

引用本文:郭银杰,赵春雨. 数据中心冷却技术发展综述[J]. 制冷与空调,2025,25(3):1-8.

DOI:10.20245/j.issn.1009-8402.2025.03.001

中图分类号:TB657.5 文献标识码:A

行业·技术视点

本栏目投稿邮箱:

zldt@chinacraa.org

数据中心冷却技术发展综述*

郭银杰 赵春雨

(北华航天工业学院 建筑工程学院)

摘要 随着数字经济的飞速发展以及国家双碳政策的推进,数据中心作为信息存储、处理和传输的核心设施,规模和性能不断提升导致数据中心的高能耗问题越发凸显并亟待解决。冷却技术作为保障数据中心稳定运行的关键因素,其发展历程经历了从简单到复杂、从低效到高效的转变。文章以数据中心的发展历程为背景,对数据中心冷却技术进行了综述,并指出制约数据中心液冷技术发展的因素和未来冷却技术的发展趋势,为建设和发展高效节能的绿色数据中心提供参考借鉴。

关键词 数据中心冷却技术;风冷技术;冷通道封闭;液冷技术;冷板式液冷;浸没式液冷;喷淋式液冷;冷却液

Discussion on the development history of data center cooling technology

Guo Yinjie Zhao Chunyu

(School of Civil Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering)

ABSTRACT With the rapid development of the digital economy and the promotion of the national dual-carbon policy, data centers as the core facilities for information storage, processing and transmission, the continuous improvement of scale and performance has led to the problem of high energy consumption of data centers has become more prominent and needs to be solved. As a key factor to ensure the stable operation of data centers, cooling technology has undergone a transformation from simple to complex and from inefficient to efficient. Based on the development history of data center, this paper summarizes the cooling technology of data center, and points out the factors restricting the development of liquid cooling technology of data center and the development trend of cooling technology in the future, so as to provide reference for the construction and development of efficient and energy-saving green data center.

KEY WORDS data center cooling technology; air cooling technology; cold aisle closure; liquid cooling technology; cold plate liquid cooling; immersion liquid cooling; spray type liquid cooling; coolant

在后疫情时代、全球数字技术快速发展的变局下,发展数字经济已成为各个国家实现经济复苏的关键^[1]。全球数字经济白皮书(2023年)^[2]显示,全球数字经济规模快速增长。2022年,测算的51个国家数字经济增加值规模为41.4万亿美元(约3 013 837.2亿人民币),同比名义增长7.4%,占GDP比重的46.1%。产业数字化持续成为数

字经济发展的主引擎,占数字经济比重的85.3%。1946年,世界上第一台通用电子计算机ENIAC诞生^[3],开启了与之配套的“数据中心”的演进。随着通信技术的逐步发展,20世纪90年代初,连接型网络设备带头了上一代PC,人们开始尝试将服务器单独放在一个房间^[4],数据中心发展开始步入常态化。2005年,中国电信集团推出了中国电信

* 润泽数据中心机房环境控制项目申报及其科研服务项目(一)(编号:JZH-2023-17-H)

收稿日期:2024-06-30,修回日期:2024-08-10

作者简介:郭银杰,在读硕士研究生,研究方向为人工环境工程。

IDC 产品规范^[5]；在同一时间，美国也颁布了 ANSI/TIA-942-B-2005《数据中心电信基础设施标准》，将机房分为 Tire1、Tire2、Tire3 和 Tire4 共 4 个等级^[6]；这两项标准规范和指导了数据中心的发展。2022 年 ChatGPT 开启了数据中心 AIGC 这一全新业态，之后 OpenAI 在 2024 年推出 Sora 视频 AI 处理生成模型。至此，数据中心开始从零散中小型机房、大型云数据中心朝着智算中心和超算中心发展。随着算力行业的高质量快速发展，对算力性能要求也越来越高，特别是对高性能的 CPU、GPU 等服务器关键部件的性能需求也越来越高，其功耗增加也愈发显著^[7]。冷却技术是数据中心建设的关键技术之一^[8-10]，为保证高算力和高热密度数据中心能够安全高效地运行，数据中心的冷却技术必须不断地更新与迭代。文章分别从数据机房末端冷却技术和冷源侧冷却技术两个方面探讨了数据中心冷却技术的发展历程，并阐述了数据中心未来冷却技术的发展趋势，旨在为未来数据中心的低碳节能发展提供参考。

1 数据中心冷却技术

1.1 风冷技术

数据中心风冷技术是通过向 IT 机房等相关房间输送经过处理后且符合相应房间室内环境质量的低温冷空气，使机房内环境满足安全稳定运行需求的技术。在早期的数据中心的，通常采用风帽上送风、风管上送风以及地板下送风的房间级系统送风形式。

风帽上送风系统的有效送风距离较近，仅适用于小型的、热密度较低的数据中心机房，如图 1 所示^[11]；但在机房规模不断增长及 IT 功率不断增加变化的今天，风帽送风气流组织不均匀的缺点逐渐凸显，在大机房中已被逐渐淘汰^[12]。风管上送风方式与传统建筑空调系统风管送风方式类

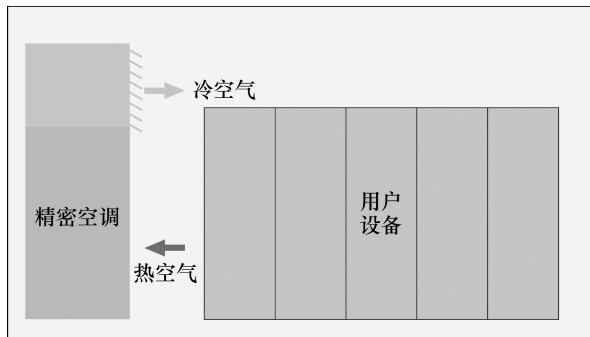


图 1 风帽上送风组织架构图^[11]

似，适用于风帽上送风无法满足送风距离、空调房间又要求各处空调效果均匀的场所，如图 2 所示^[11]，虽然目前大多数数据中心的 IT 机房已经不采用这种送风形式，但该种送风方式在配电室、电池室等电力室中仍被采用。

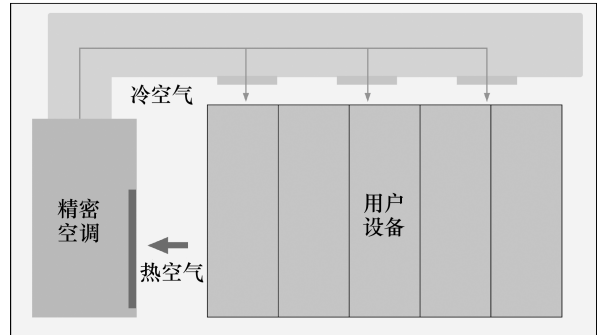


图 2 风管上送风组织架构图^[11]

地板下送风系统送风是指在机房内铺设高架地板，机房空调间内的精密空调将冷空气输送到高架地板下方，再通过通风地板将冷空气送到 IT 设备周围，并降低服务器等散热设备以及机房环境的温度，随后机房精密空调再将房间内的热回风吸收，经过空制冷后再送入机房，如图 3 所示^[11]。在应用过程中随着地板下电缆的不断增加，高架地板下走线 + 地板下送风形式的劣势逐渐显现。为了避免地板下送风方式中送风路径阻塞，优化风冷形式下的气流组织对降低能耗和提高制冷系统的冷却效率显得尤为重要。数据中心相关工作者在经过长期的实践验证和数值模拟研究后发现，采用冷/热通道封闭 + 地板下送风 + 机房上空走线架上走线，必要时适当增加高架地板高度的方法在优化地板下送风数据中心制冷效果方面能够取得更佳的效果^[13-22]，如图 4、图 5 所示。王志刚^[23]研究利用火积损失来评价数据中心冷却效率，研究发现当架空地板高度从 400mm 增加到

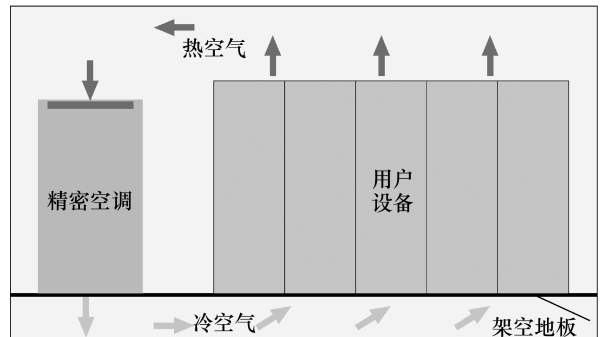


图 3 地板下送风组织架构图^[11]

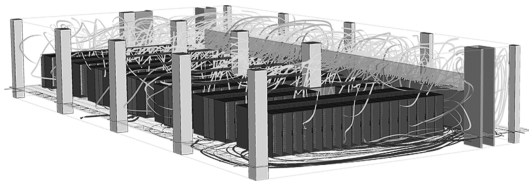


图 4 地板下送风 + 冷通道封闭模型

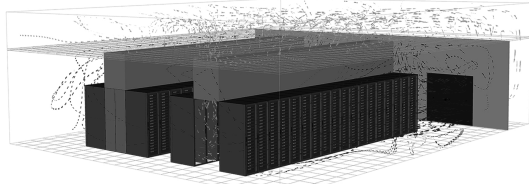
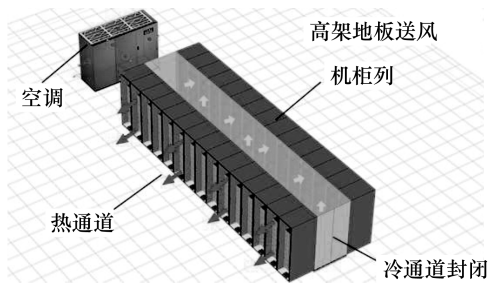


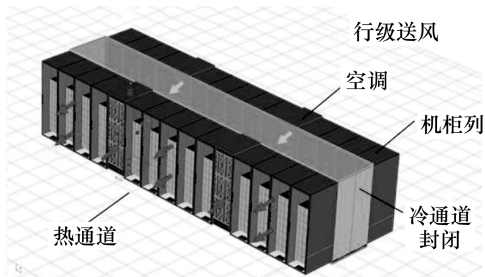
图 5 地板下送风 + 热通道封闭模型

800 mm时,机房内火积损失降低。此外当地板格栅开孔率在 20%至 40%范围内时火积损失较小,冷量利用率较高。而封闭冷通道相较于封闭热通道有更好的冷却效果,但两者的火积损失相差不大,选择哪种封闭方式取决于机房建筑条件。

为解决传统机房地板下送风系统形式下长距离输送冷风存在冷量损失的问题,行间制冷方案应运而生^[24-25]。JIN 等^[26]对某学校的数据机房进行了研究,结果表明行间送风方式与高架地板送风相比,具有更好的冷却效率,JIN 等研究的送风方案模型如图 6 所示。在行间冷却技术中,通过将空调设备直接集成于设备机列中,结合冷通道封闭设计,并采用正面送风、背面回风的气流方式,从而实现对特定机柜行的精准制冷。这种方法不



(a) 高架地板送风方式



(b) 行间送风方式

图 6 JIN 送风方案模型图^[26]

仅有效地提升了能源使用效率,还显著减少了局部热点问题的发生^[27],行间制冷系统平面如图 7 所示。

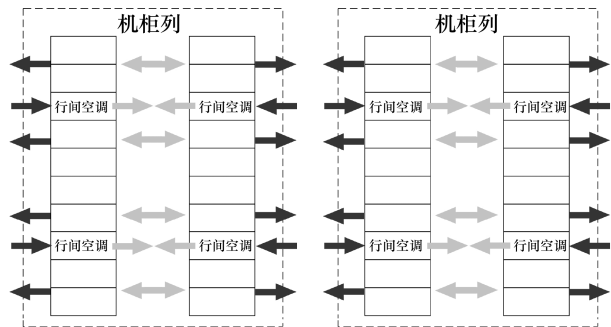


图 7 行间空调组织架构图^[27]

随着机房中特定高热密度机柜散热需求的增加,柜级制冷技术逐渐崭露头角。这种技术将制冷部件直接集成在机柜内部(如顶置空调、底置空调等)^[28-31]或机柜门(如背板空调,水冷前门等)^[32-34]上,以精确地为每个机柜提供所需的冷却能力。水冷前门空调组织架构图如图 8 所示。赖柏年等^[35]通过 CFD 模拟分析研究了传统下送风、热管背板、水冷前门和列间空调在不同机房功耗下的制冷效果和气流组织情况。研究发现,相比于传统下送风,其余 3 种空调形式在中、高功耗机房更具优势,节能效果也随着机房能耗的增加而提高,同时在低功耗机房中建议优先使用下送风机房专用空调。

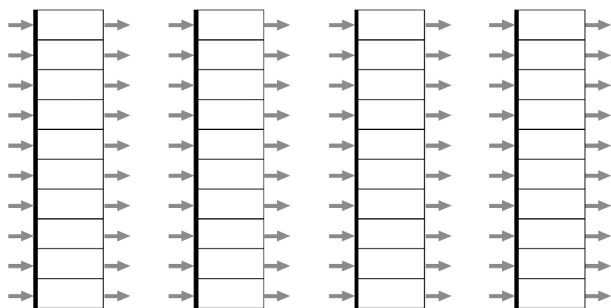


图 8 水冷前门空调组织架构图^[27]

1.2 液冷技术

20 世纪 60 年代,数据中心中的一些大型主机系统就已经开始采用这种散热方式,其中 IBM 的 System/360 型 91 大型计算机便是这一技术的代表^[36]。但由于早期数据中心的功率密度和风冷技术成本较低,且安装和部署过程更为简便,所以在过去的 60 多年里,风冷技术在 IT 产业中占据了主导地位^[7]。然而,随着时间的推移和技术的飞速发展,芯片功率的不断提升和热密度的不断升高,

散热技术有了更高的要求,传统的风冷技术已经很难满足机房散热需求,这促使业界开始重新评估液冷技术的潜力和价值^[37-40]。根据当前技术研究的进展,液冷技术被划分为 3 种主要类型:冷板式液冷、浸没式液冷以及喷淋式液冷^[41-42]。

冷板式液冷系统利用特制的冷板(通常由高导热金属如铜、铝制成一个封闭腔体)作为热量传递的媒介,间接地将电子元件产生的热量传递给冷却液,在循环泵作用下热量被冷却液转移到外界散热装置并进一步冷却,这种设计有效实现了热量的高效传导和散热^[43]。在整个冷却过程中,液冷冷板作为将服务器内热量传递到冷却液中的主要部件,在保证液体不直接接触服务器设备并安全运行的同时,通过不同类型的铲齿结构将主要散热部件的热量传递到液体中,并通过机房内二次管路返回至 CDU(Cooling Dispensing Unit, 冷液分配单元)中。CDU 作为高温液体与低温液体的换热站(相对而言,一般情况下冷却液的供回水温度分别在 40 °C 和 50 °C 左右),在 CDU 内循环泵和换热器等部件的作用下,将低温液体再输送回液冷冷板并进行再一次的循环。目前冷板式液冷方式承担主要热负荷(如 CPU 等芯片),风冷方式承担剩余低热负荷的电子元件(如内存条,PCB 板等)^[44]。通过结合冷板式液冷以及风墙冷却技术^[45-46],实现了在这种散热形式下,风墙的送风温度可以维持在 28~30 °C,最终使得冷板式液冷在兼顾制冷效率的同时也能够降低能耗。同时通过调整液体散热和风冷散热的比例,最大程度上使得数据中心安全、稳定、高效、节能和低碳地运行^[47-49],如图 9 所示。NADJAH 等^[50]研究指出采用封闭式水冷背板的数据中心机柜每年可节省近 35% 的能耗,并可实现精确冷却。IBM 设计的基于闭式水冷背板的机柜散热效率比单一风冷技术高出 80%。ZIMMERMANN 等^[51]研究发现如果将服务器中的 CPU 和内存均采用冷板-液体制冷的方式进行冷却并将冷板式液冷技术占比提高到 90%,则与传统的风冷数据中心相比,能耗可降低高达 50%。但由于在冷板式液冷技术中始终存在冷板这一具有热阻特性的中间部件,使得其导热系数、对流换热系数以及冷却液流速和温度等的大小决定性的影响着整个冷板式液冷系统的换热能力。就目前的液冷发展情况来看,冷板式液冷由于其具有较高的技术成熟度、安全性以及相对

较低的运维难度等,使得其在数据中心液冷市场中独占鳌头,处于主体地位。浸没式冷却通过将服务器完全浸入绝缘冷却液体中,直接利用冷却液吸收和带走发热元件产生的热量。随后,这些热量被传递至室外的散热装置进行冷却^[52]。这种技术摒弃了传统的机柜形式,实现了冷却液与服务器之间的直接接触,从而大幅度提高了散热效率,浸没式液冷示意图如图 10 所示。浸没式液冷技术根据冷却液是否发生相变,分为单相和相变两种类型^[53]。例如:某公司推出的磐久系列液冷一体机 Immersion DC 1000,该设备通过单相浸没式液冷显著降低了整体能耗达 34.6%;而另一个公司则推出了 C8000 相变浸没式液冷配套方案,据称该方案能将数据中心的 PUE 值有效降低至 1.05 以下^[54]。CHI 等^[55]对风冷系统和全浸入式液冷系统进行了性能比较。结果表明,与风冷系统相比,液冷系统可节省约 96 kW 的电力,节省 88% 的冷却能源。此外,液冷允许达到 1.14 的 PUE,而风冷的 PUE 为 1.48。需要注意的是浸没式液冷虽然带来了高效率、高散热性的显著优势,但同时也出现了液冷服务器发生腐蚀、故障率升高

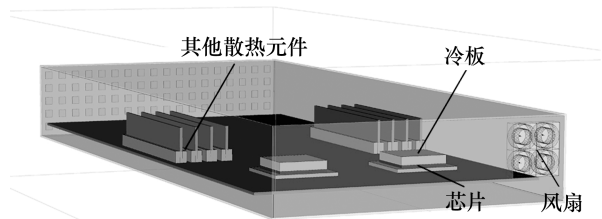
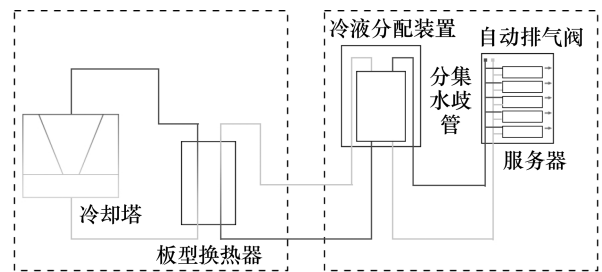


图 9 冷板式液冷系统架构图及冷板式液冷服务器组织图

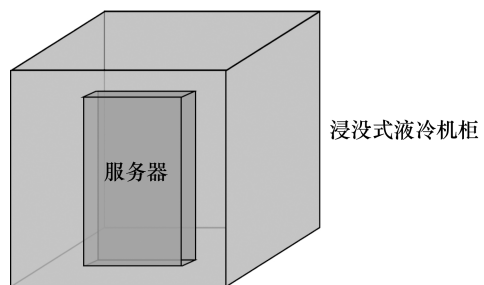


图 10 浸没式液冷系统示意图

等现象,尤其是IT设备发生腐蚀后服务器生产厂商、运营商以及施工方等各方就关于“究竟是谁的错误导致服务器腐蚀”的争辩问题,使得运营商不得不重新思考并研究关于浸没式液冷在数据中心领域的继续推广和应用。

喷淋式液冷通过将冷却液喷淋在散热元件上以直接带走其所释放的热量并排放至IDC外部环境的散热形式^[56]。喷淋液体能够完全覆盖服务器发热器件,同时根据不同发热器件的功率密度,可以对喷淋板上的液孔进行精准化开孔设计,以满足不同功率发热器件的散热需求^[57],喷淋式液冷工作原理如图11所示。KANDASMY等^[58]设计了一种由服务器和加热器组成的喷雾冷却系统。这种系统消除了对冷水机组的需求,研究表明,与风冷系统相比,新型喷雾冷却系统的总能耗可降低25.8%。但由于喷淋式液冷需要精确

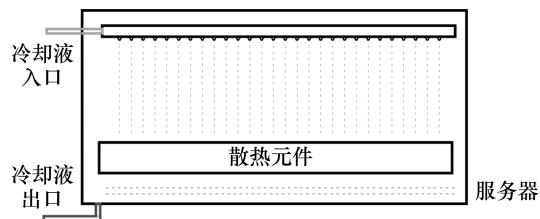


图 11 喷淋式液冷^[57]

掌控冷却液的喷淋量和喷淋位置,这使得如何合理分配冷却液流量和降低喷头及管路阻力等成为应用和实施服务器喷淋式液冷的关键。

2 对比与分析

2.1 冷却技术的对比分析

数据中心的各种冷却技术因其独特的设计属性,必然在性能上表现出差异。为便于综合对比各制冷技术的性能,对冷却技术综合进行列表对比(表1)。

表 1 冷却技术综合对比

名称	优点	缺点	适用性
风帽上送风	安装较为简便、整体造价较低,对机房的要求也较低 ^[11]	有效送风距离较近,冷热空气短路现象明显,制冷效率低 ^[59]	淘汰
风管上送风	较风帽上送风送风距离远,设计简便,造价较低 ^[11]	制冷效率低、建成后不易调整、能耗高 ^[11,59]	仅适用于一些中小型数据中心和部分数据中心的电力室等房间
地板下送风+冷/热通道封闭	制冷容量可共享,前期投入费用较低,布置方便 ^[28]	远距离送风导致冷量损失大;当机柜功率密度较高时,易产生局部热点 ^[28]	仅适用于一些中小型或者一些要求不高数据中心
行/列间空调	风机功耗低,有效消除局部热点问题,无需高架地板 ^[24,31,34]	空调占用机架安装位置;列间空调紧靠IT机柜,危险系数高 ^[24,34]	适用性和耦合系数高
背板空调	精确制冷,制冷量随机柜功率进行调节,占地面积小 ^[31,34]	末端相互独立,容易发生单点故障,服务器机柜需特别定制,不具备加湿功能时还需额外布置加湿器 ^[34]	适用性和耦合系数高
冷板式液冷	材料兼容性好,对发热器件的要求较低,安装较为简便 ^[60]	系统热管组件与服务器选择缺乏灵活性,冷板大多需单独定制,成本较高,manifold质量需重视 ^[37]	适用性和耦合系数高
浸没式液冷	冷却液有较高的热导率和比热容,能耗和噪声低,制冷效率高 ^[7,37]	技术难度高,可维护性较差,直接接触,材料兼容性较差,对建筑结构承重性能要求高 ^[39,60]	适用性高
喷淋式液冷	用量较少,节能效果好,散热效率高,静音 ^[7,57]	流量小时分液均匀性较差,对喷头要求高,喷头堵塞问题需重视 ^[61]	适用性高

液冷散热技术与传统风冷方式相比,展现出卓越的散热优势,主要包括:

1) 传统风冷散热面对高功率服务器,其散热能力已经达到瓶颈。目前,各国都在训练和研究AI算法及大模型,这离不开高功耗算力芯片服务器的支撑。

2) 传统风冷散热依赖冷空气为数据机房降温,而液冷散热则通过冷却液直接或间接吸收IT设备热量。由于冷却液在密度、比热容和导热系

数上均显著优于空气,所以液冷的散热性能优于风冷。

3) 液冷散热系统相对于风冷散热系统,在达到相同的散热效果时,液冷散热系统具有低能耗的环保特性,能够助力国家实现“双碳”目标。

4) 液冷散热系统在实现数据机房余热回收再利用方面比风冷散热系统更具优势,并且能够实现更高效的余热回收效果以及更多的余热回收量。即冷却液在吸收热量后,冷却液温度可超过

40℃(具体取决于系统设计),这些热量可转化为有价值的能源。例如将余热回收管道并入市政管网可实现区域供暖或生活热水供应;此外当部分地区或城市实施区域集中供暖或生活热水供应较为困难时,可用余热实现为数据中心园区内快速反应中心或其他配套建筑实现热水供应等,既环保又经济。

2.2 制约因素

目前数据中心的液冷技术主要受以下 7 点因素的影响,可以总结为:

1) 对于现有的数据中心来说,由于存在许多早期依靠风冷散热的数据中心,所以将风冷冷却的数据中心一次性转换为液体冷却的数据中心几乎不太可能。同时低功率的数据中心依然有一定的市场和服务需求,对于低功率 IT 设备,其采用风冷技术相对于采用液冷技术无论是经济上还是运维实施上都具有较高优势。

2) 早期的数据中心物理设施(如建筑结构建筑承重等)的设计主要是基于风冷系统的架构形式,因此其可改造的数据中心液冷技术形式通常为冷板式液冷技术,但由于冷板式液冷技术始终无法摆脱部分部件依靠风冷进行散热的约束,其能耗和冷却效果依旧无法与浸没式液冷和喷淋式液冷这种直接接触式液体冷却技术相提并论。

3) 浸没式液冷和喷淋式液冷目前应用范围并不广泛,冷却液的品质问题是一个重大的影响因素。由于冷却液和电子设备直接或间接接触,所以首先应保证冷却液不具有导电性。第二,与任何液体管道系统一样,应确保冷却液不与管道发生腐蚀,避免污染冷却液或堵塞液体管道而导致设备散热异常或者宕机。第三,对于非相变液体冷却,冷却液的稳定性至关重要。即应保证冷却液具有较高的沸点,避免系统运行过程中冷却液挥发导致系统压力失调;而对于相变液体冷却,应确保冷却液具有合适的沸点和液化临界点,保证冷却液能够发生相态转化从而最大程度发挥相变液冷系统的优势。

4) 对于发生相态转化的冷却技术,冷却液箱体的密封性和承压能力应被保证。

5) 由于液体的密度较大,所以这对建筑体的承重能力和建筑结构都有较高的要求。

6) 液冷关键部件如 manifold, CDU 以及一些精密阀件的高质量生产和制造是保证液冷数据中

心安全高效运行的关键。其作为连接 IT 设备和冷却液的中间站,连接接口处的密封性及抗氧化和抗腐蚀性等均应达到标准。

7) 目前液冷技术的产业链成熟度不如风冷技术,从初始的投资建设到投入运行后的运维管理过程都需要探索研究。尤其是浸没式液冷技术,无论是服务器外壳、液冷机柜、芯片,还是冷却液和冷却液管路,厂家都过于分散,缺乏集成式统一的生产管理和部署。当服务发生故障或出现问题时无人售后以及各项目参与方责任的相互推诿和无法定责问题严重阻碍浸没式液冷的进一步发展。此外由于缺乏相关的液冷技术及施工验收等规范,使得液冷技术和相应的设备组件缺乏明确统一的方向和质量要求。

即使数据中心液冷技术的市场占有率正逐步提高,但考虑到普通业务的需要以及各方对液冷技术和风冷技术的技术成熟性和经济性等多方面的权衡与对比,风冷散热技术在未来很长一段时间内不会被数据中心淘汰。但在未来,随着国家、行业对数据中心液冷技术探索和研究的更加明朗,液冷技术的愈加成熟和投资运营成本的逐渐降低,液冷技术将逐步取代风冷技术成为业内主流。而在众多液冷技术中,冷板式液冷技术目前已经趋于成熟,并且在目前乃至未来一段时间,其在数据中心行业将仍占据着很大一部分市场比例。由于液冷技术在数据中心领域刚刚崭露头角,浸没式等直接接触式液冷技术并没有取得优异成绩。但随着未来对液冷技术的不断创新研究以及各产业链间的协同合作,冷却液的品质、设备材质、相关技术以及技术、施工、验收规范等都将得到解决和完善,并最终帮助喷淋式液冷技术和浸没式液冷技术逐渐占据数据中心液冷技术的主导地位。如果未来在数据中心领域能有一液冷技术集成者,将液冷技术所用到的各种设备及售后服务进行全面扩充,这会是一个极具前瞻性和创新性的举措。

3 结束语

在节能减排的大背景下,无论是改造既有项目还是新建数据中心采用液冷系统都将有利于打造绿色数据中心。在众多液冷技术中,目前占比最高的液冷技术依旧是冷板式液冷。但笔者认为,在冷板式液冷系统中由于液冷冷板的存在,冷却液和 IT 设备仍处于间接接触状态,其热阻依旧

高于浸没式液冷和喷淋式液冷这两种直接接触纯液冷技术,其在未来可能更多地作为补充技术存在,适用于对现有基础设施改造困难的场景。而对于追求极致性能和能效比的新型数据中心而言,浸没式和喷淋式液冷将更加适合。虽然浸没式和喷淋式这两种高效的液冷技术面临着冷却液、建筑结构、高性能材料等的研制和质量保证问题,但通过未来各行各业发挥创新,研发新一代的冷却液,服务器的架构模式、高性能建筑物以及高性能材料等,将支持和帮助数据中心液冷技术继续向前发展,相信在将来随着技术的持续迭代与成本的逐步优化,浸没式液冷和喷淋式液冷将克服发展瓶颈,有可能成为未来高热密度数据中心主流的冷却技术。

展望未来,数据中心液冷技术的发展道路无疑是既铺满了希望也布满了挑战。随着全球数字化转型的加速推进,数据中心液冷技术以其卓越的散热效率与环保特性将逐步推动数据中心进入一个前所未有的高效绿色时代。

参考文献

- [1] 王继业,周春雷,李洋,等. 数据中心关键技术和发展趋势研究综述[J]. 电力信息与通信技术,2022,20(8):1-21.
- [2] 中国信息通信研究院. 全球数字经济白皮书(2023)[R]. 2023,2-3.
- [3] EVAN LERNER. Celebrating 75 Years of ENIAC. [EB/OL]. (2021-02-12) [2024-5-27]. <https://blog.seas.upenn.edu/celebrating-75-years-of-eniac/>.
- [4] VIVIAN A. 数据中心的发展简史[EB/OL]. (2017-10-10)[2024-05-25]. <https://blog.csdn.net/Alone-Vivian/article/details/78193768?spm=1001.2014.3001.5502>.
- [5] 中国电信集团公司. 中国电信 IDC 产品规范[R]. 2005.
- [6] TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY ASSOCIATION. Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers[R]. 2005.
- [7] 谢丽娜,郭亮. 对液冷技术及其发展的探讨[J]. 信息通信技术与政策,2019,(2):22-25.
- [8] 中国通服数字基建产业研究院. 中国数据中心产业发展白皮书(2023年)[EB/OL]. (2023-04-27) [2024-05-25]. http://www.cbdio.com/BigData/2023-04/27/content_6172847.htm.
- [9] 刘奎. 数据中心绿色化发展趋势及思考[J]. 智能城市,2020,6(21):41-42.
- [10] NOROUZ-KHANGAH B, MOHAMMDSADEGHI-AZAD M B, HOSEYNI S M, et al. Performance assessment of cooling systems in data centers; methodology and application of a new thermal metric[J]. Case Studies in Thermal Engineering,2016,8:152-163.
- [11] 北京慧苑教育. 数据中心空调系统送风方式介绍[EB/OL]. (2022-08-06) [2024-05-25]. https://mp.weixin.qq.com/s/E4WyyEj1QUZEB3QyJg_SPQ.
- [12] 王景云,王建瑚,林其标,等. 建筑物理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1987:88-92.
- [13] 杨力芝,张忠斌,陆宏杰,等. 地板送风方式对数据中心热环境性能的影响分析[J]. 暖通空调,2018,48(12):25-31,53.
- [14] 许伟伟. 数据中心机房空调气流组织研究[D]. 北京:北方工业大学,2022.
- [15] 陈宇欣,梁珍. 地板送风数据中心气流组织设计与优化分析[J]. 流体机械,2022,50(9):91-99.
- [16] 李国辉,段之殷,胡然. 基于热环境评价指标的某高校机房气流组织优化研究[J]. 暖通空调,2023,53(7):144-150.
- [17] 魏赠,肖新文,曾春利. 数据中心风墙气流组织的CFD模拟研究[J]. 建筑节能(中英文),2022,50(3):124-129.
- [18] 张玉燕,孙海峰,郑竺凌,等. 上海地区水冷地板送风冷通道封闭数据中心机房气流组织优化研究[J]. 暖通空调,2022,52(S1):209-215.
- [19] 张宇阳. 基于数值模拟的数据机房气流组织优化研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2019.
- [20] 李国辉. 数据机房不同尺度气流组织优化研究[D]. 北京:北京建筑大学,2023.
- [21] 王文谦. 北京地区某数据中心机房气流组织优化研究[D]. 北京:北京建筑大学,2023.
- [22] 易伶俐. 不同空调送风方式在数据中心的应用[J]. 制冷与空调,2016,16(3):8-9,7.
- [23] 王志刚. 数据中心气流组织及影响因素研究[D]. 北京:北京建筑大学,2018.
- [24] 廖霄,吴劲松. 行级制冷系统在高热密度数据中心制冷中的应用探讨[J]. 南方能源建设,2015,2(S1):172-177.
- [25] 张雪娇,周军莉,邓勤犁,等. 数据中心三种送风方式的对比研究[J]. 建筑科学,2019,35(2):102-107,115.
- [26] JIN C, BAI X, AN Y, et al. Case study regarding the thermal environment and energy efficiency of raised-floor and row-based cooling[J]. Building and Environment, 2020,182:107-110.
- [27] 邵格格,曾兴旺,胡传振,等. 数据中心机房制冷技术浅析[J]. 电信快报,2019,(4):30-34.
- [28] 王舜翔. 行级空调下置式数据中心冷通道内的气流组织优化研究[D]. 广州:广州大学,2023.

- [29] 曾思航. 数据中心冷通道在下置式行级空调不同冗余条件下气流组织研究[D]. 广州:广州大学,2022.
- [30] 王利平. 数据机房用顶置空调数值模拟及性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
- [31] 徐坚强. 数据中心列间空调送风的气流组织优化和失效研究[D]. 上海:东华大学,2023.
- [32] 刘莹,梁珍. IDC 机房热管背板空调排列组织优化研究[J]. 暖通空调,2022,52(S1):64-69.
- [33] 周涛涛,陈月琴. 传统数据中心高密度设备散热优化解决方案[J]. 暖通空调,2022,52(1):112-116,147.
- [34] 刘莹. 采用列间/背板空调的高密度机房气流组织研究[D]. 上海:东华大学,2022.
- [35] 赖柏年,张剑麟,陈文,等. 数据中心水冷空调末端的 CFD 模拟及应用分析[J]. 制冷与空调(四川),2017,31(6):565-575.
- [36] 范平. 高温不宕机! 解密 IBM 水冷技术发展史[EB/OL]. (2013-01-05)[2024-05-25]. https://server.zol.com.cn/345/3456362_all.html.
- [37] 包云皓,陈建业,邵双全. 数据中心高效液冷技术研究现状[J]. 制冷与空调,2023,23(10):58-69.
- [38] SARKAR S, GUPTA R, ROY T, et al. Review of jet impingement cooling of electronic devices: Emerging role of surface engineering[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 206. DOI: 10.1007/s001930050175.
- [39] 肖新文. 数据中心液冷技术应用研究进展[J]. 暖通空调,2022,52(1):52-65.
- [40] 张海南,田亚玲,张阳,等. 中国数据中心节能技术发展现状与趋势[J]. 中国基础科学,2020,22(6):10-14.
- [41] KHALAJ A H, HALGAMUGE S K. A Review on efficient thermal management of air and liquid-cooled data centers: From chip to the cooling system[J]. *Applied Energy*, 2017, 205(Nov.1):1165-1188.
- [42] 齐文亮,赵亮,王婉人,等. 高热流密度电子设备液冷技术研究进展[J]. 科学技术与工程,2022,22(11):4261-4270.
- [43] KHEIRABADI A C, D GROULX. Cooling of server electronics: A design review of existing technology[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016:622-638.
- [44] AMALFI R L, SALAMON T, CATALDO F, et al. Ultra-Compact microscale heat exchanger for advanced thermal management in data centers[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2021021110.
- [45] 程小静,刘彬,鄢康俊,等. 燕郊某数据中心风墙空调系统设计[J]. 暖通空调,2022,52(8):65-68.
- [46] 肖新文. 数据中心风墙技术应用研究进展[J]. 制冷与空调,2023,23(11):1-9.
- [47] 陈洁琼. 高效能云计算中心制冷技术节能研究[J]. 制冷与空调,2019,19(6):7-9,37.
- [48] 肖新文. 直接接触冷板式液冷冷却数据中心的热回收探讨[J]. 建筑节能,2020,48(2):69-73.
- [49] 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.
- [50] NADJAH C, LOUAHLIA H, LEMASSON S. A review of thermal management and innovative cooling strategies for data center[J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2018, 19:14-28.
- [51] ZIMMERMANN S, MEIJER I, TIWARI M K, et al. Aquasar: A hot water cooled data center with direct energy reuse[J]. *Energy*, 2012, 43(1):237-245.
- [52] 侯富民,李超恩,吴佳育,等. 服务器浸没式液冷技术研究进展[J]. 暖通空调,2023,53(S1):40-45.
- [53] PAMBUDI N A, SARIFUDIN A, FIRDAUS R A, et al. The immersion cooling technology: Current and future development in energy saving[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(12):9509-9527.
- [54] 朱佳佳,赵妍. 数据中心浸没式液冷技术研究[J]. 通信管理与技术,2022,(1):12-15.
- [55] CHI Y Q, SUMMERS J, HOPTON P, et al. Case study of a data centre using enclosed, immersed, direct liquid-cooled servers[C]//2014 Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM). IEEE, 2014:164-173.
- [56] 曹原铭,陈婉新,郑云帆,等. 液冷服务器在数据中心的应用研究[J]. 电信工程技术与标准化,2024,37(4):5-12.
- [57] 柯媛华,成军,杨瑛洁,等. 数据中心液冷技术研究[J]. 邮电设计技术,2023,(12):35-41.
- [58] KANDASAMY R, HO J Y, LIU P, et al. Two-phase spray cooling for high ambient temperature data centers: Evaluation of system performance[J]. *Applied Energy*, 2022, 305. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.117816.
- [59] 严瀚. 气流组织对数据中心空调系统能耗影响的研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.
- [60] 王艳松,张琦,孙聪,等. 数据中心液冷技术发展分析[J]. 电力信息与通信技术,2021,19(12):69-74.
- [61] 潘洋洋,向军,肖玮. 基于喷淋液冷系统的数据中心节能降耗研究[J]. 通信电源技术,2019,36(S1):192-194.