

文章编号:0253-4339(2015)03-0029-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.03.029

机械制冷/回路热管一体式机房空调系统研究

张海南^{1,2} 邵双全¹ 田长青¹

(1 中国科学院理化技术研究所 北京 100190; 2 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 降低数据中心冷却系统能耗,已成为节能减排的迫切要求。热管自然冷却是降低这一能耗的有效方法之一。为解决热管自然冷却在炎热季节需要机械制冷辅助的问题,进一步提升热管自然冷却的节能潜力,本文提出一种新型机械制冷/回路热管一体式机房空调系统。利用三介质换热器将机械制冷回路和回路热管耦合起来,实现了二者的同时或单独工作,避免了现有系统依赖电磁阀切换带来的可靠性隐患。利用焓差实验台对系统性能进行了实验研究。实验结果表明,系统最佳充液率为 100% 左右。三个工作模式均具备良好的制冷能力,热管模式 EER 值在 20 ℃ 温差下达 20.8。以济南地区的数据中心为例进行了全年能耗计算,计算结果表明这一新型系统与传统空调系统相比节能 40%,有着良好的应用前景。

关键词 机房;空调;热管;机械制冷;一体式

中图分类号:TU831.8; TQ051.5; TP308 **文献标识码**:A

Performance Analysis on Integrated System of Mechanical Refrigeration and Thermosyphon

Zhang Hainan^{1,2} Shao Shuangquan¹ Tian Changqing¹

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing, 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract Cutting down the energy consumption of air conditioners in data centers is an urgent need for realizing emission control targets. Thermosyphon (heat pipe) free cooling is one of the effective methods. To solve the need of mechanical refrigeration in hot seasons and improve the energy-saving rate of thermosyphon free cooling, a new type integrated system of mechanical refrigeration and thermosyphon is proposed. A three-fluid heat exchanger is used to connect the mechanical refrigeration loop and thermosyphon loop, achieving the simultaneous work of refrigeration and thermosyphon and avoiding the risk brought by solenoid valve. The performance of the system is tested in an enthalpy difference lab. The results show that the best filling ratio is 100%. The three working modes all have sufficient cooling capacity. The EER of thermosyphon mode reaches 20.8 when the indoor and outdoor temperature difference is 20 ℃. The simulation results of a data center in Jinan show that the new system saves 40% energy of a year compared to traditional ones and have great application potential.

Keywords computer room; air conditioner; thermosyphon; mechanical refrigeration; integrated system

信息技术的兴起给人类的生活带来了巨大变革,数据中心的概念和建设也逐渐受到重视。数据中心包括所有含有数据服务器、通信设备、冷却和供电设备的建筑、厂房等^[1]。在带来变革的同时,数据中心的迅速扩张也产生了日益严重的能源问题。2000—2005 年,全世界数据中心能耗翻了一倍;2005—2010 年,数据中心能耗增长趋势受经济危机影响有所减缓,但仍然增长了 56%,2010 年已占全球能耗总量的 1.3%^[2]。美国数据中心能耗更是由 2000 年占总能耗的 0.12% 增长到 2010 年的约 2%^[2-3]。在数据中心能耗的组成中,制冷系统能耗占相当大的部分,约占数据中心总能耗的 30%~45%^[4-5]。因此,采用先进的节能冷却技术合理地控制和降低冷却系统的能耗,从而降低数据中心总能耗,不仅仅可以为企业节约运营成本,更有推进节能减排的重要意义。

目前,机房空调系统多采用恒温恒湿的空调设备,通过电力驱动压缩机做功制造低温冷源,通过冷热通道送回风的方式将机房内产热排出室外,并维持

室内的湿度稳定。采用这种传统的空调方式进行数据中心环境控制的能源利用率较低,消耗大量电能。而对于绝大多数地区来说,全年有相当多的时间室外气温低于数据中心室内温度。利用自然界的低温冷源进行冷却的方案称为自然冷却。它可以降低机械制冷的运行时间,所以节能的潜力非常大。

数据中心的自然冷却方案主要可以分为空气侧节能自然冷却、液体侧节能自然冷却和基于热管技术的自然冷却^[6]。由于热管受地域影响小、效率高,同时不会引入室内污染物,近年来热管自然冷却技术受到广泛的关注,很多学者开始进行这方面的研究。田浩等^[7-8]研发了热管空调系统,将其作为空气压缩机组的辅助,得到了比较好的节能效果,进一步研究了热管空调系统的最佳充液率。李奇贺等^[9]、金鑫等^[10-11]也先后提出了不同的热管空调系统形式。周峰等^[12-13]则着重分析了 IDC 机房内热管换热器和空调各自的散热负荷和能耗特性,以及围护结构、设定温度和室外温度对系统的影响。由于热管自然冷却系统需要一定的室内外温差才能工作,因此在室外温度较高的季节需要机械制冷的辅助,这无疑增加了系统的复杂性和投资。研究开发同时具有机械制冷和热管冷却功能的机房空调系统成为必然趋势。韩林俊等^[14]提出了一种热管/蒸汽压缩复合空调系统,系统利用电磁阀实现了蒸汽压缩和热管工作模式的切换,获得了良好的节能效果。王蒙^[15]在重力回路热管循环中增加了一个换热器,同时作为热管循环的冷凝器和机械制冷循环的蒸发器,得到了另一种热管复合式空调,实现了热管与机械制冷同时运行。但增加换热器导致热管回路流阻增加,使热管回路难以自然循环,需要采用氟泵驱动强制循环,在一定程度上降低了节能效果。

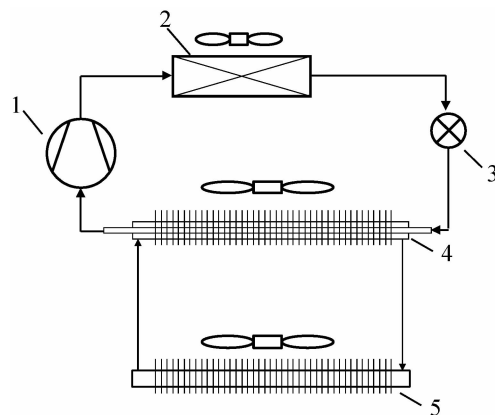
现有的机械制冷/回路热管一体式空调不能实现热管自然循环和机械制冷的同时工作,过渡季节的节能效果受到限制;同时,电磁阀的频繁开闭带来了潜在的安全隐患。为解决现有系统存在的问题,本文提出了一种新型机械制冷/回路热管一体式机房空调系统,对系统充液率进行了优化,同时对系统在不同工况下的性能进行了测试,并计算了系统的全年能耗及节能效果。

1 系统原理

机械制冷/回路热管一体式机房空调系统原理如图 1 所示。

系统利用三介质换热器将一个机械制冷回路和回路热管回路耦合起来。三介质换热器采用翅片管

式,内管为制冷剂通道,外管和内管之间的环形通道为热管工质通道,外管外侧嵌套翅片,为空气通道。机械制冷回路由压缩机、冷凝器、节流阀和三介质换热器的制冷工质通道组成。回路热管回路由三介质换热器的回路热管工质通道和蒸发器组成。蒸发器安装在室内,其余装置安装在室外。系统有三种工作模式:热管模式、制冷模式和双启模式。



1 压缩机 2 冷凝器 3 节流器 4 三介质换热器 5 蒸发器

图 1 系统原理

Fig. 1 Schematic diagram

根据机房设定温度和室外温度选择不同的工作模式。1) 当室外温度较高时运行制冷模式:启动压缩机,机械制冷回路内的制冷工质在三介质换热器内从回路热管工质吸热,回路热管回路的工质在室内蒸发器内吸收机房的排热蒸发后流入三介质蒸发器,向机械制冷回路的制冷工质放热冷凝,冷凝后的冷凝液在重力作用下回流至蒸发器,以便于继续蒸发。2) 在室外温度足够低时运行热管模式:关闭压缩机,仅开启三介质换热器的风机,此时回路热管回路的工质在回路热管通道内仅与室外空气通道中的冷空气进行换热冷凝,并在重力作用下回流。3) 在中间温度时运行双启模式:启动压缩机和三介质换热器的风机,利用制冷工质和室外冷空气同时冷却三介质换热器的热管工质,即回路热管制冷量的不足由机械制冷来补充。

2 性能测试

采用焓差实验台进行性能测试,蒸发器置于室内环境室,其余装置置于室外环境室。三介质换热器与室内蒸发器保持一定的高度差,以克服内部自然循环流动阻力。实验工况如表 1 所示。

热管模式制冷量是系统性能的重要指标,充液率(即 20 ℃ 条件下,系统所充液体总体积占蒸发器容积的百分比)对热管模式制冷量有显著影响,因此首

先对系统最佳充液率进行了研究。在室内温度 27℃,室外温度 17℃下,热管模式制冷量随充液率的变化如图 2 所示。随着充液率的增加,热管模式制冷量先增加后降低,最佳充液率约为 100%。这是由于充液率较小时液膜不能完全覆盖蒸发器壁面,存在明显的过热现象;充液率过大时大量液体积聚在蒸发器内,使换热不完全为两相换热。

表 1 实验工况
Tab.1 Test conditions

模式	热管	制冷	双启
室内干球温度/℃	27	27	27
室内湿球温度/℃	19.54	19.54	19.54
室外干球温度/℃	7~22	17~35	12~22
蒸发器风量/(m ³ /h)	2700	2700	2700
三介质换热器风量/(m ³ /h)	4009	0	4009
机械制冷回路冷凝器风量/(m ³ /h)	0	2600	2600

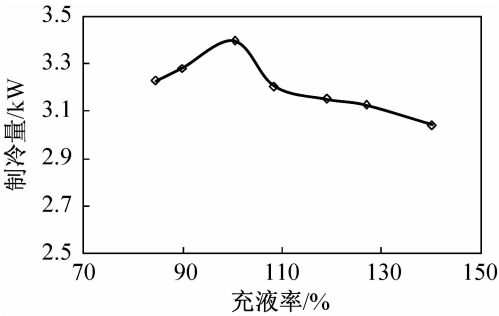


图 2 热管模式制冷量随充液率的变化
Fig.2 Cooling capacity of thermosyphon mode varies with the filling ratio

设定充液率为 100%,分别测试热管、制冷和双启工作模式下,系统的制冷量和耗功,结果分别如图 3、图 4 和图 5 所示。

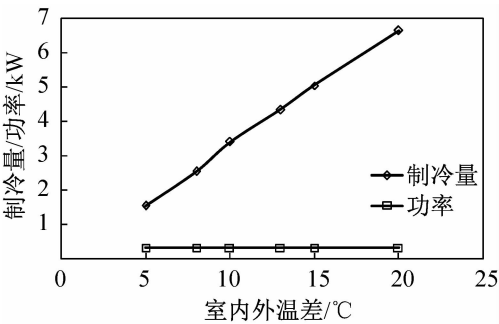


图 3 热管模式制冷量和功率随室内外温差的变化
Fig.3 Cooling capacity and input power of thermosyphon mode varies with temperature difference

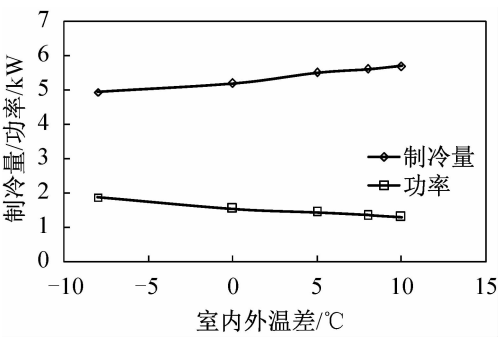


图 4 制冷模式制冷量和功率随室内外温差的变化
Fig. 4 Cooling capacity and input power of refrigeration mode varies with temperature difference

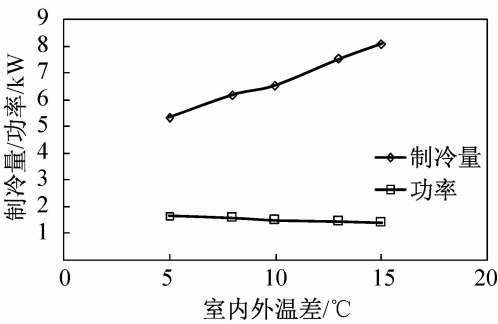


图 5 双启模式制冷量和功率随室内外温差的变化
Fig.5 Cooling capacity and input power of dual mode varies with temperature difference

热管模式下,系统制冷量随室内外温差的增大以近似线性的趋势增加,由于仅有风扇耗功,功率保持在 0.3 kW。20℃温差下制冷量达 6.6 kW,能效比 EER 达 20.8。具有足够的自然冷却能力和较高的 EER 值。制冷模式的制冷量随室内外温差增加(即室外温度降低)略微升高。制冷量在所测试的温度范围始终高于 4.5 kW,保证了炎热季节的制冷能力。由于需要压缩机制冷,功率大于热管模式。双启模式由于同时利用机械制冷和室外自然冷源,制冷量最大,在 15℃温差下制冷量已达 8.0 kW。随着室内外温差增大,制冷量有所上升,但上升幅度小于热管模式。实际应用中,可以采用变频压缩机以降低双启模式中机械制冷功耗和制冷量,作为热管的辅助,补充热管冷却在过渡季节的不足。

从图 4 和图 5 可以看出:在 5℃温差下,双启模式的制冷量反而略低于制冷模式。这是由于双启模式下,当三介质换热器温度低于外界环境温度时,风机开启反而会造成冷量的散失。进一步的实验研究表明在室内外温差低于 7℃时会发生这一现象。因此,双启模式运行时室内外温差需要大于这一临界温度值,避免浪费能源。制冷模式下,室外温度较高,三

介质换热器与空气会产生自然对流换热造成冷量流失。实验表明,这一冷量散失不超过6%。在炎热季节可以将三介质换热器翅片包裹绝热材料,减小冷量损耗。

3 全年能耗分析

根据 GB/T 19413—2010《计算机和数据处理机房用单元式空气调节机》全年能效比的定义^[16],全年能效比 AEER 的计算方法为:

$$AEER = \alpha_a \times EER_a + \alpha_b \times EER_b + \alpha_c \times EER_c + \alpha_d \times EER_d + \alpha_e \times EER_e \quad (1)$$

式中: $EER_a \sim EER_e$ 为室内环境温度 24 °C,室外为 35 °C、25 °C、15 °C、5 °C、-5 °C 时机组的 EER 值; $\alpha_a \sim \alpha_e$ 为相应的温度分布系数。根据实验结果将本系统的制冷量和 EER 值拟合合成室内外温差的函数,前三个工况工作在制冷模式,后两个工况工作在热管模式,则全年能效比: $AEER = 2.32 \times 7.2\% + 3.17 \times 28.1\% + 4.09 \times 23.1\% + 17.71 \times 21.0\% + 27.35 \times 20.6\% = 11.4$ 。

为了进一步讨论系统的节能潜力,对系统全年能耗进行了计算。设某小型数据中心设备发热量为定值 4.0 kW,内温设定为 27 °C,以山东济南的天气数据^[17]为例。系统按照如下策略进行工作:在制冷量满足条件的情况下选择 EER 最高的模式。即当热管模式制冷量大于 4.0 kW 时工作在热管模式,否则选择双启模式或制冷模式中 EER 更高时进行工作。则每一时刻的功耗为:

$$P = Q/EER \quad (2)$$

其中, $Q = 4.0$ kW。计算得到系统逐时能耗如图 6 所示。图中曲线在某些时间大幅下降是由于在寒冷天气,热管模式制冷量可以满足冷却需求,系统依靠热管冷却从而所消耗的功率大幅下降。设传统机房空调全年能效比为 3.5,与其相比可节能 40%,每

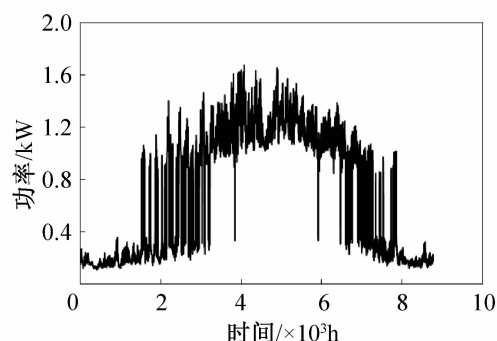


图6 功率随时间的变化

Fig. 6 Input power changing with time

年约 3950 kW·h。在气候更寒冷的地区,由于热管的制冷能力更大,节能效果更为明显。可见,本系统具有良好的节能潜力。

4 结论

本文创新性地提出了一种机械制冷/回路热管一体式机房空调系统,采用三介质换热器将蒸汽压缩制冷循环与重力回路热管循环耦合起来,实现了良好的匹配和节能效果。主要结论如下:

1) 室内外温差一定时,回路热管循环制冷量随充液率先增加后减小,最佳充液率为 100%。

2) 热管模式的制冷量随室内外温差增大近似线性增加,20 °C 温差下制冷量达到 6.6 kW, EER 达到 20.8。较为充足的制冷量保证了良好的节能潜力。制冷模式的制冷量在 4.5 kW 以上,保证了炎热季节的温度控制能力。双启模式的制冷量最大,在过渡季节利用热管冷却作为机械制冷的补充,扩大了热管的使用时间。

3) 对于济南地区的天气条件,本系统比传统系统节能 40%,在数据中心机房有着良好的节能前景。

参考文献

- [1] Code of conduct on data centres, energy efficiency-Version 2.0[R]. European Commission, 2009.
- [2] Jonathan Koomey. Growth in data center electricity use 2005 to 2010 [EB/OL]. (2011-08-01) [2014-10-28]. <http://www.analyticspress.com/datacenters.html>.
- [3] Mitchell-Jackson J, Koomey J G, Blazek M, et al. National and regional implications of internet data center growth in the US[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 36(3): 175-185.
- [4] 安真. 数据中心的节能分析[J]. 智能建筑电气技术, 2011, 5(5): 62-64. (An Zhen. Analysis on energy-conservation of datacenter project[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2011, 5(5): 62-64.)
- [5] 李智. 下一代通信机房及 IDC 数据中心能源成本战略[C]//第十届中国科协年会信息化与社会发展学术讨论会分会场论文集. 北京: 国防工业出版社, 2008: 458-462.
- [6] Zhang H, Shao S, Xu H, et al. Free cooling of data centers: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 35: 171-182.
- [7] 田浩, 李震, 刘晓华, 等. 信息机房热管空调系统应用研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 141-145. (Tian Hao, Li Zhen, Liu Xiaohua, et al. Study on thermosyphon air conditioning system of IT rooms[J]. Building Science, 2010, 26(10): 141-145.)

- [8] 钱晓栋, 李震, 李志信. 数据机房热管空调系统的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(7): 1217-1220. (Qian Xiaodong, Li Zhen, Li Zhixin. Experimental study on data center heat pipe air conditioning system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(7): 1217-1220.)
- [9] 李奇贺, 黄虎, 张忠斌. 热管式机房空调性能实验研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(4): 145-148. (Li Qihe, Huang Hu, Zhang Zhongbin. Performance experiment of heat pipe type air conditioning units for computer and data processing rooms[J]. Journal of HV&AC, 2010, 40(4): 145-148.)
- [10] 金鑫, 瞿晓华, 祁照岗, 等. 分离式热管型机房空调性能实验研究[J]. 暖通空调, 2011, 41(9): 133-136, 73. (Jin Xin, Qu Xiaohua, Qi Zhaogang, et al. Performance experiment of separate heat pipe air conditioning units for electronic equipment rooms[J]. Journal of HV&AC, 2011, 41(9): 133-136, 73.)
- [11] 金鑫. 微通道型分离式热管通讯基站节能特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [12] 周峰, 田昕, 马国远. IDC 机房用热管换热器节能特性实验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(1): 111-117. (Zhou Feng, Tian Xin, Ma Guoyuan. Energy-saving performance of thermosyphon heat exchanger applied in internet data center[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(1): 111-117.)
- [13] Zhou F, Tian X, Ma G Y. Investigation into the energy consumption of a data center with a thermosyphon heat exchanger[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(20):

2185-2190.

- [14] Han L, Shi W, Wang B, et al. Development of an integrated air conditioner with thermosyphon and the application in mobile phone base station[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36: 58-69.
- [15] 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.
- [16] 全国冷冻空调设备标准化技术委员会. GB/T 19413—2010 计算机和数据处理机房用单元式空气调节机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [17] Song F T, Zhu Q F, Wu R H, et al. Meteorological data set for building thermal environment analysis of China [C]//Proceedings of the 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition. Beijing: IBPSA, 2007: 9-16.

通信作者简介

邵双全, 男, 博士, 副研究员, 中国科学院理化技术研究所, (010)82543433-8, E-mail: shaoshq@gmail.com. 研究方向: 变频多联机、太阳能空调、复杂制冷系统仿真、冷链和噪音控制。

About the corresponding author

Shao Shuangquan, male, Ph. D. / associate professor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, +86 10-82543433-8, E-mail: shaoshq@gmail.com. Research fields: variable refrigerant flow (VRF) refrigeration system, solar-assisted air conditioning system, numerical simulation of refrigeration and air conditioning systems, cold chains and noise control.

(上接第28页)

- [8] Jolly P G, Tso C P, Chia P K, et al. Intelligent control to reduce superheat hunting and optimize evaporator performance in container refrigeration[J]. HVAC&R Research, 2000, 6(3): 243-255.
- [9] Ekren O, Kucuka S. Energy saving potential of chiller system with fuzzy logic control[J]. International Journal of Energy Research, 2010, 34(10): 897-906.
- [10] Changenet C, Charvet J N, Gehin D. Study on predictive functional control of an expansion valve for controlling the evaporator superheat[J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2008, 222(16): 571-582.
- [11] Huelle Z R. The MSS-line a new approach to the hunting problem[J]. ASHRAE Journal, 1972(1): 43-46.
- [12] Chen Y M, Deng S M, Xu X G, et al. A study on the operational stability of a refrigeration system having a variable speed compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(8): 1368-1374.
- [13] Gruhle W D, Isermann H. Modeling and control of a refrig-

erant evaporator[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1985, 107(4): 235-240.

- [14] Aprca C, Renno C. Experimental analysis of a transfer function for an air cooled evaporator[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(4): 481-493.

通信作者简介

杨昭, 女, 教授, 博士生导师, 天津大学机械工程学院, 热能研究所, (022)27890627, E-mail: zhaoyang@tju.edu.cn. 研究方向: 生物冷藏保鲜及制冷热泵新技术, 环保制冷剂。

About the corresponding author

Yang Zhao, female, Ph. D., Thermal Energy Research Institute, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, +86 22-27890627, E-mail: zhaoyang@tju.edu.cn. Research fields: the technology of biological refrigerated store, the new technology of refrigeration and heat pump and the environmental protection refrigerants.