

文章编号:0253-4339(2020)05-0083-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.05.083

基于氟泵增压的机房空调系统性能实验研究

林郁聪 刘金平 许雄文 刘 镇 李国立

(华南理工大学电力学院 广州 510641)

摘 要 为解决蒸汽压缩式制冷空调系统在低冷凝温度时供液不足以及寒冷季节自然冷能利用率低的问题,本文设计了氟泵增压空调系统并实验研究了系统运行特性。该系统可以在夏季炎热季节、过渡季节和冬季寒冷季节分别以蒸汽压缩、氟泵增压、单氟泵驱动 3 种模式运行。结果表明:实验中使用毛细管/电子膨胀阀的传统压缩蒸气制冷系统分别会在室外温度低于 25 ℃/15 ℃时发生供液不足、制冷量下降的问题,使用氟泵增压系统在室外温度为-5~25 ℃的工况范围内均可实现 100%以上的额定制冷量,COP 可达 3.96~6.25,满足过渡季节工况下的运行需求。室外温度低于-5 ℃时,使用单氟泵驱动可满足额定制冷量,且 COP>19。

关键词 数据中心;空调;工质泵;自然冷能;制冷性能实验

中图分类号:TU831.3;TP308

文献标识码:A

Experimental Research on Air Conditioning System of a Computer Room Based on Refrigerant Pump Pressurization

Lin Yucong Liu Jinping Xu Xiongwen Liu Zhen Li Guoli

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510641, China)

Abstract To solve the problems involving insufficient liquid supply in the low-condensation temperature of the vapor compression air-conditioning refrigeration system and the low utilization rate of natural cold energy in the cold season, an air-conditioning system based on refrigerant pump boosting was designed, and the operating characteristics of the system was experimentally studied in this paper. The system can be operated in three modes: vapor compression, refrigerant pump boost, and single refrigerant pump drive in hot summer, transitional season, and cold winter. The results show that the traditional compression vapor refrigeration system using a capillary tube and an electronic expansion valve in the experiment suffers from insufficient liquid supply and reduced cooling capacity when the outdoor temperature is below 25 ℃ and 15 ℃, respectively. Furthermore, it can achieve a rated cooling capacity of more than 100% and a COP of 3.96 to 6.25 in the working conditions with an outdoor temperature of 25 ℃ to -5 ℃. This satisfies the operating requirements of the transition season. When the outdoor temperature is lower than -5 ℃, the use of a single refrigerant pump drive can satisfy the rated cooling capacity and exhibit a COP of more than 19.

Keywords data center; air conditioning system; refrigerant pump; natural cold energy; refrigeration performance test

随着信息技术的高速发展,数据机房数量激增,机房空调能耗约占整个机房能耗的 40%^[1],提升机房空调系统的能效对节能减排具有重要意义。

由于机房热负荷主要来自于内部设备发热,受外界影响较小,且需要全年运行^[2],因此制冷空调系统需全年均能满足制冷量需求,以维持设备的正常散热。在夏季高温天气,传统蒸汽压缩式制冷系统在设计温度范围内制冷性能和 COP 较为稳定,但在冬季和过渡季节冷凝温度较低时,由于系统冷凝压力过

低,节流装置调节范围有限无法产生足够的压降,产生供液不足的现象,制约系统的制冷性能和效率^[3]。马克臣等^[4]提出的泵与压缩机双动力直膨式制冷系统(DDPC)可以有效降低冷凝温度,提升冷凝器出口的压力,为节流装置提供足够的压降,保证蒸发器供液充足。

此外,在寒冷季节充分利用自然冷能可极大地减少空调系统能耗。目前机房空调使用自然冷能的方式主要有自然通风和热管系统。自然通风能够以较

基金项目:国家自然科学基金(51776075)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51776075).)

收稿日期:2019-10-31;修回日期:2020-01-14

高的效率地利用自然冷源,但机房内部通常对室内空气洁净度要求较高,机房新风系统需设置一定的除尘过滤和除湿装置,维护成本相对较高^[5-6]。热管系统的自然冷源利用率虽不如直接引进新风高,但可以避免空气处理问题,维护使用较为方便^[7]。且使用复合热管系统,可以进一步简化系统,节约成本^[8]。石文星等^[9]将重力型分离式热管技术与压缩蒸气制冷系统结合,相对常规空调可节能 30%~45%,而重力热管对安装高度有一定要求,Y. Udagawa 等^[10]将液泵应用于热管,使系统在室内外都有相变,增大了换热效率。张卓^[11]为传统蒸气压缩式制冷系统添加了氟泵作为动力源,并通过实验验证了该系统各工况的运行性能。

目前所提出的复合热管系统虽然可以兼顾常规的蒸气压缩式制冷和自然冷能的应用,但在过渡季节,传统蒸气压缩式系统和热管系统均无法保持高效运行,两种模式的制冷能力通常无法达到良好的衔接。本文引入氟泵增压系统以解决过渡季节传统蒸气压缩式空调性能不足的问题,在寒冷季节氟泵亦可单独作为动力源驱动制冷剂在蒸发器和冷凝器之间换热,利用原系统的回路构成氟泵驱动的热管系统,通过实验验证系统各工况下的制冷性能和效率。

1 实验方法

实验系统基于 1 台额定制冷量为 7.2 kW 的家用空调(制冷剂为 R22)进行改装,于冷凝器与毛细管之间加装了 1 台电磁齿轮泵,额定流量为 900~8 400 mL/min,可设定频率范围为 5~50 Hz,同时在氟泵前加装了储液罐以防止氟泵内部产生气蚀,氟泵增压系统结构如图 1 所示。该氟泵的运行频率可由变频器控制,并于空调系统各部件出入口设置了热电偶和压力传感器进行测温测压,当蒸发器出口过热度大于 8℃时,对氟泵进行升频操作,当过热度小于 5℃时,对氟泵进行降频操作,从而控制系统蒸发器出口过热度在 8℃以内^[12]。

本系统可以 3 种模式运行,如表 1 所示。根据冷凝温度的不同,在夏季高温季节时,关闭氟泵和电子膨胀阀,氟泵侧单向阀保持通路,压缩机侧单向阀保持闭路,系统可以传统的压缩蒸气模式运行。在过渡季节随着冷凝温度的降低,保持压缩机运行的同时,开启氟泵,使泵与节流装置串联,氟泵侧和压缩机侧单向阀均保持闭路,以氟泵增压模式运行,从而保证蒸发器供液充足。而在冬季寒冷季节,关闭压缩机,打开电子膨胀阀,压缩机侧单向阀保持通路,氟泵侧单向阀保持闭路,氟泵可以单独作为动力源,驱动制

冷剂在蒸发器和冷凝器间换热,以利用自然冷源。

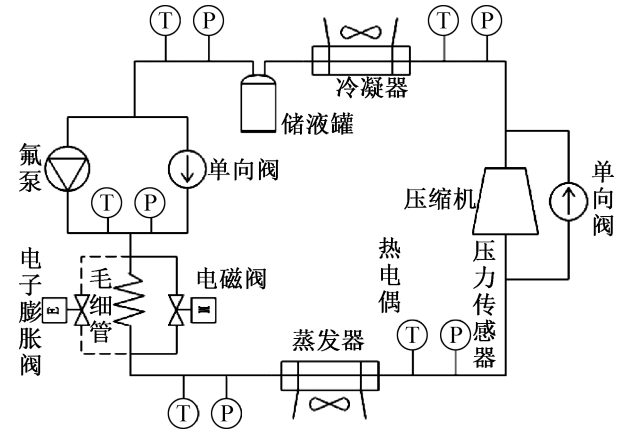


图 1 氟泵增压系统结构

Fig.1 The dual power direct expansion refrigeration system

表 1 系统运行的 3 种模式

Tab.1 The three modes of the system operation

运行模式	系统操作
压缩机驱动	压缩机开启,氟泵、电磁阀关闭
氟泵增压	压缩机、氟泵开启,电磁阀关闭
单氟泵驱动	压缩机关闭,氟泵、电磁阀开启

蒸气压缩式制冷循环与氟泵增压制冷循环压焓图如图 2 所示。

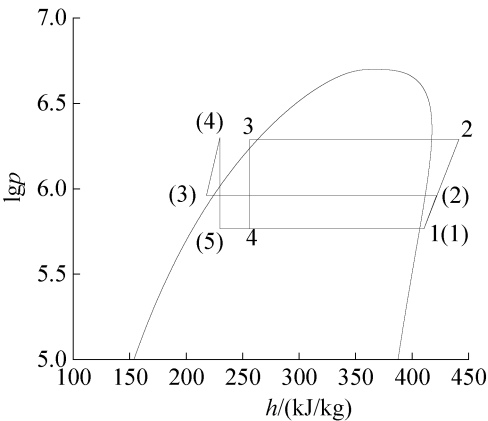


图 2 压缩蒸气制冷循环与氟泵增压制冷循环压焓图

Fig.2 The p - h diagram of conventional direct refrigeration cycle and the dual power direct expansion refrigeration system

传统蒸气压缩式制冷循环如 1-2-3-4-1 所示,当冷凝压力降低,蒸发压力保持一定时,系统的制冷量不变,压缩机做功降低,系统能效升高^[13]。但当系统蒸发压力过小时,由于节流装置和冷凝器仍存在一定流动阻力,会导致蒸发器制冷剂供液不足。

加装氟泵增压系统后,氟泵可提升冷凝器出口压

力,其热力过程如(1)-(2)-(3)-(4)-(5)-(1)所示,为节流装置提供足够的压降,氟泵使冷凝器出口压力从 $p_{(3)}$ 提升至 $p_{(4)}$,节流装置前后压差由 $p_{(3)}-p_{(5)}$ 变成 $p_{(4)}-p_{(5)}$,从而保证蒸发器供液充足。由于液态制冷剂比体积远小于气态制冷剂,因此理论上相同压比下氟泵功耗比压缩机要小得多。

当冷凝温度继续降低至一定程度时,氟泵亦可作为动力源驱动工质,协同原系统的蒸发器和冷凝器构成热管系统,从而充分利用自然冷源,达到节能减排的目的。

2 测试结果与分析

根据 GB 50174—2017《数据中心设计规范》^[14],在基站内设备运行时,基站内的环境温度需控制在18~27℃,本实验于焓差实验室进行,控制室内侧工况为干球温度27℃、湿球温度19℃固定不变,测试该空调系统的3种模式在各温度范围内的制冷能力与效率。

由于机房空调使用时机房内部热负荷主要来源于设备散热,受外界影响较小,因此对于机房空调制冷系统的制冷能力需求较为恒定。实验以系统在额定工况下(室外干球温度35℃,室内干球温度27℃,室内湿球温度19℃)的制冷量作为额定制冷量,为空调选型和模式选择提供参照。

2.1 各模式制冷能力与效率

在制冷系统中,为防止蒸发器供液不足或制冷剂过余,可通过电子膨胀阀的开度调节来控制系统制冷剂流量^[15],但当电子膨胀阀开度达到上限时,无法继续调控流量,随着系统冷凝压力的降低,通过电子膨胀阀的流量随阀前后的压差减小而减小,导致系统制冷量下降^[16]。毛细管因为尺寸固定,缺乏对制冷剂流量的调节能力^[17]。

针对电子膨胀阀和毛细管对制冷剂流量的调节特性不同,本文通过实验测试对比了采用毛细管和电子膨胀阀作为节流装置的制冷系统,为了研究电子膨胀阀的理论调节范围上限,开启与节流装置并联的电磁阀(即无节流装置的情况),为了便于对比不同模式、不同工况下系统的实际制冷量与额定制冷量,采用实际制冷量与额定制冷量比值的方式来衡量系统的制冷性能,不同室外温度时3种情况下的制冷性能如图3所示。

采用毛细管的制冷系统在室外温度低于25℃时便无法达到额定制冷量,而采用电子膨胀阀的制冷系统可将正常工作的温度下限延伸至约15℃,使用电子膨胀阀的制冷系统相对于毛细管适用范围更广。

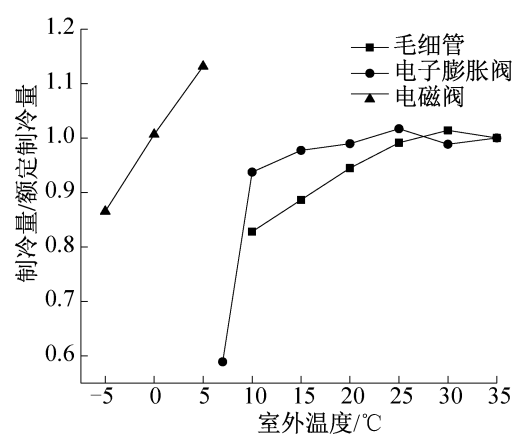


图 3 不同室外温度时采用不同节流装置的系统制冷量
Fig.3 System cooling capacity with different throttling devices at different outdoor temperatures

但在室外温度低于10℃时,系统制冷量开始明显下降,说明此时电子膨胀阀的开度已达到上限,无法继续调节。

当室外温度为5℃,毛细管和电子膨胀阀均无法有效调节时,开启电磁阀,此时系统制冷量提升较大,但室外温度低于5℃时蒸发器出口的过热度较大(>10℃),说明系统仍存在供液相对不足的问题,且在0℃以下时,无法达到额定制冷量。因此单纯通过调节节流装置无法满足过渡季节的制冷需求,使用氟泵增压系统具有一定的必要性。

由于制冷系统电子膨胀阀的开度和本文采用的氟泵运行频率均需要根据蒸发器出口制冷剂过热度控制流量,且本实验装置所采集的过热度会有一定波动,两者同时进行调控会造成电子膨胀阀开度的频繁变化或氟泵的频繁启停,为简化控制流程,减少各模式的切换频率,延长各部件寿命,本文基于使用毛细管的制冷系统进行氟泵增压模式测试。

3种模式下制冷量的测试结果如图4所示。使用毛细管的压缩机驱动制冷模式从额定工况开始,随着外部环境温度的降低,系统制冷能力先升高后下降。当室外温度为20℃时,系统制冷量降至额定制冷量的93%;当室外温度为10℃时,仅能达到81%的额定制冷量。而使用电子膨胀阀的压缩机驱动制冷模式在室外温度高于20℃时制冷量在额定制冷量上下略有浮动,在室外温度约为15℃时开始有下降趋势,10℃时可达到约94%的额定制冷量,7℃时仅能达到29%的额定制冷量。

氟泵增压模式下,通过调节氟泵频率控制冷凝器出口制冷剂的过热度在8℃以内,在10~25℃温区内其制冷量高于压缩机驱动模式,且在-5~25℃的工况下均能满足100%以上的额定制冷量。

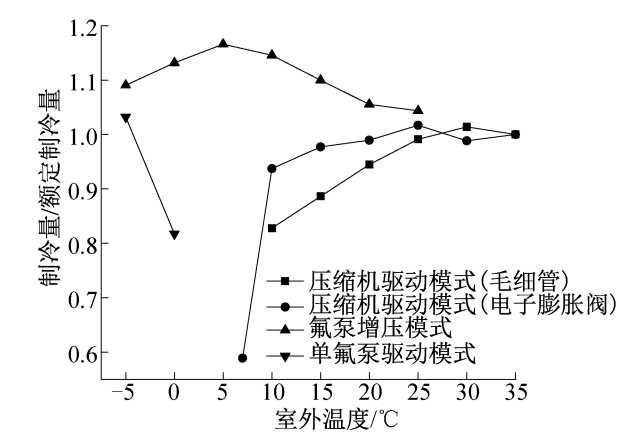


图 4 3 种模式下的制冷量
Fig.4 The cooling capacity of the three modes

单氟泵驱动模式下,当室外温度为 0℃,系统可达到 80%的额定制冷量;当室外温度为-5℃时,可达到 101%的额定制冷量。因此,当环境温度低于-5℃时,可以使用单氟泵运行以满足制冷需求,此时由于自然冷源的利用,系统具有较高的制冷效率。

因此,本系统可通过切换运行模式在测试工况范围内(-5~25℃)维持 100%及以上的额定制冷量,根据系统的制冷能力和能效,可将空调运行室外温度工况划分为高、中、低 3 个温区:当室外温度高于 25℃时为高温区,对应压缩机驱动模式运行;当室外温度在-5~25℃时为中温区,对应氟泵增压模式运行;当室外温度低于-5℃时为低温区,对应单氟泵驱动模式运行。

2.2 能效分析

压缩机是蒸气压缩式制冷系统的主要能耗部件,其运行功率主要受压缩机进出口压比、气体流量等参数影响^[18]。维持压缩机在设计工况范围内运行,对系统整体的能效和寿命具有重要意义。

实验系统中,以使用毛细管的制冷系统为例,通过测量压缩机出口压力及蒸发器出口压力,对比压缩机驱动模式下和氟泵增压模式下系统的冷凝压力和蒸发压力变化,如图 5 所示。随着室外温度的降低,由于节流装置无法提供有效的压降,系统的蒸发压力也随之降低,而使用氟泵增压模式后,系统的蒸发压力虽有小幅升高,但随着室外温度的降低,系统的蒸发压力基本维持不变,系统的高低压比相对压缩机驱动模式有所减小,对应压缩机的功耗减小。

压缩机驱动模式和氟泵增压模式下单位质量制冷剂的压缩机功耗如图 6 所示。由于压比降低,采用氟泵增压模式下单位流量制冷剂对应压缩机功耗在低于 25℃的温度范围内均比压缩机驱动模式要低。而压缩机驱动模式下,当环境温度低于 20℃时,由于

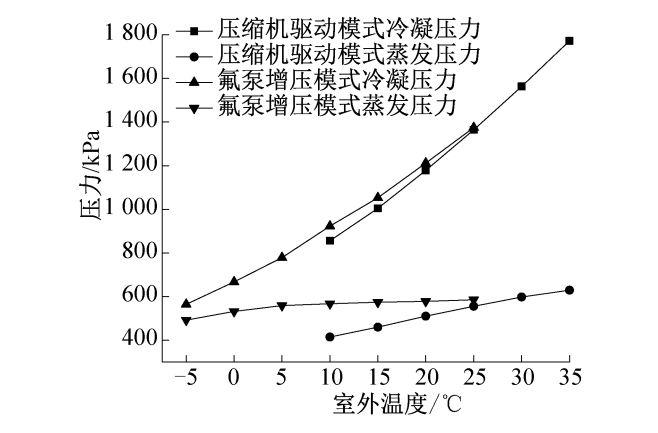


图 5 蒸气压缩模式和氟泵增压模式的系统压力变化
Fig.5 System pressure changes in vapor compression mode and fluorine pump acceleration mode

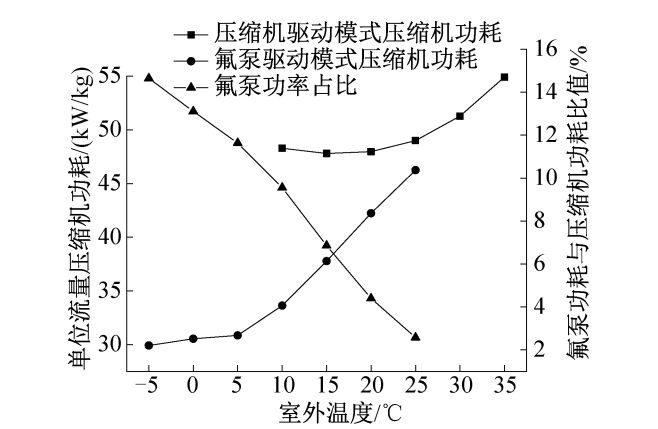


图 6 压缩机与氟泵功耗
Fig.6 Power consumption of compressor and fluorine pump

流量不足,压缩机供气量低于额定设计标准,随着冷凝温度降低,单位流量压缩机功耗甚至还有上升的趋势。

由于氟泵的功耗相对于压缩机的功耗较小,在工作温度范围内仅占总能耗的 2.51%~12.78%,而加入氟泵后系统制冷量提升较大,因此采用氟泵增压模式在过渡季节具有良好的能效比,在工作范围内 COP 可达 3.96~6.25,在单氟泵驱动运行时,自然冷源的应用使系统具有更高的 COP(>19)。各模式的 COP 如图 7 所示。因此,3 种模式在其工作温区范围内可兼具良好的制冷性能和制冷效率。

3 结论

为了满足数据机房全年运行与节能的需求,本文提出了基于氟泵增压的机房空调系统,实验验证了该系统 3 种运行模式在不同工况下的制冷性能,得到如下结论:

1) 采用不同节流装置的蒸气压缩式制冷系统,

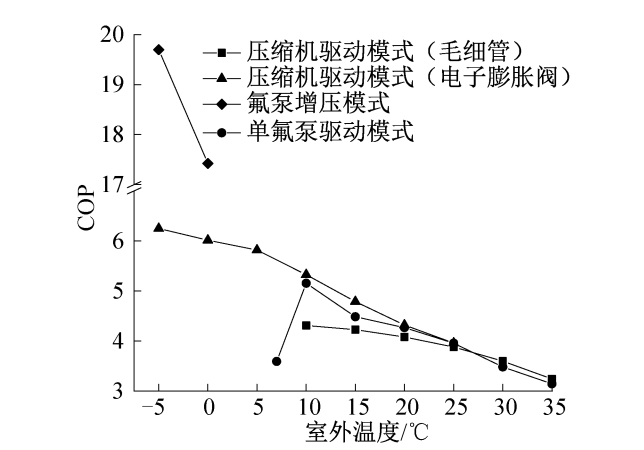


图 7 各模式的 COP 对比

Fig.7 COP comparison of each mode

正常运行的工况范围不同。采用毛细管的制冷系统在室外温度低于 25℃ 时发生供液不足,而使用电子膨胀阀的制冷系统在室外温度低于 15℃ 时发生供液不足。

2) 采用氟泵增压系统可在室外温度为-5~25℃ 工况范围内达到 100% 以上的额定制冷量,且 COP 可达 3.96~6.25。单氟泵运行时可在低于-5℃ 室外工况达到 100% 以上的额定制冷量,且由于自然冷能的应用,COP>19。

3) 提出的氟泵增压空调系统的 3 种运行模式可在各个季节温区间有效衔接,室外温度高于 25℃ 时采用压缩机驱动模式,室外温度在-5~25℃ 之间时采用氟泵增压模式,室外温度低于-5℃ 时采用单氟泵驱动模式,以满足机房空调的全年运行需求。

本文受广东省自然科学基金(2019A1515011253)、中央高校基本科研业务费专项资金(2018MS11)资助。(The project was supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2019A1515011253) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018MS11).)

参考文献

[1] 廖了. 大型计算机机房空调设计模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. (LIAO Liao. Simulation and study on air conditioning design of large computer room [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.)

[2] 姚建强, 冯梅, 陈靓, 等. 高热密度机房的空调选配及能效分析[J]. 信息系统工程, 2014, 27(1): 99-102. (YAO Jianqiang, FENG Mei, CHEN Liang, et al. Air conditioning matching and energy efficiency analysis of high heat density computer room[J]. Information System Engineering, 2014, 27(1): 99-102.)

[3] 岑敏婷. 过低冷凝温度对制冷系统制冷能力负面影响

的原因分析[C]//中国建筑学会暖通空调分会、中国制冷学会空调热泵专业委员会. 杭州: 中国制冷学会, 2010:168. (CEN Minting. Analysis of the reasons for the influence of excessively low condensing temperature on the refrigeration capacity of the refrigeration system [C]// HVAC Branch of the Architecture Society of China, Air-conditioning Heat Pump Technical Commission of Chinese Association of Refrigeration. Hangzhou: Chinese Association of Refrigeration, 2010:168.)

[4] 马克臣, 臧润清. 泵与压缩机双动力直膨式制冷系统的分析研究[J]. 低温与超导, 2014, 42(4): 57-61. (MA Kechen, ZANG Runqing. Performance analysis and study on the dual power direct expansion refrigeration system of pump and compressor[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2014, 42(4): 57-61.)

[5] 许梦玫, 翟晓强, 李国柱, 等. 数据中心冷却技术的研究进展[J]. 建筑科学, 2018, 34(8): 124-132. (XU Mengmei, ZHAI Xiaoqiang, LI Guozhu, et al. Research progress in cooling technology of data centers[J]. Architecture Science, 2018, 34(8): 124-132.)

[6] 顾小杰. 哈尔滨大型数据机房新风空调系统节能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016. (GU Xiaojie. Energy-saving research in data center with fresh air system in Harbin [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.)

[7] 王飞, 王君, 史作君, 等. 热管型机房空调系统设计与分析[J]. 制冷与空调(北京), 2018, 18(5): 4-8. (WANG Fei, WANG Jun, SHI Zuojun, et al. Design and analysis on heat pipe type air-conditioning system in IDC room [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2018, 18(5): 4-8.)

[8] 王蒙. 35 kW 数据中心热管复合型空调模块设计研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013. (WANG Meng. Design and study of 35 kW composite air conditioning module with heat pipe for data center [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.)

[9] 石文星, 韩林俊, 王宝龙, 等. 热管/蒸汽压缩复合空调原理及其在高发热量空间的应用效果分析[J]. 制冷与空调(北京), 2011, 11(1): 30-36. (SHI Wenxing, HAN Linjun, WANG Baolong, et al. Principle of combined air conditioner by heat pipe and vapor compression and its application analysis in high heat density space[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2011, 11(1): 30-36.)

[10] KOHATA Y, UDAGAWA Y, SEKIGUCHI K, et al. Characteristics of air-cooled package air conditioners with refrigeration pump for data centers[J]. Ashrae Transactions, 2015, 121(1): 430-439.

[11] 张卓. 基于自然冷能利用的氟泵/蒸汽压缩复合制冷系统实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

- (ZHANG Zhuo. Experimental study on an integrated system of refrigerant pump and vapor compression based on utilization of natural cold energy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.)
- [12] 何俊,陶乐仁,虞中旸. 变流量制冷系统循环性能稳定性的实验研究[J]. 热能动力工程, 2018, 33(7): 1-6, 121. (HE Jun, TAO Leren, YU Zhongyang. Experimental study on stability of cyclic performance of refrigeration system with variable refrigerant flow[J]. Thermal Energy Engineering, 2018, 33(7): 1-6, 121.)
- [13] 郭怀远, 郭宪民, 黄康. 蒸发温度对空调冷柜双联机组性能影响的实验研究[J]. 低温与超导, 2018, 46(4): 92-96. (GUO Huaiyuan, GUO Xianmin, HUANG Kang. Experimental study on effect of evaporation temperature on the performance of combined air-conditioner and freezer system[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2018, 46(4): 92-96.)
- [14] 数据中心设计规范:GB 50174—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2008. (Code for design of data centers: GB 50174—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.)
- [15] 翁文兵, 王瑾竹, 蒋能照. 电子膨胀阀的制冷剂流量特性的试验研究[J]. 流体机械, 1998, 26(10): 58-61. (WENG Wenbing, WANG Jinzhu, JIANG Nengzhao. Experimental study on refrigerant flow characteristics of electronic expansion valve[J]. Fluid Machinery, 1998, 26(10): 58-61.)
- [16] 张川, 马善伟, 陈江平, 等. 电子膨胀阀节流机构流量特性的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(2): 291-296. (ZHANG Chuan, MA Shanwei, CHEN Jiangping, et al. Experimental research on the flow characteristic of electronic expansion valve[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006, 40(2): 291-296.)
- [17] 胡朝发, 陈华康, 汪俊勇. 电子膨胀阀和毛细管在定频空调器中的应用分析[J]. 制冷与空调(北京), 2015, 15(12): 17-20. (HU Chaofa, CHEN Huakang, WANG Junyong. Application analysis of electronic expansion valve and capillary to fixed-frequency air-conditioner[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2015, 15(12): 17-20.)
- [18] 刘蓉. 涡旋制冷压缩机变工况特性数值研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017. (LIU Rong. Numerical investigation on characteristics of scroll compressor under variable operating conditions[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.)

通信作者简介

刘金平, 男, 教授, 博士生导师, 华南理工大学电力学院, 13501546214, E-mail: mpjpliu@scut.edu.cn。研究方向: 制冷空调系统的优化设计与控制。

About the corresponding author

Liu Jinping, male, professor, Ph. D. supervisor, School of Electric Power, South China University of Technology, + 86 13501546214, E-mail: mpjpliu@scut.edu.cn. Research fields: optimization design and control of refrigeration and air conditioning systems.