

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-565-07

基于湖水直供+集中式 冷冻水系统的智算中心冷却方案分析

李 潼¹ 黄 翔¹ 褚俊杰¹ 白本通² 刘和军² 胡 建¹ 田金星¹

(1. 西安工程大学 西安 710048; 2. 深圳易信科技股份有限公司 深圳 518000)

【摘 要】 随着人工智能对当前产业体系进行重构, 新型基础设施也开始进入了智算时代, 智算中心相对比普算数据中心单机柜功率更高, 对冷却方案提出了更高的要求。介绍了基于湖水直供+集中式冷冻水系统的智算中心冷却方案。该方案应用露点型间接蒸发冷却塔, 对机房空气预冷后 35℃ 的冷却水冷却至 29℃, 大幅度提高全年自然冷源利用时间; 采用湖水直供技术, 提取平均水温在 11~12℃ 的东江湖湖水作为自然冷源; 末端采取双盘管阶梯冷却技术, 进一步增大自然冷源利用时间; 负荷侧采用封闭冷通道+活动地板下送风的方式, 避免机房内冷热空气掺混造成冷量损失, 提高机房空调系统的利用率。在实际工程设计中, 该系统可维持 3000 多台单机柜平均为 18kW 的智算中心冷却需求, 满负载后可实现年电能利用效率 (PUE) 1.08 的节能成效, 结果表明该冷却方案在推动数据中心自然冷却技术的同时, 还为智算中心冷却做出典型解决方案。

【关键词】 智算中心; 湖水直供; 间接蒸发冷却; 露点型间接蒸发冷却塔

中图分类号 TU831 文献标志码 A

Based on the Direct Lake Water Supply + Centralized Frozen Water System Analysis of the Cooling Scheme of the Intelligent Computing Center

Li Tong¹ Huang Xiang¹ Chu Junjie¹ Bai Bentong² Liu Hejun² Hu Jian¹ Tian Jinxing¹

(1. Xi'an Polytechnic, Xi'an, 710048; 2. Shenzhen Esin Technology Co., Ltd, Shenzhen, 518000)

【Abstract】 With the reconstruction of the current industrial system by artificial intelligence, the new infrastructure has also begun to enter the era of intelligent computing. Now, the intelligent computing center has a higher single cabinet power than the general computing data center, which puts forward higher requirements for the cooling scheme. This paper introduces the cooling scheme of intelligent computing center based on direct water supply + centralized frozen water system. The scheme applies the dew point indirect evaporative cooling tower to extract the water of 11-12℃. Double coil step cooling technology is adopted at the end to further increase the utilization time; to avoid the mixing of cold and hot air in the machine room and improve the utilization rate of the air conditioning system in the machine room. In actual engineering design, the system can maintain more than 3000 single cabinet average 18kW computing center cooling requirements, full load can realize the annual energy utilization efficiency (PUE) 1.08 energy saving results show that the cooling scheme in the data center natural cooling technology at the same time, also make typical solutions for intelligent computing center cooling.

【Keywords】 Intelligent calculation center; The lake direct supply; Indirect evaporation cooling; Open-point-type indirect evaporative cooling tower;

作者简介: 李 潼 (2001.07-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: litong070701@163.com

通讯作者: 黄 翔 (1962.07-), 男, 教授, E-mail: huangx@xpu.edu.cn

收稿日期: 2024-10-11

0 引言

随着人工智能对产业体系进行重构,新型基础设施面临着巨大挑战。在人工智能计算场景下,智能算力具有高效率、优能耗的特点,智算中心成为了支撑人工智能发展的“基石”^[1]。预计在 2030 年前,我国智能算力规模将创造新的突破,达到 1271.4EFLOPS^[2]。

数据中心的冷却方案多样,相关方案中自然冷却方案的节能效果尤为突出^[3,4],数据中心自然冷却方案主要分为水侧自然冷却^[5,6]与风侧自然冷却^[7]。与风侧自然冷却相比,水侧自然冷却运行效率高、不受室外空气品质影响、更利于实现数据中心的余热回收,因而被得到广泛应用。将自然低温水引入数据中心进行冷却可将冷却系统能耗降低 94%^[8],采用天然湖泊中湖水作为自然冷源,可使数据中心全年平均能耗远低于传统数据中心^[9]。

因此为了充分利用自然冷源,减少智算中心室外空气对室内空气的污染,提高其冷却系统运行效率,智算中心采用间接蒸发冷却技术或用地表水直供冷却技术可实现机房冷却需求^[10,11]。本文通过介绍智算中心湖水直供+集中式冷冻水系统冷却技术综合系统并结合实际案例,分析电能利用效率(PUE),总结该系统的应用特点,验证该系统的可行性。

1 概况

东江湖位于湖南省郴州市资兴市境内,水域面积达 160km²,保持国家一类水质^[12],湖水水位稳定且全年水温处于 11.5~16℃ 范围内。智算中心预计建设 8000 架机柜,采用湖水直供+间接蒸发冷却技术荷储一体化,满负载后可实现年电能利用效率(PUE) 1.08 的节能成效。

2 湖水直供+集中式冷冻水系统

2.1 系统组成

湖水直供+集中式冷冻水系统主要由露点型间接蒸发冷却塔、水泵、板式换热器、磁悬浮冷水机组、双冷源列间空调组成。其中间接蒸发冷却系统作为主用冷源,同时设置冷水机组冷源系统作为其中一套备用冷源,总计 3 套冷源,可靠性极高。湖水冷源是引入平均水温在 11~12℃ 的东江湖深层湖水为冷源,同时采用 1 台热泵机组,回收部分余

热在冬季为园区其他楼层提供生活热水和空调制冷用水等。图 1 为湖水直供+集中式冷冻水系统图。

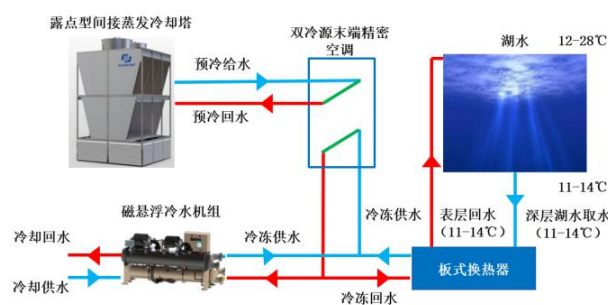


图 1 湖水直供+集中式冷冻水系统

Fig.1 Lake water direct supply + centralized frozen water system

2.2 间接蒸发冷却技术

间接蒸发冷却技术可制取出低至空气湿球温度以下的冷水^[13,14]。间接蒸发冷却制取冷水以空气的干湿球温差为驱动势,利用高温干燥的空气和水之间的热湿交换作用,使水温降低的制冷设备。如图 2 所示,处于 O 状态点的室外空气被吸入机组后,经过过滤装置,到达间接蒸发冷却段,在间接蒸发冷却段内空气与盘管内回水进行显热交换,空气到达 C 状态点、回水到达 H 状态点;后在直接蒸发冷却段中,空气与水进行热湿交换,空气被冷却至 E 状态点同时水被冷却至室外空气湿球温度以下即 G 状态点。

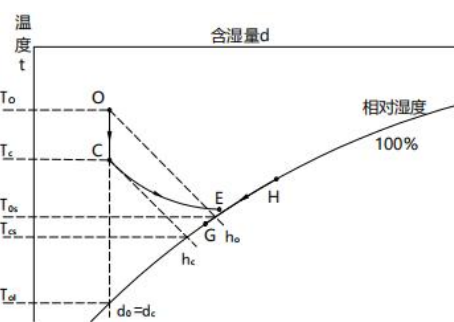


图 2 间接蒸发冷却技术制取冷水理论过程 h-t 图

Fig.2 Enthalpy diagram of cold water theoretical process prepared by indirect evaporative cooling technique

该露点型间接蒸发冷却塔在系统中设计供回水温度为 29℃/35℃,设计风量 200000m³/h,散热量 1400kW。该冷却塔设置两路冷水,其中一路为预冷水,另一路为冷冻水,在运行过程中,进入表冷器的室外空气被从预冷水箱中的冷水降温后,再

在填料中与预冷水箱中的冷水进行热湿交换, 使空气与水的温度同时被降低; 预冷水与冷冻回水分别在上层填料首次冷却后, 再进入到下层填料进行充分热湿交换, 冷冻回水首先在上层填料中与被冷却水降温后的空气冷却, 再在下层填料中与经过表冷器与预冷填料的空气再次换热, 实现二次冷却, 最终冷冻水汇集在冷冻水水箱中^[15]。图 3 为露点型间接蒸发冷却塔结构图。

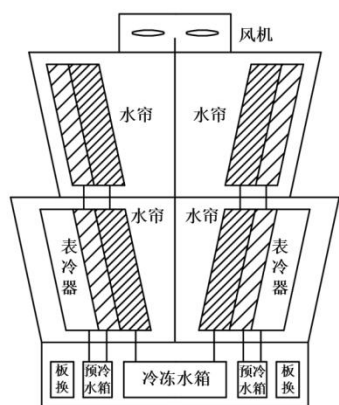


图 3 露点型间接蒸发冷却塔结构图

Fig.3 Structure diagram of exposed point type indirect evaporative cooling tower

2.3 湖水直供冷却技术

东江湖位于湖南省郴州市资兴市, 其水面下 25~75m 处水温常年低于 5℃, 冷水资源丰富, 东江湖下游近 20 年历史最低流量为 40m³/s, 最低水位为 145.25m^[16], 径流量充沛, 水位稳定, 可满足智算中心用自然冷需求。

故该智算中心以东江湖水做为自然冷源之一, 将东江湖中湖水引入, 通过板式换热器使湖水中的冷量直接应用于智算中心, 并配备冷水机组作为备用冷源的冷却方式, 同时采用露点型间接蒸发冷却塔为双冷源空调提供预冷水。如图 4 所示, 上游为东江湖大坝, 坝底距离下游数据中心冷冻水的取水点约为 11km, 大坝坝底的水温约为 6℃, 取水点的水温约为 12℃。冷冻水与冷却水系统的水均利用湖水。

2.4 系统特点

(1) 应用露点型间接蒸发冷却塔作为冷源之一。该冷却塔采用双层结构, 并将预冷水与冷冻水分离为两个独立的水系统, 使其可制取出比同条件传统冷却塔出水温度低 3℃~5℃的冷水, 大幅度提高全年自然冷源利用时间, 实现节能降耗。



图 4 露点型间接蒸发冷却塔

Fig.4 An open-point type indirect evaporative cooling tower

(2) 应用湖水直供冷却技术, 直接供水进一步降低系统能耗。系统将平均水温在 11~12℃的东江水为冷源, 同时采用 1 台热泵机组, 回收部分余热在冬季为园区其他楼层提供生活热水和空调制热用水等。在室外温度较低, 湖水温度可满足智算中心用水温度需求时, 可直接利用湖水为冷源, 同时为智算中心冷却的同时为院区供给生活热水。

(3) 填补末端高效制冷的空白。末端精密空调采用双盘管阶梯冷却技术, 实现冷源的梯级利用, 可大缩减了备用冷水机组系统的配置及备用江水冷源的输送能耗。末端空调采用 N+X (X=1~3) 冗余形式。图 5 为末端精密空调供水系统图。

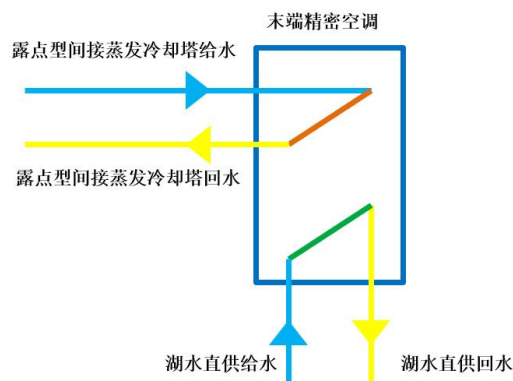


图 5 末端精密空调供水系统图

Fig.5 Terminal precision air conditioning water supply system diagram

(4) 采用良好的气流组织方式。负荷侧采用封闭冷通道+活动地板下送风的方式, 同时部分主机房采用背板空调。系统封闭冷通道的气流组织,

避免机房内冷热空气掺混造成冷量损失,空调系统的利用率得到提高^[17-19],同时延长节能模式的运行时长、避免局部过热。

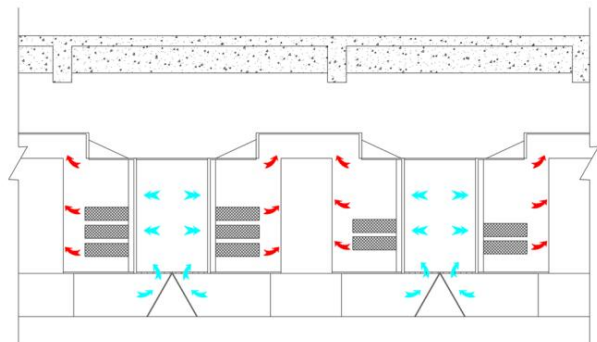


图 6 智算机房气流组织形式示意图

Fig.6 Schematic diagram of the airflow organization form in the intelligent computing computer room

2.5 系统运行模式

为了能够充分利用自然冷源,系统采用湖水自然冷却模式、联合供冷模式与机械补冷模式三种运行模式,针对不同的气候条件相互切换运行,系统运行模式切换方式如表 1 所示,通过 TRNSYS 平台建立动态仿真模型,如图 7 所示,选取数据中心冷通道温度为 25℃,冷冻水供水温度 18℃作为输入条件进行模拟,得出系统三种运行模式下各节点温度以及系统运行能耗。

表 1 系统运行模式

Table 1 System operation mode

运行模式	运行策略
湖水自然冷却模式	阀门 V2 开启, 阀门 V1、V3 关闭
联合供冷模式	阀门 V1、V2 开启, 阀门 V3 关闭
机械补冷模式	阀门 V1、V2、V3 开启

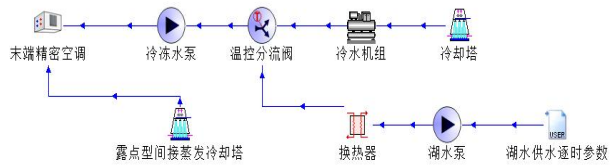


图 7 冷却系统仿真模型

Fig.7 Simulation model of the cooling system

以下为 3 种运行模式详细介绍:

湖水自然冷却模式: 当湖水温度低于 14℃, 机房负荷较小时, 系统运行湖水自然冷却模式, 磁

悬浮冷水机组不运行, 该模式下直供的湖水承担机房全部负荷。系统直接将东江湖深层 14℃的湖水引入至板式换热器与空调系统冷冻水换热, 换热后 24℃的冷冻回水排至东江湖表层; 末端精密空调内与机房热空气换热后 25℃的冷冻回水经过板式换热器与湖水换热被冷却至 15℃, 后通过阀门 V2 输送回末端精密空调, 如图 8 所示。

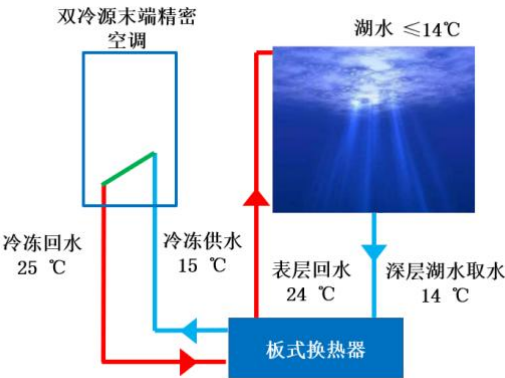


图 8 冷却系统模式: 湖水自然冷却模式

Fig.8 Cooling system mode: natural cooling mode of lake water

联合供冷模式: 当湖水温度低于 15℃, 机房负荷较大时, 系统运行联合供冷模式, 该模式下湖水自然冷承担 57%的负荷, 间接蒸发冷却塔承担 43%的负荷。湖水通过板式换热器作为双冷源末端精密空调的冷源之一, 同时露点型间接蒸发冷却塔制取出的 29℃冷水经过阀门 V1 也送至双冷源末端精密空调对机房热空气预冷后, 35℃的冷却回水回到间接蒸发冷却塔, 如图 9 所示。

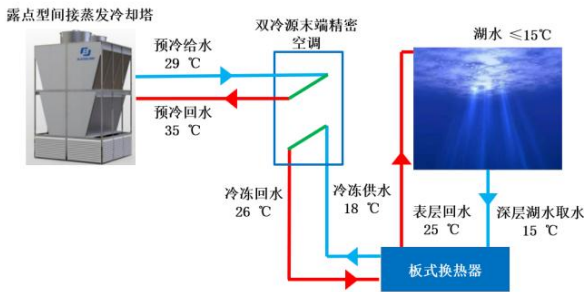


图 9 冷却系统模式: 联合供冷模式

Fig.9 Cooling system mode: combined cooling mode

机械补冷模式: 当湖水温度大于 15℃时, 系统运行机械补冷模式, 间接蒸发冷却塔的供冷路径不变, 从空调系统的冷冻水一部分由直接引入的湖

水换热提供, 另一部分由悬浮冷水机组提供。该模式下湖水与磁悬浮冷水机组一同承担承担 57% 的负荷, 间接蒸发冷却塔承担剩余 43% 的负荷。该模式通过调节悬浮冷水机组开机数量以及运行频率以控制冷供水供水干管温度为 18℃, 悬浮冷水机组的冷却水直接引入湖水, 其供回水温度为 29℃/34℃, 如图 10 所示。

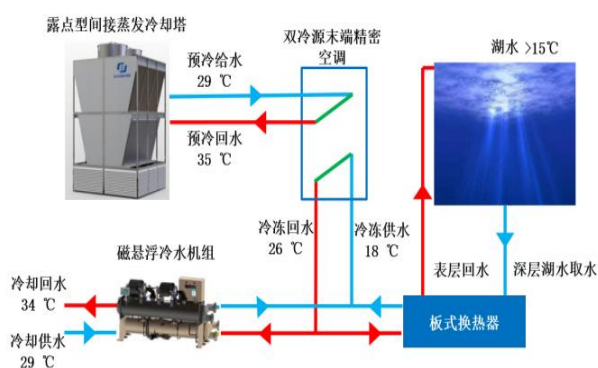


图 10 冷却系统模式：机械补充冷模式

Fig.10 Cooling system mode: mechanical supplementary cooling mode

3 工程实例

3.1 项目概况

该智算中心占地面积 43043.5m², 总建筑面积 86150m², 建筑面积 3.76 万 m², 数据中心机房夏季空调系统冷负荷为 108680kW, 共设计 3480 个机柜, 其中第 2~6 层每层机柜数量为 696 个, 单机柜平均功率为 18kW。IT 机房区域空调形式采用双冷源列间空调。机房机柜采用冷热通道均封闭的形式。每个封闭模块内的列间空调采用 N+2 备用。配套建设变配电站、储能站、给排水、道路、停车场、绿化等附属工程。

3.2 项目机电介绍

该智算中心供电系统设计总用电容量 2WkVA, 分别从两个相隔较远的不同变电站引入的四路 10kV 线路接入, 配备 9 台 2000kW 柴油发电机, 提供 24 小时电力保障。不间断电源系统采用双路 UPS 设置。

冷源采用湖水直供和集中式冷冻水系统并用的方案, 其中湖水作为主导冷源, 电制冷系统作为备用, 电制冷主机制冷量为 1200 冷吨, 其中一期备用 10 台制冷主机, 冷冻水系统一次侧供回水温

度为 14/24℃, 二次侧供回水温度为 15/25℃。系统配备 20 台间接蒸发冷却塔置于建筑顶层, 冷却塔自带冷冻水泵和冷却水泵, 进出水温度为 35℃/29℃。采用卧式蓄冷罐, 埋地安装, 满足 15min 的供冷需求, 保证智算中心不间断供冷; 输配系统管路采用双供双回, 保证供冷的可靠性; 负荷侧采用主机房精密空调、封闭冷通道和活动地板下送风的方式, 同时部分主机房采用背板空调; 电池室以及配电间采用热管空调。冷却塔用水的水源也利用湖水。另外, 项目采用弹性冷却技术设计, 最大可支持单机柜 48kW 的功率密度。

3.3 项目取水介绍

该智算中心采用东江湖的湖水作为空调系统的主用冷源, 同时在大楼一层设置备份电制冷主机。智算中心冷冻水的取水距离约为 11km, 大坝坝底的水温约为 6℃, 取水点的水温约为 12℃。冷冻水与冷却水系统的水均利用湖水, 其中冷却塔的水箱中的平时是灌满的, 水箱灌满一般需要 5~6h。

冷冻水系统一次侧 (即取水点部分) 设置两根 DN1000 的取水管, 同时设置两个 20.6m×2.5m×5.54m 的取水井。由于取水点的水位高于制冷机房的换热板换的高度, 因此一次侧仅靠重力驱动水流的流动换热。取水点位置设置有爬梯, 由于取水点处藻类较多, 需人工通过爬梯进入水中不定期清理取水点的藻类。同时在取水点的管道入口处仅设置了过滤网, 并没有其他水处理及过滤装置, 系统排水直接进入湖中。图 11 为取水点与排水口位置。



图 11 取水点与排水口位置

Fig.11 Location of water intake point and drain outlet

湖水由取水系统进入制冷机房与设置的板式换热器进行换热, 其供回水温度为 14/24℃, 其中制冷机房内设置了两套板换。图 12 为冷冻水系统一次侧与二次侧换热板换。



图 12 冷冻水系统一次侧与二次侧换热板换

Fig.12 Primary and secondary heat exchange plates of the chilled water system

3.4 系统能耗

电能利用效率 (PUE) 计算按照公式 (1) 进行计算。

$$PUE = P_{total} / P_{IT} \quad (1)$$

式中: PUE 为电能利用效率; P_{total} 为数据中心总耗电, kWh; P_{IT} 为数据中心 IT 设备耗电, kWh。

选取数据中心冷通道温度为 25°C , 冷冻水供水温度 18°C 作为输入条件进行系统能耗模拟, 并计算不同模式下系统各设备能耗, 如图 13 所示。

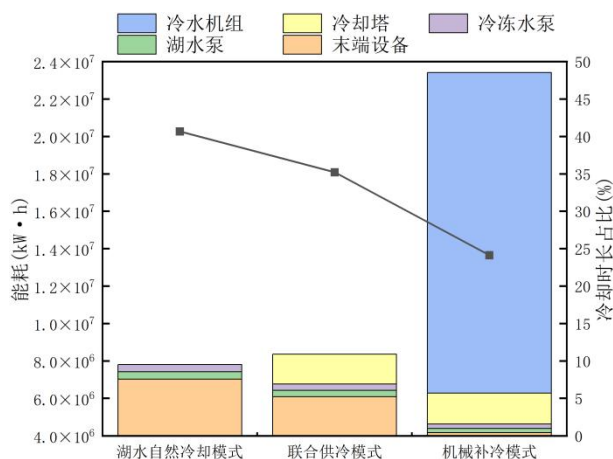


图 13 不同模式下系统各设备能耗

Fig.13 Energy consumption of each equipment of the system in different modes

该智算数据中心冷却系统自然冷却时间占全年总运行时间的 76%, 机械补冷模式运行时间仅占全年总运行时长的 24%, 但其运行能耗占总运行能耗的 59%。冷却系统总能耗为 $3.96 \times 10^7 \text{ kWh}$, 当该智算数据中心满载时, 全年电能利用效率 (PUE) 可低至 1.08。

4 结束语

综合而言, 通过实际项目充分证明了智算中心基于湖水直供+集中式冷冻水系统的有以下特点:

(1) 该系统应用露点型间接蒸发冷却塔将机房空气预冷后 35°C 的冷却水冷却至 29°C , 其可制取出比同条件传统冷却塔出水温度低 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 的冷水, 可实现自然冷源全年利用, 提高二次冷却冷源温度, 即延长湖水直供应用时长, 降低机械补冷模式下的冷量需求;

(2) 采用湖水直供冷却技术, 直接供冷进一步降低系统能耗。将平均水温在 $11\sim 12^{\circ}\text{C}$ 的东江湖深层湖水抽取用于智算数据中心冷却, 同时采用 1 台热泵机组, 回收部分余热在冬季为园区其他楼层提供生活热水和空调制热用水, 节能高效;

(3) 末端精密空调采用双盘管阶梯冷却技术, 在深层湖水温度高于 14°C 后可一直运行间接蒸发冷却塔对机房回风进行预冷, 在采用湖水或运行机械磁悬浮制冷机组制取 18°C 的冷冻水进行二次冷却, 极大缩减了备用冷水机组系统的配置及备用江水冷源的输送能耗;

(4) 系统还可根据气候条件进行运行模式的切换, 分别可运行湖水自然冷却模式、联合供冷模式与机械补冷模式。其中湖水自然冷却模式下湖水承担机房全部负荷; 联合供冷模式下湖水自然冷承担 57% 的负荷, 间接蒸发冷却塔承担 43% 的负荷; 机械补冷模式下湖水与机械制冷机组共同承担 57% 的负荷。该系统充分利用了自然冷源, 在实际工程中可维持 3000 多个台单机柜平均为 18kW 的智算中心冷却需求, 系统自然冷却时间占系统全年总运行时间的 76%, 满负载后可实现年电能利用效率 (PUE) 1.08 的节能成效, 节能效果显著, 为智算中心冷却做出典型解决方案。

参考文献:

- [1] 李树翀.可信智算助力 AI 产业创新可持续发展[J].软件和集成电路,2023,(9):68-69.
- [2] 中国制冷学会数据中心冷却工作组.中国数据中心冷却技术年度发展研究报告[M].北京:中国建筑工业出版社,2023.
- [3] 李国柱,崔美华,黄凯良,等.数据中心余热利用现状及在建筑供暖中的应用[J].科学技术与工程,2022,22(26):11287-11295.

- [4] 褚俊杰,耿志超,严政.数据中心间接蒸发冷却空调系统能效评价[J].西安工程大学学报,2023,37(5):46-52.
- [5] DEYMI-DASHTEBAYAZ V A A. Simultaneous use of air-side and water-side economizers with the air source heat pump in a data center for cooling and heating production[J]. *Applied thermal engineering: Design, processes, equipment,economics*, 2019,161.
- [6] 田振武,黄翔,吴志湘,等.水侧蒸发冷却技术在数据中心的应用[J].西安工程大学学报,2019,33(6):625-630.
- [7] 李佐洋,白雪莲,徐鑫,等.数据中心风侧直接自然冷却气候分区研究[J].建筑科学,2022,38(10):152-157.
- [8] ELAHEE K, JUGOO S. Ocean Thermal Energy for Air-conditioning: Case Study of a Green Data Center[J]. *Energy Sources*, 2013,35(5-8):679-684.
- [9] LING L, ZHANG Q, ZENG L. Performance and energy efficiency analysis of data center cooling plant by using lake water source[J]. *Procedia Engineering*, 2017,205:3096-3103.
- [10] 贾晨昱,黄翔,田振武,等.间接蒸发冷却技术在国内外数据中心的应用研究[J].制冷与空调,2020,20(1):61-67.
- [11] 武苗苗,黄翔,史东旭,等.不同运行模式下间接蒸发冷却空调的能耗分析[J].西安工程大学学报,2022,36(4):84-91.
- [12] 刘春香,黄紫乐,谭博文,等.湖南东江湖水库消落带地形因子与水文要素时空格局变化[J].山地学报,2023,41(5):676-688.
- [13] 沈天磊,黄翔,白本通,等.间接蒸发冷却技术在数据中心节能改造中的应用[J].制冷与空调,2024,24(2):88-91.
- [14] 傅耀玮,黄翔.蒸发冷凝式间接蒸发冷却空调机组的设计与测试[J].西安工程大学学报,2022,36(1):61-69.
- [15] 田金星,黄翔,褚俊杰,等.基于露点间接蒸发冷却塔的数据中心冷却系统的应用分析[J].制冷与空调,2024,38(3):360-365.
- [16] 张宁,张泉,黄振霖,等.数据中心湖水源自然冷却系统现场性能测试分析[J].暖通空调,2022,52(2):70-74.
- [17] 闻发凡,涂淑平,李林星,等.数据中心露点间接蒸发冷却气流组织模拟分析[J].能源研究与利用,2016,(4):43-45,48.
- [18] 王博,郭焱华,邵双全,等.数据中心冷却系统相关能效评价指标综述[J].制冷学报,2023,44(2):18-27.
- [19] 张博,廖炜铖,李学智,等.数据中心中机柜出风温度的快速模拟[J].西安工程大学学报,2023,37(5):1-9,38.

(上接第 509 页)

- [11] Xia GD, Jiang J, Wang J, et al. Effects of different geometric structures on fluid flow and heat transfer performance in microchannel heat sinks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015,80:439-447.
- [12] 陆卓群,谢志辉,王蓉,等.单侧内肋阵微通道复合热沉的流动和传热性能分析与构形设计[J].工程热物理学报,2022,43(11):2841-2851.
- [13] Ahmad F, Cheema TA, Khan A, et al. Hydrothermal Investigation of the Performance of Microchannel Heat Sink with Ribs Employed on Side Walls[J]. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 2021,46(3):255-272.
- [14] Wang Y, Liu J, Yang K, et al. Performance and parameter optimization design of microchannel heat sink with different cavity and rib combinations[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024,53:103843.
- [15] Zhang Q, Li Z, Feng Z, et al. Effects of combination modes of different cavities and ribs on performance in mini-channels - A comprehensive study[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023,142:106633.
- [16] Zhu Q, Chang K, Chen J, et al. Characteristics of heat transfer and fluid flow in microchannel heat sinks with rectangular grooves and different shaped ribs[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020,59(6):4593-4609.
- [17] 陈明健,张莹.树状微通道散热器强化换热的数值模拟[J].南昌大学学报(工科版),2022,44(4):381-390.
- [18] Chai L, Xia G, Wang L, et al. Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks with periodic expansion-constriction cross-sections[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013,62:741-751.