

液冷技术在高密度数据中心中的应用与节能潜力探讨

李宏鹏

中信银行股份有限公司 北京 100000

摘要：液冷技术为应对高密度数据中心散热难题提供了创新方案。本文系统介绍了间接液冷、直接液冷与喷淋式液冷三大技术分类及其散热原理，剖析了液冷技术在散热效率提升、节能降耗、空间与成本优化及设备稳定性增强等方面的显著优势，深入探讨了其节能潜力，涵盖与传统风冷系统的对比分析、余热回收价值及全生命周期成本优化，同时指出了冷却液兼容性等技术挑战，并展望了液冷技术与边缘计算融合等未来发展方向。

关键词：液冷技术；高密度数据中心；节能潜力；余热回收；技术挑战

引言：随着数字化进程加速，高密度数据中心设备功率密度持续攀升，传统风冷散热技术因散热效率低、能耗高、空间占用大等问题，已难以满足数据中心高效稳定运行需求。液冷技术凭借其高效散热与节能降耗的突出优势，成为突破传统散热局限的关键路径。探索液冷技术在高密度数据中心的应用，对推动数据中心绿色化、智能化转型具有重要意义。

1 高密度数据中心与液冷技术

1.1 高密度数据中心特点与散热需求

高密度数据中心以高功率密度为显著特征，大量服务器、存储设备紧密排布，单位空间内设备运行产生的热量远超常规数据中心。设备集成度高使得内部空间愈发紧凑，各组件之间间距缩小，热量难以有效扩散。这种环境下，散热负荷急剧增大，若热量无法及时排出，设备温度持续升高，会导致运行性能下降，甚至引发硬件故障，缩短设备使用寿命。传统风冷技术在应对高密度散热时存在明显局限。风冷技术依靠空气作为传热介质，通过风扇强制空气流动带走设备热量。然而，空气的比热容较低，传热效率有限，难以快速转移高密度数据中心产生的大量热量。随着设备功率密度不断提升，风冷系统需增加风扇数量和转速来增强散热能力，但这会带来噪音污染加剧、能耗增加等问题。风冷系统在空气流路径设计上存在限制，易出现局部散热不均，导致部分设备温度过高，无法满足高密度数据中心对稳定散热的严格要求。

1.2 液冷技术原理与分类

液冷技术基于液体高效传热特性，通过液体介质与发热设备接触，快速带走热量。液体的比热容和导热系数普遍高于空气，能够吸收更多热量且传热速度更快，为高密度数据中心散热提供了更有效的解决方案。液冷技术主要分为直接液冷与间接液冷^[1]。直接液冷中，发

热部件直接浸泡在冷却液中，冷却液与设备直接接触吸收热量，随后通过循环系统将热量带走。这种方式传热效率极高，能直接对发热核心部件进行冷却，但对冷却液的绝缘性和化学稳定性要求严格，需确保冷却液不会对设备造成腐蚀或短路。间接液冷则不使冷却液与设备直接接触，而是通过冷板、管道等中间媒介实现热量传递。例如冷板液冷，将冷板紧贴设备发热表面，冷却液在冷板内部流动，吸收冷板热量，再通过循环系统将热量散发出去。这种方式安全性较高，避免了冷却液泄漏对设备的损害风险，适用于对稳定性要求较高的数据中心场景，但传热效率相对直接液冷略低。两种液冷技术各有特点，可根据数据中心的具体需求和设备特性选择合适的应用方式。

2 液冷技术应用于高密度数据中心的必要性

2.1 突破散热瓶颈

高密度数据中心设备功率密度持续攀升，服务器、存储阵列等硬件集成度不断提高，单位空间内热量产生量急剧增加。传统风冷技术依赖空气作为传热介质，空气比热容低、导热性能差，难以快速带走大量热量。随着设备功率密度超出风冷系统承载能力，空气流动受限，散热效率大幅下降，极易导致局部热点出现。在密闭机柜环境中，风冷系统即便提高风扇转速，也无法有效改善热量堆积问题，致使设备温度持续升高。液冷技术凭借液体介质的高比热容和导热系数，有效突破散热瓶颈。直接液冷方式中，冷却液与发热部件直接接触，能迅速吸收热量，传热效率远超空气。间接液冷通过冷板或管道，将设备热量高效传递至冷却液循环系统。两种方式均能实现对高密度设备的精准散热，避免局部过热，确保设备在合理温度区间运行，维持数据中心稳定运行，为高功率密度设备部署提供散热保障。

2.2 应对能源消耗压力

数据中心冷却系统能耗在整体能耗中占据较大比重。传统风冷系统为增强散热效果，需不断提高风扇转速，增加空气流量，这导致风机能耗显著上升。风冷系统制冷效率有限，为维持设备温度，制冷机组需长时间高负荷运转，进一步消耗能源。随着数据中心规模扩大，风冷系统能源利用效率低的问题愈发突出，运营成本持续增加^[2]。液冷技术展现出强大的节能潜力。液体高效的传热性能减少了制冷设备的运行时间和负荷。直接液冷无需大量风机强制空气流动，降低风机能耗；间接液冷通过优化冷却液循环，减少制冷系统启停次数。液冷系统可利用自然冷源，在适宜环境温度下，通过冷却液与外界热交换实现散热，降低制冷机组使用频率，有效降低数据中心整体能耗，缓解能源消耗压力，为数据中心绿色化运营提供技术支持，降低运营成本。

2.3 满足设备可靠性要求

高温环境对数据中心设备寿命和性能影响显著。电子元件在高温下，化学反应速率加快，加速老化进程，导致设备故障率上升。过高温度还会降低芯片运算速度，引发数据传输错误，影响数据中心整体性能。传统风冷系统难以精准控制设备温度，温度波动大，无法为设备提供稳定运行环境。液冷技术通过精确的温度控制，满足设备可靠性要求。冷却液循环系统可根据设备发热情况，动态调节冷却液流量和温度，维持设备表面温度恒定。直接液冷方式对发热核心部件的高效冷却，间接液冷对机柜整体温度的均衡控制，均能避免设备因温度过高出现性能下降或故障。稳定的温度环境延长了设备使用寿命，减少硬件维护频率，提高数据中心整体稳定性，保障数据存储和运算的准确性与连续性。

3 液冷技术在高密度数据中心中的应用方式

3.1 直接液冷技术应用

直接液冷技术通过将冷却液直接接触发热部件，实现高效散热。在高密度数据中心服务器中，CPU、GPU作为主要发热源，运行时产生大量热量。直接液冷技术应用时，拆除传统风冷散热器，将CPU、GPU等核心部件直接浸泡在绝缘冷却液中。冷却液具备良好的绝缘性与化学稳定性，确保不会对电子元件造成短路或腐蚀。当设备运行，核心部件产生的热量直接传递给冷却液，冷却液吸收热量后温度升高。通过循环泵驱动，升温后的冷却液流入热交换器，在热交换器中与外部冷却介质进行热量交换，温度降低后再次回流至设备，形成循环冷却回路。这种方式极大缩短了热量传递路径，减少热阻，相比传统风冷，能更快速带走热量，显著提升散热效率。由于冷却液直接接触发热源，散热效果不受空气

流动限制，可使核心部件始终处于较低温度，保障设备稳定运行，特别适用于对散热要求极高的高性能计算服务器。

3.2 间接液冷技术应用

间接液冷技术通过热交换器实现冷却液与发热部件间接换热。以冷板液冷在服务器机箱中的应用为例，冷板通常由金属材料制成，具备良好导热性能。将冷板紧密贴合在服务器CPU、GPU等发热部件表面，通过导热硅脂填充冷板与部件之间的微小缝隙，增强热传导效果。冷却液在冷板内部管道中循环流动，吸收冷板从发热部件传导过来的热量。吸收热量后的冷却液通过管道输送至外置热交换器，进行热量散发后，低温冷却液再次回流至冷板，完成循环。这种方式避免了冷却液与电子元件直接接触，降低液体泄漏对设备造成损害的风险，有效保护设备安全。在兼顾散热与设备防护方面，间接液冷技术优势明显。一方面，冷板良好的导热性能与冷却液高效传热能力相结合，能满足设备散热需求；另一方面，非直接接触的冷却方式，为设备提供防护屏障，即便出现冷却液轻微泄漏，也不会直接影响电子元件正常工作。冷板可根据不同设备布局和发热特点进行定制化设计，适配多种类型服务器，在保障设备可靠性的同时，实现高效散热。

3.3 液冷系统与数据中心架构融合

液冷技术与数据中心架构融合是实现高效运行和管理的关键。在机柜布局方面，需根据液冷系统特点重新规划。对于直接液冷，机柜需设计为密闭式，确保冷却液不会泄漏，并预留足够空间布置冷却液循环管道和接头。间接液冷则需考虑冷板与机柜内部设备的安装适配，以及冷却液管道的走向，避免与机柜内其他线缆产生干涉。供电系统与液冷系统的融合也至关重要。液冷系统中的循环泵、制冷设备等需要稳定电力供应。在设计供电系统时，要合理分配电力负载，为液冷设备提供独立供电回路，确保其稳定运行。同时考虑到液冷系统可能增加的电力需求，对数据中心整体供电容量进行评估和升级。监控系统需与液冷系统紧密结合。在冷却液循环管道关键位置安装温度、压力、流量传感器，实时监测冷却液状态。一旦出现温度异常升高、压力波动过大或流量不足等情况，监控系统立即发出警报。通过对这些参数的监测和分析，可及时发现液冷系统潜在故障，如管道堵塞、循环泵故障等，并采取相应维护措施。

4 液冷技术在高密度数据中心的节能潜力分析

4.1 降低冷却系统能耗

高密度数据中心内，服务器等设备持续运行产生大

量热量,冷却系统需不间断工作维持适宜温度。传统风冷依赖风机强制对流散热,随着设备功率密度增加,需提高风机转速、增加风机数量,导致功耗大幅上升^[3]。液冷技术凭借液体高比热容与导热系数优势,可实现高效热量传递。直接液冷中,冷却液直接接触发热部件,带走热量效率远超空气。发热部件热量迅速传递至冷却液,无需大量空气循环,减少风机使用数量与转速,直接降低风机功耗。间接液冷通过冷板或换热器隔离冷却液与电子元件,同样能以较少能量实现高效散热。冷板贴合发热部件,冷却液流经冷板带走热量,相较风冷减少空气对流所需能量损耗。制冷设备运行负荷方面,液冷系统可降低制冷机组工作强度。风冷系统需将空气冷却至较低温度以保证散热效果,制冷机组需持续高负荷运行。液冷系统中,冷却液能吸收更多热量,制冷机组无需将冷却液冷却至极低温度,降低制冷机组能耗,减少数据中心冷却系统整体能源消耗。

4.2 余热回收利用

液冷系统运行过程中,冷却液吸收设备散发的热量后温度升高,所产生的余热具备较高的回收价值。通过合理设计和系统集成,这些热量可以被有效利用于多个方面,进一步提升数据中心整体能源利用效率。在数据中心内部环境调控中,冬季低温环境下可将升温后的冷却液接入暖通系统,用于空间加热。借助热交换装置,冷却液中的热量可传递给空气,辅助维持机房及办公区域的适宜温度,减少传统制热设备的运行频率和能源消耗。这种余热利用方式不仅降低了供暖系统的电力或燃料需求,还提升了冷却系统的附加价值。生活热水供应也是余热再利用的重要方向之一。通过高效热交换设备,可将冷却液携带的热量转移至生活用水系统,为工作人员提供洗浴、清洁等所需的热热水,部分替代电加热或燃气加热装置,从而降低热水制备环节的能耗。余热还可与吸收式制冷设备结合,作为驱动热源用于制冷循环,实现能量的梯级利用,减少对电力制冷系统的依赖。也可用于预热进入数据中心的新风,在保证空气流通的同时降低新风处理过程中的能耗。多种途径的余热

回收利用,有助于构建更加高效、低碳的数据中心运行体系。

4.3 优化能源管理

液冷技术与智能控制系统结合,实现对数据中心冷却需求的动态响应,有效优化能源管理。智能控制系统通过部署在数据中心内的各类传感器,实时监测设备负载、环境温度、冷却液温度等参数。根据监测数据,系统能够准确判断当前冷却需求。当设备负载较低、发热量较小时,智能控制系统自动降低冷却液流量,减少循环泵功耗,同时降低制冷设备运行功率或使其进入节能模式。而在设备负载升高、发热量增大时,系统迅速增加冷却液流量,提升制冷设备运行负荷,确保设备处于适宜工作温度。这种动态调节机制避免了冷却资源的浪费,使能源供应与实际需求精准匹配。智能控制系统还可结合历史数据和预测算法,对未来冷却需求进行预判,提前调整液冷系统运行参数。例如,根据天气预报预测环境温度变化,在高温天气来临前,提前优化制冷设备运行策略,确保数据中心在极端环境下也能高效节能运行,显著提高能源利用效率,降低数据中心运营成本。

结束语

液冷技术凭借其高效散热、节能降耗及稳定性提升等显著优势,为高密度数据中心散热难题提供了有效解决方案,展现出巨大应用潜力。尽管当前液冷技术面临冷却液兼容性等技术挑战,但随着技术不断进步与标准化推进,液冷技术将逐步优化升级,助力高密度数据中心实现绿色、高效、可持续发展,成为未来数据中心散热领域的主流技术选择。

参考文献

- [1]刘鑫宁,谢丽娜,邵剑峰.冷板式液冷盲插快接头解耦问题研究[J].信息通信技术与政策,2025,51(02):40-45.
- [2]章正哲,张恒运.基于高效液冷技术的锂离子电池热管理研究进展[J].电源技术,2025,49(01):14-25.
- [3]李媛媛.一种高密度浸没式液冷机柜模块构想[J].电信工程技术与标准化,2024,37(z1):180-184.