低温度时，螺杆式制冷压缩机仅用单级就可实现。

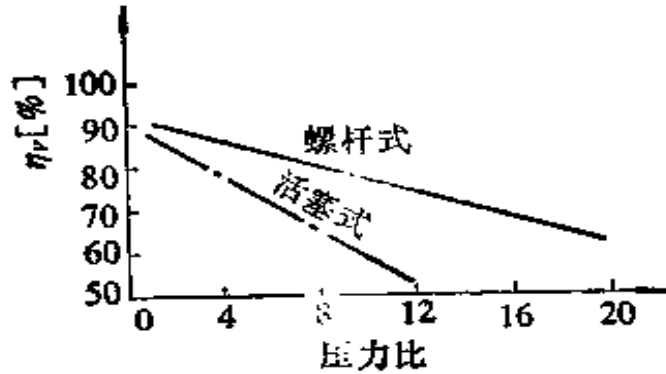


图 14.23 螺杆式与活塞式制冷压缩机的  $\eta_v$  值

### 14.2.2 螺杆式制冷压缩机的运行调节

现代螺杆式制冷压缩机均带有能量调节机构，以适应外界冷负荷的变化。能量调节机构是通过装在两个转子之间的移动滑阀和一套控制滑阀沿轴向移动的机构进行工作，图 14.24 表示滑阀移动与能量调节原理。图中 a) 为滑阀与滑阀固定部紧密接触，基元容积的吸气量为  $V_0$ ，此时滑阀处于全负荷(100%)状态。当滑阀向排出端移动时，滑阀与其固定部位将产生与吸气端相通的小间隙，使基元容积内的吸气量将减至  $V_0(b)$ 。这样，压缩机的输气量减少，使压缩机的制冷量得到了调节。

螺杆式制冷压缩机的冷量可在 15~100% 之间无级调节。当冷量减少时，耗功将明显减少。由图 14.25 可知，当冷量在 60~100% 之间调节时，功率几乎与冷量以相同比例变化。

螺杆式制冷压缩机的结构

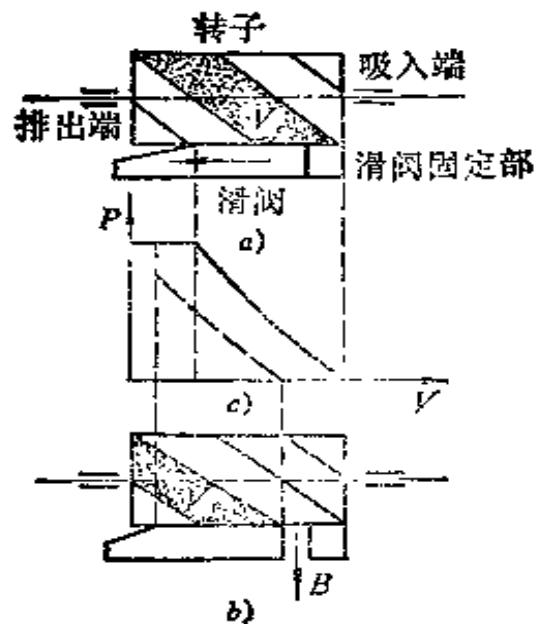


图 14.24 滑阀调节原理

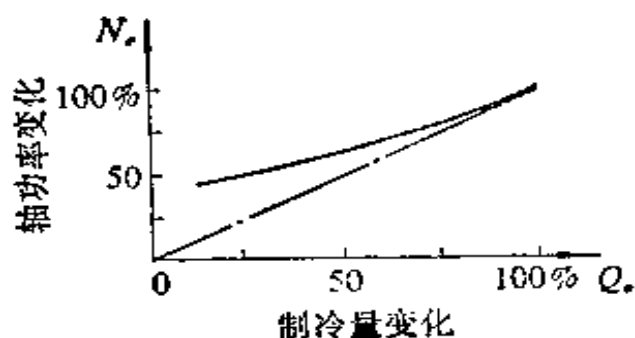


图 14.25 能量调节与耗功关系

特点，确定了它的许多优点，如零件数仅为活塞式的1/10，压缩机运行可靠、安全、振幅小，适应性强，在高、低温制冷范围内以及热泵应用中均有良好性能。但是，螺杆式压缩机良好性能必须建立在高精度加工和装配基础上，否则就难以实现。

国产螺杆式制冷压缩机与活塞式压缩机一样，它的型号也用某些符号和数字表示，见表14.9，设计和使用条件见表14.10。

螺杆式制冷压缩机的型号和名称表示法

表 14.9

| 压缩机型号     | 结构形式    | 转子公称直径[mm] | 制冷剂    | 标准制冷量                                 |
|-----------|---------|------------|--------|---------------------------------------|
| KA 20-50  | 开启式[K]  | 200        | 氨(A)   | $5 \times 10^4$ [kcal/h] (581.4 [kW]) |
| BF 12.5-4 | 半封闭式[B] | 125        | 氟利昂(F) | $4 \times 10^4$ [kcal/h] (46.5 [kW])  |

螺杆式制冷压缩的设计和使用的条件

表 14.10

| 制 冷 剂      | R 717      | R 22 | R 12 |
|------------|------------|------|------|
|            | 最高冷凝温度[°C] | 45   |      |
| 最低蒸发温度[°C] | -40        |      |      |
| 最高蒸发温度[°C] | +5         |      | +10  |
| 最高排气温度[°C] | ≤105       |      | 90   |

### 14.3 偏心滚动转子式制冷压缩机

转子式压缩机虽然出现较早,但由于材质和加工精度的限制,长期来在制冷领域一直未被采用。近10年,随着科学技术的发展,原有的难题已经或者逐步得到了解决,偏心滚动转子式制冷压缩机在1[kW]左右以下的小型窗式空调器和食品冷藏箱中已开始广泛使用,在该冷量范围内所显示的优点足以取代活塞式制冷压缩机。目前,我国在上海、西安、珠海等地也已开始生产高、低温全封闭式转子压缩机,供家用电冰箱和空调器配套使用。

图14.26为偏心滚动转子式制冷压缩机的示意图。在机壳(气缸)1内偏心配置转子2,当转子绕气缸中心 $O$ 转动时,转子紧贴在气缸内表面上(实际有极小间隙)滚动。由此,转子外表面和气缸内表面形成一月牙形空间,其位置随转子的转角而变化。滑片将月牙形空间分离成两个孤立部分,一部分和吸气口相通,另一部分通过排气阀片与排气管相通。滑片靠弹簧压紧在转子外表面上。当转子与气缸接触点转到超过吸气口时,滑片右方至接触点之间部分与吸气口相通,它的容积随转子的转动而增大,从而吸气口吸进气体。当转子接触点转到最上位置时,此部分空间达到最大值,且充满了制冷剂气体。当转子继续旋转时,吸入气体因容积逐渐缩小而受到压缩,当压力达到排气压力时,排气阀开启并开始排气。由于气缸内有滑片分隔,实际上转子每转一圈即完成一次吸气、压缩和排气过程。

偏心滚动转子式制冷压缩机在目前的使用冷量范围内与活塞式相比较,其EER值可提高20%,体积缩小40%,零件数减少

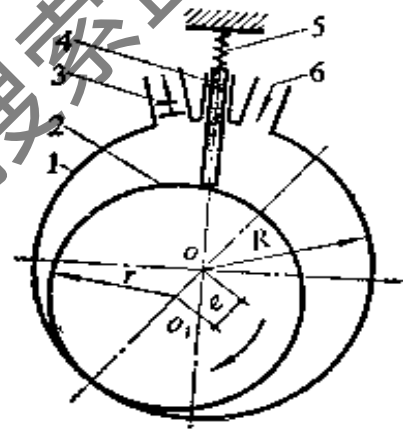


图14.26 偏心滚动转子式制冷压缩机示意图  
1—机壳;2—转子;3—排气阀片;4—滑片;5—滑片弹簧;6—吸气口

1/3,重量下降 50%, 噪声降低 5[dB(A)]。

## 14.4 涡旋(涡线)式制冷压缩机

近几年,国外又开发了另一种新型高效的回转式制冷压缩机——涡旋式制冷压缩机。日立公司用这种压缩机组装的系列空调器,已经投放市场,经使用效果良好。

涡旋式制冷压缩机的构造和工作原理如图14.27和图14.28所示。

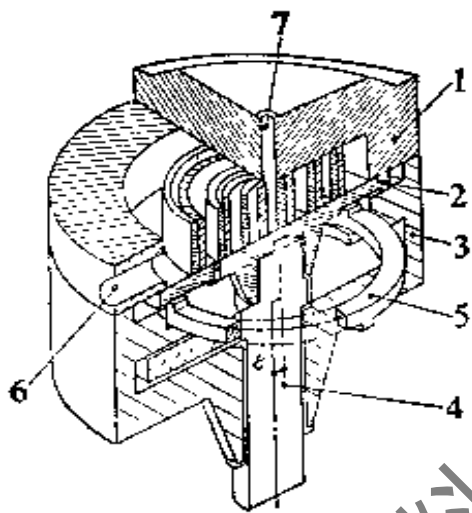


图 14.27 涡旋式制冷压缩机构造图

- 1—固定螺旋槽板; 2—旋回螺旋槽板; 3—壳体; 4—偏心轴;  
5—防自转环; 6—进气口;  
7—排气口

来自蒸发器的制冷剂蒸气由机壳的吸气口吸入,因旋回槽板绕偏心轴公转,气体在两块槽板之间所形成的空间压缩,高压气体在固定槽板的中心排出。为了防止旋回槽板自转,设置了防自转环。

由涡旋式制冷压缩机的工作过程可知,该机型不需要设置吸、排气阀片,具有较高的容积效率,而且允许吸入少量湿蒸气,故特别适用于热泵式空调器。

目前,涡旋式制冷压缩机的使用功率大约在 1~15[kW]之间。与活塞式制冷压缩机相比较,它的体积可缩小 40%,重量减轻 15%,结构简单(仅需 5

个零件),运行平稳、可靠,噪声可降低 2~3[dB(A)],具有较高的 EER 值。

螺杆式、转子式、涡旋式压缩机均属于容积型中的回转式制冷压缩机,由于这些机器的结构简单,性能优良,运行可靠,制造技术也日趋成熟,这就打破了活塞式制冷压缩机在某些领域一统天下的局面,可以预料,今后在回转式制冷压缩机的研究和开发方面仍将十分活跃,甚至可能出现更新式的机型。

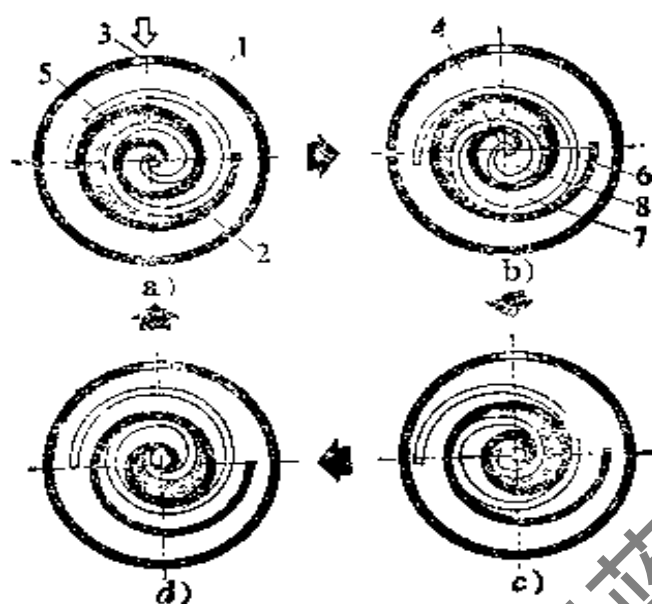


图 14.28 涡旋式制冷压缩机工作原理

1—旋回螺旋槽板；2—固定螺旋槽板；3—进气口；4—排气口；  
5—压缩室；6—吸气过程；7—压缩过程；8—排气过程

## 14.5 离心式制冷压缩机

离心式制冷压缩机的发展已有 60 多年历史，30 年代氟利昂制冷剂的出现以及后来冶金工业和其他科学技术的发展，为离心式制冷压缩机的制造和应用奠定了良好基础。目前，单机冷量在 1200[kW] 以上的制冷压缩机，几乎全部采用离心式。

### 14.5.1 离心式制冷压缩机的构造和工作原理

图 14.29 为单级离心式制冷压缩机的简图。压缩机本体包括高速旋转的叶轮，扩压器，进口导叶以及传动轴等部件。当电动机通过增速齿轮带动叶轮高速旋转时，由于制冷剂蒸气受叶轮离心力的作用而产生极高的流速，当进入扩压器和机壳后，便转化为压力能，使吸入蒸气由蒸发压力升至冷凝压力。目前，离心式制冷压缩机的转数一般在  $10^4$  [r/min] 左右。

空调用单级离心式制冷压缩机通常用分子量较大的 R11 作为制冷剂。对于大容量压缩机，近几年也逐渐开始使用 R12 制冷剂。由于 R12 的单位容积制冷量  $q_v$  较 R11 大，所以对大容



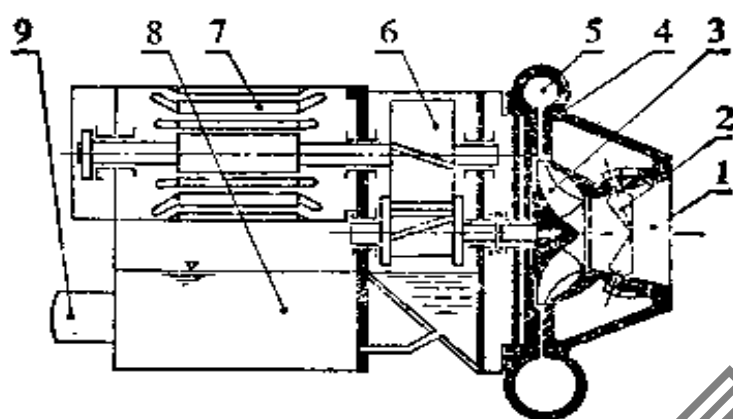


图 14.29 单级离心式制冷压缩机简图

1—吸气腔; 2—进口导叶; 3—叶轮; 4—扩压器; 5—蜗壳;  
6—增速齿轮; 7—电动机; 8—油箱; 9—齿轮油泵

量离心式制冷压缩机特别适合。但是, 由于 R12 的分子量小于 R11, 为了在一定转速和叶轮外径条件下获得相应的冷凝压力, 通常采用两级压缩。

离心式制冷压缩机也有开启式和封闭式两种, 当采用封闭式压缩机时, 电动机依靠系统中的制冷剂冷却。

#### 14.5.2 离心式制冷压缩机的调节

离心式制冷压缩机的容量通常在  $581[\text{kW}]$  ( $5 \times 10^4[\text{kcal/h}]$ ) 以上, 由于单机容量较大, 在使用中经常需要根据外界负荷变化而进行调节。目前在空调用离心式冷水机组中, 大都采用进口导叶调节法(图 14.30), 它是通过冷冻水出水温度的变化, 由温度传感器和变送、执行机构来完成。当冷冻水出水温度过低时(外界所需冷负荷减少), 执行机构即能转动进口导叶角度, 使压缩机吸气量减少, 制冷量下降。相反, 当冷冻水出口温度过高时(外界所需冷量增加), 执行机构又能使进口导叶反向转动, 压缩机吸气量增大, 制冷量上升。这样冷冻水的出水温度就能基本稳定, 达到了冷量调节目的。

离心式制冷机组运行时, 若冷却水温过高或水量过小时, 制冷剂的冷凝压力  $P_k$  升高, 离心压缩机的吸气量减少。当吸气量过小时, 叶轮进口处的气流冲角很大, 使气流产生严重脱流现象, 导致离心压缩机的排气压力下降。当排气压力降至冷凝器中的冷凝

压力时，制冷剂将由冷凝器倒流入压缩机，直至冷凝压力降至排气压力为止，这时压缩机又开始向冷凝器排气，当冷凝压力恢复到原来压力时，气体又开始倒流。这种周期性的气体脉动，称为离心式制冷压缩机的喘振现象。喘振不但会增加压缩机的运行噪声、振动和耗功量，严重时还会损坏机件，因此必须采取措施，严防发生喘振现象。

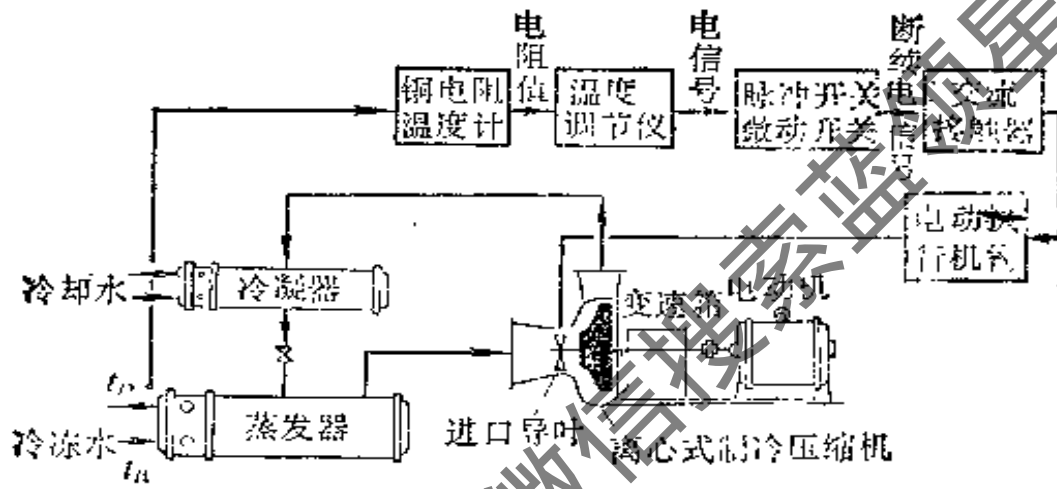


图 14.30 离心式制冷压缩机的进口导叶调节

## 第 15 章 冷凝器和蒸发器

为了完成蒸气压缩式制冷循环，冷凝器和蒸发器是必不可少的，其运行特性将直接影响制冷装置的性能及运行的经济性。冷凝器和蒸发器的选用是由换热器的用途、传热介质的种类、流动方式及传热特性等所决定。

本章主要介绍在空调用制冷装置中常用的几种冷凝器和蒸发器的工作特点、结构型式和选择计算方法等。

### 15.1 冷 凝 器

冷凝器的主要作用是使制冷压缩机排出的过热蒸气冷却冷凝为高压液体。

#### 15.1.1 冷凝器的构造及特点

冷凝器按冷却方式可分为水冷式、风冷式和蒸发式及淋激式冷凝器等三种类型。

##### 1. 水冷式冷凝器

在水冷式冷凝器中，制冷剂放出的热量被冷却水带走。冷却水可以一次流过，也可用冷却水塔冷却后循环使用。水冷式冷凝器有壳管式、套管式等结构型式。

##### (1) 立式壳管冷凝器

立式壳管冷凝器的结构型式如图 15.1 所示，其外壳是用钢板卷制成的大圆筒，圆筒两端焊有多孔管板，板上用胀管法或焊接固定着许多根无缝钢管。冷却水自上而下在管内流过；氨气在壳体内管簇之间冷凝后积聚在冷凝器的底部，经出液管流入贮液器。

冷凝器的顶端装有配水箱，使冷却水能均匀地分配到各个管口，每根钢管的管口上装有一只带斜槽的分水器，如图 15.2。

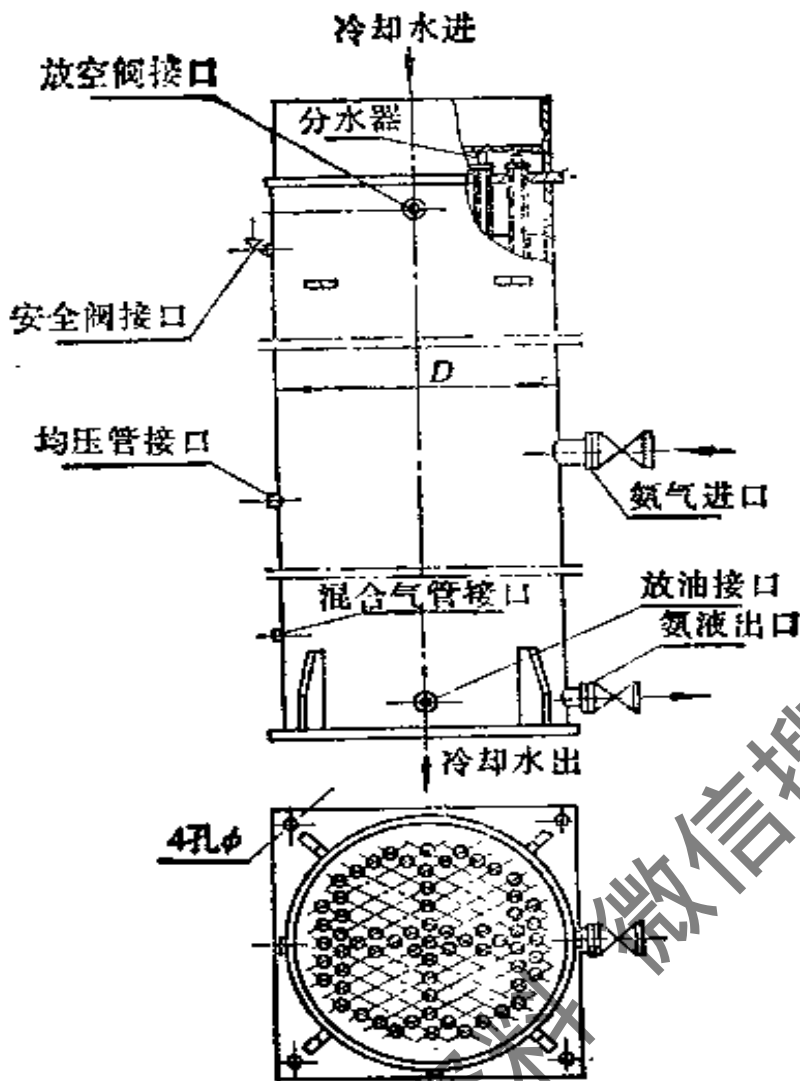


图 15.1 立式壳管冷凝器

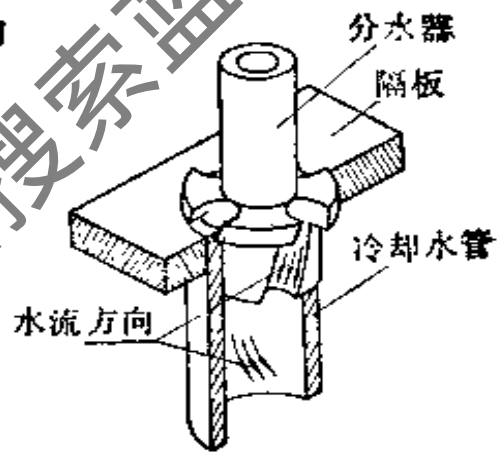


图 15.2 分水器结构图

冷却水通过分水器上的斜槽后沿钢管内壁作螺旋线状向下流动，在钢管内侧构成薄膜状的水层，充分吸收制冷剂的热量，既提高了冷凝器的冷却效果，又节省用水。

在冷凝器的外壳上设有进气、出液、放空气、均压、放油和安全阀等管路接头，与相应的管路和设备相连接。

立式壳管冷凝器的优点是占地面积小，可以装在室外；清洗较方便，可在制冷系统运行的情况下清洗。缺点是冷却水消耗量较大。立式壳管冷凝器适用于水源充足，水质较差的地区，目前，立式壳管冷凝器用于大型、中型氨制冷系统中。

## (2) 卧式壳管冷凝器

卧式壳管冷凝器的外壳是用钢板卷制焊接而成的圆筒体。外壳两端焊有两块圆形的管板，传热管两端用胀管或焊接法固定在管板的管孔中。筒体两端装有端盖，端盖内设有隔板，将管子按一定的管数和流向分成几个流程，使冷却水按一定的流向在管内依次流过。制冷剂蒸气在管外冷凝，冷凝后液体由下部排出，见图 15.3。

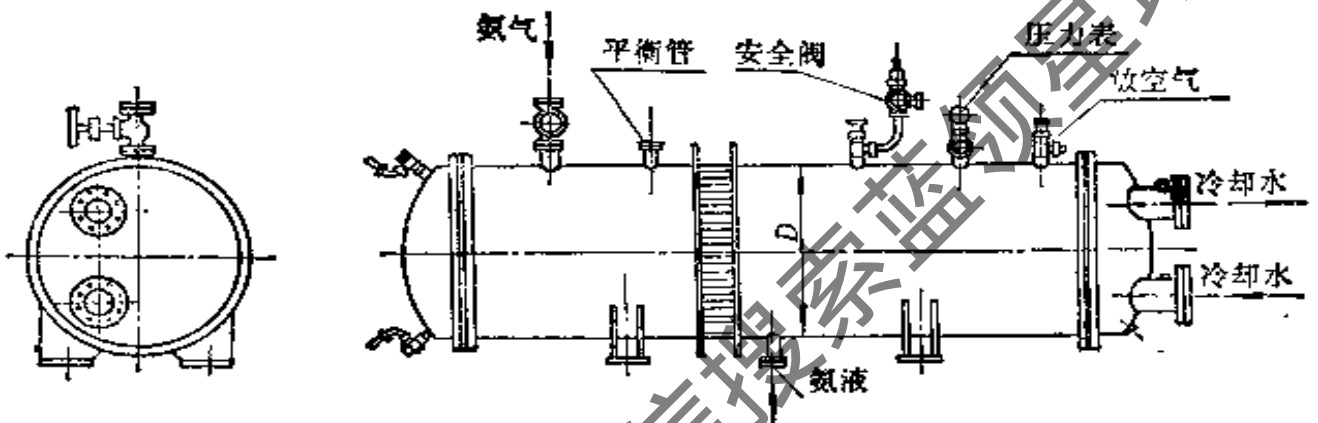


图 15.3 卧式壳管冷凝器

卧式壳管冷凝器通常采用偶数流程，以便把冷却水进出管安装在同一端盖上。冷却水从端盖的下部进入，从端盖的上部流出。另一端的上侧装有放气旋塞，以便在充水时排出空气；下部装有放水旋塞，在冬季冷凝器停止使用时将水排尽，以免冻裂管子。

氨卧式壳管冷凝器通常用  $\phi 25 \sim 32$  [mm] 的无缝钢管制造；氟利昂卧式壳管冷凝器大多数采用滚压肋片铜管，以提高制冷剂侧的传热效果。

卧式壳管冷凝器的优点是传热系数较高，冷却水耗用量较少。目前已广泛应用于氨和氟利昂制冷系统中。

### (3) 套管式冷凝器

套管式冷凝器的构造见图 15.4。在一根较大直径的无缝钢管内套有一根或数根小直径的铜管(光管或低肋管)，并弯制成螺旋形。

制冷剂蒸气从上部进入外套管内，冷凝后的液体由下部流出。

冷却水由下部进入内管，吸热后从上部流出，与制冷剂成逆向流动，以增强传热效果。

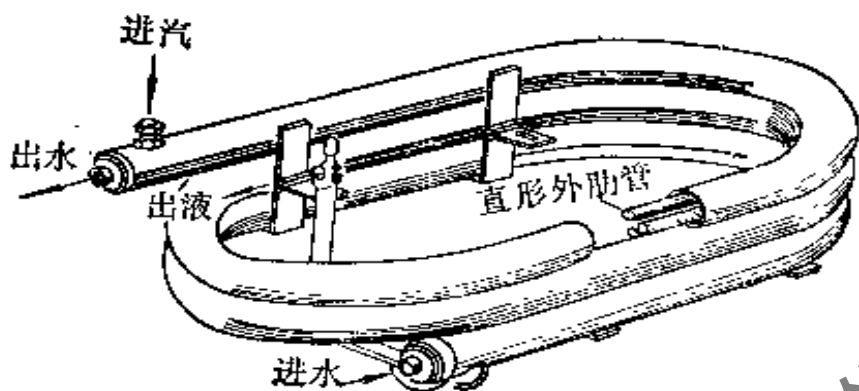


图 15.4 套管式冷凝器

套管式冷凝器应用于立柜式空调器的制冷系统中。

## 2. 风冷式冷凝器

风冷式冷凝器是以空气作为冷却介质的，它由几组蛇型盘管组成，在盘管外加肋片，以增加空气侧的传热面积，同时，采用风机加速空气的流动，以增强空气侧的传热效果。

风冷式冷凝器的结构型式如图 15.5 所示。制冷剂蒸气从上部的分配集管进入蛇形管中，冷凝的液体沿管子流下，由下部排出。

风冷式冷凝器最大的优点是不用冷却水，因此特别适用于供水困难的地区。目前，风冷式冷凝器已广泛应用于中、小型氟利昂空调机组中（如窗式空调器、立柜式空调机组等），而且大型冷、热水机组也开始逐步采用。

## 3. 蒸发式和淋激式冷凝器

在这两种冷凝器中，制冷剂蒸气是在管内冷凝，冷凝时放出的热量同时被水和空气带走。

### (1) 蒸发式冷凝器

图 15.6 是蒸发式冷凝器的结构示意图，蛇形盘管装在立式的箱体内，箱体的底部为水盘，制冷压缩机排出的制冷剂蒸气从蛇形盘管上部进入，冷凝后由下部排出。水盘内的冷却水由循环

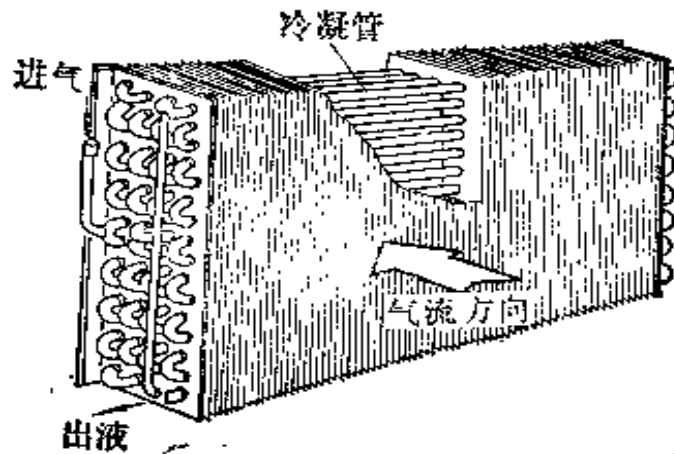


图 15.5 风冷式冷凝器

水泵送到盘管上部，经喷嘴喷淋在盘管的外表面，一部分冷却水吸收管内制冷剂蒸气冷凝时放出的热量而蒸发，未蒸发的喷淋水仍流进水盘内。

蒸发式冷凝器装有风机，以使空气加大流速自下而上地流经

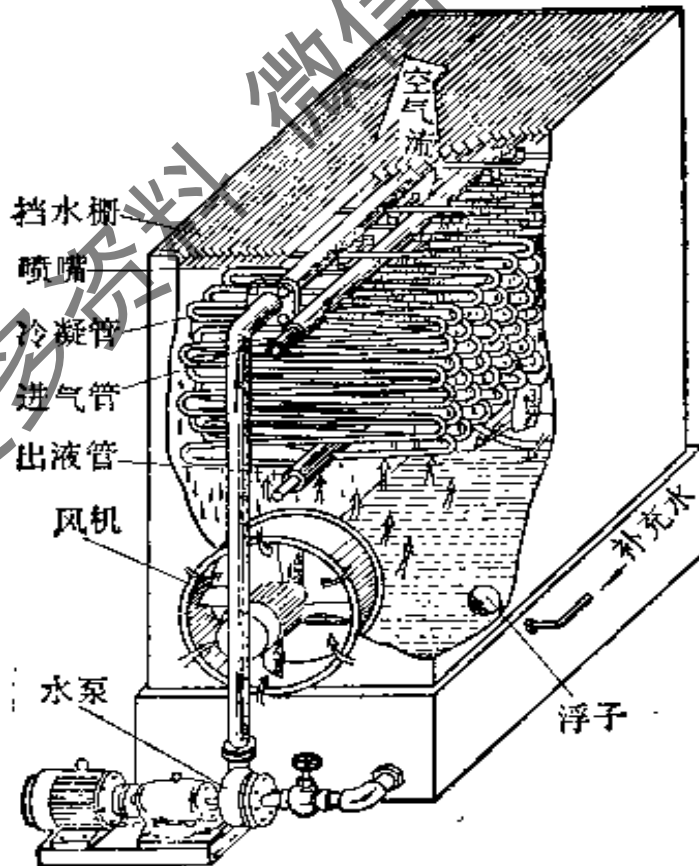


图 15.6 蒸发式冷凝器

盘管，不断带走水蒸汽，加速喷淋水的汽化，为防止未汽化的水滴被空气带走，在箱体上部还装有挡水板。

由于蒸发式冷凝器主要是利用冷却水的汽化来吸收制冷剂蒸气冷凝时放出的热量，所以耗水量很小。蒸发式冷凝器特别适用于缺水地区，通常安装在制冷机房的屋顶上。

## (2) 淋激式冷凝器

淋激式冷凝器由无缝钢管组成，如图15.7所示，制冷剂蒸气从下面进入蛇形管，冷凝后的液体由蛇形管的一端经排液管流入贮液器。冷却水从配水箱流入水槽中，经水槽下面的缝隙流到蛇形管外表面，最后流入水池。冷却水经冷却塔冷却后循环使用。

淋激式冷凝器构造简单，可在现场加工制作，水垢容易清除。但需用较多的金属材料，占地面积大。淋激式冷凝器通常是露天安装，使用在大、中型氨制冷系统中。

### 15.1.2 冷凝器的传热系数

冷凝器的传热系数与冷凝器的型式、制冷剂种类、冷却介质的流速、传热温差及传热面的污染程度等因素有关。

国产各种冷凝器的传热面积，一般以传热管外表面积计算。水冷式冷凝器的传热系数  $K$  的计算公式如下：

$$K = \left[ \frac{1}{\alpha_o} + R_{o,io} + \frac{\delta}{\lambda} \times \frac{F_o}{F_i} + \left( R_f + \frac{1}{\alpha_w} \right) \times \frac{F_o}{F_i} \right]^{-1} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (15.1)$$

式中， $\alpha_o$ ——制冷剂侧的放热系数， $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ ；对于肋管冷凝器，应以  $\alpha_{o,r,e}$  替代；

$\alpha_w$ ——冷却剂侧的放热系数 $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ ；

$R_{o,io}$ ——油膜热阻， $[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$ ；

$R_f$ ——冷却剂侧的污垢热阻， $[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$ ；

$\delta$ ——管壁的厚度， $[\text{m}]$ ；

$\lambda$ ——管壁材料的导热系数， $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ ；

$F_o$ ——管外表面积， $[\text{m}^2]$ ；



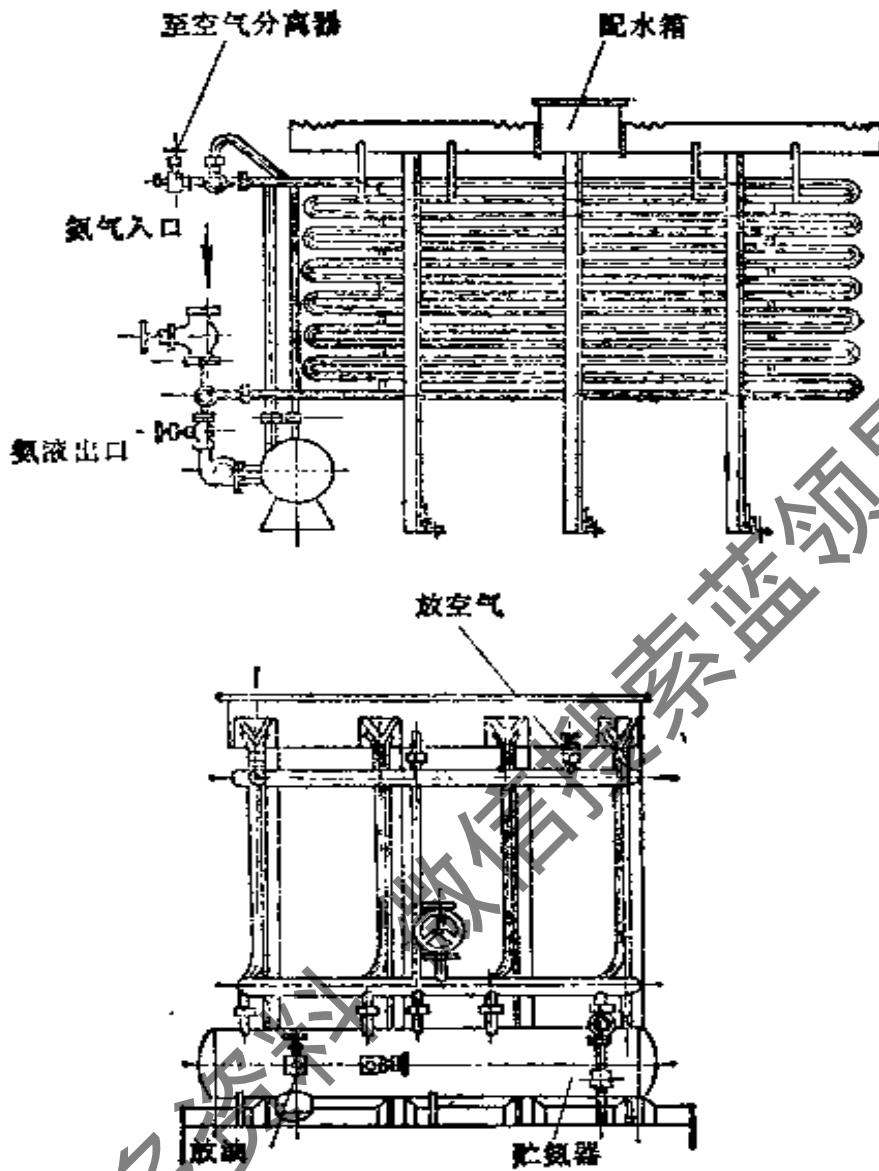


图 15.7 淋激式冷凝器

$F_i$ ——管内表面积,  $[m^2]$ ;

$\bar{F}$ ——管子的平均面积,  $[m^2]$ 。

风冷式冷凝器的传热系数  $K$  按下式计算:

$$K = \left[ \frac{1}{\alpha_w} + R_f + \frac{\delta}{\lambda} \frac{F_o}{\bar{F}} + \left( R_{o10} + \frac{1}{\alpha_o} \right) \times \frac{F_o}{F_n} \right]^{-1} [W/m^2K] \quad (15.2)$$

式中,  $F_n$ ——每米基管的可见面积,  $[m^2]$ ;

1. 制冷剂的冷凝放热系数

制冷剂蒸气与低于其饱和温度的传热管表面接触时，就会发生凝结现象，冷凝后的制冷剂液体积聚在传热管表面上而形成液膜，阻碍了制冷剂与管表面之间的热交换。此时，放热系数  $\alpha_0$  值的大小，主要取决于膜层的热阻。

单根光管外表面的冷凝放热系数可按努谢尔特公式计算

$$\alpha_0 = C \left( \frac{\beta}{\Delta t l} \right)^{0.25} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$\text{或} \quad \alpha_0 = C' \left( \frac{\beta}{q l} \right)^{1.3} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15.3)$$

式中， $C, C'$ ——系数

对于水平单管， $C = 0.725, C' = 0.65$ ；

对于垂直面液膜呈波浪形流动时， $C = 1.13,$

$C' = 1.18$ ；

$l$ ——定形尺寸

对于水平单管取其外径  $d_0$ ，[m]；

对于垂直面取其高度  $H$ ，[m]；

$\Delta t$ ——冷凝温度与壁面温度之差，[°C]；

$q$ ——热流密度，[W/m<sup>2</sup>]；

$\beta$ ——物性系数， $\beta = \frac{\lambda^3 \rho^2 g \gamma}{\mu}$ ，取冷凝液温度的有关数据；

$\lambda$ ——冷凝液的导热系数，[W/mK]；

$\rho$ ——冷凝液的密度，[kg/m<sup>3</sup>]；

$\gamma$ ——制冷剂的潜热，[J/kg]；

$\mu$ ——冷凝液的动力粘度，[Ns/m<sup>2</sup>]；

$g$ ——重力加速度。[m/s<sup>2</sup>]。

对于水平管束，由于下落的冷凝液使下部管束外侧的液膜增厚，造成液膜热阻增加，放热系数降低。制冷剂在水平管束外表面冷凝时的平均放热系数为

$$\alpha_s = \varepsilon_s \alpha_0 = n^{-0.25} \times \alpha_0 \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15.4)$$

式中,  $\varepsilon_c$ ——管束修正系数,  $\varepsilon_c = n^{-0.25}$

$n$ ——水平管束在垂直方向的平均排数,

对于等边三角形排列的管束可近似取

$$n = (0.6) \times \sqrt{N} \quad (15.5)$$

式中,  $N$ ——管子总数。

水平肋管外表面的冷凝放热系数为

$$\alpha_{of} = \varepsilon_f \alpha_o \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15.6)$$

式中  $\varepsilon_f$ ——肋管的修正系数, 可按下式计算

$$\varepsilon_f = 1.3 \eta_f^{0.75} \frac{F_f}{F_o} \left( \frac{d_o}{H_e} \right)^{0.25} + \frac{F_p}{F_o}$$

式中,  $d_o$ ——基管外径, [m];

$H_e$ ——肋片的当量高度, [m];

$$H_e = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d_f^2 - d_o^2}{d_f} \right)$$

$d_f$ ——肋片外径, [m];

$F_f$ ——对于 1[m] 长肋管的垂直部分面积, [m<sup>2</sup>];

$F_p$ ——表示 1[m] 长肋管的水平部分面积, [m<sup>2</sup>];

$F_o$ ——对于 1[m] 长肋管的总外表面积, [m<sup>2</sup>];

$\eta_f$ ——肋片效率, 可按下式计算

$$\eta_f = \frac{\text{th}(ml)}{ml}$$

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_c}{\lambda\delta}}$$

$$l = \frac{d_f - d_o}{2} \left( 1 + 0.805 \lg \frac{d_f}{d_o} \right)$$

式中,  $\delta$ ——肋片厚度, [m];

$\lambda$ ——肋片材料的导热系数, [W/mK]。

对于一般低肋管的  $\eta_f$  约为 0.7~0.8, 低螺纹的紫铜管  $\eta_f = 1$  制冷剂在水平肋管管束外表面冷凝时的放热系数可按下式计

算

$$\alpha_{0, f, e} = \varepsilon_e \alpha_{0f} = \varepsilon_e \varepsilon_f \times \alpha_0 \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (15.7)$$

制冷剂在水平管内冷凝时，由于冷凝液不能随时排走，积聚在管底，放热系数将下降。按管子进口参数计算，管内蒸气雷诺数  $Re$  小于 35000 时，对于氟利昂，其放热系数可按下式计算

$$\alpha_0 = 0.555 \times \left[ \frac{\beta}{(t_k - t_w) d_i} \right]^{0.25} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$

或 
$$\alpha_0 = 0.455 \times \left( \frac{\beta}{q d_i} \right)^{1/3} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (15.8)$$

式中， $d_i$ ——管子的内径，[m]；

$t_k$ ——冷凝温度，[°C]；

$t_w$ ——管内壁面温度，[°C]。

对于氨，管内冷凝时的放热系数按下式计算

$$\alpha_0 = 2116 (t_k - t_w)^{-0.07} \times d_i^{-0.25} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$

或 
$$\alpha_0 = 86.88 q^{0.2} \times d_i^{-0.33} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (15.9)$$

制冷剂蒸气在水平蛇形管内冷凝时，其放热系数  $\alpha_{0,0}$  应将  $\alpha_0$  乘以修正系数  $\varepsilon_0$ ，即

$$\alpha_{0,0} = \varepsilon_0 \times \alpha_0 = 0.25 q^{0.15} \times \alpha_0 \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (15.10)$$

式中， $q$ ——蛇形管内表面的热流密度，[W/m<sup>2</sup>]。

## 2. 冷却剂侧的放热系数

对于水冷式冷凝器，一般冷却水在管内的流动为湍流，当水温为 0~50[°C] 时，冷却水侧的放热系数可用下式计算

$$\alpha_w = (1430 + 22\bar{t}) \frac{w^{0.8}}{d_i^{0.2}} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (15.11)$$

式中， $\bar{t}$ ——冷却水的平均温度，[°C]；

$w$ ——冷却水的流速，[m/s]；

$d_i$ ——管子内径，[m]。

增大冷却水的流速，将提高冷却水侧的放热系数，使冷凝器的传热系数有所提高。但是，由于冷却水的流速增大，其流动阻力将增加，并且加速了水对管子的腐蚀，所以冷却水的流速不能

无限制地增大，水冷式冷凝器水流速的限度见表 15.1。在氨冷凝器中，通常选用较低的流速，这是因为水对钢管的腐蚀作用较大。另外，从传热角度考虑，水流速的最小值一般为：光管取 1[m/s]，肋片管取 1.5[m/s]。

水冷式冷凝器水流速的限度

表 15.1

| 使用时间(h/年) | 水速[m/s] |
|-----------|---------|
| 1500      | 3.0     |
| 2000      | 2.9     |
| 3000      | 2.7     |
| 4000      | 2.4     |
| 6000      | 2.1     |
| 8000      | 1.8     |

对于风冷式冷凝器，由于管外空气侧的对流放热系数较小，所以在管外加设肋片，增加空气侧的换热面积，以强化传热。目前采用的肋片管通常为铜管铝片。

风冷式冷凝器空气侧的放热系数可按下式计算

$$\alpha_w = C \frac{\lambda}{d_o} Re_f^{0.625} \left( \frac{F}{F_n} \right)^{-0.375} Pr_f^{0.33} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15.12)$$

式中， $C$ ——系数。错排管束， $C = 0.45$ ；顺排管束， $C = 0.30$ ；

$\lambda$ ——空气的导热系数，[W/mK]；

$d_o$ ——管子外径，[m]；

$Re_f$ ——雷诺数， $Re_f = \frac{wd_o}{\nu}$

$w$ ——空气在最窄截面上的流速，[m/s]；

$\nu$ ——空气的运动粘性系数，[m<sup>2</sup>/s]；

$F$ ——每米肋管总外表面积，[m<sup>2</sup>]；

$F_n$ ——每米基管的可见面积，[m<sup>2</sup>]；

$Pr_f$ ——普兰特数，空气一般取0.71。

### 3. 油膜热阻

在氨冷凝器中，制冷剂侧存在油膜，其厚度约为0.05~0.08 [mm]，油膜热阻为0.45~0.8 [ $m^2K/W$ ]。在氟利昂12制冷装置中，由于调滑油与氟利昂12相互溶解，所以在计算时不考虑油膜热阻。

### 4. 冷却剂侧的污垢热阻

冷却器投入使用后，冷却水侧会产生污垢热阻，污垢热阻可从表15.2查得。

风冷式冷凝器肋管外表面的尘埃热阻，一般取0.0003 [ $m^2K/W$ ]。

冷却水侧的污垢热阻 [ $m^2K/W$ ]

表 15.2

| 冷却水的种类       | 冷却水侧的污垢热阻 [ $m^2K/W$ ] |                 |
|--------------|------------------------|-----------------|
|              | 水流速 $\leq 1$ [m/s]     | 水流速 $> 1$ [m/s] |
| 海水           | 0.0001                 | 0.0001          |
| 冷却塔循环水(经处理)  | 0.0002                 | 0.0002          |
| 冷却塔循环水(未经处理) | 0.0005                 | 0.0005          |
| 沉淀后的河水       | 0.0003                 | 0.0002          |
| 污浊的河水        | 0.0005                 | 0.0003          |
| 自来水          | 0.0002                 | 0.0002          |

注：对于易腐蚀的管材，应将表中数值乘以2。

## 15.1.3 冷凝器的选择计算

冷凝器的选择计算主要是确定冷凝器的传热面积、选择适用的冷凝器并计算冷凝器的冷却水用量。

### 1. 确定冷凝器的热负荷

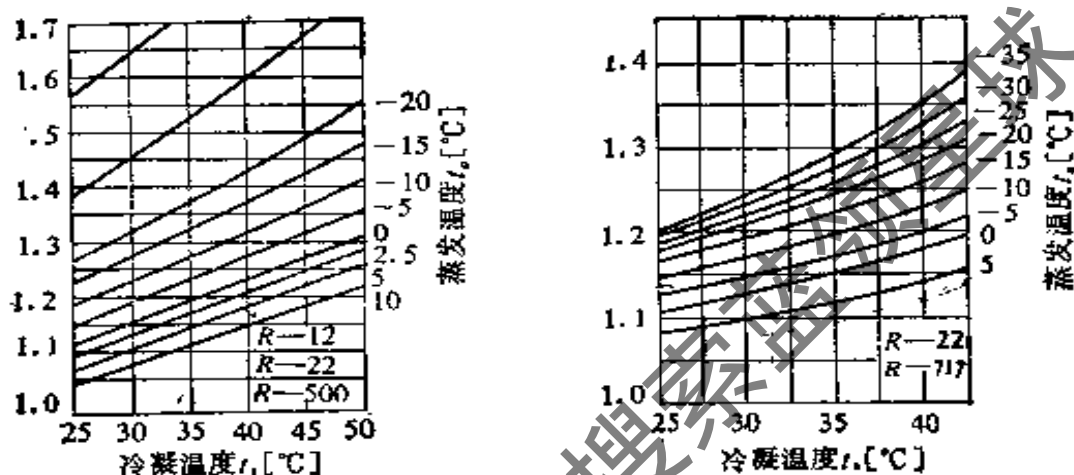
制冷剂蒸气在冷凝器中放出的热量包括制冷剂在蒸发器中吸收的热量(即压缩机的制冷量  $Q_0$ ) 和在压缩过程中由机械功转化给制冷剂的热量，即

$$Q_k \approx Q_0 + N_c \quad [kW] \quad (15.13)$$

由于制冷压缩机的指示功率与制冷量和制冷压缩机运行工况有关，因而为了简化计算，上式可改写为

$$Q_k = \psi Q_0 [\text{kW}] \quad (15.14)$$

式中， $\psi$ ——冷凝器的热负荷系数，可从图 15.8 查得。



a) 风冷气缸      b) 水冷气缸

图 15.8  $\psi$  与  $t_0, t_k$  的关系

## 2. 冷凝器的选型

根据当地的水温、水质、水量、气候条件以及制冷机房布置要求等，冷凝器型式的选择原则是：

(1) 在水质较差、水温较高，水源充足时，宜采用立式壳管冷凝器。

(2) 在水质较好，水温较低时，宜采用卧式壳管冷凝器。

(3) 在缺乏水源或夏季室外空气含湿量较低时，宜采用蒸发式冷凝器。冷却水水质较差时，应进行处理。

## 3. 传热温差

制冷压缩机排出的过热蒸气进入冷凝器后，先冷却为饱和蒸气，接着冷凝为饱和液体，还可能进一步冷却为过冷液体。在水冷式冷凝器中，制冷剂和冷却水的温度变化如图 15.9 所示。

由于使过热蒸气冷却为饱和蒸气和使饱和液体再冷却为过冷液体所带走的热量与冷凝器的总热负荷相比，所占的比例很小，

所以在计算传热温差时，把制冷剂的温度当作定值，冷凝器内制冷剂 and 冷却水之间的平均温差  $\Delta t_m$  通常用下式计算，

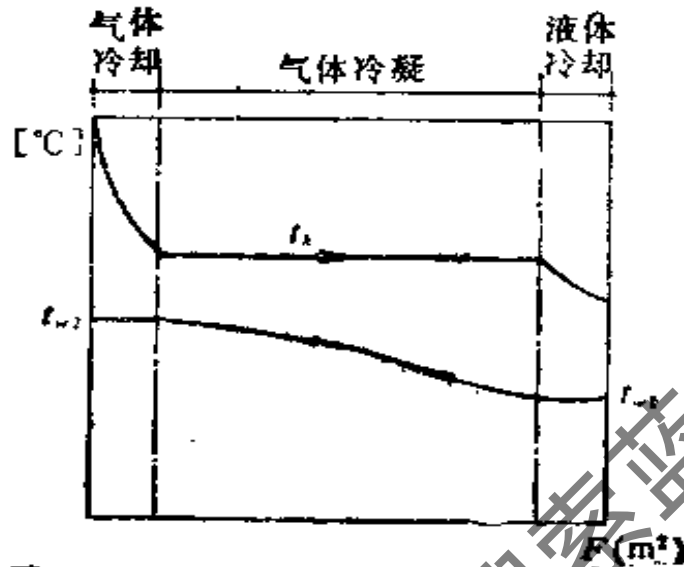


图 15.9 冷凝器内制冷剂和冷却水的温度变化

$$\Delta t_m = \frac{t_{w2} - t_{w1}}{2.3 \lg \frac{t_k - t_{w1}}{t_k - t_{w2}}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (15.15)$$

式中， $t_k$ ——冷凝温度， $[^{\circ}\text{C}]$ ；

$t_{w1}$ ——冷凝器进水温度， $[^{\circ}\text{C}]$ ；

$t_{w2}$ ——冷凝器出水温度， $[^{\circ}\text{C}]$ ；

冷凝器进、出水温度取：立式壳管冷凝器

$$t_{w2} - t_{w1} = 2 \sim 4 [^{\circ}\text{C}]；$$

卧式壳管冷凝器

$$t_{w2} - t_{w1} = 4 \sim 8 [^{\circ}\text{C}]；$$

淋激式冷凝器

$$t_{w2} - t_{w1} = 2 \sim 3 [^{\circ}\text{C}]。$$

#### 4. 传热面积

冷凝器的传热面积按下式计算，

$$F_K = \frac{Q_K}{K \cdot \Delta t_m} = \frac{Q_K}{q_f} \quad [\text{m}^2] \quad (15.16)$$

式中， $K$ ——冷凝器的传热系数， $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ ；



$\Delta t_m$ ——制冷剂与冷却水的对数平均温差, [°C];

$q_f$ ——热流密度, [W/m<sup>2</sup>].

如前所述, 冷凝器的传热系数  $K$  与冷热器的型式, 制冷剂种类、冷却剂的流速、传热温差及传热面的污染程度等因素有关。已知管内外的放热系数后, 才能求出传热系数  $K$ , 但放热系数是热流密度或壁面温度等的函数, 所以传热系数  $K$  一般用连续逼近法或图解法求出。

进行冷凝器的选择计算时, 其传热系数  $K$  与热流密度  $q_f$  值可按表 15.3 选取。

冷凝器的  $K$  与  $q_f$  值 表 15.3

| 制冷剂种类 | 冷凝器型式    | 传热系数 $K$<br>[W/m <sup>2</sup> K] | 热流密度 $q_f$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | 平均温差 $\Delta t_{m1}$<br>[°C] |
|-------|----------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 氨     | 立式壳管     | 700~800                          | 4000~4500                         | 4~6                          |
|       | 卧式壳管     | 700~900                          | 4000~5000                         | 4~6                          |
|       | 蒸发式      | 580~750                          | 1400~1800                         | 3                            |
|       | 淋水式      | 700~1000                         | 4000~5800                         | 4~6                          |
| 氟利昂   | 卧式壳管(肋管) | 850~900                          | 4500~5000                         | 5                            |
|       | 风冷式      | 24~28                            | 210~290                           | 8~12                         |

### 5. 冷凝器冷却水量的计算

$$M_K = \frac{Q_K}{C_w (t_{w2} - t_{w1})} \quad [\text{kg/s}] \quad (15.17)$$

式中,  $C_w$ ——冷却水的比热, [kJ/kgK];

$t_{w1}$ ——冷凝器冷却水的进水温度, [°C];

$t_{w2}$ ——冷凝器冷却水出水温度, [°C].

[例15.1] 已知某制冷量为200[kW](172000[kcal/h])的氨制冷系统, 蒸发温度  $t_0 = 5$  [°C], 冷却水温度  $t_{w1} = 31$  [°C], 如选用卧式壳管冷凝器, 试确定其传热面积。

[解] 1. 确定冷凝温度  $t_K$

设冷却水在卧式壳管冷凝器中的进出口温差  $\Delta t_w = 5$  [°C], 则

$$t_{w2} = t_{w1} + \Delta t_w = 31 + 5 = 36 [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_k = t_{w2} + 4 = 36 + 4 = 40 [^{\circ}\text{C}]$$

2. 确定冷凝器的热负荷  $Q_K$

根据  $t_k = 40 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $t_o = 5 [^{\circ}\text{C}]$ , 查图 15.8(b) 得  $\psi = 1.14$

$$Q_K = \psi Q_o = 1.14 \times 200 = 228 [\text{kW}]$$

3. 确定传热面积  $F_K$

从表 15.3 查得, 卧式壳管冷凝器的热流密度  $q_f = 4000 \sim 5000 [\text{W}/\text{m}^2]$ , 取  $q_f = 4500 [\text{W}/\text{m}^2]$ , 则

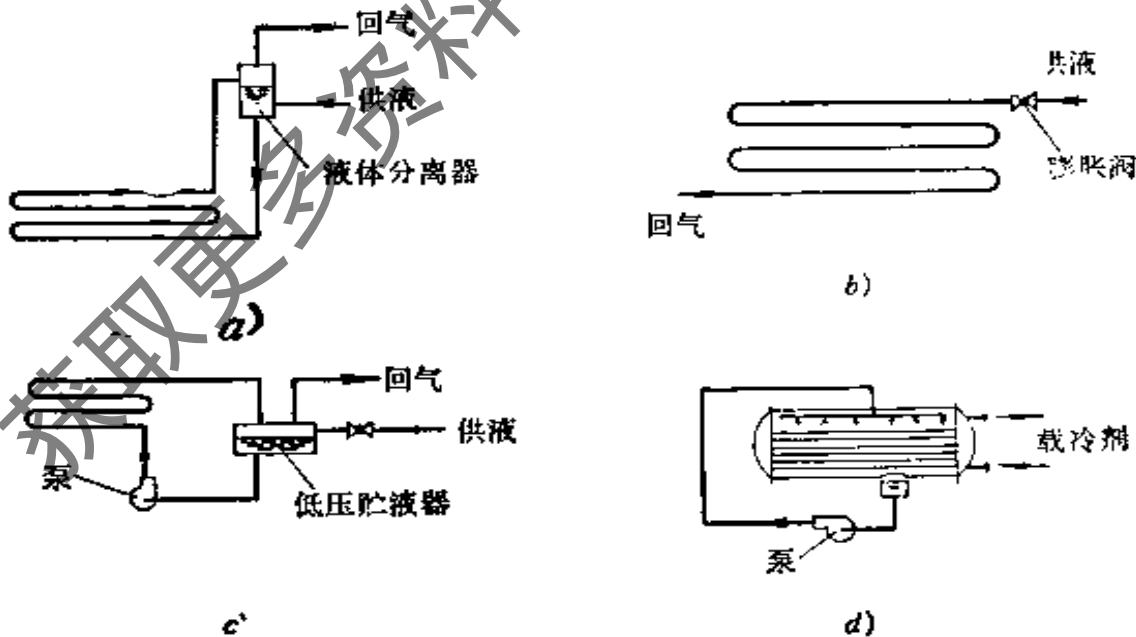
$$F_K = \frac{Q_K}{q_f} = \frac{228 \times 10^3}{4500} = 50.7 [\text{m}^2]$$

## 15.2 蒸发器

在制冷循环过程中, 液态的制冷剂经过节流后在蒸发器中气化吸热, 使被冷却介质的温度降低, 达到制冷的目的。

按供液方式的不同, 蒸发器可以为满液式、非满液式, 循环式和喷淋式等四种, 如图 15.10 所示。

由于满液式蒸发器内充满了液态制冷剂, 使传热面与液态制冷剂接触, 所以满液式蒸发器的沸腾放热系数较大, 其缺点是需要



a) 满液式; b) 非满液式; c) 循环式; d) 喷淋式

图 15.10 蒸发器的种类

加入大量的制冷剂。另外,如果采用能溶于润滑油的制冷剂,润滑油将难于返回压缩机。属于这类蒸发器的有立管式、螺旋管式和卧式壳管蒸发器等。

非满液式蒸发器主要用于氟利昂制冷系统。制冷剂经膨胀阀节流后直接进入蒸发器,在蒸发器内制冷剂处于气、液共存的状态。由于有一部分传热面积与气态制冷剂相接触,所以其传热效果比满液式差。其优点是充液量少,润滑油容易返回压缩机。属于这类蒸发器的有壳管式蒸发器和直接蒸发式空气冷却器等。

循环式蒸发器是依靠泵强迫制冷剂在蒸发器中循环,因此,沸腾放热系数较高并且润滑油不易在蒸发器中积存。由于循环式蒸发器的设备费用较高,所以目前只在大、中型冷藏库中使用。

喷淋式蒸发器是用泵把制冷剂送至喷嘴后喷淋在传热面上,这样可减少制冷剂的充液量,又能消除静液高度对蒸发温度的影响。但因设备费用较高而较少使用。

### 15.2.1 蒸发器的构造及特点

根据被冷却介质的种类,蒸发器可分为冷却液体的蒸发器和冷却空气的蒸发器。

#### 1. 冷却液体的蒸发器

##### (1) 立管式蒸发器

如图15.11所示,由数个管组组成的立管式蒸发器装在矩形的水箱内,蒸发管组由上集管、下集管和许多焊在两集管之间的末端微弯的立管组成。上集管的一端焊有液体分离器,其底部接有一根立管与下集管相通,使分离出来的制冷剂液体流回下集管。下集管的一端与集油器相连接,集油器的上端与吸气管相通。

每组蒸发管组的中部有一根穿过上集管通向下集管的竖管,见图15.12。这样,能使液体从下部进入下集管后均匀地进入立管中。

制冷剂液体在管内吸收冷冻水的热量后不断气化,气化后制冷剂通过上集管经液体分离器,使蒸气中携带的液滴分离出来,仍返回下集管。蒸气从上面引出被压缩机吸走。

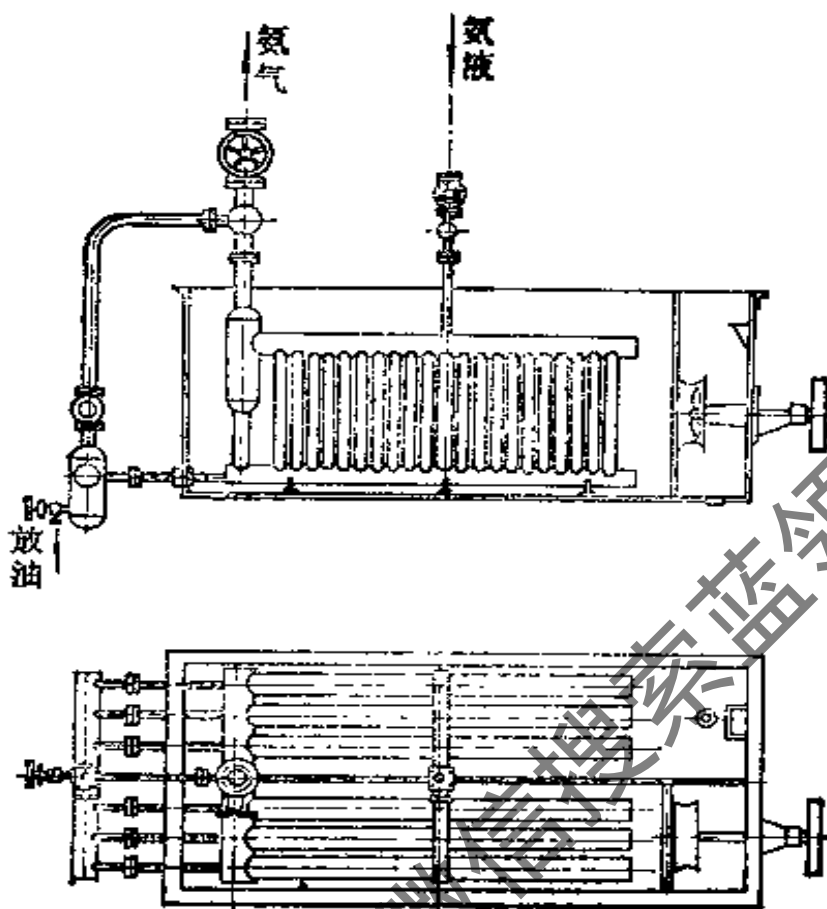


图 15.11 立管式蒸发器

冷冻水从上部进入水箱，被冷却后由下部流出。水箱中装有搅拌器和隔板，使水箱中的冷冻水能按一定的方向和速度循环流动，其流速一般为 $0.5\sim 0.7$  [m/s]。水箱还装有溢水管和泄水管等。

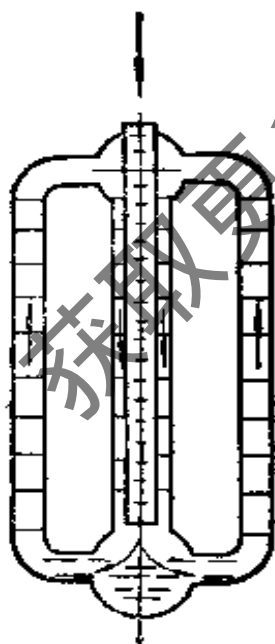


图 15.12 蒸发管组剖面

在蒸发管组中制冷剂下进上出，循环良好，所以立管式蒸发器的传热效果较好。目前，氨制冷系统中常采用这种型式的蒸发器。

螺旋管式蒸发器与立管式蒸发器的主要区别在于它以螺旋管代替两集管之间的立管，因此，当传热面积相同时，其外型尺寸比立管式的小，结构紧凑，又可减少焊接工作量。

## (2) 卧式壳管蒸发器

卧式壳管蒸发器有满液式和干式两种。

满液式壳管蒸发器的构造与卧式壳管冷凝器相似,如图15.13所示。其外壳是用钢板焊成的圆筒,在圆筒的两端焊有管板,钢管用焊接或胀管法固定在管板上。制冷剂在管外空间气化,载冷剂在管内流动。为了保证载冷剂在管内具有一定的流速,在两端盖内铸有隔板,使载冷剂多流程通过蒸发器。

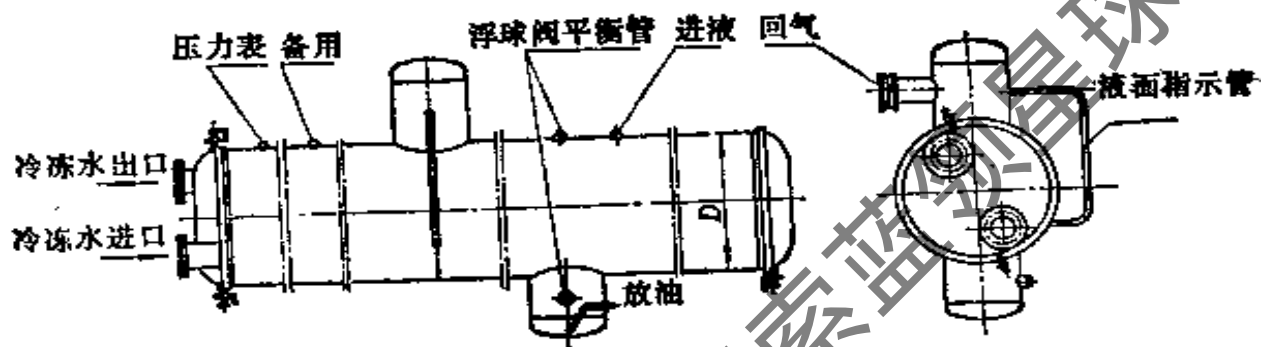


图 15.13 满液式壳管蒸发器

制冷剂液体经膨胀阀节流后,从进液口进入管外空间,充满筒体空间的70~80%,吸热气化后的制冷剂蒸气上升至液体分离器,分离后的蒸气被压缩机吸入,制冷剂液滴仍落入蒸发器内。为了能观察到蒸发器内的液位,在液体分离器和壳体之间装设一根旁通管,旁通管上的结霜处即表示了蒸发器内的液位。

氨蒸发器的底部焊有集油器,可定期放出沉集在其中的润滑油。

这种型式的蒸发器具有传热性能好,结构紧凑等优点,但是,当采用水为载冷剂时,操作不当,易发生冻结事故。

在氟利昂制冷系统中也可以采用这种蒸发器,为了提高制冷剂的沸腾放热系数,传热管大多采用低肋铜管。但是,由于充液量大,并且蒸发器内的润滑油返回压缩机困难,因此,在氟利昂制冷系统中建议采用干式壳管蒸发器。

干式壳管蒸发器的构造与满液式的一样,如图15.14所示。两者主要区别在于:在干式壳管蒸发器内制冷剂在传热管内气化吸热,载冷剂在管外流动,为了提高载冷剂的流速,在筒体内装有多块折流板。

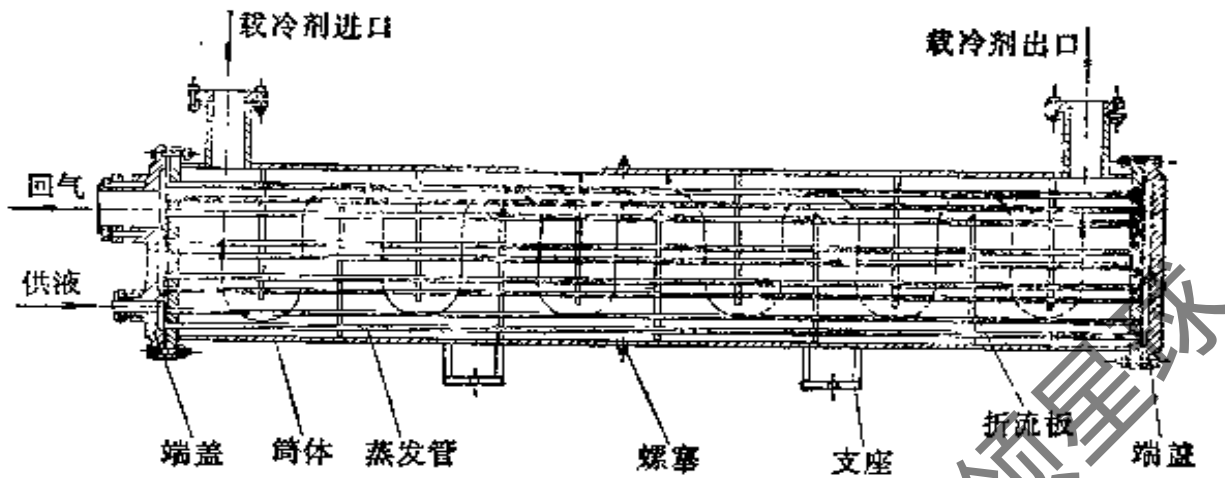


图 15.14 干式壳管蒸发器

由于制冷剂在管内流动,充液量少;流速较高,容易解决润滑油返回压缩机的问题,此外,干式壳管蒸发器还具有冷损失少,传热管不致发生冻结等优点。

## 2. 冷却空气的蒸发器

在冷藏库中通常采用排管直接对库房进行降温。排管通常用无缝钢管(氨或氟利昂制冷系统用)与紫铜管(氟利昂制冷系统用)加工成蛇管形,安装在冷库的平顶或墙壁上,依靠自然对流冷却使库内保持低温。排管虽有构造简单、容易制作等优点,但传热系数较低。

直接蒸发式空气冷却器广泛应用于冷藏库和空调设备中。在冷藏库冻结间和高温冷藏间等场合使用的冷风机由风机和在光管上套金属片或绕金属带制成的肋片管等组成。由于冷风机在低温下工作,肋片和管子上将结霜,影响空气流通,因此肋片管应采用较大的片距,通常为 $6\sim 12[\text{mm}]$ 。

空调用直接蒸发式空气冷却器的构造如图 15.15 所示。它由数排肋片管组成,肋片管一般采用 $\phi 10\sim 18[\text{mm}]$ 的铜管,外套约 $0.2[\text{mm}]$ 的铝片,片距为 $2\sim 4[\text{mm}]$ 。

直接蒸发式空气冷却器的优点是:不用载冷剂,冷损失少;降温快,起动时间短;结构紧凑,易于实现自动化控制等。但其传热系数较低。

### 15.2.2 蒸发器的传热系数

冷却液体的蒸发器，其传热系数的计算与水冷式冷凝器的计算基本相同。蒸发器的传热过程包括制冷剂侧的沸腾换热、传热管和垢层的导热及载冷剂侧的对流换热等。

#### 1. 制冷剂侧的沸腾放热系数

(1) 制冷剂在水平管束外大空间内的沸腾放热系数可按下式近似计算

$$\alpha_o = a q^b \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (15.18)$$

式中，系数  $a$ 、 $b$  与制冷剂种类和热流密度有关；

$q$ ——热流密度， $[\text{W}/\text{m}^2]$ ；

当  $q < 2100 [\text{W}/\text{m}^2]$  时，氨：

$$a = 103, b = 0.25$$

氟利昂 12:  $a = 39.5, b = 0.25$

氟利昂 11:  $a = 33.8, b = 0.25$

当  $q > 2100 [\text{W}/\text{m}^2]$  时，氨:  $a = 4.4(1 + 0.007t_o), b = 0.7$

氟利昂 12:  $a = 5.32, b = 0.6$

氟利昂 11:  $a = 3.95, b = 0.6$

(2) 制冷剂在管内沸腾时的放热系数

在立管内沸腾时，其放热系数的计算公式为

$$\text{氨: } \alpha_o = 4.57 \times (1 + 0.03 \times t_o) \times q^{0.7} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (15.19a)$$

氟利昂 12:  $q < 1350 [\text{W}/\text{m}^2]$  时，

$$\alpha_o = 100 q^{0.25} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (15.19b)$$

$1350 [\text{W}/\text{m}^2] < q < 11500 [\text{W}/\text{m}^2]$  时，

$$\alpha_o = 7.24 q^{0.8} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (15.19c)$$

当进口处制冷剂流速  $w_o = 0.05 \sim 0.5 [\text{m}/\text{s}]$ ，入口制冷剂干度  $x_1 = 0.04 \sim 0.25$ ，出口干度  $x_2 = 0.9 \sim 1.0$  时，氟利昂在水平管内的沸腾放热系数可按下式计算

$$q < 4000 [\text{W}/\text{m}^2] \text{ 时}$$

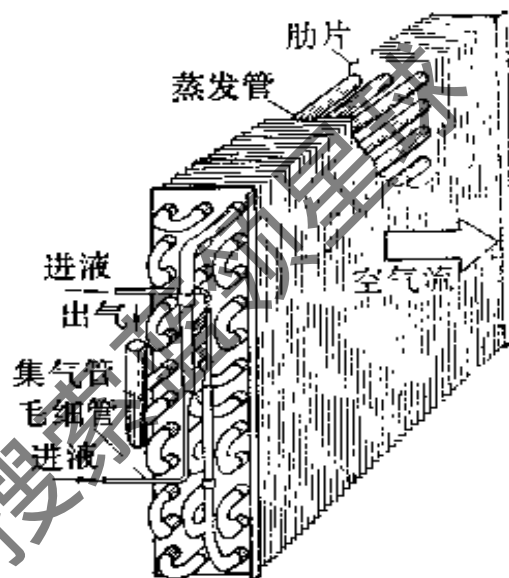


图 15.15 直接蒸发式空气冷却器

$$\text{氟利昂 12: } \alpha_o = 1600 \times w_o^{0.42} [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15.20 a)$$

$$\text{氟利昂 22: } \alpha_o = 2470 \times w_o^{0.47} [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15.20 b)$$

当制冷剂的质量流速  $w_m = 50 \sim 600 [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}]$ ,  $q > 0.6 \sim 25 [\text{kW/m}^2]$  时, 可按下式计算

$$\alpha_o = A \times \frac{q^{0.6} \times w_m^{0.2}}{d_i^{0.2}} [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15.20c)$$

式中,  $A$ ——系数, 与制冷剂的性质和蒸发温度有关, 从表 15.4 查得

系数  $A$  值

表 15.4

| 蒸发温度 $t_o$ [°C] | 制 冷 剂  |        |        |        |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
|                 | R11    | R12    | R22    | R142   |
| -30             | 0.3278 | 0.8389 | 0.9434 | 0.5575 |
| -10             | 0.4722 | 1.0444 | 1.1697 | 0.7249 |
| 10              | 0.5985 | 1.2160 | 1.4630 | 0.8930 |

## 2. 直接蒸发式空气冷却器的传热系数

### (1) 肋片管束外空气侧的放热系数

肋片管束外空气侧的放热系数可按下式计算

$$\alpha_w = C \times \frac{\lambda}{e} \left( \frac{d_o}{e} \right)^{-0.54} \left( \frac{h}{e} \right)^{-0.14} Re_{e,f}^n$$

$$[\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$(15.21)$$

式中,  $C, n$ ——系数, 顺排: 圆肋片  $C = 0.104, n = 0.72$

正方形肋片  $C = 0.096, n = 0.72$

错排: 圆肋片  $C = 0.223, n = 0.65$

正方形或六角形肋片  $C = 0.205, n = 0.65$

$e$ ——肋片间距, [m];

$d_o$ ——基管外径, [m];



$h$ ——肋片高度, [m];

$Re_f$ ——雷诺数,  $Re_f = \frac{wd_o}{\nu}$

$w$ ——空气在管束最窄截面上的流速, [m/s];

$\nu$ ——空气的运动粘性系数 [m<sup>2</sup>/s];

$\lambda$ ——空气的导热系数, [W/mK]。

直接蒸发式空气冷却器的肋片管束的排列方式见图 15.16。

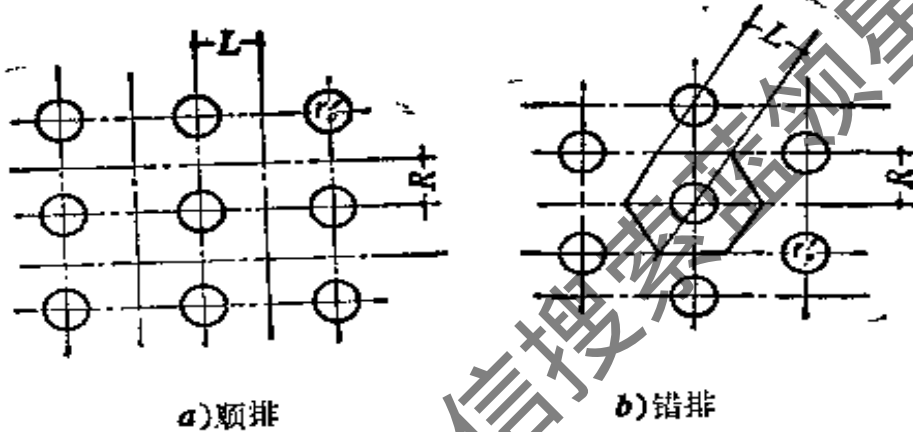


图 15.16 肋片管束的排列方式示意图

## (2) 肋片效率

直接蒸发式空气冷却器肋片管上的肋片表面温度都是不同的,根部温度基本上等于基管表面温度,与空气温差最大。沿着肋片高度方向,温差逐渐减小,至肋片顶部温差为最小。因此,肋片表面与空气之间的平均温差小于肋片根部与空气之间的平均温差,其比值称为肋片效率,即

$$\eta_f = \frac{\text{th}(ml)}{ml} \quad (15.22)$$

式中,  $m$ ——肋片的形状参数, [m<sup>-1</sup>];

$l$ ——肋片当量高度, [m]。

肋片的形状参数  $m$  取决于肋片的厚度、材料和冷却工况,可按下列式计算

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_w}{\lambda_f \delta_f}} \quad (15.22 a)$$

式中,  $\lambda_f$ ——肋片的导热系数, [W/mK];

$\delta_f$ ——肋片厚度, [m];

$\alpha_w$ ——肋片表面空气侧的相当放热系数, 其数值取决于冷却工况。

干工况时, 等于肋片外表面空气侧的放热系数, 即

$$\alpha'_w = \alpha_w [\text{W/m}^2\text{K}]$$

对于肋片表面上以结露形式凝析出湿空气中水蒸汽的冷却工况

$$\alpha'_w = \alpha_w \times \xi [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15.22b)$$

式中,  $\xi$ ——结露时肋片表面的析湿系数, 其数值等于湿空气对流换热和析湿换热时传给空气冷却器外表面的全热交换量  $Q_t$  与显热交换量  $Q_s$  的比值, 即

$$\xi = \frac{Q_t}{Q_s} \quad (15.22c)$$

肋片表面上以结霜形式凝析出湿空气中的水蒸汽时

$$\alpha'_w = \left[ \frac{1}{\alpha_w \xi} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} \right]^{-1} [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15.22d)$$

式中,  $\xi$ ——结霜时肋片表面的析湿系数;

$\delta_s$ ——肋片表面上的霜层厚度, [m];

$\lambda_s$ ——霜层的导热系数, [W/m<sup>2</sup>K]。

肋片当量高度  $l$  取决于肋片的形式。

矩形肋片形式(图 15.16a), 肋片当量高度  $l$  为

$$l = (R - r_0) \left[ 1 + 0.805 \lg \left( 1.28 \times \frac{R}{r_0} \times \sqrt{\frac{L}{R} - 0.2} \right) \right] [\text{m}] \quad (15.22e)$$

六角形肋片形式(图 15.16b), 肋片当量高度为  $l$  为

$$l = (R - r_0) \left[ 1 + 0.805 \lg \left( 1.27 \frac{R}{r_0} \sqrt{\frac{L}{R} - 0.3} \right) \right] [\text{m}] \quad (15.22f)$$

对于整体式管束上的肋片，可设想为若干组单管上的矩形肋片(顺排肋片管束)或六角形肋片(错排肋片管束)的组合，仍按上述有关公式进行计算。

### (3) 肋片管效率

肋片管外表面与空气之间的平均温差和基管表面与空气之间温差的比值，一般称为肋片管效率  $\eta_{fb}$ ，即

$$\eta_{fb} = \frac{\text{空气温度} - \text{肋片管外表面温度}}{\text{空气温度} - \text{基管表面温度}}$$

由于肋片管传递的热量包括肋片表面和基管暴露于空气中的表面所传递的热量之和，设肋片和基管表面空气侧的相当放热系数  $\alpha_w$  相同，按照热平衡关系式可得

$$\eta_{fb} = \frac{\eta_f \times F_f + F_p}{F} \quad (15.23)$$

式中， $\eta_f$ ——肋片效率；

$F_f$ ——肋片外表面面积，[m<sup>2</sup>]；

$F_p$ ——基管暴露部分的外表面面积，[m<sup>2</sup>]；

$F$ ——肋片管总外表面面积，[m<sup>2</sup>]。

### (4) 直接蒸发式空气冷却器的传热系数

若忽略管壁和管内垢层的热阻，直接蒸发式空气冷却器的传热系数可按式计算

$$K = \left[ \frac{1}{\alpha_w \eta_{fb}} + R_f + \frac{1}{\alpha_o} \frac{F_o}{F_i} \right]^{-1} [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15.24)$$

式中， $\alpha_w$ ——肋片表面空气侧的相当放热系数[W/m<sup>2</sup>K]；

$\eta_{fb}$ ——肋片管效率；

$R_f$ ——外表面的污垢热阻，[m<sup>2</sup>K/W]；

$\alpha_o$ ——制冷剂在管内沸腾的放热系数，[W/m<sup>2</sup>K]；

$F$ ——肋片管总外表面面积，[m<sup>2</sup>]；

$F_i$ ——管内表面积，[m<sup>2</sup>]。

### 15.2.3 蒸发器的选择计算

蒸发器的选择计算主要是确定蒸发器的传热面积、选择适用

常用蒸发器的  $K$  与  $q$  值

表 15.5

| 制冷剂 | 蒸发器型式   | 载冷剂 | 传热系数 $K$ [ $W/m^2 \cdot K$ ] | 热流密度 $q$ [ $W/m^2$ ] | 备 注                                   |
|-----|---------|-----|------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 氨   | 卧式壳管式   | 水   | 450~500                      | 2300~3000            | $\Delta t'_m = 5 \sim 6 [^\circ C]$   |
|     |         | 盐水  | 400~450                      | 2000~2500            | $\Delta t'_m = 5 \sim 6 [^\circ C]$   |
|     | 立管式     | 水   | 500~550                      | 2500~3500            | $\Delta t'_m = 5 \sim 6 [^\circ C]$   |
|     |         | 盐水  | 450~500                      | 2300~2900            | $\Delta t'_m = 5 \sim 6 [^\circ C]$   |
| 氟利昂 | 螺旋管式    | 水   | 500~550                      | 2300~3500            | $\Delta t'_m = 5 \sim 6 [^\circ C]$   |
|     | 壳管式(干式) | 水   | 500~550                      | 2500~3000            | $\Delta t'_m = 5 \sim 6 [^\circ C]$   |
|     | 直接蒸发式   | 空气  | 30~40                        | 350~450              | $\Delta t'_m = 12 \sim 14 [^\circ C]$ |

的蒸发器及计算载冷剂循环量等。

### 1. 传热温差

在蒸发器中制冷剂 and 载冷剂之间的温差按对数平均温差计算。

$$\Delta t'_m = \frac{t_{11} - t_{12}}{2.3 \lg \frac{t_{11} - t_0}{t_{12} - t_0}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (15.25)$$

式中,  $t_{11}$ ——载冷剂进蒸发器的温度, [°C];

$t_{12}$ ——载冷剂出蒸发器的温度, [°C];

$t_0$ ——蒸发温度, [°C]。

### 2. 蒸发器的传热面积

蒸发器的传热面积按下式计算

$$F_1 = \frac{Q_0}{K \Delta t'_m} = \frac{Q_0}{q} \text{ [m}^2\text{]} \quad (15.26)$$

式中,  $Q_0$ ——蒸发器的冷负荷, [W];

$K$ ——蒸发器的传热系数, [W/m<sup>2</sup>K];

$q$ ——热流密度, [W/m<sup>2</sup>]。

常用蒸发器的传热系数  $K$  和热流密度  $q'$  可参考表 15.5。

### 3. 载冷剂循环量

$$M_1 = \frac{Q_0}{C_p(t_{11} - t_{12})} \text{ [kg/s]} \quad (15.27)$$

式中,  $C_p$ ——载冷剂的比热, [kJ/kgK]。

## 第16章 制冷剂的节流机构

制冷剂的节流机构是制冷装置的四大主件之一，是实现制冷循环不可缺少的部件，它在制冷系统中有两个主要功能：

1. 对高压液态制冷剂节流降压，保证冷凝器和蒸发器之间的压力差，以便使进入蒸发器中的制冷剂在要求的低压下蒸发吸热，从而达到制冷降温目的；

2. 调整进入蒸发器中的制冷剂流量，以适应蒸发器的热负荷变化，使制冷装置正常运行。

节流机构在制冷系统中通常是一个较小的部件，但由于它能直接控制系统中制冷剂循环量，因此节流机构的容量、产品质量以及正确调整对保证制冷装置正常和节能运行关系极大，绝不容忽。节流机构通常以调节阀和毛细管形式出现，它可以根据制冷系统特点和所用制冷剂种类进行选择。

### 16.1 手动调节阀

手动调节阀的外形与普通截止阀相同，只是内部的阀孔较小，阀芯呈锥形或V形，阀杆采用细牙螺纹。这样，当转动手轮时，就能保证阀门的开启度缓慢地增大或关小，以适应制冷量调节要求。目前，这种阀门使用较少，仅在一些试验装置上采用，或者与浮球调节阀配套使用。

### 16.2 浮球调节阀

图16.1和图16.2是一种低压浮球调节阀的内部结构和连接安装图。由图16.1可知，浮球阀的浮球室内装有浮球、杠杆、阀针和平衡块等零部件。浮球室的上、下两侧通过角阀和平衡管与蒸发器连接，浮球室内的液位与蒸发器内的液位平衡。当蒸发器的

热负荷增大时，制冷剂的蒸发量就增加，液位下降，浮球下沉并驱动杠杆使阀针开启或开大，高压液态制冷剂经阀孔节流后直接从出液管送入蒸发器。当蒸发器中的液位过高时，浮球将驱动杠杆和阀针关小或完全关闭阀孔，使进入蒸发器中的制冷剂量减少或完全停止供给。这样，蒸发器中的进液量就能随外界负荷变化而得到调节。

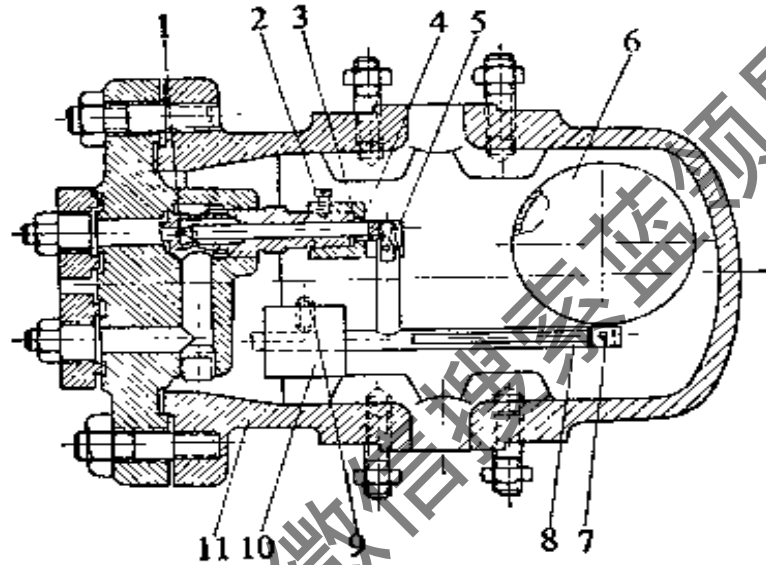


图 16.1 浮球阀结构图

1—阀座； 2—螺钉； 3—加固管； 4—阀杆； 5—轴； 6—浮球； 7—铆钉； 8—杠杆； 9—螺钉； 10—平衡块； 11—壳体

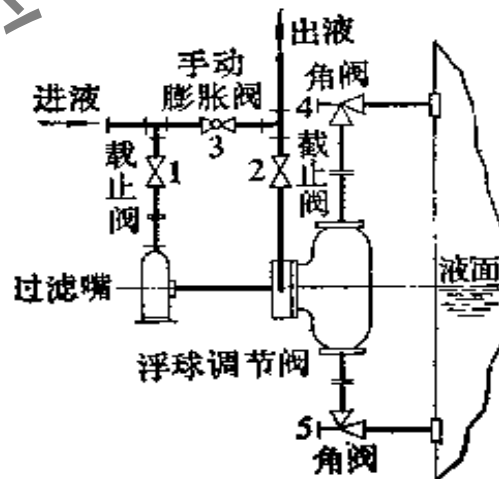


图 16.2 浮球阀接管示意图

与浮球调节阀配套使用的部件有手动调节阀，过滤器和截止阀。当浮球阀失灵时，关闭两只截止阀，液态制冷剂经手动调节阀

节流后直接进入蒸发器中蒸发。如果再关闭两只角阀,则浮球阀和过滤器就可拆下清洗和修理,待清洗和修复后再装入系统,然后打开两只截止阀和角阀,关闭手动调节阀,液态制冷剂经过滤器和浮球阀进入蒸发器,浮球阀重新恢复其节流、调节功能。

目前,浮球调节阀主要用在氨制冷系统中,通常称为氨浮球调节阀。

### 16.3 热力膨胀阀

热力膨胀阀又称感温调节阀或自动膨胀阀,它是目前氟利昂制冷系统中使用最广泛的节流机构。热力膨胀阀能根据流出蒸发器的制冷剂温度和压力信号自动调节进入蒸发器的氟利昂流量,因此它是以发信器、调节器和执行器三位组成一体的自动调节机构。热力膨胀阀根据接受信号的不同,可分为内平衡和外平衡两种形式(图 16.3 和图 16.4)。

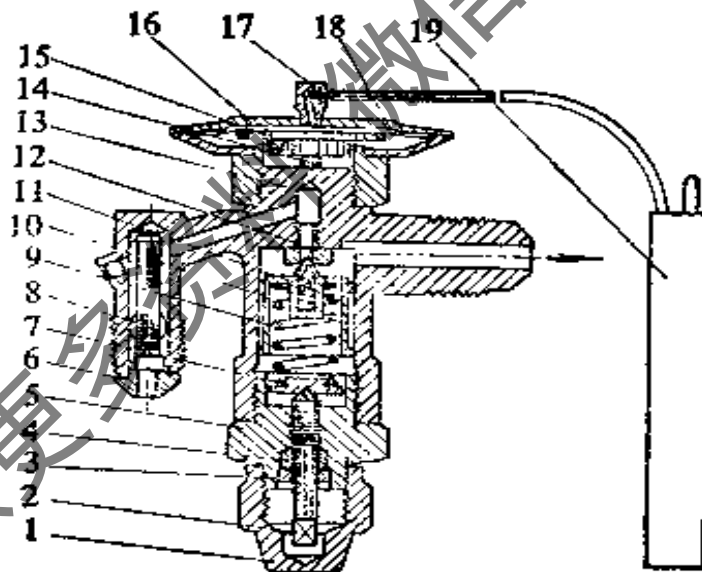


图 16.3 内平衡热力膨胀阀结构图

- 1—密封盖; 2—调节杆; 3—垫料螺帽; 4—密封垫料;  
 5—调节座; 6—喇叭接头; 7—调节垫块; 8—过滤网; 9—  
 弹簧; 10—阀针座; 11—阀针; 12—阀孔座; 13—阀体;  
 14—顶杆; 15—垫块; 16—动力室; 17—毛细管; 18—薄  
 膜片; 19—感温包



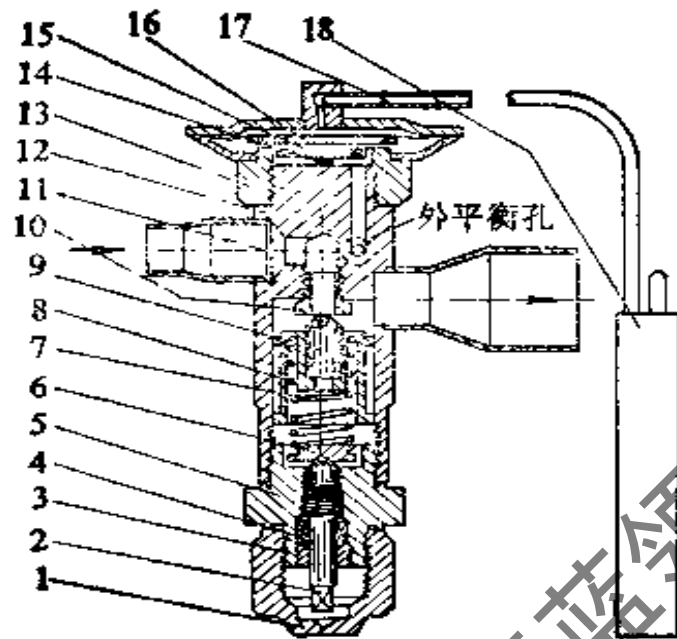


图 16.4 外平衡热力膨胀阀结构图

- 1—密封盖；2—调节杆；3—填料螺帽；4—密封填料；5—调节座；6—调节垫块；7—弹簧；8—阀针座；9—阀针；10—阀孔座；11—过滤网；12—阀体；13—动力室；14—顶杆；15—垫块；16—薄膜片；17—毛细管；18—感温包

### 16.3.1 内平衡热力膨胀阀工作原理

内平衡热力膨胀阀与蒸发器的连接如图16.5所示。膨胀阀的感温包与蒸发器出口管表面紧密接触，感温包内的工质(通常与制冷系统中的工质相同)温度等于蒸发器出口处的制冷剂温度，包内压力为该工质的饱和压力。膨胀阀对制冷剂流量的调节是通过其膜片上三个作用力的变化而自动进行。

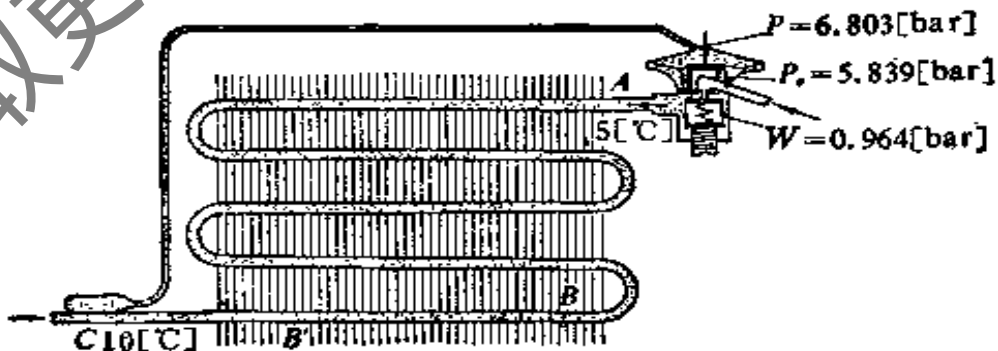


图 16.5 内平衡热力膨胀阀与蒸发器的连接

$P$ 为感温包内气体压力，作用在膜片的上部，其方向是指向

打开膨胀阀孔。

$P_0$  为蒸发压力,它通过内平衡孔作用于膜片的下部,其方向是指向关闭膨胀阀孔。

$W$  为弹簧的等效压缩力,作用在膜片的下部,其方向也是指向关闭膨胀阀孔。弹簧等效压缩力的大小能保证蒸发器出口制冷剂得到所需要的过热度。

当膨胀阀在正常情况下保持一定开度工作时,作用在膜片上,下部的三个力是平衡的

即 
$$P = P_0 + W$$

图16.5 为一只使用 R22 的内平衡热力膨胀阀,制冷剂的蒸发温度为  $5[^\circ\text{C}]$  ( $p_0 = 5.839[\text{bar}]$ ),当制冷剂在蒸发器中由  $A$  点流至  $B$  点时,液态制冷剂全部蒸发为气态,如果忽略蒸发器中阻力,制冷剂在  $AB$  两点之间的蒸发温度保持不变,均为  $5[^\circ\text{C}]$ ,当制冷剂蒸气由  $B$  点流至  $C$  点时,由于继续吸热,其温度将升至  $10[^\circ\text{C}]$ ,因此  $C$  点的过热度为  $5[^\circ\text{C}]$ 。感温包内压力  $P$  等于 R22 在  $10[^\circ\text{C}]$  时饱和压力,即  $P = 6.803[\text{bar}]$ 。弹簧等效压缩力  $W$  为  $5[^\circ\text{C}]$  过热度的压力,即  $W = 0.964[\text{bar}]$ 。显然,此时膨胀阀膜片上、下部压力相等,且保持一定开度,制冷系统运行稳定。

当蒸发器热负荷减少时,蒸发器中的制冷剂在  $B'$  点才能全部蒸发结束,这样,蒸发器出口处制冷剂的过热温度将小于  $10[^\circ\text{C}]$ ,感温包内的工质压力  $p$  下降,膨胀阀向关闭方向动作,制冷剂流量减少,蒸发压力  $p_0$  也稍有降低, $C$  点温度上升,结果在新的平衡点工作。相反,当蒸发器的热负荷增加时,制冷剂将在  $B$  点前蒸发结束,蒸发器出口处的制冷剂温度将高于  $10[^\circ\text{C}]$ ,感温包内工质压力  $P$  升高,膨胀阀向打开方向动作,制冷剂流量增加,蒸发压力  $P_0$  稍有升高, $C$  点温度将得到降低,膨胀阀处在另一个新的平衡点工作。

应当指出,在膨胀阀开度增加时,由于蒸发压力  $P_0$  稍有上升,以及膜片和弹簧系数的影响,膨胀阀在新的平衡点工作时,蒸发器出口制冷剂过热度稍有增加。相反,在膨胀阀开度关小时,蒸发器

出口制冷剂过热度稍有降低。

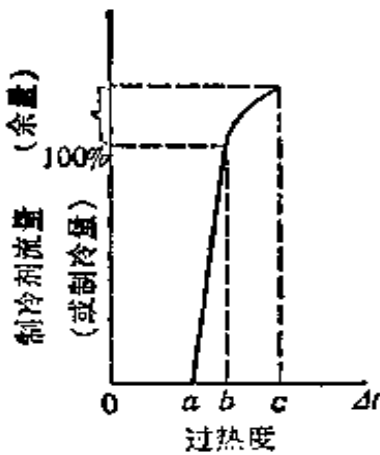


图 16-6 热力膨胀阀的特性

图 16.6 为热力膨胀阀的特性图,由图中曲线可知,热力膨胀阀的开度(可用制冷剂流量或制冷量表示)随蒸发器出口制冷剂过热度的增加而增加,图中的  $\Delta t_a$  称为膨胀的静止过热度,它是膨胀阀阀针由静止到开始动作的过热度。 $\Delta t_b$  称为膨胀阀的梯度过热度(也称过热度斜率),它是阀针从开始开启到最大开启位置所需要的过热度,所以又叫膨胀阀的过热度变化。当过热度大于  $\Delta t_b$  时,膨胀阀的供液量继续增加,当到达  $\Delta t_c$  时,阀孔开足,流量达到最大值。为了不使制冷剂的过热度太大,影响蒸发器传热效果,因此在选用热力膨胀阀时。为了使制冷系统得到所需要的冷量(或制冷剂循环量),蒸发器出口制冷剂的过热度应在  $a$ 、 $b$  两点之间。

### 16.3.2 外平衡热力膨胀阀工作原理

外平衡热力膨胀阀与蒸发器的连接如图 16.7 所示,它与内平衡热力膨胀阀的主要区别在于增加了一根外接平衡管,接管的一端与阀体上的接头连接,另一端与蒸发器出口连接。这样,膜片下部的制冷剂蒸发压力就不是蒸发器的进口压力  $P_0$ ,而是蒸发器出口压力  $P'$ 。外平衡热力膨胀阀适用于蒸发器阻力较大的制冷系统中。

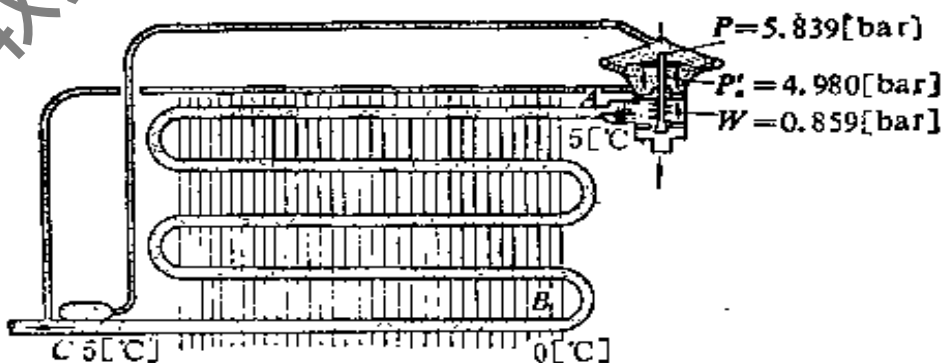


图 16.7 外平衡热力膨胀阀与蒸发器的连接

若图 16.7 所示的制冷系统仍采用 R22 制冷剂,但蒸发器有 0.859[bar] 阻力。当外平衡热力膨胀阀在如图所示条件下工作时,制冷剂在蒸发器入口处 A 点的蒸发温度为 5[°C],相应的蒸发压力  $P_0$  为 5.839[bar],在接近蒸发器出口处 B 点压力  $P'_0 = 5.839 - 0.859 = 4.980$ [bar],制冷剂在该点的蒸发温度  $t'_0 = 0$ [°C]。若制冷剂在蒸发出口 C 点仍保持 5[°C]过热度,则感温包的温度为 5[°C],膜片上部压力  $P$  为 5.839[bar],此时弹簧等效压缩力  $W = 0.859$ [bar],则膜片上、下两侧作用力相等,外平衡膨胀阀正常工作。

若在上述制冷系统中安装内平衡热力膨胀阀,则膜片下部的压力为

$$P_0 + W = 5.839 + 0.859 = 6.698[\text{bar}]$$

为了平衡膜片下部压力,则膜片上部也须有 6.698[bar]的压力,该压力下 R 22 的饱和温度约为 9[°C],则蒸发器出口处的制冷剂应具有(9 + 0)[°C]的过热度。显然,这样高的过热度将影响蒸发器传热效果。

热力膨胀阀在制冷系统中工作时,可以通过其调节杆的转动时对弹簧的预紧力进行调整,以满足制冷装置运行时所要求的蒸发温度和过热度。但是,由于感温包的传热和压力传递均有滞后现象,因此膨胀阀的调节应耐心细致地进行。

### 16.3.3 热力膨胀阀的安装

#### (一)膨胀阀阀体的安装

膨胀阀安装的位置应尽量靠近蒸发器,调节和拆修都比较方便的部位。当膨胀阀向多根蒸发盘管供液时,应在阀后加装分配器或弯头、集管,以保证向每根供液的均匀性。如果分配器阻力较大,应安装外平衡热力膨胀阀。在膨胀阀前还应装设过滤器(或过滤干燥器),用来清除系统中的垃圾(水分),防止膨胀阀堵塞。

#### (二)感温包的安装

感温包感受的温度将直接影响膨胀阀的开启度,感温包应装在蒸发器出口的吸气管上,如果吸气管上装有液-气回热器(热交

换器),则应装在压缩机和回热器之间。感温包与吸气管的接触部分应该平直、清洁,并用绑带扎紧,外加不吸潮的保温材料绝热。

感温包应装在不易积液的吸气管上,为此,当吸气管直径小于22[mm]以上时,感温包装在吸气管上部,当吸气管直径大于22[mm]时,应装在吸气管水平线45°处(图16.8)。

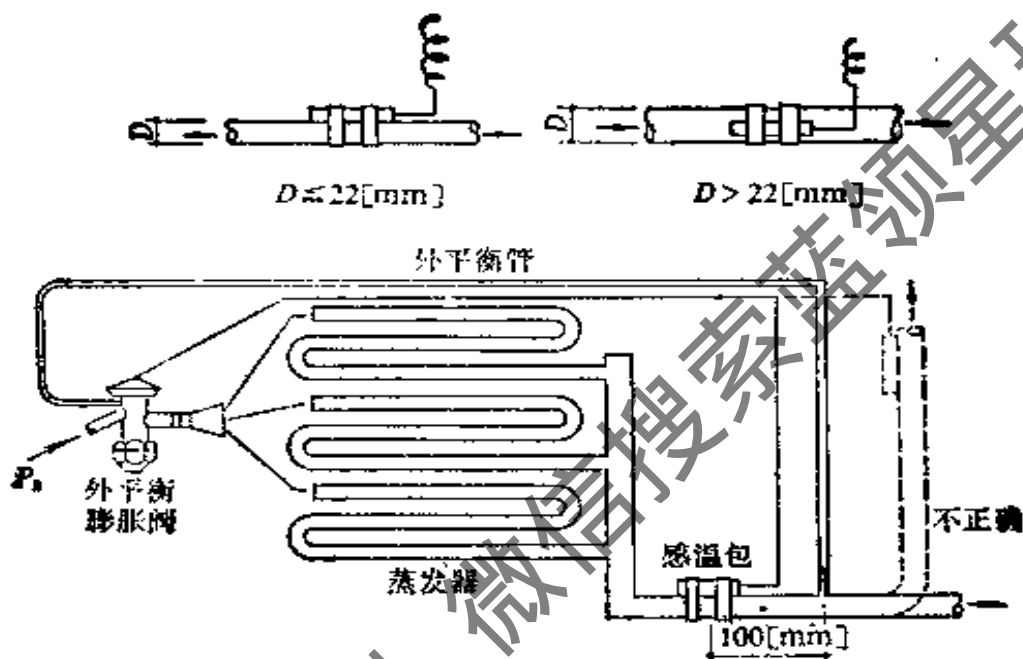


图16.8 热力膨胀阀感温包和外平衡管的正确安装

### (三)外平衡管的安装

外平衡管应装在蒸发器的出口处(图16.8),感温包装在它的前面,而且应保持适当距离,两者位置不能互换。因为膨胀阀内有时可能有极少量制冷剂液体漏入外平衡管而到达吸气管,如果感温包装在接口后面,感温包接受的温度就偏低,膨胀阀开度不足,影响制冷装置正常运行。

## 16.4 热电膨胀阀

热电膨胀阀是利用一只暴露于吸气管制冷剂蒸气中的热敏电阻进行制冷剂流量控制的调节阀,它的基本结构以及与蒸发器的连接如图16.9所示。当蒸发器出口处制冷剂的过热度增加时,热敏电阻的电阻值降低,外电路通过膨胀阀内的双金属控制器的电流

增大,使阀孔开启或开大。反之,阀孔就关小或关闭。为了达到良好的控制性能,热敏电阻可以更换。热膨胀阀可以在高精度的范围内控制制冷剂流量,特别适用于热泵装置。

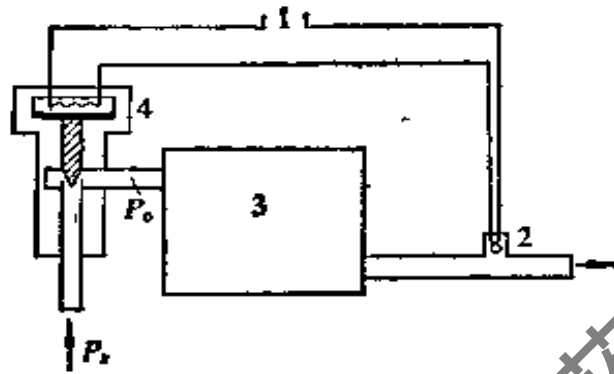


图 16.9 热膨胀阀

1—外加电压; 2—热敏电阻; 3—蒸发器; 4—热膨胀阀

## 16.5 毛细管

毛细管是最简单的节流机构,通常用一根直径为  $0.5 \sim 2.5$  [mm], 长度为  $1 \sim 3$  [m] 的紫铜管就能使制冷剂节流、降温。目前,在家用电冰箱、窗式空调器,小型立柜式空调器和去湿机中已广泛使用。

毛细管的结构十分简单,但制冷剂在管内的节流过程却极其复杂。制冷剂在毛细管中的节流过程与膨胀阀有较大区别。在膨胀阀中,制冷剂在通过阀孔的瞬间即完成节流过程,而在毛细管中,节流过程是沿毛细管总长的流动过程中完成的。在正常情况下,毛细管通过的制冷剂量主要取决于它的内径、长度和进出口压力差。

当空调器或电冰箱的设计运行工况和所需冷量确定后,毛细管的参数(内径、长度)可通过计算或查有关图表确定。但是,由于制冷剂在毛细管中的节流过程比较复杂,利用现有的一些计算公式和图表确定的毛细管参数通常误差较大,目前,各制造厂常用类比法(参考比较成熟的同类型产品进行类比而选择毛细管的内径和长度)和试验方法确定。

采用毛细管作为节流机构的制冷装置,有以下一些特性。

1. 制冷装置运行工况变化时,毛细管对制冷剂流量的调节能力较差,因此,它仅适用于运行工况比较稳定的小型制冷装置。

2. 装有毛细管的制冷装置,其运行性能对制冷剂充加量十分敏感。因此在确定毛细管参数的同时,必须通过一定的试验方法确定制冷系统中的制冷剂充加量,并通过使用说明书告知用户,以便在检修机组时参照执行。

3. 由于毛细管处在常通状态,当压缩机停机后,高、低压能迅速平衡,有利于压缩机的再次起动。

4. 制冷装置开始运行时,采用毛细管的制冷系统降温速度较慢,这是因为膨胀阀在启动时,因过热度较大,阀孔开启度也大,通过的制冷剂量就多,降温速度也就较快。而毛细管对制冷剂的自调能力较差,所以降温速度较慢。

5. 制冷剂在毛细管中节流不存在进、出口方向性,因此,对热泵系统特别适用。

6. 由于毛细管内径小,管路长,极易被垃圾或水分堵塞,因此制冷系统内部必须保持清洁、干燥。

获取更多资料

## 第17章 辅助设备和自控装置

制冷装置除装有必须具备的四大主件外，通常根据各种制冷系统的运行特点和要求还设置了一些辅助设备和自控装置，安装这些附件的主要目的有以下几个方面。

1. 使制冷装置能更有效和安全地运行；
2. 简化管理，节省操作人员，提高制冷装置运行的经济性；
3. 提高用户的用冷质量，稳定用冷场合所需要的冷量和温度。

制冷装置的辅助设备和自控装置品种较多，现将氟利昂制冷系统中常用的一些设备和装置分述如下。

### 17.1 辅助设备

绝大部分辅助设备直接接入制冷系统，制冷剂经过这些设备可以认为未发生状态变化，但是它能改善制冷装置的运行条件，保证系统正常和经济地运行。

#### 17.1.1 油分离器

油分离器装在压缩机排出口和冷凝器之间，用来分离高压气体中的润滑油，不使过量的油进入冷凝器和蒸发器，影响传热效果，降低制冷量。

图17.1是氟利昂制冷系统中常用的一种能自动回油的油分离器，当压缩机排出的高压气体进入容器时，因截面积扩大使气流速度突然降低，同时因出口方向与原气流方向不一致，这时高压气体中的油就被分离出来，并沉积在容器底部。当底部油位达到一定高度时，浮球阀开启，润滑油在压差 $(P_k - P_0)$ 作用下经回油管自动流入压缩机曲轴箱。容器中油位降低后，浮球下落，回油阀关闭，油分离器又进入正常的分油状态。



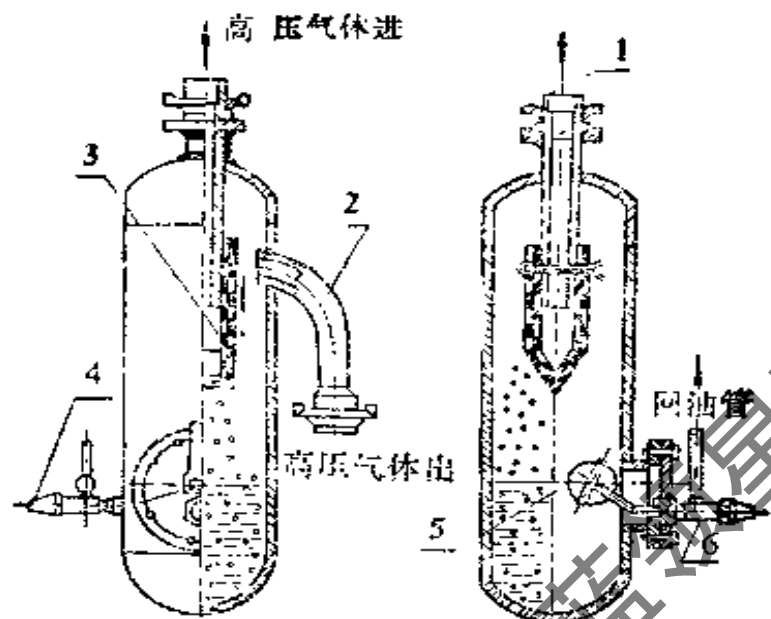


图 17.1 油分离器

1—高压气体进口；2—高压气体出口；3—滤油网；4—手动回油阀；5—浮球阀；6—回油阀

### 17.1.2 贮液器

制冷装置运行时，由于工况变化或者对制冷量进行调节时，系统中的制冷剂循环量将发生变化。设置贮液器后，它可以利用贮液能力平衡和稳定系统内的制冷剂循环量，使制冷装置正常运行。另外，当制冷装置的某些部件发生故障而需要拆修时，可以通过一定的操作方法把系统中的制冷剂收进贮液器内，以免浪费制冷剂或因外逸而污染环境。

图 17.2 为贮液器的结构图，贮液器装设在冷凝器和膨胀阀之

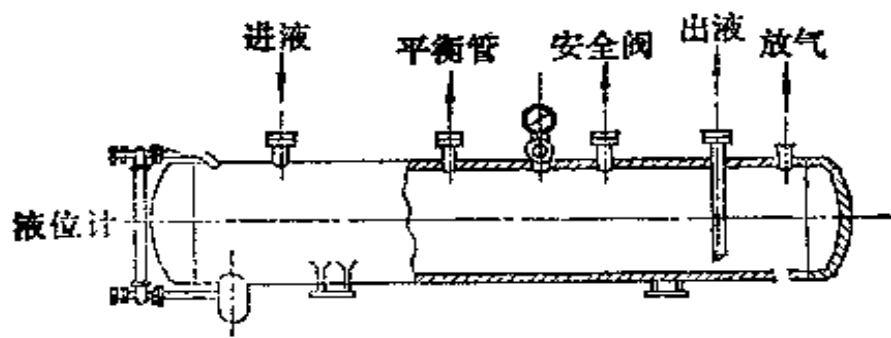


图 17.2 贮液器

间,为了使冷凝器中的液体制冷剂顺利地流入贮液器,贮液器的位置应低于冷凝器 300[mm]以上,贮液器的容量应满足以下要求:

(一)对于中小型制冷系统,应能收容制冷装置的全部充液量;

(二)装有多台蒸发器的制冷系统,贮液容量应为最大容量蒸发器的制冷剂液量和贮液器中的正常贮液量之和;

(三)为了防止温度变化时制冷剂的热膨胀,贮液器中的最大收容量为其容器体积的 80%。

应该指出,贮液器并不是所有制冷系统必须要安装的设备,有些制冷装置若在不设贮液器的情况下仍能满足正常运行要求,则应尽量省略,如果不能省略,也应在满足上述要求条件下,尽量选配容量较小的贮液器,以减少制冷装置的体积和初投资,减少制冷剂的初次充加量,以防一旦产生泄漏而对环境污染产生严重后果。

### 17.1.3 过滤干燥器

为了保证制冷剂的正常循环流动,制冷系统内部必须保持清洁、干燥,因为杂质(金属屑、砂粒、纤维等)过多会堵塞节流机构,润滑油道,损坏机件。过量的水分会使制冷系统产生冰塞,水分和润滑油在高温作用下产生油泥,堵塞节流机构。特别是氟利昂制冷系统,由于水和氟利昂的溶解度极小,冰塞现象极易产生,是目前氟利昂制冷系统的常见故障。过量的水分与氟利昂会产生盐酸,损坏机件。因此,是否能保证氟利昂制冷系统内部的清洁与干燥,已成为衡量氟利昂制冷装置质量优劣的重要标准。

制冷系统内部的清洁与干燥工作主要靠机组或设备在装配时完成,但是在系统中装设过滤干燥器也是一个十分有效措施。图 17.3 为氟利昂制冷系统中常用的一种过滤干燥器形式,它的外壳为无缝钢管,管内两端按一定要求放置了滤网和纱布等物质,用来过滤杂质,中间放置了吸湿性能较强的无水氯化钙,用来吸收水分。过滤干燥器通常装在膨胀阀之前,当液体制冷剂经过干燥过滤后,就能防止膨胀阀节流口的堵塞。

目前,用作干燥剂的物质较多,有无水氯化钙、硅胶、分子

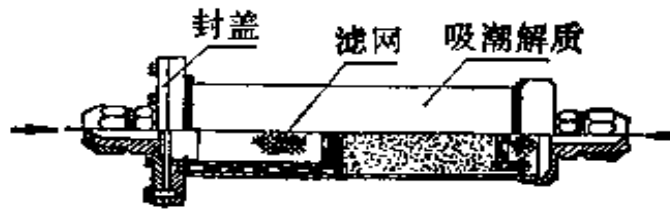


图 17.3 过滤干燥器

筛、三氧化二铝等。由于氯化钙吸水后将变成糊状物质，因此只能在制冷机组调试时临时使用，使用后必须从系统中取出。近年来，随着封闭式制冷机组的大量应用，要求具有吸湿性能更强、甚至能吸收酸分子的干燥剂，目前应用的分子筛是一种净化制冷剂的较理想物质。分子筛是一种具有均匀微孔，其孔径与分子大小相当的吸附类物质，根据其有效孔径，可用来筛分大小不同的流体分子而得名。分子筛可以人工制作，也有如天然沸石等作为分子筛使用的物质。分子筛根据其孔径大小有很多品种，对于 R 12、R 22 和 R 13 等制冷剂，使用 5 A 型分子筛较合适。目前家用电冰箱中已广泛采用。

#### 17.1.4 热交换器

当氟利昂制冷剂系统采用回热循环时，制冷剂环路中须装设热交换器。图 17.4 a 是盘管式热交换器的结构，它的外壳用无缝钢管或铜管制作，内装钢制螺旋盘管。来自冷凝器或贮液器的制冷剂液体在盘管内流动，而来自蒸发器的低温制冷剂蒸气在盘管外流动。由于两种流体在逆流过程的热交换，使液体制冷剂过冷，压缩机吸气过热。图 17.4 b 是具有气液分离的热交换器，常在氟利昂冷藏库制冷系统中使用。

#### 17.1.5 熔塞

在小型氟利昂制冷系统中，常用熔塞代替压缩机的高压安全阀。熔塞的结构如图 17.5 所示。熔塞的中心钻有小孔，在小孔中浇灌了易熔合金。熔塞通常装在冷凝器上，当由于某种原因使得冷凝器的温度或其中的压力过高时，合金熔化（一般熔点为  $70^{\circ}\text{C}$  左右），容器中的制冷剂经小孔排出，防止容器产生破裂。

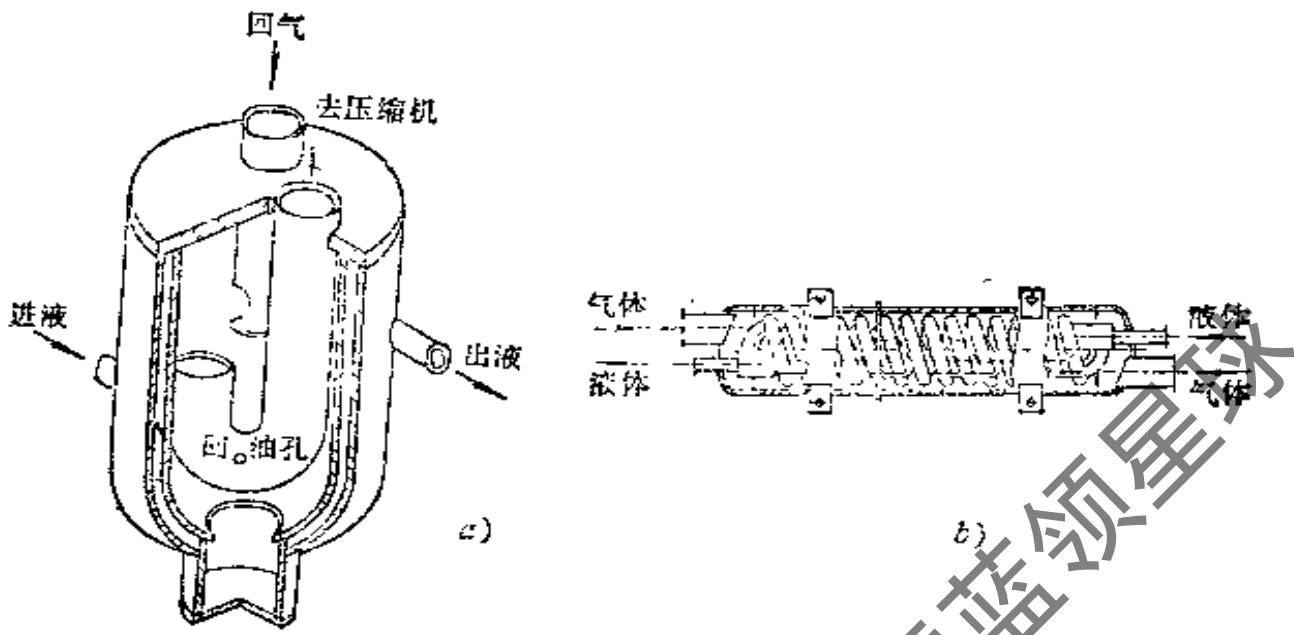


图 17.4 氟利昂热交换器

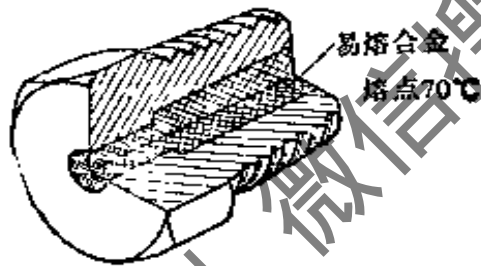


图 17.5 熔塞结

熔塞合金配方(重量比)

表 17.1

| 成 分       | 铋(Bi)<br>[%] | 铅(Pb)<br>[%] | 锡(Sn)<br>[%] | 镉(Cd)<br>[%] | 锑(Sb)<br>[%] |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 熔点 70[°C] | 69           | 25.7         | 13.3         | 10           | 1            |

## 17.2 自 控 装 置

制冷系统中的自控装置有两大类：各种自动控制阀和继电器。

### 17.2.1 自动控制阀

在制冷系统中，除了第 16 章中介绍的浮球调节膨胀阀和各种

热力膨胀阀之外,还装设了其他各种自动控制阀,以实现制冷装置运行的自动控制和调节。

### 1. 电磁阀

电磁阀是由电流通过电磁铁产生电磁吸力来控制阀门的启闭,而电流可以受各种继电器和控制器或手动开关所发出的信号控制。电磁阀通常安装在膨胀阀前,用来直接控制进入蒸发器的制冷剂量。也可以安装在压缩机卸载油缸之前,控制压缩机气缸的卸载。目前常用的电磁阀有两种形式:

(一)直接启闭式电磁阀(图 17.6)。它由阀体和电磁头两部分组成。当电磁头中的线圈通电时,线圈与衔铁产生感应电磁场,衔铁带动阀针上移,阀孔被打开,流体正常流动。当电源被切断时,磁场消失,衔铁靠自重和弹簧力下落,阀针将阀孔关闭,流体停止流动。由上述动作看出,所谓直接启闭式电磁阀,就是利用电磁头中的衔铁直接控制阀孔的启闭。因而其结构简单,操作方便、可靠。但它仅适用于控制直径为 3[mm] 以下的阀孔。如阀孔较大,衔铁和阀针也需增大,则电磁力也需按比例增加,这样就需要增大线圈和电磁头,使材料消耗过多,也增加了制造的产品规格,给生产带来麻烦。

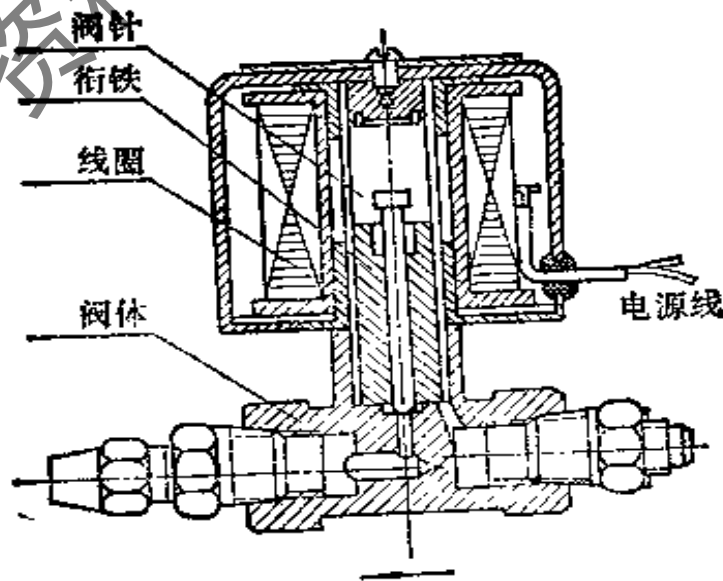


图 17.6 直接启闭式电磁阀

(二)筒接启闭式电磁阀 (图 17.7)。它能以较小的电磁头启闭较大的阀孔,动作过程分两次进行 (故又称两次开阀)。当电磁头中的线圈通电后,衔铁和阀针上移,首先打开操纵孔 (孔径较小),使浮阀上部空间的制冷剂通过操纵孔流向阀的出口,上部压力迅速下降,这样浮阀在压差作用下上升,再打开阀孔。当线圈切断电源时,衔铁和阀针下落并关闭操纵孔,制冷剂通过浮阀上的平衡孔进入上部空间,使浮阀两侧压力平衡,在自重和弹簧力作用下而下落,再将阀孔关闭。如果游阀发生故障,可转动调节杆强行顶开浮阀。

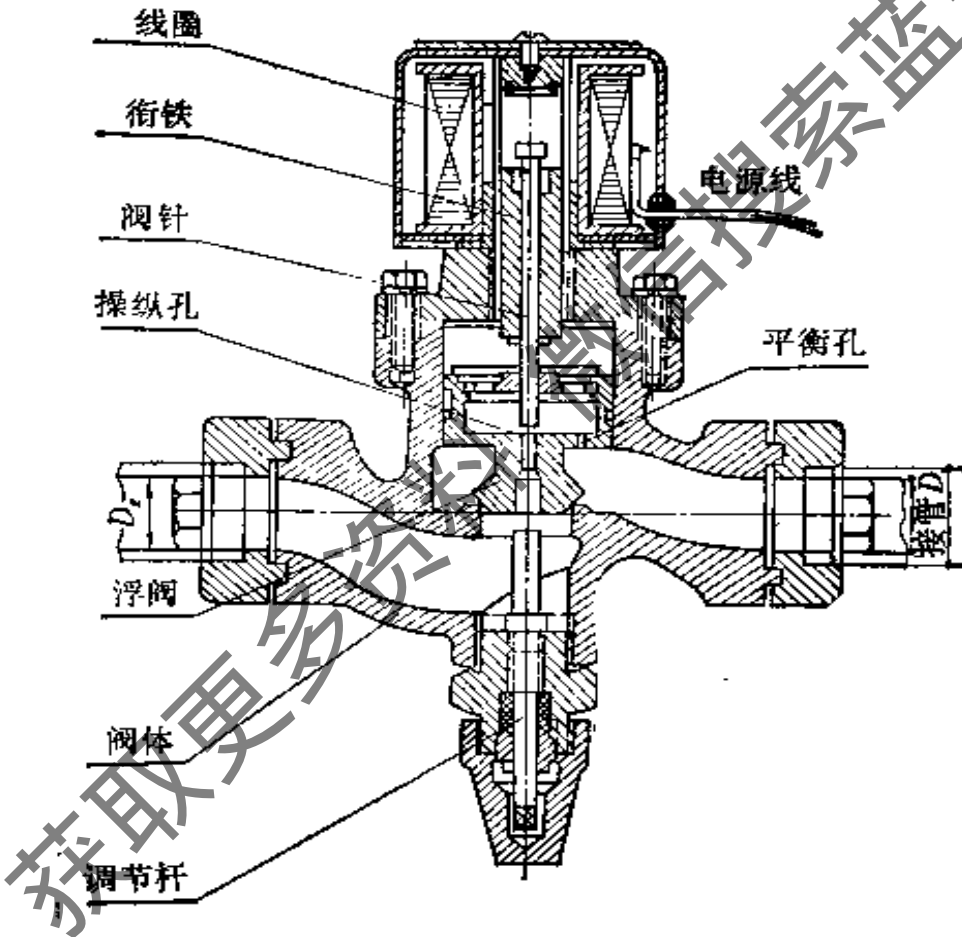


图 17.7 筒接启闭式电磁阀

### (三)电磁阀的选用与安装

1) 应根据外接管路的内径选用,目前国产电磁阀的内径(通径)有 3,6,8,10,13,16,19,25,32[mm]几种。

2) 氟利昂制冷系统一般选用铜质电磁阀,氨系统一定选用不锈钢电磁阀。

3) 根据电磁阀控制线路电源和电压选配,如为交流(AC)电源,可选 36[V]、220[V]、380[V];如为直流(DC)电源,可选 24[V]、110[V]、220[V]等。

4) 电磁阀应水平安装,流体流动方向应与阀体标注箭头相同,切勿装反。

5) 安装点的环境温度不应超过 40[°C],也不应装在潮湿地方,以免烧坏线圈。

## 2. 蒸发压力调节阀

蒸发压力调节阀是用来调节蒸发器中制冷剂的蒸发压力(或温度)的自动阀。当使用一台压缩机需要得到几种不同蒸发温度时,在制冷系统中装设几只蒸发压力调节阀便能满足要求,目前在一些小型冷藏制冷系统中应用较多。例如,船上的伙食冷库,若贮存果蔬、蛋类食品的库房温度为 2[°C],而贮存肉、鱼类食品的库温为 -20[°C],为了减少压缩机台数,选用一台压缩机,在制冷系统中配以一只蒸发压力调节阀和单向阀就能达到上述目的(图 17.8)。蒸发压力调节阀装在高温库的蒸发器出口管上,而单向阀装在低温库的蒸发器出口管上。这样,蒸发压力调节阀就能控制高温库中蒸发器内的制冷剂压力为 2[°C]时的饱和压力,而不受压缩机吸气压力(等于低温库蒸发器内的制冷剂为 -15[°C]时的饱和压力)的影响。设置单向阀的目的是为了防止停车时高温库的制冷剂流入低温库,而影响低温库的温度。

图 17.9 为蒸发压力调节阀的结构图。由图可知,当来自蒸发器的制冷剂蒸气进入阀内时,由于蒸气的压力作用,将克服弹力、推动阀芯上移,使阀孔打开,制冷剂蒸气由出口流入压缩机吸气管。当来自蒸发器的制冷剂压力升高,阀孔开大,流出的制冷剂量增加,蒸发器内压力降低。反之,当来自蒸发器的制冷剂偏低,阀孔关小,流出的制冷剂量减少,蒸发器内压力升高。蒸发压力调节的设定值是通过调节杆和调节弹簧实现的。显然,调节弹簧的弹

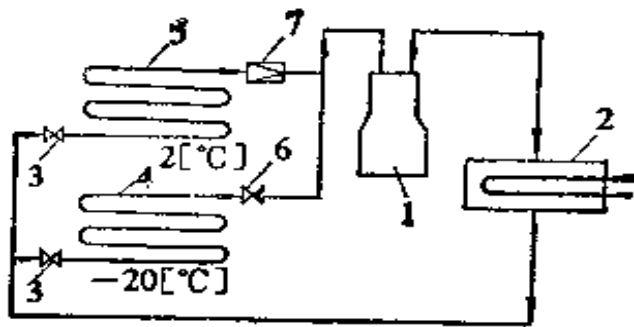


图 17.3 蒸发压力调节阀在制冷系统中的安装  
1—压缩机；2—冷凝器；3—膨胀阀；4—低温库蒸发器；5—高温库蒸发器；6—单向阀；7—蒸发压力调节阀

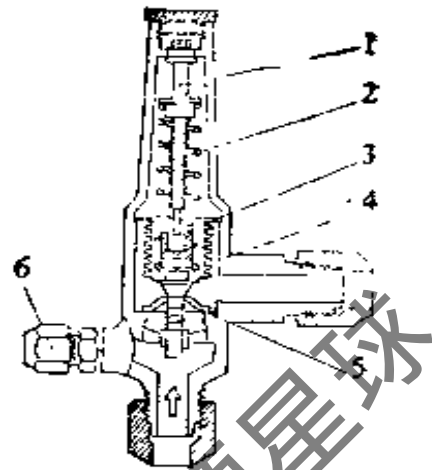


图 17.9 蒸发压力调节阀  
1—调节螺钉；2—调节弹簧；3—脉冲阻尼件；4—波纹管；5—阀芯；6—压力表接头

力越大，控制的蒸发压力也越高，库温也上升。

### 3. 组合式恒压阀

图 17.9 所示的蒸发压力调节阀实际上是一种控制阀前压力的恒压阀，但这种阀的阀孔不宜过大，仅适用于小型制冷系统。对于口径较大的接管，应使用组合式恒压阀来调节阀前压力。

组合式恒压阀是由压力导阀与主阀组成整体的恒压阀(图 17.10)，主阀阀孔的启闭和调节由压力导阀根据阀前流体压力控制。当来自蒸发器的制冷剂蒸气进入压力导阀膜片下部时，将克服辅助弹簧的弹力把导阀阀孔开启，并进入主阀活塞的上腔，在蒸气压力作用下推动活塞下移，使主阀处于一定开启度，制冷剂经主阀流动。显然，当阀前压力增大，主阀活塞的下移位置增加，主阀开度增大，使制冷剂流量加大，阀前压力(即蒸发压力)下降。组合式恒压阀的控制压力，可转动压力导阀上的手轮，通过调节辅助弹簧的弹力而获得。当主阀的活塞移动发生故障而无法打开阀孔时，可转动强开机构使阀孔强行开启。

### 4. 主阀-导阀组



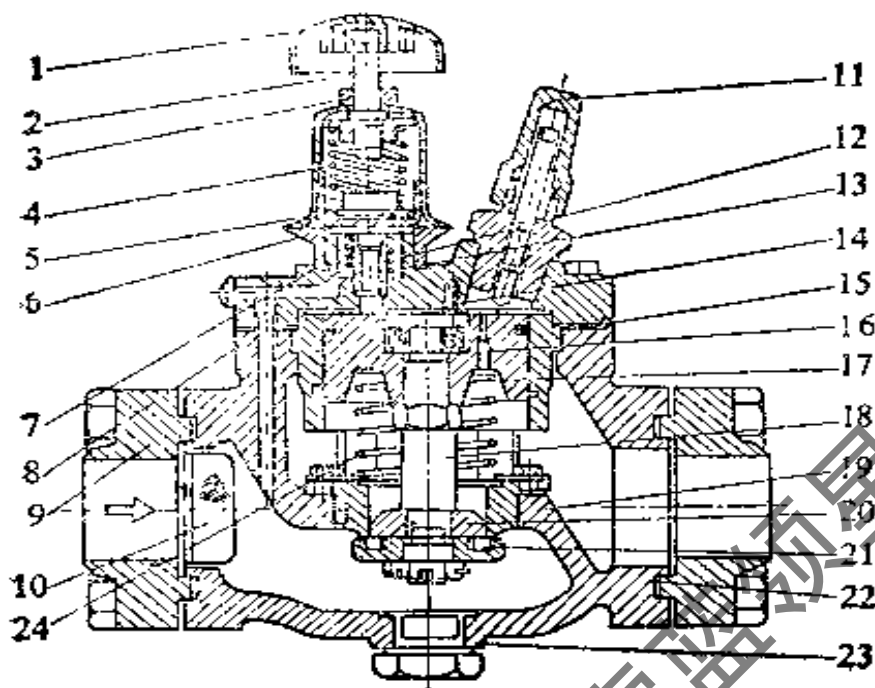


图 17.10 组合式恒压阀

1—手轮；2—调节杆；3—密封圈；4—辅助弹簧；5—辅节流阀；6—膜片；7—垫片；8—辅助孔道；9—进口接管；10—主滤器；11—手动强开机构；12—辅阀座；13—过滤板；14—止回阀片；15—垫片；16—压力平衡小孔；17—活塞；18—推杆；19—“O”型圈；20—主节流阀芯；21—主阀板；22—垫片；23—泄放塞；24—主弹簧

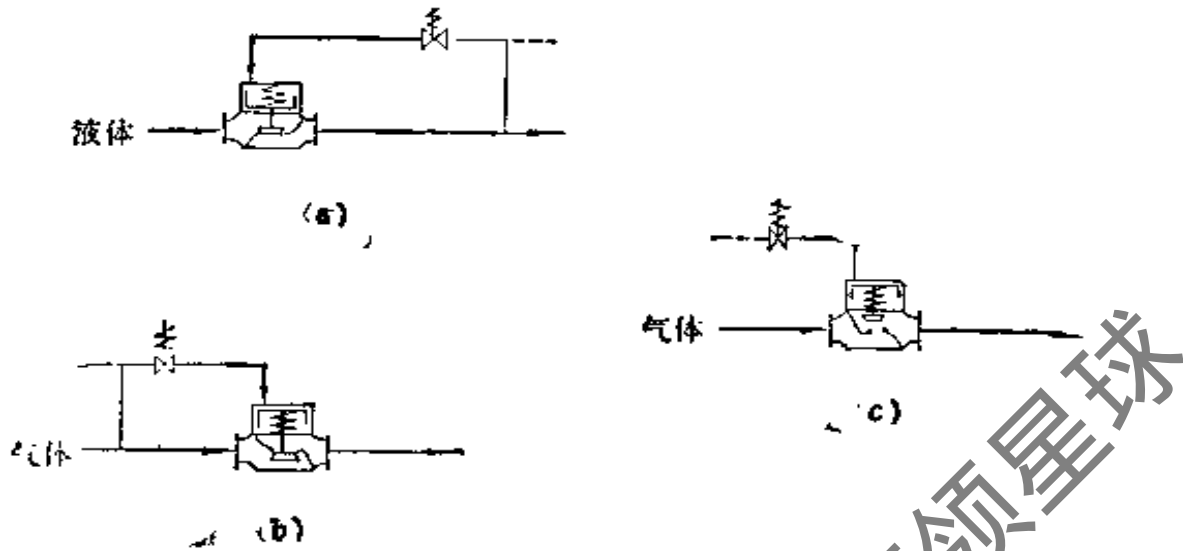
在一些大型制冷系统中，自动控制阀也可以采用主阀—导阀组件，控制液体或气体制冷剂的流动。主阀本身不会动作，必须与导阀配合使用。导阀可以是恒压阀，也可以是电磁阀，导阀通过管路与主阀连接，并根据导阀输入的压力信号使主阀启闭。

主阀的型式和连接如图 17.11 所示。

#### 4. 水量调节阀

在一些小型水冷式制冷装置的冷凝器进水管上，常装有水量调节阀，用来控制冷凝压力，节省冷却水量。

水量调节阀的结构如图 17.12 所示，阀顶端的毛细管与压缩机排气阀上的旁通孔连接，当冷凝器的进水温度过高或水量不足时，压缩机的排气压力上升，阀内波纹管被压缩，并通过调节杆和顶杆向下推动阀门，使阀塞开大，水量增加，压缩机排气压力下降。当排气压力过低时，波纹管伸张，传给顶杆的压力减少小，阀



a) 液用常闭型主阀与导阀连接(主阀减压开启) b) 气用常闭型主阀与导阀连接(主阀加压开启) c) 气用常开型主阀与导阀连接(主阀加外来压力关闭)

图 17.11 主阀的型式与导阀的连接

塞在弹簧作用下向上移动,使阀孔关小,通过水量减少。当压缩机停止工作时,水量调节阀自动关闭。

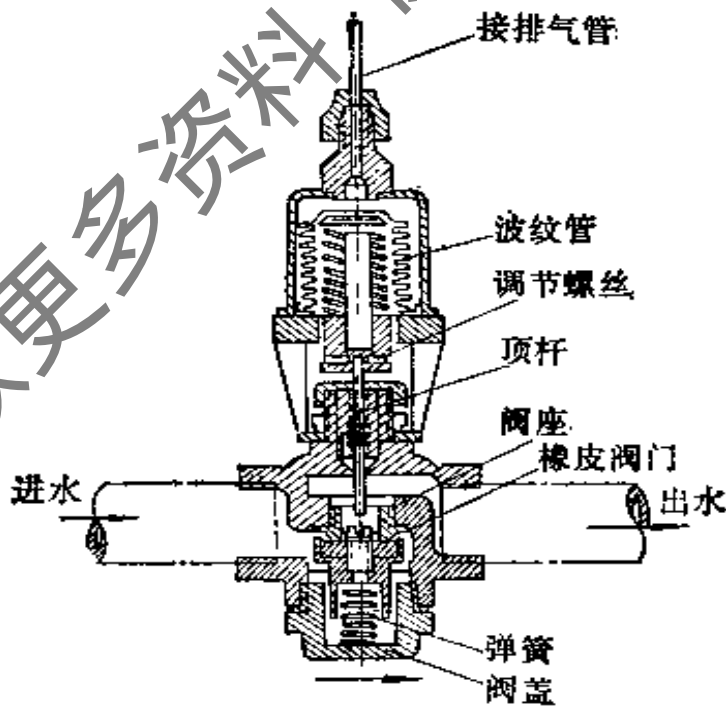


图 17.12 水量调节阀

水量调节阀中部有调节螺丝，可适当调节排气压力使阀门保持一定开启度。当调节阀发生故障无法打开时，可将下部的阀盖拧下，取出阀塞和弹簧，然后再拧紧阀盖，使冷却水流通（此时阀门已无调节水量之功能）。

### 17.2.2 继电器

制冷系统中自控装置的继电器（或控制器）主要是指各种温度和压力（或压差）类继电器，使用这类继电器，不但可以提高制冷装置运行的自动化程度，而且可以保证其运行的可靠性和经济性。

#### 1. 温度继电器

温度继电器是对用冷部位（如空调室、冷冻水、库温）的温度及其波动范围进行控制的电开关。根据制冷装置的大小和供冷方式的不同，温度继电器的电控对象亦不同。例如，对于小型制冷装置（如空调器、饮水机、冷藏箱），温度继电器可以根据设定温度直接控制压缩机电机的停开；对于一机多用的制冷系统，由于各用冷部位的温度不同，温度继电器就不能直接控制压缩机停开，而只能根据某个用冷部位设定的温度控制该部位制冷剂供液管上的电磁阀；对于带有能量装卸载机构的压缩机，温度继电器也可用来控制卸载油缸前的供油电磁阀，使气缸处于工作或卸载状态，以达到冷量调节、稳定用冷温度的目的。

温度继电器的种类较多，有水银导电表和半导体以及比例计式的温度继电器，但是目前以压力作用式原理来推动电触点通断的温度继电器使用较多。现将国产 WJ 35 型温度控制器的动作过程和性能介绍如下。

图 17.13 为 WJ 35 型温度控制器的外形，图 17.14 为温度控制器动作原理。由图 17.14 可知，该控制器实际上有三部分组成：感温包、毛细管和壳体内部的继电器。

由图 17.14 可见感温包、毛细管和波形纹管组成一个密封的容器，内充液体工质（如氟利昂等）。感温包安置在需要控温的部位，如空调机组的进风口、低温箱体内等，当它感受到这些部位的温度发生变化时，容器内工质压力将产生相应变化，而且通过毛

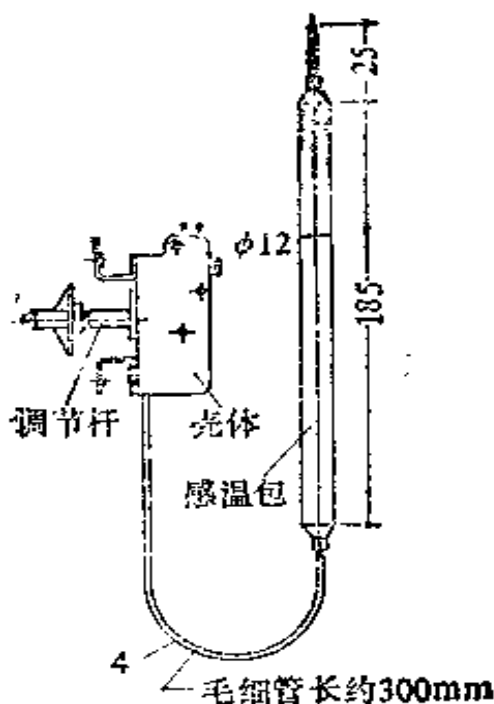


图 17.13 WJ35 型温控器外形

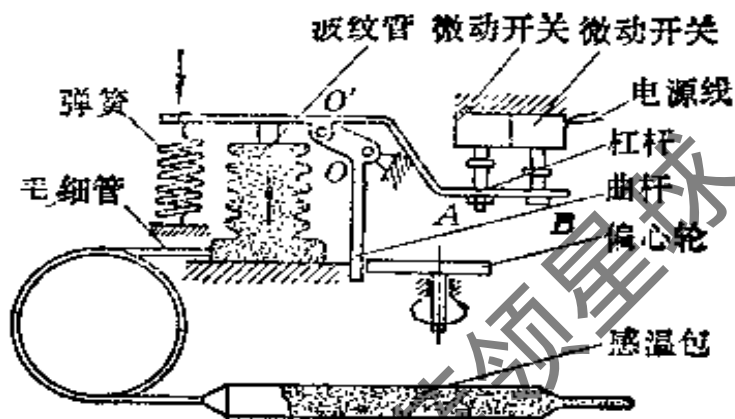


图 17.14 WJ35 型温控器原理

细管传至波纹管，使波纹管对杠杆产生的顶力矩与弹簧拉力矩相互对抗着。当感温包的温度恒定时，顶力矩与弹簧拉力矩使杠杆平衡在某一位置，从而带动微动开关动作，使电控对象（如压缩机、电磁阀等）处于工作或停止状态。它的动作过程如下：若感温包感受的温度高于设定值，则波纹管产生的顶力矩增大，使杠杆绕支点  $O'$  顺时针方向转动， $A$ 、 $B$  两点脱离微动开关按钮，开关在自身弹力作用下复位，触点闭合，电控对象处于工作状态；相反，若感温包感受的温度低于设定值，则波纹管的顶力矩减小，杠杆绕支点  $O'$  逆时针方向转动， $A$ 、 $B$  两点挤压微动开关按钮，使触点切断电源，电控对象处于停止工作状态。

温度控制器的温控设定值可通过调节偏心轮的位置获得。当旋动偏心轮使曲杆绕  $O$  点左移时， $O'$  支点上移，弹簧拉力矩增大，显然，温度控制的设定值将提高。相反，当转动偏心轮使曲杆绕  $O$  点右移时， $O'$  支点上移，弹簧拉力矩减小，温度控制的设定值降低。由于 WJ35 型温控器上无控温指示值，因此调试时需

感温包处放置一根水银温度计,根据水银温度计上的读数,转动偏心轮,以获得设定的控制温度。

**WJ 35 型温度控制器的主要技术性能如下:**

|            |                     |
|------------|---------------------|
| 温度调节范围     | (15~27[°C]) ± 2[°C] |
| 动作灵敏度      | ≥ 1.5[°C]           |
| 两微动开关动作温度差 | 1~2[°C]             |
| 触点容量       | 220[V], 5[A]        |

WJ 35 型温度控制器专供各种空调器使用,它的感温包固定在机组的进风口,以控制室内温度。感温包应保持清洁,防止因积尘过多而影响控温精度。

## 2. 压力继电器

压力继电器是一种受压力信号控制的电器开关。在制冷装置

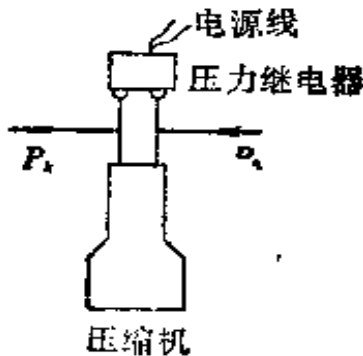


图 17.15 压力继电器的安装位置

上安装压力继电器的主要目的是为了控制压缩机运行时的排气压力和吸气压力。因为压缩机排气压力过高,不但会增加电耗,影响机器寿命,而且有可能产生意外事故。当压缩机吸气压力过低时,特别是低于大气压时,外界的空气和水分可能进入制冷系统,影响制冷装置的正常运行。另外,过低的吸气压力会影响润滑油泵的供油量,危及压缩机的各摩擦偶合件,影响压缩机的使用寿命。因此制冷装置上装设的压力继电器是一种高低压力控制器,当排气压力过高或吸气压力过低时,压力继电器动作,使压缩机停车(图 17.15)。压力继电器也有多种形式,现将广泛使用的国产 KD 型高低压力继电器的结构和控制原理介绍如下。

图 17.16 为 KD 型高低压力继电器的内部结构,图 17.17 为该型继电器的电器控制线路。继电器的高低压接管分别与压缩机的排气阀和吸气阀上的旁通孔(或阀)连接,接受排气压力和吸气压力信号,它的电器线路接入压缩机电机的控制线路,这样压力继电器就能根据接受到的吸、排气压力,直接控制压缩机的停开。

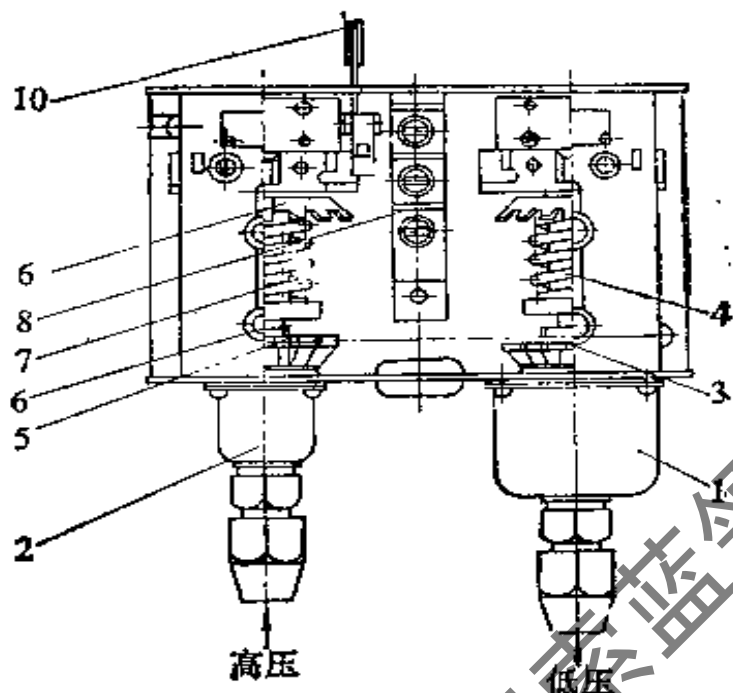


图 17.16 KD 型高低压力继电器内部结构图

1—低压管波纹管箱；2—高压管波纹管箱；3—低压压差调节盘；4—低压调节弹簧；5—高压压差调节盘；6—顶杆；7—高压调节弹簧；8—接线板；9—压力调节盘；10—手动复位手柄

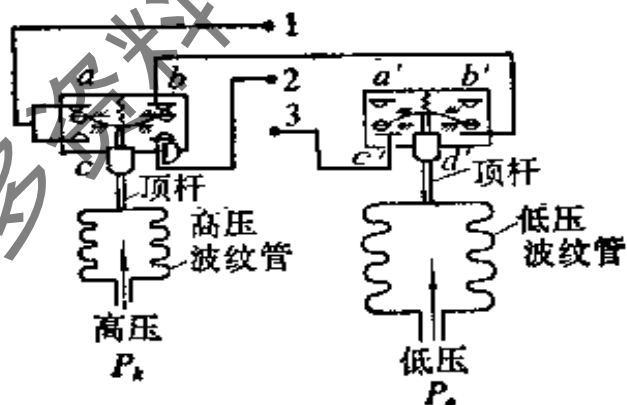


图 17.17 KD 型高低压力继电器的电器线路

1—接电源进线；2—接事故报警(灯或铃)；3—接电机的接触器线圈

KD 型高低压力继电器的压力动作是独立的，互不干扰，而电器线路是相互串联的（图 17.17）。当压缩机的排气压力超过设定值时，高压波纹管的胀力大于高压调节弹簧的弹力，并推动顶杆上移，触及微动开关，使接通  $a, b$  两点的动触点切断，而  $c, d$  两点接

通,此时接电机的接触器线圈断电,压缩机停止工作,而接事故报警的红灯闪亮或警铃发出响声,告知操作值班人员排气压力已超出设定值,须寻找和排除故障。显然,当排除故障后压缩机的排气压力正常,顶杆下移,动触点又使  $a$ 、 $b$  两点接通(如图 17.17),事故讯号消失,压缩机重新开始工作。因此在正常情况下,高压控制部分的顶杆不应与微动开关的动触点接触。在低压控制部分的动作过程正好与高压部分相反,当压缩吸气压力处于正常状态时,因低压较高,低压波纹管的胀力大于低压调节弹簧的弹力,顶杆上移并推动微动开关的动触点使  $c'$ 、 $d'$  接通(如图 17.17),压缩机电机的接触器线圈通电,压缩机正常工作。当吸气压力过低时,显然顶杆下移并与微动开关脱离接触,动触点使  $a'$ 、 $b'$  接通,而  $c'$ 、 $d'$  切断,这样压缩机即停止工作,事故报警装置将发出事故讯号。因此在正常情况下,低压控制部分的顶杆应当顶住微动开关的动触点。

高、低压力继电器的压力控制值(设定值)可通过转动各自的压力调节盘而得到调节。顺时针方向转动压力调节盘能使调节弹簧压紧,压力控制值升高,反之则降低。高、低压差调节盘是调节高、低压各自的差动值。当顺时针转动调节盘时,差动值增加,反之则减少。

KD 型高、低压力继电器有自动和手动复位两种形式。当制冷压缩机运行过程中出现高低压超出设定值范围时,由于继电器的作用而使压缩机停车,在停车后制冷系统中的制冷剂压力将很快恢复平衡,即高压下降,低压上升,当高低压达到设定值范围时,自动复位的压力继电器中的触点即闭合,压缩机又开始工作。若此时尚未排除引起超压的故障,压缩机又将开车。这样由于压缩机的频繁启动,可能使电机烧毁。带有手动复位的压力继电器,当高压触点分离后有一铜片自锁装置,触点不能自行闭合。只有找出和排除故障,并按动复位按钮时,压缩机才能重新开始工作。

压力继电器在出厂时的控制设定值均已作过调整和试验(见各厂使用说明书),如果不符合实际应用要求,可以在其允许使用

围内进行调整,调整试验应反复几次,确认其切断与接触压力控制值已达到设定值要求。装在制冷装置上的压力继电器,每年至少应试验一次,特别是高压控制部分,以免继电器失控产生重大事故。

KD型压力继电器的主要性能和规格见表17.2。

### 3. 压差继电器(油压继电器)

压差继电器是一种受两个压力之差作为信号控制的电器开关,在制冷装置上安装压差继电器的主要目的是为了防止压缩机油泵因压差过小而影响油泵的供油量,使压缩机各摩擦偶合件不能得到充分润滑,产生“咬煞”等各种事故。

图17.18为目前常用的JC型压差继电器的内部结构和控制线路图。在使用压差继电器时,它的低压端接吸气压力管,高压端接油泵出口压力,这两个不同压力作用在感压元件波纹管上,其压力差值作用于杠杆19,当杠杆上的作用力与主弹簧20的张力不平衡时,将使杠杆动作,控制压缩机的停开。

当压力差大于弹簧的调定值时,杠杆推动压差开关4的动触头和静触头DZ点相接,则电路R-a-18-X-F-SX-W接通。由于接触器线圈18通电,接触器16的常开触点闭合,电动机15的主线路通电,电机带动压缩机工作。另一电路R-C-K-DZ-W也通电,正常信号灯13亮。

当油压低于正常值时,压力差将小于调定值,杠杆将使压差开关的动触点脱离DZ点,而与YJ相接,显然此时正常信号灯熄灭,同时电路R-C-K-YJ-5(电加热丝)-D<sub>1</sub>-X-F-SX-W接通,电加热丝加热双金属片6,而由于R-a-18-X-F-SX-W仍然通电,接触器触头仍然闭合,压缩机尚在运行。

当电加热丝延时60秒通电后,双金属片开始向一侧弯曲,并推动开关脱离F点,而与E点接通。显然此时接触器线圈18断电,触头16打开,电动机和压缩机均停止工作。与此同时电路R-a-S-E-SX-W接通,故障信号灯亮。

应该指出,当压缩机停车后,压差继电器不能自动复位,须排



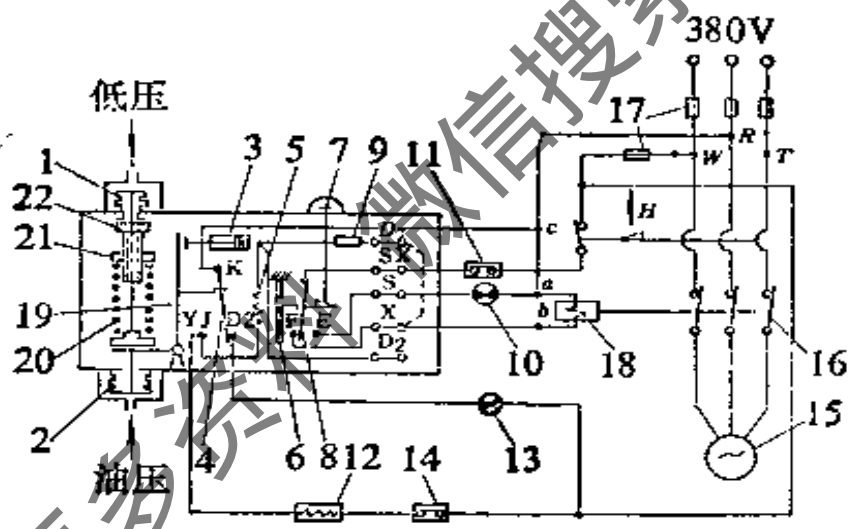
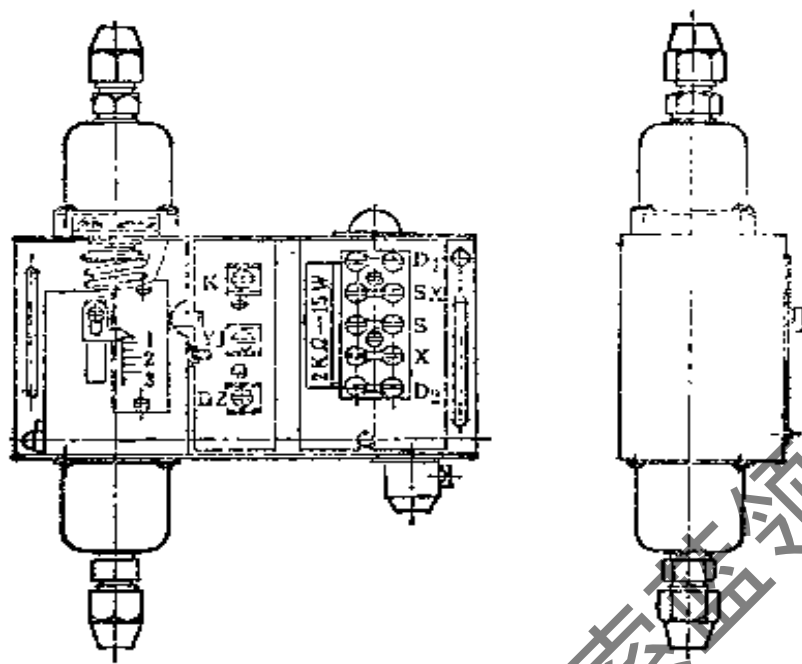


图 17.18 JC 型压差继电器的结构和控制线路

- 1—低压波纹管；2—高压波纹管；3—试验按钮；4—压差开关；5—加热器；6—双金属片；7—复位按钮；8—延时开关；9—降压电阻；10—故障信号灯；11—高低压继电器触头；12—滑油加热器；13—正常信号灯；14—手动开关；15—电动机；16—接触器触头；17—熔断器；18—接触器线圈；19—杠杆；20—弹簧；21—可调弹簧座；22—调节轮

除故障后,扭下复位按钮 7,使延时开关由点 E 退回 F 后,压缩机才能重新启动。

JC-3.5 型油压继电器的主要性能规格如下:

表 17.2

KD 型高低压力继电器的主要性能规格

| 型号       | 低压端压力调节范围<br>[mmHg~bar] | 低压端压力差调节范围<br>[bar] | 高压端压力调节范围<br>[bar] | 高压端压力差<br>[bar] | 开点<br>容量                                     | 触量 | 适用介质                  | 备注           |
|----------|-------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|--|----|-----------------------|--------------|
| KD 255   | 550~3.40                | (0.49~1.47)±0.1     | 6.86~19.60         | 2.94±0.98       | AC.220/380[V],300[VA]<br>DC.115/230[V];50[W] |    | R 22;R 717;<br>水;油;空气 |              |
| KD 255-S | 550~3.40                | (0.49~1.47)±0.1     | 6.86~19.60         | 2.94±0.98       | 同上   | 同上 | 同上                    | 高压端有<br>手动复位 |
| KD 155   | 550~3.40                | (0.49~1.47)±0.1     | 5.88~14.70         | 2.94±0.98       | 同上   | 同上 | R 12;油;<br>空气         |              |
| KD 155-S | 550~3.40                | (0.49~1.47)±0.1     | 5.88~14.70         | 2.94±0.98       | 同上   | 同上 | 同上                    | 高压端有<br>手动复位 |

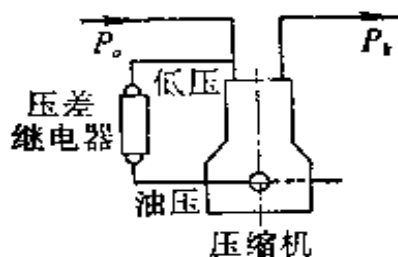


图 17.19 压差继电器的连接

压力差调节范围:  $0.49 \sim 3.43$  [bar], ( $0.5 \sim 3.5$  [kgf/cm<sup>2</sup>])

波纹管最大承受压力:  $15.68$  [bar], ( $16$  [kgf/cm<sup>2</sup>])

额定工作电压: AC  $.220/380$  [V]; DC  $.220$  [V]

延迟时间:  $60$  [s]  $\pm 20$  [s]

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

## 第18章 制冷系统

在熟悉制冷装置各设备性能和特点后，我们就可以进行制冷系统的设计。在设计制冷系统时，必须对用户的要求和水源等方面的情况，进行调查研究，一般需要了解以下一些内容：

1. 用户要求：用户需要的冷量及其变化情况，供冷方式，冷冻水的供水温度和回水温度，以及用户使用场所和使用安装方面的要求。
2. 冷却水源：工程建设地区附近的地面水（江、河、湖等）和地下水的水量、水温和水质等情况。
3. 气象条件：当地的气温、相对湿度和夏季主导风向等。
4. 制冷压缩机的产品资料和有关设备的产品资料。
5. 工程项目的总平面图和其他有关资料。

### 18.1 制冷设备的选择计算

制冷设备的选择计算可按下列步骤进行：

1. 确定制冷系统的制冷量。

制冷系统的制冷量应包括：用户需要的制冷量，制冷系统和供冷系统的冷损失。冷损失的大小可由设备和管道等有关情况计算得出，一般可按附加系数确定：直接冷却系统附加系数为5~7%；间接冷却系统为7~15%。

2. 确定制冷系统的冷凝温度和蒸发温度。
3. 根据制冷量和制冷工况，选择制冷压缩机和电动机。
4. 选择冷凝器并确定冷却水量。
5. 选择蒸发器并确定冷冻水量。
6. 选择其他辅助设备。

【例 18.1】 空调用户要求供给7[℃]的冷冻水,回水平均温度为11[℃],需要的总冷量为768[kW](660480[kcal/h]),可利用河水作冷却水源,水温最高为32[℃]。试选择有关制冷设备。

【解】 采用氨为制冷剂;利用河水作冷却水源,选用立式壳管冷凝器,直流供水。

1. 确定制冷工况

蒸发温度  $t_0$ : 比要求供给的冷冻水温度  $t_1$ , 低 5[℃]。

$$t_0 = t_1 - 5 = 7 - 5 = 2 \text{ [℃]}$$

冷凝温度  $t_k$ : 比冷却水进出口平均温度高 8[℃]。取立式壳管冷凝器冷却水的进出口温差为 4[℃], 则  $t_{w_2} = t_{w_1} + 4 = 32 + 4 = 36 \text{ [℃]}$

$$t_k = \frac{32 + 36}{2} + 8 = 40 \text{ [℃]}$$

2. 选择制冷压缩机和电动机

间接冷却系统,取附加系数为 10%, 制冷系统的制冷量为

$$Q_0 = 1.1 \times Q = 1.1 \times 768 = 844.8 \text{ [kW]} (726528 \text{ [kcal/h]})$$

根据制冷量选择制冷压缩机的方法有下列三种:

(1) 按理论公式确定制冷压缩机的理论输冷量

根据  $t_0 = 2 \text{ [℃]}$ ,  $t_k = 40 \text{ [℃]}$ , 从氨的  $\lg P-h$  图上查得的有关数据如图 18.1。

$$q_0 = \frac{h_1 - h_4}{v_1} = \frac{1763 - 687}{0.27} = 3985 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

$$t_0 = 2 \text{ [℃]}, P_0 = 4.64 \text{ [bar]}; t_k = 40 \text{ [℃]}, P_k = 15.55 \text{ [bar]}$$

$$\eta_s = 0.94 - 0.085 \left[ \left( \frac{P_k}{P_0} \right)^{1.28} - 1 \right]$$

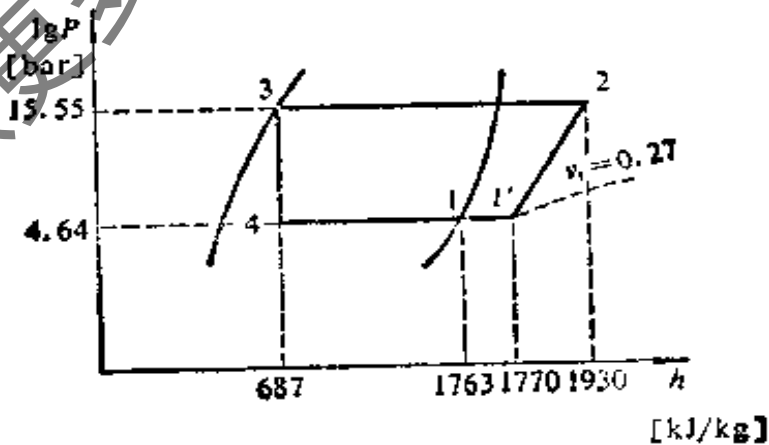


图 18.1 例 18.1 图

$$= 0.94 - 0.085 \times \left[ \left( \frac{15.55}{4.64} \right)^{\frac{1}{1.28}} - 1 \right]$$

$$= 0.81$$

$$0.81 - 0.04 = 0.77$$

$$V_h = \frac{Q_c}{\eta_v q_v} = \frac{844.8}{0.77 \times 3985} = 0.275 \text{ [m}^3/\text{s]} (990 \text{ [m}^3/\text{h]})$$

从有关样本查得：6W-12.5型压缩机  $V_{h1} = 0.118 \text{ [m}^3/\text{s]} (425 \text{ [m}^3/\text{h]})$

8S-12.5型压缩机  $V_{h2} = 0.157 \text{ [m}^3/\text{s]} (566 \text{ [m}^3/\text{h]})$

确定选择 6W-12.5 和 8S-12.5 型制冷压缩机各 1 台，其理论输汽量  $V_h = V_{h1} + V_{h2} = 0.118 + 0.157 = 0.275 \text{ [m}^3/\text{s]} (990 \text{ [m}^3/\text{h]})$ 。

制冷压缩机的制冷量：

$$Q_{c1} = \eta_v q_v V_{h1} = 0.77 \times 3935 \times 0.118 = 362.1 \text{ [kW]}$$

$$Q_{c2} = \eta_v q_v V_{h2} = 0.77 \times 3985 \times 0.157 = 481.7 \text{ [kW]}$$

两台压缩机的制冷量

$$Q_c = Q_{c1} + Q_{c2} = 362.1 + 481.7 = 843.8 \text{ [kW]} (725668 \text{ [kcal/h]})$$

可以满足要求。

(2) 由冷量换算公式确定

从有关样本查得：6W-12.5型制冷压缩机的标准制冷量  $Q_1 = 183.7 \text{ [kW]} (15.8 \times 10^4 \text{ [kcal/h]})$ ；8S-12.5型制冷压缩机的标准制冷量  $Q_2 = 244.2 \text{ [kW]} (21 \times 10^4 \text{ [kcal/h]})$ 。在  $t_0 = 2 \text{ [}^\circ\text{C]}$ ， $t_k = 40 \text{ [}^\circ\text{C]}$  时，从表 14.2 查得冷量换算系数  $K_i = 2.04$ ，其制冷量/分别为：

$$Q_{c1} = K_i \times Q_1 = 2.04 \times 183.7 = 374.7 \text{ [kW]} (322242 \text{ [kcal/h]})$$

$$Q_{c2} = K_i \times Q_2 = 2.04 \times 244.2 = 498.2 \text{ [kW]} (428452 \text{ [kcal/h]})$$

两台压缩机的制冷量  $Q_c = Q_{c1} + Q_{c2} = 374.7 + 498.2 = 872.9 \text{ [kW]} (750894 \text{ [kcal/h]})$ ，可以满足要求。

除了按上述方法选择外，还可以根据制造厂提供的制冷压缩机特性曲线直接查得。

8. 确定制冷压缩机配用的电动机功率

(1) 理论功率：以 8S-12.5 型制冷压缩机为例

$$N_{th} = M_{rwc} = \frac{481.7}{1763 - 687} \times (1930 - 1770) = 71.6 \text{ [kW]}$$

(2) 指示功率

$$\frac{P_k}{P_c} = \frac{15.55}{4.64} = 3.4$$

从图 14.14 查得， $\eta_i = 0.85$

$$N_i = \frac{N_{th}}{\eta_i} = \frac{71.6}{0.85} = 84.2 \text{ [kW]}$$

### (3) 轴功率

从图 14.15 查得,  $\eta_m = 0.85$

$$N_B = \frac{N_i}{\eta_m} = \frac{84.2}{0.85} = 99 \text{ [kW]}$$

### (4) 电动机的功率

$$N_D = 1.1 \times N_B = 1.1 \times 99 = 108.9 \text{ [kW]}$$

8 S-12.5 型制冷压缩机按空调工况配用的电动机功率为 115 [kW], 可以选用。

6 W-12.5 型制冷压缩机配用的电动机功率为 100 [kW]。

### 4. 选择冷凝器和冷却水量计算

选用立式壳管冷凝器, 冷却水进水温度为 32 [°C], 出水温度为 36 [°C]

#### (1) 冷凝器的热负荷计算

当  $t_c = 2$  [°C],  $t_k = 40$  [°C] 时, 查图 13.8 得,  $\psi = 1.17$

$$Q_k = \psi \times Q_0 = 1.17 \times 844.8 = 988.4 \text{ [kW]}$$

#### (2) 冷凝器传热面积的计算

$$\text{传热温差 } \Delta t_m = \frac{t_{w_2} - t_{w_1}}{2.3 \times 1g \frac{t_k - t_1}{t_k - t_{w_2}}} = \frac{36 - 32}{2.3 \times 1g \frac{40 - 32}{40 - 36}} = 5.8 \text{ [°C]}$$

查表 15.3, 取  $q_f = 4400$  [W/m<sup>2</sup>]

$$F_k = \frac{Q_k}{q_f} = \frac{988.4 \times 10^3}{4400} = 225 \text{ [m}^2\text{]}$$

选用 LN-125 型立式壳管冷凝器两台, 每台传热面积为 125 [m<sup>2</sup>].

#### (3) 冷却水量计算

$$M_w = \frac{Q_k}{C_w \times (t_{w_2} - t_{w_1})} = \frac{988.4}{4.186 \times (36 - 32)} = 59 \text{ [kg/s]}$$

### 5. 选择蒸发器和计算冷冻水量

#### (1) 蒸发器传热面积的计算

选用螺旋管式蒸发器。

$$\Delta t_{m'} = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{2.3 \times 1g \frac{t_{c1} - t_c}{t_{c1} - t_o}} = \frac{11 - 7}{2.3 \times 1g \frac{11 - 2}{7 - 2}} = 6.8 \text{ [°C]}$$

查表 15.5, 取  $q_f' = 2800$  [W/m<sup>2</sup>]

$$F_o = \frac{Q_o}{q_f'} = \frac{844.8 \times 10^3}{2800} = 264 \text{ [m}^2\text{]}$$

选用 SR-180 型螺旋管式蒸发器两台, 每台传热面积为 180[m<sup>2</sup>].

(2) 冷冻水量计算

$$M_w = \frac{Q_0}{C_w(t_{w1} - t_{w2})} = \frac{844.8}{4.186 \times (11 - 7)} = 50.5 \text{ [kg/s]}$$

8. 选择其他辅助设备

(1) 选择贮液器

$$V = \frac{\frac{1}{3} M_w v_3 3600}{\beta} = \frac{1}{3} \times \frac{481.7 + 362.1}{1763 - 687} \times 0.0017 \times 3600 = 2 \text{ [m}^3\text{]}$$

选用 ZA-2 型贮液器一台, 容积为 1.92[m<sup>3</sup>].

(2) 选择氨油分离器

$$D = \sqrt{\frac{4 \times V_w \eta_i 3600}{\pi 3600 \omega}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.275 \times 0.77}{3.14 \times 0.18}} = 0.58 \text{ [m]}$$

选用 YF-80 B 型氨油分离器两台。

制冷设备汇总表见表 18.1.

制冷设备汇总表

表 18.1

| 设备名称    | 型号      | 规格                               | 数量 | 单位 | 备注                                  |
|---------|---------|----------------------------------|----|----|-------------------------------------|
| 制冷压缩机   | 6W-12.5 |                                  | 1  | 台  | 配用电动机功率<br>$N_c = 100 \text{ [kW]}$ |
|         | 8S-12.5 |                                  | 1  | 台  | 配用电动机功率<br>$N_D = 115 \text{ [kW]}$ |
| 立式冷凝器   | LN-125  | $F_k = 125 \text{ [m}^2\text{]}$ | 2  | 台  |                                     |
| 螺旋管式蒸发器 | SR-145  | $F_e = 145 \text{ [m}^2\text{]}$ | 2  | 台  |                                     |
| 贮液器     | ZA-2    | $V = 1.92 \text{ [m}^3\text{]}$  | 1  | 台  |                                     |
| 氨油分离器   | YF-80 B | $d = 325 \text{ [mm]}$           | 2  | 台  |                                     |
| 集油器     | JY-325  | $D = 325 \text{ [mm]}$           | 1  | 台  |                                     |
| 紧急泄氨器   | ZA-32   | $D = 121 \text{ [mm]}$           | 1  | 台  |                                     |

图 18.2 为由上述设备组成的氨制冷系统流程图。



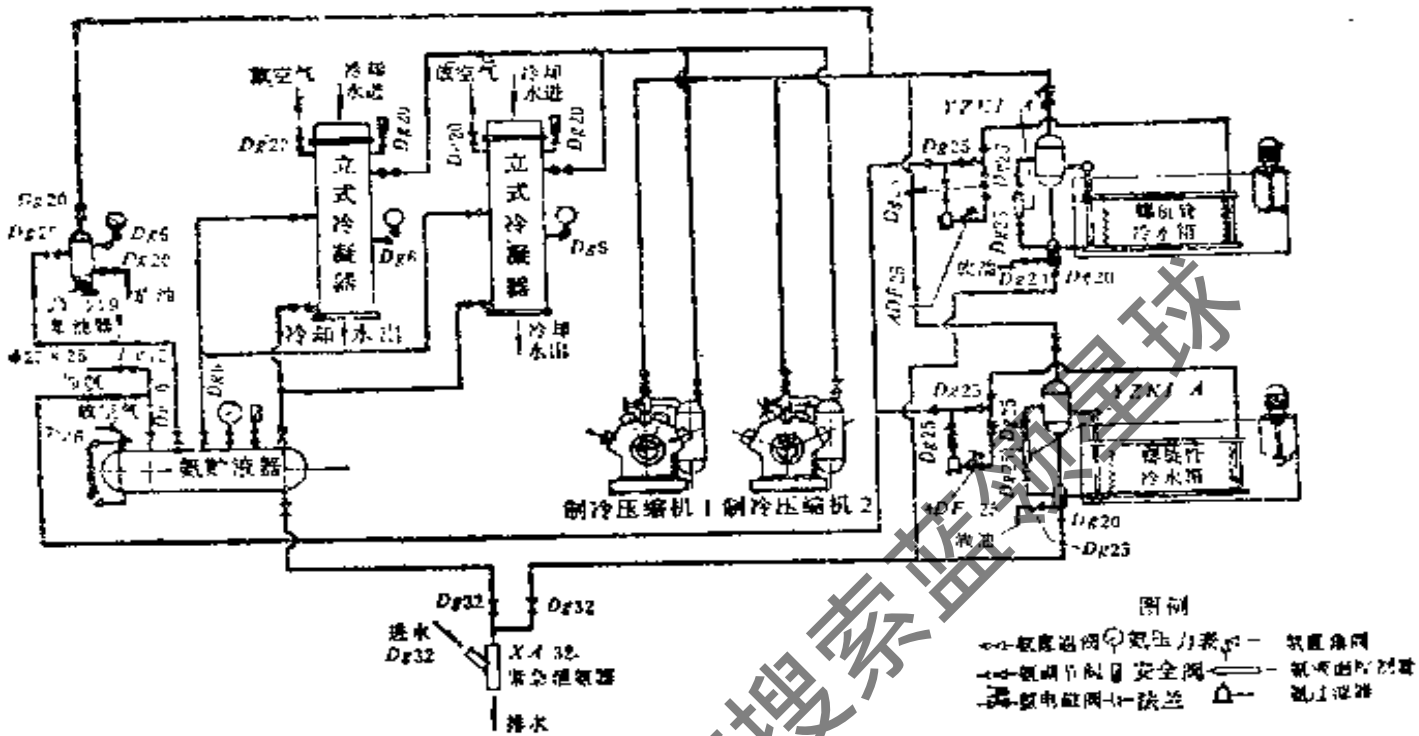


图 18.2 氨制冷系统流程图

图 18.3 为氟利昂制冷系统流程图

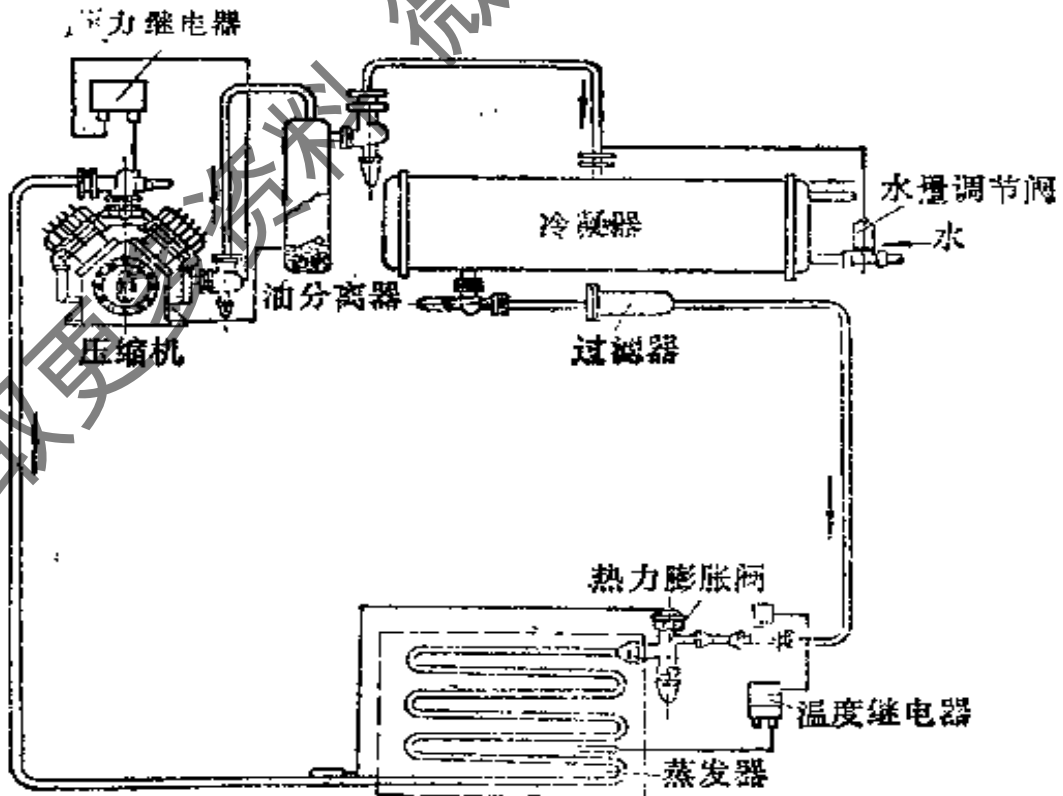


图 18.3 氟利昂制冷系统流程图

## 18.2 制冷机房和设备布置

设置制冷装置的建筑称为制冷机房或冷冻站。制冷机房通常靠近空调机房,氟利昂制冷设备可以设置在空调机房内,规模小的制冷机房一般附设在其他建筑内,规模较大的制冷机房(特别是氨制冷机房)宜单独修建。

制冷机房和设备的布置应考虑以下几点:

1. 单独修建的制冷机房宜布置在全厂厂区夏季主导风向的下风向。在动力站区域内,一般应布置在乙炔站、锅炉房、煤气站、堆煤场等的上风向。

2. 制冷机房的位置应尽可能设在冷负荷的中心,并力求缩短冷冻水和冷却水管路。当制冷机房是全厂主要用电负荷时,还应考虑靠近电源。

3. 氨制冷机房不应靠近人员密集的场所和精密贵重设备间等。

4. 制冷机房应用二级耐火材料或不着火材料建筑。制冷机房宜设于单层建筑中,并设不相邻的出入口两个,其中一个出入口应考虑设备安装要求。站房的门窗必须向外开。

5. 氨制冷机房内应考虑每小时不小于三次换气的自然通风和每小时不小于七次换气的事故通风。

6. 规模较小的制冷机房一般不分隔间;规模较大的制冷机房可按不同情况分别设置机器间(用以布置制冷压缩机),设备间(用以布置冷凝器、蒸发器及其他辅助设备),水泵间(用以布置冷冻水和冷却水泵),变电间(制冷设备耗电量大时需设专用变压器)以及值班室和维修贮存室等。

7. 制冷机房内的设备布置应保证操作、检修方便,同时尽可能使设备布置紧凑,以节省建筑面积。压缩机均设于室内,其他辅助设备可以设在室内、室外或敞开式建筑中。

8. 压缩机及辅助设备的布置应使连接管路短、流向通畅,并便于安装。

9. 压缩机的主要操作通道宽度及压缩机突出部分到配电盘间的距离不小于1.5[m], 非主要通道宽度不小于0.8[m]。两台压缩机之间的距离应满足抽出压缩机曲轴所需的地位。

10. 设备、管路上的压力表、温度计等仪表, 应设置在便于观察的地方。

11. 卧式冷凝器和蒸发器布置在室内时, 应考虑其清洗和更换管子的可能。安装直管式(或螺旋管式)蒸发器时, 应考虑起吊高度。

### 18.3 制冷剂管道的设计

#### 18.3.1 管道材料及连接

氟利昂制冷系统管道常用紫铜管或无缝钢管, 一般, 管径在20[mm]以下时用紫铜管, 管径较大时用无缝钢管。氨制冷系统的管道一律采用无缝钢管。

常用无缝钢管和铜管的规格见表18.2和表18.3。

常用无缝钢管规格

表 18.2

| 外径×壁厚<br>[mm] | 内径<br>[mm] | 理论重量<br>[kg/m] | 净断面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 1[m] 长容量<br>[l/m] | 外圆周长<br>[mm] | 1[m] 长的外表面<br>积<br>[m <sup>2</sup> /m] | 1[m <sup>2</sup> ]<br>的<br>长度<br>[m/m <sup>2</sup> ] |
|---------------|------------|----------------|---------------------------|-------------------|--------------|--|--|
| 冷 轧 钢         |            |                |                           |                   |              |  |  |
| 10×2.0        | 6          | 0.395          | 0.00003                   | 0.0283            | 31.40        | 0.031                                  | 31.84  |
| 14×2.0        | 10         | 0.592          | 0.00008                   | 0.0785            | 43.98        | 0.044                                  | 22.74  |
| 18×2.0        | 14         | 0.789          | 0.00015                   | 0.1538            | 56.62        | 0.057                                  | 17.69  |
| 22×2.0        | 18         | 0.986          | 0.00025                   | 0.2543            | 69.08        | 0.069                                  | 14.47  |
| 25×2.0        | 21         | 1.13           | 0.00034                   | 0.3456            | 78.54        | 0.078                                  | 12.82  |
| 32×2.20       | 27.6       | 1.62           | 0.00059                   | 0.5935            | 100.48       | 0.100                                  | 9.95   |
| 38×2.20       | 33.6       | 1.94           | 0.00088                   | 0.8809            | 119.32       | 0.119                                  | 8.38   |
| 45×2.20       | 40.6       | 2.32           | 0.00129                   | 1.2876            | 141.30       | 0.141                                  | 7.07   |

续表18.2

| 外径×壁厚<br>[mm] | 内 径<br>[mm] | 理论重量<br>[kg/m] | 净断面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 1[m]长容量<br>[l/m] | 外圆周长<br>[mm] | 1[m]长的外表<br>面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 1[m <sup>2</sup> ]的<br>长度<br>[m <sup>2</sup> ] |
|---------------|-------------|----------------|---------------------------|------------------|--------------|-------------------------------------|--|
| 热 轧 钢         |             |                |                           |                  |              |                                     |  |
| 32×2.5        | 27.0        | 1.76           | 0.00057                   | 0.5723           | 100.48       | 0.100                               | 9.95   |
| 38×2.5        | 33.0        | 2.19           | 0.00085                   | 0.8549           | 119.32       | 0.119                               | 8.38   |
| 45×2.5        | 40.0        | 2.62           | 0.00126                   | 1.2560           | 141.30       | 0.141                               | 7.07   |
| 57×3.5        | 50.0        | 4.62           | 0.00200                   | 1.9625           | 178.98       | 0.179                               | 5.58   |
| 70×3.5        | 63          | 5.74           | 0.0031                    | 3.1172           | 219.91       | 0.220                               | 4.55   |
| 76×3.5        | 69          | 6.26           | 0.0038                    | 3.7373           | 238.64       | 0.239                               | 4.19   |
| 89×3.5        | 82          | 7.38           | 0.0053                    | 5.2783           | 279.46       | 0.279                               | 3.57   |
| 108×4.0       | 100         | 10.26          | 0.0079                    | 7.8500           | 339.12       | 0.339                               | 2.94   |
| 133×4.0       | 125         | 12.73          | 0.0123                    | 12.2656          | 417.62       | 0.418                               | 2.39   |
| 159×4.5       | 150         | 17.15          | 0.0177                    | 17.6625          | 449.26       | 0.449                               | 2.22   |
| 219×6.0       | 207         | 31.52          | 0.0366                    | 33.6265          | 687.66       | 0.688                               | 1.45   |
| 273×7.0       | 259         | 45.92          | 0.0527                    | 52.6586          | 857.22       | 0.857                               | 1.16   |

常用铜管规格

表 18.3

| 外径壁厚<br>[mm]    | 内 径<br>[mm] | 理论重量<br>[kg/m] | 净断面积<br>[cm <sup>2</sup> ] | 1[m]长容量<br>[l/m] | 外周长<br>[mm] | 1[m]长的外表<br>面积<br>[m <sup>2</sup> ] | 1[m <sup>2</sup> ]外<br>表面<br>积的<br>管长<br>[m] |
|-----------------|-------------|----------------|----------------------------|------------------|-------------|-------------------------------------|--|
| 紫 铜 管(YB447-64) |             |                |                            |                  |             |                                     |  |
| 6×1             | 4           | 0.140          | 0.125                      | 0.0125           | 18.90       | 0.0189                              | 52.90  |
| 8×1             | 6           | 0.196          | 0.282                      | 0.0282           | 26.15       | 0.0252                              | 39.70  |
| 10×1            | 8           | 0.252          | 0.505                      | 0.0505           | 31.40       | 0.0314                              | 31.84  |
| 12×1            | 10          | 0.307          | 0.785                      | 0.0785           | 37.85       | 0.0378                              | 26.45  |

|        |    |       |        |        |        |        |       |
|--------|----|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 14×1   | 12 | 0.363 | 1.130  | 0.1130 | 43.96  | 0.0440 | 22.75 |
| 16×1   | 14 | 0.419 | 1.540  | 0.1540 | 50.25  | 0.0503 | 19.89 |
| 18×1.5 | 15 | 0.692 | 1.760  | 0.1760 | 56.62  | 0.0566 | 17.70 |
| 20×1.5 | 17 | 0.775 | 2.265  | 0.2265 | 62.80  | 0.0628 | 15.90 |
| 22×1.5 | 19 | 0.859 | 2.835  | 0.2835 | 69.08  | 0.0691 | 14.45 |
| 24×1.5 | 21 | 0.943 | 3.460  | 0.346  | 75.40  | 0.0754 | 13.26 |
| 26×1.5 | 23 | 1.027 | 4.160  | 0.416  | 81.75  | 0.0816 | 12.26 |
| 28×1.5 | 25 | 1.111 | 4.910  | 0.491  | 88.10  | 0.0881 | 11.35 |
| 36×2   | 32 | 1.900 | 8.050  | 0.805  | 113.20 | 0.1132 | 8.83  |
| 45×2.5 | 40 | 2.969 | 12.500 | 1.250  | 141.80 | 0.1413 | 7.07  |
| 55×2.5 | 50 | 3.688 | 19.600 | 1.960  | 173.10 | 0.1731 | 5.78  |
| 65×2.5 | 60 | 4.366 | 28.300 | 2.830  | 204.50 | 0.2045 | 4.88  |
| 75×2.5 | 70 | 5.065 | 38.500 | 3.850  | 236.50 | 0.2355 | 4.24  |

黄铜管(YB448-64)

|        |    |       |       |        |       |        |       |
|--------|----|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 10×1   | 8  | 0.240 | 0.505 | 0.0505 | 31.40 | 0.0314 | 31.84 |
| 12×1   | 10 | 0.294 | 0.785 | 0.0785 | 37.85 | 0.0378 | 26.45 |
| 15×1.5 | 12 | 0.540 | 1.130 | 0.1130 | 47.20 | 0.0472 | 21.20 |
| 18×1.5 | 15 | 0.661 | 1.760 | 0.1760 | 56.62 | 0.0566 | 17.70 |
| 20×1.5 | 17 | 0.741 | 2.265 | 0.2265 | 62.80 | 0.0628 | 15.90 |
| 24×2   | 20 | 1.174 | 3.160 | 0.3160 | 75.40 | 0.0754 | 13.26 |
| 28×2   | 24 | 1.388 | 4.530 | 0.4530 | 88.10 | 0.0881 | 11.35 |

在氟利昂制冷系统中,应尽量减少连接管件以避免泄漏,制冷管道一般采用焊接连接。在管道与设备或阀件之间可用法兰连接。但注意不得使用天然橡胶垫料,也不能涂矿物油,必要时可涂甘油。管径在 20[mm]以下的紫铜管需拆卸部位采用带螺纹和喇

喇叭口的接头丝扣连接。

氨制冷系统的管道一律采用焊接，设备或阀门上带有法兰的用法兰连接。

### 18.3.2 管径的确定方法\*

管道的直径用下式计算：

$$d_n = \sqrt{\frac{4M_r v}{\pi w}} \quad [\text{m}] \quad (18.1)$$

式中  $M_r$ ——制冷剂的质量流量[kg/s]；

$v$ ——制冷剂的比容[m<sup>3</sup>/kg]；

$w$ ——制冷剂流速[m/s]。

在制冷系统中，制冷剂的允许流速见表 18.4。

制冷剂在管道内的允许流速 [m/s]

表 18.4

| 管道名称<br>制冷剂      | 管道名称  |       | 冷凝器至贮液器的<br>液体管 | 贮液器至节流阀的<br>液体管 |
|------------------|-------|-------|-----------------|-----------------|
|                  | 排气管   | 吸气管   |                 |                 |
| 氨                | 15~25 | 10~20 | 0.5             | 0.5~1.25        |
| 氟利昂 12<br>氟利昂 22 | 10~16 | 6~15  | 0.5             | 0.5~1.25        |

按上式算出管径后，还要校核其压力损失是否超过允许的数值。如压力损失大于许可值，则应选择较小的流速重新计算，直至符合要求为止。

氨制冷系统的吸气管道的压力损失不宜超过相当蒸发温度降低 0.5[°C]，排气管道的压力损失不宜超过相当冷凝温度升高 0.5[°C]。氟利昂制冷系统的吸气管道的压力损失不宜超过相当蒸发温度降低 1[°C]，排气管道的压力损失不宜超过相当冷凝温度升高 1[°C]。

注：本章节采用的有关图表仍为工程单位制。

制冷剂管道的压力损失包括沿程阻力和局部阻力两部分。沿程阻力按下式计算：

$$\Delta P_m = f_m \frac{L}{d_n} \frac{w^2}{2} \rho [\text{Pa}] \quad (18.2)$$

式中， $\Delta P_m$ ——沿程阻力损失，[Pa]；

$f_m$ ——沿程阻力系数；

$L$ ——管段长度，[m]；

$d_n$ ——管内径，[m]；

$w$ ——管内制冷剂的流速，[m/s]；

$\rho$ ——制冷剂的密度，[kg/m<sup>3</sup>]。

局部阻力按下式计算：

$$\Delta p_l = \xi \frac{w^2}{2} \rho = f_m \frac{l_a}{d_n} \frac{w^2}{2} \rho [\text{Pa}] \quad (18.3)$$

式中， $\Delta p_l$ ——局部阻力损失，[Pa]；

$\xi$ ——局部阻力系数；

$l_a$ ——三通、弯头和阀门等部件的当量长度，[m]。

常用管件的当量长度与管道内径的比值

表 18.5

| 管件名称        | $l_a/d_n$ | 管件名称         | $l_a/d_n$ |
|-------------|-----------|--------------|-----------|
| 直通截止阀(全开)   | 340       | 三段焊成 90° 弯头  | 20        |
| 角 阀 (全开)    | 170       | 四段焊成 90° 弯头  | 15        |
| 闸 阀 (全开)    | 8         | 扩径 $d/D=1/4$ | 30        |
| 止 回 阀 (全开)  | 80        | 扩径 $d/D=1/2$ | 20        |
| 丝扣弯头 90°    | 30        | 扩径 $d/D=3/4$ | 17        |
| 45°         | 14        |              |           |
| 两段焊成 45° 弯头 | 15        | 缩径 $d/D=1/4$ | 15        |
| 两段焊成 60° 弯头 | 30        | 缩径 $d/D=1/2$ | 11        |
| 两段焊成 90° 弯头 | 60        | 缩径 $d/D=3/4$ | 7         |

当量长度一般以管内径的倍数表示, 即  $l_d = \frac{\xi}{f_m} \times d_n [\text{m}]$ 。

常用管件的当量长度与管道内径的比值  $\frac{l_d}{d_n} = \frac{\xi}{f_m}$ , 见表 18.5。

制冷系统各管段的压力损失一般是采用当量长度计算法, 按下式计算:

$$\Delta p = f_m \frac{l + l_d}{d_n} \frac{w^2}{2} \rho \quad [\text{Pa}] \quad (18.4)$$

常用制冷剂在不同条件下每米当量管长的摩擦阻力损失见图 18.4 至图 18.8。

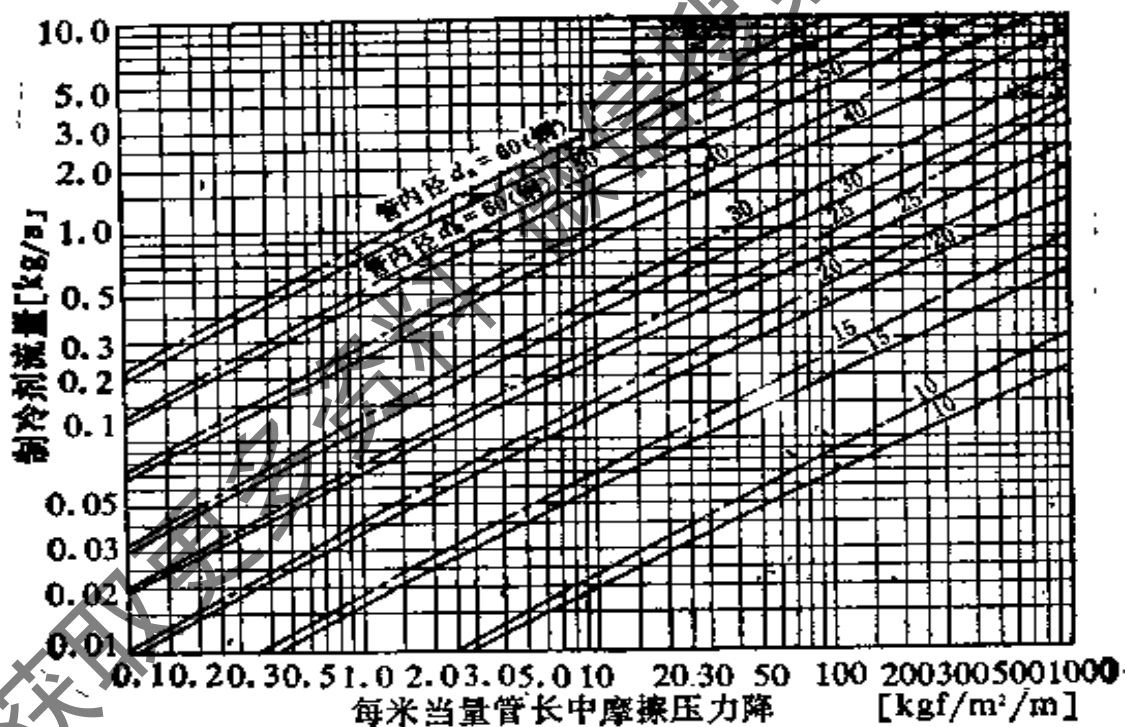


图 18.4 氟利昂12液体在管道中的阻力损失

注: ①  $1[\text{kg} \cdot \text{f}/\text{m}^2/\text{m}] = 9.8[\text{N}/\text{m}^2/\text{m}]$ 。

② 铜管按光滑管计算; 钢管绝对粗糙度为  $0.06[\text{mm}]$ 。

③ 使用范围: 无闪发气体。



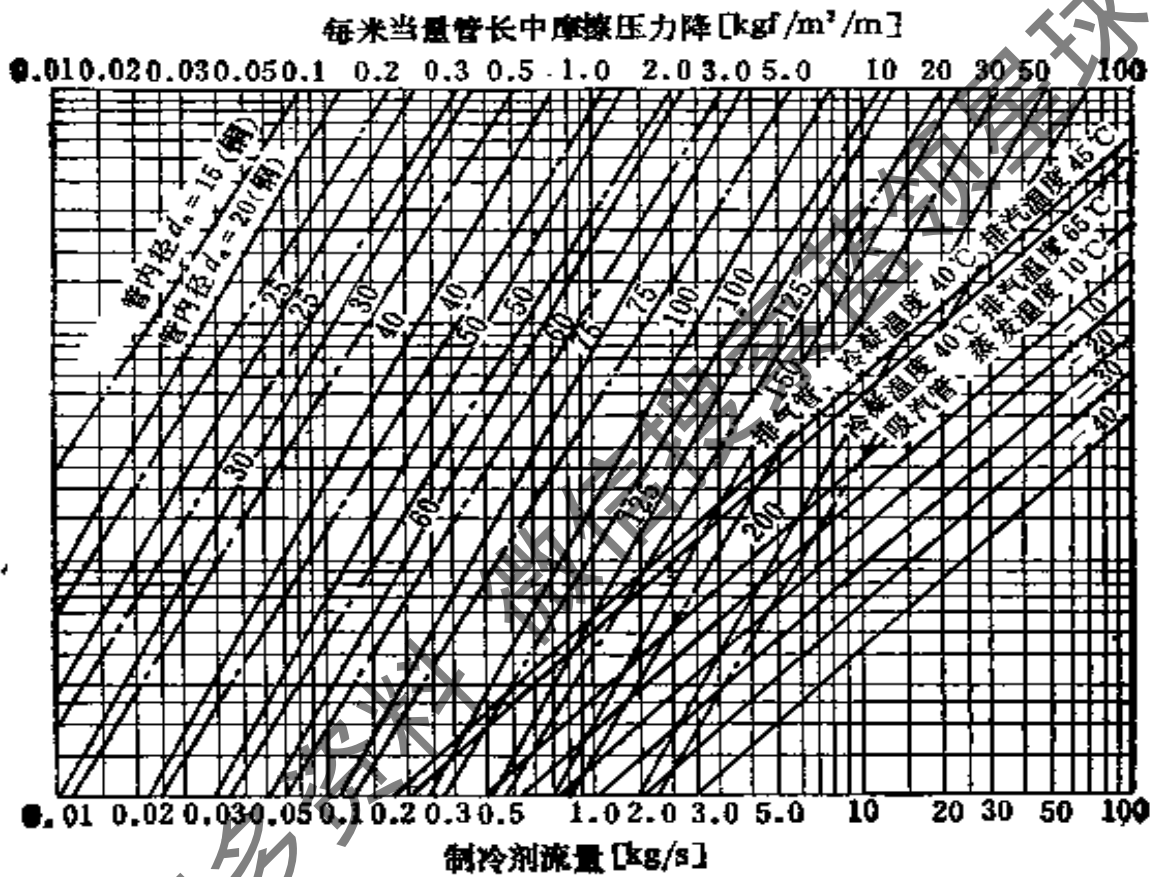


图 18.5 氟利昂 12 气体在管道中的阻力损失

注：① 铜管按光滑管计算；钢管绝对粗糙度为 0.96 [mm]

② 回气过热度为 10 [°C]。

氟利昂 22 液管可借助图 18.4 查出数值，再乘以 1.10 即可。

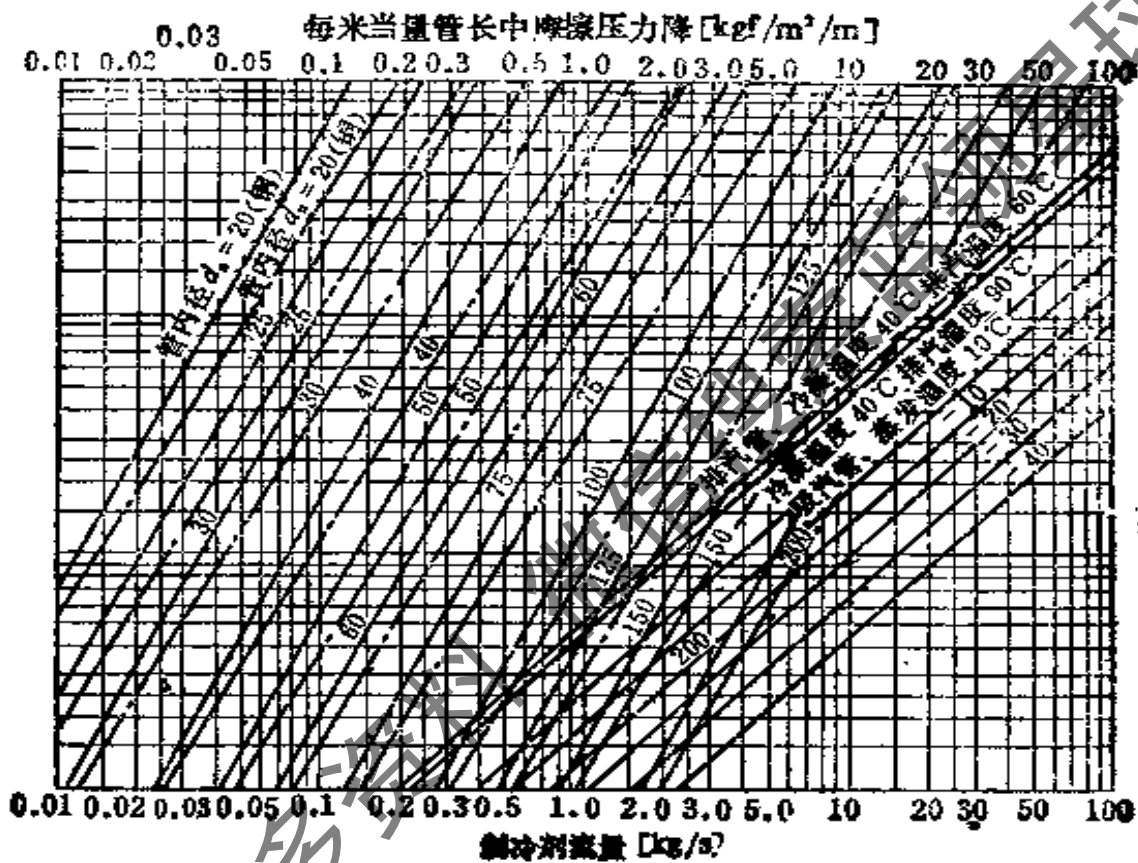


图 18.6 氟利昂 22 在管道中的阻力损失

- 注：① 铜管按光滑管计算；钢管绝对粗糙度为 0.06 [mm]。  
 ② 回气过热度为 10 [℃]。

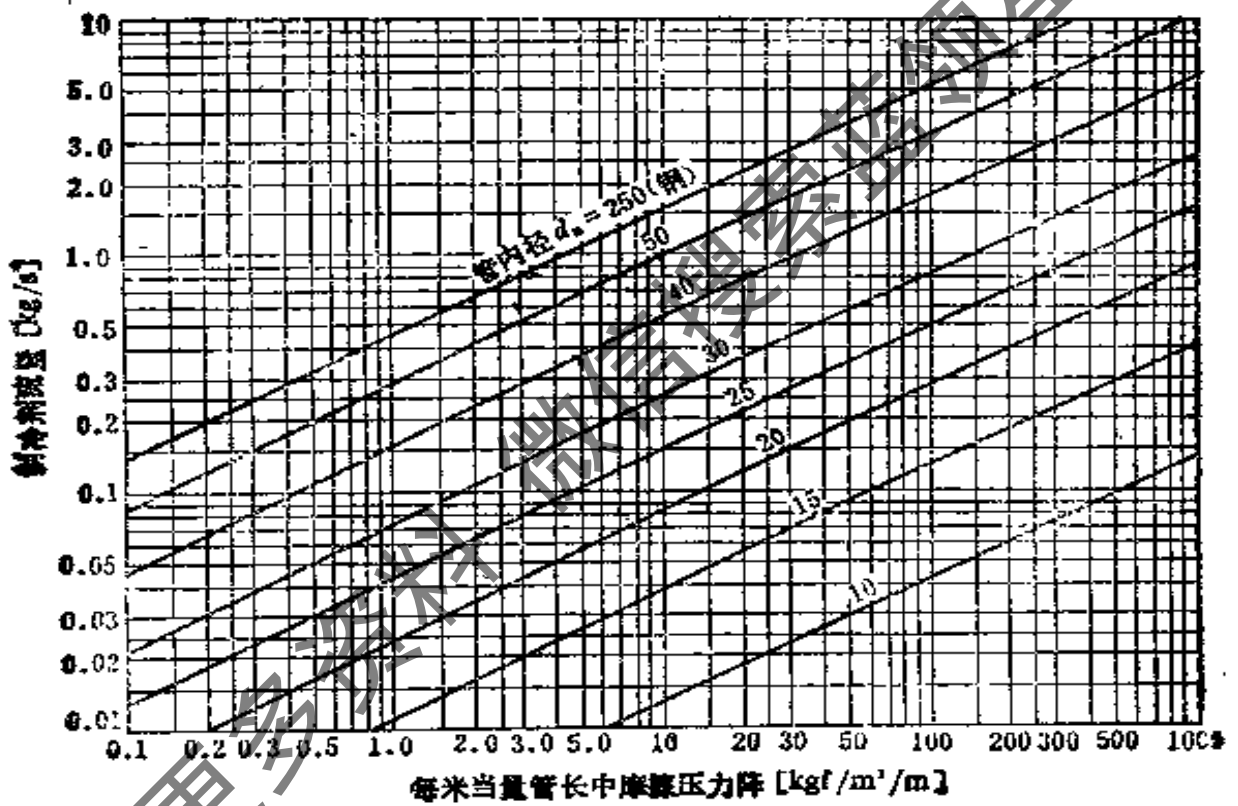


图 18.7 氨液体在管道中的阻力损失

注：① 钢管绝对粗糙度为 0.06[mm]。

② 使用范围：无闪发气体。

根据蒸发温度、冷凝温度和制冷量，可分别应用图 18.9 至图

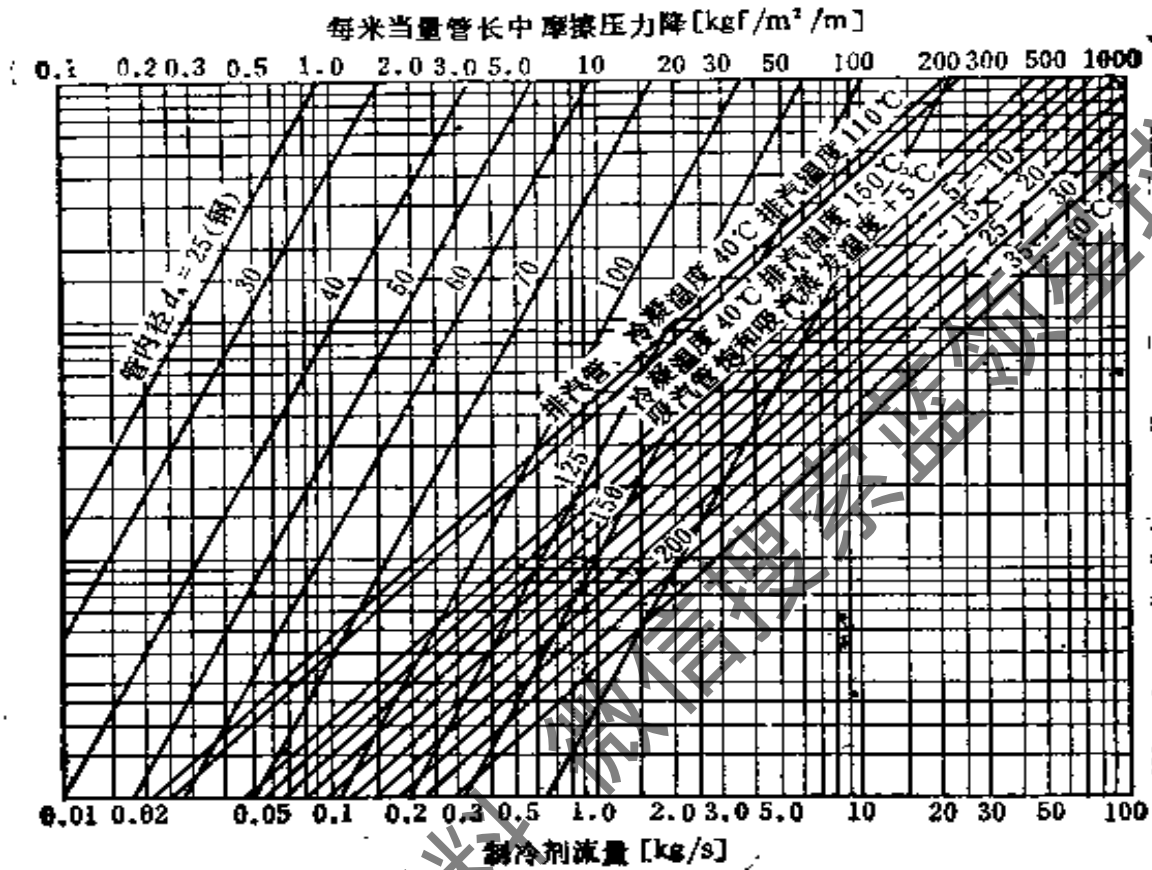


图 18.8 氨气体在管道中的阻力损失

注：钢管绝对粗糙度为 0.06[mm]。

18.14，确定氨、氟利昂 12 和氟利昂 22 作制冷剂时制冷系统的有关管道的管径。

图的左侧供单级压缩制冷系统或双级制冷系统中的高压级的管道选用，右侧供低压级管道选用。

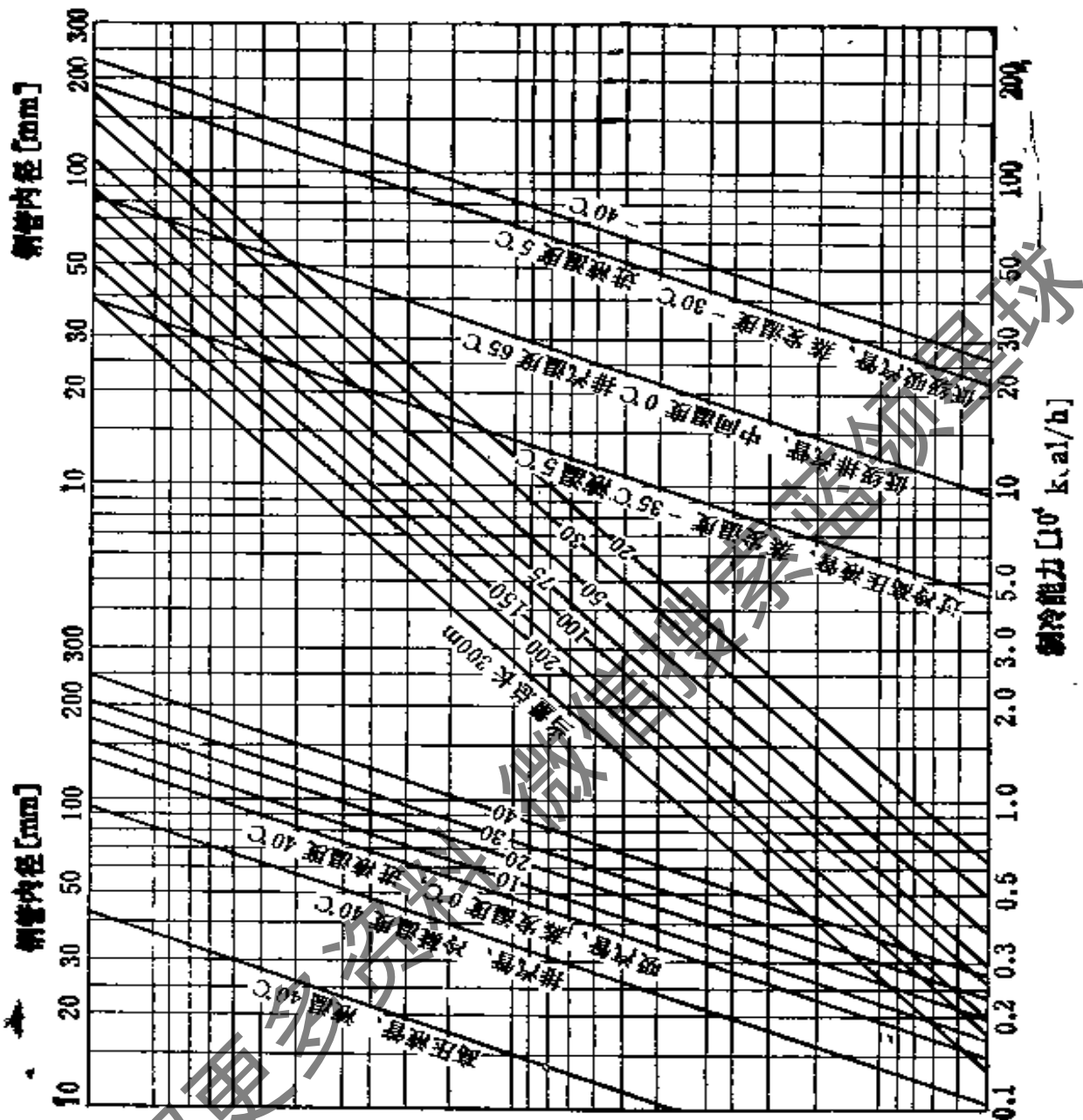


图 18.9 氨管道计算图

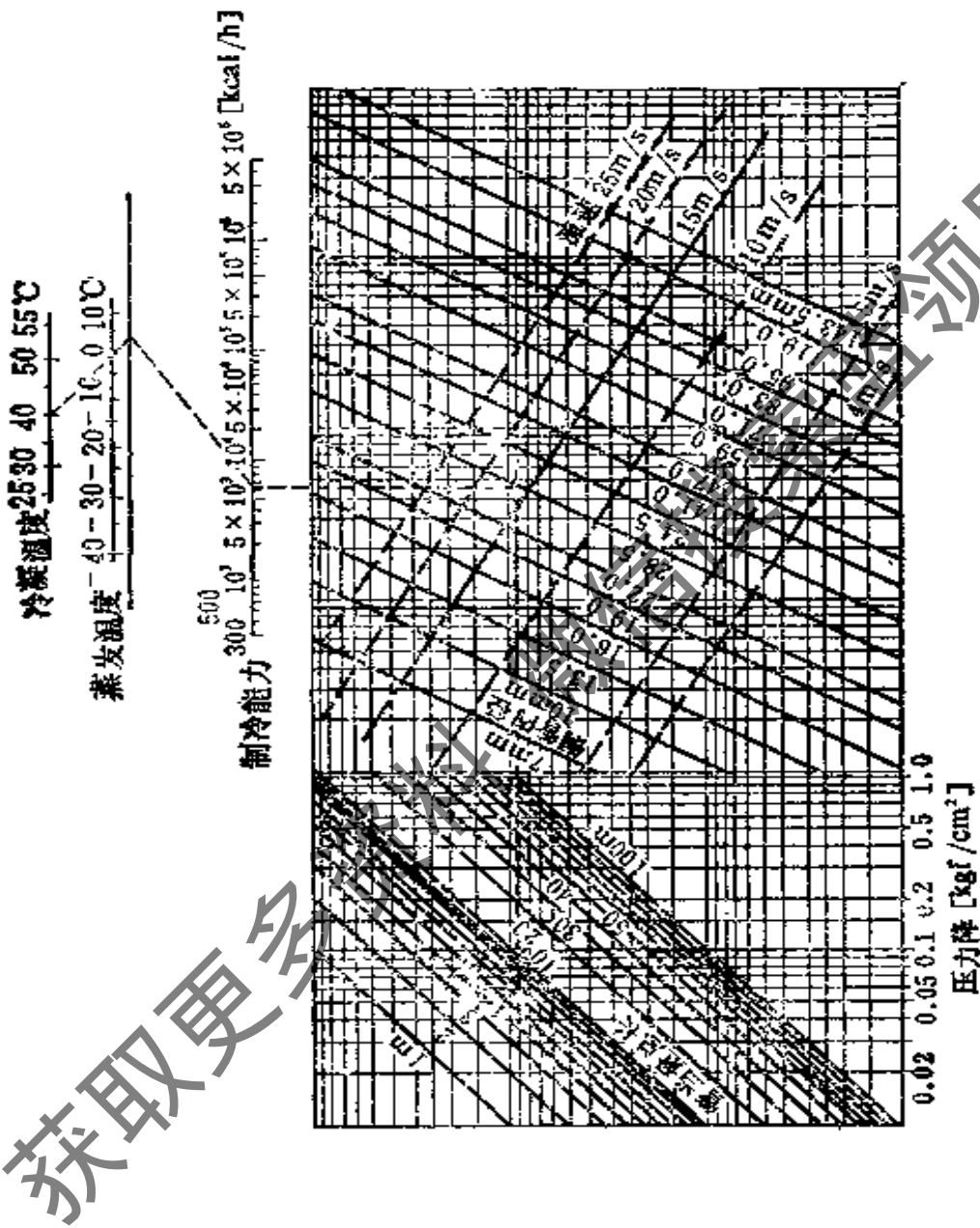


图 18.10 氨剂第 12 级气密计算图

领星球

冷媒温度 25 30 40 50 55℃

蒸发温度 -40 -30 -20 -10 0 10℃

制冷能力  $500 \times 10^3$   $5 \times 10^4$   $10^5$   $5 \times 10^5$   $10^6$   $5 \times 10^6$   $10^7$  [kcal/h]

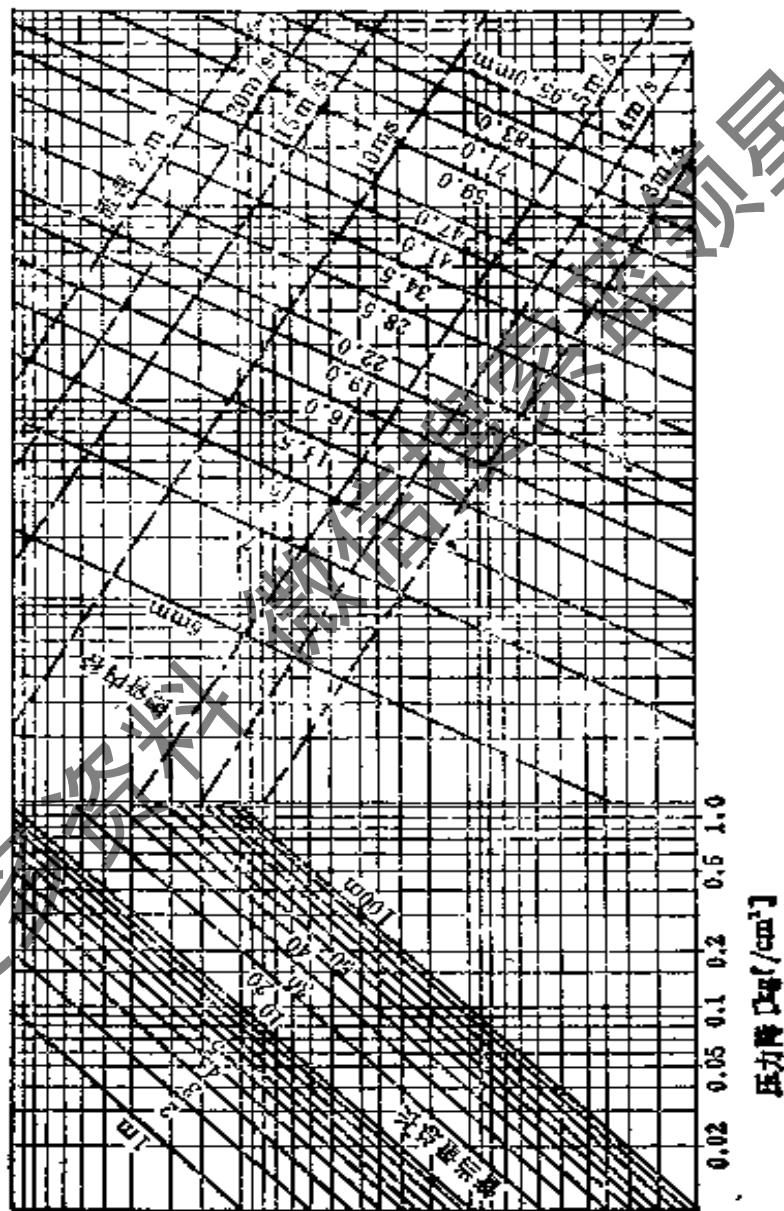


图 18.11 氟利昂22吸气管计算图

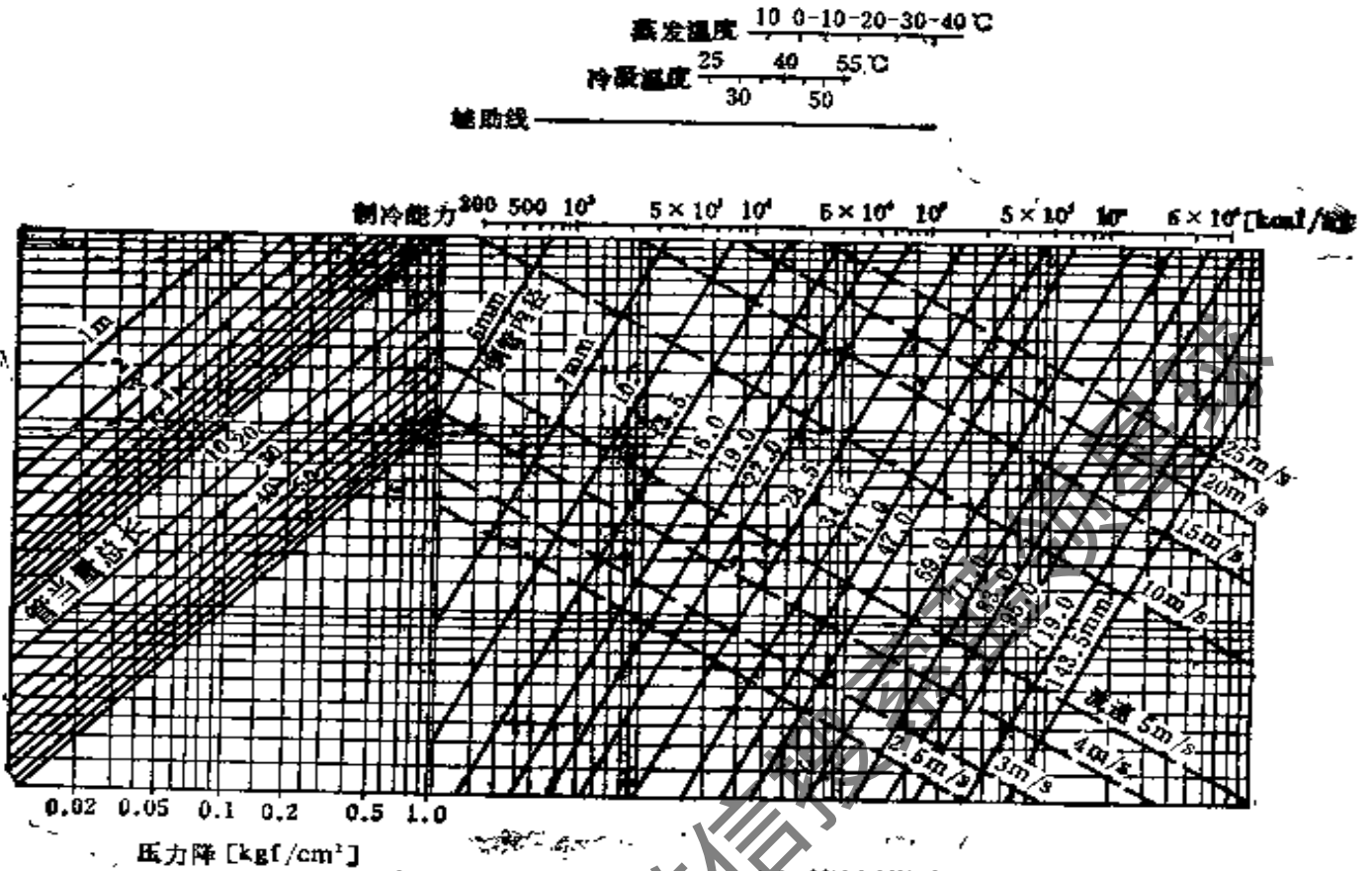


图 18.12 氟利昂 12 排气管计算图

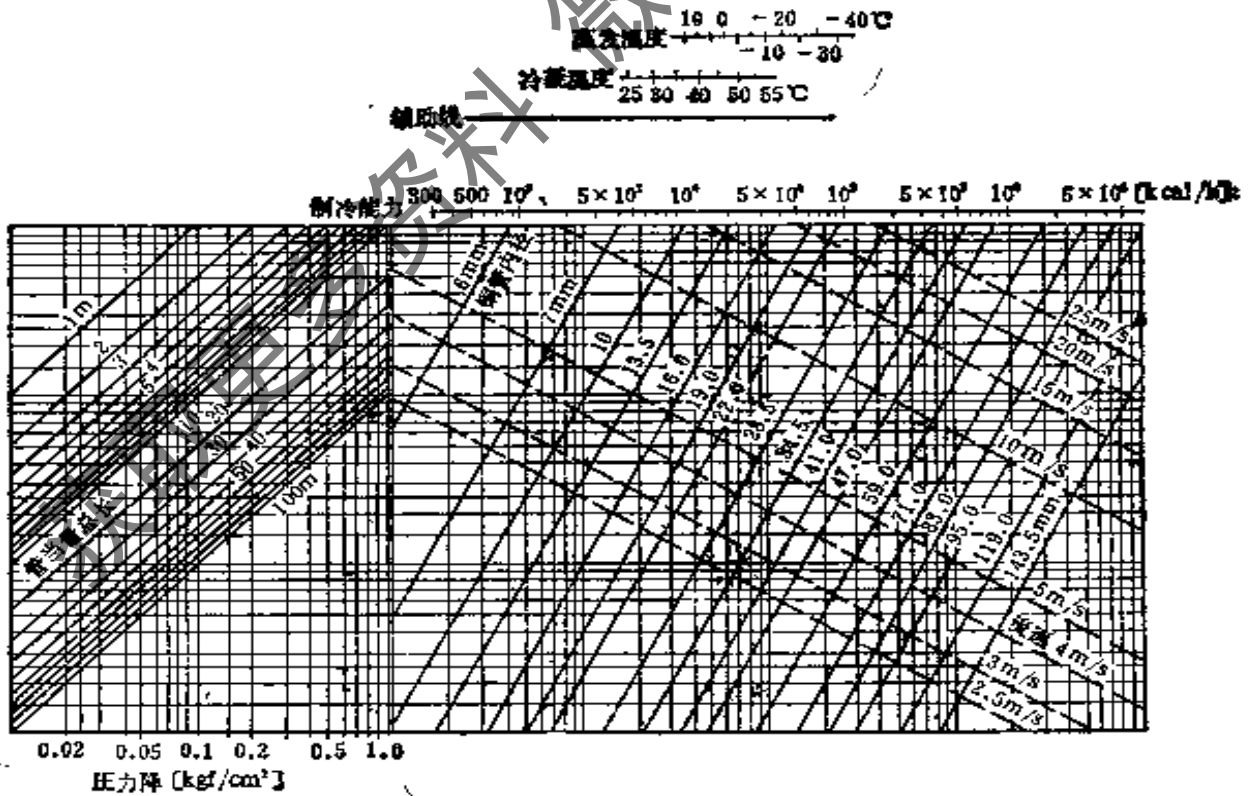


图 18.13 氟利昂 22 排气管计算图



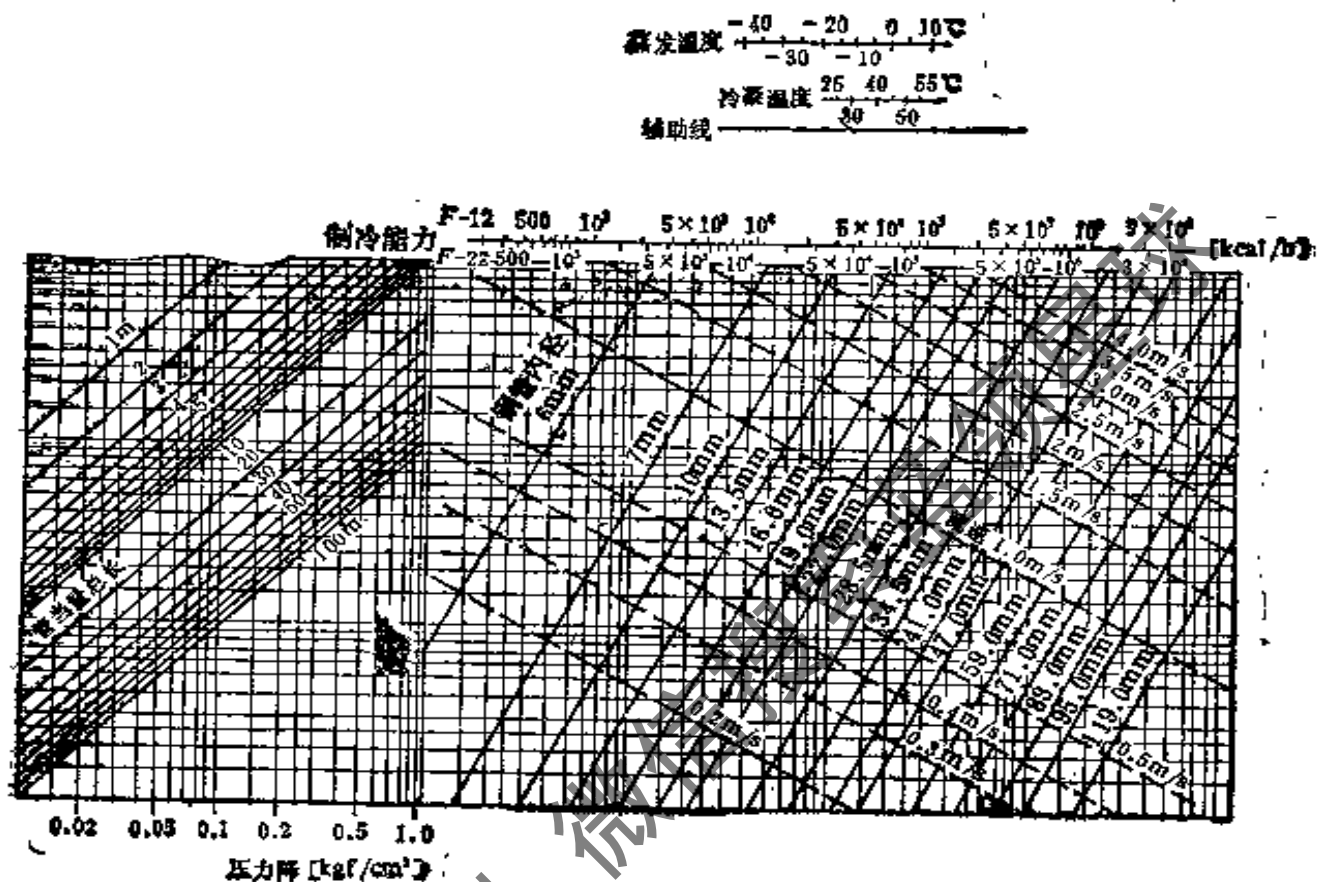


图 18.14 高压液管计算图

图 18.10 至图 18.14 是按铜管制成的,当采用钢管时,可近似采用高一档的铜管管径值。

**例【18.2】** 已知氟利昂 12 制冷系统的制冷量  $Q_0 = 7[\text{kW}] (6020[\text{kcal/h}])$ , 蒸发温度  $t_0 = 0[^\circ\text{C}]$ , 冷凝温度  $t_k = 40[^\circ\text{C}]$ , 吸气管的当量长度为  $10[\text{m}]$  试选择所需的管径。

**【解】** 当蒸发温度  $t_0 = 0[^\circ\text{C}]$  时, 氟利昂 12 的吸气管的允许压力损失为  $10[\text{kPa}] (0.1[\text{kgf/cm}^2])$ , 如图 18.10 中的虚线所示, 查得铜管内径  $d_n \approx 28.5[\text{mm}]$ 。

### 18.3.3 制冷剂管道的布置原则

制冷剂管道的布置应考虑下列要求:

- (1) 保证各个蒸发器得到充分的供液。
- (2) 避免过大的压力损失。
- (3) 防止液态制冷剂进入制冷压缩机。
- (4) 防止制冷压缩机失油。

(5) 应能保持气密、清洁和干燥。

(6) 应考虑操作和检修方便，并适当注意整齐。

由于制冷剂的性质不同，所以管道布置的要求也有所不同。

### 1. 氟利昂管道的布置原则

氟利昂制冷剂的主要特点是与润滑油互相溶解，因此，必须保证从每台制冷压缩机带出的润滑油在经过冷凝器、蒸发器和一系列设备、管道之后，能全部回到制冷压缩机的曲轴箱里来。

#### (i) 吸气管

1) 考虑到润滑油能从蒸发器不断流向压缩机，压缩机的吸气管应有不小于 0.01 的坡度，坡向压缩机，见图 18.15 a。

2) 当蒸发器高于制冷压缩机时，为了防止停机对液态制冷剂从蒸发器流入压缩机，蒸发器回气管应先向上弯曲至蒸发器的最高点，再向下通至压缩机，如图 18.15 b 所示。

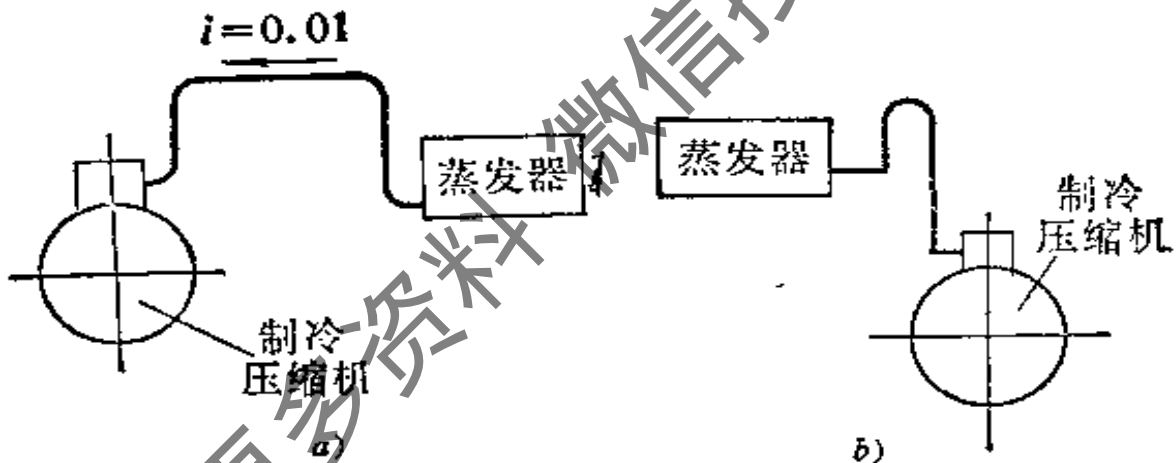


图 18.15 氟利昂压缩机的吸气管

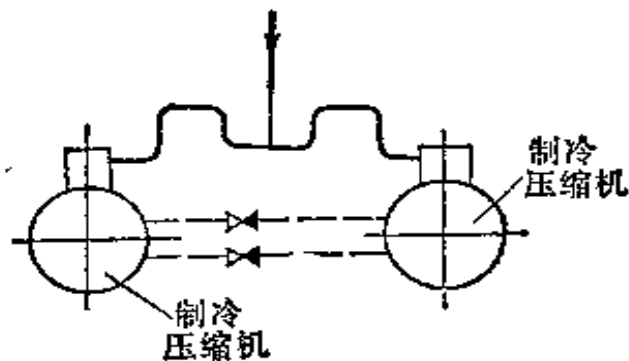


图 18.16 并联压缩机的配管

3) 氟利昂制冷压缩机并联运转时,回到每台制冷压缩机的润滑油不一定和从它带走的润滑油量相等,必须在曲轴箱上装有均压管和油平衡管,使回油较多的制冷压缩机里的油通过平衡管流入回油较少的压缩机。

并联的氟利昂压缩机为了防止润滑油进入未工作的压缩机的吸入口,压缩机的吸气管应按图 18.16 安装。

4) 上升吸气立管中的氟利昂气体必须具有一定的流速,才能把润滑油带回压缩机内。氟利昂 12 和氟利昂 22 上升吸气立管带油需要的最低流速见图 18.17。

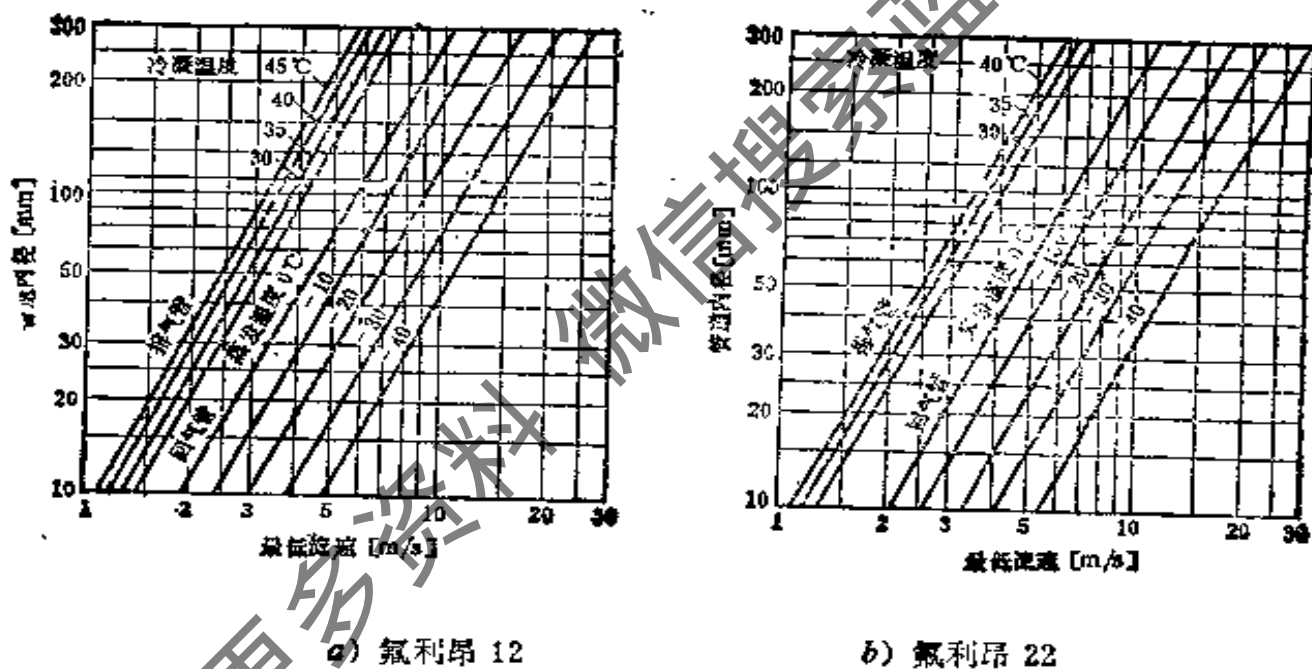


图 18.17 氟利昂上升立管的最低带油速度

5) 在变负荷工作的制冷系统中,为了保证低负荷回油,管径可能需要选用得很小,特别是能量调节范围较大时,问题更加突出。为了避免全负荷时压力降太大,可用两根上升立管,两管之间用一个集油弯头连接,如图 18.18 所示。其工作原理如下:

在全负荷时,两根立管同时使用。两管截面之和应能保证回油速度,同时不应产生过大的压力降。

两根立管中的一根 A,按可能出现的最低负荷选用管径,在低

负荷时,起初是两根立管同时使用,由于管内流速低,所以润滑油逐渐积聚在弯头内,直至将弯头封住,于是只剩一根立管 A 工作,管内流速提高,保证低负荷时能回油。

在恢复全负荷运行后,由于管内流速增大,润滑油从弯头中排出,使两根立管同时工作。

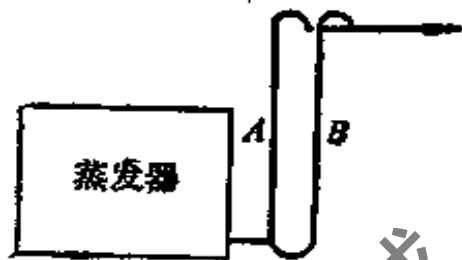
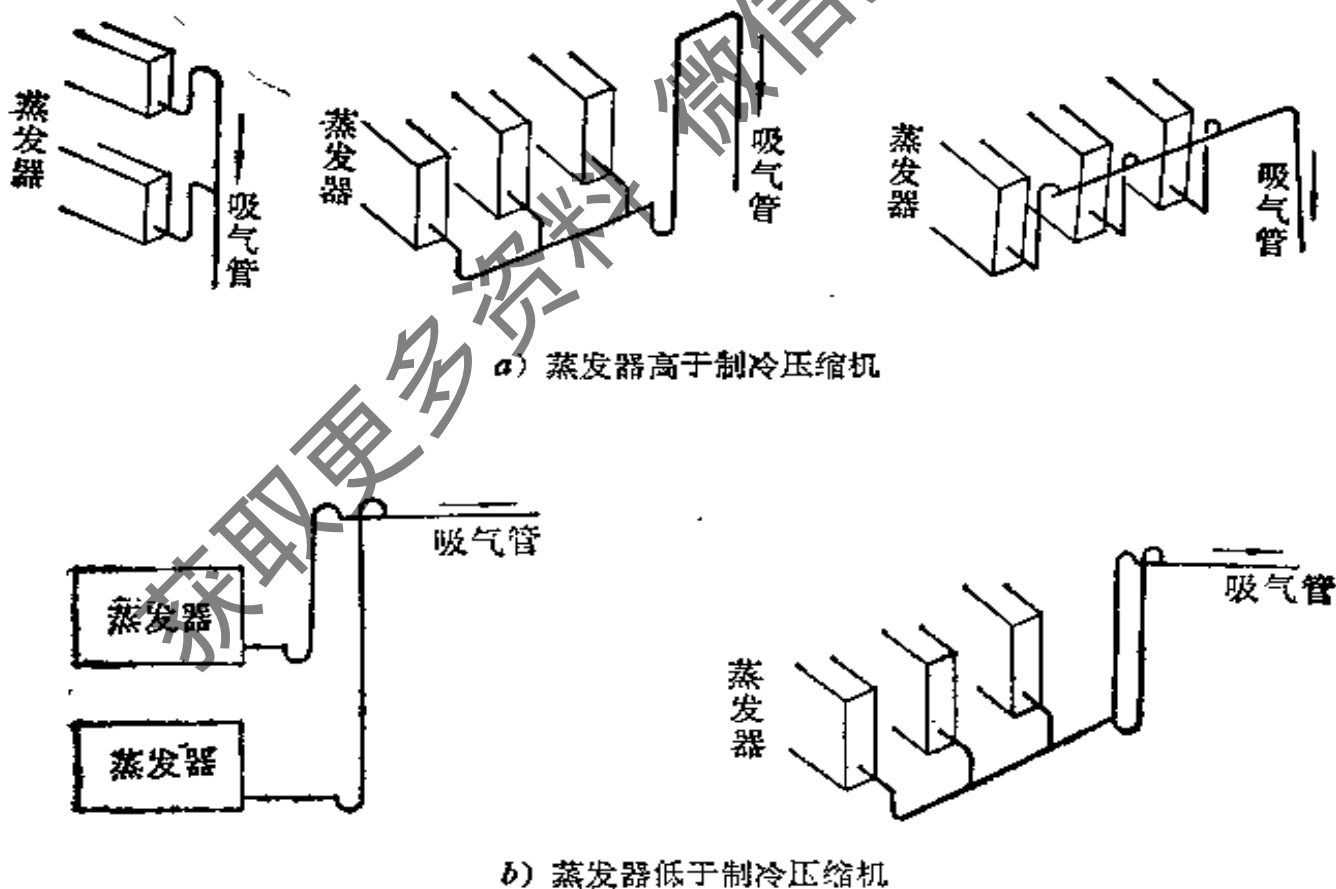


图18.18 双上升吸气管

为了避免单管工作时可能不断地有油进入不工作的一根管子里,制作时两管均应从上部与水平管相接。

6) 多组蒸发器的回气支管接至同一吸气总管时,应根据蒸发器与制冷压缩机的相对位置采取不同的方法处理,如图 18.19 所示。



a) 蒸发器高于制冷压缩机

b) 蒸发器低于制冷压缩机

图 18.19 回气管道连接示意图

## (2) 排气管

制冷压缩机排气管的设计应考虑带油问题，氟利昂排气管的带油最低流速见图 18.17。此外，应避免停机后在排气管中可能凝结的液滴流回制冷压缩机。

1) 为了防止润滑油或可能冷凝下来的液体流回压缩机，制冷压缩机的排气管应有  $0.01 \sim 0.02$  的坡度，坡向油分离器或冷凝器。

2) 在不用油分离器时，如果压缩机低于冷凝器，排气管道应设计成一个  $U$  型弯管，如图 18.20，以防止冷凝的液体制冷剂和润滑油返流回制冷压缩机。

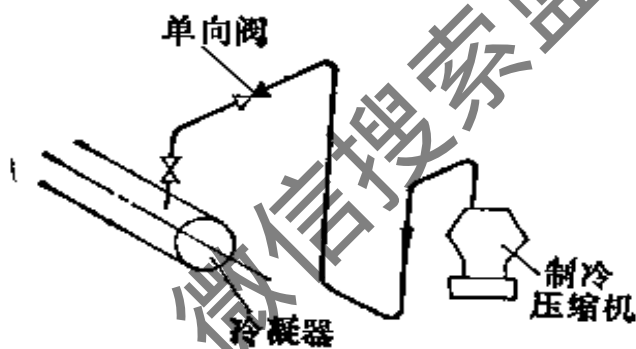


图 18.20 排气管连接示意图

## (3) 冷凝器至贮液器的液管

冷凝器至贮液器之间的液管，其连接方法有两种，分别如图 18.21 和图 18.22 所示。

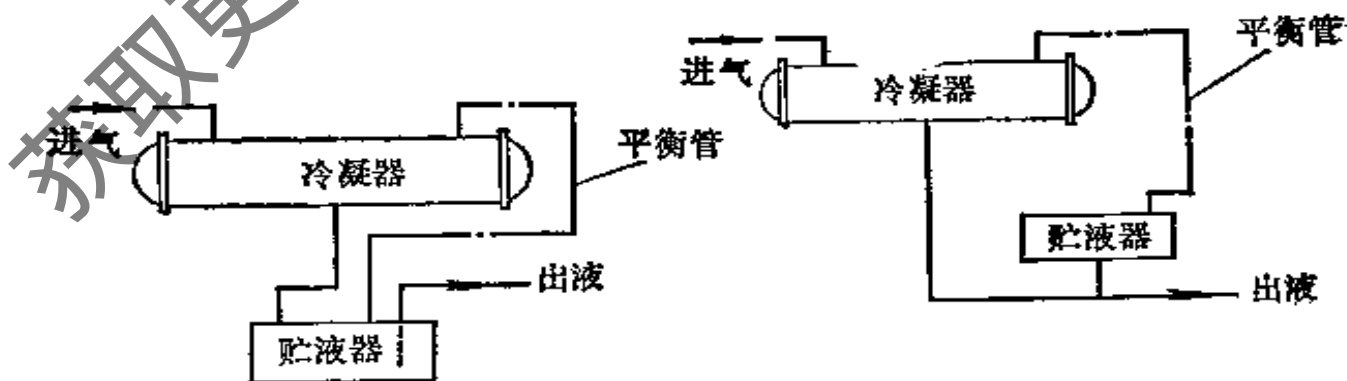


图 18.21 直通式贮液器的连接

图 18.22 波动式贮液器的连接

直通式贮液器的接管应考虑在贮液器内有气体反向流入冷凝

器时,冷凝器内的液体制冷剂仍顺利流入贮液器,其管径大小应按满负荷运行时液体的流速不大于  $0.5[m/s]$  来选择。在接管的水平管段应有不小于  $0.01$  的坡度,坡向贮液器。该管段应尽量减少弯头或管弯,贮液器的进液阀应尽量采用角阀(角阀阻力较小)。贮液器应低于冷凝器,角阀中心与冷凝器出液口的高度应不小于  $200[mm]$ 。

采用直通式贮液器时,从冷凝器出来的过冷液体进入贮液器后将失去过冷度。

波动式贮液器的顶部有一平衡管与冷凝器顶部连通,液体制冷剂从贮液器底部进出,以调节和稳定制冷剂循环量。从冷凝器出来的液体制冷剂,可以不经过贮液器直接通过液管到达膨胀阀。冷凝器与波动式贮液器的高差应大于  $300[mm]$ ,液体制冷剂在管道中的流速及冷凝器液体出口至贮液器液面的必要高差  $H$  值见表 18.6。

管道内的液体流速和高差  $H$  值

表 18.6

| 管内液体流速<br>[m/s] | 冷凝器至贮液<br>器接管形式 | $H$<br>[mm] | 管内液体流速<br>[m/s] | 冷凝器至贮液<br>器接管形式 | $H$ [mm] |
|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|-----------------|----------|
| 最高 0.5          | 球阀或角阀           | 350         | 最高 0.8          | 角 阀             | 400      |
| 最高 0.5~0.8      | 无 阀             | 350         | 最高 0.8          | 球 阀             | 700      |

#### (4) 冷凝器或贮液器至蒸发器之间的管道

为了避免在液管中产生闪发气体,有条件时,应把来自贮液器的给液管与压缩机的吸气管贴在一起,并应用隔热材料保温,必要时,可装设回热器。

1) 蒸发器位于冷凝器或贮液器下面时,如液管上不装设电磁阀,液体管道应设有倒  $U$  形液封,其高度应不小于  $2[m]$ ,如图 18.23 所示,以防止在制冷系统停止运行时液体继续流向蒸发器。

2) 多台不同高度的蒸发器位于冷凝器或贮液器上面时,为了避免可能形成的闪发气体都进入最高的一个蒸发器,应按图 18.24

所示方法接管。

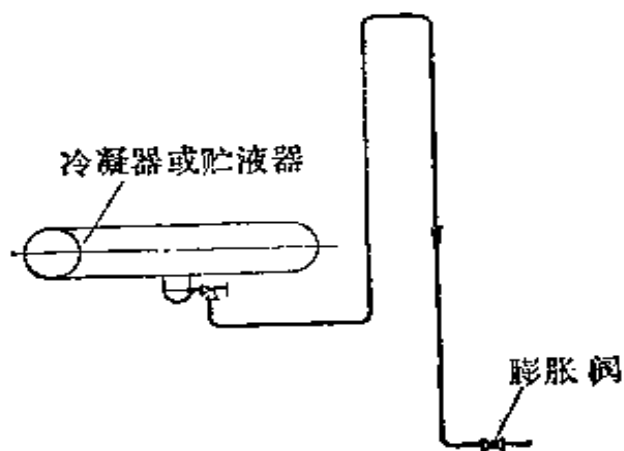


图 18.23 液管连接示意图

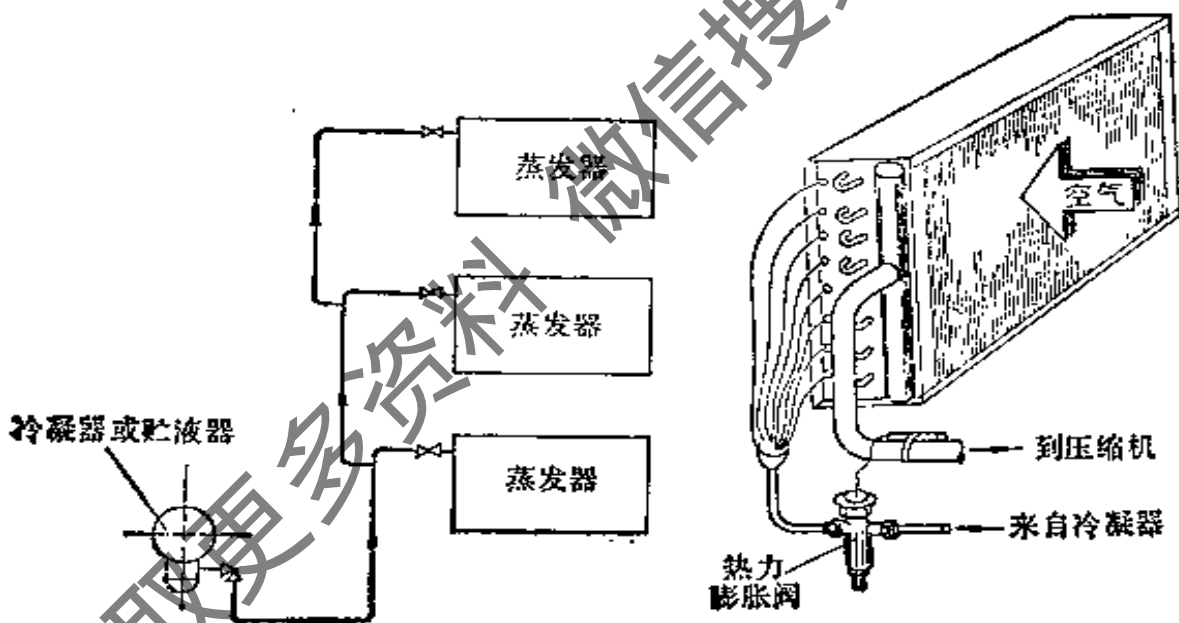


图 18.24 不同高度蒸发器的供液管连接示意图

图 18.25 直接蒸发式空气冷却器的接管示意图

3) 直接蒸发式空气冷却器的空气流动方向应使热空气与蒸发器出口排管首先接触,如图 18.25 所示。

4) 在压力降允许的条件下,蒸发排管可以串连。用热力膨胀阀供液的氟利昂蒸发排管,一般采用上进下出形式以保证回油。

串联排管只要保持最后一组上进下出，不要求每一组都是上进下出。

## 2. 氨管道的布置原则

氨在润滑油中几乎是不溶解的，由于润滑油的密度大于氨的密度，进入制冷系统的润滑油就会积存在制冷设备的底部，因此，在氨制冷系统中，应设置氨油分离器，并在可能集油的设备底部装设放油阀，制冷系统中应有放油装置。

### (1) 吸气管

为了防止氨液滴进入压缩机，氨压缩机的吸气管应有不小于0.005的坡度，坡向蒸发器。

### (2) 排气管

1) 为了防止润滑油和冷凝氨液流回制冷压缩机，压缩机的排气管道应有不小于0.01的坡度，坡向油分离器。

2) 并联制冷压缩机的排气管上宜装设止回阀，以防止一台压缩机工作时，在停止运行的压缩机出口处积存较多的冷凝氨液和润滑油，重新启动时产生液击事故。

### (3) 冷凝器与贮液器的连接管

1) 冷凝器至贮液器的液体管道应有不小于0.02的坡度，坡向贮液器。

2) 贮液器与冷凝器出液管之间的高差应保证液体靠重力流入贮液器。

3) 多台冷凝器并联时，应设有压力平衡管。为了检修方便，平衡管上应装有截止阀，如图18.26所示。

### (4) 贮液器至蒸发器的连接管

贮液器至蒸发器的液体管道可直接经节流机构接至蒸发器。节流机构采用浮球阀时，其接管应考虑正常运转时，氨液能通过过滤器、浮球阀进入蒸发器。在检修浮球阀或清洗过滤器时，氨液由旁通管道经手动节流阀降压后进入蒸发器(图18.26)。

### (5) 放油管及安全阀的接管

1) 所有可能积存润滑油的制冷设备底部都应有放油接头和



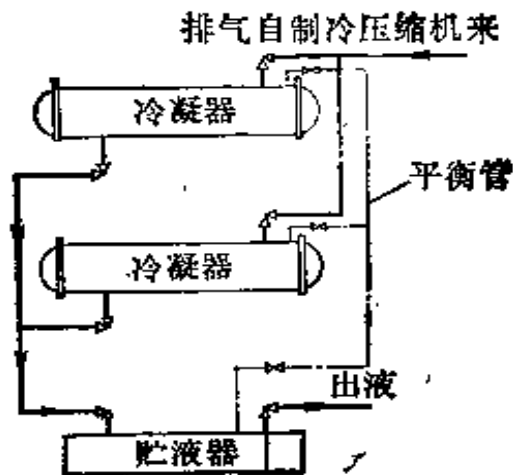


图 18.26 并联冷凝器的接管示意图

放油阀, 并接至集油器。

2) 冷凝器、贮液器等设备上应装设安全阀和压力表。如在安全阀接管上装设截止阀时, 必须装在安全阀之前, 呈开启状态并加以铅封。

## 18.4 制冷机组

制冷系统机组化是现代制冷装置的发展方向。制冷机组就是将制冷系统中的全部或部分设备直接在工厂组装成一个整体, 为用户提供所需要的冷量和用冷温度。制冷机组不但结构紧凑, 使用灵活, 管理方便, 而且质量可靠, 安装简便, 能缩短施工周期, 加快施工进度, 深受设计人员和用户欢迎。

常用的制冷机组有压缩机-冷凝器机组, 压缩式冷水和冷、热水机组, 以及各种空调和低温机组。所有机组的型号规格、性能参数均有制造厂提供, 用户可以直接从样本中选择。

### 18.4.1 活塞式冷水机组

活塞冷水机组由活塞式制冷压缩机、卧式壳管式冷凝器、热力膨胀阀和干式蒸发器等组成, 并配有自动(或手动)能量调节和自动安全保护装置, 冷水机组常用的制冷剂为 R 22 和 R 12。目前, 国产活塞式冷水机组大多采用 70, 100, 125 系列制冷压缩机组装。其中, 70 系列为半封闭式制冷压缩机, 100 和 125 系列为开启式

压缩机。当冷凝器进水温度为  $32[^\circ\text{C}]$ ，出水温度为  $36[^\circ\text{C}]$ ，蒸发器出口冷冻水温度为  $7[^\circ\text{C}]$  时，冷量范围约为  $35\sim 580[\text{kW}]$ 。冷水机组可用一台或几台制冷压缩机组装，以扩大冷量选择范围。另外，在冷水机组的冷凝器和蒸发器中，还采用了各种高效传热管，提高制冷剂与冷却水和冷冻水的换热效果，降低传热温差，节省运行能耗。

图 18.27 为活塞式冷水机组的外形结构，整个制冷设备装在槽钢底架上。在安装时，用户只需固定底架，连接冷却水和冷冻水管以及电机电源，即可进行调试。

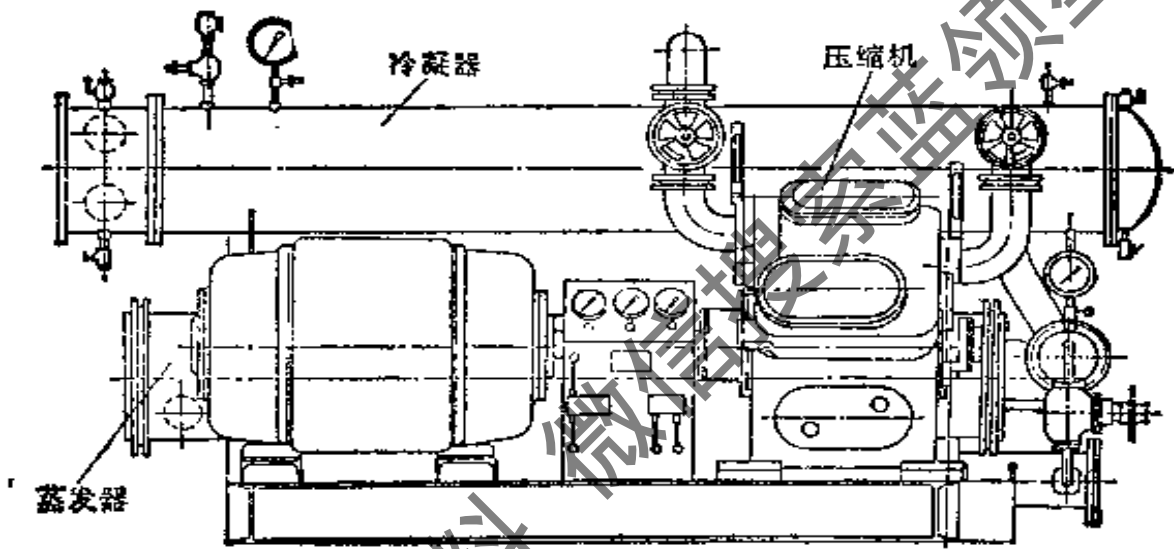


图 18.27 活塞式冷水机组外形结构

图 18.28 为活塞冷水机组的制冷系统流程及其控制设备，由图可知，冷水机组中除装有压缩机( $J$ )、冷凝器( $LN$ )、蒸发器( $ZF$ )和热力膨胀阀( $RF_{1,2}$ )等四大主件外，还装有各种关闭阀( $F$ )，电磁阀( $DF$ )和高、低压力继电器( $JY$ )，油压压差继电器( $JC$ )，冷冻水出水温度自控装置( $WJ$ )和实现压缩机能量调节的温度控制器( $WT$ )。这些自控装置的整定值应根据所用制冷剂种类和用户使用的冷冻水温度设定。通常情况下，这些整定值在机组出厂前已由工厂作了初步调整，无特殊情况用户在试车时仅需验证即可。

由于机组装有各种自控设备,使制冷系统的高、低压力得到控制,当润滑油和冷却水出现断油和断水,或者冷冻水结冻时,能使压缩机自行停车,机组得到保护。

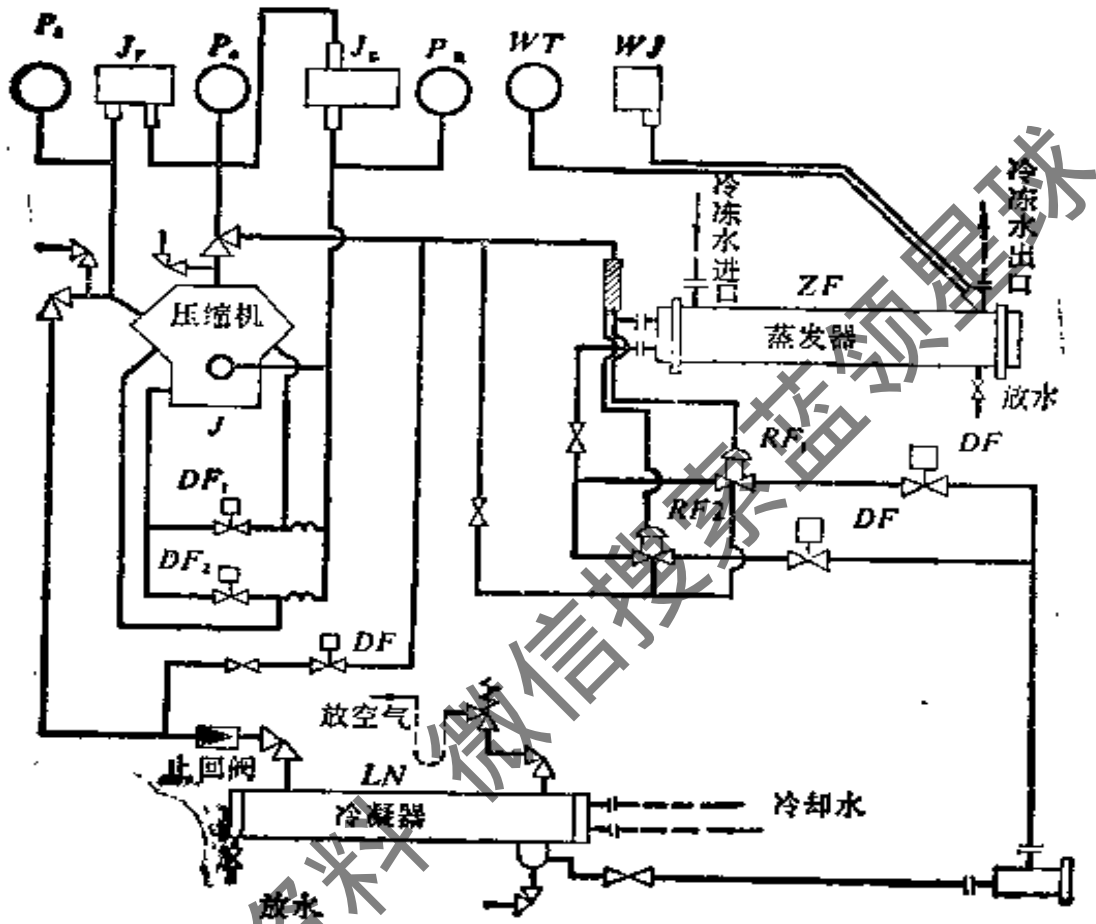


图 18.28 活塞式冷水机组的制冷系统和控制设备

根据压缩式制冷循环的基本理论可知,活塞式冷水机组的制冷量  $Q_0$  和轴功率  $N_0$  随制冷剂的蒸发温度  $t_0$  和冷凝温度  $t_k$  变化,而  $t_0$  和  $t_k$  的变化又与蒸发器和冷凝器的进水温度和流量有关。因此,各制冷设备制造厂均绘制了冷水机组的制冷量、轴功率、冷却水和冷冻水出口温度特性曲线,供用户选择和配备水、电容量(图 18.29)。

应该指出,图 18.29 中所示的冷却水量曲线是在冷凝器冷却水进口温度为  $32[^\circ\text{C}]$ ,出口温度为  $36[^\circ\text{C}]$  时,蒸发器冷冻水在各种不同出口温度条件下所需要的冷却水量。当冷却水进出口温度不是上述规定值时,若要保持蒸发器冷冻水出口温度不变,则所需水

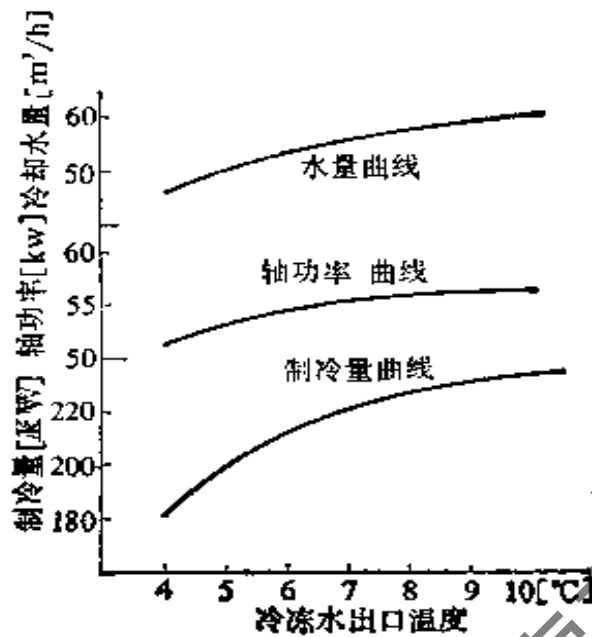


图 18.29 冷水机组性能曲线

量将发生变化。

活塞式冷水机组的压缩机通常都具有顶开吸气阀片的能量调节机构(即卸载机构), 制冷设备厂提供的机组特性曲线是在满载(100%负荷)时的各个性能参数值。当空调冷负荷减少时, 可以通过能量调节机构使压缩机的部分气缸卸载, 从而达到调节冷量的目的。当空调总冷负荷是由几台冷水机组(或者一台大型冷水机组是用几台制冷压缩机组装)提供时, 也可用停开冷水机组(或停开压缩机)的方法实现冷量调节。显然, 用能量调节机构调节冷量时, 其冷量与消耗不是以相同比例递减, 因为卸载气缸中仍有气体流动, 活塞也在往复运动, 需要耗功。而用停开机组(或压缩机)调节时, 冷量和耗功完全以相同比例递减, 因此能取得更好的节能效果和减少运行费用。但是, 当选用的台数过多时, 设备费用和占地面积将增大, 设计者必须对冷负荷的变化情况以及产品和能源价格, 建筑而积造价等有关项目进行详细的综合计算, 才能确定最佳调节方案。

#### 18.4.2 活塞式冷、热水机组

制冷装置实际上是以耗功为补偿, 通过制冷剂的循环, 从低温热源吸取热量, 而在高温热源放出热量。当制冷装置运行时, 既可

以使用它的冷量,也可以利用它的热量(称热泵装置)。若在系统中适当增加一些设备,连接管道和控制阀门,还可以根据实际需要调节它的制冷量和供热量,满足用户要求。

图 18.30 至图 18.35 为一台活塞式冷、热水机组在各种不同要求下的运行工况。由图可知,该装置中除了装有一台半封闭压缩机,两只空气换热器和一只蒸发器(供应冷水)外,还装有一只辅助换热器,它可以向用户供应热水。制冷剂在各个设备和管路中的流动由感温元件和电磁阀自动控制,具体情况分述如下。

图 18.30 中所示的工况为制冷运行工况,在该工况下运行时机组向用户提供额定冷量,供应一定温度的冷冻水,制冷剂在两只空气换热器中向室外空气放出全部热量(换热器作冷凝器用)。显然,用户此时并不需要使用热量,辅助换热器也不工作。

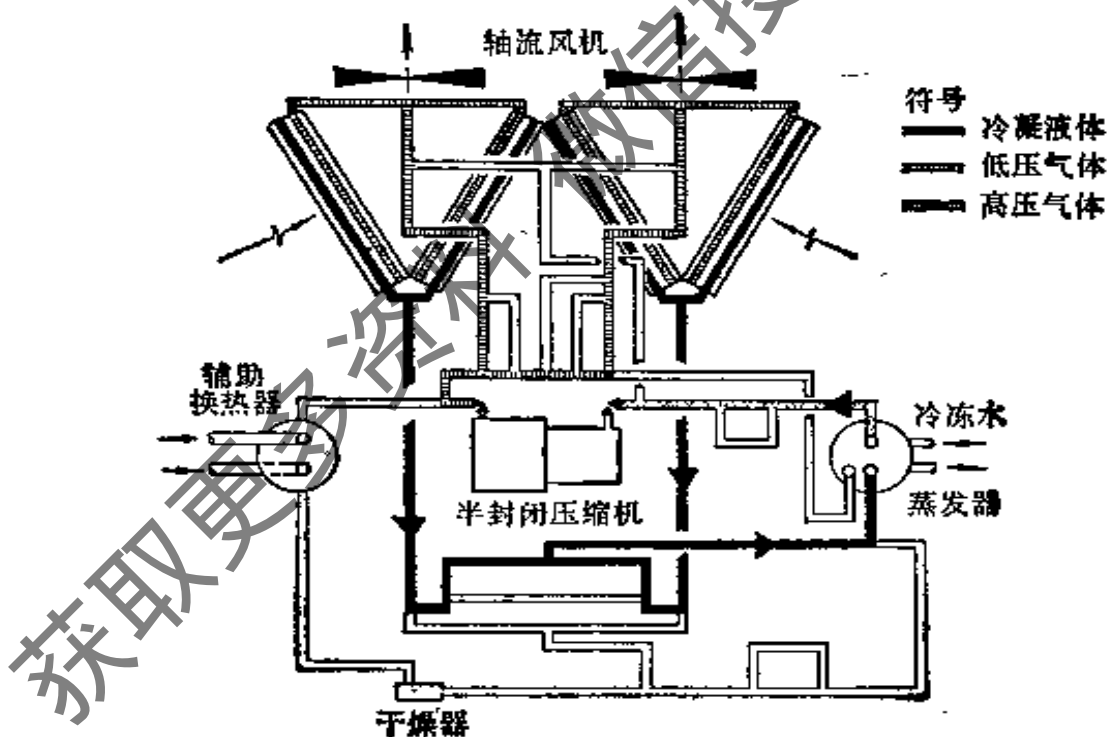


图 18.30 制冷运行

图 18.31 为制冷和热回收运行,机组在该工况下运行时既能向用户提供冷冻水,又能在辅助换热器中供应一定温度的热水。此时室外两只空气换热器停止工作。

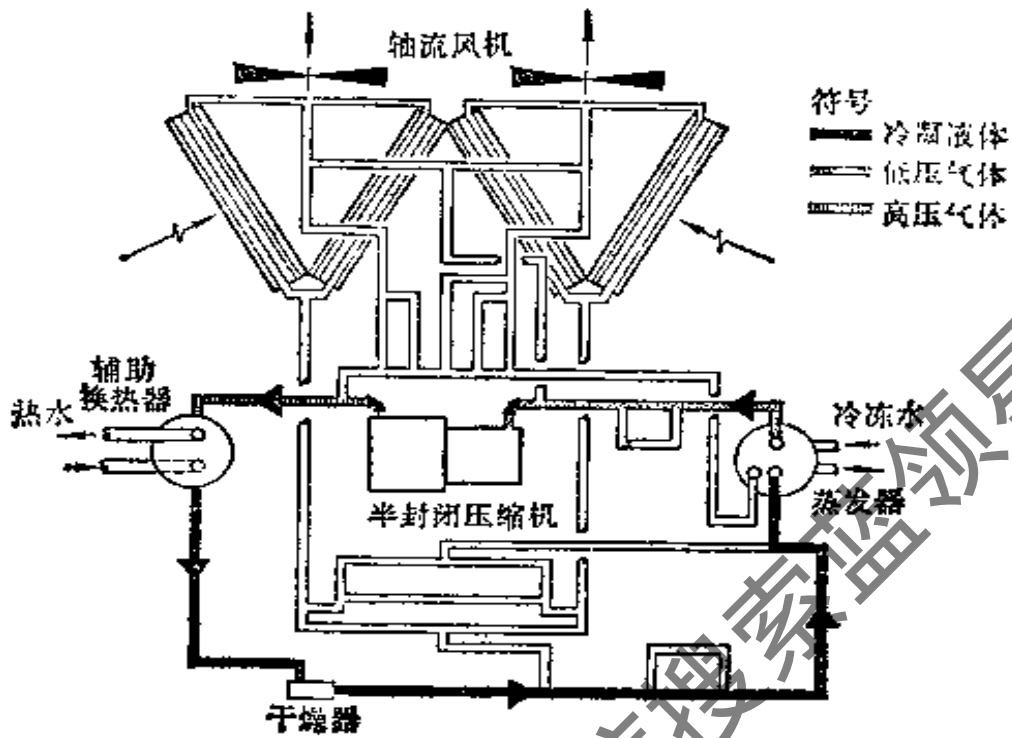


图 18.31 制冷和热回收运行

图 18.32 为制冷、部分热回收运行,机组在该工况下运行时能

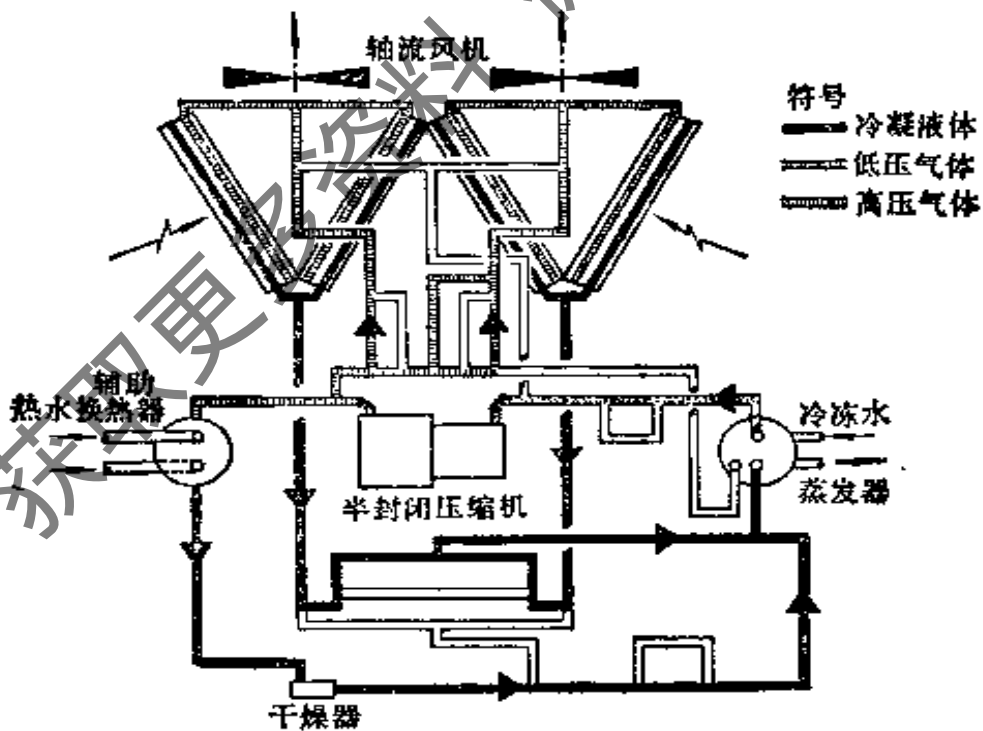


图 18.32 制冷、部分热回收运行

向用户提供冷冻水,而且在辅助换热器中回收部分热量,供应所需要的水。部分制冷剂在室外空气换热器中冷凝,热量排入大气。显然此时辅助换热器和空气换热器(作冷凝器用)均在工作。

图 18.33 为热泵运行工况,全部制冷剂在室外空气换热器中蒸发,从大气中吸收热量,并在辅助换热器中放出,向用户供应热水。显然此时蒸发器停止工作,用户也不需冷冻水。室外空气换热器作为蒸发器使用。

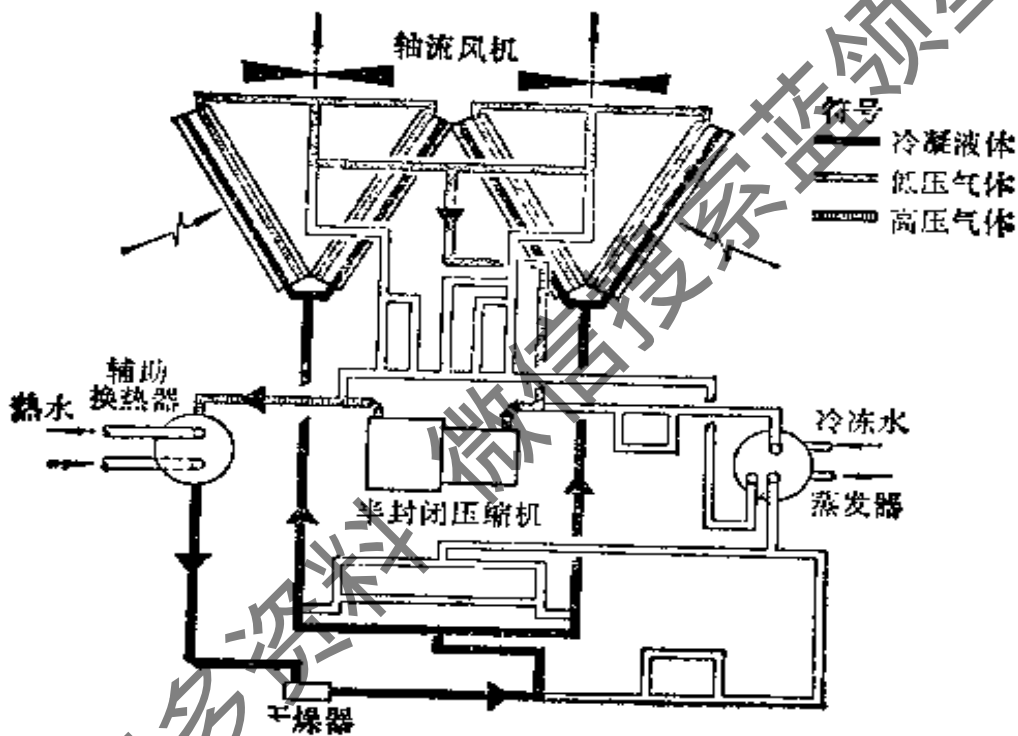


图18.33 热泵运行

图 18.34 为热泵、部分制冷运行工况,机组在该工况下运行时在辅助换热器中能回收全部热量,向用户供应热水。部分制冷剂在蒸发器中蒸发、吸热,向用户供应所需要的冷冻水。另一部分制冷剂在室外空气换热器中蒸发,从大气中吸收热量,此时室外空气换热器作为蒸发器使用。

图 18.35 为冲霜运行。当机组作热泵工况运行时,由于室外空气换热器作蒸发器使用,若室外空气温度较低,则换热器表面会产生霜层,霜层过厚不但影响机组正常运行,而且也使辅助换热器

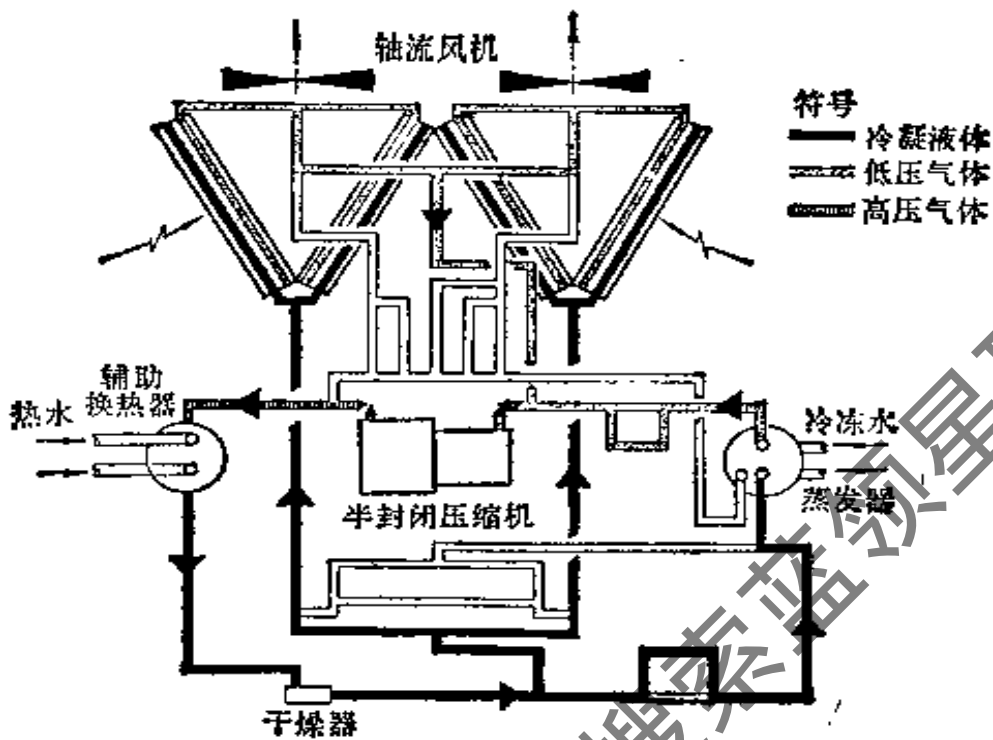


图 18.34 热泵、部分制冷运行

的供热效果下降。为此,当机组在热泵工况下运行一段时间后,根据结霜情况有时需要进行冲霜。当冲霜时,使压缩机排出的部分

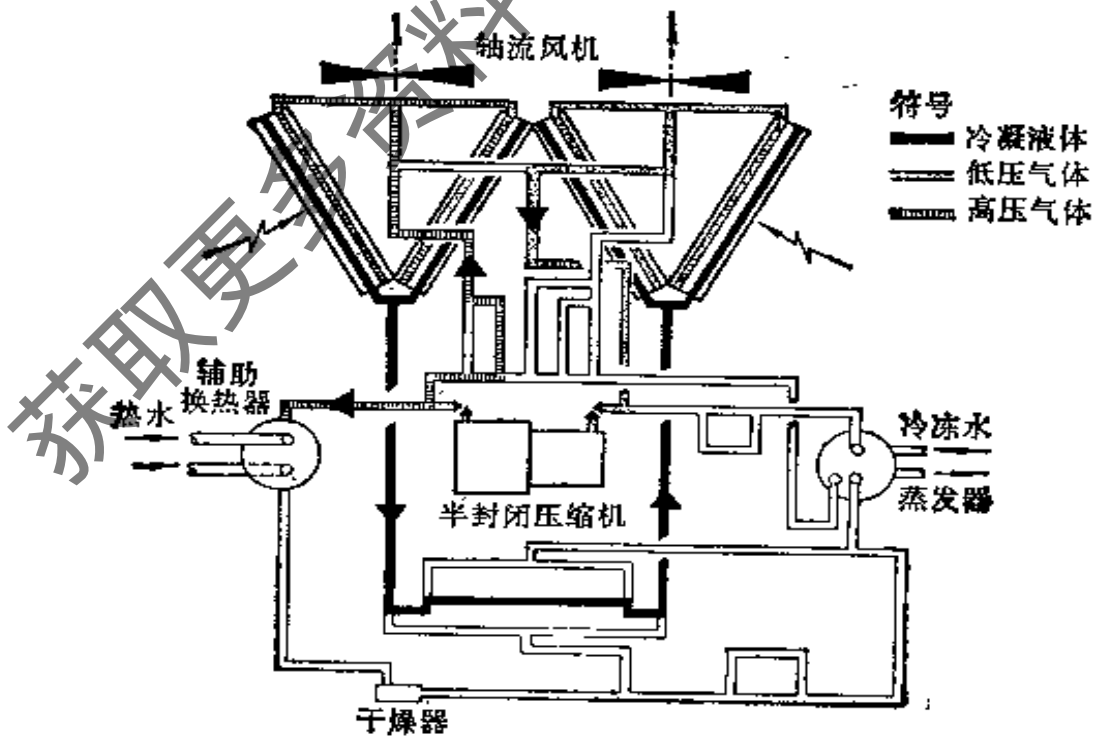


图 18.35 冲霜运行



高压高温制冷剂蒸汽先进入一只空气换热器(此时作冷凝器用),使其表面的霜层溶化,然后再通过阀门的切换,使制冷剂蒸气进入另一只空气换热器冲霜。显然,这种冲霜方法机组仍可连续运行,不必停机,但是在冲霜期间热水供应量或温度将有所下降。

### 18.4.3 螺杆式冷水机组

螺杆式冷水机组是由螺杆式制冷压缩机、冷凝器、蒸发器、热力膨胀阀、油分离器、自控元件和仪表等组成的一个完整的制冷系统(图 18.36)。由于螺杆压缩机运行平稳,机组安装时可以不装底脚螺栓,可直接放在具有足够强度的水平地面或楼面上。机组在出厂前已进行过各种试验,在现场安装后(包括机组安装,连接水管和电源),如无意外情况,只要加足润滑油、抽真空,然后就可按说明书要求充加制冷剂并进行调试。

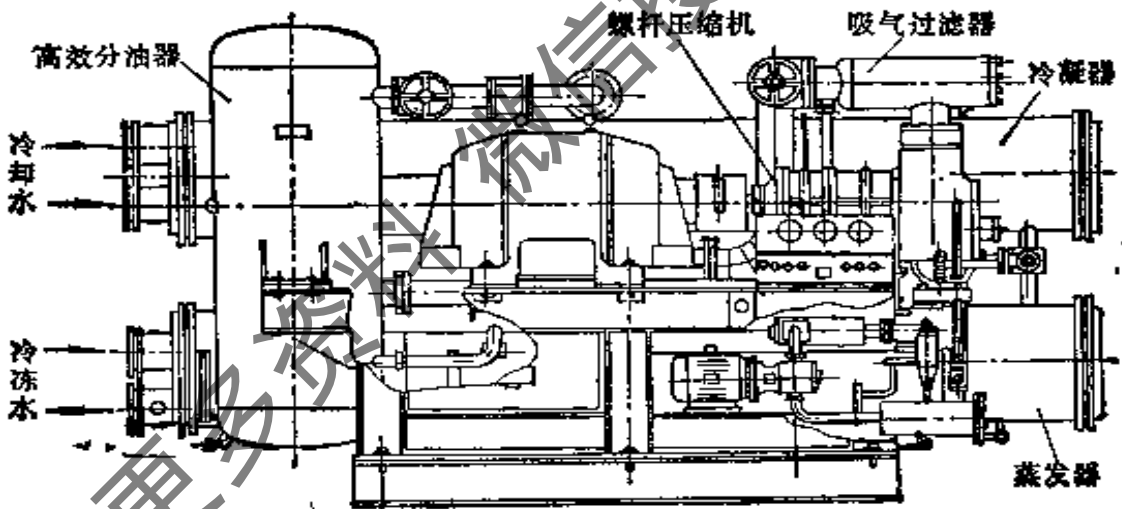


图 18.36 螺杆式冷水机组外形结构

螺杆式冷水机组结构紧凑,运转平稳,冷量能无级调节,省能性好,易损件少,它的使用范围正日益扩大。

目前国产螺杆式冷水机组的制冷剂通常为 R 22,空调工况冷量范围约为  $121 \sim 1119$  [kW] ( $10.4 \sim 96.2 \times 10^4$  [kcal/h]) 之间。

### 18.4.4 离心式冷水机组

离心式冷水机组是由离心式制冷压缩机、冷凝器、蒸发器、节流机构和调节机构以及各种控制元件组成的整体机组。离心式冷

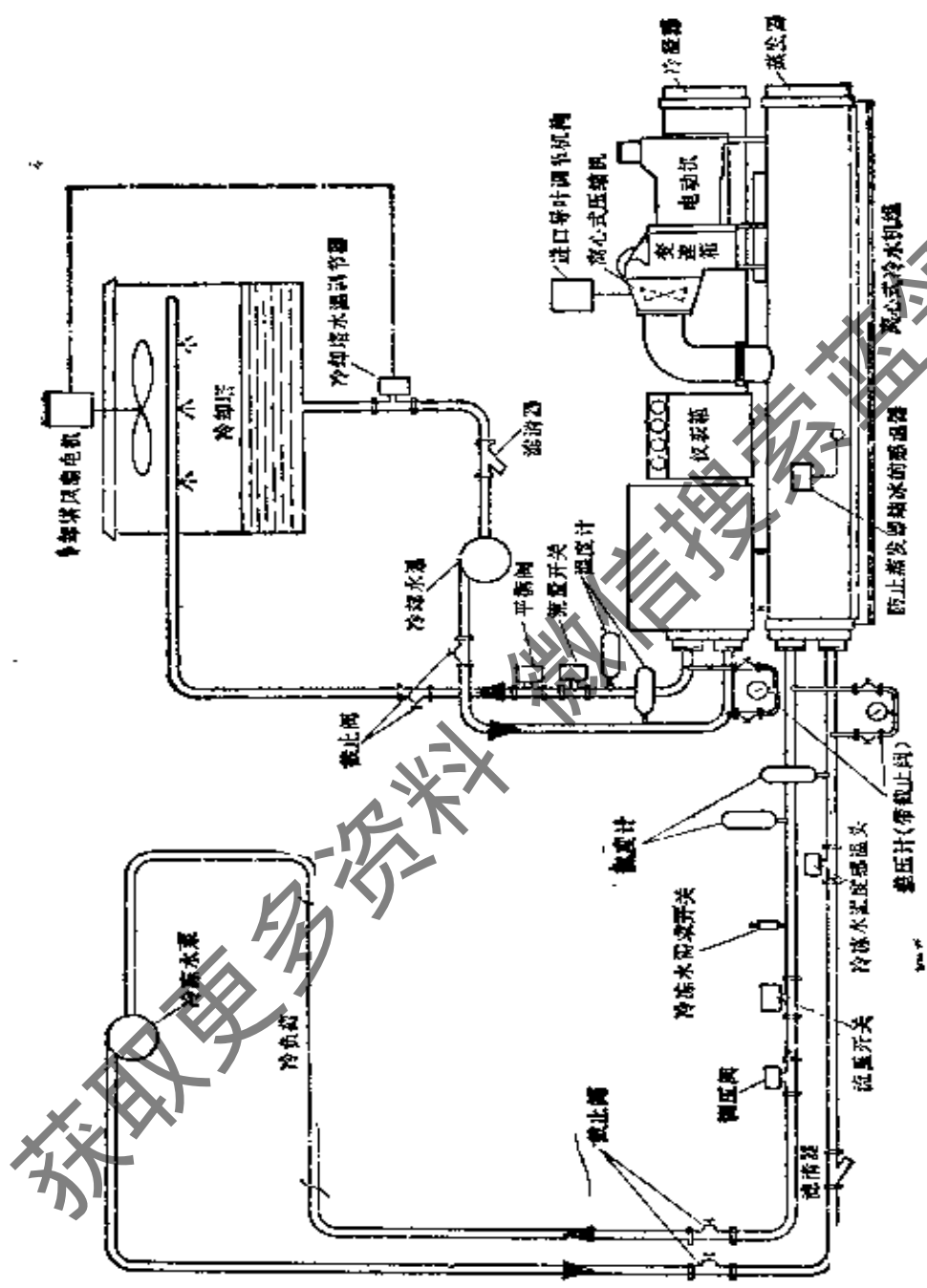


图 18.31 离心式冷水机组与水系统图

水机组的空调工况制冷量较大，单机容量通常在  $581.4[\text{kW}]$  ( $50 \times 10^4[\text{kcal/h}]$ ) 以上。目前，世界上最大的离心式制冷压缩机可达  $35000[\text{kW}]$  (约  $3000 \times 10^4[\text{kcal/h}]$ ) 制冷量。

图 18.37 表示离心式冷水机组与冷却水和冷冻水管的连接情况，由图可知，各水管中装设的仪表、控制开关和各种阀门，能正确显示和控制冷却水和冷冻水的流量及温度，保证制冷机组和水系统正常运行。

应该指出，目前我国制造的活塞式、螺杆式和离心式冷水机组，其中的冷凝器均采用水冷式。随着城市用水日益紧张，世界各国的大型冷水机组正在向空冷式发展，冷水机组采用空气冷却后不但能节省用水，而且可以免装水冷却塔和水泵及水管路系统。这样，现场施工就更简便，维护保养也更容易。

#### 18.4.5 空调机组

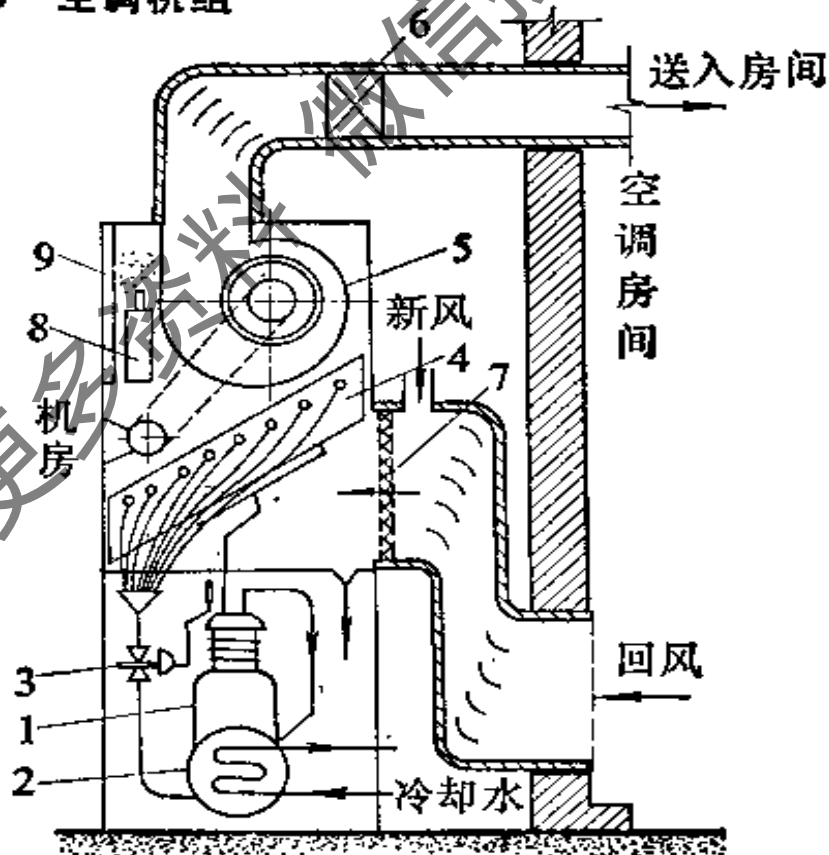


图 18.38 空调机组示意图

1—制冷压缩机；2—冷凝器；3—热力膨胀阀；4—蒸发器；5—离心式通风机；6—电加热器；7—空气过滤器；8—电加热器；9—自控电器屏板

空调机组实际上是一个小型空调系统(见图 18.38)。空调机组内既有提供冷源的制冷装置,还装有迫使空气循环流动的风机,而且根据需要在机组内也可装设加热器和加湿器。由于空调机组已具备了对空气直接进行温度和含湿量处理的全部条件,因此安装和使用就特别方便,在中、小型空调范围几乎全部采用空调机组。

空调机组分两大类:房间空气调节器(窗式空调器)和单元式空气调节机(立柜式空调机组)。

### 1. 房间空气调节器

房间空气调节器的名义制冷量较小,通常在 $1250\sim 9000$ [W] ( $1075\sim 7740$ [kcal/h]) 之间。空调器中的压缩机均采用全封闭式,冷凝器为风冷式,安装简便,接通电源即可运行。

#### (一) 房间空气调节器的型式和名义工况

房间空气调节器以创造舒适的环境为主要目的,根据使用和安装要求,它可以分几种不同的工作和结构型式(见表 18.7、表 18.8)。

空调器型式

表 18.7

| 型 式     | 代 号 | 备 注            |
|---------|-----|----------------|
| 冷 风 型   | —   | 仅用作制冷          |
| 热 泵 型   | R   | 制冷、供热两用        |
| 热泵辅助电热型 | D   | 制冷、供热两用(部分用电热) |
| 电 热 型   | Z   | 制冷、供热两用(全部为电热) |

型号示例:

房间空调器型号前均以“K”表示,后面的数字和符号表示它的制冷量及结构、工作形式如:

K-2.5 C 型房间空调器,表示名义制冷量为 $2.5$  [kW] ( $2150$

| 结 构 型 式 |         | 代 号   |   |
|---------|---------|-------|---|
| 窗 式     |         | C     |   |
| 分 体 式   | 室 内 机 组 | 挂 壁 式 | G |
|         |         | 落 地 式 | L |
|         |         | 嵌 入 式 | Q |
|         |         | 吊 顶 式 | P |
| 室 外 机 组 |         | W     |   |

[kcal/h])的单相冷风型窗式(C)空调器。

KR-3.5 GS型房间空调器,表示名义制冷量为 3.5[kW] (3010[kcal/h])的三相(S)热泵型(R)挂壁式(G)空调器。

应该指出,目前国内房间空调器的型号表示尚未统一,许多产品的冷量仍用[kcal/h]为单位,一些符号的表示意义也不完全相同,具体说明可参阅各制造厂样本。

房间空调器的名义制冷量(热泵型的名义制热量)是按表18.9规定工况,通过试验测定的。显然,空调器运行工况偏离规定工况时,其实际制冷量或制热量也将发生变化。空调器允许使用的环

空调器名义制冷量、制热量的规定工况

表 18.9

| 工 况  | 室内侧空气状态 |         | 室外侧空气状态 |         |
|------|---------|---------|---------|---------|
|      | 干球温度[℃] | 湿球温度[℃] | 干球温度[℃] | 湿球温度[℃] |
| 名义制冷 | 27      | 19.5    | 35      | 24      |
| 名义制热 | 21      | —       | 7       | 6       |

境温度为：冷风型—— $21\sim 43[^\circ\text{C}]$ ；热泵型—— $-5\sim 43[^\circ\text{C}]$ 。

## (二) 房间空气调节器的结构和安装

图 18.39 为一台窗式空气调节器的外形结构及其运行控制开关图。现代空调器不但为室内创造舒适环境，而且已发展为室内的装饰品。目前空调器的品种繁多，色彩丰富，外形结构日益讲究，使用也极其方便。有些空调器在电路中不但装有定时器，而且装有电脑，完全可以根据使用者的要求决定它的停、开时间。

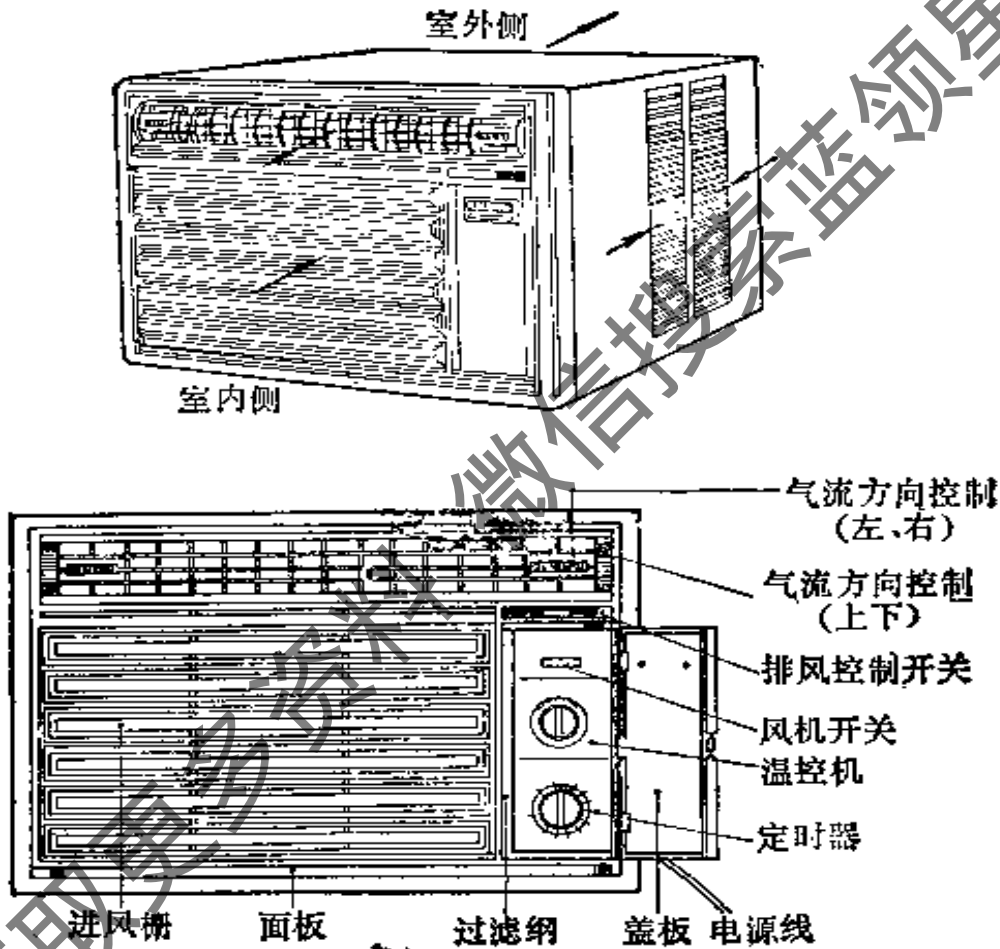


图 18.39 窗式空调器的外形和控制开关

图 18.40 为冷风型窗式空调器的内部结构，它包括了制冷系统和空气流动系统两部分。当启动风机电机时，室内侧的离心风机和室外侧的轴流风机同时运行。然后再启动全封闭制冷压缩机，制冷剂开始循环。压缩机排出的制冷剂先进入室外侧换热器（此时作冷凝器用），当制冷剂放出热量被冷凝后，再经毛细管节流

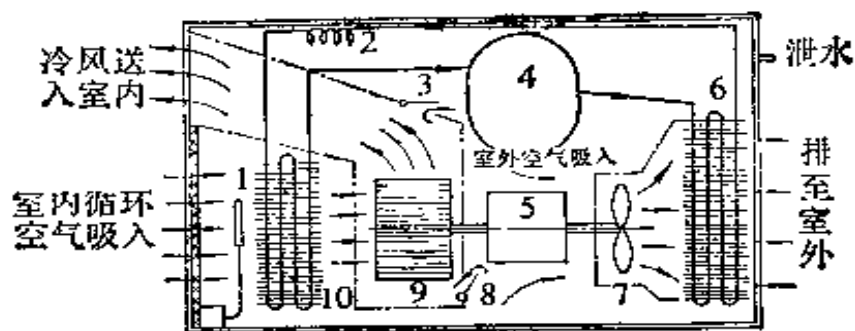


图 18.40 窗式空调器的内部结构图

1—温度开关；2—毛细管；3—排风门；4—全封闭压缩机；5—风机电机；  
6—室外侧换热器；7—轴流风机；8—吸风门；9—离心风机；10—室内侧换热器

进入室内侧换热器(此时作蒸发器用)，并吸收室内循环空气的热量气化，然后再进入压缩机，而冷空气由风机送入室内。室内侧设置的温度开关(感温包)能根据吸入空气的温度自动控制压缩机的停开，使室内保持舒适的环境温度。

如果在冷风型窗式空调器的制冷系统中装有一只四通换向阀，使压缩机排出的高温制冷剂首先进入室内侧换热器(此时作为冷凝器用)，则室内侧的循环空气将变热空气，使室内得到热量，而冷空气将通过室外侧换热器(此时作蒸发器用)排向大气。

图 18.41 表示热泵型空调器在作热泵运行，向室内供热时的制冷剂流程。由图可知，制冷系统中的四通换向阀(实际上远小于压缩机，为了清楚起见，现已扩大)由两部分组成；即电磁阀和四通阀。当电磁阀接通电源后，由于线圈产生磁场，吸引衔铁和阀芯 A 向右移动，阀芯 B 下面的小孔关闭，而阀芯 A 下面的小孔开启。压缩机排出的高压气体进入四通阀后，将有极少量气体经活塞 1 的节流小孔进入 D 管，由于该状态下 D 管通过 E 管直接与吸气管相通，因此活塞 1 两侧产生压差。而通过活塞 2 的节流小孔气体压力逐渐上升(因为 C 管已堵塞)，活塞两侧压力平衡，这样，活塞将带动滑块向右移动(如图 18.41 所示)，压缩机排出气体将通过滑块外侧和管 1 进入室内侧换热器，使室内供给热空气，而制冷

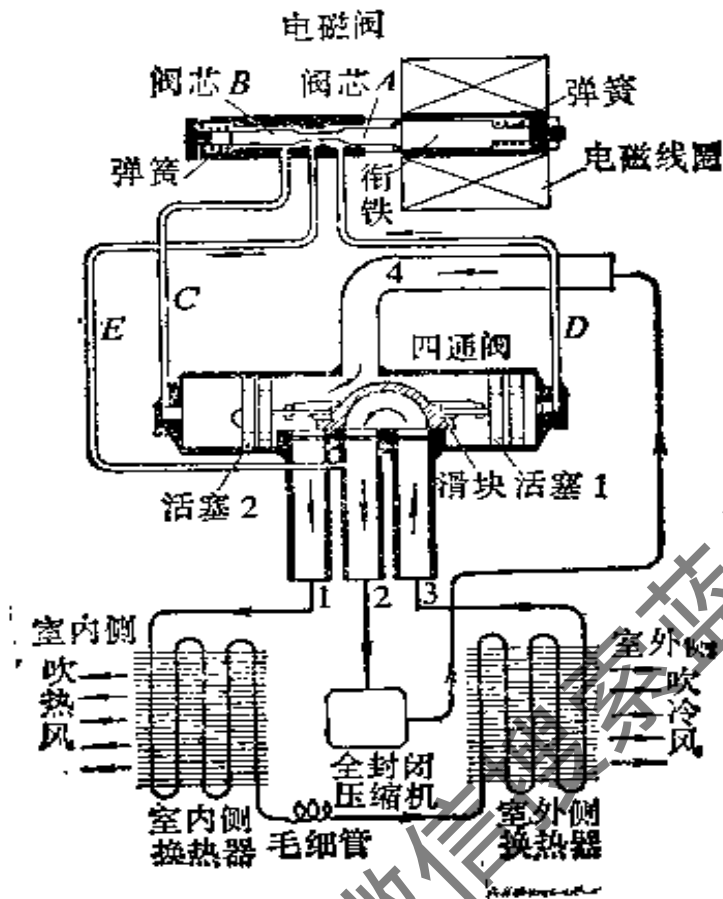


图 18.41 热泵型空调器供热时的原理图

剂冷凝液经毛细管节流后在室外侧换热器中吸热气化，然后再经管3和四通阀中的滑块内侧进入压缩机，而通过室外侧换热器的冷空气将直接排入大气。显然，当切断电磁阀的电源时，电磁线圈磁场消失，阀芯右移，此时 D 管堵塞，C 管开启，四通阀中的活塞和滑块左移，压缩机排出的高压气体进入室外侧换热器，而压缩机将从室内侧换热器吸气，空调器将作制冷工况运行，向室内供应冷气。

根据制冷循环的基本理论知道，制冷剂在冷凝器中的放热量  $Q_K$  近似等于它在蒸发器中的制冷量(即吸热量)  $Q_0$  与压缩机输入功率  $N_{in}$  之和

即 
$$Q_K \approx Q_0 + N_{in} \text{ [kW]}$$

由上式可知，空调器作热泵运行时，在室内侧得到的热量  $Q_K$  总大于压缩机的输入功率  $N_{in}$ ，这就是利用热泵型空调器取暖较



电热取暖省能和经济的原因。

房间空调器在墙上和室内的安装如图18.42和图18.43所示。安放空调器的底板应向外稍有倾斜，以便凝结水向外溢出。撑脚牢固，以防共振。四周应用木框或硬质海绵密封，室外侧应无直接阻挡物。空调器在室内的安装位置不宜过低，应稍高于工作区。

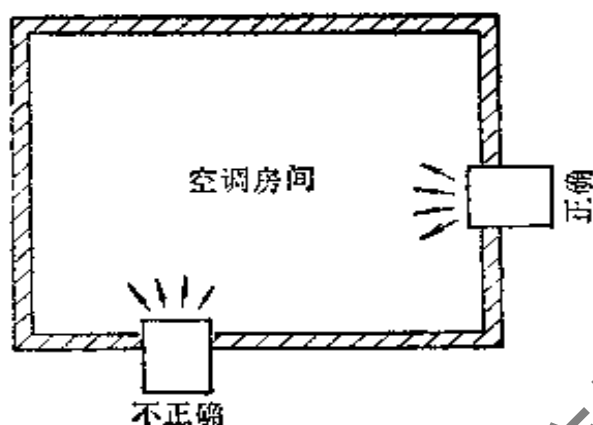


图 18.42 空调器在室内安装的平面位置

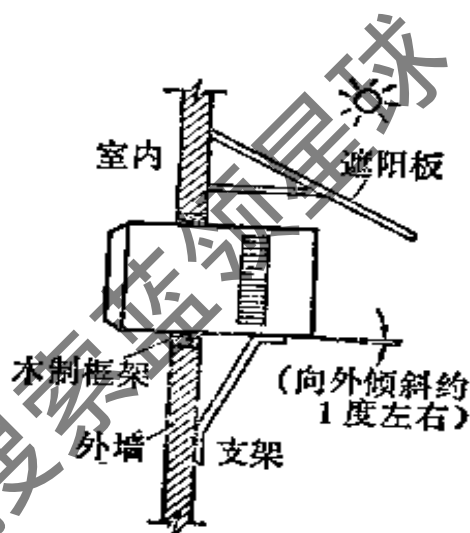


图 18.43 空调器的安装示意图

## 2. 单元式空气调节机

单元式空气调节机的冷量较大，通常在 7000[W] (6020[kcal/h]) 以上，它不但能为室内创造舒适的环境温度，而且能为生产工艺和科学研究创造恒温恒湿的环境条件。因此，单元式空调机的型式和品种较多(表18.10)。

空调机的型式

表18.10

| 代号 | 型式       | 结构      |
|----|----------|---------|
| L  | 水冷式冷风型   | —       |
| LD | 水冷式冷风电热型 | —       |
| LF | 风冷式冷风型   | 压缩机在室内侧 |
|    |          | 压缩机在室外侧 |

续表 18.10

| 代号  | 型 式      | 结 构     |
|-----|----------|---------|
| LFD | 风冷式冷风电热型 | 压缩机在室内侧 |
|     |          | 压缩机在室外侧 |
| RF  | 风冷式热泵型   | 压缩机在室内侧 |
|     |          | 压缩机在室外侧 |
| H   | 水冷式恒温恒湿型 |         |
| HF  | 风冷式恒温恒湿型 | 压缩机在室内侧 |
|     |          | 压缩机在室外侧 |

型号示例：

LF14 W 型空调机，表示该空调机为风冷(F)冷风(L)型，名义制冷量为 14000[W] (12040[kcal/h])，压缩机在室外侧(W)。

H 12 型空调机，表示该空调机为水冷式恒温恒湿(H)型，名义制冷量为 12000[W] (10320[kcal/h])。

单元式空气调节机的送风方式有两种：即直接向室内吹冷风或热风(图18.45,图18.46)和外接风管(图18.38)，通过风管向各个房间送入冷风或热风。当空调机为外接风管型时，制造厂必须注明它在额定风量时的剩余静压[mmH<sub>2</sub>O]，供设计人员平衡风道阻力。

由于空调机的制冷量和输入功率随室内侧的风量和进风湿球温度以及室外侧的风量和进风干球温度变化(水冷式应为水量和进水温度)，制造厂应为用户提供变工况时的性能曲线，以配合选用。图 18.44 为某风冷式冷风型空调机的变工况性能曲线。

图 18.45 为风冷分体式空调机的安装图，室内机通常包括蒸

空调机名义制冷量、制热量的规定工况

表 18.11

| 条 件              | 工况温度[℃] |     | 制冷(制热) | 恒温恒湿 |
|------------------|---------|-----|--------|------|
|                  | 室内侧     | 室外侧 |        |      |
| 名<br>义<br>制<br>冷 | 室内侧     | 干 球 | 27     | 23   |
|                  |         | 湿 球 | 19.5   | 17   |
|                  | 室外侧     | 干 球 | 35     | 35   |
|                  |         | 湿 球 | 24     | 24   |
|                  |         | 进 水 | 30     | 30   |
|                  |         | 出 水 | 35     | 35   |
| 名<br>义<br>制<br>热 | 室内侧     | 干 球 | 21     |      |
|                  |         | 湿 球 | —      |      |
|                  | 室外侧     | 干 球 | 7      |      |
|                  |         | 湿 球 | 6      |      |

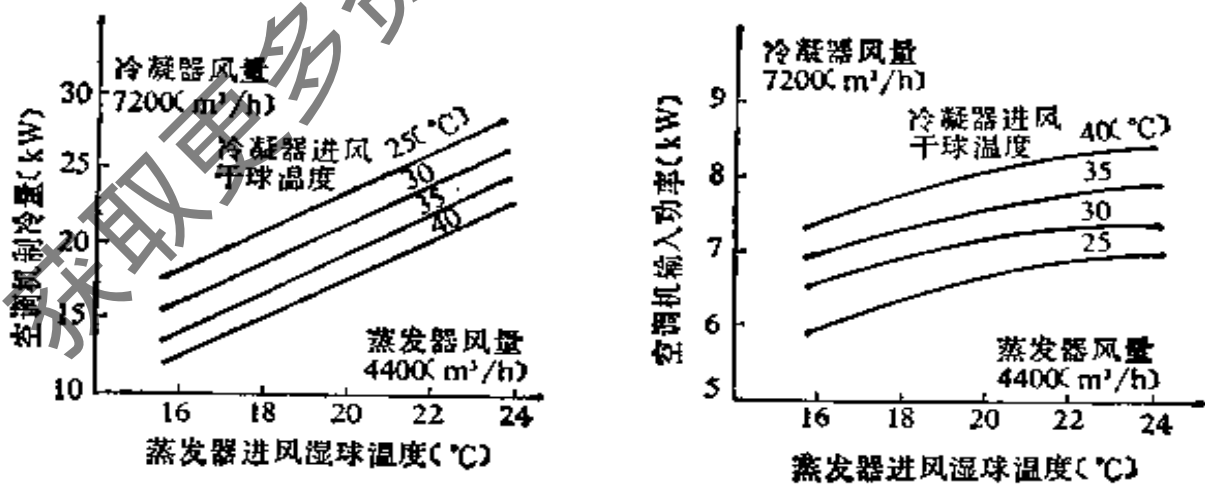


图 18.44 风冷式冷风型空调机的性能曲线

发器、膨胀阀和离心风机(电加热器、加湿器)等, 室外机包括压缩

机、冷凝器和轴流风机等。在现场安装时,还须连接压缩机的吸气管和膨胀阀的供液管,安装和调试应有熟练的冷气工承担。

图 18.46 为水冷整体式空调机的安装图,冷凝器的冷却水用

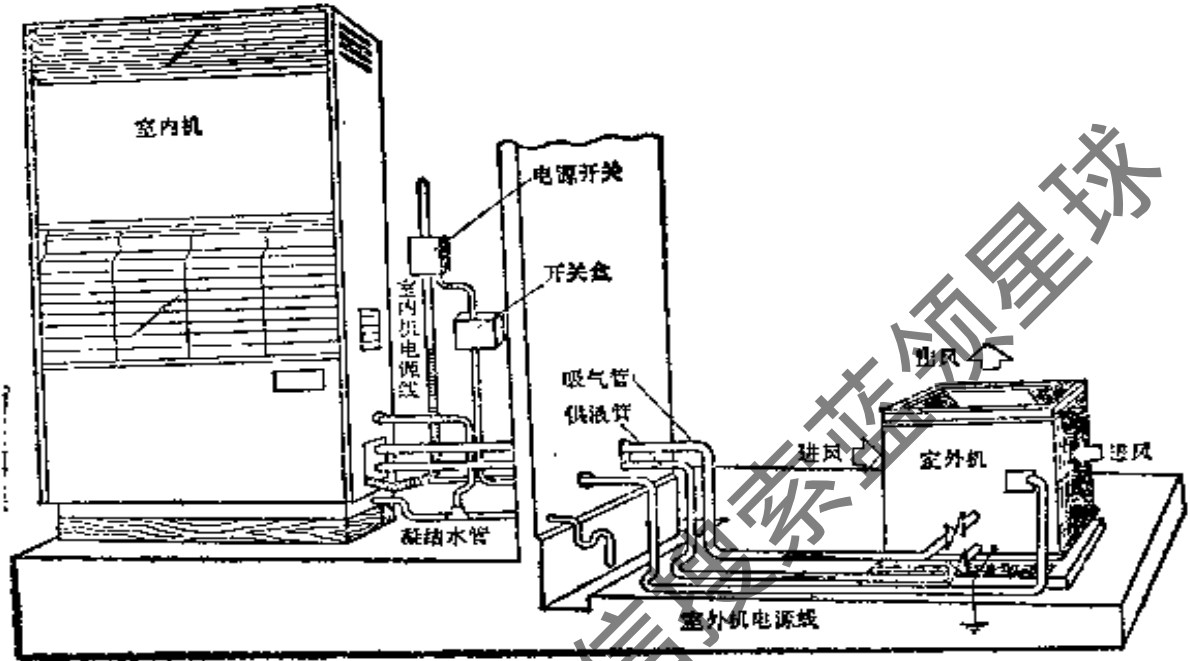


图 18.45 风冷分体式空调机的安装

水泵和冷却塔循环冷却使用。当循环水流量正常后,若空调机无意外故障,用户即可按制造厂的使用说明书要求操作运行。

图 18.47 为外接风管空调机的安装示意图。当这种空调机投入运行时,应对送风系统进行调整,使风量基本保持在设计状态,各空调房间的温湿度达到设计要求。

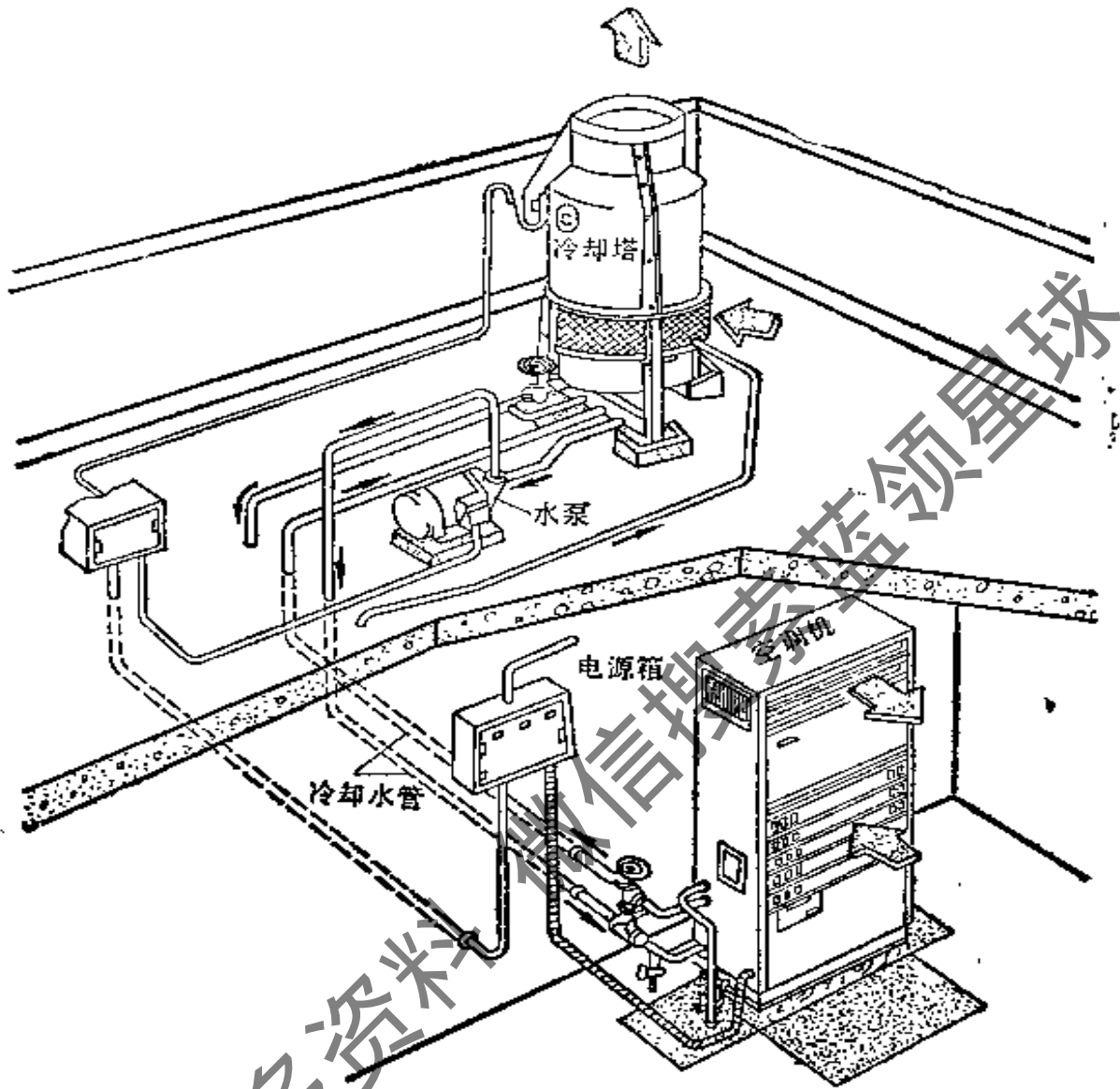


图 18.46 水冷整体式空调机的安装

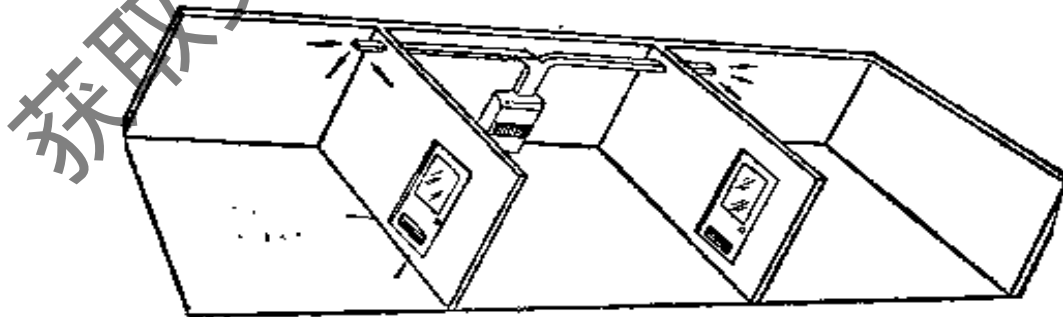


图 13.47 外接风管空调机的安装

## 第 19 章 制冷系统的调试和维护

制冷系统的正确调试和维护,是保证制冷装置正常运行、节省能耗、延长使用寿命的重要环节。对于现场安装的大型制冷系统,调试前首先应按设计图纸要求熟悉整个系统的布置和连接,了解各个设备的结构和性能,以及电器控制和供水系统等。为此,调试时应有冷气和水电等工程技术人员共同参加。对于机组型制冷装置(如冷水机组、空调机组等),用户在调试前应认真阅读厂方提供的产品操作说明书,按操作要求逐步进行,对于中、大型机组,还应由经过专门培训并获得操作证书的冷气工承担。

大型制冷系统或机组的调试目的,除了验证系统和设备是否完好之外,其他工作主要围绕制冷系统内部的清洁、干燥、密封以及制冷剂的充加量进行,因为只有做好上述四项工作,才能保证系统中制冷剂的正常循环,达到设计所需要的冷量。应该指出,目前制冷装置运行中的绝大多数故障均来源于上述工作处理不善,因此,作为制冷技术工程人员和冷气操作工,应牢记这些工作的重要性。

### 19.1 调试前的准备工作

现场安装和连接的大型制冷系统,在调试前应完成以下一些准备工作。

1. 应由设计、施工、用户以及有关上级部门人员组成临时领导小组,根据验收要求,制订工作计划,指挥调试工作的进行。

2. 调试人员应详细了解系统设计,设备构造,检查安装质量。

3. 电路系统应在不带负载的情况下先进行供电和控制电路的通电试验,证明各项动作正确无误。

4. 供水和通风系统应预先单独进行,流量应符合设计要求。
5. 如果发现某些主要设备的出厂时间过长,应根据情况另作检查或拆检(如压缩机等)。
6. 准备必要的测试仪表。
7. 对于氨制冷系统,应准备必要的安全、防毒设备。
8. 空气负荷试车。这是一项单独检查压缩机运行性能的工作,在试车前,应使压缩机的吸、排气管与制冷系统暂时分离。压缩机启动时,从大气中吸入空气,经气缸压缩后仍排入大气,当逐渐关闭排气阀时,压缩机的排气压力升高,当压力升至  $2\sim 3$ [bar] 表压时,停止关阀(阀门切不可关得太小),使压缩机连续运行 3 小时左右。在此期间,压缩机应无异常响声和振动,排气温度和润滑油温应低于规定要求;试调能量卸载装置时,电机电流应有明显变化。试车过程中如出现异常情况,必须立即停车检查。
9. 制冷系统的排污。制冷系统内部必须十分清洁,否则残留在系统内部的垃圾将堵塞节流孔、润滑油道,或者拉毛各摩擦表面。对于氨系统,通常用制冷压缩机使系统中的空气升压,然后在各主要容器(如冷凝器、蒸发器、贮液器、氨液分离器等)的最低部位把系统中的空气急速冲出,使垃圾排出系统。对于氟利昂制冷系统,通常用氮气排污,以防空气中的水分进入系统。

## 19.2 制冷系统的试漏

制冷系统的密封性通常是衡量制冷装置的安装或制造质量的一个重要指标。因为系统泄漏不但造成制冷剂渗漏或外界空气渗入,影响制冷装置正常运行,而且还造成经济损失,污染环境。对于大型制冷系统,由于安装或装配过程中的焊接点和连接头较多,泄漏是难免的,这就要求调试人员对系统认真试漏,查出并排除各泄漏点。系统试漏是整个调试工作中的主要项目,必须认真负责、细致耐心地进行。

### 19.2.1 压力检漏

制冷系统的压力检漏是检查和寻找泄漏点的最有效方法,系

系统中的检漏压力与所用的制冷剂种类、制冷系统的冷却方式和管段部位有关。对高压系统，检漏压力约为设计冷凝压力的1.25倍；低压系统的检漏压力应近似于夏季环境温度下饱和压力的1.20倍（表19.1）。这样，制冷装置无论在运行或停车时就能防止制冷剂泄漏。对于某些制冷系统，如果预先订有验收或检漏标准，则应按规定压力检漏。显然检漏压力也不能任意提高，否则将可能损坏设备，造成意外事故。

制冷系统的检漏压力(表压)

表 19.1

| 制冷剂   | 高压系统 [bar] |       | 低压系统 [bar] |
|-------|------------|-------|------------|
|       | 水冷冷凝器      | 风冷冷凝器 |            |
| R 22  | 18         | 23    | 14         |
| R 12  | 12         | 16    | 10         |
| R 717 | 18         | —     | 14         |

制冷系统中的检漏压力应逐步提高，每升高2~3[bar]时，就应对易漏部位进行一次检查，一旦发现泄漏点，应立即停止升压。在排除泄漏时，通常应放出泄漏部位的高压气体，特别是在补焊情况下，一定要放出高压气体，切不可在高压条件下焊接，以免产生事故。

对于氨系统，可用制冷压缩机使系统逐步升高。对于氟利昂系统，应使用氮气或经过干燥处理的空气升压，以防空气中的水分带入系统。

目前，常用的检漏方法有以下几种。

### 1. 肥皂水检漏

这是目前使用最普遍的检漏方法，特别是中、大型制冷系统，基本上就是利用这种方法寻找泄漏点。肥皂水通常用肥皂或肥皂粉调制而成。肥皂水的溶液不能过稠，否则会因粘度过大而难以



流动,检漏的灵敏性就较差,但调制的溶液也不能过稀,否则会因流动性过大而不易粘附在设备表面上,难以形成气泡。肥皂水可用毛刷直接涂抹在易漏处,观察其部位是否起泡。对于不易直接观察的部位,可利用镜面反射和手电筒检查。检漏结束后,应将所涂的肥皂水擦干,以防腐蚀。

对于中、大型制冷系统,在用肥皂水检漏之后,在18~24小时之内尚须将高压气体封闭在系统内,观察其压力变化,最终确定系统是否还存在泄漏。

当系统内的高压气体与环境温度平衡后,记下系统压力和环境温度,在18~24小时之内,系统内高压气体压力的变化应附合下列公式的计算值

$$P_2 = P_1 \frac{273 + t_2}{273 + t_1} \quad [\text{bar}] \quad (19.1)$$

式中,  $P_1$ 、 $P_2$ ——系统内初、终状态的绝对压力, [bar];

$t_1$ 、 $t_2$ ——系统内初、终状态的温度, [°C]。

【例 19.1】 某制冷系统内检漏高压气体的温度与环境温度平衡后,读得表压力为  $P' = 18$  [bar],环境温度  $t_1 = 25$  [°C],24小时后高压气体表压力降至  $P'_2 = 17.81$  [bar],环境温度  $t_2 = 22$  [°C],试问该系统是否泄漏。

【解】 如果该系统无泄漏,则24小时后的绝对压力  $P_2$  应为

$$P_2 = (18 + 0.98) \frac{273 + 22}{273 + 25} = 18.79 \text{ [bar]}$$

终态压力表读数应为  $(18.79 - 0.98) = 17.81$  [bar],计算值与24小时后的压力表读数相等,因此系统无泄漏。

【例 19.2】 某制冷系统内检漏高压气体的温度与环境温度平衡后,读得表压力为  $P'_1 = 16$  [bar],环境温度  $t_1 = 15$  [°C],24小时后表压升至  $P'_2 = 16.20$  [bar],环境温度  $t_2$  变为 25 [°C],试问该系统是否泄漏。

【解】 该系统无泄漏时,24小时后的绝对压力为

$$P_2 = (16 + 0.98) \frac{273 + 25}{273 + 15} = 17.57 \text{ [bar]}$$

终态压力表读数应为  $(17.57 - 0.98) = 16.59$  [bar],显然,24小时后的压力表读数小于终态表压计算值,系统仍有泄漏,必须继续检漏。

从上述两例计算中可知,系统是否泄漏,不能只观察终态压力的变化,还必须计及环境温度因素。

## 2. 浸水检漏

浸水检漏的灵敏度高于肥皂水检漏，这种方法通常用于小型氟利昂制冷机组。当采用浸水检漏时，应拆除系统中不允许接触水的设备（如各种继电器、电器控制设备等）。浸水最好用清洁的温水，因为温水的表面张力小于冷水，容易形成气泡。若配以较强光源照射时，泄漏部位极易发现。浸水检漏后，应立即用压缩空气将表面吹干，防止腐蚀金属。

## 3. 卤素灯和卤素仪检漏

这是检查氟利昂制冷系统的两个专用装置。因为氟利昂制冷剂中含有氟( $F_2$ )、氯( $Cl_2$ )、溴( $Br$ )等卤素成分，当它们遇到灼热的铜件时，便能产生不同颜色的火焰，从而找出泄漏部位。

图 19.1 为卤素检漏灯的结构图。使用时首先将底盖旋下，向筒内充入一定量的乙醇或甲醇（浓度99%），然后再将底盖拧紧，把灯竖直放平后，再将乙醇倒入酒精盆中，并把它点燃。当盆中的乙醇燃烧时，使筒体中的乙醇加热、气化、升压，待盆中乙醇接近烧完时，即把阀杆微微转动，使筒中气化的乙醇由喷嘴处喷出，并开始燃烧。由于喷嘴上部有一旁通孔，则外部空气将被高速喷射的火焰引入（在软管吸入口听到声响）。当吸气软管吸入含有氟利昂的空气时，上部火焰将产生绿色或蓝色等亮光。根据火焰颜色不但能找出泄漏点，而且可以判别其泄漏的严重程度（表

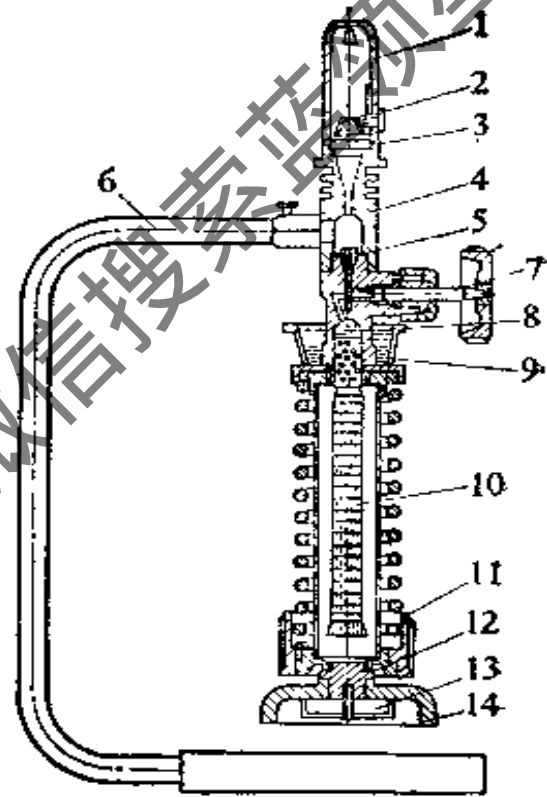


图 19.1 卤素检漏灯结构图

- 1—燃烧口；2—火焰套；3—滤网；4—灯体；5—喷嘴；6—吸气软管；7—阀针；8—滤网；
- 9—酒精盆；10—灯芯；11—胶木座；12—垫片；13—空腔；
- 14—底盖

19.2。应该指出，当卤素检漏灯发生紫色火焰时，应立即停止检查，因为大量氟利昂已分解为剧毒的光气。此时可改用肥皂水继续检漏。

火焰颜色与 R12 泄漏量的关系

表 19.2

| 火焰颜色     | 泄漏量 [g/月] |
|----------|-----------|
| 微绿色      | 24        |
| 淡绿色      | 32        |
| 绿色       | 42        |
| 深绿色      | 114       |
| 紫绿色      | 163       |
| 深紫绿色     | 500       |
| 紫色(气体分解) | 1400      |

卤素检漏灯的喷嘴孔径极小，很容易堵塞，此时可取出藏在底盖腔内的备用通针，利用通针排除喷嘴孔内的垃圾。目前的卤素检漏灯中大都充加了烷等可燃物，使用更为方便。使用卤素检漏灯检漏应细致耐心，平时应积累经验，这样就能提高检漏率，正确判断泄漏量。

图 19.2 为电子管式卤素检漏仪的原理图，它不需要燃烧物料，而是利用氟利昂电离使微安表偏转的检漏仪。它主要由电离室、风扇、变压器、微安表、喷嘴等部件组成。电加热器将阳极加热到 800[℃] 左右，阴、阳极之间加直流高电压，吸入的氟利昂在此环境中电离，并引起微安表指针偏转。为了提高检测精度，采用电子放大器将信号放大。因此，这种卤素检漏仪具有极高的灵敏度（见表 19.3），当用它检漏时，只有在周围空气十分纯净的条件下才能正确无误地找到泄漏点。

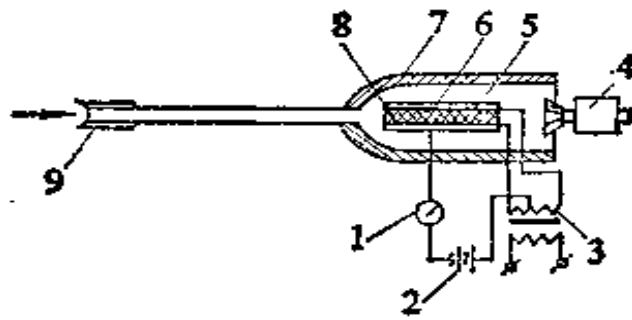


图 19.2 电子管式卤素检漏仪

1—微安表；2—阳极电源；3—变压器；4—风扇；  
5—阳极；6—阴极；7—外壳；8—电热器；9—吸口

泄漏量与检测器的灵敏度

表 19.3

| 泄漏量(g/年) | 电子管式卤素检漏仪 | 卤素检漏灯   | 浸水法           |
|----------|-----------|---------|---------------|
| 1        | 可能        |         |               |
| 10       | 可能        | 熟练者可能检出 | 5~10[s]产生一个气泡 |
| 30       | 可能        | 基本能检出   | 2~3[s]产生一个气泡  |
| 50       | 可能        | 可能      | 连续起泡          |

目前,检测氟利昂泄漏灵敏度最高的设备是氦质谱检漏仪,但该仪器的价格昂贵,经常使用费用也较大,国内极少使用。

### 19.2.2 真空检漏

制冷系统经压力检漏合格后,还需要进行真空检漏,因为有些部件可能存在单向泄漏,只有经过压力和真空检漏均符合要求后,才能确保制冷系统的密封性。另外,系统抽空还能去除水分,特别是氟利昂系统,利用抽空干燥是机组调试过程中的一项重要环节。系统抽空通常有两种方法。

#### 1. 真空泵抽空

制冷系统应该用真空泵抽空,特别是封闭式压缩机的制冷系统,一定要用真空泵抽空。这不但能达到极高的真空度,去除系统中的空气和水分,而且能保护压缩机和电机。当大气压力为760[mmHg]时,系统的真空度应抽到765[mmHg]以上(即系统

绝对压力为 5[mmHg] 以下), 经过大气压和环境温度变化修正后, 对于小型制冷机组的真空度应基本无变化, 中、大型系统的真空度回升应不超过 5[mmHg]。

应该指出, 真空泵长期使用后, 系统中的水蒸汽可能进入真空泵的润滑油中, 影响其抽空能力, 因此润滑油须经常更换。

【例 19.3】 当大气压力为 760[mmHg], 环境温度为 25[°C], 制冷系统抽得的真空度为 756[mmHg], 24 小时后, 大气压力变为 755[mmHg], 温度降至 20[°C], 制冷系统真空表的指示值变为 751[mmHg], 试问系统的真空度是否回升。

【解】 制冷系统的绝对压力  $P_1 = 760 - 756 = 4$ [mmHg]

温度变化使系统内部的绝对压力变为(按公式 19.1 计算)

$$P_2 = P_1 \frac{273 + t_2}{273 + t_1} = 4 \times \frac{273 + 20}{273 + 25} = 3.93$$
[mmHg]

大气压力变化使系统中真空度  $P_{02}$  的变化为

$$P_{02} = 755 - 3.93 = 751.07$$
[mmHg]

计算结果表明, 24 小时后, 制冷系统的真空表指示值 (751[mmHg]) 与计算值 (751.07[mmHg]) 基本相等, 系统密封性良好。

## 2. 制冷压缩机抽空

图 19.3 为制冷系统用压缩机抽空的操作图。由图可知, 把压缩机的排气三通阀关闭, 使排气旁通孔与大气相通, 或者接一根排气管通向油杯, 系统中的其他阀门全部呈开启状态。这样, 当压缩

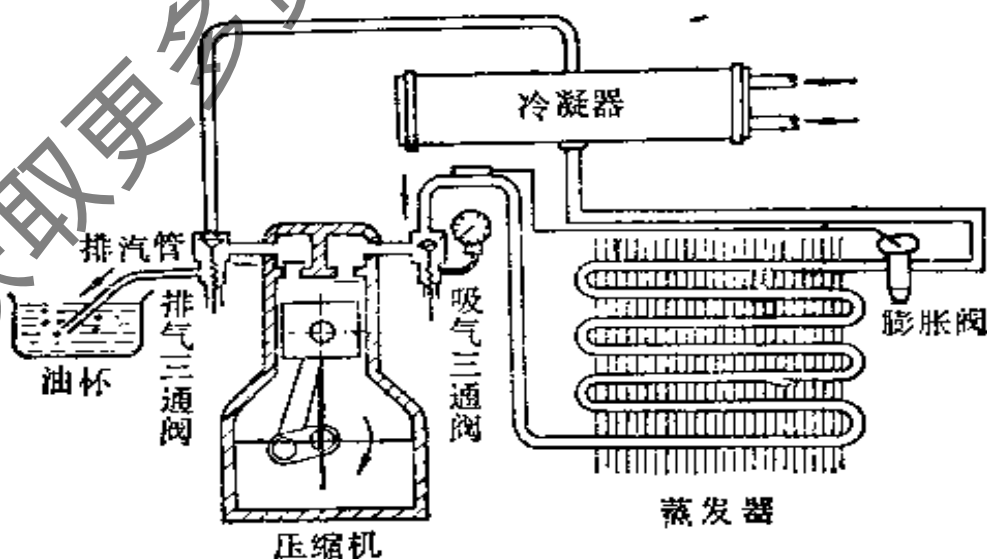


图 19.3 制冷压缩机抽空操作图

机运行时，就能把系统中的空气排至大气。当空气通过油杯排出时，应抽至油杯中基本无气泡为止。对于大型压缩机，由于活塞排量较大，而旁通孔直径较小，因此当压缩机刚启动抽气时，因系统内空气量较多，此时排气阀不能全部关闭，以防排气压力过高，损伤阀片及其他部件。只有当系统抽至一定真空度时，才能将排气阀逐渐关紧。

由于制冷压缩机的抽空能力较真空泵差，而且排气腔中的空气无法排出，为了克服这一缺点，可在系统抽至一定真空度时，充加适量制冷剂（氟利昂制冷系统），然后再用压缩机抽空，用这种置换方法可以进一步排除残留在系统中的空气。

对于用油泵输送润滑油的压缩机，由于系统抽空后油面压力极低，油泵供油困难，可能导致摩擦面的损坏，必须引起注意。

### 19.3 制冷剂的充加和制冷系统的调试

当制冷系统经压力和真空检漏完全符合要求后，就可以着手充加制冷剂，并进行制冷系统的全面调试工作。

#### 19.3.1 制冷剂的充加

目前，中、小型制冷机组在出厂前均已按规定充足制冷剂，现场安装后，经外观检查如果未发现意外损伤，可直接打开有关阀门（应先阅读厂方的使用说明书）开机调试。如果发现制冷剂已经漏完或者不足，应首先找出泄漏点并排除泄漏现象，然后按产品使用说明书要求，加入规定的制冷剂及其充加量。

对于现场安装的非定型制冷系统，只能由调试人员估计确定。制冷剂的初次充加量不但与系统大小有关，而且与制冷设备的形式、制冷剂循环方式、制冷剂种类以及用冷温度等许多因素有关。因此，制冷剂充加量只能在估算的基础上通过逐步调试才能最终确定。表 19.4 所示的各制冷设备充液量仅供参考。

【例 19.4】某制冷系统中的贮液器容积为  $V=0.1[\text{m}^3]$ ，环境温度为  $20[^\circ\text{C}]$ ，试求该容器中 R12 的充加量。

制冷系统中各个设备的充液量(按所占容积的百分比计)

表 19.4

| 设备名称 | 充液量容积(%) |     | 设备名称    | 充液量容积(%) |     |
|------|----------|-----|---------|----------|-----|
|      | 氨        | 氟利昂 |         | 氨        | 氟利昂 |
| 冷凝器  | 15       | 15  | 中间冷却器   | 30       | 30  |
| 油分离器 | 15       | 15  | 蒸发器墙排管  | 60       | 30  |
| 贮液器  | 50       | 50  | 蒸发器顶排管  | 50       | 20  |
| 液管   | 100      | 100 | 低温冷风蒸发器 | 50       | 20  |
| 过冷器  | 100      | 100 |         |          |     |

【解】 根据  $t = 20[^\circ\text{C}]$ , 查 R12 的饱和蒸气表, 求得 R12 的饱和液体比容为  $v = 0.753[1/\text{kg}]$ , 则贮液器中的 R12 充加质量为

$$M = 0.5V\rho = 0.5 \times 0.1 \times \frac{1}{0.753 \times 10^{-3}} = 66.4[\text{kg}]$$

整个系统中的制冷剂充加量, 等于各个设备中的充加量之和。在实际充加时, 当制冷剂充加量接近计算值的 80% 左右, 即可开机调试, 如果在调试过程中未出现制冷剂量不足的现象, 可以暂停充加, 继续调试。应该强调指出, 任何制冷系统, 过多地充加制冷剂不但会增加费用, 而且对运行能耗、设备安全等均可能带来不利影响。如果一旦发生意外泄漏事故, 过多的制冷剂贮藏充加量还会给环境带来更大的污染。

在充加制冷剂前, 应预先备有足够的制冷剂。对于大型制冷系统, 由于充入的制冷剂量较多, 开始时可直接从贮液器或冷凝器上的专用阀门或三通阀处充入。由于系统处于真空状态, 钢瓶中制冷剂与系统压差较大, 当打开阀门时(应先用制冷剂吹出连接管中的空气), 制冷剂迅速流入系统当系统中的压力与钢瓶中的制冷剂压力相平衡而充加量仍未达到要求时, 此时可关闭有关阀门, 将

钢瓶移至压缩机吸入口连接,并启动压缩机,利用压缩机把瓶中制冷剂送入系统。但在此之前必须向冷凝器供应冷却水,否则将会使压缩机排气压力骤增,产生意外事故。另外,钢瓶的阀门不能开得过大,必须适当控制,以防大量液体制冷剂进入气缸,产生严重的液击现象。

### 19.3.2 制冷系统的调试

当制冷剂充加结束后,还须对系统进行一次泄漏复查,确实证明系统无泄漏后才可进行负荷试车。在负荷试车之前或试车过程中,应特别注意以下几点。

1. 检查制冷系统中的各个阀门,是否处在正常的开启状态,特别是排气截止阀,切勿关闭。

2. 打开冷凝器的冷却水阀门,若为风冷式冷凝器,则应开启风扇,检查转向。水量和风量应符合要求。

3. 电器控制线路应预先单独进行试验,启动前应注意供电电压是否正常。

4. 压缩机曲轴箱油面是否处在正常位置,一般应保持在视油镜的水平中心线位置。

5. 对制冷压缩机进行点启动,检查是否正常。开启式压缩机的旋转方向是否正确。

6. 当压缩机启动后,应查看高、低压压力表指示值,是否在压缩机正常运行的压力范围之内。

7. 查看油压表指示值。带有能量卸载装置的压缩机,油压指示值应比吸气压力高 $1.5\sim 3.0$ [bar],没有卸载装置的压缩机,油压指示值比吸气压力高 $0.5\sim 1.5$ [bar]。否则应对油压调整。

8. 倾听膨胀阀是否有制冷剂流动声,观察膨胀阀后的管路是否有正常的结露(空调)和结霜(冷库)现象。

9. 带有能量卸载的压缩机,运行初期应全负荷工作,这可以根据手摸气缸盖的温度而了解:缸盖温度较高,气缸在工作;缸盖温度偏低,则气缸已卸载。当进行卸载试验时,电机电流应有明显下降。



10. 制冷系统中装设的安全保护装置,如高、低压力继电器,油压压差继电器,冷却水和冷冻水断水继电器,冷冻水结冻保护继电器以及安全阀等设备,在调试阶段应对其动作进行整定,以免产生误动作或不动作。

11. 查看其他各种仪表指示值,是否在规定范围之内,如出现异常情况,应立即停机检查。

制冷系统调试时的常见故障是膨胀阀或干燥过滤器堵塞(特别是中、小型氟利昂制冷机组)。堵塞的主要原因是系统中的垃圾及水分未处理干净,或者是充加的氟利昂制冷剂含水量不符合标准。因此,在制冷系统的安装和调试前,一定要做好系统内部的清洁和干燥工作。如果前期工作不认真进行,在调试期间将会增加许多工作量,而且会给制冷装置以后运行带来隐患。

## 19.4 制冷装置的常见故障和排除方法

制冷装置的故障主要来自电路系统和制冷系统两方面,故障的最终结果必然导致压缩机无法启动、制冷量下降或者设备损坏。正确判断各种故障产生的原因以及采取合理的排除方法,这不但涉及电器和制冷技术方面的理论知识,更重要的是还须具备实践技能,只有通过长期的实践工作,才能获得维修制冷装置的丰富经验。

### 19.4.1 电路系统的常见故障和排除方法

电路系统出现故障通常会导致电机无法启动,这类故障应从电路电压以及与电机启动有关的控制线路及其设备检查。

1. 电源电路是否供电,电源开关是否闭合,熔断丝是否完好等。这类故障可用电笔或万用电表检查。

2. 接入电机控制线路中的各个继电器和控制器等电器设备的触点尚未按正常要求闭合,因此电机的供电线路未接通,电机无法启动。这些电器设备主要有热保护继电器,高、低压力继电器,油压压力继电器,温度继电器以及过电流保护器等。触点未闭合的原因可能是制冷压缩机在运行过程中出现某种故障而跳开,

或者是设定值过高或过低而跳开。遇到这类故障应首先使触点复位,观察压缩机及整个制冷系统的运行工况,判断触点跳开原因,并采用相应措施加以排除。如果是电器设备损坏而无法动作,则应修理或更换。

3. 如供电后熔断丝烧毁,而其他电器设备和电路并无故障,则多数情况是电机接线柱短路或电机已烧毁。此时可用万用表或兆欧表检查。如果各相电路出现短路或电阻值相差甚大,说明电机已经损坏。

在检查电机的控制线路故障时,首先应熟悉控制线路以及各电器设备的工作原理,切不可盲目进行,以免造成更大事故。

### 19.4.2 制冷系统的常见故障和排除方法

制冷系统常见故障的项目很多,现将各种故障产生的原因及其排除方法列在表 19.5 和表 19.6 中供参考。应该指出,有些制冷系统的故障可能是由于几种原因产生,必须对制冷装置运行采取综合分析,才能找到有效的解决办法。寻找故障原因及其采取的排除方法,是一件实践性很强的工作,必须通过实际操作才能真正学到。

制冷压缩机的常见故障及其排除方法

表 19.5

| 故障情况      | 主要原因  | 排除方法  |
|-----------|---|---|
| 压缩不能正常启动  | 1. 电路系统故障<br>2. 压缩机“咬煞”<br>3. 排气阀片漏气,造成曲轴箱压力过高  | 1. 按 19.4.1 电路系统常见故障及其排除方法检查<br>2. 按一定操作要求拆开压缩机,检查其传动机构<br>3. 拆下气缸盖,研磨阀片和阀座的密封线 |
| 压缩启动后立即停车 | 1. 排气阀门未打开,冷却水量未开足,高压继电器动作<br>2. 吸气压力过低,低压继电器动作 | 1. 打开排气阀门,开大冷却水量<br>2. 制冷剂量过少,膨胀阀未能打  |

续表 19.5

| 故障情况         | 主要原因   | 排除方法  |
|--------------|--|---|
|              | 器动作<br>3. 润滑油压过低,油压压差<br>继电器动作<br>4. 电机过载,热继电器或过<br>电流保护器动作          | 开或严重堵塞<br>3. 检查引起油压过低的原因(如<br>油路堵塞、润滑油量过少。曲轴箱中<br>制冷剂含量过多、油泵损坏等)并采取<br>相应措施排除<br>4. 电源电压过低,冷负荷过大,<br>制冷剂充加量过多 |
| 曲轴箱内有敲击<br>声 | 1. 连杆、曲轴等传动机构的<br>摩擦偶合件间隙过大<br>2. 轴承钢珠磨损或轴承架<br>断裂<br>3. 曲轴箱内有异物     | 1. 拆下整修或更换<br>2. 拆下更换<br>3. 打开曲轴箱取出,并检查异物<br>的来源  |
| 能量调节机构失<br>灵 | 1. 油压过低,无法推动油活<br>塞工作<br>2. 油活塞或转动环卡住<br>3. 油分配阀装配不当                 | 1. 检查油压过低的原因,并采取<br>措施排除<br>2. 拆下清洗,更换润滑油<br>3. 用通气法检查各工作位置是<br>不正确   |
| 阀片漏气或断裂      | 1. 压缩机因液击使阀片变<br>形或断裂<br>2. 阀片安装位置不当                                 | 1. 调整膨胀阀开度或系统中的<br>制冷剂充加量,避免产生液击<br>2. 更换阀片或重新安装  |
| 气缸拉毛         | 1. 吸入气体中含有过多杂<br>质<br>2. 活塞、活塞环与气缸的间<br>隙尺寸不正确<br>3. 润滑粘度太低或含有杂<br>质 | 1. 检查和清洗压缩机的过滤器,<br>并采取措,清除系统中的杂质<br>2. 按要求间隙重新装配<br>3. 更换符合粘度要求的润滑油  |

| 故障情况              | 主要原因  | 排除方法  |
|-------------------|---|---|
| 吸气压力过低且<br>吸气温度过高 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 膨胀阀或过滤干燥器堵塞,制冷剂循环量不足</li> <li>2. 分液器部分管路堵塞</li> <li>3. 制冷剂充加量过少或已泄漏</li> <li>4. 膨胀阀容量过小或失控</li> </ol>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 清洗膨胀阀或过滤干燥器</li> <li>2. 拆下分液器,通气试验</li> <li>3. 寻找泄漏点,补足制冷剂</li> <li>4. 更换合适的膨胀阀</li> </ol>  |
| 吸气压力和吸气<br>温度均过低  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 蒸发器面积过小</li> <li>2. 蒸发器结霜或积灰过厚</li> <li>3. 温度继电器失控,被冷却介质已低于设计温度</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 增大蒸发器面积</li> <li>2. 清除蒸发器表面的结霜积灰</li> <li>3. 检修或更换温度继电器</li> </ol>  |
| 吸气压力和吸气<br>温度均过高。 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 低压吸气阀片损坏</li> <li>2. 冷负荷过大</li> <li>3. 压缩机吸气滤网堵塞</li> </ol>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换吸气阀片</li> <li>2. 适当减少冷负荷。如果仍不能降低吸气压力和温度,可能由于选用的制冷装置冷量过小</li> <li>3. 拆下清洗</li> </ol>   |
| 排气压力过高            | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 冷却水或风量不足</li> <li>2. 冷却水温或风温过高</li> <li>3. 冷凝器传热面积过小</li> <li>4. 冷凝器传热面积被污染</li> <li>5. 制冷系统内有空气</li> <li>6. 制冷剂充加量过多</li> <li>7. 冷负荷过大</li> <li>8. 油分离器部分堵塞</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 增大水量或风量</li> <li>2. 检查原因,降低水温和风温。</li> <li>3. 适当增大传热面积或更换冷凝器</li> <li>4. 清洗传热面积</li> <li>5. 按操作要求排除空气</li> <li>6. 回收部分制冷剂</li> <li>7. 适当减少冷负荷</li> <li>8. 排除堵塞</li> </ol> |

续表 19.6

| 故障情况   | 主要原因  | 排除方法  |
|--------|---|---|
| 排气压力过低 | 1. 冷却水温或风量过大<br>2. 冷却水温或风温过低<br>3. 制冷剂循环量过少<br>4. 高压或低压吸气阀片损坏 | 1. 适当调小水量或风量<br>2. 适当调小水量或风量<br>3. 检查膨胀阀、过滤干燥器是否堵塞,或者制冷剂泄漏<br>4. 更换阀片 |

制冷装置在运行中的故障可以通过压缩机的排气压力和吸气压力的大小以及吸气温度的高低进行检查。为此,操作管理人员首先应该能区别正常和非正常的压力和温度,从而确定制冷系统是否有故障,以及产生故障的原因,并采取有效的排除方法。制冷装置运行中出现故障时,通常会导致制冷量下降,因此,当制冷装置的制冷量低于设计要求,或者达不到以往的降温速度时,就应该对整个系统的运行情况进行全面检查。

## 19.5 制冷装置的维护和保养

制冷装置的维护和保养内容包括日常保养和定期检修。它是保证制冷装置长期正常运行,延长使用寿命,节省制冷能耗的有效措施。对于大型制冷装置,不但要有每班运行记录,而且要建立维修技术档案。完整的资料有助于发现故障隐患,及早采取措施,以防故障出现。

制冷装置应根据平时运行记录以及运行总时间,决定检修和保养等级(小修、中修和大修),检修和保养的主要内容应包括以下几方面。

### 1. 压缩机

压缩机是制冷装置中的主要运动部件,通常也是最容易产生故障的设备。特别是压缩机的吸、排气阀片和阀板(或阀座),传动

机构的各磨擦偶合件,轴封装置和齿轮油泵等,均应认真检查。对于封闭式制冷压缩机,在夏季使用前还应测量其接线柱与机壳之间的绝缘值,通常应在  $5[M\Omega]$  以上。

## 2. 冷凝器和蒸发器的清洗

对于由空气经过的风冷冷凝器和直接蒸发式冷却器,因片距较小,空气中的灰尘极易在肋片之间的缝隙中积聚,使风量减少,热阻增大,影响传热效果。因此,在工作一段时间后,根据积灰情况需用压缩空气或钢丝刷清理。

水冷式冷凝器的冷却水一般采用自来水经冷却塔循环使用,或者直接来源于江河湖泊,水质相差较大。当水中的钙盐和镁盐含量较大时,极易分解和沉积在冷却水管的壁面上而形成水垢,影响传热。结垢过厚还会使冷却水的流通截面缩小,水量减少,冷凝压力上升。因此,当使用的冷却水的水质较差时,对冷却水管每年至少清洗一次,去除管中的水垢及其他污物。清洗冷凝器水管的方法通常有以下几种:

(1) 用钢丝刷帚拉刷(可用人工或机械方法进行);

(2) 根据结垢情况,也可考虑用特制刮刀滚刮(铜管最好不用此法);

(3) 用清洗剂或一定浓度的盐酸循环冲洗,或浸注在冷却水管中,待 24 小时后再重新更换溶液,直至洗净为止。

## 3. 更换润滑油

压缩机中的润滑油经长期使用后,油质变差,油中的颗粒性杂质、水分和酸量(氟利昂制冷系统)增加。特别是制冷装置的初期运行阶段,应经常观察和检查油质,一旦发现问题,应及时更换。

## 4. 清洗过滤器、更换干燥剂

这是保证制冷剂进行正常循环的重要措施,由于氟利昂制冷剂与水互不溶解,因此保持系统内部干燥是十分重要的。

## 5. 检查自控元件

自控元件的动作应灵敏、正确,如果发现有严重锈蚀等现象,

应加以清理或更换。

#### 6. 其他部分

在制冷装置停机检查期间，对于以前运行中曾出现过故障的部位应重点检查。与制冷装置运行的其他设备，如冷却塔、水泵、风机等也应进行检查和保养，以保证制冷装置的正常运行。

制冷装置经拆修后，应对整个或部分系统重新进行压力检漏，特别是水冷式冷凝器，如果使用刮刀或酸洗方法去垢，则应进行耐压强度试验，确保制冷装置运行的安全。

获取更多资料 微信搜索蓝领星

## 第20章 食品冷藏

食品的低温冷藏是制冷技术应用的一个重要部分。实验证明,当温度在 $25\sim 35[^\circ\text{C}]$ 时,食品因微生物(细菌、霉菌和酵母菌的生命活动)的侵入,其腐败作用进行得最剧烈,随着温度降低,微生物的活动也随之变慢。在低温、高湿条件下,不但能停止食品的腐败,而且还能降低其干缩速率,冷冻还有助于延缓食品的脂肪氧化和保持果蔬的维生素。由于冷藏能有效地延长食品变质时间,保持其新鲜度和色、香、味,因此,在保存食品的所有方法中(如盐腌、熏腊、蜜饯、罐装等),冷藏依然是使用最为普遍和有效的方法。

低温冷藏虽然能较好地保存食品,解决食品(特别是植物类食品)的季节性生产与全年均匀供给之间的矛盾,但冷藏设备投资较高,运行耗能也较多,目前仅在一些经济发达国家有较完整的设备,大多数发展中国家尚不理想。据联合国粮农组织统计,目前全世界每年生产易腐食品在10亿吨以上,其中只有25%的食品得到冷藏加工,在渔业和运输业中的损耗每年达数百万吨以上,收获的果蔬类食品有30~40%没有得到妥善保持。在我国,人均冷藏容量仅 $2[\text{kg}]$ 左右,而美国已接近 $90[\text{kg}]$ 。我国食品的冷藏贮存运输和销售尚处在起步阶段,有待今后大力发展。

食品冷藏的完整结构应该是从原料加工,直至消费者食用前均处在低温条件下保存,该过程必然包括食品加工、包装、运输、分配、销售以及家庭冷藏等环节,由这些环节组成的完整结构通常称为食品的“冷藏链”(简称“冷链”),见图20.1。

### 20.1 食品冷藏库

食品冷藏库是冷藏链中的重要环节,它一般可分为生产性、分



配性和销售性冷藏库三类。

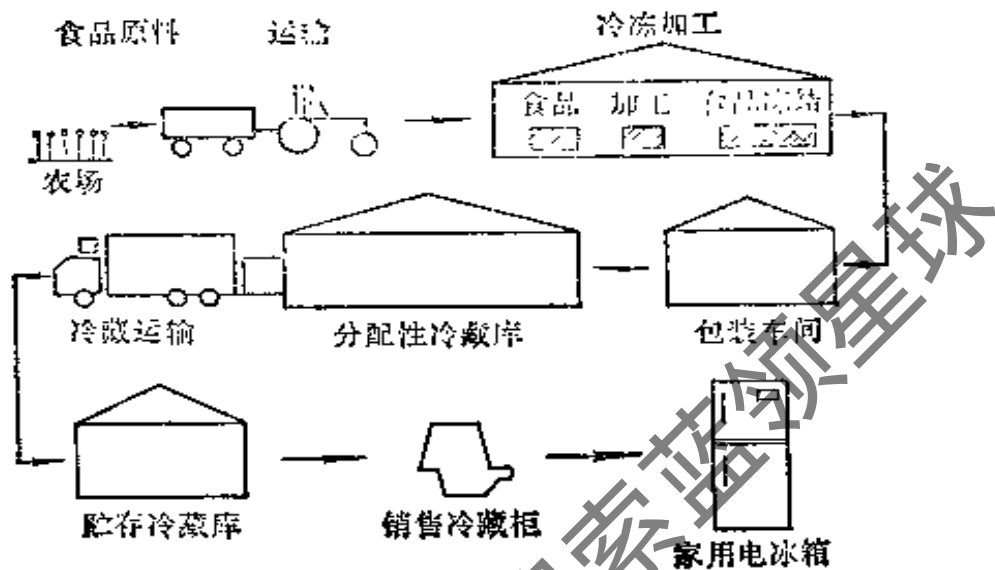


图 20.1 食品冷藏链示意图

**20.1.1** 生产性冷藏库主要建立在货源集中的产区，故又称产地冷库。它既作为肉、禽、鱼、蛋、果蔬等食品的冷冻加工使用，又要具备短期冷藏的能力，它应容纳整个生产季节的产品，或者根据最大冷藏运输能力确定库容量。由于食品冻结过程中所需冷量较大，因此生产性冷藏库通常具有较大的冻结能力，冷藏设备的投资也较高。

**20.1.2** 分配性冷藏库一般建立在大中城市，水陆交通枢纽和人口较集中的工矿区，作为市场供应，中转运输和贮存食品之用。其特点是冻结量小，冷藏量大，而且要考虑多种食品的不同冷藏要求。由于冷藏量大，进出货物流比较集中，因此要求库内运送通畅，吞吐迅速。

**20.1.3** 销售性冷藏库一般建在城市的大型副食品商店内，供临时贮存和销售食品之用，它的库容量应根据食品的每月销售量和每季度的周转数确定。

食品低温冷藏的期限与食品品种和冷藏的温湿度有关，因此食品在冷藏期间必须加强库房管理，定期测量库房内的温湿度，及

处理到期食品,以保证食品质量和消费者的健康。

## 20.2 食品冷加工和冷藏条件

食品冷加工的温度应根据食品的品种决定,对于果蔬类食品,可直接冷却到接近其冰点温度,然后再冷藏在规定的高温条件下(见表 20.1)保存。对于肉禽鱼类食品,可以从常温先预冷到 4 [°C]左右,然后进入结冻室冻结(称二次冻结),也可以直接进入结冻室冻结(称一次冻结)。由于一次冻结速度较快,食品的干耗(食品中的水损失量)较小,耗电量和搬运劳动量也小于二次冻结,因此目前肉禽鱼类食品大都采用一次冻结。但是,由于在一次冻结中食品直接进入低温结冻室,室内温度回升较快,因此,在设计和选配制冷设备时,要充分考虑因室温升高使蒸发温度上升对制冷压缩机、电机功率、冷凝器和蒸发器传热面积的影响。

部分食品的主要物理特性和冷藏条件

表 20.1

| 序号 | 食品名称 | 含水量 [%] | 冰冻点 [°C] | 贮藏容积 [m <sup>3</sup> /t] | 贮藏温度 [°C] | 贮藏湿度 [%] | 贮藏时间 [月] |
|----|------|---------|----------|--------------------------|-----------|----------|----------|
| 1  | 苹果   | 85      | -2       | 7.5                      | -1~1      | 85~90    | (2~7)    |
| 2  | 杏子   | 85.4    | -2       | 7.5                      | -0.5~1.6  | 78~85    | 7~14     |
| 3  | 香蕉   | 75      | -1.7     | 15.6                     | 11.7      | 85       | 14       |
| 4  | 櫻桃   | 82      | -4.5     | 15.6                     | 0.5~1     | 80       | 7~21     |
| 5  | 椰子   | 83      | -2.8     | 7.5                      | -4.5      | 75       | (12)     |
| 6  | 葡萄   | 82      | -4       | 9.4                      | -1~3      | 85~90    | (1~4)    |
| 7  | 柠檬   | 89      | -2.1     | 9.4                      | 5~10      | 85~90    | (2)      |
| 8  | 柑桔   | 86      | -2.2     |                          | 1~2       | 75~80    | (1~3)    |
| 9  | 桔子   | 90      | -2.2     | 9.4                      | 0~1.2     | 85~90    | 56~70    |
| 10 | 桃子   | 86.9    | -1.5     | 7.5                      | -0.5~1    | 80~85    | 14~28    |
| 11 | 梨    | 83      | -2       | 7.5                      | 0.5~1.5   | 85~90    | (1~6)    |

续表 20.1

| 序号 | 食品名称 | 含水量<br>[%] | 冰冻点<br>[°C]   | 贮藏容积<br>m <sup>3</sup> /t | 贮藏温度<br>[°C] | 贮藏湿度<br>[%] | 贮藏时间<br>[月] |
|----|------|------------|---------------|---------------------------|--------------|-------------|-------------|
| 12 | 菠萝   | 85.3       | -1.2          | 8.1                       | 4~12         | 85~90       | 14~28       |
| 13 | 李子   | 86         | -2.2          | 8.1                       | -4~0         | 80~95       | 21~33       |
| 14 | 杨梅   | 90         | -1.3          |                           | -0.5~1.5     | 75~85       | 7~10        |
| 15 | 西瓜   | 92.1       | -1.6          |                           | 2~4          | 75~85       | 14~21       |
| 16 | 洋白菜  | 85         |               |                           | 0~1.5        | 90~95       | 21~28       |
| 17 | 卷心菜  | 91         | -0.5          | 15.6                      | 0~1          | 85~90       | (1~3)       |
| 18 | 芹菜   | 94         | -1.2          | 9.4                       | -0.6~0       | 90~95       | 2~4)        |
| 19 | 扁豆   | 89         |               |                           | 1~1.5        | 85~90       | 8~10        |
| 20 | 黄瓜   | 96.4       | -0.3          | 7.5                       | 2~7          | 75~85       | 10~14       |
| 21 | 韭菜   | 88.2       | -1.4          |                           | 0            | 85~90       | (1~3)       |
| 22 | 莴苣   | 94.8       | -0.3          |                           | 0~1          | 85~90       | (1~2)       |
| 23 | 洋葱   | 87.5       | -1            | 9.4                       | 1.5          | 80          | (3)         |
| 24 | 青豌豆  | 71         | -1.1          | 8.1                       | 0            | 80~90       | 7~21        |
| 25 | 萝卜   | 93.6       | -2.2          | 8.1                       | 0~1          | 85~95       | 14          |
| 26 | 菠菜   | 92.7       | -0.9          |                           | 0~1          | 90          | 10~14       |
| 27 | 西红柿  | 94         | -0.9          |                           | 1~5          | 80~90       | 7~21        |
| 28 | 干大蒜  | 74         | -4            |                           | 0~1          | 75~80       | (6~8)       |
| 29 | 南瓜   | 90.5       | -1            |                           | 0~3          | 80~85       | (2~3)       |
| 30 | 土豆   | 77.8       | -1.8          | 12.5                      | 3~6          | 85~90       | (6)         |
| 31 | 猪肉   | 35~42      | -2.2~<br>-1.7 |                           | 0~1.2        | 85~90       | 3~10        |
| 32 | 冻猪肉  |            |               |                           | -18~-24      | 85~90       | (2~3)       |
| 33 | 羊肉   | 60~70      | -1.7          |                           | 0            | 80          | 10          |
| 34 | 冻羊肉  |            |               | 6.2                       | -12~-18      | 80~85       | (3~3)       |
| 35 | 鲜家禽  | 74         | -1.7          | 6.2                       | 0            | 80          | 7           |
| 36 | 冻家禽  | 60         |               | 6.2                       | -16~-30      | 80          | (3~12)      |

续表20.1

| 序号 | 食品名称 | 含水量<br>[%] | 冰冻点<br>[°C]  | 贮藏容积<br>[m <sup>3</sup> /t] | 贮藏温度<br>[°C] | 贮藏湿度<br>[%] | 贮藏时间<br>[月] |
|----|------|------------|--------------|-----------------------------|--------------|-------------|-------------|
| 37 | 鲜鱼   | 73         | -1~-2        | 12.5                        | -0.5~4       | 90~95       | 7~14        |
| 38 | 冻鱼   |            |              | 8.1                         | -12~-20      | 90~95       | (8~10)      |
| 39 | 干鱼   | 45         |              | 7.5                         | -9~0         | 75~80       | (3)         |
| 40 | 猪油   | 46         |              | 6.0                         | -18          | 90          | (12)        |
| 41 | 火腿   | 47~54      | 1.7~<br>-2.2 |                             | 0~1          | 85~90       | (7~12)      |
| 42 | 牛奶   | 87         | -2.8         |                             | 0~2          | 80~95       | 7           |
| 43 | 奶粉   |            |              | 7.5                         | 0~1.5        | 70~80       | (1~6)       |
| 44 | 人造奶油 | 17~18      |              | 6.0                         | 0.5          | 80          | (6)         |
| 45 | 奶油   | 59         |              | 7.5                         | 0~2          | 80          | 7           |
| 46 | 巧克力  | 1.6        |              | 6.6                         | 4.5          | 75          | (6)         |
| 47 | 酪乳   | 87         | -1.7         | 9.4                         | 0            | 85          | (1)         |
| 48 | 鲜蛋   | 70         | -2.2         |                             | -0.5~-1      | 80~85       | (8)         |
| 49 | 蛋粉   | 6          |              | 6.9                         | 2.0          | 极小          | (6)         |
| 50 | 冰蛋   | 73         | -2.2         |                             | -18          |             | (12)        |
| 51 | 冰淇淋  | 87         |              | 18.7                        | -20~-30      | 85          | 14~84       |
| 52 | 兔肉   | 60         | -1.7         |                             | 0~1          | 80~90       | 5~10        |
| 53 | 冻兔肉  | 60         |              | 6.9                         | -12~-24      | 80~90       | (6)         |
| 54 | 啤酒   | 89~91      | -2           | 6.2~10.6                    | 0~5          |             | (6)         |
| 55 | 葡萄酒  |            |              | 7.5                         | 10           | 85          | (6)         |

### 20.3 食品的冻结和冷藏方法

食品冻结的目的是移去食品中的显热和潜热，在规定时间内达到冻结温度，然后送往冷藏室贮藏。冻结室的温度通常在  $-20 \sim -30$  [°C]，食品冻结的方法有以下几种。

### 20.3.1 空气自然对流法(图 20.2)

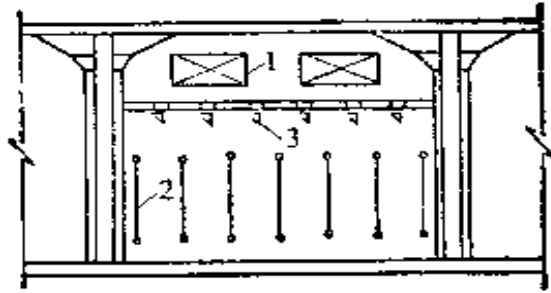


图 20.2 空气自然对流冻结法

1—顶管； 2—墙管； 3—吊轨

此种方法是在结冻室的顶部或墙侧安装光滑的蒸发排管，也有装在吊轨之间。利用空气自然对流冻结的冻结时间较长，通常为 48~72 小时，为了加强冷却效果，有时在室内也装轴流风机。目前这种方法仅用在小型结冻室。

### 20.3.2 强制空气循环法(图 20.3)

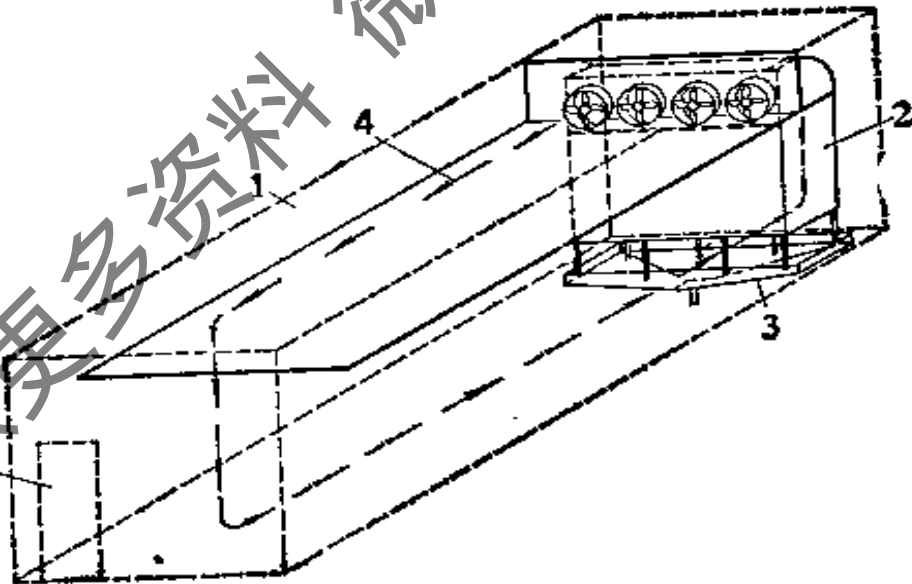


图 20.3 纵向强制空气循环冻结法

1—结冻室； 2—冷风机； 3—冷风机水盘； 4—吊顶； 5—门

此种方法是在结冻室的一端或一侧安装冷风机，使冷空气在室内强制循环。室温为  $-23[^\circ\text{C}]$  时，食品的冻结时间通为 20 小时左右，目前该方法在大中型结冻室已被广泛使用。

### 20.3.3 半接触式冻结法(图 20.4)

此种方法是在结冻室内安装搁架式排管,把装有鱼、禽等食品装在一定规格的铁盘内,然后将铁盘直接搁在排管上冻结。室内也可安装轴流风机,加强冷空气流动,加快食品冻结。当室温为 $-23[^\circ\text{C}]$ 时,食品冻结时间约30小时。由于这种方法搬运劳动强度较大,目前也仅适用于小型结冻室。

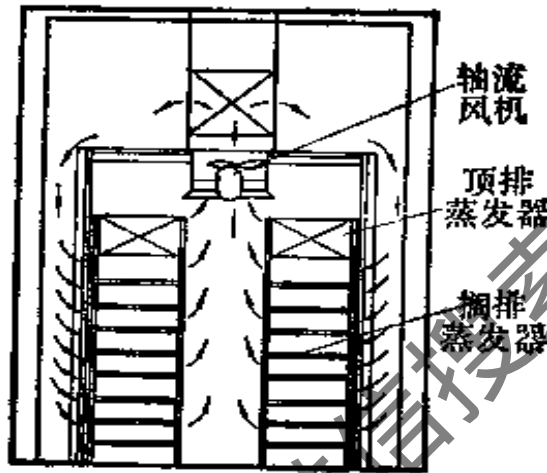


图 20.4 半接触式冷冻法

### 20.3.4 带式流态床冻结法(图 20.5)

带式流态床冻结主要用于快速冻结小颗粒食品,如青豌豆、颗粒玉米、花菜心、草莓等食品。由于从带式流态床底部吹入的冷风速度较高,进入的食品便能悬浮在不锈钢带床(传送带)上进行单体冻结。带床上部的空间较大,风速较低,故颗粒食品不会吹走。

食品在流态冻结器内的冻结过程通常分两个阶段进行,第一阶段为外壳冻结,冻结的时间较短,约为1~5分钟(青豆);这样颗粒食品之间就不会粘结。第二阶段为最终冻结阶段,食品的中心温度要达到 $-12\sim-18[^\circ\text{C}]$ ,冻结的时间较长。这两个阶段的传送带速度可进行调节,以满足各种不同食品的冻结要求。

采用各种机械化的食品冻结器,是目前食品冷加工的发展方向,它不但能减轻劳动,而且能提高食品的冻结效率和质量。但是,机械冻结器的价格较大,技术较复杂,我国虽引进了部分设备,但使用范围仍不广泛,有待今后大力发展。

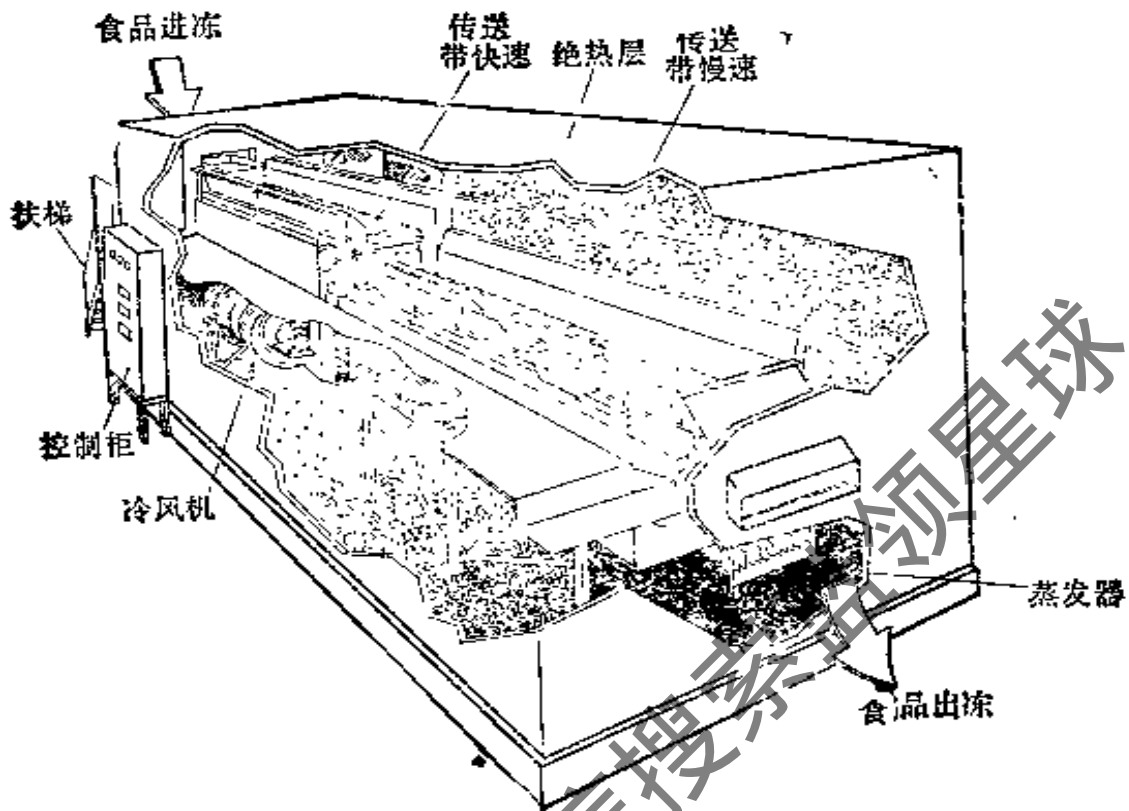


图 20.5 带式流态床冻结器

冷藏室通常分为两种：低温冷藏室和高温冷藏室。低温冷藏室用来贮存已经冻结的食品，长期贮存的食物其库温一般在  $-18$   $[\text{°C}]$  左右。高温冷藏室通常用来存放果蔬、鲜蛋等食品，其库温一般为  $0$   $[\text{°C}]$  左右。

进入低温冷藏室的食物已经冻结，它不需要消耗冷量，冷藏间的冷负荷主要用来平衡围护结构的传热量和渗入空气的热量，因此低温冷藏室的冷负荷和蒸发器面积远小于冻结室，室内的蒸发盘管一般安装在顶部或墙的四周。

高温冷藏库主要存放果蔬和鲜蛋，要求室内温度控制在食物的冻结点以上，以免冷伤食物。另外，由于来自母体后的果蔬仍是活的生物体，在体内进行着吸入氧气，呼出二氧化碳和水蒸汽的新陈代谢，同时放出呼吸热。因此室内必须采用强制空气循环才能使空冷气比较均匀地分布于食物货堆之间，但是货堆间的风速应控制在  $0.3 \sim 0.5$   $[\text{m/s}]$  之间，过大的风速将增加食物的干耗。

## 20.4 气调冷库和夹套式冷库

果蔬类食品的冷藏管理较肉、鱼、禽类等食品的冻结贮存困难,因为它的贮存质量不但与冷藏温度有关,而且与湿度和空气的成分有关。长期来,人们一直在寻求贮存果蔬类食品的新方法,近几年逐步得到发展和使用的气调冷库和夹套冷库对贮存果蔬类食品取得了较好的效果。

### 20.4.1 气调冷库

气调冷库有普通气调库和洗涤式气调库两种。

#### (一)普通气调冷库

众所周知,在一般空气中,氮气含量约为80%,氧气约为20%,另外有少量的二氧化碳及其他气体。随着果蔬类食品在室内贮存期的延长,如果冷藏室是气密的,氧气含量会因果蔬类食品的呼吸作用而逐渐降低,二氧化碳含量增加,单位体积的氧气耗量基本上为增加的同体积二氧化碳所补充。当二氧化碳超过允许水平时,可通过换气方法引入一部分室外空气,排出部分室内空气,以达到降低二氧化碳的目的,这种保持室内空气中氧和二氧化碳含量基本不变的冷库称为普通气调冷库。

#### (二)洗涤式气调冷库

如果要求室内空气中的氧和二氧化碳总含量低于20%,氮含量高于80%,则依靠通风换气已不能达到这种气体成分,就需要利用某种二氧化碳洗涤装置来降低其含量,这种气调库称为洗涤式气调冷库。对室内气体成分的要求,不同品种果蔬有不同要求,须根据试验确定,但大多数水果来讲,空气中含有2~3%的氧,1~1.5%的二氧化碳,其余有氮气平衡是较合适的,这样在贮藏温度条件下,水果的呼吸率可降低1/3,贮存期可延长2~4个月。

除去二氧化碳的方法有化学和物理法两种。也可以先充惰性气体,降低氧含量,再利用洗涤设备来控制二氧化碳成分,使其保持在一定水平上。图20.6是利用生石灰洗涤二氧化碳的简单而又经济的方法,洗涤时间取决于水果种类和贮藏温度,开始阶段,一



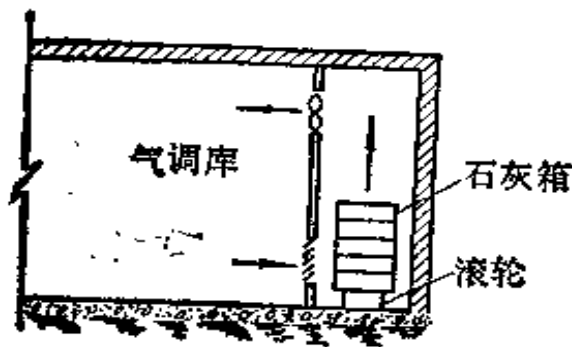


图 20.6 生石灰洗涤二氧化碳装置

一般每吨水果用 20[kg]石灰,可控制二氧化碳 6~8 星期,贮存终了时,20[kg]石灰可以用 8~10 个星期。在美国,管理水平较高的气调冷库,当苹果或生梨贮藏 10 个月后,基本上仍能保持果品的原有色香味,其损耗率不超过 1%。

#### 20.4.2 夹套式冷库

图 20.7 为夹套式冷库的平面示意图,由图可知,它与一般冷

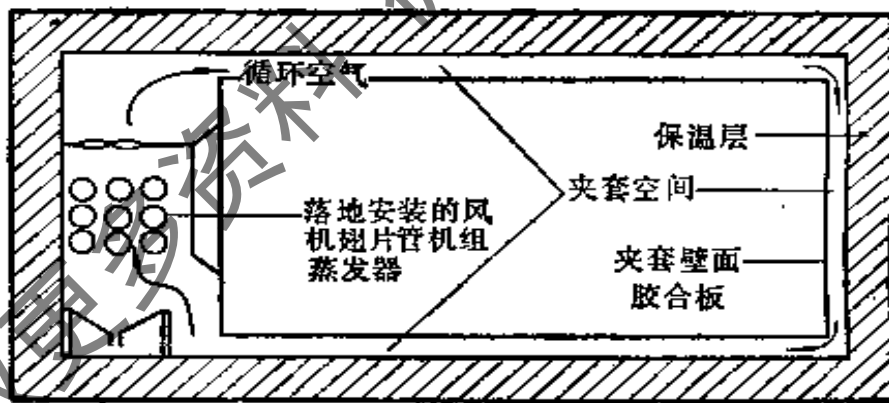


图 20.7 夹套式冷库平面示意图

库的不同之处是用夹套壁与隔热保温层构成一个夹套间,冷风机安装在库房外面,冷风也不直接送入库内,而是在夹套间内循环流动,这样不但来自外部围护结构传入的热量能很快地直接被冷风所吸收,而且由于库内食品不与来自蒸发器的干燥冷空气接触,这就能使食品的干耗减小,同时,由于夹套壁的冷辐射,使库内能保

持较均匀的温度，蒸发器基本上不需融霜。夹套式冷库特别适宜冷藏非包装的鱼、肉、果蔬，可以有效地防止食品表面干裂和皱缩等变质现象。

气调冷库和夹套式冷库的投资较高，但是由于能减少食品长期贮存的损失，因此仍能获得较好的经济效益。

## 20.5 食品的冷藏运输

食品的冷藏运输是食品冷藏链中的一个重要环节，冷藏运输的主要工具有保温车、机械冷藏车和冷藏船，蓄冷板冷藏车以及近十几年迅速发展的冷藏集装箱。

### 20.5.1 保温车

这是一种车厢用绝热层装嵌的运输汽车或货车，它可以减少车厢内外的热交换，使厢内保持一定温度。由于保温车不具备制冷设备，因此仅适用于短途输送冻结或已被冷却的食品。

### 20.5.2 机械冷藏车或冷藏船

在这种车和船上均装有机械制冷设备，可以恒定车厢或船舱内所要求的低温，因此它适用于长途输送冻结食品和果蔬类食品。

### 20.5.3 蓄冷板冷藏车

蓄冷板冷藏车的保温时间介于保温车和机械冷藏车之间，如果在保温车箱内装上一定数量的蓄冷板，即可改装为蓄冷板冷藏车。这种冷藏车的造价低，运行可靠，机动灵活，配备不同蓄冷剂的蓄冷板就可以得到所需要的车厢温度，增加冷藏运输距离。

蓄冷板一般为扁平形的钢制容器，其中充有一定数量的蓄冷剂，蓄冷剂必须具有较低的熔点和较大的溶化潜热，同时应该具备无毒、冻结膨胀率小、成本低等条件，常用的蓄冷剂为低溶共晶盐溶液或共晶胶溶液。蓄冷剂靠外界机械冷源使其在冷板中凝固，然后装入保温车厢中。在食品运输过程中，蓄冷剂吸收外界热量而逐渐溶化，使车厢内食品保持一定的冷藏温度。保温车厢中装设的蓄冷板数量可根据每块冷板的蓄冷量和运送食品的时间计算确定。

#### 20.5.4 冷藏集装箱

利用集装箱运送货物是目前世界各国航行业中大力发展的方向,当运送易腐食品时,就需要应用冷藏集装箱。冷藏集装箱实际上是一台运送易腐食品的小型活动冷库,它能在冷藏链中发挥其独特的作用,使货迅速运往目的地。早期的冷藏集装箱是用干冰(固体二氧化碳)或冰盐作为冷源,从1963年起,日本开始成批生产机械式冷藏集装箱,以后又生产液氮集装箱。目前,世界冷藏集装箱数已占总集装箱数的60%。

#### 20.6 冷藏陈列柜

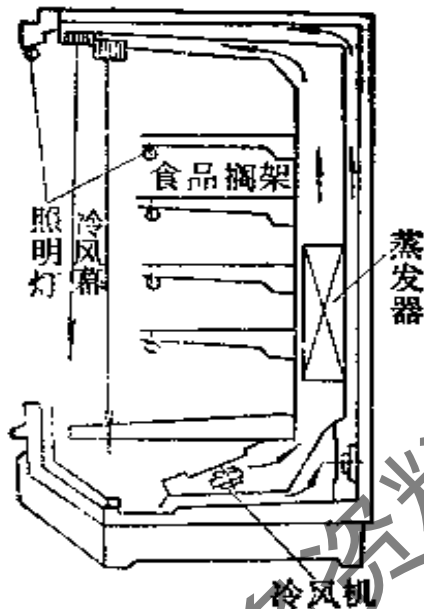


图 20.8 立式冷藏陈列柜

冷藏陈列柜是食品冷藏链销售环节中最后一个设备,它的主要功能是使零售小包装食品处在一定低温条件下供消费者选购。冷藏陈列柜的形式很多,而且外形讲究,以适应美化商场的要求,在国外超级市场或食品零售店已广泛采用。

图 20.8 是一台典型的立式冷藏柜示意图,柜内冷空气用风机循环,以保证温度的均匀性。为了方便顾客选购食品,陈列柜的玻璃门或盖均可移动,对于高温陈列柜,大多不

设玻璃门,而是利用循环冷风作风幕隔离外界空气。

冷藏陈列柜通常装在具有夏季空调的商场内,这不但有利用陈列柜的保温,而且可防止玻璃门盖和外壳表面的凝露现象。

#### 20.7 家用电冰箱

家用电冰箱是整个食品冷藏链的末端装置,是家庭冷藏食品和制作冷饮的电器设备。目前,世界电冰箱年产量约在4000万台以上,近10年来,我国家用电冰箱制造业以极快速度发展,若按

现有设计生产能力全部投产估算，到 1990 年的产量将达 1300 万台，将成为世界电冰箱生产的超级大国之一。

### 20.7.1 家用电冰箱的结构

家用电冰箱实际上是用一套简单的全封闭制冷装置和其他设备组成，它为冷藏和冻结食品提供必要的温度条件。由于属家用电器，因此在结构上必须考虑外形美观、使用方便、经久耐用，节省电耗。

家用电冰箱大致由下述四部分组成。

1. 箱体。它是冰箱的框架(图 20.9)，箱体外壳用 0.6[mm] 的薄钢板制作，外表喷涂各种颜色的丙稀酸漆，箱体内胆用 ABS 工程塑料真空成形，这种塑料板坚固耐用，加工性能好，而且无毒。外壳和内胆之间用隔热性能极好的聚氨脂注塑，厚度约为 25~40 [mm]。另外，在门的四周装有磁性密封条，以防止外界热空气渗入，以节省电耗，避免凝露。如果发现封条损坏，可以更换。

2. 制冷系统。它是电冰箱中的最主要部件，由全封闭制冷压缩机、冷凝器、蒸发器、毛细管和过滤干燥器等组成。

目前，电冰箱压缩机仍以活塞为主，输入功率约 100[W] 左右。但从 70 年代起，由于偏心滚动转子式压缩机具有许多优点(见第 14 章)，在电冰箱中已逐步开始采用。不久将可能完全取代活塞式压缩机。

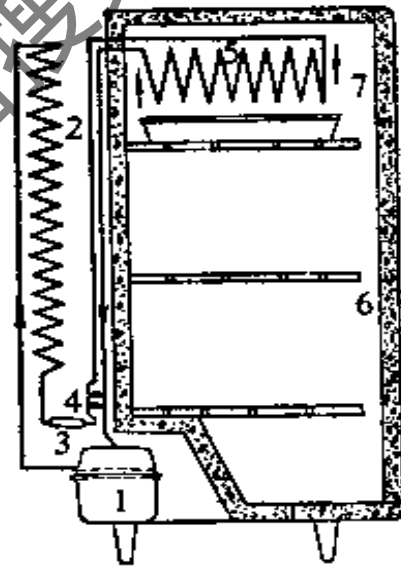


图 20.9 家用电冰箱示意图  
1—压缩机；2—冷凝器；3—过滤器；4—毛细管；5—蒸发器；  
6—冷藏空间；7—结冻空间

家用电冰箱的冷凝器均为空气自然对流冷却，冷凝管直径为  $6 \times .75$ [mm] 紫铜管或镀铜无缝钢管，管外可以卡装冲有百页窗式的肋片(图 20.10)或者焊上钢丝(图 20.11)，然后将整个冷凝器涂覆一层黑漆。近年来，也有将冷凝盘管暗藏在冰箱两侧(或后侧)

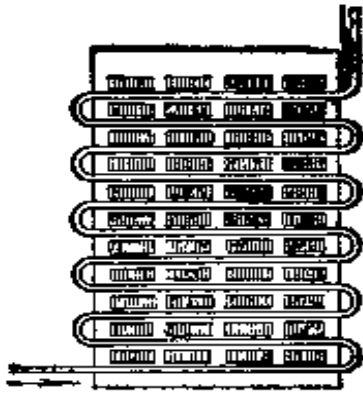


图 20.10 百页窗式冷凝器

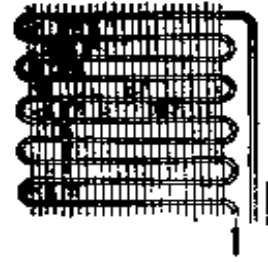


图 20.11 钢丝盘管式冷凝器

钢板的内表面,利用壳体表面散热的结构形式,显然这种冰箱外形结构简单,搬运也较方便。

家用电冰箱蒸发器的形式较多,但目前直冷式电冰箱中大都采用铝板吹胀管式蒸发器(图 20.12)。这种蒸发器是用两块铝板热压而成,但在热压前先在铝板上按蒸发器设计通路要求用石墨印上线路,待热压加工结束后,再用一定压力的空气吹入石墨通路

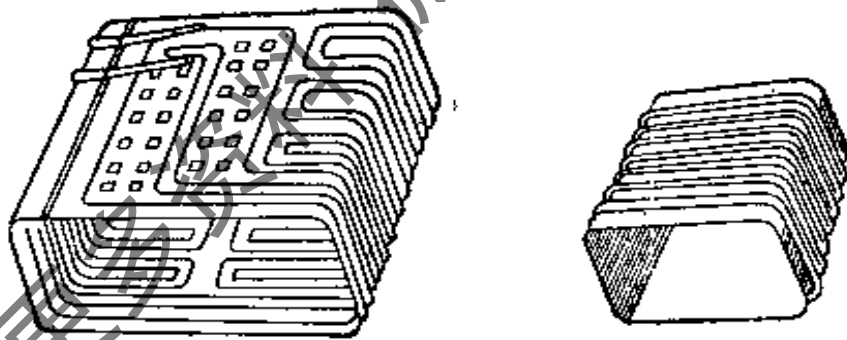


图 20.12 铝板吹胀管式蒸发器

中,由于涂上石墨部位的铝板无法热压粘合,因此空气将按石墨线路慢慢胀起,形成蒸发器通道,然后再清洗掉石墨,并折弯成需要的形状。这种蒸发器对铝材质量要求较高,热压时的加压压力和温度控制也应适当,否则在吹胀过程中胀起部位的壁厚将不均匀,甚至破裂,或者装入电冰箱中经短期使用后即出现制冷剂渗漏。

家用电冰箱制冷系统均采用毛细管节流,毛细管的内径约为

0.4~0.8[mm],长度为2[m]左右,为了增加R12制冷剂的过冷度,毛细管通常串入压缩机吸气管中。

家用电冰箱的制冷系统中除装有上述四大件外,通常在冷凝器出口处还装有一只过滤干燥器,其中装有分子筛吸湿剂和铜滤网,用来吸收系统中的水分和收集微量异物,保证制冷剂正常循环。

### 3. 电路控制系统

家用电冰箱的电路控制系统主要用于压缩机的停开以及其他电器设备的动作,以保证箱内所需温度以及节省制冷电耗,防止意外事故。电路控制系统主要有以下几方面。

(1) 温度控制装置。它是通过温度控制器的感温元件所感受到的温度来控制压缩机的停开。对于直冷式电冰箱,感温元件紧贴在蒸发器出口的表面上,对于间冷式电冰箱,感温元件通常安置在循环冷风的进风口,用来感受并控制箱内温度变化。温控装置的控制范围可根据季节和存放食品的种类、数量而通过旋钮调节。

(2) 化霜控制装置。由于电冰箱蒸发器的温度远低于0[°C],因此贮存食品中的水分以及开门时外界热空气中带入的水蒸汽均向蒸发器表面迁移,并形成霜层,当霜层达到一定厚度时,不但箱内降温困难,而且使冰箱的耗电量增加。对于直冷式电冰箱,广泛采用半自动化霜控制器,即蒸发器结霜过厚(5[mm]以上)时,用人工按动化霜按钮,压缩机即停止工作,箱内温度逐渐上升,冰霜开始融化,待化霜过程结束,感温元件感受到5[°C]温度时,化霜控制器自动接通电源,压缩机又通电运行。对于装有翅片式盘管蒸发器的间冷式电冰箱,由于用风扇强制冷风循环,使霜内水分加速向蒸发器迁移并形成霜层。为此,间冷式电冰箱采用全自动定时化霜。当压缩机运行累计8小时对蒸发器的化霜电热元件通电一次,以加速化霜过程。在化霜期间,压缩机停止工作。

(3) 制冷压缩机的启动保护装置。该装置是指全封闭制冷压缩机用电动机正常启动和安全运行的装置,它包括各种安全启动

继电器,过电流、过温升保护继电器等。

(4) 辅助设备电源控制装置。它包括门框防露加热器,箱内照明灯,接水盘防冻和出水管加热器,以及间冷式冰箱的风机电源控制器等。

随着电子技术的不断发展,世界各国电冰箱的供电和控制线路也常有变动和更新,在检修电冰箱之前,应熟悉各个冰箱的电器线路图,特别是自动化程度较高的电冰箱,更应注意。

4. 附件。每只家用电冰箱中均带有一定数量的附件,以满足家庭使用要求。这些附件主要包括果蔬盒、制冷盒、食品存水器(架)、化霜接水罐等。应该指出,由于各国人民生活习惯和饮食品种的差异,世界各地所产电冰箱中的附件形式和数量也有所不同。

### 20.7.2 家用电冰箱的分类

家用电冰箱可以从许多方面分类,现就涉及日常识别和选择电冰箱所需要的基本知识介绍几种分类方法。

(1) 按容积分类。家用电冰箱的有效容积是关上冰箱门后箱内可以贮存食品的空间容积,我国以立升为单位,如100,140,150,170,200 [l]等。

(2) 按门数分类。有单门、双门以及多门电冰箱。门数越多,冰箱容积也越大。200 [l]以下的冰箱以单门和双门较多。

(3) 按冷却食品的方法分类。有直冷式(图 20.13)和间冷式(图 20.14)两种电冰箱。直冷式电冰箱是依靠蒸发器与食品直接接触或空气的自然对流使食品冻结和冷却,这种电冰箱的结构简单,耗电较少,但降温速度较慢,箱内温度的均匀性较差。直冷式电冰箱均为有霜冰箱。间冷式电冰箱又称“无霜”冰箱,箱内装有冷风循环风扇,食品是依靠冷风通过蒸发器和食品之间的不断循环而冻结或冷却。因此间冷式冰箱冷却速度快,箱内温度均匀,而且在蒸发器部位装有化霜电热元件,能实现自动化霜,使用方便。但间冷式冰箱的结构和电器控制线路较复杂,耗电较多,价格也较高。

(四)按运行温度分类。家用电冰箱的冷藏室和结冻室温度与

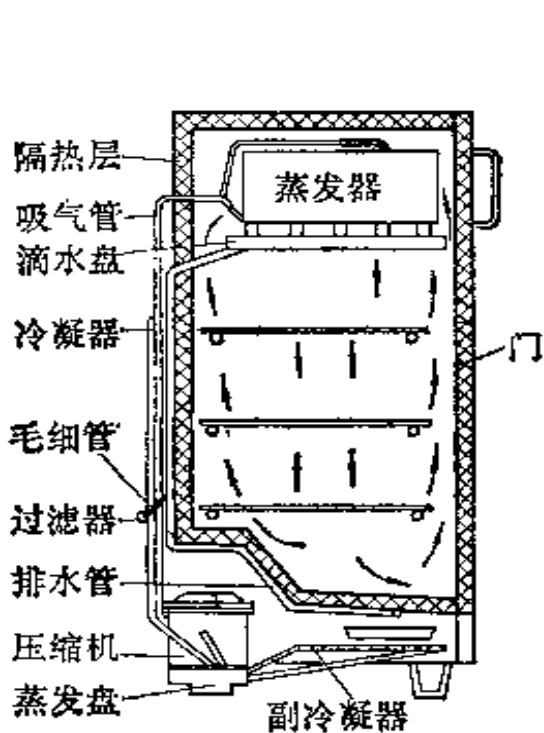


图 20.13 单门直流式电冰箱内部结构

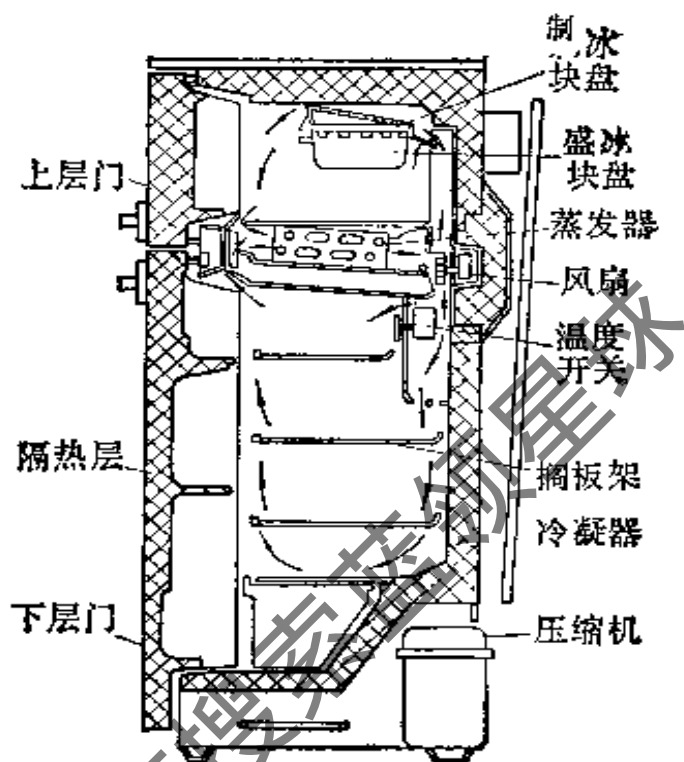


图 20.14 双门间冷式电冰箱内部结构

环境温度有关。对于一般单门电冰箱的冷藏室，应附合表 20.2 的要求。

环境温度与冷藏室平均温度

表 20.2

| 环境温度 [°C] | 温度控制器的调定位置 | 冷藏室平均温度 [°C] |
|-----------|------------|--------------|
| 15±1      | 弱冷点        | 高于 0         |
| 32±1      | 强冷点        | 不高于 5        |
| 43±1      | 强冷点        | 不高于 10       |

对于双门电冰箱的冷藏室除应附合表 20.2 的要求外，结冻室还应附合表 20.3 的要求。

对于四星级电冰箱，除了应附合表 20.2 和表 20.3 的要求外，对食品冻结到 -18[°C] 的时间和质量有严格规定，试验采用的标准食品为瘦牛肉，而实际试验中采用了相当于瘦牛肉物性的羟乙基甲基纤维素包装袋。



结冻室温度和星级的表示

表 20.3

| 环境温度 [°C]         | 温控器的调定位置 | 冷藏室温度[°C] | 结冻室温度[°C] | 星级符号 |
|-------------------|----------|-----------|-----------|------|
| 15 和 32<br>[±1°C] | 在可调范围内某点 | 0~5       | 不高于-6     | ⊗    |
|                   |          |           | 不高于-12    | ⊗⊗   |
|                   |          |           | 不高于-15    | ⊗⊗⊗  |
|                   |          |           | 不高于-18    | ⊗⊗⊗⊗ |

注：箱内温度达到上表规定值时，压缩机必须有停开。

### 20.7.3 家用电冰箱的使用和保养

家用电冰箱的设计使用寿命为 10~15 年，但是实际使用寿命还与产品质量和使用情况有关。作为用户，应注意地区的供电质量。如果电源电压波动范围过大，或者供、断电次数频繁，均可能危及电机寿命，严重时甚至能烧毁电机的漆包线。另外，温度过高的食品不能放入箱内，这不但影响冰箱的耗电量，而且会增加制冷系统的压力和温度，这些后果同样可能影响电冰箱的使用寿命。应该指出，有些使用直冷式电冰箱的用户，经常用过量的热水放入结冻室以加快蒸发器的化霜过程，这种做法有时可能危及紧贴在蒸发器上的感温元件，使元件中的充加剂因过分热胀而失去控制性能，严重时甚至会使感温元件胀裂，使温控化霜装置失灵。

就目前国产家用电冰箱的故障分析，绝大部分是制造质量问题，其中以 R 12 制冷剂的渗漏和制冷系统内部堵塞为最多，约占冰箱故障率的 50% 以上。电机烧毁或压缩机损坏也时有出现，当出现这种情况时，必须卸下压缩机修理或更换。更换时应使用同型号压缩机，过大或过小的压缩机装上后可能造成与其他主体不匹配，使箱内降温困难，或者耗电增加，或者出现其他故障。在重新装上压缩机之前，对制冷系统内部要进行适当的清洁工作，特别是因电机烧损的故障，对制冷系统内部必须作清洗工作，以排除内部的污

染物,否则装上的压缩机可能在运行一定时间后又将损坏。

家用电冰箱是目前大多数用户家中的主要耗电设备之一,节省冰箱用电量就成为用户十分关心的问题。根据制冷原理的基本知识可以懂得,电冰箱耗电量与箱内保持一定低温条件时所需提供的制冷量有关,而所需冷量又与冰箱的环境温度、容积大小、箱体隔热材料性能和厚度、存放食品的数量和品种、冷藏形式(冻结或冷却)、开门次数,以及压缩机形式、制冷系统主件的匹配和制造质量等许多因素有关。因此冰箱的省电性能必须在某些条件相同的情况下才能进行比较。为此,世界各国均订有严格的家用电冰箱性能和耗电量试验标准,只有按一定标准测得的性能和耗电量才有比较价值,各用户家中的电冰箱实际用电量是无法比较冰箱的省电性能的。

作为用户,可采取下述一些措施,以减少冰箱电耗。

1. 根据所需要的电冰箱容积,选购经有关部门按统一标准检测耗电量较小的产品。

2. 电冰箱的冷凝器应处在良好的通风状态,周围温度发生 $10[^\circ\text{C}]$ 变化,冰箱耗电量会有 $40\sim 50\%$ 的变化。

3. 箱内食品的存放量不宜过少,否则在开门时箱外热空气大量进入箱内,特别是夏季,空气中的水蒸汽含量较高,这些水蒸汽最终在蒸发器表面形成霜层,这不但消耗冷量,而且会因霜层过厚影响制冷系统正常运行,增加电耗。这也是直冷式电冰箱为什么夏季比冬季化霜频繁的主要原因之一。

4. 减少开门次数和时间。当室内环境温度为 $30[^\circ\text{C}]$ 时,冰箱开门 $10[\text{s}]$ ,箱内温度将上升 $5\sim 6[^\circ\text{C}]$ ,如开门时间为 $1\sim 2[\text{min}]$ ,箱内温度将升至环境温度。

5. 新鲜的鱼、肉、禽等食品,如在 $1\sim 2$ 天内食用,不必放入冷冻室内冻结,可放入冷藏室内贮存,这不会影响食品质量,而且可以极大地节省冷量。因为食品在冻结过程中放出大量热量,食品冻结的冷量约为冷却的 $3$ 倍左右。

6. 存入冰箱中的食品应尽量减少其表面水分,应该用食品塑

料袋包装。这不但可以防止因水分向蒸发器迁移而在其表面结霜,增加耗冷量,而且能减少食品的干缩(特别是果蔬类食品),保持原有质量。

7. 存入冰箱中的食品应根据一次食用数量分小包存放,以免取出分割后再次放入。

8. 存入冰箱中的食品应进行适当整理,尽量去除非食用部分,减少耗冷量。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

## 第 21 章 溴化锂吸收式制冷

吸收式制冷机和蒸气压缩式制冷机一样，都是利用液体在汽化时要吸收热量这一物理特性来实现制冷的。蒸气压缩式制冷机要消耗电能，而吸收式制冷机主要是消耗热能来制取冷量的，其最大特点是可以利用低势热源来制冷，因此，它特别适用于有余热可供利用的工矿企业中。

吸收式制冷机主要由发生器、冷凝器、节流机构、蒸发器和吸收器等组成，如图 21.1 所示。它所采用的工质是两种沸点不同的物质组成的二元混合物，其中沸点低的物质为制冷剂，沸点高的物质为吸收剂，通称为“工质对”。在以氨水溶液为工质的吸收式制冷机中，氨为制冷剂，水为吸收剂。在发生器中利用工作蒸气加热浓度较大的氨水溶液时，由于氨的沸点比水低，被加热时首先沸腾，形成一定压力和温度的氨蒸气进入冷凝器，被冷却水冷却。凝结成氨液。氨液经节流机构节流后进入蒸发器，吸收被冷却剂的热量而气化，气化后氨蒸气进入吸收器，在其中被稀的氨水溶液所吸

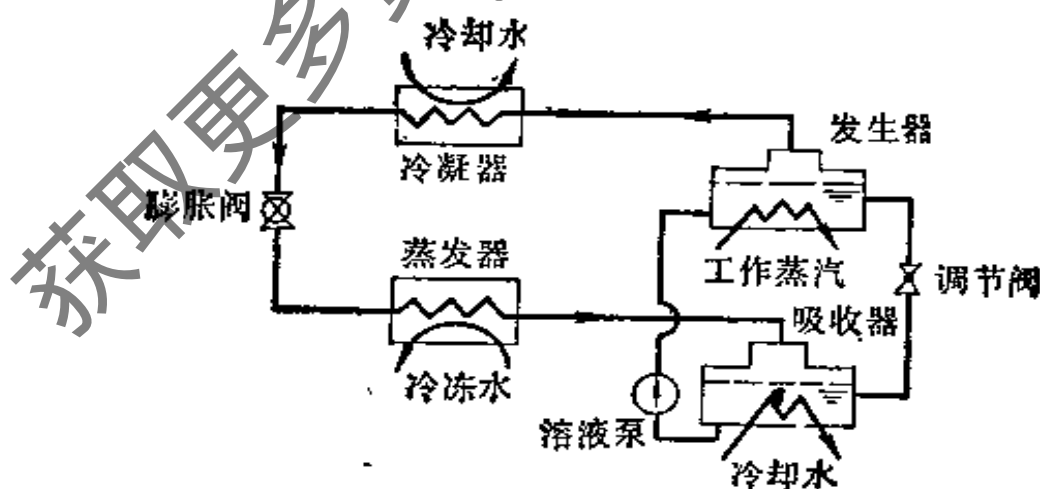


图 21.1 吸收式制冷机工作原理图

收，吸收时产生的热量由冷却水带走，吸收的结果使溶液的浓度增

加。在发生器中，氨不断气化，溶液的含氨量不断减少而浓度降低，成为稀溶液。稀溶液经降压后进入吸收器，吸收来自蒸发器的氨蒸气而浓度增加，然后由溶液泵将吸收器里的浓溶液送入发生器，如此循环，不断制冷。

实际上，氨水吸收式制冷机的设备较为复杂，因为氨和水较难分离，需要精溜设备等，它主要用于工业生产中制取 0[°C] 以下的冷量。目前在空气调节工程中应用溴化锂吸收式制冷机。

## 21.1 溴化锂水溶液的性质及图表

### 21.1.1 溴化锂水溶液的性质

溴化锂是一种无色粒状结晶物，锂和溴分别属于碱和卤族元素，所以其性质与食盐相似。无水溴化锂的熔点为 549[°C]，沸点为 1265[°C]；化学性质稳定，在大气中不变质、不分解。

溴化锂极易溶解于水，形成溴化锂水溶液。溴化锂水溶液的主要特点是：

1. 溴化锂水溶液的水蒸汽分压力小，它比同温度下纯水的饱和蒸汽压小得多，所以具有较强的吸湿性。溶液的浓度越高或温度越低，水蒸汽分压力就越小，其吸湿能力就越强。

2. 溴化锂水溶液的温度过低或浓度过高，均容易发生结晶。

3. 溴化锂水溶液对一般金属材料具有很大的腐蚀性，并且，腐蚀产生的不凝性气体对制冷机的性能影响很大。

4. 由于溴化锂水溶液是由两种不同性质的物质混合而成的，所以其热力性质与单一物质的水不相同：

1) 对于单一的饱和水蒸汽，因温度与压力互成函数关系，因而只要知道其中一个参数，其他参数值就可确定；饱和溴化锂水溶液的饱和温度与压力和浓度有关，即  $t_s = f(P, \xi)$ ，在一定压力下，其饱和温度随浓度变化，浓度越大，相应的饱和温度越高。

2) 单一的水在汽化和冷凝过程中，压力一定其温度也一定；溴化锂水溶液在压力一定时，随着吸收或放出水蒸汽其浓度发生变化时，温度也在不断变化。

## 21.1.2 溴化锂水溶液的图表

### 1. 溴化锂水溶液的压力-饱和温度图( $P-t$ 图)

图 21.2 给出了溴化锂水溶液在不同浓度下压力和饱和温度的关系。因为溴化锂是一种难于挥发的物质，所以溴化锂水溶液

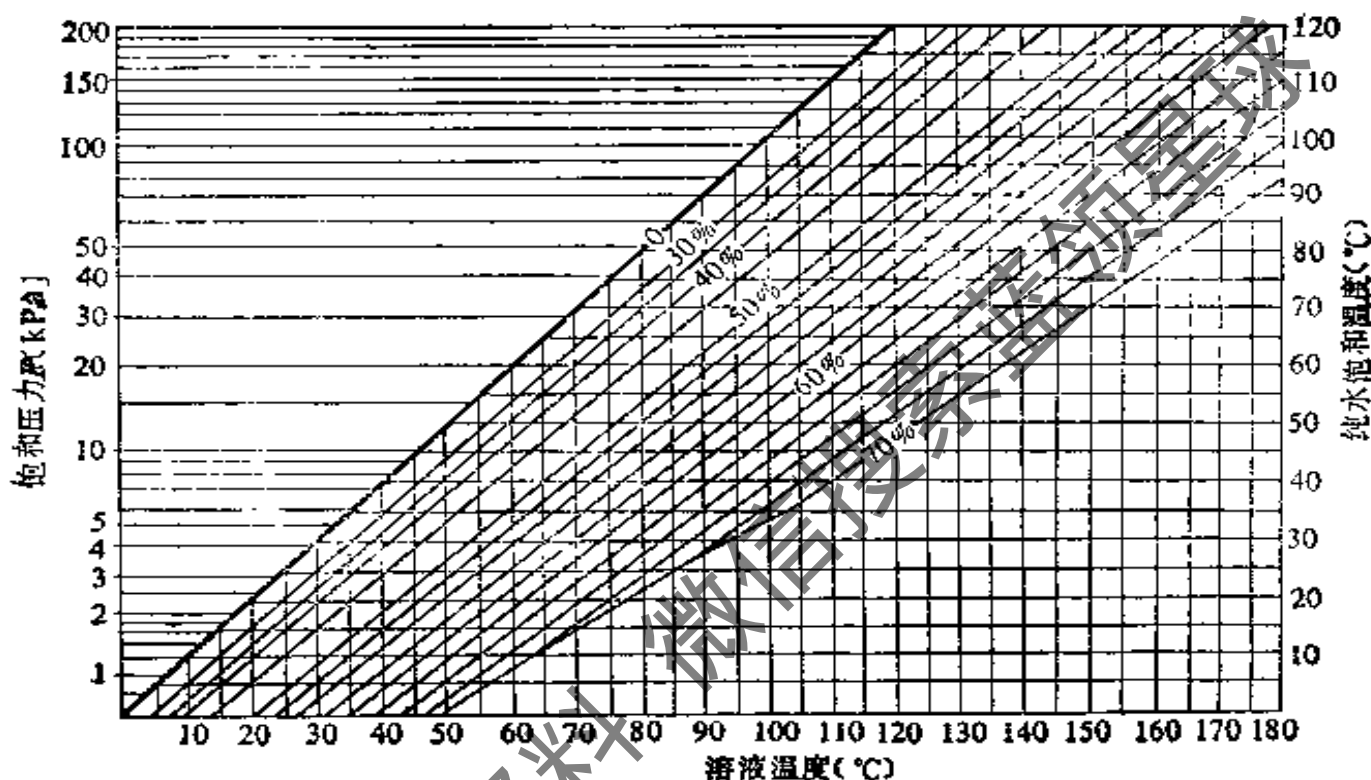


图 21.2 溴化锂水溶液的压力-饱和温度图

沸腾时，液面上部空间的蒸汽总压力，即是水蒸汽的分压力。该图以溶液的温度为横坐标，以压力为纵坐标，图中左侧第一条斜线表达纯水的压力和饱和温度的关系，最右侧的折线为溴化锂水溶液的结晶线。

从图中可以看出，在一定温度下溶液面上的水蒸汽饱和分压力小于纯水的饱和压力，而且浓度越高，液面与水蒸汽饱和分压力越小。

### 2. 溴化锂水溶液的焓-浓度图( $h-\xi$ 图)

溴化锂水溶液的  $h-\xi$  图见图 21.3，该图以焓值  $h$  为纵坐标，以溶液的浓度  $\xi$  为横坐标。它表示了溴化锂水溶液  $h$ 、 $\xi$ 、 $t$  和  $P$  之

间的相互关系,只要知道其中任意的两个参数,就能确定其他两个参数,同时也可确定位于溶液液面上处于过热状态的水蒸汽焓值,所以是进行溴化锂吸收式制冷循环的理论分析和热力计算的主要图表。该图分成两部分,下部是沸腾溶液的曲线,上部是与溶液相平衡的等压水蒸汽辅助曲线,由于溶液面上水蒸汽的温度和溶液的温度相等,故不另画等温线[详见附图]。

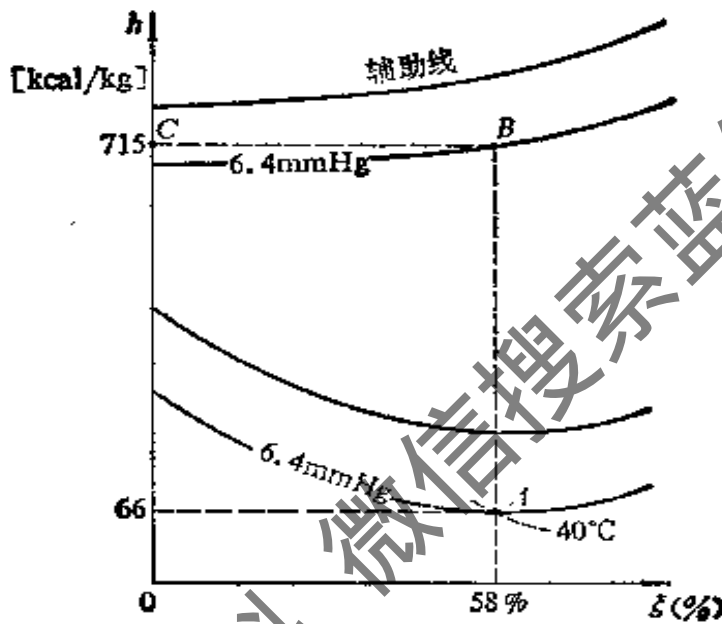


图 21.3 溴化锂水溶液的  $h-\xi$  图

【例 21-1】\* 已知饱和溴化锂水溶液的压力为 6.4 [mmHg], 温度为 40 [°C], 求溶液及液面上水蒸汽的各状态参数。

【解】 如图 21.3 所示, 在  $h-\xi$  图中, 找出 6.4 [mmHg] 的等压线与 40 [°C] 等温线交于 A, 查得  $h_A = 66$  [kcal/kg],  $\xi_A = 58\%$ 。

通过点 A 的等浓度线  $\xi_A = 58\%$  与压力为 6.4 [mmHg] 的辅助线交点 B 作水平线与  $\xi = 0$  的纵坐标相交于 C 点, C 点即为液面上水蒸汽的状态点, 查得  $h_C = 715$  [kcal/kg]。

## 21.2 溴化锂吸收式制冷机的工作原理

### 1. 工作流程

\* 目前,国内溴化锂溶液的特性图表均为工程单位制,故本章例题计算仍按工程单位制进行。

溴化锂吸收式制冷机是利用溴化锂水溶液在温度较低时能强烈吸收水蒸汽，而在高温下释放出所吸收的水蒸汽这一特性，同时，让水在很低的压力下汽化吸热而达到制冷的目的。

溴化锂吸收式制冷机主要由发生器、冷凝器、蒸发器和吸收器等四个热交换设备组成。通常把这四个热交换设备合置于一个或两个密闭的筒体内，即所谓单筒结构和双筒结构，容量较大的机器一般采用双筒式。

图 21.4 为双筒式溴化锂吸收式制冷机的结构图，上筒体为发生器和冷凝器，下筒体为吸收器和蒸发器，采用管壳式结构，各换热器传热管用胀管或焊接的方法与相应的管板连接。为防止发生器中的溴化锂水溶液液滴随气流进入冷凝器中，发生器与冷凝器之间设有挡水板。蒸发器与吸收器之间也设有挡水板，以防止冷剂水液滴从蒸发器随气流进入吸收器，影响机器性能。

冷剂水通过 U 形管节流装置，由冷凝器流入蒸发器。

在蒸发器和吸收器的下部——泵的入口处，均设置了液囊，并在液囊内装设防止涡旋产生的导流装置，以改善泵的吸入状态，防止泵在运转中发生汽蚀。

溴化锂吸收式制冷机的工作流程如图 21.5 所示。由发生器泵 11 送来的溴化锂稀溶液，经热交换器 5 进入发生器 2 内，被发生器管簇内的工作蒸汽加热，由于溶液中水的沸点比溴化锂的沸点低得多，因此，稀溶液被加热到一定温度后，溶液中的水分汽化成为冷剂水蒸汽，冷剂水蒸汽经挡水板将其中所携带的液滴分离后进入冷凝器 1，被冷凝器管簇内的冷却水冷却而凝结成冷剂水。冷剂水经 U 形管 6 节流后，进入蒸发器 3 的水盘内，并由蒸发器泵 9 送往蒸发器的喷淋装置而被均匀地喷淋在蒸发器管簇的外表面，冷剂水由于吸收了管内冷冻水的热量而汽化成为水蒸汽，管内的冷冻水被冷却而温度降低。

蒸发器 3 中由于吸热汽化所形成的水蒸汽经挡水板将其所携带的液滴分离后进入吸收器 4，被从吸收器泵 10 送来的喷淋在吸收器管簇外表面的中间溶液（从发生器经热交换器来的浓溶液与



吸收器中的稀溶液混合成为中间溶液) 所吸收。吸收过程中放出的吸收热被吸收器管簇内的冷却水带走。中间溶液吸收了制冷剂水蒸汽而成为稀溶液, 又被发生器泵 11 经热交换器 5 送入发生器 2 中加热, 如此不断循环, 连续制取冷量。

在溴化锂吸收式制冷机中设置热交换器是因为从发生器出来的浓溶液温度较高, 而从吸收器中出来的稀溶液温度较低, 通过热交换后, 稀溶液温度提高, 浓溶液温度降低, 故发生器中工作蒸汽的消耗量和吸收器中的冷却水量减少, 制冷装置更经济。

## 2. 制冷循环在 $h-\xi$ 图上的表示

溴化锂吸收式制冷机的理想循环过程可以用  $h-\xi$  图表示, 如图 21.6。

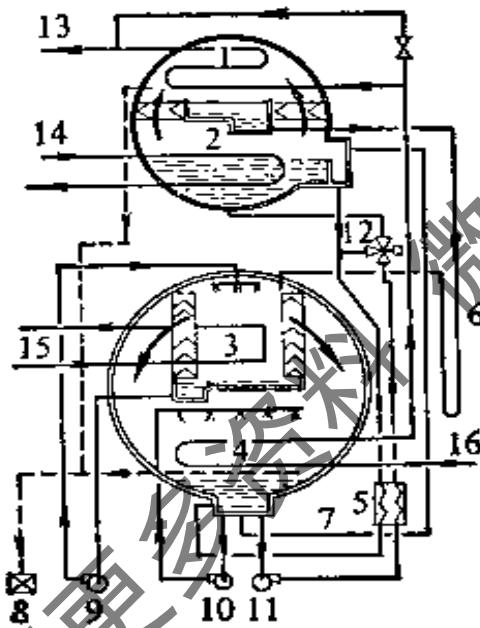


图 21.5 溴化锂吸收式制冷机流程图

1—冷凝器; 2—发生器; 3—蒸发器;  
4—吸收器; 5—热交换器; 6—U 形管;  
7—防结晶管; 8—抽气装置; 9—蒸发器泵;  
10—吸收器泵; 11—发生器泵;  
12—溶液三通阀; 13—冷却水出口;  
14—工作蒸汽; 15—冷冻水; 16—冷却水进口

### (1) 发生过程

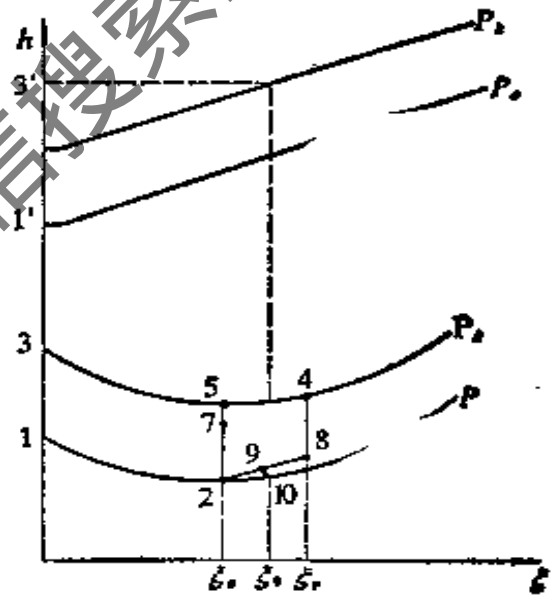


图 21.6 溴化锂吸收式制冷循环在  $h-\xi$  图上的表示

点 2 (浓度为  $\xi_0$ 、压力为  $P_0$ 、温度为  $t_2$ ) 表示稀溶液出吸收器的状态。经过发生器泵, 压力升高为  $P_k$  后进入热交换器, 在等压条件下, 成为点 7, 浓度不变, 温度由  $t_2$  升高至  $t_7$ , 2-7 表示稀溶液在热交换器中的吸热过程; 状态为点 7 的稀溶液进入发生器, 由于被管内的工作蒸汽加热, 温度由  $t_7$  升高到  $P_k$  压力下的饱和温度  $t_5$ , 并开始沸腾, 溶液中的水分不断汽化, 压力不变, 浓度由  $\xi_0$  逐渐变浓至  $\xi_r$ , 温度由  $t_5$  升高为  $t_4$ , 7-5-4 表示稀溶液在发生器中的加热和发生过程。汽化产生的水蒸汽状态用始发状态(点 5') 和终了状态(点 4') 的平均状态点 3' 表示。

#### (2) 冷凝过程

在发生器中产生的水蒸汽(点 3') 进入冷凝器, 在压力  $P_k$  不变的情况下被冷凝器管内流动的冷却水冷却而凝结为冷剂水(点 3)。3'-3 表示冷剂水蒸汽在冷凝器中的冷凝过程。

#### (3) 蒸发过程

压力为  $P_k$  的冷剂水经 U 形管节流, 压力降为  $P_0$  后进入蒸发器。由于压力降低, 有一部分冷剂水汽化为点 1' 状态的水蒸汽, 大部分未汽化的冷剂水(点 1) 积存在蒸发器的水盘中, 通过蒸发器泵喷淋在蒸发器管簇的外表面, 吸收管内冷冻水的热量而汽化, 状态由点 1 变为点 1'。1-1' 表示冷剂水在蒸发器中的汽化过程。

#### (4) 吸收过程

状态为点 4 (压力为  $P_k$ 、温度为  $t_4$ 、浓度为  $\xi_r$ ) 的浓溶液, 在重力与压差的作用下由发生器流入热交换器, 将热量传给稀溶液, 温度降低至  $t_8$  (点 8), 4-8 表示浓溶液在热交换器中的放热过程。状态点 8 的浓溶液与状态点 2 的稀溶液混合, 形成状态为点 9 的中间溶液(浓度为  $\xi_0$ 、温度为  $t_0$ ), 经吸收器泵均匀喷淋在吸收器管簇的外表面。中间溶液进入吸收器后, 闪发成为点 10, 由于不断地吸收从蒸发器来的冷剂水蒸汽, 使溶液的浓度由  $\xi_0$  降为  $\xi_0$ , 温由  $t_{10}$  降为  $t_2$ 。8-9 和 2-9 表示混合过程, 10-2 表示在吸收器内进行的等压吸收过程。

假设送往发生器中的稀溶液为  $G_a$  [kg]，浓度为  $\xi_a$ ，在发生器中被蒸汽加热后产生  $D$  [kg] 的制冷剂蒸汽，剩下的  $(G_a - D)$  [kg] 浓度变为  $\xi_r$  的浓溶液送至吸收器。根据物质守恒定律，即从发生器出来的浓溶液中所含溴化锂的质量等于由吸收器送入发生器的稀溶液中的所含溴化锂的质量，即

$$\xi_a G_a = (G_a - D) \xi_r$$

$$\xi_a \cdot \frac{G_a}{D} = \left( \frac{G_a}{D} - 1 \right) \xi_r$$

$$\text{令 } \frac{G_a}{D} = a, \text{ 则 } a = \frac{\xi_r}{\xi_r - \xi_a} \quad (21.1)$$

$a$  称为循环倍率，表示在发生器中产生 1 [kg] 制冷剂蒸汽所需要溴化锂稀溶液的循环量。 $(\xi_r - \xi_a)$  称为放汽范围。

在吸收器中，为了吸收 1 [kg] 制冷剂蒸汽，实际上是喷淋了  $(a-1)$  [kg] 点 8 状态的浓溶液和  $f$  [kg] 点 2 状态的稀溶液。虽然中间溶液的浓度有所降低，但喷淋密度增加了，而增强了吸收效果。

$f$  称为吸收器稀溶液再循环倍率，一般取  $f = 20 \sim 50$ ，即为了吸收 1 [kg] 制冷剂蒸汽，需在  $(a-1)$  [kg] 的浓溶液中加入  $20 \sim 50$  [kg] 的稀溶液。

实际上，由于存在流动阻力，制冷剂蒸汽经过挡水板时压力有所降低。在发生器中，发生器压力  $P_g$  应大于冷凝压力  $P_c$ ，在加热温度不变的情况下将引起浓溶液浓度的降低，同时，由于溶液液柱等的影响，使发生终了浓溶液的浓度  $\xi_r$  低于理想情况下的浓度  $\xi_r'$ ， $(\xi_r - \xi_r')$  称为发生不足。在吸收器中，吸收器压力  $P_a$  应小于蒸发压力  $P_e$ ，在冷却水温度不变的情况下将使稀溶液浓度增大，加上系统内空气等不凝性气体的存在，吸收终了的稀溶液浓度  $\xi_a'$  高于理想情况下的  $\xi_a$ ， $(\xi_a' - \xi_a)$  称为吸收不足。

在实际循环中，由于存在发生不足和吸收不足等因素，使循环的经济性降低。

## 21.3 溴化锂吸收式制冷机的热工计算

溴化锂吸收式制冷机的热工计算,一般是根据已知条件(空调或生产工艺对制冷量的要求、冷冻水温度、冷却水温度、加热介质的温度或压力等),合理选择某些设计参数(换热温差、放汽范围等),从而进行各热交换设备的热负荷、传热面积等的设计计算。

### 21.3.1 热力计算

#### 1. 已知参数

(1) 根据空调工程或生产工艺要求的制冷量 $Q_0$ 和冷冻水进、出蒸发器的温度 $t_{11}$ 、 $t_{12}$ 。

(2) 冷却水温度 $t_{w1}$ :根据当地自然条件决定。

(3) 工作蒸汽压力 $P_k$ :一般选取1[bar](表压)的工作蒸汽。

#### 2. 设计参数的选定

(1) 冷却水一般先进入吸收器,出吸收器的冷却水再进入冷凝器。冷却水总的温升一般取7~9[°C],考虑到吸收器的热负荷比冷凝器大,因此,通过吸收器的温升要比通过冷凝器的温升高些。

冷却水出吸收器的温度 $t_{w2}$ :  $t_{w2} = t_{w1} + \Delta t_{w1}$  [°C] (21.2)

冷却水出冷凝器的温度 $t_{w3}$ :  $t_{w3} = t_{w2} + \Delta t_{w2}$  [°C] (21.3)

(2) 冷凝温度 $t_k$ :一般比冷却水出冷凝器的温度高3~5[°C],

即

$$t_k = t_{w3} + (3 \sim 5) [\text{°C}] \quad (21.4)$$

(3) 冷凝压力 $P_k$ :根据 $t_k$ 从水蒸汽表查得相应的饱和压力。

(4) 蒸发温度 $t_0$ :一般比冷冻水出蒸发器的温度低2~4[°C]

即

$$t_0 = t_{11} - (2 \sim 4) [\text{°C}] \quad (21.5)$$

(5) 蒸发压力 $P_0$ :根据 $t_0$ 从水蒸汽表查得相应的饱和压力。

(6) 稀溶液出吸收器的温度 $t_2$ :一般比冷却水出吸收器的温度高3~5[°C],即  $t_2 = t_{w2} + (3 \sim 5) [\text{°C}]$  (21.6)

(7) 吸收器压力 $P_a$ :因冷剂水蒸汽流经挡水板时的阻力损

失，吸收器压力小于蒸发压力，压降  $\Delta P_0$  的大小与挡水板的结构和汽流速度有关，一般取  $\Delta P_0 = (0.13 \sim 0.67) \times 10^{-3} [\text{bar}] (0.1 \sim 0.5 [\text{mmHg}])$ ，即

$$P_a = P_0 - (0.13 \sim 0.67) \times 10^{-3} [\text{bar}] \quad (21.7)$$

(8) 稀溶液浓度  $\xi_a$ ：根据  $P_0$  和  $t_2$ ，从  $h-\xi$  图查得。

(9) 浓溶液浓度  $\xi_r$ ：一般放汽范围  $(\xi_r - \xi_a)$  为  $0.03 \sim 0.06$

$$\xi_r = \xi_a + (0.03 \sim 0.06) \quad (21.8)$$

(10) 浓溶液出发生器的温度  $t_4$ ：根据  $\xi_r$  和  $P_0$ ，从  $h-\xi$  图查得。

(11) 溶液出热交换器的温度  $t_7$ 、 $t_8$ ：浓溶液出热交换器的温度  $t_8$  应比  $\xi_r$  所对应的结晶温度高  $10 [^\circ\text{C}]$  以上，以防止在热交换器出口处产生结晶，通常可按下式计算：

$$t_8 = t_2 + (15 \sim 25) [^\circ\text{C}] \quad (21.9)$$

稀溶液出热交换器的温度  $t_7$  可由  $\xi_a$  和  $h_7$  从  $h-\xi$  图上查得， $h_7$  可根据热交换器的热平衡式确定

$$a(h_7 - h_2) = (a-1)(h_4 - h_8)$$

$$h_7 = \frac{a-1}{a}(h_4 - h_8) + h_2 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (21.10)$$

(12) 吸收器喷淋溶液的浓度  $\xi_0$  和焓值  $h_0$ ：可分别由下列公式求得

$$\xi_0 = \frac{f \cdot \xi_a + (a-1)\xi_r}{f + a - 1} \quad (21.11)$$

$$h_0 = \frac{f h_2 + (a-1)h_8}{f + a - 1} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (21.12)$$

$t_0$  可由  $\xi_0$  和  $h_0$  从  $h-\xi$  图查得。

### 3. 设备热负荷计算

在  $h-\xi$  图上确定了制冷循环中有关状态点的参数值后，就可以通过热平衡式计算出各热交换设备的热负荷。

(1) 发生器的单位热负荷  $q_A$

如图 21.7 所示，根据发生器得到的和失去的热量平衡式，即

$$q_h + ah_7 = (a-1)h_4 + h_3'$$

可得发生器的单位热负荷为

$$q_h = h_3' + (a-1)h_4 - ah_7 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (21.13)$$

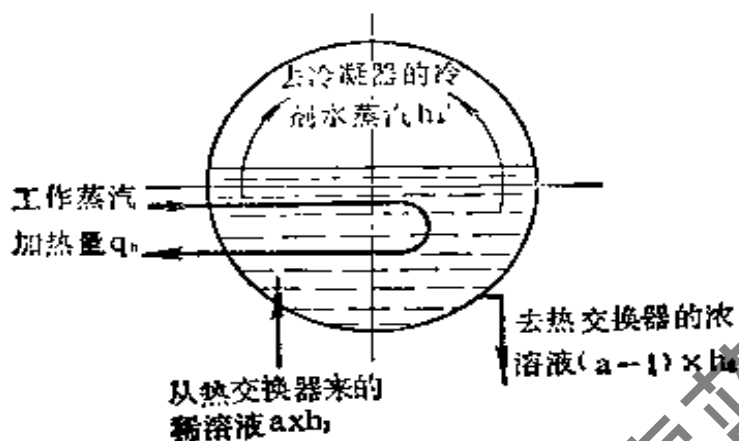


图 21.7 发生器的热平衡图

(2) 冷凝器的单位热负荷  $q_k$

由图 21.8 可知, 冷凝器的单位热负荷为

$$q_k = h_3' - h_3 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (21.14)$$

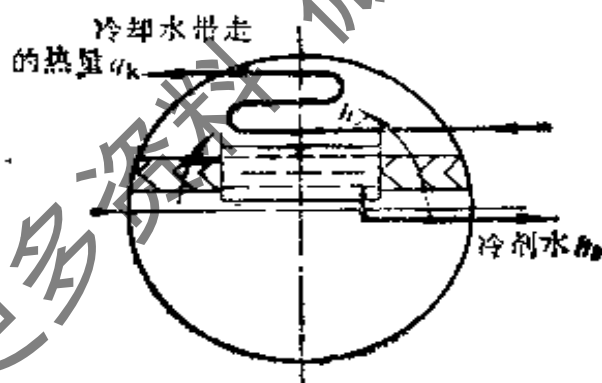


图 21.8 冷凝器的热平衡图

(3) 蒸发器的单位热负荷  $q_0$

蒸发器的热平衡关系如图 21.9 所示, 蒸发器的单位热负荷  $q_0$ , 即 1[kg] 制冷剂水汽化时所产生的制冷量可由下式求得

$$q_0 = h_1' - h_3 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (21.15)$$

(4) 吸收器的单位热负荷  $q_a$

从图 21.10 可以看出, 根据吸收器的热平衡关系式, 即

$$(a-1)h_8 + h_1' = q_a + ah_2$$

可得吸收器的单位负荷  $q_a$  为

$$q_a = (c-1)h_8 + h_1 - ah_2 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (21.16)$$

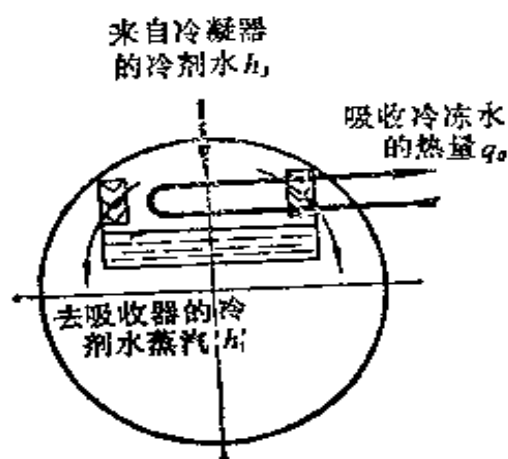


图 21.9 蒸压器的热平衡图

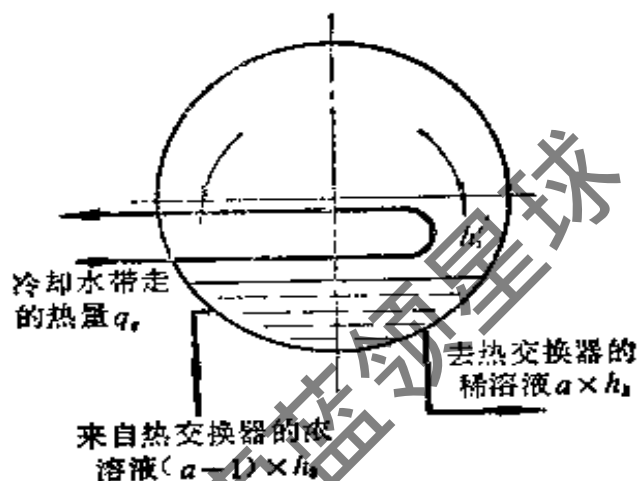


图 21.10 吸收器的热平衡图

(5) 热交换器的单位热负荷  $q_e$

如图 21.11 所示, 从发生器来的浓溶液在热交换器中放出的热量, 等于从吸收器来的稀溶液在热交换器中吸收的热量, 即

$$q_e = a(h_7 - h_2) = (a-1)(h_4 - h_8) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (21.17)$$

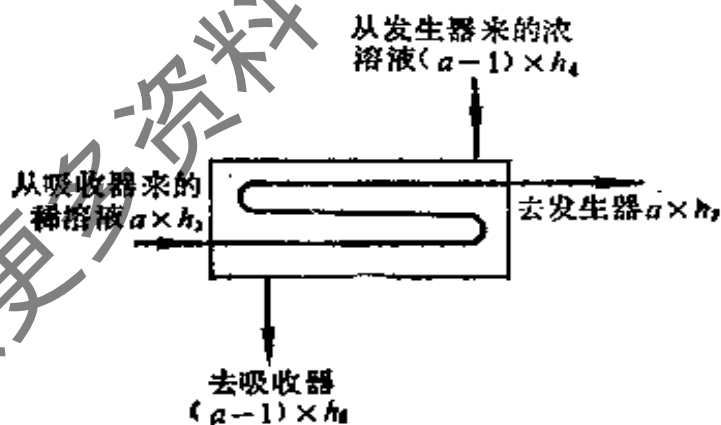


图 21.11 热交换器的热平衡图

#### 4. 制冷装置的热平衡及热力系数

如果忽略由于泵消耗功率所带给系统的热量, 则整个制冷装置的热平衡式为:

$$q_h + q_0 = q_a + q_e \quad [\text{kJ/kg}] \quad (21.18')$$

上式各项与制冷循环量  $D = Q_o/q_o$  [kg/s] 相乘, 可得

$$Q_h + Q_o = Q_a + Q_k \quad [\text{kW}] \quad (21.18)$$

式中,  $Q_o$ ——制冷装置的制冷量, [kW];

$Q_h$ ——发生器的耗热量, [kW];

$Q_a$ ——吸收器的热负荷, [kW];

$Q_k$ ——冷凝器的热负荷, [kW];

热力系数  $\zeta$  是表示消耗单位蒸汽加热量所能获得的制冷量, 用来评价制冷装置的经济性。

$$\zeta = \frac{Q_o}{Q_h} = \frac{q_o}{q_h} \quad (21.19)$$

单效溴化锂吸收式制冷机的热力系数  $\zeta$  一般为 0.65~0.75, 两效溴化锂吸收式制冷机的热力系数  $\zeta$  为 1.0 以上。

### 21.3.2 设备传热面积的计算

#### 1. 传热面积的计算

对于溴化锂吸收式制冷机, 各热交换设备的传热面积通常采用沙柯洛夫的简化公式计算

$$F = \frac{Q}{K[\Delta - a\Delta t_a - b\Delta t_b]} \quad [\text{m}^2] \quad (21.20)$$

式中,  $F$ ——传热面积, [m<sup>2</sup>];

$Q$ ——传热量, [W];

$K$ ——传热系数, [W/m<sup>2</sup>K];

$\Delta$ ——热交换器中的最大温差, 即热流体和冷流体进换热设备时的温差, [°C];

$a, b$ ——常数, 与换热设备内流体流动的方式有关, 其值见表 21.1;

$\Delta t_a$ ——温度变化较小的流体温度差, [°C];

$\Delta t_b$ ——温度变化较大的流体温度差, [°C]。

如果换热过程中, 有一种流体发生了集态变化(如冷凝器中制冷剂水蒸汽的凝结等), 则  $\Delta t_a = 0$ , 计算公式简化为

$$F = \frac{Q}{K(\Delta - bt_b)} \quad [\text{m}^2] \quad (21.20)$$



各种流动状态下的  $a, b$  值

表 21.1

| 流 动 方 式 | $a$       | $b$  |
|---------|-----------|------|
| 逆 流     | 0.35      | 0.65 |
| 顺 流     | 0.65      | 0.65 |
| 叉 流     | 0.45~0.55 | 0.65 |

## (1) 发生器的传热面积

$$F_g = \frac{Q_g}{K_g[(t_n - t_5) - 0.65(t_4 - t_5)]} [\text{m}^2] \quad (21.21)$$

式中,  $K_g$ ——发生器的传热系数,  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ ;

$t_n$ ——工作蒸汽的温度,  $[\text{C}]$ 。

在发生器中, 温度为  $t_7$ , 浓度为  $\xi_0$  的稀溶液先被加热到温度为  $t_5$  的饱和状态, 然后沸腾产生冷剂水蒸汽, 离开发生器时的温度为  $t_4$ 。因为 7-5 过程所需的热量与沸腾过程所需的热量相比只占极小的比例, 所以在计算时, 换热过程中溶液的计算温度采用  $t_5$ , 而不采用  $t_7$ 。

## (2) 冷凝器的传热面积

$$F_k = \frac{Q_k}{K_k[(t_k - t_{w1}) - 0.65(t_{v1} - t_{w1})]} [\text{m}^2] \quad (21.22)$$

式中,  $K_k$ ——冷凝器的传热系数,  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ 。

在冷凝器中冷却水必须将温度为  $t_{s'}$  的冷剂水蒸汽 (过热状态) 冷却到饱和状态后才能使之凝结为冷剂水, 由于冷却过程所占的热负荷很小, 因此计算时仍采用冷凝温度  $t_k$  而不采用  $t_{s'}$ 。

## (3) 蒸发器的传热面积

在蒸发器中冷剂水发生相变, 故  $\Delta t_0 = 0$ , 其传热面积按下式计算

$$F_0 = \frac{Q_0}{K_0[(t_{i1} - t_0) - 0.65(t_{i1} - t_{i1})]} [\text{m}^2] \quad (21.23)$$

式中,  $K_e$ ——蒸发器的传热系数,  $[W/m^2K]$ 。

#### (4) 吸收器的传热面积

在吸收器中混合溶液喷淋在吸收器管簇外, 沿管外成液膜流下, 冷却水在管内流动, 喷淋液与冷却水的流动方式为叉流, 故

$$F_a = \frac{Q_a}{K_a [(t_b - t_{w1}) - 0.5(t_{w2} - t_{w1}) - 0.65(t_b - t_2)]} \quad [m^2] \quad (21.24)$$

式中  $K_a$ ——吸收器的传热系数,  $[W/m^2K]$ 。

#### (5) 热交换器的传热面积

在热交换器中, 由于稀溶液流量大, 其温度变化较小。两种溶液的流动方式一般采用逆流形式, 故

$$F_t = \frac{Q_t}{K_t [(t_4 - t_2) - 0.35(t_7 - t_2) - 0.65(t_4 - t_8)]} \quad [m^2] \quad (21.25)$$

式中,  $K_t$ ——热交换器的传热系数,  $[W/m^2K]$ 。

### 2. 传热系数 $K$

在溴化锂吸收式制冷机中, 影响各设备传热系数  $K$  值的因素很多, 如热交换的形式、管子材料、喷淋密度、热流密度、管径、管内外介质的流速、污垢情况等, 目前国内这方面的研究工作做得很少, 因此, 在设计计算时, 一般根据某些同类设备的试验数据作为选取传热系数值  $K$  的依据。

### 21.3.3 加热蒸汽的消耗量及泵的流量计算

#### 1. 加热蒸汽的消耗量 $M_h$

$$M_h = (1.05 \sim 1.10) \frac{Q_h}{r} \quad [kg/s] \quad (21.26)$$

式中, 1.05~1.10——考虑热损失的附加系数;

$r$ ——加热蒸汽的汽化潜热,  $[kJ/kg]$ 。

#### 2. 冷冻水泵的流量

$$V_f = \frac{Q_w}{1000 C_w (t_{11} - t_{12})} 3600 \quad [m^3/h] \quad (21.27)$$

式中,  $c_w$ ——冷冻水的比热,  $[\text{kJ}/\text{kgK}]$ 。

### 3. 冷却水泵的流量

溴化锂吸收式制冷机中, 吸收器和冷凝器的冷却水通常是串联使用的。即冷却水先通过吸收器再通过冷凝器, 因此, 冷却水量的确定要由两个方面来考虑。

对于吸收器

$$V_{w_1} = \frac{Q_a}{1000 c_w (t_{w_2} - t_{w_1})} 3600 [\text{m}^3/\text{h}] \quad (21.28)$$

对于冷凝器

$$V_{w_2} = \frac{Q_k}{1000 c_w (t_{w_2} - t_{w_1})} 3600 [\text{m}^3/\text{h}] \quad (21.29)$$

计算结果应使  $V_{w_1} \approx V_{w_2}$ , 如两者相差较大, 则应重新考虑冷却水总温升的分配, 直至两者相等或相近。

### 4. 蒸发器泵的流量

由于蒸发器内压力很低, 为了消除静液柱高度对蒸发沸腾过程的影响, 蒸发器通常做成喷淋式。为了保证一定的喷淋密度, 冷剂水的喷淋量大于实际的蒸发量, 两者之比称为蒸发器冷剂水的再循环倍率, 用  $f_0$  表示, 一般取  $f_0 = 10 \sim 20$ , 因此, 蒸发器泵的流量为

$$V_0 = \frac{f_0 D}{1000} 3600 [\text{m}^3/\text{h}] \quad (21.30)$$

### 5. 发生器泵的流量

$$V_h = \frac{aD}{\rho_0} 3600 [\text{m}^3/\text{h}] \quad (21.31)$$

式中,  $\rho_0$ ——稀溶液的密度,  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 。

### 6. 吸收器泵的流量

$$V_a = \frac{(f + a - 1)D}{\rho_p} 3600 [\text{m}^3/\text{h}] \quad (21.32)$$

式中,  $\rho_p$ ——喷淋溶液的密度,  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 。

【例 21.2】 已知条件: 制冷量  $Q_0 = 50 \times 10^4 [\text{kcal}/\text{h}] (581.4 \text{ kW})$

冷冻水出蒸发器的温度  $t_{1,2} = 7[^\circ\text{C}]$

冷冻水进蒸发器的温度  $t_{1,1} = 12[^\circ\text{C}]$

冷却水温度  $t_{w,1} = 32[^\circ\text{C}]$

加热蒸汽的压力  $p_h = 0.8[\text{kgf/cm}^2]$

(表)( $t_h = 116.33[^\circ\text{C}]$ )

试进行单效溴化锂吸收式制冷的热力计算和传热计算。

【解】 1. 设计参数的选定

(1) 吸收器出口冷却水温度  $t_{w,2}$

$$t_{w,2} = t_{w,1} + 4.5 = 36.5[^\circ\text{C}] \quad (\text{取 } \Delta t_{w,1} = 4.5[^\circ\text{C}])$$

(2) 冷凝器出口冷却水温度  $t_{w,3}$

$$t_{w,3} = t_{w,2} + 3.5 = 40[^\circ\text{C}] \quad (\text{取 } \Delta t_{w,2} = 3.5[^\circ\text{C}])$$

(3) 冷凝温度  $t_k$

$$t_k = t_{w,3} + 5 = 45[^\circ\text{C}] \quad (\text{取 } \Delta t = 5[^\circ\text{C}])$$

(4) 冷凝器压力  $P_k$

根据  $t_k = 45[^\circ\text{C}]$ , 查饱和水蒸汽表得  $P_k = 71.9[\text{mm Hg}](0.096[\text{bar}])$

(5) 蒸发温度  $t_o$

$$t_o = t_k - 2 = 5[^\circ\text{C}] \quad (\text{取 } \Delta t = 2[^\circ\text{C}])$$

(6) 蒸发压力  $P_o$

根据  $t_o = 5[^\circ\text{C}]$ , 查饱和水蒸汽表得  $P_o = 6.54[\text{mm Hg}](0.0087[\text{bar}])$

(7) 吸收器压力  $P_a$

假定由蒸发器到吸收器之间气流的压降  $\Delta P = 0.14[\text{mm Hg}](0.0002[\text{bar}])$

$$P_a = P_o - \Delta P = 6.54 - 0.14 = 6.4[\text{mm Hg}](0.0085[\text{bar}])$$

(8) 吸收器内溶液最低温度  $t_2$

$$t_2 = t_{w,3} + 3.5 = 40[^\circ\text{C}] \quad (\text{取 } \Delta t = 3.5[^\circ\text{C}])$$

(9) 稀溶液浓度  $\xi_a$

根据  $P_a$  和  $t_2$ , 从  $h-\xi$  图查得  $\xi_a = 58\%$

(10) 浓溶液浓度  $\xi_r$

$$\xi_r = \xi_a + 4\% = 62\% \quad (\text{取 } \xi_r - \xi_a = 4\%)$$

(11) 发生器内溶液最高温度  $t_4$

根据  $\xi_r, P_k$ , 从  $h-\xi$  图查得  $t_4 = 96[^\circ\text{C}]$

上述各参数值确定后, 可在溴化锂水溶液的  $h-\xi$  图上进一步查得相应点的状态参数, 列表于表 21.2, 其循环过程及点号如图 21.6 所示。

表 21.2 中, 热交换器出口处浓溶液的温度  $t_3$  由式 21.9 确定, 取  $\Delta t = 19[^\circ\text{C}]$ , 则

$$t_3 = t_2 + 19 = 59[^\circ\text{C}]$$

再由  $t_3, \xi_r$  从  $h-\xi$  图查得  $h_3 = 74.5[\text{kcal/kg}]$

热交换器出口处稀溶液的焓值  $h_7$  由式 21.1、式 21.10 求得

h-ξ 图上各点参数值

表-21.2

| 序号 | 名称           | 状态点号 | 温度<br>[°C] | 浓度<br>% | 压力<br>[mmHg] | 焓值<br>[kcal/kg] |
|----|--------------|------|------------|---------|--------------|-----------------|
| 1  | 蒸发器出口处制冷剂水蒸汽 | 1'   | 5          | 0       | 6.54         | 699.3           |
| 2  | 吸收器出口处稀溶液    | 2    | 40         | 58      | 6.4          | 66              |
| 3  | 冷凝器出口处制冷剂水   | 3    | 45         | 0       | 71.9         | 145             |
| 4  | 冷凝器进口处制冷剂水蒸汽 | 3'   | 91.75      | 0       | 71.9         | 738.5           |
| 5  | 发生器出口处浓溶液    | 4    | 96         | 62      | 71.9         | 91              |
| 6  | 发生器内开始沸腾的稀溶液 | 5    | 87.5       | 58      | 71.9         | 87.9            |
| 7  | 热交换器出口处稀溶液   | 7    | 73.5       | 58      |              | 81.4            |
| 8  | 热交换器出口处浓溶液   | 8    | 59         | 62      |              | 74.5            |
| 9  | 吸收器喷淋溶液      | 9    | 44.5       | 59      |              | 67.8            |

$$a = \frac{\xi_r}{\xi_r - \xi_a} = \frac{62}{62 - 58} = 15.5$$

$$h_7 = h_2 + \frac{a-1}{a} \times (h_4 - h_2)$$

$$= 66 + \frac{15.5-1}{15.5} \times (91 - 66)$$

$$= 81.4 [\text{kcal/kg}]$$

由  $h_7, \xi_a$  从  $h-\xi$  图查得  $t_7 = 73.5 [^\circ\text{C}]$

喷淋溶液的浓度和焓值分别由式 21.11、式 21.12 求得

$$\xi_9 = \frac{f \xi_a + (a-1) \xi_r}{f + a - 1} = \frac{50 \times 0.58 + (15.5 - 1) \times 0.62}{50 + 15.5 - 1} = 59\% (\text{取 } f = 50)$$

$$h_9 = \frac{f h_2 + (a-1) h_4}{f + a - 1} = \frac{50 \times 66 + (15.5 - 1) \times 91}{50 + 15.5 - 1} = 67.8 [\text{kcal/kg}]$$

由  $\xi_9, h_9$  从  $h-\xi$  图查得  $t_9 = 44.5 [^\circ\text{C}]$

## 2. 设备热负荷计算

### (1) 设备的单位热负荷

#### 1) 蒸发器的单位热负荷

$$q_0 = h_{1'} - h_2 = 699.3 - 66 = 633.3 [\text{kcal/kg}]$$

2) 发生器的单位热负荷

$$q_h = h_3' + (a-1)h_4 - ah_7 = 738.5 + (15.5-1) \times 91 - 15.5 \times 81.4 \\ = 796.3 [\text{kcal/kg}]$$

3) 冷凝器的单位热负荷

$$q_k = h_3' - h_3 = 738.5 - 145 = 593.5 [\text{kcal/kg}]$$

4) 吸收器的单位热负荷

$$q_a = h_1' + (a-1)h_2 - ah_3 = 699.3 + (15.5-1) \times 74.5 - 15.5 \times 66 \\ = 756.6 [\text{kcal/kg}]$$

5) 热交换器的单位热负荷

$$q_t = a(h_7 - h_2) = 15.5 \times (81.4 - 66) = 238.7 [\text{kcal/kg}]$$

(2) 设备的热负荷

1) 制冷剂水的循环量

$$D = \frac{Q_o}{q_o} = \frac{50 \times 10^4}{554.3} = 902 [\text{kg/h}]$$

2) 发生器的热负荷

$$Q_h = Dq_h = 902 \times 796.3 = 718263 [\text{kcal/h}]$$

3) 冷凝器的热负荷

$$Q_k = Dq_k = 902 \times 593.5 = 535337 [\text{kcal/h}]$$

4) 吸收器的热负荷

$$Q_a = Dq_a = 902 \times 756.6 = 682453 [\text{kcal/h}]$$

5) 热交换器的热负荷

$$Q_t = Dq_t = 902 \times 238.7 = 215307 [\text{kcal/h}]$$

(3) 热平衡和热力系数

1) 热平衡

吸收热量为  $Q_o + Q_h = 500000 + 718263 = 1218263 [\text{kcal/h}]$

放出热量为  $Q_k + Q_a = 535337 + 682453 = 1217790 [\text{kcal/h}]$

两者相差极小，可认为是平衡的。

2) 热力系数

$$\zeta = \frac{Q_o}{Q_h} = \frac{50 \times 10^4}{718263} \approx 0.7$$

3. 加热蒸汽的消耗量和泵的流量计算

(1) 加热蒸汽的消耗量

$$M_h = 1.05 \frac{Q_h}{r} = 1.05 \times \frac{718263}{528.3} = 1427.6 [\text{kg/h}]$$

(2) 冷冻水泵的流量

$$V_t = \frac{Q_o}{1000 c_w (t_{t_1} - t_{t_2})} = \frac{50 \times 10^4}{1000 \times (12 - 7)} = 100 [\text{m}^3/\text{h}]$$

(3) 冷却水泵的流量

$$V_{w_1} = \frac{Q_a}{1000 c_w (t_{w_2} - t_{w_1})} = \frac{682453}{1000 \times (36.5 - 32)} = 152 [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$V_{w_2} = \frac{Q_k}{1000 c_w (t_{w_3} - t_{w_2})} = \frac{535337}{1000 \times (40 - 36.5)} = 153 [\text{m}^3/\text{h}]$$

$V_{w_1} = V_{w_2}$ , 说明冷却水温升的分配是合理的, 取  $V_w = 153 [\text{m}^3/\text{h}]$ .

(4) 蒸发器泵的流量

$$V_o = \frac{f_o D}{1000} = \frac{10 \times 902}{1000} = 9 [\text{m}^3/\text{h}] \text{ (取 } f_o = 10 \text{)}$$

(5) 发生器泵的流量

$$V_h = \frac{aD}{\rho_a} = \frac{15.5 \times 902}{1.67 \times 10^3} = 8.4 [\text{m}^3/\text{h}]$$

(6) 吸收器泵的流量

$$V_a = \frac{(f+a-1)D}{\rho_p} = \frac{(50+15.5-1) \times 902}{1.69 \times 10^3} = 34.4 [\text{m}^3/\text{h}]$$

4. 设备的传热面积计算

(1) 发生器的传热面积  $F_h$  取  $K_h = 950 [\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$

$$\begin{aligned} F_h &= \frac{Q_h}{K_h [t_h - t_s] + 0.65(t_d - t_s)} \\ &= \frac{718283}{950 \times [(116.33 - 87.5) - 0.65 \times (96 - 87.5)]} = 32 [\text{m}^2] \end{aligned}$$

(2) 冷凝器的传热面积  $F_k$  取  $K_k = 2500 [\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$

$$\begin{aligned} F_k &= \frac{Q_k}{K_k [t_k - t_{w_1}] - 0.65(t_{w_2} - t_{w_1})} \\ &= \frac{535337}{2500 \times [(45 - 36.5) - 0.65 \times (40 - 36.5)]} = 34 [\text{m}^2] \end{aligned}$$

(3) 蒸发器的传热面积  $F_o$  取  $K_o = 1800 [\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$

$$\begin{aligned} F_o &= \frac{Q_o}{K_o [t_{t_1} - t_o] - 0.65(t_{t_1} - t_{t_2})} \\ &= \frac{500000}{1800 \times [(12 - 5) - 0.65 \times (12 - 7)]} = 74 [\text{m}^2] \end{aligned}$$

(4) 吸收器的传热面积  $F_a$  取  $K_a = 800 [\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$

$$F_a = \frac{Q_a}{K_a[(t_9 - t_{w1}) - 0.5(t_{w1} - t_{w2}) - 0.65(t_9 - t_2)]}$$

$$= \frac{682453}{800 \times [(44.5 - 32) - 0.5 \times (36.5 - 32) - 0.65 \times (44.5 - 40)]} = 186 [\text{m}^2]$$

(5) 热交换器的传热面积  $F_t$  取  $K_t = 400 [\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$

$$F_t = \frac{Q_t}{K_t[(t_4 - t_2) - 0.35(t_7 - t_2) - 0.65(t_4 - t_8)]}$$

$$= \frac{216307}{400 \times [(96 - 40) - 0.35 \times (73.5 - 40) - 0.65 \times (96 - 59)]} = 27 [\text{m}^2]$$

## 21.4 溴化锂吸收式制冷机的辅助设备和附加措施

### 21.4.1 辅助设备

#### 1. 抽气装置

溴化锂吸收式制冷机的工作过程是在较高的真空度下进行的，外界空气很容易渗入机器内部。不凝性气体的存在将影响管壁传热和吸收过程的正常进行，制冷量将显著减少，因此，必须及时抽除机器内的不凝性气体。

在抽除不凝性气体时，制冷剂水蒸汽将同不凝性气体一起被抽出。由于水蒸汽在低压下的比容很大，直接影响抽除效果。同时水蒸汽如长期被抽除，将改变溶液的浓度，影响机器的性能。为此，在抽气装置中设有冷剂分离器，如图 21.12 所示，从机器内抽出的不凝性气体和冷剂水蒸汽一起进入冷剂分离器，冷剂水蒸汽被喷淋的溴化锂溶液所吸收，不凝性气体由真空泵排出。阻油器设有阻油挡板，其作用是防止真空泵停止运动时，泵内的润滑油倒流入制冷机系统内。

自动抽气装置如图 21.13 所示。自动抽气装置虽有多种形式，但其基本原理都是利用溶液泵排出的高压流体作为抽气动力，通过引射器抽出不凝性气体。不凝性气体随同溶液一起进入贮气室，在贮气室内与溶液分离后上升至贮气室顶部，溶液再经回流阀返回吸收器。当不凝性气体体积聚到一定数量时，关闭回流



阀，依靠溶液泵的压力将不凝性气体压缩到大气压力以上，然后打开放气阀，将不凝性气体排出。

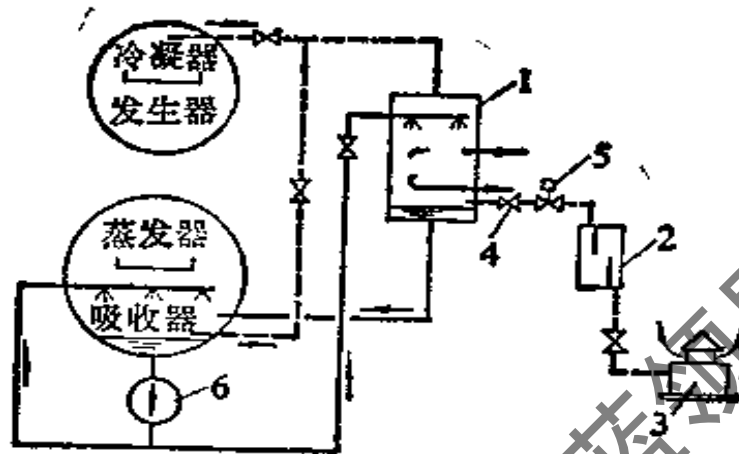


图 21.12 抽气装置  
1—冷剂分离器；2—阻油器；3—真空泵；4—手动截止阀；  
5—电磁阀；6—吸收器泵

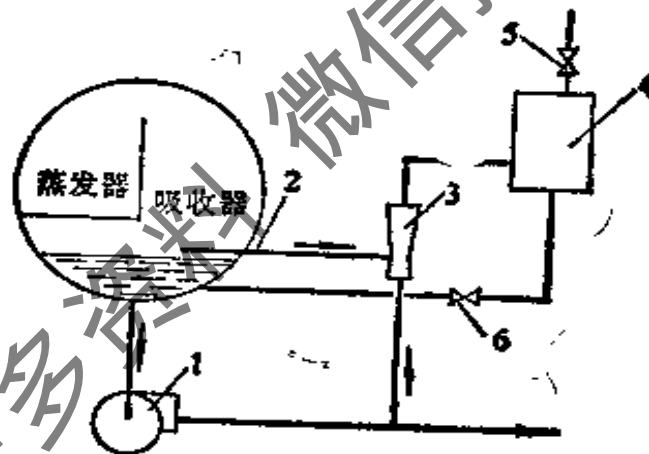


图 21.13 自动抽气装置  
1—溶液泵；2—抽气管；3—引射器；4—贮气室；  
5—放气阀；6—回流阀

自动抽气装置的抽气效率较低，抽气量较小，只能在机组正常运行时使用，在机组运行前抽真空等仍由机械真空泵抽气装置进行。

## 2. 屏蔽泵

为了使制冷系统保持稳定的真空度，吸收器泵，发生器泵和蒸发器泵都采用结构紧凑、密封性能好的屏蔽泵。屏蔽泵是将

泵的叶轮和电动机的转子装在同一根轴上，泵与电动机共用一个外壳，电机转子的外侧及定子的内侧各加上一个圆筒形的屏蔽套，使电机的绕线与溶液分开，防止溶液对转子和定子的腐蚀。屏蔽泵的结构和工作过程如图 21.14 所示，工作液体由吸入口进入，经叶轮和蜗壳升压后由出口排出，一部分液体由连接管流入电机的后部，用以冷却和润滑轴承，并通过转子和定子的屏蔽套的间隙来冷却电机，最后冷却和润滑前轴承后回到叶轮的吸入口。

屏蔽泵的安装位置应保证一定的灌注高度，以防止屏蔽泵发生汽蚀、产生噪声和震动等。

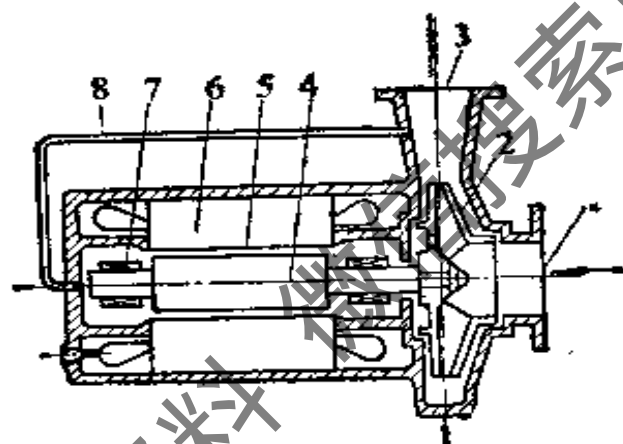


图 21.14 屏蔽泵

1—吸入口；2—叶轮；3—出口；4—转子；5—屏蔽套；  
6—定子；7—轴承；8—连接管

### 3. 自动溶晶管

在发生器出口溢流箱的上部连接一根J形管通入吸收器。制冷装置正常运转时，浓溶液从溢流箱的底部流出，经热交换器降温后流入吸收器。如果浓溶液在热交换器出口处因温度过低而结晶，堵塞管道使溶液不能流通，溢流箱内的液位升高。当液位高于J形管的上端位置时，高温的浓溶液便由J形管直接流入吸收器，使出吸收器的稀溶液温度升高，因而提高了热交换器出口处浓溶液的温度，使结晶的溴化锂自动溶解。消除了结晶，发生器中的浓溶液又重新从正常的回流管流入吸收器。

## 21.4.2 附加措施

### 1. 防腐措施

由于溴化锂溶液对金属材料具有强烈的腐蚀作用，尤其在有空气存在的情况下腐蚀更为严重，而腐蚀产生的不凝性气体又将影响制冷装置的性能，因此，除了严格防止空气漏入并装设抽气装置外，还必须采取适当的防腐措施。

近年来通过试验证明，在溴化锂溶液中加入 0.1~0.3% 的铬酸锂 ( $\text{Li}_2\text{CrO}_4$ ) 作为缓蚀剂，同时加入 0.02% 的氢氧化锂，使溶液呈弱碱性，保持 pH 值在 9~10.5 之间，并且，溶液温度不超过 120[°C]，可以取得良好的防腐蚀效果。

### 2. 添加能量增强剂

在溴化锂溶液中加入能量增强剂辛醇 [ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}_2\text{C}_2\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ] 可以提高机器的制冷能力。

辛醇是一种表面活性剂，它能减小溴化锂溶液的表面张力，使溶液与水蒸汽的结合能力增强；能降低溴化锂水溶液的分压，使作为吸收推动力的压差增大，提高了吸收效果。另外，添加辛醇后，冷凝器中的水蒸汽由膜状凝结变为珠状凝结，提高了冷凝效果。

试验证明，辛醇的添加量通常为溴化锂溶液量的 0.2~0.3%，添加辛醇后制冷量约提高 10~15%。

辛醇的密度比纯水或溴化锂水溶液小，基本上不溶于水或溴化锂水溶液，因此，随着机组不断运行，辛醇将积聚在蒸发器和吸收器液面上，逐渐失去了提高制冷量的作用。为此，必须定期将蒸发器水盘中的冷剂水旁通至吸收器，采用加热或冲击的方法，使辛醇与溶液重新混合，循环使用。

## 21.5 溴化锂吸收式制冷机的性能

溴化锂吸收式制冷机的性能除了受冷却水和冷冻水的温度、流量及换热表面污垢情况等因素的影响外，还与加热蒸汽的压力（温度）、溶液的流量等因素有关。

## 1. 加热蒸汽压力与制冷量的关系

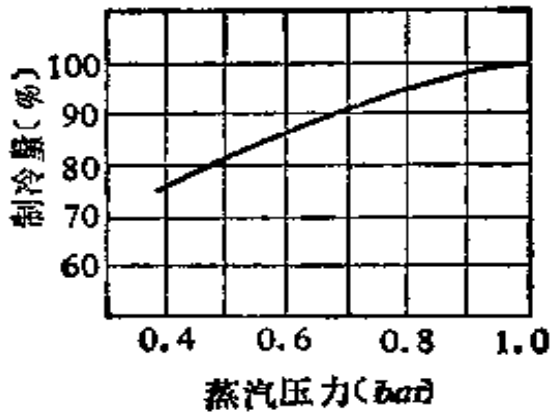


图 21.15 加热蒸汽压力和制冷量关系

加热蒸汽压力对于制冷量的影响如图 21.15 所示。加热蒸汽压力每提高 0.1[bar], 制冷量约增加 3~5%。

加热蒸汽压力下降, 将引起浓溶液温度与浓度降低, 放汽范围( $\xi_r - \xi_0$ )减小, 使吸收器中吸收制冷剂水蒸汽的能力减弱, 因而制冷量下降。

虽然提高加热蒸汽压力可以增加制冷量, 但是, 随着加热蒸汽压力的提高, 浓溶液浓度过大, 易发生结晶的危险; 同时, 当溶液温度过高时, 会使加入的缓蚀剂铬酸锂失去作用, 所以, 使用的加热蒸汽温度以不超过 132[°C] 为宜。

## 2. 冷冻水出口温度与制冷量的关系

当其他参数不变时, 蒸发器出口冷冻水温度和制冷量的关系如图 21.16 所示。冷冻水出口温度每升高 1[°C], 制冷量约增加 4~6%。

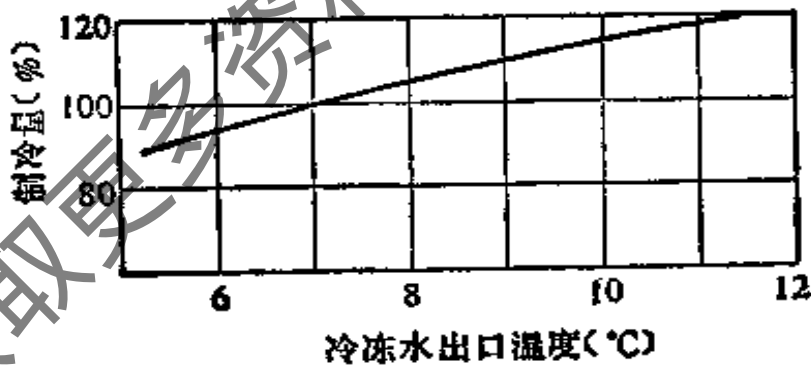


图 21.16 冷冻水出口温度和制冷量的关系

由于蒸发压力取决于冷冻水出口温度, 如果冷冻水出口温度降低, 则蒸发压力(蒸发温度)下降, 吸收器中吸收制冷剂水蒸汽的能力减弱, 稀溶液浓度升高, 放汽范围( $\xi_r - \xi_0$ )减小, 因此制冷量下降。

### 3. 冷却水进口温度和制冷量的关系

冷却水进口温度对制冷量的影响如图 21.17 所示。冷却水进口温度每降低 1[°C], 制冷量约增加 4%。

冷却水进口温度降低, 将使吸收器内稀溶液温度下降, 吸收效果增强, 稀溶液浓度随之下降; 同时, 冷凝温度也将降低, 引起浓溶液浓度升高, 因而造成放汽范围( $\xi_r - \xi_o$ )增大, 制冷量增加。

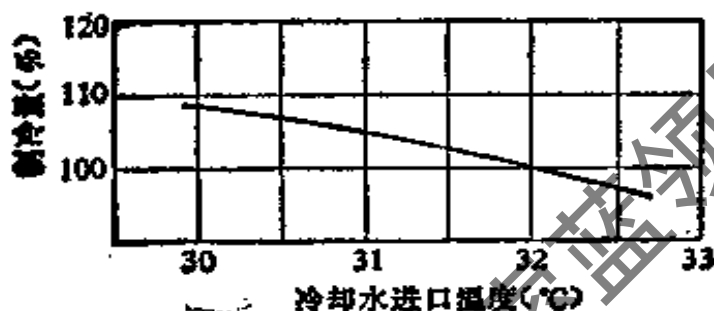


图 21.17 冷却水进口温度和制冷量的关系

必须指出, 当冷却水温度过低时, 将会产生浓溶液结晶、蒸发器泵吸空等问题。当冷却水进口温度低于 16[°C] 时, 应减少冷却水量, 以适当提高其出口温度。

### 4. 冷却水量、冷冻水量与制冷量的关系

由于冷却水量的变化将引起冷却水温度的改变, 因此其变化对制冷量的影响与冷却水温度变化对制冷量的影响相似。冷却水量变化对制冷量的影响如图 21.18 所示。

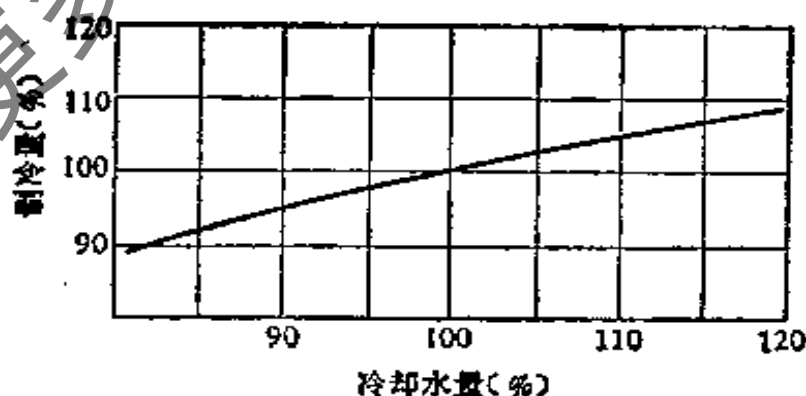


图 21.18 冷却水量与制冷量的关系

冷冻水出口温度不变时, 冷冻水量对制冷量的影响很小。以

冷冻水量增大为例，虽然冷冻水量增大使蒸发器传热管内的流速加快，传热系数增大，制冷量增加，但是，由于外界负荷不变，将使冷冻水的回水温度降低，导致平均温差减小，制冷量减少，其结果是制冷量几乎不发生变化，如图 21.19 所示。

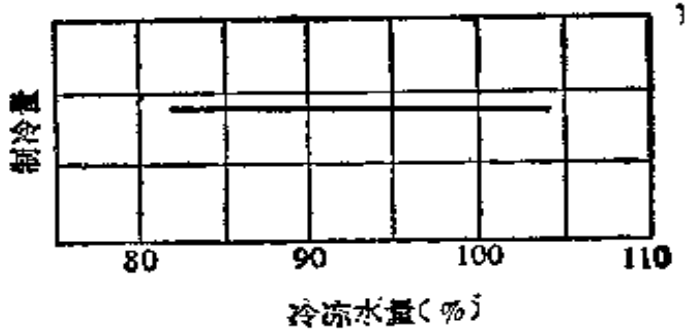


图 21.16 冷却水量与制冷量的关系

5. 稀溶液循环量与制冷量的关系

图 21.20 表示稀溶液循环量、蒸汽压力与制冷量的关系。从图中可以看出，制冷量基本上与溶液循环量成正比。

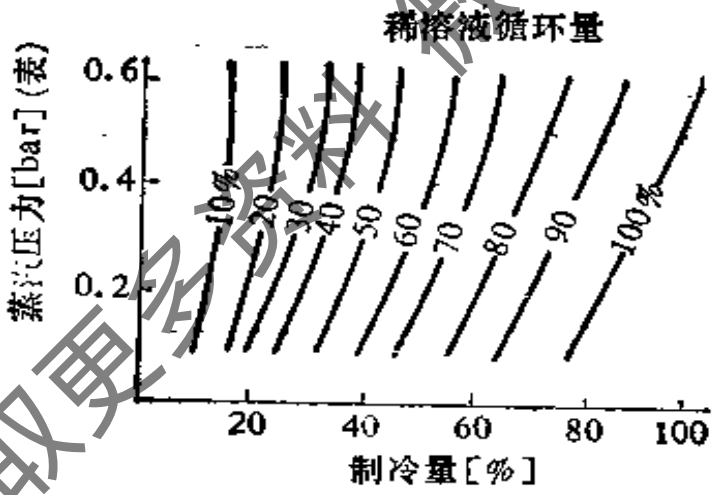


图 21.20 稀溶液循环量与制冷量的关系

6. 水侧污垢对制冷量的影响

溴化锂吸收式制冷机运转一段时间后，在传热管内、外壁将逐渐形成一层污垢。污垢系数越大，传热性能越差，制冷量随之下降，其影响可以表 21.3 看出。

由于污垢系数对机组性能影响较大，因此在运行期间应及时

取措施以保证一定的水质要求。

污垢系数与制冷量的关系

表 21.3

| 类别   | 污垢系数<br>$m^2s^{\circ}C/kJ$ | 制冷量%  |       |       |
|------|----------------------------|-------|-------|-------|
|      |                            | 0.086 | 0.172 | 0.344 |
| 冷却水侧 | 100                        | 89    | 74    |       |
| 冷冻水侧 | 100                        | 92    | /     |       |

## 21.6 冷量的自动调节

溴化锂吸收式制冷机的制冷量调节可通过控制冷却水量、加热蒸汽量、加热蒸汽凝结水量和溶液循环量等方法来实现。现在一般使用控制加热蒸汽量、溶液循环量或组合式调节等方法。

### 1. 冷却水量调节法

改变冷却水量，可调节机组的制冷量，但控制的范围较小，且随着制冷量减少，加热蒸汽的消耗比率将逐渐增加，如图21.21所示。

### 2. 加热蒸汽量调节法

改变加热蒸汽量可对制冷量进行控制，该调节法的蒸汽消耗率比冷却水量调节法小。从图 21.21 可以看出，当机组在低负荷运行时，蒸汽消耗率急剧上升，因此，采用这种调节方法时，制冷量最好不低于 50%。

### 3. 加热蒸汽凝结水量调节法

加热蒸汽凝结水量调节法是把调节阀安装在加热蒸汽的凝水管道上，用控制凝结水量的方法改变发生器的有效传热面积，从而改变发生器的热负荷，使机组的制冷量发生变化，其调节特性

与加热蒸汽量调节法基本相同。

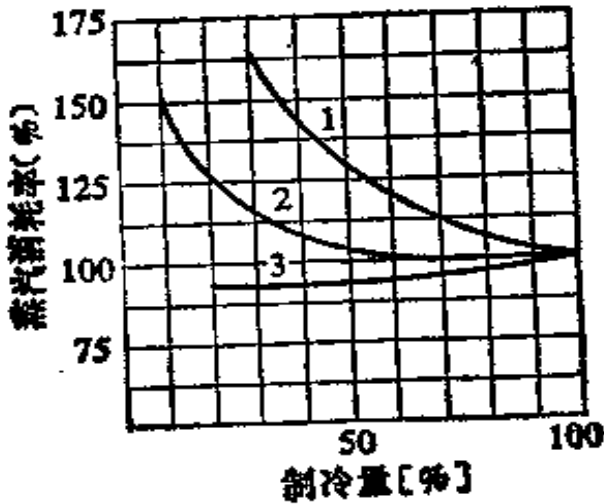


图 21.21 各种冷量调节法与蒸汽消耗率的关系

1—冷却水量调节法；2—加热蒸汽量(或凝结水量)调节法；3—溶液循环量调节法

#### 4. 溶液循环量调节法

溶液循环量调节法是根据冷冻水出口温度来控制送入发生器的稀溶液量，达到改变制冷量的目的。从图 21.21 可以看出，采用溶液循环量调节法效果最好，在整个控制范围内，蒸汽消耗率几乎是不变的。

单独采用溶液循环量调节法有可能产生浓溶液结晶，这是因为如不控制加热蒸汽量，进入发生器的稀溶液量减少将使溶液的浓度增大。

#### 5. 组合式调节法

目前采用的有溶液循环量和加热蒸汽量组合调节及溶液循环量和加热蒸汽凝结水量组合调节等方法。其优点是调节制冷量时，蒸汽消耗率变化较小，并且，减少了浓溶液结晶的可能性。

### 21.7 两效溴化锂吸收式制冷机

单效溴化锂吸收式制冷机一般采用 1[bar] (表压) 的加热蒸汽为热源，其热力系数约为 0.7。当有较高的加热蒸汽可供利用时，为了充分利用热源，提高机组的热效率，通常使用两效溴化锂吸收式制冷机。

两效溴化锂吸收式制冷机是在机组中设有高压与低压两只发生器。在高压发生器中采用压力较高的蒸汽(一般为 6~10[bar]) 或燃油、燃气等热源来加热，由它产生的制冷剂蒸汽作为低压发生器的热源。这样，不仅有效地利用了制冷剂蒸汽的潜热，同时又减小了冷凝器的热负荷，因此机组的热效率较高，热力系数可达 1.0 以上。



图 21.22 为两效溴化锂吸收式制冷机的系统原理图。它由高压发生器、低压发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器、高温热交换器，低温热交换器、泵和抽气装置等组成。高压发生器单独设置在一个筒体内，另一筒体由低压发生器、冷凝器、蒸发器和吸收器等组成。组成。

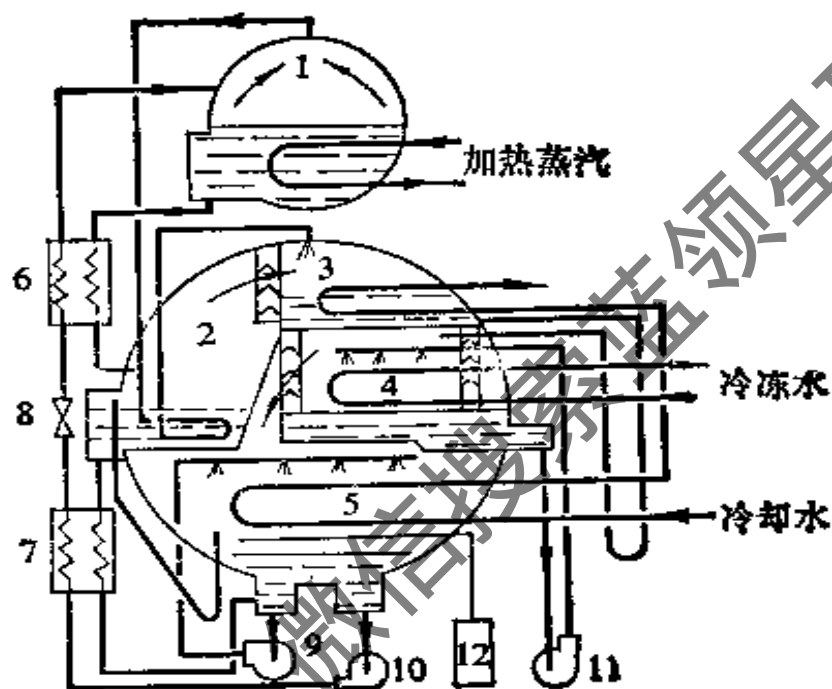


图 21.22 两效溴化锂吸收式制冷机系统原理图

- 1—高压发生器；2—低压发生器；3—冷凝器；4—蒸发器；5—吸收器；  
6—高温热交换器；7—低温热交换器；8—调节阀；9—吸收器泵；10—  
发生器泵；11—蒸发器泵；12—抽气装置

吸收器出口的稀溶液由发生器泵输送，先后流经低、高温热交换器，温度升高后进入高压发生器，被管内的工作蒸汽加热产生制冷剂水蒸汽，溶液的温度和浓度升高。由高压发生器出来的溶液经高温热交换器降温后进入低压发生器，被管内来自高压发生器的制冷剂水蒸汽加热，再次产生制冷剂水蒸汽，溶液的浓度进一步提高。

高压发生器中产生的制冷剂水蒸汽加热低压发生器中的溶液后放出潜热，凝结成制冷剂水，经节流后与低压发生器中的制冷剂水蒸汽一起进入冷凝器，被管内冷却水冷却而成为制冷剂水。制冷剂水经节

流装置后进入蒸发器的水盘中，并由蒸发器泵输送，喷淋在蒸发器的管簇外表面，吸收管内冷冻水的热量而汽化成为冷剂水蒸汽。冷冻水温度降低，达到制冷的目的。

另一方面，由低压发生器出来的浓溶液低温热交换器降温后进入吸收器，与稀溶液混合后由吸收器泵输送并喷淋在吸收器管簇上，吸收由蒸发器产生的冷剂水蒸汽，使蒸发器保持所需的低压，冷剂水得以不断汽化吸热。喷淋溶液吸收冷剂水蒸汽后浓度降低，重新成为稀溶液，又由发生器泵送往高压发生器。吸收过程产生的热量则由吸收器管冷却水带走。

上述的工作过程在  $h-\xi$  图上的表示，见图 21.23。用点 2 表示的吸收器出口的稀溶液 ( $t_2, \xi_0$ ) 由发生器泵输送，先后经过低温热交换器(点 7)和高温热交换器(点 10)，在浓度不变的情况下，温度升高为  $t_{10}$ ，过程线 2-7-10 表示在低、高温热交换器中稀溶液的加

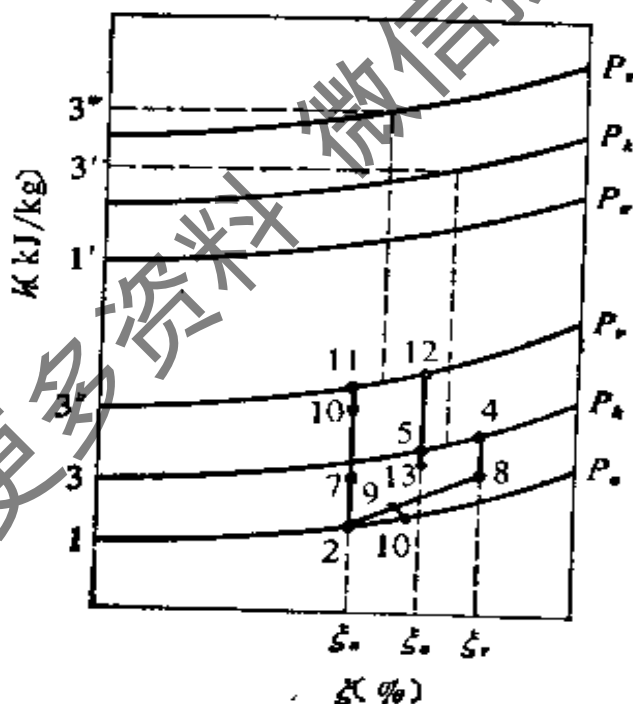


图 21.23 两效溴化锂吸收式制冷机工作过程在  $h-\xi$  图上的表示

热过程。稀溶液(点10)进入高压发生器，被工作蒸汽加热至饱和状态(点 11)后开始沸腾，产生冷剂水蒸汽(点  $3''$ )，溶液的浓度和温度增大，成为点 12 状态的中间溶液 ( $\xi_0, t_{12}$ )，过程线 10-11-12

表示稀溶液在高压发生器中的加热和发生过程。中间溶液经过高温热交换器,温度降低为 $t_{13}$ ,过程线12-13表示中间溶液在高温热交换器中的冷却过程。中间溶液(点13)进入低压发生器,被来自高压发生器的冷剂水蒸汽(点3''')加热,再次产生冷剂水蒸汽(3'),溶液进一步被浓缩,浓度由 $\xi_0$ 增大为 $\xi_r$ 、温度由 $t_{13}$ 升高为 $t_4$ (点4),过程线13-5-4表示中间溶液在低压发生器中的加热和发生过程。

在高压发生器中产生的冷剂水蒸汽(点3''')加热低压发生器的溶液,放出潜热后凝结成冷剂水(点3''),过程线3'''-3''表示冷剂水蒸汽在低压发生器中的冷却和冷凝过程。冷剂水(点3'')经节流后与低压发生器中产生的冷剂水蒸汽(点3')一起进入冷凝器,被冷却水冷却后成为冷剂水(点3),过程线3''-3表示节流后的湿蒸汽在冷凝器中的冷凝过程,3'-3表示低压发生器发生的冷剂水蒸汽在冷凝器中的冷却和冷凝过程。冷剂水(点3)经节流后进入蒸发器,由于压力降低,部分冷剂水汽化,成为由点1和点1'组成的湿蒸汽,点1状态的冷剂水由蒸发器泵输送、喷淋在蒸发器管簇上,吸收管内冷冻水的热量而汽化,成为冷剂水蒸汽(点1'),过程线1-1'表示冷剂水在蒸发器中吸热汽化的过程。

低压发生器出来的浓溶液(点4)经过低温热交换器后温度降低为 $t_8$ (点8),过程线4-8表示浓溶液在低温热交换器中的冷却过程。点8状态的浓溶液与部分点2状态的稀溶液混合后成为点9的喷淋溶液,由吸收器泵输送并喷淋在吸收器管簇上,吸收来自蒸发器的冷剂水蒸汽(点1'),成为稀溶液(点2)后又送往高压发生器,过程线8-9、2-9表示浓溶液和稀溶液的混合过程;过程线9-10-2表示喷淋溶液的吸收和冷却过程。

## 21.8 其他型式的溴化锂吸收式制冷机

### 1. 直燃式溴化锂吸收式冷热水机组

直燃式溴化锂吸收式冷热水机组不用蒸汽热源,直接采用燃气或煤油的燃烧热直接加热溴化锂水溶液,因而机组的热效率高。

冷热水机组除了将高压发生器改为直燃式发生器外，其他部分与两效溴化锂吸收式制冷机相同。由于做成冷热机组的型式，因此夏天可用来制冷，冬天则用于采暖。

根据产生热水的方式不同，冷热水机组有多种机型，图 21.24 为最初开发的直燃式溴化锂吸收式冷热水机组的系统原理图。制冷循环与两效溴化锂吸收式制冷机相同。采暖循环时，关闭蒸发器的冷剂水和冷冻水进水管上阀门，蒸发器泵和冷冻水泵停止运行。冷凝器中凝结的冷剂水改为流入低压发生器将浓溶液稀释。溶液泵和冷却水泵继续运行。冷却水回路切换成热水回路，其工作流程如下：

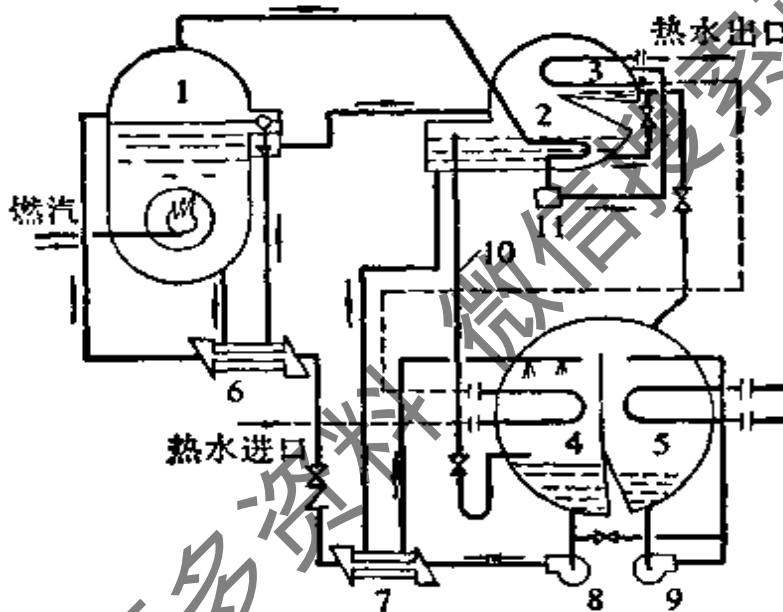


图 21.24 直燃式溴化锂吸收式冷热水机组的系统原理图

- 1—高压发生器；2—低压发生器；3—冷凝器；4—吸收器；5—蒸发器；  
6—高温热交换器；7—低温热交换器；8—溶液泵；9—蒸发器泵；  
10—J形管；11—疏水器

吸收器出来的稀溶液由溶液泵输送，经低温热交换器和高温热交换器加热后进入高压发生器，被燃气或燃油的燃烧热直接加热，产生水蒸汽，浓缩后的溶液经高温热交换器冷却；进入低压发生器，被管内来自高压发生器的水蒸汽加热，再次产生水蒸汽成为浓溶液。低压发生器产生的水蒸汽进入冷凝器加并热管内的热水。

低压发生器中的浓溶液被低压发生器加热管内和冷凝器中的凝结水稀释为稀溶液,经低温热交换器冷却后进入吸收器,喷淋在吸收器管簇上,预热管内流动的热水。预热后的热水进入冷凝器被加热,温度升高成为采暖用热水。吸收器内的稀溶液又送往高压发生器,不断循环。

采暖循环在  $h-\xi$  图的表示,见图 21.25。图中,

2-7-7H 表示稀溶液先后经低温热交换器、高温热交换器的加热过程。

7H-5H-4H 表示稀溶液在高压发生器中加热和浓缩过程。

4H-8H 表示来自高压发生器的溶液在高温热交换器中的冷却过程。

8H-4 表示溶液进入低压发生器,并在其中被加热的过程,产生的水蒸汽进入冷凝器并加热管内的热水。

4-5 表示在低压发生器中浓溶液被凝结水稀释的过程。

5-8 表示出低压发生器的稀溶液在低温热交换器中的冷却过程。

8-2 表示稀溶液在吸收器中加热管内热水的过程。

## 2. 两级吸收式制冷机

当其他条件一定时,随着热源温度的降低,吸收式制冷机的放汽范围( $\xi_s - \xi_0$ )将减小,制冷量下降。当热源温度较低,使用普通吸收式制冷循环已不能制冷时,可采用两级吸收式循环。

图 21.26 为两级吸收式制机的系统原理图。上筒体为高压发生器、冷凝器,低压发生器和高压吸收器;下筒体为蒸发器和低压吸收器。工作过程在  $h-\xi$  图上的表示如图 21.27。

从低压吸收器出来的稀溶液(点 2a)由低压发生器泵输送,经低温热交换器后(点 7a)进入低压发生器,被加热浓缩为浓溶液(点

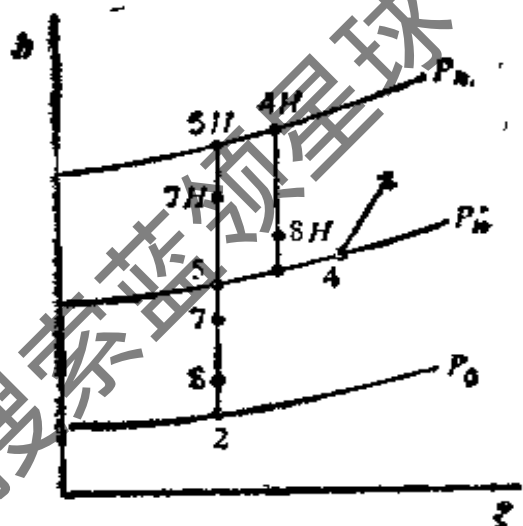


图 21.25 采暖循环  $h-\xi$  图上的表示

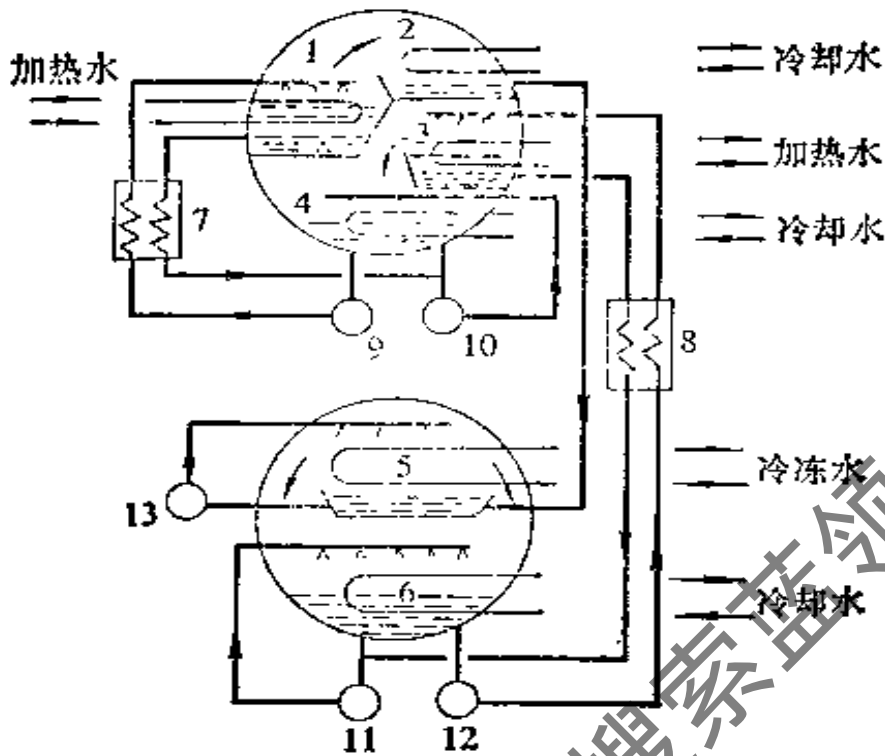


图 21.26 两级吸收式制冷机系统原理图

- 1—高压发生器；2—冷凝器；3—低压发生器；4—高压吸收器；5—蒸发器；  
 6—低压吸收器；7—高温热交换器；8—低温热交换器；9—高压发生器泵；  
 10—高压吸收器泵；11—低压吸收器泵；12—低压发生器泵；13—蒸发器

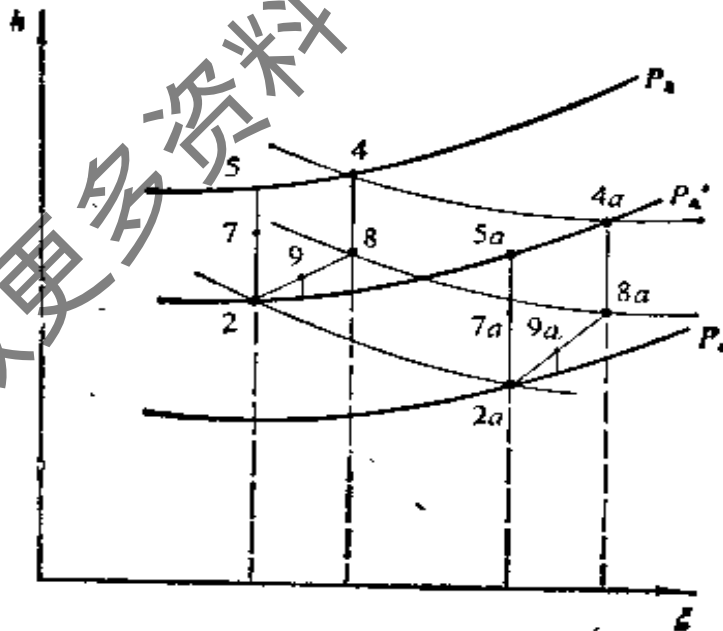


图 21.27 两级吸收循环在  $h-s$  图的表示

4 a), 产生的制冷剂蒸汽进入高压吸收器。高压吸收器内的喷淋溶

液吸收制冷剂水蒸汽后成为稀溶液(点 2),经高压发生器泵输送,经高温热交换器后(点 7)进入高压发生器,被加热浓缩为浓溶液(点 4)。浓溶液经高温热交换器冷却后(点 8)与点 2 的稀溶液混合为中间溶液(点 9),由高压吸收器泵输送并喷淋在高压吸收器的管簇上,吸收来自低压发生器的制冷剂水蒸汽。

从低压发生器出来的浓溶液(点 4a)经低温热交换器后(点 8a)与点 2a 状态的稀溶液混合为中间溶液(点 9a),由低压吸收器泵输送并喷淋在低压吸收器的管簇上,吸收来自蒸发器的制冷剂水蒸汽。

在高压发生器中产生的制冷剂水蒸汽进入冷凝器,冷却凝结为制冷剂水,制冷剂水经节流后进入蒸发器吸热汽化,产生的制冷剂水蒸汽进入低压吸收器被喷淋溶液所吸收。

两级吸收式制冷机的热力系数较低(约为普通吸收式的 1/2),设备投资费用较大(所需的传热面积约为普通吸收式的 1.5 倍),它可以利用 70~90[°C] 的废气或热水作为热源,是采用低势热源制冷的机种之一。

获取更多资料

# 参 考 文 献

## 第 一 篇

- [ 1 ] 第四机械工业部第十设计研究院主编. 空气调节手册, 北京: 中国建筑工业出版社, 1983 年.
- [ 2 ] 井上宇市. 空气调节手册(中译本), 北京: 中国建筑工业出版社, 1986 年.
- [ 3 ] 清华大学、同济大学等四校编. 空气调节, 北京: 中国建筑工业出版社, 1986 年.
- [ 4 ] 陈沛霖、曹叔维等. 空气调节负荷计算理论与方法, 上海: 同济大学出版社, 1987 年.
- [ 5 ] 天津大学、同济大学等三校. 传热学, 北京: 中国建筑工业出版社, 1980 年.
- [ 6 ] 陕西省第一设备安装公司等. 空调试调, 北京: 中国建筑工业出版社, 北京: 1977 年.
- [ 7 ] 董晋兴. 现代建筑设备管理, 北京: 中国建筑工业出版社, 1988 年.
- [ 8 ] 陆耀庆主编. 供暖通风设计手册, 北京: 中国建筑工业出版社, 1987 年.
- [ 9 ] 洛巴耶夫, 风道计算法(中译本), 北京: 中国工业出版社, 1964 年.
- [ 10 ] 顾顺符、潘秉勤主编, 管道工程安装手册, 北京: 中国建筑工业出版社, 北京: 1987 年.
- [ 11 ] 哈尔滨建筑工程学院、天津大学. 供热工程, 北京: 中国建筑工业出版社, 1985 年.
- [ 12 ] 上海市经委节能办公室等. 风机水泵调速节能手册, 北京:



- 机械工业出版社, 1987年。
- [13] 国家标准, 高层民用建筑设计防火规范(GBJ 45-82)。
- [14] 《纺织厂空气调节》编写组, 纺织厂空气调节, 北京: 纺织工业出版社, 1980年。
- [15] 西安冶金建筑学院、同济大学, 热工测量与自动调节, 北京: 中国建筑工业出版社, 1983年。
- [16] 沈世锐, 电路与电机, 北京: 高等教育出版社, 1986年。
- [17] 北京市建筑设计院等, 电气安装工程施工图册, 北京: 水利电力出版社, 1985年。
- [18] 上海市电子电器技术协会, 简明实用电工手册, 上海: 上海科学技术出版社, 1986年。
- [19] 上海市供电局, 上海地区低压用户电路装置规程, 上海: 上海科学技术出版社, 1987年。
- [20] 《电工手册》编写组, 电工手册, 上海: 上海人民出版社, 1973年。

## 第二篇

- [1] 彦启森, 空调用制冷技术, 北京: 中国建筑工业出版社, 1985年, 第二版。
- [2] 蒋能照、余有水, 氟利昂制冷机, 上海: 上海科学技术出版社, 1983年。
- [3] 制冷工程设计手册编写组, 制冷工程设计手册, 北京: 中国建筑工业出版社, 1978年。
- [4] 尉迟斌、顾安忠, 船舶制冷装置, 北京: 国防工业出版社, 1980年。
- [5] 戴永庆、郑玉清, 溴化锂吸收式制冷机, 北京: 国防工业出版社, 1980年。
- [6] 中国制冷学会科普工作委员会编, 制冷系统原理、运行、维修, 北京: 宇航出版社, 1988年。
- [7] 湖北工业建筑设计院, 冷藏库设计, 北京: 中国建筑工业出版社

社, 1980 年。

[8] 石渡憲治, 实用冷凍空調便覧, 日本东京: オーム社出版, 1970年。

[9] 高田秋一, 大型吸收式冷凍機(連載), 日本东京: 冷凍空調技術雜誌, 1964 年。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

# HF12A 立柜式分体型空调机组简介

## 一 用 途

由同济大学机电厂生产的 HF 12 A 立柜式分体型空调机组是用以处理空调室内的空气，使之达到恒温恒湿的效果。本机适用于精密仪表、电子及光学仪器的生产车间、计量室、计算机房、实验室。对餐厅、宾馆、医疗卫生等也能满足要求。特别适用于高层建筑和缺水地区。欢迎各界用户前来洽谈业务。

## 二 结构特点

1. 本机组分室内侧机组和室外侧机组两部分，室内侧机组主要有蒸发器、节流阀、电加热器、加湿器和电器箱，它们组装于立柜体中；室外侧机主要有压缩机、冷凝器、汽液分离器和轴流风机。室内侧机组与室外侧机组用管道，电线连接，便于安装，使用方便。

2. 室内侧机组离心风机根据用户需求可接两种转速，低转速适用于不接风管，放置在被空调房间内，噪音为 58[dB]，高转速适用于接风管，室内侧机组设有机房的场所。

3. 加湿器为浮球式，能自动关闭和自动控制水位进行加湿。

4. 本机组采用电接点水银温度计作干、湿传感器，合理设计各控制传递环节、正确选择输出执行元件，使系统有较高的精度，尽快达到预定平衡的能力，以及较低的功耗。

5. 系统设有保护报警环节。当压缩机、离心风机、轴流风机、加热器、加湿器以及管道压力不正常时，能自动停止，并发出灯光报警，本机还具有压缩机延时启动，室内风机延时关闭及零压保护误操作程序保护，确保系统有高度的可靠性。

同济大学机电厂：上海四平路 1239 路 邮政编码：200092  
电 话：5416414 电 挂：3658

## 杭州杭生空调设备厂产品简介

一、杭生牌 FP- 系列风机盘管空调器规格有：250[m<sup>3</sup>/h]~1200[m<sup>3</sup>/h]。安装型式有立式、卧式、壁挂式、立柱式、顶蓬式、矮装式。结构型式有暗装、明装两种。

二、杭生牌 BFPX- 系列新风机组规格有 2000[m<sup>3</sup>/h]~20000[m<sup>3</sup>/h]。安装型式有吊顶式、卧式、立式。结构型式有暗装、明装两种。

三、杭生牌 BDM、BCM 系列变风量末端设备 BDM (顶送) 规格有：440[m<sup>3</sup>/h]、600 [m<sup>3</sup>/h]、800[m<sup>3</sup>/h]、1000[m<sup>3</sup>/h]、1240 [m<sup>3</sup>/h]、1500 [m<sup>3</sup>/h] 六种。BCM(侧送)规格有：500[m<sup>3</sup>/h]、700 [m<sup>3</sup>/h]、1400 [m<sup>3</sup>/h]、1700[m<sup>3</sup>/h] 四种。其控制方式为电子比例式，控制灵活方便，还可供带静压箱送风口、回风口。

四、杭生牌 DPS-23 型吊顶式卫生间排气扇其排气量为 110 [m<sup>3</sup>/h]，安装简便，并带有余压。

五、杭生牌 2K 型装配式空调机，规格有 10000 [m<sup>3</sup>/h]~100000 [m<sup>3</sup>/h]，功能齐全，供用户随意选择。

以上产品是与浙江省建筑设计院、浙江大学、同济大学、国家建设部建筑设计院、航天部第七设计研究院空调研究所等科研单位共同研制而成，现已在全国各大城市的宾馆、办公楼、影剧院、商场、科研实验楼，以及精密机械制造，电子仪表装配，轻纺工业，医药、食品工业等空调工程中得到广泛的应用，并受到用户的好评。杭生牌 FP- 系列风机盘管空调器是浙江省优质产品。本厂的宗旨是以质量取胜，以优等的服务取得广大用户的信任。欢迎各建设单位、设计人员、安装单位采用杭生系列产品。

厂址： 杭州市莫干山路杭生站(原浙江汽校)，杭州乘313路公共汽车至杭生站

电 话： 浙江余杭瓶窑 129

电 挂： 浙江余杭 2082

## 青云空调风口产品简介

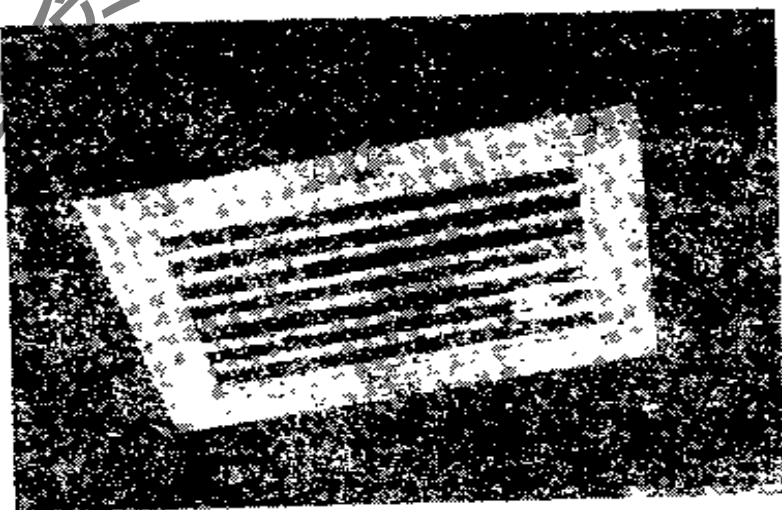
青云牌空调风口,是该厂自行设计、制造精良的产品,设计合理、结构精巧、安装方便,可与国际上同类产品媲美。

该厂主要产品有: 1. 百叶式风口[(1)活动百叶, (2)固定百叶, (3)地百叶, (4)自垂百叶]; 2. 散流器[(1)圆形, (2)方形]; 3. 条形风口; 4. 风口过滤器; 5. 调节阀; 6. 静压箱。

各种型号的风口全部采用优质合金6063材料制作,材料表面经过氧化处理,耐蚀性良好,装饰面有很高的表面光洁度,美观大方。风口的表面以铝合金本色为主(银亮色)。也可以根据用户指定的颜色制成其他各种彩色。

青云牌空调风口,结构繁多,规格齐全,并可根据用户要求设计制造特种结构的风口。产品保证质量,价格合理。

热情欢迎各界用户来厂洽谈业务! 欢迎您选用青云牌空调风口。



航空工业部青云仪器厂上海联营厂上海中南铝合金风口厂  
厂址: 上海老沪闵路 130 弄 6 号, 电话: 4365055 电挂: 89017

# 上海—华欣冷气

## 美国—特灵冷气

### 北京—怡建公司

这三组简单的名字,被有机地组成一个整体,它给您带来一片清凉世界;为您的生产、生活带来方便。

美国特灵 (TRANE) 公司成立于1913年,是一家国际性机构,也是世界上采暖、通风和空气调节设备的最大生产厂之一。上海展览中心3300TR(冷吨)的空调设备就是该公司提供的。

北京怡建技术服务有限公司,是香港怡和公司的子公司,该公司专门负责美国特灵公司在国内的一切业务。

上海华欣冷气设备修理安装厂,是一家为冷冻、冷藏、空调设备提供设计、安装、调试与保养、维修的专业厂,也是美国特灵公司、怡建技术服务有限公司在上海地区的总代理。该厂拥有一批中、高级制冷专业人才,能及时提供制冷行业的各种服务,亦能提供国内外各厂家的冷冻、冷藏、空调设备及各种零配件。

上海“华欣”,愿为国内外用户提供服务;

上海“华欣”,应该为“特灵”(川恩)用户服务。

上海“华欣”,愿成为您的合作伙伴。

上海华欣冷气设备修理安装厂地址:中国:上海共和新路1482号

联系电话:6625355 邮政编码:200072 联系人:胡福顺、朱毅华

## SJ-1 型高温防火隔热涂料简介

SJ-1 型防火涂料是一种以无机绝热材料为主要成分的新型防火涂料。它是根据上海越江隧道工程需要,为节约外汇费用,由上海市建筑科学研究所1987年研制成功的。

根据国家耐火构件质量检测中心、公安部天津消防研究所和公安部上海消防研究所等单位对涂料用于大型钢构件和混凝土构件的耐火隔热试验等性能检测表明:该涂料防火隔热性能优良,能经受较长时间高温火焰冲击,并具有强度高,耐潮、耐老化等特点。

该涂料已在上海延安东路越江隧道、吴泾冷库、扬子石化公司的混凝土结构和钢结构中使用了2万多平方米。1989年5月在上海市建委组织的,由消防、设计、科研、大专院校、施工等部门有关专家参加的技术鉴定会上审定通过。认为该涂料主要技术性能已达到国外80年代同类产品水平,为国家填补了烃类火灾用高温防火隔热涂料的空白。

### 涂料主要性能指标

1. 容 重  $450 \sim 550$  [kg/m<sup>3</sup>]  
(涂层容重  $520 \sim 620$  [kg/m<sup>3</sup>])
2. 抗压强度  $\geq 15$  [kg/cm<sup>2</sup>]
3. 导热系数  $\lambda_t = 0.1168 + 0.000112 \text{ tm kcal/mh}^\circ\text{C}$ .
4. 高温线收缩  $\leq 5\%$  (1200[°C])
5. 不同耐火时间所需涂层厚度(mm): 见下表

| 耐火时间(min) | 30 | 60   | 90   | 120  | 150  | 180  | 备注       |
|-----------|----|------|------|------|------|------|----------|
| 混凝土结构*    | 5  | 12   | 16   | 19   | 23   | 26   |          |
| 钢结构       | 5  | 10±1 | 15±1 | 20±1 | 25±2 | 30±2 | 耐火<br>极限 |

注：混凝土表面温度低于380[℃]。

生产单位：上海市吕巷防火材料厂

联系地址：上海市金山县吕巷乡

邮政编码：201517

电 话：7319519 电挂：8915

联系人：金兴观 周友春

研制单位：上海市建筑科学研究所

联系地址：上海市宛平南路15号

邮政编码：200032

电 话：4380803 电挂：3295

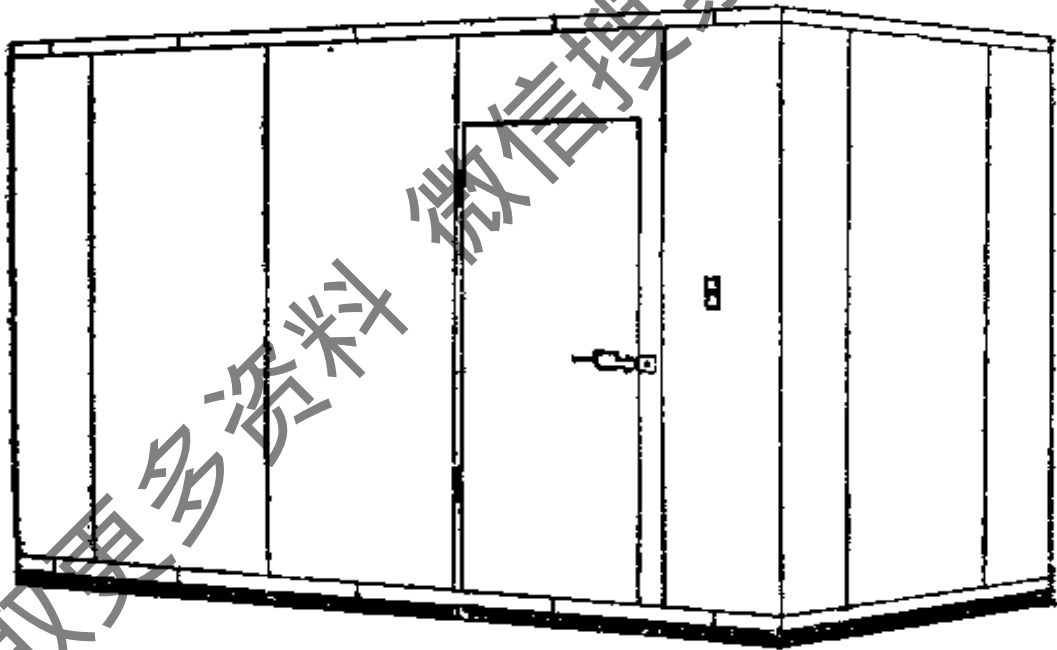
联系人：林桂祥 史学列

获取更多资料 微信搜索 索技星球



# N W ZL 系列装配式冷库

我厂是生产装配式冷库及轻体结构建筑物的专业厂。装配式冷库由中国船舶工业总公司第九设计研究院在国内首创研制成功，1981年通过技术鉴定，曾获1984年全国建筑科技成果交流会优秀项目。本产品吸收国内外最新技术，结合我国国情，精心设计、精心制造，具有结构新颖、品种规格多、保温性能好、使用安装方便、经久耐用等特点，欢迎用户选用。



江苏省无锡县装配式冷库厂

厂址：江苏省无锡市塘头 电话 445473、445478、445470 电挂 8160

联系及订货地址：

中国船舶工业总公司第九设计研究院：上海市武宁路 303 号

电话：2549700×281、308 电挂：1143

获取更多资料 微信搜索蓝领星球