

金代中 主编  
侯 锐 副主编

# 电工 速查速算 手册

 机械工业出版社  
China Machine Press

● ISBN 7-111-08784-4/TM·875

封面设计 / 电脑制作 : 姚毅

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

ISBN 7-111-08784-4



9 787111 087847 >

定价: 35.00 元

# 电工速查速算手册

金代中 主 编  
侯 锐 副 主 编



机械工业出版社

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

本书作者多年从事电工工作，有丰富的实践经验和教学经验。本书将作者多年来工作中经常遇到的，在查找计算时既费时又费力而且容易出错的计算数据资料，经过综合和提炼，编写而成。

书中主要介绍了电工学常用计算公式与数表、输变电、变压器、电动机、电容器及无功补偿、低压电器的选用及计算、电焊机及其选择、风机与空压机、电加热、照明、接地接零、晶闸管及电子电路等速查速算资料及附录。对所选编的公式进行了验证，并适当增加例题，以适应技术人员、技术工人和技工学校学生在实际工作中学习和应用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电工速查速算手册/金代中主编. —北京: 机械工业出版社, 2001.6

ISBN 7-111-08784-4

I. 电... II. 金... III. 电工-手册 IV. TM1-62

中国版本图书馆CIP数据核字 (2001) 第 08656 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 蓝伙金 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李秋荣

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 9 月第 1 版·第 2 次印刷

850mm×1168mm<sup>1/32</sup>·19.125 印张·2 插页·673 千字

4 001--9 000 册

定价: 35.00 元

## 电工速查速算手册编写组

主 编：金代中

副主编：侯 锐

编 委：金代中 金喜波 付 建 刘国华  
刘 强 范 原 李志庆 李 辉  
侯 锐 齐 雨 宋 欣 丁 浩  
武 明 陈 刚 李 福

获取更多资料

微信订阅号：领星球

# 前 言

电工和电子专业工作者经常遇到电工和电子专业方面的计算。由于公式数表很多，而且资料较为分散，计算中查找公式及计算需要进行各种计算的工作量较大，既费时又费力，还容易出现错误，给学习和工作带来不便。为满足快速计算，提高效率的要求，我们把生产、学习中常用的计算数据和资料编成本书。

本手册力求以实用为主，选取在实际工作中常见、技术难度适当的技术内容。作者在编写中对所选编的公式进行了验证，并适当增加例题，以更好适应广大技术人员、技术工人和技工学校学生在学习和工作中学习与应用。

由于我们水平有限，编写中难免有疏漏之处，真诚希望广大读者批评指正。

编者

# 目 录

前言

<b>第一章 电工学常用计算公式与数表</b> .....	1
<b>第一节 电工学的单位与数学基础</b> .....	1
一、法定计量单位与换算 .....	1
二、常用电工常数及系数 .....	2
<b>第二节 常用数表</b> .....	11
一、 $\pi$ 的重要函数 .....	11
二、 $\pi$ 的近似分数 .....	11
三、圆的周长和面积 .....	12
四、复数运算 .....	16
五、正弦量的表示方法 .....	18
<b>第三节 电工学的基本定律与参数计算</b> .....	20
一、欧姆定律 .....	20
二、焦耳-楞茨定律 .....	22
三、基尔霍夫定律 .....	22
四、电阻的计算 .....	25
五、阻抗计算 .....	25
六、电感的计算 .....	25
七、电容的计算 .....	34

第四节 简单交流电路计算 .....	38
一、单参数交流电路 .....	38
二、电阻、电感和电容的串联与并联计算 .....	38
三、交流电路中功率的计算 .....	38
四、旋转因子 $a$ 及三相交流电的表示方法 .....	38
五、对称分量法 .....	45
六、非正弦交流电计算 .....	47
第五节 复杂电路计算方法 .....	64
一、支路电流法 .....	64
二、回路电流法 .....	65
三、节点电压法 .....	67
四、戴维南定理 .....	69
五、迭加原理 .....	72
六、交流电路的谐振 .....	74
第六节 磁路与电磁感应 .....	78
一、磁路的基本概念和定律 .....	78
二、磁路正面问题的计算步骤 .....	79
三、电磁感应及楞次定律 .....	81
四、磁滞损失与涡流损失、电介质损耗 .....	84
第七节 过渡过程 .....	86
一、换路定律 .....	86
二、电阻、电容电路与电阻、电感电路的过渡过程 .....	86
<b>第二章 输配电 .....</b>	<b>90</b>



第一节 电路参数的计算 .....	90
一、导线电阻、电感和电容的计算 .....	90
二、常用导线、电缆的电阻和电抗 .....	100
第二节 线损和电压降的计算 .....	102
一、直流线路计算 .....	102
二、配电线路损耗计算 .....	104
三、交流线路电压损失的计算 .....	107
四、380/220V 系统中零线电位升高的计算 .....	122
五、相序对线路电流影响的计算 .....	125
第三节 民用住宅电气负荷的计算 .....	130
一、单位建筑面积法 .....	130
二、户为基准法 .....	130
三、设计标准法 .....	131
第四节 工厂用电量计算 .....	133
一、用电设备、车间和全厂计算负荷的确定 .....	133
二、工厂年电能需要量的计算 .....	148
第五节 导线、电缆的选择与计算 .....	150
一、经济电流密度及计算 .....	150
二、导线截面的选择 .....	155
三、电力电缆的选择 .....	172
四、电缆故障点的测定 .....	183
<b>第三章 变压器</b> .....	<b>188</b>
第一节 基本原理及计算 .....	188
一、变压器的电压比和容量 .....	188

二、变压器基本参数及计算 .....	189
三、电压变动率 .....	190
四、效率 .....	190
五、自耦变压器基本计算 .....	191
六、变压器负载率计算 .....	194
七、变压器损耗的计算 .....	196
八、变压器空载试验和短路试验计算 .....	196
<b>第二节 变压器经济运行计算 .....</b>	<b>202</b>
一、变压器并联运行计算 .....	202
二、变压器年电能损耗计算 .....	204
<b>第三节 特殊变压器设计和计算 .....</b>	<b>205</b>
一、干式电力变压器的基本计算 .....	205
二、整流变压器设计与计算 .....	219
三、单相小型变压器设计与计算 .....	224
四、小型变压器骨架制作 .....	250
五、电动机起动用自耦变压器设计 .....	262
六、脉冲变压器设计 .....	265
七、音频变压器的设计 .....	269
<b>第四节 铁磁谐振稳压器设计 .....</b>	<b>273</b>
一、电厂、变电所整流装置用稳压器的设计 .....	273
二、小型铁磁谐振稳压器设计 .....	279
<b>第五节 电抗器的设计与计算 .....</b>	<b>283</b>
一、滤波电抗器计算 .....	283
二、交流电抗器计算 .....	286

三、均流电抗器计算 .....	288
四、空芯电抗器计算 .....	290
五、平衡电抗器计算 .....	293
<b>第四章 电动机 .....</b>	<b>295</b>
<b>第一节 三相异步电动机基本概念 .....</b>	<b>295</b>
一、三相异步电动机铭牌 .....	295
二、同步转速及转差率 .....	302
三、电势方程 .....	302
四、异步电动机的机械特性 .....	306
<b>第二节 异步电动机的工作特性 .....</b>	<b>309</b>
一、工作特性曲线 .....	309
二、电源电压变化或频率变化对电动机工作性能的影响 .....	310
三、线绕型异步电动机转子电阻的计算 .....	312
<b>第三节 直流电动机的基本公式 .....</b>	<b>312</b>
一、电枢电势 .....	312
二、直流电动机转矩特性 .....	313
三、电压平衡方程 .....	314
四、直流电动机的转速特性 .....	314
五、直流电动机的机械特性 .....	316
六、功率平衡方程 .....	317
七、直流电动机电枢回路电感、电阻的计算 .....	319
<b>第四节 传动电动机的选择程序 .....</b>	<b>320</b>

一、传动电动机的选择程序 .....	320
二、电动机过载能力及平均起动转矩的计算 .....	320
三、根据打滑条件允许的最大加速度计算 .....	326
四、电动机功率的校验 .....	331
五、电动机功率的选定 .....	338
<b>第五节 电动机的起动计算 .....</b>	<b>353</b>
一、异步电动机直接起动功率的确定 .....	353
二、异步电动机降压起动方式的选择 .....	354
三、磁力起动器的选择 .....	355
四、Y- $\Delta$ 起动器的选择 .....	363
五、自耦减压起动器的选择与计算 .....	365
六、延边三角起动法的计算 .....	370
七、三相笼型异步电动机起动电阻的计算 .....	370
八、绕线型异步电动机起动电阻的计算 .....	371
<b>第六节 异步电动机的制动计算 .....</b>	<b>376</b>
一、异步电动机反接制动计算 .....	376
二、异步电动机能耗制动计算 .....	379
三、异步电动机电容-电磁制动的电容计算 .....	382
四、直流他励电动机反接制动计算 .....	383
五、直流他励电动机能耗制动计算 .....	384
<b>第七节 电动机的调速计算 .....</b>	<b>386</b>
一、绕线型异步电动机转子附加电阻调整的计算 ...	386
二、绕线型异步电动机机械回馈式串级调速的 计算 .....	387

三、直流电动机不同调速方法比较 .....	389
四、电阻器和频敏变阻器的计算 .....	390
<b>第五章 电容器及无功补偿 .....</b>	<b>406</b>
<b>第一节 电容器和无功补偿容量的计算 .....</b>	<b>406</b>
一、电容器运行规定和技术性能 .....	406
二、电容测算和保护元件计算 .....	413
三、功率因数和无功补偿容量的计算 .....	419
<b>第二节 设备的无功经济当量的计算 .....</b>	<b>428</b>
一、企业内无功经济当量的计算 .....	428
二、几种设备的无功补偿容量的确定 .....	432
<b>第三节 提高功率因数与降损及改善电压的</b>	
<b>计算 .....</b>	<b>439</b>
一、提高功率因数与降损关系的计算 .....	439
二、功率因数降低与电网元件（线路和变压器）	
损耗增加的关系 .....	439
三、提高功率因数与降低线损的关系 .....	441
四、提高功率因数与降低变压器铜损的关系 .....	442
五、提高功率因数与改善电压关系的计算 .....	443
<b>第四节 提高功率因数与增加设备容量的</b>	
<b>计算 .....</b>	<b>445</b>
一、增加线路供电能力的计算 .....	445
二、增加变压器供电能力的计算 .....	447
<b>第六章 低压电器的选用及计算 .....</b>	<b>448</b>
<b>第一节 开关与熔断器的选用与计算 .....</b>	<b>448</b>

一、低压电器选用的一般原则 .....	448
二、断路器的选用和计算 .....	448
三、刀开关和转换开关的选用 .....	468
四、熔断器的选用 .....	470
五、熔断器的级间配合 .....	480
<b>第二节 热继电器的选用与计算 .....</b>	<b>484</b>
一、热继电器的选用 .....	484
二、热继电器主要技术参数 .....	489
三、热继电器双金属片的自由行程和有效行程 的计算 .....	490
<b>第三节 接触器的选用及计算 .....</b>	<b>491</b>
一、交流接触器的选用 .....	491
二、直流接触器的选用 .....	499
<b>第四节 交直流接触器线圈重绕与改压 .....</b>	<b>503</b>
一、交流接触器线圈重绕计算 .....	503
二、直流接触器线圈重绕计算 .....	506
三、交直流接触器改压计算 .....	507
<b>第五节 交流接触器和电磁铁直流无声运行元件 的选择 .....</b>	<b>509</b>
一、交流接触器和直流无声运行元件的选择 .....	509
二、交流电磁铁直流无声运行元件的选择 .....	511
三、无声节能接触器直流线圈的计算 .....	513
<b>第六节 电磁铁的计算和选用 .....</b>	<b>515</b>
一、电磁铁气隙磁导的计算 .....	515

二、电磁铁吸力基本计算公式 .....	520
三、电磁铁吸力的近似计算 .....	521
四、电磁铁的选用及计算 .....	527
五、交、直流电磁铁线圈的简单计算 .....	534
<b>第七节 交直流线圈的简捷计算 .....</b>	<b>541</b>
一、直流线圈的简捷设计 .....	541
二、交流线圈的简捷设计 .....	545
三、合闸电磁铁的计算 .....	547
<b>第八节 保护继电器与时间继电器 .....</b>	<b>550</b>
一、保护继电器 .....	550
二、时间继电器的选用 .....	553
三、继电器加速与延缓电路 .....	553
<b>第九节 继电器熄火花电路 .....</b>	<b>563</b>
<b>第七章 电焊机及其选择 .....</b>	<b>570</b>
<b>第一节 基础知识及计算 .....</b>	<b>570</b>
一、弧焊机的基本计算 .....	570
二、电焊机熔敷金属量及效率计算 .....	574
三、电焊机耗电量计算 .....	579
<b>第二节 电焊机选择 .....</b>	<b>581</b>
一、弧焊机的特点和适用范围 .....	581
二、电焊机电源容量计算 .....	582
三、阻焊变压器的设计程序及参数确定 .....	589
<b>第三节 电焊机运行 .....</b>	<b>591</b>
一、电焊机电源干线工作电流计算及熔断器与	

电缆的选择 .....	591
二、交流弧焊机加装节电器后的节电效果 .....	595
<b>第八章 风机与空压机</b> .....	<b>598</b>
<b>第一节 风机及其计算</b> .....	<b>598</b>
一、风机基本参数及特性曲线 .....	598
二、风量和风压的测算 .....	600
三、风机轴功率、电动机功率及风机效率的计算 .....	602
四、风机耗电量计算 .....	604
五、风机参数的换算 .....	604
六、变速风机的电动机功率的选择 .....	605
七、空调设备用风机的轴功率和送风量的计算 .....	608
八、锅炉送、引风机风量、全压和电动机功率的 计算 .....	609
<b>第二节 空压机计算</b> .....	<b>610</b>
一、空压机效率计算 .....	610
二、空压机管网漏气损失电能的测算 .....	612
<b>第九章 电加热</b> .....	<b>615</b>
<b>第一节 电热计算</b> .....	<b>615</b>
一、电热元件的计算 .....	615
二、电热干燥室功率计算 .....	643
三、按炉膛容积估算炉子功率 .....	645
<b>第二节 盐浴炉计算</b> .....	<b>645</b>
一、炉膛尺寸和功率的计算 .....	645
二、埋入式盐浴炉对电源变压器的要求 .....	646



三、电阻炉、盐浴炉电能利用率计算 .....	647
<b>第三节 感应加热炉计算 .....</b>	<b>661</b>
一、电流透入深度计算 .....	661
二、电源频率和感应器尺寸的计算 .....	664
三、输电线路计算 .....	672
四、中频感应炉补偿电容的计算 .....	674
五、工频感应加热器的计算 .....	679
<b>第四节 远红外加热 .....</b>	<b>683</b>
一、红外区的划分 .....	683
二、远红外辐射元件 .....	684
三、远红外辐射涂料 .....	686
四、辐射元件表面温度和受热物最佳加热干燥温度 的选择 .....	691
<b>第十章 照明计算 .....</b>	<b>695</b>
<b>第一节 基础知识 .....</b>	<b>695</b>
一、照明术语、单位及计算 .....	695
二、关于照明质量的一些要求 .....	699
三、常用电光源特性比较及对电源的要求 .....	705
四、灯具的选择 .....	707
五、灯具的分类、配光曲线和效率 .....	708
六、常用材料的反射、透射和吸收率 .....	719
<b>第二节 照度标准及灯具布置计算 .....</b>	<b>721</b>
一、照度标准 .....	721
二、灯具布置计算 .....	731

<b>第三节 照度计算</b> .....	737
一、各类光源的照度计算 .....	737
二、逐点法计算照度 .....	746
三、利用系数法计算照度 .....	758
四、单位容量法计算照度 .....	777
<b>第四节 生产厂房及室外照明设计</b> .....	797
一、生产厂房照明的设计 .....	797
二、道路照明的设计 .....	797
三、投光灯照明计算 .....	808
<b>第五节 照明线路、设备及其它</b> .....	808
一、照明导线截面的选择 .....	808
二、电感式镇流器的计算 .....	812
三、荧光灯和附件的技术参数及计算 .....	821
<b>第十一章 接地接零</b> .....	824
<b>第一节 基础知识及计算</b> .....	824
一、接地与接零的种类 .....	824
二、保护接地与保护接零的范围 .....	826
三、接触电压、跨步电压和对地电压等的计算 .....	827
四、等化对地电压的计算 .....	840
五、屏蔽的种类和要求 .....	843
六、接地电阻允许值的规定 .....	844
七、土壤和水的电阻率 .....	852
<b>第二节 接地体接地电阻的计算</b> .....	854
一、人工接地体的接地电阻计算 .....	854

二、人工接地坑和接地沟的流散电阻的计算 .....	861
三、防雷保护接地电阻的计算 .....	863
四、接地装置截面的要求 .....	869
五、保护接零计算 .....	871
<b>第十二章 晶闸管及电子电路 .....</b>	<b>874</b>
<b>第一节 晶闸管电路及其计算 .....</b>	<b>874</b>
一、晶闸管基本参数定义 .....	874
二、晶闸管整流电路参数及基本电量关系 .....	889
三、晶闸管起动器的型式及其特点 .....	914
四、硅整流元件及晶闸管的选择 .....	914
五、晶闸管串、并联计算 .....	920
六、晶闸管保护计算 .....	923
<b>第二节 整流电路及其计算 .....</b>	<b>934</b>
一、各种整流电路参数及比较 .....	934
二、多级倍压整流电路的计算 .....	934
三、整流元件串、并联计算 .....	939
四、整流元件的保护计算 .....	941
<b>第三节 滤波电路及其计算 .....</b>	<b>941</b>
一、常用小功率滤波电路的比较 .....	941
二、滤波电路计算 .....	945
三、电动机和变压器电感量的估算 .....	948
<b>第四节 晶体管基础知识 .....</b>	<b>950</b>
一、常用晶体管的基本参数 .....	950
二、晶体管计算 .....	955

三、晶体管散热计算 .....	963
<b>第五节 晶体管电路及其计算</b> .....	965
一、稳压电路的计算 .....	965
二、交流放大电路静态工作点的选择和直流 负载线的确定 .....	971
三、放大器的输入、输出电阻、负载电阻及 放大倍数的计算 .....	973
四、阻容耦合放大器的计算 .....	976
五、射极输出器的计算 .....	980
六、负反馈电路的计算 .....	981
七、单管交流放大器的设计要点 .....	984
八、工作点稳定的典型电路设计要点 .....	985
九、各类交流放大器的特点及比较 .....	987
十、晶体管直流放大器的计算 .....	987
十一、差动放大器的计算 .....	995
十二、场效应管放大电路的计算 .....	995
十三、运算放大器的计算 .....	995
十四、晶体管电子继电器元件参数的选择 .....	1006
十五、功率放大器保护元件的计算 .....	1013
十六、发光二极管回路限流电阻的计算 .....	1016
<b>第六节 触发电路、振荡器和变流器等计算</b> ...	1018
一、单结晶体管触发电路的计算 .....	1018
二、射极耦合单稳态触发器的设计 .....	1021
三、双稳态触发器的设计 .....	1024
四、多谐振荡器的计算 .....	1026

五、LC 振荡器的比较 .....	1032
六、晶体管直流变换器的设计 .....	1033
<b>第七节 晶体管延时电路与计算 .....</b>	<b>1041</b>
一、三种基本晶体管延时电路延时时间	
计算 .....	1041
二、几种晶体管延时电路和记忆电路的延时时间的	
计算 .....	1044
三、可控硅延时电路 .....	1051
<b>附录 .....</b>	<b>1063</b>
附录一 磁性材料 .....	1063
附录二 绝缘材料 .....	1075
附录三 电气图用图形符号 .....	1085
附录四 新旧电气图用图形符号对照 .....	1126
附录五 电磁线 .....	1186
附录六 Y 系列小型异步电动机 .....	1194
<b>主要参考文献 .....</b>	<b>1202</b>

获取更多资料

# 第一章 电工学常用计算公式与数表

## 第一节 电工学的单位与数学基础

### 一、法定计量单位与换算

#### 1. 国际单位制(SI)(GB3100--1993)

##### (1) 国际单位制的基本单位(表 1-1)

表 1-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

##### (2) 国际单位制的辅助单位(表 1-2)

表 1-2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

(3) 国际单位制中具有专门名称的导出单位(表 1-3)

2. 可与国际单位制单位并用的我国法定计量单位(1-4)

3. 常用法定计量单位与非法定计量单位的换算(表 1-5)(电磁学部分)

4. 功率单位换算(表 1-6)

## 二、常用电工常数及系数

1. 常用金属材料的电阻率和温度系数(表 1-7)

2. 介电系数

介质的介电系数

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

式中  $\epsilon$ ——介质的介电系数,又称电容率(F/m);

$\epsilon_0$ ——真空的介电系数,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m, 经常称该数为电常数;

$\epsilon_r$ ——介质的相对介电系数,是一个纯数。

表 1-8 列出了几种常用介质的相对介电系数。

3. 导磁系数

介质的导磁系数

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

式中  $\mu$ ——介质的导磁系数,也称磁导率(H/m);

$\mu_0$ ——真空的导磁系数,也称磁常数,  $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-6}$  H/m;

$\mu_r$ ——介质的相对导磁系数,是个纯数,表 1-9 列出了几种介质的相对导磁系数。

表 1-3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示示例
频率	赫[兹]	Hz	$s^{-1}$
力	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$
压力、压强、应力	帕[斯卡]	Pa	$N/m^2$
能[量]、功、热量	焦[耳]	J	$N \cdot m$
功率、辐[射能]通量	瓦[特]	W	J/s
电荷[量]	库[仑]	C	$A \cdot s$
电位、电压、电动势	伏[特]	V	W/A
(电势)电容	法[拉]	F	C/V
电阻	欧[姆]	$\Omega$	V/A
电导	西[门子]	S	$A/V, \Omega^{-1}$
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$V \cdot s$
磁通[量]密度、磁感	特[斯拉]	T	$Wb/m^2$
应强度	亨[利]	H	Wb/A
电感	摄氏度	C	
摄氏温度	流[明]	lm	$cd \cdot sr$
光通量			



(续)

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示示例
[光]照度	勒[克斯]	lx	lm/m <sup>2</sup>
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	s <sup>-1</sup>
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sv	J/kg

表 1-4 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	与 SI 单位的关系
时 间	分	min	1 min = 60s
	[小]时	h	1 h = 60min = 3600s
	日(天)	d	1 d = 24h = 86400s
平面角	[角]秒	"	1" = (π/648000) rad (π 为 圆周率)
	[角]分	'	1' = 60" = (π/10800) rad
	度	°	1° = 60' = (π/180) rad

(续)

量的名称	单位名称	单位符号	与SI单位的关系
旋转速度	转每分	r/min	$1\text{r/min} = (1/60)\text{s}^{-1}$
长度	海里	n mile	$1\text{n mile} = 1852\text{m}$ (只用于航程)
速度	节	kn	$1\text{kn} = 1\text{n mile/h} = (1852/3600)\text{m/s}$ (只用于航行)
质量	吨	t	$1\text{t} = 10^3\text{kg}$
	原子质量单位	u	$1\text{u} \approx 1.6605655 \times 10^{-27}\text{kg}$
体积	升	L, (l)	$1\text{L} = 1\text{dm}^3 = 10^{-3}\text{m}^3$
	电子伏	eV	$1\text{eV} \approx 1.6021892 \times 10^{-19}\text{J}$
	分贝	dB	
	特[克斯]	tex	$1\text{tex} = 1\text{g/km}$
面积	公顷	hm <sup>2</sup>	$1\text{hm}^2 = 10^4\text{m}^2$

表 1-5 常用法定计量单位与非法定计量单位的换算(电磁学部分)

物理量名称	物理量符号	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算
		单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
能量 功 热量	$E$	焦[耳]	J	尔格	erg	$1\text{erg} = 10^{-7}\text{J}$
	$W$	电子伏	eV	千克力米	kgf·m	$1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6\text{MJ}$
	$Q$	千瓦小时	kW·h	英马力小时 卡 马力小时	hp·h cal	$1\text{kgf} \cdot \text{m} = 9.80665\text{J}$ $1\text{hp} \cdot \text{h} = 2.68452\text{MJ}$ $1\text{cal} = 4.1868\text{J}$ 1 马力小时 $= 2.64779\text{MJ}$
功率	$P$	瓦[特]	W	电工马力小时		1 电工马力小时 $= 2.68560\text{MJ}$
				英热单位	Btu	$1\text{Btu} = 1055.06\text{J}$ $= 1.05506\text{kJ}$
				千克力米每秒	kgf·m/s	$1\text{kgf} \cdot \text{m}$ $= 9.80665\text{W}$

(续)

物理量名称	物理量符号	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算
		单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
功率	P	瓦[特]	W	马力	德PS	1PS=735.499W
				(米制马力)	(法 ch, cV)	英马力
电导 磁通[量]	G Φ	西[门子] 韦[伯]	S Wb	电工马力		1电工马力=746W
				卡每秒	cal/s	1cal/s=4.1868W
				千卡每小时	kcal/h	1kcal/h=1.163W
				热化学卡每秒	kalth/s	1kalth/s=4.184W
				伏安	VA	1VA=1W
				乏	Var	1Var=1W
电导	G	西[门子]	S	英热	Btu/h	1Btu/h=0.293071W
				每小时		
磁通[量]	Φ	韦[伯]	Wb	麦克斯威	Mx	1Mx=10 <sup>-8</sup> Wb

(续)

8

物理量名称	物理量符号	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算
		单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
磁通[量] 密度, 磁 感应强度	B	特[斯拉]	T	高斯	Gs, G	$1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$

表 1-6 功率单位核算

瓦 (W)	千瓦 (kW)	米制马力 (PS)	英制马力 (hp)	千克力· 米/秒 kgf·m/s	英尺· 磅力/秒 ft·lbf/s	千卡/秒 kcal/s
1	$10^{-3}$	$1.36 \times 10^{-3}$	$1.341 \times 10^{-3}$	0.102	0.7376	$239 \times 10^{-6}$
1000	1	1.36	1.341	102	737.6	0.239
735.5	0.7355	1	0.9863	75	542.5	0.1757
745.7	0.7457	1.014	1	76.04	550	0.1781
9.807	$9.807 \times 10^{-3}$	$13.33 \times 10^{-3}$	$13.15 \times 10^{-3}$	1	7.233	$2.342 \times 10^{-3}$
1.356	$1.356 \times 10^{-3}$	$1.843 \times 10^{-3}$	$1.82 \times 10^{-3}$	0.1383	1	$0.324 \times 10^{-3}$
4186.8	4.187	5.692	5.614	426.935	3083	1

表 1-7 常用金属材料的电阻率和温度系数

材 料	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$	温度系数 $\alpha/(1/^\circ\text{C})$
银	0.0162	0.0038
铜	0.0172	0.00393
铝	0.0282	0.00403
铅	0.219	0.0039
铂	0.0558	0.0047
金	0.0240	0.0034
铂	0.105	0.0030
汞	0.958	0.00089
钨	0.0548	0.0045
铁	0.10~0.30	0.00500
钢	0.13~0.25	0.006
锡	0.114	0.0042
镍	0.0690	0.0060
锌	0.061	0.0037
黄铜	0.07~0.08	0.002
青铜	0.021~0.4	0.0037
锰铜	0.42	0.000006
康铜	0.4~0.51	0.000005
镍铬	1.1	0.00015
铁铬铝	1.4	0.00005

表 1-8 几种介质的相对介电系数

材 料	相对介电系数 $\epsilon_r$	材 料	相对介电系数 $\epsilon_r$
空 气	1.0	酚醛玻璃纤维	8
聚本乙烯	2.5	塑料(FQBD-12)	10
聚四氟乙烯	2.1	氧化铝	27
聚丙 烯	2.2	氧化钽	80
聚脂(涤纶)	3.1	水(C)	2.24
聚碳酸脂	3.0	变压器油(20 C)	3.7~7.5
聚 砒	3.1	云 母	5~10
聚酰亚胺	3.4	玻 璃	6~8
聚苯醚	2.58	瓷	$10^3 \sim 10^4$
尼龙 66(增强)	4.0~4.6	钛酸钡	
高频酚醛塑料 (14-6)	7		

表 1-9 几种介质的相对导磁系数

种 类	介质名称	相对导磁系数 $\mu_r$
抗磁质	铋	0.99983
	银	0.99998
	锌	0.999987
	铜	0.999991
顺磁质	空气	1.0000004
	铝	1.00002
	白金	1.00026

(续)

种 类	介质名称	相对导磁系数 $\mu_r$
铁磁质(因不是 常数,故以 最大值表示)	纯铁	20000
	钴	250
	镍	600

## 第二节 常用数表

一、 $\pi$  的重要函数,见表 1-10( $\pi$  为圆周率)。

表 1-10  $\pi$  的重要函数表

$\pi$	3.141593	$\frac{1}{\pi}$	0.318310
$\pi^2$	9.869604	$\frac{1}{\pi^2}$	0.101321
$\sqrt{\pi}$	1.772454	$\sqrt{\frac{1}{\pi}}$	0.564190
$\sqrt{2\pi}$	2.506628	$\sqrt{\frac{1}{2\pi}}$	0.398942
$\sqrt{\frac{\pi}{2}}$	1.253314	$\sqrt{\frac{2}{\pi}}$	0.797885
$\sqrt[3]{\pi}$	1.464592	$\sqrt[3]{\frac{1}{\pi}}$	0.682784

二、 $\pi$  的近似分数(表 1-11)



表 1-11  $\pi$  的近似分数

近似分数	误差
$\pi \approx 3.1400000 = \frac{157}{50}$	0.0015927
$\pi \approx 3.1428571 = \frac{22}{7}$	0.0012644
$\pi \approx 3.1418181 = \frac{32 \times 27}{25 \times 11}$	0.0002254
$\pi \approx 3.1417322 = \frac{19 \times 21}{127}$	0.0001395
$\pi \approx 3.1417112 = \frac{25 \times 47}{22 \times 17}$	0.0001185
$\pi \approx 3.1417004 = \frac{8 \times 97}{13 \times 19}$	0.0001077
$\pi \approx 3.1416666 = \frac{13 \times 29}{4 \times 30}$	0.0000739
$\pi \approx 3.1415929 = \frac{5 \times 71}{113}$	0.0000002

## 三、圆的周长和面积(表 1-12)

表 1-12 圆的周长和面积( $d$  为圆的直径)

$d$	$\pi d$	$\pi d^2/4$	$d$	$\pi d$	$\pi d^2/4$
0.1	0.314	0.0079	0.7	2.199	0.3848
0.2	0.628	0.0314	0.8	2.513	0.5027
0.3	0.942	0.0707	0.9	2.827	0.6362
0.4	1.257	0.1257	1.0	3.142	0.7854
0.5	1.571	0.1964	1.1	3.456	0.9503
0.6	1.885	0.2827	1.2	3.770	1.1310

(续)

$d$	$\pi d$	$\pi d^2/4$	$d$	$\pi d$	$\pi d^2/4$
1.3	4.084	1.3273	3.7	11.62	10.752
1.4	4.398	1.5394	3.8	11.94	11.341
1.5	4.712	1.7672	3.9	12.25	11.946
1.6	5.027	2.0106	4.0	12.57	12.566
1.7	5.341	2.2698	4.1	12.88	13.203
1.8	5.655	2.5447	4.2	13.19	13.854
1.9	5.969	2.8353	4.3	13.51	14.522
2.0	6.283	3.1416	4.4	13.82	15.205
2.1	6.597	3.4636	4.5	14.14	15.904
2.2	6.912	3.8013	4.6	14.45	16.619
2.3	7.226	4.1548	4.7	14.77	17.349
2.4	7.540	4.5239	4.8	15.08	18.096
2.5	7.854	4.9087	4.9	15.39	18.857
2.6	8.168	5.3093	5.0	15.71	19.635
2.7	8.482	5.7256	5.1	16.02	20.428
2.8	8.796	6.1575	5.2	16.34	21.237
2.9	9.111	6.6052	5.3	16.65	22.062
3.0	9.425	7.0686	5.4	16.96	22.902
3.1	9.739	7.5477	5.5	17.28	23.758
3.2	10.05	8.0425	5.6	17.59	24.630
3.3	10.37	8.5530	5.7	17.91	25.518
3.4	10.68	9.0792	5.8	18.22	26.421
3.5	11.00	9.6211	5.9	18.54	27.340
3.6	11.31	10.179	6.0	18.85	28.274

(续)

$d$	$\pi d$	$\pi d^2/4$	$d$	$\pi d$	$\pi d^2/4$
6.1	19.16	29.225	8.5	26.70	56.745
6.2	19.48	30.191	8.6	27.02	58.088
6.3	19.79	31.172	8.7	27.33	59.447
6.4	20.11	32.170	8.8	27.65	60.821
6.5	20.42	33.183	8.9	27.96	62.211
6.6	20.73	34.212	9.0	28.27	63.617
6.7	21.05	35.257	9.1	28.59	65.039
6.8	21.36	36.317	9.2	28.90	66.476
6.9	21.68	37.393	9.3	29.22	67.929
7.0	21.99	38.485	9.4	29.53	69.398
7.1	22.31	39.592	9.5	29.85	70.882
7.2	22.62	40.715	9.6	30.16	72.382
7.3	22.93	41.854	9.7	30.47	73.898
7.4	23.25	43.008	9.8	30.79	75.430
7.5	23.56	44.179	9.9	31.10	76.977
7.6	23.88	45.365	10.0	31.42	78.540
7.7	24.19	46.566	10.1	31.73	80.119
7.8	24.50	47.784	10.2	32.04	81.713
7.9	24.82	49.017	10.3	32.36	83.323
8.0	25.13	50.266	10.4	32.67	84.949
8.1	25.45	51.530	10.5	32.99	86.590
8.2	25.76	52.810	10.6	33.30	88.247
8.3	26.08	54.106	10.7	33.62	89.920
8.4	26.39	55.418	10.8	33.93	91.609

(续)

$d$	$\pi d$	$\pi d^2/4$	$d$	$\pi d$	$\pi d^2/4$
10.9	34.24	93.313	13.3	41.78	138.929
11.0	34.56	95.033	13.4	42.10	141.026
11.1	34.87	96.769	13.5	42.41	143.139
11.2	35.19	98.520	13.6	42.73	145.267
11.3	35.50	100.287	13.7	43.04	147.411
11.4	35.81	102.070	13.8	43.35	149.571
11.5	36.13	103.869	13.9	43.67	151.747
11.6	36.44	105.683	14.0	43.98	153.938
11.7	36.76	107.513	14.1	44.30	156.145
11.8	37.07	109.359	14.2	44.61	158.368
11.9	37.38	111.220	14.3	44.92	160.606
12.0	37.70	113.097	14.4	45.24	162.860
12.1	38.01	114.990	14.5	45.55	165.130
12.2	38.33	116.899	14.6	45.87	167.415
12.3	38.64	118.823	14.7	46.18	169.717
12.4	38.96	120.763	14.8	46.50	172.034
12.5	39.27	122.718	14.9	46.81	174.366
12.6	39.58	124.690	15.0	47.12	176.715
12.7	39.90	126.677	15.1	47.44	179.079
12.8	40.21	128.680	15.2	47.75	181.458
12.9	40.53	130.698	15.3	48.07	183.854
13.0	40.84	132.732	15.4	48.38	186.265
13.1	41.15	134.782	15.5	48.69	188.692
13.2	41.47	136.848	15.6	49.01	191.13

(续)

$d$	$\pi d$	$\pi d^2/4$	$d$	$\pi d$	$\pi d^2/4$
15.7	49.32	193.59	17.9	56.23	251.65
15.8	49.64	196.07	18.0	56.55	254.47
15.9	49.95	198.56	18.1	56.86	257.30
16.0	50.27	201.06	18.2	57.18	260.16
16.1	50.58	203.58	18.3	57.49	263.02
16.2	50.89	206.12	18.4	57.81	265.90
16.3	51.21	208.67	18.5	58.12	268.80
16.4	51.52	211.24	18.6	58.43	271.72
16.5	51.84	213.82	18.7	58.75	274.65
16.6	52.15	216.42	18.8	59.06	277.59
16.7	52.46	219.04	18.9	59.38	280.55
16.8	52.78	221.67	19.0	59.69	283.53
16.9	53.09	224.32	19.1	60.00	286.52
17.0	53.41	226.98	19.2	60.32	289.53
17.1	53.72	229.66	19.3	60.63	292.55
17.2	54.04	232.35	19.4	60.95	295.59
17.3	54.35	235.06	19.5	61.26	298.65
17.4	54.66	237.79	19.6	61.58	301.72
17.5	54.98	240.53	19.7	61.89	304.81
17.6	55.29	243.28	19.8	62.20	307.91
17.7	55.61	246.06	19.9	62.52	311.03
17.8	55.92	248.85	20.0	62.83	314.16

#### 四、复数运算

在电工原理中,复数常用来表示正弦量及阻抗和导

纳,因此,掌握复数运算是十分必要的。复数的表示方法如表 1-13。

表 1-13 复数的表示方法

坐标制	直角坐标	极坐标
表示法	$a + jb$	$r \angle \theta$
图形表示法		
两种坐标式的互换	$r = \sqrt{a^2 + b^2}$ $\theta = \arctan \frac{b}{a}$ $a = r \cos \theta$ $b = r \sin \theta$ $a + jb = r \cos \theta + jr \sin \theta$	$r \angle \theta = \sqrt{a^2 + b^2} \angle \tan^{-1} \frac{b}{a}$ <p>也可写成指数形式</p> $r e^{j\theta} = \sqrt{a^2 + b^2} e^{j \tan^{-1} \frac{b}{a}}$

复数的四则运算如表 1-14 所示。

表 1-14 复数的四则运算

运算方式	所用坐标	运算方法
加减乘除	直角坐标	$(a_1 + jb_1) + (a_2 + jb_2)$ $= (a_1 + a_2) + j(b_1 + b_2)$

(续)

运算方式	所用坐标	运算方法
加减乘除	直角坐标	$(a_1 + jb_1) - (a_2 + jb_2)$ $= (a_1 - a_2) + j(b_1 - b_2)$
	极坐标	$r_1 \angle \theta_1 \cdot r_2 \angle \theta_2 = r_1 r_2 \angle (\theta_1 + \theta_2)$
	极坐标	$r_1 \angle \theta_1 / r_2 \angle \theta_2 = \frac{r_1}{r_2} \angle (\theta_1 - \theta_2)$

复数的幅角范围如表 1-15。

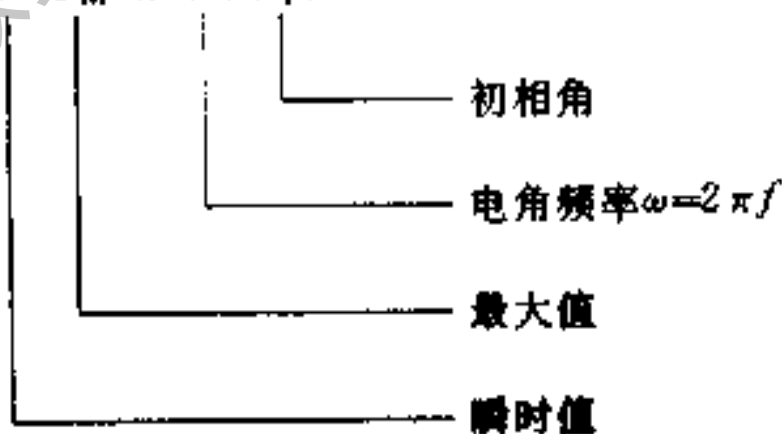
表 1-15 复数的幅角范围

实部符号	虚部符号	所对应的象限	幅角 $\theta$ 的范围
+	+	I	$0^\circ < \theta < 90^\circ$
-	+	II	$90^\circ < \theta < 180^\circ$
-	-	III	$-180^\circ < \theta < -90^\circ$
+	-	IV	$-90^\circ < \theta < 0^\circ$

## 五、正弦量的表示方法

### 1. 瞬时值表达式:

$$i = I_M \sin(\omega t + \psi)$$



## 2. 曲线表示法:(图 1-1)

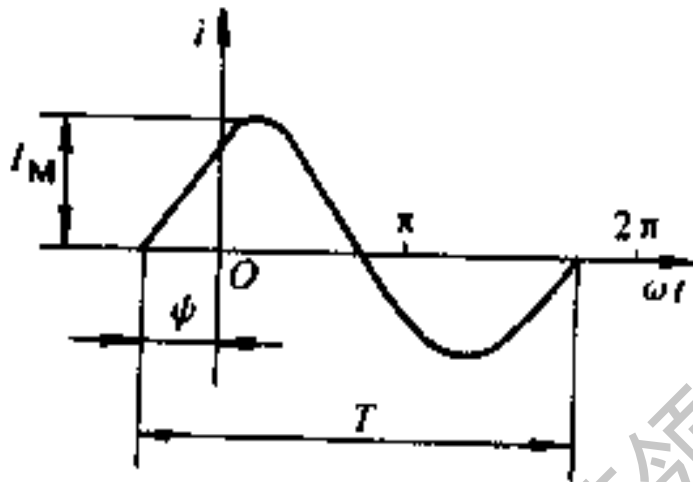


图 1-1 正弦曲线

 $I_M$ —电流最大值 $\psi$ —初相角 $\omega$ —电角频率 $T$ —周期

## 3. 旋转矢量:(图 1-2)

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

称电流有效值

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

称电压有效值



图 1-2 旋转矢量

## 4. 复数表示法(符号法)

$$\dot{I}_m = I_m \angle \psi \text{ 或 } \dot{I}_m = I_m e^{j\psi}$$

$\dot{I}_m$  这种复数是用来表示正弦量的, 上式称复数最大



值表示式,复数有效值表示式如下:

$$\dot{i} = I \angle \phi \text{ 或 } \dot{i} = I e^{j\omega t}$$

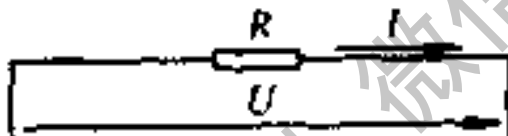

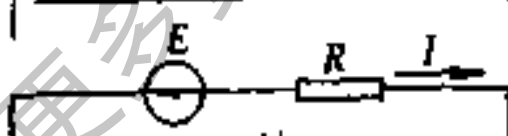
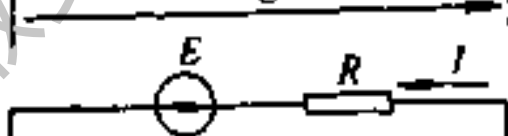
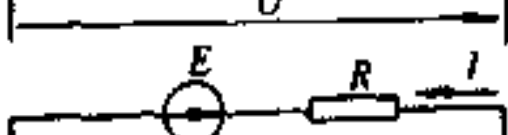
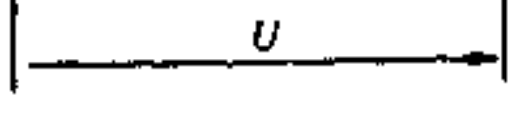
其中

$$I = I_m / \sqrt{2}$$

### 第三节 电工学的基本定律 与参数计算

一、欧姆定律:见表 1-16。

表 1-16 欧姆定律表达形式

电流类别	电路形式	表达式	说明
直 流		$I = \frac{U}{R}$	以电流方向为参考正方向,凡是电势方向,电压方向与电流方向一致时为正,相反为负。计算结果 I 值为正,说明电流真实方向与参考正方向一致, I 值为负,说明电流真实方向与参考正方向相反。
		$I = \frac{E+U}{R}$	
		$I = \frac{-E+U}{R}$	
		$I = \frac{E-U}{R}$	
		$I = \frac{-E-U}{R}$	
		$I = \frac{-E-U}{R}$	

(续)

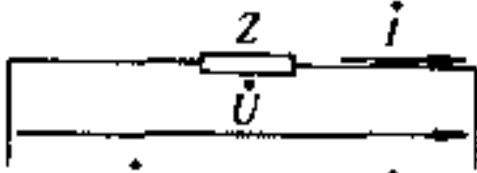
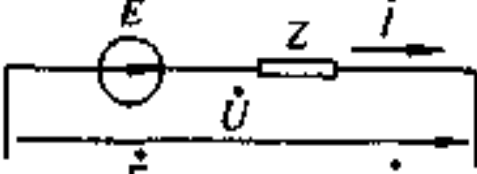
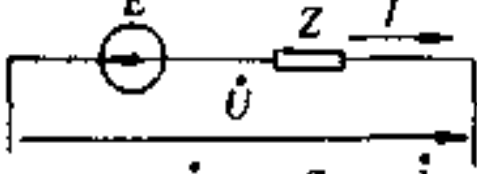
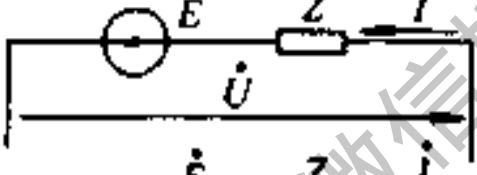


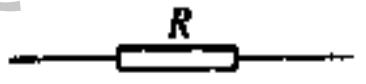

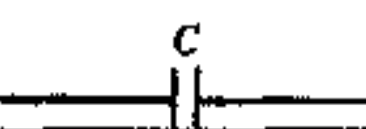

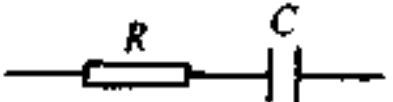

电流类别	电路形式	表达式	说明
交流		$i = \frac{\dot{U}}{Z}$	$\dot{E}$ 为复数电势有效值 $\dot{U}$ 为复数电压有效值 $Z$ 为复数阻抗
		$i = \frac{\dot{E} + \dot{U}}{Z}$	
		$i = \frac{-\dot{E} + \dot{U}}{Z}$	
		$i = \frac{-\dot{E} + \dot{U}}{Z}$	
		$i = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{Z}$	
		$i = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{Z}$	

表 1-17 列出交流电路中复数阻抗的写法。

表 1-17 复数阻抗的写法

电路类型	复数阻抗
	$Z = R$
	$Z = jx_L = j\omega L$ $x_L \text{ 为感抗}$
	$Z = -jx_C = -j \frac{1}{\omega C}$ $x_C \text{ 为容抗}$

(续)

电路类型	复数阻抗
	$Z = R + jx_L = R + j\omega L$
	$Z = R - jx_C = R - j\frac{1}{\omega C}$
	$Z = R + j(x_L - x_C)$ $= R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + jx$ $x$ 为电抗, 等于 $x_L - x_C$

## 二、焦耳-楞次定律

电功:

$$W = UI t$$

式中  $W$ ——电功(J);

$I$ ——电流(A);

$t$ ——通电时间(s)。

电功率:

$$P = \frac{W}{t} = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

$P$ ——电功率(W)。

## 三、基尔霍夫定律

基尔霍夫第一定律:

在复杂电路中,凡是三条以上支路的汇集点,称为节点。汇集在节点的电流的代数和等于零,如果流入节点的

电流为正,则流出节点的电流为负。

在直流电路中:(图 1-3)

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 = 0$$

一般表达式为:

$$\Sigma I = 0 (\text{代数和})$$

在交流电路中:(图 1-4)

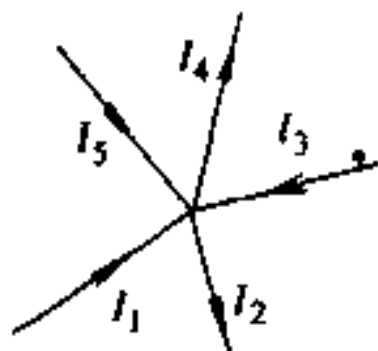


图 1-3 直流电路



图 1-4 交流电路

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 - \dot{I}_4 + \dot{I}_5 = 0$$

一般表达式为:

$$\Sigma \dot{I} = 0 (\text{代数和})$$

基尔霍夫第二定律:

在复杂电路中,有许多闭合回路。对于任意一个闭合回路,所有各段电压的代数和等于零。

在直流电路中(图 1-5):首先确定回路绕行方向,图中方向为顺时针绕行。以绕行方向为准,凡是支路电压方向与绕行方向一致时为正,相反时为负,则有:

$$U_{AB} - U_{CB} + U_{CD} - U_{AD} = 0$$

一般写成:  $\Sigma U = 0 (\text{代数和})$

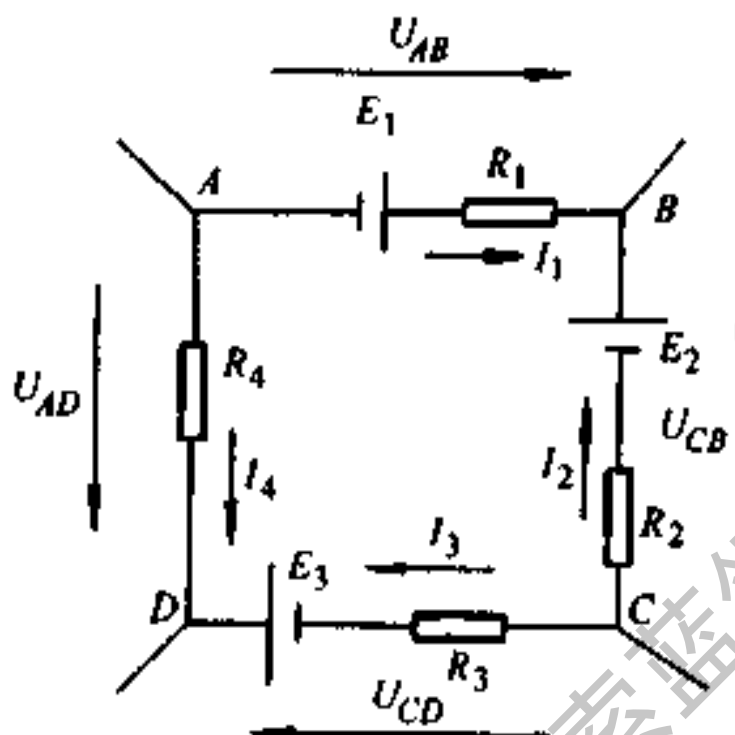


图 1-5 部分直流复杂电路

根据欧姆定律,每段支路的电压均可用电动势和电压降表示,所以上式也可写成: $\Sigma E = \Sigma IR$ (代数和)

即,在闭合回路中,电动势的代数和,等于电压降的代数和。以回路绕行方向为准,凡是电动势的方向与绕行方向相同为正,相反为负。凡是电流方向与绕行方向一致时,则电压降为正,否则为负。

在交流电路中,如果电流、电压、电动势均用复数形式表示,负载用复数阻抗表示,则基尔霍夫第二定律可用下式表示: $\Sigma \dot{U} = 0$ (代数和)

$$\Sigma \dot{E} = \Sigma \dot{I}Z \text{ (代数和)}$$

其中  $\dot{U}, \dot{E}, \dot{I}Z$  的正、负号判别方法与直流电路中的判别方法相同。

#### 四、电阻的计算(表 1-18)

#### 五、阻抗计算(表 1-19)

#### 六、电感的计算

1. 几种典型的电感计算公式如表 1-20 所示。

#### 2. 空心电抗器电感的计算

矩形和圆形空心电抗器如图 1-6 所示

(1) 截面为矩形的线圈电感:

$$L = 4W^2(A+C) \left[ \ln \frac{2AC}{H+B} - \frac{C}{A+C} \ln(C + \sqrt{A^2+C^2}) \right. \\ \left. - \frac{A}{A+C} \ln(A + \sqrt{A^2+C^2}) + \frac{2\sqrt{A^2+C^2}}{A+C} - \frac{1}{2} \right. \\ \left. + 0.447 \frac{H+B}{A+C} \right] \times 10^{-4}$$

式中  $L$ ——电感(mH);

$A$ ——线圈平均宽度(m)

$$A = (M+f)/2$$

$B$ ——线圈厚度(m)

$$B = (M-f)/2$$

$C$ ——线圈平均长度(m)

$$C = (E+e)/2$$

$H$ ——线圈高度(m);

$E$ ——线圈长度(m);

$M$ ——线圈宽度(m);

$e$ ——线圈内孔长(m);

表 1-18 电阻的计算

名称	计算公式	说明
导体电阻	$R = \rho \frac{l}{s}$ $R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20)]$	$R_{20}$ —20℃时的电阻(Ω) $\rho$ —电阻系数(Ω·mm <sup>2</sup> /m) $l$ —导体长度(m) $s$ —导体截面积(mm <sup>2</sup> ) $\alpha$ —电阻温度系数(1/℃) $R_t$ — $t$ ℃时导体的电阻(Ω)
电阻的 联接	串联 $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ 并联 $R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$	$R$ —电路的总电阻(等效电阻)(Ω) $R_1, R_2, \dots, R_n$ —电路各组成部分的电阻

(续)

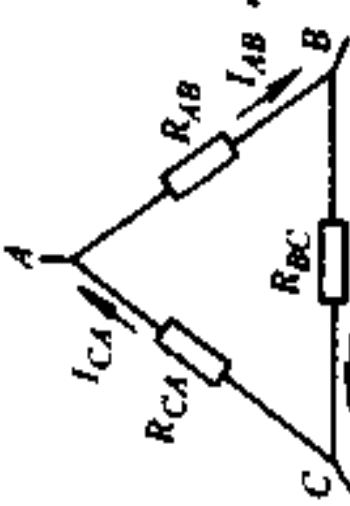
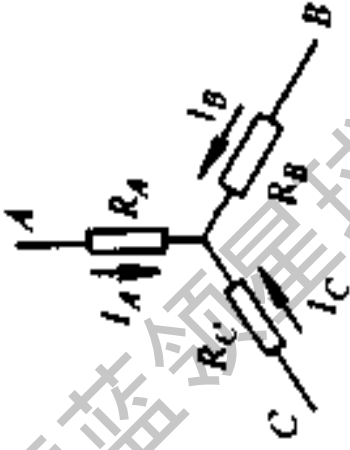
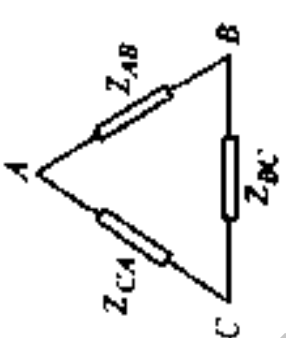
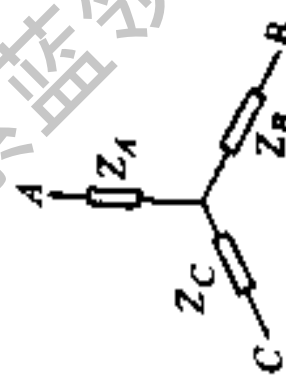
名称	计算公式	说明
电阻三角形联接变成星形联接	$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$ $R_B = \frac{R_{BC} \cdot R_{AB}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$ $R_C = \frac{R_{CA} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$	
电阻的星形联接变成三角形联接	$R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A \cdot R_B}{R_C}$ $R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B \cdot R_C}{R_A}$ $R_{CA} = R_C + R_A + \frac{R_C \cdot R_A}{R_B}$	



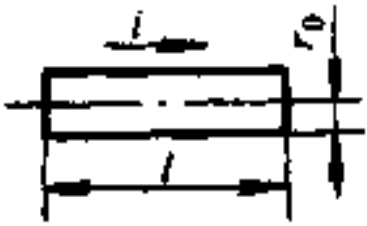


表 1-19 阻抗的计算

名称	计算公式	说明
阻抗串联	$Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$	$Z$ —等效阻抗( $\Omega$ ) $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ —构成电路的各部分阻抗( $\Omega$ ) 各个阻抗均为复阻抗
阻抗并联	$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}}$	
阻抗的三角形联接变成星形联接	$Z_A = \frac{Z_{AB} \cdot Z_{CA}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}$ $Z_B = \frac{Z_{BC} \cdot Z_{AB}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}$ $Z_C = \frac{Z_{CA} \cdot Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}$	 <p>图中阻抗均为复数阻抗</p>
阻抗的星形联接变成三角形联接	$Z_{AB} = Z_A + Z_B + \frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_C}$ $Z_{BC} = Z_B + Z_C + \frac{Z_B \cdot Z_C}{Z_A}$ $Z_{CA} = Z_C + Z_A + \frac{Z_C \cdot Z_A}{Z_B}$	

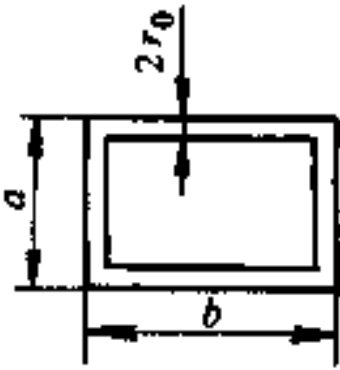
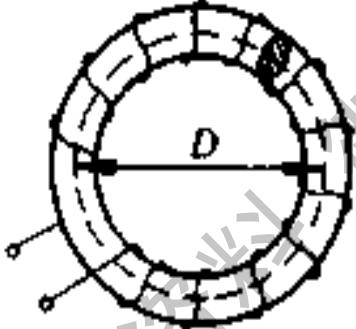
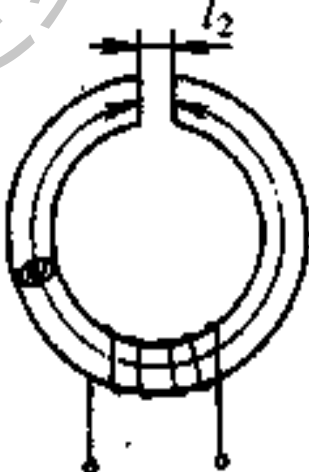
$f$ ——线圈内孔宽(m);

$W$ ——线圈匝数(匝)。

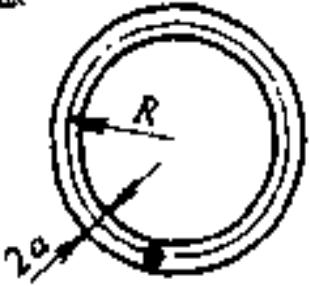
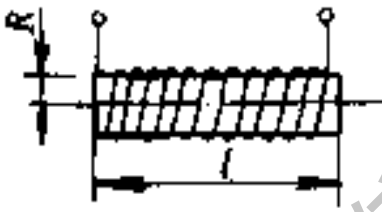
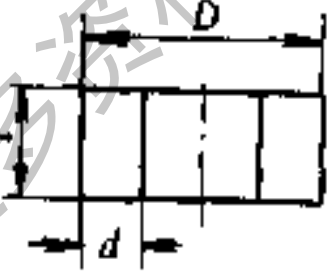
表 1-20 几种典型电感的计算公式

结构形式	电感量(H)
<p>圆截面直导线段的自感</p> 	$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r_0} - 0.75 \right)$ <p><math>l</math>——直导线段的长度(m)  <math>r_0</math>——导线的半径(m)            条件: <math>r_0 \ll l</math></p>
<p>同轴电缆的电感 (电缆外层导体厚度忽略不计)</p> 	$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{r_2}{r_1} \right)$ <p><math>l</math>——电缆长度(m)</p>
<p>两平行直导线段间的互感</p> 	$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{D} - 1 \right)$ <p><math>l</math>——直导线段的长度(m)            条件: 导线半径 <math>\ll D</math>  <math>D \ll l</math></p>

(续)

结构形式	电感量(H)
<p>矩形线圈的自感</p> 	$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[ a \ln \frac{2ab}{r_0(a+b)} + b \ln \frac{2ab}{r_0(b+d)} - 2(a+b-d) \right] + \frac{\mu_0}{\pi} \left( \frac{a+b}{4} \right)$ <p><math>r_0</math>—圆形导线半径  <math>d = \sqrt{a^2 + b^2}</math>            条件 <math>r_0 \ll a, r_0 \ll b</math></p>
<p>环状圆筒线圈的电感</p> 	$L = \frac{\mu_0 W^2}{2} (D - \sqrt{D^2 - 4R^2})$ <p><math>W</math>—匝数  <math>R</math>—圆环截面的半径(m)  <math>D</math>—圆环平均直径(m)</p>
<p>有气隙环形铁心的电感(也适用铁心式电抗器)</p> 	$L = \frac{\mu_0 \mu_r S W^2}{l_1 + \mu_r l_2}$ <p><math>S</math>—环形圆筒的截面积(m)  <math>l_1</math>—平均长度(m)  <math>l_2</math>—气隙长度(m)  <math>W</math>—线圈匝数  <math>\mu_r</math>—铁芯的相对导磁系数</p>

(续)

结构形式	电感量(H)
<p>圆环的电感</p> 	$L = \mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{a} - 1.75 \right)$ <p><math>a</math>—圆环截面的半径(m) 条件: <math>a \ll R</math>, <math>R</math> 的单位为 m</p>
<p>长螺管的自感</p> 	$L = \frac{\mu_0 W^2 A}{l} (\sqrt{R^2 + l^2} - R)$ <p><math>A</math>—螺管线圈截面积(<math>m^2</math>) <math>W</math>—匝数 <math>l, R</math> 单位均为 m</p>
<p>短螺管的自感</p> 	$L \approx \frac{6.4 \mu_0 W^2 D^2}{3.5D + 8l} \cdot \frac{D - 2.25d}{D}$ <p><math>W</math>—匝数 <math>l, D, d</math> 单位均为 m</p>

(2) 截面为矩形的正方形线圈的电感:

$$L = 8W^2 C \left( \ln \frac{C}{H+B} + 0.2235 \frac{H+B}{C} + 0.726 \right) \times 10^{-4}$$

式中符号意义同前。

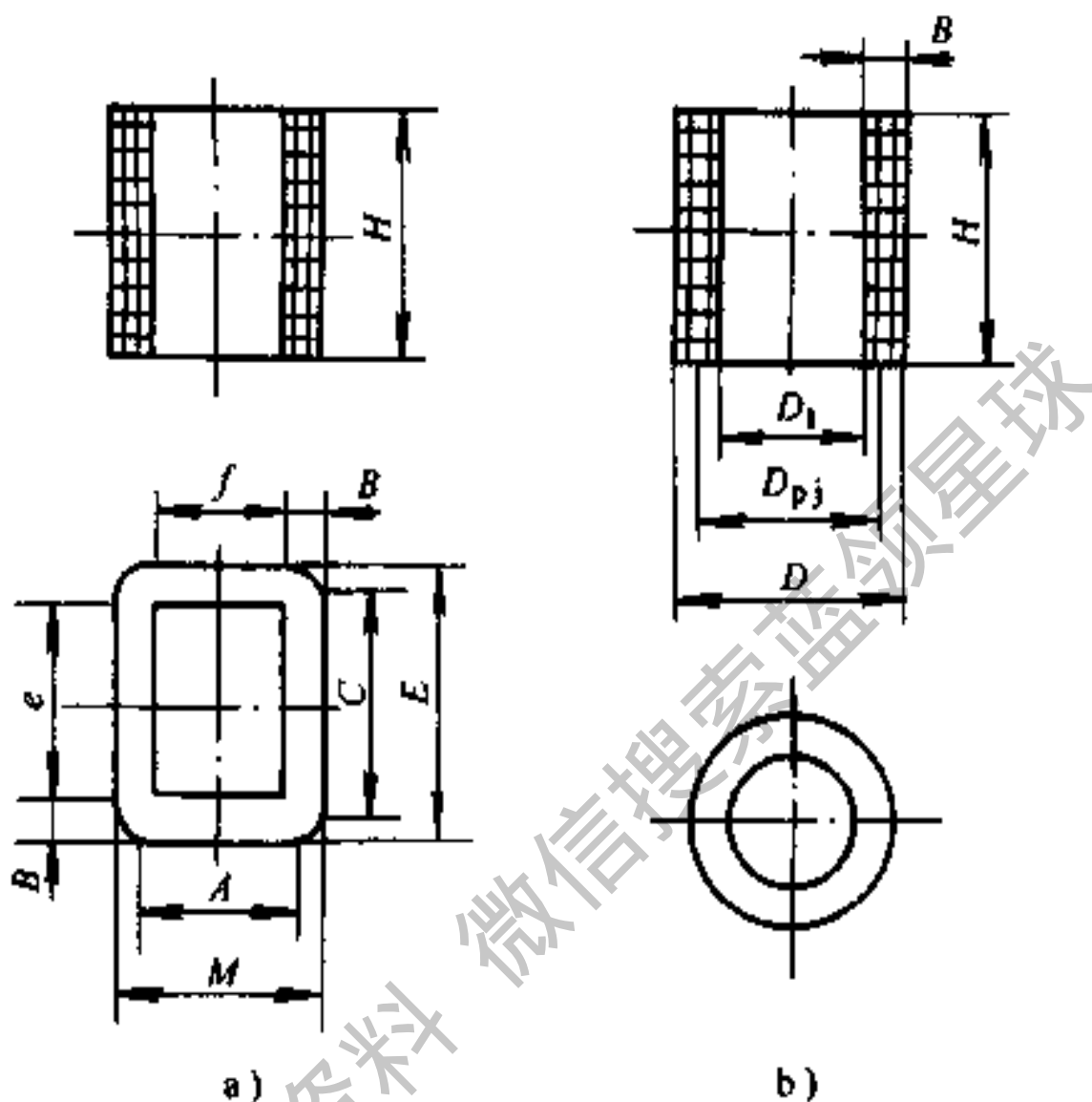


图 1-6 矩形与圆形电抗器

(3) 截面为矩形的圆形线圈电感:

$$L = \frac{7.85W^2 D_{pj}^2}{3D_{pj} + 9H + 10B} \times 10^{-3}$$

空心线圈电抗器中圆形线圈最佳尺寸比,在导线截面积一定的条件下,  $H/D_{pj} = 0.345$ ,  $B/D_{pj} = 0.335$  时重量最轻。

3. 两个线圈并联及串联时,线圈联接的等效电感(表 1-21)。

表 1-21 线圈并联、串联的等效电感


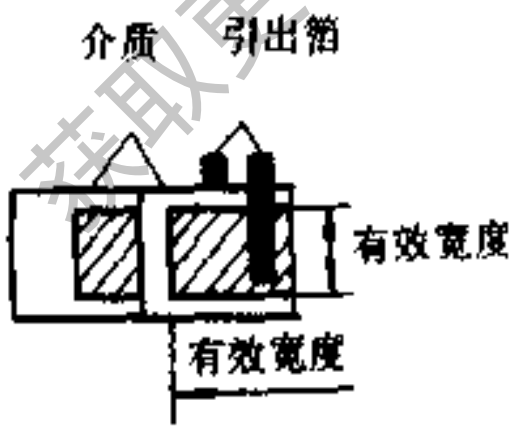
联接	接线圈	总电感	说 明
串联	<p>a) 增助      b) 抵消</p>	$L = L_1 + L_2 + M$ $L_1, L_2$ —两线圈的自感 $M$ —两线圈的互感	增助时 $M$ 取正号, 抵消时, $M$ 取负号
并联	<p>a) 增助      b) 抵消</p>	$L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$ $L_1, L_2$ —两线圈的自感 $M$ —两线圈的互感	增助时 $M$ 取正号, 抵消时 $M$ 取负号

## 七、电容的计算

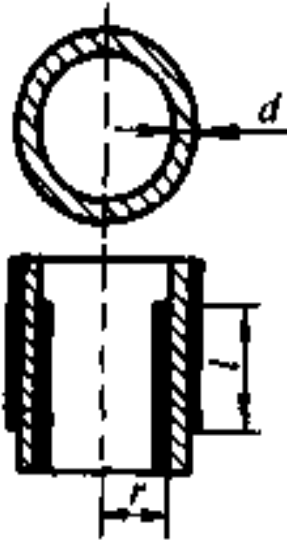
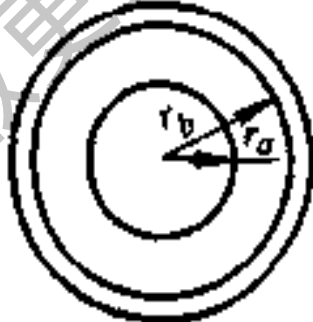
1. 在表 1-22 中示出几种典型的电容器电容量的计算公式:

2. 电容器联接时等效电容计算(表 1-23)

表 1-22 几种典型的电容器电容的计算公式

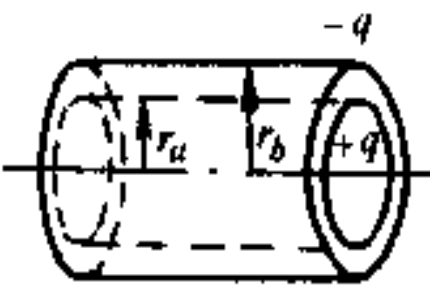
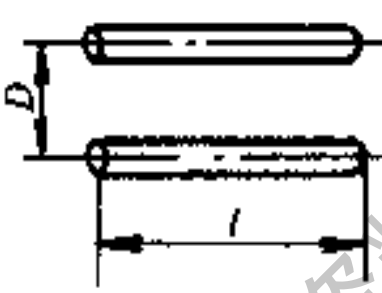
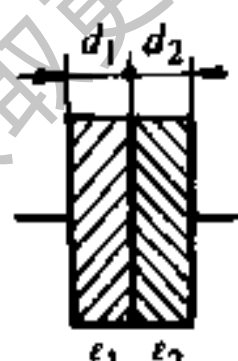
结构形式	电容量/F
<p>平板电容(忽略边缘效应的影响)</p> 	$C = \frac{\epsilon S}{d}$ <p><math>\epsilon</math>—介质的介电系数(F/m), 下同  <math>S</math>—电极有效面积(<math>m^2</math>)  <math>d</math>—介质厚度(m)</p>
<p>卷绕型电容</p> 	$C = \frac{2\epsilon S}{d}$ <p><math>S</math>—电极(铝箔)有效面积(<math>m^2</math>)  <math>d</math>—元件极间介质厚度(m)</p>

(续)

结构形式	电容量/F
<p data-bbox="427 365 639 409">圆管型电容</p> 	$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(1 + \frac{d}{r}\right)}$ <p data-bbox="826 815 1225 860"><math>l</math>—电极有效长度(m)</p> <p data-bbox="826 891 1145 936"><math>d</math>—介质厚度(m)</p> <p data-bbox="826 967 1353 1012"><math>r</math>—圆管内半径,与 <math>d</math> 同单位</p>
<p data-bbox="448 1323 624 1368">球形电容</p> 	$C = \frac{4\pi\epsilon r_a r_b}{r_b - r_a}$ <p data-bbox="831 1525 1422 1648">若 <math>r_b \rightarrow \infty</math>, 则半径为 <math>r_a</math> 的孤立导体球的电容为</p> $C = 4\pi\epsilon r_a$ <p data-bbox="831 1749 1422 1872"><math>r_a, r_b</math>—内球外表面与外球内表面半径(m)</p>



(续)

结构形式	电容量/F
<p>圆柱形电容 (或单芯电缆电容)</p> 	$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_b}{r_a}}$ <p><math>l</math>—电容器(或电缆)长度(m)  <math>r_a, r_b</math>—内柱外表面,外柱内表面的半径(或缆芯半径与外甲(铅皮)半径),同单位</p>
<p>二平行导线段的电容</p> 	$C = \frac{\pi\epsilon l}{\ln \frac{D}{r}}$ <p><math>\epsilon</math>—导体周围的介电系数(F/m)  <math>l</math>—导线长度(m)  <math>D</math>—导线间距离(m)  <math>r</math>—导线半径(m)          条件: <math>r \ll D</math></p>
<p>平行板电容器串联</p> 	$C = \frac{1}{\frac{d_1}{\epsilon_1 S} + \frac{d_2}{\epsilon_2 S}} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 S}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2}$ <p><math>d_1, d_2</math>—介质1和介质2的厚度(m)  <math>\epsilon_1, \epsilon_2</math>—介质1和介质2的介电系数(F/m)  <math>S</math>—电极有效面积(m<sup>2</sup>)</p>

(续)

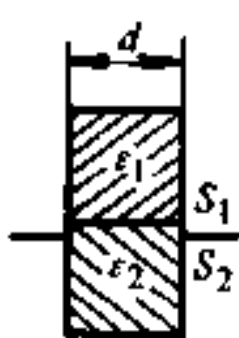
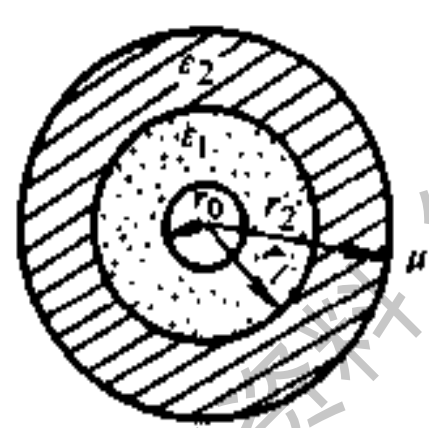
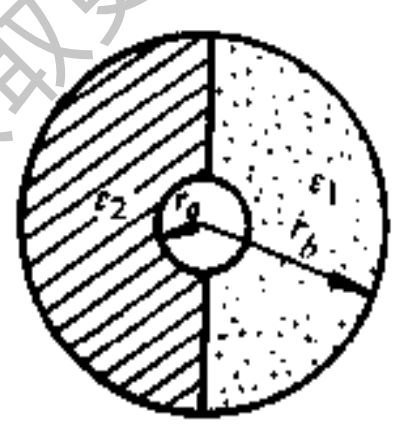
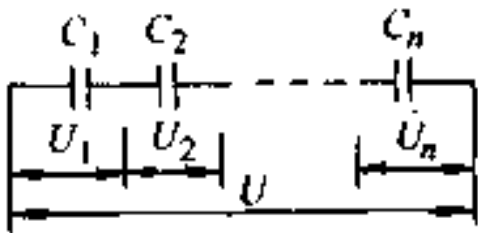
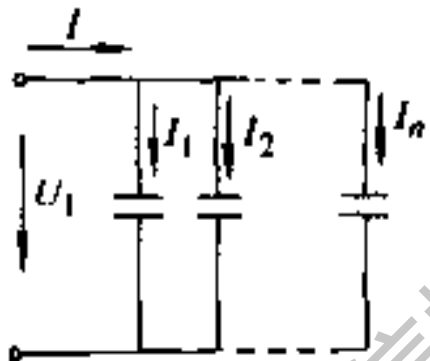
结构形式	电容量/F
<p>平行板电容器并联</p> 	$C = \frac{\epsilon_1 S_1 + \epsilon_2 S_2}{d}$ <p><math>S_1, S_2</math>—介质 1 和介质 2 的电极有效面积(<math>m^2</math>)  <math>d</math> 介质厚度(m)</p>
<p>同轴圆柱电容器串联</p> 	$C = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2 l}{\epsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0} + \epsilon_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$ <p><math>l</math>—电容器长度(m)</p>
<p>同轴圆柱电容器并联</p> 	$C = \frac{\pi l(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{\ln \frac{r_b}{r_a}}$ <p><math>l</math>—电容器长度(m)</p>

表 1-23 电容器联接时的等效电容

联接方式	电 路 图	等 效 电 容
串联		$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$
并联		$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$

## 第四节 简单交流电路计算

### 一、单参数交流电路

表 1-24 列出单参数交流电路的计算方法

### 二、电阻、电感和电容的串联与并联计算(表 1-25)

### 三、交流电路中功率的计算(表 1-26)

### 四、旋转因子 $a$ 及三相交流电的表示方法

#### 1. 旋转因子 $a$

在三相电路中常用旋转因子 $a$

$$a = e^{j120^\circ} = \angle 120^\circ$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = \angle -120^\circ$$

表 1-24 单参数交流电路计算

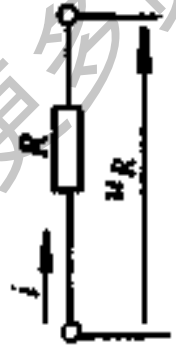


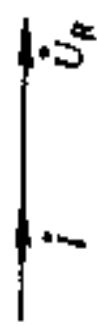






原参数	电阻 $R/\Omega$	电感 $L/H$	电容 $C/F$
电路图			
性能方程	$u_R = iR$ $i = \frac{u_R}{R}$ $\dot{U} = \dot{I}R$	$u_L = L \frac{di}{dt}$ $i = \frac{1}{L} \int u_L dt$ $\dot{U}_L = j\omega L \dot{I} = jX_L \dot{I}$	$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$ $i = C \frac{du_C}{dt}$ $\dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = -jX_C \dot{I}$
矢量图			
平均功率/W	$P = U_R I$	$P_L = 0$	$P_C = 0$
无功功率/Var	$Q = 0$	$Q_L = U_L I$	$Q_C = U_C I$

表 1-25 电阻、电感和电容的串联和并联计算




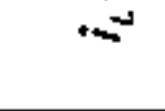
联接方式	串 联	并 联
<p>电路图</p> 	$\dot{U} = \left( R + j\omega L - j \frac{1}{\omega C} \right) \dot{I} = z \dot{I}$ $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j\omega L - j \frac{1}{\omega C}} = \frac{\dot{U}}{z}$	
<p>性能方程</p>	$Z = R + jX = z \angle \varphi$ <p>阻抗 <math>z = \sqrt{R^2 + X^2}</math></p> <p>阻抗角 <math>\varphi = \tan^{-1} \frac{X}{R}</math></p>	$\dot{I} = \left( \frac{1}{R} - j \frac{1}{\omega L} + j\omega C \right) \dot{U} = Y \dot{U}$ $\dot{U} = \frac{\dot{I}}{\frac{1}{R} - j \frac{1}{\omega L} + j\omega C} = \frac{\dot{I}}{Y}$ <p><math>Y = g - jb = y \angle -\varphi</math></p> <p>导纳 <math>y = \sqrt{g^2 + b^2}</math></p> <p>导纳角 <math>-\varphi = \tan^{-1} \frac{b}{g}</math></p>
<p>复数阻抗 Z 或 复数导纳 Y</p>		

(续)

联接方式	串联	并联
复数阻抗 $Z$ 或 复数导纳 $Y$	其中 电抗 $X = X_L - X_C$ 感抗 $X_L = \omega L$ 容抗 $X_C = \frac{1}{\omega C}$	其中 电导 $g = \frac{1}{R}$ 电纳 $b = b_L - b_C$ 感纳 $b_L = \frac{1}{\omega L}$ 容纳 $b_C = \omega C$
阻抗、电压三角 形或导纳、电 流三角形	阻抗三角形、电压三角形 	导纳三角形、电流三角形 

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

(续)

联接方式	串联	并联
	<p><math>X_L &gt; X_C</math> <math>i</math> 滞后于 <math>\dot{U}</math>, 电路呈感性</p>	<p><math>b_L &gt; b_C</math> <math>i</math> 滞后于 <math>\dot{U}</math>, 电路呈感性</p>
		
	<p><math>X_L = X_C</math> <math>i</math> 与 <math>\dot{U}</math> 同相</p>	<p><math>b_L = b_C</math> <math>i</math> 与 <math>\dot{U}</math> 同相</p>
		

矢量图

(续)

联接方式	串联	并联
矢量图	<p><math>X_L &lt; X_C</math> <math>i</math> 超前于 <math>\dot{U}</math>, 电路呈容性</p> <p>以电流矢量为参考</p>	<p><math>b_L = b_C</math> <math>i</math> 超前于 <math>\dot{U}</math>, 电路呈容性</p> <p>以电压矢量为参考</p>

表 1-26 交流电路中功率的计算

名称	图与计算公式	说明
功率三角形	<p><math>S = I \cdot U</math> <math>P = U_R \cdot I</math> <math>Q = I \cdot X_L</math></p>	<p><math>U \cdot I = S</math>—视在功率(VA)  <math>U_X \cdot I = Q</math>—无功功率(Var)  <math>U_R \cdot I = P</math>—有功功率(W)  <math>\varphi</math>—功率因数角  <math>\cos\varphi</math>—功率因数</p>



(续)

名称	图与计算公式	说明
单相交流电路	$P = UI \cos \varphi$ $Q = UI \sin \varphi$ $S = U \cdot I$ $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	
对称三相电路	$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi$ $Q = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi$ $S = \sqrt{3} U_l I_l$	$U_l$ —线电压(V) $I_l$ —线电流(A) $\varphi$ —每相的功率因数角 $\cos \varphi$ —每相的功率因数
不对称三相电路	$P = P_A + P_B + P_C$ $Q = Q_A + Q_B + Q_C$	$P_A, P_B, P_C$ —每相的有功功率 $Q_A, Q_B, Q_C$ —每相的无功功率

$$a^3 = e^{j360^\circ} = e^{j0^\circ} = \angle 0^\circ = 1$$

## 2. 三相电压的表示方法:

### (1) 瞬时值表达式

$$u_A = U_m \sin \omega t$$

$$u_B = U_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$u_C = U_m \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

### (2) 正弦曲线(见图 1-7a)

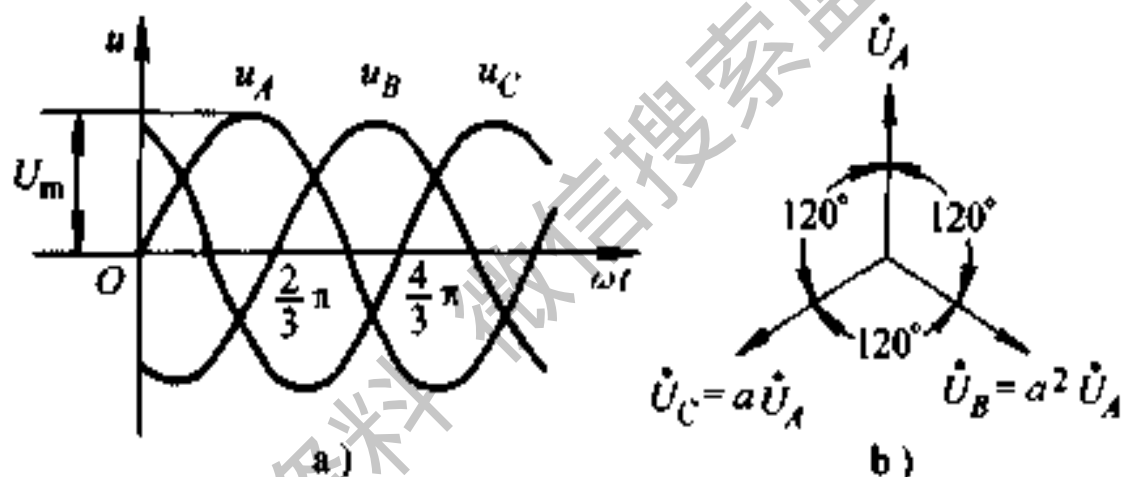


图 1-7 三相正弦曲线

### (3) 矢量图(见图 1-7b)

### (4) 复数表示法:

$$\dot{U}_A = U \angle 0^\circ = U$$

$$\dot{U}_B = U \angle -120^\circ = a^2 \dot{U}_A$$

$$\dot{U}_C = U \angle 120^\circ = a \dot{U}_A$$

## 五、对称分量法

### 1. 对称分量法是分析计算不对称三相电路的重要

方法。任何不对称三相正弦量,可以看成是三组同频率的对称三相正弦量的迭加。

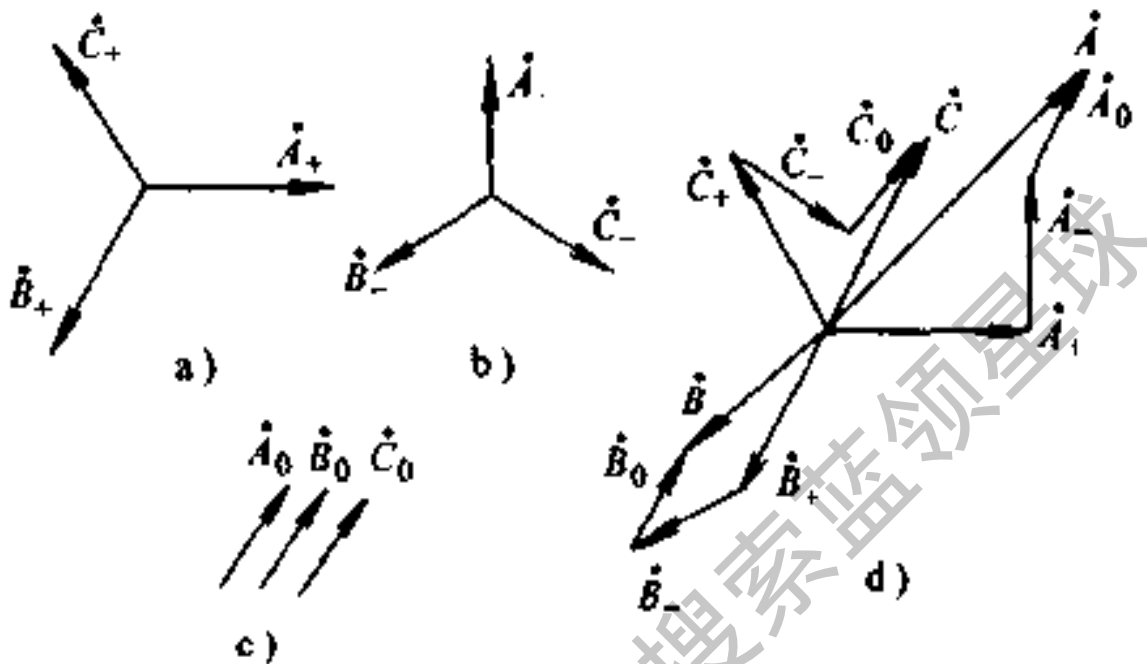


图 1-8 矢量图

正序分量

$$\dot{A}_p, \dot{B}_p = a^2 \dot{A}_p, \dot{C}_p = a \dot{A}_p$$

负序分量

$$\dot{A}_n, \dot{B}_n = a \dot{A}_n, \dot{C}_n = a^2 \dot{A}_n$$

零序分量  $\dot{A}_0, \dot{B}_0 = \dot{A}_0, \dot{C}_0 = \dot{A}_0$

这样  $\dot{A} = \dot{A}_0 + \dot{A}_p + \dot{A}_n$

$$\dot{B} = \dot{B}_0 + \dot{B}_p + \dot{B}_n = \dot{A}_0 + a^2 \dot{A}_p + a \dot{A}_n$$

$$\dot{C} = \dot{C}_0 + \dot{C}_p + \dot{C}_n = \dot{A}_0 + a \dot{A}_p + a^2 \dot{A}_n$$

不对称三相量  $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$  如图 1-8 所示。

2. 如果  $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$  不对称三相量已知, 则它们的对称分

量可用下式求出：

$$\dot{A}_p = \frac{1}{3} (\dot{A} + a \dot{B} + a^2 \dot{C})$$

$$\dot{A}_n = \frac{1}{3} (\dot{A} + a^2 \dot{B} + a \dot{C})$$

$$\dot{A}_0 = \frac{1}{3} (\dot{A} + \dot{B} + \dot{C})$$

### 3. 三相制电压和电流对称分量的性质

#### (1) 三相制电压对称分量的性质：

① 线电压矢量和为零，不含零序分量。

② 三相Y接法负载相电压对称分量有如下性质：  
负载对称时，不含零序分量；负载不对称时，含零序分量。

③ 三相△形接法负载相电压对称分量即为线电压分量。

#### (2) 三相制电流对称分量的性质：

① Y接法负载相电流或线电流总和为零，即无零序分量。

② Y接法有中线时，有零序分量，中线电流  $i_N = 3i_0 = i_A + i_B + i_C$

③ 发电机为△接时，有环流，负载也为△接法，则线电压有零序分量。

## 六、非正弦交流电计算

### 1. 非正弦波的分解

任何一个非正弦周期性函数,都可以分解为不同频率的正弦分量与直流分量之和。

设  $f(t)$  为非正弦周期性函数,则:

$$\begin{aligned}
 f(t) &= F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (B_{mk} \sin k\omega t + C_{mk} \cos k\omega t) \\
 &= F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} F_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k) = F_0 + F_{m1} \times \\
 &\quad \sin(\omega t + \psi_1) + F_{m2} \sin(2\omega t + \psi_2) \\
 &\quad + \dots + F_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k) + \dots
 \end{aligned}$$

式中  $F_0$  —— 直流分量;

$F_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$  —— 基波分量;

$F_{m2} \sin(2\omega t + \psi_2)$  —— 二次谐波分量;

.....

$F_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k)$  ——  $k$  次谐波分量。

上述各量之间关系如下:

$$F_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$B_{mk} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t \cdot dt$$

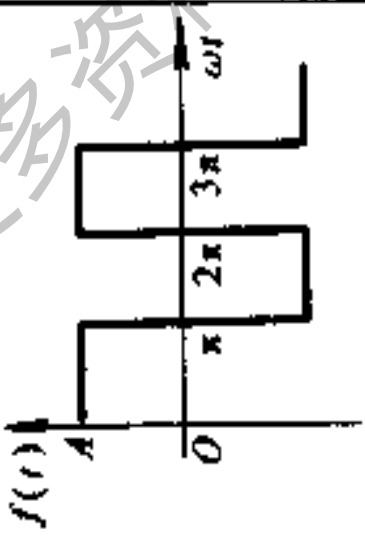
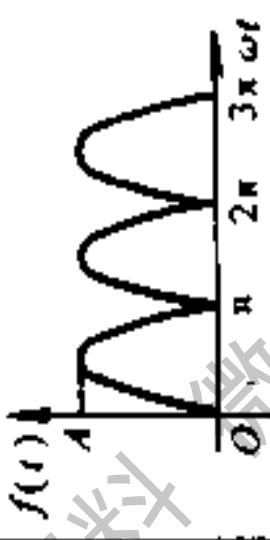
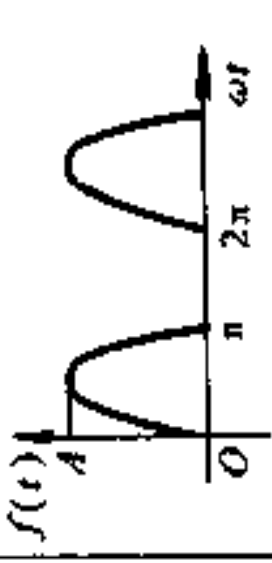
$$C_{mk} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t \cdot dt$$

$$F_{mk} = \sqrt{B_{mk}^2 + C_{mk}^2}$$

$$\psi_{mk} = \tan^{-1} \frac{C_{mk}}{B_{mk}}$$

## 2. 几种常见波形的分解(表 1-27)

表 1-27 几种常见波形的分解

名称	矩形波	全波整流波	半波整流波
波形图			
傅里叶级数展开式	$f(t) = A \left( \frac{4}{\pi} \sin \omega t + \frac{4}{3\pi} \sin 3\omega t + \frac{4}{5\pi} \sin 5\omega t + \dots \right)$	$f(t) = A \left( \frac{2}{\pi} - \frac{4}{\pi} \frac{1}{3 \times 5} \cos 4\omega t - \frac{4}{\pi} \frac{1}{5 \times 7} \cos 6\omega t - \dots \right)$	$f(t) = A \left( \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{\pi} \frac{1}{1 \times 3} \cos 2\omega t + \frac{2}{\pi} \frac{1}{3 \times 5} \cos 4\omega t - \dots \right)$

(续)

名称	矩形波	全波整流波	半波整流波
最大值 $F_m$	$A$	$A$	$A$
直流分量 $F_0$	0	$2A/\pi$	$A/\pi$
有效值 $F$	$A$	$A/\sqrt{2}$	$A/2$
均绝值 $F_a$	$A$	$2A/\pi$	$A/\pi$
波形因数 $k_f$	1	1.110	1.571
波顶因数 $k_c$	1	1.414	2

(续)

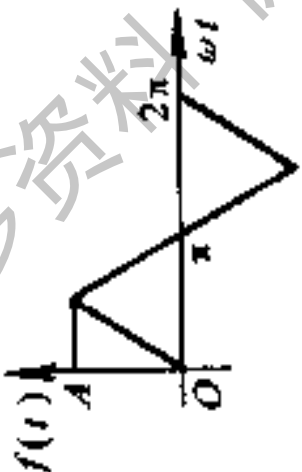
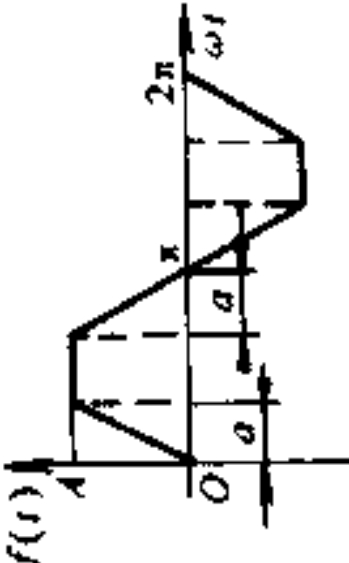
名称	三相半波	锯齿波
波形图		
傅里叶级数展开式	$f(t) = \frac{3\sqrt{3}A}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2 \times 4} \cos 3\omega t - \frac{1}{5 \times 7} \cos 6\omega t + \frac{1}{8 \times 10} \cos 9\omega t - \dots \right)$	$f(t) = A \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \times (\sin \omega t + \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots) \right]$



(续)

名称	三相半波	锯齿波
最大值 $F_m$	$A$	$A$
直流分量 $F_0$	$3 \sqrt{3} A/2\pi$	$A/2$
有效值 $F$	$A \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi}}$	$A/\sqrt{3}$
均绝值 $F_a$	$3 \sqrt{3} A/2\pi$	$A/2$
波形因数 $k_f$	1.017	1.155
波顶因数 $k_c$	1.190	1.732

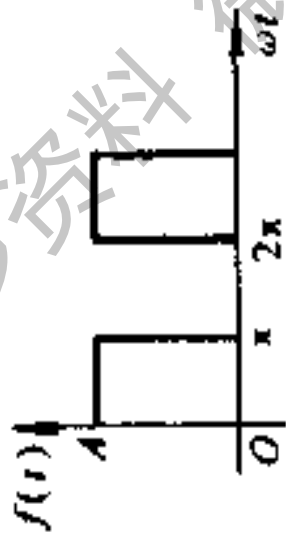
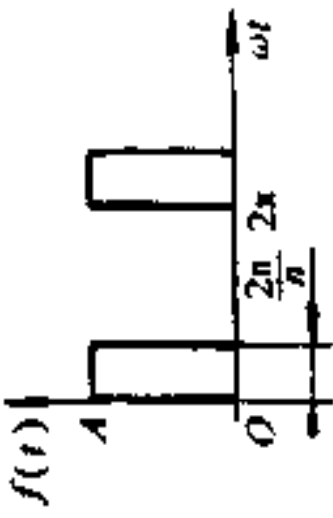
(续)

名称	三角波	梯形波
波形图		
傅里叶级数展开式	$f(t) = \frac{8A}{\pi^2} \times (\sin\omega t - \frac{1}{9}\sin 3\omega t + \frac{1}{25}\sin 5\omega t - \dots + \frac{(-1)^{\frac{k-1}{2}}}{k^2} \times \sin k\omega t + \dots)$ <p>(k 为奇数)</p>	$f(t) = \frac{4A}{a\pi} \times (\sin a\sin\omega t + \frac{1}{9}\sin 3a\sin 3\omega t + \frac{1}{25}\sin 5a\sin 5\omega t + \dots + \frac{1}{k^2}\sin k a\sin k\omega t + \dots)$ <p>(k 为奇数)</p>

(续)

名称	三角波	梯形波
最大值 $F_m$	$A$	$A$
直流分量 $F_0$	$0$	$0$
有效值 $F$	$A/\sqrt{3}$	$A\sqrt{1-\frac{4a}{3\pi}}$
均绝值 $F_a$	$A/2$	$A\left(1-\frac{a}{\pi}\right)$
波形因数 $k_f$	1.155	$\sqrt{1-\frac{4a}{3\pi}} / \left(1-\frac{a}{\pi}\right)$
波顶因数 $k_c$	1.732	$1/\sqrt{1-\frac{4a}{3\pi}}$

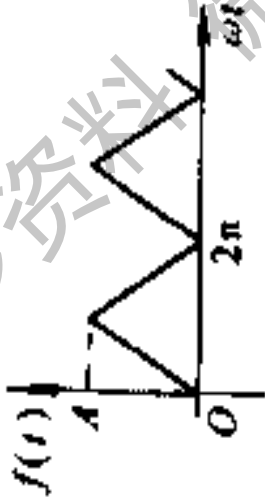
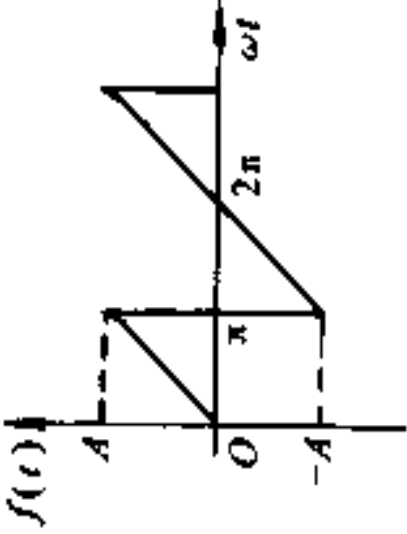
(续)

名称	半周期方形脉冲波	方形脉冲波
波形图		
傅里叶级数展开式	$f(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$	$f(t) = \frac{A}{n} + \frac{2A}{\pi} \left[ \sin \frac{\pi}{n} \cos(\omega t + \frac{\pi}{n}) + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{n} \cos 2 \left( \omega t + \frac{\pi}{n} \right) + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi}{n} \cos 3 \left( \omega t + \frac{\pi}{n} \right) + \dots \right]$

(续)

名称	半周期方形脉冲波	方形脉冲波
最大值 $F_m$	$A$	$A$
直流分量 $F_0$	$A/2$	$A/n$
有效值 $F$	$A/\sqrt{2}$	$A/\sqrt{n}$
均绝值 $F_a$	$A/2$	$A/n$
波形因数 $k_f$	$\sqrt{2}$	$\sqrt{n}$
波顶因数 $k_c$	$\sqrt{2}$	$\sqrt{n}$

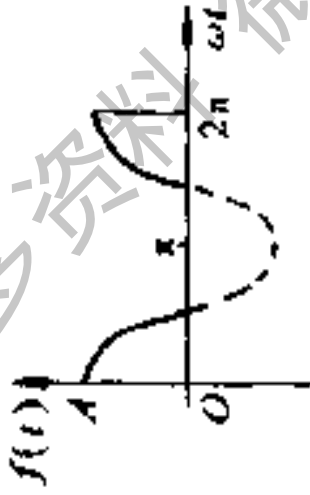
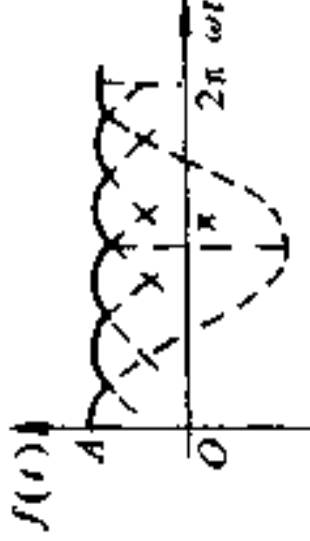
(续)

名称	三角脉冲	锯齿波
波形图		
傅里叶级数展开式	$f(t) = A \left( \frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2} \cos \omega t + \frac{1}{9\pi^2} \cos 3\omega t + \dots + \frac{1}{k^2\pi^2} \cos k\omega t + \dots \right)$ <p style="text-align: center;">(k 为奇数)</p>	$f(t) = \frac{2A}{\pi} \left( \sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots + \frac{1}{k} \sin k\omega t + \dots \right)$ <p style="text-align: center;">( (-1)<sup>k+1</sup> sin kωt + ... )</p>

(续)

名称	三角脉冲	锯齿波
最大值 $F_m$	$A$	$A$
直流分量 $F_0$	$A/2$	$0$
有效值 $F$	$0.644A$	$1.8A/\pi$
均绝值 $F_e$	$A/2$	$A/2$
波形因数 $k_f$	$1.288$	$1.146$
波顶因数 $k_c$	$1.553$	$1.745$

(续)

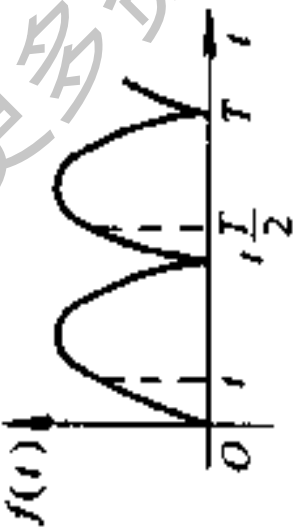
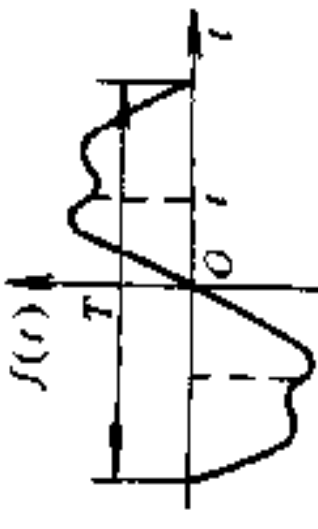
名称	正弦半波	六相半波
波形图		
傅里叶级数展开式	$f(t) = \frac{2A}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1 \times 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \times 5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5 \times 7} \cos 6\omega t + \dots \right)$	$f(t) = \frac{6A}{\pi} \left( 1 + \frac{1}{5 \times 7} \cos 6\omega t - \frac{1}{11 \times 13} \cos 12\omega t + \frac{1}{17 \times 19} \cos 18\omega t - \dots \right)$



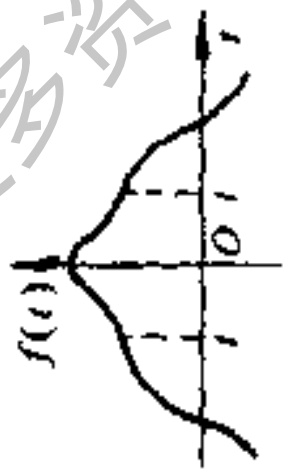
(续)

名称	正弦半波	六相半波
最大值 $F_m$	$A$	$A$
直流分量 $F_0$	$A/\pi$	$6A/\pi$
有效值 $F$	$\pi A/5$	$6A/\pi$
均绝值 $F_a$	$A/\pi$	$6A/\pi$
波形因数 $k_f$	1.974	1
波顶因数 $k_c$	1.592	1

(续)

波形及特点	谐波特点	说明
 <p>前后半波波形相同：  <math>f(t) = f(t + \frac{T}{2})</math></p>	$f(t) = F_0 + F_{m2}\sin(2\omega t + \psi_2) + F_{m4}\sin(4\omega t + \psi_4) + \dots + F_{mk}\sin(k\omega t + \psi_k) + \dots$ <p>(k 为偶数)</p> <p>谐波中无奇次谐波分量</p>	<p>直流电路中常出现此类波形</p>
 <p>波形对原点对称 <math>f(t) = -f(-t)</math></p>	$f(t) = B_{w1}\sin\omega t + B_{w3}\sin 3\omega t + \dots + B_{w+1}\sin k\omega t + \dots$ <p>谐波中仅含正弦项，不含余弦项和直流分量</p>	<p>在倍频电路中常出现，波形性质与时间起点有关</p>

(续)

波形及特点	谐波特点	说明
 <p data-bbox="813 1321 861 1859">波形对纵轴对称 <math>f(t) = f(-t)</math></p>	$f(t) = C_{m1} \cos \omega t + C_{m2} \cos 2\omega t + \dots + C_{mk} \cos k\omega t + \dots$ <p data-bbox="702 470 829 1187">谐波仅含余弦项, 不含正弦项和直流分量</p>	<p data-bbox="558 201 766 425">波形性质与时间起点有关</p>

## 3. 非正弦交流电路的各种数值计算(表 1-28)

表 1-28 非正弦交流电的各种数值与系数

名称	计算公式	说明
有效值	$F = \sqrt{F_0^2 + F_1^2 + F_2^2 + \dots + F_k^2}$	$F_0$ —直流分量 $F_1, F_2, \dots, F_k$ 各次谐波的有效值

(续)

名称	计算公式	说明
平均值	$F_a = \frac{1}{T} \int_0^T  f(t)  dt$	
有功功率	$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k$	单位: W
无功功率	$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k$	单位: Var
波形因数	$k_f = F/F_a$	
波顶因数	$k_c = F_m/F$	
畸变因数	$k_d = F_1/F$	$F_1$ —基波有效值 $F$ —非正弦量有效值

## 第五节 复杂电路计算方法

### 一、支路电流法

支路电流法是直接应用基尔霍夫两个定律以支路电流为求解对象的方法。解题步骤如下：

1. 先假定各支路电流方向,确定回路绕行方向;
2. 运用基尔霍夫第一定律,列节点方程。如果电路有  $n$  个节点,则只能列  $n-1$  个方程,不足的方程用基尔霍夫第二定律列出。

3. 用基尔霍夫第二定律,列回路电压方程,在列回路方程时,只少包含一个新支路。

4. 解方程,并确定支路电流的真实方向。如图 1-9,已知  $E_1 = 2V$ ,  $E_2 = 1.5V$ ,  $R_1 = 50\Omega$ ,  $R_2 = 75\Omega$ ,  $R_3 = 100\Omega$ ,求各支路电流?

假定好支路电流  $I_1$ ,  $I_2, I_3$  的方向,对节点  $A$  有

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

在  $E_1 A B E_1$  回路中,

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1$$

在  $E_2 A B E_2$  回路中,

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2$$

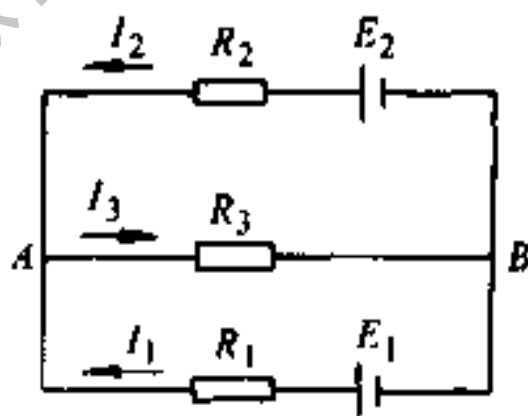


图 1-9 电路图

解联立方程得：

$$I_1 = \frac{E_1(R_2 + R_3) - E_2R_3}{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}$$

$$= \frac{2 \times (75 + 100) - 1.5 \times 100}{50 \times 75 + 75 \times 100 + 100 \times 50} \text{A} = 0.0123 \text{A}$$

$$I_2 = \frac{E_2(R_1 + R_3) - E_1R_3}{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}$$

$$= \frac{1.5(50 + 100) - 2 \times 100}{50 \times 75 + 75 \times 100 + 100 \times 50} \text{A} = 0.00154 \text{A}$$

$$I_3 = \frac{E_2R_1 + E_1R_2}{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}$$

$$= \frac{1.5 \times 50 + 2 \times 75}{50 \times 75 + 75 \times 100 + 100 \times 50} \text{A} = 0.0138 \text{A}$$

电流若有负值，说明电流的真实方向与假定方向相反。

在交流电路中，只要应用复数电流、复数电动势，复数阻抗列方程即可。

## 二、回路电流法

回路电流法是以回路电流为求解对象，根据基尔霍夫第二定律列方程式进行计算的一种方法。步骤如下：

1. 先假定回路电流的方向；

2. 用基尔霍夫第二定律列回路电压方程式。一般有几个网孔，就列几个方程式。在本回路中，电动势的代数和，应等于本回路电流在本回路所有电阻上产生的电压降和相邻回路电流在公共电阻上产生电压降的代数和。

3. 解方程, 求出回路电流

4. 根据回路电流的大小和方向, 求出支路电流, 一般情况下, 单独支路的电流应等于回路电流, 公共支路的电流, 等于相邻回路电流的代数和。

如图 1-10:  $E_1 = 40\text{V}$ ,  $E_2 = 5\text{V}$ ,  $E_3 = 25\text{V}$ ,  $R_1 = 5\Omega$ ,  $R_2 = 10\Omega$ ,  $R_3 = 10\Omega$ , 求各支路电流?

首先确定两个网孔中回路电流的方向。如果回路电流的方向就是回路绕行方向, 则按基尔霍夫第二定律列出电压方程式:

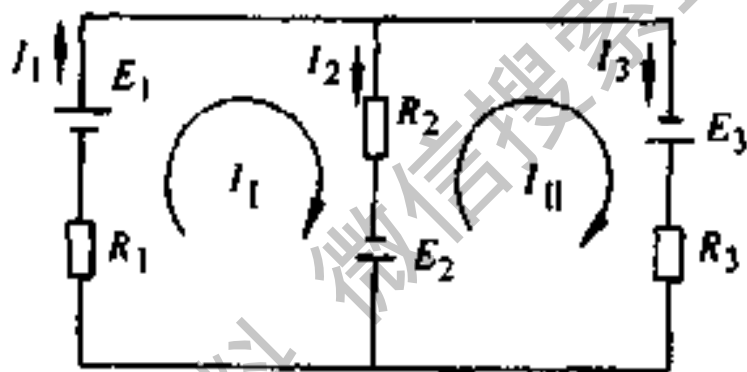


图 1-10 电路图

回路 I:

$$I_1(R_1 + R_2) - I_2 R_2 = E_1 + E_2$$

回路 II:

$$-I_1 R_2 + I_2(R_2 + R_3) = -E_2 + E_3$$

代入数据:

$$(5 + 10)I_1 - 10I_2 = 40 + 5$$

$$(10 + 10)I_2 - 10I_1 = -5 + 25$$

解得:

$$I_1 = 5.5\text{A}$$

$$I_1 = 3.75\text{A}$$

支路电流如下：

$$I_4 = I_1 = 5.5\text{A}$$

$$I_2 = I_1 - I_4 = (5.5 - 3.75)\text{A} = 1.75\text{A}$$

$$I_3 = I_1 = 3.75\text{A}$$

一般情况下回路电流法的方程式可表示为如下一组方程，以三个网孔为例：

$$I_1 R_{11} + I_2 R_{12} + I_3 R_{13} = E_1$$

$$I_1 R_{21} + I_2 R_{22} + I_3 R_{23} = E_2$$

$$I_1 R_{31} + I_2 R_{32} + I_3 R_{33} = E_3$$

式中  $R_{11}, R_{22}, R_{33}$  称为每个回路的自有电阻。

$R_{12} = R_{21}, R_{13} = R_{31}, R_{23} = R_{32}$ ，称为相邻两网孔的公共支路的共有电阻，如果两回路电流在公共支路上流向相同，取正号，否则取负号。

$E_1, E_2, E_3$  称为每个网孔的电动势的代数和，凡是电动势的方向与回路电流方向一致时为正，相反时为负。

在交流电路中，以三个网孔为例：

$$\dot{I}_1 Z_{11} + \dot{I}_2 Z_{12} + \dot{I}_3 Z_{13} = \dot{E}_1$$

$$\dot{I}_1 Z_{21} + \dot{I}_2 Z_{22} + \dot{I}_3 Z_{23} = \dot{E}_2$$

$$\dot{I}_1 Z_{31} + \dot{I}_2 Z_{32} + \dot{I}_3 Z_{33} = \dot{E}_3$$

### 三、节点电压法

节点电压法适用于一对节点的电路，它以节点电压为求解对象，然后按含源支路或无源支路的欧姆定律求



支路电流。

节点电压公式：

$$U = \frac{\Sigma E_g}{\Sigma g}$$

$\Sigma E_g$  (代数和) 表示：联接在两节点之间的所有支路电动势与电导之积的代数和。凡是电动势的方向指向高电位点时为正，相反为负。

$\Sigma g$  表示联接在两个节点之间所有各支路的电导之和。  
在交流情况下：

$$\dot{U} = \frac{\Sigma \dot{E}Y}{\Sigma Y}$$

式中  $\dot{E}, \dot{U}$  表示复数电势和复数电压；

$Y$  表示支路的复数导纳。

$\Sigma \dot{E}Y$  中正负号的判定方法同直流一样。

下面以一个实例说明节点电压法具体应用。

图 1-11，具有一对节点的电路，已知： $E_1 = 10V$ ， $E_2 = 8V$ ， $E_3 = 12V$ ， $R_1 = 2\Omega$ ， $R_2 = 4\Omega$ ， $R_3 = 4\Omega$ 。求：支路电流？

首先假定节点之间的电压方向  $U_{OO'}$ ，即  $O$  点为高电位点。

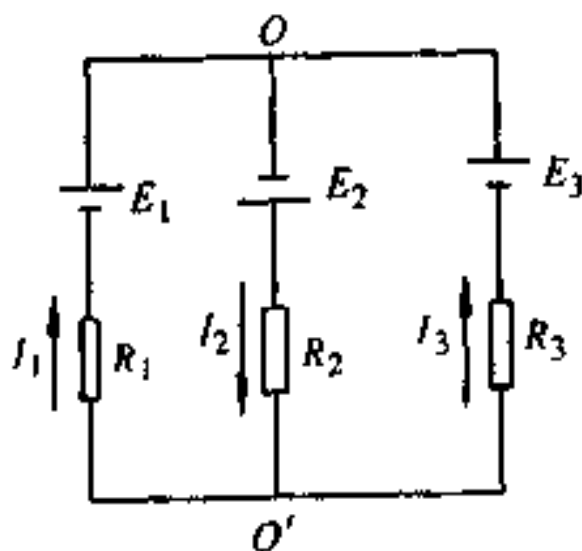


图 1-11 电路图

$$U_{\infty} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2 + E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3}$$

$$= \frac{10 \times \frac{1}{2} - 8 \times \frac{1}{4} + 12 \times \frac{1}{4}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}} \text{V} = 6\text{V}$$

假定支路电流方向, 如图所示:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{\infty}}{R_1} = \frac{10 - 6}{2} \text{A} = 2\text{A}$$

$$I_2 = \frac{E_2 + U_{\infty}}{R_2} = \frac{8 + 6}{4} \text{A} = 3.5\text{A}$$

$$I_3 = \frac{E_3 - U_{\infty}}{R_3} = \frac{12 - 6}{4} \text{A} = 1.5\text{A}$$

#### 四、戴维南定理

戴维南定理也称等效发电机定理。一个复杂的有源二端网路, 对外电路来说, 可以简化成一个由电动势  $E_0$  和内阻为  $R_0$  的简单等效电路(见图 1-12)。

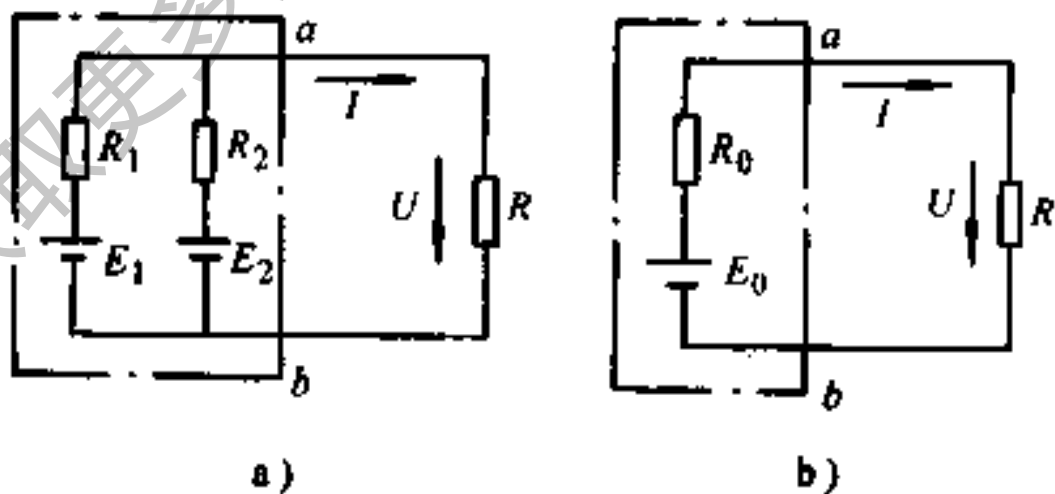


图 1-12 有源二端网路

$E_0$  等于原来网络的开路电压  $U_0$ ,  $R_0$  等于原来网络中所有电动势为零时的等效电阻。

图 1-12a 是一个有源二端网络, 当外电路中电流为  $I$ , 电压为  $U$  时, 可用图 1-12b 的等效电路来代替它。

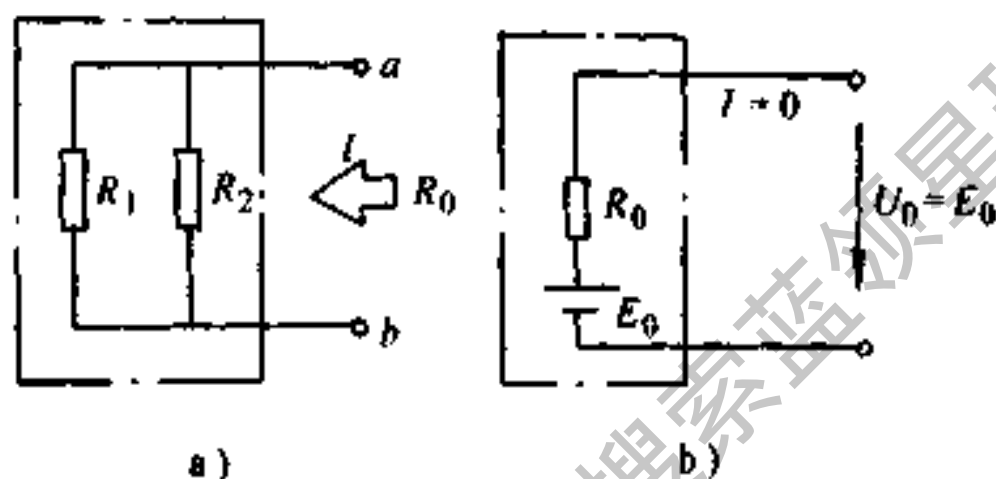


图 1-13 等效电路

从图 1-13a 可见,  $R_0$  等于  $R_1$  和  $R_2$  并联后的总电阻, 也就是说, 设有源网络中所有电动势为零, 则它就变成无源二端网络了。从  $ab$  端看过去, 它的总电阻就是  $R$ 。

$E_0$  等于二端有源网络开路时的开路电压  $U_0$ 。如图 1-13b 所示。

下面以一个实例说明戴维南定理的应用。

如图 1-14a, 已知:  $R_1 = 10\Omega$ ,  $R_2 = 20\Omega$ ,  $R_3 = 30\Omega$ ,  $R_4 = 40\Omega$ ,  $R_5 = 5\Omega$ ,  $E = 30V$ , 求:  $R$  中的电流?

从  $R$  两端看, 电路变成一个有源二端网络(图 1-14b)。c 图是 b 图所对应的无源二端网络。它的等效电阻  $R_0$  就是等效发电机的内阻:

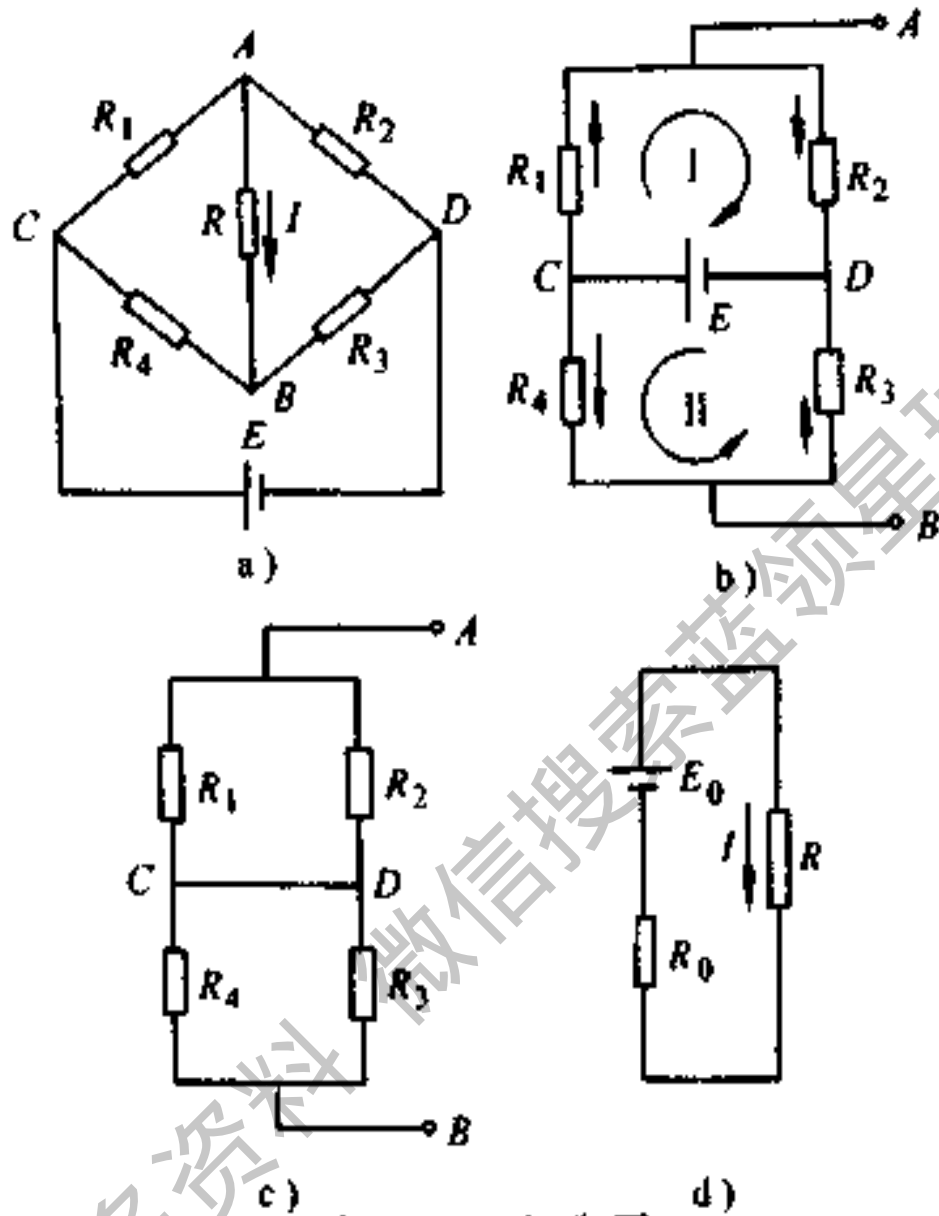


图 1-14 电路图

$$R_0 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}$$

$$= \left( \frac{10 \times 20}{10 + 20} + \frac{30 \times 40}{30 + 40} \right) \Omega = 23.8 \Omega$$

从图 b 看等效发电机的电势  $E_0$  即为图 b 中 A、B 两点的开路电压  $U_{AB}$ 。

$$U_{AB} = U_{AD} + U_{DB} = \frac{ER_2}{R_1 + R_2} + \frac{ER_3}{R_3 + R_4}$$

$$= \left( \frac{30 \times 20}{10 + 20} - \frac{30 \times 30}{30 + 40} \right) \text{V} = 7.1 \text{V}$$

根据图 d,  $R$  中的电流

$$I = \frac{E_0}{R_0 + R} = \frac{7.1}{23.8 + 5} \text{A} = 0.247 \text{A}$$

等效发电机定理也适用于交流电路,只不过电动势用  $\dot{E}$  表示,电路参数用  $Z$  表示,而开路电压  $\dot{U}_0 = \dot{E}_0$ ,等效内阻抗为  $Z_0$  而已。

### 五、迭加原理

在线性电路中,如果有多个电动势起作用时,每个支路的电流可以看成是各个电动势单独起作用时,在该支路所产生的电流分量的迭加,这一性质就称为迭加原理。

即:  $I = I' + I'' + I''' + \dots$  (代数和)

在迭加时要注意到电流分量的流向。有了迭加原理,就可以把复杂电路的问题,变成简单电路的计算问题,如图 1-15 所示。

应用迭加原理时,应注意以下四点:

(1) 迭加原理只能用来计算线性电路中的电流和电压,不能用来计算功率;

(2) 只考虑一个电动势单独起作用时,其余的电动势可看成短路,但它们的内阻应保留;

(3) 应用迭加原理时,电路中所有的电阻不能变动,遇到电势源时予以短路,遇到电流源时,可将其断开;

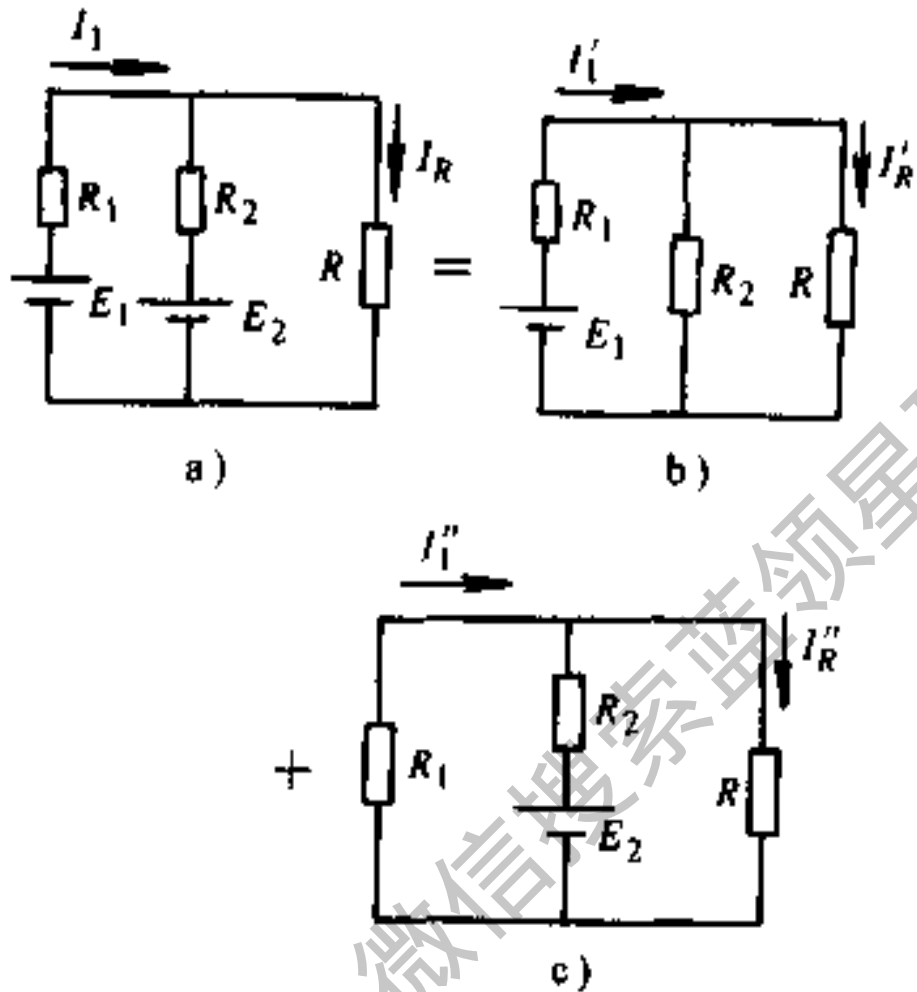


图 1-15 电路图

(4) 电流或电压分量迭加时,要注意分量的方向,如果电流分量的方向与原支路电流标出的方向相同时取正号,否则取负号。

现举一实例,来研究迭加原理的应用。

如图 1-16 所示:  $E = 20\text{V}$ ,  $I_s = 20\text{A}$ ,  $R_1 = 5\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$ ,  $R_{L2} = 7\Omega$ , 用迭加原理来计算负载电阻  $R_{L2}$  中的电流和功率?

$$I' = \frac{E}{R_{L2} + R_2} = \frac{20}{7 + 3} \text{A} = 2\text{A}$$

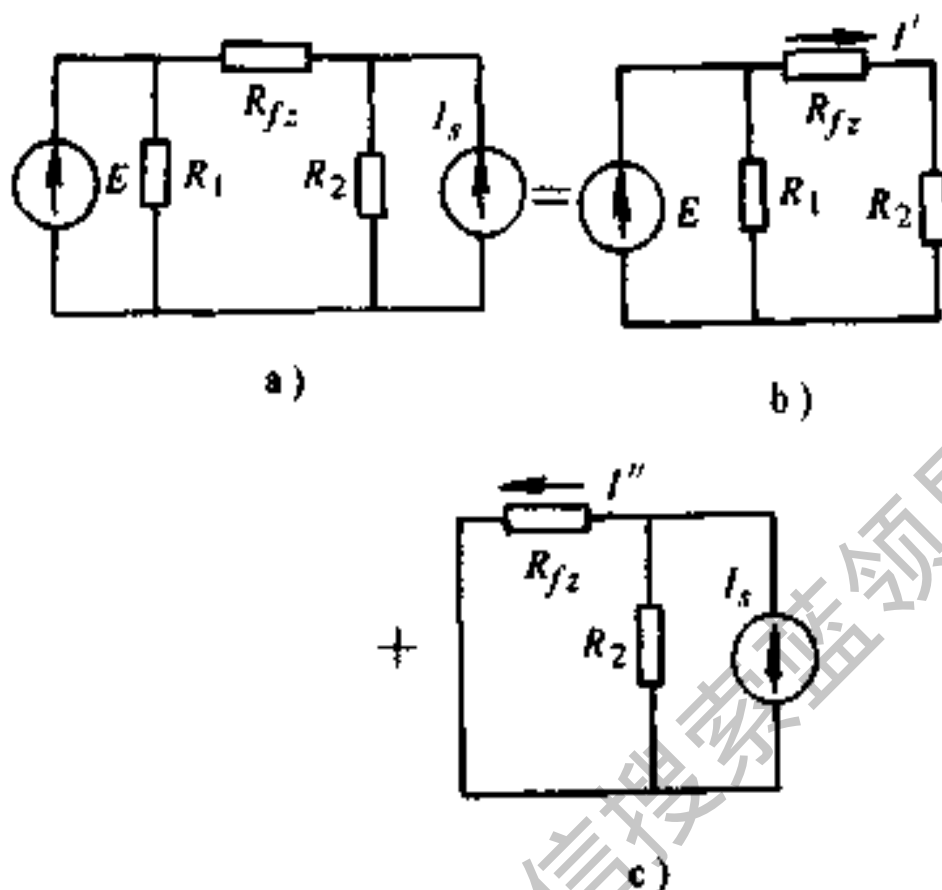


图 1-16 电路图

$$I'' = \frac{I_s \times R_2}{R_{fz} + R_2} = \frac{20 \times 3}{10 + 3} \text{A} = 6 \text{A}$$

若假定  $R_{fz}$  中的电流  $I$  与  $I''$  流向一致, 则:

$$I = I'' - I' = (6 - 2) \text{A} = 4 \text{A}$$

负载的功率:

$$P = I^2 R_{fz} = 4^2 \times 7 \text{W} = 112 \text{W}$$

## 六、交流电路的谐振

### 1. 串联谐振

在  $R-L-C$  串联电路中, 电路两端电压和电流同相位时, 此时电感电压和电容电压大小相等, 相位相差  $180^\circ$ , 此时称为串联谐振, 也称电压谐振, 电压谐振的条件和特

点见表 1-29。

表 1-29 电压谐振的条件和特点

项目	计算公式	说 明
条件	$x_L = x_C$ $2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \text{ 或者 } \omega L = \frac{1}{\omega C}$ <p>也可以</p> $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	<p>感抗和容抗相等的条件, 可通过改变 <math>L</math> 或 <math>C</math> 来达到</p> <p><math>f_0</math>—固有振荡频率</p> <p><math>\omega_0</math>—固有振荡角频率</p>
特点	<p>(1) 阻抗最小, 且呈电阻性,</p> $Z_0 = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} = R$ <p>(2) 电路中电流最大, 且与电源电压同相, 即</p> $I_0 = \frac{U}{R}$ <p>(3) 电感上电压和电容上电压相等, 相位相反。其数值是电源电压的 <math>Q</math> 倍</p> $U_L = U_C = \frac{x_L}{R}U = \frac{x_C}{R}U = QU$ $Q = \frac{x_L}{R} = \frac{x_C}{R} = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{1}{2\pi f_0 CR}$	<p><math>Q</math>—称为品质系数。当 <math>Q \gg 1</math> 时, 电感电压和电容电压大于电源电压; 即:</p> $U_L = U_C \gg U$ <p>这种现象称为过电压现象</p>

图 1-17 所示是一个电压谐振电路, 已知:  $R = 2\Omega$ ,



$L=0.13\text{mH}$ ,  $C=558\mu\text{F}$ , 外加电压  $U=10\text{mV}$ 。求: 谐振时电流, 品质因数, 电感电压和电容电压?

$$\text{谐振电流 } I_0 = \frac{U}{R} = \frac{10 \times 10^{-3}}{2} \text{A} = 5 \times 10^{-3} \text{A} = 5\text{mA}$$

品质因数

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \frac{\sqrt{\frac{0.13 \times 10^{-3}}{558 \times 10^{-12}}}}{20} = 240$$

电感和电容两端的电压:

$$U_L = U_C = QU \approx 240 \times 10\text{mV} = 2400\text{mV} = 2.4\text{V}$$

## 2. 并联谐振

在电感和电容并联电路中, 总电流和电压同相位的现象, 称并联谐振。此时, 电感中的电流和电容中的电流大小相等, 方向相反, 所以也称电流谐振。电流谐振时的特点(表 1-30)。

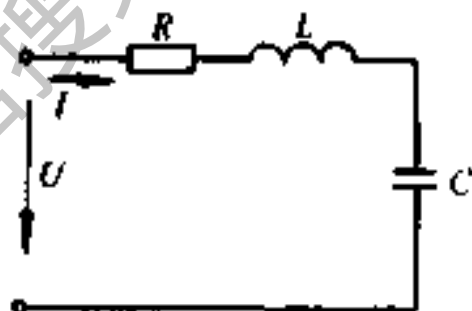


图 1-17 串联电路

表 1-30 电流谐振时特点

项目	计算公式	说明
条件	$b_L = b_C \text{ 或 } \frac{1}{\omega L} = \omega C$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$	感纳和容纳相等的条件, 可用改变 $L$ , 或改变 $C$ , 或改变电源的 $\omega$ 使之 $\omega = \omega_0$ 来达到

(续)

项目	计算公式	说明
特点	$(1) y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = g$ <p>此时阻抗 <math>z = \frac{1}{g}</math> 最大</p> <p>(2) 电路中总电流最小; 且电流与电压同相位</p> <p>(3) 谐振时, 电感电流和电容电流可能大大超过总电流, 此现象称为过电流现象</p>	

如图 1-18 所示, 电源的频率可变,  $R = 55\Omega$ ,  $L = 5\text{mH}$ ,  $C = 50\mu\text{F}$ ,  $U = 220\text{V}$ , 求谐振频率, 及谐振时  $I$ ,  $I_C$ ,  $I_L$  及电路总阻抗?

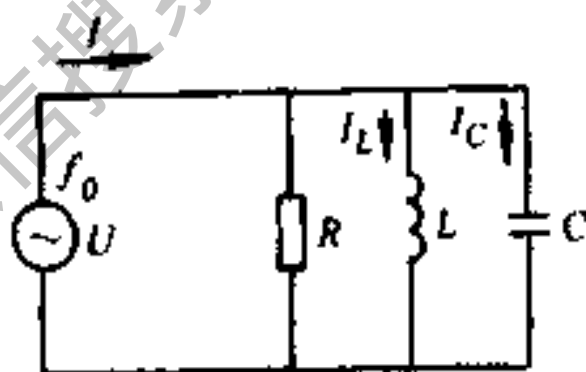


图 1-18 并联电路

谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{CL}}$$

$$= \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{5 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^{-6}}} \text{Hz} = 318 \text{Hz}$$

谐振时电流

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{55} = 4 \text{A}$$

$$I_C = \frac{U}{x_C} = \omega_0 C U = 2\pi \times 3.14 \times 50 \times 10^{-6} \times 220 A$$

$$= 22 A$$

$$I_L = \frac{U}{x_L} = \frac{U}{\omega_0 L} = \frac{220}{2\pi \times 3.14 \times 318 \times 5 \times 10^{-3}} A$$

$$= 22 A$$

谐振时电路的总阻抗

$$Z_0 = R = 55 \Omega$$

## 第六节 磁路与电磁感应

### 一、磁路的基本概念和定律(表 1-31)

表 1-31 磁路的基本概念和定律

名 称	定义公式	说 明
磁感应强度 (磁通密度)	$B = \frac{F}{Il}$	$B$ —磁感应强度(T) $F$ —磁场力(N) $I$ —电流(A) $l$ —导体长度(m)
磁通	$\Phi = B \cdot S$	$S \perp B$ $\Phi$ —磁通(Wb) $S$ —横截面积(m <sup>2</sup> )
磁场强度	$H = \frac{IW}{l}$	$H$ —磁场强度(A/m) $W$ —线圈匝数 $l$ —磁导体长度(m)

(续)

名称	定义公式	说明
磁导率	$\mu = \frac{B}{H}$	$\mu$ —磁导率(H/m)
磁路的欧姆定律	$\Phi = \frac{WI}{R_m}$ $R_m = \frac{l}{\mu S}$	$WI$ —磁动势(A) $R_m$ —磁阻(H <sup>-1</sup> )
磁路基尔霍夫第一定律	$\Sigma \Phi = 0 \text{ (代数和)}$ $\Sigma \Phi_{入} = \Sigma \Phi_{出}$	对于磁路的封闭面来说,穿过封闭面的磁通代数和为零
磁路基尔霍夫第二定律	$\Sigma H \cdot l = \Sigma IW$ <p>在闭路磁路中,磁压降的代数和,等于磁动势的代数和</p>	磁动势与磁压降的正负,取决于 $\phi$ 和 $l$ 是否符合右手螺旋定则,符合时为正,否则为负

## 二、磁路正面问题的计算步骤

已知磁通求磁动势属于磁路计算的正面问题。步骤如下:

1. 将磁路按着材料和截面不同进行分段;
2. 计算各段的截面积和平均长度;
3. 根据已知磁通计算各段的磁感应强度;
4. 按磁感应强度,确定磁场强度;

5. 根据每段的磁场强度和中心线长度, 求出每段的磁压;

6. 按基尔霍夫第二定律求出所需要的磁动势。

如图 1-19 所示, 磁路由硅钢片迭成, 已知磁通为  $2 \times 10^{-3} \text{Wb}$ , 线圈为 1200 匝, 求所需磁化电流。如线圈电阻为  $150 \Omega$ , 求外加电压, 图中尺寸为 mm。

磁路分成两段, 一段为空气隙, 另一段为铁芯。

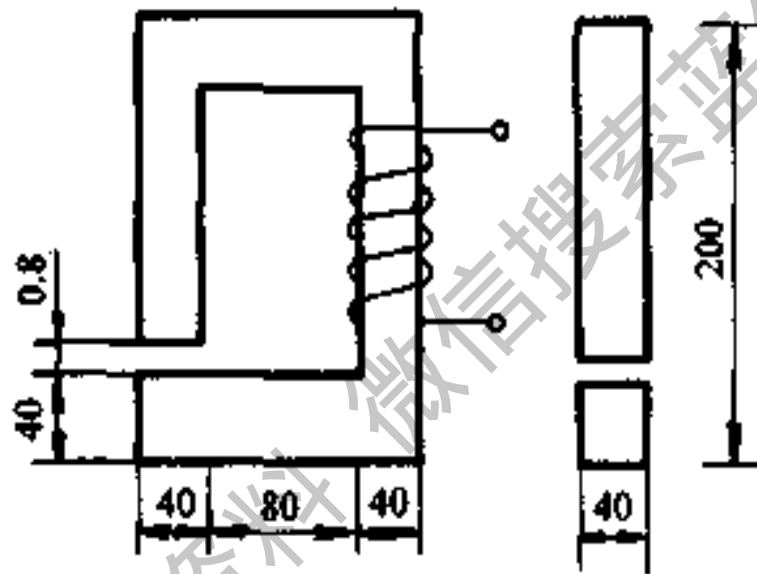


图 1-19 无分支磁路

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{2 \times 10^{-3}}{1600 \times 10^{-6}} \text{T} = 1.25 \text{T}$$

查磁化曲线得

$$H_1 = 10 \text{A/cm}$$

空气隙中磁场强度

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1.25}{4\pi \times 10^{-7}} \text{A/m} = 99.5 \times 10^{-4} \text{A/m}$$

各段的磁压

$$H_1 \cdot l_1 = 10 \times (160 + 120) \times 2 \times 10^{-1} \text{A} = 560 \text{A}$$

$$H_0 l_0 = 99.5 \times 10^{-1} \times 0.8 \times 10^{-3} \text{A} = 796 \text{A}$$

根据基尔霍夫第二定律：

$$\Sigma HI = H_1 l_1 + H_0 l_0 = 560 \text{A} + 796 \text{A} = 1360 \text{A}$$

即  $WI = 1360 \text{A}$

$$I = \frac{WI}{W} = \frac{1360}{1200} \text{A} = 1.13 \text{A}$$

线圈两端所加的电压

$$U = I \cdot R = 1.13 \times 150 \text{V} = 170 \text{V}$$

### 三、电磁感应及楞次定律

#### 1. 直导体中的感应电动势

直导体在磁场中作切割磁力线运动时，导体中会产生感应电动势(图 1-20)。

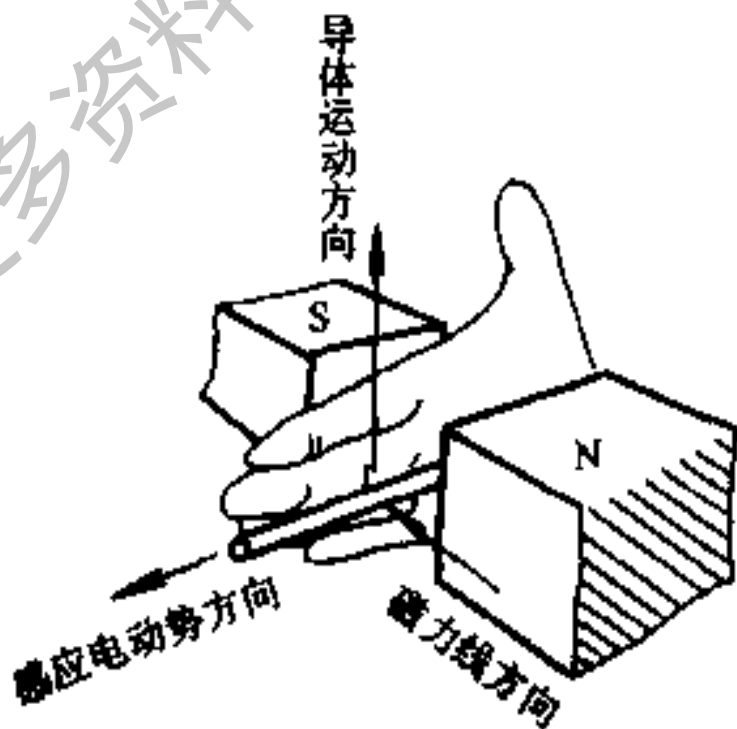


图 1-20 右手定则

感应电动势的大小：

$$E = Bvl \sin \alpha$$

式中  $E$ ——感应电动势(V)；

$B$ ——磁感应强度(T)；

$l$ ——导体长度(m)；

$v$ ——导体运动速度(m/s)；

$\alpha$ ——导体和磁力线之间的夹角(°)。

如果  $B, l, v$  三者互相垂直, 则

$$E = B \cdot l \cdot v$$

感应电动势的方向, 用右手定则判定。见图, 伸开右手, 让磁力线从手心穿过, 拇指指向导体运动方向, 则四个手指的方向, 就是导体中感应电动势的方向。

## 2. 线圈中的感应电动势

当穿过线圈的磁通随时间发生变化时, 线圈中就会产生感应电动势。感应电动势大小：

$$e = -W \frac{d\phi}{dt}$$

式中  $e$ ——感应电动势(V)；

$\phi$ ——磁通(Wb)；

$t$ ——时间(s)；

$W$ ——匝数。

感应电动势的方向用楞次定律判定。感应电流所产生的磁通总是反对原来磁通变化的。

如图 1-21 所示,导体  $MN$  有效长度  $0.2\text{m}$ ,在磁感应强度为  $1.2\text{T}$  的均匀磁场中以  $v=20\text{m/s}$  速度垂直于磁场匀速运动,导体外接电阻为  $0.5\Omega$ ,导体自身电阻为  $0.06\Omega$ ,求感应电动势、电流、导体所受电磁力的大小和方向?

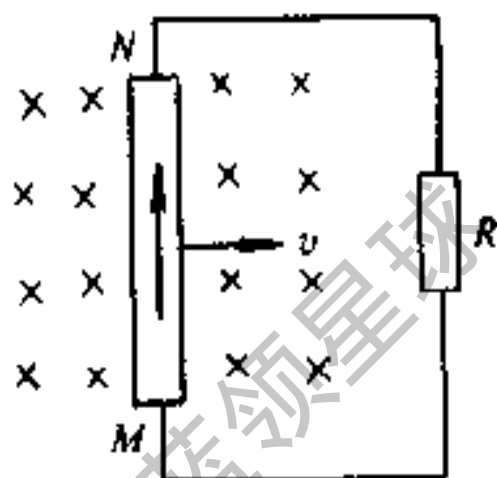


图 1-21 导体中电势

$$E = Bvl = 1.2 \times 20 \times 0.2\text{V} \\ = 4.8\text{V}$$

$$I = \frac{E}{R} = \frac{4.8}{0.5 + 0.06}\text{A} = 8.57\text{A}$$

电磁力

$$F = BI l = 1.2 \times 8.57 \times 0.2\text{N} = 2.06\text{N}$$

有一矩形线圈如图 1-22,平面垂直于磁力线,其面积为  $5\text{cm}^2$ ,共有 100 匝。若将线圈在  $0.025\text{s}$  内从磁感应强度为  $1.5\text{T}$  的均匀磁场中移出,求线圈的感应电动势?

线圈在磁场中的磁通

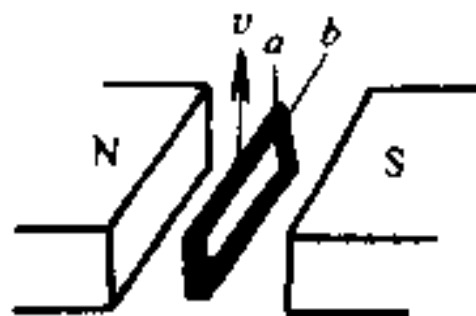


图 1-22 线圈中电势



$$\phi_1 = B \cdot S = 1.5 \times 5 \times 10^{-4} \text{Wb} = 7.5 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

线圈移到磁场外时

$$\phi_2 = 0$$

线圈中的感应电动势

$$\begin{aligned} e &= -W \frac{d\phi}{dt} = -W \frac{\phi_2 - \phi_1}{\Delta t} \\ &= -100 \times \frac{0 - 7.5 \times 10^{-4}}{0.025} \text{V} = 3\text{V} \end{aligned}$$

#### 四、磁滞损失与涡流损失、电介质损耗

##### 1. 磁滞损失

在交变电磁场中,铁磁材料产生磁滞损失

$$P_h = K_h \cdot f B_m^{1.6} V$$

式中  $P_h$ ——磁滞损失(W);

$f$ ——频率(Hz);

$B_m$ ——磁感应强度最大值(T);

$V$ ——铁磁物质的体积( $\text{m}^3$ );

1.6——史坦梅茨常数;

$K_h$ ——磁滞常数,表 1-32 示出几种铁磁物质的磁滞常数。

##### 2. 涡流损失

交变电磁场的导电物质,内部会感应出涡流。由涡流产生的热损耗称为涡流损失。可由下面的经验公式计算:

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 V$$

式中  $P_e$ ——涡流损失(W)；

$K_e$ ——涡流系数，与材料电阻系数、截面大小及形状有关，由实验确定；

$V$ ——导电物质的体积( $m^3$ )。

其它符号同前。

表 1-32 几种材料的磁滞常数

材 料	$K_h$ ( $J/T^{1.6}m^3$ )	材 料	$K_h$ ( $J/T^{1.6}m^3$ )
硅 钢	$2.5 \sim 1.5 \times 10^2$	铸 铁	$28 \sim 40 \times 10^2$
变压器用 优质铁皮	$2.8 \times 10^2$	镍	$33 \sim 95 \times 10^2$
发电机铸钢	$6.5 \times 10^2$	钴	$30 \times 10^2$

### 3. 电介质损耗

在交变电场中，电介质中发生电能转变成热能。在电工产品中常用介质损耗角正切  $\tan\delta$  来作为其绝缘性能的一个指标，计算公式如下：

$$\tan\delta = \frac{1}{r\omega C}$$

式中  $\tan\delta$ ——介质损耗因数；

$r$ ——电阻、电介质等效损耗参数( $\Omega$ )；

$\omega$ ——交变电流的电角频率(rad/s)；

$C$ ——电介质等效电容量(F)。

一般情况下  $\tan\delta$  很小, 约在  $10^{-4} \sim 10^{-1}$  之间, 所以一般情况下  $\tan\delta \approx \delta$ 。 $\delta$  越大, 绝缘材料易老化。

## 第七节 过渡过程

### 一、换路定律

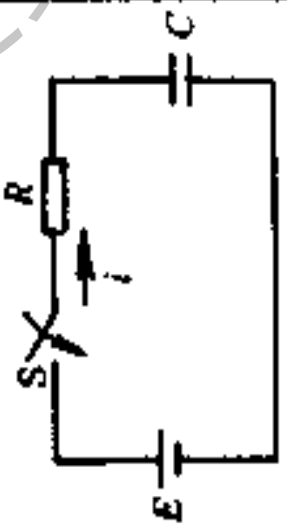

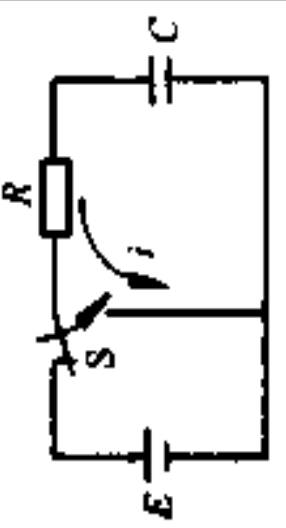
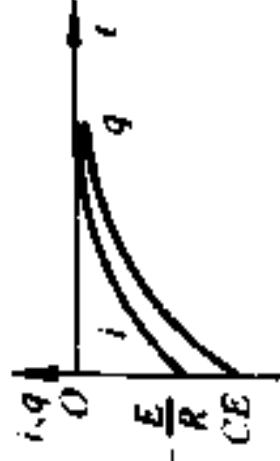
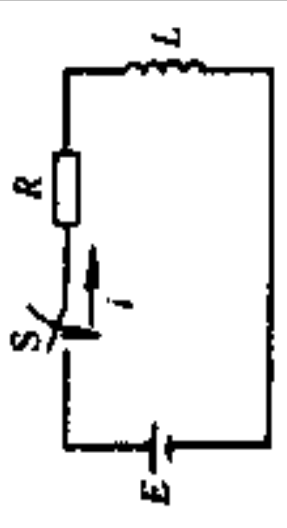

含有电感和电容的电路, 在合、断闸的瞬间, 在电路参数发生突变的瞬间, 由于电感中的磁场能量和电容器中的电场能量都不能发生突然变化, 所以电路不可能从一种稳定状态马上变成另一种稳定状态, 中间必须存在一种过渡过程。

电感中的磁场能量与电流有关, 电容中的电场能量与电压有关。磁场能量不能发生跃变就是电感中的电流不能跃变, 电场能量不能发生跃变, 就是电容器两端电压不能跃变, 通常称为换路定律。

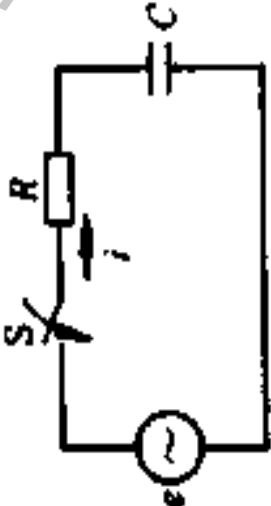
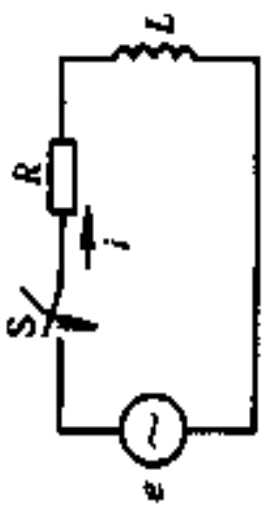
### 二、电阻、电容电路与电阻、电感电路的过渡过程

电阻、电容电路与电阻、电感电路在开关通、断时, 发生的过渡过程, 方程式及电流、电压的变化规律在表 1-33 中列出。图表中最后一格, 是电阻、电感、电容电路的过渡过程。

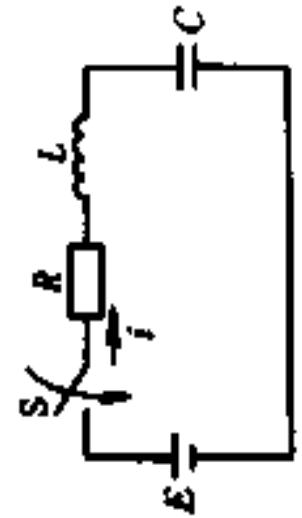
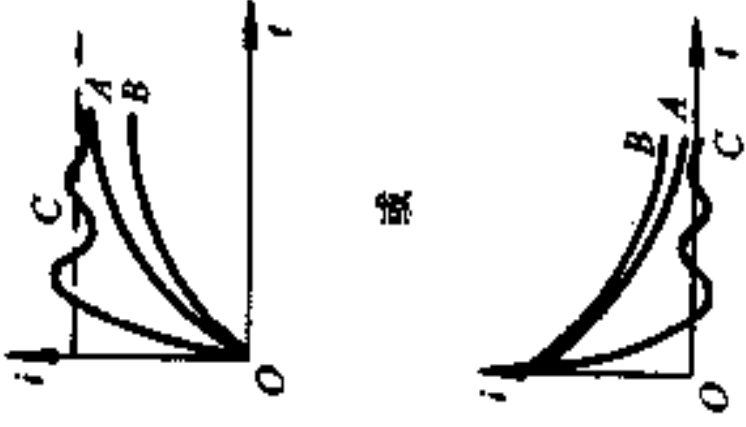
表 1-33 电容、电感电路的瞬变现象

电路图	方程式	解	图
	$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E$	$q = CE(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ $i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$	
	$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0$	$q = CE e^{-\frac{t}{RC}}$ $i = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$	
	$L \frac{di}{dt} + Ri = E$	$i = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$	

(续)

电路图	方程式	解	图
	$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E_m \sin(\omega t + \varphi)$	$i = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} [\sin(\omega t + \varphi - \theta)]$ $-\tan \theta \cos(\varphi + \theta) e^{-\frac{t}{RC}}$ $\theta = \tan^{-1} \frac{1}{\omega C R}$	
	$L \frac{di}{dt} + Ri = E_m \sin(\omega t + \varphi)$	$i = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} (\sin(\omega t + \varphi - \theta))$ $-\sin(\varphi - \theta) e^{-\frac{R}{L} t}$ $\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$	

(续)

电路图	方程式	解	图
	$L \frac{di}{dt} + Ri + \int \frac{idt}{C} = E$	<p>临界状态  <math>(R = 2\sqrt{\frac{L}{C}})</math>  <math>i = \alpha^2 CEte^{-\alpha t}</math>                      非振荡状态  <math>(R &gt; 2\sqrt{\frac{L}{C}})</math></p> <p>振荡状态  <math>(R &lt; 2\sqrt{\frac{L}{C}})</math>  <math>i = \frac{2E}{\sqrt{\frac{4L}{C} - R^2}} e^{-\alpha} \sin \beta t</math></p>	<p>或</p>  <p>A—临界状态                      B—非振荡状态                      C—振荡状态</p>

## 第二章 输 配 电

### 第一节 电路参数的计算

#### 一、导线电阻、电感和电容的计算

##### 1. 导线（电缆）的电阻计算

每千米长导线（电缆）的交流电阻按下式计算：

$$R_0 = \rho / S$$

式中  $R_0$ ——导线（电缆）的交流电阻（ $\Omega/\text{km}$ ）；

$S$ ——导线标称截面（ $\text{mm}^2$ ）；

$\rho$ ——导线材料的电阻率（ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ）。

导线温度发生变化时，其电阻也要变化，电阻与温度的关系：

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha_{20} (t - 20)]$$

式中  $R_t$ ——温度  $t$ （ $^{\circ}\text{C}$ ）时电阻（ $\Omega/\text{km}$ ）；

$R_{20}$ —— $20^{\circ}\text{C}$ 时电阻值（ $\Omega/\text{km}$ ）；

$\alpha_{20}$ ——电阻的温度系数（ $1/^{\circ}\text{C}$ ）。

表 2-1 列出常用导电金属线在  $20^{\circ}\text{C}$  时的电阻率，电导率和电阻温度系数。

各类电缆的电阻率和电导率如下：

铜心： $\rho_{20} = 18.4 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ；

$\gamma_{20} = 0.054 \text{ km}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ；

铝心:  $\rho_{20} = 31.0 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ;

$\gamma_{20} = 0.032 \text{ km}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ 。

表 2-1 金属导线电阻率、电导率和电阻温度系数

线 材	$\rho_{20}/$ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ )	$\gamma_{20}/$ ( $\text{km}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ )	$\alpha_{20}/(1/^\circ\text{C})$
硬铝线	29.0	0.034	0.00403
软铝线	28.3	0.035	0.00410
铝合金线	32.8	0.031	0.00422
硬铜线	17.9	0.056	0.00385
软铜线	17.6	0.057	0.00393

导线(电缆)在运行过程中要发热,最高允许温度如表 2-2 所示。

表 2-2 导线与电缆最高允许温度

裸导线 $t_{\text{max}}$	+70°C		
绝缘导线 $t_{\text{max}}$	+65°C		
电缆 $t_{\text{max}}$	1~3kV	6kV	10kV
	+80°C	+65°C	+60°C

## 2. 架空线路电感计算

(1) 单相二线制及三相三线制:

$$L = 0.4605 \lg \frac{D_j}{r} + 0.05 \mu$$



$$D_j = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}}$$

式中  $L$ ——每根相线的电感 (mH/km);

$D_j$ ——导线间几何均距 (cm);

$r$ ——导线的半径 (cm);

$\mu$ ——导线的导磁系数 (H/m);

$D_{AB}, D_{BC}, D_{CA}$ ——各相线间的中心距离 (cm),

(2) 三相四线制:

$$L = 0.4605 \lg \frac{D_j}{r} + 0.05 \mu$$

$$L_N = 0.4605 \lg \frac{D_N}{r_N}$$

$$D_N = \sqrt[3]{D_{AN} \cdot D_{BN} \cdot D_{CN}}$$

式中  $L_N$ ——中性线的电感 (mH/km);

$D_N$ ——三相四线制时, 相线与中线间的几何均距 (cm);

$r_N$ ——中性线的半径 (cm);

$D_{AN}, D_{BN}, D_{CN}$ ——各相线对中线间的中心其他符号同前。

(3) 分裂导线的电感:

分裂导线的电感比单根导线电感约小 20%~30%。

可用下式计算:

$$L = 0.4605 \lg \frac{D_j}{r^{\frac{1}{n}} \cdot d^{\frac{n-1}{n}}} + 0.05 \frac{\mu}{n}$$

式中  $D_j$ ——线间几何均距 (cm);

$n$ ——每相分裂导线的根数;

$d$ ——分裂导线的间距;

其他符号同前。

### 3. 架空线路的电容计算

(1) 单相二线制及三相四线制:

$$C_N = \frac{0.02413}{\lg \frac{D_j}{r}}$$

式中  $C_N$ ——每相导线对中性点的工作电容 ( $\mu\text{F}/\text{km}$ );

其他符号同前。

(2) 三相三线制:

$$C = \frac{0.02413}{\lg \frac{D_j}{r}}$$

$$C_e = \frac{0.02413}{\lg \frac{8h_j^3}{rD_j^2}}$$

$$C_m = \frac{0.02413 \lg \frac{2h_j}{D_j}}{2 \lg \frac{D_j}{r} \cdot \lg \frac{8h_j^3}{rD_j^2}}$$

式中  $C$ ——工作电容 ( $\mu\text{F}/\text{km}$ );

$C_e$ ——对地电容 ( $\mu\text{F}/\text{km}$ );

$C_m$ ——线间电容 ( $\mu\text{F}/\text{km}$ )。

$h_j$ ——导线对地的几何均距 (cm);

$h_A, h_B, h_C$ ——相线距地高度。

其他符号同前。

(3) 分裂导线的电容: 分裂导线的工作电容比单根导线的工作电容约增加 20%~30%, 可用下式计算:

$$C = \frac{0.02413}{\lg \frac{D_j}{r^{\frac{1}{n}} \cdot d^{\frac{n-1}{n}}}}$$

式中符号同前。

#### 4. 电缆电阻的精确计算

电缆的直流标准电阻可按下式计算:

$$R_{20} = \rho_{20} \frac{(1+K_1)(1+K_2)}{\frac{\pi}{4} d^2 \cdot n} \times 10^3$$

式中  $R_{20}$ ——电缆在 20℃ 时的直流标准电阻 ( $\Omega/\text{km}$ );

$\rho_{20}$ ——导线电阻率 (20℃ 时) ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ );

$d$ ——每根导线的直径 (mm);

$n$ ——芯线数;

$K_1$ ——芯线扭绞率, 约 0.02~0.03;

$K_2$ ——多芯电缆时的扭绞率, 约 0.01~0.02。

任意温度下, 每千米长电缆实际交流电阻:

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha_t) (1 + K_3)$$

式中  $\alpha_t$ ——电阻在  $t$ ℃ 时的温度系数,

$$\alpha_t = \alpha_0 (t - 20)$$

$K_3$ ——考虑到集肤效应和临近效应的系数，  
截面在  $250\text{mm}^2$  以下时

$$K_3 = 0.01;$$

截面在  $1000\text{mm}^2$  时，

$$K_3 \text{ 为 } 0.23 \sim 0.26$$

### 5. 电缆电感计算

配电网地下电缆，当导线截面为圆形时，如忽略铠装及铅包损失时，每根芯线的电感计算方法与架空导线相同。

导线截面为扇形或半圆形，则芯线间距离应按下式计算：

$$D = 1.68r + b$$

式中  $D$ ——芯线间距离 (cm)；

$r$ ——与扇形、半圆形芯线截面积相同的圆形芯线的半径 (cm)；

$b$ ——芯线间绝缘层厚度 (cm)。

### 6. 电缆电容的计算

(1) 单芯铠装纸介电缆 (地埋)：

$$C = \frac{0.2413\epsilon_s}{\lg \frac{2D}{r}}$$

(2) 多芯铠装纸介电缆 (地埋)：

$$C = \frac{0.056N\epsilon_s}{G}$$

表 2-3 TJ 型裸铜导线的电阻和电抗

导线型号	TJ-10	TJ-16	TJ-25	TJ-35	TJ-50	TJ-70	TJ-95	TJ-120	TJ-150	TJ-185	TJ-240
电阻/ ( $\Omega/\text{km}$ )	1.84	1.20	0.74	0.54	0.39	0.28	0.20	0.158	0.123	0.103	0.078
线间几何 均距/m	电抗/( $\Omega/\text{km}$ )										
0.4	0.355	0.334	0.318	0.308	0.298	0.287	0.274	—	—	—	—
0.6	0.381	0.360	0.345	0.335	0.324	0.321	0.303	0.295	0.287	0.281	—
0.8	0.399	0.378	0.363	0.352	0.341	0.330	0.321	0.313	0.305	0.299	—
1.0	0.413	0.392	0.377	0.366	0.356	0.345	0.335	0.327	0.319	0.313	0.305
1.25	0.427	0.406	0.391	0.380	0.370	0.359	0.349	0.341	0.333	0.327	0.319
1.50	0.438	0.417	0.402	0.392	0.381	0.370	0.360	0.353	0.345	0.339	0.330
2.0	0.457	0.435	0.421	0.410	0.399	0.389	0.378	0.371	0.363	0.356	0.349
2.5	—	0.449	0.435	0.424	0.413	0.402	0.392	0.385	0.377	0.371	0.363
3.0	—	0.460	0.446	0.435	0.424	0.414	0.403	0.396	0.388	0.382	0.374
3.5	—	0.470	0.456	0.445	0.434	0.423	0.413	0.406	0.398	0.392	0.384

表 2-4 TJ 型裸铝导线的电阻和电抗

导线型号	LJ-16	LJ-25	LJ-35	LJ-50	LJ-70	LJ-95	LJ-120	LJ-150	LJ-185	LJ-240
电阻/ ( $\Omega/\text{km}$ )	1.98	1.28	0.92	0.64	0.46	0.34	0.27	0.21	0.17	0.132
线间几何 均距/m	电抗/( $\Omega/\text{km}$ )									
0.6	0.358	0.344	0.334	0.323	0.312	0.303	0.295	0.287	0.281	0.273
0.8	0.377	0.362	0.352	0.341	0.330	0.321	0.313	0.305	0.299	0.291
1.0	0.390	0.376	0.366	0.355	0.344	0.335	0.327	0.319	0.313	0.305
1.25	0.404	0.390	0.380	0.369	0.358	0.349	0.341	0.333	0.327	0.319
1.50	0.416	0.402	0.392	0.380	0.369	0.360	0.353	0.345	0.339	0.330
2.0	0.434	0.420	0.410	0.398	0.387	0.378	0.371	0.363	0.356	0.348
2.5	0.448	0.434	0.424	0.412	0.401	0.392	0.385	0.377	0.371	0.362
3.0	0.459	0.445	0.435	0.424	0.413	0.403	0.396	0.388	0.382	0.374
3.5	—	—	0.445	0.433	0.423	0.413	0.406	0.398	0.392	0.383

表 2-5 LGJ 钢芯铝绞线的电阻和电抗

导线 型号	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ	LGJ
	-16	-25	-35	-50	-70	-95	-120	-150	-185	-240	-300	-400		
电阻/ ( $\Omega/\text{km}$ )	2.04	1.38	0.85	0.65	0.46	0.33	0.27	0.21	0.17	0.132	0.107	0.082		
线间几 何均距 /m														
1.0	0.387	0.374	0.359	0.351	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.25	0.401	0.388	0.373	0.365	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.50	0.412	0.400	0.385	0.376	0.365	0.354	0.347	0.340	—	—	—	—	—	—
2.0	0.430	0.418	0.403	0.394	0.383	0.372	0.365	0.358	—	—	—	—	—	—
2.5	0.444	0.432	0.417	0.408	0.397	0.386	0.379	0.372	0.365	0.357	—	—	—	—
3.0	0.456	0.443	0.428	0.420	0.409	0.398	0.391	0.384	0.377	0.369	—	—	—	—
3.5	0.466	0.453	0.438	0.429	0.418	0.406	0.400	0.394	0.386	0.378	0.371	0.362	—	—

电抗/( $\Omega/\text{km}$ )

表 2-6 户内明敷及穿管的铝、铜心绝缘导线的电阻和电抗

标称截面 /mm <sup>2</sup>	铝/(Ω/km)				铜/(Ω/km)				
	电 阻 R <sub>0</sub> (20℃)	电 抗 X <sub>0</sub>		电 阻 R <sub>0</sub> (20℃)	电 抗 X <sub>0</sub>		电 阻 R <sub>0</sub> (20℃)	电 抗 X <sub>0</sub>	
		明线间距 150mm	穿 管		明线间距 150mm	穿 管		明线间距 150mm	穿 管
1.5	—	—	—	12.27	—	—	12.27	—	—
2.5	12.40	0.337	0.102	7.36	0.337	0.102	7.36	0.337	0.102
4	7.75	0.318	0.095	4.60	0.318	0.095	4.60	0.318	0.095
6	5.17	0.309	0.09	3.07	0.309	0.09	3.07	0.309	0.09
10	3.10	0.286	0.073	1.84	0.286	0.073	1.84	0.286	0.073
16	1.94	0.271	0.068	1.15	0.271	0.068	1.15	0.271	0.068
25	1.24	0.257	0.066	0.75	0.257	0.066	0.75	0.257	0.066
35	0.88	0.246	0.064	0.53	0.246	0.064	0.53	0.246	0.064
50	0.62	0.235	0.063	0.37	0.235	0.063	0.37	0.235	0.063
70	0.44	0.224	0.061	0.26	0.224	0.061	0.26	0.224	0.061
95	0.33	0.215	0.06	0.19	0.215	0.06	0.19	0.215	0.06
120	0.26	0.208	0.06	0.15	0.208	0.06	0.15	0.208	0.06
150	0.20	0.201	0.059	0.12	0.201	0.059	0.12	0.201	0.059
185	0.17	0.194	0.059	0.10	0.194	0.059	0.10	0.194	0.059



- 式中  $C$ ——电缆的电容 ( $\mu\text{F}/\text{km}$ );  
 $\epsilon_r$ ——相对介电系数 (3.5~3.7);  
 $D$ ——绝缘体外径 (cm);  
 $N$ ——多芯电缆的芯数;  
 $r$ ——芯线外径 (cm);  
 $G$ ——形状系数。

对于圆形芯线, 可直接从图 2-1 中求得。

## 二、常用导线、电缆的电阻和电抗(表 2-3~表 2-7)

表 2-7 电缆芯线单位长度电阻 (20℃时)

(单位  $\Omega/\text{km}$ )

线芯标称截面/ $\text{mm}^2$	铜芯电缆	铝芯电缆
16	1.15	1.94
25	0.74	1.24
35	0.53	0.89
50	0.37	0.62
70	0.26	0.44
95	0.19	0.33
120	0.15	0.26
150	0.12	0.21
180	0.10	0.17
240	0.08	0.13

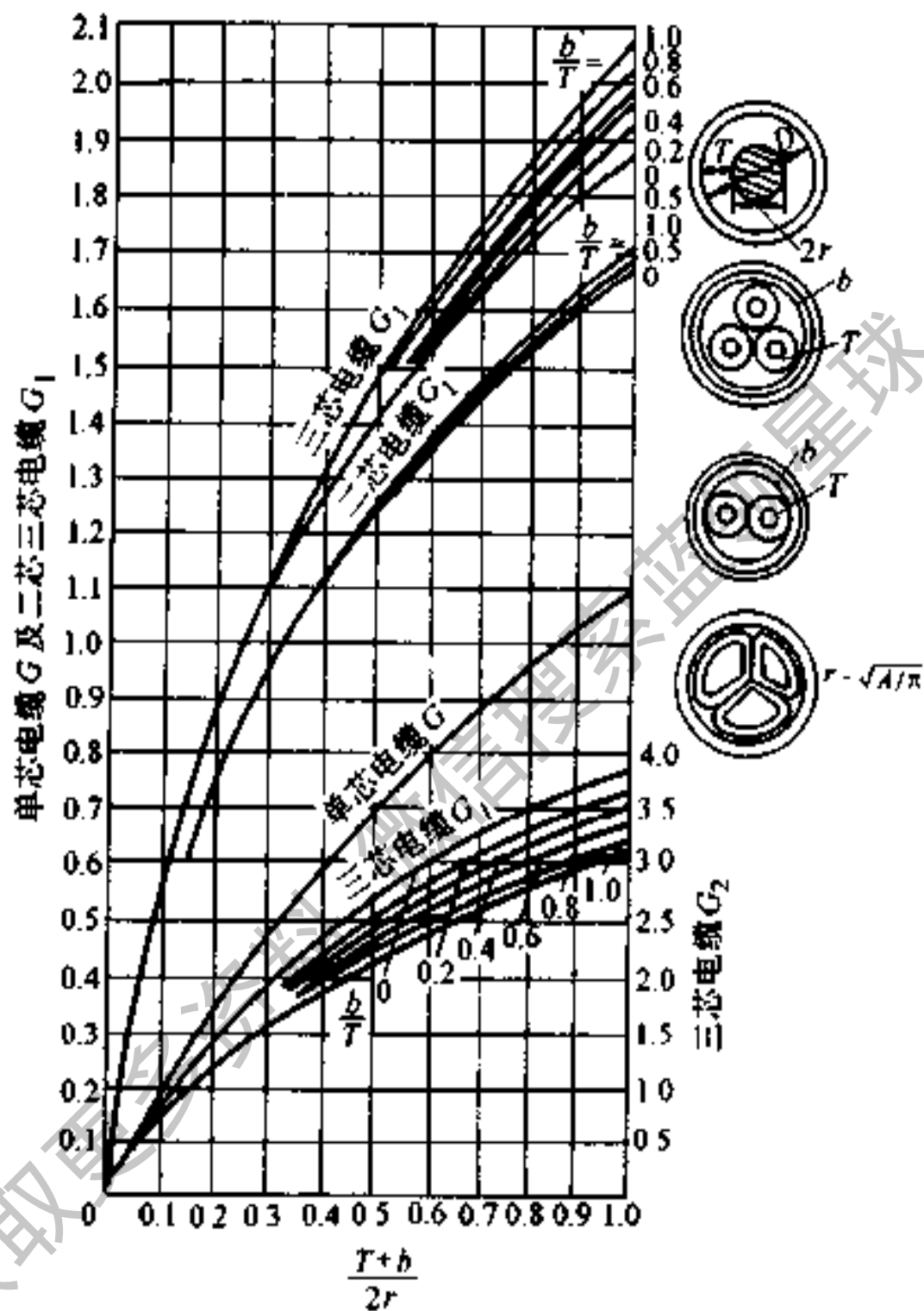


图 2-1 求形状系数  $G$  的曲线

$r$ —芯线的半径 (cm)     $D$ —绝缘层外径 (cm)

$T$ —芯线绝缘层厚度 (cm)     $b$ —带绝缘层的厚度 (cm)

## 第二节 线损和电压降的计算

### 一、直流线路计算

#### 1. 集中负荷

##### (1) 电压损失:

$$\Delta U = \frac{2IL}{\gamma S}, \quad \Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_r} \times 100\%$$

式中  $\Delta U$ ——电压损失 (V);

$\Delta U\%$ ——电压损失率 (%);

$I$ ——线路末端负荷电流 (A);

$L$ ——负荷至电源的距离 (km);

$\gamma$ ——导线电导率 ( $\text{km} \cdot / \Omega \cdot \text{mm}^2$ );

$S$ ——导线截面 ( $\text{mm}^2$ );

$U_r$ ——线路电压额定值 (V);

##### (2) 求导线的截面积:

$$S = \frac{2PL \times 10^5}{\gamma \Delta U\% \cdot U_r^2}$$

式中  $S$ ——导线截面积 ( $\text{mm}^2$ );

$P$ ——负荷功率 (kW);

其他符号同前。

**例:** 已知直流额定电压为 110V, 在距电源 60m 处有一个 4kW 的集中负荷, 允许电压损失率为 5%, 用铝导线敷设, 求导线截面?

$$S = \frac{2 \times 4 \times 0.06 \times 10^6}{0.034 \times 5 \times 110^2}$$

$$= 23.3 \text{ (mm}^2\text{)}$$

## 2. 分散负荷

图 2-2，是一个分散负荷的供电系统，导线截面相同。

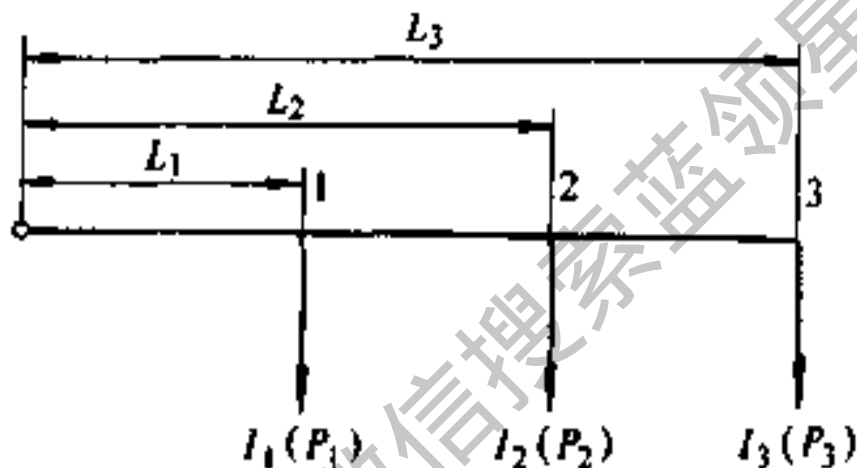


图 2-2 分散负荷供电系统

### (1) 电压损失

$$\Delta U = \frac{2000}{\gamma S U_c} (P_1 L_1 + P_2 L_2 + P_3 L_3)$$

$$= \frac{2}{\gamma S} (I_1 L_1 + I_2 L_2 + I_3 L_3)$$

式中  $\Delta U$ ——电压损失 (V)；

$P_1, P_2, P_3$ ——分别为各点负荷功率(kW)；

$I_1, I_2, I_3$ ——各点负荷电流(A)；

$L_1, L_2, L_3$ ——线路始端到各负荷点的距离(km)；

其他符号同前。

(2) 求导线截面积公式:

$$S = \frac{2 \times 10^5}{\gamma \Delta U \% \cdot U_e^2} (P_1 L_1 + P_2 L_2 + P_3 L_3)$$

$$= \frac{200}{\gamma \Delta U \% \cdot U_e} (I_1 L_1 + I_2 L_2 + I_3 L_3)$$

## 二、配电线路损耗计算

配电线路损耗的有功功率与输入有功功率之比,叫做配电线路损失率,简称线损耗。一般大中型企业的线损率应在 1%~3% 之间。

1. 负荷在末端的线路损耗计算

(1) 计算公式之一:

$$\Delta P = m I_l^2 R \times 10^{-3}, \quad \Delta Q = m I_l^2 X \times 10^{-3}$$

式中  $\Delta P$ ——有功功率损耗 (kW);

$\Delta Q$ ——无功功率损耗 (kvar);

$m$ ——线路相数;

$I_l$ ——线路电流有效值 (A);

$R, X$ ——线路每相的电阻和电抗 ( $\Omega$ )。

(2) 计算公式之二 (三相交流电路):

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_e^2} \cdot R \times 10^{-3} = \frac{P^2}{U_e^2 \cos^2 \varphi} \cdot R \times 10^{-3}$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U_e^2} \cdot X \times 10^{-3} = \frac{P^2}{U_e^2 \cos^2 \varphi} \cdot X \times 10^{-3}$$

式中  $P$ ——线路输送有功功率 (kW);

$Q$ ——线路输送无功功率 (kvar);

$\cos\varphi$ ——负荷功率因数;

$U_e$ ——线路额定电压 (kV)。

其他符号同前。

## 2. 具有分支线路线损的近似计算

具有分支线路线损的计算比较复杂, 工厂配电线路线损采用近似计算时, 可以近似认为各支路负荷的功率因数相等。这样, 各支路电流就能简单地用代数相加来进行计算。下面以一实例来说明计算过程 (见图 2-3)。

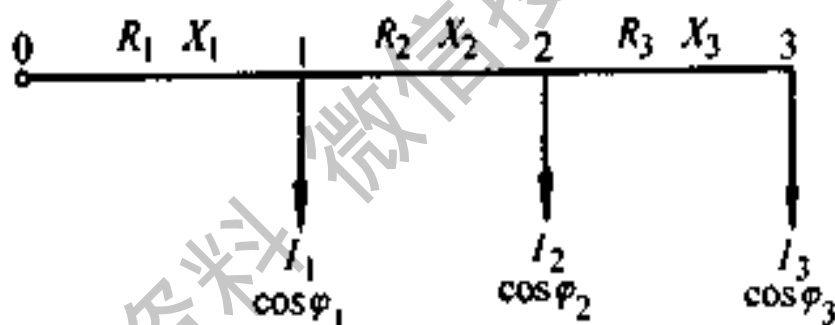


图 2-3 多支线路

已知:  $I_1 = 60\text{A}$

$I_2 = 80\text{A}$

$I_3 = 20\text{A}$

$\cos\phi_1 = 0.7$

$\cos\phi_2 = 0.8$

$\cos\phi_3 = 0.5$

$R_1 = 0.5\Omega$

$R_2 = 0.3\Omega$

$R_3 = 0.2\Omega$

$X_1 = 0.3\Omega$

$X_2 = 0.2\Omega$

$X_3 = 0.1\Omega$

求: 03 线路的有功功率损耗和无功功率损耗。

可认为各支路负荷的功率因数相等, 这样:

$$I_{03} = I_1 + I_2 + I_3 = (60 + 80 + 20)\text{A} = 120\text{A}$$

$$I_{12} = I_2 + I_3 = (80 + 20) \text{ A} = 100 \text{ A}$$

$$I_{23} = I_3 = 20 \text{ A}$$

线路各段的功率损耗如下：

$$\begin{aligned} \Delta P_{23} &= 3I_{23}^2 R_3 \times 10^{-3} = 3 \times 20^2 \times 0.2 \times 10^{-3} \text{ kW} \\ &= 0.24 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{23} &= 3I_{23}^2 X_3 \times 10^{-3} = 3 \times 20^2 \times 0.1 \times 10^{-3} \text{ kvar} \\ &= 0.12 \text{ kvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= 3I_{12}^2 R_2 \times 10^{-3} = 3 \times 100^2 \times 0.3 \times 10^{-3} \text{ kW} \\ &= 9 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{12} &= 3I_{12}^2 X_2 \times 10^{-3} = 3 \times 100^2 \times 0.2 \times 10^{-3} \text{ kvar} \\ &= 6 \text{ kvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{01} &= 3I_{01}^2 R_1 \times 10^{-3} = 3 \times 120^2 \times 0.5 \times 10^{-3} \text{ kW} \\ &= 21.6 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{01} &= 3I_{01}^2 X_1 \times 10^{-3} = 3 \times 120^2 \times 0.3 \times 10^{-3} \text{ kvar} \\ &= 12.96 \text{ kvar} \end{aligned}$$

因此，03线路的功率损耗为：

$$\begin{aligned} \Delta P_{03} &= \Delta P_{01} + \Delta P_{12} + \Delta P_{23} = (21.6 + 9 + 0.24) \text{ kW} \\ &= 30.84 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{03} &= \Delta Q_{01} + \Delta Q_{12} + \Delta Q_{23} = (12.96 + 6 + 0.12) \text{ kW} \\ &= 19.08 \text{ kvar} \end{aligned}$$

### 3. 电力电缆损耗计算

电力电缆损耗的计算一般要考虑集肤效应和邻近效

应的影响。计算公式如下：

$$\Delta P = 3I^2 R (1 + K_{jf} + K_{lj}) \times 10^{-3}$$

式中  $I$ ——电缆电流 (A)；

$R$ ——每条电缆芯线的电阻 ( $\Omega$ )；

$K_{jf}$ ——集肤效应系数，架空线  $K_{jf} = 0$

$K_{lj}$ ——邻近效应系数，架空线  $K_{lj} = 0$

$1 + K_{jf} + K_{lj}$  数据见下表。

电缆截面/ $\text{mm}^2$	240	185	150	120	95
$1 + K_{jf} + K_{lj}$	1.028	1.019	1.013	1.009	1.006

### 三、交流线路电压损失的计算

#### 1. 负荷在末端的线路电压损失计算

负荷在末端的三相供电线路，如图 2-4 所示。

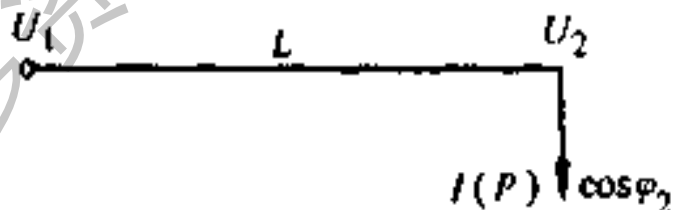


图 2-4 单根输电线路

线路电压损失

$$\begin{aligned} \Delta U &= \sqrt{3} I (R \cos \phi_2) + X \sin \phi_2 \\ &= \frac{PR + QX}{U_2} \approx \frac{PR + QX}{U_1} \end{aligned}$$



式中  $\Delta U$ ——线电压损失 (V);

$I_1 P$ ——负荷电流 (A) 和有功功率 (kW);

$Q$ ——负荷无功功率 (kvar);

$R$ 、 $X$ ——线路电阻和电抗 ( $\Omega$ );

$U_c$ ——线路额定电压 (kV)。

2. 沿线路有几个负荷时电压损失计算

图 2-5 为有几个负荷的三相供电线路。

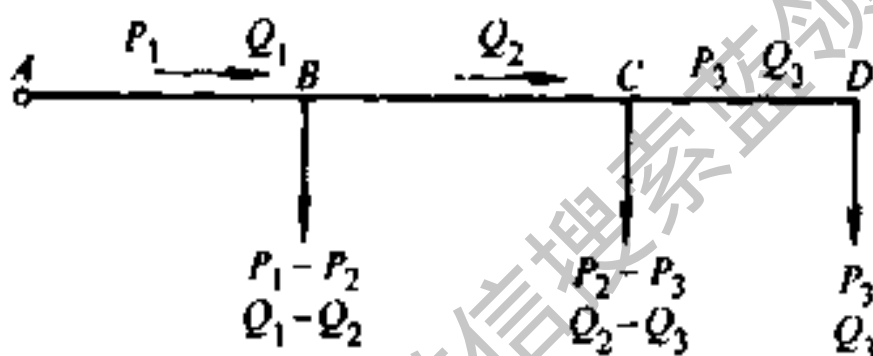


图 2-5 沿线有几个负荷的线路

线路电压损失

$$\Delta U = \sum_1^n \frac{PR + QX}{U_c} = \sum_1^n \frac{(PR_0 + QX_0)L}{U_c}$$

式中  $\Delta U$ ——线路电压损失 (V);

$P$ 、 $Q$ ——通过每段线路的有功功率 (kW) 和无功功率 (kvar);

$R_0$ 、 $X_0$ ——每段线路每千米电阻和电抗 ( $\Omega$ );

$L$ ——每段线路长度 (km);

其他符号同前。

(1) 如果沿线路  $R_0$ 、 $X_0$  不变时, 则电压损失为:

$$\Delta U = \sqrt{3} \left[ R_0 \sum_1^n (I \cos \varphi \cdot L) + X_0 \sum_1^n (I \sin \varphi \cdot L) \right]$$

如果负荷的功率因数相同，则

$$\Delta U = \sqrt{3} (R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi) \sum_1^n IL$$

(2) 如果  $\cos \varphi = 1$ ，则

$$\Delta U = \sqrt{3} \sum_1^n (IR_0 L)$$

### 3. 查表法求电压损失

在工程计算中，常常应用系数法和负荷矩查表计算。

电压损失率

$$\Delta U \% = K_r \sum_1^n M_r = K_r \sum_1^n IL$$

式中  $K_r$ ——与负荷功率因数对应的每  $1 \text{ A} \cdot \text{km}$  电流负荷矩的电压损失百分数，可查表 2-9；

$M_r$ ——电流负荷矩 ( $\text{A} \cdot \text{km}$ )

$$M_r = IL$$

当负荷矩的功率因数与表 2-9 中所列功率因数不相符时， $K_r$  值可用表中相邻数值按插入法求得。

对于 380/220V 低压网络，若整条线路的导线截面、材料、敷设方式都相同，且  $\cos \varphi \approx 1$  时，则电压损失率还

可用下式计算：

$$\Delta U \% = \frac{\Sigma M}{CS}$$

式中  $\Sigma M$ ——总负荷矩 (kW·m)

$$\Sigma M = \Sigma P \cdot L;$$

$S$ ——导线截面 (mm<sup>2</sup>)；

$C$ ——系数，根据电压和导线材料而定，可查表 2-8。

表 2-8 系数  $C$  值

线路额定电压 /V	线路系统及电流种类	C 值	
		铜 线	铝 线
380/220	带中性线的三相电路	83	50
380/220	带中性线的两相电路	37	22
220	交流单相或直流电路	14	8.3
110	交流或直流两线电路	0.37	0.22
36	三相三线电路	0.73	0.44
36	交流线直流两线电路	0.37	0.22
24	交流或直流两线电路	0.165	0.1
12	交流或直流两线电路	0.041	0.025

注：导线的电导系数铜为 57.5；铝为 34.5m/mm<sup>2</sup>·Ω。

为了省略计算，将线路负荷矩与电压损失制成对照表，知道了负荷矩，便可查得电压损失率，见表 2-9~表 2-13。

表 2-9 三相四线制电路中每  $1A \cdot km$  的  
电压损失百分数  $K_1$

导线 截面 /mm <sup>2</sup>	铜心绝缘导线(明设/穿管)						
	cosφ						
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1	3.85	4.84	5.73	6.64	7.56	8.51	9.40
	3.76	4.70	5.64	6.58	7.52	8.46	
1.5	2.58	3.23	3.83	4.45	5.06	5.66	6.27
	2.51	3.14	3.76	4.39	5.01	5.63	
2.5	1.59	1.98	2.36	2.72	3.10	3.47	3.76
	1.53	1.92	2.30	2.68	3.06	3.44	
4	1.05	1.28	1.51	1.71	1.97	2.17	2.35
	0.99	1.23	1.46	1.70	1.93	2.11	
6	0.76	0.86	1.03	1.17	1.33	1.44	1.57
	0.68	0.82	0.98	1.13	1.29	1.41	
10	0.467	0.57	0.658	0.739	0.814	0.896	0.91
	0.412	0.52	0.596	0.699	0.779	0.871	
16	0.33	0.37	0.42	0.49	0.53	0.58	0.59
	0.27	0.32	0.38	0.45	0.50	0.53	
25	0.241	0.269	0.295	0.346	0.355	0.372	0.376
	0.189	0.221	0.252	0.305	0.323	0.355	
35	0.19	0.212	0.232	0.252	0.265	0.280	0.268
	0.14	0.165	0.189	0.215	0.234	0.255	

(续)

导线 截面 /mm <sup>2</sup>	铜心绝缘导线(明设/穿管)						
	cosφ						
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
50	0.175	0.190	0.199	0.211	0.227	0.232	0.125
	0.123	0.143	0.161	0.181	0.196	0.211	
70	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.16	0.14
	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.13	
95	0.12	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13	0.10
	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.10	
导线 截面 /mm <sup>2</sup>	铝心绝缘导线(明设/穿管)						
	cosφ						
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1							
1.5	4.33	5.41	6.44	7.46	8.51	9.50	10.54
	4.21	5.21	6.32	7.38	8.43	9.48	
2.5	2.67	3.30	3.92	4.54	5.17	5.80	6.34
	2.58	3.20	3.84	4.47	5.10	5.76	
4	1.71	2.11	2.49	2.87	3.25	3.62	3.96
	1.62	2.02	2.41	2.80	3.18	3.57	
6	1.18	1.42	1.70	1.95	2.20	2.43	2.64
	1.09	1.36	1.62	1.88	2.13	2.38	

(续)

导线 截面 /mm <sup>2</sup>	铝心绝缘导线(明设/穿管)						
	cosφ						
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
10	0.75	0.91	1.06	1.195	1.35	1.54	1.58
	0.66	0.82	0.96	1.130	1.29	1.50	
16	0.51	0.60	0.96	0.78	0.86	0.94	0.99
	0.42	0.52	0.63	0.72	0.81	0.90	
25	0.36	0.42	0.47	0.53	0.58	0.61	0.63
	0.28	0.34	0.40	0.47	0.53	0.58	
35	0.28	0.32	0.36	0.40	0.43	0.45	0.45
	0.21	0.25	0.30	0.34	0.38	0.42	
50	0.243	0.274	0.303	0.330	0.354	0.370	0.362
	0.171	0.206	0.245	0.274	0.306	0.337	
70	0.184	0.202	0.217	0.231	0.243	0.245	0.226
	0.116	0.138	0.158	0.178	0.198	0.215	
95	0.156	0.169	0.179	0.187	0.193	0.191	0.167
	0.092	0.107	0.125	0.137	0.150	0.161	

注:1. 导线的工作温度为 50℃。

2. 电压为单相 220V 时,表中数据乘以 2;二相三线时,应乘以 1.5。

3. 表中数值未计及气体放电灯奇次谐波电流在零线中引起的电压损失(对结果影响不大)。

表 2-10 三相 380/220V 三线式或各相负荷均匀的四线制铝导线

负荷矩与电压损失率对照表 ( $\cos\varphi=1$ ) (kW·m)

导线截面 / mm <sup>2</sup>	负荷矩									
	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95
0.2	23	37	55.6	92.6	146	232	324	463	648	878
0.4	46.3	74.2	111	186	296	463	650	926	1298	1761
0.6	69.5	111	167	276	445	695	975	1388	1947	2640
0.8	92.5	148	222	371	593	926	1300	1850	2595	3520
1.0	116	185	278	463	741	1158	1620	2315	3241	4390
1.2	138	222	333	556	890	1390	1945	2775	3890	5270
1.4	161	259	388	648	1036	1640	2270	3235	4540	6150
1.6	184	296	444	742	1185	1851	2592	3700	5180	7035
1.8	206	333	499	834	1333	2082	2918	4165	5840	7920
2.0	232	370	555	927	1481	2314	3240	4630	6480	8800
2.2	252	407	610	1018	1629	2548	3568	5008	7140	9675
2.4	276	444	666	1112	1778	2780	3890	5550	7780	10540

(续)

负荷矩 导线截面 / mm <sup>2</sup>	电压损失率(%)									
	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95
2.6	300	482	722	1205	1925	3008	4220	6002	8440	11430
2.8	324	518	778	1298	2075	3240	4540	6480	9080	12310
3.0	347	555	833	1391	2221	3475	4865	6950	9740	13200
3.2	370	593	889	1484	2370	3700	5190	7402	10380	14080
3.4	390	630	944	1576	2520	3938	5515	7865	11020	14950
3.6	416	667	998	1670	2668	4170	5840	8340	11680	15850
3.8	439	704	1055	1761	2812	4400	6165	8795	12320	16705
4.0	463	740	1110	1854	2962	4628	6480	9260	12960	17600
4.2	485	778	1160	1947	3110	4865	6810	9720	13610	18480
4.4	509	815	1221	2040	3258	5009	7140	10180	14260	19350
4.6	532	852	1278	2132	3408	5325	7460	10650	14920	20210
4.8	555	888	1334	2224	3557	5551	7780	11100	15600	21100
5.0	578	926	1388	2316	3702	5784	8100	11560	16230	21980



表 2-11 三相 380/220V 三线式或各相负荷均匀的四线制铜导线

负荷矩与电压损失率对照表 ( $\cos\varphi=1$ ) (kW·m)

导线截面 / mm <sup>2</sup>	负荷矩										
	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95
0.2	23	38.5	62	92.4	154	246	385	539	770	1078	1463
0.4	46.2	77	123	185	308	492	770	1078	1540	2156	2926
0.6	69.3	116	185	277	462	739	1150	1617	2310	3234	4389
0.8	92.4	154	246	369	616	985	1540	2156	3080	4312	5852
1.0	116	193	308	462	770	1232	1925	2695	3850	5390	7315
1.2	139	231	370	554	924	1478	2310	3234	4920	6468	8778
1.4	162	270	431	647	1078	1724	2695	3773	5390	7546	10243
1.6	185	308	493	739	1232	1971	3080	4312	6160	8624	11704
1.8	208	347	554	832	1386	2217	3465	4851	6930	9702	13167
2.0	231	385	616	924	1540	2464	3850	5390	7700	10780	14630
2.2	254	424	668	1016	1694	2710	4235	5929	8470	11858	16093
2.4	277	462	729	1109	1848	2950	4620	6468	9240	12936	17556

(续)

电压损失率(%)	导线截面 / mm <sup>2</sup>		负荷矩											
	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95			
2.6	300	501	791	1201	2002	3204	5006	7007	10010	14014	19019			
2.8	323	539	851	1244	2156	3449	5390	7546	10780	15092	20482			
3.0	347	578	914	1386	2310	3696	5775	8085	11550	16170	21945			
3.2	366	616	976	1478	2464	3742	6160	8624	12320	17248	23408			
3.4	389	655	1037	1571	2618	4188	6545	9163	13090	18326	24871			
3.6	412	693	1099	1663	2772	4435	6930	9702	13860	19404	26334			
3.8	435	732	1160	1756	2826	4681	7315	10241	14630	20472	27797			
4.0	458	770	1222	1848	3080	4928	7700	10780	15400	21560	29260			
4.2	481	809	1294	1940	3234	5174	8085	11319	16170	22638	30723			
4.4	504	847	1345	2033	3388	5420	8470	11858	16940	23716	32186			
4.6	527	886	1407	2125	3542	5667	8855	12397	17710	24794	33694			
4.8	550	924	1468	2218	3696	5913	9240	12936	18480	25872	35112			
5.0	574	963	1530	2310	3850	6160	9625	13475	19250	26950	36575			

表 2-12 单相 220V 两线制铝导线负荷

(kW · m)

导线截面 / mm <sup>2</sup>	矩与电压损失率对照表					
	2.5	4	6	10	16	25
负荷矩						
电压损失率(%)						
0.2	3.9	6.2	9.3	15.5	24.8	38.8
0.4	7.8	12.4	22.5	31	49.5	77.5
0.6	11.6	18.6	27.9	46.5	74.3	116
0.8	15.5	24.8	37.2	62	99	155
1.0	19.4	31	46.5	77.5	124	194
1.2	23.2	37.2	55.8	93	149	232
1.4	27.4	43.4	65.1	108	174	271
1.6	31	49.6	74.5	124	198	310
1.8	34.8	55.8	83.7	140	223	348
2.0	38.8	62	93	155	248	388
2.2	42.6	68.2	102	171	272	426
2.4	46.4	74.4	112	186	297	465

(续)

负 荷 矩	导线截面 / mm <sup>2</sup>		4	6	10	16	25
	2.5	2.5					
电压损失率(%)							
2.6	50.4	80.6	121	202	322	504	
2.8	54.2	86.8	131	217	347	543	
3.0	58.1	93	140	233	372	582	
3.2	62	99.2	149	248	397	620	
3.4	65.8	105	159	263	422	658	
3.6	69.7	112	168	279	446	697	
3.8	73.6	118	177	294	471	737	
4.0	77.5	124	186	310	496	775	
4.2	81.4	130	196	325	521	814	
4.4	85.2	137	205	341	545	850	
4.6	89	143	214	356	570	892	
4.8	93	149	224	372	595	930	
5.0	96.8	155	233	387	619	968	

表 2-13 单相 220V 两线制铜导线负荷

矩与电压损失率对照表 ( $\cos\varphi=1$ ) (kW·m)

导线截面 / mm <sup>2</sup>	负荷矩						
	1	1.5	2.5	4	6	10	16
电压损失率(%)							
0.2	2.6	3.8	6.4	10.3	15.4	25.6	41
0.4	5.1	7.7	12.9	20.5	30.7	51.3	82
0.6	7.7	11.5	19.3	30.8	46.1	76.9	123
0.8	10.4	15.4	25.3	41	61.4	103	164
1.0	12.8	19.2	32.2	51.3	76.8	128	205
1.2	15.4	23.1	38.6	61.6	92.1	154	246
1.4	17.9	26.9	45.1	71.8	108	180	287
1.6	20.5	30.8	51.5	82.1	123	205	328
1.8	23	34.6	58	92.3	138	231	369
2.0	25.6	38.4	64.4	103	154	256	410
2.2	28.2	42.3	70.8	113	169	282	451
2.4	30.7	46.1	77.3	123	184	308	492

(续)

负荷矩 导线截面 / mm <sup>2</sup>	电压损失率(%)									
	1	1.5	2.5	4	6	10	16			
2.6	33.3	50	83.7	133	200	334	533			
2.8	35.8	53.8	90.2	144	215	360	574			
3.0	38.4	57.7	96.6	154	230	386	615			
3.2	41	61.5	103	164	246	411	656			
3.4	43.5	65.4	109	174	261	437	697			
3.6	46.1	69.2	116	185	276	463	738			
3.8	48.6	73	122	195	292	488	779			
4.0	51.2	76.9	129	205	307	514	820			
4.2	53.8	80.7	135	215	323	540	861			
4.4	56.3	84.6	142	226	338	565	902			
4.6	58.9	88.4	148	236	353	591	943			
4.8	61.4	92.3	155	246	369	616	984			
5.0	64	96.1	161	257	384	642	1025			

#### 四、380/220V 系统中零线电位升高的计算

1. 电流在零线阻抗上引起的电压降计算

(1) 单相供电: 如图 2-6 所示, 零线上负载端的  $O'$  的电位为

$$\dot{\phi}_{O'} = U_{O'O} = I_0 Z_0$$

式中  $I_0$  —— 负载电流(A);

$Z_0$  —— 零线阻抗( $\Omega$ )。

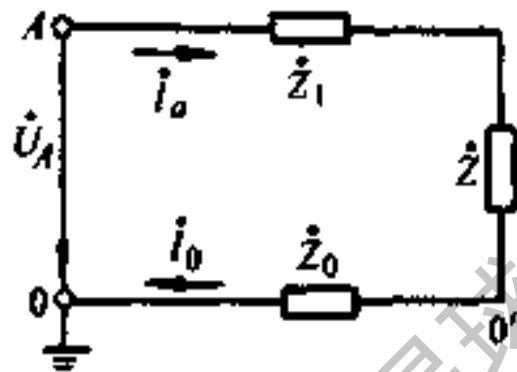


图 2-6 单相供电

(2) 两相三线制供电: 如图 2-7 所示, 零线上电流为

$$I_0 = I_A + I_B$$

当电源对称, 负载对称时, 电流矢量图如图 b 所示,

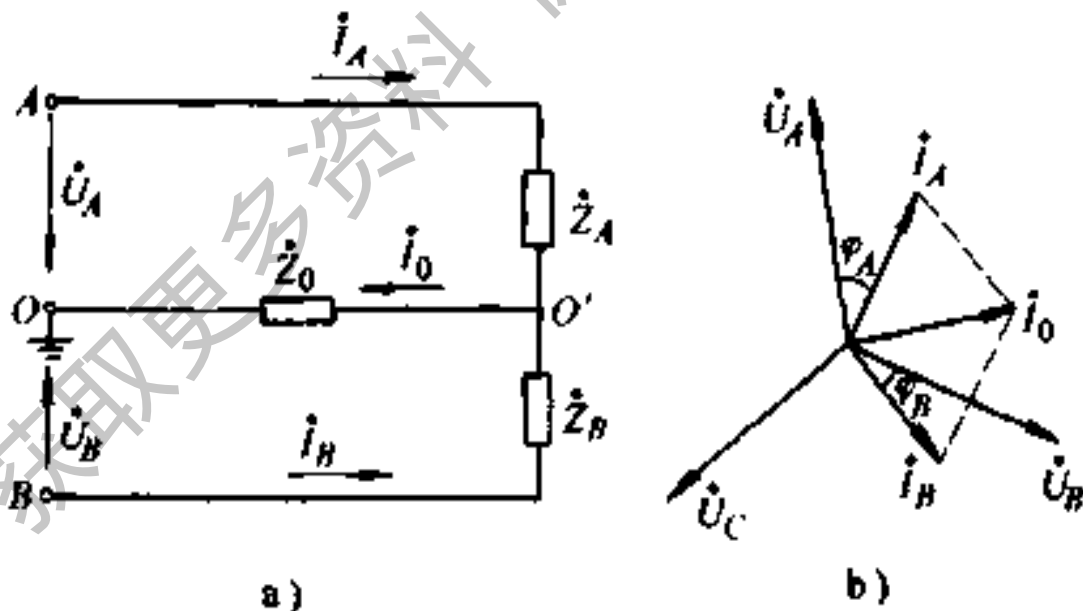


图 2-7 两相三线制供电

a) 电路图 b) 矢量图

电流为

$$I_0 = I_A + I_B$$

(3) 三相四线供电：如图 2-8 所示，负载对称时， $I_0 = 0$ ，这时  $\dot{\phi}_0 = \dot{U}_{00'} = 0$ 。

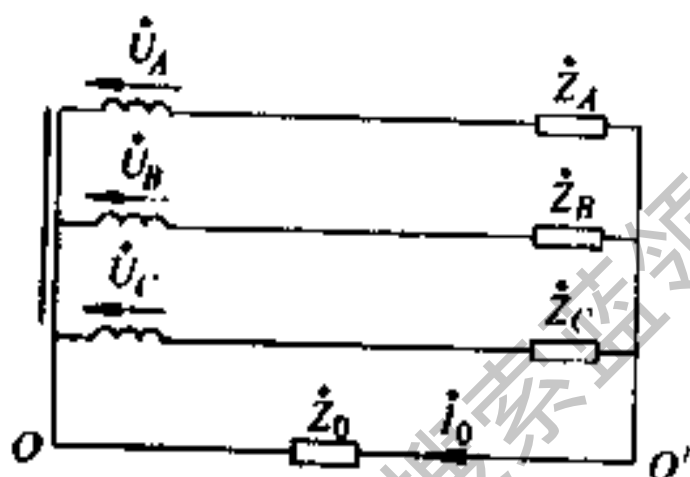


图 2-8 三相四线制供电

若零线上有电流，为

$$I_0 = \dot{U}_{00'} Y_0$$

零线上的电压降

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}$$

式中  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ ——电源的相电压(V)；

$Y_A, Y_B, Y_C$ ——三相负载的复导纳(S)；

$Y_0$ ——零线导纳(S)。

## 2. 零线断线时，引起电位升高的计算

(1) 单相供电：图 2-9a，电源接通后，零线在  $O'O$  断开，这时  $\dot{\phi}_0 = \dot{U}_A$



(2)两相三线制供电:如图 2-9b,零线  $O'O$  的电位升高为

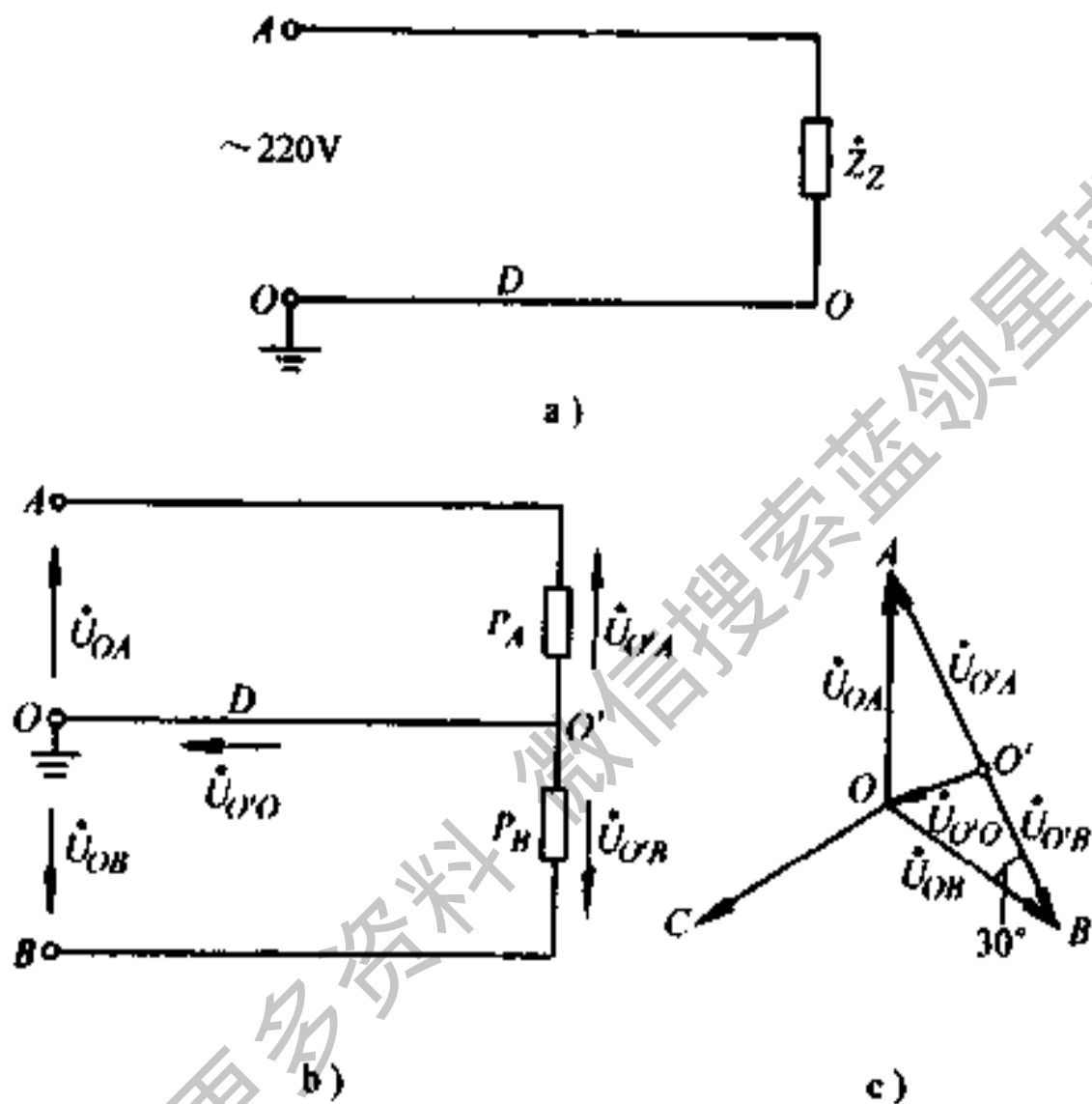


图 2-9 两相三线制供电零线断路

a)单相供电 b)示意图 c)矢量图

$$\begin{aligned}
 U_{O'O} &= \sqrt{U_{OA}^2 + U_{O'A}^2 - 2U_{OA}U_{O'A}\cos 30^\circ} \\
 &= \frac{\sqrt{(P_A/P_B)^2 - (P_A/P_B) + 1}}{1 + (P_A/P_B)} U_{OA}
 \end{aligned}$$

上式表明：当  $P_A \gg P_B$  或  $P_B \gg P_A$  时， $U_{v0} = U_{0A}$ ，达到了相电压；当  $P_A = P_B$  时，则  $U_{v0} = 0.5U_{0A}$ 。

(3) 三相四线制供电：当零线断路后，断线处的电压  $U_{v0}$  为

$$\dot{U}_{v0} = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

若电源对称，负载对称时

$$\dot{U}_{v0} = \frac{1}{3} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = 0$$

若电源对称，负载不对称，则  $U_{v0} \neq 0$ ，不对称程度越大，此电压越高。可以证明：

$$0.5U_A < U_{v0} < U_A$$

## 五、相序对线路电流影响的计算

### 1. 两相三线制供电

两相三线制供电给 220V 单相用电设备时，负荷的接线方案不同，零线中的电流也不同。

设有两台用电设备  $S_1 \cos \varphi_1, S_2 \cos \varphi_2$

已知： $S_1 < S_2$ ，即  $I_1 < I_2$

$$\cos \varphi_1 > \cos \varphi_2 \text{ (即 } \varphi_1 < \varphi_2 \text{),}$$

如图 2-10，可采用两种接线方案

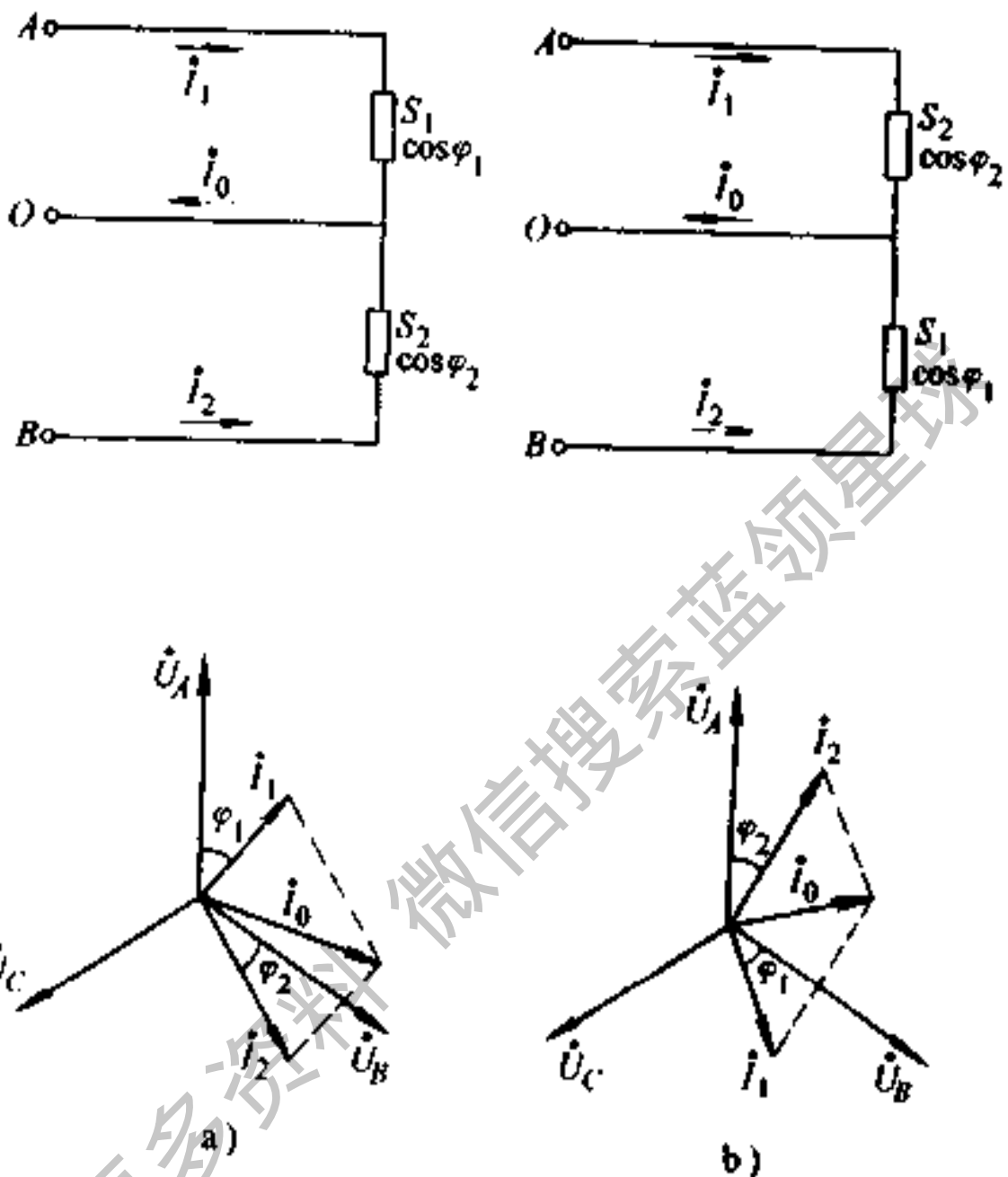


图 2-10 两相三线制供电两种接法

a) 方案一 b) 方案二

方案一  $I_{0(1)} = [I_1^2 + I_2^2 - 2I_1I_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2 + 60^\circ)]^{\frac{1}{2}}$ ;

方案二  $I_{0(2)} = [I_1^2 + I_2^2 - 2I_1I_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1 + 60^\circ)]^{\frac{1}{2}}$ 。

从两式比较可见, 方案一接线较合理, 零线的电流小

于最大负荷的相电流。此时零线的截面较小，必然经济合理。

例如：一相接 220V、2kW 电炉一只， $\cos\varphi_1 = 1$ ；另一相接 1.1kW 电动机一台， $\cos\varphi_2 = 0.75$ ，效率  $\eta = 0.8$ ，求零线电流。

$$\text{电炉电流 } I_1 = \frac{2000}{220} \text{A} = 9.09(\text{A})$$

$$\text{电动机电流 } I_2 = \frac{1100}{220 \times 0.75 \times 0.8} = 8.33(\text{A})$$

$$\cos\varphi_1 = 1 \quad \varphi_1 = 0 \quad \cos\varphi_2 = 0.75 \quad \varphi_2 = 41.4^\circ$$

当采用方案一时

$$\begin{aligned} I_{0(1)} &= [9.09^2 + 8.33^2 - 2 \times 9.09 \times 8.33 \\ &\quad \cos(-41.4^\circ + 60^\circ)]^{\frac{1}{2}} \\ &= 2.91(\text{A}) \end{aligned}$$

当采用方案二时

$$\begin{aligned} I_{0(2)} &= [9.09^2 + 8.33^2 - 2 \times 9.09 \times 8.33 \\ &\quad \cos(41.4^\circ + 60^\circ)]^{\frac{1}{2}} \\ &= 13.49(\text{A}) \end{aligned}$$

可见方案一的零线电流较小，故宜采用方案一。如果选定了方案一，则零线截面较小，如果接线时按第二方案，这时零线将会过载。因此，在具体接线时，必须考虑相序的问题。

## 2. 三相三线制供电

三相三线制供电给 380V 单相用电设备时,与两相三线制供电给 220V 单相用电设备类似。

如图 2-11 所示,采用两种接线方案。

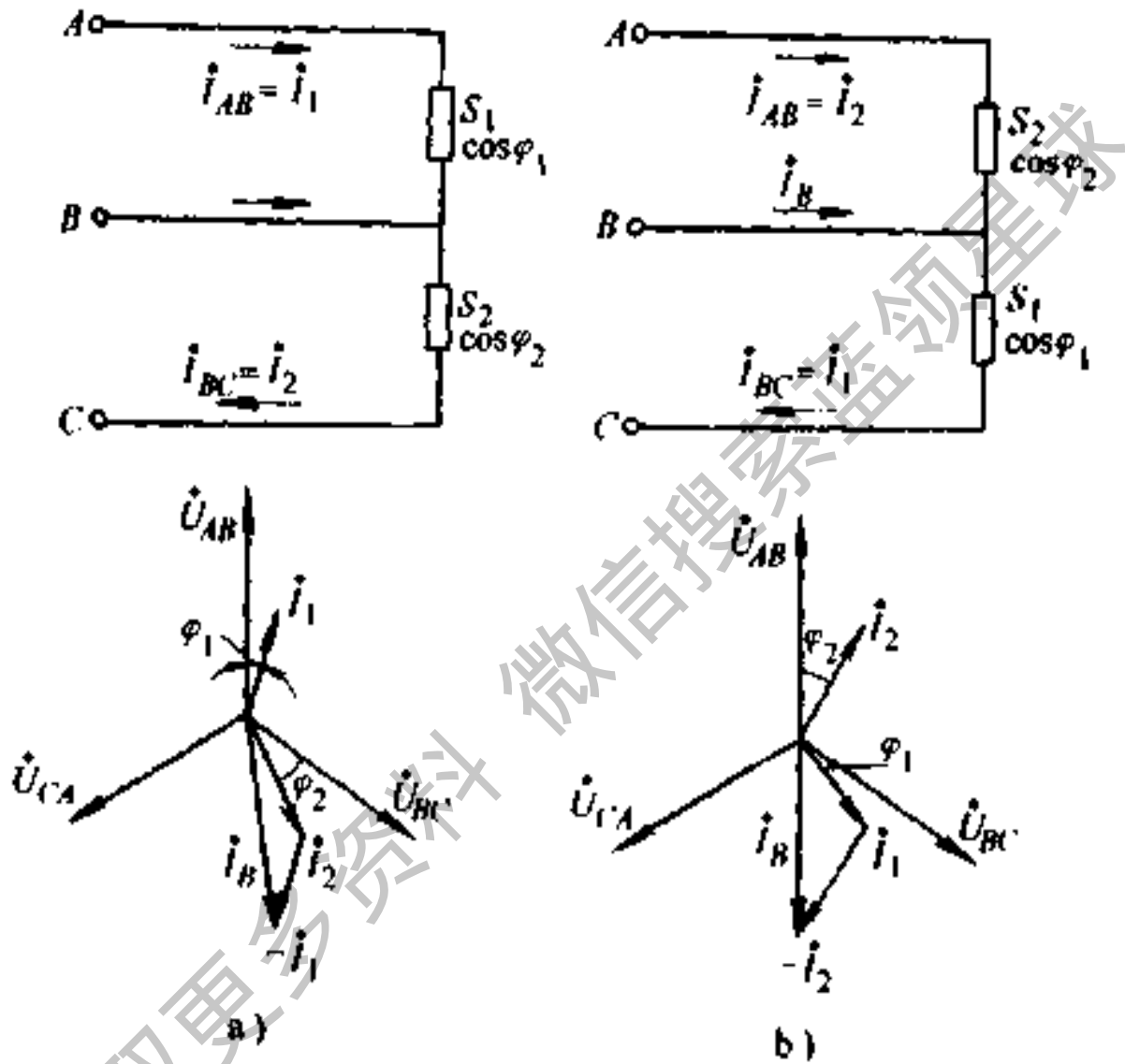


图 2-11 三相三线制的两种接法

a) 方案一 b) 方案二

设有两台用电设备,  $S_1 < S_2$  (即  $I_1 < I_2$ ),

$\cos \varphi_1 > \cos \varphi_2$ , 即  $\varphi_1 < \varphi_2$

方案一

$$I_{BC(1)} = [I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1 - 60^\circ)]^{\frac{1}{2}}$$

方案二

$$I_{BC(2)} = [I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2 - 60^\circ)]^{\frac{1}{2}}$$

例如：有电热干燥箱(380V, 10kW  $\cos\varphi_1 = 1$ ),

电焊机(380V, 32kW  $\cos\varphi_2 = 0.52$ ,  $FZ\% =$

65)( $FZ\%$ 为负载持续率)。

电热干燥箱中的电流

$$I_1 = P_c/U_c = 10/0.38A = 26.3A$$

电焊机中的电流

首先将电焊机容量换算成负载持续率

$FZ\% = 100$  接通时间的容量

$$S = \frac{S_c}{10} \sqrt{FZ\%} = \frac{32}{10} \times \sqrt{65} \text{ kW} = 25.78 \text{ kW}$$

这样电焊机中的电流为

$$I_2 = S/U_c = 25.78/0.38 = 67.8(A)$$

(1)采用方案二时,即将电焊机接在 AB 相之间,干燥箱接在 BC 相间,则

$$\begin{aligned} I_B &= [26.3^2 + 67.8^2 + 2 \times 26.3 \times 67.8 \\ &\quad \cos(-58.67^\circ - 60^\circ)]^{\frac{1}{2}} A \\ &= 59.9(A) \end{aligned}$$

(2)若采用方案一时,即电焊机接在 BC 相间,干燥箱接在 AB 相间,则

$$\begin{aligned}
 I_B &= [26.3^2 + 67.8^2 + 2 \times 26.3 \times 67.8 \times \\
 &\quad \cos(58.67^\circ - 60^\circ)]^{\frac{1}{2}} \text{A} \\
 &= 94(\text{A})
 \end{aligned}$$

从上面的计算可见,方案二是合理的,可选用 BLV-3×35 导线做为 B 相的电线。

对于三相四线制供电,负荷联接也与相序有关,分析、计算可参照上述方法进行。

### 第三节 民用住宅电气负荷的计算

通常采用三种简化方法来计算设备容量。

#### 一、单位建筑面积法

按以下标准进行单位面积耗电量估算

##### 1. 具有电热水器的住宅

$$P = p_1 \cdot S = 20 \cdot S$$

##### 2. 具有电炊器具的住宅

$$P = p_2 \cdot S = 30 \cdot S$$

##### 3. 有电炊具,又有空调器的住宅

$$P = p_3 \cdot S = 90 \cdot S$$

式中  $P$ ——计算负荷(kW);

$p_1, p_2, p_3$ ——单位面积耗电量(kW/m<sup>2</sup>);

$S$ ——总建筑面积(m<sup>2</sup>)。

#### 二、户为基准法

## 1. 各户用电水平比较接近的住宅

$$P = p_i \cdot n$$

## 2. 各户用电量很不相同的住宅

$$P = p_1 \cdot n_1 + p_2 \cdot n_2 + p_3 \cdot n_3$$

式中  $p_i$ ——每户用电设备容量(kW), 一般情况下, 取  
 $p_i = 1\text{kW}$ ; 有电炊具的住宅, 取  $p_i = 3\text{kW}$ ,  
 有电淋浴和空调的住宅取  $p_i = 6\text{kW}$ ;

$n$ ——用户数;

$n_1, n_2$  和  $n_3$ ——对应于用电设备为  $P_1, P_2, P_3$  的用户数。

## 三、设计标准法

住宅照明标准:

大居室: 白炽灯 60W, 荧光灯 40W。

小居室: 小客厅: 白炽灯 40W 或荧光灯 20W。

厨房: 白炽灯 25W。

厕所: 卫生间、廊道: 白炽灯 15W。

楼梯间: 白炽灯为 25~40W。

门厅: 白炽灯为 25~60W。

管理房、修理间: 荧光灯为 40W。

电梯机房、水泵房: 白炽灯为 60W。

若采用壁灯照明时, 应将上述要求的容量增大一个等级或加多盏数。

计算荧光灯及其他有镇流器的电光源的设备时, 应按下式计算



$$P_y = k \cdot P_e$$

式中  $P_y$ ——荧光灯及其他有镇流器的电光源设备的容量 (W);

$P_e$ ——电光源额定功率 (W);

$k$ ——系数, 荧光灯为 1.2; 汞、钠灯为 1.1。

### 住宅电源插座标准

大居室: 两组插座 (一组为单相三极式, 一组为两极式);

小居室、小客厅: 各一组插座。

厨房、卫生间: 各一组插座。

每个电源插座按 50W 计算。

确定了每户的设备容量  $P_e$  后, 即可进行计算负荷的计算, 计算方法如下

用户分支线路的计算负荷:

$$P_{js} = P_e$$

用户主干线的计算负荷

$$P_{js} = K_x P_e$$

由三相电源供电, 且负荷不均匀的民用住宅

$$P_{js} = 3K_x \cdot P_{e_{max}}$$

式中  $K_x$ ——设备需要系数, 一般民用住宅取 0.6 左右; 对以电做炊事能源的住宅取 0.8~0.9;

$P_{e_{max}}$ ——三相负荷中功率最大一相的设备容量 (kW)。

## 第四节 工厂用电量计算

### 一、用电设备、车间和全厂计算负荷的确定

用电设备的计算负荷和车间、全厂计算负荷的确定，是工厂设计供电的重要依据，也是衡量工厂是否经济合理供电的一种手段。

计算负荷是按发热条件选择供电系统元件而需要计算的负荷功率或负荷电流，是用来代替实际负荷的一种假想负荷。

下面按需要系数法来确定计算负荷。

某工厂供电系统如图 2-12 所示。

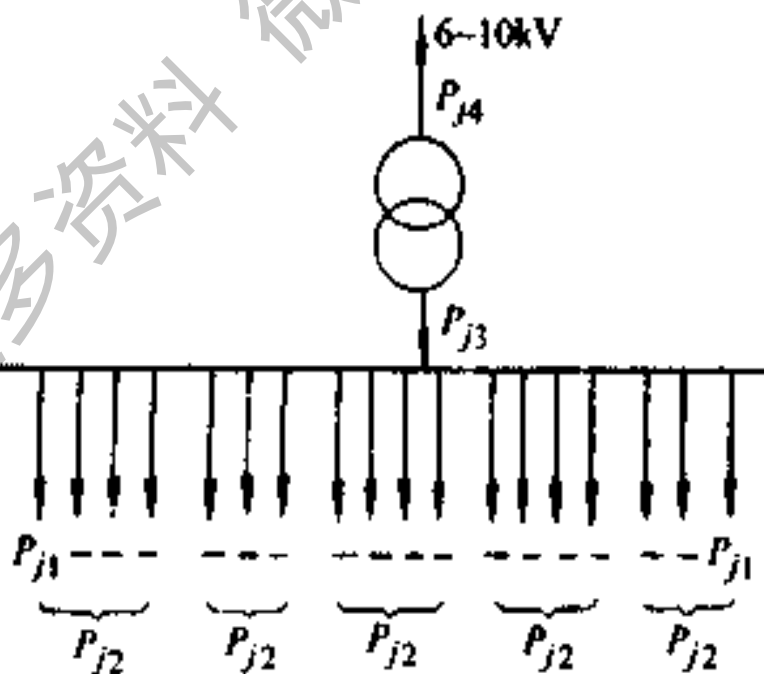


图 2-12 某工厂供电系统

## 1. 用电设备容量及单台设备计算负荷的确定

### (1) 用电设备的设备容量 $P_e$

① 长期工作制电动机的设备容量，是指铭牌上的额定功率

$$P_e = P_n$$

② 反复短时工作制电动机的设备容量，是指统一换算到负载持续率（或称暂载率） $FZ = 25\%$ 时的额定功率，若  $FZ$  不等于  $25\%$ 时，应按下式计算

$$P_e = \sqrt{\frac{FZ}{FZ_{25}}} \cdot P_n = 2P_n \sqrt{FZ}$$

式中  $P_e$ ——换算到  $FZ_{25} = 25\%$  电动机的设备容量 (kW)；

$FZ$ ——铭牌上负载持续率 (%)

$P_n$ ——电动机额定功率 (kW)。

负载持续率定义

$$FZ = \frac{t_g}{t_g + t_T} \times 100\%$$

式中  $t_g$ ——每周期的工作时间；

$t_T$ ——每周期的停歇时间。

$t_g + t_T$  为工作周期，我国按 10min 为计算依据。如吊车电动机的标准负载持续率有 15%、25%、40% 及 60% 四种。

### ③ 电焊机的设备容量电焊机及电焊设备的设备容

量，是指统一换算到负载持续率  $FZ=100\%$  时的额定功率，若其  $FZ$  不等于  $100\%$  时，应按下式换算

$$P_s = \sqrt{FZ} S_r \cos\varphi$$

式中  $S_r$ ——交流电焊机的额定视在功率 (kW)；

$FZ$ ——与  $S_r$  相对应的铭牌负载持续率 (%)，我国电焊机的负载持续率：50%、65%、75% 及 100%；

$\cos\varphi$ ——在  $S_r$  时额定功率因数。

④ 电炉变压器的设备容量 (是指额定功率因数时额定功率)。即

$$P_s = S_r \cos\varphi$$

式中  $S_r$ ——电炉变压器的额定视在容量 (kV·A)；

$\cos\varphi$ ——电炉变压器的额定功率因数。

⑤ 整流设备的设备容量

$$P_s = U_z I_z$$

式中  $U_z$ 、 $I_z$ ——整流设备输出的额定直流电压和电流 (kV·A)。

⑥ 成组用电设备的设备容量

$$P_{s\Sigma} = \sum_{i=1}^m P_{s_i}$$

式中  $m$ ——单台用电设备台数。

⑦ 照明设备容量

白炽灯、碘钨灯  $P_s = P_e$

荧光灯  $P_s = 1.2P_r$

高压汞灯  $P_s = (1.08 \sim 1.10) P_r$

式中  $P_r$ ——灯泡铭牌功率 (kW)。

前面的系数是考虑了镇流器的损耗。

在初步设计时，照明设备容量可按单位面积照明容量法来估算。即

$$P_s = A\omega$$

式中  $A$ ——建筑物平面面积 ( $m^2$ )；

$\omega$ ——单位容量 ( $W/m^2$ )。

一般工厂车间及有关建筑物的照明容量，见表 2-14。

(2) 单台用电设备的计算负荷  $P_{js1}$  的确定

① 对于不需计及效率的单台用电设备为

$$P_{js1} = P_s$$

② 对于需计及效率的单台用电设备(如电动机等)为

$$P_{js1} = P_s / \eta$$

式中  $\eta$ ——用电设备效率。

2. 用电设备的计算负荷

当求出各用电设备的设备容量  $P_{js1}$  之后，就可按需要系数表上的分类方法详细地分成若干组，进行用电设备组的负荷计算。用电设备组的计算负荷的计算公式如下

表 2-14 单位建筑面积照明容量

房间名称	功率指标/ (W/m <sup>2</sup> )	房间名称	功率指标/ (W/m <sup>2</sup> )
金工车间	6	各种仓库	5
装配车间	9	生活间	8
工具修理间	8	锅炉房	4
金属结构车间	10	机车库	8
焊接车间	8	汽车库	8
锻工车间	7	住宅	4
热处理车间	8	学校	5
铸钢车间	8	办公楼	5
木工车间	11	单身宿舍	4
铸铁车间	8	食堂	4
实验室	10	托儿所	5
煤气站	7	商店	5
压缩空气站	5	浴室	3

注：按白炽灯计算，仅供粗略估算时参考。

有功功率计算负荷  $P_{js2} = K_d \Sigma P_{js1}$

无功功率计算负荷  $Q_{js2} = P_{js2} \tan \varphi$

视在功率计算负荷  $S_{js2} = \sqrt{P_{js2}^2 + Q_{js2}^2}$

式中  $\Sigma P_{js1}$ ——该用电设备组内的设备容量总和，但不包括备用设备容量 (kW)；

$K_r$ ——该用电设备组的需要系数，参看表 2-15  
~表 2-18；

$\tan\varphi$ ——与运行功率因数角相对应的正切值。

表 2-15 用电设备组的需要系数及功率因数表

用电设备名称	需要系数 $K_r$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
机械和冶金工业 生产机床的单独传动装 置：			
金属热加工车间大批、 流水作业生产	0.27	0.65	1.17
金属冷加工车间大批、 流水作业生产	0.2	0.65	1.17
金属冷加工车间小批、 单独生产	0.18	0.65	1.17
木加工车间的一般负荷	0.22	0.65	1.17
木加工车间的重负荷	0.35	0.65	1.17
生产用通风机	0.7	0.8	0.75
卫生用通风机	0.65	0.8	0.75
泵及电动发电机	0.7	0.8	0.75
铸工、冷作车间间歇工 作的吊车	0.2	0.5	1.73
加工、装配、修理车间间 歇工作吊车	0.15	0.5	1.73
间歇运行工作制的生产 机械	0.2~0.4	0.5	1.73

(续)

用电设备名称	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
铸工车间内的连续运输 设备及整砂机:			
非联锁的	0.5	0.75	0.88
联锁的	0.65	0.75	0.88
电阻炉、干燥柜、加热器	0.8	0.95	0.33
实验室内小型加热器	0.7	1.0	0
低频感应电炉	0.8	0.35	2.68
高频感应电炉	0.8	0.1	9.95
电弧炉	0.9	0.87	0.57
单头焊接电动发电机	0.35	0.6	1.33
多头焊接电动发电机、	0.5~0.9	0.65	1.17
铆钉加热机			
单头手动弧焊变压器	0.35	0.35	2.68
多头手动弧焊变压器	0.7~0.9	0.5	1.73
自动弧焊变压器	0.5	0.5	1.73
点焊机、缝焊机	0.35	0.6	1.33
对焊机	0.35	0.7	1.02
高频发电机	0.7~0.8	0.7~0.8	1.02~0.75
真空管振荡器	0.8	0.7~0.8	1.02~0.75
磁力探伤机:			
发电机	0.7	0.8	0.75
变压器	0.3	0.4	2.29
整流器	0.7	1.0	0
退磁机	0.4	0.55	1.52



(续)

用电设备名称	需要系数 $K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
超声波探伤器	0.7	0.7	1.02
硒整流器	0.7	0.7	1.02
X光设备	0.4~0.5	0.5~0.55	1.73~1.52
机床试验台	0.1	0.5	1.73
电线电缆制造工业:			
拔丝机、绞线机、包纱 机、包纸机、铠装机	0.4	0.7	1.02
压延机及其辅助机械	0.5	0.7	1.02
制漆及漆包线机床绕线 机	0.4	0.65	1.17
熔铜车间的重型机床用 电动机	0.4	0.65	1.17
照明:			
生产厂房(有天然采光)	0.8~0.9	1.0	0
生产厂房(无天然采光)	0.9~1.0	1.0	0
办公楼	0.7~0.8	1.0	0
设计室	0.9~0.95	1.0	0
仓库	0.5~0.7	1.0	0
锅炉房	0.9	1.0	0
宿舍区	0.6~0.8	1.0	0
室外照明	1.0	1.0	0
事故照明	1.0	1.0	0

表 2-16 3~6~10kV 高压用电设备  
需要系数及功率因数表

高压用电设备组名称	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
电弧炉变压器	0.92	0.87	0.57
锅炉	0.90	0.87	0.57
转炉鼓风机	0.70	0.80	0.75
水压机	0.50	0.75	0.88
煤气站、排风机	0.70	0.80	0.75
空压站压缩机	0.70	0.80	0.75
轧钢设备	0.80	0.80	0.75
氧气压缩机	0.80	0.80	0.75
试验电动机组	0.50	0.75	0.88
高压给水泵(感应电动机)	0.50	0.80	0.75
高压输水泵(同步电动机)	0.80	0.90	0.48
引风机、送风机	0.80~0.90	0.85	0.62
有色金属轧机	0.15~0.20	0.70	1.02

3. 车间配电干线及变电所低压母线上计算负荷的确定

$$\text{有功功率负荷 } P_{j3} = K_P \Sigma P_{j2}$$

$$\text{无功功率负荷 } Q_{j3} = K_Q \Sigma Q_{j2}$$

$$\text{视在功率计算负荷 } S_{j3} = \sqrt{P_{j3}^2 + Q_{j3}^2}$$

表 2-17 各种车间的低压负荷  
需要系数及功率因数参考表

车间名称	需要系数 $K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
铸钢车间(不包括电炉)	0.3~0.4	0.65	1.17
铸铁车间	0.35~0.4	0.7	1.02
锻压车间(不包括高压水泵)	0.2~0.3	0.55~0.65	1.52~1.17
热处理车间	0.4~0.6	0.65~0.7	1.17~1.02
焊接车间	0.25~0.3	0.45~0.5	1.98~1.73
金工车间	0.2~0.3	0.55~0.65	1.52~1.17
木工车间	0.28~0.35	0.6	1.33
工具车间	0.3	0.65	1.17
修理车间	0.2~0.25	0.65	1.17
落锤车间	0.2	0.6	1.33
废钢铁处理车间	0.45	0.68	1.08
电镀车间	0.4~0.62	0.85	0.62
中央实验室	0.4~0.6	0.6~0.8	1.33~0.75
充电站	0.6~0.7	0.8	0.75
煤气站	0.5~0.7	0.65	1.17
氧气站	0.75~0.85	0.8	0.75
冷冻站	0.7	0.75	0.88
水泵站	0.5~0.65	0.8	0.75
锅炉房	0.65~0.75	0.8	0.75
压缩空气站	0.7~0.85	0.75	0.88

(续)

车间名称	需要系数 $K_r$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
乙炔站	0.7	0.9	0.48
试验站	0.4~0.5	0.8	0.75
发电机车间	0.29	0.6	1.32
变压器车间	0.35	0.65	1.17
电容器车间(机 械化运输)	0.41	0.98	0.19
高压开关车间	0.3	0.7	1.02
绝缘材料车间	0.41~0.5	0.8	0.75
漆包线车间	0.8	0.91	0.48
电磁线车间	0.68	0.8	0.75
线圈车间	0.55	0.87	0.51
扁线车间	0.47	0.75~0.78	0.88~0.8
圆线车间	0.43	0.65~0.7	1.17~1.02
压延车间	0.45	0.78	0.8
辅助性车间	0.3~0.35	0.65~0.7	1.17~1.02
电线厂主厂房	0.44	0.75	0.88
电瓷厂主厂房 (机械化运输)	0.47	0.75	0.88
电表厂主厂房	0.4~0.5	0.8	0.75
电刷厂主厂房	0.5	0.8	0.75

式中  $\Sigma P_{js}$ 、 $\Sigma Q_{js}$ ——各用电设备组的有功、无功功率  
计算负荷的总和 (kW, kvar);

$K_p$ 、 $K_Q$ ——分别为最大负荷时有功和无功

表 2-18 各种工厂的全厂需要系数及自然功率因数参考表(数值偏大)

工厂类别	需要系数 $K_d$		最大负荷时功率因数 $\cos\varphi$	
	变动范围	建议采用	变动范围	建议采用
汽轮机制造厂	0.38~0.49	0.38	—	0.88
锅炉制造厂	0.26~0.33	0.27	0.73~0.75	0.73
柴油机制造厂	0.32~0.34	0.32	0.74~0.84	0.74
重型机械制造厂	0.25~0.47	0.35	—	0.79
机床制造厂	0.13~0.3	0.2	—	—
重型机床制造厂	0.32	0.32	—	0.71
工具制造厂	0.34~0.35	0.34	—	—
仪表仪器制造厂	0.31~0.42	0.37	0.8~0.82	0.81
滚珠轴承制造厂	0.24~0.34	0.28	—	—
量具刃具制造厂	0.26~0.35	0.26	—	—
电机制造厂	0.25~0.38	0.33	—	—
石油机械制造厂	0.45~0.5	0.45	—	0.78
电线电缆制造厂	0.35~0.36	0.35	0.65~0.8	0.73
电气开关制造厂	0.3~0.6	0.35	—	0.75
阀门制造厂	0.38	0.38	—	—

(续)

工厂类别	需要系数 $K_r$		最大功率因数 $\cos\phi$	
	变动范围	建议采用	变动范围	建议采用
铸管厂	—	0.5	—	0.78
橡胶厂	0.5	0.5	0.72	0.72
通用机器厂	0.34~0.43	0.4	—	—
小型造船厂	0.32~0.5	0.33	0.6~0.8	0.7
中型造船厂	0.35~0.45	有电炉时取大值	0.7~0.8	有电炉时取大值
大型造船厂	0.35~0.4	有电炉时取大值	0.7~0.8	有电炉时取大值
有色冶金企业	0.6~0.7	0.65	—	—
化学工厂	0.17~0.38	0.28	—	—
纺织工厂	0.32~0.6	0.5	—	—
水泥工厂	0.5~0.84	0.71	—	—
锯木工厂	0.14~0.3	0.19	—	—
各种金属加工厂	0.19~0.27	0.21	—	—
钢结构桥梁厂	0.35~0.4	—	—	0.6
混凝土桥梁厂	0.3~0.45	—	—	0.55
混凝土轨枕厂	0.35~0.45	—	—	—

功率负荷的同期系数，见表 2-19。

当变电所的低压母线上装有无功补偿电容时，其容量为  $Q_C$  (kvar)，则  $Q_{j3}$  按下式计算

$$Q_{j3} = K_Q \Sigma Q_{j2} - Q_C$$

表 2-19 配电干线及低压母线上负荷需要系数

应 用 范 围	$K_P = K_Q$
确定车间变电所母线的最大负荷时，所采用的有功功率同期系数	
冷加工车间	0.7~0.8
热加工车间	0.7~0.9
动力站	0.8~1.0
确定配电所母线最大负荷时，所采用的有功负荷同期系数	
计算负荷小于 5000kW	0.9~1.0
计算负荷为 5000~10000kW	0.85
计算负荷超过 10000kW	0.8

#### 4. 变电所中变压器高压侧计算负荷的确定

车间变电所中变压器高压侧计算负荷的计算公式如下

$$P_{j4} = P_{j3} + \Delta P_b$$

$$Q_{j4} = Q_{j3} + \Delta Q_b$$

$$S_{j4} = \sqrt{P_{j4}^2 + Q_{j4}^2}$$

式中  $P_{js4}$ 、 $Q_{js4}$ 、 $S_{js4}$ ——车间变压器高压侧的有功功率 (kW)、无功功率 (kvar) 和视在功率计算负荷 (kVA);

$\Delta P_b$ 、 $\Delta Q_b$ ——分别为变压器的有功损耗 (kW) 和无功损耗 (kvar)。

一般可按下列经验公式估算

$$\Delta P_b = 0.02 S_{js3}$$

$$\Delta Q_b = 0.1 S_{js3}$$

对于一般中小型企业而言,  $S_{js4}$  实际上是全厂总计算负荷。

#### 5. 单相负荷换算成三相负荷的计算

当单相用电设备的总容量超过三相用电设备总容量的 15% 以上时, 则需对单相负荷进行换算成三相负荷的计算, 然后才能参与负荷计算。换算方法如下

(1) 对于接在相电压上的用电设备

$$P_{dx} = 3P_{xx}$$

式中  $P_{dx}$ ——三相等效设备容量 (kW);

$P_{xx}$ ——接在相电压上的单设备容量 (kW)。

(2) 对于接在线电压上的用电设备

$$P_{dx} = \sqrt{3} P_d$$

式中  $P_d$ ——接在线电压上的单相设备容量 (kW)。

单相用电设备应尽量对称的接入三相电路, 使供电



网络的电流不平衡度小于 20%。如果三相负荷有明显的不对称时，应将接在线电压上的容量都换算为接在相电压容量，并求出负荷最大的一相，然后按  $P_{\Delta L} = 3P_{\text{max}}$  换算为三相等效负荷。

将接在线电压上的容量换算为相电压容量的方法如下

设接在线电压的单相用电设备有功和无功功率分别为  $P_{ab}$ 、 $P_{bc}$  和  $Q_{ab}$ 、 $Q_{bc}$ ，则换算在 B 相（该相负荷最大）的有功和无功容量分别为

$$P_b = P_{ab}K_{(ab)b} + P_{bc}K_{(bc)b}$$

$$Q_b = Q_{ab}K_{(ab)b} + Q_{bc}K_{(bc)b}$$

如果 A 相负荷最大，则换算在 A 相为

$$P_a = P_{ab}K_{(ab)a} + P_{ca}K_{(ca)a}$$

$$Q_a = Q_{ab}K_{(ab)a} + Q_{ca}K_{(ca)a}$$

式中的换算系数见表 2-20。

## 二、工厂年电能需要量的计算

### 1. 单位产品耗电量法

#### (1) 工厂年有功电能需要量

$$A_p = \omega \cdot m$$

式中  $A_p$ ——年有功电能需要量 (kW·h)；

$\omega$ ——单位产品耗电量 (kW·h/单位产品)；

$m$ ——产品年产量。

#### (2) 工厂年无功电能需要量 (kvar·h)

表 2-20 换算系数

换算 系数	负荷功率因数								
	0.35	0.4	0.5	0.6	0.65	0.7	0.8	0.9	1.0
$K_{(ab)a}$ $K_{(bc)b}$ $K_{(ca)c}$	1.27	1.17	1.0	0.89	0.84	0.8	0.72	0.64	0.5
$K_{(ab)b}$ $K_{(bc)c}$ $K_{(ca)a}$	-0.27	-0.17	0.0	0.11	0.16	0.2	0.28	0.36	0.5
$K_{(ab)a}$ $K_{(bc)b}$ $K_{(ca)c}$	1.05	0.86	0.58	0.38	0.30	0.22	0.09	-0.05	-0.29
$K_{(ab)b}$ $K_{(bc)c}$ $K_{(ca)a}$	1.63	1.44	1.16	0.96	0.88	0.8	0.67	0.53	0.29

$$A_Q = A_P \cdot \tan \varphi_n$$

式中  $A_Q$ ——年无功电能需要量 (kvar · h)；

$\tan \varphi_n$ ——工厂年平均功率因数角的正切值，考虑到补偿后的年平均功率因数若取  $\cos \varphi_n = 0.85 \sim 0.95$ ，则相应的， $\tan \varphi_n = 0.62 \sim 0.33$ 。

## 2. 年最大负荷利用小时法

$$A_P = P_{\max} \cdot T_{\max} \cdot P$$

$$A_Q = Q_{\max} \cdot T_{\max} \cdot Q$$

式中  $P_{\max}$ 、 $Q_{\max}$ ——年最大有功功率 (kW) 和最大无功功率 (kvar);

$T_{\max \cdot P}$ 、 $T_{\max \cdot Q}$ ——年最大有功功率利用小时数和最大无功功率利用小时数。

$A_P$ 、 $A_Q$ ——同前。

### 3. 年平均负荷法

$$A_P = \alpha_p P_{\max} T$$

$$A_Q = \beta_q Q_{\max} T$$

式中  $\alpha_p$ 、 $\beta_q$ ——年平均有功和无功负荷系数, 一般取  $\alpha_p = 0.7 \sim 0.75$ ,  $\beta_q = 0.76 \sim 0.82$ ;

$T$ ——年实际工作小时数, 一般情况下

一班制工厂  $T = 2300$  h;

二班制工厂  $T = 4600$  h;

三班制工厂  $T = 8760$  h。

## 第五节 导线、电缆的选择与计算

### 一、经济电流密度及计算

#### 1. 沿用的经济电流密度标准及计算公式推导

(1) 经济电流密度: 对应于经济截面的电流密度称为经济电流密度。导线的经济截面由线路年计算支出费用最小的条件所决定。线路的年计算支出费用可写为

$$Z = Y_{\Sigma} + \alpha_r F_L$$

$$F_L = (F_0 + F_r \cdot S) L$$

式中  $Z$ ——线路的年计算支出费用 (元);

$Y_z$ ——线路的年运行费用 (元);

$\alpha_r$ ——标准经济效益系数;

$F_L$ ——线路投资 (元);

$F_0$ ——每千米线路投资中与线路截面无关的部分 (元/km);

$F_1$ ——每千米线路的每平方毫米截面的投资费用 (元/km·mm<sup>2</sup>);

$S$ ——导线截面 (mm<sup>2</sup>);

$L$ ——线路长度 (km)。

线路的年运行费用可由下式表示

$$Y_z = \frac{\alpha}{100} (F_0 + F_1 \cdot S) L + 3I_{\max}^2 \frac{\rho L}{S} T_{\max} \beta \times 10^{-3}$$

式中  $\alpha$ ——线路折旧及维修费的百分数;

$\beta$ ——电能损耗的校正电价,它不同于发电厂成本或售电价格。其计算方法见后。

$\rho$ ——导线电阻率 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ );

$T_{\max}$ ——线路年最大负荷利用小时数;

$I_{\max}$ ——线路最大负荷电流 (A)

所以,线路的年计算支出费用可写成

$$Z = Y_z + \alpha_r F_L = \frac{\alpha}{100} (F_0 + F_1 S) L + 3I_{\max}^2 \frac{\rho L}{S} T_{\max} \times \beta \times 10^{-3} + \alpha_r (F_0 + F_1 S) L$$

可由上式求出导线的经济截面为：

$$S_j = I_{\max} \sqrt{\frac{3\rho T_{\max} \beta \times 10^{-3}}{F_r \left( \frac{\alpha}{100} + \alpha_r \right)}}$$

由下式可得出经济电流密度

$$j_n = \frac{I_{\max}}{S_j} = \sqrt{\frac{F_r \left( \frac{\alpha}{100} + \alpha_r \right)}{3\rho T_{\max} \beta \times 10^{-3}}}$$

式中  $j_n$ ——经济电流密度 (A/mm<sup>2</sup>)；

$S_j$ ——经济截面 (mm<sup>2</sup>)。

(2) 电能损耗的校正电价

$$\beta = b_y K_c K_s + \frac{K_z}{T_{\max}} \left( P + \frac{\alpha_1}{100} \right)$$

$$K_z = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 (1+f)$$

式中  $b_y$ ——补充发电设备的煤耗费 (元/kW·h)；

$\alpha_1$ ——发、送、变电设备的年折旧及维修费的百分数；

$P$ ——线路输送功率 (kW)；

$K_z$ ——补偿线路每千瓦功率损耗所需增加的发、送、变电设备的投资；

$K_1$ ——每千瓦补充发电设备的投资；

$K_2$ ——线路同时系数，

$$K_2 = \frac{\text{线路在系统最大负荷时功率损耗}}{\text{线路的最大功率损耗}}$$

$K_3$ ——电力系统备用容量系数，约为 1.1~1.2

$$K_3 = \frac{\text{发电设备容量}}{\text{电力系统最大负荷}}$$

$K_4$ ——线路中功率损耗系数（网损系数）；

$K_5$ ——厂用电系数；

$f$ ——输送 1kW 电力所需电力网投资与 1kW 发电设备投资的比值。

我国现行的经济电流密度标准见表 2-21，同时超高压送电线路电流密度见表 2-22。

表 2-21 经济电流密度（单位：A/mm<sup>2</sup>）

导线种类	年最大负荷利用小时数/h		
	3000 以下	3000~5000	5000 以上
裸铜线与母线	3.0	2.25	1.75
裸铝线、钢芯铝绞线、 母线	1.65	1.15	0.9
铜芯电缆	2.5	2.25	2.0
铝芯电缆	1.92	1.73	1.54

## 2. 修正经济电流密度标准的必要性和公式

表 2-21 的标准沿用到现在，由于下述原因，该标准应该修正。

(1) 电能损耗价格已由过去的 0.04 元/kW·h 上升到 0.06~0.07 元/kW·h, 甚至更高。送电线路单位导线费用随着导线、金具、钢材等价格的上升而增加了许多。

表 2-22 国外超高压送电线路电流密度

(单位: A/mm<sup>2</sup>)

电压/kV	长 线 路	短 线 路
275~300	0.6~0.9	1.0~1.4
330~345	0.5~0.8	0.8~1.05
380~400	0.55~0.8	0.8~1.0
500	0.7~0.75	0.8~1.0
750	0.7~1.0	

(2) 在制定标准时, 我国还没有 300kV 以上的超高压送电线路, 现在已出现超高压长送电线路, 所以必须考虑电晕引起的电能损耗这一重要现象。

电流密度修正的公式如下

$$j_n = \sqrt{\frac{1000(K_1 - K_1 F_1 K_2 + F_2) F_1}{3(T_{\max} + 8760 K_k) r_0 \delta}}$$

式中  $j_n$ ——经济电流密度 (A/mm<sup>2</sup>);

$K_1$ ——投资利用标准经济效果系数。建议对纯收入采用 0.1~0.15, 对国民收入采用 0.18~0.26;

$F_1$ ——线路基本折旧率，国家有统一标准；  
 $K_1$ ——基本折旧费年平均扣除系数，取 6.52~6.62；

$F_2$ ——线路综合折旧率，国家有统一规定；  
 $K_2$ ——计及电晕引起的电能损耗的系数（电晕功率损耗与导线发热损耗之比）；

$r_0$ ——导线单位电阻 ( $\Omega/\text{km} \cdot \text{mm}^2$ )；

$\delta$ ——单位电价 (元/kW·h)；

其他符号同前。

目前在选用导线时，如表 2-21 电流密度所选用的导线，须加大一级选用。如按 2-21 选用的导线截面为  $50\text{mm}^2$ ，则实际须采用  $70\text{mm}^2$  的导线。

## 二、导线截面的选择

### 1. 导线截面选择计算及校验

#### (1) 按线路最大工作电流选择导线截面

根据发热条件，要求线路最大工作电流不大于导线的允许载流量。

导线在  $25^\circ\text{C}$  情况下安全载流量见表 2-23~2-32。对于架空线来说，当环境温度不是  $25^\circ\text{C}$  时，需乘以温度校正系数  $K$ 。表 2-33 列出温度校正系数。

(2) 按经济电流密度选择导线截面 根据线路年最大负荷利用小时数和导线材料，由表 2-21 查得经济电流密度，便可根据线路计算电流求出导线截面  $S$ 。即



表 2-23 裸绞线安全载流量 (环境温度 25℃)

(单位: A)

铜 绞 线			铝 绞 线			钢芯铝绞线	
导线 型号	室外	室内	导线 型号	室外	室内	导线 型号	室外
TJ-4	50	25	LJ-10	75	50	LGJ-35	170
TJ-6	70	35	LJ-16	105	80	LGJ-50	220
TJ-10	95	60	LJ-25	135	110	LGJ-70	275
TJ-16	130	100	LJ-35	170	135	LGJ-95	335
TJ-25	180	140	LJ-50	215	170	LGJ-120	380
TJ-35	220	175	LJ-70	265	215	LGJ-150	445
TJ-50	270	220	LJ-95	325	260	LGJ-180	515
TJ-60	315	250	LJ-120	375	310	LGJ-240	610
TJ-70	340	280	LJ-150	440	370	LGJ-300	700
TJ-95	415	340	LJ-185	500	425	LGJ-400	800
TJ-120	485	405	LJ-240	610		LGJ-300	690
TJ-150	570	480	LJ-300	680		LGJ-400	825
TJ-185	645	550	LJ-400	830		LGJ-500	945
TJ-240	770	650	LJ-500	980		LGJ-600	1050
TJ-890	890		LJ-625	1140		LGJ-300	705
TJ-400	1035					LGJ-400	850

表 2-24 BVR 型和 BLVR 型聚氯乙烯铜心  
软线及铝心线的参考载流量

标称截面 /mm <sup>2</sup>	参考载流量/A			
	BVR		BLVR	
	单 芯	双 芯	单 芯	双 芯
0.8	17	13	13	10
1.0	20	16	15	12
1.5	25	21	19	16
2.4	34	26	26	22
4.0	45	28	35	29
6.0	56	47	43	36
8.0	70	59	54	45
10.0	85	72	66	56
16.0	113	96	87	73
25	146	123	112	95
35	180	151	139	117
50	225	188	173	145

注：本标准所列载流量数据，是在环境 25℃，带流芯温度 70℃ 条件下，空气架空敷设的载流量。在设计选用时，对于 1.0mm<sup>2</sup> 以下的小截面，应同时考虑电路压降和机械强度。

不同环境温度时的载流量修正系数

环境温度/℃	5	10	15	20	25	30	35	40	45
修正系数	1.2	1.15	1.11	1.05	1	0.94	0.88	0.81	0.74

表 2-25 BVV 型和 BLVV 型聚氯乙烯絕緣、  
聚氯乙烯护套鋼心及鋁心導線參考載流量

標稱截面 /mm <sup>2</sup>	BVV			BLVV		
	單芯	雙芯	三芯	單芯	雙芯	三芯
1.0	20	16	13	15	12	10
1.5	25	21	16	19	16	12
2.5	34	26	22	26	22	17
4.0	45	38	29	35	29	23
5.0	51	43	33	39	33	26
6.0	56	47	36	43	36	28
8.0	70	59	46	54	45	35
10.0	85	72	55	66	56	43

表 2-26 RVZ 型聚氯乙烯絕緣、聚氯乙烯  
护套連接軟線的參考載流量

標稱截面 /mm <sup>2</sup>	二 芯	三 芯	四 芯
1.00	16	13	13
1.50	21	16	16
2.00	24	19	19
2.50	26	22	22
3.00	28	26	26
4.00	38	29	29
5.00	43	33	33
6.00	47	36	36



(续)

标称 截面 /mm <sup>2</sup>	明线敷设		穿管敷设						护套线			
			二根		三根		四根		二芯		三及四芯	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
6	50	39	44	34	41	31	37	28	41	31	31	24
8	63	48	56	43	49	39	43	34	51	39	40	30
10	75	55	68	51	56	42	49	37	63	48	48	37
16	100	75	80	61	72	55	64	49				
20	110	85	90	70	80	65	74	56				
25	130	100	100	80	90	75	85	65				
35	160	125	125	96	110	84	105	75				
50	200	155	163	125	142	109	120	89				
70	255	200	203	156	182	141	161	125				
95	310	240	243	187	227	175	197	152				

注:1. 线芯最高工作温度为70℃;2. 电线周围环境温度为35℃。当实际空气温度高于

35℃时,导线安全载流量应按校正系数表乘以校正系数。





(续)

标称 截面 /mm <sup>2</sup>	明线敷设				穿管敷设						护套线		
	二根		三根		四根		二芯		三及四芯				
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	
70	230	185	186	144	168	130	149	115					
95	290	225	220	170	210	160	180	140					
120	355	270	260	200	220	173	210	165					
150	400	310	290	230	260	207	240	188					
185	475	370											
240	580	445											
300	670	520											
400	820	630											
500	950	740											

注:1. 线芯最高工作温度为65℃;2. 导线安全载流量的温度校正系数如下表。

周围空气温度/℃	35	40	45	50	55
校正系数	1.0	0.91	0.82	0.71	0.58



表 2-29 直接敷设在地下的高压绝缘  
电缆(铜、铝)安全载流量  
(单位:A)

标称截面 /mm <sup>2</sup>	双芯电缆		三芯电缆		四芯电缆	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.5	13	9	13	9		
2.5	22	16	22	16	22	16
4	35	26	35	26	35	26
6	52	39	52	39	52	39
10	88	66	88	62	74	56
16	123	92	105	79	101	75
25	162	122	140	105	132	99
35	198	148	167	125	154	115
50	237	178	206	155	189	141
70	286	214	250	188	233	174
95	334	250	299	224	272	204
120	382	287	343	257	308	231

(续)

标称截面 /mm <sup>2</sup>	双芯电缆		三芯电缆		四芯电缆	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝
150	440	330	382	287	347	260
185			431	323	396	297
240					448	336

注:1. 表中安全载流量,线芯最高工作温度为80℃,地温为30℃,在实际地温不是30℃的

地方,电缆的安全载流量应乘以下表中的校正系数。

地温/℃	10	15	20	25	30	35	40
校正系数	1.18	1.14	1.11	1.05	1.00	0.95	0.89

2.  $n$  条电缆平行敷设(电缆外皮间距为200mm)时,电缆的安全载流量应乘以下表中的并

列系数。

电缆系数	1	2	3	4	5	6	7	8
并列系数	1.00	0.92	0.87	0.84	0.82	0.81	0.80	0.79

表 2-30 1 千伏 VV、VLV 型无铠装聚氯乙烯  
聚乙烯绝缘电缆安全载流量

(单位: A)

导线 截面 /mm <sup>2</sup>	单 芯		二 芯		三 芯		四 芯	
	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯
1	18		15		12			
1.5	23		19		16			
2.5	32	24	26	20	22	16		
4	41	31	35	26	29	22	29	22
6	54	41	44	34	38	29	38	29
10	72	55	60	46	52	40	51	40
16	97	74	79	61	69	53	68	53
25	122	102	107	83	93	72	92	71
35	162	124	124	95	113	87	115	89
50	204	157	155	120	140	108	144	111
70	253	195	196	151	175	135	178	136
95	272	214	238	182	214	165	218	168
120	356	276	273	211	247	191	252	195
150	410	316	315	242	293	225	297	228
185	465	358			332	257	341	263
240	552	425			396	306		
300	636	490						
400	757	589						
500	886	680						
620	1025	787						
800	1338	934						

注: 导线最高允许温度 65 C, 空气中敷设, 环境温度 25 C。

表 2-31 1 千伏 VV29、VLV29、VV30、VLV30、  
VV50、VLV50、VV59、VLV59 型铠装

聚乙烯电缆安全载流量 (单位: A)

导线 截面 /mm <sup>2</sup>	单 芯		二 芯		三 芯		四 芯	
	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯
4			36	27	31	23	30	23
6			45	35	39	30	39	30
10	76	58	60	46	52	40	52	40
16	100	77	81	62	71	54	70	54
25	135	104	106	81	96	73	94	73
35	164	126	128	99	114	88	119	92
50	205	158	160	128	144	111	149	115
70	253	195	197	152	179	138	184	141
95	311	239	240	185	217	167	226	174
120	356	276	278	215	252	194	260	201
150	410	316	319	246	292	225	301	231
185	466	359			333	257	345	266
240	551	424			392	305		
300	632	486						
400	764	587						
500	882	677						
625	1032	789						
800	1208	931						

注: 1. 导线最高允许温度 65 C, 空气中敷设, 环境温度 25 C; 2. 单芯铠装电缆不用于交流系数, 表列为直流电流值。

表 2-32 金属圆梗 (铜、铝) 载流量

圆梗直径 /mm	最大允许电流/A		圆梗直径 /mm	最大允许电流/A	
	铜 梗	铝 梗		铜 梗	铝 梗
6	135	105	16	535	420
7	170	130	18	635	490
8	205	160	19	685	530
10	280	215	20	735	570
12	365	280	21	790	610
14	445	345	22	840	650
15	495	380	25	1005	780

注：表中最大允许电流，最高温度为 70℃，周围空气温度为 35℃。如果实际空气温度不是 35℃，金属圆梗的载流量应乘以下表中的校正系数。

周围空气温度/℃	5	10	15	20	25	30
校正系数	1.36	1.31	1.25	1.20	1.13	1.07
周围空气温度/℃	35	40	45	50	55	
校正系数	1.00	0.93	0.85	0.76	0.66	

表 2-33 导线载流量温度校正系数

导线最高允许温度 $t_1/^\circ\text{C}$	环境温度 $t_0/^\circ\text{C}$					
	-5	0	+5	+10	+15	+20
+70	1.29	1.24	1.2	1.15	1.11	1.05
+90	2.14	1.95	1.14	1.11	1.07	1.04
导线最高允许温度 $t_1/^\circ\text{C}$	环境温度 $t_0/^\circ\text{C}$					
	+25	+30	+35	+40	+45	+50
+70	1	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67
+90	1	0.96	0.92	0.88	0.83	0.79

$$S = I_{\max} / j_n$$

线路的最大负荷利用系数  $T_{\max}$  一般可按

一班制企业  $T_{\max} = 1800 \sim 2500\text{h}$

二班制企业  $T_{\max} = 2500 \sim 4500\text{h}$

三班制企业  $T_{\max} = 5000 \sim 7000\text{h}$

(3) 按允许电压损失选择及校验导线、电缆截面公式一

$$S = \frac{\rho \sum_{i=1}^n PL}{U_c \cdot \Delta U_a}$$

公式二

$$\text{三相系统: } S = \frac{\sqrt{3} \rho \sum_{i=1}^n IL}{10U_c \cdot \Delta U \%}$$

$$\text{单相系统: } S = \frac{2\rho \sum_{i=1}^n IL}{10U_c \cdot \Delta U \%}$$

$$\Delta U_a = \Delta U_{u,r} - \Delta U_r$$

$$\Delta U_r = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i X}{U_c} = \frac{X_0 \sum_{i=1}^n Q_i L}{U_c}$$

式中  $S$ ——导线截面 ( $\text{mm}^2$ );

$\rho$ ——导线材料的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ );

$U_e$ ——线路额定电压 (kV)。三相为线压，单相为相压；

$P$ ——通过每段线路的有功功率 (kW)；

$L$ ——每段线路长度 (km)；

$\Delta U_r$ ——线路电阻中电压损失 (V)；

$\Delta U_{\text{允}}$ ——线路允许电压损失 (V)；

$\Delta U_x$ ——线路电抗部分电压损失 (V)；

$X_0$ ——导线、电缆单位电抗 ( $\Omega/\text{km}$ )；

$Q$ ——通过每段线路的无功功率 (kvar)， $Q = P \tan \varphi$ ；

$I$ ——通过每段线路的电流 (A)；

$\Delta U\%$ ——线路允许电压损失率。

其他符号同前。

在截面未确定时，可先假定电抗值（平均值）。电缆的电抗约为  $0.08\Omega/\text{km}$ ，架空线的电抗为  $0.36\sim 0.42\Omega/\text{km}$ 。

(4) 按机械强度选择导线截面 根据机械强度允许值，确定出最小截面。表 2-34，示出导线的最小截面值。

## 2. 低压供电线路导线的快速选择

在低压 380/220V 三相供电系统中，各相负荷均匀分配， $\cos\varphi=0.8$ ，允许电压损失  $\leq 7\%$  的条件下，可用表 2-35 直接查出导线最大输电距离和截面。

表 2-34 根据机械强度

导线	用途	导线最小截面 /mm <sup>2</sup>	
		铝线	铜线
照明装置 用导线	户内	2.5	0.5
	户外	2.5	1
双芯软电线	用于吊灯		0.35
	用于移动或生活用电设备		0.5
多芯软线及软电缆	用于移动式生产设备		1
绝缘导线	架在户内间距 2m 以下的 绝缘子上	2.5	1
裸导线	户外	16	2.5
	户内	4	4
绝缘导线	户外沿墙敷设	4	2.5
	户外其他方式	10	4
绝缘导线	穿管	2.5	1
	木板内	2.5	1
进户线		2.5	1.5



表 2-35 导线最大输送距离和截面选择

年最大负荷 小时数/h	经济电流 密度 $j_n$ (A/mm <sup>2</sup> )	输电最大 距离/m	输送功率/ (kW)公式 $P = \frac{j_n S}{1.9}$	经济导线 截面/(mm <sup>2</sup> ) $S = \frac{1.9 P}{j_n}$
裸 导 线				
3000 以下	1.65	403	0.868S	1.15P
3000~5000	1.15	578	0.61S	1.65P
5000 以上	0.90	739	0.47S	2.11P
铝 芯 电 缆				
3000 以下	1.92	346	1.01S	0.99P
3000~5000	1.72	386	0.91S	1.10P
5000 以上	1.54	432	0.81S	1.23P
铜 芯 电 缆				
3000 以下	2.50	411	1.32S	0.76P
3000~5000	2.25	490	1.18S	0.84P
5000 以上	2.0	552	1.05S	0.95P

### 三、电力电缆的选择

#### 1. 电缆选择的一般原则

(1) 电缆的额定电压等于或大于所在网络的额定电压，电缆的最高工作电压不得超过其额定电压的 15%。

(2) 在移动或剧烈振动的场所选择铜芯电缆，一般情况下采用铝芯电缆。

(3) 敷设在电缆构筑物内的电缆,宜选用裸铠装电缆或铝包裸塑料护套电缆。

(4) 直埋电缆采用带护层的铠装电缆或铝包裸塑料护套电缆。

(5) 移动机械采用重型橡套电缆。

(6) 腐蚀性土壤一般不埋电缆。否则应采用特殊的防腐护套电缆。

(7) 垂直或高差较大处敷设电缆,应选用不滴流电缆。

(8) 环境温度超过  $40^{\circ}\text{C}$  时,不宜采用橡皮绝缘电缆。

表 2-36 示出电力电缆的品种和型号。

表 2-37 示出常用电缆的型号、特性及使用范围。

## 2. 电缆敷设的一些规定

(1) 电缆与热力管道及其他管道之间应有一定距离,必要时应有隔热措施。电缆与热力管道平行时要求距离为  $2\text{m}$ ,交叉时为  $0.5\text{m}$ 。

### (2) 电缆直埋深度及相互距离

① 直埋深度  $1\sim 35\text{kV}$  电缆直埋深度不小于  $0.7\text{m}$ ,  $35\text{kV}$  以上电缆直埋深度不小于  $1\text{m}$ 。

② 电缆间净距  $10\text{kV}$  以上电缆净距不小于  $0.1\text{m}$ ,  $10\sim 35\text{kV}$  电缆间净距不小于  $0.25\text{m}$ 。

③ 电缆相互交叉时的距离不小于  $0.5\text{m}$ 。

### (3) 电缆的最小允许弯曲半径

表 2-36 电力电缆的品种及型号

绝缘类型	电缆名称	电压等级 /kV	允许最高工作温度 /C	代表产品型号
油浸纸 绝缘 电 缆	1. 普通粘性浸渍电缆 统包型	1~35	1~3kV 6kV	80 65
	分相铅(铝)包型		10kV	60
	2. 不滴流电缆	1~35	20~35kV 65~80	50
	统包型			ZLL, ZL, ZLQ, ZQ ZLLF, ZLQF, ZQF
	分相铅(铝)包型			ZLQD, ZQD ZLLDF, ZQDF
	3. 自容式充油电缆	110~750	80~85	ZQCY
4. 钢管充油电缆	110~750	80~85		
5. 钢管压气电缆	110~220	80		
6. 充气电缆	35~110	75		
塑料绝 缘电缆	7. 聚氯乙烯电缆	1~10	65	VLV, VV
	8. 聚乙烯电缆	6~220	70	YLV, YV
	9. 交联聚乙烯电缆	6~220	10kV 及以下 90 20kV 及以上 80	YJLV, YJV

(续)

绝缘类型	电缆名称	电压等级 /kV	允许最高工作温度 /C	代表产品型号
橡皮绝缘电缆	10. 天然丁苯橡皮 电缆	0.5~6	65	XLQ, XQ, XLV, XV, XLHF, XLF
	11. 乙丙橡皮电缆	1~35	80~85	
	12. 丁基橡皮电缆	1~35	80	
气体绝缘电缆	13. 压缩气体绝缘电 缆	220~500	90	
新型电缆	14. 低温电缆 15. 超导电缆			

表 2-37 常用电缆型号特性及使用范围

序号	电缆型号		名称	主要用途
	铜心	铝心		
1	ZQ	ZLQ	纸绝缘裸铅包电力电缆	敷设在室内、沟道中及管子内，对电缆应没有机械损伤，且对保护层应有中性环境
2	ZQ1	ZLQ1	纸绝缘铅包麻被电力电缆	敷设在土壤中，其它条件同上
3	ZQ2	ZLQ2	纸绝缘铅包钢带铠装电力电缆	敷设在土壤中，能承受机械损伤，但不能受大的拉力
4	ZQ20	ZLQ20	纸绝缘铅包裸钢带铠装电力电缆	敷设在室内、沟道中及管子内，其他条件同上
5	ZQ3	ZLQ3	纸绝缘铅包细钢丝铠装电力电缆	敷设在土壤中，能承受机械损伤及大的拉力
6	ZQ30	ZLQ30	纸绝缘铅包裸细钢丝铠装电力电缆	敷设在室内及矿井中，其他条件同上
7	ZQ5	ZLQ5	纸绝缘铅包粗钢丝铠装电力电缆	敷设在水中，能承受较大的拉力

(续)

序号	电缆型号		名称	主要用途
	铜心	铝心		
8	ZQF2	ZLQF2	纸绝缘分相铅包钢带铠装电力电缆	敷设条件同 ZQ2
9	ZQF20	ZLQF20	纸绝缘分相铅包裸钢带铠装电力电缆	敷设条件同 ZQ20
10	ZQF5	ZLQF5	纸绝缘分相铅包粗钢丝铠装电力电缆	敷设条件同 ZQ5
11	ZL	ZLL	纸绝缘裸铝包电力电缆	敷设在干燥的户内、沟管中, 电缆不能承受机械外力作用, 且对铝层应有中性环境
12	ZLL11	ZLL11	纸绝缘铝包裸塑料护套电力电缆	敷设在铝保护层有腐蚀的沟管或土壤中, 电缆不能承受机械外力的作用

(续)

序号	电缆型号		名称	主要用途
	铜心	铝心		
13	ZL12	ZLL12	纸绝缘铝包钢带铠装一级防腐电力电缆	敷设在铝保护层有腐蚀的土壤中,电缆能承受机械外力作用,但不能承受拉力
14	ZL120	ZLL120	纸绝缘铝包裸钢带铠装一级防腐电力电缆	敷设在铝保护层有腐蚀的室内及沟管中,其他条件同上
15	ZL13	ZLL13	纸绝缘铝包细钢丝铠装一级防腐电力电缆	敷设在铝保护层有腐蚀的土壤和水中,电缆能承受机械外力作用,亦能承受相当的拉力
16	ZL15	ZLL15	纸绝缘铝包粗钢丝铠装一级防腐电力电缆	敷设在铝保护层有腐蚀的土壤中,电缆能承受较大的拉力
17	ZQD3	ZLQD3	纸绝缘铅包细钢丝铠装不滴流电力电缆	敷设在土壤及空气中,电缆能承受机械外力作用及相当的拉力,用于垂直敷设或高差较大处

(续)

序号	电缆型号		名称	主要用途
	铜心	铝心		
18	ZQD30	ZLQD30	纸绝缘铅包裸钢丝铠装不滴流电力电缆	敷设在室内矿井中,其他条件同上
19	ZQD5	ZLQD5	纸绝缘铅包粗钢丝铠装不滴流电力电缆	敷设在水中或电缆承受较大拉力的地方,用于垂直敷设或位差较大处
20	XQ	XLQ	橡皮绝缘铅包电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中,电缆不能受推动和机械外力作用,且对铅护层应有中性环境
21	XQ2	<u>XLQ2</u>	橡皮绝缘铅包钢带铠装电力电缆	敷设在地下(隧道),电缆不能承受大的拉力
22	<u>XQ20</u>	<u>XLQ20</u>	橡皮绝缘铅包钢带铠装电力电缆	敷设在室内,隧道内及管道中,电缆不能承受大的拉力



(续)

序号	电缆型号		名称	主要用途
	铜心	铝心		
23	VV	VLV	聚氯乙烯绝缘及护套电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中 敷设在地下(隧道), 电缆不能承受大的拉力
24	VV <sub>2</sub>	VLV <sub>2</sub>	聚氯乙烯绝缘及护套钢带铠装电力电缆	
25	VV <sub>20</sub>	VLV <sub>20</sub>	聚氯乙烯绝缘及护套裸钢带铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中, 电缆不能承受大的拉力
26	VV <sub>3</sub>	VLV <sub>3</sub>	聚氯乙烯绝缘及护套细钢丝铠装电力电缆	敷设在地下, 电缆能承受机械外力作用, 并能承受相当的拉力
27	VV <sub>30</sub>	VLV <sub>30</sub>	聚氯乙烯绝缘及护套裸细钢丝铠装电力电缆	敷设在室内及矿井中, 其他条件同上
28	YHC		重型橡套电缆	用于 500V 及以下移动式受电装置, 能承受较大的机械外力作用
29	CHY		船用橡皮绝缘耐油橡套电缆	固定敷设于瓦斯继电器、变压器温度表等回路中

(续)

序号	电缆型号		名称	主要用途
	铜心	铝心		
30	XV <sub>20</sub>	XLV <sub>20</sub>	橡皮绝缘聚氯乙烯护套裸钢带铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中，能承受机械外力作用，但不能承受大的拉力
31	YJV		交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中，电缆不能承受机械外力作用
32	YJC <sub>2</sub>		交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套钢带铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中，电缆能承受机械外力作用，但不能承受大的拉力
33			交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套裸钢带铠装电力电缆	同 YJV <sub>2</sub>

注：1. 电缆型号下有横线者为火电厂常用电缆。

2. 电缆型号字母及数字所代表的意义：

Z—纸绝缘	X—橡皮绝缘	V—塑料绝缘及护套	L—铝包
T—铜心(省略)	Q—铅包	L—铝心	D—不滴流
P—干绝缘	F—分相铅包	C—船用	HF—非燃性橡套
Y—移动式	H—橡套	C—重型	1—麻被
2—铜带铠装	20—裸钢带铠装	3—细钢丝铠装	30—裸细钢丝铠装
5—粗钢丝铠装	11—防腐护层	12—钢带铠装有防腐层	120—裸钢带铠装

① 普通粘性浸渍电缆 多芯电缆的最小弯曲半径为  $15D$ ；单芯电缆最小允许弯曲半径  $25D$ 。

② 不滴流电缆 单芯和多芯电缆最小允许弯曲半径为  $25(D+d)$ ；分相电缆的最小允许弯曲半径为  $20(D+d)$ 。

③ 塑料、橡皮电缆的最小允许弯曲半径为  $10D$ 。

④ 自容式充油电缆 单芯电缆的最小允许弯曲半径为  $25(D+d)$ ；三芯电缆为  $20(D+d)$ ；平铝层电缆最小允许弯曲半径为  $36(D+d)$ 。

其中， $D$  为电缆金属护套外径； $d$  为电缆导体外径。

(4) 电缆敷设时的环境温度 敷设电缆时，如环境温度低于下列数值，应将电缆预热，否则不允许敷设。

- ① 35kV 以下油浸电缆，不能低于  $0^{\circ}\text{C}$ ；
- ② 橡皮绝缘沥青浸渍护层电缆，不能低于  $-7^{\circ}\text{C}$ ；
- ③ 橡皮绝缘聚氯乙烯护套电缆，不能低于  $-15^{\circ}\text{C}$ ；
- ④ 橡皮绝缘裸铅包电缆，不能低于  $-20^{\circ}\text{C}$ ；
- ⑤ 自容式充油电缆，不能低于  $-10^{\circ}\text{C}$ 。

### 3. 电缆截面选择计算及校验

(1) 按电压选择电缆 即按一般原则的第一条选择电缆。

(2) 按经济电流密度选择电缆 计算方法与导线截面选法相同。

## (3) 按线路最大长期负荷电流校验电缆截面

$$I_{ur} \geq I_{zmax}$$

式中  $I_{ur}$ ——电缆允许负载电流 (A)；

$I_{zmax}$ ——电缆中长期通过的最大负载电流。

电缆允许的长期工作电流，应查有关电缆方面的手册。

## 四、电缆故障点的测定

## 1. 电阻回线法

电阻回线法适用于电缆绝缘对地击穿，且只有少数芯绝缘较好的场合，其原理接线图如图 2-13 所示。

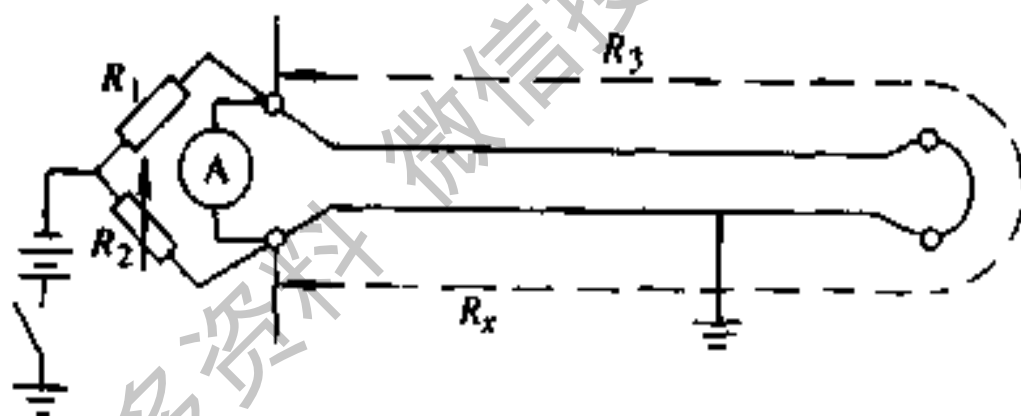


图 2-13 电阻回线法接线图

可选择电缆任意端测量。取完好芯线和接地芯线各一根，对端短接。连线截面不小于电缆截面，然后在本端同样两根芯线上，接入桥臂电阻  $R_1$  和  $R_2$  及电源、检流计 A 等。这样，电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_x$  组成了桥路的四个臂。其中  $R_3$  和  $R_x$  就是所接人的两缆心的电阻。当故障点不同时， $R_3$  和  $R_x$  的比值也不同，但  $R_3 + R_x = 2R$  为

常数，其值为两根芯线的电阻之和。

调整  $R_1$  或  $R_2$ ，使桥路处于平衡状态，根据直流电桥原理得

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}$$

一般情况下，电阻与长度成正比，因此有：

$$L_x = 2L \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

式中  $L_x$ ——从测量端到故障点的距离；

$L$ ——所测电缆长度。

## 2. 电容法

电容法适用于电缆芯断路，且对地绝缘又较好的场合。铠装电缆或铝皮电缆，可使用交流或直流电桥法；橡胶、塑料皮电缆，还可采用电子管（晶体管）电压表法或音频电容探测法。

(1) 交流电桥法 适用于电缆芯断路，且被测芯线接地过渡电阻不小于  $5\text{k}\Omega$  的场合。测量仪器采用交流西林电桥或万能电桥，测量原理接线图如图 2-14 所示。

用交流电桥时，电源为工频  $50\text{Hz}$ ，用万能电桥时，电源为音频  $800\sim 1000\text{Hz}$ ，用耳机代替检流计。

用万能电桥时，最好取  $R_A = R_B$ ， $R = R_x$ ，适当调整电容  $C$  使电桥平衡（耳机中声音最小），则  $C_x = C$ 。用同样办法，也可测出  $C_1$  和  $C_2$ ，然后根据电容与电缆长度成

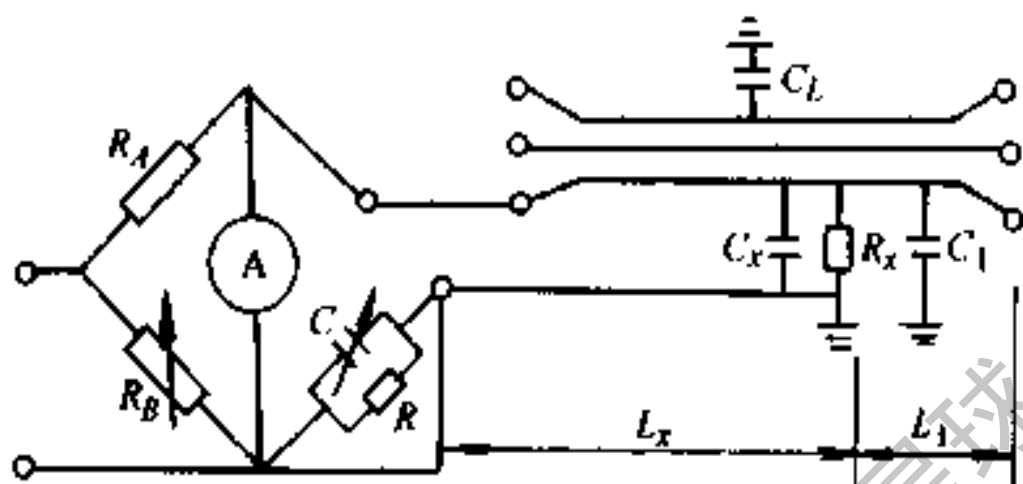


图 2-14 交流电桥法接线图

正比的原理，可求得

$$L_x = LC_x / C_L$$

$$L_1 = LC_1 / C_2$$

(2) 交流电压电流表法 本法的原理图如图 2-15 所示。

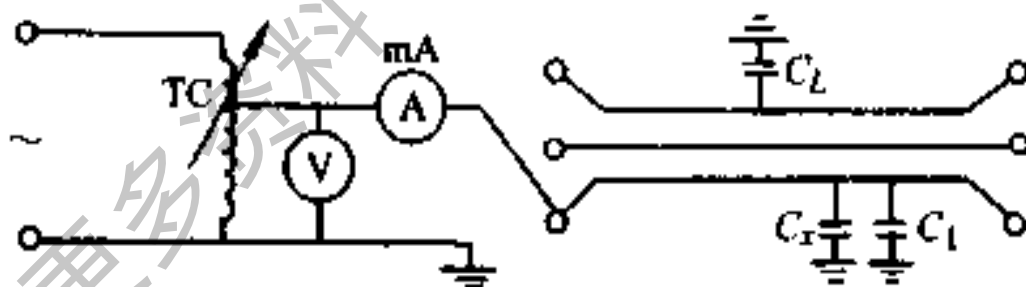


图 2-15 交流电压电流表法接线图

分别测出某一固定电压下各电容的电流值，然后根据电容电流与电容成正比的关系，可得：

$$L_x = LI_x / I_L$$

$$L_1 = LI_1 / I_L$$

所加电压的选择随电缆类型和长度而定，以毫安表能准确读数为准。

(3) 直流电容法 适用于缆芯断路且绝缘较好的场合。测量原理图如图 2-16 所示。

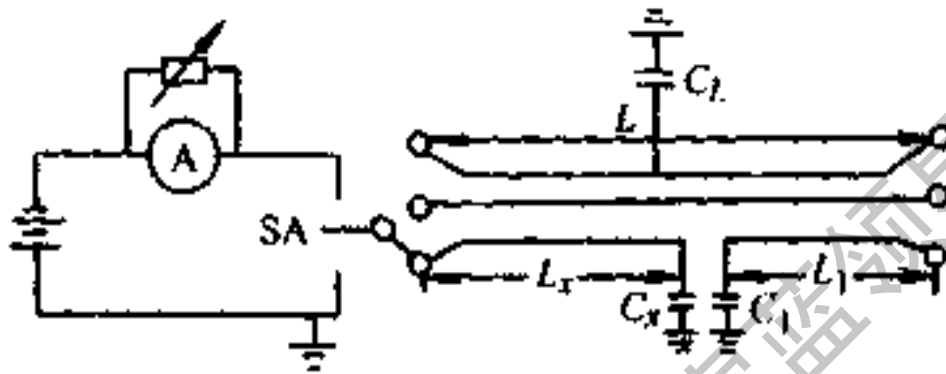


图 2-16 直流电容法接线图

图中电流表为一冲击检流计。检流计的最大摆角与电量成正比。利用开关 SA 分别把检流计轮流接入  $C_L$ 、 $C_x$  和  $C_1$  上，从每次的最大偏转角  $\alpha_x$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_L$ ，就可求出

$$L_x = L \alpha_x / \alpha_L$$

$$L_1 = L \alpha_1 / \alpha_L$$

用该法时要注意电容上不能有初始电荷量。为此，每次测量前应将电容短路放电 3min 以上。

(4) 电子管（晶体管）电压表法 适用于橡胶、塑料外皮绝缘的电缆芯线断路的情况。测量原理图如图 2-17 所示。

变压器次级 36V 加在故障芯线上，其余芯线接地。手持检查器 S，从加压端沿电缆移动，在未滑到断路点之

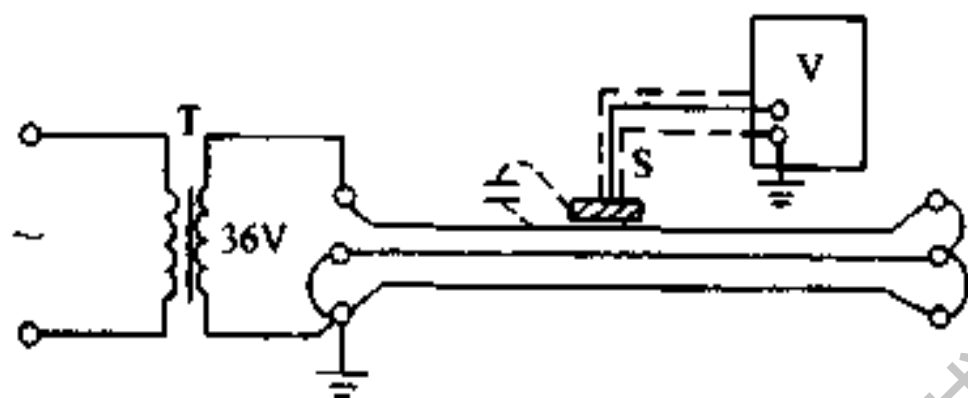


图 2-17 电子管电压表法接线图

前，由于芯线带电，在芯线与检查器之间电容耦合作用下，电压表有明显指示。当S滑到断路点时，电压表指示突然减小甚至到零。由此可准确找到断路点。

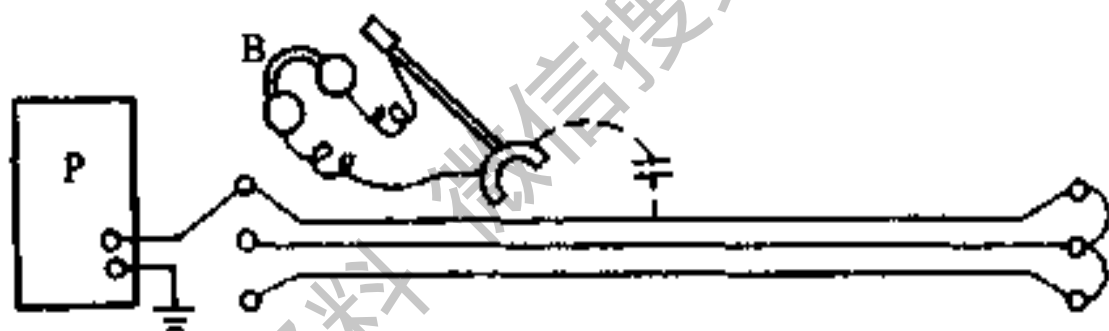


图 2-18 音频电容法接线图

(5) 音频电容检测法 (图 2-18) 此法适用范围同电压表法，只是电源改用 400~1000Hz 的音频信号发生器 P，检查器改用铜或铝制成的探叉 S，电压表改用高阻抗耳机 B。该方法测量灵敏度较高。在探叉滑动的过程中，耳机无声处，便是电缆芯线的断路点。



# 第三章 变 压 器

## 第一节 基本原理及计算

### 一、变压器的电压比和容量

电压比

$$U_1 = E_1 = 4.44fW_1\Phi_{m}$$

$$U_2 = E_2 = 4.44fW_2\Phi_{m}$$

电压比用  $K$  表示，为

$$K = K_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}$$

因为  $W_1I_1 = W_2I_2$

所以  $K = K_{12} = \frac{I_2}{I_1}$

式中  $E_1$ 、 $E_2$ ——变压器一次侧和二次侧的感应电势；

$f$ ——电源频率；

$W_1$ 、 $W_2$ ——一次侧和二次侧绕组的匝数；

$\Phi_m$ ——变压器中铁心磁通的最大值；

$I_1$ 、 $I_2$ ——变压器一次侧和二次侧电流值。

变压器的容量

单相变压器的容量为  $S = U_1I_1 = U_2I_2$

三相变压器的容量为  $S = \sqrt{3}U_1I_1 = \sqrt{3}U_2I_2$

## 二、变压器基本参数及计算

### 变压器的等效电阻

$$R_{12} = \frac{P_d}{3I_{1c}^2} \times 10^3 = \frac{P_d U_{1c}^2}{S_c^2} \times 10^3$$

$$R_{21} = \frac{P_d}{3I_{2c}^2} \times 10^3 = \frac{P_d U_{2c}^2}{S_c^2} \times 10^3$$

式中  $R_{12}$ 、 $R_{21}$ ——变压器每相电阻折算到一次侧值和二次侧值 ( $\Omega$ )；

$P_d$ ——变压器额定电流时的铜损耗 (kW)，可由产品目录中查到；

$I_{1c}$ 、 $I_{2c}$ ——一次侧和二次侧额定电流值 (A)；

$U_{1c}$ 、 $U_{2c}$ ——一次侧和二次侧额定电压 (kV)；

$S_c$ ——变压器额定容量 (kV·A)。

### 变压器的等效漏电抗

$$X_D = U_d \% \frac{10S_c}{3I_c^2} = U_d \% \frac{10U_c}{\sqrt{3}I_c} = U_d \% \frac{10U_c^2}{S_c}$$

式中  $X_D$ ——变压器每相等效漏抗 ( $\Omega$ )，折算到一次侧时用  $X_{D12}$  表示，折算到二次侧时用  $X_{D21}$  表示；

$I_c$ 、 $U_c$ ——折算到一次侧（或二次侧）的电流与电压值 (A, kV)；

$U_d\%$ ——变压器阻抗电压百分数，可由产品目录中查得；

$S_r$ ——同前。

### 三、电压变动率

$$\epsilon\% = \frac{U_{2r} - U_2}{U_2} \times 100\%$$

式中  $U_2$ ——负载时二次侧电压；

$U_{2r}$ ——同前

近似计算中：

$$\epsilon\% = \beta (U_a\% \cos\varphi_2 + U_r\% \sin\varphi_2),$$

$$\beta = S/S_r$$

式中  $\beta$ ——变压器负载率；

$S$ ——变压器实际输出功率 (kVA)；

$S_r$ ——同前 (kVA)；

$U_a\%$ 、 $U_r\%$ ——变压器电阻电压率和电抗电压率；

$\cos\varphi_2$ ——负荷功率因数。

### 四、效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

当略去变压器中阻抗电压影响时，

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2}{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_d} \times 100\%$$

式中  $P_2$ ——变压器输出有功功率 (kW)；

$P_1$ ——变压器输入有功功率 (kW)；

$P_0$ ——空载损耗，即铁损 (kW)；

$P_d$ ——短路损耗，即铜损 (kW)；

其他符号同前。

通常大型变压器的效率一般在 99% 以上，而中小型变压器则在 95%~98% 左右。

### 五、自耦变压器基本计算

#### 1. 单相自耦变压器：

单相自耦变压器原理如图 3-1 所示。一部分绕组为一、二次所共用，称为并联绕组，另一部分非共用，称为串联绕组。

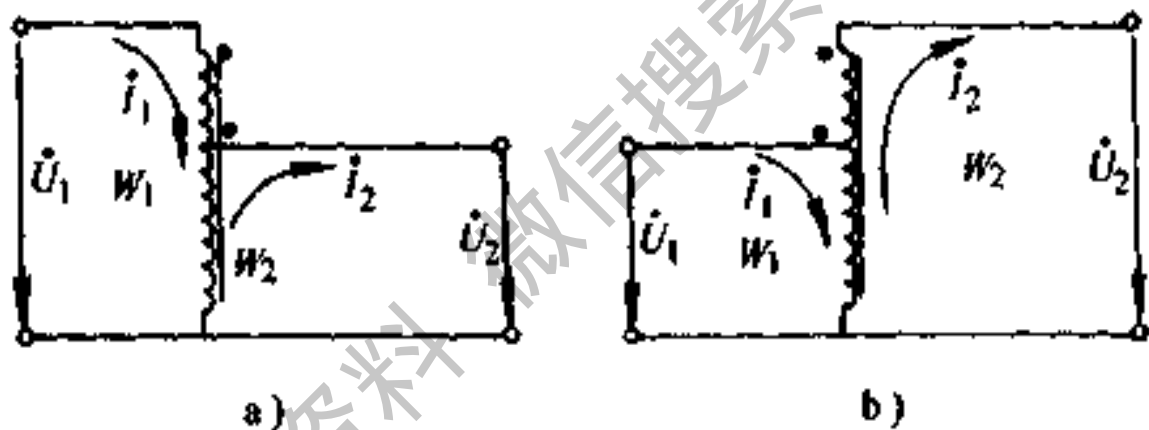


图 3-1 单相自耦变压器原理图

电压比：在忽略阻抗电压时

$$K = K_{12} = U_1 / U_2 = W_1 / W_2$$

忽略空载电流时

$$K = I_2 / I_1$$

串联绕组容量

$$S_1 = (U_1 - U_2) I_1$$

### 并联绕组容量

$$S_2 = U_2 (I_2 - I_1)$$

因  $U_1 I_1 = U_2 I_2$  得  $S_1 = S_2$

$S_1$ 、 $S_2$  的大小是改变绕组抽头为某一电压档的位置而决定的。在各抽头中，以容量值最大者称为自身容量，而二次侧容量 ( $U_2 I_2$ ) 的额定值称为输出功率或线路容量。

### 绕组分配比

$$\alpha = \frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{I_2 - I_1}{I_2}$$

式中  $U_1$ 、 $U_2$ ——一次侧和二次侧电压 (kV)；

$I_1$ 、 $I_2$ ——一次侧和二次侧电流 (A)；

$W_1$ 、 $W_2$ ——一次侧和二次侧绕组匝数；

$K$ ——自耦变压器的变比。

## 2. 三相自耦变压器

三相自耦变压器有降压用的，有升压用的。现在介绍降压用自耦变压器。

(1) 内接双 $\Delta$ 联结 (图 3-2)；

对此种接法，各量之间关系如下：

$$I_A + I_B = I_2, \quad I_B = \frac{U_1 - U_B}{U_1} I_2$$

$$I_A = \frac{U_B}{U_A} I_B, \quad U_B = \frac{U_1}{2} + \sqrt{\frac{U_2^2}{3} - \frac{U_1^2}{12}}$$

$$\alpha = \frac{U_1^2 - U_2^2}{\sqrt{3} U_1 U_2}$$

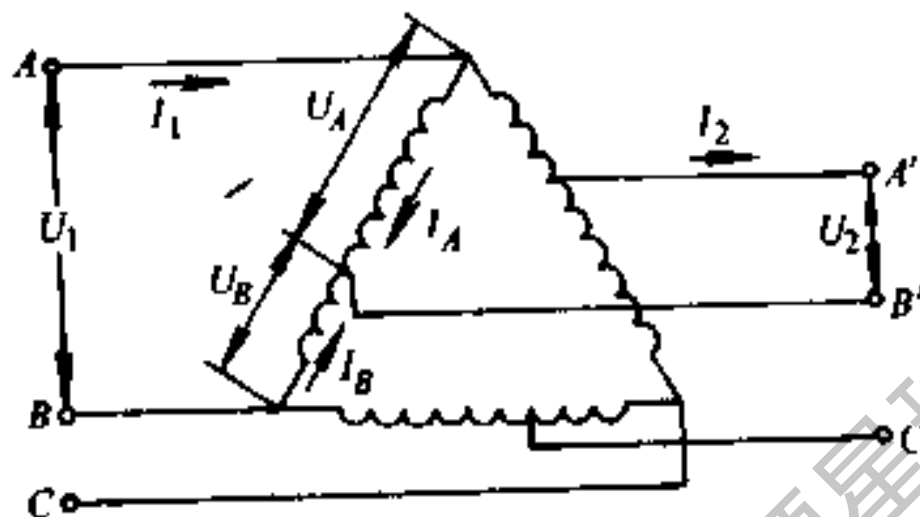


图 3-2 内接双△联结

(2) 延边△联结 (图 3-3):

各量之间关系如下:

$$U_1^2 = 3U_A^2 + 3U_A U_2 + U_2^2$$

$$U_A = -\frac{U_2}{2} + \sqrt{\frac{U_1^2}{3} - \frac{U_2^2}{12}}$$

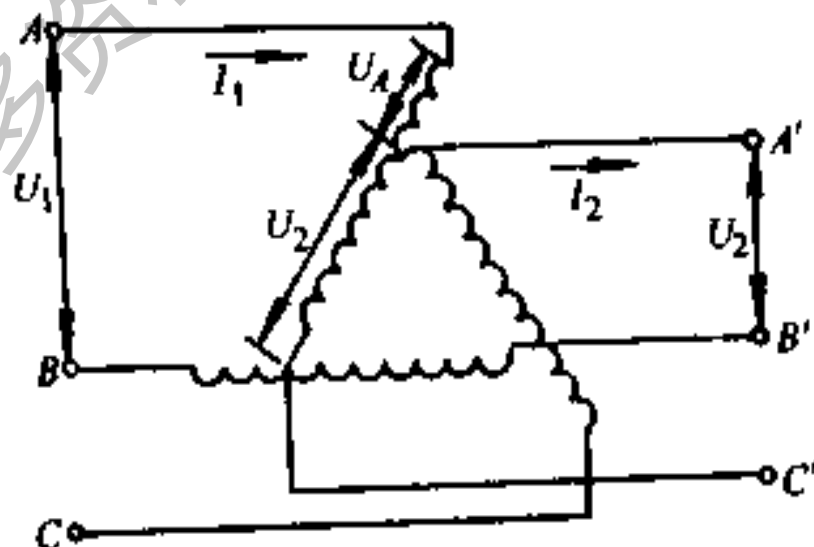


图 3-3 延边△联结

$$\alpha = \frac{\sqrt{3} U_A}{U_1}$$

(3) 丫联接 (图 3-4)

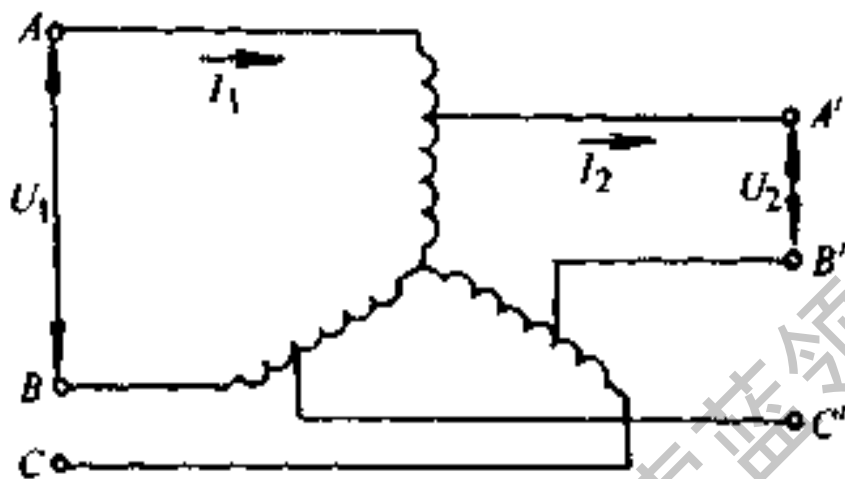


图 3-4 丫联结

各量之间关系如下。

$$\text{线路容量} = \sqrt{3} U_1 I_1 = \sqrt{3} U_2 I_2$$

$$\text{自身容量} = \frac{3}{\sqrt{3}} (U_1 - U_2) I_1$$

$$\alpha = \frac{U_1 - U_2}{U_1}$$

## 六、变压器负载率计算

变压器负载率可按下式计算

$$\beta = \frac{S}{S_r} = \frac{I_2}{I_{2r}} = \frac{P_2}{S_r \cos \phi_2}$$

当测量  $I_2$  有困难时, 也可近似用  $I_1/I_{1r}$  来求负载率。

变压器最大效率时负载率, 即最佳负载率可按下式计算:

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0 + KQ_0}{P_d + KQ_d}}$$

$$Q_0 = I_0\% \cdot S_e \times 10^{-2}$$

$$Q_d = U_d\% \cdot S_e \times 10^{-2}$$

式中  $Q_0$ ——变压器空载无功损耗 (kvar);

$Q_d$ ——变压器负载无功损耗 (kvar);

$I_0\%$ ——变压器空载电流百分数, 可由产品目录查得;

$K$ ——无功经济当量 (kW/kvar), 是指变压器联接处的无功经济当量。表 (3-1) 给出了无功经济当量的概略值, 供参考。

其他符号同前。

表 3-1 无功经济当量  $K$  值

变压器安装地点特征	$K / (\text{kW/kvar})$	
	最大负荷时	最小负荷时
直接由发电厂母线供电的变压器	0.02	0.02
由发电厂供电的线路变压器	0.07	0.04
由区域线路供电的 35~110kV 的降压变压器	0.1	0.06
由区域线路供电的 10~6/0.4kV 的降压变压器	0.15	0.1



约略估计时,  $\beta_m = \sqrt{P_0/P_d}$ , 对国产变压器而言,  $\beta_m$  在 0.4~0.6 之间。

这样变压器的最佳负荷  $S_{rj}$  为

$$S_{rj} = \beta_m S_r$$

而最大效率可写成

$$\eta_{\max} = \left[ 1 - \frac{2P_0}{\sqrt{P_0/P_d} S_r \cos \varphi_2 + 2P_0} \right] \times 100\%$$

### 七、变压器损耗的计算

1. 变压器在任何负载率下的有功损耗

$$\Delta P_b = P_0 + \beta^2 P_d$$

2. 变压器在任何负载率下的无功损耗

$$\Delta Q_b = Q_0 + \beta^2 Q_d$$

3. 变压器综合损耗

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P_b &= \Delta P_b + K Q_b \\ &= P_0 + \beta^2 P_d + K (Q_0 + \beta^2 Q_d) \end{aligned}$$

式中符号同前。

### 八、变压器空载试验和短路试验计算

1. 空载试验计算

图 3-5 示出空载试验的接线图。a)、b) 为三相电源接线方法, c)、d) 为单相电源接线方法。

三相电源时

$$P_0 = K_{TV1} K_{TA1} P_1 - K_{TV2} K_{TA2} P_2$$

式中  $P_0$ ——空载损耗 (kW);

$K_{TV1}$ 、 $K_{TV2}$ ——两电压互感器倍率;

$K_{TA1}$ 、 $K_{TA2}$ ——两电流互感器倍率;

$P_1$ 、 $P_2$ ——低功率因数瓦特表读数 (kW)。

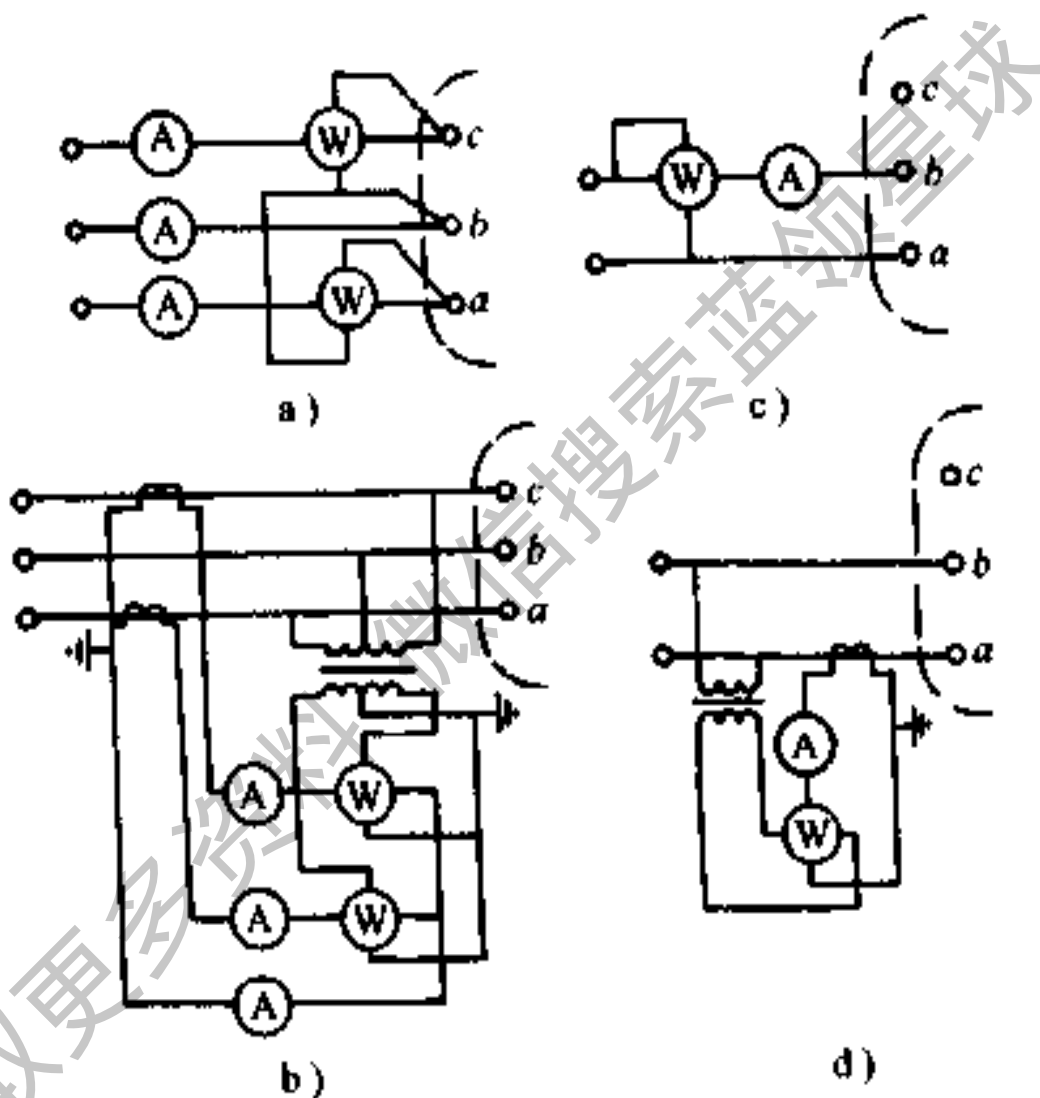


图 3-5 变压器容载试验接线图

空载电流百分数

$$I_0\% = \frac{I_{0a} + I_{0b} + I_{0c}}{3I_{2e}} \times 100\%$$

式中  $I_{0a}$ 、 $I_{0b}$ 、 $I_{0c}$ ——三相线电流 (A)。

单相电源时

当外加电压为  $\frac{2}{\sqrt{3}}U_{2r}$  时

$$P_0 = \frac{P_{0ab} + P_{0k} + P_{0ca}}{2}$$

空载电流百分数按下式计算

$$I_0\% = \frac{I_{0ab} + I_{0bc} + I_{0ca}}{3I_{2r}} \times 100\%$$

## 2. 短路试验

短路试验就是将变压器低压侧绕组短路，在另侧绕组加一较小电压，使绕组中电流达到额定值。外加之电压称为短路电压，测得损耗称为短路损耗。

短路试验电流  $I_s$  也可低于额定电流  $I_r$ ，但不能低于  $0.25I_r$ 。这时测得阻抗电压  $U_d$  和短路损耗  $P_d$  可按下式换算到额定电流下的值：

$$U_d \approx \frac{U_d I_r}{I_s}$$

$$P_d \approx \left( \frac{I_r}{I_s} \right)^2 P_d'$$

并按下式换算到相当于  $75^\circ\text{C}$  时的值

$$P_{d75} \approx T P_d$$

$$U_{d75} \approx \sqrt{U_d^2 + \left( \frac{P_d}{10S_e} \right)^2 (T^2 - 1)}$$

式中 温度系数  $T$  可按下式计算

$$\text{铜绕组 } T = \frac{75 + 234.5}{t + 234.5}$$

$$\text{铝绕组 } T = \frac{75 + 225}{t + 225}$$

式中  $t$ ——试验时变压器油温。

如用单相电源测试，则短路损耗可按下式计算：

$$P_d = \frac{P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}}{2}$$

### 3. 变压器额定性能数据的允许偏差（表 3-2）

表 3-2 变压器额定性能数据允许偏差

项 目	允许偏差(%)	适用范围
空载损耗 $P_0$	+15	所有变压器
短路损耗 $P_d$	+10	
总损耗 $\Delta P_z$	+10	
空载电流 $I_0$	+22	
阻抗电压 $U_d$	$\pm 10$	
变比 $K$	$\pm 0.5^{\text{①}}$	变比不小于 3 的变压器
三相直流电阻 不平衡度	线 2 相 4	1600kVA 及以下变压器
	相 2	其他所有变压器

① 变比小于 3 的变压器为  $\pm 1$ 。

### 4. 变压器的绝缘要求

表 3-3~表 3-7 列出绝缘要求及  $\tan\delta$  的数值。

表 3-3 变压器无原始资料时绝缘电阻参考值 (单位:  $M\Omega$ )

电压等级	线圈温度/ $^{\circ}C$		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
	测试项目												
10kV 及以下	允许值 ( $M\Omega$ )	一次对地	675	450	300	200	130	90	60	40	25	18	
		一次对二次											
		二次对地	45	30	20	13	9	6	4	3	2	1	
	良好值 ( $M\Omega$ )	一次对地	1000	675	450	300	200	130	90	60	40	25	
		一次对二次											
		二次对地	68	45	30	20	13	9	6	4	3	2	
20~30 kV	允许值 ( $M\Omega$ )	一次对地	900	600	400	270	180	120	80	50	35	23	
		一次对二次											
	良好值 ( $M\Omega$ )	一次对地	1400	900	600	400	270	180	120	80	53	35	
		一次对二次											

注:对投入运行前的线圈绝缘电阻应不低于制造厂的70%或不低于本表的允许值(此值原

规定不一,本表据最近国家标准)。因温度每差 $10^{\circ}C$ ,绝缘电阻值变化50%,故当测量温度与产品出厂试验时温度不符合时,可按表3-4换算到同一温度 $0^{\circ}C$ 时的数值(即测试值和出厂值各乘于换算系数)来进行比较。

表 3-4 油浸式电力变压器绝缘电阻的温度换算系数

温度差/℃	5	10	15	20	25	30
换算系数	1.2	1.5	1.8	2.3	2.8	3.4
温度差/℃	35	40	45	50	55	60
换算系数	4.1	5.1	6.2	7.5	9.2	11.2

表 3-5 铁心、铁轭螺杆和夹件（轭铁梁）  
的绝缘电阻标准

变压器电压等级/kV	20℃时绝缘电阻最低限值/MΩ
0.4	90
3~10	200
20~35	300

注：绝缘电阻值不应低于初始值的 50%，如无原始值时用本表数值。

表 3-6 油浸式电力变压器线圈的  $\tan\delta$  允许值 (%)

高压线圈电压等级 温度 (℃)	10	20	30	40	50	60	70
35kV 及以下	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	11.0
35kV 以上	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0

注：1. 同一变压器中压和低压线圈的  $\tan\delta$  标准与高压线圈相同。

2. 当测量温度与产品出厂试验温度不同时，可按表 3-4 换算到同一温度的数值来比较。

表 3-7 油浸式电力变压器线圈的  $\tan\delta$  的  
温度换算系数

温度差/°C	5	10	15	20	25	30
换算系数	1.15	1.3	1.5	1.7	1.9	2.2
温度差/°C	35	40	45	50	55	60
换算系数	2.5	3.0	3.5	4.0	4.6	5.3

## 第二节 变压器经济运行计算

### 一、变压器并联运行计算

#### 1. 变压器并联运行的条件

(1) 各变压器具有同样的一次额定电压和二次额定电压，即变比  $K$  相等（允许差别  $\leq \pm 0.5\%$ ）；

(2) 联结方式相同；

(3) 各变压器阻抗电压百分数  $U_d\%$  相等（允许差别  $\leq \pm 10\%$ ）；

(4) 变压器的容量比不应超过 3:1。

#### 2. 变比相等的两台变压器并联运行计算

阻抗电压和额定容量均不等，但变比相等的两台变压器并联运行时，负荷电流按下式分配。

$$\begin{cases} \frac{I_A}{I_B} = \frac{U_{dB}\%}{U_{dA}\%} \cdot \frac{I_{N_A}}{I_{N_B}} \\ I_A + I_B = I \end{cases}$$

式中  $I_A$ 、 $I_B$ ——变压器 A 和 B 所承担的负荷电流；

$I_{AN}$ 、 $I_{BN}$ ——变压器 A 和 B 的额定电流；

$U_{dA}\%$ 、 $U_{dB}\%$ ——变压器 A 和 B 的阻抗电压百分数；

$I$ ——负荷电流。

分析上式，若容量大、阻抗电压小时，总的容量利用的好。若容量相等，阻抗电压不等时，阻抗电压大的变压器满载时，阻抗电压小的变压器将过载；反之，当阻抗电压小的变压器满载时，阻抗电压大的变压器将轻载。这样两台变压器将不能充分利用。

### 3. 电压比不等的两台变压器并联运算

(1) 空载运行时的环流：电压比不等的两台变压器空载运行时，存在着环流，环流使绕组发热，产生损耗。环流大小如下。

$$I_h = \frac{U_1 \left( \frac{1}{K_A} - \frac{1}{K_B} \right)}{j (X_{D2A} + X_{D2B})} \times 10^3$$

式中  $I_h$ ——变比不等的两台变压器空载时的环流 (A)；

$U_1$ ——变压器一次侧的电压 (kV)；

$K_A$ 、 $K_B$ ——变压器 A 和 B 的电压比；

$X_{D2A}$ 、 $X_{D2B}$ ——变压器 A 和 B 每相漏电抗折算到二次侧的值 ( $\Omega$ )；

$j$ ——虚数符号。



(2) 带负荷运行时电流分配,除环流外,还要迭加一个负载的电流分量,即

$$i_{2A} = i \frac{X_{D2B}}{X_{D2A} + X_{D2B}} + \frac{\dot{U}_1 \left( \frac{1}{K_A} - \frac{1}{K_B} \right)}{j (X_{D2A} + X_{D2B})} \times 10^3$$

$$i_{2B} = i \frac{X_{D2A}}{X_{D2A} + X_{D2B}} - \frac{\dot{U}_1 \left( \frac{1}{K_A} - \frac{1}{K_B} \right)}{j (X_{D2A} + X_{D2B})} \times 10^3$$

式中  $i_{2A}$ 、 $i_{2B}$ ——变压器 A 和 B 所承担的电流 (二次侧电流) (A);

其他符号同前。

上式表明,变压器中的电流,由二部分组成。第一部分是认为变比相等时的负荷电流分量,与漏电抗成反比分配;第二部分是环流分量,对两台变压器来说,大小相等、方向相反,由一台变压器流到另一台变压器,而不送给负载。

## 二、变压器年电能损耗计算

变压器年负载率  $\beta_n$  可按下列式计算

$$\beta_n = \frac{A_P}{TS_n \cos \varphi_n}$$

式中  $\cos \varphi_n$ ——年加权平均功率因数,可根据  $\tan \varphi_n = A_Q/A_P$  求得。

$A_P$ 、 $A_Q$ ——装在降压变压器一次侧的电度表示数,在一年时间内的有功电能 (kWh) 与无

功电能 (kvarh)。

$T$ ——变压器年运行小时数 (h)。

变压器年电能损耗为

$$\Delta A = (P_0 T + \beta_n^2 P_d r) + K (I_0 \% \cdot S_r T + \beta_n^2 U_d \% \cdot S_r r) \times 10^{-2}$$

式中  $\Delta A$ ——变压器年电能损耗 (kW·h)；

$r$ ——变压器正常负荷下工作小时数；

其他符号同前。

$r$  的数值查表 3-8

表 3-8 生产班制及各种时间 (供参考值)

(单位: h)

生产班制	正常负荷下工作小时数 $r$	年运行小时数	最大负荷年利用小时数 $T_{max}$
一班制	2300	8000	1500
二班制	4600	8000	3000
三班间断	6900	8000	4500
三班连续	8000	8000	7500

### 第三节 特殊变压器设计和计算

#### 一、干式电力变压器的基本计算

##### 1. 铁柱直径的选择:

$$D_2 = K_D \sqrt{P_2}$$

式中  $D_2$ ——铁柱直径 (mm);

$K_D$ ——经验系数, 见表 3-9;

$P_2$ ——变压器每柱容量 (kVA), 三相双绕组变压器  $P_2 = S_r/3$ ; 单相双绕组变压器  $P_2 = S_r/2$ ;

$S_r$ ——变压器额定容量 (kVA)。

表 3-9 经验系数  $K_D$

铁心材料	$K_D$ (适用于 50Hz)	
	铝绕组	铜绕组
冷轧硅钢片	50~60	60~69
热轧硅钢片	60~66	69~78

多级阶梯形铁柱规格尺寸见表 3-10。当求得铁柱直径  $D_2$  后, 便可由表 3-10 查得铁柱的净面积  $S$ , 铁柱厚度  $T$  和宽度等尺寸。

铁轭截面  $S_1$  可按下式计算

单相壳式  $S_1 = 0.5S$

单相心式  $S_1 = S$

当采用多级铁柱截面时

$$S_1 = (1.05 \sim 1.1) S$$

铁轭高

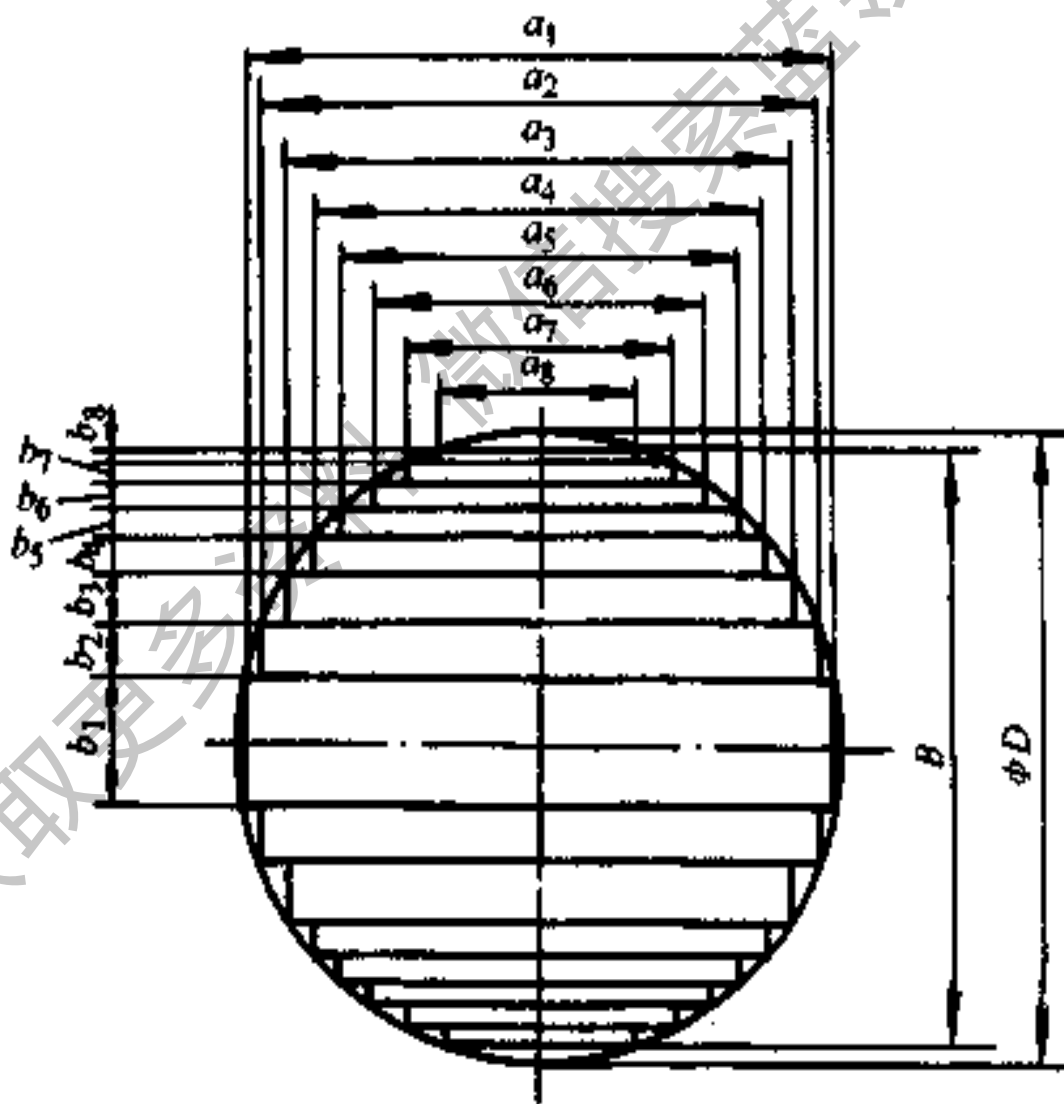
$$h_k = \frac{S_k}{K_d T}$$

式中  $S_k$ ——铁轭截面 ( $\text{cm}^2$ );

$h_k$ ——铁轭高 (cm);

$K_d$ ——迭片系数, 见表 3-11。

表 3-10 多级阶梯形铁柱规格尺寸表



(续)

外接圆直径 $D$ /mm	毛面积 $S'$ /cm <sup>2</sup>	净面积 $S$ /cm <sup>2</sup>			铁柱宽度/mm				
		0.91 $S'$	0.92 $S'$	0.95 $S'$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
70	34.30	31.21	31.56	32.95	65	60	50	35	20
75	39.90	36.31	36.71	37.91	70	65	55	40	25
80	45.30	41.22	41.68	43.04	75	65	55	40	25
85	51.00	46.41	46.92	48.45	80	70	60	45	25
90	57.75	52.55	53.13	54.86	85	75	65	50	30
95	64.30	58.52	59.16	61.09	90	80	65	50	30
100	70.95	64.57	65.27	67.40	95	85	70	55	30
105	79.50	72.35	73.14	75.53	100	90	80	65	50
110	87.15	79.31	80.18	82.79	105	95	85	70	55
115	95.00	86.45	87.40	90.25	110	100	90	75	55
120	104.10	94.73	95.77	98.90	115	105	90	75	60
125	112.80	102.65	103.78	107.16	120	110	95	80	60
130	122.55	111.52	112.75	116.42	125	115	100	85	65
135	132.00	120.12	121.44	125.40	130	115	105	85	65
140	141.95	129.18	130.59	134.85	135	120	110	90	70
145	152.20	138.50	140.02	144.59	140	125	110	95	70
150	165.00	150.15	151.80	156.75	145	135	120	105	90
155	175.80	159.99	161.74	167.01	148	140	125	110	90
160	188.30	171.35	173.24	178.89	155	145	130	115	95
165	199.46	181.51	183.50	189.49	160	148	135	115	95
170	211.55	192.51	194.63	200.97	165	155	140	120	100
175	224.30	204.11	206.36	213.09	170	160	140	125	100
180	237.30	215.94	218.32	225.44	175	160	145	125	105
185	250.44	227.90	230.40	237.92	180	165	148	130	110

(续)

外接 圆直 径 $D$ /mm	毛面积 $S'$ /cm <sup>2</sup>	净面积 $S$ /cm <sup>2</sup>			铁柱宽度/mm				
		0.91 $S'$	0.92 $S'$	0.95 $S'$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
190	263.65	239.92	242.56	250.47	185	170	155	135	110
195	278.50	253.44	256.22	264.58	185	175	160	140	115
200	292.50	266.18	269.10	277.88	195	180	160	140	115
205	308.60	280.83	283.91	293.17	200	185	165	145	120
210	322.08	293.09	296.31	305.98	200	185	170	148	120
215	339.20	308.67	312.06	322.24	210	195	175	148	125
220	353.60	321.78	325.31	335.92	210	200	180	155	130
225	372.65	339.11	342.84	354.02	215	200	180	160	130
230	387.10	352.26	356.13	367.75	220	205	185	160	135
235	404.20	367.82	371.86	383.99	225	210	185	165	135
240	422.90	384.84	389.07	401.76	230	215	195	170	140
245	445.10	403.22	409.65	420.95	235	220	200	180	155
250	460.90	419.42	424.03	437.86	240	225	210	185	165
255	480.70	437.44	442.24	456.67	245	230	215	185	165
260	500.34	455.31	460.31	475.32	248	235	220	195	170
265	517.10	470.56	475.73	491.25	255	240	225	200	175
270	539.60	491.04	496.43	542.62	260	245	225	205	175
275	557.83	507.63	513.20	529.94	265	248	230	205	180
280	581.06	528.76	534.58	552.01	270	255	235	210	180
285	600.80	546.73	552.74	570.76	275	260	240	215	185
290	621.90	565.93	572.15	590.81	280	265	245	220	185
295	643.16	585.28	591.71	611.00	285	270	248	220	185
300	663.20	603.51	610.14	630.04	290	275	255	225	195

(续)

外接 圆直 径 $D$ /mm	铁柱宽度 /mm			铁柱厚度/mm								
	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$B$
70				26	5	6	6	3				66
75				27	5	7	6	4				71
80				28	9	6	5	4				76
85				28	10	6	6	4				80
90				29	10	7	6	5				85
95				30	11	9	5	5				90
100				31	11	9	6	6				95
105	30			32	11	7	7	5	4			100
110	30			33	11	7	8	5	5			105
115	30			34	11	8	7	7	5			110
120	35			34	12	11	7	5	5			114
125	35			35	12	11	8	6	5			119
130	35			35	13	11	8	7	6			125
135	40			37	17	7	10	7	5			129
140	40			37	18	7	10	7	7			135
145	40			38	18	10	8	8	7			140
150	65	40		38	14	12	9	6	8	4		144
155	70	40		45	11	12	9	9	6	5		149
160	70	40		40	14	13	9	8	8	6		156
165	70	35		41	16	11	12	8	7	6	161	
170	75	45		41	14	14	12	8	8	5		163
175	75	45		41	15	17	9	10	8	5		169
180	80	45		42	20	12	12	8	8	6		174
185	80	45		43	20	14	10	9	9	6		179

(续)

外接 圆直 径 $D$ /mm	铁柱宽度 /mm			铁柱厚度/mm								
	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$B$
190	85	50		43	21	12	12	11	7	7		183
195	85	50		62	12	13	12	11	9	6		188
200	85	50		44	21	17	11	11	8	7		194
205	90	50		45	22	16	12	11	9	7		199
210	90	55		64	18	11	13	12	9	6		202
215	95	55		46	23	17	15	10	8	8		208
220	95	55		66	13	17	15	11	10	7		212
225	100	55		67	18	16	15	13	9	8		219
230	100	55		67	19	16	14	10	11	8		223
235	100	65		68	19	19	12	12	10	7		226
240	105	65		69	19	17	14	13	11	7		231
245	130	100	60	68	20	16	13	11	10	8	7	238
250	135	100	60	70	20	13	16	10	11	9	7	242
255	135	100	60	72	19	14	19	10	10	9	7	248
260	140	105	65	78	17	14	16	13	11	9	7	252
265	140	110	60	70	21	14	17	12	13	8	9	258
270	145	110	65	76	19	18	13	15	11	9	8	262
275	145	110	65	73	23	16	16	12	13	9	8	267
280	148	115	65	74	21	19	16	15	11	9	8	272
285	155	115	70	74	21	19	17	15	11	10	8	276
290	155	120	70	76	21	19	16	17	12	9	9	282
295	155	120	70	76	21	21	18	17	11	9	8	286
300	160	115	70	77	21	19	20	15	13	12	7	291



表 3-11 迭片系数的选取

硅钢片类型	迭片系数 $K_d$	
	无漆膜绝缘时	有漆膜绝缘时
0.35mm 冷轧硅钢片	0.94~0.95	0.93~0.94
0.35mm 热轧硅钢片	—	0.91~0.92
0.5mm 硅钢片	0.96	0.93

铁心柱窗高  $h$ ，为绕组高加 2 倍绕组端部到铁轭的距离，并要考虑到通风散热及引出线方便。试验电压 5kV 以下的主绝缘，绕组端部到铁轭的距离为 15mm；绕组到心柱距离为 8mm；高、低压绕组之间或高压绕组之间的距离为 10~16mm。

绕组最大径向尺寸等于铁心外径与绕组各导线总厚、加上各层间绝缘的厚度，再加上通风道厚度，以上总和再加上 5% 的余量。

绕组排布后，根据绕组的最大径向尺寸，绕组间绝缘距离（约为 20mm 左右），便可决定中心距尺寸  $M_0$ ，如图 3-6 所示。 $M_0$  一般为 5 的倍数。

单相变压器铁心的外型尺寸即宽、高之比为 0.75~0.85；三相变压器约为 1.30~1.45。

## 2. 铁柱磁密和电流密度的选择

表 3-12 示出铁柱磁通密度（磁密）的选择，表 3-13 示出干式变压器电流密度的选择。

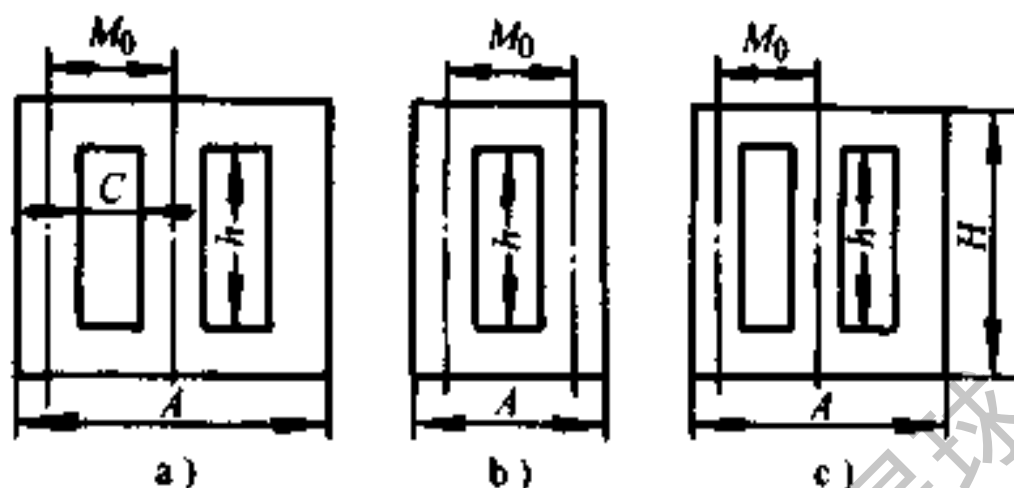


图 3-6 不同铁心结构的尺寸

a) 三柱铁心式 b) 单相心式 c) 单相壳式

表 3-12 干式变压器磁通密度的选择

铁心材料	绝缘耐热等级	磁通密度 $B_7/T$
冷轧硅钢片	B	1.40~1.55
	H	1.50~1.65
热轧硅钢片	B	1.20~1.35
	H	1.30~1.45

表 3-13 干式变压器电流密度的选择

绕组材料	绝缘耐热等级	电流密度 / ( $A/mm^2$ )	
		内绕组	外绕组
铜导线	B	1.4~2.1	2~3
	H	2.4~3.6	2.8~4.3
铝导线	B	1.0~1.5	1.6~2.1
	H	1.5~2.1	1.8~2.3

当绕组平行绕制时取小值；通风散热条件好的取大值；外绕组用裸铜板绕制时可取  $3\text{A}/\text{mm}^2$ ，容量小的取小值，容量大的取大值。

### 3. 绕组匝数计算

$$W = U_1 / e_0 \quad e_0 = 4.44 f B_2 S \times 10^{-4}$$

式中  $W$ ——一次侧或二次侧绕组匝数；

$U_1$ ——一次侧或二次侧空载额定电压 (V)；

$e_0$ ——每匝电压 (V/匝)；

$f$ ——频率；

$B_2$ ——磁通密度，见表 3-12；

$S$ ——铁柱的净面积 ( $\text{cm}^2$ )。

一般先求低压绕组匝数  $W_2$ ，再求高压绕组的匝数

$$W_1 = kW_2 \quad (k \text{ 为变比})。$$

### 4. 绕组铁重计算

由图 3-6 可求得铁重如下

三柱铁心式

$$G_{Fe} = 3 \times 7.6h \cdot S \times 10^{-3} + 2 \times 7.6AS_E \times 10^{-3}$$

单相心式

$$G_{Fe} = 2 \times 7.6h \cdot S \times 10^{-3} + 2 \times 7.6AS_E \times 10^{-3}$$

单相壳式

$$G_{Fe} = 7.6 \times (2h + A) S \times 10^{-3}$$

式中  $G_{Fe}$ ——绕组铁重 (kg)；

其他符号同前。

### 5. 绕组铜重计算

$$G_{Cu} = 8.9LqW \times 10^{-3} \quad L = \pi \cdot d$$

式中  $G_{Cu}$ ——绕组铜重 (kg);

$L$ ——绕组平均匝长 (cm);

$d$ ——绕组平均直径 (cm);

$q$ ——绕组导线截面 (cm<sup>2</sup>);

$W$ ——绕组匝数。

考虑引出线及导线绝缘的重量，一般按上述计算的结果还要增加 5%~10% 的重量。

6. 干式变压器在额定使用条件下的温升限值，表 3-14 中示出。

表 3-14 干式变压器温升限值

部 位	绝缘系统温度 /C	最高温升 /C
线圈 (用电阻法测量的温升)	105 (A)	60
	120 (E)	75
	130 (B)	80
	155 (F)	100
	180 (H)	125
	220 (C)	150

(续)

部 位	绝缘系统温度 /C	最高温升 /C
铁心、金属部件和其相邻的材料		在任何情况下，不会出现使铁心本身、其它部件与其相邻的材料受到损害的温度

对于 160kVA 及以上的变压器，温升计算如下（对于容量更小的变压器，计算结果偏大）。

(1) 铁心

① 有效散热面 ( $m^2$ ):  $A_r = A_1 + K_{zh} A_2$

式中  $A_1$ ——铁心外露表面积不包括有绝缘件遮蔽的部位和下铁轭下表面；

$A_2$ ——铁柱和铁轭气道内表面积 ( $m^2$ )，不包括有绝缘件遮蔽部位；

$K_{zh}$ ——垂直气道散热折合系数，可由图 3-7 查得。

图 3-7 中， $b$  为气道有效宽度 (mm)，气道两面的散热面间若无绝缘隔开时，取气道实际宽度的一半； $H$  为气道的高度 (mm)。

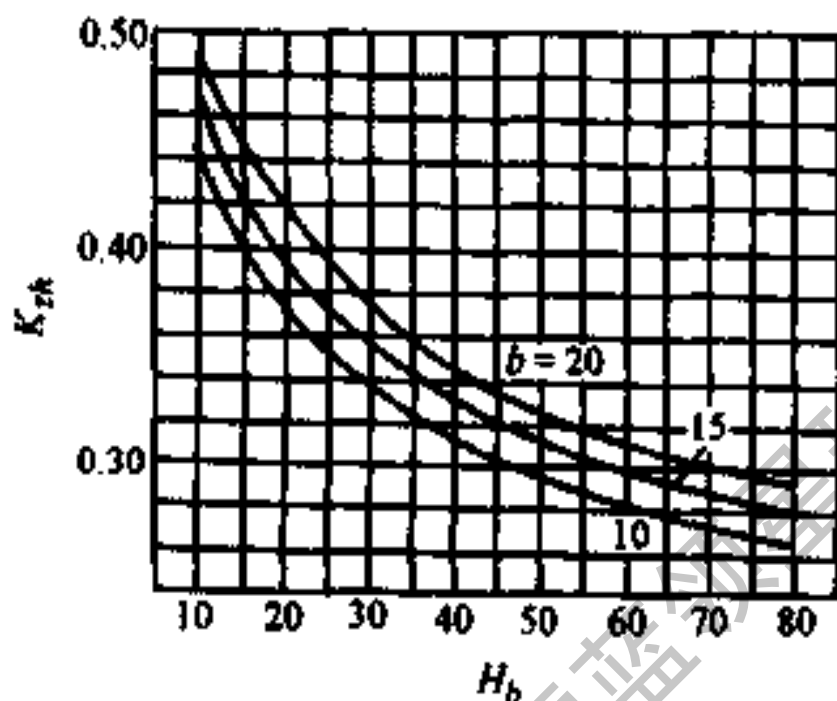


图 3-7 垂直气道散热折合系数  $K_{zh}$

- ② 铁心表面热负载 ( $W/m^2$ ),  $q_x = P_0/A_x$
- ③ 铁心对空气的温升 ( $^{\circ}C$ ),  $\tau'_{x-k} = 0.36q_x^{0.8}$
- (2) 绕组
- ① 有效散热面 ( $m^2$ ):

$$A_Q = A_1 + K_{zh}A_2 + K_{hh}A_3$$

式中  $A_1$ ——绕组外露表面积 ( $m^2$ ), 内绕组无此项面积;

$A_2$ ——绕组各垂直气道的表面积 ( $m^2$ );

$A_3$ ——绕组横向气道表面积 ( $m^2$ ), 圆筒式绕组无横向气道;

$K_{hh}$ ——横向气道散热折合系数, 可由图 3-8 查得。

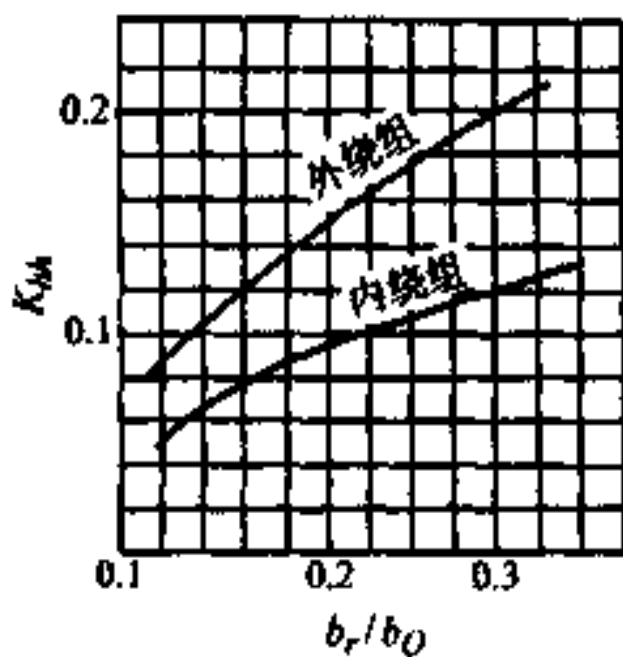


图 3-8 横向气道散热折合系数  $K_M$

图 3-8 中,  $b_r$  为线饼间气道宽度 (不小于 8);  $b_Q$  为线饼幅向厚度。

② 绕组表面热负载 ( $W/m^2$ ):  $q_Q = P_S/A_Q$

③ 绕组对空气温升 ( $^{\circ}C$ ):  $\tau'_{Q-K} = 0.36q_Q^{0.8}$

(3) 温升校正量, 当两相邻发热部件之间有绝缘筒间隔时, 求得的温升  $\tau'_{X-K}$ ,  $\tau'_{Q-K}$  不必校正, 否则应考虑相互间的热交换而进行校正。

① 内绕组与铁柱之间的热交换及温升校正。二者之间的热交换量为

$$\Delta q_{Q-K} = 1.8 \frac{A_{Q-K}}{A_Q} \Delta \tau^{1.25},$$

$$\Delta \tau = |\tau'_{Q-K} - \tau'_{X-K}|$$

式中  $\Delta q_{Q-K}$ ——内绕组与铁柱之间热交换量 ( $W/m^2$ );

$A_{Q-X}$ ——内绕组和铁柱间的热交换面 ( $m^2$ )。

因此, 温升校正量为  $\Delta\tau_{Q-K} = 0.36\Delta q_{Q-K}^0$

当  $\tau'_{Q-K} > \tau'_{X-K}$  时, 则校正后的铁心和绕组温升为

$$\tau_{X-K} = \tau'_{X-K} + \Delta\tau_{Q-X}, \quad \tau_{Q-K} = \tau'_{Q-K} - \Delta\tau_{Q-X}$$

当  $\tau'_{Q-K} < \tau'_{X-K}$  时, 则校正后的铁心和绕组温升为

$$\tau_{X-K} = \tau'_{X-K} - \Delta\tau_{Q-K}, \quad \tau_{Q-K} = \tau'_{Q-K} + \Delta\tau_{Q-X}$$

② 内、外绕组之间的热交换及温升校正, 计算方法同上。

## 二、整流变压器设计与计算

### 1. 铁心截面的选择

单相壳式  $S = \sqrt{P}$

单相心式  $S = (0.7 \sim 0.8) \sqrt{P}$

三相心式  $S = \sqrt{P/3}$

三相圆柱型铁心 (多级铁心) 铁柱直径

$$D_2 = (5.8 \sim 6.5) \sqrt{P}$$

式中  $S$ ——铁心截面 ( $cm^2$ );

$P$ ——变压器容量 (VA);

$D_2$ ——铁柱直径 (cm)。

表 3-15 示出各种不可控整流方式的变压器容量。

表中  $U_2, I_2$  为输出直流电压、电流平均值;  $I_1, I_2$  和  $U_1,$

$U_2$  为变压器一次侧、二次侧的电流和线电压。



表 3-15 不可控整流方式(电阻性负载理想情况下)的变压器容量计算

	二次相电压 $U_2$	一次相电压 $U_1$	二次电流 $I_2$	一次电流 $I_1$	变压器二次相容量 $P_2$	变压器一次相容量 $P_1$	设计容量 $P = \frac{P_1 + P_2}{2}$
单相半波	$2.22U_2$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$1.57I_2$	$1.21I_2 \frac{W_2}{W_1}$	$3.49U_2I_2$	$2.69U_2I_2$	$3.09U_2I_2$
单相全波 (双半波)	$2 \times 1.11U_2$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$0.785I_2$	$1.11I_2 \frac{W_2}{W_1}$	$1.74U_2I_2$	$1.23U_2I_2$	$1.49U_2I_2$
单相桥式 (全波)	$1.11U_2$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$1.11I_2$	$1.11I_2 \frac{W_2}{W_1}$	$1.23U_2I_2$	$1.23U_2I_2$	$1.23U_2I_2$
三相半波	$0.855U_2$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$0.58I_2$	$0.47I_2 \frac{W_2}{W_1}$	$1.49U_2I_2$	$1.21U_2I_2$	$1.35U_2I_2$
三相桥式	$0.428U_2$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$0.817I_2$	$0.817I_2 \frac{W_2}{W_1}$	$U_2I_2$	$1.05U_2I_2$	$1.05U_2I_2$
六相双反 星形	$0.855U_2$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$0.289$	$0.407I_2 \frac{W_2}{W_1}$	$1.48U_2I_2$	$1.05U_2I_2$	$1.26U_2I_2$

表中所列是在理想状态下得出的,实际设计时,应考虑整流元件管压降、变压器漏抗及励磁电流等因素。

考虑整流管的管压降及熔断器、导线等压降时,  $U_2$  应加上 1.5V (半波电路) 或 3V (桥式电路); 如考虑变压器阻抗压降及交流电网电压波动时, 还应再增大 10% ~ 15% 左右, 考虑到励磁电流时, 一次电流  $I_1$  可加大 5% 左右。

## 2. 绕组匝数计算

### (1) 变压器二次绕组匝数

$$W_2 = \frac{U_2 \times 10^4}{4.44 f B_m S K_d}$$

式中  $f$ ——频率, 工频时  $f = 50\text{Hz}$ ;

$B_m$ ——磁通密度 (T), 它与变压器容量的关系如表 3-16 所示;

$K_d$ ——迭片系数, 见表 3-11, 一般可取  $K_d = 0.9 \sim 0.95$ ;

其他符号同前。

### (2) 变压器一次绕组匝数:

$$W_1 = \frac{U_1}{U_2} W_2$$

## 3. 导线截面的选择

一次侧和二次侧绕组导线截面  $q_1$  和  $q_2$  按下列公式计算

表 3-16 磁通密度  $B_z$  与硅钢片型号及变压器容量的关系

型号	S				
	$B_z$ (T)	100VA 以下	100VA~1kVA	1~10kVA	10~100kVA
冷轧硅钢片 D310, D340		1.0~1.2	1.2~1.5	1.4~1.7	1.5~1.75
热轧硅钢片 D41, D42		0.8~1.0	1.0~1.2	1.2~1.3	1.3~1.45
					100kVA 以上

表 3-17 电流密度  $J$  与绝缘等级及变压器容量的关系

$J$ (A/mm <sup>2</sup> )	S					
	10~100VA	100VA~1kVA	1~10kVA	10~100kVA	100kVA 以上	100kVA 以上
A 级绝缘自冷	5~3.5	3.5~2	2.4~1.8	2~3	2~3	2~3
A 级绝缘风冷	—	6~4	5~3	4~3	3~2.5	3~2.5
A 级绝缘油冷	—	—	—	3~4.5	4.5~5.5	4.5~5.5
B 级绝缘自冷	6~4	4~2.5	2.8~2	2.6~1.8	2~1.6	2~1.6
B 级绝缘风冷	—	7~5	5.5~3.5	4.5~3.5	3.5~3	3.5~3
B 级绝缘油冷	—	—	—	3.5~5	5~6	5~6

$$q_1 = I_1/J_1, \quad q_2 = I_2/J_2$$

式中  $q_1$ 、 $q_2$ ——一次侧和二次侧绕组导线的截面 ( $\text{mm}^2$ );

$J_1$ 、 $J_2$ ——一次侧和二次侧绕组的电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ), 可参考表 3-17 选取。一般二次侧绕组在内层, 散热条件较差,  $j$  可选小些; 一次侧绕组在外层,  $j$  可选稍大。

#### 4. 铁心窗口大小的确定

##### (1) 中、小型变压器

铁心窗口面积为

$$Q = \frac{W_1 q_1 + W_2 q_2}{K_Q} \times 10^{-2}$$

窗口高与铁心柱宽的关系为

$$h = (2.5 \sim 3.5) a$$

窗口宽为  $C = Q/h$

式中  $Q$ ——窗口面积 ( $\text{cm}^2$ );

$h$ 、 $C$ ——窗口的高和宽 ( $\text{cm}$ );

$K_Q$ ——窗口填充系数, 对于几十 VA 以下的变压器, 取 0.25~0.3, 对于几百 VA 以上的变压器, 取 0.3~0.4;

$a$ ——铁心柱宽 ( $\text{cm}$ );

其他符号同前。

(2) 大容量变压器，可根据导线的排列仔细计算。

铁心窗高  $h_1 = (2.5 \sim 3.5) a$

计算时须注意，每层绕组占的尺寸为实际有效匝数加1。选用扁导线时，以排满整数的双层为好，即排满2、4、6、8层为好。

考虑风道或油道算出绕组的厚度后，便可计算铁心窗口的宽度  $C$ 。心式较大容量的变压器，铁心窗口的宽度为

$$C = 2d + 2d' + d''$$

式中  $d$  —— 绕组厚度；

$d'$  —— 绕组与铁心之间的空隙，约为2~3mm；

$d''$  —— 两绕组之间的空隙，约4~6mm。

### 三、单相小型变压器设计与计算

#### 1. 输出总功率按下式计算

$$P_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 + \dots$$

式中  $P_2$  —— 输出总功率 (VA)；

$U_2$ 、 $U_3$  —— 二次侧各绕组电压有效值 (V)；

$I_2$ 、 $I_3$  —— 二次侧各绕组电流有效值 (A)。

如果是整流变压器，即二次侧直流电压和电流应按下列式折算到交流，然后再代入上式计算。

$$U_2 = K_U U_{2Z}, \quad I_2 = K_I I_{2Z}$$

该绕组的功率为  $P_2 = K_P P_{2Z}$

式中  $U_2$ 、 $I_2$ 、 $P_2$  —— 分别折算到交流的电压 (V)、电

流 (A) 和功率 (VA);

$U_{22}$ 、 $I_{22}$ 、 $P_{22}$ ——分别为直流电压 (V)、电流 (A) 和功率 (VA);

$K_U$ 、 $K_I$ 、 $K_b$ ——系数, 表 3-18。

表 3-18 系数  $K_U$ 、 $K_I$  和  $K_b$

系数	负荷性质	单相半波	单相全波	单相桥式	三相桥式
$K_U$	电阻性	2.22	1.11	1.11	0.43
	电感性	2.22	1.11	1.11	0.43
$K_I$	电阻性	1.57	0.79	1.11	0.82
	电感性	0.71	0.71	1	0.82
$K_b$	电阻性	3.09	1.48	1.23	1.05
	电感性	1.34	1.34	1.11	1.05

## 2. 输入功率和一次电流计算

$$P_v = P_2 / \eta, \quad I_1 = K \frac{P_v}{U_1}$$

式中  $P_v$ ——输入功率 (VA);

$I_1$ ——一次电流 (A);

$\eta$ ——变压器效率, 见表 3-19;

表 3-19 变压器效率

变压器容量 /V·A	效率 $\eta$	变压器容量 /V·A	效率 $\eta$
小于 10	0.6~0.7	100~300	0.85~0.9
10~50	0.7~0.8	300~500	0.9
50~100	0.8~0.85	500~1000	0.9~0.95

$U_1$ ——外加电源的电压 (V);

$K$ ——经验系数, 约为 1.1~1.2。

### 3. 铁心截面的选择

$$S = K_0 \sqrt{P} \quad P = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

式中  $S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ );

$K_0$ ——经验系数, 与硅钢片质量有关,  $B_m$  越大,  $K_0$

取得越小, 表 3-20 查  $K_0$ ;

$P$ ——容量 (VA);

$P_1$ 、 $P_2$ ——同前。

表 3-20 系数  $K_0$  参考值

$P_s$	0~	10~	50~	500~	1000
/VA	10	50	500	1000	以上
$K_0$	2	2~ 1.75	1.5~ 1.4	1.4~ 1.2	1

## 4. 每个绕组匝数的计算

$$W_0 = \frac{10^4}{4.44fB_2S}$$

式中  $W_0$ ——每伏匝数 (匝/V);

$f$ ——电源频率、工频为 50Hz;

$B_2$ ——磁通密度 (T), 冷轧钢片 D310 取 1.2~1.4T; 热轧硅钢片 D41、D42 取 1.0~1.2T; D43 取 1.1~1.2T; 一般电机用 D21~D22 取 0.5~0.7T; 黑铁片取 0.6T;

$S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ )。

## 5. 导线截面的选择

$$q = I/j, \quad d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{j}}$$

式中  $q$ ——导线截面 ( $\text{mm}^2$ );

$d$ ——导线直径 (mm);

$j$ ——电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ), 一般 100VA 以下连续使用的变压器, 取  $2.5\text{A}/\text{mm}^2$ , 100VA 以上的取  $2\text{A}/\text{mm}^2$ , 变压器短时工作的取 4~ $5\text{A}/\text{mm}^2$ 。

## 6. 核算铁心窗口是否能容纳所有绕组

## (1) 绕组每层可绕的匝数



$$n_1 = \frac{0.9 [h - (2 \sim 4)]}{d'}$$

式中  $n_1$  —— 绕组每层可绕的匝数 (匝);

0.9 —— 绕组框架两端各空出约 5% 的空间;

$h$  —— 铁心窗高 (mm);

$d'$  —— 包括绝缘厚的导线外径 (mm)。

(2) 每组绕组需绕的层数

$$m_1 = W / n_1$$

式中  $m_1$  —— 每组绕组需绕的层数;

$W$  —— 绕组匝数。

(3) 一次绕组厚度

$$B_1 = m_1 (d' + \delta) + r$$

式中  $B_1$  —— 一次侧绕组的厚度 (mm);

$m_1$  —— 一次侧绕组的层数;

$\delta$  —— 层间绝缘厚度 (mm), 一般用牛皮纸,  $\delta = 0.05\text{mm}$ , 若线径较细, 可用透明纸,  $\delta = 0.015 \sim 0.02\text{mm}$ , 若线径较粗, 也可用青壳纸,  $\delta = 0.12\text{mm}$ ;

$r$  —— 绕组间绝缘厚度 (mm), 当电压不超过 500V 时, 可用 2~3 层牛皮纸或 0.12mm 青壳纸。

表 3-21 示出变压器常用绝缘材料。

同样可求出跨在一次侧绕组外面的各个二次侧绕组

表 3-21 变压器常用绝缘材料

品名	颜色	常用规格		特点	用途	备注
		厚度 /mm	耐压强度 /V			
电话纸	白色	0.04 0.05	400	坚实、不易 破裂	线径小于 0.4mm 的漆包线 的层间绝缘垫纸	代用品: 相应 厚度的打字纸, 描图纸或胶版纸
电缆纸	±黄色	0.08 0.12	300 ~400 800	柔顺、耐拉 力强	线径大于 0.5mm 的漆包线 的层间绝缘垫纸, 低压绕组间的绝缘 (2~3层)	代用品: 牛皮 纸
青壳纸	青褐色	0.25	1500	坚实、耐磨	线包外层绝缘(2 ~3层)	

(续)

品名	颜色	常用规格		特点	用途	备注
		厚度 /mm	耐压强度 /V			
电容 器纸	白色 黄色	0.03	475	薄、密度高	线径小于 0.4mm 的漆包线 层间绝缘	
聚脂 薄膜	透明	0.04	3000	耐温 140℃	层间绝缘	
		0.05	4000			
		0.10	9000			
玻璃 漆布	黄色	0.15 0.17	2000 ~ 3000	耐温好	绕组间绝缘	

(续)

品名	颜色	常用规格		特点	用途	备注
		厚度/mm	耐压强度/V			
聚四氟乙烯薄膜	透明	0.03	6000	耐温 280 C, 耐酸碱	层间绝缘	
压制板	土黄色	1.0 1.5		坚实、易弯 曲	线包骨架	又称弹性纸
黄蜡布	糖浆色	0.14 0.17	2500	光滑、耐压 高	高压绕组间绝缘	系凡立水浸渍 的棉制品

(续)

品名	颜色	常用规格		特点	用途	备注
		厚度 /mm	耐压强度 /V			
黄蜡绸	糖浆色	0.08	4000	细薄、少针孔	高压绕组的层间绝缘、高压绕组间绝缘(2~3层)	系凡立水浸渍的丝织品
高频漆				粘料	粘合绝缘纸、压制板、黄蜡布、黄蜡绸等	系无水酒精和酚醛树脂溶合泡制 代用品：洋干漆
青喷漆	透明			粘料	粘合绝缘纸、压制板、黄蜡布、黄蜡绸等	又名罩光漆，蜡克

的厚度  $B_2$ 、 $B_3$ ……

(4) 所有绕组的总厚度

$$B_z = K (B_0 + B_1 + B_2 + \dots)$$

式中  $B_z$ ——所有绕组的总厚度 (mm);

$K$ ——尺寸裕量, 取 1.1~1.2;

$B_0$ ——绕组框架的厚度 (mm)。

如果计算得到的绕组厚度  $B$  小于铁心窗口的宽度  $C$  的话, 即符合设计要求。否则应加大铁心迭厚, 以减小绕组匝数 [一般迭厚  $b' = (1 \sim 2) a$  较合适]。

7. 小型变压器铁心尺寸规格

图 3-9 示出小型变压器尺寸规格标识。表 3-22~表 3-25 示出  $1\text{kV} \cdot \text{A}$  以下变压器的铁心和每伏匝数等技术数据。

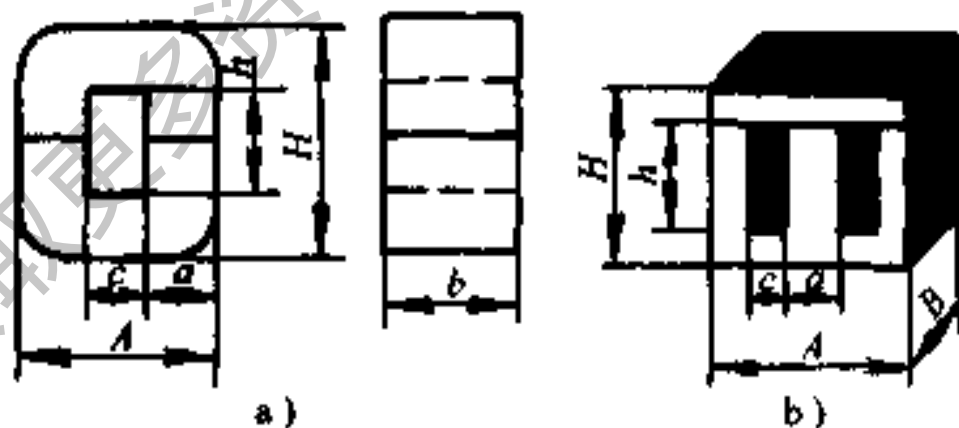


图 3-9 小型变压器铁心尺寸规格

a) XCD 型变压器 b) GE、XE 型变压器

表 3-22 XCD 型变压器铁心尺寸

铁心型号	尺寸 /mm						参考数据		
	$a$	$b$	$c$	$h$ (不小于)	$H$	$A$	平均磁 路长度 $l$ /cm	中间铁 芯柱净 截面 $S$ /cm <sup>2</sup>	铁心 重量 /kg
XCD10×20×20				20	40		9.47		0.129
	10	20	12.5	25	45	32.5	10.5	1.78	0.143
				32	52		11.9		0.162
				40	60		13.5		0.183
XCD12.5×25×25				25	50		11.9		0.261
	12.5	25	16	32	57	41	13.3	2.88	0.292
				40	65		14.9		0.327
				50	75		16.9		0.317

(续)

铁心型号	尺寸 /mm						参考数据		
	$a$	$b$	$c$	$h$ (不小于)	$H$	$A$	平均磁 路长度 $l$ /cm	中间铁 心柱净 截面 $S$ /cm <sup>2</sup>	铁心 重量 /kg
XCD16×32×32				32	64		14.4		0.518
	16	32	16	40	72	48	16.0	4.71	0.575
				50	82		18.0		0.647
				64	96		20.8		0.748
XCD20×40×40				40	80		18.0		1.01
	20	40	20	50	90	60	20.0	7.36	1.13
				64	104		22.8		1.28
				80	120		26.0		1.47



(续)

铁心型号	尺寸 /mm							参考数据		
	a	b	c	h (不小于)	H	A	平均磁 路长度 l /cm	中间铁 心柱净 截面 S /cm <sup>2</sup>	铁心 重量 /kg	
XCD25×50×50				50	100		22.6		1.99	
	64			64	114	75	25.4	11.5	2.23	
	80	50	25	80	130		28.6		2.52	
	100			100	150		32.6		2.87	
XCD32×64×64				64	128		29.0		4.18	
	80			80	144	96	32.2	18.8	4.64	
	100	64	32	100	164		36.2		5.22	
	125			125	189		41.2		5.94	

注:  $S = K_d ab$ ; 其中  $K_d$  为迭片系数, 一般取 0.89~0.82。

表 3-23 GE 型变压器铁心尺寸

铁心尺寸 $a \times B$	尺寸 /mm						参考数据		
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准化 迭厚 $B$	磁路平 均长度 $l$ /cm	中间舌片 净截面 $S$ /cm <sup>2</sup>	铁心净重 $G$ /kg
								铁心片厚度 0.35mm	
10×12.5						12.5		1.14	0.0756
10×15	10	6.5	36	31	18	15	5.76	1.37	0.0908
10×17.5						17.5		1.59	0.106
10×20						20		1.82	0.121
12×15						15		1.64	0.136
12×18	12	8	44	38	22	18		1.97	0.163
12×21						21	6.94	2.28	0.190
12×24						24		2.62	0.217

获取更多资料  
微信搜索 蓝领星球

(续)

铁心尺寸 $a \times B$	尺寸 /mm						参考数据		
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准化 迭厚 $B$	磁路平 均长度 $l$ /cm	中间舌片 净截面 $S$ /cm <sup>2</sup>	铁心净重 $G_c$ /kg
							铁心片厚度 0.35mm		
14×18						18		2.29	0.211
14×21	14	9	50	43	25	21	8.04	2.68	0.246
14×24						24		3.06	0.281
14×28						28		3.57	0.327
16×20						20		2.91	0.293
16×24	16	10	56	48	28	24		3.49	0.364
16×28						28	9.15	4.08	0.424
16×32						32		4.66	0.485

(续)

铁心尺寸 $a \times B$	尺寸 /mm						参考数据		
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准化 透厚 $B$	磁路平 均长度 $l$ /cm	中间舌片 净截面 $S$ /cm <sup>2</sup>	铁心净重 $G_c$ /kg
							铁心片厚度 0.35mm		
19×24						24		4.15	0.496
19×28	19	12	67	57.5	33.5	28	10.9	4.84	0.576
19×32						32		5.53	0.660
19×38						38		6.57	0.783
22×28						28		5.62	0.781
22×33	22	14	78	67	39	33		6.61	0.920
22×38						38		7.61	1.06
22×44						44		8.81	1.23

(续)

铁心尺寸 $a \times B$	尺寸 /mm							参考数据		
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准化 迭厚 $B$	磁路平 均长度 $l$ /cm	中间舌片 净截面 $S$ /cm <sup>2</sup>	铁心净重 $G_c$ /kg	
								铁心片厚度 0.35mm		
26×32						32		7.57	1.31	
26×39	26	17	94	81	47	39	15.0	9.23	1.60	
26×45						45		10.7	1.83	
26×52						52		12.3	2.12	
30×38						38		10.4	1.96	
30×45	30	19	106	91	53	45	17.2	12.3	2.32	
30×52						52		14.2	2.68	
30×60						60		16.4	3.09	

(续)

铁心尺寸 $a \times B$	尺寸 /mm							参考数据		
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准化 迭厚 $B$	磁路平 均长度 $l$ /cm	中间舌片 净截面 $S$ /cm <sup>2</sup>	铁心净重 $G_r$ /kg	
								铁心片厚度 0.35mm		
35×44						44		14.0	3.12	
35×52	35	22	123	105.5	61.5	52	20.0	16.6	3.65	
35×60						60		19.1	4.22	
35×70						70		22.3	4.92	
40×50						50		18.2	4.84	
40×60	40	26	144	124	72	60		21.8	5.80	
40×70						70	23.0	25.5	6.78	
40×80						80		29.1	7.75	

注:  $S = K_d a B$ ; 其中  $K_d$  为迭片系数, 一般取 0.91.

表 3-24 XE 型变压器铁心尺寸

铁心尺寸 $a \times B$	尺寸 /mm						参考数据				
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准 化迭 厚 $B$	磁路平 均长度 $l$ /cm	中间舌片净 截面 $S/\text{cm}^2$		铁心净重 $G/\text{g}$	
							厚 度		Ni46 合金片厚度		
							0.1mm	0.2mm	0.1mm	0.2mm	
3×4	3	3.5	13	10.5	7.5	4	2.67	0.096	0.109	2.20	2.50
3×6.3						6.3		0.151	0.172	3.47	3.94
4×4						4		0.128	0.146	4.00	4.55
4×5						5		0.160	0.182	5.00	5.68
4×6.3	4	5	18	14	10	6.3	3.63	0.202	0.230	6.30	7.16
4×8						8		0.256	0.291	8.00	9.10
5×5						5		0.200	0.228	7.75	8.75
5×6.3						6.3		0.252	0.287	9.70	11.1
5×8	5	6	22	17.5	12.5	8	4.49	0.320	0.364	12.4	14.1
5×10						10		0.400	0.455	15.5	17.5

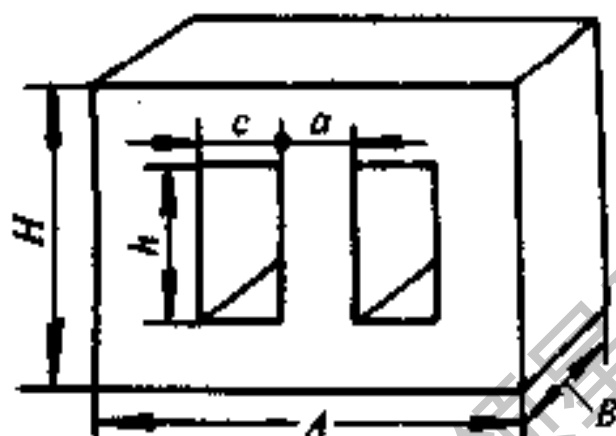
(续)

铁心 尺寸 $a \times B$	尺寸 /mm						磁路平 均长度 $l$ /cm	参 考 数 据			
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准 化透 厚 $B$		中间舌片净 截面 $S/\text{cm}^2$		铁心净重 $G_i/\text{g}$	
								厚 度		Ni46 合金片厚度	
								0.1mm	0.2mm	0.1mm	0.2mm
6×6.3						6.3	0.301	0.342	13.8	15.7	
6×8	6	7	26	21	15	8	0.384	0.437	17.7	20.1	
6×10						10	0.480	0.546	22.1	25.1	
6×12.5						12.5	0.601	0.683	27.6	31.4	
8×8						8	0.501	0.580	31.0	35.2	
8×10						10	0.640	0.728	38.8	44.0	
8×12.5	8	9	34	28	20	12.5	0.800	0.910	46.5	55.0	
8×16						16	1.02	1.16	62.0	70.5	

注:  $S = K_d a B$ ; 其中  $K_d$  为选片系数, 一般取 0.80~0.91。



表 3-25 1kVA 以下



容量 /VA	一次电压 $U_1=220V$				铁心截 面积 $S$ /cm <sup>2</sup>
	电流 /A	裸导线直径/mm			
		$J=2$ A/mm <sup>2</sup>	$J=2.5$ A/mm <sup>2</sup>	$J=3$ A/mm <sup>2</sup>	
3	0.0136	0.09	0.08	0.08	2.18
4	0.0182	0.11	0.09	0.09	2.47
5	0.0227	0.12	0.11	0.10	2.8
6	0.0273	0.13	0.12	0.108	3.05
8	0.0363	0.15	0.136	0.125	3.55
10	0.0454	0.17	0.15	0.14	3.95
12	0.0546	0.19	0.17	0.15	4.35
15	0.0682	0.21	0.18	0.17	4.85
16	0.0728	0.21	0.19	0.18	5

## 的变压器数据

每伏需绕匝数/(匝/V)			参考核心尺寸/mm				
磁通密度 $B_m$			中心柱宽 ×迭厚 $a \times B$ /mm × mm	A	H	c	h
7T	8.5T	10T					
31	25	22	12 × 21	44	38	8	22
27	22	19	12 × 24	44	38	8	22
24	20	17	14 × 22	50	43	9	25
22	18	15.5	16 × 22	56	48	10	28
18.5	15.5	13	16 × 24	56	48	10	28
17	14	12	16 × 28	56	48	10	28
15	12.7	11	19 × 26	67	57.5	12	33.5
14	11.5	9.6	19 × 35	56	48	10	28
13	11	9.4	19 × 30	67	57.5	12	33.5

容量 /VA	一次电压 $U_1=220V$				铁心截 面积 $S$ /cm <sup>2</sup>
	电流 /A	裸导线直径/mm			
		$J=2$ A/mm <sup>2</sup>	$J=2.5$ A/mm <sup>2</sup>	$J=3$ A/mm <sup>2</sup>	
20	0.0910	0.24	0.21	0.2	5.6
22	0.10	0.25	0.23	0.21	5.85
25	0.1135	0.27	0.24	0.22	6.15
30	0.1365	0.29	0.26	0.24	6.85
33	0.15	0.31	0.27	0.25	7.15
38	0.1725	0.33	0.30	0.27	7.65
40	0.181	0.34	0.30	0.28	7.8
42	0.191	0.35	0.31	0.28	8
45	0.204	0.36	0.32	0.29	8.3
50	0.227	0.38	0.34	0.31	8.8
55	0.25	0.40	0.36	0.33	9.25
60	0.273	0.41	0.38	0.35	9.65
70	0.318	0.45	0.40	0.36	10.3
76	0.345	0.47	0.42	0.38	10.8
90	0.409	0.51	0.46	0.41	11.8
100	0.454	0.53	0.48	0.44	12.4
120	0.546	0.59	0.53	0.48	13.6

(续)

每伏需绕匝数/(匝/V)			参考铁心尺寸/mm				
磁通密度 $B_m$			中心柱宽 × 迭厚 $a \times B$ /mm × mm	A	H	c	h
7T	8.5T	10T					
12	10	8.4	19 × 34	67	57.5	12	33.5
	9.3	8	22 × 30	78	67	14	39
11.3	8.7	7.4	19 × 37	67	57.5	12	33.5
10.5	8	6.8	22 × 36	78	67	14	39
9.5	7.6	6.5	19 × 43	67	57.5	12	33.5
8.6	7	6.0	22 × 40	78	67	14	39
8.4	6.9	5.9	22 × 41	78	67	14	39
8.2	6.7	5.7	26 × 35	95	81	17	47
7.8	6.5	5.5	22 × 43	78	67	14	39
7.4	6.2	5.2	22 × 46	78	67	14	39
7	5.9	5	26 × 41	94	81	17	47
6.7	5.6	4.7	26 × 43	94	81	16	47
6.3	5.2	4.4	30 × 39	106	91	19	53
6	5	4.2	26 × 48	94	81	17	47
5.5	4.5	3.8	30 × 45	106	91	19	53
5.3	4.4	3.7	30 × 48	106	91	19	53
4.8	3.9	3.4	30 × 50	106	91	19	53

容量 /VA	一次电压 $U_1 = 220V$				铁心截 面积 $S$ /cm <sup>2</sup>
	电流 /A	裸导线直径/mm			
		$J=2$ A/mm <sup>2</sup>	$J=2.5$ A/mm <sup>2</sup>	$J=3$ A/mm <sup>2</sup>	
140	0.636	0.63	0.57	0.52	14.7
160	0.728	0.68	0.61	0.56	15.5
185	0.841	0.73	0.66	0.60	16.7
200	0.91	0.76	0.68	0.62	17.7
230	1.045	0.83	0.73	0.67	19
250	1.135	0.86	0.77	0.69	19.7
280	1.273	0.90	0.8	0.73	20.8
320	1.454	0.96	0.86	0.8	22.3
380	1.725	1.04	0.94	0.86	24.5
420	1.91	1.10	0.98	0.90	25.5
450	2.045	1.14	1.02	0.93	26.5
518	2.35	1.23	1.10	1.00	28.5
575	2.61	1.29	1.16	1.04	29.8
600	2.72	1.33	1.18	1.08	30.5
700	3.18	1.43	1.30	1.16	32.8
781	3.55	1.50	1.35	1.22	34.5
1020	4.63	1.72	1.35	1.40	39.5

(续)

每伏需绕匝数/(匝/V)			参考铁心尺寸/mm				
磁通密度 $B_m$			中心柱宽 ×迭厚 $a \times B$ /mm × mm	$A$	$H$	$c$	$h$
7T	8.5T	10T					
4.5	3.7	3.1	35 × 48	123	105.5	22	61.5
4.1	3.4	2.9	35 × 50	123	105.5	22	61.5
3.8	3.2	2.7	35 × 35	123	105.5	22	61.5
3.7	3.1	2.6	35 × 58	123	105.5	22	61.5
3.4	2.9	2.4	40 × 55	144	124	26	72
3.3	2.75	2.3	40 × 57	144	124	26	72
3.1	2.6	2.2	40 × 60	144	124	26	72
2.9	2.4	2.1	40 × 64	144	124	26	72
2.7	2.2	1.9	45 × 63	161	138.5	29	80.5
2.6	2.1	1.8	40 × 73	144	124	26	72
2.5	2.05	1.75	45 × 68	161	138.5	29	80.5
2.30	1.90	1.6	45 × 73	161	138.5	29	80.5
2.2	1.8	1.55	45 × 76	161	138.5	29	80.5
2.15	1.75	1.5	50 × 70	178	153	32	89
2.0	1.63	1.4	50 × 75	178	153	32	89
1.85	1.55	1.3	50 × 79	178	153	32	89
1.6	1.35	1.15	50 × 91	178	153	32	89

#### 四、小型变压器骨架制作

##### 1. 纸心无框骨架的制作

此种骨架适用于 1kVA 以下的变压器，所用弹性纸的厚度为  $t$ ，见表 3-26。

表 3-26 弹性纸的厚度  $t$

变压器容量/VA	30	50	300 以下	300 以上
弹性纸厚度 $t$ /mm	0.5	0.8	1.0	1.0~1.5

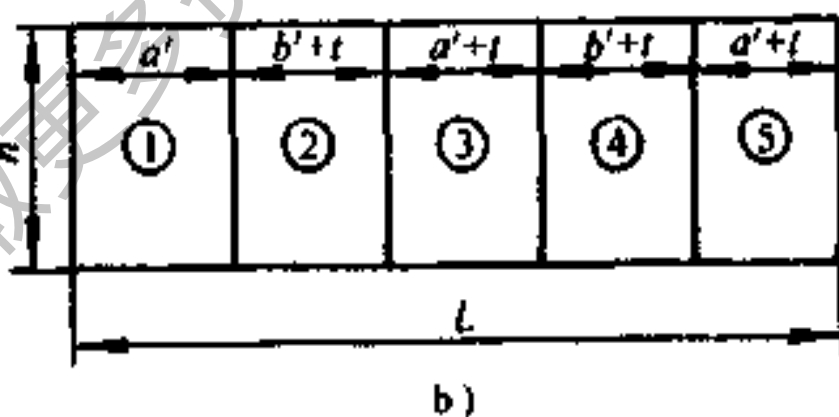
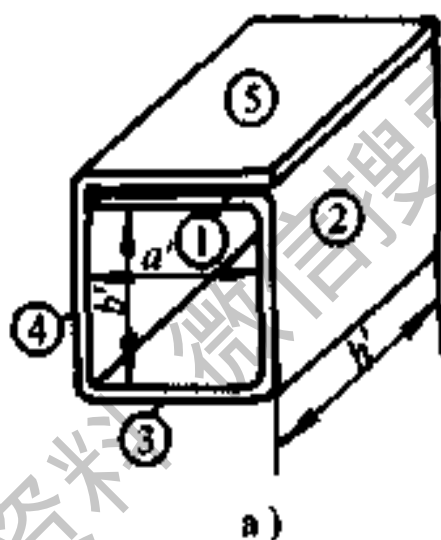


图 3-10 纸质无框骨架

a) 粘迭后骨架 b) 弹性纸尺寸

通常，无框架骨架的长度比铁心窗高  $h$  短 2mm 左右，弹性纸的长度为

$$\begin{aligned} L &= 2(b' + t) + a' + 2(a' + t) \\ &= 2b' + 3a' + 4t \end{aligned}$$

纸质无框骨架如图 3-10 所示。

## 2. 整体式骨架的制作

图 3-11 示出整体式骨架。

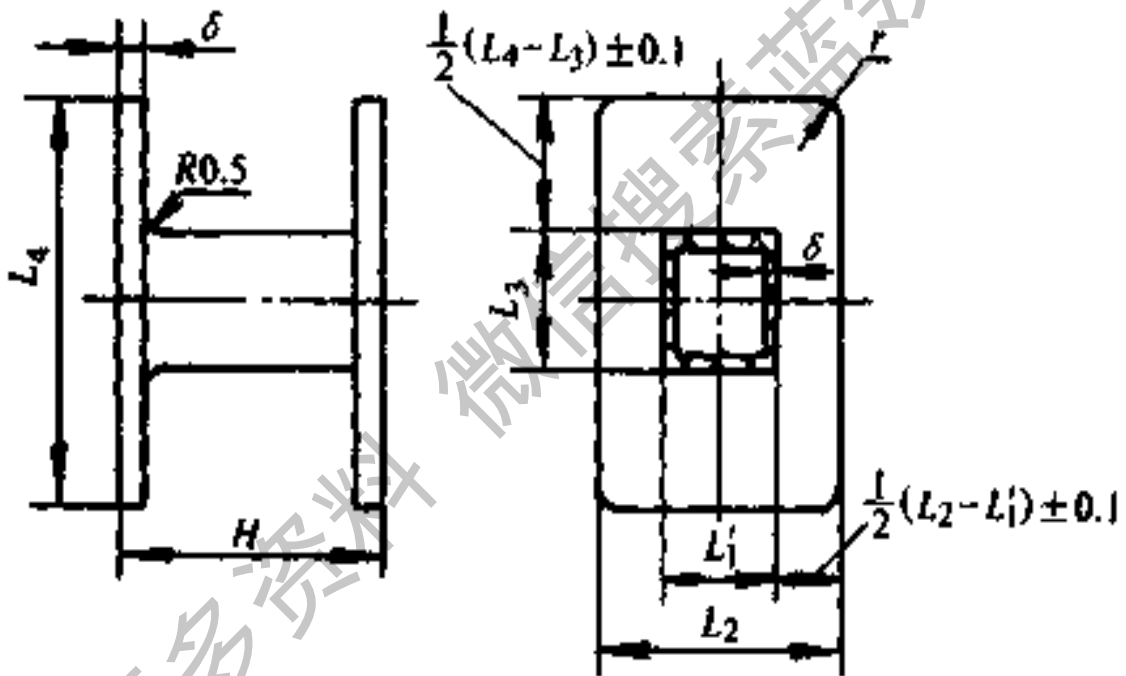


图 3-11 整体式骨架

$$L_1 = a + 2\delta + 0.2, L_2 = a + 2L_1 - 0.2$$

$$L_3 = B + 2\delta, L_4 = L_3 + (L_2 - L_1') + A$$

$$H = h - A_1$$

式中  $a, L_1, B$ ——铁心尺寸(mm);

$\delta$ ——骨架壁厚(mm);

0.2——装配间隙留量(mm);



$A$ ——经验数据 (mm), 与引出线头数及粗细有关; 对铁心片  $E_2$ 、 $E_{2.5}$  取 2; 对  $E_3$ 、 $E_4$  取 3;  $E_5$ 、 $E_6$  取 4;  $E_8$  取 5;

$A_1$ ——装配间隙余量经验数据 (mm), 对心片  $E_2$ 、 $E_3$  取 0.25; 其余心片取 0.2;

$h$ ——铁心中柱高度。

表 3-27 示出整体式骨架尺寸。

### 3. 组合式骨架的制作

图 3-12 示出组合式骨架。

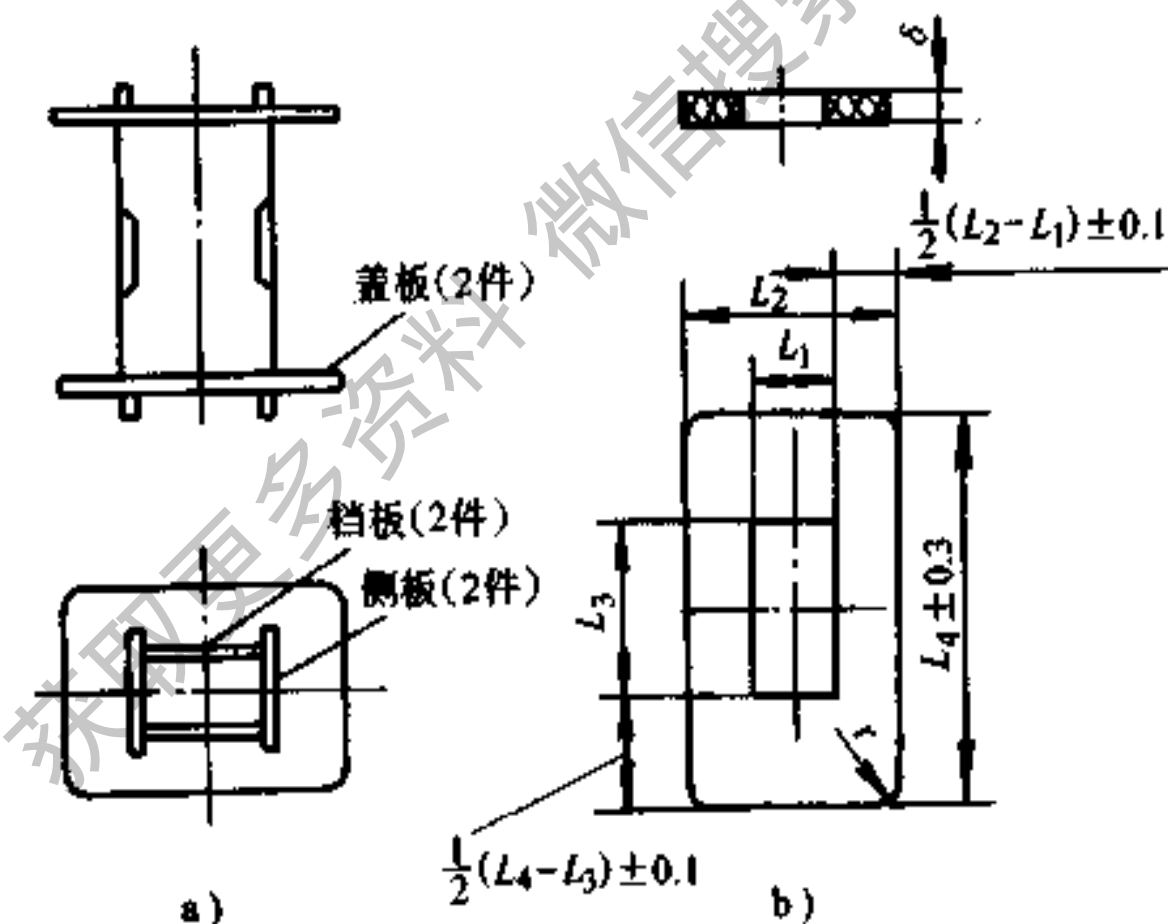


图 3-12 组合式骨架

a) 骨架结构 b) 盖板尺寸

表 3-27 整体式骨架尺寸 (单位: mm)

铁心型号	尺寸 $a \times B$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$H$		$\gamma$	$\delta$
						E 型	XE 型		
$E_2$	$2 \times 1.5$	2.8	6.8	3.5	9	6			
	$2 \times 4$			5					
$E_{2.5}$	$2.5 \times 3.2$	3.3	8.3	4.2	10.8	7.3		10	
	$2.5 \times 5$			6					
$E_3$ $XE_3$	$3 \times 4$	3.8	9.8	5	13.6	8.5	7.3		0.5
	$3 \times 6.3$			7.3					
$E_4$ $XE_4$	$4 \times 4$	5.2	13.8	5	16.6			1.5	
	$4 \times 5$			6					
	$4 \times 6.3$			7.3	19	12.3	9.8		
	$4 \times 8$			9					

(续)

铁心型号	尺寸 $a \times b$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	H		$\gamma$	$\delta$
						E型	XE型		
$E_5$	5×5	6.2	16.8	6	20.6	14.8	12.3	1.5	0.5
	5×6.5			7.3	22				
	5×8			9	23.6				
	5×10			11	25.6				
$XE_5$	6×6.3	7.2	19.8	7.3	24	17.3	14.8	1.5	0.5
	6×8			9	25.6				
	6×10			11	27.6				
	6×1.25			13.5	30				
$E_8$	8×8	9.6	25.8	9.4	30.6	22.3	19.8	2	0.8
	8×10			11.4	32.6				
	8×12.5			13.9	35				
	8×16			17.4	38.6				
$XE_8$	8×8	9.6	25.8	9.4	30.6	22.3	19.8	2	0.8
	8×10			11.4	32.6				
	8×12.5			13.9	35				
	8×16			17.4	38.6				

$$L_1 = a + 2\delta + 0.2, \quad L_2 = a + 2L_1 - 0.2$$

$$L_3 = B - 2\delta, \quad L_4 = L_3 + (L_2 - L_1) + A$$

式中符号意义同前。表 3-28 示出组合式骨架尺寸。

表 3-28 组合式骨架尺寸 (单位: mm)

铁心尺寸 $a \times B$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$\gamma$	$\delta$
2×2.5	2.8	6.8	3.1	9	1.0	0.3
2×4			4.6	10.6		
2.5×3.2	3.3	8.3	3.8	10.8		
2.5×5			5.6	12.6		
3×4	3.8	9.8	4.6	13.6		
3×6.3			6.9	16		
4×4	5.2	13.8	5	16.6		
4×5			6	17.6		
4×6.3			7.3	19		
4×8			9	20.6		
5×6.3	6.2	16.8	7.3	22		
5×8			9	23.6		
5×5			6	20.6		
5×10			11	25.6		

(续)

铁心尺寸 $a \times B$		$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$\gamma$	$\delta$
6×6.3		7.2	19.8	7.3	24	1.5	0.5
6×8				9	25.6		
6×10				11	27.6		
6×12.5				13.5	30		
8×8		9.6	25.8	9.4	30.6	—	—
8×10				11.4	32.6		
8×12.5				13.9	35		
8×16				17.4	38.6		
铁心 型号	铁心尺寸 $a \times B$	$L_1$	$L_2$	$H$	$H_1$	$H_2$	$\delta$
E <sub>8</sub>	8×8	8	9.4	22.3	7.5	7.3	0.7
	8×10	10	10.4				
	8×12.5	12.5	13.9				
	8×16	16	17.4				
XE <sub>3</sub>	3×4	4	4.6	7.3	2.5	2.3	0.3
	3×6.3	6.3	6.9				

(续)

铁心 型号	铁心尺寸 $a \times B$	$L$	$L_1$	$H$	$H_1$	$H_2$	$\delta$
XE <sub>4</sub>	4×4	4	5	9.8	3.4	3	
	4×5	5	6				
	4×6.3	6.3	7.3				
	4×8	8	9				
XE <sub>5</sub>	5×5	5	6	12.3	4	4.3	0.5
	5×6.3	6.3	7.3				
	5×8	8	9				
	5×10	10	11				
XE <sub>6</sub>	6×6.3	6.3	7.3	14.8	5	4.8	
	6×8	8	9				
	6×10	10	11				
	6×12.5	12.5	13.5				
XE <sub>8</sub>	8×8	8	9.4	19.8	6.5	6.8	0.7
	8×10	10	10.4				
	8×12.5	12.5	13.9				
	8×16	16	17.4				

变压器骨架用挡板尺寸如图 3-13 所示。

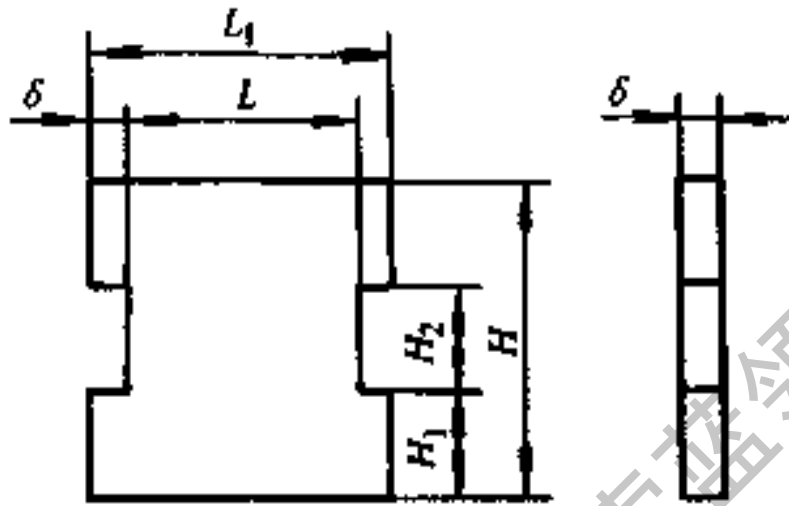


图 3-13 挡板尺寸

$$L_1 = B, \quad L = L_1 + 2\delta, \quad H = h - A, \quad H_1 = H_2$$

式中  $\delta$ ——挡板厚度 (mm);

$A$ ——装配间隙留量 (mm), 对于  $E_2$ 、 $E_3$  铁心,  $A = 0.25$ ; 其余铁心,  $A = 0.2$ ;

$B$ ——铁心迭厚 (mm);

$h$ ——铁心中柱高度 (mm);

其他符号均标在图 3-13 上, 变压器骨架用挡板尺寸如表 3-29 所示。

图 3-14 示出变压器用侧板尺寸。

$$L_1 = a + 0.2, \quad L_2 = L_1 + 2\delta$$

$$L_3 = L_2 + A, \quad H_0 = H + 2M$$

表 3-29 变压器骨架用挡板尺寸 (单位: mm)

铁心 型号	铁心尺寸 $a \times B$	$L$	$L_1$	$H$	$H_1$	$H_2$	$\delta$																																																																		
$E_2$	$2 \times 2.5$	2.5	3.1	6	2	2	0.3																																																																		
	$2 \times 4$	4	4.6					$E_{2.5}$	$2.5 \times 3.2$	3.2	3.8	7.3	2.5	2.3	$2.5 \times 5$	5	5.6	$E_3$	$3 \times 4$	4	4.6	8.5	3	2.5	$3 \times 6.3$	6.3	6.9	$E_4$	$4 \times 4$	4	5	12.3	4	4.3	$4 \times 5$	5	6	$4 \times 6.3$	6.3	7.3	$4 \times 8$	8	9	$E_5$	$5 \times 5$	5	6	14.5	5	4.8	$5 \times 6.3$	6.3	7.3	$5 \times 8$	8	9	$5 \times 10$	10	11	$E_6$	$6 \times 6.3$	6.3	7.3	17.3	6	5.3	$6 \times 8$	8	9	$6 \times 10$	10	11	$6 \times 12.5$
$E_{2.5}$	$2.5 \times 3.2$	3.2	3.8	7.3	2.5	2.3																																																																			
	$2.5 \times 5$	5	5.6					$E_3$	$3 \times 4$	4	4.6	8.5	3	2.5	$3 \times 6.3$	6.3	6.9	$E_4$	$4 \times 4$	4	5	12.3	4	4.3	$4 \times 5$	5	6		$4 \times 6.3$	6.3	7.3				$4 \times 8$	8	9	$E_5$	$5 \times 5$	5	6	14.5	5		4.8	$5 \times 6.3$	6.3				7.3	$5 \times 8$	8	9	$5 \times 10$	10	11	$E_6$	$6 \times 6.3$		6.3	7.3	17.3				6	5.3	$6 \times 8$	8	9	$6 \times 10$	10
$E_3$	$3 \times 4$	4	4.6	8.5	3	2.5																																																																			
	$3 \times 6.3$	6.3	6.9					$E_4$	$4 \times 4$	4	5	12.3	4	4.3	$4 \times 5$	5	6		$4 \times 6.3$	6.3	7.3				$4 \times 8$	8	9	$E_5$	$5 \times 5$	5	6	14.5	5	4.8	$5 \times 6.3$	6.3	7.3		$5 \times 8$	8	9			$5 \times 10$		10	11	$E_6$	$6 \times 6.3$	6.3	7.3	17.3	6	5.3	$6 \times 8$	8	9		$6 \times 10$	10	11	$6 \times 12.5$		12.5	13.5								
$E_4$	$4 \times 4$	4	5	12.3	4	4.3																																																																			
	$4 \times 5$	5	6																																																																						
	$4 \times 6.3$	6.3	7.3																																																																						
	$4 \times 8$	8	9																																																																						
$E_5$	$5 \times 5$	5	6	14.5	5	4.8																																																																			
	$5 \times 6.3$	6.3	7.3																																																																						
	$5 \times 8$	8	9																																																																						
	$5 \times 10$	10	11																																																																						
$E_6$	$6 \times 6.3$	6.3	7.3	17.3	6	5.3																																																																			
	$6 \times 8$	8	9																																																																						
	$6 \times 10$	10	11																																																																						
	$6 \times 12.5$	12.5	13.5																																																																						



(续)

铁心 型号	铁心尺寸 $a \times B$	$L$	$L_1$	$H$	$H_1$	$H_2$	$\delta$
$E_8$	8×8	8	9.4	22.3	7.5	7.3	0.7
	8×10	10	10.4				
	8×12.5	12.5	13.9				
	8×16	16	17.4				
$XE_3$	3×4	4	4.6	7.3	2.5	2.3	0.3
	3×6.3	6.3	6.9				
$XE_4$	4×4	4	5	9.8	3.4	3	
	4×5	5	6				
	4×6.3	6.3	7.3				
	4×8	8	9				
$XE_5$	5×5	5	6	12.3	4	4.3	0.5
	5×6.3	6.3	7.3				
	5×8	8	9				
	5×10	10	11				
$XE_6$	6×6.3	6.3	7.3	14.8	5	4.8	
	6×8	8	9				
	6×10	10	11				
	6×12.5	12.5	13.5				

(续)

铁心 型号	铁心尺寸 $a \times B$	$L$	$L_1$	$H$	$H_1$	$H_2$	$\delta$
XE <sub>8</sub>	8×8	8	9.4	19.8	6.5	6.8	0.7
	8×10	10	10.4				
	8×12.5	12.5	13.9				
	8×16	16	17.4				

式中  $a$ ——铁心中柱宽度 (mm);

$\delta$ ——侧板厚度 (mm);

$A$ ——经验数据, 对  $E_2$ 、 $E_{2.5}$  铁心,  $A=2$ ;  $E_3$ 、 $E_4$ ,  $A=3$ ;  $E_5$ 、 $E_6$ ,  $A=2.4$ ;  $E_8$ ,  $A=5$ ;

$M$ ——系数, 对  $E_2$ 、 $E_{2.5}$ 、 $E_3$  铁心,  $M=1.2$ ;  $E_4$ 、 $E_6$ ,  $M=1.5$ ;  $E_8$ ,  $A=2$ ;

其它符号见图 3-14 所示。

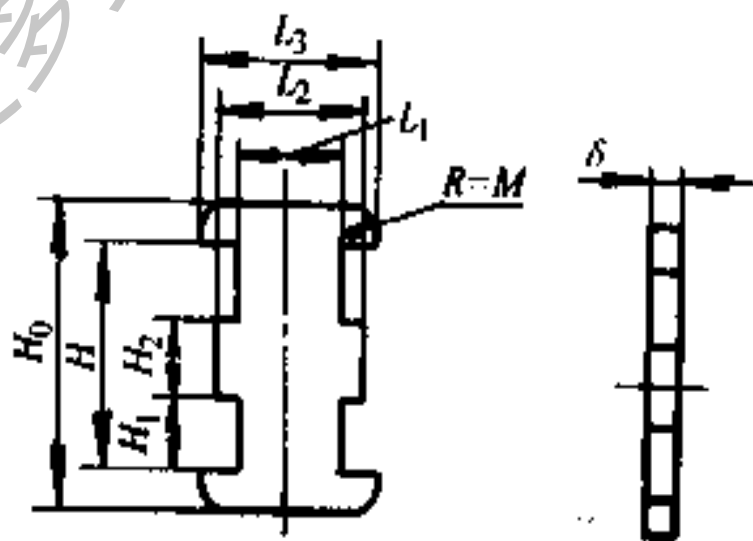


图 3-14 变压器骨架用侧板

变压器用骨架侧板尺寸如表 3-30 所示。

表 3-30 变压器骨架用侧板尺寸

(单位: mm)

铁心型号	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$H$	$H_1$	$H_2$	$H_0$	$M$	$\delta$
$E_2$	2.2	2.8	4.8	6	2	2	8.4	1.2	0.3
$E_{2.5}$	2.7	3.3	5.3	7.3	2.5	2.3	9.7		
$E_3$	3.2	3.8	6.8	8.5	3	2.5	10.9		
$E_4$	4.2	5.2	8.2	12.3	4	4.3	15.3	1.5	0.5
$E_5$	5.2	6.2	10.2	14.8	5	4.8	17.8		
$E_6$	6.2	7.2	11.2	17.3	6	5.3	20.3		
$E_8$	8.2	9.6	14.6	22.3	7.5	7.3	26.3	2	0.7
$XE_3$	3.2	3.8	6.8	7.3	2.5	2.3	9.7	1.2	0.3
$XE_4$	4.2	5.2	8.2	9.8	3.4	3	12.8	1.5	0.5
$XE_5$	5.2	6.2	10.2	12.3	4	4.3	15.3		
$XE_6$	6.2	7.2	11.2	14.8	5	4.8	17.8		
$XE_8$	8.2	9.6	14.6	19.8	6.5	6.8	23.8	2	0.7

## 五、电动机起动用自耦变压器设计

### 1. 铁心截面选择

电动机起动用自耦变压器是短时工作制, 铁心材料多用低碳钢片, 允许空载电流较大 ( $I_0 \leq 0.2I_n$ )。

三相异步电动机起动用三相自耦变压器铁心截面可

按下式计算：

$$S = (5.85 \sim 6.9) \sqrt{P_{de}}$$

式中  $S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ )；

$P_{de}$ ——电动机额定功率 (kW)。

## 2. 绕组匝数确定

$$W = \frac{U_x \times 10^4}{4.44 f B_s S}$$

式中  $U_x$ ——相电压，220V；

$f$ ——电源频率，工频时  $f = 50\text{Hz}$

$B_s$ ——磁通密度 (T)，可取  $1.6 \sim 1.8\text{T}$ ；

$S$ ——同前。

设每相有两个抽头，它们的电压比分别为  $n_1\%$  和  $n_2\%$  (图 3-15)，其中  $n_1\% > n_2\%$ ，则各绕组的匝数为：

$$W_1 = (1 - n_1\%) \times W$$

$$W_2 = (n_1\% - n_2\%) \times W$$

$$W_3 = n_2\% \times W$$

## 3. 各段绕组可能通过的最大电流的计算

(1) 当使用  $n_1\%$  抽头时 (即  $W_1$  中)

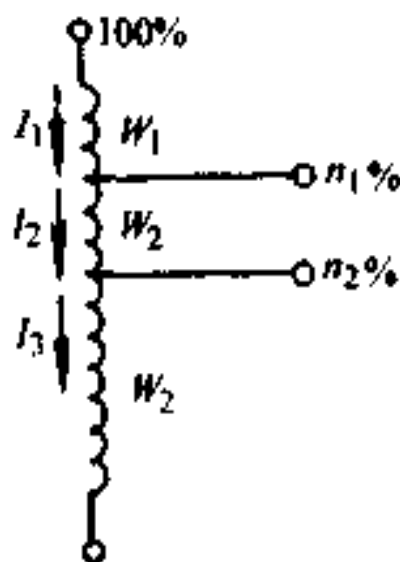


图 3-15 每相二个抽头的示意图

$$I_1 = 0.8 (n_1 \%)^2 K I_{dc}$$

(2) 当使用  $n_2 \%$  抽头时 (即  $W_2$  中)

$$I_2 = 0.8 (n_2 \%)^2 K I_{dc}$$

(3) 当使用  $n_2 \%$  抽头时 (即  $W_3$  中)

$$I_3 = 0.8 n_2 \% K (1 - n_2 \%) I_{dc}$$

式中  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ……可能流过各绕组的最大电流 (A);

$K$ ——电动机直接起动电流倍数, 取  $K = 6$ ;

$I_{dc}$ ——电动机额定电流 (A)。

#### 4. 电流密度的计算

$$J = \sqrt{\frac{C\gamma\tau}{\rho t (1 + K_s)}}$$

式中  $J$ ——电流密度 ( $A/mm^2$ );

$C$ ——导线的比热 ( $J/g \cdot C$ );

$\gamma$ ——导线的密度 ( $g/cm^3$ );

$\tau$ ——绕组的允许温升 ( $C$ );

$\rho$ ——导线的电阻率 ( $\Omega \cdot mm^2/m$ );

$t$ ——绕组的通电时间总和 (s);

$K_s$ ——散热系数, 对于  $t < 10s$ , 取  $K_s = 0$ ,  $t$  为数秒时,  $K_s = 0.1 \sim 0.2$ 。

#### 5. 导线截面的选择

$$q_1 = \frac{I_1}{J}, \quad q_2 = \frac{I_2}{J}, \quad q_3 = \frac{I_3}{J}$$

式中  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  —— 各段绕组 ( $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ ) 导线截面 ( $\text{mm}^2$ );

其他符号同前。

若选用铝导线, 可按下式换算

$$q_{\text{Al}} = 1.56q_{\text{Cu}}$$

## 六、脉冲变压器设计

### 1. 可控硅脉冲变压器设计

用于窄脉冲的脉冲变压器

设计要点如下:

铁心材料的选择, 可用热轧或冷轧电工钢片, 如用铁淦氧磁心, 必须选用  $B_m$  较高的, 这样前沿陡度较好。

采用硅钢片时, 截面不宜小于  $0.5\text{cm}^2$ , 若选用环形冷轧硅钢片铁心时, 内径为  $1.8\sim 2\text{cm}$ , 外径为  $3.0\text{cm}$ , 高为  $1\text{cm}$  左右。

匝数的选择, 当磁路长度为  $6\sim 8\text{cm}$  时, 一次侧绕组  $W_1$  为

热轧钢片 250~350 匝

冷轧钢片环形铁心为 200~300 匝

铁淦氧磁环为 50~60 匝

二次侧绕组匝数一般选  $W_2 = W_1$ , 导线直径一般为  $0.15\sim 0.25\text{mm}$  的高强度漆包线。

用于宽脉冲的脉冲变压器

铁心截面和一次侧绕组匝数的计算:

$$W_1 S = \frac{\Delta\psi}{100 \cdot \Delta B}$$

式中  $W_1$ ——一次绕组匝数；

$S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ )；

$\Delta\psi$ ——变压器一次侧绕组磁链最大变化值 ( $\text{V} \cdot \mu\text{s}$ )，它由一次侧脉冲幅度、宽度及形状决定，参看图 3-16；

$\Delta B$ ——变压器铁心磁通密度的变化值 (T)，它由铁心磁化曲线决定。

输出单向脉冲  $\Delta B = B_s - B_r$ ；

有去磁绕组时  $\Delta B = 2B_s$ ；

$B_s$ ——铁心饱和磁通密度， $B_s \approx 1.43B_m$ ；

$B_r$ ——剩余磁通密度，一般铁淦氧环取 0.1~0.3T；冷轧硅钢片取 0.4~0.5T；热轧钢片取 0.7~0.8T；

$B_m$ ——同前。

图 3-16 中  $U_1$  为变压器一次侧脉冲的幅值 (V)；一般的晶体管触发电路， $U_1$  即为电源电压  $E$ ，对单结晶体管触发电路可取单结晶体管的峰点电压  $V_p = \eta U_{HB}$ 。

当脉冲宽度较小时 (如 1ms 左右)，可选  $W_1$  为 200 匝，当脉冲宽度大，选出的  $S$  过大 (超过  $3\text{mm}^2$ ) 时，可增大  $W_1$  (如 400 或更大)。

在脉冲宽度较大时，一般可采用去磁绕组和采用

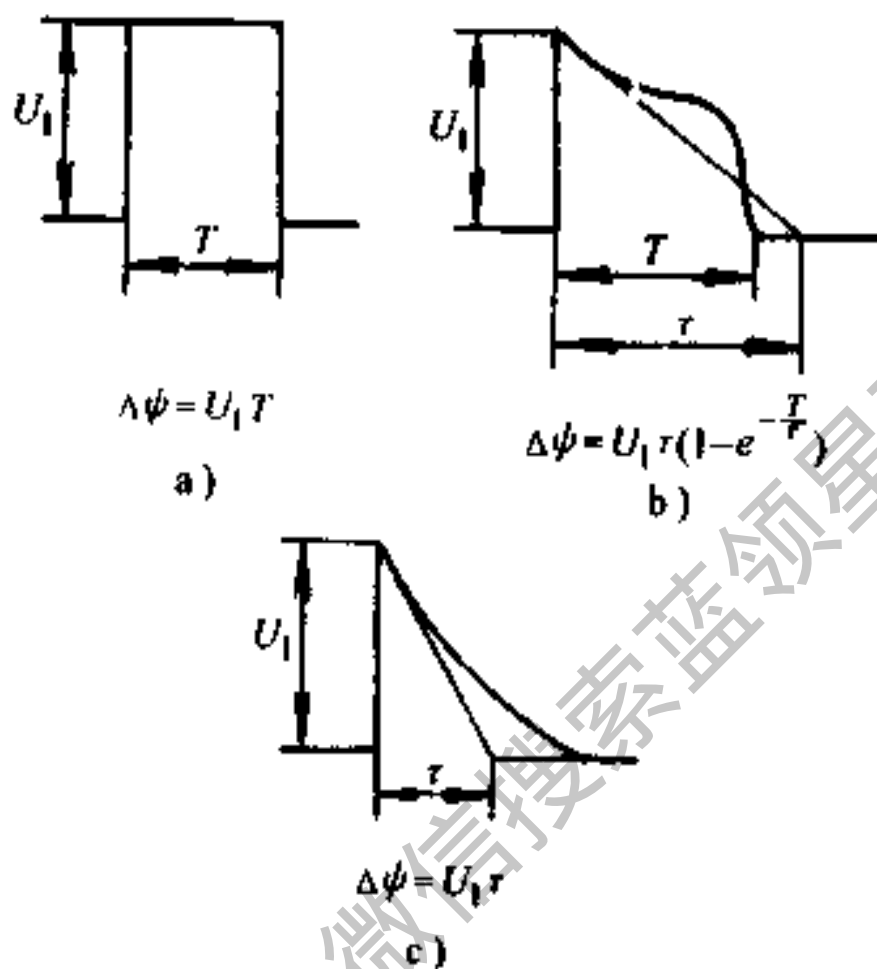


图 3-16 几种形状的脉冲

a) 矩形波    b) 梯形波    c) 尖波

$\Delta B$  大的铁心材料，以便使  $S$  大大减小。

也可按下列范围选取  $S$  后，计算  $W_1$ ，再根据实际使用情况进行调整。

$$S = (2 \sim 4) \sqrt{P}, \quad P = V_g I_g$$

式中  $S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ )；

$P$ ——可控硅最大触发功率 (W)；

$V_g$ ——可控硅最大触发电压 (V)；

$I_g$ ——可控硅最大触发电流 (A)。





式中  $L_l$ ——励磁电感 ( $\mu\text{H}$ );

$\mu_d$ ——脉冲导磁率 ( $\text{T/A} \cdot \text{m}^{-1}$ ), 例如:  $M_{1000}$  型磁心,  $\mu_d = 0.5026 \times 10^{-3} \sim 0.8168 \times 10^{-3}$ , 而  $M_{2000}$  型磁心,  $\mu_d = 0.9425 \times 10^{-3} \sim 1.7592 \times 10^{-3}$ ;

$W_1$ ——一次侧绕组匝数;

$S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ );

$l$ ——磁路平均长度 ( $\text{cm}$ )。

### 七、音频变压器的设计

音频变压器常用于推挽式电子线路中, 图 3-17 示出推挽式音频变压器的应用线路。从图中可见  $T_1$  为输入变压器,  $T_2$  为输出变压器, 都是音频变压器。

#### 1. 计算一次侧阻抗

$$Z_1 = \frac{2(U_c - U_{ces})}{I_1}$$

$$I_1 = \frac{1.1P_{2e}}{(U_c - U_{ces}) \eta_b \eta}$$

式中  $Z_1$ ——一次阻抗 ( $\Omega$ );

$U_c$ ——电源电压 ( $\text{V}$ );

$U_{ces}$ ——晶体管饱和压降 ( $\text{V}$ );

$I_1$ ——一次侧绕组电流 ( $\text{A}$ );

$P_{2e}$ ——额定输出功率 ( $\text{W}$ );

$\eta_b$ ——变压器效率,  $1\text{W}$  以下取 0.7;

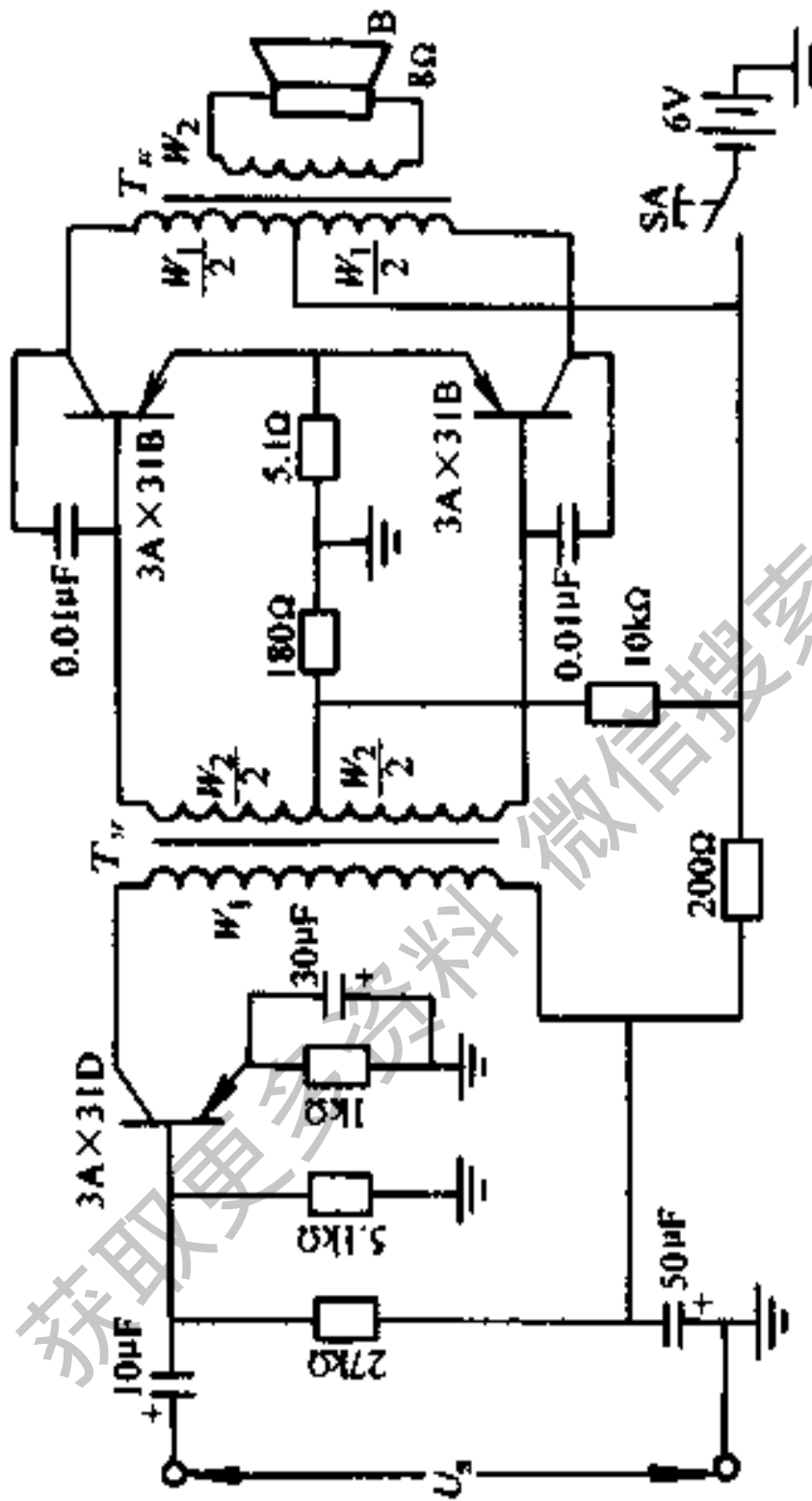


图 3-17 常用音频变压器电路

$\eta$ ——晶体管乙类推挽放大效率，约 0.65 ~ 0.75。

为了简化计算，一次阻抗  $Z_1$  可直接从图 3-18 的曲线上查得。

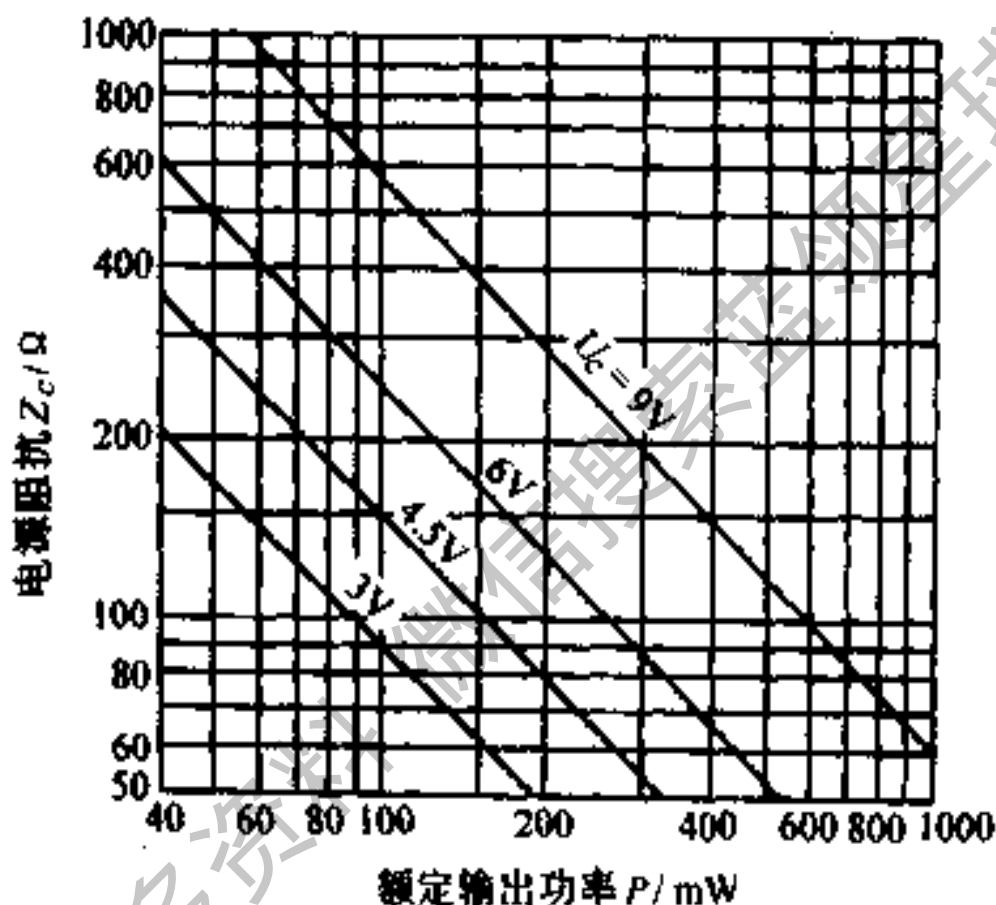


图 3-18 负载阻抗与输出功率的关系曲线

2. 一、二次侧绕组的匝数比为

$$n = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$$

小变压器效率较低，为了补偿绕组中的电压降，还应考虑变压器效率  $\eta_b$ ，这时

$$n = \sqrt{\frac{Z_c \eta_b}{R_y}}$$

式中  $R_v$ ——二次绕组阻抗 ( $\Omega$ )。

3. 二次绕组电感量为

$$L_1 = \frac{Z_c}{2\pi f \sqrt{M^2 - 1}}, \quad M = 10^{\frac{s}{20}}$$

式中  $L_1$ ——二次侧绕组电感量 (H)；

$M$ ——衰减  $s$  分贝时的失真系数。

4. 选择铁心截面：

当选用 XE 型铁心时，

$$S = \sqrt{P_{2e}}$$

式中  $S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ )；

$P_{2e}$ ——额定输出功率 (W)。

5. 计算一、二次侧绕组匝数：

$$W_1 = 10 \sqrt{\frac{L_1 l}{\mu S}}, \quad W_2 = W_1 / n$$

式中  $l$ ——磁路平均长度 (cm)；

$\mu$ ——磁性材料导磁率 ( $\text{T/A} \cdot \text{m}^{-1}$ ) 硅钢片  $\mu$  约

为  $1.2566 \times 10^{-3} \text{T/A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

6. 选择导线直径：

$$d = 1.13 \sqrt{I/J}$$

式中  $d$ ——导线直径 (mm)；

$J$ ——电流密度，一、二次取相同，一般  $2 \sim 3 \text{A/mm}^2$ 。

## 第四节 铁磁谐振稳压器设计

### 一、电厂、变电所整流装置用稳压器的设计

稳压器的一次侧绕组  $W_1$  接至电流互感器二次侧，电容器绕组  $W_c$  接电容器，二次侧绕组  $W_2$  与补偿绕组  $W_B$  反极性串联后接入整流器。 $W_2$  与  $W_c$  中的电势随  $W_1$  中电流增加而升高，达到一定值后因铁心饱和而平稳。 $W_B$  中电势与  $W_1$  中电流成正比，而  $W_B$  与  $W_2$  反极性串联，因此，当系统短路，电流互感器二次侧电流有很大变化时， $W_B$  能有效地抵消  $W_2$  中部分电压，使直流电压保持稳定。接线图如图 3-19 所示。

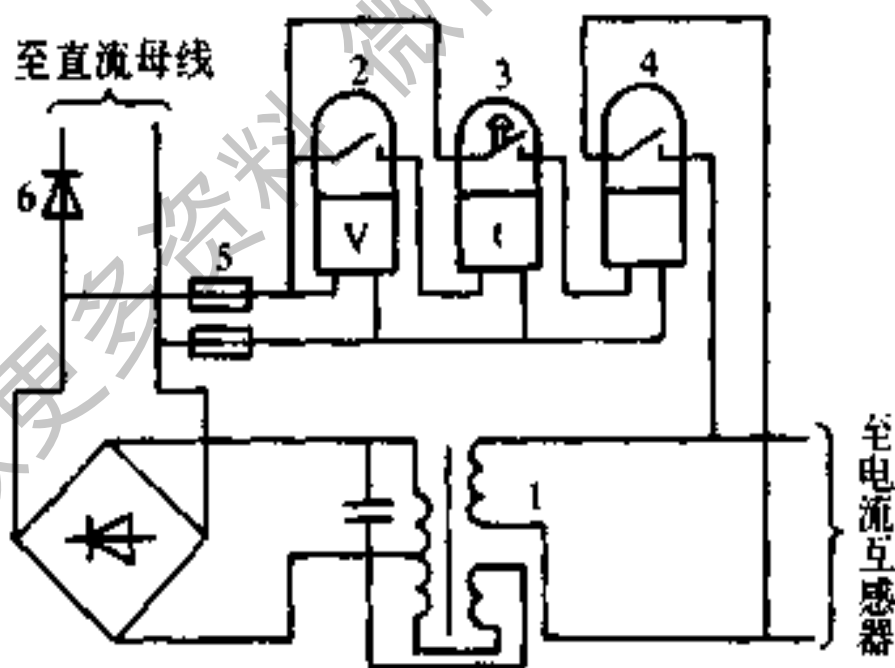


图 3-19 监视电压的消振装置接线图

- 1—铁磁消振稳压器 2—电压继电器 3—时间继电器  
4—中间继电器 5—熔断器 6—硅整流器

1. 铁心型式的选择, 铁心可采用不等截面与等截面两种。表 3-31 示出两种截面的比较。

表 3-31 中,  $W_1$ 、 $W_B$  为一次绕组和补偿绕组, 装在不饱和铁心上;  $W_2$ 、 $W_c$  为二次侧绕组和电容器绕组, 装在饱和铁心柱上。

## 2. 铁心截面的选择

### (1) 不等截面

非饱和铁心柱截面

$$S_1 = 1.1 \sqrt{P}$$

式中  $P$ ——稳压器容量 (VA)。

饱和铁心柱截面

$$S_2 = 0.582 S_1$$

有磁分路铁心柱截面

$$S_3 = 0.4 S_1$$

### (2) 等截面

$$S = (0.65 \sim 0.85) \sqrt{P}$$

## 3. 每个绕组应绕匝数的计算

### (1) 每匝绕组的电压

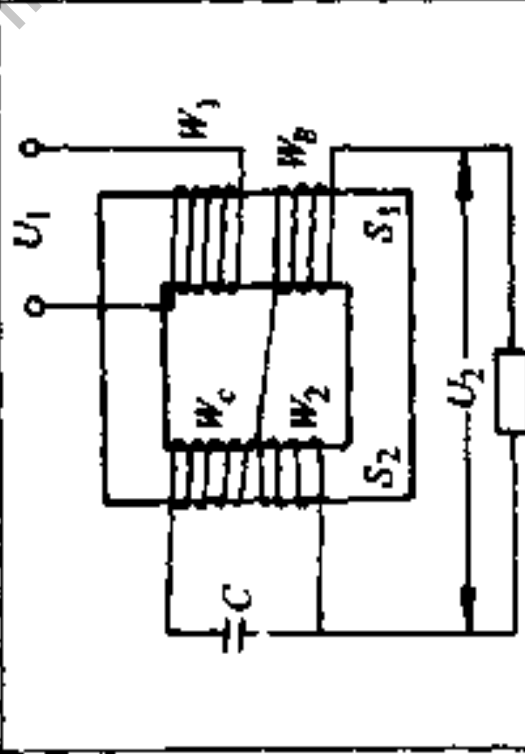
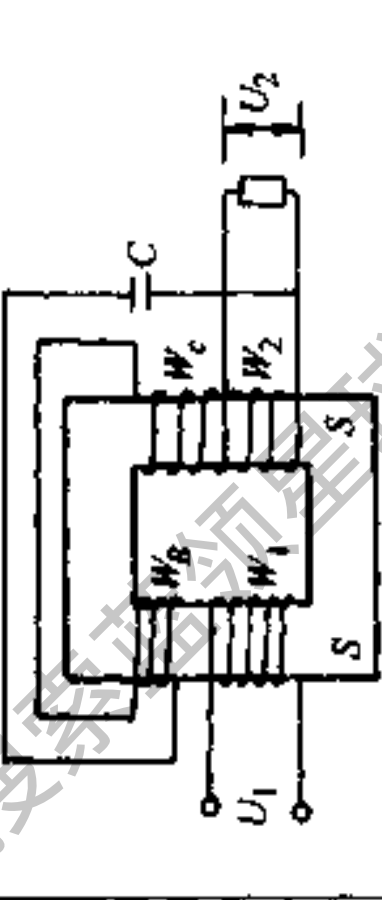
$$e_o = 4.44 f B_2 S \times 10^{-4}$$

式中  $e_o$ ——每匝绕组的电压 (V/匝);

$S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ );

$f$ ——电源频率 (Hz);

表 3-31 等截面与不等截面铁心的比较

序号	不等截面	等截面
1	空载时稳压性能良好	空载时稳压性能较差
2	防止电压曲线起翘时所需电容量小	防止电压曲线起翘时需要较大的电容量或电容绕组反接
3	抗负载能力弱	抗负载能力强
4	制造较复杂	制造方便
5	适用于电源稳压器	适用于电源稳压器
示意图		



$B_z$ ——磁通密度 (T), 一般硅钢片取  $0.8 \sim 1.0\text{T}$ 。

(2) 一次侧绕组应绕匝数为

$$W_1 = U_1 / e_0$$

式中  $W_1$ ——一次侧绕组匝数 (匝);

$U_1$ ——对电压源稳压器为输入电压 (V); 对电流源稳压器取电流互感器伏安特性曲线上高于拐点的电压, 宜取偏后一些, 使  $W_1$  偏大, 以便调整。

(3) 二次侧绕组匝数  $W_2$

若二次侧绕组加补偿

$$W_2 = 1.4U_2 / e_0, \text{ 若二次侧不加补偿}$$

$$W_2 = U_2 / e_0$$

式中  $U_2$ ——输出电压 (V), 单相桥式  $U_2 = 1.1U_c$ , 三相桥式  $U_2 = 0.74U_c / \sqrt{3}$  (稳压器二次接星形),  $U_c$  为直流输出电压 (V)。

(4) 补偿绕组匝数  $W_B$  为

当  $W_B$  作为二次侧回路补偿时

$$W_B = (0.2 \sim 0.3) W_2$$

当  $W_B$  作为电容器绕组补偿时

$$W_B = (0.2 \sim 0.3) W_C$$

(5) 电容器绕组匝数

不采用补偿绕组时  $W_C = (U_C - U_2) / e_0$

采用补偿绕组时  $W_c = (1.3 \sim 1.4)(U_c - U_2)/e_0$

式中  $U_c$ ——二次侧绕组与电容器绕组电压之和 (V),  
一般取小于 1000V;

(6)  $U_c$  按所选电容器允许额定电压选择时

当不正常谐振时  $U_c = U_g$

当正常谐振时  $U_c = (0.8 \sim 0.9) U_g$

式中  $U_g$ ——电容器的工作电压 (V)。

4. 各绕组导线直径的选择:

一次侧绕组电流为  $I_1 = \frac{2P}{U_1}$

电容器绕组电流  $I_c = 1.5 \frac{P}{U_c}$

补偿绕组电流为  $I_B = P/U_2$

二次侧绕组电流  $I_2 = \sqrt{I_c^2 + I_B^2}$

一次侧绕组导线直径 (铜导线)  $d_1 = 0.8 \sqrt{I_1}$

二次侧绕组导线直径 (铜导线)  $d_2 = 0.9 \sqrt{I_2}$

电容器绕组导线直径 (铜导线)  $d_c = 0.9 \sqrt{I_c}$

补偿绕组导线直径 (铜导线)  $d_B = 0.8 \sqrt{I_B}$

当采用铝导线时, 上述各导线直径应乘上系数  $K_r = 1.285$ 。

5. 电容量的确定, 选用的经验公式

$$C = 11000P/U_c^2$$

式中  $C$ ——电容器电容值 ( $\mu\text{F}$ );

$P$ ——稳压器容量 (VA);

$U_c$ ——同前。

由上式选出的电容量较大,也可按下式选择

$$C = 3180P/U_c^2, \text{ 这时}$$

$$P = Q$$

### 6. 谐振点选择

#### (1) 据实验结果

$$I_1 W_1 = I_c W_c - I_L W_c = (I_c - I_L) W_c$$

(2)  $I_c - I_L$  也可用做图法求得, (图 3-20)。

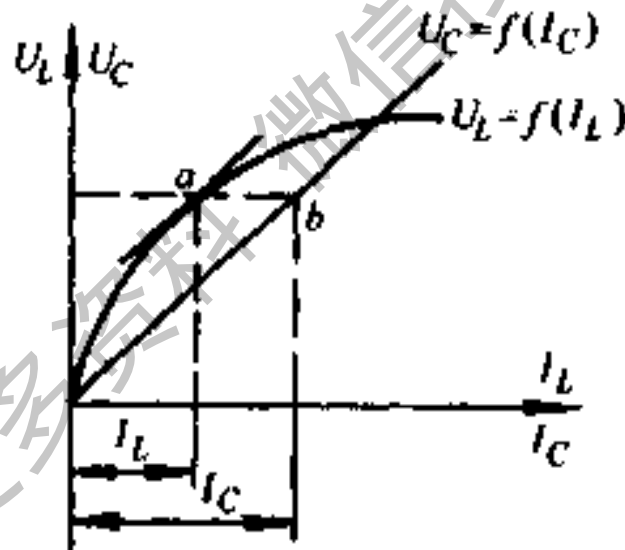


图 3-20 谐振点的选择曲线

如图所示,先作出  $U_L = f(I_L)$  和  $U_C = f(I_C)$ , 在  $U_L = f(I_L)$  曲线上一点做一与  $U_C = f(I_C)$  平行切线, 过  $a$  点做一平行于横轴的直线, 则线段  $ab$  即代表  $(I_c - I_L)$  之值。该值也是起振前最大电流差值。

## 7. 稳压器制造参数

表 3-32 列出了 3000VA 以下铁磁稳压器的制造数据。

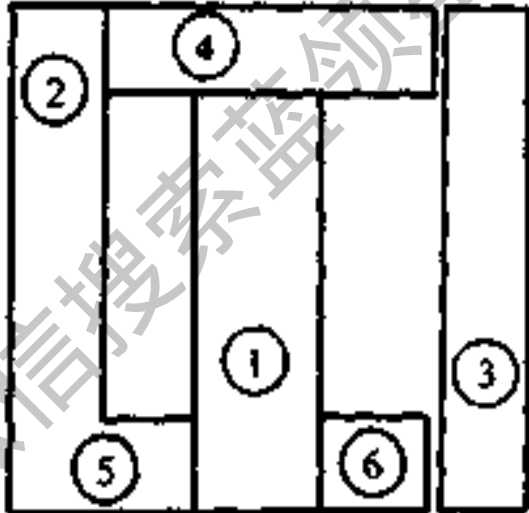
## 二、小型铁磁谐振稳压器设计

## 1. 功率 60W 以下的交流稳压器

表 3-32 稳压器的制造参数

容量/W		500	1000	500	1000
铁 心 尺 寸  /mm	①	237×60	237×60	237×60	237×60
	②	237×33	237×33	237×33	237×33
	③	270×23	270×23	270×23	270×23
	④	127×33	164×33	122×33	150×33
	⑤	78×33	102×33	73×33	97×33
	⑥	22×33	33×33	22×33	35×33
迭厚/mm		55	75	51	73
绕组 匝数 直径  (匝/ mm)	$W_1$	281/1.81	207/2.44	282/1.81	197/2.44
	$W_2$	322/1.81	230/2.44	355/1.81	250/2.44
	$W_C$	700/1.4	800/1.81	700/1.4	740/1.81
	$W_B$	45/1.81	40/2.44	70/1.81	65/2.44
电容器		10 $\mu$ F 2kV	10 $\mu$ F 2kV	4 $\mu$ F 2kV	10 $\mu$ F 2kV

(续)

容量/W		2000	3000	铁心代号
铁心尺寸/mm	①	255×91	266×99	
	②	255×50	266×56	
	③	305×38	322×40	
	④	197×50	129×56	
	⑤	127×50	136×56	
	⑥	35×50	46×56	
迭厚/mm		70	83	
绕组匝数直径/(匝/mm)	$W_1$	140/2.44	103/4.1	
	$W_2$	165/3.28	124/4.1	
	$W_c$	770/2.02	450/2.83	
	$W_B$	40/2.63	30/2.83	
电容器		10 $\mu$ F 或 8 $\mu$ F ×2.2kV	10 $\mu$ F×2 2kV	

注：绕组如采用铝导线时，应增加直径 1.285 倍。

图 3-21 示出原理图。图中电阻  $R$  取 30~500k $\Omega$ 、2W。设计步骤如下：

(1) 根据负载功率  $P$  和铁心种类查图 3-22 的曲线，得到“Ⅱ”型变压器铁心截面  $S$  和电容  $C$  的数值。然后

按表 3-33 选择标准铁心。(设定铁心迭厚)。

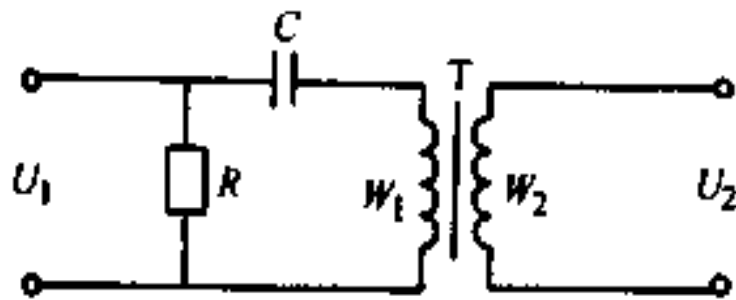


图 3-21 最简单的稳压器

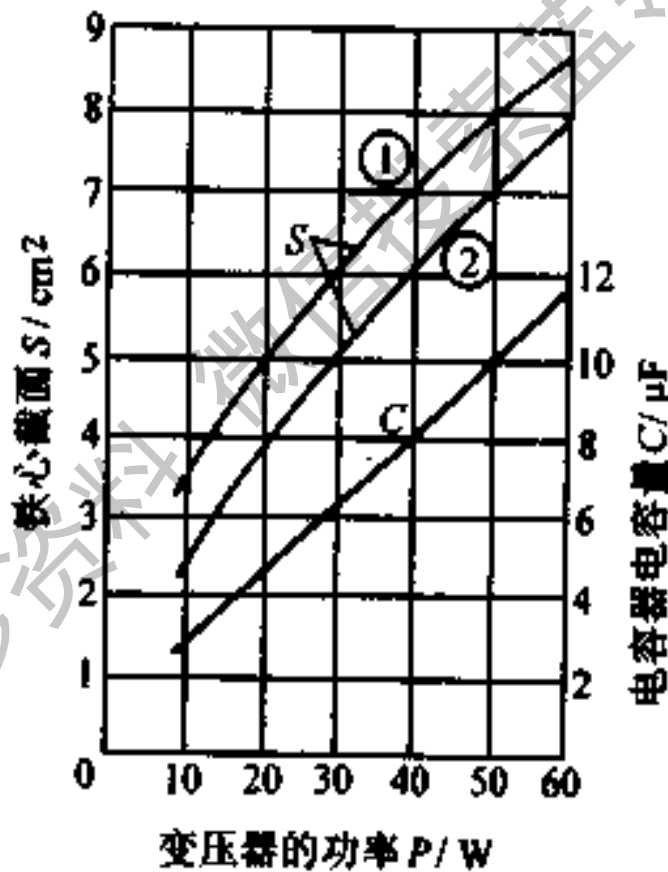


图 3-22 确定铁心截面和电容量的曲线

①曲线： $B_s=0.8\sim 1.0T$ ，如热轧硅钢片

②曲线： $B_s=1.0\sim 1.2T$ ，如冷轧硅钢片 D41、D42

表 3-33 小型变压器通用硅钢片尺寸

(单位: mm)

$a$	$c$	$h$	$A$	$H$
13	7.5	22	40	34
16	9	24	50	40
19	10.5	30	60	50
22	11	33	66	55
25	12.5	37.5	75	62.5
28	14	42	84	70
32	16	48	96	80
38	19	57	114	95
44	22	66	132	110
50	25	75	150	125
56	28	84	168	140
64	32	96	192	160

(2) 变压器一、二次侧绕组匝数和导线直径的计算。

$$\text{一次侧绕组匝数} \quad W_1 = \frac{40U_1}{S}$$

$$\text{一次侧绕组线径} \quad d_1 = 0.9 \sqrt{\frac{P}{U_1}}$$

$$\text{二次侧绕组匝数} \quad W_2 = \frac{30U_2}{S}$$

$$\text{二次侧绕组线径} \quad d_2 = 0.8 \sqrt{I_2}$$

式中  $U_1$ 、 $U_2$ ——输入和输出电压 (V);

$I_2$ ——负荷电流 (A)。

(3) 核算铁心窗口是否能容纳下所有绕组

$$\frac{\pi (W_1 d_1^2 + W_2 d_2^2)}{4ch} \leq 30\%$$

式中  $ch$ ——铁心窗口面积 ( $\text{mm}^2$ )。

若满足上式要求, 则能放下; 否则放不下, 应另选铁心。

绕制时, 一次侧绕组绕在中心铁心上, 二次绕组绕在两边心柱上。

## 第五节 电抗器的设计与计算

### 一、滤波电抗器计算

#### 1. 铁心形式的选择

电抗器常用的铁心形状有 E 型 (图 3-23) 和  $\square$  型 (图 3-24) 及十字型截面的  $\square$  形 (图 3-25)。

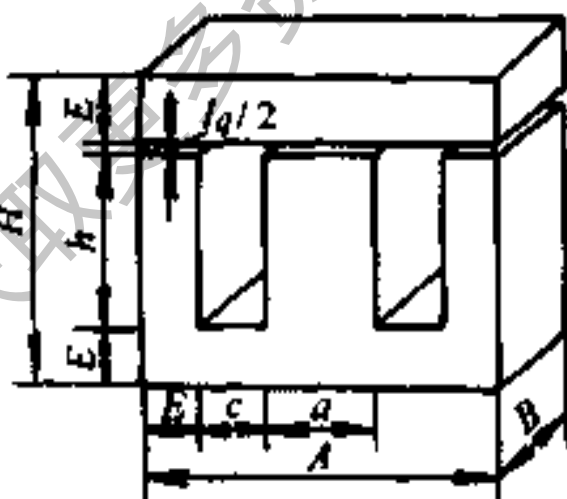


图 3-23 E 型铁心

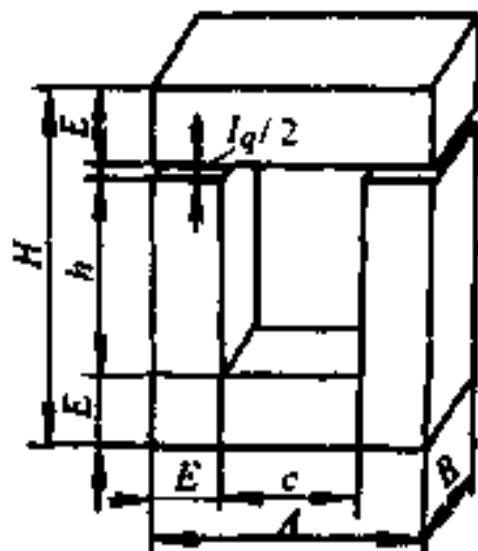


图 3-24  $\square$  形铁心



$1 < LI^2 < 2$  的小型电抗器, 可选用 E 形铁心;  $LI^2 > 2$  的中型电抗器, 可选用  $\square$  形铁心; 对于  $LI^2 \geq 30$  的大型电抗器, 可选用十字形截面的  $\square$  型铁心。其中  $L$  为额定负荷电流下的电感 (H);  $I$  为额定负荷电流 (A)。

设  $Q$  为铁心窗口面积 ( $\text{cm}^2$ );  $S$  为铁心截面 ( $\text{cm}^2$ );  $l$  为铁心平均磁路长度 (cm);  $l_0$  为气隙长度 (cm)。

2. 铁心尺寸的选择

E 形铁心  $E \approx (2.4 \sim 2.7) \sqrt{LI^2}$

$\square$  形铁心  $E \approx (2.6 \sim 2.9) \sqrt{LI^2}$

十字形截面的  $\square$  形铁心  $E \approx (3.3 \sim 3.7) \sqrt{LI^2}$

式中  $E$ ——硅钢片的宽度 (cm)。

硅钢片的宽度确定后, 再计算铁心其余各部分尺寸。采用冷轧硅钢片时, 上述尺寸可稍小些。

3. 绕组匝数  $W$  和最佳气隙  $l_0$  (cm) 的计算

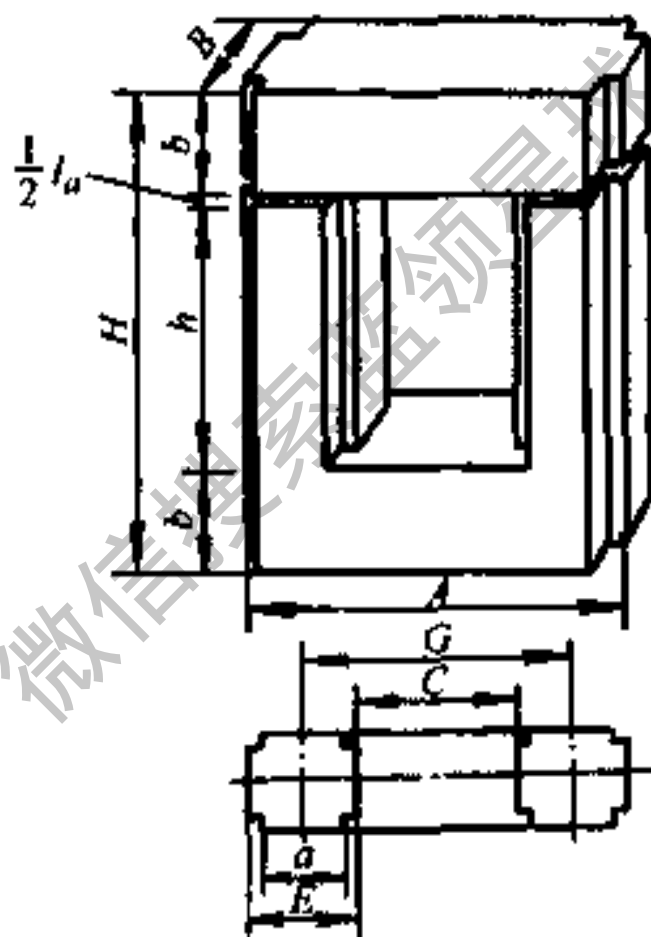


图 3-25 十字形截面的  $\square$  形铁心

可利用图 3-26 的曲线来计算  $W$  和  $l_g$ 。曲线  $a$  和  $b$  适用于 D43 热轧硅钢片和 D310 冷轧硅钢片：

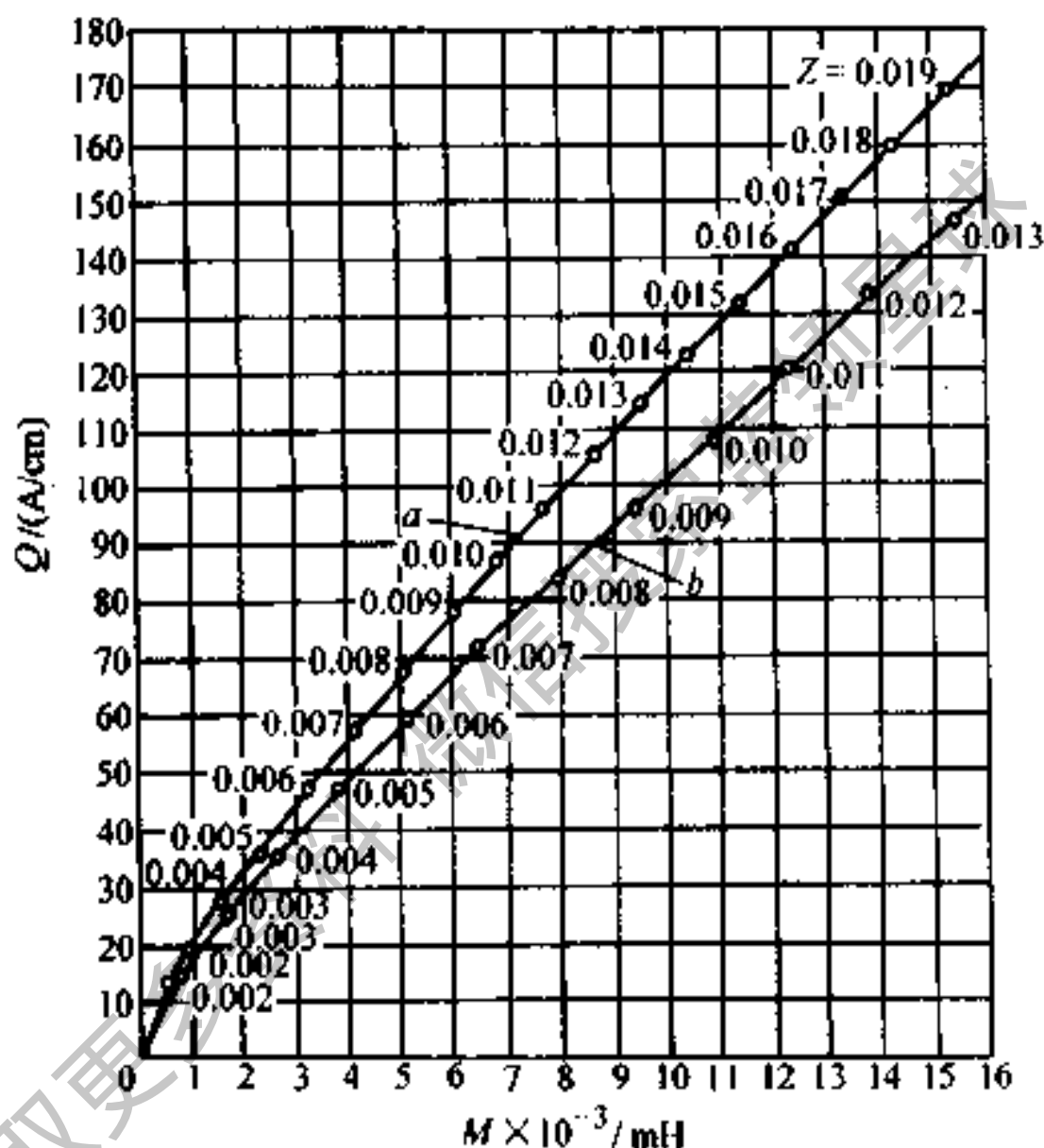


图 3-26 电抗器绕组匝数和最佳气隙的计算曲线

$$Q = \frac{WI}{l}, \quad M = \frac{LI^2}{Sl}, \quad Z = \frac{l_g}{l}$$

计算方法：先计算  $M$  值，然后在图 3-26 曲线上查出相对应的  $Q$  值和  $Z$  值，则

$$W = Ql/I, \quad l_g = Zl$$

#### 4. 导线直径的选择

$$S_b = I/j, \quad d = 1.3 \sqrt{I/j}$$

式中  $S_b$ ——扁导线的截面 ( $\text{mm}^2$ );

$d$ ——圆导线的直径 ( $\text{mm}$ );

$j$ ——电流密度, 取  $1.8 \sim 2.4 \text{A/mm}^2$ 。

#### 5. 核算铁心窗口是否能容纳绕组

核算方法同前。

#### 6. 电抗器的电感核算

先按下式计算出电感

$$L = \frac{12.6W^2S}{L_g + \frac{l}{\mu_{r\Delta}}} \times 10^{-9}$$

式中  $L$ ——电抗器的电感 (H);

$\mu_{r\Delta}$ ——硅钢片的相对有效导磁率, D43 热轧硅钢片  $\mu_{r\Delta} \approx 1000$ , D310 冷轧硅钢片  $\mu_{r\Delta} \approx 1200$ 。

### 二、交流电抗器计算

交流电抗器常用来限制交流电流及变频滤波, 为了有较好的线性度, 电抗器通常有适当的气隙。

#### 1. 铁心形式的选择

交流电抗器铁心形式的选择, 同滤波电抗器。

#### 2. 铁心截面的选择

电抗器铁心截面、窗口面积与电抗器容量有如下关系:

$$SQ = \frac{UI \times 10^2}{4.44fB_z j K_d K_Q}$$

式中  $S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ );

$Q$ ——铁心窗口截面 ( $\text{cm}^2$ );

$U$ ——电抗器上所加额定电压 (V);

$I$ ——通过电抗器的额定电流 (A);

$B_z$ ——磁通密度, (T);

$j$ ——电流密度, 可取  $1.6 \sim 2.4 \text{A/mm}^2$ ;

$K_d$ ——铁心迭片系数, 取 0.93;

$K_Q$ ——窗口填充系数, 取 0.4~0.5。

根据电抗器容量  $UI$  的大小, 选用适当的铁心, 使  $SQ$  乘积符合上式即可。

### 3. 绕组匝数 $W$ 和气隙 $l_g$ 的计算

(1) 求出铁心截面后, 便可求匝数:

$$W = \frac{U \times 10^4}{4.44fB_z S K_d}$$

(2) 气隙  $l_g$  可按以下方法确定 (图 3-27):

先计算交流磁场强度  $H = IW/l$

式中  $H$ ——交流磁场强度 (A/m);

$l$ ——铁心平均磁路长度 (m)。

然后在曲线上查出  $Z$  值, 则气隙为

$$l_g = Zl$$

实际调整时可根据测得的电抗值  $X = U/I$ , 适当增

量。

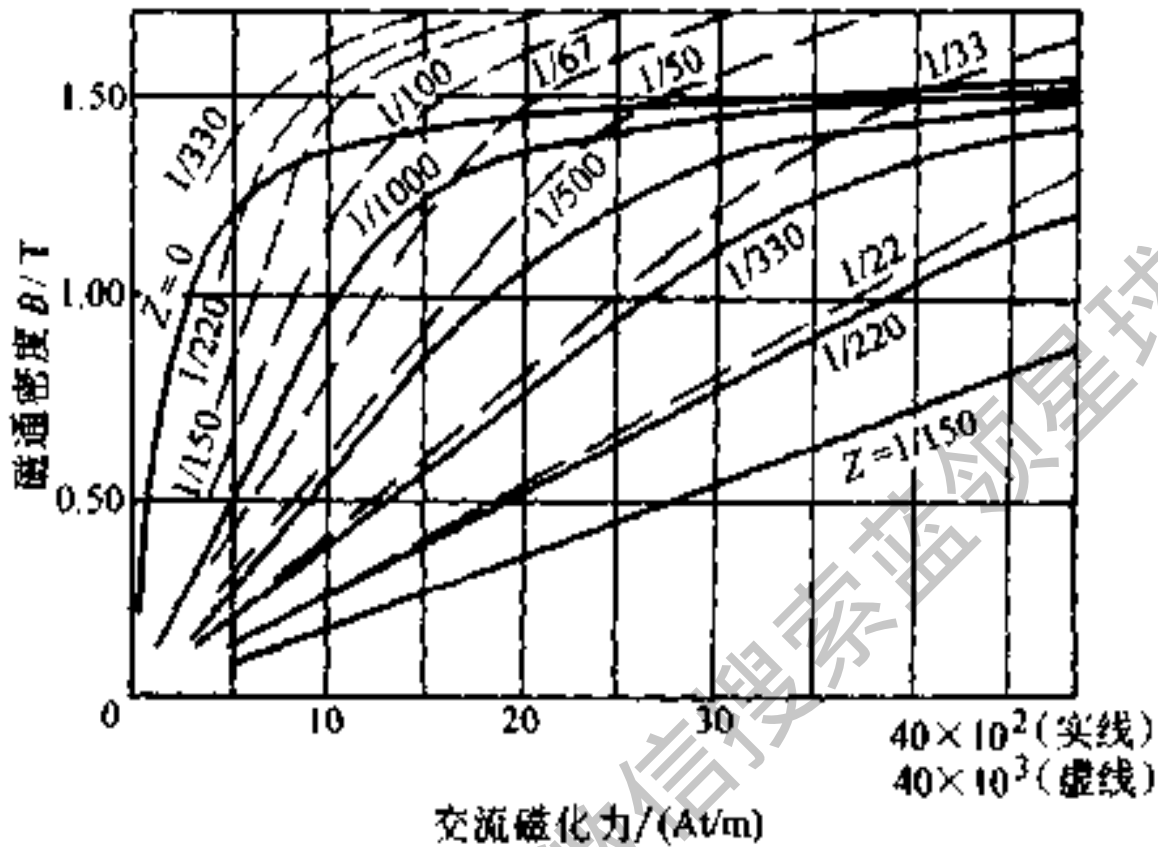


图 3-27 带气隙铁心电抗器的  $B-H$  曲线

### 三、均流电抗器计算

均流电抗器主要用于硅整流装置中解决整流元件的均流问题 (图 3-28)

#### 1. 铁心截面的选择

$$S = \frac{\Delta U \times 10^4}{2fWB_z}$$

式中  $S$  —— 铁心截面 ( $\text{cm}^2$ );

$f$  —— 电源频率 (Hz);

$W$  —— 绕组匝数;

$B_z$  —— 磁通密度, 可按表 3-34 选取。

$\Delta U$ ——并联元件的管压降差，可由整流二极管及可控硅元件电气参数表中查得。当多管并联时，应选两个管子压降差最大的管压降来计算。

表 3-34 均流电抗器磁通密度选用表

铁心 磁密 /T	匝 数	1	2	3	4
		元件额定电流/A			
50		0.45	0.55	0.60	0.65
100		0.50	0.60	0.65	0.70
200		0.55	0.65	0.70	0.75

当采用三个元件  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  并联时，可采用三柱铁心均流电抗器，其绕法如图 3-29 所示。

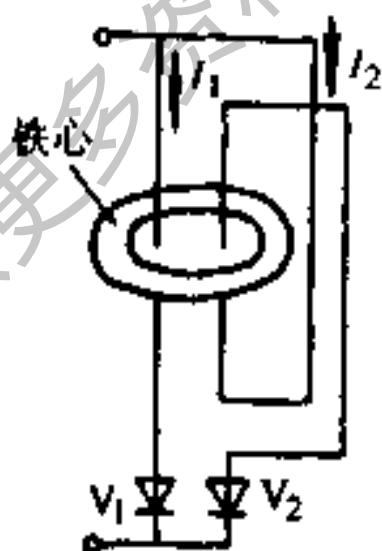


图 3-28 均流电抗器的接线

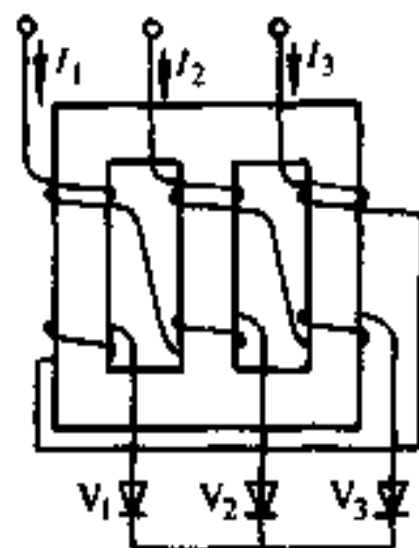


图 3-29 三柱铁心的均流电抗器

铁心截面计算公式同上，但  $B_m$  值应取小些。

## 2. 匝数的确定

均流电抗器的匝数，以不超过 4 匝为宜。磁路长度应尽可能的短。

## 四、空心电抗器计算

为了限制可控硅元件导通瞬间电流变化率，并且有利于并联及可控硅元件均流，在每个桥臂上串入一只空心电抗器。

### 1. 空心电抗器的电感

$$L = \frac{\mu_p}{di/dt} \cdot \mu_p = 1.1 \sqrt{2} U_2$$

式中  $L$ ——空心电抗器的电感 ( $\mu\text{H}$ )；

$\mu_p$ ——每臂元件开闭最大电压 (V)，需考虑电网电压波动 10%；

$U_2$ ——变压器二次电压有效值 (V)；

$di/dt$ ——可控硅元件允许的电流变化率 ( $\text{A}/\mu\text{s}$ )，可取  $10\text{A}/\mu\text{s}$ 。

### 2. 空心电抗器的结构

当电感量小时可制成单层螺管式，电感量大时可制成多层式 (图 3-30)。

#### (1) 单层螺管式的电感：

$$L = K (\pi n D)^2 l$$

式中  $L$ ——电感 ( $\mu\text{H}$ )；

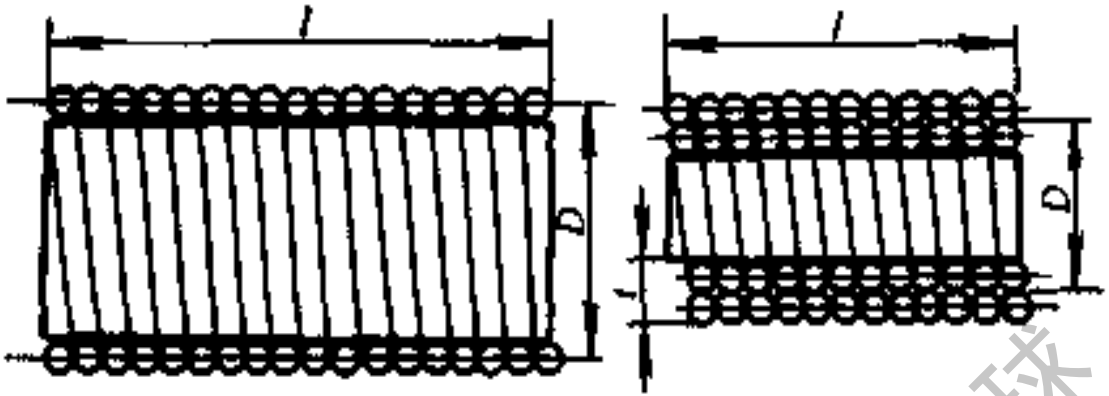


图 3-30 单层及多层空心电抗器

$K$ ——系数，图 3-31 示出  $K$  与  $l/D$  之间的关系；

$n$ ——每厘米长度内绕组匝数（匝/cm）；

$D$ ——螺管直径（cm）；

$l$ ——绕组长度（cm）。

(2) 多层螺管的电感：

$$L = K' (\pi n D)^2 l$$

式中  $L$ ——电感（ $\mu\text{H}$ ）；

$K'$ ——系数，图 3-32 示出它与  $l/D$  及  $t/D$  的函数关系；

$D$ ——绕组平均直径（cm）；

$t$ ——绕组厚度（cm）；

$n$ 、 $l$ ——同前。

设计时，先根据流过电抗器的电流选取导线及  $n$  值，然后假设一个  $D$  值，取一个  $K$  值，求出  $l$  值，再验算  $l/D$  与所选  $K$  误差，重选  $K$  值，再进行计算，直到相符时为止。



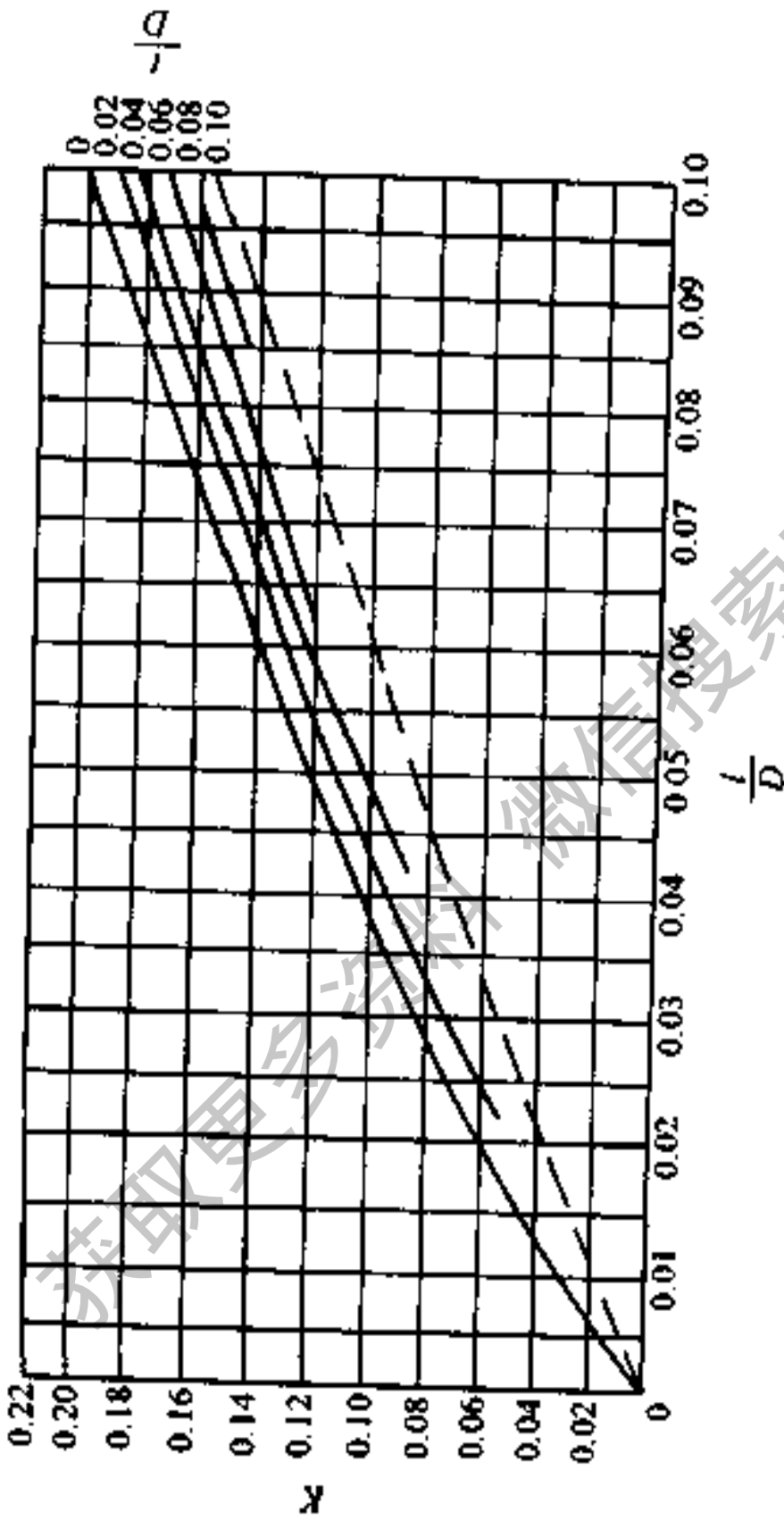


图 3-31 单层空心电抗器的系数

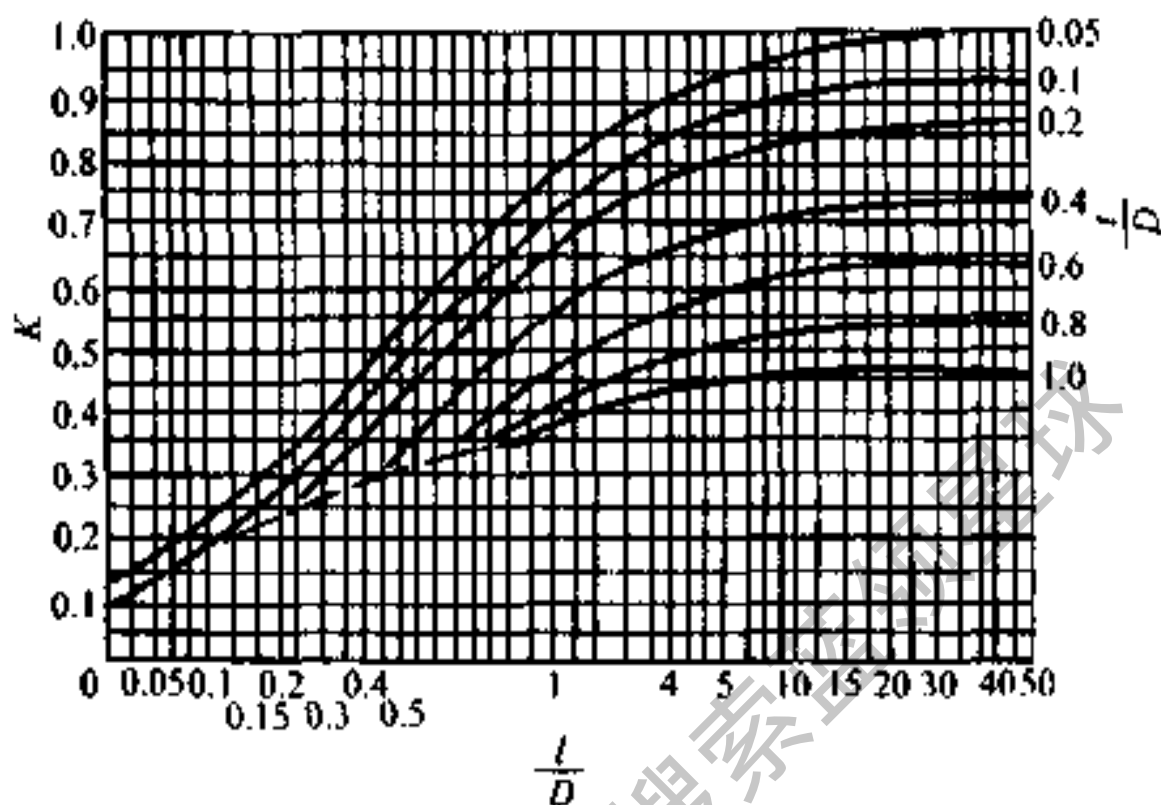


图 3-32 多层空心电抗器的系数

### 五、平衡电抗器计算

在双反星形带不平衡电抗器的线路中，为了隔离两个变压器，需接入平衡电抗器（图 3-33）。

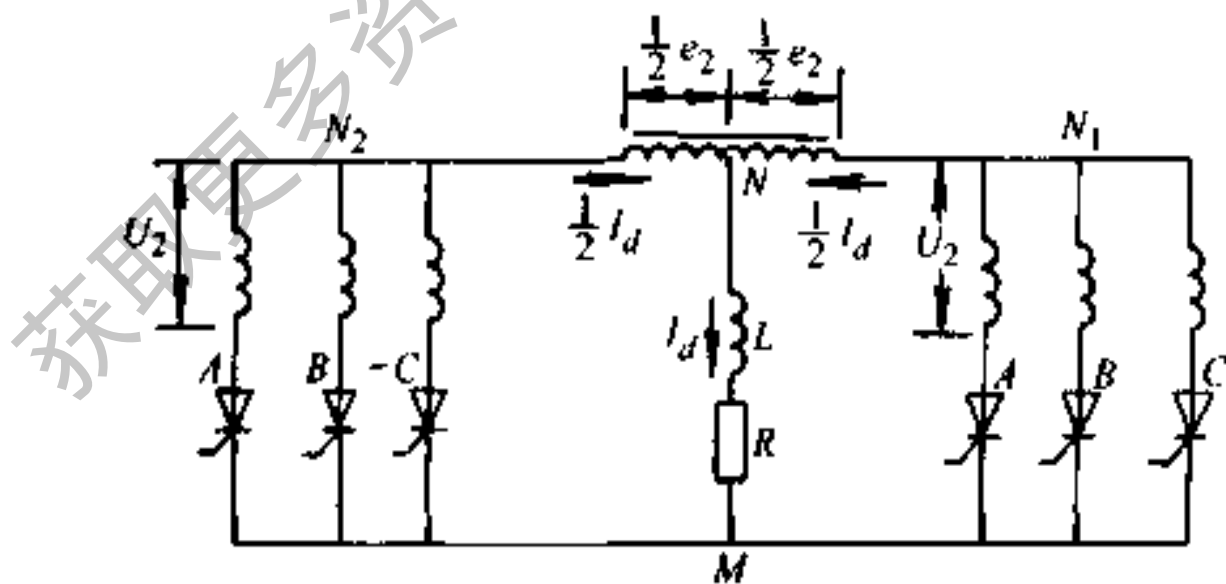


图 3-33 双丫带平衡电抗器的整流电路

## 1. 铁心截面选择:

$$\text{E形铁心截面 } S = 0.35 \sqrt{U_{Z\max} I_Z}$$

$$\square\text{形铁心截面 } S = 0.22 \sqrt{U_{Z\max} I_Z}$$

式中  $S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ );

$U_{Z\max}$ ——最大输出直流电压 (V);

$I_Z$ ——额定输出直流电流 (A)。

## 2. 绕组总匝数的计算

$$W = \frac{2.25U_i \times 10^3}{f_i B_z S}$$

式中  $W$ ——绕组总匝数 (匝);

$U_i$ ——平衡电抗器两端电压有效值 (V);

$f_i$ ——平衡电抗器频率 (Hz), 是电网频率的三倍;

$B_z$ ——磁通密度, 一般取 0.5T。

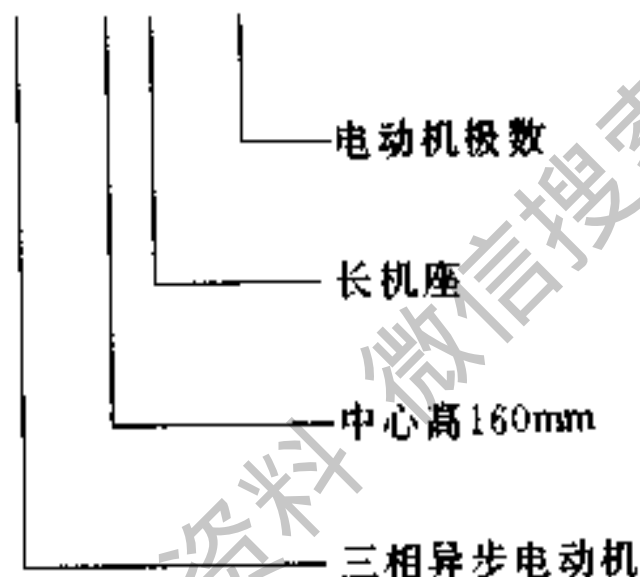
# 第四章 电动机

## 第一节 三相异步电动机基本概念

### 一、三相异步电动机铭牌

#### 1. 型号

Y-160L-4



新、老电动机型号对照见表 4-1。

2. 额定功率  $P_e$ ——电动机在额定负载下运行时轴输出的机械功率，单位是 kW。而电动机的输入功率  $P_1$  是电功率，即

$$P_1 = \frac{P_e}{\eta_e}$$

或  $P_1 = \sqrt{3} U_e I_e \cos \varphi_e$

式中  $\eta_e$  ——电动机额定效率；

$I_e$  ——电动机额定电流 (A)。

3. 额定频率  $f_1$  ——电动机电源的额定频率 (Hz)。

4. 额定电压  $U_e$  ——指电动机定子绕组上的线电压 (V)。

表 4-1 新、老电动机型号对照

名称	型号		型号的汉字意义	结构形式	用途
	老	新			
化工防 腐蚀异步 电动机	JO-F JO2-F	Y-F	异闭-腐	结构同 JO、JO2 型，为满 足防腐性 能，采取 了密封及 防腐措施	用途同 JO、JO2 型。 一般在制造 化肥氯碱等 化工厂的腐 蚀环境中使 用
户外用 异步电动 机	JO2-W	Y-W	异闭-外	结构同 JO2 型	用于户外 环境下不需 加防护措 施的传动机 械上

(续)

名称	型号		型号的汉字意义	结构形式	用途
	老	新			
起重冶金用异步电动机	JZ JZB	YZ	异重 异重 (B级绝缘)	封闭式、铸铁外壳上有散热筋、外风扇吹冷, 笼型铜条转子	用于起重机械及冶金辅助机械
起重冶金用绕线转子异步电动机	JZR JZRB	YZR	异重绕 异重绕 (B级绝缘)	封闭式, 铸铁外壳上有散热筋, 外风扇吹冷, 绕线转子	
起重冶金用绕线转子异步电动机 (管道通风)	JZRG	YZRG	异重绕 管	管道通风冷却式, 绕线转子	用于钢铁冶炼及轧制的辅助设备上

(续)

名称	型号		型号的汉字意义	结构形式	用途
	老	新			
电磁调速异步电动机	JZT	YCT	异磁调	由封闭式异步电动机和电磁转差离合器组成	用于纺织、印染、化工、造纸、船舶等要求变速的机械上
齿轮调速异步电动机	JTC	Y CJ	异(齿)减	由封闭式异步电动机和减速两部分组成	用于要求低转速、大转矩的机械,例如运输机械,矿山机械,炼钢机械,造纸、制糖、化工搅拌机械及其他需要低转速的机械
整流子异步变速电动机	JZS	YHT	异换调	防护式,铸铁外壳,有手动调速或遥控调速两种	用途同JZT型,其负载效率和功率因数较高

(续)

名称	型号		型号的汉字意义	结构形式	用途
	老	新			
自制动异步电动机	JZD	YEP	异(制)傍	封闭式, 定子铁心长于转子铁心。在转子轴上装有分磁铁	广泛用于作单梁吊车及行走机构的动力, 也适用于其他要求快速、准确停车的机械, 如卷扬机、木工机械及机床的进给系统
		YEG	异(制)杠	封闭式, 定子铁心稍长于转子铁心。在定子内圆处装有半圆弦形衔铁	
锥形转子制动异步电动机	ZD	YEZ	异(制)锥	定、转子铁心为锥形, 风冷带制动环自制动	电动葫芦专用电动机, 也适用于起重设备及其他需要准确制动的设备



(续)

名称	型号		型号的汉字意义	结构形式	用途
	老	新			
防爆异步电动机	JB	YB	异爆	防爆式, 钢板外壳, 铸铝转子	用于有爆炸气体的场合
防爆异步电动机 (小机座)	JBS JBX	YB	异爆小	防爆式, 铸铁外壳, 上有散热筋	
中型笼型转子异步电动机	JS JSQ	Y	异鼠 异鼠(加强绝缘)	防护式或管道通风式, 铸铁外壳, 双笼转子	用于拖动各种不同机械, 如通风机、压缩机、水泵、破碎机、切削机床、运输机械等。可供厂矿作原动机用
中型绕线转子异步电动机	JR JRQ	YR	异绕 异绕(加强绝缘)	防护式或管道通风式, 铸铁外壳, 绕线转子	

(续)

名称	型号		型号的汉字意义	结构形式	用途
	老	新			
中型高速异步电动机	JK	Y	异高	防护式, 铸铁外壳, 铸铝转子	用于电力、冶金、炼焦及化工等部门的鼓风机、水泵等机械
力矩异步电动机	JLJ	YLJ	异力矩	强迫通风式, 转子导线采用高电阻材料, 铸铁外壳, 笼型转子	用于纺织、印染、造纸、电线电缆、橡胶、冶金等具有恒转矩负载特性的设备上
防护式绕线转子异步电动机	JR	YR	异绕	防护式, 铸铁外壳, 绕线转子	用于电源容量不足以起动笼型电动机及要求起动转矩高等场合
防护式多速异步电动机	JD	YD	异多	结构同J型	同J型, 它使用在要求2~4种速度的场合

5. 额定电流  $I_N$ ——额定功率时定子线电流 (A)。

6. 额定转速  $n_r$ ——输出额定功率时每分钟转速 (r/min)。

7. 对于线绕式异步电动机还标明转子额定电压  $U_{N2}$ , 转子额定电流  $I_{N2}$ , 额定功率因数  $\cos\varphi$ , 额定效率  $\eta_N$ , 绕组接法、绝缘等级、温升、工作制、防护等级、噪声等级、出厂年月日等。

## 二、同步转速及转差率

同步转速  $n_1$  (r/min):

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

式中  $f_1$ ——电源频率 (Hz);

$p$ ——电动机极对数。

转差率:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

额定转差率:

$$s_N = \frac{n_1 - n_r}{n_1}$$

式中  $n$ ——转子转速 (r/min);

$n_r$ ——额定转速 (r/min)。

## 三、电势方程

1. 定子绕组产生的感应电势

$$E_1 = K_e U_1 = 4.44 K_{d\rho 1} f_1 W_1 \Phi$$

$$\Phi = B_{\rho 1} S$$

式中  $E_1$ ——定子绕组产生的感应电势 (V);

$K_e$ ——电势系数, 小型电动机取 0.86, 中型电动机取 0.90, 大型电动机取 0.91;

$U_1$ ——外加电源电压 (V);

$f_1$ ——电源频率 (Hz);

$W_1$ ——定子绕组匝数;

$\Phi$ ——每极磁通 (Wb);

$B_{\rho 1}$ ——气隙中平均磁通密度 (T), 它与气隙中最大磁通密度  $B_g$  的关系为:

$$B_{\rho 1} = \frac{2}{\pi} B_g$$

$S$ ——每极下的气隙面积 ( $\text{m}^2$ );

$K_{d\rho 1}$ ——定子绕组系数。

最大磁通密度  $B_g$  可由表 4-2 中选取, 电机容量大的选大值; 容量较小的取小值。

绕组系数  $K_{d\rho 1}$  由分布系数  $K_{d1}$  和短距系数  $K_{\rho 1}$  的乘积求得, 即

$$K_{d\rho 1} = K_{d1} K_{\rho 1}$$

$K_{d1}$  数值见表 4-3,  $K_{\rho 1}$  见表 4-4。

2. 转子产生的感应电势:

$$E_2 = S E_{20} = 4.44 K_{d\rho 2} f_2 W_2 \Phi$$

表 4-2 三相异步电动机的气隙磁通密度  $B_g$  (T)

型 式	极 数			
	2	4	6	8
开启式	0.6~0.75	0.70~0.80	0.70~0.80	0.70~0.8
封闭式	0.5~0.65	0.60~0.70	0.60~0.75	0.64~0.74
Y 系列	Y (IP44)			Y (IP23)
	H80~112	H132~160	H180 以上	
	0.60~0.73	0.59~0.75	0.75~0.80	0.73~0.86

表 4-3 分布系数

每极分相槽数 $q$	1	2	3	4	5	6	7 以上
分布系数 $K_{d1}$	1.0	0.966	0.960	0.958	0.957	0.956	0.956

式中  $E_2$ ——转子每相绕组中产生的感应电势 (V);

$s$ ——转差率;

$E_{20}$ ——电动机刚接通电源时, 转子未转动瞬间, 转子中感应电动势 (V);

$K_{dp2}$ ——转子的绕组系数;

$f_2$ ——转子电势频率 (Hz),  $f_2 = sf_1$ ;

$W_2$ ——转子绕组一相匝数;

$\Phi$ ——网前。

表 4-4 短距系数  $k_{p1}$ 

节距 $y$	每极槽数						
	24	18	16	15	14	13	12
1~25	1.000						
1~24	0.998						
1~23	0.991						
1~22	0.981						
1~21	0.966						
1~20	0.947						
1~19	0.924	1.000					
1~18	0.897	0.996					
1~17	0.866	0.985	1.000				
1~16	0.832	0.966	0.955	1.000			
1~15	0.793	0.940	0.981	0.995	1.000		
1~14	0.752	0.906	0.956	0.978	0.994	1.000	
1~13	0.707	0.866	0.924	0.951	0.975	0.993	1.000
1~12		0.819	0.882	0.914	0.944	0.971	0.991
1~11		0.766	0.831	0.866	0.901	0.935	0.966
1~10		0.707	0.773	0.809	0.847	0.884	0.924
1~9			0.707	0.743	0.782	0.833	0.866
1~8				0.669	0.707	0.749	0.793
1~7						0.663	0.707
1~6							
1~5							
1~4							

(续)

节距 $y$	每 极 槽 数					
	11	10	9	8	7	6
1~25						
1~24						
1~23						
1~22						
1~21						
1~20						
1~19						
1~18						
1~17						
1~16						
1~15						
1~14						
1~13						
1~12	1.000					
1~11	0.990	1.000				
1~10	0.960	0.988	1.000			
1~9	0.910	0.951	0.985	1.000		
1~8	0.841	0.891	0.940	0.981	1.000	
1~7	0.756	0.809	0.866	0.924	0.975	1.000
1~6	0.655	0.707	0.766	0.832	0.901	0.966
1~5			0.643	0.707	0.782	0.866
1~4					0.624	0.707

#### 四、异步电动机的机械特性

图 4-1 示出电动机的机械特性。

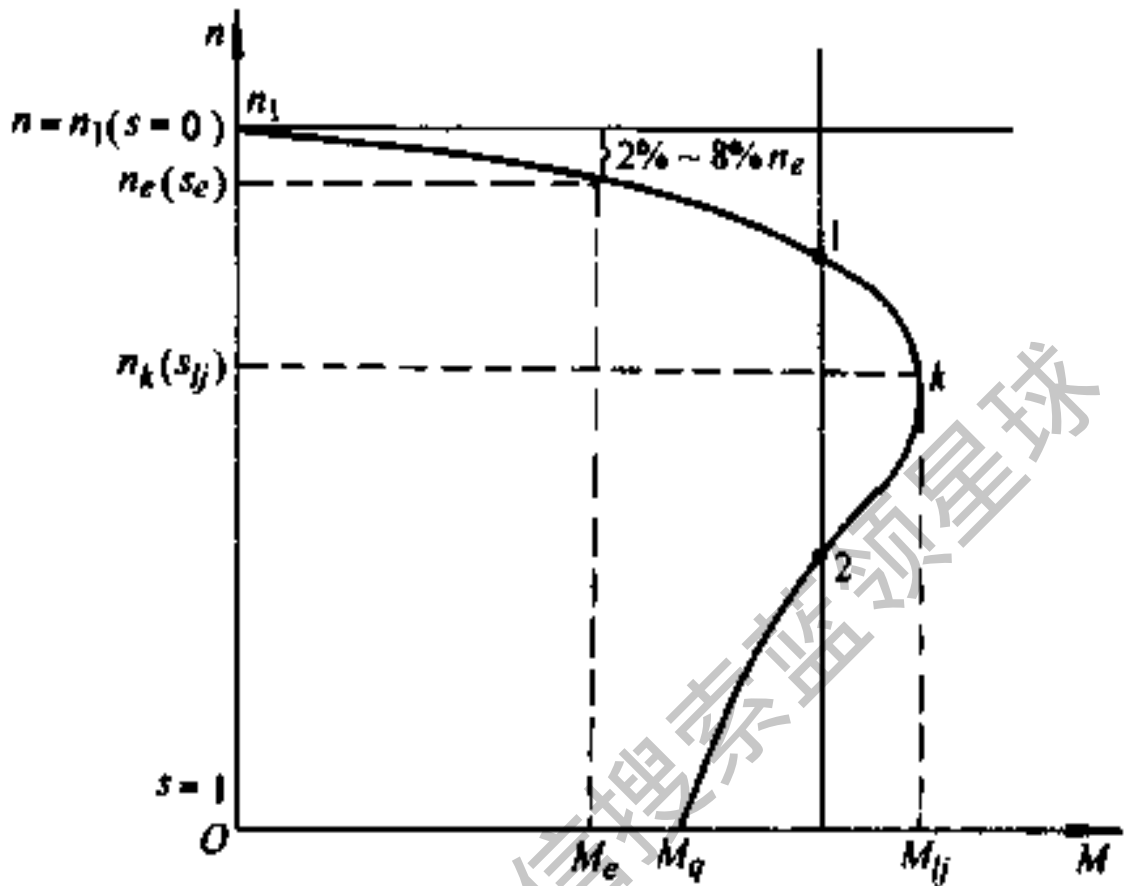


图 4-1 异步电动机的机械特性

1. 异步电动机的机械特性可用下式近似地表示

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{\max}} + \frac{s_{\max}}{s}}$$

当  $s$  比  $s_{\max}$  小得多时，则上式可简化为

$$M = \frac{2M_{\max}}{s_{\max}}$$

式中  $M$ ——电动机转矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )；

$M_{\max}$ ——最大转矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )；

$s$ 、 $s_{\max}$ ——转差率和临界转差率。



## 2. 电动机额定转矩

$$M_e = 9555 \frac{P_e}{n_e}$$

式中  $M_e$ ——电动机额定转矩 (N·m)；

$P_e$ ——电动机额定功率 (kW)；

$n_e$ ——电动机额定转速 (r/min)。

## 3. 过载系数

$$\lambda = M_{\max} / M_e$$

异步电动机的过载系数一般在 1.8~2.5 之间, Y 系列电动机为 2.0~2.2。YZR 型电动机可达 3.3~3.4, 甚至更大。

4. 功率平衡方程, 图 4-2 为异步电动机功率流向图。

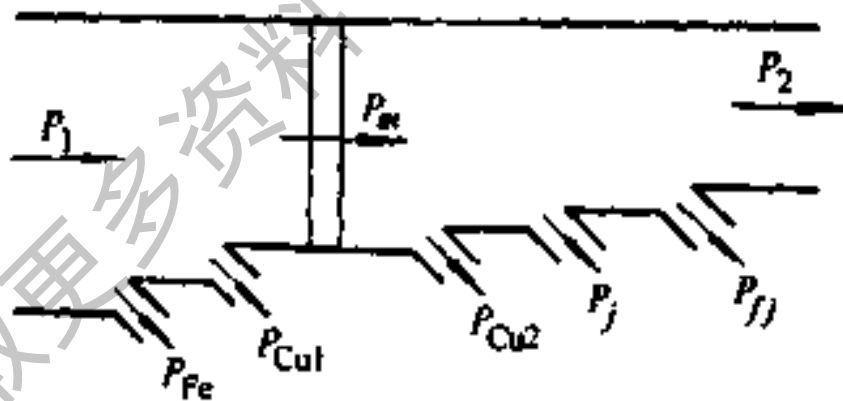


图 4-2 异步电动机功率流向图

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta P$$

$$P_2 = \sqrt{3} UI \eta \cos \varphi \times 10^{-3}$$

$$P_1 = \sqrt{3} UI \cos \varphi \times 10^{-3}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma\Delta P}{P_2 + \Sigma\Delta P}$$

$$\Sigma\Delta P = P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_f + P_{fj}$$

式中  $P_1$ 、 $P_2$ ——电动机的输入功率和输出功率 (kW)；

$U$ ——电源电压 (V)；

$I$ ——电动机负载电流 (定子电流) (A)；

$\eta$ ——电动机效率；

$\cos\varphi$ ——电动机功率因数；

$\Sigma\Delta P$ ——电动机总损耗 (kW)；

$P_{Fe}$ ——铁损 (kW)；

$P_{Cu1}$ ——定子铜损 (kW)；

$P_{Cu2}$ ——转子铜损 (kW)；

$P_f$ ——机械损耗 (kW)；

$P_{fj}$ ——附加损耗 (kW)，包括风摩损耗  $P_f$  和杂散损耗  $P_s$  等。

## 第二节 异步电动机的工作特性

### 一、工作特性曲线

工作特性一般是指电动机在额定电压和额定频率下运行时，转子转速  $n$ 、电磁转矩  $M$ 、功率因数  $\cos\varphi$ 、效率  $\eta$  和定子电流等随输出功率  $P_2$  而变化的关系。图 4-3 示出以标么值表示的普通异步电动机典型的工作特性曲线。

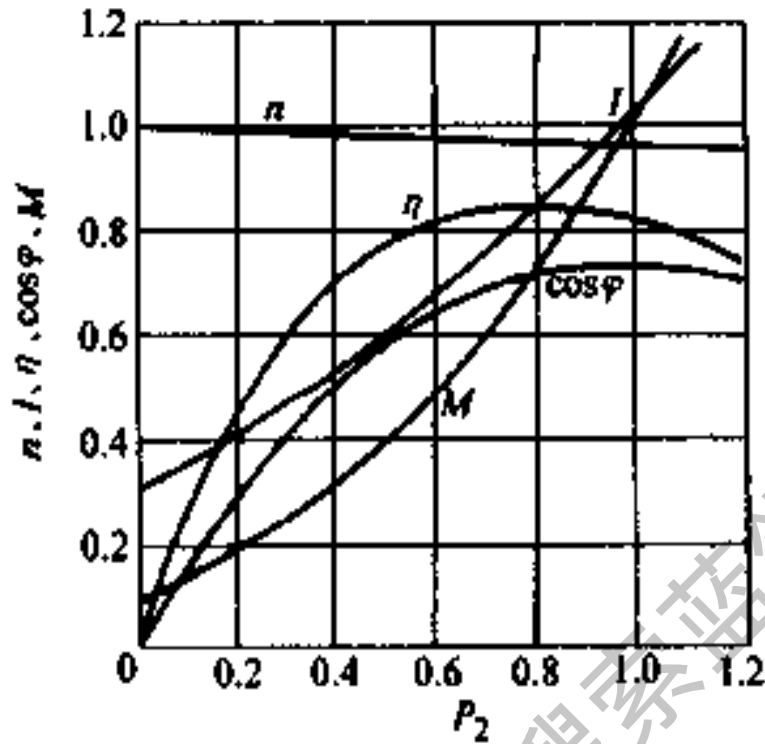


图 4-3 异步电动机工作特性曲线

由图可见：

1. 异步电动机的转速基本上与负载大小无关，在不超出满载范围内运行时，转速基本不变。
2. 轻负载时，功率因数和效率很低，而当负载增大到 50% 额定值时，功率因数和效率变化很少。
3. 电磁转矩  $M$  和定子电流  $I_1$  随负载增大而增大。

## 二、电源电压变化或频率变化对电动机工作性能的影响

表 4-5 示出电动机转矩不变时，电源电压和频率低于额定值时，电动机工作性能的变化。

表 4-5 工作性能的变化

性能	频率额定, 电压 低于额定值	电压额定, 频率 低于额定值
转矩	$M_{\max}$ 减小 ( $\propto U_1^2$ ) $M_q$ 减小 ( $\propto U_1^2$ )	$M_{\max}$ 增大 ( $\propto \frac{1}{f^2}$ ) $M_q$ 也增大
功率 因数	因 $\phi_1$ 减小 ( $\propto U_1$ ), 故励 磁电流 $I_l$ 减小, $\cos\varphi$ 增大	因 $U_1 \approx E_1 \propto f\phi_1 =$ 常 值, 即 $\phi_1$ 增大 ( $\propto \frac{1}{f}$ ), 故 $I_l$ 增大, $\cos\varphi$ 降低
电 流	因 $M \propto \phi_1 I_2 \propto U_1 I_2 =$ 常 值, 故 $I_2$ 增大 ( $\propto \frac{1}{U_1}$ ); 负载较大时 $I_1$ 一般增大	因 $M \propto \phi_1 I_2 \propto \frac{I_2}{f} =$ 常值, 故 $I_2$ 减小 ( $\propto f$ ); 而 $I_l$ 增大, 故 $I_1$ 视具体 情况而定
转差率	$s$ 增大 ( $\propto I_2^2 \propto \frac{1}{U_1^2}$ )	$s$ 降低 ( $\propto \frac{I_2^2}{f} \propto f$ )
转 速	当电压过低, 轻载时 $n$ 变化较小, 重载时 $n$ 变化 大	$n$ 降低 ( $\propto f$ )
损 耗	$P_{Fe1}$ 减小; $P_{Cu2}$ 增大; $P_f$ 近似不变; $P_{Cu1}$ 轻载时变 化小; 负载较大时一般增 大	$P_{Fe1}$ 增大; $P_{Cu2}$ 减小; $P_f$ 减小; $P_{Cu1}$ 视具体情 况而定
效 率	轻载时 $\eta$ 稍增加; 负载 较大时 $\eta$ 降低	因输出功率降低, 故 $\eta$ 一般略降低
温 升	$\tau$ 增加	$\tau$ 略增加

### 三、线绕型异步电动机转子电阻的计算

线绕型异步电动机转子的电阻可用电桥精确测定，在不太严格的情况下，可用下式计算：

近似法

$$R_2 = \frac{S_r U_{2r}}{\sqrt{3} I_{2r}}$$

较准确法

$$R_2 = \frac{S_r}{1 - S_r} \cdot \frac{P_e + P_j}{3 I_{2r}^2} \times 10^3$$

式中  $R_2$ ——转子每相电阻 ( $\Omega$ )；

$S_r$ ——额定转差率；

$U_{2r}$ ——转子开路电压 (V)；

$I_{2r}$ ——转子额定电流 (A)；

$P_e$ ——电动机额定功率 (kW)；

$P_j$ ——电动机机械损耗 (kW)，一般可取 (0.01~0.02)  $P_e$ 。

## 第三节 直流电动机的基本公式

### 一、电枢电势

$$E_a = C_e \Phi n$$

$$C_e = \frac{PN}{60a}$$

式中  $E_a$ ——电枢电动势 (V)；

- $C_e$ ——电动势常数；  
 $p$ ——极对数；  
 $N$ ——绕组导体数；  
 $a$ ——绕组支路数；  
 $\Phi$ ——每极磁通 (Wb)；  
 $n$ ——电枢转速 (r/min)。

## 二、直流电动机转矩特性 (图 4-4)

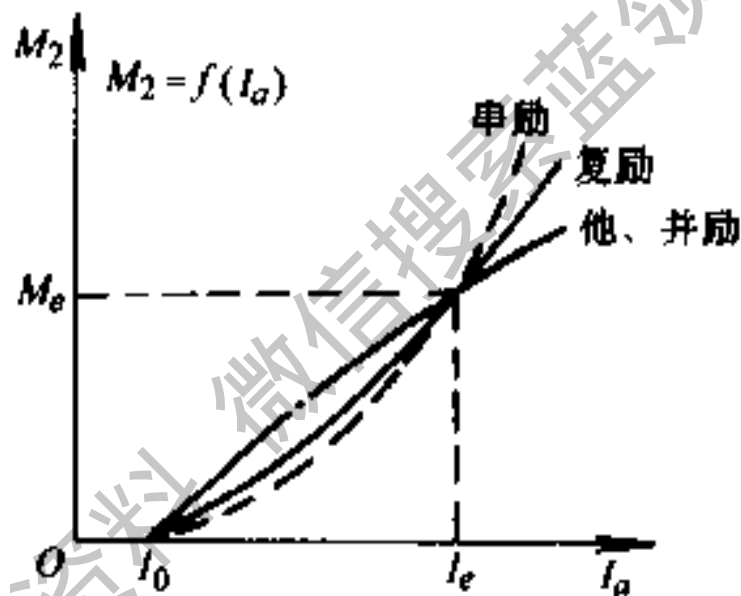


图 4-4 直流电动机转矩特性

$$M_2 = M - M_0 = C_m \Phi I_a - M_0$$

$$C_m = \frac{PN}{2\pi a}$$

式中  $M_2$ ——输出转矩 (N·m)；

$M$ ——电磁转矩 (N·m)；

$M_0$ ——涡流、磁滞与通风摩擦阻转矩 (N·m)，其作用方向与电机转向相反；

$I_a$ ——电枢电流 (A);

$C_m$ ——转矩常数;

其他符号同前。

空载时,  $I_a = I_0 = \frac{M_0}{C_m \Phi}$ ; 负

载时  $M_2$  随  $I_a$  的增加而增加, 并与  $\Phi$  随  $I_a$  而变的情况有关。

### 三、电压平衡方程

图 4-5 为他励直流电动机电路图。

$$U = E_a + I_a (R_a + R_f) + \Delta U_b$$

式中  $U$ ——外加电枢电压 (V);

$E_a$ ——电枢电动势 (V);

$R_a$ ——电枢电阻 ( $\Omega$ );

$R_f$ ——附加电阻 ( $\Omega$ );

$\Delta U_b$ ——正负电刷接触电阻压降 (V);

$I_a$ ——同前。

### 四、直流电动机的转速特性 (图 4-6)

$$n = \frac{U - [I_a (R_a + R_f)] + \Delta U_b}{C_e \Phi}$$

式中符号同前。

当外加电枢电压为常值, 电枢电流  $I_a$  变化时, 影响

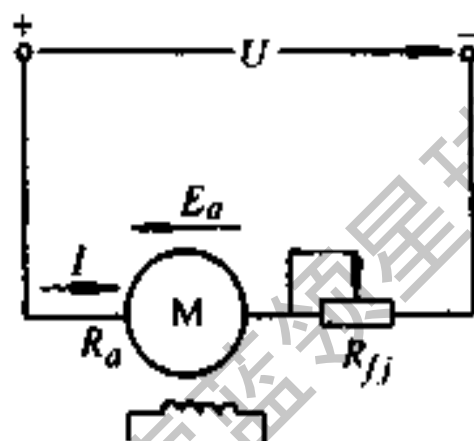


图 4-5 他励直流电动机电路图

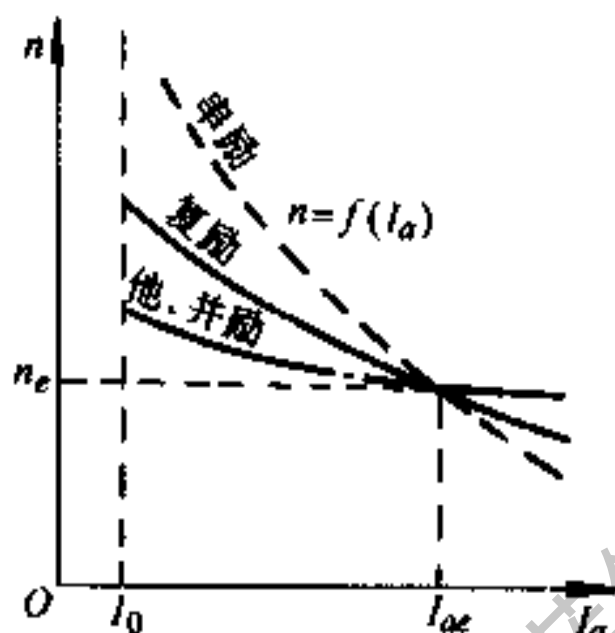


图 4-6 直流电动机的转速特性

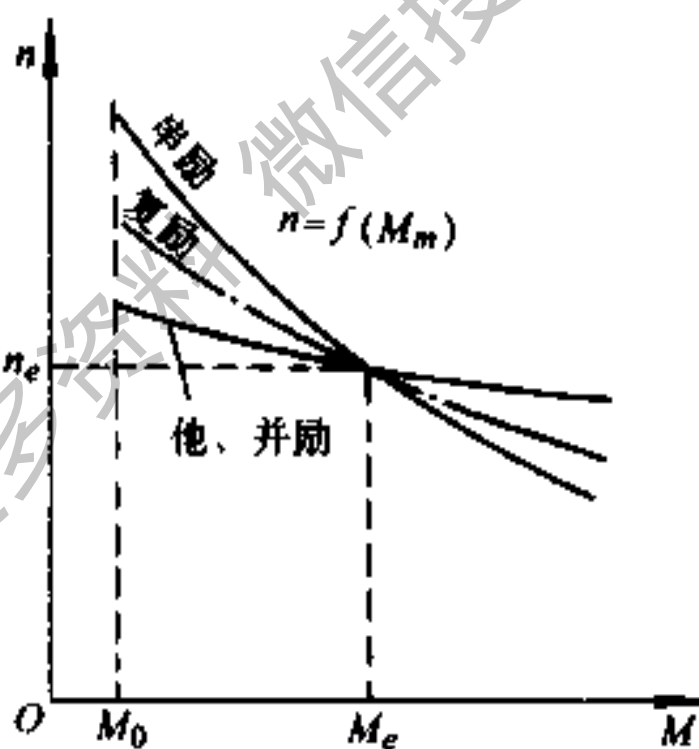


图 4-7 直流电动机的机械特性

转速特性的因素是电枢回路电阻压降与气隙磁通的变化。



### 五、直流电动机的机械特性 (图 4-7)

$$n = \frac{U - \Delta U_b}{C_r \Phi} - \frac{M}{C_r C_m \Phi^2} (R_a + R_f)$$

式中符号同前。

机械特性曲线与转速特性曲线相似。电枢回路串入外接电阻后，其外特性将变软。

图 4-8 为他励直流电动机励磁改变时的机械特性 ( $\Phi_2 > \Phi_1 > \Phi_2$ )。

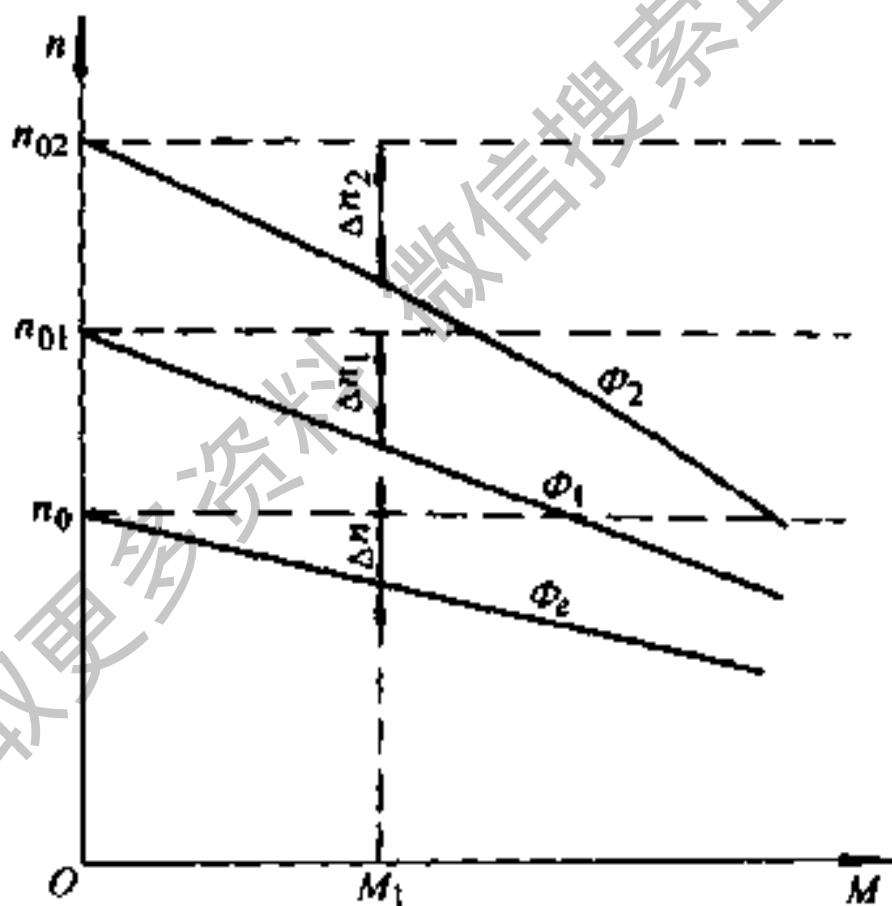


图 4-8 他励直流电动机励磁改变时的机械特性

$$(\Phi_2 > \Phi_1 > \Phi_2)$$

图 4-9 为他励直流电动机电枢电压改变时的机械特性 ( $U_4 > U_1 > U_2 > U_3$ )。

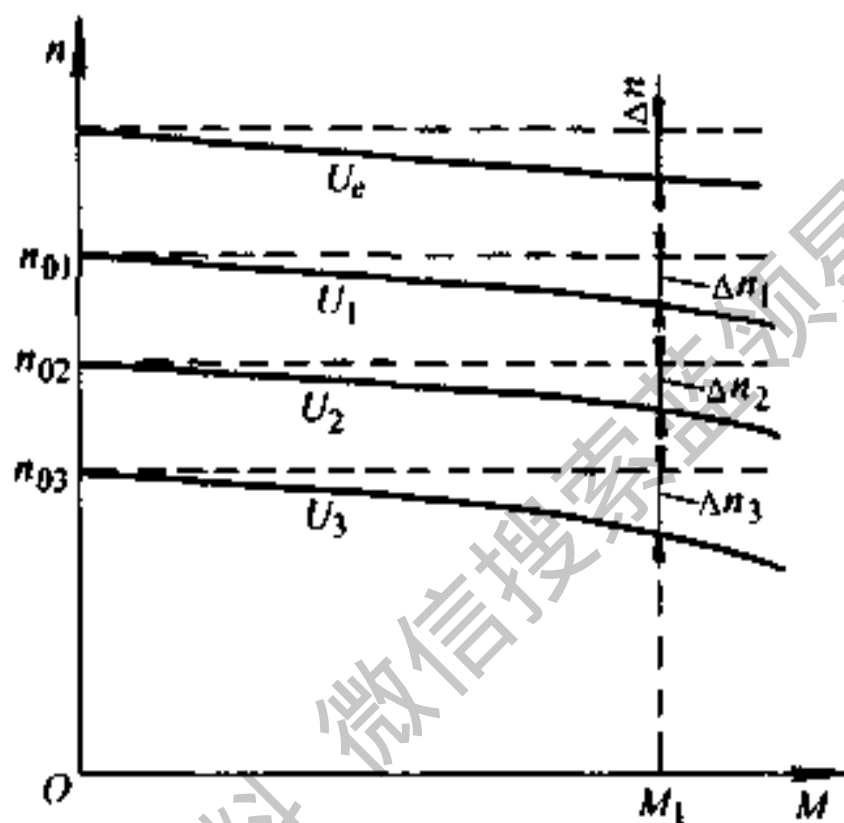


图 4-9 他励直流电动机电枢电压改变时的机械特性  
( $U_4 > U_1 > U_2 > U_3$ )

图 4-10 为他励直流电动机串接电阻时的机械特性  
( $R_{f3} > R_{f2} > R_{f1}$ )。

#### 六、功率平衡方程

$$P_1 = P_m + \Sigma \Delta P_a = P_0 + \Sigma \Delta P_a + P_2$$

$$P_2 = P_m - P_0$$

$$P_1 = UI_a \times 10^{-3}, P_m = E_a I_a \times 10^{-3}$$

$$\Sigma\Delta P_a = (I_a^2 R_a + I_a \Delta U_b) \times 10^{-3}$$

式中  $P_1$ ——电动机输入功率 (kW);

$P_m$ ——电磁功率 (kW);

$\Sigma\Delta P_a$ ——电枢回路总损耗 (kW);

$P_0$ ——涡流、磁滞与通风摩擦损耗 (kW);

$P_2$ ——电动机输出功率 (kW);

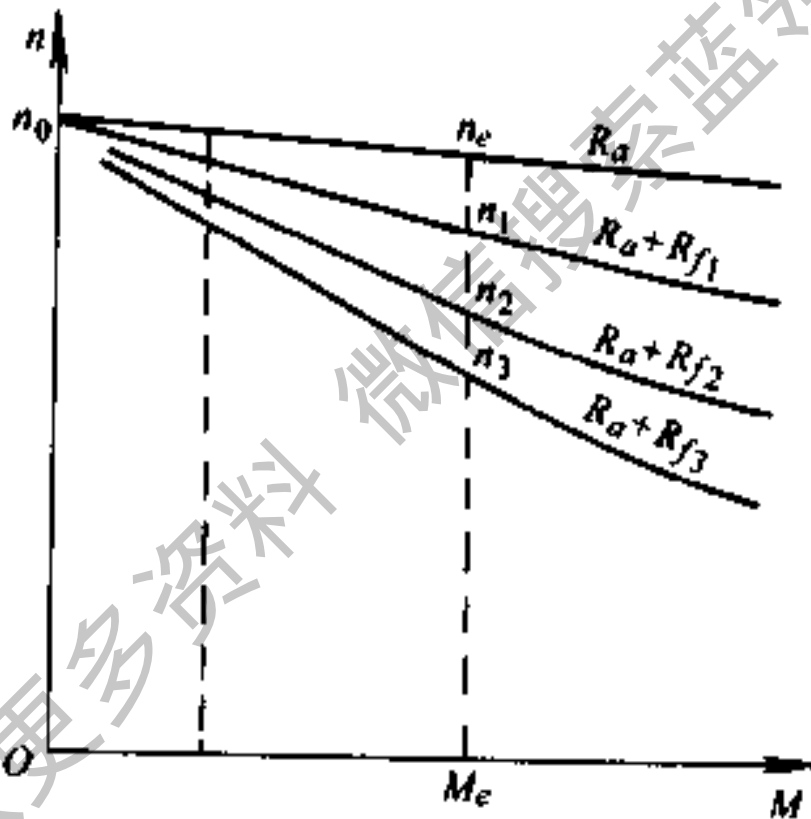


图 4-10 他励直流电动机电枢串联电阻时的机械特性

$$(R_{f3} > R_{f2} > R_{f1})$$

其他符号同前。

电动机效率:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_2 + \Sigma \Delta P}$$

## 七、直流电动机电枢回路电感、电阻的计算

### 1. 电枢回路电感、电阻的计算

$$L_a = \frac{19.1CU_e}{2pn_e I_e} \times 10^3$$

$$R_a = R_{a1} + R_{a2} + R_{a3}$$

式中  $L_a$ ——电动机电枢回路的电感 (mH);

$R_a$ ——电动机电枢回路的电阻 ( $\Omega$ );

$C$ ——系数, 有补偿电机为 0.1, 无补偿电机为 0.4;

$U_e$ ——电动机额定电压 (V);

$I_e$ ——电动机额定电流 (A);

$n_e$ ——电动机额定转速 (r/min);

$p$ ——极对数;

$R_{a1}$ ——电枢绕组电阻 ( $\Omega$ );

$R_{a2}$ ——换向绕组电阻 ( $\Omega$ );

$R_{a3}$ ——补偿绕组电阻 ( $\Omega$ )。

### 2. 发电机电枢回路的电感和电阻

$$L_a = \frac{19.1CU_e}{2pn_e I_e} \times 10^3$$

$$R_a = R_{a1} + R_{a2} + R_{a3}$$

式中  $L_a$ ——发电机电枢回路的电感 (mH);

$R_c$ ——发电机电枢回路的电阻 ( $\Omega$ );

$C$ ——系数, 有补偿电机为 0.2, 无补偿电机为 0.6;

$U_r$ ——发电机额定电压 (V);

$I_r$ ——发电机额定电流 (A);

$n_r$ ——发电机额定转速 (r/min);

$R_{a1}$ ——发电机电枢绕组电阻 ( $\Omega$ );

$R_{a2}$ ——发电机换向绕组电阻 ( $\Omega$ );

$R_{a3}$ ——发电机补偿绕组电阻 ( $\Omega$ )。

## 第四节 传动电动机的选择程序

### 一、传动电动机的选择程序

图 4-11 示出传动电动机的一般选择程序。

### 二、电动机过载能力及平均起动转矩的计算

#### 1. 过载能力

电动机的过载能力可从电动机产品目录中查得。一般常用电动机允许的转矩过载能力, 见表 4-6。

#### 2. 平均起动转矩

鼠笼型异步电动机, 在起动过程中其机械特性  $M=f(n)$  为非线性。因此, 平均起动转矩值要根据电动机的机械特性来计算。一般估算时, 可参见表 4-7。

3. 部分机械所需起动转矩和最大转矩参考值见表 4-8。

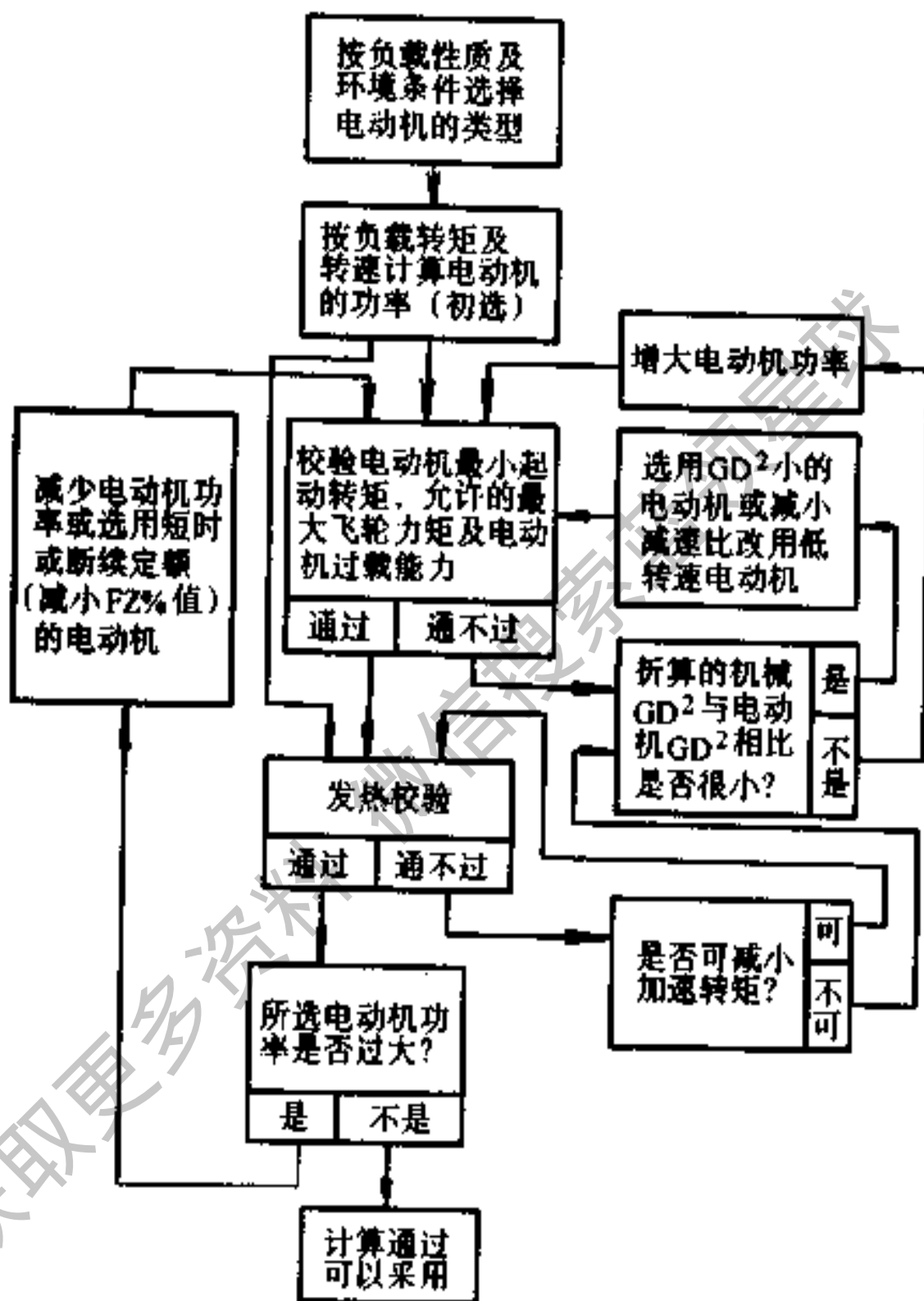


图 4-11 传动电动机的一般选择程序

表 4-6 一般电动机允许的转矩过载倍数

$$(\lambda = M_{\max} / M_r)$$

电动机类型	工作制	过载倍数 $\lambda$
鼠笼型异步电动机	连续工作制	$\geq 1.65$
	起重冶金型 (10kW 及以下)	$\geq 2.5$
	起重冶金型 (10kW 以上)	$\geq 2.8$
绕线型异步电动机	连续工作制	$\geq 1.8$
	起重冶金型 (10kW 及以下)	$\geq 2.5$
	起重冶金型 (10kW 以上)	$\geq 2.8$
同步电动机	$\cos\varphi = 0.8$ (超前)	$\geq 1.65$
	强励时	3~3.5
直流电动机 (一般型)	额定励磁时	1.5

注：1.8、2.5、2.8 是电机厂提供的保证值。

表 4-7 交流电动机的平均起动转矩

电动机类型	平均起动转矩	符号含义
同步电动机 $M_q > M_{qr}$ 时 $M_q \leq M_{qr}$	$M_{q\text{av}} = 0.5 (M_q + M_{qr})$ $M_{q\text{av}} = 1.0 \sim 1.1 M_q$	$M_{q\text{av}}$ ——平均起动转矩 $M_q$ ——最初起动转矩 ( $s=1$ 时)
鼠笼型异步电动机 (一般用途)	$M_{q\text{av}} = 0.45 \sim 0.5$ ( $M_q + M_{lj}$ )	$M_{qr}$ ——牵入转矩 $M_{lj}$ ——临界转矩

表 4-8 部分机械所需的起动转矩和最大转矩参考值

类 型	机 械	起动转矩 额定转矩	最大转矩 额定转矩
1. 冶 金业	轧机		
	(1) 粗轧机、钢板轧机、扩 管轧机	0.4	2.4~3.6
	(2) 线材轧机	1.0	2.2
	(3) 黄铜及铜加工轧机	1.5	2.2
	(4) 其它各种轧机	0.4~0.6	2.2
2. 造 纸机械	(1) 搅拌器(标准)、粉碎机、 连续型液压浆料	1.25	1.4
	(2) 粉碎机(空载起动)		
	① 碾磨机和排气风扇 (共用电动机)	1.05	1.6
	② 碾磨机(单独驱动)	1.75	1.5
	(3) 搅拌器(粉碎机)	1.25	1.8
	(4) 卷纸机(空载起动)	0.6	2.2
	(5) 其它造纸机械	0.4~0.5	1.4
3. 水 泥机械	管磨机(球磨机)	1.4	1.6
4. 各 种粉碎 机(除 碎铁 机之 外)	(1) 谷物碾磨机	1.0	1.6
	(2) 球磨机(煤、岩石)	1.4	1.6
	(3) 球磨机(矿石)	1.5	1.6
	(4) 带式碾磨机	0.4	2.2
	(5) 球磨机(碎煤、空载起 动)		



(续)

类 型	机 械	起动转矩 额定转矩	最大转矩 额定转矩
4. 各种粉碎机 (除碎铁 机之外)	① 共用电动机 (碾磨机 和排风扇)	0.9	1.4
	② 单独驱动 (碾磨机)	1.4	2.2
	(6) 碎矿机 (空载起动)	1.0	2.2
	(7) 圆锥式破碎机 (空载起 动)	1.0	2.2
	(8) 回转破碎机 (空载起动)	1.0	2.2
	(9) 爪式破碎机 (空载起动)	1.5	2.2
	(10) 滚筒式破碎机 (空载起 动)	1.5	2.2
	(11) 锤碎机 (空载起动)	1.0	2.2
	(12) 地面破碎机	1.75	1.3
	(13) 棒磨机 (矿石)	1.6	1.6
5. 木 工机械	各类木工机械, 如各种锯用	0.4~0.6	2.2
6. 鼓 风机	各种鼓风机	0.3~0.4	1.3~1.5
7. 空 气压缩机	各种空气压缩机	0.3~0.6	1.0~1.5
8. 泵 类	(1) 无分流的三筒式往复泵	1.5	1.5
	(2) 其它各类泵	0.4~0.8	1.5

(续)

类 型	机 械	起动转矩 额定转矩	最大转矩 额定转矩
9. 发 电机组	(1) 150kW 以上的直流发电 机组	0.2	2.0
	(2) 其它发电机组	0.2	1.5
10. 煤 矿机械	(1) 采煤机	1.8~2.5	2~2.7
	(2) 装载机	2~2.8	2.8
	(3) 运输机	1.6~2.0	1.8~2.2
11. 其 它机械	(1) 密闭式混练机	1.25	2.2~2.5
	(2) 橡胶磨机	1.25	2.2~2.5
	(3) 整形机	1.25	2.2~2.5

4. Y 系列三相异步电动机效率和起动转矩, 见表 4-9。

表 4-9 Y 系列电动机效率  
和起动转矩的比较

指 标	Y 系列	备注
系列 $\eta$ (%)	86.91	同步转速 3000r/min
起动转矩倍数	1.97	
效率 $\eta$ (%)	87.19	同步转速 1500r/min
起动转矩倍数	1.99	

(续)

指 标	Y 系列	备注
效率 $\eta$ (%)	86.64	同步转速 1000r/min
起动转矩倍数	2.07	
效率 $\eta$ (%)	88.39	同步转速 750r/min
起动转矩倍数	1.93	

### 三、根据打滑条件允许的最大加速度计算

为防止行走机械或运送钢材的辊道等机械在加、减速过程中打滑，其最大允许加速度由下式决定

$$a_{\max} < g\mu$$

式中  $g$ ——重力加速度， $g = 9.8\text{m/s}^2$ ；

$\mu$ ——摩擦面间最小滑动摩擦系数，见表 4-10～表 4-12。

表 4-10 各种工程塑料的摩擦系数

下试样的 塑料名称	上试样 (钢)		上试样 (塑料)	
	静滑动 摩擦系 数 $\mu_0$	动滑动 摩擦系 数 $\mu$	静滑动 摩擦系 数 $\mu_0$	动滑动 摩擦系 数 $\mu$
聚四氟乙烯	0.10	0.05	0.04	0.04
聚全氟乙烯	0.25	0.18	—	—
聚乙烯	低密度	0.27	0.33	0.33
	高密度	0.18	0.08~0.12	0.12

(续)

下试样的 塑料名称	上试样 (钢)		上试样 (塑料)	
	静滑动 摩擦系 数 $\mu_0$	动滑动 摩擦系 数 $\mu$	静滑动 摩擦系 数 $\mu_0$	动滑动 摩擦系 数 $\mu$
聚甲醛	0.14	0.13	—	—
聚偏二氯乙烯	0.33	0.25	—	—
聚碳酸酯	0.60	0.53	—	—
聚苯二甲酸乙二醇酯	0.29	0.28	0.27 <sup>①</sup>	0.20 <sup>①</sup>
聚酰胺 (尼龙 66)	0.37	0.34	0.42 <sup>①</sup>	0.35 <sup>①</sup>
聚三氟氯乙烯	0.45 <sup>①</sup>	0.33 <sup>①</sup>	0.43 <sup>①</sup>	0.32 <sup>①</sup>
聚氯乙烯	0.45 <sup>①</sup>	0.40 <sup>①</sup>	0.50 <sup>①</sup>	0.40 <sup>①</sup>
聚偏二氯乙烯	0.68 <sup>①</sup>	0.45 <sup>①</sup>	0.90 <sup>①</sup>	0.52 <sup>①</sup>

① 粘滑运动。

表 4-11 常用材料的摩擦系数

摩擦材料	滑动摩擦系数 $\mu$ (或 $\mu_0$ )	
	无润滑	有润滑
钢-钢	0.1 (0.15)	0.05~0.1 (0.1~0.12)
钢-软钢	0.2	0.1~0.2
钢-铸铁	0.16~0.18 (0.2~0.3)	0.05~0.15
钢-黄铜	0.19	0.03
钢-青铜	0.15~0.18	0.07 (0.1~0.15)

(续)

摩擦材料	滑动摩擦系数 $\mu$ (或 $\mu_0$ )	
	无润滑	有润滑
钢-铝	0.17	0.02
钢-夹布胶木	0.22	—
硬木-铸铁或钢	0.20~0.35	0.12~0.16
软木-铸铁或钢	0.30~0.50	0.15~0.25
软钢-铸铁	0.18 (0.2)	0.05~0.15
软钢-青铜	0.18 (0.2)	0.07~0.15
铸铁-铸铁	0.15	0.07~0.12 (0.15~0.16)
铸铁-青铜	0.15~0.21 (0.28)	0.07~0.15 (0.16)
铸铁-橡皮	0.8	0.5
铜-淬火的 T8 钢	0.15	0.03
铜-铜	0.20	—
黄铜-淬火的 T8 钢	0.14	0.02
黄铜-黄铜	0.17	0.02
黄铜-硬橡胶	0.25	—
黄铜-石板	0.25	—
黄铜-绝缘物	0.27	—
青铜-黄铜	0.16	—
青铜-青铜	0.15~0.20	0.04~0.10
青铜-钢	0.16	—

(续)

摩擦材料	滑动摩擦系数 $\mu$ (或 $\mu_0$ )	
	无润滑	有润滑
青铜-夹布胶木	0.23	—
青铜-硬橡皮	0.36	—
青铜-石板	0.33	—
青铜-绝缘物	0.26	—
铝-淬火的 T8 钢	0.17	0.02
铝-黄铜	0.27	0.02
铝-青铜	0.22	—
铝-钢	0.30	0.02
铝-夹布胶木	0.26	—
钢-粉末冶金	(0.35~0.55)	—
木材-木材	纹路平行时	} 0.07~0.10 { (0.1)
	纹路垂直时	
麻绳-木材	0.5 (0.5~0.8)	—
45 号淬火热钢-尼龙 9 (加 3% MoS <sub>2</sub> 填充料)	0.57	0.02

表 4-12 滑动摩擦系数

摩擦物体	滑动摩擦系数	
	静止的 $\mu_0$	运动的 $\mu$
轮缘与钢轨间		
(1) 起动时	0.20	
(2) 速度 $v=5\text{m/s}$ 运动时		0.15

(续)

摩擦物体	滑动摩擦系数	
	静止的 $\mu_0$	运动的 $\mu$
钢锭与钢制辊子间 (1) 热金属 (2) 冷金属	0.3~0.25 0.15	
滑动轴承 (1) 热轧机带有金属轴衬 (2) 冷轧机带有金属轴衬 (3) 带有木质塑料制轴衬 (4) 液体摩擦系数		0.07~0.10 0.05~0.07 0.01~0.03 0.003~0.005
滚动轴承 (有润滑时) (1) 减速机 (2) 吊车车轮 (3) 辊道辊子与热金属 (4) 辊道辊子与冷金属		0.005 0.008 0.015 0.010
钢-卵石	0.42~0.49	
钢-压实沥青沙面	0.4~0.45	
钢-花岗石沙面	0.27~0.35	
硬木-卵石	0.6	
钢-碎石沙面	0.36~0.39	
钢-硬木沙面	0.55~0.6	

在辊道上输送钢材时，冷钢材最大允许加速度  $a_{\max} \approx 0.94 \sim 1.47 \text{m/s}^2$ ，热钢材最大允许加速度  $a_{\max} \approx 1.47 \sim 2.94 \text{m/s}^2$ 。

从满足上式要求出发，可换算成限制电动机在加、减速过程中的动态转矩值

$$M_d \leq \frac{60g}{375} \cdot \frac{i\mu GD^2}{\pi DK_s}$$

式中  $M_d$ ——动态转矩 (N·m)；

$D$ ——传动轮（辊子）直径 (m)；

$K_s$ ——滑动系数，可取 0.98；

$GD^2$ ——传动系统飞轮力矩 (N·m<sup>2</sup>)；

$i$ ——传动系统的总速比（传动比）；

$\mu$ ——同前。

#### 四、电动机功率的校验

##### 1. 平稳负载长期工作制电动机容量的校验

##### (1) 电动机额定功率计算

① 对于平稳或变化很小的负载长期工作制的电动机额定功率按下式计算

$$P_e \geq P_z = \frac{M_z n_z}{9555}$$

式中  $P_e$ ——电动机额定功率 (kW)；

$P_z$ ——负载功率 (kW)；

$M_z$ ——折算到电动机轴上的静负载转矩 (N·m)；



$n_r$ ——电动机额定转速 (r/min)。

② 对恒定负载转矩,在额定转速以上调速时,应使电动机弱磁后的最高工作转速符合机械所要求的最高转速。此时按最高转速来校验电动机的功率,即

$$P_e \geq \frac{M_r n_{\max}}{9555}$$

式中  $n_{\max}$ ——电动机的最高工作转速 (r/min); 其它符号同前。

(2) 校验起动过程中的最小转矩。对起动沉重的机械,当采用鼠笼型电动机时,按下列公式校验最小起动转矩

$$M_{\min} \geq \frac{M_{\max} K_s}{K_u^2}, \quad K_u = U_q / U_e$$

式中  $M_{\min}$ ——起动过程中电动机的最小转矩 (N·m);

$M_{\max}$ ——起动过程中的最大负载转矩 (N·m);

$K_s$ ——保证起动时有足够加速转矩的系数,一般取 1.15~1.25;

$U_q$ ——起动时电动机端电压 (V);

$K_u$ ——电压波动系数,直接起动时取 0.85。

## 2. 短时工作制电动机功率的校验

对于异步电动机,其额定功率  $P_e$  按下式计算

$$P_e = \frac{P_{\max}}{0.75\lambda}$$

式中  $P_{rmax}$ ——短时负载功率最大值 (kW);

$\lambda$ ——电动机允许的转矩过载倍数, 见表 4-7。

### 3. 波动负载长期工作制电动机容量的校验

#### (1) 发热校验

#### ① 电动机负载曲线为矩形时 (图 4-12)

$$M_{jf} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

$$I_{jf} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

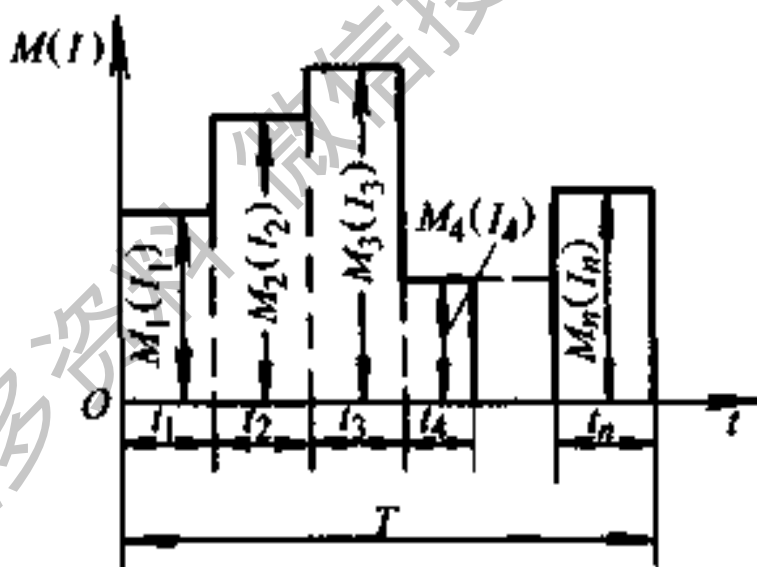


图 4-12 矩形曲线的负荷图

式中  $M_{jf}$ ——负载等效转矩 (N·m), 即均方根值;

$I_{jf}$ ——负载等效电流 (A);

$M_1 \sim M_n$ ——各分段时间的转矩值 (N·m);

$I_1 \sim I_n$ ——各分段时间的电流值 (A);

$t_1 \sim t_n$ ——相应的各分段时间 (s)。

当  $M_c > M_{jf}$ , 或  $I_c > I_{jf}$  时, 发热校验合格。

② 电动机的负载曲线是梯形或三角形时 (图 4-13)

应将每一个梯形或三角形的转矩(或电流)换算成等效平均值, 然后再按①中的公式计算等效转矩或等效电流, 进行校验。

每个梯形转矩(或电流)的等效平均值(时间  $t_1$  间隔内)可按下式求得

$$M_{pj} = \sqrt{\frac{M_1^2 + M_2^2 + M_1 M_2}{3}}$$

$$I_{pj} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2}{3}}$$

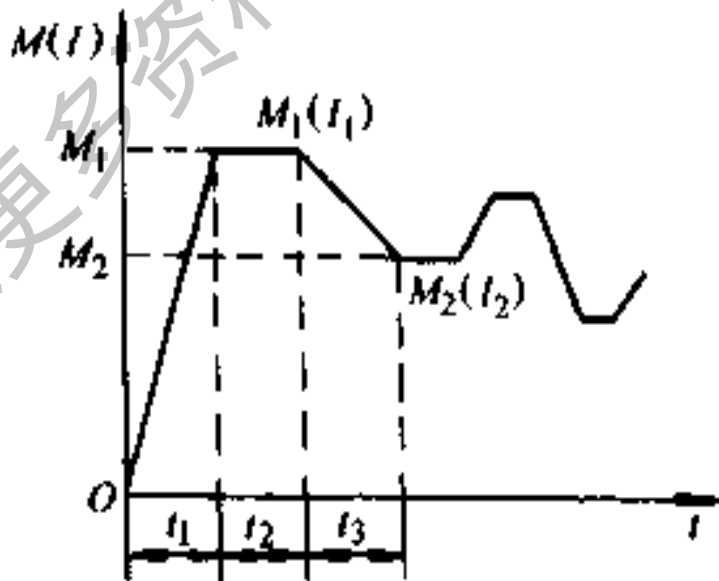


图 4-13 梯形和三角形曲线的负荷图

每个三角形转矩（或电流）的等效平均值（时间  $t$  间隔内）可按下式计算

$$M_{pj} = \sqrt{\frac{M_1^2}{3}} = 0.578M_1$$

$$I_{pj} = \sqrt{\frac{I_1^2}{3}} = 0.578I_1$$

等效电流法适用于直流电动机、线绕型及鼠笼型异步电动机；等效转矩法只适用于转矩与电流成正比的条件下，如磁场不变的直流电动机、稳定工作速度下的线绕型和鼠笼型异步电动机，而不能用于直流串激电动机。

(2) 校验最大过载转矩：

$$M_e \geq \frac{M_{rmax}}{0.9K_v\lambda}$$

式中  $M_e$  —— 电动机的额定转矩 (N·m)；

$M_{rmax}$  —— 最大负载转矩 (N·m)；

$K_v$  —— 电网电压波动对电动机转矩的影响系数，异步电动机取 0.72；直流电动机取 1.0；

$\lambda$  —— 同前。

(3) 校验起动过程中的最小转矩的方法同平稳负载长期工作制电动机。

#### 4. 重复短时工作制电动机功率的校验

图 4-14 示出速度与负载图形，电动机通常选用 YZ、YZR 系列。

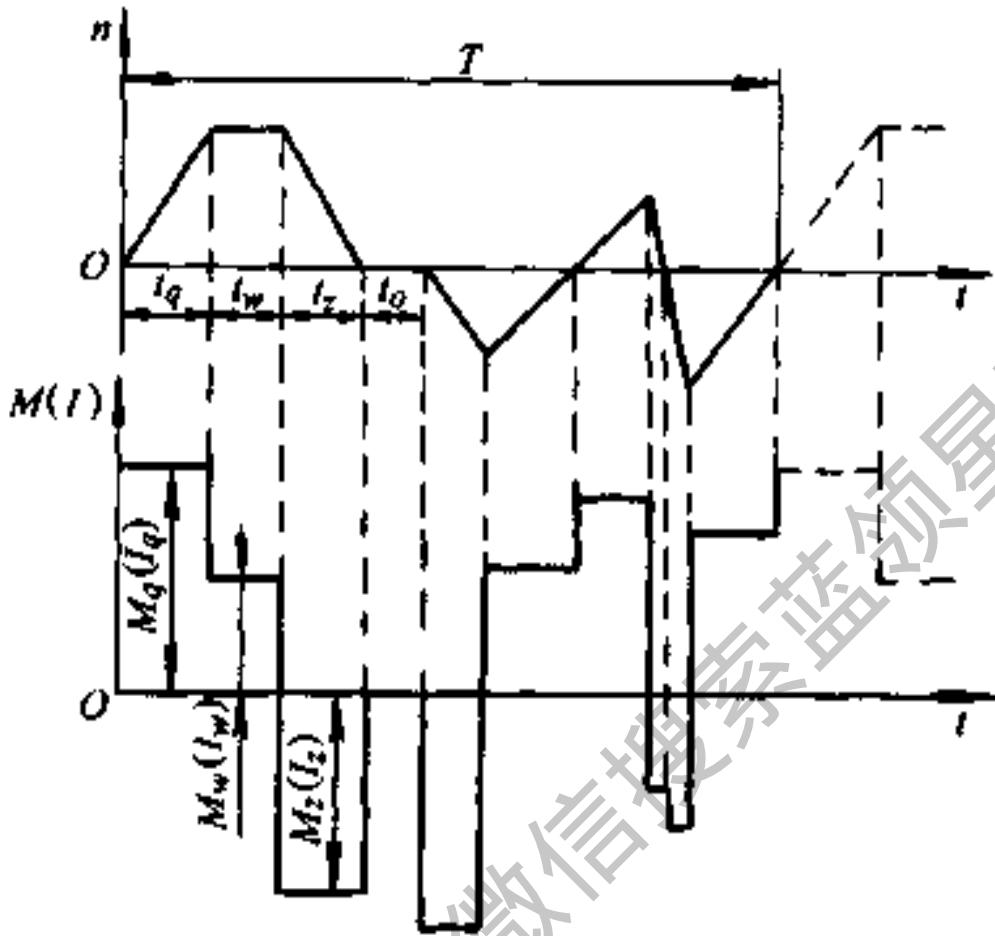


图 4-14 重复与短时工作制电动机的速度与负载图

(1) 按等效转矩法（或等效电流法）校验发热

$$M_{jf} = \sqrt{\frac{\sum M_g^2 t_q + \sum M_w^2 t_w + \sum M_z^2 t_z}{C_s (\sum t_q + \sum t_z) + \sum t_w}}$$

$$I_{jf} = \sqrt{\frac{\sum I_g^2 t_q + \sum I_w^2 t_w + \sum I_z^2 t_z}{C_s (\sum t_q + \sum t_z) + \sum t_w}}$$

式中  $M_{jf}$ 、 $I_{jf}$ ——电动机在一个工作周期  $T$  内的等效转矩 (N·m) 和等效电流 (A)；

$M_q, I_q$ ——起动转矩 (N·m) 和起动电流 (A);

$M_r, I_r$ ——制动转矩 (N·m) 和制动电流 (A);

$M_w, I_w$ ——稳态运行转矩 (N·m) 和电流 (A);

$\Sigma t_q$ ——一个周期起动时间的总和 (s);

$\Sigma t_r$ ——一个周期制动时间的总和 (s);

$\Sigma t_w$ ——一个周期稳态运行时间的总和 (s);

$C_a$ ——电动机起、制动时间的散热恶化系数

$C_a = (1 + C_\beta) / 2$ ,  $C_\beta$  的大小在表 4-13 中示出。

表 4-13 散热恶化系数  $C_\beta$  值

电动机的冷却方式	$C_\beta$ 值
封闭式电动机 (无冷却风扇)	0.95~0.98
封闭式电动机 (强迫通风)	0.9~1.0
封闭式电动机 (自带内冷风扇)	0.45~0.55
防护式电动机 (自带内冷风扇)	0.25~0.35

实际负载持续率  $FZ\%$  为

$$FZ\% = \frac{\Sigma t_q + \Sigma t_r + \Sigma t_w}{T} \times 100$$

式中  $T$ ——一个工作周期的总时间 (s)。

当实际的负载持续率  $FZ\%$  与电动机铭牌上规定的负载持续率  $FZ_0\%$  不同 (但差不多) 时, 应将电动机的额定转矩和额定电流折算到实际负载持续率来计算, 折算公式如下:

$$M_r = \sqrt{\frac{FZ_0\%}{FZ\%}} M_e \quad I_r = \sqrt{\frac{FZ_0\%}{FZ\%}} I_e$$

式中  $M_r$ ——折算到实际负载持续率时的额定转矩 (N·m);

$I_r$ ——折算到实际负载持续率时的额定电流 (A);

$M_e$ ——对应于  $FZ_0\%$  时的电动机额定转矩 (N·m);

$I_e$ ——对应于  $FZ_0\%$  时的电动机额定电流 (A);

当  $M_r \geq M_e$  或  $I_r \geq I_e$  时, 发热校验合格。

(2) 校验最大过载转矩: 校验方法同波动负载长期工作制电动机。

只有以上两项校验合格, 才算通过。

## 五、电动机功率的选定

1. 采用寿命期费用分析法选定电动机

电动机寿命期间的全部费用为

$$Z = G + Q + F_M$$

式中  $Z$ ——全部费用 (元);

$G$ ——购买费（元），已知；

$Q$ ——安装费（元），根据安装条件和现场条件可估算；

$F_M$ ——寿命期内的全部使用费现值（元）。

第  $m$  年的使用费现值可由下式计算

$$F_m = C_m \left( \frac{1}{1+i} \right)^m$$

式中  $C_m$ ——第  $m$  年发生的使用费（元）；

$i$ ——使用费的利率，由财务部门提供。

设选定的电动机的使用寿命为  $M$  年，则  $M$  年内发生的使用费现值为

$$F_M = F_1 + F_2 + \dots + F_m = \sum_1^M \left[ C_m \left( \frac{1}{1+i} \right)^m \right]$$

由于电动机在使用过程中效率逐年有所下降，使用费则逐年递增。设递增率为  $e$ ，则

$$F_M = \sum_1^M \left[ C_m \left( \frac{1+e}{1+i} \right)^m \right]$$

式中  $e$ ——递增率（经验系数），一般取 0.75~0.80。

在正常使用条件下，电动机效率衰减很小，各年使用费用的增长不大。可以设  $C_1 = C_2 = \dots = C_n = A$ ，利用等比数列求和的公式可得：



$$F_M = A \frac{\left(\frac{1+e}{1+i}\right) \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+i}\right)^M\right]}{1 - \frac{1+e}{1+i}}$$

$$A = \left\{ P_2 + P_0 + \left(\frac{P_2}{P_c}\right)^2 \left[ \left(\frac{1}{\eta_c} - 1\right) P_c - P_0 \right] \right\} T \delta$$

式中  $A$ ——每年的使用费用 (元);

$P_2$ ——电动机输出功率 (kW);

$P_0$ ——电动机空载损耗 (kW);

$P_c$ ——电动机额定功率 (kW);

$\eta_c$ ——电动机额定效率;

$T$ ——电动机年运行小时数 (h);

$\delta$ ——电价 (元/kW·h)。

根据上述公式,逐台比较预选电动机的全部费用  $Z$  值的大小,就可以选出  $Z$  值最小的电动机,即经济性最佳的电动机。

## 2. 在不同环境温度时电动机功率的计算

电动机的额定功率以周围环境温度为  $40^\circ\text{C}$  来标定,当环境温度为  $40^\circ\text{C}$  时,电动机能以其额定功率连续运行而温升不超过允许范围;电动机在非标准温度下运行时,其功率应做相应修正,修正的近似公式为

$$P_t = P_r \sqrt{\frac{\tau_r}{\tau_t} (m+1) - m}$$

式中  $P_t$ ——当环境温度为  $t^\circ\text{C}$  时,电动机的功率 (kW);

表 4-14 三相异步电动机的最高允许温度(周围环境温度为 40℃)

电动机的部分	A 级绝缘				E 级绝缘				B 级绝缘	
	最高允许温度 /℃		最大允许温升 /℃		最高允许温度 /℃		最大允许温升 /℃		最高允许温度 /℃	
	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法
定子绕组	95	100	55	60	105	115	65	75	110	120
	95	100	55	60	105	115	65	75	110	120
转子绕组	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
定子铁心	100	—	60	—	115	—	75	—	120	—
滑环	100	—	60	—	110	—	70	—	120	—
滑动轴承	80	—	40	—	80	—	40	—	80	—
滚动轴承	95	—	55	—	95	—	55	—	95	—

(续)

电动机的部分	B级绝缘		F级绝缘		H级绝缘	
	最大允许温升 /C		最高允许温度 /C		最高允许温度 /C	
	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法
定子绕组	70	80	125	140	85	100
	70	80	125	140	85	100
转子绕组	—	—	—	—	—	—
定子铁心	80	—	140	—	100	—
滑环	80	—	130	—	90	—
滑动轴承	40	—	80	—	40	—
滚动轴承	55	—	95	—	55	—
					165	—
					140	—
					80	—
					95	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—
					165	—
					105	—
					145	—

$P_r$ ——电动机额定功率 (kW)；

$\tau_t$ ——当环境温度为  $t$ °C 时，电动机的允许温升 (°C)；

$\tau_r$ ——当周围环境温度为 +40°C 时，电动机的允许温升 (°C)，视电动机绝缘等级而异，见表 4-14。

$m$ ——电动机空载损耗  $P_0$  与铜耗  $P_{Cu}$  之比， $m = P_0/P_{Cu}$ ，见表 4-15。

上式有三种情况：

(1) 当  $\tau_t > \frac{m\tau_r}{m+1}$  时，根号内数值为正，表示在这种温升下，电动机能发挥出  $P_r$  的功率。

(2) 当  $\tau_t = \frac{m\tau_r}{m+1}$  时， $P_r$  等于零，表示在这种温度下，

表 4-15 电动机的  $m$  值

电动机型式	$m$ 值	
	复励电动机	低速
高速		1.0
并励电动机	低速	1.0
	高速	2.0
工业用感应电动机	0.5~1.0	
吊车用感应电动机	0.5~1.5	

电动机由于它的空载损耗  $P_0$  已经使其发热达到极限程度，因而不能再带负载运行了。

(3) 当  $\tau < \frac{m\tau_c}{m+1}$  时，根号内的数据为负， $P_1$  变成一个虚数，表示在这种情况下，电动机空载运行也不可能。

### 3. 各种设备电动机功率的选择

#### (1) 卷扬机电机功率的计算

卷扬机电机负载曲线如图 4-15 所示。电动机的负载功率可按式计算：

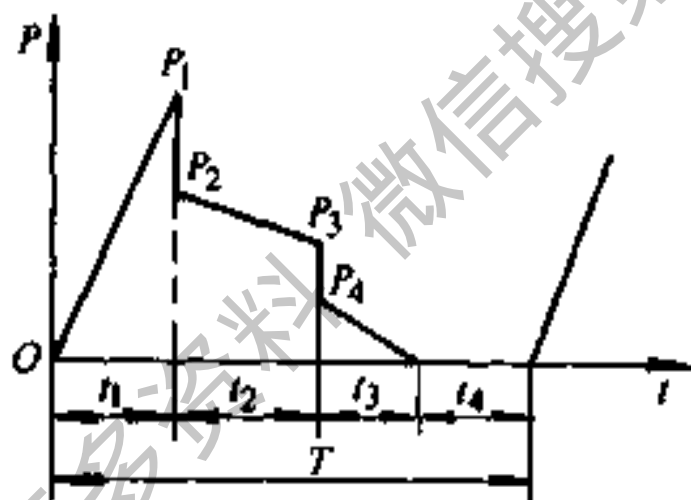


图 4-15 卷扬机电机负载曲线

$$P_{if} = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + (P_2^2 + P_2 P_3 + P_3^2) \frac{t_2}{3} + P_4^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + \frac{t_4}{3}}}$$

式中  $P_{if}$ ——电动机负载功率 (kW)；

$\eta$ ——卷扬机效率，直接联接的为 0.8~0.9，—

对齿轮乘以 0.9~0.95。

其它符号见图 4-15。

卷扬机电动机功率另一计算公式

$$P = 0.105 \frac{nM}{\eta} \times 10^{-3}$$

式中  $P$ ——所需电动机功率 (kW)；

$n$ ——转速 (r/min)；

$M$ ——电动机的负载转矩 (N·m)；

$\eta$ ——同前。

当计算出的  $P_c \geq P$  时，电动机功率即可确定。

(2) 摩擦负载电动机功率的计算

① 直线运动：

$$F = \mu G$$

$$P = Fv \times 10^{-3} = \mu Gv \times 10^{-3}$$

式中  $F$ ——滑动摩擦力 (N)；

$P$ ——电动机所需功率 (kW)；

$G$ ——垂直正压力 (N)；

$v$ ——运动速度 (m/s)；

$\mu$ ——滑动摩擦系数，见表 4-11。

② 回转运动：

$$M = PG\gamma$$

$$P = \omega M \times 10^{-3} = \omega \rho G\gamma \times 10^{-3}$$

式中  $M$ ——所需转矩 (N·m)；

$r$ ——轴承的旋转半径 (m);

$\omega$ ——旋转轴的角速度 (rad/s);

$\rho$ ——轴承摩擦系数, 套筒轴承为 0.001 ~ 0.006; 滚珠轴承, 滚柱轴承为 0.001 ~ 0.007。

### (3) 各类机床电动机的选择

#### ① 机床主传动电动机的负载功率

$$P = \frac{M_c \eta_c}{9555} \quad \text{或} \quad P = P_{\max} / \eta_{\min}$$

式中  $P$ ——电动机的负载功率 (kW);

$M_c$ ——电动机的负载转矩 (N·m);

$P_{\max}$ ——机床最大切削功率 (kW);

$\eta_{\min}$ ——传动最低效率。

#### ② 车床进给电动机的负载功率:

$$P = \frac{P_1}{\eta} = \frac{Fv \times 10^{-3}}{60\eta} \quad \text{或} \quad P = 36.5D^{1.54}$$

式中  $P$ ——电动机的负载功率 (kW);

$P_1$ ——车床的切削功率 (kW);

$\eta$ ——传动机构的效率;

$F$ ——进给运动的总阻力 (N);

$v$ ——切削速度 (m/min), 取最大值;

$D$ ——工件的最大直径 (m)。

#### ③ 刀架快速移动所需电动机的功率

$$P = \frac{GvF}{102 \times 60\eta\lambda}$$

式中  $P$ ——辅助传动电动机的功率 (kW);

$G$ ——被移动元件的重量 (kg);

$v$ ——移动速度 (m/min);

$\mu$ ——摩擦系数, 可取 0.1~0.2;

$\eta$ ——传动机构的效率, 可取 0.1~0.2;

$\lambda$ ——电动机过载倍数, 可由产品目录查得。

④ 切削机床电动机的负载功率

$$P = \left( \frac{F_1 R n}{9555} + \frac{F_2 v \times 10^{-3}}{60} \right) \frac{1}{\eta}$$

式中  $P$ ——电动机的负载功率 (kW);

$F_1$ 、 $F_2$ ——切削力 (N);

$R$ ——半径 (m);

$n$ ——转速 (r/min);

$v$ ——送刀速度 (m/min);

$\eta$ ——机床传动效率。

⑤ 摇臂钻床电动机的负载功率:

$$P = 0.0646D^{1.19}$$

式中  $P$ ——电动机的负载功率 (kW);

$D$ ——最大的钻孔直径 (mm)。

⑥ 电钻转矩计算, 钻削 45 号钢, 不采用冷却液时, 电钻的转矩可按下式计算:



$$M = 0.29D^2v^{0.8}$$

$$v = \left( \frac{F}{5590} \right)^{1.43}$$

式中  $M$ ——电钻的钻矩 ( $N \cdot m$ );

$D$ ——最大钻孔直径 ( $mm$ );

$v$ ——钻头进给速度 ( $mm/r$ );

$F$ ——在电钻上施加的轴向压力 ( $N$ )。

各种规格的电钻钻削 45 钢时, 设计用轴向压力, 见表 4-16。

表 4-16 电钻轴向压力推荐值

最大钻孔直径 /mm	4	6	10	13	16	19	23	38	49
轴向压力/N	245	343	539	883	1177	1667	2256	4217	5884

⑦ 电动攻丝机转矩计算, 利用冷却润滑液切削螺纹的电动攻丝机转矩可按下式计算:

$$M = 0.0981KD^{1.4}S^{1.5}$$

式中  $M$ ——攻丝机转矩 ( $N \cdot m$ );

$K$ ——系数, 钢取 2.75, 铸铁按硬度不同取 1.29~1.89, 青铜及黄铜取 0.55;

$D$ ——螺纹直径 ( $mm$ );

$S$ ——螺距 ( $mm$ )。

表 4-17 列出丝锥的切削速度。

表 4-17 电动攻丝机的切削速度推荐值

螺 纹 直 径 /mm	切 削 材 料		
	用冷却液		不用冷却液
	$\delta_b$ 为 392~588 MPa 的钢或黄铜	$\delta_b$ 为 392 MPa 以内 和 588MPa 以上的钢	铸铁、青铜 及铝合金
	切削速度/ (m/min)		
6	6.5	4.5	6.0
8	7.5	5.0	7.0
10	8.0	5.5	8.0
12	9.0	6.0	9.0
14	9.5	6.5	10.0
16	11.0	7.5	11.0

## (4) 砂磨电动工具参数的选择:

① 磨具安全线速度: 纤维加强砂轮为 80m/s, 树脂砂轮为 50m/s, 各类磨头为 30m/s, 布、塑料、皮革抛光盘为 12m/s。

② 空转转速: 最高空载转速在 1.1 倍的额定电压时, 不得使磨具的线速度超过规定的安全值。

交直两用电动机额定电压时的空载转速为

$$n_0 = \frac{n}{0.55 \sim 0.6}$$

三相鼠笼式电动机的空载转速接近于同步转速。

③ 额定转矩：

以圆周面加工的角向磨光机

$$M_r = 7.5 F_j D \times 10^{-5}$$

以端面加工的角向磨光机

$$M_r = 2.94 F_j D^2 \times 10^{-5}$$

角向抛光机

$$M_r = 6.86 D^2 \times 10^{-5}$$

磨具直径大于 50mm 的直向砂轮机

$$M_r = 2.94 D^{1.5} b \times 10^{-5}$$

式中  $M_r$ ——额定转矩 (N·m)；

$D$ ——磨具直径 (mm)；

$F_j$ ——磨具切削时施加的压力，见表 4-18；

$b$ ——磨具厚度 (mm)。

表 4-18 切削压力推荐值

砂轮直径/mm	100	125	180	230
砂轮切削压力 /N	24.5~ 34.3	49.0~ 58.8	156.9~ 166.7	166.7~ 176.5

(5) 木材锯割电动工具参数的选择

① 电圆锯、带锯电动机的输出功率：

$$P = \frac{K_y b H C}{9.81 \times 6120 \eta}$$

式中  $P$ ——输出功率 (kW);

$K_y$ ——锯截时的单位切削阻力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ), 对通用锯截电动工具取  $196\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$b$ ——锯截宽度 (mm);

$H$ ——锯截高度 (mm);

$C$ ——进给速度 (m/min), 见表 4-19;

$\eta$ ——传动机构效率。

电圆锯锯片空载线速度一般在  $50\sim 60\text{m}/\text{s}$ 。

表 4-19 电圆锯进给速度

木 质	进给速度/ (m/min)
硬	0.7~0.9
中硬	1.0~1.2
软	1.2~1.8

② 电刨电动机的输出功率:

$$P = \frac{K_B b H C}{9.18 \times 6120 \eta}$$

式中  $P$ ——电动机的输出功率 (kW);

$K_B$ ——刨削时的阻力, 通常取  $29.4\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$b$ ——刨削宽度 (mm);

$H$ ——刨削深度 (mm);

$C$ ——进给速度, 取  $3\sim 5\text{m}/\text{min}$ ;

$\eta$ ——传动机构效率。

电刨刨刀的线速度一般在  $20\sim 30\text{m/s}$ 。

(6) 一般连续运行电动机功率的选择

$$P_e \geq P_s / \eta$$

式中  $P_e$ ——电动机额定功率 (kW)；

$P_s$ ——生产机械功率 (kW)；

$\eta$ ——传动机构效率。

(7) 农用机械电动机功率的选择

① 电犁电动机负载功率

$$P = \frac{Fv}{\eta} \times 10^{-3}$$

式中  $P$ ——电动机的负载功率 (kW)；

$F$ ——电犁最大牵引力 (N)；

$v$ ——电犁速度 (m/s)；

$\eta$ ——从电动机转轴到农田机械轴间的总传送效率，可取  $0.7\sim 0.9$ 。

② 脱粒机电动机的负载功率：

$$P = \frac{KLDZ}{102\eta}$$

式中  $P$ ——电动机的负载功率 (kW)；

$K$ ——经验系数，可取  $0.134$ ；

$L$ 、 $D$ ——脱粒机滚筒长度和直径 (cm)；

$Z$ ——谷物稻秆数；

$\eta$ ——总效率。

## 第五节 电动机的起动计算

### 一、异步电动机直接起动功率的确定

鼠笼型异步电动机能否直接起动,取决于下列条件:

1. 电动机自身要允许直接起动。对于惯性较大、起动时间较长或起动频繁的电动机,过大的起动电流会使电动机老化,甚至损坏。

2. 所带动的机械设备能承受直接起动时的冲击转矩。

3. 电动机直接起动时所造成的电网电压下降不致影响电网上其他设备的正常运行。一般情况下,要求经常起动的电动机引起的电网压降不大于10%;不经常起动的电动机不大于15%;当能保证生产机械要求的起动转矩,且在电网中引起的电压波动不致破坏其它电气设备工作时,电动机引起的电网压降允许为20%或更大;由一台变压器供电给许多不同特性的负载,而有些负载要求电压变动较小时,则允许直接起动的异步电动机的功率要小一些。

4. 电动机起动不过于频繁。因为频繁起动会给同一电网上的其他负载带来较大影响。

电动机能否直接起动,可利用下式进行判定:

$$\frac{I_s}{I_r} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{供电变压器的容量 (kVA)}}{4 \times \text{电动机的功率 (kW)}}$$

式中  $I_q$ ——起动电流 (A);

$I_r$ ——额定电流 (A)。

上式有时不如表 4-20 和表 4-21 所示数据准确。

**表 4-20 按电源容量估算鼠笼型异步电动机直接起动时的功率**

电源情况	允许直接起动的鼠笼型电动机最大功率/kW
小容量发电厂	每 1kVA 发电机容量为 0.1 ~ 0.12kW
变电所	经常起动时, 不大于变压器容量的 20%
	不经常起动时, 不大于变压器容量的 30%
高压线路	不超过电动机连接线路上的短路容量的 3%
变压器—电动机组	电动机功率不大于变压器容量的 80%

## 二、异步电动机降压起动方式的选择

如果三相异步电动机不允许直接起动, 就应选择适当的方式降压起动。无论采用何种降压起动方式, 必须使电动机的起动转矩, 大于负载的阻力转矩。因此, 电动机所拖动的负载的性质, 是选择降压起动方式的依据。根据

表 4-21 6 (10) /0.4kV 变压器允许直接  
起动的笼型电动机最大功率

变压器供电的其 它负载 $S_j$ 和功 率因数 $\cos\varphi$	起动时允 许电压降 (%)	供电变压器容量 $S_b$ /kVA					
		100	200	365	630	800	1000
		起动笼型电动机 最大功率 (kW)					
$S_j = 0.5S_b$ $\cos\varphi = 0.7$	10	22	45	90	132	160	220
	15	30	55	110	200	250	280
$S_j = 0.6S_b$ $\cos\varphi = 0.8$	10	18.5	30	90	110	132	185
	15	30	55	110	200	250	280

注：所列数据系指电动机与变压器低压母线直接相连时的情况。

一些负载的性质选择降压起动方式，见表 4-22，各种起动器特性及优缺点比较，见表 4-23。

### 三、磁力起动器的选择

磁力起动器由交流接触器和热继电器组成，是直接起动电动机的电器，它具有失压和过载保护功能。

#### 1. QC10 系列磁力起动器的技术参数（表 4-24）

#### 2. 磁力起动器的主要技术性能

(1) 机械寿命：在额定条件下不低于 300 万次，电寿命不低于 60 万次，其热继电器不低于 1000 次过载动作。

(2) 操作频率：



表 4-22 起动方式选择表

负载性质	对起动的要求		负载举例
	限制起动电流	减小起动时 对机械的冲击	
无载或轻载 起动	星三角形减压起动 电阻或电抗减压起动		车床、钻床、铣床、刨床、齿 轮加工机床、圆锯、带锯等； 带有离合器的卷扬机、绞 盘和带卸料机的破碎机； 带离合器的普通纺织和工 业机械； 电动发电机组
负载转矩与 转速成平方关 系的负载（风 机负载）	延边三角形减压起动 自耦减压起动 电抗或阻抗压起动		离心泵、叶轮泵、螺旋泵、 轴流泵等； 离心式鼓风机和压缩机、 轴流式风扇和压缩机等
重力负载		电阻、电抗或阻 抗压起动	卷扬机、倾斜式传送带类 机械； 升降机、自动扶梯类机械

(续)

负载性质	对起动的要求		负载举例
	限制起动电流	减小起动时对机械的冲击	
摩擦负载	延边三角形减压起动 电阻或电抗减压起动	电阻、电抗或阻 抗减压起动	水平传送带、活动台车、粉 碎机、混砂机、压延机和电动 门等
阻力矩小的 惯性负载	三角形减压起动 延边三角形减压起动 自耦减压起动 电抗减压起动		离心式分离机、脱水机、曲 柄式压力机等(限于阻力矩 小的机械)
恒转矩负载	延边三角形减压起动 电阻或电抗减压起动	电阻或电抗减压 起动	往复泵和压缩机、罗茨鼓 风机、容积泵、挤压机
恒重负载		电阻、电抗或阻 抗减压起动	织机、卷纸机、夹送辊、长 距离皮带输送机、链式输送 机

表 4-23 各种起动机启动特性及优缺点比较

项 目	全压直接 起动机	减压起动机			
		星三角 起动机	电抗减压起动机 抽 头		
启动时电动机端电压	$U_q$	$0.58U_q$ (相电压)	50%	65%	80%
启动时电动机电流	$I_q$	$0.33I_q$	$0.5I_q$	$0.65I_q$	$0.8I_q$
启动转矩	$M_q$	$0.33M_q$	$0.25M_q$	$0.42M_q$	$0.64M_q$
启动过程中电动机端 电压	恒定	恒定	随速度增加而较快加大		
启动电流	最大	小	在相同的启动电流下起 动转矩较自耦减压起动机		
启动转矩	最大	小	小		
		启动特性		优缺点比较	

(续)

项 目	全压直接 起动器	减压起动器	
		星三角 起动器	电抗减压起动器
起动时电源电压的影 响	最大	小	一般
起动时对机械的冲击	最大	小	较小
起动过程中力矩变化 情况	得到充分 加速力矩	力矩增加不大	力矩增加较快
最大转矩	大	较小	较大
电动机起动时间	最短	较长	较短
线路复杂性	最简单	简单	较复杂
价格	最便宜	便宜	较贵

优缺点比较

获取更多资料

微信搜一搜

(续)

项 目		减压起动器						
		电阻减压起动器			自耦减压起动器			
		抽 头		抽 头		抽 头		
起动特性	起动时电动机端电压	50%	65%	80%	50%	65%	80%	延边星三角起动器 $(0.7 \sim 0.8) U_e$ $\sim 0.7 I_q$ $\sim 0.49 M_q$
	起动时电动机电流	$0.5 U_e$	$0.65 U_e$	$0.8 U_e$	$0.5 U_e$	$0.65 U_e$	$0.8 U_e$	
	起动转矩	$0.5 I_q$	$0.65 I_q$	$0.8 I_q$	$0.5 I_q$	$0.65 I_q$	$0.8 I_q$	
优缺点比较	起动过程中电动机端电压	$0.25 M_q$	$0.42 M_q$	$0.64 M_q$	$0.25 M_q$	$0.42 M_q$	$0.64 M_q$	恒定 中等 较小
	起动电流	随速度增加而稍加大						
	起动转矩	在相同的起动电流下起动转矩较自耦减压起动器小 即使起动电流较小也能获得较大的起动转矩						

(续)

项 目	减压起动器						延边星三角起动器
	电阻减压起动器			自耦减压起动器			
	抽 头		抽 头	抽 头		抽 头	
	50%	65%	80%	50%	65%	80%	
起动时电源电压的影响	一 般			较 小			较小
起动时对机械的冲击	较 小			较 小			较小
起动过程中力矩变化情况	随速度增加而稍加大			力矩有增加			力矩有增加
最大转矩	一 般			一 般			一般
电动机起动时间	较 长			较 短			较短
线路复杂性	较复杂			最复杂			复杂
价格	较 贵			最 贵			一般

优缺点比较

表 4-24 QC10 系列磁力起动器的技术参数

起动器 型号	额定 电流 /A	配用接 触器型 号 CJ10 系列	配用热 继电器 型号 JR15 系列	可控笼型三相 异步电动机最大 功率/kW			
				127V	220V	380V	500V
QC10-1	5	5	10	1.1	1.2	2.2	2.2
QC10-2	10	10	20	1.5	2.2	4	4
QC10-3	20	20	40	3	5.5	10	10
QC10-4	40	40	40	6	11	20	26
QC10-5	60	60	100	9	17	30	40
QC10-6	100	100	100	17	29	50	
QC10-7	150	150	150	25	47	75	

① 在额定条件下控制笼型异步电动机，正常起动功率因数为 0.35~0.4， $TD=40\%$ ，额定电压时接通 6 倍额定电流，17% 额定电压下分断额定电流，其操作频率不低于 600 次/h（不带热继电器）；在减轻负载时可提高到 1200 次/h。

② 一般带热继电器时，不应超过 60 次/h。

③ 起动器的接通和分断能力，与组成起动器的交流接触器相同；在工作环境恶劣的场合，可适量降低。

④ 具有过载保护性，带热继电器的起动器，允许过载不超过 5%（视电动机的过载能力而定），一般过载 20% 时，在 20min 内即动作。

#### 四、Y-△起动器的选择

起动器在起动时将电动机的定子绕组接成星形，正常运转时接成三角形，以减小起动电流。

1. 星-三角起动器原理，如图 4-16 所示。

(1) 绕组接成星形起动时：

$$U_Y = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$I_Y = I_{\setminus Y} = \frac{U_Y}{Z} = \frac{U}{\sqrt{3}Z}$$

式中  $U$ ——三相电源线电压 (V)；

$U_Y$ ——电动机绕组接成 Y 形的相电压 (V)；

$I_Y$ 、 $I_{\setminus Y}$ ——电动机绕组接成

Y 形的线电流和起动相电流；

$Z$ ——电动机绕组起动时一相等效阻抗 ( $\Omega$ )。

(2) 绕组接成三角形起动时：

$$U_{\Delta} = U, I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{\setminus \Delta} = \frac{\sqrt{3} U_{\Delta}}{Z} = \frac{\sqrt{3} U}{Z}$$

式中  $U_{\Delta}$ ——电动机绕组接  $\Delta$  形时的相电压 (V)；

$I_{\Delta}$ 、 $I_{\setminus \Delta}$ ——电动机绕组接成  $\Delta$  形时的线电流和起动相电流 (A)。

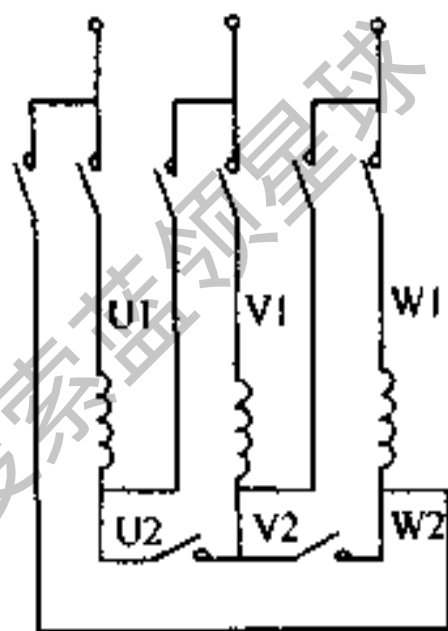


图 4-16 Y-△起动器原理接线图



$$\text{由此得 } \frac{I_Y}{I_\Delta} = \frac{U/\sqrt{3}Z}{\sqrt{3}U/Z} = \frac{1}{3}$$

可见，接成Y形启动时，比直接接△形启动时，启动电流要小2/3，有效地限制了启动电流。但启动转矩如何？

$$M_Y \propto U_Y^2 = U^2/3, \quad M_\Delta \propto U_\Delta^2 = U^2$$

故  $M_Y = M_\Delta / 3$

可见，启动转矩却减少到1/3。

Y-△启动器多用于启动设备转矩不大于电动机启动转矩的1/3、功率不大于125kW的三相鼠笼型异步电动机。

2. QX4系列自动Y-△启动器的技术数据如表4-25所示。

### 3. 启动时间的计算

Y-△法或自耦变压器法启动异步电动机时，从启动到切换为全电压运行的时间，可由下式计算：

$$t = \frac{\pi n J}{30 M_q}$$

式中  $t$ ——启动时间 (s)；

$n$ ——切换终止时电动机转速，一般取  $n = 0.7 \sim 0.8n_e$  (r/min)；

$n_e$ ——电动机额定转速 (r/min)；

$J$ ——转动惯量 (包括电动机和负载的总转动惯量) ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ )；

$M_q$ ——平均起动转矩 ( $N \cdot m$ ),  $M_q = 0.45 \sim 0.5 (M_r + M_{max})$ ;

$M_r$ ——转差率  $s=1$  时的起动转矩 ( $N \cdot m$ );

$M_{max}$ ——电动机的最大转矩 ( $N \cdot m$ )。

表 4-25 QX4 系列自动 Y- $\Delta$  起动器的技术数据

起动器 型号	控制 功率 /kW	额定 电压 /V	额定 电流 /A	热元件 整定电 流/A	延时调 节范围 /s	反复短 时工作 操作频 率/ (次/h)
QX4-14	13	500	26	15	11	30
	17	380	33	19	13	30
QX4-30	22	500	42.5	25	15	30
	30	380	58	34	17	30
QX4-55	40	500	77	45	20	30
	55	380	105	61	24	30
QX4-75	75	380	142	85	30	30
QX4-125	125	380	260	100~ 160	14~60	30

$M_r$  和  $M_{max}$  均为电动机在额定工作情况下的数据。

## 五、自耦减压起动器的选择与计算

### 1. 自耦减压起动器的选择

自耦减压起动器是利用自耦变压器能调压的原理达到降低电源电压，以减小起动电流，同时还能通过选择自耦变压器的不同抽头改变起动电流并达到改变起动转矩的目的。通常用于控制 320kW 以下的三相鼠笼式异步电动机作不频繁起动、停止之用，具有过载和失压保护功能，其原理接线如图 4-17 所示。

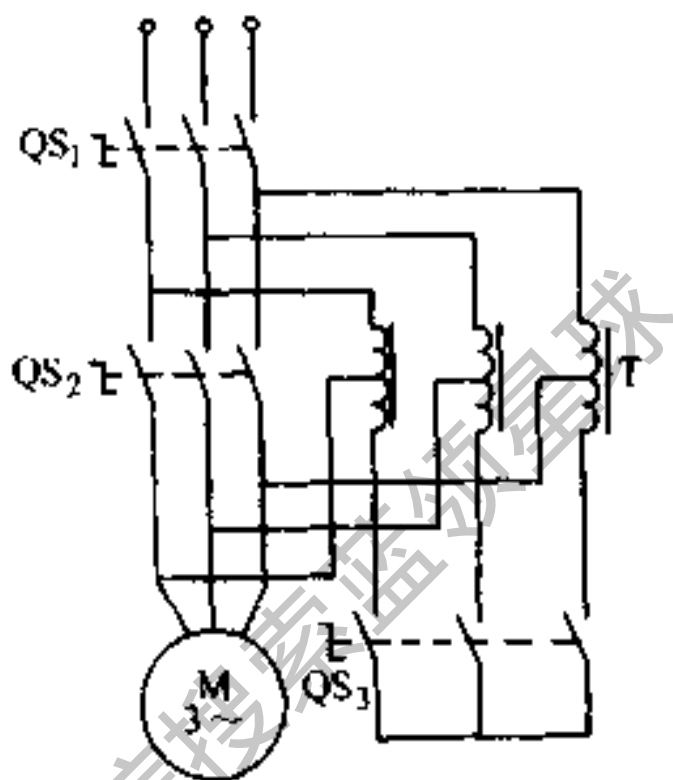


图 4-17 自耦减压起动器

原理接线图

自耦减压起动器的起动电流和起动转矩有如下关系

$$I_{1q} = K^2 I_{qr}, \quad M_q = K^2 M_{qr}$$

式中  $K$ ——自耦变压器的变比， $K = U_2/U_1 < 1$ ；

$I_{1q}$ ——降压起动时自耦变压器的一次侧电流 (A)；

$I_{qr}$ ——在额定电压下的起动电流 (A)；

$M_q$ ——降压起动时电动机的起动转矩 (N·m)；

$M_{qr}$ ——在额定电压下的起动转矩 (N·m)。

常用自耦减压起动器的主要技术数据见表 4-26，正常起动条件见表 4-27。

表 4-26 常用自耦减压起动器的技术数据

型 号	额定电压 /V	额定电流 /A	控制电动机功率 (380V 时) /kW	起动时间 /s
QJ2-75	380	75	40	6
QJ2-150	380	150	75	6
QJ2-200	380	200	100	6
QJ2-300	380	300	130	6
QJ3-40	380	40	10、15、20	30
QJ3-80	380	80	22、28、40	40
QJ3-150	380	150	55、75	60

表 4-27 自耦减压起动器正常操作条件

接 通 条 件			分 断 条 件		
电压/V	电流/A	$\cos\varphi$	电压/V	电流/A	$\cos\varphi$
380	$4.5I_n$	0.4	$380 \times 0.16$	$I_n$	0.4

自耦减压起动器的机械寿命，手动和自动式为 10000 次，电磁式可达 100000 次；电寿命在表 4-26 规定条件下应不少于上述机械寿命的二分之一。其通电间隔为 60s，通电时间不超过 0.3s。

起动器主触头的通断能力，在电压为额定值的

105%、 $\cos\varphi$ 不大于0.4时,能承受8倍额定电流20次接通与分断,每次时间间隔为30s,通电时间不大于0.5s,之后能继续工作。

起动自耦变压器为短时工作制,当电动机接在65%或80%额定电压比抽头时,其连续负载时间应符合表4-28的规定。如再次承受负载时,需冷却4h以上。

表 4-28 自耦减压起动器承载时间

可供起动的电动机额定功率/kW	一次或数次连续负载时间的总和/s
10~13	30
17~30	40
40~75	60
100~125	80
132~320	100

## 2. 起动自耦变压器的计算

自耦变压器可以起动单台电动机,也可以用于起动电动机群。

起动自耦变压器的容量按下列两种方法计算。

(1) 方法一:

$$S_b = \frac{S_{qd} t_q n}{T}$$

$$S_{qd} = K S_b \left( \frac{U_{qd}}{U_c} \right)^2$$

- 式中  $S_b$ ——自耦变压器容量 (kVA);
- $t_q$ ——电动机起动时间 (min), 一般按一次起动 0.2min 计;
- $n$ ——电动机起动次数, 如果有  $N$  台连续起动, 每台按二次计, 则  $n=2N$ ;
- $T$ ——起动自耦变压器一次或数次连续起动的最大起动时间, 不同类型时  $T$  为 0.5~2min, 一般定型的  $T$  为 2min。
- $S_{qd}$ ——电动机起动功率 (kVA), 若为电动机群, 则指电动机群的起动功率平均值;
- $K$ ——电动机全压起动时的电流倍数;
- $U_{qd}$ ——电动机起动电压 (V);
- $U_e$ ——电动机额定电压 (V);
- $S_e$ ——电动机额定功率 (kVA),
- $$S_e \approx \sqrt{3} U_e I_e \times 10^{-3}$$
- $I_e$ ——电动机额定电流 (A)。

按上式计算的起动自耦变压器的功率  $S_b$  是指其短时的工作容量, 并非指起动器铭牌上标的被控电动机的功率。

(2) 方法二:

$$P_b = \frac{P_e t_q n}{T}$$

式中  $P_b$ ——自耦变压器额定功率 (kW);

其他符号同前。

根据  $P_s$  的大小来选取相应的自耦变压器。

### 六、延边三角起动法的计算

不同抽头下，延边三角形接法（简写“ $\Delta$ ”接法）和  $\Delta$ 接法的电压、电流和起动转矩的关系。

$$1:1 \text{ 时 } U'_s \approx \frac{2}{3}U_s; I'_q \approx 0.5I_q; M'_q \approx 0.25M_q$$

$$1:2 \text{ 时 } U'_s \approx \frac{3}{4}U_s; I'_q \approx 0.6I_q; M'_q \approx 0.36M_q$$

$$1:3 \text{ 时 } U'_s \approx \frac{4}{5}U_s; I'_q \approx 0.68I_q; M'_q \approx 0.46M_q$$

式中  $U_s$ 、 $I_q$ 、 $M_q$ ——分别为“ $\Delta$ ”接法的相电压、起动电流和起动转矩；

$U'_s$ 、 $I'_q$ 、 $M'_q$ ——分别为 $\Delta$ 接法的相电压、起动电流和起动转矩。

### 七、三相笼型异步电动机起动电阻的计算

三相笼型异步电动机电阻降压起动，适合于中等功率的电动机要求平稳起动的场合。起动时，三相绕组串联降压电阻  $R$ ，起动完毕后，交流接触器主触头闭合，切除降压电阻。

$$R = \frac{220}{I_r} \sqrt{\left(\frac{I_s}{I_q}\right)^2 - 1}$$

$$P = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}\right) I_r^2 R$$

式中  $R$ ——降压电阻 ( $\Omega$ );

$P$ ——降压电阻功率 (W);

$I_q$ ——未串降压电阻时起动电流 (A);

$I_q'$ ——串降压电阻后起动电流 (A), 即允许起动电流, 一般取  $(2 \sim 2.5) I_e$ ;

$I_e$ ——电动机额定电流 (A)。

## 八、绕线型异步电动机起动电阻的计算

### 1. 三相对称起动电阻的计算

继电器控制的起动线路如图 4-18 所示。图中  $KI$  为过流继电器;  $KM$  为交流接触器;  $KT_1$ 、 $KT_2$ 、 $KT_3$  为加速接触器。

起动电阻的计算步骤如下

(1) 最大起动转矩与换接起动转矩之比  $k$  为

$$k = \frac{M_{\max}}{M_h} = \sqrt[m]{\frac{1}{\frac{M_{\max}}{M_e} S}}$$

$$M_{\max} = (1.5 \sim 2) M_e$$

式中  $M_{\max}$ ——最大起动转矩 ( $N \cdot m$ );

$M_h$ ——换接起动转矩 ( $N \cdot m$ ), 比负载转矩  $M_L$  大些;

$M_e$ ——电动机额定转矩;

$m$ ——变阻器级数, 通常  $m=3$ ;

$S_e$ ——额定转差率。





$$R_2 = kR_1 = k^2 r_2$$

$$R_3 = kR_2 = k^3 r_2$$

### (5) 各段电阻

$$R_{F1} = R_1 - r_2 = (k - 1)r_2$$

$$R_{F2} = R_2 - R_1 = kR_{F1}$$

$$R_{F3} = R_3 - R_2 = kR_{F2}$$

### 2. 三相不对称起动电阻的计算

采用三相不对称起动电阻的接法,能减少电阻段数,简化控制回路的结构。三相转子不对称电阻可以采用对称的等效电阻来计算。现举例介绍其计算方法。

如图 4-19 所示,是某吊车采用四级不对称电阻的切换情况。

设  $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$  为三相转子不对称电阻的实际值,则等效对称电阻  $R_{dx}$  为

$$R_{dx} = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_a + R_b + R_c}$$

由于  $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$  为等比级数关系,即

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_b}{R_c} = k$$

所以  $R_a = kR_b$ ,  $R_c = kR_b/k$

$$R_{dx} = \frac{kR_b^2 + \frac{R_b^2}{k} + R_b^2}{kR_b + R_b + \frac{R_b}{k}} = R_b$$

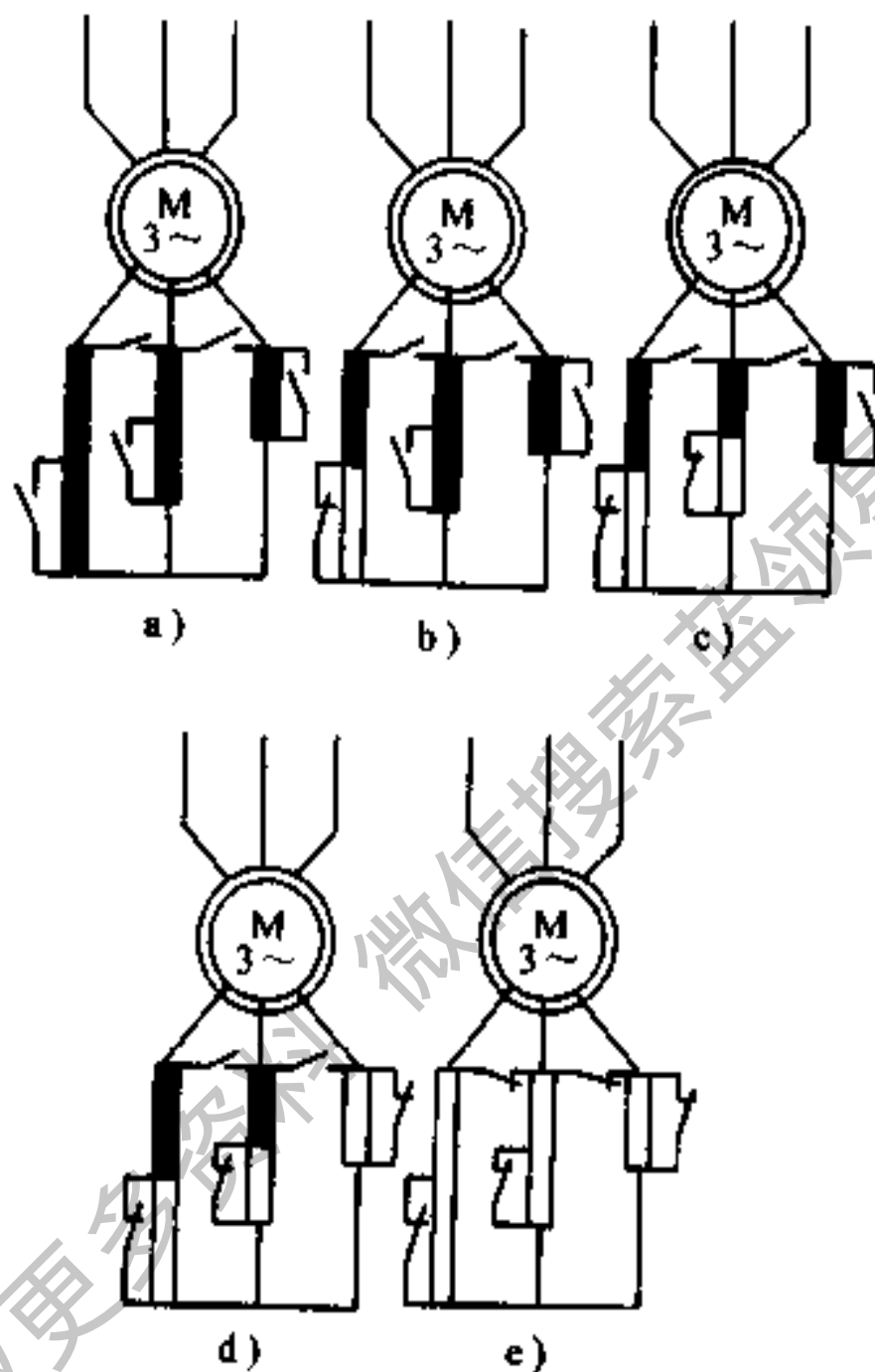


图 4-19 四级不对称电阻的切除顺序

a) 全接入 b) 一组切换 c) 二组切换

d) 三组切换 e) 全切除

上式表明,当三相不对称电阻值成等比级数时,其等效对称电阻相当于对称的转子回路中每相电阻值(为三

表 4-29 四级不对称电阻切除段数计算公式

控制 器位 置	串入 电阻 级数	等效对 称电阻	三相不对称电阻			各级切除的分段电阻		
			1	2	3	1	2	3
1	4	$R_4 = kR_3$	$R_5 = kR_4$	$R_4$	$R_3 = \frac{R_1}{k}$	—	—	—
2	3	$R_3 = kR_2$	$R_2 = \frac{R_3}{k}$	$R_1 = kR_3$	$R_3$	—	$R_5 - R_2 = R_{F1}$	—
3	2	$R_2 = kR_1$	$R_2$	$R_1 = \frac{R_2}{k}$	$R_3 = kR_2$	—	$R_4 - R_1 = R_{F2}$	—
4	1	$R_1 = kr_2$	$R_2 = kR_1$	$R_1$	$r_2 = \frac{R_1}{k}$	—	—	$R_3 - r_2 = R_{F3}$
5	0	$r_2$	$r_2$	$r_2$	$r_2$	—	$R_2 - r_2 = R_{F4}$	$R_1 - r_2 = R_{F5}$

注： $r_2$ —转子内阻； $R_1, R_2, \dots$ —依次被切除的电阻。

相等比级数中的一个阻值)。

表 4-29 中列出不对称电阻计算方法。

## 第六节 异步电动机的制动计算

### 一、异步电动机反接制动计算

#### 1. 笼型异步电动机反接制动限流电阻的计算

图 4-20 示出笼型异步电动机正反转驱动、反接制动线路图。图 4-20a 线路, 在起动及制动时电动机供电线路中都接入限流电阻; 图 4-20b 线路, 仅在制动时接入限流电阻。

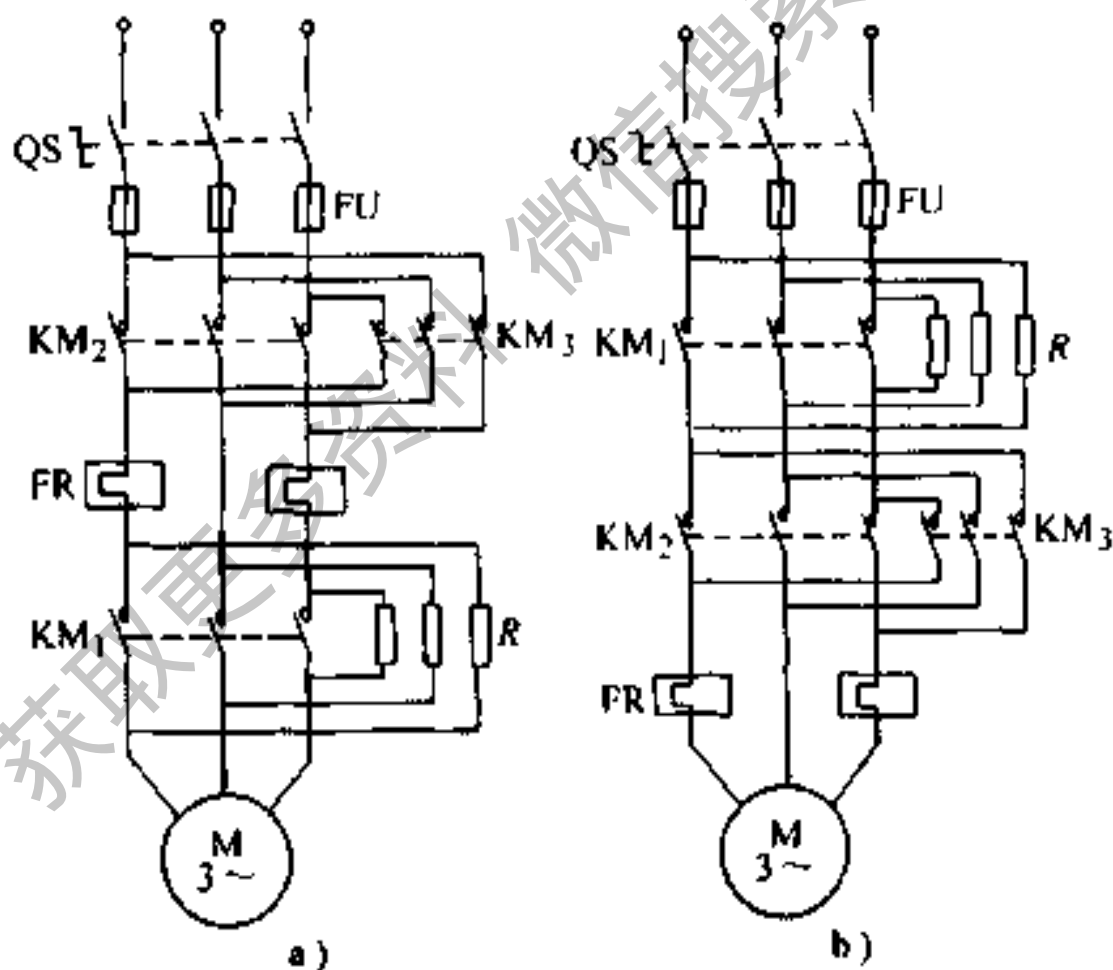


图 4-20 笼型异步电动机反接制动电路图

(1) 如果要求反接制动最大电流等于该电动机直接起动时的起动电流，则反接制动限流电阻可按下式估算

$$R \approx 0.13Z = 0.13 \frac{U}{\sqrt{3} I_q}$$

式中  $R$ ——限流电阻 ( $\Omega$ );

$Z$ ——电动机起动时每相阻抗 ( $\Omega$ );

$U$ ——电源电压 (V);

$I_q$ ——电动机直接起  
动时起动电  
流 (A)。

(2) 如果反接制动最大  
电流取  $I_q/2$ ，则限流电阻的  
阻值可按下式估算

$$R \approx 1.5 \frac{U}{\sqrt{3} I_q}$$

(3) 限流电阻的功率可  
按下式估算

$$P = \frac{I_f^2 R}{3}$$

式中  $P$ ——限流电阻的功  
率 (W);

$I_f$ ——反接制动时的  
制动电流 (A)。

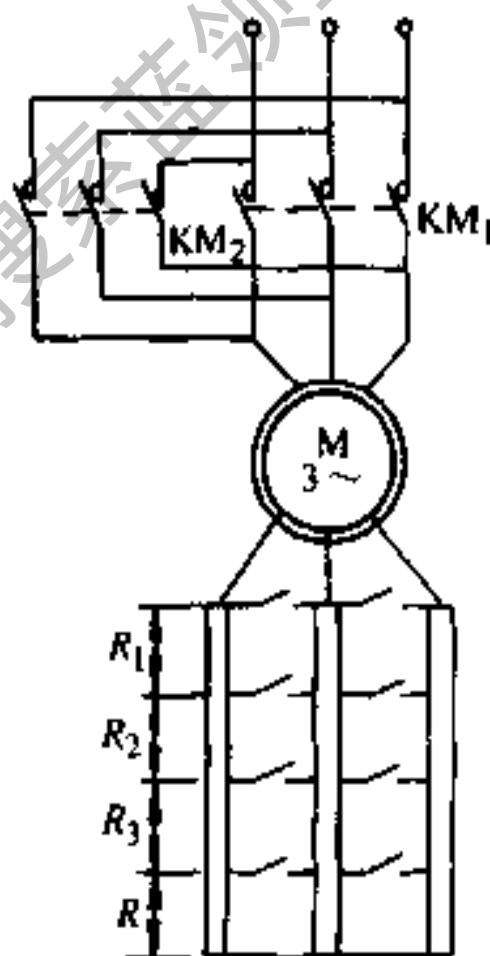


图 4-21 绕线型异步  
电动机反接制  
动线路图

(4) 如果仅有两相接有限流电阻, 则阻值应略大, 分别取上述电阻的 1.5 倍左右。

## 2. 绕线型异步电动机反接制动限流电阻计算

图 4-21 为三相绕线型异步电动机的正转驱动、反接制动线路图。其中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  为起动电阻。绕线型异步电动机反接制动机械特性曲线, 如图 4-22 所示。

反接制动电阻按下式计算

$$R = R_2 - R_0 - r_2 \quad R_0 = \frac{S_f}{M_f} R_{20}$$

$$R_0 = \frac{U_{20}}{\sqrt{3} I_{20}}$$

其中  $R$ ——反接制动电阻 ( $\Omega$ )

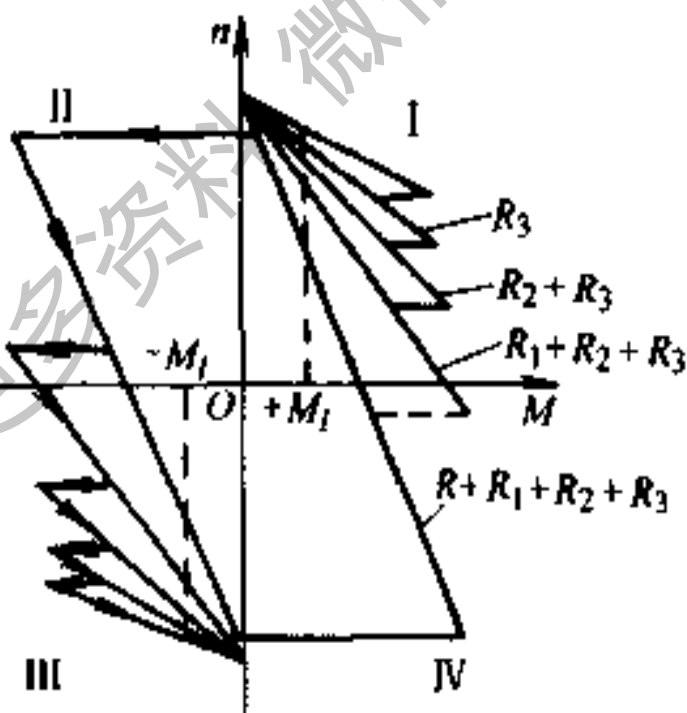


图 4-22 绕线型异步电动机  
反接制动机械特性曲线

$R_r$ ——反接制动时转子回路总电阻 ( $\Omega$ );

$S_f$ ——反接制动开始时, 电动机转差率, 一般取  
 $S_f = 2$ ;

$M_f$ ——反接制动时, 转矩标么值 (需考虑到电动机能承受的最大转矩);

$R_{2e}$ ——电动机转子额定电阻 ( $\Omega$ );

$U_{2e}$ ——电动机转子额定电压 (V);

$I_{2e}$ ——电动机转子额定电流 (A);

$R_q$ ——电动机起动电阻 ( $\Omega$ ), 图 4-21 中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ;

$r_2$ ——电动机转子内阻 ( $\Omega$ )。

## 二、异步电动机能耗制动计算

### 1. 工作原理

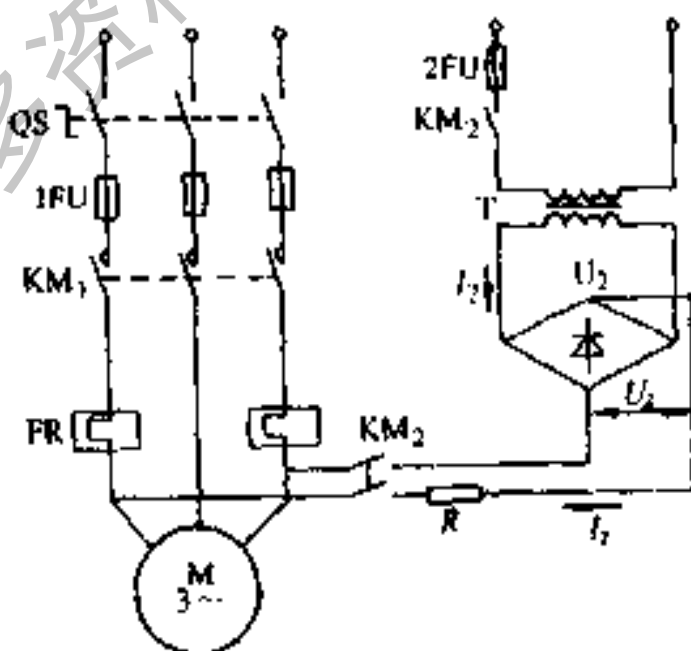


图 4-23 笼型异步电动机能耗制动线路图



异步电动机能耗制动线路如图 4-23 所示, 其制动机械特性曲线如图 4-24。

将运行中的异步电动机定子绕组断开交流电源后, 接到制动用的直流电源上, 从而得到励磁, 此时电动机即变为一台交流发电机运行, 其电能消耗于转子回路, 产生制动转矩, 从而使电动机停下来。

调节励磁电流  $I_2$ , 可改变制动转矩。该制动方法适用于要求制动平稳停位准确的场合。

绕线型电动机的能耗制动与鼠笼型电动机相同。

## 2. 能耗制动电路参数的计算

(1) 采用不改变电动机绕组接法的不对称能耗制动时, 电路参数可近似按下列公式计算

$$I_2 = 1.22I_1, \quad P_2 = 6I_2^2 R_1$$

$$U_2 = 4.88I_2 R_1, \quad R = R_1$$

式中  $I_2$  —— 制动时励磁电流 (A);

$P_2$  —— 直流回路的功率 (VA);

$U_2$  —— 直流电源的电压 (V);

$R$  —— 直流回路的限流电阻 ( $\Omega$ );

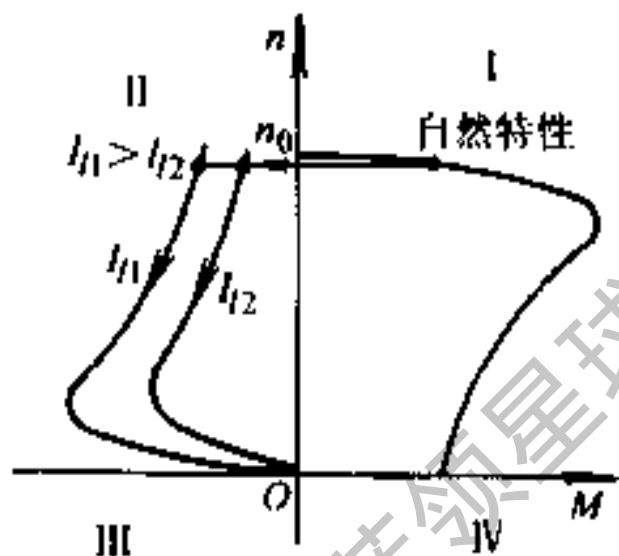


图 4-24 异步电动机能耗制动机械特性曲线

$R_1$ ——电动机定子绕组任意两根电源线之间的冷态电阻 ( $\Omega$ );

$I_e$ ——电动机额定电流 (A)。

(2) 采用改变电动机绕组接法(改成并联或串联)的对称能耗制动时, 电路参数可近似按下列公式计算

$$I_2 = K_e I_e; R = U_2 / I_2 \quad (\text{绕组并联时})$$

$$R = \left( \frac{U_2}{I_2} \right) - R_s \quad (\text{绕组串联时})$$

式中  $I_2$ ——制动电流 (A);

$K_e$ ——强迫系数, 由所需制动转矩的大小决定, 一般取 1.5~3.5;

$R$ ——限流电阻 ( $\Omega$ );

$R_s$ ——绕组串联后的总电阻 ( $\Omega$ );

其它符号同前。

(3) 整流变压器的计算:

① 直流回路串限流电阻时

变压器二次侧电压:  $U_2 = 1.11U_d + 2\Delta U_d$

式中  $\Delta U_d$ ——一只整流管子的压降, 约 0.6~0.7V。

变压器二次侧电流:  $I_2 = 1.11I_d$

变压器计算容量:  $S_{2j} = U_2 I_2$

② 直流回路不串限流电阻时

直流回路不串限流电阻的方案, 其电机运行的安全性较串限流电阻的方案差, 然而, 一般情况下都采用此方

案。这时变压器的计算公式如下

直流电源电压： $U_1 = I_1 R_1$

直流电源电流： $I_1 = 1.5 I_c$

变压器二次侧电压： $U_2 = 1.11 U_1 + 2 \Delta U_k$

变压器计算容量： $S_{2j} = U_2 I_2$

以上两方案的变压器实际容量： $S_2 = S_{2j} / 2$ （制动特别频繁场合）； $S_2 = S_{2j} / 3$ （制动不频繁的场所）。

由于整流变压器属于短时工作，变压器实际容量可取小些。

(4) 硅整流元件选用：单相桥式整流线路中，每个二极管中流过的电流平均值为  $0.5 I_c$ ，最大反向电压为  $1.57 U_2$ ，考虑 1.5~2.5 倍的裕度，选择适当的整流二极管。

### 三、异步电动机电容-电磁制动的电容计算

#### 1. 工作原理

三相异步电动机电容-电磁制动线路如图 4-25 所示。制动过程分两个阶段，首先为自励发电制动，然后把电动机三相绕组短接，转入能耗制动。该制动方法适用于小功率的三相鼠笼型异步电动机。

#### 2. 电容器电容量的计算

三角接法  $C_{\Delta} = 4.85 K I_0$

星形接法  $C_Y = 1.45 K I_0$

式中  $C_{\Delta}$ 、 $C_Y$ ——三角形和星形接法的电容器电容量

( $\mu\text{F}$ ):

$K$ ——强迫系数, 取 4-6;

$I_0$ ——电动机空载电流 (A)。

电容器耐压大于 600V。

#### 四、直流他励电动机

##### 反接制动计算

##### 1. 工作原理

直流电动机反接制动线路如图 4-26 所示, 其制动机械特性如图 4-27 所示。在直流电动机运转时, 励磁不变, 突然将电枢电源反接, 由于反接, 此时电枢电源极性和电机反电势极性相同, 在电枢回路中产生较大的反向制动电流  $I_f$ , 从而使电

动机迅速制动停转。在图 4-26 中, 当反接制动时,  $\text{KM}_1$  打开、 $\text{KM}_3$  打开、 $\text{KM}_2$  闭合。该制动方法适用于要求迅速制动停转并反转的场合。

##### 2. 反接制动电阻的计算

$$R_f = \frac{U_c - E_{\text{max}}}{I_{\text{rmax}}} - (R_e + R_g)$$

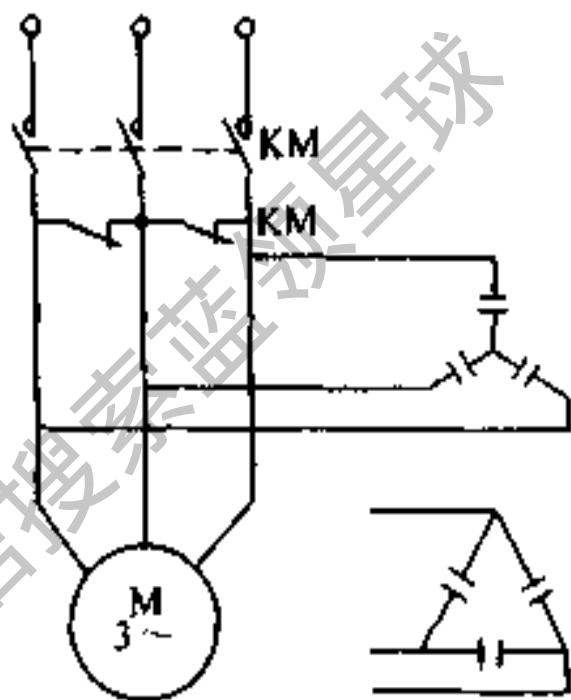


图 4-25 鼠笼型异步电动机电容—电磁制动线路图

式中  $R_f$  —— 反接制动电阻 ( $\Omega$ );

$I_{z\max}$  —— 允许最大的反接制动电流 (A), 取决于电动机允许的电流过载倍数, 一般取  $I_{z\max} = (1.5 \sim 2.5) I_n$ ;

$E_{\max}$  —— 电动机最大反电势 (V);

$R_q$  —— 起动电阻 ( $\Omega$ );

$R_a$  —— 电动机电枢电阻 ( $\Omega$ )。

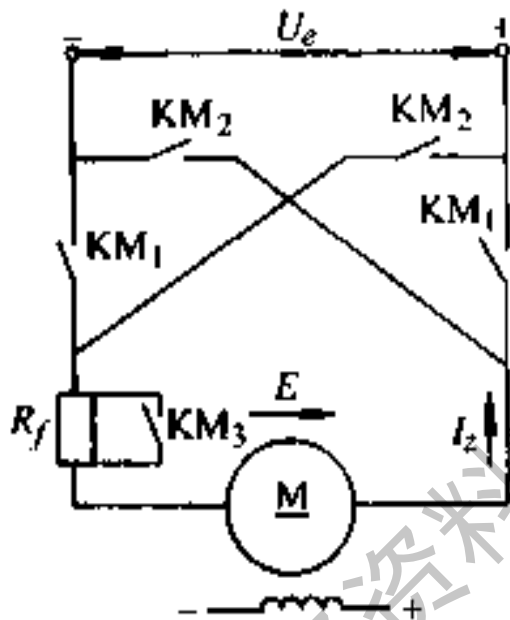


图 4-26 直流电动机反接制动线路图

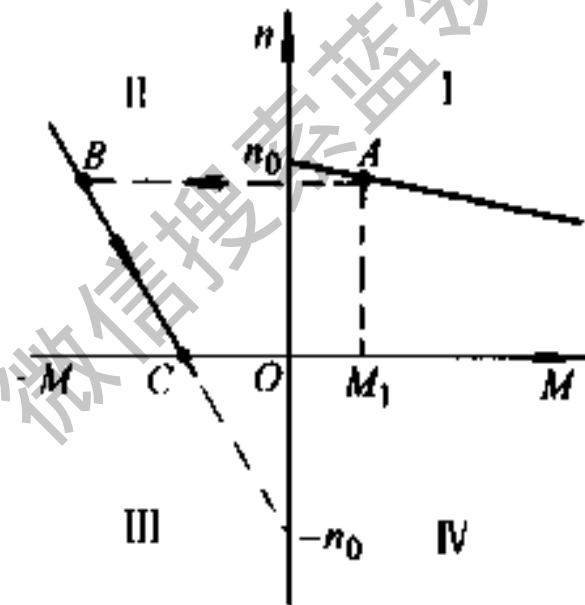


图 4-27 直流电动机反接制动机械特性

### 3. 反接继电器的整定

反接继电器  $KM_1$ ，当反接制动开始时，将电阻  $R_f$  接入电路；而当制动到电动机转速接近于零时，将电阻  $R_f$  短接，如图 4-28 所示。继电器  $KM_1$  线圈的连接点 A，由电阻  $R_f$  值来决定，一般整定在  $0.4 \sim 0.45U_e$ 。

## 五、直流他励电动机能耗制动计算

## 1. 工作原理

直流电动机能耗制动线路如图 4-29 所示，其制动机械特性如图 4-30 所示。将直流电动机电枢从电源上断开后，并联制动电阻  $R$ ，这时电动机因负载惯性而继续运转，成为一台向  $R$  供电的发电机，而制动。

## 2. 制动电阻的计算

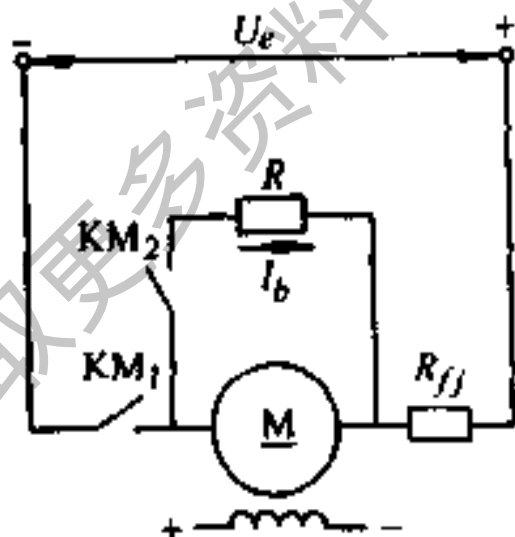


图 4-29 直流电动机能耗制动线路图

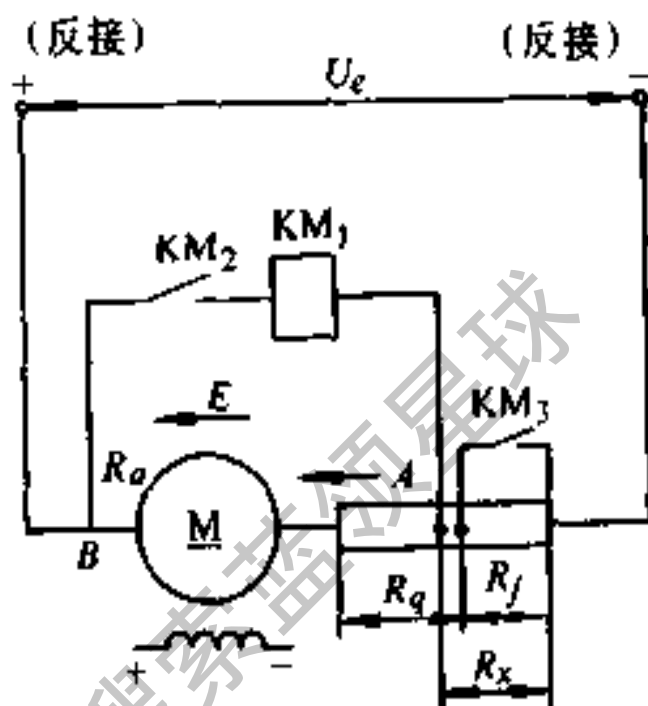


图 4-28 反接继电器整定线路图

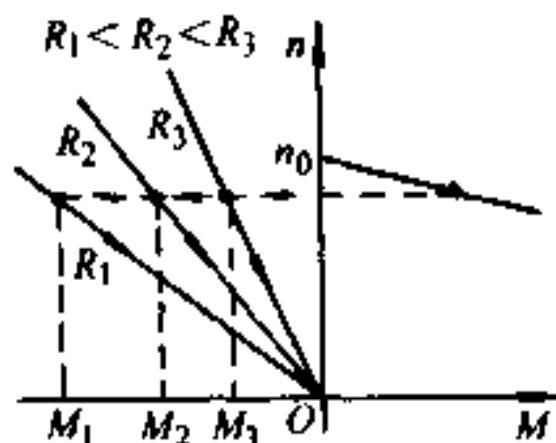


图 4-30 直流电动机能耗制动机械特性

$$R = \frac{E}{I_{z\max}} - R_a$$

式中  $R$ ——制动电阻 ( $\Omega$ );

$E$ ——制动开始时电动机的反电势 (V);

$I_{z\max}$ ——电动机最大制动电流 (A);

$R_a$ ——电动机电枢电阻 ( $\Omega$ )。

## 第七节 电动机的调速计算

### 一、绕线型异步电动机转子附加电阻调整的计算

某卷扬机采用 30kW、6 极、380V 三相绕线型异步电动机，要求有  $n_r$ 、 $n_r/2$ 、 $n_r/3$  三种速度，则转子附加电阻可按下法计算。

转子串入附加电阻调速时，在一定负载转矩下，电动机的转差率  $S$  与转子回路的电阻  $R$  成正比，即

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

相对转速为  $n_r$ 、 $n_r/2$ 、 $n_r/3$  的转差率分别为

$$S_1 = S_r = \frac{n_1 - n_r}{n_1}, \quad S_2 = \frac{n_1 - n_r/2}{n_1}$$

$$S_3 = \frac{n_1 - n_r/3}{n_1}$$

相应转子回路中的每相全部电阻分别为

$$R_1 = r_2, \quad R_2 = r_2 \frac{S_2}{S_r}, \quad R_3 = r_2 \frac{S_3}{S_r}$$

式中  $r_2$ ——转子绕组每相电阻 ( $\Omega$ )，可用电桥测得。

相应  $n_r/2$  和  $n_r/3$  速度下的每相需要串入的附加电阻分别为

$$R_2 = R_2 - r_2 = r_2(S_2/S_r - 1)$$

$$R_3 = R_3 - r_2 = r_2(S_3/S_r - 1)$$

附加电阻中的电流值应按负载时转子中的电流计算。若为短时负载，则按附加电阻的发热情况适当减小电阻功率。

## 二、绕线型异步电动机机械回馈式串级调速的计算

异步电动机转子回路串联电阻调速是有级调速且消耗大量电能。机械回馈式调速耗能低，效率高，是无级调速，适用于恒功率或恒转矩性质的负载。线路如图 4-31 所示。

### 1. 工作原理

交流电动机  $M_1$  和直流电动机  $M_2$  同轴拖动机械负载。

在主机  $M_1$  起动前， $M_2$  的励磁回路接通电源（励磁变阻器  $R_f$  处在低阻值位置）。主回路接通电源时， $KM_1$  闭合，起动电阻  $R$  被接入， $M_1$  起动至低速状态。然后  $KM_2$  闭合， $KM_1$  断开， $M_1$  仍保持在低速状态运行。调解  $R_f$ ，便可调解  $M_1$  的运行速度。

### 2. 直流电动机 $M_2$ 的选择



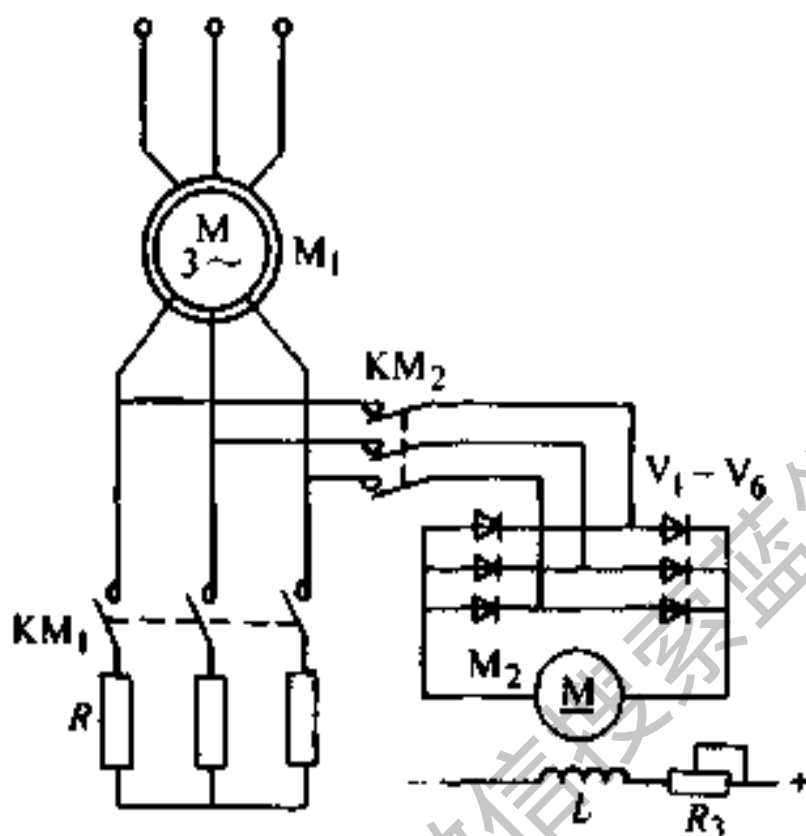


图 4-31 异步电动机机械回  
馈式串级调速线路图

选择步骤如下

(1) 按下式计算出供给整流器的相电压

$$U_2 = \frac{SE_{20}}{\sqrt{3}} - R_2 I_2$$

式中  $U_2$ ——调速下限状态时  $M_1$  转子回路供给整流器的相电压 (V)；

$S$ ——对应于调速下限状态的转差率；

$E_{20}$ —— $M_1$  转子绕组额定开路电势 (V)；

$R_2$ —— $M_1$  转子绕组相电阻 ( $\Omega$ )；

$I_2$ ——调速下限状态下  $M_1$  转子负载电流 (A)。

(2) 直流电动机电压的选择

$$U_r \geq U_s = 2.34 \left( \frac{SE_{20}}{\sqrt{3}} - R_2 I_2 \right)$$

(3) 直流电动机电枢额定电流的选择

$$I_r \geq I_s = 1.23 I_2$$

(4) 直流电动机额定容量的选择

$$P_r = 2.87 \left( \frac{SE_{20} I_2}{\sqrt{3}} - R_2 I_2^2 \right) \times 10^{-3}$$

式中  $I_s$ 、 $U_s$  分别为整流装置在调速下限状态的输出直流电流和电压； $U_r$ 、 $I_r$ 、 $P_r$  的单位分别为 V、A、kW。

(5) 直流电动机额定转速的选择，直流电动机额定转速应选择与交流主电机  $M_1$  额定转速相同或接近。

如果此调速装置用于负载转矩随转速上升而增加的设备（如风机、水泵）时，则直流电动机的额定电流应按调速范围上限状态的主电机转子电流来计算选择。

### 三、直流电动机不同调速方法比较

直流电动机能在宽广范围内平滑的调速。当电枢回路内接入电阻  $R_f$  时，转速可按下式计算

$$n = \frac{U - [I_a (R_a + R_f) + \Delta U_a]}{C_e \phi}$$

式中符号同前。

由上式可知，直流电动机可以采用调节励磁电流、电

枢端电压和电枢回路电阻等方法进行调速。不同调速方法的主要特点、性能和适用范围见表 4-30。

#### 四、电阻器和频敏变阻器的计算

##### 1. 电阻器计算

电阻器主要用于电动机的起动、制动和调速等。

(1) 电阻元件材料的性能，见表 4-31。

(2) 不同工作制下允许负载电流的计算：

$$I_t = \frac{I_r}{\sqrt{1 - e^{-t/T}}} = K_{11} I_r$$

$$I_r = \frac{\sqrt{1 - e^{-t/T}}}{\sqrt{1 - e^{-t/T_c}}} I_t = K_{12} I_t$$

式中  $I_t$ ——在通电时间  $t$  秒的短时工作制下的允许负载电流 (A)；

$I_r$ ——长期工作制额定电流 (A)；

$I_c$ ——在通电持续率为  $\epsilon$  的反复短时工作制下的允许负载电流 (A)；

$K_{11}$ 、 $K_{12}$ ——过载系数，可由图 4-32 和图 4-33 查得；

$T$ ——发热时间常数 (s)。

##### 2. 频敏变阻器的计算

###### (1) 频敏变阻器的设计

① 铁心结构的选择 频敏变阻器由铁心和绕组两部分组成，铁心采用特厚的普通钢板或方钢，以获得较大的涡流损失，达到理想的频敏特性。铁心结构形式有迭片

表 4-30 直流电动机不同调速方法的主要特点、性能和适用范围

调速方法	调节励磁电流	调节电枢电压	调节电枢回路电阻
特性曲线	见图 4-8	见图 4-9	见图 4-10
主要特点	<p>1. <math>U = \text{常值}</math>, 转速 <math>n</math> 随励磁电流 <math>I_f</math> 和磁通 <math>\phi</math> 的减小而升高</p> <p>2. 转速愈高, 换向愈困难, 电枢反应和换向元件中电流的去磁效应对电动机运行稳定性的影响愈大。最高转速受机械因素、换向和运行稳定性的限制</p> <p>3. 电枢电流保持额定值不变时, 转矩 <math>M</math> 与 <math>\phi</math> 成正比, <math>n</math> 与 <math>\phi</math> 成反比, 输入、输出功率及效率基本不变</p>	<p>1. <math>\phi = \text{常值}</math>, 转速 <math>n</math> 随电枢电压 <math>U</math> 的减少而降低</p> <p>2. 低速时, 机械特性的斜率不变, 稳定性好。由发电机组供电时, 最低转速受电机剩磁的限制</p> <p>3. 电枢电流保持额定值不变时, <math>M</math> 保持不变, <math>n</math> 与 <math>U</math> 成正比, 输入、输出功率随 <math>U</math> 和 <math>n</math> 的降低而减小, 效率基本不变</p>	<p>1. <math>U = \text{常值}</math>, 转速 <math>n</math> 随电枢回路电阻 <math>R</math> 的增加而降低</p> <p>2. 转速愈低, 机械特性愈软。采用此法调速时, 调速变阻器可作起动变阻器用</p> <p>3. 电枢电流保持额定值不变时, <math>M</math> 保持不变, 可作恒转矩调速, 但低速时, 输出功率随 <math>n</math> 的降低而减小, 而输入功率不变, 效率将随 <math>n</math> 的降低而降低, 经济性很差</p>
适用范围	适用于额定转速以上的恒功率调速	适用于额定转速以下的恒转矩调速	只适用于额定转速以下, 不需经常调速, 且机械特性要求较软的调速

表 4-31 电阻元件材料的机械及物理性能

名称	牌号	密度 ( $\text{g}/\text{mm}^3$ )	熔化 温度 / $^{\circ}\text{C}$	抗拉强度 / $\text{MPa}$	20 $^{\circ}\text{C}$ 时的电阻率 $\rho$ / $(\Omega\text{mm}^2/\text{m})$	
					截面 ( $\text{mm}^2$ )	电阻率
康 铜		8.9	1260	392~588 $\geq 637$		0.44~0.5
						0.46~0.52
新康铜		8	970	392~539		0.45~0.52
镍 箔	Ni80	8.4	1400	637~785		
	Cr20					
铁 铬 铝	Cr13 Al45	7.4	1480	588~735		线状
						带状
灰铸铁	Cr25 Al5	7.1				1.4
	HT00					0.8~0.85

(续)

名称	牌号	20°C时的电阻温度系数 $\alpha$ ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	平均热容量 ( $\text{J/g}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	对铜热电势 ( $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ )	最高工作温度 / $^{\circ}\text{C}$	附注
新康铜		$\approx 50$	0.41	-43	500	耐腐蚀抗氧化及机械性能均较好
		$\approx 50$		0.3~0.5	500	
镍铬	Ni90 Cr20	$\approx 70$	0.46	3.5~4	500	用于各种加热元件及电阻元件
	Cr13 Al145	$\approx 120$			500	
铁铬铝	Cr25 Al5	50			500	铸造成栅片电阻元件
	HT00	1000			350	

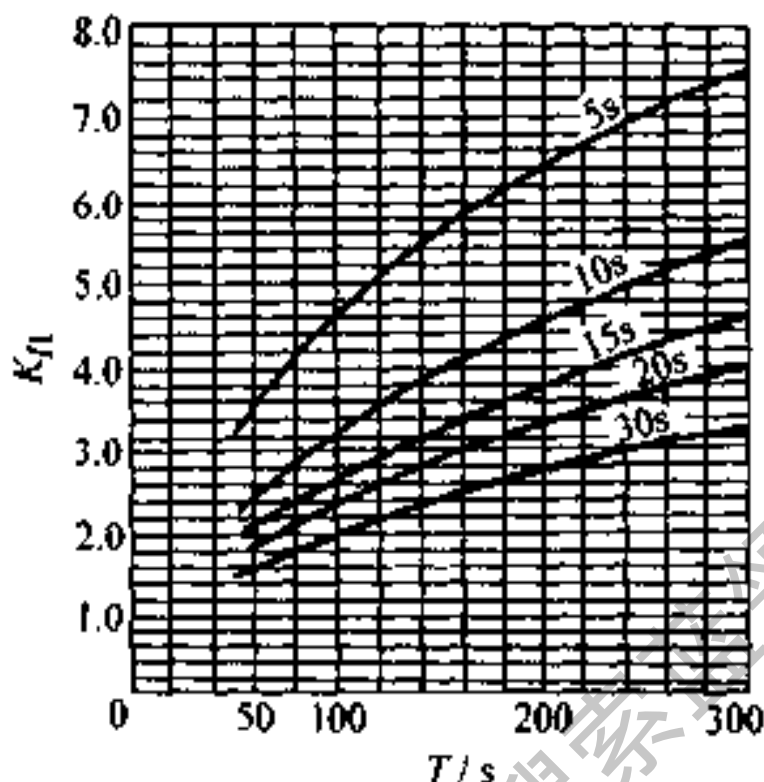


图 4-32 不同通电时间下短时工作制的

$K_{II} = f(T)$  曲线 (工作周期为 60s)

式、管式、方柱式, 以及铁心柱由方钢组成而上下磁轭采用迭片的混合式等多种。

② 电磁性能的计算, 电源频率为 50Hz 时的变阻器单位重量铁心柱损耗  $P_c$ 、磁通密度  $B$ 、铁心功率因数  $\cos\varphi_c$  与磁场强度  $H$  之间的关系可按以下经验公式计算:

方柱式和混合式铁心 (铁心厚度  $\delta > 10\text{mm}$ )

$$P_c = 0.39\delta B^2$$

$$H = \frac{354P_c}{B\cos\varphi_c} = 313 \sqrt{\delta} \sqrt{P_c}$$

式中  $P_c$  —— 铁心柱损耗 (kW/kg);

$H$ ——磁场强度 (A/cm);

$\delta$ ——铁心柱宽度或厚度 (cm);

$B$ ——铁心柱内平均磁通密度 (T);

$\cos\varphi$ ——铁心功率因数, 取 0.707。

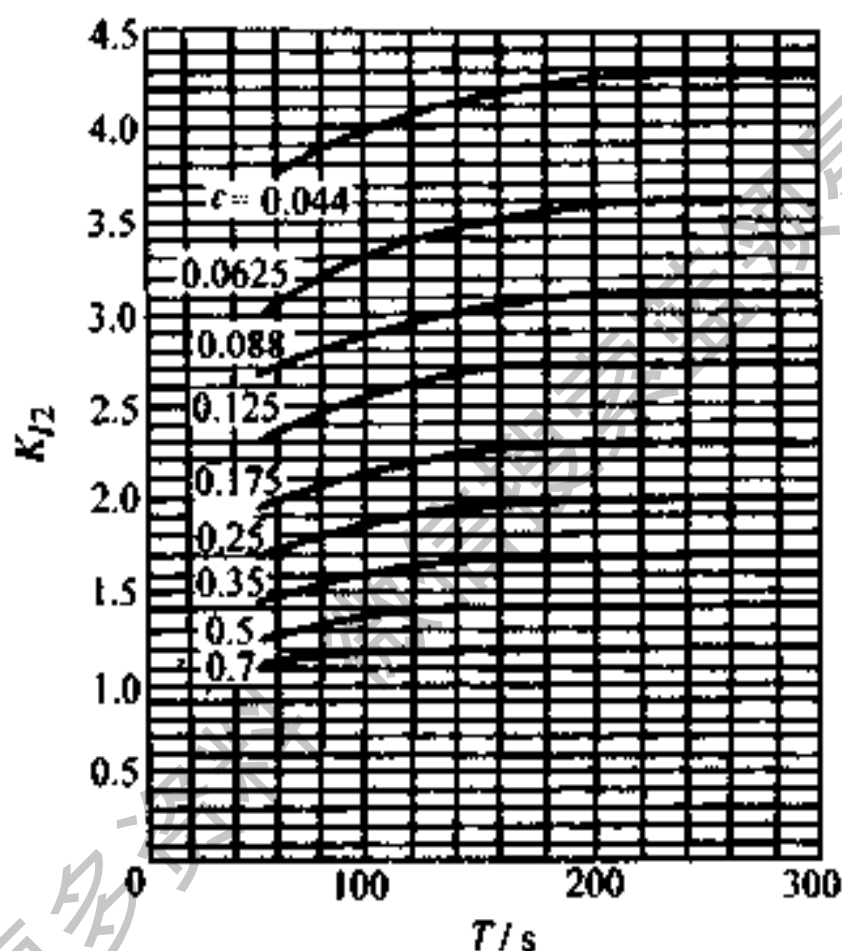


图 4-33 不同通电持续率下反复短时工作制的  $K_{12}=f(T)$  曲线 (工作周期为 60s)

迭片式和管式铁心的电磁性能见图 4-34 及图 4-35 和表 4-32、表 4-33。

③ 机械特性的计算, 绕线型电动机的转子回路接入频敏变阻器的情况如图 4-36 所示。

图中  $R_0$  为频敏变阻器绕组的直流电阻;  $R_1$  为频敏



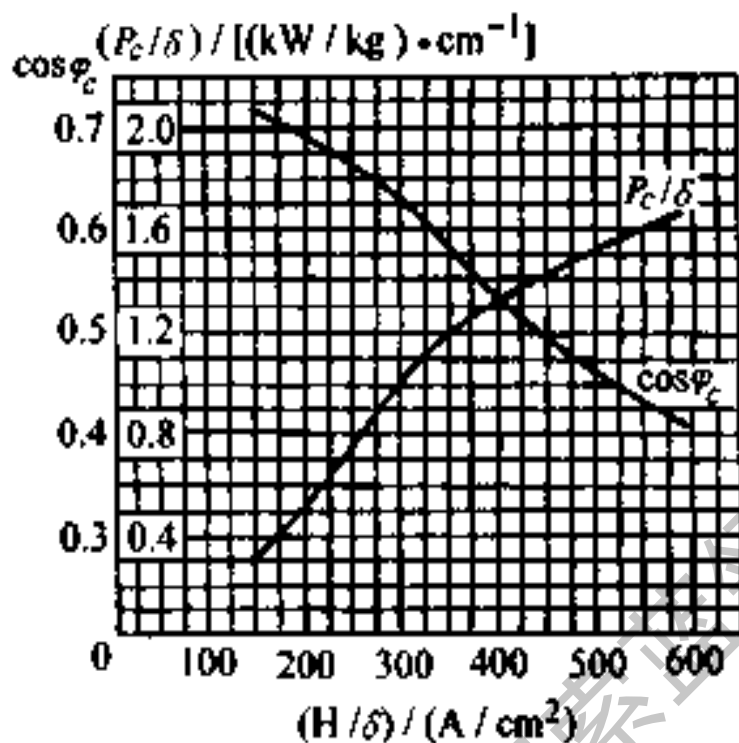


图 4-34  $\delta = 4 \sim 6\text{mm}$  的电磁性能曲线

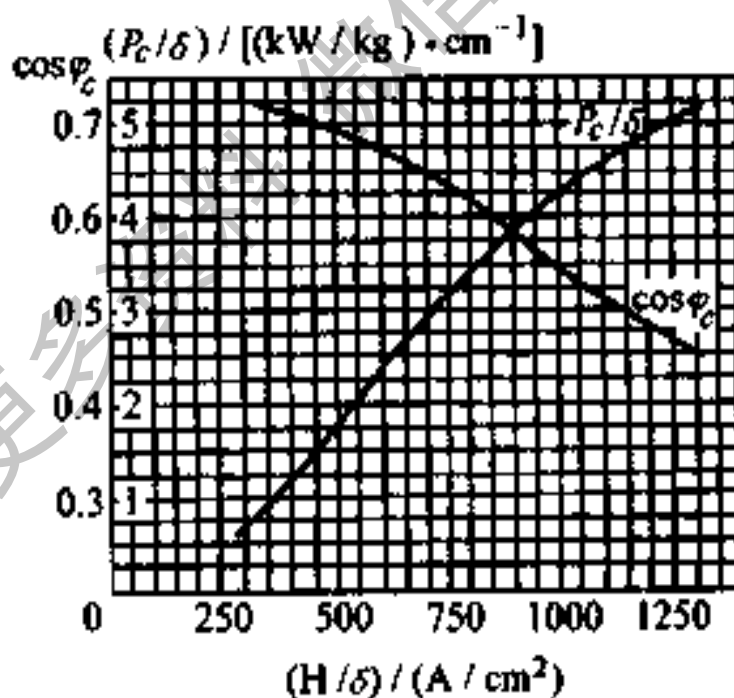


图 4-35  $\delta = 8 \sim 25\text{mm}$  的电磁性能曲线

变阻器铁心的等效串联电阻,  $R_s = R \sqrt{s}$ ;  $x_s$  为频敏变

阻器铁心的等效串联电抗,  $x_s = x \sqrt{s} = R \sqrt{s} \tan \varphi$ 。

$\tan\varphi$  为转差率  $s=1$  时铁心功率因数角正切值。

表 4-32 适用于  $\delta = 4 \sim 6\text{mm}$

$B \times 10^8 / \text{T}$	1.0	1.2	1.4	1.6
$\cos\varphi$	0.707	0.7	0.69	0.67
$\frac{P_c}{\delta} / (\text{kW/kg} \cdot \text{cm})$	0.283	0.407	0.555	0.725
$\frac{H}{\delta} / (\text{A/cm}^2)$	141	172	211	240
$B \times 10^8 / \text{T}$	1.8	2.0	2.2	2.4
$\cos\varphi$	0.64	0.59	0.52	0.41
$\frac{P_c}{\delta} / (\text{kW/kg} \cdot \text{cm})$	0.917	1.13	1.37	1.63
$\frac{H}{\delta} / (\text{A/cm}^2)$	281	340	414	585

表 4-33 适用于  $\delta = 8 \sim 25\text{mm}$

$B \times 10^8 / \text{T}$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$\cos\varphi$	0.71	0.71	0.71	0.7	0.69	0.675
$\frac{P_c}{\delta} / (\text{kW/kg} \cdot \text{cm})$	0.565	0.814	1.11	1.45	1.83	2.26
$\frac{H}{\delta} / (\text{A/cm}^2)$	282	338	394	458	522	592
$B \times 10^8 / \text{T}$	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	
$\cos\varphi$	0.65	0.615	0.575	0.52	0.45	
$\frac{P_c}{\delta} / (\text{kW/kg} \cdot \text{cm})$	2.74	3.26	3.82	4.43	5.08	
$\frac{H}{\delta} / (\text{A/cm}^2)$	678	780	904	1080	1330	

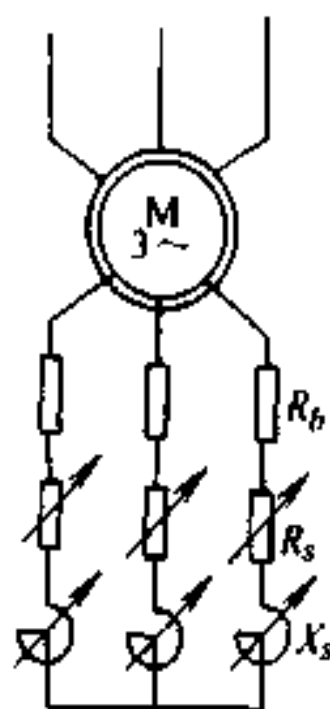


图 4-36 电动机转子接入变频变阻器的电路图

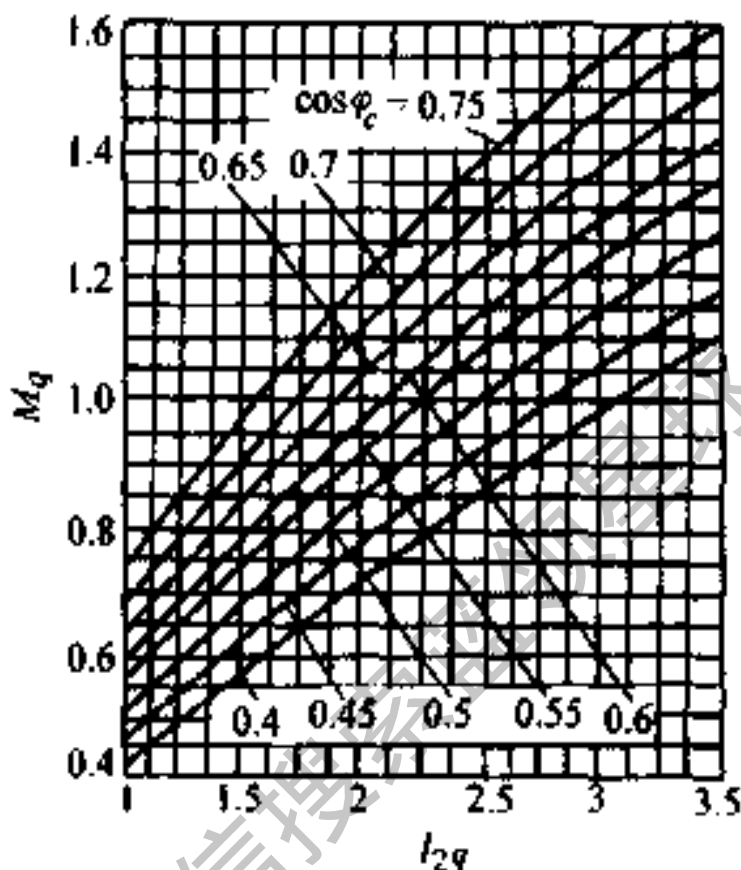


图 4-37  $M_q^* = f(I_{2q}^*, \cos\varphi_c)$  曲线

变频变阻器的机械特性决定于起动瞬间的起动转矩  $M_q$  和转子起动电流  $I_{2q}$ 。图 4-37 和图 4-38 分别为  $M_q^* = f(I_{2q}^*, \cos\varphi_c)$  和  $R_{dr} = f(I_{2q}^*, \cos\varphi_c)$  曲线， $R_{dr}$  为变阻器等效电阻。图中  $M_q^*$  和  $I_{2q}^*$  均为标么值。

① 变阻器结构参数计算步骤：

第一，根据机械特性的要求，选定  $M_q^*$ 、 $I_{2q}^*$ ，由图 4-37 和图 4-38 中查得  $R_{dr}$ 、 $\cos\varphi_c$ ；也可根据发热要求，先选定  $I_{2q}^*$ 、 $\cos\varphi_c$ ，由图中曲线中查得  $M_q^*$  和  $R_{dr}$ ，再校核机械特性。

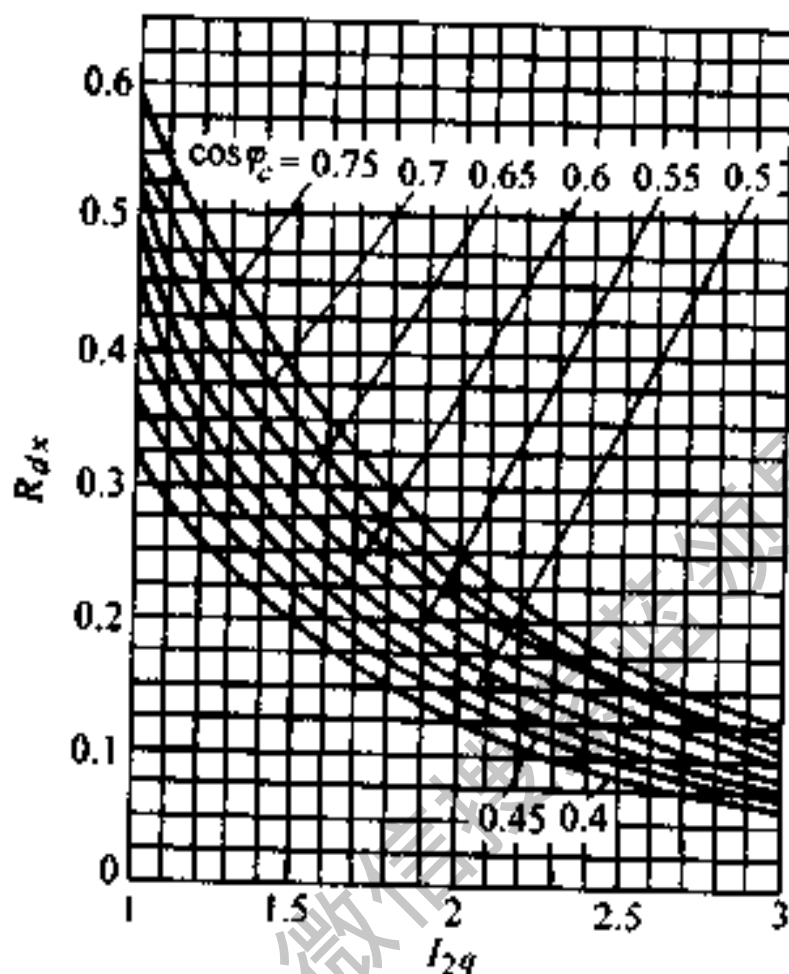


图 4-38  $R_{dx} = f(I_{2q}^2, \cos \varphi_c)$  曲线

第二, 由变阻器的电磁性能曲线或计算, 得  $P_c$ 、 $B$  及  $H$  值。

第三, 计算铁心柱高

$$h = \frac{1.08 I_{2q}^2 R_{dx} P_c}{3 P_c r S}$$

式中  $h$ ——铁心柱高 (cm);

$P_c$ ——额定功率 (kW);

$r$ ——钢材密度 ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ),  $r = 7.85 \times 10^{-3}$ ;

$S$ ——铁心柱面积 ( $\text{cm}^2$ );

其他符号同前。

#### 第四，计算绕组匝数

$$W = \frac{Hh}{I_{2q} I_{2r}}$$

式中  $W$ ——绕组匝数（匝）；

$I_{2r}$ ——转子额定电流（A）。

(2) 绕线型异步电动机短时起动用频敏变阻器的计算：

① 起动瞬间变阻器铁心柱损耗为

$$P_c = 3.33 \frac{\tau_{ur}}{t_q}$$

式中  $P_c$ ——铁心柱损耗（kW/kg）；

$\tau_{ur}$ ——铁心允许温升（C）；

$t_q$ ——起动时间（s）。

校验此值应与电磁性能曲线查得的  $P_c$  相适应，否则应重新计算，直到相适应为止。

② 起动的频敏变阻器的电流密度按下式选择

铜导线  $J = \sqrt{\frac{312\tau_{ur}}{t_q}}$

铝导线  $J = \sqrt{\frac{141\tau_{ur}}{t_q}}$

式中  $J$ ——电流密度（A/mm<sup>2</sup>），对于 B 级绝缘的绕组，

$J$  可参见表 4-34。

表 4-34 频敏变阻器电流密度参考值 (A/mm<sup>2</sup>)

导线材质	负载类型	
	轻载	重轻载
铜	25~32	20~25
铝	16~20	12.5~16

频敏变阻器在各种不同接法下的绕组匝数和导线截面计算公式, 列于表 4-35。

表 4-35 频敏变阻器在各种接法下绕组的计算公式

计算项目	单组星形接法	单组三角形接法	二组并联星形接法	二组串联星形接法
绕组匝数	$W = \frac{Hh}{I_{2q}^* I_{2r}}$	$W = \frac{\sqrt{3} Hh}{I_{2q}^* I_{2r}}$	$W = \frac{2Hh}{I_{2q}^* I_{2r}}$	$W = \frac{Hh}{I_{2q}^* I_{2r}}$
绕组导线截面/mm <sup>2</sup>	$q = \frac{I_{2q}^* I_{2r}}{j}$	$q = \frac{I_{2q}^* I_{2r}}{\sqrt{3} j}$	$q = \frac{I_{2q}^* I_{2r}}{2j}$	$q = \frac{I_{2q}^* I_{2r}}{j}$

注: 表中  $I_{2q}^*$  为标么值。

(3) 绕线型异步电动机用反复短时起动频敏变阻器的计算

① 反复短时起动时变阻器铁心柱损耗为

$$P_c = \frac{36000K_c}{t_q Z}$$

式中  $P_c$ ——铁心损耗 (kW/kg);

$K_c$ ——散热系数 (kW/kg);

Z——每小时折合起动次数。

相应于0、4、5号铁心的散热系数曲线如图4-39所示。

铁心片数为

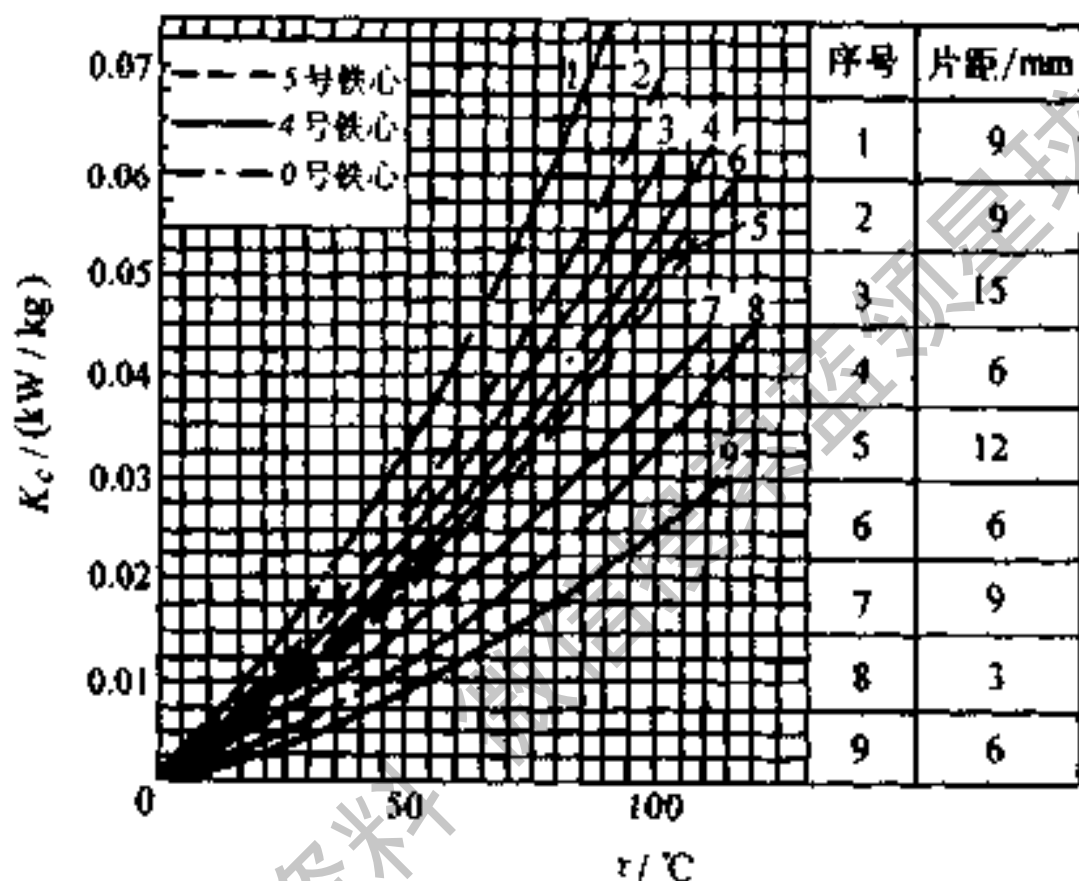


图4-39 0、4、5号铁心散热系数

$$\eta = \frac{1.08 I_{20}^2 R_{d1} P_c}{3 P_c r a \delta h}$$

式中  $a$ ——铁心柱宽度 (cm)；

$h$ ——铁心柱高度 (cm)；

$\delta$ ——每片铁心厚度 (cm)；

其他符号同前。

## ② 星形接法绕组导线截面的计算

$$\text{铜导线 } q = 0.08I_{2r} \sqrt{t_q Z}$$

$$\text{铝导线 } q = 0.125I_{2r} \sqrt{t_q Z}$$

式中  $q$ ——导线截面 ( $\text{mm}^2$ );

$I_{2r}$ ——转子额定电流 (A)。

### 3. 管式频敏变阻器的计算

管式频敏变阻器的结构如图 4-40 所示。图中 1 为钢管做成的铁心，2 为钢板或槽钢做成的铁轭，3 为绕组。

#### (1) 钢管的选择

电动机功率愈大，所选用的钢管直径愈大。通常取直径在 50mm 以上，管壁厚 6mm 以上。

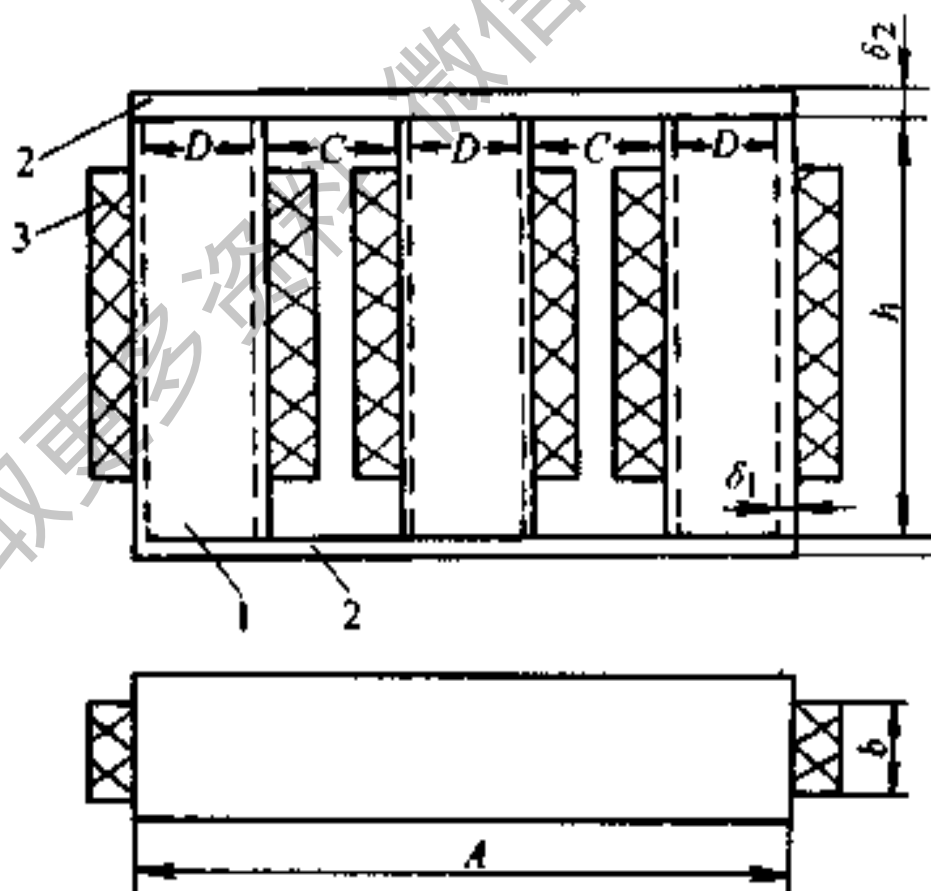


图 4-40 管式频敏电阻结构图



## (2) 钢管高度的计算

$$h = \frac{C_1 P_e}{2D\delta_1^2}$$

式中  $h$ ——钢管高度 (cm);

$P_e$ ——电动机额定功率 (kW);

$C_1$ ——常数, 见表 4-36。

$D$ ——钢管外径 (cm);

$\delta_1$ ——钢管壁厚 (cm)。

## (3) 绕组匝数和导线截面的计算

$$W = C_2 \frac{\delta_1 h}{I_{2e}}, q = C_3 I_{2e}$$

式中  $W$ ——绕组匝数 (匝);

$q$ ——导线截面 ( $\text{mm}^2$ );

$C_2$ 、 $C_3$ ——常数, 见表 4-36;

$I_{2e}$  = 转子额定电流 (A)。

## (4) 窗口宽度计算

表 4-36 常数  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  值

常 数	负 载 类 型		
	轻 载	重 轻 载	重 载
$C_1$	4.3	8.6	8.6
$C_2$	692	390	292
$C_3$	0.05	0.08	0.10

$$C = 6 \frac{Wq}{h}$$

式中  $C$ ——窗口宽度 (cm)。

(5) 铁轭厚度、宽度和长度的计算

$$\delta_2 \geq \frac{3}{4} \delta_1, B \geq D, A \geq 3D + 2C$$

式中  $\delta_2$ 、 $B$ 、 $A$ ——分别为铁轭厚度、宽度和长度 (cm)。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

## 第五章 电容器及无功补偿

### 第一节 电容器和无功补偿容量的计算

#### 一、电容器运行规定和技术性能

##### 1. 移相电容器运行的一般规定

(1) 额定电压 移相电容器的额定电压原则上应等于电网的额定电压。选用时,对于额定电压为 0.22、0.38、3、6 和 10kV 的电网,电容器的额定电压为 0.23、0.4、3.15、6.3 和 10.5kV。

##### (2) 运行温度

电容器使用的下限温度有 +5℃、-5℃、-25℃、-40℃ 和 -50℃ 五种。

电容器使用的上限温度由代号 A、B、C、D 表示,见表 5-1。

表 5-1 GB/T3983-1989 中规定的上限温度

代号	环境空气温度/℃		
	最高	24h 平均最高	年平均最高
A	40	30	20
B	45	35	25
C	50	40	30
D	55	45	35

电容器运行时的冷却空气温度应不超过相应温度类别的最高环境温度加  $5^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 海拔高度 一般应在海拔不超过  $1000\text{m}$  的地区使用。如超过此高度的地区,应由制造厂提供高原型电容器。

(4) 过电压 电容器能在  $1.1$  倍额定电压下长期工作,并能在  $1.15$  倍额定电压下每  $24\text{h}$  中运行  $30\text{min}$ ;在  $1.2$  倍额定电压下运行  $5\text{min}$ ;在  $1.36$  倍额定电压下运行  $1\text{min}$ 。但应避免最高环境温度和瞬时过电压同时出现。

(5) 过电流 电容器应能在  $1.3$  倍额定电流下长期运行。对于具有最大正偏差的电容器,过电流可以允许  $1.43$  倍额定电流。

(6) 铁磁谐振 为避免铁磁谐振,在投入空载变压器或电抗器之前,应切除电容器组。

(7) 电容器断开电源后,应在放电电路经  $30\text{s}$  放电,放电后其端电压不应超过  $65\text{V}$ 。自动切换频繁的电容器装置,在投入运行时电容器上的电压不应高于额定电压的  $10\%$ ,以免电容器受到过高的过电压。

## 2. 串联电容器运行的一般规定

串联电容器比移相电容器能承受更高的过电压。

(1) 当  $24\text{h}$  内平均电压不超过额定电压值时,电容器能在  $1.25$  倍额定电压下连续运行  $4\text{h}$ 。

(2) 在正常运行条件下,能在  $1.5$  倍额定电压下运

行 1h, 但在电容器整个使用过程中, 这种情况不得超过 10 次。

(3) 在正常运行条件下, 能在 5 倍额定电压下运行 0.2s, 在整个使用过程中, 这种情况不允许超过 30 次。

(4) 在正常工作条件下, 电容器在受到 5 倍额定电压下运行 0.2s 后, 再受 2.5 倍额定电压作用 30s, 但在电容器的整个使用过程中, 这种情况不得超过 20 次。

(5) 并联放电间隙击穿的整定电压值一般为电容器额定电压的 2.5 倍左右。

(6) 电容器放电时, 以并联电感和电阻作阻尼装置。

表 5-2 和表 5-3 列出电容器的技术性能。

表 5-2 串联补偿电容器技术数据

型 号	额定电压 /kV	额定容量 /kVar	额定电容 / $\mu$ F	重量 /kg
CY0.6-10-1	0.6	10	88.5	21
CY0.6-20-1	0.6	20	177	40
CL0.6-20-1	0.6	20	177	23.5
CL0.6-40-1	0.6	40	354	44.5
CY1-10-1	1	10	31.8	21
CY1-20-1	1	20	63.6	40
CL1-20-1	1	20	63.6	23.5
CL1-40-1	1	40	127.2	44.5
CL1-45-1	1	45	143.2	58

注: C—串联; Y—油浸; L—氯化联苯浸渍。

表 5-3 移相电容器技术数据

型 号	额定电压 /kV	额定容量 /kVar	额定电容 / $\mu$ F	出厂试验电压/kV		内部接线	重量 /kg
				极间	对地		
YY0.23-4-3	0.23	4	240	0.5	2	每组 10 并, 3 组接成 $\Delta$ 30 并	23
0.23-4-3-TH							
0.23-4-1							
0.23-4-1-TH							
YY0.4-10-3	40	10	200	0.86	2	每组 10 并, 3 组接成 $\Delta$ 30 并	23
0.4-10-1							
0.4-9-3-TH							
0.4-9-1-TH							

(续)

型 号	额定 电压 /kV	额定 容量 /kVar	额定 电容 / $\mu$ F	出厂试验 电压/kV		内 部 接 线	重 量 /kg
				极间	对地		
0.525-10-3	0.525	10	116	1.13	2	每组 10 并, 3 组接成 $\Delta$ 30 并	23
0.525-10-1		9	104				
0.525-9-3-TH	0.525	9	104	1.13	2	每组 10 并, 3 组接成 $\Delta$ 30 并	23
0.525-9-1-TH							
YY1.05-10-1	1.05	10	20	2.26	5	20 并	23
1.05-10-1-TH							
3.15-10-1	3.15	10	3.21	6.8	18	6 并 4 串	23.5
3.15-10-1-TH							

(续)

型 号	额定电压 /kV	额定容量 /kVar	额定电容 /μF	出厂试验电压/kV		内部接线	重量 /kg
				极间	对地		
YY6.3-10-1	6.3	10	0.802	13.6	25	3并8串	24
6.3-10-1-TH							
10.5-10-1	10.5	10	0.29	22.6	35	2并14串	25
10.5-10-1-TH							
YYW3.15-9-1	3.15	9	2.89	6.8	18	6并4串	27
3.15-9-1-TH							
6.3-9-1	6.3	9	0.721	13.6	25	3并8串	27
6.3-9-1-TH							
10.5-9-1	10.5	9	0.26	22.6	35	2并14串	28
10.5-9-1-TH							



(续)

型号	额定电压 /kV	额定容量 /kVar	额定电容 /μF	出厂试验电压/kV		内部接线	重量 /kg
				极间	对地		
YLW6.3-25-1	6.3	25	2	13.6	25	31.5	
6.3-25-1-TH							
6.3-50-1		50	4				
6.3-50-1-TH							
YLW10.5-25-1	10.5	25	0.745	22.6	35	35.5	
10.5-25-1-TH							
10.5-50-1		50	1.49				
10.5-50-1-TH							

注: Y—移相; W—油浸; W—户外式; L—氯化联苯浸渍; TH—湿热带用。

## 二、电容测算和保护元件计算

### 1. 电容器的静电电容量和 kVar 容量

$$C = 0.0885\epsilon \frac{S}{b} \times 10^{-6}$$

$$Q = 2\pi fCU^2 \times 10^{-6}$$

- 式中  $C$ ——电容器的静电电容量，简称电容量 ( $\mu\text{F}$ )；  
 $Q$ ——电容器的 kVar 容量，简称电容器容量 (kVar)；  
 $\epsilon$ ——介质的相对介电系数。油浸纸介质的  $\epsilon$ ，当用矿物性绝缘油时为 3.5~4.5；当用合成绝缘油时为 5~7；  
 $S$ ——电极的有效面积 ( $\text{cm}^2$ )；  
 $b$ ——介质厚度 (cm)；  
 $f$ ——电源频率 (Hz)；  
 $U$ ——电源电压 (V)。

### 2. 电介质损耗公式

$$P = 2\pi fC_0\epsilon \tan\delta U^2 \times 10^{-6} = 2\pi fC \tan\delta U^2 \times 10^{-6}$$

- 式中  $P$ ——电介质损耗 (W)；  
 $C_0$ ——无电介质时的静电电容 ( $\mu\text{F}$ )；  
 $C$ ——有电介质时的静电电容 ( $\mu\text{F}$ )；  
 $\epsilon$ ——电介质的介电系数；  
 $\delta$ ——放入电介质时充电电流的相位比  $90^\circ$  超前一个小角度，即介质损耗角；

其他符号同前。

$\tan\delta$  为介质损耗因数。

### 3. 电容器电容量的测算

用电压、电流表法测量电容器的电容量,如图 5-1 所示。

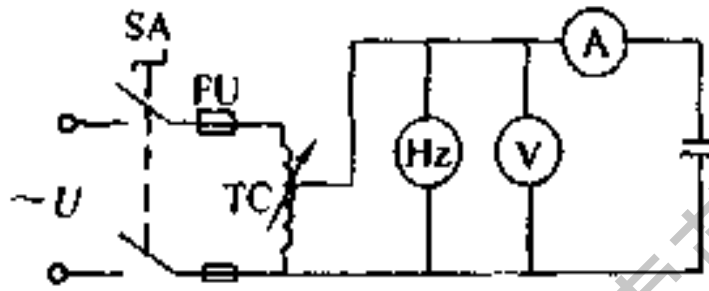


图 5-1 电压、电流表法测量电容量

外加电源频率为  $f=50\text{Hz}$  时

$$C = \frac{I \times 10^6}{314U}$$

$$I = U/X_c = 2\pi fCU \times 10^{-6}$$

式中  $C$ ——电容器电容量 ( $\mu\text{F}$ );

$U$ ——外加电容器两端的电压 (V);

$I$ ——通过电容器的电流 (A)。

上述方法可用于测定单相电容器和三相电容器的电容量。在测定三相电容器时,要将电容器三个接线端子中的两个端子短接,然后轮流测定未短接端子与短接的两个端子间的电容量(图 5-2,表 5-4),根据电容器的不同接法按表 5-5 和表 5-6 算出所测电容器的电容量。

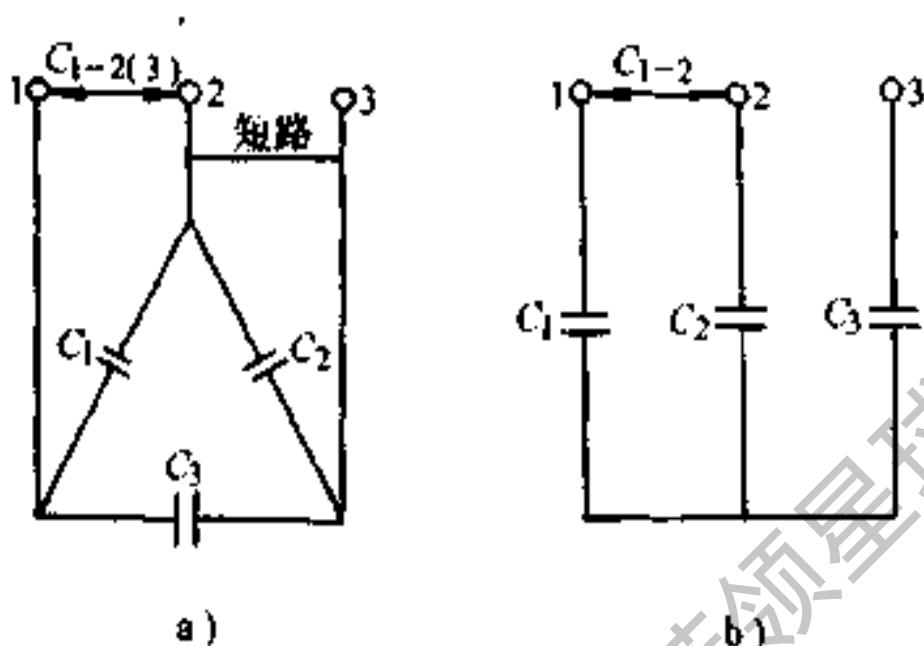


图 5-2 电容器测量示意图

a)  $\Delta$ 接法 b) Y接法

表 5-4 三相电容器电容量的测定方法

短路接线头	测量电容出线头	测量电容符号
2-3	1-2, 3	$C_{1-23}$
1-2	3-1, 2	$C_{3-12}$
1-3	2-1, 3	$C_{2-13}$

表 5-5  $\Delta$ 接法电容器电容量计算方法

每相电容量计算公式	三相电容总电容量计算公式
$C_1 = \frac{1}{2} (C_{1-23} + C_{2-13} - C_{3-12})$	$C = \frac{1}{2} (C_{1-23} + C_{3-12} + C_{2-13})$
$C_2 = \frac{1}{2} (C_{3-12} + C_{2-13} - C_{1-23})$	
$C_3 = \frac{1}{2} (C_{1-23} + C_{3-12} - C_{2-13})$	

表 5-6 Y 接法电容器电容量计算方法

每相电容量计算公式	三相电容总电容量 计算公式
$C_1 = \frac{2C_{12}C_{23} + C_{12}C_{31} - C_{23}C_{31}}{C_{23} + C_{31} - C_{12}}$	$C = C_1 + C_2 + C_3$
$C_2 = \frac{2C_{12}C_{23} + C_{12}C_{31} - C_{23}C_{31}}{C_{31} + C_{12} - C_{23}}$	
$C_3 = \frac{2C_{12}C_{23} + C_{12}C_{31} - C_{23}C_{31}}{C_{12} + C_{23} - C_{31}}$	

所加电源电压为电容器的工作电压。电容器实测电容量与铭牌标称值之偏差，不应超过±10%。

#### 4. 移相电容器组有功和无功功率的测算

移相电容器是一种低功率因数的三相基本平衡的容性负荷，其有功和无功功率可用两只单相电度表按图 5-3a 所示的接法正确测量。

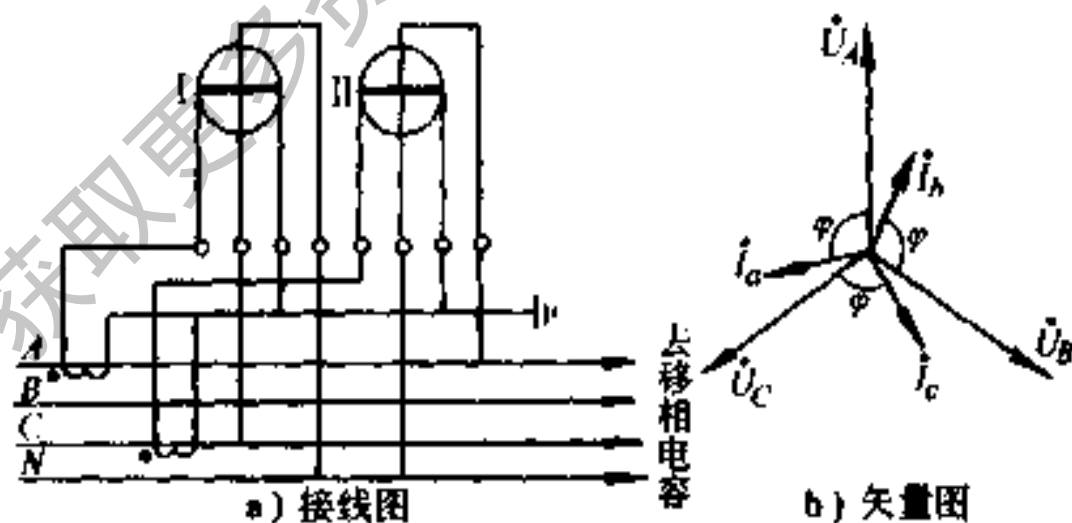


图 5-3 电容器有功和无功功率测量

由矢量图可知，两只电度表所测得的电能分别为

$$\begin{aligned} W_1 &= U_c I_a t \cos(120^\circ - \varphi) \\ &= -\frac{\sqrt{3}}{6} U I t \cos \varphi + \frac{1}{2} U I t \sin \varphi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_2 &= -U_A I_c t \cos(\varphi - 60^\circ) \\ &= \frac{\sqrt{3}}{6} U I t \cos \varphi + \frac{1}{2} U I t \sin \varphi \end{aligned}$$

式中  $U_A$ 、 $U_c$ ——A、C 相的相电压 (V)；

$I_a$ 、 $I_c$ ——A、C 相的相电流 (A)；

$I$ ——由于三相负载平衡，故

$$I_a = I_b = I_c = I;$$

$t$ ——时间 (h)。

当  $\varphi \leq 90^\circ$  时， $W_1 \leq 0.5 U I t$ ； $W_2 \geq 0.5 U I t$

两只电度表测得的电能之差的绝对值为

$$|W_1 - W_2| = \frac{\sqrt{3}}{3} U I t \cos \varphi$$

若上式乘以 3，再乘以电流互感器的倍率  $K_{TA}$ ，及电压互感器的倍率  $K_{TV}$ ，即为移相电容器所消耗的电能。此电能再除以  $t$ ，就是电容器的有功功率。

两只电度表的读数之和为

$$W_1 + W_2 = U I t \sin \varphi$$

将此值乘以  $\sqrt{3}$  及  $K_{TA}$ 、 $K_{TV}$ ，即为移相电容器所具有的无功电能。将此值除以  $t$ ，就是移相电容器所具有的

无功功率。

### 5. 移相电容器组放电电阻的计算

为了减少冲击电流,当电源断开时,应在电容器两端并联放电电阻,将电容器上的电荷放掉。通常,380V 及以下的低压电容器组采用白炽灯放电电路;3.3~11kV 高压电容器组,常采用接成 V 形的单相电压互感器或三相电压互感器作为放电电路。

#### (1) 电阻放电电路的计算

电容器放电时间为

$$t = 2.3RC \lg \frac{\sqrt{3}U}{u_c}$$

式中  $t$ ——电容器放电时间 (s);

$R$ ——放电电阻 ( $\Omega$ );

$C$ ——每相的电容量 (F);

$U$ ——电网线电压 (V);

$u_c$ ——电容器上的电压 (V)。

当电容器组为三角形接法时,每相电容量为

$$C = \frac{Q_c \times 10^{-9}}{3\omega U^2}$$

当电容器组为星形接法时,每相电容量为

$$C = \frac{Q_c \times 10^{-9}}{\omega U^2}$$

式中  $C$ ——电容器组每相电容量 (F);

$Q_c$ ——移相电容总容量 (kVar);

$\omega$ ——角频率 (rad/s);

$U$ ——同前。

当电压  $U$  为 380V 时, 要求  $u_c = 65V$ , 放电时间不大于 30s 时, 根据以上各式得:

① 放电电阻采用三角形接法时, 每相电阻

$$R_{\Delta} \leq \frac{193 \times 10^4}{Q_c}$$

② 放电电阻采用星形接法时, 每相电阻

$$R_Y = \frac{R_{\Delta}}{3} \leq \frac{64.3 \times 10^4}{Q_c}$$

(2) 放电电路采用电感性负载时, 设电阻为  $R$  ( $\Omega$ ), 电感为  $L$  (H):

① 当  $R \geq 2\sqrt{L/C}$  时, 放电电流为非周期性的单向电流, 放电时间可按前述公式计算。

② 当  $R < 2\sqrt{L/C}$  时, 放电电流为周期性的振荡电流, 放电时间为

$$t = 4.6 \frac{L}{R} \lg \frac{\sqrt{2} U}{u_c}$$

### 三、功率因数和无功补偿容量的计算

#### 1. 功率因数的测算

(1) 功率因数可以从所接电网的功率因数表中直接读出。



(2) 功率因数可以从有功、无功电度表读数中求得

$$\begin{aligned}\cos\varphi &= \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2\varphi}} \\ &= \frac{A_P}{\sqrt{A_P^2 + A_Q^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + (A_Q/A_P)^2}}\end{aligned}$$

可将上述关系作成表格的形式，见表 5-7。

表 5-7 无功电度/有功电度与功率因数对照表

$A_Q/A_P = \tan\varphi$	$\cos\varphi$	$A_Q/A_P = \tan\varphi$	$\cos\varphi$
1.01~1.03	0.70	0.59~0.60	0.86
0.98~1.00	0.71	0.56~0.58	0.87
0.95~0.97	0.72	0.53~0.55	0.88
0.93~0.94	0.73	0.50~0.52	0.89
0.90~0.92	0.74	0.48~0.49	0.90
0.87~0.89	0.75	0.45~0.47	0.91
0.85~0.86	0.76	0.42~0.44	0.92
0.82~0.84	0.77	0.38~0.41	0.93
0.79~0.81	0.78	0.35~0.37	0.94
0.77~0.78	0.79	0.32~0.34	0.95
0.74~0.76	0.80	0.28~0.31	0.96
0.72~0.73	0.81	0.23~0.27	0.97
0.69~0.71	0.82	0.18~0.22	0.98
0.66~0.68	0.83	0.11~0.17	0.99
0.64~0.65	0.84	0.00~0.10	1.00
0.61~0.63	0.85		

当记录某段时间内所消耗的有功电能和无功电能后，便可得到该段时间内的加权平均功率因数。

(3) 若要计算某瞬时功率因数，可先根据有功电度表和无功电度表按下列公式求出有功功率和无功功率

$$P = \frac{3600n_1 \times 10^3}{K_P \cdot t} \cdot K_{TV} K_{TA}$$

$$Q = \frac{3600n_2 \times 10^3}{K_Q \cdot t} K_{TV} K_{TA}$$

式中  $P$ ——有功功率 (kW)；

$Q$ ——无功功率 (kVar)；

$n_1$ 、 $n_2$ ——有功、无功电度表转数；

$K_P$ 、 $K_Q$ ——有功、无功电度表常数 (r/kW·h)；

$t$ ——有功、无功电度表所走的时间 (s)，即测试时间；

$K_{TV}$ ——电压互感器变比；

$K_{TA}$ ——电流互感器变比。

然后，根据前述公式或表 5-7 的  $\tan\phi$  值，便可求得瞬时功率因数。

## 2. 无功补偿容量的确定

(1) 为了提高电网的经济运行水平，减少线损，提高供电质量，水电部和国家物价局颁布了《功率因数调整电

费办法》的规定指出：大于 160kVA 的高压供电工业用户（包括乡镇工业用户），装有带负荷调整电压装置的高压供电用户，以及不小于 3200kVA 的高压供电电力排灌站均执行以 0.9 为标准值的功率因数调整电费表，见表 5-8。不小于 100kVA 的其他工业用户、非工业用户均执行以 0.85 为标准值的功率因数调整电费表。

(2) 改善功率因数的最佳值确定 一般按费用进行评定，可参考下式：

$$\cos\phi = \sqrt{1 - \left(\frac{C_F}{C_C}\right)^2}$$

式中  $C_F$  —— 变配电设备费用（元/kVA）；

$C_C$  —— 电容器设备费用（元/kVar）。

根据经验认为功率因数改善到超过 0.95 很少是合算的。

(3) 补偿容量的确定 补偿容量的大小取决于电力负荷的大小及补偿前后的功率因数。补偿容量可按下式计算：

$$Q_c = P_{ap}(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$$

式中  $Q_c$  —— 无功补偿容量（kVar）；

$P_{ap}$  —— 年平均功率；

$\tan\phi_1$  —— 改善前功率因数角的正切值；

$\tan\phi_2$  —— 改善后功率因数角的正切值。

为了计算方便起见，可查表 5-9。

表 5-8 以 0.9 为标准值的功率因数调整电费表

减收电费	实际功率因数	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95~1.00			
	月电费减少 (%)	0.0	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75			
增收电费	实际功率因数	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81
	月电费增加 (%)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
增收电费	实际功率因数	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72
	月电费增加 (%)	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
增收电费	实际功率因数	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	≤0.64	
	月电费增加 (%)	9.5	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	功率因数每降低 0.01 电费增加 2%	

表 5-9 1kW 有功功率所需补偿电容器的  
补偿容量 (kVar)

$\cos\varphi_2$	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89
0.40	1.54	1.57	1.60	1.62	1.65	1.67	1.70	1.73	1.75	1.78
0.41	1.47	1.50	1.53	1.55	1.58	1.60	1.63	1.66	1.68	1.71
0.42	1.41	1.44	1.47	1.49	1.52	1.54	1.57	1.60	1.62	1.65
0.43	1.35	1.38	1.41	1.43	1.46	1.48	1.51	1.54	1.56	1.59
0.44	1.29	1.32	1.34	1.37	1.39	1.41	1.44	1.47	1.50	1.53
0.45	1.23	1.26	1.29	1.31	1.34	1.36	1.39	1.42	1.44	1.47
0.46	1.18	1.21	1.23	1.26	1.28	1.31	1.36	1.38	1.39	1.42
0.47	1.12	1.15	1.18	1.20	1.23	1.26	1.28	1.31	1.34	1.36
0.48	1.08	1.10	1.12	1.16	1.18	1.21	1.23	1.26	1.29	1.31
0.49	1.04	1.06	1.09	1.12	1.14	1.17	1.19	1.22	1.25	1.27
0.50	0.98	1.01	1.04	1.06	1.09	1.11	1.15	1.17	1.19	1.22
0.51	0.94	0.97	0.99	1.02	1.04	1.07	1.11	1.13	1.16	1.19
0.52	0.89	0.92	0.94	0.97	1.00	1.02	1.05	1.08	1.10	1.13
0.53	0.84	0.88	0.90	0.93	0.95	0.98	1.01	1.03	1.06	1.09
0.54	0.81	0.84	0.86	0.89	0.91	0.94	0.97	0.99	1.02	1.05
0.55	0.77	0.79	0.82	0.85	0.87	0.90	0.92	0.95	0.98	1.00
0.56	0.72	0.76	0.78	0.81	0.83	0.86	0.89	0.91	0.94	0.97
0.57	0.69	0.72	0.75	0.77	0.80	0.82	0.85	0.88	0.90	0.93
0.58	0.66	0.68	0.71	0.73	0.76	0.79	0.81	0.84	0.87	0.89
0.59	0.62	0.65	0.67	0.70	0.72	0.75	0.78	0.80	0.83	0.86
0.60	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.74	0.77	0.79	0.82
0.61	0.55	0.58	0.60	0.63	0.65	0.68	0.71	0.73	0.76	0.79
0.62	0.51	0.54	0.57	0.59	0.62	0.65	0.67	0.70	0.73	0.75
0.63	0.48	0.51	0.54	0.56	0.59	0.61	0.64	0.67	0.69	0.72
0.64	0.45	0.48	0.50	0.53	0.56	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69

(续)

$\cos\varphi_2 \backslash \cos\varphi_1$	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.0
0.40	1.81	1.84	1.87	1.90	1.93	1.97	2.00	2.04	2.09	2.15	2.29
0.41	1.74	1.77	1.80	1.83	1.86	1.90	1.93	1.98	2.02	2.08	2.22
0.42	1.68	1.71	1.74	1.77	1.80	1.84	1.87	1.91	1.96	2.02	2.16
0.43	1.62	1.65	1.68	1.71	1.74	1.78	1.81	1.85	1.91	1.96	2.10
0.44	1.55	1.58	1.61	1.65	1.68	1.71	1.75	1.79	1.84	1.90	2.04
0.45	1.50	1.53	1.56	1.59	1.62	1.66	1.70	1.74	1.78	1.84	1.99
0.46	1.44	1.48	1.50	1.54	1.57	1.60	1.64	1.68	1.73	1.79	1.93
0.47	1.39	1.42	1.46	1.49	1.52	1.56	1.60	1.64	1.68	1.75	1.88
0.48	1.34	1.37	1.40	1.43	1.46	1.50	1.54	1.58	1.62	1.69	1.83
0.49	1.30	1.33	1.36	1.39	1.42	1.46	1.50	1.54	1.58	1.65	1.79
0.50	1.25	1.28	1.31	1.34	1.37	1.40	1.44	1.48	1.53	1.59	1.73
0.51	1.21	1.24	1.27	1.31	1.34	1.37	1.41	1.45	1.50	1.56	1.69
0.52	1.16	1.19	1.21	1.25	1.28	1.31	1.35	1.39	1.44	1.50	1.64
0.53	1.11	1.14	1.17	1.21	1.24	1.27	1.31	1.35	1.40	1.46	1.60
0.54	1.07	1.10	1.13	1.17	1.20	1.23	1.27	1.31	1.36	1.42	1.56
0.55	1.03	1.06	1.09	1.12	1.15	1.19	1.23	1.27	1.31	1.38	1.52
0.56	0.99	1.02	1.05	1.09	1.12	1.15	1.19	1.23	1.28	1.34	1.48
0.57	0.96	0.99	1.02	1.05	1.08	1.11	1.15	1.19	1.24	1.30	1.44
0.58	0.92	0.95	0.98	1.01	1.04	1.08	1.12	1.16	1.20	1.27	1.41
0.59	0.88	0.91	0.94	0.98	1.01	1.04	1.08	1.12	1.17	1.23	1.37
0.60	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97	1.01	1.04	1.09	1.13	1.19	1.33
0.61	0.81	0.84	0.87	0.91	0.94	0.97	1.01	1.05	1.10	1.16	1.30
0.62	0.78	0.81	0.84	0.87	0.90	0.94	0.98	1.02	1.06	1.13	1.27
0.63	0.75	0.78	0.81	0.84	0.87	0.90	0.94	0.98	1.03	1.09	1.23
0.64	0.72	0.75	0.77	0.81	0.84	0.87	0.91	0.95	1.00	1.06	1.20

(续)

$\cos\varphi_2 \backslash \cos\varphi_1$	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89
0.65	0.42	0.44	0.47	0.50	0.52	0.55	0.57	0.60	0.63	0.66
0.66	0.39	0.42	0.44	0.47	0.49	0.52	0.55	0.57	0.60	0.63
0.67	0.36	0.38	0.41	0.44	0.46	0.49	0.51	0.54	0.57	0.60
0.68	0.33	0.35	0.38	0.41	0.43	0.46	0.48	0.51	0.54	0.57
0.69	0.30	0.32	0.35	0.38	0.40	0.43	0.45	0.48	0.51	0.54
0.70	0.27	0.30	0.32	0.35	0.38	0.40	0.43	0.46	0.48	0.51
0.71	0.24	0.27	0.30	0.32	0.35	0.37	0.40	0.43	0.45	0.48
0.72	0.21	0.24	0.27	0.29	0.32	0.34	0.37	0.40	0.42	0.45
0.73	0.19	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32	0.34	0.37	0.40	0.42
0.74	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.29	0.31	0.34	0.37	0.40
0.75	0.13	0.16	0.19	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32	0.34	0.37
0.76	0.10	0.13	0.16	0.18	0.21	0.23	0.26	0.29	0.31	0.34
0.77	0.08	0.11	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32
0.78	0.05	0.08	0.11	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.29
0.79	0.02	0.05	0.08	0.10	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26
0.80	—	0.03	0.05	0.08	0.11	0.13	0.16	0.19	0.21	0.24
0.81	—	—	0.02	0.05	0.08	0.10	0.13	0.16	0.18	0.21
0.82	—	—	—	0.03	0.05	0.07	0.10	0.13	0.15	0.18
0.83	—	—	—	—	0.03	0.04	0.07	0.10	0.12	0.15
0.84	—	—	—	—	—	0.02	0.05	0.08	0.10	0.13
0.85	—	—	—	—	—	—	0.03	0.06	0.08	0.11
0.86	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.05	0.08
0.87	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02	0.05
0.88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03
0.89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

(续)

$\cos\varphi_2$	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.0
$\cos\varphi_1$											
0.65	0.68	0.71	0.74	0.77	0.80	0.84	0.88	0.92	0.97	1.03	1.17
0.66	0.65	0.68	0.71	0.75	0.78	0.81	0.85	0.89	0.94	1.00	1.14
0.67	0.62	0.65	0.68	0.71	0.74	0.78	0.82	0.86	0.91	0.97	1.11
0.68	0.59	0.62	0.65	0.68	0.71	0.75	0.79	0.83	0.88	0.94	1.08
0.69	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.72	0.76	0.80	0.85	0.91	1.05
0.70	0.54	0.57	0.59	0.63	0.66	0.69	0.73	0.77	0.82	0.88	1.02
0.71	0.51	0.54	0.57	0.60	0.63	0.66	0.70	0.74	0.79	0.85	0.99
0.72	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.64	0.67	0.71	0.76	0.82	0.96
0.73	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.61	0.65	0.69	0.73	0.80	0.94
0.74	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.58	0.62	0.66	0.71	0.77	0.91
0.75	0.40	0.43	0.46	0.49	0.52	0.55	0.59	0.63	0.68	0.74	0.88
0.76	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.56	0.61	0.65	0.71	0.85
0.77	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.50	0.54	0.58	0.63	0.68	0.83
0.78	0.32	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.55	0.60	0.66	0.80
0.79	0.29	0.32	0.35	0.38	0.41	0.45	0.49	0.53	0.57	0.63	0.78
0.80	0.27	0.30	0.33	0.36	0.39	0.42	0.46	0.50	0.55	0.61	0.75
0.81	0.24	0.27	0.30	0.33	0.36	0.39	0.43	0.47	0.52	0.58	0.72
0.82	0.21	0.24	0.27	0.31	0.34	0.37	0.41	0.45	0.50	0.56	0.70
0.83	0.18	0.21	0.24	0.27	0.31	0.34	0.38	0.42	0.47	0.53	0.67
0.84	0.16	0.19	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.44	0.50	0.64
0.85	0.14	0.17	0.20	0.23	0.26	0.29	0.33	0.37	0.42	0.48	0.62
0.86	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23	0.26	0.30	0.34	0.39	0.45	0.59
0.87	0.08	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23	0.27	0.31	0.36	0.42	0.56
0.88	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.25	0.29	0.34	0.40	0.54
0.89	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.22	0.26	0.31	0.37	0.51
0.90	—	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.19	0.23	0.28	0.34	0.48



## 第二节 设备的无功经济当量的计算

### 一、企业内无功经济当量的计算

无功功率经济当量简称无功经济当量。定义是，电力系统中任意一点减少或增加一千乏无功功率后，使系统有功功率损耗减少或增加的千瓦数。即

$$K = \frac{\Delta P''}{Q_1 - Q_2} = \frac{\Delta P''}{\Delta Q}$$

式中  $K$ ——电力系统中某点无功经济当量(kW/kVar)；

$\Delta P''$ ——电力系统中某点无功功率变化所引起该点至电源之间有功功率损耗的变化量(kW)；

$Q_1$ 、 $Q_2$ ——电力系统中某点无功功率变化前后值(kVar)；

$\Delta Q$ ——电力系统中某点无功功率变化量(kVar)。

由上式可知，电力系统中各处的无功当量是不一样的。距电源越远，因  $\Delta P$  越大，无功当量也就越大；反之，距电源越近， $\Delta P$  越小，无功当量也就越小。

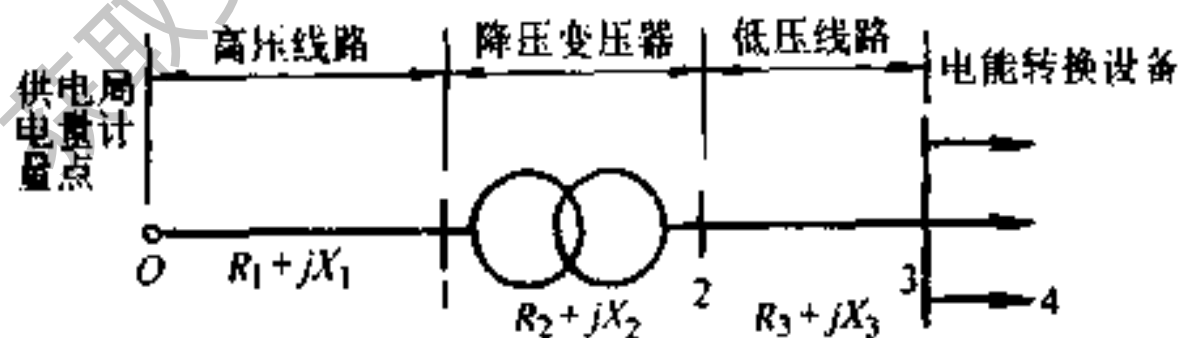


图 5-4 某企业供电系统

图 5-4 为某企业供电系统示意图，各部分的等值阻抗标于图中。

如果以供电局电量计量点作为该企业电源，则企业内各处无功当量计算如下：

设 O 点为电源，则该点无功当量为零。

O-1 段高压线路的有功功率损耗为

$$\Delta P = 3I_1^2 R_1 \times 10^{-3} = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} R_1 \times 10^{-3}$$

式中  $\Delta P$  --- 有功功率损耗 (kW)；

$U_1, I_1$  --- 点 1 处三相电压 (kV) 和线电流 (A)；

$P_1, Q_1$  --- 点 1 处有功功率 (kW) 和无功功率 (kVar)。

若点 1 后任意一点装设补偿电容，使点 1 处的无功功率减少了  $\Delta Q$  千乏，则 O-1 段高压线路有功功率损耗降低到：

$$\Delta P' = 3I_1'^2 R_1 \times 10^{-3} = \frac{P_1^2 + (Q_1 - \Delta Q)^2}{U_1^2} R_1 \times 10^{-3}$$

减少了有功损耗  $\Delta P''$  为

$$\Delta P'' = \Delta P - \Delta P' = \frac{(2Q_1 - \Delta Q)\Delta Q}{U_1^2} R_1 \times 10^{-3}$$

因此点 1 处的无功当量为

$$K_1 = \frac{\Delta P - \Delta P'}{\Delta Q} = \frac{2Q_1 - \Delta Q}{U_1^2} R_1 \times 10^{-3}$$

$$\approx \frac{2Q_1 R_1}{U_1^2} \times 10^{-3}$$

同理可得，点 2 处的无功当量为

$$K_2 \approx K_1 + \frac{2Q_2 R_2}{U_2^2} \times 10^{-3}$$

注意，对变压器而言， $R_2$  应折算到  $U_2$  同侧。

点 3 处的无功当量为

$$K_3 \approx K_1 + K_2 + \frac{2Q_3 R_3}{U_3^2} \times 10^{-3}$$

所以，得点  $m$  处的无功当量为

$$K_m = \sum_{i=1}^{m-1} K_i + \frac{2Q_m R_m}{U_m^2} \times 10^{-3}$$

式中  $Q_m$ ——点  $m$  处的无功功率 (kVar)；

$R_m$ ——点  $(m-1)$  至点  $m$  之间的等效电阻 ( $\Omega$ )；

$U_m$ ——点  $m$  处的电压 (kV)。

如果设法在点  $m$  处减少了  $\Delta Q$  的无功功率，则整个企业共减少了有功功率损耗  $K_m \Delta Q$ ，其中第  $m$  级（以  $K_1$  为第一计算级）用电设备减少了有功功率损耗

$$\left( K_m - \sum_{i=1}^{m-1} K_i \right) \cdot \Delta Q。$$

图 5-5 为某企业无功电能分布情况，方框中的数字为该设备在电平衡时间内消耗的无功电量。方框前后数字为该设备输入端和输出端的无功当量（以供电局计量点为参考）。

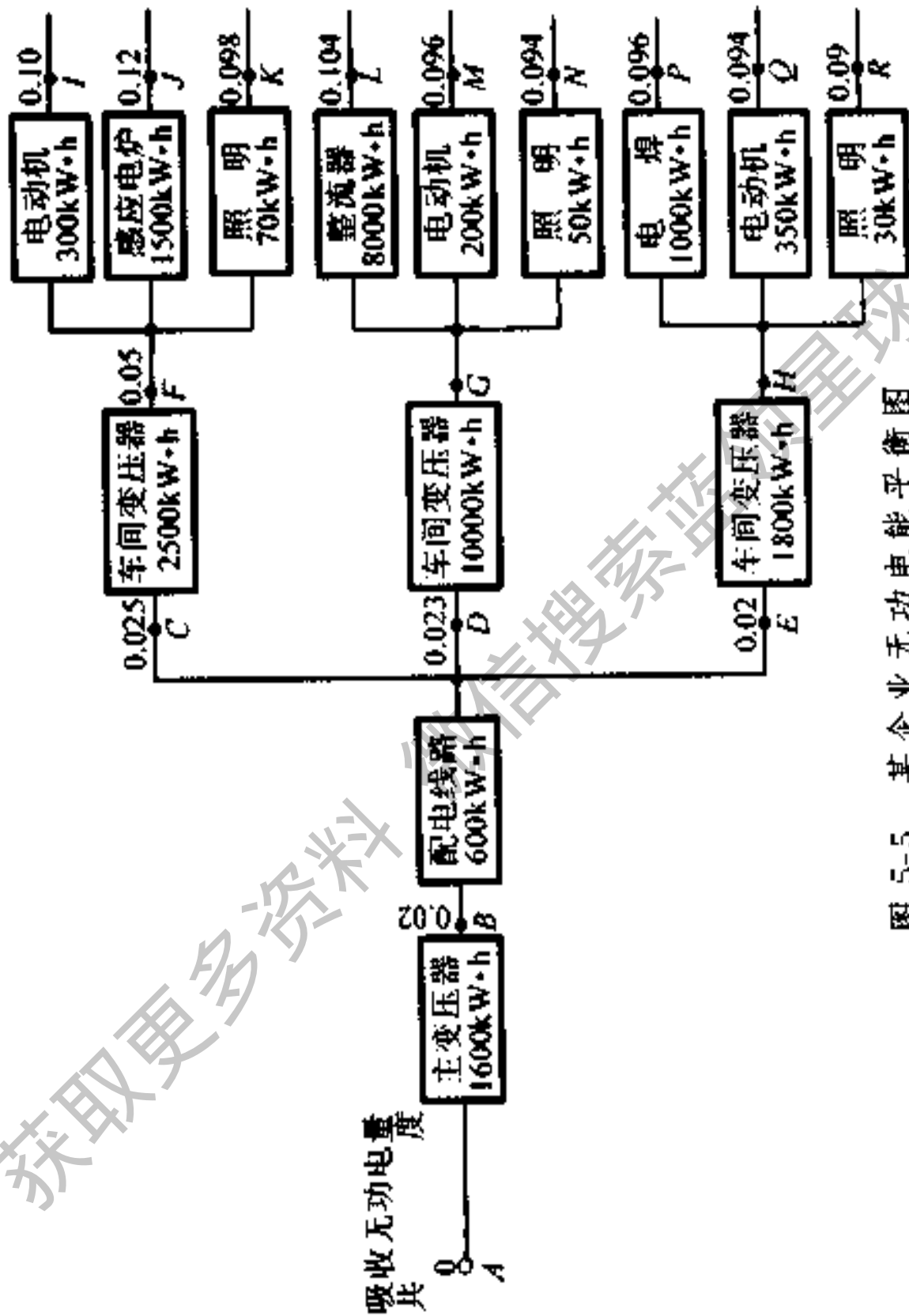


图 5-5 某企业无功电能平衡图

获取更多资料

现以 J 点为例,若设法使感应电炉的无功功率需求量减少  $\Delta Q$ ,则全企业共减少了  $0.12\Delta Q$  的有功功率损耗。其中感应电炉本身减少有功损耗为

$$\begin{aligned}\Delta P_J &= [K_J - (K_A + K_B + K_C + K_F)]\Delta Q \\ &= [0.12 - (0 + 0.02 + 0.025 + 0.05)]\Delta Q \\ &= 0.025\Delta Q(\text{kW})\end{aligned}$$

车间变压器减少有功损耗为

$$\begin{aligned}\Delta P_{b2} &= [K_F - (K_A + K_B + K_C)]\Delta Q \\ &= [0.05 - (0 + 0.02 + 0.025)]\Delta Q \\ &= 0.005\Delta Q(\text{kW})\end{aligned}$$

配电线路减少有功损耗为

$$\begin{aligned}\Delta P_1 &= [K_C - (K_A + K_B)]\Delta Q \\ &= [0.025 - (0 + 0.02)]\Delta Q \\ &= 0.005\Delta Q(\text{kW})\end{aligned}$$

主变压器减少有功损耗为

$$\Delta P_M = (K_B - K_A)\Delta Q = 0.02\Delta Q(\text{kW})$$

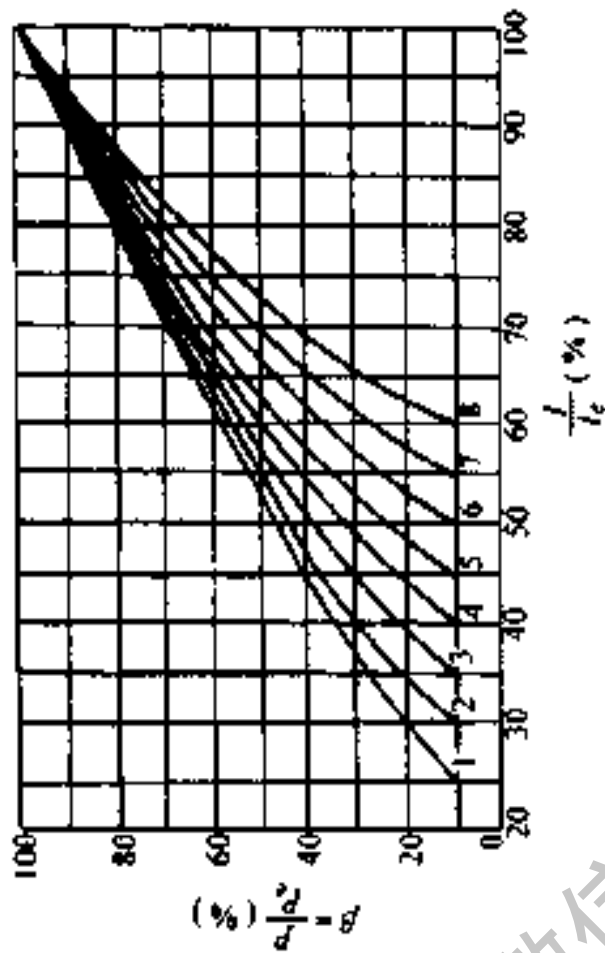
## 二、几种设备的无功补偿容量的确定

### 1. 必须改善功率因数的设备

表 5-10 列出必须改善功率因数的设备。

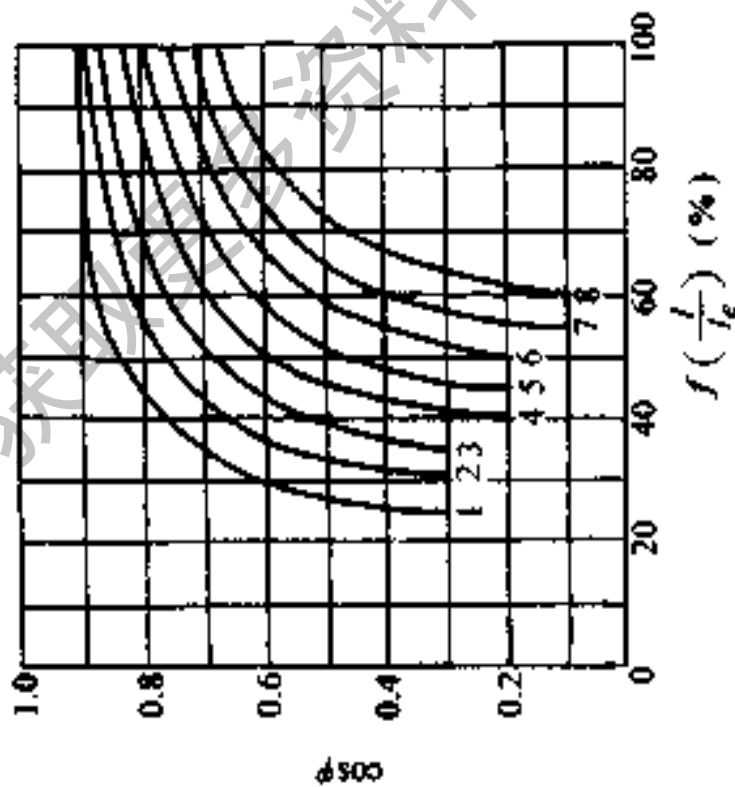
### 2. 感应电动机补偿容量的确定

(1) 电动机在某一负荷下的功率因数的计算:先测出电动机在某一负荷  $P$  下的工作电流  $I$  和空载电流  $I_0$ ,计算出  $(I_0/I_c)\%$  和  $(I/I_c)\%$  值,再从图 5-6 中求出该电



$\cos \varphi_e$	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79	0.76	0.73	0.69
曲线	1	2	3	4	5	6	7	8

图 5-7 各种额定功率因数的感应电动机的  
负荷因数与电流百分数关系曲线



曲线	1	2	3	4	5	6	7	8
$f(I/I_e)$ (%)	25	30	35	40	45	50	55	60

图 5-6  $\cos \varphi = f(I/I_e)$  曲线

表 5-10 必须改善功率因数的设备

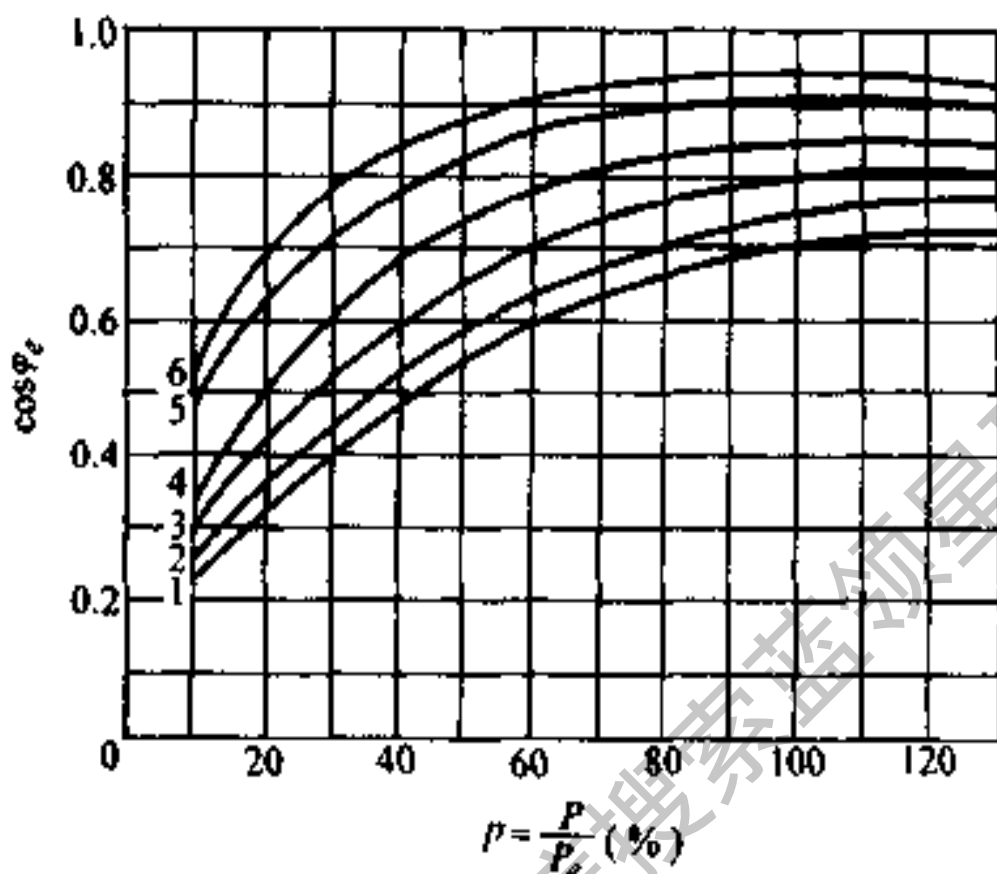
用 电 设 备	容 量/kW
鼠笼式感应电动机	100
绕线式感应电动机	100
坩锅式感应炉	100
沟形感应炉	100
真空感应炉	100
炼钢用电弧炉	—
倾式电弧炉	—
闪光对焊机(携带式除外)	10
电弧焊机(携带式除外)	10
整流器	10000

动机工作时的功率因数。

如果测得电动机端电压  $U$  值与额定电压  $U_n$  值相差较大, 则应代入下式算出额定电流

$$I_n = I \frac{U_n}{U}$$

有时受运行条件的限制, 不可能测得空载电流  $I_0$ , 在这种情况下, 可测出工作电流  $I$ , 算出  $(I/I_n)\%$ , 再查得铭牌上的额定功率因数  $\cos\varphi$ , 便可在图 5-7 中得到电动机的负荷率  $\beta = (P/P_n)\%$ , 最后再在图 5-8 中得出电动机在负荷率  $\beta$  时的功率因数。



曲线	1	2	3	4	5	6
cos φ	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.92

图 5-8 各种额定功率因数的电动机工作时的  
功率因数与负荷因数的关系曲线

(2) 补偿电容的计算 已知工作电流  $I$  及功率因数  $\cos\varphi$  后, 便可按下式求出

$$I_c = I(\sin\varphi - \tan\phi \cos\varphi)$$

$$Q = \sqrt{3} UI_c \times 10^{-3}$$

式中  $I_c$ ——所需补偿电容器的电流 (A);

$Q$ ——电容器的容量 (kVar);



$\varphi'$  —— 功率因数改善后的功率因数角。

改善后的功率因数  $\cos\varphi'$  应尽可能达到 0.95。

电动机采用单台补偿时，为防止电动机自激产生过电压，电容器的电流应比电动机的空载电流小约 10%。  
即

$$Q_c = 0.9 \sqrt{3} U I_0 \times 10^{-3}$$

式中  $I_0$  —— 电动机的空载电流 (A)。

### 3. 农用水泵类电动机补偿量的确定

农用水泵的无功补偿量可按下式计算

$$Q_0 < Q_c < Q_L$$

式中  $Q_c$  —— 单机无功补偿容量 (kVar)；

$Q_0$  —— 电动机空载无功负荷 (kVar)；

$$Q_0 = \sqrt{3} U I_0 \sin\varphi_0 ;$$

$Q_L$  —— 电动机负载额定无功负荷 (kVar)，

$$Q_L = \sqrt{3} U I_L \sin\varphi_L ;$$

$\sin\varphi_0$  —— 电动机空载时功率因数角的正弦值；

$\sin\varphi_L$  —— 电动机负载下功率因数角的正弦值；

其他符号同前。

对于 100kW 以下排灌用电动机，也可按下式估算

$$Q_c = (0.5 \sim 0.7) P_r$$

式中  $P_r$  —— 电动机额定功率 (kW)；

$Q_c$  —— 同前。

#### 4. 交流弧焊机补偿容量的计算

交流弧焊机功率因数为 0.45~0.60, 效率为 80% 左右。

##### (1) 计算法确定补偿容量

① 方法一：在电焊机一次侧并联补偿电容器以提高功率因数时

$$Q_c = K_c P_s$$

$$K_c = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1} - \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}}{\cos \varphi_1}$$

式中  $Q_c$ ——所需的电容器的容量 (kVar)；

$K_c$ ——系数, 取决于补偿前功率因数  $\cos \varphi_1$  及补偿后功率因数  $\cos \varphi_2$ ；

$P_s$ ——弧焊变压器的使用容量 (kVA)。

为了减小电容器容量, 可在变压器一次侧加升压抽头, 如图 5-9 所示。此时, 电容器的电压须大于或等于抽头的电压。

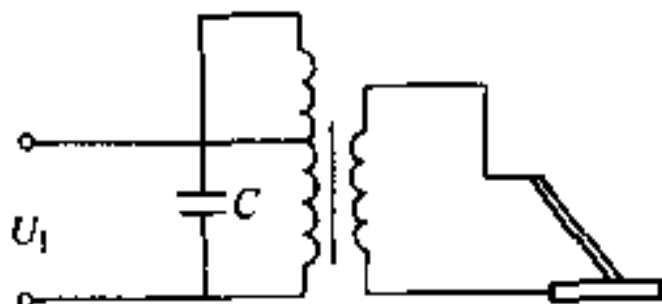


图 5-9 在升压抽头上加补偿电容器

② 方法二：在电

焊机一次侧并联补偿电容量  $C$  可参考下式选取

$$C \approx 8.1 I_o, Q_c = \omega C U^2 \times 10^{-3}$$

式中  $C$ ——电容量 ( $\mu\text{F}$ )；

8.1——经验系数；

$I_0$ ——弧焊机的空载电流 (A)；

$Q$ ——补偿电容器容量 (kVar)；

$\omega$ ——角频率 (rad/s)；

$U$ ——单相弧焊机的额定电压 (kV)。

### (2) 查表法确定补偿容量

380V 交流弧焊机的补偿电容器容量也可参照表 5-11 选取。这时功率因数将由 0.45~0.60 提高到 0.60~0.70 左右，输入视在功率减少 20% 左右，而一次侧配线损耗降低到 64% 左右。

表 5-11 380 伏交流弧焊机的电容器补偿容量

最大输入功率/kVA	5~7	7~10	10~15	15~20
电容量/ $\mu\text{F}$	30	60	70	80
补偿容量/kVar	1.36	2.72	3.17	3.62
最大输入功率/kVA	20~25	25~30	30~40	40~50
电容量/ $\mu\text{F}$	100	150	200	250
补偿容量/kVar	4.53	6.80	9.70	11.34

若电焊机的额定电压为 220V，则表 5-11 中的电容量可按下式折算：

$$C_2 = \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 C_1 = \left( \frac{380}{220} \right)^2 C_1 = 2.98C_1$$

式中  $C_2$ ——电压为 220V 时电焊机补偿电容量 ( $\mu\text{F}$ )；

$C_1$ ——电压为 380V 时电焊机补偿电容量 ( $\mu\text{F}$ )。

### 第三节 提高功率因数与 降损及改善电压的计算

#### 一、提高功率因数与降损关系的计算

不同供电方式下功率因数改善前后的受电功率、有功损耗、视在功率、补偿容量、线路电压降及输出电压的关系，见表 5-12。

#### 二、功率因数降低与电网元件（线路和变压器）损耗增加的关系

表 5-12 功率因数改善前、后的各关系式表

	功率因数改善前		功率因数改善后	
	单相二线制	三相制	单相二线制	三相制
受电功率 $P/\text{kW}$	$P = UI_1 \cos \varphi_1$ $\times 10^{-3}$	$P = \sqrt{3} VI_1 \cos \varphi_1$ $\times 10^{-3}$	$P = UI_2 \cos \varphi_2$ $\times 10^{-3}$	$P = \sqrt{3} UI_2 \cos \varphi_2$ $\times 10^{-3}$
有功损耗 $\Delta P/\text{kW}$	$\Delta P_1 = I_1^2 R$ $\times 10^{-3}$	$\Delta P_1 = 3I_1^2 R$ $\times 10^{-3}$	$\Delta P_2 = I_2^2 R$ $\times 10^{-3}$	$\Delta P_2 = 3I_2^2 R$ $\times 10^{-3}$
视在功率 $S/\text{kVA}$	$S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1}$		$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2}$	
补偿容量 $Q_c/\text{kVar}$			$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$	

(续)

	功率因数改善前		功率因数改善后	
	单相二线制	三相制	单相二线制	三相制
线路电压降 $\Delta U/V$	$\Delta U_1 = (R\cos\varphi_1 + X\sin\varphi_1)I_1$		$\Delta U_2 = (R\cos\varphi_2 + X\sin\varphi_2)I_2$	
输出电压 $U'/V$	$U'_1 = U + \Delta U_1$		$U'_2 = U + \Delta U_2$	

注： $U$ ——受电端电压，三相时为线电压（V）。

$\Delta U$ ——线路电压降，三相时为线电压（V）。

$R$ 、 $X$ ——三相时为每相导线的电阻和电抗，单相二线制时为来回二条导线的值（ $\Omega$ ）。

当负荷的功率因数从1降到 $\cos\varphi$ 时，电网元件的功率损耗增加的百分数可由下式近似计算（表5-13）。

$$\Delta P\% = \left( \frac{1}{\cos^2\varphi} - 1 \right) \times 100$$

表 5-13 功率因数由1下降与电网元件损耗增加的关系

功率因数由1降低到右列数值	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6
电网元件有功损耗增加百分数（%）	11	23	38	56	78	104	136	178

### 三、提高功率因数与降低线损的关系

因为功率因数改善前的线路电流为

$$I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3}U} \times 10^3 = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi_1} \times 10^3$$

改善后的线电流为

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3}U} \times 10^3 = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi_2} \times 10^3$$

所以线路损耗减少为

$$\Delta \Delta P_1 = \Delta P_1 - \Delta P_2 = 3R (I_1^2 - I_2^2) \times 10^3$$

将  $I_1$  和  $I_2$  的关系式代入上式得

$$\begin{aligned} \Delta \Delta P_1 &= \frac{RP^2}{U^2} \left( \frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_2} \right) \times 10^6 \\ &= 3\Delta P_1 \left( 1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2} \right) \end{aligned}$$

式中  $\Delta \Delta P_1$ ——线路损耗减少量 (kW);

$\Delta P_1$ 、 $\Delta P_2$ ——分别为功率因数提高前、后的线损 (kW);

$P$ ——负荷功率 (kW);

$U$ ——电网线电压 (V);

$R$ ——每相导线的电阻 ( $\Omega$ );

$\cos \varphi_1$ 、 $\cos \varphi_2$ ——补偿前后的功率因数。

表 5-14 列出提高功率因数与降低线损的关系。

表 5-14 提高功率因数与降低线损的关系

功率因数由有列 数值提高到 0.95	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
线路有功损耗降 低百分数 (%)	60	53	46	38	29	20	10

## 四、提高功率因数与降低变压器铜损的关系

提高功率因数,线路电流会减少,变压器铜损也相应减少。

设变压器短路损耗为  $P_d$ , 二次额定电流为  $I_{2r}$ , 当电流为  $I_1$  时的铜损 (功率因数改善前)

$$P_{d1} = P_d \left( \frac{I_1}{I_{2r}} \right)^2$$

当电流为  $I_2$  (功率因数改善后) 时的铜损

$$P_{d2} = P_d \left( \frac{I_2}{I_{2r}} \right)^2$$

因此铜损减少量为

$$\Delta P_d = P_{d1} - P_{d2} = P_d \left( \frac{I_1^2 - I_2^2}{I_{2r}^2} \right)$$

将  $I_1$  和  $I_2$  的关系式代入上式

$$\Delta P_d = P_d \left[ \frac{\left( \frac{P}{\sqrt{3}U} \right)^2 \left( \frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_2} \right) \times 10^6}{\left( \frac{S_r}{\sqrt{3}U} \right)^2 \times 10^6} \right]$$

$$= P_d \left( \frac{P}{S_r \cos \varphi_1} \right)^2 \cdot \left( 1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2} \right)$$

式中  $\Delta P_d$ ——变压器铜耗减少量 (kW);

$S_r$ ——变压器额定容量 (kVA);

$S_r = \sqrt{3} U_{2e} I_{2e} \times 10^3$ , 此处  $U_{2e} = U$  (V), 即二次额定线电压。

其他符号同前。

## 五、提高功率因数与改善电压关系的计算

### 1. 减少线路压降的计算

提高功率因数线路压降减少量可由下式计算

$$\Delta U'_r = \Delta U_1 - \Delta U_2 = [I_1 \cos \varphi_1 (R + x \tan \varphi_1)] \\ - [I_2 \cos \varphi_2 (R + x \tan \varphi_2)]$$

由于负荷功率在功率因数改变前后没有变化, 所以

$I_1 \cos \varphi_1 = I_2 \cos \varphi_2$ , 代入上式得

$$\Delta U'_r = I_1 \cos \varphi_1 (R + x \tan \varphi_1) \left( 1 - \frac{R + x \tan \varphi_2}{R + x \tan \varphi_1} \right) \\ = \Delta U_1 \left( 1 - \frac{R + x \tan \varphi_2}{R + x \tan \varphi_1} \right)$$

式中  $\Delta U'_r$ ——相电压压降减少量 (V);

$\Delta U_1$ 、 $\Delta U_2$ ——改善功率因数前、后线路相电压压降 (V);

$R$ 、 $x$ ——每相导线的电阻和电抗, 单相时为来回二条线的阻值 ( $\Omega$ );



其他符号同前。

表 5-15 投入电容器后电压降减少的数据

供电元件	SL <sub>1</sub> 型变压器容量 /kVA				
	315	500	630	800	1000
投入 100kVar 电 容器后电压提高值 (%)	1.27	0.8	0.71	0.56	0.45
电压提高 1%需 投入电容器容量/ kVar	79	125	140	178	222

供电元件	每千米架空线路 电压/kV			每千米电缆线路 电压/kV		
	0.38	6	10	0.38	6	10
投入 100kVar 电 容器后电压提高值 (%)	28	1.1	0.4	5.5	0.022	0.008
电压提高 1%需 投入电容器容量/ kVar	3.6	900	2500	18	4500	12500

若用电压降减少百分数表示,则可用下式近似计算

$$\Delta U, \% \approx \frac{\Delta Q_c \times 10^3}{U^2} \times 100\%$$

式中  $\Delta U_s\%$  —— 线路电压降减少百分数 (%)；

$\Delta Q_c$  —— 移相电容器投入增加量 (kVar)，若原先未并入补偿电容，则  $\Delta Q_c$  即为改善后电容器的投入量  $Q_c$ ；

$U_s$  —— 线路额定电压 (V)。

## 2. 减少变压器电压降的计算

用电压降减少百分数表示，可用下式近似计算

$$\Delta U_s\% \approx \frac{\Delta Q_c \cdot U_d\%}{S_c}$$

式中  $\Delta U_s\%$  —— 变压器电压降减少百分数 (%)；

$U_d\%$  —— 变压器阻抗电压百分数 (%)；

$S_c$  —— 变压器额定容量 (kVA)。

投入电容器后线路及变压器电压降减少的数据，可参考表 5-15。

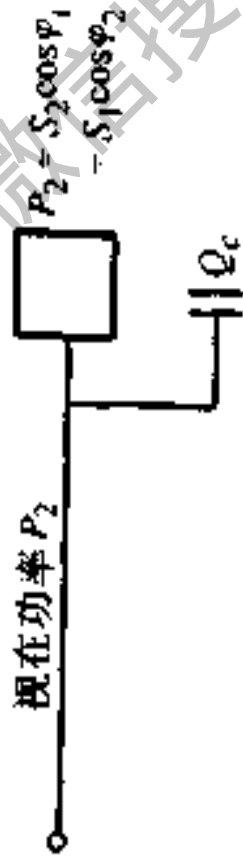
## 第四节 提高功率因数与 增加设备容量的计算

### 一、增加线路供电能力的计算

如图 5-10 所示，在负荷的功率因数  $\cos\varphi_1$  一定时，将供电功率由  $P_1$  增加到  $P_2$ 。这时视在功率也由  $S_1$  增加到  $S_2$ ，即增加了  $\Delta S = S_2 - S_1$ 。若配电线路的容量短缺为  $\Delta S$ ，如果安装  $Q_c = OF = ED$  的补偿电容器，则合成视在功率为  $OD = S_1$ ，等于原来的视在功率，解决了容量不足



a) 补偿前



b) 补偿后

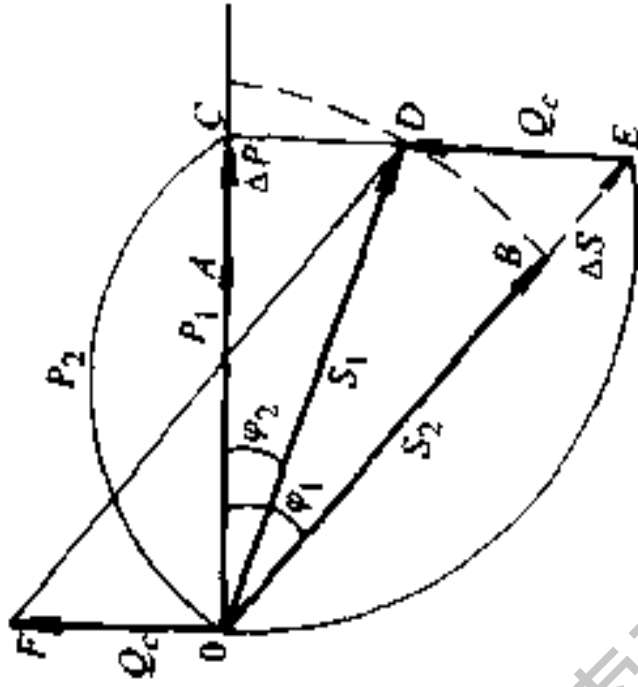


图 5-10 增加设备容量的说明图

的问题，并可增加  $\Delta P_l = P_2 - P_1$  的供电功率。即

$$\Delta P_l = P_2 - P_1 = S_1 (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1)$$

式中  $\Delta P_l$ ——功率因数提高所增加线路的供电功率 (kW)；

$S_1$ ——功率因数提高前的视在功率 (kVA)。

也可用下式计算

$$\Delta S_l = \frac{XQ_c}{R \cos \varphi_1 + X \sin \varphi_1}$$

式中  $\Delta S_l$ ——功率因数提高所增加线路的供电容量 (kVA)；

$Q_c$ ——无功补偿容量；

$\cos \varphi_1$ ——补偿前的功率因数；

其他符号同前。

## 二、增加变压器供电能力的计算

$$\Delta S_b = \left[ \frac{Q_c}{S_r} \sin \varphi_1 - 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{Q_c}{S_r} \right)^2 \cos^2 \varphi_1} \right] S_r$$

式中  $\Delta S_b$ ——功率因数提高后，变压器增加的供电能力 (kVA)；

$S_r$ ——变压器额定容量 (kVA)；

其他符号同前。

## 第六章 低压电器的选用及计算

### 第一节 开关与熔断器的选用与计算

#### 一、低压电器选用的一般原则

1. 低压电器的额定电压应不小于回路的工作电压，即  $U_n \geq U_g$ 。

2. 低压电器的额定电流应不小于回路计算工作电流，即  $I_n \geq I_g$ 。

3. 设备遮断电流应不小于短路电流，即

$$I_{sh} \geq I_{sh}$$

4. 热稳定保证值应不小于计算值。低压设备的动热稳定及最大断流能力见产品技术数据。

5. 按回路起动情况选择低压电器。例如，熔断器和自动空气开关就需要按起动情况进行选择。

#### 二、断路器的选用和计算

断路器也称自动空气断路器，它能在供电系统中发生过载、短路和欠电压等情况时，自动切断电路，也可用于不频繁地起动电动机或接通、分断电路。

断路器的分类见表 6-1；断路器类型及适用场合见表 6-2；常用断路器的性能及技术数据见表 6-3。

表 6-1 断路器按保护特性及用途分类

分类名称	电流种类及范围	保护特性			主要用途
配用电自动开关	交流 200~ 5000A	选择型	二段保护	瞬时、短延时	电源总开关和负荷近端支路开关
			三段保护	瞬时、短延时及长延时	
		非选择型	限流型	长延时、瞬时	支路近端开关和支路末端开关
			一般型		
	直流 600~ 6000A	快速型	正向	保护硅整流设备	
			双向		
一般型		长延时	保护一般直流设备		
	瞬动				
电动机保护用自动开关	交流 60~ 600A	直接起动	过流脱扣器瞬动倍数 (8~15) $I_e$		保护鼠笼型电动机
		间接起动	过流脱扣器瞬动倍数 (3~8) $I_e$		保护鼠笼型和绕线型电动机
		限流式	过流脱扣器瞬动倍数 12 $I_e$		可装于变压器近端

(续)

分类名称	电流种类及范围	保护特性	主要用途
照明用自动开关	交流 5~50A	过载长延时 短路瞬时(单极)	照明电路 开关信号二 次回路
漏电保护自动开关	交流 5~200A	30mA, 1/10s 分断	保护人身 安全及防止 漏电引起火 灾
特殊用途的自动开关	交流 直流	瞬 动	灭磁开关 闭合开关

表 6-2 断路器类型和适用场合

类别	产品系列	适用场合
塑料外壳式	DZ(B) 5 型(单极)	主要作开关板控制线路及照明线路的过载和短路保护
	DZ5-20 型(3极)	作电动机和其它电气设备的过载及短路保护,也可作小容量电动机不频繁的起停操作和线路转换之用
	DZ5-50 型(3极)	与 DZ5-20 相同,但容量比 DZ5-20 大一级,并可用于交流 500V 及以下电路中

(续)

类别	产品系列	适用场合
塑料外壳式	DZ10 系列	在低压交直流线路中,作不频繁接通和分断电路用;该开关具有过载和短路保护装置,用以保护电气设备、电机和电缆不因过载或短路而损坏
	DZ6、DZ12、 DZ13 型	主要用于照明线路,作线路过载和短路保护,以及作线路不频繁分断和接通之用
	DZ15 系列	作为配电、电动机、照明线路的过载和短路保护及晶闸管交流侧的短路保护,也可用作线路不频繁转换及电动机不频繁起动
	S060 系列	该系列为引进技术小型开关,适用于交流 50、60Hz,电压 415V 及以下的线路,用于照明线路、电动机过载和短路保护
框架式	DW5 系列	有配电用和保护电动机用两种,分别作配电线路电源设备和电动机的过载、短路和欠电压保护;在正常条件下,也可分别用于电路的不频繁转换和电动机的不频繁起动
	DW10 系列	用于低压交直流配电线路,作过载、短路及欠电压保护,在正常条件下,也可用于不频繁转换电路之用



(续)

类别	产品系列	适用场合	
框架式	DW15 系列	用于交流电压至 1140V, 电流至 1500A 的电路作配电和电动机保护。有配电用开关和保护电动机用开关两种。分别用作配电线路电源设备和电动机的过载、短路及欠电压保护; 在正常条件下, 也可分别用于电路不频繁转换和电动机不频繁起动	
	新系列	用作主变压器和电路配电开关, 额定电流可达 4000A, 具有选择性保护	
直流快速	DS7~DS9 系列 DS10 系列 DS11、DS12 系列	单向动作 单双向均可动作 双向动作	用于大容量直流机组、硅整流供电装置和晶闸管整流装置等直流供电线路作过载、短路和逆流保护
限流式	DW×15 系列 框架式	具有快速断开和限制短路电流上升的特点, 适用于可能发生特大短路的低压网络, 作配电和保护电动机之用; 在正常条件下, 也可用于线路不频繁转换和电动机不频繁起动	
	DZ×10 系列 塑料外壳式	在集中配电、变压器并联运行或采用环形供电时, 在要求高分断能力的分支线路中, 作为线路和电源设备的过载、短路和欠电压保护; 在正常条件下, 也可作线路的不频繁转换之用	

(续)

类别	产品系列	适用场合
漏电保护	DZ15L 型	适用于电源中性点接地的电路, 作漏电保护, 也可作线路和电动机的过载及短路保护, 还可用于线路不频繁转换和电动机不频繁启动
	DZ5--20L 型	与 DZ15L 相同, 但容量比 DZ15L 小一级, 额定电流仅 20A, 且无 4 极触头

### 1. 一般选用条件

- (1) 断路器的额定电压  $\geq$  线路额定电压;
- (2) 断路器的额定电流  $\geq$  线路计算负荷电流;
- (3) 断路器的脱扣器额定电流  $\geq$  线路计算负荷电流;
- (4) 断路器的极限通断能力  $\geq$  线路中最大短路电流;
- (5) 线路末端单相对地短路电流不小于 1.25 倍的自动开关瞬时 (或短延时) 脱扣整定电流;
- (6) 断路器欠电压脱扣器额定电压等于线路额定电压。

### 2. 配电用断路器的选用原则

- (1) 长延时动作电流整定值为导线允许载流量的

表 6-3 常用断路器的性能及技术数据

类型	型号	额定 电流 /A	机械寿命 电寿命 /万次	过电流脱 扣器范围 /A	通断能力						备注
					交 流			直 流			
					电压 /V	电流/kA (有效值)	$\cos\varphi$	电压 /V	电流/kA	时间常数 /s	
万 能 式	DW10	200	1/0.5	100~200	10			10			电 动 操 作
		400		100~400	15			15			
		600		400~600	15			15			
		1000	400~1000	20	380	0.4	440	20	0.01		
		1500	1000~1500	20				20			
		2500	1000~2500	30				30			
		4000	2000~4000	40				40			
		400	200~400	20				20			
式	DWS	1000	1/0.5	400~1000	40	380	0.4	440	40	0.01	
		1500		1000~1500	40			40			

(续)

类型	型号	额定 电流 /A	机械寿命 电寿命 /万次	过电流脱 扣器范围 /A	通断能力						备注	
					交 流			直 流				
					电压 /V	电流/kA (有效值)	$\cos\varphi$	电压 /V	电流/kA	时间常数 /s		
万 能 式	DW15	200	2/1	100~200	380	25/0.4	0.35					
		400	1/0.5	200~400	380	25/0.8	0.35					
		600	1/0.5	300~600	660	15	0.3					
					1140	10	0.3					
					380	30/12	0.35					电动 操作, 半导体 脱扣器
					660	20	0.3					
					1140	12	0.3					

(续)

类型	型号	机械寿命		过电流脱扣器范围 / A	通断能力						备注	
		额定电流 / A	电寿命 / 万次		交流			直流				
					电压 / V	电流 / kA (有效值)	$\cos\varphi$	电压 / V	电流 / kA	时间常数 / s		
塑壳式	DZ10	100	1/0.5	15~20 25~50 60~100 100~250 200~600	380	7	7		220	7	通断能力的电流为峰值	
						9	9	0.4	220	9		0.01
						12	12			12		
						30	30			20		
						50	50			25		
塑壳式	DZ5	10 25 20 50	0.8/0.4 0.7/0.2	0.5~10 0.5~25 0.15~20 10~50	单相 220	1						
					单相 220	2	0.7	220	1.2	0.01		
					380	1.2						
					380	1.2						
直流快速	DS7-10/15	1000	0.2/	1000~2000				1500	20	$2 \times 10^6$	单向动作	
	DS7-20/15	2000	0.2/	2000~4000				1500	20	$2 \times 10^6$		
	DS7-30/15	3000	0.2/	3000~6000				1500	20	$2 \times 10^6$		

(续)

类型	型号		额定 电流 /A	机械寿命		过电流脱 扣器范围 /A	通断能力				备注	
				电寿命 /万次	电寿命 /万次		交流		直流			
							电压 /V	电流/kA (有效值)	$\cos\varphi$	电压 /V		电流/kA
直流	DS8	3/8	300	0.2/	0.2/	200~500			750	10	$2 \times 10^6$	单向 动作
		6/8	600	0.2/	0.2/	500~1200			750	10	$2 \times 10^6$	
		6/15	600	0.2/	0.2/	500~1200			1500	10	$2 \times 10^6$	
快速	DS11	6000	6000	0.2/	0.2/	4800~9600			750	55	$10 \times 10^6$	双向 动作
		1000	1000						825	80	$5 \times 10^6$	
		2000	2000						1500	50	$3 \times 10^6$	
	DS10	2000	2000	0.2/	0.2/				825	80	$5 \times 10^6$	不包 括电 器重 量
		3000	3000						1500	50	$3 \times 10^6$	
									825	80	$5 \times 10^6$	
								1500	50	$3 \times 10^6$		
								825	80	$5 \times 10^6$		
								1500	50	$3 \times 10^6$		

0.8~1 倍；

(2) 3 倍长延时动作电流整定值的可返回时间不小于线路中最大起动电流的电动机的起动时间；

(3) 短延时动作电流整定值不小于  $1.1(I_{js} + 1.35kI_{rdm})$ ， $I_{js}$  为线路计算负荷电流； $k$  为电动机起动电流倍数； $I_{rdm}$  为最大一台电动机额定电流；

(4) 短延时时间按被保护对象的热稳定校验；

(5) 无短延时时，瞬时电流整定值不小于  $1.1(I_{js} + k_1kI_{rdm})$ 。 $k_1$  为电动机起动电流的冲击系数，取 1.7~2。

如有短延时时，则瞬时电流整定值不小于 1.1 倍的下级开关进线端计算短路电流值。

### 3. 电动机保护用自动开关的选用

(1) 长延时电流整定值等于电动机的额定电流；

(2) 6 倍长延时电流整定值的可返回时间  $\geq$  电动机起动时间；

(3) 鼠笼型瞬时整定电流为 8~15 倍脱扣器额定电流；绕线型瞬时整定电流为 3~6 倍脱扣器额定电流。

### 4. 照明用自动开关的选用

(1) 长延时电流整定值不大于线路计算负荷电流；

(2) 瞬时电流整定值等于 6 倍的线路计算负荷电流。

### 5. 与相邻电器保护特性配合的要求

(1) 长延时特性低于被保护对象的允许过载特性；

(2) 短延时脱扣器与一次侧过电流保护继电器的配合级差，视不同保护继电器而定；

(3) 过电流脱扣器保护特性低于一次侧熔断器的熔化特性；

(4) 上一级断路器的保护特性与下一级断路器的保护特性不能相交；

(5) 上一级断路器短延时整定电流不小于 1.2 倍下一级自动开关短延时或瞬时整定电流；

(6) 上一级自动开关瞬时整定电流不小于断路器的延时通断能力，不小于 1.1 倍下一级断路器进线处的短路电流；

(7) 具有延时的断路器如带欠压脱扣器，则欠压脱扣器必须是延时的，其延时时间不小于短路延时时间。

#### 6. $S_{060}$ 型导线保护开关的选用

$S_{060}$ 型导线保护开关，又称小型断路器，分 L 型——导线保护用（过载、短路保护）；G 型——电动机保护用（过载、短路保护及不频繁起动）。脱扣器整定电流：L 型有 6、10、16、20、25 及 32A 等 6 种；G 型除上述 6 种外，还有 40A。

##### (1) $S_{060}$ 型保护开关的选用

- ① 保护开关的额定电压不小于线路额定电压；
- ② 保护开关的额定电流不小于线路计算负荷电流；



③ 脱扣器动作电流不大于照明线路允许长期负荷电流乘以允许短路时过载电流的倍数（导线保护用）；

④ 保护开关的极限分断能力不小于安装处可能出现的最大短路电流；当不能满足时，应加装具有相应分断能力的熔断器；

⑤ 保护开关，根据环境温度不同，所能通过的最大电流的修正曲线，如图 6-1～图 6-5 所示；

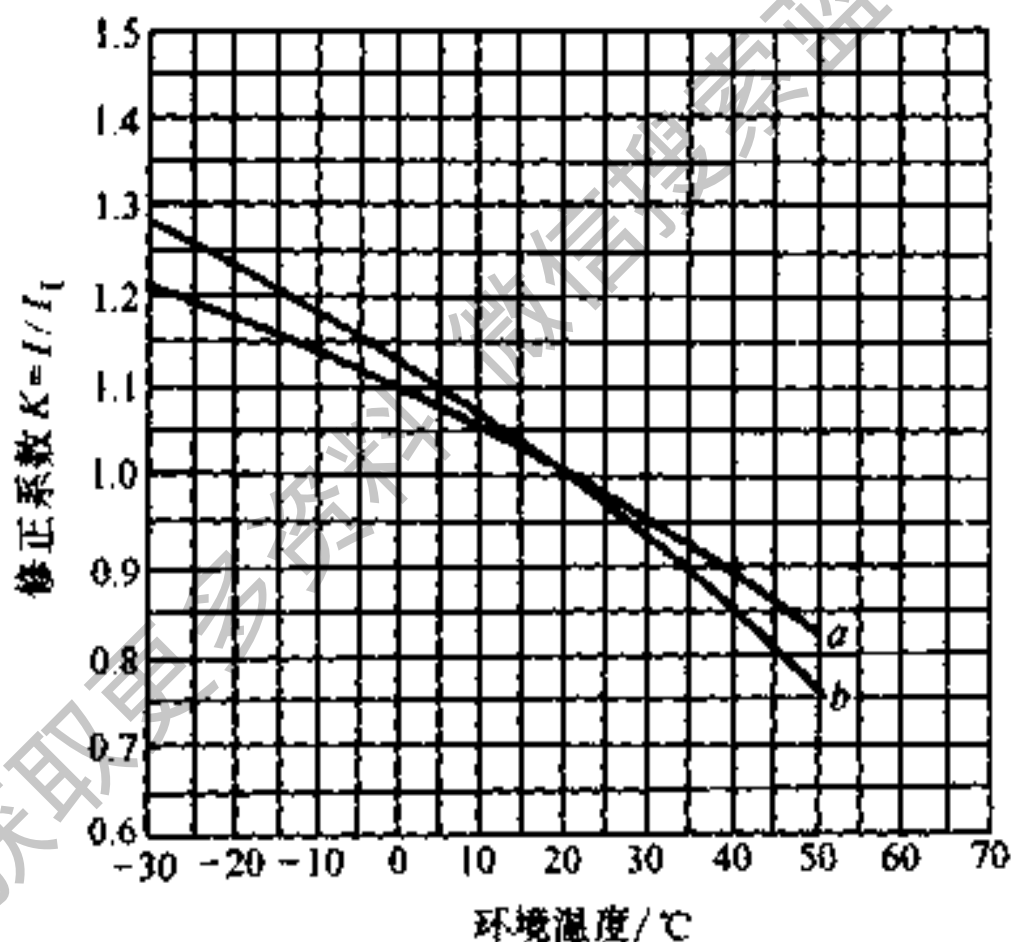


图 6-1 L 型导线保护开关修正曲线

a—L16~L32 b—L6~L10

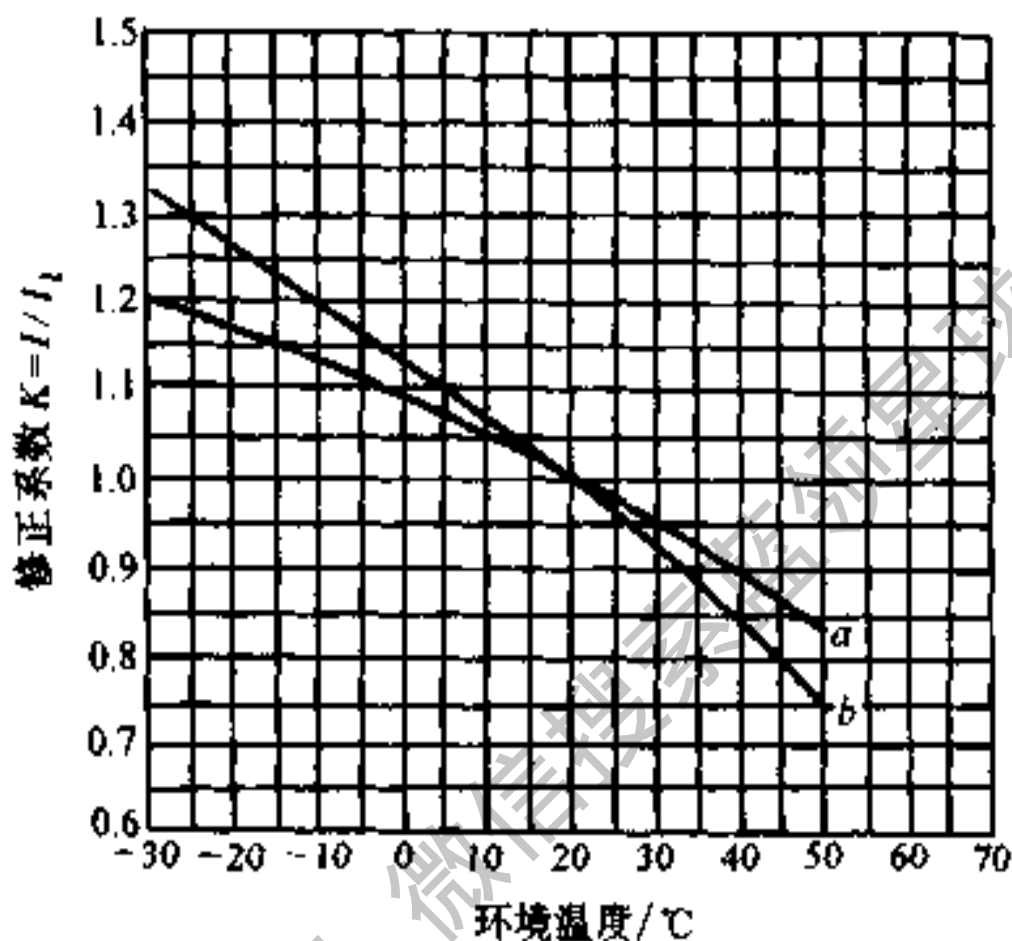


图 6-2 G 型导线保护开关修正曲线

a—G6~G40 多极 b—G6~G40 单极

⑥ 当环境温度为 20℃ 时，开关并列靠紧安装时，其所能通过的最大电流应按图 6-3 进行修正；

⑦ 控制白炽灯的选用曲线见图 6-4，额定电压为 220V，选用时要结合相应的保护特性；

⑧ 控制荧光灯的选用曲线见图 6-5，横轴 6-40 指 G 型开关，6-32 指 L 型开关。

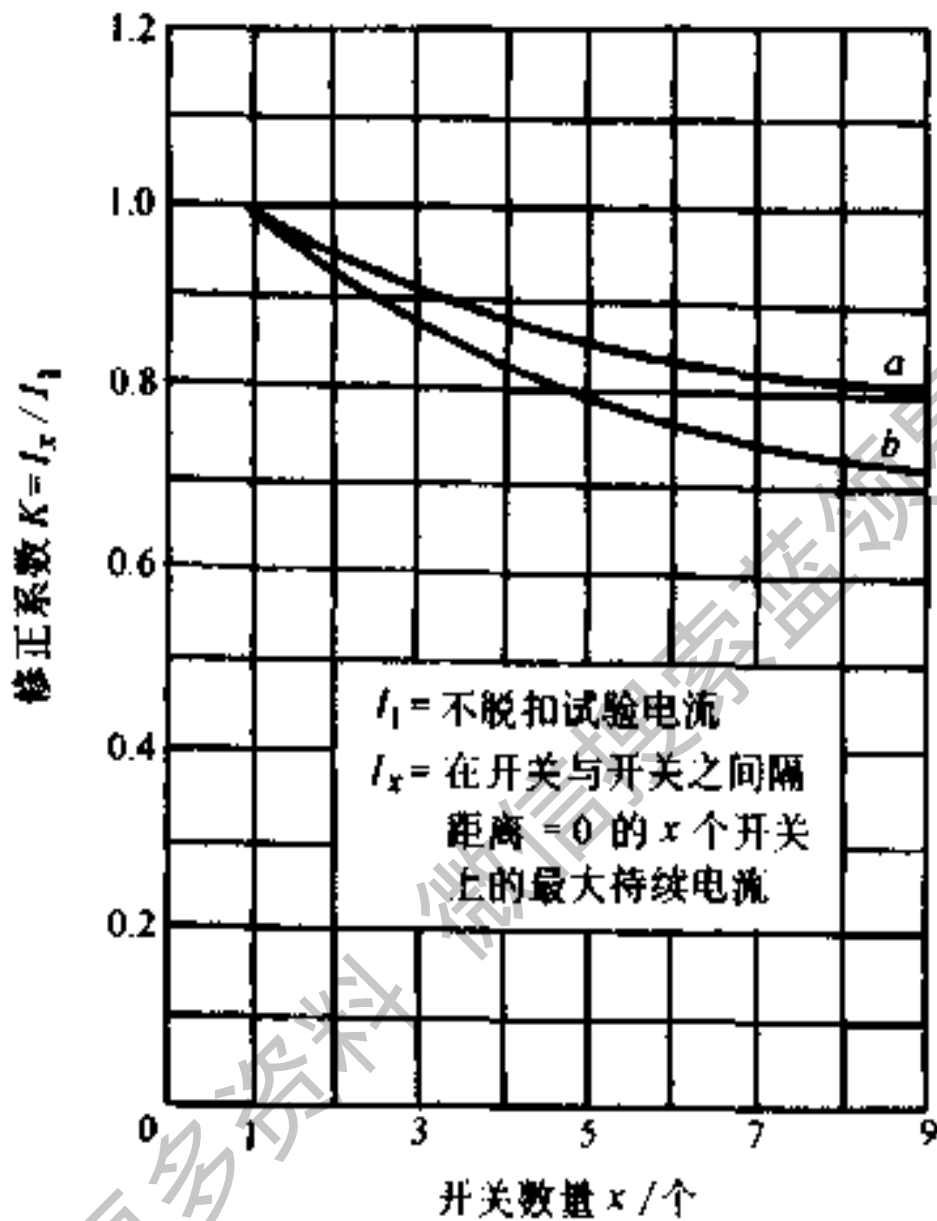


图 6-3 环境温度修正曲线

a—L6~L12 b—L16~L32; G6~G40

(2)  $S_{050}$ 型保护开关的技术指标:

- ① 极限分断能力  $I_f$  单极的, 交流 240/415V, 50、60Hz,  $\cos\varphi=0.8\sim0.9$  时,  $I_f \geq 3000\text{A}$ ; 多极的, 交流 415V, 50、60Hz,  $\cos\varphi=0.8\sim0.9$  时,  $I_f \geq 3000\text{A}$ 。

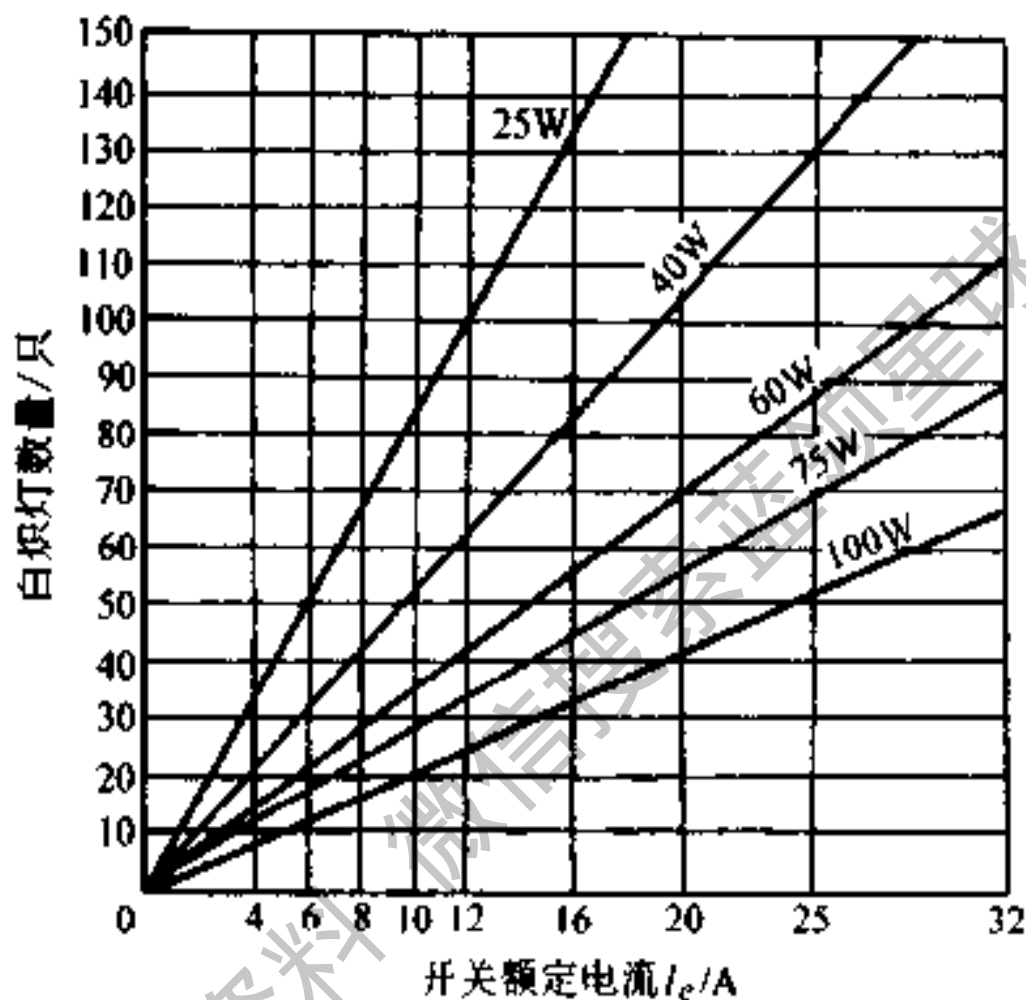


图 6-4 导线保护开关控制白炽灯  
选用曲线

- ② 操作频率按脱扣器额定电流  $I_e$  分,  $I_e \leq 20A$ , 240 次/h;  $I_e \geq 25A$ , 120 次/h。
- ③ 机械寿命 1000 次 (包括电寿命次数)。
- ④ 电寿命按脱扣器额定电流  $I_e$  分,  $I_e \leq 20A$ , 不小于 8000 次;  $I_e \geq 25A$ , 不小于 6000 次。

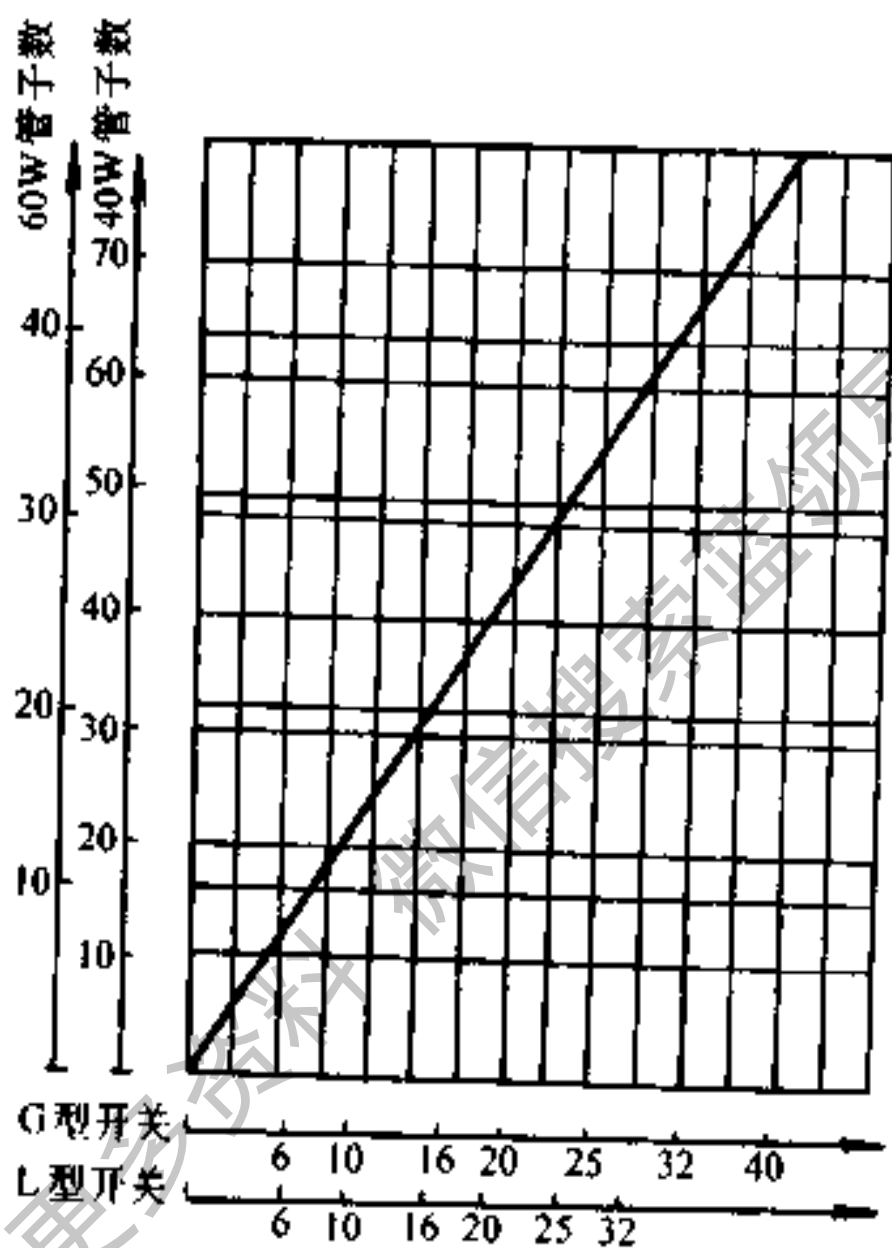


图 6-5 导线保护开关控制荧光灯  
选用曲线

- ⑤ 最大工作电压交流 440V，频率 50、60Hz。
- ⑥ 接线柱最大截面  $10\text{mm}^2$ 。
- ⑦ 保护特性 L 型见表 6-4，G 型见表 6-5。

表 6-4  $S_{630}$  导线保护开关 L 型保护特性

脱扣特性	脱扣器 额定 电流 /A	热 脱 扣			磁 脱 扣	
		脱扣器额定电流倍数				
L6 L10	6 10	$1.5I_r$	$1.9I_r$	$3.38I_r$	$3.6I_r$	$5.25I_r$
L16 L20 L25	16 20 25	$1.4I_r$	$1.75I_r$	$3.15I_r$	$3.35I_r$	$4.9I_r$
L32	32	$1.3I_r$	$1.6I_r$	$2.92I_r$	$3.12I_r$	$4.55I_r$
起始状态		冷态	热态	冷态	冷态	冷态
动作时间		$>1h$	$<1h$	$1s \leq t < 60s$	$\geq 0.1s$	$<0.1s$

注：动作时间： $1s \leq t < 120s$ 。

表 6-5  $S_{630}$  导线保护开关 G 型保护特性

脱扣特性	脱扣器 额定电流 /A	热 脱 扣		磁 脱 扣	
		脱扣器额定电流倍数			
G6~G40	6~40	$1.05I_r$	$1.35I_r$	$5I_r$	$10I_r$
起始状态		冷态	热态	冷态	热态
动作时间		$>1h$	$<1h$	$>0.5s$	$<0.5s$

## 7. 自动开关与熔断器的配合使用

自动开关和熔断器作为保护器件具有各自的优点，因此常常将两者串联起来使用。这样可达到既能自动操作又有较高分断能力的目的。当过载和短路电流较小时，保护由自动开关担任，而当有较大的短路电流时，保护则由熔断器担任，熔断器则作为自动开关的后备保护。

图 6-6 为自动开关和熔断器的配合图。图中  $I_1$  为交接电流，它相当于熔断器熔断特性上限与自动开关保护特性下限交点的电流值。当短路电流大于  $I_1$  时，必须保证熔断器在自动开关之前分断。为此，自动开关应有短延时特性。

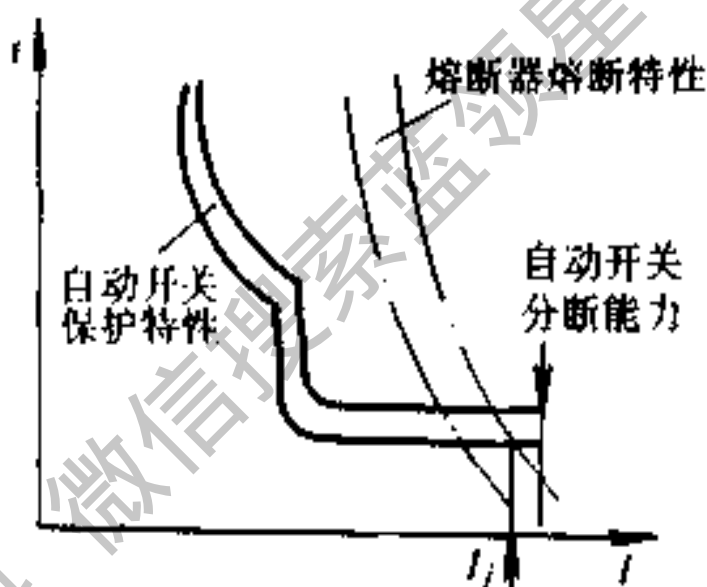


图 6-6 自动开关与  
熔断器特性配合

熔断器应尽可能装在自动开关的电源侧，以确保安全。

## 8. 自动开关损耗计算

自动开关具有过电流线圈，同时开关触头具有接触电阻，因此，当电流流过时，会产生功率损耗。其损耗功

率按下式计算

$$\Delta P = 3I^2(R_c + R_s), \Delta Q = 3I^2X$$

式中  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$ ——自动开关的有功 (W) 和无功损耗 (Var);

$I$ ——通过开关的电流 (A);

$R_c$ ——开关触头接触电阻 ( $\Omega$ ), 见表 6-6;

$R_s$ 、 $X$ ——电流线圈电阻和电抗 ( $\Omega$ ), 见表 6-7。

表 6-6 自动空气开关及开关触头的接触电阻

(单位:  $m\Omega$ )

额定电流 /A	50	70	100	140	200	400	600	1000	2000	3000
自动空气开关	1.3	1.0	0.75	0.65	0.6	0.4	0.25	—	—	—
刀开关	—	—	0.5	—	0.4	0.2	0.15	0.08	—	—
隔离开关	—	—	—	—	—	0.2	0.15	0.08	0.03	0.02

表 6-7 自动开关过电流线圈的阻抗

(单位:  $m\Omega$ )

线圈的额定电流 (A)	50	70	100	140	200	400	600
电阻 (65°C 时)	5.5	2.35	1.3	0.74	0.36	0.15	0.12
电抗	2.7	1.3	0.86	0.55	0.28	0.1	0.094



### 三、刀开关和转换开关的选用

#### 1. 刀开关及带熔断器式刀开关的选用

刀开关主要用作隔离电源,但不能切断故障电流,只能承受故障电流引起的电动力和热效应。刀开关的选择如下

##### (1) 按额定电压选择

$$U_r \geq U_g$$

式中  $U_r$ ——刀开关的额定电压 (V);

$U_g$ ——刀开关的工作电压,即线路额定工作电压 (V)。

##### (2) 按额定电流选择

$$I_r \geq I_g$$

式中  $I_r$ ——刀开关的额定电流 (A);

$I_g$ ——刀开关的工作电流,即为所控制负载的电流总和 (A),如果电路中有电动机,  $I_g$  应按电动机的起动电流来计算。

##### (3) 按动稳定和热稳定校验计算方法如下:

动稳定校验的目的是校验短路电流通过刀开关时,是否会因电动力而损坏。

$$i_{\max} \geq i_{ch}^{(3)}$$

式中  $i_{\max}$ ——电动稳定电流,即最大允许电流 (kA);

$i_{ch}^{(3)}$ ——三相短路冲击电流 (kA)。

热稳定校验的目的是短路电流通过时,是否使其过热而损坏,甚至烧毁。

$$I_t^2 t_k \geq I_{sc}^2 t_f$$

式中  $I_t$  —— 由制造厂给出的给定时间  $t_k$  秒内的热稳定电流 (kA);

$t_k$  —— 给定时间 (s), 通常是 1.5s 或 10s;

$I_{sc}$  —— 三相短路电流稳态有效值 (kA);

$t_f$  —— 假想时间, 根据短路延续时间  $t$  求得, 即

$$t = t_A + t_{th}$$

$t_A$  —— 故障元件的主要继电保护动作时间 (s);

$t_{th}$  —— 断路器的断路时间 (s)。

对于快速及中速动作的断路器  $t = 0.11 \sim 0.16s$ 。

对于低速动作的断路器  $t = 0.18 \sim 0.26s$ 。

HD、HS 系列低压刀开关主要技术数据见表 6-8。

表 6-8 低压刀开关主要技术数据

额定 电流 /A	分断能力 A		在交流 380V 和 60% 额 定电流 时刀开 关的电 寿命 (次)	电动稳定性 电流峰值		一秒钟 热稳定 性电流 /kA
	交流 380V $\cos\varphi=$ 0.7	直流 220V $T=0.01$		中央手 柄式 /kA	杠杆操 作式 /kA	
200	200	200	1000	20	30	10
400	400	400	1000	30	40	20
600	600	600	500	40	50	25
1000	1000	1000	500	50	60	30
1500	—	—	—	—	80	40

## 2. 转换开关的选用

转换开关可供几种负载或电源转换之用。它的选用较简单，只要根据电压、电流、控制功率、通断能力、电寿命等技术数据就可确定。

转换开关的电寿命可达几次。机械寿命，如 HZ<sub>5</sub> 系列，40A 以下等级为 100 万次，60A 为 10 万次，允许操作频率为 120 次/h。

## 四、熔断器的选用

熔断器通常作短路保护用，若作过载保护，则可靠性不高。熔断器的保护特性必须与被保护设备的过载特性有良好的配合。熔断器的额定电压应与相应的电网电压相匹配。

### 1. 熔断器熔体的选择

熔断器熔体电流的选择应按正常工作电流、起动尖峰电流确定，并按短路电流校验其动作灵敏性。

#### (1) 按正常工作电流选择

$$I_{er} \geq I_s$$

式中  $I_{er}$ ——熔体额定电流 (A)；

$I_s$ ——线路计算电流 (A)。

#### (2) 按起动尖峰电流选择，见后面。

#### (3) 按短路电流校验动作灵敏性

$$\frac{I_{dmin}}{I_{er}} \geq K_r$$

式中  $I_{dmin}$  —— 被保护线段最小短路电流(A), 在中性点接地系统中为单相接地短路电流  $I_d^{(1)}$ ; 在中性点不接地系统中为两相短路电流  $I_d^{(2)}$ ;

$K_r$  —— 熔断器动作系数, 一般为 4; 在 Q-1、Q-2、G-1 级爆炸危险场所取 5。

RT0 系列和 RM 系列熔断器主要技术数据见表 6-9 和表 6-10。

表 6-9 RT0 系列有填料熔断器主要技术数据

额定电压 /V	熔断器额定电流/A	熔体额定电流 /A	分断能力/kA
交流 380	50	5, 10, 15, 20, 30	交流 50 ( $\cos\varphi \leq 0.2$ )
	100	30, 40, 50, 60, 80, 100	
	200	80, 100, 120, 150, 200	
直流 440	400	150, 200, 250, 350, 400	直流 25 ( $T \leq 15\text{ms}$ )
	600	350, 400, 450, 500, 550, 600	
	1000	700, 800, 900, 1000	
交流 660	100	30, 60, 80, 100	( $\cos\varphi \leq 0.3$ )
	200	100, 120, 160, 200	
交流 1140	200	30, 60, 80, 100, 120, 160, 200	

表 6-10 无填料熔断器主要技术数据

型号	额定电压 /V	熔断器额定电流 /A	熔体电流/A	分断能力		
				kA	cosφ	
RM7	交流 220	15	2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 10, 15	1.5	0.8	
	交流 380	15	6, 10, 15	2	0.7	
		60	15, 20, 25, 30, 40, 50, 60	5	0.5	
		100	60, 80, 100	20	0.35	
		直流 440	200	100, 120, 150, 200	20	0.35
			400	200, 250, 300, 350, 400	20	0.35
			600	400, 450, 500, 550, 600	20	0.35
RM10	交流 380	15	6, 10, 15	1.5	0.8	
		60	15, 20, 25, 35, 45, 60	3.5	0.7	
		100	60, 80, 100	10	0.35	
		200	100, 125, 160, 200	10	0.35	
		350	200, 225, 260, 300, 350	10	0.35	
		600	350, 430, 500, 600	10	0.35	
		1000	600, 700, 850, 1000	12	0.35	

## 2. 各类设备的熔断器选用

### (1) 单台电动机回路熔体的选择

$$I_r \geq \frac{I_{qd}}{\alpha}$$

式中  $I_r$ ——熔体额定电流 (A);

$I_{qd}$ ——电动机起动电流 (A);

$\alpha$ ——计算系数, 决定于起动状况和熔断器特性, 见表 6-11 及表 6-12。

表 6-11 系数  $\alpha$  值

熔断器型号	熔体材料	熔体额定 电流/A	$\alpha$ 值	
			电动机轻 起动	电动机重 起动
RT0	铜	50 及以下	2.5	2
		60~200	3.5	3
		200 以上	4	3
RM10	锌	60 及以下	2.5	2
		80~200	3	2.5
		200 以上	3.5	3
RL1	铜、银	60 及以下	2.5	2
		80~100	3	2.5
RC1A	铅、铜	10~200	3	2.5

注: 1. 该表系根据熔断器特性曲线分析而得。

2. 轻载起动时间按 6~10s 考虑, 重载起动时间按 15~20s 考虑。

表 6-12 系数  $\alpha$  值

起动时间/s	$\alpha$ 值
3s 以下	2.86~4
3~8s	2~2.5
8s 或起动频繁或带反接制动者	1.67~2

## (2) 配电线路熔体的选择

$$I_r \geq \frac{I_{qd1} + I_{g(n-1)}}{\alpha}$$

式中  $I_{qd1}$  —— 线路中起动电流最大一台电动机的起动电流 (A);

$I_{g(n-1)}$  —— 除起动电流最大的一台电动机以外的线路工作电流 (A);

$\alpha$  —— 同前。

## (3) 照明线路熔体的选择

$$I_r \geq \frac{I_k}{\alpha_m}$$

式中  $\alpha_m$  —— 计算系数, 决定于电光源起动状况和熔断器特性, 见表 6-13。

## (4) 变压器高低压熔体的选择

① 容量为 160kVA 的变压器, 其高压熔体按 2~3 倍额定电流选用; 容量为 160kVA 以上的变压器, 高压熔体按 1.5~2 倍额定电流选用。

表 6-13 计算系数  $\alpha_m$  值

熔断器 型号	熔体 材料	熔体额 定电流 /A	$\alpha_m$ 值		
			白炽灯、荧 光灯、卤钨 灯、金属卤 化物灯	高压汞灯	高压 钠灯
RL1	铜、银	$\leq 60$	1	0.59~0.77	0.67
RC1A	铅、铜	$\leq 60$	1	0.67~1	0.91

② 变压器低压熔体可按其额定电流或过负荷 20% 选用。

常用保护三相电力变压器的熔体选择见表 6-14。

表 6-14 变压器高低压熔体选择表

变压器 容量 /kVA	熔体额定电流选择值/A							
	低压侧电压/V				高压侧电压/kV			
	120	220	380	500	3	6	10	35
5	25	15	10	—	3	2	—	—
10	50	25	15	—	5	3	2	—
20	100	50	30	25	10	5	3	—
30	150	80	50	30	15	7.5	5	—
50	250	125	80	50	20	10	7.5	3
63	300	150	100	80	20	10	7.5	3
80	400	200	125	100	30	15	10	5



(续)

变压器 容量 /kVA	熔体额定电流选择值/A							
	低压侧电压/V				高压侧电压/kV			
	120	220	380	500	3	6	10	35
100	500	250	150	125	40	20	15	5
125	2×300	300	200	150	50	30	20	7.5
160	2×400	400	250	175	75	40	20	7.5
200	2×500	500	300	250	75	40	30	10
250	3×400	2×350	400	300	75	40	30	10
315	3×500	3×300	500	350	100	50	40	15
400	4×400	3×400	2×300	500	100	50	40	15
500	—	—	—	—	150	75	50	20
630	—	—	—	—	150	75	50	20
800	—	—	—	—	200	100	75	30
1000	—	—	—	—	300	150	100	30
1250	—	—	—	—	300	150	100	30
1600	—	—	—	—	400	200	150	40

## (5) 静电电容器组熔体的选择

$$I_{cc} \geq (1.5 \sim 2)I_n$$

式中  $I_{cc}$ ——电容器组的额定电流 (A)。

当熔体过细时还需考虑机械强度的要求，一般不低于 5A。

## (6) 变电站直流系统的各级熔体的选择

熔断器的额定电压应与相应的回路的额定电压相匹

配。其熔体选择如下：

① 直流电动机回路

$$I_{cr} = I_{qd} / K$$

式中  $I_{qd}$ ——直流电动机起动电流 (A)，一般为 2.5~3 倍额定电流；

$K$ ——配合系数，一般取 3。

② 控制信号回路

$$I_{cr} = I_{max} / K$$

式中  $I_{max}$ ——最大负载电流 (A)；

$K$ ——配合系数，一般取 1.5。

直流 220V 时，控制、信号回路熔断器配置，见表 6-15。

表 6-15 熔断器配置表

名称	熔断器型式	熔断器额定电流 /A		用途
		熔管	熔丝	
控制回路	R1	10	6	油开关
控制回路	RM10	15	5	空气开关
信号回路	R1	10	6	
有公用保护保险	RM10	25	15	
中央信号(预告)回路	RM10	25	15	
公用设备回路	R1	10	10	
隔离刀闸闭锁回路	R1	10	4	适用屋内配电装置
	RM10	15	6	适用屋外配电装置
母线隔离刀闸闭锁回路	R1	10	6	适用屋内装置
	RM10	15	6	适用屋外装置

### ③ 开关合闸回路

按开关额定合闸电流的 0.25~0.3 倍来选择。其上一级合闸总电源的保险，应按两个开关同时动作合闸来考虑保险的大小。

### 3. 快速熔断器的选用

快速熔断器主要用作硅整流元件、可控硅元件及成套装置内部过电流保护。

#### (1) 用于小容量变流装置

$$I_{cr} = 1.57I_F$$

式中  $I_{cr}$ ——快速熔断器额定电流有效值 (A)；

$I_F$ ——可控硅正向平均电流 (A)。

经验表明，当  $I_F \leq 2000\text{A}$ ，且系统短路电流小于 4kA 时，按上式选用能达到可靠保护。

#### (2) 用于大容量变流装置

大容量变流装置，桥臂由几个并联支路组成，每一支路由硅元件与快速熔断器组成。当一臂中有元件损坏产生短路时，与该元件串联的熔断器应迅速熔断切除故障，如要保护其它臂硅元件，应满足下式要求。

$$m \geq \frac{1}{K_d} \sqrt{\frac{A_r}{A_K}}$$

式中  $m$ ——并联支路数；

$K_d$ ——动态均流系数，一般取 0.5~0.6；

$A_r$ ——熔断器最大熔断  $\int i^2 dt (A^2 \cdot s)$  ;

$A_K$ ——硅元件浪涌  $\int i^2 dt (A^2 \cdot s)$  。

RS0, RS3 系列快速熔断器主要技术数据见表 6-16。

表 6-16 快速熔断器主要技术数据

系列型号	额定电压 /V	熔断器额定电流 /A	熔体额定电流 /A	极限分断能力 /kA	$\cos\phi$
RS0	500	50	30, 50	50	0.3
		100	50, 80, 100		
		200	150, 200		
		350	320		
		500	400, 480		
	750	350	320, 350		
RS3	500	50	10, 15, 20, 30, 40, 50	50	0.3
		100	80, 100		
		250	150, 200		
		320	250, 300, 320		
	750	200	150, 200		
		300	200, 300		
		350	320, 350		

## 五、熔断器的级间配合

### 1. 熔断器级间配合计算

为满足选择性保护的要求，上下级熔断器应根据其保护特性曲线上的数据及其实际误差来选择。若两熔断时间的匹配裕度以 10% 来考虑，则应满足下式要求

$$t_1 \geq \left( \frac{1.05 + \delta\%}{0.95 - \delta\%} \right) t_2$$

式中  $t_1$  —— 对应于故障电流值，从特性曲线上查得的上一级熔断器的熔断时间；

$t_2$  —— 对应于故障电流值，从特性曲线上查得的下一级熔断器的熔断时间；

$\delta\%$  —— 熔断器熔断时间误差，见产品目录，当没有给出时，一般可按 50% 考虑。

### 2. 熔断器级间配合表

经过对熔断器保护特性曲线的分析比较，并考虑熔断时间的误差，绘制出熔断器级间配合表，见表 6-17。按表选择熔断器，即能满足选择性保护的要求。例如，在短路电流为 2kA 时，熔体电流 40A 的上一级至少应为 80A，50A 的上一级至少应为 100A 等等。

### 3. 几种常用的保护特性曲线

(1) RT0 系列 380V 保护特性曲线，如图 6-7 所示。

(2) RM7 系列 380V 保护特性曲线，如图 6-8 所示。

(3) RS0 系列 500V 保护特性曲线，如图 6-9 所示。

(4) RS3 系列 500V 保护特性曲线, 如图 6-10 所示。

表 6-17 熔断器级间配合表

熔断器 额定电 流/A	熔体 额定 电流 /A	短路电流 (周期分量有效值) /kA				
		1.0	2.0	4.0	6.0	10-25
100/30	30					
100/40	40					
100/50	50					
100/60	60					
100/80	80					
100/100	100					
200/120	120					
200/150	150					
200/200	200					
400/250	250					
400/300	300					
100/350	350					
400/400	400					
600/450	450					
600/500	500					
600/550	550					
600/600	600					

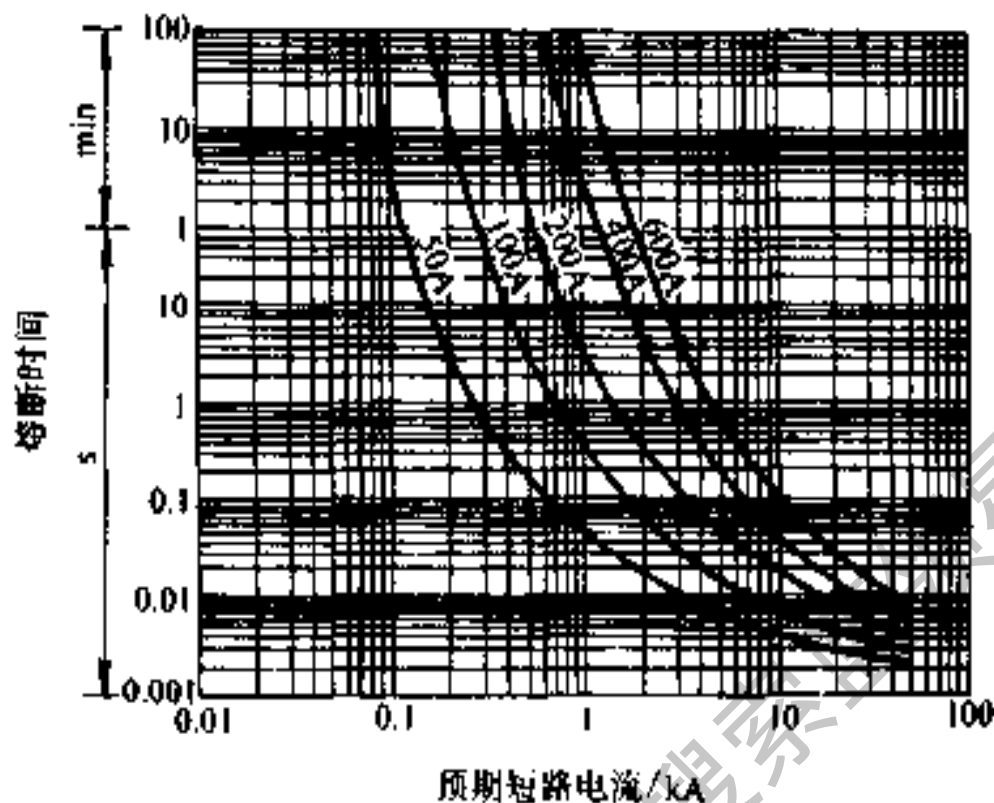


图 6-7 RT0 系列 380V 保护特性曲线

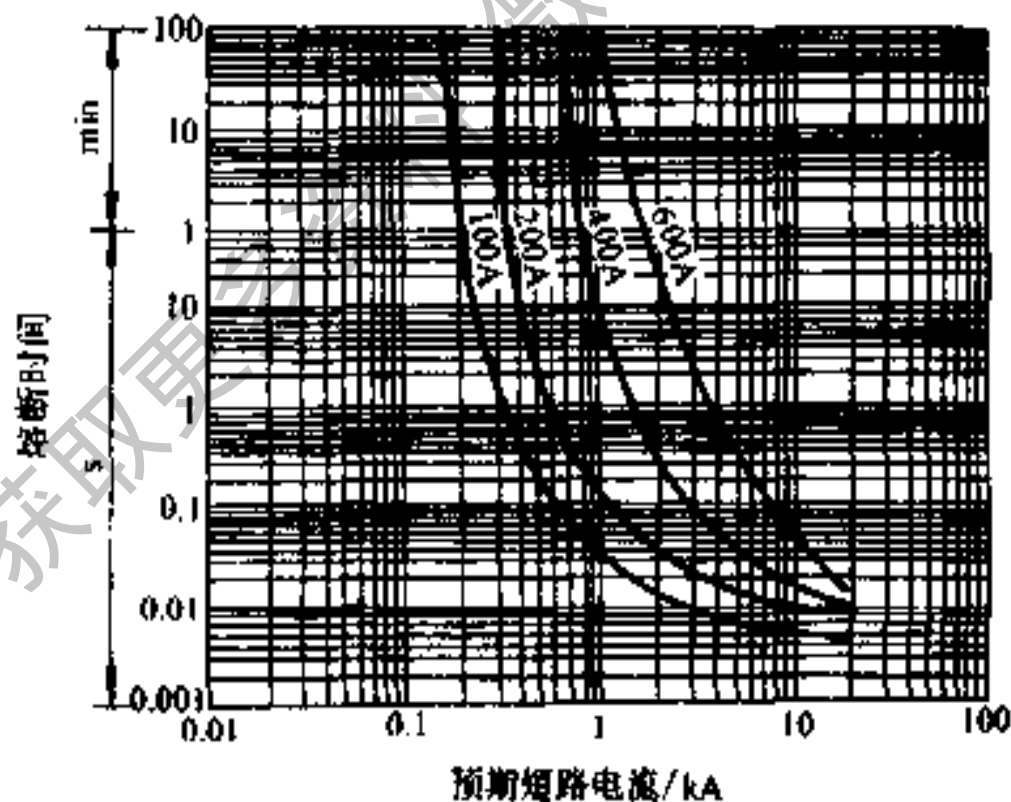


图 6-8 RM7 系列 380V 保护特性曲线

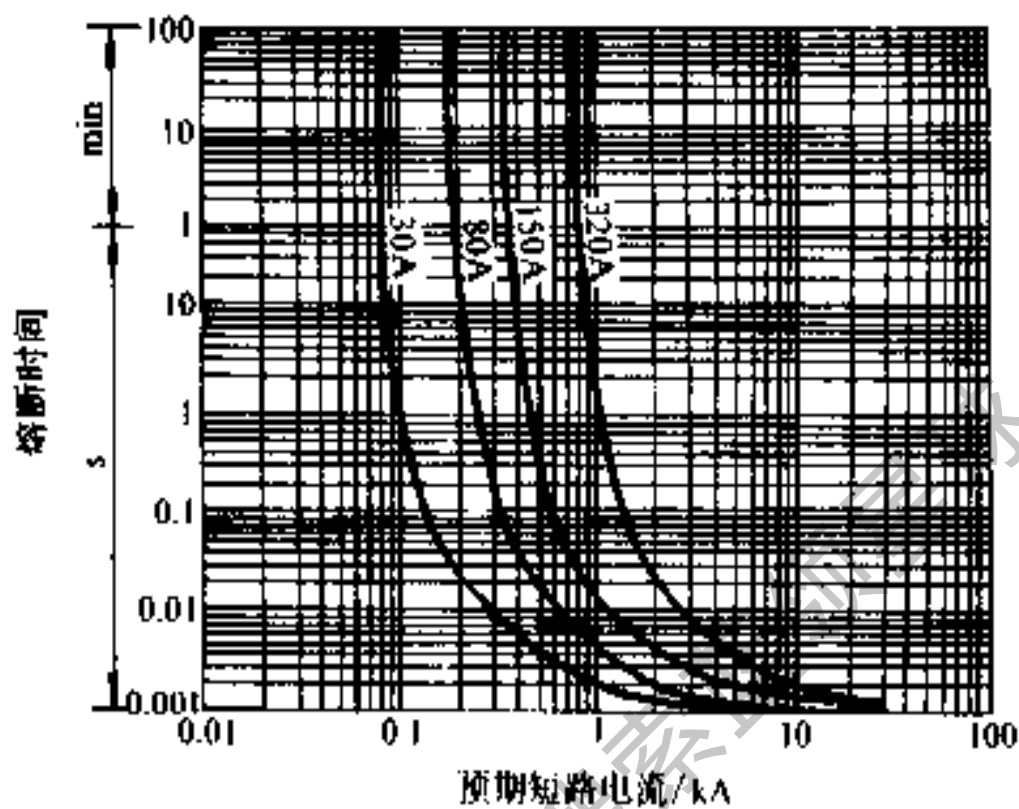


图 6-9 RS0 系列 550V 保护特性曲线

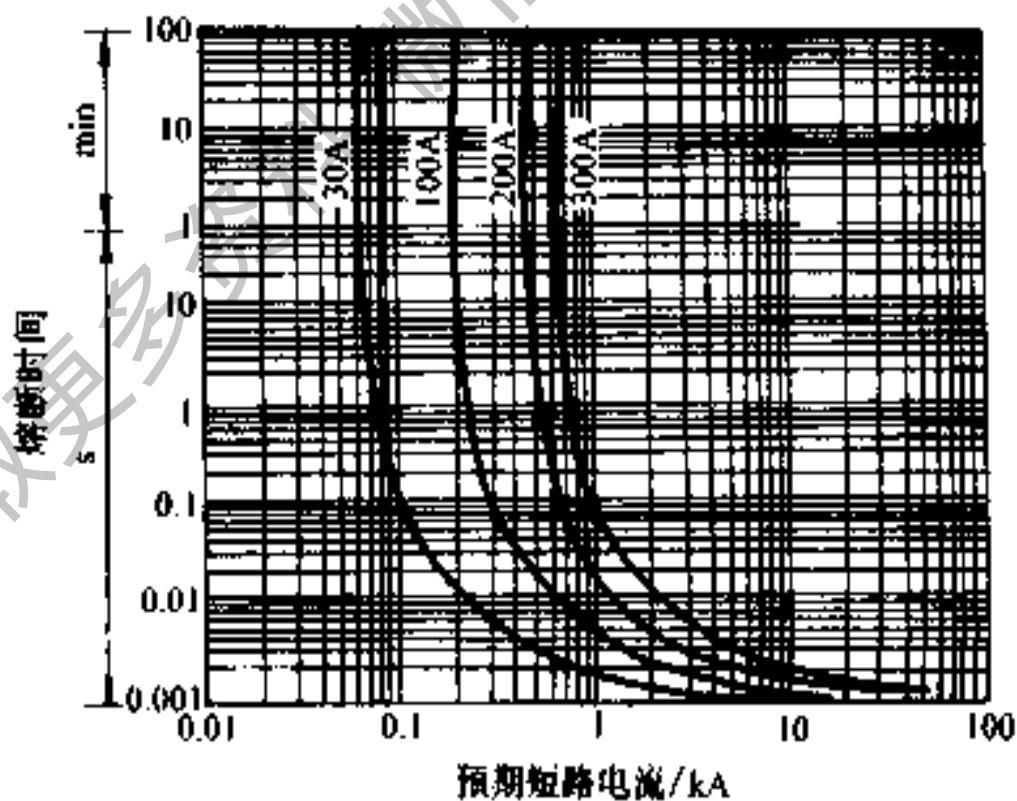


图 6-10 RS3 系列 550V 保护特性曲线



## 第二节 热继电器的选用与计算

### 一、热继电器的选用

热继电器主要用作过载保护，最常用于交流电动机的过载保护，应根据电动机的工作情况，起动及负载性质来选用。

1. 长期工作或间断长期工作电动机保护用热继电器的选用。

#### (1) 按电动机的起动时间选择

一般热继电器在  $6I_L$  下的可返回时间与动作时间有如下关系 ( $I_L$  为热元件的额定电流)：

$$t_r = (0.5 \sim 0.7)t_d$$

式中  $t_r$ ——热继电器在  $6I_L$  下的可返回时间 (s)；

$t_d$ ——热继电器在  $6I_L$  下的动作时间 (s)。

按电动机的起动时间，选取  $6I_L$  下具有相应可返回时间的热继电器，见表 6-18。

#### (2) 按电动机的额定电流选择

$$I_c = (0.95 \sim 1.05)I_{ed}$$

式中  $I_c$ ——热继电器整定电流 (A)；

$I_{ed}$ ——电动机额定电流 (A)。

#### (3) 按断相保护要求选择

对于星形接法的电动机，采用三极热继电器即可；对于三角形接法的电动机，应采用带断相运转保护装置的

表 6-18 三极动作特性

序 号	整定电流	动 作 时 间		试验条件
1	$1.0I_r$	不动作		冷态
2	$1.2I_r$	$<20\text{min}$		热态
3	$1.5I_r$	$<3\text{min}$		热态
4	$6.0I_r$	可返回时间 $t_r$	$\geq 3\text{s}$ $\geq 5\text{s}$ $\geq 8\text{s}$	冷态
5	三极热继电器如二极通电,则本表第 2 栏规定的整定电流允许升高 10%			

注:当试验地点海拔高度 $h \leq 1000\text{m}$ 时,试验的周围空气温度为 $40\text{C}$ 。

热继电器。

热继电器特性见表 6-19 和表 6-20。

电动机在运行中缺相,可能是电动机输入端直接断相(如熔体熔断),或者是三角形接法的电动机内部断相

表 6-19 热继电器控制触头的通断能力

触头种类		常闭触头		常开触头	
工作电压/V		220	380	220	380
额定电流/A		5		1.5	
通断能力 /A	分断 $\cos\varphi=0.2$	3	2		
	接通 $\cos\varphi=0.2$			5	5

(如绕组内部开路或是三角起动器的某触头接触不良引起), 如图 6-11。

表 6-20 断相保护动作特性

序号	整定电流		动作时间	试验条件
	任意 2 极	第 3 极		
1	$1.0I_r$	$0.9I_r$	不动作	冷 态
2	$1.15I_r$	0	$<20\text{min}$	热 态 (以序 1 电流加热稳定后开始)

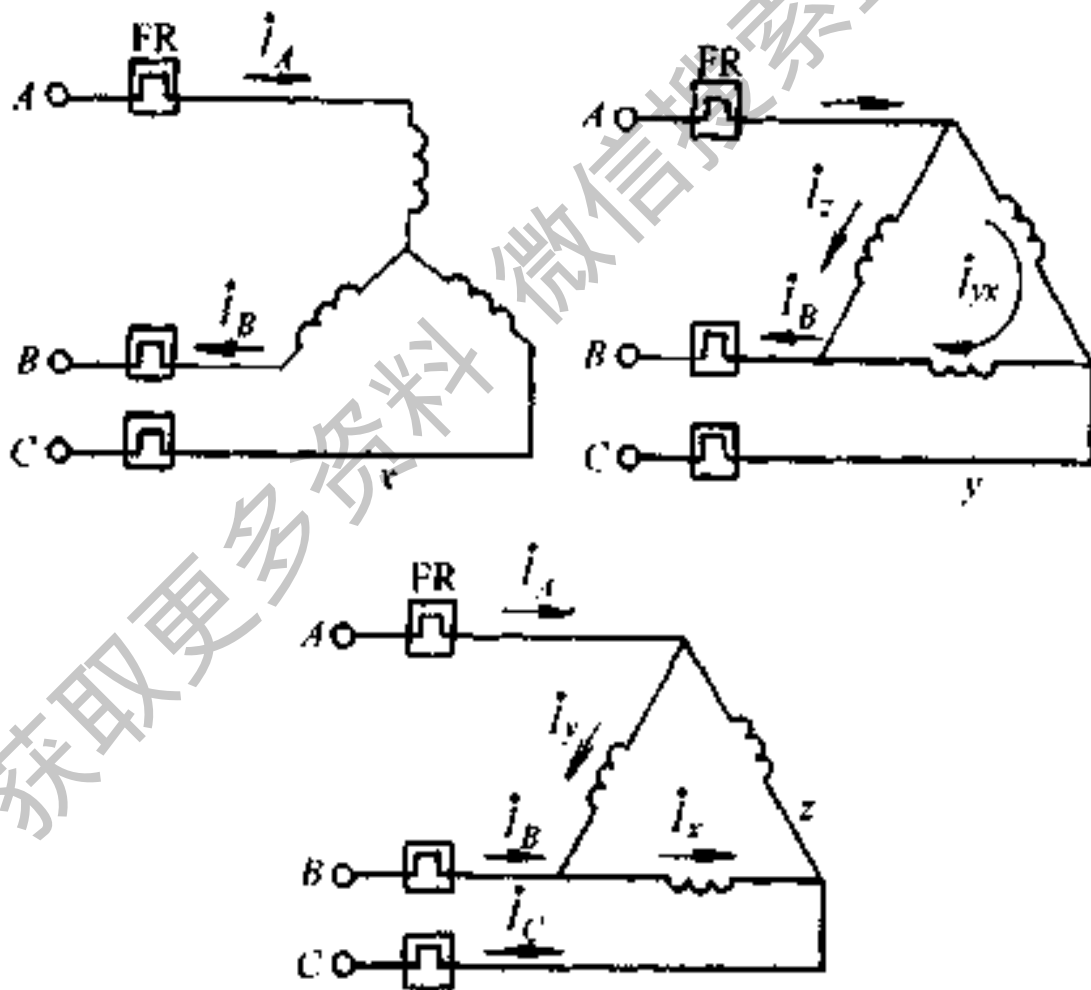


图 6-11 各种缺相情况

表 6-21 对于各种缺相情况热继电器保护能力

序 号	电动机 接线 方式	负 载 率 (%)	动作条件	线电流 的最大 值(对 额定线 电流的 百分数) (%)	电动机 绕组电 流的最 大值(对 额定相 电流的 百分数) (%)	流过热继电器的 电流(对整定电 流的百分数) (%)		热继电器能否动作		
						2 元件	3 元件	2 元件	3 元件	带断相 保护器
1	$\gamma, \Delta$	100	正常三相	100	100	100	100	不动作	不动作	不动作
2	$\gamma$	100	$x$ 点断路	173	173	173	173	能	能	能
3	$\Delta$	100	$y$ 点断路	173	200	173	173	能	能	能
4	$\Delta$	100	$z$ 点断路	150	150	87	150	不	能	能
5	$\Delta$	80	$z$ 点断路	120	120	69	120	不	尚	能
6	$\Delta$	85	$y$ 点断路	147	170	147	147	能	能	能
7	$\Delta$	78	$y$ 点断路	135	156	135	135	能	能	能
8	$\Delta$	66	$y$ 点断路	114	132	114	114	不	不	不

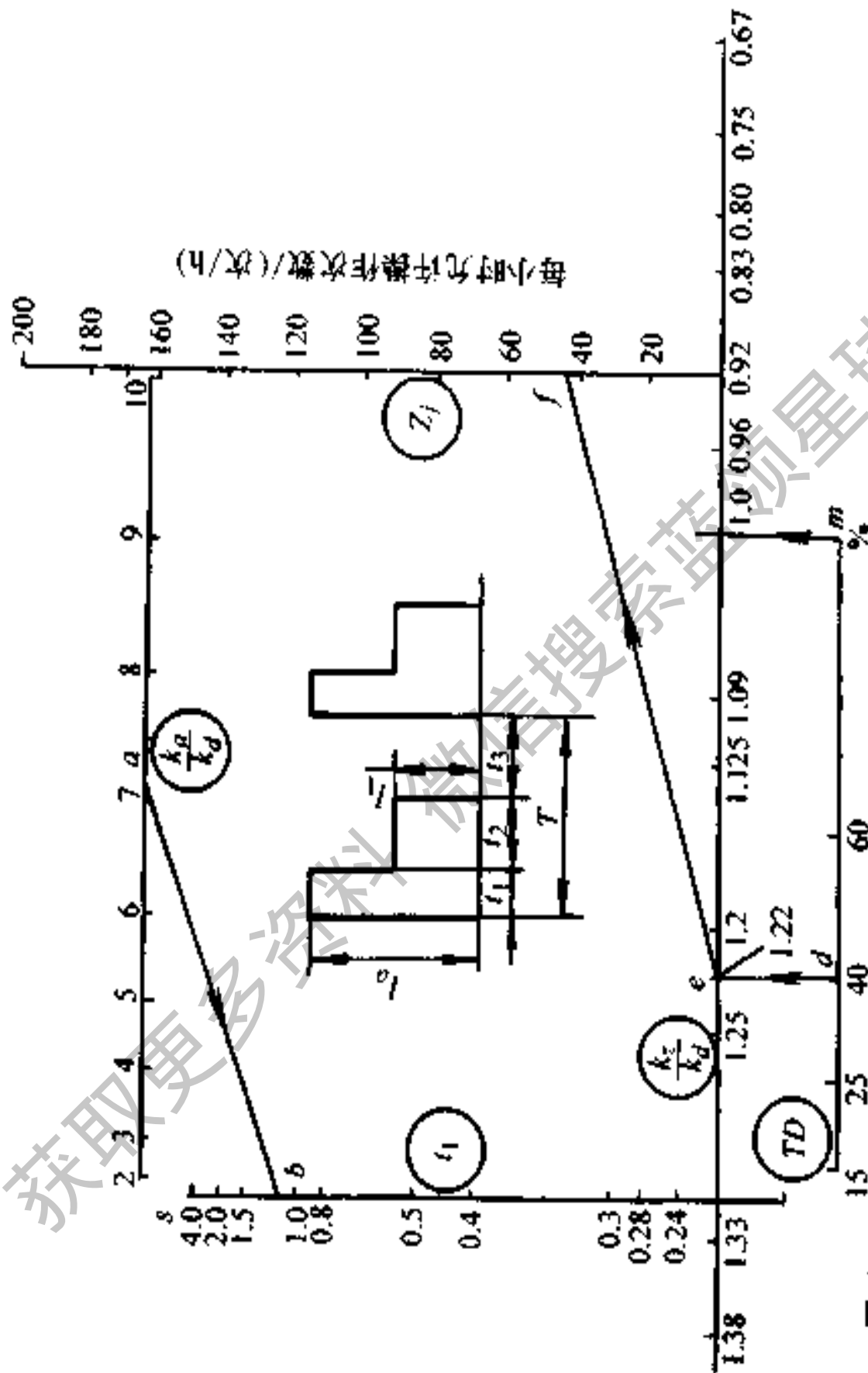


图 6-12 双金属片式热继电器反复短时工作每小时允许操作次数选用图

缺相时流过电动机的电流、热继电器中的电流以及热继电器保护情况，见表 6-21。

## 2. 反复短时工作电动机保护用热继电器的选用

根据电动机的起动参数和通电持续率按图 6-12 查得热继电器用于该电动机的每小时允许操作次数。图中所选用符号意义见表 6-22。

该图所求的每小时允许操作次数仅用于 JR0 系列同类参数的双金属片式热继电器。要求操作频率较高时，可选用带速饱和电流互感器的热继电器。

表 6-22 热继电器反复短时工作选用图符号表

序号	符号	意义	计算式
1	$k$	选用系数	0.8~0.9
2	$k_q$	电动机起动电流倍数	$k_q = I_q / I_{ed}$
3	$k_d$	电动机负载电流倍数	$k_d = I_1 / I_{ed}$
4	$t_1$	电动机起动时间/s	
5	$I_{ed}$	电动机额定电流/A	
6	$TD$	通电持续率(%)	$TD = \frac{t_1 + t_2}{t_1} \times 100\%$
7	$I_z$	热继电器整定电流/A	
8	$k_z$	热继电器整定电流倍数	$k_z = I_z / I_{ed}$
9	$I_q$	电动机起动电流/A	
10	$I_1$	电动机负载电流/A	

注：选用图中取  $k=0.9$ 。

## 二、热继电器主要技术参数

1. 控制触头通断能力，见表 6-19。

2. 动作特性，见表 6-18 和表 6-20。
3. 温度补偿范围，一般为  $40 \sim -25^{\circ}\text{C}$ 。
4. 热元件的热稳定性，热元件额定电流大于 100A 时通以 8 倍整定电流，小于 100A 时通以 10 倍整定电流，热继电器应能可靠动作 5 次而不损坏。
5. 控制触头寿命，一般用途的热继电器为 1000 次。
6. 复位时间，自动复位时间不大于 5min，手动复位时间不大于 2min。
7. 电流调节范围约 66%~100% 左右，最大为 50%~100%。

### 三、热继电器双金属片的自由行程和有效行程的计算

#### 1. 双金属片的自由行程计算

如图 6-13 所示，当没有外力作用时，可按下式计算一端固定的双金属片的自由弯曲行程  $\Delta f_i$ ：

$$\Delta f_i = \frac{K(t - t_0)L^2}{\delta}$$

偏转角  $\varphi_i$

$$\varphi_i = \frac{2K(t - t_0)L}{\delta}$$

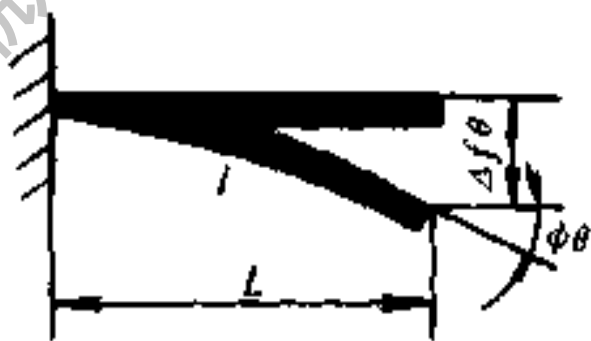


图 6-13 一端固定的双金属片的弯曲

式中  $K$ ——比弯曲 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ );

$L$ ——双金属片的有效长度 (mm);

$l$ ——双金属片的实际长度 (mm);

$\delta$ ——双金属片的厚度 (mm);

$t$ ——双金属片动作温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_0$ ——双金属片的周围环境温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

双金属片动作温度不应超过其线性温度范围的上限温度,如 5J11、5J18、5J101 型不应超过  $200^{\circ}\text{C}$ 。

双金属片的行程,一般在最小刻度电流位置时,尽可能不小于  $0.8\sim 1\text{mm}$ 。

## 2. 双金属片的有效行程计算:

双金属片要与电阻元件夹持在一起组成热元件,这时双金属片的实际行程(即有效行程)  $\Delta f_{\text{有}}$  为

$$\Delta f_{\text{有}} = \eta \cdot \Delta f$$

式中 双金属片热元件的弯曲系数  $\eta$ , 复合式可取  $0.7\sim 0.9$ 。

## 第三节 接触器的选用及计算

### 一、交流接触器的选用

接触器是电力拖动和自动控制系统中应用最广的电器。交流接触器按使用类别,工作电压、容量、工作制及操作频率、电寿命等进行选用。

1. 按使用类别选用:交流接触器可分为轻任务(—



般任务)和重任务两类。轻任务接触器如CJ8、CJ10等系列;重任务接触器如CJ12、CJ15、CJ20系列。交流接触器的使用类别如下

(1) AC-1系列:无感或微感负载、电阻炉、钨丝灯;

(2) AC-2系列:绕线型电动机的起动、反接制动与反向、密接通断;

(3) AC-3系列:笼型电动机的起动、运转中分断;

(4) AC-4系列:笼型电动机的起动、反接制动与反向、密接通断;

交流接触器不同使用类别的操作条件,见表6-23。

用于AC-1类负载时,所选接触器的额定电流与负载电流相近。

用于AC-2、AC-3类负载时,可选用CJ8、CJ10、CJ20系列。

用于AC-2类负载时,如电动机功率大于20kW,可选用CJ12、CJ15、CJ20系列,其额定电流和负载电流相近。

用于AC-4类负载时,可选用CJ12、CJ15、CJ20系列,按适当降低接触器的控制容量来选用。

代替产品CJ20系列交流接触器的性能及技术数据见表6-24。

表 6-23 交流接触器不同使用类别的操作条件

验证各使用类别额定接通与分断能力的接通与断开条件

使用类别	额定工作电流 /A	接 通			断 开				
		$I/I_c$	$U/U_c$	$\cos\varphi \pm 0.05$	$I_c/I_c$	$U_c/U_c$	$\cos\varphi \pm 0.05$	$f^1$ (kHz)	$\gamma^2$
AC-1	全部值	1.5	1.1	0.95	1.5	1.1	0.95		
		4	1.1	0.65	4	1.1	0.65		
AC-3	$I_c \leq 17$	10	1.1	0.65	8	1.1	0.65		
		10	1.1	0.35	8	1.1	0.35		
		8 <sup>1)</sup>	1.1	0.35	6 <sup>1)</sup>	1.1	0.35	$2000 \times I_c^{0.3}$	1.1
AC-4	$17 < I_c \leq 100$	12	1.1	0.65	10	1.1	0.65	$\times U_c^{0.3}$	
		12	1.1	0.35	10	1.1	0.35		
		10 <sup>3)</sup>	1.1	0.35	8 <sup>1)</sup>	1.1	0.35		

(续)

各使用类别电寿命的接通与断开条件

使用类别	额定工作电流 /A	接 通			断 开			$\gamma$
		$I/I_c$	$U/U_c$	$\cos\varphi$	$I_c/I_c$	$U_c/U_c$	$\cos\varphi$	
AC-1	全部值	1	1	0.95	1	1	0.95	
AC-2	全部值	2.5	1	0.65	2.5	1	0.65	
AC-3	$I_c \leq 17$	6	1	0.65	1	0.17	0.65	$2000 \times I_c^{0.2}$ $\times U_c^{-0.8}$
	$I_c > 17$	6	1	0.35	1	0.17	0.35	
AC-4	$I_c \leq 17$	6	1	0.65	6	1	0.65	1.1
	$I_c > 17$	6	1	0.35	6	1	0.35	

注:  $I_c$ ——额定工作电流;  $U_c$ ——接通前电压;  $U_c$ ——额定工作电压;  $U_c$ ——恢复电压;

$I_c$ ——接通电流;  $I_c$ ——分断电流。

①  $f$ 指暂态恢复电压的振荡频率; ②  $\gamma$  过振荡系数, 其误差为  $\pm 0.05$ ; ③  $I$  或  $I_c$  的最小值为 1000A; ④  $I_c$  的最小值为 800A; ⑤  $I$  的最小值为 1200A。

表 6-24 CJ20 系列交流接触器  
可控笼型异步电动机功率

接触器型号	额定电流 /A	可控笼型异步电动机最大功率/kW				
		220V	380V	500V	600V	备注
CJ20-5	5	1.2	2.2	2.2	—	只限额定电压下使用
CJ20-10	10	2.2	4.0	4.0	—	
CJ20-20	20	5.5	10	10	—	
CJ20-40	40	11	20	20	20	
CJ20-60	60	17	30	30	30	
CJ20-100	100	29	50	50	—	
CJ20-150	150	47	75	75	—	

2. 按降低接触容量选用：对于动作频繁且重载工作的接触器，如行车、机床用接触器，可降容使用，以免接触器触头损坏。这时接触器的工作电流可按以下经验公式计算

$$I_r = \frac{P_r}{1.3K_r U_r} \times 10^3$$

式中  $I_r$ ——接触器工作电流 (A)；

$P_r$ ——被控电动机额定功率 (kW)；

$U_r$ ——被控电动机额定电压 (V)；

$K_r$ ——交流接触器负载系数，见图 6-14。其值取决于接触器分断不同电流时的操作频率。

如果按上式计算的结果大于接触器额定值的 20%

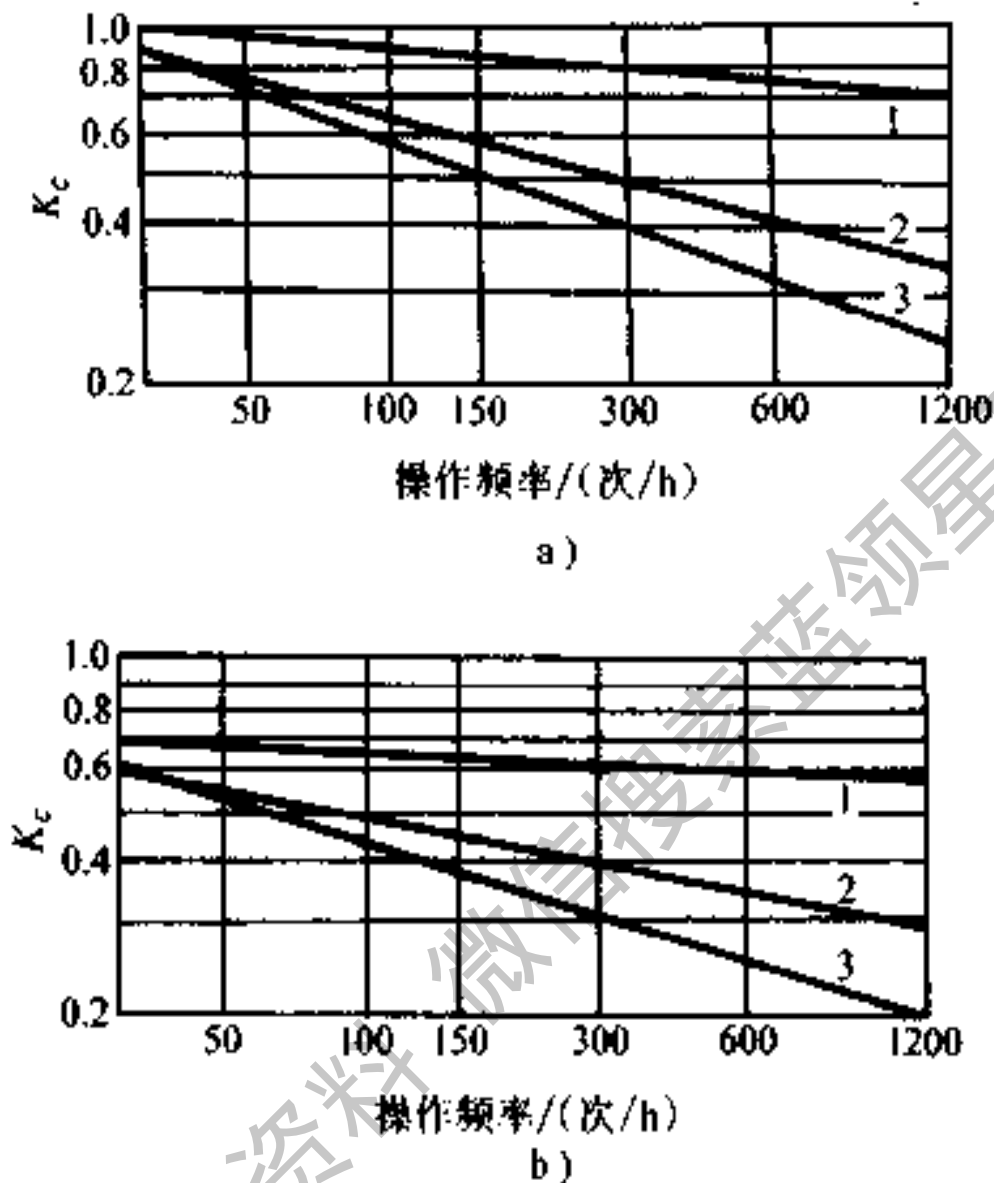


图 6-14 分断不同电流时不同操作频率下的接触器负荷系数

a) 额定电压为 220~380V b) 额定电压为 500V

以上时，应选高一级的接触器。

图 6-14 中，曲线 1 是在额定转速或接近额定转速时分断情况下的  $K_c$  与操作频率的关系；曲线 2 是有 10% 分断起动电流的情况；曲线 3 是有 50% 分断起动电流的情况。

### 3. 降容使用对电寿命的影响

接触器降容使用后，电寿命提高可由图 6-15 得：

$$k\% = \frac{I_s}{I_r} \times 100$$

式中  $I_s$ ——接触器实际分断的电流；

$I_r$ ——接触器的额定电流。

图中  $V$  表示电寿命提高的倍数。

### 4. 工作制与操作

频率对电寿命的影响。对于长期工作制，宜选用银或银基合金触头的接触器。当选用铜触头的接触器时，则应降容一半以下使用。

对于反复短时工作制，接触器的额定工作电流应不小于等效发热电流。

反复短时工作制负荷图如图 6-16。

等效发热电流  $I_{dr}$

可按下式计算：

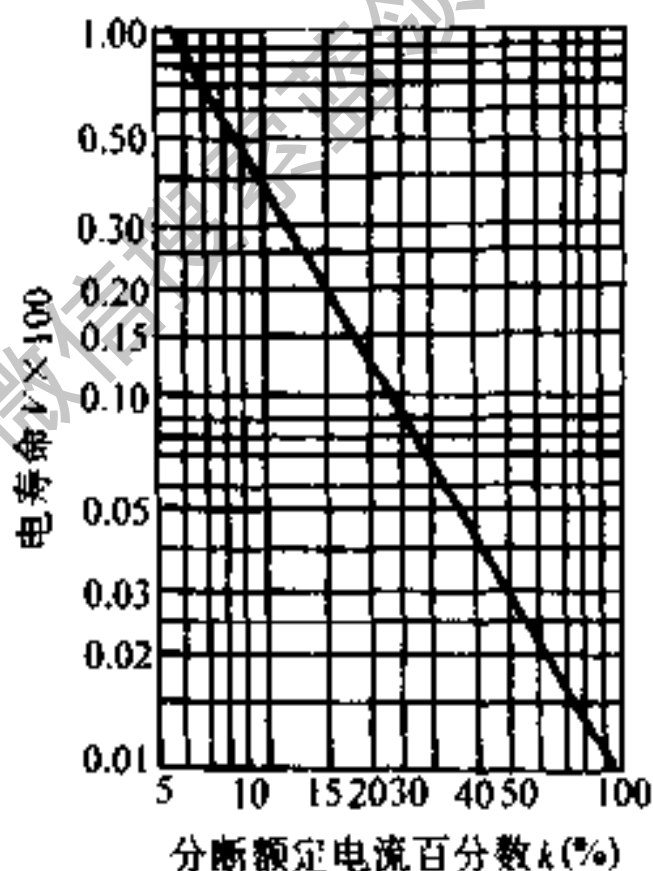


图 6-15 分断额定电流百分数与电寿命的关系

$$I_{da} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i^2 dt} = \sqrt{\frac{I_q^2 t_q + I_e^2 t_e}{T}}$$

- 式中  $I_q$ ——电动机起动电流 (A);  
 $I_e$ ——电动机额定电流 (A);  
 $T$ ——每一操作循环的全周期 (s);  
 $t_q$ ——电动机起动时间 (s);  
 $t_e$ ——电动机额定转速下的工作时间 (s),  $t_e = T \times TD - t_q$ ;  $TD$  为通电持续率 (%),  $TD = \frac{T_e}{T} \times 100\%$ ,  $T_e$  为触头闭合通电时间 (s)。

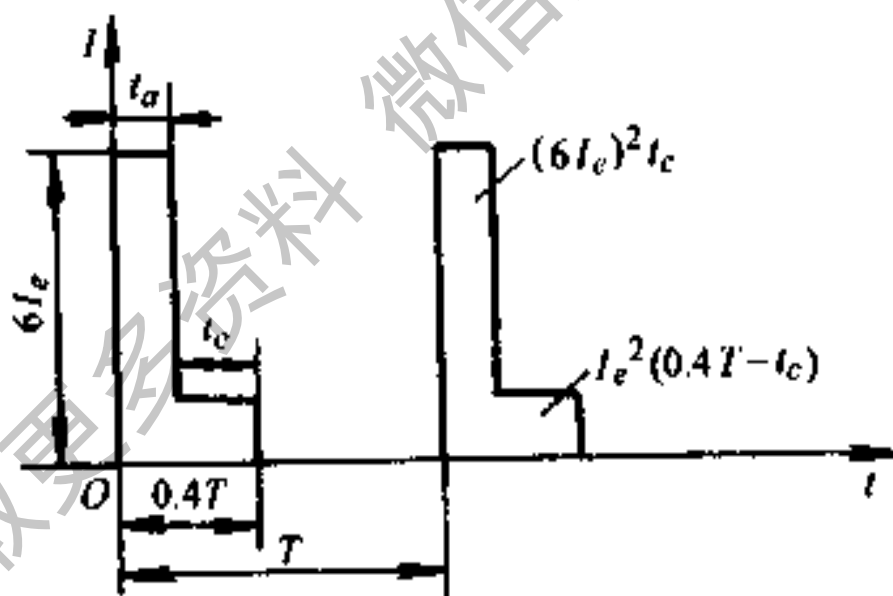


图 6-16 反复短时工作制的负荷图

对于普通鼠笼型电动机，等效发热电流可按下式计

算

$$I_{dr} = I_c \sqrt{\frac{35t_q + 0.4T}{T}}$$

5. AC-3、AC-4 两种工作制混合时对电寿命的影响。产品技术条件中所订的 AC-3 类负载的电寿命为 60 万次，是理想状态下得出的。实际使用中会混有一定比例的 JK4 类负载，因此电寿命将明显降低。

例如，CJ20-40A 接触器控制 13kW 电动机，若为 AC-3 类负载，则电寿命可达 180 万次。

AC-4 类负载分别占下列比例时，试验表明电寿命降至值如下：10% 时为 150 万次；20% 时为 100 万次；30% 时为 70 万次；40% 时为 50 万次；50% 时为 30 万次；100% 时为 20 万次。

6. 按接触器通断能力选择。接触器主触头的接通与分断能力，在 1.05 倍的额定电压，功率因数为 0.35，每次通电时间不大于 0.2s，每次操作间隔 6~12s 的情况下：

(1) 150A 及以下的接触器，能承受接通 12 倍额定电流 100 次，分断 10 倍额定电流 20 次，

(2) 250A 及以上的接触器，能承受接通 10 倍额定电流 100 次，分断 8 倍额定电流 25 次。

各类接触器触头的接通与分断能力可由产品目录中查得。

## 二、直流接触器的选用



直流接触器的选用条件与交流接触器基本相同。

1. 按使用类别选用 直流接触器的使用类别如下：

(1) DC-1 系列 于感或微感负载 电阻炉 钨丝灯。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

(续)

相应于使用类别验证电寿命的试验条件

使用类别	接 通			分 断		
	$I/I_e$	$U/U_e$	$L/R/ms$	$I/I_e$	$U/U_e$	$L/R/ms$
DC-1	1	1	1	1	1	1
DC-2	2.5	1	2	1	0.1	7.5
DC-3	2.5	1	2	2	1	2
DC-4	2.5	1	7.5	1	0.3	7.5
DC-5	2.5	1	7.5	7.5	1	7.5

注： $I_e$ ——额定工作电流；

$U$ ——接通前电压；

$U_e$ ——额定工作电压；

$I$ ——接通或分断电流；

$L/R$  为时间常数。

当额定电流  $I_e > 600A$  时，其试验电流由产品技术条件规定。

表中非正常操作条件指接通与分断能力试验条件，试验时的通电时间应不少于  $4T$ ，时间间隔为  $5\sim 10s$  能承受通、断各 25 次操作。

2. 按接触器通断能力选择。直流接触器的通断能力见产品目录。

3. 机械寿命和电寿命。1000A 以下者，机械寿命为 500~1000 万次；1000A 及以上者，机械寿命为 20~100 万次；电寿命前者为 50~100 万次，后者为 1~10 万次。

4. 直流接触器选用原则见表 6-26。

表 6-26 直流接触器的选用原则

回路类别	负载性质	选用产品类别	产品容量
主回路	DC-1, DC-3	具有二常开或二常闭主触头产品	按产品额定工作电流选用
	DC-5		按产品额定工作电流的 30%~50% 选用
能耗回路	DC-3, DC-5	具有一常闭主触头产品	按产品额定工作电流选用
起动回路	DC-3, DC-5	具有一常开主触头产品	按产品额定工作电流选用
动力制动回路	DC-2~DC-4	具有二常开主触头产品	按产品额定工作电流选用
高电感回路	电磁铁	具有二常开主触头产品	选用比回路电流大一级电流等级的产品

## 第四节 交直流接触器线圈重绕与改压

### 一、交流接触器线圈重绕计算

当线圈烧毁无法查找线圈的线径和匝数时，应量取线径，按下式估算线圈的匝数

#### 1. 线圈匝数的估算

$$W = \frac{45U}{BS}$$

式中  $W$ ——线圈匝数（匝）；

$U$ ——工作电压（V）；

$B$ ——铁心磁通密度（T），一般取 1.1~1.4T，硅钢片含硅量较高或铁心温升较低时，可选较高值；反之选较低值；

$S$ ——铁心截面（cm<sup>2</sup>）。

为了计算方便，可根据铁心截面面积由图 6-17 查得绕组每匝电压，绕组电压除以该值即得绕组匝数。

铁心窗口面积  $Q$  与其填充系数  $K_Q$  的关系如图 6-18 所示。对于有骨架的线圈  $K_Q$  取较小值，无骨架的线圈  $K_Q$  取较大值。 $K_Q$  乘以  $Q$  即为线圈铜线总面积  $A_2$ ，然后根据匝数确定铜线的截面。

根据所选定的导线计算线圈填充系数  $K_r$ 。 $K_r$  与导线标号及线径  $d$  的关系如图 6-19 所示，并以此校验上述计算值。若两者相近，则所选导线合适，能绕下；否则应

重新计算，直到所选导线符合要求为止。

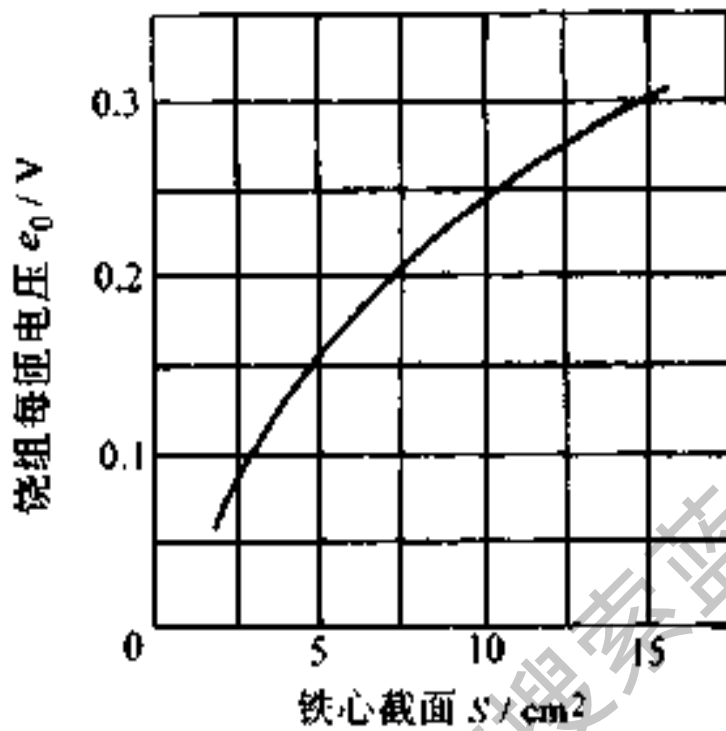


图 6-17 绕组每匝电压  $e_0$   
与铁心截面  $S$  的关系

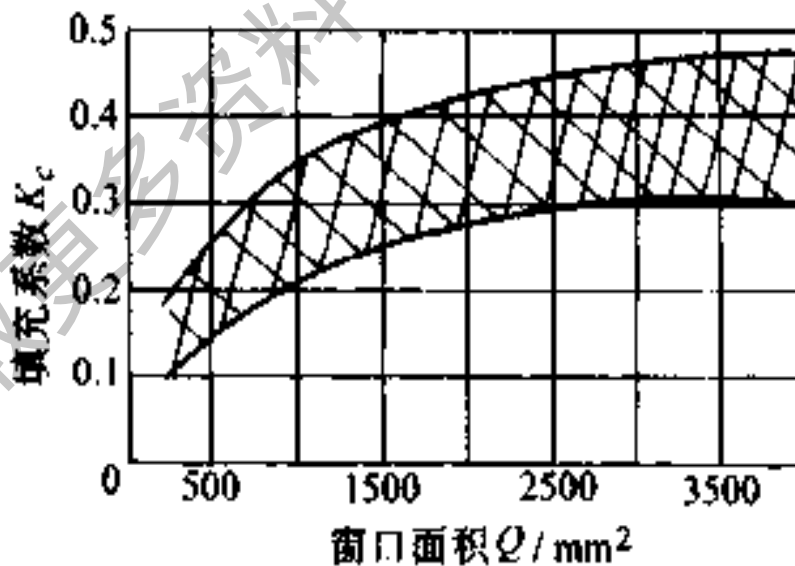


图 6-18 铁心窗口面积  $Q$   
与填充系数  $K_c$  的关系

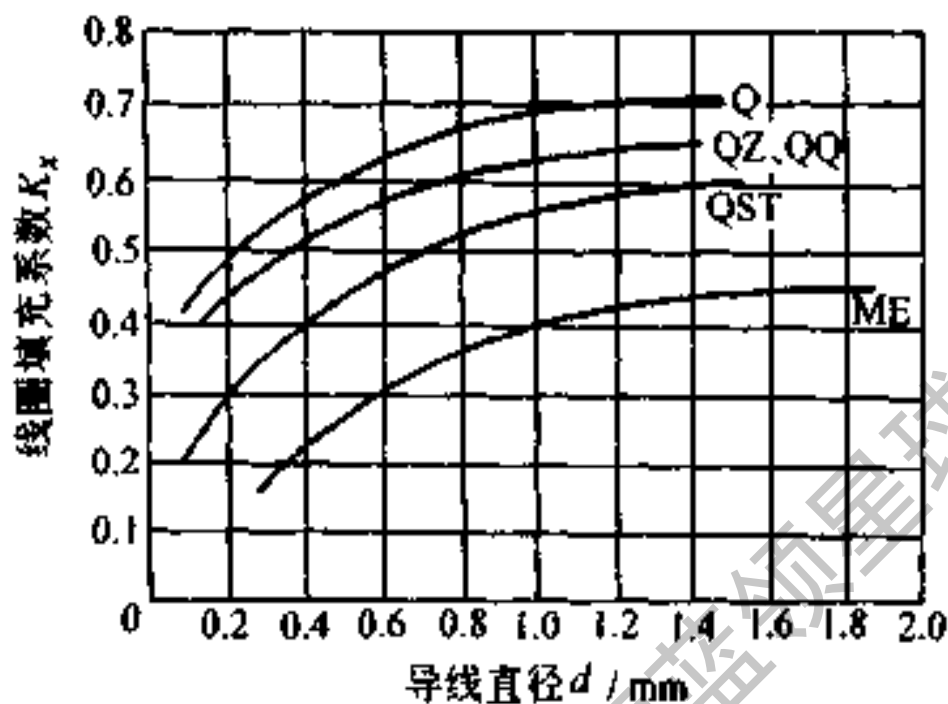
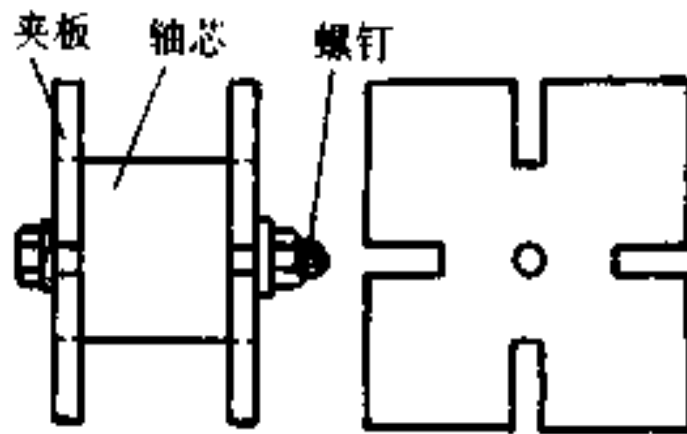


图 6-19 线圈填充系数  $K_x$  与导线标号关系曲线

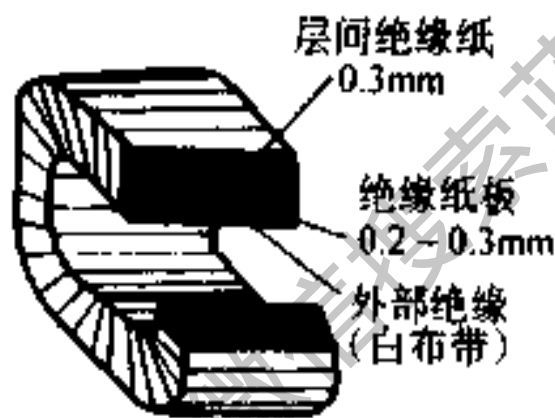
## 2. 线圈的绕制方法

如图 6-20 所示, 绕制后应将接触器在 85% 的额定电压下试验吸合是否良好。若好, 再测吸合时线圈中的电流, 若电流密度约为  $2 \sim 3 \text{ A/mm}^2$  (长期工作) 或  $3 \sim 5 \text{ A/mm}^2$  (反复短时工作) 时, 线圈能经济安全运行。若发现吸力不足, 应适当减少匝数; 如电流密度过高, 即温升过高, 则应适当增加匝数; 如温升过高但吸力裕度又不大时, 则应保持匝数不变而适当增加线径。

绕制的线圈应放入  $105 \sim 110^\circ\text{C}$  的烘箱内烘 3 小时左右, 冷却至  $60 \sim 70^\circ\text{C}$ , 浸 1010 沥青漆或 1032 聚酰胺醇酸等绝缘漆, 再放入  $110 \sim 120^\circ\text{C}$  的烘箱内烘干, 冷却



a) 绕制用木框



b) 线圈外形结构

图 6-20 线圈的绕制

a) 绕制用木框 b) 线圈外形结构

至常温即可使用。

## 二、直流接触器线圈重绕计算

先测出线径和线圈外形尺寸(图 6-21),按下式估算线圈匝数:

$$W = \frac{K_Q A}{\frac{\pi}{4} d^2} \quad A = hb = h \frac{D_1 - D_0}{2}$$

式中  $K_0$ ——填充系数，一般为 0.3~0.5，线径细或层间垫绝缘时应取低值；

$A$ ——线圈横截面 ( $\text{mm}^2$ )；

$d$ ——绝缘导线外径 ( $\text{mm}$ )。

电流密度选取同交流接触器。

### 三、交直流接触器改压计算

在保证吸力、温升、工作制不变的情况下，进行换算。

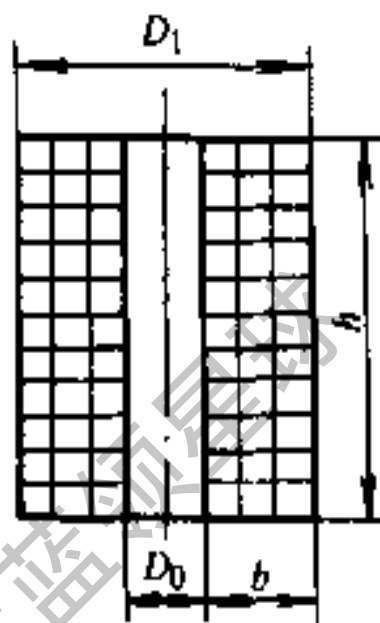


图 6-21 线圈横截面

#### 1. 交流接触器改压计算

$$W_2 = W_1 \frac{U_2^2}{U_1^2}, \quad d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}}$$

式中  $W_1$ 、 $W_2$ ——原线圈和改压后线圈的匝数；

$d_1$ 、 $d_2$ ——原线圈和改压后线圈导线的直径 ( $\text{mm}$ )；

$U_1$ 、 $U_2$ ——原线圈和改压后线圈的额定电压 ( $\text{V}$ )。

对于交流串联励磁线圈，则可按下列公式换算：

$$W_2 = W_1 \frac{I_1}{I_2}, \quad d_2 = d_1 \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}$$

式中  $I_1$ 、 $I_2$ ——原线圈和改压后线圈的电流 ( $\text{A}$ )。

#### 2. 直流接触器改压计算



$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}}, W_2 = W_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

$$R_2 = \frac{W_2}{W_1} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 R_1$$

式中  $R_1$ 、 $R_2$ ——20℃时，原线圈和改压后线圈的直流电阻（Ω）；

其他符号同前。

### 3. 直流接触器改变通电持续率的换算 导线直径换算

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\frac{TD_1}{TD_2}}$$

式中  $TD_1$ 、 $TD_2$ ——原线圈和改绕后线圈的通电持续率。

线圈  $W_2$  和直流电阻  $R_2$  的换算仍按上述公式计算。

### 4. 交流接触器短路环计算

#### (1) 短路环电阻的计算

$$R = (0.2 \sim 0.4) \frac{2\pi f \mu_0 (S_1 + S_2)}{\delta}$$

$$S_1/S_2 \approx 1/2 \sim 1/3$$

式中  $R$ ——短路环电阻（Ω）；

$S_1$ ——铁心端面没有被短路环包围的面积（cm<sup>2</sup>）；

$S_2$ ——铁心端面被短路环包围的面积（cm<sup>2</sup>）；

$\mu_0$ ——空气导磁系数（H/cm）， $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-8}$  H/

cm:

$\delta$ ——短路环所包围的铁心截面与衔铁之间的空气隙 (cm)。

## (2) 短路环导体截面的计算

当短路环所包围的截面确定后,便可算出短路环所包围的面积周长,这样,就可按下式求出短路环导体的截面:

$$S = \rho \frac{L}{R}$$

式中  $S$ ——短路环导体截面 ( $\text{mm}^2$ );

$\rho$ ——短路环导体的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ );

$L$ ——短路环所包围的面积周长 (m);

$R$ ——短路环电阻 ( $\Omega$ )。

然后便可进一步确定短路环的尺寸。

## 第五节 交流接触器和电磁铁直流 无声运行元件的选择

### 一、交流接触器和直流无声运行元件的选择

交流接触器直流无声运行的几种典型线路如图 6-22 所示。

#### 1. 电容选择:

$$C = (6.5 \sim 8)kI, U_c \geq 2U_m$$

式中  $C$ ——电容值 ( $\mu\text{F}$ );

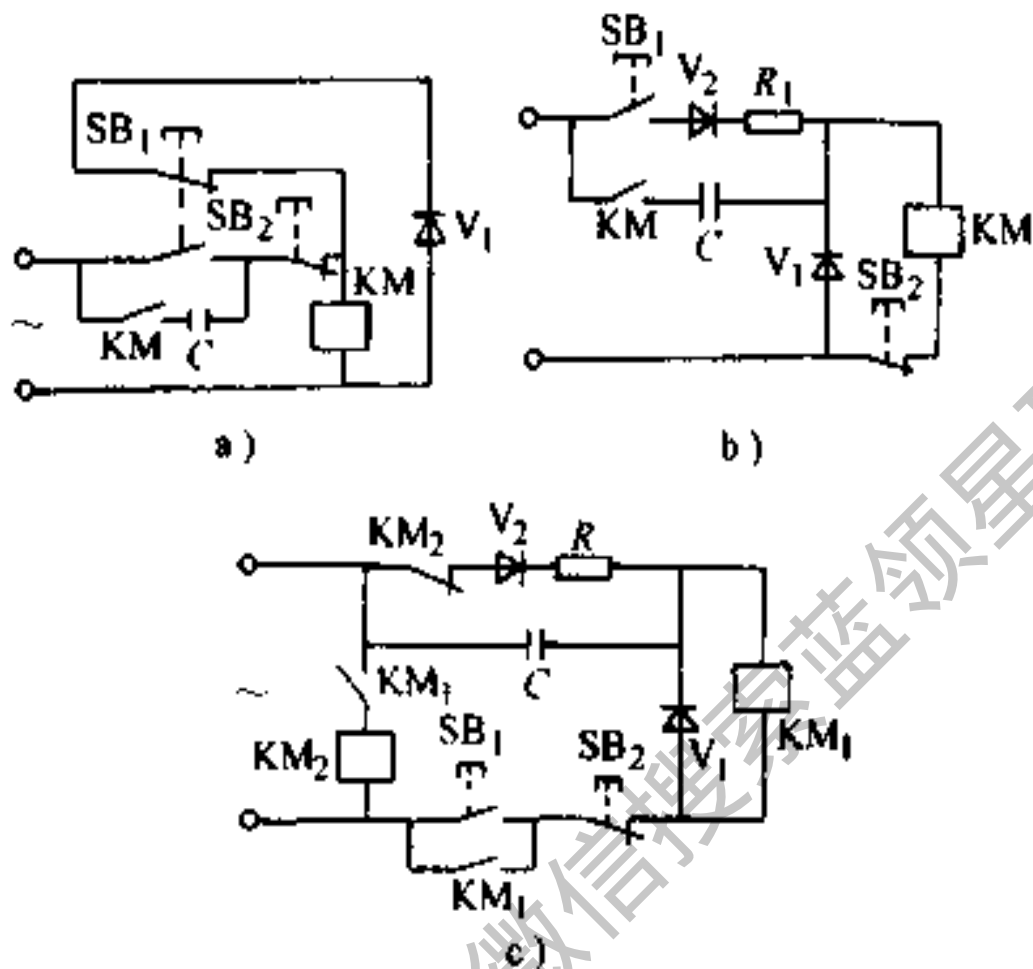


图 6-22 交流接触器直流无声运行线路

$U_c$ ——电容器耐压 (V);

$k$ ——经验系数, 当电源电压为 380V 时,  $k=1$ ;

220V 时  $k=1.73$ ; 127V 时  $k=3$ ;

$I$ ——通过线圈的直流电流 (A);

$U_m$ ——电源电压的峰值 (V)。

对于较大电流等级的接触器, 宜取电容量  $C$  的下限; 反之取上限。 $C$  的电容量尽量取小值。通常可由实验决定, 只要在启动时能可靠吸合即可。

2. 二极管的选择: 二极管  $V_1$ 、 $V_2$  的额定电流可按线

圖的直流電流選取； $V_2$  的反向電壓可按二倍電源電壓的峰值  $2U_m$  選取。 $V_1$  的反向電壓可按電源電壓選取。

不同容量的接觸器各元件參數選取可參表 6-27。

## 二、交流電磁鐵直流無聲運行元件的選擇

表 6-27 交流接觸器直流運行元件參數的選取

型 號	$R$	$C/\mu F$	$V_1/A$	$V_2/A$
CJ1-600/3	4.8Ω 50W	30	5	5
CJ1-300/3	8Ω 15W	10	1	1
CJ1-150/2	10Ω 5W	10	1	1
CJ10-150	15Ω 2W	2	0.3	0.3
CJ10-100	15Ω 1W	2	0.3	0.3
CJ12-600/3	5Ω 25W	10	5	5
CJ12-400	8Ω 15W	10	1	1
CJ12-250	15Ω 5W	4	1	1

交流電磁鐵與交流接觸器的工作原理相同，只是交流電磁鐵吸力和損耗較大而已。

交流電磁鐵直流無聲運行的線路，如圖 6-23 所示。

1. 工作原理：按下起動按鈕  $SB_1$ ，時間繼電器  $KT$  和交流電磁鐵  $YA$  立即吸合并通過  $KT$  的瞬時常開觸點自鎖。當  $KT$  延時閉合常開觸點閉合時，中間繼電器  $KM$  吸合， $KM$  常閉觸點斷開，電磁鐵  $YA$  投入正常的直流運行狀態。

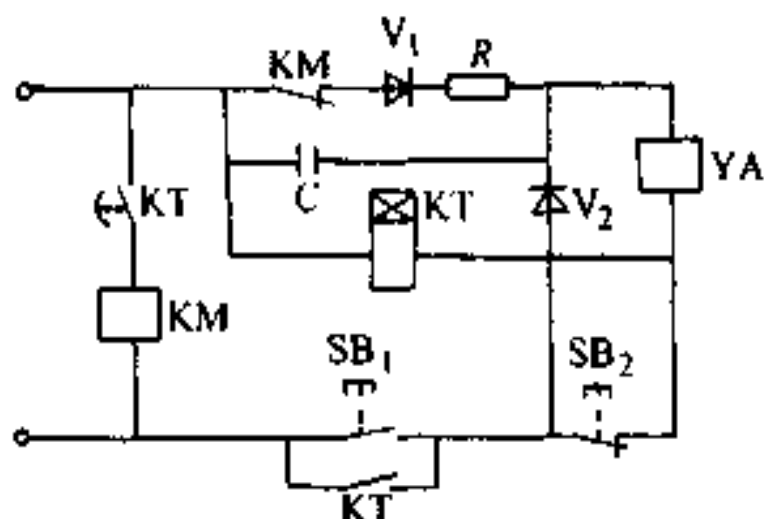


图 6-23 交流电磁铁直流运行线路

2. 各元件参数选取, 可参见表 6-28。

表 6-28 交流电磁铁直流运行各元件参数的选取

型 号	电压 /V	吸力 /N	保持电流/A		C / $\mu$ F	D <sub>1</sub> /A	D <sub>2</sub> /A	R / $\Omega$
			交流	直流				
MQ1-5151	380	245	1.05	1	6	3	3	12
MQ2-15	380	147	0.84	0.78	5	3	3	12
MQ1-5131	380	78	0.28	0.23	1.5	1	1	12
MQ1-5121	380	49	0.21	0.15	1	1	1	30
MQ2-5102	380	29	0.36	0.30	2	1	1	30
MQ2-5111	380	29	0.165	0.135	1	1	1	12
MQ1-5101	380	15	0.11	0.085	0.5	0.5	0.5	12
MZD1-100	380	—	0.72	0.63	4	3	3	12
MZD1-200	380	—	3	2.6	1.6	5	5	10
MZD1-300	380	—	4	3.4	20	5	5	3
MQ1-5141	380	147	1	0.8	5	3	3	10

(续)

型 号	电压 /V	吸力 /N	保持电流/A		C / $\mu$ F	D <sub>1</sub> /A	D <sub>2</sub> /A	R / $\Omega$
			交流	直流				
MQ1-5141	220	147	2.2	1.9	20	5	5	3
MQ1-6121	220	49	0.4	0.38	4	1	1	10
MQ1-5121	220	49	0.44	0.36	4	1	1	5
MQ1-5111	220	29	0.385	0.36	4	1	1	5
MQ1-5101	220	15	0.23	0.18	2	1	1	5
MQ1-5102	220	29	0.88	0.66	8	3	3	5

### 三、无声节能接触器直流线圈的计算

上述介绍的交流接触器无声节电技术都采用外加电容等外附式方式。这里介绍的是一种从接触器本身着手改造的无声节能方式。其原理电路图如图 6-24 所示。

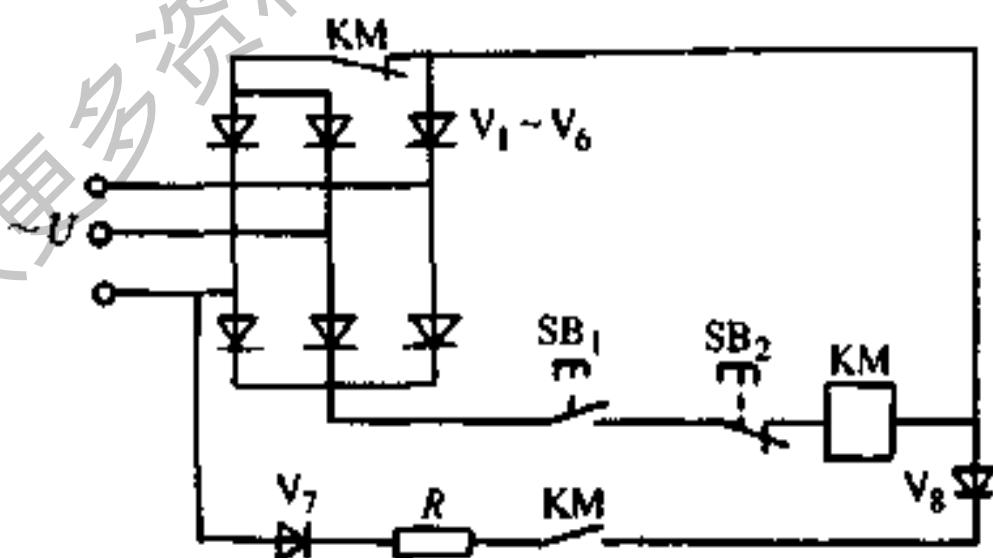


图 6-24 无声节能接触器接线图

1. 工作原理 当按下起动按钮  $SB_1$ ，接触器 KM 两端就有一个三相全桥式整流电压  $U_1$  输出 ( $U_1 = 1.35U_{\text{L}}$ )，在衔铁闭合过程中，其常闭触点断开，线圈 KM 两端变为二相正半波与另一相负半波组合的整流方式，输出的直流电压为  $U_2$  ( $U_2 = 0.5U_1$ )，待衔铁完全闭合后，按下停止按钮  $SB_2$ ，线圈两端的电压降低到二相半波整流方式所产生的直流电压  $U_3$  ( $U_3 = 0.45U_{\text{L}}$ )。

由于线圈的电阻不变，故相应的线圈工作电流  $I_1 = 3I_3$ ，相应的磁势  $(I_1W)^2 = 9(I_3W)^2$ 。实际上，衔铁吸合所需吸力要比衔铁闭合后保持闭合所需吸力的比值大 9 倍，故在整流二极管  $V_7$  后面串联一只限流电阻  $R$ ，使接触器 KM 的工作电流更小，二极管  $V_8$  起续流作用。

## 2. 直流线圈匝数的计算

$$W = U_1 / j\rho l, U_2 = IR_c$$

式中  $W$ ——线圈匝数 (匝)；

$U_1$ ——经整流后输出的直流电压 (V)；

$I$ ——线圈电流 (A)；

$j$ ——电流密度 ( $A/mm^2$ )；

$R_c$ ——线圈电阻 ( $\Omega$ )；

$\rho$ ——导线电阻率 ( $\Omega \cdot mm^2/m$ )；

$l$ ——线圈平均每匝长度 (m)。

### 3. 导线线径的计算：

$$d = 1.12 \sqrt{\frac{K_0 S}{W}}$$

式中  $d$ ——导线的直径 (mm)；

$K_0$ ——线圈填充系数；

$S$ ——线圈骨架窗口面积 (mm<sup>2</sup>)；

$W$ ——线圈匝数 (匝)。

4. 校验 根据计算得的线径  $d$ ，选择标准线径的导线。制成后进行验证。若吸力不足，则适当增加线径，并相应减少匝数（否则窗口放不下），若吸力过大，则应减少线径。

由于无声节能接触器的工作电流非常小，线圈温升不必校验。

无声节能接触器可利用 CJ10 系列、CJ12 系列等交流接触器的铁心。经检验测定，与原交流接触器相比，有功节电率在 90% 以上，且机械寿命和电寿命、操作频率等都不受影响。

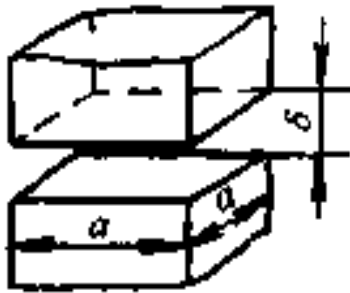
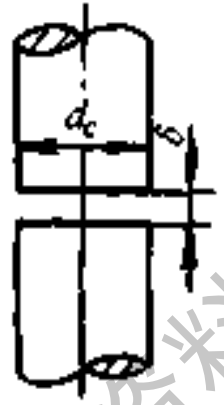
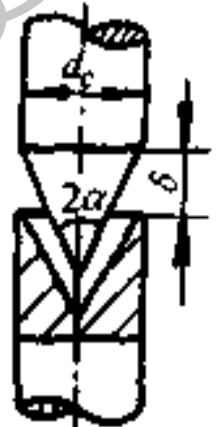
## 第六节 电磁铁的计算和选用

### 一、电磁铁气隙磁导的计算

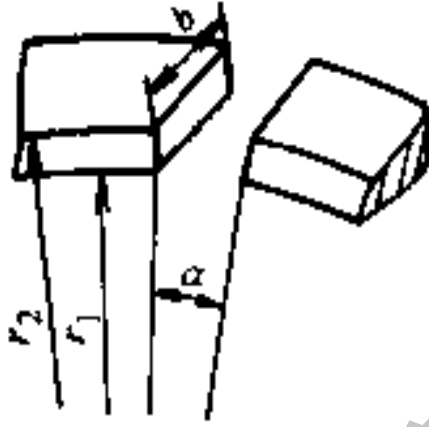
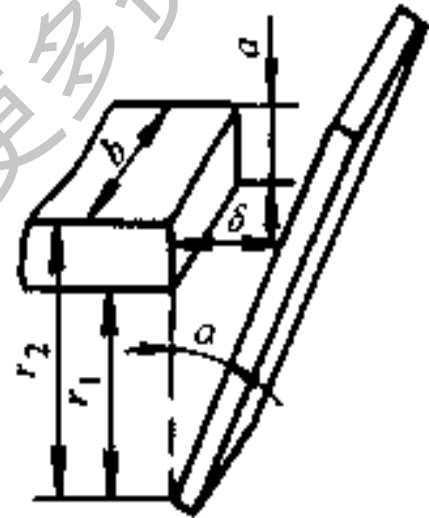
电磁铁气隙磁导的常用计算公式列于表 6-29 中。表中长度单位用 cm，空气的导磁系数  $\mu_0$  为  $0.4\pi \times 10^{-8} \text{H/cm}$ 。



表 6-29 气隙磁导的计算公式

编号	几何图形	磁极形状	磁导 /H
1		两平行矩形平面	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{a^2}{\delta} (\delta/a \leq 0.2)$ $G_{\delta} = \mu_0 \left[ \frac{a^2}{\delta} + 0.58a + \frac{0.14a}{\ln \left( 1.05 + \frac{\delta}{a} \right)} \right]$
2		两平行圆形平面	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{\pi d_c^2}{4\delta} (\delta/d_c \leq 0.2)$ $G_{\delta} = \mu_0 \left( \frac{\pi d_c^2}{4\delta} + 0.58d_c \right)$
		锥形表面	$G_{\delta} = \mu_0 \left( \frac{\pi d_c^2}{4\delta \sin^2 \alpha} - \frac{0.157d_c}{\sin^2 \alpha} + 0.75d_c \right)$

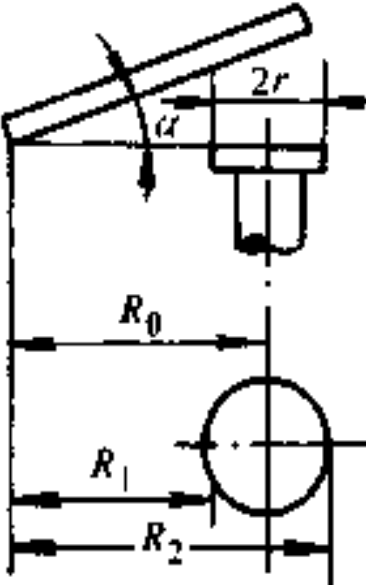
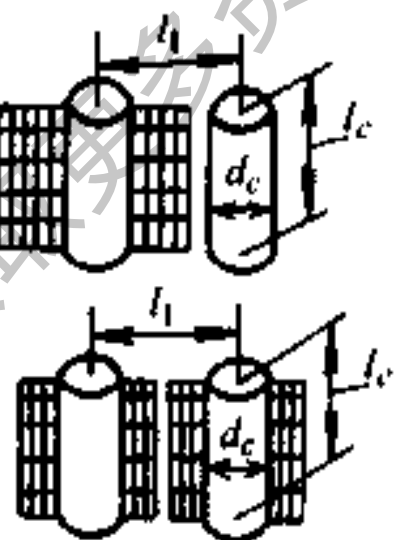
(续)

编号	几何图形	磁极形状	磁导 /H
3		两不平行平面	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{b}{a} \ln \frac{r_2}{r_1}$ <p><math>a</math> ..... 弧度</p>
4		矩形铁心和衔铁	$G_{\delta} = \frac{\mu_0 b}{a} \ln \frac{r_2}{r_1}$ <p><math>a</math> ..... 弧度</p> <p>或</p> $G_{\delta} = \mu_0 \frac{ab}{\delta}$ <p><math>\delta</math> ..... 气隙平均长度</p>

工作磁通的磁导

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

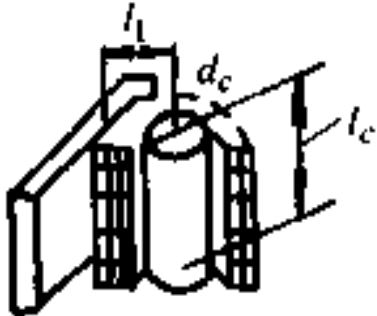
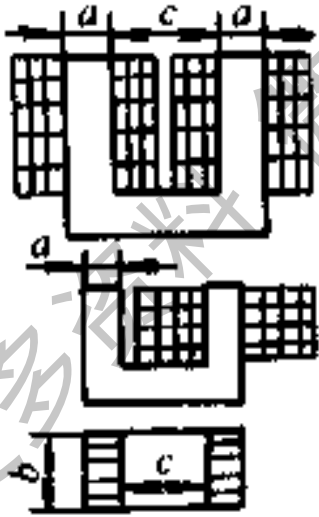
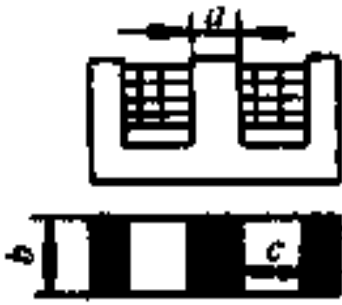
(续)

编号	几何图形	磁极形状	磁导 /H
5		圆形铁心和衔铁	$G_{\delta} = \frac{2\pi R_0 \pi_0}{a} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{R_0^2}}\right)$ <p><math>a</math>——弧度</p> $\text{或 } G_{\delta} = \frac{2\pi R_0^2 \mu_0}{\delta} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{R_0^2}}\right)$ <p><math>\delta</math>——气隙平均长度</p>
6		两平行圆柱体	$g = \frac{G_{\delta}}{l}$ $= \frac{\pi \mu_0}{\ln \frac{l_1 + \sqrt{l_1^2 - d_c^2}}{d_c}}$ <p>或当 <math>l_1 &gt; 4d_c</math> 时</p> $g = \frac{\pi \mu_0}{\ln \frac{2l_1}{d_c}}$

工作磁通的磁导

漏磁通的比磁导

(续)

编号	几何图形	磁极形状	磁导 /H
7		圆柱体与平面	$g = \frac{G_0}{l}$ $= \frac{2\pi\mu_0}{\ln \frac{l_1 \sqrt{l_1^2 - (d_c/2)^2}}{d/2}}$ <p>或当 <math>l_1 &gt; 2d</math> 时</p> $g = \frac{2\pi\mu_0}{\ln \frac{4l_1}{d}}$
8		U形磁路铁芯之间	$g = \frac{G_0}{l}$ $= \mu_0 \left( \frac{b}{c} + \frac{2a}{c + \frac{\pi d}{2}} \right)$
9		山形磁路铁心柱之间	$g = \frac{G_0}{l}$ $= 2\mu_0 \left( \frac{b}{c} + \frac{a}{c + \frac{\pi a}{4}} \right)$

(续)

漏磁通的比磁导	编号	几何图形	磁极形状	磁导 /H
	10		两同心圆柱体	$g = \frac{G_d}{l}$ $= \frac{2\pi/\mu_0}{\ln \frac{2c+d_s}{d_c}}$

## 二、电磁铁吸力基本计算公式

### 1. 计算气隙较小时的吸力为

$$F = 0.392 \frac{\Phi^2}{S} \times 10^{10}$$

式中  $F$ ——电磁铁吸力 (N);

$\Phi$ ——磁极端面磁通 (Wb);

$S$ ——磁极表面的总面积 ( $\text{cm}^2$ )。

### 2. 计算气隙较大时的吸力为

$$F = 0.392 \frac{\Phi}{S(1+a\delta)} \times 10^{10}$$

式中  $a$ ——修正系数, 约为 3~5;

$\delta$ ——气隙长度 (cm)。

上式适用于直流和交流电磁铁的吸力计算。交流时, 用磁通有效值代入, 所得的吸力为平均值。

### 三、电磁铁吸力的近似计算

1. 拍合式电磁铁 (图 6-25)、直流拍合式电磁铁吸力

$$F = 62.8(IW)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-8}$$

式中  $F$ ——电磁铁吸力 (N)。

交流拍合式电磁铁吸力有如下三种情况:

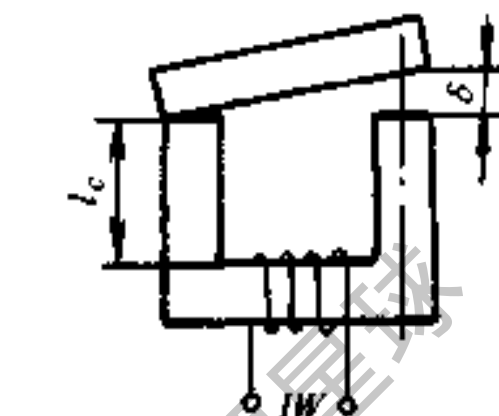


图 6-25 拍合式电磁铁

(1) 当供给励磁线圈的是数值不变的电流时, 吸力最大值和平均值为

$$F_m = 62.8(I_m W)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-8}$$

$$F_0 = \frac{F_m}{2} = 31.4(I_m W)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-8}$$

式中  $F_m$ ——吸力最大值 (N);

$F_0$ ——吸力平均值 (N);

$I_m$ ——励磁电流最大值 (A);

$W$ ——线圈匝数。

(2) 当供给电磁铁线圈的是恒定的交流电压时 (线圈集中在底铁上), 吸力最大值和平均值为

$$F_m = 1.96 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{l_c g \delta}{\mu_0} \right)^2} \times 10^4$$

$$F_0 = \frac{F_m}{2} = 0.98 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{l_c g \delta}{\mu_0} \right)^2} \times 10^4$$

式中  $U$ ——电磁铁线圈上的电压有效值 (V);

$f$ ——电源频率 (Hz);

$IW$ ——励磁线圈的总磁势 (A);

$S$ ——电磁铁极面面积 ( $\text{cm}^2$ );

$l_c$ ——铁心长度 (cm);

$g$ ——单位长度漏磁导 (H), 按表 6-29 中第 6 项公式计算;

$\delta$ ——气隙长度 (cm);

$\mu_0$ ——空气的导磁系数 (H/cm)。

(3) 线圈分布在铁心柱一侧上时, 吸力平均值为

$$F_0 = 9.81 \left( \frac{U}{IW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{1}{3\mu_0} l_c g \delta \right)^2} \times 10^7$$

2.  $\square$ 形电磁铁(图 6-26): 直流

$\square$ 形电磁铁吸力为

$$F = 31.4 (IW)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-4}$$

式中  $F$ ——电磁铁吸力 (N)。

交流  $\square$ 形电磁铁吸力有如下

三种情况:

(1) 当供给线圈的是恒定的

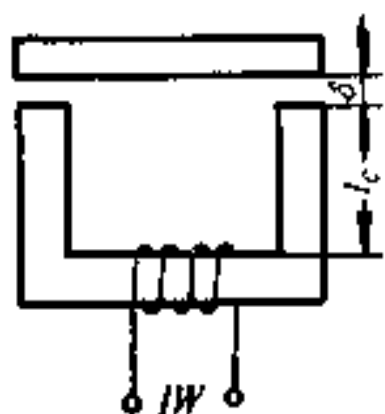


图 6-26  $\square$ 形电磁铁

交流电流时，吸力最大值为

$$F_m = 31.4(I_m W)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-8}$$

(2) 当供给电磁铁线圈的是恒定的交流电压时（线圈集中在底铁上），吸力最大值和平均值为

$$F_m = 3.9 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{2l_g \delta}{\mu_0} \right)^2} \times 10^8$$

$$F_0 = \frac{F_m}{2} = 1.95 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{2l_g \delta}{\mu_0} \right)^2} \times 10^8$$

(3) 当线圈分布在铁心柱一侧时，吸力平均值为

$$F_0 = 1.95 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{2}{3\mu_0} l_g \delta \right)^2} \times 10^8$$

式中符号同前。注意，所有□形电磁铁的吸力计算公式中， $S$ 均指一个极面的面积。

3. 螺管式电磁铁（图 6-27），直流螺管式电磁铁吸力为

$$F = 62.8(IW)^2 \left[ \frac{\pi r^2}{\delta^2} + \frac{g}{\mu_0} \left( \frac{z}{l_c} \right)^2 \right] \times 10^{-8}$$

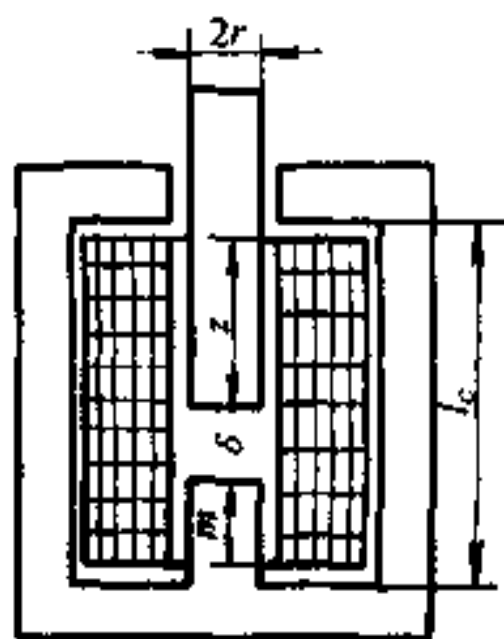


图 6-27 螺管式电磁铁



式中符号见图 6-27。比磁导  $g$  可按表 6-30 中第 10 项所列的公式计算。交流螺管式电磁铁吸力有如下两种情况：

(1) 当线圈中的励磁电流是大小不变的交流电流时，吸力最大值为

$$F_m = 62.8(I_m W)^2 \left[ \frac{\pi r^2}{\delta^2} + \frac{g}{\mu_0} \left( \frac{z}{l_c} \right)^2 \right] \times 10^{-8}$$

(2) 当给定的是最大值不变的电压时，吸力最大值和平均值为

$$F_m = 19.6 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{\frac{\pi r^2}{\delta^2} + \frac{g}{\mu_0} \left( \frac{z}{l_c} \right)^2}{\left[ \frac{\pi r^2}{\delta} + \frac{g}{\mu_0} \frac{z^3 + m^2}{3l_c^2} \right]^2} \times 10^7$$

$$F_n = 9.8 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{\frac{\pi r^2}{\delta^2} + \frac{g}{\mu_0} \left( \frac{z}{l_c} \right)^2}{\left[ \frac{\pi r^2}{\delta} + \frac{g}{\mu_0} \frac{z^3 + m^2}{3l_c^2} \right]^2} \times 10^7$$

式中符号同前。

4. 没有外壳的螺管式电磁铁(图 6-28)，吸力大小与衔铁位置有关。吸力最大值出现在衔铁处于  $x/l_k \approx 40\%$  的位置；衔铁在  $40\% < x/l_k < 80\%$  位

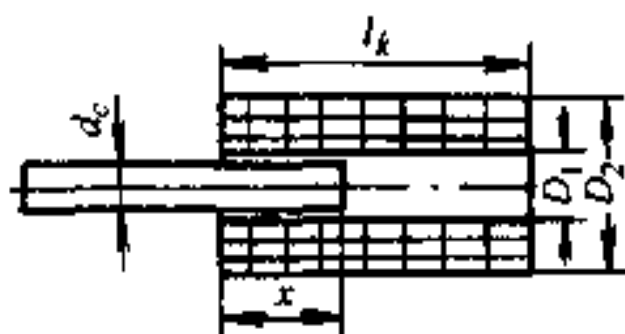


图 6-28 没有外壳的螺管式电磁铁

置范围内,吸力几乎保持不变;在  $x/l_k > 80\%$  的位置,吸力开始减小。当衔铁全部进入线圈后吸力等于零。

若  $D_2 \gg d_c$  及  $l_k \gg D_2$ , 则吸力最大值为

$$F_m \approx (15.4 \sim 17.3) IW \frac{\pi d_c^2}{4l_k} \times 10^{-3}$$

式中符号同前。

5.  $\Omega$ 形电磁铁 (图 6-29):  $\Omega$ 形电磁铁的吸力计算,可按着  $\Pi$ 形电磁铁的吸力计算公式,可把  $\Omega$ 形电磁铁看成两个形电磁铁并联而成,每个形电磁铁的磁极表面为  $S/2$ ,合并后总面积  $S/2 + S/2 = S$ ,所以可按形电磁铁计算。不过当线圈分

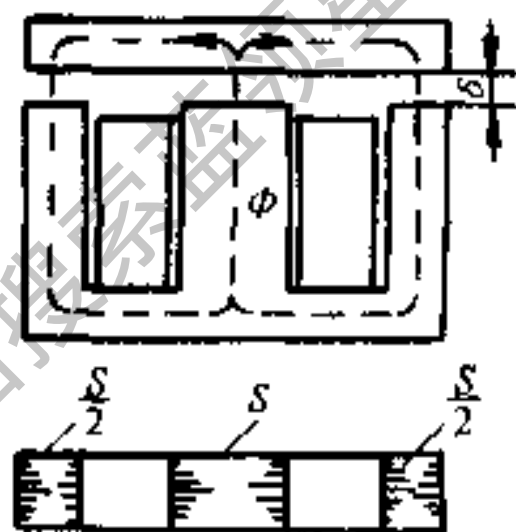


图 6-29  $\Omega$ 形电磁铁

布在中心柱上时,其吸力平均值仍可按  $\Pi$ 形当线圈分布在铁心柱一侧时的公式计算,只是式中的比磁导  $g$  值,应按表 6-30 中第 9 项公式代入。

6. E形电磁铁 (图 6-30): 衔铁闭合在某一位置时的吸力为

$$F = 62.8(IW)^2 \left[ \frac{S}{(2\delta)^2} + \frac{g}{\mu_0} \left( \frac{z}{l_k} \right)^2 \right] \times 10^{-8}$$

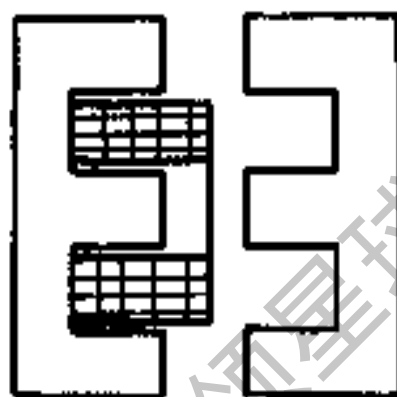
式中  $F$ ——电磁铁吸力 (N);

$S$ ——E形铁心中心柱与两边柱铁心截面积之和  
( $\text{cm}^2$ );

$\delta$ ——中心柱空气隙长度  
( $\text{cm}$ );

$l_k$ ——励磁线圈的高度  
( $\text{cm}$ );

$z$ ——衔铁伸入线圈的长度  
( $\text{cm}$ )。



7. 三相交流电磁铁 (图 6-30 E形电磁铁 31), 作用在铁心上的合力为

$$F = F_1 + F_2 + F_3$$

$$= 62.8 \times \frac{3}{2} (I_m W)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-8}$$

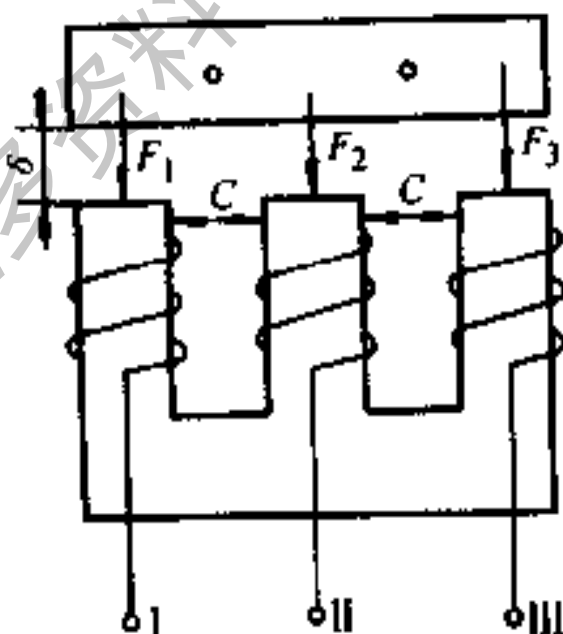


图 6-31 三相交流电磁铁

式中  $F$ ——作用在铁心上的合力；

$S$ ——铁心柱截面积 ( $\text{cm}^2$ )；

$\delta$ ——气隙长度 ( $\text{cm}$ )；

$I_m$ ——电流最大值 ( $\text{A}$ )；

$W$ ——每相匝数。

三相电磁铁常用作制动电磁铁。

#### 四、电磁铁的选用及计算

##### 1. 电磁铁的选用

电磁铁应按机械负荷要求，即工作行程、操作频率、工作方式、转矩、通电持续率 ( $TD\%$  值) 等进行选用。

(1) 交、直流电磁铁的比较，见表 6-30。

表 6-30 交、直流电磁铁的比较

项 目	直 流	交 流	说 明
铁 心	圆柱体	迭片	交流有铁耗，防剩磁的气隙 直流的比交流的长
振动噪声	无	有	交流有脉动电磁吸力 $F$ 而 直流无
机械强度	强	弱	交流迭压成型，机械强度弱
起动电流	$0 \rightarrow I_c$ (小)	$nI_c \rightarrow I_c$ (大)	交流电抗比气隙近似反比
吸合时间	慢	快	直流时间常数大，磁通建立 缓慢

(续)

项 目	直 流	交 流	说 明
吸力特性	陡	平坦	见图 7-55
操作频率	高	低	交流铁心机械强度弱, 起动电流大, 线圈温度高
线圈形状	细长	扁平	采用扁平线圈, 改善交流电磁铁特性配合

(2) 通电持续率  $TD\%$  的计算:

$$TD\% = \frac{nt}{T} \times 100$$

式中  $n$  —— 在一个循环周期内通电次数;

$t$  —— 每次通电时间 (min);

$T$  —— 电磁铁工作的一个循环周期 (min)。

(3) 衔铁作直线运动的制动电磁铁的选用气隙为  $h$  时的电磁铁吸力  $F$  可下式确定:

$$Fhk \geq N\epsilon \frac{1}{\eta_i}$$

式中  $F$  —— 电磁铁的吸力 (N);

$h$  —— 衔铁行程 (cm);

$N$  —— 制动瓦块压在刹车轮上的压力 (N);

$\epsilon$  —— 瓦块与刹车轮之间的空隙 (cm), 参见表 6-

$k$ ——衔铁行程利用系数，约 0.8~0.85，

$$k = \frac{\text{调整好的衔铁行程}}{\text{衔铁最大行程}}$$

表 6-31 刹轮直径与对应空隙距离

刹车轮直径 $D/\text{mm}$	100	200	300	400	500	600	700	800
空隙距离 $e/\text{mm}$	0.6	0.8	1.0	1.25	1.25	1.5	1.5	1.5

当制动转矩已知时，可按一定的刹车轮直径求  $N$ 。上式左边为欲选择行程  $h$  和吸力  $F$ （即确定适合的电磁铁），适当选取公式中的有关参数，便可满足上式条件。

制动瓦块在刹车轮上的压力  $N$  为

$$N = \frac{2M_{zh}}{fD}$$

式中  $M_{zh}$ ——转动力矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )，一般取  $M_{zh} = 1.75 \sim 2.5M_e$ ，对于低速电动机取  $1.75M_e$ ，高速电动机取  $2.5M_e$ ；

$M_e$ ——电动机的额定转矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )；

$f$ ——摩擦系数，见表 6-32；

$D$ ——刹车轮直径 ( $\text{m}$ )。

制动力矩  $M_{zh}$  是选择刹车轮尺寸的基本依据，见表 6-33。

表 6-32 瓦块材料的摩擦系数  $f$ 

瓦块材料	$f$ (干燥)	$f$ (潮湿)
钢	0.15~0.2	0.1~0.15
生铁	0.15~0.2	0.1~0.15
木	0.3~0.4	0.25~0.3
兰令皮	0.4~0.5	0.3~0.4

表 6-33 按制动力矩选择刹车轮尺寸表

制动力矩 /N·m	226	412	706	1324	2746	4021	8189
刹车轮直径 /mm	150	225	300	400	500	600	700
刹车轮宽 /mm	80	100	125	140	150	160	190
刹车轮飞轮力矩 /N·m	1.18	11.8	31.4	109.8	245.2	—	—

## 4. 衔铁作旋转运动的制动电磁铁的选用

$$\varphi M k \geq N \varepsilon \frac{1}{\eta}$$

式中  $M$ ——制动电磁铁在最大转角  $\varphi$  下的转矩 (N·cm);







其他符号同前。

## 2. 直流电磁铁结构型式的选择

研究表明，结构因数  $K_\phi$  和电磁铁型式之间的关系，见表 6-34。按表选择的电磁铁型式是最经济的。

$$K_\phi = \frac{\sqrt{F}}{\delta}$$

表 6-34 结构因数与电磁铁型式的关系

结构因数 $K_\phi$	电磁铁型式	结构因数 $K_\phi$	电磁铁型式
$< 0.6$	无挡铁螺管式电磁铁 	51.7 ~ 291	具有平面柱挡铁的螺管式电磁铁 
5.8 ~ 12.5	具有圆锥形 ( $\alpha = 60^\circ$ ) 挡铁的螺管式电磁铁 	$> 291$	衔铁为平板形的盘式电磁铁 
12.5 ~ 51.6	具有圆锥形 ( $\alpha = 45^\circ$ ) 挡铁的螺管式电磁铁 	8.1 ~ 81.4	拍合式电磁铁 



式中  $F$ ——电磁铁吸力 (N);

$\delta$ ——衔铁行程 (cm)。

### 3. 交流电磁铁的基本计算公式

#### (1) 电势公式

$$E = 4.44fWSB_{mc}$$

式中  $E$ ——线圈中的感应电势 (V);

$f$ ——电源频率 (Hz);

$W$ ——线圈匝数;

$S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ );

$B_{mc}$ ——铁心中最大磁感应强度 (T)。

衔铁处在最大行程时,  $E \approx (0.96 \sim 0.98) U$ ; 空气隙  $\delta$  最小, 衔铁在闭合位置时, 则  $E \approx U$ 。由于线路电压可能发生波动, 电源电压  $U$  可能降低至最小值, 即  $U = 0.85U_n$  ( $U_n$  为线路额定电压)。

#### (2) 吸力公式

$$F = 19.6B_m^2S$$

式中  $F$ ——电磁铁吸力 (N);

$B_m$ ——工作气隙中磁通密度最大值 (T), 一般可取

0.20~1.00;

$S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ )。

#### (3) 线圈匝数公式

$$W = \frac{E}{4.44f\Phi_{mc}}, \Phi_{mc} = \sigma B_m S, E \approx 0.96U$$

式中  $\Phi_{mc}$ ——铁心中磁通最大值 (Wb);

$\sigma$ ——漏磁系数, 约为 1.3~2.5。

(4) 导线直径经验计算公式

a) 线圈电压为 220V 时:

$$d = 0.12 \sqrt{F}$$

式中  $d$ ——铜导线直径 (mm);

$F$ ——电磁铁吸力 (N)。

根据算得的  $d$  可查线规表, 得绝缘导线外径  $d'$ 。

b) 线圈电压不是 220V 而是  $U_2$  时:

$$\begin{aligned} d_2 &= d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}} = 0.12 \sqrt{F} \sqrt{\frac{220}{U_2}} \\ &= 1.78 \sqrt{\frac{F}{U_2}} \end{aligned}$$

式中  $d_1$ 、 $d_2$ ——线圈电压为 220V 时和  $U_2$  时的铜导线直径 (mm);

$F$ ——同前。

(5) 线圈厚度和高度的计算公式

$$b_k = d' \sqrt{\frac{W}{\beta}}, l_k = \beta b_k$$

式中  $b_k$ ——线圈厚度 (cm);

$l_k$ ——线圈高度 (cm);

$\beta$ ——线圈高度与厚度比, 见表 6-35; 其他符号同前。

表 6-35 线圈高度与厚度之比  $\beta$  值

电磁铁型式		$\beta$ 值	
		直流电磁铁	交流电磁铁
拍合式	带极靴	4~6	2
	不带极靴	5~7	
□ 型	带极靴	5~7	2
	不带极靴	6~8	
盘 式		2~4	1~2
装甲螺管式		7~8	3~4

### 五、交、直流电磁铁线圈的简单计算

当电磁铁工作参数（如电压、电流、通电持续率、频率）改变时，都需要重新换一个线圈，这时在磁路系统和线圈骨架都已确定的条件下，线圈参数要作相应的改变。

#### 1. 线圈匝数和导线直径的计算

(1) 直流电磁铁改变线圈电压的换算：

$$\text{导线直径} \quad d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}}$$

$$\text{线圈匝数} \quad W_2 = W_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

$$\text{线圈电阻} \quad R_2 = \frac{W_2}{W_1} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 R_1$$

式中  $d_1$ 、 $d_2$ ——改压前和改压后的导线直径 (mm)；

$W_1$ 、 $W_2$ ——改压前后线圈的匝数；

$R_1$ 、 $R_2$ ——改压前后线圈的电阻 ( $\Omega$ )。

(2) 直流电磁铁改变通电持续率的换算：

当电源电压不变，而仅改变通电持续率时

$$\text{导线直径} \quad d_2 = \sqrt{\frac{TD_1}{TD_2}} d_1$$

$$\text{线圈匝数} \quad W_2 = W_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

$$\text{线圈电阻} \quad R_2 = \frac{W_2}{W_1} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 R_1$$

式中  $TD_1$ 、 $TD_2$ ——改绕前、后通电持续率；

其他符号同前。

注意，如果选用的是标准线规中邻近较大的直径，则线圈发热和吸力都将较原来线圈时略大；反之，则发热和吸力都将略小。

(3) 交流电磁铁改变线圈电压的换算

$$\text{导线直径} \quad d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}}$$

$$\text{线圈匝数} \quad W_2 = W_1 \frac{U_2}{U_1}$$

(4) 电磁铁电流线圈的换算

当通过电磁铁电流线圈的电流值改变时，为了保持电磁吸力不变，安匝数  $IW$  应保持不变，故线圈匝数为

$$W_2 = W_1 \frac{I_1}{I_2}$$

为了保持换算后线圈温升不变，电流密度应保持不变，故导线直径为

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}$$

式中  $I_1$ 、 $I_2$ ——改绕前后电流线圈的电流 (A)；

$W_1$ 、 $W_2$ ——改绕前后电流线圈的匝数；

$d_1$ 、 $d_2$ ——改绕前后，电流线圈的线径 (mm)。

### (5) 各种情况的线圈换算表

线圈换算关系列于表 6-36。表中脚码“1”表示标准产品的电气参数；“2”表示换算后产品的有线圈数据。

### 2. 校验线圈能否放入铁心窗口

$$Q_k = \frac{Wq}{f_k} \leq Q$$

式中  $Q_k$ ——线圈的截面积 (mm<sup>2</sup>)；

$Q$ ——铁心窗口面积 (mm<sup>2</sup>)；

$q$ ——导线截面积 (mm<sup>2</sup>)；

$f_k$ ——线圈填充系数 (表 6-37)。

### 3. 线圈的温升校验

$$\tau = \frac{P}{aS_r} = \frac{I^2 R}{aS_r} = \frac{U^2}{RaS_r} \leq \tau_{er}$$

式中  $\tau$ ——线圈的温升 (°C)；

$\tau_{er}$ ——线圈的允许温升 (°C)；

表 6-36 线圈换算表

序号	线圈种类	要变的参数	保持条件	变化参数比	匝数比 $W_2/W_1$	线圈直径比 $d_1/d_2$	扁截面比 $q_2/q_1$	电阻比 $R_2/R_1$	电流比 $I_2/I_1$	变换后某些特性的变化		
										温升	吸力特性	线圈骨架
1	直流电压线圈	$U$	$F_1 = F_2$ $\tau_1 = \tau_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$\frac{U_2}{U_1} = a$	$a$	$a^{-\frac{1}{2}}$	$a^{-1}$	$a^2$	$a^{-1}$	基本不变	基本不变	有余量
2												
3	直流电流线圈	$TD$	$I_1 = I_2$ $\tau_1 = \tau_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$\frac{TD_1}{TD_2} = a$	$a^{-\frac{1}{2}}$	$a^{-\frac{1}{4}}$	$a^{-\frac{1}{2}}$	$a$	$a^0$	$a > 1$ $\tau_2 > \tau_1$	$a > 1, F_2 > F_1$ $a < 1, F_2 < F_1$	$a < 1,$ 略小
4												

(续)

序号	线圈种类	要变的参数	保持条件	变化参数比	匝数比 $W_2/W_1$	圆线直径比 $d_1/d_2$	扁截面比 $q_2/q_1$	电阻比 $R_2/R_1$	电流比 $I_2/I_1$	变换后某些特性的变化		
										温升	吸力特性	线圈骨架
5	交流电流线圈	$I$	$F_1 = F_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$I_2/I_1 = a$	$a^{-1}$	$a$	$a$	$a^{-2}$	$a$	基本不变	$a > 1$ , $F_2 > F_1$ $a < 1$ , $F_2 < F_1$	$a > 1$ , 有余量
6	交流电压线圈	$U$	$F_1 = F_2$ $\tau_1 = \tau_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$U_2/U_1 = a$	$a$	$a^{-1/2}$	$a^{-1}$	$a^0$	$a^{-1}$	温升下降	基本不变	有余量
7		$f$	$U_1 = U_2$ $\tau_1 = \tau_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$f_2/f_1 = a$	$a^{-1}$	$a$	$a$	$a^{-2}$	$a$	基本不变	$a > 1$ , $F_2 > F_1$ $a < 1$ , $F_2 < F_1$	$a > 1$ , 有余量 $a < 1$ , 不够用

注： $f_k$ ——线圈填充系数； $F$ ——吸力； $\tau$ ——线圈温升。

表 6-37 珐瑯漆包絕緣導線的線圈填充係數  $f_k$ 

裸導線 直 徑 /mm	手動送線繞制				自動送線繞制	
	圓 筒 框 套	矩 形 框 套	矩形框 套每層 墊 紙	矩形框 套每兩 層墊紙	圓筒框 套每層 墊 紙	矩形框 套每層 墊 紙
0.05	—	—	—	0.3	—	—
0.10	0.440	0.420	0.285	0.35	0.38	0.36
0.15	0.495	0.475	—	0.39	—	—
0.20	0.535	0.515	0.350	0.425	0.48	0.44
0.25	—	—	—	0.460	—	—
0.30	—	—	0.385	—	0.54	0.37
0.40	—	—	0.410	—	0.57	0.53

$P$ ——線圈的功率損耗(W);

$U$ ——線圈的工作電壓(V),取額定電壓的1.05  
或1.1倍值;

$R$ ——線圈的電阻( $\Omega$ ),銅導線的電阻率 $\rho$ 見表6-  
38;

$\alpha$ ——線圈的散熱係數( $W/cm^2 \cdot C$ ),見表6-39;

$S_r$ ——線圈的散熱表面積( $cm^2$ );其中: $S_r = S_w +$   
 $\eta_m S_n$

$S_w$ ——線圈外表面面積( $cm^2$ );

$S_n$ ——線圈內表面面積( $cm^2$ );

$\eta_m$ ——經驗係數,在0~2.4範圍內,可估計如下:

金屬骨架  $\eta_m = 1.7$ ; 無骨架,  $\eta_m = 0.9 \sim 1$ ; 直



绕铁心上  $\eta_m = 2.4$ 。

表 6-38 铜导线的电阻率  $\rho$  值

工作温度 / C	电阻率 $\rho$ /( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	工作温度 / C	电阻率 $\rho$ /( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )
20	$\rho_{20} = 0.01754$	90	$\rho_{90} = 0.02236$
35	$\rho_{35} = 0.01857$	105	$\rho_{105} = 0.02339$
40	$\rho_{40} = 0.01991$	120	$\rho_{120} = 0.02443$

表 6-39 线圈的散热系数  $\alpha$  值的经验数据

线圈温升 / C	$\alpha / \times 10^{-4} (\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{C})$	
	A 类 当线圈到铁心柱之间 的热传导良好时	B 类 当线圈到铁心柱之间 热传导不良时
40	11.00	9.84
45	11.20	10.01
50	11.41	10.19
55	11.62	10.37
60	11.80	10.54
65	12.04	10.72
70	12.25	10.99
75	12.46	11.17
80	12.68	11.35
85	12.89	11.52

注：表中 A 类一般适用于直流电磁铁的线圈，B 类适用于交流。

若结果不满足上式条件,说明电流密度太大,可适当放大导线截面重新计算,直到温升合格为止。

关于电阻  $R$ 、线圈内表面面积  $S_i$  和外表面面积  $S_o$  可如下计算:当已知内径  $D_1$  和外径  $D_2$  时,

$$R = \rho \frac{L}{S} = \frac{\rho \pi D_p W}{\frac{\pi}{4} d^2}, D_p = D_1 + b_k$$

式中  $D_p$ ——线圈的平均直径 (m);

$b_k$ ——线圈厚度 (m);

$d$ ——导线直径 (mm);

线圈内表面面积  $S_i = \pi D_1 l_k$

线圈外表面面积  $S_o = \pi D_2 l_k$

式中  $l_k$ ——线圈高度。

## 第七节 交直流线圈的简捷计算

### 一、直流线圈的简捷设计

利用诺模图可以很快地确定电磁式继电器和接触器线圈的尺寸、匝数、线径及电阻等。图 6-32 示出直流线圈的计算图。该图是假定电源电压为额定值的 1.05 时,线圈稳定温升为 +70℃ 所作出的。如果线圈温升只允许 65℃,则按该计算图求得的线圈匝数  $W$  应增加 5%~7% 左右,线圈温升合格。

#### 1. 第一类设计

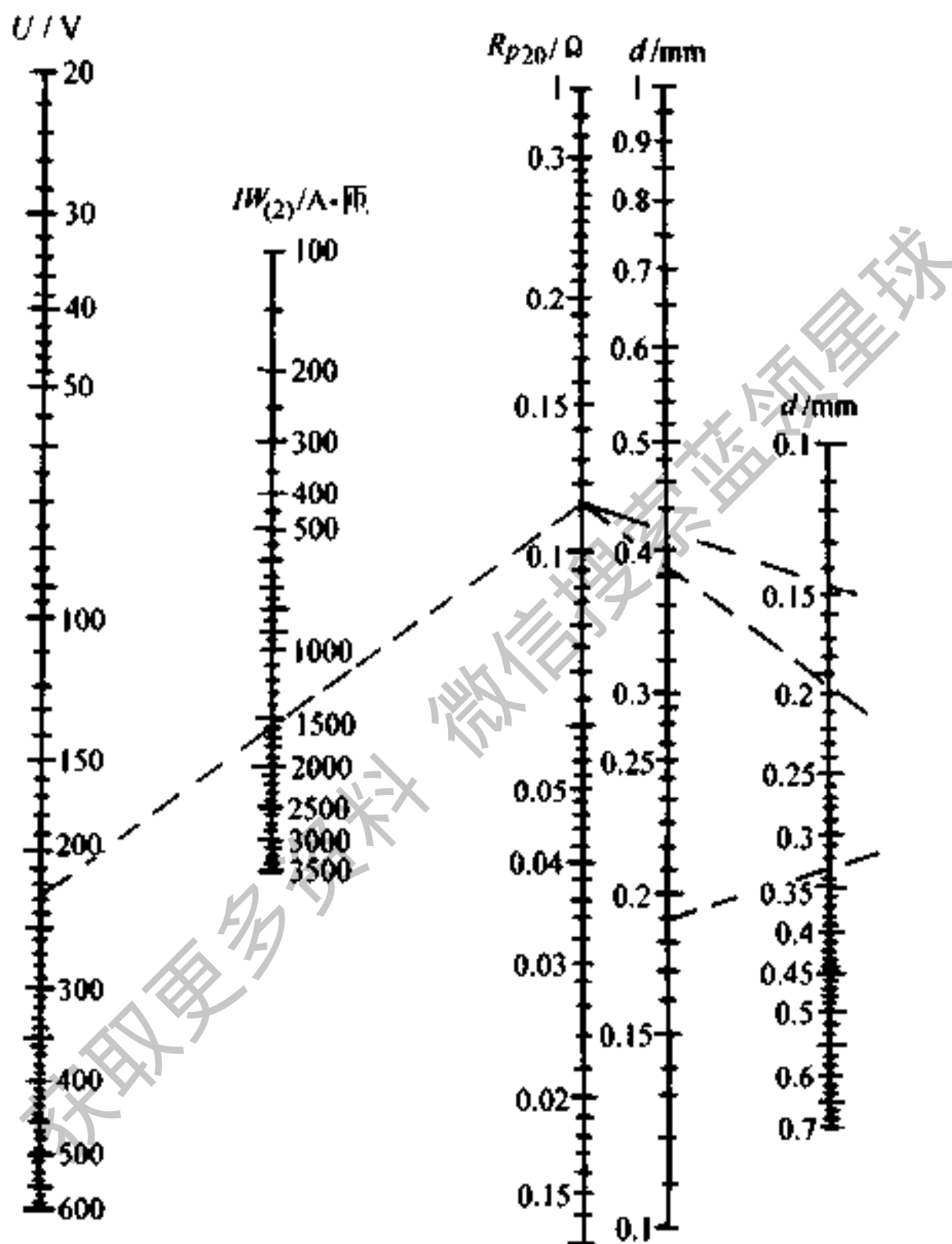
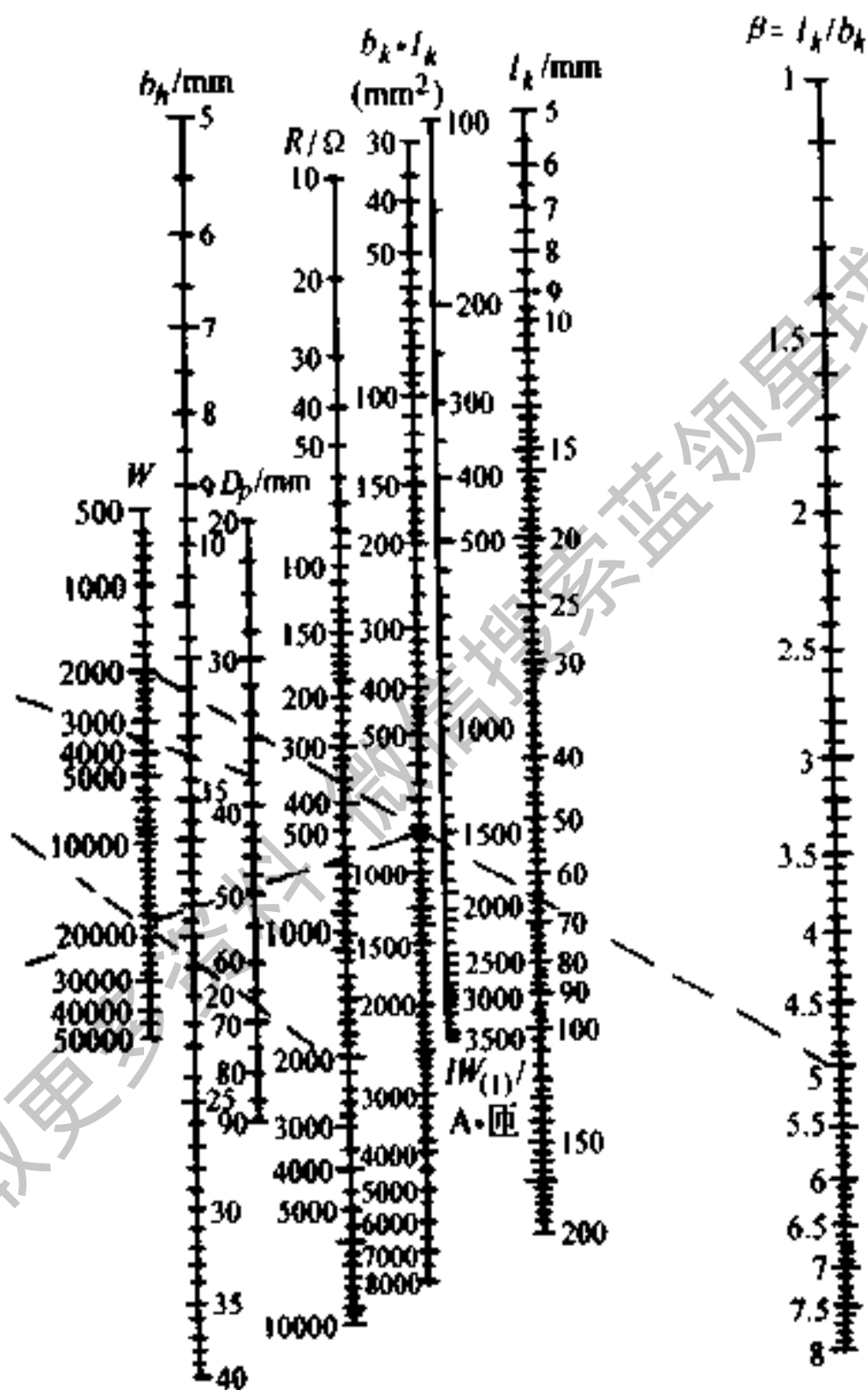


图 6-32 直流线



圆的计算图

已知安匝数  $WI$ 、线圈工作电压  $U$ 、线圈高度与厚度比  $\beta$ ，求线圈的尺寸参数的计算步骤

(1) 确定线圈厚度  $b_k$ 、高度  $l_k$  及线圈窗口面积  $b_k l_k$ ：把已知的  $WI$  和  $\beta$  放到相应标号的  $WI_{(1)}$  及  $\beta$  坐标线上，用直尺连接这两点，连线与坐标线  $b_k$ 、 $l_k$ 、 $b_k l_k$  的交点就是所求的相应值。

(2) 求出 20°C 时平均匝长的电阻值  $R_{p20}$ ：把已知  $U$  及  $WI$  放到相应的  $U$  坐标线及  $WI_{(2)}$  坐标线上，连接两点，即可在坐标线  $R_{p20}$  上找到 20°C 时平均匝长电阻值  $R_{p20}$ 。

(3) 求导线直径  $d$ ：根据铁心尺寸及骨架结构确定线圈内径  $D_1$ ，求出绕组平均直径  $D_p = D_1 + b_k$ 。连接  $D_p$  与  $R_{p20}$  在  $d$  坐标线上即可找到导线直径  $d$ 。查线规表，得绝缘导线外径  $d'$ 。

(4) 确定线圈匝数  $W$ ：连接  $d'$  和  $b_k l_k$  两点，在坐标线  $W$  上即可找到线圈匝数  $W$ 。

(5) 求线圈总电阻  $R$ ：连接  $W$  和  $R_{p20}$  两点，在坐标线  $R$  上即可找到 20°C 时，线圈总电阻  $R$  值。

把上述计算步骤简单地归纳如下：由  $WI_{(1)}$  与  $\beta$  决定  $b_k$ 、 $l_k$ 、 $b_k l_k$ ；由  $U$  与  $WI_{(2)}$  决定  $R_{p20}$ ；由  $R_{p20}$  与  $D_p$  决定  $d$ ；由  $d'$  与  $b_k l_k$  决定  $W$ ；由  $W$  和  $R_{p20}$  决定  $R$ 。

## 2. 第二类设计

已知线圈尺寸、任意标号直径的导线，求线圈的匝数

及电阻的计算步骤：

- (1) 由  $d'$  及  $b_k l_k$  决定  $W$ ；
- (2) 由  $d$  与  $D_p$  决定  $R_{p20}$ ；
- (3) 由  $R_{p20}$  与  $W$  决定  $R$ 。

### 3. 第三类设计

已知线圈尺寸、电源电压，求温升为  $70\text{C}$  时线圈的数据的计算步骤：

- (1) 由  $b_k$  与  $\beta$  决定  $IW_{(1)}$ ；
- (2) 由  $WI_{(2)}$  与  $U$  决定  $R_{p20}$ ；
- (3) 由  $R_{p20}$  与  $D_1$  决定  $d$ ；
- (4) 由  $d'$  与  $b_k l_k$  决定  $W$ ；
- (5) 由  $W$  与  $R_{p20}$  决定  $R$ 。

### 4. 第四类设计

已知原有线圈的尺寸及数据，求线圈工作电压改变（不改变原有线圈尺寸）时新线圈的计算步骤：

- (1) 先按下式求出新线圈的平均电阻  $R_{p20(2)}$

$$R_{p20(2)} = \frac{U_2}{U_1} R_{p20(1)}$$

式中  $R_{p20(1)}$  —— 原线圈的平均电阻；

- (2) 由  $R_{p20}$ （指  $R_{p20(2)}$ ）与  $D_p$  决定  $d$ ；
- (3) 由  $d'$  与  $b_k l_k$  决定  $W$ ；
- (4) 由  $W$  与  $R_{p20}$  决定  $R$ 。

## 二、交流线圈的简捷设计

已知磁路系统尺寸和铁心截面  $S$ 、线圈工作电压(电源电压)  $U$ 、电磁铁工作制, 求线圈匝数及导线直径的计算步骤

1. 由铁心截面积  $S$  和工作制  $TD\%$  值, 查图 6-33 中曲线, 求出线圈每伏的匝数  $W_0$ 。

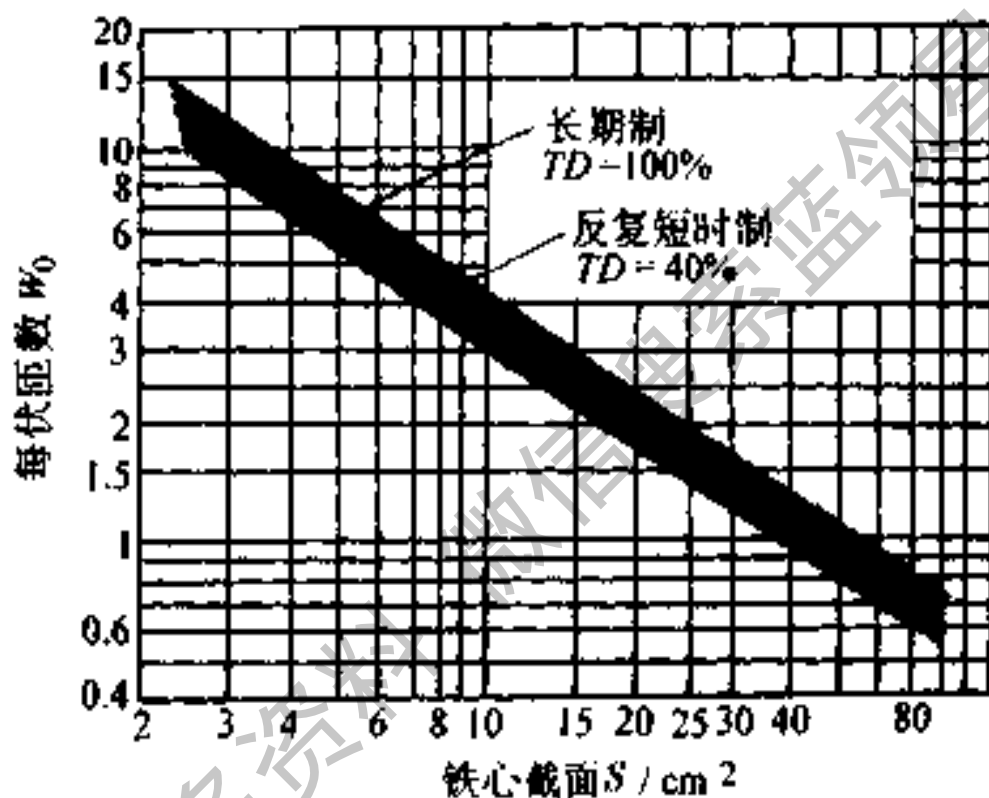


图 6-33 求线圈匝数的曲线

2. 由电源电压  $U$ , 求出线圈的匝数

$$W = U \cdot W_0$$

3. 根据已知的磁路系统结构尺寸, 算出铁心窗口面积

$$Q = h \cdot c$$

式中  $Q$ ——铁心窗口面积 ( $\text{mm}^2$ );

$h$ ——铁心窗口高度 (mm);

$c$ ——铁心窗口宽度 (mm)。

线圈在铁心窗口中所占的截面积为

$$Q_K = K_Q Q$$

式中  $K_Q$ ——窗口填充系数，可由图 6-34 中查得。

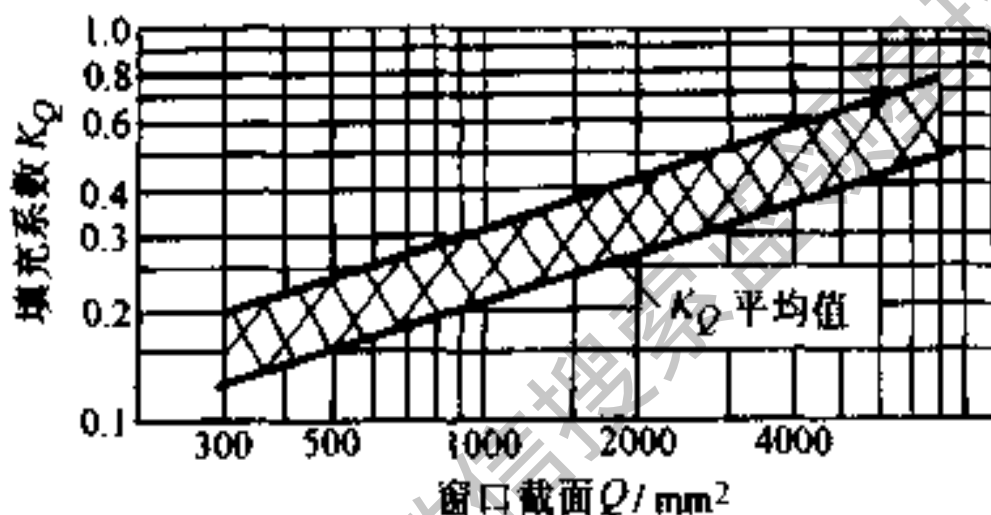


图 6-34 求填充系数  $K_Q$  的曲线

#### 4. 求导线直径 $d$

先按下式计算出单位截面的匝数  $W_0$ 。

$$W_0 = W/Q_K$$

再由图 6-35 中查出对应的线圈导线直径。图 6-35 中， $Q$  表示油性漆包线； $QSR$  表示单纱漆包线。

### 三、合闸电磁铁的计算

#### 1. 线圈安匝数的计算

$$IW = \frac{Ud^2}{4\rho D_p} \times 10^{-4}$$

式中  $I$ ——线圈电流 (A);



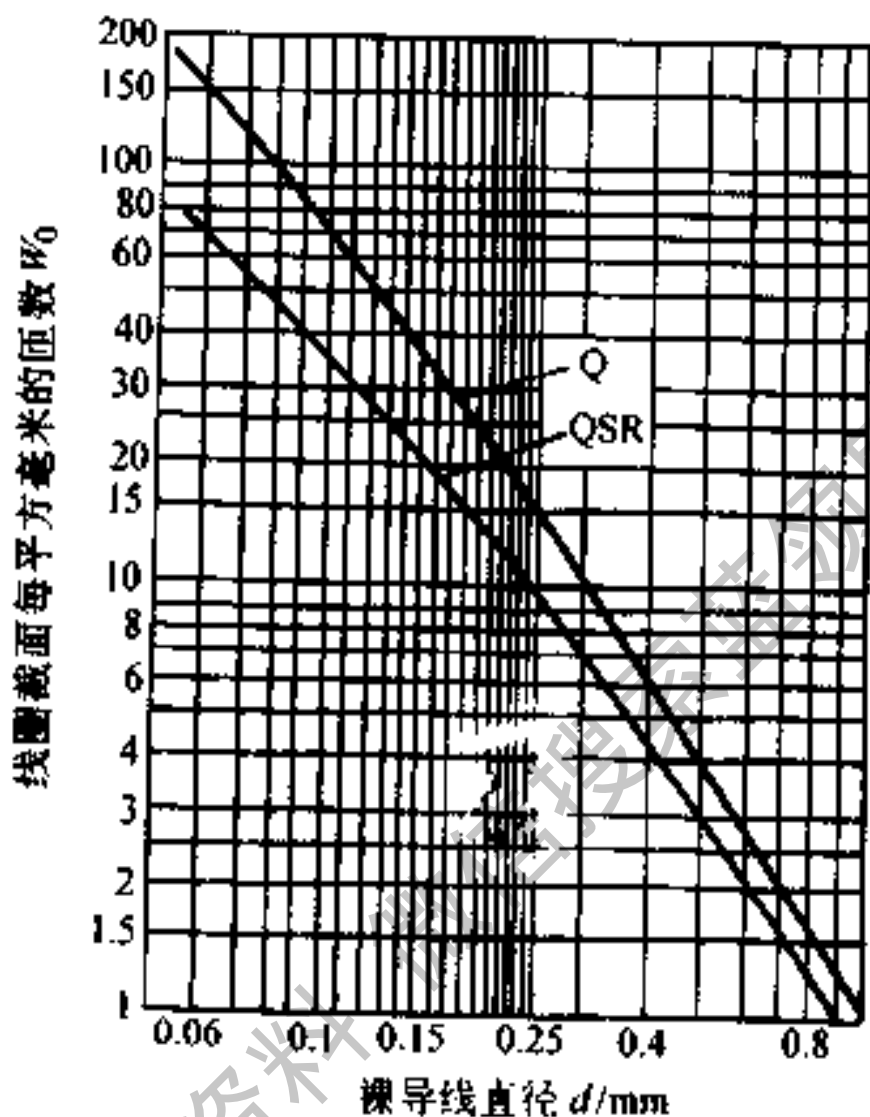


图 6-35 求线圈导线直径的曲线

$W$  —— 线圈匝数 (匝);

$U$  —— 电源电压 (V);

$d$  —— 线圈导线直径 (mm);

$\rho$  —— 导线电阻率 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ );

$D_p$  —— 线圈的平均直径 (cm)。

## 2. 线圈改绕计算

若在线圈外形尺寸不变的条件下, 增大线圈的安匝

数,以提高出力时,可保留原线圈的部分匝数,只拆除另一部分加以重绕,将留下的部分原线圈与新绕的线圈并联,如图 6-36 所示。

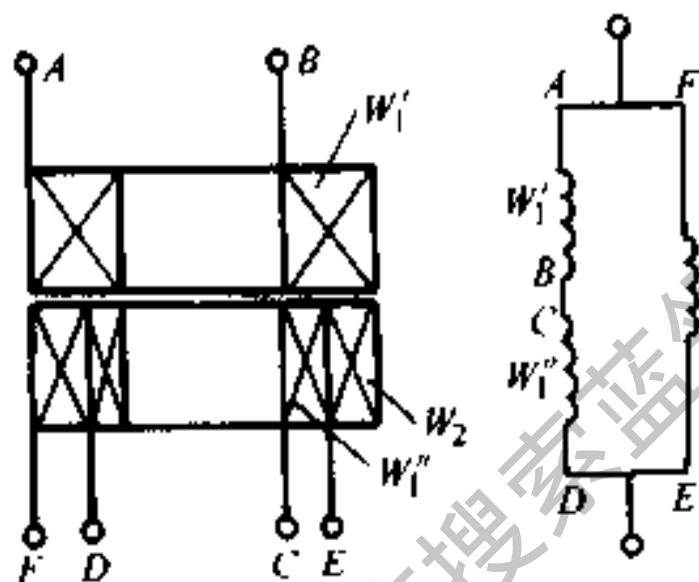


图 6 36 线圈改绕的结构及接线图

拆除后保留的匝数  $W_1$  为

$$W_1 = W_1' + W_1'' \approx \frac{IW}{IW + \Delta(IW)} W$$

应拆除掉的匝数  $W_2$  为

$$W_2 = W - W_1$$

式中  $W$  —— 原线圈匝数;

$\Delta(IW)$  —— 需增大的安匝数。

新绕线圈导线直径为

$$d = 200 \sqrt{\frac{\rho D_p \Delta(IW)}{U}}$$

应绕匝数  $W_2$  为

$$W'_2 = \frac{f_k Q_1}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

式中  $f_k$  —— 新绕线圈部分的填充系数；

$Q_1$  —— 拆掉部分的窗口面积 ( $\text{cm}^2$ )。

### 3. 温升校验

合闸线圈为短时工作制时，铜导线温升可按下式计算

$$\tau = 0.0066 \left( \frac{4I}{\pi d^2} \times 80\% \right)^2 t \leq \tau_{\text{允许}}$$

式中  $\tau$  —— 铜导线的温升 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$\tau_{\text{允许}}$  —— 线圈的允许温升 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$d$  —— 导线直径 ( $\text{mm}$ )；

$t$  —— 通电时间 ( $\text{s}$ )；

$I$  —— 同前。

设计时应考虑连续几次操作，线圈的温升不应超过允许温升。

## 第八节 保护继电器与时间继电器

### 一、保护继电器

#### 1. 过流继电器

选用条件

(1) 按电流种类选择继电器的型式。

(2) 继电器额定电流不小于电动机额定电流。

### (3) 继电器动作电流整定值 $I_{jd}$

$$I_{jd} = (1.1 \sim 1.3)I_q$$

式中  $I_q$  ——电动机起动电流最大值 (A)。

继电器动作电流应留有一定的上下限调整范围。

### 2. 堵转保护用过流继电器的选用

重复短时运转的鼠笼型异步电动机，可采用过电流继电器与延时继电器组成堵转保护环节，实现电动机过载保护。其延时时间略大于电动机的起动时间，其整定值应使继电器在电动机长期过载或堵转时动作，而在电流接近额定电流时应释放。通常采用的高返回系数的过电流继电器，有 JL14-JG、JL15 型。

### 3. 过电压保护继电器的选用

过电压保护继电器通常用于直流发电机端电压保护，选用条件如下

(1) 当控制系统过电压时，加于继电器线圈的电压不应超过继电器额定电压值。

### (2) 继电器动作电压值整定值 $U_{jd}$

$$U_{jd} = (1.1 \sim 1.15)U_r$$

式中  $U_r$  ——线路额定电压 (V)。

对于 JT3 系列直流电压继电器，其额定电压  $U_r$  为 220V 时，吸合动作电压为  $(0.3 \sim 0.5)U_r$ ，当用于 220V 线路上作过电压保护时，继电器线圈必须串接附加电阻  $R_f$ ，以达到既能保护线路过电压，又不使加于继电器的

电压超过其额定电压而遭损坏。

假定吸引电压为继电器线圈额定电压的 40%，则

$$0.4U_{\mu} = (1.1 \sim 1.15)U_c \frac{R_j}{R_j + R_f}$$

$$R_f = (2.75 \sim 2.9) \frac{U_c}{U_{\mu}} R_j - R_j$$

式中  $R_f$  ——附加电阻 ( $\Omega$ )；

$U_c$  ——控制系统线路额定电压 (V)；

$U_{\mu}$  ——继电器线圈的额定电压 (V)；

$R_j$  ——继电器线圈的额定电阻 ( $\Omega$ )。

#### 4. 失磁保护继电器的选用

失磁保护继电器通常用于直流电动机失磁保护。选用条件如下

(1) 继电器额定电流  $I_{\mu}$  不小于电动机额定励磁电流  $I_{\mu 0}$ 。

(2) 继电器释放电流整定值  $I_{fj}$ ：

$$I_{fj} = (0.8 \sim 0.85)I_{\min}$$

式中  $I_{\min}$  ——电动机的最小励磁电流 (A)。

继电器的释放电流应留有一定的上下限调整范围。

#### 5. 欠电压继电器的选用

欠压继电器通常用于交流电动机欠压保护。

可按线路电压选择欠电压继电器。一般控制系统对释放电压值无特殊要求。

## 二、时间继电器的选用

1. 在动作较频繁的场所，可选用电磁式时间继电器，如 JS3、JT3 型。

2. 在延时精度要求较高的情况下，可选用晶体管式 (JJS1 型) 或电动式时间继电器 (如 JS10 型)。

3. 在延时精度要求不高的场合，可选用空气式延时继电器。

4. 在动作频率较高的场合，可选用晶体管式时间继电器。

5. 长延时 (以分或小时计)，可选用电动式时间继电器。

6. 在多尘或有潮气的场合，可选用水银式时间继电器、封闭式时间继电器或防潮型时间继电器。

各类时间继电器性能比较，见表 6-40。

## 三、继电器加速与延缓电路

当需要继电器动作或释放得以加速或延缓时，可采取改变线路结构、参数及外加一些元件等办法。

### 1. 加速继电器动作时间电路

(1) 加速电路一：如图 6-37。

图中  $I_c$  为继电器额定电流； $I_{d_2}$  为继电器的动作电流 (下同)。

$$\textcircled{1} \text{ 条件 } I_c = \frac{U}{R} = \frac{U'}{R+r} = \text{常数}$$

表 6-40 各类时间继电器性能比较

类别	别	延时范围	精度 (%)	环境温度 / C	参考型号	备注
机械式	电磁式	10ms~2s	±10	-20~40	JRB、JR-2	
	钟表机构	0.1~10s	±2	-20~40	DS-110、DS-120	
	电动机式	0.5s~数h	±2	-10~40	JS-10、JS-11	直流产品制造困难
电热式	热敏电阻式	0.5~100s				
	双金属片式	1~200s	±10	-55~85	JF-7F、JE-10M	
阻尼式	空气阻尼(气囊)式	0.4~180s	±10		JS-7、JSK-1	
	水银式	0.25~20s			JSS	
电子式	闸流管式	10ms~600s	±4	-10~50		低压直流困难
	晶体管式	阻容式	±5	-20~50	JS-12、JSB-3	特殊要求可用于 -55~85 C
		计数式	0.1~9999s	±1位	0~40	JSSB

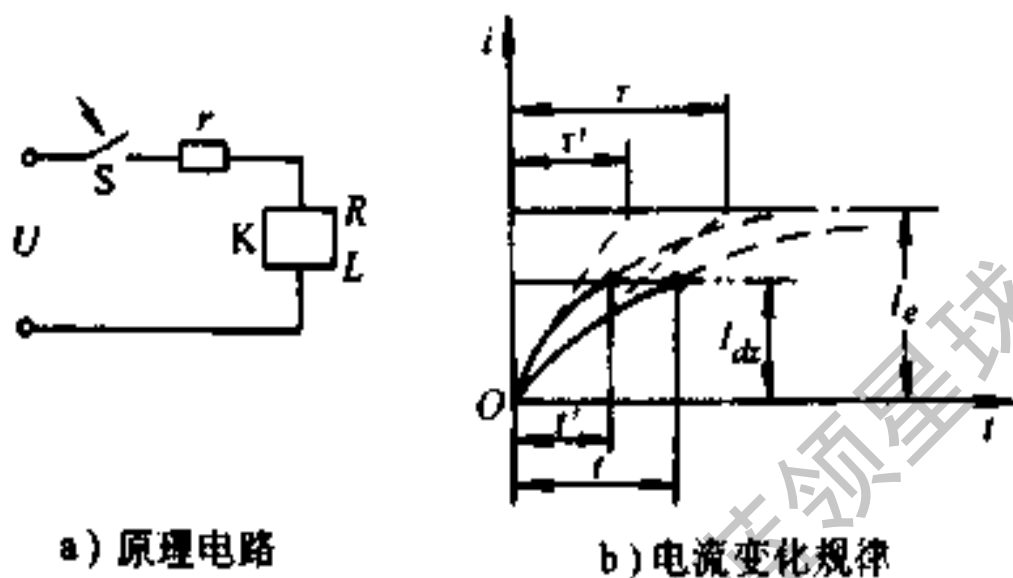


图 6-37 加速电路一

② 时间常数  $\tau = \frac{L}{R}$ ;  $\tau' = \frac{L}{R+r}$

③ 储备系数  $K = I_e / I_{dz}$

④ 动作触头时间  $t = \tau \ln \frac{K}{K-1}$

$$t' = \tau' \ln \frac{K}{K-1}$$

可使动作时间减少到 10ms 左右。

⑤ 改进系数  $\xi = 1 - \frac{t'}{t} = \frac{r}{R+r}$

(2) 加速电路二：如图 6-38 所示。

① 条件  $I_e = \frac{U}{R} = \frac{U'}{R+r} = \text{常数}$

$$I_e = \frac{U'}{R}, K = \frac{I_e}{I_{dz}}, K' = \frac{I_e}{I_{dz}}$$



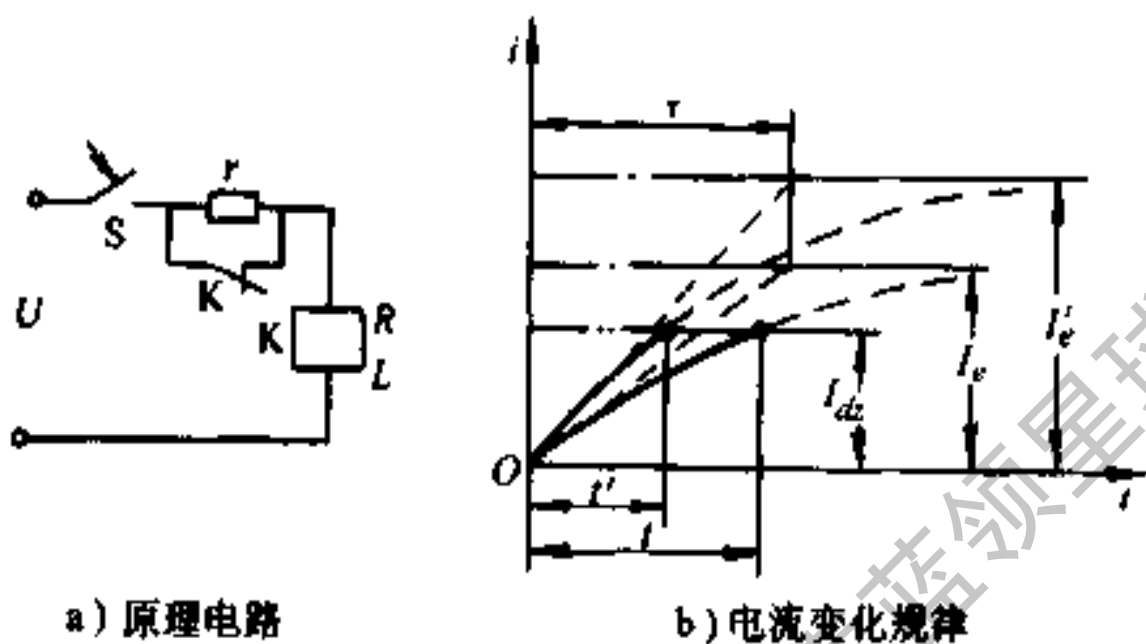


图 6-38 加速电路二

## ② 时间常数

$$\tau = L/R(\text{动作时})$$

## ③ 动作触动时间

$$t = \tau \ln \frac{K}{K-1}; t' = \tau \ln \frac{K'}{K'-1}$$

## ④ 改进系数

$$\xi = 1 - \frac{t'}{t} = 1 - \frac{\ln \frac{K'}{K'-1}}{\ln \frac{K}{K-1}}$$

(3) 加速电路三：如图 6-39。

① 条件  $I_e = \frac{U}{R} = \frac{U'}{R+r} = \text{常数}$ 

## ② 电流变化规律

$$i^* = \frac{i}{I_c} = 1 - A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(r + \varphi) \quad (a^2 < b)$$

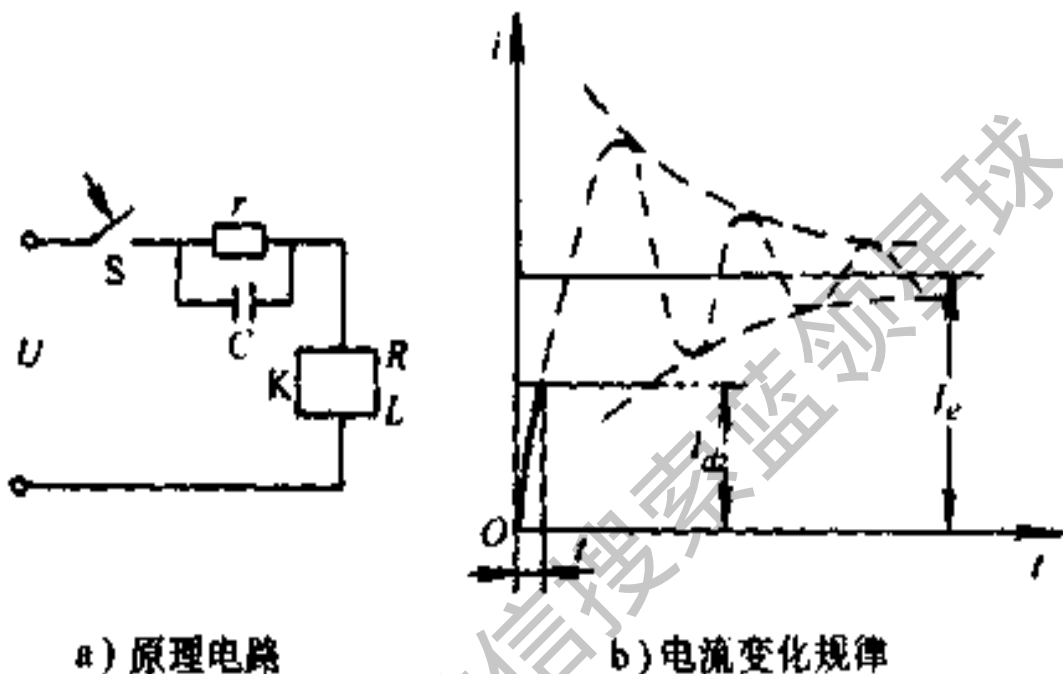


图 6-39 加速电路三

其中  $r = \omega t$ ,  $\omega^* = \omega \tau = \sqrt{b - a^2} / 2$

$$\frac{\beta}{\omega} = \frac{1 + \lambda_0}{2\omega^*}, \quad A_0 = \frac{\sqrt{\lambda(1 + \lambda)}}{\omega^*}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2\omega^*}{\lambda_c - \lambda - 1}$$

$$a = 4\lambda(1 + \lambda), \quad b = (1 + \lambda)^2$$

$$\lambda = r/R, \quad \tau = L/R, \quad \lambda_c = \tau/rC$$

$r/R$  比值越大及  $C$  越大, 加速作用越显著。但不应使电路发生振荡。

元件选择:

$$C = \frac{L}{Rr} \times 10^{-6}, \quad U' = \frac{R+r}{R} U$$

式中  $C$ ——电容 ( $\mu\text{F}$ );

$r$ ——电阻 ( $\Omega$ );

$R$ 、 $L$ ——线圈的电阻和电感 ( $\Omega \cdot \text{H}$ );

$U_e$ ——线圈额定工作电压 ( $\text{V}$ );

$U'$ ——电源电压 ( $\text{V}$ )。

## 2. 延缓继电器动作时间电路

(1) 延缓电路一：如图 6-40。

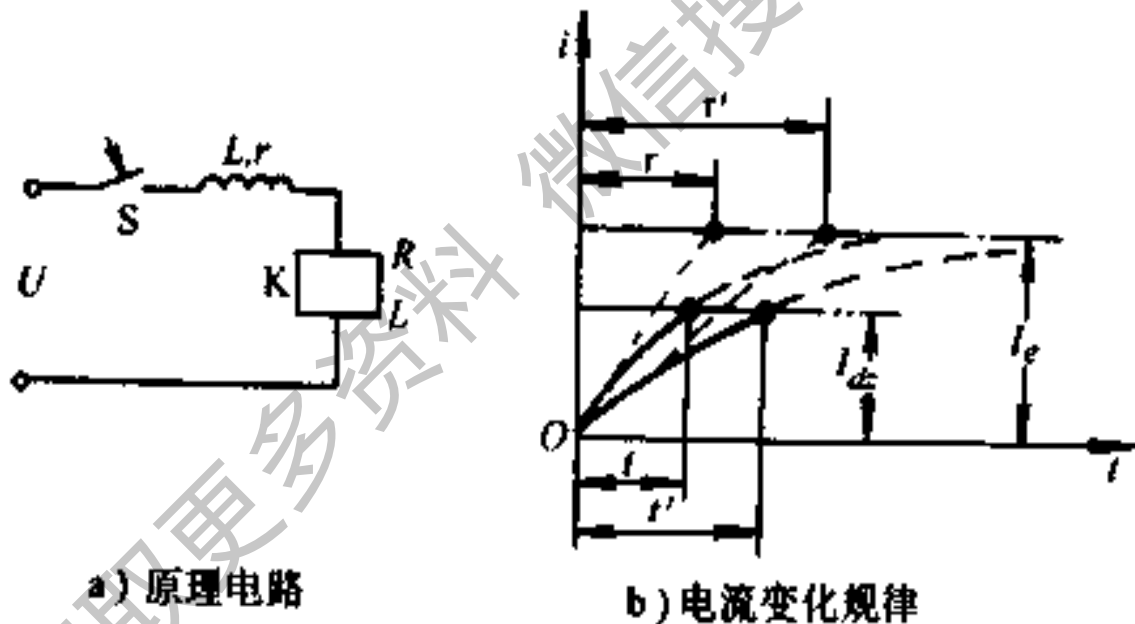


图 6-40 延缓电路一

① 条件  $I_e = \frac{U}{R} = \frac{U'}{R+r} = \text{常数}$

② 时间常数  $\tau = \frac{L}{R}$ ,  $\tau' = \frac{L+L'}{R+r}$

## ③ 动作触动时间

$$t = \tau \ln \frac{K}{K-1}, \quad t' = \tau' \ln \frac{K}{K-1}$$

④ 延迟系数  $\xi = \frac{t'}{t} - 1 = \frac{\tau'}{\tau} - 1$ 

(2) 延缓电路二：如图 6-41 所示。

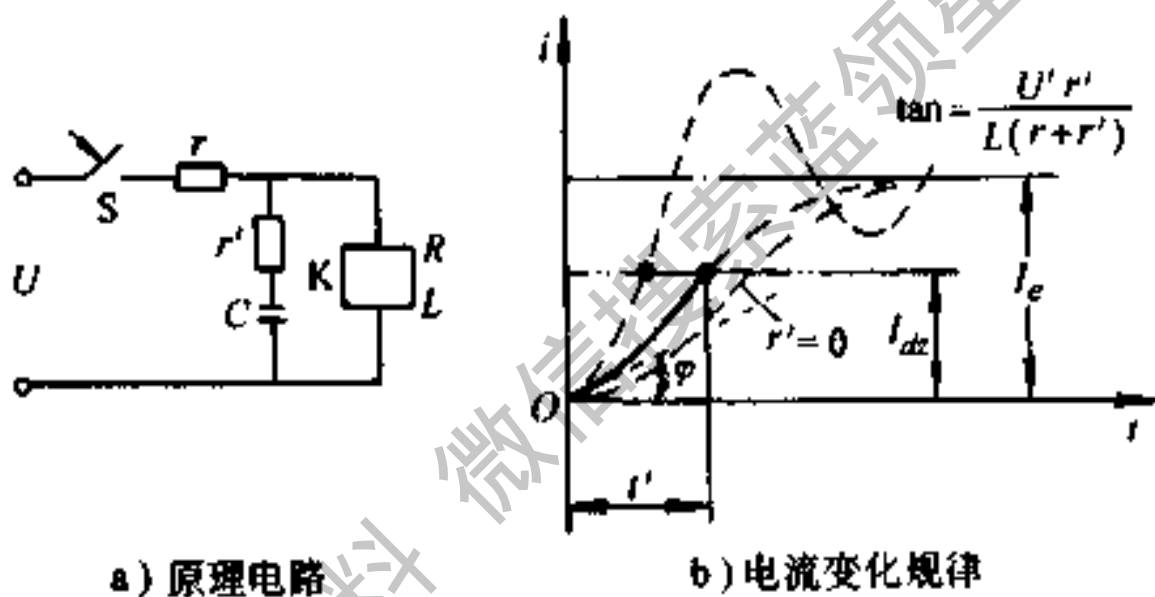


图 6-41 延缓电路二

① 条件  $I_e = \frac{U}{R} = \frac{U'}{R+r} = \text{常数}$ 

## ② 电流变化规律：

$$i' = \frac{i}{I_e} = 1 - e^{-\frac{\beta}{\omega} t} (chr + Ashr) \quad (\text{当 } a^2 > b)$$

$$= 1 - A^0 e^{-\frac{\beta}{\omega} t} \sin(r + \varphi) \quad (\text{当 } a^2 < b)$$

$$\text{其中 } \frac{\beta}{\omega} = \frac{1 + \lambda + \lambda' (1 + \lambda)}{2 (1 + \lambda') \omega^*}$$

$$A^{\circ} = \frac{\sqrt{(\lambda_c - \lambda)(1 + \lambda)}}{(1 + \lambda') \omega^*}$$

$$\omega^* = \omega r = \frac{\sqrt{|a^2 - b|}}{2(1 + \lambda')}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2(1 + \lambda') \omega^*}{1 + \lambda - \lambda'(1 + \lambda)}$$

$$a = 1 + \lambda + \lambda'(1 + \lambda), \quad b = 4\lambda(1 + \lambda)(1 + \lambda')$$

$$\lambda' = r'/r, \quad \lambda = r/R, \quad \lambda_c = \tau/rC, \quad \tau = L/R$$

阻容式电路参数对加速、延缓作用的影响，如图 6-42。图 6-42a 中的电路应满足以下条件：

$$(2\lambda + 1) - 2\sqrt{\lambda(\lambda + 1)} < \lambda_c < (2\lambda + 1) + 2\sqrt{\lambda(\lambda + 1)}$$

其中  $\lambda = r/R$ ,  $\lambda_c = 1/RrC$

图 6-42 中， $t$  为有加速与延缓电路的继电器的动作触动时间， $t_0$  为没有加速与延缓电路的继电器的固有动作触动时间。

图 6-42 中， $C^* = CR^2/L$ ，曲线  $t/t_0(\lambda)$  是  $r' = 0$ ，储备系数  $K = 2$  的条件下绘制的。

### 3. 继电器延缓释放电路

(1) 延缓释放电路一：如图 6-43 所示

基本关系

$$I_c = \frac{U'}{R + r}$$

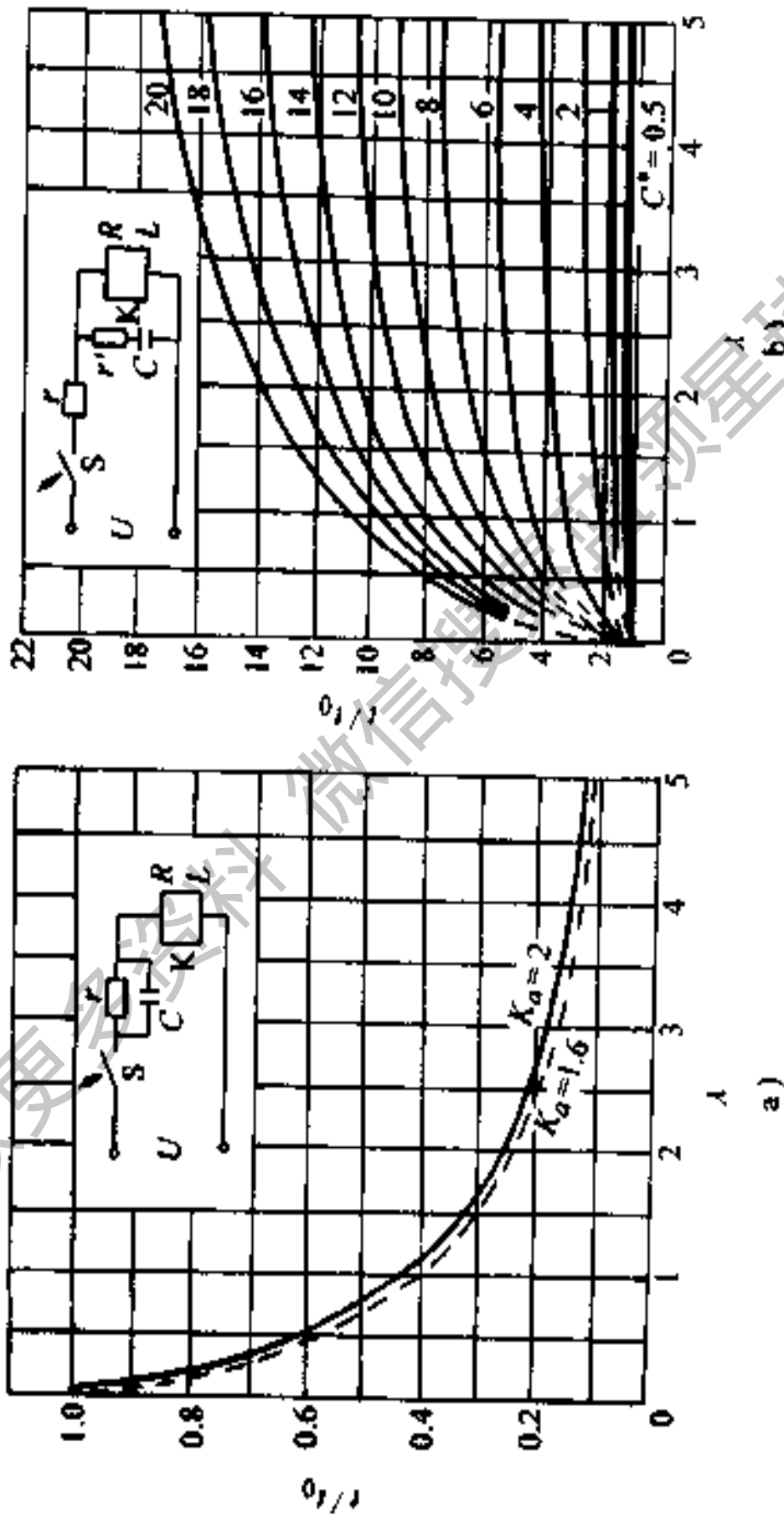


图 6-42 阻容加速与延缓电路

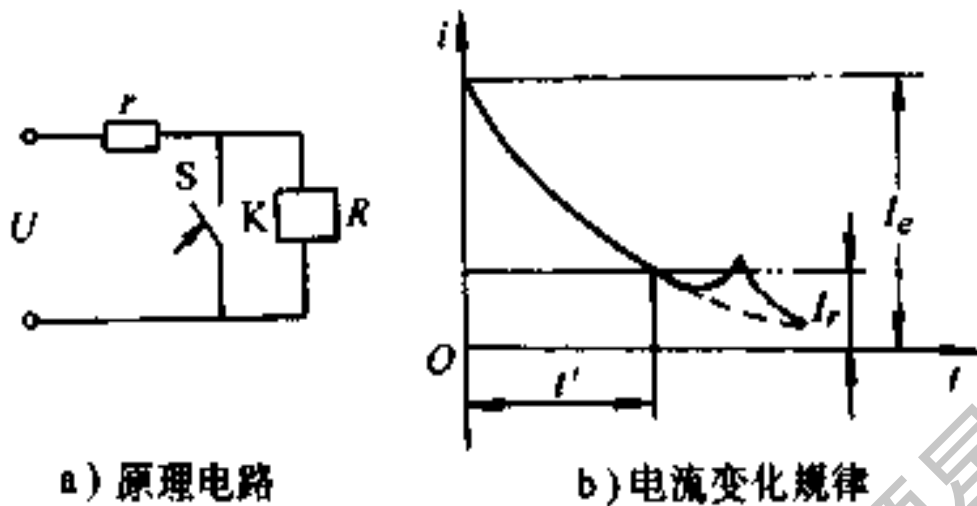


图 6-43 延缓释放电路一

电阻元件功率  $P=U^2/r$

(2) 延缓释放电路二：如图 6-44 所示。

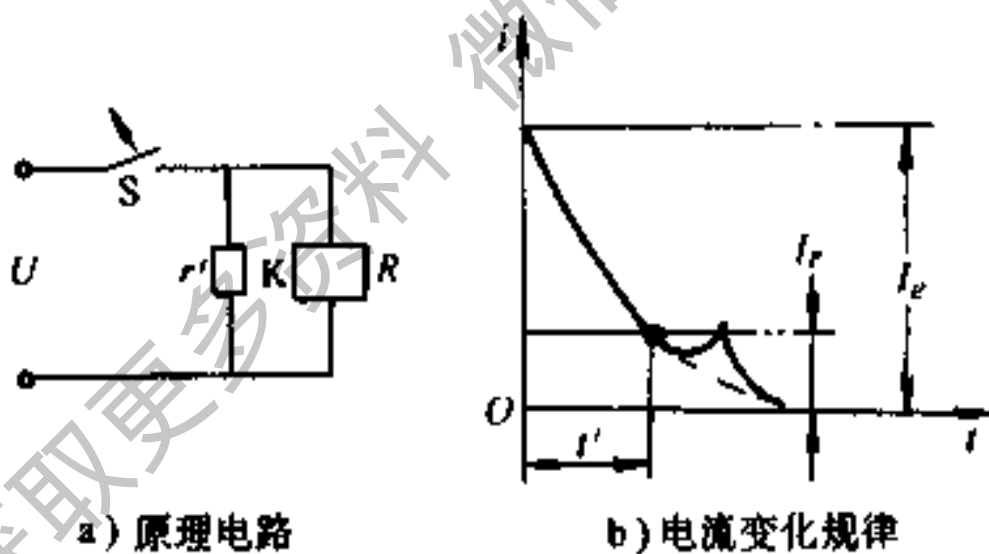


图 6-44 延缓释放电路二

基本关系  $I_r=U/R$

电阻元件功率  $P=U^2/r'$

## 第九节 继电器熄火花电路

继电器是感性负荷，当断开时在触头处会产生过电压，从而引起火花放电。这不但会加速触头损坏，还会产生一种高频信号，严重干扰无线电通信，因此常采用熄火花电路。

### 常用熄火花电路

1. 熄火花电路一：如图 6-45 所示。

(1) 参数选择，可按下列经验公式计算

$$C = 0.1I^2$$

$$r = E/[10I(1 + 50/E)]$$

式中  $C$ ——电容器电容量 ( $\mu\text{F}$ )；

$r$ ——电阻 ( $\Omega$ )。

(2) 电容击穿电压应大于过电压  $U_{km}$ 。

(3)  $U_{km}$  应小于最小击穿电压  $U_d$ ，并留适当的裕度。

该电路特点是，电源极性相反时，电路仍能正常工作。 $S$  闭合后，电阻  $r$  中无损耗。

2. 熄火花电路二：如图 6-46 所示。

(1) 参数选择

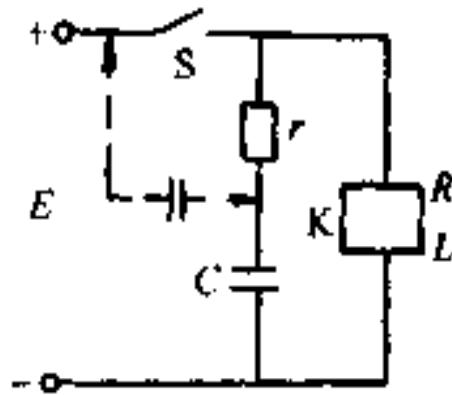
$$r \leq (U_{km} - E - U_v)/I$$

式中  $I$ —— $E/r$ 。

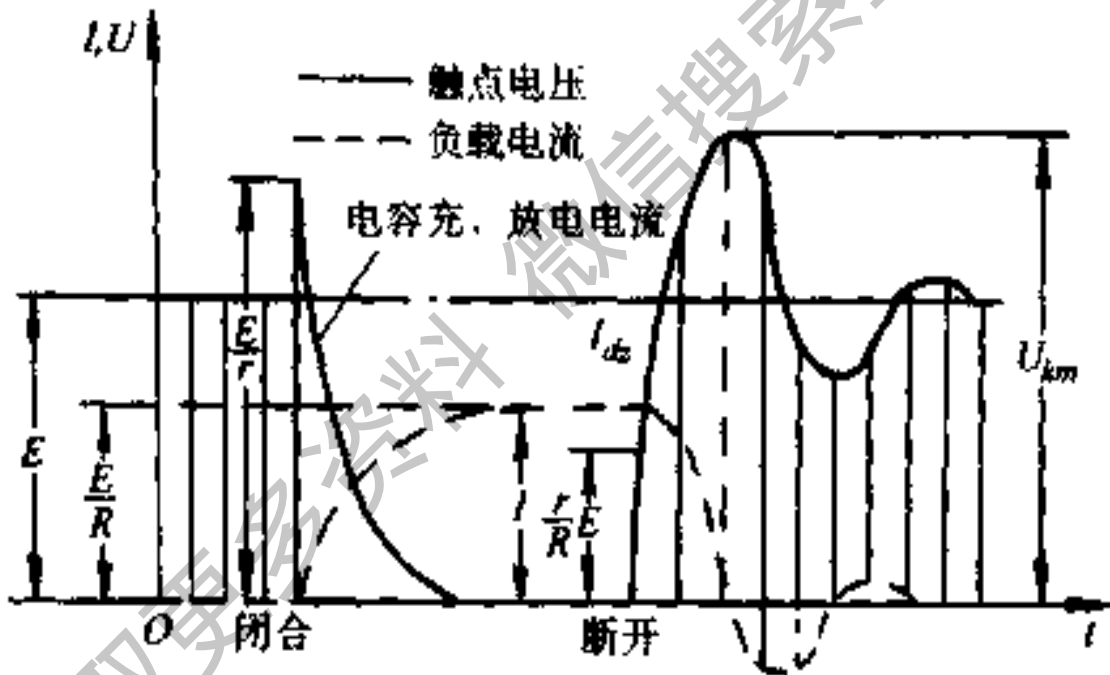
(2) 二极管选择，反向击穿电压大于  $E$ ，正向电流大



于  $E/r$ 。



a) 原理电路



b) 电流、电压变化规律

图 6-45 熄火花电路

(3) 若负荷是继电器线圈，则此继电器将有一定的释放时间。有时电阻  $r$  也可略去。

该电路熄火花效果好，但电源极性不能接反。

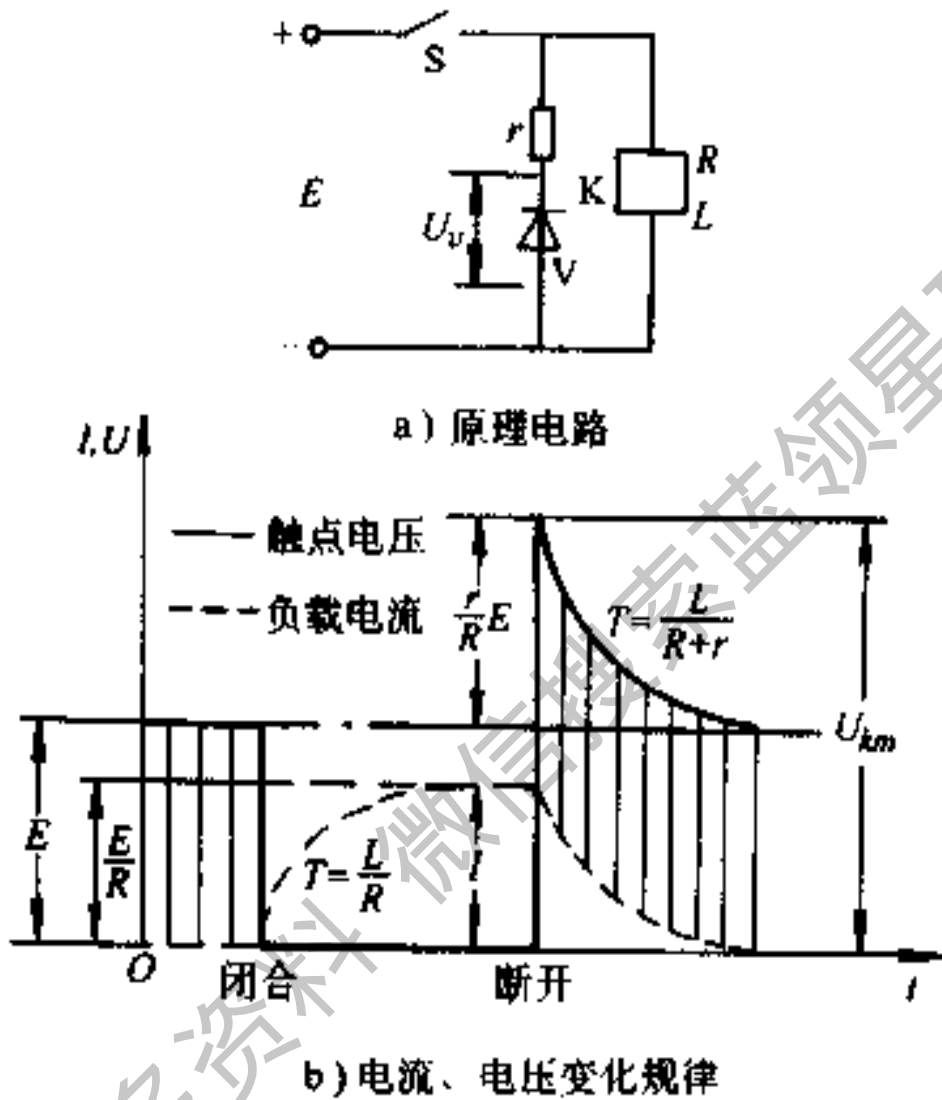


图 6-46 熄火花电路二

3. 熄火花电路三：如图 6-47 所示。

(1) 二极管选择当采用两只稳压管时，

$$U_w > E \text{ 及 } U_w < U_{km} - E$$

式中  $U_w$ ——稳压管的稳压值。

当采用一只稳压管和一只二极管时，二极管反向击穿电压大于  $E$ ，正向电流大于  $E/r$ 。

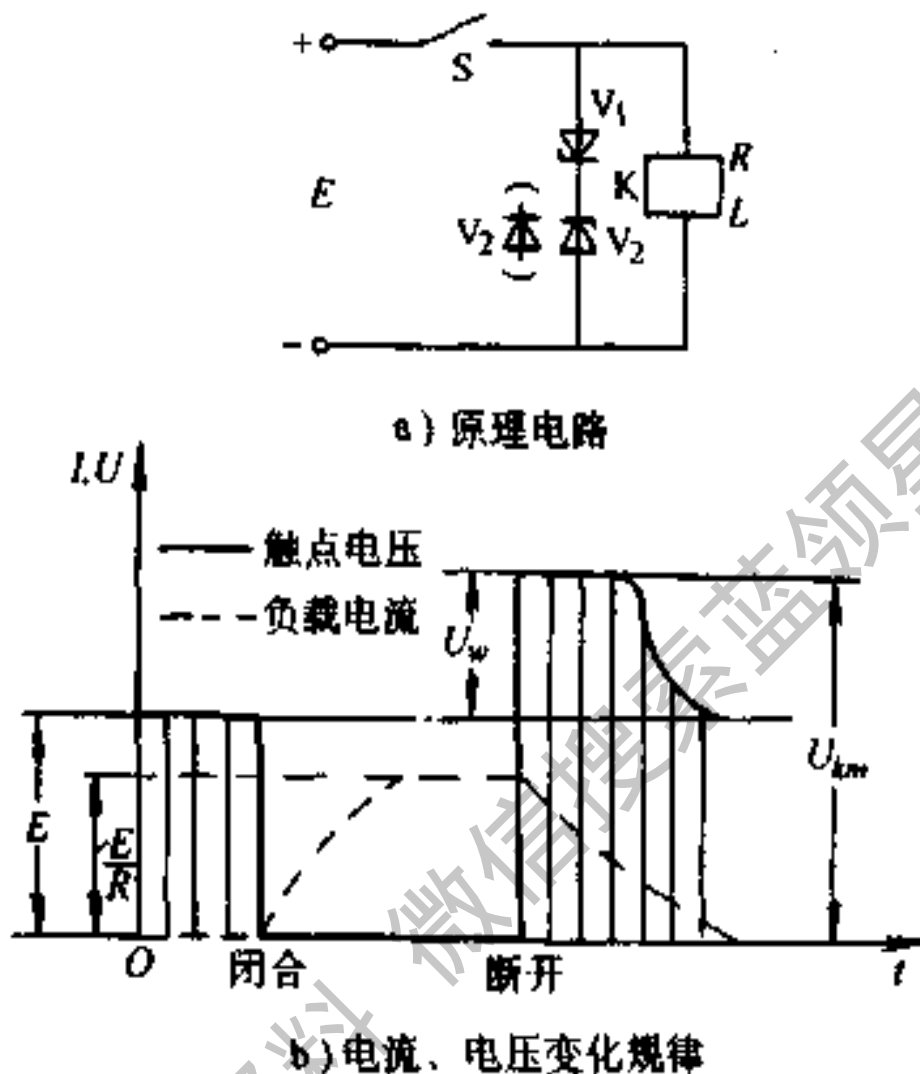


图 6-47 熄火花电路三

(2) 该电路特点熄火花效果好。当  $S$  断开时，负载电流下降较快。

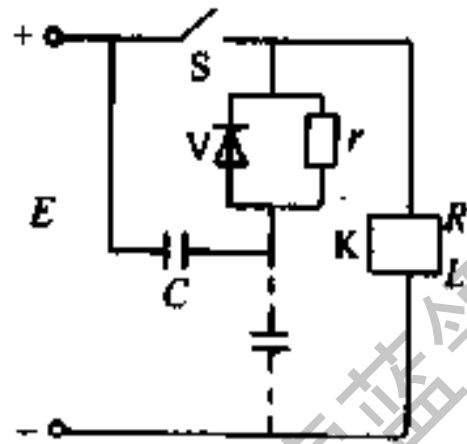
4. 熄火花电路四：如图 6-48 所示。

(1) 触头  $K$  刚断开时，其间隙压降为二极管正向压降，约  $0.3 \sim 1V$ ，不会产生火花与电弧。

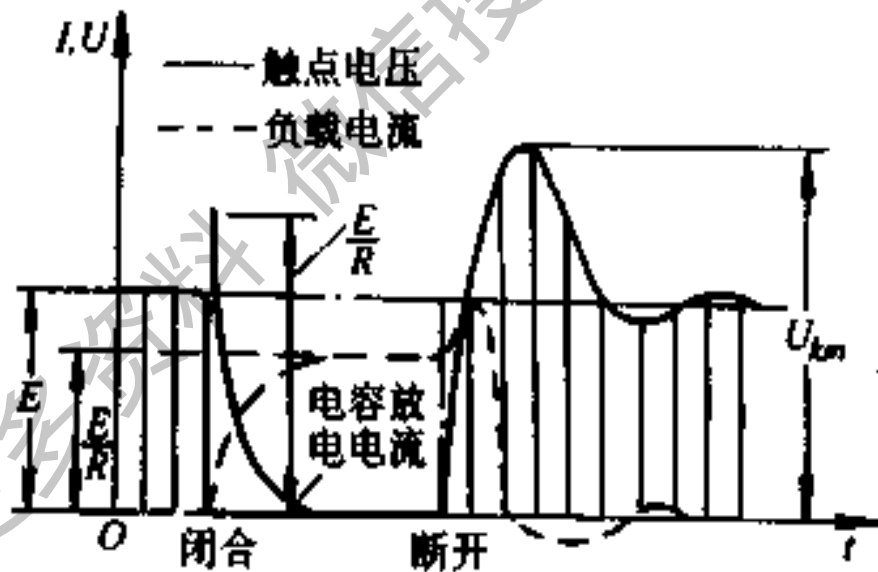
(2) 电容量的选择，应使电容电压上升的速度均不能击穿逐渐拉开的间隙，可按下式选，

$$C \geq 0.01EI(1 + 0.5\tau)$$

式中  $C$  的单位为  $\mu\text{F}$ ;  $\tau = L/R$  为时间常数, 单位为  $\text{ms}$ 。



a) 原理电路



b) 电流、电压变化规律

图 6-48 熄火花电路四

(3) 电容的击穿电压小于  $U_{km}$ 。

(4) 电阻值由放电电流限制值决定, 其最小值应满

足：

$$r_{\min} \geq 2 \sqrt{L/C}$$

5. 熄火花电路五：如图 6-49 所示。

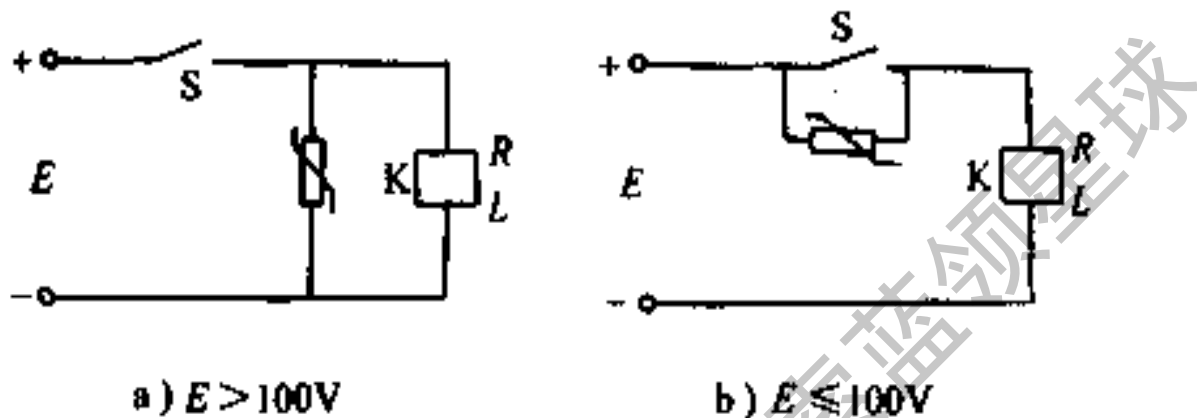


图 6-49 熄火花电路五

氧化锌压敏电阻参数的选择由下列公式确定

$$U_{1mA} > 1.3E$$

$$\alpha > \frac{\lg I + 3}{U_{jc}/U_{1mA}}$$

式中  $U_{1mA}$ ——压敏电阻标称电压 (V)，当  $E$  较小时，可

取  $U_{1mA} = (1.5 \sim 2.5) E$ ；

$E$ ——电源电压 (V)；

$\alpha$ ——非线性系数，MY31 型压敏电阻的  $\alpha = 35 \sim 60$ ；

$I$ ——继电器工作电流 (A)；

$U_{jc}$ ——触头击穿电压，对于银触头取 300V。

6. 表 6-41 和表 6-42 示出熄火花电路效果的比较。

表 6-41 熄火花电路效果示例

熄火花电路类型	过电压峰值 /V	释放时间 /ms
无熄火花电路	950	1.5
并联电容 $0.22\mu\text{F}$	120	1.55
并联首尾相接的二个 60V 稳压管	190	1.7
并联二极管与 $470\Omega$ 电阻	80	5.4
并联压敏电阻	64	2.7

注：采用直流 28V 密封继电器。

表 6-42 齐纳电压对熄火花效果影响示例

熄火花电路	额定齐纳电压 /V	过电压峰值 /V	释放时间 /ms
无熄火花电路	—	1600	3.8
并联首尾相	75	70	4.8
接的二个稳	35	42	6.0
压二极管	18	18	8.8

注：采用直流 26.5V、 $225\Omega$  小型继电器。

# 第七章 电焊机及其选择

## 第一节 基础知识及计算

### 一、弧焊机的基本计算

#### 1. 弧焊机一般参数及功率因数计算

弧焊机除有输入功率、效率等参数外，还有下列参数：

(1) 空载电压  $U_0$ ：对手工弧焊机规定为：弧焊变压器空载电压  $U_0 \leq 80V$ ，弧焊整流器空载电压  $U_0 \leq 90V$ ，直流弧焊发电机空载电压  $U_0 \leq 100V$ （单头）或  $U_0 \leq 60V$ （多头）。

(2) 工作电压  $U_r$ ：指弧焊机在焊接电弧燃烧时的输出电压。对下降特性电源，规定负载特性可用  $U_r = 20 + 0.04I$  表示；对单头平特性电源可用  $U_r = 14 + 0.05I$  表示。

(3) 额定焊接电流  $I_r$ ：指弧焊机在额定工作条件下运行时，能符合标准规定（如温升限度、电流稳定性等）而输出的电流。

(4) 额定工作电压  $U_{gr}$ ：指与额定工作电流相应的工作电压。

(5) 最大焊接电流  $I_{A \cdot \max}$ ：指弧焊机通过调节所允许

输出的与工作电压相应的最大电流。

(6) 最小焊接电流  $I_{h \cdot \min}$ : 指弧焊机通过调节所能输出的与工作电压相应的最小电流。

(7) 电流调节范围: 指弧焊机在工作电压符合规定负载特性条件下, 能够调节获得的焊接电流范围, 以最大和最小焊接电流对额定电流之比表示:

$$I_{h \cdot \max} / I_e \geq 1.2 \quad I_{h \cdot \min} / I_e \leq 0.25$$

(8) 最大工作电压  $U_{g \cdot \max}$ : 指弧焊机通过调节所能输出的与规定负载特性相应的最大电压。

(9) 最小工作电压  $U_{g \cdot \min}$ : 指弧焊机通过调节所能输出的与规定负载特性相应的最小电压。

(10) 工作电压调节范围: 指弧焊机在焊接电流符合规定负载特性条件下, 能够调节的电压范围。

(11) 连续焊接电流  $I_{Lr}$ : 指弧焊机能够以恒载连续工作方式运行的电流, 此时电焊机温升不超过标准的规定。

(12) 负载持续率 (又称暂载率)  $FZ$ :

$$FZ = \frac{t}{T} \times 100\%$$

式中  $t$  —— 焊机工作时间;

$T$  —— 整个周期 (工作和休止时间之和), 与  $t$  同单位。

我国规定: 一般手工交流弧焊机  $T=5\text{min}$ , 自动埋



弧焊机等  $T=10\text{min}$ ，一般接触焊机  $T=1\text{min}$ 。

① 一般电焊机如作连续通电使用，可以降低容量使用，下式可近似计算其容量：

$$S_{100} = \sqrt{FZ_r} \cdot S_r$$

式中  $S_{100}$ ——电焊机连续使用时的容量 ( $\text{kV} \cdot \text{A}$ )；

$FZ_r$ ——电焊机额定负载持续率 (%)；

$S_r$ ——电焊机额定容量 ( $\text{kV} \cdot \text{A}$ )。

② 在某一负载持续率  $FZ$  下，允许的焊接电流  $I_h$ ，可按下式近似计算：

$$I_h = \sqrt{FZ_r/FZ} \cdot I_{2r}$$

式中  $I_{2r}$ ——电焊机级次额定电流 (A)。

当连续焊接时，

$$I_h = \sqrt{FZ_r} \cdot I_{2r}$$

③ 弧焊变压器的功率因数：

$$\cos\varphi \approx \frac{0.9U_s}{U_o\eta}$$

式中  $\eta$ ——弧焊变压器的效率；

其它符号同前。

## 2. 电阻焊机焊接回路短路阻抗的估算

交流工频电阻焊机的焊接回路短路阻抗  $Z_{sd}$

$$Z_{sd} = \sqrt{X_{sd}^2 + R_{sd}^2}$$

式中  $X_{sd}$ ——焊接回路短路时感抗 ( $\Omega$ )；

$R_{sd}$ ——焊接回路短路时电阻 ( $\Omega$ )。

估计值： $Z_{sd} = 150 \sim 400 \mu\Omega$

$X_{sd} = 120 \sim 400 \mu\Omega$

$R_{sd} = 60 \sim 150 \mu\Omega$

焊接回路短路感抗  $X_{sd}$  为阻焊变压器漏抗及回路感抗之和，其值按图 7-1 所示曲线估计。

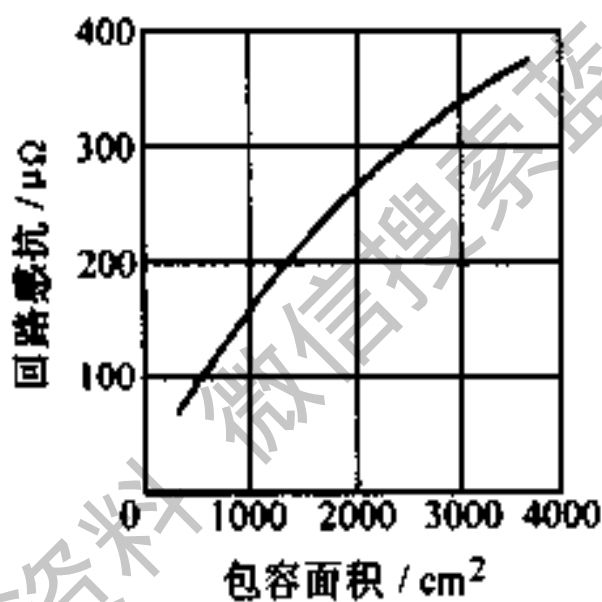


图 7-1 回路电感和包容面积的关系

焊接回路短路电阻  $R_{sd}$  为阻焊变压器内阻及回路中其他组件的电阻之和。

焊接回路组件的导电截面，可按表 7-1 的推荐电流密度来确定。截面确定后，便可求得电阻值。考虑 50Hz 时集肤效应，其阻值约增加 20%~70%。接头的接触电阻与材料性质有关，一般估计：固定接触为 2~10 $\mu\Omega$ ，滑动接触为 20 $\mu\Omega$ 。

表 7-1 焊接回路组件允许的电流密度

组件名称	材 料	冷却条件	允许的电流密度 /(A/mm <sup>2</sup> )
电 极	铜、铜合金	强迫水冷	20~50
电极握杆	青 铜	强迫水冷	10~20
	黄 铜		8~12
电极臂、 夹头、平板	铜	空 冷	1.4~2.2
		水 冷	2~3
	铜合金	空 冷	1.4~1.6
	铝		1.2~2
软连接线	铜电缆、 紫铜带	空 冷	2.5~3
		接头处水冷	2.5~4
固定接触点	铜和其 他材料	—	0.5~1
滑动接触点		水 冷	0.5~1
		水中工作	~12

## 二、电焊机熔敷金属量及效率计算

### 1. 熔敷金属量

$$m_s = aIt = m \left( \frac{1}{1 + K_s} \right) (1 - \zeta)(1 - \psi)$$

式中  $m_s$ ——焊接期间，熔敷到焊缝中的焊条金属质量

(kg);

$\alpha$ ——焊条焊心的熔敷系数, 即每 1Ah 能熔敷到焊缝中的焊芯质量 (kg/Ah);

$t$ ——焊接时间 (h);

$I$ ——焊接电流 (A);

$m$ ——焊接期间, 焊条消耗质量 (kg);

其它符号见下述。

## 2. 损失系数

$$\psi = \Delta m / m_b$$

式中  $\Delta m$ ——焊接期间, 金属蒸发、氧化和飞溅损失的焊条金属质量 (kg);

$m_b$ ——焊接期间, 熔化的熔芯金属质量 (kg)。

损失系数  $\psi$ , 对于结 422 焊条为 0.0391; 对于结 507 焊条为 0.026。

## 3. 有效利用电流

$$I_{y'} = I(1 - \psi)$$

## 4. 药皮的质量系数

$$K_b = m_b / m_x$$

式中  $m_b$ ——药皮质量 (kg);

$m_x$ ——焊条的金属焊芯质量 (kg)。

## 5. 焊心丢失系数

$$\zeta = \Delta m' / m_x$$

式中  $\Delta m'$ ——焊接期间, 丢弃的焊芯端头 (kg)。

$K_b$ 、 $\zeta$  可以实测，为此，令

$$K_l = \left( \frac{1}{1 + K_b} \right) (1 - \zeta)$$

式中  $K_l$  —— 实测得的焊条利用系数。

则 
$$I_{yr} = \frac{mK_l (1 - \psi)^2}{\alpha t}$$

熔敷系数与电流对焊条的熔化系数之间有如下关系：

$$\alpha_h = \frac{\alpha}{1 - \psi}$$

式中  $\alpha_h$  —— 电流对焊芯的熔化系数 (kg/Ah)，参见表 7-2 和表 7-3；

$\alpha$  —— 熔敷系数 (kg/Ah)。

表 7-2 焊芯的熔化系数  $\alpha_h$  值 (结 507 焊条)

序号	厂家名称	$\alpha_h$ /(kg /Ah)	序号	厂家名称	$\alpha_h$ /(kg /Ah)
1	宜昌电焊条厂	0.00844	8	上海电焊条厂	0.00721
2	自贡电焊条厂	0.00750	9	株洲电焊条厂	0.00794
3	集宁电焊条厂	0.00770	10	西安电焊条厂	0.00742
4	泰州电焊条厂	0.00727	11	沈阳电焊条厂	0.00849
5	电力电焊条厂	0.00774	12	兰州电焊条厂	0.00823
6	锦州电焊条厂	0.00736	13	东风电焊条厂	0.00832
7	常州电焊条厂	0.00787			

表 7-3 焊心的熔化系数  $\alpha_h$  值(结 422 焊条)

序号	厂家名称	$\alpha_h$ /(kg /Ah)	序号	厂家名称	$\alpha_h$ /(kg /Ah)
1	锦州电焊条厂	0.00854	19	上海电焊条厂	0.00831
2	天关电焊条厂	0.00834	20	成都电焊条厂	0.00857
3	韶关电焊条厂	0.00860	21	长治电焊条厂	0.00797
4	辽源电焊条厂	0.00843	22	常州电焊条厂	0.00803
5	西宁电焊条厂	0.00812	23	东风电焊条厂	0.00782
6	合肥电焊条厂	0.00825	24	杭州电焊条厂	0.00781
7	萍乡电焊条厂	0.00833	25	淄博电焊条厂	0.00768
8	天津电焊条厂 (MT-20)	0.00845	26	厦门电焊条厂	0.00812
9	银川电焊条厂	0.00753	27	贵阳电焊条厂	0.00796
10	西安电焊条厂	0.00862	28	郑州电焊条厂	0.00774
11	广州电焊条厂	0.00790	29	兰州电焊条厂	0.00815
12	大同电焊条厂	0.00782	30	抚顺电焊条厂	0.00798
13	北京电焊条厂	0.00809	31	丹东电焊条厂	0.00841
14	上饶电焊条厂	0.00801	32	宝鸡电焊条厂	0.00814
15	天津电焊条厂	0.00820	33	宜昌电焊条厂	0.00816
16	青岛电焊条厂	0.00817	34	南京电焊条厂	0.00843
17	牡丹江电焊条 厂	0.00771	35	电力电焊条厂	0.00871
18	保定电焊条厂	0.00769	36	泰州电焊条厂	0.00807
			37	哈尔滨电焊条 厂	0.00805

(续)

序号	厂家名称	$\alpha_h$ /(kg /Ah)	序号	厂家名称	$\alpha_h$ /(kg /Ah)
38	株洲电焊条厂	0.00855	43	长春电焊条厂	0.00787
39	石家庄电焊条 厂	0.00807	44	洛阳电焊条厂	0.00809
40	桂林电焊条厂	0.00836	45	邢台电焊条厂	0.00869
41	哈反帝电焊条 厂	0.00795	46	自贡电焊条厂	0.00852
42	集宁电焊条厂	0.00842	47	福州电焊条厂	0.00836
			48	沈阳电焊条厂	0.00817

### 6. 电焊机的有效电功率、有效电能和效率

$$P_{yr} = \frac{mk_1(1-\psi)U_2\cos\varphi}{\alpha_h t}$$

$$A_{yr} = \frac{mk_1(1-\psi)U_2\cos\varphi}{\alpha_h}$$

$$\eta = \frac{A_{yr}}{A_r} \times 100\%$$

式中  $P_{yr}$ ——电焊机有效电功率 (W);

$A_{yr}$ ——电焊机有效电能 (W·h);

$\eta$ ——效率;

$U_2$ ——电焊机焊接时二次电压 (V);

$\cos\varphi$ ——电焊机焊接时一次侧功率因数;

$A_r$ ——耗电量 (W·h)。

### 三、电焊机耗电量计算

电焊机熔化金属的单位耗电量可按下式计算：

$$A = \frac{CU_{21}}{k\eta}$$

式中  $A$ ——单位耗电量 ( $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ )；

$U_{21}$ ——电焊机次级电弧电压 ( $\text{V}$ )；

$C$ ——电源空载损失系数，交流焊接空载时  $C=1$ ；直流电源空载时  $C=1.17$ ；

$\eta$ ——供电电源效率；

$k$ ——焊接系数，当焊条涂厚涂料时， $k=6\sim 8$ ；当采用焊剂自动焊接时， $k=11\sim 24$ 。

表 7-4 列出了手工电弧焊和堆焊时每公斤熔敷金属的耗电量。整流式直流弧焊比直流弧焊发电机效率高，单位耗电量和空载功率都降低。表 7-5 列出了电阻焊的各种过程的单位耗电量。

表 7-4 电焊机的单位耗电量

电流种类和电焊方法	单位耗电量/ $(\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg})$
交流手工电弧焊	
单相制	3.5~3.8
三相制	2.65~3.0
采用焊剂的自动电弧焊和半自动电弧焊	2.8~3.5
电弧堆焊	1.8~2.4



(续)

电流种类和电焊方法	单位耗电量/(kW·h/kg)
直流手工电弧焊	
单头焊	5.0~6.5
多头焊	8.0~9.0
采用焊剂的自动电弧焊和半自动电弧焊	4.2~6.0
二氧化碳保护自动电焊和半自动电焊	2.2~3.2

表 7-5 电阻焊的单位耗电量

闪光对焊			
焊接处的 横截面积 /mm <sup>2</sup>	一个对焊点 的耗电量 /kWh	焊接处的 横截面积 /mm <sup>2</sup>	一个对焊点 的耗电量 /kWh
100	0.024	1000	0.4
200	0.06	1500	0.825
300	0.06	2000	1.275
500	0.125	2500	1.725
自动焊机点焊			
被焊接板 的总厚度 /mm	100个焊点 的耗电量 /kWh	被焊接板 的总厚度 /mm	100个焊点 的耗电量 /kWh
2	0.04	8	0.23
4	0.08	10	0.38
6	0.13	12	0.62

(续)

酸洗钢缝焊			
被焊接板的总厚度 /mm	1m 焊缝的耗电量 /kW·h	被焊接板的总厚度 /mm	1m 焊缝的耗电量 /kW·h
0.5	0.04~0.08	2	0.12~0.24
1.0	0.08~0.14	3	0.25~0.5
1.5	0.1~0.2	4	0.5~1.0

## 第二节 电焊机选择

### 一、弧焊机的特点和适用范围

1. 常用弧焊机的特点和适用范围见表 7-6:

表 7-6 常用弧焊机的特点和适用范围

电源类型	弧焊变压器	弧焊整流器	弧焊发电机
输出及电弧特点	输出为交流的下降外特性 电弧的稳定性较差, 但磁偏吹 <sup>②</sup> 现象很少产生	输出为直流或直流脉冲, 其外特性可以是平的或下降的 有磁偏吹现象	输出为直流 <sup>①</sup> , 其外特性可以是平的或下降的。磁偏吹现象较明显

(续)

电源类型	弧焊变压器	弧焊整流器	弧焊发电机
运行特点	大多接单相电网, 功率因数较低, 空载损耗小, 噪声较小, 维修简单	大多接三相电网, 空载损耗较小, 维修比弧焊变压器复杂	大多接三相 <sup>③</sup> 电网, 空载损耗较大, 维修比弧焊变压器复杂
适用范围	一般焊接结构的手工电弧焊(常使用酸性焊条), 铝合金的钨极氩弧焊 埋弧焊	较重要焊接结构的手工电弧焊(常使用碱性焊条) 各种埋弧焊及气体保护弧焊	

注:

- ① 也曾制造过交流中频 ( $f=200\sim 400\text{Hz}$ ) 输出。
- ② 指电弧受电磁力影响所产生的偏移。
- ③ 这里指电动发电机型式。

## 2. 常用弧焊机的性能数据 (表 7-7~表 7-10)

### 二、电焊机电源容量计算

对于电阻焊机, 其电源容量应考虑焊接时所造成的电压降及变压器温升等因素。

#### 1. 单台电阻焊机所需电源容量

表 7-7 BX1 系列的性能数据

项 目		单 位	技 术 规 格						
型 号			BX1-300			BX1-135			
额定工作电压		V	32			30			
额定持续率		%	60			65			
额定焊接电流		A	300			135			
接 法			I	II		I	II		
输 出	空载电压	V	70	60		75	60		
	焊接电流 调节范围	A	50~ 180	160~ 450		25~85	50~150		
	不同持续率下 参数变动	持续率	%	100	60	35	100	65	50
焊接电流		A	265	330	450	110	135	150	
输入容量		kVA	17	21	28	7.2	8.7	10.3	
输 入		输入 电 流	220V	A	78	96	128	33	41
	380V		A	45	56	74	19	23.5	27
	440V		A	40	50	66	16.2	19.8	23.4
电 源 电 压		V	220, 280 或 440			380 或 220			
相 数			1			1			
频 率		Hz	50			50			
效 率		%	80			78			
功率因数			0.5			0.58			
重 量		kg	185			100			
外形尺寸 (长×宽×高)		mm	870×530 ×790			680×480 ×580			

表 7-8 BX2 系列的性能数据

项 目	单 位	技 术 规 格			
		BX2-500	BX2-700	BX2-1000	BX2-2000
型 号					
额定工作电压	V	45.5	43	42	50
额定持续率	%	60	60	60	50
额定焊接电流	A	500	700	1000	2000
空载电压 I	V	80	72	69	72
	V		80	78	84
工作电压范围	V	32~50	31.75~43	30~46	30~52.5
焊接电流调节范围	A	200~600	250~900	400~1200	800~2200

输 出

(续)

技术规格

项 目	单 位	100	60	42	100	60	35	100	60	42	100	50	40
输出	持续率	%											
	焊接电流	A	390	500	600	542	700	900	775	1000	1400	2000	2200
输入	输入电流	220V	A	155	190	228	200	254	325	260	336	400	
		380V	A	88.5	110	132	116	147	188	150	194	232	450
	输入容量	kVA		42		56				76		170	
电源电压	V	220 或 380		220 或 380		220 或 380		220 或 380		380			
相 数		1		1		1		1		1			
频 率	Hz	50		50		50		50		50			
效 率		87		87		87		90		89			
功率因数		0.62		0.62		0.62		0.62		0.69			
重 量	kg	445		500		560		690		690			
外形尺寸 (长×宽×高)	mm	950×818 ×1215		950×818 ×1215		950×818 ×1215		950×818 ×1215		1020×814 ×1260			

表 7-9 直流弧焊机的性能数据

项 目		单 位	技 术 规 格							
发 电 机	型 号		AX-320 (AT-320)			AX1-500 (AB-500)		AX-165 (AB-165)		
	工作电压	V	最大 30			最大 40		25~35		
	空载电压	V	50~80			60~90		最大 80		
	电流调节 范围	A	45~320			120~600		45~375		
	转速	r/min	1450			1450		2900		
	持续率	%	100	75	50	100	65	100	60	35
	焊接电流	A	250	280	320	400	500	230	300	375
	功率	kW	7.5	8.4	9.6	16	20	3.9		5
电 动 机	功率	kW	14	14	26	26	6	6		
	电压	V	220/ 380	380/ 660	220/ 380	380/ 660	220/ 380	380/ 660		
	相数		3	3	3	3	3	3		
	转速	r/min	1450	1450	1450	1450	2900	2900		
	电流	A	47.8/ 27.6	27.6/ 15.95	88.2/ 50.9	50.9/ 29.4	21.4/ 12.4	12.4/ 7.16		
	频率	Hz	50	50	50	50	50	50		

(续)

项 目		单 位	技 术 规 格							
发 电 机	型 号		AR-300			AX3-300-2 (AG300-1)		ZHJ-300		
	工作电压	V	25~35			25~30		30		
	空载电压	V	最大 85			最大 68		62~75		
	电流调节 范围	A	45~375			35~375		45~300		
	转速	r/min	2900			2900		1450		
	持续率	%	100	60	35	100	65	35	65	50
	焊接电流	A	230	300	375	230	300	375	280	300
	功率	kW								
电 动 机	功率	kW	10			10	10	13		
	电压	V	380			220/ 380	380/ 660	380		
	相数		3			3	3	3		
	转速	r/min	2900			2900	2900	1450		
	电流	A	20.8			36/ 20.8	20.8/ 12	28		
	频率	Hz	50			50	50	50		



表 7-10 ZXG 系列弧焊机的性能数据

项 目		单 位	技 术 规 格		
输 出	型号		ZXG-200	ZXG-300	ZXG-500
	空载电压	V	70	70	70
	工作电压	V	25~30	25~30	25~40
	额定焊接电流	A	200	300	500
	焊接电流 调节范围	A	10~200	15~300	25~500
	额定持续率	%	60	60	60
	各持续率 下的焊接 电流	100%	A	155	230
60%		A	200	300	500
输 入	电源电压	V	380	380	380
	相数		3	3	3
	频率	Hz	50	50	50
	额定输入电流	A	23.6	32	58
	额定输入容量	kVA	15.55	21	38
重 量	kg	170	220	325	
外形尺寸 (长×宽×高)	mm	560×410 ×820	600×440 ×940	650×500 ×1020	

$$S = S_0$$

式中  $S$ ——电源容量 (kVA);

$S_0$ ——一台电阻焊机的容量 (kVA)。

2. 多台同规格的电阻焊机所需电源容量:

由以下两式计算值中取大者

$$S_r = \sqrt{nFZ} \sqrt{1 - (n-1)FZ} \cdot S_{ap}$$

$$S_v = \frac{4U_d\%}{\Delta U\%} \sqrt{nFZ} \cdot S_{ap}$$

式中  $S_r$ ——由温升决定的容量 (kVA);

$S_v$ ——由电压降限制所决定的容量 (kVA);

$S_{ap}$ ——每台焊机实际使用时的平均输入视在功率 (kVA);

$n$ ——电焊机台数;

$FZ$ ——负载持续率 (又称暂载率) (%), 计算方法与交流弧焊机相同;

$U_d\%$ ——变压器的阻抗电压百分数, 可由产品目录查得;

$\Delta U\%$ ——使用状态下变压器允许的电压降百分数。高低压侧及变压器内部压降之和不超过 10% 时, 可取 4~8。

一般情况下,  $S_r < S_v$ , 因此只用  $S_v$  作基准即可。

### 三、阻焊变压器的设计程序及参数确定

1. 根据焊件的厚度或截面和焊接工艺要求, 确定所

需的额定焊接电流  $I_c$ 。

2. 由所焊工件大小及焊机结构, 按图 7-1 曲线求得焊接回路的感抗, 再加上阻焊变压器的漏抗, 得短路总感抗  $X_{hd}$ 。

3. 计算额定次级电压

$$U_{2r} = I_c \sqrt{X_{hd}^2 + (R_{hd} + r_g)^2}$$

式中  $U_{2r}$  —— 额定次级电压 (V);

$I_c$  —— 额定焊接电流 (A);

$r_g$  —— 工件电阻 ( $\Omega$ )。

4. 确定额定初级容量

$$P_{2r} = (1.02 \sim 1.05) I_c U_{2r}$$

式中  $P_{2r}$  —— 额定初级容量 (VA)。

5. 确定变压器的额定负载持续率  $FZ_r$ 。通常点、凸、对焊机取 20%, 缝焊机取 50%, 从而求得次级连续电流  $I_{2cr}$  和初级连续电流  $I_{1cr}$ 。

$$I_{2cr} = I_c \sqrt{FZ_r}, I_{1cr} = \frac{P_{2r}}{U - U_y} \sqrt{FZ_r}$$

式中  $FZ_r$  —— 焊机的额定负载持续率;

$U$  —— 电网电压 (V);

$U_y$  —— 初级主回路中闸流管或可控硅管压降 (V)。

6. 确定次级线圈匝数

次级线圈一般为一匝, 但 5kVA 以下变压器及其它

特殊焊机的变压器，为缩小铁心尺寸常超过一匝。

### 7. 铁心截面的选择

$$S = \frac{U_{2e} \times 10^4}{4.44fB_m W_2}$$

式中  $S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ )；

$f$ ——电源频率 (Hz)；

$B_m$ ——磁通密度 (T)；

$W_2$ ——次级匝数。

### 8. 电流密度的选择

(1) 初级电流密度：当次级线圈为外焊铜管水冷式时，选用  $2 \sim 3 \text{A}/\text{mm}^2$ ；当次级线圈直接用水冷铜管时，选用  $4 \sim 5 \text{A}/\text{mm}^2$ 。

(2) 次级电流密度：相应上述两种情况，分别选用  $3 \sim 5 \text{A}/\text{mm}^2$  和  $10 \sim 14 \text{A}/\text{mm}^2$ 。

由以上选择可确定初、次级铜线截面。

9. 有了上述各参数，便可按一般变压器的设计方法进行计算和安排。

10. 最后校验励磁电流、初级电阻、次级电阻、温升及重量是否符合要求。

## 第三节 电焊机运行

### 一、电焊机电源干线工作电流计算及熔断器与电缆的选择

## 1. 单相单台电焊机回路工作电流的计算

$$I_{\mu} = \frac{S_e}{U_e} \sqrt{FZ} \times 10^3 = I_e \sqrt{FZ} = I_{100}$$

$$S_e = P_e / \cos\varphi$$

式中  $I_{\mu}$ ——电焊机回路计算电流 (A);

$S_e$ ——额定视在功率 (kVA);

$P_e$ ——额定功率 (kW);

$\cos\varphi$ ——功率因数, 可取 0.5;

$U_e$ ——额定电压 (V);

$FZ$ ——负荷持续率;

$I_e$ 、 $I_{100}$ —— $FZ$  为 65% 和 100% 时的一次电流 (A)。

## (2) 多台焊机接于单相回路时的计算工作电流

$$I_{\mu} = K_e \sum \frac{S_e \sqrt{FZ}}{U_e} \times 10^3$$

$$= K_e \sum I_e \sqrt{FZ} = K_e I_m$$

式中  $K_e$ ——需要系数, 二台焊机取 0.65, 三台及以上取 0.35;

$I_m$ ——峰值电流 (A)。

若由上式计算所得的电流小于其中一台最大焊机电流时, 则以最大一台焊机电流作为回路计算工作电流。

(3) 在三相供电回路的二相或三相上分别连接单相电焊机馈电干线的工作电流的计算。

## ① 三相负荷平衡时:

$$I_p = \frac{K_x \Sigma S_e \sqrt{FZ}}{\sqrt{3} U_e} \times 10^3 = \frac{K_x \Sigma P_e \sqrt{FZ}}{\sqrt{3} U_e \cos \varphi} \times 10^3$$

$$= \frac{K_x \Sigma I_e \sqrt{FZ}}{\sqrt{3}}$$

式中  $\Sigma S_e$ 、 $\Sigma P_e$ ——接于三相的总负荷 (kVA) 和总功率 (kW)；

$\Sigma I_e$ ——各电焊机负荷电流之和 (A)；

$K_x \cos \varphi$ ——网前。

② 三相负荷不平衡时：取  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  中最大的电流值作为计算电流：

$$I_A = K_{xA} \sqrt{I_{AB}^2 + I_{CA}^2 + I_{AB}I_{CA}} = K_{xA} I_{mA}$$

$$I_B = K_{xB} \sqrt{I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{AB}I_{BC}} = K_{xB} I_{mB}$$

$$I_C = K_{xC} \sqrt{I_{CA}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}I_{BC}} = K_{xC} I_{mC}$$

式中  $I_{AB}$ 、 $I_{BC}$ 、 $I_{CA}$ ——分别为跨接于 AB、BC、CA 相间的电焊机负荷电流之和 (A)；

$K_{xA}$ 、 $K_{xB}$ 、 $K_{xC}$ ——分别为各相电流的需要系数，当一相接一台电焊机时， $K_x = 1$ ，接二台电焊机时  $K_x = 0.65$ ，接三台电焊机时  $K_x = 0.35$ ；

$I_{mA}$ 、 $I_{mB}$ 、 $I_{mC}$ ——分别为各相负荷的峰值电流 (A)。

## 2. 熔断器选择：

单台电焊机回路：

$$I_{cr} \geq K_a K_m I_p$$

式中  $I_{cr}$ ——熔体额定电流 (A)；

$K_a$ ——安全系数，取 1.1；

$K_m$ ——负荷尖峰系数，取 1.1；

$I_p$ ——计算工作电流 (A)。

多台电焊机回路

$$I_{cr} \geq I_m / 2$$

3. 电缆选择：

(1) 按发热条件选择：

$$I_p \leq I_{cr}$$

式中  $I_{cr}$ ——电缆允许工作电流 (A)。

(2) 按电压损失选择：

要求电压损失不超过 10%

$$\text{单相回路 } \Delta U \% = \frac{2I_p l}{U_c} (R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi) \times 100$$

三相回路

$$\Delta U \% = \frac{\sqrt{3} I_p l}{U_c} (R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi) \times 100$$

式中  $l$ ——电焊机回路线路长度 (m)；

$R_0$ 、 $X_0$ ——电焊机回路线路每米电阻和电抗 ( $\Omega/m$ )。

初级电缆一般选择单芯或多芯橡皮套电缆，如 YHC 型、BXR 型。单芯电缆电流密度可取  $5 \sim 10 \text{ A/mm}^2$ 。三

芯或敷设在管道内或较长时，可取  $3\sim 6\text{A}/\text{mm}^2$ 。

次级电缆采用 YHH 型电焊橡胶套电缆及 YHHR 型特软电缆。20m 以下时，电流密度取  $4\sim 10\text{A}/\text{mm}^2$ 。一般要求压降要小于 4V，即小于次级电弧电压的 10%。

焊接导线的截面与电流、长度的关系见表 7-11。

表 7-11 焊接导线截面与电流、导线长度的关系

截面 /mm <sup>2</sup>	导线长度/m									
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
100	25	25	25	25	25	25	25	28	35	
150	35	35	35	35	50	50	60	70	70	
200	35	35	35	50	60	70	70	70	70	
300	35	50	60	60	70	70	70	85	85	
400	35	50	60	70	85	85	85	95	95	
500	50	60	70	85	95	95	95	120	120	
600	60	70	85	85	95	95	120	120	120	

电阻焊机焊接回路导线截面的选择可按表 7-12 中的电流密度确定。

## 二、交流弧焊机加装节电器后的节电效果

1. 加装节电器（空载自停装置）后，减少的视在功率计算如下：



表 7-12 焊接回路组件允许的电流密度

组件名称	材 料	冷却条件	允许电流密度 / (A/mm <sup>2</sup> )
电 极	铜、铜合金	强迫水冷	20~50
电极握杆	青 铜	强迫水冷	10~20
	黄 铜		8~12
电极臂、夹 头、平板	铜	空 冷	1.4~2.2
		水 冷	2~3
	铜合金	空 冷	1.4~1.6
	铝		1.2~2
软连接线	铜电缆、紫铜带	空 冷	2.5~3
		接头处水冷	2.5~4
固定接触点	铜和其他材料	—	0.5~1
滑动接触点		水 冷	0.5~1
		水中工作	~12

$$S = (U_1 I_0 - U_1 I_{01}) \times 10^{-3}$$

式中  $S$ ——节约的视在功率 (kV·A);

$U_1$ ——电源电压, 即电焊机一次侧电压 (V);

$I_0$ 、 $I_{01}$ ——加装节电器前后的空载电流 (A)。

加装节电器后, 空载视在功率可比原来减少 60%~90%。

## 2. 节电量计算

$$A = [(P_0 - P_{01})t_1 - P_{02}t_2] \times 10^{-3}$$

式中  $A$ ——节电量 (kW·h);

$P_0$ 、 $P_{01}$ ——加装节电器前后空载输入功率 (W);

$P_{02}$ ——节电器消耗的功率 (W);

$t_1$ 、 $t_2$ ——电焊机空载和负载时间 (h)。

为方便起见, 几个数据如下估算:

$$P_0 \approx 0.35U_1I_0$$

$$P_{01} \approx 0.6U_1I_{01}$$

$P_{02}$ : CJ0-20 取 14W; CJ0-40 取 18W。

获取更多资料 微信搜公众号 蓝领星球

# 第八章 风机与空压机

## 第一节 风机及其计算

### 一、风机基本参数及特性曲线

#### 1. 风机的基本参数

(1) 风量  $Q$ : 指气体在单位时间内通过风机的体积, 单位是  $\text{m}^3/\text{s}$  或  $\text{m}^3/\text{h}$ 。当用重量流量  $G$  来表示时, 单位是  $\text{kg}/\text{s}$  或  $\text{t}/\text{h}$ 。体积流量与重量流量之间的关系:

$$G = \rho Q$$

式中  $\rho$ ——气体的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), 当大气压力为  $101\text{kPa}$ 、温度为  $20^\circ\text{C}$  时, 空气的密度  $\rho = 1.20\text{kg}/\text{m}^3$ 。

$g$ ——重力加速度,  $g = 9.81\text{m}/\text{s}^2$ 。

(2) 全压  $H$ : 指单位体积的空气经过风机后其能量的增加值, 单位为  $\text{Pa}$ 。

$$H = H_2 - H_1$$

$$H_1 = H_{j1} + H_{d1}; H_2 = H_{j2} + H_{d2}$$

式中  $H_2$ ——风机出口处静压 ( $\text{Pa}$ );

$H_1$ ——风机进口处动压 ( $\text{Pa}$ );

$H_{j1}$ 、 $H_{j2}$ ——风机进口与出口处静压 ( $\text{Pa}$ );

$H_{d1}$ 、 $H_{d2}$ ——风机进口与出口处动压 ( $\text{Pa}$ )。

风机的全压  $H$  可表成

$$\begin{aligned} H &= (H_{j2} + H_{d2}) - (H_{j1} + H_{d1}) \\ &= (H_{j2} - H_{j1}) + (H_{d2} - H_{d1}) \end{aligned}$$

(3) 转速  $n$ : 指风机叶轮每分钟转动次数, 单位是 r/min。

(4) 有效功率(即理论功率)  $N_{yx}$ : 指气体在单位时间内从风机中所获得的总能量, 单位为 kW。

$$N_{yx} = HQ \times 10^{-3}$$

式中  $H$ ——风机全压(Pa);

$Q$ ——风机的流量( $m^3/s$ )。

(5) 轴功率  $N$ : 指电动机传给风机轴上的功率, 单位为 kW。

(6) 风机效率  $\eta$ : 指风机有效功率  $N_{yx}$  与轴功率  $N$  之比。

$$\eta = \frac{N_{yx}}{N} \times 100\%$$

## 2. 风机的特性曲线

风机做功能力的大小可以用流量  $Q$ 、全压  $H$  的大小来反映。在一定转速下, 一台风机的流量  $Q$  与全压  $H$  之间有一个对应关系。同样, 也有流量  $Q$  与轴功率  $N$  的关系及流量与效率  $\eta$  的关系, 图 8-1 示出 9-19№7.1 风机的上述三种特性曲线。

从特性曲线上可以看出, 风机在某一对应的  $Q$ - $H$  值

运行时,风机将有最高效率,这时的  $Q$ 、 $H$ 、 $\eta$  值即为该台风机的额定参数。风机的流量是根据生产、工艺的需要来决定的,全压是根据管道阻力特性曲线来决定的。

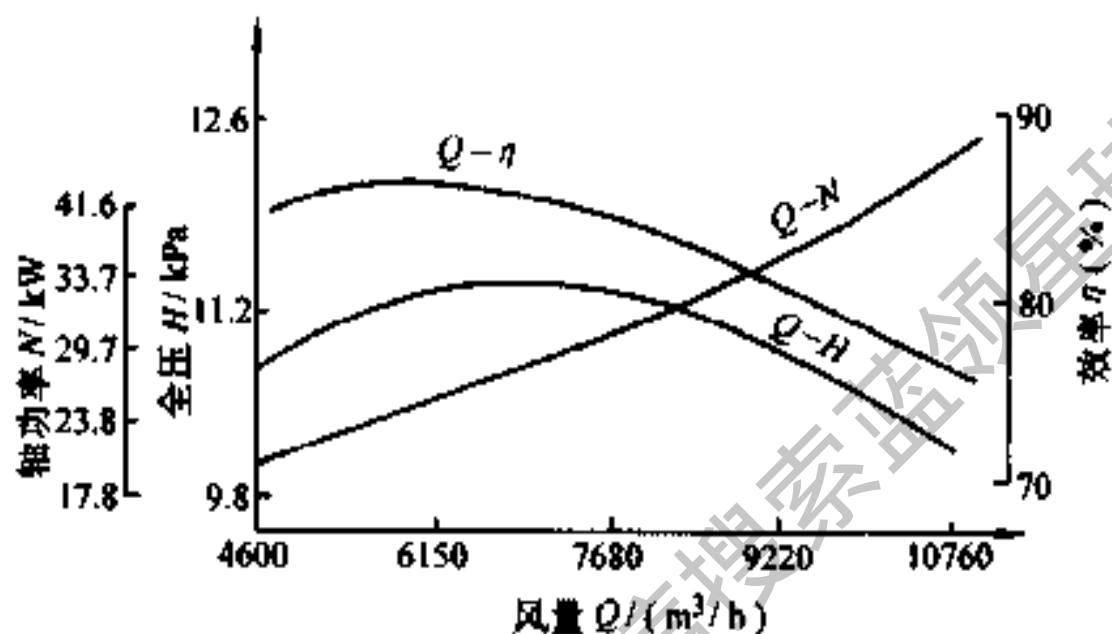


图 8-1 9-19N07.1 风机特性曲线

## 二、风量和风压的测算

### 1. 风量的测算

(1) 风速的计算:用毕托管测量风量时,按下式计算:

$$v = 1.41K \sqrt{H_d / \rho_i}$$

$$H_d = (\sqrt{H_{d1}} + \sqrt{H_{d2}} + \dots + \sqrt{H_{dn}})^2$$

$$\rho_i = \rho_0 \frac{273 + 20}{273 + t} \cdot \frac{H_a \pm H_j}{101325}$$

式中  $v$ ——测量截面上的平均气流速度(m/s);

$K$ ——毕托管校正系数;

$H_d$ ——测量截面上的平均动压(Pa);

$H_{d1}, H_{d2}, \dots, H_{dn}$ ——各测点的动压(Pa);

$\rho_1$ ——测量截面处介质密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$H_a$ ——当地大气压(Pa);

$H_s$ ——测孔截面上的平均静压(Pa), 当为表压力时取“+”号, 真空时取“-”号;

$\rho_0$ ——标准状态下气体密度, 对空气,  $\rho_0 = 1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ ; 对烟气(在  $H_a = 101 \text{kPa}$ 、 $t = 0^\circ\text{C}$  时),

$$\rho_0 = \left( \frac{1.97\text{RO}_2 + 1.42\text{O}_2 + 1.25\text{N}_2}{100} \right) \times 9.81 (\text{kg}/\text{m}^3).$$

(2) 风量计算:

① 用毕托管测风量时:

$$Q = 3600Fv$$

式中  $Q$ ——风量( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$F$ ——测点处有效截面( $\text{m}^2$ );

$v$ ——测点处平均流速( $\text{m}/\text{s}$ )。

② 用集流器测风量时:

$$Q = 0.00399\alpha D^2 \sqrt{\Delta H/\rho_i}$$

式中  $\alpha$ ——集流器系数, 锥形集流器  $\alpha = 0.98$ ; 圆弧形集流器  $\alpha = 0.99$ ;

$\Delta H$ ——集流器进口截面处测得的静压差值(Pa);

$\rho_i$ ——集流器处气体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$D$ ——管道直径(mm)；

$g$ ——同前。

## 2. 全压计算

如前所述

$$\begin{aligned} H &= H_2 - H_1 = (H_{jx} - H_{j1}) + (H_{dx} - H_{d1}) \\ &= \Delta H_j + \Delta H_d \end{aligned}$$

(1) 风机进口处动压可按下式计算：

$$H_{d1} = \frac{1}{2} \left( \frac{Q}{3600F_1} \right)^2 \rho_1 = \frac{1}{2} v_1^2 \rho_1$$

式中  $H_{d1}$ ——风机进口处动压(Pa)；

$F_1$ ——风机进口处截面(m<sup>2</sup>)；

$v_1$ ——风机进口处平均流速(m/s)；

$\rho_1$ ——风机进口处气体密度(kg/m<sup>3</sup>)。

(2) 风机出口处动压可按下式计算

$$H_{d2} = \frac{1}{2} \left( \frac{Q}{3600F_2} \right)^2 \rho_2 = \frac{1}{2} v_2^2 \rho_2$$

式中  $H_{d2}$ ——风机出口处动压(Pa)；

$F_2$ ——风机出口处截面(m<sup>2</sup>)；

$v_2$ ——风机出口处平均流速(m/s)；

$\rho_2$ ——风机出口处气体密度(kg/m<sup>3</sup>)。

## 三、风机轴功率、电动机功率及风机效率的计算

### 1. 风机轴功率

$$N = \frac{N_{jx}}{\eta} = \frac{QH}{\eta} \times 10^{-3}$$

式中  $N$ ——风机轴功率(kW)；

$\eta$ ——风机效率,约为 0.4~0.75,实际数值以制造厂提供的数据为准；

其他符号同前。

风机轴功率还可写成如下形式：

$$N = P_1 \eta_d \eta_t$$

式中  $P_1$ ——电动机输入功率(kW)；

$\eta_d$ ——电动机效率；

$\eta_t$ ——传动装置效率,见表 8-1。

表 8-1 传动效率估算值

传动方式	传动效率	传动方式	传动效率
V 带	0.95	齿轮减速器	0.94~0.98
联轴器	0.98	直 联	

## 2. 电动机输入功率

$$P_1 = \sqrt{3} UI \cos\varphi \times 10^{-3}$$

式中  $P_1$ ——电动机输入功率(kW)；

$U$ ——电源线电压(V)；

$I$ ——电动机电流(A)；

$\cos\varphi$ ——电动机功率因数。

## 3. 风机效率 $\eta$ 与用电体系效率 $\eta_e$

$$\eta = \frac{N_{zz}}{N} \times 100\% = \frac{QH}{1000N} \times 100\%$$



$$= \frac{QH}{1000P_1\eta_d\eta_c} \times 100\%$$

$$\eta_c = \frac{N_{yz}}{P_1} \times 100\% = \frac{QH}{1000P_1} \times 100\%$$

#### 四、风机耗电量计算

$$A = \sum_1^n K_n P_e T$$

式中  $A$ ——风机年耗电量(kW·h/年);

$n$ ——工厂中风机的数量;

$P_e$ ——电动机额定功率(kW);

$T$ ——风机年运行小时数(h);

$K_n$ ——风机利用系数,参见表 8-2。

表 8-2 风机的利用系数  $K_n$

鼓风机	0.5~0.6
通风机	0.6~0.8
高压通风机	0.75

#### 五、风机参数的换算

##### 1. 换算为标准状况下的计算

风机特性曲线是在规定条件下作出的。为了把被测风机的特性与风机特性曲线做比较,需要把所测的风量、全压和轴功率换算到标准情况下的数值。

(1) 风量换算:

$$Q_0 = Q \frac{\pi_0}{\pi}$$

(2) 全压换算:

$$H_0 = H \frac{273 + t}{273 + t_0} \cdot \frac{H_a \pm H_j}{101325} \left( \frac{n_0}{n} \right)^2 = H \frac{\rho_0}{\rho_1} \left( \frac{n_0}{n} \right)^2$$

(3) 轴功率换算:

$$N_0 = N \frac{\rho_0}{\rho_1} \left( \frac{n_0}{n} \right)^3$$

上式中  $Q$ 、 $H$ 、 $N$ 、 $n$ 、 $\rho$  为风机实测的流量、全压、轴功率、转速和气体密度;  $Q_0$ 、 $H_0$ 、 $N_0$ 、 $n_0$ 、 $\rho_0$  为风机在标准状况下的流量、全压、轴功率、转速和气体密度。  $H_a$  为当地的大气压力(Pa)。

## 2. 风机变工况的换算

当风机工况改变时,改变如表 8-3 中第一列所示,其参数换算见表 8-3。表中  $D$  为外轮直径。

## 六、变速风机的电动机功率的选择

1. 连续周期运行方式:其运行状况如图 8-2 所示。这种状况电动机的输出功率应按负载的均方根计算。即

$$P_2 = \sqrt{\frac{N_1^2 t_1 + N_2^2 t_2}{t_1 + t_2}}$$

由图可得负载持续率为  $(t_1 + t_2)/T \times 100\%$ 。

根据以上计算的输出功率和负载持续率,便可从产品目录中选择合适的电动机。

2. 连续运行方式:其运行状况如图 8-3 所示。这种工况电动机的等效输出功率为

表 8-3 风机变工况换算表

变量	定量	风量	全压	轴功率
$n$	$D, \rho$	$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1}$	$H_2 = H_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2$	$N_2 = N_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3$
$\rho$	$D, n$	$Q_2 = Q_1$	$H_2 = H_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$	$N_2 = N_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$
$D$	$\rho, n$	$Q_2 = Q_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3$	$H_2 = H_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2$	$N_2 = N_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^5$
$n, \rho$	$D$	$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1}$	$H_2 = H_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3$	$N_2 = N_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^5$
$n, D$	$\rho$	$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1} \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3$	$H_2 = H_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2$	$N_2 = N_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^5$
$\rho, D$	$n$	$Q_2 = Q_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3$	$H_2 = H_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2$	$N_2 = N_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^5$

注：角码 1 指原来的数据，2 指变量变化后的数据。

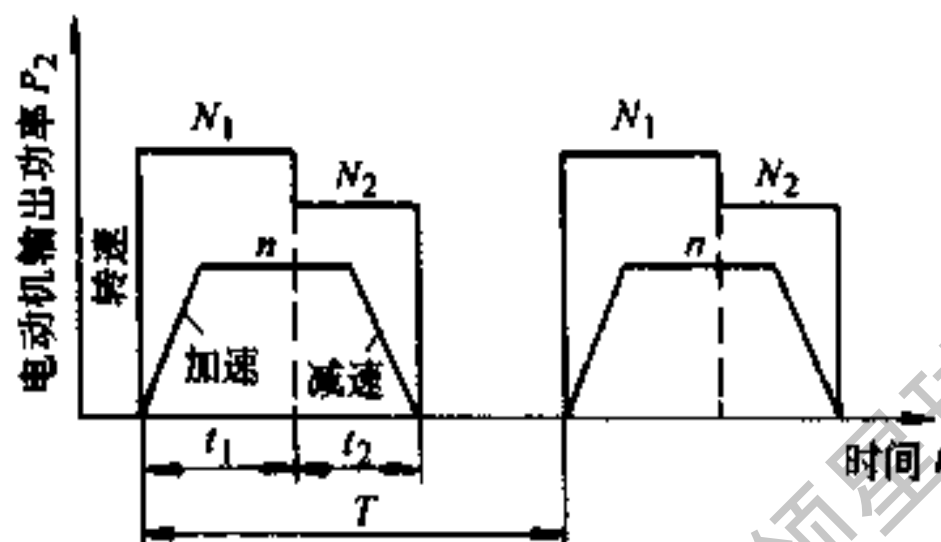


图 8-2 连续周期运行的状态曲线

$$P_2 = \sqrt{\frac{N_1^2 t_1 + N_2^2 t_2 + N_3^2 t_3}{t_1 a_1 + t_2 a_2 + t_3 a_3}}$$

式中  $a$ ——冷却系数,见表 8-4。

这时  $T = t_1 a_1 + t_2 a_2 + t_3 a_3 + t_4 a_4$  为考虑冷却系数的等效周期。

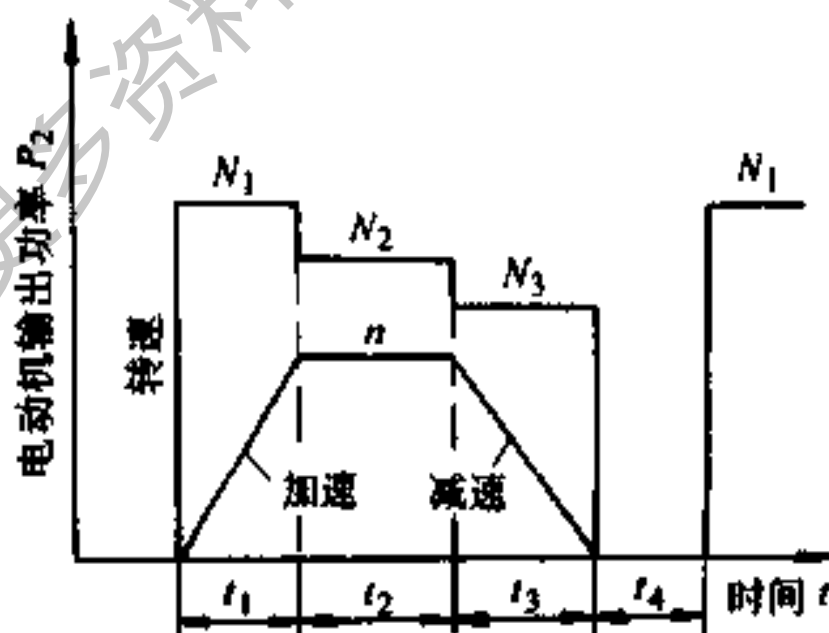


图 8-3 周期性负载

表 8-4 冷却系数  $\alpha$  表

电动机型式	停止	加速	运行	减速
开启式交流电动机	0.2	0.5	1.0	0.5
封闭式交流电动机	0.3	0.6	1.0	0.6
全封闭外扇冷却式交流电动机	0.5	0.75	1.0	0.75
强迫通风冷却式交流电动机	1.0	1.0	1.0	1.0

由上式求出的输出功率一般偏低,还应计算电动机起动、运行、减速中的损耗。

### 七、空调设备用风机的轴功率和送风量的计算

空调设备用风机的轴功率和送风量可按下列公式计算

$$N = \frac{QH}{1000\eta}$$

$$Q = \frac{vq_{rj} \cdot SHF}{3600C \cdot \Delta t_f}$$

式中  $N$ ——轴功率(kW);

$Q$ ——送风量( $m^3/s$ );

$H$ ——风机全压(Pa);

$\eta$ ——风机效率;

$v$ ——空气的比体积( $m^3/kg$ );

$q_{rj}$ ——室内全热负荷(kJ/h);

$SHF$ ——室内负荷显热比;

$C$ ——空气的比热( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ );

$\Delta t_f$ ——送风温差(°C)。

## 八、锅炉送、引风机风量、全压和电动机功率的计算

### 1. 送风机风量：

$$Q = k_1 a B v^0 \frac{(273 + t_r) \times 101.3 \times 10^3}{273 H_a n}$$

式中  $Q$ ——送风机风量( $\text{m}^3/\text{h}$ )；

$k_1$ ——风量贮备系数，一般取 1.05；

$v^0$ ——(标态下)理论燃烧空气比体积( $\text{m}^3/\text{kg}$ )；

$a$ ——炉膛过剩空气系数；

$B$ ——锅炉的计算耗煤量( $\text{kg}/\text{h}$ )；

$t_r$ ——进入送风机的冷空气温度(°C)；

$H_a$ ——当地大气压(Pa)；

$n$ ——送风机台数。

### 2. 引风机风量：

$$Q = k_1 \left[ B v^0 \frac{(273 + t_y) \times 101.3 \times 10^3}{275 H_a} + V_{sq} \right] \frac{1}{n}$$

$$V_{sq} = \frac{\Delta G}{0.804} \cdot \frac{273 + t_c}{273} \cdot 3600;$$

式中  $Q$ ——引风机风量( $\text{m}^3/\text{h}$ )；

$k_1$ ——风量贮备系数，取 1.05~1.1；

$v^0$ ——(标态下)计入漏风后引风机前的烟气比体积( $\text{m}^3/\text{kg}$ )；

$t_y$ ——引风机前烟气温度(°C)；

$n$ ——引风机台数；

$V_{st}$ ——当采用湿式除尘器时，除尘器内蒸发的水蒸汽体积( $m^3/h$ )；

$\Delta G$ ——除尘器进出口增加的烟气湿分量( $kg/s$ )；

$t_c$ ——除尘器出口烟温度( $^{\circ}C$ )；

$B, H_d$ ——同前。

### 3. 送引风机的电动机功率的计算

$$P = K_3 \frac{QH}{36000\eta}$$

式中  $P$ ——电动机功率( $kW$ )；

$K_3$ ——功率储备系数，一般取  $1.15 \sim 1.3$ ；

$Q$ ——计算使用容量( $m^3/h$ )；

$H$ ——计算使用全压( $Pa$ )；

$\eta$ ——送、引风机的运行效率。

## 第二节 空压机计算

### 一、空压机效率计算

#### 1. 每千克压缩空气的理论有效能

(1) 绝热压缩时：

① 对于一级压缩：

$$W_{st} = \frac{K}{K-1} RT_1 \left[ \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] \times 10^{-3}$$

式中  $W_{st}$ ——每  $1kg$  压缩空气的理论有效能( $kJ/kg$ )。

K);

$K$ ——空气压缩指数为 1.4;

$R$ ——空气的气体常数, 为  $287.676\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$T_1$ ——空压机吸气口空气绝对温度(K);

$H_1, H_2$ ——空压机进气和出气绝对压力(MPa)。

② 对于二级压缩:

$$W_{yx} = \frac{K}{K-1} R \left[ T_1 \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} + \left( \frac{H_4}{H_3} \right)^{\frac{K-1}{K}} - T_1 - T_3 \right] \times 10^{-3}$$

式中  $T_3$ ——二级吸气口空气绝对温度(K);

$H_3, H_4$ ——空压机二级进气和出气绝对压力(MPa)。

(2) 等温压缩时

① 对于一级压缩:

$$W_{yx} = \left( RT \lg \frac{H_2}{H_1} \right) \times 10^{-3}$$

② 对于二级压缩:

$$W_{yx} = \left( RT \lg \frac{H_2 H_4}{H_1 H_3} \right) \times 10^{-3}$$

式中  $T$ ——等温压缩绝对温度(K), 一般用制成品空气温度计算。

2. 空压机压缩空气量

$$m = 3476.1 \frac{QH}{T}$$



式中  $m$ ——空压机压缩空气量(kg/h);  
 $Q$ ——测点处空气流量( $m^3/h$ );  
 $H$ ——测点处绝对压力(MPa);  
 $T$ ——测点处绝对温度(K)。

### 3. 空压机效率

$$\eta = \frac{W_{x,yz}}{3600P_1} \times 100\% \quad W_{x,yz} = mW_{yz}$$

式中  $P_1$ ——电动机实测输入功率(kW);  
 $W_{x,yz}$ ——空压机总有效能(kJ/h);  
 $m$ ——空压机压缩空气量(kg/h);  
 $W_{yz}$ ——同前。

## 二、空压机管网漏气损失电能的测算

现设有  $n$  台空压机, 将它们全开动, 使空压机系统的压力逐渐升高, 直至达到工艺规定的压力, 关闭空压机, 由于漏气, 系统压力逐渐降低。在此过程中, 记录压力在实际使用范围内由  $H_1$  至  $H_2$  压力上升时间  $t_1$  和由  $H_2$  至  $H_1$  压力下降时间  $t_2$  (图 8-4)。

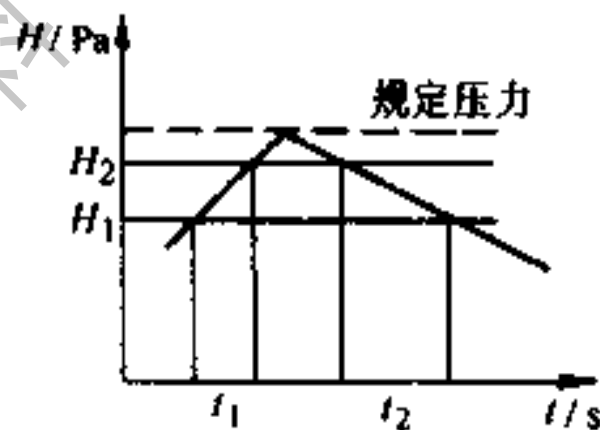


图 8-4 压力-时间曲线

则  $n$  台空压机总排气量  $Q_p$  为:

$$Q_P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i$$

设空压机系统的容积为  $V(\text{m}^3)$ , 则

$$V = (Q_P - Q_L)t_1 = Q_L t_2$$

式中  $Q_L$ ——空压机系统的漏气量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$t_1$ ——压力从  $H_1$  上升到  $H_2$  所需时间 (s);

$t_2$ ——压力从  $H_2$  下降到  $H_1$  所需时间 (s)。

$$\text{漏气量 } Q_L = \frac{t_1}{t_1 + t_2} Q_P$$

设年有效工作日为 300 天, 则每年漏气量为

$$Q_a = Q_L \times 300 \times 24 \times 3600$$

## 2. 管网漏气损失电能计算

测试期在  $t_1$  时间内, 供给  $n$  台空压机的总电能为

$$A = \frac{1}{3600} (P_1 + P_2 + \dots + P_n) t_1 = (\sum P_i) t_1$$

式中  $A$ ——在  $t_1$  时间内供给  $n$  台空压机的总电能 (kWh);

$P_1 \sim P_n$ ——各空压机的输入电能 (kW)。

测试期在  $t_1$  时间内  $n$  台空压机换算到吸气状态下的总排气量为

$$Q_P = (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n) t_1 = (\sum Q_i) t_1$$

式中  $Q_P$ ——在  $t_1$  时间内  $n$  台空压机换算到吸气状态下的总排气量 ( $\text{m}^3$ )。

平均比电能为

$$m_H = A/Q_P$$

空压机管网年漏气损失电能为

$$\Delta A = Q_a m_H$$

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

# 第九章 电 加 热

## 第一节 电 热 计 算

### 一、电热元件的计算

#### 1. 电热元件的选用

常用电热材料及元件不同品种的工作温度、特性及电阻率修正系数,见表 9-1~表 9-3。

#### 2. 电热元件温度和单位表面负荷的计算

电热元件温度,是指其长期工作的最高温度。表面负荷是电热元件表面积上发出的功率数( $W/cm^2$ )。

(1) 以辐射热交换为主的电热元件温度和允许表面负荷,见表 9-4。通常加热温度  $t_q \leq 300^\circ C$  时,电热元件温度  $t_j$  取  $600^\circ C$ ; 加热温度  $t_q = 700^\circ C$  时,  $t_j$  取  $800^\circ C$ 。

电热元件表面负荷的选用还与电热设备的类型有关,见表 9-5。

(2) 以对流交换为主的电热元件的允许表面负荷,可根据气流速度  $v$ 、加热温度  $t_q$  和电热元件温度  $t_j$ ,由图 9-1 和图 9-2 查得。使用图 9-1 和图 9-2 应注意如下事项:

#### ① 电热元件的允许表面负荷 $W_w$

$$W_w = W_C + W_R$$

表 9-1 常用电热材料及元件的品种、工作温度和主要特点

类别	品种	发热体工作温度 / $^{\circ}\text{C}$		主要特点	
		常用	最高		
材料	镍铬合金	Cr20Ni80	1000~1050	1150	1. 高温强度较好, 适用于移动式设备上; 2. 基本上无磁性
		Cr15Ni60	900~950	1050	
	铁铬铝合金	1Cr13Al4	900~950	1100	1. 价较廉; 2. 高温强度低, 适用于各种固定式设备; 3. 有磁性
		0Cr13Al6Mo2	1050~1200	1300	
		0Cr25Al5	1050~1200	1300	
		0Cr27Al7Mo7	1200~1300	1400	
	高熔点纯金属	铂 Pt	1300~1400	1600	1. 电阻率较低, 须配调压装置, 以防开始加热时电流过大; 2. 材料价高; 3. 适用于实验室或特殊电炉
		钼 Mo		1800	
		钽 Ta		2200	
		钨 W		2400	

(续)

类别	品种	发热体工作温度 / $^{\circ}\text{C}$		主要特点
		常用	最高	
材料	石墨 C		3000	1. 电阻率较低, 须配大电流 低电压调压器; 2. 适用于真空 或保护气氛中使用
元件	硅碳棒 硅碳管 SiC	1250~1400	1500	1. 高温强度高; 2. 硬而脆; 3. 易老化, 电阻随使用时间延 长而增大(须配调压装置)
	硅钼棒 MoSi <sub>2</sub>	1500~1600	1700	1. 无老化现象; 2. 须配调压 装置, 以防开始加热时电流过大
	管状电加热元件	500 $^{\circ}\text{C}$ 以下 (介质温度)		1. 可直接在液体中加热; 2. 机械强度高

表 9-2 常用电热材料的物理及机械性能

性能	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	线胀系数 (20~1000°C) (10 <sup>-6</sup> /°C)	比热容 (J/g·°C)	热导率 (kJ/m·h·°C)	熔点 约值 /°C	抗张 强度 /MPa	伸长率 (%)	反复 弯曲 次数	电阻率 (20°C) /(Ω·mm <sup>2</sup> /m)
镍铬合金	Cr20Ni80	14	0.440	60.3	1400	637 ~785	≥20		1.09±0.05
	Cr15Ni60	13	0.461	45.2	1390	637 ~785	≥20		1.12±0.05
铁铬铝合金	1Cr13Al4	15.4	0.490	52.8	1450	588 ~735	≥12	≥5	1.26±0.08
	0Cr13Al6Mo2	7.2	0.494	49.0	1500	686 ~834	≥12	≥5	1.40±0.10
	0Cr25Al5	7.1	0.494	46.1	1500	637 ~785	≥12	≥5	1.40±0.10
	0Cr27AlMo2	7.1	0.494	45.2	1520	686 ~785	≥10	≥5	1.50±0.01

(续)

性能	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	线胀 系数 (20~ 1000 C) (10 <sup>-6</sup> / C)	比热容 (J/g · C)	热导率 (kJ /m·h · C)	熔点 约值 / C	抗张 强度 /MPa	伸长率 (%)	反复 弯曲 次数	电阻率 (20 C) /(Ω · mm <sup>2</sup> /m)
铂	21.5	8.9	0.133	248.7	1773	157 ~177			0.106
钨	10.2	6.1	0.314	527.5	2622	745 ~1177			0.0563
钼	16.6	6.5	0.142	195.9	2996	294 ~441			0.124
钨	19.3	5.9	0.142	466.8	3400	1079			0.0549
硅碳棒	3.1 ~3.2	5(20~ 21500 C)	0.712	83.7		39~49 (抗折)			1000左右 (1400 C)
硅钼棒	5.3 ~5.5				2030	245 ~343 (抗弯)			0.25



表 9-3 常用电热材料在不同温度下的电阻率修正系数  $C_t$ 

温度 / °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
镍铬合金	1.000	1.006	1.016	1.024	1.031	1.035	1.026	1.019	1.017	1.021	1.028	1.038
铁铬合金	1.000	1.013	1.029	1.046	1.062	1.074	1.078	1.083	1.089	1.097	1.105	
1Cr13Al4	1.000	1.004	1.013	1.027	1.041	1.062	1.090	1.114	1.126	1.135	1.142	
0Cr13Al6Mo2	1.000	1.001	1.003	1.007	1.014	1.028	1.048	1.053	1.057	1.060	1.063	1.066
0Cr25Al5	1.000	1.002	1.007	1.013	1.022	1.036	1.056	1.063	1.068	1.072	1.076	1.079
0Cr27Al7Mo2	1.000	0.997	0.994	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992
铂 Pt	1.000	1.291	1.645	1.987	2.32	2.64	2.95	3.25	3.53	3.81	4.08	4.33
钼 Mo	1.000	1.362	1.822	2.28	2.74	3.20	3.65	4.12	4.58	5.06	5.58	6.11
钽 Ta	1.000	1.275	1.621	1.96	2.31	2.65	2.99	3.34	3.68	4.02	4.35	4.67
钨 W	1.000	1.352	1.801	2.28	2.79	3.32	3.85	4.39	4.94	5.49	6.05	6.62
硅钼棒元件	1.00	1.40	2.00	2.60	3.32	4.08	4.96	5.84	6.80	7.76	8.80	9.76

(续)

温度 / C	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900
铁铬 合金	1Cr13Al4 0Cr13Al6Mo2 0Cr25Al5 0Cr27Al7Mo2	1.069 1.082 0.992										
高熔 点纯 金属	铂 Pt 钼 Mo 钽 Ta 钨 W	4.58 6.64 4.96 7.19	4.81 7.18 5.23 7.78	5.03 7.71 5.50 8.36	5.25 8.24 5.77 8.96	8.79 6.03 6.29 9.56	9.34 6.29 6.80 10.16	10.43 11.51 7.30 12.65	12.61 13.73 7.78 13.94	8.23 8.23 8.70 15.25	8.70 8.70 9.13 16.58	9.13 17.95
硅钼棒元件	10.80	11.84	12.84	13.92	14.92	16.00						

注:

1. 硅钼棒元件 1400 C 时电阻率为  $1000\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  左右, 室温至 900 C 时电阻率由大变小, 900~1450 C 则由小变大。

2.  $C_t = p_t / p_{20}$ , 式中  $p_t$ —温度  $t$  C 时的电阻率;  $p_{20}$ —20 C 时电阻率。

表 9-4 辐射电热元件的温度和允许表面负荷

加热元件材料	Cr20Ni80	1Cr13Al4	0Cr25Al5 0Cr13Al6Mo2	0Cr27Al7Mo2	碳化硅 元件	二硅化钼 元件
推荐最高工作 温度/°C	1100	1000	1200	1350	1450	1700
允许表面负荷/(W/cm <sup>2</sup> )						
600	1.8~2.2					
700	1.6~2.0					
800	1.4~2.0	1.0~1.6	1.8~2.2			
900	1.2~1.6	0.8~1.0	1.4~2.0			
1000	0.8~1.2		1.0~1.6	1.8~2.4		
1100			0.8~1.0	1.2~1.8		
1200				1.0~1.5	26.3	14~22
1300				0.8~1.0	20.5	11~18
1400					13.5	9~15
1500					4.9	6~11
1600						
炉温 /°C						

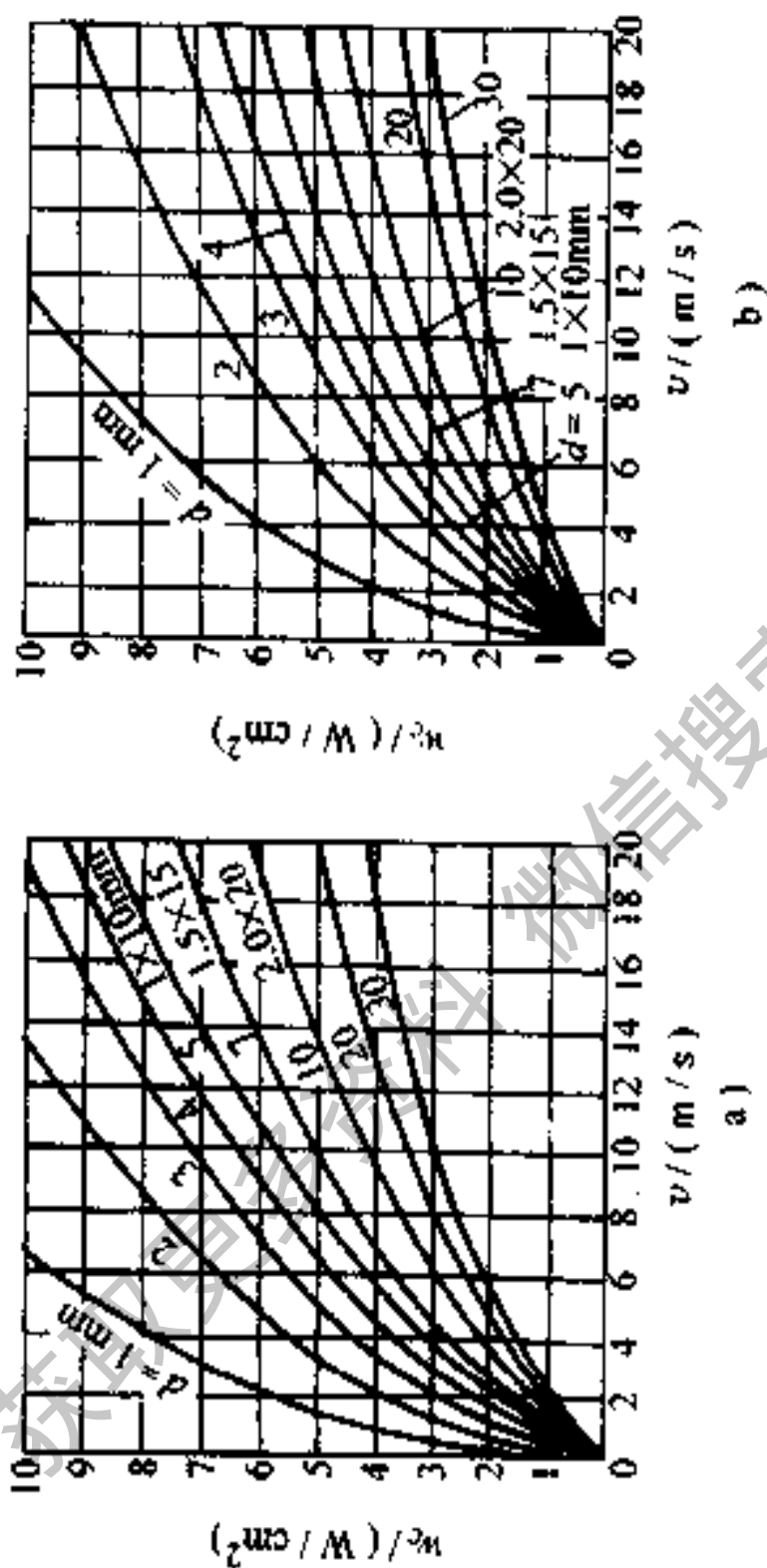
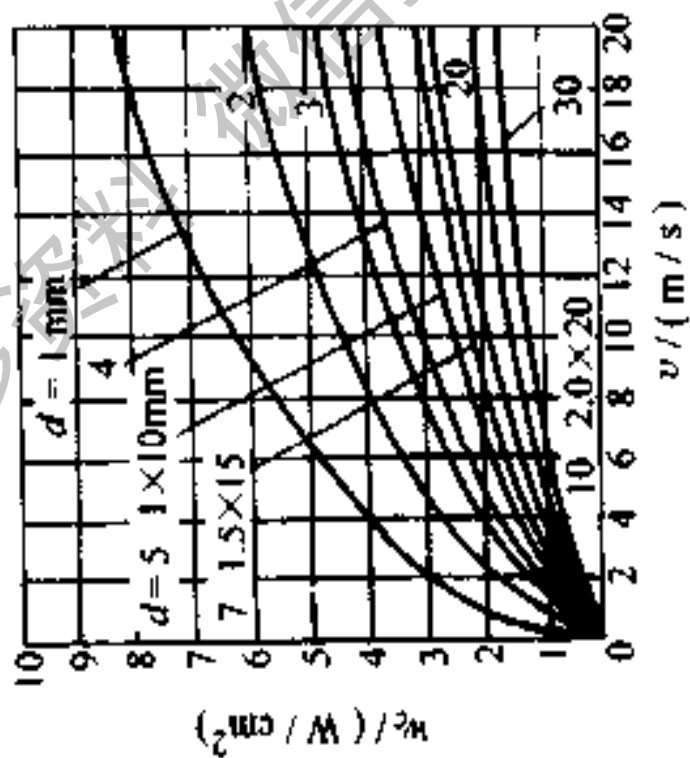
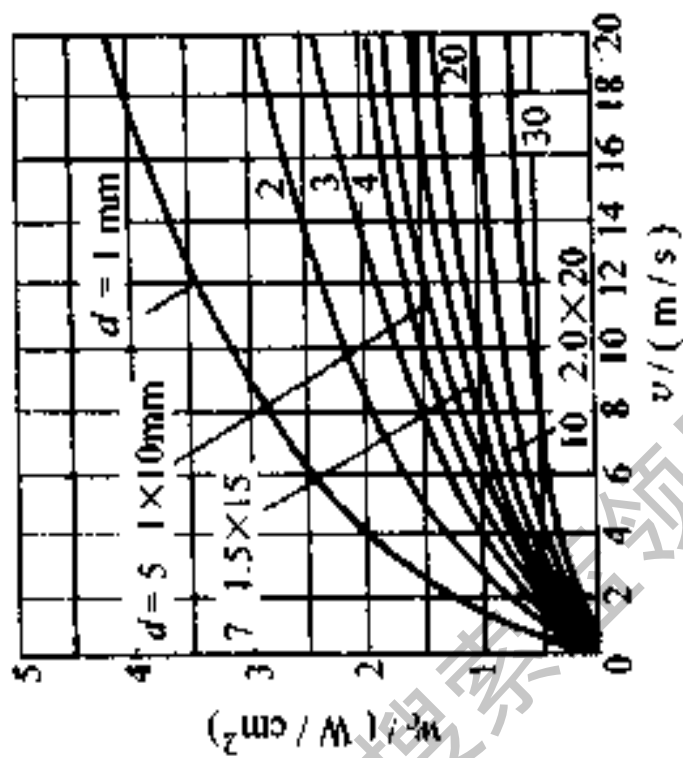


图 9-1 对流加热元件的表面负荷

a) $t_q = 100$ C	$t_j = 500$ C	$W_R = 1.0 \sim 0.7$ W/cm <sup>2</sup>
b) $t_q = 200$ C	$t_j = 500$ C	$W_R = 0.8 \sim 0.55$ W/cm <sup>2</sup>
c) $t_q = 300$ C	$t_j = 500$ C	$W_R = 0.6 \sim 0.4$ W/cm <sup>2</sup>
或 $t_q = 400$ C	$t_j = 600$ C	$W_R = 0.9 \sim 0.6$ W/cm <sup>2</sup>
d) $t_q = 500$ C	$t_j = 600$ C	$W_R = 0.55 \sim 0.4$ W/cm <sup>2</sup>
e) $t_q = 600$ C	$t_j = 800$ C	$W_R = 1.8 \sim 1.2$ W/cm <sup>2</sup>
f) $t_q = 700$ C	$t_j = 800$ C	$W_R = 1.0 \sim 0.7$ W/cm <sup>2</sup>



获取更多资料，请访问：[www.xuehuibook.com](http://www.xuehuibook.com)

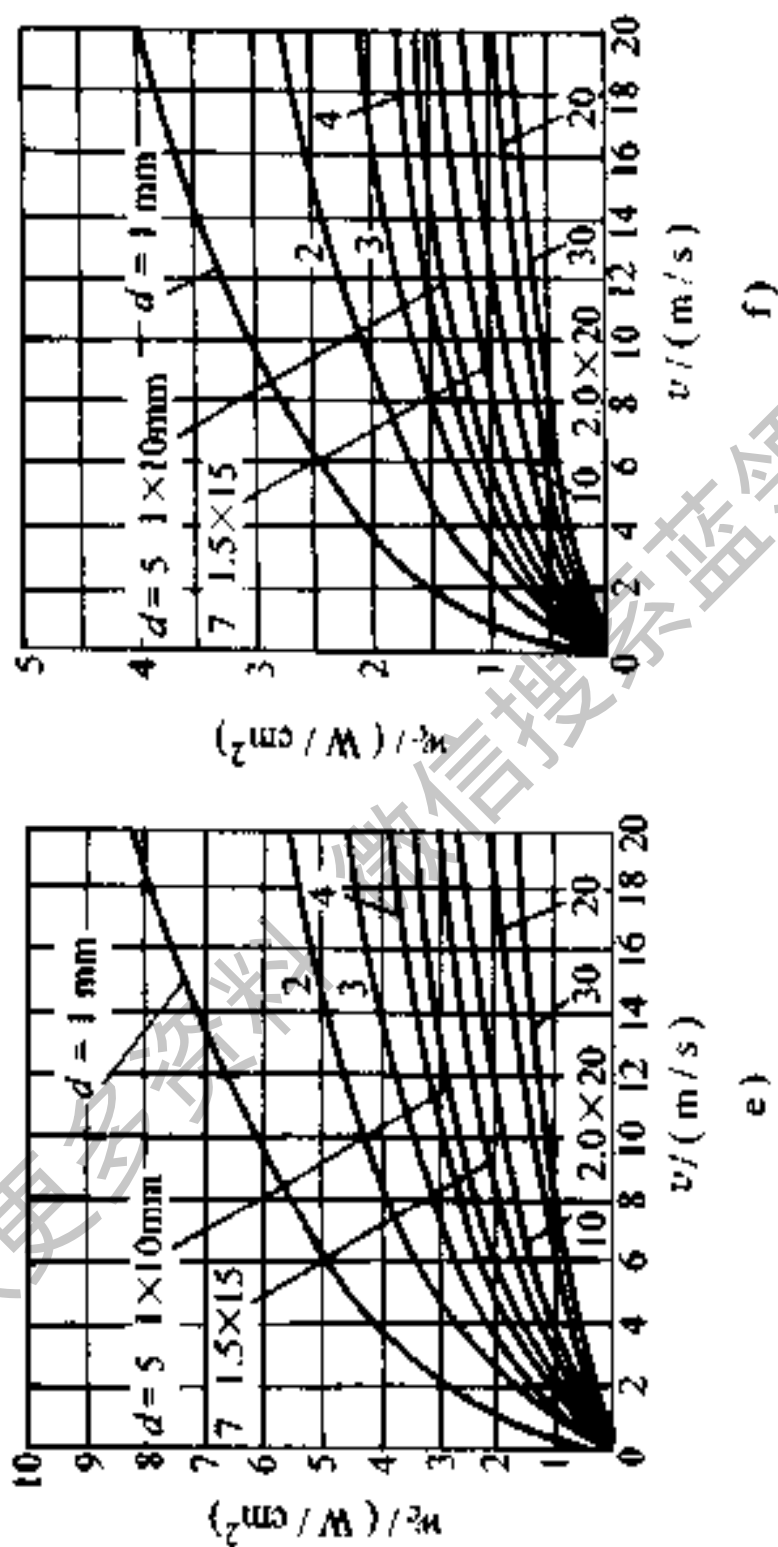


图 9-1 (续)

表 9-5 铁铬铝合金(0Cr25Al5)允许表面负荷

电热设备类型	工业电阻炉		日用电炉		电烙铁		电熨斗	管状电加热元件
	炉温 1000~ 1200 C	炉温 950 C	开启式	半开启式	外热式	内热式		
材料形状	线材	线材	线材	线材	带材	带材	带材	线材
表面负荷选用范围 (W/cm <sup>2</sup> )	1.0 ~1.5	1.4 ~1.8	4~6	13 ~15	2~3	8~10	5~8	8~25

注:带材元件的表面负荷可高出表列线材元件 20% 左右。

式中  $W_c$ ——图中对流部分表面负荷(W/cm<sup>2</sup>);

$W_R$ ——图中辐射部分表面负荷(W/cm<sup>2</sup>),它有两个值,当电热元件与被加热炉料之间屏蔽少时,取较大值;反之,取较小值。

② 图中的  $d$ ,对于线材元件即为线径,对于带材则为当量直径  $d_1$ 。对于  $m=10$  的带材,若宽面与气流方向平行,则  $d_1=0.22l$ ;若宽面与气流方向垂直,则  $d_1=0.32l$ 。其中  $l$  为带材截面的周长。

③ 该图是在气流流过的截面上除了线材或带材的

发热部分外没有支撑结构和其他东西阻挡的情况下得出的。对于绕在陶瓷管上的线材螺旋形加热元件,使用此图时应作如下修正:当螺旋节距  $S > 3d$  时,允许表面负荷取图中查得值的 80%;  $S < 3d$  时,取 70%,其中  $d$  为线径。

④ 该图适用于加热介质为空气的情况,若为其他介质,此图仅作参考。

### 3. 以辐射为主电热元件的计算

#### (1) 计算条件

- ① 每组电热元件的总功率为  $P_j$ , 单位 kW。
- ② 每组中电热元件的个数  $n$ 。
- ③ 每组元件的端电压为  $U$ 。
- ④ 允许表面负荷为  $W_{sr}$ , 单位是  $W/cm^2$ 。
- ⑤ 电热元件的材料种类和性能。

#### (2) 计算步骤

- ① 每个元件的功率  $P_i$

$$P_i = P_j/n$$

- ② 工作温度下,电热元件材料的电阻率  $\rho_i$

$$\rho_i = \rho_{20} \cdot c_i$$

式中  $\rho_{20}$ ——元件材料在 20℃ 时的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ), 见表 9-2;

$c_i$ ——电阻率修正系数, 见表 9-3。

- ③ 电热元件的截面尺寸



### 线材直径

$$d_1 = 34.3 \sqrt[3]{\frac{\rho_1 P_1^2}{U^2 W_{ax}}}$$

带材宽度和厚度： $b_1$  与  $a_1$

$$a_1 = \sqrt[3]{\frac{10^5 \rho_1 P_1^2}{2m(m+1)U^2 W_{ax}}}$$

$$b_1 = ma_1$$

按所求得的截面尺寸，便可从产品目录中选定标准规格的尺寸。

#### ④ 选定材料截面

线材：
$$S = \frac{\pi}{4} d_2^2$$

带材：
$$S = a_2 b_2$$

式中  $d_2, a_2, b_2$ ——选定的材料截面尺寸(mm)。

⑤ 每个电热元件在工作温度下的电阻值和每个元件的长度

$$R_1 = U^2 \times 10^{-3} / P_1, \quad l = SR_1 / \rho_1$$

式中  $R_1$ ——每个电热元件的电阻值( $\Omega$ )；

$l$ ——每个电热元件的长度(m)。

#### ⑥ 实际表面负荷

$$W = \frac{\rho_1}{fl} \times 10^3$$

式中  $W$ ——实际表面负荷( $W/cm^2$ )；

$f$ ——每米电热元件材料的表面积( $\text{cm}^2/\text{m}$ )。

⑦ 每组电热元件的总长度  $L$

$$L = nt$$

可把上述各参数之间的关系绘制成计算曲线,如图 9-2 所示。这样就可利用图解法计算电热元件的尺寸。

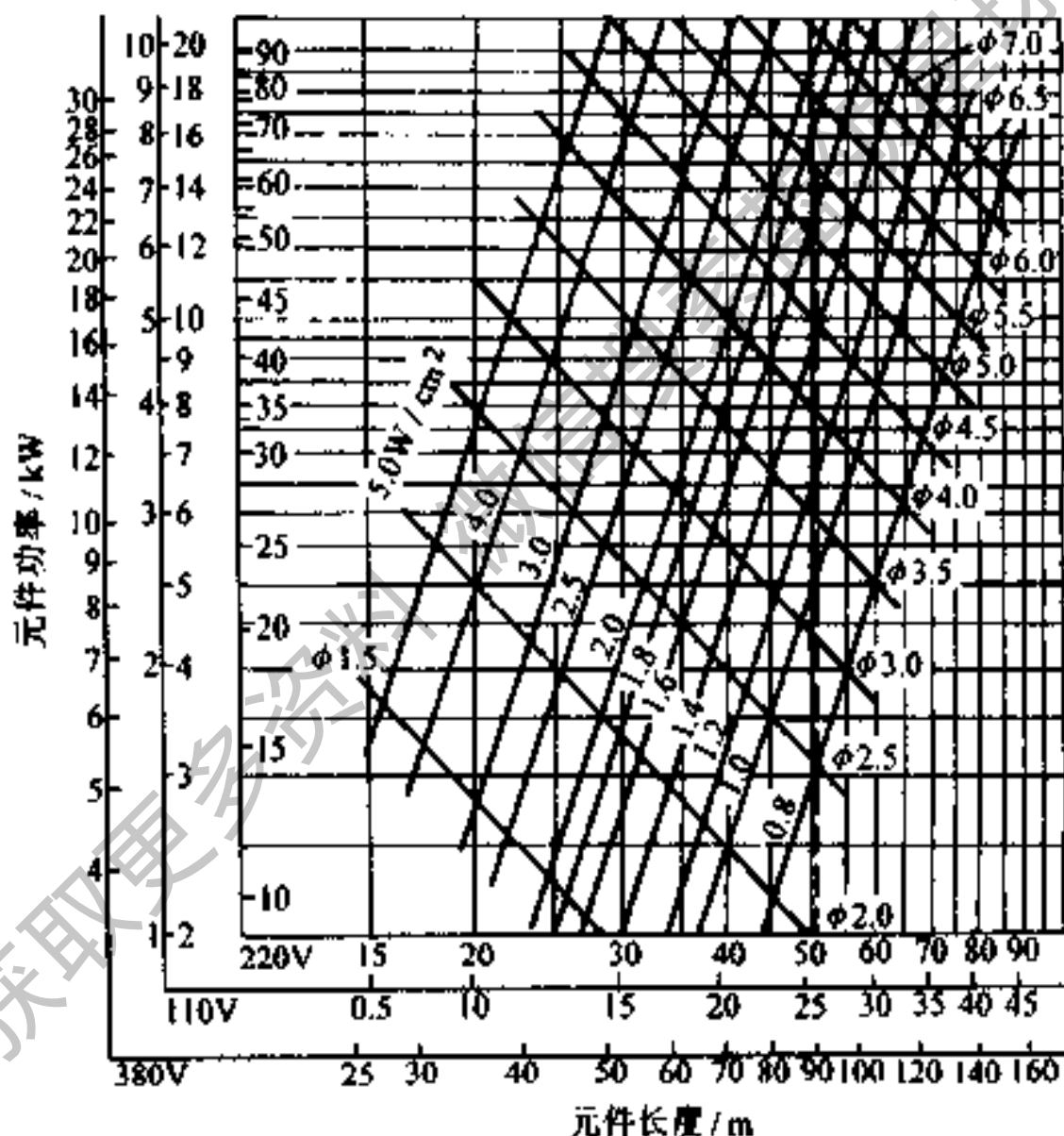


图 9-2 0Cr25Al5 线材电热元件计算图

( $\rho_r = 1.51 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )

如果不是采用 0Cr25Al5 和  $\rho_i$  不等于  $1.51\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  的线材, 则从图上查得  $d_1$  和  $L_1$  值, 还须修正

$$d'_1 = d_1 \sqrt[3]{\frac{\rho_i}{1.51}} \quad L'_1 = L_1 \sqrt[3]{\frac{1.51}{\rho_i}}$$

#### 4. 以对流为主的电热元件的计算

(1) 当气流速度  $v$ 、气体加热温度  $t_g$ 、电热元件温度  $t_1$  已知后, 查图 9-1 得允许表面负荷  $[W]$  和元件截面尺寸  $d$  之间的对应关系  $[W] = f(d)$ ; 对于带状元件  $d$  为当量直径。

(2) 当供电电压  $U$ 、每个电热元件的功率  $P_i$ 、加热元件材料的  $\rho_i$  及带材  $m$  已知后, 便可按前面所述的以辐射为主的电热元件的计算方法求出允许表面负荷  $W_{Lr}$  和元件尺寸  $d$  或  $a$  之间的对应关系  $[W] = \varphi(d)$  或  $[W] = \varphi(a)$ , 如图 9-3 所示。

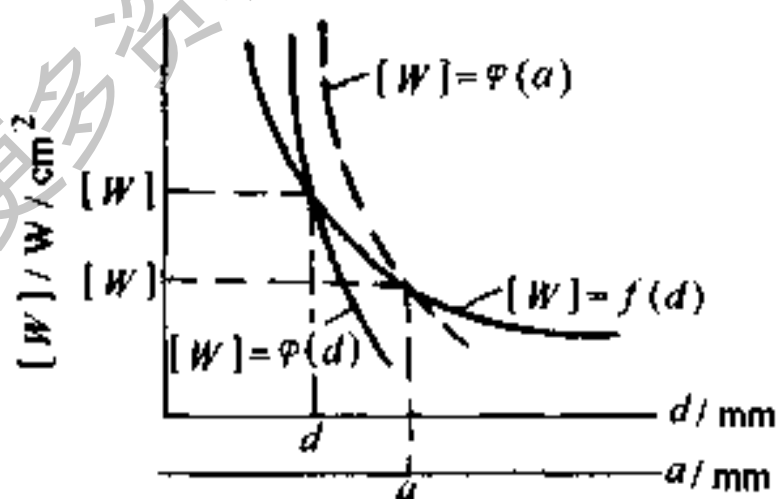


图 9-3 图解计算示意图

(3) 图解法求出同时满足  $[W] = f(d)$  和  $[W] = \varphi(d)$

或  $W_{uz} = \varphi(\alpha)$  的  $W_{uz}$  值和  $d$  或  $a$  值。

(4) 接下的计算与前面介绍的以辐射为主的电热元件的计算方法相同。

### 5. 硅碳电热元件的计算

(1) 硅碳元件表面负荷的计算：

$$W = C \left[ \left( \frac{T_1}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{1000} \right)^4 \right] \times 10^{12}$$

式中  $W$  —— 电热元件表面负荷 ( $W/cm^2$ )；

$T_1$  —— 电热元件的绝对温度 (K),  $T_1 = 273 + t_1$ ；

$T_2$  —— 炉内绝对温度 (K),  $T_2 = 273 + t_2$ ；

$C$  —— 硅碳元件的辐射系数, 为  $5 \times 10^{-12} W/cm^2 \cdot C^4$ ；

$t_1$  —— 元件温度 (C), 一般  $t_1 = t_2 + \Delta t$ ；

$\Delta t$  —— 温差, 约  $50 \sim 100 C$ ；

$t_2$  —— 所需炉温 (C)。

(2) 硅碳元件支数的计算：

① 硅碳元件发热部的总面积

$$S = P_T / W$$

式中  $S$  —— 元件发热部总面积 ( $cm^2$ )；

$P_T$  —— 电炉所需总功率 (W)。

② 根据电炉的实际尺寸, 确定一种合适的硅碳元件发热部长度  $l$  和接线端长度  $l_2$ 。并从中选定一种直径  $d$  (棒) 或  $D$  (管) 查表 9-5。

③ 按下式求出元件支数  $Z$

$$Z = \frac{S}{\pi dl} (\text{棒}), \quad Z = \frac{S}{\pi Dl} (\text{管})$$

在三相电路中,须把  $Z$  凑成 3 的倍数。

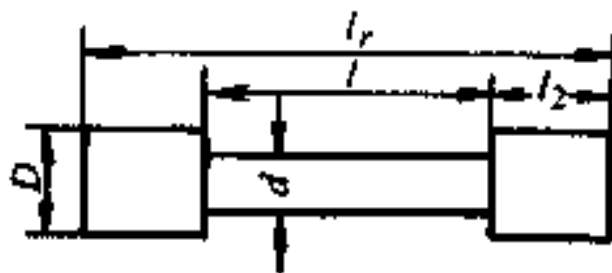
④ 求出每支功率  $P_1$

$$P_1 = P_T / Z$$

(3) 每支元件的允许负荷:表 9-4 中列出不同炉温下每支元件的允许负荷,是在元件温度规定为 1450 C 条件下的值。由表 9-7 查得炉温在 1100 C、1200 C 和 1300 C 与 1400 C 时表面负荷分别为 26.3、20.5、13.47 和 4.91 W/cm<sup>2</sup>。把它们分别乘以每支发热部表面积  $\pi dl$  (棒)或  $\pi Dl$  (管),就可求得各种规格的元件在不同炉温下的每支允许负荷,使用中不得超过该值。

(4) 元件电压调节:为了延缓电热元件老化,在使用过程中须用调压器随时调节电压,保证其额定功率。因为  $U = \sqrt{P_1 R}$ ,若设允许元件电阻  $R$  增加至 4 倍,则调压器的调节范围上限应为起始使用电压的两倍。

表 9-6 碳化硅棒电热元件尺寸



(续)

工作部分尺寸 /mm		粗端/mm		碳化硅棒 的全长 $l_T$ /mm	喷有金 属部分 的长度 /mm	接触卡箍	
直径 $d$	长度 $l$	直径 $D$	长度 $l_2$			宽度 /mm	接触舌 片长度 /mm
6	60	12	75	210	25	16	20
6	100	12	75	250	25	16	20
6	100	12	130	360	25	16	20
8	100	14	80	270	25	16	20
8	100	14	130	360	25	16	20
8	150	14	60	270	25	16	20
8	150	14	85	320	25	16	20
8	150	14	150	450	25	16	20
8	180	14	60	300	25	16	20
8	180	14	80	340	25	16	20
8	180	14	85	350	25	16	20
8	180	14	150	480	25	16	20
8	180	14	110	400	25	16	20
8	180	14	200	580	25	16	20
8	250	14	100	450	25	16	20
8	250	14	150	550	25	16	20
12	200	18	150	500	40	20	20
12	100	18	200	500	40	20	20
12	250	18	115	460	40	20	20
12	150	18	200	550	40	20	20
12	250	18	200	650	40	20	20
14	200	22	250	700	40	20	20

(续)

工作部分尺寸 /mm		粗端/mm		碳化硅棒 的全长 $l_r$ /mm	喷有金 属部分 的长度 /mm	接触卡箍	
直径 $d$	长度 $l$	直径 $D$	长度 $l_2$			宽度 /mm	接触舌 片长度 /mm
14	250	22	250	750	40	20	20
14	250	22	350	950	40	20	20
14	300	22	150	600	40	20	20
14	300	22	250	800	40	20	20
14	300	22	350	1000	40	20	20
14	400	22	250	900	40	20	20
14	400	22	350	1100	40	20	20
18	250	28	250	750	40	20	20
18	250	28	350	950	40	20	20
18	300	28	250	800	40	20	20
18	300	28	350	1000	40	20	20
18	400	28	250	900	40	20	20
18	400	28	350	1000	40	20	20
18	500	28	250	1000	40	20	20
18	500	28	350	1200	40	20	20
18	600	28	150	900	40	20	20
18	600	28	250	1100	40	20	20
18	600	28	350	1300	40	20	20
18	800	28	250	1300	40	20	20
18	800	28	350	1500	40	20	20
25	800	39	400	1600			
30	1000	45	500	2000			

表 9-7 硅碳元件在不同元件温度和炉温下的表面负荷值

(单位:  $W/cm^2$ )

元件 温度 /C	炉 温 /C													
	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550		
1100	4.63	2.45												
1150	7.37	5.19	2.74											
1200	10.41	8.23	5.78	3.04										
1250	13.77	11.60	9.15	6.41	3.37									
1300	17.47	15.29	12.84	10.1	7.06	3.70								
1350	21.6	19.38	16.93	14.19	11.15	7.78	4.09							
1400	26.0	23.9	21.4	18.67	15.63	12.26	8.57	4.48						
1450	30.9	28.8	26.3	23.6	20.5	17.17	13.47	9.39	4.91					
1500	36.3	34.1	31.7	28.9	25.9	22.5	18.82	14.73	10.26	5.35				
1550	42.1	39.9	37.5	34.7	31.7	28.3	24.6	20.5	16.05	11.15	5.80			
1600	48.4	46.2	43.8	41.0	38.0	34.6	30.9	26.8	22.4	17.46	12.11	6.32		



## 6. 电炉丝抽伸长度的计算

拉伸电炉丝有两种方法：一种方法是先加热后拉伸到规定长度；另一种方法是把电热丝硬拉到所需长度，然后通电加热定型。后者效果较好。

表 9-8 列出电炉丝拉伸长度参考值。

表 9-8 电炉丝拉伸长度参考值

电炉功率/kW	0.8	1	1.2	1.5	2
炉盘直径/cm	14	16	18	19	20
炉丝原长度/cm	48	50	53	62	76
拉伸后实际长度/cm	96	120	130	140	165

电炉丝配用电炉盘的规格，见表 9-9。

## 7. 小电炉的效率

小电炉是指额定容量小于 2kW 的电炉。小电炉有以下两种效率：

(1) 初始效率：在标准容器中加入水，通电后 15min，根据水的温升计算出来的效率。

(2) 额定效率：把水盛于标准容器中，从通电 45min 后开始计算水在 15min 内的温升，用这个温升计算的效率。

小电炉的效率见表 9-10。

## 8. 并联电热带的计算

表 9-9 电炉丝配用电炉盘的规格

圆形电炉 盘规格 /mm	配用电炉丝 /W	方(矩)形 电炉盘规格 /mm×mm	配用电炉丝 /W
75	200~300	50×200	500~600
100	400	75×120	500~600
125	500	100×150	700~800
140	600	100×200	800~1000
150	700~800	125×125	600~700
165	1000~1200	125×225	1000~1500
185	1500	140×140	800~1000
200	1500~2000	140×275	1000~1500
250	3000	150×165	1500
300	4000	175×300	1500~2000
370	4500	175×400	2000~2500
520	6000	200×200	1200~1500
600	6000	200×500	3000~4000
		275×275	2000~2500
		300×300	2500~3000
		325×650	4000~5000

表 9-10 小电炉的效率

标定功率	初始效率(%)	额定效率(%)
600W 外露式	56~67	78~93
600W 反射式	79~84	89~98
1.2kW 外露式	40~53	69~85
1.2kW 封闭式	40~48	95~100
600W 改良式	72	94

并联式电热带用于各种工业管路及管路附件的伴热保温,通常用在温度低于+150℃、保温距离小于600m的场合。

(1) 保温所需功率计算:

① 圆筒状设备保温所需功率

$$P_s = \frac{8.767\lambda(t_y - t_0)}{\ln \frac{D+2b}{D}}$$

式中  $P_s$ ——被伴热物体每米所需功率(W/m);

$\lambda$ ——保温材料的热导率(W/m·℃),见表9-

11,1W·h=3.6kJ;

$t_y$ ——管路等设备要求维持的温度(℃);

$t_0$ ——环境较冷日平均地温度(设备埋地)或大气温度(设备在露天)(℃);

$D$ ——管路或设备的外径(mm);

$b$ ——保温材料厚度(m)。

表 9-11 常用保温绝热材料的热物理特性

序号	材料名称	密度 $\rho$ /(kg /m <sup>3</sup> )	热导率 $\lambda$ /(kJ/m ·h·°C)	导温 系数 $a \times 10^3$ /(m <sup>2</sup> /h)	比热容 $c$ /(kJ/kg ·°C)	重量 湿度 (%)
1	泡沫混凝土	525	0.398	0.79	0.963	0
2	加气混凝土	545	0.544	0.97	1.172	4.8
3	粉煤灰混凝土	640	0.754	0.87	1.340	12.5
4	耐热混凝土	296	0.310	0.91	1.172	—
5	浮石藻混凝土	729	0.628	0.77	0.837	0
6	玻璃棉混凝土	232	0.276	1.39	0.879	0
7	聚苯乙烯混 凝土	538	0.670	0.90	1.340	13.7
8	锯木屑混凝土	705	0.712	1.21	0.837	—
9	木屑硅制土砖	590	0.502	0.89	0.921	—
10	珍珠岩粉料	44	0.151	2.00	1.591	0
11	水泥珍珠岩制 品	400	0.327	0.93	0.879	0
12	沥青珍珠岩制 品	285	0.356	0.82	1.507	—
13	乳化沥青珍珠 岩制品	304	0.301	0.68	1.465	—
14	水玻璃珍珠岩 制品	310	0.356	1.08	1.047	1.9

(续)

序号	材料名称	密度 $\rho$ /(kg /m <sup>3</sup> )	热导率 $\lambda$ /(kJ/m ·h·°C)	导温 系数 $a \times 10^3$ /(m <sup>2</sup> /h)	比热容 $c$ /(kJ/kg ·°C)	重量 湿度 (%)
15	矽石粉料	278	0.327	0.88	1.340	—
16	沥青矽石制品	450	0.586	0.63	2.093	26.7
17	水泥矽石制品	347	0.544	1.34	1.172	7.9
18	白灰矽石制品	408	0.879	1.29	1.675	—
19	水玻璃矽石制 品	430	0.461	1.32	0.795	—
20	乳化沥青矽石 制品	473	0.586	0.91	1.340	—
21	玻璃棉	100	2.093	2.78	0.754	—
22	树脂玻璃棉板	57	1.465	2.13	1.214	—
23	沥青玻璃棉	78	0.155	1.81	1.089	—
24	火山岩棉	80~ 110	0.147~ 0.180	—	—	—
25	硅酸铝纤维	140	0.193	1.41	0.963	—
26	矿渣棉	180	0.151	—	—	—
27	沥青矿棉板	300	0.335	1.48	0.754	—
28	酚醛矿棉板	200	0.251	1.67	0.754	—
29	碎石棉	103	0.176	—	—	—
30	石棉水泥板	300	0.335	1.33	0.837	—
31	硅藻土石棉板	810	0.502	0.39	1.633	—

(续)

序号	材料名称	密度 $\rho$ /(kg /m <sup>3</sup> )	热导率 $\lambda$ /(kJ/m ·h·C)	导温 系数 $a \times 10^3$ /(m <sup>2</sup> /h)	比热容 $c$ /(kJ/kg ·C)	重量 湿度 (%)
32	石棉菱苦土	870	1.59	1.97	0.921	—
33	泡沫石膏	411	0.586	1.67	0.837	—
34	泡沫玻璃	140	0.188	1.51	0.879	—
35	聚苯乙烯硬塑 料	50	0.113	1.07	2.093	—
36	脲醛泡沫塑料	20	0.167	5.71	1.465	—
37	聚胺酯泡沫塑 料	34	0.147	2.15	2.010	—
38	聚异氰尿酸酯 泡沫塑料	41	0.117	1.64	1.717	0
39	聚氯乙烯泡沫 塑料	190	0.209	0.75	1.465	—
40	矿渣棉板	322	0.155	0.57	0.837	—
41	锯木屑	250	0.335	0.53	2.512	—

注：测定温度为常温。

## ② 板状设备保温所需功率

$$P_s = \frac{1.395\lambda(t_1 - t_0)}{b}$$

式中  $P_s$ ——被伴热物体每平方米所需功率 (W/m<sup>2</sup>)；

其他符号同前。

(2) 所需电热带计算:

① 电热带规格

$$P = P_s / N$$

式中  $P$ ——电热带发热功率 (W), 见表 9-12;

$N$ ——每米或每平方米被加热物所配电热带长度  
(m/m 或 m/m<sup>2</sup>);

$P_s$ ——同前。

表 9-12 几种发热带的技术数据

产品型号	电压 /V	发热 功率 /(W /m)	绝缘 材料 色别	长期工 作温度 /C	短时冲 击温度 /C	最大应 用长度 /m	发热 节长 /m
RRVB-10	220	10	PN 灰	90	125	150	1.08
RRVB-15	220	15	PN 黑	90	125	140	0.88
RRVB-20	220	20	F46 棕	190	235	130	0.90
RRVB-30	220	30	F46 绿	190	235	120	0.82
RRVB-40	220	40	F46 红	190	235	110	0.71

注: PN——聚氯乙烯——丁腈橡胶混合物; F46——四氟乙  
烯——六氟丙烯聚合物。

② 所需电热带长度:

$$L = NI \quad \text{或} \quad L = NS$$

式中  $L$ ——电热带长度 (m);

$l$ ——管路等设备长度 (m);

$S$ ——管路等设备表面积 ( $m^2$ )。

## 二、电热干燥室功率计算

### 1. 求出墙壁的热量损失 (表 9-13)

表 9-13 墙壁单位热量损失

砖墙厚 /mm	100	200	300	400	500	600	700	800
墙的种类	每平方米每 $1^\circ\text{F}$ 的热量损失 / ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{F}$ )							
普通 砖墙	2.108	1.239	0.965	0.805	0.710	0.625	0.551	0.498
内面 粉墙	2.172	1.303	1.027	0.773	0.709	0.646	0.593	0.529

注:  $1^\circ\text{F} = \frac{9}{5}C + 32$ ,  $C$  为摄氏度  $C$ 。

按下式求出干燥室墙壁的净面积, 然后查表 9-13 得墙壁的热量损失  $P_w$ 。

$$S_j = S_z - S_m$$

式中  $S_j$ ——墙壁的净面积 ( $m^2$ );

$S_z$ ——墙壁的总面积 ( $m^2$ );

$S_m$ ——门的面积 ( $m^2$ )。

### 2. 求出门的热量损失 $P_m$



$$P_m = W_m S_m$$

式中  $W_m$ ——门的单位热量损失 ( $W/m^2 \cdot F$ )，普通门为  $3.154 (W/m^2 \cdot F)$ 。

3. 求出室顶天花板的散热热量损失  $P_b$

100mm 钢筋混凝土室顶为  $1.865 W/m^2 \cdot F$ ；

150mm 钢筋混凝土室顶为  $1.674 W/(m^2 \cdot F)$ 。

4. 求出地板散热热量损失  $P_d$

砖铺上粉泥地面为  $0.947 W/(m^2 \cdot F)$ ；钢筋混凝土地面为  $0.635 W/(m^2 \cdot F)$ 。

5. 求出空气吸收的热量

求出室内空气的体积，然后根据每小时空气换气的次数（视需要而定），由表 9-14 查出系数，即可求出空气所需吸收的热量  $P_q$ 。

表 9-14 空气单位热量损失

空气换气次数	1/2	1	1 1/2	2	3
热量损失 / ( $W/m^3 \cdot F$ )	0.0918	0.1871	0.2789	0.3743	0.5579
空气换气次数	4	5	6	10	—
热量损失 / ( $W/m^3 \cdot F$ )	0.7450	0.9287	1.1193	1.8608	—

6. 电热器所需功率  $P$

$$P = \frac{K}{\eta} (P_w + P_m + P_b + P_d + P_q)$$

式中  $K$ ——余量系数；

$\eta$ ——电热器热效率。

7. 电热器的功率  $P$  和使用电压  $U$  已知后, 就可根据电热丝的单位表面负荷来选择电热元件。

单位表面负荷: 露出式电热器为  $4 \sim 5 \text{ W/cm}^2$ ; 密封式为  $1.5 \sim 2 \text{ W/cm}^2$ 。

### 三、按炉膛容积估算炉子功率

普通箱式和井式电阻加热炉的炉子功率, 可根据不同炉温按下列公式估算

$$\text{炉温 } 1200 \text{ C} \quad P = (100 \sim 150) \sqrt[3]{V^2}$$

$$\text{炉温 } 950 \text{ C} \quad P = (75 \sim 100) \sqrt[3]{V^2}$$

$$\text{炉温 } 650 \text{ C} \quad P = (50 \sim 75) \sqrt[3]{V^2}$$

$$\text{炉温 } 400 \text{ C} \quad P = (35 \sim 50) \sqrt[3]{V^2}$$

式中  $P$ ——炉子功率 (kW);

$V$ ——炉膛名义容积 ( $\text{m}^3$ ), 箱式炉  $V = bhl$ ,  $b$ 、 $h$ 、 $l$  分别为炉口宽度、高度和深度 (m); 井式炉  $V = D\pi L$ ,  $D$  为口径直径,  $l$  为深度 (m)。

## 第二节 盐浴炉计算

### 一、炉膛尺寸和功率的计算

#### 1. 炉膛尺寸的确定

炉膛尺寸应能容纳熔盐体积  $V_m$ , 同时工件在盐液中的位置应满足加热工艺的要求。电极底边应离开盐槽底

约 50~80mm，工件与盐槽壁之间应有 30~50mm 的间距。

熔盐在工作温度下的体积  $V_n$  为

$$V_n = G_r / \rho_n$$

式中  $G_r$ ——所需要的熔盐重量 (kg)；

$\rho_n$ ——工作温度下熔盐的密度 (kg/l.)。

据经验， $G_r$  与炉子生产率  $A$  (kg/h) 之间存在如下关系：

对中温炉 (炉温 650~950 C)  $G_r = (2 \sim 3) A$

对高温炉 (炉温高于 950 C)  $G_r = (1 \sim 1.5) A$

## 2. 炉子功率的确定

$$P = KV_n$$

式中  $P$ ——炉子功率 (kW)；

$K$ ——经验系数，对埋入式盐浴炉，炉温为 650 C 时取 0.4~0.6；850 C 时取 0.6~0.8；1300 C 时取 0.9~1.5；对升温要求快，或盐面散热大的炉子，取较大值。

## 二、埋入式盐浴炉对电源变压器的要求

变压器容量按下式估算

$$P_b = (1.1 \sim 1.2) P$$

式中  $P_b$ ——变压器额定容量 (kVA)；

$P$ ——炉子额定功率 (kW)。

变压器一次侧电压为 380V 或 220V，二次侧电压：

5.5~17.5V (插入式电极盐炉); 14~32V (埋入式电极盐炉)。电压分 6~7 级调节。

### 三、电阻炉、盐浴炉电能利用率计算

#### 1. 测试电能利用率注意事项

(1) 实测时炉子工作条件与日常生产情况相符。

(2) 对于一般的周期性作业炉, 应测量一个完整的工艺周期的有关数据; 冷炉升温时的耗电量, 要均匀分摊到每个炉次中去。

(3) 对于连续作业炉或连续工作的周期性作业炉, 当产品工艺相同时, 可以只测一个作业周期的有关数据。

#### 2. 电能利用率的测量方法

##### (1) 电阻炉、盐浴炉的电能利用率

$$\eta = \frac{Q_{yr}}{Q_e} \times 100\% = \frac{Q_{yr}}{Q_{yr} + \Delta Q} \times 100\%$$

$$\Delta Q = Q_T + Q_s + Q_r + Q_x + Q_L + Q_c + Q_{FZ} \\ + Q_{J1} + Q_{J2} + Q_Q$$

对盐浴炉上式还要加上  $Q_{m0}$  (炉子空载时变压器及导体损耗)。

式中  $Q_{yr}$  —— 工件升温所吸收热量 (kJ), 即有效热量;

$Q_e$  —— 电网输入电能换算成热量 (kJ);

$\Delta Q$  —— 总损失热量 (kJ);

$Q_T$  —— 炉体蓄热 (kJ), 对盐浴炉是指炉蓄热  $Q_L$ ;

$Q_s$  —— 通过炉墙向周围空间散失的热量 (kJ);

$Q_F$ ——辐射热损耗 (kJ);

$Q_L$ ——泄漏热损耗 (kJ);

$Q_{L1}$ ——冷却水带走的热量 (kJ);

$Q_{L2}$ ——外伸金属件的传热损耗 (kJ);

$Q_{F2}$ ——辅件热损耗 (kJ);

$Q_{r1}$ ——加热控制气氛、渗炭剂的热量 (kJ);

$Q_{r2}$ ——排除废气所带走的热量 (kJ);

$Q_Q$ ——其他原因造成的损失热量 (kJ)。

(2) 输入热量计算: 由电能表实测出加热工艺周期中的耗电量  $A$ , 按下式折算成输入热量;

$$Q_{in} = 3600A$$

式中  $Q_{in}$ ——输入热量 (kJ);

$A$ ——耗电量 (kW·h)。

(3) 有效热量计算:

$$Q_{eff} = G(c_2t_2 - c_1t_1)$$

式中  $Q_{eff}$ ——有效热量 (kJ);

$G$ ——被加热工件的重量 (kg);

$c_1, c_2$ ——工件起始和终止温度时的比热 (kJ/kg·°C), 见表 9-15。

$t_1, t_2$ ——工件起始和终止时温度 (°C)。

### 3. 损耗热量计算

(1) 冷炉升温损耗计算: 对于电阻炉来说, 该项损耗主要是升温时炉体 (主要是耐火材料、保温材料) 吸收的

表 9-15 常用金属不同温度的比热容 (kJ/kg·C)

金属 比热容	铝		铜		纯铁		钢		钢		铸铁	
	温度/C		0.3%C		0.6%C		0.8%C		0.6%Mn 1.5%Si		0.7%Mn 1.5%Si 4.2%C	
100	0.938	0.389	0.465	0.481	0.481	0.481	0.502	—	0.544	—	—	0.544
200	0.950	0.398	0.490	0.486	0.486	0.486	0.502	0.461	0.565	0.461	0.461	0.565
300	0.955	0.410	0.511	0.515	0.515	0.515	0.523	0.494	0.565	0.494	0.494	0.565
400	0.959	0.41	0.536	0.528	0.528	0.528	0.536	0.507	0.565	0.507	0.507	0.565
500	0.971	0.423	0.561	0.544	0.544	0.544	0.553	0.515	0.586	0.515	0.515	0.586
600	0.978	0.435	0.595	0.574	0.574	0.574	0.586	0.536	0.607	0.536	0.536	0.607
700	1.453	0.444	0.599	0.607	0.607	0.607	0.615	0.603	0.641	0.603	0.603	0.641
800	1.344	0.448	0.632	0.678	0.678	0.678	0.691	0.687	0.691	0.666	0.666	0.691
900	1.352	0.444	0.649	0.678	0.678	0.678	0.678	0.699	0.712	0.678	0.678	0.712
1000	—	0.465	0.632	0.678	0.678	0.678	0.670	0.699	0.720	0.670	0.670	0.720
1100	—	0.662	0.678	0.682	0.682	0.682	0.653	0.699	0.733	0.670	0.670	0.733
1200	—	0.689	0.678	0.682	0.682	0.682	0.653	0.703	0.909	0.670	0.670	0.909
1300	—	0.641	0.682	0.687	0.687	0.687	0.653	0.703	0.909	0.670	0.670	0.909
1400	—	0.628	0.691	0.687	0.687	0.687	0.653	0.703	0.913	0.670	0.670	0.913
1500	—	0.632	0.699	—	—	—	—	—	—	—	—	—

能量，即炉体蓄热。

① 电阻炉炉蓄热  $Q_T$

$$Q_T = V_1 \rho_1 c_1 \Delta t_1 + V_2 \rho_2 c_2 \Delta t_2 + \dots + V_n \rho_n c_n \Delta t_n$$

式中  $V_1, V_2, \dots, V_n$ ——各种炉衬的体积 ( $m^3$ )；

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——各层炉衬的密度 ( $kg/m^3$ )，

查表 9-16。

$c_1, c_2, \dots, c_n$ ——各层炉衬的平均比热容 ( $kJ/kg \cdot C$ )，查表 9-16；

$\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ ——各层炉衬加热开始的平均温度与加热终了的平均温度之差 ( $C$ )， $\Delta t = t_h - t_q$ ；

② 盐浴炉蓄热  $Q_T$ ：盐浴炉冷炉升温，除炉体蓄热外，还包括盐浴炉吸热、辐射损失和变压器及导体损耗。炉体蓄热  $Q_T$ ，计算方法同电阻炉。盐浴熔化耗能，包括以下两项损耗

升温耗能  $Q_T'$

$$Q_T' = G(c_2 t_2 - c_1 t_1)$$

熔化潜热量  $Q_q$

$$Q_q = Gq$$

式中  $G$ ——盐浴重量 ( $kg$ )；

$c_1, c_2$ ——盐浴加热初始和终止温度下的比热容 ( $kJ/kg \cdot C$ )，查表 9-17 及有关资料；

表 9-16 常用耐火材料的主要性能

材 料	密度 $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	耐火度 (不低于) / $^{\circ}\text{C}$	常温耐压 强度 / $\text{MPa}$	最高使用 温度 / $^{\circ}\text{C}$	热导率 $\lambda$ ( $\text{kJ}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	比热容 $c$ ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ )
QN-1.3b	1.3	1710	1.41	1300	$1.47+1.26$ $\times 10^{-3}t_p$	$0.81+0.26$ $\times 10^{-3}t_p$
QN-1.3b	1.3	1670	3.43	1300	$1.47+1.26$ $\times 10^{-3}t_p$	$0.84+0.26$ $\times 10^{-3}t_p$
QN-1.0	1.0	1670	2.94	1250	$1.05+0.92$ $\times 10^{-3}t_p$	$0.84+0.26$ $\times 10^{-3}t_p$
QN-0.8	0.8	1670	1.96	1250	$0.75+1.55$ $\times 10^{-3}t_p$	$0.84+0.26$ $\times 10^{-3}t_p$
QN-0.4	0.4	1670	0.59	1150	$0.33+0.59$ $\times 10^{-3}t_p$	$0.84+0.26$ $\times 10^{-3}t_p$

轻质粘土砖



(续)

材 料	密度 $\rho$ ( $g/cm^3$ )	耐火度 (不低于) / $^{\circ}C$	常温耐压 强度 /MPa	最高使用 温度 / $^{\circ}C$	热导率 $\lambda$ ( $kJ/m \cdot h \cdot ^{\circ}C$ )	比热容 $c$ ( $kJ/kg \cdot ^{\circ}C$ )
普通粘土砖	1.8 ~2.2	1610 ~1730	12.26 ~14.71	1400	$2.51+2.30$ $\times 10^{-3}t_p$	$0.84+0.26$ $\times 10^{-3}t_p$
普通高铝砖	2.3 ~2.75	1750 ~1790	39.23	1500	$7.54+6.70$ $\times 10^{-3}t_p$	$0.84+0.234$ $\times 10^{-3}t_p$
泡沫高铝砖	$<0.8$	$>1770$	0.59 ~2.94	1150 ~1300	—	$0.84+0.234$ $\times 10^{-3}t_p$
刚玉制品	2.6 ~3.4	$>1900$	$>49.03$	1800	$7.54+6.70$ $\times 10^{-3}t_p$	$0.80+0.419$ $\times 10^{-3}t_p$
泡沫氧化铝砖	$<0.8$	$>1900$	0.59 ~2.94	1350	—	$0.80+0.419$ $\times 10^{-3}t_p$
石墨制品	1.6	$>3000$	19.61 ~29.42	2000	—	—
碳化硅制品	2.4	2000 ~2100	—	1500	1000 $^{\circ}C$ 时, 38.52 1200 $^{\circ}C$ 时, 33.49	$0.96+0.147$ $\times 10^{-3}t_p$

注:  $t_p$ —平均温度( $^{\circ}C$ )。

表 9-17 常用盐浴的物理性能数据

性 能	碱金属 硝酸盐 亚硝酸盐 混合盐	碱金属 硝酸盐 混合盐	碱金属 氯化盐 混合盐	碱金属 氯化盐 碳酸盐 混合盐	碱金属 碱土金属 氯化盐 混合盐	氯化钡	碱类 混合 物
熔点/℃	≈145	≈170	≈670	≈590	≈550	960	≈150
工作温度/℃	≈300	≈430	≈850	≈670	≈750	1290	≈250
固态密度/(kg/m <sup>3</sup> )	2120	2150	2080	2260	2070	3860	2120
工作温度下密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1850	1800	1600	1900	2280	2870	1660
固态比热容/(kJ/kg·℃)	1.34	1.34	0.84	0.96	0.59	0.13	—
液态比热容/(kJ/kg·℃)	1.55	1.51	1.09	1.42	0.75	0.50	—
熔解热/(kJ/kg)	127.7	23.0 <sup>①</sup>	669.9 <sup>①</sup>	368.4	345.4 <sup>①</sup>	182.1 <sup>①</sup>	—

① 此数据波动较大,可能与含结晶水有关。

$t_1$ 、 $t_2$ ——加热初始和终止温度 (C)；

$q$ ——熔液潜热，即溶解热 (kJ/kg) 可查表 9-17 或有关资料。盐浴表面辐射损失  $Q_{mF}$ ，可参见表 9-18。

表 9-18 盐浴表面在不同温度下的辐射热损失

盐浴表面 温度 /C	辐射热损失		盐浴表面 温度 /C	辐射热损失	
	(kJ/m <sup>2</sup> ·h)	(kW/m <sup>2</sup> )		(kJ/m <sup>2</sup> ·h)	(kW/m <sup>2</sup> )
200	7318	2.0	800	194250	53.9
300	15797	4.4	900	277120	77.0
400	30061	8.4	1000	384830	106.9
500	52335	14.5	1100	520750	144.6
600	85120	23.6	1200	689860	191.6
700	131310	36.5	1300	897150	249.2

上述冷炉升温测算对周期性作业炉，特别是间歇使用的周期炉十分重要。据统计，老式砖砌处理箱式炉 850 C 间断作业时  $Q_1$  约占总能耗的 53%~66%。

(2) 空载损耗：电炉在空载情况下，炉温达到额定温度并处于热稳定状态，维持这种状态所需要的能量。

空载损耗 (单位 kJ) 包括以下各项：

① 通过炉墙向周围空间散失的热量  $Q_w$

$$Q_w = \frac{t_{in} - t_w}{\sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{67 \sim 71}} \cdot F \cdot \tau$$

式中  $t_{in}$ ——炉体内表面温度 (C)；

$t_w$ ——外界环境温度 (C)；

$\delta_1, \delta_2 \dots \delta_n$ ——各层炉衬厚度 (m)；

$\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ ——各层炉衬导热系数 (kJ/m · h · C)；

67~71——炉墙外表面向周围介质放热系数的经验值 (kJ/m<sup>2</sup> · h · C)；

$F$ ——炉壁外表面积 (m<sup>2</sup>)；

$\tau$ ——时间 (h)。

在稳定工况下，炉体的散热损失还可用热流计直接测得。

② 通过炉门、缝隙及盐浴表面的辐射热损耗  $Q_r$

$$Q_r = \alpha \epsilon \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F \tau$$

式中  $\alpha$ ——绝对黑体的辐射系数，为 20.77 (kJ/m<sup>2</sup> · h · K<sup>4</sup>)；

$\epsilon$ ——实际物体的全辐射率，见表 9-29；

$T_1, T_2$ ——测量时被测物及环境温度 (K)， $T_1 = 273 + t_b$ ； $T_2 = 273 + t_w$ ， $t_b, t_w$  为被测物表面温度和  
环境温度 (C)；

$F$ ——辐射散热表面积 (m<sup>2</sup>)；

$\tau$ ——时间 (h)。

箱式炉及井式电阻炉

$$Q_f = \alpha \epsilon \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F \phi J \tau$$

式中  $\phi$ ——遮蔽系数,见表 9-19,一般炉门取 0.9,小孔缝隙取 0.5;

$J$ ——炉门开启率,即启闭周期中开启时间所占的比例。缝隙  $J=1$ ;

其他符号同前。

表 9-19 遮蔽系数  $\phi$  值

炉口深度/mm	炉口宽度/mm	炉口高度/mm				
		150	250	450	600	750
115	150	0.55	0.63	0.66	0.68	0.69
	300	0.63	0.70	0.73	0.76	0.78
	600	0.68	0.76	0.80	0.82	0.84
	900	0.71	0.79	0.83	0.85	0.87
	1200	0.72	0.81	0.85	0.87	0.89
	1500	0.73	0.82	0.86	0.89	0.91
230	150	0.43	0.49	0.52	0.55	0.56
	300	0.49	0.56	0.60	0.63	0.64
	600	0.55	0.63	0.67	0.70	0.72
	900	0.57	0.66	0.70	0.73	0.75
	1200	0.59	0.68	0.72	0.76	0.78
	1500	0.61	0.69	0.74	0.77	0.79

(续)

炉口 深度 /mm	炉口 宽度 /mm	炉口高度/mm				
		150	250	450	600	750
345	150	0.36	0.43	0.45	0.47	0.49
	300	0.42	0.48	0.52	0.55	0.57
	600	0.47	0.55	0.59	0.62	0.64
	900	0.50	0.58	0.63	0.66	0.69
	1200	0.52	0.60	0.65	0.68	0.71
	1500	0.53	0.61	0.66	0.70	0.72
460	150	0.31	0.36	0.39	0.42	0.43
	300	0.36	0.43	0.46	0.49	0.51
	600	0.42	0.49	0.53	0.56	0.58
	900	0.45	0.52	0.57	0.60	0.62
	1200	0.47	0.55	0.59	0.63	0.65
	1500	0.48	0.56	0.61	0.64	0.67

注:

1. 尺寸未包括在表中的炉口,其 $\phi$ 值可按比例求得,例如  
2400×2400×460(mm)的炉口可按600×600×115  
(mm)求。

2. 圆形炉口可近似地以其直径作边长按正方形炉口求。

③ 泄漏热损耗  $Q_3$ 

$$Q_3 = V\rho C_p(t_i - t_w)\tau$$

式中  $V$ ——进入炉内的冷空气量( $m^3/h$ ),电阻炉  $V = 2200BH\sqrt{H}$ ;  $B$ 为炉门的宽度(m);  $H$ 为炉门开启高度(m);

$C_p$ ——空气的平均比热容(kJ/kg·C)见表 9-19;

$\rho$ ——炉外空气的密度(kg/m<sup>3</sup>),见表 9-20;

$t_i, t_{re}$ ——炉内温度和室温(C);

$\tau$ ——时间(h)。

表中是干空气的物理常数,当车间空气中含有 H<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 等气体时,由于这些气体的比热比干空气的比热大 10%~20%左右,在计算时可参照表中的数据作些修正。

表 9-20 干空气的某些物理常数(—大气压下)

温度 /C	密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	比 热 容	
		(kJ/kg·C)	(kJ/m <sup>3</sup> ·C)
0	1.252	1.009	1.264
10	1.206	1.009	1.218
20	1.164	1.013	1.181
30	1.127	1.013	1.143
40	1.092	1.013	1.105
50	1.056	1.017	1.076
60	1.025	1.017	1.043
70	0.996	1.017	1.013
80	0.968	1.022	0.988
90	0.942	1.022	0.963
100	0.916	1.022	0.938
120	0.870	1.026	0.892

(续)

温度 /C	密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	比 热 容	
		(kJ/kg·C)	(kJ/m <sup>3</sup> ·C)
140	0.827	1.026	0.850
160	0.789	1.030	0.812
180	0.755	1.034	0.779
200	0.723	1.034	0.749
250	0.653	1.034	0.682
300	0.596	1.047	0.624
350	0.549	1.055	0.578
400	0.508	1.059	0.540
500	0.450	1.072	0.481
600	0.400	1.089	0.435
800	0.325	1.114	0.360
1000	0.268	1.139	0.306
1200	0.238	1.164	0.276
1400	0.204	1.189	0.243
1600	0.182	1.218	0.222
1800	0.165	1.243	0.205

④ 冷却水带走的热量  $Q_t$ : 当电炉使用冷却水时, 要计算被冷却水带走的热量。

$$Q_t = qc_1(t_2 - t_1)\tau$$

式中  $q$ ——每小时冷却水的流量(kg/h);

$c_1$ ——水的比热容(kJ/kg·C);



$t_1, t_2$ ——冷却水入、出的温度(C)；

$\tau$ ——时间(h)。

⑤ 外伸金属件的传热损耗  $Q_e$

$$Q_e = \lambda \frac{t_L - t_{w2}}{L} F n \tau$$

式中  $\lambda$ ——外伸金属件的热导率(kJ/m·h·C)；

$L$ ——外伸金属件的长度(m)；

$t_L$ ——炉膛温度(C)；

$t_{w2}$ ——外伸件外端温度,取60~100(C)；

$F$ ——外伸件的截面积(m<sup>2</sup>)；

$n$ ——外伸件的数目；

$\tau$ ——时间(h)。

⑥ 盐浴炉变压器及导电体的热损耗  $Q_{ed}$  约为输入能量的5%左右。

⑦ 其他热损耗  $Q_o$ ：约为总损耗的10%左右。

(3) 加热工件所要求的辅件、气氛等所损耗的能量：

① 工夹具、料筐(盘)及炉底板的吸热  $Q_{FZ}$

$$Q_{FZ} = G_f (c_2 t_2 - c_1 t_1)$$

式中  $G_f$ ——辅助工件的重量(kg)；

$c_1, c_2$ ——辅助工件在初始和终止温度时的比热容(kJ/kg·C)；

$t_1, t_2$ ——辅助工件的初始和终止温度。

② 加热控制气氛、渗炭剂的热量及其因加热而溢出

气体带走的热量

加热上述介质的热量  $Q_{J1}$

$$Q_{J1} = C_J c_p (t_2 - t_1)$$

式中  $C_J$ ——通入炉内介质的重量(kg)；

$c_p$ ——介质的平均比热容(kJ/kg·C)；

$t_1, t_2$ ——介质入炉前后的温度(C)。

排除废气所带走的热量  $Q_{J2}$

$$Q_{J2} = q d c_p (t_Q - t_w) \tau$$

式中  $q$ ——排出气体的流量(m<sup>3</sup>/h)；

$c_p$ ——排出气体的平均比热容(kJ/kg·C)；

$t_Q, t_w$ ——被加热的气体和周围空气温度(C)；

$d$ ——气体密度(kg/m<sup>3</sup>)；

$\tau$ ——时间(h)。

按上述方法测算出各项损耗,若  $Q_{rr} = Q_{yr} + 4Q \approx 3600A$ ,其误差小于5%,说明前述方法基本符合要求,可作为电平衡分析的依据。

### 第三节 感应加热炉计算

#### 一、电流透入深度计算

电流在工件中渗透的深度与电流频率成反比,频率越高,渗透深度越浅,反之越深。其值可按下式计算:

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

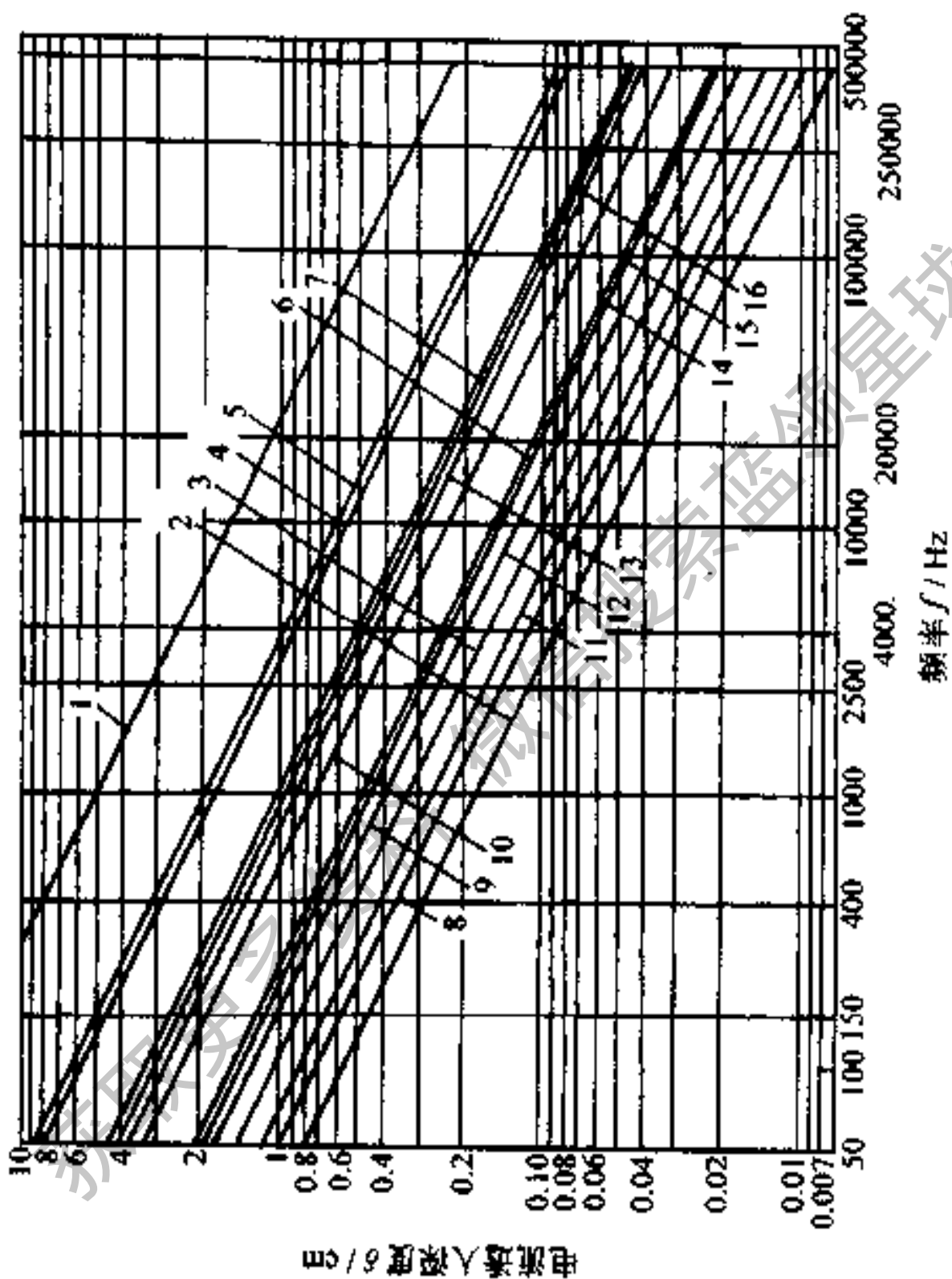


图 9-4 常用材料的电流透入深度

1. 电极石墨 1500 C 电阻率  $\rho = 9 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 2. 碳钢  $\mu_r = 16$  20 C  $\rho = 20 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ;  
 3. 碳钢  $\mu_r = 16$  500 C  $\rho = 66 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 4. 碳钢 1200 C  $\rho = 126 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ;  
 5. 碳钢 1520 C  $\rho = 136.6 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 6. 锌 20 C  $\rho = 6.1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ;  
 7. 锌 419.4 C  $\rho = 35 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 8. 铜 55 C  $\rho = 2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ;  
 9. 铜 900 C  $\rho = 8 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 10. 铜 1200 C  $\rho = 22 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ;  
 11. 铝 20 C  $\rho = 2.7 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 12. 铝 500 C  $\rho = 8.6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ;  
 13. 铝 800 C  $\rho = 29.28 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 14. 黄铜 20 C  $\rho = 6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ;  
 15. 黄铜 800 C  $\rho = 6.8 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 16. 黄铜 910 C  $\rho = 38.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ;

式中  $\delta$ ——电流透入深度(cm), 见图 9-4;

$\rho$ ——平面体材料(炉料)的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$\mu_r$ ——平面体材料(炉料)的相对磁导率;

$f$ ——电磁波的频率(Hz)。

常用材料在不同温度下的电流透入深度见表 9-4。

## 二、电源频率和感应器尺寸的计算

电源频率的选取可根据工件的尺寸和加热层的厚度及要求来决定。我国当前感应炉电源的频率主要有 50、400、1000、2500、4000、8000、250000~300000Hz 几种, 在发展中的有 150、25000、50000~70000Hz 等。

### 1. 圆柱形炉料及其感应器(图 9-5)

#### (1) 电源频率:

$$f \geq \frac{F_0 \rho_r \times 10^8}{\mu_r D^2}$$

$$\rho_r = \frac{1}{t} \int_0^t \rho dt$$

式中  $f$ ——电源频率(Hz);

$F_0$ ——与金属材料直径  $D$  和长度  $L$  有关的参数, 约 3~6; 当  $D/L < 0.1$  时, 取 3,  $D/L > 0.2$  时取 6;

$\rho$ ——金属材料的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$t$ ——温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$D$ ——圆柱型炉料的直径(cm);

$\rho_p$ ——材料积分平均电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ ), 见图 9-6。

电源频率可参见表 9-21 选择。

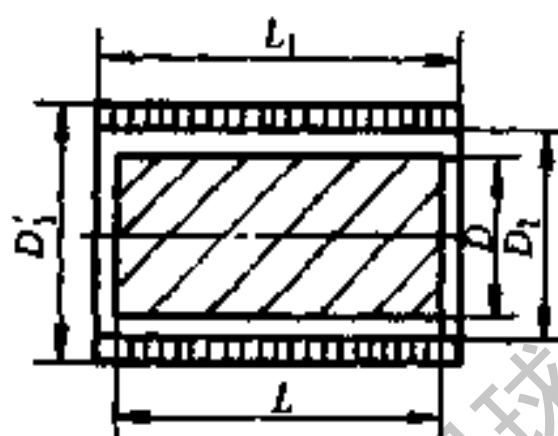


图 9-5 圆柱形炉料及其感应器尺寸

(2) 感应器的尺寸: 用不锈钢筒作内衬的感应器, 取  $D_1 = (1.3 \sim 1.5)D$ ; 用耐火材料作炉衬的感应器, 取  $D_1 = (1.4 \sim 2.0)D$ ,  $D$  大时取较小值,  $D$  小时取较大值。炉衬内径取  $(1.1 \sim 1.2)D$ 。

感应器长度取  $L_1 = L + (0.85 \sim 1.5)D$ 。

表 9-21 金属材料感应退热频率的选择

电源频率 / Hz	炉料直径 / mm					
	钢	铜	黄铜	镍	铝	钛
50	>150, 最佳 330	>70, 最佳 90	>100	>120, 最佳 210	>70, 最佳 90	>200, 最佳 200
1000	40~150	20~500	25~300	—	—	—
2500	25~70	10~300	13~150	—	—	—
8000	12~50	5~150	8~100	—	—	—

## 2. 圆管形炉料及其感应器(图 9-7)

(1) 电源频率:

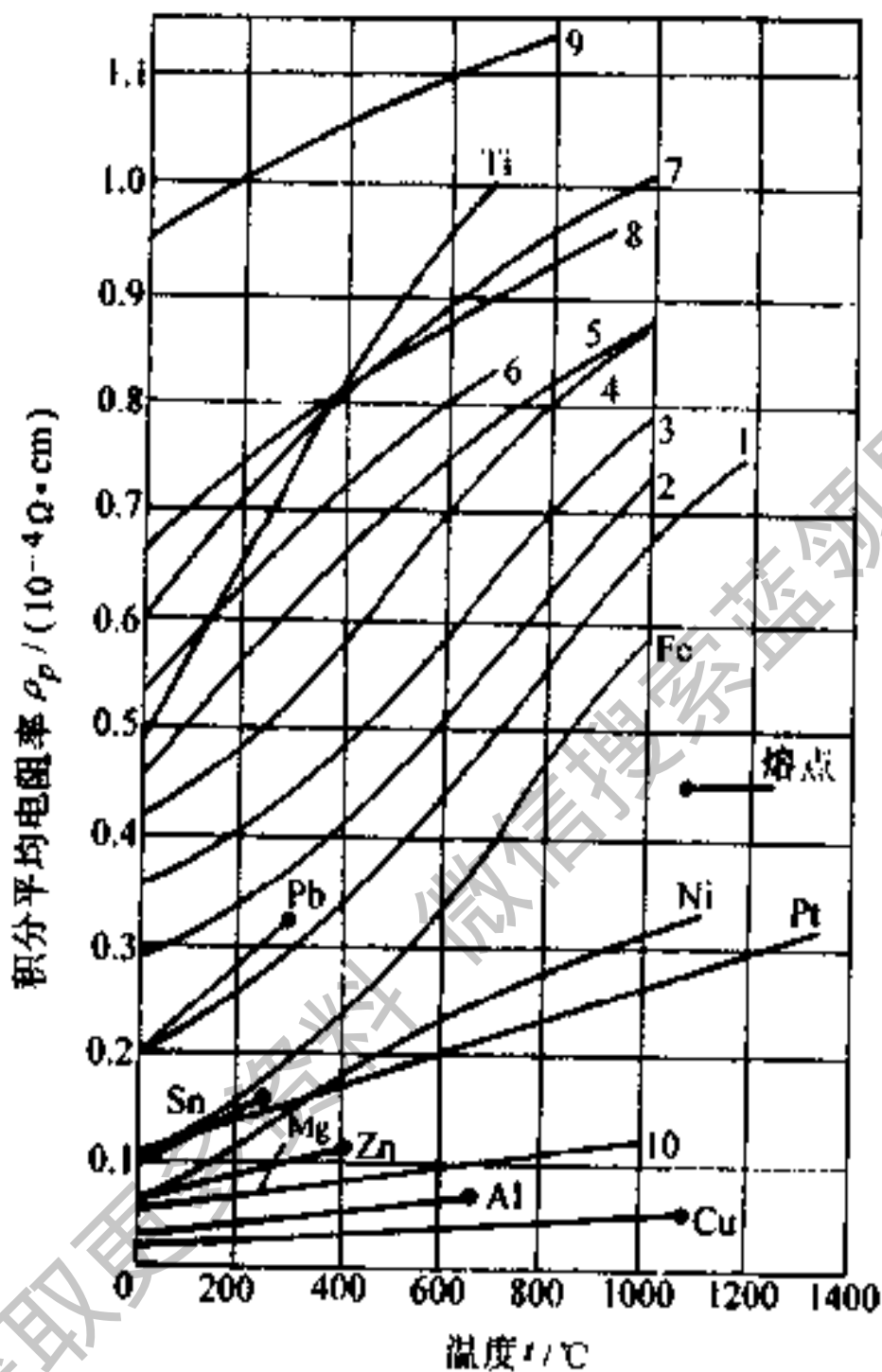


图 9-6 金属材料的积分平均电阻率

1. 碳钢(C0.44~1.5%) 2. 镍钢(Ni5.5%)  
 3. 镍钢(Ni14.7%) 4. 镍钢(Ni25%) 5. 铬钢(Cr12%)  
 6. 铬钢(Cr13.65%) 7. 铬钢(Cr25%) 8. 镍铬钢  
 (Ni8.04%,Cr17.87%) 9. 镍铬钢(Ni26.86%,  
 Cr15.20%) 10. 黄铜(Cu58%~62%,其余 Zn)

## 初选频率

$$f \geq \frac{4 \times 10^7 \rho_p}{\mu_r (D - b) b K_1}$$

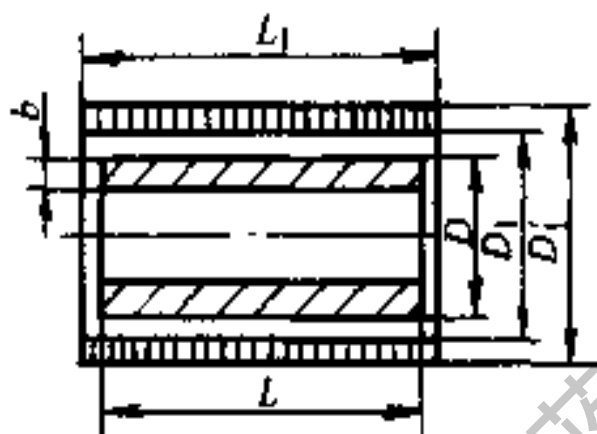


图 9-7 圆管形炉料  
及其感应器的尺寸

- 式中  $f$ ——电源频率(Hz);  
 $D$ ——圆管形炉料外径(cm);  
 $b$ ——圆管壁厚(cm);  
 $K_1$ ——系数,可由图 9-8 查得,图中  $\sigma = (D - b) / L$ ,  
 $L$  为炉料长度(cm);

其他符号同前。

初选频率确定后,再按式  $\delta = 5030 \sqrt{\rho_p / (\mu_r f)}$  计算出透入深度  $\delta$ ,如  $\delta > b$ ,则初选频率可用。如  $\delta < b$ ,则  $f$  应参照圆形炉料的公式选择。

(2) 感应器的尺寸:同圆柱形炉料的感应器。

3. 矩形截面炉料及其感应器(见图 9-9)。

(1) 电源频率



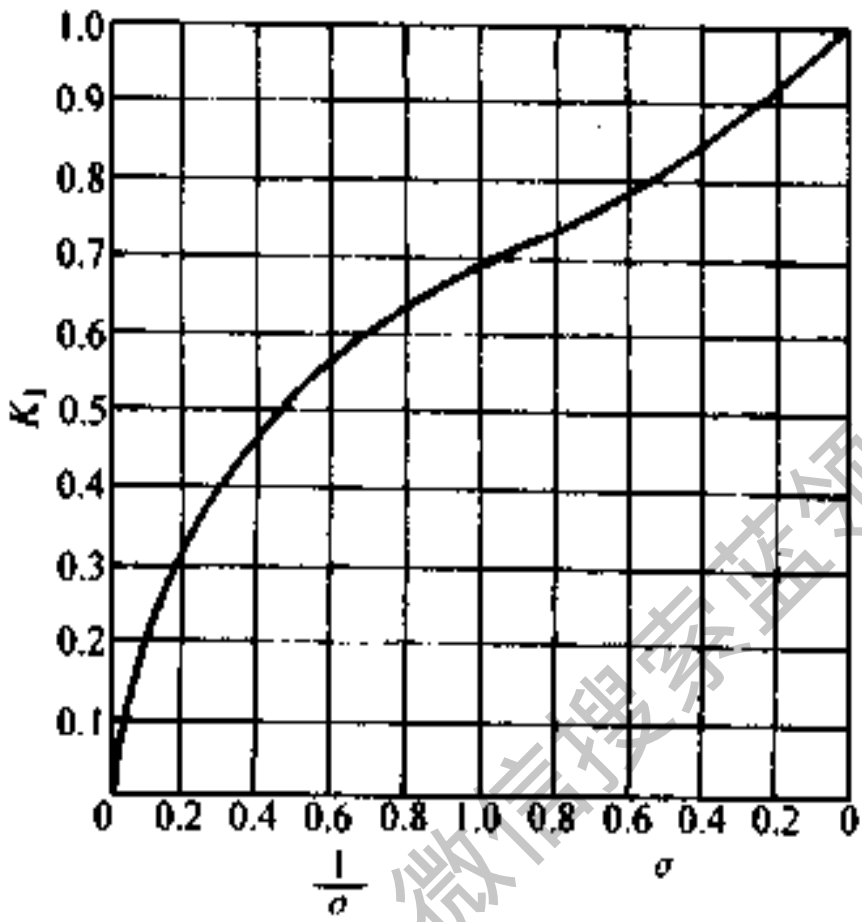


图 9-8  $K_1$  值

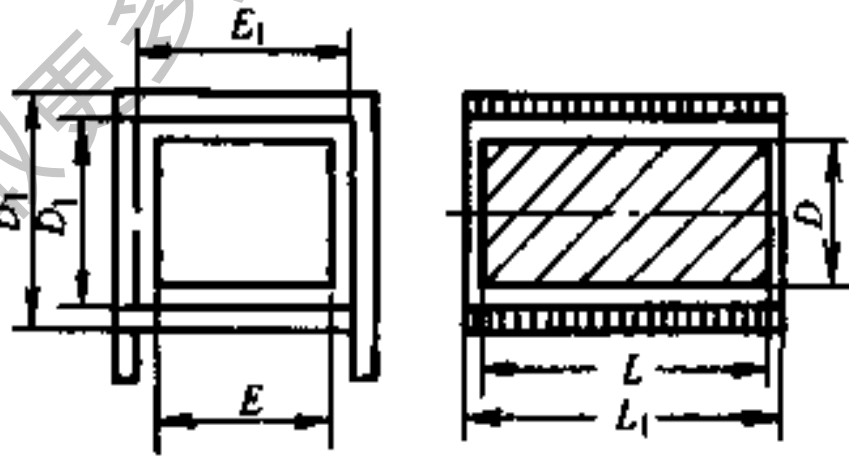


图 9-9 矩形截面炉料及其感应器尺寸

① 当  $E=D$  (即方锭) 时, 可将其折算成等截面面积的圆柱形炉料, 按计算圆柱形炉料的方法选取频率。

② 当  $E>D$  时, 可按下式选取:

$$f \geq \frac{F_f \rho_f \times 10^8}{\mu_r D^2}$$

式中  $f$ ——电源频率 (Hz);

$F_f$ ——系数, 约 1~6.25, 当  $D/L < 0.1$  和  $D/E < 0.1$  时取 1, 当  $D/L = D/E = 0.5$  时, 取 4.8。

(2) 感应器的尺寸: 参照圆柱形炉料的感应器尺寸。当采用不锈钢筒内衬时,  $D_1 = (1.25 \sim 1.5) D$ ; 当采用耐火材料炉衬时,  $D_1 = (1.4 \sim 3.0) D$ ;  $E_1$  类推。当炉料较薄、加热中挠曲较大时,  $D_1$  应适当放大。

$$L_1 = L + (1.0 \sim 1.5) D$$

#### 4. 淬火感应器

(1) 电源频率: 棒材和板材表面淬火所需的电源频率可按下式选取:

$$150/\delta_k < f < 2500/\delta_k$$

式中  $\delta_k$ ——所要求的淬硬层深度 (cm)。

(2) 电源功率  $P$ :

$$P = P_s S / \eta$$

式中  $P_s$ ——感应淬火需要的功率密度 ( $\text{kW}/\text{cm}^2$ ), 对中频为  $0.5 \sim 2.5 \text{kW}/\text{cm}^2$ ; 对高频为  $0.2 \sim 1.5 \text{kW}/\text{cm}^2$ ; 当  $\delta_k$  大时取较小值;

$S$ ——材料淬火表面积 ( $\text{cm}^2$ );

$\eta$ ——感应器效率, 约 0.6~0.85。

### 5. 坩埚和感应器 (图 9-10)

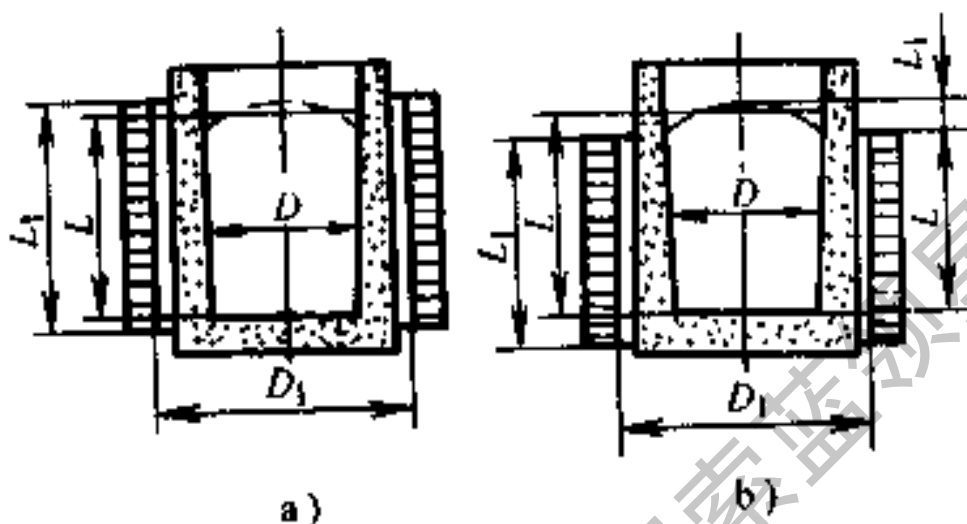


图 9-10 无芯感应熔炼炉炉料  
和感应器尺寸

a) 中频炉 b) 工频炉

#### (1) 电源频率

$$f \geq \frac{25 \times 10^8}{D^2} \rho$$

式中  $f$ ——电源频率 (Hz);

$\rho$ ——液态炉料的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$D$ ——坩埚的平均内径 (cm)。

#### (2) 感应器尺寸

##### ① 坩埚的有效容积:

$$V_g = 10^3 G / \rho_y$$

式中  $V_g$ ——坩埚的有效容积 ( $\text{cm}^3$ );

$\rho_v$ ——液态金属的密度 (kg/L);

$G$ ——炉子重量 (kg)。

铸铁熔炼用工频炉的最小经济容量约为 750kg。

② 坩埚的平均内径  $D$  和液态炉料的高度  $L$ ;

$$D = \sqrt[3]{AV_p/\pi a}; \quad L = aD$$

式中  $a$  见表 9-22。

表 9-22 耐火材料坩埚的  $a$  和  $\Delta_k$  值

炉子容量/kg	$a$	$\Delta_k/cm$
<500	2~1.5	(0.25~0.2) $D$
500~3000	1.5~1.25	(0.2~0.15) $D$
>3000	1~1.25	(0.15~0.1) $D$

③ 感应线圈的内径  $D_1$ :

$$D_1 = D + 2\Delta_k$$

式中  $\Delta_k$ ——坩埚壁厚 (cm), 铸铁用炉,  $\Delta_k$  值可按表 9-22 选择; 中频炉和有色金属熔炉的  $\Delta_k$  值可取稍小。

④ 感应器的高度  $L_1$

中频炉  $L_1 \approx (1.1 \sim 1.3) L$

工频炉  $L_1 \approx L - (0.8 \sim 1.3) L_2$

$$L_2 = \frac{100P}{DL'\rho_v \sqrt{pf}}$$

式中  $L_2$ ——当液态炉料与坩埚的交界线位于感应器顶

部平面时，液态炉料由于电动力所产生的液面驼峰高度 (cm)；

$L'$  —— 液态炉料被感应器包围部分的高度 (cm)。

初算时可取  $L' = (0.7 \sim 0.9) L$ ；对小容量炉取较大值。

以上求得的  $L_1$  值对熔铝、镁、锌炉取较小值；熔铜、钢和铸铁炉取较大值。

### 三、输电线路计算

1. 中频线路用电缆的长期允许工作电流 (表 9-23)。

2. 汇流排的长期允许工作电流

中高频线路用汇流排的长期允许工作电流可按下式估算：

$$I_r = K_r (n - 1) I_0 \sqrt{\delta_r / d}$$

式中  $I_0$  —— 汇流排长期允许电流 (A)；

$K_r$  —— 系数，对双条汇流排取 1；多条取 0.7；

$n$  —— 汇流条的条数；

$\delta_r$  —— 汇流排材料的电流透入深度 (m)；

$d$  —— 汇流条的厚度 (cm)，对两侧汇流条应有  $d > 1.2\delta_r$ ；中间汇流条  $d > 2.4\delta_r$ 。

3. 线路电压降

$$\Delta \dot{U}_r = \dot{I}_r (R_r + jX_r)$$

4. 线路功率损耗

表 9-23 不同频率下多心电缆的长期允许工作电流 (单位:A)

缆芯 名义 截面 /mm <sup>2</sup>	频 率/Hz											
	500		1000		2500		8000		10000			
	双心	四心	双心	四心	双心	四心	双心	四心	双心	四心	双心	四心
25	115/130	--	95/80	--	76/66	--	57/47	--	55/45	--	--	--
35	130/115	--	110/95	--	86/75	--	65/55	--	60/50	--	--	--
50	150/130	290/235	120/105	235/205	96/84	185/160	75/65	135/115	70/60	130/110		
70	180/155	320/280	150/130	265/230	115/100	210/185	90/75	155/135	85/70	150/130		
95	205/180	385/335	170/150	325/305	135/120	250/220	100/85	190/160	95/80	180/150		
120	225/200	430/370	190/170	355/310	150/135	280/250	115/105	210/180	105/95	200/170		
150	260/225	470/415	215/185	385/340	170/150	310/260	130/110	230/195	120/105	220/190		

注:

1. 表中分子指铜心电缆,分母指铝心电缆。
2. 表中数据相当于电缆的环境温度为 25℃,最高温升为 55℃的情况。

$$P_d = I^2 R, \times 10^{-3}$$

式中  $R, X, \dots$ —汇流排的电阻和电抗 ( $\Omega$ )。

5. 交流输电线路的阻抗计算 (表 9-24 和表 9-25)。

#### 四、中频感应炉补偿电容的计算

感应炉是感性负载, 功率因数很低, 需要电容器进行无功补偿。补偿电容一般通水冷却, 也有自然冷却的。通水冷却, 如 RW0.5-125-2.5s 型中频电热电容器, 其工作电压是 500V、标称电容量为 125kvar、运行频率为 2500Hz。

补偿电容器的电容量, 可按下式计算:

$$C = \frac{I_L \sin\varphi - I_L \cos\varphi \tan\phi}{2\pi f U}$$

式中  $C$ ——电容器电容量 ( $\mu\text{F}$ );

$I_L$ ——流过感应线圈的电流 (A);

$\cos\varphi$ ——感应线圈的功率因数;

$\phi$ ——补偿后的功率因数角;

$f$ ——频率 (Hz);

$U$ ——电源电压 (V)。

补偿电容器的容量可按下式计算


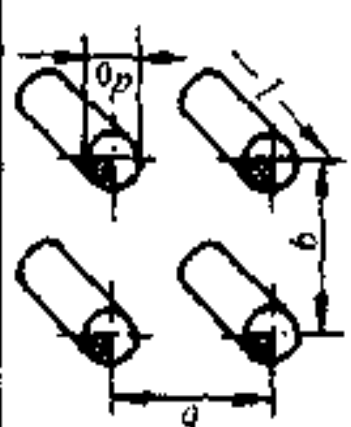
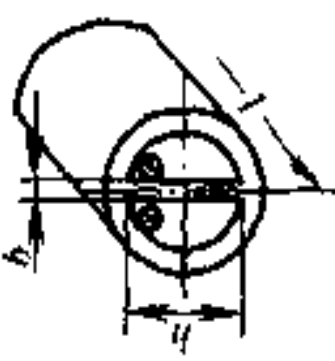
$$Q_c = QP + UI_L \sin\varphi$$

式中  $Q_c$ ——电容器容量 (kvar);

$Q$ ——感应线圈的品质因数, 见表 9-26;

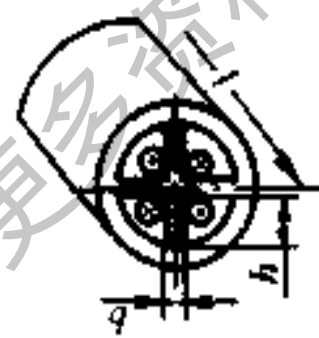
$P$ ——有功功率 (kW);

表 9-24 交流输电线路的电阻  $R_r$  和电抗  $X_r$  (—) (单位:  $\Omega$ )

图号	线路类型	$R_r$ 和 $X_r$
1		$R_r = \frac{2\rho_r l K_{dr}}{S_r}$ $X_r = \frac{2\rho_r l K_{dr}}{S_r} + 2.89 \times 10^{-8} f l g \frac{2b}{d_0}$
2		$R_r = \frac{\rho_r l K_{dr}}{S_r}$ $X_r = \frac{\rho_r l K_{dr}}{S_r} + 2.89 \times 10^{-8} f l g \frac{2b}{d_0} - 2.51 \times 10^{-8} f l \left( \frac{b}{d_0} \right) \left[ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{b}{d_0} \right) \right]$
3		$R_r = \frac{2\rho_r l K_{lr}}{S_r}$ $X_r = \frac{2\rho_r l K_{lr}}{S_r} + 7.9 \times 10^{-8} \frac{f b l}{h}$

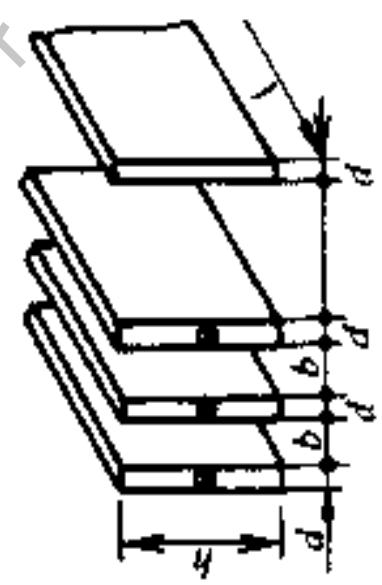


(续)

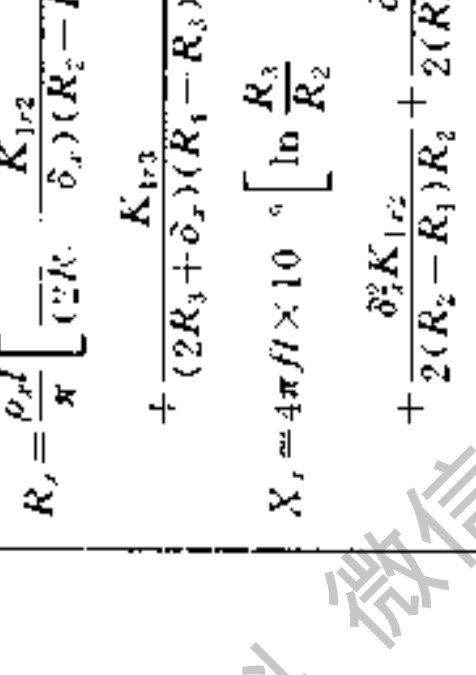
图号	线路类型	R、和 X、
4		$R_r = \frac{\rho_r l K_{1r}}{2S_r}$ $X_r = \frac{\rho_r l K_{1r}}{2S_r} + 7.9 \times 10^{-8} \frac{fbl}{4h}$

注： $\rho_r$ —线路材料的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ )； $l$ —线路长度(cm)； $d_0$ —电缆外径(cm)； $\delta_r$ —线路材料的电流透入深度(cm)； $b$ —电缆间中心距(图 1、2)，缆芯间距(图 3、4)； $f$ —电流频率(Hz)； $S_r$ —电缆截面( $\text{cm}^2$ )； $S_r = 0.75\pi d_0^2/4$ (图 1、2)；每股缆芯的截面( $\text{cm}^2$ )，图 3、4)； $h$ —缆芯宽度(cm)； $K_{dr}$ 、 $K_{dr}$ —系数，由图 9-12 查得，图中  $\beta = d_0/\delta_r$ ； $K_{1r}$ 、 $K_{1r}$ —系数，由图 9-11 查得，图中  $\beta = h/\delta_r$ 。

表 9-25 交流输电线路的电阻  $R_r$  和电抗  $X_r$  (—) (单位:  $\Omega$ )

图号	线路类型	$R_r$ 和 $X_r$
1	 <p style="text-align: center;">(共 <math>n</math> 条)</p>	$R_r = \frac{\rho_{rl} K_{or}}{hd}$ $X_r = \frac{\rho_{rl} K_{or}}{hd} + \frac{7.9 \times 10^{-8} f b l}{(n-1)h}$ <p>式中, 当 <math>n</math> 为偶数时 (<math>n \geq 2</math>)</p> $K_{or} = \frac{4K_{or}K_{lr}}{2K_{or} + (n-2)K_{lr}}$ $K_{or} = \frac{4K_{or}K_{lr}}{2K_{or} + (n-2)K_{lr}}$ <p>当 <math>n</math> 为奇数时 (<math>n \geq 3</math>)</p> $K_{or} = \frac{[K_{or} + [2K_{or} + (n-2)K_{lr}]]}{(n-1)[4K_{or} + (n-3)K_{lr}]}$ $K_{or} = \frac{4K_{or}[2K_{or} + (n-2)K_{lr}]}{(n-1)[4K_{or} + (n-3)K_{lr}]}$ <p>当频率很高, <math>d/\delta_r \geq 4</math> 时</p> $K_{or} \approx K_{or} \approx \frac{2d}{\delta_r(n-1)}$

(续)

图号	线路类型	$R_s$ 和 $X_s$
2		$R_s = \frac{\rho_r l}{\pi} \left[ \frac{K_{1r2}}{(2K_r + \delta_r)(R_2 - R_1)} + \frac{K_{1r3}}{(2R_3 + \delta_r)(R_3 - R_2)} \right]$ $X_s = 4\pi f l \times 10^{-9} \left[ \ln \frac{R_3}{R_2} + \frac{\delta_r^2 K_{1r2}}{2(R_2 - R_3)R_2} + \frac{\delta_r^2 K_{1r3}}{2(R_1 - R_3)R_3} \right]$

注： $\rho_r$ 、 $l$ 、 $f$ 、 $\delta_r$ —同前； $h$ —汇流条高度(cm)； $d$ —汇流条厚度(cm)； $b$ —汇流条之间的间距(cm)； $n$ —汇流条的条数； $K_r$ 、 $K_{1r}$ 、 $K_{1r2}$ 、 $K_{1r3}$ —系数，由图 9-11 查得，图中  $\beta = d/\delta_r$ ； $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ —分别为内外管的内外半径(cm)； $K_{1r2}$ 、 $K_{1r3}$ 、 $K_{1r3}$ —由图 9-11 查得； $K_{1r2}$  按  $\beta = \frac{R_2 - R_1}{\delta_r}$  查  $K_{1r}$  曲线； $K_{1r3}$  按  $\beta = \frac{R_3 - R_2}{\delta_r}$  查  $K_{1r}$  曲线； $K_{1r3}$  按  $\beta = \frac{R_3 - R_1}{\delta_r}$  查  $K_{1r}$  曲线。

$I_n$  ..... 逆变器输出电流有效值 (A)。

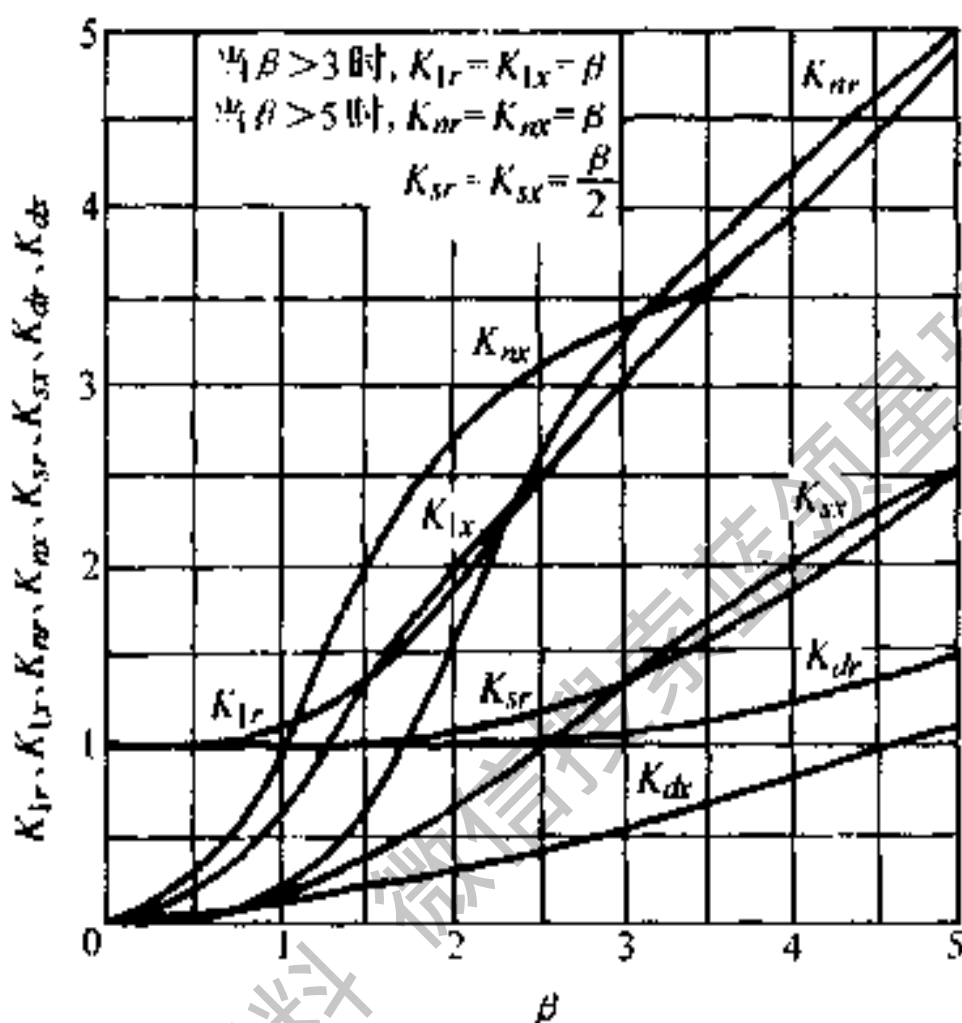


图 9-11  $K_{lr}$ 、 $K_{mr}$ 、 $K_{sr}$ 、 $K_{dr}$ 、 $K_{lr}$ 、 $K_{mr}$ 、 $K_{sr}$ 、 $K_{dr}$  的值

表 9-26 各种用途的感应线圈的品质因数  $Q$  值

用途	熔炼	透热	淬火	烧结
$Q$ 值	10~20	5~10	3~5	3~7

### 五、工频感应加热器的计算

工频感应加热器是利用涡流加热的一种加热器，一般加热温度不超过 600℃。

## 1. 加热器的功率

$$P = \lambda F(t_1 - t_0)$$

式中  $P$ ——加热器所需功率 (kW);

$F$ ——工件的表面积 ( $m^2$ );

$t_1$ ——加热所需的最高温度 ( $^{\circ}C$ );

$t_0$ ——周围介质温度 ( $^{\circ}C$ );

$\lambda$ ——导热系数 ( $kW/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ), 保温良好时取  $5.3 \times 10^{-3}$ , 不保温时取  $12 \times 10^{-3}$ ; 管式油箱保温良好时, 取  $6 \times 10^{-3}$ , 不保温时取  $16 \times 10^{-3}$ ; 对于保温变压器取  $5 \times 10^{-3}$ , 不保温的取  $12 \times 10^{-3}$ 。

## 2. 励磁电流

## (1) 单相电源

$$I = \frac{P \times 10^3}{U \cos \varphi}$$

式中  $I$ ——励磁电流 (A);

$U$ ——电源电压 (V);

$\cos \varphi$ ——功率因数, 可取  $0.5 \sim 0.7$ ;

$P$ ——同前。

## (2) 三相电源

$$I = \frac{P \times 10^3}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

每相励磁电流  $I_1$

Y 接法时  $I_r = I$

$\Delta$  接法时  $I_r = I / \sqrt{3}$

式中  $I$ ——线电流 (A);

$U$ ——线电压 (V)。

其他符号同前。

### 3. 导线选择

导线截面可按安全电流选取, 即

单相  $q = I / j$ ; 三相  $q = I_r / j$

式中  $q$ ——导线截面 ( $\text{mm}^2$ );

$j$ ——电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ); 铜导线取 4.5, 铝导线取 3;

$I$ 、 $I_r$ ——同前。

### 4. 单位面积上的功率损耗计算

(1) 单相电源:

$$\Delta P = P / F_l$$

(2) 三相电源:

$$\Delta P = P / 3F'_l$$

式中  $\Delta P$ ——单位面积上的功率损耗 ( $\text{kW}/\text{m}^2$ );

$F_l$ ——被励磁绕组覆盖的面积 ( $\text{m}^2$ );

$F'_l$ ——被每相绕组覆盖的面积 ( $\text{m}^2$ );

$P$ ——同前。

### 5. 励磁绕组匝数计算

(1) 单相电源:

$$W = \frac{KU}{l}$$

式中  $W$  —— 励磁绕组匝数 (匝);

$U$  —— 电源电压 (V);

$l$  —— 被加热体周长 (m);

$K$  —— 系数, 取决于功率  $P$  和磁通势  $HI$ , 见图 9-12。

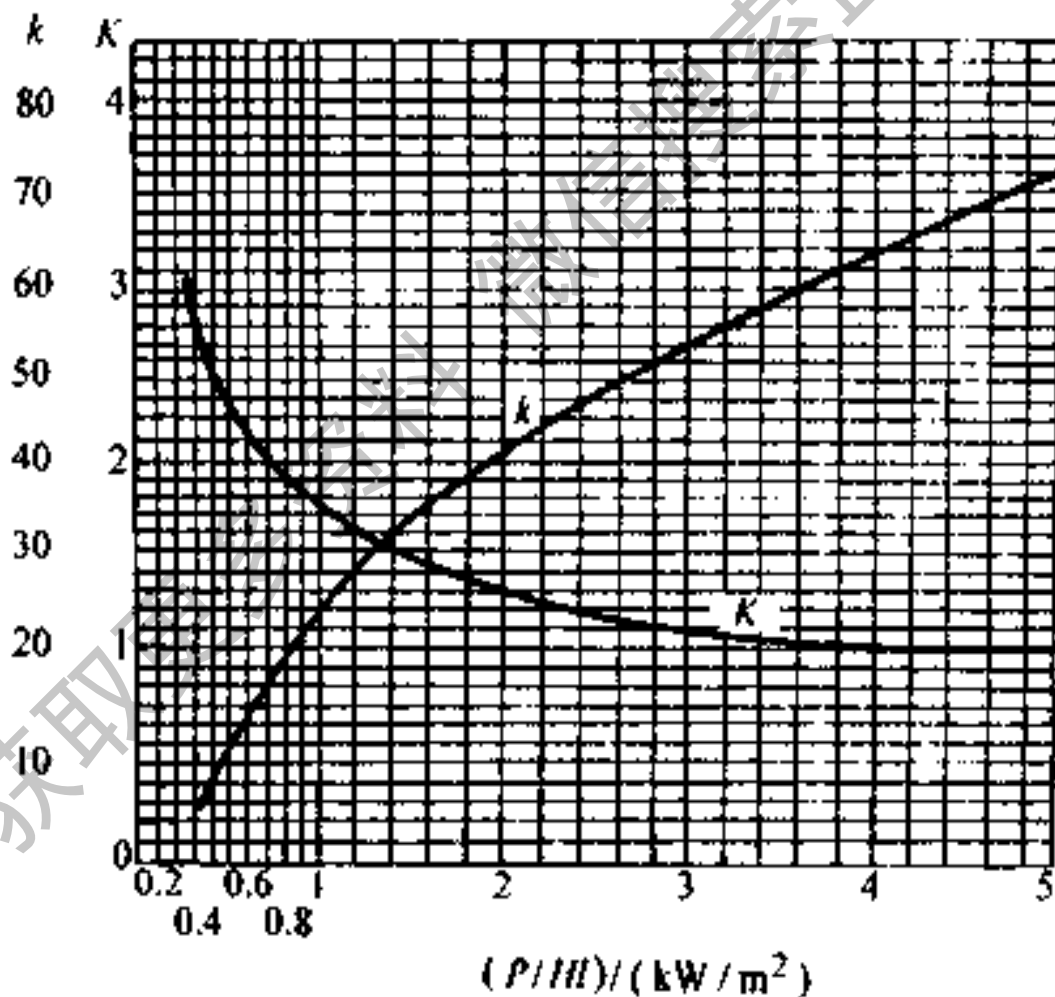


图 9-12  $K$  与磁通势  $HI$  之间的关系

(2) 三相电源:

$$W = \frac{KU_r}{I}$$

式中  $W$ ——每相励磁绕组的匝数 (匝);  
其他符号同前。

## 第四节 远红外加热

### 一、红外区的划分

红外线的波长范围大致在  $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$  频谱之内。相对应的频率大致在  $4 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{11} \text{Hz}$ 。表 9-27 列出红外区的划分。

国际照明委员会规定:  $0.78 \sim 1.4 \mu\text{m}$  为近红外;  $1.4$

表 9-27 红外区的划分

(单位:  $\mu\text{m}$ )

学科	近红外	中红外	远红外	极远红外
红外分析	0.78~2.5	2.5~25	25~1000	
	0.78~2	2~25	25~1000	
光学物理	0.75~1.5	1.5~5.6	5.6~1000	
照 明	0.78~1.4	1.4~3	3~1000	
其 它	0.75~4	3~6	4~400	400~1000
	0.76~3		6~15	15~1000
加 热	0.75~2.5		2.5~15 (实效区)	15~1000 (兼效区)



$\sim 3\mu\text{m}$  为中红外； $3\sim 1000\mu\text{m}$  为远红外，适宜加热。

远红外加热是指利用波长  $2.5\sim 25\mu\text{m}$  的辐射加热技术。当辐射源的波长与被加热物的吸收波长相一致时，被加热物就吸收大量的红外能，从而改变和加剧其分子的运动，达到发热升温加热的作用，这就是匹配吸收原理。

## 二、远红外辐射元件

常用的远红外辐射材料有金属氧化物、碳化物、氮化物和硼化物，见表 9-28。

表 9-28 高辐射率的远红外辐射材料

元素	氧化物	碳化物	氮化物	硼化物
B	$\text{B}_2\text{O}_3$	$\text{B}_4\text{C}$	BN	$\text{CrB} \cdot \text{Cr}_3\text{B}_3$
Cr	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_3\text{C}_2$	CrN	
Si	$\text{Si}_2\text{O}_3$	SiC	SiN	
Ti	$\text{TiO}_3$	TiC	TiN	$\text{TiB}_2$
Zr	$\text{ZrO}_2$	ZrC	ZrN	$\text{ZrB}_2$
Al	$\text{Al}_2\text{O}_3$			
Fe	$\text{Fe}_2\text{O}_3$			
Mn	$\text{MnO}_3$			
Ni	$\text{Ni}_2\text{O}_3$			
Co	$\text{Co}_2\text{O}_3$			

### 1. 远红外元件的品种

(1) 碳化硅板：由天然或人造的单晶体粉状 SiC 加入粘土烧结而成，表面涂有辐射材料，是一种良好的远红

外辐射材料。要求 SiC 含量 60%~70%。如含量低于 60%，辐射率将显著下降。在 930℃ 时 10 $\mu$ m 波长的辐射率相当于黑体辐射率的 80%~90%。表面温度可达 1100~1700℃。使用寿命长，转换效率高。缺点是抗机械振动性差，热惯性大，升温时间长。

(2) 氧化镁管：金属电热管采用适宜直径、长度的金属管、重要用途的选用 1Cr18Ni9Ti $\phi$ 18 不锈钢管，根据辐射器的额定功率绕电热丝，装入金属管内填以氧化镁粉。其表面涂有辐射涂料。涂层厚度不超过 0.2~0.3mm。其特点是机械强度高，适用于硝石、油、水、酸、碱等工业生产的加热系统。

(3) LHMG 型高硅氧灯：是在普通碘钨灯表面烧结一层黑色高硅氧玻璃粉料而成。由于近红外光谱较多，远红外光谱较少，因此效率不高。

(4) DYF 铁锰酸稀土钙高辐射涂层电阻带：表面温度低于 500℃，辅助装置复杂，效率不高。

(5) MTY 埋入式陶瓷元件：发热丝埋入陶瓷基体中烧结成一体，表面涂有高辐射层，功率为 0.2~1.2kW，表面温度一般低于 500℃，表面光洁、白质、适用于食品及医药加工。但在高热下辐射率和导热系数下降，效率降低。

(6) TIR 半导体元件：以多晶半导体为发热体，涂覆远红外辐射层，两端有涂银的电极，它只适用于 300℃ 以

下加热场合，转换效率较高。

(7) SHQ 乳白石英元件：采用乳白石英为远红外转换元件，吸收电热丝发射的可见光和近红外光，转换成远红外辐射。功率 0.2~5kW，表面温度 200~850℃，转换效率较高。

(8) 准黑体不锈钢平板辐射器：具有较好的高温特性。但转换效率不及 TIR 和 SHQ。

## 2. 远红外辐射元件主要参数

(1) 辐射率要高(大于 0.85)，要求使用 3000h 以上，辐射率仍不低于铭牌数据的 75%。

(2) 有效辐射面积要大。

(3) 在输入固定功率情况下，要求表面温度愈高愈好。

## 三、远红外辐射涂料

### 1. 典型的远红外辐射涂料

(1) 锆钛系：ZrO<sub>2</sub> 由 97.5%~5%加 TiO<sub>2</sub>2.5%~95%。

(2) 三氧化二铁系：如 α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和以 γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主体的辐射涂料。

(3) 碳化系：多数以 SiC60%以上和粘土 40%以下烧结成的碳化硅板，或以 SiC 为主配比的其他材料制成的涂料。

(4) 稀土系：如铁镧酸稀土钙复合涂料，或将某些稀

土材料烧结在碳化硅元件表层以提高其辐射率的涂料。

(5) 镍钴系：以  $\text{Ni}_2\text{O}_3$  和  $\text{Co}_2\text{O}_3$  为主的涂料。

(6) 锆英砂系：以锆英砂（含 67%  $\text{ZrO}_2$  和 31%  $\text{SiO}_2$  为主）添加金属氧化物呈浅黑色锆系辐射元件的涂料。

(7) 沸石分子筛系：辐射特性与水吸特性相近。如在  $2.6\sim 3\mu\text{m}$ 、 $5.5\sim 6.5\mu\text{m}$  和  $8\sim 12.5\mu\text{m}$  处，都有较强烈的辐射功率。

常用几种远红外辐射涂料的配方，见表 9-29，表 9-30，表 9-31，表 9-32。

表 9-29 氧化硅系远红外涂料配方（按重量%）

材料	配 方 类							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\text{SiO}_2$	80	40	30	30	30	30	30	79.8
$\text{SiC}$				10			10	
$\text{ZrO}_2$	8			10	30	30	10	
$\text{MgO}$	7	10	30	10	10	10	10	
$\text{CaO}$	5				10			
$\text{Fe}_2\text{O}_3$					10	10	10	
$\text{TiO}_2$		40				15		
$\text{Cr}_2\text{O}_3$			20	10		5		
$\text{TiC}$			10	10		5	10	
$\text{BN}$		10	10		10			
$\text{WC}$					10			
$\text{MO}_3\text{B}_4$						5		
$\text{CN}$							10	
$\text{C}$							10	20.2

· 表 9-30 氧化锆系辐射涂料配方 (按重量%)

$\text{Co}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{NiO}_2$	$\text{ZrO}_2$
50	20		10	20
85		15		
85	2		5	8

表 9-31 一种烧结陶瓷涂层的配方 (按重量%)

$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{ZrO}_2$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$
10	50	20	20

表 9-32 一种钴质陶瓷的配方

材料成分	重量 (%)	材料成分	重量 (%)
199A 铁红	3	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	3
60~80 目锆英砂	26	$\text{MnO}_2$	2
100~120 目锆英砂	26	苏州粘土	10
矾土	15	漳州黑土	15

## 2. 常用辐射涂料分类

(1) 长波涂料：是指在  $5\mu$  以内辐射率降低与  $6\mu$  以外长波部分辐射率很高的涂料，如锆系、锆钛系 (图 9-13)。

(2) 近全波涂料：是指在远红外实效区  $2.5\sim 15\mu\text{m}$

全波段内辐射率较高的涂料,如碳化硅系,沈混一号和稀土系等(图 9-14)。

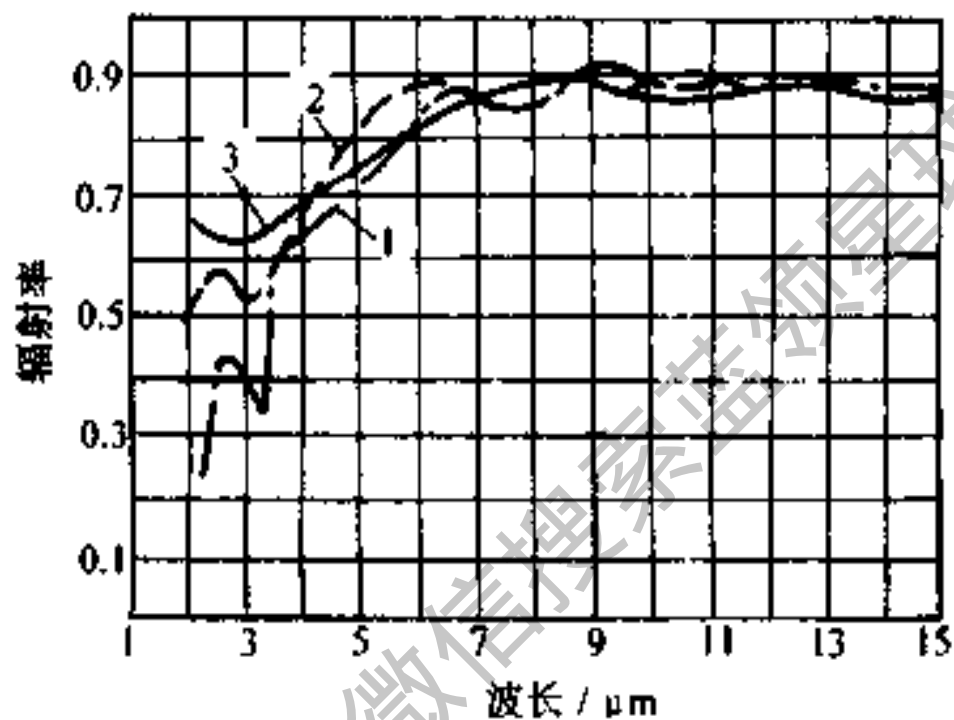


图 9-13 长波涂料的辐射光谱

1— $\text{Fe}_2\text{O}_3$  以有机硅粘结 2—镍  
英砂为主以水玻璃粘结 3—铅钛系

(3) 短波涂料: 是指在  $3.5\mu$  以内有很高辐射率的涂料, 如沸石分子筛系、高硅氧和半导体氧化钛 ( $\text{TiO}_{1.9}$ ) 涂料等(图 9-15)。

(4) 中高温涂料: 如金属加热温度高于  $600^\circ\text{C}$ , 则某些长波涂料(纯  $\text{SiC}$ ) 会有较好效果; 如加热温度  $1000^\circ\text{C}$ , 则用镍钴系和二硅化钼等涂料有较好效果(图 9-16)。

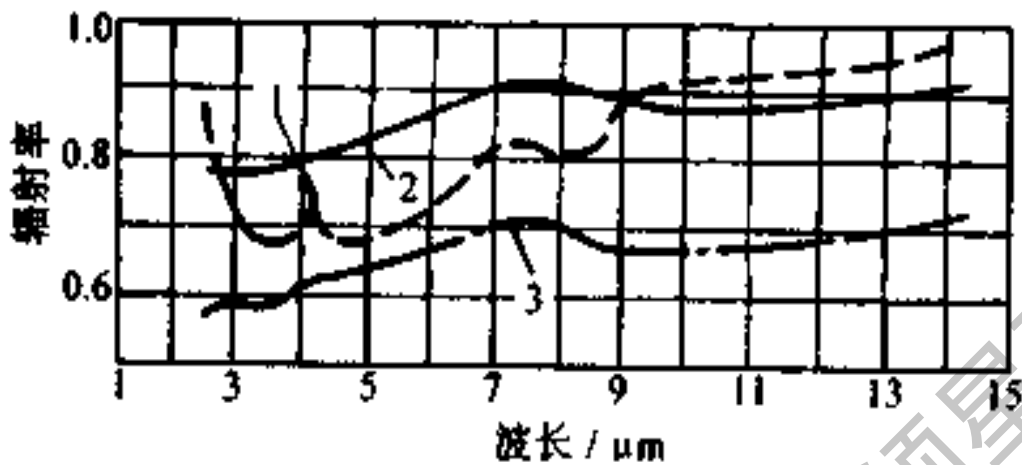


图 9-14 近全波涂料的辐射光谱

1—铁锰酸稀土钙 2— $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$

3—碳化硅板粉, SiC60%, 陶土 40%

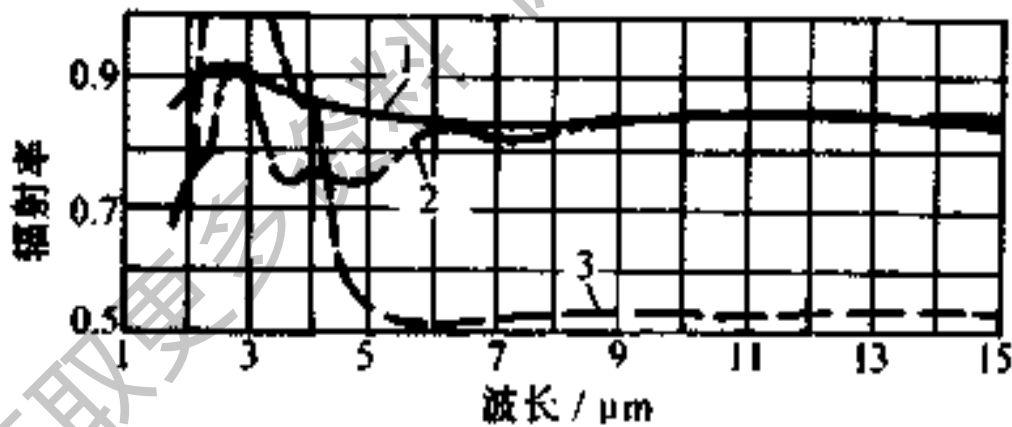


图 9-15 短波涂料的辐射光谱

1— $\text{TiO}$ 80% 2—沸石分子筛 DB-12

3—高硅氧灯

几种远红外辐射器的性能见表 9-33。

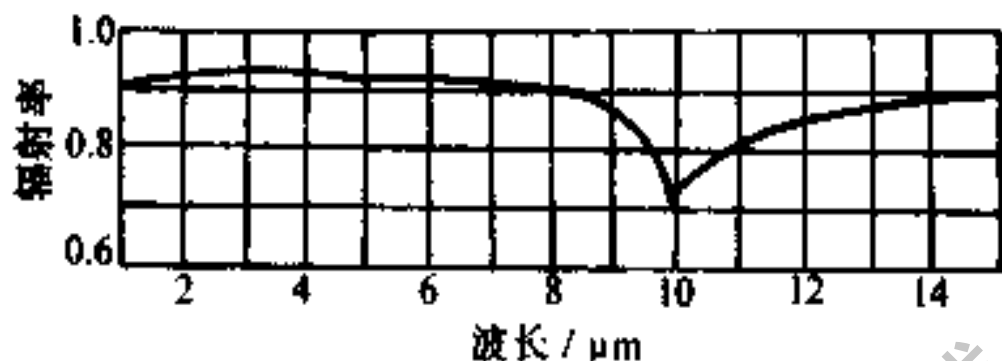


图 9-16 中、高温涂料的辐射光谱

#### 四、辐射元件表面温度和受热物最佳加热干燥温度的选择

##### 1. 辐射元件表面温度的选择

表 9-34 列出元件表面温度的计算结果。

从表 9-34 分析可知：当元件温度在 200℃ 以下时，对流损失在 50% 以上，辐射能量密度低，加热速度慢，红外涂层的效果只能在 10% 左右。温度在 400~600℃ 之间，主辐射波长在 3.3~4.3 $\mu\text{m}$  之间，辐射能量密度在 1~3 $\text{W}/\text{cm}^2$  之间，有效辐射能量在 80% 左右，加热干燥效果好，是有利的辐射温度。

##### 2. 被加热物最佳干燥温度的确定

表 9-35 列出几种被加热物的最佳加热干燥温度和时间。

##### 3. 最佳辐照距离的确定

最佳辐照距离为 100~400mm 左右。一般情况下，辐照距离越近，加热效率越高。当辐射元件与受热物的面互相平行时获得的热量多。



表 9-33 几种远红外辐射器的性能

特 性	电加热						煤气加热			
	红外线	石英碘钨灯	镍铬合金丝 石英辐射器	管状加 热器	板状加 热器	陶瓷穿 孔板	反射型			
工作温度 /C	1650~ 2200	1650~ 2200	760~980	400~ 600	200~ 590	760~ 920	760~ 1200			
峰值能量波长 /μm	1.5~ 1.15	1.5~ 1.15	2.8~2.6	4.3~ 3.3	6.0~ 3.2	2.8~ 2.5	2.8~2.2			
最大功率密度 /(W/cm <sup>2</sup> )	1	5~8	4~5	2~4	1~4					
平均寿命	5000h	5000h	几年 (中波石英灯)	几年	几年	几年	几年			几年
工作温度 时的颜色	白	白	樱桃红	淡红	暗色	深红	鲜红			
抗冲击	差	中	中	优	不一	优	差			
稳定性	差	优	优	优	良	优	优			
时间	秒级	秒级	分级	分级	十分级	几分钟	几分钟			几分钟
响应	秒级	秒级	分级	分级	十分级	几分钟	几分钟			几分钟

表 9-34 不同元件表面温度下的计算结果

温度 / °C	$\lambda_m / \mu\text{m}$	$W_{\text{总}} / (\text{kJ} / \text{h})$	$W_{3-16} / (\text{kJ} / \text{h})$	$\frac{W_{3-16}}{W_{\text{总}}} (\%)$	$W_{\text{对直}} / (\text{元件} / \text{向下}) / (\text{kJ} / \text{h})$	$\frac{W_{3-16}}{W_{\text{对直}}}$	$W_{\text{对直}} / (\text{元件} / \text{垂直}) / (\text{kJ} / \text{h})$	$\frac{W_{3-16}}{W_{\text{对垂}}}$	$W_{\text{对垂}} / (\text{元件} / \text{向上}) / (\text{kJ} / \text{h})$	$\frac{W_{3-16}}{W_{\text{对上}}}$	$\frac{W_{\text{总}}}{W_{\text{总}}} (\%)$
200	6.1	7850	6490	82.7	3864	1.68	6071	1.07	7725	0.84	56
250	5.5	112405	10618	85.6	5250	2.02	8252	1.29	10505	1.01	60
300	5.1	18472	15960	86.4	6711	2.38	10547	1.51	13423	1.19	64
350	4.7	26348	22789	86.5	82248	2.76	12958	1.76	16496	1.38	67
400	4.3	36367	31238	85.9	8935	3.18	15458	2.02	19632	1.59	70
450	4.0	48889	41311	84.5	11476	3.60	18037	2.29	22952	1.80	73
500	3.7	64414	52821	82	13172	4.01	20695	2.55	26343	2.00	76
550	3.5	83003	65988	79.5	14905	4.43	23425	2.82	29810	2.21	78
600	3.5	105449	81190	77	16680	4.87	26214	3.10	33365	2.43	80
700	3.0	163461	116058	71	22356	5.70	31991	3.63	40712	2.85	84
800	2.7	242395	159496	65.8	24162	6.60	37966	4.20	48324	3.30	87
900	2.5	346772	220949	60.4	28093	7.46	44150	4.74	56187	3.73	89
1000	2.3	491545	264849	55	32138	8.24	50505	5.24	64276	4.12	91

表 9-35 几种被加热物的最佳加热干燥温度及时间

被加热物 名 称	醇酸磁漆	1032 绝缘清漆	1010 沥青漆	谷物	木板
最佳加热 温度/℃	110~130	150~170	180~200	45~55	80~90
最短辐射 时 间	1.3min	1.5min	3min	0.5~1 min	20~50h

获取更多资料 微信搜索蓝领学术

# 第十章 照明计算

## 第一节 基础知识

### 一、照明术语、单位及计算

#### 1. 光通量

光源在单位时间内、向周围空间辐射并引起视觉的能量，称为光通量，用  $\Phi$  表示，单位为流明 (lm)。

光通量与光源的辐射强度有关，还与波长有关。人眼对波长 555nm 的黄、绿光最敏感。

#### 2. 发光强度 (光强)

光源在某一特定方向上单位立体角内辐射的光通量，称为光源在该方向上的发光强度，简称光强，用符号  $I$  表示，单位为坎 [德拉] (cd)。对于向各方向均匀辐射光通量的光源。

$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$

式中  $\Phi$ ——光源在  $\omega$  立体角内所辐射出的总光通量 (lm)；

$\omega$ ——光源发光范围的立体角 (sr)。

立体角是一个锥形的角度，用球面度来测量，单位为球面度 (sr)，图 10-1 示出： $\omega$  是随看见  $S$  的位置而变化

的。图中  $S = 2\pi r^2 (1 - \cos\theta)$ ,  $\omega = S/r^2 = 2\pi (1 - \cos\theta)$ 。

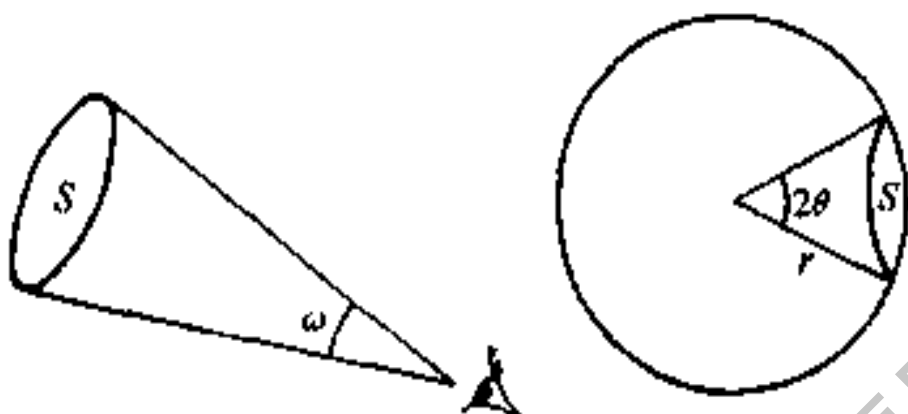


图 10-1 立体角概念

### 3. 照度

单位面积上接收的光通量称为照度，用符号  $E$  表示，单位是勒克司 (lx)。

$$E = \Phi/S$$

式中  $\Phi$ ——光通量 (lm)；

$S$ ——受照面积 ( $m^2$ )。

几种照度单位的换算见表 10-1。

表 10-1 照度单位的换算

单位名称	勒克司 (lx)	辐脱 (ph)	呎烛光 (fc)
1 勒克司 ( $lm/m^2$ )	1	$10^{-4}$	$9.29 \times 10^{-2}$
1 辐脱 ( $lm/cm^2$ )	$10^4$	1	929
1 呎烛光 ( $lm/ft^2$ )	10.76	$10.76 \times 10^{-4}$	1

注：呎烛光是英制照度单位，符号为 fc， $1fc = 1lm/ft^2$ 。

照度的一些实际概念：

(1) 在 40W 白炽灯下 1m 远处的照度约为 30lx，加搪瓷灯伞后增加到 70lx。

(2) 晴天中午太阳直射时的照度可达  $(0.2 \sim 1) \times 10^5 \text{lx}$ 。

(3) 无云满月夜晚的地面上照度约为 0.2lx。

(4) 阴天室外照度约为  $(8 \sim 12) \times 10^3 \text{lx}$ 。

#### 4. 亮度

发光体在给定方向单位投影面积上的发光强度称为亮度，用符号  $L$  表示，单位为坎 [德拉] 每平方米 ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )。

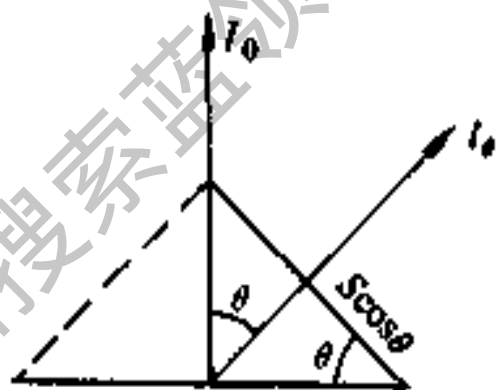


图 10-2 亮度的定义

如图 10-2 所示，发光体在  $\theta$  方向上的亮度为

$$L = \frac{I_{\theta}}{S \cos \theta}$$

式中  $I_{\theta}$ ——与法线成  $\theta$  角的给定方向上的发光强度 (cd)；

$S$ ——发光体面积 ( $\text{m}^2$ )。

物面的亮度与光源强度有关，还与物体反射能力有关，白纸与灰纸相比，白纸反射光线强，所以白纸的亮度大。

几种亮度单位的换算见表 10-2。

表 10-2 亮度单位的换算

单位名称	坎每平方米 ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	熙提 (sb)	阿波熙提 (asb)	呎朗伯 (fi)
$1\text{cd}/\text{m}^2$	1	$10^{-4}$	6.142	0.2919
1 熙提 ( $\text{cd}/\text{cm}^2$ )	$10^4$	1	$3.142 \times 10^4$	$0.2919 \times 10^4$
1 阿波熙提	0.3183	$0.3183 \times 10^{-4}$	1	0.0929
1 呎朗伯	3.426	$3.426 \times 10^{-4}$	0.1076	1

注：呎朗伯为英制亮度单位。

#### 5. 与亮度有关的其他术语

(1) 完全扩散面：不论从那个方向看，亮度都相等的反射面或透过面，称为完全扩散面。

(2) 光效：有光源光效（效率）和综合光效之分，单位为流明/瓦 ( $\text{lm}/\text{W}$ )。

$$\text{光源光效} = \frac{\text{光源的总光通量}}{\text{光源（灯）的功率}}$$

$$\text{综合光效} = \frac{\text{光源的总光通量}}{\text{光源的功率} + \text{镇流器消耗的功率}}$$

#### 6. 色温

当光源发光的颜色与黑体加热到某一个温度所发出的光的颜色相同时，称该温度为光源的颜色温度，简称色温。

光源中含短波蓝、紫光多的，如蓝天、日光灯等，其

色温高；含长波红、橙光多的，如日出、烛光等，其色温低。

### 7. 显色性、显色指数

光源的显色性是指光源能否正确地显现物体的颜色的性能。正确与否的标准是该物体在日光下所呈现的颜色。为了对光源的显色性进行定量比较，引入显色指数的概念。显色指数用符号  $R_c$  表示， $R_c$  值越接近 100，光源的显色性越好。

### 8. 灯泡的寿命

(1) 燃点寿命：灯泡在额定电压下，自开始点燃到烧坏为止的时间。

(2) 平均寿命或平均燃点寿命：每一批灯泡燃点时间的算术平均值。

(3) 有效寿命：灯泡在额定电压下，自开始点燃到其光通量减弱到一定数值的这段时间。

## 二、关于照明质量的一些要求

### 1. 照明的均匀度

(1) 最低均匀度：场所的最低照度  $E_{\min}$  与最高照度  $E_{\max}$  之比。

(2) 平均均匀度：场所的最低照度  $E_{\min}$  与平均照度  $E_p$  之比。

(3) 生产厂房照明均匀度要求：采用一般照明时，生产厂房的照明均匀度应不低于表 10-3 中所列的数值。



表 10-3 照明的均匀度要求

厂房的工作性质	最低均匀度 $E_{\min}/E_{\max}$	平均均匀度 $E_{\min}/E_p$
精密工作	0.3	0.7
粗糙工作	0.2	0.4

## 2. 限制眩光

所谓眩光,是指观察高亮度物体时,所产生的刺眼的视觉状态。为了限制直射眩光,灯具一般悬高及保护角应不小于表 10-4 中的规定值。

表 10-4 灯具最低悬挂高度

光源种类	反射器类型	保护角 (deg)	灯泡容量 /W	最低悬 挂高度 /m	
白炽灯	搪瓷反射器	10°~30°	100 及以下	2.5	
			150~200	3.0	
			300~500	3.5	
			500 以上	4.0	
	乳白玻璃 漫射罩			100 及以下	2.0
				150~200	2.5
				300~500	3.0

(续)

光源种类	反射器类型	保护角 (deg)	灯泡容量 /W	最低悬 挂高度 /m
荧光高 压汞灯	搪瓷反射器	10°~30°	250 及以下	5.0
	铝抛光反射器		400 及以上	6.0
卤钨灯	搪瓷反射器	30°及以上	500	6.0
	铝抛光反射器		1000~2000	7.0
荧光灯	无反射器		40 及以下	2.0
金属卤 化物灯	搪瓷反射器	10°~30°	400	6.0 <sup>①</sup>
	铝抛光反射器	30°以上	1000	14.0 以上
高压钠灯	搪瓷反射器	10°~30°	250	6
	铝抛光反射器		400	7
低压钠灯	搪瓷反射器	10°~30°	100	4
	铝抛光反射器		180	6

① 1000W 金属卤化物灯有紫外线防护措施时，悬挂高度可适当降低。

### 3. 显色性

当采用高压汞灯及高压钠灯，其显色性不能令人满意时，为了节约和改善照明场所的光色及显色性，可采用二种光源混光的办法来改善光色，见表 10-5。

表 10-5 常用混光照明种类、效果和适用范围

级别	分类	混光照明所要达到的目的	混光光源种类	光通量比 (%)
I	对色彩识别要求很高的场所	获得高显色性和高光效	DDG+NGG	50~70
			DDG+NGX	50~70
			DDG+PZ	50~80
			GGY+PZ	<20
			DGG+RR	40~60
II	对色彩识别要求较高的场所	获得较高的显色性和高光效	DDG+NGX	30~60
			DDG+PZ	>80
			DDG+NG	40~80
			KNG+NGG	40~70
			GGY+NGG	<30
			ZJD+NGX	40~60
III	对色彩识别要求一般的场所	改善显色性和提高发光效率	DDY+PZ	50~60
			KNG+NG	50~80
			GGY+NGG	30~50
			DDG+NG	30~40
IV	对色彩识别要求较低的场所	改善显色和提高发光效率	GGY+NG	40~60
			KNG+NG	20~50
			DDG+NG	20~30
			GGY+NGX	40~60
			ZJD+NG	30~40

(续)

级别	一般显色指数 $R_a$	色彩识别效果	适用场所举例
I	$\geq 85$	除个别颜色为中等外, 其余良好	配色间、颜色检验、彩色印刷
II	$70 \leq R_a < 85$	除部分颜色为中等外, 其余均良好	色织间、控制室、展览室、体育场馆
III	$60 \leq R_a < 70$	除部分颜色为中等和可以外, 其余良好	机电、仪表仪器装配
IV	$40 \leq R_a < 60$	除个别颜色可以外, 其余为中等	焊接、冲压、铸造、热处理

注: GGY—荧光高压汞灯, DDG—镉灯, KNG—钨钠灯, NGG—高显色高压钠灯, NG—高压钠灯, RR—日光色荧光灯, NGX—改进型高压钠灯, PZ—白炽灯, HGG—高显色荧光灯, ZTD—金属卤化物灯。

#### 4. 消除灯光的频闪效应

实验证明: 当光通量的波动深度降低到 25% 以下时, 灯光的频闪效应就可避免。几种常用光源的光通量波动深度见表 10-6。

表 10-6 几种光源的光通量波动深度

光源类型	接入电路的方式	光通量波动深度 (%)
日光色荧光灯	一灯接入单相电路	55
	二灯不同相接入电路	23
	二灯移相接入电路	23
	三灯不同相接入电路	5
冷白光色荧光灯	一灯接入单相电路	35
	二灯不同相接入电路	15
	二灯移相接入电路	15
	三灯不同相接入电路	3.1
荧光高压汞灯	一灯接入单相电路	65
	二灯不同相接入电路	31
	三灯不同相接入电路	5
氙灯	一灯接入单相电路	130
	二灯不同相接入电路	65
	三灯不同相接入电路	5
白炽灯	40W	13
	100W	5

### 三、常用电光源特性比较及对电源的要求

1. 常用电光源特性比较, 见表 10-7。

表 10-7 常用电光源特性比较

光源名称	普通照明灯泡	卤钨灯	荧光灯	荧光高压汞灯
额定功率范围/W	15~1000	500~2000	6~200	50~1000
光效/(lm/W)	7~19	19.5~21	27~67	32~53
平均寿命/h	1000	1500	1500~5000	3500~6000
一般显色指数 $R_a$	95~99	95~99	70~80	30~40
启动稳定时间	瞬时		1~3s	4~8min
再启动时间	瞬时			5~10min
功率因数	1	1	0.32~0.7	0.44~0.67
频闪效应	不明显		明显	
表面亮度	大	大	小	较大
电压变化对光通量的影响	大	大	较大	较大
温度变化对光通量的影响	小	小	大	较小
耐震性能	较差	差	较好	好
所需附件	无	无	镇流器 启辉器	镇流器

(续)

光源名称	管形氙灯	高压钠灯	低压钠灯	金属卤化物灯
额定功率范围/W	1500~ 100000	250, 400	18~180	250~3500
光效/(lm/W)	20~37	90, 100	75~150	72~80
平均寿命/h	500~ 1000	3000	2000~ 5000	1000~ 1500
一般显色指数 $R_a$	90~94	20~25	黄色	65~80
启动稳定时间	1~2s	4~8min	8~10min	4~10min
再启动时间	瞬时	10~20min	25min	10~15min
功率因数	0.4~0.9	0.44	0.6	0.5~0.61
频闪效应	明显			
表面亮度	大	较大	较大	大
电压变化对 光通量的影响	较大	大	大	较大
温度变化对 光通量的影响	小	较小	小	较小
耐震性能	好	较好	较好	好
所需附件	镇流器 触发器	镇流器	漏磁 变压器	镇流器 触发器

## 2. 几种电光源对电源电压的要求

### (1) 白炽灯和卤钨灯:

① 电源电压变化不宜大于 $\pm 2.5\%$ , 否则电压升高会明显缩短其寿命, 降低其光效。

② 钨丝的冷态电阻比热态电阻小得多, 起动瞬间最高电流可达额定电流的 8 倍以上。

③ 卤钨灯需水平安装, 其倾角不得大于 $\pm 4^\circ$ , 否则将严重影响寿命。

(2) 荧光灯: 电源电压的变化不宜大于 $\pm 5\%$ 。

(3) 高压钠灯: 电源电压变化不宜大于 $\pm 5\%$ 。高压钠灯由点亮到稳定工作约需 4~8min。当电源中断, 灯熄灭后, 即使立即恢复供电, 灯也不能马上点燃, 需经过十几 min 待双金属片冷却复原闭合后才能再启动。

(4) 高压汞灯: 电源电压如突然降低超过 5%, 可能造成灯泡自行熄灭。

(5) 金属卤化物灯: 电源电压变化不宜大于 $\pm 5\%$ , 电源电压变化不但会引起光效变化, 而且会引起光色的变化。

管形碘灯安装时, 必须认清灯的方向标记, 且灯轴中心的偏离不应大于 $\pm 15^\circ$ 。

## 四、灯具的选择

### 1. 灯具选择的一般原则

根据环境条件选择如下:



(1) 在干燥且无爆炸性气体的场所,可采用广照型、配照型、深照型和各种乳白玻璃罩灯具。

(2) 在潮湿和特潮的场所,可采用防水防尘型或带防水灯头的开启式灯具。

(3) 在含有大量尘埃,但为非易燃性或无爆炸性气体的场所,可采用防水防尘型密闭灯具。

(4) 在有爆炸性气体或尘埃的场所,可采用防爆型或密闭型灯具。

(5) 在高大厂房(装灯高度 $7\sim 8\text{m}$ ),可采用集中配光的直射光灯具(如探照型灯)或高压汞灯。

(6) 在不很高的厂房(装灯高度 $5\sim 6\text{m}$ ),可采用余弦配光类的直射光灯具(如配照型灯)。

(7) 在装灯高度不能满足限制眩光要求的工作地点,以及要求光线柔和的场所,可采用有漫射罩的灯具。

## 2. 有爆炸、火灾危险的场所灯具选择

先确定有爆炸或火灾危险场所的等级,然后根据爆炸性混合物的级别和组别选择灯具,参见表 10-8 和表 10-9。

## 五、灯具的分类、配光曲线和效率

### 1. 灯具的分类(表 10-10)

### 2. 灯具的配光曲线(光强分布曲线)

电光源装在灯罩中使用,其发光强度在空间的分布

表 10-8 火灾危险场所电气设备选型

电气设备 及其使用条件		场所等级		可燃液体 (H-1级)	悬浮状、 堆积状可 燃粉尘或 可燃纤维 (H-2级)	固体状 可燃物质 (H-3级)
		固定安装	移动式 和携带式	防溅式 <sup>①</sup>	封闭式	防滴式 <sup>②</sup>
电机	固定安装			防溅式 <sup>①</sup>	封闭式	防滴式 <sup>②</sup>
	移动式 和携带式			封闭式	封闭式	封闭式
电器 和仪表	固定安装			防水型、防尘型、 充油型、保护型 <sup>③</sup>	防尘型	开启式
	移动式 和携带式			防水型、防尘型	防尘式	保护型
照明 灯具	固定安装			保护型	防尘型 <sup>④</sup>	开启型
	移动式 和携带式 <sup>⑤</sup>			防尘型	防尘型	保护型
配电装置				防尘型	防尘型	保护型
接线盒				防尘型	防尘型	保护型

① 电机正常运行时有火花的部件(如滑环)应装在全封闭的罩子内;

② 正常运行时有火花的部件(如滑环)的电机最低应选用防溅型;

③ 正常运行时有火花的设备,不宜采用保护型;

④ 照明灯具的玻璃罩应用金属网保护;

⑤ 可燃纤维火灾危险场所,固定安装时,允许采用普通荧光灯。

表 10-9 电气设备按爆炸危险场所的  
危险程度选型举例

场所等级		有可燃气、易燃液体的场所		
		正常情况下能达到爆炸浓度的场所 (Q-1级) <sup>①</sup>	事故或检修时才能达到爆炸浓度的场所 (Q-2级)	事故或检修时不易在整个区域达到爆炸浓度的场所 (Q-3级)
电气设备及其使用条件				
电机		隔爆型、防爆通风充气型	任意一种防爆类型	封闭式 <sup>②③</sup>
电器和仪表	固定安装	隔爆型、防爆充油型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	任意一种防爆类型 <sup>④</sup>	防尘型、防水型 <sup>⑤</sup>
	移动式	隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、密封型、防水型
	携带式	防爆型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、密封型、防水型

(续)

场所等级		有可燃气、易燃液体的场所		
		正常情况下能达到爆炸浓度的场所 (Q-1级) <sup>①</sup>	事故或检修时才能达到爆炸浓度的场所 (Q-2级)	事故或检修时不易在整个区域达到爆炸浓度的场所 (Q-3级)
电气 设备及其 使用条件	固定安装 及移动式	隔爆型、防 爆通风充气型	任意一种防 爆类型	防尘型
	便携式 <sup>②</sup>	隔爆型	隔爆型	隔爆型、防 爆安全型
变压器		隔爆型、防 爆通风充气型	任意一种防 爆类型	防尘型
通讯电器		隔爆型、防 爆充油型、防 爆通风充气 型、防爆安全 火花型	任意一种防 爆类型	密封型
配电装置		隔爆型、防 爆通风充气型	任意一种防 爆类型	密封型

(续)

场所等级		有可燃粉尘、纤维的场所	
		正常情况下能达到爆炸浓度的场所 (G-1级)	事故或检修时才能达到爆炸浓度的场所 (G-2级)
电气设备及其使用条件			
电机		任意一级隔爆型、 防爆通风充气型	封闭式 <sup>①</sup>
电器和仪表	固定安装	任意一级隔爆型、 防爆通风充气型、防 爆充油型	防尘型
	移动式	任意一级隔爆型、 防爆通风充气型	防尘型
	携带式	任意一级隔爆型	防尘型
照明灯具	固定安装 及移动式	任意一级隔爆型	防尘型
	携带式 <sup>②</sup>	任意一级隔爆型	防尘型
变压器		任意一级隔爆型、 防爆充油型、防爆通 风充气型	防尘型

(续)

场所等级	有可燃粉尘、纤维的场所	
	电气 设备及其 使用条件	正常情况下能达到 爆炸浓度的场所 (G-1级)
通讯电器	任意一级隔爆型、 防爆充油型、防爆通 风充气型	防尘型
配电装置	任意一级隔爆型、 防爆通风充气型	防尘型

- ① 正常情况下,连续或经常存在爆炸性混合物的地点(例如贮存易燃液体的贮罐或工艺设备内的上部空间),不宜设置电气设备,但为了测量、保护或控制的要求,可装设防爆安全火花型电气设备;
- ② 事故排风用电动机应选用任意一种防爆类型;
- ③ 电机正常运行时有火花的部件(例如滑环)应采用下列类型之一的罩子,即防爆通风充气型乃至封闭式等;
- ④ 正常运行时不发生火花的部件和按工作条件发热不会超过 $80^{\circ}\text{C}$ 的电器和仪表,可选用防尘型;
- ⑤ 事故排风机用电机的控制设备(如按钮)应选用任意一种防爆类型;
- ⑥ 照明灯具的玻璃罩应有金属网保护。

表 10-10 按灯具结构特点分类

结构型式	特 点		
开启型 闭合型 密闭型	光源与外界空间直接接触（无罩） 透明罩将光源包含起来，但内外空气仍能自由流通 透明罩固定处加以严密封闭，与外界隔绝相当可靠，内外空气不能流通		
防爆型	透明罩本身及其固定处和灯具外壳，均能承受要求的压力，符合《防爆电气设备制造检验规程》的规定，能安全使用在爆炸危险性介质的场所	隔爆型 (代号 B)	在灯具内部发生爆炸时，通过一定间隙的防爆面后，不会引起灯具外部的爆炸
		安全型 (代号 A)	在正常运行时，不产生火花电弧，或在危险温度的部件上，采取适当措施，以提高其安全程度，但在正常运行时产生火花电弧的部件应放在单独隔爆室内

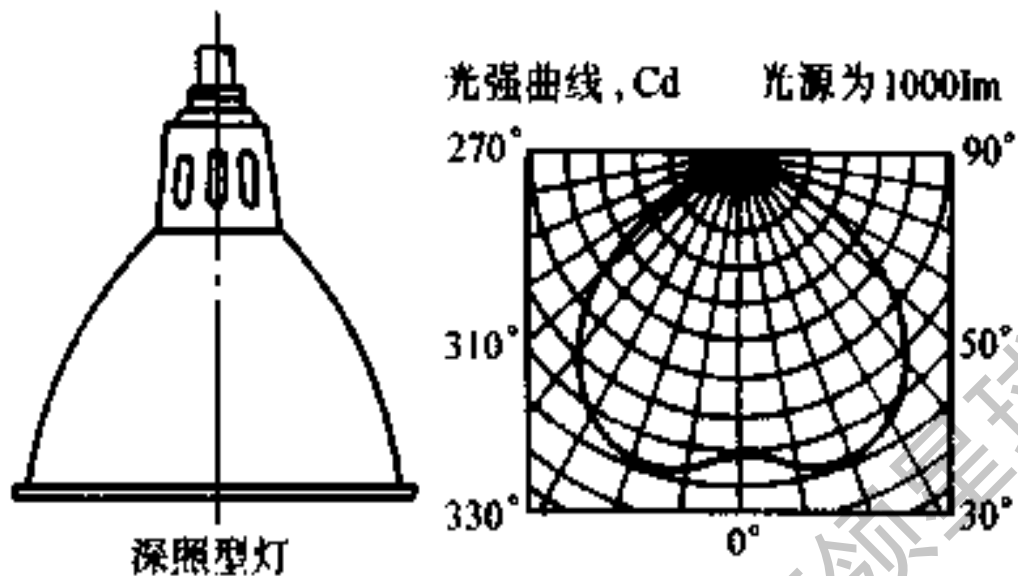


图 10-3 对称配光的极坐标光强分布曲线

由灯罩结构决定。以光源为原点，以各角度上的光强  $I_\theta$  为长度的各点所连成的曲线，称为该光源的配光曲线，如图 10-3 所示。灯具的几种典型光强分布曲线如图 10-4 所示。为了比较灯具的配光特性，光强分布曲线通常将光源化为 1000lm 光通量的假想光源来绘制曲线。实际光源不是 1000lm 时，可按下列式换算：

$$I_\theta = \frac{1000}{\Phi} I'_\theta$$

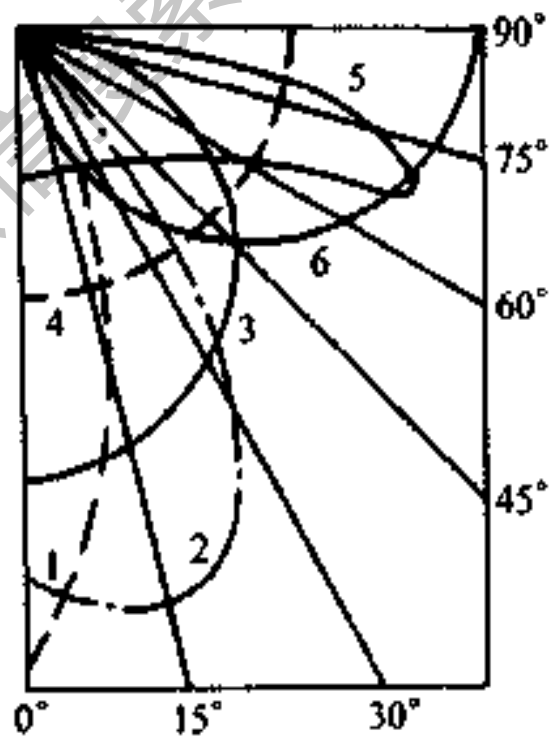


图 10-4 灯具的几种典型光强分布曲线

- 1—特深照型 2—深照型  
3—配照型 4—漫射型  
5—广照型 6—正弦配光型



式中  $I_{\theta}$ ——换算成光源的光通量为 1000lm 时  $\theta$  方向上的光强 (cd)；

$I_{\theta}$ ——灯具在  $\theta$  方向上的实际光强 (cd)；

$\Phi$ ——灯具实际配用的光源的光通量 (lm)。

灯具的配光情况还可用空间等照度曲线来间接地表示。图 10-5 和图 10-6 是搪瓷探照型和广照型灯具的空间等照度曲线，只要知道灯具的计算高度  $h$  和计算点距灯具的水平距离  $d$ ，就可以从曲线中查出该计算点的照度  $E$ 。图 10-7 是用于线光源计算的漫反射罩开启型直射光灯具的线光源等照度曲线。图中  $L$ 、 $P$  的意义，见例 10-1。

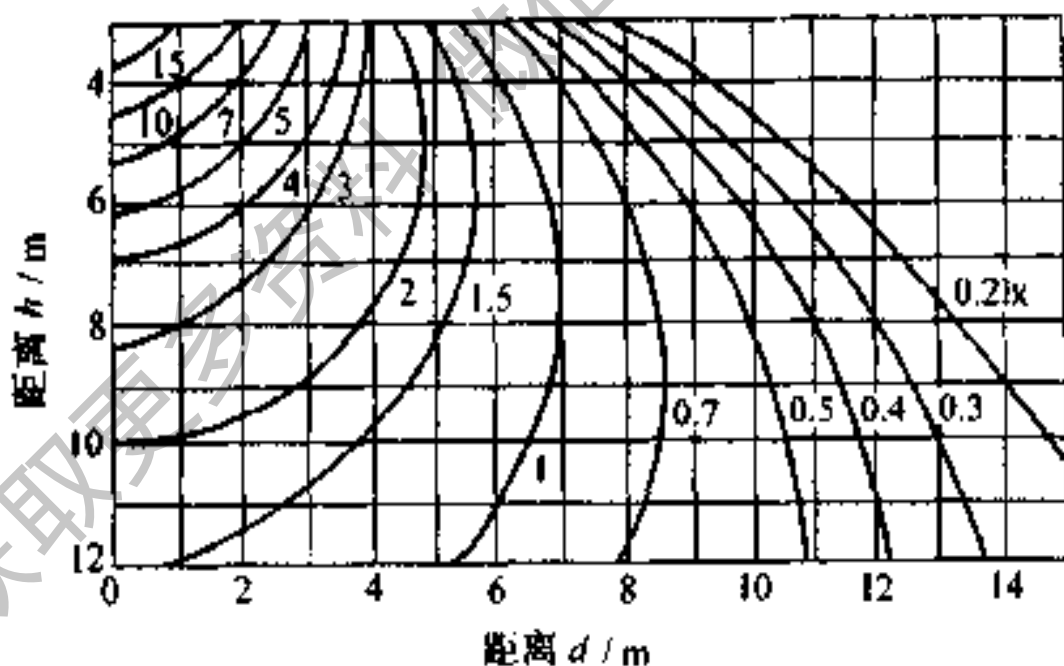


图 10-5 搪瓷探照型灯具的空间等照度曲线

### 3. 保护角

灯具的保护角应配置适当，使工作人员在保护角内

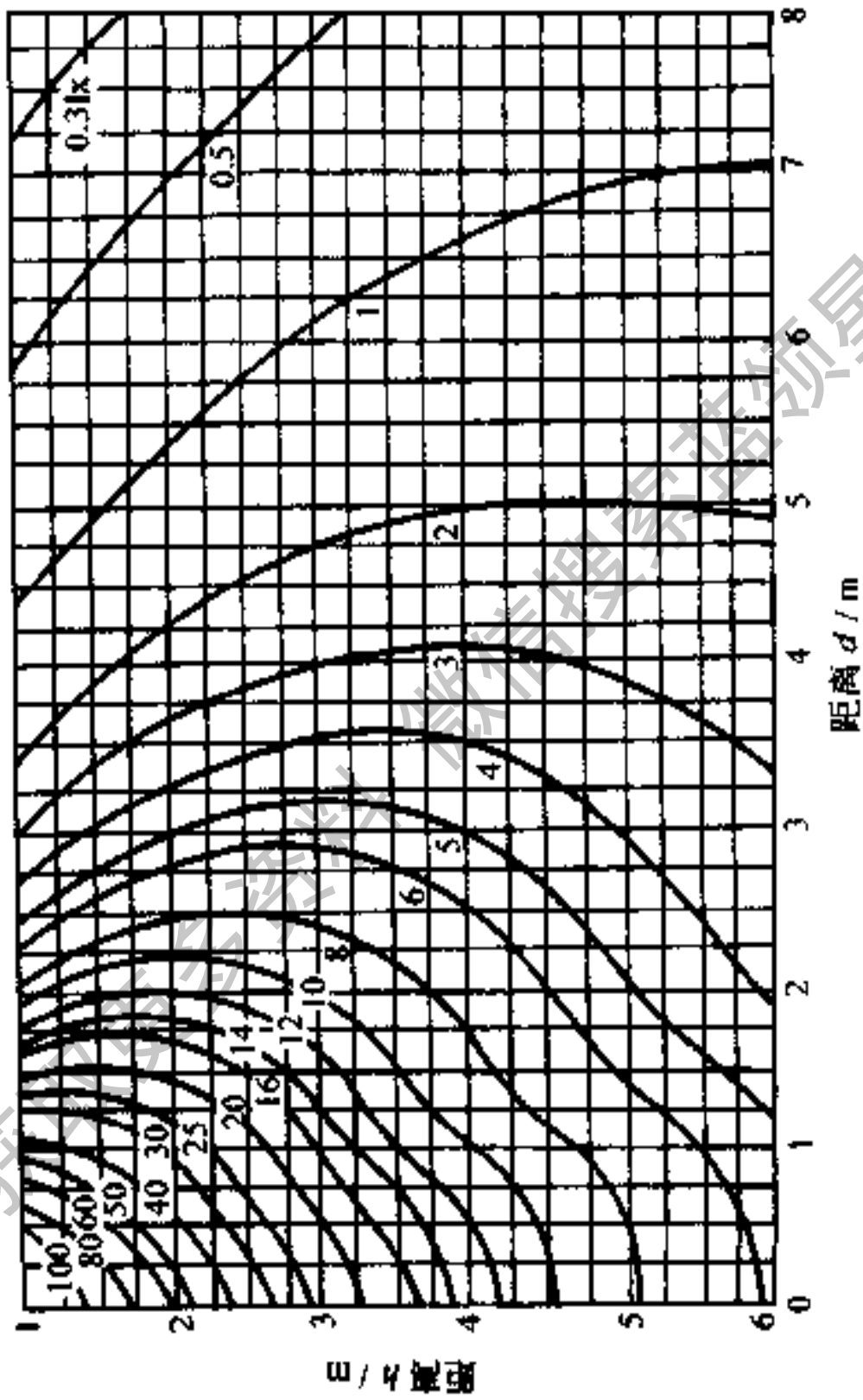


图 10-6 搪瓷广照型灯具的空间等照度曲线

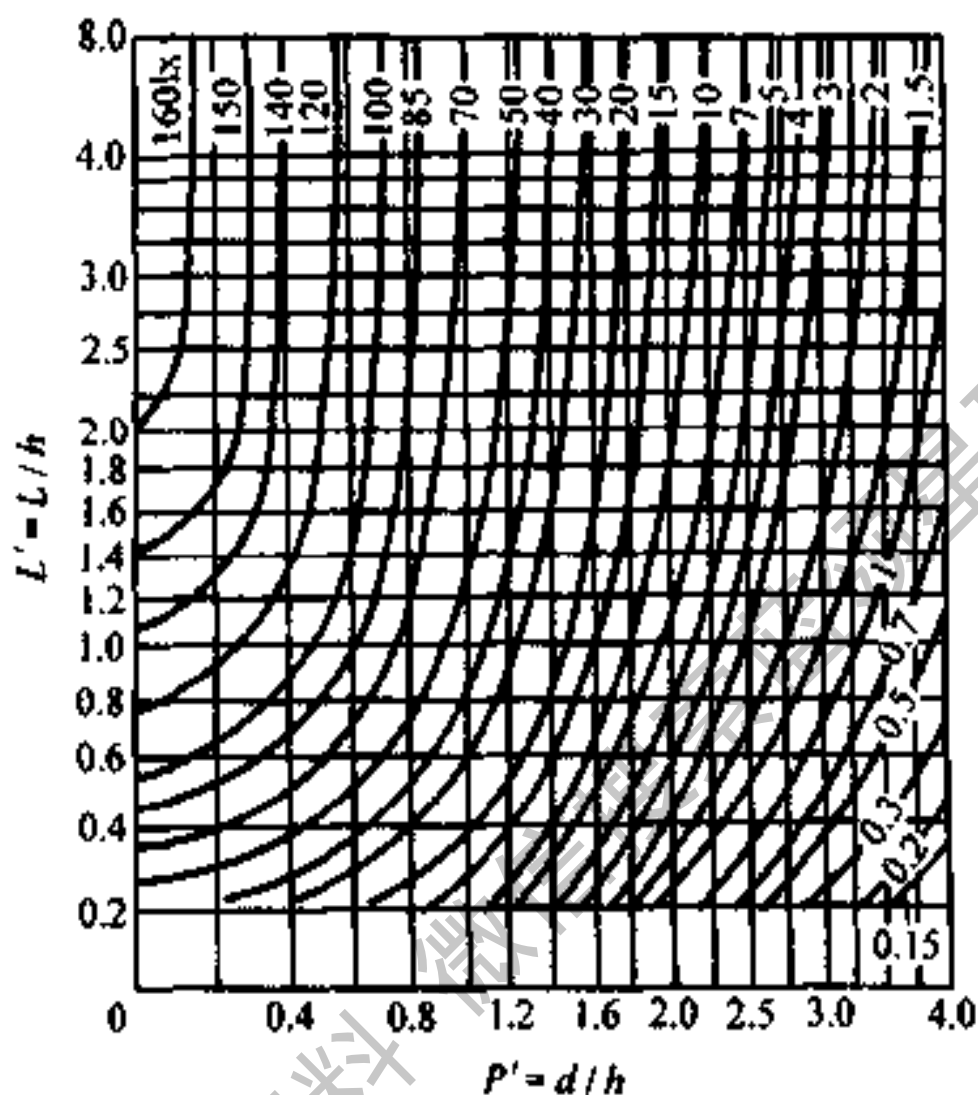


图 10-7 漫反射罩开启型直射灯具  
的线光源等照度曲线

看不见光源，以避免直射眩光。

#### 4. 灯具的效率

$$\eta = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \times 100\%$$

式中  $\Phi_1$ ——灯具辐射的光通量 (lm)；

$\Phi_2$ ——光源的光通量 (lm)。

效率  $\eta$  越高，表示光源辐射的光通量损失越小。

## 六、常用材料的反射、透射和吸收率

常用材料的反射率  $\rho$ 、透射率  $\tau$  和吸收率  $\alpha$  见表 10-11。

表 10-11 常用材料的反射、透射和吸收率

材料名称		$\rho$ (%)	$\tau$ (%)	$\alpha$ (%)	备注	
玻 璃 及 塑 料	普通玻璃 2~6mm	8~10	84~90		光对平滑面	
	磨砂玻璃 1.5mm		76.5		光对磨砂面	
				79.5		光对平滑面
	乳白玻璃 1.5mm		64			
	有机玻璃 1~6mm		91~92			
	聚氯乙烯		75~83			
	聚碳酸脂		74~81			
	聚苯乙烯		75~83			
	塑料安全夹层玻璃 (透明)		78		(3+3) mm	
	双层中空隔热玻璃 (透明)		64		(3+3) mm	
	蓝色吸热玻璃			64		3mm
				52		5mm
	压花玻璃 3mm			57		花纹深密
			71		花纹浅稀	

(续)

材料名称		$\rho$ (%)	$\tau$ (%)	$\alpha$ (%)	备注
金 属	普通铝 (抛光)	71~76		24~29	
	高纯铝 (电化抛光)	84~86		14~16	
	镀汞玻璃镜	83		17	
	不锈钢	55~60		40~45	
饰 面 材 料	大白粉刷	75			
	白色乳胶漆	84			
	乳黄色调和漆	70			白色调和漆
	白水泥	75			
	水泥砂浆抹面	35			
	红砖	30			
	灰砖	24			
	花岗岩	15~25			
	浅色瓷砖	78			
	白色水磨石	70			
	塑料贴面板	30			
混凝土地板	15~32				
石膏地面	13				

(续)

材料名称		$\rho$ (%)	$\tau$ (%)	$\alpha$ (%)	备注
饰 面 材 料	石膏	90~92		8~10	
	白亮木材	40 以下			
	暗色木材	10 以上			
	白色棉织物	35	57	8	
	深色大理石	40			
搪 瓷 类	白搪瓷	80			
	涂釉瓷器	60~90			
	处理过的铝面	70~80			

注：双层中空玻璃中间的空隙为 5mm。

## 第二节 照度标准及灯具布置计算

### 一、照度标准

一般生产车间和工作场所工作面上的最低照度参考值见表 10-12。办公室、公共用室、生活用室的最低照度参考值见表 10-13。厂区露天工作场所和交通运输线的最低照度参考值见表 10-14。体育建筑中一般房间照明的照度标准见表 10-15。体育运动场所照明的照度标准见表 10-16。

表 10-12 一般生产车间和工作场所工作面上的最低照度 (参考值)

序号	车间名称及工作场所	工作面上的最低照度/lx		
		混合照明	混合照明中的一般照明	单独使用一般照明
1	金属机械加工车间			
	一般	500	30	—
	精密	1000	75	—
2	机电装配车间			
	大件装配	500	50	—
	精密小件装配	1000	75	—
3	机电装配试车			
	地面	—	—	30
	试车台	500	50	—
4	焊接车间			
	弧焊	—	—	50
	接触焊	—	—	50
	一般划线	—	—	75
5	钣金车间	—	—	50
6	冲压剪切车间	300	30	—
7	锻工车间	—	—	30

(续)

序号	车间名称及工作场所	工作面上的最低照度/lx		
		混合照明	混合照明中的一般照明	单独使用一般照明
8	热处理车间	—	—	30
9	铸工车间	—	—	—
	熔化、浇铸	—	—	30
	型砂处理清理	—	—	20
	造型	—	—	20
10	木工车间	—	—	—
	机床区	300	30	—
	木模区	300	30	—
11	表面处理车间	—	—	—
	电镀槽区	—	—	50
	酸洗	—	—	30
	抛光	500	30	—
	电源(整流器)室	—	—	30
12	喷砂车间	—	—	30
13	检修间	—	—	30
14	喷漆车间	—	—	30



(续)

序号	车间名称及工作场所	工作面上的最低照度/lx		
		混合照明	混合照明中的一般照明	单独使用一般照明
15	电修车间			
	一般	300	30	—
	精密	500	50	—
16	理化计量实验室	—	—	100
17	动力站			
	压缩机	—	—	30
	锅炉房、煤气站	—	—	20
	操作台			
	泵房、煤风机房	—	—	20
	乙炔发生器房	—	—	20
18	配电所			
	高低压配电房	—	—	50
	变压器室	—	—	20
19	控制室			
	一般控制室	—	—	75
	主控制室	—	—	150
20	热工仪表控制室	—	—	100

(续)

序号	车间名称及工作场所	工作面上的最低照度/lx		
		混合照明	混合照明中的一般照明	单独使用一般照明
21	广播站(室)	—	—	75
22	工具库	—	—	30
23	仓库			
	工具库	—	—	56
	大件贮库	—	—	5
	精细件贮库	—	—	20
	小件贮库	—	—	10
24	乙炔瓶库、氧气瓶库、 电石库	—	—	10
25	汽车库			
	停车间	—	—	10
	充电室	—	—	20
26	电话间			
	人工转换台、转接台	—	—	50
	蓄电池室	—	—	20

表 10-13 办公室、公共用室、生活用室的  
最低照度 (参考值)

序号	房间名称	一般照明的 最低照度 /lx	规定照度的平面
1	设计室	100	距地面 0.8m 处
2	阅览室	75	距地面 0.8m 处
3	办公室、会议室、资料室、医务室	50	距地面 0.8m 处
4	托儿所、幼儿园	30	距地面 0.4~0.5m 处
5	车间休息室、单身宿舍、食堂	30	距地面 0.8m 处
6	更衣室、浴室、厕所	10	地面
7	楼梯间、通道	5	地面

表 10-14 厂区露天工作场所和交通运输线  
的最低照度 (参考值)

工作种类和地点		最低照度 /lx	规定照度的平面
露天工作	视觉工作要求较高的工作	20	工作面
	用眼睛检查质量的金属焊接	10	工作面
	用仪器检查质量的金属焊接	5	工作面
	间断视察的仪表	5	工作面
	装卸工作	3	地面
	露天堆场	0.2	地面

(续)

工作种类和地点		最低照度 /lx	规定照度 的平面
道路	主要道路	0.5	地面
	一般道路	0.2	地面
站台	视觉要求较高的站台	3	地面
	一般站台	0.5	地面
	码头	3	地面

表 10-15 体育建筑中一般房间  
照明的照度标准

场所或类别	照度 <sup>①</sup> /lx	注
大门厅、观众休息厅	75~100~150	地面照度
会议室	100~150~200	
运动员餐厅	75~100~150	地面照度
运动员休息室、更衣室	75~100~150	
灯光控制室、播音室	100~150~200	地面照度
衣帽间、浴室	30~50~75	
通道、库房	50~70~100	地面照度

① 在照度标准值中，国家级训练、比赛应取高值或中值；  
省市级训练、比赛应取低值。

表 10-16 体育运动场所照明的照度标准

场所或类别	照度 <sup>①</sup> /lx		注
	训练	比赛	
篮球、排球、羽毛球、网球、手球、田径、体操、艺术体操、技巧、武术、曲棍球	15~200 ~300	300~500 ~750	地面照度。 室外比赛照度 降低一级
保龄球	150~200 ~300	200~300 ~500	地面照度
举重	100~150 ~200	200~500 ~750	地面照度
击剑	200~300 ~500	300~500 ~750	台面照度
柔道	200~300 ~500	300~500 ~750	地面照度
中国、国际摔跤	200~300 ~500	300~500 ~750	地面照度。 宜设局部照明
拳击	200~300 ~500	1000~1500 ~2000	地面照度。 宜设局部照明

(续)

场所或类别	照度 <sup>①</sup> /lx		注
	训练	比赛	
乒乓球	300~500 ~750	500~750 ~1000	台面照度。 赛区其它部分 的照度不应低 于台面照度的 一半
游泳	150~200 ~300	300~500 ~750	尽可能沿游 泳池两侧布灯
跳水	150~200 ~300	300~500 ~750	水面照度。 在跳水区应有 附加照明
水球	150~200 ~300	300~500 ~750	
花样游泳	200~300 ~500	300~500 ~750	水面照度。 应设水下照 明,其容量为 1000lm/m <sup>2</sup>
冰球、速滑、花 样滑冰	150~200 ~300	300~500 ~750	冰面照明
围棋、中国象棋、 国际象棋、桥牌		500~750 ~1000	台面照明。 宜设局部照明

(续)

场所或类别		照度 <sup>①</sup> /lx		注
		训练	比赛	
射 击	靶心	1000~1500 ~2000	1000~1500 ~2000	靶心垂直照 度
	通道	75~100 ~150	75~100 ~150	
	射击点	75~100 ~150	75~100 ~150	0.75m 高处 水平照度
足 球	观看距离 /m (指观众 席最后一排 到场地边线 距离)	120	150~200 ~300	地面照度
		160	200~300 ~500	地面照度
		200	300~500 ~750	地面照度
观众席			50~75 ~100	座面照度
健身房		100~150 ~200		地面照度
综合体育馆				根据该馆的 比赛项目而定

① 同表 10-15.

## 二、灯具布置计算

### 1. 室内灯具布置原则

(1) 保证规定的照度：工作面上的照度要均匀、无眩光、安装容量在保证照度的前提下尽可能小。

(2) 选择合适的灯具布置方式：

① 选择性布置方式：局部照明；加强照度；消除阴影或定向照射使用。

② 均匀布置方式：除上述外的照明。

③ 合理的灯具悬挂高度：以不发生眩光为限。

④ 合理的距离比  $L:h$ ，为了使照度分布均匀。

### 2. 灯具的悬挂高度要求

一般灯具的悬挂尺寸示意图如图 10-8 所示。

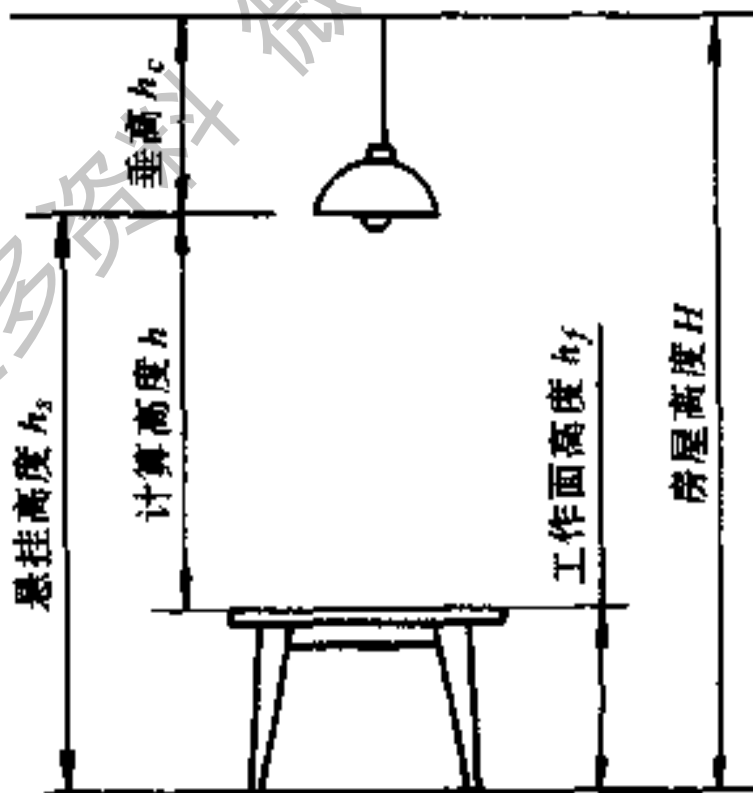


图 10-8 灯具悬挂尺寸示意图



垂度  $h_c$  一般为  $0.3 \sim 1.5\text{m}$ ，大多数取  $0.7\text{m}$ 。在有行车的车间里或吸顶安装的灯具，其垂度为零。

为限制直接眩光的作用，室内一般灯具距地面的最低高度，不宜低于表 10-4 所规定的数值。

### 3. 均匀照明的灯具布置方式

灯具的平面布置如图 10-9 所示有三种方式，其等效灯距  $L$  的计算如下：

图 10-9a  $L = L_1 + L_2$

图 10-9b  $L = \sqrt{L_1 L_2}$

图 10-9c  $L = \sqrt{L_1 L_2}$

灯具布置是否合理，主要取决于灯具的间距  $L$  和计

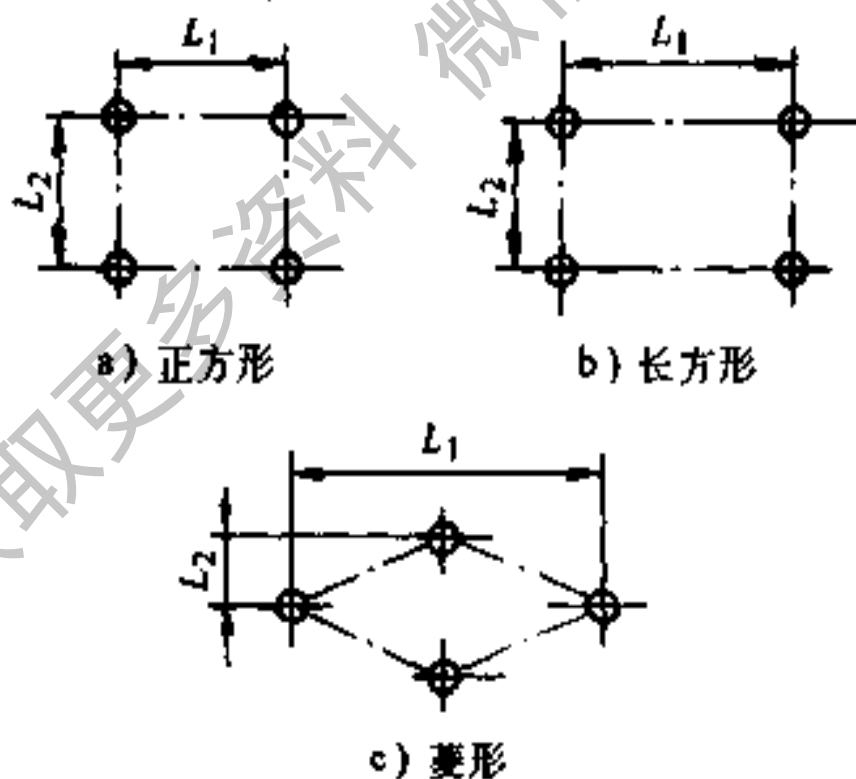
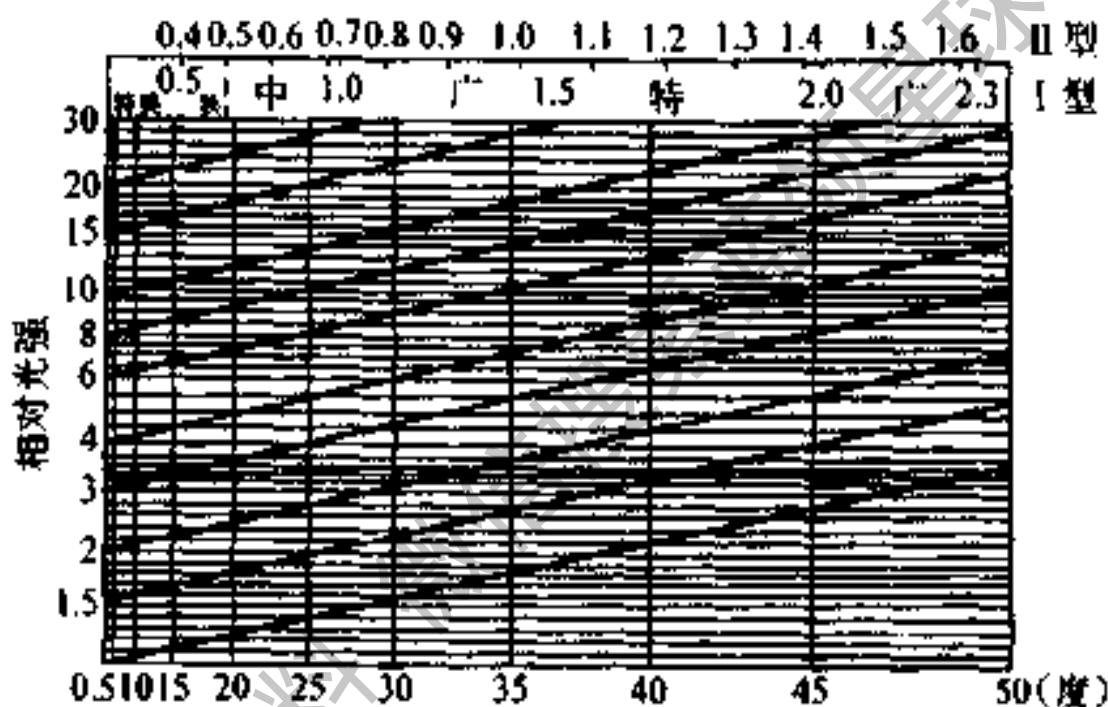


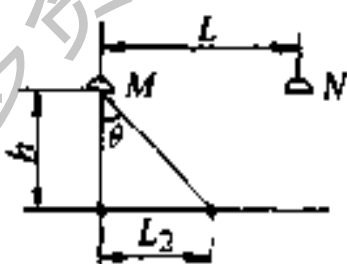
图 10-9 均匀布灯的几种形式

算高度  $h$  的比值 ( $L:h$ ) 是否恰当。 $L:h$  值小, 照度均匀度好, 但费电,  $L:h$  值过大, 又不能满足所规定的照度均匀度。求取最大允许的  $L:h$  值有以下两种方法:

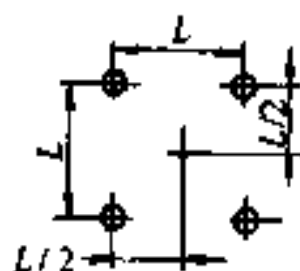
(1) 根据各种灯具的配光曲线, 利用图 10-10 给出的曲线来求取;



a) 距离比曲线



b) I型: 单排排列



c) II型: 正方形排列

图 10-10 确定各种灯具  $L:h$  的曲线

(2) 查表法求取: 查“照明器技术参数表”查取。

现将 (1) 法求  $L:h$  值的步骤介绍如下:

- ① 将灯具配光曲线按相对值画在图 10-10a 中；
- ② 将灯具配光曲线中  $0^\circ$  光强值的  $1/2$  或  $1/4$  点放在图 10-10a 的  $0^\circ$  线相应的光强位置上；
- ③ 过步骤 b) 作的点，作图 10-10a 中斜线的平行线，与步骤 a) 中的曲线相交；
- ④ 过交点作垂直线与图 10-10a 上面的标尺相交，上下标尺的读数即是灯具按 I 型或 I 型排列时的距离比。

从图 10-10a 求得  $L:h$  后，当已知计算高度  $h$ ，便可求得  $L$ ，然后根据具体情况来确定  $L_1$  和  $L_2$ 。

对于房间的边缘地区，灯具距墙的距离一般取  $(1/3 \sim 1/2) L$ ；如果工作位置靠近墙壁时，可将边行灯具距墙的距离取为  $(1/4 \sim 1/3) L$ 。

图书室、资料室、实验室、教室的灯具布置，取  $L:h=1.6 \sim 1.8$  较有利。

各种灯具的距离比推荐值，见表 10-17；嵌入式均匀布置发光带最适宜的距高比，见表 10-18；荧光灯的最大允许距高比，见表 10-19。

表 10-17 各种灯具的  $L:h$  值

灯具类型	$L:h$		单行布置时 房间最大宽度
	多行布置	单行布置	
配照型、广照型	1.8~2.5	1.8~2	1.2h

(续)

灯具类型	$L : h$		单行布置时 房间最大宽度
	多行布置	单行布置	
深照型、镜面深照型 乳白玻璃罩灯	1.6~1.8	1.5~1.8	$h$
防爆灯、圆球灯、吸 顶灯、防水防尘灯	2.3~3.2	1.9~2.5	1.3h
栅格荧光灯具	1.2~1.4	1.2~1.4	0.75h
荧光灯具 (余弦配 光)	1.4~1.5	—	—
块板型 (高压钠灯) GC108-NG400	1.6~1.7	1.6~1.7	1.2h

注：第一个数字为最适宜值、第二个数字为允许值。

表 10-18 嵌入式均匀布置发光带  
最适宜的  $L : h$  值

发光带类型	$L : h$
玻璃面发光带	$\leq 1.2$
栅格式发光带	$\leq 1.0$

表 10-19 荧光灯的最大允许距离比  $L:h$  值

灯具名称	灯具型号	灯具效率 (%)	最大允许距离比 $L:h$		光通量 /lm	示意图
			A-A	B-B		
筒式	YG1-1	81	1.62	1.22	2200	
筒式	YG2-1	88	1.46	1.28	2200	
荧光灯	YG2-2	97	1.33	1.28	2×2200	
密封型	YG4-1	84	1.52	1.27	2200	
荧光灯	YG4-2	80	1.41	1.26	2×2200	
吸顶式	YG6-2	86	1.48	1.22	2×2200	
荧光灯	YG6-3	86	1.5	1.26	3×2200	
嵌入式						
栅格荧光灯(塑料栅格)	YG15-3	45	1.07	1.05	3×2200	
嵌入式 栅格荧光灯 (铝栅格)	YG15-2	63	1.25	1.20	2×2200	

### 第三节 照度计算

#### 一、各类光源的照度计算

##### 1. 点光源照度计算 (图 10-11)

$$E_o = \frac{I_\theta}{l^2} = \frac{I_\theta}{h^2 + d^2}$$

$$E_n = E_o \cos \theta$$

$$= \frac{I_\theta}{l^2} \cos \theta$$

$$= \frac{I_\theta}{h^2} \cos^3 \theta$$

$$E_r = E_o \sin \theta$$

$$= \frac{I_\theta}{l^2} \sin \theta$$

$$= \frac{I_\theta}{d^2} \sin^3 \theta$$

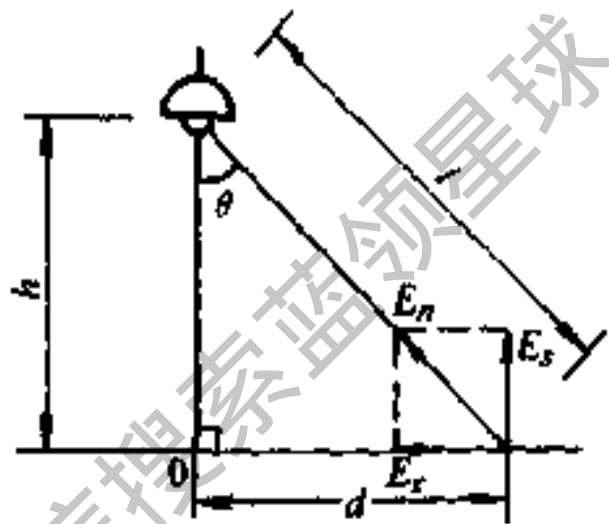


图 10-11 计算点光源照度的示意图

如果光源的光强对所有方向均相等, 则  $I = I_\theta$ 。

式中  $E_o$  —— 法线照度 (lx);

$E_n$  —— 水平面照度 (lx);

$E_r$  —— 垂直面照度 (lx);

$I_\theta$  —— 光源指向被照点方向的光强 (cd);

$\theta$  —— 光线的方向与被照面法线间的夹角;

$h$  —— 计算高度 (m);

$d$  —— 水平距离 (m)。

当水平距离  $d$  一定时, 给出最大水平面照度的条件是  $h = d / \sqrt{2}$ 。

2. 给出立体角时被照面上的照度计算 (图 10-12)

$$E_r = \frac{\Phi}{S} = \frac{2\pi I (1 - \cos\theta)}{\pi R^2}$$

$$= \frac{2I (1 - \cos\theta)}{R^2}$$

$$\omega = 2\pi (1 - \cos\theta)$$

式中  $E_r$  —— 圆桌面上的照度  
(lx);

$I$  —— 发光强度 (cd);

$R$  —— 圆桌半径 (m);

$\omega$  —— 从光源处看到的圆  
桌的立体角 (sr)。

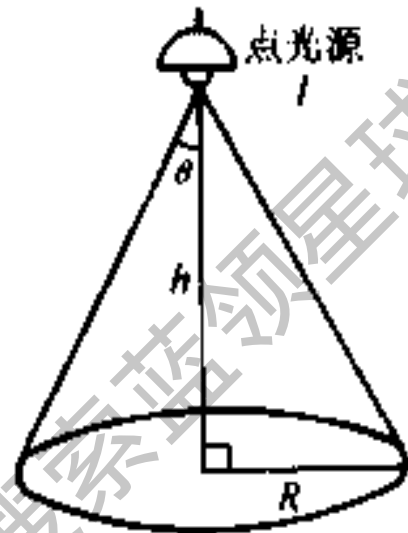


图 10-12 点光源在  
圆桌上的照度

3. 几何形状简单的光源计算

几何形状简单的光源的配光、发光强度、照度、光通量, 列于表 10-20。

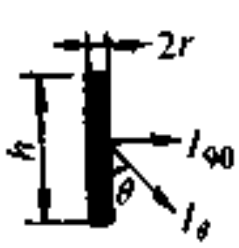



4. 面光源的计算

几种面光源的水平面照度计算见表 10-21。

5. 直线光源照度的计算

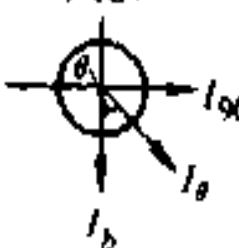
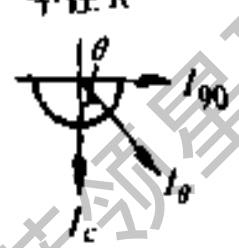


当光源长度与计算高度之比为  $l/h \geq 0.5$ , 光源宽度与计算高度之比  $b/h \leq 0.5$  时, 可认为是直线光源, 如荧光灯照明, 如图 10-13 所示。

表 10-20 几何形状简单的光源的配光、  
发光强度、照度、光通量

光源		圆柱	圆盘
性质			
光源轴的取向			
垂直配光曲线			
发光强度 /cd	$I_\theta$	$I_{90}\sin\theta$	$I_0\cos\theta$
	$I_{90}$	$2rhL$	0
	$I_0$	0	$SL$
	平均球面光强	$\pi I_{90}/4$	$I_0/4$
水平面照度 $E_r$ (lx)	下半球面光强	$\pi I_{90}/4$	$I_0/2$
	上半球面光强	$\pi I_{90}/4$	0
		0	$SL/l^2$
光通量 /lm	全光通	$\pi^2 I_{90}$	$\pi I_0$
	下半球光通	$\pi^2 I_{90}/2$	$\pi I_0$
	上半球光通	$\pi^2 I_{90}/2$	0

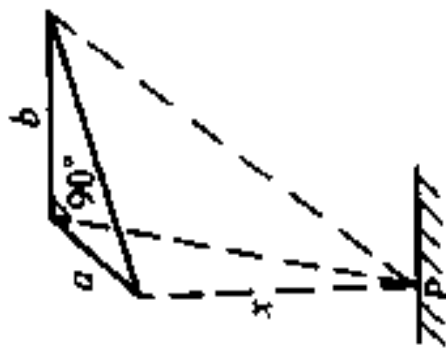
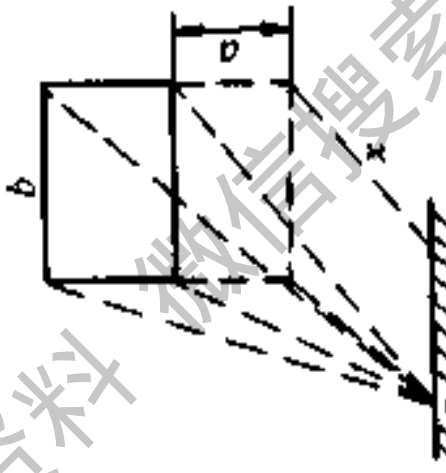



(续)

性质		光源	
		球	半球
光源轴的取向		半径 $R$ 	半径 $R$ 
垂直配光曲线			
发光强度 /cd	$I_\theta$	$I_{90} = I_0$	$I_{90} (1 + \cos\theta)$
	$I_{90}$	$\pi R^2 L$	$\pi R^2 L / 2$
	$I_0$	$\pi R^2 L$	$\pi R^2 L$
	平均球面光强	$I_{90} = I_0$	$I_{90}$
/cd	下半球面光强	$I_{90} = I_0$	$3I_0 / 4$
	上半球面光强	$I_{90} = I_0$	$I_0 / 4$
	水平面照度 $E_s$ (lx)	$I_0 / h^2$	$I_0 / h^2$
光通量 /lm	全光通	$4\pi I_0$	$2\pi I_0$
	下半球光通	$2\pi I_0$	$3\pi I_0 / 2$
	上半球光通	$2\pi I_0$	$\pi I_0 / 2$

注： $L$ —每单位长度或每单位面积的亮度 (nt)； $l$ —圆盘边缘至圆盘轴线与被照面交点之间的距离 (m)； $h$ —球中心至球轴线与被照面交点之间的距离 (m)。

表 10-21 几种面光源的水平面照度

光源	与被照面平行的 直角三角形光源	与被照面成直角的 无限远的方形光源	与被照面下端的 高度相同的方形光源
图			
水平面 照度 $E_s/lx$	$\frac{La}{2\sqrt{x^2+a^2}} \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{x^2+a^2}}$	$\frac{Lx}{2\sqrt{x^2+a^2}} \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{x^2+a^2}}$	$\frac{L}{2} (\beta - \beta_1 \cos \gamma)$

注:  $L$ —亮度(nt)。

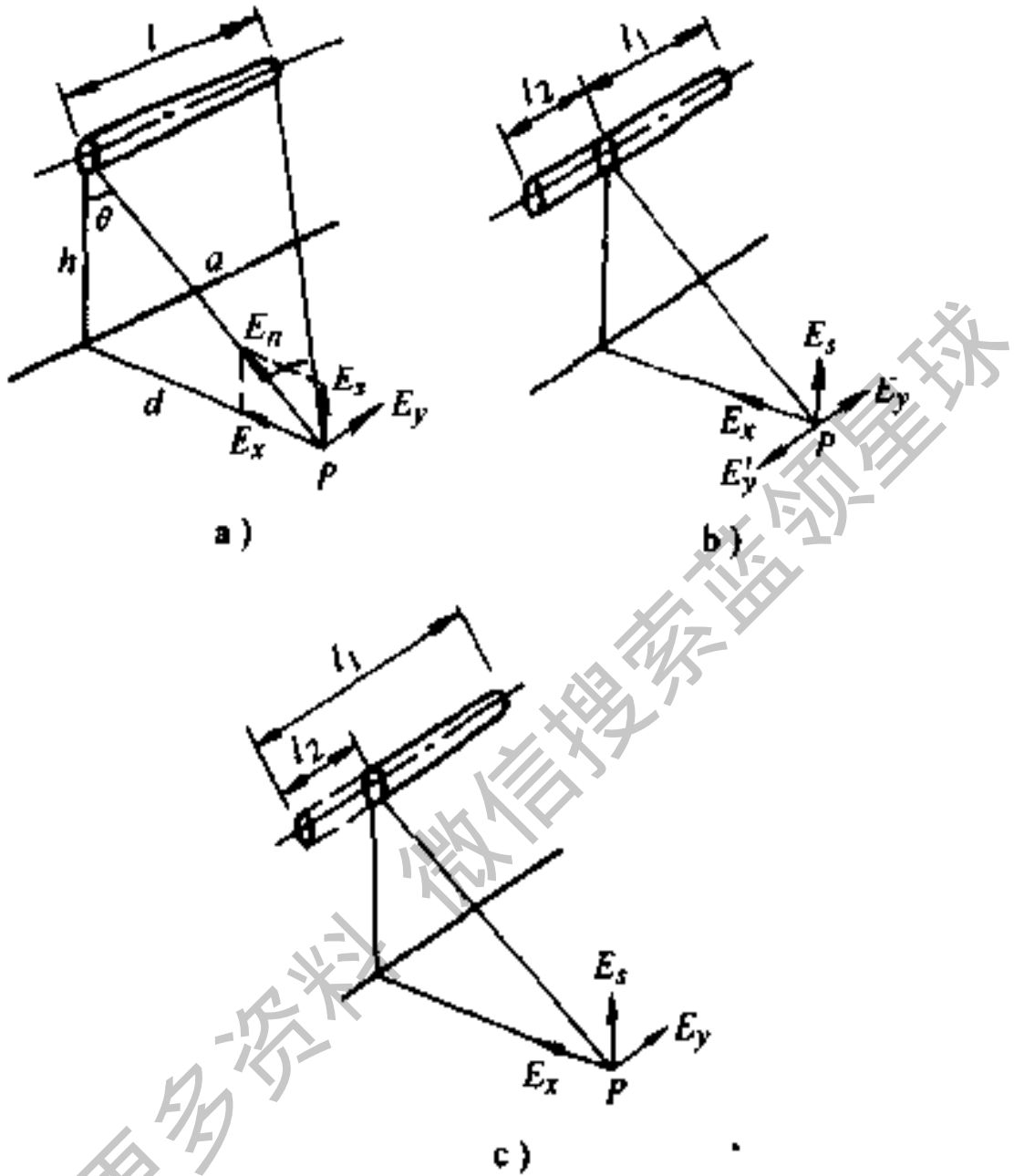


图 10-13 圆柱形光源

a) 圆柱形光源直射照度 b)  $P$  点在包含光源端的平面上 c)  $P$  点不在包含光源端的平面上

(1) 图 10-13a, 其照度计算公式如下:

$$E_n = \frac{1}{2a} (a + \sin\alpha \cdot \cos\alpha)$$

$$E_n = E_n \cos \theta = K \frac{hI}{a^2}$$

$$E_r = E_n \sin \theta = K \frac{dI}{a^2}$$

$$E_y = \frac{I}{2a} \sin^2 \alpha = K' \frac{I}{a}$$

式中  $E_n$ ——与光源轴线垂直的平面内被照点  $P$  的法线照度 (lx);

$E_r$ —— $P$  点的水平照度 (lx);

$E_y$ —— $P$  点的垂直照度 (lx);

$I$ ——单位长度光强 (cd/m);

$K$ 、 $K'$ ——系数, 可由图 10-14 查取;

其它符号见图 10-14。

(2) 图 10-13b, 其照度计算公式如下:

$$E_n = E_{n1} + E_{n2}$$

$$E_r = E_{r1} + E_{r2}$$

$$E_y = E_{y1}, \quad E'_y = E_{y2}$$

(3) 图 10-13c, 其照度计算公式如下:

$$E_n = E_{n1} - E_{n2}$$

$$E_r = E_{r1} - E_{r2}$$

$$E_y = E_{y1} - E_{y2}$$

## 6. 带状光源照度的计算

当光源的宽度  $b$  与长度  $l$  相比很小时, 即可认为是带状光源, 如图 10-15 所示。

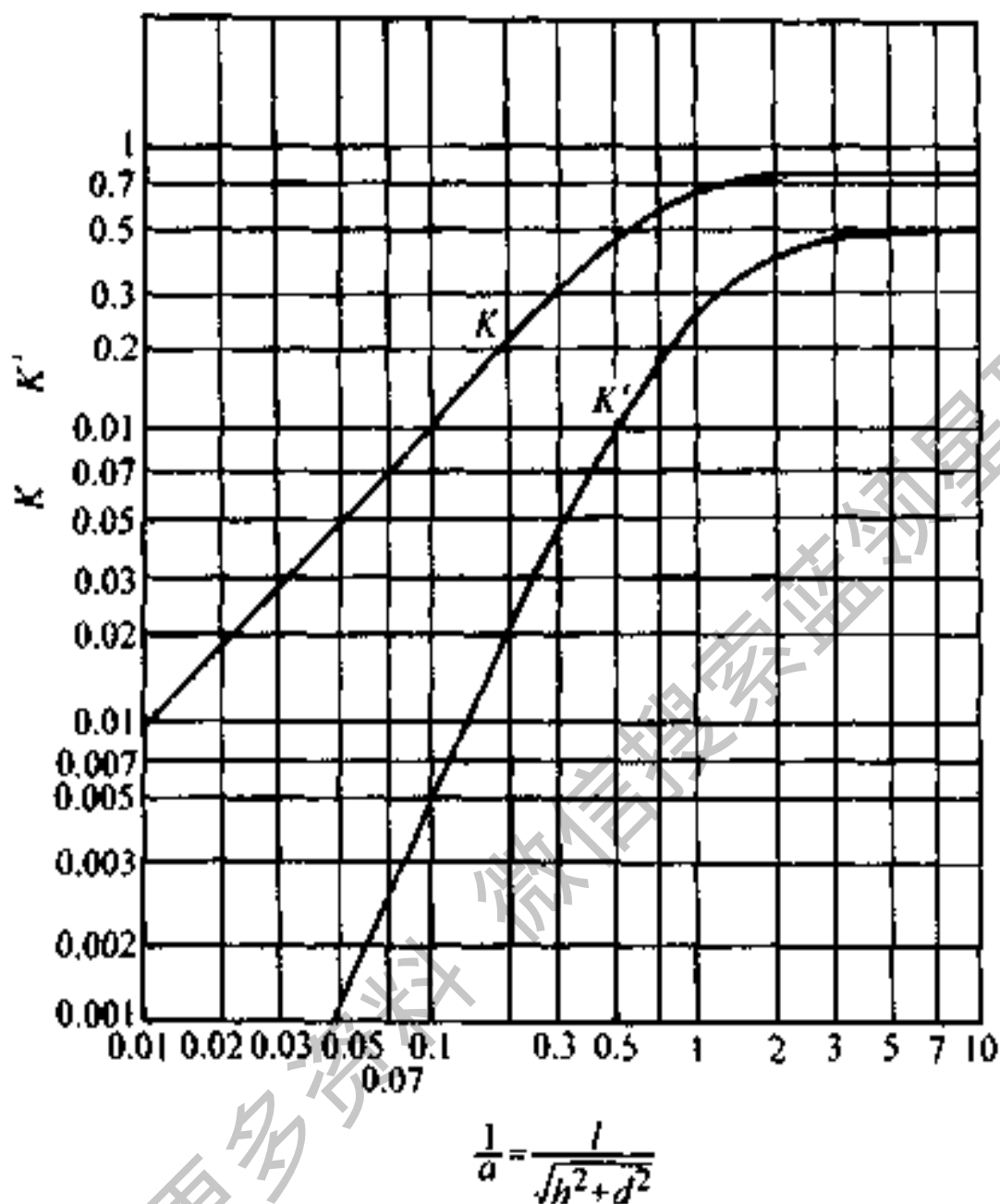


图 10-14 计算直线光源的照度用图  
带状光源的照度计算公式如下：

$$E_n = K \frac{hl}{a^2} \quad E_y = K' \frac{hl}{a^2}$$

$$E_r = E_n \cos \theta \quad E_x = E_n \sin \theta$$

式中符号同前。

其中， $K$ 、 $K'$ 可由图 10-14 曲线中查取。

### 7. 圆盘光源照度

的计算

图 10-16 为一圆盘光源，其照度公式如下：

(1) 光源中心下垂线上  $P$  点的照度：

$$E_p = \frac{\pi r^2 L}{h^2 + r^2}$$

(2) 至光源中心下垂线的距离为  $d$  的  $Q$  点的照度：

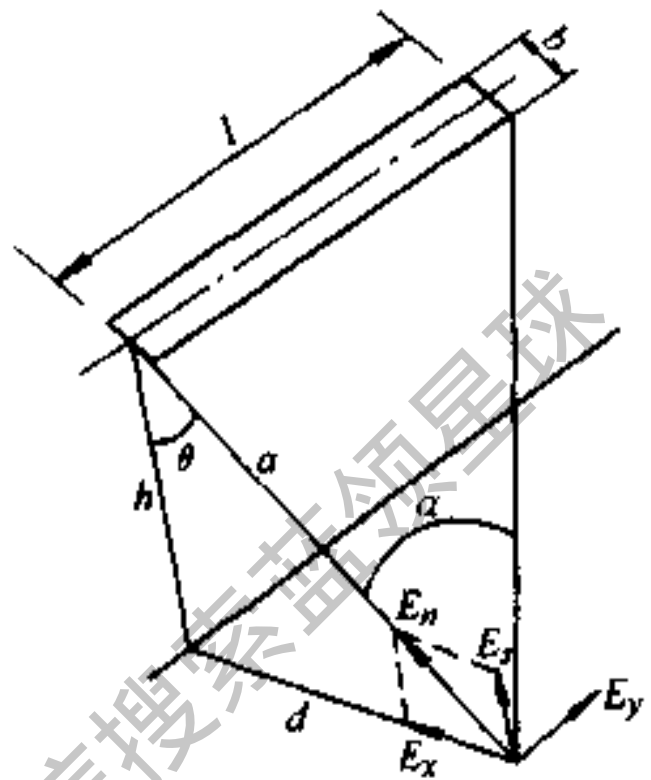


图 10-15 带状光源

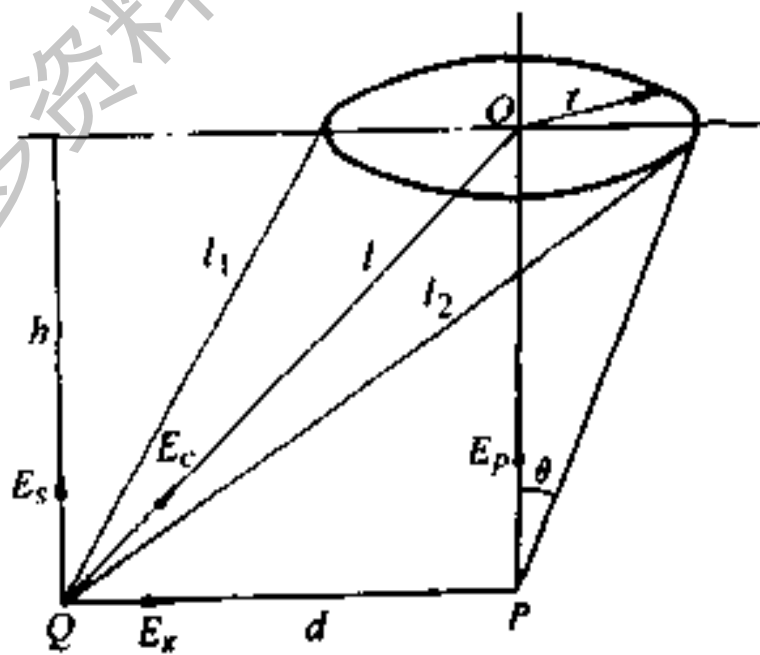


图 10-16 圆盘光源

$$E_s = \pi L \cdot \frac{4r^2 - (l_1 - l_2)^2}{4l_1 l_2}$$

$$E_s = \frac{\pi h L}{d} \cdot \frac{(l_1 - l_2)^2}{4l_1 l_2}$$

$$E_0 = \frac{\pi r^2 L}{l_1 l_2} \cdot \frac{h}{l}$$

式中  $L$ ——每单位面积的亮度 ( $\text{cd}/\text{m}^2$ );

$r$ ——圆盘的半径 ( $\text{m}$ );

其他符号同前, 有的符号参见图 10-16。

## 二、逐点法计算照度

该方法主要用于直射型灯具照明, 而且反射光对照度影响较小的场所。

### 1. 点光源逐点计算法

方法一:

光源光通量为  $1000\text{lm}$  的灯具, 每个灯具在计算点产生的水平照度直射分量为  $e_s$ 。当灯具型式、布置及光源每个灯具的光通量为已知时,  $n$  个灯具在任意指定点上产生的总照度  $E_s$  可由下式计算

$$E_s = \frac{\Phi}{1000k} \sum_{i=1}^n e_{s_i}$$

式中  $E_s$ ——任意点上的总水平照度 ( $\text{lx}$ );

$\Phi$ ——每个灯具的实际光通量 ( $\text{lm}$ );

$k$ ——照度补偿系数, 可由表 10-22 查取;

$e_{s_i}$ ——一个光通量为  $1000\text{lm}$  的灯具在被照点产

表 10-22 照度补偿系数  $k$  值

分类	环境污染特征	举 例	照明补偿系数 $k$		灯具擦洗次数 (次/月)
			白炽灯、荧光灯、荧光灯、高压汞灯	卤钨灯	
I	有微量尘埃 (清洁)	仪器仪表的装配车间, 电子元件的装配车间, 实验室, 办公室等	1.3	1.2	1
II	有少量尘埃 (一般)	机械加工、装配车间, 发动机车间, 焊接车间等	1.4	1.3	1
III	有较多尘埃 (污染严重)	锻工、铸工车间等	1.5	1.4	2
IV	室外	道路、堆场等	1.4	1.3	1



生的水平照度直射分量 (lx)，也称假设照度，它可以由下式取得，也可以从空间等照度曲线中查得。

$$e_r = \frac{I_\theta \cos \theta}{l^2} = \frac{I_\theta \cos^3 \theta}{h^2}$$

$I_\theta$ ——灯具垂直面光强分布曲线中与  $\theta$  角对应方向的光强值 (cd)，其值可以从灯具设计计算图表中查得；

$l$ ——光源与受照面上某点的距离 (m)；

$h$ ——光源与受照水平面的垂直距离 (m)。

由于空间等照度曲线是以假设光源的光通量为 1000lm 制作的，所以公式中要除以 1000。

方法二：

$$E_r = \frac{I_\theta \phi}{100 \times 1000k} \sum_{i=1}^n e_i$$

式中  $E_r$ ——任意点上的总水平照度 (lx)；

$I_\theta$ ——当光源的光通量为 1000lm 时， $\theta$  方向的光强值 (cd)，可由“照明技术参数表”中查得。其中  $\theta$  角可根据灯具离计算点的水平距离  $d$  和计算高度  $h$ ，由表 10-23 查得；

$e_i$ ——光强为 100cd 时的假设照度 (lx)，可由表 10-23 中查得；

其他符号同前。

表 10-23 光源至计算点的投射角  $\theta$  及 100cd 光源  
对水平面上不同计算点的假设照度  $e_r$

$d/m$ $h/m$	0	1	2	3	4	5	6
lx/100cd							
2	0°0'	27°	45°	56°	63°	68°	71°
	25.00	17.85	8.850	4.275	2.245	1.298	0.802
3	0°0'	18°	34°	45°	53°	59°	63°
	11.11	9.500	6.400	3.933	2.400	1.522	1.000
4	0°0'	14°	27°	37°	45°	51°	56°
	6.250	5.707	4.472	3.200	2.210	1.524	1.006
5	0°0'	11°	22°	31°	39°	45°	50°
	4.000	3.771	3.202	2.522	1.904	1.414	1.050
6	0°0'	9°	18°	27°	34°	40°	45°
	2.778	2.673	2.372	1.987	1.600	1.260	0.982
7	0°0'	8°	16°	23°	30°	36°	41°
	2.041	1.980	1.814	1.585	1.336	1.100	0.893
8	0°0'	7°	14°	21°	27°	32°	37°
	1.563	1.527	1.427	1.283	1.118	0.958	0.800
9	0°0'	6°	13°	18°	24°	29°	34°
	1.235	1.212	1.148	1.054	0.943	0.825	0.711
10	0°0'	5°43'	11°	17°	22°	27°	31°
	1.000	0.985	0.943	0.879	0.801	0.716	0.631

(续)

$d/m$ $h/m$	0	1	2	3	4	5	6
lx/100cd							
12	0°0' 0.694	4°46' 0.687	9° 0.668	14° 0.634	18° 0.593	23° 0.546	27° 0.497
14	0°0' 0.510	4°5' 0.506	8° 0.495	12° 0.477	16° 0.454	20° 0.426	23° 0.396
16	0°0' 0.391	3°35' 0.388	7° 0.382	11° 0.371	14° 0.357	17° 0.339	21° 0.321
18	0°0' 0.309	3°11' 0.307	6° 0.303	9° 0.297	13° 0.287	16° 0.276	18° 0.264
20	0°0' 0.250	2°51' 0.249	5°43' 0.246	9° 0.242	11° 0.236	14° 0.228	17° 0.219
24	0°0' 0.174	2°23' 0.173	4°45' 0.172	7° 0.170	10° 0.166	12° 0.163	14° 0.158
27	0°0' 0.137	2°7' 0.137	4°14' 0.136	6° 0.135	8° 0.133	10° 0.130	12° 0.128
30	0°0' 0.111	1°54' 0.111	3°50' 0.111	5°43' 0.109	8° 0.108	9° 0.107	11° 0.105
36	0°0' 0.077	1°36' 0.077	3°11' 0.077	4°46' 0.076	6° 0.076	8° 0.075	9° 0.074
40	0°0' 0.063	1°26' 0.062	2°52' 0.062	4°17' 0.062	5°43' 0.062	7° 0.061	9° 0.060

(续)

$d/m$ $h/m$	7	8	9	10	11	12
lx/100cd						
2	74° 0.528	76° 0.355	78° 0.255	79° 0.190	80° 0.142	81° 0.113
3	67° 0.680	69° 0.477	72° 0.356	73° 0.264	75° 0.205	76° 0.161
4	60° 0.764	63° 0.559	66° 0.419	68° 0.320	70° 0.249	72° 0.198
5	54° 0.785	58° 0.595	61° 0.458	63° 0.358	66° 0.283	67° 0.228
6	49° 0.766	53° 0.600	56° 0.474	59° 0.378	61° 0.305	63° 0.249
7	45° 0.722	49° 0.583	52° 0.473	55° 0.385	58° 0.316	60° 0.261
8	41° 0.672	45° 0.552	48° 0.458	51° 0.381	54° 0.318	56° 0.267
9	38° 0.697	42° 0.515	45° 0.437	48° 0.370	51° 0.314	53° 0.267
10	35° 0.550	39° 0.476	42° 0.411	45° 0.354	48° 0.305	50° 0.263

(续)

$d/m$ $h/m$	7	8	9	10	11	12
$lx/100cd$						
12	30° 0.451	34° 0.400	37° 0.356	40° 0.315	43° 0.278	45° 0.246
14	27° 0.365	30° 0.334	33° 0.304	36° 0.275	38° 0.248	41° 0.223
16	24° 0.300	27° 0.280	29° 0.259	32° 0.238	35° 0.219	37° 0.200
18	21° 0.250	24° 0.236	27° 0.221	29° 0.206	31° 0.192	34° 0.178
20	19° 0.210	22° 0.200	24° 0.190	27° 0.179	29° 0.168	31° 0.158
24	16° 0.154	18° 0.148	21° 0.143	23° 0.137	25° 0.130	27° 0.124
27	15° 0.124	17° 0.121	18° 0.117	20° 0.113	22° 0.109	24° 0.105
30	13° 0.103	15° 0.100	17° 0.098	18° 0.095	20° 0.092	22° 0.089
36	11° 0.073	13° 0.072	14° 0.070	16° 0.069	17° 0.067	18° 0.066
40	10° 0.060	11° 0.059	13° 0.058	14° 0.057	15° 0.056	17° 0.055

(续)

$d/m$ $h/m$	13	14	15	16	18	20
$lx/100cd$						
2	81° 0.090	82° 0.070	82° 0.058	83° 0.048	84° 0.038	84° 0.025
3	77° 0.126	78° 0.100	79° 0.084	80° 0.070	81° 0.050	81° 0.036
4	73° 0.159	74° 0.130	75° 0.107	76° 0.090	78° 0.064	79° 0.047
5	69° 0.185	70° 0.152	72° 0.126	73° 0.106	74° 0.077	76° 0.057
6	66° 0.205	67° 0.170	68° 0.142	69° 0.120	71° 0.088	73° 0.066
7	62° 0.218	63° 0.183	65° 0.154	66° 0.131	69° 0.097	71° 0.074
8	58° 0.225	60° 0.191	62° 0.163	63° 0.140	66° 0.105	68° 0.080
9	55° 0.228	57° 0.196	59° 0.168	61° 0.146	63° 0.110	66° 0.085
10	52° 0.227	54° 0.196	56° 0.171	58° 0.149	61° 0.115	63° 0.089

(续)

$d/m$ $h/m$	13	14	15	16	18	20
$lx/100cd$						
12	47° 0.217	49° 0.191	51° 0.169	53° 0.150	56° 0.119	59° 0.094
14	43° 0.201	45° 0.180	47° 0.162	49° 0.146	52° 0.118	55° 0.096
16	39° 0.183	41° 0.167	43° 0.152	45° 0.138	48° 0.115	51° 0.095
18	36° 0.165	38° 0.152	40° 0.140	42° 0.129	45° 0.109	48° 0.092
20	33° 0.147	35° 0.137	37° 0.128	39° 0.119	42° 0.103	45° 0.088
24	28° 0.118	30° 0.112	32° 0.106	34° 0.100	37° 0.089	40° 0.079
27	26° 0.100	27° 0.096	29° 0.092	31° 0.087	34° 0.079	37° 0.071
30	23° 0.086	25° 0.083	27° 0.080	28° 0.077	31° 0.070	34° 0.064
36	20° 0.064	21° 0.062	23° 0.061	24° 0.059	27° 0.055	29° 0.052
40	18° 0.054	19° 0.053	21° 0.051	22° 0.050	24° 0.047	27° 0.045

(续)

$d/m$ $h/m$	22	24	26	28	30	40
$lx/100cd$						
2	85° 0.020	85° 0.015	86° 0.013	86° 0.008	86° 0.007	87° 0.000
3	82° 0.027	83° 0.021	83° 0.016	84° 0.012	84° 0.011	86° 0.004
4	80° 0.037	81° 0.028	81° 0.022	82° 0.018	82° 0.015	84° 0.006
5	77° 0.044	78° 0.034	79° 0.027	80° 0.022	81° 0.017	83° 0.008
6	75° 0.051	76° 0.040	77° 0.032	78° 0.026	77° 0.024	81° 0.009
7	72° 0.057	74° 0.045	76° 0.036	76° 0.029	77° 0.024	80° 0.010
8	70° 0.063	72° 0.050	73° 0.040	74° 0.032	75° 0.026	79° 0.012
9	68° 0.067	69° 0.053	71° 0.043	72° 0.035	73° 0.029	77° 0.013
10	66° 0.071	67° 0.057	69° 0.046	70° 0.038	72° 0.036	76° 0.017



(续)

$d/m$ $h/m$	22	24	26	28	30	40
$lx/100cd$						
12	61° 0.076	63° 0.062	65° 0.051	67° 0.043	68° 0.036	73° 0.017
14	58° 0.079	60° 0.065	62° 0.054	63° 0.046	65° 0.039	71° 0.018
16	54° 0.080	56° 0.067	58° 0.056	60° 0.048	62° 0.041	68° 0.020
18	51° 0.079	53° 0.067	55° 0.057	57° 0.049	59° 0.042	66° 0.021
20	48° 0.076	50° 0.066	52° 0.057	54° 0.049	56° 0.043	63° 0.022
24	43° 0.070	45° 0.061	47° 0.054	49° 0.048	51° 0.042	59° 0.024
27	39° 0.064	42° 0.057	44° 0.051	46° 0.046	48° 0.041	56° 0.024
30	36° 0.058	39° 0.053	41° 0.048	43° 0.043	45° 0.039	53° 0.024
36	31° 0.048	34° 0.044	36° 0.041	38° 0.038	40° 0.035	48° 0.023
40	29° 0.042	31° 0.039	33° 0.037	35° 0.034	37° 0.032	45° 0.022

## 2. 线光源逐点计算法

线光源主要指荧光灯。线光源逐点计算法,只适用于在一条线上灯具间距离较小的情况,否则计算误差较大。线光源水平照度计算公式如下。

$$E_x = \frac{\Phi}{1000kLh} \sum e_x$$

式中  $E_x$ ——任意点上的总水平照度 (lx);

$\Phi$ ——一条线光源的光源总光通量 (lm);

$k$ ——照度补偿系数,可由表 10-22 查取;

$L$ ——一条线光源的总长度 (m);

$h$ ——计算高度 (m);

$e_x$ ——单位长度光源光通量为 1000lm 的一条线光源在被照点产生的水平照度,它可以从空间等照度曲线 (图 10-7) 中查得。

**例 10-1** 带有漫反射开启型直射灯具的 40W 荧光灯照明布置,如图 10-17 所示,求 A 点的水平照度。

**解** 由表 10-19 查得,40W 荧光灯的光通量为 2200lm,灯管长为 1.2m。

$$\Phi = n\Phi_1 = 4 \times 2200\text{lm} = 8800\text{lm}$$

$$p' = d/h = 1.5/3 = 0.5$$

$$L' = L/h = 9.3/3 = 3.1$$

$$[L = 4 \times 1.2 + 3 \times 1.5 = 9.3 \text{ (m)}]$$

由图 10-7 曲线查得  $e_x = 118\text{lx}$

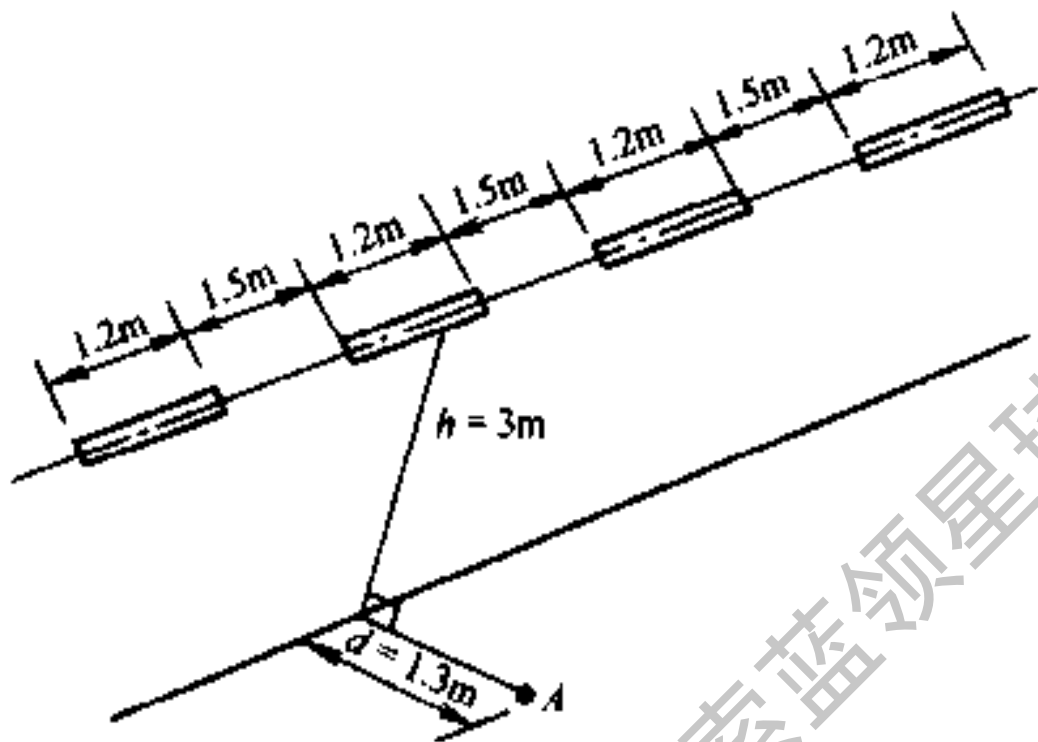


图 10-17 荧光灯布置图

因此 A 点的水平照度为

$$\begin{aligned}
 E_x &= \frac{\phi}{1000kLh} \sum e_i \\
 &= \frac{8800 \times 118}{1000 \times 1.3 \times 9.3 \times 3} \text{lx} \\
 &= 28.6 \text{lx}
 \end{aligned}$$

(取  $k=1.3$ )

### 三、利用系数法计算照度

该方法特别适用于非直射型灯具的室内反光性能较好的场合。

#### 1. 平均照度的计算

$$E_{pj} = \frac{\phi n \mu}{Ak}$$

式中  $E_p$ ——工作面上的平均照度 (lx);  
 $\phi$ ——每个光源的光通量 (lm);  
 $n$ ——由布灯方案得出的灯具数量 (个);  
 $A$ ——房间面积 ( $m^2$ );  
 $k$ ——照度补偿系数, 可由表 10-22 查得;  
 $\mu$ ——利用系数, 可根据房间的室空比 (又称空腔系数)、表面反射率和灯具型式等, 用下面的介绍的方法, 便可从有关灯具手册的利用系数表中查得, 见表 10-24。

若照度标准为最低值时, 必须将平均照度值  $E_p$  换算成最低照度值  $E$ 。换算公式如下:

$$E = E_p / Z$$

式中  $E$ ——工作面上的最低照度值;  
 $Z$ ——最小照度系数, 可查阅有关照明手册和图表。这里列举部分灯具的最小照度系数。见表 10-25。

## 2. 利用系数 $\mu$ 的确定

(1) 房间结构及其表示系数: 利用系数  $\mu$  是表示室内工作面上, 由灯具的照射和墙、顶棚的反射而得到的光通量与光源发出的光通量之比。

可将房间分成三个空间, 如图 10-18 所示。

三个空间形状大小分别由三个系数来表示:

表 10-24 部分灯具的利用系数表

	70			50			30			0											
	70	50	30	10	70	50	30	10	50		30	10	50	30	10						
$\rho_{rr}(\%)$																					
$\rho_w(\%)$																					
室空比 RCR																					
	配照型灯 GCI- $\frac{A}{B}$ -1, $\eta=85\%$ , B150W, 2090lm																				
1	0.89	0.85	0.82	0.78	0.85	0.82	0.79	0.76	0.81	0.78	0.76	0.74	0.70	0.74	0.70	0.74	0.70	0.74	0.70	0.70	
2	0.80	0.73	0.68	0.63	0.76	0.70	0.66	0.61	0.72	0.68	0.61	0.60	0.57	0.60	0.57	0.60	0.57	0.60	0.57	0.57	
3	0.73	0.64	0.57	0.51	0.68	0.61	0.55	0.50	0.65	0.59	0.50	0.49	0.46	0.49	0.46	0.49	0.46	0.49	0.46	0.46	
4	0.66	0.56	0.49	0.43	0.63	0.54	0.48	0.43	0.59	0.52	0.43	0.42	0.39	0.42	0.39	0.42	0.39	0.42	0.39	0.39	
5	0.60	0.50	0.42	0.36	0.57	0.48	0.41	0.36	0.54	0.46	0.36	0.35	0.33	0.35	0.33	0.35	0.33	0.35	0.33	0.33	
6	0.55	0.44	0.36	0.31	0.52	0.43	0.36	0.31	0.49	0.41	0.31	0.30	0.28	0.30	0.28	0.30	0.28	0.30	0.28	0.28	
7	0.51	0.39	0.32	0.26	0.48	0.38	0.31	0.26	0.45	0.37	0.26	0.26	0.24	0.26	0.24	0.26	0.24	0.26	0.24	0.24	
8	0.47	0.35	0.28	0.23	0.44	0.34	0.28	0.23	0.42	0.33	0.23	0.23	0.21	0.23	0.21	0.23	0.21	0.23	0.21	0.21	
9	0.43	0.32	0.25	0.20	0.41	0.31	0.24	0.20	0.39	0.30	0.20	0.20	0.18	0.20	0.18	0.20	0.18	0.20	0.18	0.18	
10	0.40	0.29	0.22	0.17	0.38	0.28	0.22	0.17	0.36	0.27	0.17	0.17	0.16	0.17	0.16	0.17	0.16	0.17	0.16	0.16	

(续)

	70			50			30			0			
	70	50	30	70	50	30	70	50	30				
$\rho_{ec}$ (%)													
$\rho_w$ (%)	70	50	30	70	50	30	70	50	30	0			
室空比 RCR	广照型灯 GC3- $\frac{A}{B}$ -2, $\eta=76\%$ , G125W, 4750lm												
1	0.75	0.70	0.66	0.62	0.69	0.65	0.62	0.59	0.64	0.61	0.58	0.56	0.51
2	0.66	0.59	0.53	0.48	0.61	0.55	0.50	0.46	0.56	0.52	0.47	0.44	0.40
3	0.60	0.51	0.44	0.39	0.55	0.48	0.42	0.37	0.50	0.45	0.40	0.35	0.32
4	0.55	0.45	0.38	0.32	0.50	0.42	0.36	0.31	0.46	0.39	0.34	0.30	0.27
5	0.50	0.40	0.33	0.27	0.46	0.37	0.31	0.26	0.42	0.35	0.30	0.25	0.22
6	0.46	0.35	0.28	0.23	0.42	0.33	0.27	0.22	0.39	0.31	0.26	0.22	0.19
7	0.42	0.31	0.25	0.20	0.39	0.30	0.23	0.19	0.36	0.28	0.22	0.18	0.16
8	0.39	0.28	0.22	0.17	0.36	0.27	0.21	0.17	0.32	0.25	0.20	0.16	0.14
9	0.36	0.26	0.19	0.15	0.33	0.24	0.19	0.15	0.31	0.23	0.18	0.14	0.12
10	0.34	0.23	0.17	0.13	0.31	0.22	0.17	0.13	0.29	0.21	0.16	0.12	0.11

(续)

$\rho_{er}(\%)$	70			50			30			0			
	70	50	30	10	70	50	30	10	70		50	30	10
$\rho_{ob}(\%)$	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0
室空比 RCR	深照型灯 GC5-A-4, $\eta=67\%$ , 330W, 4610lm 500W, 8300lm												
1	0.71	0.69	0.66	0.64	0.68	0.66	0.64	0.62	0.65	0.63	0.61	0.60	0.57
2	0.65	0.60	0.56	0.52	0.62	0.58	0.54	0.51	0.59	0.55	0.52	0.50	0.41
3	0.59	0.52	0.47	0.43	0.56	0.50	0.46	0.42	0.53	0.48	0.45	0.41	0.39
4	0.54	0.46	0.40	0.36	0.51	0.44	0.39	0.36	0.48	0.43	0.39	0.35	0.33
5	0.49	0.40	0.35	0.30	0.46	0.39	0.34	0.30	0.44	0.38	0.33	0.30	0.28
6	0.44	0.36	0.30	0.26	0.42	0.34	0.29	0.25	0.40	0.33	0.29	0.25	0.23
7	0.41	0.32	0.26	0.22	0.38	0.31	0.25	0.21	0.36	0.30	0.25	0.21	0.20
8	0.37	0.28	0.23	0.19	0.35	0.28	0.22	0.19	0.34	0.27	0.22	0.18	0.17
9	0.35	0.26	0.20	0.16	0.33	0.25	0.20	0.16	0.31	0.24	0.19	0.16	0.15
10	0.32	0.23	0.18	0.14	0.30	0.22	0.17	0.14	0.29	0.22	0.17	0.14	0.13

(续)

$\rho_{rc}$ (%)	70			50			30			0			
	70	50	30	70	50	30	70	50	30				
$\rho_w$ (%)	70	50	30	70	50	30	70	50	30	10	0		
室空比	3×4W												
RCR	吸顶式荧光灯 YG6-3, $\eta=86\%$ , 3×2400lm												
1	0.82	0.77	0.73	0.69	0.73	0.70	0.66	0.63	0.65	0.63	0.60	0.58	0.49
2	0.74	0.67	0.61	0.56	0.66	0.60	0.55	0.51	0.58	0.54	0.50	0.47	0.40
3	0.67	0.58	0.52	0.46	0.60	0.53	0.47	0.43	0.53	0.48	0.43	0.39	0.33
4	0.61	0.51	0.44	0.39	0.54	0.46	0.40	0.36	0.48	0.42	0.37	0.33	0.28
5	0.56	0.46	0.38	0.33	0.50	0.41	0.35	0.30	0.44	0.37	0.32	0.28	0.24
6	0.52	0.41	0.34	0.28	0.46	0.37	0.31	0.26	0.41	0.34	0.29	0.25	0.21
7	0.48	0.37	0.30	0.25	0.42	0.33	0.27	0.23	0.38	0.30	0.25	0.21	0.18
8	0.44	0.33	0.26	0.21	0.39	0.30	0.24	0.20	0.35	0.28	0.22	0.19	0.15
9	0.41	0.30	0.23	0.19	0.36	0.28	0.22	0.18	0.33	0.25	0.20	0.16	0.13
10	0.37	0.27	0.20	0.16	0.33	0.24	0.19	0.15	0.30	0.22	0.17	0.14	0.11



(续)

$P_{ec}$ (%)	70				50				30				0
	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	
$P_{w}$ (%)	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0
室空比 RCR	平面型吸顶灯 JXD5-2.7=57%, 100W, 1250lm 60W, 630lm												
1	0.52	0.49	0.47	0.44	0.45	0.42	0.41	0.39	0.38	0.36	0.35	0.34	0.36
2	0.47	0.42	0.39	0.36	0.40	0.37	0.34	0.31	0.34	0.31	0.29	0.27	0.21
3	0.42	0.37	0.33	0.29	0.36	0.32	0.29	0.26	0.31	0.28	0.25	0.23	0.17
4	0.39	0.32	0.28	0.24	0.33	0.28	0.25	0.22	0.28	0.24	0.21	0.19	0.14
5	0.35	0.29	0.24	0.21	0.30	0.25	0.21	0.18	0.25	0.22	0.19	0.16	0.12
6	0.32	0.26	0.21	0.18	0.28	0.22	0.19	0.16	0.24	0.19	0.16	0.14	0.11
7	0.30	0.23	0.18	0.15	0.26	0.20	0.16	0.14	0.22	0.17	0.14	0.12	0.09
8	0.28	0.21	0.16	0.13	0.24	0.18	0.14	0.12	0.20	0.16	0.13	0.10	0.08
9	0.26	0.19	0.14	0.12	0.22	0.16	0.13	0.10	0.19	0.14	0.11	0.09	0.07
10	0.23	0.17	0.13	0.10	0.20	0.15	0.11	0.09	0.17	0.13	0.10	0.08	0.05

(续)

室空比 RCR	筒式双层卤钨灯 DD6-500、 $\eta=70\%$ 、 500W、9750lm												
	70				50				30				0
	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0
1	0.77	0.75	0.73	0.71	0.74	0.72	0.70	0.69	0.70	0.69	0.68	0.66	0.63
2	0.72	0.68	0.65	0.62	0.69	0.66	0.63	0.61	0.66	0.64	0.61	0.59	0.57
3	0.67	0.62	0.58	0.55	0.64	0.60	0.57	0.54	0.62	0.58	0.56	0.53	0.51
4	0.63	0.57	0.53	0.49	0.60	0.55	0.51	0.48	0.58	0.54	0.51	0.48	0.46
5	0.59	0.52	0.47	0.44	0.56	0.51	0.47	0.43	0.54	0.49	0.46	0.43	0.41
6	0.55	0.48	0.43	0.39	0.53	0.46	0.42	0.39	0.51	0.45	0.42	0.39	0.37
7	0.51	0.43	0.38	0.35	0.49	0.42	0.38	0.35	0.47	0.41	0.37	0.34	0.33
8	0.48	0.40	0.35	0.31	0.46	0.39	0.34	0.31	0.44	0.38	0.34	0.31	0.30
9	0.44	0.36	0.31	0.28	0.43	0.36	0.31	0.28	0.41	0.35	0.31	0.28	0.27
10	0.41	0.33	0.29	0.25	0.40	0.33	0.28	0.25	0.38	0.32	0.28	0.25	0.24

(续)

$\rho_{cc}(\%)$	70			50			30			0		
	70	50	30	70	50	30	70	50	30			
$\rho_{wp}(\%)$	70	50	30	70	50	30	70	50	30	10	0	
室空比 RCR	筒式荧光灯 YG1-1, $\eta=81\%$ , $1 \times 40W$ , $2400lm$											
1	0.75	0.71	0.67	0.63	0.67	0.63	0.60	0.57	0.59	0.54	0.52	0.43
2	0.68	0.61	0.55	0.50	0.60	0.54	0.50	0.46	0.53	0.45	0.41	0.34
3	0.61	0.53	0.46	0.41	0.54	0.47	0.42	0.38	0.47	0.38	0.34	0.28
4	0.56	0.46	0.39	0.34	0.49	0.41	0.36	0.31	0.43	0.32	0.28	0.23
5	0.51	0.41	0.34	0.29	0.45	0.37	0.31	0.26	0.39	0.28	0.24	0.20
6	0.47	0.37	0.30	0.25	0.41	0.33	0.27	0.23	0.36	0.25	0.21	0.17
7	0.43	0.33	0.26	0.21	0.38	0.30	0.24	0.20	0.33	0.22	0.18	0.14
8	0.40	0.29	0.23	0.18	0.35	0.27	0.21	0.17	0.31	0.19	0.16	0.12
9	0.37	0.27	0.20	0.16	0.33	0.24	0.19	0.15	0.29	0.17	0.14	0.11
10	0.34	0.24	0.17	0.13	0.30	0.21	0.16	0.12	0.26	0.15	0.11	0.09



(续)

$\rho_{cc}(\%)$	70			50			30			0				
	70	50	30	70	50	30	70	50	30					
$\rho_w(\%)$	70	50	30	70	50	30	70	50	30	70	50	30	10	0
室空比 RCR														
1	1.04	1.0	0.96	0.93	0.99	0.96	0.93	0.90	0.94	0.92	0.89	0.87	0.83	0.83
2	0.95	0.88	0.83	0.78	0.91	0.85	0.80	0.76	0.86	0.82	0.78	0.74	0.71	0.71
3	0.87	0.79	0.72	0.67	0.83	0.76	0.70	0.65	0.79	0.73	0.68	0.64	0.61	0.61
4	0.80	0.70	0.62	0.57	0.76	0.67	0.61	0.56	0.72	0.65	0.60	0.55	0.52	0.52
5	0.74	0.63	0.55	0.49	0.70	0.60	0.54	0.48	0.67	0.59	0.52	0.48	0.45	0.45
6	0.68	0.56	0.48	0.43	0.65	0.55	0.48	0.43	0.62	0.53	0.47	0.42	0.40	0.40
7	0.63	0.51	0.43	0.37	0.60	0.49	0.42	0.37	0.57	0.48	0.41	0.37	0.34	0.34
8	0.58	0.46	0.38	0.32	0.55	0.44	0.37	0.32	0.53	0.43	0.37	0.32	0.30	0.30
9	0.54	0.42	0.34	0.29	0.51	0.40	0.33	0.29	0.49	0.39	0.33	0.28	0.26	0.26
10	0.49	0.36	0.29	0.24	0.46	0.35	0.28	0.24	0.44	0.34	0.28	0.23	0.22	0.22

筒式荧光灯 YG2-2,  $\eta=97\%$ ,  $2 \times 40W$ ,  $2 \times 2400lm$

(续)

$\rho_w$ (%)	70			50			30			0			
	70	50	30	70	50	30	70	50	30				
$\rho_w$ (%)	70	50	30	70	50	30	70	50	30	10	0		
室空比 RCR	配照型灯 GC1-A <sub>1</sub> -B <sub>1</sub> -7=72%, G125W, 4750lm												
1	0.75	0.72	0.68	0.66	0.71	0.69	0.66	0.63	0.68	0.66	0.64	0.62	0.58
2	0.67	0.62	0.57	0.52	0.64	0.59	0.55	0.51	0.61	0.56	0.53	0.50	0.47
3	0.61	0.53	0.47	0.42	0.57	0.51	0.46	0.42	0.54	0.49	0.44	0.41	0.38
4	0.55	0.47	0.40	0.35	0.52	0.45	0.39	0.35	0.49	0.43	0.38	0.34	0.32
5	0.50	0.41	0.34	0.30	0.47	0.39	0.34	0.29	0.45	0.38	0.33	0.29	0.27
6	0.46	0.36	0.30	0.25	0.43	0.35	0.29	0.25	0.41	0.34	0.28	0.24	0.23
7	0.42	0.32	0.26	0.21	0.39	0.31	0.25	0.21	0.37	0.30	0.25	0.21	0.19
8	0.39	0.29	0.23	0.18	0.37	0.28	0.22	0.18	0.35	0.27	0.22	0.18	0.16
9	0.36	0.26	0.20	0.16	0.34	0.25	0.20	0.16	0.32	0.24	0.19	0.15	0.14
10	0.33	0.24	0.18	0.14	0.31	0.23	0.17	0.14	0.30	0.22	0.17	0.13	0.12

(续)

$\rho_{rr}(\%)$	70			50			30			0			
	70	50	30	10	70	50	30	10	70		50	30	10
$\rho_{rw}(\%)$	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0
室空比 RCR	A-4,7=65%.G400W,20000lm												
1	0.68	0.65	0.62	0.59	0.64	0.62	0.59	0.57	0.61	0.59	0.57	0.56	0.52
2	0.61	0.56	0.51	0.47	0.58	0.53	0.49	0.46	0.55	0.51	0.48	0.45	0.43
3	0.55	0.48	0.43	0.38	0.52	0.46	0.41	0.38	0.49	0.44	0.40	0.37	0.35
4	0.50	0.42	0.36	0.32	0.47	0.40	0.35	0.31	0.44	0.39	0.35	0.31	0.29
5	0.45	0.37	0.31	0.27	0.43	0.35	0.30	0.26	0.40	0.34	0.30	0.26	0.24
6	0.41	0.33	0.27	0.22	0.39	0.31	0.26	0.22	0.37	0.30	0.25	0.22	0.20
7	0.38	0.29	0.23	0.19	0.35	0.28	0.22	0.18	0.33	0.27	0.22	0.18	0.17
8	0.35	0.26	0.20	0.16	0.33	0.25	0.20	0.16	0.31	0.24	0.19	0.16	0.14
9	0.32	0.23	0.18	0.14	0.30	0.22	0.17	0.14	0.28	0.22	0.17	0.14	0.12
10	0.30	0.21	0.15	0.12	0.28	0.20	0.15	0.12	0.26	0.20	0.15	0.12	0.10

(续)

$\rho_{cc}$ (%)	70			50			30			0			
	70	50	30	70	50	30	70	50	30				
$\rho_{wr}$ (%)	70	50	30	70	50	30	70	50	30	10	0		
室空比 RCR	吸顶式荧光灯 YG6-2.7=86%, 2×40W 2×2400lm												
1	0.82	0.78	0.74	0.70	0.73	0.70	0.67	0.64	0.65	0.63	0.60	0.58	0.49
2	0.74	0.67	0.62	0.57	0.66	0.61	0.56	0.52	0.59	0.54	0.51	0.48	0.40
3	0.68	0.59	0.53	0.47	0.60	0.53	0.48	0.44	0.53	0.48	0.44	0.40	0.34
4	0.62	0.52	0.45	0.40	0.55	0.47	0.41	0.37	0.49	0.43	0.38	0.34	0.28
5	0.56	0.46	0.39	0.34	0.50	0.42	0.36	0.31	0.45	0.38	0.33	0.29	0.24
6	0.52	0.42	0.35	0.29	0.46	0.38	0.32	0.27	0.41	0.34	0.29	0.25	0.21
7	0.48	0.37	0.30	0.25	0.43	0.34	0.28	0.24	0.38	0.31	0.26	0.22	0.18
8	0.44	0.34	0.27	0.22	0.40	0.31	0.25	0.21	0.35	0.28	0.23	0.19	0.16
9	0.41	0.31	0.24	0.19	0.37	0.28	0.22	0.18	0.33	0.26	0.21	0.17	0.14
10	0.38	0.27	0.21	0.16	0.34	0.25	0.19	0.15	0.30	0.22	0.18	0.14	0.11

注: B—白炽灯泡; G—荧光高压汞灯泡。



表 10-25 部分灯具的最小照度系数 Z 值

灯具名称	灯具型号	光源种类 及容量 /W	距高比 $L:h$				$L:h/z$ 的 最大允许值	
			0.6	0.8	1.0	1.2		
			Z 值					
配照型灯具	GC1-A-B-1	B150	1.30	1.32	1.33		1.25/1.33	
		G125		1.34	1.33	1.32		1.41/1.29
广照型灯具	GC3-A-B-2	G125	1.28	1.30				0.98/1.32
		B200 150	1.30	1.33				1.02/1.33
深照型灯具	GC5-A-B-3	B300		1.34	1.33	1.30		1.40/1.29
		G250		1.35	1.34	1.32		1.45/1.32
	GC5-A-B-4	B300 500		1.33	1.34	1.32		1.40/1.31
		G400	1.29	1.34	1.35			1.23/1.32

(续)

灯具名称	灯具型号	光源种类 及容量 /W	距高比 $L:h$				$L:h/z$ 的 最大允许值
			0.6	0.8	1.0	1.2	
			Z 值				
筒式荧光灯具	YG1-1	1×40	1.34	1.34	1.31		1.22/1.29
	YG2-1			1.35	1.33	1.28	1.28/1.28
	YG2-2	2×40		1.35	1.33	1.29	1.28/1.29
吸顶荧光灯具	YG6-2	2×40	1.34	1.36	1.33		1.22/1.29
	YG6-3	3×40		1.35	1.32	1.30	1.26/1.33
	YG15-2	2×40	1.34	1.34			
嵌入式荧光灯具	YG15-3	3×40	1.37	1.33			1.05/1.30
	房间较矮	灯排数 ≤ 3	1.15~1.20				
反射条件较好	灯排数 > 3		1.10				
其它白炽灯(B)的灯布置合理时			1.10~1.20				

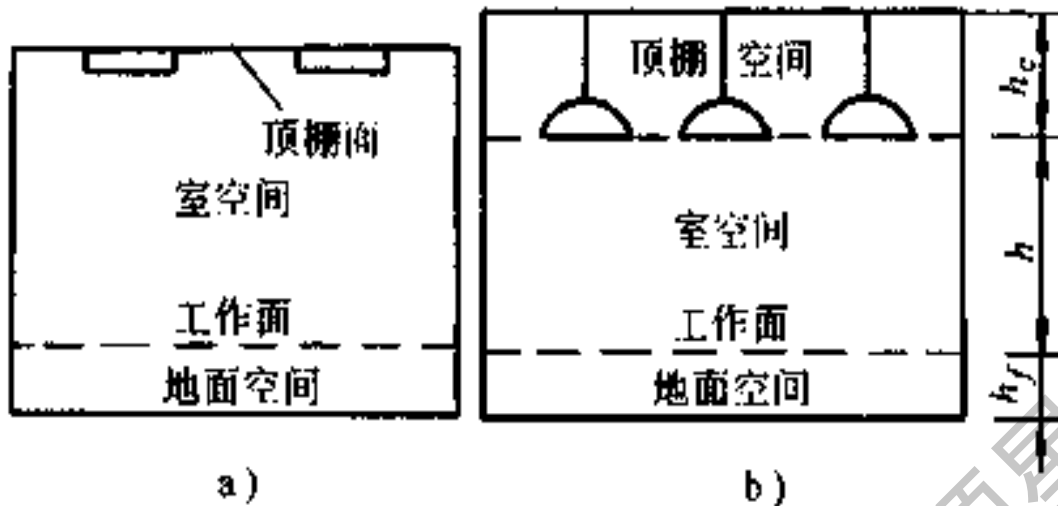


图 10-18 室内三个空间的划分

a) 灯具吸顶安装 b) 灯具悬吊安装

$$\text{室空比 } RCR = \frac{5h(L+W)}{LW}$$

$$\text{顶空比 } CCR = \frac{5h_c(L+W)}{LW}$$

$$\text{地空比 } FCR = \frac{5h_f(L+W)}{LW}$$

式中  $L$ ——房间长度 (m);

$W$ ——房间宽度 (m);

$h$ ——室空间的高度, 即计算高度 (m);

$h_c$ ——顶棚空间的高度 (m);

$h_f$ ——地面空间的高度, 即工作面高度 (m)。

(2) 顶棚空间有效反射率  $\rho_{cc}$ : 根据顶棚反射率  $\rho_r$  和墙壁反射率  $\rho_{w1}$  以及顶空比  $CCR$ , 查图 10-19 计算曲线, 便可求得  $\rho_{cc}$  值。

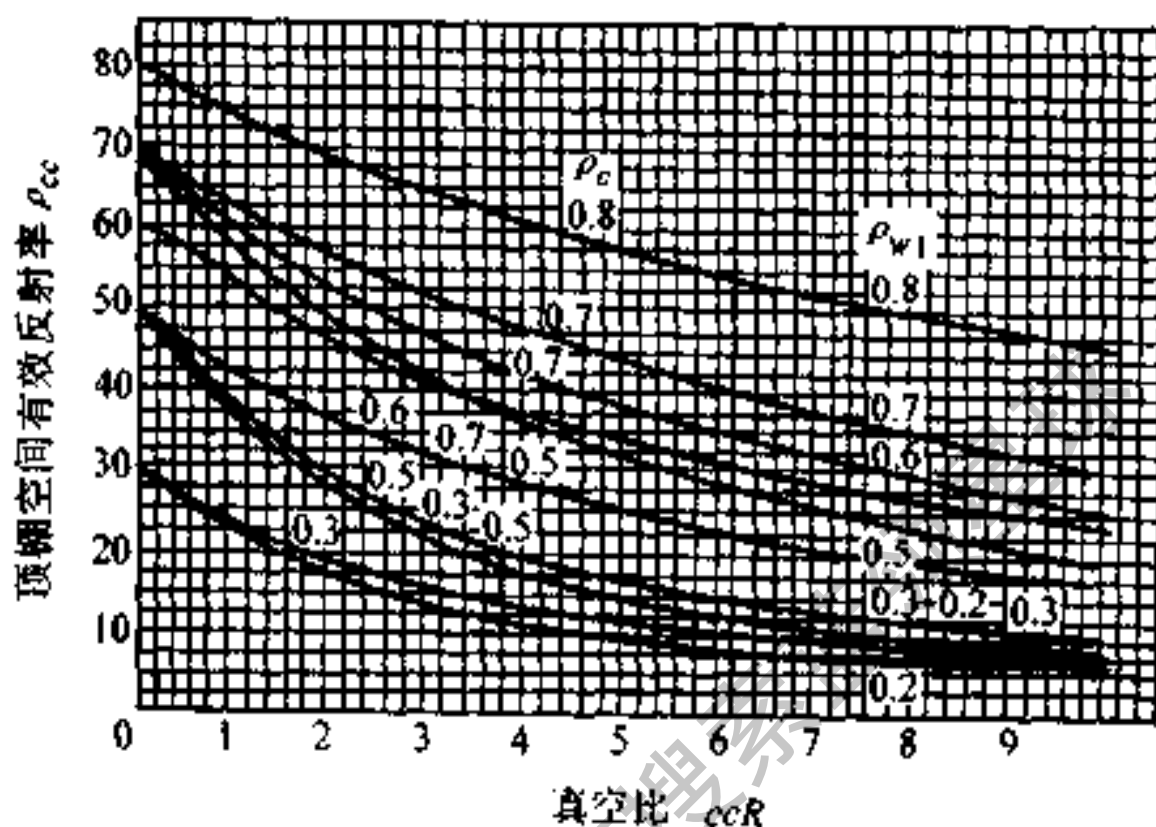


图 10-19 顶棚空间有效反射率计算曲线

(3) 墙面平均反射率  $\rho_w$ ：整个墙面的平均反射率可按下式计算：

$$\rho_w = \frac{\rho_{w1} (A_w - A_p) + \rho_p A_p}{A_w}$$

式中  $\rho_{w1}$ ——墙面反射率，见表 10-9；

$\rho_p$ ——玻璃窗反射率，见表 10-9；

$A_w$ ——整个墙的面积 ( $m^2$ )；

$A_p$ ——玻璃窗的面积 ( $m^2$ )。

(4) 利用系数  $\mu$  的查取按上述方法求出室空比 (RCR)、顶棚空间有效反射率 ( $\rho_{cc}$ )、墙面平均反射率

( $\rho_w$ ) 值以后, 便可从设计手册或图表中 (如表 10-24) 用插值法查取该型灯具的利用系数  $\mu$ 。

将有关数据代入  $E_{pj} = \frac{\phi n \mu}{A k}$ , 便可进行照度计算。

部分灯具的利用系数, 见表 10-24。

### 3. 查概算曲线求所需灯具数

所谓概算曲线, 是假设被照面上的平均照度为 100lx 时, 房间面积与所用灯具数量的关系曲线。利用概算曲线可直接求出所需灯具的数量。概算曲线是利用系数法计算而得。

应用概算曲线首先要知道下列条件:

- (1) 计算高度  $h$ 。
- (2) 房间面积  $A$ 。
- (3) 房间顶棚、墙壁、地面的反射率。

(4) 灯具类型及光源的种类和容量。有了上述已知条件, 便可从概算曲线中查得所需灯具的数量  $N$ 。但由于概算曲线是按假设被照面上的平均照度为 100lx 绘制的, 因此, 须按下式换算成实际应采用的灯具数:

$$n = \frac{E_{pj} k}{100 k'} N$$

式中  $n$ ——实际应采用的灯具数量 (个);

$E_{pj}$ ——工作面上的平均照度 (lx);

$N$ ——由概算曲线查得的灯具数量 (个);

$k'$ 、 $k$ ——分别为概算曲线和实际照度的补偿系数。

工厂常用的几种灯具的概算曲线，如图 10-20~10-28 所示。

#### 四、单位容量法计算照度

灯具的单位容量值计算公式如下：

$$\omega = P/A$$

式中  $\omega$ ——在某最低照度值下的单位容量值 ( $W/m^2$ )；

$P$ ——房间内照明安装容量 ( $W$ )；

$A$ ——房间面积 ( $m^2$ )。

已知房间面积  $A$ 、计算高度  $h$  和房间的照度标准便可由表 10-26~表 10-32 查得所采用灯具的单位容量值  $\omega$ ，再由上式求出房间的总照明安装容量  $P$ 。

若房间的照度标准为平均照度值  $E_p$  时，则应由表 10-25 查出最小照度系数  $Z$  值，再按下式求得房间的总照明安装容量  $P$ ：

$$P = \frac{\omega}{Z} A$$

于是由下式算出需要安装的灯具数：

$$n = P/\omega'$$

式中  $n$ ——在规定照度下所需的灯具数；

$\omega'$ ——每盏灯具的灯泡数  $\times$  灯泡功率 ( $W$ )。

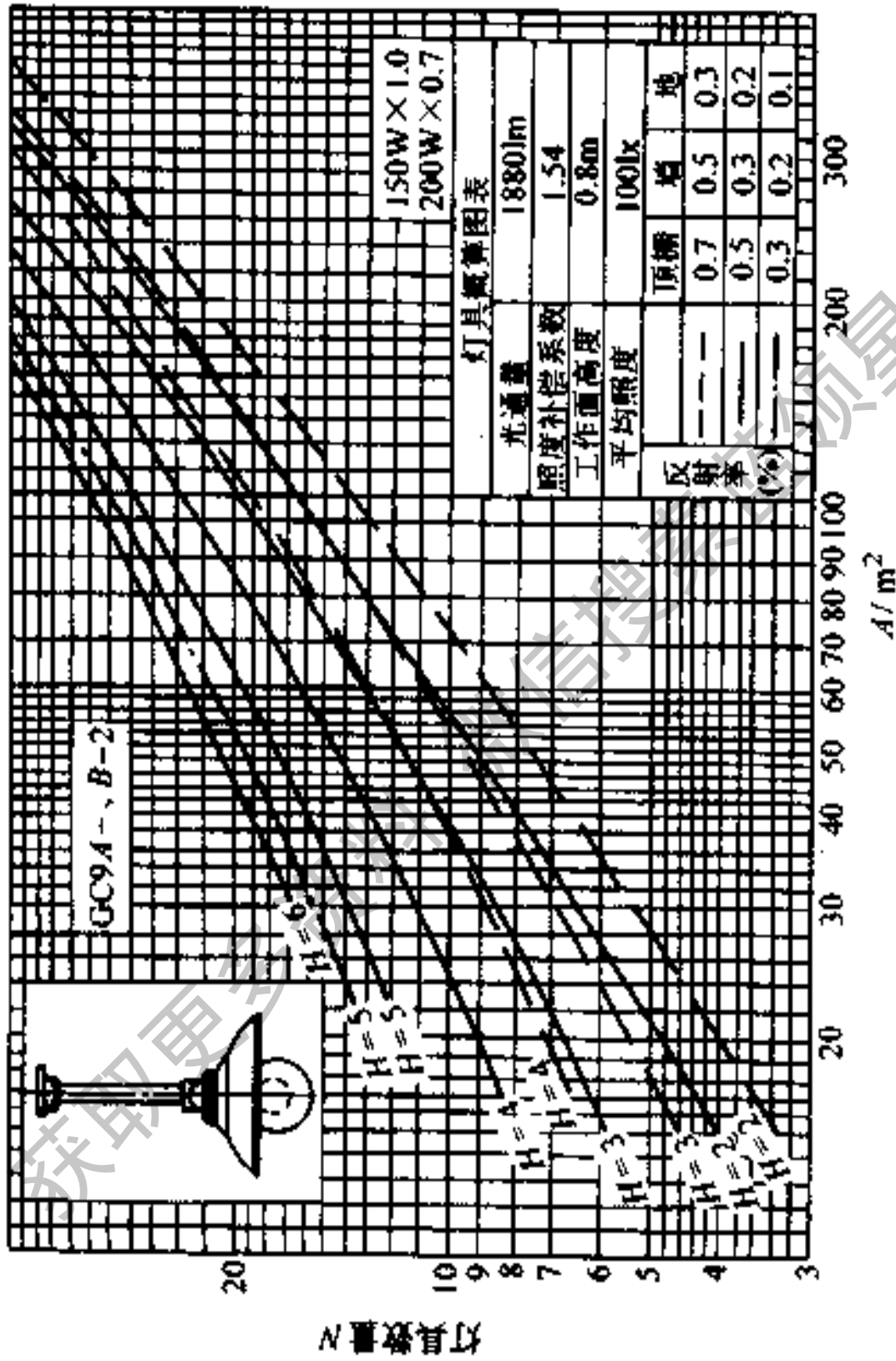


图 10-20 广照型防水防尘灯(150W、200W 白炽灯)概算曲线

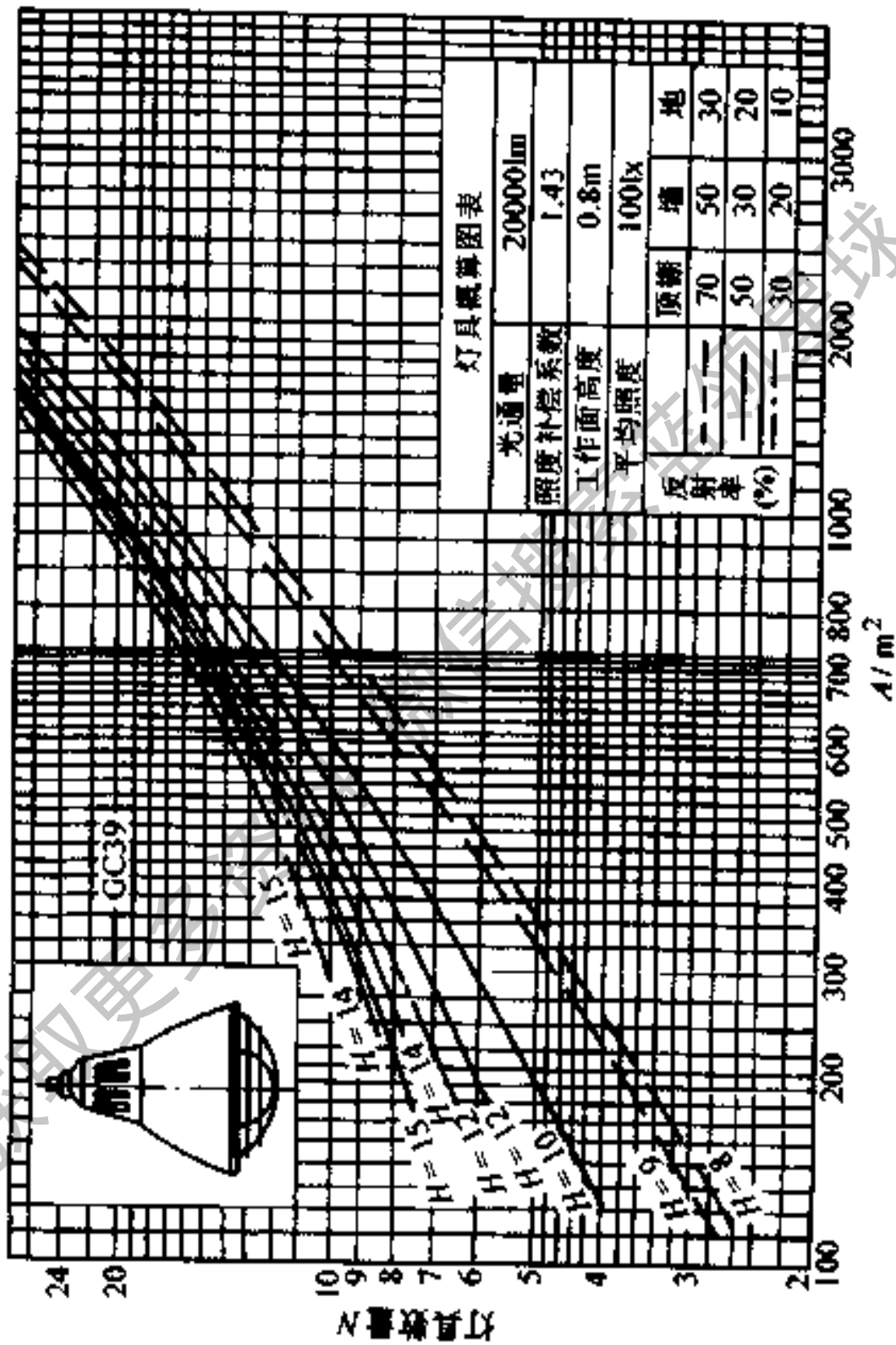


图 10-21 深照型防震灯(400W 荧光高压汞灯)概算曲线



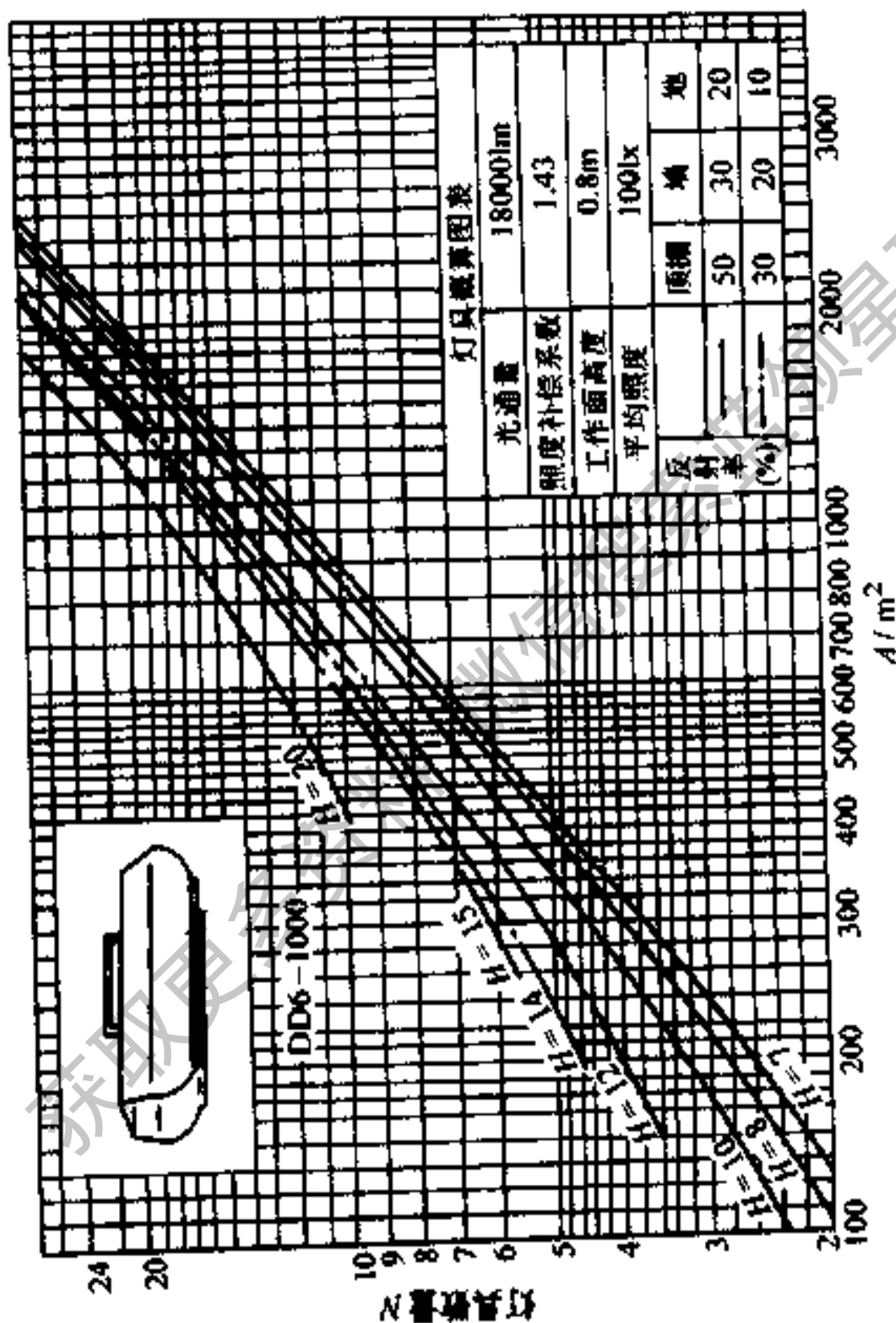


图 10-22 筒式双层卤钨灯(1000W)概算曲线

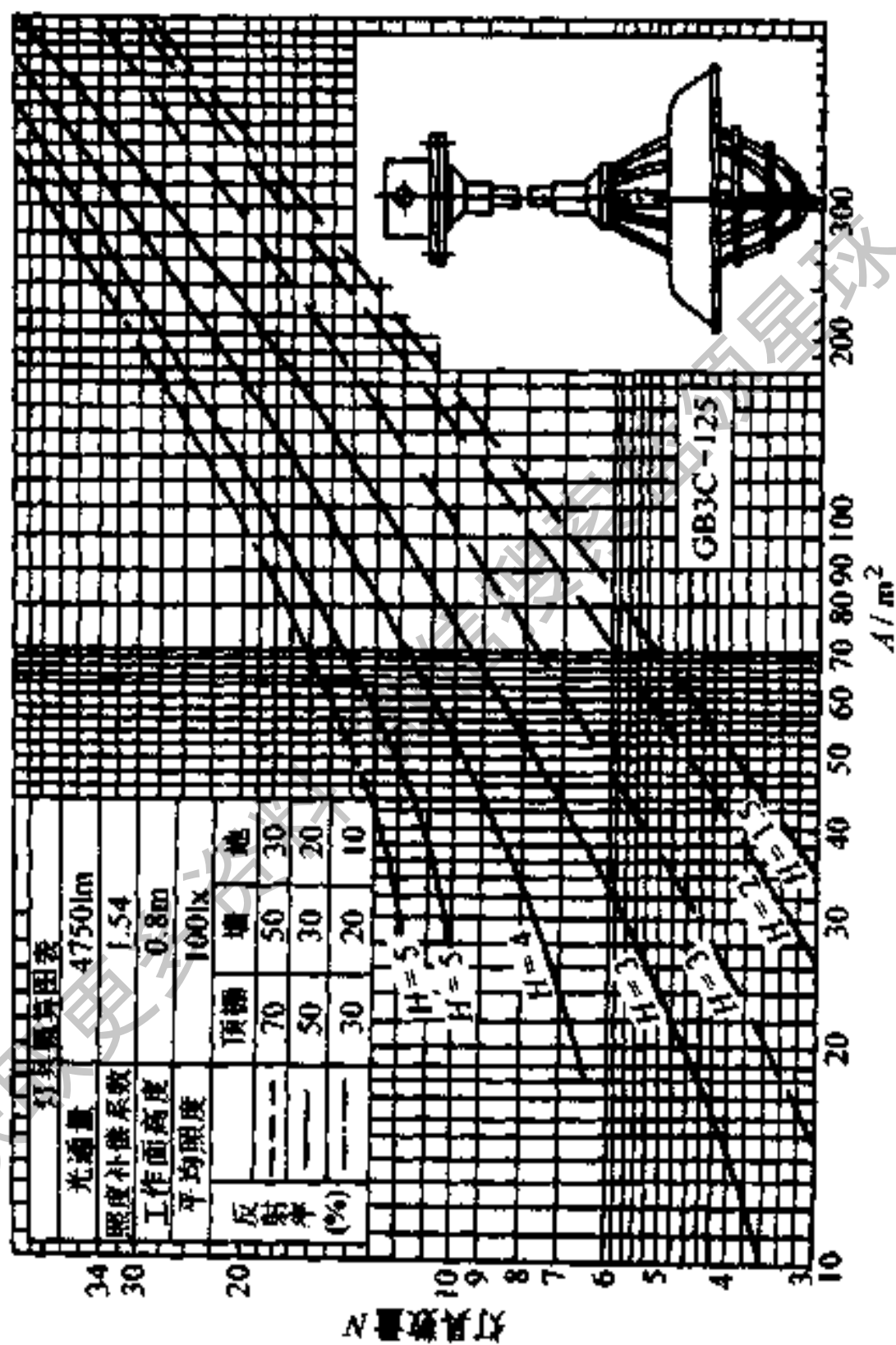


图 10-23 隔爆型防爆灯(125W 荧光高压汞灯)概算曲线

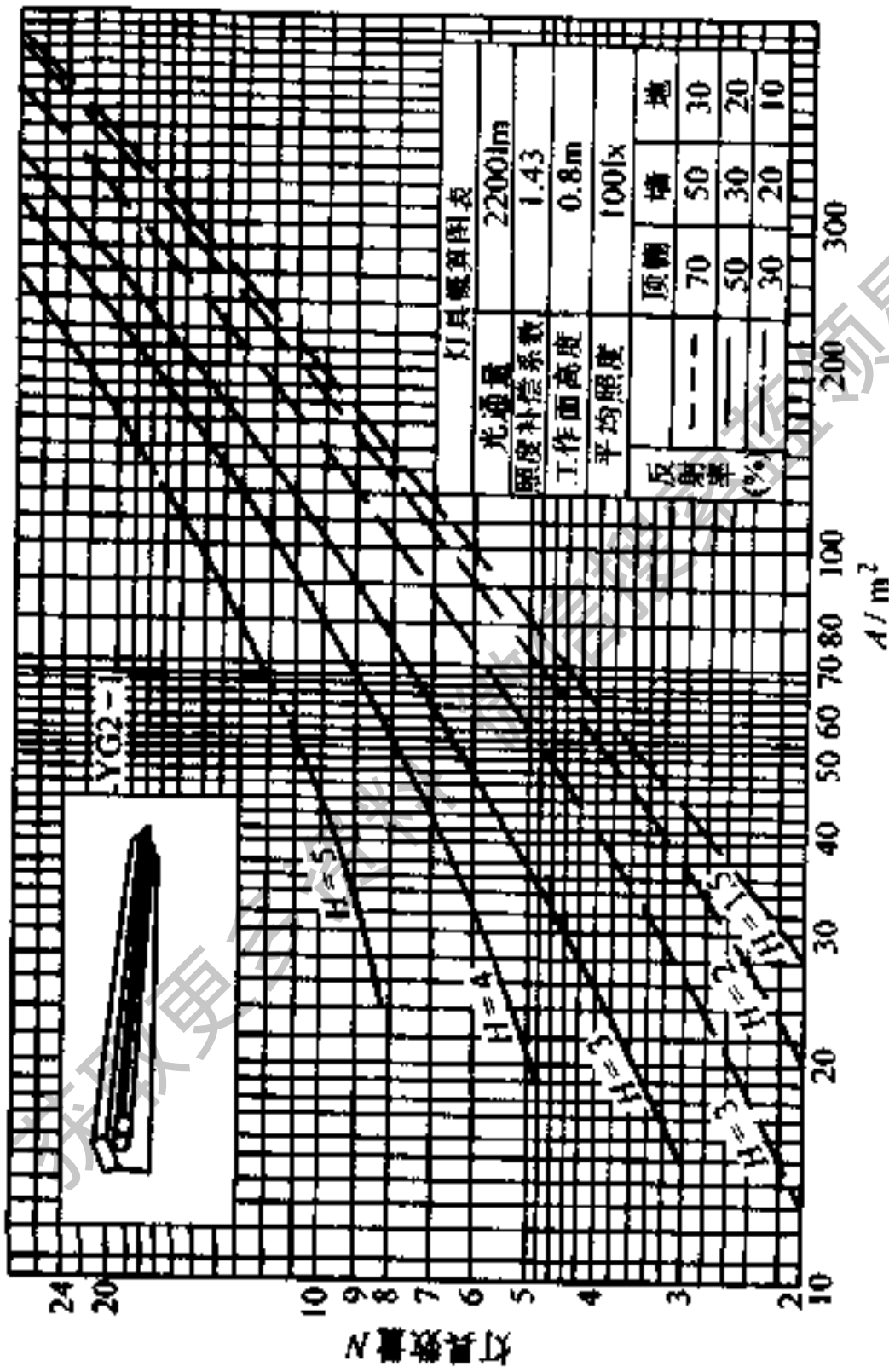


图 10-24 YG2-1 型荧光灯(1×40W)概算曲线

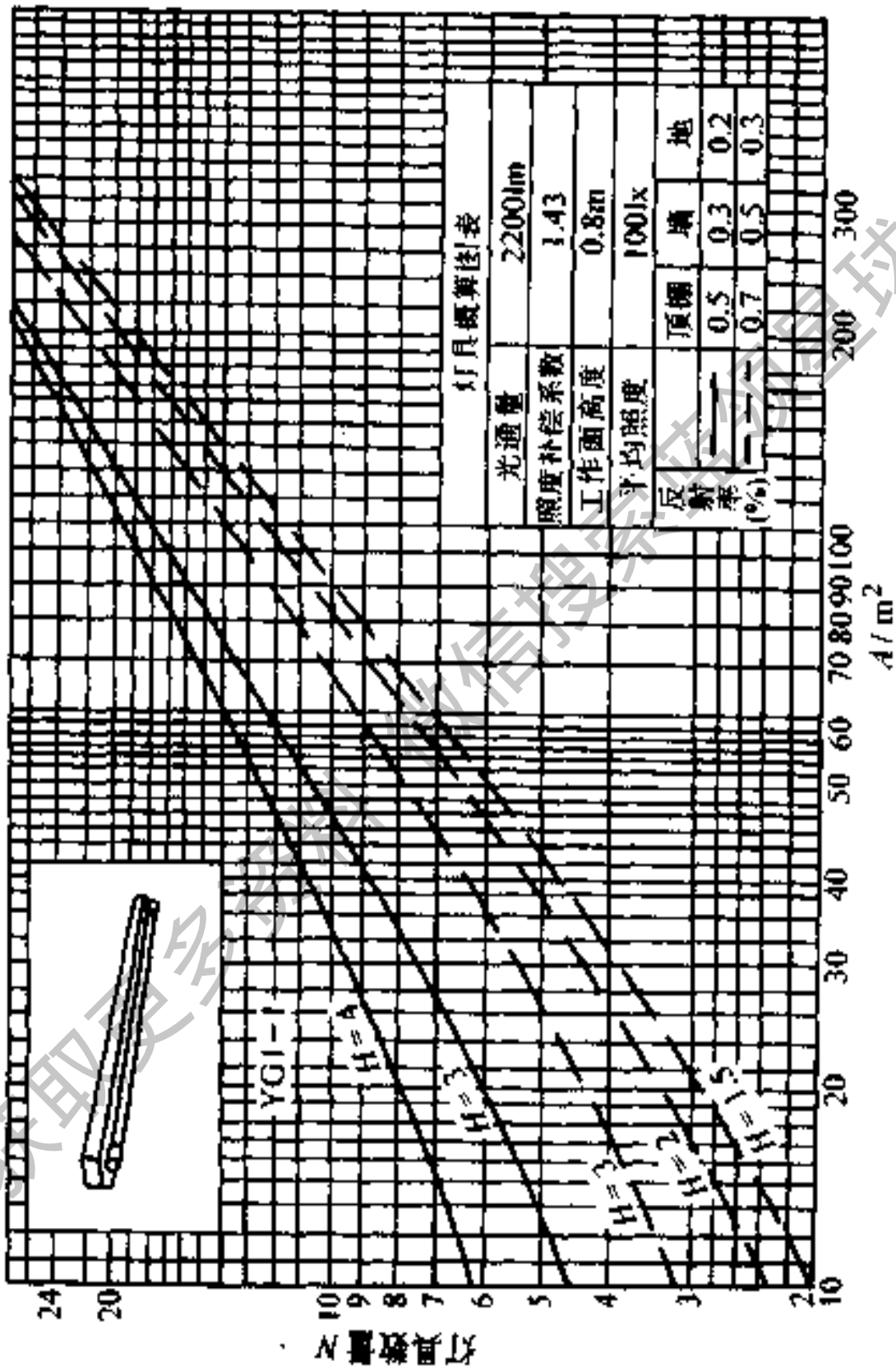


图 10-25 YG1-1 型筒式荧光灯(1×40W)概算曲线

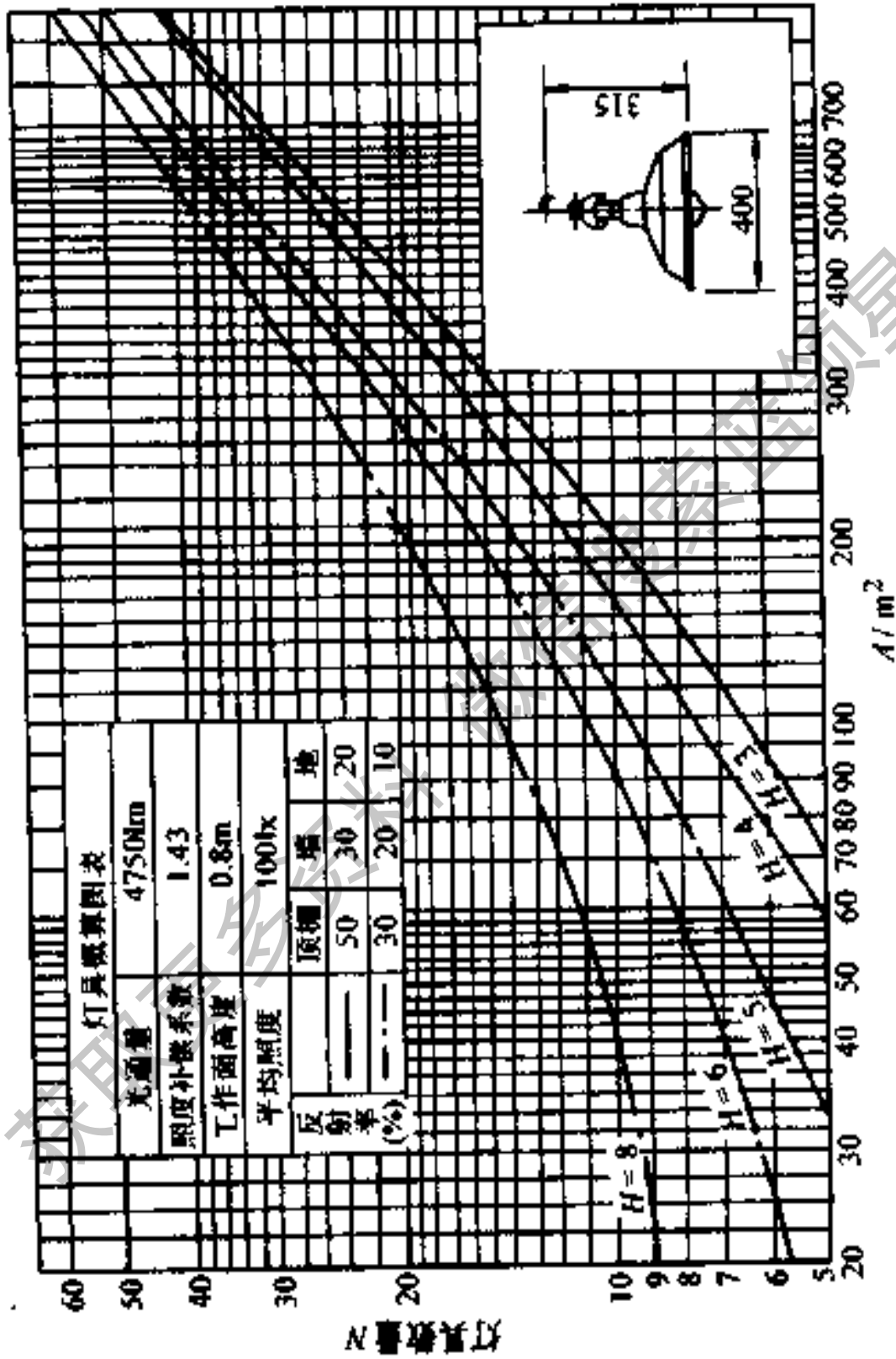


图 10-26 配照型工厂灯(125W 荧光高压汞灯)概算曲线

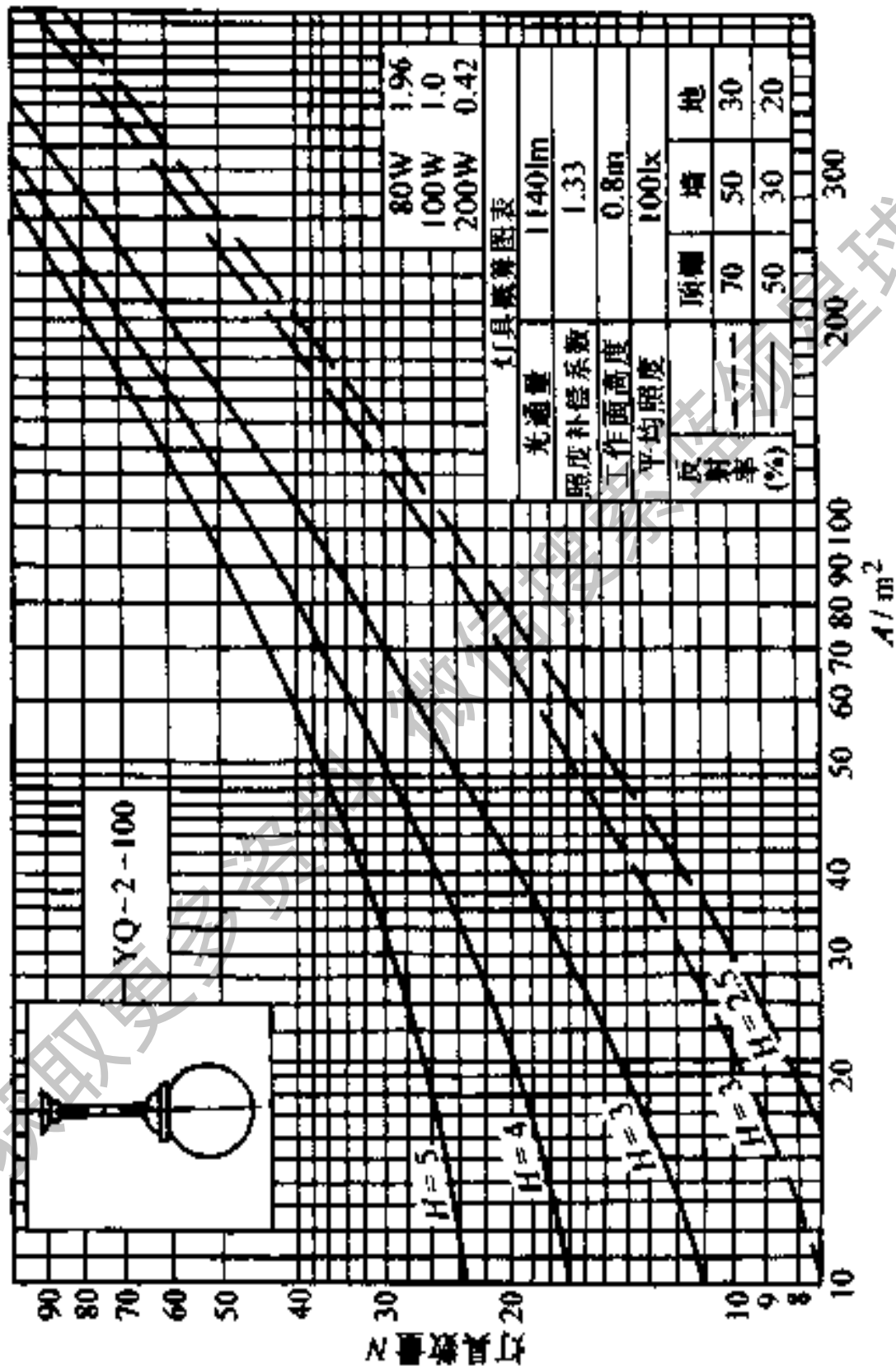


图 10-27 圆球吊灯(100W 白炽灯)概算曲线

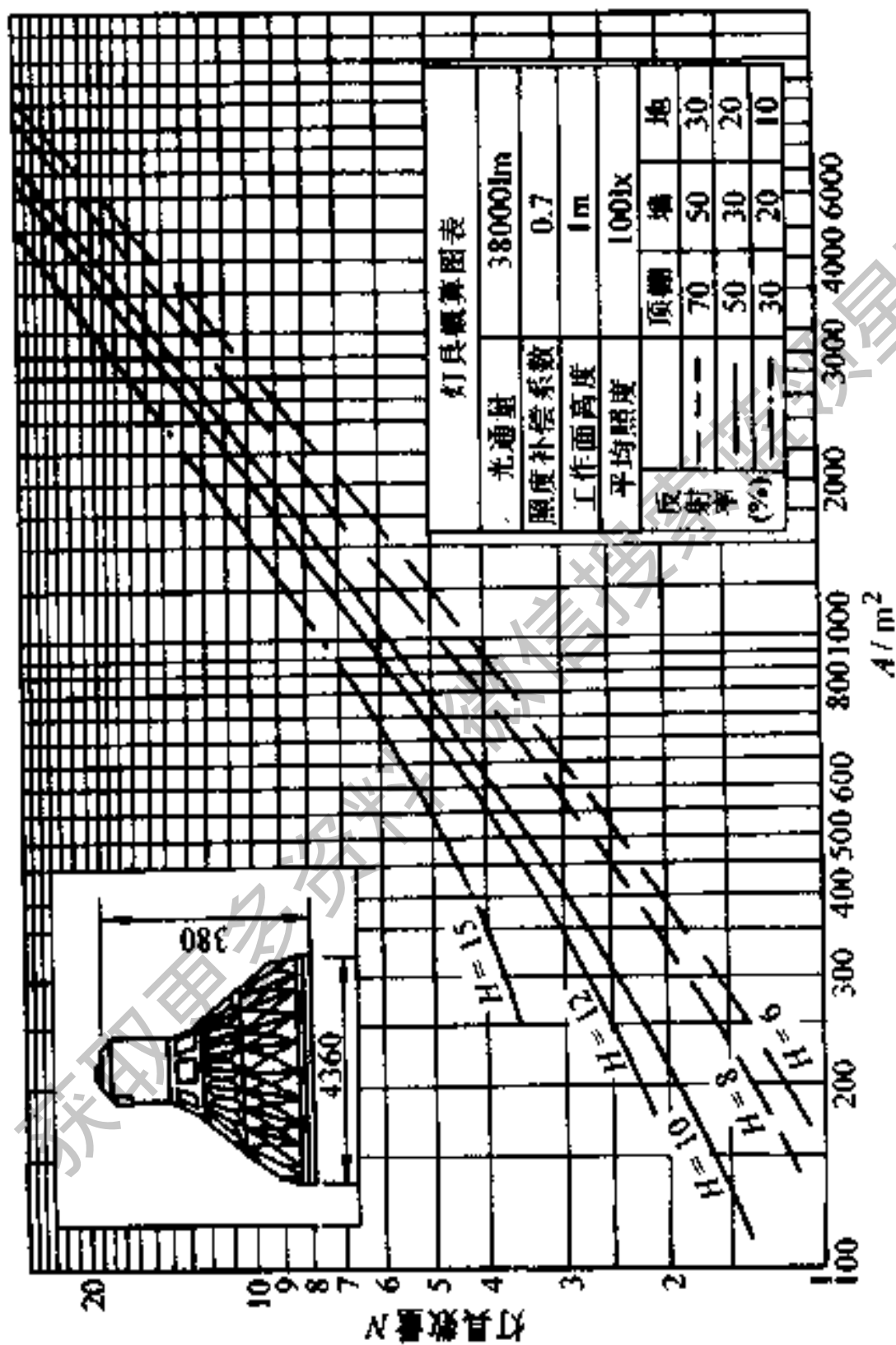


图 10-28 块板型工厂灯(GC108-NC400, 400W 高压钠灯)概算曲线

表 10-26 日光色荧光灯均匀照明近似

单位容量值 (单位:  $W/m^2$ )

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m$	30W、40W 带灯罩					
		30	50	75	100	150	200
2~3	10~15	2.5	4.2	6.2	8.3	12.5	16.7
	15~25	2.1	3.6	5.4	7.2	10.9	14.5
	25~50	1.8	3.1	4.8	6.4	9.5	12.7
	50~150	1.7	2.8	4.3	5.7	8.6	11.5
	150~300	1.6	2.6	3.9	5.2	7.8	10.4
	大于 300	1.5	2.4	3.2	4.9	7.3	9.7
3~4	10~15	3.7	6.2	9.3	12.3	18.5	24.7
	15~20	3	5	7.5	10	15	20
	20~30	2.5	4.2	6.2	8.3	12.5	16.7
	30~50	2.1	3.6	5.4	7.2	10.9	14.5
	50~120	1.8	3.1	4.8	6.4	9.5	12.7
	120~300	1.7	2.8	4.3	5.7	8.6	11.5
	300	1.6	2.7	3.9	5.3	7.8	10.5
4~6	10~17	5.5	9.2	13.4	18.3	27.5	36.6
	17~25	4.0	6.7	9.9	13.3	19.9	26.5
	25~35	3.3	5.5	8.2	11	16.5	22
	35~50	2.6	4.4	6.6	8.8	13.3	17.7
	50~80	2.3	3.9	5.7	7.7	11.5	15.5
	80~150	2.0	3.4	5.1	6.9	10.1	13.5
	150~400	1.8	3	4.4	6	9	11.9
	大于 400	1.6	2.7	4.0	5.4	8.0	11



(续)

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m$	30W、40W 不带灯罩					
		30	50	75	100	150	200
2~3	10~15	2.8	4.7	7.1	9.5	14.3	19
	15~25	2.5	4.2	6.3	8.3	12.5	16.7
	25~50	2.1	3.5	5.4	7.2	10.9	14.5
	50~150	1.9	3.1	4.7	6.3	9.5	12.7
	150~300	1.7	2.9	4.3	5.7	8.6	11.5
	大于 300	1.6	2.8	4.2	5.6	8.4	11.2
3~4	10~15	4.3	7.1	10.6	14.2	21.2	28.2
	15~20	3.4	5.7	8.6	11.5	17.1	22.9
	20~30	2.8	4.7	7.1	9.5	14.3	19
	30~50	2.5	4.2	6.3	8.3	12.5	16.7
	50~120	2.1	3.5	5.4	7.2	10.9	14.5
	120~300	1.9	3.1	4.7	6.3	9.5	12.7
	300	1.7	2.9	4.3	5.7	8.6	11.5
4~6	10~17	6.3	10.5	15.7	20.9	31.4	41.9
	17~25	4.6	7.6	11.4	15.2	22.9	30.4
	25~35	3.8	6.4	9.5	12.7	19	25.4
	35~50	3.1	5.1	7.6	10.1	15.2	20.2
	50~80	2.6	4.4	6.6	8.8	13.3	17.7
	80~150	2.3	3.9	5.7	7.7	11.5	15.5
	150~400	2.0	3.4	5.1	6.9	10.1	13.5
	大于 400	1.8	3.0	4.5	6	9	12

表 10-27 广照型灯一般均匀照明

单位容量值 (单位:  $W/m^2$ )

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m^2$	白炽灯		
		5	10	20
2~3	10~15	3.3	6.2	11
	15~25	2.7	5	9
	25~50	2.3	4.3	7.5
	50~150	2	3.8	6.7
	150~300	1.8	3.4	6
	300 以上	1.7	3.2	5.8
3~4	10~15	4.3	7.5	12.7
	15~20	3.7	6.4	11
	20~30	3.1	5.5	9.3
	30~50	2.5	4.5	7.5
	50~120	2.1	3.8	6.3
	120~300	1.8	3.3	5.5
	300 以上	1.7	2.9	5
4~6	10~17	5.2	8.9	15
	17~25	4.1	7	12
	25~35	3.4	5.8	10
	35~50	3	5	8.5
	50~80	2.4	4.1	7
	80~150	2	3.3	5.8
	150~400	1.7	2.8	5
	400 以上	1.5	2.5	4.5

(续)

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m^2$	白炽灯/荧光高压汞灯		
		30	50	75
2~3	10~15	15/5	22/7.3	30/10
	15~25	12/4	18/6	25/8.3
	25~50	10/3.3	15/5	21/7
	50~150	9/3	13/4.3	18/6
	150~300	8/2.7	12/4	17/5.7
	300以上	7.5/2.5	11/3.7	16/5.3
3~4	10~15	17/5.7	26/8.7	36/12
	15~20	14/4.7	22/7.3	31/10.3
	20~30	13/4.3	19/6.3	27/9
	30~50	10.5/3.5	15/5	22/7.3
	50~120	8.5/2.8	13/4.3	18/6
	120~300	7.5/2.5	12/4	16/5.3
	300以上	7/2.3	11/3.7	15/5
4~6	10~17	21/7	33/11	48/16
	17~25	16/5.3	27/9	37/12.3
	25~35	14/4.7	22/7.3	32/10.7
	35~50	12/4	19/6.3	27/9
	50~80	10/3.3	15/5	22/7.3
	80~150	8.5/2.8	12/4	17/5.7
	150~400	7/2.3	11/3.7	15/5
	400以上	6.3/2.1	10/3.3	14/4.7

表 10-28 配照型灯一般均匀照明

单位容量值 (单位:  $W/m^2$ )

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m^2$	白炽灯		
		5	10	20
3~4	10~15	4.3	7.3	12.1
	15~25	3.7	6.4	10.5
	25~30	3.1	5.5	8.9
	30~50	2.5	4.5	7.3
	50~120	2.1	3.8	6.3
	120~300	1.7	3.3	5.5
	300以上	1.3	2.9	5.0
4~6	10~17	5.2	8.6	14.3
	17~25	4.4	6.8	11.4
	25~35	3.4	5.8	9.5
	35~50	3.0	5.0	8.3
	50~80	2.4	4.1	6.8
	80~150	2.0	3.3	5.8
	150~400	1.7	2.8	5.0
	400以上	1.5	2.5	4.5
6~8	25~35	4.2	6.9	11.7
	35~50	3.4	5.7	10.0
	50~65	2.9	4.9	8.7
	65~90	2.5	4.3	7.8
	90~135	2.2	3.7	6.5
	135~250	1.8	3.0	5.4
	250~500	1.5	2.6	4.6
	500以上	1.4	2.4	4.0

(续)

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m^2$	白炽灯/荧光高压汞灯		
		30	50	75
3~4	10~15	16.2/	25.2/8.4	35.2/11.7
	15~25	13.8/	21.8/7.3	30.8/10.3
	25~30	12.4/4.1	18.4/6.1	26.4/8.8
	30~50	10/3.3	14.5/4.8	21.5/7.2
	50~120	8.3/2.8	12.8/4.3	17.8/5.9
	120~300	7.3/2.4	11.8/3.9	15.8/5.3
	300以上	6.8/2.3	10.8/3.6	14.8/4.9
4~6	10~17	20/6.7	32/10.7	47/15.7
	17~25	15.7/5.2	26.7/8.9	36.7/12.3
	25~35	13.3/4.4	21.3/7.1	31.3/10.4
	35~50	11.4/3.8	18.4/6.1	26.4/8.8
	50~80	9.5/3.2	14.5/4.8	21.5/7.2
	80~150	8.3/2.8	11.8/3.9	16.8/5.6
	150~400	6.8/2.3	10.8/3.6	14.8/4.9
	400以上	6.3/2.1	10/3.3	14/4.6
6~8	25~35	16.6/6.5	27.6/9.2	37.6/12.5
	35~50	14.7/4.9	22.7/7.6	31.7/10.5
	50~65	12.4/4.1	18.4/6.1	26.4/8.8
	65~90	10.9/3.6	15.4/5.1	22.4/7.5
	90~135	8.6/2.9	12.1/4	17.1/5.7
	135~250	7.3/2.4	11.8/3.9	15.8/5.3
	250~500	6.5/2.2	10.2/3.4	14.2/4.7
	500以上	5.5/1.8	9.8/3.1	13.8/4.6

表 10-29 搪瓷深照型灯一般均匀照明

单位容量值 (单位:  $W/m^2$ )

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m^2$	白炽灯		
		5	10	20
6~8	25~35	4.2	7.2	12.8
	35~50	3.5	6	10.8
	50~65	3	5	9.1
	65~90	2.6	4.4	8
	90~135	2.2	3.8	6.8
	135~250	1.9	3.3	5.8
	250~500	1.7	2.8	5.1
	500 以上	1.4	2.5	4.4
8~12	50~70	3.7	6.3	11.5
	70~100	3	5.3	9.7
	100~130	2.5	4.4	8
	130~200	2.1	3.8	6.9
	200~300	1.8	3.2	5.8
	300~600	1.6	2.8	5
	600~1500	1.4	2.4	4.3
	1500 以上	1.2	2.2	3.8

(续)

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m^2$	白炽灯/荧光高压汞灯		
		30	50	75
6~8	25~35	18/6	28/9.3	40/13.3
	35~50	15/5	23/7.7	34/11.3
	50~65	13/4.3	20/6.7	29/9.7
	65~90	11.5/3.8	18/6	25/8.3
	90~135	10/3.3	15/5	21/7
	135~250	8.2/2.7	12.5/4.2	17/5.7
	250~500	7.2/2.4	11/3.7	15/5
	500以上	6.2/2.1	9.5/3.2	13/4.3
8~12	50~70	17/5.7	27/9	40/13.3
	70~100	15/5	23/7.7	34/11.3
	100~130	12/4	19/6.3	28/9.3
	130~200	10/3.3	16/5.3	23/7.7
	200~300	8.2/2.7	13/4.3	19/6.3
	300~600	7/2.3	11/3.7	17/5.7
	600~1500	6/2	9.5/3.2	15/5
	1500以上	5.2/1.7	8.5/2.8	12.5/4.2

表 10-30 乳白玻璃明月罩吊灯一般照明

单位容量值 (单位:  $W/m^2$ )

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m^2$	白 炽 灯				
		10	20	30	50	75
2~3	10~15	6.3	11.2	15.4	24.8	35.3
	15~25	5.3	9.8	13.3	21.0	30.0
	25~50	4.4	8.3	11.2	17.3	24.8
	50~150	3.6	6.7	9.1	13.5	19.5
	150~300	3.0	5.6	7.7	11.3	16.5
	300 以上	2.6	4.9	7.0	10.1	15.0
3~4	10~15	7.2	12.6	18.5	31.5	45.0
	15~20	6.1	10.5	15.4	27.0	37.5
	20~30	5.2	9.5	13.3	21.0	32.2
	30~50	4.4	8.1	11.2	18.0	26.3
	50~120	3.6	6.7	9.1	14.3	21.0
	120~300	2.9	5.6	7.6	11.3	17.3
	300 以上	2.4	4.6	6.3	9.4	14.3

表 10-31 乳白玻璃罩天棚灯一般照明

单位容量值 (单位:  $W/m^2$ )

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m^2$	白炽灯 $\rho_{cc}=70\%$ , $\rho_w=50\%$			
		5	10	20	30
2~3	10~15	4.9	8.8	16	22
	15~25	4.1	7.5	13.6	18
	25~50	3.6	6.4	11.3	15.6
	50~150	2.9	5.1	8.8	12.4
	150~300	2.4	4.3	6.9	10.2
	300 以上	2.2	3.9	6.2	9.2



(续)

计算高度 $h/m$	$E/lx$ $A/m^2$	白炽灯 $\rho_{cc}=70\%$ , $\rho_w=50\%$			
		5	10	20	30
3~4	10~15	6.2	10.7	18	26
	15~20	5.1	8.7	15	22
	20~30	4.3	7.2	13	19
	30~50	3.7	6.2	11.2	16
	50~120	3	5.3	9.3	13
	120~300	2.3	4.1	7.3	10
	300 以上	2	3.5	5.9	8.5

表 10-32 一般小房间安装灯泡的容量

(单位:W)

$E/lx$ $A/m^2$	白炽灯					荧光灯	
	5	10	20	30	50	75	100
2	15	15	25	40	60	—	—
4	15	15	25	60	75	—	—
6	25	25	40	60	100	30	40
8	25	40	60	100	100	2×30	2×40
3×4	40	60	100	2×60	2×75	2×30	2×40
3×6	40	60	2×40	2×75	2×100	2(2×30)	2(2×40)
4×6	60	2×40	2×60	2×75	2×100	2(2×30)	2(2×40)
6×6	60	2×60	4×60	4×60	4×75	4(2×30)	4(2×40)
6×8	2×40	2×60	4×60	4×75	4×100	4(2×30)	4(2×40)

注:白炽灯用碗形灯罩、搪瓷平盘罩或裸灯泡等,荧光灯为裸灯管。

## 第四节 生产厂房及室外照明设计

### 一、生产厂房照明的设计

#### 1. 照明种类及其选择

(1) 正常照明：正常照明可单独使用，也可与事故照明、值班照明同时使用，但控制部分应分开。

(2) 事故照明：当正常照明因事故熄灭后，供部分工作及安全通行的照明。事故照明应设在可能引起事故的设备、材料周围及主要通行处。事故照明一般采用白炽灯或卤钨灯。

(3) 值班照明：对非三班制生产的重要车间和重要仓库，应设置值班照明。也可以利用事故照明的一部分作为值班照明。

(4) 警卫照明：作为警卫地区所使用的照明。

(5) 障碍照明：作为障碍标志用的照明。

#### 2. 照度选择：

工业企业的照度可参照表 10-12~表 10-14 选用。

### 二、道路照明的设计

#### 1. 道路照明的布置原则

(1) 道路照明可采用光强分布宽阔的灯具或保护角大于  $10^\circ$  的配照型灯具。

(2) 道路照明，当路面宽度小于 9m，或照度要求不高时可采用单侧布灯方式；大于 9m，或照度要求较高时，

可采用双侧布灯。一般厂区道路照明的灯杆间距以 30~40m 为宜，在与电力线路共杆时，应取较大的档距。

(3) 灯具悬挂高度见表 10-33。

表 10-33 道路灯具悬挂高度要求

道路类型	主干路及交叉路口		次要道路	
灯具	125 ~ 250W 荧 光高压汞 灯	400W 荧 光高压汞灯 或 250 ~ 400W 高压 钠灯	60~100W 白炽灯或 50 ~80W 荧光 高压汞灯	100 ~ 180W 低 压钠灯
悬高/m	≥5	≥6	4~6	4~6

(4) 悬臂吊挂式灯具，其悬臂长一般为 1.3~3.5m。

(5) 为了防止眩光，道路照明灯具有的采用半截光型（适合周围比较亮的街道），有的采用截光型（适合周围比较暗的街道）。

表 10-34 和表 10-35 为日本 JISC8131 “道路照明器”

表 10-34 道路灯具型式和配光的规定  
(眩光控制)

灯具型式	光强/ (cd/1000lm)	
	与垂直线成 90°	与垂直线成 80°
截光型	10 以下	30 以下
半截光型	30 以下	120 以下

注：水平角 90°时也适用此表。

表 10-35 道路灯具型式和配光的规定  
(最大光强控制)

灯具型式	光强/ (cd/1000lm)	
	与垂直线成 65°	与垂直线成 60°
截光型	—	200 (180) 以上
半截光型	190 (170) 以上	—

注：水平角 60°~90°范围内的任何角度都在本表值内。括弧内数字指低压钠灯及荧光灯。

中规定的配光型式。

## 2. 路面平均照度计算

路面平均照度可按下式简易计算：

$$E_{pj} = \frac{\Phi NU}{kBD}$$

式中  $E_{pj}$ ——路面平均照度 (lx)；

$\Phi$ ——光源总光通量 (lm)；

$N$ ——灯柱的列数，单侧排列与交错排列时  $N=1$ ，对称排列时  $N=2$ ；

$U$ ——照明率（即从光源总光通量中投射到整个宽度路面上的光通量比例），见表 10-36；

$k$ ——照度补偿系数，通常为 1.3~2.0，对于混凝土路面取小值，沥青路面取大值；

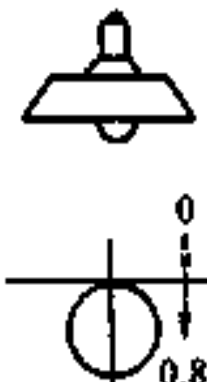
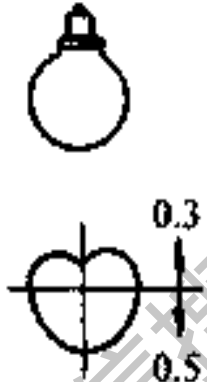
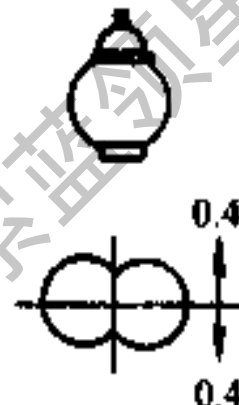
$B$ ——路面宽度 (m)；

$D$ ——电杆间距 (m)。

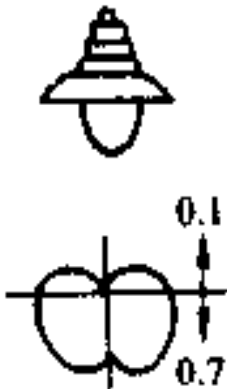
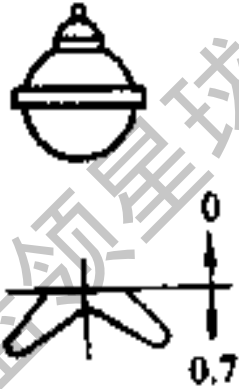
## 3. 工厂道路照明速查表

工厂道路宽度一般不大于 9m，一般采用单侧布灯方式。为了简化设计，将计算结果列于表 10-37。

表 10-36 室外照明的照明率  $U$ 

灯具 配光	反射罩	球状灯泡	柱头式灯泡
			
$B/h$			
0.5	0.09	0.05	0.04
1.0	0.20	0.11	0.07
1.5	0.25	0.15	0.10
2.0	0.30	0.20	0.12
2.5	0.31	0.20	0.13
3.0	0.35	0.25	0.14
4.0	0.35	0.25	0.16
5.0	0.35	0.25	0.16
10.0	0.39	0.27	0.18
20.0	0.39	0.27	0.19

(续)

灯具 配光  $B/h$	悬挂式灯泡  	三菱形灯泡 (非对称)  
0.5	0.09	0.18
1.0	0.16	0.31
1.5	0.20	0.38
2.0	0.22	0.43
2.5	0.24	0.47
3.0	0.25	0.48
4.0	0.26	0.51
5.0	0.27	0.52
10.0	0.28	0.53
20.0	0.30	0.53

注： $B$  为道路宽度 (m)。 $h$  为灯具安装高度 (m)。

表 10-37 杆距、灯具悬挂高度、灯具种类、光源容量及路面照度表

杆距/m		30											
悬挂高度/m		5		6		7		8					
道路宽度/m		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9
灯具型号及光源种类		路面照度/lx											
GC1-1	100B	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3
	150B	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.6	0.6	
	200B	0.6	0.7	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	0.7	0.8	0.8	
	300B	0.9	1.2	0.9	1.0	1.3	1.1	1.0	1.3	1.1	1.3	1.3	
JTY-19	80G	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.6	0.6	
	125G	0.3	0.5	0.3	0.4	0.7	0.6	0.4	0.7	0.6	0.9	0.9	
	250G	1.9	2.8	1.9	2.3	3.2	2.7	2.3	3.2	2.7	3.6	3.6	
	400G	—	4.5	—	3.8	5.0	4.4	3.8	5.0	4.4	5.3	5.3	
	400K	—	7.1	—	5.8	8.4	7.1	5.8	8.4	7.1	8.8	8.7	
	400N	—	11.9	—	10.6	12	10.8	10.6	12	10.8	13.1	13.1	

(续)

杆距/m		30											
悬挂高度/m		5			6			7			8		
道路宽度/m		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9
灯具型号及光源种类		路面照度/lx											
JTY-23	125G	—	—	0.5	—	0.7	0.6	—	0.7	0.6	—	—	0.8
	250G	—	2.1	1.5	—	2.6	1.8	—	2.8	2.2	—	3.4	2.4
	400G	—	—	—	—	2.9	2.4	—	3.4	2.8	—	3.8	3.2
JTY-26	250G	—	3.0	3.7	—	5.3	5.2	—	6.6	—	—	6.8	8.0
	400G	—	—	—	—	8.8	7.1	—	10.2	8.2	—	10.2	9.7
	100B	—	—	—	0.2	—	—	—	0.2	—	—	—	0.2
GC-1	150B	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	—	0.4	0.3	—	—	0.4	—
	200B	0.4	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5
	300B	0.6	0.5	0.5	0.7	0.6	0.6	0.9	0.7	0.7	1.0	1.0	0.9
JTY-19	80G	0.2	—	—	0.2	—	—	0.3	0.2	—	—	0.3	0.3



(续)

杆距/m		30																																							
悬挂高度/m		5					6					7					8																								
道路宽度/m		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9																			
灯具型号及光源种类容量		路面照度/lx																																							
125G		0.2					0.3					0.2					0.4					0.3					0.5					0.4									
250G		1.2					0.9					1.8					1.3					2.0					1.7					2.5					2.1				
杆距/m		35																																							
悬挂高度/m		5					6					7					8																								
道路宽度/m		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9																			
灯具型号及光源种类容量		路面照度/lx																																							
400G		—					2.7					2.2					3.3					2.8					3.9					3.4									
400K		—					3.6					3.0					5.2					4.3					6.4					5.5									
400N		—					7.5					5.5					8.8					7.8					9.2					8.3									

(续)

杆距/m		35														
悬挂高度/m		5				6				7				8		
道路宽度/m		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9
灯具型号及光源种类		路面照度/lx														
JTY-23	125G	—	0.3	0.4	—	0.4	0.3	—	0.5	0.4	—	0.6	0.5	—	0.6	0.5
	250G	—	1.2	1.0	—	1.5	1.4	—	1.8	1.4	—	2.1	1.6	—	2.1	1.6
	400G	—	—	—	—	1.8	1.7	—	2.3	1.8	—	2.6	2.2	—	2.6	2.2
JTY-26	250G	—	1.6	1.3	—	2.6	2.5	—	3.7	3.9	—	4.9	5.3	—	4.9	5.3
	400G	—	—	—	—	5.1	4.2	—	6.4	5.4	—	7.9	6.6	—	7.9	6.6
GC-1	100B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	150B	—	0.2	—	—	0.2	—	—	0.2	—	—	0.2	—	—	0.2	—
	200B	—	0.3	—	—	0.3	—	—	0.3	—	—	0.3	—	—	0.3	—
JTY-19	200B	—	0.4	—	—	0.4	—	—	0.4	—	—	0.4	—	—	0.4	—
		—	0.4	—	—	0.5	0.4	—	0.5	—	—	0.5	—	—	0.5	—

(续)

杆距/m		40																	
悬挂高度/m		5				6				7				8					
道路宽度/m		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9			
灯具型号及光源种类容量		路面照度/lx																	
80G		—				—				0.2				—		0.2			
125G		—				0.2				—				0.2		0.3		0.2	
250G		0.7				1.0				0.8				1.3				1.3	
400G		—				1.8				1.4				2.0				2.2	
400K		—				2.3				1.7				2.7		2.6		3.2	
400N		—				4.4				3.2				5.4				5.9	
125G		—				0.2				—				0.3		—		0.3	
JTY-19																			
JTY-23																			

(续)

杆距/m		40																			
悬挂高度/m		5					6					7					8				
道路宽度/m		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9		
灯具型号及光源种类容量		路面照度/lx																			
JTY-23	250G	—	0.9	0.8	—	1.0	1.0	—	1.3	1.0	—	1.4	1.4	—	1.4	1.4	—	1.4	1.4		
	400G	—	—	—	—	1.2	1.0	—	1.3	—	—	1.4	—	—	1.4	—	—	—	1.4		
JTY-26	250G	—	0.8	1.0	—	1.5	1.3	—	1.8	2.4	—	2.2	2.8	—	2.2	2.8	—	2.2	2.8		
	400G	—	—	—	—	3.2	2.7	—	3.7	3.8	—	4.1	4.2	—	4.1	4.2	—	4.1	4.2		

注：1. 表列照度值超过国家照明标准规定部分，仅供参考；

2. 表中光源代号说明：B-白炽灯；G-荧光高压汞灯；K-金属卤化物灯；N-高压钠灯；

3. JTY-23-250G 为改进产品。

### 三、投光灯照明计算

在大面积的露天堆场，警卫照明或大型露天作业场所等，可采用投光灯。

投光灯所需数量可按下式计算：

$$n = \frac{E_{pj} k A}{\phi \eta \eta_1 z}$$

式中  $E_{pj}$  —— 被照面要求的平均照度 (lx)；

$k$  —— 照明补偿系数，由表 10-22 查得；

$A$  —— 照明场地面积 ( $m^2$ )；

$\phi$  —— 每盏投光灯泡的光通量 (lm)；

$\eta$  —— 光通利用系数，照明面积大时， $\eta \approx 0.9$ ；

$\eta_1$  —— 投光灯效率， $\eta_1 = 0.35 \sim 0.38$ ；

$z$  —— 照明不均匀系数，等于最小照度与平均照度之比， $z \approx 0.7$ 。

投光灯容量也可按下式估算：

$$P = m E_{pj}$$

式中  $P$  —— 投光灯单位容量 ( $W/m^2$ )；

$m$  —— 投光灯系数，一般为  $0.2 \sim 0.28$ ；

$E_{pj}$  —— 同前。

## 第五节 照明线路、设备及其它

### 一、照明导线截面的选择

#### 1. 线路工作电流的计算

(1) 按下式求出各类光源的计算容量:

$$P_{\beta} = K_{\beta} P_{\alpha}$$

式中  $P_{\beta}$ ——各类光源的计算容量 (kW);

$K_{\beta}$ ——需要系数, 见表 10-38;

$P_{\alpha}$ ——光源的安装容量 (kW)。

表 10-38 需要系数  $K_{\beta}$

类 别	$K_{\beta}$
小型厂房及小型仓库	1.0
大厂房	0.95
行政办公楼	0.9
多数小房间组成的厂房	0.85
大型仓库、配变电所	0.6
学校、医院、托儿所、实验楼、生活用房	0.8
事故照明、室外照明	1.0
支线	1.0

(2) 分相计算出各种光源的有功电流和无功电流:

$$I_a = \frac{P_{\beta}}{220} \times 10^{-3}$$

$$I_r = I_a \operatorname{tg} \varphi$$

式中  $I_a$ 、 $I_r$ ——有功电流和无功电流 (A)。

(3) 求出该相线路的工作电流和功率因数:

$$I_{\phi} = \sqrt{(\sum I_a)^2 + (\sum I_r)^2}$$

$$\cos\varphi = \Sigma I_p / I_g$$

式中  $\Sigma I_p$  —— 该相线路各种光源有功电流之和 (A);

$\Sigma I_r$  —— 该相线路各种光源无功电流之和 (A);

$\cos\varphi$  —— 线路的功率因数。

取其最大一相的工作电流作为三相四线制线路的工作电流。若为三相对称电路，计算其中一相即可。

常用照明灯具的功率因数数值见表 10-39。

表 10-39 照明用电设备的  $\cos\varphi$  及  $\tan\varphi$

光源类别	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
白炽灯、卤钨灯	1	0
荧光灯 (无补偿)	0.55	1.52
荧光灯 (有补偿)	0.9	0.48
高压水银灯	0.45~0.65	1.98~1.16
高压钠灯	0.45	1.98
低压钠灯	0.6	1.33
金属卤化物灯	0.4~0.61	2.29~1.29
碘灯	0.51	1.6
氙灯	0.9	0.48

## 2. 导线截面的选择

(1) 选用截面的载流量应满足下式的要求:

$$I \geq I_g$$

式中  $I$  —— 选用导线的允许载流量 (A);

$I_g$ ——线路工作电流 (A)。

(2) 根据机械强度选择导线截面, 见表 10-40。

表 10-40 根据机械强度允许的  
最小导线截面面积

导线敷设方式	支持点距离 /m	截面面积/mm <sup>2</sup>	
		铜心	铝心
吊灯用软线		0.5	
瓷卡配线	0.8	1	2.5
瓷珠配线	1.5	1	2.5
	2.0	1.5	4
瓷瓶配线	3.0 以下	1.5	4
	6.0 以下	2.5	4
槽板配线		1	2.5
穿管配线		1	2.5
铝卡片配线	0.3 以下	1	2.5
建筑物内裸导线		2.5	6
建筑物外沿墙敷设绝缘导线	20 以下	4	10
引下线 (绝缘导线)	10 以下	2.5	4
	25 以下	4	6
移动式用电设备绝缘软线	生活用	0.5	
	生产用	1	
380/220V 架空裸导线		6	16



(3) 验算线路电压损失：要求线路末端电压不低于规定的允许值。

### 3. 电压损失的校验

(1) 照明线路允许电压损失率的规定：

- ① 对视觉工作要求较高的室内照明，为 2.5%；
- ② 一般工作场所的室内照明、露天工作场所的照明，为 5%；
- ③ 道路照明、事故照明、警卫值班及低压照明，为 10%；
- ④ 为了保护光源寿命，要求灯具的最高电压应不高于其额定值的 105%。

(2) 电压损失的验算：三相四线制对称负载的电压损失率可按下式计算：

$$\Delta U\% = K_l I_g \cdot L$$

式中  $K_l$ ——与负荷功率因数对应的每  $1\text{A} \cdot \text{km}$  电流负荷距的电压损失百分数，三相四线制，查表 10-37；二相三线制为查得的  $K_l$  值的 1.5 倍；单相二线制为  $K_l$  的 2 倍。

$I_g$ ——线路工作电流 (A)；

$L$ ——线路长度 (m)。

## 二、电感式镇流器的计算

电感式镇流器的铁心尺寸如图 10-29 所示。计算步骤如下：

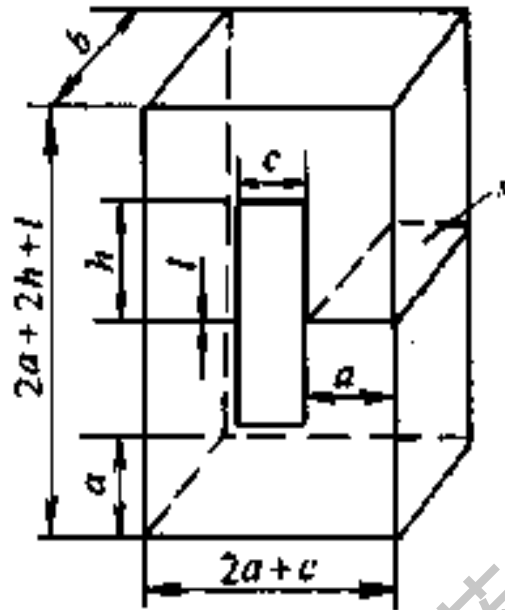


图 10-29 电感式镇流器的铁心

### 1. 镇流器工作电压

$$U_B \approx \sqrt{\frac{U^2 - 1.5U_L^2}{K_1}}$$

式中  $U_B$ ——镇流器工作电压 (V);

$U$ ——电源电压 (V);

$U_L$ ——灯管的额定电压 (V), 见表 10-43;

$K_1$ ——荧光灯镇流器取 1.2; 汞灯镇流器取 1.0。

### 2. 铁心截面

$$S = K_2 \sqrt{U_B I}$$

式中  $S$ ——铁心截面 ( $\text{cm}^2$ );

$K_2$ ——铁心截面系数, 荧光灯镇流器取 0.5~0.6;

汞灯镇流器取 0.5~0.7;

$I$ ——灯管的额定工作电流 (A), 见表 10-43。

## 3. 绕组匝数

$$W = \frac{45U_B}{B_m S}$$

式中  $B_m$ ——最大磁通密度 (T), 荧光灯镇流器取 1.10 ~ 1.55T; 汞灯镇流器取 0.95 ~ 1.05T。

4. 绕组导线直径  $d$ 

$$d = K_3 \sqrt{I}$$

式中  $d$ ——导线直径 (mm);

$K_3$ ——电流密度系数, 荧光灯镇流器取 0.54 ~ 0.58; 汞灯镇流器取 0.6 ~ 0.7。

## 5. 绕组厚度

$$c' = \frac{2W (d + 0.03)^2}{H}$$

式中  $c'$ ——绕组厚度 (mm);

$H$ ——绕组骨架高度 (mm)。

## 6. 铁心窗口尺寸

窗口宽度 (mm):  $c = c' + 1$

窗口高度 (mm):  $h = H/2 + 0.5$

## 7. 铁心叠厚

$$b = 1.03s/a$$

式中  $b$ ——铁心叠厚 (cm);

$a$ ——铁心片宽度 (cm)。

## 8. 空气隙长度

$$\delta = \frac{WI \times 10^{-3}}{1.59B_m}$$

式中  $\delta$ ——空气隙的长度，即塞入的调节纸片厚度 (mm)。

### 9. 镇流器的功率损耗

$$P_d = I^2 R, \quad P_o = V_o \rho G$$

式中  $P_d$ ——铜耗 (W)；

$P_o$ ——铁耗 (W)；

$R$ ——绕组冷态电阻 ( $\Omega$ )；

$V_o$ ——铁心体积 ( $\text{cm}^3$ )；

$\rho$ ——硅钢片密度，约  $7.55\text{g}/\text{cm}^3$ ；

$G$ ——硅钢片比耗 ( $\text{W}/\text{kg}$ )，见表 10-41。

表 10-41 的使用：要求  $B_m = 1.15\text{T}$  下的比耗，可先从第一列中找到 1.10，再从横行中找到 0.05，两行列交叉的数值 4.4 便是 1.15 下的比耗。

表 10-41 是 0.5 厚的 D11 硅钢片的比耗，其他牌号的硅钢片，还须再乘以一个系数  $K$ ，见表 10-42。

表 10-41 硅钢片的比耗

(单位：W/kg)

B/T	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.50	1	1.04	1.08	1.11	1.14	1.2	1.2	1.25	1.31	1.35
0.60	1.4	1.45	1.5	1.55	1.6	1.65	1.7	1.75	1.8	1.85

(续)

B/T	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.70	1.9	1.95	2	2.05	2.1	2.15	2.15	2.15	2.2	2.25
0.80	2.3	2.35	2.4	2.45	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75
0.90	2.8	2.85	2.9	2.95	3	3.05	3.1	3.15	3.2	3.25
1.00	3.3	3.35	3.4	3.45	3.5	3.6	3.7	3.78	3.86	3.94
1.10	4	4.05	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8
1.20	4.9	5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8
1.30	5.9	6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8
1.40	6.9	7	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8
1.50	7.9	8	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8
1.60	8.9	9	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8
1.70	9.9	10	10.1	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.76	10.88
1.80	11	11.15	11.3	11.45	11.6	11.75	11.9	12.15	12.2	12.35

表 10-42 系数  $k$  值

硅钢片号	D12	D13	D21	D22	D23	D31	D31	D41	D41
厚度/mm	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.35	0.5	0.35
系数 $k$	0.85	0.8	0.76	0.71	0.66	0.61	0.49	0.49	0.41

表 10-43 荧光灯主要性能及技术数据

灯管名称	型号	光电参数						
		额定功率 /W	工作电压 /V	工作电流 /mA	起动电流 /mA	光通量 /lm	平均寿命 /h	
	YZ6RR	6	50±6	140	180	160	1500	
	YZ8RR	8	60±6	150	200	250	1500	
	YZ12RR	12	90±5	160	200	550	1500	
	YZ15RR	15	51±7	330	500	450	3000	
	YZ20RR	20	57±7	370	550	775	3000	
	YZ30RR	30	81±10	405	620	1295	5000	
	YZ40RR	40	103±10	430	650	2200	5000	
	YZ65RR	65	110±10	670	1800	3510	3000	
	YZ85RR	85	120±10	800		4760	3000	
	YZ100RR	100	92±11	1500		4400	2000	
	YZ125RR	125	140±15	940		7500	3000	

直管形  
日光灯  
(荧光色)

(续)

灯管名称	型号	光电参数						平均寿命 /h
		额定功率 /W	工作电压 /V	工作电流 /mA	起动电流 /mA	光通量 /lm		
日光色细 管荧光灯	YZS20RR	20	59±7	360	550	1000	3000	
	YZS40RR	40	107±10	420	650	1256	5000	
日光色快 起动荧光灯	YZK15RR	15	51±7	330		450	3000	
	YZK20RR	20	51±7	370		775	3000	
	YZK40RR	40	103±10	430		2000	5000	
三光色荧光灯	SJS40	40	103±10	430	650	3000	5000	
U型荧光灯 (日光色)	YU30	30	89	350	550	1550	2000	
	YU40	40	108	410	650	2200	2000	
圆环型	YH20	20	60	350	500	930	2000	
荧光灯 (日光色)	YH30	30	89	350	560	1350	2000	
	YH40	40	108	410	650	2200	2000	

(续)

灯管名称	型号	尺寸/mm						灯头 型号
		$L_1$	$L$	$d$	$D_1$	$D$		
直管形 日光灯 (荧光色)	YZ6RR	211.9	226.7	15			G <sub>5</sub>	
	YZ8RR	288.1	302.4	15			G <sub>5</sub>	
	YZ12RR	485.4	500	38			G <sub>5</sub>	
	YZ15RR	437.4	451.6	38			G <sub>13</sub>	
	YZ20RR	589.8	604	38			G <sub>13</sub>	
	YZ30RR	894.6	908.8	38			G <sub>13</sub>	
	YZ40RR	1199.4	1213.6	38			G <sub>13</sub>	
	YZ65RR	1500	1514.2	38			G <sub>13</sub>	
	YZ85RR	1763.4	1778.0	38			G <sub>13</sub>	
	YZ100RR	1199.4	1213.6	38			G <sub>13</sub>	
YZ125RR	2374.9	2389.1	38			G <sub>13</sub>		



(续)

灯管名称	型号	尺寸/mm						灯头 型号
		$L_1$	$L$	$d$	$D_1$	$D$		
日光色细 管荧光灯	YZS20RR	539.8	604.0	25			G13	
	YZS40RR	1199.4	1213.6	25			G13	
日光色快 启动荧光灯	YZK15RR	437.4	451.6	38			G13	
	YZK20RR	539.8	664.0	38			G13	
	YZK40RR	1199.4	1213.6	38			G13	
三光色荧光灯	SJS40	1199.4	1213.6	38			G13	
U型荧光灯	YU30	410	417	20				
(日光色)	YU40	619	626	20				
圆环型	YH20				145	207		
荧光灯	YH30				244	308		
(日光色)	YH40				333	397		

注： $L_1$ —灯管长度； $L$ —包括两端管脚在内的管长； $d$ —灯管直径。

### 三、荧光灯和附件的技术参数及计算

1. 电感式镇流器技术数据，见表 10-44。

表 10-44 荧光灯镇流器的技术数据

所配灯管的功率 /W	工作电压 /V	工作电流 /mA	起动电压 /V	起动电流 /mA	功率损耗 /W
6	203	140 <sub>-5</sub>	215	180±10	≤4
8	200	150 <sub>-10</sub>	215	190±10	≤4
15	202	330 <sub>-30</sub>	215	440±30	≤8
20	196	350 <sub>-30</sub>	215	460±30	≤8
30	180	360 <sub>-30</sub>	215	560±30	≤8
40	165	410 <sub>-30</sub>	215	650±30	≤8
100	185	1500 <sub>-100</sub>	215	1800±100	≤20

规格 (220V)	线径 /mm	匝数	铁心截面 /cm <sup>2</sup>	铁心间隙 /mm
6W	0.19~0.2	2200~2400	1.5×1.7	0.08~0.09
8W	0.19~0.2	2400;	1.4×1.4;	0.05~0.1
		3200~3460	1.5×1.7	
15W	0.31~0.33	1680~1780	1.7×2.4	0.05~0.08
20W	0.31~0.33	1650~1720	1.7×2.4	0.08~0.12
30W	0.34~0.35	1420~1500	1.7×2.4	0.23
40W	0.34~0.35	1230~1290	2.0×2.4	0.4~0.5

2. 荧光灯起辉器的电参数, 见表 10-45。

**表 10-45 荧光灯起辉器的电参数**

类别 /W	电源电压 /V	欠压启动		起辉电压 /V
		电压/V	时间/s	
4~8	220	198	<5	≥75
15~20			<4	≥75
30~40			<4	≥130
100			<5	≥130

3. 各种荧光灯的耗电量, 见表 10-46。

**表 10-46 各种荧光灯的耗电量**

灯管的自身耗电 /W	配用的镇流器耗电 /W	总耗电量 /W	规格直径 /mm
4	4	8	16
6	4	10	16
8	4	12	16
10	5	15	25
12	5	17	18
15	7.5	22.5	38
20	8	28	38
30	8	38	38
40	8	48	38
110	20	130	38

#### 4. 荧光灯电容器的选用

由于电感式镇流器有一个电感元件—镇流器,因此,功率因数很低,一般只有0.5~0.6。为了提高功率因数,可在电源侧并联电容器加以补偿,其电容量可按下式计算:

$$C = \frac{3183I\sin\varphi}{U}$$

式中  $C$ ——补偿电容器电容量 ( $\mu\text{F}$ );

$I$ ——灯管的额定工作电流 (A);

$\sin\varphi$ ——补偿前功率因数角的正弦值,  $\sin\varphi =$

$$\sqrt{1 - \cos^2\varphi}$$

$U$ ——电源电压 (V)。

电容器的耐压值应大于工作电压。由于电容器上标的耐压值是最大值,因此电容器的耐压应大于  $\sqrt{2}U = \sqrt{2} \times 220 = 300$  (V)

荧光灯选配电容器的数值,见表10-47。

表 10-47 荧光灯选配电容量表

电源电压 /V	荧光灯功率 /W	选配电容量 / $\mu\text{F}$
220	15	2.5
220	20	2.5
220	30	3.75
220	40	4.75

# 第十一章 接地接零

## 第一节 基础知识及计算

### 一、接地与接零的种类

电力系统和电气设备的接地与接零，按用途可分八类，图 11-1 是接地的示意图。

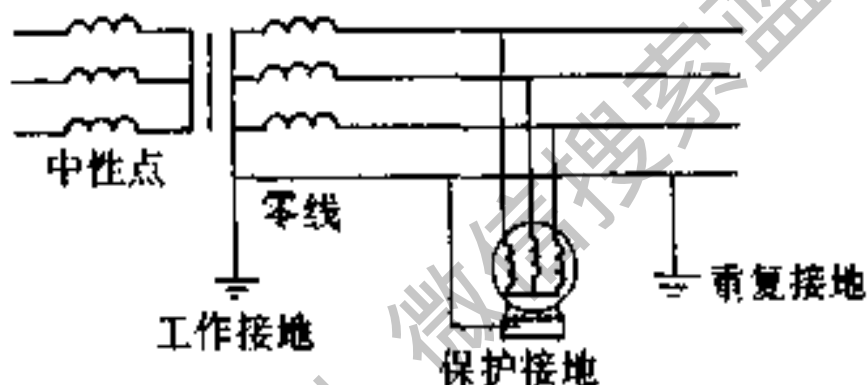


图 11-1 工作接地、重复接地  
与保护接地示意图

#### 1. 工作接地

将电力系统中运行需要的接地（如变压器或发电机的中性点、避雷器的引下线等）直接与地作金属连接，称为工作接地。

#### 2. 重复接地

与变压器或发电机直接接地的中性点连接的中性线称为零线；将零线上的一点或多点与地再次做电气连接，

称重复接地。

### 3. 保护接零

在中性点直接接地的低压电网中，电气设备的金属外壳等与零线连接，称为保护接零。

### 4. 保护接地

电气设备的金属外壳、钢筋混凝土电杆和金属杆塔由于绝缘损坏可能带电，为了防止这种电压危及人身安全而设置的接地，称为保护接地，如图 11-2 所示。

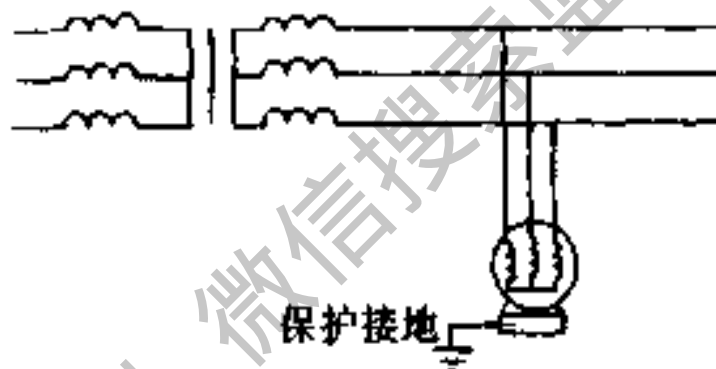


图 11-2 保护接地示意图

### 5. 过电压保护接地

为了消除雷击和过电压的危险影响而设的接地，称过电压保护接地。

### 6. 静电接地

为了消除生产过程中产生的静电而设的接地，称静电接地。

### 7. 屏蔽接地

为了防止电磁感应而对电气设备的金属外壳、屏蔽

罩、屏蔽线的外皮或建筑物金属屏蔽体进行的接地,称为屏蔽接地。

### 8. 电法保护接地

为了保护管道不受腐蚀,采用阴极保护或牺牲阳极保护等的接地,称电法保护接地。

### 二、保护接地与保护接零的范围

保护接地适用于不接地(对地绝缘)电网;保护接零适用于低压中性点直接接地、电压为 380/220V 的三相四线制电网。

1. 应采用保护接地与保护接零的范围(除另有规定外)

(1) 电机、变压器、电器、携带式及移动式用电器具等的底座和外壳。

(2) 电力设备传动装置。

(3) 互感器二次绕组。

(4) 配电屏与控制屏壳体。

(5) 室内外配电装置的金属架构和钢筋混凝土架构,以及靠近带电部分的金属围栏和金属门。

(6) 交、直流电力电缆的接线盒、终端盒外壳和电缆外皮、穿线钢管等。

(7) 装有避雷器线的电力线路塔杆。

(8) 在非沥青地面的居民区内,无避雷线、小接地短路电流架空电力线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆塔。

(9) 安装在配电线路上的开关、电容器等电力设备。

(10) 铠装控制电缆的外皮, 非铠装或非金属护套电缆的 1~2 根屏蔽芯线。

2. 可不采取保护接地与保护接零的范围 (除另有规定外)

(1) 在木质、沥青等不良导电地面的干燥房间内, 交流额定电压 380V 及以下、直流额定电压 440V 及以下的电力设备外壳。

(2) 安装在配电屏、控制屏和配电装置上的电气测量仪表、继电器和其它低压电器等的外壳, 以及当发生绝缘损坏时, 在支持物上不会引起危险电压的绝缘子金属底座等。

(3) 安装在已接地的金属构架上的设备, 如套管等 (应保证电气接触良好)。

(4) 与已接地的机床底座之间有可靠电气接触的电动机和电器的外壳。

(5) 额定电压 220V 及以下的蓄电池室内支架。

保护接地与保护接零的范围见表 11-1。

### 三、接触电压、跨步电压和对地电压等的计算

#### 1. 接触电压和跨步电压的计算

接触电压和跨步电压的计算, 有下面几种常用的方法



(1) 大接地短路系统的允许值:

$$\text{接触电压 } E_c = \frac{250 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}}$$

$$\text{跨步电压 } E_k = \frac{250 + \rho_s}{\sqrt{t}}$$

表 11-1 保护接地与保护接零的范围

序号	对地电压	房屋特征			
		无高度危险	有高度危险	特别危险包括有着火危险及室外装置	有爆炸危险
	1	2	3	4	5
I	65V 以下	不需要接地或接零 (在固定式 36V 或 12V 低压装置中, 常将线路的一相接地作为变压器绝缘击穿和一次电压窜入二次绕组的保护装置)			防止静电荷引起火花, Q-1、Q-2 级房屋中, 应将保存易燃体的金属容器或含有这些液体的器械、运送这些液体的管子、过滤器及液体流过时与金属包皮摩擦的部分, 予以接地

(续)

序号	对地电压	房屋特征			
		无高度危险	有高度危险	特别危险包括有着火危险及室外装置	有爆炸危险
	1	2	3	4	5
I	65~150V	不需要接地或接零	手柄、飞轮及与机床有连接的电机外壳	在正常情况下，与带电部分绝缘的器械、电机及配电箱的金属外壳及构架、电缆接头盒、中间接线盒的金属外壳、电缆的金属包皮及金属保护管等	同序号 I-5 及 I-4 中的元件
II	150~1000V	同序号 I-4 中的元件	同序号 I-4 中的元件	同序号 I-4 中的元件	同序号 I-5 及 I-4 中的元件
IV	1000V 以上	在正常条件下，与带电部分绝缘的金属部分、电气设备的支架和围栅结构的所有金属部分及房架、平台和可能带电且人能接触的结构部分			同序号 I-5、II-3 及 II-4 的元件

式中  $E_c$ 、 $E_k$ ——接触电压和跨步电压 (V)；

$\rho_s$ ——人足站立地面的土壤电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )；

$t$ ——短路电流持续时间 (s)。

(2) 小接地短路电流系统允许值：

接触电压  $E_c = 50 + 0.05\rho_s$ ，

跨步电压  $E_k = 50 + 0.2\rho_s$ ，

在特别潮湿的接地装置附近，人体的接触电压应不超过 10V，跨步电压应不超过 20V。大牲畜如牛等的跨步电压不超过 8V。

(3) 实际计算值：接地装置水平敷设时，最大接触电压及跨步电压可按下式计算：

最大接触电压  $E_{cm} = K_m \cdot K_r \rho \frac{I}{l}$

最大跨步电压  $E_{km} = K_s \cdot K_r \rho \frac{I}{l}$

式中  $E_{cm}$ 、 $E_{km}$ ——最大接触电压和最大跨步电压 (V)；

$\rho$ ——平均土壤电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )；

$I$ ——流经接地装置的最大单相短路电流 (A)；

$K_m$ 、 $K_s$ ——与接地网布置方式有关的系数，可取

$K_m = 1$ ， $K_s = 0.1 \sim 0.2$ ；

$K_r$ ——接地电流不均匀修正系数，可取 1.25；

$l$ ——接地网全长 (m)。

## 2. 各种接地、接零保护的的对地电压计算

(1) 中性点的不接地系统，电气设备接地和不接地  
(图 11-3)；

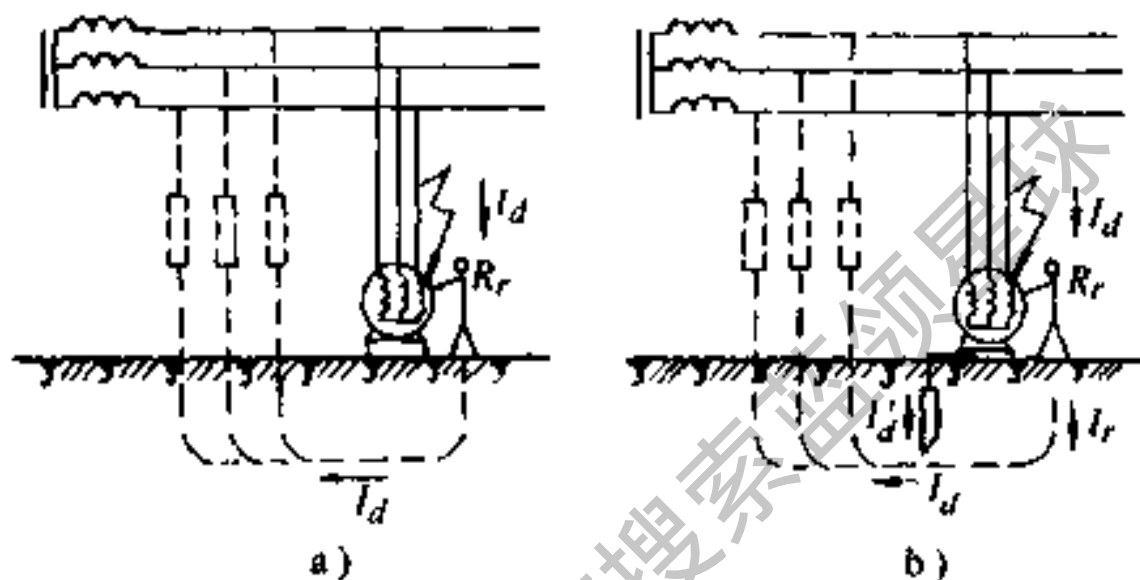


图 11-3 设备不接地或接地

a) 设备不接地 (危险)    b) 设备接地保护 (安全)

① 中性点不接地系统、电气设备不接地，如图 11-3a) 所示。如果电网各相对地绝缘阻抗相等，则漏电设备对地电压  $U_d$  为

$$U_d = \frac{3UR_r}{|3R_r + Z|}$$

式中  $U$ ——电网相电压 (V)；

$R_r$ ——人体电阻 ( $\Omega$ )；

$Z$ ——电网每相对地绝缘阻抗 ( $\Omega$ )。

当系统的绝缘电阻大大高于分布电容的容抗时，对地电压为

$$U_d = \frac{3UR_r}{|3R_r + jX_c|} = \frac{3UR_r}{\sqrt{9R_r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}$$

式中  $C$ ——电网每相对地分布电容 (F);

$X_c$ ——电网每相对地容抗 ( $\Omega$ );

$\omega$ ——电源电角频率,  $\omega = 2\pi f$ 。

流过人体的电流  $I_r$  为

$$I_r = I_d = \frac{U_d}{R_r} = \frac{3U}{\sqrt{9R_r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}$$

② 中性点不接地系统, 采取保护接地, 如图 11-3b) 所示。漏电设备外壳对地电压  $U_d$  为

$$U_d = \frac{3UR_d}{|3(R_d // R_r) + Z|}$$

式中  $R_d$ ——保护接地电阻 ( $\Omega$ );

其他符号同前。

因  $R_d \ll R_r$ , 故有

$$U_d = \frac{3UR_d}{|3R_d + Z|}$$

因为  $R_d \ll Z$ , 所有漏电设备对地的电压大大降低。

流过人体的电流为

$$I_r = \frac{U_d}{R} \approx \frac{R_d}{R_r + R_d} I_d$$

式中  $I_d$ ——接地电流 (A)。

当  $R_d$  足够小时,  $I_r$  很小, 起到保安作用。

(2) 中性点接地系统, 电气设备不接地或接零、保护接地、保护接零 (图 11-4)

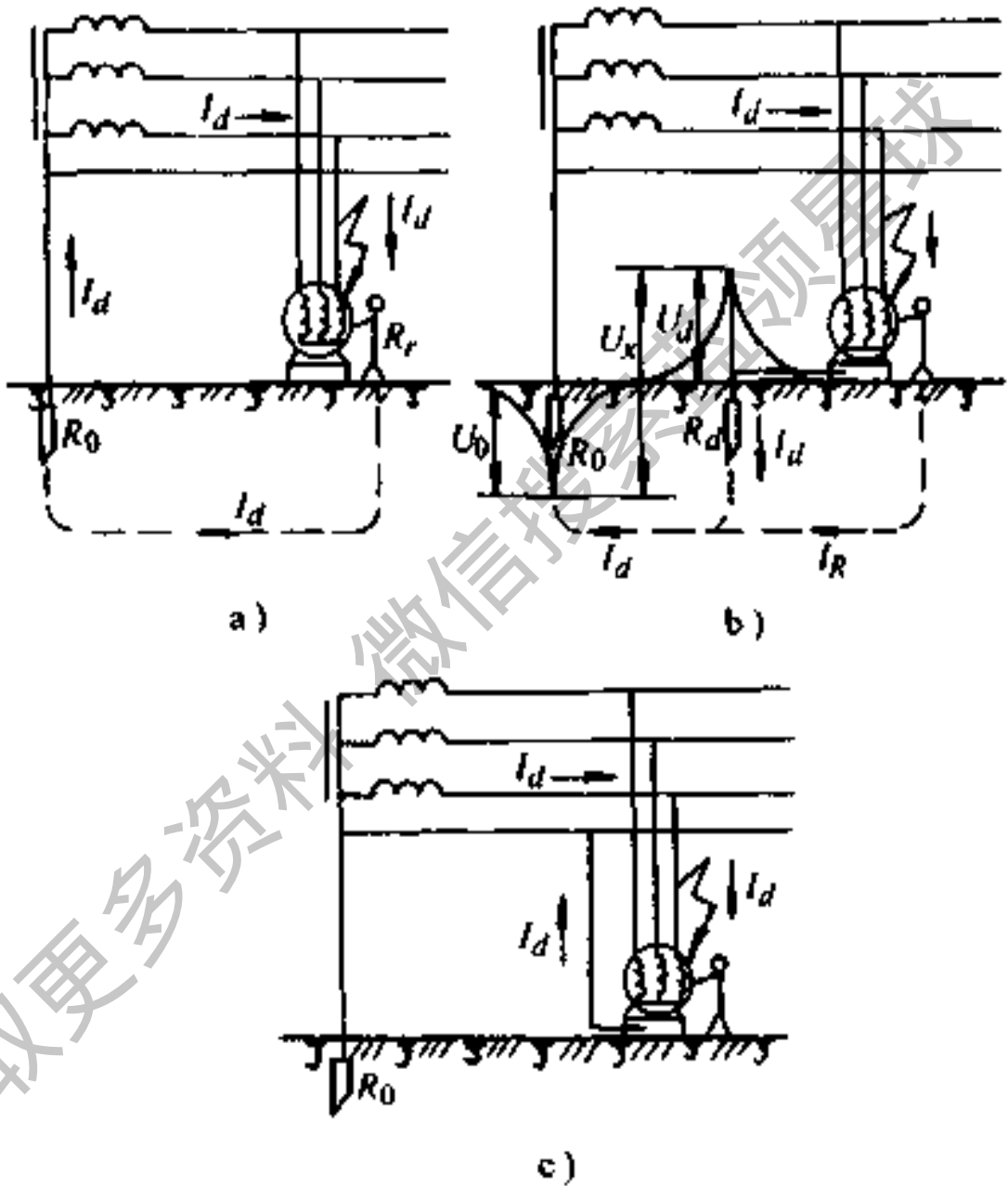


图 11-4 设备不接地、接零与保护接地、接零

a) 设备不接地或接零(危险) b) 设备接地

保护(不安全) c) 设备接零保护(安全)

① 中性点接地系统，电气设备不接地或接零：图 11-4a 为电气设备不接地或接零的情况。流过人体的电流为

$$I_r = \frac{U}{R_r + R_0}$$

式中  $R_0$ ——工作接地装置的电阻 ( $\Omega$ )。

② 中性点接地系统，采取保护接地，图 11-4b 为电气设备采取保护接地的情况。忽略导线及设备电阻的影响时，故电流为

$$I_d \approx \frac{U}{R_0 + R_d}$$

漏电设备对地电压为

$$U_d = \frac{R_d U}{R_0 + R_d}$$

通过人体的电流为

$$I_r = U_d / R_r$$

若要控制安全接触电压  $U_d$  不超过 60V，则保护接地电阻应尽量小。不过在经济上不合算。

③ 中性点接地系统，采取保护接零，图 11-4c 为电气设备采取保护接零的情况。当一相绝缘损坏并与电气设备外壳相碰时，便形成了一个由相线—设备外壳—零线的闭合电路。由于该回路的电阻很小，所以，短路电流很大，从而引起保护电器（如熔断器等）动作，迅速切断故障设备的电源，消除触电的危险。

(3) 中性点接地系统中的个别设备接地如图 11-5 所示：

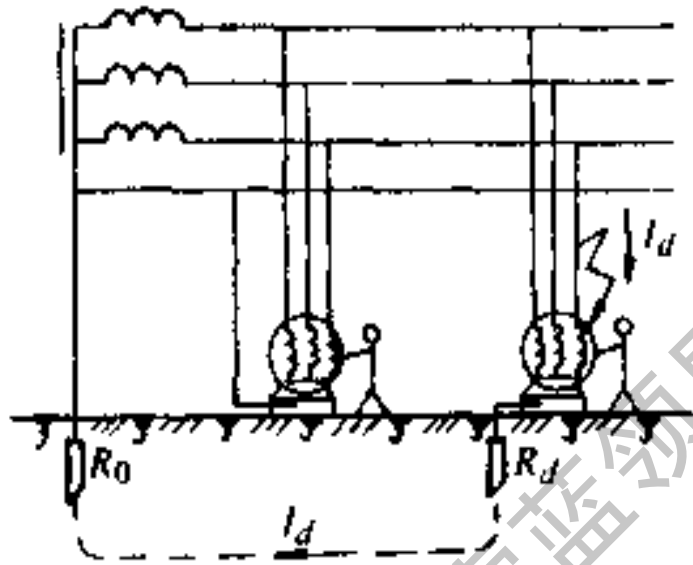


图 11-5 个别设备不接零（危险）

中性点接地系统中，不允许个别设备接地而不接零。图 11-5 中，设备  $D$  接地而未接零，当设备  $D$  漏电时，其电流流过  $R_d$  和  $R_0$  构成回路。由于该电流可能不太大，而不能引起保护电器动作，故障将长时间存在。这时，漏电设备外壳对地电压为

$$U_d = \frac{R_d U_0}{R_0 + R_d}$$

零线对地电压为

$$U_0 = \frac{R_0 U}{R_0 + R_d}$$

$U_d$  和  $U_0$  都可能是危险电压，从而造成与该设备相连的其他所有接零设备都可能带上危险电压。

(4) 中性点接地系统，零线未重复接地和有重复接



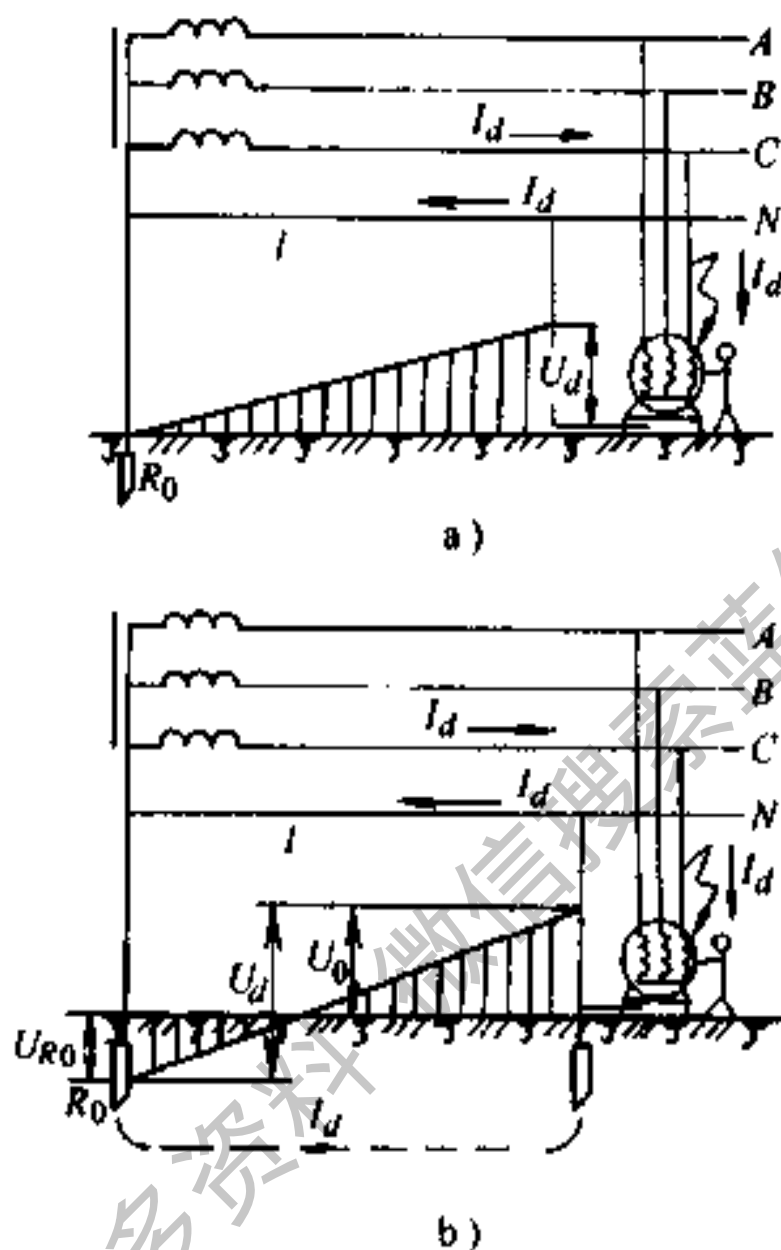


图 11-6 零线未重复接地  
和有重复接地

a) 未重复接地 b) 重复接地

地如图 11-6，零线重复接地的作用。

① 当系统发生碰壳短路时，可降低漏电设备的对地电压。在没有重复接地时，短路电流  $I_d$  在零线部分产生的电压降  $U_d$ ，等于漏电设备对地电压  $U_d$ 。即

$$U_d = U_l = I_d Z_0$$

式中  $Z_0$ ——零线  $l$  段的阻抗 ( $\Omega$ )。

通常，零线的导电能力不低于相线导电能力的 50%，若忽略其他电阻，则设备外壳对地电压为（电抗成分很小）

$$\begin{aligned} U_d &= I_d Z_0 = \frac{U}{Z_0 + Z_x} \cdot Z_0 \\ &= \frac{U}{Z_0 + 0.5Z_0} \cdot Z_0 \\ &= \frac{2}{3}U = \frac{2}{3} \times 220 \\ &= 146.7(\text{V}) > \text{安全电压} \end{aligned}$$

式中  $Z_x$ ——相线阻抗 ( $\Omega$ )。

146.7V 已大于安全电压，所以在单纯接零的情况下，还有触电危险。

有重复接地时，短路电流  $I_d$  将沿着零线和流经重复接地和工作接地两个并联电阻  $R_n$ 、 $R_0$  流入大地。

流入大地的电流  $I_d''$  为

$$I_d'' = \frac{U_0}{R_0 + R_n}$$

工作接地装置上的对地电压  $U_{R0}$  为

$$U_{R0} = \frac{R_0 U_0}{R_0 + R_n}$$

重复接地装置上的对地电压  $U_{R_n}$  为

$$U_{R_n} = \frac{R_n U_0}{R_0 + R_n}$$

通常  $R_0 \leq 4\Omega$ ,  $R_n \leq 10\Omega$ , 若  $U_0 = 146.7V$ , 则漏电设备对地电压为

$$U_d = \frac{10 \times 146.7}{4 + 10} = 104.8V$$

104.8V 电压仍对人体有危险, 但比没有重复接地时的危险性已大为减小。一般重复接地不只一处, 所以接地电阻可降低。

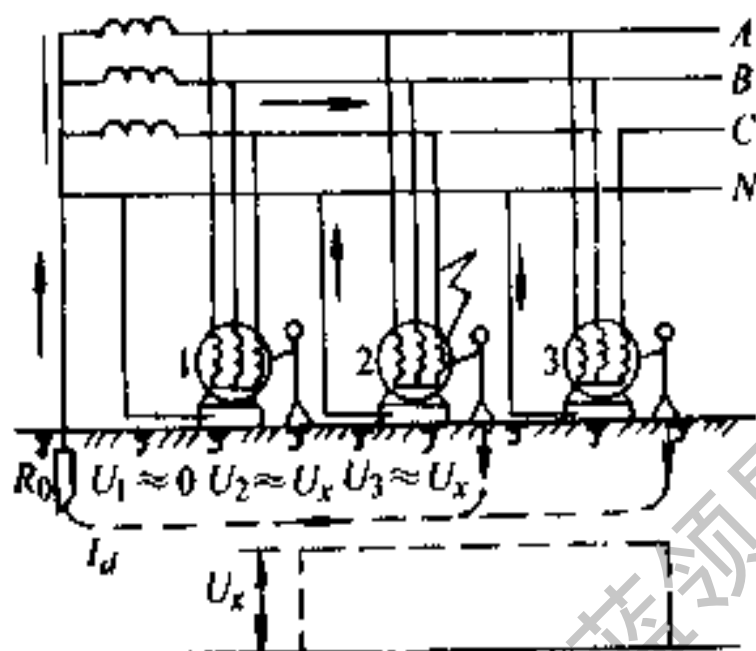
② 当零线断线, 且断线处后面某些电气设备碰壳短路时, 能减轻触电的危险如图 11-7 所示。在没有重复接地时, 断线处两边接零设备的对地电压分别接近于零和相电压。

在有重复接地时, 接在断线处后面的电气设备外壳对地电压为

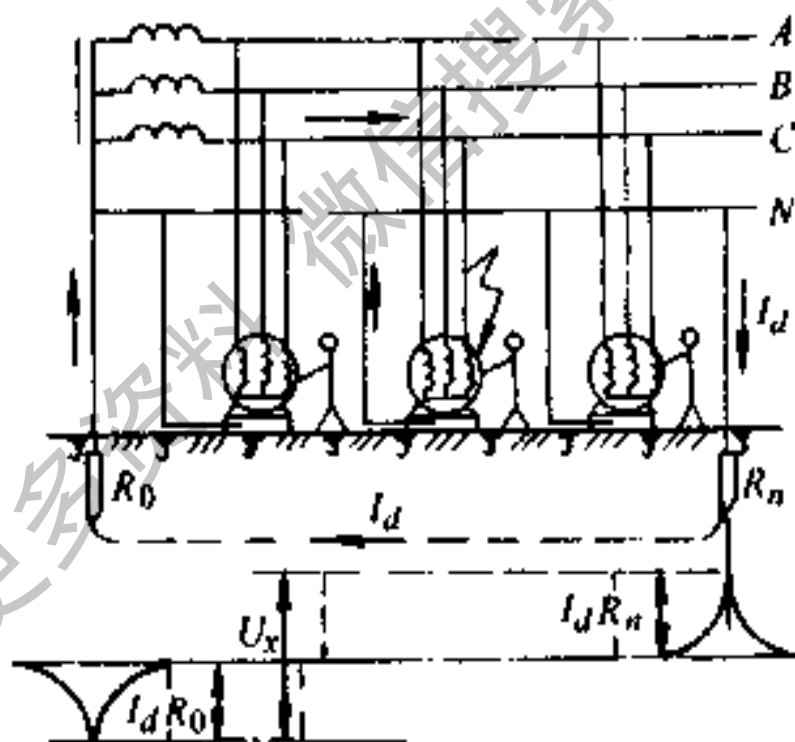
$$U_n = I_d R_n = \frac{R_n U}{R_0 + R_n}$$

接在断线处前面的电气设备外壳对地电压为

$$U_0 = I_d R_0 = \frac{R_0 U}{R_0 + R_n}$$



a)



b)

图 11-7 未重复接地与有重复  
接地时零线断线的情况  
a) 未重复接地时零线断线 (不安全)  
b) 有重复接地时零线断线 (较安全)

例如,当  $R_n = R_0$  时,断线处前后对地电压均为  $U/2$ 。由于断线处后面的设备外壳对地电压降低了一半,从而减轻了触电的危险程度。但  $U/2$  的电压对人体仍然不安全,因此应避免零线断线。

采取重复接地,还可缩短碰壳或接地短路持续时间,以及改善架空线路的防雷性能。

#### 四、等化对地电压的计算

等化对地电压是采用特殊的接地方式等化大地各点的电位,降低接触电压和跨步电压,从而达到安全用电的目的。

##### 1. 网络接地体总长度的估算

网络接地体可分为长孔网络和方孔网络两种,如图 11-8 所示。图中,  $n$  为网络一边均压条数,  $D$  为网络均压条间距离,  $r$  为圆弧半径。

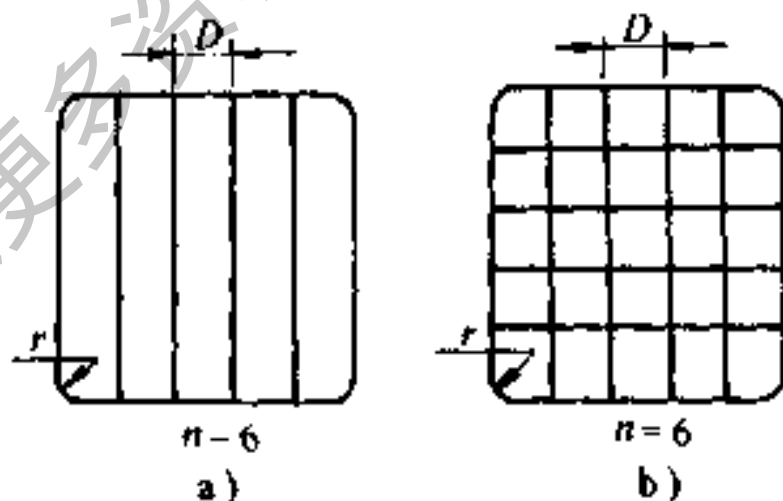


图 11-8 网络接地体

a) 长孔网格 b) 方孔网格

网络接地体总长度可按下式估算：

$$L = K_i K_r \rho \frac{I_d}{E_{j,r}}$$

式中  $L$ ——网络接地体总长度 (m)；

$K_r$ ——网络接地体形状系数，计算见后；

$\rho$ ——土壤电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )；

$I_d$ ——接地短路电流 (A)；

$E_{j,r}$ ——接地电势允许值 (V)。

$K_i$ ——网络接地体调整系数，见表 11-2；

表 11-2 接地装置的调整系数

网络短边 均压条数	1	2	3	4	5	6	7	8 以上
$K_i$	1	1.16	1.32	1.47	1.6	1.73	1.87	2

网络接地体形状系数  $K_r$ ，由下式计算：

$$K_r = 0.366 \lg \frac{D}{16hd} + 0.366 \lg \left( \frac{3}{4} \right) \left( \frac{5}{6} \right) \left( \frac{7}{8} \right) \dots$$

式中  $D$ ——网络均压条间距离 (cm)，一般大于 400cm；

$h$ ——埋入地下深度 (cm)，一般为 60~80cm；

$d$ ——圆钢接地体直径或扁钢宽度的一半 (cm)。

上式右边第二项乘积的项数等于网络短边均压条数减去 2。

## 2. 网络内接触电势 $E_j$ 的计算

$$E_j = K_j I_d R_d$$

式中  $K_j$ ——接触系数；

$I_d$ ——接地短路电流 (A)；

$R_d$ ——接地装置的接地电阻 ( $\Omega$ )。

当埋入深度  $h = 60 \sim 80\text{cm}$  时，接地系数可按下式计算

$$K_j = K_n K_d K_s$$

式中  $K_n$ 、 $K_d$ 、 $K_s$ ——分别为考虑均压条数  $n$ 、接地体直径  $d$  和网络面积  $S$  影响的系数，见表 11-3。

表 11-3 系数  $K_n$ 、 $K_d$ 、 $K_s$

系数类别	长孔网络	方孔网络	备注
$K_n$	$\frac{0.97}{n} + 0.096$	$\frac{1.03}{n} + 0.047$	$n \leq 9$
	$\frac{0.545}{n} + 0.137$	$\frac{0.55}{n} + 0.105$	$n \geq 10$
$K_d$	1.2 - 10d		$d$ 的单位 m
$K_s$	1.0		$S \leq 1600\text{m}^2$
	$1.23 - 0.23 \times \frac{40}{\sqrt{S}}$		$S > 1600\text{m}^2$

注： $n$  为均压系数； $d$  为圆钢接地体直径或扁钢宽度的一半；

$S$  为网络的面积。

### 3. 网络外跨步电势的计算

网络外最大跨步电势  $E_k$  可按下式计算

$$E_k = K_k I_d R_d$$

式中  $K_k$ ——最大跨步系数；

$I_d$ 、 $R_d$ ——同前。

当埋入深度分别为 0.6m 和 0.8m 时，方形网络的跨步系数为

$$K_{k(0.6)} = 1.28 \left( \frac{L - L_1}{L} \cdot \frac{0.477}{S^{0.25}} + \frac{L_1}{L} \cdot \frac{0.61}{\ln \frac{9.02 \sqrt{S}}{d}} \right)$$

$$K_{k(0.8)} = 1.28 \left( \frac{L - L_1}{L} \cdot \frac{0.41}{S^{0.25}} + \frac{L_1}{L} \cdot \frac{0.476}{\ln \frac{9.02 \sqrt{S}}{d}} \right)$$

式中  $L$ ——网络接地体总长 (m)；

$L_1$ ——网络接地体周长 (m)；

$S$ ——网络面积 ( $m^2$ )；

$d$ ——接地体直径或扁钢宽度的一半 (m)。

### 五、屏蔽的种类和要求

作为对电磁干扰抑制的一种措施，可采用屏蔽方法。所谓屏蔽，就是把干扰源、载扰线路、易受干扰的设备或线路，用金属板（铝板、铜板、钢板）或金属网（钢板拉网、铜丝编织网）包围起来，以降低辐射干扰传播。屏蔽的种类和要求见表 11-4。



表 11-4 屏蔽的种类和要求

类 型	简单说明	基本要求	常用材料	适用频段
静电屏蔽	把电场终止在屏蔽金属物表面，而将电荷传送到接地的机壳上，可以封闭干扰电场	屏蔽外壳与干扰源机壳相连	铜或铝	低频
磁屏蔽	利用屏蔽层具有高导磁率，把磁场封闭在屏蔽层厚度内，可封闭干扰电场	屏蔽层具有高导磁率	铁或铁镍合金	直流或低频
电磁屏蔽	利用在金属表面的反射和金属内部的吸收，或利用在屏蔽层中的涡流现象，以削弱干扰电磁场	屏蔽层具有高导磁率和高导电系数	铜、铝、铁	高频

## 六、接地电阻允许值的规定

### 1. 流散电阻、接地电阻、工频接地电阻、冲击接地

## 电阻的区别

(1) 流散电阻：电流自接地的周围向大地流散所遇到的全部电阻。

(2) 接地电阻：接地体的流散电阻与接地线电阻之和。由于接地线电阻很小，可忽略不计，因此，可以认为流散电阻等于接地电阻。

(3) 工频接地电阻：通常所说的接地电阻是对于工频电流而言的，因此也叫工频接地电阻。

(4) 冲击接地电阻：雷电流通过接地体时的接地电阻。

在接地电阻前没有注明“冲击”两字时，一般均指工频接地电阻（流散电阻）。

## 2. 电力线路及电力设备对接地电阻的要求

电力设备和线路对接地电阻的要求，见表 11-5。表中接地装置流入大地的接地短路电流  $I_{jd}$  的计算方法如下：

(1) 在中性点经消弧线圈接地的网络中，短路电流应等于消弧线圈额定电流的 1.25 倍。

(2) 在中性点不接地的网络中，短路电流应采用单相接地电容电流，按下式计算：

$$I_{jd} = \frac{U_c(35L_1 + L_2)}{350}$$

式中  $I_{jd}$ ——单相接地电容电流 (A)；

表 11-5 电力线路及电力设备接地电阻要求

序号	名称	接地装置特点	接地电阻/ $\Omega$
1	1kV 以上 大接地电流 电力线路	仅用于该线路的接地装置	$R \leq \frac{2000}{I_{jd}}$ 当 $I_{jd} > 4\text{kA}$ , 可取 $R \leq 0.5$
2	1kV 以上 小接地电流 电力线路	仅用于该线路的接地装置	$R \leq \frac{250}{I_{jd}} \leq 10$
3		与 1kV 以下线路的共同 接地装置	$R \leq \frac{125}{I_{jd}} \leq 10$
4	1kV 以下 中性点直接 接地的电力 线路	与 100kVA 以上发电机或 变压器相连的接地装置	$R \leq 4$
5		序号 4 的重复接地	$R \leq 10$
6		与 100kVA 及以下发电机 或变压器相连的接地装置	$R \leq 10$
7		序号 6 的重复接地	$R \leq 30$
8	1kV 以下 中性点不接 地的电力线 路	与 100kVA 以上发电机或 变压器相连的接地装置	$R \leq 4$
9		序号 8 的重复接地装置	$R \leq 10$
10		与 100kVA 及以下发电机 或变压器相连的接地装置	$R \leq 10$
11		序号 10 的重复接地装置	$R \leq 10$

(续)

序号	名称	接地装置特点	接地电阻/ $\Omega$
12	引入线装有 25A 以下熔断器的线路	任何供电系统	$R \leq 10$
13	电弧炉、工业电子设备、电流及电压互感器等	高低压电气设备联合接地	$R \leq 4$
14		电流、电压互感器二次线圈	$R \leq 10$
15		高压线路的保护网或保护线	$R \leq 10$
16		电弧炉	$R \leq 4$
17		工业电子设备	$R \leq 10$
18		静电接地	$R \leq 100$
19	$\rho$ 大于 $500\Omega \cdot m$ 高土壤电阻率地区	1kV 以下小接地系统的电气设备	$R \leq 20$
20		发电厂和变电所的接地装置	$R \leq 10$
21		大接地电流系统发电厂和变电所装置	$R \leq 5$
22	无避雷线的架空线路	小接地电流系统钢筋混凝土杆、金属杆	$R \leq 30$

(续)

序号	名称	接地装置特点	接地电阻/ $\Omega$
23	无避雷线的架空线路	低压线路钢筋混凝土杆、金属杆	$R \leq 30$
24		零线重复接地	$R \leq 10$
25		低压进户线绝缘子铁脚	$R \leq 10$

注：指单台或并联运行的总容量而言。

$U_0$ ——网路额定电压 (kV)；

$L_c$ ——电缆线路长度 (km)；

$L_j$ ——架空线路长度 (km)。

(3) 计算接地短路电流应按运行中可能发生最大接地短路电流的接地方式确定。

3. 建筑物和构筑物过电压保护接地电阻要求见表 11-6。

4. 防雷保护设备的接地电阻要求见表 11-7

5. 通讯线路用户保安器及分线箱保安器的接地电阻要求

用户保安器的接地电阻要求与保安器的数目有关，当保安器数 1~2 个时不大于  $50\Omega$ ，3 个时不大于  $30\Omega$ ，4 个时不大于  $20\Omega$ ，4 个以上时不大于  $10\Omega$ 。

分线箱内保安器接地装置的电阻要求，见表 11-8。

表 11-6 建筑物和构筑物过电压保护接地电阻要求

建筑物、构筑物分类	直击雷冲击接地电阻/ $\Omega$	感应雷工频接地电阻/ $\Omega$	利用基础钢筋工频接地电阻/ $\Omega$	电气设备与避雷器的共用工频接地电阻/ $\Omega$	架空引入线间隙及金属管道的冲击接地电阻/ $\Omega$
第一类	$\leq 10$	$\leq 10$		$\leq 10$	$\leq 20$
工业建筑					
第二类	$\leq 10$	与直击雷共同接地 $\leq 10$		$\leq 5$	入户处 10, 第一根杆 20, 第二根杆 20, 架空管道 10
第三类	20~30		$\leq 5$		$\leq 30$
烟囱	20~30				
水塔	$\leq 30$				
民用建筑					
第一类	5~10		1~5	$\leq 10$	第一根杆 10, 第二根杆 30
第二类	20~30		$\leq 5$	20~30	$\leq 30$

表 11-7 防雷保护设备的接地电阻要求

序号	防雷保护设备名称	接地电阻 (不大于) /Ω
1	保护变电所的室外独立避雷针	25
2	装设在变电所架空进线上的避雷针	25
3	装设在变电所与母线连接的架空进线上的管型避雷器(电气上与旋转电机无联系者)	10
4	同上(但电气上与旋转电机有联系者)	5
5	装设在 20kV 以上架空线路交叉处跨越电杆上的管型避雷器	15
6	装设在 35~110kV 架空线路中,以及在绝缘较薄弱处木质电杆上的管型避雷器	15
7	装设在 20kV 以下架空线路电杆上的放电间隙,以及装设在 20kV 及以上架空线路相交叉的通信线路电杆上的放电间隙	25

表 11-8 分线箱内保安器接地电阻要求

土壤种类	土壤 电阻率 $\rho/\Omega \cdot m$	用户引入线线条数 $n$					
		5 以下	6~10	11~12	21~40	41~60	50 以上
		接地电阻(不大于)/Ω					
黑土地、 泥炭	<50	12	9	7	6	5	4

(续)

土壤种类	土壤 电阻率 $\rho/\Omega \cdot m$	用户引入线线条数 $n$					
		5 以下	6~10	11~12	21~40	41~60	60 以上
		接地电阻 (不大于) $/\Omega$					
黄土地、 砂质粘土	50~100	14	10	8	7	6	5
夹砂土地	100~300	17	13	10	9	7	6
砂土地	300~500	24	18	14	12	10	8
夹石土地	500~ 1000	30	22	17	15	12	10

6. 3kV 及以上架空线路杆塔的接地电阻要求见表 11-9

表 11-9 3kV 及以上架空线路杆塔接地电阻要求

土壤电阻率 $\rho/\Omega \cdot m$	接地电阻 (不大于) $/\Omega$
100 及以下	10
100~500	15
500~1000	20
1000~2000	25
2000 以上	敷设 6~8 根射线, 接地电阻 30 $\Omega$ , 或连续伸长接地, 阻值不作规定



## 七、土壤和水的电阻率

### 1. 土壤和水的电阻率

在工程设计中,土壤和水的电阻率应以实测为依据。

当缺乏资料时,可参见表 11-10。

表 11-10 土壤和水的电阻率

类别	名称	含水量	电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$
岩石	花岗石		$2.47 \times 10^6$
	多岩石地		$4 \times 10^5$
	砾石, 碎石		$2 \times 10^5$
砂	砂子	干的	$2.5 \times 10^5$
	砂子	湿的	$1 \times 10^4$
	砂子	很湿	$2.5 \times 10^3$
泥土	黄土	干的 (湿的)	$2.5 \times 10^3$ ( $1 \sim 2 \times 10^4$ )
	多石土壤		$4 \times 10^4$
	含砂粘土	含有 75% 水分 (按重量计)	$2.5 \times 10^3$
	黑土	湿的	$1.9 \times 10^3$
	混合土(粘土、 石灰石、碎 石)		$1 \times 10^3$
	粘土		$0.6 \times 10^3$
	砂质粘土		$0.8 \times 10^3$
	砂土		$3 \times 10^3$
	陶土	含有 20% 水分 (按体积计)	$(0.4 \sim 0.8) \times 10^4$
	园土	含有 20% 水分 (按体积计)	$0.5 \times 10^3$
	捣碎の木炭	—	$0.4 \times 10^3$
泥炭	—	$0.2 \times 10^3$	

(续)

类别	名称	含水量	电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$
水	河水		$1 < 10^4$
	地下水		$(0.2 \sim 0.7) \times 10^4$
	泉水		$(0.4 \sim 0.5) \times 10^4$
	海水		$(0.01 \sim 0.05) \times 10^4$
	湖水(池水)		$0.03 \times 10^4$

## 2. 土壤干湿对电阻率的影响

土壤电阻率在一年中是变化的,考虑季节(干湿)因素,电阻率可按下式计算:

$$\rho = \psi \rho_0$$

式中  $\rho_0$  实测土壤电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

$\psi$  季节系数,见表 11-11。

表 11-11 土壤的季节系数  $\psi$

土壤性质	深度/m	$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$
粘土	0.5~0.8	3	2	1.5
粘土	0.8~3	2	1.5	1.4
陶土	0~2	2.4	1.36	1.2
砂砾盖于陶土	0~2	1.8	1.2	1.1
园地	0~3	—	1.32	1.2
黄沙	0~2	2.4	1.56	1.2
杂以黄沙的砂砾	0~2	1.5	1.3	1.2
泥炭	0~2	1.4	1.1	1.0
石炭石	0~2	2.5	1.51	1.2

注:  $\psi_1$ —测量前数天下过较长时间的雨时用之;  $\psi_2$ —测量时土壤具有中等含水量时用之;  $\psi_3$ —测量时土壤干燥或测量前降雨不大时用之。

## 第二节 接地体接地电阻的计算

### 一、人工接地体的接地电阻计算

人工接地电阻可按下列公式计算。注意，计算结果还须与实地测试的数据进行核实，以确定是否符合接地要求。

#### 1. 单根垂直接地体的接地电阻 $R_c$ 的计算

$$\text{钢管 } R_c = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$

$$\text{等边角钢 } R_c = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{0.84b}$$

$$\text{不等边角钢 } R_c = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{0.515b}$$

$$\text{槽钢 } R_c = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r}$$

$$r = 0.46 \sqrt[3]{b^2 h^3 (b^2 + h^2)^2}$$

式中  $R_c$ ——垂直接地体的接地电阻 ( $\Omega$ )；

$\rho$ ——土壤电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )；

$l$ ——接地体长度 (cm)；

$d$ ——管子直径 (cm)；

$b$ ——等边角钢或槽钢的边长，或不等边角钢的较小边边长 (cm)；

$h$ ——槽钢高度 (cm)；

$r$ -----等效尺寸 (cm)。

当接地体采用直径为 50mm, 长度为 250cm 的钢管, 管顶离开地面为 50~70cm 时, 可采用简化计算法。其他尺寸的接地体均应折算后方可按简化式计算。

各种垂直接地体接地电阻的简化计算公式为

$$R_c = K\rho$$

式中  $K$ -----简化计算系数, 见表 11-12, 其他符号同前。

表 11-12 各种接地极的  $K$  值

极形	规范 (mm)	计算外径 (mm)	长度 (cm)	$K$ 值
管子	$\phi 38$	48	250	$34 \times 10^{-4}$
	$\phi 38$	48	200	$40.7 \times 10^{-4}$
	$\phi 50$	60	250	$32.6 \times 10^{-4}$
	$\phi 50$	60	200	$39 \times 10^{-4}$
角钢	$\angle 40 \times 40 \times 4$	33.6	250	$36.3 \times 10^{-4}$
	$\angle 40 \times 40 \times 4$	33.6	200	$43.6 \times 10^{-4}$
	$\angle 50 \times 50 \times 5$	42	250	$34.85 \times 10^{-4}$
	$\angle 50 \times 50 \times 4$	42	200	$41.8 \times 10^{-4}$
槽钢	$[80 \times 43 \times 5$	68	250	$31.8 \times 10^{-4}$
	$[80 \times 43 \times 5$	68	200	$38 \times 10^{-4}$
	$[100 \times 48 \times 5.3$	82	250	$30.6 \times 10^{-4}$
	$[100 \times 48 \times 5.3$	82	200	$36.5 \times 10^{-4}$

## 2. 单根水平埋设接地体的接地电阻 $R_c$ 的计算

$$\text{扁钢} \quad R_s = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{6h}$$

$$\text{圆钢} \quad R_s = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{2rh}$$

式中  $l$  —— 扁钢宽度 (cm);

$h$  —— 埋设深度 (cm);

$r$  —— 圆钢半径 (cm);

$l, \rho$  —— 同前。

3. 构成环形回路的水平埋设体的接地电阻  $R_s$  的计算, 当长短边之比不超过 3 倍长方形时, 可按下列公式计算:

$$\text{扁钢} \quad R_s = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{8l^2}{\pi 6h}$$

$$\text{圆钢} \quad R_s = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{\pi rh}$$

式中符号同前。

4.  $n$  根钢管或钢棒的总接地电阻  $R_{\Sigma}$  的计算

$$R_{\Sigma} = \frac{R_c}{n\eta_c}$$

式中  $R_c$  —— 单根钢管或钢棒的扩散电阻 ( $\Omega$ );

$n$  —— 接地体数目;

$\eta_c$  —— 接地体利用系数, 即考虑到多根接地间的屏蔽影响, 可由表 11-13 至表 11-17 查得。

表 11-13 成排垂直敷设的管形接地体的利用系数

管间距 离与管 长之比	管子根数				
	2	3	5	10	20
1	0.84~0.87	0.76~0.80	0.67~0.72	0.56~0.62	0.51~0.56
2	0.90~0.92	0.85~0.88	0.79~0.83	0.72~0.77	0.66~0.73
3	0.93~0.95	0.90~0.92	0.85~0.88	0.79~0.83	0.74~0.79

注：该表数据未计入联结扁钢的影响。

表 11-14 环形垂直敷设的管形接地体的利用系数

管间距 离与管 长之比	管子根数						
	4	6	10	20	40	60	100
1	0.66~0.720	0.58~0.650	0.52~0.580	0.44~0.500	0.38~0.440	0.36~0.420	0.33~0.39
2	0.76~0.800	0.71~0.750	0.66~0.710	0.61~0.660	0.55~0.610	0.52~0.580	0.49~0.55
3	0.84~0.860	0.78~0.820	0.74~0.780	0.68~0.730	0.64~0.690	0.62~0.670	0.59~0.65

注：该表数据未计入联结扁钢的影响。

表 11-15 管子成排垂直敷设时联结扁钢的利用系数

管间距离与管长之比	管子根数					
	2	3	5	10	15	20
1	0.87	0.80	0.74	0.62	0.50	0.42
2	0.92	0.88	0.86	0.75	0.65	0.56
3	0.95	0.92	0.90	0.82	0.74	0.68

表 11-16 管子环形垂直敷设时联结扁钢的利用系数

管间距离与管长之比	管子根数						
	4	6	10	20	40	60	100
1	0.45	0.40	0.34	0.27	0.22	0.20	0.19
2	0.55	0.48	0.40	0.32	0.28	0.27	0.24
3	0.70	0.64	0.56	0.45	0.38	0.36	0.33

表 11-17 水平敷设的扁钢接地体的利用系数

并联敷设的扁钢数	每条扁钢长度/m	并联敷设的扁钢间的距离/m				
		1	2.5	5.0	10.0	15.0
5	15	0.37	0.49	0.60	0.73	0.79
	25	0.35	0.45	0.55	0.66	0.73
	50	0.33	0.40	0.48	0.58	0.65
	75	0.31	0.38	0.45	0.53	0.58
	100	0.30	0.36	0.43	0.51	0.57
	200	0.28	0.32	0.37	0.44	0.50

(续)

并联数设的扁钢数	每条扁钢长度/m	并联数设的扁钢间的距离/m				
		1	2.5	5.0	10.0	15.0
10	15	0.25	0.37	0.49	0.64	0.72
	25	0.23	0.31	0.43	0.57	0.66
	50	0.20	0.27	0.35	0.46	0.53
	75	0.18	0.25	0.31	0.41	0.47
	100	0.17	0.23	0.28	0.37	0.44
	200	0.14	0.20	0.23	0.30	0.36
20	15	0.16	0.27	0.39	0.57	0.64
	25	0.14	0.23	0.33	0.47	0.57
	50	0.12	0.19	0.25	0.36	0.44
	75	0.11	0.16	0.22	0.31	0.38
	100	0.10	0.15	0.20	0.28	0.35
	200	0.09	0.12	0.15	0.22	0.27

注：该表数据相应于扁钢宽度 20~40mm、埋设深度 0.3~0.8m 的情况。

5. 在水平埋设接地体上连有棒形接地体时，水平接地体的接地电阻  $R'$  的计算

$$R' = R_s / \eta_s$$

式中  $\eta_s$ ——考虑到水平接地体的接地棒间的屏蔽作用的水平接地体利用系数，可由表 10-17 查得。



6. 由接地棒和水平接地体所组成的复式接地装置的接地电阻  $R_f$  的计算

$$R_f = \frac{1}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{R'}} = \frac{1}{\frac{n\eta_c}{R_c} + \frac{\eta_s}{R_s}}$$

式中符号同前。

$R_f$  还可按下面方法估算：

以接地棒为主的接地装置，在计算中可以不单独计算水平接地体的接地电阻，而直接由接地电阻要求值按下式求出接地棒的数目：

$$n \geq \frac{0.9R_c}{R\eta_c}$$

式中  $R$ ——接地电阻要求值 ( $\Omega$ )；

0.9——考虑到水平接地体的接地电阻作用的系数。

对于大接地短路电流系统，在选择接地导线和接地母线时，尚须进行热稳定校验：

$$S \geq \frac{I_d}{C} \sqrt{t}$$

式中  $S$ ——接地导线与母线的最小允许截面 ( $\text{mm}^2$ )；

$I_d$ ——单相接地电流，为计算简便， $I_d$  可取用起始短路电流  $I''$  (A)；

$t$ ——短路的切除时间 (s)；

$C$ ——由材料性能决定的计算系数，对于低压中性点直接接地电网，可按表 11-18 选取。

表 11-18 校验热稳定用的计算系数 C 值

种类	材 料		
	钢	铝	铜
零线	60	100	180
接地线	90	155	270

## 二、人工接地坑和接地沟的流散电阻的计算

在高土壤电阻率 ( $\rho > 5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ ) 地区, 可采用人工接地坑或接地沟等方法降低接地电阻值。

## 1. 人工接地坑见图 11-9a

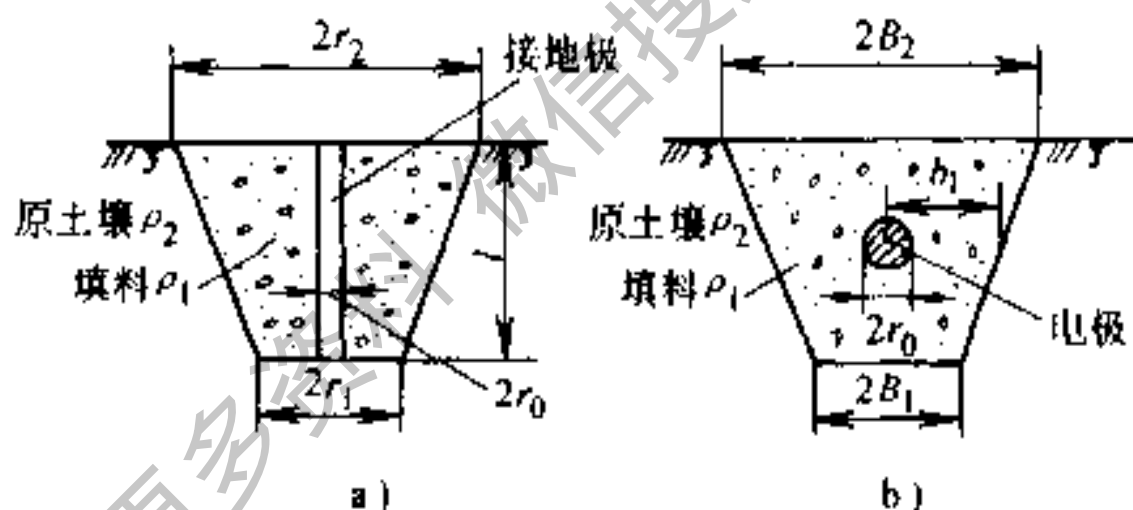


图 11-9 人工接地坑和接地沟的几何尺寸

a) 人工接地坑 b) 人工接地沟

根据计算和试验, 最大电位梯度发生在离接地极边缘  $0.5 \sim 1\text{m}$  处, 因此接地坑的坑径不必过大, 一般取  $r_1$  为  $500\text{cm}$ ,  $r_2$  为  $1000\text{cm}$ ,  $l$  为  $200 \sim 300\text{cm}$ , 其流散电阻可按下式计算:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{\rho_2}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r_1}$$

式中  $R$ ——流散电阻 ( $\Omega$ )。

## 2. 人工接地沟如图 11-9b

接地沟的几何尺寸，通常采用外切于以接地带为中心以 0.5m 为半径圆的梯形断面。其流散电阻可按下列公式计算：

(1) 接地带为圆钢时：

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{l}{2r_c} + \frac{\rho_2}{2\pi l} \ln \frac{l}{b_1}$$

式中  $l$ ——接地带长度。

(2) 接地带为扁钢时：

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{2l}{b} + \frac{\rho_2}{2\pi l} \ln \frac{l}{b_1}$$

式中  $b$ ——扁钢宽度。

3. 短接地带组合的接地装置组合方式及结果如表 11-19。

表 11-19 短接地带组合的接地装置

土壤电阻率 $\rho/\Omega \cdot m$	组合方式 (根数×单根长度)	钢带总长 /m	阻抗值 $R$ / $\Omega$
(1~1.2) $\times 10^5$	2×60//2×40	200	14.6
	5×40	200	13.8
	4×60	240	12.5

(续)

土壤电阻率 $\rho/\Omega \cdot \text{m}$	组合方式 (根数 $\times$ 单根长度)	钢带总长 /m	阻抗值 $R$ / $\Omega$
$2 \times 10^5$	6 $\times$ 40	240	21.6
	4 $\times$ 60	240	20.7
	2 $\times$ 60//2 $\times$ 100	320	16.2
$5 \times 10^5$	8 $\times$ 60	480	34
	10 $\times$ 60	600	28
	4 $\times$ 60//4 $\times$ 100	640	27

短接地带组合接地装置，适用于 $\rho$ 等于 $(1\sim 5) \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 的土壤。对于 $\rho$ 不小于 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 的土壤，可采用伸长接地带的方式效果较好。

### 三、防雷保护接地电阻的计算

防雷保护接地电阻，即冲击接地电阻，可按下列公式计算：

#### 1. 单独接地体的冲击接地电阻 $R_s$

$$R_s = \alpha R$$

式中  $\alpha$ ——单独接地体的冲击系数，见表 11-21～表 11-23；

$R$ ——单独接地体在工频小电流下测出的或按稳态公式算出的电阻值 ( $\Omega$ )。

计算中所用的土壤电阻率 $\rho$ ，应取雷雨期中最大可能的土壤电阻率，可按下式计算：

$$\rho = \psi \rho_v$$

式中  $\rho_v$ ——雷雨季节中无雨水时所测得的土壤电阻率  
( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$\psi$ ——由于大地晒干, 电阻率增大的系数。见表  
11-20。

表 11-20 电阻率增大系数  $\psi$  值

接 地 体	测量时土壤情况	
	湿	干
埋深 0.5m 水平接地	1.8	1.4
埋深 0.8~1m 水平接地	1.45	1.25
长 2~3m 垂直水平接地	1.3	1.15
埋深 2.5~3m 深埋接地	1.1	1.0

宽 2~4cm 的扁钢或直径 1~2cm 的圆钢水平环形接地体, 由环的中心引入雷电流, 引入处与环有 3~4 个联线, 冲击电流波头 3~6 $\mu\text{s}$  下的冲击系数  $\alpha$  值, 见表 11-21。

表 11-21 水平环形接地体的  $\alpha$  值

土壤 电阻率 $\rho/\Omega \cdot \text{cm}$	$10^1$			$5 \sim 10^2$			$10^3$			
	$I_f/\text{kA}$	20	40	80	20	40	80	20	40	80
环 $D=4\text{m}$	0.6	0.45	0.35		---	---	---	---	---	---
环 $D=8\text{m}$	0.75	0.65	0.50	0.55	0.45	0.30	0.40	0.30	0.25	
环 $D=12\text{m}$	0.8	0.70	0.60	0.60	0.50	0.35	0.45	0.40	0.30	

长 2~3m、直径 6cm 以下的垂直接地体、冲击电流波头 3~6 $\mu$ s 下冲击系数  $\alpha$  值, 见表 11-22。

表 11-22 垂直接地体的  $\alpha$  值

土壤 电阻率 $\rho/\Omega \cdot \text{cm}$	流向大地的电流幅值 $I_f/\text{kA}$			
	5	10	20	40
$10^4$	0.85~0.90	0.75~0.85	0.6~0.75	0.5~0.6
$5 \times 10^4$	0.6~0.7	0.5~0.6	0.35~0.45	0.25~0.3
$10^5$	0.45~0.55	0.35~0.45	0.25~0.30	--

注: 表中较大的数值用于 3m 长的接地体, 较小者用于 2m 长的接地体。

宽 2~4cm 扁钢或直径 1~2cm 圆钢水平接地体, 由一端引入雷电流, 冲击电流波头 3~6 $\mu$ s 下的冲击系数  $\alpha$  值见表 11-23。

表 11-23 水平接地体  
(一端引入雷电流) 的  $\alpha$  值

土壤电阻率 $\rho$ $/\Omega \cdot \text{cm}$	$l$ $/\text{m}$	流向大地的电流幅值 $I_f/\text{kA}$		
		10	20	40
$10^4$	5	0.75	0.65	0.50
	10	1.00	0.90	0.80
	20	1.15	1.05	0.95

(续)

土壤电阻率 $\rho$ / $\Omega \cdot \text{cm}$	$l$ /m	流向大地的电流幅值 $I_i$ /kA		
		10	20	40
$5 \times 10^4$	5	0.55	0.45	0.30
	10	0.75	0.60	0.45
	20	0.90	0.75	0.60
	30	1.00	0.90	0.80
$10^5$	10	0.55	0.45	0.35
	20	0.75	0.60	0.50
	40	0.95	0.85	0.75
	60	1.15	1.10	0.95
$2 \times 10^5$	20	0.60	0.50	0.40
	40	0.75	0.65	0.55
	60	0.90	0.80	0.75
	80	1.05	0.95	0.90
	100	1.20	1.10	1.05


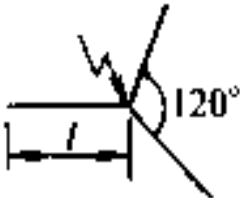
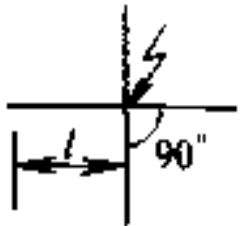
2. 由  $n$  个相同的水平射线接地体所组成的接地体的冲击接地电阻  $R_{ch}$

$$R_{ch} = \frac{R_h}{n} \times \frac{1}{\eta}$$

式中  $R_h$ ——每根射线的冲击接地电阻 ( $\Omega$ ), 计算与单独接地体的冲击接地电阻计算公式相同;

$\eta$ ——考虑接地装置各射线相互影响的利用系数, 见表 11-24。

表 11-24  $n$  个水平射线接地装置的利用系数

接地装置	射线数 $n$	长度 $l/m$	利用系数 $\eta$
	2	任何长度的射线	1
	3	10	0.75
		20	0.80
		40	0.85
		80	0.90
	4	10	0.65
		20	0.70
		40	0.75
		80	0.80

3. 由水平接地体联结的  $n$  个垂直接地体组成的接地装置的冲击接地电阻  $R_{h\Sigma}$

$$R_{h\Sigma} = \frac{\frac{R_{hv}}{n} \times R_{chs}}{\frac{R_{hv}}{n} \times R_{chs}} \times \frac{1}{\eta}$$

式中  $R_{hv}$  —— 单个垂直接地体的冲击接地电阻 ( $\Omega$ );

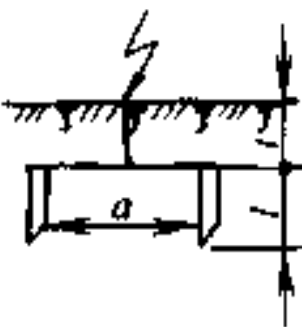
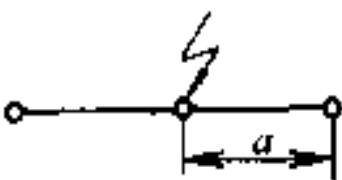

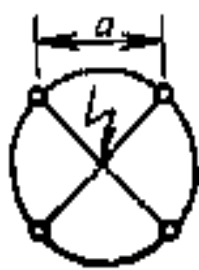
$R_{chs}$  —— 水平接地体的冲击接地电阻 ( $\Omega$ );

$n$  —— 垂直接地体数目;

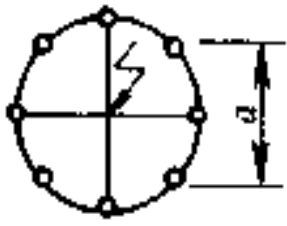
$\eta$  —— 利用系数, 见表 11-25。



表 11-25  $n$  个垂直接地体组成、并以水平接地体  
联结的接地装置的利用系数

接地装置	$a/l$	垂直电极 数目 $n$	利用系数 $\eta$
	2	2	0.80
	3	2	0.85
	2	3	0.75
	3	3	0.80
	2	3	0.70
	3	3	0.75
	2	4	0.70
	3	4	0.75

(续)

接地装置	$a/l$	垂直电极数目 $n$	利用系数 $\eta$
	2	6	0.65
	3	6	0.70

表中所有的环形接地装置的利用系数  $\eta$  值, 均可按照周长相等的原则 [即  $\pi D = 2(A+B)$ ] 用于矩形接地装置的计算中。其中  $D$  为圆环直径,  $A$ 、 $B$  为矩形两边长。

#### 四、接地装置截面的要求

##### 1. 人工接地极最小尺寸 (表 11-26)

表 11-26 人工接地极的最小尺寸

接地极类别		最小尺寸/mm
圆钢直径		16
角 钢		40×40×4
钢 管	管壁厚度	2.5
	内 径	13

##### 2. 接地线最小尺寸

按机械强度并考虑防腐要求, 接地线、接零线的允许

最小尺寸见表 11-27 和表 11-28。

携带式、移动式电气设备,其接地线或接零线应采用

表 11-27 接地线的最小尺寸

导体类别	钢			铜	铝
	屋内	屋外	地下		
圆钢直径/mm	5	6	8	--	--
扁钢截面/mm <sup>2</sup>	24 (厚3mm)	48 (厚4mm)	48 (厚4mm)	--	--
角钢边厚/mm	2	2.5	4	--	--
钢管管壁厚/mm	2.5	2.5	3.5	--	--
露天敷设的导体	--	--	--	4	6
绝缘导体	--	--	--	1.5	2.5
电缆的接地芯线或具有公共保护包皮的多芯导线的接地芯线	--	--	--	1	1.5

表 11-28 铜、铝接零线或接地线的最小尺寸

导体类别	铜/mm <sup>2</sup>	铝/mm <sup>2</sup>
明设的裸导体	4	6
绝缘导线	1.5	2.5
电缆接地芯或与相线包在同一保护外套内的多芯导线的接地芯	1	1.5

0.75~1.5mm<sup>2</sup> 以上的多股铜线。

### 3. 热稳定校验

根据热稳定条件，零线或接地线的最小截面应符合下式要求：

$$S \geq \frac{I_d^{(1)}}{C} \sqrt{t}$$

式中  $S$  —— 零线或接地线的最小截面 (mm<sup>2</sup>)；

$I_d^{(1)}$  —— 单相短路电流或接地短路电流 (A)；

$t$  —— 短路持续时间 (s)；

$C$  —— 决定于材料性能的计算系数，低压中性点直接接地电网， $C$  值可按表 11-29 选取。

表 11-29 校验热稳定用的计算系数  $C$  值

种 类	材 料		
	钢	铜	铝
零 线	60	180	100
接地线	90	270	155

## 五、保护接零计算

保护接零的零线，除上面所述的要求外，还要符合相零回路阻抗的要求，以满足线路保护要求。

### 1. 单相短路电流计算

$$I_d^{(1)} = \frac{3U_p}{|2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}|}$$

$$= \frac{3U_r}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$$

式中  $U_r$ ——低压网路平均额定线电压 (V);

$Z_{1\Sigma}$ 、 $Z_{0\Sigma}$ ——短路电路各元件正序和零序总阻抗 (m $\Omega$ );

$R_{1\Sigma}$ 、 $R_{0\Sigma}$ ——短路元件正序和零序总电阻 (m $\Omega$ );

$X_{1\Sigma}$ 、 $X_{0\Sigma}$ ——短路电路各元件正序和零序总电抗 (m $\Omega$ )。

## 2. 线路保护装置的整定

当发生单相短路时, 保护装置应迅速动作。

自动开关  $I_{KZ} \leq I_D^{(1)}/1.5$

式中  $I_{KZ}$ ——自动开关瞬时(或延时)动作过电流脱扣器整定值 (A)。

熔断器  $I_r \leq I_D^{(1)}/4$

式中  $I_r$ ——熔体的额定电流 (A)。

## 3. 接零线路允许长度计算

相零回路阻抗不能过大, 否则就不能保证足够的单相短路电流以促使线路保护装置迅速动作。相零回路阻抗允许值  $Z_{\Sigma}$  可按下式估算:

$$Z_{\Sigma} = \frac{U}{1.5I_{KZ}} - Z_b$$

$$Z_{\Sigma} = \frac{U}{4I_r} - Z_b$$

式中  $U$ ——相电压 (V)；

$Z_b$ ——变压器阻抗 (折算到低压侧) ( $\Omega$ )。

单一截面的相零回路，只要查取回路单位长度阻抗值，便可按上式计算；各段截面不同的相零回路，可按照类似方法分段进行计算。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

## 第十二章 晶闸管及电子电路

### 第一节 晶闸管电路及其计算

#### 一、晶闸管基本参数定义

##### 1. 晶闸管元件参数定义

(1) 正向转折电压  $V_{BO}$ : 元件正向从阻断状态转向导通状态的电压。

(2) 正向阻断峰值电压 PFV: 在控制极断路和正向阻断条件下, 可以重复加于正向的峰值电压, 此电压规定为小于正向转折电压 100V。

(3) 正向压降  $V_F$ : 在规定环境温度、标准散热和元件导通条件下, 通以工频正弦半波额定正向平均电流时, 阳极与阴极间的电压平均值。

(4) 正向电流  $I_F$ : 在规定环境温度、标准散热和元件导通条件下, 阳极与阴极间可连续通过的工频正弦半波电流的平均值。

(5) 正向平均漏电流  $I_L$ : 正向阻断时, 控制极断路和额定结温条件下, 阳极与阴极间加以工频正弦半波正向阻断峰值电压时的正向平均电流。

(6) 正向电压上升率  $dV/dt$ : 在额定结温, 控制极断路和正向阻断条件下, 元件在单位时间内所能允许上升

的正向电压（电压从零加到正向阻断峰值电压），通常用“ $V/\mu s$ ”来表示。

(7) 维持电流  $I_H$ ：在规定环境温度，控制极断路和元件导通时，要保持元件处于导通状态所必须的最小正向电流。

(8) 反向阻断峰值电压 PRV：在控制极断路和额定结温的条件下，可以重复加在元件上的反向峰值电压。此电压规定为元件的反向漏电流急速增加，反向特性曲线开始弯曲时的电压减去 100V。

(9) 反向转折电压（反向最高测试电压） $V_{RO}$ ：在控制极断路条件下，加于反向的峰值电压，此电压规定为反向漏电流急速增加，反向特性曲线开始弯曲时的电压。

(10) 控制极触发电压  $V_g$ ：在规定环境温度和阳极与阴极间加以一定的电压条件下，触发晶闸管元件，使元件从阻断状态转变为导通状态所需要的最小控制极直流电压。

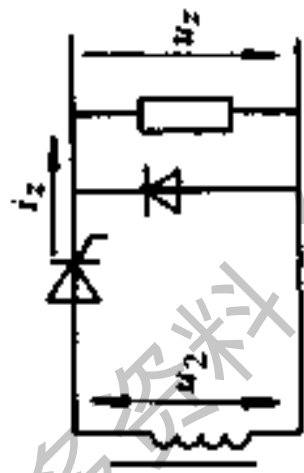
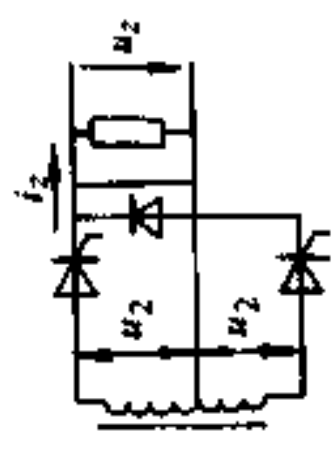
(11) 控制极触发电流  $I_g$ ：在规定环境温度及阳极与阴极间加以一定正向电压时，使其从阻断状态变为导通状态所需的最小控制极直流电流。

(12) 控制极不触发电压  $V_{gN}$ ：在规定环境温度及阳极与阴极间加以一定正向电压时，保持元件阻断状态所能加的最大控制极直流电压。

(13) 控制极最大反向电压  $V_{gR}$ ：在规定额定结温条件下，在控制极与阴极间所能加的最大反向峰值电压。

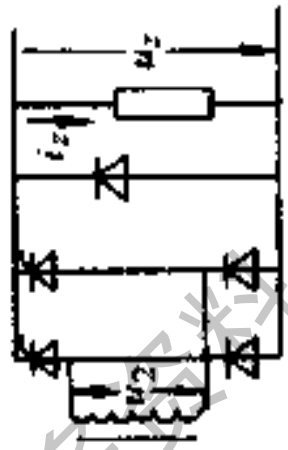
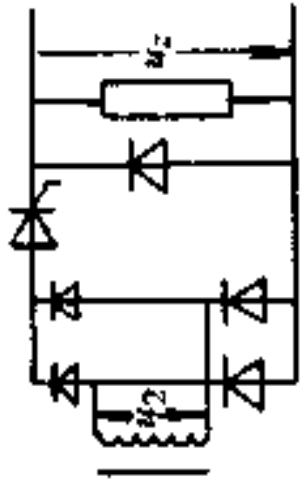


表 12-1 晶闸管整流电路的基本电量关系

整流电路名称	单相半波	单相全波
电路图  		
全导通 ( $\alpha=0$ ) $U_{z0}$	$0.45U_2$	$0.9U_2$
某一移相角 $\alpha$ 时 $U_z$ (电阻负载或带续流二极管电感性负载)	$\frac{1+\cos\alpha}{2}U_{z0}$	$\frac{1+\cos\alpha}{2}U_{z0}$
某一移相角 $\alpha$ 时 $U_z$ (无续流二极管电感性负载)	—	$\cos\alpha U_{z0}$
空载直流输出电压		

元件最大正向电压和最大反向电压峰值 $U_m$	$1.41U_2$ (3.14 $U_{20}$ )	$2.83U_2$ (3.14 $U_{20}$ )
移相范围	电阻负载或带续流二极管的电感负载	$0^\circ \sim 180^\circ$
	无续流二极管的电感负载	$0^\circ \sim 90^\circ$ ( $\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态)
元件最大导通角	$180^\circ$	$180^\circ$
输出电压最低脉动频率	$1f$	$2f$
全导通时输出电压纹波系数 $\gamma$	1.21	0.484
全导通时输出电压脉动系数 $s$	1.57	0.667
流过可控硅的电流平均值 (无续流二极管)	$I_2$	$0.5I_2$
功率因数	0.405	0.637
变压器一次侧容量 $P_{11}$	$3.48U_2I_2$	$1.11U_2I_2$
变压器二次侧容量 $P_{12}$	$3.48U_2I_2$	$1.57U_2I_2$

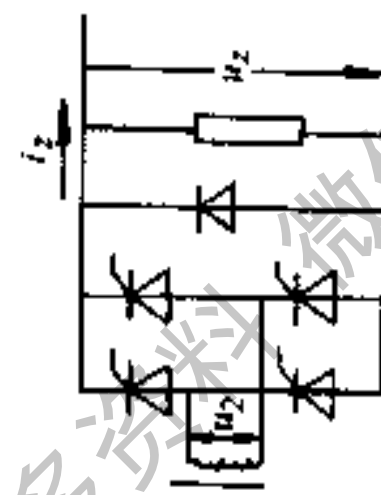
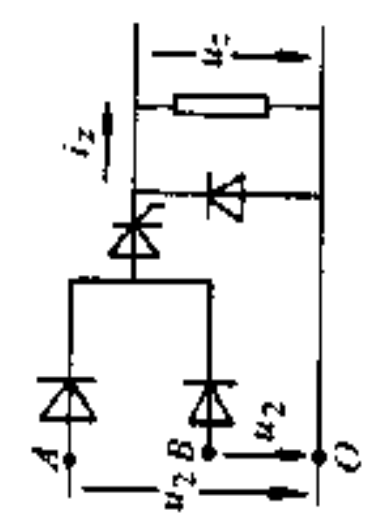
(续)

整流电路名称	单相半控桥	晶闸管作开关的单相桥
<p>电路图</p> 		
<p>全导通 (<math>\alpha = 0</math>)</p> <p><math>U_{r0}</math></p>	<p><math>0.9U_2</math></p>	<p><math>0.9U_2</math></p>
<p>某一移相角 <math>\alpha</math> 时</p> <p><math>U_2</math> (电阻负载或带续流二极管电感负载)</p>	<p><math>\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{r0}</math></p>	<p><math>\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{r0}</math></p>
<p>某一移相角 <math>\alpha</math> 时</p> <p><math>U_2</math> (无续流二极管电感负载)</p>	<p><math>\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{r0}</math></p>	
<p>空载直流输出电压</p>		

元件最大正向电压和最大反向电压峰值 $U_{m0}$	$1.41U_2$ ( $1.57U_{10}$ )	$1.41U_2$ ( $1.57U_{10}$ )
电阻负载或带续流二极管的电感负载	$0^\circ \sim 180^\circ$	$0^\circ \sim 180^\circ$
无续流二极管的电感负载	$0^\circ \sim 180^\circ$	—
元件最大导通角	$180^\circ$	$360^\circ$
输出电压最低脉动频率	$2f$	$2f$
全导通时输出电压纹波系数 $\gamma$	0.484	0.484
全导通时输出电压脉动系数 $\delta$	0.667	0.667
流过晶闸管的电流平均值 (无续流二极管)	$0.5I_2$	$1I_2$
功率因数	0.901	0.901
变压器一次侧容量 $P_{11}$	$1.11U_2 I_2$	$1.11U_2 I_2$
变压器二次侧容量 $P_{22}$	$1.11U_2 I_2$	$1.11U_2 I_2$

可控硅不受反向电压

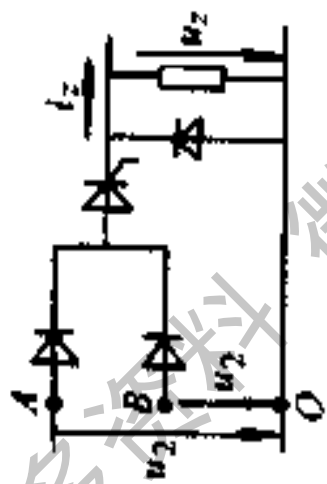
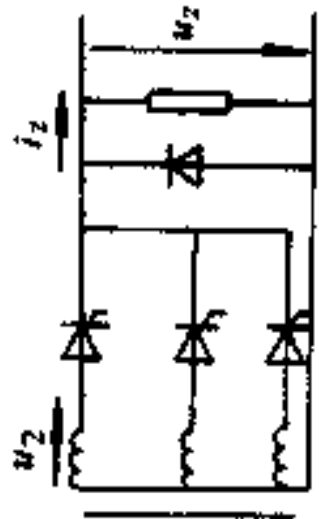
(续)

整流电路名称	单相全控桥	二相零式
电路图 		
全导通 ( $\alpha=0$ ) $U_{z0}$	$0.9U_2$	$0.839U_2$
某一移相角 $\alpha$ 时 $U_x$ (电阻负载或带续流二极管电感负载)	$\frac{1+\cos\alpha}{2}U_{z0}$	$0.268(2.73+\cos\alpha)U_{z0}$ $(0 < \alpha < 150^\circ)$ $0.268[1+\cos(\alpha-120^\circ)]U_{z0}$ $(150^\circ < \alpha < 300^\circ)$
某一移相角 $\alpha$ 时 $U_x$ (无续流二极管电感负载)	$\cos\alpha U_{z0}$	

空载直流输出电压

元件最大正向电压和最大反向电压峰值 $U_m$	$1.41U_2$ ( $1.57U_{z0}$ )	可控硅 $1.41U_2$ ( $1.69U_{z0}$ ) 二极管 $2.45U_2$
移相范围	电阻负载或带续流二极管的电感负载	$0^\circ \sim 180^\circ$
	无续流二极管的电感负载	$0^\circ \sim 90^\circ$ ( $\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态)
元件最大导通角	$180^\circ$	$300^\circ$
输出电压最低脉动频率	$2f$	$1f$
全导通时输出电压纹波系数 $\gamma$	0.484	0.613
全导通时输出电压脉动系数 $s$	0.667	0.698
流过可控硅的电流平均值 (无续流二极管)	0.5 $I_z$	SCR: 0.833 $I_z$ ; V: 0.320 $I_z$
功率因数	0.901	
变压器一次侧容量 $P_{11}$	1.1 $U_z I_z$	
变压器二次侧容量 $P_{12}$	1.1 $U_z I_z$	

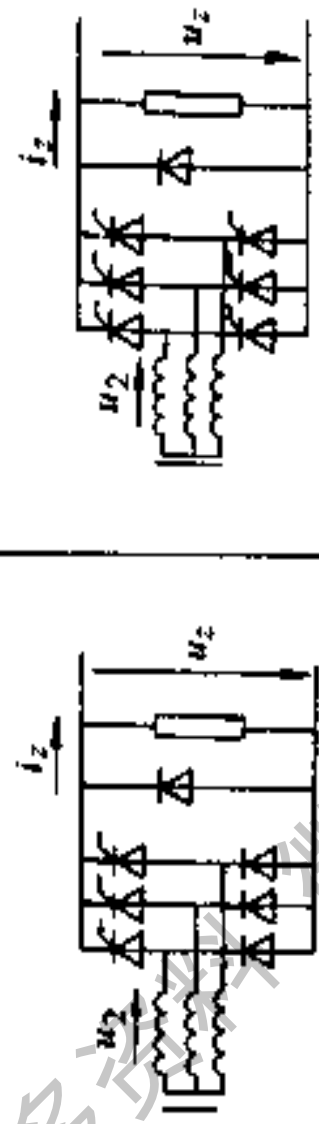
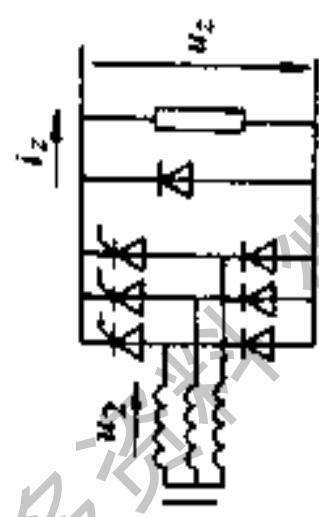
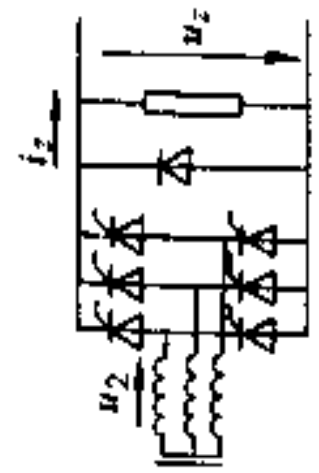
(续)

整流电路名称	二相式	三相半波
<p>电路图</p> 		
<p>全导通 (<math>\alpha=0</math>) <math>U_{z0}</math></p> <p>某一移相角 <math>\alpha</math> 时 <math>U_z</math> (电阻负载或带续 流二极管电感负载)</p> <p>某一移相角 <math>\alpha</math> 时 <math>U_z</math> (无续流二极管电 感负载)</p>	<p><math>0.675U_2</math></p> <p><math>0.334 (2 + \cos\alpha) U_{z0}</math> (<math>0 &lt; \alpha &lt; 120^\circ</math>)</p> <p><math>0.334 [1 + \cos(\alpha - 60^\circ)] U_{z0}</math> (<math>120^\circ &lt; \alpha &lt; 240^\circ</math>)</p>	<p><math>1.17U_2</math></p> <p><math>\cos\alpha U_{z0}</math> (<math>0 \leq \alpha \leq 30^\circ</math>)</p> <p><math>0.577 [1 + \cos(\alpha + 30^\circ)] U_{z0}</math> (<math>30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ</math>)</p>
<p>空载直流输出电压</p>		

元件最大正向电压和最大反向电压峰值 $U_{m0}$	$1.41U_1$ ( $2.09U_{s0}$ )	$2.45U_2$ ( $2.09U_{s0}$ )
电阻负载或带续流二极管的电感负载	$0^\circ \sim 240^\circ$	$0^\circ \sim 150^\circ$
无续流二极管的电感负载	—	$0^\circ \sim 90^\circ$ ( $\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态)
元件最大导通角	$240^\circ$	$120^\circ$
输出电压最低脉动频率	$1f$	$3f$
全导通时输出电压纹波系数 $\gamma$	0.875	0.183
全导通时输出电压脉动系数 $s$	1-21	0.25
流过晶闸管的电流平均值 (无续流二极管)	可控硅: $0.667I_a$ ; 二极管: $0.40I_a$	$0.333I_a$
功率因数		0.826
变压器一次侧容量 $P_{11}$		$1.21U_a I_a$
变压器二次侧容量 $P_{12}$		$1.48U_a I_a$

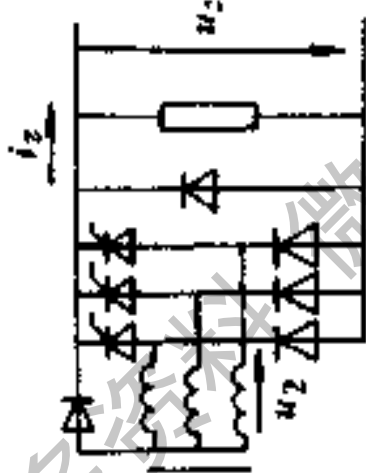
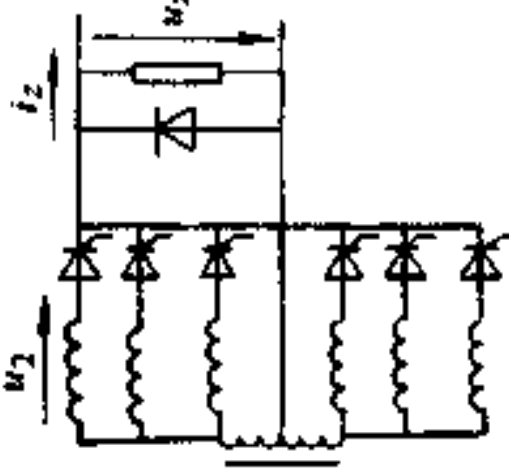


(续)

整流电路名称	三相半控桥	三相全控桥
<p>电路图</p> 		
<p>全导通 (<math>\alpha=0</math>) <math>U_{i0}</math></p>	$2.34U_2$	$2.34U_2$
<p>某一移相角 <math>\alpha</math> 时 <math>U_2</math> (电阻负载或带续流二极管电感负载)</p>	$\frac{1+\cos\alpha}{2}U_{i0}$	$\cos\alpha U_{i0}$ $(0 \leq \alpha \leq 60^\circ)$ $(1+\cos(\alpha+60^\circ)) U_{i0}$ $(60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ)$
<p>某一移相角 <math>\alpha</math> 时 <math>U_2</math> (无续流二极管电感负载)</p>	$\frac{1+\cos\alpha}{2}U_{i0}$	$\cos\alpha U_{i0}$
<p>空载直流输出电压</p>		

元件最大正向电压和最大反向电压峰值 $U_m$	$2.45U_2$ ( $1.05U_{z0}$ )	$2.45U_2$ ( $1.05U_{z0}$ )
电阻负载或带续流二极管的电感负载	$0^\circ \sim 180^\circ$	$0^\circ \sim 120^\circ$
无续流二极管的电感负载	$0^\circ \sim 180^\circ$	$0^\circ \sim 90^\circ$ ( $\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态)
元件最大导通角	$120^\circ$	$120^\circ$
输出电压最低脉动频率	$6f$	$6f$
全导通时输出电压纹波系数 $\gamma$	$0.042$	$0.042$
全导通时输出电压脉动系数 $s$	$0.057$	$0.057$
流过晶闸管的电流平均值 (无续流二极管)	$0.333I_1$	$0.333I_1$
功率因数	$0.955$	$0.955$
变压器一次侧容量 $P_{s1}$	$1.05U_2 I_1$	$1.05U_2 I_1$
变压器二次侧容量 $P_{s2}$	$1.05U_2 I_2$	$1.05U_2 I_2$

(续)

整流电路名称	具有中点二极管的三相半控桥	双反星形带平衡电抗器
<p>电路图</p> 		<p>全导通 (<math>\alpha=0</math>) <math>U_{z0}</math></p> <p>某一移相角 <math>\alpha</math> 时 <math>U_z</math> (电阻负载或带续流二极管电感负载)</p>
<p>全导通 (<math>\alpha=0</math>) <math>U_{z0}</math></p>	<p><math>2.34U_2</math></p> <p><math>0.5(1+\cos\alpha) U_{z0}</math> (<math>0 &lt; \alpha \leq 30^\circ</math>)</p> <p><math>0.288[\sqrt{3} + 1 + \cos(\alpha + 30^\circ)] U_{z0}</math> (<math>30^\circ &lt; \alpha &lt; 150^\circ</math>)</p>	<p><math>1.17U_2</math></p> <p><math>\cos\alpha U_{z0}</math> (<math>0 \leq \alpha \leq 60^\circ</math>)</p> <p><math>(1 + \cos(\alpha + 60^\circ)) U_{z0}</math> (<math>60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ</math>)</p>
<p>空载直流</p>		

输出电压	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_2$ (无续流二极管电 感负载)	同上	$\cos\alpha U_{20}$
元件最大正向电压和最 大反向电压峰值 $U_m$	1.41 $U_2$ (2.45 $U_{20}$ )	2.45 $U_2$ (2.09 $U_{20}$ )	
移相范围	电阻负载或带续流 二极管的电感负载	0°~150°	0°~120°
	无续流二极管的电 感负载	0°~150°	0°~90° ( $\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态)
元件最大导通角	120°	120°	120°
输出电压最低脉动频率	6f	6f	6f
全导通时输出电压纹波 系数 $\gamma$	0.042	0.042	0.042
全导通时输出电压脉动 系数 $s$	0.057	0.057	0.057

(续)

整流电路名称	具有中点二极管的三相半控桥	双反星形带平衡电抗器
流过晶闸管的电流平均值 (无续流二极管)	晶闸管、二极管: $0.333I_d$ ( $0 < \alpha < 150^\circ$ )	$0.167I_d$
功率因数	0.955	0.955
变压器一次侧容量 $P_{11}$	$1.05U_2I_d$	$1.05U_2I_d$
变压器二次侧容量 $P_{12}$	$1.05U_2I_d$	$1.48U_2I_d$

注:

1. 表 12-1 中  $U_2$  指相电压。若变压器二次侧为三角形接法, 则  $U_2$  应以  $U_{12}/\sqrt{3}$  代入,  $U_{12}$  为二次侧线电压。

2.  $f$ ——交流电源频率 (Hz)。

3.  $\gamma$ ——纹波系数 =  $\frac{\text{交流分量的有效值}}{\text{直流分量 (即平均值)}}$ 。

4.  $s$ ——脉动系数 =  $\frac{\text{交流分量的基波 (或最低次谐波) 的振幅值}}{\text{直流分量 (即平均值)}}$ 。

(14) 控制极不触发电流  $I_{gN}$ : 在规定环境温度及阳极及阴极间加以一定正向电压时, 保持元件阻断状态所能加的最大控制极直流电流。

(15) 开通时间  $T_{on}$ : 在规定的环境温度下, 通以一定的正向电流, 元件自加以控制信号至进入导通状态所需要的时间。

(16) 关断时间  $T_{off}$ : 在额定结温条件下, 元件从切断正向电流, 使元件重新处于阻断状态, 直到控制极恢复控制能力为止所需的时间。

(17) 额定工作结温  $t_j$ : 元件在正常工作条件下所允许的 PN 结温度。

## 2. 3CT 系列晶闸管元件使用条件

- (1) 环境温度不高于  $40^{\circ}\text{C}$ , 不低于  $-40^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 空气相对湿度不大于 85%。
- (3) 海拔高度不超过 1000m。
- (4) 在无爆炸危险的介质中, 且介质无足以腐蚀金属和绝缘的气体及导电尘埃。

## 二、晶闸管整流电路参数及基本电量关系

1. 晶闸管整流电路的电参数见表 12-1。
2. 晶闸管整流电路的比较见表 12-2。
3. 各种晶闸管整流电路的波形及电流、电压的关系  
各种晶闸管整流电路在不同性质负载和不同导通角时  $I_a/I_T$ 、 $I_r/I_T$  及  $I_r/I_a$  的数值, 见表 12-3~表 12-13。

表 12-2 常用晶闸管整流电路比较

线路 指标	单相半波	单相全波	二相零式	单相 全控桥	三相半波	三相桥式	双反星形 带平衡 电抗器
$U_m/U_{z0}$	3.14	3.14	1.68	1.57	2.09	1.05	2.09
越小越好	最大	最大	一般	一般	较大	最小	较大
$I_e/I_z$	1	0.5	0.83	0.5	0.33	0.33	0.167
越小越好	最大	一般	较大	一般	一般	一般	最小
变压器初 级利用率 (%)	28.6	90		90	82.7	95.5	95.5
越大越好	最小	较大		较大	一般	最大	最大
变压器次 级利用率 (%)	28.6	63.7		90	67.5	95.5	67.5

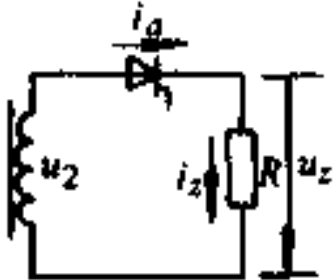


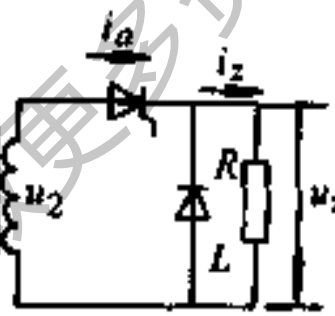


(续)

线路	单相半波	单相全波	二相零式	单相全控桥	三相半波	三相桥式	双反星形带平衡电抗器
指标							
越大越好	最小	一般		较大	一般	最大	一般
功率因数	0.405	0.637		0.901	0.826	0.955	0.955
越大越好	最小	小	小	一般	一般	最大	最大
$s$	1.21	0.484		0.484	0.187	0.042	0.042
越小越好	最大	较大	较大	较大	一般	最小	最小
线路结构	一个晶闸管	二个晶闸管	一个晶闸管 二个二极管	四个晶闸管	三个晶闸管	六个整流元件	六个晶闸管 平衡电抗
越简单越好	最简单	较简单	较简单	较简单	一般	一般	较复杂

注:  $U_m$ —元件最大反向电压峰值;  $U_{d0}$ —空载直流输出电压;  $I_a$ —流过晶闸管的电流平均值;  $I_s$ —输出直流电流;  $s$ —全导通时输出电压脉动系数。



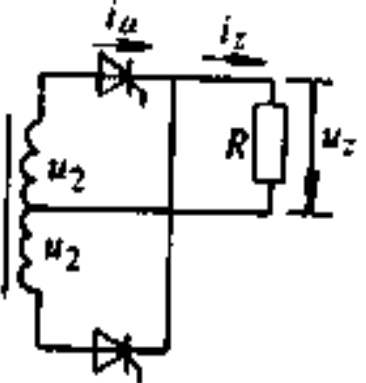


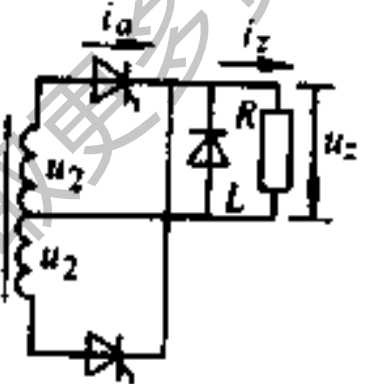
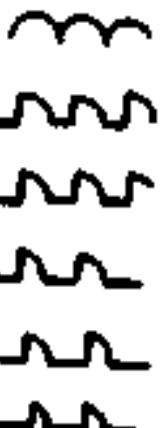

表 12-3 单相

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_r$	流过晶闸管的电流波形 $i_a$
电阻性负载			
电感性负载			

## 半波电路

移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_z}{U_2}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_Y$	$\frac{I_z}{I_L}$	$\frac{I_z}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_Y$
0°	180°	0.450	1.57	0.318	1	1	1
30°	150°	0.420	1.66	0.297	0.946	1	0.946
60°	120°	0.338	1.88	0.239	0.835	1	0.835
90°	90°	0.225	2.26	0.159	0.695	1	0.695
120°	60°	0.113	2.78	0.092	0.565	1	0.565
150°	30°	0.030	3.99	0.043	0.394	1	0.394
0°	180°	0.450	1.41	0.500	1.11	2	2.22
30°	150°	0.420	1.55	0.417	1.01	2.4	2.42
60°	120°	0.338	1.73	0.334	0.908	3	2.72
90°	90°	0.225	2.00	0.250	0.785	4	3.14
120°	60°	0.113	2.45	0.167	0.640	6	3.84
150°	30°	0.030	3.46	0.083	0.454	12	5.45

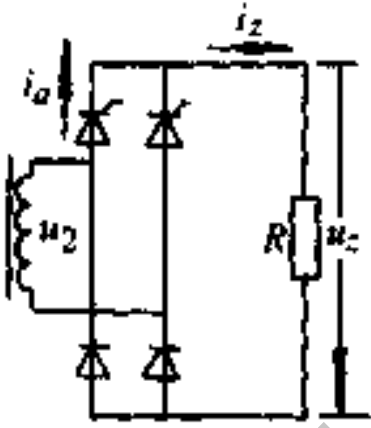


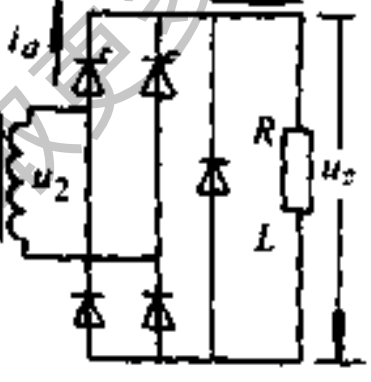


表 12-4 单相

负载性质	电路图	整流器输出 电压波形 $u_z$	流过晶闸管的 电流波形 $i_d$
电阻性负载			
电感性负载			

## 全波电路

移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_z}{U_2}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_u}{I_m}$	$\frac{I_u}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_V$	$\frac{I_z}{I_u}$	$\frac{I_z}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_V$
0°	180°	0.900	1.57	0.318	1	2	2
30°	150°	0.840	1.66	0.297	0.946	2	1.89
60°	120°	0.676	1.88	0.239	0.835	2	1.67
90°	90°	0.450	2.26	0.159	0.695	2	1.39
120°	60°	0.226	2.78	0.092	0.565	2	1.13
150°	30°	0.060	3.99	0.043	0.394	2	0.788
0°	180°	0.900	1.41	0.500	1.11	2	2.22
30°	150°	0.840	1.55	0.417	1.01	2.4	2.42
60°	120°	0.676	1.73	0.334	0.908	3	2.72
90°	90°	0.450	2.00	0.250	0.785	4	3.14
120°	60°	0.226	2.45	0.167	0.640	6	3.84
150°	30°	0.060	3.46	0.083	0.454	12	5.45

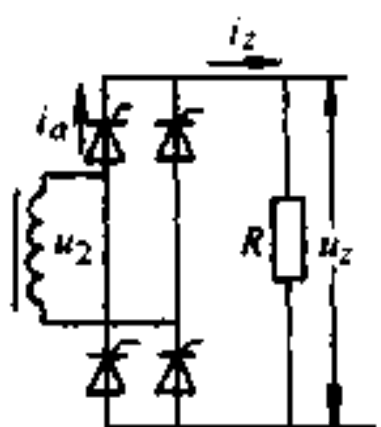


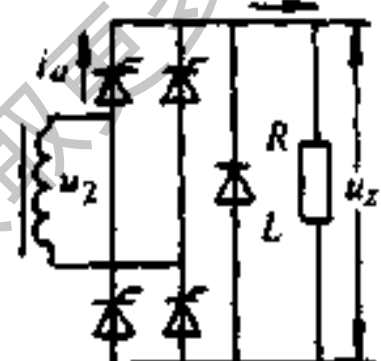


表 12-5 单相半控

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_z$	流过晶闸管的电流波形 $i_a$
电阻性负载			
电感性负载			

## 桥式电路

移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_z}{U_2}$	$\frac{I_y}{I_x}$	$\frac{I_d}{I_m}$	$\frac{I_d}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_Y$	$\frac{I_z}{I_d}$	$\frac{I_z}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_Y$
0°	180°	0.900	1.57	0.318	1	2	2
30°	150°	0.840	1.66	0.297	0.946	2	1.89
60°	120°	0.676	1.88	0.239	0.835	2	1.67
90°	90°	0.450	2.26	0.159	0.695	2	1.39
120°	60°	0.226	2.78	0.092	0.565	2	1.13
150°	30°	0.060	3.99	0.043	0.394	2	0.788
0°	180°	0.900	1.41	0.500	1.11	2	2.22
30°	150°	0.840	1.55	0.417	1.01	2.4	2.42
60°	120°	0.676	1.73	0.334	0.908	3	2.72
90°	90°	0.450	2.00	0.250	0.785	4	3.14
120°	60°	0.226	2.45	0.167	0.640	6	3.84
150°	30°	0.060	3.46	0.083	0.454	12	5.45

表 12-6 单相全控

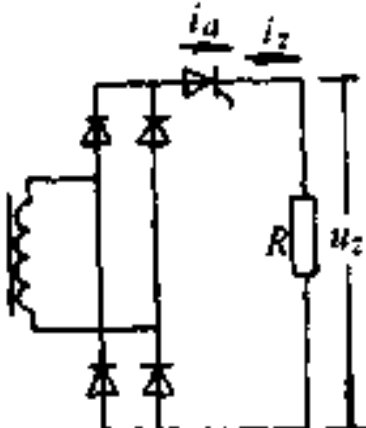


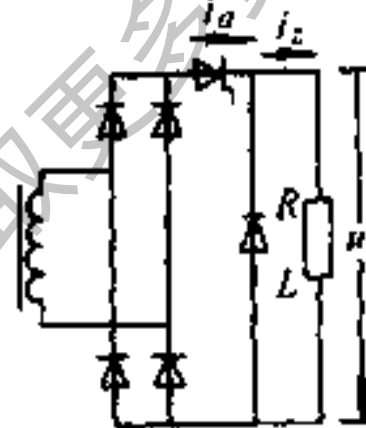
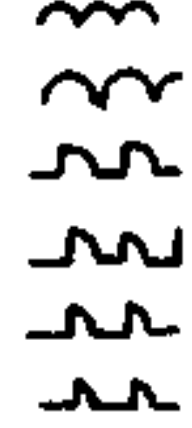

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_z$	流过晶闸管的电流波形 $i_a$
电阻性负载			
电感性负载			

## 桥式电路

移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_z}{U_2}$	$\frac{I_y}{I_o}$	$\frac{I_o}{I_m}$	$\frac{I_o}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_Y$	$\frac{I_z}{I_a}$	$\frac{I_z}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_Y$
0°	180°	0.900	1.57	0.318	1	2	2
30°	150°	0.840	1.66	0.297	0.946	2	1.89
60°	120°	0.676	1.88	0.239	0.835	2	1.67
90°	90°	0.450	2.26	0.159	0.695	2	1.39
120°	60°	0.226	2.78	0.092	0.565	2	1.13
150°	30°	0.060	3.99	0.043	0.394	2	0.788
0°	180°	0.900	1.414	0.500	1.11	2	2.22
30°	180°	0.780	1.414	0.500	1.11	2	2.22
60°	180°	0.450	1.414	0.500	1.11	2	2.22



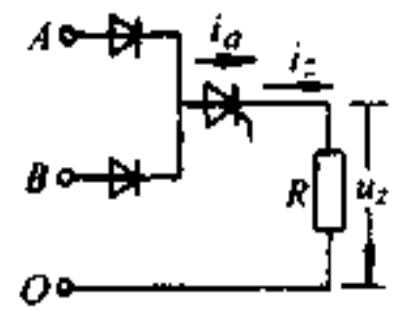


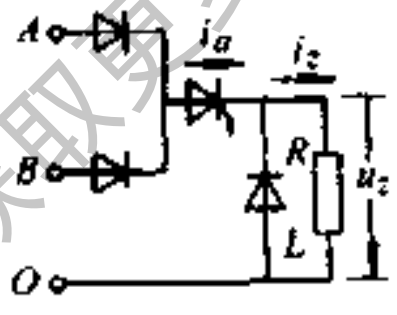


表 12-7 单相桥式 (输出)

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_z$	流过晶闸管的电流波形 $i_a$
电阻性负载			
电感性负载			

## 端有一个晶闸管) 电路

移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_2}{U_2}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_d}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_Y$	$\frac{I_z}{I_a}$	$\frac{I_z}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_Y$
0°	180	0.900	1.11	0.636	1.41	1	1.41
30°	150°	0.840	1.17	0.594	1.34	1	1.34
60°	120°	0.676	1.33	0.478	1.18	1	1.18
90°	90°	0.450	1.57	0.318	1.00	1	1.00
120°	60°	0.226	1.97	0.184	0.796	1	0.796
150°	30°	0.060	2.82	0.085	0.557	1	0.557
0°	180°	0.900	1	1	1.57	1	1.57
30°	150°	0.840	1.09	0.833	1.43	1.2	1.71
60°	120°	0.676	1.22	0.667	1.29	1.5	1.93
90°	90°	0.450	1.41	0.500	1.11	2	2.22
120°	60°	0.226	1.73	0.333	0.908	3	2.72
150°	30°	0.060	2.45	0.167	0.640	6	3.84

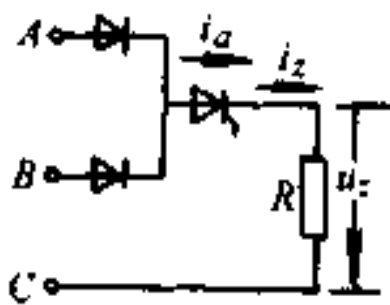


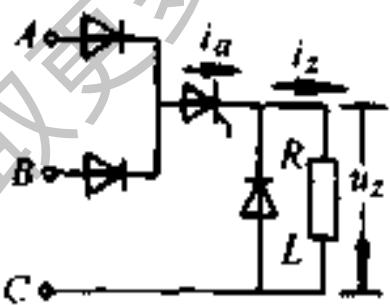


表 12-8 二相零

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_c$	流过晶闸管的电流波形 $i_a$
电阻性负载			
电感性负载			

## 式线路

移 相 角 $\alpha$	导 通 角 $\beta$	$\frac{U_1}{U_2}$	$\frac{I_Y}{I_a}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_Y = I_Y$	$\frac{I_2}{I_a}$	$\frac{I_2}{I_F}$ 条件为 $I_Y = I_Y$
0°	300°	0.843	1.18	0.595	1.33	1	1.33
30°	270°	0.810	1.20	0.572	1.31	1	1.31
90°	210°	0.616	1.39	0.435	1.13	1	1.13
150°	150°	0.421	1.67	0.297	0.940	1	0.940
210°	90°	0.225	2.23	0.159	0.706	1	0.706
270°	30°	0.030	3.96	0.043	0.396	1	0.396
0°	300°	0.843	1.10	0.833	1.43	1.20	1.72
30°	270°	0.810	1.16	0.750	1.35	1.33	1.79
90°	210°	0.616	1.31	0.583	1.20	1.72	2.06
150°	150°	0.421	1.55	0.416	1.01	2.40	2.42
210°	90°	0.225	2.00	0.250	0.785	4.00	3.14
270°	30°	0.030	3.48	0.083	0.451	12.00	5.41

表 12-9 二相

负载性质	电路图	整流器输出 电压波形 $u_z$	流过晶闸管的 电流波形 $i_a$
电阻性负载			
电感性负载			

## 式电路

移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_z}{U_f}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_x}{I_m}$	$\frac{I_u}{I_f}$ 条件为 $I_y = I_Y$	$\frac{I_x}{I_a}$	$\frac{I_z}{I_f}$ 条件为 $I_y = I_Y$
0°	240°	0.676	1.33	0.478	1.18	1	1.18
30°	210°	0.645	1.38	0.456	1.14	1	1.14
60°	180°	0.563	1.49	0.398	1.05	1	1.05
90°	150°	0.451	1.66	0.319	0.946	1	0.946
150°	90°	0.225	2.23	0.159	0.706	1	0.706
210°	30°	0.030	3.96	0.043	0.396	1	0.396
0°	240°	0.676	1.23	0.667	1.28	1.50	1.92
30°	210°	0.645	1.31	0.583	1.20	1.72	2.06
60°	180°	0.563	1.42	0.500	1.11	2.00	2.22
90°	150°	0.451	1.55	0.416	1.01	2.40	2.42
150°	90°	0.225	2.00	0.250	0.785	4.00	3.14
210°	30°	0.030	3.48	0.083	0.451	12.00	5.41

表 12-10 三相

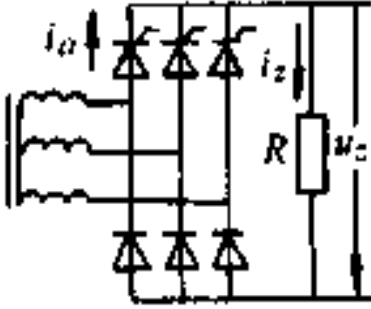


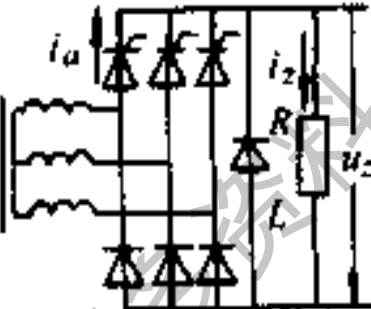


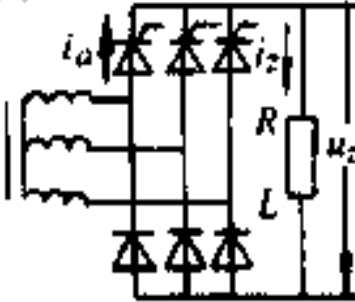

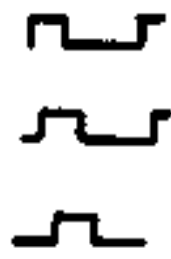
负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_z$	流过晶闸管的电流波形 $i_a$
电阻性负载			
(有续流二极管) 电感性负载			
(无续流二极管) 电感性负载			

## 半波电路

移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_c}{U_2}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_c}{I_F}$ 条件为 $I_p = I_y$	$\frac{I_c}{I_a}$	$\frac{I_c}{I_F}$ 条件为 $I_p = I_y$
0°	120°	1.17	1.76	0.276	0.892	3	2.68
30°	120°	1.01	1.88	0.239	0.835	3	2.50
60°	90°	0.675	2.22	0.159	0.708	3	2.12
90°	60°	0.338	2.75	0.093	0.565	3	1.69
120°	30°	0.0905	3.92	0.042	0.394	3	1.18
0°	120°	1.17	1.73	0.333	0.908	3	2.72
30°	120°	1.01	1.73	0.333	0.908	3	2.72
60°	90°	0.675	2.00	0.250	0.785	4	3.14
90°	60°	0.338	2.45	0.167	0.641	6	3.85
120°	30°	0.0905	3.48	0.083	0.451	12	5.41
0°	120°	1.17	1.73	0.333	0.908	3	2.72
30°	120°	1.01	1.73	0.333	0.908	3	2.72
60°	120°	0.586	1.73	0.333	0.908	3	2.72



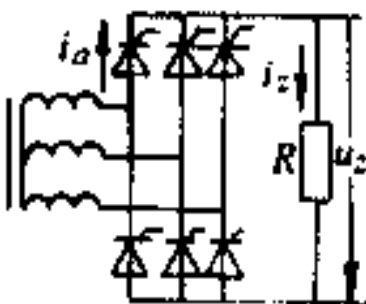


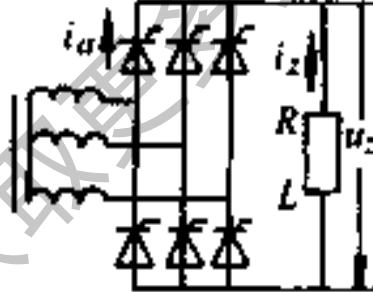


表 12-11 三相

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_2$	流过晶闸管的电流波形 $i_a$
电阻性负载			
(有续流二极管) 电感性负载			
(无续流二极管) 电感性负载			

## 半控桥式电路

移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_c}{U_f}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_L}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_L$	$\frac{I_c}{I_s}$	$\frac{I_c}{I_F}$ 条件为 $I_c = I_y$
0°	120°	2.33	1.73	0.318	0.908	3	2.72
30°	120°	2.17	1.75	0.297	0.891	3	2.69
60°	120°	1.75	1.88	0.242	0.835	3	2.51
90°	90°	1.17	2.22	0.161	0.707	3	2.12
150°	30°	0.157	3.99	0.042	0.394	3	1.18
0°	120°	2.33	1.73	0.333	0.908	3	2.72
30°	120°	2.17	1.73	0.333	0.908	3	2.72
60°	120°	1.75	1.73	0.333	0.908	3	2.72
90°	90°	1.17	2.00	0.250	0.785	4	3.14
150°	30°	0.157	2.48	0.083	0.451	12	5.41
0°	120°	2.33	1.73	0.333	0.908	3	2.72
60°	120°	1.75	1.73	0.333	0.908	3	2.72
150°	120°	0.157	1.73	0.333	0.908	3	2.72

表 12-12 三相全

负载性质	电路图	整流器输出 电压波形 $u_z$	流过晶闸管的 电流波形 $i_a$
电阻性负载			
电感性负载 (无续流二极管)			

## 控桥式电路

移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_d}{U_T}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_L}{I_m}$	$\frac{I_d}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_y$	$\frac{I_d}{I_d}$	$\frac{I_d}{I_b}$ 条件为 $I_y = I_y$
0°	120°	2.33	1.73	0.318	0.912	3	2.73
30°	120°	2.02	1.76	0.275	0.891	3	2.67
60°	120°	1.17	1.97	0.183	0.796	3	2.39
90°	60°	0.311	2.82	0.085	0.556	3	1.67
0°	120°	2.33	1.73	0.333	0.912	3	2.72
30°	120°	2.02	1.73	0.333	0.912	3	2.72
60°	120°	1.17	1.73	0.333	0.912	3	2.72

表 12-13 双反星形带

负载性质	电路图	整流器输出 电压波形 $u_z$	流过晶闸管的 电流波形 $i_a$
电阻性负载			
(有续流二极管) 电感性负载			

## 平衡电抗器电路

移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_z}{U_2}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_F$	$\frac{I_z}{I_a}$	$\frac{I_c}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_F$
0°	120°	1.17	1.76	0.276	0.892	6	5.35
30°	120°	1.01	1.88	0.239	0.835	6	5.01
60°	90°	0.675	2.22	0.159	0.708	6	4.25
90°	60°	0.338	2.75	0.093	0.565	6	3.39
120°	30°	0.0905	3.62	0.042	0.394	6	2.36
0°	120°	1.17	1.73	0.333	0.908	6	5.44
30°	120°	1.01	1.73	0.333	0.908	6	5.44
60°	120°	0.586	1.73	0.333	0.908	6	5.44

表中符号说明：

$u_i$ ——整流器输出电压瞬时值；

$i_a$ ——整流器工作电流瞬时值；

$U_a$ ——整流器输出电压平均值；

$U_2$ ——变压器二次侧相电压的有效值；

$U_l$ ——变压器二次侧线电压的有效值；

$I_y$ ——晶闸管工作电流的有效值；

$I_T$ ——晶闸管额定正向电流有效值；

$I_r$ ——晶闸管额定半波电流的有效值；

$I_a$ ——晶闸管工作电流的平均值；

$I_T$ ——晶闸管额定正向平均电流；

$I_c$ ——整流器输出电流平均值；

$I_m$ ——晶闸管工作电流的峰值。

### 三、晶闸管起动器的型式及其特点

三相晶闸管起动器的主要型式及其特点，见表 12-14。

### 四、硅整流元件及晶闸管的选择

#### 1. 电压等级的选择

硅整流元件  $U_{RM} > U_{mf}$

晶闸管元件  $PFV \geq (1.5 \sim 2) U_{mc}$

$PRV \geq (1.5 \sim 2) U_{mf}$

式中  $U_{RM}$ ——所选整流元件额定反向峰值电压 (V)；

$U_{mf}$ ——所选整流元件所承受的反向电压峰值

(V)，可由表 12-1 查得；

$U_{ms}$ ——所选整流元件所承受的正向电压峰值  
(V)，可由表 12-1 查得；

PFV——所选晶闸管正向阻断峰值电压 (V)；

PRV——所选晶闸管反向阻断峰值电压 (V)；

1.5~2——安全系数。

## 2. 电流等级的选择

(1) 不考虑环境影响时：

$$I_F > I_a = I / 1.57$$

式中  $I_F$ ——所选元件额定正向平均电流 (A)；

$I_a$ ——实际流过元件的电流平均值 (A)，一般情况下取全导通时流过元件的电流平均值，可由表 12-1 查得；

$I$ ——实际流过元件的电流有效值 (A)；

1.57——正弦半波电流有效值与平均值之比。

(2) 考虑环境影响时：

$$I_F \geq \frac{K_3 I_a}{K_1 K_2}$$

式中  $K_1$ ——风速系数，见图 12-1a，20A 以下的硅整流元件不需强迫鼓风，故  $K_1 = 1$ ；


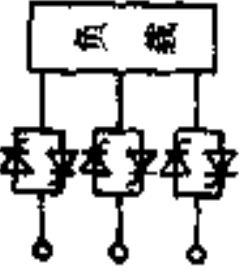
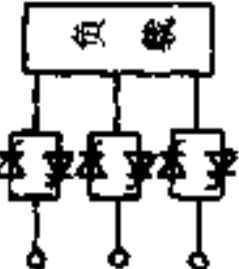
$K_2$ ——环境温度系数，见图 12-1b；

$K_3$ ——海拔高度系数，见图 12-1c。

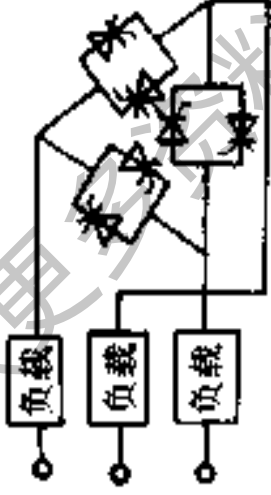

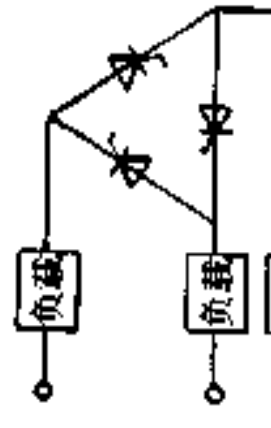
如果整流电路为三相桥式，晶闸管不串联，也可参照表 12-15，根据电动机的额定电压来选择元件的额定电



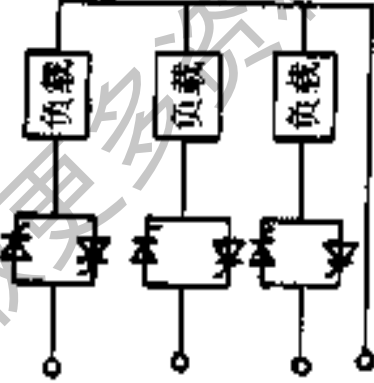
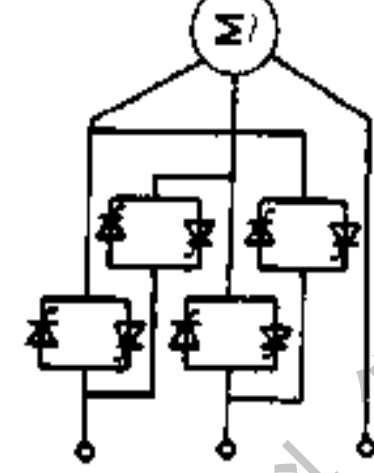
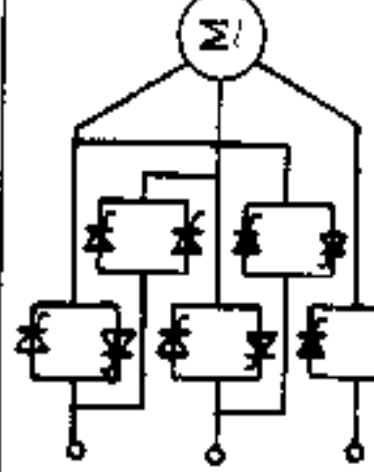
表 12-14 三相晶闸管起动器的主要型式及其特点

序号	1	2	3
电路图	 <p> <math>i_A = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi)</math>  <math>u_f = \sqrt{2} U \sin \omega t</math> </p>		
晶闸管承受的电压最大值	$\sqrt{2} U$	$\sqrt{2} U$	正向 $\sqrt{2} U$ , 反向 0
流过晶闸管的电流平均值	$\frac{\sqrt{2} I}{\pi}$	$\frac{\sqrt{2} I}{\pi}$	$\frac{\sqrt{2} I}{\pi}$
(1) 特点	<p>(1) 元件用量少</p> <p>(2) 在断开状态下承受过电压能力小</p> <p>(3) 三相电流不平衡, 若用于电动机, 只适于小容量</p>	<p>(1) 在断开状态下承受过电压能力较强</p> <p>(2) 三相电流平衡</p> <p>(3) 适用于各种负载</p>	<p>(1) 元件用量少</p> <p>(2) 可使用反向耐压低的管子</p> <p>(3) 在断开状态下承受过电压能力小</p> <p>(4) 相、线电压及正负半波不对称。无直流分量, 含偶次谐波。用于电动机时, 应考虑正、负序线电流对转矩的影响</p>

(续)

<p>序号</p>	<p>4</p>	<p>5</p>	<p>6</p>
<p>电路图</p>			
<p>晶闸管承受的电压最大值</p>	$\sqrt{2}U$	$\sqrt{2}U$	$\sqrt{2}U$
<p>流过晶闸管的电流平均值</p>	$\frac{1}{\pi\sqrt{2}}I$	$\frac{\sqrt{2}}{\pi\sqrt{3}}I$	$\frac{\sqrt{2}}{\pi}I$
<p>(1) 特点</p>	<p>(1) 晶闸管的负载较轻 (2) 在断开状态下承受电压能力小 (3) 只适用于星形负载</p>	<p>(1) 晶闸管负载较轻, 为线电流的 <math>1/\sqrt{3}</math> (2) 在断开状态下承受电压能力小 (3) 适用于三角形负载</p>	<p>(1) 晶闸管用量少 (2) 元件电流为额定电流的 1.5 倍 (3) 在断开状态下承受电压能力小 (4) 有偶次谐波电流, 冲击电流大 (5) 适用于星形负载</p>

(续)

序号	7	8	9
电路图			
晶闸管承受的电压最大值	$\frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{2}U$	$\sqrt{2}U$
流过晶闸管的电流平均值	$\frac{\sqrt{2}I}{\pi}$	$\frac{\sqrt{2}I}{\pi}$	$\frac{\sqrt{2}I}{\pi}$
(1) 特点	(1) 晶闸管承受的电压较低, 为相电压幅值 (2) 适用于星形负载	在断开状态下承受过电压能力小	(1) 在断开状态下承受过电压能力强 (2) 电路对称性好

注:  $U$ —相电压有效值(V);  $I$ —线电流有效值(负荷电流)(A).

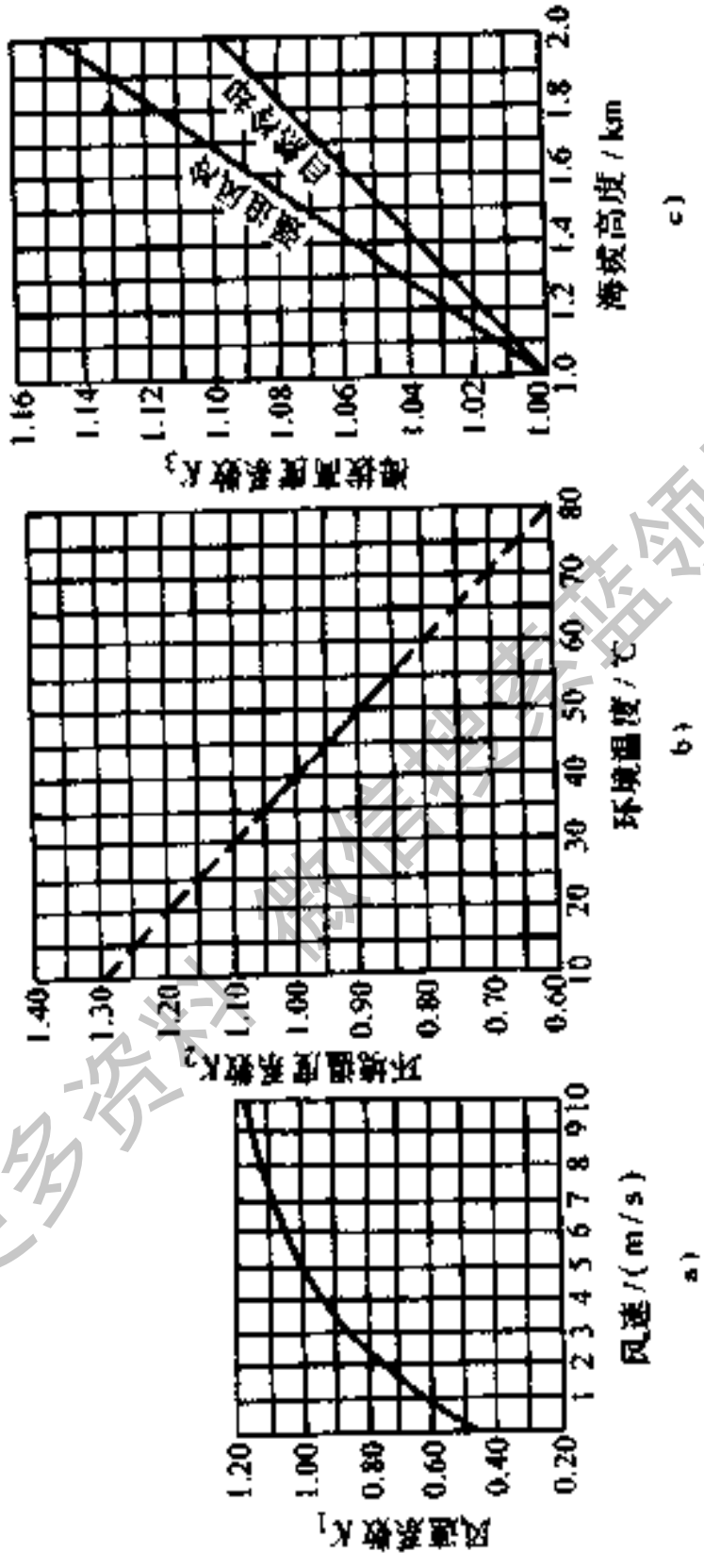


图 12-1 硅整流元件电流选择中的环境影响系数

a) 风速系数  $K_1$ ; b) 温度系数  $K_2$ ; c) 海拔高度系数  $K_3$

获取更多资料

www.zybooks.com

表 12-15 晶闸管额定电压的选择

电动机额定电压/V	220	330	440 <sup>*</sup>	660	750
可控硅额定电压/V	800	1200	1600	2300	2500

压。

### 五、晶闸管串、并联计算

为了避免晶闸管串、并联后引起击穿或烧毁，必须选用特性相近的同一规格的晶闸管，并采用均压保护（串联）和均流保护（并联）。

#### 1. 串联

晶闸管串联保护，如图 12-2 所示。

##### (1) 串联元件数

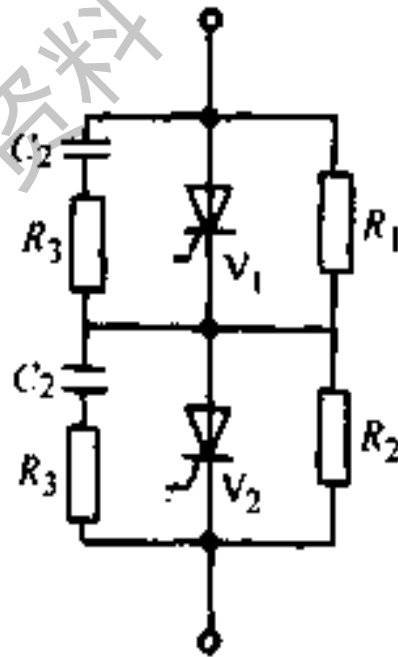


图 12-2 晶闸管串联保护

$$n = \frac{U_{zf}}{0.45PRV}$$

式中  $U_{zf}$ ——元件串联后承受总的反向峰值电压 (V)；

PRV——晶闸管反向阻断峰值电压 (V)。

(2) 均压电阻估算

$$R = (K_1 - 1) \frac{PRV}{I_R}$$

式中  $K_1$ ——允许电压不均匀系数。

(3) 电阻功率

$$P = K_2 \frac{(PRV)^2}{R}$$

式中  $K_2$ ——系数，对于单相电路，取 0.25；三相电路，

$K_2$  取 0.4；直流线路， $K_2$  取 1。

(4)  $R_3$ 、 $C_2$  的选择：见本节晶闸管保护元件选择。

2. 并联

晶闸管并联保护如图 12-3 所示。

(1) 并联元件数：

$$n = \frac{I}{1.26I_F}$$

式中  $I$ ——并联元件中流过总的正向电流有效值 (A)；

$I_F$ ——同前。

(2) 均流电阻计算：

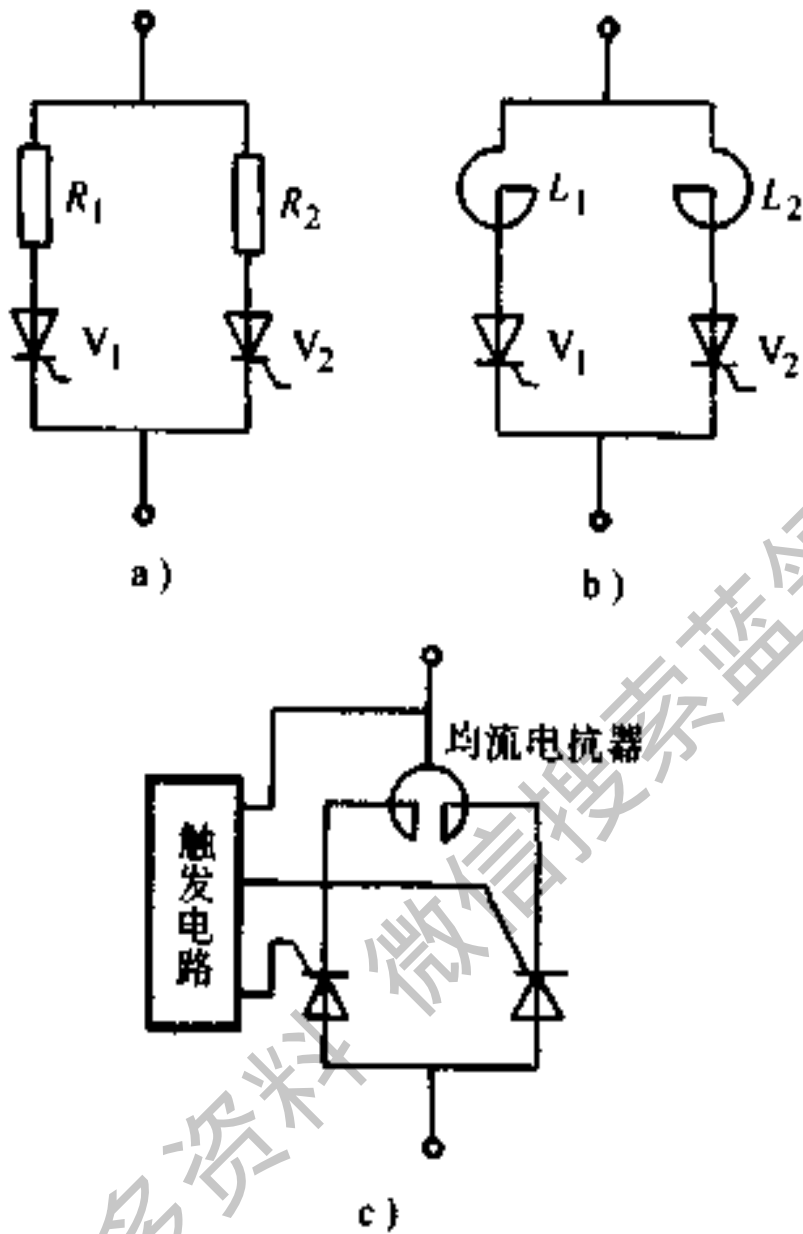


图 12-3 晶闸管并联保护

$$R = \frac{0.4 \sim 1}{I_F}$$

(3) 电阻功率:

$$P_R = I_F^2 R$$

串联电阻的方法,由于损耗较大,只适用于小功率的场合。空芯电抗器  $L$  可取  $40\mu\text{H}$  左右,即可保证有良好的

均流效果。

## 六、晶闸管保护计算

### 1. 交流侧过电压保护计算

(1) 阻容保护计算：交流侧阻容保护接法，如图 12-4 所示。

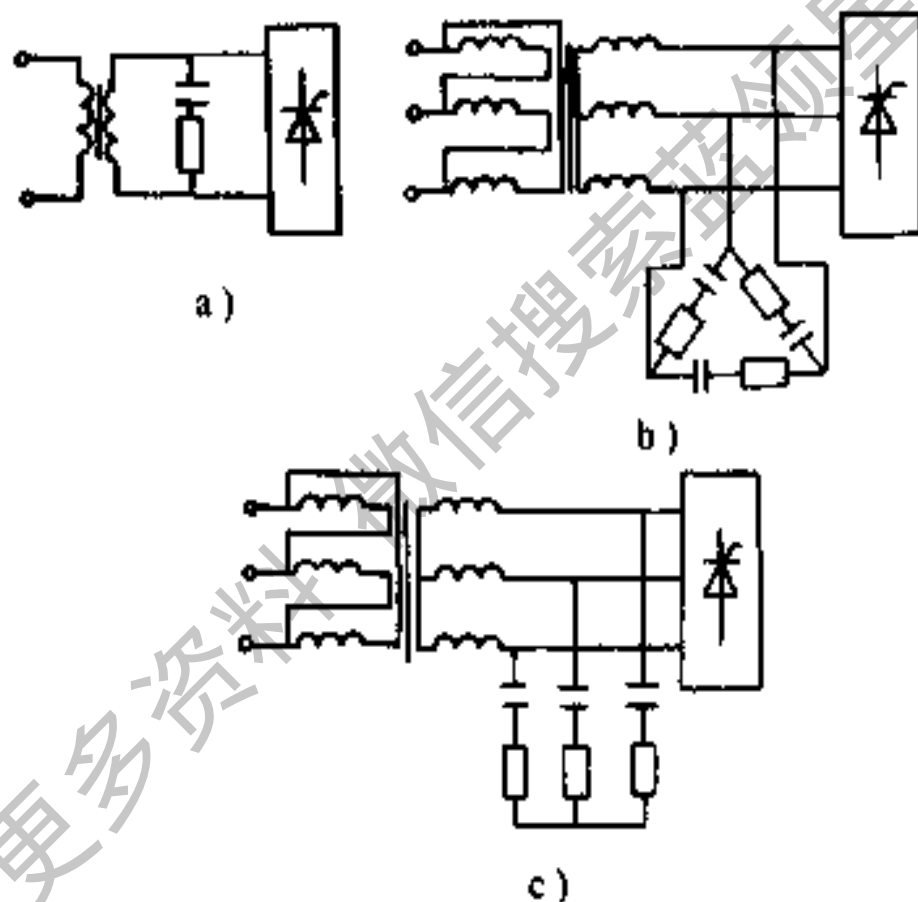


图 12-4 交流侧阻容保护电路

a) 单相 b) 变压器次级 Y 接法，阻容 Δ 接法

c) 变压器次级 Y 接法，阻容 Y 接法

① 方法一：见图 12-4a，交流侧过电压保护  $R$ 、 $C$  之值可按下列公式计算：



$$C \geq 6I_0\% \frac{S_x}{U_2^2}$$

$$R \geq 2.3 \frac{U_2^2}{S_x} \sqrt{\frac{U_d\%}{I_0\%}}$$

电容  $C$  的交流耐压  $\geq 1.5U_c$ ,

电阻功率  $P \geq (3 \sim 4) I_c^2 R$

式中  $S_x$  —— 变压器每相的平均计算容量 (VA);

$U_2$  —— 变压器二次侧相电压有效值 (V);

$I_0\%$  —— 变压器空载电流百分数, 对于几百 VA 的变压器, 取 10; 对于几十 VA 的取 3~4;

$U_d\%$  —— 变压器阻抗电压百分数, 约 5%~10%;

$U_c$  —— 阻容两端正常工作交流电压有效值 (V);

$I_c$  —— 正常工作时流过阻容电路的交流电流有效值 (A)。

对于图 12-4b 或 c, 若  $R$ 、 $C$  接法与变压器二次侧接法一致 (均  $\Delta$  或均  $Y$  接法), 则  $R$ 、 $C$  值可按以上公式计算, 若接法不一致, 则先按以上两式算出阻容值, 再进行  $Y-\Delta$  换算:  $R_\Delta = 3R_Y$ ;  $C_\Delta = C_Y/3$ 。如图 12-4b, 可先计算出都按  $Y$  接法的  $R_Y$  及  $C_Y$  值, 再将阻容换算成  $\Delta$  接法的值。若变压器二次侧是  $\Delta$  接法,  $R$  及  $C$  是  $Y$  接法, 先计算出均按  $\Delta$  接法的  $R_\Delta$  及  $C_\Delta$  值, 再将阻容换算成  $Y$  接法的值。

② 方法二: 对于小容量整流设备:

200VA 以下的单相电路

$$C = 700 \frac{S}{(\text{PRV})^2}$$

200VA 以上的单相电路

$$C = 400 \frac{S}{(\text{PRV})^2}$$

5kVA 以下的三相电路

$$C = K \frac{S}{(\text{PRV})^2}$$

式中  $S$ ——整流变压器的容量 (VA);

$\text{PRV}$ ——晶闸管额定反向峰值电压 (V), 当由  $n$  只晶闸管串联时, 则此值应乘  $n$ ;

$K$ ——计算系数, 见表 12-16。

表 12-16 小容量整流设备过电压抑制  
电容的计算系数  $K$  值

变压器联接型式	电容器三角形接法	电容器星形接法
$Y_y$ , 一次侧中点不接地	150	450
$Y_d$ , 一次侧中点不接地	300	900
所有其他接法	900	2700

$$R = 100 \sqrt{\frac{R_z}{C \sqrt{f}}}$$

电阻功率  $P_R = R (U_z / X_c)^2$

式中  $R_z$ ——等效负载电阻, 即负载情况下直流电压除以直流电流之值 ( $\Omega$ );

$F$ ——电网频率 (Hz);

$U_2$ ——变压器次级每相电压 (V);

$X_c$ ——容抗 ( $\Omega$ ),

$$X_c = \frac{10^{-6}}{2\pi FC}$$

为了减少发热量,电阻功率应选择为计算值的 2 倍。

对于大容量整流设备

$$C = K_c \left( \frac{I_{02}}{U_{02}} \right)$$

$$R = K_R (U_{02}/I_{02})$$

$$P_R = (2 \sim 3) (K_p I_{02})^2 R$$

式中  $U_{02}$ ——变压器二次侧绕组电压 (V);

$I_{02}$ ——折算到变压器二次侧绕组的励磁电流 (A);

$K_c$ 、 $K_R$ 、 $K_p$ ——系数,见表 12-17。

③ 整流装置直接接到电源上时阻容保护和限制电

表 12-17 大容量整流设备交流侧过电压

RC 抑制电路计算系数

整流电路	$K_c$	$K_R$	$K_p$
单相桥式	29000	0.3	0.25
三相桥式	10000	0.3	0.25
三相半波	8000	0.36	0.25
六相半波	7000	0.3	0.2

压上升率  $dV/dt$  的保护的计算:

阻容保护估算: 保护电容器容量

$$C = \frac{2IU_r^2 I^2 U_d \%}{S_r (\text{PRV})^2}$$

式中  $U_r$ ——额定工作电压 (V);

$I$ ——相邻负载拉闸电流 (A);

其它符号同前。

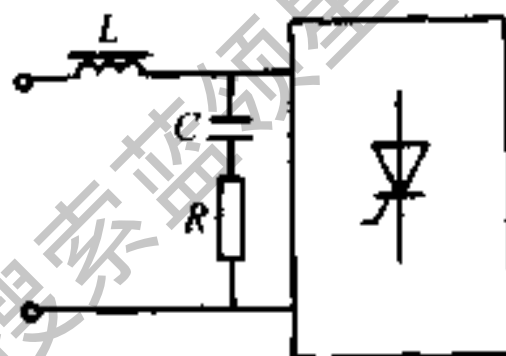
当电源电压发生突变时, 有可能出现电压上升率  $dV/dt > 20\text{V}/\mu\text{s}$  的情况, 如果不用整流变压器, 就可能引起晶闸管误导通。为此, 需做限制  $dV/dt$  的保护计算, 在电源输入端加串联电感和阻容保护电路 (图 12-5)。

电感的计算

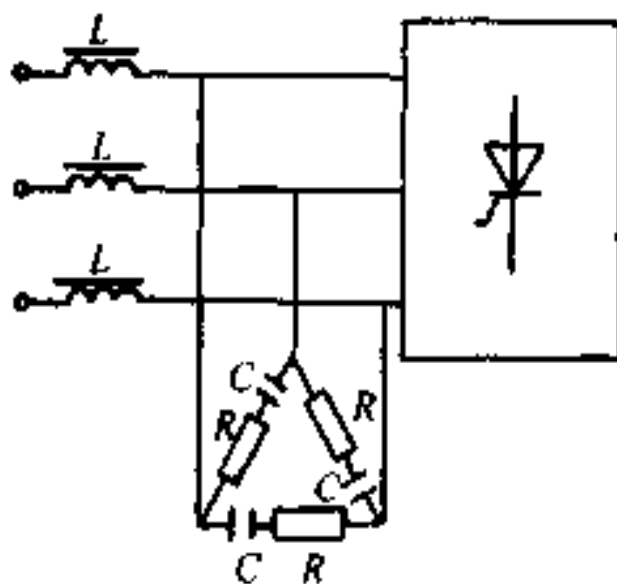
$$L = \frac{(0.03 \sim 0.05) R_r}{2\pi f}$$

式中  $L$ ——电感 (H);

$R_r$ ——整流器输入端等效负载电阻, 即电



a) 单相



b) 三相

图 12-5 限制电压上升率的保护电路

源电压除以输入整流器的电流之值；对于三相整流为每相等效负荷电阻 ( $\Omega$ )；

$f$ ——电源频率 (Hz)。

④ 晶闸管换相过电压阻容保护计算：晶闸管换相过电压采取阻容保护，是将  $RC$  并联在晶闸管上， $RC$  数值可由表 12-18 选取。

表 12-18 与晶闸管并联的  $RC$  数值

晶闸管额定 电流/A	5	10	20	50	100	200	500
电容 $C/\mu\text{F}$	0.1	0.1	0.15	0.2	0.25	0.5	1
电阻 $R/\Omega$	100	100	80	40	20	10	2

电阻  $R$  值也可按负荷电阻的 2.2 倍选取。

电阻功率计算：

方法一

$$P_R = \frac{1.5 (\text{PRV} \cdot 2\pi f C)^2 \times 10^{-12}}{2} \times R$$

方法二

$$P_R > \frac{U_2}{R^2 + X_c^2} R$$

式中  $U$ ——阻容保护电路两端电压有效值 (V)，若接在直流侧应为整流电压中交流分量有效值；

$X_c$ ——阻容保护的电容容抗 ( $\Omega$ )。

需指出,过电压保护的计算方法有多种,尚无统一的标准公式。计算结果并不是严格的,可根据同类设备的保护参数或实际经验进行适当修正。

(2) 硒堆保护计算: 硒堆可装在交流侧及直流侧。

① 硒片面积选择: 10kW 以下, 选用  $16 \times 16\text{mm}^2$  或  $22 \times 22\text{mm}^2$ ; 20~30kW, 选用  $40 \times 40\text{mm}^2$ ; 30~100kW, 选用  $90 \times 90\text{mm}^2$ ; 100kW 以上, 选用  $100 \times 100\text{mm}^2$ 。

② 硒片片数确定:

$$\text{单相 } n = K_{cp} U_2 / U_{cp}$$

$$\text{三相 } n = K_{cp} \sqrt{3} U_2 / U_{cp}$$

式中  $K_{cp}$ ——硒片动作电压系数, 一般为 1.1~1.3;

$U_2$ ——变压器二次侧线电压有效值 (V);

$U_{cp}$ ——硒片击穿电压, 一般为 20~30V; 上海无线电十四厂生产的 XTP 或 XLP 型硒片, C 级每片 20V, D 级每片 25V, E 级每片 30V。

硒堆保护接法如图 12-6 所示。

如交流侧单相电压为 220V, 则硒片片数  $n = K_{cp} U_2 / U_{cp} = (1.1 \times 220) / 20 \text{ 片} = 12 \text{ 片}$ 。

硒片片数确定后, 应满足下式要求: (否则应适当调整片数)

$$I_p \geq K_0 I_{02}$$

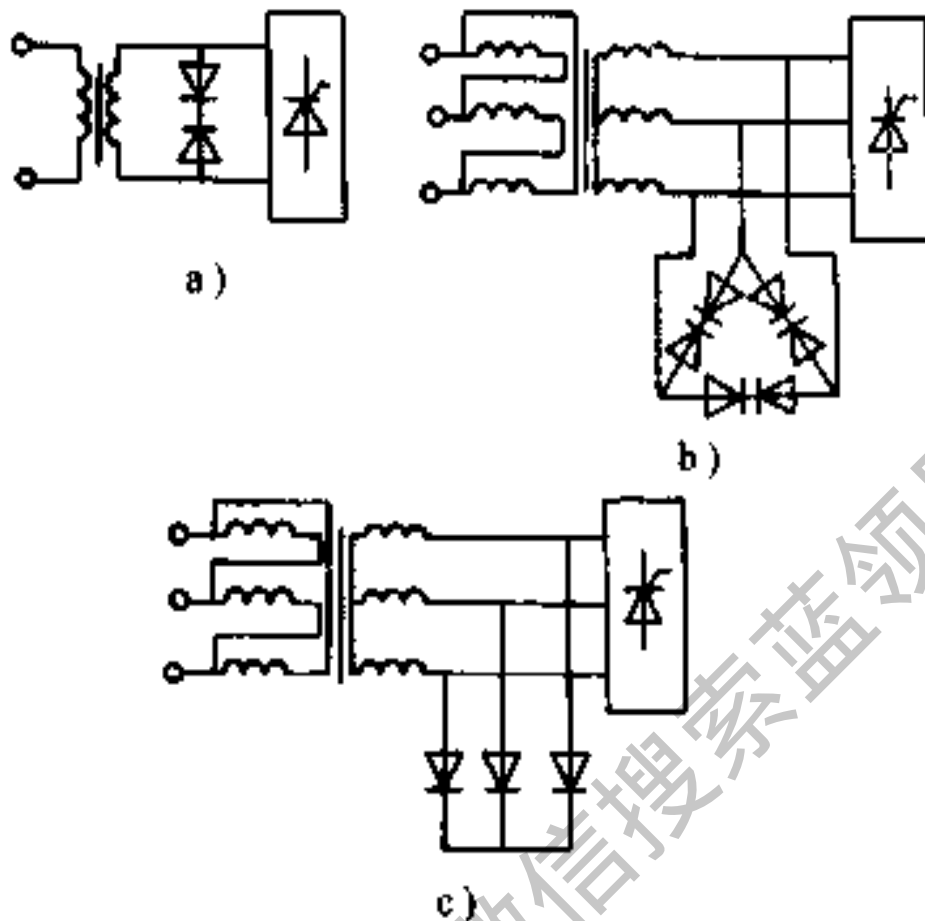


图 12-6 硒堆保护接法

a) 单相 b) 三相 $\Delta$ 接法 c) 三相 $\Upsilon$ 接法式中  $I_p$ ——硒堆在试验电压下的反向电流； $I_{02}$ ——隔离变压器二次空载电流； $K_0$ ——经验系数，取 0.7。

(3) 压敏电阻保护计算：即确定压敏电阻额定电压

 $U_y$ ：

$$U_y = \frac{\epsilon}{0.8 \sim 0.9} U_{ym}$$

式中  $U_{ym}$ ——承受额定电压的峰值 (V)； $\epsilon$ ——电网电压升高系数，取 1.05~1.10。

## 2. 晶闸管直流侧过电压保护计算

## (1) 阻容保护计算:

$$C = K_{C1} \frac{I_{02}}{fU_{02}}$$

$$R = K_{R2} U_{02} / I_{02}$$

式中  $C$  —— 电容量 ( $\mu\text{F}$ );

$R$  —— 电阻 ( $\Omega$ );

$I_{02}$  —— 折算到变压器二次绕组的励磁电流 ( $\text{A}$ );

$U_{02}$  —— 变压器二次绕组电压 ( $\text{V}$ );

$K_{C1}$ 、 $K_{R2}$  —— 系数, 见表 12-19。

表 12-19 直流侧过电压 RC 抑制电路计算系数

整流电路	$K_{C1}$	$K_{R2}$
单相桥式	120000	0.25
三相桥式	$70000 \sqrt{3}$	$0.1 / \sqrt{3}$
三相半波	$70000 \sqrt{3}$	$0.1 / \sqrt{3}$

(2) 快熔保护计算: 快熔是快速熔断器的简称, 装在交流侧或直流侧。常用的快熔有 RLS 和 RS3 系列。快熔的额定电压  $U_r$  和熔体额定电流  $I_r$  (有效值) 按下列公式选取:

$$U_r \geq U_g$$

$$1.57I_r \geq I_{cr} \geq I_g \text{ 或 } I_r = (1.2 \sim 1.5) I_r$$

式中  $U_g$  —— 线路正常工作电压 ( $\text{V}$ );



$I_F$ ——晶闸管额定正向平均电流 (A)；

$I_g$ ——流过晶闸管的实际工作电流有效值 (A)。

快速熔断器的接法，如图 12-7 所示。

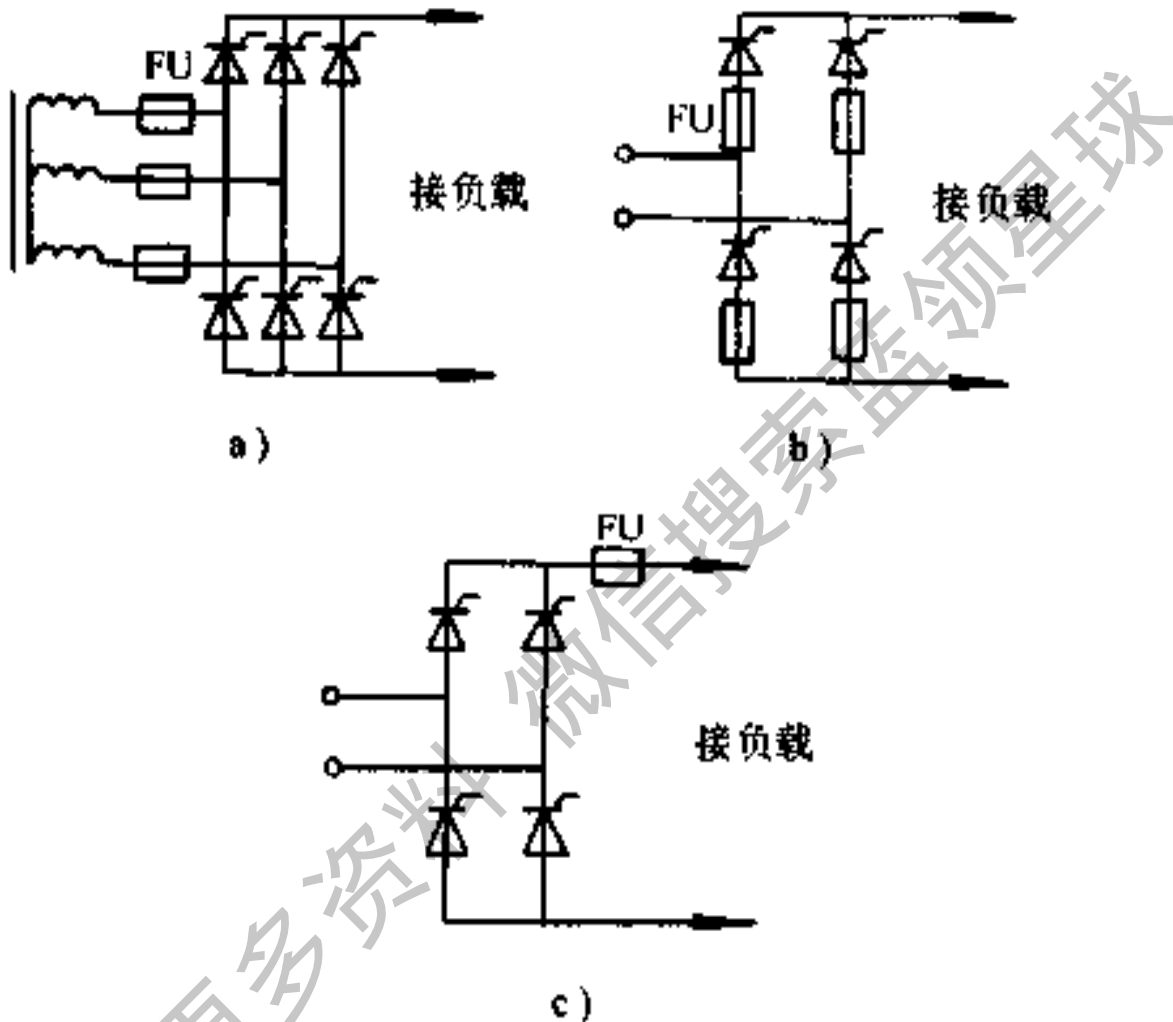


图 12-7 快速熔断器保护接法

a) 交流侧串快熔 b) 元件串快熔 c) 直流侧串快熔

RLS 系列螺旋式快速熔断器的技术数据，见表 12-20。

(3) 应急时用普通熔断器代替快熔保护的计算：作为临时措施，可用普通熔断器降低定额代替快熔保护可

表 12-20 RLS 系列快速熔断器的技术数据

型号	额定电压 /V	额定电流 /A	熔体额定电流 /A	极限分断电流 有效值	电路功率因数
RLS-10	500V 以下	10	3.5、10	40kA	≥0.3
RLS-50		50	15、20、25、30、40、50		
RLS-100		100	60、80、100		

## 保护特性

额定电流倍数	熔断时间
1.1	5h 不断
1.3	1h 不断
1.75	1h 内断
4	<0.2s
6	<0.02s

控硅。这时可按下式选择：

$$I_c \leq \frac{2}{3} \times 1.57 I_F = 1.05 I_F$$

式中  $I_c$ ——普通熔断器的熔体额定电流 (A)；

$I_F$ ——同前。

如 20A 的晶闸管可选用 20A 的普通熔断器来保护。

除了上述保护方法外，还有直流快速开关作直流侧的过载和短路保护，以及在交流侧和直流侧接入过流继

电器进行过电流保护。快速开关机构动作时间只有 2ms，全部断弧时间为 25~30ms，是较好的直流侧过电流保护装置。

## 第二节 整流电路及其计算

一、各种整流电路参数及比较见表 12-21。

二、多级倍压整流电路的计算

当整流电流很小（小于 5mA）时，可以采用多级倍压整流电路获得很高的直流电压。

多级倍压整流电路如图 12-8 所示（图中为 5 级）。

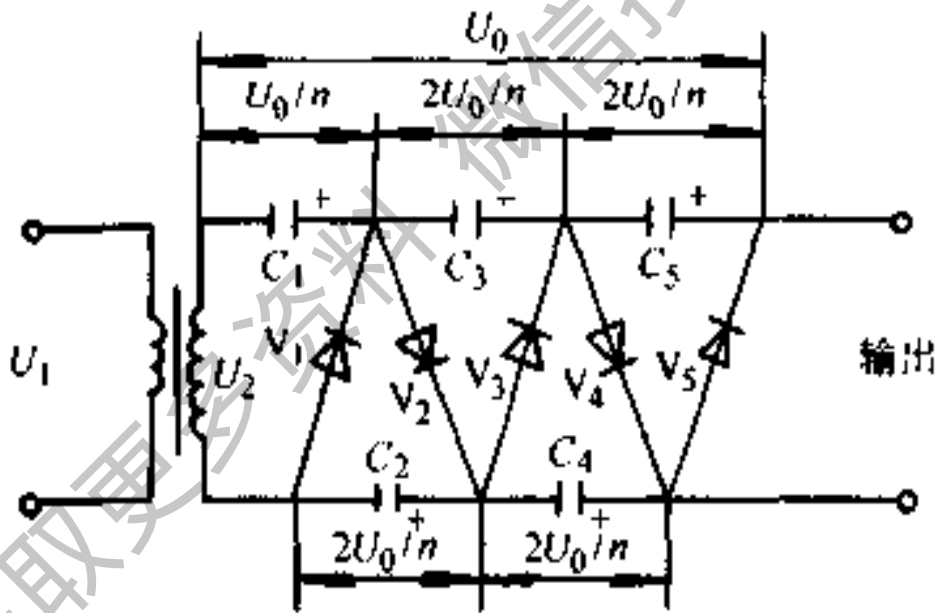


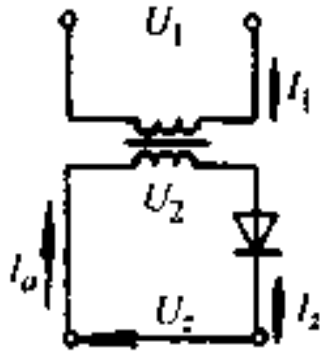
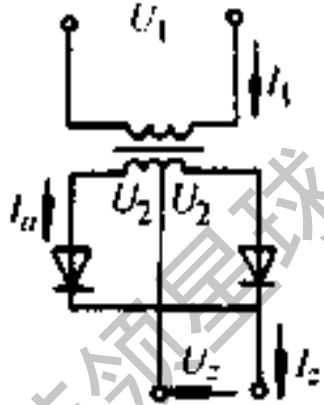
图 12-8 多级倍压整流电路

理论输出直流电压  $U_c'$  为

$$U_c' = nU_{2m} = n \sqrt{2} U_2$$

实际上，加上负载后的输出直流电压  $U_x$  约为

表 12-21 整流电路的基本电量关系

整流电路名称	单相半波	单相全波(双半波)
电路图		
空载直流输出电压 $U_{z0}$	$0.45U_2$	$0.90U_2$
元件最大正向和最大反向电压峰值 $U_m$	$1.41U_2 (3.14U_{z0})$	$2.83U_2 (3.14U_{z0})$
输出电压纹波系数 $\gamma$	1.21	0.484
流过元件的电流平均值 $I_d$	$I_2$	$0.5I_2$
变压器一次侧相电流 $I_{A1}$	$1.21kI_2$	$1.11kI_2$
变压器二次侧相电流(有效值) $I_{A2}$	$1.57I_2$	$0.785I_2$
变压器二次侧相电压(有效值) $U_{A2}$	$2.22U_2 + ne$	$1.11U_2 + ne$
变压器一次侧容量 $P_1$	$2.69U_2I_2$	$1.23U_2I_2$
变压器二次侧容量 $P_2$	$3.49U_2I_2$	$1.74U_2I_2$
变压器平均计算容量 $P_{pj}$	$3.09U_2I_2$	$1.49U_2I_2$

(续)

整流电路名称	单相桥式(全波)	三相半波(星形零点)
电路图		
空载直流输出电压 $U_{z0}$	$0.90U_2$	$1.17U_2$
元件最大正向和最大反向电压峰值 $U_m$	$1.41U_2(1.57U_{z0})$	$2.45U_2(2.09U_{z0})$
输出电压纹波系数 $\gamma$	0.484	0.183
流过元件的电流平均值 $I_a$	$0.5I_2$	$0.333I_2$
变压器一次侧相电流 $I_{r1}$	$1.11kI_2$	$0.47kI_2$
变压器二次侧相电流(有效值) $I_{r2}$	$1.11I_2$	$0.58I_2$
变压器二次侧相电压(有效值) $U_{r2}$	$1.11U_2 + ne$	$0.855U_2 + ne$
变压器一次侧容量 $P_{r1}$	$1.23U_2I_2$	$1.21U_2I_2$
变压器二次侧容量 $P_{r2}$	$1.23U_2I_2$	$1.49U_2I_2$
变压器平均计算容量 $P_{rj}$	$1.23U_2I_2$	$1.35U_2I_2$

(续)

整流电路名称	三相星形桥式	六相双反星形
电路图		
空载直流输出电压 $U_{z0}$	$1.35U_2$	$1.35U_2$
元件最大正向和最大反向电压峰值 $U_m$	$1.41U_2(1.05U_{z0})$	$2.83U_2(2.09U_{z0})$
输出电压纹波系数 $\gamma$	0.042	0.042
流过元件的电流平均值 $I_a$	$0.333I_2$	$0.167I_2$
变压器一次侧相电流 $I_{x1}$	$0.817kI_2$	$0.407kI_2$
变压器二次侧相电流(有效值) $I_{x2}$	$0.817I_2$	$0.289I_2$
变压器二次侧相电压(有效值) $U_{x2}$	$0.428U_2 + 2ne$	$0.855U_2 + ne$
变压器一次侧容量 $P_{s1}$	$1.05U_2I_2$	$1.05U_2I_2$
变压器二次侧容量 $P_{s2}$	$1.05U_2I_2$	$1.48U_2I_2$
变压器平均计算容量 $P_{sj}$	$1.05U_2I_2$	$1.26U_2I_2$

(续)

整流电路名称	六相星形半波
电路图	
空载直流输出电压 $U_{c0}$	$1.17U_2$
元件最大正向和最大反向电压峰值 $U_m$	$2.45U_2 (2.09U_{c0})$
输出电压纹波系数 $\gamma$	0.042
流过元件的电流平均值 $I_d$	$0.167I_2$
变压器一次侧相电流 $I_{L1}$	$0.576kI_2$
变压器二次侧相电流(有效值) $I_{L2}$	$0.407I_2$
变压器二次侧相电压(有效值) $U_{L2}$	$0.744U_2 + n\epsilon$
变压器一次侧容量 $P_1$	$1.28U_2I_2$
变压器二次侧容量 $P_2$	$1.81U_2I_2$
变压器平均计算容量 $P_p$	$1.43U_2I_2$

注:  $\epsilon$  为硅整流元件正向压降;  $n$  为硅整流元件的串联只数;

$k$  为  $U_2/U_1$ 。

$$U_1 = nU_2/0.85$$

电容器两端电压约为

$$U_{c1} = U_1/n = U_2/0.85$$

$$U_{c2} = U_{c3} = \dots = U_{cn} = 2U_{c1} = 2U_2/0.85$$

电容器电容量约为

$$C_1 = C_2 = C_3 = \dots = 34I_0(n+2)/U_2$$

式中  $U_2$ ——变压器二次侧电压有效值(V);

$n$ ——倍压级数;

$I_0$ ——整流电流(mA)。

需注意:当加大负荷(负荷电阻减小)时,输出电压将严重下跌。倍压整流的级数不宜过多,如用于静电喷漆上的九级倍压输出电压可在 60~120kV 范围内调节(由调节高频振荡器输出的振荡电压来实现),输出的电能够供给 6 支喷枪同时进行喷漆。

### 三、整流元件串、并联计算

为了避免元件串、并联后整流元件击穿烧毁,必须选用特性相近的同一规格的整流元件,并采

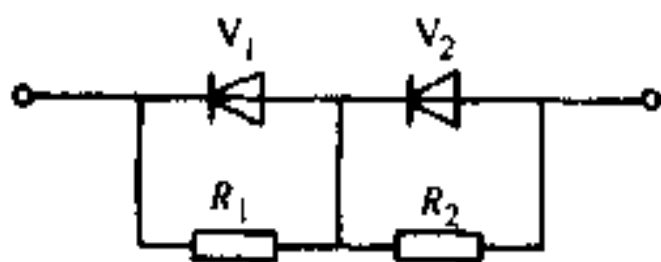


图 12-9 整流元件串联保护

用均压保护(串联)和均流保护(并联)。

#### 1. 串联(图 12-9)

串联元件数



$$n = \frac{U_{xmf}}{0.9U_{RM}}$$

$$\text{均压电阻 } R = \frac{U_{mf}}{K_1 I_{mf}} \times 10^3$$

$$\text{均压电阻功率 } P_R = \frac{K_2}{R_1} \left( \frac{U}{N} \right)^2$$

式中  $U_{xmf}$ ——元件串联后承受总的反向峰值电压 (V);

$U_{RM}$ ——每个硅整流元件额定反向峰值电压 (V);

$U_{mf}$ ——每个硅整流元件反向峰值电压 (V);

$I_{mf}$ ——每个硅整流元件反向漏电流 (mA);

$K_1$ ——系数, 取 2~5;

$K_2$ ——系数, 取 0.35~1;

$U$ ——线路反向峰值电压 (V);

$N$ ——整流元件串联支数。

## 2. 并联 (图 12-

10)

并联元件数

$$n = \frac{I}{1.26I_f}$$

均流电阻

$$R = K_1 NU / I$$

$$\text{功率 } P_R = K_2 R \left( \frac{I}{N} \right)^2$$

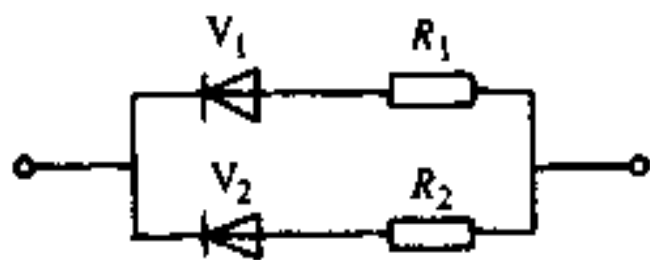


图 12-10 整流元件并联保护

- 式中  $I$ ——流过并联元件总的正向电流有效值(A);  
 $I_F$ ——每个整流元件的额定正向平均电流(A);  
 $K_1$ ——系数,取 3~4;  
 $K_2$ ——系数,取 1.5~2.5;  
 $N$ ——整流元件并联支路;  
 $U$ ——整流元件正向压降(V);  
 $I$ ——同上。

#### 四、整流元件的保护计算

1. 阻容保护计算(同晶闸管的阻容保护)。
2. 快熔保护计算

$$I_r \leq 0.8I_r$$

- 式中  $I_r$ ——快熔额定电流(A);  
 $I_r$ ——整流元件的额定电流(A)。

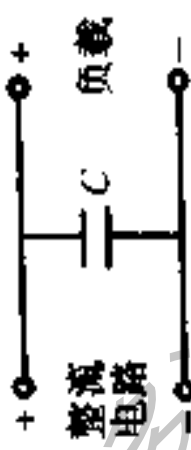
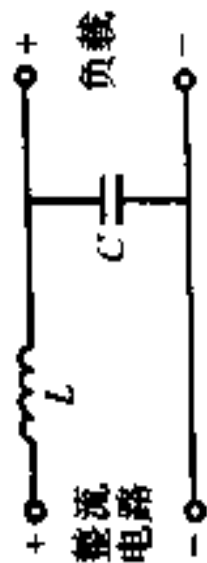
### 第三节 滤波电路及其计算

#### 一、常用小功率滤波电路的比较

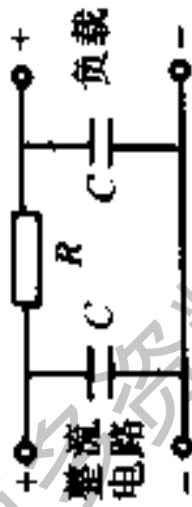

1. 常用小功率滤波电路的比较和参数见表 12-22。

(1) 负载特性指负载电流变化时输出电压的变化情况。输出电压变化大,负载特性差。对于电容滤波电路,当负载变化很大时,可在输出端并联一个泄放电阻,以改善负载特性。泄放电阻可按  $10R_L$  来选取。 $R_L$  为等效负载电阻。

表 12-22 常用小功率滤波电路的比较和参数

名称	电容滤波	Γ型滤波
电路图	 <p>整流电路</p>	 <p>整流电路</p>
滤波效果	较差	较好
输出电压	高	低
输出电流	较小	大
负载特性	差	较好
参数选择 ( $f=50\text{Hz}$ )	全波整流 $C = \frac{1.44 \times 10^3}{\gamma R_L}$ 半波整流 $C = \frac{2.88 \times 10^3}{\gamma R_L}$	全波整流 $LC = \frac{1.19}{\gamma}$ 取 $L \geq \frac{2R_L}{942}$

(续)

名称	阻容滤波	$\pi$ 型滤波
电路图 		
滤波效果	较好	好
输出电压	较高	高
输出电流	小	较小
负载特性	差	差
参数选择 ( $f=50\text{Hz}$ )	全波整流 $RC^2 = \frac{2.3 \times 10^6}{\gamma R}$ 其中 $R$ 一般取数十至数百欧	由于体积、重量都较大,所以在 晶体管整流电路中较少应用

注:  $\gamma$  为输出电压纹波系数, 电容  $C$  的单位为  $\mu\text{F}$ 。

$$R_x = \frac{\text{输出直流电压 } U_x}{\text{负载直流电流 } I_x}$$

(2) 滤波用电解电容的耐压等级不小于  $\sqrt{2}U_2$ 。采用较大的滤波电容时,要加大整流二极管的电流裕度,必要时加限流电阻限制充电电流。

(3) 采用电感滤波电感量较大时,为防止断开电源的瞬时感应电动势击穿整流管,所选用的整流管的电压等级应留有一定裕度。

2. 常用小功率电容滤波电路的特性见表 12-23。

表 12-23 常用小功率电容滤波电路的特性

电路形式	输入交流电压 (有效值)	空载直流输出电压 $U_{x0}$	负载直流输出电压 $U_x$	元件最大反向电压 峰值 $U_m$	流过元件的电流平均值 $I_a$	需用二极管数
半波整流电容滤波	$U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$U_2$	$2\sqrt{2}U_2$	$I_x$	1
全波整流电容滤波	$U_2 + U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$1.2U_2$	$2\sqrt{2}U_2$	$0.5I_x$	2
桥式整流电容滤波	$U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$1.2U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$0.5I_x$	4
二倍压	$U_2$	$2\sqrt{2}U_2$	$2U_2$	$2\sqrt{2}U_2$	$I_x$	2

## 二、滤波电路计算

### 1. 各种滤波电路的计算

#### (1) 电感型滤波电

路见图 12-11。

全波整流滤波系数

$$Q = \gamma_{\text{未滤}} / \gamma_{\text{滤}} = 2\omega L /$$

$R_z$

半波整流滤波系数

$$Q = \omega L / R_z$$

如果已知负载电阻及滤波系数, 便可由上述公式求得所需的电感值。

#### (2) 电容型滤波电

路见图 12-12。

##### ① 全波整流:

$$\text{纹波系数 } \gamma_{\text{全波}} = \frac{0.072}{fCR_z}$$

$$\text{滤波系数 } Q = 2.2fCR_z$$

##### ② 半波整流:

$$\text{纹波系数 } \gamma_{\text{半波}} = \frac{0.144}{fCR_z}$$

$$\text{滤波系数 } Q = 1.1fCR_z$$

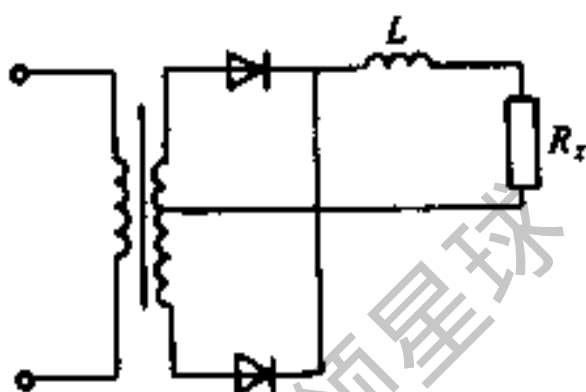


图 12-11 电感型滤波电路

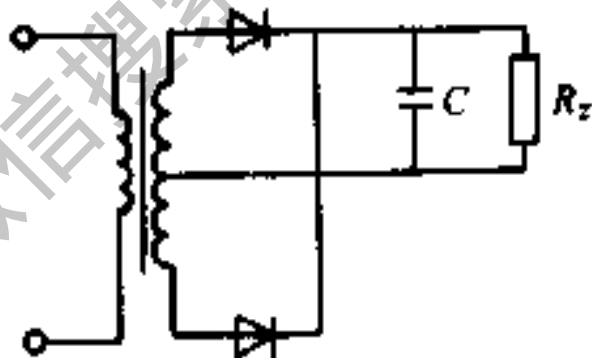


图 12-12 电容型滤波电路

通常电容取数百到数千  $\mu\text{F}$ ；电容耐压应取变压器二次电压有效值  $U_2$  的  $\sqrt{2}$  倍以上。

电容器电容量的一般经验数据见表 12-24。

表 12-24 滤波电容与输出电流的关系

输出电流	2A 左右	1A 左右	0.5~ 1A	0.1~ 0.5A	100mA 以下	50mA 以下
电容量 $\mu\text{F}$	4000	2000	1000	500	200~ 500	200

(3)  $\Gamma$  型滤波电路：

① 单节  $\Gamma$  型

滤波电路见图 12-13。

滤波系数  $Q$   
 $= m^2 \omega^2 LC$

对于半波整流，  
 $m=1$ ；对于全波和

桥式整流， $m=2$ 。 $\omega=2\pi f$ ， $f$  为电源频率。

② 多节  $\Gamma$  型滤波电路见图 12-14。

两节  $\Gamma$  型滤波电路的滤波系数为

$$Q=Q_1Q_2$$

式中  $Q_1$ 、 $Q_2$ ——第一节和第二节滤波电路的滤波系数。

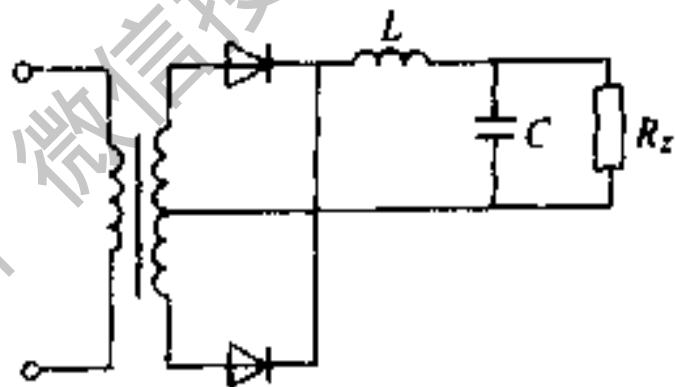


图 12-13 单节  $\Gamma$  型滤波电路

对全波整流，有

$$\gamma_{\text{滤}} = \frac{0.67}{4\omega^2 L_1 C_1} \times \frac{1}{4\omega^2 L_2 C_2}$$

一般取  $L_1 = L_2 = L$ ,  $C_1 = C_2 = C$ , 现仍以  $S_{\text{滤}}$  为 0.001 的要求来设计, 则有  $\gamma_{\text{滤}} = 0.67 / (16\omega^4 L^2 C^2) = 0.001$ , 得  $LC = 6.55 \times 10^{-5}$ , 若取  $L = 2\text{H}$ 、 $100\text{mA}$ , 则

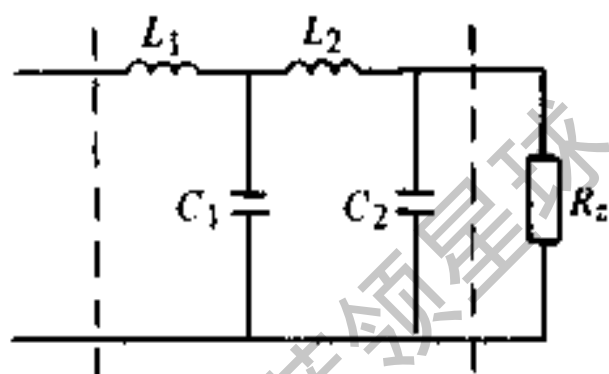


图 12-14 两节  $\Gamma$  型滤波电路

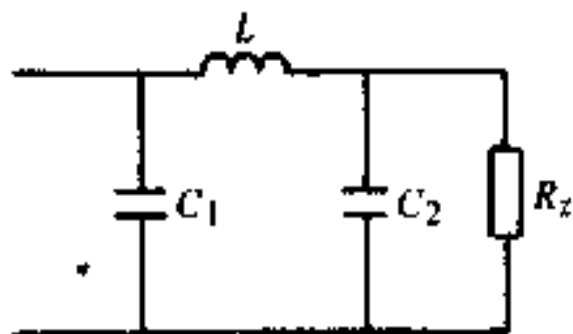
$$C = 6.55 \times 10^{-5} / L = 32.8 \text{ } (\mu\text{F})$$

(4)  $\pi$  型滤波电路见图 12-15。

由  $C$  型滤波电路和  $\Gamma$  型滤波电路串联组成, 其滤波系数为

$$Q = Q_1 Q_2$$

式中  $Q_1$ 、 $Q_2$ ——电容滤波电路和  $\Gamma$  型滤波电路的滤波系数。



一般取  $C_1 = C_2 = C$ 。图 12-15  $\pi$  型滤波电路

## 2. 大功率整流电路中滤波电抗器电感量的估算

在大功率整流电路中, 为了使整流电流连续并减小电流脉动, 往往在负载回路中串入电抗器。滤波电抗器电感量的估算如下:



(1) 维持电流连续的临界电感量:

$$L_{lj} = K_{lj} \frac{U_2}{I_{c, \min}} - (L_d + L_b)$$

式中  $L_{lj}$ ——临界电感量 (mH);

$K_{lj}$ ——系数, 见表 12-25;

$U_2$ ——整流变压器二次侧相电压 (V);

$I_{c, \min}$ ——最小负荷电流 (A);

$L_d$ ——负荷 (如电动机) 的电感量 (mH);

$L_b$ ——整流变压器的每相电感量 (mH)。

(2) 保证电流脉动不超过要求值的电感量:

$$L_{md} = K_{md} \frac{U_2}{S I_{cs}} - (L_d + L_b)$$

式中  $K_{md}$ ——系数, 见表 12-25;

$S$ ——电流最大允许脉动系数, 100kW 以下的电动机, 当为三相半波整流时, 取 0.12;

三相桥式整流时, 取 0.10;

$I_{cs}$ ——额定负荷电流 (A);

其它符号同前。

### 三、电动机和变压器电感量的估算

#### 1. 电动机电感量

$$L_d = K_d \frac{U_c}{2pn_c I_c} \times 10^3$$

式中  $L_d$ ——电动机电感量 (mH);

$K_d$ ——系数, 与电动机种类有关, 一般无补偿电动

表 12-25 计算滤波电抗器系数表

输出端形式		整流电路形式									
		单相半波	单相全波	单相半控桥	用一个可控硅的单相桥	单相全控桥	三相半波	三相半控桥	三相全控桥	六相半波	双反星形带平衡电抗器
输出端有续流二极管	$K_{Lj}$	2.7	1.67	1.67	1.67	1.67	1.03	1.78	0.655	0.378	0.325
	$K_{ind}$	5.05	2.8	2.8	2.8	2.8	1.66	2.88	0.925	0.56	0.338
	$K_b$	6.37	6.37	3.18	3.18	3.18	6.75	3.9	3.9	5.51	7.8
输出端无续流二极管	$K_{Lj}$	—	—	1.67	—	2.86	1.46	1.78	0.695	0.401	0.348
	$K_{ind}$	—	—	2.8	—	4.5	2.25	2.88	1.05	0.605	0.523
	$K_b$	—	—	3.18	—	3.18	6.75	3.9	3.9	5.51	7.8

机取 8~12; 快速无补偿电动机取 6~8; 有补偿电动机取 5~6;

$U_e$ ——电动机额定电压 (V);

$p$ ——电动机极对数;

$n_e$ ——电动机额定转速 (r/min);

$I_e$ ——电动机额定电流 (A)。

## 2. 变压器每相电感量

$$L_b = K_b \frac{U_d \% U_2}{100 I_e}$$

式中  $L_b$ ——变压器每相电感量 (mH);

$K_b$ ——系数, 见表 12-25;

$U_d \%$ ——变压器阻抗电压百分数, 一般变压器取 4%~5% 整流变压器取 10% 左右;

其它符号同前。

## 第四节 晶体管基础知识

### 一、常用晶体管的基本参数

#### 1. 二极管基本参数

(1) 平均整流电流  $I_0$ : 在有效负载的半波整流电路中, 一个周期内通过二极管的电流平均值 (直流分量)。

(2) 最大允许整流电流  $I_{OM}$ : 在有效负载的半波整流电路中, 二极管参数的变化不超过规定允许值时, 二极管所能通过的最大整流电流。

(3) 反向电流  $I_R$ : 在给定的反向偏压下, 通过二极管的直流电流值。

(4) 整流电压  $U_0$ : 在半波整流电路中, 在一个周期内二极管有效负载上的电压平均值 (直流分量)。

(5) 额定正向平均电流  $I_F$  (即最大正向电流  $I_{FM}$ ): 正向电流过大, 将烧毁 PN 结, 因此二极管工作电流应在额定值以下。

(6) 正向电压降  $U_F$ : 最大整流电流时, 二极管两端的电压降。锗管约  $0.2 \sim 0.4V$ , 硅管约  $0.6 \sim 0.8V$ 。

(7) 额定反向峰值电压  $U_{RM}$ : 二极管参数的变化不超过规定允许值时, 所能承受的最大反向电压峰值。它等于反向最高测试电压的一半。反向最高测试电压规定为反向漏电流急速增加反向特性曲线开始弯曲时的电压。

(8) 二极管电容  $C$ : 是二极管加上反向电压时, 引出线间的电容。

## 2. 晶体管 (三极管) 基本参数

(1) 集电极反向饱和电流  $I_{c0}$ : 是发射极开路时, 基极和集电极之间加以规定的反向电压时的集电极电流。

(2) 发射极反向饱和电流  $I_{e0}$ : 是集电极开路时, 基极和发射极之间加以规定的反向电压时的发射极电流。

(3) 集电极穿透电流  $I_{ce0}$ : 是基极开路时, 集电极和发射极之间加以规定的反向电压时的集电极电流。

(4) 共发射极电流放大系数  $h_{fe}$  ( $\beta$ ): 是在共发射极

电路中，集电极电流和基极电流的变化量之比。

(5) 共基极电流放大系数  $h_{fb}(\alpha)$ ：是在共基极电路中，集电极电流和发射极电流的变化量之比。

(6) 共发射极截止频率  $f_{\beta}$ ：是  $\beta$  下降到低频的 0.707 倍时所对应的频率。

(7) 共基极截止频率  $f_{\alpha}$ ：是  $\alpha$  下降到低频的 0.707 倍时所对应的频率。

(8) 特征频率  $f_T$ ：是  $\beta$  下降到 1 时所对应的频率。当  $f \geq f_T$  时，晶体管便失去电流放大能力。

(9) 最高振荡频率  $f_M$ ：是给定条件下，晶体管能维持振荡的最高频率。它表示晶体管功率增益下降到 1 时所对应的频率。

(10) 集电极—基极反向击穿电压  $BV_{cbo}$ ：是发射极开路时，集电结的最大允许反向电压。

(11) 集电极—发射极反向击穿电压  $BV_{ceo}$ ：是基极开路时，集电极和发射极之间的最大允许电压。

(12) 发射极—基极反向击穿电压  $BV_{ebo}$ ：是发射极开路时，发射结最大允许反向电压。

(13) 基极—发射极间并联电阻时的集电极—发射极反向击穿电压  $BV_{cer}$ ：是基极—发射极间并联电阻  $R_b$  时，集电极与发射极之间最大允许电压。

(14) 集电极最大允许电流  $I_{CM}$ ：是晶体管参数变化不超过规定允许值时，集电极的最大电流。

(15) 集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$ : 是保证晶体管参数变化在规定允许范围之内的集电极最大消耗功率。

(16) 最高允许结温  $T_{jm}$ : 是保证晶体管参数变化不超过规定允许范围的 PN 结最高温度。

(17) 基极电阻  $r_{bw}$ : 输入电路接通时, 发射极—基极间的电压变化与集电极电流变化之比值。

(18) 热阻  $R_r$ : 是集电极每耗散 1W (大功率管) 或 1mW (小功率管) 功率引起管子 PN 结结温升高的度数。

### 3. 稳压管和单结晶体管的基本参数

#### (1) 稳压管

① 稳定电压  $V_w$ : 稳定范围内, 稳压二极管上的电压。

② 稳定电流  $I_w$ : 稳压范围内, 稳压二极管的电流。

③ 动态电阻  $R_w$ : 稳定状态下, 稳压二极管上的电压微变量与通过稳压二极管的电流微变量之比值。

④ 最大稳定电流  $I_{wM}$ : 能保证稳压二极管稳定电压 (并不致损坏) 的电流。

⑤ 最大允许耗散功率  $P_M$ : 稳压二极管参数变化不超过规定允许值时耗散的最大功率。

#### (2) 单结晶体管

① 基极电阻  $R_{b1}$ : 发射极开路状态下基极 1 和基极 2 之间的电阻。基极电阻随温度的增加而增大。

② 分压比  $\eta$ : 发射极和基极 1 之间的电压与基极 2

和基极 1 之间的电压之比，一般为 0.3~0.8。

③ 发射极与基极 1 间反向电压  $V_{cb1}$ ：基极 2 开路时，在额定的反向电流下基极 1 与发射极之间的反向耐压。

④ 发射极与基极 2 间反向电压  $V_{cb2}$ ：基极 1 开路时，在额定的反向电流下，基极 2 与发射极之间的反向耐压。

⑤ 反向电流  $I_{co}$ ：基极 1 开路时，在额定的反向电压  $V_{cb2}$  下的反向电流。

⑥ 峰点电流  $I_{pc}$ ：发射极电压最大值时的发射极电流。该电流表示了使管子工作或使振荡电路工作时所需的最小电流。 $I_{pc}$  与基极电压成反比，并随温度增高而减小。

#### 4. 光电元件基本参数

(1) 光谱响应曲线：用单位辐射通量的不同波长的光分别照射光电元件，在光电元件上产生的饱和电流的大小不同，饱和电流相对值与光波波长的关系曲线称为光谱响应曲线。

(2) 光谱响应峰值  $\lambda_m$ ：即峰值波长，是光谱响应曲线峰值所对应的波长即单位辐射通量的光照射元件时最大饱和电流所对应的光波波长。

(3) 光谱范围：是光谱响应曲线所占据的波长范围。

(4) 最大工作电压  $V_{MFR}$ ：测试条件下，光电元件能承

受的最大工作电压。

(5) 暗电流  $I_D$ : 光敏元件没有光照时流过的电流。

(6) 光电流  $I_{PH}$ : 光敏元件在光照射下流过的电流。

(7) 响应时间  $T_r$ : 即时间常数, 是光敏元件自停止光照起到电流下降到光照时的 63% 所需要的时间, 此时间越短表示光敏元件惰性越小。

(8) 光调截止频率: 光敏晶体管的工作频率为调制光频, 晶体管增益与调制光频的关系曲线为光敏晶体管频率特性曲线, 此特性曲线下降到 0.707 处所对应的调制光频为光调制截止频率。





常用光电元件的特点见表 12-26。

## 二、晶体管计算

### 1. 晶体管三种工作状态的特点和条件

晶体管作为放大用时, 应工作在晶体管特性曲线的

表 12-26 常用光电元件的特点

类型	光敏二极管	光敏三极管	光电池	光敏电阻 (光导管)
符号				



(续)

类型	光敏二极管	光敏三极管	光电池	光敏电阻 (光导管)
说明与特点	<p>说明: 无光照时有一反向饱和电流称为暗电流。有光照时反向饱和电流增加, 称为光电流。有光照时反向电阻可以降到几百欧</p> <p>特点: 体积小, 频率特性好, 弱光下灵敏度低</p>	<p>说明: 光照电流相当于三极管的基极电流, 因此集电极电流是其<math>\beta</math>倍, 故光电三极管比光电二极管有更高的灵敏度</p> <p>特点: 与光敏二极管相比, 其电流灵敏度大</p>	<p>说明: 当PN结受光照时, 在PN结两端出现电动势, P区为正极, N区为负极</p> <p>特点: 体积小, 不需外加电源; 频率特性差, 弱光下灵敏度低</p>	<p>说明: 当光照射到光敏层时, 阻值变化, 光线愈强, 阻值愈小</p> <p>特点: 体积小, 可工作在可见光至红外线区。弱光下工作其灵敏度比所列元件高很多, 频率特性差, 工作频率在100Hz时, 衰减较大, 光电特性为非线性, 同时受温度影响大</p>

放大区; 晶体管作为开关用时, 应工作在其特性曲线的饱和区和截止区。例如, 图 12-16 为某晶体管的放大区、饱和区和截止区。

### (1) 截止状态

1) 条件: 对 PNP 型管,  $U_b \geq U_c$ ; 对 NPN 型管,  $U_b \leq U_c$ 。截止时的特点是两个 PN 结均为反向偏置。

2) 特点:  $I_b \approx 0$ ,  $I_c \approx 0$ ,  $U_{ce} \approx E_c$  ( $E_c$  为电源电压)。

为了使晶体管更好地截止, 可采取下列措施:

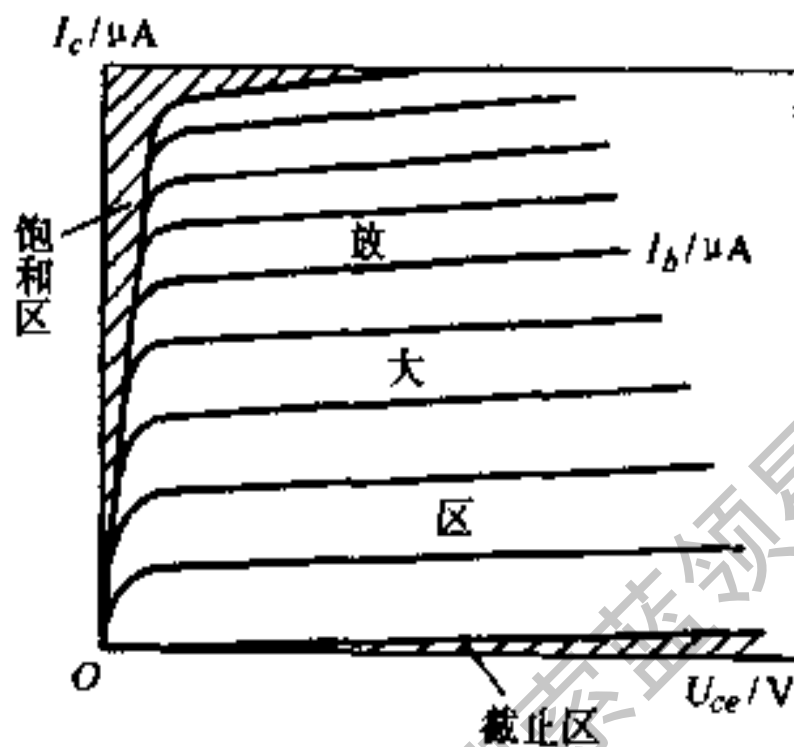


图 12-16 晶体管的放大区、饱和区和截止区

① 采用  $I_{c0}$  较小的管子。

② 在基极和发射极间加反向偏压。此时截止的条件为：对于 PNP 型管， $U_{be} \geq 0$ ；对于 NPN 型管， $U_{be} \leq 0$ 。

### (2) 放大状态

1) 条件：发射结加正向电压； $U_b > U_e$ ；集电结反向， $U_c > U_b$ 。

2) 特点： $\Delta I_c = \beta \Delta I_b$  满足放大规律， $I_c$  与  $R_c$ 、 $E_c$  基本上无关。

### (3) 饱和（导通）状态

1) 条件： $I_b \geq \frac{I_{CM}}{\beta}$ （如果  $I_{CM} = \frac{E_c}{R_c}$ ，则  $I_b > \frac{E_c}{\beta R_c}$ ）。

2) 特点: 发射结、集电结都处于正向,  $I_b$  增加,  $I_c$  不再增加,  $I_c = E_c/R_c$  由  $R_c$ 、 $E_c$  决定, 饱和压降  $U_{ces} \approx 0$ , 这时可以把晶体管的三个电极看作是接通的。

1. 晶体管三种工作状态和数量关系见表 12-27。

2. 晶体管三种接法的比较见表 12-28。

3. 晶体管集电极反向截止电流  $I_{cbo}$  计算

手册中给出的晶体管集电极反向截止电流  $I_{cbo}$  一般为室温 25℃ 时测量的数据, 当温度上升时,  $I_{cbo}$  会急剧增加。锗管每升高 12℃ 时  $I_{cbo}$  约增加一倍, 硅管每升高 8℃ 时  $I_{cbo}$  约增加一倍。某温度下的  $I_{cbo}$  可按下列公式计算:

$$\text{对于锗管 } I_{cbo} = (I_{cbo})_{25} \times 2^{\frac{t-25}{12}}$$

$$\text{对于硅管 } I_{cbo} = (I_{cbo})_{25} \times 2^{\frac{t-25}{8}}$$

式中  $(I_{cbo})_{25}$  —— 25℃ 时集电极反向截止电流;

$t$  —— 管子周围的空气温度 (℃)。

4. 晶体管集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$  计算

手册中给出的晶体管集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$  一般为室温 25℃ 时测量的数据。当温度上升时,  $P_{CM}$  会降低。某一温度下的  $P_{CM}$  可按下式计算:

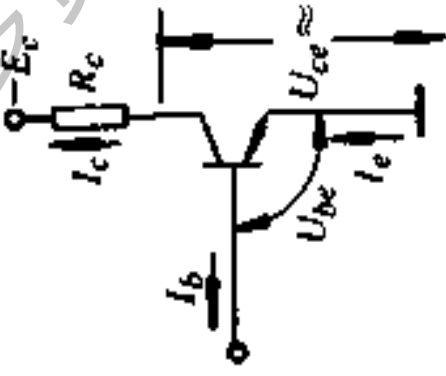
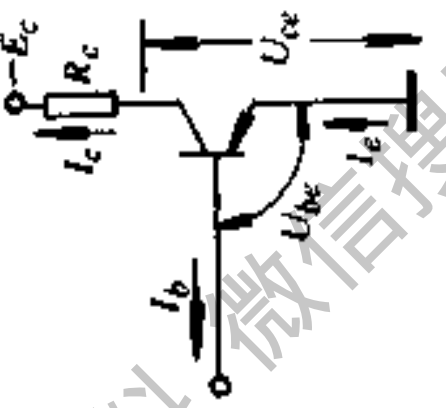
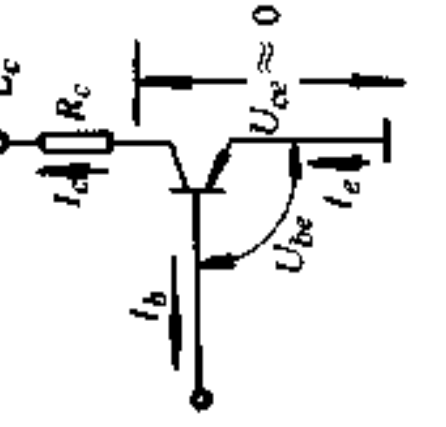
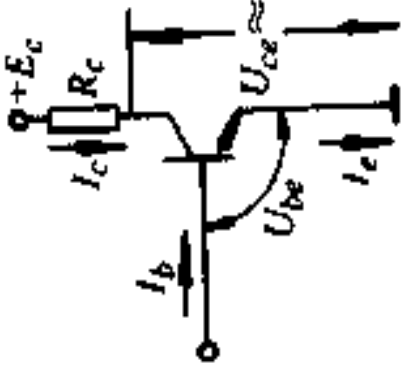
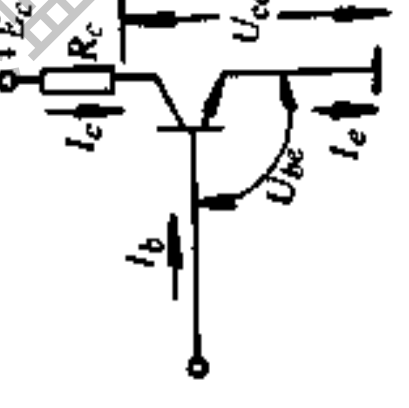
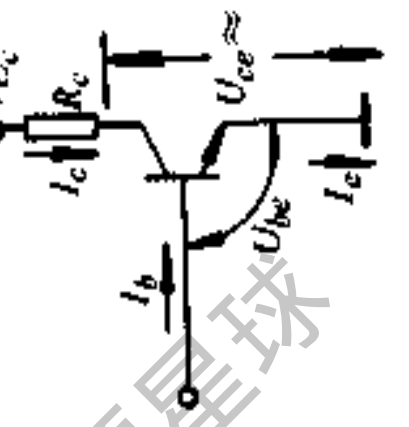
$$P_{CM} = (P_{CM})_{25} = \frac{T_{jM} - t}{T_{jM} - 25}$$

式中  $(P_{CM})_{25}$  —— 25℃ 时允许耗散功率;

$T_{jM}$  —— 最高允许结温 (℃);

$t$  —— 管子周围的空气温度 (℃)。

表 12-27 晶体管三种工作状态和数量关系

工作状态	截止状态	放大状态	饱和状态
PNP 型			
NPN 型			

(续)

工作状态	截止状态	放大状态	饱和状态
	$I_b \leq 0$ , $I_b$ 为负值时, 表示实际方向与图中所示相反	$I_b > 0$ , 其实际方向如图所示	$I_b > \frac{E_c}{\beta R_c}$ , 为使晶体管处于深度饱和和工作区, $I_b = (2 \sim 3) E_c / \beta R_c$
参数范围	锗管 $U_{be}$ 约 $+0.3V \sim -0.1V$ ; 硅管约 $-0.3V \sim +0.5V$ $I_c \leq I_{ce0}$	锗管 $U_{be}$ 约从 $-0.1V \sim -0.2V$ ; 硅管约从 $+0.5V \sim +0.7V$ $I_c = \beta I_b + I_{ce0}$	锗管 $U_{be}$ 比 $-0.2V$ 更负; 硅管大于 $+0.7V$ $I_c = E_c / R_c$
工作状态的特点	当 $I_b \leq 0$ 时, 集电极电流很小, 晶体管相当于截止, 电源电压 $E_c$ 几乎全部加在管子两端	$U_{ce} \approx E_c - I_c R_c$ $I_b$ 从 0 逐渐增大, 集电极电流 $I_c$ 也按一定比例增加。很小的 $I_b$ 变化引起很大的 $I_c$ 变化, 晶体管起放大作用	(管子饱和和压降) $U_{ce} \approx 0.2 \sim 0.3V$ 晶体管饱和时, 管子两端压降很小, 电源电压 $E_c$ 几乎全部加在集电极负载电阻 $R_c$ 两端; $\beta$ 越大, 控制越灵敏

表 12-28 晶体管三种接法的比较

名称	共发射极电路	共集电极电路 (射极输出器)	共基极电路
电路图			
输出与输入电压的相位	反相	同相	同相
输入电阻	中(几百 $\Omega$ ~ 几 $k\Omega$ )	大(几十 $k\Omega$ 以上)	小(几 $\Omega$ ~ 几十 $\Omega$ )
输出电阻	中(几 $k\Omega$ ~ 几十 $k\Omega$ )	小(几 $\Omega$ ~ 几十 $\Omega$ )	大(几十 $k\Omega$ ~ 几百 $k\Omega$ )
电压放大倍数	大	小(小于 1 并接近于 1)	大

(续)

名称	共发射极电路	共集电极电路 (射极输出器)	共基极电路
电流放大倍数	大( $\beta$ 为几十)	大 $[(1+\beta)$ 为几十]	小( $\alpha$ 小于1并接近于1)
功率放大倍数	大(约30~40dB)	小(约10dB)	中(约15~20dB)
频率特性	高频差	好	好
稳定性	差	较好	较好
失真情况	较大	较小	较小
对电源要求	只需一个电源	只需一个电源	需两个独立的电源
应用	多级放大器的中间级, 低频放大	输入级, 输出级或作阻抗匹配用	高频或宽频带电路及恒流源电路

注: PNP型三种接法的电源极性相反。

### 三、晶体管散热计算

晶体管集电极耗散功率与各热阻之间的关系可由下式表达：

$$T_j - t \approx P_c (R_{Tj} + R_{Tc} + R_{Tf})$$

式中  $T_j$ ——管子允许结温 (°C)，一般手册给出的最大允许结温  $T_{jM}$ ，不等于  $T_j$ ，但计算时可取

$$T_j = T_{jM};$$

$t$ ——管子周围的空气温度 (°C)；

$R_{Tj}$ ——管子本身的热阻 (°C/W)，手册给出的  $R_T$  是指这个数值；

$R_{Tc}$ ——管子与散热片之间的热阻，与两者间是否垫绝缘层及两者间的接触面积和紧固程度有关，约在 0.1~3°C/W 之间，如 0.05mm 厚的云母片的热阻约为 1.5°C/W；

$R_{Tf}$ ——散热片的热阻 (°C/W)，可按表 12-29 作粗略估算。

表 12-29 散热片面积和热阻的估算

散热片面积 /cm <sup>2</sup>	100	200	300	400	500	600 以上
$R_{Tf}$ / (°C/W)	4.5~6	3.5~4.5	3~3.5	2.5~3	2~2.5	1.5~2.5

散热片较厚 (3mm 以上)，垂直放置时取下限值。散热片薄 (1.5mm 以下)，水平放置时取上限值。



利用上述公式可以计算在一定的温升和散热片面积下功率管的允许集电极耗散功率，也可以在给定耗散功

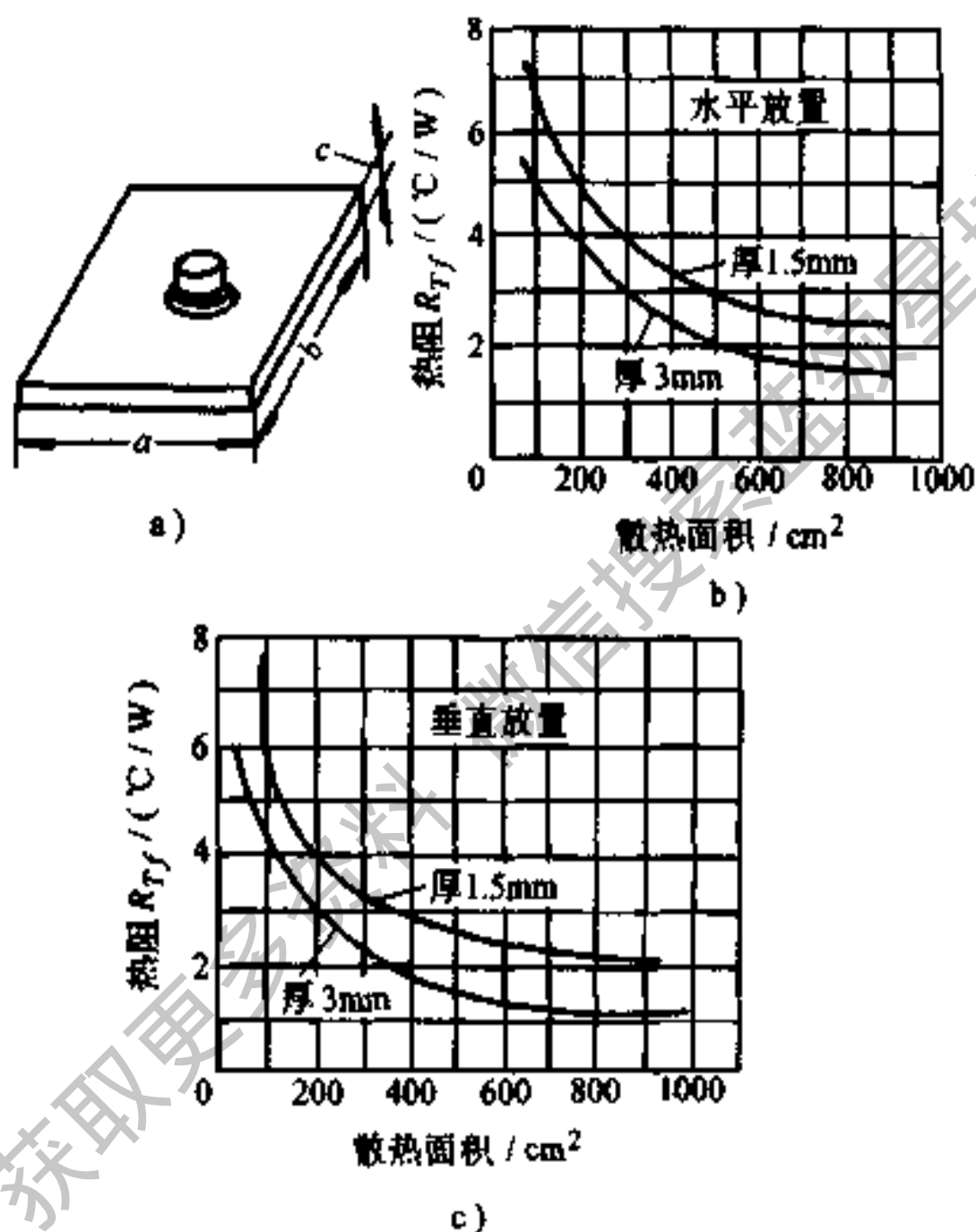


图 12-17 铝平板散热器的热阻

- a) 铝平板散热器 b) 铝平板散热器在水平放置情况下的热阻 c) 铝平板散热器在垂直放置情况下的热阻

率的情况下求散热片的面积。

图 12-17 为铝平板散热器在不同情况下的热阻。

## 第五节 晶体管电路及其计算

### 一、稳压电路的计算

1. 最简单的稳压电路见图 12-18。

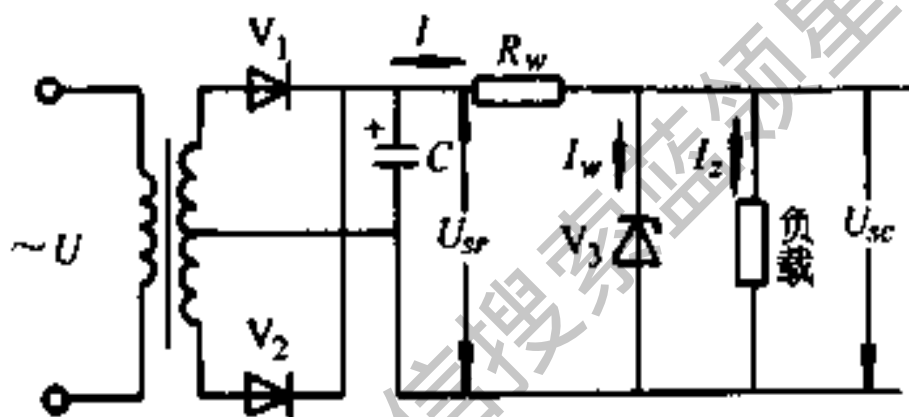


图 12-18 硅稳压管稳压电路

(1) 稳压管选择：

稳定电压  $V_w = U_x$

稳压管工作电流  $I_w = I_z$  或取  $I_{wM} \geq (2 \sim 3) I_z$

式中  $U_x$ ——输出电压（即负载上的电压）(V)；

$I_z$ ——负载电流 (A)；

$I_{wM}$ ——稳压管最大稳定电流 (A)，可查手册或按下式计算：

$$I_{wM} = P_M / V_{wf}$$

$P_M$ ——稳压管最大耗散功率 (W)。

(2) 限流电阻估算：

$$R_w = \frac{U_{sr} - U_K}{I_{w1} + I_z} = \frac{U_{sr} - U_K}{I}$$

式中  $R_w$ ——限流电阻 ( $\Omega$ );

$U_{sr}$ ——输入电压 (V);

$I_{w1}$ ——实际流过稳压管的电流 (A), 可取其略大于  $I_z$ ;

$I$ ——流过限流电阻的电流 (A)。

限流电阻的功率  $P_R \geq (2 \sim 4) I^2 R_w$

(3) 校验: 初定了电路参数后, 再校验一下两种极端情况:

① 在  $U_{sr}$  最大 ( $U_{srmax}$ ) 而负载开路时, 流过稳压管的电流不应超过  $I_{wM}$ , 以免烧坏稳压管。即

$$\frac{U_{srmax} - U_K}{R_w} \leq I_{wM}$$

② 在  $U_{sr}$  最小 ( $U_{srmin}$ ) 而负载又最大时, 尚能起稳压作用。即

$$U_{srmin} - (I_w + I_{zmax}) R_w \geq V_w$$

否则稳压管不进入击穿区, 不起稳压作用。

## 2. 稳压电路温度补偿计算

(1) 采用具有正温度系数的电阻补偿:

① 当稳压管具有正温度系数时, 可采用图 12-19 的电路。

补偿电阻为

$$R_c = \frac{V_w \alpha_{VWT}}{I_z \alpha_r}$$

式中  $R_c$ ——补偿电阻 ( $\Omega$ );

$\alpha_{VWT}$ ——电压温度系数  $1/^\circ\text{C}$ ;

$\alpha_r$ ——补偿电阻的温度系数  $1/^\circ\text{C}$ ;

其它符号同前。

实际上, 为了得到较好的温度补偿效果, 还需进行温度试验, 对  $R_c$  作调整。

② 当稳压管具有负温度系数时, 可采用图 12-20 的电路。

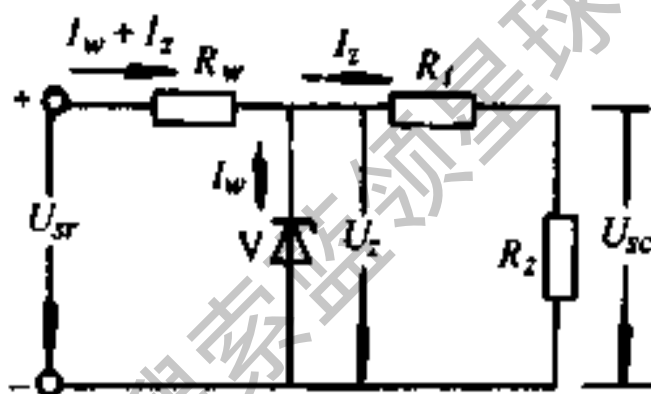
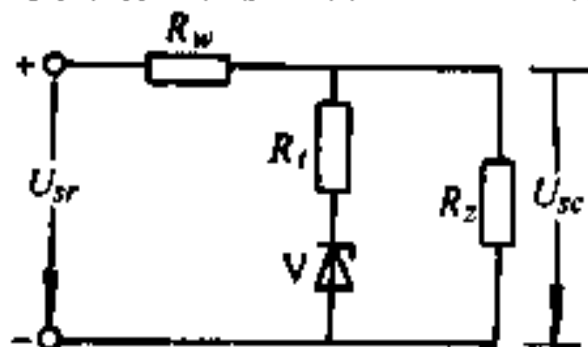


图 12-19 采用具有正温度系数的硅稳压管的温度补偿

(2) 采用稳压管或二极管补偿: 当稳压管具有正温度系数时, 可采用具有负温度系数的稳压管或正向工作的二极管与之互补, 其电路如图 12-21 所示。

图 12-21b 中配接的二极管数量计算举例。



2CW3 的稳定电压  $V_w = 10\text{V}$ , 其电压温度

图 12-20 采用具有负温度系数的硅稳压管的温度补偿电路

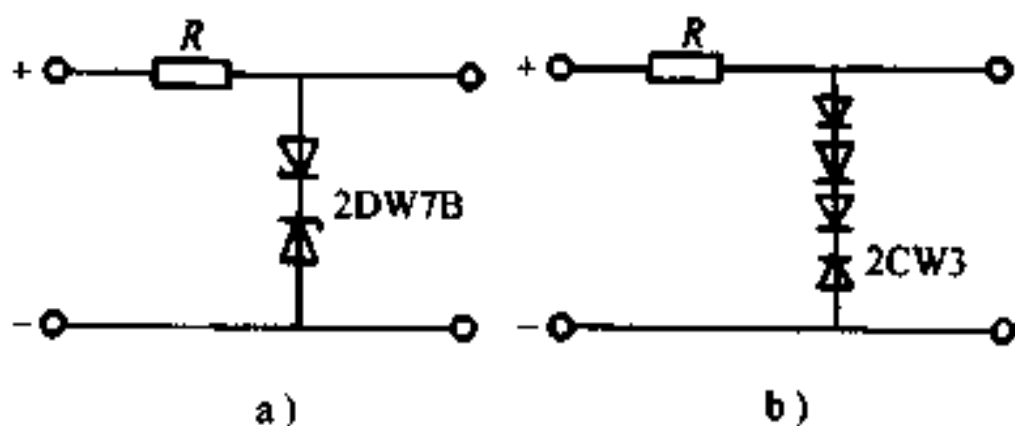


图 12-21 采用稳压管或二极管作温度补偿的电路

a) 采用稳压管自补偿 b) 采用正向二极管补偿

系数  $\alpha_{V_{WT}} = (0.09\%) / ^\circ\text{C}$ , 则温度变化  $1^\circ\text{C}$  稳定电压将变化  $\Delta V_w = 10 \times 0.09 \times 10^{-2} \text{mV} = 9 \text{mV}$ 。正向二极管的电压温度系数为  $\alpha_{V_{WT}} = -3 \text{mV} / ^\circ\text{C}$ , 所以串联二极管只数为

$$n = \frac{\Delta V_w}{|\alpha_{V_{WT}}|} = \frac{9}{3} = 3$$

注意, 自补稳压管, 如 2DW7A、2DW7B、2DW7C 在其内部已装入补偿二极管。

3. 带有直流放大环节的稳压电源计算见图 12-22。

(1) 电路元件参数的选择

1) 晶体管的选择:  $V_5$  起调整作用, 必须工作在放大区, 需要有一个合适的管压降  $U_{ce1} = U_d - U_c = 3 \sim 8 \text{V}$ , 此电压过小, 管子易饱和; 过大, 管耗增大, 不仅要选用更大功率的管子, 还增加电耗。

调整管的  $\beta$  应选得大些, 由于一般大功率管的  $\beta$  较低, 故常用复合管作调整管见图 12-23。

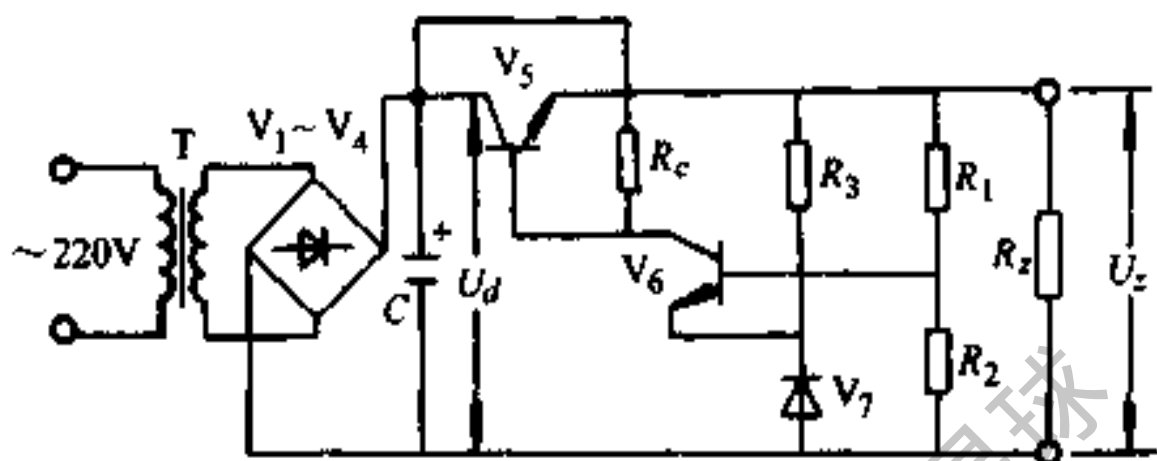


图 12-22 带有直流放大环节的稳压电源

$V_3$  应选用  $\beta$  较大的管子,  $\beta$  越大电压越稳定。

2) 分压电阻  $R_1$ 、 $R_2$  的选择: 当  $I_2 \gg I_{b2}$  时, 取样电压  $U_{b2} = U_z \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 。  $R_2 / (R_1 + R_2)$  的比值不能太小, 一般取 0.5~0.8;  $R_1 + R_2$  的阻值也不能太大, 否则不能满足  $I_1 \gg I_{b2}$  的要求。

3) 限流电阻  $R_3$  的选择:

$$R_3 = (U_z - V_w) / I_w$$

式中  $V_w$ 、 $I_w$ ——稳压管  $V_7$  的稳定电压和稳定电流 (V、A), 可由手册查得。

(2) 图 12-23 中各元件及其作用:  $V_1$  采用大或中功率管;  $V_2$  采用中或小功率管子。总放大倍数为  $\beta = \beta_1 \beta_2$ 。电位器  $R_w$  起保证  $U_1$  正确地达到所需电压的作用。电容  $C_2$  防止脉冲负载电流引起输出电压的波动, 也可减小输出端的纹波电压。电容  $C_3$  防止干扰信号影响调整管的工

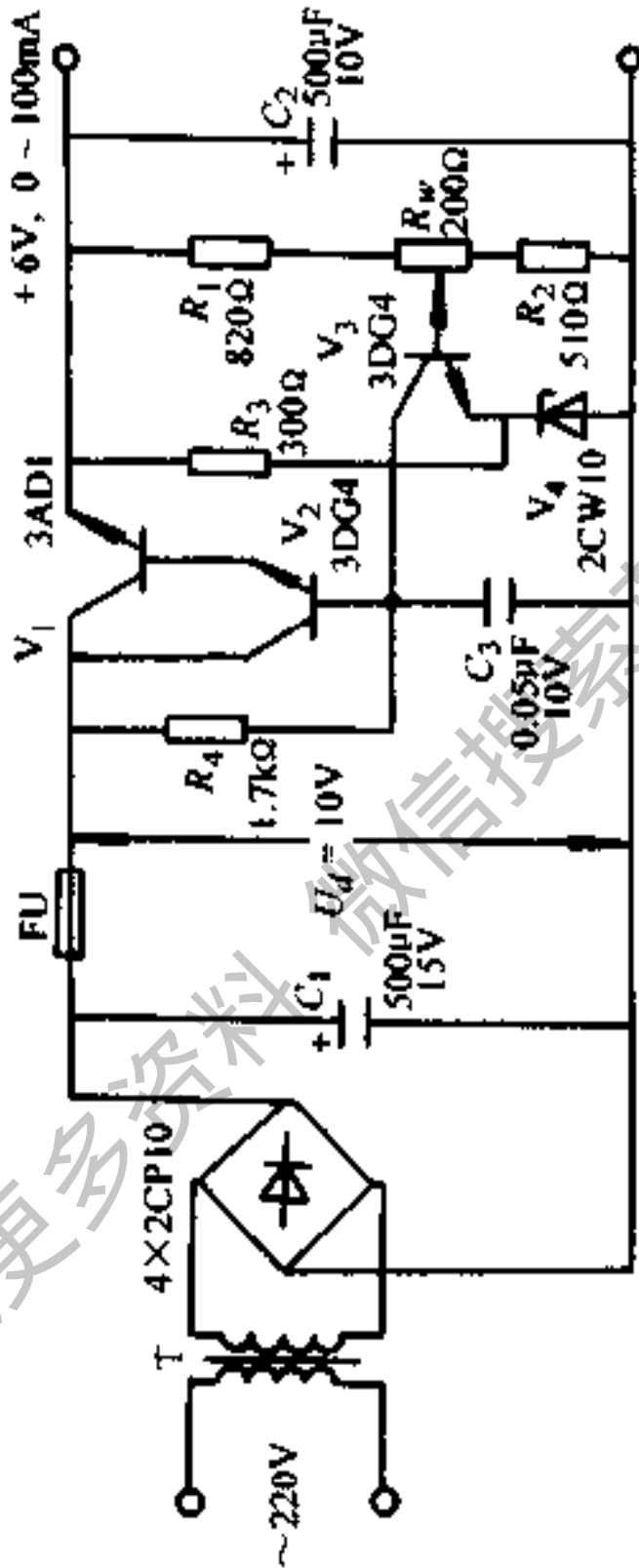


图 12-23 采用复合管的稳压电源

获取更多资料 微信扫描 蓝色星球

作，并可抑制电源内部可能产生的高频自激。

## 二、交流放大电路静态工作点的选择和直流负载线的确定

### 1. 放大电路静态工作点的选择

放大电路的静态工作点是指在没有输入信号时晶体管的工作状态。其静态工作点由下列各式决定见图 12-24。

$$I_b = \frac{E_c - U_{be}}{R_b} \approx \frac{E_c}{R_b}$$

$$I_c = \beta I_b + I_{ce0} \approx \beta I_b$$

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c$$

$U_{be}$  对于硅管约为 0.5~0.7V；对于锗管约为 0.1~0.2V，较电源电压  $E_c$  小很多，可以忽略不计；晶体管的穿透电流  $I_{ce0}$  数值也很小，有时也可忽略不计。

$R_b$  确定了， $I_b$  也就确定了，从而可求出相应的  $I_c$  和  $U_{ce}$  的数值，把这一点标在图 12-24b 中，该点 Q 就是静态工作点。

### 2. 放大器的直流负载线的确定

$I_b$  的大小随  $R_b$  值的改变而变化，即静态工作点位置会发生变化，其变化规律是在某一直线上移动。该直线称为直流负载线。它由下列关系式确定。

当  $U_{ce} = 0$  时  $I_c = E_c / R_c$  (图 12-24 (b) 上的 M 点)。

当  $I_c = 0$  时  $U_{ce} = E_c$  (图 12-24 (b) 上的 N 点)。



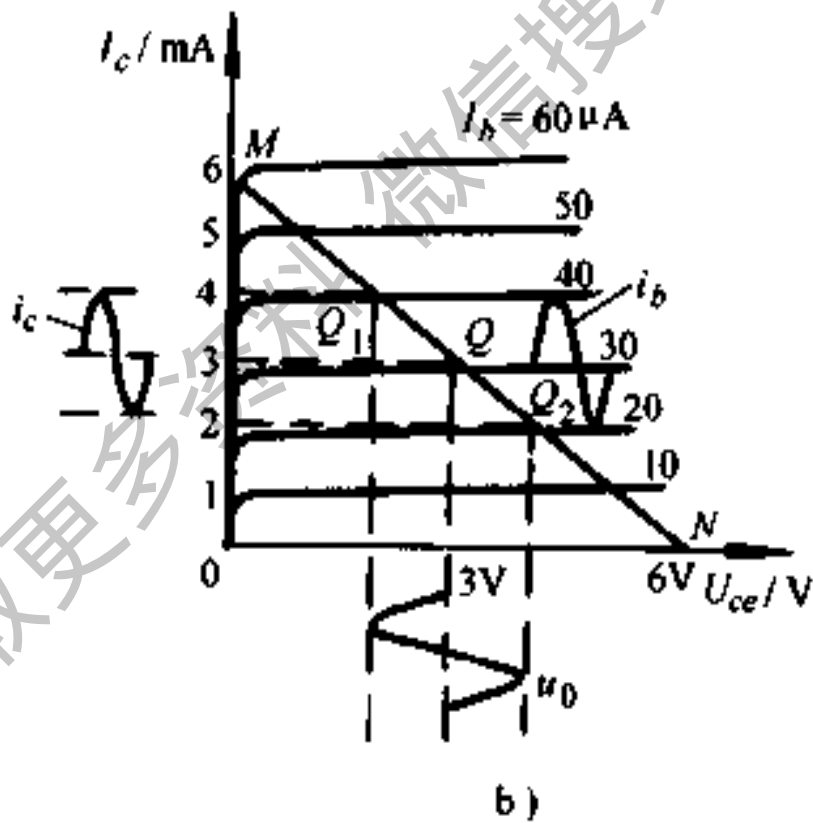
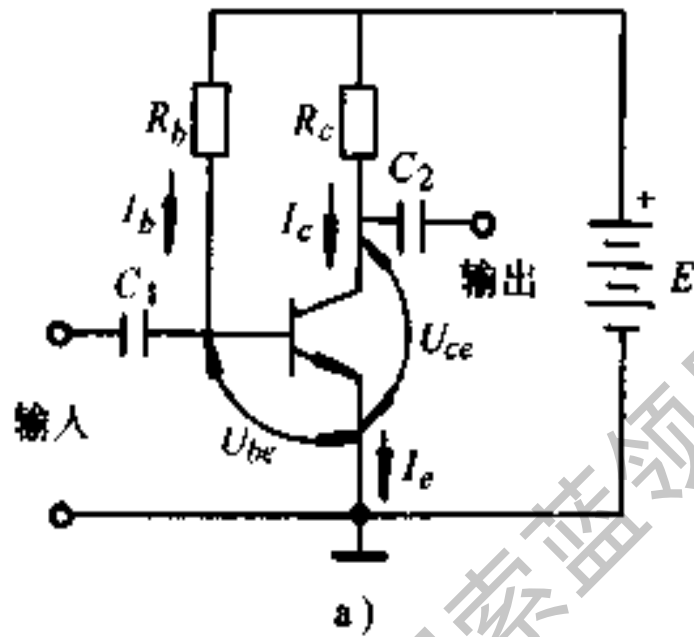


图 12-24 最简单的单管放大器及其图解

a) 单管放大器 b) 放大器的图解

### 3. 图解法确定静态工作点

图解法确定静态工作点,即通过作图,在晶体管输出特性曲线上找出放大器的静态工作点。例如,  $E_c$  为 6V,  $R_c$  为  $1k\Omega$ ,  $R_b$  为  $180k\Omega$ , 则  $I_b = (E_c - U_{be}) / R_b = (6 - 0.6) / 180\mu A \approx 30\mu A$ , 所以晶体管必定工作在  $I_b = 30\mu A$  的那一条特定输出特性曲线上。另外,晶体管的工作点还必须在直流负载线  $MN$  上 ( $M$  点在纵坐标上,距原点为  $E_c / R_c = 6mA$ ;  $N$  点在横坐标上,距原点为  $E_c = 6V$ )。要同时满足这两个条件,在图 12-24 中只有一个特定点,即直流负载线  $MN$  与  $I_b = 30\mu A$  的输出特性曲线的交点  $Q$ 。因此,  $Q$  点就是放大器的静态工作点。

确定好工作点  $Q$  后,可以从图上分析有交流信号输入时放大器的运行状态 [图 12-24b]。由图解可见,如果放大器工作在输出特性曲线的放大区,它不会产生明显的失真。但若  $Q$  点选择不当,而使放大器的工作点进入了饱和区或截止区,就会引起失真。

### 三、放大器的输入、输出电阻、负载电阻及放大倍数的计算

#### 1. 晶体管输入电阻的计算

$$r_{be} = \frac{\Delta U_{be}}{\Delta I_b} = r_b + (\beta + 1) \frac{26}{I_c}$$

式中  $r_{be}$  —— 晶体管输入电阻 ( $\Omega$ );

$\beta$  —— 晶体管的电流放大倍数;

$r_b$ ——晶体管的基区电阻，对一般小功率管在低频信号状态时约为  $300\Omega$  左右；

$I_c$ ——发射极的静态工作电流 (mA)。

$r_{be}$  约在  $300\Omega$  到几  $k\Omega$  之间变化。晶体管手册中常把  $r_{be}$  写成  $h_{ie}$  或  $h_{i1}$ 。

例如，有一 3DG6 晶体管， $\beta=100$ ， $I_c=3.2\text{mA}$ ，则它的输入电阻为  $r_{be} \approx 300 + (100+1) \times 26/3.2 \approx 1120\Omega$

## 2. 放大器的输入电阻和输出电阻的计算

如图 12-25 所示， $e_s$  为信号源电势， $R_s$  为信号源内阻。

(1) 放大器的输入电阻  $r_{in}$ ：放大器的输入电阻就是从放大器输入端  $AB$  两点看进去的等效电阻，即

$$r_{in} = U_{sr} / i_{sr} = R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$$

由于在实际电路中，通常  $r_{be} \ll R_{b1}, R_{b2}$ ，所以有  $r_{in} \approx r_{be}$ ， $r_{be}$  为晶体管的输入电阻。

(2) 输出电阻  $r_{out}$ ：放大器的输出电阻就是从放大器输出端  $CD$  两端看进去的等效电源的内阻，即

$$r_{out} = \left( \frac{e_0}{U_{sc}} - 1 \right) R_c$$

式中  $e_0$ ——放大器的空载电压 (V)，由实测得；

$U_{sc}$ ——放大器有载电压 (V)，由实测得。

实际上，从图 12-25c 的等效电路即可看出， $r_{out} = R_c$ ，并不需要进行上述测算。

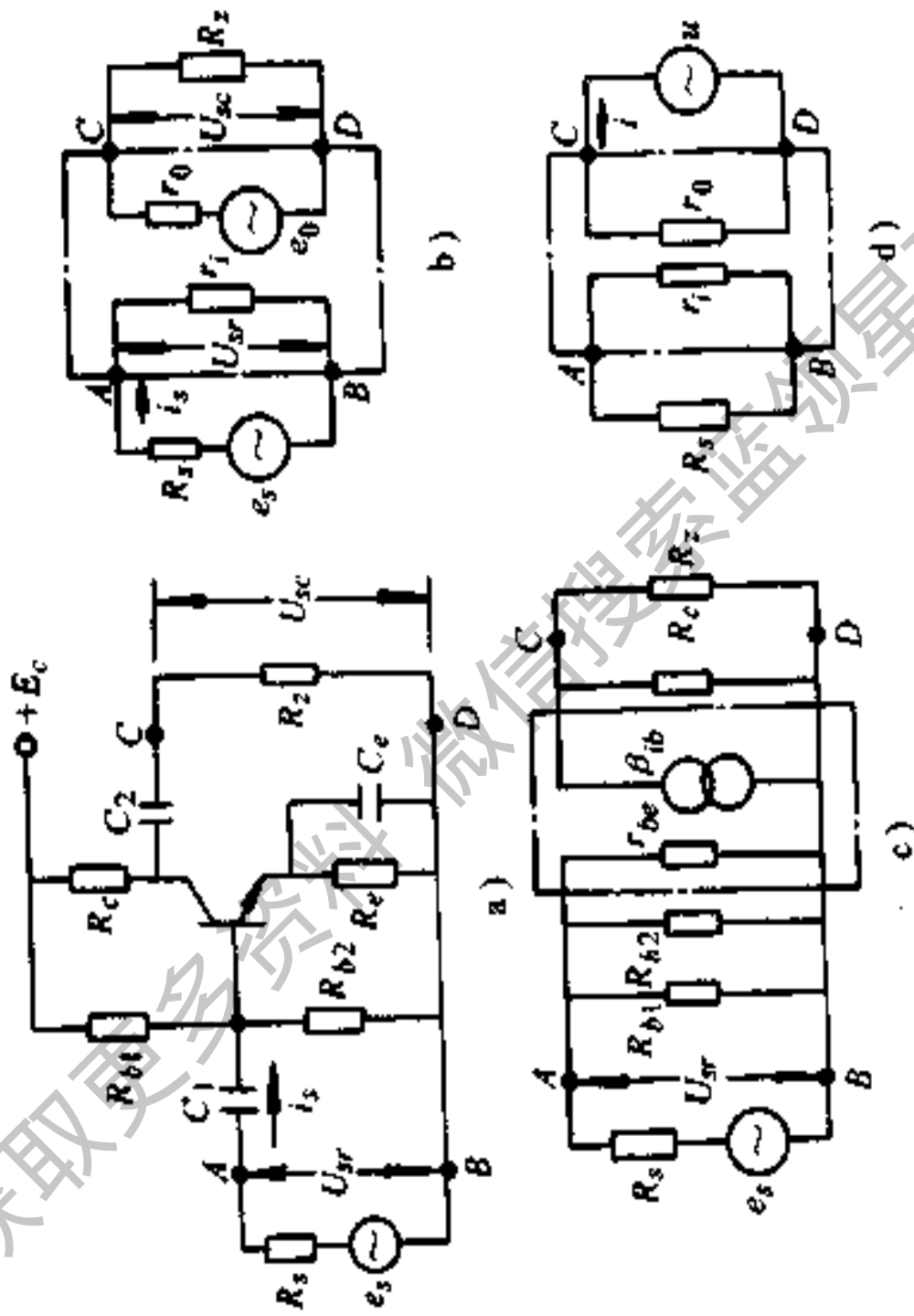


图 12-25 放大器的输入电阻和输出电阻 a) 典型放大电路 b) 输入电阻和输出电阻 c) 等效电路 d) 测试输出电阻

通常我们总是希望放大器的输入电阻较高，以便较少地从信号源取出电流，使它对信号源的影响小一些；并希望放大器的输出电阻较低，以便能带动更大的负载。

### 3. 放大器的放大倍数 $K$ 的计算

$$K = \frac{U_{\text{sc}}}{U_{\text{sr}}} = \frac{-\beta R'_L}{r_{be}}$$

式中  $R'_L$ ——放大器输出的总负载电阻 ( $\Omega$ ),

$$R'_L = \frac{R_c R_L}{R_c + R_L}$$

其它符号同前。

### 四、阻容耦合放大器的计算

阻容耦合放大器的典型电路如图 12-26 所示。

#### 1. 电压放大倍数计算

(1) 分解成两个单级放大器：先将以上两级放大器分成两个单级放大器，如图 12-27 所示。

(2) 第一级放大器计算：第一级放大器的负载电阻  $r_{sr2}$  为

$$r_{sr2} = R_{b3} // R_{b4} // r_{be2}$$

式中  $r_{be2}$ ——晶体管  $V_2$  的输入电阻 ( $\Omega$ )，计算方法同单管放大器。

第一级放大器的总负载电阻  $R'_{L1}$  为

$$R'_{L1} = R_{c1} // r_{sr2} = R_{c1} // R_{b3} // R_{b4} // r_{be2}$$

如果  $V_1$  和  $V_2$  的电流放大倍数为  $\beta_1 = \beta_2 = 60$ ，输入

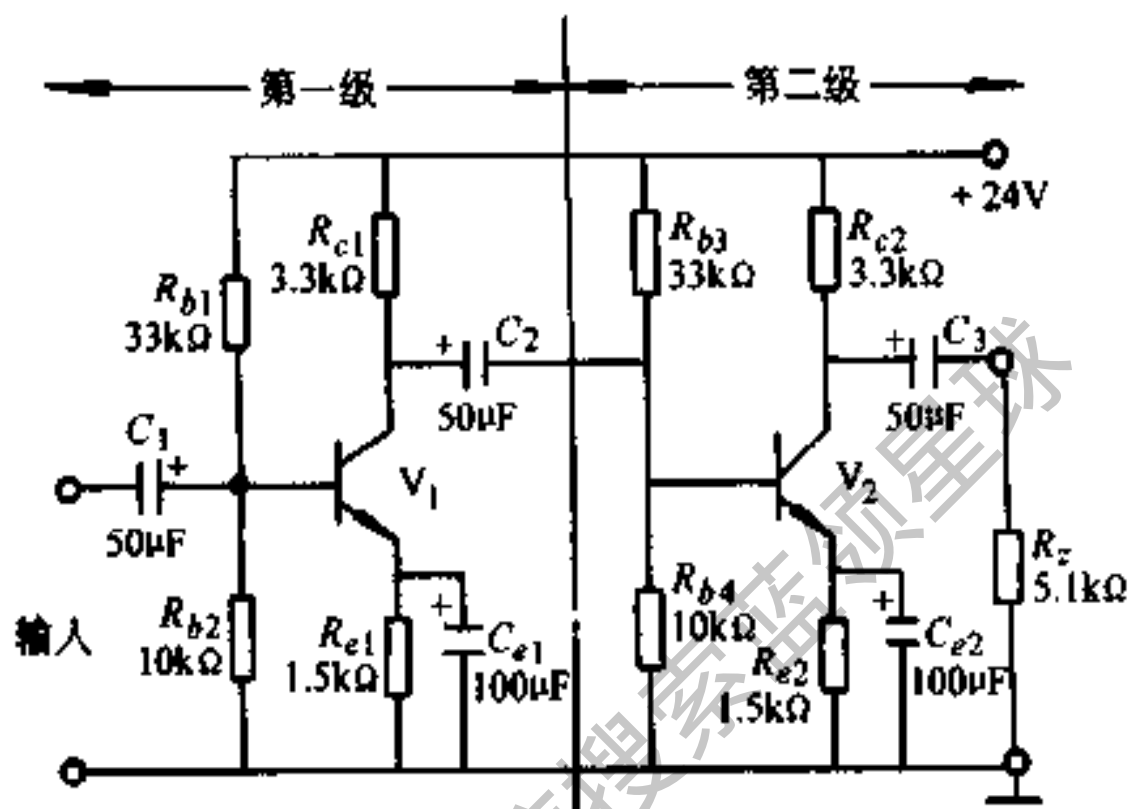


图 12-26 典型的阻容耦合放大器

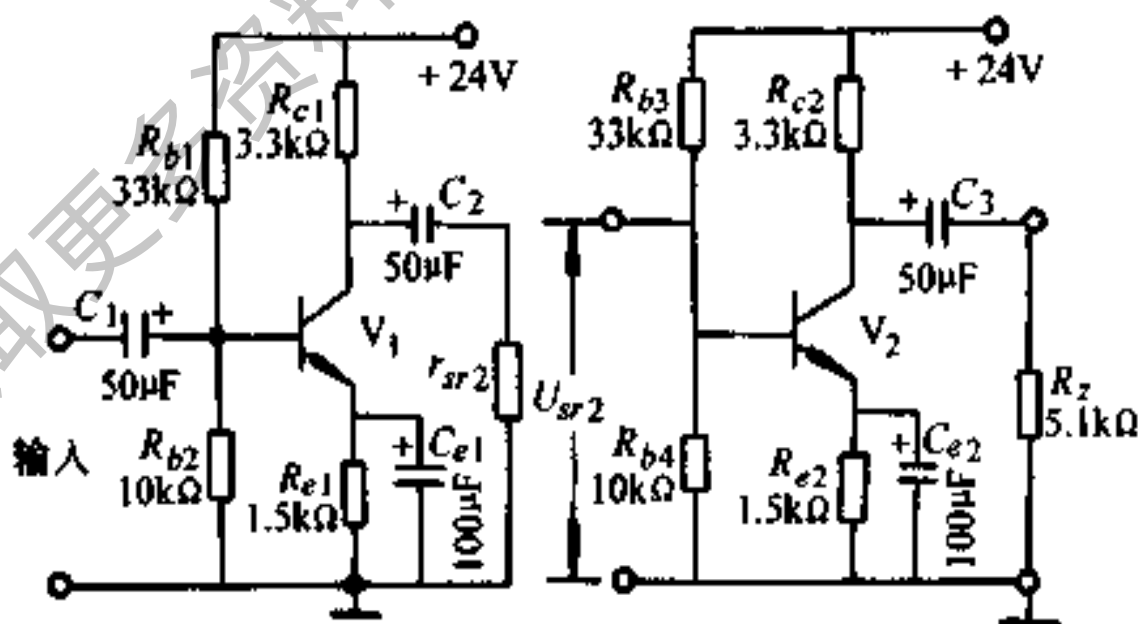


图 12-27 多级放大器的分解

电阻  $r_{be1} = r_{be2} = 1.4\text{k}\Omega$ ，则

$$R'_{s1} = (3.3 // 33 // 10 // 1.4) \text{ k}\Omega = 0.87\text{k}\Omega$$

第一级放大器的电压放大倍数  $K_{u1}$  为

$$K_{u1} = -\beta_1 \frac{R'_{s1}}{r_{be1}} = -60 \times \frac{0.87}{1.4} = -37.3$$

(3) 第二级放大器计算：第二级放大器的总负载电阻  $R'_{s2}$  为

$$R'_{s2} = (R_{e2} // R_L) \text{ k}\Omega = (3.3 // 5.1) \text{ k}\Omega \approx 2\text{k}\Omega$$

第二级放大器的电压放大倍数  $K_{u2}$  为

$$K_{u2} = -\beta_2 \frac{R'_{s2}}{r_{be2}} = -60 \times \frac{2}{1.4} = -85.7$$

(4) 两级电压放大器的总电压放大倍数计算：

$$K_u = K_{u1} K_{u2} = (-37.3) \times (-85.7) = 3197$$

## 2. 耦合电容计算

耦合电容可按下式估算：

$$C_2 \geq (3 \sim 5) \frac{1}{2\pi f (r_{s1} + r_{s2})}$$

式中  $C_2$ ——耦合电容器电容量 ( $\mu\text{F}$ )；

$r_{s1}$ ——第一级放大器的输出电阻 ( $\Omega$ )；

$r_{s2}$ ——第二级放大器的输入电阻 ( $\Omega$ )。

实际上，为了减小低频信号耦合中的损失，耦合电容往往选得较大，约  $10 \sim 15\mu\text{F}$ ，并不作精确计算。

## 3. 发射极旁路电容计算

发射极旁路电容可按下式估算：

$$C_{e2} \geq (3 \sim 10) \frac{\beta + 1}{2\pi f (R_s + r_{be2})}$$

式中  $C_{e2}$ ——发射极旁路电容器容量 ( $\mu\text{F}$ )；

$R_s$ ——信号源内阻 ( $\Omega$ )；

$r_{be2}$ ——第二级放大器输入电阻 ( $\Omega$ )。

通常  $C_{e2}$  的容量选择得比耦合电容  $C_2$  大。

#### 4. $n$ 级共射极放大器总放大倍数的估算

$$K_n = K_{n1} K_{n2} \cdots K_{nn} \approx (-1)^n \beta_1 \beta_2 \cdots \beta_n \frac{R'_{en}}{r_{be1}}$$

式中  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ ——分别为各级晶体管的电流放大倍数；

$R'_{en}$ ——第  $n$  级 (末级) 的总负载电阻；

$r_{be1}$ ——第一级晶体管的输入电阻。

当级数愈多，估算值的误差也愈大。

$(-1)^n$  是为了考虑共射极电路每级的倒相关系。当  $n$  为奇数时，放大器末级的输出电压与第一级的输入电压相位相反；当  $n$  为偶数级时，末级的输出电压与第一级的输入电压同相。

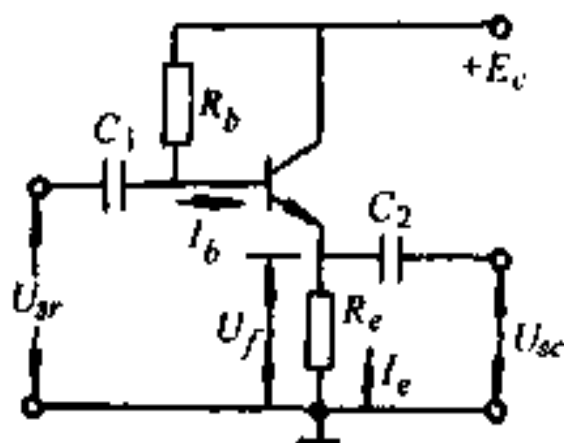


图 12-28 射极输出器



## 五、射极输出器的计算

射极输出器的典型电路如图 12-28 所示。

### 1. 静态工作点计算

基极静态电流  $I_b$

$$I_b = \frac{E_c - U_{be}}{R_b + (\beta + 1) R_e} \approx \frac{E_c}{R_b + (\beta + 1) R_e}$$

当  $E_c \gg U_{be}$  时，可用近似式计算。

### 2. 输入电阻计算

$$r_{sr} = R_b // r'_{sr} \approx R_b // \beta R'_e$$

式中  $r_{sr}$  —— 输入电阻 ( $\Omega$ )；

$R'_e$  —— 射极输出器输出端的等效负载 ( $\Omega$ )，

$$R'_e = R_e // R_L;$$

$r'_{sr}$  —— 不考虑  $R_b$  时射极输出器的输入电阻 ( $\Omega$ )，

$$r'_{sr} = r_{be} + (\beta + 1) R_e。$$

射极输出器的输入电阻一般可达几十  $k\Omega$  到几百  $k\Omega$ ，比起集电极输出电路（即共发射极电路）的输入电阻提高几十倍到几百倍。

### 3. 输出电阻计算

$$r_{sr} = R_e // \left( \frac{R_b + r_{be}}{\beta + 1} \right) \approx \frac{R_b + r_{be}}{\beta}$$

式中  $r_{sr}$  —— 输出电阻 ( $\Omega$ )；

$R'_e$  —— 等效电阻 ( $\Omega$ )， $R'_e = R_b // R_L$ ；

$R_s$  —— 信号源内阻。

当  $\left(\frac{R_b + r_{be}}{\beta + 1}\right) \ll R_c$  时, 可用近似式计算。

由以上公式可见, 晶体管的  $\beta$  愈大,  $r_o$  就愈小。为了获得特别低的输出电阻, 应选用  $\beta$  大的管子。

射极输出器的输出电阻大约在几十  $\Omega$  到几百  $\Omega$  的范围内, 比共发射极电路的输出电阻低得多。

## 六、负反馈电路的计算

### 1. 电压串联负反馈

射极输出器图 12-28 就是电压串联负反馈的一个突出例子。它的反馈电压等于输出电压, 即  $U_f = I_e R_e = U_o$ 。

电压串联负反馈放大电路能稳定输出电压 (提高了电压放大倍数的稳定性, 减少了电路的输出电阻) 和提高输入电阻。

### 2. 电流串联负反馈

单级电流串联负反馈电路如图 12-29 所示。

(1) 输入电阻:

$$r_{in} = R_b // R_i \cdot R_i = r_{be} + (\beta + 1) R_e$$

(2) 输出电阻:

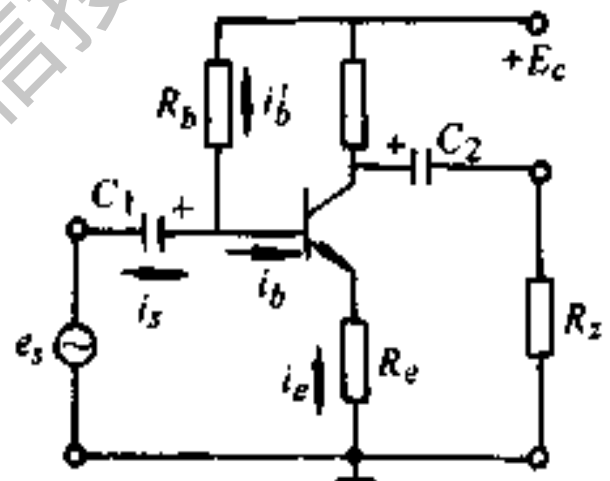


图 12-29 单级电流串联负反馈放大器

$$r_{ic} \approx R_c$$

(3) 电压放大倍数:

$$K_v \approx -K'_c / R_i, \quad K'_c = R_c // R_L$$

由以上公式可见, 电流负反馈放大电路的主要特点是电压放大倍数稳定, 输入电阻比较高。

3. 电压并联负反馈  
单级电压并联负反馈电路如图 12-30 所示。

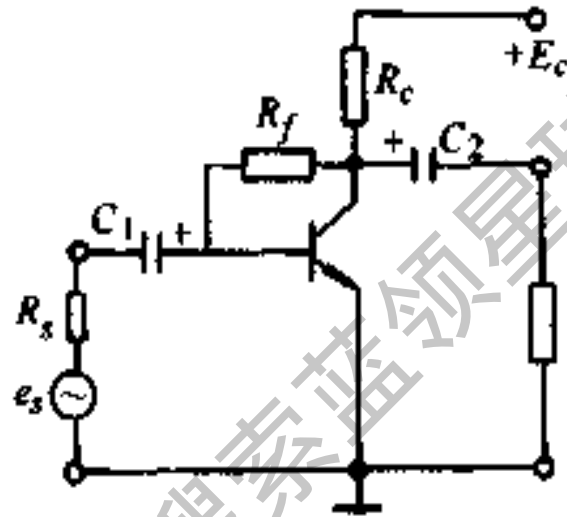


图 12-30 单级电压并联负反馈放大器

(1) 输入电阻:

$$r_{ir} \approx \frac{r_{be}}{1 + \frac{K_0 (R_s + r_{be})}{R_f}}$$

式中  $R_s$  —— 信号源内阻 ( $\Omega$ );

$K_0$  —— 没有反馈时的放大倍数,  $K_0 = \frac{-\beta R'_c}{R_c + r_{be}}$ ;

$$R'_c = R_c // R_L$$

(2) 输出电阻:

$$r_{ic} \approx \frac{R'_c}{1 + K_0 \beta}$$

式中  $\beta$  —— 电压并联负反馈电路的反馈系数,  $\beta = R_c / R_f$ 。

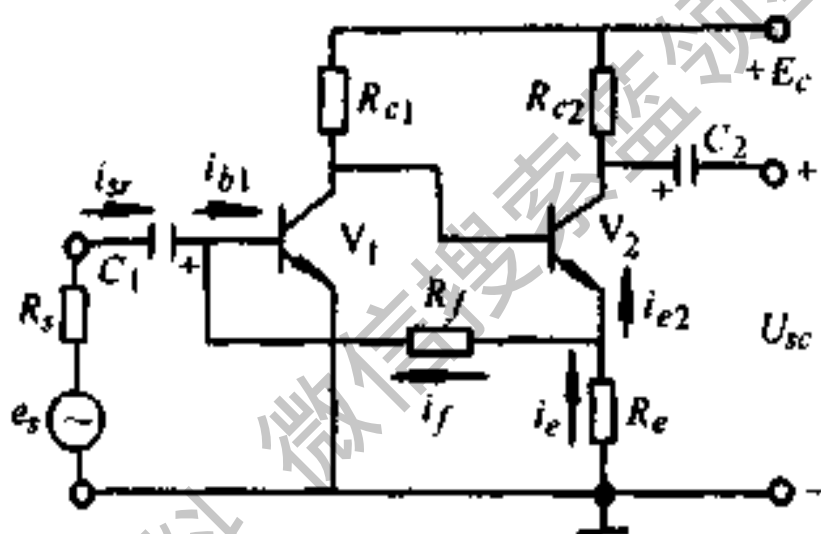
(3) 放大器的电压放大倍数:

$$K_v \approx \frac{K_0}{1 + K_0 \beta}$$

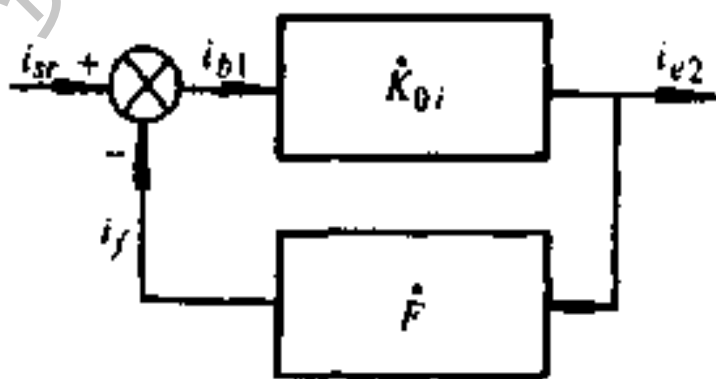
由以上公式可见，电压并联负反馈放大电路能减小输入电阻，对高频放大电路来说能改善频率特性，提高放大器的稳定性。

#### 4. 电流并联负反馈

电流并联负反馈电路如图 12-31 所示。



a) 电路



b) 方块图

图 12-31 电流并联负反馈放大器

## 放大器的电流放大倍数

$$K_i \approx 1 + R_f / R_e$$

可见，电流并联负反馈放大电路能稳定电流放大倍数（因为放大倍数仅与  $R_f$  和  $R_e$  有关，而与晶体管的具体参数几乎无关）。

小结：

表 12-30 为以上四种负反馈电路的特点。

表 12-30 四种负反馈连接形式的特点

负反馈的连接形式		稳定了哪个输出量？	输入电阻	输出电阻
反馈信号取自哪个输出量？	输入端怎么连接？			
电压	串联	$U_{sc}$	提高	减小
电流	串联	$I_{sc}$ (或 $I_e$ )	提高	提高 (或近似不变)
电压	并联	$U_{sc}$	减小	减小
电流	并联	$I_{sc}$ (或 $I_e$ )	减小	提高 (或近似不变)

### 七、单管交流放大器的设计要点

单管交流放大器设计的重要原则之一，是使信号不失真，为此应遵守下列原则：

## 1. 不截止的条件

$$I_b > I_{bm}$$

式中  $I_b$ ——晶体管基极电流；

$I_{bm}$ ——输入交流信号  $i_b$  的峰值， $I_{bm} = U_{sm}/r_{be}$ ；

$U_{sm}$ ——输入交流电压峰值。

## 2. 不饱和的条件

考虑到带负载的情况，应有

$$U_{ce, \min} = E_c - I_c R_c - I_{cm} R'_L > 0.5V$$

式中  $U_{ce, \min}$ ——晶体管最小管压降 (V)；

$E_c$ ——电源电压 (V)；

$I_c$ ——集电极电流 (A)；

$R_c$ ——集电极电阻 ( $\Omega$ )；

$I_{cm}$ ——集电极交流电流峰值 (A)， $I_{cm} = \beta I_{bm}$ ；

$R'_L$ ——等效负载电阻 ( $\Omega$ )， $R'_L = R_c // R_L$ ；

$R_L$ ——负载电阻 ( $\Omega$ )。

此外，在校验放大器的电压放大倍数时，可以利用下面公式

$$K_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

为留有余地，上述条件宜适当放宽。

## 八、工作点稳定的典型电路设计要点

工作点稳定的典型电路如图 12-32 所示。

为了保证工作点足够稳定，应满足下列条件：

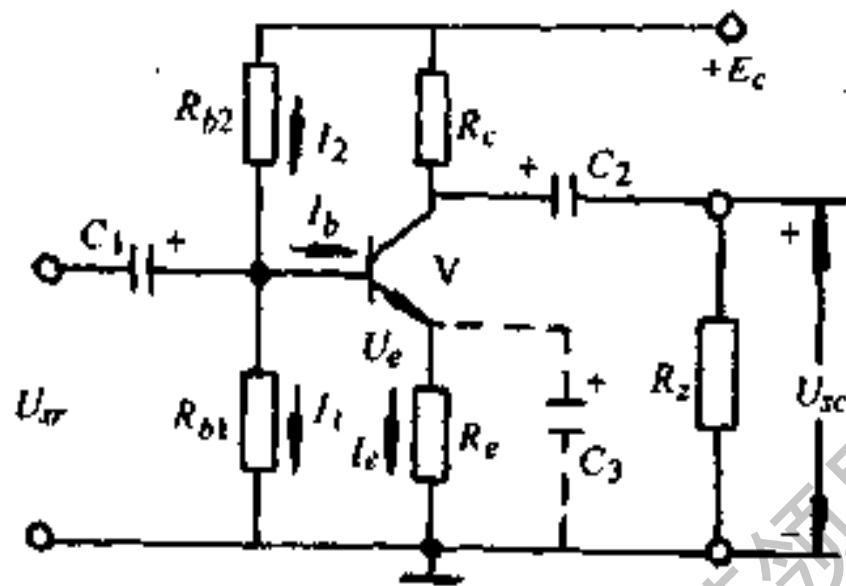


图 12-32 工作点稳定的典型电路

$$I_1 \geq (5 \sim 10)I_b$$

$$U_b \geq (5 \sim 10)U_{be} = \begin{cases} 3 \sim 5V (\text{硅管}) \\ 1 \sim 3V (\text{锗管, 取绝对值}) \end{cases}$$

各量的计算公式如下:

$$U_b \approx E_c \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}}$$

$$I_c \approx I_e = \frac{U_b - U_{be}}{R_e} \approx \frac{U_b}{R_e}$$

$$I_b = I_c / \beta$$

$$I_1 = U_b / R_{b1}$$

引入反馈电阻  $R_z$  后, 为了稳定直流分量, 又不削弱交流分量, 在电阻  $R_z$  上并联一个电容  $C_z$  (约  $10 \sim 100\mu\text{F}$ ), 利用电容对直流电与交流电的容抗不同, 使其

对射极的交流电流起“短路”的作用。即让  $R_e$  对交流电流不起负反馈作用，从而使放大器的交流放大倍数不致下降。

该电路的电压放大倍数仍按下式计算：

$$K_u = -\beta \frac{R'_e}{r_{be}}$$

式中  $R'_e$ —— $R_e$  与  $R_c$  的并联电阻 ( $\Omega$ )， $R'_e = R_e // R_c$ 。

### 九、各类交流放大器的特点及比较

交流放大器的基本单元电路及特点见表 12-31。

### 十、晶体管直流放大器的计算

直流放大器和交流放大器的主要区别，在于直流放大器是放大变化缓慢的微弱信号（通称为直流信号）用的。直流放大器的形式很多，图 12-33 是最简单的直流放大器。该放大器是利用调整后级发射极电位，使前级输出端电位和后级输入端电位相配合，以使各级管子工作点处于线性区。

#### 各元件参数的估算

已知条件：电源电压  $E_c$ 、晶体管  $V_1$  和  $V_2$  的工作点（即已知各管的  $U_{ce}$  和  $I_c$ ）及放大倍数  $\beta$ （各管均同）。

#### 1. 选取 $R_{b1}$

$R_{b1}$  根据稳定性要求选取，对小信号放大器可取几百  $\Omega$  到几  $k\Omega$ 。

#### 2. 确定 $R_{b2}$



表 12-31 交流放大器的基本单元电路及特点

电路图		
图解法	<p>交流负载线</p> <p><math>I_b \approx \frac{E_c}{R_b}</math></p> <p><math>U_{ce} \tan^{-1} \frac{1}{R_e}</math></p>	<p>交流负载线</p> <p><math>\frac{E_c}{R_c + R_e}</math></p> <p><math>U_{ce} \tan^{-1} \frac{1}{R_2}</math></p>

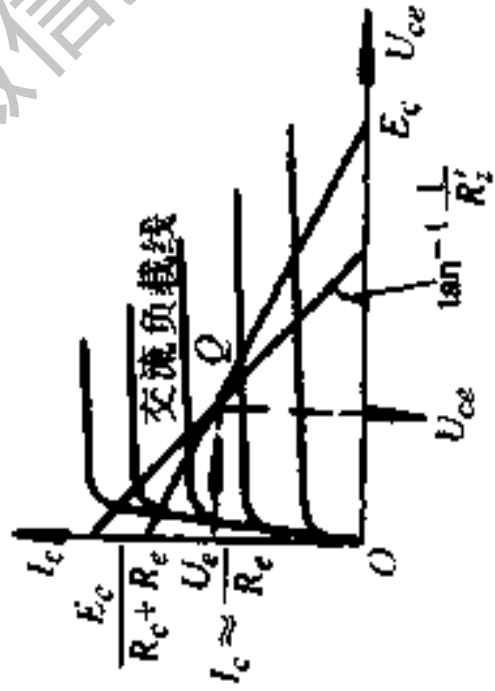
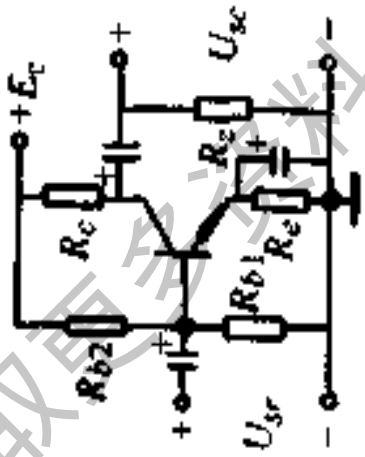
获取学术资料 微信搜索 蓝须星球

(续)

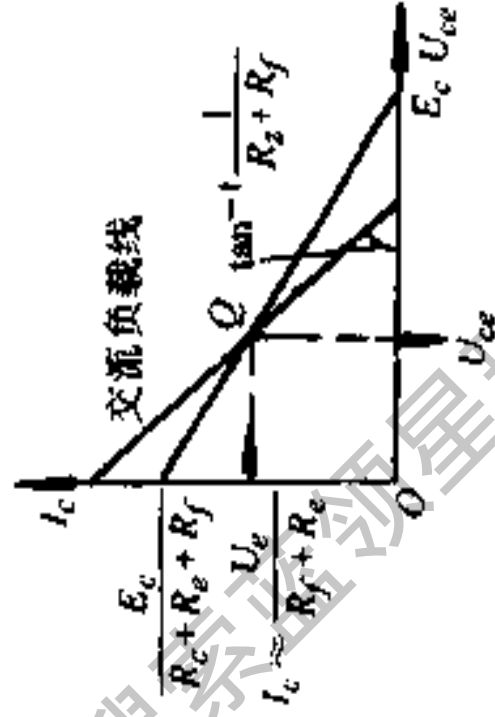
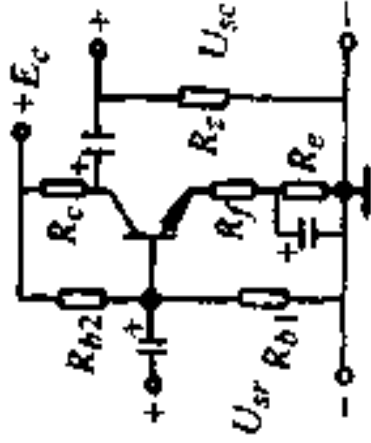
静态 工作点	$I_b \approx \frac{E_c}{R_b}, I_c = \beta I_b$ $U_{ce} = E_c - I_c R_c$	$\text{由} \left( \frac{U_{ce} R_1}{R_1 + R_2} - U_{be1} \right) \frac{1}{R_{c1}} \approx$ $\frac{E_c - (U_{ce} + U_{be2})}{R_{c1}} \text{解得 } U_{ce} \text{ 等}$
输入电阻	$r_{in} \approx r_{be} \text{ (当 } r_{be} \ll R_b \text{)}$	$r_{in} \approx r_{be1} \text{ (当 } r_{be1} \ll R_1 // R_2 \text{)}$
输出电阻	$r_{oc} \approx R_c$	$r_{oc} \approx R_{c2}$
放大倍数	$K = \frac{-\beta R_c'}{r_{be}}$	$K = \frac{U_{ce}'}{U_{sr}} \approx \beta_1 \beta_2 \frac{R_c'}{r_{be1}}$ (当 $R_{c1} \geq r_{be2}$ )
特点	放大倍数大, 工作点不稳定	放大倍数大, 工作点稳定
用途	不要求工作点稳定的简单放大电路	工作要求稳定的放大电路, 多用于多级放大器的中间级

(续)

电路图



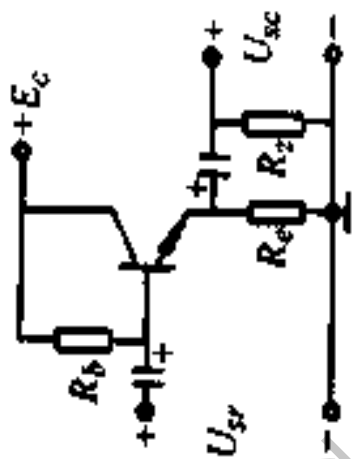
图解法



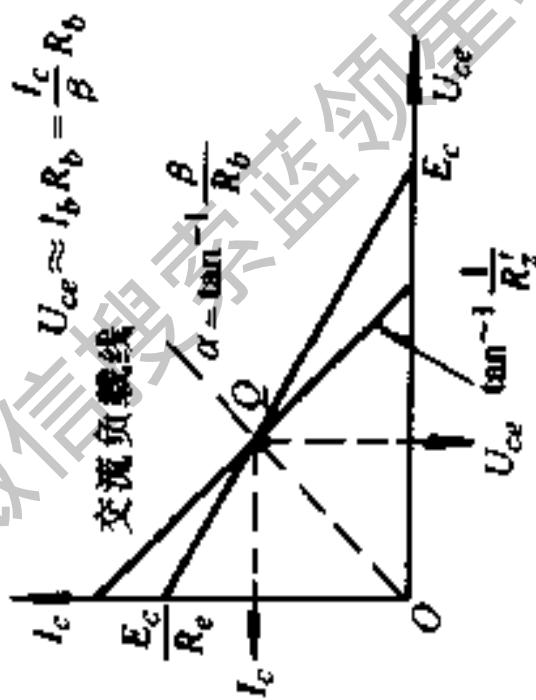
(续)

静态 工作点	$U_b \approx \frac{E_c R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}}, U_c = U_b - U_{be}$ $I_c = \frac{U_c}{R_c}, U_{ce} \approx E_c - I_c (R_c + R_f)$	$U_b, U_c \text{ 同左, 但 } I_c = \frac{U_c}{R_c + R_f}$ $U_{ce} \approx E_c - I_c (R_c + R_c + R_f)$
输入电阻	$r_{ie} \approx r_{be} \text{ (当 } r_{be} \ll R_{b1} // R_{b2} \text{)}$	$r_{ie} \approx R_{b1} // R_{b2} // (\beta R_f + r_{be})$
输出电阻	$r_{oe} \approx R_c$	$r_{oe} \approx R_c$
放大倍数	$K = \frac{-\beta R'_c}{r_{ie}}$	$K \approx \frac{-R'_c}{R_f} \text{ (当 } \beta R_f \gg r_{be} \text{)}$
特点	工作点稳定	$r_{ie}$ 较大, $ K  > 1$ 且与晶体管参数几乎无关, 工作点稳定
用途	工作点要求稳定的放大电路, 多用于多级放大器的中间级	放大器的输入级或为了改善波形和提高 $K$ 的稳定性

(续)



电路图



图解法

(续)

静态 工作点	$I_b \approx \frac{E_c}{R_b + \beta R_c}, I_c \approx \beta I_b,$ $U_{ce} = E_c - I_c R_c$
输入电阻	$r_{if} \approx R_b // \beta R_c$
输出电阻	$r_{of} \approx \frac{R_b + r_{be}}{\beta} \left( \text{当 } \frac{R_b + r_{be}}{\beta} \ll R_c \right)$
放大倍数	$K = \frac{(\beta + 1) R_c}{r_{be} + (\beta + 1) R_c}$
特点	$r_{if}$ 大, $r_{of}$ 小, $ K  \leq 1$ , 工作点稳定
用途	放大器的输入级或输出级

获取更多资料 微信订阅号 益学星球

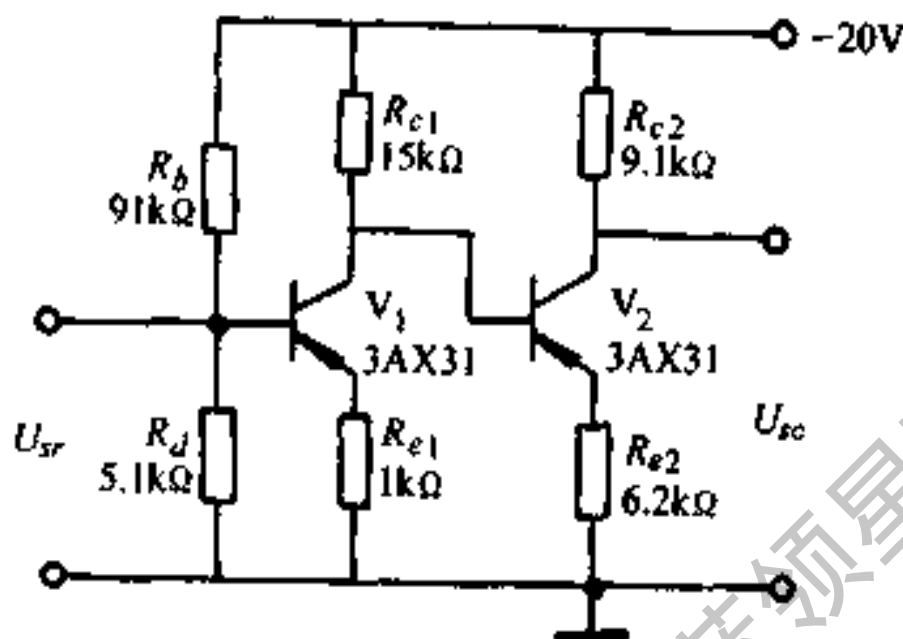


图 12-33 最简单的直流放大器

$$R_{c1} = \frac{E_c - U_{ce1} - I_{c1}R_{e1}}{I_{c1}}$$

3. 确定  $R_c$  和  $R_b$

$$R_c = \frac{\beta}{10} R_{b1}$$

$$R_b = \frac{\beta}{10} \left( \frac{E_c}{I_1} - R_{c1} \right)$$

4. 确定  $R_{e2}$

$$R_{e2} = \frac{U_{ce1} + I_{c1}R_{c1} - U_{ce2}}{I_{c2}} \approx \frac{U_{ce1} + I_{c1}R_{c1}}{I_{c2}}$$

5. 确定  $R_{e2}$

$$R_{e2} = \frac{E_c - U_{ce2} - I_{c2}R_{c2}}{I_{c2}}$$

上述各参数选定后（取标准值电阻），再根据实际情

况调整  $R_1$  和  $R_2$ ，以确定  $V_1$  和  $V_2$  的工作点。

### 十一、差动放大器的计算

差动放大器的输入信号是差动信号。即两管的输入信号振幅相等、相位相反，即  $u_{sr_1} = u_{sr_2}$ 。放大器的输出正比于差动信号， $u_{sc} = K_{dv} (u_{sr_1} - u_{sr_2})$ 。式中  $K_{dv}$  为差动放大器的差动电压放大倍数。

差动放大器的基本电路，见表 12-32。

### 十二、场效应管放大电路的计算

场效应管的输入阻抗非常高，可达  $10^9 \sim 10^{15} \Omega$ ，输入电路和输出电路基本独立，电路结构较简单，并具有噪声低、动态范围广和抗干扰、抗辐射能力强等特点。

常用的场效应管基本放大电路，见表 12-33。

### 十三、运算放大器的计算

运算放大器是具有高放大倍数 ( $K_o$ ) 和深度负反馈的直流放大器，可用来实现信号的组合和运算。它的输出-输入关系仅简单地决定于反馈电路和输入电路的参数，与放大器本身的参数没有很大关系。运算放大器基本上有两种连接方式：反相输入 (图 12-34a) 和同相输入 (图 12-34b)。

(1) 开环放大倍数  $K_o$ ：是指元件加反馈环路，放大器工作在直流 (或很低频率的交流) 下的电压放大倍数，一般在  $10^3 \sim 10^7$  左右。运算放大器除作比较器外，通常都接成闭环使用，以保证其工作稳定。



表 12-32 差动放大器基本电路

电路型式	电 路 图	输入电阻	电压放大倍数	输出电阻
双端输入 双端输出		$r_{sr} = 2(R_{b1} + r_{be})$	$K_{du} = -\beta \frac{R'_{fz}}{R_{b1} + r_{be}}$ $R'_{fz} = R_c // \frac{R_{fz}}{2}$	$r_{sc} = 2R_c$
双端输入 单端输出		$r_{sr} = 2(R_{b1} + r_{be})$	$K_{du} = -\beta \frac{R'_{fz}}{2(R_{b1} + r_{be})}$ $R'_{fz} = R_c // R_{fz}$	$r_{sc} = R_c$

(续)

电路型式	电路图	输入电阻	电压放大倍数	输出电阻
单端输入 单端输出		$r_{sr} = 2(R_{b1} + r_{be})$	$K_{du} = -\beta \frac{R'_{fz}}{2(R_{b1} + r_{be})}$ $R'_{fz} = R_c // R_{fz}$	$r_{sc} = R_c$
单端输入 双端输出		$r_{sr} = 2(R_{b1} + r_{be})$	$K_{du} = -\beta \frac{R'_{fz}}{R_{b1} + r_{be}}$ $R'_{fz} = R_c // \frac{R_{fz}}{2}$	$r_{sc} = 2R_c$

注:  $K_{du}$  为差动放大器的差动电压放大倍数。

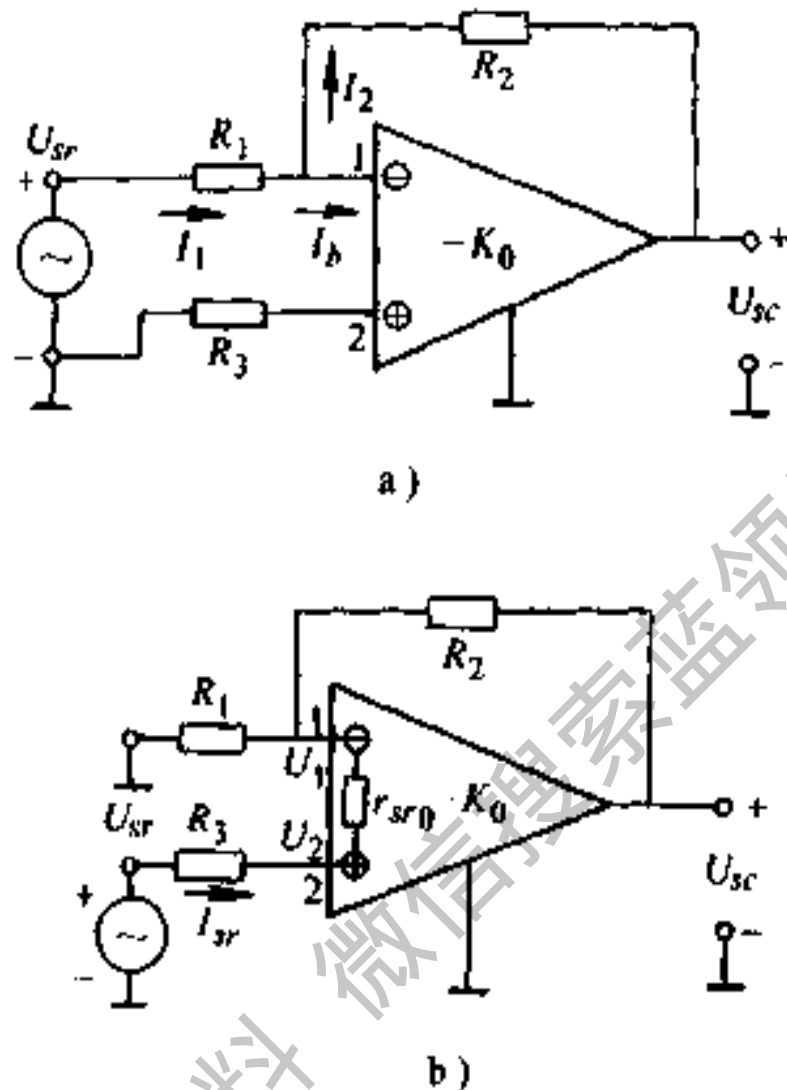


图 12-34 运算放大器的两种接线

a) 反相输入接线图 b) 同相输入接线图

(2) 输入特性：输入电阻的计算：

当反相输入时，属于电压并联负反馈

$$r_{ir} \approx R_1$$

当同相输入时，属于电压串联负反馈

$$r_{ir} = (1 + K_0 F) r_{sr0} + R_3, F = \frac{r_{sr0} // R_1}{(r_{sr0} // R_1) + R_2}$$

式中  $r_{sr0}$  —— 放大器开环输入电阻 ( $k\Omega$ )，一般数值较

大，如几十  $k\Omega$ ~几百  $k\Omega$ ；

$K_0$ ——开环电压放大倍数，此值很大，如积分用的运算放大器为  $10^6$ ~ $10^7$ ；

$F$ ——电压反馈系数。

输入电流  $I_b$  在数  $\mu A$ ~数  $pA$  之间。

(3) 输出特性  $V_{pp}$ —— $R_L$ ： $R_L$  代表输出端接有负载时能输出的最大电压值。它标志一个放大器的负载能力。输出电阻计算如下：

开环输出电阻  $r_{ic0}$  约几百  $\Omega$ 。

闭环输出电阻  $r_{ic} \approx \frac{r_{ic0}}{1+K_0F} \approx 0$

(4) 失调电压  $V_{os}$ 、电流  $I_{os}$ ：集成运算放大器通常都采用差分输入级，由于输入差分管的不对称，即使输入端电压、电流为零。放大器的输出电压、电流也不为零。我们把使放大器输出电压为零在输入端所加的信号电压称为失调电压。

(5) 单位增益带宽  $f_c$ ：当开环差模增益下降到  $K=1$  时的频率称为放大器的单位增益带宽，即放大器使用频率上限。

## 2. 运算放大器的设计

现以运算放大器 F008 为例，介绍同相和反相放大器的设计和调试。F008 外引线排列见图 12-35a，开环增益随频率变化曲线见图 12-35b。表 12-34 列出了它的性

表 12-33 常用场效应

电路类型	电 路 图	静态工作点
共源放大器		$U_S = I_D R_S$ $U_G = U_{R_2} = \frac{E_D R_2}{R_1 + R_2}$ $U_{GS} = U_G - U_S$
源极输出器		$U_S = I_D R_S$ $U_G = U_{R_2} = \frac{E_D R_2}{R_1 + R_2}$ $U_{GS} = U_G - U_S$
混合跟随器		$U_S = (I_D + I_C) R_S$ $U_G = U_{R_2} = \frac{E_D R_2}{R_1 + R_2}$ $U_{GS} = U_G - U_S$
电流负反馈放大器		$U_S = I_D (R_S + R_{SF})$ $U_G = U_{R_2} = \frac{E_D R_2}{R_1 + R_2}$ $U_{GS} = U_G - U_S$

注： $g_m$  为正向跨导。

## 管基本放大电路

输入电阻	电压放大倍数	输出电阻
$r_{in} = R_g + R_1 // R_2$	$K_u = -g_m (R_d // R_{fz})$	$r_{oc} \approx R_d$
$r_{in} = R_g + R_1 // R_2$	$K_u = \frac{g_m (R_d // R_{fz})}{1 + g_m (R_s // R_{fz})}$	$r_{oc} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + g_m}$
$r_{in} = [1 + (1 + \beta') g_m R'_s] \times R_s$ $\beta' = \beta \frac{R_d}{h_{ip} + R_d}$ $R'_s = R_s // R_1 // R_2$	$K_u = \frac{\beta' g_m R_c + (1 + \beta') g_m R'_s}{1 + (1 + \beta')}$	$r_{oc} = \frac{R_d + (1 + g_m R_d) R'_s}{1 + (\beta' + 1) g_m R'_s}$
$r_{in} = R_g + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$	$K_u = \frac{-g_m R'_{fz}}{1 + g_m R_{SF}}$ $R'_{fz} = R_d // R_{fz}$	$r_{oc} \approx R_d$

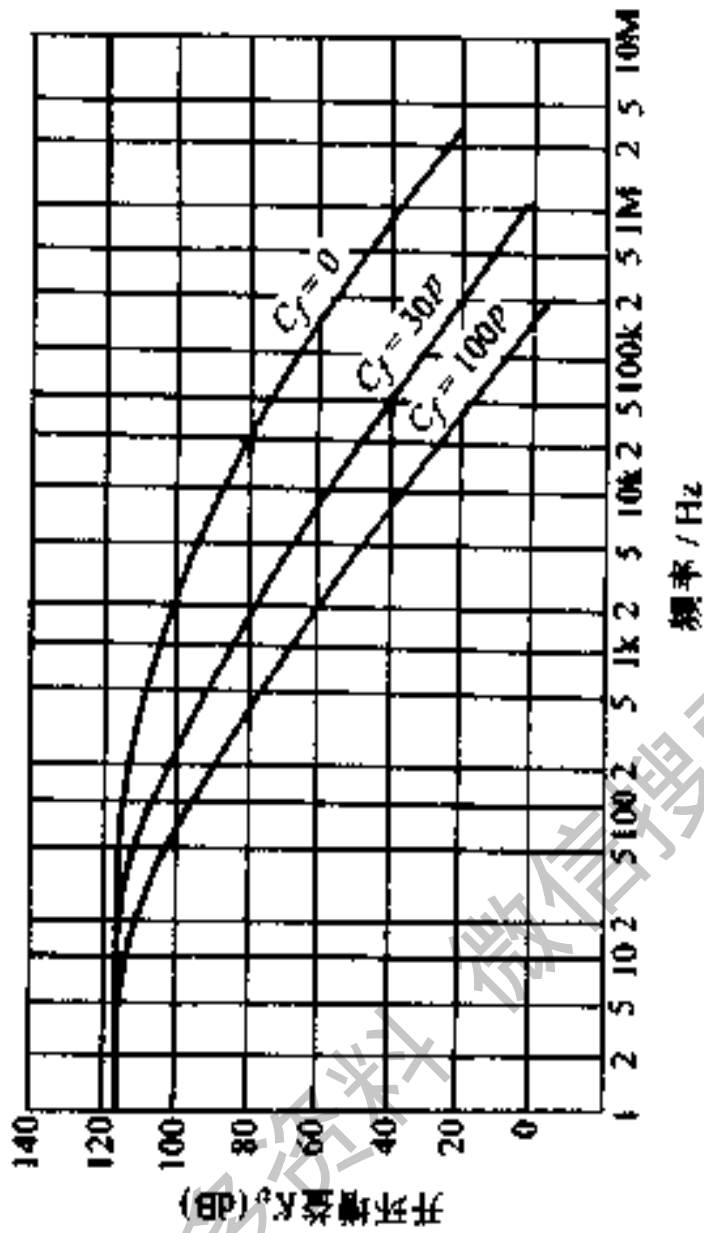
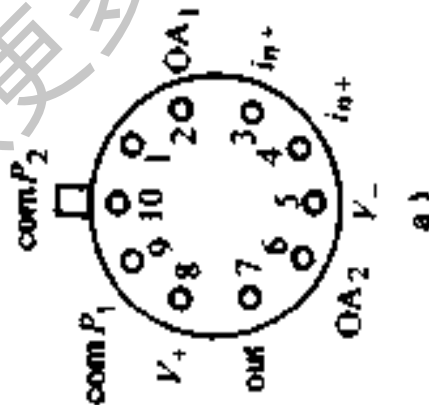


图 12-35 F008 管脚图及开环增益变化曲线  
a) 管脚排列图 b) 开环增益  $K_u$  随频率变化的曲线



获取更多资料  
www.dzbook.com

表 12-34 F008 性能参数

名称	符号	单位	测试条件	典型值
输入失调电压	$V_{os}$	mV	$R_b = 50\Omega$	5
输入失调电流	$I_{os}$	nA	$R_b = 50k\Omega$	50
输入基极电流	$I_{ib}$	nA	$R_b = 50k\Omega$	300
静态功耗电流	$I_c$	mA	$R_f = \infty$	1.5
开环增益	$G_{ol}$	dB	$f = 4Hz, R_i = 10k\Omega$ $V_{opp} = 20V$	
共模电压范围	$V_{CM}$	V		24
共模抑制比	CMRR	dB	$R_b = 50\Omega$	100
输出电压幅度	$V_{opp}$	V	$R_f = 10k\Omega (R_f = 1k\Omega)$	24(20)

注： $U_+ = 15V, U_- = -15V, T_c = 25^\circ C$

能参数。

(1) 反相比例放大器设计见图 12-36，图中  $R_f$  为反馈电阻， $R_1$  与  $R_f$  共同决定放大器闭环增益。 $R_2$  为  $R_1$  与  $R_f$  并联值，它可以减小失调电流的影响。 $C_f$  为相位补偿电容，主要用来防止放大器产生自激振荡。 $C_f$  一般在几  $\sim 1000pF$  之间。此电容量太大会使频带变窄，太小又使放大器不能稳定工作。

若信号源内阻很小，则输出电压  $U_o$  为

$$U_o = \frac{-R_f}{R_1} U_{sr}$$



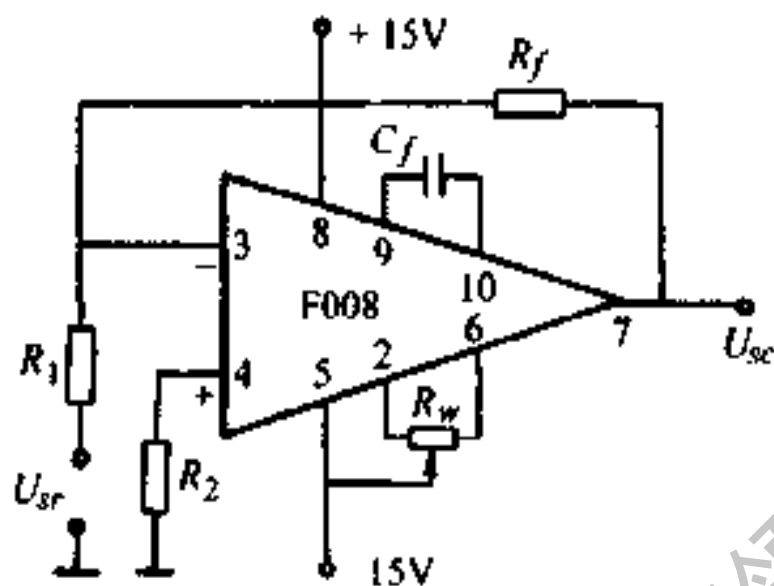


图 12-36 反相比例放大器

电压放大倍数  $K_u = U_o / U_i = -R_f / R_1$

式中负号表示反相。图中若  $R_f = 51\text{k}\Omega$ ,  $R_1 = 1\text{k}\Omega$ , 则  $K_u = -51/1 = -51$ 。在小信号输入 ( $U_i = 50\text{mV}$ ) 时,  $C_f = 2\text{pF}$ , 测得放大器带宽大于  $500\text{kHz}$ 。若  $R_f = 5.1\text{k}\Omega$ ,  $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ,  $K_u = -5$ ,  $U_i = 50\text{mV}$ ,  $C_f = 50\text{pF}$ , 测得放大器带宽大于  $1\text{MHz}$ 。

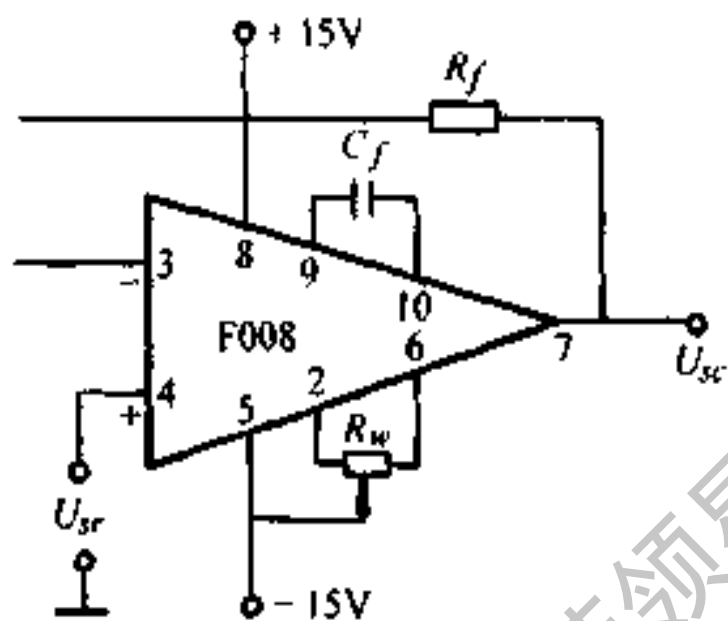
(2) 同相放大器的设计见图 12-37。

对于图 12-37a 有下列关系式

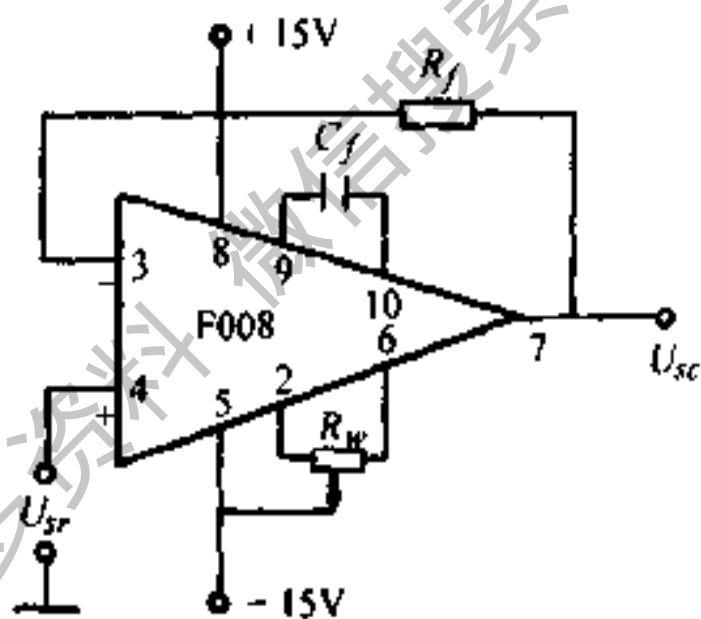
$$U_o = U_i \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right)$$

$$K_u = U_o / U_i = 1 + R_f / R_1$$

如果  $R_1 \rightarrow \infty$ , 则  $K_u = 1 + R_f / R_1 = 1$ , 于是图 12-37a 就变成图 12-37b 所示的电压跟随器电路。图 12-37a 中, 若  $R_f = 51\text{k}\Omega$ ,  $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ,  $C_f = 2\text{pF}$ ,  $U_i = 50\text{mV}$ ,  $K_u = 52$ 。



a)



b)

图 12-37 同相放大器

a) 同相比例放大器 b) 电压跟随器

则频率响应大于  $600\text{kHz}$ 。若  $R_f = 5.1\text{k}\Omega$ ,  $R_i = 1\text{k}\Omega$ ,  $U_{sr} = 50\text{mV}$ ,  $K_v = 6$ , 则频率响应大于  $1\text{MHz}$ 。

(3) 调试:上述两种电路调试方法简单。当要求输入电压为零时输出也要为零,可把  $U_e$  对地短路,调整  $R_w$  使输出为零即可。

$C_f$  的调整:先不接  $C_f$ ,放大器可能振荡,若振荡则加上  $C_f$ ,由小逐渐增大,直到不振荡。固定输入电压,改变信号频率,使其从某一个频率开始增益单调下降,这时的  $C_f$  值称为最佳补偿值,可得到最大带宽。这里所述的带宽是指小信号带宽。若要放大器有较窄的带宽,可适当加大电容量至数百  $\mu\text{F}$ 。

3. 各种运算放大器的基本电路见表 12-35。

可以通过改变运算放大器输入和反馈电路的形式和参数实现不同的运算关系。 $K_0$  愈大,运算精度愈高。

#### 十四、晶体管电子继电器元件参数的选择

几种常用晶体管电子继电器原理电路如图 12-38 所示。图中触点  $K_1$  代表发信元件的触点。 $K_1$  闭合,晶体管  $V_1$  导通,继电器  $K_2$  吸合; $K_1$  断开, $V_1$  截止, $K_2$  释放。为了防止误动作, $V_1$  的基极可外加正偏压(对 PNP 管)或负偏压(对 NPN 管)。电子继电器元件的选择及计算如下:

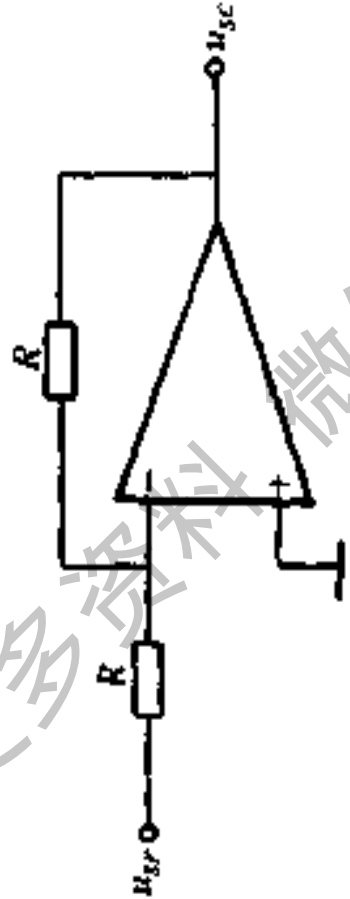
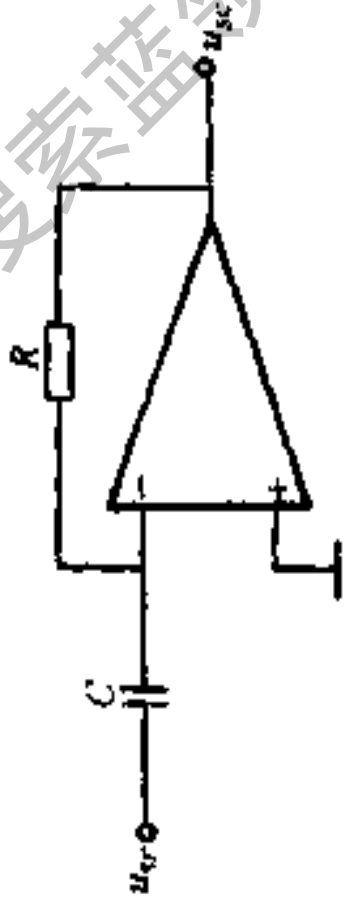
(1) 继电器  $K_2$  的选择:继电器  $K_2$  可用直流电阻  $R_c$  为几百  $\Omega$  到几  $\text{k}\Omega$ ,吸合电流  $I_{\text{吸}}$  为几到几十  $\text{mA}$  的小型继电器,如 JR 型、JRX 型、JQ 型和 JQX 型等。

(2) 电源电压  $E_c$  选择: $E_c \geq U_{\text{吸}} = I_{\text{吸}} R_c$

表 12-35 各种运算放大器的基本电路

运算关系	基本电路方框图	逻辑关系
加法		$u_{sc} = -R_f \sum_{i=1}^n \frac{u_i}{R_i}$ <p>当 <math>R_f = R_1 = R_2 = \dots = R_n</math> 时 <math>u_{sc} = -\sum_{i=1}^n u_i</math></p>
减法		$u_{sc} = u_2 - u_1$

(续)

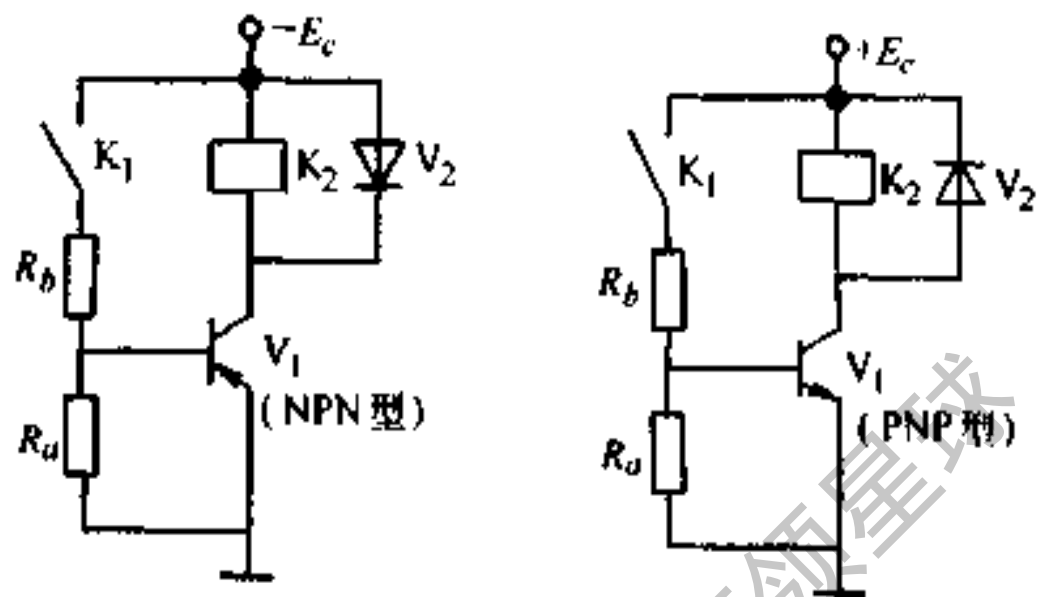
运算关系	基本电路方框图	逻辑关系
<p>倒相</p>		$u_{sc} = -u_{sr}$
<p>微分</p>		$u_{sc} = -RC \frac{du_{sr}}{dt}$

(续)

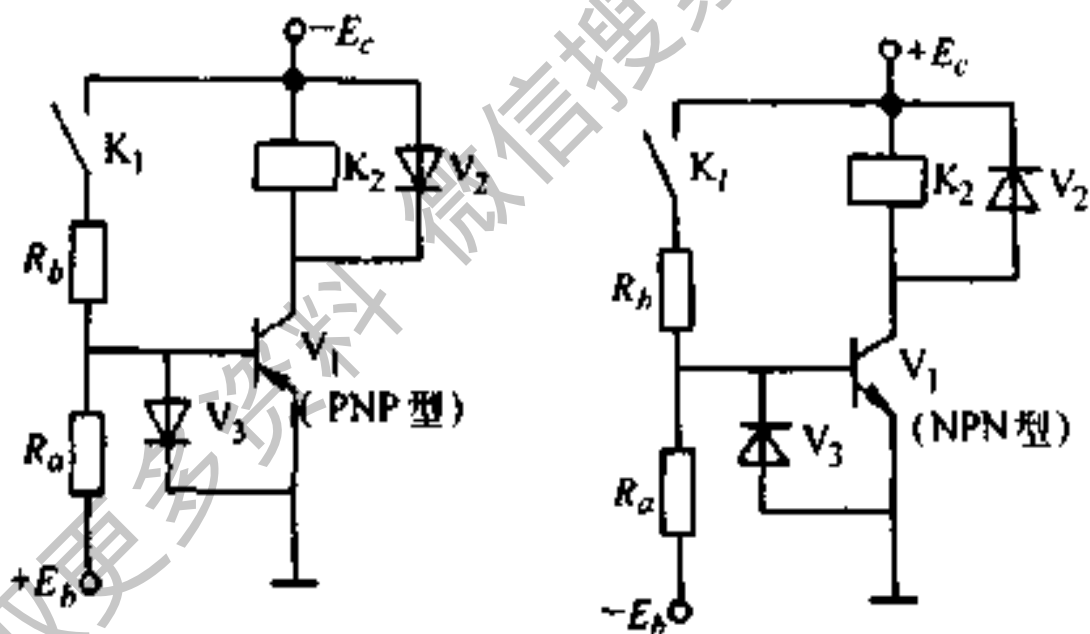
运算关系	基本电路方框图	逻辑关系
积分		$u_{sc} = -\frac{1}{RC} \int u_{sr} dt$
对数放大		$u_{sc} = K_1 \ln u_{sr} + K_2$
反对数放大		$u_{sc} = K_1 \ln^{-1}(u_{sr} K_2)$

(续)

运算关系	基本电路方框图	逻辑关系
乘法		$u_{sc} = K u_1 u_2$
除法		$u_{sc} = K \frac{u_1}{u_2}$



a) 无外加偏压的电路



b) 外加反向偏压的电路

图 12-38 晶体管电子继电器原理电路

(3) 晶体管  $V_1$  选择:  $V_1$  一般采用小功率锗管或硅管。要求集电极最大允许电流  $I_{CM} > I_{\text{管}}$ ; 集电极与发射极间的反向击穿电压  $BV_{\text{cR}} > E_c$ 。



(4) 二极管  $V_2$  选择:  $V_2$  为保护晶体管用, 要求其额定反向峰值电压  $V_{RM} > E_c$ ; 最大正向电流  $I_{OM} > I_{zmax}$  ( $I_{zmax}$  为最大负载电流)。

(5) 二极管  $V_3$  选择:  $V_3$  为保护晶体管  $V_1$  用, 要求其额定电流  $I_c > E_b/R_a$ 。

(6) 电阻  $R_a$  的选择:

1) 对于图 12-38a, 低频小功率锗管取几百  $\Omega$  到几千  $\Omega$ 。 $R_a$  小些, 管子截止更可靠, 但损耗大。当  $R_a \approx 1k\Omega$  时,  $BV_{ceR} \approx 1.5BV_{ceo}$ 。

2) 对于图 12-38b, 为使管子可靠截止,  $BV_{ce0}$  不小于 0.3V, 即要求

$$R_a \leq \frac{E_b - 0.3}{I_{c0}}$$

式中  $E_b$  —— 基极电压, 一般取 6V;

$I_{c0}$  —— 集电极反向饱和电流(A), 取最高可能环境温度下的数值。

(7) 电阻  $R_b$  的选择:

1) 对于图 12-38a, 为使管子饱和, 要求  $\frac{E_c}{R_b} \geq \frac{E_c}{\beta R_{\Sigma}}$ , 即  $R_b \leq \beta R_{\Sigma}$ 。

2) 对于图 12-38b, 可按下列公式计算  $R_b$ :

$$\text{(锗管)} \quad E_c - \left( I_b + \frac{E_b + 0.2}{R_a} \right) R_b \geq 0.2$$

$$(\text{硅管}) \quad E_c - \left( I_b + \frac{E_b + 0.7}{R_b} \right) R_b \geq 0.7$$

由于管子性能有差异,偏置电阻  $R_b$  尚需实际调整。 $R_b$  值取得略小,能使管子得到充分饱和,但将使开关速度有所下降。

## 十五、功率放大器保护元件的计算

### 1. 功率放大器感应过电压的抑制元件的选择

在控制电路中,末级的功率放大器往往要推动接触器、继电器、电磁阀等电感性负载。在切断这些电感负载时会产生感应过电压,因而可能击穿晶体管。为此需采取保护措施。常用的保护元件有二极管、稳压管、电阻、电容等。图 12-39 为几种常用的过电压抑制线路和晶体管导通、截止过程中集电极电流  $I_c$  与电压  $U_{ce}$  的变化曲线。图 e 对应于图 a 和图 b 的线路;图 f 对应于图 c 的线路;图 g 对应于图 d 的线路。抑制元件的选择原则如下:

(1) 对于图 12-39a:在上述“晶体管电子继电器元件参数的选择”内容中已述。

(2) 对于图 12-39b;二极管仍按上述原则选择;稳压管的功率应考虑流过最大电流时必须低于其允许的耗散功率,稳压管的稳定电压  $V_w$  可按下式计算:

$$V_w = E_c(N - 1)$$

式中  $N$ ——允许电压上升系数,等于  $U_w/E_c$ ;

$V_w$ ——稳压管稳定电压,其值应小于  $BV_{ceo}$ 。

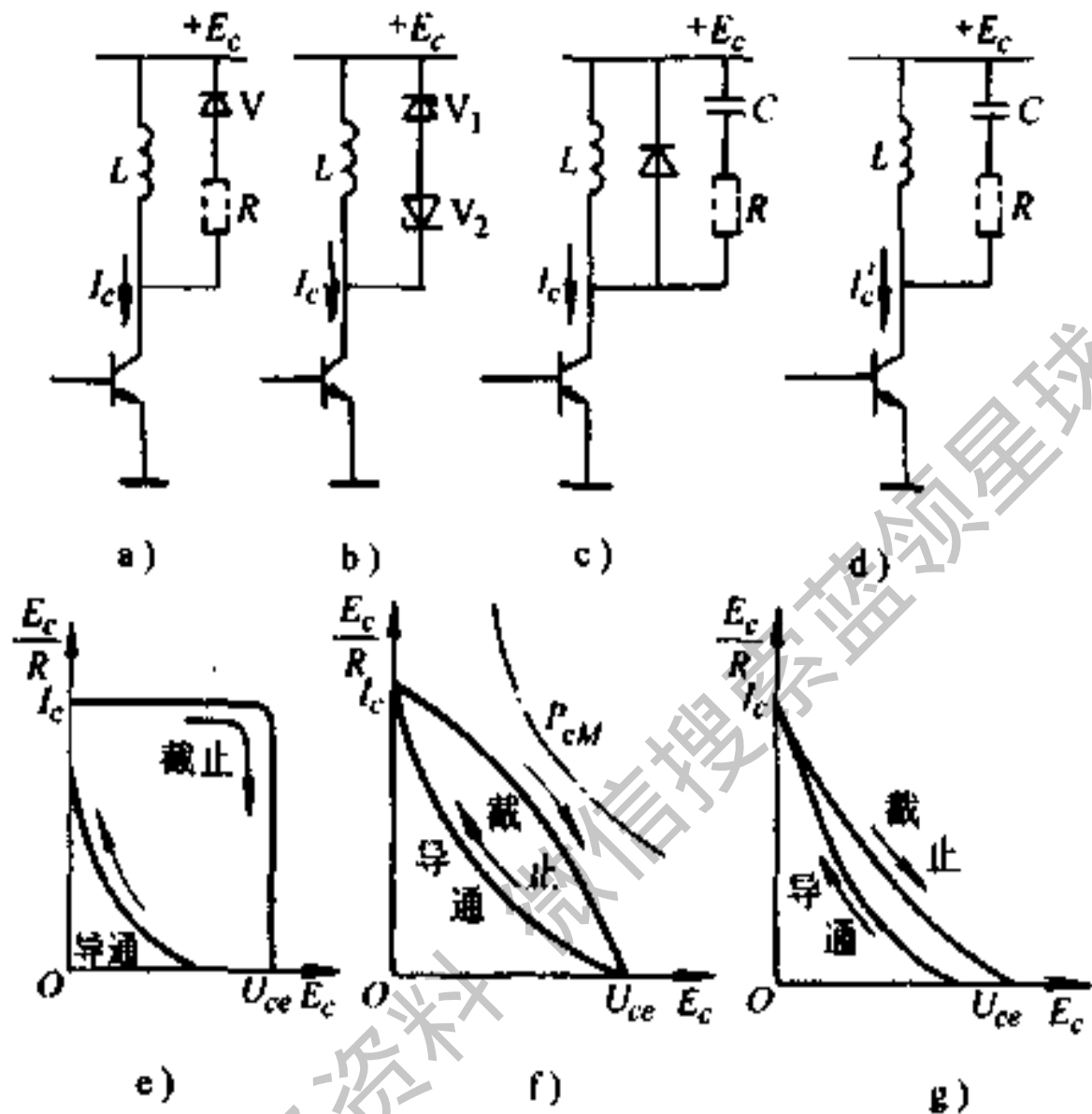


图 12-39 过电压抑制线路及晶体管导通截止

(3) 对于图 12-39c 和 d: 电源合闸瞬间(电容相当于短路), 充电电流应小于晶体管集电极最大允许电流  $I_{CM}$ , 若不能满足, 可串接一个限流电阻。同时还要考虑防止电容电感可能产生自激振荡。

## 2. 功率放大器连接白炽灯泡时的限流计算

白炽灯泡灯丝的冷态电阻要比燃亮后的热态电阻小

8~10 倍,因而放大器接通灯泡的瞬间,其电流要比热态电流大 8~10 倍。如果根据灯泡的标称功率(热态功率)计算出的热态电流来选择晶体管的工作电流,则在接通灯泡的瞬间,可能会损坏晶体管,这时需采取限流措施,见图 12-40。

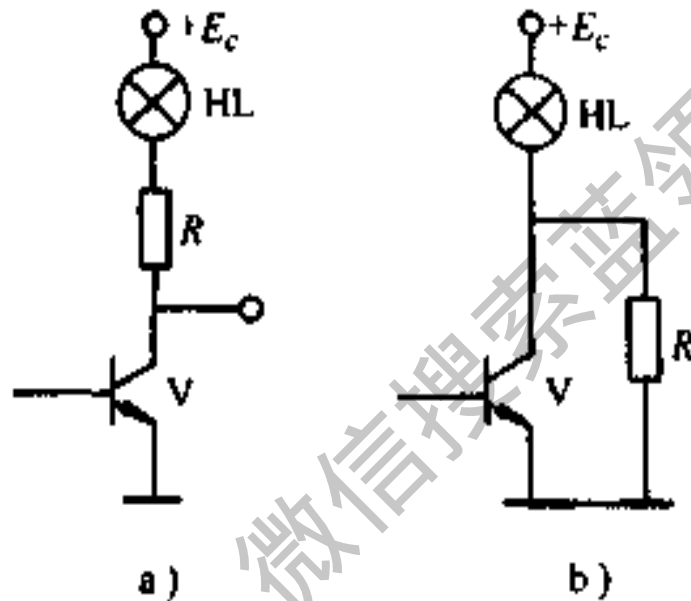


图 12-40 限制灯泡冷态电流的方法

a) 串联电阻 b) 预热灯丝

#### 限流电阻 $R$ 的计算

(1) 对于图 12-40a: 方法一: 灯泡采用比电源电压  $E_c$  低一级的电压, 其差值则由  $R$  降压; 方法二: 串联电阻降压按  $0.1E_c$  来选择, 其电阻  $R$  能降低灯泡的工作电压, 该方法可提高灯泡的使用寿命。

(2) 对于图 12-40b: 当  $V$  截止时,  $R$  与灯泡串联, 使灯泡上的电压降约为  $(0.1 \sim 0.2)E_c$ , 灯泡中流过少量预热电流但又不燃亮。

## 十六、发光二极管回路限流电阻的计算

发光二极管主要用作电源、音频和信号状态的指示，以及数字符号的显示。

### 1. 驱动电路形式

发光二极管可以用直流、交流和脉冲等电流驱动，其典型电路如图 12-41 所示。

### 2. 直流电阻计算

$$R = \frac{E - V_F}{I_F}$$

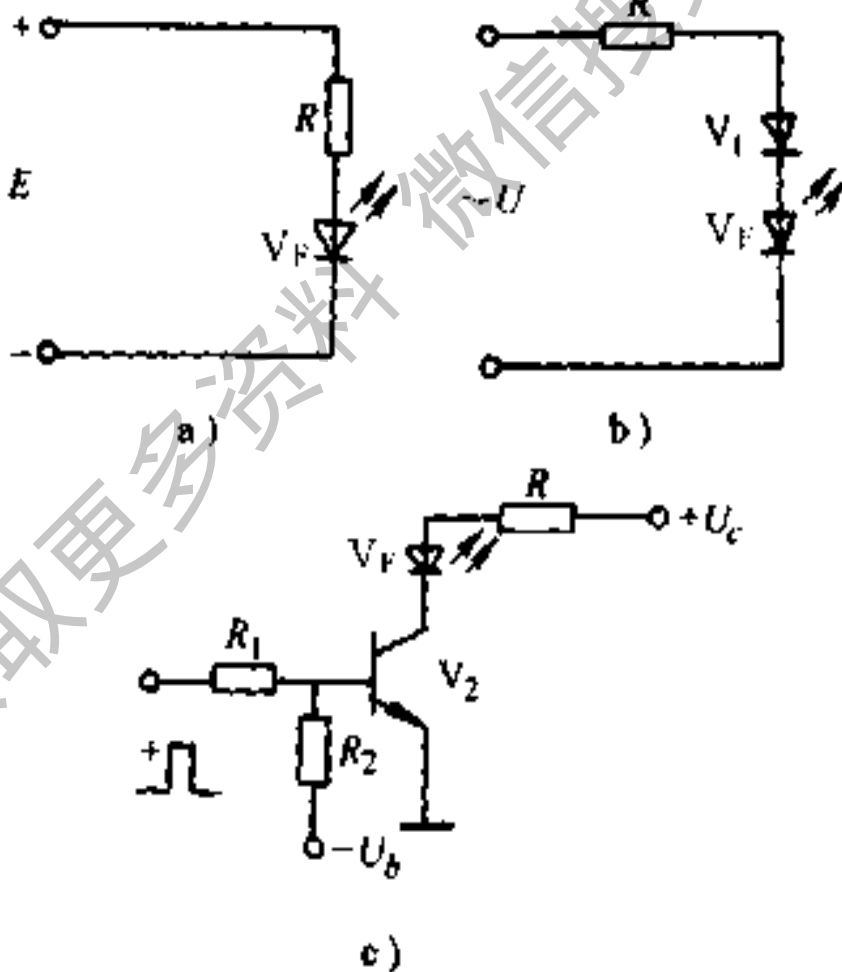


图 12-41 发光二极管驱动电路

式中  $R$ ——限流电阻(k $\Omega$ );

$E$ ——电源电压(V);

$V_F$ ——发光二极管正向压降(V);

$I_F$ ——发光二极管工作电流(mA)。

(2) 交流驱动时如图 12-41b 所示:

$$R = \frac{U_m - (V_1 + V_F)}{I_{Fm}}$$

式中  $U_m$ ——交流电压的峰值(V);

$V_1$ ——二极管正向压降(V);

$I_{Fm}$ ——发光二极管最大工作电流(mA)。

图中二极管  $V_1$  是用来保护发光二极管在交流负半周时不被击穿。

(3) 脉冲驱动时如图 12-41c 所示:

$$R = \frac{U_c - (U_{ces} + V_F)}{I_{Fm}}$$

式中  $U_c$ ——电源电压(V);

$U_{ces}$ ——三极管饱和导通时的管压降(V);

其它符号同前。

### 3. 注意事项

(1) 发光二极管的最大工作电流与环境温度关系极大,如磷化镓管,温度低于 25 $^{\circ}\text{C}$ 时, $I_{Fm}$ 为 30mA,当温度高于 80 $^{\circ}\text{C}$ 时, $I_{Fm}$ 为零。用于室温时,一般取发光二极管的工作电流  $I_F \leq 1/5 \sim 1/3 I_{Fm}$  为宜。

(2) 发光二极管的反向耐压低,一般为 6V 左右。为保护管子免受击穿,可与发光二极管并联一只反向保护二极管。

## 第六节 触发电路、振荡器 和变流器等计算

### 一、单结晶体管触发电路的计算

单结晶体管弛张振荡器如图 12-42 所示。

#### 1. 电容 $C$ 的选择

电容  $C$  的容量太小,储存的电能量不足,放电脉冲就窄,不易触发晶闸管; $C$  的容量太大,这将与  $R$  的选择产生矛盾。一般  $C$  的选用范围为  $0.1 \sim 1\mu\text{F}$ ,触发大容量的晶闸管时可选大些。

#### 2. 放电电阻 $R_1$ 的选择

$R_1$  的阻值太小,会使放电太快,尖顶脉冲过窄,不易触发导通晶闸管; $R_1$  的阻值太大,则漏电流(约几 mA)在  $R_1$  上的电压降就大,致使晶闸管误触发(晶闸管的不触发电压约为  $0.15 \sim 0.25\text{V}$ )。一般  $R_1$  的选用范围为  $50 \sim 100\Omega$ 。

#### 3. 温度补偿电阻 $R_2$ 的选择

因为单结晶体管的峰值电压为  $U_p = \eta U_M + U_D$ ,其中,分压比  $\eta$  几乎与温度无关, $U_p$  的变化是由等效二极管的正向压降  $U_D$  引起, $U_D$  具有  $-2\text{mV}/\text{C}$  的温度系数。

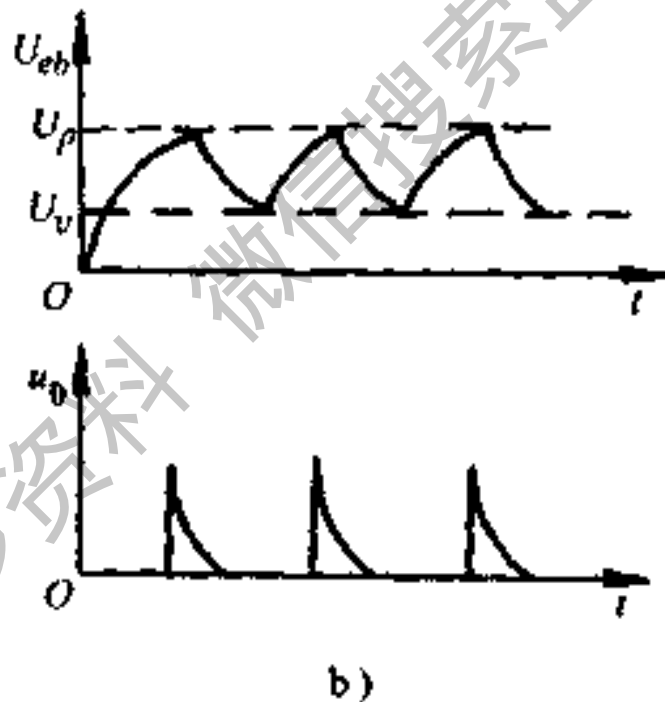
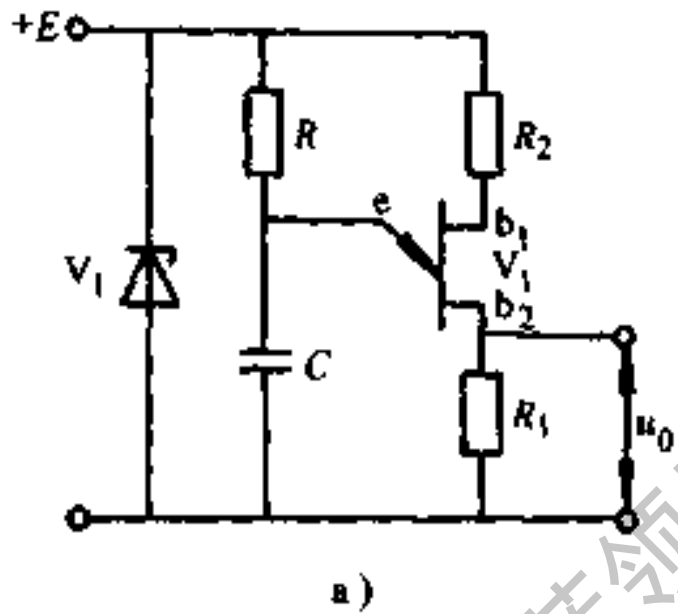


图 12-42 单结晶体管张弛振荡器

a) 振荡器典型线路 b) 波形图

$U_p$  变化会引起晶闸管的通导角改变, 这是不允许的。为了稳定  $U_p$ , 接入电阻  $R_2$ , 此时基极间的电压将为



$$U_{bb} = \frac{R_{bb}}{R_1 + R_2 + R_{bb}} E$$

式中  $R_{bb}$ ——基极间电阻( $\Omega$ )。

$R_{bb}$ 具有正的温度系数,只要适当选择  $R_2$  的数值,便可使  $nU_{bb}$ 随温度的变化恰好补偿  $U_D$  的变化量。

$R_2$  一般选用  $300 \sim 400 \Omega$ 。

#### 4. 充电电阻 $R$ 的选择

为了获得稳定的振荡,  $R$  的阻值应满足:

$$\frac{U_{bb} - V_1}{I_v} < R < \frac{U_{bb} - U_p}{I_p}$$

式中  $U_v, U_p$ ——谷点和峰点电压(V);

$I_v, I_p$ ——谷点和峰点电流(A)。

为了便于调整,  $R$  一般由一只固定电阻和一只电位器串联而成。

振荡器的振荡频率按下式计算:

$$f = \frac{1}{RC \ln \frac{1}{1-\eta}}$$

式中  $f$ ——振荡频率(Hz);

$R$ ——电阻( $\Omega$ );

$C$ ——电容(F)。

#### 5. 分压比 $\eta$ 的选择

一般选用单晶体管的分压比  $\eta$  为  $0.5 \sim 0.85$ 。 $\eta$  太大,触发时间容易不稳定;太小,脉冲幅值又不够高。

## 6. 稳压管 $V_L$ 的选择

稳压管的工作电压  $V_w$  若选得太低, 会使输出脉冲幅度减小造成不触发; 选得太高(超过单晶体管的耐压, 即  $30\sim 60V$ , 或使触发脉冲幅值超过晶体管控制极的允许值, 即  $10V$ ), 会损坏单晶体管或晶体管。一般选用  $20V$  左右。

## 二、射极耦合单稳态触发器的设计

下面以整形器为例介绍一般的设计原则。

**例 12-1** 试设计一个将脉冲信号进行整形的射极耦合触发器。要求输出低电位不超过  $3V$ 、输出幅度  $U_m > 4V$ 、最高工作频率  $f$  为  $20kHz$ 、输出波形的边沿小于  $100ns$ , 负载为射极输出器。

**解** 设计步骤如下:

(1) 电路选择: 根据给定的技术指标, 选用图 12-43 的电路。

(2) 电源电压的选择: 根据设计要求, 输出低电位不等于零, 所以只用一个电源即可。

$$E_c > 3 + 4 = 7(V), \text{ 选用 } 9V$$

输出低电位  $U_{\text{red}} = 2V$ , 输出幅度为  $7V$ 。

(3) 晶体管选择: 考虑波形边沿要好, 故选用  $3DK2A$ ,  $BV_{\text{ceo}} \geq E_c$ ,  $f_T \geq 50f = 50 \times 20 = 1000(kHz)$ ,  $\beta_{\text{min}} = 20$ 。

(4) 确定电阻  $R_{c1}$ 、 $R_{c2}$ : 作为整形器应具有一定的稳

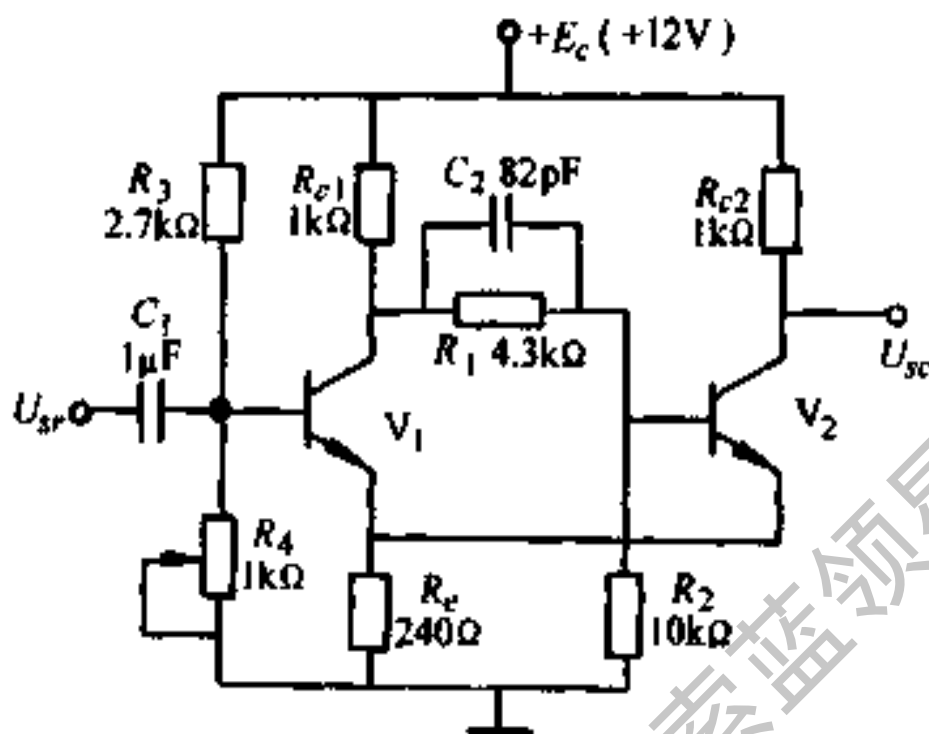


图 12-43 射极耦合触发器

定性,为此,要求  $V_1$ 、 $V_2$  分别在两种稳态下处于饱和状态,可选  $R_{c1} = R_{c2}$ 。

$R_{c2}$  一般根据负载情况来选择,由于负载是射极输出器,负载电流很小,负载对电路输出影响很小。可取  $V_2$  的集电极电流为  $I_{c2} = (1/3 \sim 1/2) I_{CM}$ 。3DK2A 的  $I_{CM}$  为 30mA,选  $I_{c2}$  为 10mA。

$$R_{c2} = \frac{E_c - U_{ced}}{I_{c2}} = \frac{9V - 2V}{10mA} = 0.7k\Omega = 700\Omega$$

取  $R_{c1} = R_{c2} = 910\Omega$ 。

(5) 确定电阻  $R_e$ : 忽略  $I_{b2}$  时

$$\begin{aligned} R_e &\approx \frac{U_{ced} - V_{ces}}{I_{c2}} = \frac{2V - 0.3V}{10mA} = 0.17k\Omega \\ &= 170\Omega, \text{取 } 200\Omega \end{aligned}$$

(6) 确定分压电阻  $R_1$  和  $R_2$ : 当  $V_1$  饱和时,  $V_2$  定能截止, 当  $V_1$  截止时, 要使  $V_2$  可靠饱和,  $R_2$  宜选得较大, 例如选  $I_{R_2} = (0.2 \sim 1) I_{b_2}$ , 由于  $I_{b_2 \cdot \min} = I_{c_2} / \beta_{\min} = 10 / 20 = 0.5(\text{mA})$ , 取  $I_{b_2}$  为临界值的 2.5 倍, 则

$$I_{b_2} = 2.5 I_{b_2 \cdot \min} = 2.5 \times 0.5 \approx 1.3(\text{mA})$$

所以可选  $I_{R_2} = 0.3\text{mA}$ , 取  $U_{b_2} = 2.5\text{V}$ ,

$R_2 = U_{b_2} / I_{R_2} = 2.5\text{V} / 0.3\text{mA} \approx 8.3\text{k}\Omega$ , 取  $10\text{k}\Omega$  (这时实际  $U_{b_2} = 3\text{V}$ )。

$$\begin{aligned} \text{而 } R_{c_1} + R_1 &= \frac{E_c - U_{b_2}}{I_{b_2} + I_{R_2}} = \frac{9\text{V} - 3\text{V}}{1.3\text{mA} + 0.3\text{mA}} \\ &= 3.75\text{k}\Omega \end{aligned}$$

所以  $R_1 = 3.75 - 0.91 = 2.84(\text{k}\Omega)$ , 取  $2.7\text{k}\Omega$

(7) 确定电阻  $R_3$ 、 $R_4$ : 为了使接通电位连续可调, 采取设置基极回路(即用分压电阻  $R_3$ 、 $R_4$ )的方法, 使  $V_1$  基极得到一个所需要的起始电压。现选  $R_3$  为  $2\text{k}\Omega$ ,  $R_4$  采用阻值为  $1\text{k}\Omega$  的电位器。

隔直电容  $C_1$  取  $1\mu\text{F}$ 。

(8) 选择加速电容  $C_2$ : 电阻  $R_1$  上并联加速电容  $C_2$  的目的是加速翻转过程, 改善输出波形边沿。对于开关管来说,  $C_2$  可取几十 pF, 此外选  $C_2$  为  $82\text{pF}$ 。

计算结果: 电源电压  $E_c = 9\text{V}$ ,  $V_1$ 、 $V_2$  采用 3DK2A,  $R_1 = 2.7\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 2\text{k}\Omega$ ,  $R_4 = 1\text{k}\Omega$  电位器,  $R_{c_1} = R_{c_2} = 910\Omega$ ,  $C_1 = 1\mu\text{F}$ ,  $C_2 = 82\text{pF}$ 。

### 三、双稳态触发器的设计

下面以计数用触发器为例介绍一般的设计原则。

**例 12-2** 试设计一个计数式双稳态触发器,要求输出脉冲幅度  $U_m \geq 9V$ ,最高工作频率  $f$  为  $100kHz$ ,在环境温度  $-20^\circ C \sim 50^\circ C$  的范围内正常工作。

**解**

(1) 电路选择:根据给定的技术指标,可选用最基本的计数式触发器,如图 12-44 所示。

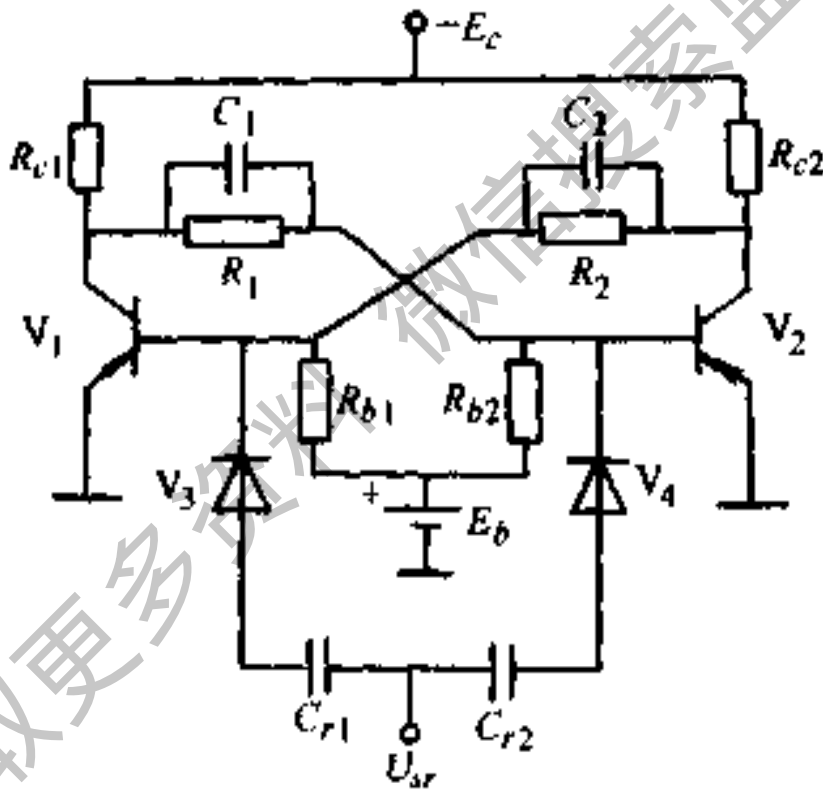


图 12-44 计数式双稳态触发器

(2) 电源电压的选择:

$$E_c \geq 1.2U_m = 1.2 \times 9 = 10.8V, \text{ 选用 } E_c = 12V$$

$$E_b \geq 0.2E_c = 0.2 \times 12 = 2.4V, \text{ 选用 } E_b = 4V$$

(3) 晶体管选择: 所选晶体管要满足共基极截止频率  $f_c > (2 \sim 4)f = (200 \sim 400)\text{kHz}$  的要求, 低频管已能满足此要求, 选用  $3A \times 4, BV_{ceo} \geq E_c, P_{CM} \geq 3P_M$  ( $P_M$  为负载要求的功率),  $\beta_{\min} = 20$ 。

(4) 确定集电极电阻  $R_{c1}, R_{c2}$ :

$$R_{c1} = R_{c2} \geq E_c / I_c = 12\text{V} / 8\text{mA} = 1.5\text{k}\Omega$$

$I_c$  为晶体管工作时的集电极饱和电流,  $I_c < I_{CM}$ , 这里取  $I_c = 8\text{mA}$ ;  $I_{CM}$  为晶体管集电极最大允许电流。

(5) 确定电阻  $R_{b1}, R_{b2}$ :

$$R_{b1} = R_{b2} \leq E_b / I_{cb0} = 4\text{V} / 43\mu\text{A} = 93\text{k}\Omega$$

$$\text{取 } R_{b1} = R_{b2} = 62\text{k}\Omega$$

$I_{cb0}$  为最高温度时最大反向集电极电流

$$I_{cb0} = I_{cb025} \times 2^{\frac{t-25}{12}} = 10 \times 2^{2.1} = 43(\mu\text{A})$$

(6) 确定电阻  $R_1, R_2$ :

$$R_1 = R_2 < \beta R_c$$

$$\frac{0.3}{\frac{E_b - 0.3}{R_b} - I_{cb0}} \leq R_1 \leq \frac{E_c - 0.3}{\frac{E_b + 0.3}{R_b} + \frac{I_c}{\beta}} - R_c$$

若为硅管, 上式中的 0.3 改为 0.7。

将具体数值代入上列公式, 得

$$R_1 < 20 \times 1.5 = 30(\text{k}\Omega)$$

$$\frac{0.3}{\frac{4 - 0.3}{62} - 0.043} \leq R_1 \leq \frac{12 - 0.3}{\frac{4 + 0.3}{62} + \frac{8}{20}} - 1.5$$

$$18.1\text{k}\Omega \leq R_1 \leq 23.4\text{k}\Omega$$

取  $R_1 = R_2 = 20\text{k}\Omega$

(7) 选择加速电容  $C$ : 加速电容一般可按下列取值范围选取: 低频小功率管, 取  $300 \sim 1000\text{pF}$ ; 高频小功率管, 取  $100 \sim 300\text{pF}$ ; 开关管, 取  $20 \sim 200\text{pF}$ 。

本例是低频小功率管, 取  $C = 520\text{pF}$ 。

(8) 选择触发电容  $C_T$ :

$$\begin{aligned} C_T &= (1.5 \sim 2)Q_g / U_{tr} = (1.5 \sim 2) \times 3000 / 5 \\ &= 900 \sim 1200(\text{pF}), \text{取 } 1000\text{pF} \end{aligned}$$

$Q_g$  为晶体管由饱和至截止所放出的电荷, 可用电荷参数测试仪测得, 此处  $Q_g$  为  $3000\mu\text{C}$ ;  $U_{tr}$  为触发脉冲电压幅度, 取  $U_{tr}$  为  $5\text{V}$ 。

#### 四、多谐振荡器的计算

1. 检查多谐振荡器是否满足条件的计算

简单的多谐振荡器电路如图 12-45 所示。

(1) 检查是否满足饱和条件: 多谐振荡器属无稳态电路, 它通过正反馈的连锁反应达到某一暂稳态状态。一管饱和导通的条件是:

$$I_b > I_{b\text{c}}$$

由于  $I_b = E_c / R_b$

$$I_{b\text{c}} = I_{c\text{c}} / \beta = E_c / (R_c \beta)$$

故导通条件可改写为

$$R_c \beta > R_b$$

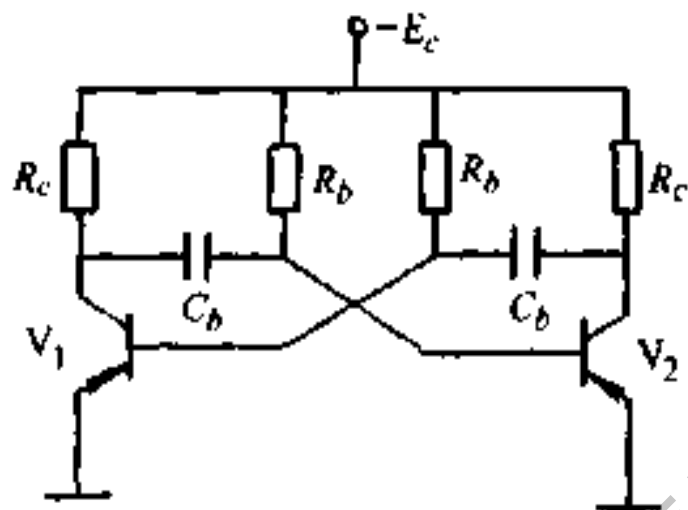


图 12-45 简单的多谐振荡器

若检查电路参数是否满足上式要求,可将一耦合电容断开,如图打“×”号处,如果此时两只管子的  $U_c \approx 0$ 、 $U_b \approx 0$ ,则说明满足  $R_c \beta > R_b$  的条件。

(2) 检查电路能否起振:将断开处连接,合上电源。若振荡器的两侧完全对称,则两管集电极电位应为  $U_{c1} = U_{c2} \approx E_c/2$ 。如果测得  $U_{c1} = U_{c2} \approx 0$ ,则说明两管均处于饱和状态,不起振。这时应更换  $\beta$  值较小的管子,或者增大电阻  $R_b$  试试。注意,  $R_b$  增大后,若要保持振荡频率不变,应调整耦合电容  $C_b$  的数值。

(3) 检查输出电压的大小和对称性是否满足要求:输出电压  $U_{c1}$  和  $U_{c2}$  不对称的原因是两侧回路参数不对称,应着重检查耦合电容是否严重漏电。

输出电压值不符合要求的原因有:

- ① 电源电压变化。
- ② 波形畸变。



当晶体管的  $\beta$  值太小时,集电极电压有可能出现畸变。

## 2. 基极定时自激多谐振荡器的设计例

**例 12-3** 试设计一个多谐振荡器。要求输出脉冲幅度  $U_m \geq 10V$ 、振荡频率  $f$  为  $70kHz$ , 输出脉冲的上升沿  $t_r \leq 0.5\mu s$ , 输出脉冲的下降沿  $t_f = 0.6\mu s$ 、在环境温度  $20^\circ C \sim 50^\circ C$  的范围内正常工作。

**解**

(1) 电路选择: 由于下降沿要求较高, 电路中加入“校正”二极管, 故选用图 12-46 电路。

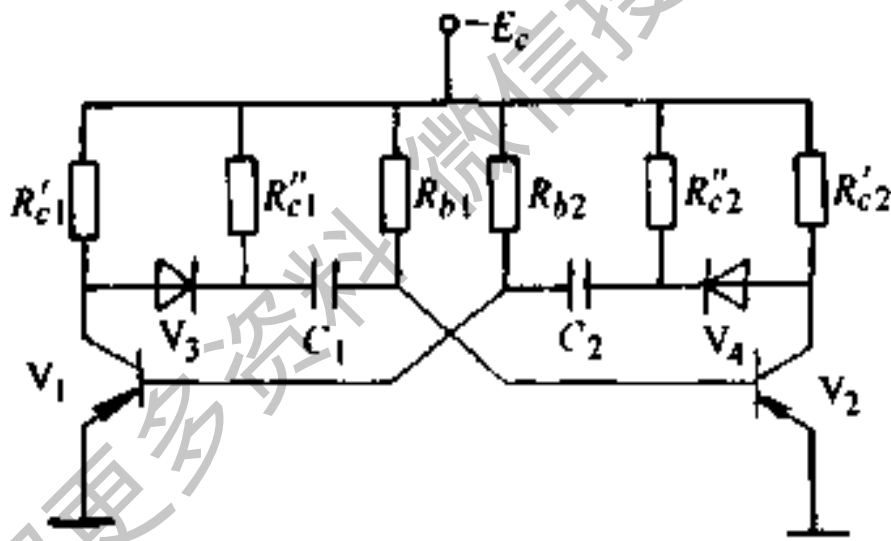


图 12-46 基极定时自激多谐振荡器

(2) 电源电压的选择: 选择方法与双稳态触发器相同, 选  $E_c = 12V$ 。

(3) 晶体管选择: 由于振荡频率不高, 可以选用低频管, 如  $3A \times 4$ 。

(4) 确定集电极电阻  $R'_{c1}$  ( $R'_{c2}$ ) 和  $R''_{c1}$  ( $R''_{c2}$ ): 选择方法与双稳态触发器相同, 取  $R_{c1} = R'_{c1} // R''_{c1} = 2\text{k}\Omega$ , 取  $R'_{c1} = R'_{c2} = R''_{c1} = R''_{c2} = 2\text{k}\Omega$ 。

(5) 确定电阻  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$ :

$$R_{b1} = R_{b2} = \beta_{\min} R_c = 20 \times 1 = 20(\text{k}\Omega)$$

(6) 选择耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$ :

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{1.4fR_{b1}} = \frac{1}{1.4 \times 70 \times 10^3 \times 20 \times 10^3} \\ = 511 \text{ (pF)}$$

(7) 确定振荡频率: 多谐振荡器的振荡频率可按下式计算:

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} \approx \frac{1}{0.7R_{b1}C_2 + 0.7R_{b2}C_1}$$

当  $R_{b1} = R_{b2}$ 、 $C_1 = C_2$  时

$$f = \frac{1}{1.4R_{b1}C_2}$$

(8) 检验耦合电容  $C$  是否满足不等式  $C > C_{\min}$ : 按下式求出电容的最小值:

$$C_{\min} = (1.5 \sim 2) Q_r / E_c = (1.5 \sim 2) \times 3000 / 12 \\ = 375 \sim 500 \text{ (pF)} < C = 511\text{pF} \text{ 满足要求。}$$

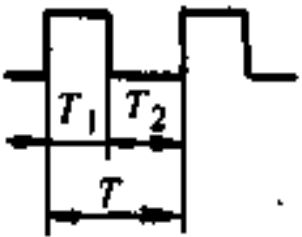
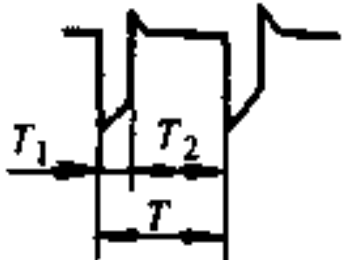


$Q_r$  为晶体管由饱和至截止所放出的电荷, 可用电荷参数测试仪测得, 此处  $Q_r$  为  $3000\mu\text{C}$ 。

(9) 检验上升沿  $t_r$ : 上升沿按下式计算:

表 12-36 常用非正弦波

类别	名称	电路图
方波振荡器	自激多谐振荡器	
脉冲波振荡器	变压器间歇振荡器	
	单结晶体管间歇振荡器	
锯齿波振荡器	利用多谐振荡器的锯齿波振荡器	

## 振荡器及频率计算公式

波 形	振荡频率
	$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2}$ $= \frac{1}{0.69 (C_1 R_{b2} + C_2 R_{b1})}$ <p>若 <math>R_{b1} = R_{b2} = R</math>, <math>C_1 = C_2 = C</math>, 则</p> $f = \frac{1}{1.38RC}$
	$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2}$ $= \frac{1}{\pi \sqrt{L_2 C_0} \cdot R_b C_b \ln \left( 1 + \frac{L_1}{L_2} \right)}$
	$f = \frac{1}{RC \ln \frac{1}{1-\eta}}$ <p><math>\eta</math> 为单结晶体管的分压比</p>
	$f = \frac{1}{2RC}$

类别	名称	电路图
锯齿波振荡器	利用间歇振荡器的锯齿波振荡器	

$$t_s = \frac{2C_{j1}R_{c1}}{1-n} + C_H R_{c1}$$

$C_{j1}$  为集电结势垒电容 (F);  $C_H$  为电路的分布电容 (F);  $n$  为常数, 对于突变结,  $n=0.5$ 。

对晶体管  $3A \times 4$ , 其  $C_{j1}=40\text{pF}$ , 设电路的  $C_H$  为  $50\text{pF}$ , 则

$$t_s = \frac{2 \times 40 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^3}{1-0.5} + 50 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^3$$

$$\approx 0.42 \times 10^{-6} \text{ (s)} = 0.42 \mu\text{s} < 0.5 \mu\text{s} \text{ 满足要求。}$$


(10) 检验下降沿  $t_x$ : 由于采用了“校正”二极管, 其下降沿与上升沿接近, 也能满足要求。

常用非正弦波振荡器电路及频率计算公式, 见表 12-36。

### 五、LC 振荡器的比较

LC 振荡器的比较, 见表 12-37。振荡器的计算步骤如下:

(续)

波 形	振荡频率
	$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2}$ $= \frac{1}{RC + \pi \sqrt{L_2 C_2}}$

(1) 选定振荡频率。如用于接近开关的  $LC$  振荡器、振频一般在几十 kHz 至几百 kHz。

(2) 由表 12-37 中的计算公式，求得  $LC$  乘积。

(3) 按以下原则选定  $C$  和  $L$  值：

1) 品质因数  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ， $L$  大， $Q$  高，但  $L$  过大，则易引起寄生振荡，反而不好。

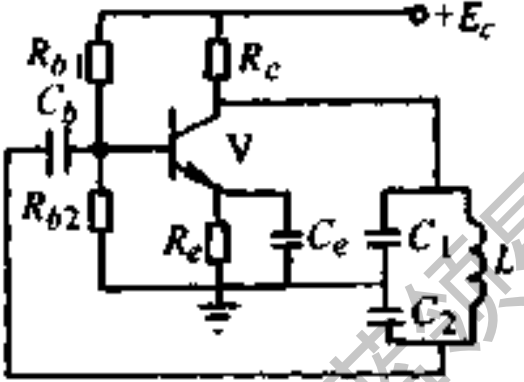
2)  $C$  一般取  $1000 \sim 4700 \text{pF}$ ；对于电容三点式振荡器，可取  $C_1/C_2 = 0.01 \sim 0.5$ ，线圈匝数一般取 100 匝左右；对于电感三点式振荡器， $L_2/L_1 = 1/7 \sim 1/3$ 。

## 六、晶体管直流变换器的设计

典型的单管直流变换器如图 12-47 所示。图中  $W_0$  是变压器初级绕组， $W_f$  是反馈绕组， $W_1$  是次级绕组。电阻  $R$  提供电路初始的直流注入，电容  $C$  起交流旁路作用。

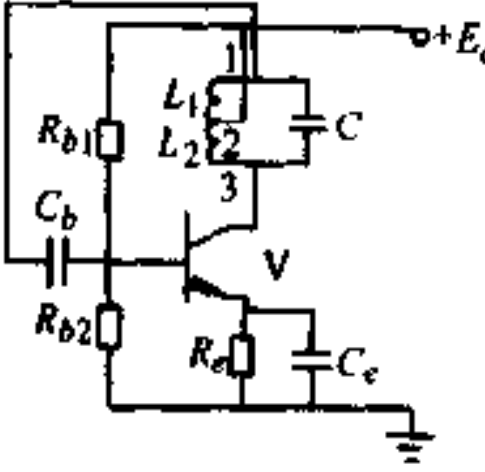
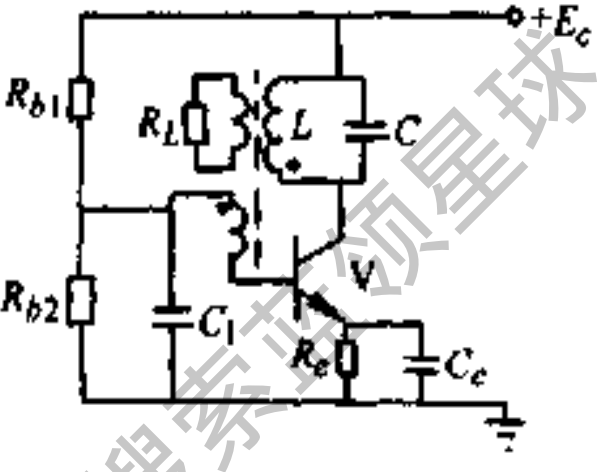
### 1. 确定振荡频率 $f$

表 12-37 LC 振

电路种类	电容三点式振荡器
电路形式	
振荡频率	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$
振荡条件	$\frac{C_2}{C_1} \leq \beta$
特 点	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 振荡波形好</li> <li>(2) 频率稳定性好</li> <li>(3) 振荡频率高</li> </ul>

注： $\beta$ ——电流放大倍数； $F$ ——反馈系数； $M$ ——互感。

### 振荡器的比较

电感三点式振荡器	变压器反馈式振荡器
	
$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_1 + L_2 + 2M) C}}$	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$
$\frac{L_1 + M}{L_2 + M} \leq \beta$ $\frac{W_1}{W_2} \leq \beta \text{ (磁芯线圈)}$	$\beta F \geq 1$
<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 容易起振</li> <li>(2) 高次谐波多</li> <li>(3) 振荡波形差</li> </ul>	<p>特性一般 (较少采用)</p>



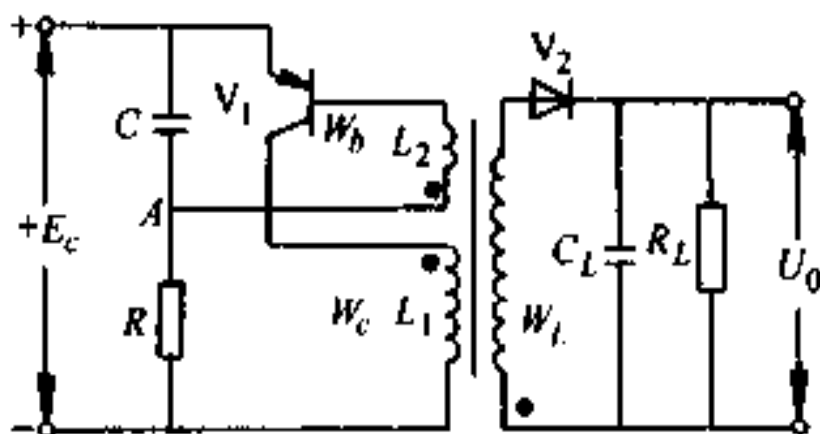


图 12-47 典型的单管直流变换器

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_1 + t_2}$$

$$t_1 = L_1 I_{cm} / E_c$$

$$t_2 = L_1 I_{cm} \frac{W_1}{W_c U_0}$$

式中  $f$ ——振荡频率 (Hz);

$T$ ——变换器的周期 (s);

$t_1$ 、 $t_2$ ——晶体管的导通时间和截止时间 (s);

$L_1$ ——变压器初级绕组电感 (H);

$I_{cm}$ ——集电极电流峰值 (A);

$U_0$ ——负载两端的电压 (V)。

在一般情况下，变换器的频率可达几 kHz 至几十 kHz。要减小变换器的体积，可将振荡频率提高，但提得太高，变压器损耗会增大。一般认为，当输出电压较高而输出功率不大时，可将振荡频率取得高些 (15~40kHz)；当输出功率较大，电压较低时，则可将振荡频率取得低些 (几 kHz)。

## 2. 晶体管选择

(1) 单管电路如图 12-48: 管子的  $P_{CM} \geq (3 \sim 5) P_M$ 。

(2) 推挽电路:  $P_{CM} > 0.5 P_M$ 。

式中  $P_M$ ——负载要求功率。

$$BV_{ceo} > 2E_c$$

$$f_T \geq 50f$$

式中  $f$ ——变换器的工作频率。

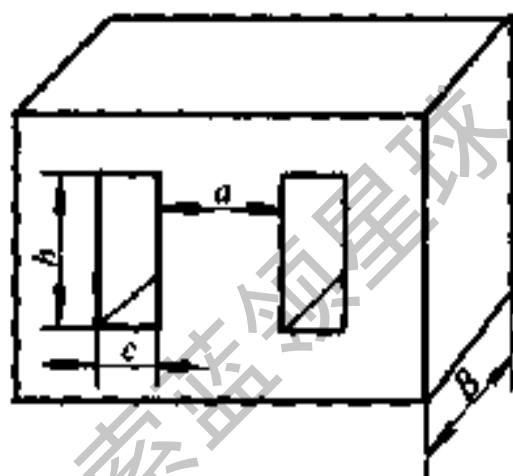


图 12-48 采用铁氧体的 E 形铁芯

所选取的管子应有尽可能小的饱和压降, 小的反向漏电流及较大的  $\beta$ 。

## 3. 确定振荡启动元件 $R$ 、 $C$

一般  $R$  可取几百  $\Omega$  到几  $k\Omega$ 。  $R$  取得太小, 电源功耗会增大, 电路工作效率会降低, 甚至会烧毁管子。

电容  $C$  一般可取  $0.1 \sim 1 \mu F$ , 具体数值可由实验决定, 以获电路的最高效率。

## 4. 滤波器的选择

(1) 整流电压低压时: 当整流电压小于  $1kV$  时, 可由以下经验公式确定滤波电容

$$C_L = (1 \sim 2) \times 10^6 \frac{I_0}{fU_0 S_0}$$

(2) 整流电压高压时:

$$C_L = (5 \sim 10) \times 10^6 \frac{I_0}{fU_0S_0}$$

式中  $C_L$ ——滤波电容电容量 ( $\mu\text{F}$ );

$I_0$ 、 $U_0$ ——输出电流 (A) 和电压 (V);

$S_0$ ——脉动振幅与整流电压  $U_0$  的百分比。

### 5. 变压器设计

(1) 变压器铁芯的选择: 对于  $f$  在 1kHz 以下的变压器, 可用硅钢片作铁芯, 其饱和磁通密度  $B_s$  为 1.00~2.00T; 对于  $f$  为几 kHz 时, 可用坡莫合金作铁芯, 其  $B_s$  为零点几 T; 对于更高频率的变压器时, 可用铁氧体磁芯, 其  $B_s$  为 0.10~0.20T。E 型磁芯如图 12-48 所示。

当变压器效率  $\eta$  为 0.75~0.9、导线电流密度  $j$  为 2.5~3A/mm<sup>2</sup> 时, 有

$$SQ = \frac{0.72 \times 10^2}{fB_s} P_1$$

式中  $S$ ——铁芯有效截面积 (cm<sup>2</sup>),  $S = aB$ ;

$Q$ ——窗口面积 (cm<sup>2</sup>),  $Q = hC$ ;

$B_s$ ——铁芯的饱和磁通密度 (T);

$P_1$ ——变压器的标称功率 (VA)。

变压器输出绕组上的负载为电阻或桥式整流 (或倍压整流器) 时, 有

$$P_1 \approx 1.3I_0U_2$$

如果输出绕组上的负载为全波整流时, 有

$$P_s \approx 2.1 I_0 U_2$$

式中  $I_0$ ——输出电流 (A);

$U_2$ ——输出绕组 (全波时为一半) 的电压有效值 (V)。

(2) 变压器各绕组匝数的确定及导线选择:

1) 变压器初级绕组匝数  $W_c$ :

$$W_c = \frac{U_c \times 10^4}{4fB_s S} \approx \frac{E_c \times 10^4}{4fB_s S}$$

式中  $U_c$ ——集电极线圈上的交流电压峰值 (V);

$E_c$ ——电源电压 (V);

其它符号同前。

上式对推挽电路较为合适, 单管电路也可参考。

2) 反馈绕组匝数  $W_b$ :

$$W_b = W_c U_b / U_c$$

式中  $U_b$ ——反馈电压峰值, 一般取  $U_b \approx (1/2 \sim 1/4) E_c$ 。

3) 初级绕组匝数  $W_1$ :

$$W_1 = W_c U_{om} / U_c$$

式中  $U_{om}$ ——次级绕组上峰值电压 (V)。

当考虑到绕组的直流电阻时, 绕组匝数应适当增加。

4) 导线直径  $d$  (mm) 的选择:

$$d = 1.13 \sqrt{I/j}$$

式中  $I$ ——变压器绕组的电流有效值 (A);

$j$ —电流密度 ( $A/mm^2$ )。

当绕组上的电压超过 1000V 时, 导线直径应不小于 0.06mm。导线可用油基漆包线, 在高压变压器的次级绕组中需采用高强度漆包线。

(3) 变压器绕组的绕法: 由于变换器的工作频率一般总在几 kHz 以上, 因此绕制应特别注意。常用的绕法有:

1) 双线平绕法如图 12-49; 采用推挽电路时, 初级绕组可采用图 12-49b 绕法, 而反馈绕组分绕在二端。

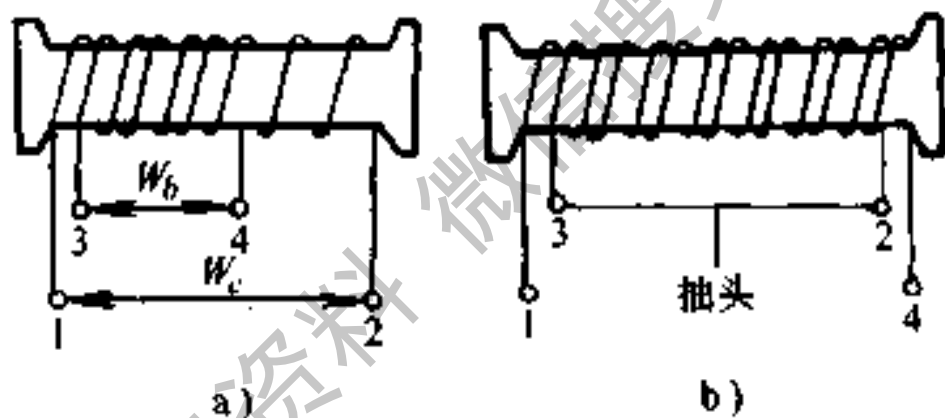


图 12-49 双线平绕法

2) 蜂房式绕法: 该绕法能使绕组层间的分布电容减小, 特别适用于高频高压电路中, 但变压器铁芯的内芯柱须选用圆形。

各绕组位置的安排一般是将次级绕组最内层的引出线接输出电压的低电位端, 最外层次级绕组引出处接输出电压的高电位端。

(4) 变压器的绝缘: 在高频高压中, 层间绝缘采用聚

脂塑料薄膜纸，它具有耐压高（0.1mm 厚耐压达万伏），吸湿性小的优点。绕组间绝缘，常用聚脂薄膜青壳纸，0.15~0.2mm 厚耐压为 1500~2000V，且强度高。

骨架及引出线的接线板可用厚度为 1.5mm 以上的环氧酚醛玻璃布板。

线圈绕制后，在安装铁芯时要注意铁芯距次级绕组最外层绝缘纸之间应留有 1mm 以上的空隙，以免两者之间打火。变压器须经过浸渍处理，常用 3404 环氧树脂漆。为了进一步提高防潮性能，有时还可采用硅橡胶或环氧树脂灌注。

## 第七节 晶体管延时电路与计算

### 一、三种基本晶体管延时电路延时时间计算

以下电路均为延时工作、瞬时复归电路。

1. 普通晶体管延时电路如图 12-50 所示。

(1) 工作原理：当输入  $U_{ic}$  为高电位时，二极管  $V_1$  截止，电源  $E_c$  经  $R_1$ 、 $R_2$  对电容  $C$  充电，电容两端的电压  $U_c$  由零逐渐上升，当  $U_c$  达到一定值  $U_{cp}$  时，晶体管  $V_3$  导通，输出  $U_{oc}$  为低电位。当  $U_{ic}$  为低电位时，电容  $C$  便分别经  $V_2$ 、 $V_1$  和  $R_3$ 、 $V_3$  的基极-发射极入地放电。放电时间极短，可以忽略不计。

(2) 延时时间：电容  $C$  两端的电压由零到达  $U_{cp}$  这段时间该电路的延时时间  $t_d$ （单位：s），可按下式计算：

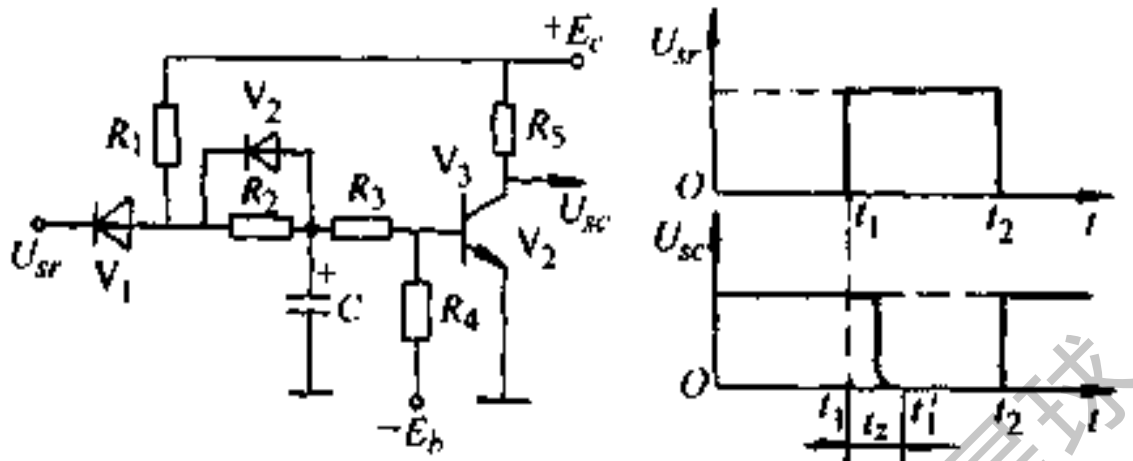


图 12-50 普通晶体管延时电路

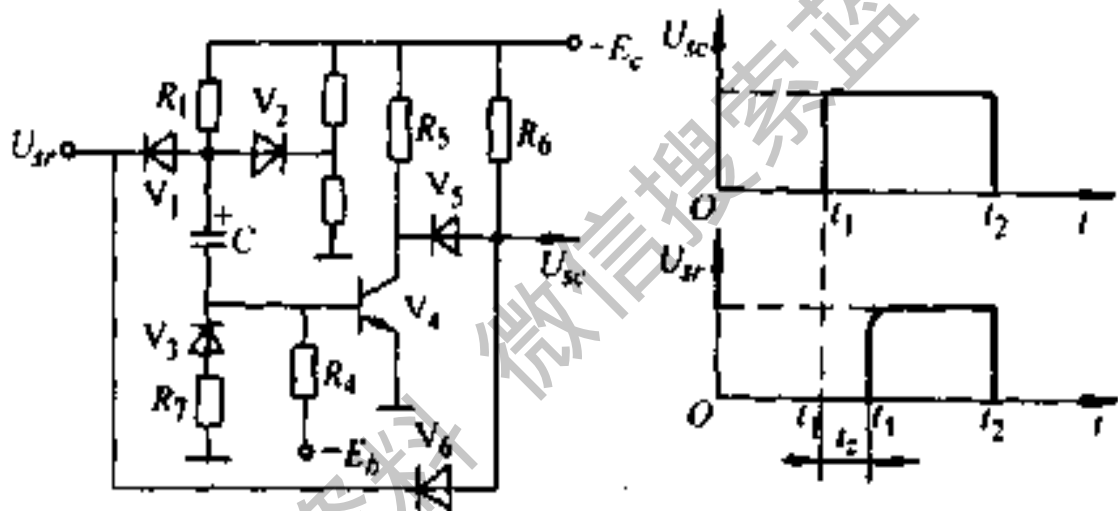


图 12-51 桥型延时电路

$$t_c = (R_1 + R_2)C \ln \frac{E_c}{E_c - U_{\phi}}$$

2. 桥式延时电路如图 12-51 所示。

(1) 工作原理：当  $U_{sr}$  为低电位时， $V_4$  导通，输出  $U_{sc}$  为低电位。当  $U_{sr}$  为高电位时，电源  $E_c$  经  $R_1$  和  $V_4$  的基极-发射极对电容  $C$  充电，充电电流使  $V_4$  导通，故  $V_5$  导通，输出仍为低电位。当  $C$  的两端电压逐渐升高，使  $M$  点电

位高于  $N$  点电位时,  $V_2$  导通, 电容器充电立即停止,  $V_1$  截止,  $V_5$  截止。输出  $U_o$  为高电位。当  $U_{sr}$  又变为低电位时,  $V_6$  立即使  $U_o$  瞬时变为低电位。

(2) 延时时间:  $V_4$  导通的时间即为该电路在输入高电位时的延时时间  $t_d$  (单位: s), 可按下式计算:

$$t_d = R_1 C \ln \frac{R_2 + R_3}{R_2}$$

3. 带射极耦合触发器的延时电路如图 12-52 所示。

(1) 工作原理: 当  $U_{sr}$  为高电位时, 其电位经  $V_1$ 、 $V_2$  对  $C$  充电。充电时间很短, 可忽略不计。因  $V_2$  箝位作用,  $N$  点电位约为  $+1V$ , 当  $C$  充电完毕,  $M$  点电位接近输入电位。同时, 输入高电位也经  $V_1$ 、 $R_1$ 、 $V_3$  基极-发射极和  $R_7$  入地, 使  $V_3$  基极电位高于射极耦合触发器的翻转电压  $V_f$ ,  $V_3$  导通,  $V_4$  截止, 输出高电位。

当  $U_{sr}$  变为低电位时, 电容  $C$  沿  $C+$ 、 $R_1$ 、 $V_3$  基极-发射极、 $R_7$ 、地、 $E_c$ 、 $R_3$  和  $C$ , 使  $V_3$  继续导通,  $V_4$  截止。当  $P$  点放电电压低于  $V_f$  时,  $V_3$  截止,  $V_4$  导通, 输出  $U_o$  为低电位。

(2) 延时时间: 当输入端变为低电位瞬时至射极耦合触发器翻回的时间, 就是该延时电路在输入变低电位时的延时时间  $t_d$  (单位: s), 可按下式计算:

$$t_d = (R_1 + R_3) C \ln \frac{2E_c}{E_c - V_f}$$



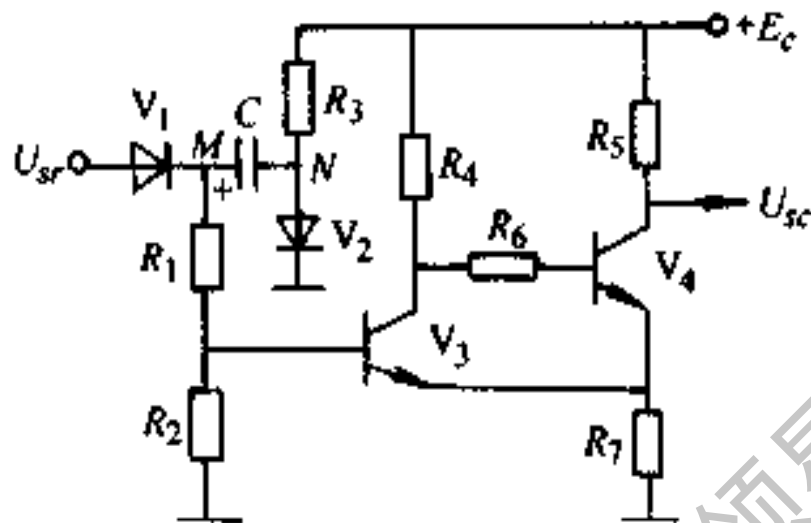


图 12-52 带射极耦合触发器延时电路

## 二、几种晶体管延时电路和记忆电路的延时时间的计算

延时电路可分为延时动作、瞬时复归电路和瞬时动作、延时复归电路两大类。

### 1. 第一类电路：延时动作、瞬时复归电路

(1) 导通管控制充电式时间电路如图 12-53 所示。

1) 工作原理：正常情况下输入  $U_{sr}$  为负电位， $V_1$  导

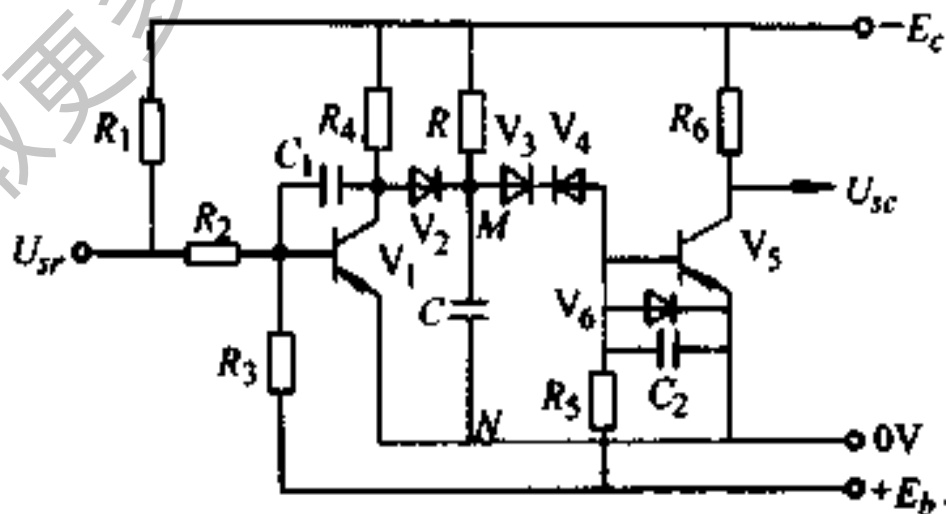


图 12-53 导通控制充电式时间电路

通、 $V_2$  导通， $U_{MN}$  小于稳压管  $V_3$  的击穿电压， $V_5$  截止，输出  $U_o$  为负电位。

当  $U_o$  变为零电位时， $V_1$  截止， $V_2$  反向不导通，电源  $-E_c$  经  $R$  对  $C$  充电， $U_{MN}$  逐渐变负，当达到一定值时， $V_3$ 、 $V_6$  和  $V_5$  的发射结回路击穿， $V_5$  导通，输出  $U_o$  变为零电位。从  $U_o$  变为零电位至  $U_o$  变为零电位的时间间隔  $t_d$  就是时间元件的延时时间。

2) 一些元件的作用： $V_3$  决定时间电路的温度稳定性。一般选用大于 5、6V 的稳压管，因为大于 5、6V 的稳压管的起始击穿特性较好； $V_4$  具有正向特性随温度升高而减小的特性，能对稳压管的击穿电压  $V_{bc}$  进行温度补偿； $V_6$  为温度补偿二极管，它有两个作用：

① 利用  $V_6$  的正向压降稳定  $V_5$  截止时的基极电位，减小它随温度的变差。

② 当  $V_5$  由截止变为导通时，利用  $V_6$  的反向电流随温度升高而增大来补偿  $V_5$  的  $\beta$  随温度升高而增大。

③ 延时时间。延时时间  $t_d$  (s) 按下式计算：

$$t_d = RC \ln \frac{E_c}{E_c - U_p} = RC \ln \frac{1}{1 - K}$$

式中  $R$ ——电阻 ( $\Omega$ )；

$C$ ——电容 (F)；

$E_c$ ——电源电压 (V)；

$U_p$ —— $V_3$ 、 $V_4$  及  $V_5$  发射结串联回路的击穿电压

(V);

$K$ ——系数,  $K=U_{\varphi}/E_c$ 。

当  $K=0.63$  时,  $t_c=RC$ , 时间特性较为稳定, 并能获得最长的整定时间  $t_{cmax}$ , 计算简单。

$$t_{cmax} = \frac{0.3\beta_2 R_5 R_6}{K \left( R_5 + \beta_2 \frac{E_b}{E_c} R_6 \right)}$$

在  $\beta_2$  较大时,

$$t_{cmax} \approx \frac{0.37E_c}{kE_b} R_5 C$$

式中  $k$ ——可靠系数, 一般取 2;

$\beta_2$ —— $V_5$  的电流放大倍数;

$E_b$ ——反偏压值 (V)。

④ 复归时间。当  $U_{\varphi}$  又变为负电位时, 输出信号即瞬时返回 (约 1~2ms), 但整个电路的复归时间  $t_f$  (单位: s) 为

$$t_f = R_b C \ln \frac{U_{\varphi} - (E_c - \beta_1 I_{b1} R_b)}{U_{MN} - (E_c - \beta_1 I_{b1} R_b)}$$

当  $K=0.63$  时

$$t_f = R_b C \ln \frac{\beta_1 I_{b1} R_b - 0.37E_c}{\beta_1 I_{b1} R_b - E_c}$$

式中  $R_b$ ——为  $R$  与  $R_1$  的并联电阻 ( $\Omega$ );

$I_{b1}$ —— $V_1$  的基极电流 (A);

$\beta_1$ —— $V_1$  的电流放大倍数;

$U_{MN}$  ——  $MN$  稳态电压的近似值 (V);

其它符号同前。

(2) 截止管控制充电式时间电路 (图 12-54);

1) 动作时间:

$$t_r = RC \ln \frac{E_c}{U_{MN}}$$

式中  $U_{MN}$  ——  $V_5$  由导通变为截止时  $MN$  间的电压 (V)。

当  $U_{MN}/E_c = 0.37$  时,  $t_r = RC$ , 时间特性较为稳定, 并能获得最长的整定时间  $t_{rmax}$ , 计算简单。

$$t_{rmax} = \frac{0.37 E_c \beta_2 R_6 R_7 C}{k (E_b \beta_2 R_7 + E_c R_6)}$$

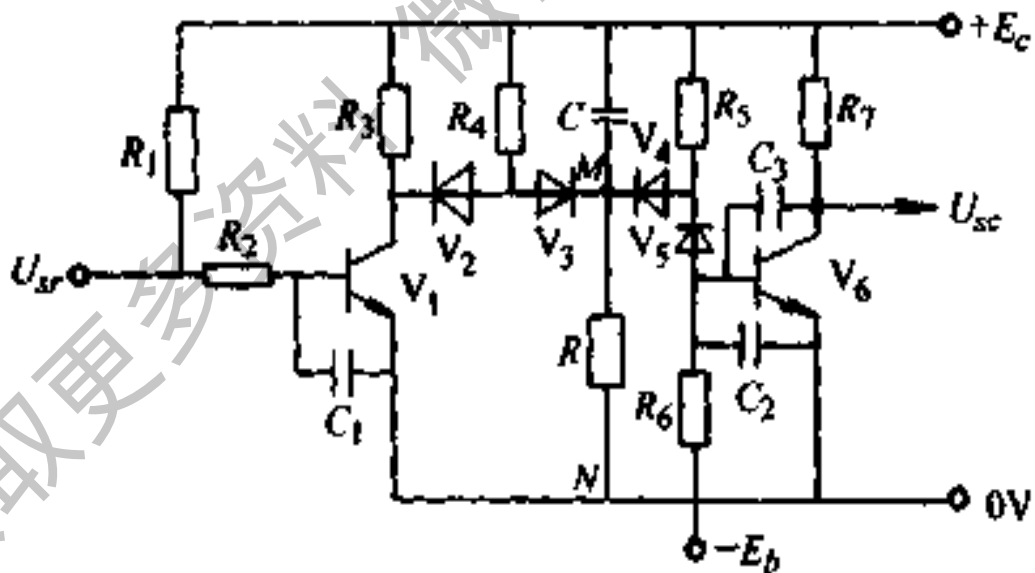


图 12-54 截止管控制式时间电路

在  $\beta_2$  较大时,

$$t_{rmax} = \frac{0.37}{k} \frac{E_c}{E_b} R_6 C$$

式中  $k$ ——可靠系数，一般取 2。

2) 复归时间：输出信号的复归是瞬时的，整个电路的复归时间  $t_f$  (单位：s) 为

$$t_f \approx 3R_1C$$

### (3) 放电式时间电路 (图 12-55)

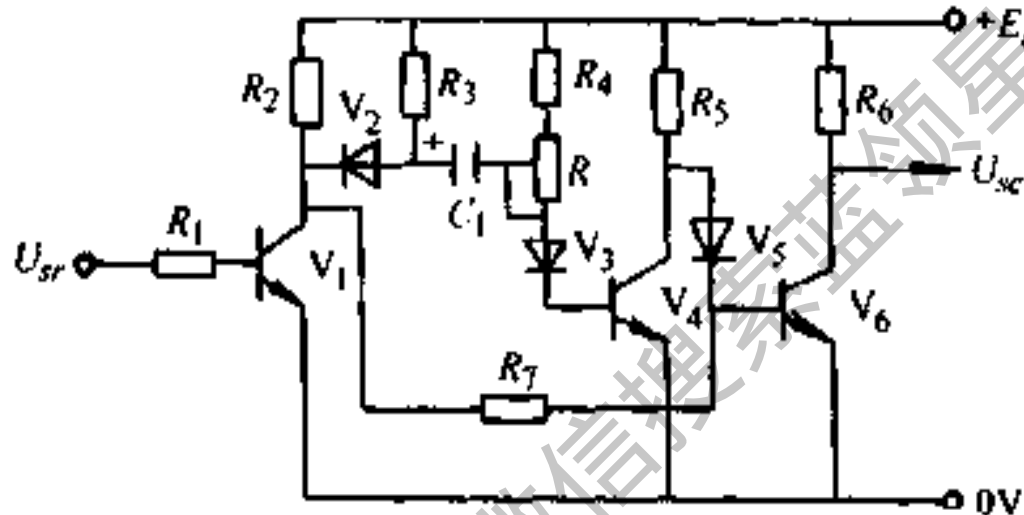


图 12-55 放电式时间电路

#### 1) 动作时间

$$t_d = 0.7(R_1 + R)C_1$$

2) 返回时间：输出信号的返回是瞬时的。电路的复归时间

$$t_f \approx 3R_3C_1$$

2. 第二类电路：瞬时动作、延时复归电路 (记忆电路)

第二类电路又可分为前记忆和后记忆两类。前记忆电路为输入信号一到即动作，并开始计算记忆时间；后记忆电路为输入信号一到即动作，信号消失时开始计算记

忆时间。

(1) 放电式前记忆电路如图 12-56 所示：

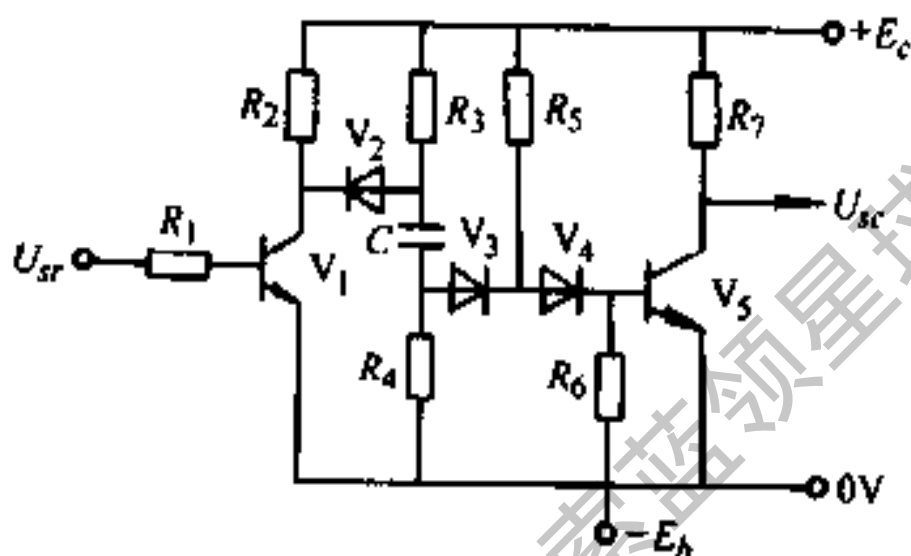


图 12-56 放电式前记忆电路

1) 前记忆时间：

$$t_s = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} C \ln \frac{(2R_4 + R_5)E_c - R_4 U_{jk}}{R_4 E_c + R_5 U_{jk}}$$

式中  $U_{jk}$  ——  $V_3$  的击穿电压 (V)。

2) 电路的返回时间：

$$t_f \approx 3(R_3 + R_4)C$$

(2) 充电式前记忆电路如图 12-57 所示：

① 前记忆时间：

$$t_s = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} C_1 \ln \frac{E_c}{E_c - U_{jk}}$$

式中  $U_{jk}$  ——  $V_3$  的击穿电压 (V)。

2) 电路的复归时间

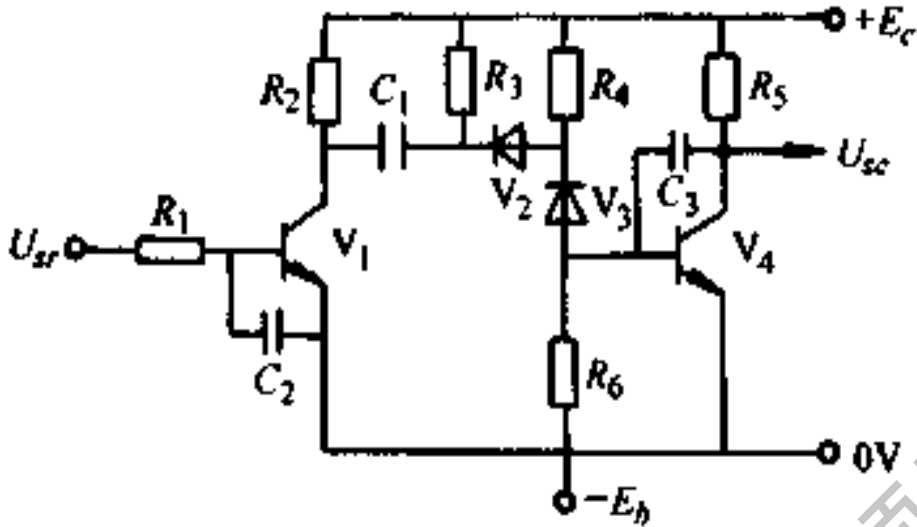


图 12-57 充电式前记忆电路

$$t_f \approx 3(R_2 + R_3)C_1$$

(3) 放电后记忆电路如图 12-58 所示：

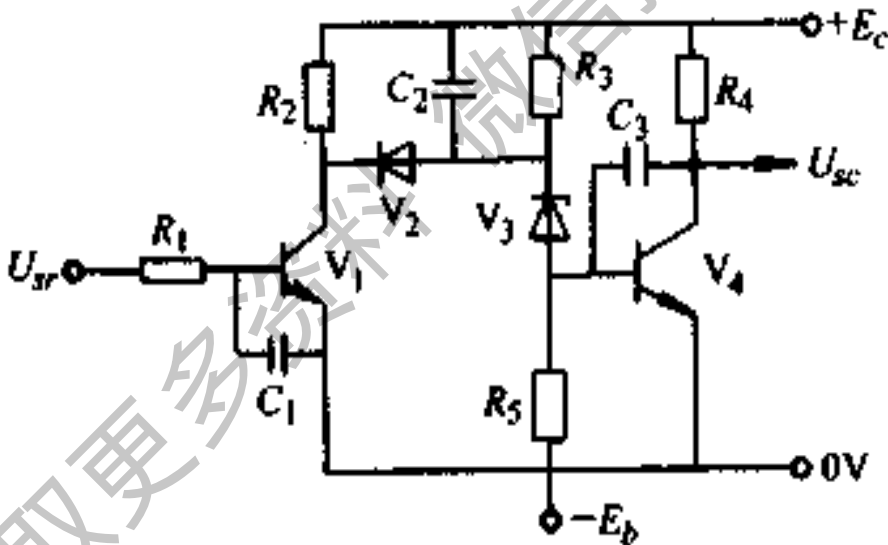


图 12-58 放电式后记忆电路

后记忆时间为

$$t_r = R_3 C_3 \ln \frac{E_c}{E_c - U_x}$$

(4) 充电式后记忆电路如图 12-59 所示。

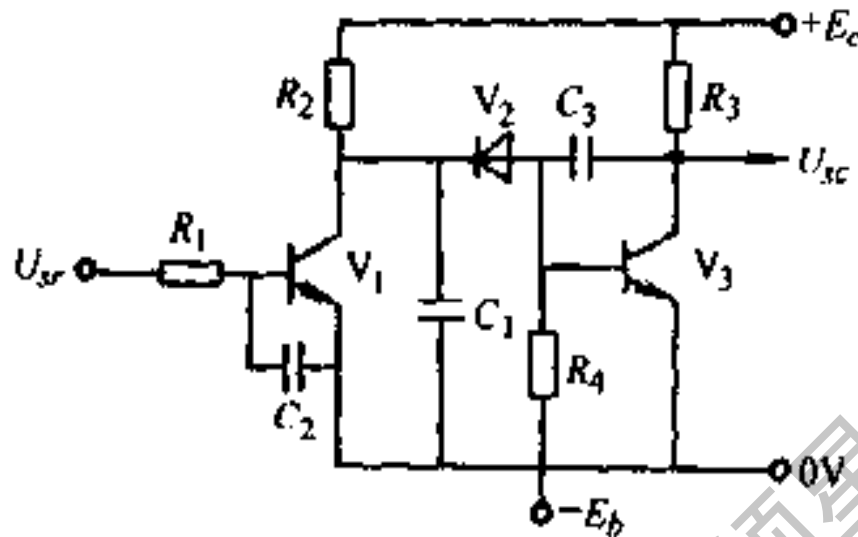


图 12-59 充电式后记忆电路

后记忆时间为

$$t_z = R_2 C_1 \ln \frac{E_c}{E_c - U_{sk}}$$

### 三、可控硅延时电路

1. 截止延时如图 12-60 至图 12-65 所示。

所谓截止延时，即可控硅导通后，经过一段延时后截止。

(1) 电路一：见图 12-60。

1) 工作原理：按动按钮  $S$ ，电源便经  $R_2$  向可控硅  $V_1$  提供一控制电流， $V_1$  导通，继电器  $K$  吸合并自保；同时常闭触点断开，电源经  $R_1$  向  $C$  充电，当  $C$  两端电压达到稳压管  $V_2$  的击穿电压时， $V_2$  饱和导通，于是  $V_1$  截止， $K$  释放，同时  $C$  通过  $R_3$  放电，电路复原。

2) 延时时间：10s 以内。改变  $R_1$ （或  $C$  或  $V_2$ ）可调



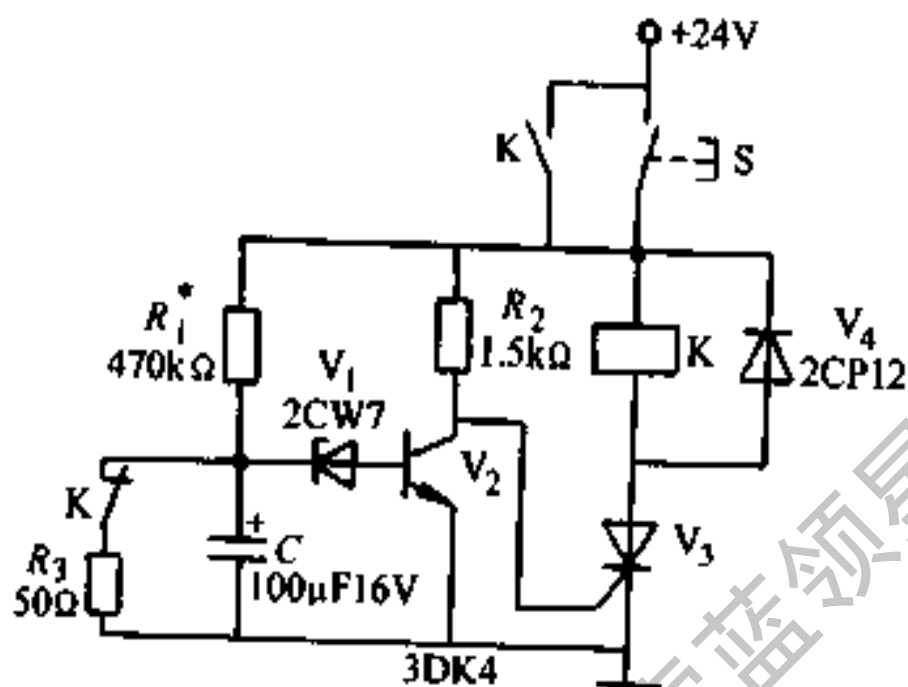


图 12-60 电路一

节延时量。

(2) 电路二，见图 12-61。

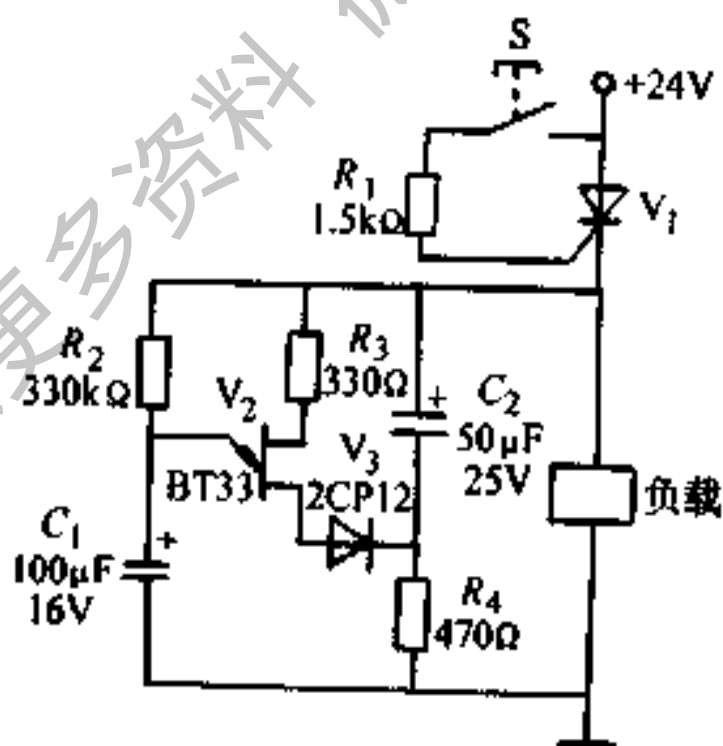


图 12-61 电路二

1) 工作原理：按动按钮  $S$ ， $V_1$  导通，接通负载，这时在负载上的电压降  $U_1$  约为 23V，于是  $U_1$  对  $C_2$  充电；同时  $U_1$  通过  $R_2$  对  $C_1$  充电，当  $C_1$  的端电压达到单结晶体管峰值电压  $V_p$ （约 16V）时， $C_1$  经  $e-b_1$  结、 $V_3$  及  $R_4$  迅速放电，从而使得负载上的电压升到大约  $(23+16)V$ ，于是  $V_1$  被反偏置而截止，电路复原。

2) 延时时间：数分钟。改变  $R_2$ （或  $C_1$ ）可调节延时量。

(3) 电路三：见图 12-62。

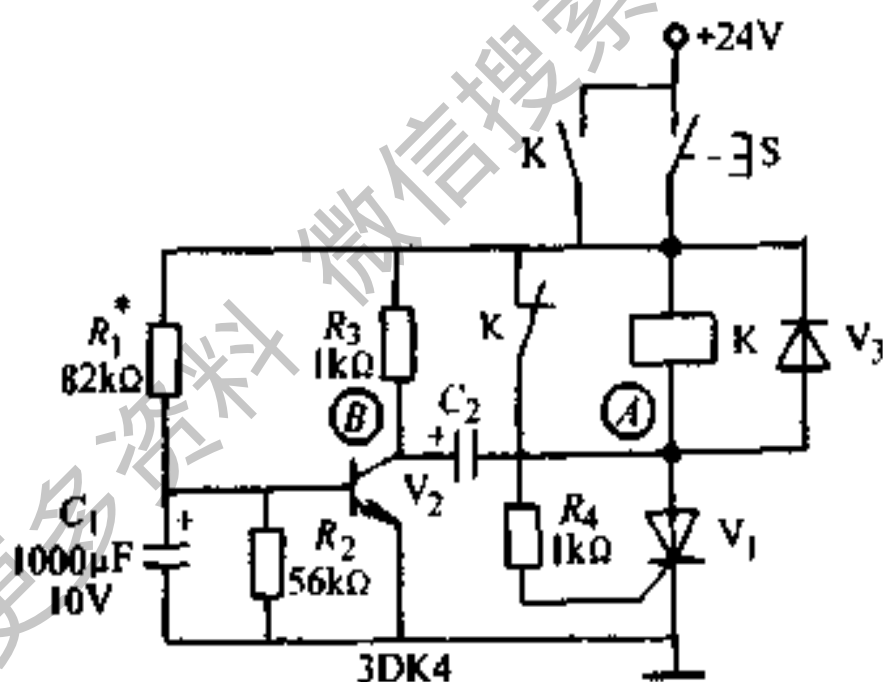


图 12-62 电路三

1) 工作原理：按动按钮  $S$ ，电源即通过  $R_1$  向  $V_1$  提供一控制极电流， $V_1$  导通，其常开触点闭合，并自保；常闭触点断开，切断控制极回路。同时电源通过  $R_3$  对  $C_2$  充电， $C_2$  两端很快充电到约 23V；电源也经  $R_1$  对  $C_1$  充电，

经过一段延时， $V_2$  饱和导通。③点约为地电位， $C_2$  上的电荷使④点电位相对于地为负值。 $C_2$  向负载  $K$  放电，使电流减小到零， $V_1$  截止， $K$  释放，电路复原。

2) 延时时间：数秒。改变  $R_1$  (或  $C_1$ ) 可调节延时长短。

(4) 电路四：见图 12-63。

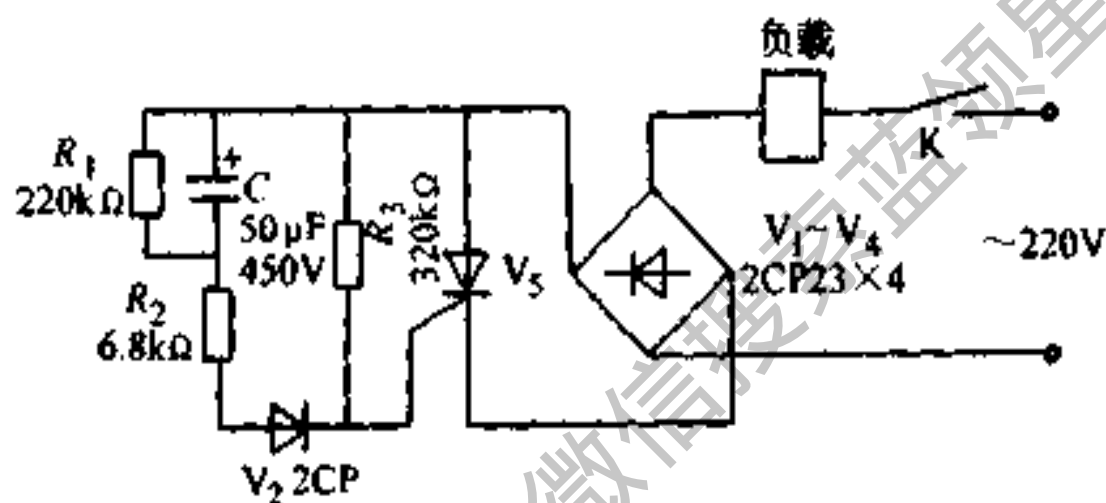


图 12-63 电路四

1) 工作原理：当  $K$  吸合后，交流电源便经负载在  $V_5$  阳极—阴极间建立一个经  $V_1 \sim V_4$  桥式整流后的脉动电压；同时该电压对  $C$  充电， $V_5$  控制极有一电流通过， $V_5$  立即导通，于是负载接通。随着  $C$  充电电流的减小，经过一段延时， $V_5$  不能再触发导通，负载电源被切断。这种电路属于自断电路如图 12-64、图 12-65 也属自断电路。

$R_1$  的作用是当  $K$  释放后，为  $C$  提供一放电回路，以便电路复原。

2) 延时时间:  $1 \sim 2\text{min}$ 。改变  $R_1 \sim R_3$  可调节延时量。

(5) 电路五: 见图 12-64。

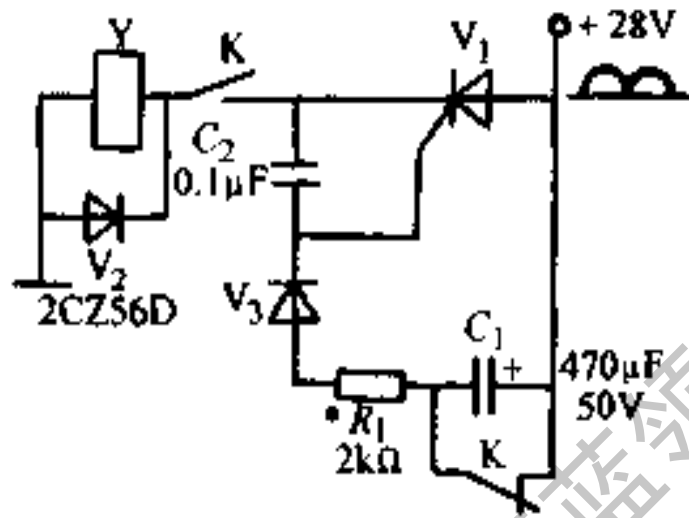


图 12-64 电路五

1) 工作原理: 当  $K$  吸合后, 电源便向  $C_1$  充电,  $V_1$  即触发导通, 直流电磁离合器  $Y$  吸合; 随着  $C_1$  充电电流的减小, 经过一段延时,  $V_1$  不能再触发导通, 切断  $Y$  电源,  $Y$  释放。  $C_2$  为防干扰电容。

2) 延时时间:  $10\text{s}$  以内。改变  $R_1$  (或  $C_1$ ) 可调节延时量。

(6) 电路六: 见图 12-65。

1) 工作原理: 按动按钮  $S$ , 电源正半周电压使向  $C_2$  充电,  $V_1$  即触发导通, 直流继电器  $K$  吸合并自保; 随着  $C_2$  充电电流的减小, 经过一段延时,  $V_1$  截止,  $K$  释放, 电路复原。  $C_2$  向  $R_2$  释放电荷。  $C_1$  有提高继电器  $K$  线圈两端的工作电压作用, 此处不能用二极管代替。

2) 延时时间:  $5\text{s}$  以内。改变  $R_1$  (或  $C_2$ ) 可调节延时

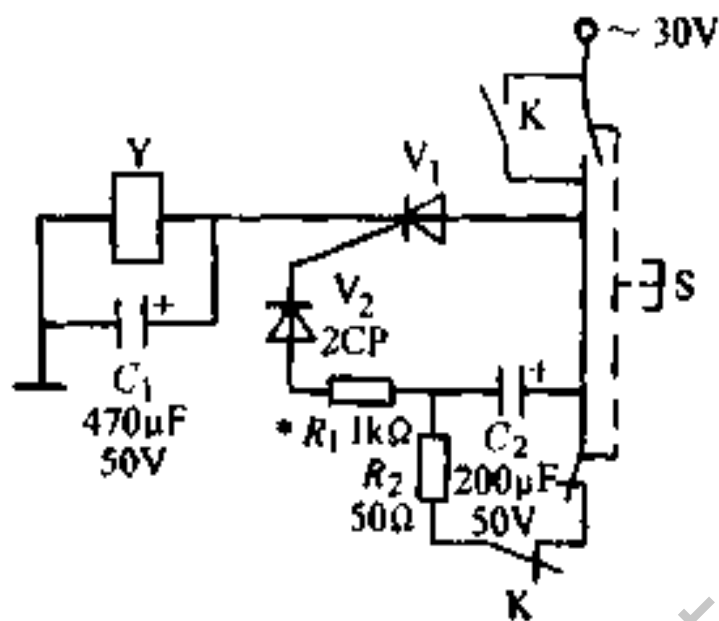


图 12-65 电路六

量。

2. 接通延时 如图 12-66 至图 12-73 所示：

所谓接通延时，即截止的可控硅经过一段延时后导通。

(1) 电路一：见图 12-66。

1) 工作原理：当接触器  $K_1$  吸合，电源便经  $R_1$  对  $C$  充电，当  $C$  两端的电压达到  $V_2$  的击穿电压时， $V_1$  触发导通， $K_2$  吸合，其常闭触点断开控制极回路。当  $K_1$  释放后，电路复原。

2) 延时时间：10s 以内。改变  $R_1$ （或  $C$  或  $V_2$ ）可调节延时量。

(2) 电路二：见图 12-67。

1) 工作原理：与图 12-66 电路类似，不同的是，当

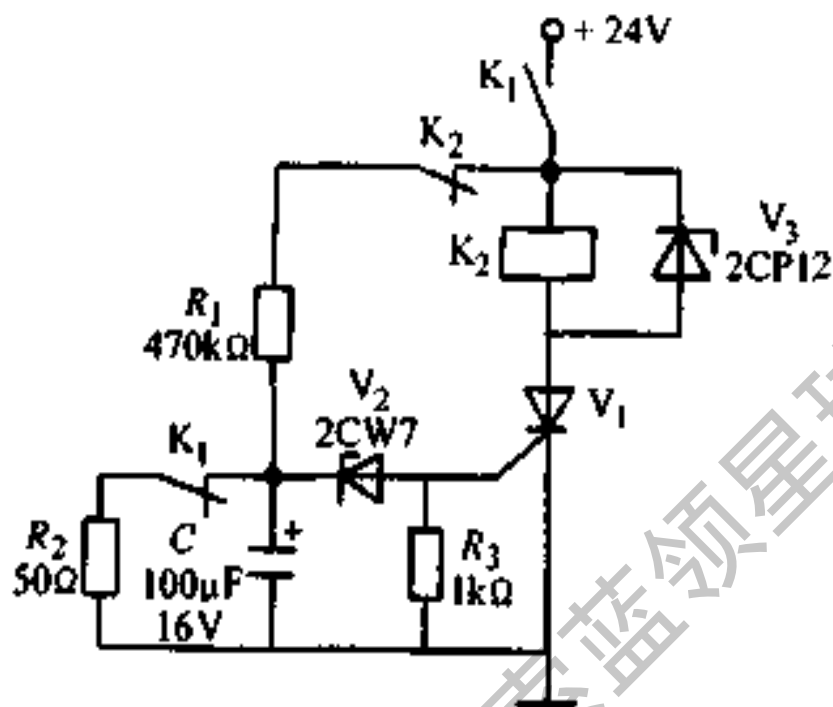


图 12-66 电路一

$V_1$  导通后,  $V_1$  阳极-阴极间的电压降约为 1V, 使控制极不再有触发电压。

2) 延时时间: 10s 以内。改变  $R_1$  (或  $C$  或  $V_2$ ) 可调节延时量。

(3) 电路三: 见图 12-68。

1) 工作原理: 当  $K_1$  吸合, 电源便经  $R_1$  对  $C_1$  充电, 当  $C_1$  两端电压达到单结晶体管的峰点电压  $V_p$  时,  $C_1$  经  $e-b_1$  结和

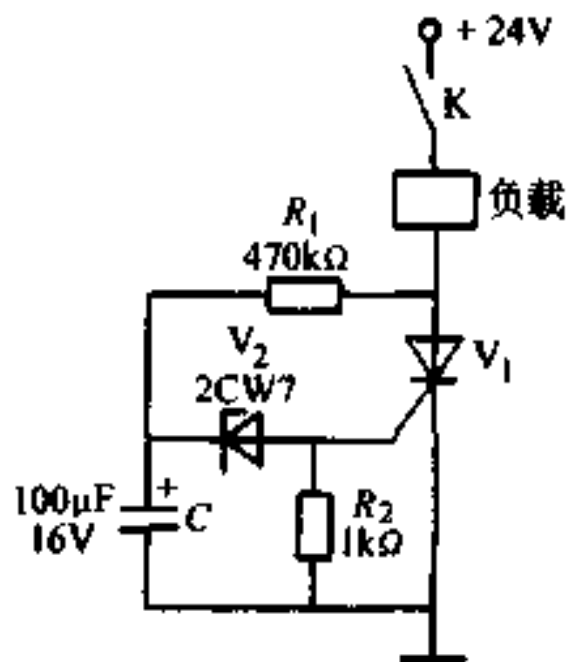


图 12-67 电路二

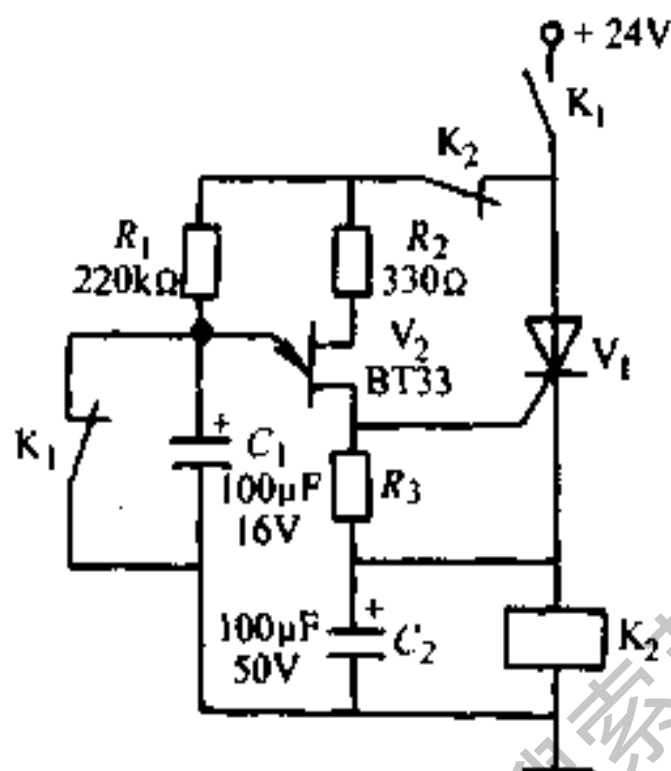


图 12-68 电路三

$R_3$  迅速放电，在  $R_3$  上产生一正脉冲输出，于是  $V_1$  导通， $K_2$  吸合，其常闭触点断开触发回路。 $K_1$  释放后电路复原。 $C_2$  在这里有当单晶体管被触发时电路负载的作用。

2) 延时时间：数分钟。改变  $R_1$  (或  $C_1$ ) 可调节延时长短。

(4) 电路四：见图 12-69。

1) 工作原理与图 12-68 同。

(5) 电路五：见图 12-70。

1) 工作原理：当  $K$  吸合，+220V 电源经负载、 $R_1$  降压、 $V_2$  稳压，稳压后的电源对  $C$  充电，经过一段延时，

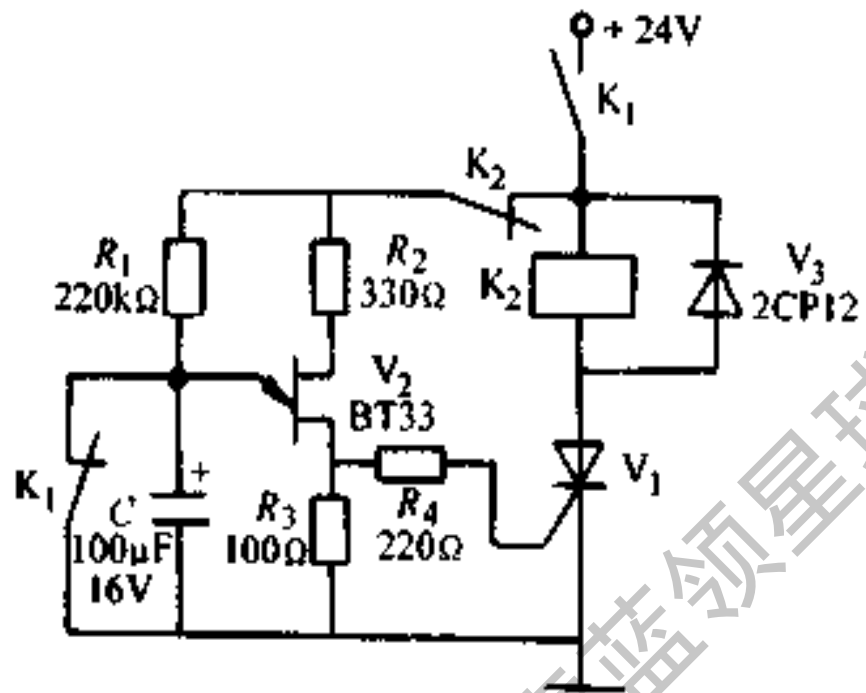


图 12-69 电路四

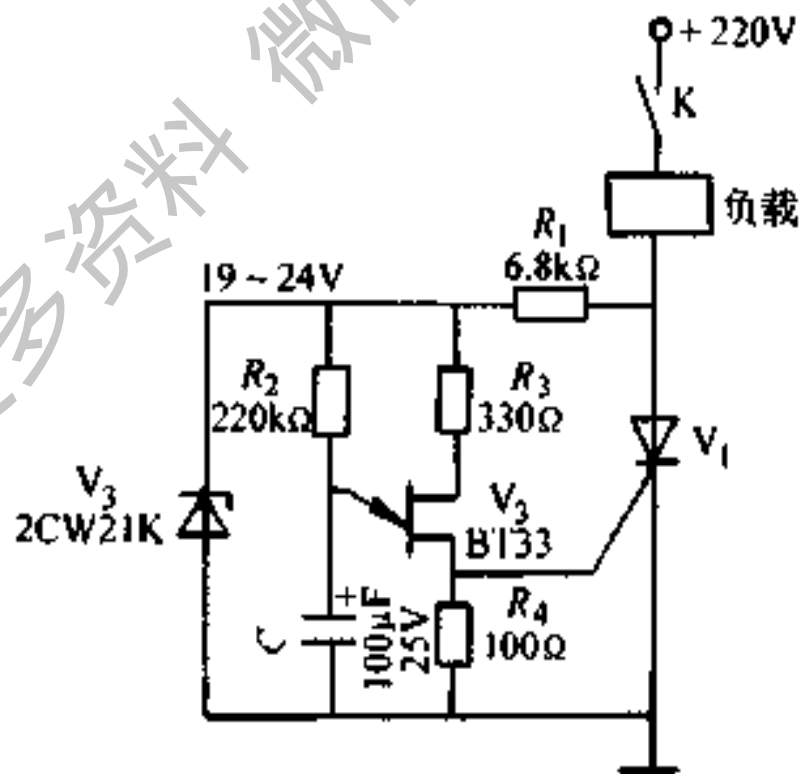


图 12-70 电路五



$V_3$  触发,  $V_1$  导通, 接通负载, 此时  $V_1$  阳极-阴极间电压降约 1V, 使控制极不再有触发电压,  $K$  释放后电路复原。

2) 延时时间: 数分钟。改变  $R_2$  (或  $C$ ) 可调节延时量。

(6) 电路六: 见 12-71。

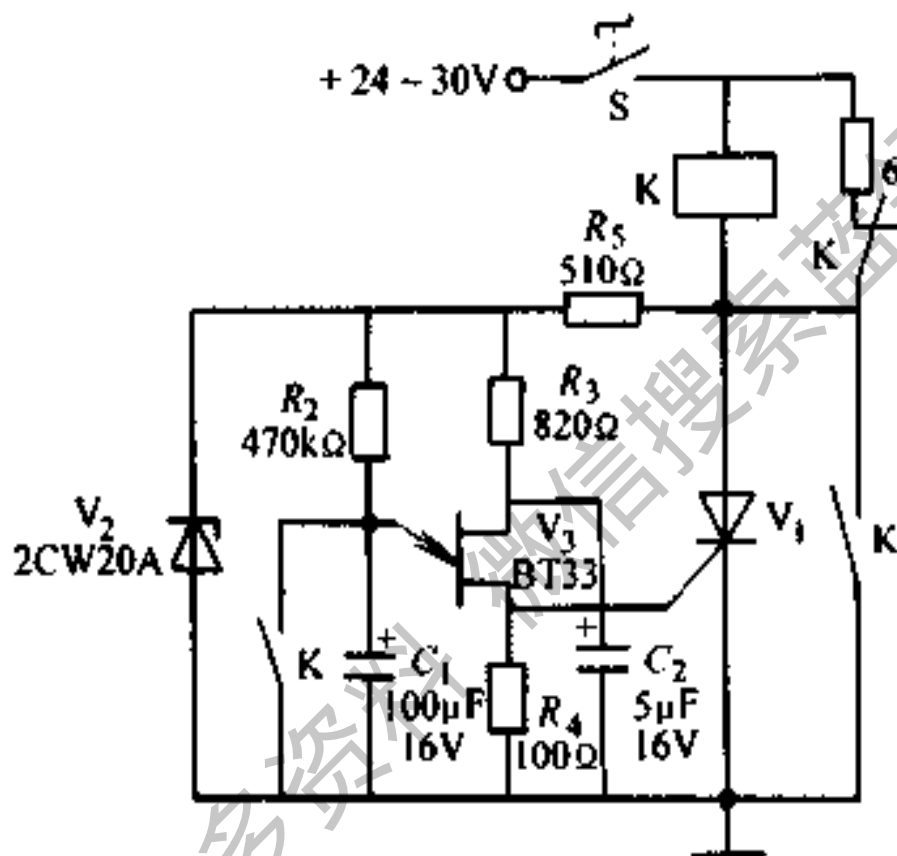


图 12-71 电路六

1) 工作原理: 合上开关  $S$ ,  $V_1$  通过  $K$  的线圈及  $R_1$  得到正向阳极电压, 同时电源又经  $R_2$  对  $C_1$  充电。经过一段延时,  $V_3$  触发,  $V_1$  导通,  $K$  得电吸合, 其常开触点闭合, 此时  $V_1$  的正向阳极电压为零, 便自动关断, 继电器  $K$  自保。另一常开触点闭合, 给  $C_1$  放电, 为下次延时作

好准备。电路其他部分失电。要使下次动作，必须打开  $S$ ，否则  $K$  一直吸合不放。 $C_2$  为稳定单结晶体管工作而加的， $S$  合上至  $K$  吸合止为延时时间。

2) 延时时间：1min。改变  $R_2$  (或  $C_1$ ) 可调节延时量。

(7) 电路七：见图 12-72。

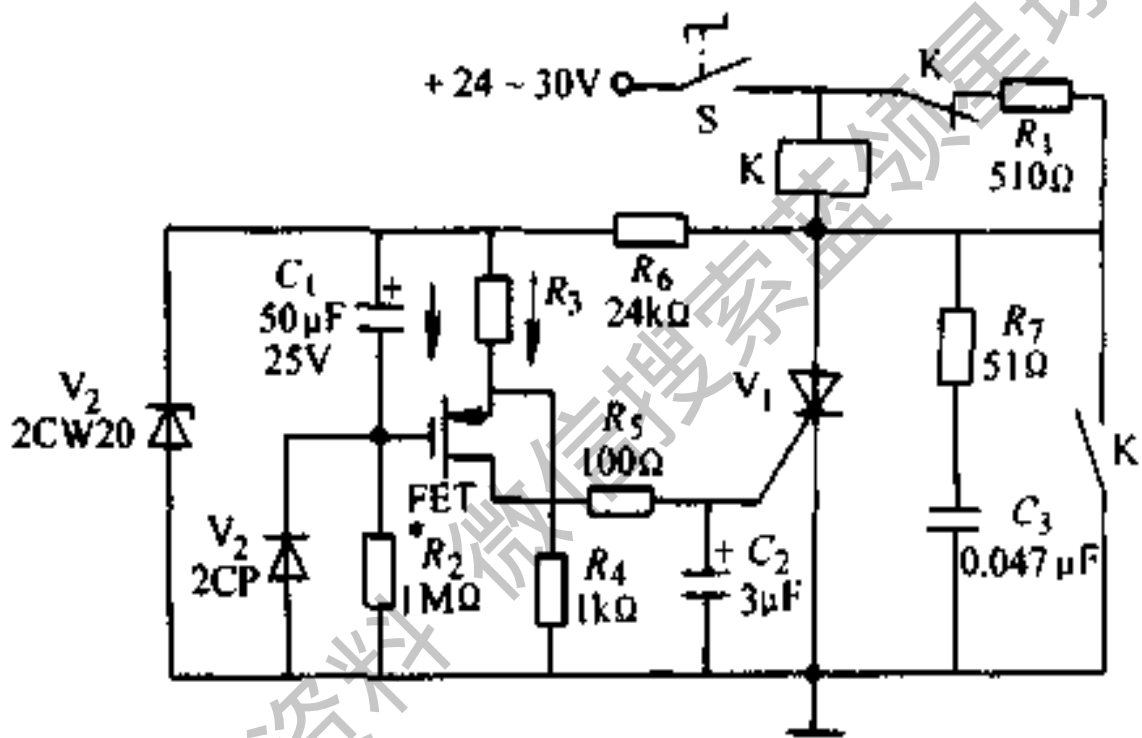


图 12-72 电路七

1) 工作原理：合上开关  $S$ ， $+24\sim 30V$  电源经  $K$ 、 $R_1$ 、 $R_6$  降压、 $V_2$  稳压，稳定后的直流电压经  $R_2$  向  $C_1$  充电。接通电源的瞬间， $U_{C1}=0$ ，场效应管 FET 的栅源电压  $U_{GS} = -U_{C1} + U_{R3} = U_{R3} \geq 0$ ，因此 FET 截止，漏极电流  $I_D=0$ ， $V_1$  截止， $K$  释放。当  $U_{GS} < 0$  时，FET 导通， $I_D$  便开始流通。 $U_{C1}$  充得愈高， $U_{GS}$  愈负， $I_D$  就愈大。当  $I_D$  大到  $V_1$  的触发电流时， $V_1$  导通， $K$  吸合。其常闭触点断

开，常开触点闭合， $K$  自保。 $V_3$  的作用是提供快速放电回路 ( $R_5$ 、 $R_4$ 、 $V_3$ 、 $C_1$ )； $R_7$ 、 $C_3$ 、 $C_2$  的作用是防止可控硅误导通。

2) 延时时间：数分钟。改变  $R_2$  (或  $C_2$ ) 等可调节延时量。

(8) 电路八：见图 12-73。

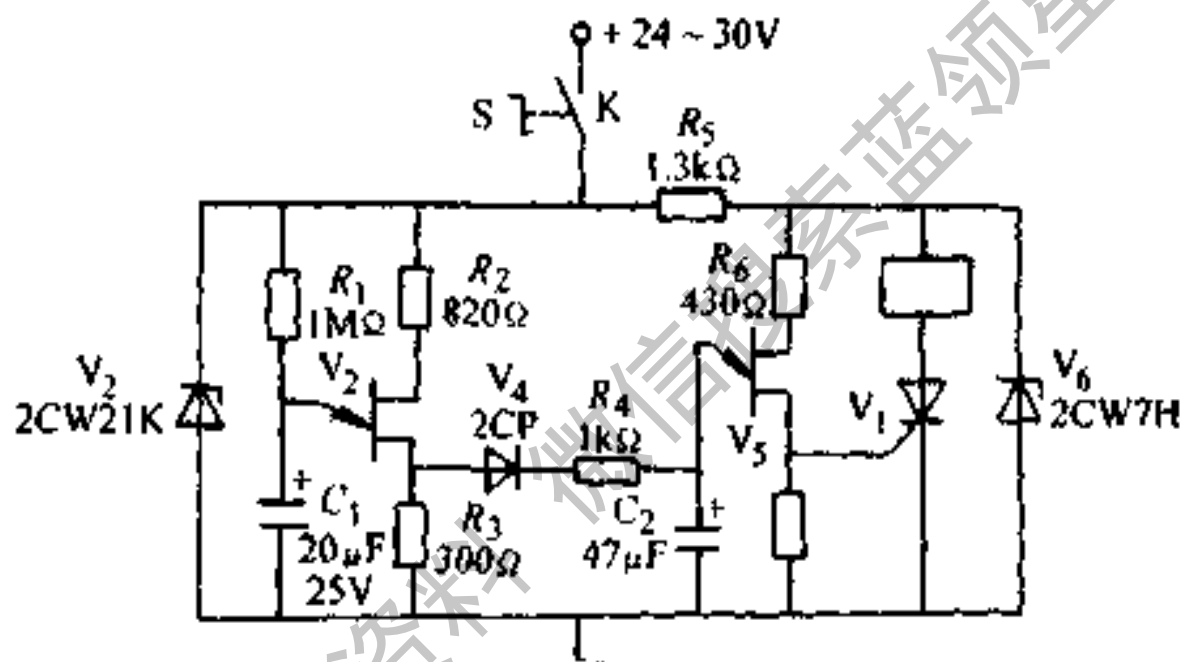


图 12-73 电路八

1) 工作原理：合上开关  $S$ ，由  $R_1$ 、 $C_1$  及  $V_2$  组成的弛张振荡器便工作，其脉冲重复周期达几十秒。这些电压脉冲经  $V_4$ 、 $R_3$  向  $C_2$  间断充电。当  $C_2$  上的电压逐渐升高达  $V_3$  的峰点电压  $V_p$  时， $V_3$  导通， $C_2$  通过  $V_3$  放电，触发  $V_5$ ， $K$  吸合。

2) 延时时间：十几至数十 min。改变  $R_1$  (或  $C_1$ ) 及  $C_2$  可调节延时量。

# 附录

## 附录一 磁性材料

附表 1-1 电磁纯铁的磁性能

磁性等级	代号	$H_c$ (A/m) 不大于	$\mu_0 \mu_m$ (mH/m) 不小于	在不同磁场强度下,磁感应强度 $B/T$ , 不小于					
				$B_{200}$	$B_{500}$	$B_{1000}$	$B_{2500}$	$B_{5000}$	$B_{10000}$
普级	DT3,	96	7.5	1.2	1.4	1.5	1.62	1.71	1.80
	DT5,DT6								
高级	DT3A,DT4A	72	8.8	1.2	1.4	1.5	1.62	1.71	1.80
	DT5A,DT6A								
特级	DT4E,DT6E	48	11.3						
超级	DT4C,DT6C	32	15.1						

附表 1-2 低碳钢的典型磁特性

饱和磁感应强度 $B_s$	矫顽力 $H_c$	起始磁导率 $\mu_r$ /(H/m)		不同厚度下铁损 $P_{15/50}$ /(W/kg)		电阻率 $/(10^{-8}\Omega \cdot m)$	密度 $/(g/cm^3)$
		$H=10e$	$H=100e$	0.35mm	0.64mm		
2.14	72	2000	1530	6.22	8.70	12.50	7.85

注:  $100e=79.58A/m$ 

$P_{15/50}$ 表示波形为正弦波、频率为 50Hz、磁感应强度峰值为 1.5T 时,每公斤材料的功率损耗。

附表 1-3 热轧电工钢片的厚度和磁性

牌 号	厚度 /mm	最小磁感应强度 $B$ /T					最大磁损 $P$ /(W/kg)				
		$B_6$	$B_{10}$	$B_{25}$	$B_{50}$	$B_{100}$	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{7.5/300}$	$P_{10/400}$	
DR530-50	0.50	—	—	1.51	1.61	1.74	2.20	5.30	—	—	
DR510-50	0.50	—	—	1.54	1.64	1.76	2.10	5.10	—	—	
DR490-50	0.50	—	—	1.56	1.66	1.77	2.00	4.90	—	—	

(续)

牌 号	厚度 /mm	最小磁感应强度 <sup>①</sup> /T						最大磁损 <sup>②</sup> /(W/kg)			
		$B_5$	$B_{10}$	$B_{25}$	$B_{50}$	$B_{100}$	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{7.5/100}$	$P_{10/100}$	
DR450-50	0.50	—	—	1.54	1.64	1.76	1.85	4.50	—	—	
DR420-50	0.50	—	—	1.54	1.64	1.76	1.80	4.20	—	—	
DR400-50	0.50	—	—	1.54	1.64	1.76	1.65	4.00	—	—	
DR440-50	0.50	—	—	1.46	1.57	1.71	2.00	4.40	—	—	
DR405-50	0.50	—	—	1.50	1.61	1.74	1.80	4.05	—	—	
DR360-50	0.50	—	—	1.45	1.56	1.68	1.60	3.60	—	—	
DR315-50	0.50	—	—	1.45	1.56	1.68	1.35	3.15	—	—	
DR290-50	0.50	—	—	1.44	1.55	1.67	1.20	2.90	—	—	
DR265-50	0.50	—	—	1.44	1.55	1.67	1.10	2.65	—	—	
DR360-35	0.35	—	—	1.46	1.57	1.71	1.60	3.60	—	—	
DR325-35	0.35	—	—	1.50	1.61	1.74	1.40	3.25	—	—	

(续)

牌号	厚度 /mm	最小磁感应强度 $B/T$						最大磁损 $P/(W/kg)$			
		$B_5$	$B_{10}$	$B_{25}$	$B_{50}$	$B_{100}$	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{7.5/100}$	$P_{10/400}$	
DR320-35	0.35	—	—	1.45	1.56	1.68	1.35	3.20	—	—	
DR280-35	0.35	—	—	1.45	1.56	1.68	1.15	2.80	—	—	
DR255-35	0.35	—	—	1.44	1.54	1.66	1.05	2.55	—	—	
DR225-35	0.35	—	—	1.44	1.54	1.66	0.90	2.25	—	—	
DR1750G-35	0.35	1.23	1.32	1.44	—	—	—	—	10.00	17.50	
DR1250G-20	0.20	1.21	1.30	1.42	—	—	—	—	7.20	12.50	
DR1100G-10	0.10	1.20	1.29	1.40	—	—	—	—	6.30	11.00	

①  $B_5$ 、 $B_{25}$ 表示当磁场强度分别为5A/cm和25A/cm时,基本磁化曲线上的磁感应强度,其他类推。

②  $P_{10/50}$ 和 $P_{7.5/100}$ 表示波形为正弦波形,频率分别为50Hz和400Hz时,磁感应强度峰值分别为1.0T和0.75T时,每公斤材料的功率损耗(W),其他类推。

附表 1-4 非取向冷轧电工钢片(带)的磁性能

公称厚度 /mm	牌 号	最大铁损 $P_{15/50}$ /(W/kg)	最小磁感 应强度 $B_{10}$ /T
0.35	DW270-35	2.70	1.58
	DW310-35	3.10	1.60
	DW360-35	5.60	1.61
	DW435-35	4.35	1.65
	DW500-35	5.00	1.65
	DW550-35	5.50	1.66
0.50	DW315-50	3.15	1.58
	DW360-50	3.60	1.60
	DW400-50	4.00	1.61
	DW465-50	4.65	1.65
	DW540-50	5.40	1.65
	DW620-50	6.20	1.66
	DW800-50	8.00	1.69
	DW1050-50	10.50	1.69
	DW1300-50	13.00	1.69
	DW1550-50	15.30	1.69



附表 1-5 单取向冷轧电工硅钢片(带)磁性能

公称厚度 /mm	牌 号	最大铁损 $P_{15/50}$ /(W/kg)	最小磁感 应强度 $B_{10}$ /T
0.30	DQ122G-30	1.22	1.88
	DQ133G-30	1.33	1.88
	DQ147-30	1.47	1.77
	DQ162-30	1.62	1.74
	DQ179-30	1.79	1.71
	DQ196-30	1.96	1.68
	DQ133-30	1.33	1.79
0.35	DQ126G-35	1.26	1.88
	DQ137G-35	1.37	1.88
	DQ151-35	1.51	1.77
	DQ166-35	1.66	1.74
	DQ183-35	1.83	1.71
	DQ200-35	2.00	1.68
	DQ230-35	2.30	1.63

附表 1-6 矩磁铁镍合金(坡莫合金)的磁性能

合金 牌号	厚度 /mm	在 0.8A/m 磁场强度 中的磁导 率 $\mu_{0.8}$ (mH/m)	最大磁 导率 $\mu_m$	方形 系数 $B_r/B_m$	矫顽力 (在饱和 磁感应 强度下) $H_r$ (A/m)	铁损		饱和磁 感应强
						$P_{1/100}$	$P_{1/3000}$	
1J34 I	0.005~0.01	不小于	62.5	0.90	20			1.5
	0.02~0.04		75	0.90	16			1.5
	0.05~0.09		112.5	0.90	9.6			1.5
	0.10~0.20		137.5	0.87	8			1.5
1J51 I	0.005		19	0.80	40			1.5
	0.01		25	0.83	32			1.5
	0.02~0.09		50	0.85	20			1.5
	0.10		50	0.85	18			1.5

(续)

合金	级	厚度 /mm	在 0.8A/m 磁场强度 中的磁导 率 $\mu_{0.8}$	最大磁 导率 $\mu_m$	方形 系数 $B_r/B_m$	矫顽力 (在饱和 磁感应 强度下) $H_c$ (A/m)	铁损		饱和磁 感应强
							$P_{1.400}$	$P_{1.3000}$	
1J51	I	0.01		44	0.87	20			1.5
		0.02~0.04		75	0.92	15	4.0		1.5
		0.05~0.09		75	0.92	15	4.5		1.5
	II	0.10		75	0.90	15	5.0		1.5
		0.01		75	0.91	15			1.52
		0.02~0.04		95	0.94	13			1.52
		0.05		100	0.94	11			1.52

(续)

合金	级	厚度 /mm	在 0.8A/m 磁场强度 中的磁导 率 $\mu_{0.8}$	最大磁 导率 $\mu_m$	方形 系数 $B_r/B_m$	矫顽力 (在饱和 磁感应 强度下) $H_c$	铁损		饱和磁 感应强
							$P_{1/100}$	$P_{1/3000}$	
牌号	别	/mm	(mH/m)			(A/m)			
1J52	I	0.02~0.04		62.5	0.90	20			1.40
		0.05~0.10		87.5	0.90	16			1.40
1J65	I	0.005~0.01		100	0.90	8.0			1.30
		0.02~0.04		125	0.90	6.4			1.30
		0.05~0.09		187.5	0.90	4.8			1.30
		0.10~0.50		275	0.90	3.2			1.30
1J67	I	0.02~0.04		200	0.90	6.4			1.20
		0.05~0.09		250	0.90	4.8			1.20
		0.10~0.19		312.5	0.90	4.0			1.20
		0.20~0.5		437.5	0.90	3.2			1.20

不小于

(续)

合金	级	厚度	在 0.8A/m 磁场强度 中的磁导 率 $\mu_{0.8}$	最大磁 导率 $\mu_m$	方形 系数 $B_r/B_m$	矫顽力 (在饱和 磁感应 强度下) $H_c$	铁损		饱和磁 感应强
							$P_{1/100}$	$P_{1/5000}$	
牌号	别	/mm	(mH/m)	不小于					
1J83	I	0.005~0.01	5	62.5	0.80	5.6			0.82
		0.02~0.04	8.8	125	0.80	4.0			0.82
		0.05~0.09	8.8	187.5	0.80	2.4			0.82
		0.1	20	225	0.80	1.6			0.82
1J403	I	0.02		500	0.97	3.2	3.0~4.5	35~65	1.38
		0.05		625	0.97	2.4	3.0~4.5	35~65	1.38
		0.02		375	0.95	4.0	3.0	35	1.38
		0.05		500	0.95	3.2	3.5	40	1.38
		0.10		625	0.95	2.4	2.5	30	1.38

附表 1-7 铝镍钴永磁合金的磁特性

牌 号	最大磁 能积 ( $BH$ ) <sub>max</sub> /(kJ /m <sup>3</sup> )	矫顽力		剩磁 $B_r$ /(mT)	相对回复 磁导率 $\mu_{rec}$
		$H_{cb}$ /(kA /m)	$H_{cJ}$ /(kA /m)		
最小值					典型值
LN10	9.6	40	43	600	4.5~5.5
LNG12	12	40	43	700	6.0~7.0
LNG37	37	48	49	1200	3.0~4.5
LNGT28	28	58	59	1000	3.5~5.5
LNGT38	38	110	112	800	1.5~2.5
LNGT36J	36	140	148	700	1.5~2.5
LNG44	44	52	53	1250	2.5~4.0
LNG52	52	56	57	1300	1.5~3.0
LNGT60	60	110	112	900	1.5~2.5
LNGT72	72	112	114	1050	1.5~2.5
FLN8	8	40	43	520	4.5~5.5
FLN12	12	40	43	700	6.0~7.0
FLNG28	28	46	47	1050	4.0~5.0
FLNG34	34	47	48	1120	3.0~4.5
FLNGT31	31	107	111	760	2.0~4.0
FLNGT33J	33	136	150	650	1.5~3.5

附表 1-8 铁氧体永磁材料的磁特性

牌 号	剩磁 $B_r$ /mT	矫顽力		最大磁能积 $(BH)_{max}$ /(kJ/m <sup>3</sup> )	相对回 复磁导率 $\mu_{rec}$	饱和 磁化场 /(kA/m)
		$H_{cB}$ /(kA/m)	$H_{cJ}$ /(kA/m)			
Y8T	200~230	125~160	210~280	6.5~9.5	1.0~1.3	800
Y17	280~340	135~190	140~195	14.5~18.5		
Y22H	310~360	220~250	280~320	20.0~24.0		
Y23	320~380	170~190	190~230	20.0~25.5		
Y25	350~400	135~160	140~200	24.0~26.5		
Y25H	350~380	215~255	230~290	24.0~28.0		
Y26H	360~390	220~250	225~255	23.0~28.0		
Y27H	370~400	205~240	220~255	25.0~29.0		
Y28-1	380~410	130~175	135~185	25.0~30.0		
Y28-2	370~400	175~210	180~220	26.0~30.0		
Y30H-1	390~410	240~270	240~285	28.0~32.5		
Y30H-2	395~415	275~300	310~335	28.5~32.0		
Y32	400~420	160~190	160~195	30.0~33.5		
Y33	410~430	220~250	225~255	31.5~35.0		

## 附录二 绝缘材料

附表 2-1 气体绝缘材料的性能

性能	单位	空气	氮	氩	二氧化碳	六氟化硫	二氟二氯甲烷
密度	kg/m <sup>3</sup>	1.18	1.2506	0.0825	6.10	5.575(-11C)	
沸点	C	-196	-195.8	-252.8	78.7	-63.8	-29.8
临界温度	C	-140.7	-147.1	-240	31	45.64	112.0
临界压力	MPa		3.394	1.297	7.397	3.768	4.120
比热容	J/(kg·K)	0.2399	0.2477	3.408	0.1988	0.142	0.145
热导率	W/(m·K)	0.0317	0.0258	0.0429	0.0168	0.00994	
相对介电常数		1.00059	1.00058	1.00027	1.00096	1.00191	1.0032(29C)
相对介电强度 <sup>①</sup>		1.00	1.05	0.6	0.95	2.40~2.63	2.53

① 在标准状态下,电极距离 1cm 均匀电场中进行比较。



附表 2-2 菜籽油和蓖麻油的性能

性能	菜籽油	蓖麻油
密度 20 C (kg/dm <sup>3</sup> )	0.915~0.940	0.950~0.970
闪点(C)开口杯法	320	—
相对介电系数 $\epsilon_r$	3.2	4.7
损耗因数(%) <sup>①</sup>	0.03	0.3
体电阻率( $\Omega \cdot m$ )	$5.4 \times 10^{12}$	$1.0 \times 10^{11}$
介电强度(kV/2.5mm)	57	50

① 损耗因数即损耗角正切值。

附表 2-3 矿物油的性能

性能	变压器油 (GB2536—90)			超高压变压器油 (SH0040—91)		电缆油 (Y Q152 —87) 35kV 级
	10号	25号	45号	25号	45号	
密度/(kg/m <sup>3</sup> )20 C	$\leq 895$					
闪点/C	$\geq 140$	$\geq 140$	$\geq 135$	$\geq 140$	$\geq 135$	$\geq 250$
凝点/C	—	—	$\leq -45 C$	—	$\leq -45 C$	$\leq -25$

(续)

性能	变压器油 (GB2536—90)			超高压变压器油 (SH0040—91)		电 缆 油 (JB Q152 —87)
	10号	25号	45号	25号	45号	
密度/(kg/m <sup>3</sup> )20 C	≤895			≤895		35kV级
介电强度/(kV/2.5mm)	≥35	≥35	≥35	≥40	≥40	≥35
损耗因数	≤0.005 (90 C)	≤0.005 (90 C)	≤0.005 (90 C)	≤0.002 (90 C)	≤0.002 (90 C)	≤0.06 (100 C)
体电阻率/Ω·m	—	—	—	—	—	—
性能	电容器油(GB4621—84)		断 路 器 油 (ZBE38002—88)			
	1号	2号				
密度/(kg/m <sup>3</sup> )20 C	≤900		≤895			
闪点/C	≥135	≥135	≥95			
凝点/C	—45	—45	—			
介电强度/(kV/2.5mm)	≥50	≥50	≥40			

(续)

性能	电容器油(GB4621—84)		断路器油 (ZBE38002—88)
	1号	2号	
密度/(kg/m <sup>3</sup> )20℃	≤900		≤895
损耗因数	≤0.004 (100℃)	≤0.005 (100℃)	≤0.003 (70℃)
体电阻率/Ω·m	≥1×10 <sup>12</sup> (20℃)	≥1×10 <sup>12</sup> (10℃)	—
	≥1×10 <sup>11</sup> (100℃)	≥1×10 <sup>11</sup> (20℃)	—

附表 2-4 电缆纸的性能

指标名称	单位	DLZ-U	DLZ-A	DLZ-B	GDL-045	GDL-075	GDL-175
密度	g/cm <sup>3</sup>	0.85±0.05	0.85±0.05	0.85±0.05	0.85±0.05	0.85±0.05	0.85±0.05
介电强度, 不小于 100℃介质损耗, 不大于 水抽出液电导率, 不大于	kV/mm	600V/层	950V/层	1200V/层	8.9	8.0	6.9
	%	0.7	—	—	0.22	0.22	0.22
厚度	ms/m	10	10	10	4	4	4
	μm	80±5.0	130±7.0	170±10.0	45±3.8	75±5.0	175±10.0

附表 2-5 电容器纸的性能

级 别	U						
	8	10	12	15	17	20	22
厚度/ $\mu\text{m}$							
密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.0	1.0	1.0	1.0	1.15	1.15	1.15
击穿电压/(V/层)	340	370	410	430	470	520	540
导电质点/(个/ $\text{m}^2$ )	50	40	25	15	10	5	3
介质损耗(%)	0.15(60 C)0.20(100 C)						
水分(%)	5~9						
灰分(%)不大于	0.35						
水抽出物电导率/( $\text{ms}/\text{m}$ )	3						
抗拉指数(纵向) /( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{g}$ )不小于	70						
级 别	A						
厚度/ $\mu\text{m}$	8	10	12	15	17	20	22
密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.0	1.0	1.0	1.0	1.15	1.15	1.15
击穿电压/(V/层)	320	350	390	410	450	500	520
导电质点/(个/ $\text{m}^2$ )	110	60	50	35	25	15	15
介质损耗(%)	0.17(60 C)0.22(100 C)						
水分(%)	5~9						
灰分(%)不大于	0.35						
水抽出物电导率/( $\text{ms}/\text{m}$ )	4						
抗拉指数(纵向) /( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{g}$ )不小于	55						

(续)

级 别	B						
	8	10	12	15	17	20	22
厚度/ $\mu\text{m}$	8	10	12	15	17	20	22
密度/ $(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.15	1.15	1.15
击穿电压/ $(\text{V}/\text{层})$	305	335	375	395	435	485	505
导电质点/ $(\text{个}/\text{m}^2)$	150	110	65	50	45	20	20
介质损耗 $(\%)$	0.17(60 C)0.22(100 C)						
水分 $(\%)$	5~9						
灰分 $(\%)$ 不大于	0.35						
水抽出物电导率/ $(\text{ms}/\text{m})$	4						
抗拉指数(纵向) / $(\text{N} \cdot \text{m}/\text{g})$ 不小于	55						

附表 2-6 薄片云母的性能

性 能	白云母	金云母	合成云母
密度/ $(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.7~2.9	2.7~2.85	2.78~2.85
介电强度/ $(\text{kV}/\text{mm})$	150~280	125~200	185~238
体积电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	$1 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{13-14}$	$3 \sim 6 \times 10^{15}$
表面电阻率/ $\Omega$	$1 \times 10^{13}$	$1 \times 10^{11-13}$	$1 \times 10^{13}$
相对介电系数	6~8	5~7	5.8~6.3
损耗角正切, 1MHz	$2 \sim 5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$3.4 \times 10^{-4}$

附表 2-7 絕緣漆布的性能

性 能	单 位	油性漆布		油性漆綢		油性玻 璃漆布 2412	沥青醇 酸漆布 2430
		2010	2012	2210	2212		
标称厚度	mm	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
体电阻率(室温)	$\Omega \cdot m$			$1.0 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{10}$
击穿电压	kV						
室温下		6.0	6.5	5.2~8.7	6.5~9.8	3.7~5.7	4.2~6.6
受潮 24h 后				2.8~4.7	3.0~5.5	1.9~3.4	2.6~3.8

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

附表 2-8 各种层压板的性能

性 能	酚醛层压纸板			
	PFCP1	PFCP2	PFCP3	PFCP4
垂直板层介电强度 /(kV/mm)	—	15.8	12.1	12.1
平行板层耐电压 /kV	—	40	20	25
平行板层间绝缘 电阻/MΩ	—	—	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^4$
相对介电系数 1MHz 浸水后	—	5.5 (50Hz 105 C)	—	5.5
损耗角正切 1MHz 浸水后	—	0.05 (50Hz 105 C)	—	0.05
用 途	机械 设备用	耐油 性好,高 压电器 设备用	电气 性能好, 电器设 备用	耐湿 性好,电 气、电子 设备用

(续)

性 能	酚醛层压布板			
	PFCC1	PFCC2	PFCC3	尼龙布板
垂直板层介电强度 /(kV/mm)	—	—	—	—
平行板层耐电压 /kV	—	15	—	60
平行板层间绝缘 电阻/MΩ	—	$1 \times 10^4$	—	$1 \times 10^4$
相对介电系数 1MHz 浸水后	—	—	—	3.9
损耗角正切 1MHz 浸水后	—	—	—	0.04
用 途	力学 性能好, 机械设 备用	电气 性能好, 电气机 械设备 用	力学 性能好, 机械设 备用	高湿 下绝缘 性能好, 电子高 频设备 用



(续)



性能	环氧层压板			有机硅玻璃层压板	
	EPGP1	EPGP1 EPGP3	3240	SIGC1	SIGC2
垂直板层介电强度 /(kV/mm)	15.8	14.2	22(20 C 油中)	—	—
平行板层耐电压 /kV	20	35	30	30	25
平行板层间绝缘 电阻/MΩ	$1 \times 10^4$	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^2$ (垂直)	$1 \times 10^2$	$1 \times 10^2$
相对介电系数 1MHz 浸水后	5.0	5.5	—	4.5	6.0
损耗角正切 1MHz 浸水后	0.05	0.04	0.05	0.02	0.07
用途	电子 设备用	电 气、电 子、机 械设备 用	力 学、电 气性能 好，电 气，机 械设备 用	电 气性 能好， 耐湿 性好， 电气、 电子 设备 用	高 温 电气性 能好、 电气、 机械 设备 用

## 附录三 电气图用图形符号


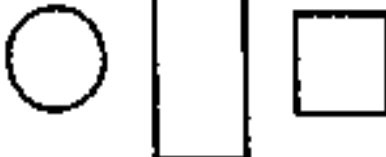
### 1. 符号要素、限定符号和常用其他图形符号

#### (1) 符号要素

附表 3-1 轮廓和外壳图形符号



图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	元件 装置 功能单元 注：填入或加上适当的符号或代号于轮廓符号内以表示元件装置或功能	=	
	外壳(容器) 管壳 注：① 可使用其他形状的轮廓 ② 若外壳具有特殊的防护性能可加注以引起注意 ③ 使用外壳符号是非强制性的，若不致引起混乱，外壳符号可省略。但若外壳与其他物件有连接，则必须示出外壳符号，必要时，外壳可以分开画出	=	

(续)

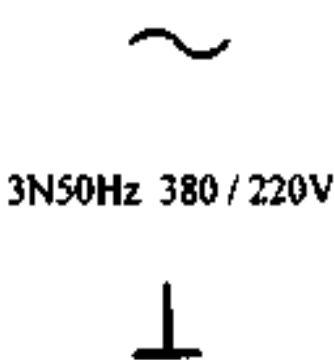





图形符号	说 明	IEC	种类代号
	边界线 用于表示在边界线内的元件、装置等是实际地、机械地或功能地相互联系在一起	=	
	屏蔽(护罩) 注:屏蔽可画成任何方便形状	=	

## (2) 限定符号

附表 3-2 电流和电压的种类图形符号

图形符号	说 明	IEC	种类代号
 2M—220/110V	直流 示例:直流,带中间线的三线制 220V(两根导线与中间线之间为 110V),2M 可用 2+M 代替	=	
	直流	=	







(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
 <p>3N50Hz 380/220V</p>	<p>交流</p> <p>频率或频率范围以及电压的数值应标注在符号的右边,系统类型应标注在符号的左边</p> <p>示例:交流,三相带中性线,50Hz,380V(中性线与相线之间为220V),3N可用3+N代替</p>	=	
	低频(二频或亚音频)	=	
	中频(音频)	=	
	高频(超音频、载频或射频)	=	
	交直流	=	
	<p>具有交流分量的整流电流</p> <p>注:当需要与稳定直流相区别时使用</p>	=	







(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
N	中性(中性线)	=	
M	中间线	=	
+	正极	=	
-	负极	=	




附表 3-3 信号波形图形符号

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	正脉冲	=	
	负脉冲	=	
	交流脉冲	=	
	正阶跃函数	=	
	负阶跃函数	=	
	锯齿波	=	



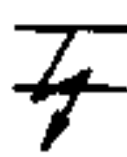
附表 3-4 接地、接机壳和等电位图形符号

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	接地一般符号	=	
	无噪声接地(抗干扰接 地)	=	
	保护接地	=	
<p>形式1 </p> <p>形式2 </p>	接机壳或接底板	=	
	等电位	=	

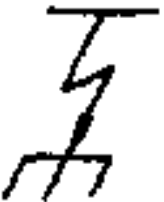

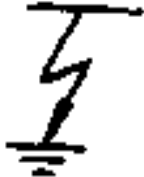


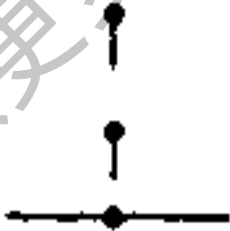

附表 3-5 理想电路元件图形符号

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	理想电流源	=	G
	理想电压源	=	G
	理想回转器	=	U, Z

附表 3-6 其他图形符号

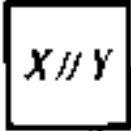


图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	故障(用以表示假定故障位置)	=	
	闪络、击穿	=	
	导线间绝缘击穿		

(续)

图形符号	说 明	IEC	类种 代号
形式 1  形式 2 	导线对机壳绝缘击穿		
	导线对地绝缘击穿		
	永久磁铁	=	
	动触点(如滑动触点)	=	
	测试点指示 示例: 导线上测试点	=	
	变换器一般符号 转换器一般符号	=	U, B




(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	电流隔离器	=	U
	模拟信号识别符 注: 仅在有必要区分模拟信号和数字信号时, 才用此符号	=	
	数字信号识别符 注: 仅在有必要区分模拟信号和数字信号时, 才用此符号	=	


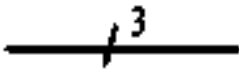






## 2. 导线和连接器件图形符号

### (1) 导线图形符号

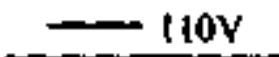

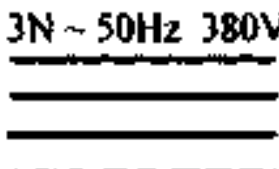
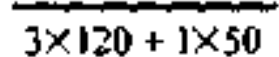





附表 3-7 导线图形符号

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	导线、导线组、电线、电缆、电路、传输通路(如微波技术)、线路、母线一般符号	=	W

(续)




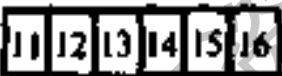
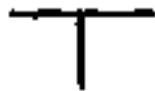

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	示例: 3 根导线	=	W
	示例: 3 根导线	=	W
	柔软导线	=	W
	屏蔽导线	=	W
	绞合导线(示出 2 股)	=	W
<p>形式 1</p>  <p>形式 2</p> 	电缆中的导线(示出 3 股)	=	W
	5 根导线中箭头所指的两根导线在一根电缆中	=	W

(续)



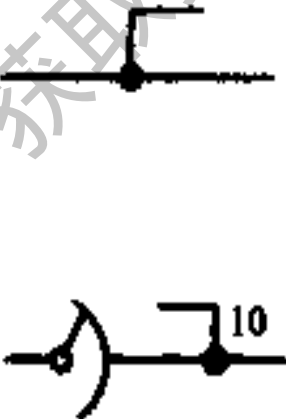
图形符号	说 明	IEC	种类 代号
 110V  $2 \times 120 \text{mm}^2 \text{Al}$   $3\text{N} \sim 50\text{Hz} \ 380\text{V}$  $3 \times 120 + 1 \times 50$	<p>示例: 直流电路, 110V, 2 根铝导线, 导线截面积均为 <math>120 \text{mm}^2</math></p> <p>示例: 三相交流电路, 50Hz, 380V, 3 根导线的截面积均为 <math>120 \text{mm}^2</math>, 中线截面积为 <math>50 \text{mm}^2</math></p>	=	
 	<p>同轴对、同轴电缆</p> <p>示例: 同轴对连接到端子</p>	=	W
	屏蔽同轴电缆对	=	W
	未连接的导线或电缆	=	W
	未连接的特殊绝缘的导线或电缆	=	W
—	—	—	—

## (2) 端子和导线的连接图形符号

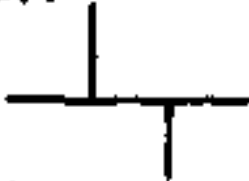


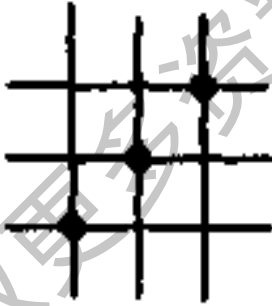
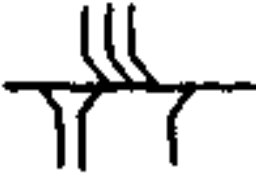
附表 3-8 端子和导线的连接图形符号

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	导线的连接点	=	
	端子 注：必要时圆圈可画成圆 黑点	=	X
	可拆卸的端子		
	端子板(示出带线端标 记的端子板)	=	X
形式 1   形式 2 	导线的连接	=	


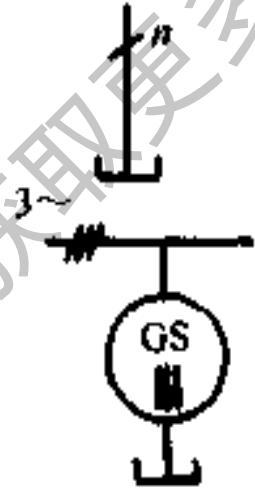
(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	<p>导线的不连接(跨越)</p> <p>示例:单线表示法</p> <p>示例:多线表示法</p>		
	<p>导线直接连接 导线接头</p>	=	S, X
	<p>一组相似连接件的公共 连接</p> <p>注:相似连接件的总数注 在公共连接符号附近</p> <p>示例:复接的单行程选 择器(表示 10 个触点)</p>	=	

(续)



图形符号	说 明	IEC	种类 代号
<p>形式 1</p>  <p>形式 2</p>   	<p>导线的多线连接</p> <p>示例: 导线的交叉连接 (点)单线表示法</p> <p>示例: 导线的交叉连接 (点)多线表示法</p>	=	
	<p>导线或电缆的分支和合 并</p>		

(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	<p>导线的交换(换位), 相序的变更或极性的反向 (示出用单线表示 <math>n</math> 根导线)</p> <p>示例: 示出相序的变更</p>	=	
	<p>多相系统的中性点(示出用单线表示)</p> <p>示例: 每相两端引出, 示出外部中性点的三相同步发电机</p>	=	










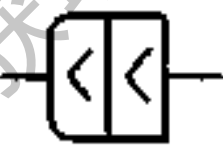

## (3) 连接器件图形符号

附表 3-9 连接器件图形符号








图形符号		说 明	IEC	种类 代号
优选形	其他形			
		插座(内孔的)或插座的一个极	=	X
		插头(凸头的)或插头的一个极	=	X
		插头和插座(凸头和内孔的)	=	X
		多极插头插座(示出带6个极): 多线表示  单线表示	=	X
		电话型断开或隔开的塞孔	=	X



(续)






图形符号		说 明	IEC	种类 代号
优选形	其他形			
形式1  形式2 	 	同轴的插头和插座	=	X
形式1  形式2 		同轴插接器		X
		对接连接器	=	X
		连接器的固定部分	=	X
		连接器的可动部分	=	X
		配套连接器(插头一边 固定而插座一边可动)	=	X
		电话型两极插塞和插孔	=	X

(续)

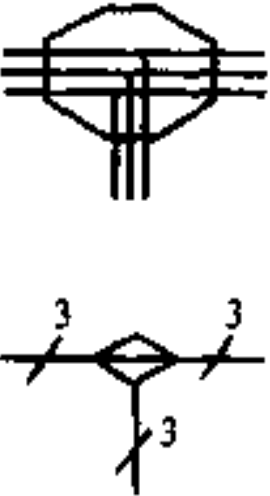


图形符号		说 明	IEC	种类 代号
优选形	其他形			
		电话型三极插塞和插孔 (示出断开的塞孔)	=	X
形式1 	形式2 	接通的连接片	=	X,S
		断开的连接片	=	X,S
		插头插座式连接器 插头-插头 插座-插座 带插座通路的插头-插 头	=	X
		滑动(滚动)连接器		

## (4) 电缆附件图形符号

附表 3-10 电缆附件图形符号

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
 	<p>电缆密封终端头(示出一根三芯电缆)</p> <p>多线表示</p> <p>单线表示</p>	=	X
	不需要示出电缆芯数的 电缆终端头		
 	<p>电缆直通接线盒(示出带 3 根导线):</p> <p>多线表示</p> <p>单线表示</p>	=	X




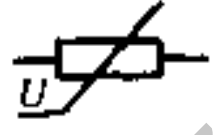




(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	<p>电缆接线盒、电缆分线盒(示出带3根导线T形连接);</p> <p>多线表示</p> <p>单线表示</p>	=	X
	<p>电缆气闭套管(梯形长边为高压边)</p>	=	X
	<p>电缆密封终端头(示出3根单芯电缆)</p>	=	X
—	—	—	—








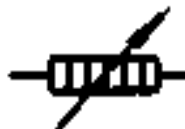

## 3. 无源器件图形符号

## (1) 电阻器、电容器和电感器图形符号




附表 3-11 电阻器

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
优选形  其他形 	电阻器一般符号	=	R
	可变电阻器	=	R
	压敏电阻器(U 可以代 替 V)	=	R
	热敏电阻(Q 可用 $r^{\circ}$ 代 替)		R
	0.125W 电阻器		R
	0.25W 电阻器		R
	0.5W 电阻器		R



(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	1W 电阻器 注:大于 1W 电阻器都用阿 拉伯数字表示		R
	熔断电阻器		R
	滑线式变电阻器	=	R
	带滑动触点和断开位置 的电阻器	=	R
	两个固定抽头的电阻器	=	R
	两个固定抽头的可变电 阻器		
	分路器	=	R
	碳堆电阻器	=	R
	加热元件	=	R, E

(续)

图形符号	说 明	IEC	种类代号
	滑动触点电位器	=	R
	带开关的滑动触点电位器		
	预调电位器	=	R

附表 3-12 电容器图形符号

图形符号		说 明	IEC	种类代号
优选形	其他形			
		<p>电阻器一般符号</p> <p>注: 如果必须分辨同一电容器的电极时, 弧形的极板表示 在固定的纸介质和陶瓷介质电容器中表示外电极 在可调和可变的电容器中表示动片电极 在穿心电容器中表示低电位电极</p>	=	C

(续)


图形符号		说 明	IEC	类种 代号
优选形	其他形			
		穿心电容器	=	C
		极性电容器	=	C
		可变电容器	=	C
		双联同调可变电容器		
		微调电容器	=	C
		差动可变电容器	=	C




(续)

图形符号		说 明	IEC	种类 代号
优选形	其他形			
		分裂定片可变电容器 (蝶形电容器)	=	C
		移相电容器		
		热敏极性电容器(Q可 用 $\rho$ 代替)	=	C
		压敏极性电容器(U可 用V代替)	=	C



附表 3-13 电感器图形符号

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	电感器、线圈、绕组、扼 流圈 注：符号中半圆数目不作 规定，但不得少于3个	=	L

(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	磁芯连续可调的电感器	=	L
	有两个抽头的电感器 注:抽头可在外侧两个半 圆交点处引出	=	L
	示例: 带磁芯的电感器  磁芯有间隙的电感器	=	L
	步进移动触点的可变电感器	=	L
	可变电感器	=	L



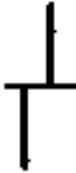

(续)

图形符号	说 明	IEC	种类代号
	带磁芯的同轴扼流圈	=	L
	穿在导线上的磁珠	=	L







## 4. 半导体图形符号

## (1) 半导体图形符号





附表 3-14 半导体图形符号

图形符号	说 明	IEC	种类代号
	具有一处欧姆接触的半导体区水平线表示半导体,垂直线表示欧姆接触	=	
形式1  形式2  形式3 	具有多处欧姆接触的半导体区(示出两个欧姆接触)	=	


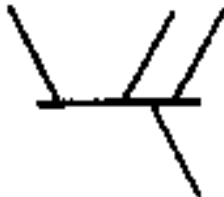




(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	耗尽型器件的导电沟道	=	
	增强型器件的导电沟道	=	
<p>优选形 </p> <p>其它形 </p>	整流结	=	
 	用电场影响半导体层的 结(如结型场效应半导体的 结): P 区影响 N 层 N 区影响 P 层	=	


(续)

图形符号	说 明	IEC	类种 代号
	绝缘栅场效应半导体管 (IGFET)的沟道导电型: P 型衬底上的 N 型沟 道(示出耗尽型 IGFET) N 型衬底上的 P 型沟 道(示出增强型 IGFET)	=	
	绝缘栅	=	
	不同导电型区上的发射 极(带箭头的斜线表示发 射极); N 区上的 P 型发射极 N 区上的 4 个 P 型发射 极	=	
	P 区上的 N 型发射极  P 区上的 4 个 N 型发射 极		

(续)



图形符号	说 明	IEC	种类 代号
 	<p>不同导电型区上的集电极(斜线表示集电极)</p> <p>不同导电型区上的4个集电极</p>	=	
	<p>不同导电型区之间的转变,P转N或N转P</p> <p>注:短斜线表示沿水平线从P至N或从N至P的转变点。欧姆接触不应绘在短斜线上</p>	=	
  	<p>隔开不同导电型的本征区(I区),所给出的导电型PIN结构或NIP结构</p> <p>本征区位于相连斜线之间,对I区的任何欧姆接触应在短线之间表示,而不应绘在短线上</p> <p>在相同导电型的两区之间的本征区,所给出的导电型PIP结构或NIN结构</p>	=	

(续)




图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	<p>在集电极与不同导电型的两区之间的本征区, 所给出的导电型 PIN 结构或 NIP 结构, 长斜线表示集电极</p> <p>在集电极与相同导电型的两区之间本征区, 所给出的导电型 PIP 结构或 NIN 结构, 长斜线表示集电极</p>	=	

## (2) 半导体管特有的限定符号

附表 3-15 半导体管特有的限定符号



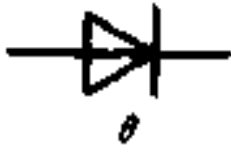
图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	肖特基效应	=	
	隧道效应	=	

(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	单向击穿效应	=	
	双向击穿效应	=	
	反向效应(单隧道效应)	=	







## (3) 半导体二极管图形符号示例

附表 3-16 半导体二极管图形符号示例


图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	半导体二极管一般符号	=	V
	发光二极管一般符号	=	V,H
	利用温度效应的二极管 ( $\theta$ 可以用 $t$ 代替)	=	V,B



(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	用作电容性器件的二极管(变容二极管)	=	V,C
	隧道二极管	=	V
	单向击穿二极管 电压调整二极管 江崎二极管	=	V
	双向击穿二极管	=	V
	反向二极管(单隧道二极管)	=	V
	双向二极管 交流开关二极管	=	V
	阶跃恢复二极管		V

(续)

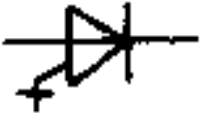
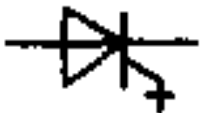


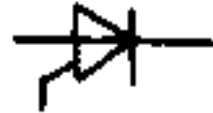
图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	体效应二极管		V

## (4) 晶体闸流管图形符号示例



附表 3-17 晶体闸流管图形符号示例

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	反向阻断二极晶体闸流管	=	V
	反向导通二极晶体闸流管	=	V
	双向二极晶体闸流管	=	V
	反向阻断三极晶体闸流管, P 型控制极(阴极侧受控)	=	V
	可关断三极晶体闸流管, 无控制极	=	V

(续)






图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	可关断三极晶闸流管, N型控制极(阳极侧受控)	=	V
	可关断三极晶闸流管, P型控制极(阴极侧受控)	=	V
	反向阻断四极晶闸流管	=	V
	三极晶闸流管 注: 当没有必要规定控制极的类型时, 这个符号用于表示反向阻断三极晶闸流管	=	V
	反向阻断三极晶闸流管, N型控制极(阳极侧受控)	=	V

(续)





图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	双向三极晶体闸流管 三端双向晶体闸流管	=	V
	反向导通三极晶体闸流 管,无控制极	=	V
	反向导通三极晶体闸流 管,N型控制极(阳极侧受 控)	=	V
	反向导通三极晶体闸流 管,P型控制极(阴极侧受 控)	=	V
	光控晶体闸流管		V

(5) 半导体管图形符号示例






附表 3-18 半导体管图形符号示例

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	PNP 型半导体管	=	V
	NPN 型半导体管, 集电 极接管壳	=	V
	NPN 型雪崩半导体管	=	V
	具有 P 型双基极单结 型半导体管	=	V
	具有 N 型双基极单结 型半导体管	=	V


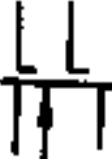

(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	增强型、单栅、P沟道和衬底无引出线的绝缘栅场效应半导体管	=	V
	增强型、单栅、N沟道和衬底无引出线的绝缘栅场效应半导体管	=	V
	增强型、单栅、P沟道和衬底有引出线的绝缘栅场效应半导体管	=	V
	增强型、单栅、N沟道和衬底与源极在内部连接的绝缘栅场效应半导体管	=	V
	耗尽型、单栅、N沟道和衬底无引出线的绝缘栅场效应半导体管	=	V

(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	有横向偏压基极的 NPN 型半导体管	=	V
	与本征区有欧姆接触的 PNIP 型半导体管	=	V
	与本征区有欧姆接触的 PNIN 型半导体管	=	V
	N 型沟道结型场效应半 导体管	=	V
	P 型沟道结型场效应半 导体管	=	V






(续)

图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	耗尽型、单栅、P沟道和 衬底无引出线的绝缘栅场 效应半导体管	=	V
	耗尽型、双栅、N沟道和 衬底有引出线的绝缘栅场 效应半导体管  注：在多栅的情况下三栅 极与源极的引线应在 一条直线上	=	V
	N沟道结型场效应半导 体对管		V
—	—	—	—


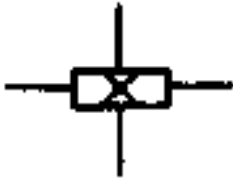
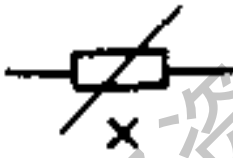


(6) 光电子、光敏和磁敏器件图形符号示例



附表 3-19 光电子、光敏和磁敏器件图形符号示例










图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	光敏电阻 具有对称导电性的光电 器件	=	B,R
	光电二极管 具有非对称导电性的光 电器件	=	B,V
	光电池	=	B,G
	光电半导体管(示出 PNP 型)	=	B,V
	半导体激光器		

(续)

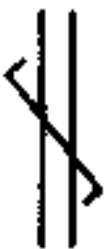









图形符号	说 明	IEC	种类 代号
	发光数码管		
	有四个欧姆接触的霍尔 发生器	=	B
	磁敏电阻器(示出线性 型)	=	B,R
	磁敏二极管		
	NPN 型磁敏半导体管		

# 附录四 新旧电气图用图形符号对照



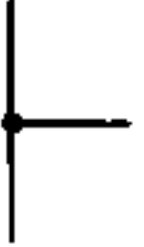




## 附表 4-1 新旧电气图用图形符号对照

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
 或 	三根导线的单线 表示		三根导线的单线 表示
	柔软导线		软电缆、软导线
	屏蔽导线	 或 	屏蔽的导线或电 缆
			部分屏蔽的导线











(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	绞合导线(二股)	单线表示  多线表示 	二股绞合导线
	同轴电缆		同轴电缆
	屏蔽同轴电缆		
	端子	 或 	端子
	可拆卸的端子		






(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
<p>形式 1</p>  <p>形式 2</p> 	<p>导线的连接</p>		<p>导线的单分支</p>
<p>优选形</p>  <p>其他形</p> 	<p>插头和插座</p>	 <p>或</p> 	<p>插接器—般符号</p>








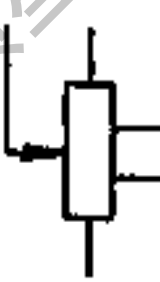
(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
形式1  形式2 	接通的连接片		连接片
	断开的连接片		换接片
	电缆终端头		电缆终端头
优选形  其他形 	电阻器的一般符号		电阻的一般符号

(续)







新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	可变电阻器	 或 	变阻器
	压敏电阻器		压敏电阻

(续)

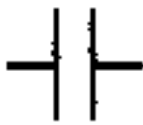





新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	热敏电阻 注: $\theta$ 可用 $t$ 代替		热敏电阻
	滑线式变阻器		可断开电路的变阻器
	有固定抽头的电阻器		有抽头的固定电阻
	带固定抽头的可变电阻器		带抽头的可变电阻



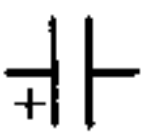
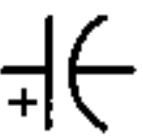


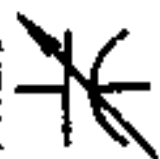
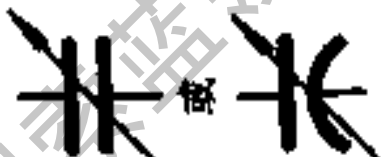
(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	分流器		分流器
	滑动触点电位器		电位器的一般符号
	预调电位器		微调电位器



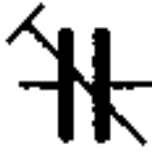




(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
优选形  其他形 	电容器的一般符 号		电容器的一般符 号
优选形  其他形 	穿心电容器		穿心式电容器







(续)

新符号 (GB 4728)		旧符号 (GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
优选形  其他形 	极性电容器		有极性的电解电 容器
优选形  其他形 	可变电容器		可变电容器








(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
优选形  其他形 	微调电容器	 或 	微调电容器
优选形  其他形 	利用温度效应的 二极管(热敏二极 管) 注: $\theta$ 可用 $r$ 代替		利用温度效应的 二极管




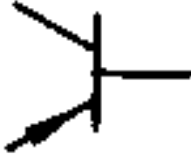

(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
<p>优选形 </p> <p>其他形 </p>	<p>变容二极管</p>		<p>变容二极管</p>
<p>优选形 </p> <p>其他形 </p>	<p>隧道二极管</p>		<p>隧道二极管</p>

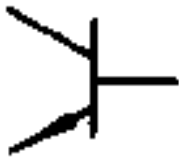




(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
<p>优选形</p>  <p>其他形</p> 	<p>单向击穿二极管 (稳压二极管)</p>		<p>雪崩二极管</p>
<p>优选形</p>  <p>其他形</p> 	<p>双向击穿二极管 (双向稳压二极管)</p>	  	<p>稳压二极管</p>  <p>双向稳压二极管</p>

(续)






新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
优选形  其他形 	双向二极管、交流开关二极管		双向二极管
	PNP型半导体管		PNP型半导体管

(续)




新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	NPN型半导体管		NPN型半导体管
	集电极接管壳的NPN型半导体管		
<p>优选形</p>  <p>其他形</p> 	<p>三极晶体闸流管</p> <p>注: 没必要规定门极类型时, 用于表示反向阻断三极晶闸管</p>		普通晶体闸流管






(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
<p>优选形</p>  <p>其他形</p> 	<p>反向阻断三极晶体闸流管(阴极侧受控)</p>		<p>普通晶体闸流管</p>
<p>优选形</p>  <p>其他形</p> 	<p>可关断三极晶体闸流管(阴极侧受控)</p>		<p>可关断晶体闸流管</p>







(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	图形符号	说明
<p>图形符号</p> <p>优选形 </p> <p>其他形 </p>	<p>说明</p> <p>双向三极晶体 流管</p>	<p>图形符号</p> <p></p>	<p>说明</p> <p>双向晶体解流管</p>




(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	说明
<p>图形符号</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>优选形</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>其他形</p>  </div> </div>	<p>图形符号</p> 	<p>说明</p> <p>光控半导体管</p>

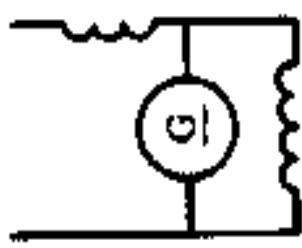
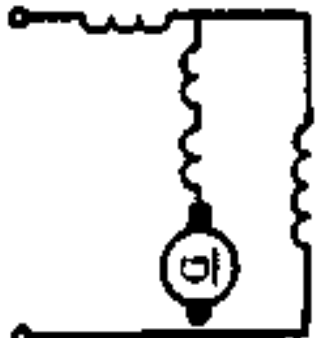
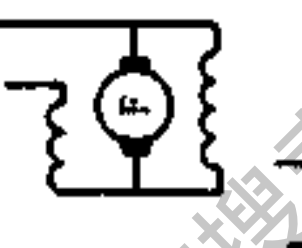
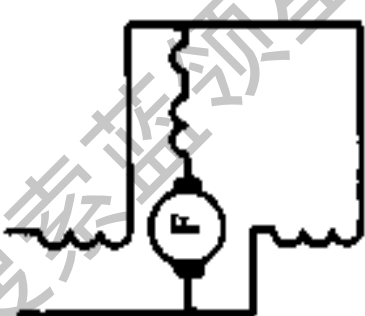
(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	光电池		光电池
	间热式阴极二极管		旁热式二极管
	充气光电管		离子光电管




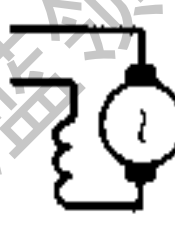
(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	充气二极管		单阳极充气管
			双阳极充气管

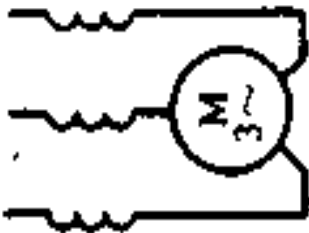

(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	<p>短路复励直流发电机</p>		<p>复励式直流发电机</p> <p>注: 示出换向绕组和补偿绕组时</p>
	<p>短路复励直流发电机</p>		<p>复励式直流发电机</p> <p>注: 示出换向绕组和补偿绕组时</p>

(续)





新符号 (GB 4728)	旧符号 (GB 312)	旧符号 (GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	<p>永磁直流电动机</p>		<p>永磁直流电动机</p>
	<p>单相交流串励电动机</p>		<p>单相交流串励 向器电动机</p>

(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	三相交流串励电动机		三相串励换向器电动机  注:有移动电刷的调速装置时









(续)





新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	三相永磁同步发电机		永磁三相同步发电机
	三相永磁同步电动机		

微信搜索 蓝领星球

(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	单相永磁同步电动机		永磁单相同步电动机
	单相笼型异步电动机		单相鼠笼异步电动机
	三相笼型异步电动机		三相鼠笼异步电动机




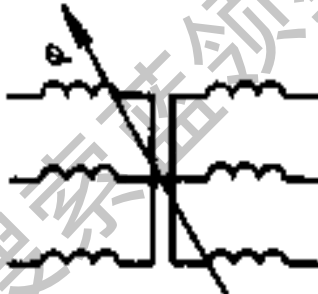
(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	三相绕线转子异步电动机		三相滑环异步电动机
	电机扩大机		交磁放大机


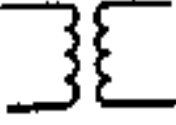


(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
—	<p>铁心</p> <p>注:当不致引起混淆时,允许不画出铁心,但要注意全书统一</p>	—	铁心
— · —	带间隙的铁心	— · —	带空气隙的铁心

(续)





新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
<p>形式 1</p>  <p>形式 2</p> 	<p>三相移相器</p>	<p>单线表示</p>  <p>多线表示</p> 	<p>三相移相器</p>

(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	图形符号	说明
<p>图形符号</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>形式1</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>形式2</p>  </div> </div>	<p>说明</p> <p style="text-align: center;">电压互感器</p>	<p>图形符号</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>单线表示</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>多线表示</p>  </div> </div>	<p>说明</p> <p style="text-align: center;">电压互感器</p>

获取更多资料 微信搜索 技领星球

(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	
<p>图形符号</p>	<p>图形符号</p>	<p>说明</p>
<p>形式 1</p>  <p>形式 2</p> 	<p>单线表示</p>  <p>多线表示</p> 	<p>具有两个铁心和两个二次绕组的电流互感器</p>
		<p>有分开铁心的双绕组电流互感器</p>

(续)

旧符号(GB 312)

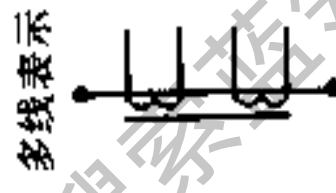
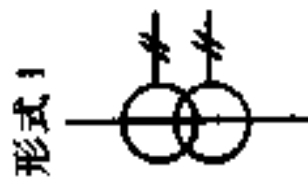
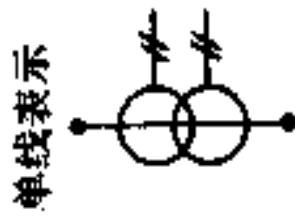
新符号(GB 4728)

说明

说明

图形符号

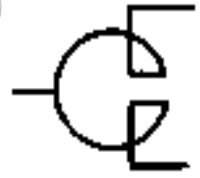
图形符号



有共同铁心的双  
次级绕组电流互感  
器

在一个铁心上有  
两个二次绕组的电  
流互感器

分裂电抗器





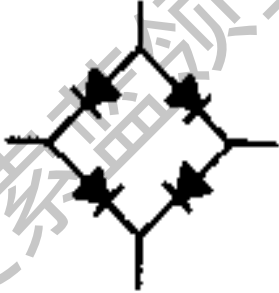


频敏变阻器









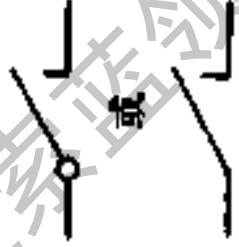

(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	说明	
图形符号	图形符号	说明	说明
		分裂电抗器	
		整流器方框符号	整流器
		桥式全波整流器 方框符号	桥式全波整流器






(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	原电池或蓄电池		原电池或蓄电池
形式1 	蓄电池组或原电 池组		蓄电池组或原电 池组
形式2 			
48V 			
	带抽头的原电 组或蓄电池组		带抽头的电 池组

(续)


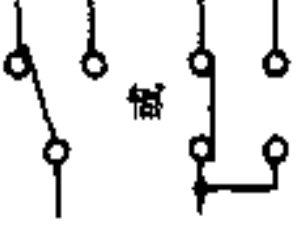

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
<p>形式 1</p>  <p>形式 2</p> 	<p>动合(常开)触点</p>	 <p>或</p> 	<p>开关的动合(常开)触点</p>
		 <p>或</p> 	<p>继电器动合(常开)触点</p>

(续)

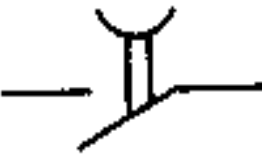


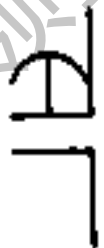
新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	图 形 符 号	说 明
	<p>动断(常闭)触点</p>	 <p>或</p> 	<p>开关的动断(常闭)触点</p>
		 <p>或</p> 	<p>继电器动断(常闭)触点</p>

获取资料 微信搜索 蓝领星球


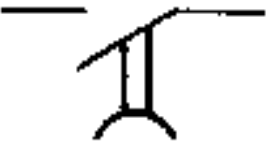


(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	说明
<p>图形符号</p>  <p>说明</p> <p>先断后合的转换 触点</p>	<p>图形符号</p>  <p>说明</p> <p>开关的切换触点</p>	
	<p>图形符号</p>  <p>说明</p> <p>继电器切换触点</p>	



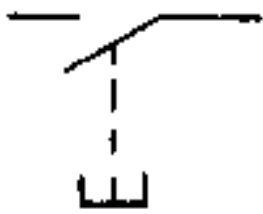

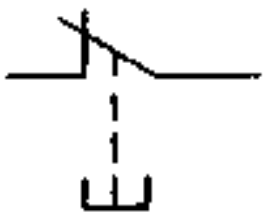

(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
<p>形式1</p>  <p>形式2</p> 	<p>延时闭合的动合 (常开)触点</p>		<p>继电器延时闭合 的动合(常开)触点</p>
			<p>接触器延时闭合 的动合(常开)触点</p>

(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
<p>形式 1</p>  <p>形式 2</p> 	<p>延时断开的动合 (常开)触点</p>	 	<p>继电器延时开启 的动合(常开)触点</p>



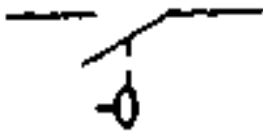

(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
形式 I 	延时闭合的动断 (常闭)触点		继电器延时闭合 的动断(常开)触点
	动合(常开)按钮		带动合(常开)触 点的按钮
	动断(常闭)按钮		带动断(常闭)触 点的按钮


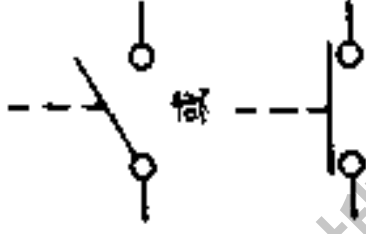

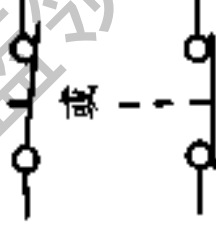
获取更多资料 微信搜索 蓝领星球




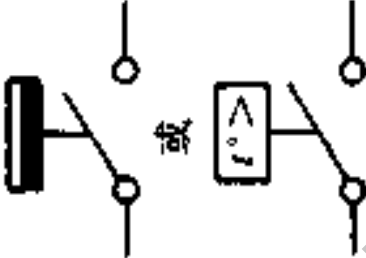


(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	带动断(常闭)和 动合(常开)触点的 按钮		带动断(常闭)和 动合(常开)触点的 按钮
	液位开关		液位继电器触点

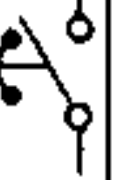




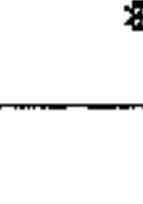
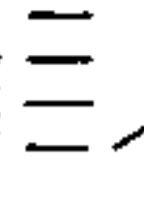
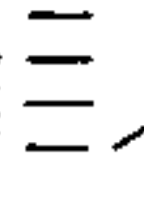
(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	位置开关和限制 开关(动合触点)		与工作机械联动 的开关(动合触点)
	位置开关和限制 开关(动断触点)		与工作机械联动 的开关(动断触点)


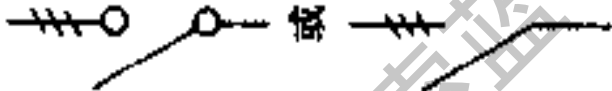
(续)

新符号(GB 4728)	说 明	旧符号(GB 312)	说 明
	<p>热敏开关(动合触点)</p> <p>注: <math>\theta</math> 可用动作温度代替</p>		<p>温度继电器动合(常开)触点</p>
	<p>荧光灯起动器</p>		<p>荧光灯触发器</p>

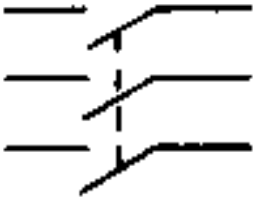

(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	说明
		惯性开关
形式1 		离心式继电器触点
形式2 		转速式继电器触点
		单极四位转换开关




(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	<p>三极开关(单线表示)</p>		<p>三极开关(单线表示)</p>


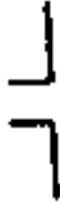


(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	<p>三极开关(多线表示)</p>		<p>三极开关(多线表示)</p>

(续)

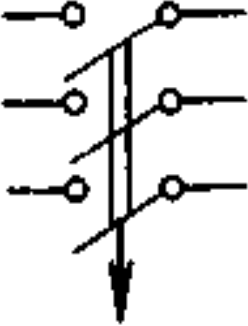
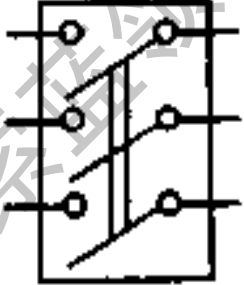
新符号(GB 4728)	说明	旧符号(GB 312)	说明
	<p>断路器</p>		<p>自动空气断路器</p>
			<p>高压断路器</p>

(续)

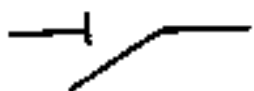
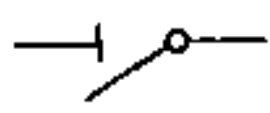
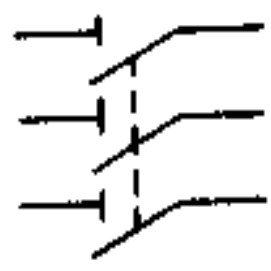
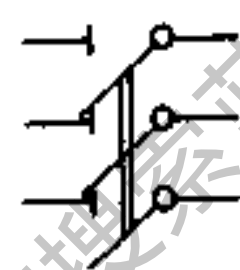

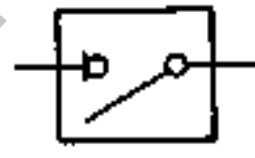
新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	接触器(动合触点) 注:在控制电路中可不画半圆		接触器动合(常开)触点
	接触器(动断触点) 注:在控制电路中可不画半圆		接触器动断(常闭)触点



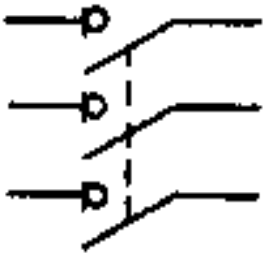
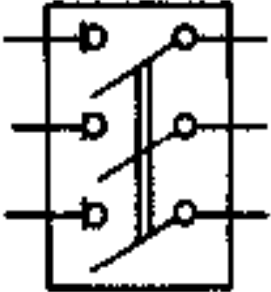
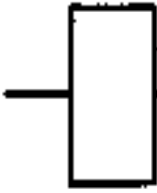
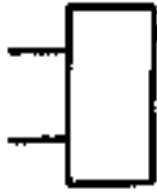
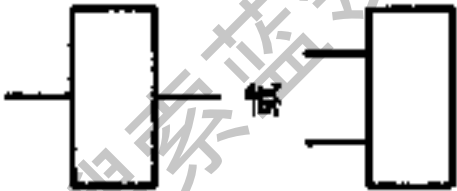
(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)		
图形符号	图形符号	说 明	说 明
		<p>三极断路器</p>	<p>三极自动空气断路器</p>
		<p>三极断路器</p>	<p>三极高压断路器</p>



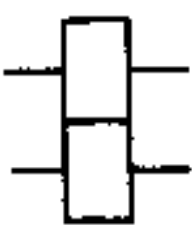

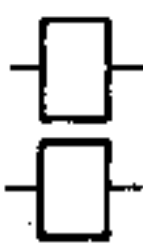
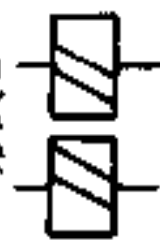

(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	隔离开关		高压隔离开关
	三极隔离开关		三极高压隔离开关
	负荷开关		高压负荷开关

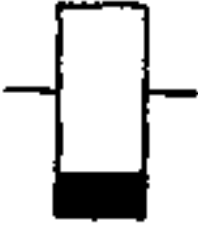

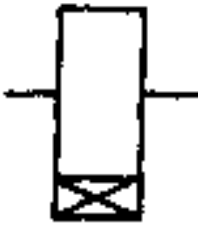
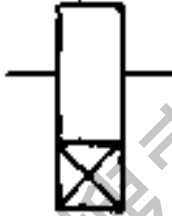
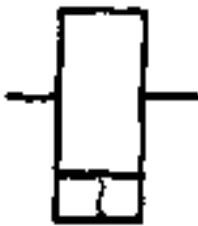

(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
 <p data-bbox="584 1193 632 1458">三极负荷开关</p>	 <p data-bbox="552 237 671 600">三极高压负荷开关</p>	<p data-bbox="818 1727 863 1839">形式 1</p>  <p data-bbox="1118 1720 1163 1839">形式 2</p>  <p data-bbox="818 1149 1007 1507">继电器和接触器操作器件(线圈)一般符号</p> <p data-bbox="1038 1149 1342 1462">注:多绕组操作器件可由适当数值的斜线或重复本符号来表示</p>	 <p data-bbox="991 237 1174 600">继电器、接触器和磁力起动器的线圈</p>

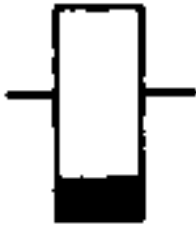
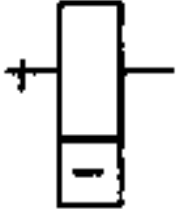
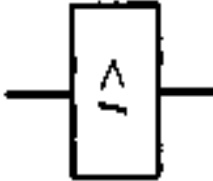

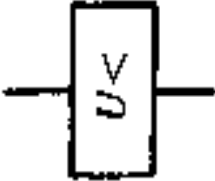
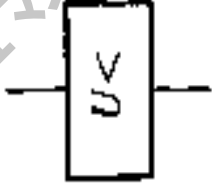
(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
形式1  形式2 	双绕组操作器件 组合表示法	 或 	双线圈组合表示 法
形式1  形式2 	双绕组操作器件 分离表示法		双线圈分离表示 法





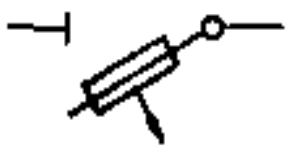

(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	缓放继电器线圈		电磁继电器缓放线圈
	缓吸继电器线圈		电磁继电器缓吸线圈
	交流继电器线圈		交流继电器线圈













(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	极化继电器线圈		极化继电器线圈
	过流继电器线圈		过电流继电器线圈
	欠压继电器线圈		低电压继电器线圈

(续)


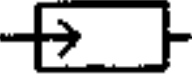







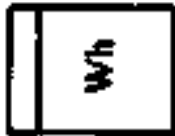
新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	热继电器动断 (常闭)触点		热继电器动断 (常闭)触点
	熔断器一般符号		熔断器
	跌落式熔断器		跌落式熔断器

(续)





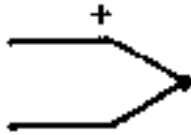
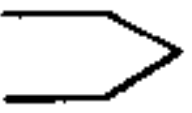
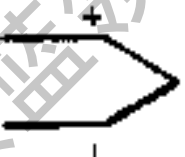
新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	说明	
图形符号	图形符号	图形符号	说明
	熔断器式开关 	熔断器式开关 	刀开关-熔断器 
	熔断器式隔离开 关 	熔断器式隔离开 关 	隔离开关-熔断 器 
	火花间隙 	火花间隙 	火花间隙 



(续)






新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	避雷器		避雷器—般符号
	电流表		安培表
	电压表		伏特表
	功率表		瓦特表
	电度表(瓦时计)		瓦时计

(续)


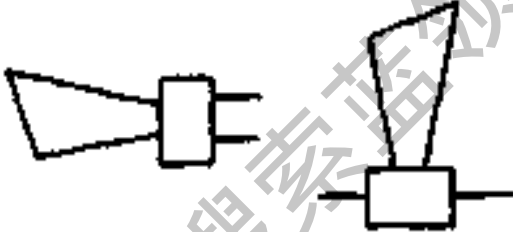
新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	检流计		检流计
	示波器		示波器
<p>形式1 </p> <p>形式2 </p>	热电偶		热电偶

获取资料 微信搜索 蓝领星球




(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	钟的一般符号		电钟
	灯的一般符号		照明灯
			信号灯




(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
	电喇叭		电喇叭

(续)

新符号(GB 4728)		旧符号(GB 312)	
图形符号	说明	图形符号	说明
优选形  其他形 	电铃		电铃—般符号

(续)

新符号(GB 4728)	旧符号(GB 312)	
图形符号	图形符号	说明
<p>优选形</p>  <p>其他形</p> 		<p>蜂鸣器</p>
		<p>蜂鸣器</p>

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

## 附录五 电 磁 线

裸导线 直径 /mm	允许 公差 /mm	裸导线 截面积 /mm <sup>2</sup>	20℃时直 流电阻计 算值 /( $\Omega$ /km)	漆包线最大外径 /mm		漆包线近似重量 /(kg/km)	
				Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS
0.020	±0.002	0.00031	55587	—	0.035	—	—
0.025	±0.002	0.00049	35574	—	0.040	—	—
0.030	±0.003	0.00071	24704	—	0.045	—	—
0.040	±0.003	0.00126	13920	—	0.055	—	—
0.050	±0.003	0.00196	8949	0.065	0.065	0.019	0.022
0.060	±0.003	0.00283	6198	0.075	0.090	0.027	0.029
0.070	±0.003	0.00385	4556	0.085	0.100	0.036	0.039
0.080	±0.003	0.00503	3487	0.095	0.110	0.047	0.050

(续)

裸导线 直径 /mm	允许 公差 /mm	裸导线 截面积 /mm <sup>2</sup>	20℃时直 流电阻计 算值 /(Ω/km)	漆包线最大外径 /mm			漆包线近似重量 /(kg/km)		
				Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	
0.090	±0.003	0.00636	2758	0.105	0.120	0.059	0.063		
0.100	±0.005	0.00785	2237	0.120	0.130	0.073	0.076		
0.110	±0.005	0.00950	1846	0.130	0.140	0.088	0.092		
0.120	±0.005	0.01131	1551	0.140	0.150	0.104	0.108		
0.130	±0.005	0.01327	1322	0.150	0.160	0.122	0.126		
0.140	±0.005	0.01539	1139	0.160	0.170	0.141	0.145		
0.150	±0.005	0.01767	993	0.170	0.190	0.162	0.167		
0.160	±0.005	0.0201	872	0.180	0.200	0.184	0.189		
0.170	±0.005	0.0227	773	0.190	0.210	0.208	0.213		



(续)

裸导线 直径 /mm	允许 公差 /mm	裸导线 截面积 /mm <sup>2</sup>	20℃时直 流电阻计 算值 /(Ω/km)	漆包线最大外径 /mm			漆包线近似重量 /(kg/km)		
				Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	
0.180	±0.005	0.0255	689	0.200	0.220	0.233	0.237	0.237	
0.190	±0.005	0.0284	618	0.210	0.230	0.259	0.264	0.264	
0.200	±0.005	0.0314	558	0.225	0.240	0.287	0.292	0.292	
0.210	±0.005	0.0346	506	0.235	0.250	0.316	0.321	0.321	
0.230	±0.005	0.0415	422	0.255	0.280	0.378	0.386	0.386	
0.250	±0.005	0.0491	357	0.275	0.300	0.446	0.454	0.454	
0.270	±0.010	0.0573	306	0.31	0.32	0.522	0.529	0.529	
0.290	±0.010	0.0661	265	0.33	0.34	0.601	0.608	0.608	
0.31	±0.010	0.0755	232	0.35	0.36	0.689	0.693	0.693	

(续)

裸导线 直径 /mm	允许 公差 /mm	裸导线 截面积 /mm <sup>2</sup>	20℃时直 流电阻计 算值 /(Ω/km)	漆包线最大外径 /mm			漆包线近似重量 /(kg/km)		
				Q	QZ,QQ QY,QXY QQS	Q	Q	QZ,QQ QY,QXY QQS	
0.33	±0.010	0.0855	205	0.37	0.38	0.780	0.784		
0.35	±0.010	0.0962	182	0.39	0.41	0.876	0.884		
0.38	±0.010	0.1134	155	0.42	0.44	1.03	1.04		
0.41	±0.010	0.1320	133	0.45	0.47	1.20	1.21		
0.44	±0.010	0.1521	115	0.49	0.50	1.38	1.39		
0.47	±0.010	0.1735	101	0.52	0.53	1.57	1.58		
0.49	±0.010	0.1886	93	0.54	0.55	1.71	1.72		
0.51	±0.010	0.204	85.9	0.55	0.58	1.86	1.87		
0.53	±0.010	0.221	79.5	0.58	0.60	2.00	2.02		

(续)

裸导线 直径 /mm	允许 公差 /mm	裸导线 截面积 /mm <sup>2</sup>	20℃时直 流电阻计 算值 /(Ω/km)	漆包线最大外径 /mm			漆包线近似重量 /(kg/km)		
				Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	
0.55	±0.010	0.238	73.7	0.60	0.62	2.16	2.17	2.17	
0.57	±0.010	0.255	68.7	0.62	0.64	2.32	2.34	2.34	
0.59	±0.010	0.273	64.1	0.64	0.66	2.48	2.50	2.50	
0.62	±0.010	0.302	58.0	0.67	0.69	2.73	2.76	2.76	
0.64	±0.010	0.322	54.5	0.69	0.72	2.91	2.94	2.94	
0.67	±0.010	0.353	49.7	0.72	0.75	3.19	3.21	3.21	
0.69	±0.010	0.374	46.9	0.74	0.77	3.38	3.41	3.41	
0.72	±0.015	0.401	43.0	0.78	0.80	3.67	3.70	3.70	
0.74	±0.015	0.430	40.7	0.80	0.83	3.89	3.92	3.92	

(续)

裸导线 直径 /mm	允许 公差 /mm	裸导线 截面积 /mm <sup>2</sup>	20℃时直 流电阻计 算值 /( $\Omega$ /km)	漆包线最大外径 /mm		漆包线近似重量 /(kg/km)	
				Q	QZ、QQ	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS
0.77	$\pm 0.015$	0.466	37.6	0.83	0.86	4.21	4.24
0.80	$\pm 0.015$	0.503	34.8	0.86	0.89	4.55	4.58
0.83	$\pm 0.015$	0.541	32.4	0.89	0.92	4.89	4.92
0.86	$\pm 0.015$	0.581	30.1	0.92	0.95	5.25	5.27
0.93	$\pm 0.015$	0.636	27.5	0.96	0.99	5.75	5.78
0.93	$\pm 0.015$	0.679	25.8	0.99	1.02	6.13	6.16
0.96	$\pm 0.015$	0.724	24.2	1.02	1.05	6.53	6.56
1.00	$\pm 0.015$	0.785	22.4	1.05	1.11	7.10	7.14
1.04	$\pm 0.020$	0.850	20.6	1.12	1.15	7.67	7.72

(续)

裸导线 直径 /mm	允许 公差 /mm	裸导线 截面积 /mm <sup>2</sup>	20℃时直 流电阻计 算值 /(Ω/km)	漆包线最大外径 /mm			漆包线近似重量 /(kg/km)	
				Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	
1.08	±0.020	0.916	19.1	1.16	1.19	8.27	8.32	
1.12	±0.020	0.985	17.8	1.20	1.23	8.89	8.94	
1.16	±0.020	1.057	16.6	1.24	1.27	9.53	9.59	
1.20	±0.020	1.131	15.5	1.28	1.31	10.2	10.4	
1.25	±0.020	1.227	14.3	1.33	1.36	11.1	11.2	
1.30	±0.020	1.327	13.2	1.38	1.41	12.0	12.1	
1.35	±0.020	1.431	12.3	1.43	1.46	12.9	13.0	
1.40	±0.020	1.539	11.3	1.48	1.51	13.9	14.0	
1.45	±0.020	1.651	10.6	1.53	1.56	14.9	15.0	

(续)

裸导线 直径 /mm	允许 公差 /mm	裸导线 截面积 /mm <sup>2</sup>	20℃时直 流电阻计 算值 /(Ω/km)	漆包线最大外径 /mm			漆包线近似重量 /(kg/km)		
				Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	
1.50	±0.020	1.767	9.93	1.58	1.61	15.9	16.0		
1.56	±0.020	1.911	9.17	1.64	1.67	17.2	17.3		
1.62	±0.020	2.06	8.50	1.71	1.73	18.5	18.6		
1.68	±0.025	2.22	7.91	1.77	1.79	19.9	20.0		
1.74	±0.025	2.38	7.37	1.83	1.85	21.4	21.4		
1.81	±0.025	2.57	6.81	1.90	1.93	23.1	23.3		
1.88	±0.025	2.78	6.31	1.97	2.00	25.0	25.2		
1.95	±0.025	2.99	5.87	2.04	2.07	26.8	27.0		
2.02	±0.025	3.21	5.47	2.12	2.14	28.9	29.0		
2.10	±0.025	3.46	5.06	2.20	2.23	31.2	31.3		
2.26	±0.030	4.01	4.37	2.36	2.39	36.2	36.3		
2.44	±0.030	4.68	3.75	2.54	2.57	42.1	42.2		

## 附录六 Y 系列小型异步电动机

型 号	额定功率 /kW	满载时				堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度	气隙长度	定子外径	定子内径
		定子电流 /A	转速 /r·min <sup>-1</sup>	效率 (%)	功率因数							
Y801-2	0.75	1.8	2830	75	0.84	7		65	0.3	67	67	
Y802-2	1.1	2.5		77	0.86			80		120	67	
Y801-4	0.55	1.5	1390	73	0.76	6.5		65	0.25	75	75	
Y802-4	0.75	2.0		74.5	0.76			80			75	
Y90S-2	1.5	3.4	2840	78	0.85	7	2.2	85	0.35	72	72	
Y90L-2	2.2	4.7		82	0.86			110			72	
Y90S-4	1.1	2.8	1400	78	0.78	6.5		90	0.25	130	80	
Y90L-4	1.5	3.7		79	0.79			120			80	
Y90S-6	0.75	2.3	910	72.5	0.70	6	2.0	100			86	
Y90L-6	1.1	3.2		73.5	0.72			125			86	

(续)

型 号	额定功率 /kW	满 载 时				堵转 电 流 /A	堵转 电 流 /A	堵转 转 矩 /N·m	堵转 转 矩 /N·m	最大 转 矩 /N·m	铁 心 长 度	气 隙 长 度	定 子 外 径	定 子 内 径
		定子 电 流 /A	转 速 /r·min <sup>-1</sup>	效 率 (%)	功 率 因 数									
Y100L-2	3.0	6.4	2870	82	0.87					100	0.4	94	94	
Y100L1-4	2.2	5.0	1430	81	0.82	7	2.2	2.2	2.2	105	0.3	155	98	
Y100L2-4	3.0	6.8		82.5	0.81					135				
Y100L-6	1.5	4.0	940	77.5	0.74	6	2.0	2.0	2.0	100	0.25		106	
Y112M-2	4.0	8.2	2890	85.5	0.87	7	2.2	2.2	2.2	105	0.45		98	
Y112M-4	4.0	8.8	1440	84.5	0.82					135	0.3	175	110	
Y112M-6	2.2	5.6	940	80.5	0.74	6	2.0	2.0	2.0	110			120	
Y132S1-2	5.5	11	2900	85.5	0.88	7	2.0	2.0	2.2	105	0.55		116	
Y132S2-2	7.5	15		86.2	0.88					125		210		
Y132S-4	5.5	12	1440	85.5	0.84		2.2	2.2		115	0.4		136	
Y132M-4	7.5	15		87	0.85					160				



(续)

型 号	额定功率 /kW	满 载 时				堵转 电 流 /A	堵转 电 流 /额定 电 流	堵转 转 矩 /额定 转 矩	最大 转 矩 /额定 转 矩	铁 心 长 度	气 隙 长 度	定 子 外 径	定 子 内 径
		定 子 电 流 /A	转 速 /r· min <sup>-1</sup>	效 率 (%)	功 率 因 数								
Y132S-6	3.0	7.2		83	0.76				110				
Y132M1-6	4.0	9.4	960	84	0.77	6.5			140				
Y132M2-6	5.5	13		85.3	0.78			2.0	180	0.35	210	148	
Y132S-8	2.2	5.8	710	81	0.71	5.5	2.0		110				
Y132M-8	3.0	7.7		82	0.72				140				
Y160M1-2	11	22		87.2	0.88				125				
Y160M2-2	15	29	2930	88.2	0.88	7		2.2	155	0.65		150	
Y160L-2	18.5	36		89	0.89				195				
Y160M-4	11	23	1460	88	0.84		2.2		155	0.5	260	170	
Y160L-4	15	30		88.5	0.85				195				
Y160M-6	7.5	17	970	86	0.78	6.5	2.2	2.0	145	0.4		180	
Y160L-6	11	25		87	0.78				195				

(续)

型 号	额定 功率 /kW	满 载 时			堵转 电 流 /A	转 速 /r· min <sup>-1</sup>	效 率 (%)	功 率 因 数	堵转 电 流 /额定 电 流	堵 转 矩 /定 额 转 矩	最 大 转 矩 /定 额 转 矩	铁 心 长 度	气 隙 长 度	定 子 外 径	定 子 内 径
		定 子 电 流 /A	转 速 /r· min <sup>-1</sup>	效 率 (%)											
Y160M1-8	4.0	9.9		84		0.73	6	110							
Y160M2-8	5.5	13	720	85		0.74	6	145		2.0	2.0	145	0.4	260	180
Y160L-8	7.5	18		86		0.75	5.5	195		2.0	2.2	195	0.8		160
Y180M-2	22	42	2940	89		0.89	7	175		2.2	2.2	175	0.55		187
Y180M-4	18.5	36		91		0.86	7	190		2.2	2.2	190	0.45		205
Y180L-4	22	43	1470	91.5		0.86	6	220		2.0	2.0	220	0.45	290	
Y180L-6	15	31	970	89.5		0.81	6.5	200		1.8	2.0	200	0.45		205
Y180L-8	11	25	730	86.5		0.77	6	200		1.7	2.0	200	0.45		205
Y200L1-2	30	57	2950	90		0.89	7	180		2.2	2.2	180	1.0		182
Y200L2-2	37	70		90.5		0.89	7	210		2.0	2.2	210	0.65	327	
Y200L-4	30	57	1470	92.2		0.87	7	230		2.0	2.2	230	0.65		210

(续)

型 号	额定功率 /kW	满 载 时				堵转 电 流 /A	堵转 电 流 /A	堵转 转 矩 /额定 转 矩	最大 转 矩 /额定 转 矩	铁 心 长 度	气 隙 长 度	定 子 外 径	定 子 内 径
		定 子 电 流 /A	转 速 /r· min <sup>-1</sup>	效 率 (%)	功 率 因 数								
Y200L1-6	18.5	38	970	89.8	0.83	6.5	1.8	2.0	195	0.5	327	230	
Y200L2-6	22	45	730	90.2	0.83	6	2.0	2.2	220	1.1	368	245	
Y200L-8	15	34	2970	88	0.76	7	1.9	2.0	195	0.7	—	—	
Y225M-2	45	84	1480	91.5	0.89	6.5	1.7	2.0	210	0.5	—	260	
Y225S-4	37	70	1480	91.8	0.87	6	1.8	2.2	200	—	—	—	
Y225M-4	45	84	980	92.3	0.88	6.5	2.0	2.2	235	—	—	—	
Y225M-6	30	60	730	90.2	0.85	6	1.7	2.0	210	—	—	—	
Y225S-8	18.5	41	740	89.5	0.76	7	1.8	2.0	170	—	—	—	
Y225M-8	22	48	2970	90	0.78	7	2.0	2.2	210	—	—	—	
Y250M-2	55	103	1480	91.5	0.89	7	2.0	2.2	195	1.2	400	225	
Y250M-4	55	103	1480	92.6	0.88	7	2.0	2.2	240	0.8	—	260	

(续)

型 号	额定 功率 /kW	满 载 时				堵转 电 流 /A	堵转 速 /r· min <sup>-1</sup>	效 率 (%)	功 率 因 数	堵转 电 流 /额定 电 流	堵转 转 矩 /额定 转 矩	最大 转 矩 /额定 转 矩	铁 心 长 度	气 隙 长 度	定 子 外 径	定 子 内 径
		定 子 电 流 /A	转 速 /r· min <sup>-1</sup>	效 率 (%)	功 率 因 数											
Y250M-6	37	72	980	90.8	0.86	6.5	1.8	2.0	225	0.55	400	285				
Y250M-8	30	63	740	90.5	0.80	6	2.0	2.2	225							
Y280S-2	75	140	2970	91.5	0.89	7	1.9	2.0	225	1.5	255					
Y280M-2	90	167		92	0.89				260							
Y280S-4	75	140	1480	92.7	0.88				240	0.9	300					
Y280M-4	90	164		93.6	0.89				325					445		
Y280S-6	45	85	980	92	0.87	6.5	1.8	2.0	215	0.65	325					
Y280M-6	55	104		92	0.87				260							
Y280S-8	37	78	740	91	0.79	6	1.8	2.2	215							
Y280M-8	45	93		91.7	0.80				260							
Y315S-2	110	200	2980	93	0.90	7			290	1.8	520	300				

(续)

型 号	额定功率 /kW	满 载 时				堵转 电 流 /额定 电 流	堵转 转 矩 /额定 转 矩	最大 转 矩 /额定 转 矩	铁 心 长 度	气 隙 长 度	定 子 外 径	定 子 内 径
		定 子 电 流 /A	转 速 /r· min <sup>-1</sup>	效 率 (%)	功 率 因 数							
Y315M1-2	132	237	2980	94	0.90			340	1.8		300	
Y315M2-2	160	286		94.5	0.90			380				
Y315S-4	110	201	1480	93.5	0.89	7	1.8	300	1.1		350	
Y315M1-4	132	241		93.5	0.89			350				
Y315M2-4	160	291	1490	94	0.89			400				
Y315S-6	75	141		93	0.87			300		520		
Y315M1-6	90	168		93.5	0.87			350				
Y315M2-6	110	204	990	94	0.87	6.5	1.6	400	0.8		375	
Y315M3-6	132	245		94	0.87			455				
Y315S-8	55	111		92	0.82			300				
Y315M1-8	75	150	740	92.5	0.82			350			390	

(续)

型 号	额定功率 /kW	满 载 时				堵转 电 流 /A	堵转 电 流 /额定 电 流	堵转 转 矩 /额定 转 矩	最大 转 矩 /额定 转 矩	铁 心 长 度	气 隙 长 度	定 子 外 径	定 子 内 径
		定 子 电 流 /A	转 速 /r· min <sup>-1</sup>	效 率 (%)	功 率 因 数								
Y315M2-8	90	179	740	93	0.82		1.6		400				
Y315M3-8	110	219		93	0.82				455				
Y315S-10	45	99		91	0.76	6.5		2.0	300	0.8	520	390	
Y315M1-10	55	120	590	91.5	0.76		1.4		400				
Y315M3-10	75	161		92	0.77				455				