

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20161401

基于温度优先级的并联双蒸发器冰箱的控制策略

杨丛彦, 赵丹, 丁国良, 胡海涛

(上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240)

摘要: 大容量冰箱需要采用并联双蒸发器分别控制各箱室的温度, 现有的顺序控制策略在动态工况下容易导致箱室温度超限和偏离目标平均温度的问题, 因此需提出一个新的控制策略。本文提出基于各箱室需要冷量的紧迫级别来进行冷冻/冷藏循环的切换的温度优先级控制策略, 并分析该控制策略如何解决在动态工况下箱室温度超限和偏离目标平均温度的问题。对采用新控制策略与现有的顺序控制策略的并联双蒸发器冰箱进行数值仿真研究, 结果表明, 在新控制策略下不会出现箱室温度超限的问题, 且与目标平均温度的偏差均在 0.6 K 以内; 与现有顺序控制策略相比, 节能幅度最高达 8.5%。

关键词: 并联双蒸发器; 冰箱; 温度; 温度优先级控制策略; 顺序控制策略

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157(2016)S2-0202-06

A control strategy based on temperature priority level for domestic refrigerator with parallel evaporators

YANG Congyan, ZHAO Dan, DING Guoliang, HU Haitao

(Institute of Refrigeration & Cryogenics Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The adoption of a parallel evaporators for large-capacity refrigerators can control the cabinet air temperature separately. The existing sequential control strategies cause some problems of exceeding the cabinet air temperature up limit and deviating from the set average temperature easily under the dynamic conditions, and a new control strategy is necessary to avoid these problems. The objective of this study is to put forward a new control strategy which switch freezing/refrigerating cycle based on the cooling urgency of cabinet, and the new control strategy is analyzed to find the way to solve the two problems mentioned above under the dynamic conditions. Refrigerator with parallel dual evaporator in the new control strategy and existing three sequential control strategies are simulated numerically, the results show that the new control strategy does not have the problem of exceeding the cabinet air up temperature limit, and the deviation from the set average temperature is less than 0.6 K; the energy-saving effect can reach 8.5%, comparing with the existing sequential control strategies.

Key words: parallel dual evaporator; refrigerator; temperature; control strategy based on temperature priority level; sequential control strategy

2016-10-08 收到初稿, 2016-10-19 收到修改稿。

联系人: 胡海涛。第一作者: 杨丛彦 (1990—), 女, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51506117); 国家博士后基金项目 (2015M581610); 上海市优秀学术带头人计划项目 (16XD1401500)。

Received date: 2016-10-08.

Corresponding author: HU Haitao, huhaitao2001@sjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51506117), the China Postdoctoral Science Foundation (15M581610) and the Program for Excellent Academic Leaders of Shanghai (16XD1401500).

引言

冰箱的温控精度和能效是衡量冰箱性能的主要指标段^[1-3]。冰箱中采用并联双蒸发器是提高冰箱的能效和温控精度的重要手段。采用并联双蒸发器的冰箱，通过三通电磁阀来交替控制冰箱的冷冻循环制冷回路和冷藏循环制冷回路，进而实现冷藏室、冷冻室的单独控制，提高各间室的温控精度；同时通过对冷藏回路单独控制，可减少冷藏室蒸发器的热力学不可逆损失，降低压缩机的压缩比，进而达到与传统的单回路蒸发器冰箱和串联蒸发器冰箱相比更好的节能效果^[4-7]。冰箱在实际运行过程中经常处于动态工况，实现并联双蒸发器冰箱温控精度和冰箱能效最优，就要明确何时进行冷冻循环和冷藏循环的切换，即选择合适的控制策略^[4]。

冰箱控制策略在动态运行情况下需满足箱室温度不能超过温度上限、箱室的平均温度不能偏离目标平均温度的控制要求。

现有的并联双蒸发器冰箱的控制策略为顺序控制策略^[8-13]。顺序控制策略是预先设定好各循环过程的顺序，然后通过比较箱室温度和目标温度来控制各循环过程的切换。

冰箱常见的动态扰动过程包括：①一个箱室热负荷突然增加；②两个箱室热负荷同时增加；③冷冻室的热负荷远大于冷藏室热负荷^[10]。现有的顺序控制策略在处理冰箱常见的动态扰动时，每次循环都必须使箱室的温度达到温度下限再进入下一循环，这就造成了另一箱室因长期得不到冷量而超过温度上限和偏离目标平均温度问题。

现有的顺序控制策略出现温度超限和偏离目标平均温度的问题的根本原因是没有根据箱室在动态工况下需要冷量的紧迫级别来进行冷冻/冷藏循环的切换，即在箱室需要冷量时不能及时切换循环提供冷量，而在箱室不需要冷量时却提供了额外的冷量。

本文的目的是提出基于各箱室需要冷量的紧迫级别来切换冷冻/冷藏循环的控制策略，进而解决现有控制策略在动态工况下温度超限和偏离目标平均温度的问题。

1 基于温度优先级控制策略的提出

并联双蒸发器冰箱循环共包括两个循环回路：冷藏循环回路（图1中 a—b—c—e—g—a）和冷冻

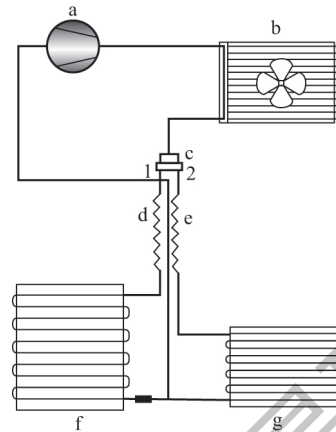


图1 并联双蒸发器冰箱的循环示意图

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

a—compressor; b—condenser; c—three-way valve; d—capillary of freezer; e—capillary of refrigerator; f—evaporator of freezer; g—evaporator of refrigerator

循环回路（图1中 a—b—c—d—f—a）。其中三通电磁阀控制制冷剂的流向，实现两个循环回路之间的切换。并联双蒸发器冰箱包括冷藏循环、冷冻循环、蒸发器抽真空以及停机 4 个基本过程，其控制策略就是描述这 4 个基本过程如何切换的控制逻辑。

本文提出基于各箱室需要冷量的紧迫级别来进行冷冻/冷藏循环的切换的控制策略，即基于温度优先级控制策略。

基于温度优先级控制策略的基本思路：首先，根据各箱室需要冷量的急切程度划分为若干温度优先级别，箱室温度偏离目标温度越远，优先级别越高，如表1所示；然后，比较两个箱室的温度优先级，温度优先级高的箱室先进行制冷，如果两个箱室温度优先级都为 0，则冰箱停机。

表1 温度优先级的划分

Table 1 Division of temperature priority

Cabinet	Priority level	Standard of division
freezer	2	$T_F - T_{F_set} \geq \Delta T_{F1} + \Delta T_{F2}$
	1	$\Delta T_{F1} < T_F - T_{F_set} < \Delta T_{F1} + \Delta T_{F2}$
	0	$T_F - T_{F_set} \leq \Delta T_{F1}$
refrigerator	2	$T_R - T_{R_set} \geq \Delta T_{R1} + \Delta T_{R2}$
	1	$\Delta T_{R1} < T_R - T_{R_set} < \Delta T_{R1} + \Delta T_{R2}$
	0	$T_R - T_{R_set} \leq \Delta T_{R1}$

温度优先级控制策略的详细控制逻辑（图2）如下。

(1) 首先判断冷藏室和冷冻室箱室的温度优先

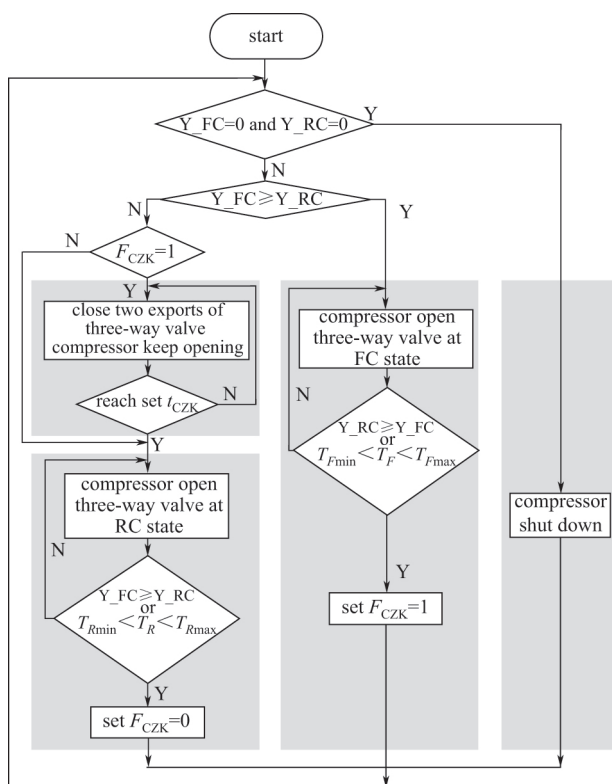


图 2 温度优先级控制策略

Fig. 2 Schematic diagram of control strategy based on temperature priority level

级，如果冷冻优先级 $Y_FC=0$ 且冷藏室优先级 $Y_RC=0$ ，冰箱将进入压缩机停机状态，否则转到步骤 (2)。

(2) 比较 Y_FC 和 Y_RC ，如果 $Y_FC \geq Y_RC$ ，转到步骤 (3)，否则，转到步骤 (4)；

(3) 冰箱进行冷冻循环，压缩机开机并且电磁阀处于 FC 状态，比较 Y_FC 和 Y_RC 的大小以及冷冻室温度 T_F ，如果 T_F 在 T_{Fmin} 和 T_{Fmax} 之间或 $Y_RC \geq Y_FC$ ，设置 $F_{CZK}=1$ ，然后转到步骤 (1)，否则继续冷冻循环；

(4) 冰箱在进行冷藏循环之前，需要判断是否进行蒸发器抽真空，如果 $F_{CZK}=1$ ，进行抽真空过程，转到步骤 (5)，否则转到步骤 (6)；

(5) 冰箱进行蒸发器抽真空循环，如果达到设定的抽真空时间 t_{CZK} ，转到步骤 (6)，否则继续进行蒸发器抽真空过程；

(6) 冰箱进行冷藏循环，压缩机保持开机，电磁阀处于 RC 状态，比较 Y_FC 和 Y_RC 大小及冷藏室温度 T_R ，如果 T_R 在 T_{Rmin} 和 T_{Rmax} 之间或 $Y_FC \geq Y_RC$ ，设置 $F_{CZK}=0$ ，然后转到步骤 (1)，否则继续冷藏循环。

2 基于温度优先级控制策略的效果

本节将温度优先级控制策略和现有顺序控制策略嵌入到成熟的冰箱仿真平台^[14-15]，仿真两种策略在冰箱动态扰动下的性能，验证温度优先级控制策略可避免在冰箱实际动态运行过程中箱室温度超限以及偏离目标平均温度的问题。用于仿真测试的冰箱为对开门冰箱。设定环境温度为 298.15 K，冷藏室的温度上下限为 280.15 K/274.15 K、冷冻室的温度上下限为 257.15 K/253.15 K 为稳态工况，仿真的工况包括冰箱常见的 3 种动态运行工况：一个箱室热负荷突然增加、两个箱室热负荷同时增加、冷冻室的热负荷远大于冷藏室热负荷，详细的工况如表 2 所示。

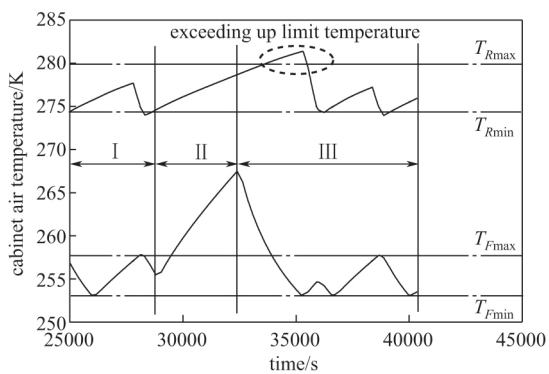
2.1 一个箱室热负荷突然增加时的控制效果

现有的顺序控制策略向下向冷冻室突然加入大量的食品 (过程 I)，此时 T_F 急剧上升，并且超过了 T_{Fmax} (257.15 K)，冰箱运行冷冻循环，冷冻室冷却到 T_{Fmin} 后， T_R 均已超过 T_{Rmax} (279.15 K)，降低了冷藏箱室的温控精度，箱室的温度波动曲线如图 3 (a) 所示。温度优先级控制策略向下向冷冻室突然加入大量的食品 (过程 I)，使得 Y_FC 大于 Y_RC ，压缩机启动，运行冷冻循环，当 T_R 回

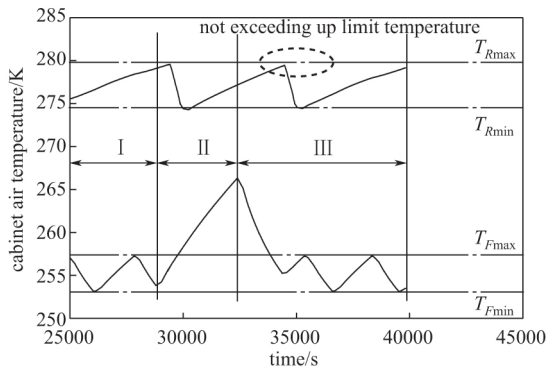
表 2 仿真工况

Table 2 System conditions for simulation

Condition	Example	Input
I a cabinet heating load increases suddenly	put food into freezer suddenly	20 W heating load is supplied to freezer during 28800—32400 s
II both cabinet heating load increase simultaneously	ambient temperature is very high	ambient temperature is 15 K higher than steady condition
III freezer heating load is far more than refrigerator's	freezer temperature is very low	freezer up and low limit temperature are 3.5 K/1 K lower than steady condition respectively



(a) temperature fluctuation under sequential control strategy



(b) temperature fluctuation under control strategy based on temperature priority level

图 3 突然向冷冻室放入大量食品时两种控制策略下的箱室温度动态波动

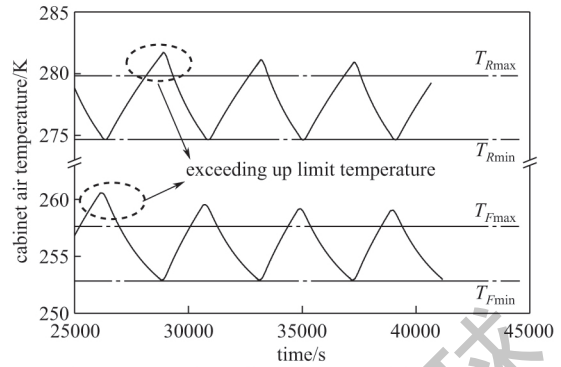
Fig. 3 Fluctuation of cabinets air temperature when put food into freezer suddenly

I —normal refrigeration process; II —put food into freezer suddenly; III —refrigeration process after putting a lot of food

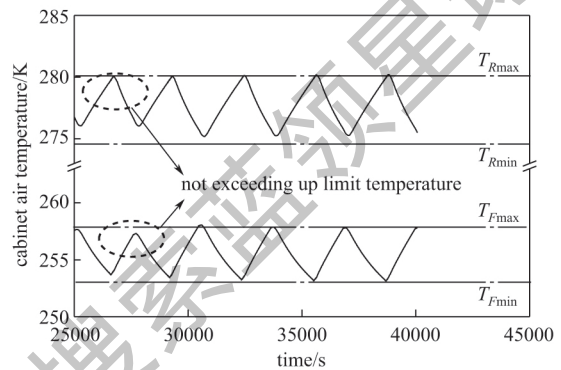
升到 T_{Rmax} (279.15 K), 即 $Y_{RC} \geq Y_{FC}$ 时, 电磁阀切换到冷藏循环, 给冷藏室制冷, 如图 3 (b) 所示。此控制策略避免了冷冻循环运行时间过长导致冷藏室温度回升超过温度上限的问题, 提高了箱室的温控精度。温度优先级控制策略下箱室平均温度与设定的平均温度的偏差在 0.11 K 以内, 远小于顺序控制策略下箱室平均温度与设定的平均温度的偏差 (1.32 K)。温度优先级控制策略比现有的顺序控制策略的能耗低 1.20%~1.74%。

2.2 两个箱室热负荷同时增加的控制效果

现有的顺序控制策略下, 由于过高的环境温度, 两箱室漏热量都增大, 在冷藏 (冷冻) 循环中, 当 T_R (T_F) 降低到温度下限 T_{Rmin} (T_{Fmin}) 时, T_F (T_R) 已回升超过 T_{Fmax} (T_{Rmax}), 进而带来箱室温度波动过大和温控精度降低的问题, 箱室温度波动曲线如图 4 (a) 所示。



(a) temperature fluctuation under sequential control strategy



(b) temperature fluctuation under control strategy based on temperature priority level

图 4 环境温度过高时两种控制策略下的箱室温度动态波动

Fig. 4 Fluctuation of cabinet air temperature when ambient temperature is very high

温度优先级控制策略下, 由于过高的环境温度, 两箱室漏热量都增大, 当 $Y_{FC} \geq Y_{RC}$, 压缩机启动, 运行冷冻循环, 当 T_R 回升到 T_{Rmax} (279.15 K), 即 $Y_{RC} \geq Y_{FC}$ 时, 电磁阀切换到冷藏循环, 给冷藏室制冷, 如图 4 (b) 所示。此控制策略避免了当 T_F (T_R) 已经回升到 T_{Fmax} (T_{Rmax}) 却得不到冷量的问题, 保证了箱室的温控精度。

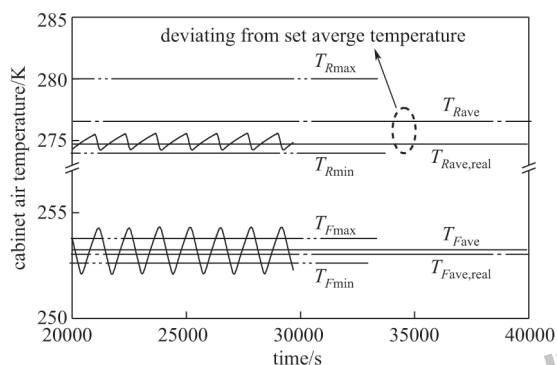
温度优先级控制策略下箱室平均温度与设定的平均温度的偏差在 0.59 K 以内, 远小于顺序控制策略下箱室平均温度与设定的平均温度的偏差 (1.01 K)。温度优先级控制策略比现有的顺序控制策略的能耗低 0.68%~1.01%。

2.3 冷冻室的热负荷远大于冷藏室时控制效果

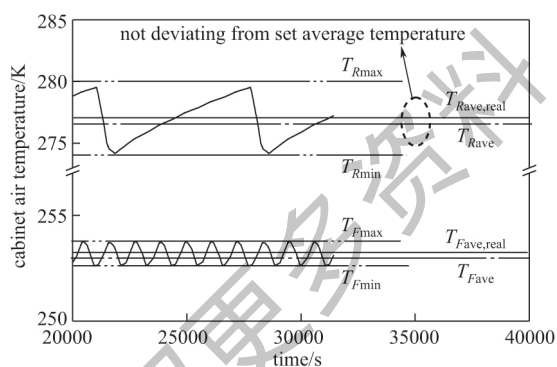
现有的顺序控制策略下, 冷冻室冷却到 T_{Fmin} (252.65 K) 后, 冷藏室还没有达到温度上限 T_{Rmax} (279.15 K), 并不需要制冷, 但按照此顺序控制策略, 冰箱还是切换至冷藏循环, 导致 T_R 偏低, 从而冷藏室的平均温度将低于目标平

均温度，降低了箱室的温控精度，箱室的温度波动曲线如图 5 (a) 所示。温度优先级控制策略下，当 $Y_FC \geq Y_RC$ ，运行冷冻循环，当每次冷冻循环结束但冷藏室还不需要制冷时，将不进行冷藏循环，如图 5 (b) 所示。此控制策略避免了因冷藏室不需要冷量时给冷藏室制冷导致能耗增加的问题，同时也避免了冷藏室平均温度低于目标平均温度。

温度优先级控制策略下箱室平均温度与设定的平均温度的偏差在 0.17 K 以内，远小于顺序控制策略下箱室平均温度与设定的平均温度的偏差 (2.21 K)。温度优先级控制策略比现有的顺序控制策略能耗低 3.4%~8.5%。



(a) temperature fluctuation under sequential control strategy



(b) temperature fluctuation under control strategy based on temperature priority level

图 5 冷冻室温度过低时两种控制策略下的箱室温度波动

Fig 5 Fluctuation of cabinet air temperature when freezer temperature is very low

3 结 论

本文提出的基于各箱室所需冷量的紧迫级别来进行冷冻/冷藏循环的切换的控制策略，可以避免现有顺序控制策略导致的温度超限和偏离目标平均温度的问题。实例计算结果显示采用本文提出的控制方案，箱室平均温度与目标平均温度的偏差在

0.6 K 以内，远小于其在顺序控制策略下的偏差 (2.2 K)；节能幅度最高达 8.5%。

符 号 说 明

- F_{CZK} —— 抽真空执行参数
- T_F —— 冷冻室温度
- T_{Fave} —— 冷冻室目标平均温度
- $T_{Fave,real}$ —— 冷冻室平均温度
- T_{Fmax} —— 冷冻室温度上限
- T_{Fmin} —— 冷冻室温度下限
- T_{F_set} —— 冷冻室设定温度
- T_R —— 冷藏室温度
- T_{Rave} —— 冷藏室目标平均温度
- $T_{Rave,real}$ —— 冷藏室平均温度
- T_{Rmax} —— 冷藏室温度上限
- T_{Rmin} —— 冷藏室温度下限
- T_{R_set} —— 冷藏室设定温度
- ΔT_{F1} —— T_{F_set} 的最大波动值
- ΔT_{F2} —— 冷冻室温度优先级 2 的最大温度波动值
- ΔT_{R1} —— T_{R_set} 的最大波动值
- ΔT_{R2} —— 冷藏室温度优先级 2 的最大温度波动值
- t_{CZK} —— 抽真空时间
- Y_FC —— 冷冻室优先级
- Y_RC —— 冷藏室优先级

References

- [1] 毛林伟, 周汪贵, 张孝军, 等. 家用电冰箱能效检测中的问题及提高其能效水平的探讨 [C] // 家电科技增刊——第十二届全国电冰箱 (柜)、空调器及压缩机学术交流大会论文集. 2014.
MAO L W, ZHOU W G, ZHANG X J, *et al.* To investigate the problems in household refrigerators energy efficiency testing and improving their energy efficiency levels [C] // Household Appliance Technology Supplement — Twelfth National Refrigerator (Cabinet), Air-conditioners and Compressors Academic Exchanges Assembly Proceedings 2014.
- [2] 熊征, 李娟, 王跃河, 等. 冰箱保鲜技术现状分析及发展趋势 [J]. 家电科技, 2012, (3): 60-62.
XIONG Z, LI J, WANG Y H, *et al.* Analysis of influence factors for heat transfer and pressure [J]. China Appliance Technology, 2012, (3): 60-62.
- [3] 梅勤光. 家用冰箱的节能减排技术 [J]. 制冷技术, 2008, 28 (4): 12-14.
MEI Q G. Energy saving and emission reduction technology for household refrigerator [J]. Refrigeration Technology, 2008, 28 (4): 12-14.
- [4] 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.
- [5] YOON W J, SEO K, CHUNG H J, *et al.* Performance

- optimization of dual-loop cycles using R-600a and hydrocarbon mixtures designed for a domestic refrigerator-freezer [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35 (6): 1657-1667.
- [6] WON S, JUNG D, RADERMACHER R. An experimental study of the performance of a dual-loop refrigerator freezer system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1994, 17 (6): 411-416.
- [7] LU Z L, DING G L, ZHANG C L. Dynamic simulation of natural convection bypass two-circuit cycle refrigerator-freezer and its application (II): System simulation and application [J]. 2004, 24 (10): 1525-1533.
- [8] 董蕾, 陈超敏. 简析冰箱的箱内温度控制 [J]. *家用电器*, 2001, (10): 19-20.
TONG L, CHEN C M. Analysis of the refrigerator temperature control [J]. *Household Appliance*, 2001, (10): 19-20.
- [9] LU Z, DING G. Temperature and time-sharing running combination control strategy of two-circuit cycle refrigerator-freezer with parallel evaporators [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26 (s 11/12): 1208-1217.
- [10] 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.
LU Z L, DING G L. Temperature and time-sharing running combination 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.
- [11] 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.
LU Z L, DING G L. Temperature and time-sharing running combination 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.
- [12] FELICE M D, PIRODDI L, LEVA A, *et al.* Adaptive temperature control of a household refrigerator [C] // *Proceedings of the 2009 Conference on American Control Conference IEEE Press*, 2009: 889-894.
- [13] VISEK M, JOPPOLOC M, MOLINAROLI L, *et al.* Advanced sequential dual evaporator domestic refrigerator/freezer: system energy optimization [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 43 (4): 71-79.
- [14] DING G L, ZHANG C, LU Z L. Dynamic simulation of natural convection bypass two-circuit cycle refrigerator-freezer and its application (I): Component models [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24 (10): 1513-1524.
- [15] 杨丛彦, 赵丹, 丁国良, 等. 多类型冰箱部件及系统仿真软件开发 [C] // *2015 年中国家用电器技术大会论文集*, 2015.
YANG C Y, ZHAO D, DING G L, *et al.* Development of simulation platform for multi-type refrigerator components and the whole system [C] // *China Household Electrical Appliances Technical Conference Proceedings* 2015.