

文章编号:0253 - 4339(2016) 06 - 0091 - 06

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2016. 06. 091

低频率下电子膨胀阀调节对制冷系统性能的影响

虞中扬 陶乐仁 王超 沈冰洁

(上海理工大学 能源与动力工程学院 制冷与低温工程研究所 上海 200093)

摘要 以 R32 变制冷剂流量制冷系统实验装置为研究对象,通过改变变频压缩机频率和电子膨胀阀开度,对低频率下电子膨胀阀调节对系统性能的影响进行了实验分析。研究表明:1)系统制冷量和质量流量在各频率下变化规律相同;2)当控制蒸发器出口过热度在 2 K 附近时,低频率范围(25 ~ 35 Hz)内存在一个最佳频率点,与其他各频率相比,其系统 COP 最高;3)低频率下压缩机在过热度 0 K 附近极少量的吸气带液就会对系统性能造成严重影响,这在实际运行中需要极力避免;4)低频率下(25 ~ 35 Hz)控制过热度从 0 K 变为 10 K,电子膨胀阀调节区间为 4% ~ 9%,而高频率下(40 ~ 50 Hz)调节区间为 15% ~ 23%,提高冷冻水温度可以有效改善低频下电子膨胀阀的调节性能。以上结论可以推广到其他变制冷剂流量系统,如变频热泵空调和汽车空调等。

关键词 变频压缩机;电子膨胀阀;过热度;系统性能

中图分类号:TB61;TB652

文献标识码:A

Effect of Electronic Expansion Valve Adjustment on Performance of Refrigeration System at Low Compression Frequency

Yu Zhongyang Tao Leren Wang Chao Shen Bingjie

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

Abstract To experimentally investigate the effect of electronic expansion valve adjustment on performance of variable refrigerant flow refrigeration system with R32, the frequency of inverter compressor and the opening of electronic expansion valve are changed. The results show that the tendencies of refrigerating capacity and mass flow varying with the opening of electronic expansion valve are the same in each frequency. However, when superheated temperature is controlled at about 2 K, there has an optimum frequency in the lower range (25 - 35 Hz) where the COP of refrigeration system reaches the highest. Moreover, the compression with minute liquid of refrigerant has great effect on the performance of system at low frequency, which should be avoided in practical application. To control the superheated temperature from 0 K to 10 K, the opening of electronic expansion valve at low compression frequency (25 - 35 Hz) should be adjusted from 4 % to 9 %, and that should be adjusted from 15 % to 23 % at high compression frequency (40 - 50 Hz). Increasing the temperature of chilled water could effectively improve the control performance of electronic expansion valve at low compression frequency. The conclusions mentioned above are same with other type of variable refrigerant flow system, such as heat pump air - conditioning with variable frequency and vehicle air - conditioning.

Keywords inverter compressor; electronic expansion valve; superheated temperature; system performance

自变频空调推出以来,因其具有软启动、快速制冷、节能、温控精度高等特点,得到广泛的应用和快速的发展^[1]。电子膨胀阀和变频压缩机作为主要调节原件,其工作特性直接影响着系统的性能。随着对制冷系统节能的要求越来越高,低负荷下变频空调的调节尤为重要。控制系统在低负荷下运行,最主要的方法是将压缩机频率降低,但也会造成许多不利影响^[2-6]。对于压缩机变频率时系统各性能变化的研

究有很多,但是系统最佳工作性能对应的压缩机频率这一问题的答案尚未形成统一,主要分为两类:额定频率附近系统性能最佳和低频率时存在最佳运行频率点。

郑学鹏等^[7]利用模型计算研究了系统制冷量、输入功率、性能系数等参数随压缩机频率的变化规律,发现当频率较小,转速过低时,机组的泄漏、热交换、余隙膨胀严重,压缩机性能下降。当频率逐渐增

大时,制冷量和输入功率几乎呈线性上升,而性能系数呈抛物线型,在额定频率附近维持较高值。张华俊等^[8]通过实验验证了这一结论。

田晓亮等^[9]测试了常规压缩机的变频性能,指出当压缩机频率低于 20 Hz 时存在共振及机组发热现象,高于 60 Hz 可能会造成电机烧毁现象。结合制冷系数随频率的变化曲线图得出,最佳系统工作性能在额定频率附近。

但是赵力等^[10]指出,以上实验研究均在变工况情况下进行,文中设计的实验,将蒸发温度和冷凝温度控制在某一较小区域内,测量系统参数和压缩机频率的关系,得出 COP 在 30 ~ 35 Hz 存在一个极大值,因而最佳系统工作性能并不一定在额定功率处,在低频率处也有可能达到。石文星等^[11]研究了压缩机频率对性能指标 EER 的影响,得出了相同结论。李松波等^[12]在保持同一测试工况下进行实验,发现压缩机频率对 COP 的影响有两个抛物线峰值,分别在 25 Hz 和 85 Hz 出现,即低频范围和高频范围分别存在一个最佳运行频率点。

以上研究均基于定膨胀阀开度的情况,但在实际运行过程中,变频压缩机与电子膨胀阀总是共同调节,而此时的压缩机频率与系统性能的关系必然不同。韩磊等^[13]实验分析了 R22 变制冷剂流量制冷系统中,不同膨胀阀开度和压缩机频率下的系统参数变化规律,但是并未确定最佳工作频率,也没有详细分析低频率下电子膨胀阀的调节规律。

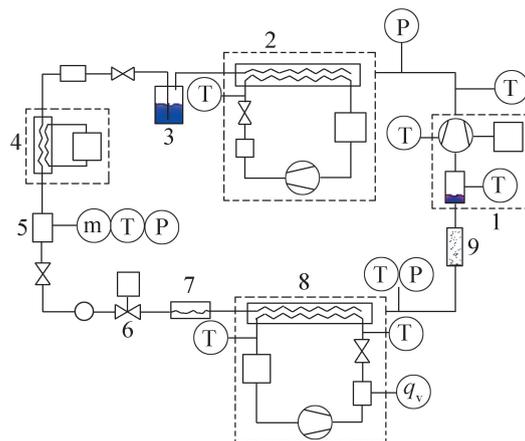
综上所述,对于变制冷剂流量制冷系统低频率下电子膨胀阀的调节特性和系统性能变化并没有得到充分研究。本文通过实验,分析了 R32 变制冷剂流量制冷系统中,压缩机不同频率和电子膨胀阀开度对系统制冷量、制冷剂质量流量和系统 COP 的影响,以及低频率下通过电子膨胀阀开度来控制蒸发器出口过热度的调节特性,试图得出对实际运行过程具有指导意义的结论。

1 实验原理及方法

1.1 实验装置简介

图 1 中,压缩机 1 选用变频滚动转子式压缩机,自带气液分离器。理论排量 10.2 mL,频率可调范围为 16.6 ~ 120 Hz,额定频率为 50 Hz。压缩机由一台通用型变频器驱动,工作频率可以通过手动设定。选用智能数字功率表测量压缩机耗功 W ,精度等级为 0.5 级,制冷剂为 R32。

采用科氏力流量计测量制冷剂质量流量 m (g/s),及流过流量计的制冷剂温度 T_v (°C) 和压力 p_v ,



- 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

图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Experimental installation schematic diagram

(kPa),精度为 $\pm 0.1\%$ 。流量计前安装过冷器,通过恒温水箱可以精确控制制冷剂的过冷度,偏差不超过 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。蒸发器 8 为 BL26-20 型板式换热器。以出水温度为控制对象,由电加热器来自动调节水循环温度,其加热量由调压调功器自动控制。为了方便观察蒸发器出口制冷剂的流型,蒸发器出口连接可视管 2。电子膨胀阀 6 为步进电机驱动的直动式电子膨胀阀,通过手动调节控制器改变其开度。

图中 m 为制冷剂质量流量测点; T 、 P 分别表示温度和压力测点; q_v 为水侧的体积流量, L/min。采用温度偏差为 $\pm 0.15\text{ }^\circ\text{C} + 0.002 |t|$ (t 为测量温度, °C) 的内置式铂电阻测量冷却水出水温度 $T_{w,o}$ 、压缩机排气温度 T_d 和压缩机吸气温度 T_s 。采用精度为 0.5% 的压力变送器测量压缩机排气压力 p_d 、蒸发器出口压力 p_e 和冷凝器出口压力 p_c 。

1.2 实验方法

为了使实验工况与国内标准制冷工况(蒸发温度 $7.2\text{ }^\circ\text{C}$,冷凝温度 $54.4\text{ }^\circ\text{C}$,过冷温度 $46.1\text{ }^\circ\text{C}$)相近,同时为了模拟较低室内环境温度下的空调运行特性,设定冷却水出水温度为 $40\text{ }^\circ\text{C}$,冷冻水出水温度为 $7\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $12\text{ }^\circ\text{C}$ 。首先保持压缩机频率在 60 Hz 不变,调节电子膨胀阀使系统过热度为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,并稳定运行 60 min 以上。手动调节电子膨胀阀开度逐步增大,并观察蒸发器出口处可视管 2 内的制冷剂状态,直到制冷剂极少量吸气带液;同时实时监控数据采集程序的蒸发器出口过热度值,直到其小于 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 为止。每一个开度下稳定运行 60 min 后,记录 10 min

内的数据并取平均值,以保证数据的准确性。之后降低压缩机频率,分别在 25、30、35、40、50、60 Hz 时调节膨胀阀并记录数据。具体实验工况见表 1。后文统一以工况 1 和工况 2 表述表 1 中对应的测试数据。

表 1 实验工况
Tab. 1 Operating conditions

项目	冷冻水出水 温度/℃	冷却水出水 温度/℃	过冷度/ ℃
工况 1	7	40	8
工况 2	12	40	8

1.3 计算公式

由测量值通过 Refprop9.0 物性软件可得质量流量计内制冷剂压力 p_v 对应的饱和温度 $T_{v,sat}$ 、蒸发温度 $T_{e,sat}$ 、膨胀阀前焓值 h_v 及蒸发器出口焓值 h_e 。可以根据式(1)、式(2)、式(3)和式(4)计算,得到所需参数:

过冷度:

$$T_{sc} = T_{v,sat} - T_v \quad (1)$$

蒸发器出口过热度:

$$T_{sh} = T_e - T_{e,sat} \quad (2)$$

制冷量:

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

COP:

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (4)$$

2 实验结果分析

2.1 不同频率下系统性能的变化

由图 2~图 5 可知,制冷量和质量流量在各个频率下的变化趋势大致相同,均随着过热度增大(即膨胀阀开度的减小)而减小,这一规律在低频率下依然适用。导致制冷量减小的原因:电子膨胀阀开度减小,使制冷剂质量流量减小;蒸发温度的降低使蒸发器中制冷剂侧与水侧换热温差变小,换热条件恶化。

制冷量随频率的变化较为规律,但是系统 COP 的变化情况却较为复杂。由图 6 可知,当系统处于工况 1 时,在低频率下(25~35 Hz)随着过热度的增加,COP 先上升后下降,最大值在 2℃ 附近;而高频率时的 COP 并没有极大值点,而是直接下降。另外,观察图 6 中 30 Hz 和 35 Hz 的 COP 变化趋势可知,当过热度接近 0℃ 时,系统 COP 突然下降,原因在于系统此时有少量吸气带液,这对于系统性能是不利的。虽然在过热度 0℃ 附近压缩机吸气带液量极少,但是在低

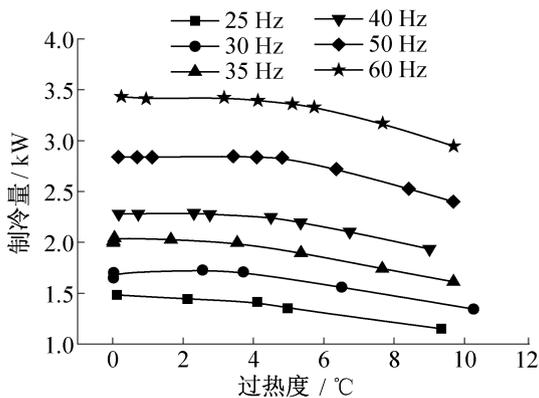


图 2 工况 1 不同频率下制冷量的变化趋势

Fig. 2 The change of refrigerating capacity with different compression frequency at operating condition 1

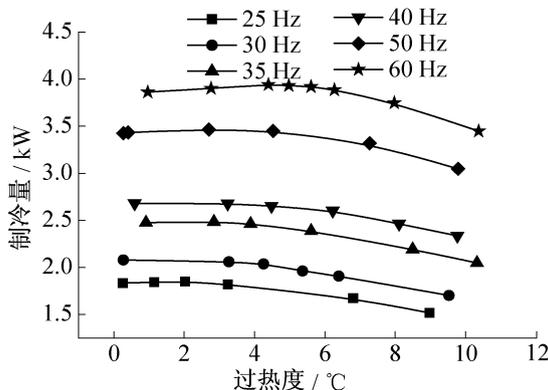


图 3 工况 2 不同频率下制冷量的变化趋势

Fig. 3 The change of refrigerating capacity with different compression frequency at operating condition 2

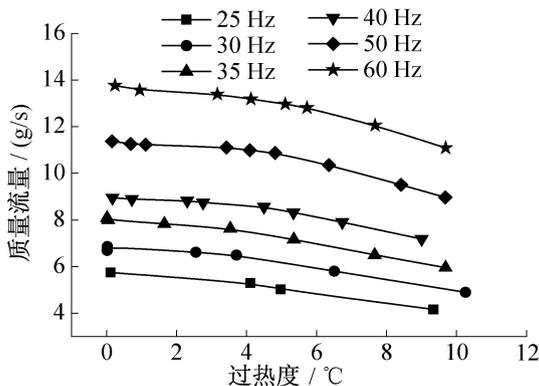


图 4 工况 1 不同频率下质量流量的变化趋势

Fig. 4 The change of mass flow with different compression frequency at operating condition 1

频率时这一影响却尤为显著。对比图 2 和图 3,在低过热度时,制冷量并未受到明显影响,由此可知低频下吸气带液主要影响压缩机性能。当压缩机低频运

下制冷剂流速较慢,导致压缩机回油困难,使内部泄漏严重,泄漏系数较小。而高频率时,制冷剂流速加快,温度系数和泄漏系数在极少量吸气带液时变化不大,因此系统 COP 并不会突然下降。总之,低频下吸气带液的情况需要极力避免。

通过比较图6和图7过热度为2℃时不同频率的COP可知,在工况1下,压缩机频率为35 Hz时COP最大,而对于工况2,25 Hz时COP最大。对此的解释是:与工况1相比,工况2的冷冻水出水温度较高,与制冷剂侧的换热温差较大,同时蒸发压力上升,达到相同过热度所需的制冷剂流量更少,此时与蒸发器换热量相匹配的压缩机频率将降低,因此最佳系统性能对应的压缩机频率从35 Hz变为25 Hz。

综上所述,在压缩机低频率工作时,电子膨胀阀开度过大会引起少量吸气带液,此时严重影响压缩机的运行。适当调节膨胀阀,将过热度控制在2℃左右,系统将获得最佳性能。工况的改变也会影响低频率下的系统性能,当冷冻水温度上升时,最佳压缩机频率将变低。

2.2 低频率下电子膨胀阀调节特性

由图8可知,在工况1下,压缩机在低频率(25~35 Hz)时电子膨胀阀开度均处于较小的开度,调节电子膨胀阀开度控制过热度从0℃变为10℃,此时阀的调节区间很小,约为4%~9%,而高频率(40~50 Hz)时阀的调节区间约为15%~23%。因此,相比于高频率,电子膨胀阀开度的调节对低频率系统参数的影响更大。同时,较小的膨胀阀调节区间对制冷系统的调控不利,说明电子膨胀阀的控制比例带 δ 较小,受控参数变化灵敏,系统过调严重,阀开度稍微变化就会使系统各参数产生巨大变化。

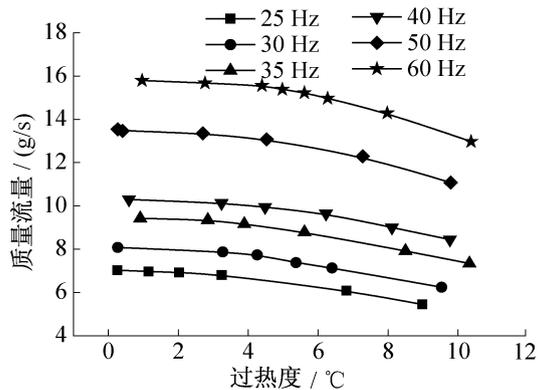


图5 工况2不同频率下质量流量的变化趋势

Fig. 5 The change of mass flow with different compression frequency at operating condition 2

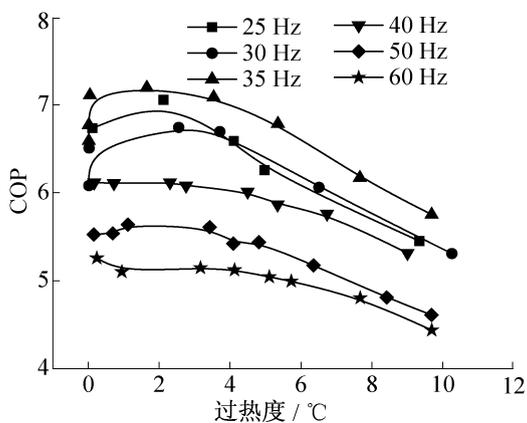


图6 工况1不同频率下COP的变化趋势

Fig. 6 The change of COP with different compression frequency at operating condition 1

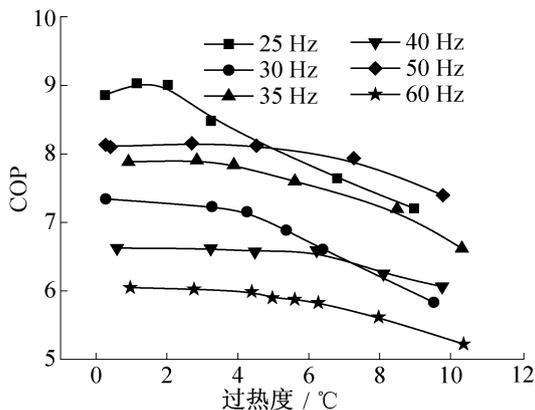


图7 工况2不同频率下COP的变化趋势

Fig. 7 The change of COP with different compression frequency at operating condition 2

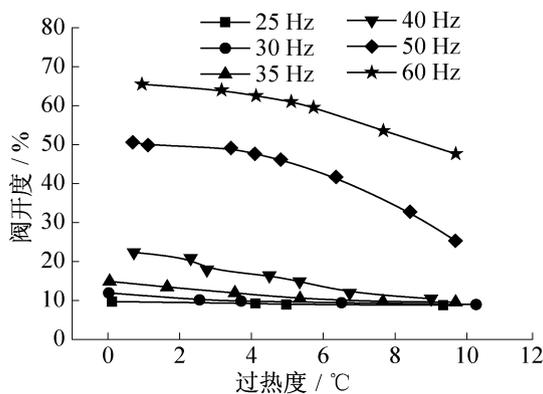


图8 工况1不同频率下电子膨胀阀对过热度的调节

Fig. 8 The control characteristic of electronic expansion valve for superheated with different compression frequency at operating condition 1

转时,进入压缩机的液体制冷剂在吸入口有充分的时间吸热,造成压缩机内有效气体体积减少,温度系数明显降低^[2]。同时吸气带液会稀释润滑油,且低频

图9所示为工况2时不同频率下电子膨胀阀对过热度的调节。与图8对比可知,冷冻水温度的提升使低频率下电子膨胀阀的调节区间变宽,有效改善了膨胀阀的调节性能。这是因为冷冻水温度的提升使蒸发压力上升,压缩机吸气比容减少,制冷剂质量流量减少,为了与蒸发器负荷达到平衡,膨胀阀需要更大的调节范围。即通过提高冷冻水温度或空调室内环境温度可使电子膨胀阀控制比例带变宽,这为低频率下电子膨胀阀的优化调节提供了一种思路。

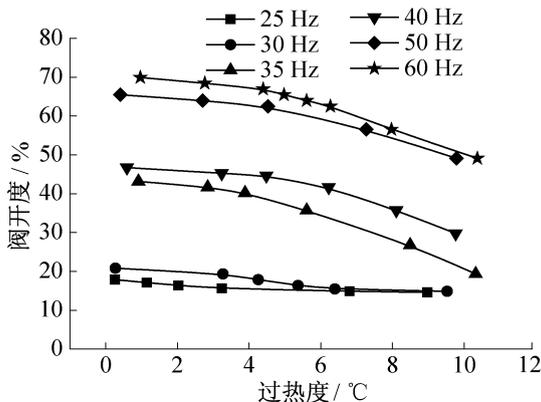


图9 工况2不同频率下电子膨胀阀对过热度的调节
Fig.9 The control characteristic of electronic expansion valve for superheated with different compression frequency at operating condition 2

3 结论

本文对 R32 变制冷剂流量系统进行实验,在不同压缩机频率下调节电子膨胀阀开度,研究了压缩机低频率下电子膨胀阀调节特性和系统性能变化。分析数据得出以下结论:

- 1) 随着电子膨胀阀开度逐渐减小,制冷量和质量流量均减小,这一规律在低频率下依然适用。
- 2) 压缩机频率越高,制冷量越大,即制冷量与频率成正比。但是系统 COP 与频率并没有明确的关系。低频率下调节电子膨胀阀,控制过热度在 2 °C 左右,系统将获得最佳性能。此时系统 COP 最大,且高于高频率时的系统 COP。另外,当冷冻水温度上升时,最佳系统性能对应的压缩机频率降低,更为广泛的说,当蒸发器中换热温差增大时,压缩机低频运行的效果更为优异。
- 3) 与高频率相反,低频率下压缩机在过热度 0 °C 附近,极少量的吸气带液就会严重影响系统性能,更确切的说,压缩机性能会迅速恶化。因此,在低频下需要极力避免压缩机吸气带液的情况。
- 4) 低频率下调节电子膨胀阀开度对系统性能的

影响更大。由于低频下电子膨胀阀控制比例带较小,因此制冷系统容易过调导致失稳。提高冷冻水温度或空调室内温度可以有效改善膨胀阀的调节性能,这为低频下电子膨胀阀控制性能的优化提供了思路。

上述规律可以适用于其他变制冷剂流量的蒸气压缩式循环,如变频热泵空调、汽车空调等。本文研究的是开环控制时,压缩机低频下电子膨胀阀调节特性和系统性能,对于膨胀阀-蒸发器闭环控制,两者变化更为复杂,这在今后的研究中需要重点关注。

本文受上海市动力工程多相流动与传热重点实验室(1N-15-301-101)项目资助。(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] 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.)
- [2] 陈华俊,马国远,石文星,等.变频滚动转子压缩机容积效率的频率修正方法[J].流体机械,2001,29(10):12-19. (CHEN Huajun, MA Guoyuan, SHI Wenxing, et al. Frequency correction method on volumetric efficiency of inverter rolling piston compressor[J]. Fluid Machinery, 2001, 29(10): 12-19.)
- [3] 张猛,李永东,赵铁夫,等.一种减小变频空调压缩机低速范围内转速脉动的方法[J].电工技术学报,2006,21(7):99-104. (ZHANG Meng, LI Yongdong, ZHAO Tiefu, et al. A new method to reduce the periodic speed ripples of air-conditioners in low speed range[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 99-104.)
- [4] 郝华杰,申晓亮.变频压缩机的研究现状[J].低温与超导,2010,38(7):52-54. (HAO Huajie, SHEN Xiaoliang. The temporary research status of the variable speed compressor[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2010, 38(7): 52-54.)
- [5] 陶宏,陶乐仁,王金锋,等.带高压贮液器的变频空调“临界频率”现象的实验研究[J].流体机械,2008,36(11):1-3. (TAO Hong, TAO Leren, WANG Jinfeng, et al. Experimental research on critical frequency phenomenon in an inverter chiller with receiver[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(11): 1-3.)
- [6] 张骏,朱玉群,耿玮,等.滚动转子变频压缩机低频振动及其控制[J].流体机械,2002,30(2):27-29.

(ZHANG Jun, ZHU Yuqun, GENG Wei, et al. The low frequency vibration of rolling piston inverter-compressor and its control[J]. Fluid Machinery, 2002, 30(2): 27-29.)

[7] 郑学鹏, 高秀峰, 黄允东, 等. 变频滚动转子式压缩机热力性能分析[J]. 流体机械, 1999, 27(1): 48-51. (ZHENG Xuepeng, GAO Xiufeng, HUANG Yundong, et al. The analysis for the thermal performance of frequency vibration of rolling piston inverter-compressor [J]. Fluid Machinery, 1999, 27(1): 48-51.)

[8] 张华俊, 袁秀玲, 刘勇, 等. 滚动转子式变频压缩机的实验研究[J]. 制冷与空调(北京), 2004, 4(2): 14-16. (ZHANG Huajun, YUAN Xiuling, LIU Yong, et al. Experimental study of performance of rolling piston type rotary inverter compressor[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2004, 4(2): 14-16.)

[9] 田晓亮, 王兆俊, 赵先星. 常规 50 Hz 压缩机变频性能试验 [J]. 青岛大学学报(工程技术版), 1998, 13(4): 59-62. (TIAN Xiaoliang, WANG Zhaojun, ZHAO Xianxing. Frequency conversion characteristics for 50 Hz compressor[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 1998, 13(4): 59-62.)

[10] 赵力, 张启. 关于压缩机频率和热泵主要参数之间的关联[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 311-315. (ZHAO Li, ZHANG Qi. Corelation with frequency of compressor and key parameters of heat pumps[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24(3): 311-315.)

[11] 石文星, 彦启森, 陈华俊, 等. 论变频空调器性能评价

体系[J]. 暖通空调, 2004, 34(5): 52-58. (SHI Wenxing, YAN Qisen, CHEN Huajun, et al. Discussion on performance evaluation system of inverter air conditioners[J]. Journal of HV & AC, 2004, 34(5): 52-58.)

[12] 李松波, 刘湘云, 樊胜华. 变频压缩机频率与热泵空调各参数关联的研究[J]. 建筑热能通风空调, 2014, 33(1): 36-38. (LI Songbo, LIU Xiangyun, FAN Shenghua. The associated research of inverter compressor frequency and heat pump air condition parameters[J]. Building Energy and Environment, 2014, 33(1): 36-38.)

[13] 韩磊, 陶乐仁, 郑志皋, 等. 变频空调制冷系统流量调节性能分析和实验研究[J]. 低温与超导, 2009, 38(2): 39-42. (HAN Lei, TAO Lenren, ZHENG Zhigao, et al. Performance analysis and experimental study for refrigerant flux adjusting in inverter aided air-conditioning system[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009, 38(2): 39-42.)

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,制冷与低温工程研究所,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, Institute of Refrigeration and Cryogenics, 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 48 页)

通信作者简介

王丽慧,女,博士,副教授,上海理工大学建筑与环境学院,13816498129, E-mail: 66amy99@126.com. 研究方向:地铁等地下空间室内热环境及节能研究。

About the corresponding author

Wang Lihui, female, Ph. D., associate professor, School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 13816498129, E-mail: 66amy99@126.com. Research fields: subway and other underground space indoor thermal environment and energy-saving