

文章编号:0253-4339(2019)04-0095-06

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.04.095

# 变流量制冷系统中频率与电子膨胀阀开度的协同控制研究

何俊 陶乐仁 胡鹏荣

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

**摘要** 针对变流量(VRF)制冷系统控制中的滞后或超调现象,本文以变频滚动转子式制冷系统为研究对象,分别通过改变压缩机频率与电子膨胀阀开度,建立了两者单独控制下的曲线拟合模型,并对不同工况下两者的同步控制方法进行了实验研究。结果表明:过热度随膨胀电子膨胀阀开度的增大而减小,在电子膨胀阀开度为 28%~32%与频率为 44.5~46.5 Hz 时,过热度控制难度上升,通过调节冷冻水温度可改善这一状况;在一定的工况下,通过控制质量流量,可以得到频率与电子膨胀阀开度的关系式,实现电子膨胀阀开度与压缩机频率的同步控制,使系统迅速达到稳定状态。

**关键词** 压缩机;电子膨胀阀;频率;开度;控制

**中图分类号**:TB652;TB663

**文献标识码**:A

## Collaborative Control of the Frequency and Opening of Electronic Expansion Valve in Variable Refrigerant Flow Refrigeration System

He Jun Tao Leren Hu Pengrong

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

**Abstract** The hysteresis or overshoot in a variable refrigerant flow (VRF) system control is studied. This study considers a variable-frequency rolling rotor refrigeration system as the research object. By changing the compressor frequency and opening of the electronic expansion valve, a curve fitting model under a separate control of the two processes was established. An experimental research on the synchronous control method of the two processes under different working conditions was carried out. The results show that the superheat decreased with the opening of the electronic expansion valve. When the electronic expansion valve opening was 28%–32% and the frequency was 44.5–46.5 Hz, the degree of superheat control became more difficult. This condition could be improved by adjusting the temperature of the chilled water. Under certain conditions, the relationship between the frequency and opening of the electronic expansion valve could be obtained by controlling the mass flow. Synchronous control of the opening degree of the electronic expansion valve and compressor frequency was achieved; thus, the system could quickly reach a stable state.

**Keywords** compressor; electronic expansion valve; frequency; opening; control

变频空调具有节能、噪音低、温控精度高和调温速度快等优点<sup>[1]</sup>,越来越受到人们的广泛关注。压缩机频率与电子膨胀阀开度作为变频空调控制的主要元件<sup>[2]</sup>,其变化直接影响系统的稳定与性能。

周兴禧等<sup>[3]</sup>建立了双蒸发器、电子膨胀阀与压缩机的一体式双联空调系统模型,基于分散化的控制策略对双联变频空调系统的稳态特性进行了仿真研究,实现了各部件的解耦控制。张坤竹等<sup>[4]</sup>对一拖多空调系统进行了优化控制研究,在单独分析了各系统参数作为优化控制参数的可行性后,提出了新的过热度计算及控制方法,优化了控制策略。石毅登等<sup>[5]</sup>提出采用变频技术可以实现节能、压缩机软启

动、高精度控制等优势,但并未进一步研究控制方法。姚兴等<sup>[6-7]</sup>总结了频率变化与电子膨胀阀开度的关系,指出二者应匹配调整,才能得到最佳的性能系数。金听祥等<sup>[8]</sup>研究了定频率与定电子膨胀阀开度下的系统性能,但没有给出最佳系统性能下的控制策略。虞中旻等<sup>[9]</sup>研究了压缩机在低频率下电子膨胀阀调节对制冷系统的影响,结果发现:低频率下电子膨胀阀调节区间仅为 4%~9%,得到单一变量(电子膨胀阀开度或频率)的控制策略。伍光辉等<sup>[10]</sup>建立了制冷量和压缩机频率的关系方程,得到较好的系统优化效果,但控制策略还不全面。陈武等<sup>[11]</sup>研究了一拖三变频空调系统,建立了系统的动态模型,基于自律

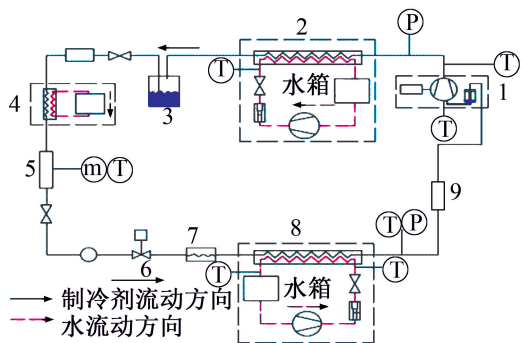
分散式控制法的观点,提出以压缩机运行状态与电子膨胀阀步数为控制目标的室内机单独控制策略。

目前,对压缩机频率和电子膨胀阀开度联合控制的研究,大多是单一的考虑电子膨胀阀或压缩机频率的控制方法,但在系统调节中,二者是相互匹配调节的<sup>[12-14]</sup>。若以变电子膨胀阀开度的参量扰动转化为电信号累加,再去对压缩机频率做出匹配调节,期间响应有一定的滞后,由此产生超调或者延迟的现象将使短时间内二者不能达到较好的耦合<sup>[15]</sup>,难以使系统迅速达到最佳的运行状态。本文通过实验研究,将得到的电子膨胀阀与压缩机频率的同步控制方法应用于实际,改善控制难度,提升系统运行的效率,加强运行稳定性。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 实验装置

实验装置为一台小型变流量制冷系统,循环原理如图 1 所示。



1 变频滚动转子式压缩机(自带气液分离器);2 冷凝器及冷却水循环系统;3 高压储液罐;4 过冷装置;5 科氏力质量流量计;6 电子膨胀阀;7 可视管 1;8 蒸发器及冷冻水循环系统;9 可视管 2;T 压力测点;P 压力测点; m 质量流量计。

图 1 实验装置原理

Fig.1 The principle of experimental apparatus

压缩机的理论排气量为 10.2 mL/r,允许变频范围为 16.6~120 Hz,额定功率为 50 Hz,选用制冷剂为 R32。管路循环制冷剂质量流量采用科氏力串联管型流量计测量,量程范围为 0.05~2.50 kg/min,测量精度为±0.1%。

电子膨胀阀总开度为 2 500 步,可以精确调节制冷剂的流量。在膨胀阀的出口 10 cm 处和蒸发器出口 10 cm 处,分别水平安装一个石英玻璃管组件用于观察当时制冷剂的流动状态。

温度由温度允许偏差为±0.15 °C+0.002|t|的内嵌式铂电阻测量,t 为测量温度,°C。压力由量程为 0

~4 MPa,精度为 0.5 % 的压力变送器测量。

### 1.2 实验方法

实验步骤分为两个部分。

实验一:控制压缩机以额定频率 50 Hz 运行,先调节电子膨胀阀将蒸发器出口过热度稳定在 10 K 左右,运行 60 min 以上,之后将电子膨胀阀开度逐步增大,使过热度稳定降至 9 K,依次分别记录过热度在到达 8、7、6、5、4、3、2、1、0 K 时所需数据。为保证数据准确性,在达到一个过热度时,使系统稳定运行 60 min 后,记录 5 min 内数据并取平均值。

实验二:在运行工况 1/工况 2 的条件下,将压缩机频率提升到 55 Hz,为达到相同的初始过热度,将电子膨胀阀开度定为 615/840 步,改变压缩机频率使过热度稳定降至 9 K,依次分别得到过热度在到达 8、7、6、5、4、3、2、1、0 K 时所需的数据。为保证数据准确性,在达到一个过热度时,使系统稳定运行 60 min 后,记录 5 min 内数据并取平均值。

### 1.3 计算公式

由安装在实验台的仪表所测得数据,结合 Ref-prop9.0 物性软件调用,通过计算可得所需数据。

蒸发器出口过热度:

$$T_{sh} = T_e - T_{e,sat} \quad (1)$$

式中:  $T_{sh}$  为蒸发器出口过热度, K;  $T_e$  为吸气温度, K;  $T_{e,sat}$  为蒸发压力下的饱和温度, K。

压比:

$$p_r = \frac{p_d}{p_e} \quad (2)$$

式中:  $p_r$  为压比;  $p_d$  为冷凝压力, kPa;  $p_e$  为蒸发压力, kPa。

系统制冷量:

$$Q = q_m(h_e - h_v) \quad (3)$$

式中:  $Q$  为系统制冷量, kW;  $q_m$  为质量流量, g/s;  $h_e$  为蒸发器出口焓值, kJ/kg;  $h_v$  为膨胀阀前焓值, kJ/kg。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 电子膨胀阀开度和频率对过热度的影响

图 2 所示为电子膨胀阀开度对过热度的影响。系统的过热度随电子膨胀阀开度的增大而降低,原因是电子膨胀阀开度的增大,使系统的蒸发压力增大,蒸发温度上升,制冷剂的流速增大,与另一侧水的换热时间减少,换热不充分,造成蒸发器出口制冷剂的温度下降,因此过热度减小。而随着过热度的降低,电子膨胀阀可调范围也逐渐降低,这是电子膨胀阀本身特性导致。当电子膨胀阀开度为总开度的 28%~

32%时,过热度对其变化最为敏感,此时控制难度增大,可能产生超调现象,可以通过提高冷冻水温度来改善这一现象(如工况 2)。

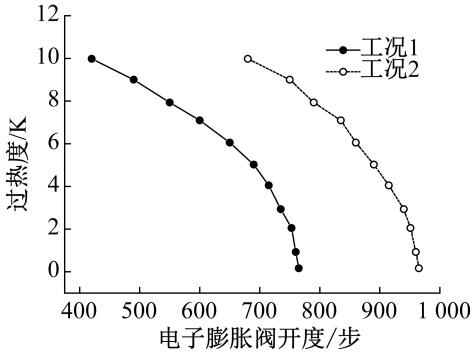


图 2 电子膨胀阀开度对过热度的影响

Fig.2 The influence of opening degree of electronic expansion valve on super heat

图 3 所示为频率对过热度的影响。由图 3 可知,过热度随着频率的增大而增大,且过热度对频率的敏感度越来越低。这是因为频率的增大,系统的蒸发压力减小,蒸发温度减小,制冷剂的流速增大,与另一侧水的换热时间减少,换热不充分,造成蒸发器出口制冷剂的温度降低,而由于蒸发温度降低的幅度大于蒸发器出口制冷剂温度,因此过热度增大。随着过热度的降低,频率的可调范围也逐渐降低,当频率为 44.5~46.5 Hz 时,过热度对其最为敏感,可通过降低冷冻水温度来改善(如工况 1)。

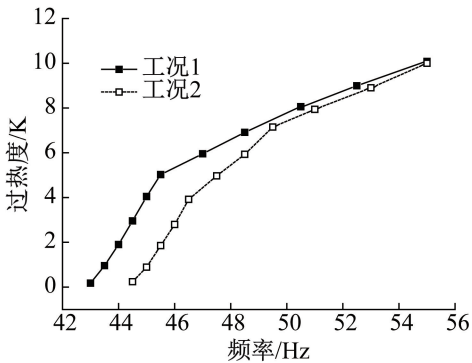


图 3 频率对过热度的影响

Fig.3 The influence of frequency on super heat

## 2.2 电子膨胀阀开度和频率对压比的影响

图 4 所示为电子膨胀阀开度对压比的影响。由图 4 可知,压比与电子膨胀阀开度成反比。这是因为随着膨胀电子膨胀阀开度增大,制冷剂流量增大,蒸发压力升高,而冷凝温度变化不大,压比逐渐减小,此后持续增大电子膨胀阀开度,蒸发器内压力变化减小,对压比的影响越来越小。

图 5 所示为频率对压比的影响。由图 5 可知,压

比与频率成正比。这是因为频率增大,压缩机吸气功率增加,使蒸发压力减小,而冷凝压力变化不大,故压比增大。随着频率进一步增大,对压比的影响越来越明显。

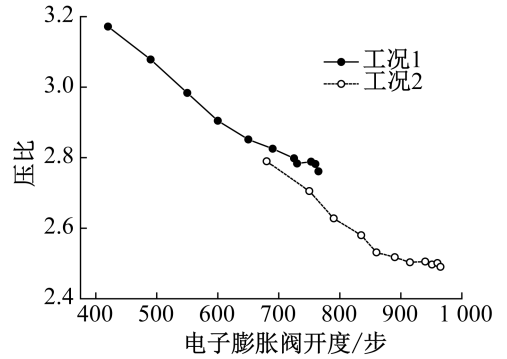


图 4 电子膨胀阀开度对压比的影响

Fig.4 The influence of opening degree of electronic expansion valve on pressure ratio

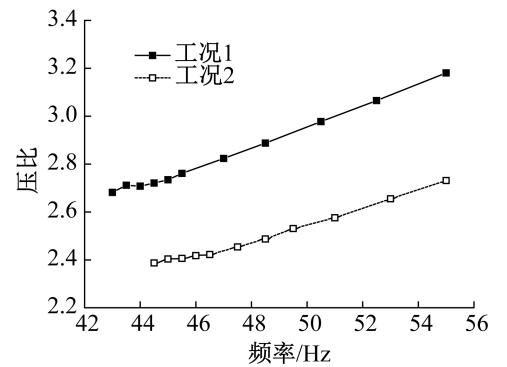


图 5 不同频率对压比的影响

Fig.5 The influence of different frequencies on the pressure ratio

## 2.3 工况 1 下协同控制拟合

图 6 所示为工况 1 下电子膨胀阀开度对质量流量特性曲线。由图 6 可知,质量流量随着电子膨胀阀开度的增大而增大,且电子膨胀阀开度越大质量流量对其越敏感。虚线为工况 1 下电子膨胀阀开度与质量流量的拟合曲线,拟合公式:

$$q = (5.62e-6)x_1^2 - (4.41e-4)x_1 + 7.69 \quad (4)$$

式中:  $q$  为质量流量,  $g/s$ ;  $x_1$  为工况 1 下电子膨胀阀开度。此外,为得到最佳拟合度,提高控制精度,将电子膨胀阀开度与质量流量采用二项式拟合,拟合因子  $R^2=0.99811$ 。

图 7 所示为工况 1 下频率对质量流量特性曲线。由图 7 可知,质量流量随着频率的增大而增大,且频率越大质量流量对其越不敏感。虚线为工况 1 下频率与质量流量的拟合曲线,拟合公式:

$$q = 0.28x_2 - 6.17 \quad (5)$$

式中:  $x_2$  为工况 1 下的频率, Hz。此外, 为获得最佳拟合度, 提高控制精度, 将频率与质量流量采用一次函数拟合, 拟合因子  $R^2 = 0.999\ 07$ 。

联立式(4)和式(5), 可以得出频率与电子膨胀阀开度的关系式:

$$x_2 = (1.98e-5)x_1^2 + 29.42 \quad (6)$$

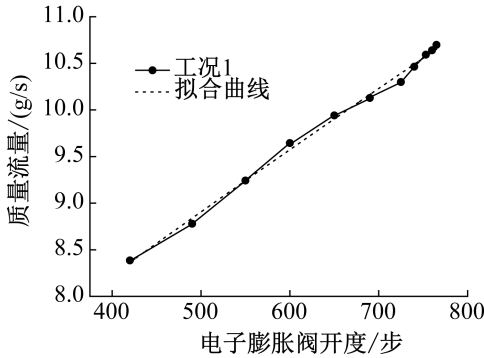


图 6 工况 1 下电子膨胀阀开度对质量流量特性曲线  
Fig.6 The of characteristic curve opening of electronic expansion valve to mass flow under condition 1

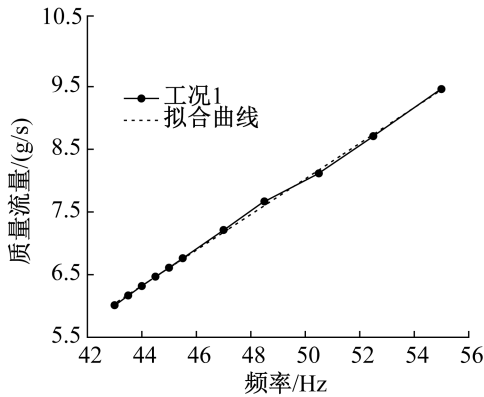


图 7 工况 1 下频率对质量流量特性曲线  
Fig.7 The characteristic curve of frequency to mass flow under condition 1

## 2.4 工况 2 下协同控制拟合

图 8 所示为工况 2 下膨胀阀电子膨胀阀开度对质量流量的特性曲线。由图 8 可知, 质量流量随着电子膨胀阀开度的增大而增大, 且电子膨胀阀开度越大, 质量流量对其越敏感。虚线为工况 2 下电子膨胀阀开度与质量流量的拟合曲线, 拟合公式:

$$q = (-2.1e-6)x_3^2 + 0.01x_3 + 3.07 \quad (7)$$

式中:  $x_3$  为工况 2 下电子膨胀阀开度。此外, 为保证最佳拟合效果, 提升控制精度, 将电子膨胀阀开度与质量流量采用二项式拟合, 拟合因子  $R^2 = 0.993\ 24$ 。

图 9 所示为工况 2 下频率对质量流量特性曲线,

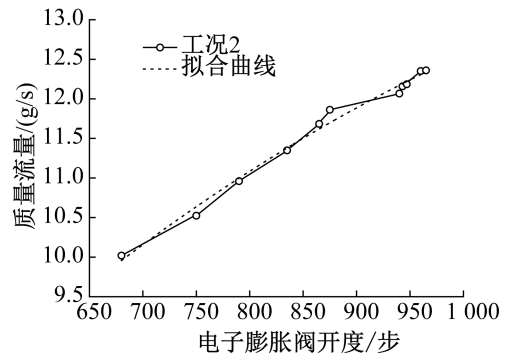


图 8 工况 2 下电子膨胀阀开度对质量流量特性曲线  
Fig.8 The of characteristic curve opening of electronic expansion valve to mass flow under condition 2

由图 9 可知, 质量流量随着频率的增大而增大, 且频率越大, 质量流量对其越不敏感。虚线为工况 2 下频率与质量流量的拟合曲线, 拟合公式:

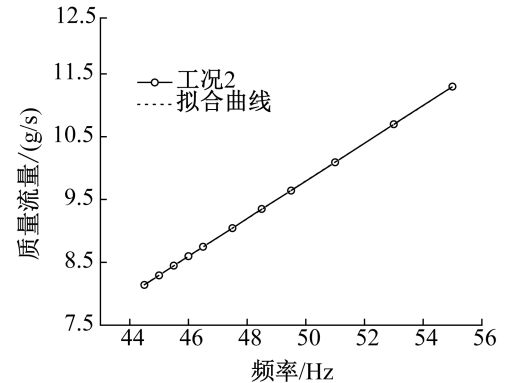


图 9 工况 2 下频率对质量流量特性曲线  
Fig.9 The characteristic curve of frequency to mass flow under condition 2

$$q = 0.3x_4 - 5.21 \quad (8)$$

式中:  $x_4$  为工况 2 下的频率, Hz。此外, 为保证最佳拟合效果, 提升控制精度, 将频率与质量流量采用一次函数拟合, 拟合因子  $R^2 = 0.999\ 99$ 。

联立式(7)和式(8), 可以得出频率与电子膨胀阀开度的关系式:

$$x_4 = (-7.0e-6)x_3^2 + 0.04x_3 + 27.59 \quad (9)$$

工况 1 和工况 2 时, 得到膨胀电子膨胀阀开度与频率之间的关系分别为式(6)和式(9)。对比式(6)与式(9)可知, 当工况发生变化时, 频率与电子膨胀阀开度的对应关系式也改变。在确定工况下, 均能得到一个频率与电子膨胀阀开度的关系式。系统在达到稳定之前, 可以以此来进行较小幅度的调整, 能有效减少系统频繁调节带来的损失。虽以质量流量一致而建立起来的频率与电子膨胀阀开度不完全精确, 但空调系统一般以标准工况来运行, 不能考虑所有的

工况。该方法能够使系统在某一工况下迅速达到平衡,而无需依靠系统的频繁调节。

### 3 结论

针对变流量制冷系统控制中的滞后或超调现象,本文以变频滚动转子式制冷系统为研究对象,分别通过改变压缩机频率与电子膨胀阀开度,建立了二者单独控制下的曲线拟合模型,并对不同工况下二者的同步控制方法进行了实验研究,得到如下结论:

1) 过热度随膨胀电子膨胀阀开度的增大而减小,随压缩机频率的增大而增大。随着过热度逐渐减小,电子膨胀阀开度的可调范围越来越小。当电子膨胀阀开度为总开度的 28%~32% 时,对过热度的控制较难,容易出现超调现象,可以通过增大冷冻水的温度来改善;频率随过热度的减小而减小,当频率为 44.5~46.5 Hz 时,对过热度控制较难,降低冷冻水温度,可以使控制范围增大。

2) 压比随电子膨胀阀开度的增大而减小,持续增大电子膨胀阀开度,对压比的影响越来越小;压比随压缩机频率的增大而增加,持续增大压缩机频率对压比的影响越来越明显。

3) 在一定工况下,质量流量随电子膨胀阀开度的增大呈非线性增加趋势,压缩机的频率几乎与质量流量成线性关系,压力、密度等其它因素影响较小。

4) 压缩机频率与电子膨胀阀开度关系的确定可以减少超调或者延迟的现象,在保证与系统变化趋势一致的情况下,可以使系统迅速达到稳定状态,减少不必要的操作,达到相同的目的。

本文受上海市动力工程多相流动与传热重点实验室项目(1N-15-301-101)资助。(The project was supported by the Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Shanghai Power Engineering (No.1N-15-301-101).)

#### 参考文献

[1] 黄桂玲. 基于 DSP 的智能变频空调系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2004. (HUANG Guiling. Design of intelligent variable frequency air conditioning system based on DSP[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.)

[2] 杨前明, 隋志蔚, 孔祥强. 热泵空调变频压缩机与电子膨胀阀控制方法探讨[C]//第十九届全国测控、计量、仪器仪表学术年会论文集. 桂林:中国仪器仪表学会, 中国计量测试学会, 中国电子学会, 2009. (YANG Qianming, SUI Zhiwei, KONG Xiangqiang. Discussion on control methods of variable frequency compressor and electronic expansion valve of heat pump air conditioning[C]//Pro-

ceedings of the Nineteenth National Academic Annual Conference on Measurement and Control, Metrology and Instruments. Guilin: China Instruments and Instruments Society, China Metrology and Testing Society, China Electronics Society, 2009.

[3] 周兴禧, 武永强, 邵渊, 等. 双联变频空调系统建模与特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(11): 1675-1679. (ZHOU Xingxi, WU Yongqiang, SHAO Yuan, et al. Modeling and research on the characteristics of double-evaporator air conditioner with inverter[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(11): 1675-1679.)

[4] 张坤竹, 贾衡, 吴占松, 等. 变频一拖多空调系统的优化控制参数分析[J]. 北京工业大学学报, 2000, 26(增刊 1): 50-54. (ZHANG Kunzhu, JIA Heng, WU Zhansong, et al. The analysis of the optimal control parameters of the inverter-aided multi-system air conditioners[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2000, 26(Suppl. 1): 50-54.)

[5] 石毅登, 田怀璋, 陈林辉, 等. 采用变频技术的制冷装置的优势分析[J]. 制冷与空调(北京), 2004, 4(5): 59-62. (SHI Yideng, TIAN Huaizhang, CHEN Linhui, et al. Technical superiority in the refrigeration system adopting frequency conversion technology[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2004, 4(5): 59-62.)

[6] 姚兴. 变频空调器电子膨胀阀开度控制方案分析[J]. 制冷与空调(北京), 2016, 16(7): 31-35. (YAO Xing. Analysis on opening control scheme of electronic expansion valve of variable frequency air conditioner[J]. Refrigeration & Air-conditioning, 2016, 16(7): 31-35.)

[7] 侯泽飞. 电子膨胀阀对变频空调性能影响的实验研究[J]. 建材发展导向, 2013(3): 385-386. (HOU Zefei. Experimental study on the effect of electronic expansion valve on the performance of variable frequency air conditioning[J]. Building Materials Development Orientation, 2013(3): 385-386.)

[8] 金听祥, 李冠举, 郑祖义. 变频空调器性能影响因素的试验研究[J]. 供热制冷, 2010(9): 66-69. (JIN Tingxiang, LI Guanju, ZHENG Zuyi. Experimental study on the factors influencing the performance of variable frequency air conditioner[J]. Heating and Refrigeration, 2010(9): 66-69.)

[9] 虞中旻, 陶乐仁, 王超, 等. 低频率下电子膨胀阀调节对制冷系统性能的影响[J]. 制冷学报, 2016, 37(6): 91-96. (YU Zhongyan, TAO Leren, WANG Chao, et al. Effect of electronic expansion valve adjustment on performance of refrigeration system at low compression frequency[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(6): 91-96.)

[10] 伍光辉, 吴克启. 变频压缩机空调系统的理论分析及实

验研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(6):961-963. (WU Guanghui, WU Keqi. Theoretical analysis and experimental research on variable frequency compressor air conditioning system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(6):961-963.)

[11] 陈武, 蔡振雄, 周兴禧. 一拖三变频空调系统建模方法及控制研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10):2123-2127. (CHEN Wu, CAI Zhenxiong, ZHOU Xingxi. Modeling and control research of the triple-evaporator air-conditioner with inverter[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(10):2123-2127.)

[12] 马善伟. 制冷系统稳定性研究综述[J]. 上海第二工业大学学报, 2004, 21(2):36-44. (MA Shanwei. Research on the stability of refrigeration system review[J]. Journal of Shanghai Second Polytechnic University, 2004, 21(2):36-44.)

[13] 田长青, 窦春鹏, 杨新江, 等. 制冷系统的稳定性[J]. 流体机械, 2002, 30(4):44-47. (TIAN Changqing, DOU Chunpeng, YANG Xinjiang, et al. The stability of refrige-

ration systems[J]. Fluid Machinery, 2002, 30(4):44-47.)

[14] LIANG Nan, SHAO Shuangquan, XU Hongbo, et al. Instability of refrigeration system—a review[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(11):2169-2178.

[15] 陈芝久. 制冷装置自动化[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 128-193. (CHEN Zhijiu. Automation of refrigeration equipment [M]. Beijing: China Machine Press, 1997: 128-193.)

#### 通信作者简介

陶乐仁, 男, 教授, 上海理工大学能源与动力工程学院, 13916356948, E-mail: cryo307@usst.edu.cn。研究方向: 低温制冷系统, 低温生物医学技术。

#### About the corresponding author

Tao Leren, male, professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 13916356948, E-mail: cryo307@usst.edu.cn. Research fields: low temperature refrigeration system, cryobio-medical technology.

(上接第 51 页)

[16] 王泮浩, 王志华, 郑煜鑫, 等. 低温环境下空气源热泵的研究现状及展望[J]. 制冷学报, 2013, 34(5):47-54. (WANG Fenghao, WANG Zhihua, ZHENG Yuxin, et al. Research progress and prospect of air source heat pump in low temperature environment[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(5):47-54.)

#### 通信作者简介

郭宏伟, 男, 在读硕士, 天津城建大学能源与安全工程学院, 15222006168, E-mail: 836166621@qq.com。研究方向: 建筑节能及可再生能源综合利用。

#### About the corresponding author

Guo Hongwei, male, master, School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, +86 15222006168, E-mail: 836166621@qq.com. Research fields: building energy conservation and comprehensive utilization of renewable energy.