

# 蒸发器并联双循环冰箱的温度与分时运行控制策略 理论分析

卢智利, 丁国良

(上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200030)

**摘要:** 分析了现有蒸发器并联双循环冰箱采用基于温度的冷藏室(冷冻室)优先的控制策略, 提出了基于温度与分时运行联合控制的控制策略, 并对该控制策略进行了理论分析. 由于设定了冷藏循环、冷冻循环最长运行时间, 因此, 其中任何一个循环需要冷量时, 它的最大等待时间是另一个循环的最大运行时间, 从而避免了冷藏室或冷冻室长时间得不到冷量的情况发生, 保证了冷藏室、冷冻室温度在合理的温度范围内波动.

**关键词:** 蒸发器; 双循环; 冰箱; 温度; 控制策略; 分时运行

中图分类号: TB 657.4 文献标识码: A

## The Temperature and Time-Sharing Running Control Strategy of Two-Circuit Cycle Refrigerator/Freezer with Parallel Evaporators: Theoretical Analysis

LU Zhi-li, DING Guo-liang

(Inst. of Refrigeration and Cryogenics Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The existing control strategies of the fresh food compartment (FFC)/freezer compartment (FZC) prior based on the temperature control of the two-circuit cycle refrigerator/freezers (RFs) with parallel evaporators were analyzed. A new control strategy was put forward and analyzed theoretically. Since the maximum running time of FFC cycle and FZC cycle is set, the maximum waiting time of either compartment when it need cooling would be the setting maximum running time of the next cycle, so the long waiting time of either compartment is avoided effectively, and the compartment temperature fluctuation is controlled in the rational range.

**Key words:** evaporators; two-circuit cycle; refrigerator/freezer; temperature; control strategy; time-sharing running

目前实现冰箱冷冻室与冷藏室温度独立控制的常用方法有两种: 采用双压缩机结构<sup>[1~3]</sup>; 采用旁通双循环结构<sup>[4,5]</sup>. 对于双压缩机结构而言, 能完全实现冷藏室、冷冻室的独立控制, 但对于每一个

循环而言, 由于负荷的减小, 需要采用较小的压缩机, 而小压缩机的效率较差, 将造成系统性能降低. 另外, 由于增加了一个压缩机, 将使冰箱成本大大增加. 旁通双循环结构也能实现冷藏室、冷冻室的

收稿日期: 2004-11-28

作者简介: 卢智利(1976-), 男, 江西崇仁县人, 博士生, 主要研究方向为制冷空调系统的数值仿真与换热器的换热强化.

丁国良(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-62932110; E-mail: glding@sjtu.edu.cn.

单独控制,但由于制冷剂在通过冷藏蒸发器时必须通过冷冻蒸发器,冷藏室的蒸发温度也同样由冷冻室决定,故不能减少冷藏室蒸发器的热力学不可逆损失.为了更好地实现冷藏室、冷冻室的单独控制,减少冷藏室蒸发器的热力学不可逆损失,降低冰箱的成本,蒸发器并联双循环冰箱受到了重视. Kim 与 Lavanis 等<sup>[6, 7]</sup>对蒸发器并联的双循环冰箱进行了实验研究,发现该冰箱比蒸发器串联的单循环冰箱节能 2.3% ~ 8.5%.

由于蒸发器并联双循环冰箱不能同时对冷藏室、冷冻室供冷,因此箱内温度难以准确控制,大大阻碍了它的应用.虽然文献[6, 7]中冷藏室、冷冻室温度均得到了较准确的控制,但这主要是因为其研究目的是冰箱的节能情况,美国标准 AHAM 规定的耗电量实验都是在冰箱稳定运行情况下进行.实际上,冰箱经常运行于动态工况,在稳定运行情况下冷藏室、冷冻室温度能控制得较准确,并不能说明在动态运行过程中温度也能控制得较准确.最简单的例子是突然把大量新购买食品放入冷冻室,此时冷冻室需要大量冷量,如果冰箱一直给冷冻室制冷,直到冷冻室温度达到设定的控制温度以下,那么冷藏室将十几个小时得不到冷量,温度将回升得非常高,不利于冷藏室食品的保鲜.因此,合理分配冷藏室、冷冻室的制冷时间对于蒸发器并联的双循环冰箱非常重要.

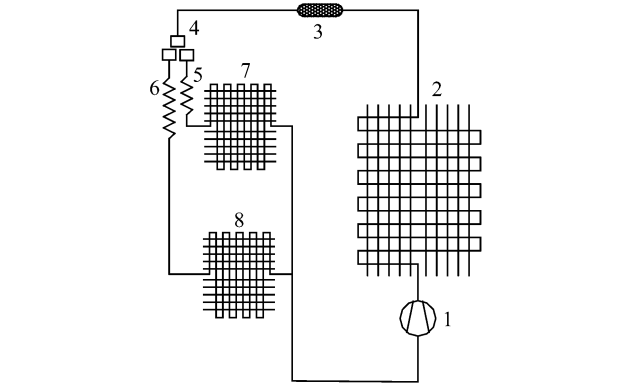
本文提出一种基于温度与分时运行的联合控制策略,以解决冰箱在动态过程中冷藏室、冷冻室的制冷时间分配不合理的问题,从而解决冰箱箱内温度控制不准确的难题.

## 1 蒸发器并联双循环冰箱的基本原理及现有控制策略的缺点

蒸发器并联的双循环冰箱结构如图 1 所示.该冰箱包含两个循环回路,一个是冷藏循环回路:1-2-3-4-5-7-1;另一个是冷冻循环回路:1-2-3-4-6-8-1.三通电磁阀控制制冷剂的流向.电磁阀有 3 个端口(1 个进口,2 个出口),由电信号控制,使得制冷剂流过 2 个出口中的一个,而不会同时从 2 个出口流出.

冰箱箱内温度的控制是通过控制箱内的最高、最低温度实现的.当箱内温度高于设定最高温度时,压缩机启动,给冰箱制冷,直到箱内温度低于设定最低温度,压缩机停机.

蒸发器并联的双循环冰箱在冷藏室、冷冻室的中部各安装有一个热电阻温度传感器,用于测量箱



1- 压缩机, 2- 冷凝器, 3- 干燥过滤器, 4- 电磁阀, 5- 冷藏毛细管  
6- 冷冻毛细管, 7- 冷藏室蒸发器, 8- 冷冻室蒸发器  
图 1 蒸发器并联的双循环冰箱示意图

Fig. 1 Schematic of the two-circuit cycle RF with parallel evaporators

内空气温度,其控制通过一个微处理器来实现.微处理器把从温度传感器采集来的温度信号与自身内部设定信号进行比较,并按内部设定控制方式决定压缩机的启停及运行哪一个循环.用户可以通过控制面板来设定冷藏室、冷冻室的温度.对于设定的任何一个温度,都唯一对应着一个最高和最低箱内温度.

目前蒸发器并联的双循环冰箱采用的是基于温度控制的控制方式. Lavanis 等<sup>[7]</sup>采用了一种基于温度控制的冷冻室优先控制方式.其控制原理如下:

(1) 如果冷冻室温度高于冷冻室设定温度上限,压缩机启动运行冷冻循环,直到冷冻室温度低于冷冻室设定温度下限.

(2) 如果冷藏室温度高于冷藏室设定温度上限,压缩机启动运行冷藏循环.如果在冷藏循环运行中,冷冻室温度高于冷冻室设定温度上限,那么电磁阀将切换到冷冻循环,给冷冻室制冷,直到冷冻室温度低于冷冻室设定温度下限.

对于上述控制策略,当冷藏室、冷冻室同时需要冷量时,将首先满足冷冻室的要求,造成冷冻室优先制冷.对于该控制方式,会出现如下两种情况:当某一时刻给冷冻室放入大量食品时,冷冻循环将运行十几个小时才能使冷冻室温度降到设定点,冷藏室则十几个小时得不到冷量,冷藏室温度必将大幅度上升;当冷冻室温度设定的过低或环境温度过高时,冷冻室与环境的换热温差大,冷冻室热负荷大,将造成冷冻循环运行时间非常长,甚至一直运行冷冻循环的情况,这样冷藏室将长时间得不到冷量,其温度将急速上升,甚至回升到与环境温度接近.这两种情况都将导致冷藏室食品变质.

相对于冷冻室优先控制方式的是基于温度控制

的冷藏室优先控制方式. 对于冷藏室优先控制方式, 当在冷藏室内放入大量食品或环境温度过高时, 冷冻室温度将回升的过高, 冷冻室食品容易变质.

## 2 基于温度与分时运行控制的控制策略

### 2.1 控制策略

基于温度与分时运行控制的控制策略如图 2 所

示. 为了防止冷藏循环(或冷冻循环)运行时间过长, 导致冷冻室(或冷藏室)温度回升得过高, 有必要设定冷藏循环、冷冻循环的最长运行时间. 当冷藏循环(或冷冻循环)运行时间达到冷藏循环(或冷冻循环)最长设定运行时间时, 无论冷藏室(或冷冻室)温度怎样, 只要冷冻室(或冷藏室)需要冷量, 系统将切换到冷冻循环(或冷藏循环), 给冷冻室(或冷藏室)制冷, 保证冷冻室(或冷藏室)温度在合理范围内.

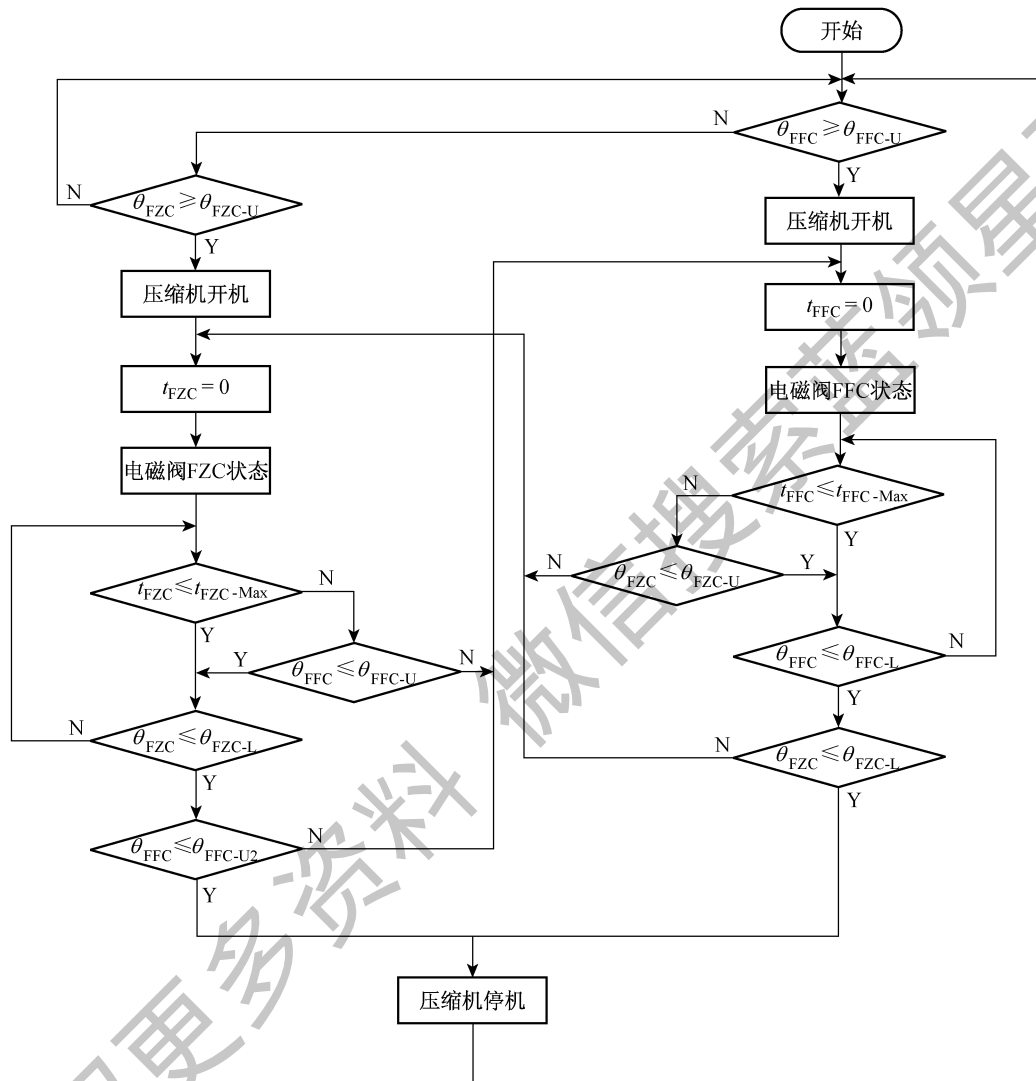


图 2 基于温度与分时运行控制的控制策略

Fig. 2 Schematic of the control strategy based on both temperature and time-sharing running control

图 2 中,  $\theta_{FFC}$  为冷藏室温度,  $\theta_{FFG-U}$  为冷藏室温度上限,  $\theta_{FFG-L}$  为冷藏室温度下限,  $t_{FFC}$  为冷藏循环运行时间,  $t_{FFG-Max}$  为冷藏循环最大运行时间;  $\theta_{FZC}$  为冷冻室温度,  $\theta_{FZG-U}$  为冷冻室温度上限,  $\theta_{FZG-L}$  为冷冻室温度下限,  $t_{FZC}$  为冷冻循环运行时间,  $t_{FZG-Max}$  为冷冻循环最大运行时间.  $\theta_{FFG-U}$ 、 $\theta_{FFG-L}$ 、 $\theta_{FZG-U}$ 、 $\theta_{FZG-L}$  由控制面板按钮设定,  $\theta_{FFG-U2} = \theta_{FFG-U} - 0.5$ .

为了方便说明问题, 设定如下参数:

冷藏室温度回升时间  $t_{FFG-Rec}$ : 即冷藏室从温度  $\theta_{FFC}$  回升到  $\theta_{FFG-U}$  所需要的时间. 冷藏室温度从  $\theta_{FFG-L}$  回升到  $\theta_{FFG-U}$  所需要的时间设定为  $t_{FFG-Rec-Max}$ .

冷冻室温度回升时间  $t_{FZG-Rec}$ : 即冷冻室从温度  $\theta_{FZC}$  回升到  $\theta_{FZG-U}$  所需要的时间. 冷冻室温度从  $\theta_{FZG-L}$  回升到  $\theta_{FZG-U}$  所需要的时间设定为  $t_{FZG-Rec-Max}$ .

冷藏室降温时间  $t_{FFG-Cool}$ : 冷藏室温度从  $\theta_{FFG-U}$  降到  $\theta_{FFC}$  所需要的时间. 冷藏室温度从  $\theta_{FFG-U}$  降到  $\theta_{FFG-L}$

所需时间设定为  $t_{FFG-CoolMax}$  .

冷冻室降温时间  $t_{FZG-Cool}$ : 冷冻室温度从  $\theta_{FZG-U}$  降到  $\theta_{FZC}$  所需要的时间. 冷冻室温度从  $\theta_{FZG-U}$  降到  $\theta_{FZGL}$  所需时间设定为  $t_{FZG-CoolMax}$  .

对于图 2 所示的控制策略, 在冰箱插电后,

(1) 检测冷藏室温度  $\theta_{FFC}$ . 如果  $\theta_{FFC} > \theta_{FFGU}$ , 那么压缩机启动, 运行冷藏循环, 转(4).

(2) 检测冷冻室温度  $\theta_{FZC}$ . 如果  $\theta_{FZC} > \theta_{FZGU}$ , 那么压缩机启动, 运行冷冻循环, 转(5).

(3) 转(1).

(4) 在冰箱运行冷藏循环时,

当  $t_{FFC} < t_{FFG-Max}$  时, 如果  $\theta_{FFC} > \theta_{FFGL}$ , 冰箱将一直运行冷藏循环, 直到  $t_{FFC} > t_{FFG-Max}$ , 控制程序转(4); 如果某时刻  $\theta_{FFC}$  已经达到  $\theta_{FFGL}$ , 控制程序进入(4) .

当  $t_{FFC} > t_{FFG-Max}$  时, 如果  $\theta_{FZC} > \theta_{FZGU}$ , 冰箱将切换到冷冻循环, 转(5); 否则, 冰箱将一直运行冷藏循环, 直到  $\theta_{FFC} < \theta_{FFGL}$  .

当  $\theta_{FFC} = \theta_{FFGL}$  时, 如果  $\theta_{FZC} > \theta_{FZGL}$ , 冰箱将切换到冷冻循环, 转(5). 之所以这样设定, 是因为冷冻室的温度回升较快, 这样可以防止压缩机频繁启动, 同时减少冷藏室、冷冻室同时需要冷量的情况发生.

(5) 在冰箱运行冷冻循环时,

当  $t_{FZC} < t_{FZG-Max}$  时, 如果  $\theta_{FZC} > \theta_{FZGL}$ , 一直运行冷冻循环, 直到  $t_{FZC} > t_{FZG-Max}$ , 控制程序转(5); 如果某一时刻  $\theta_{FZC} < \theta_{FZGL}$ , 控制程序转(5) .

当  $t_{FZC} > t_{FZG-Max}$  时, 如果  $\theta_{FFC} > \theta_{FFGU}$ , 那么, 冰箱将切换到冷藏循环, 控制程序转(4); 否则, 冰箱将一直运行冷冻循环, 直到  $\theta_{FZC} < \theta_{FZGL}$  .

$\theta_{FZC} < \theta_{FZGL}$  后, 如果冷藏室温度高于  $\theta_{FFGU}$ , 冰箱将切换到冷藏循环, 控制程序转(4), 否则压缩机停机, 控制程序转(1). 之所以这样设定, 也是为了防止压缩机的频繁启动.

## 2.2 控制策略分析

在冰箱实际使用过程中, 主要有如下 3 种动态情况发生: 突然向冷冻室内放置大量食品; 突然向冷藏室内放置大量食品; 环境温度过高及冷藏室、冷冻室温度设定的非常低.

(1) 突然向冷冻室内放置大量食品. 此时,  $\theta_{FZC}$  急速上升, 高于  $\theta_{FZG-Max}$ , 因此压缩机启动, 运行冷冻循环. 在冷冻循环运行期间,  $\theta_{FZC}$  渐渐回升. 当  $\theta_{FZC}$  回升到  $\theta_{FZG-Max}$  时, 电磁阀第一次切换到冷藏循环, 给冷藏室制冷(如果此时  $t_{FZC}$  没有达到  $t_{FZG-Max}$ , 那么冷藏室将处于等待状态. 由于  $t_{FZC} = t_{FFG-Rec}$ , 故冷藏室等待时间等于  $t_{FZG-Max} - t_{FFG-Rec}$ . 如果冷冻循环刚启动

时,  $\theta_{FFC}$  就回升到  $\theta_{FFG-Max}$ , 那么  $t_{FFG-Rec} = 0$ , 冷藏室等待时间最长, 等于  $t_{FZG-Max}$ , 这种情况只可能在第 1 次切换时遇到). 当  $\theta_{FFC} < \theta_{FFGL}$  时, 电磁阀将切换到冷冻循环, 第 2 次给冷冻室制冷. 此时  $\theta_{FFC}$  回升. 当  $\theta_{FFC}$  再次回升到  $\theta_{FFG-Max}$ , 电磁阀再次切换到冷藏循环, 给冷藏室制冷(如果此时  $t_{FZC}$  没有达到  $t_{FZG-Max}$ , 那么冷藏室将处于等待状态. 等待时间等于  $t_{FZG-Max} - t_{FFG-Rec-Max}$ ). 经过几次反复切换, 冷冻室温度将达到其设定温度.

为了保证  $\theta_{FFC}$  回升得不会过高, 首先应该保证在  $t_{FFG-Max}$  时间内, 冷藏室能从  $\theta_{FFGU}$  降到  $\theta_{FFGL}$ . 同时, 应该尽可能避免出现冷藏室等待时间, 因此, 一般  $t_{FZG-Max}$  需要设定的比  $t_{FFG-Rec-Max}$  小. 虽然在第 1 次切换可能出现冷藏室等待时间等于  $t_{FZG-Max}$  的情况, 此时,  $\theta_{FFC}$  会回升得比  $\theta_{FFGU}$  稍微高一些, 但这种情况只能出现一次, 时间也不长, 因此, 对于冷藏室温度的影响只是瞬间的, 对于食品保鲜也不会有影响. 在设定  $t_{FZG-Max}$  时, 也要考虑  $t_{FZG-CoolMax}$ . 一般而言,  $t_{FZG-Max}$  应与  $t_{FZG-CoolMax}$  接近, 最好能稍微大一些.

(2) 突然向冷藏室内放置大量食品. 此时,  $\theta_{FFC}$  急速上升,  $\theta_{FFC} > \theta_{FFGU}$ , 因此压缩机启动, 运行冷藏循环. 在冷藏循环运行期间,  $\theta_{FZC}$  渐渐回升. 当  $\theta_{FZC}$  回升到  $\theta_{FZGU}$  时, 电磁阀第 1 次切换到冷冻循环, 给冷冻室制冷(如果此时  $t_{FZC}$  没有达到  $t_{FZG-Max}$ , 那么冷冻室将处于等待状态. 由于  $t_{FZC} = t_{FZG-Rec}$ , 故等待时间等于  $t_{FZG-Max} - t_{FZG-Rec}$ . 如果冷藏循环刚启动时,  $\theta_{FZC}$  就回升到  $\theta_{FZGU}$ , 那么  $t_{FZG-Rec} = 0$ , 冷冻室等待时间最长, 等于  $t_{FZG-Max}$ , 这种情况只可能在第 1 次切换时遇到). 当  $\theta_{FZC} < \theta_{FZGL}$  时, 电磁阀将切换到冷藏循环, 第 2 次给冷藏室制冷. 此时,  $\theta_{FZC}$  回升. 当  $\theta_{FZC}$  再次回升到  $\theta_{FZGU}$  时, 电磁阀再次切换到冷冻循环, 给冷冻室制冷(如果此时  $t_{FZC}$  没有达到  $t_{FZG-Max}$ , 那么冷冻室将处于等待状态. 等待时间等于  $t_{FZG-Max} - t_{FZG-Rec-Max}$ ). 经过几次反复切换, 冷藏室温度将达到其设定温度.

为了保证  $\theta_{FZC}$  回升得不会过高, 首先应该保证  $\theta_{FZC}$  在  $t_{FZG-Max}$  时间内, 能从  $\theta_{FZGU}$  降到  $\theta_{FZGL}$ . 同时, 应该尽可能避免出现冷冻室等待时间, 因此, 一般  $t_{FFG-Max}$  需要设定得比  $t_{FZG-Rec-Max}$  小一些. 虽然在第 1 次切换时, 可能出现冷冻室等待时间等于  $t_{FFG-Max}$  的情况, 此时,  $\theta_{FZC}$  会回升得比  $\theta_{FZGU}$  稍微高一些, 但这种情况只能出现一次, 时间也不很长, 因此, 对于冷冻室温度的影响只是瞬间的, 对于食品保鲜不会有影响. 在设定  $t_{FFG-Max}$  时, 也要考虑冷藏室降温时间  $t_{FFG-CoolMax}$ . 一般而言,  $t_{FFG-Max}$  应与  $t_{FFG-CoolMax}$  接近, 最好能稍微大一些.

(3) 环境温度过高或冷藏室、冷冻室温度设定得非常低, 这种情况将使得冷藏室、冷冻室与环境的换热温差大, 热负荷大, 冷藏室温度、冷冻室温度在冷藏、冷冻循环切换时间内均达不到其设定的最低温度, 出现压缩机不停机现象. 此时, 冷藏循环、冷冻循环将出现分时运行的情况, 即冷藏循环运行  $t_{FFG-Max}$  后, 切换到冷冻循环, 冷冻循环运行  $t_{FZG-Max}$  后, 又切换到冷藏循环制冷, 冷藏循环、冷冻循环依次交替运行. 这样, 虽然冷藏室、冷冻室的温度都比设定温度高, 但冷藏室、冷冻室的温度得到了兼顾, 冷藏室、冷冻室的温度都不至于过高.

综上所述, 冷藏循环  $t_{FFG-Max}$  最好能比  $t_{FFG-Cool-Max}$  稍微大一些, 比  $t_{FZG-Ree-Max}$  小一些; 冷冻循环  $t_{FZG-Max}$  最好能比  $t_{FZG-Cool-Max}$  大一些, 比  $t_{FFG-Ree-Max}$  小一些. 这样, 如果向冷冻室、冷藏室突然加入大量食品或环境温度过高或冷藏、冷冻室温度设定得过低时, 冷藏室、冷冻室温度均不会回升得过高, 从而保证了冷藏室、冷冻室内食品的保鲜质量.

实际上, 如果把  $t_{FZG-Max}$  设置为无限大, 把  $t_{FFG-Max}$  设定为 0, 那么该控制策略就是基于温度的冷冻室优先控制策略. 如果把  $t_{FFG-Max}$  设定为无限大, 把  $t_{FZG-Max}$  设定为 0, 那么该控制策略就是基于温度的冷藏室优先控制策略.

### 3 结语

目前的蒸发器并联双循环冰箱采用的都是基于温度控制的冷冻室优先或冷藏室优先的控制策略, 本文分析了该种控制策略存在的缺点. 在此基础上, 提出了基于温度与分时运行联合控制的控制策略. 分析了突然向冷冻室内放置大量食品、突然向冷藏

室内放置大量食品及环境温度过高 3 种情况下, 只要冷藏、冷冻循环最大运行时间设置得合理, 都能保证冷藏室、冷冻室温度控制在合理的范围内.

### 参考文献:

- [1] Won S, Jung D, Radermacher R. An experimental study of the performance of a dual-loop refrigerator/freezer system [J]. *Int J Refrig*, 1994, 17(6): 411-416.
- [2] Baskin E, Delafield F R. Performance of a two-cycle refrigerator/freezer using HFC refrigerants [J]. *ASHRAE Trans*, 1999, 105(1): 310-318.
- [3] Gan A I, Klein S A, Reind D T. Analysis of refrigerator/freezer appliances having dual refrigeration cycles [J]. *ASHRAE Trans*, 2000, 106(1): 185-191.
- [4] Ding G L, Zhang C L, Lu Z L. Dynamic simulation of natural convection bypass two-circuit cycle refrigerator-freezer and its application. Part I. Component models [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24: 1513-1524.
- [5] Lu Z L, Zhang C L, Ding G L. Dynamic simulation of natural convection bypass two-circuit cycle refrigerator-freezer and its application. Part II. System simulation and application [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24: 1525-1533.
- [6] Kim K, Kopko K, Radermacher R. Application of tandem system to high-efficiency refrigerator/freezer [J]. *ASHRAE Trans*, 1995, 101(2): 1239-1247.
- [7] Mahesh L, Haider I, Radermacher R. Experimental investigation of an alternating duty refrigerator/freezer [J]. *ASHRAE Trans*, 1998, 104(2): 1103-1111.

### 下期部分发表论文预告

基于用户浏览兴趣的网页预取策略 .....	高 凯, 王永成, 李 刚
面向服务的分布式部分计值 .....	毛宏燕, 黄林鹏, 孙永强
残差修正步进模型在社保卡数字照片处理中的应用 .....	李 峰, 吴瑞明, 王浣尘
基于修正后拟牛顿算法的织物实时模拟 .....	田海山, 何援军, 邝 昱
基于最小发射功率的自适应调制多输入多输出系统 .....	王智鹰, 何 晨, 蒋铃鸽
一种适用于无线传感器网络的低能耗移动代理路由算法 .....	曹涌涛, 何 晨, 王 珺, 武文权 <sup>3</sup>
千兆以太网 1000BASE-T 收发器物理编解码子层系统及芯片设计 .....	夏 琦, 戎蒙恬, 诸 悦
基于混沌系统的真随机数发生器芯片设计和实现 .....	张 亮, 戎蒙恬, 诸 悦, 吕永其
多入多出系统特征模发射最小化误码率优化功率分配 .....	刘云辉, 杨宇航
编码分组空时块码多入多出正交频分复用系统中的迭代接收机 .....	樊 迅, 罗汉文, 徐友云, 黄建国
有限元法结合多元 Padé 逼近提取缺陷接地结构的模型参数 .....	张文剑, 李征帆
正交频分复用系统基于时域子载波簇的自适应功率分配算法 .....	甘小莺, 徐友云, 宋文涛
斜阶跃信号激励下的 RLC 互连线时延模型 .....	任英磊, 毛军发, 李晓春