文章编号：1672-9897(2026)02-0072-09 doi: 10.11729/syltlx20240017

单相浸没式液冷系统的流动传热特性实验研究

徐世杰，黄永平，张程宾*

东南大学 能源与环境学院，南京 210096

摘要：为解决数据中心的能耗问题，本文基于实验平台对单相浸没式液冷（Single-Phase Immersion Liquid Cooling, SPILC）系统进行研究，分析了冷却液体积流量和模拟芯片功率对 SPILC 系统性能的影响机制。研究结果表明：与出水口区域相比，位于进水口区域的芯片传热受器件排布位置的影响更大；随着冷却液流量增大，芯片壳温先升高后降低；存在一个临界流量，超过该流量后，继续增大流量也不会明显改善 SPILC 系统的性能；随着功率增大，芯片壳温显著升高，且在较低流量下，温度升高的幅度更大；当流量不超过 4.0 L/min 时，芯片功率对系统压降几乎没有影响；芯片总功率较低时，冷却液流量对 SPILC 系统能效影响很大，但这种影响随着芯片功率增大而大幅减弱。

关键词：传热；单相浸没式液冷；数据中心；能耗；芯片壳温；芯片功率；冷却液

中图分类号：TB64；TK124；V21 **文献标识码：**A

Experimental study on flow and heat transfer characteristics of Single-Phase Immersion Liquid Cooling systems

XU Shijie, HUANG Yongping, ZHANG Chengbin*

School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: To address the energy consumption issue in data centers, this study investigates the Single-Phase Immersion Liquid Cooling (SPILC) system by an experimental platform. The influential mechanisms of the coolant flow rate and chip power on the SPILC performance are analyzed. The results indicate that the heat transfer of chips located at inlet regions is more influenced by board layout than that of the chips at the outlet region. Moreover, the chip case temperature shows a trend of slight increase followed by a decrease as the flow rate increases. There exists a critical flow rate beyond which further increase does not significantly improve the SPILC performance. Additionally, the chip case temperature rises significantly with increasing power, and lower flow rates result in greater temperature increases. When the flow rate does not exceed 4.0 L/min, the chip power has almost no effect on the system pressure drop. Moreover, the influence of the flow rate on the power usage effectiveness of SPILC systems is significant when the total chip power is low, but this effect is greatly weakened as the chip power increases.

Keywords: heat transfer; Single-Phase Immersion Liquid Cooling (SPILC); data center; energy consumption; chip case temperature; chip power; coolant

0 引 言

高密度集成数据中心是支持信息技术革命的基础[1]，其规模和数量持续增长，年总耗电量已接近全球耗电量的 3%[2]。在数据中心耗电构成中，除信息技术（IT）设备基本运行耗电外，大部分用于 IT 设备

收稿日期：2024-02-04；**修回日期**：2024-03-12；**录用日期**：2024-03-13

基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFB3803203）

* 通信作者 E-mail: cbzhang@seu.edu.cn

引用格式：徐世杰, 黄永平, 张程宾. 单相浸没式液冷系统的流动传热特性实验研究 [J]. 实验流体力学, 2026, 40(2): 72-80.

XU S J, HUANG Y P, ZHANG C B. Experimental study on flow and heat transfer characteristics of Single-Phase Immersion Liquid Cooling systems[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(2): 72-80.

的冷却[3]。因此，急需研究高效、低功耗的冷却技术[4-5]，以实现数据中心的节能减排。

传统的强迫风冷技术已无法满足高密度集成数据中心的冷却需求，研究者提出了包括热管[6-7]、相变储能[8-10]和液体冷却[11-13]等多种新型冷却技术。Jouhara 和 Meskimmon[7]研究发现，基于热管的数据中心热管理系统可降低 75% 的能耗。Huang 等[9]研究了相变蓄热在数据中心热管理中的应用，发现每年最多可节省 2397.4 kW·h 的电力。Hnayno 等[11]通过实验比较了数据中心强迫风冷和冷板液冷的性能，发现使用液冷板可增强电子设备的热传导，将数据中心的能源效率指标 PUE（Power Usage Effectiveness）降低 16.2%。

热管和液冷板可以提高电子设备的传热性能，但它们仅能实现热量转移；相变蓄热能够降低能耗，但前期投资极大。与液冷板和微通道等间接液冷技术不同，浸没式液冷技术[14-16]将电子设备与冷却液直接接触，可实现高效冷却，目前已被视为数据中心最有潜力的冷却解决方案之一。

单相浸没式液冷（Single-Phase Immersion Liquid Cooling, SPILC）系统具有传热性能强、能效高、结构紧凑、配置简单等优点，学者们对其开展了大量研究[17-19]。相关研究工作主要分为 4 个方面：冷却液选择[20-24]、液冷结构设计[25-27]、运行条件控制[28-30]和传热增强机制[31-32]。

在 SPILC 系统中，由于冷却液与电子设备直接接触，对冷却液的电性能和热性能都有很高要求。Jithin 和 Rajesh[21]就 3 种不同冷却液对 SPILC 系统性能的影响进行了数值模拟。研究发现，在相同冷却效果下，SPILC 系统的能耗从高到低依次为：矿物油、电子氟化液和超纯水。Wang 等[24]通过数值模拟研究了不同冷却油对浸没式冷却性能的影响，发现与矿物油、合成油相比，硅油的努塞尔数降低了 24.4%，而流动阻力损失则增大了 7.4 倍。

液冷结构设计对 SPILC 系统内部流动和传热特性存在重要影响。Shrigondekar 等[26]通过实验研究优化了 SPILC 系统的散热器结构。研究表明，小翅片间距散热器的热阻比大翅片间距散热器增大了 19%～43%。Huang 等[27]对重力驱动 SPILC 系统和浮力驱动 SPILC 系统进行了数值模拟，结果显示浮力驱动 SPILC 系统的 PUE 降低了 13.1%。

在实际工程应用中，SPILC 系统的运行条件差异很大，了解运行条件控制机制对 SPILC 系统管理具有重要价值。Cheng 等[28]研究了不同流速下的泵驱动 SPILC 系统，发现当冷却液流速从 0.4 m/s 升高至 1.2 m/s 时，器件温度降低了 16.1%。Liu 等[29]研究了锂电池 SPILC 系统的性能，发现随着放电速率增大，锂电池温度升高。此外，Wang 等[24]在研究运行条件对泵驱动 SPILC 系统的影响时，发现存在一个临界流速，超过该临界流速后，继续增大冷却液流量对 SPILC 的系统性能影响不大。

为进一步提高 SPILC 系统性能，学者们对浸没式液冷性能强化进行了研究。Muneeshwaran 等[32]改进了一种热管辅助散热器，使电子设备温度进一步降低了 4.8 ℃。Shrigondekar 等[26]对 SPILC 系统在不同工作条件（入口和出口位置、循环流速等）下的性能进行了实验研究。研究结果表明，与 U 形和 Z 形布置相比，采用 T 形进出口布置的 SPILC 系统的最高温度和热阻分别降低了 4.9% 和 12.6%。

与数据中心 SPILC 系统有关的实验研究[33-34]非常有限，现有研究仅分析了 SPILC 系统中单个电子设备的传热性能[26, 32]，这与数据中心服务器上多热源非均匀分布的实际情况不符。因此，亟需开展实验研究，揭示服务器多热源单相浸没冷却过程的流动和传热特性，以及多热源非均匀分布的 SPILC 系统内的传热机制。

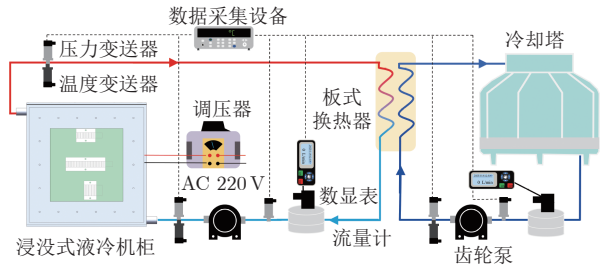
本文建立了一个 SPILC 实验平台，用于研究具有多个模块和热源的 SPILC 系统性能。对模拟芯片（模拟热源）在 SPILC 系统内不同位置的传热特性进行研究，在此基础上，研究分析浸没式冷却液的体积流量和芯片功率对 SPILC 系统传热特性、流动行为和能效水平的影响。

1　实验方法

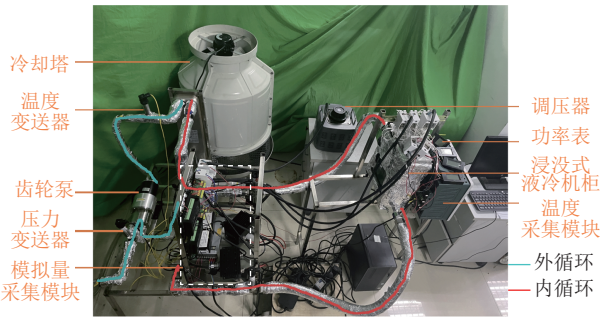
1.1　实验台搭建

为分析 SPILC 系统的流动和传热特性，本文构建了 SPILC 实验平台。如图 1（a）所示，SPILC 实验平台由浸没式液冷机柜单元、液体循环单元、冷却单元和数据采集单元组成。浸没式液冷机柜单元包括柜体、模拟印刷电路板（PCB）、浸没式冷却液和调压器；液体循环单元由齿轮泵、阀门和管道组成；冷却单元主要包括板式换热器和冷却塔；数据采集单元包括温度变送器、压力变送器、流量计、功率表、数据采集设备（含数据采集仪和计算机，其中数据采集仪包括模拟量采集模块和温度采集模块）。

图 1（b）为 SPILC 实验平台实物图。冷却介质从



（a）原理图



（b）实物图

图 1 SPILC 实验平台

Fig. 1 The SPILC experimental platform

浸没式液冷机柜内模拟 PCB 上的热源带走热量，然后通过板式换热器中来自冷却塔的冷却水进行冷却。图中蓝色实线代表外循环回路，由外径 19 mm、壁厚 2 mm 的不锈钢管组成；红色实线代表内循环回路，由外径 28 mm、壁厚 1.5 mm 的不锈钢管组成。为降低环境热损失影响，用保温棉包裹回路中的所有管道，并用铝箔密封。此外，在浸没式液冷机柜的出入口和齿轮泵前后分别布置温度和压力测量点，以监测液冷机柜和内循环回路的温度和压降。表 1 列出了本文所用仪器设备的主要参数。

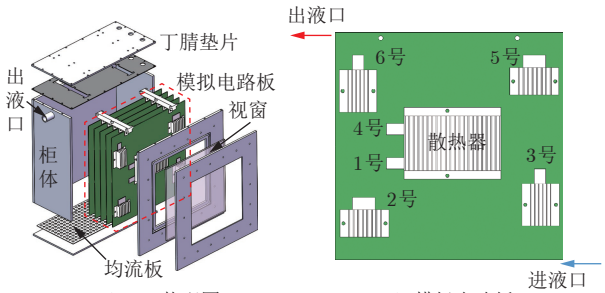
表 1 主要仪器设备参数

Table 1 Performance parameter of main devices

设备	参数
热电偶	T型，测温范围−200～350 ℃，精度 ± 0.5 ℃
功率表	输入电压80～250 V，输入电流0～80 A，精度 ± 2 W
齿轮泵（内循环）	流量0～28 L/min，耐温130 ℃，耐压2 MPa
齿轮泵（外循环）	流量0～18 L/min，耐温130 ℃，耐压2 MPa
流量计	测量范围0～28 L/min，精度 ± 0.3 L/min
温度变送器	测温范围0～150 ℃，精度 ± 0.5 ℃
压力变送器	测压范围0～200 kPa，精度 ± 400 Pa
板式换热器	最大换热功率3.5 kW
冷却塔	冷却水最大流量3～5 m^3/h

1.2 浸没式液冷机柜

图 2 为浸没式液冷机柜示意图。如图 2(a)所示，浸没式液冷机柜的柜体长 220 mm、宽 110 mm、高 220 mm。冷却液从柜体右下进入，从左上流出。为使冷却液分布均匀，在距柜体底部 18 mm 处设置 1 块均流板，均流板上布置了 1 排孔径 5 mm、孔距 5 mm 的开孔率为 71.1% 圆孔。柜体前侧开设 1 个可视玻璃窗，用于监控机柜内的运行情况。柜内安装 5 块模拟 PCB 模块。模块由商用 PCB、模拟芯片和散热器组成。模拟芯片为高功率密度氧化铝陶瓷加热器，散热器以 6061 铝合金制成。模拟芯片和散热器的技术参数见表 2。实验过程中，可通过控制向模拟芯片供电的调压器调节加热功率，并以功率计进行实时监测。在模拟芯片和散热器之间注入导热系数为 5.2 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ 的 TC–5888 导热硅脂，以降低接触热阻。



（a）3D 装配图 （b）模拟电路板

图 2 浸没液冷机柜布置示意图

Fig. 2 Description of the immersion liquid-cooled cabinet

表 2 模拟 PCB 模块上热源和散热器参数

Table 2 Technical information of simulated heat sources and heat sinks on simulated PCBs

部件	几何尺寸/mm	功率/W	数量
PCB	200 × 200 × 1.0	—	1
模拟芯片1	90 × 10 × 1.3	0～300	2
模拟芯片2	50 × 10 × 1.3	0～300	2
模拟芯片3	35 × 20 × 1.3	0～300	2
散热器1	基底：85 × 62 × 1 翅片：6 × 1 × 48 翅片间距：3	—	2
散热器2	基底：37 × 32 × 1 翅片：6 × 1 × 37 翅片间距：3	—	2
散热器3	基底：24 × 42 × 1 翅片：6 × 1 × 24 翅片间距：3	—	2

为便于后续分析，将浸没式液冷机柜中的 5 块模拟 PCB 从前至后依次命名为#1、#2、#3、#4 和

#5PCB。每块模拟 PCB 上模拟芯片的布局和编号如图 2(b)所示。其中，1、4 号，2、5 号，3、6 号分别为完全相同的模拟芯片，3 号芯片靠近冷却液入口，6 号芯片靠近冷却液出口。在后文中，每个模拟芯片都以“PCB 编号−位置编号”形式命名，例如，“1−2”表示#1PCB 上的 2 号芯片。为监测和比较不同位置模拟芯片的温度变化特征，在#1PCB 上所有模拟芯片和散热器的表面都安装了 T 型热电偶，其他 PCB 上仅在 1、2、3 号或 4、5、6 号芯片及其对应散热器上安装热电偶。使用冰河冷媒公司的 LM−14G 型冰河冷媒作为冷却液，其主要热物理参数如表 3 所示。

表 3　浸没式冷却液的热物理参数
Table 3　Thermophysical parameters of immersion coolants

热物性参数(25 ℃)	值
密度ρ	1 800 kg·m^{-3}
质量定压热容c_p	1.5 kJ·kg^{-1}·K^{-1}
导热系数λ	0.09 W·m^{-1}·K^{-1}
动力黏度μ	6.32 mPa·s
沸点T	150 ℃

1.3　数据处理和不确定性分析

实验过程中的测量误差分为 2 类：直接测量误差和间接测量误差。本文中直接测量参数为温度 T、压力 p、体积流量 Q_V 和芯片功率 P，间接测量参数为等效传热热阻 R、压降 Δp 和电能使用效率 E_{PU}。

1.3.1　等效传热热阻 R

本文模拟芯片的等效传热热阻是指从芯片表面到散热器表面的热阻，计算公式为：

$$R=(T_1-T_2)/P \tag{1}$$

式中：T_1 为芯片表面温度，T_2 为散热器表面温度。

1.3.2　压降 Δp

本文的压降为内循环回路中齿轮泵入口与出口之间的压力差，计算公式为：

$$\Delta p=p_{\mathrm{out}}-p_{\mathrm{in}} \tag{2}$$

式中：p_{in}、p_{out} 分别为内循环回路中齿轮泵入口和出口压力。

1.3.3　电能使用效率 E_{PU}

E_{PU} 的定义为总耗电量与 IT 设备耗电量之比：

$$E_{\mathrm{PU}}=(P_{\mathrm{IT}}+P_{\mathrm{cool}})/P_{\mathrm{IT}} \tag{3}$$

式中：P_{IT} 为模拟 PCB 的总功率，P_{cool} 为内循环回路和外循环回路齿轮泵的总功率。

在本文中，直接测量参数的相对不确定度 δ_{d} 由式(4)计算得出，间接测量参数的相对不确定度 δ_{i} 采用 Moffat、Chang、Rehman、Saw 等[35-38] 提出的误差传播函数进行计算：

$$\delta_{\mathrm{d}}=|\sigma_p|/p_{\min} \tag{4}$$

$$\delta_{\mathrm{i}}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial F}{\partial p_i}\right)^2(\sigma_{p_i})^2}/F_{\min} \tag{5}$$

式中：p_i 为某一直接测量参数，$p_{\min}$ 为实验过程中测得的该参数的最小值；σ_p 为直接测量参数的测量精度(仪器生产商提供)，σ_{p_i} 为某一直接测量参数的测量精度；n 为测量参数的数量；F 为间接测量参数与直接测量参数之间的函数关系，$F_{\min}$ 为实验中测得的间接测量参数的最小值。表 4 给出了本文各参数的相对不确定度。

表 4　直接测量参数和间接测量参数的相对不确定度
Table 4　Relative uncertainties of directly and indirectly measured parameters

参数	相对不确定度
温度T	3.3%
压力p	2.5%
体积流量Q_V	13.35%
功率P	2%
等效传热热阻R	4.81%
压降Δp	3.53%
电能使用效率	1.74%

2　结果与讨论

2.1　实验可重复性验证

为确保实验数据的可靠性，对 SPILC 实验平台进行了重现性验证。实验工况为：浸没式液冷机柜内的模拟芯片总功率 350 W；内循环回路中冷却液的体积流量 3.2 L/min，入口温度 32 ℃；外循环回路中冷却水的体积流量 1.9 L/min；环境温度 26 ℃。

在 3 次相同工况的独立实验中，#1PCB 上所有模拟芯片表面温度的测量结果如图 3 所示。从图中可以清楚地看到，3 次实验中，测量参数的一致性都很好。根据统计分析，各次实验中的芯片温度和内循环体积流量的偏差分别为 2.10% 和 2.63%，均在实验误差允许范围内，说明本文实验可重复性良好，测量数据真实可靠。

2.2　浸没式液冷机柜性能分析

为说明模拟芯片位置对 SPILC 传热特性的影

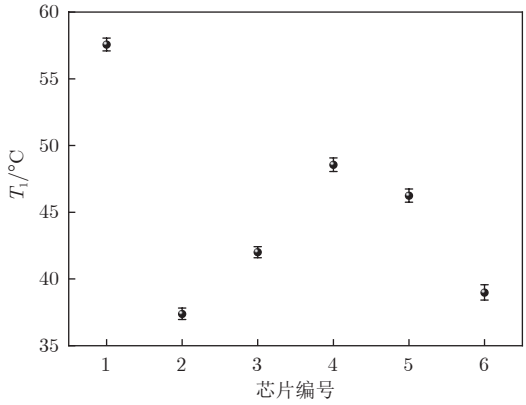


图 3 实验可重复性验证

Fig. 3 Experimental reproducibility verification

响，给出了如图 4 所示的浸没式液冷机柜内不同位置模拟芯片的表面温度和热阻。实验工况为：模拟芯片总功率 600 W；内循环回路中冷却液的体积流量为 5.4 L/min，入口温度 31.6 ℃；外循环回路中冷却水的体积流量 1.9 L/min；环境温度 26 ℃。实验中，1、4 号芯片的功率为 25.5 W，2、5 号芯片的功率为 27.6 W，3、6 号芯片的功率为 13.9 W。

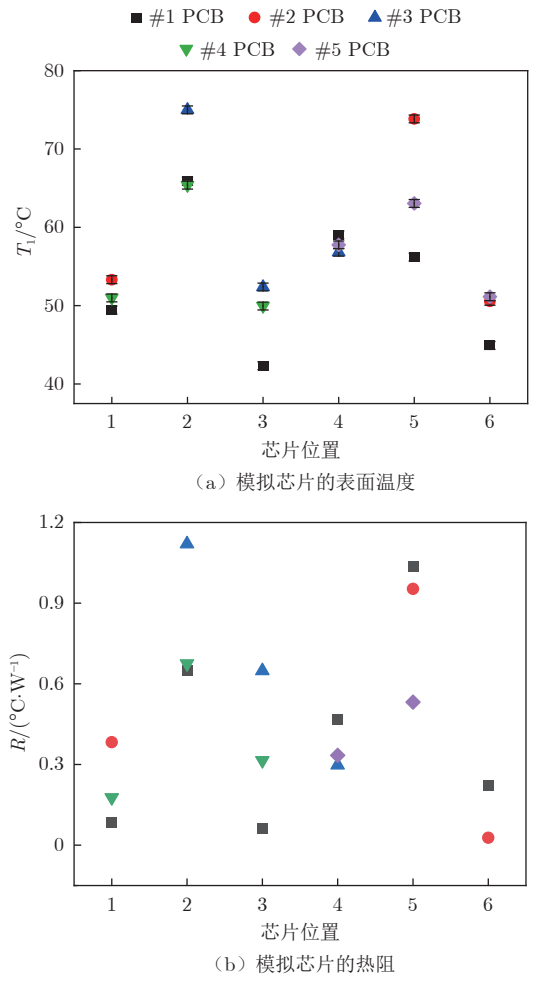


图 4 不同位置模拟芯片的表面温度和热阻

Fig. 4 Case temperature and thermal resistance of simulated chips at different locations

比较#1～#5PCB 可以看出，机柜中心区域流动和传热性能更好，不同 PCB 上芯片的温差不大。2、5 号芯片分别处于机柜左下角和右上角流动死区，3、6 号芯片处于主流区域，因此不同 PCB 上的 2、5 号芯片温差较大，3、6 号芯片温差较小。

以#1PCB 为例，分析模拟芯片位置的影响。功率相同的 1、4 号芯片位于 PCB 的中心，散热器较大，表面温度较低，热阻较小；功率相同的 2、5 号芯片位于流动死角，热对流效率较低，热阻最大。此外，功率相同的 3 号芯片（靠近入水口）和 6 号芯片（靠近出水口）位于机柜主流区域，该区域流动和传热性能较好，发热量较低，因此两者位置造成的传热差异不明显。综上所述，处于主流区域的芯片温度波动较小，处于流动死区的芯片温度波动较大。

2.3 运行工况对 SPILC 系统性能的影响

在实际运行过程中，浸没式液冷机柜中的芯片功率和循环流量都会发生变化。因此，有必要研究不同工况下 SPILC 系统的运行性能。实验工况为：环境温度 26 ℃，冷却水体积流量 1.9 L/min。为了研究冷却液体积流量和芯片功率对 SPILC 系统性能的影响，内循环回路中冷却液的体积流量设为 2.1～5.4 L/min，模拟芯片总功率为 350～850 W。

2.3.1 传热特性

以模拟芯片 1–2 和 2–1 为对象，定量分析不同工况下浸没式液冷机柜内的传热特性。图 5 显示了不同工况下 SPILC 系统中芯片 1–2 和 2–1 的表面温度。可以看出，当模拟芯片总功率保持不变时，随着冷却液体积流量增大，芯片表面温度先略微升高，而后降低。其原因在于：冷却液流量较小时，机柜内自然对流的影响很大，随着体积流量增大，自然对流的影响逐渐减小，机柜内的对流扰动增大，改善了模拟芯片的散热。存在一个临界流量，当达到该临界流量后，进一步增大冷却液的体积流量无法继续明显改善模拟芯片的散热性能。如图 5 所示，当模拟芯片总功率为 850 W 时，体积流量从 3.2 L/min 增大至 4.0 L/min，芯片 1–2 的表面温度降低了 4.4%；体积流量继续从 4.0 L/min 增大至 5.4 L/min，芯片 1–2 的表面温度则仅降低了 1.1%。此外，当冷却液体积流量保持不变时，模拟芯片表面温度随功率增大而显著上升，且当体积流量为 2.1～4.1 L/min 时，体积流量越小，温度上升幅度越大。这表明模拟芯片的表面温度对功耗变化更为敏感。

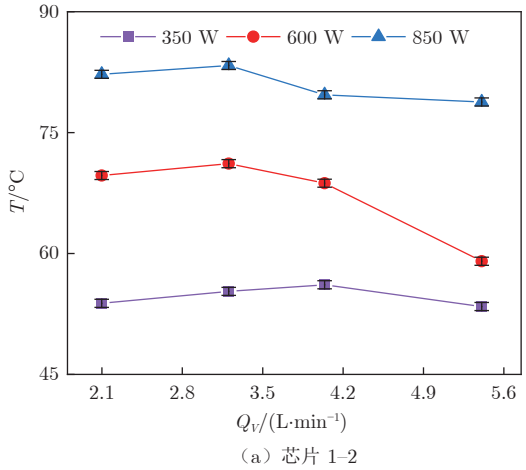


图 5　不同位置模拟芯片的表面温度

Fig. 5　Case temperature of simulated chips at different positions

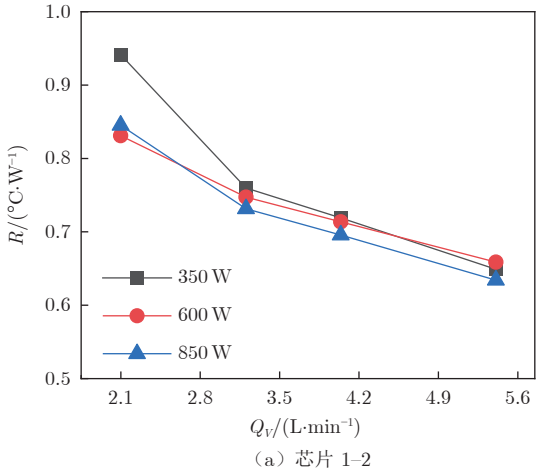


图 6　不同位置模拟芯片的热阻

Fig. 6　Thermal resistance of simulated chips at different positions

图 6 给出了不同位置模拟芯片的热阻。当模拟芯片总功率保持不变时，与芯片 2–1 相比，芯片 1–2 的热阻对冷却液体积流量变化更为敏感。其原因在于：芯片 1–2 位于流动死区，体积流量变化导致的流场演变对其热阻影响很大；芯片 2–1 位于机柜中央，且具有较大的散热器，流动和传热性能更好，其热阻在较大体积流量下才会发生明显变化。

2.3.2　流动特性

压降是评价 SPILC 系统流动特性的一个重要指标，本文选择内循环回路的压降进行定量分析。图 7 显示了 SPILC 系统在不同工况下的压降。从图中可以看出：当冷却液体积流量不超过 4.0 L/min 时，模拟芯片的总功率对 SPILC 系统的压降几乎没有影响；当冷却液体积流量为 5.4 L/min 时，模拟芯片总功率从 350 W 增大至 850 W，SPILC 系统的压降减小了 8.8%。出现这种现象的原因是：在较小的体积流量下，冷却液平均温度相对较高，温度变化引起的动力黏度变化较小；在较大的体积流量下，冷却液平均温度相对较低，随着模拟芯片总功率增大，冷却液因温度变化而引起的动力黏度变化较大（显著下降），从而大大改善了 SPILC 系统的流动特性。

2.3.3　能效特性

在不同工况下，以电能使用效率 E_{PU} 作为指标，

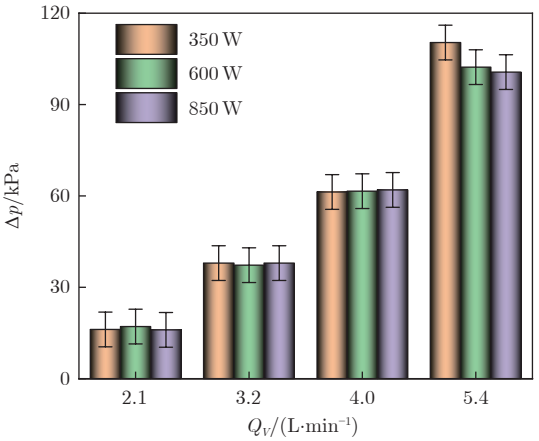


图 7　不同工况下 SPILC 系统的压降

Fig. 7　Pressure drop of SPILC systems under different operating conditions

评估环境温度恒定、冷却水流量恒定的 SPILC 系统的能效水平。图 8 显示了 SPILC 系统在不同模拟芯片总功率和不同冷却液体积流量下的 E_{PU}。从图中可以看到：当冷却液体积流量保持不变时，E_{PU} 随着模拟芯片总功率的增大而降低，这是由于模拟芯片的功耗增大，加强了冷却液的对流传热，提升了 SPILC 系统的能效水平；当模拟芯片的总功率保持不变时，E_{PU} 随着冷却液体积流量的增大而升高，这是由于随着冷却液体积流量增大，泵的功耗升高。

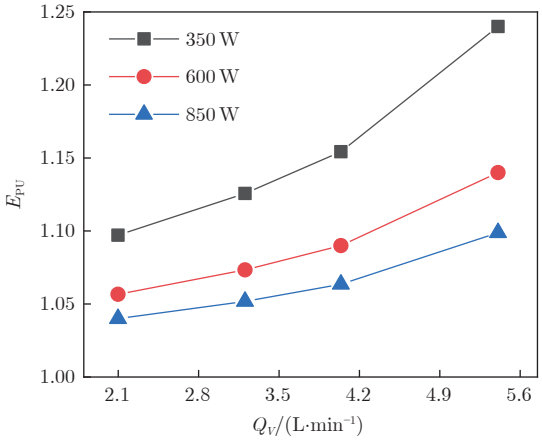


图 8 不同工况下 SPILC 系统的电能使用效率

Fig. 8 Power usage effectiveness of the SPILC system under different operating conditions

从图 8 中还可以看到，当模拟芯片总功率较低时，冷却液体积流量对 E_{PU} 的影响更明显。数据分析显示：冷却液体积流量从 2.1 L/min 增至 5.4 L/min 时，在模拟芯片总功率 350 W 条件下，E_{PU} 提升了 13.0%，而在总功率 850 W 条件下，E_{PU} 则仅提升了 5.6%。其原因在于：随着模拟芯片总功率增大，冷却液平均温度增大，动力黏度降低，从而降低了流动阻力，提高了 SPILC 系统的能效水平。因此，在实际应用中，当芯片总功率相对较低时，可以在确保芯片安全运行的前提下，适当降低冷却液的体积流量，从而降低 SPILC 系统的能耗。

3 结 论

1）在相同工况下，芯片位置对其传热性能影响显著。与靠近冷却液出口区域的芯片相比，靠近入口区域的芯片传热特性受模拟 PCB 位置的影响更大。为提高传热性能，应将大功率芯片置于浸没式液冷机柜中传热效果更好的位置，同时优化流道结构，避免出现流动死区。

2）当芯片总功率保持不变时，芯片表面温度随着冷却液体积流量增大先略有上升而后下降。存在一个临界体积流量，超过该临界流量后，进一步增大体积流量，无法进一步显著改善芯片的散热效果。当冷却液体积流量保持不变时，芯片表面温度随着功率增大而显著升高，且体积流量越小，温升越高。

3）当冷却液体积流量不超过 4.0 L/min 时，芯片总功率对 SPILC 系统的压降几乎没有影响；当体积流量为 5.4 L/min 时，芯片总功率从 350 W 增大至 850 W，SPILC 系统的压降降低了 8.8%。

4）芯片总功率和冷却液体积流量对 SPILC 系统的电能使用效率影响很大。当芯片总功率较低时，体积流量对电能使用效率影响较大，但随着芯片总功率增大，这种影响会明显减弱：当体积流量从 2.1 L/min 增大至 5.4 L/min，在芯片总功率 350 W 条件下，电能使用效率提升了 13.0%，而在芯片总功率 850 W 条件下，仅提升了 5.6%。

本文揭示了 SPILC 系统的浸没式液冷机柜及内循环回路运行参数（流量和功率）对系统温度、流动和能效特性的影响规律。后续将引入外循环回路流量和冷源所处环境温度作为研究变量，进一步探讨运行工况对 SPILC 系统性能的影响，并提出以电能使用效率最小化为导向的智能调控系统，以实时改变系统运行参数，达到节能减排的目的，进而为 SPILC 系统数据中心冷却中的应用提供设计依据和技术指导。

参考文献：

[1] XING L L, LI F H, LIN X X, et al. Construction and performance analysis of CO_2 heat pump energy storage based on the waste heat of data center[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2023, 39(6): 514-523.
doi: 10.19944/j.eptep.1674-8069.2023.06.007

[2] PAMBUDI N A, SARIFUDIN A, FIRDAUS R A, et al. The immersion cooling technology: current and future development in energy saving[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(12): 9509-9527.
doi: 10.1016/j.aej.2022.02.059

[3] HAGHSHENAS K, TAHERI S, GOUDARZI M, et al. Infrastructure aware heterogeneous-workloads scheduling for data center energy cost minimization[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2022, 10(2): 972-983.
doi: 10.1109/TCC.2020.2977040

[4] 肖新文. 数据中心液冷技术应用研究进展[J]. 暖通空调, 2022, 52(1): 52-65.
XIAO X W. Review on liquid cooling technologies applied to data centers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(1): 52-65.

doi: 10.19991/j.hvac1971.2022.01.09

[5] 赵田田, 王鲁元, 张兴宇, 等. 数据中心浸没式相变冷却研究进展[J]. 华电技术, 2021, 43(10): 68-72.
ZHAO T T, WANG L Y, ZHANG X Y, et al. Research progress of immersion phase-change cooling for data centers[J]. Huadian Technology, 2021, 43(10): 68-72.
doi: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.10.008

[6] LING L, ZHANG Q, YU Y B, et al. A state-of-the-art review on the application of heat pipe system in data centers[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 199: 117618.
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117618

[7] JOUHARA H, MESKIMMON R. Heat pipe based thermal management systems for energy-efficient data centres[J]. Energy, 2014, 77: 265-270.
doi: 10.1016/j.energy.2014.08.085

[8] 侯立强, 阎帅, 钮晓博, 等. 基于主动旋转的螺旋翅片储热单元传热性能优化分析[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(6): 553-560.
HOU L Q, YAN S, NIU X B, et al. Analysis of the heat transfer performance of spiral fin heat storage units under active rotation conditions[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2023, 39(6): 553-560.
doi: 10.19944/j.eptep.1674-8069.2023.06.011

[9] HUANG Y P, DENG Z L, CHEN Y P, et al. Performance investigation of a biomimetic latent heat thermal energy storage device for waste heat recovery in data centers[J]. Applied Energy, 2023, 335: 120745.
doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120745

[10] MA X W, ZHANG Q, ZOU S K. An experimental and numerical study on the thermal performance of a loop thermosyphon integrated with latent thermal energy storage for emergency cooling in a data center[J]. Energy, 2022, 253: 123946.
doi: 10.1016/j.energy.2022.123946

[11] HNAYNO M, CHEHADE A, KLABA H, et al. Experimental investigation of a data-centre cooling system using a new single-phase immersion/liquid technique[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 45: 102925.
doi: 10.1016/j.csite.2023.102925

[12] NADA S A, EL-ZOHEIRY R M, ELSHARNOBY M, et al. Experimental investigation of hydrothermal characteristics of data center servers' liquid cooling system for different flow configurations and geometric conditions[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 27: 101276.
doi: 10.1016/j.csite.2021.101276

[13] ZHAN B F, SHAO S Q, ZHANG H N, et al. Simulation on vertical microchannel evaporator for rack-backdoor cooling of data center[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 164: 114550.
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114550

[14] LI Y, BAI M L, ZHOU Z F, et al. Thermal management for the 18650 lithium-ion battery pack by immersion cooling with fluorinated liquid[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 109166.
doi: 10.1016/j.est.2023.109166

[15] LIU X Y, ZHOU Z F, WU W T, et al. Modelling for the mitigation of lithium ion battery thermal runaway propagation by using phase change material or liquid immersion cooling[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 52: 103749.
doi: 10.1016/j.csite.2023.103749

[16] LIN X W, LI Y B, WU W T, et al. Advances on two-phase heat transfer for lithium-ion battery thermal management [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 114052.
doi: 10.1016/j.rser.2023.114052

[17] CHEN M Y, CHENG W M, ZHAO L Y, et al. Feasibility study and dimensionless theoretical analysis of cylindrical lithium-ion battery module cooled by dynamic circulating transformer oil[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121737.
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121737

[18] GAO Q, LEI Z G, HUANG Y P, et al. Performance investigation of a liquid immersion cooling system with fish-shaped bionic structure for Lithium-ion battery pack[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 222: 125156.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125156

[19] LIU Q, SUN C, ZHANG J S, et al. The electro-thermal equalization behaviors of battery modules with immersion cooling[J]. Applied Energy, 2023, 351: 121826.
doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121826

[20] LUO Q Y, WANG C H, WU C L. Study on heat transfer performance of immersion system based on sic/white mineral oil composite nanofluids[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 187: 108203.
doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108203

[21] JITHIN K V, RAJESH P K. Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric fluids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 188: 122608.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122608

[22] ROE C, FENG X N, WHITE G, et al. Immersion cooling for lithium-ion batteries-A review[J]. Journal of Power Sources, 2022, 525: 231094.
doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231094

[23] 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): 74-82.
WU X L, LIU Y, NI H, et al. Effect of different electronic cooling liquid on the performance of immersion phase change cooling system[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(4): 74-82.
doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2021.04.074

[24] WANG H J, YUAN X J, ZHANG K, et al. Performance evaluation and optimization of data center servers using single-phase immersion cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 221: 125057.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125057

[25] BEHNIA M, DeHGHAN A A, MISHIMA H, et al. A numerical study of natural convection immersion cooling of multiple heat sources in parallel interacting open-top cavities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(4-5): 797-808.
doi: 10.1016/s0017-9310(97)00130-0

[26] SHRIGONDEKAR H, LIN Y C, WANG C C. Investigations on performance of single-phase immersion cooling system[J].

International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 206: 123961.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123961

[27] HUANG Y P, GE J L, CHEN Y P, 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.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124023

[28] 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.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120203

[29] LIU Y H, ALDAN G, HUANG X Y, et al. Single-phase static immersion cooling for cylindrical lithium-ion battery module[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 233: 121184.
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121184

[30] CELEN A. Experimental investigation on single-phase immersion cooling of a lithium-ion pouch-type battery under various operating conditions[J]. Applied Sciences, 2023, 13(5): 2775.
doi: 10.3390/app13052775

[31] LIU Q, QIN L, SHI Q L, et al. Optimization of the active battery immersion cooling based on a self-organized fluid flow design[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 76: 109851.
doi: 10.1016/j.est.2023.109851

[32] MUNEESHWARAN M, LIN Y C, WANG C C. Performance analysis of single-phase immersion cooling system of data center using FC-40 dielectric fluid[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 145(Part B): 106843.
doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106843

[33] 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.
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121260

[34] KANBUR B B, WU C L, FAN S M, et al. System-level experimental investigations of the direct immersion cooling data center units with thermodynamic and thermoeconomic assessments[J]. Energy, 2021, 217: 119373.
doi: 10.1016/j.energy.2020.119373

[35] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(1): 3-17.
doi: 10.1016/0894-1777(88)90043-x

[36] CHANG H L, HAN Z R, LI X H, et al. Experimental investigation on heat transfer performance based on average thermal-resistance ratio for supercritical carbon dioxide in asymmetric airfoil-fin printed circuit heat exchanger[J]. Energy, 2022, 254: 124164.
doi: 10.1016/j.energy.2022.124164

[37] REHMAN T U, AMBREEN T, NIYAS H, et al. Experimental investigation on the performance of RT-44HC-nickel foam-based heat sinks for thermal management of electronic gadgets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 188: 122591.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122591

[38] SAW L H, POON H M, THIAM H S, et al. Novel thermal management system using mist cooling for lithium-ion battery packs[J]. Applied Energy, 2018, 223: 146-158.
doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.042



作者简介:
徐世杰(1999—),男,江苏扬州人,硕士研究生。研究方向:浸没液冷技术。
E-mail: 220210505@seu.edu.cn

(编辑:宋嘉慧)