

高算力数据中心单相浸没液冷系统设计与试验研究

刘 展, 季沈蕊, 孙鑫山, 凌云志

(中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 随着人工智能(AI)、大数据、云平台对算力需求的大幅提升,传统风冷技术对IT机柜的冷却能力已达到极限,研究和开发液冷技术对降低数据中心能耗、提高能源利用效率具有重要意义。考虑到国内至今开展有关单相浸没液冷方面的科研与教学实验研究较少,该文通过合理设计、对比选型、系统调试等环节搭建了用于教学研究的综合单相浸没式液冷试验台,对数据中心液冷散热系统运行性能进行了深入探究和分析,评估了该系统的改进空间与应用潜力,相关工作一方面可为绿色数据中心的低碳高效运行提供技术支持,另一方面也可进一步完善数据中心液冷研究方面的科研与教学实践改革。

关键词: 高算力数据中心; 单相浸没液冷; 系统设计; 试验研究

中图分类号: TK32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2025)04-0037-05

在全球数字化的驱动下,世界正在进行新一轮科技产业革命。世界各地数据中心所存储和处理的数据量正呈指数型增长,我国数据中心的产业规模也随互联网的发展快速增长,超大型和大型数据中心逐步成为相关行业主流的数据运营基础设施,数据中心的维护成本与管理难度急剧上升^[1],高能耗、高产热、高碳排放成了数据中心亟待解决的关键技术难点。预计到2030年,我国的数据中心用电量将超过 4×10^{12} kWh,约占全国电力消费的4%^[2]。

目前,物联网技术正处于快速发展阶段,通过云端监控数据机房实现无人值守化的管理已成为数据中心智能化的必然趋势^[3]。在散热方面,传统风冷冷却方式具有适用性高、冷却可靠性高且初期投资和运维成本低的优势,并可通过在散热器中增加热管^[4]、使用蒸发式冷却器^[5],以及加强内部气流管理^[6]等方式进行系统的改进和优化。目前,国内风冷冷却数据中心比例达70%以上,然而风冷冷却这一技术仅在低算力的情况下具有优势,当算力提高、散热增加时,风冷冷却技术的弊端便显露无遗。随着AI、大数据、云平台对算力需求的大幅提升,传统风冷技术对IT机柜的冷却能力已达到极限,无法满足高功率、高密度IT设备(如微处理器^[7])的散热要求,不能有效控制IT设备的温升,给数据机柜带来了宕机风险。

为积极响应国家对数据中心电能利用效率(PUE)的高建设要求,我国数据中心机柜已从传统风冷模式转变成以冷板液冷为主、浸没液冷和风冷为辅的风液混合模式,高密度、高算力、高产热等多样性算力基础设施的更新替代有效地推动了液冷技术的发展。在我国“双碳”目标下,政府部门对数据中心PUE的监管日趋严格。液冷技术有效改善了传统风冷散热形式,可满足高密机柜、芯片级精确制冷的需求,具有节能高效、节省占地空间、低噪声等优点,从长远来看,浸没液冷将替代传统风冷并成为高算力数据中心的主流冷却降温形式。

1 研究现状

液冷冷却方式具有传热能力强、散热均匀、噪声低、能源利用效率高等优势,除了用于冷却IT设备,在电池热管理^[8]方面也有广泛的应用。液冷冷却可分为间接液冷和直接液冷两种模式,前者以冷板冷却为主,负责局部区域大功率电子芯片的高强度散热,在锂电池散热领域应用较广,但其系统较为复杂;而后者则是将服务器直接浸泡在冷却液中,通过冷却液循环带走IT设备的散热,以浸没液冷形式为主,主要被用于满足5 kW以上大功率服务器的散热需求^[9],该系统结构简单、占地面积小且运维方便。宋慧瑾等^[10]对

收稿日期: 2024-12-27

基金项目: 教育部产学研合作协同育人项目(220606517295317); 中国博士后面上项目(2023M743765)

作者简介: 刘展(1988—),男,山东鄄城,博士,副教授,主要研究方向为数据中心冷却,liuzhankd@cumt.edu.cn。

引文格式: 刘展,季沈蕊,孙鑫山,等.高算力数据中心单相浸没液冷系统设计与试验研究[J].实验技术与管理,2025,42(4):37-41.

Cite this article: LIU Z, JI S R, SUN X S, et al. System design and experimental study of single-phase immersion liquid cooling for high-computing-power data center[J]. Experimental Technology and Management, 2025, 42(4): 37-41. (in Chinese)

比了风冷和水冷两种冷却方式对笔记本电脑的降温效果,发现在运行大型游戏结束后,采用水冷冷却的计算机 CPU 温度比采用风冷冷却所对应的 CPU 温度降低了 5°C ,且散热速度更快。

浸没液冷又可分为单相冷却和两相冷却。单相浸没冷却 (SPIC) 指冷却剂仅以液态形式传热。部分研究学者对 SPIC 的运行性能进行了研究。Taddeo 等^[11]建立了 SPIC 系统的实验模型,探究了该模型对静态和动态工作负载下 SPIC 的响应情况。Huang 等^[12]模拟了泵驱动和浮力驱动式 SPIC 水箱,并证实泵驱动 SPIC 系统具有优良的散热效果。Li 等^[13]通过优化翅片高度、翅片间距、导热系数、挡板高度比、出口面积、入口流量和入口温度等参数提升了 SPIC 系统的运行性能。Cheng 等^[14]测试了不同材质散热器强制循环 SPIC 系统的运行性能,发现散热器材质对 SPIC 系统冷却效果的影响不大。相较两相浸没式冷却,SPIC 系统的换热特性略差^[15],但在流动稳定性、投资成本、安全性和可维护性方面具有优势,其更适合大规模商业应用。

目前,国内外对两相浸没液冷技术的研究相对成熟,而单相浸没液冷技术相关研究则较少。本文针对单相浸没液冷系统,在现有理论上合理设计方案、设备选型与系统调试,搭建了单相浸没液冷试验装置,深入探究了数据中心液冷系统的运行性能、评估了其改进空间及推广应用前景,在推动数据中心行业发展的同时,建立并完善了数据中心液冷研究型试验的教学实践模式。

2 试验系统设计

单相浸没液冷试验系统由一次侧冷却液系统、二次侧冷却水系统,以及监测系统组成,具体包括:冷却液 Tank、冷却液进液管路、冷却液出液管路、冷却液循环泵、板式换热器、冷却塔、冷却水出水管路、冷却水进水管路、冷却水泵、自来水管路,以及相应的监测设备,具体如图 1、图 2 所示。该 SPIC 系统设计散热量为 20 kW ,一次侧冷却液进、出口温度为 50°C 、 40°C ;二次侧冷却水进、出口温度为 15°C 、 20°C 。

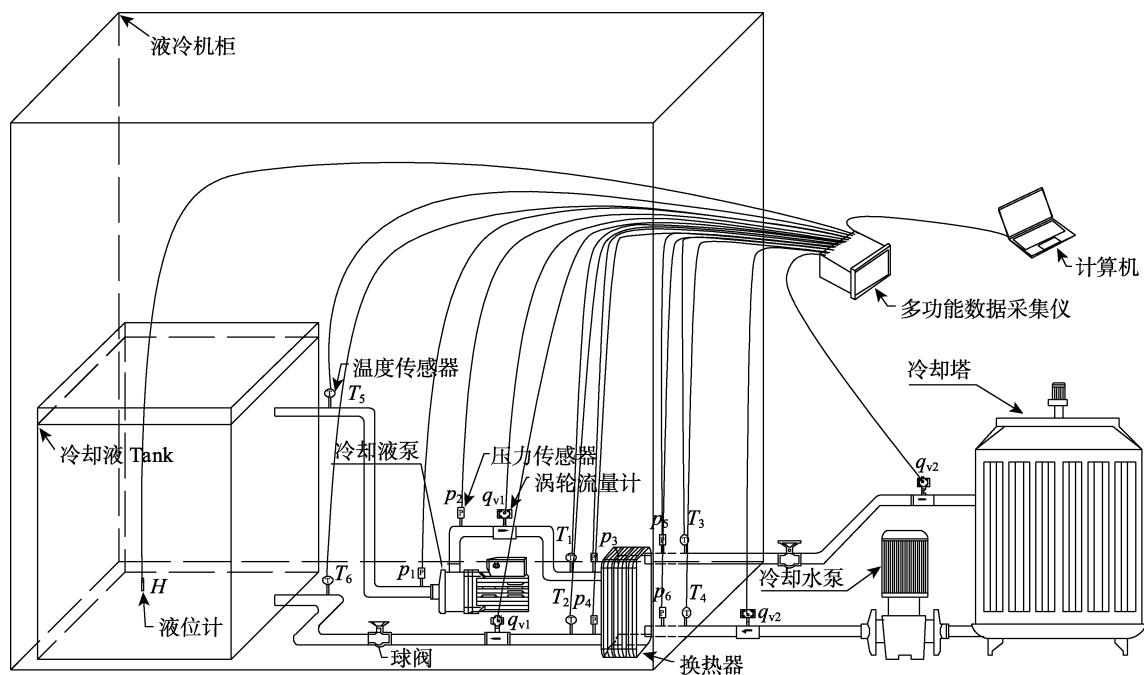


图 1 单相浸没液冷试验原理图

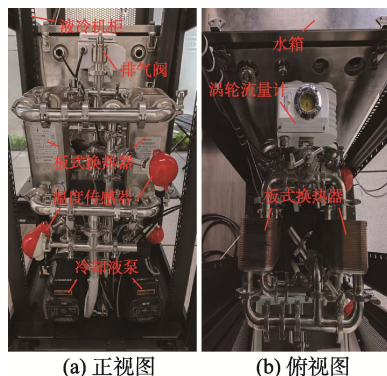


图 2 单相浸没液冷试验装置实物图

SPIC 冷却液 Tank 可容纳 12U 服务器, Tank 内存放冷却液并设有液位计, 通过冷却液进、出液管路与换热器相连接; 服务器直接浸没在冷却液中, 通过冷却液循环流动带走服务器散热。本试验中冷却液选用电子氟化液 Noah 3000D, 该液体为美国专利产品。在板式换热器中, 高温冷却液将服务器散热量转移到低温冷却水中, 再通过冷却塔散至大气中。氟化液进液管路上设有氟化液泵, 出液管路上设置 Y 形过滤器。冷却塔通过冷却水进、出水管路与换热器相连接, 其顶部设有喷淋泵, 底部接自来水管路; 冷却水泵被设

置于冷却水出水管路上。监测系统由温度传感器、压力传感器、涡轮流量计、液位计浓度传感器及数据采集仪组成,用于实时监测并记录试验数据,具体参数见表1。

表1 测量仪表

名称	类型	测量范围	精度
温度传感器	PT100 热电阻	-50~200 ℃	A 级
压力传感器	通用型压力变送器	-0.1~0.6 MPa	0.2%
流量计	涡轮式	2~20 m ³ /h	0.5%
液位计	投入式	0~3 m	0.5%

3 试验方案

3.1 试验内容

参照《单相浸没式液冷数据中心设计要求(报批稿)》(YD/T 0240—2021)建议,本工作搭建了真实单相浸没式液冷系统,通过重复试验验证其冷却效果,并根据具体问题提出相应改进措施。试验主要对不同服务器散热功率、不同冷却液循环流量、不同冷却水循环流量进行了变工况测试,测试过程中监测参数包括主要设备进出口温度、压降、耗电量、泵功率等。

3.2 试验步骤

试验操作主要包括试验前试车试验、正式试验与重复性试验等。正式试验开始前需对 SPIC 系统进行

打压保压试验、密封测试、仪器仪表准确度测试,以及试车试验,当一切正常后方可开始正式试验。正式试验采用电加热器模拟 IT 设备散热,通过控制冷却水阀门开度调节水流量,使系统分别在流量为 4.4、5.4 和 6.4 m³/h 三种不同工况下进行多次重复测试;当系统处于稳定运行时,通过数据采集仪收集和保存数据,并采用 MATLAB 进行数据处理。

4 试验结果与分析

4.1 流体温度与压降变化

不同工况下冷却液 Tank 进出口温度与冷却塔进出口温度的变化如图3所示。由图3可见,随着模拟加热的热量持续供给,冷却液 Tank 进出口温度与冷却塔进出口温度均先迅速增大,后逐渐减小,最后趋于稳定。当系统处于稳定运行时,随着冷却水循环流量的增大,氟化液与冷却水的进出口温度均出现明显降低。

在三种不同工况下,板式换热器两侧的压降与冷却液循环泵的压增随时间的变化如图4所示。试验初始阶段,换热器两侧压降基本无变化。电加热器通电后,流体温度迅速上升,氟化液侧压降逐渐减小,一段时间后压降变化率逐渐趋于0;而冷却水侧压降则几乎不受影响。随着冷却水流量的增大,氟化液侧压降基本无变化,而冷却水侧压降则显著增加,在工况3时达到最大值(约56.5 kPa)。

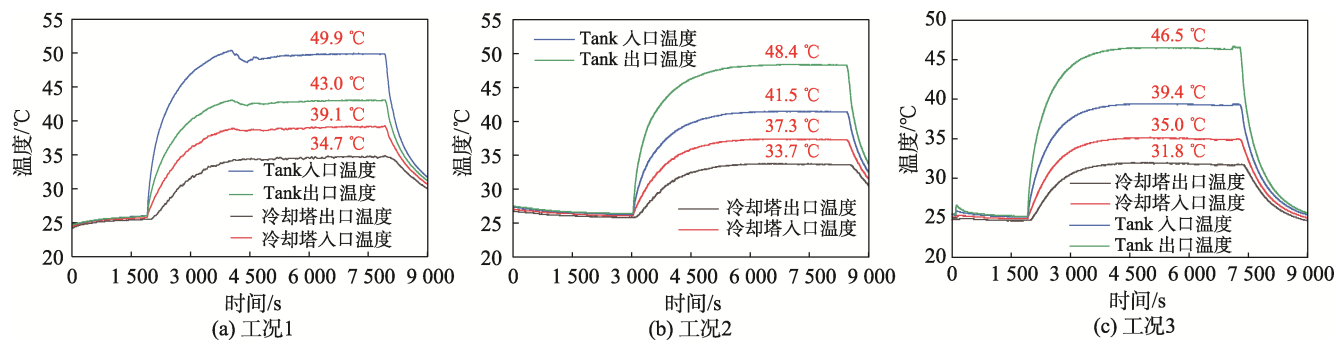


图3 三种工况下不同流体温度随时间的变化

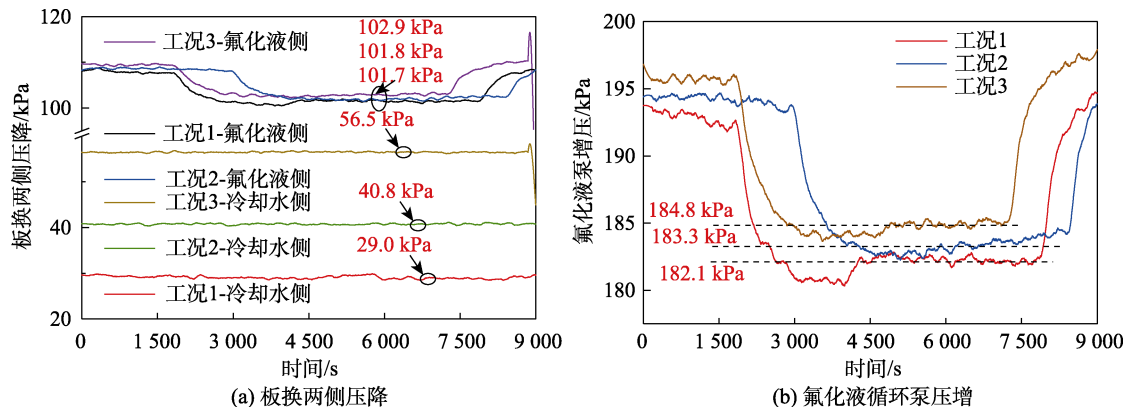


图4 三种工况下换热器两侧压降及冷却液泵压增随时间的变化

4.2 系统 PUE 与 COP 的变化

系统的电源使用效率^[12]PUE 按照式 (1) 计算。

$$PUE = P_{\text{total}} / P_{\text{IT}} \quad (1)$$

式中: P_{total} 为数据中心总能耗, 包括 IT 设备、空调、供配电系统和照明能耗, kW; P_{IT} 为 IT 设备能耗, kW。

试验中, 电表 1 与电表 2 的功率之和为总功率, 其中, 电表 1 负责监测冷却液循环泵与电加热器的耗电量, 电表 2 负责监测冷却水循环泵、冷却塔风机等其余用电设备的耗电量。

系统性能系数 COP 的计算方式如下。

$$COP = P_{\text{IT}} + P_{\text{cooling}} \quad (2)$$

式中: P_{cooling} 为冷却系统功耗, kW。

针对上述三种不同试验工况, 计算所得到的 SPIC 系统 PUE 和 COP 值如表 2 所示。由表 2 可知, 系统 PUE 在 1.08~1.09。该试验充分表明, 相较风冷系统 ($PUE \in [1.4, 1.6]$), SPIC 系统可将 PUE 降到 1.1 以下, 节能效果显著。随着冷却水循环流量的增加, 系统 COP 值呈现减小的趋势, 在工况 1 下取得最大值 6.40。

表 2 不同工况下系统 PUE 与 COP 值

工况	时刻/min	电表 1 示数/(kW·h)	电表 1 功率/kW	电表 2 示数/(kW·h)	电表 2 功率/kW	PUE	COP
1	130	501.9	23.90	198.0	2.0	1.08	6.40
2	140	539.9	23.47	204.9	2.0	1.09	6.36
3	120	577.6	23.87	210.5	2.2	1.08	5.68

4.3 泵功率的变化

冷却液循环泵的有效功率 P_e 为

$$P_e = L_f \Delta p \quad (3)$$

式中: L_f 为冷却液的流量, m^3/s ; Δp 为冷却液循环泵进出口的压差, kPa。

泵效率 η 表示泵有效功率与泵功耗 P 之比, 具体计算方式如下。

$$\eta = P_e / P \quad (4)$$

不同工况下泵效率的计算值如表 3 所示。由于试验所用循环泵为定频泵, 三种工况下泵效率均在 20% 左右。若采用变频泵, SPIC 系统的能耗将进一步降低, 系统 PUE 也将有所提高。

表 3 三种工况下泵效率

工况	泵功耗/kW	泵有效功率/kW	泵效率/%
1	1.50	0.313	20.87
2	1.46	0.317	21.71
3	1.70	0.319	18.76

5 结语

本工作在国内率先搭建了单相浸没液冷试验台用

于高校创新科研教学研究, 开展了变工况试验研究, 试验结果表明, SPIC 系统运行 PUE 可降至 1.08, 远低于常规风冷冷却系统, 验证了单相浸没液冷的高效冷却效率与推广应用潜力, 大幅改善了数据中心服务器的散热效率, 可作为研究型教学试验的经典案例。将单相浸没液冷技术的试验研究引入实验教学中可为学生积极探索数据中心高效冷却新领域提供广阔平台, 为构建低能耗、绿色环保的数据中心提供了技术支持。

参考文献 (References)

- [1] SUN X, LIU Z, JI S, et al. Experimental study on thermal performance of a single-phase immersion cooling unit for high-density computing power data center[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2025, 112: 10975.
- [2] LIU W, MAO H, CAO Y, et al. Long-term energy consumption forecasting for data center industry in China[C]//2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). New York, 2021: 4392–4397.
- [3] 彭灿华, 杨呈永, 张玉斌. 基于 HTML5 与物联网技术的大数据中心机房智能管理系统[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(4): 140–144.
- [4] PENG C H, YANG C Y, ZHANG Y B. Intelligent management system of computer room based on HTML5 and the internet of things technology in big data center[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2018, 37(4): 140–144. (in Chinese)
- [5] MOHAMMED R K, XIA Y, SAHAN R A, et al. Performance improvements of air-cooled thermal tool with advanced technologies[C]//2012 28th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM). New York, 2012: 354–361.
- [6] DUAN Z, ZHAN C, ZHANG X, et al. Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(9): 6823–6850.
- [7] ISAZADEH A, ZIVIANI D, CLARIDGE D E. Thermal management in legacy air-cooled data centers: An overview and perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 187: 113707.
- [8] BRILL K G. The invisible crisis in the data center: The economic meltdown of Moore's law[R]. New York: Uptime Institute, 2007.
- [9] 黄瑞, 舒雷, 陈俊玄, 等. 特种车辆电池热管理设计与实验研究[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(7): 30–36.
- [10] HUANG R, SHU L, CHEN J X, et al. Design and experimental study of battery thermal management for special vehicles[J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(7): 30–36. (in Chinese)
- [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] 宋慧瑾, 鄢强, 朱晓东, 等. 一种笔记本电脑水冷散热系统

- 设计及散热效果[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(3): 55–58.
- SONG H J, YAN Q, ZHU X D, et al. Design and research on the cooling effect of a computer water cooling system[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2017, 36(3): 55–58. (in Chinese)
- [11] TADDEO P, ROMANÍ J, SUMMERS J, et al. Experimental and numerical analysis of the thermal behaviour of a single-phase immersion-cooled data centre[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 234: 121260.
- [12] HUANG Y, GE J, CHEN Y, et al. Natural and forced convection heat transfer characteristics of single-phase immersion cooling systems for data centers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 207: 124023.
- [13] LI X, XU Z, LIU S, et al. Server performance optimization for single-phase immersion cooling data center[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 224: 120080.
- [14] CHENG C C, CHANG P C, LI H C, et al. Design of a single-phase immersion cooling system through experimental and numerical analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 160: 120203.
- [15] LIU Z, SUN X, JI S, et al. A multi-objective optimization of a single-phase immersion cooling system at cabinet level[J]. Energy and Buildings, 2024, 312: 114221.

System design and experimental study of single-phase immersion liquid cooling for high-computing-power data center

LIU Zhan, JI Shenrui, SUN Xinshan, LING Yunzhi

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: [Objective] With the rapidly increasing demand for high computing power and intelligent computing from artificial intelligence, big data, and cloud platforms, the cooling capacity of traditional air cooling technology for IT cabinets has reached its limit. The renewal and replacement of diverse computing infrastructure, such as high density, high computing power, and high thermal output, have effectively promoted the development of liquid cooling technology. Liquid cooling technology effectively improves the traditional form of air cooling and can meet the precise cooling needs of high-density cabinets and chip levels. Depth research and development of liquid cooling technology are crucial for reducing data center energy consumption and improving energy utilization efficiency. Thus far, no teaching or research experiments on single-phase immersion liquid cooling have been conducted in Chinese universities. [Methods] A comprehensive single-phase immersion liquid cooling test bench for teaching and research was constructed in this study. The detailed thermal performance was analyzed, and the associated calculation was carried out to select the circulation pump, plate heat exchanger, cooling tower, heating device, and other heat transfer equipment to establish the single-phase immersion liquid cooling system. The coolant was comparatively selected from fluorinated liquid, deionized water, and mineral oil based on the fluid thermal physical properties, fluid motion characteristics, heat exchange performance, and operational stability. Three circulation mass flow rates were designed to compare the performance difference of the proposed single-phase immersion liquid cooling unit. The circulation mass flow rate, fluid pressure, liquid height, and power consumption were monitored and utilized to control and reflect the detailed operation of the single-phase immersion liquid cooling system. After reasonable design, comparative selection, and device connection, both the primary side cooling water cycle and the secondary side coolant cycle were assembled. After the gas injection pressure and water injection tests, the airtightness and compressive strength of the established experimental system were confirmed. Meanwhile, system debugging was conducted to test the accuracy and sensitivity of the monitoring system. [Results] With the circulation mass flow rate of cooling water varying from $4.4 \text{ m}^3/\text{h}$ to $6.4 \text{ m}^3/\text{h}$, the temperatures of the inlet and outlet of the coolant and cooling water have been reduced. For pressure loss, the pressure difference on the coolant side was nearly uninfluenced, whereas the maximum pressure drop was approximately 56.5 kPa on the cooling water side, with a mass flow rate of $6.4 \text{ m}^3/\text{h}$. The power usage efficiency of the proposed single-phase immersion cooling system was varied in the range of 1.08–1.09. The coefficient of performance of the cooling system decreased from 6.4 to 5.68, with the cooling water mass flow rate increasing from $4.4 \text{ m}^3/\text{h}$ to $6.4 \text{ m}^3/\text{h}$. The efficiency of the circulation was evaluated and determined to be approximately 20% for three operation cases. [Conclusions] Generally, the performance of the single-phase liquid cooling and heat dissipation system utilized for high-computing-power data centers is thoroughly explored and analyzed, and its improvement space and application potential are evaluated. On the one hand, the present work can provide technical support for the low-carbon and efficient operation of green data centers. On the other hand, the present work can further improve the teaching practice reform of liquid cooling research-oriented experiments in data centers.

Key words: high-computing-power data center; single-phase immersion liquid cooling; system design; experimental study

(编辑: 张利芳)