

数据中心液冷系统中合成脂类液体的长期运行性能研究

林子杰 白瑞晨

兰洋(宁波)科技有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i4.15450

[摘要] 随着数据中心功率密度的持续攀升,液冷技术已成为高效散热的核心方案。合成脂类液体因具备优良的绝缘性、热稳定性及材料兼容性,在浸没式液冷系统中应用潜力显著。为此,本文首先对液体冷却技术进行阐述,同时对合成脂类液体进行概述,其次分析数据中心液冷系统中合成脂类液体的长期运行性能,最后提出推动数据中心液冷系统中合成脂类液体的长期运行策略,以期合成脂类液体的液冷系统优化设计提供参考。

[关键词] 数据中心; 液冷系统; 合成脂类液体; 长期运行性能; 热稳定性

中图分类号: N37 **文献标识码:** A

Study on long-term performance of synthetic lipid liquid in data center liquid cooling system

Zijie Lin Ruichen Bai

Lanyang (Ningbo) Technology Co., LTD.

[Abstract] With the continuous increase in power density of data centers, liquid cooling technology has become a core solution for efficient heat dissipation. Synthetic lipid-based liquids, due to their excellent insulation properties, thermal stability, and material compatibility, show significant potential in immersion liquid cooling systems. This paper first explains liquid cooling technology and provides an overview of synthetic lipid-based liquids. It then analyzes the long-term operational performance of these liquids in data center liquid cooling systems. Finally, it proposes strategies to enhance the long-term performance of synthetic lipid-based liquids in data center liquid cooling systems, aiming to provide reference for optimizing their design.

[Key words] data center; liquid cooling system; synthetic lipid liquid; long-term operation performance; thermal stability

引言

近年来,5G、人工智能和云计算等新兴技术的广泛应用,推动数据中心基础设施持续升级,服务器功率密度呈现显著增长态势,使得传统依靠空气对流的风冷散热方式面临新的挑战,其固有的热交换效率局限逐渐显现。面对高热密度设备的散热需求,液冷技术因其更优异的热传导特性受到业界重视^[1]。浸没式液冷采用直接液体接触的散热方案,通过特殊冷却介质实现高效热管理,在降低系统整体能耗方面表现突出。该技术的核心在于冷却介质的选择,需要综合考虑电气绝缘能力、长期热稳定性、安全环保特性以及与设备材料的适配性等多个关键因素。新型合成脂类液体在多个方面展现出潜在优势,特别是在环境友好性和经济性方面具备更好的应用前景,为绿色数据中心的建设提供新的技术选择^[2]。

1 液体冷却

1.1 原理

在数据中心的散热方案中,液体冷却技术是一种重要方式。

其核心逻辑在于利用液体作为热量传导的媒介,通过与服务器、CPU、内存条等发热部件直接或间接接触,把设备运行时产生的热量有效地传递出来。和空气相比,液体的比热容更大,导热系数也更高,在相同的流量条件下,液体能够承载更多的热量,散热过程也更为直接、高效^[3]。

1.2 分类

1.2.1 浸没式液体冷却

浸没式液体冷却技术系将发热设备直接置于特定冷却液体中的散热方案。该技术通过冷却介质与发热元件的直接接触,显著降低对流热阻,具备传热系数优异、设备运行温度稳定性强等特性。因无需风扇辅助散热,系统运行过程中噪声水平极低,适用于对绿色环保标准要求严苛且机柜热流密度较高的超大型数据中心场景。不过,此技术对数据中心的整体架构设计与运营管理提出较高要求,在冷却液分配环节需采用同程回路供回液设计,于机柜间设置平衡管,并在机柜内部装配均流板,以保障各电子设备冷量分配均匀;在热阻控制层面,降低CPU与冷却液

间的换热热阻是核心任务,若单纯通过增大换热温差强化散热,会削弱自然冷源利用效率并增加系统能耗,故需选用高性能热界面材料并优化CPU散热器结构设计^[4]。

1.2.2 喷淋式液体冷却

喷淋式液体冷却通过专用喷淋装置将冷却液体直接喷洒于发热设备表面,借助液体与设备表面的接触换热及部分液体蒸发吸热实现降温目的。相较于浸没式技术,该方案可减少冷却液用量,且能维持较低运行噪声,在解决高功耗机柜部署难题、降低IT系统制冷成本及提升数据中心能效方面具有显著优势。但实际应用中存在多项技术瓶颈:其一需精确设计喷淋流量,确保液体均匀覆盖所有发热元件,避免局部冷却不足引发设备过热;其二要求冷却液体与电子元件材料具备良好兼容性,防止发生腐蚀或短路现象;此外,系统运行中冷却液蒸发速率较快,需频繁补充,且服务器维护频率较高,加之对原有数据中心结构改动较大,导致初期投资与长期运维成本居高不下,限制了其在中小型数据中心的普及应用^[5]。

1.2.3 冷板式液体冷却

冷板式液体冷却是数据中心领域应用成熟的间接接触式液冷技术,其核心原理是通过冷板与CPU等核心发热元件的直接接触,利用冷板内部冷却液循环实现热量导出。冷却液体可直接通入冷板内部,或通过热传导方式间接为冷板降温。该技术对机房、机柜及服务器的改造幅度较小,服务器日常维护流程与传统风冷系统基本一致,方案成熟度较高,虽初期投资相对较高,但长期运维成本较低,适合大规模推广应用。其主要技术挑战在于漏液风险防控,由于冷板与冷却液管道连接结构复杂,密封不当易导致液体泄漏损坏设备,因此系统需配备高精度漏液监测及预警装置,实时监控管道连接处及冷板表面液体状态^[6]。

2 合成脂类液体

合成脂类液体是通过化学合成制备的含酯基结构化合物,其分子中含有有机酸与醇经酯化反应形成的酯键。根据化学结构差异,可分为双酯、多元醇酯和复酯等常见类别。双酯由二元脂肪酸与一元醇反应生成,分子结构简单,具有良好的低温流动性和较高粘度指数,在对低温性能要求高的液冷场景中优势明显。多元醇酯由多元醇与一元脂肪酸酯化而成,特定结构的多元醇酯因分子特性,热氧化安定性显著增强。这类酯类具备优异的热氧化安定性、低挥发性和良好润滑性,能在高温环境下稳定工作,适用于对高温性能要求严苛的数据中心液冷系统。复酯结构更复杂,由二元酸、多元醇与一元酸经缩聚反应制成,综合了多种酯类优点,性能全面,但合成工艺复杂导致成本较高。此外,合成脂类液体化学稳定性良好,在常规工作温压下分子结构稳定,不易分解或氧化,这得益于酯基碳氧双键的稳定性,加之合成时的结构设计与工艺优化,增强了抗外界化学影响能力,可保障液冷系统长期运行可靠性,降低性能衰减和维护成本增加的风险。

3 数据中心液冷系统中合成脂类液体的长期运行性能

3.1 热性能稳定性

在数据中心液冷系统运行阶段,合成脂类液体的热性能稳定性相对较高,具备较高的比热容,不仅能够吸收大量热量,也能将数据中心液冷系统的温度升高幅度控制在较低水平,继而在数据中心系统散热环节中展现优异性能。在服务器始终处于长时间高负载运行状态时,合成脂类液体可稳定将设备产生的热量进行导出,确保设备始终处于适宜的温度区间,追根究底是由于合成脂类液体中分子结构具备固有稳定性,因此在吸收热量以及传递热量的过程中分子结构也不会发生破坏,保证热传递效益的一致性。此外,合成脂类液体的热导率在长期运行环节中也能维持相对稳定的运行状态,即便合成脂类液体经历多次热循环,合成脂类液体的热导率下降幅度控制在较小范围内,继而为数据中心高效率系统运行提供保障,维持数据中心系统散热性能的稳定性。

3.2 化学稳定性

合成脂类液体本身的化学稳定性,是影响数据中心液冷系统长期运行的重要因素。尤其是在数据中心液冷系统运行阶段,所使用的冷却液水受到温度变化、氧气接触以及金属离子等因素的影响,合成脂类液体本身具备良好的化学稳定性,因此在液冷系统使用阶段不会出现分解、氧化等化学反应,让合成脂类液体的物理性质与化学性质始终处于稳定状态。与此同时,从氧化稳定状态来看,合成脂类液体通过增加不同类型的功能性助剂,有效抑制合成脂类液体在高温环境下与氧气发生反应过程,进一步减缓合成脂类液体的氧化速度,确保合成脂类液体的稳定性^[7]。此外,液冷系统运行中液体也不可避免会与金属管道、散热片等部件进行接触,继而导致少量金属离子被溶出,合成脂类液体对金属离子有着一定的耐受力,因此不会引发合成脂类液体出现化学性质改变,也不会受到金属离子的影响发生分解或是聚合反应,推动数据中心液冷系统的高效率、可持续化运行。

4 推动数据中心液冷系统中合成脂类液体的长期运行策略

4.1 优化冷却液配方

优化冷却液配方是提升合成脂类液体在数据中心液冷系统长期运行性能的关键策略。通过调整基础脂类的种类比例及添加功能性助剂,可全面改善冷却液各项性能指标。在基础脂类选择上,技术人员可探索新型合成脂类材料,通过分子结构设计研发具有更高热稳定性与化学稳定性的脂类化合物,增强分子间作用力与抗氧化性能,为冷却液配方提供更优的基础成分。在功能性助剂的合理添加时,除常规抗氧化剂外,可引入抗磨剂、缓蚀剂和金属钝化剂等助剂。抗磨剂能减少冷却液循环时对管道和泵等部件的磨损,延长设备寿命;缓蚀剂可强化对金属材料的防护,防止腐蚀发生;金属钝化剂能在金属表面形成保护膜,抑制金属离子溶出,维持冷却液化学稳定性,多类助剂协同作用可提升冷却液综合性能。

4.2 建立监测与维护体系

建立完善的监测与维护体系是保障合成脂类液体长期稳定运行的重要手段,通过实时监测与规范维护,可及时发现问题并处理,延长冷却液使用寿命,确保系统高效运行。监测方面,技术人员需重点关注冷却液的温度、流量、压力、酸值、黏度、水分含量及金属离子浓度等指标;安装在线监测设备并将数据实时传输至监控中心,借助数据分析软件进行实时分析与趋势预测,指标异常时系统及时报警提示运维处理。维护环节中,技术人员需定期抽样检测,通过实验室检测精准掌握冷却液性能变化。依据检测结果对冷却液进行补充、更换或添加助剂调整。针对不同性能异常情况采取对应处理措施,同时定期清洗或更换系统过滤器,去除杂质颗粒物,保证冷却液清洁度。

4.3 加强系统密封与防护

良好的密封性能可防止冷却液泄漏,阻挡外界杂质和水分进入,维持冷却液性能稳定。数据中心冷却系统设计阶段应选用高质量密封材料并优化密封结构,管道连接部位采用密封性能优良的垫片及合适密封方式,液冷机柜确保柜门和接口处密封严密,避免空气和灰尘侵入。此外,在金属管道和散热片等部件表面涂覆耐腐蚀、抗氧化的防护涂层,形成致密保护膜,减少冷却液与金属直接接触带来的腐蚀风险。同时控制机房环境保持清洁干燥,规避潮湿和灰尘对系统的损害。

4.4 开展技术研发与合作

相关部门需通过产学研合作整合资源攻克技术难题,推动技术创新与完善。高校和科研机构可深耕基础研究,探索合成脂类液体分子结构与性能关系,研发新合成方法和配方设计,为性能提升提供理论支撑。与此同时,企业加大技术研发和产品创新投入,将科研成果转化为实际产品,并依据市场反馈优化性能。此外,可建立行业联盟或技术交流平台,组织各方分享技术经验,通过联合研发、制定行业标准规范产品质量和应用,统一冷却液性能测试标准和系统维护规范,提升行业技术水平与产品质量,推动合成脂类液体技术健康发展。

5 结语

总而言之,数据中心的能耗问题已逐渐成为行业发展的核心关切点,对其制冷系统实施节能增效改进显得尤为关键。浸没式液体冷却技术凭借高效的散热效能,不仅有效提升服务器的运行效率与稳定性,进而全面增强数据中心的整体运营效能。合成脂类液体作为一种成本可控且环境兼容性优异的液冷介质,在中高热密度数据中心场景中的应用,既能满足数据中心向高密度化演进的发展需求,又能契合高效能、绿色化、低碳化的发展目标要求。

[参考文献]

- [1]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(03):62-67.
- [2]蒋绍辉,张博博,熊滕,等.数据中心液冷技术的应用研究进展[J].新能源进展,2025,13(02):204-213.
- [3]刘展,季沈蕊,孙鑫山,等.高算力数据中心单相浸没液冷系统设计 with 试验研究[J].实验技术与管理,2025,42(04):37-41.
- [4]周瑜,李小平,安红,等.浸没式液冷冷技术在数据中心中的应用与测试[J].数字通信世界,2025,(02):133-136.
- [5]潘永莉,王会娟,宗皓男,等.数据中心服务器浸没式液冷技术研究进展[J].润滑油,2024,39(06):7-13.
- [6]陈岳浩,陈莎,陈慧兰,等.储能电池组浸没式液冷系统冷却性能模拟研究[J].储能科学与技术,2025,14(02):648-658.
- [7]吴曦蕾,杨佳亮.数据中心浸没式液体冷却系统的发展历史及关键环节设计[J].制冷与空调,2022,22(11):61-74.

[基金项目]

2024年宁波市高新区重点科技项目:国产芯片服务器新型液冷复合热管理材料研发及应用示范:2024CX050001。

作者简介:

林子杰(1984--),男,满族,吉林省吉林市人,日本熊本大学博士研究生,研究方向:热工学和能源转化领域。

白瑞晨(1987--),男,蒙古族,辽宁省沈阳市人,日本熊本大学博士研究生,研究方向:先进机械系统。