

采用冷板式液冷的智算中心制冷系统架构分析

景淼¹, 何健¹, 杨瑛洁²

(1. 联通数字科技有限公司; 2. 中讯邮电咨询设计院有限公司)

【摘要】文章分析采用冷板式液冷技术的智算中心制冷系统架构, 重点对水液冷源分离架构与水液冷源同源架构两种制冷方式, 从应用场景、节能性、经济性等维度开展对比分析, 同步对比不同冷却水系统架构, 为后续采用冷板式液冷的数据中心项目提供合理参考。

【关键词】冷板式液冷; 智算中心; 制冷系统; 节能效益; 经济效益

中图分类号: TU83

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2026.04.040

Analysis of Refrigeration System Architecture of Intelligent Computing Center with Cold Plate Liquid Cooling

JING Miao¹, HE Jian¹, YANG Ying-jie²

(1.China Unicom Digital Technology Co., Ltd.; 2.China Information Technology Designing&Consulting Institute Co., Ltd.)

【Abstract】This paper analyzes the refrigeration system architecture of intelligent computing centers using cold-plate liquid cooling. A comparative study is carried out on two cooling schemes, namely the separate water-liquid cooling source architecture and the common water-liquid cooling source architecture, from the perspectives of application scenarios, energy efficiency and economic performance. In addition, different cooling water system architectures are compared. The research can provide a reference for data center projects adopting cold-plate liquid cooling in the future.

【Keywords】cold plate liquid cooling; intelligent computing center; refrigeration system; energy saving benefits; economic performance

1 引言

随着云计算、5G、大数据、人工智能等信息技术的迅猛发展,算力已成为数字经济时代的核心生产力,同时推动芯片功耗快速攀升。根据IDC评估报告,2021—2026年智能算力年复合增长率预计达52.3%^[1],接近同期通用算力增长率的3倍,大模型应用进一步推动算力需求呈指数级增长。当前单个CPU芯片功率已达350W,单个GPU芯片功率更是高达700W以上。传统风冷技术已难以满足此类高功耗芯片的散热需求,而液冷技术采用高比热容液体取代空气作为冷媒,其冷却能力是空气的1000倍~3000倍,热传导能力是空气的25倍,能够有效解决高功耗芯片的散热问题^[2]。

本文对采用冷板式液冷的智算中心制冷系统架构进行详细阐述,重点对水液冷源分离架构与水液冷源同源架构两种制冷方式,从应用场景、节能性、经济性等维度开展对比分析,同时说明冷却水系统架构,为后续采用冷板式液冷的数据中心项目提供

参考。

2 冷板式液冷技术

液冷技术按冷却原理,主要分为冷板式、浸没式及喷淋式三种^[3]。冷板式液冷是将液冷散热片紧密贴合于服务器CPU侧,借助板式换热器内的低温流体带走服务器芯片散热量^[4-5]。冷板式液冷服务器中,芯片散热量由冷板式液冷系统承担,其余15%~30%的电子器件热量需通过风冷或冷冻水空调辅助散热,因此冷板式液冷机房的制冷系统以液冷为主、风冷或冷冻水为辅。相较于浸没式、喷淋式液冷技术,冷板式液冷技术中液体不与设备直接接触,可靠性更高,且市场成熟度高、与风冷系统兼容性好,更适配现有数据中心布局架构,目前应用最为广泛。

3 制冷系统架构对比分析

3.1 水液冷源分离架构

大部分冷板式液冷的智算中心均采用两套独立

的冷源系统,分别为水冷集中式空调系统与液冷系统,即水液冷源分离架构(见图1)。

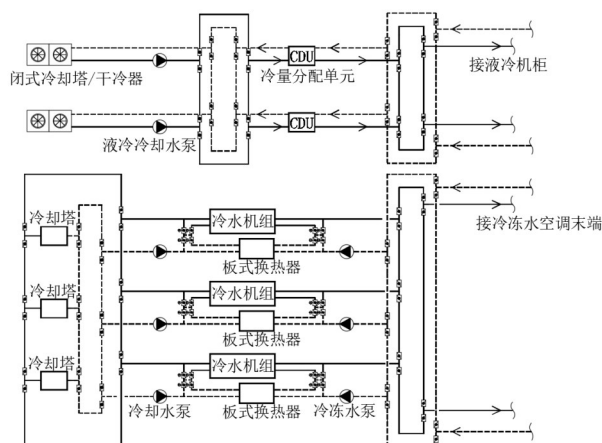


图1 水液冷源分离架构示意图

液冷系统冷源可采用干冷器、闭式冷却塔、开式冷却塔+板式换热器。干冷器选型时需参照项目所在地的干球温度,闭式冷却塔、开式冷却塔选型时需参照项目所在地的湿球温度。干冷器占地面积大,无需补水,适用于室外安装空间充足、水资源紧缺的场景;但夏季炎热地区需配置水喷淋冷却系统使用。对于干球温度过高的地区,不适宜采用干冷器。闭式冷却塔占地面积较大,补水量较大,适用于液冷水泵房空间紧张、水资源充足的场景。开式冷却塔+板式换热器占地面积约为闭式冷却塔的60%~70%,补水量最大,适用于室外空气品质较好、液冷水泵房

空间较大、水资源充足的场景。

3.2 水液冷源同源架构

水液冷源同源架构是指水冷集中式空调系统与液冷系统共用冷却塔系统,冷却塔采用开式冷却塔,如图2所示。冷却塔与液冷冷量分配单元之间采用板式换热器隔离,可以提高进入液冷冷量分配单元的一次侧供回水温度,降低PUE;又可以避免开式冷却塔的冷却水直接进入洁净度要求较高的液冷冷量分配单元内。

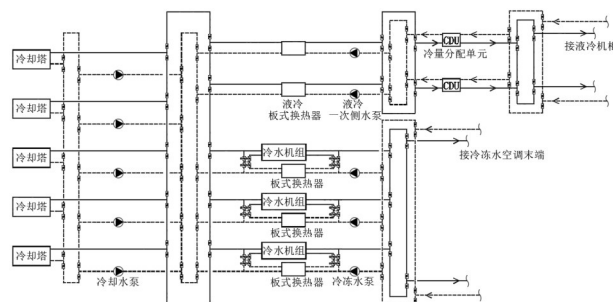


图2 水液冷源同源架构示意图

3.3 对比分析

水液冷源分离架构和水液冷源同源架构在工程应用上具有的特点详见表1。

4 冷却水系统架构

4.1 单管制

单管制冷却水系统中冷却塔、冷却水泵、冷水机

表1 智算中心制冷系统架构对比分析

项目	水液冷源分离架构	水液冷源同源架构
冷源设备	采用两套独立冷源设备,设备较多。	共用一套冷却塔系统。节约设备台数,节约屋面冷却塔占地面积。
不间断冷源	水冷集中空调系统采用蓄冷罐作为不间断冷源;液冷系统采用UPS作为不间断冷源。	水冷集中空调系统根据该系统承担的IT功耗,采用蓄冷罐作为不间断冷源;液冷系统对共用冷却塔中负责液冷部分的台数+1及液冷侧其他设备设置UPS作为不间断冷源。
空间布局	冷却塔占地空间大。若制冷机房位置紧张,可将液冷系统水泵、定压补水设备等设置在屋面或一层室外。	节约冷却塔安装空间。若制冷机房位置紧张,可将液冷系统水泵、定压补水设备、液冷板换等设置在屋面或一层室外。
管路敷设	两套系统,管路独立。	共用冷却水系统,冷却系统管路复杂。
液冷 CDU 一次侧温度	按照出水温度较低工况选型,后期调整液冷冷却塔或干冷器的供回水温度,调节温度便捷。	板换按照对数平均温差小的工况选型,后期调整到对数平均温差大的工况,可通过调整水流量调整板换二次侧的供回水温度,调节温度便捷。
灵活性	灵活性较差。	水液比例弹性可调,灵活性高。
控制系统	简单。	复杂,需要根据负载变化情况分配水冷和液冷流量。

组或液冷冷却塔、液冷冷却水泵、冷量分配单元一一对应,组成一个冷却单元,如图3所示。某一个冷却单元发生故障,不影响其余冷却单元。整个系统中各个冷却单元不能切换运行,运行灵活性较差^[6]。

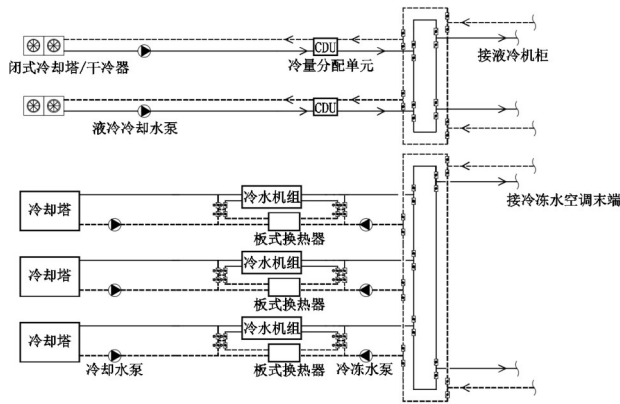


图3 采用单管制冷却水系统架构

4.2 母管制

数据中心冷却水母管制系统分为单母管制和双母管制两种。单母管制冷却水系统中多台冷却塔与多台冷却水泵之间共用一套循环冷却水供回水管道^[7],如图1中水冷集中空调系统所示。双母管制冷却水系统中多台冷却塔与多台冷却水泵之间、多台冷却水泵与多台冷水机组之间均共用一套循环冷却水供回水管道,如图2所示。

4.3 单管制+循环母管

单管制+循环母管系统兼顾单管制和母管制系统的优点,其控制较母管制更为简单,可靠性较单管制更高^[8]。单元制+循环母管系统中相邻单元之间可以通过循环母管上的阀门手动或自动切换运行,如图4所示。

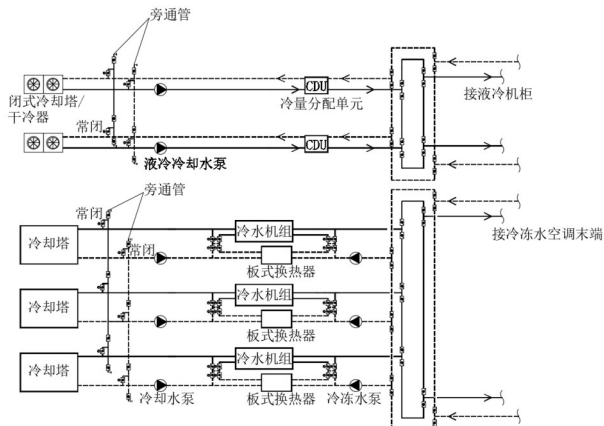


图4 采用单管制+循环母管制冷却水系统架构

数据中心冷却水系统应根据项目特点、制冷机房物理条件等综合选择采用何种方式的冷却水系统。对于水液冷源融合架构,需考虑水液比例弹性可调,将冷却塔作为冷量资源池,因此该架构冷却水系统采用母管制。

5 节能性与经济性分析

5.1 项目介绍

以呼和浩特地区某数据中心为例,数据中心机房楼总建筑面积约为1.52万m²,地上四层,属于多层丙类厂房。四层局部机房采用冷板式液冷系统,其余均采用水冷集中空调系统,其中水冷集中式空调系统承担的IT功耗为12591.94kW,冷板式液冷系统承担的IT功耗为3010.56kW。

水冷集中式空调系统采用二级泵变流量系统,冷冻水供回水温度为18/24℃;采用开式冷却塔,冷却水供回水温度为32/38℃;空调末端送回风温度为24/36℃,末端采用房间级空调及列间空调,热通道封闭。液冷系统中冷量分配单元一次侧供回水温度为35/41℃,二次侧供回水温度为50/60℃。

5.2 节能性分析

CLF表示制冷负载因子,是衡量空调系统能耗的重要指标。

$$CLF = \text{全年制冷系统能耗} / \text{全年IT设备总能耗}$$

该项目采用水液冷源分离架构时水冷集中空调系统的全年总功耗为16435.50MWh,冷板式液冷系统的全年总功耗为968.93MWh。采用水液冷源同源架构时水冷集中空调系统的全年总功耗为16435.50MWh,冷板式液冷系统的全年总功耗为1124.52MWh。水冷集中式空调系统承担的IT设备全年总功耗为110305.39MWh,冷板式液冷系统承担的IT设备全年总功耗为26372.51MWh。该项目中采用水液冷源分离与同源架构时的CLF如图5所示。水液冷源分离与同源架构的加权CLF分别为0.1273和0.1285,两者差值为0.0012。

若冷板式液冷系统承担的IT功耗占比30%、40%、50%时,两种制冷系统架构的CLF对比如图6所示。液冷占比越高,采用水液冷源同源架构的节能性较水液冷源分离架构相比也会越差。

5.3 经济性分析

采用水液冷源同源架构后,节约液冷冷却塔,但

增加共用开式冷却塔的总散热量,并增加液冷用板换。水液冷源分离架构冷源部分初投资为3233万元,水液冷源同源架构冷源部分初投资为3143万元,水液冷源同源架构初投资约节约90万元,由于冷源部分初投资较高,节约比例为2.8%。

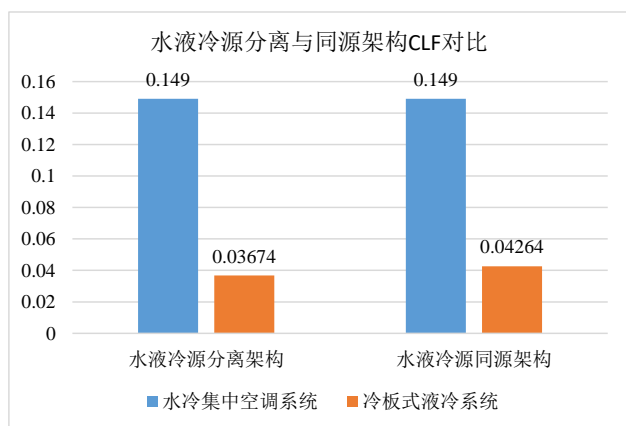


图5 水液冷源分离与同源架构CLF对比

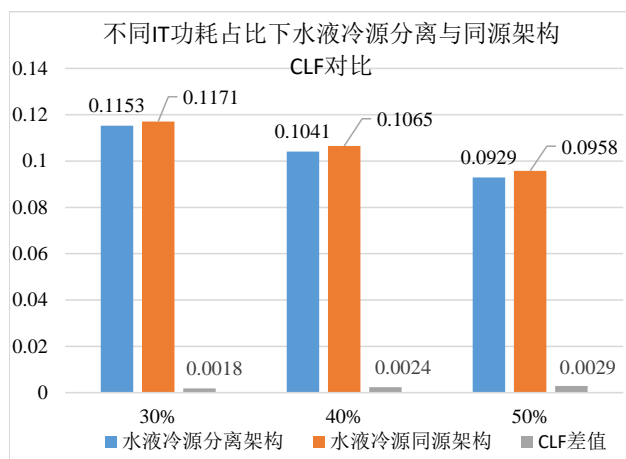


图6 不同IT功耗占比下水液冷源分离与同源架构CLF对比

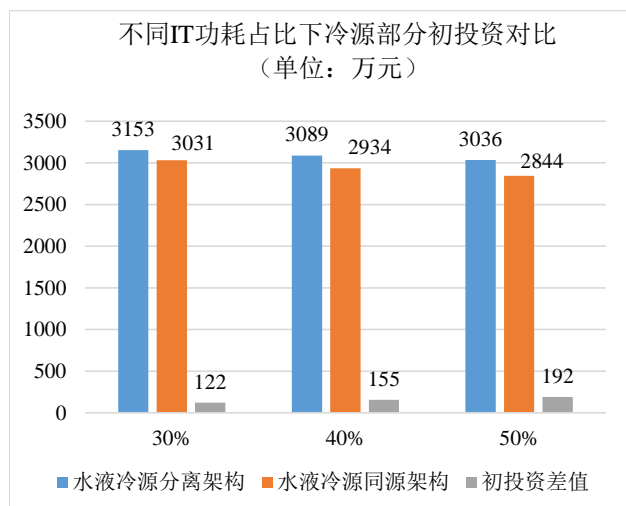


图7 不同IT功耗占比下冷源部分初投资对比

仍以该数据中心为例,分析冷板式液冷系统承担总IT功耗的30%、40%、50%时,两种制冷系统架构冷源部分的初投资,如图7所示。随着液冷比例的增加,采用水液冷源同源架构的经济优势也逐渐突出。但液冷占比越高,采用水液冷源同源架构的节能性较水液冷源分离架构相比也会越差。综上,在满足节能要求的前提下选择经济性最佳的方案。

6 结语

液冷技术可以满足高功率密度机柜的散热需求,具有系统能耗少、噪声小、选址因素影响小等优点^[9]。通过对采用冷板式液冷的智算中心制冷系统架构分析与研究,得出如下结论。

①水液冷源分离架构和水液冷源同源架构在实际应用中,需针对项目的特点、基础设施的实际情况以及节能要求,综合判断选择合适的制冷系统架构。

②水液冷源同源架构的节能性略低于水液冷源分离架构,但其经济性优于水液冷源分离架构。

③冷却水系统分为单管制、母管制、单管制和循环管并用3种,综合考虑可靠性、灵活性等,建议优先选择母管制或单管制+循环管。

参考文献

- [1] 张世华, 文湘江, 申佳, 等. 新型智算中心组网方案研究[J]. 邮电设计技术, 2024 (6): 22-25.
- [2] 袁朋, 吴培, 赵鹏飞, 等. 5G基站中的冷板式液冷技术分析[J]. 集成电路应用, 2023 (11): 162-163.
- [3] 周婷, 王玮, 常传源, 等. 液冷技术在数据中心的应用[J]. 河南科技, 2022 (12): 36-39.
- [4] 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.
- [5] 肖新文, 郑伟坚, 曾春利. 某液冷服务器性能测试台的液冷系统设计[J]. 制冷与空调, 2021, 35 (5): 706-712.
- [6] 郭春燕. 数据中心循环冷却水系统布置方式的设计比较[J]. 净水技术, 2018, 37 (S1): 201-204.
- [7] 谭立国. 北京地标建筑地下数据中心循环冷却水系统的节能设计[J]. 工程建设与设计, 2019 (7): 45-50.