

文章编号:0253-4339(2022)02-0033-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2022.02.033

启停过程对空气源热泵-冷柜一体机性能影响的实验研究

孟维焕 郭宪民 张京京

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

摘 要 空气源热泵-冷柜一体机中热泵的启停过程不仅会影响系统供热性能,还会影响冷柜性能。本文实验研究了在单独运行及联合运行工况下考虑空气源热泵的启停过程的空气源热泵-冷柜一体机的性能,分析了空气源热泵的启停次数对热泵系统和冷柜系统性能的影响。实验结果表明:相比热泵单独运行工况,空气源热泵-冷柜一体机中热泵制热量的衰减开始时间延缓约 10 min,且联合运行工况下热泵制热量及 COP 均大于单独运行工况。联合运行工况下,三次启停工况下的空气源热泵对比一次启停工况下的热泵的平均制热量及平均 COP 分别减少了 18.2%和 27.3%,平均功耗增加 16.3%。相应地,在热泵三次启停工况下对比热泵一次启停工况下冷柜系统平均制冷量以及平均 COP 分别降低 11.6%和 11.1%。

关键词 空气源热泵;冷柜;一体机;启停;联合运行

中图分类号:TB61⁺1; TB657.5

文献标识码:A

Experimental Study on Influence of Start-stop Process on Performance of Unit Integrated with Air-source Heat Pump and Freezer

Meng Weihuan Guo Xianmin Zhang Jingjing

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

Abstract The start-stop process of units integrated with air-source heat pumps (ASHPs) and freezer affects the heating performance of the heat pump system and the performance of the freezer. In this study, the performance of the integrated unit under separate operation and combined operation conditions was studied experimentally considering the start-stop process of the ASHP system. The effect of the start-stop times of the ASHP on the performance of the heat pump system and freezer system was analyzed. The experimental results indicated that compared with the different operating conditions of the heat pump, the attenuation start time of the heat pump heating capacity in the integrated unit was delayed by approximately 10 min, and the heating capacity and COP under the combined operation condition were both higher than those in the different operating condition. Under the combined operation condition, the average heating capacity and average COP of the ASHP under the three time start-stop condition were reduced by 18.2% and 27.3%, respectively. The average power consumption was increased by 16.3% compared with that under the one time start-stop condition. Correspondingly, under the three time start-stop condition of the heat pump, the average refrigeration capacity and average COP of the freezer system were reduced by 11.6% and 11.1% respectively compared with the one start-stop condition of the heat pump.

Keywords air-source heat pump; freezer; integrated unit; start-stop; combined operation

中小型超市及便利店制冷系统的节能优化一直是国内外学者关注的焦点。A. Polzot 等^[1]提出一种 R744 制冷系统,带有高压回热器用于回收热量为超市供暖,并可满足冷藏冷冻所需冷负荷。G. Maouris 等^[2]研究了一种 CO₂ 增压制冷集成加热和冷却系统,具有蓄热功能。空气源热泵-冷柜一体机是基于目前便利店以及中小型超市等运营模式而提出的一种新型制冷系统模式^[3],通过将空调系统和冷柜系统结合运行,在冬季工况下回收冷柜系统冷凝热用于延缓空调系统的结霜^[4],从而达到节能的效果。为研究空调-冷柜一体机的可行性,D. Ha 等^[5]通过中

间冷却器将空气源热泵和冷柜系统连接,在便利店经过一年的实测发现,与空气源热泵和冷柜单独运行的系统相比,联合运行下总电能消耗降低 32%。张鲁梦等^[6]提出一种将空气源热泵与冷藏冷冻系统结合的一体机系统,实验证明一体机系统节能效果显著。相对于冷柜系统的单一制冷模式,空气源热泵在空气源热泵-冷柜一体机中受到更多学者的关注,余斌等^[7]实验研究了一体机在夏季工况下的性能,结果表明空气源热泵系统的质量流量比在 8%~12%时,空调和冷柜系统的 COP 得到提升。吴琦琦等^[8]在冬季结霜工况下研究了一体机中空气源热泵室外机的

结霜问题,发现联合运行下结霜周期延长为单独运行的 1.27 倍。

空气源热泵因其高效便捷的优势被应用于一体机系统中,但作为一种启停式热泵,其在启停过程中对系统造成的能量损失不容忽视^[9]。高佳佳等^[10]为减少启停式小型热泵的启停频率,提出将温度设定值重设技术和双线性控制技术结合的控制方法,结果表明该控制方式简单高效且不会对室内的热舒适性产生影响。张旭光等^[11]针对小型家用空调器建立了夏季工况下启停机过程的动态仿真模型,结果表明采用变频调节可以降低压缩机在启停过程中的能量损失。Shang Yan 等^[12]对立式地源热泵系统进行了间歇运行实验研究,并对比了不同运行模式,研究表明在间歇时间内地热能的恢复可有效提高热泵的系统效率。管国兵等^[13]对末端不带温控的空调系统进行周期性启停控制,通过减少制冷机运行时间来实现降载节能。李元旦等^[14]通过实测分析了土壤源热泵在冬季制热工况下的气动特性。

目前大多数研究针对一体机联合运行工况性能提升,或在热泵系统中单独提出启停控制策略以优化系统,但空气源热泵作为一体机的一部分,有关其对一体机系统性能影响的研究较少。本文主要对空气源热泵-冷柜一体机系统中空气源热泵的启停机过程进行了实验研究,分析了在一体机中热泵的启停对热泵联合运行性能以及冷柜系统性能的影响。

1 实验系统及工况

1.1 实验装置介绍

实验装置主要包括空气源热泵-冷柜一体机系统、焓差室以及数据采集系统三部分,实验系统原理如图 1 所示。其中空气源热泵-冷柜一体机系统主要分为两部分:一部分是空气源热泵系统,制冷剂采用 R410A;另一部分是冷柜系统,制冷剂采用 R404A。通过板式换热器将两部分相连,达到空调系统为冷柜系统提供过冷的目的;空气源热泵的室外机和冷柜系统的冷凝器设计为室外一体翅片式换热器,其前排 2/3 的管为冷柜冷凝器,剩余用作空调室外机,在冬季工况下可实现利用冷柜冷凝热为空气源热泵蒸发器除霜的效果^[15]。焓差法性能实验室依据 GB/T 7725—1996《房间空气调节器》^[16]建造,用于控制实验工况所需要的环境温湿度。数据采集系统及相关测点布置如图 1 所示,主要采集参数包括温度、压力、相对湿度、质量流量及功耗。其中,温度测量采用 T 型热电偶测量,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;干湿球温度采用 Pt100 铂电阻测量,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;压力通过 MPM4730 压力变送器测量,精度为 0.25%;热泵侧及冷柜侧制冷剂的质量流量采用质量流量传感器测量,精度为 0.1%FS;空气源热泵功耗通过焓差室测控软件测量,冷柜功耗采用 WT330 数字功耗计测量,精度为 0.5%。

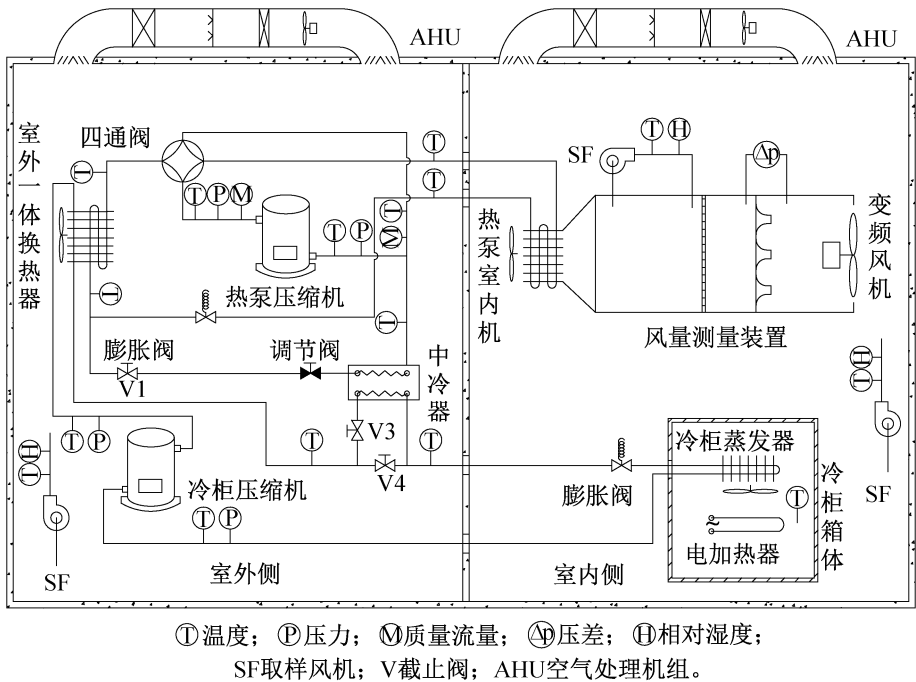


图 1 空气源热泵-冷柜一体机实验系统
Fig.1 Experimental system of ASHP-freezer integrated unit

1.2 实验工况

为了对比空气源热泵在单独运行及其与冷柜联合运行工况下的性能,实验测试了空气源热泵单独运行以及联合运行工况下的性能变化。“单独运行”工况是指空气源热泵开机运行而冷柜系统关闭;而“联合运行”工况是指空气源热泵与冷柜同时运行,热泵系统为冷柜系统提供过冷度。

为研究联合运行工况下空气源热泵启停次数对空气源热泵-冷柜一体机性能的影响,设定空气源热泵在 70 min 内分别经历一至三次启停,一次启停工况,即热泵在开机后连续运行直至停机,运行周期为 70 min;两次及三次启停工况,即热泵在 70 min 周期内启停两次及三次,两次启停之间的间歇时长为 5 min。所有实验均在表 1 所示的环境工况参数下进行。

表 1 实验工况参数

Tab.1 Experimental operation parameters

参数	数值
室外干球温度/℃	-1
室外相对湿度/%	60
室内干球温度/℃	18
室内相对湿度/%	40
冷流比/%	12
冷柜温度/℃	0

2 实验结果与分析

2.1 考虑启停过程的空气源热泵动态性能

为了对比分析考虑启停过程的空气源热泵性能,分别在空气源热泵单独运行及联合运行工况下进行性能测试。

图 2(a)、图 2(b)所示分别为空气源热泵单独运行及联合运行工况下的制热量及 COP 动态曲线。由图 2(a)可知,两种工况下空气源热泵的制热量在开机初期随运行时间的增加而逐渐增大,其中单独运行工况下在开机约 30 min 后制热量达到最大值,而在联合运行工况下制热量则在开机约 40 min 后达到最大值,实验中发现这是由于室外机换热器表面结霜造成的。由于冷柜冷凝热延缓了室外机结霜,导致空气源热泵制热量的衰减延迟约 10 min。同时发现,在整个运行周期内,联合运行工况下的热泵制热量始终高于单独运行工况,这是由于冷柜冷凝热延缓结霜及中冷器传热面积相当于增大了蒸发面积所致^[17]。

由图 2(b)可知,在考虑空气源热泵启停过程的情况下,两种运行方式下热泵系统的 COP 在开始阶段随运行时间逐渐增大,在空气源热泵单独运行工况下制热 COP 约在 30 min 达到最大值,而在联合运行工况下其 COP 在约 60 min 达到最大值。整个过程中联合运行工况下的 COP 始终高于单独运行工况下的制热 COP。这是由于热泵与冷柜的联合运行工况有效提升了空气源热泵系统的蒸发温度,如图 2(c)所示。由图 2 可知,联合运行工况下空气源热泵系统性能始终高于单独运行工况,原因是空气源热泵-冷柜一体机的联合运行可以有效延缓热泵室外机的结霜,从而提升系统性能。

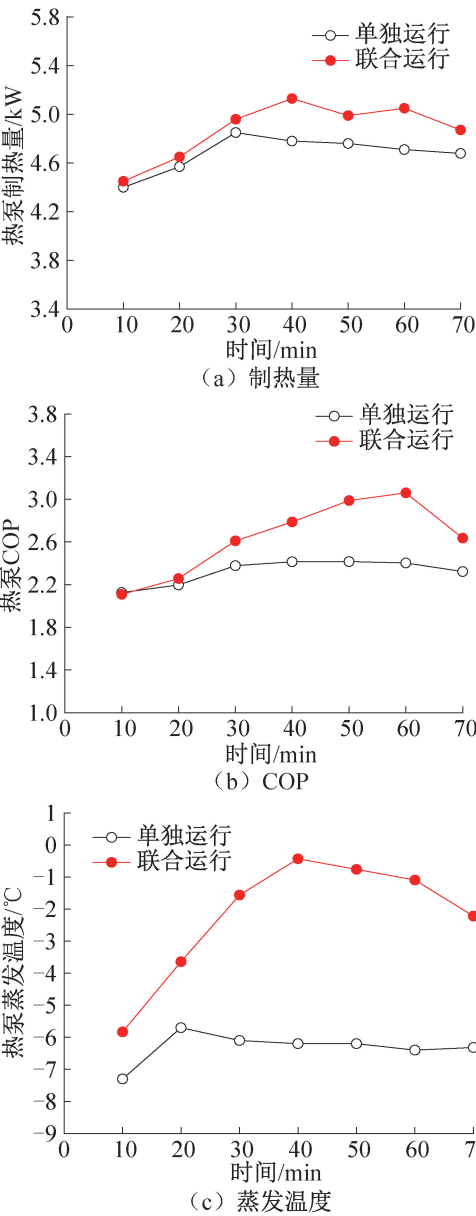


图 2 空气源热泵系统性能对比
Fig.2 Performance comparison of ASHP system

2.2 启停次数对空气源热泵性能的影响

为了研究启停次数对空气源热泵性能的影响,实验测试了空气源热泵在单独运行及联合运行工况下不同启停次数下的性能,实验中空气源热泵在 70 min 内分别经历一至三次启停过程。图 3 所示为不同启停次数下空气源热泵在单独运行及联合运行工况下的平均制热量、平均功耗以及平均 COP 对比。

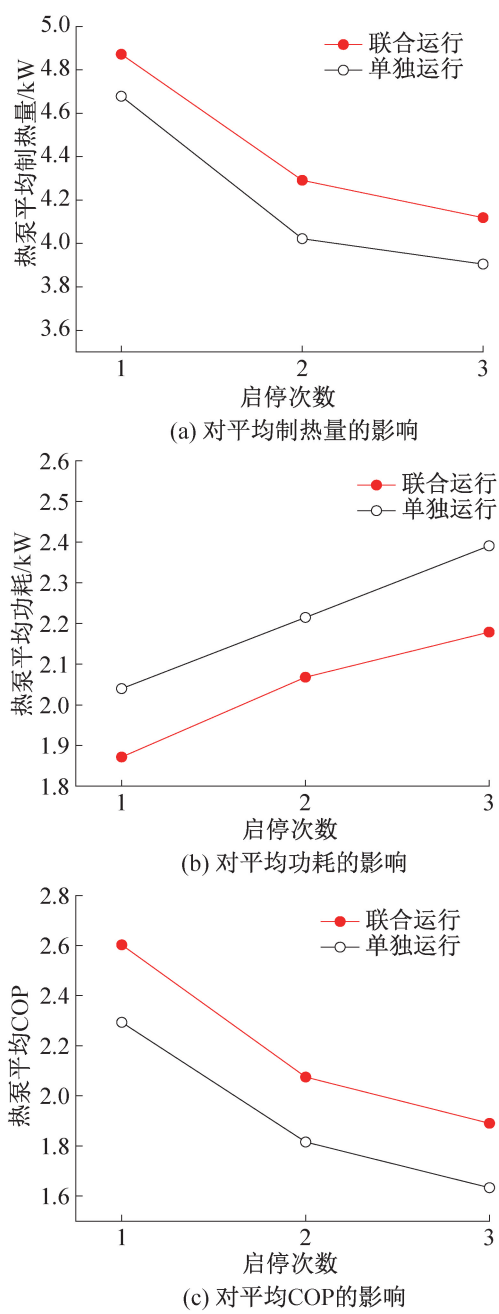


图 3 启停次数对空气源热泵性能的影响
Fig.3 Effect of start-stop times on the performance of ASHP

由图 3 可知,无论在单独运行还是联合运行工况下,随着启停次数的增加,空气源热泵系统的平均功耗增大,平均制热量减少,导致平均 COP 减小,这是由于在启停过程中的能量损失造成的,其中在停机过

程中由于压差的存在,制冷剂工质从压力较高的室内机流向压力较低的室外机内从而发生热量交换,不仅造成能量的耗散,且室内机内工质温度的降低也会导致下一次启动过程中冷负荷的增大;而在热泵启动过程中,压缩机的排气压力快速升高,吸气压力急速降低,压缩机功耗增大,而蒸发器中的工质在压缩后进入冷凝器重新建立高低压差的过程中却没有有效输出,造成启动能量损失。对于单独运行工况,压缩机从启停一次增至三次,造成空气源热泵的平均功耗增加 17.2%,平均制热量减少 19.5%,平均 COP 减少 28.8%。对于联合运行工况,热泵压缩机从启停一次增至三次,平均功耗增加 16.3%,制热量减少 18.2%,平均 COP 降低 27.3%。虽然开、停机过程中的能量耗散不可逆,但空气源热泵-冷柜一体机可以利用冷柜冷凝热延迟热泵室外机结霜,提高热泵系统蒸发温度,联合运行下空气源热泵性能得到提升,部分抵消了压缩机启停的影响,表现为热泵在联合运行下平均制热量、平均 COP 的提高以及平均功耗的减少,由此启停次数的影响对于单独运行工况更大。

2.3 空气源热泵启停对冷柜性能的影响

在空气源热泵-冷柜一体机系统联合运行工况下,空气源热泵的启停机过程也会对冷柜系统的性能产生影响^[18-19]。在 70 min 内空气源热泵分别进行三种启停次数,冷柜的动态性能曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,空气源热泵系统的停机对冷柜系统的过冷度产生显著影响,在空气源热泵停机期间,冷柜制冷系统的过冷度大幅减小,造成其制冷量及 COP 在空气源热泵停机期间相应大幅降低。随着空气源热泵启停次数的增加,冷柜系统的平均制冷量呈现逐渐下降的趋势,在空气源热泵三次启停工况下冷柜平均制冷量对比空气源热泵一次及两次启停工况下冷柜平均制冷量分别降低 11.6%和 4.7%。由于在空气源热泵的启停过程中冷柜系统的运行工况变化较小,冷柜系统的功耗始终保持相对稳定,因此冷柜系统的 COP 随空气源热泵系统启停次数的增加而逐渐减小,在空气源热泵三次启停工况下冷柜系统的平均 COP 相较于在空气源热泵一次及两次启停工况下冷柜系统的平均 COP 分别降低约 11.1%和 3.9%。

3 结论

本文在空气源热泵不同启停次数工况下对空气源热泵-冷柜一体机的性能进行了实验研究,测试了空气源热泵启停次数对单独运行以及联合运行工况下热泵性能的影响,并分析了联合运行工况下空气源热泵启停冷柜系统性能的影响,得到结论如下:

2)联合运行工况下冷柜系统的过冷度随着空气源热泵的启停产生显著波动,从而影响冷柜系统的平均制冷量以及 COP。在空气源热泵三次启停工况下冷柜的平均制冷量及平均 COP 对比空气源热泵一次启停工况下冷柜分别减少 11.6%和 11.1%。

参考文献

[1] POLZOT A, D'AGARO P, CORTELLA G. Energy analysis of a transcritical CO₂ supermarket refrigeration system with heat recovery[J]. Energy Procedia, 2017, 111: 648-657.

[2] MAOURIS G, SARABIA E J, ACHA S, et al. CO₂ refrigeration system heat recovery and thermal storage modelling for space heating provision in supermarkets: an integrated approach[J]. Applied Energy, 2020, 264: 114722.

[3] YANG Liang, ZHANG Chunlu. Analysis on energy saving potential of integrated supermarket HVAC and refrigeration systems using multiple subcoolers[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(2): 251-258.

[4] 马龙信, 路昆. 空气源热泵机组结霜问题的实验分析[J]. 低温与超导, 2021, 49(1): 96-101. (MA Longxin, LU Kun. Experimental analysis on the frost formation problem of air source heat pump unit [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2021, 49(1): 96-101.)

[5] HA D, JEONG J H. Performance characteristics of a combined air conditioner and refrigerator system interconnected via an intercooler[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 49: 57-68.

[6] 张鲁梦, 郭宪民, 黄康, 等. 空调冷柜一体机的设计和实验研究[J]. 低温与超导, 2018, 46(12): 85-90. (ZHANG Lumeng, GUO Xianmin, HUANG Kang, et al. Design and primary experimental study on performance of combined air conditioner and freezer system[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2018, 46(12): 85-90.)

[7] 余斌, 郭宪民, 郭怀远. 夏季工况条件下空调/冷柜一体机性能实验研究[J]. 热科学与技术, 2020, 19(2): 120-125. (YU Bin, GUO Xianmin, GUO Huaiyuan. Experimental study on performance of integrated cabinet and air conditioner system under summer working conditions [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2020, 19(2): 120-125.)

[8] 吴琦琦, 郭宪民, 丁明青. 结霜工况下空气源热泵-冷柜双联机性能实验研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(5): 124-129, 152. (WU Qiqi, GUO Xianmin, DING Mingqing. Experimental study on performance of combined air-source heat pump and freezer under frosting condition [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(5): 124-129, 152.)

[9] MONTAGUD C, CORBERÁN J M, MONTERO Á. In situ

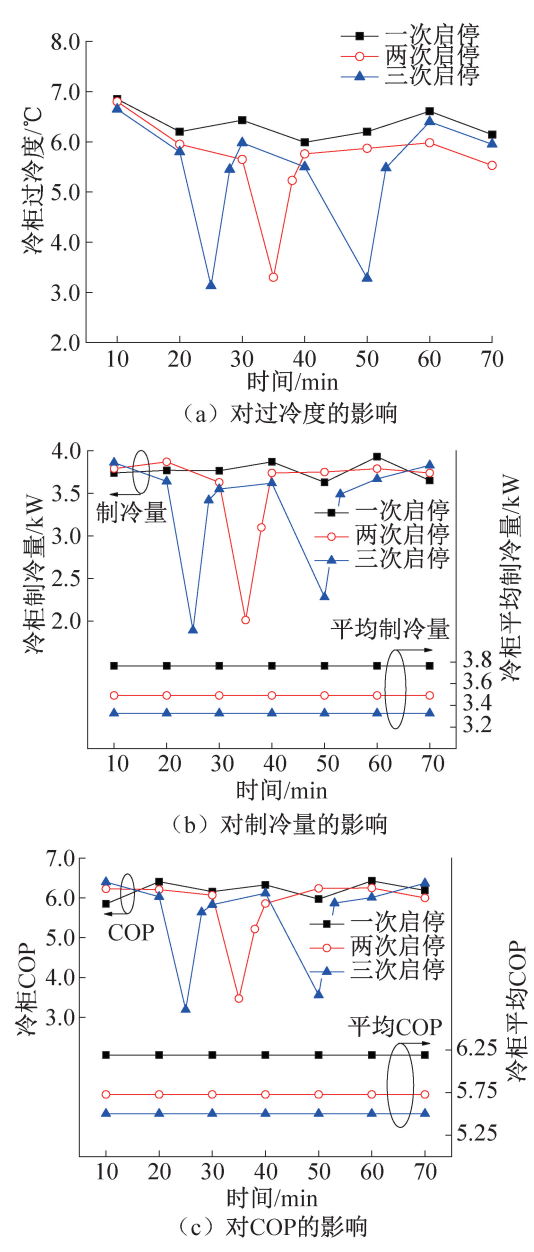


图 4 空气源热泵启停对冷柜系统性能的影响
Fig.4 Effect of start-stop of ASHP system on the performance of freezer system

1)在联合运行工况下,冷柜的冷凝热可以有效延缓室外机结霜,且有效提升了热泵系统的蒸发温度,表现为联合运行工况下空气源热泵制热量的衰减比单独运行工况下延缓了 10 min,热泵系统在启停次数增加过程中的能量损失得到部分抵消。其中在单独运行工况下,经历三次启停工况下空气源热泵的平均制热量及平均 COP 对比一次启停工况下空气源热泵,分别减少 19.5%、28.8%,平均功耗增加 17.2%。在联合运行工况下,经历三次启停工况下空气源热泵的平均制热量及平均 COP 对比一次启停工况下空气源热泵,分别减少 18.2%和 27.3%,平均功耗增加 16.3%。

- optimization methodology for the water circulation pumps frequency of ground source heat pump systems[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 68: 42–53.
- [10] 高佳佳, 徐新华, 黄公胜. 变风量空调系统室内温度控制[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(12): 86–89, 105. (GAO Jiajia, XU Xinhua, HUANG Gongsheng. Space temperature control of variable air volume air-conditioning system[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(12): 86–89, 105.)
- [11] 张旭光, 任福忱, 白彝. 小型家用空调器夏季启停机过程动态特性研究[J]. *山西建筑*, 2013, 39(15): 97–99. (ZHANG Xuguang, REN Fuchen, BAI Ben. Study on dynamic characteristics of start and stop process of small household air conditioner in summer [J]. *Shanxi Architecture*, 2013, 39(15): 97–99.)
- [12] SHANG Yan, DONG Ming, LI Sufen. Intermittent experimental study of a vertical ground source heat pump system [J]. *Applied Energy*, 2014, 136: 628–635.
- [13] 管国兵, 王志成, 辛洁晴, 等. 空调间歇性轮停最佳控制周期研究[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(12): 31–35, 42. (GUAN Guobing, WANG Zhicheng, XIN Jieqing, et al. Study on the optimal duty cycling control period of air conditioning[J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(12): 31–35, 42.)
- [14] 李元旦, 张旭, 周亚素, 等. 土壤源热泵冬季工况启动特性的实验研究[J]. *暖通空调*, 2001, 31(1): 17–20. (LI Yuandan, ZHANG Xu, ZHOU Yasu, et al. Startup characteristics of the ground source heat pump in the mode of heating [J]. *Journal of HV&AC*, 2001, 31(1): 17–20.)
- [15] 索金鹏, 郭宪民, 黄康. 冬季工况条件对空调冷柜双联机性能的影响[J]. *低温与超导*, 2018, 46(3): 79–83. (SUO Jinpeng, GUO Xianmin, HUANG Kang. Effects of ambient parameters in winter on performance of combined air-conditioner and freezer system[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2018, 46(3): 79–83.)
- [16] 房间空气调节器:GB/T7725–1996[S]. 北京:中国标准出版社,1996. (Room air conditioners: GB/T7725–1996 [S] Beijing: Standards Press of China, 1996.)
- [17] 王猛, 郭宪民, 郭怀远, 等. 空气源热泵-冷柜一体机组冬季制热和冷藏性能实验研究[J]. *低温工程*, 2020(6): 74–79. (WANG Meng, GUO Xianmin, GUO Huaiyuan, et al. Experimental study on heating and refrigeration performance of integrated air source heat pump-freezer system in winter[J]. *Cryogenics*, 2020(6): 74–79.)
- [18] 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. (LIU Yun, ZHAO Rijing, HUANG Dong. Refrigerant migration during switching of a parallel cycle frost-free refrigerator-freezer[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(3): 17–21.)
- [19] 冷永强, 张振亚, 黄东. 卧式冷柜启停过程中制冷剂迁移的动态特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(1): 155–159. (LENG Yongqiang, ZHANG Zhenya, HUANG Dong. Dynamic characteristics of the refrigerant migration during the on-off processes of a horizontal freezer [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(1): 155–159.)

通信作者简介

郭宪民,男,博士,教授,天津商业大学,天津市制冷技术重点实验室,13821309202, E-mail: xmguo@tjcu.edu.cn。研究方向: 制冷系统节能及优化。

About the corresponding author

Guo Xianmin, male, Ph. D., professor, Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, +86 13821309202, E-mail: xmguo@tjcu.edu.cn. Research fields: optimization and energy-saving technology of refrigeration system.