

基于 CFD 的风冷冰箱风道系统研究

白连社 王瑶 关鹏 洪小军 罗健
(合肥美菱股份有限公司 230601)

摘要: 在现代家庭生活中,冰箱扮演着重要角色,已成为现代家庭必不可少的家用电器之一。冰箱冷藏室内的流场分布及温度分布对储存在其内的食品有着重要影响,而流场分布及温度分布取决于冷藏室风口位置及内部结构。本文通过对冰箱冷藏室进行 CFD 建模仿真,并根据仿真结果对冰箱冷藏室风道系统进行针对性的改进,很大程度上提高了冰箱冷藏室内部温度分布均匀性,改善了其流场分布,这样对冰箱冷藏室食物储存及降低冰箱能耗大有裨益。

关键词: CFD 风冷冰箱 风道系统 温度均匀性

Studies on the Air Duct System of the Air-cooled Refrigerator Based on CFD

Bai Lianshe, Wang Yao, Guan Peng, Hong Xiaojun, Luo Jian
(Hefei Meiling Co. Ltd., 230601)

Abstract: In the modern family life, the refrigerator plays an important role, has become one of the modern family essential household appliances. The flow field distribution and the temperature distribution of refrigerating chamber of refrigerator which has an important influence on the food stored in it. And the flow field distribution and the temperature distribution depend on the air inlet position and internal structure of refrigerating chamber. In this article, a CFD modeling and simulation for the refrigerator refrigerating chamber is built. According to the simulation results of the refrigerator refrigerating chamber, an improvement of the air inlet position and the internal structure is made, which largely improves the refrigerating chamber of the refrigerator temperature distribution uniformity, and improves the distribution of flow field. That is of benefit to the food storage of the refrigerator refrigerating chamber and the energy consumption reduction of refrigerator.

Keywords: CFD, Air-cooled refrigerator, Air duct system, Temperature uniformity

1 引言

食品的生产、运输和销售流程以及消费者购买后的储存,都必须应用相关的冷藏冷冻设备,使其在一定时间内不变质。消费者是食品消费链的最后一个环节,具有冷藏冷冻能力的家用冰箱是其家庭生活中必不可少的电器之一。冰箱中的食物保质取决于冰箱内的温度分布及空气流场,冰箱型式试验时其耗电量也与冰箱内温度场密切相

关^[1]。因此在冰箱设计与改进中,通过温度场及空气流场的优化,提高箱体内部温度的均匀性,是个较为重要的课题。

当前国内外许多学者都在研究这个课题。俞炳丰等应用 SIMPLE 算法,耦合冰箱的气体区域和固体区域的热传导过程,结合冰箱制冷系统的特性进行建模仿真,实现了对冰箱箱体保温层及其内部的导热、辐射相耦合的热传导进程的计算^{[2][3]};凌长明、陶文铨通过对冰箱进行二维数

第一作者简介:白连社(1968.6—)男,西北工业大学飞机设计专业工学硕士,现任合肥美菱股份有限公司技术总监兼研究院院长。

值仿真,分析了冰箱非稳态自然对流过程^[4];丁国良与 Oellrich, L. R 采用 FIDAP 有限元分析程序,仿真计算冰箱内部空气流场,并结合相应实验研究,通过对多种不同内部结构的冰箱进行比较分析,总结出一套针对冰箱内部温度场进行优化的方法^{[5][6]}。

这些分析都是建立在二维仿真建模基础上的,与冰箱实际结构形式相差太大,对仿真结果的准确性有不利影响。因此,本文将对家用冰箱进行三维建模 CFD 仿真,并优化其风道系统,从而提高其内部温度分布的均匀性。

2 仿真模型

2.1 物理模型

本文研究对象为新研发过程中的某系列风冷冰箱冷藏室,结构示意图如图 1。

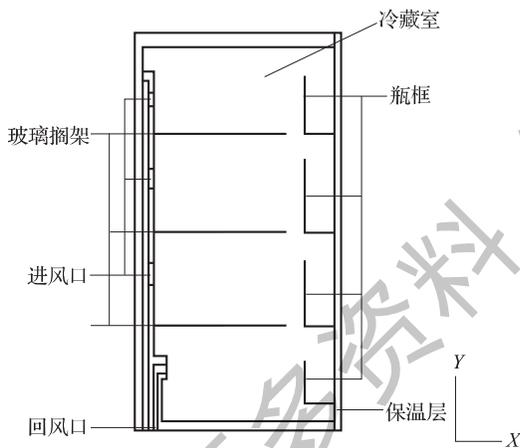


图 1 冷藏室示意图

该冰箱的蒸发器位于冷冻室内,冷藏室通过图 1 的进风口及冷冻室的风道系统获得制冷源,实现制冷功能。

2.2 仿真模型

图 1 仅仅画出本文中仿真模型坐标系的 X 向和 Y 向,XY 平面方向即坐标系的 Z 向。在综合计算准确性及复杂性的前提下,本文对该仿真模型做以下假设:冷藏室进风口为恒温内冷源。冷藏室内的空气为牛顿流体。冷藏室内的空气与固体内表面之间满足无滑移条件。忽略辐射热传动的

影响,把冷藏室内空气当作理想气体处理。不考虑其相变过程,在相关壁面的导热系数中考虑门封的影响。冷藏室内空气密度为常数,仅考虑动量方程中与体积力相关项时例外。冷藏室空气粘性耗散不作考虑。冷藏室空气的其他物性作为常数考虑。

依据动量守恒定理、质量守恒定理及能量守恒定理,流体的控制方程可以写成以下形式:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \mu \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \mu \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right\} - \rho g \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \mu \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial z} \\ &= k \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 μ, v, w 分别指流体在 x, y, z 向的速度, ρ, T, k, C_p, μ 为流体的密度、温度、导热系数、比定压热容、动力粘度, g 和 t 分别指重力加速度和时间。

3 CFD 仿真的实现

CFD 仿真计算过程分为以下几个步骤:

(1) 模型网格划分要求。

- a. 模型网格数量控制在 70 万左右。
- b. 网格倾斜率在 0.6 以下。
- c. 控制壁面网格 Y^+ 在 30 ~ 60。

(2) CFD 仿真模型的选择。

- a. 启用能量方程。
- b. 选择稳定性和计算精度较高的标准 $\kappa - \epsilon$ 模型。

(3) CFD 仿真参数设定。

a. 设定保温层的材料属性。

b. 设定界面参数。

c. 速度入口的初始速度为 2.4m/s, 温度为 263K, 压力出口的温度为 278k。

(4) 初始化仿真模型的流场。

(5) 设置计算残差 $< 10^{-5}$, 开始迭代计算直到计算收敛。

(6) 对计算结果进行检查, 查看进口流量与出口流量的差值是否在 1% 以内。

(7) 保存结果, 以供参考与研究。

4 CFD 仿真结果的分析及研究

4.1 CFD 仿真模型的验证

为了对所建的仿真模型进行验证, 以确保其准确性, 本文对冰箱冷藏室布置一系列温度传感器, 采集冰箱稳定工作时冷藏室的温度分布数据。实验数据与 CFD 仿真数据对比如表 1。

表 1 冷藏室部分点的温度实验数据与仿真数据对比

对比点	1	2	3	4	5	6
T_c (°C)	9.31	7.01	5.19	6.12	4.58	3.21
T_s (°C)	8.62	6.56	5.74	5.21	4.82	2.89
Sum(%)	7.4	6.4	10.6	14.9	5.2	10.0

注: T_c 为仿真数据(°C), T_s 为实验数据(°C), Sum 为相对差值百分比(%)。

从表 1 的数据对比可以看出, 仿真数据与实验数据能很好地吻合, 相对差值的百分比也较小。因此, 可以判定本文建立的 CFD 仿真模型是可靠的。

4.2 改进前的 CFD 仿真结果

首先, 本文对建立的冰箱冷藏室的 CFD 仿真模型进行计算, 流场分布图如图 2。实验数据中各个考察点温度与 CFD 仿真模型中相对应点的温度如表 2 所示。

结合流场分布及各层流量分布, 可以判断整个冷藏室的顶层较热, 温度高的测试点集中在上部。从表 2 的温度分布可得出, 该冰箱冷藏室中温度考察点的最高点在第一层, 整体温度最大差值为 7.56°C, 与 CFD 仿真模型中的温度最大差值 6.84°C 较为接近, 整体温度均匀性较差。

4.3 改进后的 CFD 仿真结果

参考 4.2 中的 CFD 仿真结果及实验数据(如表 2 及图 2), 可分析得出, 冷藏室的顶层冷量分配较少, 两侧冷量分配较少, 冷量集中在室内中部, 整个冷藏室的温度分布是顶层热、下层冷、两侧热、中间冷。

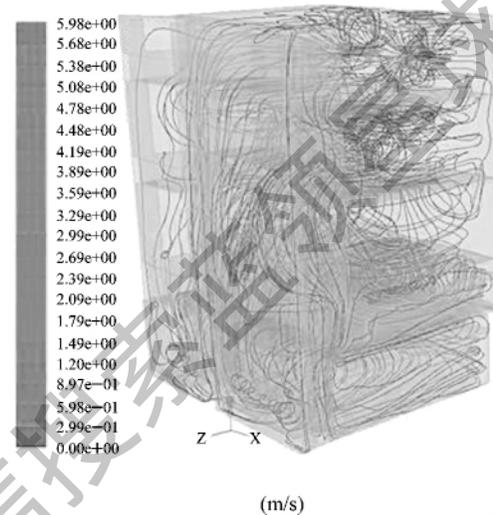


图 2 冷藏室流场仿真图

表 2 冷藏室考察点的温度实验数据与仿真数据

考察点	1	...	4	...	18	...	T_{max}
T_c (°C)	1.86	...	1.75	...	9.31	...	7.56
T_s (°C)	1.78	...	1.85	...	8.62	...	6.84

注: T_c 为仿真数据(°C), T_s 为实验数据(°C), T_{max} 为最大差值(°C)。由于测试点有 30 多个, 表中仅显示部分。

根据分析结果, 我们设计了一款新风道结构(目前该风道已申请专利保护, 专利号: 201120431162) 如图 3 所示。该风道有以下特点:

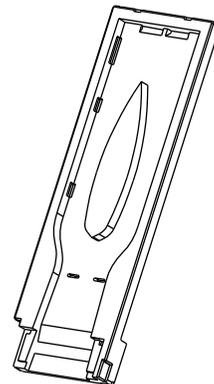


图 3 新风道结构

- (1) 增加顶层出风口数量,增加冷量占比。
- (2) 两侧出风口调整为侧出风状态。
- (3) 优化风道内部分流结构,减小内部风压损失。
- (4) 优化出风口附件结构,提高出风效率。
- (5) 各出风口的出风速度相近。

随后对新结构进行了 CFD 仿真模型计算,其中图 4 为其流场分布图,图 5 为其温度场分布图,表 3 为实验数据中各个温度考察点温度与 CFD 仿真模型中相对应点的温度。

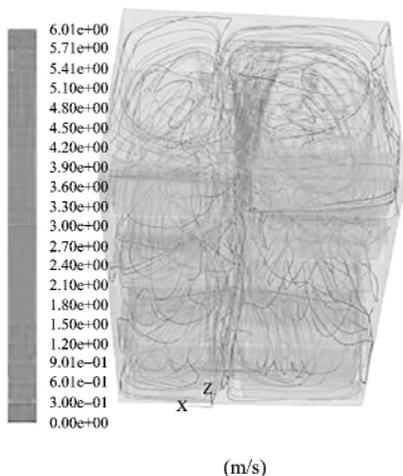


图 4 改进后冷藏室流场仿真图

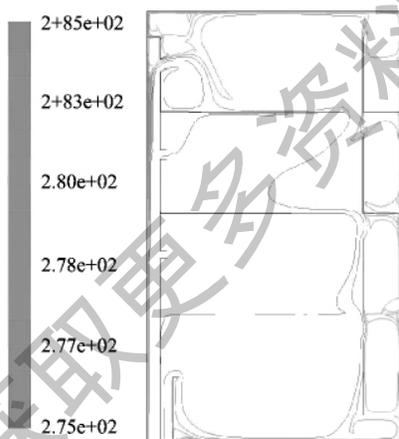


图 5 改进后冷藏室温度分布仿真图

对比图 2 与图 3、表 2 及表 3 数据可以发现:经过对冷藏风道的优化,箱内整体仿真结果大幅度提升。从表 3 中的 T_c 数据可发现:顶层考察点及两侧考察点的温度明显降低,CFD 仿真模型中相对应点的温度最大差值为 1.81°C 。

4.4 实验结果分析

随后我们做出手板件进行试验并和仿真结果对比验证,不断优化结果,利用风速风压设备测出各出风口的风速值并与仿真结果对比,见表 4。

表 4 冷藏室各出风口的速度值实验数据与仿真数据

出风口	1	2	3	4	5
V_c (m/s)	3.5	3.4	3.4	3.4	3
V_s (m/s)	3.6	3.4	3.5	3.5	3.1

注: V_c 为仿真数据(m/s), V_s 为实验测试数据(m/s),风道结构左右对称,取一侧的风口数据进行对比。

从测试数据可看出,各出风口的出风速度相近,与我们设计风道时的初衷相符。这说明对改进后的 CFD 仿真模型也是准确可靠的。

从表 3 中的 T_s 数据可发现,实验数据与仿真结果相像。顶层及两侧考察点的温度有了明显降低,冷藏室中温度考察点温度最大差值为 1.90°C ,与仿真结果相近,这说明对该风道结构的优化是成功的。

5 结论总结

本文对某款家用冰箱冷藏室进行 CFD 仿真计算,并对计算结果进行实验验证,通过对比验证了本文建立的 CFD 仿真模型的准确性。

结合 CFD 仿真结果及实验数据,对该型冰箱冷藏室风道进行一系列改进,从而大大提高了该型冰箱冷藏室的温度均匀性,这样在改善冰箱食品存储性的同时,又在某种程度对冰箱能耗降低做出贡献。

表 3 改进后冷藏室温度考察点的温度实验数据与仿真数据

考察点	1	...	6	...	10	...	20	21	22	...	T_{\max}
T_c ($^\circ\text{C}$)	5.10	...	4.21	...	4.34	...	6.11	6.03	5.99	...	1.90
T_s ($^\circ\text{C}$)	5.34	...	4.42	...	4.35	...	6.02	6.16	6.14	...	1.81

注: T_c 为仿真数据($^\circ\text{C}$), T_s 为实验数据($^\circ\text{C}$), T_{\max} 为最大差值($^\circ\text{C}$),由于测试点有 30 多个,表中仅显示部分。

参考文献:

- [1]丁国良. 冰箱箱体内空气场与流场的优化研究[J]. 制冷学报, 1998(1): 22~27
- [2]俞炳丰, 葛军, 王志刚等. 冷冻箱内温度场、速度场的计算模拟[J]. 制冷学报, 1997(1): 51~57
- [3]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(2): 32~36

[4]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, 1995(10): 35~41

[5]丁国良, Oellrich, L. R. 冰箱箱内空气温度场与流场的优化研究[J]. 制冷学报, 1998(1): 22~27

[6]丁国良, Oellrich, L. R. 冰箱中空气流场和温度场的有限元模拟[J]. 上海交通大学学报, 1998(7): 18~22