

相变浸没式液冷系统研究



Research on Phase-Change Immersion Liquid Cooling System

万积清/WAN Jiqing, 柯文/KE Wen, 徐世杰/XU Shijie, 朱冰/ZHU Bing

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202503011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250609.0935.002.html>

网络出版日期: 2025-06-09

收稿日期: 2025-04-15

摘要: 数据中心机柜功耗密度在不断提升, 传统风冷散热已难以满足其未来高密度高效的散热需求。围绕最前沿的相变式液冷技术, 首先对冷板式和浸没式相变液冷的技术原理、核心架构和技术参数进行分析与比较, 接着从5个维度对液冷的冷却液介质进行深入分析, 包括其分类、特性对比、分子结构、材料兼容和市场应用挑战, 最后针对立式和卧式两种技术架构方案进行对比分析, 并逐一探讨相变浸没液冷面临的两大难题。相变液冷冷却技术代表着未来超高密度散热的发展趋势, 未来有望与风冷等基础散热技术深度融合, 形成多技术耦合的新型冷却生态。

关键词: 冷板式液冷; 浸没式液冷; 相变浸没式液冷; 数据中心

Abstract: The power density of data center racks continues to escalate, rendering traditional air-cooling solutions increasingly inadequate to meet future demands for high-density, high-efficiency thermal dissipation. This paper focuses on the cutting-edge phase-change liquid cooling technology and first analyzes and compares the technical principles, core architectures, and key parameters of phase-change cold plate and immersion liquid cooling. Subsequently, this paper conducts an in-depth analysis of liquid cooling media across five dimensions: classification, comparative characteristics, molecular structure, material compatibility, and market application challenges. Finally, a comparative analysis of tank and rack technical architecture solutions is presented, alongside a detailed examination of the two primary challenges confronting phase-change immersion liquid cooling. Phase-change liquid cooling technology represents the primary development trajectory for ultra-high-density heat dissipation. It is anticipated that this technology can achieve deep integration with foundational thermal management technologies such as air cooling, ultimately fostering a novel cooling ecosystem characterized by multi-technology convergence.

Keywords: cold plate liquid cooling; immersion liquid cooling; phase-change immersion liquid cooling; data center

引用格式: 万积清, 柯文, 徐世杰, 等. 相变浸没式液冷系统研究 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(3): 62-67. DOI: 10.12142/ZTETJ.202503011

Citation: WAN J Q, KE W, XU S J, et al. Research on phase-change immersion liquid cooling system [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(3): 62-67. DOI: 10.12142/ZTETJ.202503011

1 冷却技术概述

数据中心的冷却技术^[1]在过去几十年中经历了巨大的演变, 从早期的远端风冷发展到近端风冷, 再到冷板液冷的批量成熟应用, 以及目前正在研究的浸没式液冷。这一演变的主要驱动力包括数据中心计算密度和热流密度的不断增加, 以及对能效 (PUE)、总拥有成本 (TCO) 和可持续性的优化需求。

1.1 风冷

数据中心最初依赖风冷系统, 通过风扇和空调机将热量从服务器中移除。这种方法在计算密度较低时是有效的, 目前全球大部分数据中心仍然在使用该冷却方式。随着数据中心的超大型化和高密度化发展, 当前 X86 平台中央处理器 (CPU) 最大功耗已达 400 W, 图形处理器 (GPU) 功率突破

700 W, 网络介质访问控制 (MAC) 芯片功率更达到 800 W 量级^[2]。英伟达 DGX A100 服务器在训练 ChatGPT 模型时, 单服务器功率突破 6.5 kW, 较传统服务器提升 16 倍, NVL72 单柜已经超过 120 kW^[3]。这种功率的跃升直接导致芯片热流密度超过 120 W/cm², 远超风冷散热极限^[2], 如图 1 所示。热力学模拟显示, 当芯片结温超过 75℃ 时, 其故障率将呈指数级增长, 迫使散热技术必须实现从空气对流到液体传导的根本性转变。此外, 风冷系统通常需要大量的风扇和空调设备, 导致能耗增加, PUE 较高。虽然全球平均 PUE 已从 2019 年的 1.67 降至 2022 年的 1.55, 但仍有改进空间。2021 年 12 月 8 日, 国家发展改革委等部门在《贯彻落实碳达峰碳中和目标要求推动数据中心和 5G 等新型基础设施绿色高质量发展实施方案》中提出: 到 2025 年, 数据中心运

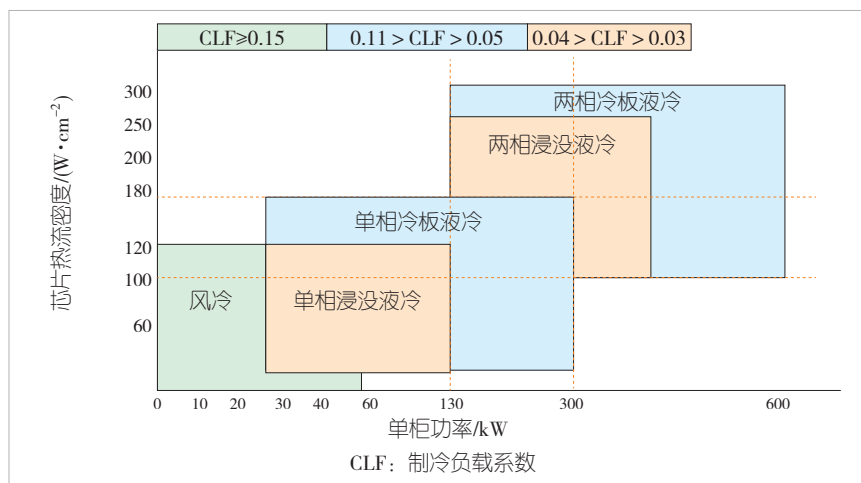


图1 不同冷却技术的解热能力

行电能利用效率和可再生能源利用率明显提升,中国新建大型、超大型数据中心PUE降到1.3以下,国家枢纽节点PUE进一步降到1.25以下,绿色低碳等级达到4A级以上。2023年三大运营商联合发布的《电信运营商液冷技术白皮书》明确要求,2025年新建数据中心液冷应用比例需高于50%,直接推动液冷技术从试点转向规模化部署^[3]。

综上所述,以液冷技术替代传统风冷技术,已成为数据中心冷却技术领域所不可阻挡的发展趋势。

1.2 单相液冷

单相液冷通过冷板或直接将整个服务器浸没在冷却液中实现散热。在整个循环过程中,冷却液不发生相变。液体冷却的散热效率远高于空气,单相浸没液冷能够支持130 kW的机柜散热需求,且各个电子器件均温性好,能耗低,单相冷板液冷甚至能够支持高达300 kW的机柜散热需求。相比于单相浸没液冷,单相冷板液冷仍需额外的空气冷却系统来处理允许结温较高的部件(如内存、网卡),系统复杂性较高^[4]。未来几年,Rubin Ultra NVL576的单机架功率密度最高可达600 kW,单相液冷技术的冷却能力逐渐面临瓶颈,亟需向相变液冷技术升级。

1.3 相变液冷

相变液冷包括相变冷板液冷和相变浸没液冷。不同于单相液冷,相变液冷技术利用冷却液的相变(液体-气体)吸收热量,显著提高了换热能力,能够处理极高的热流密度(单机600 kW)。相变冷板式液冷换热效果最强,冷却液用量少,但其高流阻导致泵的功耗较大,并且需要配合空气才能实现其他部件的冷却。相变浸没式液冷不需要对空气进行冷却,简化了系统设计,显著降低了TCO。

《绿色液冷数据中心白皮书》显示,采用冷板液冷可将PUE降至1.15~1.25,而相变浸没式液冷更可实现1.1以下的超低能耗^[2]。这种能效提升具有显著的规模效应。以10 MW数据中心为例,PUE每降低0.1,年节电量可达876万kWh,相当于减少二氧化碳排放8 730 t^[2]。

2 相变液冷技术划分

2.1 技术原理及核心架构差异

2.1.1 相变冷板式液冷

相变冷板式液冷技术通过将液冷板直接贴合于芯片或热源表面来实现散热,其核心原理是:冷却液在冷板内部吸收热量后发生汽化相变,蒸汽上升至冷凝单元重新冷凝为液态,再依靠泵驱动完成相变散热循环。制冷剂或氟化液作为主要冷却介质也对液冷板、连接器及管路的材料性能提出严格要求。为提升散热效率,冷板可采用微通道、多孔介质等特殊结构设计以促进气泡脱离,同时需选用耐高压材料以应对系统较高的工作压力。相变冷板式液冷通过相变沸腾/冷凝机制可高效吸收热量,支持GPU功率范围在700~2 800 W的高热通量场景,单机柜计算密度可达600 kW。相比于相变浸没式液冷,相变冷板式液冷有两大优势:一方面,冷却液用量极低(100 kW机柜仅需16 L),大幅降低运维成本;另一方面,部署灵活性,既适用于新建数据中心也可用于现有设施的改造。尽管有着上述优势,相变冷板式液冷的应用仍面临诸多挑战:一方面,为高功耗组件逐一组装冷板,提高了系统的复杂性及初期成本;另一方面,整个系统压力较高,调控困难,系统可靠性较低也是制约其应用的一个重要原因。

2.1.2 相变浸没式液冷

相变浸没式液冷技术通过将服务器或电子设备整体浸没于低沸点氟化液中来实现散热。冷却液直接接触所有发热元件并吸收热量后沸腾汽化,产生的蒸汽经冷凝单元散热液化后重新参与循环。通过全浸没式设计可捕获所有热量,服务器内部温度分布均匀,因此无需风扇额外辅助散热,实现了整体低噪音运行。相较于需依赖泵强制驱动冷却液流动的相变冷板式液冷,相变浸没式的泵功耗更低,能耗优势明显,在所有冷却技术中PUE最低,符合节能要求。然而,其应用仍面临多重挑战。首先,冷却液长期冲刷可能对器件表面性能造成潜在影响;其次,冷却液成本高昂(为单相浸没式

液冷的10倍，国产化后仍达5倍，单价超50美元/L），进一步地，需对服务器进行专门改造以适应浸没环境，部分硬件如光纤光模块可能因浸没失效，通用性受限；最后，含全氟和多氟烷基物质（PFAS）成分的冷却液（如3M Novec）具有环境持久性和生物毒性，维护过程中释放的PFAS蒸气亦会增加环境监管风险，对可持续性提出严峻考验。表1给出了相变冷板式液冷和相变浸没式液冷的主要技术参数对比。

2.2 当前项目及试点应用情况

2.2.1 相变冷板式液冷

多家大型服务器制造商和数据中心运营商已在高性能计算（HPC）和人工智能（AI）训练服务器中试点部署相变冷板液冷——尤其是在热流密度超过300 W/cm²的场景中。该技术虽然已进入商业化放量阶段，但仍处于产业链完善和成本优化阶段。相关厂商有ZutaCore、Accelsius、Celestica等。其中，ZutaCore的方案已获得英伟达的认可，用于未来高热设计功耗（TDP）（如1 200 W）加速器的冷却，在高密度计算场景中展现出较大市场潜力。

2.2.2 相变浸没式液冷

在相变浸没式液冷方案方面，已有厂商提供方案，并开展试点部署和应用研究。LiquidStack的DataTank™系统提供252 kW制冷功率，应用于AI和HPC场景，局部电能利用效率（pPUE）低至1.03，显著降低能耗。Wiwynn的冷却方案针对AI和机器学习，支持高密度GPU部署，减少风扇和空调能耗。GIGABYTE与Allied Control针对HPC和边缘计算提供相变液冷解决方案，着重宣传非可燃冷却液和低能耗。中科曙光的相变浸没式液冷技术已实现大规模商用，其相关产品广泛应用于数据中心和高性能计算场景中。例如，中科曙

光在2019年实现了全球首个大规模浸没相变液冷项目的商业化落地。此外，中科曙光还推出了刀片式浸没相变液冷系统，这种系统兼具运维便捷性和高性能。

3 相变浸没式液冷用冷却液

相变浸没式液冷使用的冷却液通常为氟化液，包括全氟化合物（全氟饱和化合物、全氟不饱和化合物）和氢氟化合物（氢氟饱和化合物、氢氟不饱和化合物）。这些冷却液通过相变吸收热量，实现高效散热。

全氟饱和化合物包括全氟烷烃（如FC72）、全氟胺（如FC40）以及全氟醚/聚醚（如PFPE80）等类型。这类化合物具有极高的化学稳定性和耐高温特性，同时兼具疏油疏水性和良好的绝缘性，其沸点范围跨度较大，部分产品（如FC40）适用于单相液冷系统，而低沸点类型的产品（如FC72）则更适合相变液冷应用。值得注意的是，全氟饱和化合物的全球变暖潜能值（GWP）普遍超过5000，对环境影响显著。全氟不饱和化合物包括全氟烯烃（如Noah2100A）、全氟烯基胺、全氟烯基醚等类型。这类化合物具有无色、无味、不可燃的特性，同时兼具高化学稳定性与耐高温能力，其沸点范围适中，部分产品（如Noah2100A）适用于单相液冷系统，而低沸点类型的产品（如FCM110）则适配相变液冷场景。此外，全氟不饱和化合物的密度约为水的2~3倍，热容量适中，在液冷应用中表现出良好的热传递效率。在环境特性方面，全氟不饱和化合物的GWP显著低于饱和同类，市售主流产品GWP普遍小于500。在材料兼容性方面，全氟化合物虽与多数电子材料（塑料、金属等）兼容性良好，但在高温或高压环境下需关注材料稳定性，以防止微空化现象的发生。

氢氟饱和化合物主要分为氢氟烃（如HFC-4310）和氢氟醚（如Novec 7000）两类。这类化合物通常无色、无味且

表1 相变冷板式液冷和相变浸没式液冷的主要技术参数对比

参数	相变冷板式液冷	相变浸没式液冷
散热效率	极高,热流密度可达300 W/cm ²	较高,热流密度可达250 W/cm ²
系统压力	较高,可能高达16 bar左右,冷板及管路需承压,压力控制复杂	相对较低,2 bar以内,腔体密封,压力可控
冷却液使用量	少,整个换热腔体无需充满液体	多,浸没箱体需要充满液体。
冷却液类型	制冷剂、氟化液等低沸点工质	主要为氟化液,低沸点且介电性好
设备接触方式	冷板直接接触芯片,其他元件仍需辅助散热	全浸没,所有元件均直接接触冷却液,温度均匀性更好
噪音水平	低于风冷,但仍有风扇噪音	较低,因无风扇设计,满载运行噪音低至60 dB
PUE	预计低至1.16	预计低至1.1
TCO	冷却液成本低,维护相对简单	冷却液成本高,箱体维护相对复杂
环境影响	ODP=0,低GWP,无PFAS释放	如使用PFAS冷却液,会对环境造成污染

GWP: 全球变暖潜能值 ODP: 臭氧消耗潜势 PFAS: 全氟和多氟烷基物质 PUE: 能效 TCO: 总拥有成本

不可燃，兼具良好的介电性能和低毒性，其沸点范围较广，部分产品（如 Novec 7000）适用于单相液冷系统，而低沸点类型的产品（如 Novec 7500）更适合相变液冷应用。在物性方面，其密度中等且热传导性良好，有助于高效散热。在环境特性方面，氢氟烃的 GWP 较高（约 1 600），而氢氟醚的 GWP 显著降低（如 Novec 7100 为 320）。氢氟不饱和化合物包括氢氟烯烃（如 Opteon™ SF33）和不饱和氢氟醚（如 Opteon™ SF-10）两类。其物性表现为化学稳定性中等，密度略高于水，沸点普遍较高，多数适用于单相冷却系统，而少数低沸点产品（如 Opteon™ SF33）可适配相变冷却场景。需要注意的是，这类化合物具有一定可燃性。在环境特性方面，氢氟不饱和化合物的 GWP 极低，显著优于传统氟化材料，具有突出的环境友好性。在材料兼容性方面，氢氟化合物虽与大多数硬塑料及部分弹性体兼容，但其溶解性略高于全氟化合物，实际应用中需结合具体工况（如温度、压力等）验证兼容性，以确保材料稳定性并避免潜在风险。表 2 给出了不同类型冷却液的综合性能对比。

4 相变浸没式液冷系统架构

根据服务器的排列方式，相变浸没式液冷主要分为卧式架构和立式架构。本文将对这两种架构的技术方案、工作原理进行介绍。

4.1 卧式液冷架构

典型的卧式液冷架构（如图 2 所示）采用服务器整机或多个节点水平浸没于大型密封罐体中的设计，罐体底部为液态冷却液区域，顶部为气态区域。卧式液冷架构工作原理为：冷却液吸收设备热量汽化后，蒸汽上升至顶部冷凝器冷却为液态，依靠重力自然回流至底部，全程依赖自然对流与重力循环，无需额外泵送系统。该架构技术优势显著，一方面通

过相变潜热实现高热流密度设备的散热需求，另一方面系统结构简洁且可沿用成熟的单相冷板式冷却液分配单元 CDU 架构方案，部署便捷。然而，卧式架构面临的技术挑战同样突出：设备维护需开启罐体，这容易导致冷却液挥发损耗；大型罐体体积庞大，占用数据中心空间较大；需要对服务器进行定制化设计，以适配液冷环境需求。虽然理论上卧式液冷架构能实现 100% 液冷散热，但是冷却液用量较高且流向控制精度不足，难以精准覆盖核心发热部件，从而显著影响散热效率。

4.2 立式液冷架构

典型的立式浸没式液冷架构（如图 3 所示）采用模块化设计，每个服务器节点独立封装于密封壳体内形成浸没腔体。其工作原理基于相变循环：节点内部冷却液吸收热量汽化后，蒸汽传输至冷凝器冷却液化，随后回流至腔体，形成封闭的冷却液循环系统。该架构具有多项技术优势：模块化设计支持热插拔维护，适配标准化服务器且部署灵活；通过相变潜热实现高效散热，同时密封结构有效降低冷却液泄漏

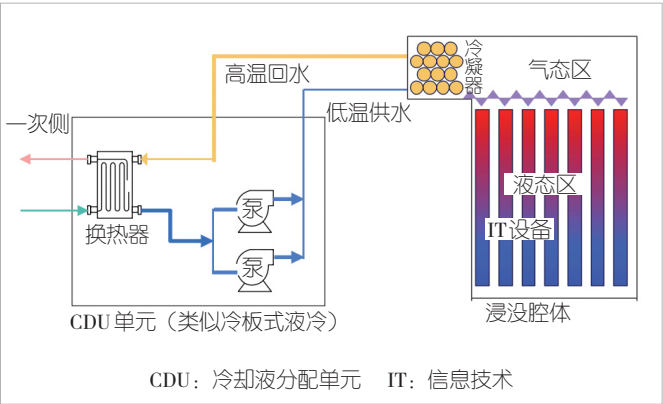


图2 卧式浸没式液冷架构示意图

表2 不同类型氟化液综合性能对比

类型	全氟饱和化合物	全氟不饱和化合物	氢氟饱和化合物	氢氟不饱和化合物
沸点范围/℃	55 ~ 270	45 ~ 128	55 ~ 167	大部分高于 110, 少部分为 33
介电常数	<2	<2	6	5.48
稳定性	高	高	中等	中等
全球变暖潜能值 (GWP)	>5 000	<500	氢氟烃: 1 600 氢氟醚: <530	极低
材料兼容性	与大多数电子材料(如塑料、金属)兼容, 但需注意在高温或高压下的稳定性, 可能导致微空化		与大多数硬塑料和有限的弹性体兼容, 溶解性略高于全氟化合物, 需要根据具体应用确认兼容性	
市场应用评估	GWP 值限制使用, 其他性能优越	全氟烯烃: 易于合成 全氟烯基胺、全氟烯基醚: 难以合成	分子极化能力强, 介电常数大, 浸没应用受限	介电强度、体积电阻率较低, 物化性质可调, 适用间接冷板液冷

注: GWP 是指单位质量的某种温室气体在 100 年内对全球变暖的影响与相同质量的二氧化碳相比的倍数。
高 GWP 表示对环境的影响更大, 当前环保法规(如欧盟 PFAS 禁令)推动低 GWP 替代品开发。

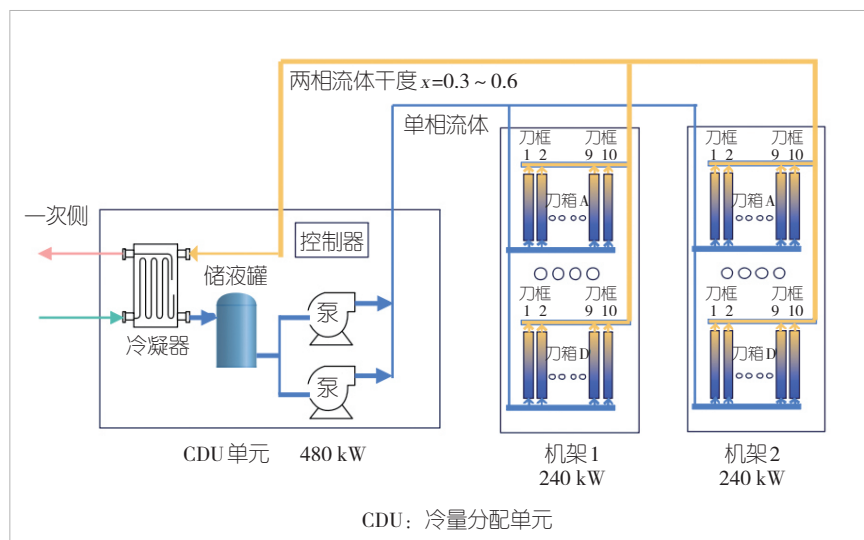


图3 立式浸没式液冷架构示意图

风险，提升了环境友好性。然而，其技术挑战亦不容忽视：一方面，模块化设计虽提升灵活性，但增加了系统的复杂性，对密封性、接口稳定性及控制器可靠性要求极高；另一方面，初期建设与维护成本显著高于卧式方案，且需选用低沸点、环保型冷却液，导致选型范围受限，这可能制约其在特定场景下的应用扩展。

5 相变浸没液冷技术的难点

相变浸没式立式架构利用液体的沸腾相变可实现极高的换热系数和功率密度，理论上在蒸发温度 50℃ 左右、芯片温度不变的情况下，可支持单机架 240 kW 的散热。但在工程化实现中，需精准控制系统干度（即蒸汽质量分数），以避免小干度引发储液罐偏小、泵入口缺液气蚀，或过大干度导致芯片过热的情况；同时需通过冷凝温度控制稳固系统压力和蒸发温度，以保证系统平稳运行。

5.1 系统干度控制

在相变浸没式液冷中，干度控制至关重要，因为它直接影响冷却液的循环流量与系统散热可靠性。相变浸没式循环流量的简化公式如公式（1）所示：

$$Q = m \times h_{fg} \times x + U \times A \times \Delta T \quad (1),$$

其中， Q 表示换热量， m 表示质量流量， h_{fg} 表示汽化潜热， x 表示干度， U 表示总传热系数， A 表示有效换热面积， ΔT 表示壁面与饱和温度的温差。

干度过低（蒸气质量不足）会导致液相占比过高，可能引发储液罐设计容量不足、泵入口液位下降甚至气蚀风险，严重时会造成泵路损坏；而干度过高（蒸气质量过剩）则会

减少液相循环量，使热负荷集中于芯片表面，存在触发临界热流密度（CHF）导致局部过热或失效的隐患。针对上述问题，首先需要在液相入口及气液混合出口部署电容式或热敏式传感器，结合可编程逻辑控制器（PLC）实时调控补液阀与假蒸气回流阀，实现干度闭环控制；同时需要优化系统设计，设置 10 cm 以上的自由气相空间，降低气泡夹带损失并为蒸气分离提供缓冲；进一步地，集成可再生干燥剂或膜分离脱气装置，周期性清除头部空间微量水分，维持冷却液干度稳定性，从而保障系统高效、安全运行。

5.2 冷凝温度控制

在相变浸没液冷系统设计中，温度和系统稳定性的控制与饱和蒸气压-饱和温度的耦合关系密切（如图4所示）：系统压力由冷凝器性能主导，若冷凝温度过高会显著提升饱和压力，导致蒸发温度升高（ $T_{\text{evap}} = T_{\text{cond}} + \Delta T$ ），进而推高芯片工作温度与系统整体压力。为优化热力循环，首先可采用大面积低压降的增强型管壳或板式换热器来增强冷凝效率，保证与冷却水的温差 $\leq 5^\circ\text{C}$ ，并通过降低冷凝温度实现系统压力与蒸发温度的连锁下降，最终降低芯片温度；其次通过控制变频冷却水泵与温控阀，根据实时热负载调节冷却水流量，使冷凝温度平滑响应功率变化；最后通过压力安全阀与蒸气回流节流阀联动控制，在过压时自动泄压并补偿液相，确保系统干度稳定于设计范围，避免极端工况下的热失控风险。

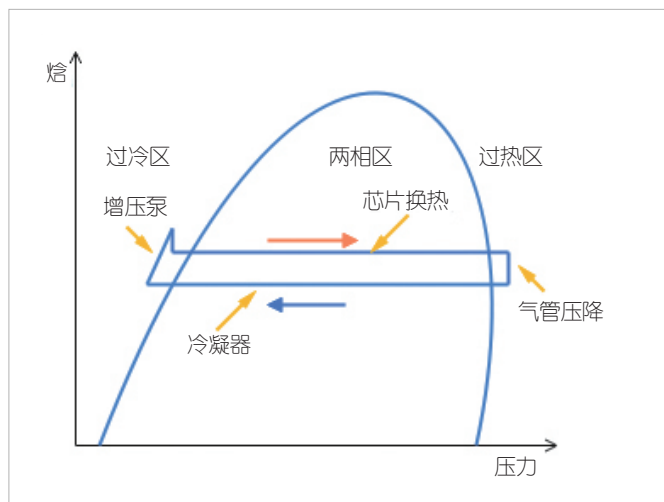


图4 换热原理图

6 液冷技术的混合应用

浸没液冷冷却代表未来超高密度散热趋势，可与风冷、冷板液冷等基础技术深度融合，衍生出多技术耦合的新冷却生态。后续研究应聚焦干度动态控制、冷却液均衡调度及智能化监测算法开发，为下一代高性能数据中心提供更高效、更可靠的冷却解决方案。

英伟达联合多家企业与高校共同研发了浸没式与冷板式相结合的混合冷却架构，该架构有效改善了传统浸没式液冷因散热路径不精准导致核心发热部件覆盖不足的问题，但同时也面临系统结构复杂及调控困难的挑战。其核心创新点体现在以下几个方面：芯片热管理性能显著提升，单芯片功耗突破1 kW时热阻仅为0.01 K/W，1 kW功率下的温升仅为10 K；冷却系统能耗占比优化至IT设备总能耗的5%，实现pPUE低至1.05；服务器采用3U高密度设计并支持10 kW功率负载，同时通过双路径散热（核心部件采用相变冷板式，其余区域使用浸没式）确保运行稳定性，年在线率达到99.996%（年均不可用时间约2.16 min），满足T4级数据中心标准。整套系统包含6个机架，单机架功率密度高达169.4 kW，展现出高效能散热与高可靠性并重的技术突破。

7 结束语

随着数据中心机柜功耗密度的急剧攀升，传统风冷技术因散热能力逼近极限且能耗较高而难以满足需求，液冷技术已成为必然趋势。本文聚焦前沿的相变浸没式液冷技术，从5个维度深入剖析了氟化液应用于浸没液冷系统的综合性能。在系统架构上，卧式浸没架构依赖重力循环，结构简单，但维护时冷却液易挥发且空间利用率低；立式模块化架构支持热插拔，泄漏风险低，但系统复杂度与成本显著提升，同时相变浸没液冷系统的关键技术难点在于干度控制和冷凝温度调控。相变浸没液冷代表了超高密度散热的未来方向，需与风冷、冷板液冷深度融合构建混合冷却生态，以支撑下一代数据中心的发展。

参考文献

- [1] 严劲, 景焕强, 张子懿, 等. 数据中心液冷散热技术及应用[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(6): 84–91. DOI: 10.12142/ZTETJ.202406013

- [2] 中兴通讯. 中兴通讯液冷白皮书 [EB/OL]. [2025-05-08]. https://www.zte.com.cn/content/dam/zte-site/res-www-zte-com-cn/mediare/zte/smart_energy/202211091130.pdf
- [3] 朝亚控股有限公司. 拥抱液冷, 迎接可持续高效运营时代 [EB/OL]. [2024-06-25][2025-05-08]. <https://chayora.com.cn/idc>
- [4] POPE D. The future of data center cooling: from direct liquid cooling to immersion cooling [EB/OL]. [2024-07-29][2025-05-08]. <https://www.datacenterfrontier.com/sponsored/article/55125713/the-future-of-data-center-cooling-from-direct-liquid-cooling-to-immersion-cooling>

作者简介



万积清, 中兴通讯股份有限公司数据中心温控技术专家; 长期从事数据中心领域制冷系统的研发与技术创新工作, 主要研究方向包括数据中心高效节能冷却技术、氟泵节能技术、传统精密空调优化、冷板式液冷及相变浸没式液冷产品的开发与应用; 获国家授权专利10余项。



柯文, 中兴通讯股份有限公司数字能源市场研究专家; 致力于数字能源方向的市场空间拓展与未来发展趋势研究。



徐世杰, 中兴通讯股份有限公司数据中心温控工程师; 主要从事数据中心领域制冷系统的研发工作, 研究方向为冷板式液冷、浸没式液冷等; 发表论文3篇, 申请专利1项。



朱冰, 中兴通讯股份有限公司数据中心暖通研发总工; 主要负责数据中心暖通系统产品的研发工作, 具备丰富的暖通液冷行业经验和半导体及电力装置冷却系统开发经验。