

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.10.008

数据中心浸没式相变冷却研究进展

Research progress of immersion phase-change cooling for data centers

赵田田^{1,2}, 王鲁元^{1,2*}, 张兴宇¹, 孙荣峰^{1,2}, 玄承博^{1,2},
耿文广^{1,2}, 程星星³, 王志强³

ZHAO Tiantian^{1,2}, WANG Luyuan^{1,2*}, ZHANG Xingyu¹, SUN Rongfeng^{1,2}, XUAN Chengbo^{1,2},
GENG Wenguang^{1,2}, CHENG Xingxing³, WANG Zhiqiang³

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院) a. 能源研究所; b. 能源与动力工程学院, 济南 250014; 2. 山东省能效与低碳工程
实验室, 济南 250014; 3. 山东大学 能源与动力工程学院, 济南 250064)

(1. a. Energy Research Institute; b. School of Energy and Power Engineering, Qilu University of Technology (Shandong
Academy of Sciences), Jinan 250014, China; 2. Energy Efficiency and Low-Carbon Engineering
Laboratory of Shandong Province, Jinan 250014, China; 3. School of Energy and Power
Engineering, Shandong University, Jinan 250064, China)

摘要:在互联网与5G技术的推进下,各产业数据中心的快速发展对高热流密度电子器件的散热需求提出了更高的要求。浸没式相变散热技术以其散热性能高、维护方便、噪音小等优势成为了研究热点。通过对浸没式相变冷却技术的原理、冷却材料的选择、沸腾换热机理、密封材料选择等的研究,对数据中心浸没式相变冷却技术的发展和研究现状进行系统探究,对数据中心高热散热技术的发展方向提出了展望。

关键词:浸没式相变散热;相变材料;散热;沸腾换热;数据中心;碳中和

中图分类号:TB 64; TK 124

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2021)10-0068-05

Abstract: With the advancement of Internet and 5G technology, the rapid development of data base stations in various industries puts forward higher requirements on the heat dissipation of electronic devices with high heat flux. Immersion phase-change heat dissipation technology has become hot issue because of its high heat dissipation performance, being convenient for maintenance and low noise. Based on the research on the principle, cooling material selection, boiling heat transfer mechanism and sealing material selection of the immersion phase-change cooling technology, the development and research status of the technology applied in data centers are systematically explored. Finally, the development direction of high heat dissipation technologies for digital base stations is prospected.

Keywords: immersion phase-change heat dissipation; phase-change material; heat heat dissipation; boiling heat transfer; data center; carbon neutrality

0 引言

随着计算机性能及计算设备集成度的提高,数据中心热流密度随之增加,对散热系统的要求也日益提高。由于传统的水冷、风冷等散热方式存在热点以及高能耗等问题,难于满足新兴电子器件的散热需求,浸没式相变散热技术随之发展起来。浸没式相变冷却系统主要由蒸发段、冷凝段以及循环系统组成,发热设备被浸泡在绝缘的惰性冷却液中,通过与冷却剂直接接触进行散热。该方式具有散

热性能好、能耗低等优势。

目前,浸没相变冷却技术正处于起步阶段。未来几年,随着智慧工业、云计算等技术的快速发展,以浸没式相变冷却为代表的新型散热技术必将成为数据中心的主流散热技术。本文以浸没相变冷却系统的主要结构和原理为切入点,从冷却材料的选择以及沸腾换热机理等方面分析了目前的研究重点和发展现状,并对浸没式相变冷却技术进行展望。

1 数据中心浸没相变冷却系统研究背景

随着近几年互联网技术的快速发展,5G、大数据、云计算广泛应用于我们的生产、生活,越来越多

收稿日期:2021-08-09;修回日期:2021-08-27

基金项目:山东省重点研发计划(国际合作)项目(2019GHZ2018)

的大规模数据中心不断涌现。相关预测表明,从2016年至2025年全球的数据中心总量将增长10倍,预计从2016年的16.1 ZB增长到163.0 ZB^[1]。同时,数据中心热流密度也呈逐年上升趋势。通常把热流密度在100~1 000 W/cm²的数据中心称为高热流密度数据中心^[2],其最显著的特点就是24 h不停机运行,因此需要向环境中排放大量的热量,这不仅给数据中心带来了巨大的压力,更加重了城市热岛效应,给环境造成一定的影响。为了缓解环境压力问题,世界主要国家都承诺在21世纪中期实现碳中和,我国争取于2060年前实现该目标^[3]。许多互联网科技(IT)集团积极响应国家号召,阿里巴巴、腾讯、蚂蚁集团等公司的大型数据中心都已启动碳中和计划,努力打造绿色数据中心^[4]。从国家政策来看,工信部发布的《关于数据中心建设布局的指导意见》中提出,新建数据中心的电源使用效率(PUE,即数据中心消耗的所有能源/IT负载消耗的能源)要低于1.50。数据中心最主要的部分为服务器、散热系统、通信设备以及照明系统,其能耗结构如图1所示。其中,散热系统耗能占数据中心总能耗的约40%,因此在降低能耗方面有很大的潜力。

学者们对数据中心的散热方式进行了大量的研究:对传统风冷散热进行了气流组织优化^[5],对水冷散热服务器加装了背板^[6],对热管散热技术^[7]、浸没式相变冷却以及余热回收^[8]等进行了多种降低能耗的技术研究。同时,国内外大型服务器厂商也在积极探究高效的散热方式。我国曙光公司曾推出一款浸没式散热服务器,如图2所示。该服务器可使数据中心机房的PUE值降至1.05,能耗较传统风冷型数据中心降低30%以上,经济效益显著。阿里巴巴推出的“麒麟”服务器不需要空调、风扇等附件设施,可在任何地方部署落地,节省空间75%以上,而且它的高度密封性使电子元件远离灰尘、湿度等因素的影响,免受外界干扰。除了散热设备之外,有的企业致力于冷却介质的研发,美国的3M公司研制了一种Novec冷却液,这种冷却液除了具有最基本的绝缘特性之外,沸点比常用冷却介质(如纯净水、氟化液、矿物油)的沸点更低^[9]。在各研究方向中,浸没式相变冷却技术由于具有散热性能高、维护方便、噪声小等优势,成为了目前研究的重点。

2 数据中心浸没相变冷却技术研究现状

2.1 浸没式相变冷却技术

浸没式冷却技术根据冷却液相态的种类可以分为单相浸没式冷却和两相浸没式冷却^[10]。单相

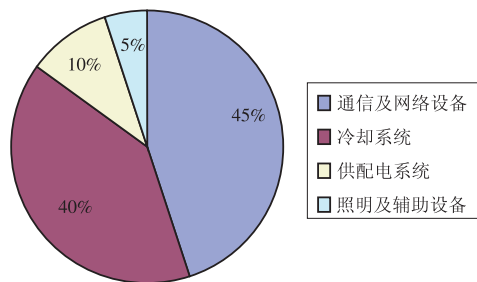


图1 数据中心能耗结构

Fig. 1 Data center energy consumption structure



图2 曙光浸没式服务器

Fig. 2 Sugon immersion server

浸没式冷却技术,即散热过程中冷却液没有发生相变,通过冷却液的显热吸收服务器产生的热量。两相浸没式冷却技术,即当冷却介质遇热时会发生相变,利用冷却剂的相变潜热,将服务器浸泡于低沸点、特性稳定的冷却剂中,当达到冷却剂的沸点时,在服务器表面发生沸腾相变带走热量;沸腾产生的蒸汽到达冷凝端温度在冷凝板完成冷凝,经过循环管路回到蒸发端;冷凝板中的冷却介质为水,通过外界冷却塔对其进行冷却(如图3所示)。

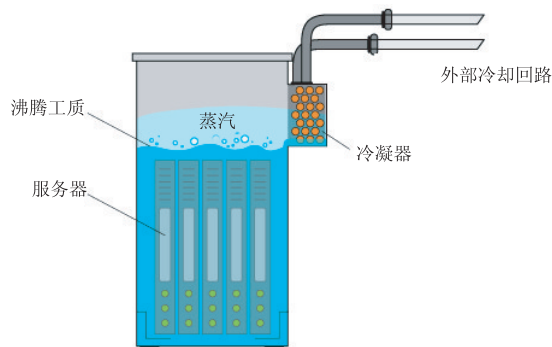


图3 浸没式相变冷却原理

Fig. 3 Principle of submerged phase-change cooling technology

Baris 等^[11]分别对单相浸没式冷却和两相浸没式冷却技术进行了热力学以及经济效益的评估,评估结果显示后者的性能趋势系数比前者高 72%,同时 Baris^[12]还通过试验,在 3.43~9.17 kW 范围内的 6 种不同实时、动态运行负荷下,对采用浸没式相变冷却的数据中心进行系统级热管理,研究其热力学和热经济性能。试验表明,在最高运行负荷时的最佳性能系数(COP)和 PUE 值分别为 6.67 和 1.15;在最低运行负荷时,最佳 COP 和 PUE 值分别为 2.50 和 1.40。雒志明等^[13]搭建了一套以 R134a 为冷媒的从机柜到室外环境的相变换热制冷循环系统,整个过程没有中间换热环节,通过焓差试验表明,其全年能效比达 20 以上。何恩等^[14]提出了一种以 R22 氟利昂为制冷剂的电子设备液体相变冷却方案,如图 4 所示,该方案与传统水冷散热方式相比散热能力增强至少 10 倍。

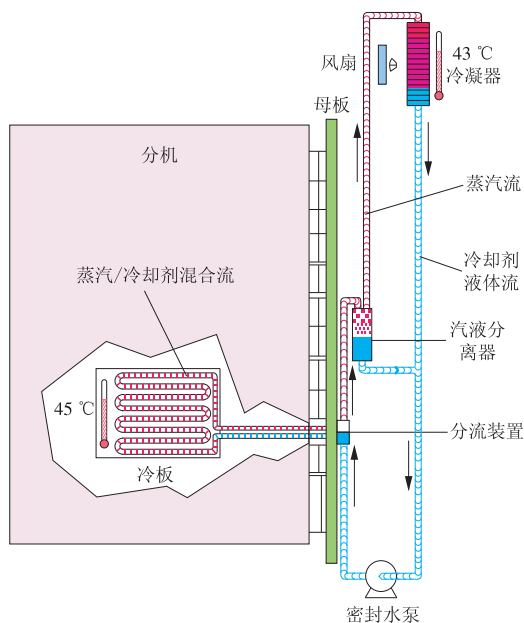


图 4 电子设备液体相变冷却方案

Fig. 4 Liquid phase-change cooling scheme for electronic equipment

2.2 冷却介质的选择

浸没式相变冷却系统装置需要较高的密封性,对硬件设施要求较高;同时冷却介质的选择也是浸没式相变冷却技术的关键。合格的冷却介质应具备以下特性。

(1)具有高汽化潜热,即同样的散热量使用更少的冷却介质,在提高散热效率的同时可减少泵、冷却塔等设备的额外能耗。

(2)在其液态、气态以及气液混合时都满足绝缘要求。

(3)应具有较低的沸点,当服务器温度不是很高时,冷却剂也可以发生稳定相变带走热量,保证

服务器温度稳定、数据中心正常运转。

(4)对服务器材料无腐蚀性。

(5)对环境友好,无毒无害,易处理。

(6)经济性高。

目前芳香族物质、硅酸酯类以及氟碳化合物都被列入浸没式相变冷却系统冷却介质的研究范围。矿物油以及氟化液是应用较为广泛的直接接触型冷却介质。矿物油价格低廉、对环境友好、无毒无害,但易分解且属于可燃物质,较危险。与矿物油相比,氟化物价格略高,但其性质稳定、具有阻燃性及合适的介电常数,成为目前最受欢迎的冷却介质。徐永生等^[15]利用针-板电极模拟常见的极不均匀电场环境,并搭建了基于 50 Hz 高压交流耐压测试系统的局部放电检测平台,来探究制冷剂沸腾对局部放电阈值的影响。研究表明,制冷剂的沸腾会降低绝缘环境的绝缘阈值。莫申扬^[16]等利用绝缘试验装置对 FC-72 制冷剂液态、气态及两相态展开了系统性的击穿特性研究,通过工频电压击穿试验获取了 FC-72 蒸汽的介电强度,实现了低沸点制冷剂蒸汽的多气压介电强度测试。吴曦蕾等^[17]模拟了 4 种常用的氟化液(FC-72, Novec649, HFE-7100 和 D-1)对浸没式相变冷却系统散热效果的影响。模拟结果显示, D-1 沸腾换热时所需的热流密度最小,但其最大散热能力与 Novec649 接近,略低于 FC-72 和 HFE-7100,可在浸没式相变冷却中替换现有的电子氟化液 Novec649。董进喜等^[18]通过试验的方式分析了合成烷基类冷却液(PAO)与“65 乙二醇类冷却液(以下简称“65”)的物理性能和热力学性能,“65”的散热能力高于 PAO,但 PAO 的物理稳定性和不导电性能高于“65”。现在对冷却介质的研究较少,需进行进一步研究,发现物理性质稳定、散热能力高的冷却介质。

2.3 沸腾换热机理研究

除了对冷却介质的选择,沸腾换热机理是浸没式相变换热技术中的重要理论支持。沸腾换热的不稳定性对换热效率有很大影响,研究沸腾换热的机理以及沸腾换热模型对浸没式相变换热技术的改进具有重要意义。沸腾换热机理非常复杂,尽管许多学者对其做了大量试验研究,得到许多数据,但目前尚没有完善的理论体系。

刘苗苗等^[19]分别以膜态沸腾模型和核态沸腾模型,模拟径向热管内液池的传热特性。模拟结果表明,核态沸腾模型与试验结果更加吻合,误差更小。而王迎慧等^[20]基于计算流体动力学(CFD)软件建立了一个波形微通道沸腾换热模型,模型示意图如图 5 所示,其中 λ 为波距, A 为波幅, q_w 为热流密

度。通过数值模拟的方法探究微通道形状对气泡生成以及沸腾换热过程的影响。模拟结果表明,与平直微通道相比,波形微通道更有利于气泡的脱离,使流动沸腾能够较好地维持在核态沸腾状态,而且能够维持流动沸腾的稳定性以及可靠性。而毕勤成等^[21]则探究了管道内尺寸对沸腾传热特性的影响,试验结果表明微小圆管的传热系数和临界热流密度值均随通道尺寸的减小而减小:当微小圆管的内径为 1.10 mm 时,低热负荷加热出现气泡阻塞,造成了沸腾滞后现象;而在内径为 1.55 mm 的圆管内没有出现这种现象。Deng 等^[22]建立了一种双导电表面的两相流沸腾换热理论模型,探究气泡结构尺寸对沸腾换热性能的影响。试验结果表明,与均匀表面相比,双导电表面的沸腾性能更高。

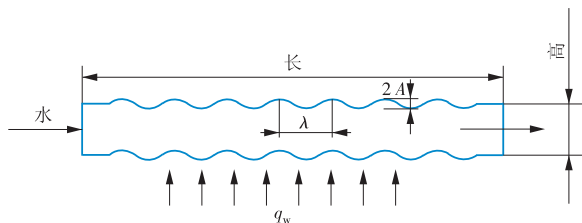


图 5 波形微通道流动沸腾换热模型示意

Fig. 5 Flow boiling heat transfer model in wavy microchannel

众多文献研究结果表明,沸腾换热效率高于传统换热方式,但其机理也更加复杂。受限于当前测试技术,我们对散热装置内部流动特性的认识还不够透彻。沸腾换热模型繁多,尚没有建立起通用的流动传热模型。

浸没式相变散热技术虽散热能力强,但是与其他新兴技术一样,尚在发展完善过程中,仍然存在一定的壁垒。例如,如何防止微通道中结构损坏以及数据包的丢失等都是浸没式相变技术发展的瓶颈。若是在传统散热机房基础上改造为浸没式散热机房,还要考虑机房地板的承重问题。

2.4 电子器件封装材料

对电子器件封装材料的选择与冷却介质同样重要。冷却系统除了选用合适的冷却介质外,还要确保封装材料不与冷却介质发生反应,同时要保证封装涂层厚度尽可能小,从而减少传热过程中的热阻。电子元件封装材料主要有 3 类,分别是金属基封装材料、陶瓷基封装材料和聚合物基封装材料^[23]。Birbarah^[24]等人对聚合物基封装材料性能进行了探究,设计了一套以水为冷却介质、以聚对二甲苯涂层为电子元件封装材料的冷却装置,通过试验验证了在 200 V 电压环境下,厚度为 1 μm 的聚对二甲苯涂层在水和电子器件之间防泄漏的有效性,但是该试验还缺少针对此聚合材料维持时间的

测试。

3 总结与展望

浸没式相变冷却技术因其散热效率高、噪音小以及缩小散热系统空间等优势,将会成为未来数据中心散热方式的首选。浸没式相变冷却技术的优化研究对改进我国能耗结构具有深远的意义。人们对冷却液的选择和沸腾换热机理探究进行了大量的试验,然而在其完善过程中存在一定的技术壁垒。服务器内部电场环境的复杂多变,对冷却介质性质的影响尚不明确,因此对冷却介质要求较高。目前没有找到绝缘良好、性质稳定、高潜热、可以代替氟化液的合格冷却介质。同时由于沸腾换热机理的复杂性,没有准确的通用机制模型来模拟内部沸腾换热。

对浸没式相变冷却技术进行进一步的优化,可提高其冷却效率,接下来的研究方向如下。

(1) 制备性质稳定的冷却介质,研究不均匀电场环境对冷却液性质的影响,对冷却介质展开高场强下的介电强度测试。

(2) 氟化液具有较强的挥发性,研发与之配套的散热装置密封材料。

(3) 通过试验进一步探究不同因素对微通道内气泡生成的影响,研究服务器表面沸腾换热的机理,从而建立更具有代表性的沸腾换热模型。

(4) 对电子器件封装聚合材料进行时间上的测试,保证其使用年限,减少服务器使用过程中的维护成本以及频繁维护造成的可靠性下降。

参考文献:

- [1] 刘嵩. 液/气双通道散热系统在数据中心的应用研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
- [2] 孙少鹏. 高热流密度电子元件喷雾相变冷却系统的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [3] 赵国涛, 钱国明, 王盛.“双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J]. 华电技术, 2021, 43(6): 11-20.
ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng. Analysis on green and low-carbon development path for power industry to realize carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 11-20.
- [4] 王月, 张一星, 李洁. 数据中心低碳发展分析与展望[J]. 通信世界, 2021(15): 42-44.
- [5] 李瑞. 基于 CFD 仿真的数据中心气流组织优化[D]. 济南:山东大学, 2020.
- [6] 罗浩文. 单元式数据机柜冷却系统研究[D]. 广州:广州大学, 2019.

- [7]郑思明. 热管技术在数据中心冷却系统中的应用[J]. 绿色科技, 2019(24): 187-188.
- [8]罗玉庆. 大型数据中心余热回收利用节能研究[J]. 节能, 2019, 38(8): 46-48.
LUO Yuqing. Energy-saving research on waste heat recovery and utilization in large data center [J]. Energy Conservation, 2019, 38(8): 46-48.
- [9]谢丽娜, 郭亮. 对液冷技术及其发展的探讨[J]. 信息技术与政策, 2019(2): 22-25.
- [10]韩冰冰. 数据中心液冷技术发展现状[J]. 智能建筑, 2020(8): 73-76.
HAN Bingbing. Development status of liquid cooling technology in data center [J]. Intelligent Building, 2020 (8): 73-76.
- [11]KANBUR B B, WU C, FAN S, et al. System-level experimental investigations of the direct immersion cooling data center units with thermodynamic and thermoeconomic assessments[J]. Energy, 2021, 217: 119373.
- [12]KANBUR B B, WU C, FAN S, et al. Two-phase liquid-immersion data center cooling system: Experimental performance and thermoeconomic analysis [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 118: 290-301.
- [13]雒志明, 张炳华. 基于相变冷却技术的数据中心新型制冷方案研究[J]. 信息技术与政策, 2021, 47(4): 38-42.
- [14]何恩, 肖百川, 李欣. 电子设备液体相变冷却技术研究[J]. 电子机械工程, 2017, 33(6): 40-42.
- [15]徐永生, 罗兵, 张福增, 等. 氟化液沸腾工况下的局部放电特性分析[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 128-134.
XU Yongsheng, LUO Bing, ZHANG Fuzeng, ZENG Xiangjun. Analysis on partial discharge characteristic of fluorinert liquid under boiling condition [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 128-134.
- [16]莫申扬, 张金强, 李学宝, 等. FC-72 介质液态、气态及两相态工频击穿特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(5): 77-83, 92.
MO Shenyang, ZHANG Jinqiang, LI Xuebao, et al. Study on power frequency breakdown characteristic of FC-72 medium in liquid, gaseous and two-phase state [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 77-83, 92.
- [17]吴曦蕾, 刘滢, 倪航, 等. 不同电子氟化液对浸没式相变冷却系统性能的影响[J]. 制冷学报, 2021, 42(4): 1-11.
WU Xilei, LIU Ying, NI Hang, et al. Effect of different electronic cooling liquid on the performance of immersion phase change cooling system [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(4): 1-11.
- [18]董进喜, 杨明明, 赵亮. 电子设备液冷散热的冷却液热学性能分析[J]. 电子科技, 2013, 26(4): 106-109.
DONG Jinxi, YANG Mingming, ZHAO Liang. Thermal performance analysis of electronic equipment liquid coolant [J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(4): 106-109.
- [19]刘苗苗, 马永康, 麻泽松, 等. 径向热管管内液池沸腾换热模型的探讨[J]. 工业炉, 2021, 43(3): 50-55.
LIU Miaomiao, MA Yongkang, MA Zesong, et al. Discussion on the liquid pool boiling heat transfer model in radial heat pipe [J]. Industrial Furnace, 2021, 43(3): 50-55.
- [20]王迎慧, 皇甫启捷. 波形微通道流动沸腾换热特性的数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 397-403.
WANG Yinghui, HUANGFU Qijie. Numerical simulation on flow boiling heat transfer characteristics in sinusoidal-wavy microchannel [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2019, 40(4): 397-403.
- [21]毕勤成, 赵天寿, 郭亚军, 等. FC-72 在浸泡于液池中的微小圆管内的沸腾传热[J]. 工程热物理学报, 2003(4): 609-612.
BI Qincheng, ZHAO Tianshou, GUO Yajun, et al. Boiling heat transfer inside miniature circular tubes immersed in FC-72 [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003 (4): 609-612.
- [22]DENG Z, LIU X, WU S, et al. Pool boiling heat transfer enhancement by bi-conductive surfaces [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 167: 107041.
- [23]WAN Y, LI G, YAO Y, et al. Recent advances in polymer-based electronic packaging materials [J]. Composites Communications, 2020, 19: 154-167.
- [24]BIRBARAH P, GEBRAEL T, FOULKES T, et al. Water immersion cooling of high power density electronics [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118918.

(本文责编: 陆华)

作者简介:

赵田田(1996—), 女, 山东东营人, 工学硕士, 从事浸没式相变散热技术方面的研究(E-mail: 1663798384@qq.com)。

王鲁元(1988—), 男, 山东德州人, 助理研究员, 工学博士, 从事低碳节能与环保工艺研发方面的工作(E-mail: luyuanwang1988@126.com)。