

# 冰箱蒸发冷却器设计方案的仿真分析

朱伟涛

童正明

(上海夏普电器有限公司)

(上海理工大学)

**摘要** 本文描述冰箱蒸发冷却器设计的能量效率的预测方法,即一种工程计算机模拟模型。用于预测冰箱中使用各种不同设计方法将会对能量消耗产生的影响。本文中讨论的问题涉及诸如需执行精确计算的设计参数和对计算有重大影响的变量,评价模型与实际运行状态的敏感性与精确性,讨论怎样改进设计匹配能提高冰箱蒸发冷却器的效率。

**关键词** 计算机仿真 冰箱设计

## 一、序言

由于每种冰箱设备的大小及容量不同,其制造过程也不同,但是,它们的主要部件几乎相同。这些部件为外壳、内衬、压缩机、蒸发器、冷凝器、控制元器件、结构部件及内部联接件诸如导线、管道系统等。

提高冰箱蒸发冷却器效率的方法,由下列步骤组成,即:

(1) 家用电器等级的选择;(2) 基本线性单位的选择;(3) 每一等级中设计方法的选择;(4) 最大技术设计可行性的确定;(5) 仿真模型的运行;(6) 成本核算;(7) 价格—效率关系曲线换算。

本文描述用于设计选择的工程分析方法。该方法通过能量利用的仿真评价冰箱蒸发冷却器的效率。

用于冰箱蒸发冷却器设计的仿真模型包括两大功能模块,即:外壳热负荷子模块和制冷元件子模块。将两模块联接起来,该模块能预示家用电冰箱、冷藏柜、冷冻柜的能量损耗状况。该模型能模拟各种设计外型及级别的制冷器具,如所有单门冰箱、冷冻室上置式冰箱、冷藏室上置式冰箱、多温室冷冻冷藏箱及冷冻箱,它们也能评价用于冰箱系统的不同方式,如单一强制对流蒸发器的背部外置式冷凝器或平背式冷凝器两种方式。程序设计可允许两子模块独立运行或两模块一起运行。此两种运行方法可分开分析热负荷对设计方法的影响。用该方法可指导冰箱的设计以提高其效率。所列的一些设计实例在现存的产品中已存在,另一些则正在开发过程中。

## 二、设计方案

下列讨论描述了每一种设计方案,并且点评其在规模生产方面的可行性。最初八个方案通过降低箱体热传导速率来提高能效。而其余方案是通过降低电耗或改进制冷循环系统来增加效率。

### 1. 发泡绝热替代方案

发泡广泛应用于冰箱和冷冻箱体。以目前情况分析,发泡主要用于基本箱体及冰

收稿日期: 1998-08-18

箱门等。有时, 玻璃纤维也用于冰箱门和箱盖。如果在同等厚度下用发泡材料而非玻璃纤维, 冰箱的效率会增加, 因为发泡材料具有较低导热性。

通过改进发泡绝热材料的隔热能力, 在同样厚度下可达到更好的绝热效果。目前使用的发泡绝热材料的导热系数约  $0.018 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 。本文所述的绝热材料的导热系数约为  $0.014 \sim 0.016 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 。该材料为节能提供了重要手段。

## 2. 增加绝热层厚度

目前大部分制造商在门及箱体处采用的绝热层厚度分别为  $38 \text{ mm}$  和  $51 \text{ mm}$  左右。其中, 冷冻部分箱体绝热层相对较厚, 增加厚度  $12.5 \sim 25.4 \text{ mm}$  效果较佳。而冷藏部分较薄, 对冷冻部分而言, 一般可提高冰箱效率  $10\%$  左右。

## 3. 两重门封条

冰箱漏冷量最显著之处在门的四角及门封条。如果门封条的绝热性能增加则通过门封条的漏冷量降低, 冰箱整体效率也就提高。所以, 在门内部增加一条内部门封条, 即双门封条结构, 可降低漏冷量, 提高效率。

## 4. 真空绝热材料 (VIP)

因为板材中抽去可导热的空气, 所以真空绝热板 (VIP) 能显著降低导热系数。目前这种技术的应用还较少。经测试, 当板材内部压力  $13 \text{ Toor}$  (负压力) 时, 其导热系数为  $0.007 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  左右,

## 5. 高效压缩机替代方案

近年来, 压缩机效率已有显著提高。一般冰箱压缩机的效率已由原 COP 值  $1.1 \sim 1.2$  提高到  $1.3 \sim 1.4$ , 并且最近又有 COP 值达  $1.5$  左右的高效压缩机问世, 例如巴西 EMBRACO 公司推出的最新压缩机就能达到此值。压缩机为冰箱中主要能耗部件, 提高压缩机效率对降低冰箱能耗有至关重要的作用。

## 6. 可调除霜

可调除霜系统用“SMART”方式控制, 用以调节除霜周期的间隔时间, 因此可使除霜能耗达到最小。目前冰箱中所使用的除霜定时器, 时间间隔为一定值, 通常为  $8 \sim 10 \text{ h}$ 。但是, 蒸发器上的结霜状况随冰箱实际使用情况 (如外界环境温度等) 的差异而有显著不同。通过制约除霜周期的数量, 能降低能耗。虽然除霜能耗在冰箱总能耗中并不占最大份额, 但降低这部分的能耗对降低冰箱总能耗仍有益处。应用该技术时应考虑为降低能耗而增加的成本, 因此该技术较适合于高档冰箱。

## 7. 关于防结露加热器

一般防结露加热器用于无霜冰箱的易结露部分的表面, 当表面湿度较低时加热器不动作。这些器件一般在制造过程中已预安装在冰箱箱体中。但是, 若用冷凝器管贯穿于这些易结露部分, 利用冷凝管自身的热量可防止结露, 同时取消加热器, 用以实现节能, 提高冰箱效率。

### 8. 混合式蒸发器

目前无霜冰箱一般只有一只蒸发器,若在冷藏室与冷冻室各置一蒸发器,即两蒸发器,提高每一蒸发器的工况适用性,降低除霜时间,能发挥压缩机的最佳性能。

### 9. 增加热交换器表面换热性能

主要方法为改进散热器翅片的设计,增加换热接触面积和对流放热系数,管内的换热强化可用内螺纹管(Groove Tube)等措施。

### 10. 改进膨胀阀

传统上毛细管用于控制制冷剂流量及保持系统平衡。自动可调膨胀阀能提供更好的性能。一般,毛细管能在一定的工况范围内较好地工作,但是,自动膨胀阀可在各种复杂条件下提供更好的性能。此方式在技术上是可行的,但是需对系统进行必要的修改。现行的效率测试过程并不统计这种节能效果,因为一般测试仅在某一工况下进行。

### 11. 液体控制阀

能用于减少非周期性制冷剂迁移的液体线性控制阀。当在正常制冷循环下压缩机停机,制冷系统中压力会由高压处向低压处自然平衡,这时,制冷剂将自身热量由冷凝器传至蒸发器。因而降低制冷剂(在压缩机停机时)迁移将增加非周期性的持续时间并减少压缩机运转时间和能量消耗。

### 12. 双压缩机系统

若将冰箱冷藏部分与冷冻部分的制冷系统分成各自独立的两个系统,则冰箱能更有效地工作,降低能耗,因为冷藏室或蔬菜室中蒸发温度愈高,效率就愈高。双压缩机的优点之一是除霜要求减少,时间缩短。因为没有冷冻部分的低温气流流入冷藏室,冷藏室化霜时间可减少;优点之二为可伴随冷冻室化霜,冷藏室压缩机停机自然化霜而不需另设加热装置。

### 13. 压缩机、冷凝器、蒸发器和风扇电机的位置

本节设想仅从理论上分析,与现行设计差异较大,仅供参考。如果压缩机和冷凝器置于冰箱上部,由于热流的流向向上,可使系统效率更高。传统上一般压缩机置于冰箱底部,冷凝器置于冰箱底部、侧面及后部,所以用户能很便利地使用。以目前的产品水平,压缩机上置不利于减震降噪。上置压缩机需改变用户的使用习惯且产品技术上尚有大量问题待解决,制造成本也会增加很多。将蒸发器及风扇电机置于冰箱箱体外部,能降低冰箱内部能耗及改善电机散热。但是,防止电机轴向传热(沿轴向传至箱体内)是非常困难的。此外,沿轴向的热传导可能引起电机外部轴的结冰等相关问题。

## 三、仿真分析

运行能量模拟方程,箱体热负荷计算结果可自动提供给冰箱单元解析模型,用以预测冰箱的性能。当单独使用该计算模型时,能增强分析设计方案或参数的能力。在

箱体尺寸一定的条件下, 箱体热负荷程序可有效地提供能量效率最优化设计的手段。而冷冻循环系统分析程序用于估价制冷元器件变化时的能量使用效率。为了计算冰箱箱体漏冷量, 模型使用基本传热定律及误差补偿法处理非二维平面及冰箱角落部位。

国内最常见的制冷系统(运用于冰箱)都具有如图1所示的冷媒流程图。通过压缩机压缩的冷媒经冷凝器到毛细管膨胀装置, 被降温降压, 而后流入蒸发器。蒸发器可能是一个或两个。气态冷媒离开蒸发器进入中间热交换装置6, 即毛细管与吸气管焊在一起或毛细管绕在吸气管上, 冷媒在进压缩机前进一步吸热气化。同时, 毛细管中液态冷媒被冷却。流程图表明, 膨胀发生在膨胀阀7处, 而实际上膨胀发生在中间热交换装置与膨胀阀之间。

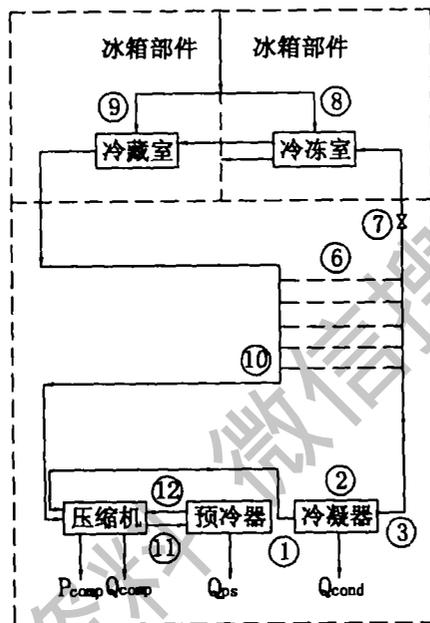


图1 冷媒流程图

能量模拟方程有八个主要方程控制整个运算系统的执行。这八个方程需要输入六个功能关系参数, 这些参数对制冷系统的分析是至关重要的。辅助方程用于求出温度和液体的特性参数。当冷媒为 R-12(CFC-12)时, 就不需要辅助方程的输入参数, 而仅需输入中间热交换装置的热交换参数, 因为通常的 R-12 热力学关系式已放在程序模块中。

冰箱系统中压缩机、预冷却器、冷凝器、中间热交换装置和蒸发器等主要部件由子模块完成分析以适应各种设计方案的选择。利用这种模拟模块可分析现有及即将要推出的新技术, 以决定每种设计方案在冰箱中的使用效果。程序由标准工序开始, 以能量守恒方程为基本模型, 检测冰箱实际能耗。根据测试的实际能量消耗, 同时通过模型计算模拟在测试条件为环境温度 32℃、冷冻室温度 -18℃、冷藏室温度 5℃及门关闭良好时的能耗。在校正过程中, 主要为冰箱的不同特性收集数据, 通常这些数据由合适的制造过程提供。模拟的最初意图是预测特殊模型的能量使用, 精度控制在测

量值的2%内。之后是调整输入参数,而其中某些特殊的参数以前是不能调整的。一般对蒸发器、冷凝器等热交换器的效率以及防露加热器的热负荷可以调整。一旦以上过程进行,就可模拟各种设计方案。

设计方案在模拟运算时的匹配计算可单独进行也能联合运行。当分析设计方案时,试图将最有效的设计方案与预测成本结合考虑。通常那些设计方案存在于更有效的模块中,并已在家电厂现存的优化方案中大量使用。

在分析这些特殊设计方案前,须先定出每一元件能量使用及损耗的份额,这可使我们找出所存在的最节能的方案。而利用能量模拟方程计算进入箱体的热损耗,然后决定一定星级条件下所需能量。加热器和蒸发器风扇电机的内部热负荷则计入外部获得热量部分。所使用的总能量包括起动压缩机、风扇、防露加热器、除霜加热器等,该能量可计算出来。箱体尺寸、绝热水平、压缩机性能、热交换效率和辅助电器元件的详细资料对启动运行本模拟模型均是必需的常数。

计算表明,最大的节能元器件为压缩机,提高压缩机效率即能获得最大限度的节能效果;其次,降低箱体能耗也是主要节能措施;再则,辅助电热元器件的能耗约占冰箱总能耗的35%,使用效率更高的风扇、风扇电机和降低电加热器的使用量也是节能的重要手段。作为分析的一部分,蒸发器UA值从表面上14.7 W增加到17.6 W可节能约2.0%。有些方法能通过增加传热面积,强化传热来提高整体节能水平。

对绝热发泡层的分析也是节能分析的内容之一,例如,当门厚度从381 mm增加至508 mm时,能耗约降低5%,但是,当门厚度从508 mm增至635 mm时,能耗降低则小于3%。模拟方程同样也能分析发泡替代产品对节能的影响,例如,研究用HCFC-123或HCFC-141B替代CFC-11发泡剂后的绝热效果。

#### 四、结论

本文的冰箱模拟模型提供了一种有效的评价冰箱节能途径及水平的手段,若再将经济的、环保的等其他因素综合考虑,该方法可提供一个基本的节能标准方法及前瞻方法。

#### 参考文献

- [1] Arthur D. Little Inc. *Refrigerator and Freezer Computer Model User's Guide*. Cambridge, Ma, ADL.1982
- [2] Association of Home Appliance Manufacturers. *Directory Certified Refrigerators and Freezers*. 1st ed. AHAM.1989
- [3] Department of Energy. *Technical Support Document for the Analysis of Efficiency Standards for Small Gas Furnaces, Television Sets, Refrigerators, Refrigerator-Freezers*. Washington, DC, 1988
- [4] NAECA. *Public Law 100-12 National Appliance Energy Conservation Act*. March 17, 1987
- [5] Turiel I, Heydari A. *Analysis of Design Options to Improve the Efficiency of Refrigerator-Freezers and Freezers*. ASHRAE Transactions, Vol. 94, Part 2, 1988