

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.03.006

基于 CFD 技术的高效节能冷柜研发

瞿星辉¹, 潘晓涛¹, 欧凌涛¹, 许欣珏¹, 方 凯²

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 广东星星制冷设备有限公司, 广东 佛山 528000)

摘 要:针对目前冷柜的研究开发主要靠经验和简单的计算,存在产品的开发周期长,费用高的缺点,提出了基于 CFD 技术的冷柜研发,介绍了 CFD 技术、封闭式冷冻陈列柜的结构及其热负荷组成。建立三维非稳态模型,编译用户自定义函数即 UDF (User-Defined Function) 程序,利用有限容积法优化冷柜内温度场/流场。应用结果表明基于 CFD 技术的冷柜研发不仅具有效率高、能耗低等特点,而且可以掌握柜内温度分布规律、改善了柜内气流组织状况,提高了温度分布的均匀性,提高食物保鲜效果。

关 键 词:冷柜;计算流体动力学;高效节能;三维非稳态模型;有限容积法

中图分类号:TB64

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)03-0022-04

Research and Development of Energy-Efficiency Closed Display Cabinet based on CFD Technology

QU Xinghui¹, PAN Xiaotao¹, OU Lingtao¹, XU Xinyue¹, FANG Kai²

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Xing Xing refrigeration equipment co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: The research and development of the refrigerated display cabinet has a long cycle and high cost by experience and simple calculation. The research and development of the refrigerated display cabinet based on CFD technology was presented, and the CFD technology, the structure of closed display cabinets and its thermal load were introduced. The temperature field and flow field inside the closed refrigerated display cabinet was simulated by the finite volume method with an unsteady three-dimension model and compiling UDF (User-Defined Function) procedure. The application results show that the method not only has high efficiency and low energy consumption, and can master the temperature distribution characteristics and improve airflow organization inside the refrigerated display cabinet. Therefore, it has improved the uniformity of temperature distribution and effect of food preservation.

Key words: refrigerated display cabinet; computation fluid dynamics (CFD); energy-efficiency; an unsteady three-dimension model; finite volume method

随着我国《能源法》的推行和十二五节能战略计划地实施,高效、节能、降耗及减排将是制造行业产品开发、制造和推行的关键。目前已有 38 个国家和地区实施了能源效率标识制度,它表示产品能源效率等级性能指标的一种信息标签。自 2005 年 3 月 1 日起,中国生产、销售、进口的家用空调和冰箱这两类电器率先贴上带有“中国能效标识”字样的标签,美国在 2005

年制定了商用冷柜的能耗标准。2009 年召开的生态设计及能效标签法规委员会会议上,欧盟成员国一致同意提升几种产品能效的新法规。该法规规定了强制性的能效要求以及为电视和“白色家电”创建了一个高标准的能效标签体系。目前国内商用冷柜已和空调电器、电冰箱一道被列入主要耗能产品之列,实施能效标识制度只是时间问题^[1-2]。所以在能效标识推出以

收稿日期:2013-12-18;修回日期:2014-02-17

基金项目:佛山市三水区产学研项目——高效节能的冷冻陈列柜的研制开发(项目编号:2011C05)

作者简介:瞿星辉(1988),男,江西修水人,硕士研究生,主要研究方向为流体分析与制冷技术。E-mail:kuanzedezhong@126.com

后,将对冷柜企业产生较大影响。但这同时也是一个机遇,能效标识的实施,必将推动节能技术的研究。本文利用 CFD 技术进行高效节能冷柜的研发,使得冷柜内的气流组织更加合理,进而达到节能保鲜的双重要求。

1 CFD 技术及在制冷领域的应用

1.1 CFD 技术简介

CFD 英语全称 computation fluid dynamics 即计算流体动力学。CFD 技术是伴随着计算机技术和数值计算技术的发展而逐步发展起来的。它的基本原理是运用计算机数值计算求解流体流动和传热的各种守恒控制偏微分方程组,得出在连续区域内流场的离散分布,从而近似模拟流体流动情况。它集流体力学、数值计算方法以及计算机图形学于一体,这种技术允许工程师去研究不同物理条件(有些是在实验室条件下不能获得或是难以获得的)下的不同模型配置,只需花费很少的时间就能获得结果,可极大地缩短研究时间,降低研究成本^[3-4]。

1.2 CFD 在制冷领域的应用

近年来,CFD 技术开始被越来越多地应用到制冷领域中,如用于描述食品冷冻、冷藏、冷却间的气体循环以及真空冷却、冷藏链、冷凝等过程中食品中的传热问题等^[5]。凌长明和陶文铨针对直冷式冰箱进行了二维非稳态速度场和温度场的数值模拟^[6]。丁国良等对冰箱内部的二维稳态空气流场进行了模拟,研究了冰箱热负荷、内部隔板与蒸发器及门之间的间距、内部隔板的导热系数对箱内温度分布与流场的影响^[7]。由于二维流场不能准确地反映冰箱内部空气的流动情况,俞炳丰等人对冰箱箱内三维流场作了分析,并对蒸发器的布置方式进行了优化设计^[8]。冯欣等人采用雷诺应力模型对某卧式超市陈列柜的风幕进行了 CFD 仿真计算和实验验证,证明环境空气的卷吸是风幕热负荷的主要来源^[9]。Ke Zhiyu 等人利用混合模型(层流与紊流混合)对立式陈列柜风幕进行模拟,证明运用混合模型较 $k-\varepsilon$ 模型能更准确地预测柜内温度场的变化情况^[10]。将 CFD 技术应用于陈列柜节能研究,可以缩短研发周期,节约研究费用,从而降低开发成本,有利于节能产品的推广和扩大市场份额^[11-12]。

2 封闭式冷冻陈列柜结构及热负荷组成

2.1 封闭式冷冻陈列柜的结构

封闭式陈列柜的四周全封闭,柜门由玻璃制成,将柜内食品与外界隔开^[13]。封闭式冷冻陈列柜由箱体结构、制冷系统和照明系统组成。箱体的前部为带金

属镶框的多层玻璃门,金属框架内有加热导线,防止门框冻结,箱体的 5 个其它面为保温层。制冷压缩机布置在柜体的底部,冷风机挂在柜内顶部。在内立柱和箱体门封处有日关灯。

2.2 封闭式冷冻陈列柜的热负荷

封闭式冷冻陈列柜的热负荷 Q 由 4 部分组成^[14-15]: $Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3$ 。

1) 柜体传热负荷 Q_0

$$Q_0 = KF\Delta t$$

式中: K 为隔热层传导系数/($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$),由柜体隔热材料种类、厚度、板两侧换热条件决定, F 为传热面积/ m^2 , Δt 为柜内外温度差/ $^\circ C$,必须满足柜壁外表面温度高于环境露点温度, Q_0 为柜体隔热层传导引起的热负荷/ W 。

2) 门封热负荷 Q_1

由门封传入的热量约是整个陈列柜热负荷的 30% ~ 40%,门封隔热效果对制冷性能影响很大。

3) 辐射热负荷 Q_2

由柜堂内照明、高温物体通过陈列柜的玻璃辐射传热引起的,可按灰体间辐射换热公式简化后计算。

4) 内部热负荷 Q_3

$$Q_3 = Q_{31} + Q_{32} + Q_{33} + Q_{34}$$

式中: Q_{31} 为融霜恢复热量,在融霜结束后为了使柜内温度下降至陈列柜使用温度所消耗的制冷量, Q_{32} 为风机发热量,是指柜内风机的工作热,它在数值上等于风机的功率, Q_{33} 为防霜加热器发热量,陈列柜结构的某些部位温度较低,需使用电加热提高表面温度以防止结露、结霜,这部分热量会传入柜内, Q_{34} 为照明发热量,陈列柜内照明会将一部分光能及热能(电灯发热)传入柜内,实际照明、防霜加热器发热量等只有部分传入柜内,传入系统约为 55% ~ 65%。

2.3 制冷系统

制冷系统是冷冻陈列柜的核心,其主要由压缩机、冷凝器、蒸发器和节流毛细管 4 部分组成。要对制冷系统有更深地了解,首先必须了解制冷系统的组成部件。图 1 为制冷系统结构简图。压缩机为 NJ2192GK;蒸发器为 5R6K850L,片距 5 mm;制冷剂 R404,制冷剂充注量 450 g。

压缩机是制冷循环的动力,由电动机带动,主要工作是及时抽出蒸发器内的蒸气、维持低温低压和创造制冷剂热量转移的条件。即将低温低压的制冷剂蒸气压缩为高温高压状态,以便用常温的冷却介质(水或空气)来冷却制冷剂蒸气。

冷凝器是一个热交换装置,作用是利用冷却介质(水或空气),带走来自压缩机的高温高压制冷蒸气的热量,使高温高压制冷剂蒸气变成高压常温的制冷剂液体。同时冷凝器在将制冷剂冷却成液体的过程中,压力保持不变,仍然为高压。

节流元件是一个降压设备,在日常生活中的冰箱、空调常用毛细管作为节流元件。节流元件的主要作用是降低制冷剂液体的压力,使高压的制冷剂液体变为低压的制冷剂液体。根据饱和压力和饱和温度的对应原理,通过降低制冷剂液体的压力,从而降低制冷剂液体的温度,得到低温低压制冷剂,再送入蒸发器内吸热蒸发。

蒸发器也是一个热交换装置。来自节流元件的低温低压制冷剂液体进入蒸发器,蒸发变为蒸气,吸收被冷却物质的热量,从而使物质温度下降,达到冷藏和冷冻食品的目的。蒸发器内制冷剂的蒸发温度越低,被冷却物的温度也越低。因此蒸发器性能的优劣,直接影响着制冷效果的好坏。

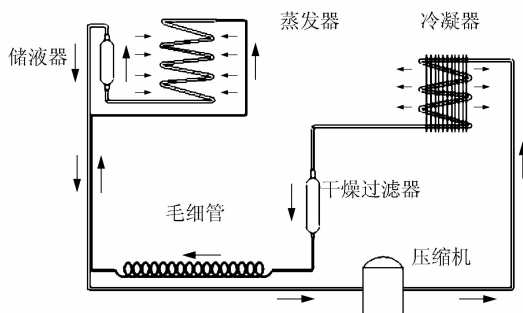


图1 制冷系统结构简图

Figure 1 Structure sketch of refrigeration system

3 高效节能冷柜研究

运用CFD技术进行冷柜研发,首先建立三维非稳态模型,编译UDF(User-Defined Function)程序,利用有限容积法进行数值模拟得到封闭式冷冻陈列柜内温度场/流场的变化情况;然后对冷冻陈列柜结构进行改进,优化柜内温度场/流场,最终达到节能效果。

3.1 FLUENT 软件介绍

FLUENT软件是由美国FLUENT公司于1983年推出的基于有限体积法的CFD软件,是目前功能最全面、国内使用最广泛和适用性最广的CFD软件之一。FLUENT软件提供了非常灵活的网格特性,让用户可以使用非结构网格,包括三角形、四边形、四面体、六面体、金字塔形网格来解决具有复杂外形的流动,甚至可以用混合型非结构网格。它允许用户根据具体情况对网格进行修改(细化/粗化)。FLUENT使用GAMBIT

作为前处理软件,它可读入多种CAD软件的三维几何模型和多种CAE软件的网格模型。FLUENT可用于二维平面、二维轴对称和三维流动分析,可完成多种参考系下流场模拟、定常与非定常流动分析、不可压流和可压流动计算、层流和湍流模拟、传热和热混合分析、化学组分混合和反应分析、多相流分析、多孔介质分析、固体与流体耦合传热分析等。它的湍流模型包括 $\kappa-\varepsilon$ 模型、Reynolds应力模型、标准壁面函数、LES模型及双层近壁模型等。FLUENT是一个模型丰富、功能强大、计算能力强的CFD软件,非常适合本课题的流体流动分析^[16-17]。图2为CFD基本工作流程图。

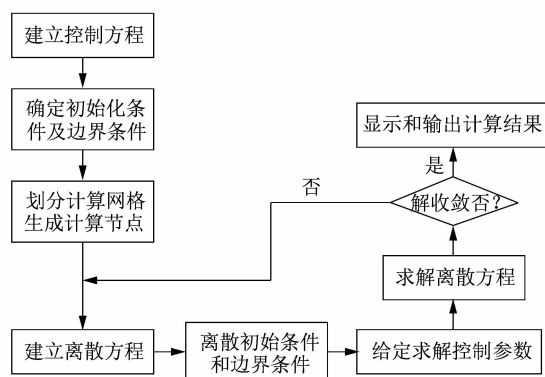


图2 CFD 工作流程图

Figure 2 Working flow chart of CFD solution

3.2 温度场/流场优化

封闭式冷冻陈列柜中的食物保存质量直接依赖于柜内空气的流场和温度分布,其耗电量也同柜内温度场和流场密切相关,因此温度场与流场的优化是冷柜设计的重点。封闭式冷冻陈列柜存在容积大和内部温度均匀性差的突出问题,而温度均匀性对于保鲜性能有着重要的影响,同时温度分布特性是评价陈列柜性能优劣的重要指标。运用CFD技术进行温度场/流场优化主要从如下三方面来研究:①对现有空载陈列柜样机进行二维及三维模拟,分析气流的动量传递和热量传递机理;②对风道系统进行改进,采用可调式风口进行智能调风,使陈列柜内温度分布均匀;③进行带负载模拟,研究负载对气流组织的影响以及负载温度分布。

3.2.1 模型建立

采用广东星星制冷设备有限公司提供的D768BMF2双门封闭式立式冷冻陈列柜作为研究对象,外形尺寸为1 250 mm × 665 mm × 2 040 mm;容积为768 L;冷却方式是风冷;冷却性能温度为-23 ~ -15℃;双层玻璃门,具有良好的保温效果,其结构简

图见图3。以柜内的空气作为研究对象,取内壁为边界,初值与边界条件通过实验来获得。

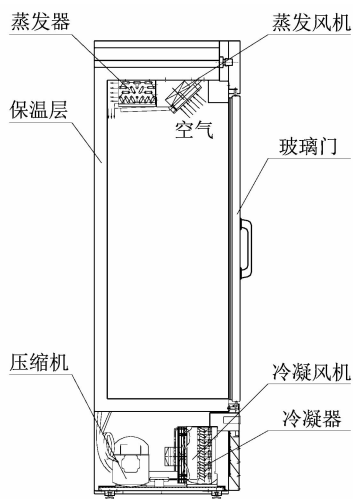


图3 封闭式冷冻陈列柜结构简图

Figure 3 Structure sketch of a closed and air cooled refrigerated display cabinet

3.2.2 模型假设

由于模型的复杂性,对柜内空气的流动和换热进行如下假设^[18-19]:

1) 忽略冷冻陈列柜内相变过程,认为冷冻陈列柜内的空气是干空气且为牛顿流体。

2) 空气流动的形式为非稳态、紊流(标准 $k-\varepsilon$ 模型)。

3) 在柜内表面的空气满足无滑动的边界条件。

4) 满足 Boussinesq 假设,即流体中的黏性耗散忽略不计;除密度外,其它物性为常数;对密度仅考虑动量方程中与体积力有关的项,其余各项中的密度作为常数处理。

5) 冷冻陈列柜内的空气流动速度比较低,压力变化小,因此可以忽略压缩性的影响。把柜内的空气作为不可压缩流体处理,密度变量仅与温度有关,即密度和温度的函数表达式

$$\rho = F(T)。$$

6) 计算时通过实验获取各壁面温度,所以边界条件为第一类边界条件。

4 结语

基于 CFD 技术的高效节能冷柜研发,与传统的冷柜研发相比有以下优势:①研究成本低,周期快;②不受实验仪器的干扰;③能够获得完整的资料;④计算结果重复性好。利用 CFD 技术最终研制出了封闭式冷冻陈列柜样机,改善了陈列柜内部气流组织状况,提高

陈列柜内部温度分布的均匀性,使其能耗降低了 15% 左右。

CFD 技术优势众多,但 CFD 模拟也存在一定的局限性,不可能完全替代实验研究,CFD 模拟结果都需要通过实验进行验证。结合 CFD 模拟优化和实验研究,可为节能降耗以及提高保鲜性能提供设计依据,降低研发成本,提升冷柜企业的市场竞争力,扩大出口,并可为其它系列产品的改造和新产品的研发提供参考,进而开拓更广阔的市场。高效节能商用冷柜的研发,符合国家的“可持续发展”战略,有利于推广节能产品,具有显著的节能、环保和经济效益。

参考文献:

- [1] 仇颖. 冷柜:能效标识的“不明地带”[J]. 电器,2005(4):30-31.
- [2] 肖寒,殷明汉,李爱仙,等. 我国节能标准现状与展望[J]. 中国标准化,2004(2):27-29.
- [3] 高远. 多孔介质对火焰及压力波抑制作用的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2010.
- [4] 王坐中. 地铁消防联动控制决策研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [5] 吴天,谢晶. CFD 技术在制冷领域流场优化设计中的应用[J]. 制冷与空调,2005,5(4):69-71.
- [6] 凌长明,陶文铨. 冰箱内非稳态自然对流的二维数值模拟[J]. 西安交通大学学报,1982,29(10):35-41.
- [7] 丁国良, OELLRICH L R. 冰箱箱内空气温度场和流场的优化研究[J]. 制冷学报,1998(1):22-27.
- [8] 俞炳丰,万军,王志刚,等. 冷冻箱内温度场速度场的模拟计算[J]. 制冷学报,1995(1):51-57.
- [9] 冯欣,陈江平,穆景阳. 立式陈列柜双层风幕的 CFD 优化[J]. 制冷学报,2001(2):32-36.
- [10] YU Kezhi, DING Guoliang, CHEN Tianji. Simulation of air curtains for vertical display cases with a two-fluid model [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14/15):2583-2591.
- [11] 卢安乐,钱锦远,张含,等. 基于 CFD 的垂直管路中先导式截止阀动力特性研究[J]. 轻工机械,2013,31(5):15-18.
- [12] 周迪锋,刘冬玉. 耦合 DEM-CFD 法双入口磨粒流动力学模拟及加工试验[J]. 机电工程,2013,30(12):1467-1471.
- [13] 余克志,丁国良,陈天及. 陈列柜研究现状及分析[J]. 制冷空调与电力机械,2004,1(25):8-12.
- [14] 李援瑛. 商用制冷设备实用维修入门[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [15] 张华. 超市冷冻展示柜内循环风量对其性能的影响[J]. 流体机械,2001,49(1):47-49.
- [16] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [17] 顾继蓉. 散流器送风的数值模拟研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
- [18] 苏庆勇,贺广兴. 冷藏展示柜内温度场的数值模拟及实验[J]. 低温工程,2007(2):65-68.
- [19] 吴小华,吴业正,曹小林. 冰箱室内温度场和流场的仿真及结构优化[J]. 制冷学报,2004(1):36-38.