

数据中心液冷散热技术及应用



Technology and Application of Liquid Cooling Heat Dissipation in Data Centers

严劲/YAN Jin¹, 景焕强/JING Huanqiang²,
张子懿/ZHANG Ziao¹, 刘帆/LIU Fan²

(1. 中国电信智能云网调度运营中心, 中国 北京 100010;

2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)

(1. Intelligent Cloud Network Operating Center, China Telecom Group,
Beijing 100010, China;

2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202406013

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241212.1054.004.html>

网络出版日期: 2024-12-12

收稿日期: 2024-10-20

摘要: 数字技术的创新演进与蓬勃发展, 推动算力需求持续提升, 数据中心能耗呈指数型增长。在可持续发展、“双碳”、新型数据中心等政策理念指引下, 数据中心制冷技术正式迈入液冷阶段。首先从芯片、设备、机柜散热诉求, 机房节能诉求等多个维度, 深入探讨液冷技术的必要性与优势, 同时针对多种液冷技术方案从架构、原理、关键组成等方面进行深入分析。其次, 通过散热能力、节能效果、维护性、技术成熟度等方面的综合对比, 短中期单相冷板式液冷将更具优势。最后, 探讨了当前数据中心液冷在可靠性、散热强化、低成本等维度的研究趋势。

关键词: 散热技术; 机房节能; 液冷散热; 冷板式液冷; 浸没式液冷

Abstract: The innovative evolution and vigorous development of digital technology have led to a continuous increase in computing power demand and an exponential growth in data center energy consumption. Under the guidance of policies such as sustainable development, "dual carbon" goals, and new-style data centers, data center refrigeration technology has officially entered the liquid cooling stage. This paper first discusses the necessity and advantages of liquid cooling technology from the aspects of chip/equipment/cabinet heat dissipation requirements and energy saving requirements, and based on the architecture, principles, and key components, a variety of liquid cooling technology solutions are deeply analyzed. Secondly, through a comprehensive comparison of heat dissipation capacity, energy-saving effect, maintainability, and technical maturity, it can be seen that single-phase cold plate liquid cooling will have more advantages in the short and medium term. Finally, the current research trends of data center liquid cooling in terms of reliability, heat dissipation enhancement, and low cost are discussed.

Keywords: heat dissipation technology; computer room energy saving; liquid cooling heat dissipation; cold plate liquid cooling; immersion liquid cooling

引用格式: 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

Citation: YAN J, JING H Q, ZHANG Z A, et al. Liquid cooling heat dissipation technology and application in data centers [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(6): 84-91. DOI: 10.12142/ZTETJ.202406013

1 应用背景

1.1 节能政策驱动

随着数字技术的创新演进, 云计算、大数据、人工智能(AI)、元宇宙等信息技术和实体经济深度融合, 推动数字经济持续快速增长。数据中心是数字经济基础设施的底座。数据量爆发式增长带动数据中心市场快速增长。数据显示, 截至2023年底, 中国在用数据中心机架总规模达到810万标准机架。作为“能耗大户”, 数据中心的耗电量不断刷新纪录, 数据中心的总用电量约占全社会用电量3%。在可持续发展、“碳达峰、碳中和”、新型数据中心等政策理念指引下, 国家及地方政府相继出台相关政策, 对数据中心电源使用效率

(PUE) 提出更高要求。

工业和信息化部于2021年7月印发《新型数据中心发展三年行动计划(2021—2023年)》, 明确到2023年底, 新建大型及以上数据中心PUE降低到1.3以下, 东数西算枢纽节点及寒冷地区力争降低到1.25以下^[1]。国家发展改革委在2021年11月印发《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》, 进一步明确“到2025年, 新建大型、超大型数据中心PUE降到1.3以下, 国家枢纽节点降至1.25以下”^[2]。东数西算工程八大枢纽节点, 要求东部地区PUE目标不超过1.25, 西部地区不超过1.2, 能效指标更加严格。

在典型数据中心能耗占比中，制冷系统占比达到24%以上，是数据中心辅助能源中占比最高的部分。因此，降低数据中心PUE的关键在于采用更加高效节能的制冷方案。

近年来，为了降低制冷系统电能消耗，业内对机房制冷技术进行了持续的创新和探索，如间接蒸发冷却、冷板式液冷、浸没式液冷^[3]等。其中，间接蒸发技术的PUE可达1.25，液冷技术则利用液体的高导热、高传热特性，在进一步缩短传热路径的同时充分利用自然冷源，可以实现数据中心PUE低至1.1的极佳节能效果。得益于绿色节能优势，近年来液冷技术也成为国家及地方政策明确鼓励采用的重要节能技术，如表1所示。

1.2 高散热诉求

算力的持续增加促进通信设备性能不断提升，市场主流芯片功耗和热流密度也在持续攀升，中央处理器（CPU）散热设计功耗已达350~500 W。AI技术的快速发展推动图形处理器（GPU）需求增长，GPU散热设计功耗已超过800 W。芯片功率密度的持续提升直接制约着芯片散热和可靠性。

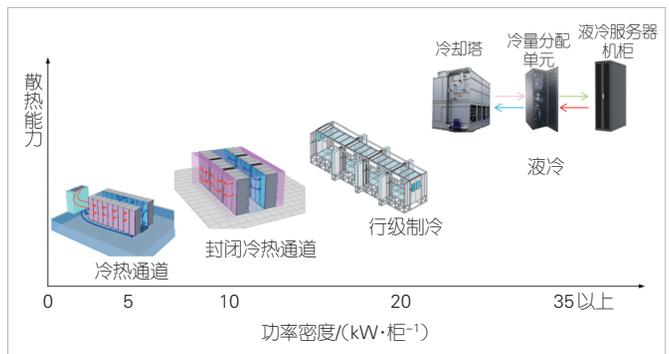
芯片功率密度的攀升同时带来整柜功率密度持续增长。8 kW以上单机柜功率密度成为目前新建数据中心的主流选择。为提升市场竞争力，人们通过升级改造的方式来提高单机柜功率密度。目前，通算最大功率密度已超过30 kW/柜，如图1所示。智算功率上升更快，已达100 kW/柜。整机柜功率密度的提升对机房制冷技术提出了更高的要求。传统风冷系统受数据中心建筑面积与单位运营成本等因素的影响散热上限一般为20 kW/柜^[4]，越来越难以为继。液冷技术采用液

体替代空气作为冷却介质，将液体直接或间接接触发热器件，可使散热效率大幅提升，能够有效满足单点、整机柜、机房的高散热需求。

2 液冷技术分类

根据热器件是否与冷却液接触，液冷技术可以分为直接接触式和间接接触式两种：直接接触式是指将冷却液体与发热器件直接接触散热，这类液体包括单相浸没式液冷、两相浸没式液冷、喷淋式液冷；间接接触式是指冷却液体不与发热器件直接接触，通过散热器间接散热，这类液体包括单相冷板式液冷、两相冷板式液冷。

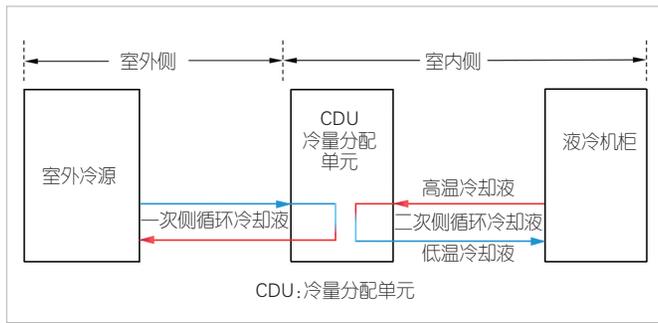
液冷系统通用架构如图2所示。其中，室外侧包含室外冷源、一次侧冷却液，室内侧包含冷量分配单元（CDU）、二次侧冷却液以及液冷机柜。该液冷系统的基本原理是：二次侧冷却液在机柜内吸收设备热量，并通过CDU内的换热器将热量传递给一次侧冷却液，一次侧冷却液通过室外冷源



▲图1 机柜功率密度与制冷方式

▼表1 液冷数据中心政策

发布时间	发布主体	政策文件	液冷政策
2021-07	工业和信息化部	《新型数据中心发展三年行动计划(2021—2023年)》	鼓励应用液冷等高效制冷系统
2021-12	国家发展改革委、工业和信息化部、国家能源局	《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》	支持数据中心采用新型机房精密空调、液冷、机柜式模块化等方式
2022-07	北京市经济和信息化局	《北京市推动软件和信息服务业高质量发展的若干政策措施》	对数据中心转型为算力中心或涉及液冷应用的，按照固定资产投资的30%进行奖励
2022-12	重庆市通信管理局、重庆市经济和信息化委员会等	《重庆市信息通信行业绿色低碳发展行动方案(2022—2025年)》	积极应用液冷型IT设备，提高数据中心IT设备能效
2022-12	成都市经济和信息化局	《全国一体化算力网络成渝国家枢纽节点(成都)推进方案》	鼓励数据中心液冷利用等先进供冷技术
2023-03	财政部、环境部、工信部	《绿色数据中心政府采购需求标准(试行)》	数据中心相关设备和服务应当优先选用新能源、液冷等高效方案
2023-03	广东省发展和改革委员会、广东省能源局等	《广东省绿色高效制冷行动计划(2023—2025)》	鼓励使用液冷服务器、自动喷淋等高效制冷系统，因地制宜采用自然冷源等制冷方式，大幅提升数据中心能效水平



▲图2 液冷系统通用架构图

最终将热量释放到大气环境中，完成散热。

1) 室外冷源：可选择开式/闭式冷却塔、干式冷却器等，冷源的选择应根据所在地的场地、气象、水电等因素综合考虑。

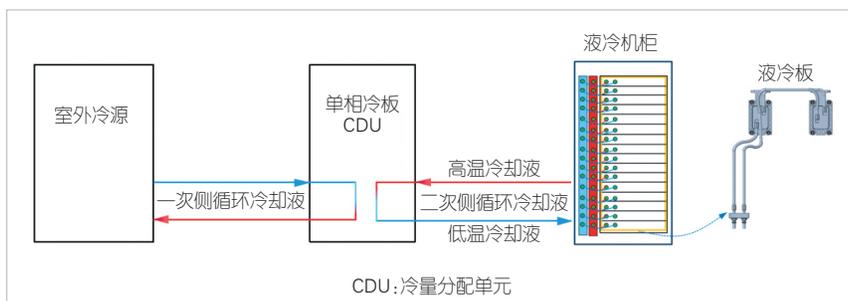
2) 一次侧冷却液：常用的液冷液有去离子水、乙二醇水溶液、丙二醇水溶液等，并配合具有一定缓蚀、杀菌、阻垢功能的化学药剂使用。冷却液的选择需要根据液体热物性、部署地理位置及气候条件等综合考虑。

3) CDU：按布置形式可分为集中式与分布式。其中，集中式 CDU 布置在机柜外，为多台液冷机柜提供冷量，易于集中化部署和管理；分布式 CDU 布置在液冷机柜内部，每台机柜对应一个 CDU，易于机柜功耗匹配。

二次侧冷却液、液冷机柜及内部液冷设备在不同液冷技术形态中略有差异，在后续章节中我们会具体介绍。

2.1 单相冷板式液冷

单相冷板式液冷通过液冷板将发热器件的热量间接传递给液冷板中的二次侧冷却液。二次冷却液在设备吸热和 CDU 放热过程不发生相变。根据液冷板覆盖范围，这种液冷可以分为局部液冷或全液冷：局部液冷通常仅覆盖高功耗器件，一般带走设备 70% 左右的热量，剩余 30% 热量仍需通过机房空调或液冷背门以风冷的形式带走；全液冷需要根据通信设备硬件架构和结构布局定制化设计液冷板，以覆盖所有发热器件。单相冷板式液冷系统架构如图 3 所示，液冷



▲图3 单相冷板式液冷系统架构

机柜内包含分液器、液冷板、流体连接器、液冷管路、漏液检测传感器等。

1) 二次侧冷却液：二次侧热量载体以去离子水、乙二醇水溶液、丙二醇水溶液为主，根据具体场景进行选择。二次侧冷却液需要定期检测 PH、浊度、残留物、细菌等参数，并符合相关标准要求。

2) 单相冷板 CDU：可分为集中式和分布式。其中，集中式 CDU 布置在机柜外，每列机柜布置一台或几台 CDU，实现主用和备份关系，需要部署二次侧管网，并考虑各液冷机柜间的流量分配；分布式 CDU 安装在液冷机柜内，免二次侧管路部署，可根据机柜功耗灵活部署。

3) 分液器：用于机柜内流量分配与收集，将低温二次侧冷却液分配到各设备节点，并收集与液冷板换热升温后的冷却液。其设计选型过程中需要保证流量分配需要的均匀性，并结合机柜空间、重量等要求综合考虑分液器的体积。

4) 液冷板：液冷板设计需要根据设备芯片功耗进行芯片冷板设计、根据芯片布局及单板结构空间设计冷板连接管路路由，具有一定的定制化特性。但在进行设计时应尽量保证内部零件的通用性，如内部翅片规格、进出口规格应尽可能一致，以降低成本。此外，液冷板的设计还需要综合考虑实际功耗、工作压力、流速等。

5) 流体连接器：可实现无泄漏通断，在设计选型时需要综合考虑工作流量、温度、压力、流阻特性、安装方式、直插/盲插、接口规格等。

6) 液冷管路：二次侧冷却液流通通路，参与液冷机柜内各设备节点的流量-流阻分配；液冷管路设计选型需要考虑材料兼容性、流速、管路布置、安装方式、流量分配设计等。

7) 漏液检测传感器：针对沿液冷板、液冷管路、分液器等可能出现液体泄漏的位置或路径布置，及时检测泄漏状态，并触发漏液告警策略，及时告知运维人员发现漏液事故，便于及时处理，有效地保护液冷系统与机房安全。漏液检测传感器可分为检测线、检测带、光电式、电极式、浮子式等，适用于不同的泄漏位置和泄漏场景。

单相冷板式液冷技术对通信设备和机房基础设施改动较小，业内已具备多年研究积累，目前技术成熟度最高，它已成为满足芯片高热流密度散热需求、提升数据中心能效、降低总体拥有成本（TCO）的有效方案。

2.2 两相冷板式液冷

两相冷板式液冷系统架构与单相液冷板

液冷相似，其系统架构如图4所示。所不同的是二次侧冷却液在设备内通过液冷板吸热发生汽化，在CDU内冷凝为液态，充分利用了冷却液的相变潜热，综合散热能力更强，可达 300 W/cm^2 以上。由于运行过程中系统内冷却液发生相变，两相冷板液冷系统的压力会高于单相冷板液冷，其二次侧冷却液、液冷板、流体连接器、液冷管路等为了适配系统压力也要满足一定的特殊化要求。

1) 二次侧冷却液：以制冷剂、氟化液等低沸点工质为主，在选型时主要考虑热物性、环保性、安全性、工作温区和压力、材料兼容性等因素。

2) 两相冷板 CDU：两相冷板液冷系统压力等级通常较高，其压力控制系统区别于单相系统，一般采用温控型压力控制方案。同时，两相 CDU 补液系统在设计时也需要考虑工质充注量对于系统压力的影响。

3) 两相液冷板：其结构与单相液冷板相似，在设计时需要重点考虑冷板承压能力，增加汽化核心、促进气泡脱离以提升散热性能，常见的方案有表面微处理、多孔介质填充等。

4) 两相流体连接器：高压系统对流体连接器的插拔操作和带压维护都提出了很高的要求。目前螺纹旋拧连接器能够较好地满足需求。

5) 液冷管路：考虑系统压力及气相工质泄漏风险，优选金属软管或汽车空调橡胶管。

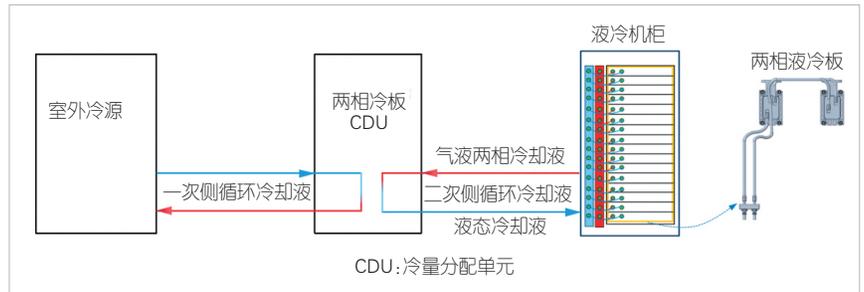
两相冷板式液冷核心技术的优势在于能够满足超高热流密度散热需求，但现阶段技术成熟度仍较低，相关产业链还有待完善。

2.3 单相浸没式液冷

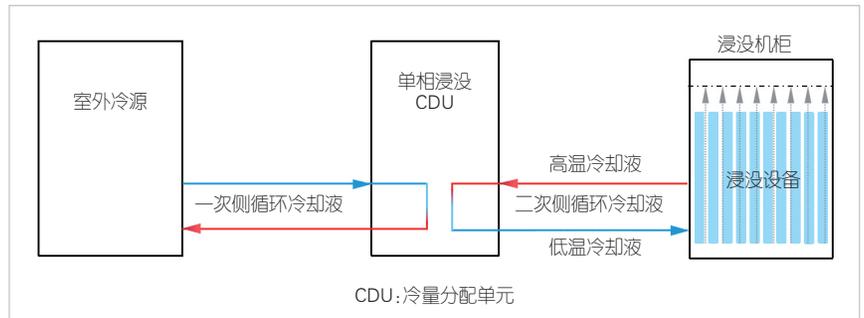
单相浸没式液冷通过将发热元件浸没在冷却液中，直接吸收设备产生的热量。卧式浸没液冷系统架构如图5所示，通信设备竖插在浸没机柜内，二次侧低温冷却液由浸没机柜底部流入。二次侧冷却液在循环散热过程中始终维持液相。

1) 二次侧冷却液：单相浸没技术通常使用高沸点的冷却液。这类冷却液不发生相变，同时需要具有高绝缘、低黏度以及良好的兼容特性，例如氟碳化合物和碳氢化合物（矿物油、合成油等）。

2) 浸没机柜：现阶段应用较多的为卧式机柜（通常称为 TANK），业内常用的尺寸规格覆盖 12U~54U。为了实现



▲图4 两相冷板式液冷系统架构



▲图5 单相浸没式液冷系统架构(卧式)

卧式架构下的流量均衡性，TANK 底部需配置均流板。冷却液由底部进入，经均流板分液后流入设备。为便于通信设备的安装和维护，TANK 设计需要有一定的槽位导向和固定功能。同时，TANK 上盖与腔体之间需要具备良好的密封性，防止运行过程中冷却液耗散。

3) 单相浸没 CDU：单相浸没液冷系统在维护过程中需要打开 TANK 上盖，系统直接与机房环境连通，属于一种“半开式”系统，因此其 CDU 设计对循环泵、系统过滤、冷却液监控等要求更高。

单相浸没液冷实现了 100% 液体冷却，无须配置风扇，可使机房极致节能、静音。单相浸没液冷在应用时需要将通信设备完全浸没在冷却液中，所有材料、器件均需要重新选型评估，并开展兼容性测试验证以保证应用的可靠性。由于不导电液体热物性普遍较差且液体流速低，因此单相浸没液冷散热能力普遍较低，这在一定程度上制约了其推广应用。

根据浸没机柜形态，单相浸没式液冷可以进一步细分为卧式浸没和立式浸没。传统卧式浸没液冷设备维护时需要打开 TANK 上盖，并配备可移动机械吊臂或专业维护车以实现设备的竖直插拔，维护复杂度高、耗时长，且开盖维护过程存在一定的冷却液挥发问题，增加了运行成本。为了解决这一问题，业内将浸没机柜形态调整为立式架构，即单相立式浸没液冷，如图6所示。立式浸没机柜架构与冷板式相似，但通信设备本身需要实现板级密封功能，兼具冷板式液冷的维护便利性和浸没式液冷的节能优势。

2.4 两相浸没式液冷

两相浸没液冷二次侧冷却液在设备内吸热由液态转化为气态，通过冷凝器冷凝放热由气态转化为液态。这种液冷技术充分利用液体的相变潜热，散热能力相比于单相浸没显著提升。需要指出的是，两相浸没液冷同样存在卧式和立式两种技术形态。

两相卧式浸没二次侧冷却液仅在浸没腔体内部循环。浸没腔体的顶部为气态区，底部为液态区。冷却液吸收设备热量后发生相变，即液态冷却液变为气态冷却液。气态冷却液汇聚到浸没腔体顶部，与安装在顶部的冷凝器发生换热后冷凝为低温液态冷却液，随后在重力作用下回流至腔体底部，实现对通信设备的散热，如图7所示。

两相立式浸没将每个设备节点作为一个独立的小型浸没腔体，可有效避免相变冷却液的运维耗散问题，且架构兼容性更优、维护操作更便捷。因此，现阶段两相浸没以立式架构为主要研究方向。两相浸没立式系统架构如图8所示，它包含二次侧冷却液、密封壳体、两相沸腾散热器等关键部件。

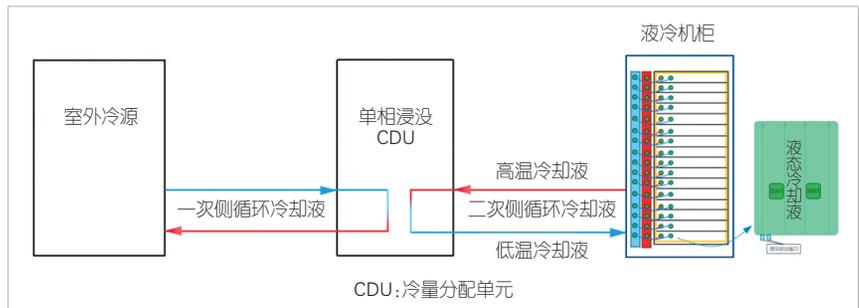
1) 二次侧冷却液：考虑密封壳体的承压设计，目前主要选用低沸点氟碳类工质。二次侧冷却液需要根据具体场景进行选择，并主要考虑热性能、环保安全性能、工作温区和压力、材料兼容性等因素。

2) 密封壳体：通信设备节点全密封设计，节点内部充满冷却液。工作时壳体上部为气体，下部为液体，通过流体连接器与CDU形成气液循环。密封壳体的关键点在于设备电、网、液接口处的密封设计。

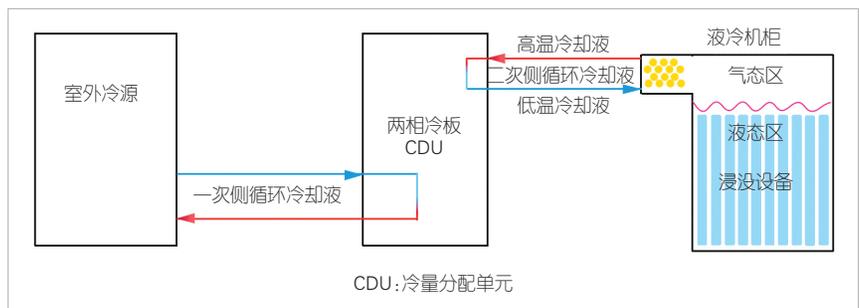
3) 两相沸腾散热器：通过界面材料与芯片接触，将芯片产生的热量通过冷却液的相变带走。这类散热器一般采用多孔介质设计方案，以增加汽化核心和散热面积^[5]。

两相浸没液冷兼具高节能、高散热的技术优势，可同时满足高功率芯片的散热需求，实现机房极致节能效果。但现阶段该技术仍在试点研究中，其密封可靠性、系统控制稳定性等有待持续优化。

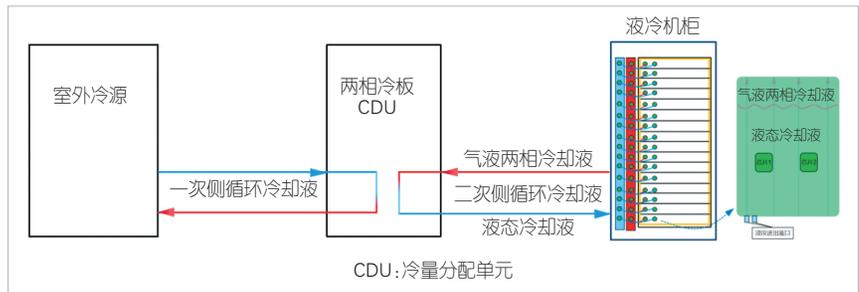
两相浸没液冷兼具高节能、高散热的技术优势，可同时满足高功率芯片的散热需求，实现机房极致节能效果。但现阶段该技术仍在试点研究中，其密封可靠性、系统控制稳定



▲图6 单相浸没式液冷系统架构(立式)



▲图7 两相浸没式液冷系统架构(卧式)



▲图8 两相浸没式液冷系统架构(立式)

性等有持续优化。

2.5 喷淋式液冷

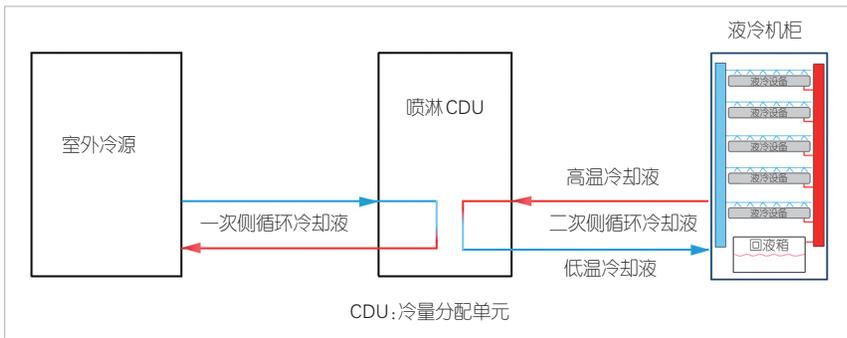
喷淋式液冷属于直接接触式液冷。二次侧冷却液由顶部进入服务器，在重力或系统压力的作用下，通过喷淋板精准喷淋发热器件，冷却液直接与发热器件接触，通过对流换热为器件散热，如图9所示。为了实现精准喷淋与有效散热，液冷机柜及设备需要一定的特殊化设计。

1) 二次侧冷却液：通常为不导电液体，可以是油基或氟碳类，换热过程不发生相变。

2) 液冷设备：上盖集成喷淋腔体和喷淋孔，可根据器件功耗、布局、尺寸设置不同的喷淋孔大小、位置、密集程度等。

3) 液冷机柜：设备内喷淋会有一定的冷却液飘逸，为了避免冷却液损耗，以及机房环境污染，液冷机柜需要具备一定的密封性。

4) 储液箱：一般放置于喷淋机柜的底部，利用重力收



▲图9 喷淋式液冷系统架构

集吸热升温后的冷却液，当系统出现异常情况时（如发生泄漏），也可收集泄漏液体，增加系统运行的稳定性和可靠性。

喷淋式液冷实现了100%液冷，使PUE优于单相冷板式液冷。通过喷淋结构，这种液冷技术可实现对高功率芯片的精准喷淋，使流经芯片的液体流速得到提升。这种液冷技术的散热能力略高于传统单相浸没液冷。因此，喷淋液冷可以看作是实现冷板式液冷节能、单相浸没液冷散热的折中方案。

2.6 液冷技术综合对比

算力攀升驱动数据中心液冷市场需求保持逐年增长的状态。业内多条液冷技术路线快速发展，针对不同应用场景各具优势，如表2所示。其中，单相冷板式液冷在液冷数据中心的应用占比达90%以上，是现阶段及未来一段时间业内主流的液冷技术方案。单相浸没式液冷节能优势更突出，且近年来该技术逐步趋于成熟，相关产业链快速发展完善，小规模商用不断推进。此外，喷淋式、两相冷板式、两相浸没式这3种液冷方案的技术研究和产业生态尚需完善。

3 液冷技术展望

数据中心液冷正处于快速发展阶段。随着液冷技术的规

▼表2 不同液冷技术方案对比

对比项	单相冷板式	两相冷板式	单相浸没式	两相浸没式	喷淋式
初投资	5	3	3	2	3
运营成本	2	2	4	5	3
节能效果	2	2	4	5	3
散热能力	4	5	2	4	2
噪音程度	3	3	5	5	4
环境影响	5	5	3	2	3
维护性	5	4	2	3	2
空间利用率	4	4	2	5	3
技术成熟度	5	2	3	2	3

注1：得分5表示最优；

注2：单相浸没式以卧式架构为对比技术方案；

注3：两相浸没式以立式架构为对比技术方案。

模化应用，各类问题也逐渐暴露出来。例如：冷板式液冷水基工质泄漏导致设备短路烧毁；单相浸没式液冷散热能力受液体流速约束，散热能力表现较弱，无法满足更高功耗CPU/GPU的散热需求^[6]；液冷系统制冷量未随负载变化及时调控，导致节能收益不明显；现阶段液冷数据中心的建设成本高等。这些均在一定程度上制约了液冷技术在数据中心领域的应用。为了解决这些问题，业界一直在持续探索研究，以提升数据中心液冷技术在安全可靠、散热能力、建设成本等方面的优势。

3.1 非水冷板式液冷

单相冷板式液冷一般采用水基工质作为二次侧冷却液，但水基工质存在腐蚀、泄漏导电等应用可靠性风险。除了基础的机械结构防泄漏外，中兴通讯创新性地提出非水冷板式液冷技术，将二次侧冷却液由水基工质更换为氟碳类或油基不导电液体，从冷却液本身解决泄漏导电问题。非水冷板式液冷架构与单相冷板式液冷相同。

非水冷板式液冷方案配合机械防泄漏结构设计，能够实现对液冷系统的多维度泄漏防护，真正做到泄漏有效防护、不损伤设备，且保留了冷板式液冷的高散热优势，能够满足现阶段各类通信设备的散热需求。同时，由于氟碳类、油基工质均属于大分子化合物，很难被微生物所分解，因此，非水系统中微生物腐蚀导致的风险会大大降低。

非水冷板式液冷因工质更换，其系统方案在设计过程也需要有一定的调整：

1) 液体润湿面材料与不同工质的兼容性存在差异，更换工质后需要重新开展材料与工质间的兼容性测试验证，以保证长期应用可靠性。

2) CDU：需要对补液装置改进，避免补液过程空气中的水分或杂质进入液冷系统中，引起非水工质的水解产生酸性物质，导致腐蚀风险问题。

3) 漏液检测：二次侧冷却液为非导电液体，因此传统导电型漏液检测传感器不再适用，需要更换为光电式、电容式、浮子式漏液检测方式。针对氟碳类工质，因其挥发性较强，泄漏后有一定的气态工质产生，可以采用吸气式漏氟检测仪器。

3.2 全液冷冷板

传统冷板式液冷通常只覆盖CPU、GPU等个别高功耗芯片，设备节点或整机柜液冷占比通常在60%~80%之间，存

在液冷占比低、节能收益不显著的问题。为此，业内已经开始布局全液冷冷板技术，即通过液冷板为设备内的所有发热器件进行散热。

以通算服务器产品为例，液冷板覆盖CPU、内存、硬盘、电源等，95%以上的热量通过液冷板带走，剩余约5%的热量通过设备节点内风液换热器中的冷却液带走，进而实现100%液冷。与传统的单相冷板式液冷相比，全液冷冷板技术具有更低的系统能耗，PUE可低至1.1，能够有效降低数据中心的运营成本。

全液冷冷板虽然可以大幅提升液冷占比，提升节能效果，但涉及液冷部件较多，液冷系统相对复杂，需要专业的维护人员进行操作和维修，同时内存、硬盘等可插拔部件的应用可靠性仍有待提升。从长期收益来看，全液冷冷板技术得益于其高效的散热性能及更低的能耗，在数据中心领域会有更广泛的应用。

3.3 单相浸没强化散热

单相浸没液冷液体流速低，使系统解热能力受限。在当下智算如火如荼发展的过程中，高功耗、高热流密度的CPU/GPU散热需求，驱动人们不断探索散热强化的创新路线，如引入主动驱动力，调整系统架构，改善冷却液热物性等，以满足高功耗、高热流密度芯片的散热需求。

单相浸没液冷通过引入外部驱动部件，可以显著提升芯片局部区域的冷却液流速和湍流程度，实现较高的换热效率。例如，Submer和英特尔共同开发了一款强制对流散热器，其通过在翅片散热器前方加装风机，搭配限流器外壳，使在散热器鳍片区域的冷却液产生强制对流，提高了冷却液的换热效率，从而改善散热器的热性能^[7]。

除了模块化设计的强制对流散热器方案，系统架构调整的散热模式也是浸没液冷发展方向之一。例如，中兴通讯与英特尔合作开发的浸没液冷架构强化方案，采用双回路设计，高功耗器件CPU/GPU等支持重力驱动强化散热方式，支持单节点散热能力2000W以上，CPU散热能力大于550W^[8]。

冷却液方面，目前单相浸没冷却液以碳氟类和油基工质为主，相比于水溶性液冷，虽然可以有效地解决绝缘性问题，但是仍存在粘度大、比热容低、导热能力差的缺点。为了提升介电液体的散热能力，纳米流体成为当下研究方向之一。纳米流体借助纳米颗粒的高导热系数和液体与颗粒之间的对流，可以显著提高导热系数和对流传热系数。虽然采用纳米流体可以有效提升换热性能，但是其稳定性差、制备难度大、生产成本高是实际应用中存在的主要问题，现阶段仍

需要持续优化。

3.4 液冷智能温控技术

液冷系统的极致节能离不开管理层的优化调控。与风冷系统相比，液冷系统耦合性更强，系统控制点位更多、更复杂。传统的液冷系统调控逻辑或群控模式无法匹配业务和负载率变化进行主动调控，在一定程度上存在冷量浪费的问题。现阶段的AI调优测试主要基于数据模型，通过对历史数据的深度学习、强化学习等，仅利用有限场景下的纯数据样本，数据成本高，历史数据依赖性强，训练周期长，且不具有可解释性，容易反逻辑控制，在极端工况下可靠性低。

为了提高液冷系统温控策略的节能效果及运行稳定性，人们提出了“数据+机理”的双驱AI技术。该技术将AI与传统暖通热力学模型相结合，构建机理和数据融合驱动的系统热力学模型，并针对机理模型中难以建立“白箱”模型的部分，可以利用采集数据构建数据模型来解决，也可以利用数据驱动方法对机理模型中的参数进行优化。双驱AI控制策略遵循热学原理，脱离纯数据依赖，避免反逻辑，具有更高可靠性、更优节能效果，能够通过对两种预测模型取长补短，最大程度提高预测的准确性，使计算复杂度及成本显著降低。

在具体应用中，需要将尽可能地将影响液冷系统节能与运行稳定性的因素纳入数据中心基础设施管理(DCIM)监管和调控中，通过双驱模型对数据中心建立多输入和输出间的拟合关系，使各工况点均具有可预测性。融合机理模型和数据模型的双驱仿真系统，借助可视化平台开发，可建立数据中心系统的数字孪生预测模型。液冷系统基于该模型不仅能实现极佳的节能温控策略，还能针对极端场景提前制定可能的风险场景应对策略，提升运维人员的响应效率和数据中心的运行可靠性^[9]。

3.5 低成本液冷系统

与传统风冷系统相比，液冷技术应用存在初期投资成本高的问题，这影响了液冷技术的规模应用与推广。此外，液冷物料本身也需要进一步研究。原材料和加工成本较高，需要引入新材料或新工艺以进一步降低成本^[10]。基于此，中兴通讯开发了低成本液冷系统，通过引入高可靠、低成本材料，改善工艺条件，使液冷数据中心投资成本综合降本15%以上。引入的材料包含铝合金冷板、高分子材料等。其中，高分子材料包括高分子工程管网、高分子分液器、高分子流体连接器等。

1) 铝合金冷板：液冷板散热底板由铜材更换为铝材。冷板上盖板等非散热接触面材料采用高分子材料，并通过注

塑成型,降低了成本。同时,液冷板取消焊接密封工艺,采用胶圈密封的方式,节省了焊接费用。

2) 高分子材料应用:工程管网、分液器等由不锈钢材料更换为高分子材料,且一体式注塑成型,工艺成本低,且所选材料经过兼容性测试验证,应用可靠性高。

3.6 芯片级液冷

芯片制程工艺向更小尺寸发展,芯片功耗和热流密度不断攀升,加之2.5D/3D封装和异构芯片的快速发展,使得芯片内热阻占比越来越大。当前芯片散热主要考虑导热界面材料(TIM)和外部系统散热技术两个方面,但仍无法解决芯片内热阻大的问题。未来随着各种新型封装形式的演进,外部液冷散热方案将难以满足超高功率密度芯片的散热需求。液冷散热方案将深入到芯片内部,从热源根本上解决散热问题。这种散热技术称为芯片级液冷技术。

芯片级液冷沿用冷板式液冷架构,所不同的是其将微尺度流道(微米级通道宽度)刻蚀在芯片内部,液体工质直接从芯片内部带走热量,大大降低芯片内热阻或者界面热阻,同时可解决多Die堆叠引起的散热问题,使散热能力得到极大提升,并可满足超高散热需求。从1981年开始,全球陆续有一些高校、科研机构和芯片厂商已经布局芯片级液冷散热技术研究,包括对微尺度液冷基础原理的研究、微尺度(硅基)流道加工工艺的探索改进、先进微尺度流道设计方案的研究等。按芯片与液冷微通道的耦合形态,芯片级液冷又可分为分体式(含TIM)和一体式(无TIM)两种,预计均可满足300 W/cm²以上的散热需求。但由于相关技术成熟度还较低,目前业内还暂无应用案例。

4 结束语

在“数字经济”和“双碳”的大背景下,不断提升的芯片热流密度和更严苛的设备能耗设计要求,成为数据中心制冷技术不断演进的两大重要驱动力。液冷技术具有低能耗、高散热、低噪声、低TCO等优势,是解决芯片散热问题、打造绿色低碳数据中心的关键技术。

参考文献

- [1] 工业和信息化部. 新型数据中心发展三年行动计划(2021—2023年)[R]. 2021
- [2] 国家发展改革委,中央网信办,工业和信息化部,等. 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[R]. 2021
- [3] MATSUOKA M, MATSUDA K, KUBO H. Liquid immersion cooling technology with natural convection in data center [C]//Proceedings of IEEE 6th International Conference on Cloud Networking (CloudNet). IEEE, 2017: 1-7. DOI: 10.1109/CloudNet.2017.8071539

- [4] 科智咨询,中国信息通信研究院. 中国液冷数据中心市场深度研究报告[R]. 2021
- [5] HONDA H, TAKAMATSU H, WEI J J. Effect of the size of micro-pin-fin on boiling heat transfer from silicon chips immersed in FC-72 [J]. Transactions of the Japan society of mechanical engineers series b, 2002, 68(672): 2327-2332. DOI: 10.1299/kikaib.68.2327
- [6] SARANGI S, MCAFEE E D, DAMM D G, et al. Single-phase immersion cooling performance in intel servers with immersion influenced heatsink design [C]//Proceedings of 38th Semiconductor Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM). IEEE, 2022: 1-5
- [7] 英特尔与Submers合作推出浸没式液冷系统可为1000 W以上CPU散热 [EB/OL]. (2023-10-18) [2024-10-15]. <https://www.expreview.com/90550.html>
- [8] 中兴通讯. 中兴通讯浸没式服务器IceTank, 重塑未来绿色数据中心 [EB/OL]. (2024-06-05) [2024-10-15]. <https://www.zte.com.cn/china/about/news/20240625c2.html>
- [9] 开放数据中心委员会. 数据中心暖通系统AI节能开放架构白皮书[R]. 2023
- [10] 开放数据中心委员会. 冷板液冷标准化及技术优化白皮书[R]. 2023

作者简介



严劲, 中国电信智能云网调度运营中心云室主任; 长期从事云计算、数据中心的运行维护、性能调优、技术研究等工作, 组织实施过多项云计算、数据中心领域的运营优化和业务保障重大项目, 在云计算运营风险治理、架构优化等方面拥有丰富经验。



景焕强, 中兴通讯股份有限公司制造工程研究院院长、硬件工程研发中心负责人; 具有丰富的可靠性理论和实践经验, 负责中兴通讯液冷团队一体化运作, 推进液冷技术实现商用突破以及关键技术的差异化创新。



张子馨, 中国电信集团云网调度运营中心项目经理, 工程师; 研究方向为算力网络、云计算及运维、人工智能、区块链。



刘帆, 中兴通讯股份有限公司热设计技术总工、青年领军人才; 研究方向为ICT设备先进散热技术预研、机房热管理技术预研, 具有丰富的热设计经验与扎实的技术能力; 申请30余项, 发表论文5篇。