

风循环系统优化对风冷冰箱能效提升的研究

陈俊 杨帆
(合肥美菱股份有限公司 安徽合肥 230601)

摘要: 本文以一款对开门风冷冰箱产品作为研究对象,依据初步摸底测试数据结果,分析此款冰箱风循环系统中存在的不足,再通过理论分析、CFD分析以及风压-流量测试验证等手段制定出风循环系统的优化设计方案。根据优化方案制作出原理样机并完成整机性能测试。结果表明,经过优化设计的风循环系统可以实现此款对开门冰箱整机耗电量降低约20%的目标要求。

关键词: 风循环效率; CFD分析; 蒸发温度

Study on-improvement of energy efficiency of frost free refrigerator by the way of the optimization of air circulation system

CHEN Jun YANG Fan
(Hefei Meiling Company Limited Co., Ltd. Hefei 230601)

Abstract: An frost free refrigerator with side-by-side combination doors as the research object in this paper. Shortcomings of the refrigerator air circulation system design are analyzed on the basis of the results of preliminary diagnostic test data. Optimized design schemes of air circulation system are developed through the theoretical analysis, CFD and pressure-flow testing and so on. A prototype is fabricated according to the optimization schemes and the performance test of the frost free refrigerator is completed. The results show that the goal of reducing the energy consumption by about 20% can be achieved by the way of the optimization of the air circulation system for the frost free refrigerator with side-by-side combination doors.

Keywords: Air circulation efficiency; CFD analysis; Evaporation temperature

1 引言

随着冰箱技术的不断成熟,冰箱产品也从原来的直冷冰箱逐渐升级为更为先进的风冷无霜冰箱。风冷无霜冰箱的风循环系统负责将箱体的高温空气循环至蒸发器腔室内,并与蒸发器进行热交换,再将经过蒸发器冷却的低温空气循环至箱内,与箱内储存的食物进行热交换,从而达到给储藏食物制冷的效果。因此,风冷无霜冰箱风循环系统的风循环效率对冰箱产品整机的能效水平有着关键性的影响。

本文以一款风冷无霜对开门冰箱产品作为研究对象,通过对该产品的相关测试数据进行分析后,针对其风循环系统存在的问题提出了全新的设计方案,并利用CFD分析技术和风压-流量测试手段对新的风循环系统设计方案进行了模拟运算与进一步优化,最终顺利达成了降低整机耗电量的改进目标。

2 系统分析

通过对研究对象原始状态的相关试验数据

进行分析,发现该产品有如下一些影响产品耗电量的问题,而这些问题都与风循环系统的设计存在密切的关系:

- (1) 冷冻蒸发温度实测在 $-32^{\circ}\text{C}\sim-34^{\circ}\text{C}$,远远低于目标设计温度 $-27^{\circ}\text{C}\sim-29^{\circ}\text{C}$;
- (2) 冷藏蒸发温度实测在 -25°C 左右,远远低于目标设计温度 $-13^{\circ}\text{C}\sim-17^{\circ}\text{C}$;
- (3) 冷冻室内温差实测在 $4^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ 左右,远高于 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的目标设计温差。

图1是某款压缩机制冷量和制冷效率

(COP) 随蒸发温度变化而变化的关系曲线, 从图1中可以看出, 制冷系统的制冷量和制冷效率 (COP) 都会随着蒸发温度的降低而降低, 由此将造成冰箱整机耗电量偏高, 压缩机运行率偏高。因此, 提高蒸发温度不仅可以提高压机的制冷效率 (COP), 实现整机能效提升的目的, 而且可以提高系统的制冷量, 降低整机开机率。

冰箱是一个内部有冷源的绝热箱体, 当环境温度稳定, 箱体内部间室空气温度稳定后, 箱体的从环境的吸热量也随之稳定, 漏入箱体的热量由蒸发器制冷进行平衡, 换热关联式可以表示为:

$$q = hA_E(T_c - T_{evap}) \quad (1)$$

常见冰箱用翅片蒸发器的空气侧传热系数h的计算式^[1]为:

$$h = \frac{k}{D_0} \cdot 0.162 \cdot \left(\frac{\rho_a Q D_0}{A_c \mu_a}\right)^{0.61} Pr^{1/3} \quad (2)$$

其中:

- q——箱体漏热量;
- h——蒸发器的空气侧传热系数;
- A_E ——蒸发器空气侧有效传热面积;
- T_c ——箱内空气温度;
- T_{evap} ——蒸发温度;
- k——空气导热系数;
- D_0 ——翅片管外径;
- ρ_a ——空气密度;
- Q——循环风量;
- A_c ——蒸发器进风截面积;
- μ_a ——空气粘度系数;

Pr——普朗特数。

根据式 (1) 可知, 在冰箱漏热量q不变的情况下, 想要用提高系统蒸发温度的手段来提升冰箱制冷系统的制冷量和制冷效率, 可以通过增加蒸发器空气侧有效传热面积 A_E 和提升蒸发器空气侧传热系数h的方式实现。根据式 (2) 可知, 加大翅片管外径 D_0 、加大蒸发器进风截面积 A_c 以及提高风循环系统的循环风量Q等都是提高蒸发器空气侧传热系数h的有效手段。

不同的风循环设计, 其系统阻力不同, 会对风机运行时的空气流量和压力产生影响, 使其运行工况点发生偏移^[2] (如图2所示), 在风循环系统的设计过程中, 可以通过实验检测的方法获得风扇和风循环的压力-流量特性曲线 (P-Q图), 获得风机的实际运行工况点, 进而评估风循环系统的设计是否满足制冷系统匹配的要求, 实现了增大系统风量的设计目标。

依据无霜冰箱目前的性能测试方法^[3], 要求冷冻室最热的区域温度要 $\leq -18^\circ\text{C}$, 因此若冷冻室的风量分配设计不合理, 导致局部区域温度过高, 会造成制冷量的严重浪费, 也会导致整机耗电量偏高, 冰箱运行率偏高。

基于以上分析, 决定从以下几个方面进行系统的改进:

- (1) 优化风循环的设计, 避免风循环内形成涡流等风循环不畅的问题, 提高风循环效率;
- (2) 优化风循环系统与风扇电机的匹配设计, 提高系统循环风量, 增强空气侧换热性能, 从而达到提高蒸发温度的目的;

(3) 优化出风口布局 and 出风口面积的分布, 改善冷冻室内的温度均匀性, 避免由于温差导致局部区域过冷而造成冷量的浪费。

3 系统优化方案

本文所研究的对开门冰箱为双循环系统, 冷

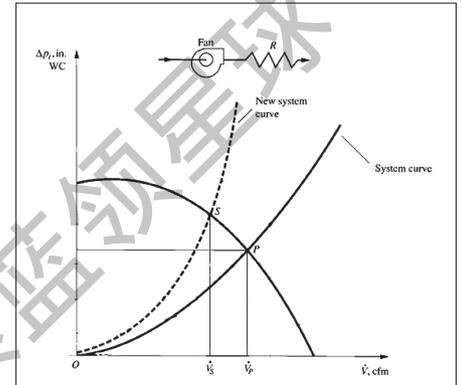


图2 风循环设计对风机实际工况的影响

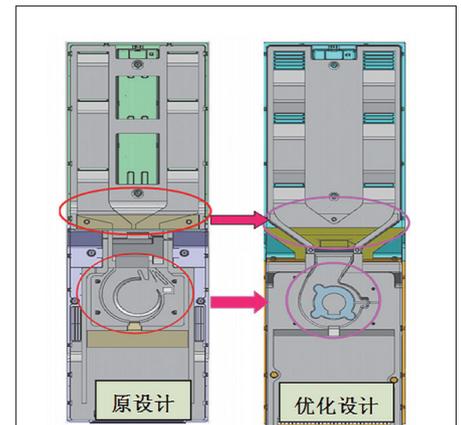


图3 冷藏风道设计优化



图4 风量测试台

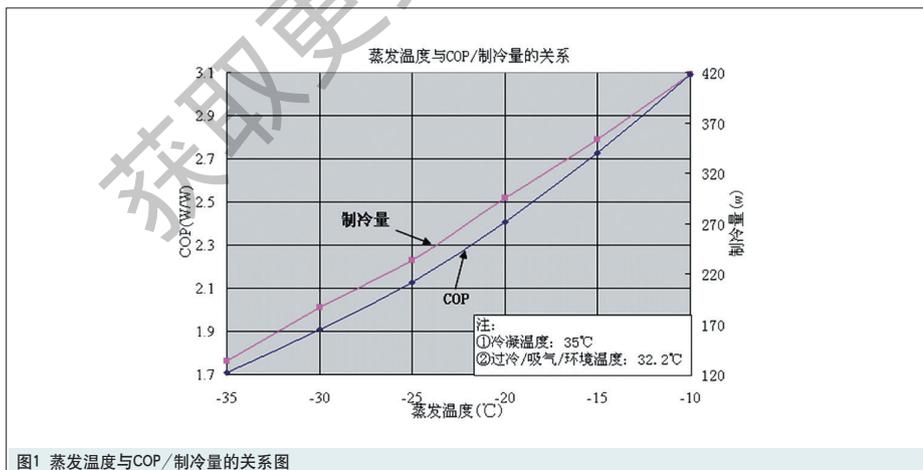


图1 蒸发温度与COP/制冷量的关系图

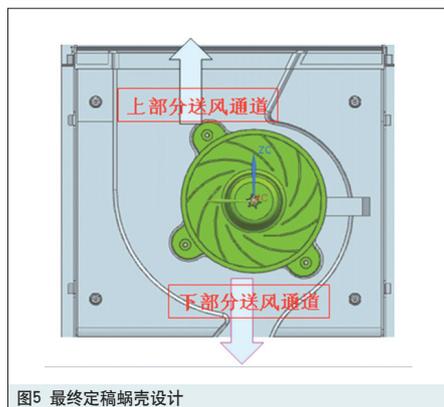


图5 最终定稿蜗壳设计

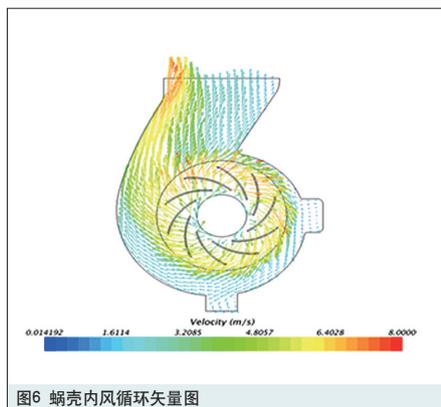


图6 蜗壳内风循环矢量图

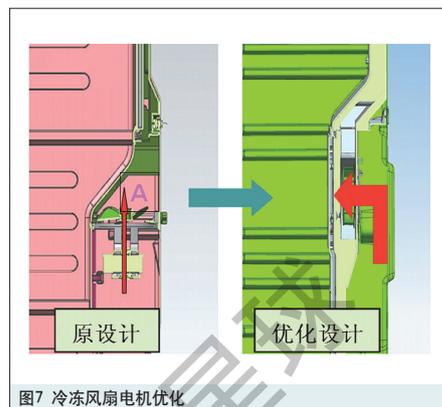


图7 冷冻风机电机优化



图8 冷冻风量分配优化



图9 冷冻出风口布局优化

藏室和冷冻室有独立的风循环系统。所以优化针对冷冻风循环系统和冷藏风循环系统分别进行。

3.1 冷藏风循环的设计优化

冷藏风道的优化目标主要是提高冷藏蒸发温度。针对该目标采用如下措施：

(1) 对风道内部风量分配的部分进行优化，减小风阻，并尽量避免出现紊流等不利于风循环的现象，同时对冷藏出风口的布局进行优化设计，改善冷藏室内温度的均匀性(图3所示)。

(2) 考虑到离心风扇的蜗壳设计对于整个风循环系统的风压、风速等关键性指标起决定性的因素，所以针对离心风扇的蜗壳设计进行了详细的分析，先通过风压-流量测试手段(图4所示)对预设的五种蜗壳设计方案逐一进行测试，根据测试结果并考虑实际结构的限制与实际风量分配的需求等因素确定了最终的蜗壳设计(图5所示)，设计完成后利用CFD辅助分析技术，绘制出了蜗壳内风循环矢量图，分析结果显示蜗壳内无窝风等不利于风循环的现象(图6所示)。

3.2 冷冻风循环的设计优化

根据前面的分析结果，冷冻风循环的优化目标主要为提高冷冻蒸发温度，改善冷冻室内温度均匀性。

(1) 原设计使用 $\phi 100\text{mm}$ 的轴流扇叶垂直向上抽风，该设计存在图7所示A区出现紊流的问题；

优化设计方案为：使用 $\phi 120\text{mm}$ 的整体式离心风扇进行替代(图7所示)，同时，借助上述离心风机的蜗壳设计分析的结论，选用最优蜗壳设计。

(2) 原设计没有在风路中设计风量分配的结构，整体出风量无法进行很好的疏导和分配。

优化设计方案为：在风路中设计风量分配结构，对出风进行合理引导与分配(图8所示)。

(3) 原设计只有风道的上半部分有出风口，下半部分完全依靠回风和箱内空气自然对流进行热交换，且上部三层出风口的大小布局也基本一致，没有针对箱体热负荷的实际分布情况有针

表1 蒸发温度的对比结果

	冷冻蒸发温度(°C)		冷藏蒸发温度(°C)	
	入口	出口	入口	出口
改进前	-33.8	-32.4	-22.2	-17.7
改进后	-29.3	-29.3	-17.0	-5.9
改善效果	4.5	3.1	5.2	11.8

表2 耗电量测试对比结果

	改进前	改进后
耗电量测试值(kW.h/24h)	1.43	1.12
能效系数 ⁽⁴⁾ η	45.9%	36.0%
能效等级	2级	1级
耗电量提升比例	21.7%	

表3 各环境温度下冷冻室温差对比结果

环境温度	10°C	25°C	38°C
改进前温差(°C)	2.5	3.8	4.9
改进后温差(°C)	2.1	2.4	2.6
温差改善幅度(°C)	0.4	1.4	2.3

对性的进行出风口面积的布局，所以造成了箱内温度的严重不均匀。

优化设计方案为：将冷冻室大致划分为上、中、下三个区域，出风口按照7:2:1的大致比例布局，尽可能的达到减小冷冻室内各处温差的目标，避免局部温度过冷导致冷量浪费而造成耗电量的增加(图9所示)。

3.3 冷冻室风循环设计方案分析

完成上述优化以后，考虑优化方案的重点为冷冻风道系统的优化设计，所以决定利用CFD辅助分析技术对优化后的冷冻风道系统进行进一步模拟分析。

(1) 从冷冻风循环蒸发器腔室进风腔内风流矢量图(图10所示)来看，显示除右上角有一小块区域存在少量紊流以外，其余位置的进风均能顺畅的进入风循环系统进行循环；

(2) CFD模拟运算所得到的冷冻进风风道内的风循环示意图(图11所示)显示，进入进风

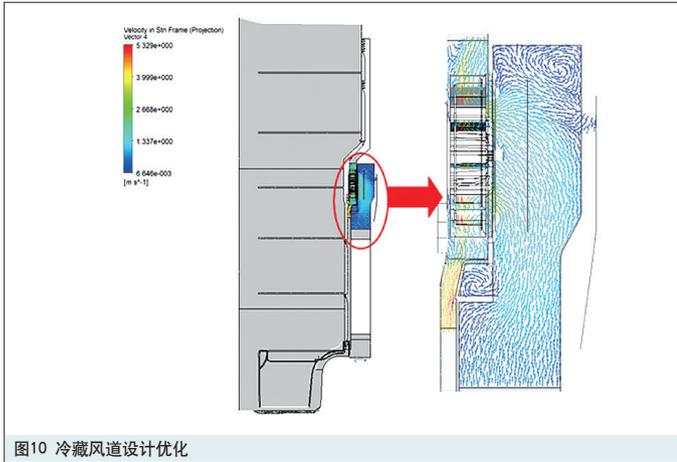


图10 冷藏风道设计优化

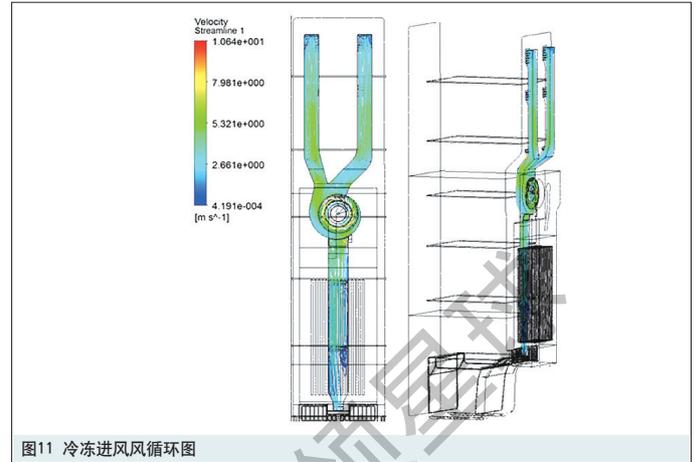


图11 冷冻进风风循环图

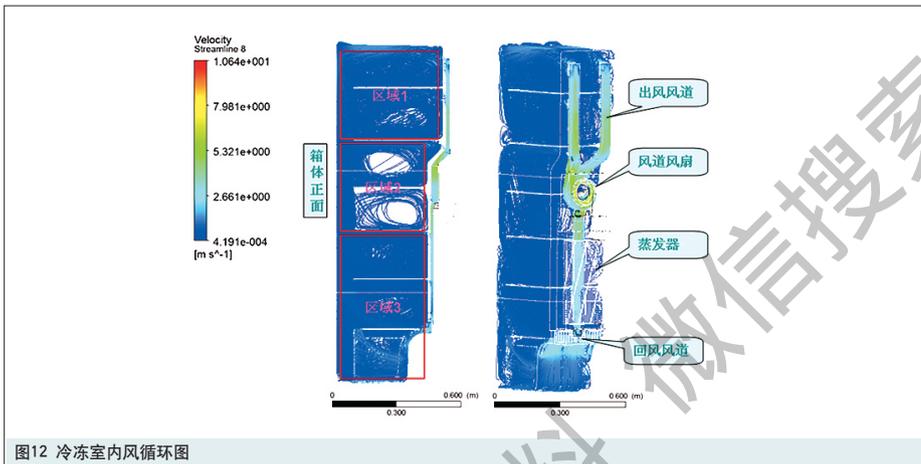


图12 冷冻室内风循环图

风道内的循环风均能顺畅的通过进风风道进行分配;

(3) 通过CFD分析模拟运算, 绘制出冷冻室内风循环图(图12所示)。从分析结果可以看出箱内区域1内风循环比较合理, 而区域2风量较小, 可以考虑在区域2适当增加出风面积, 区域3底部回风局部区域形成涡流, 说明回风存在回风不畅, 由于本文的研究前提是对产品箱体及内饰不做变更进行优化设计, 所以该问题在本文内没有进一步进行研究分析。但是针对该分析结果, 建议后续设计类似产品时考虑优化回风口的设计增加回风面积, 在结构允许的范围内尽量扩大抽屉底部与箱体之间的回风面积, 使回风更顺畅。

4 试验验证比对结果

依据上述分析结果形成最终优化设计方案

后, 制作风道手板件进行相关试验进行比对验证, 最终的比试验结果如表1~表3所示。

对比改善前后的试验数据可知, 通过优化风扇电机的匹配、优化风量分配、在风道内增加导流或分配结构以及改进蜗壳设计等手段改进风循环系统设计后进行测试, 整机性能得到了明显的改善, 各项指标基本达成了改善前的预设目标。

(1) 冷藏蒸发温度和冷冻蒸发温度均有明显上升, 都已达到了目标设计温度值;

(2) 冷冻室内的温差在不同环境温度下都有不同程度的改善, 基本达到了温差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的设计目标;

(3) 整机耗电量改善更是得到了超预期的结果, 大幅降低了约22%, 能效等级由2级跃升为了1级。

5 总结

通过本文的研究可知:

(1) 对于风冷无霜冰箱产品而言, 箱体内部风循环系统设计的优劣对于整机性能有着决定性的影响, 提升冰箱内部风循环系统的循环风量, 可以有效减小蒸发器的换热温差, 提高系统的蒸发温度, 从而达到提升冰箱制冷系统制冷量和制冷效率, 改善冰箱整体性能的目的;

(2) 箱体内部的温差, 尤其是冷冻室内的温差过大, 会造成局部区域的冷量过剩, 致使整机能量浪费严重, 改善箱体内温差能在一定程度上降低冰箱的耗电量;

(3) 在风循环系统的设计过程中, 利用CFD分析手段对设计模型进行模拟分析, 能快速、直观地发现设计中的缺陷, 并形成有效的改进指导意见;

(4) 如果设计选用离心风扇电机, 其蜗壳的设计十分重要, 需要重点关注, 本文中所述的蜗壳设计方案可供参考。

参考文献

- [1] T. H. Lee. Comparison of air-side heat transfer coefficients of several types of evaporators of household Freezer/Refrigerators International Refrigeration & air conditioning conference. 2002.
- [2] Shan K.Wang. Handbook of air conditioning and refrigeration-Second edition. McGraw-Hill. 2002.
- [3] GB/T 8059.4-93家用制冷器具 无霜冷藏箱、无霜冷冻箱、无霜冷冻食品储藏箱和无霜食品冷冻箱。
- [4] GB 12021.2-2008家用电冰箱耗电量限定值及能源效率等级。