

文章编号: 0253 - 4339(2015) 03 - 0061 - 05

doi: 10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2015. 03. 061

间冷冰箱风道系统流量分配特性的模块化计算方法

万博闻 赵丹 丁国良

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘要 本文提出了一种用于计算间冷冰箱风道系统流量分配特性的模块化计算方法。首先将整体风道根据风道串并联位置划分成若干个模块,单独得出每个模块的流量阻力特性公式,其次将各模块按照冰箱实际串并联关系连接成网络,根据网络图构建模块的流量阻力方程并联合求解,最终获得整个风道系统的流量分配特性。通过实验对模型进行了验证,结果表明应用模块化计算方法得出的系统风量值与实验测量值误差在5%以内。风道系统流量分配特性的模块化计算方法具有计算准确、方便建模与求解、通用性强等优点,可应用在间冷冰箱的实际设计中。

关键词 间冷冰箱; 风道; 流量分配特性; 模块化

中图分类号: TB657.4; TB61⁺¹

文献标识码: A

A Modular Computation Method for Flow Distribution Characteristics of Air in Duct System of Indirect Cooling Refrigerator

Wan Bowen Zhao Dan Ding Guoliang

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract A modular computation method for predicting the flow distribution characteristics in duct system of indirect cooling refrigerator was presented. Firstly, the air duct is divided into several modules according to the position; secondly, the characteristics of air duct resistance and flow rate for each module is obtained; thirdly, the modules are connected into a network according to the actual series or parallel connections of air duct; finally, the flow distribution characteristics is obtained by solving the air duct resistance and flow rate equations. The model was experimentally verified, and the result shows that the deviation of the air flow rate between modular computation method and experiment is within 5%. The modular computation method has the advantages of high accuracy, convenience for modeling and solving, generalization. It is capable to be applied in indirect cooling refrigerator design.

Keywords indirect cooling refrigerator; air duct; flow distribution characteristics; modular

随着人民生活水平的不断提高,家用冰箱的需求逐渐增加,其销量由1990年的463万台增长到2013年的9100万台以上。间冷冰箱具有大容量、可自动除霜、多温区等优点,日益受到市场的欢迎^[1]。由于间冷冰箱的需求量巨大,各大厂商都加大了对间冷冰箱的研发力度。

间冷冰箱风道系统流量分配特性的计算是间冷冰箱系统设计的重要环节,因为各箱室温度的合理分布取决于风量的合理分配。冰箱中食品的高效保存需要精确控制其储存温度,例如肉类的最佳储存温度为-18℃,蔬菜水果类的最佳储存温度为2~4℃。温度的精确控制需要合理的风量匹配,而各箱室温量的分配取决于整个风道系统的流量分配特性^[2]。

间冷冰箱风道流量分配特性的传统计算方法是采用类比法或制作样机进行大量实验来完成的^[3-4],

不仅费时费力、增加成本,而且能否成功很大程度上还依赖于设计者的经验。近年来计算机技术的发展为冰箱风道系统的流量分配特性计算提供了一种有效手段。风道流量分配的仿真计算能够数字化再现冰箱风道的流量分配特性,大大减少实验装置制作和实验次数,为风道的设计和优化提供有效指导^[5]。

间冷冰箱风道系统流量分配特性的仿真计算需要满足高精度、快速和通用的要求。间冷冰箱各箱室温度需要精确控制,就要求风道设计中流动阻力计算足够精确。较短的设计周期有利于产品快速投放市场,所以设计过程越快越好。间冷冰箱箱室结构多样,各箱室温度需求不同,整个风道系统的形式多样,这就需要有一个通用的方法来对其风道系统流量分配特性进行计算。

现有的间冷冰箱风道系统流量分配特性的仿真

收稿日期: 2014年9月11日

方法包括局部仿真方法和整体仿真方法。

局部方法是对间冷冰箱中一个箱室的风道系统整体建模分析^[6-8]，这种方法可以用于分析和优化单个箱室的温度场和速度场。然而流道作为一个整体，其各部分之间是相互牵制、相互影响的^[9]，所以这种方法不适用于整个风道系统的仿真计算。整体仿真方法包括两种形式：第一种是在对间冷冰箱风道系统特征分析基础上将整个风道系统抽象为十种基本管路元件的串并联组合，然后分别求取基本管路元件的流量和阻力特性，最后绘制出由十种基本元件组成的流量阻力网络图以求取整个风道系统的流量分配特性^[10]。这种方法仅是对十种基本元件联立求解，对于结构多样和不规则的风道系统，很难仅通过这十种基本元件来精确描述，所以该方法还不具有广泛的通用性，不适用于不同类型的风道系统仿真计算。第二种是将整个风道系统抽象成由元件和节点组成的网络来计算风道的压降和换热^[11]。这种方法计算简易、速度快，但使用的元件只有风机、蒸发器以及各个箱室，不包含其连接部分的风道特征，所以不适用于整个风道系统的仿真计算。

现有的方法不能对整个风道系统的流量分配特性进行仿真计算，主要原因是存在以下三个难点：一是风道数量多，间冷冰箱至少包含两个箱室，而每个箱室都有各自的进风风道和回风风道，风道的建模需要包含其中的各个部分；二是风道的结构复杂，对于每一个回路的风道，都经历了相对较大的蒸发器室，多出口的风量分配室，较长的送风风道和回风风道，以及多孔的出风口和回风口，所有风道结构都不是规整形状；三是各风道相互耦合，求解困难，风道系统中各子风道存在复杂的串并联关系，一个风道的修改会影响整个风道的性能。

本文的目的是针对多样和不规则结构的间冷冰箱风道系统，提出一种高精度、快速、通用的流量分配特性仿真计算方法。

1 建模思路

间冷冰箱的风道系统由风扇、蒸发器室、风量分配室、箱室、各箱室送风风道和各箱室回风风道组成，如图1所示。为了计算整个风道的流量分配特性，本文拟采用模块化计算方法。模块化计算方法的思路是首先将整体风道根据功能划分为不同的模块，分别得出各个模块的流量阻力特性公式，其次将各个模块按照间冷冰箱的实际串并联关系连接成网络，最后根据网络图构建各模块的流量阻力方程并联立求解，获得整个风道的流量分配特性。

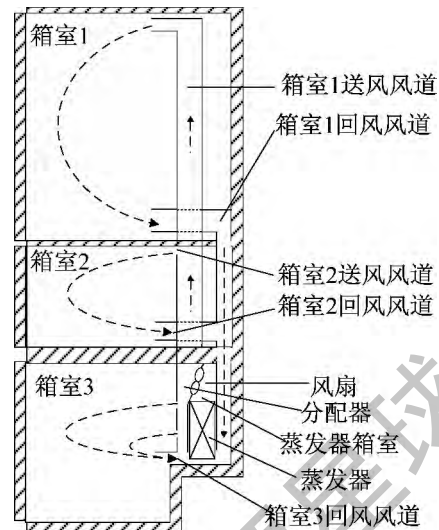


图1 间冷冰箱风道系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air duct in indirect cooling refrigerator

模块化计算方法可以解决整个风道系统仿真计算的三个难点。首先，风道系统中多个风道可以抽象为多个模块分别计算，这就解决了多风道的问题；其次，结构复杂的风道可以将其独立出来一个模块，建立一个物理模型进行仿真计算，对于多回路的复杂风道，可以将其分解为若干简单的风道子模块，再单独仿真计算，这就解决了结构复杂风道难求解问题；最后，整个风道系统按照各风道串并联关系将各计算模块连接成网络，并根据网络图构建各模块的流量阻力方程并联立求解，这就解决了整个耦合的风道系统难求解问题。

根据该思路，先将冰箱风道进行模块化划分，根据各模块的串并联位置绘制流量分配网络图，如图2所示。通过对各模块流量阻力特性的计算和联立求解，可最终得到整个风道系统流量分配特性。

2 模块化计算模型

风道系统各模块可根据间冷冰箱风道的串并联关系组成流量分配网络图。整个风道系统的求解可化为各模块阻力关系方程、系统风量关系方程、系统阻力关系方程的联立求解。其中，串联模块的流量相等，可以列出流量等式；并联模块压降相等，可以列出压降等式。据网络图构建各模块的流量阻力方程并联立求解，最终可获得整个风道的流量分配特性。具体的求解方法如下：

首先根据实际风道中各部件的位置，绘制出流量分配网络图，如图2所示。

图2中整个风道是由 n 个箱室的风道并联组成的，对于箱室 i ，由一个分配器出风口 a_i 个送风风

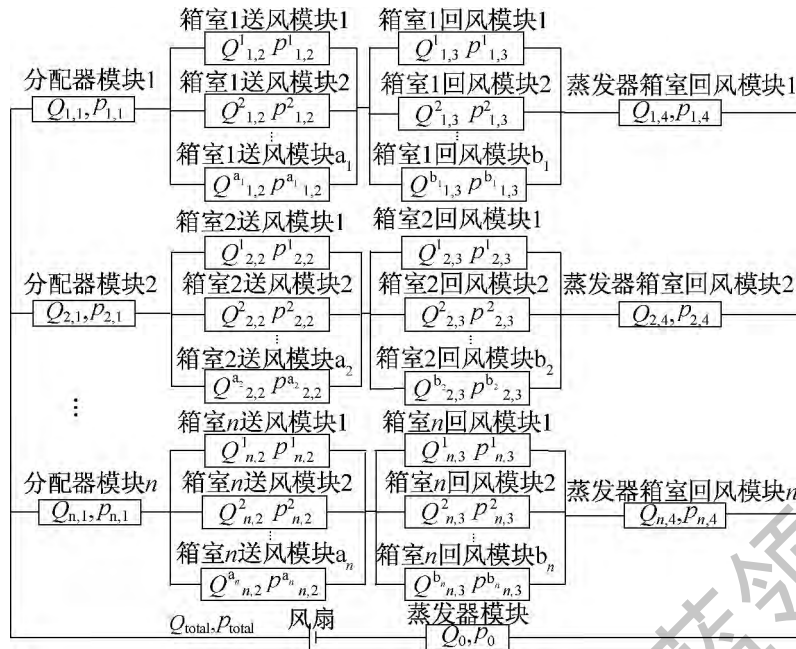


图2 风道流量分配网络图

Fig.2 Network diagram of flow rate distribution for air duct

道 b_i 个回风风道和一个蒸发器箱室回风口组成。如图所示, $Q_{i,1}$ 和 $p_{i,1}$ 分别表示分配到箱室 i 的分配器出风口的流量和压降。 $Q_{i,2}^j$ 和 $p_{i,2}^j$ 分别表示箱室 i 中第 j 个送风风道的流量和压降。 $Q_{i,3}^j$ 和 $p_{i,3}^j$ 分别表示箱室 i 中第 j 个回风风道的流量和压降。 $Q_{i,4}$ 和 $p_{i,4}$ 分别表示从箱室 i 回到蒸发器箱室的回风口的流量和压降。

其次根据各模块的串并联关系列出方程, 主要包含了三类方程:

第一类是每个模块的流量阻力方程:

$$p = f(Q) \quad (1)$$

第二类是流量方程。由串联模块流量相等的原则, 可以列出流量方程, 即公式组(2):

$$\begin{cases} Q_{total} = Q_0 \\ Q_{total} = \sum_{i=1}^n Q_{i,1} \\ Q_{i,1} = \sum_{j=1}^{a_i} Q_{i,2}^j \quad i = 1, 2, \dots, n \\ Q_{i,1} = \sum_{j=1}^{b_i} Q_{i,3}^j \\ Q_{i,1} = Q_{i,4} \end{cases} \quad (2)$$

公式组(2)中: Q_{total} 表示风道的总风量 m^3/s 。

第三类是压降方程, 由并联模块压降相等的原则, 可以列出压降方程, 即公式组(3):

$$\begin{cases} p_{i,2}^j = p_{i,2}^k \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 2, \dots, a_i \\ p_{i,3}^j = p_{i,3}^k \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 2, \dots, b_i \\ p_{i,4} + p_{i,2}^1 + p_{i,3}^1 + p_{i,4} = p_{i,1} + p_{i,2}^1 + p_{i,3}^1 + p_{i,4} \\ p_{total} = p_0 + p_{i,1} + p_{i,2}^1 + p_{i,3}^1 + p_{i,4} \end{cases} \quad (3)$$

公式组(3)中: p_{total} 表示风道的总压降, Pa。

最后由方程组求解风道的阻力特性和流量分配特性。联立公式组(1)、(2)和(3), 在风道总流量已知的情况下, 可以通过高斯-塞德尔迭代法解方程组求解出各个模块的流量和风道的总压降。

3 各模块流量阻力公式

本文采用模块化的方法分析整体风道, 需要得到各模块的流量阻力特性公式, 即公式(1)。

粘性流体在管内流动时产生两种损失, 即沿程损失和局部损失^[12]。

由于风道中流体的雷诺数小于 2300, 处于层流状态, 其沿程损失为:

$$h_f = \frac{32\nu l V}{d^2 g} \quad (4)$$

式(4)中: l 为风道长度, m; ν 为流体运动粘度, m^2/s ; d 为风道直径, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; V 为流速, m/s 。

风道中局部损失包含了转角, 管径扩大与缩小等, 可表示为统一形式:

$$h_j = \frac{K}{2g} V^2 \quad (5)$$

式中: K 为局部损失系数,无量纲数。

总的水力损失为:

$$h = \frac{K}{2g}V^2 + \frac{32vl}{d^2g}V \quad (6)$$

式(6)表示了水力损失和流速的关系,为了得到式(1)的函数,需对式(6)进行转化。

$$h = p/(\rho g) \quad (7)$$

$$V = 4Q/(\pi d^2) \quad (8)$$

式(7)和式(8)中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; d 为风道直径, m 。将(7)和式(8)代入(6)中,可得:

$$p = AQ^2 + BQ \quad (9)$$

式中:

$$A = 8\rho K/(\pi^2 d^4) \quad B = 128\rho vl/(\pi d^4)$$

式(9)中: A 和 B 为需要拟合的系数单位分别为 kg/m^7 和 $\text{kg}/(\text{m}^4 \cdot \text{s})$ 。由此可知风道中各模块的阻力可表示成流量的二次多项式。对于简单风道模块,可以直接由公式求出系数的值。而对于复杂风道模块,可以由计算流体力学软件拟合求出系数的值。

4 模块化计算方法实验验证

本节以某种型号的间冷冰箱为例,运用上述方法进行了具体计算,并同时进行了实验来验证计算结果的准确性。

4.1 实验原理与误差分析

本文选取三箱室间冷冰箱为实验对象,测量冰箱稳定运行状态下各箱室风量。实验装置主要包括以下两部分:1) 流量测试装置;2) 焓差实验室。图3给出了流量测量点布置位置图。实验的测量参数为冷藏室、冷冻室和蔬菜室的风量。

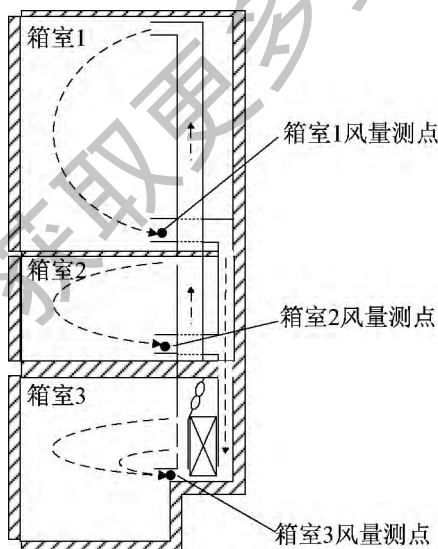


图3 箱室测点布置

Fig. 3 Measuring points location

为了确保冰箱测试的环境温度维持一定,实验在焓差实验室中进行,环境温度设置为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

流量测量采用的风速计型号为 Testo 435-2,精度为 $\pm 0.01\text{m/s}$ 。实验中为了保证回风均匀,在回风口处加入了导流段,控制回风口为直径 0.1m 的圆,风量的测量误差为 $\pm 8\text{e}^{-5}\text{m}^3/\text{s}$ 。

4.2 实验验证的结果分析

仿真结果和实验结果见表1。

表1 仿真和实验结果风量对比

Tab. 1 Comparison between simulation and experimental results

项目	仿真结果/(m^3/s)	实验结果/(m^3/s)
冷冻室风量	7.65e^{-3}	7.67e^{-3}
冷藏室风量	2.26e^{-3}	1.76e^{-3}
蔬菜室风量	1.68e^{-4}	1.94e^{-4}
总风量	1.01e^{-2}	9.62e^{-3}

从结果可以看出实验值与模拟值的风量误差在5%以内,因此使用模块化的方法可以对风道阻力特性和流量分配特性进行求解。

4.3 基于模型的分析与讨论

本文基于流量分配特性模块化计算方法,对冰箱的风道进行预测,风道各部分阻力见表2。

表2 风道各部分阻力特性

Tab. 2 Pressure loss for each part of air duct

风道	支路模块	阻力/Pa	占总阻力百分/%
冷冻室风道	送风模块	1.39	24.2
	蒸发器室模块	0.78	13.6
	蒸发器	3.57	62.2
冷藏室风道	分配室模块	0.93	16.2
	送风模块	0.90	15.7
	回风模块	0.27	4.7
蔬菜室风道	蒸发器室模块	0.07	1.2
	蒸发器	3.57	62.2
	分配室模块	0.93	16.2
回风风道	送风模块	0.80	14.1
	回风模块	0.41	7.1
	蒸发器室模块	0.02	0.3
蒸发器	3.57	62.2	

根据仿真计算数值,可以得到以下三个结果:

1) 减小冰箱风量分配室阻力是减小整体风道系统的阻力的重要途径。首先对冷冻室风道来说,分配室即是送风模块,分配室压降占了整体风道压降的24.2%,减小分配室的压降可显著减小整体风道压降。其次由于各箱室的风都经过分配室,对分配室的优化可以同时减小各个箱室风道的阻力。在仿真时通过增加导流板和肋片的方式可使分配室阻力减小。

2) 减小出风口阻力是减少各支路风道阻力的主要手段。对于冷冻室和冷藏室来说,出风口阻力分别占了总阻力的24.4%和15.7%,是除了蒸发器和分配室之外最多的部分。

3) 蔬菜室的风道设计应以减小体积为重点。由于蔬菜室的风量需求很小,蔬菜室风道的压降远大于其他部分。故蔬菜室风道设计的第一目标不是使得阻力尽可能减小,而是应该配合其他风道的位置,尽可能减小整体风道的体积,提高箱室内的使用容积。

5 结论

提出了间冷冰箱风道系统的模块化计算方法,得到的结论如下:

1) 提出了模块化计算方法求解间冷冰箱整个风道系统的流量分配特性,该方法具有方便建模、可快速求解、通用性强等优点。

2) 通过本文的分析,风道中各模块阻力可表示成流量的二次多项式。整个风道系统的求解可化为各模块阻力关系方程、系统风量关系方程、系统阻力关系方程的联立求解。

3) 采用模块化方法计算一个三门间冷冰箱流量分配特性的实例表明,仿真结果和实验测量结果吻合很好,风量的计算误差在5%以内。

4) 通过对冰箱仿真结果进行分析,本文总结了三项间冷冰箱风道的优化方向。

参考文献

- [1] 吴艳艳. 间冷冰箱的热力分析及设计[J]. 家用电器科技, 1993(4): 8-10. (Wu Yanyan. Thermal analysis and design for indirect cooling refrigerator [J]. Science and Technology of Household Electric Appliance, 1993(4): 8-10.)
- [2] 何国新, 孔宁军. 间冷式家用电冰箱风路系统的设计要点[J]. 制冷, 1999(1): 47-49. (He Guoxin, Kong Ningjun. The pith to lay out air circulation system of household frost-free refrigerator [J]. Refrigeration, 1999(1): 47-49.)
- [3] 慕志光, 陈曦, 王建中. 新型带透明玻璃门的三门无霜冰箱设计[J]. 制冷技术, 2012(2): 67-74. (Mu Zhiguang, Chen

- Xi, Wang Jianzhong. Design of three doors frost-free refrigerator with transparent glass door [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2012(2): 67-74.)
- [4] 华绍曾, 杨学宁. 实用流体阻力手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 85-154.
- [5] 陈林辉, 王石, 田怀璋, 等. 电冰箱仿真计算研究概述 [J]. 制冷与空调, 2005, 5(3): 9-14. (Chen Linhui, Wang Shi, Tian Huaizhang, et al. Summarization on simulation research of refrigerator/freezer [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2005, 5(3): 9-14.)
- [6] 俞炳丰, 费继友, 孟祥兆, 等. 间冷式冰箱冷冻室内流场的PIV测试和计算模拟 [J]. 制冷学报, 2003, 24(2): 32-36. (Yu Bingfeng, Fei Jiyu, Meng Xiangzhao, et al. PIV measurement and numerical simulation of the inner flow field of freezer chest of frost-free refrigerator [J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(2): 32-36.)
- [7] 陈成, 刘志峰, 罗建, 等. 基于Fluent的风冷冰箱的风道结构优化设计 [J]. 日用电器, 2013(5): 30-35. (Chen Cheng, Liu Zhifeng, Luo Jian, et al. The optimization design of air-cooled refrigerator duct based on fluent [J]. Electrical Appliances, 2013(5): 30-35.)
- [8] 白连社, 王瑶, 关鹏, 等. 基于CFD的风冷冰箱风道系统研究 [J]. 电器, 2012(Suppl.): 122-126. (Bai Lianshe, Wang Yao, Guan Peng, et al. Studies on the air duct system of the air-cooled refrigerator based on CFD [J]. China Appliance, 2012(Suppl.): 122-126.)
- [9] 胡伟, 阙雄才, 陈芝久. 间冷式电冰箱空气流道压力损失数值研究 [C]//上海市制冷学会学术年会论文集. 上海: 上海市制冷学会, 1997: 631-635
- [10] 阙雄才, 于兵, 丁国良, 等. 间冷式电冰箱风道阻力与流量分配特性的探讨 [J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(3): 13-16. (Que Xiongcai, Yu Bing, Ding Guoliang, et al. Study on characteristics of air tunnel resistance vs flow rate distribution in indirect-cool refrigerator [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1997, 31(3): 13-16.)
- [11] 胡伟, 冯寅山, 阙雄才, 等. 间冷式电冰箱空气流道的网络算法 [C]//上海市制冷学会学术年会论文集. 上海: 上海市制冷学会, 1997: 626-630.
- [12] 丁祖荣. 流体力学中册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 90-91.

通信作者简介

丁国良 男 教授 博导, 上海交通大学机械与动力工程学院制冷所, (021) 34206378, E-mail: glding@sjtu.edu.cn. 研究方向: 制冷空调装置的仿真、优化与新工质应用。

About the corresponding author

Ding Guoliang, male, Ph. D. / professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, + 86 21-34206378, E-mail: glding@sjtu.edu.cn. Research fields: simulation and optimization research for room air conditioner and utilization of new refrigerant.