

射流辅助单相浸没式油冷服务器的数值模拟研究

梁瑞升^{1,2} 魏健健^{1,2}

(1 浙江大学制冷与低温研究所 杭州 310027; 2 全省制冷与低温技术重点实验室 杭州 310027)

摘要 针对单相浸没式油冷服务器中旁路流动明显、散热器通道内有效流量不足及局部热点突出的问题,本文提出前置射流辅助冷却方案,并采用数值模拟方法研究其流量重新分配与散热强化规律。研究表明,增加射流可通过局部冲击、滞止增压和卷吸作用增强散热器通道入口处的动量和流体更新能力。同时,射流比主要影响强化强度,每个GPU散热器对应的射流孔数主要影响覆盖范围与温度均匀性。综合对比可知,5孔、射流比0.8为最佳射流工况,其GPU最高温度由99.12℃降至82.10℃,温度标准差由2.54℃降至0.26℃,表现出较好的综合散热性能。

关键词 单相浸没式油冷;射流;散热器;流量分配

中图分类号: TB657.5;TK124;TP308

文献标识码: A

Numerical Simulation Study of Jet-Assisted Single-Phase Immersion Oil Cooling for Servers

Liang Ruisheng^{1,2} Wei Jianjian^{1,2}

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic Technology, Hangzhou 310027, China)

Abstract A front-jet-assisted cooling scheme is proposed for single-phase immersion oil-cooled servers to address severe bypass flows, insufficient effective flows inside heat sink channels, and local hotspots. Numerical simulations were performed to investigate the associated flow redistribution and mechanisms for heat-transfer enhancement. The results show that introducing front jets enhanced the coolant momentum and renewal at the heat sink channel entrance through local impingement, stagnation pressurization, and entrainment. In addition, the jet flow ratio primarily governed the enhancement intensity, whereas the number of jet holes assigned to each GPU heat sink primarily affected the coverage range and temperature uniformity. Comprehensive comparison indicates that the case with five jet holes and a jet ratio of 0.8 demonstrated the best overall performance, reducing the maximum GPU temperature from 99.12℃ to 82.10℃ and the temperature standard deviation from 2.54℃ to 0.26℃.

Keywords single-phase immersion oil cooling; jet assistance; heatsink; flow distribution

随着人工智能、高性能计算和云服务规模持续扩大,数据中心已成为支撑数字经济运行的重要基础设施^[1-2]。同时,数据中心长期连续运行带来的高能耗也愈发受到关注,如何在保障高功率服务器安全的同时降低冷却能耗,已成为当前数据中心热管理领域亟需解决的关键问题。

传统风冷技术因系统成熟、部署方便,仍是目前数据中心中应用最广泛的冷却方式。但其最大散热能力通常仅约为37 W/cm²^[3],常规风冷已难以满足持续增长的散热需求。为此,液冷技术逐渐成为高热

流密度热管理的重要方向。液冷主要包括冷板液冷^[4]、热管^[5]和浸没式液冷^[6-7]等。冷板和热管属于间接冷却,热量传递中存在较多导热和界面热阻。浸没式液冷可使冷却介质直接与热源接触。浸没式液冷又可分为单相^[8]和相变^[9]2类,其中相变浸没式液冷依赖沸腾传热,传热强度较高,但运行涉及蒸发与冷凝过程,对密封、压力控制和介质要求更高。单相的流动与传热过程更稳定,系统安全性和材料兼容性更好,更适合高可靠性服务器场景下的长期运行。

围绕单相浸没式液冷,现有研究主要集中在冷



却液、运行工况、散热器结构及机柜等方面。已有研究表明,矿物油等介质在材料兼容性和运行可靠性方面表现出较好的应用潜力^[10]。冷却液的物性参数影响散热性能,其中较低黏度有利于提高流动、增强传热并降低压降^[11]。在运行工况方面,R. Eiland等^[12]研究了不同入口温度和流量对单相浸没式服务器冷却效果的影响,结果表明较低入口温度和较高流量均有利于降低器件温度。泵驱动方式在散热能力和温度控制方面通常优于浮力驱动方式^[13]。在结构方面,散热器翅片间距、进出口布置及服务器构型等参数均会通过改变流动路径和局部阻力影响换热性能,说明散热器几何结构与内部流动组织之间存在明显耦合关系^[14]。Liu Hongmin等^[15]对液冷柜内部挡板参数进行了优化,发现挡板角度和数量对温度均匀性影响显著,贡献率分别达到49.23%和24.18%,机柜温度均匀性提高46%。Zhang Yingying等^[16]开始将喷射强化思路引入浸没式液冷系统,通过将局部高动量流体直接引入目标区域,以进一步改善供液状态和局部换热能力,相关结果表明喷射参数与流路布置之间存在较强匹配关系。

冷却液在复杂流道中容易沿侧壁及模块间低流阻区域形成旁路流动,对目标散热区域的流场改善不足。针对上述问题,以高功率单相浸没式油冷服务器为对象,提出射流辅助冷却方案,研究射流对高热流部件区域流量重新分配和散热强化的作用机理,并进一步分析射流孔数和射流比对系统性能的影响规律,为高功率油冷服务器的强化冷却结构设计提供理论依据与方法参考。

1 单相浸没式油冷服务器模型

本研究使用ANSYS Fluent进行模拟研究,单相浸没式油冷服务器的模型如图1所示。服务器中的主要部件尺寸如表1所示。其中,散热器尺寸为115 mm×81 mm×36 mm,翅片厚度和间距均为3 mm,翅片数量为14,高度为30 mm。下排GPU自左至右记为GPU1~4,上排GPU记为GPU5~8。

在每个GPU散热器前方设置射流,射流孔直径3 mm,位于散热器长度方向中心,孔沿散热器宽度方向均匀布置,射流流量由各射流孔均匀分配。总流量统一取25 L/min。常规主流时油仅由底部进入,速度为0.6 m/s;主流-前置射流中射流流量占总流量的20%,其余仍由底部入口提供,射流比为0.2。冷却油温度均为25℃。多入口的流动阻力采用等效系统压降,定义为^[17]:

$$\Delta p_{eq} = \frac{\dot{m}_{jet}}{\dot{m}_{jet} + \dot{m}_m} p_{jet} + \frac{\dot{m}_m}{\dot{m}_{jet} + \dot{m}_m} p_m - p_{out} \quad (1)$$

式中: Δp_{eq} 为等效压降,Pa; $\dot{m}_{jet}$ 和 $\dot{m}_m$ 分别为前置射流入口和主流入口的质量流量,kg/s; p_{jet} 和 p_m 分别为前置射流入口和主流入口的压力,Pa; p_{out} 为出口压力,Pa。

温度均匀性 δT 表明GPU区域温度分布的一致性,定义为^[15]:

$$\delta T = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - T_{ave})^2} \quad (2)$$

式中: N 为GPU总数; T_i 为第*i*个GPU温度,℃; T_{ave} 为GPU区域平均温度,℃。较小的 δT 表明温度分布更均匀。

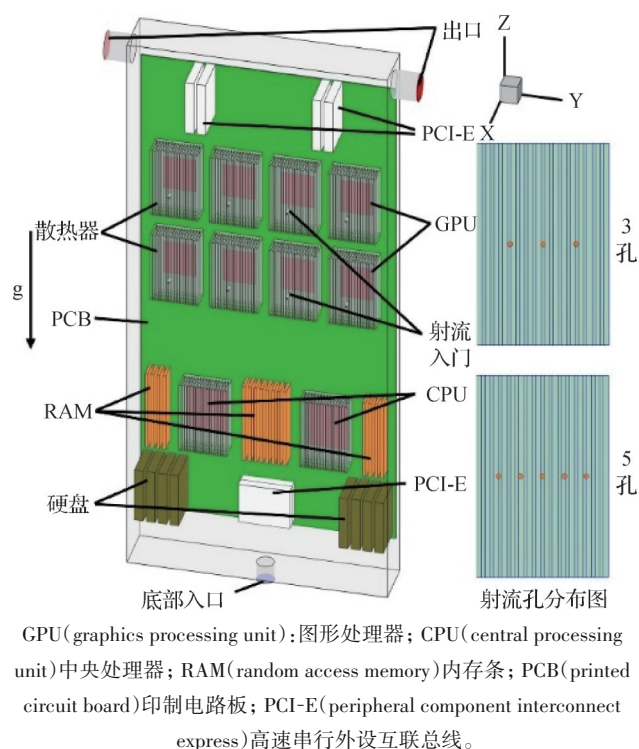


图1 单相浸没式油冷服务器物理模型
Fig.1 Physical model of the single-phase immersion oil-cooled server

表1 服务器关键部件参数
Tab.1 Parameters of the key server components

组件	尺寸/mm	功耗/W	数量
外壳	915×445×85	—	1
GPU	55×55×3	800	8
CPU	75×70×3	250	2
RAM	130×5×30	15	16
PCB	795×435×2	—	1
硬盘	88×5×66	20	8
PCI-E	88×5×66	20	6

2 数值方法和网格划分

2.1 控制方程

为简化计算过程,同时保证模型能够反映主要物理过程,作如下基本假设:1)冷却油流动为稳态、连续且不可压缩;2)忽略热辐射对传热过程的影响;3)忽略黏性耗散所产生的热量;4)固体材料物性参数取常数。在上述条件下,单相浸没式油冷服务器内部的流动与传热过程满足质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程,其一般形式如式(3)~式(5)所示。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

动量方程为:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (4)$$

能量方程为:

$$\frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p T \vec{v}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S \quad (5)$$

式中: ρ 为流体密度,kg/m³; $\vec{v}$ 为速度矢量,m/s; p 为压力,Pa; $\vec{g}$ 为重力加速度,m/s²; μ 为动力黏度,Pa·s; c_p 为比定压热容,J/(kg·K); T 为温度,K或℃; λ 为导热系数,W/(m·K); S 为源项,W/m³。

2.2 数值方法及边界条件

服务器中的散热器等部件会在周围流场中产生涡流,由于冷却油黏度较高,散热器内部会形成低雷诺数流动。本研究采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,其对低雷诺数流动及涡流区域具有高计算精度。

本研究采用有限体积法,压力-速度耦合采用(semi-implicit method for pressure linked equations)SIMPLE方案,压力离散化采用(pressure staggering option)PRESTO方案,二阶迎风方案应用于动量、能量、湍流动能和耗散率方程。能量方程的残差低于10⁻⁹,其他控制方程的残差低于10⁻⁴,表明模拟收敛。

边界条件设置为速度入口和压力出口;热源为体积热源;服务器外壳采用绝热壁面处理。由于冷却油的热物性参数会随温度变化而改变,变化关系如表2所示。

2.3 网格划分及模型验证

为保证计算结果的可靠性,分别针对常规主流和前置射流进行网格无关性验证,如图2所示。热源、散热器、射流孔出口及其冲击区域进行了局部加密。对于常规主流和射流工况,当网格数量分别达到约900万和1 000万后,增加网格时GPU平均温度

表2 冷却油主要热物性参数

Tab.2 Main thermophysical properties of the cooling oil

物性参数	热物性变化
密度/(kg/m ³)	$\rho = 2\,487.8 - 1\,408.1e^{\frac{T}{1793.1}}$
比热容/[J/(kg·K)]	$c_p = 7\,368 - 5\,881e^{\frac{-T}{1991.04}}$
热导率/[W/(m·K)]	$\lambda = 0.167 - 0.029\,7e^{\frac{T}{331.78}}$
黏度/(mPa·s)	$\mu = 0.28 + 4.5e^{\frac{-T}{17}} + 3.5e^{\frac{-T}{61}}$

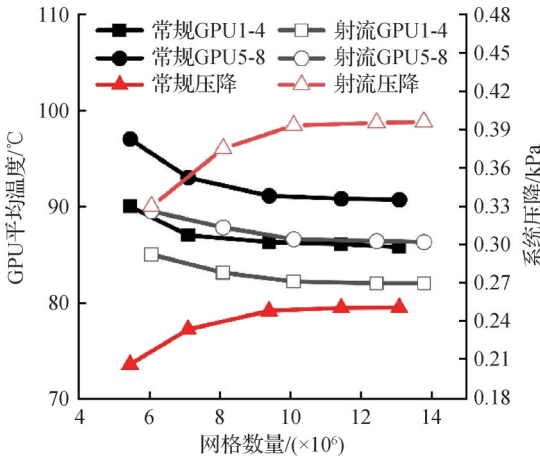


图2 网格无关性验证

Fig.2 Grid independence verification

和系统压降的变化较小,表明主要流动与传热行为已能够准确捕捉。

为验证数值方法,对Luo Qingyi等^[18]研究的实验进行模拟复现。如图3(a)所示实验装置包括一个60 W热源、主板和矿物油。实验涵盖了不同入口流速条件下油液流动与热源传热过程,其流动状态包括低速和流速增大后的传热增强过程,与散热器窄通道、主流旁路流动以及射流的局部对流强化具有相似的传热机制。由图3(b)可知,不同流速下的模拟结果与实验数据高度吻合,偏差小于4%。这些结果证实了数值方法的可靠性。

3 结果与讨论

3.1 服务器内部流动与传热特性

图4所示为服务器内部关键截面速度云图,由图4可知,常规主流工况下,冷却油由底部入口进入服务器后,侧壁及外侧流道中的局部流速可达约0.04~0.05 m/s。以 $x=41$ mm截面为例,GPU散热器通道内部整体仍以低速区为主。引入前置射流后,GPU区域前方形成新的局部进液路径,更多冷却油被导入散热器通道内部。散热器顶端附近出现明显的局部高速区,通道内部流速可达约0.3 m/s。从 $y=50.5$ mm纵向截面可知,射流在接近散热器通道入口时形成

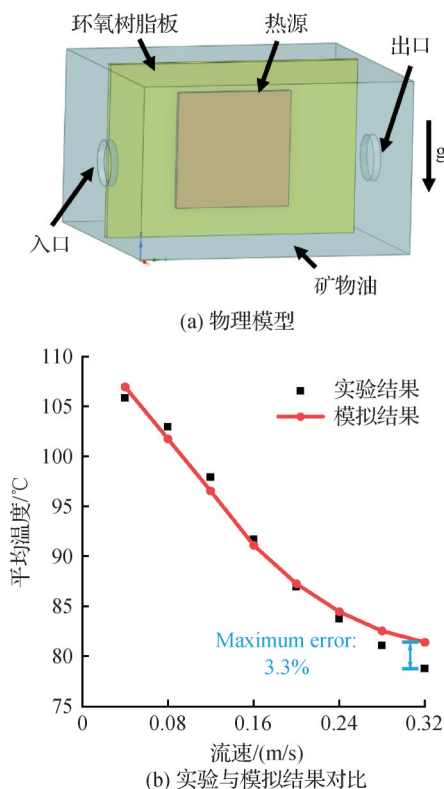


图3 单相浸没式油冷实验的数值模型验证

Fig.3 Validation of the numerical model for the single-phase immersion oil-cooling experiment

局部冲击和滞止增压作用, GPU通道内流速均提高至0.25 m/s以上, 表明射流能够显著增强GPU区域的流体更新能力, 并减弱排间流量分配差异。2个 z 截面进一步表明2排GPU对应位置均形成与射流孔相对应的局部高速区。

图5所示为对应工况下的温度分布特征。主流-前置射流在竖直方向的温度分层现象更加明显, 温度主要集中在约34~38 °C。这表明射流增强了GPU区域的局部换热, 使冷却油在散热器区域吸热后更快向上输送。同时, 部分主流被分配至射流支路后, 中下部区域整体掺混减弱, 上热下冷的分层特征进一步增强。同时, CPU及其散热器附近温度较常规工况略有升高, 表明前置射流优先改善了上部高功率GPU区域的冷却效果, 同时改变了服务器内部区域冷却能力分配。

图6所示为上下2排GPU散热器及底部的温度分布。常规主流工况下, 散热器中部及芯片对应区域均存在较明显的高温集中现象; 引入前置射流后, 散热器通道内温度整体降低, 高温区范围缩小, 芯片对应区域的最高温度也随之下降。

3.2 关键性能指标分析

图7所示为常规主流工况与主流-前置射流工

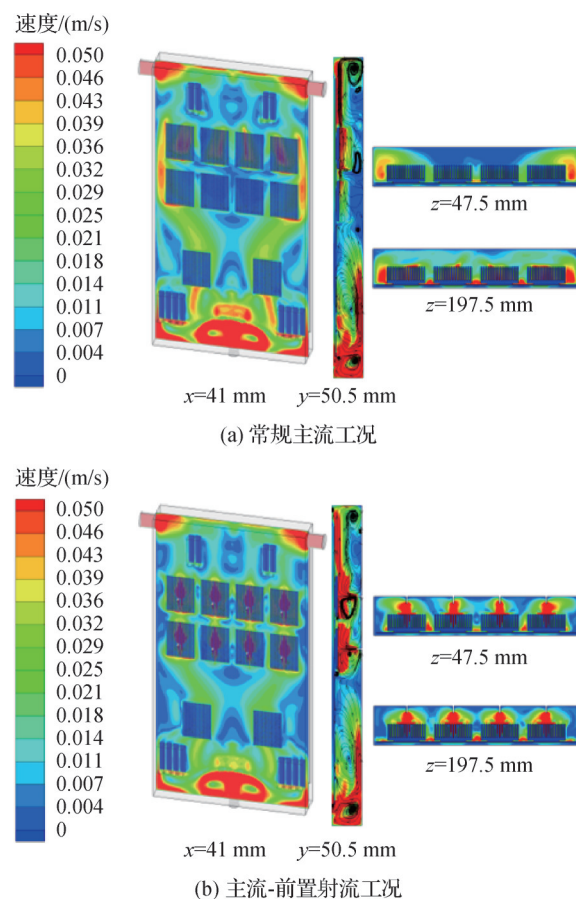


图4 服务器内部关键截面速度云图

Fig.4 Velocity contours at key cross-sections inside the server

况下的关键性能指标, 包括GPU平均温度 $T_{ave, GPU}$ 、GPU最高温度 $T_{max, GPU}$ 、GPU温度标准差 δT 、CPU温度及系统压降 Δp_{eq} 。引入前置射流后, GPU区域冷却效果明显改善。与常规主流工况相比, 前置射流工况下第1排GPU平均温度和最高温度分别降低约4 °C和7 °C, 第2排分别降低约5 °C和8 °C。表明射流对原本供液相对不足的第2排GPU具有更明显的强化作用。

GPU阵列的温度均匀性也有所提高。前置射流工况下, 不同GPU温度标准差由2.54 °C降至2.21 °C, 表明射流一定程度上减弱不同GPU之间的热状态差异。为评价单个GPU温度均匀性, 选取2排代表GPU计算温度标准差。常规主流的第1排和第2排GPU温度标准差分别为9.71 °C和9.75 °C; 引入射流后分别为9.46 °C和9.44 °C。可见, 射流对单个GPU表面温度标准差的影响相对有限, 说明其主要作用并非显著改变单芯片面内温度分布, 而是通过改善散热器入口供液状态降低GPU整体温度水平, 并减弱不同GPU之间的温度差异。同时, CPU区域的热管理性能略有下降, 系统压降由约248 Pa增至约393 Pa。这表明前置射流在强化GPU区域冷却的同时, 也带

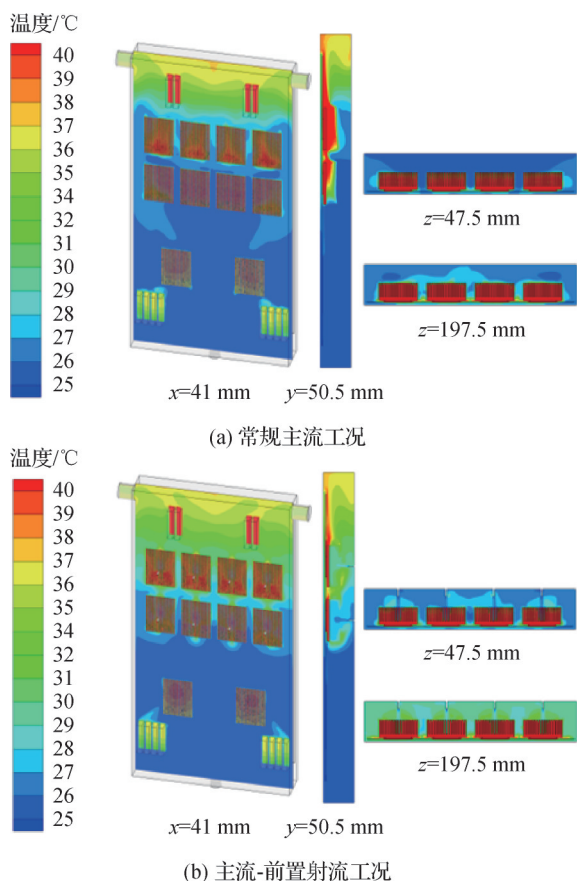


图5 服务器内部关键截面温度云图

Fig.5 Temperature contours at key cross-sections inside the server

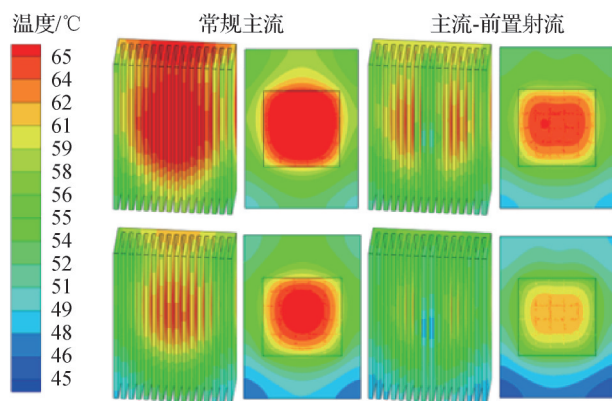


图6 GPU散热器温度云图

Fig.6 Temperature distributions of the GPU heatsinks

来一定的区域冷却能力再分配和流动阻力代价。射流辅助冷却是在GPU降温、阵列温度均匀性改善、CPU温度略升和压降增加之间形成新的性能平衡,因此有必要进一步分析射流孔数和射流比对系统性能的影响规律,以确定更合理的射流参数组合。

3.3 射流孔数与射流比的强化机理

为进一步揭示射流孔数和射流比对流量重新分配及散热强化的影响,分别设置每个GPU散热器对

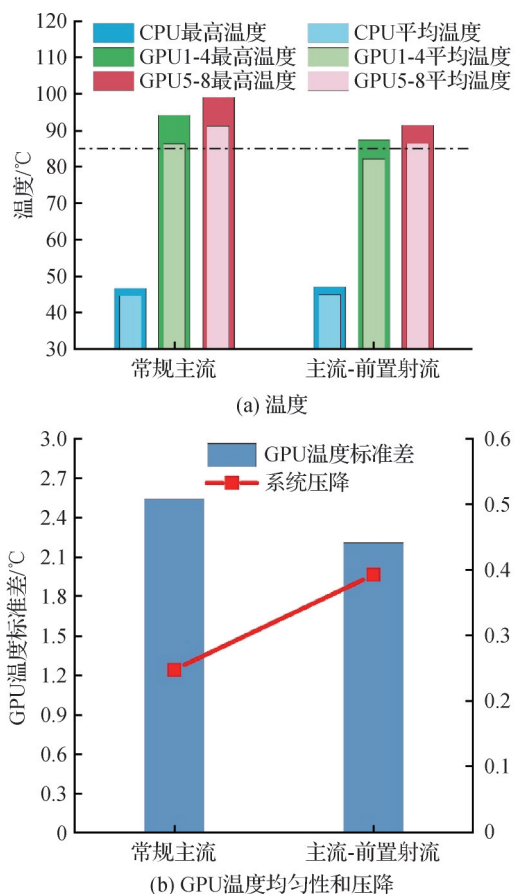


图7 常规主流与主流-前置射流性能指标

Fig.7 Performance indices under the conventional main-flow and main-flow with front-jet

应1、3和5个射流孔,并选取射流比0.2、0.4、0.5、0.6、0.8和1,共18个工况,其他参数均与基准模型一致。图8和图9分别选取1孔、3孔和5孔下射流比为0.2、0.6和1的工况,用于对比射流进入散热器通道的作用效果。

由图8可知,在射流比为0.2时,不同孔数工况下虽已在GPU散热器前方形成局部射流,但进入通道内部有限。1孔工况主要在散热器中心形成局部高速区,两侧通道受影响较小,表明射流作用集中于中心区域。3孔和5孔工况在宽度方向上出现了多个局部高速区,当射流比提高至0.6和1时,射流进入通道内部的能力明显增强。1孔工况射流比升高,但强化主要限于射流轴线附近,表明继续提高单孔射流强度更倾向于增强局部冲击。3孔和5孔工况表现出更明显的宽度方向强化,其中5孔覆盖范围最充分。同时,纯射流条件下底部主流被显著削弱,这意味着更强的GPU区域强化一般伴随更高的系统代价。

图9所示的散热器表面温度分布进一步反映流动差异对局部换热的影响。在1孔工况下,随着射流

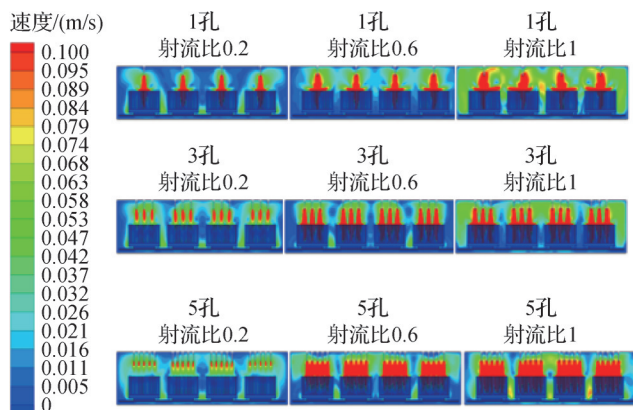


图8 不同射流孔数下服务器截面的速度云图

Fig.8 Velocity contours at server cross-sections under different jet-hole-number conditions

比由0.2提高至1,散热器中心区域高温明显减弱,但两侧温度改善相对有限,说明单孔射流主要强化的是中间局部换热。3孔工况下,散热器表面降温范围沿宽度方向明显扩大,高温区面积显著缩小,表明射流已能够在多个通道前方同时发挥作用。5孔工况下,各通道对应区域的温度分布最为接近,高温区不仅进一步减弱,而且宽度方向上的温度均匀性也明显改善。这说明孔数增加可将原本集中于中心区域的局部强化逐步扩展为更大范围的均匀降温。

射流比增大能够增强局部冲击作用,而孔数增加有利于扩大射流覆盖范围并改善宽度方向上的供液均匀性。二者共同决定散热器通道内的流动强化方式,进一步影响温度分布和整体性能。

3.4 不同射流孔数与射流比性能变化

图10所示为不同射流孔数量下各射流比的性能指标。由图10可知,随着射流比增大,GPU最高温度和温度标准差均呈下降趋势,而CPU温升和系统压降则逐步升高。这说明增大射流比能够将更多冷却油重新分配至GPU散热器区域,从而提高通道内有效流量并强化局部换热;但同时,底部主流被削弱,CPU区域冷却能力下降,系统阻力代价也随之增加。

不同射流孔数下,性能变化趋势具有明显差异。对于1孔工况,GPU最高温度随射流比由0.2增至1,由约91.35℃降至85.10℃,温度标准差由2.21℃降至0.78℃,表明单孔射流具有较强的局部强化能力;但其压降由约393 Pa急剧升至32 333 Pa,阻力代价极高。相比之下,3孔工况在保持明显强化效果的同时表现出更好的综合平衡,GPU最高温度由约95.25℃降至80.83℃,温度标准差由2.45℃降至0.20℃,而系统压降最高约为3 633 Pa,远低于1孔工况。5孔工况则进一步降低了阻力,即使在射流比

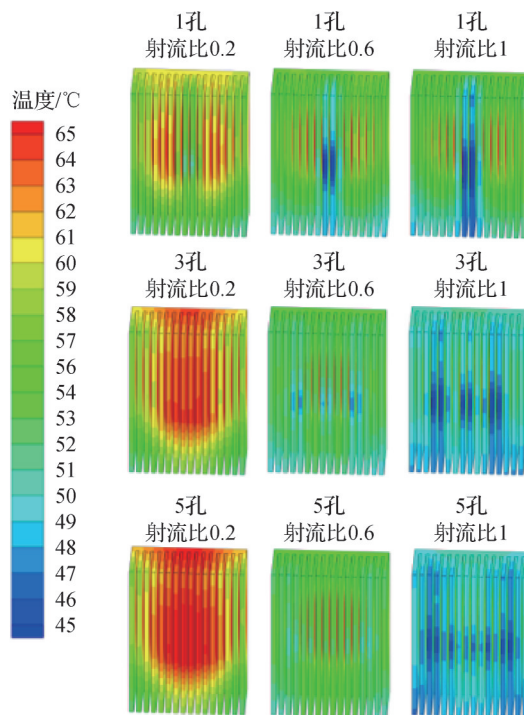


图9 不同射流孔数量下GPU散热器的温度云图

Fig.9 Temperature contours of the GPU heatsink under different jet-hole-number conditions

为1时压降也仅约1 307 Pa,且温度标准差最低可达0.14℃,表明其在温度均匀性和阻力控制方面更具优势;但在多数相同射流比下,GPU最高温度并不一定优于3孔工况,表明孔数增加虽能扩大作用范围,却会削弱单孔射流强度。

对于3孔和5孔工况,当射流比由0.2增至0.6或0.8时,GPU温度和温度均匀性改善较为明显;但当射流比继续提高至1时,降温收益已明显减弱,而CPU温度上升和压降增加更为突出,表明射流强化存在边际收益递减特征。

射流比主要影响强化程度,射流孔数主要影响作用范围与阻力水平。1孔工况表现为中心区域的强局部强化,但压降过高;3孔工况在GPU降温方面更具优势;5孔工况则在温度均匀性和压降控制方面更为突出。

3.5 基于综合性能的最佳射流工况

综合考虑GPU热点控制、GPU温度均匀性、CPU区域温升以及系统压降4项指标,对性能较好的工况进行对比分析。表3所示为常规主流工况、3孔射流比0.6、5孔射流比0.8和5孔射流比1的关键性能指标。

与常规主流工况相比,3孔射流比0.6已能明显降低GPU热点温度并改善温度均匀性,但从整体性能看,该工况在热点控制不及5孔射流比0.8。后者

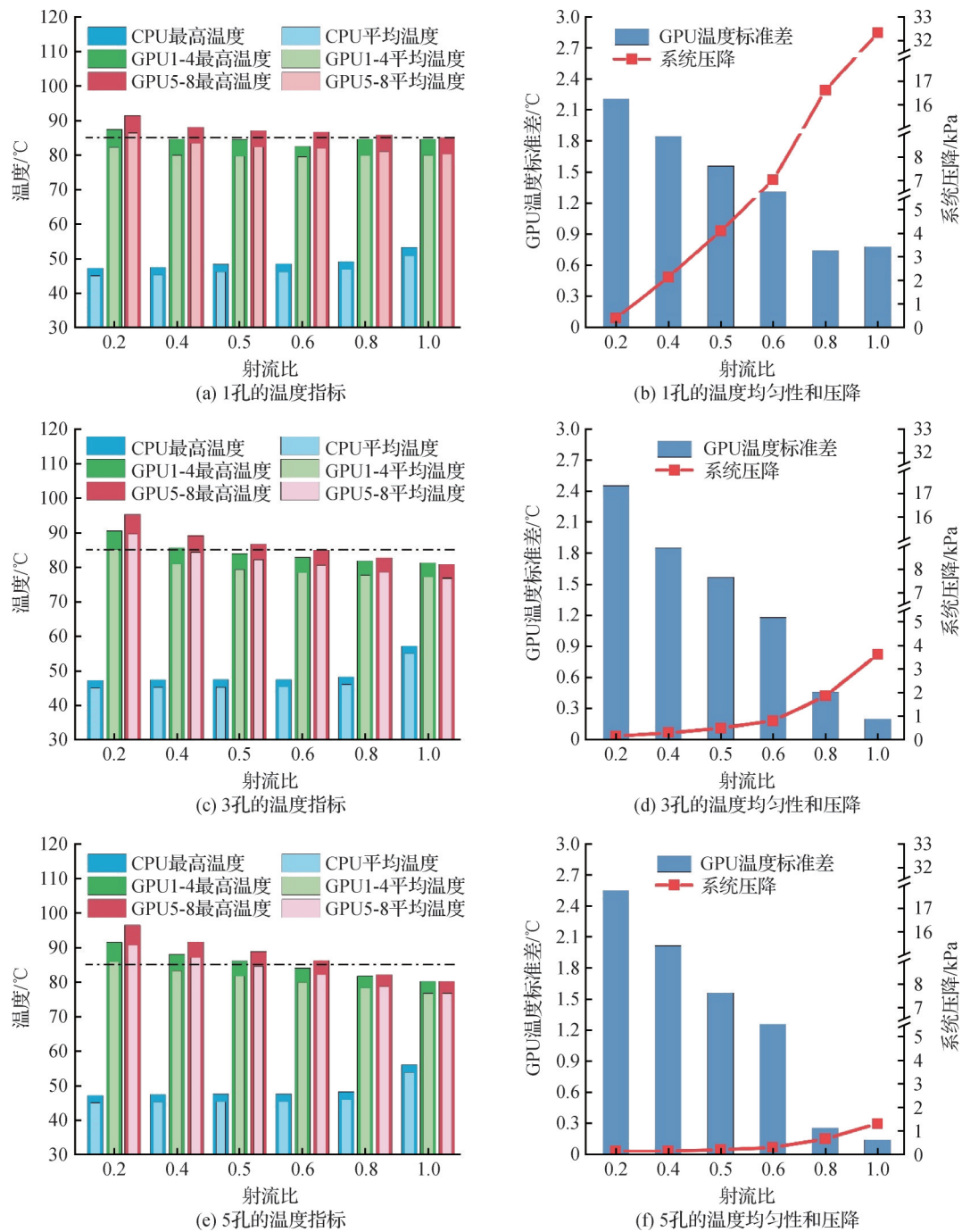


图 10 不同射流孔数量下各射流比的性能指标

Fig.10 Performance indices under different jet-hole numbers and jet-flow ratios

表 3 常规主流与综合性能较好工况的性能指标

Tab.3 Key performance indices of the conventional main-flow condition and selected high-performance cases

指标	$T_{\max, \text{GPU}} / ^\circ\text{C}$	$\delta T / ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{\text{eq}} / \text{kPa}$	$\Delta T_{\text{CPU}} / ^\circ\text{C}$
常规主流	99.12	2.54	0.248 5	0
3孔射流比0.6	84.93	1.18	0.8	0.65
5孔射流比0.8	82.10	0.26	0.667	1.30
5孔射流比1	80.20	0.14	1.307	9.20

不仅进一步降低了GPU最高温度,而且显著改善了温度均匀性,表明多孔布置配合较高射流比能够在宽度方向上形成更充分、更均匀的强化效果。5孔射流比1在GPU最高温度和温度均匀性方面相较5孔射流比0.8仍有一定改善,但这种改善已不明显;同时,CPU温升和系统压降却进一步增加,说明继续提高射流比的收益已明显减弱。5孔射流比1虽代表更强的射流强化,但其代价也更高,而新增强化并未带来与之相匹配的性能提升。

5孔射流比0.8在4项指标之间表现出更合理的平衡。与常规主流相比,该工况下GPU最高温度由99.12℃降至82.10℃,GPU温度标准差由2.54℃降至0.26℃,表明其在抑制热点温度和改善多GPU温度一致性方面具有明显优势。

因此,5孔、射流比0.8为研究范围内的最佳工况。该工况并非所有单项指标的绝对最优,但在强化强度、作用范围和系统代价之间取得了较好的综合平衡。

4 结论

针对高功率单相浸没式油冷服务器中旁路流明显、散热器通道内有效流量不足及局部热点突出的散热问题,提出了前置射流辅助冷却方案,并对其流量重新分配与散热强化规律进行了数值研究。得到结论如下:

1)常规主流工况下,冷却油更易沿侧壁及器件间低流阻区域形成旁路流动,GPU散热器通道内有效流量不足。引入射流通过局部冲击、滞止增压和卷吸作用增强了通道入口处的法向动量和流体更新能力,使更多冷却油进入散热器通道内参与换热。第1排GPU平均温度和最高温度分别降低约4℃和7℃,第2排分别降低约5℃和8℃,GPU温度标准差由2.54℃降至2.21℃;同时,CPU区域温度略有升高,系统压降由约248 Pa增至393 Pa。

2)射流比主要影响强化强度,每个GPU散热器对应的射流孔数主要影响作用范围和温度均匀性。随着射流比增大,GPU最高温度和温度标准差总体下降,但CPU温升和系统压降同步增加。1孔工况表现为中心区域的强局部强化,但压降代价较高;3孔工况在GPU热点控制方面表现较好;5孔工况则在温度均匀性和阻力控制方面更具优势。

3)综合对比典型工况可知,5孔、射流比0.8在GPU热点控制、温度均匀性、CPU区域影响和系统阻力之间取得了较好的平衡。与常规主流工况相比,GPU最高温度由99.12℃降至82.10℃,GPU温度标准差由2.54℃降至0.26℃,表现出较好的综合散热性能。

综上,前置射流辅助冷却能够有效改善高功率单相浸没式油冷服务器中GPU散热器通道内有效流量不足的问题。合理匹配射流孔数与射流比,是实现高效冷却且代价可控的关键。

参考文献

[1] 张子仪,蔡泽祥,郭采珊,等.面向泛在电力物联网的

分布式云数据中心优化选址[J].电力系统保护与控制,2020,48(3):36-42.(Zhang Ziyi, Cai Zexiang, Guo Caishan, et al. Optimization of distributed cloud computing data center layout for ubiquitous power Internet of Things [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 36-42.)

- [2] 卢子敬,邓艺欣,蒋霖,等.“东数西算”背景下大型数据中心建设对电网规划的影响研究[J].全球能源互联网,2022,5(6):552-562.(Lu Zijing, Deng Yixin, Jiang Lin, et al. Research on the influence of large-scale data center construction on power grid planning under the background of east digital west computing [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(6): 552-562.)
- [3] Saini M, Webb R L. Heat rejection limits of air cooled plane fin heat sinks for computer cooling [C]//ITherm 2002. Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2002: 1-8.
- [4] Ellsworth M J Jr, Goth G F, Zoodsma R J, et al. An overview of the IBM power 775 supercomputer water cooling system [J]. Journal of Electronic Packaging, 2012, 134(2): 020906.
- [5] Wang Han, Gan Yunhua, Li Rui, et al. Experimental study on the thermal performance of a liquid-cooled heat sink integrating heat pipes for dual CPU servers [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121851.
- [6] Huang Yongping, Deng Zilong, Chen Yongping, 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.
- [7] Satyanarayana G, Ruben Sudhakar D, Muthya Goud V, et al. Experimental investigation and comparative analysis of immersion cooling of lithium-ion batteries using mineral and therminol oil [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225: 120187.
- [8] Ali A. Thermal performance and stress analysis of heat spreaders for immersion cooling applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 181: 115984.
- [9] Kuncoro I W, Pambudi N A, Biddinika M K, et al. Immersion cooling as the next technology for data center cooling: a review [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1402(4): 044057.
- [10] Shah J M, Eiland R, Rajmane P, et al. Reliability considerations for oil immersion-cooled data centers [J]. Journal of Electronic Packaging, 2019, 141(2): 021007.
- [11] Chen Xi, Huang Yongping, Xu Shijie, et al. Thermal performance evaluation of electronic fluorinated liquids for single-phase immersion liquid cooling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 220: 124951.

- [12] Eiland R, Fernandes J, Vallejo M, et al. Flow Rate and inlet temperature considerations for direct immersion of a single server in mineral oil [C]//Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2014: 706–714.
- [13] Huang Yongping, Ge Junlei, Chen Yongping, 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.
- [14] Shrigondekar H, Lin Y C, Wang Chichuan. Investigations on performance of single-phase immersion cooling system [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 206: 123961.
- [15] Liu Hongmin, Chang Zhe. Multi-objective optimization of temperature uniformity in the immersion liquid cooling cabinet with Taguchi-based grey relational analysis [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 154: 107395.
- [16] Zhang Yingying, Wang Yu, Kosonen R, et al. Numerical research on the flow and heat transfer characteristics in the immersion jet cooling for servers [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 60: 104748.
- [17] He Juan, Deng Qinghua, Xiao Kun, et al. Heat transfer enhancement by V-shaped protrusions on jet plate under different crossflow conditions [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 141: 106597.
- [18] Luo Qingyi, Wang Changhong, Wen Haiping, et al. Research and optimization of thermophysical properties of sic oil-based nanofluids for data center immersion cooling [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 131: 105863.

通信作者简介

魏健健,男,博士,副教授,浙江大学制冷与低温研究所,0571-87953944, E-mail: weijzju@zju.edu.cn。研究方向:建筑通风、数据中心热管理、低温传热等。

About the corresponding author

Wei Jianjian, male, Ph. D., associate professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, 86-571-87953944, E-mail: weijzju@zju.edu.cn. Research fields: building ventilation, data center cooling, cryogenic heat transfer, etc.