

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.01.022

并联双循环风冷冰箱短周期切换控制特性

张振亚, 黄东, 冷永强

(西安交通大学 能源与动力工程学院 西安 710049)

摘要: 针对并联双循环风冷冰箱冷藏室、冷冻室不能同步降温, 导致冷冻室回温时间长的问题, 实验研究了开机后冷藏降温过程中兼顾冷冻降温的“2 min 冷藏+1 min 冷冻”短周期切换控制特性。结果表明: 开机后, 停机时积聚在冷冻蒸发器中的制冷剂逐渐向冷藏蒸发器迁移, 前6个短周期内, 迁移造成的冷藏蒸发器制冷量损失由33.9%降至5.2%, 之后维持不变直至冷藏运行结束。冷冻室感温包温度前6个短周期内从-16.5℃降至-17.8℃, 而之后5个短周期仅降低约0.3℃。采用短周期切换控制, 冷藏降温阶段可兼顾冷冻室降温, 且在冷冻降温时间的缩短与冷藏运行时间的延长之间存在使压缩机运行时间最短的最优值。

关键词: 风冷冰箱; 并联双循环; 短周期切换; 制冷剂迁移; 动态特性

中图分类号: TB657.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)01-0150-05

Dynamic characteristic of the air-cooled refrigerator with two parallel-evaporators in the control of short-cycle switching

ZHANG Zhenya, HUANG Dong, LENG Yongqiang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For the two-circuit refrigerator with parallel evaporators, refrigerating cabinet and freezing cabinet could not get cooling capacity at the same time. This will lead to the increase in compressor-on time due to the fact that the compressor shuts down as the counterpart cut-out temperature in the freezing cabinet is reached. The dynamic characteristics of a parallel-evaporators refrigerator with short-cycle switching control were studied experimentally. Results showed that the refrigerant stored in the freezing-evaporator was immigrated gradually to refrigerating-evaporator due to pumping action of compressor after a startup. The capacity loss of the refrigerating evaporator due to the refrigerant migration decreased from 33.9% to 5.2%. In addition, the temperature of the freezer-sensor decreased from -16.5℃ to -17.8℃ in the first six short-cycles, but only decreased by about 0.3℃ in the next five short-cycles. The short-cycle switching control strategy can decrease the temperature in both refrigerating cabinet and freezing cabinet. However, the refrigerating-run time will be extended at the same time. These two factors should be comprehensive considered to make the compressor-on time shortest.

Keywords: air-cooled refrigerator; parallel evaporators; short-cycle switching control; refrigerant migration; dynamic characteristic

冷冻、冷藏蒸发器并联布置的双循环制冷系统风冷冰箱, 因冷藏蒸发器较高的蒸发温度可减小其不可逆损失而具有较大的节能潜力。相关的节能技术, 如制冷系统匹配^[1-4]、制冷剂迁移^[5-7]、蒸发器的结霜、除霜特性^[8-13]等的研究也越来越受到关注。随着变频技术的广泛运用, 冰箱制冷系统与运行控制策略的匹配^[14-16]也已成为影响冰箱性能的主要因素之一。并联双循环风冷冰箱压缩机的启、停一般由冷冻室感温包设定的温度控制, 开机后先给冷藏降温, 由冷藏室感温包设定温度控制冷藏/冷冻运行的切换。由于冷藏降温阶段不能对冷冻室进行降

温, 导致冷冻室的回温时间较长。为满足冷冻室的温度要求, 则必须增大开机时间, 进而会增加冰箱的功耗。

针对以上问题, 本文以一款并联双循环风冷冰箱为实验对象, 开机后的冷藏降温过程中采用兼顾冷冻室降温的“2 min 冷藏运行+1 min 冷冻运行”短周期切换控制策略, 研究该控制方法下冰箱运行时的动态特性, 主要包括短周期切换过程制冷剂迁移对冷藏蒸发器造成的冷量损失以及对冷冻室降温的效果, 为并联双循环风冷冰箱节能控制研究提供理论参考。

收稿日期: 2016-01-07

作者简介: 张振亚(1989—)男, 博士研究生;

黄东(1975—)男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 黄东, h_d_huang@mail.xjtu.edu.cn

1 实验装置和测试系统

实验样机采用蒸发器并联的双循环制冷系统,

图 1 所示为冰箱系统图共有 3 个存储空间: 冷藏室、变温室和冷冻室。变温室有 0 °C/3 °C/5 °C 3 个温区, 也是一个温度可调节的冷藏室。冷藏室和变温室共用一个蒸发器, 冷冻室拥有单独的蒸发器。冷藏室感温包控制三通电磁阀在冷藏/冷冻之间的切换, 冷冻室感温包控制压缩机启、停。开机后稳定运行过程中的控制策略为: 冷藏降温-冷冻降温-停机。由冷冻室感温包设定温度控制压缩机的启/停, 开机后先给冷藏室降温, 当冷藏室感温包温度达到设定下限值时, 切换至单独冷冻运行, 这时仅为冷冻空间降温。具体参数如表 1。

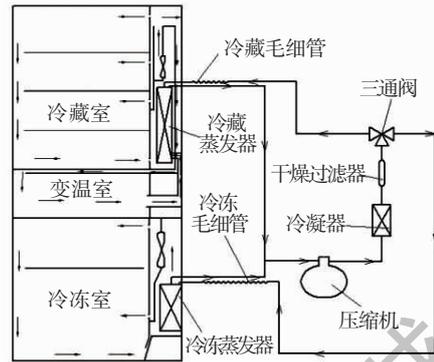


图 1 并联双循环风冷冰箱系统

Fig.1 System diagram of air-cooled refrigerator with two parallel-evaporators

表 1 被测机的主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of the tested refrigerator

制冷循环系统	制冷类型	额定电压/V	频率/Hz	电流/A	24 小时耗电量/(kW·h)
并联双循环	风冷	220	50	1.4	0.97
制冷剂	充灌量/g	变温室有效容积/L	冷藏室有效容积/L	冷冻室有效容积/L	
R600a	75	30	290	98	

实验所用冰箱稳定运行过程中, 冷藏运行总时间不足 30 min。该时段采用冷藏降温为主兼顾冷冻降温的“2 min 冷藏+1 min 冷冻”短周期切换控制策略。因冷藏降温为主, 则冷藏运行时间要长于冷冻运行时间。但冷藏运行时间太长, 会导致短周期数太少, 实验数据不充分; 太短又会导致达不到冷藏稳定运行三通阀就切换给冷冻蒸发器供液。综合考虑, 选用上述控制策略进行初步探究。

试验工况依据 GB/T8059.4—1993《家用制冷器具——无霜冷藏箱、无霜冷藏冷冻箱、无霜冷冻食品储藏箱和无霜食品冷冻箱》的规定设置。采用直径为 0.2 mm 的铜-康铜热电偶测量温度, 精度为 ±0.2 °C。主要测量数据包括冷藏、冷冻蒸发器的进口、中部和出口温度, 及蒸发器送、回风温度等。

2 切换过程冷藏蒸发器性能分析

2.1 冷藏蒸发器温度变化

冰箱稳定运行过程中, 从开机至冷藏运行结束共 11 个完整的“2 min 冷藏+1 min 冷冻”短周期切换。如图 2 所示, 由于各个短周期 1 min 冷冻运行时的温度上升(冷藏回风的影响)以及 2 min 冷藏运行时的温度下降, 冷藏蒸发器各部分的温度处于波动状态。

两个并联蒸发器中的压力相同, 冷冻运行向冷藏运行切换瞬间, 冷藏蒸发器中的压力仍为冷冻蒸发压力, 经过冷藏毛细管节流后的制冷剂进入冷藏蒸发器瞬间蒸发, 导致冷藏蒸发器进口处温度大幅降低。因此, 冷藏蒸发器进口温度波动最剧烈, 但波

动幅度逐渐减小, 0~3 min 时间内, 波动幅度为 20.1 °C。在 33~35 min 时间内的温度波动仅为 4.4 °C。受蒸发器本身热容和冷藏室回风的影响, 前 24 min 内蒸发器中部制冷剂为过热状态, 温度波动幅度较小, 而之后逐渐变大, 在 27~30 min 内达到了 17.6 °C, 说明此时中部测点处的制冷剂由过热气态变为气液两相态。出口温度波动幅度最小, 在冷藏降温阶段的 35 min 内, 出口温度一直处于在小波动中下降的趋势。以上分析说明短周期切换控制策略下, 停机时积聚在冷冻蒸发器中的制冷剂, 在压机启动后逐渐迁移至冷藏蒸发器。

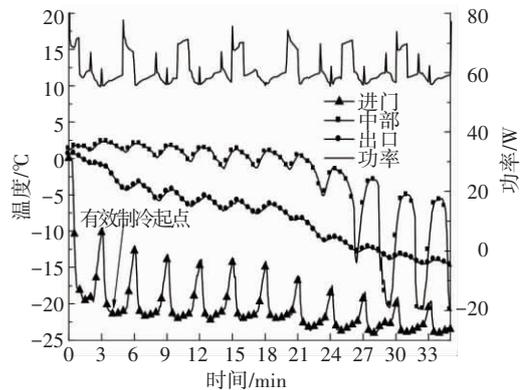


图 2 冷藏降温阶段冷藏蒸发器温度随时间变化

Fig.2 Variation in refrigerating-evaporator temperature during refrigeration cooling stage

2.2 冷藏蒸发器冷量损失分析

并联双循环制冷系统中冷冻/冷藏运行切换时的制冷剂迁移会造成蒸发器制冷能力损失。由于冷冻运行向冷藏运行切换存在蒸发压力的攀升, 其

制冷剂迁移损失约是冷藏运行向冷冻运行切换时的 3.4~7.2 倍^[17]，因此，本文章重点分析单个短周期内冷藏运行向冷藏运行切换时的制冷剂迁移造成的冷藏蒸发器冷量损失。在 2 min 冷藏运行期间，当冷藏蒸发器进口温度降至最低点时，可认为进入冷藏运行的稳定过程。定义该点为 2 min 冷藏运行中冷藏蒸发器开始有效制冷的时间点，在此之前为切换的过渡过程。

图 3 所示为每一个短周期的 2 min 冷藏运行期间冷藏蒸发器有效制冷时长变化。由图 3 可知，在 11 个短周期的冷藏运行中，总体上冷藏蒸发器的有效制冷时长先增加后逐渐达到平衡。在压缩机开机后的第 1 个短周期内冷藏蒸发器的有效制冷时长最短，约为 0.58 min，占冷藏运行总时间（2 min）的 29%。第 6 个短周期之后，有效制冷时长在 1.43 min 上下波动，约占到冷藏运行总时间的 71.5%。

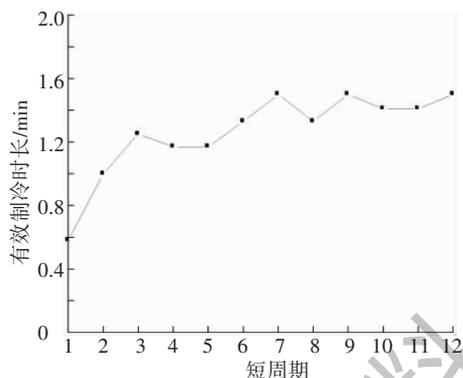


图 3 冷藏蒸发器有效制冷时长变化

Fig.3 Variation in efficient cooling time of refrigerating-evaporator

对于冰箱的蒸发器，空气侧得到的冷量便是蒸发器的有效制冷量。因此，蒸发器在一定时间内的有效制冷量可通过空气侧得到的冷量来进行计算：

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \frac{q_v c_p \Delta T}{v} dt = \frac{q_v c_p}{v} \int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt. \quad (1)$$

式中： Q 为蒸发器的有效制冷量，kW； q_v 为蒸发器风机的体积流量， $m^3 \cdot s^{-1}$ ； c_p 为空气定压比热容， $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ； ΔT 为空气的回风和送风温差， $^\circ C$ ； v 为空气的比体积， $m^3 \cdot kg^{-1}$ ； t 为时间，s。

分析式 (1) 可知 q_v 、 c_p 、 v 变化较小，可看做定值，故蒸发器的有效制冷量近似正比于通过蒸发器的空气的送、回风温差。冷藏蒸发器送回风温差平均值见表 2。

表 2 中的第 2 栏表示在每 1 个短周期的 2 min 冷藏运行内冷藏蒸发器的送、回风温差平均值，第 3 栏表示 2 min 冷藏运行内有效制冷阶段的冷藏蒸发器送回、风温差平均值，第 4 栏为二者平均值之差，可近似代表蒸发器制冷能力的损失。差值越大，说

明过渡过程的制冷剂迁移对于整个 2 min 冷藏运行的制冷量损失就越大。如表 2 所示，无论是 2 min 运行过程，还是有效制冷过程，冷藏蒸发器的送、回风温差平均值均是先增大后不变的变化趋势，而二者的差值则是先减小后不变。相应的，制冷剂迁移造成的冷藏蒸发器制冷能力损失也由 33.9% 降至 5.2%。

表 2 冷藏蒸发器送回风温差平均值

Tab.2 Difference between air supply and return temperature of refrigerating-evaporator

短周期数	2min / $^\circ C$	有效制冷过程/ $^\circ C$	差值/ $^\circ C$	能力损失/%
1	11.7	17.7	6.0	33.9
2	18.4	20.4	2.0	9.8
3	19.6	21.1	1.5	7.1
4	20.0	21.3	1.3	6.1
5	20.1	21.2	1.1	5.2
6	20.1	21.2	1.1	5.2

运行切换中的制冷剂迁移损失主要是由两个并联蒸发器的蒸发温度（压力）的不同引起的，二者差值越大，制冷剂迁移时间越长，损失就越大。图 4 为两个蒸发温度的差值与冷藏蒸发器送、回风温差在有效制冷过程与 2 min 时间内的差值对比。两个蒸发温度的差值在第 1 个短周期最大，为 7.2 $^\circ C$ 。第 1 个短周期到第 2 个短周期的下降幅度最大，约为 1.4 $^\circ C$ ；第 2 个短周期到第 5 个短周期的下降幅度分别为 0.2、0.5 和 0.4 $^\circ C$ ；第 6 个短周期之后基本维持在 4.7 $^\circ C$ 左右。

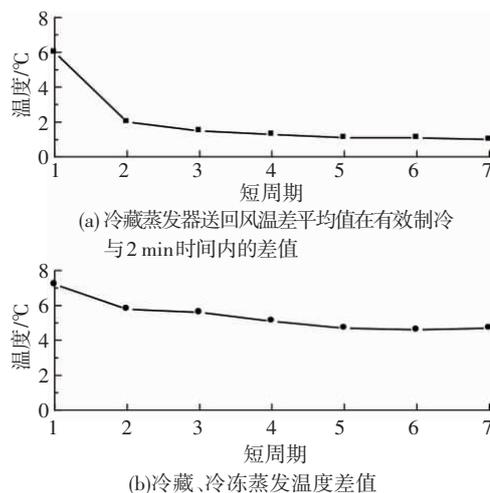


图 4 冷藏蒸发器送回、风温差与冷藏、冷冻蒸发温度差值的对比

Fig.4 Comparison of (a) and (b) value, (a) is the difference between air supply and return temperature of refrigerating-evaporator; (b) is the average temperature difference between refrigerating-evaporator and freezing-evaporator

冷藏蒸发器的送、回风温差平均值在有效制冷过程与 2 min 时间内的差值与冷冻、冷藏蒸发温度

差值的变化趋势一致. 说明随着切换的不断进行, 切换的过渡过程导致的损失越来越小, 到达第 6 个短周期后, 差值基本不再变化, 表示此时切换的损失已降至最小, 可认为系统达到了稳定运行状态.

3 短周期切换控制对冷冻室降温的影响

如图 5 所示, 冷藏降温阶段, 冷冻蒸发器进口、中部、出口温度变化趋势基本保持一致, 说明其中的制冷剂一直为气液两相状态, 冷冻蒸发器有制冷量的产生. 在 2 min 的冷藏运行期间, 冷冻蒸发器温度的上升有两个原因: 一是冷冻室回风的影响; 另外, 冷冻运行向冷藏运行切换时, 低压侧压力由冷冻蒸发压力向冷藏蒸发压力攀升, 逐渐实现两个蒸发器的压力平衡, 气液两相状态的制冷剂饱和压力与饱和温度一一对应, 其中制冷剂饱和温度也相应上升. 因此, 冷冻蒸发器的进口、中部、出口的温度均会上升. 1 min 的冷冻运行期间, 冷冻蒸发器温度的下降则是由于节流压力的下降. 当冷藏室温度达到下限值后, 系统单独给冷冻蒸发器供液, 由于节流压力的下降且冷藏蒸发器中的制冷剂逐渐迁移至冷冻蒸发器. 因此, 单独冷冻阶段冷冻蒸发器温度持续下降.

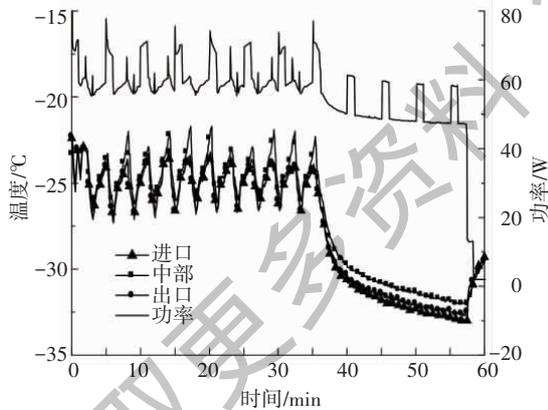


图 5 冷冻蒸发器温度变化

Fig.5 Variation in freezing-evaporator temperature

图 6 为冷冻室感温包温度随时间变化. 由图 6 可知, 在冷藏降温阶段, 前 6 个短周期 (0~18 min) 内冷冻室感温包温度降幅较大, 从 -16.5°C 降至 -17.8°C . 而后 5 个短周期 (18~35 min) 温度降幅较小, 仅从 -17.8°C 降至 -18.1°C . 对比前文分析可以看出, 在冷藏降温阶段, 冷藏蒸发器冷量损失达到最低值之后, 由于大量制冷剂已迁移到冷藏蒸发器, 导致冷冻蒸发器制冷量减小, 因此对冷冻室的降温作用也降到最低. 在冷冻单独降温阶段, 冷冻室温度是在冷藏降温阶段的降温基础上继续降低, 在 35.00~57.42 min 期间, 从 -18.1°C 降至 -20.1°C . 冷

藏降温阶段的前 18 min 温降占到冷冻室总温降的 36.1%.

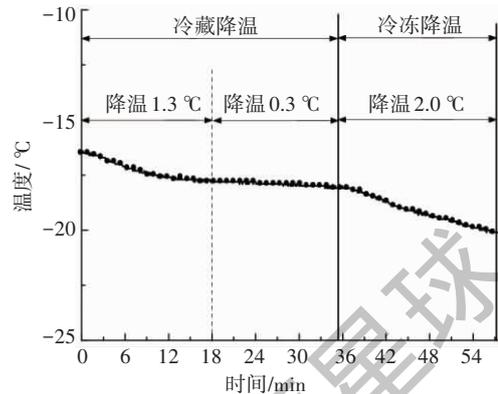


图 6 冷冻感温包温度变化

Fig.6 Variation in freezing-sensor temperature

综上所述, 冷藏降温阶段的“2 min 冷藏运行+1 min 冷冻运行”的短周期切换控制策略对冰箱整体性能的影响主要体现在以下 3 个方面: 首先, 减少了冷冻室温度的回升. 针对并联双循环风冷冰箱, 传统控制模式下冷藏运行过程中, 冷冻蒸发器不供液, 也没有冷量产生. 因此, 其对冷冻室没有任何降温作用, 冷冻室一直有温升, 直至冷藏运行结束切换至冷冻运行时为止. 因该切换是由冷藏感温包控制的, 所以在冷藏降温的过程中兼顾冷冻降温, 可防止冷冻室温度上升过高. 其次, 由于在冷藏降温阶段对冷冻进行部分降温, 那么在冷冻单独降温阶段对冷冻室的降温负荷有所减小, 从而使冷冻降温阶段时间缩短, 总运行时间减少. 再次, 冷藏降温期间, 随着制冷剂逐渐迁移到冷藏蒸发器, 冷冻蒸发器的制冷量逐渐减小. 冷冻感温包的温度在开机第 6 个短周期 (18 min) 之后仅下降了 0.4°C , 却同时也减慢了冷藏室的降温速度. 因此, 在冷冻降温时间的缩短与冷藏运行时间的延长之间存在使压缩机运行时间最短的最优值. 虽然第 6 个短周期之后, 对冷冻室的降温效果明显减弱, 但是这个时间点是否是能使得压机运行时间最短的最优值, 还需进一步研究验证.

4 结论

- 1) 压机启动后, 制冷剂逐渐由冷冻蒸发器向冷藏蒸发器迁移. 前 6 个短周期内, 冷冻运行向冷藏运行切换时制冷剂迁移的有效制冷时长由占冷藏运行的 21% 增大至 71.5%, 送回风温差由 11.7°C 增大至 20.1°C , 制冷剂迁移造成的冷藏蒸发器制制冷量损失由 33.9% 降至 5.2%, 第 6 个短周期后基本稳定.
- 2) 冷藏降温阶段冷冻蒸发器内的制冷剂一直为气液两相状态, 有冷量产生. 前 18 min 使冷冻室

感温包温度从 $-16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-17.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,占到冷冻室总温降的 36.1%。但后 17 min 由于大量制冷剂已迁移到冷藏蒸发器,导致冷冻蒸发器制冷量减小,冷冻室感温包温度仅降低 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,且减慢了冷藏室降温速度。还需进一步研究以确定冷冻降温时间的缩短与冷藏运行时间的延长之间取最优值,在保证箱温的同时使压缩机运行时间最短。

参考文献

- [1] YOON W J, JUNG H W, CHUNG H J, et al. Performance optimization of a two-circuit cycle with parallel evaporators for a domestic refrigerator-freezer[J]. *International journal of refrigeration*, 2011, 34(1): 216–224. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2010.09.008.
- [2] VISEK M, JOPPOLO C M, MOLINAROLI L, et al. Advanced sequential dual evaporator domestic refrigerator/freezer: System energy optimization[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 43: 71–79. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2014.03.001.
- [3] MITISHITA R S, BARREIRA E M, NEGRAO C O R, et al. Thermoeconomic design and optimization of frost-free refrigerators[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 1376–1385. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.06.024.
- [4] GHADIRI F, RASTI M. The effect of selecting proper refrigeration cycle components on optimizing energy consumption of the household refrigerators[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 67(1): 335–340. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.03.024.
- [5] RUBAS P J, BULLARD C W. Factors contributing to refrigerator cycling losses[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1995, 18(3): 168–176. DOI: 10.1016/0140-7007(94)00000-N.
- [6] BJORK E, PALM B. Refrigerant mass charge distribution in a domestic refrigerator, part I: transient conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(8): 829–837. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.003.
- [7] BJORK E, PALM B. Refrigerant mass charge distribution in a domestic refrigerator. Part II: Steady state conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(8): 866–871. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.004.
- [8] BANSAL P, FOTHERGILL D, FERNANDES R. Thermal analysis of the defrost cycle in a domestic freezer[J]. *International journal of refrigeration*, 2010, 33: 589–599. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2009.11.012.
- [9] KNABBEN F T, HERMES C J L, MELO C. In-situ study of frosting and defrosting processes in tube-fin evaporators of household refrigerating appliances[J]. *International journal of refrigeration*, 2011, 34(8): 2031–2041. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2011.07.006.
- [10] MASTRULLO R, MAURO A W, MENNA L, et al. Transient model of a vertical freezer with door openings and defrost effects[J]. *Applied Energy*, 2014, 121: 38–50. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.069.
- [11] MELO C, KNABBEN F T, PEREIRA P V. An experimental study on defrost heaters applied to frost-free household refrigerators[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51: 239–245. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.08.044.
- [12] OZKAN D B, OZIL E, İNAN C. Experimental investigation of the defrosting process on domestic refrigerator finned tube evaporators[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2012, 33: 548–557. DOI: 10.1080/01457632.2012.624867.
- [13] XIAO J, WANG W, ZHAO Y H. An analysis of the feasibility and characteristics of photoelectric applied in defrost-control[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32, 1350–1357. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2009.02.014.
- [14] BELMAN-FLORES J M, BARROSOMALDONADO J M, RODRIGUEZ-MUNOZ A P, et al. Enhancements in domestic refrigeration, approaching a sustainable refrigerator – A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 51: 955–968. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.003.
- [15] 卢智利, 丁国良. 蒸发器并联双循环冰箱的温度与分时运行控制策略 I. 理论分析[J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(2): 267–271. DOI: 10.3321/j.issn: 1006–2467.2006.02.020.
LU Z L, DING G L. The temperature and time sharing running control strategy of two-circuit cycle refrigerator/freezer with parallel evaporators: I. theoretical analysis[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(2): 267–271. DOI: 10.3321/j.issn: 1006–2467.2006.02.20.
- [16] 卢智利, 丁国良. 蒸发器并联双循环冰箱的温度与分时运行控制策略 II. 实验验证[J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(2): 272–276. DOI: 10.3321/j.issn: 1006–2467.2006.02.021.
LU Z L, DING G L. The temperature and time sharing running control strategy of two-circuit cycle refrigerator/freezer with parallel evaporators: II. experimental tests and validation[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(2): 272–276. DOI: 10.3321/j.issn: 1006–2467.2006.02.021.
- [17] 刘云, 赵日晶, 黄东. 并联双循环风冷冰箱冷冻/冷藏切换时制冷剂迁移研究[J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(3): 17–21. DOI: 10.7652/xjtub201403004.
LIU Y, ZHAO R J, HUANG D. Refrigerant migration during switching of a parallel cycle frost-free refrigerator-freezer[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(3): 17–21. DOI: 10.7652/xjtub201403004.

(编辑 杨波)