文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09
doi:10.12465/issn.0253-4339.20260820004

面向高功率密度数据中心的液冷-风冷耦合冷却系统研究进展

胡 深[1,2] 马宇航[1,2] 吴玉庭[1,2] 李晓琼[1,2] 王 鹏[3] 杜彦君[1,2]

(1 北京工业大学新能源学院 北京市传热与能源利用重点实验室 北京 100124; 2 国家能源用户侧储能创新研发中心 北京 100124; 3 共益合创集团有限公司 太原 030000)

摘 要 面对数据中心算力急剧增加带来的散热挑战,传统风冷散热的散热密度上限已无法满足数据中心散热需求,全浸没液冷因浸没液成本、维护便捷性、材料兼容性等问题而难以广泛应用。本文综述了液冷-风冷耦合冷却系统在高功率密度数据中心的应用进展,指出了利用冷板式液冷高效捕获芯片热量,可显著压缩辅助风冷负荷。研究证实,通过机柜流场重构与低流速风冷优化,配合智能协同控制,系统PUE可优化至1.15以下。未来,风液同源一体化及余热回收技术将推动数据中心向零碳目标演进。本文旨在为平衡散热效能与经济效益的下一代数据中心建设提供技术指引。

关键词 数据中心冷却;液冷-风冷耦合冷却系统;高功率密度;零碳;散热
中图分类号: TB657.2;TP308 **文献标识码**: A

Research Progress on Liquid-Air Coupled Cooling Systems for High-Power-Density Data Centers

Hu Shen[1,2] Ma Yuhang[1,2] Wu Yuting[1,2] Li Xiaoqiong[1,2] Wang Peng[3] Du Yanjun[1,2]

(1. Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Utilization, College of New Energy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. National Energy User-Side Energy Storage Innovation R&D Center, Beijing 100124, China; 3. Gongyi Hechuang Group Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract Faced with the heat dissipation challenges posed by the rapid increase in the computing power of data centers, traditional air cooling can no longer meet their cooling demands because of its limited heat dissipation density. Meanwhile, full immersion liquid cooling is difficult to adopt widely owing to coolant cost, ease of maintenance, and material compatibility. This paper reviews the progress in the application of liquid-air coupled cooling systems in high-power-density data centers and highlights that utilizing cold-plate liquid cooling to efficiently capture the chip heat can significantly reduce the auxiliary air cooling load. It confirms that through the reconstruction of rack airflow fields and optimization of low-flow air cooling, combined with intelligent coordinated control, the power usage effectiveness of the system can be optimized to below 1.15. In the future, the integration of liquid and air cooling systems sharing the same source and waste heat recovery technologies would drive data centers toward zero-carbon goals. This review aims to provide technical guidance for the construction of next-generation data centers that balance cooling efficiency and economic benefits.

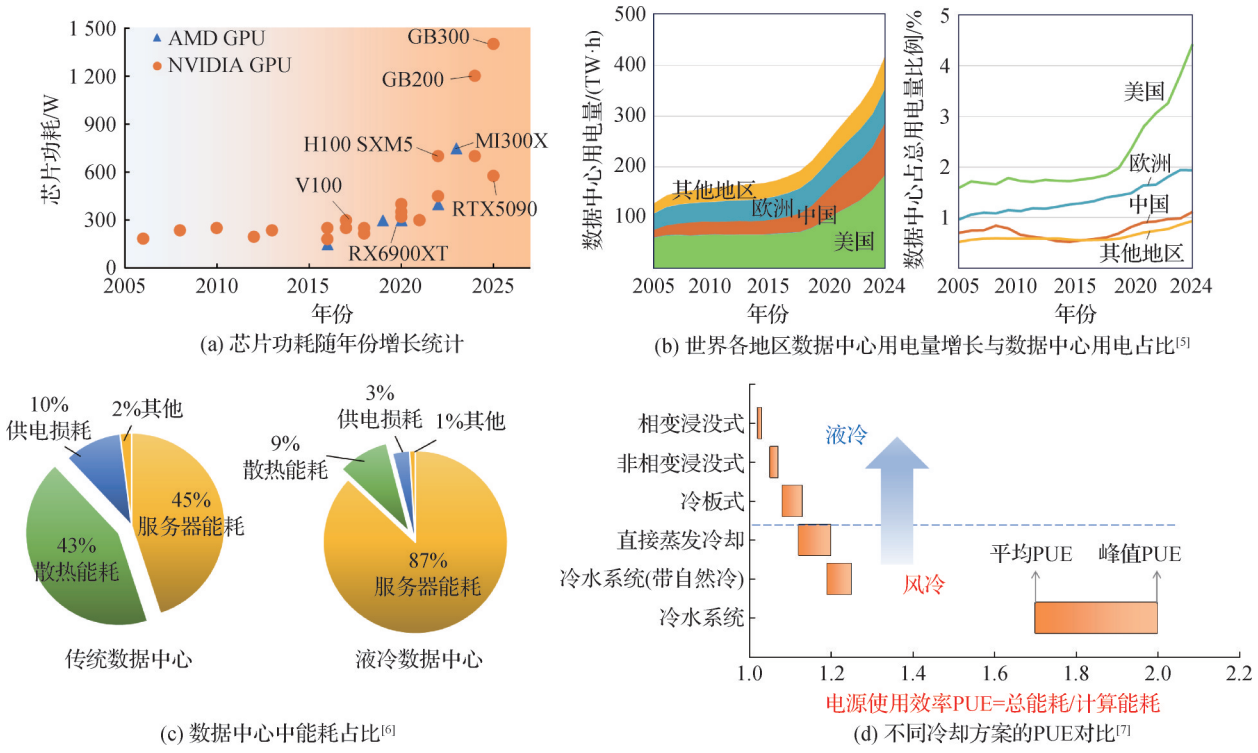
Keywords data center cooling; liquid-air coupled cooling system; high power density; zero-carbon; heat dissipation

随着“东数西算”工程的深入实施以及人工智能、高性能计算及大模型训练的爆发式增长,数据中心作为数字经济发展的重要基础,能耗与散热问题严重制约算力释放[1-2]。芯片技术的发展使得单芯片功耗突破700 W,并推动单机柜功率增至20~40 kW,部分高密场景已突破100 kW,如GB200、GB300[3]。高热流密度不仅加剧了芯片的热累积效应,也对传统冷却技术的换热极限与能效水平提出了严峻挑战[4]。芯片发展带来的节能减排问题如图1所示。

数据中心工程中常用的冷却技术主要包括空气冷却(风冷)与液体冷却(液冷)2类[5]。在传统的散热结构中,由于空气的传热系数较低,风冷系统在高功率密度场景下的散热能力面临严峻挑战[6]。为了带走同等热量,风冷系统需要极高的风速和风量,不仅

收稿日期:2026-08-20;修回日期:2026-08-31;录用日期:2026-09-22 责任编辑:田甜

移动阅读



(a) 芯片功耗随年份增长统计

(b) 世界各地区数据中心用电量增长与数据中心用电占比[5]

(c) 数据中心中能耗占比[6]

(d) 不同冷却方案的PUE对比[7]

图1 芯片发展带来的节能减排问题[3]

Fig.1 Energy conservation and emission reduction challenges brought by chip development[3]

使得风机能耗急剧增加(占IT能耗的10%~20%),还易引发气流组织不均、局部热点频发及噪声超标等问题[7]。全浸没式液冷技术通过直接接触换热实现了较高的散热效率,但其对服务器硬件的深度改造、昂贵的绝缘冷却液成本以及维护便捷性等问题,使其在当前存量数据中心改造及大规模通用数据中心建设中无法广泛使用[8]。

基于上述问题,芯片级液冷与机柜级风冷相耦合的冷却结构应运而生,并广泛应用于高密度数据中心[9]。该结构利用冷却液高的导热系数(约为空气的25倍)和比热容,通过冷板对CPU(中央处理器,central processing unit)、GPU(图形处理器,graphics processing unit)等高热流密度核心部件进行冷却,捕获并带走80%~95%的设备热量,同时,配合风冷系统对内存、硬盘、电源模块及主板VR(电压调节模块,voltage regulator)等低功耗或难以采用液冷方式冷却的部件进行辅助散热。这种冷却方法避免了全液冷的高成本与兼容性问题,还突破了纯风冷的应用极限,实现了散热能力与经济效益的平衡[10]。

近年来,国内外学者围绕液冷-风冷耦合系统展开了广泛研究。在液冷侧,研究重点集中于微通道冷板的流动换热机理、流道拓扑优化以及CDU(冷量分配单元,coolant distribution unit)的动态控制策略[11-13]。风冷侧注重气流组织优化与风机节能[14]。然而,现有研究多将液冷与风冷视为2个独立的子系统,针对二者耦合机制,特别是关于HCR(液冷热捕获效率,heat capture ratio,服务器总产热中由液冷系统带走的热量百分比)对辅助风冷负荷的动态影响、低散热需求下的机柜流场重构特性以及风-液系统协同调控策略等方面的系统性综述仍显不足。

鉴于此,本文综述了液冷-风冷耦合冷却系统的最新研究进展。首先,分析了冷板式液冷系统的高效传热机理及其在高热流密度芯片散热中的作用。其次,讨论在液冷承担主要热负荷背景下,辅助风冷系统的适配性优化策略,包括低流速气流组织与热盲点消除技术。最后,总结风-液协同的能效优化模型与智能调控方法,并展望风液同源一体化及余热回收驱动零碳数据中心的发展趋势,旨在为下一代高功率密度数据中心的热管理设计与优化提供参考。

1 液冷-风冷耦合冷却的系统架构

高功率密度数据中心的热管理实际是对热量的分级处理,在液冷-风冷耦合系统中,液冷系统承担高热流密度核心芯片的散热任务,风冷系统则补充处理液冷无法直接覆盖的低密度热量以及配电系统相关部件产生的热量[15]。相关研究指出,在单机柜功率>30 kW时需考虑液冷与风冷相结合的冷却策

略,液冷(尤其相变液冷)的传热能力比空气强制对流高约2个数量级,这也是液冷承担核心高热流密度部件、风冷协同处理辅助散热分工的主要原因[16-17]。

在系统架构层面,研究者主要从冷源共享与梯级利用展开研究。针对数据中心高功率密度散热难题,Yan Meiyue等[16]提出了一种拓扑优化的混合集成冷板,通过增材制造将液冷通道与空气流道集成于单一整体结构中,在1.25~1.5 L/(min·kW)的最优流量下基板温度维持在约52.5 ℃,较商用冷板在同泵功下核心温度降低4~6 ℃,同温度下泵功降低约50%。该混合冷板在纯风冷模式下也可维持67%的热功率,在500 kW真实数据中心测试床中将PUE(电能利用效率,power usage effectiveness,总能耗与IT设备能耗的比值)由8降至1.23。此外,高远等[2]提出"先风冷、后液冷"的梯级水流设计以降低㶲损失并实现冷量品位匹配(系统结构如图2所示)。结果表明,该系统在高温工况下COP可达28.03,低温工况下峰值达33.4,为冷量品位匹配提供了实证。针对液冷无法覆盖全部发热元件的集成复杂度问题,王露等[3]提出2种服务器级相变风辅液冷系统,利用无泵驱动的气液相变换热机制辅助液冷冷却。结果表明,50 kW负荷下蒸发器表面温差仅为1.9 ℃,5个典型气候区节能分析显示较传统系统节约电能约30%,北京与西安地区全年PUE低至1.16。Wang Zixing等[18]建立了风-液混合服务器模型,CPU采用微通道冷板液冷,硬盘/内存/电源仍由风机冷却,证实了高温进水(45 ℃)条件下系统仍可安全运行,西安地区十年期PUE为1.18。李金峰等[19]研究了液冷搭配不同冷却系统的节能潜力,指出液冷耦合可使自然冷源利用时间提升20%~30%,PUE降低了0.05~0.06。工程实践方面,皮晓峰等[20]的铁路数据中心微模块方案验证了"风液比3:7"(风液比指风冷与液冷的散热热量比例)结构的可行性。浪潮通信提出的"分温智流环网"架构通过独立环网分别为风冷供应低温水、为液冷供应中温水,并共用高温回水网络,实现了冷量的精准分级与梯次利用,获2025年度中国IDC(互联网数据中心,Internet data center)产业创新技术产品奖,从工程实践角度证实了阶梯利用的可行性。

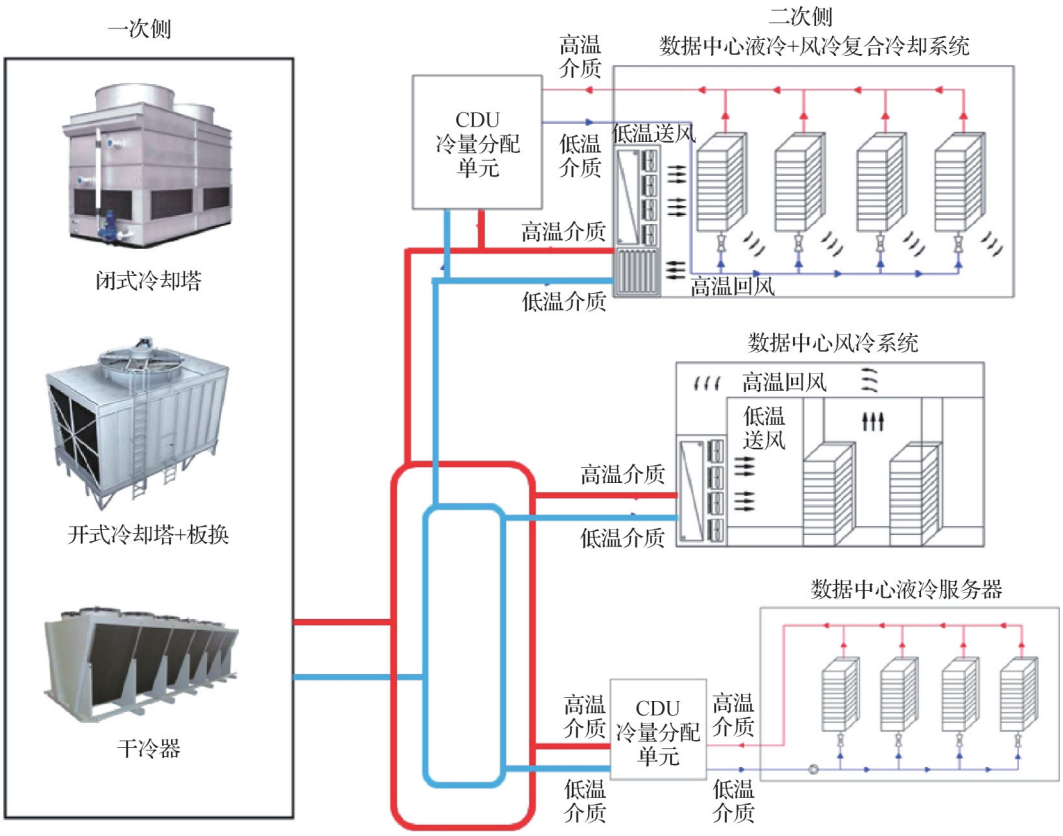


图2 风液同源液冷系统[2]

Fig.2 Unified air-liquid cooling system[2]

在耦合机制与部件层面,V. E. Ahmadi等[21]在受控风洞中对9台OCP(开放计算项目,open compute project)标准服务器进行实验,CPU采用两相直接芯片液冷,DIMM(内存,dual inline memory module)、VRM(电压调节器,voltage regulator module)等仍由传统机箱风冷,在不同负载(25%~100%)与进风温度

(25、35、45 ℃)下揭示了混合冷却的热量重分配机制。Jiao Juanjuan 等[22]提出集成歧管微通道冷板与风冷散热器的混合冷却系统,针对 CPU 利用率、风量、液冷流量等多参数建立瞬态热流体模型,并提出分区温控策略。结果表明,在 100% CPU 利用率下,相比纯风冷峰值温度降低 34.1 ℃,温度响应时间从 100 s 缩短至 20 s,优化条件下最高温度降低 25.9%、散热效率提升约 8.13 倍、功耗降低 78.7%。F. M. Naduvilakath-Mohammed 等[23]对高性能 CPU 闭环液冷系统进行实验,液冷侧为冷板、空气侧为远程风冷换热,发现液体流速与风速的协同匹配是实现最低能耗的关键,传统风冷已接近其理论极限。王玉珏等[24]针对水冷型热管散热器开展实验与数值研究,发现进水温度是影响散热效果的最主要参数。上述研究表明,只有通过液体流速、风速、进水温度等参数的联合优化,才能充分释放混合冷却的节能潜力。

2 芯片级液冷技术

液冷-风冷耦合系统中,液冷侧承担 CPU、GPU 等高热流密度核心芯片的散热,其换热能力直接决定 HCR 的上限,是实现系统高比例热捕获,进而将辅助风冷负荷压缩至最低限度的基础[3]。本节围绕冷板的研究现状,指出其优化方向在于提升 HCR,从而为风冷侧创造低负荷运行条件。

2.1 冷板微通道

冷板式液冷是将金属冷板紧贴 CPU/GPU 等热源,借助冷却液带走芯片表面热量,是目前数据中心应用最广泛的液冷方式。

微通道流动沸腾凭借潜热实现高效换热,具有热阻低、温度均匀性好、结构紧凑的优势,是解决高功率芯片热挑战的有效方案[11]。近年来,学者通过烧结铜粉增强结构[12]、顶部间隙设计[13]等方式改善流动沸腾的稳定性和传热性能。两相冷板技术则利用低沸点工质在冷板内发生相变,进一步提升了传热系数和温度均匀性,如特斯拉型微通道[25]、树状与蜘蛛网状仿生流道[26-27]等拓扑优化均旨在提升临界热流密度和温度均匀性。此外,冷板内部流道结构(如蛇形、波浪形、针翅形等)的优化也致力于降低热阻与压降,提升换热性能[15,28-30]。

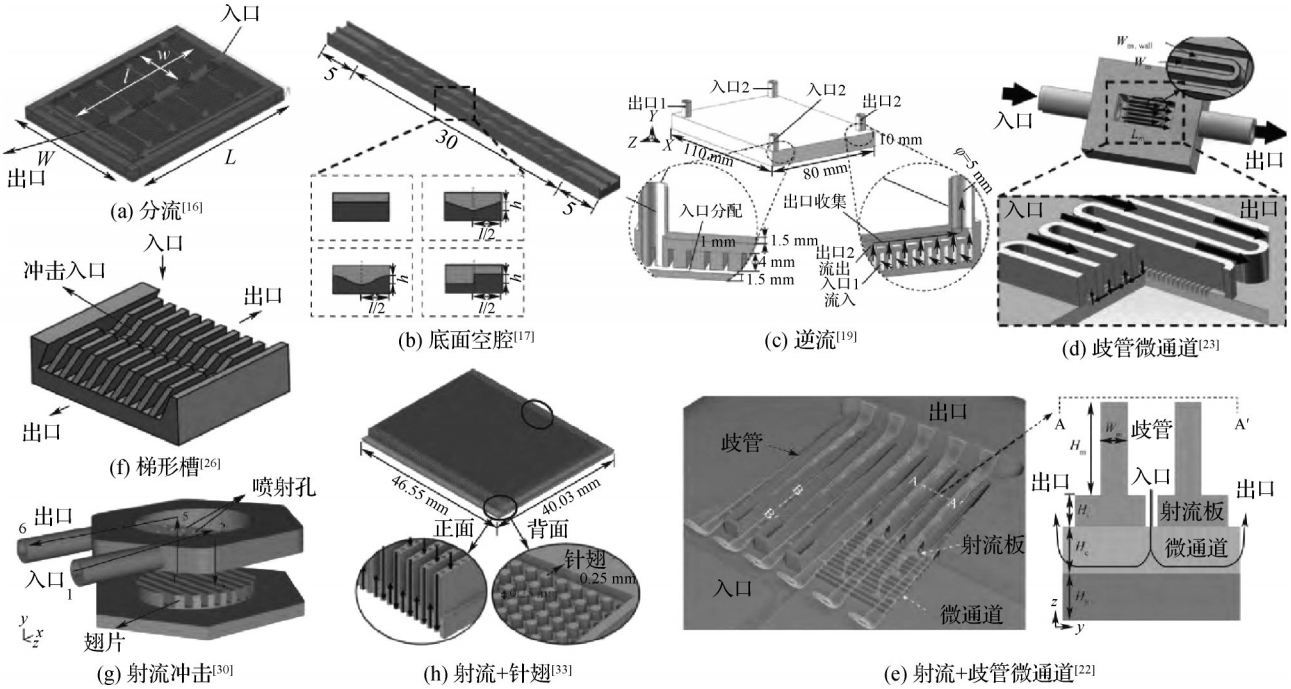


图3 微通道冷板结构[11]

Fig.3 Microchannel cold plate structure[11]

2.2 液冷-风冷耦合机制

风-液耦合系统的能效上限由 HCR 决定,而其运行能效则取决于液冷流量与风量的动态匹配。F. M. Naduvilakath-Mohammed 等[23]的实验证实,液体流速与风速的协同匹配是实现最低能耗的关键。

冷板结构优化主要在于提升液冷侧的 HCR,使液冷能够捕获并带走更大比例的热量。而 HCR 的改变将引发风冷负荷性质、机柜气流组织、风-液参数匹配以及系统控制策略的连锁变化。图 4 直观展示了 HCR 驱动下风-液耦合系统的参数相互作用关系:

HCR升高使风冷负荷由芯片高密度热量转变为低密度分散余热,风机所需风量非线性下降;液冷流量与风速存在协同匹配点,单一参数优化无法实现系统能耗最低;同时,液冷侧热惯性大、风冷侧响应快的特性要求二者在热力与控制层面深度协同。

表1 不同HCR区间下风-液耦合特征对比

Tab.1 Comparison of wind-liquid coupling characteristics under different HCR ranges

参数	低HCR(<0.7)	高HCR(>0.9)
风冷负荷	芯片高密度热量,负荷高	低密度分散余热,负荷低
气流组织	高风速强对流,易局部热点	低流速均流,需导流优化
参数匹配	液冷流量低,风量大	液冷流量高,风量低,需协同优化
系统控制	风-液独立控制	风-液协同控制

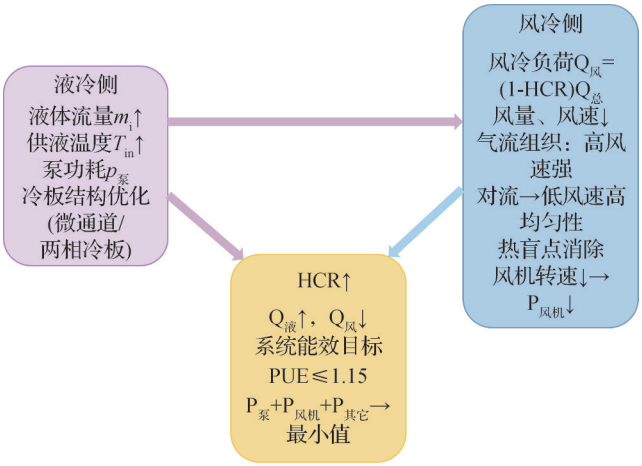


图4 风-液耦合系统机制

Fig.4 Mechanism of wind-liquid coupling system

3 辅助风冷系统的适配性优化

液冷-风冷耦合系统中,高热流密度区域热量被液冷带走后,内存、硬盘、电源模块及主板VR等剩余热源呈现出功率低、分布散的特征[3]。因此,辅助风冷优化的核心在于重构低流速下的气流组织,消除因液冷安装导致的流场盲区,并通过变速控制实现极致能效。

3.1 液冷环境下的气流组织重构

在液冷-风冷耦合结构中,随着液冷HCR的提升,风冷系统承担的负荷从芯片高密度热量转变为内存、硬盘等低密度、分散型余热,进而要求气流组织从高风速强对流转变为低流速高均匀性的流场。王露等[3]针对30~50 kW单机柜场景提出相变风辅液冷系统,由服务器蒸发器模块、重力热管及风冷冷凝器构成。实验表明,该系统在50 kW热负荷下运行稳定,5个不同高度蒸发器表面平均最大温差仅为1.9 ℃,验证了低流速下依然能保持良好的均温性。V. E. Ahmadi等[21]在受控风洞测试9台OCP标准服务器(CPU采用两相液冷,内存DIMM、VRM等仍采用风冷),发现即使总风冷负荷很小,若不对内存DIMM和VRM区域的局部气流进行导流优化,微小的残留热负荷仍可能在结构复杂的区域形成局部热点。

3.2 低功耗风机与变速控制

通过液冷带走核心热负荷后,辅助风冷风机功耗占比发生显著降低。西安交通大学陶文铨团队针对风-液混合服务器与数据中心系统的研究表明,相较于传统空气冷却,风-液混合冷却总能耗降低16.19%,主要降低了冷水机组压缩机和服务器风扇的能耗[31]。图5所示为空气冷却系统[30]。Jiao Juanjuan等[22]提出集成歧管微通道冷板与风冷散热器的混合服务器及分区温控策略,在100% CPU利用率下,较纯风冷峰值温度降低34.1 ℃,响应时间从100 s缩短至20 s,优化工况下功耗降低78.7%,揭示了风液参数协同优化的价值。液冷未覆盖的电源模块、内存等"盲区"余热仍需辅助风冷排出,内存温度超85 ℃时错误率指数级上升。针对内存盲区,研究指出DDR5(双倍数据率5同步动态随机存取内存,double data rate 5 synchronous dynamic random-access memory)内存液冷是下一代高密度服务器必要方向,已提出3种具备工程可行性的液冷结构,但面临内存条间距小、频繁更换需模块化设计、液冷路径需避开VR供电部件等挑战[32]。

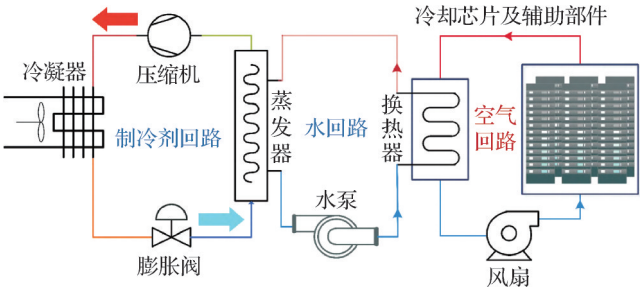


图5 空气冷却系统

Fig.5 Air cooling system

4 风-液协同的能效优化与调控策略

冷却介质在热负荷分配、流场-温度场匹配及多变量协同耦合等方面影响液冷-风冷耦合系统的能效[33]。近年来,国内外学者围绕HCR敏感性、流场协同及智能调控等方面开展了大量研究。

HCR是决定耦合系统能效上限的核心参数。研究表明,全部风冷、风液比5:5及全液冷方案的散热

系统中部分电能利用效率(pPUE,机房部分能耗与IT设备能耗的比值)分别为1.39、1.29及1.18。改造项目中保持风冷辅助散热,pPUE可进一步降至1.13。肖新文等[34-35]基于我国36个城市热工区属的测算证实,冷板式液冷数据中心pPUE均低于1.13,且冷板式液冷与动态自然冷却空调结合时,计算pPUE可低至1.09。这表明,HCR提升的本质在于提高液冷散热效率、降低辅助风冷负荷占比,并促使风机能耗非线性下降。

冷板布局与流量分配决定了机柜残余热负荷的分布,进而影响风冷效率。研究指出,冷板级拓扑优化可实现压降降低70%~90%、温度均匀性提升40%~60%,歧管设计优化可将流量不均匀因子降低38%~47%[36-38]。当冷板流量分配不均时,局部GPU温度偏差可达8~12 ℃,即便液冷承担80%~90%热负荷,残余风冷负荷仍可能形成热点。因此,协同优化的核心在于通过冷板流量均衡,使残余风冷负荷呈现“低强度、高均匀性”特征,从而降低风冷对流场均匀性的苛刻要求,使风机可在低转速下运行,保持低功耗。

4.1 工程案例解析

工程实践是验证液冷-风冷耦合系统可行性与节能潜力的关键。

秦淮数据华北基地作为国内最早的超大规模冷板液冷商用案例之一,采用“冷板液冷+磁悬浮相变冷却”组合系统。液冷侧采用湿帘式干冷器,风侧采用“风冷磁悬浮主机+薄板风墙”分布式制冷,依靠自研鲲鹏智维平台实现AI动态调优。2024年负载平稳机房最优月度PUE低至1.118,全年WUE(水资源利用效率,water usage effectiveness)仅为0.15。

中国电信18 kW路由器试点揭示了耦合结构的能效逻辑。该试点采用70%板卡液冷、30%器件风冷,满负载PUE达1.15。该结构是由液冷捕获大部分高密度热量,使风冷系统仅需处理低密度残余负荷,从而在较高供水温度下运行并充分利用自然冷源。对比测试显示,液冷微模块PUE较风冷微模块降低约0.2。这验证了通过提升HCR,可同步实现提高供水温度、降低风机转速以及缩减空调容量。

嘉庚智算中心在不足10 m^2空间内部署390台CPU服务器、6台GPU服务器及2台胖节点,采用高密冷板式液冷构建风液协同散热系统,PUE低于1.2,运行至今能耗降低30%。

4.2 智能控制系统:基于AI的预测性调控

针对AI服务器功耗波动大的特点,基于AI的风-液协同控制成为研究热点。工况自适应系统通过LSTM神经网络预测未来热负荷,划分纯风冷、混合散热及纯液冷模式,并以总能耗最小化为目标,通过模糊PID控制器迭代计算最优液冷泵功率与风机转速[39]。针对高密度GPU节点,流量均衡策略可将中心与边缘GPU温差从8~12 ℃降至3~5 ℃。目前市面公司围绕该方向取得显著进展,如浪潮风液同源方案融合CFD(计算流体动力学,computational fluid dynamics)数字孪生与LSTM(长短期记忆网络,long short-term memory)算法,通过强化学习动态调节冷却参数,全年能效提升15%以上。百度智能云双模温控方案使机房温差缩小至±1.5 ℃,制冷能耗降低18%。AI(人工智能,artificial intelligence)驱动的预测性调控正取代传统反应性控制,成为主流方式。

表2 典型液冷-风冷耦合系统定量对比

Tab.2 Quantitative comparison of typical liquid cooling-air cooling coupling systems

名称	IT功率/机柜	HCR	辅助风冷比例	供液温度/℃	风量/风机功耗	PUE/pPUE
Yan Meiyu等[16]	500 kW	—	—	—	1.25~1.5 L/(min·kW)	1.23
王露等[3]	30~50 kW	—	低	—	低流速	pPUE 1.16
肖新文[34-35]	数据中心级	0 / 0.5 / 1	1 / 0.5 / 0	—	—	pPUE 1.39/1.29/1.18
V. E. Ahmadi等[21]	9台OCP服务器	两相液冷占比高	内存/VRM风冷	25~45	—	—
F. M. Naduvilakath-Mohammed等[23]	高性能CPU	—	—	—	协同匹配点	—

5 结论与展望

本文围绕面向高功率密度数据中心的液冷-风冷耦合冷却系统,系统综述了系统架构、芯片级液冷技术、辅助风冷优化及风-液协同调控策略的研究进展,得到如下结论:

1)利用冷板式液冷高效捕获CPU、GPU等核心热源,并配合风冷处理内存、硬盘等低密度残余热负荷,是突破传统风冷散热极限、平衡散热效能与经济效益的重要技术路径。

2)通过冷板微通道的拓扑优化与两相流强化换热技术,液冷侧传热系数与临界热流密度得到显著提升。

3)液冷对核心热量的捕获,使得辅助风冷系统可在低流速下运行,通过气流组织重构与风机深度变速,大幅降低了泵功与风机能耗。

4)工程实践与数值模拟均证实,该耦合架构结合自然冷源利用与智能协同控制,可将数据中心PUE优化至1.15以下。

展望未来,液冷-风冷耦合技术发展方向如下:

1)风液同源一体化。推进冷板、管路、快速接头及CDU的标准化与模块化设计,开发集成度更高的"风液同源"换热单元,降低部署复杂度与全生命周期成本,解决存量数据中心改造难题。

2)AI深度赋能。基于数字孪生与强化学习算法,构建跨时空尺度(从芯片结温到室外气象条件)的预测性调控系统。

3)余热回收驱动零碳。探索耦合系统在中高温工况下的运行特性,将服务器废热转化为区域供暖或吸附制冷的高品位热源,通过"算热协同"提升能源综合利用率,支撑数据中心向零碳乃至负碳基础设施发展。

本文受北京市自然科学基金项目(3254050)、北京市教育委员会科技发展计划项目(JC052004202401)、北京工业大学国际科研合作一云程计划(2026YCZD15)资助。(The project was supported by the Natural Science Foundation of Beijing (No. 3254050), the R&D Program of Beijing Municipal Education Commission (No. JC052004202401), and the Yuncheng Program for International Scientific Research Cooperation, BJUT (No. 2026YCZD15).).

参考文献

[1] 邹启凡, 刘洪, 罗海亮, 等. 高功率大面积AI芯片液冷技术进展[J]. 制冷学报, 2026, 47(1): 20-36. (Zou Qifan, Liu Hong, Luo Hailiang, et al. Research progress on liquid cooling technologies for high-power and large-area AI chips[J]. Journal of Refrigeration, 2026, 47(1): 20-36.)

[2] 高远, 黄翔, 冯世豪, 等. 智算中心蒸发冷却风液协同冷却系统构建与实验验证[J]. 制冷学报, 2026, 47(1): 96-104. (Gao Yuan, Huang Xiang, Feng Shihao, et al. Development and experimental validation of an integrated evaporative and hybrid air-liquid cooling system for intelligent computing centers[J]. Journal of Refrigeration, 2026, 47(1): 96-104.)

[3] 王露, 王馨翊, 张博, 等. 高密度数据中心相变风辅液冷系统节能分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2026, 66(4): 810-817. (Wang Lu, Wang Xinyi, Zhang Bo, et al. Energy efficiency analysis of phase-change air-assisted liquid cooling systems for high-density data centers[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2026, 66(4): 810-817.)

[4] Dong Zhangzhi, Li Xiaogang, Li Zhe, et al. Modeling simulation and temperature control on thermal characteristics of airborne liquid cooling system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 113112-113120.

[5] Amin I D, Davide Z. Davide C. Cooling technologies in datacom facilities: an overview and perspectives [C]// International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2022.

[6] Chang Qiankun, Huang Yuanfeng, Liu Kaiyan, et al. Optimization control strategies and evaluation metrics of cooling systems in data centers: a review[J]. Sustainability, 2024, 16(16): 41.

[7] Zhang Qingxia, Meng Zihao, Hong Xianwen, et al. A survey on data center cooling systems: technology, power consumption modeling and control strategy optimization [J]. Journal of Systems Architecture, 2021, 119: 102253.

[8] 王霞, 张英, 戈汕琴, 等. 浸没式液冷在电池热管理与数据中心领域的应用进展[J]. 低温工程, 2025(5): 75-85. (Wang Xia, Zhang Ying, Ge Shanqin, et al. Application progress of immersion liquid cooling in fields of batteries energy storage systems and data centers[J]. Cryogenics, 2025(5): 75-85.)

[9] Heydari A, Gharaibeh A R, Tradat M, et al. Performance analysis of liquid-to-air heat exchanger of high-power density racks[J]. Journal of Electronic Packaging, 2024, 146(4): 041102.

[10] Zhang Yufeng, Fan Chengcheng, Li Guanru. Discussions of cold plate liquid cooling technology and its applications in data center thermal management[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 954718.

[11] 杨磊, 杨晖, 徐婧芳, 等. 数据中心液体冷却技术研究综述[J]. 化工学报, 2026, 77(4): 1667-1684. (Yang Lei, Yang Hui, Xu Jingfang, et al. Review of research on liquid cooling technology for data centers [J]. CIESC Journal, 2026, 77(4): 1667-1684.)

[12] Cui Chuanchuan, Jia Li, Dang Chao. Experimental study of heat dissipation for high-power multi-chips using enhanced microchannel flow boiling [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 169: 109901.

[13] Sulaiman M W, Ahmad A, Wang Chichuan. A novel step-gap design on the top-cover of the microchannel cold plate to improve the flow boiling stability and heat transfer

performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 241: 122326.

[14] Jiang Shaohui, Zhang Bobo, Xiong Teng, et al. Research progress on application of liquid cooling technology in data center [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2025, 13(2): 204-213.

[15] Osman O S, El-Zoheiry R M, Elsharnoby M, et al. Performance enhancement and comprehensive experimental comparative study of cold plate cooling of electronic servers using different configurations of mini-channels flow [J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(5): 4451-4459.

[16] Yan Meiyue, Guo Shuai, Hong Ruochen, et al. Enhancing data centre energy efficiency and reliability through hybrid cooling: a topology-optimized integrated cold plate approach[J]. Energy, 2026, 342: 139582.

[17] Zhang Furen, Wu Bo, Du Bolin. Heat transfer optimization based on finned microchannel heat sink [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 172: 107357.

[18] Wang Zixing, Xue Ke, Chen Junyu, et al. Numerical investigation on a high-temperature data center cooled by combined liquid-cooling and free-cooling-a comprehensive case study[J]. Applied Energy, 2026, 404: 127154.

[19] 李金峰, 姜宇光, 娄小军, 等. 不同冷却系统对液冷数据中心节能性的影响[J]. 制冷与空调(北京), 2025, 25(7): 91-96. (Li Jinfeng, Jiang Yuguang, Lou Xiaojun, et al. The influence of various cooling systems on the energy savings of liquid-cooling data centers [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2025, 25(7): 91-96.)

[20] 皮晓峰, 战鑫, 宗芳, 等. 基于单相冷板式液冷技术的铁路数据中心液冷系统微模块方案设计[J]. 铁路计算机应用, 2025, 34(9): 58-63. (Pi Xiaofeng, Zhan Xin, Zong Fang, et al. Micro module of railway data center liquid cooling system based on singlephase cold plate liquid cooling technology[J]. Railway Computer Application, 2025, 34(9): 58-63.)

[21] Ahmadi V E, Barestrand H A, Summers J, et al. Performance evaluation of two-phase direct-to chip liquid cooling combined with air cooling for data centers[J]. Case Studies in Thermal Engineering. 2026, 78(c): 107650.

[22] Jiao Juanjuan, Li Yan, Gong Liang, et al. Enhanced thermal performance of a hybrid air and liquid cooling system for high power data center servers [J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 283: 128878.

[23] Naduvilakath-Mohammed F M, Jenkins R, Byrne G, et al. Closed loop liquid cooling of high-powered CPUs: a case study on cooling performance and energy optimization [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 50: 103472.

[24] 王玉珏, 杜雪涛. 水冷式热管散热器在服务器中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2015(5): 39-42. (Wang Yujue, Du Xuetao. Water cooling heat pipe radiator application research on the server[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(5): 39-42.)

[25] Cao Hui, Yang Ruixue, Lu Xiaorui, Chen Yongping. Thermo-hydrodynamic performances of flow boiling in Tesla-microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, 255: 127687.

[26] Rong Yi, Wang Lizhi, Wu Tao, et al. Numerical investigation of heat transfer and parameter coupling characteristics for Spider web microchannel topological structure[J]. International Journal of Thermofluids, 2023, 17: 100307.

[27] Jing Dalei, Song Shiyu, He Lei. Reexamination of Murray's law for tree-like rectangular microchannel network with constant channel height [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 1344-1350.

[28] Lin Lin, Zhao Jun, Lu Gui, et al. Heat transfer enhancement in microchannel heat sink by wavy channel with changing wavelength/amplitude [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 118: 423-434.

[29] Zhu Qifeng, Zhao He, Zeng Jingwei, et al. Numerical analysis of rib shape effects on entransy and field synergy in a ribbed sinusoidal wavy microchannel[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2026, 118: 110222.

[30] Wang Zixing, Tao Wenquan. Heat transfer and pressure drop characteristics of microchannel cold plate in commercial CPU-package cooling system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 246: 127060.

[31] 李宇婷, 李志洋, 张润婕, 等. 数据中心空气冷却和风-液混合冷却的能耗比较[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(11): 63-72. (Li Yuting, Li Zhiyang, Zhang Runjie, et al. Comparison of energy consumption of air cooling and air-liquid hybrid cooling in data centers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(11): 63-72.)

[32] Chen Yanling, Tian Zhongyun, Kong Mingzhi, et al. A study on the thermal management performance of server-oriented memory liquid cooling solutions [J]. Energies, 2026, 19(9): 2150.

[33] Kadhim M A, Kapur N, Summers J L, et al. Rack level study of hybrid liquid/air cooled servers: the impact of flow distribution and pumping configuration on central processing units temperature[J]. Heat Transfer Engineering, 2020, 41(19/20): 1683-1698.

[34] 肖新文. 直接接触冷板式液冷在数据中心的节能分析[J]. 建筑科学, 2019, 35(6): 82-90. (Xiao Xinwen.

Energy-saving analyses on direct contact liquid cooling system in data centers[J]. Building Science, 2019, 35(6): 82-90. 82-90.)

[35] 肖新文. 液冷与动态自然冷却的综合运用技术探讨[J]. 制冷与空调(四川), 2018, 32(6): 636-642. (Xiao Xinwen. On integrated application technology of liquid cooling and dynamic free cooling air conditioning system in data center[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2018, 32(6): 636-642.)

[36] Bazmi B, Lad A A, Shatskiy E, et al. Ultra-high-performance cold plate development through topology optimization and electrochemical additive manufacturing [J]. Cell Reports Physical Science. 2026, 7(5): 103272.

[37] 黄昊, 翟玉玲, 周博婕, 等. 超临界CO_2歧管微通道热沉流动与传热特性[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(11): 3784-3793. (Huang Hao, Zhai Yuling, Zhou Bojie, et al. Thermo-hydraulic characteristics of supercritical CO_2 in manifold micro heat sinks[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(11): 3784-3793.)

[38] 凌和平, 杨家培, 王汉治, 等. 车用功率模块液冷板多目标拓扑优化设计研究[J]. 汽车工程, 2025, 47(2): 326-331. (Ling Heping, Yang Jiapei, Wang Hanzhi, et al. Research on multi-objective topology optimization design of the power module cold-plate for the electric vehicles [J]. Automotive Engineering, 2025, 47(2): 326-331.)

[39] 陈宇行, 贾伯阳, 张友森, 等. 基于工况自适应的数据机房液冷与风冷协同控制系统及方法: CN202511473614.6 [P]. 2026-01-16. (Chen Yuhang, Jia Boyang, Zhang Yousenet al. Working condition self-adaptive collaborative control system and method for liquid cooling and air cooling in data rooms: CN121357848A [P]. 2026-01-15.)

通信作者简介

杜彦君,女,副研究员,博士,北京工业大学新能源学院,13572005118,E-mail:duyanjun@bjut.edu.cn.研究方向:新型储能、热泵系统及制冷压缩机。

About the corresponding author

Du Yanjun, female, associate research fellow, Ph. D., College of New Energy, Beijing University of Technology, 86-13572005118, E-mail: duyanjun@bjut. edu. cn. Research fields: novel energy storage, heat pump systems and refrigeration compressors.