

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2013.11.015

带有冷变换器的双压缩机耦合冰箱

唐黎明, 周苏明, 陈光明, 陈 琪

(浙江大学 制冷与低温研究所, 浙江 杭州 310029)

摘 要: 为提高冰箱的节能性能, 提出一种新型双压缩机耦合冰箱, 该冰箱在传统的双压缩机双循环冰箱的基础上增加一个冷变换器. 冷变换器能将冷藏循环中部分低品位冷量转换为冷冻循环中的高品位冷量, 提高冰箱的性能系数. 文中对新型冰箱进行理论能耗分析和引入贡献率、压缩机效率等影响因素的模拟计算, 结果表明: 在国家标准测试工况下, 带冷变换器的双压缩机耦合冰箱比普通双压缩机双循环冰箱的性能系数提高 9.98%, 比蒸发器串联单循环冰箱的性能系数提高 13.38%.

关键词: 冰箱; 冷变换器; 双压缩机; 节能

中图分类号: TB 657.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2013)11-1983-04

A two-combined-compressor refrigerator/freezer with cooling transformer

TANG Li-ming, ZHOU Su-ming, CHEN Guang-ming, CHEN Qi

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: To improve the energy saving performance of refrigerator/freezers (RFs), a new two-combined-compressor RF was put forward by adding a cooling transformer (CT) into conventional two-compressor two-circuit cycle RFs. The CT can transform part of refrigerator-cycle (R-cycle) low-grade cooling capacity into freezer-cycle (F-cycle) high-grade cooling capacity, then improve the RF's coefficient of performance (COP). Theoretical energy consumption was analyzed, influence factors such as the transformation ratio (TR) and compressor efficiency were taken into consideration in the process of simulated calculation. The result shows that: when the condensation temperature is 32 °C, storage temperatures is -5 °C and freezing temperature is -25 °C, COP of two-combined-compressor RFs with cooling transformer can be improved 9.98% compared with COP of two-compressor two-circuit cycle RFs, while compared with COP of evaporator in series cycle RFs, the improvement rate is 13.38%.

Key words: refrigerator/freezer; cooling transformer; two compressors; energy saving

随着国民生活水平的提高, 冰箱几乎成为城市居民的必备家用电器, 冰箱耗能已成为不可忽视的一大能源消耗, 国家相关部门对于冰箱能效等级的要求不断提高, 加之客户节能意识的增强, 能效等级已经成为购买冰箱产品的重要参考指标^[1-2]. 所以对于冰箱的节能研究变得十分紧迫和必要.

普通双温冰箱所采用的单循环系统存在温控不准确, 工作热损大等问题, 特别是对于大冷藏室的双温冰箱, 损耗的有用能十分可观^[3]. 分立双回路循环系统利用电磁阀切换回路可以很好地解决工作热损大的问题^[4-5], 对温度控制的灵活性和准确性也有一定的优化, 但是频繁地切换循环回路对系统工作

收稿日期: 2012-08-22.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2010CB227304); 钱江人才计划资助项目(2012R10030).

作者简介: 唐黎明(1962—), 男, 教授, 从事制冷、暖通工程的教学科研工作. E-mail: lmtang@zju.edu.cn

通信联系人: 陈琪, 男, 副教授. E-mail: zjuchenqi@zju.edu.cn

的稳定性影响很大. 双压缩机双循环系统同样可以避免工作热损大的问题, 而且承袭了单循环系统性能稳定的优点. 此外, 远优于其他系统的温控性能使之具有较大的潜力, 而它的缺点在于节能效果不佳, 无法弥补成本提高的不足.

本文对带冷变换器的吸收-压缩耦合制冷系统^[6]进行了丰富的理论和实验研究. 研究结果验证了冷变换器具有将低品位冷量转换为高品位冷量以实现节能的能力. 鉴此, 在保留双压缩机系统优良温控效果的前提下, 提出一种带有冷变换器的双压缩机耦合冰箱^[7-8].

1 带有冷变换器的双压缩机耦合冰箱

双压缩机双循环系统中冷藏循环的性能系数高, 冷量品位低; 冷冻循环的性能系数低, 冷量品位高. 就循环冷量品位特性来说, 与压缩-吸收耦合系统相类似, 可以将冷变换器应用于双压缩机双循环系统.

系统流程图如图 1 所示, 从图中可知, 该系统是在双压缩机双循环系统的基础上增加了一个冷变换器 (CT), 左侧为冷藏循环子系统, 右侧为冷冻循环子系统. 冷藏循环节流后的制冷剂与冷冻循环完全冷凝后的制冷剂在冷变换器内进行热交换, 通过这个冷变换器, 将冷藏循环回路的部分低品位冷量转化为冷冻循环回路的高品位冷量.

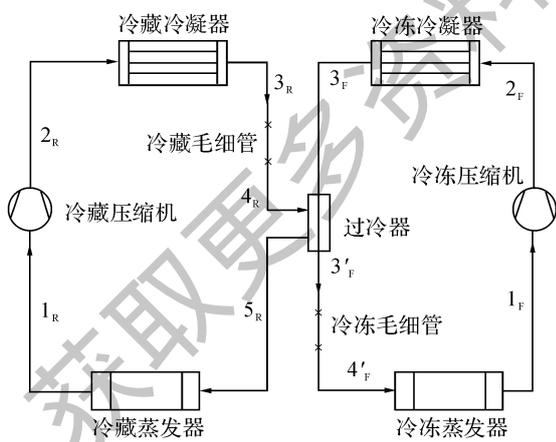


图 1 带有冷变换器的双压缩机耦合冰箱流程图

Fig. 1 Schematic diagram of two-combined-compressor RFs with cooling transformer

系统工作压焓图如图 2 所示, 在 2 个压缩机功耗都不变的情况下, 将冷冻循环回路的制冷剂过冷, 即 $3_F-3'_F$ 段, 用于增加冷冻循环子系统的制冷量, 增加的制冷量为 $4_F-4'_F$ 段, 而冷藏循环子系统损耗的冷量为 4_R-5_R 段. 经过过冷, 高温低品位的冷量 (4_R-

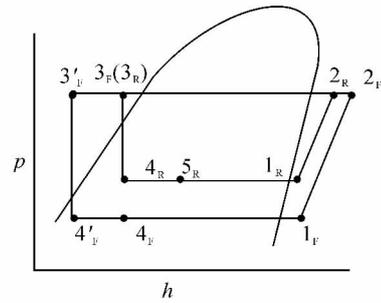


图 2 双压缩机耦合冰箱压焓图

Fig. 2 P-h diagram of two-combined-compressor RFs

5_R 段) 转化为低温高品位的冷量 ($4_F-4'_F$ 段), 这就是冷变换器的工作原理, 也是系统节能的原理.

2 系统能耗分析

本文用 C 表示冰箱的性能系数, 普通单回路循环冰箱的理论性能系数可以表示为

$$C_{RF} = COP_F \tag{1}$$

式中: 下标 RF 表示普通冰箱, COP_F 为冷冻工况下压缩机的性能系数^[9].

不考虑压缩机性能的影响, 双压缩耦合双循环冰箱的理论性能系数可以表示为

$$C_{DRF-\mu} = (Q_F + Q_R) / \left(\frac{Q_F}{COP_F} + \frac{Q_R}{COP_R} \right) \tag{2}$$

$$\mu = \frac{Q_1}{Q_2} \tag{3}$$

式中: 下标 DRF 表示新型冰箱, Q_F 为冷冻压缩机制冷量, Q_R 为冷藏压缩机制冷量, COP_R 为冷藏工况下压缩机的性能系数, Q_1 为冷冻室所需冷量, Q_2 为冷藏室所需冷量. μ 表示冷冻室和冷藏室负荷比, 只有在 μ 相等时, 双压缩机冰箱的性能系数对比才有意义.

如图 3 所示为模拟计算结果, 表示了蒸汽制冷循环的蒸发温度 (t_{EVA}) 和冷凝温度 (t_{CON}) 对性能系数的影响 (制冷工质为 R134a). 从图中可知, 其他条

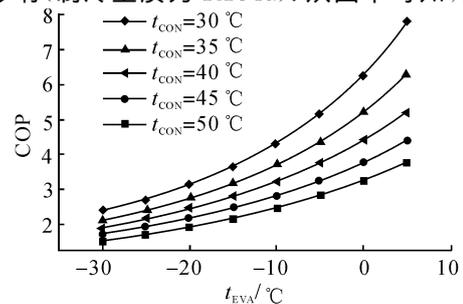


图 3 蒸发温度、冷凝温度对性能系数的影响

Fig. 3 Effect of evaporation temperature and condensation temperature on COP

件一致,冷凝温度不变,蒸发温度越高,性能系数越高.冷凝温度为 32 °C 时,冷藏工况(蒸发温度-5 °C)的 COP_R 为 4.813,而冷冻工况(蒸发温度-25 °C)的 COP_F 只有 2.624.

因为 COP_R 大于 COP_F,根据式(2),C_{DRF-μ} 必定大于 COP_F,即新型冰箱与普通单循环冰箱相比更加节能.

2.1 贡献率的影响

以上分析结果表明 C_{DRF-μ} 是处于 COP_F、COP_R 之间的一个值,性能系数虽然提高,但是不可能超过 COP_R 这个上限,即整个系统不可能完全工作于冷藏工况下,冷冻循环回路的制冷量也不可能完全从冷藏循环回路获得.因此引入贡献率的概念^[10],贡献率表示冷藏循环提供给冷冻循环的冷量占冷冻室所需冷量的百分比,即冷变换器的换热量与冷冻室所需冷量的比值.本文以 ξ 表示贡献率,贡献率等于零(ξ=0)时,系统等同于普通双压缩机双循环系统;当冷冻循环制冷剂被过冷至冷藏蒸发温度时,存在一个极限贡献率 ξ_{lim}.

贡献率 ξ 满足下式:

$$\xi = (h_{3F} - h_{3'F}) / (h_{1F} - h_{4'F}), \quad (4)$$

Q₁、Q₂ 与 Q_F、Q_R 有如下关系:

$$Q_F = (1 - \xi) \cdot Q_1, \quad (5)$$

$$Q_R + Q_F = Q_1 + Q_2. \quad (6)$$

将式(5)、(6)代入式(2)、(3)中得出冰箱性能系数式(7):

$$C_{DRF-\mu} = \frac{\mu + 1}{\frac{(1 - \xi) \cdot \mu}{COP_F} + \frac{1 + \mu \cdot \xi}{COP_R}} \quad (7)$$

$$C_{DRFO-\mu} = \frac{\mu + 1}{\frac{\mu}{COP_F} + \frac{1}{COP_R}} \quad (8)$$

C_{DRFO-μ} 表示普通双压缩机双循环冰箱(ξ=0)的性能系数.根据式(7)可知,其他条件不变,贡献率 ξ 越大,冰箱性能系数 C_{DRF-μ} 越高.

2.2 压缩机效率的影响

考虑到双压缩机冰箱使用的压缩机功率较小,实际电效率低于相同工况下的大功率压缩机,冰箱实际性能系数小于式(7)、(8)计算出来的结果.故对式(7)、(8)进行修正,引入 2 个系数 η_R、η_F^[11].

$$\eta_F = \eta_1 / \eta, \quad (9)$$

$$\eta_R = \eta_2 / \eta. \quad (10)$$

式中:η₁、η₂、η 分别表示冷冻压缩机、冷藏压缩机以及传统冰箱使用的大功率压缩机的电效率.修正后公式如式(11)、(12)所示.

$$C'_{DRF-\mu} = \frac{\mu + 1}{\frac{(1 - \xi) \cdot \mu}{COP_F \cdot \eta_F} + \frac{1 + \mu \cdot \xi}{COP_R \cdot \eta_R}} \quad (11)$$

$$C'_{DRFO-\mu} = \frac{\mu + 1}{\frac{\mu}{COP_F \cdot \eta_F} + \frac{1}{COP_R \cdot \eta_R}} \quad (12)$$

$$\alpha = (C'_{DRF-\mu} - C_{RF}) / C_{RF}. \quad (13)$$

$$\alpha_0 = \frac{(C'_{DRF-\mu} - C'_{DRFO-\mu})}{C'_{DRFO-\mu}}. \quad (14)$$

C'_{DRF-μ} 为修正后的双压缩机耦合冰箱的性能系数;C'_{DRFO-μ} 为修正后的普通双压缩机冰箱的性能系数;α 为修正后双压缩机耦合冰箱相对单循环冰箱的性能系数增长百分比;α₀ 为修正后双压缩机耦合冰箱相对普通双压缩机冰箱的性能系数增长百分比.

2.3 系统节能分析

双压缩机冰箱冷藏、冷冻蒸发温度分别在 -5 °C、-25 °C 左右,从式(4)中可知,只要确定 t_{CON},就可以确定 ξ_{lim}.通过模拟计算,得出不同冷凝温度下贡献率极限值 ξ_{lim},如表 1 所示.

表 1 不同冷凝温度下贡献率的理想值

Tab. 1. Limit value of ξ at different condensation temperatures

t _{CON} /°C	ξ _{lim}	t _{CON} /°C	ξ _{lim}
50	0.411 0	35	0.292 3
45	0.370 7	32	0.269 3
40	0.331 1	30	0.254 1

假设冷变换器足够大,且不考虑冷变换器的阻力损失.根据式(11)~(14),可得出性能提升百分比(α、α₀)随 t_{CON}、η_R、μ 的变化曲线图 4(a)~(c).

从图中可知,相比于传统双压缩机冰箱,双压缩机耦合冰箱的性能系数提升明显,且冷凝温度越高,提升越大;冷冻冷藏负荷比越大的冰箱,性能系数提升也越大.

相比于单循环冰箱,新型冰箱性能系数提升百分比受小功率压缩机的性能系数的影响较大;此外,随着冷冻冷藏负荷比的增加,性能系数提升百分比逐渐变小.

参照华日 BCD-580W/HECCW,取 Q₁ = 146 W, Q₂ = 119 W,则 μ = 1.23;根据市场上压缩机的性能参数数据,取 η_R = 0.87, η_F = 0.80.

在上述条件下,冷变换器换热面积增大到 0.05 m² 后,继续增加对换热量的影响很小.选取冷变换器的换热面积 A 为 0.05 m²,计算得到压力降为 0.37 Pa.

冷变换器换热面积已知,冷藏冷冻蒸发温度已知,贡献率 ξ 的大小只与冷凝温度有关.将以上参数代入(11)~(14)可知,C'_{DRF-μ}、C'_{DRFO-μ}、α、α₀ 只与

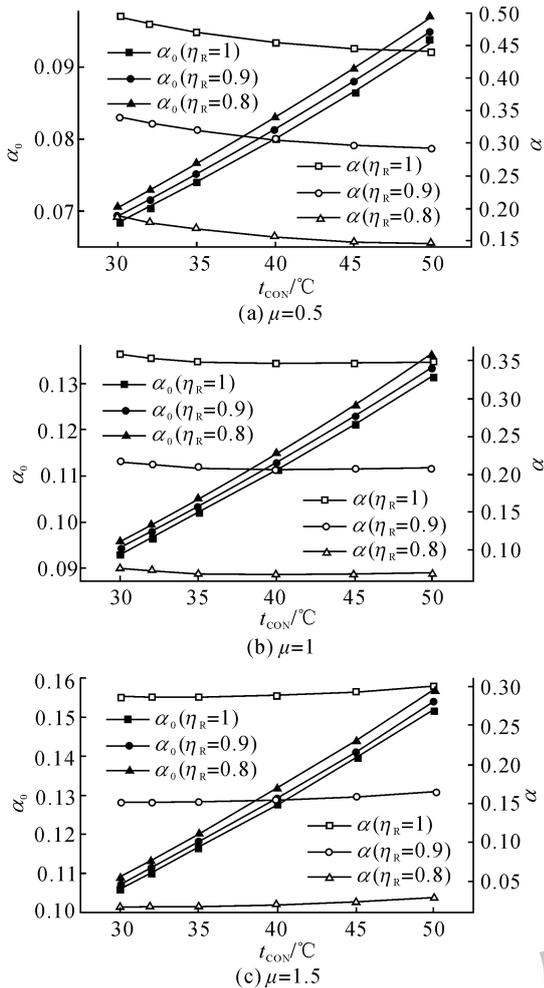


图4 性能系数增长百分比随 t_{CON} 、 η_R 、 μ 的变化趋势
Fig. 4 Trends of α 、 α_0 with t_{CON} 、 η_R 、 μ

t_{CON} 有关,通过计算,得出它们随 t_{CON} 的变化趋势,如图(5)所示。

根据国家标准测试工况,环境温度为 $25^{\circ}C$,在此工况下, t_{CON} 在 $32^{\circ}C$ 左右.由(11)~(14)计算可知: $C'_{DRF-\mu}$ 为 2.975, $C'_{DRFO-\mu}$ 为 2.705;相比普通单循环冰箱,性能系数提高 13.38%,相比于普通双压缩机冰箱,性能系数提高 9.98%.可见新型冰箱的节能效果是非常理想的。

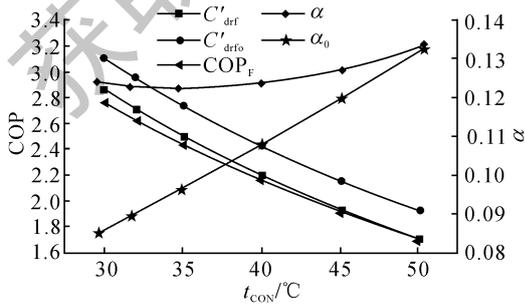


图5 3种冰箱系统的性能系数、性能系数对比随冷凝温度的变化趋势
Fig. 5 Trends of $C'_{DRF-\mu}$ 、 $C'_{DRFO-\mu}$ 、 COP_F 、 α 、 α_0 with t_{CON}

3 结语

双压缩机双循环系统远优于其他系统的温控效果预示了它巨大的潜力,但是存在初始成本的加大和节能效果不理想等问题.在保留良好温控效果的前提下,针对现有的双压缩机冰箱节能效果不明显的问题,本文提出了一种带有冷变换器的双压缩机耦合冰箱,经过理论计算分析,在国家标准测试工况下,相比于普通双压缩机冰箱其性能系数提高 9.98%,很大程度上弥补了普通双压缩机冰箱存在的不足,同时可以极大地推动双压缩机制冷系统在家用冰箱上的应用.此外,新型双压缩机耦合制冷系统在商用冰箱领域同样具有优异的应用前景。

参考文献(References):

[1] 李定川.从海尔的营销策略看农村市场开拓[J].现代家电,2008,24:12-14.
LI Ding-chuan, Analysis of rural market development based on marketing strategy of Haier [J]. **Modern Household Appliances**, 2008, 24:12-14.

[2] 魏京宇.生活习惯与电冰箱的发展[J].家用电器科技,2001(4):61-63.
WEI Jing-yu. Life habit and the development of RF [J]. **Science & Technology**, 2001(4):61-63.

[3] 博西文.电冰箱的双循环制冷系统[J].家用电器,2001(1),25-26.
BO Xi-wen. Dual-circuit cycle RFs [J]. **Household**, 2001(1),25-26.

[4] WON J Y, HAE W J, HYUN J C. An experimental study on the performance of a two-circuit cycle with parallel evaporators for a domestic refrigerator-freezer [C]// **International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue**. 2010:1042.

[5] DING G L, ZHANG C L, LU Z L, Dynamic simulation of nature convection bypass two-circuit cycle refrigerator-freezer and its application Part 1: Component models [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2004, 24(10):1513-1524.

[6] 邹云霞.扩散吸收式冷变换器的性能研究[D].杭州:浙江大学,2011.
ZHOU Yun-xia. Performance research on a diffusion absorption cool transformer [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

[7] 张恒良.冷冻冷藏库及冷却库:中国,CN102395840A [P].2010-03-28.
ZHANG Heng-liang. Freezer-refrigerator and cooling storage unit; china,CN102395840A [P]. 2012-03-28.

(下转第 2045 页)

在实际应用中,作用在多压电换能器上的激振力幅值、相位、频率都不同.幅值由振动源的振动强弱决定,取决于应用环境与传播过程.相位差可通过合理布置换能器进行调整.虽然先整流后并联的电路可以免受激振力相位差的影响,但是增加电子器件的数目会导致电路损耗增多,影响最终实际输出功率,而对于先并联后整流的电路而言,输出功率受激振力相位差影响较大,所以未来的研究可以朝着以下两个方面进行:在考虑电子器件功耗的基础上开发适合多压电换能器的接口电路;继续深入研究相位差对输出功率的影响规律.

参考文献 (References):

- [1] POULIN G, SARRAUTE E, COSTA F. Generation of electrical energy for portable devices: comparative study of an electromagnetic and a piezoelectric system [J]. *Sensors Actuators A: Physical*, 2004, 116(3): 461-71.
- [2] ROUNY S, WRIGHT P K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics [J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(5): 1131-42.
- [3] DUTOIT N E, WARDLE B L, KIM S G. Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters [J]. *Integrated. Ferroelectrics*, 2005, 71(1): 121-60.
- [4] LEFEUVRE E, BADEL A, BENAYAD A, et al. A comparison between several approaches of piezoelectric energy harvesting [J]. *Journal de Physique: An International Journal*, 2005, 128(1): 177-86.
- [5] SHU Y C, LIEN I C. Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(6): 1499-512.
- [6] GUYOMAR D, BADEL A, LEFEUVRE E. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing [J]. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 2005, 52(4): 584-95.
- [7] BADEL A, GUYOMAR D, LEFEUVRE E, et al. Efficiency enhancement of a piezoelectric energy harvesting device in pulsed operation by synchronous charge inversion [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(10): 889-901.
- [8] BADEL A, GUYOMAR D, LEFEUVRE E, et al. Piezoelectric energy harvesting using a synchronized switch technique [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, 17(8): 831-9.
- [9] MAKIHAR K, ONODA J, MIYAKAWA T. Low energy dissipation electric circuit for energy harvesting [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(5): 1493-8.
- [10] 阚君武,王淑云,彭少锋,等.多振子压电发电机的输出特性[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2108-15.
KAN Jun-Wu, WANG Shu-Yun, PENG Shao-Feng, et al. Output performance of piezoelectric generators with multi-vibrators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2018-15.
- [11] LIEN I S, SHU Y C. Array of piezoelectric energy harvesters [C] // *SPIE Smart Structures and Materials Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. San Diego, California, USA: International Society for Optics and Photonics, 2011: 79770k-79770K-9.
- [12] HAGOOD N W, CHUNG W H, FLOTOW A V. Modelling of piezoelectric actuator dynamics for active structural control [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1990, 1(3): 327-54.
- [13] WANG Q M, CROSS L E. Constitutive equations of symmetrical triple layer piezoelectric benders [J]. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 1999, 46(6): 1343-1351.
- [8] 唐黎明. 一种双温位的蒸汽压缩冷变换器: 中国, CN201110337563.6 [P]. 2012-02-29.
TANG Li-ming, A dual-temperature vapor-compression cooling transformer: China, CN201110337563.6 [P]. 2012-02-29.
- [9] 卢智利,丁国良,张春路. 冷藏蒸发器面积可变的旁通双循环冰箱[J], *工程热物学报* 2004, 25: 5-8.
LU Zhi-li, DING Guo-liang, ZHANG Chun-lu. Bypass two-circuit cycle RF with alternative areas of food compartment evaporator [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25: 5-8.
- [10] 何丽娟. 冷变换器原理及其在低品位热驱动制冷系统中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
HE Li-juan. The principle of cooling transformer and its application to refrigeration system driven by low grade thermal energy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [11] 缪道平, 吴业正. 制冷压缩机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 10-13.

(上接第 1986 页)