

文章编号: 1671-6612 (2024) 03-360-06

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

田金星¹ 黄翔¹ 褚俊杰¹ 白本通² 刘和军²

(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】 “双碳”背景下, 蒸发冷却技术已经成为降低数据中心能耗, 满足数据中心 PUE 指标的一种重要手段, 对数据中心冷却系统的优化将对该领域节能降碳做出重要贡献。介绍了数据中心间接蒸发冷却预冷一体化架构冷却系统。系统应用露点型间接蒸发冷却塔, 补充了传统冷却塔的短板, 实现了出水温度低于湿球温度, 大幅度提高全年自然冷源利用时间; 还采用下送风列间空调, 将末端二次泵内置至末端空调内部, 降低了一次泵的功耗, 实现末端和冷源侧的个性化负荷控制; 封闭冷热通道的气流组织可最大限度地提高机房空调系统的利用率, 使系统有着高效的降温效果。同时结合实际应用案例, 通过实测得出全年综合性能系数 (GCOP_A) 达 6.64, 电能利用效率 (PUE) 低至 1.23 和水资源利用效率 (WUE) 为 1.39 来评价和验证该系统的节能效果。结果表明, 该系统在推动数据中心蒸发冷却技术发展的同时, 还为整个数据中心的节能减排做出贡献, 在数据中心领域有着巨大的应用前景。

【关键词】 数据中心; 间接蒸发冷却; 露点型间接蒸发冷却塔; 全年综合性能系数 (GCOP_A); 二次泵
中图分类号 TU831 文献标志码 A

Application Analysis of Data Centre Cooling Systems Based on Dewpoint Indirect Evaporative Cooling Towers

Tian Jinxing¹ Huang Xiang¹ Chu Junjie¹ Bai Bentong² Liu Hejun²

(1. Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048;

2. Shenzhen Esin Technology Co., Shenzhen, 518000)

【Abstract】 Under the background of "double carbon", evaporative cooling technology has become an important means to reduce the energy consumption of the data centre and meet the PUE index of the data centre, and the optimization of the cooling system of the data centre will make an important contribution to energy saving and carbon reduction in this field. This paper describes the data centre indirect evaporative cooling pre-cooling integrated architecture cooling system. The system applies dew-point type indirect evaporative cooling tower, which supplements the short board of the traditional cooling tower and achieves a water outlet temperature lower than the wet bulb temperature, significantly increasing the utilization time of the natural cooling source throughout the year; it also adopts the downward-feeding column-to-column air conditioning, and builds the end-end secondary pump into the inside of the end-end air conditioning, which reduces the power consumption of the primary pump and achieves the personalized load control on the side of the end end-end and the cooling source; and the airflow organization of the

作者简介: 田金星 (2000.07-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: T308541@163.com

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

收稿日期: 2023-09-14

closed hot and cold channels can maximally improve the The airflow organisation of the closed hot and cold channels can maximise the utilisation rate of the air conditioning system in the server room and make the system have a highly efficient cooling effect. At the same time combined with the actual application cases, through the measurement of the annual comprehensive energy coefficient (GCOPA) of 6.64, power utilization efficiency (PUE) can be as low as 1.23 and water utilization efficiency (WUE) of 1.39 to evaluate and verify the energy saving effect of the system, the results show that the system promotes the development of evaporative cooling technology in the data centre, while also contributing to the energy saving and emission reduction for the whole data centre, and has a good reputation in the field of data centre. The results show that the system contributes to the development of data centre evaporative cooling technology, while also contributing to the energy saving and emission reduction of the whole data centre, and has great application prospects in the field of data centre.

【Keywords】 Data Centres; Indirect Evaporative Cooling; Dew-point Indirect Evaporative Cooling Towers; Annual General Coefficient of Performance (GCOP_A); Secondary Pumps

0 前言

随着互联网用户的规模不断增大,数据流量的快速增长对保障高性能计算和数据传输的数据中心基础设施提出了更高的要求,从而导致了能源消耗和碳排放量的快速增加^[1]。数据中心的最大耗能项为 IT 设备,其所消耗的电量会全额转化为热量。数据机房运行过程中产生的热量将引起室内空气温度的升高,从而导致机房 IT 设备运行效率下降甚至损坏。因此,高效的数据中心冷却系统是保障数据中心合理且高效运行的关键。现如今数据中心采用蒸发冷却技术已经成为降低数据中心能耗,满足数据中心 PUE 指标的一种重要手段^[2]。为了充分利用室外的自然冷源,同时,又要保证数据中心内部空气的洁净度,减少室外新风对数据中心内环境的污染,数据中心通常采用间接蒸发冷却技术便可满足对机房内热回风降温的要求。本文通过对数据中心间接蒸发冷却预冷一体化架构冷却系统介绍并结合实际应用案例,通过具体评价指标分析其系统的节能性,并总结了该系统的应用特点,验证了该系统在数据中心应用的可行性。

1 间接蒸发冷却技术

利用自然界的低温冷源对数据机房进行自然冷却的空调方案是提高数据中心能源利用效率的重要途径^[3]。蒸发冷却是一种利用自然环境中湿空气的干湿球温度差(干空气能),依靠水蒸发而从周围湿空气中吸收汽化潜热的原理,达到使水和空气温度降低目的的绿色可再生能源新技术。蒸发冷却过程受自然界大气湿球温度和水温影响较大,是高效的自然冷却。

其中,间接蒸发冷却制取冷水,即采用间接蒸发冷却和直接蒸发冷却相互组合的方式,将制取的冷水温度降低到空气湿球温度以下,其极限温度为空气的露点温度。室外空气进入空气冷却器,被水箱里的冷水等湿冷却,之后再进入填料下部淋水区和冷却后的冷水进行充分热湿交换吸收空气和液态水的显热,对循环水进行首次冷却,然后再进入到填料进行充分热湿交换,吸收空气和液态水的显热,对循环水再次冷却。被冷却后的水汇集在水箱,通过水泵输送到用户。图 1 为本系统采用的露点型间接蒸发冷却塔的结构形式。

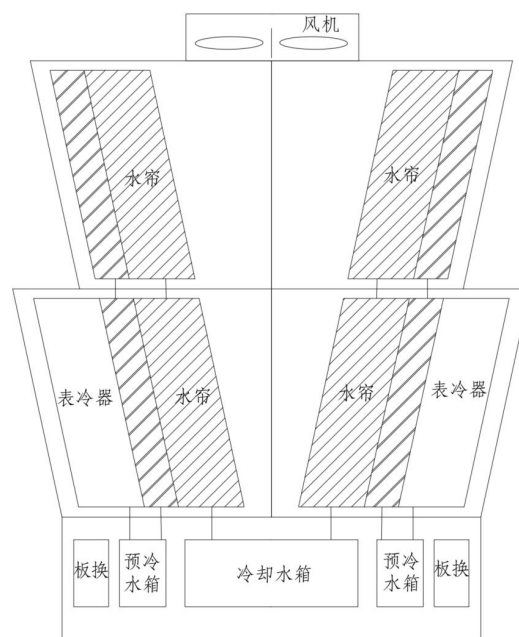


图 1 露点型间接蒸发冷却塔的结构形式

Fig.1 Structural form of dew point type indirect evaporative cooling tower

2 间接蒸发冷却预冷一体化架构

2.1 系统组成

间接蒸发冷却预冷一体化架构冷却系统由露点型间接蒸发冷却塔、离心式冷水机组、冷冻/冷却泵、板式换热器、末端空调及其他辅助设施组成，主要设备包括：离心式冷水机组、露点型间接蒸发冷却塔、板式换热器、冷冻水循环泵、冷却水循环泵、蓄冷水罐、定压补水装置、软水器、软水箱等。图 2 为间接蒸发冷却预冷一体化架构流程图。

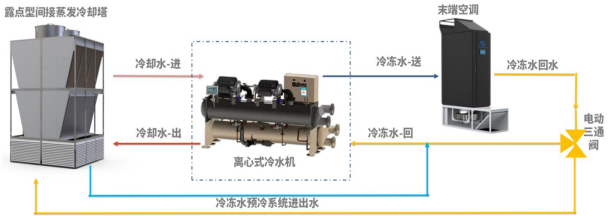


图 2 间接蒸发冷却预冷一体化架构流程图
Fig.2 Flow chart of the integrated architecture of indirect evaporative cooling pre-cooling

2.2 系统特点

(1) 应用露点型间接蒸发冷却塔，补充了传统冷却塔的短板。传统冷却塔的夏季出水温度高于湿球温度 4℃ 以上，而系统应用的近露点超高效间接蒸发冷却装置比同条件传统冷却塔出水温度低 3℃~5℃，出水温度低于湿球温度，可大幅度提高全年自然冷源利用时间，并且在夏季可大幅提高冷机能效 40% 以上，从而起到高效节能减排降耗的作用。图 3 为间接蒸发冷却塔实物图。



图 3 露点型间接蒸发冷却塔
Fig.3 Dew point type indirect evaporation cooling tower physical picture

(2) 填补了末端高效制冷的空白。系统应用下送风列间空调，同时将末端二次泵内置至末端空

调内，如图 4 所示，替代常规的一次泵憋压，末端水阀控制流量的模式，系统供回水压差通过一次泵控制为零，大幅降低了一次泵的功耗，可真正实现末端和冷源侧的个性化负荷控制，不同负荷的设备之间也互不影响，在节能的同时提升系统可靠性。



图 4 内置于末端空调的二次泵
Fig.4 Secondary pumps built into end air conditioners

(3) 应用流体动力技术。系统封闭冷热通道的气流组织可最大限度地提高机房空调系统的利用率，可通过提高送风温度来增大机房空调制冷量、延长节能模式的运行时长，避免局部过热。

2.3 系统运行模式

冷却系统根据气候条件有三种运行模式，分别是夏季冷机独立供冷的完全机械制冷模式、预冷时露点型间接蒸发冷却塔+板换+离心式冷水机组联合供冷的部分自然冷源模式、冬季板换+冷却塔的完全自然冷源模式。如表 1 所示。

表 1 系统运行模式

Table 1 System operating modes

运行模式	室外环境温度	冷却塔作用
夏季模式	环境露点温度+4℃≥冷却塔出水设定温度 (22℃)+2℃	常规冷却塔
预冷模式	冷却塔出水设定温度 (18℃)<环境露点温度 +4℃<设定温度上限 (22℃)	预冷+冷却主机
冬季模式	环境露点温度≤冷却塔出水设定温度 (18℃)-2℃	自然冷却

以下为三种运行模式详细介绍：

夏季模式：当环境露点温度+4℃≥冷却塔出水设定温度 (22℃)+2℃时，冷却塔冷却水的三通阀切换到冷却水直接去冷水机的通道，冷却水在冷水机的冷凝器做完热交换后，高温冷却水回到冷却塔；同时冷冻水的三通阀切换到冷冻水直接去冷水机的通道，冷冻水在冷水机的蒸发器做完热交换

后, 低温冷冻水送到机房供末端空调使用。如图 5 所示。

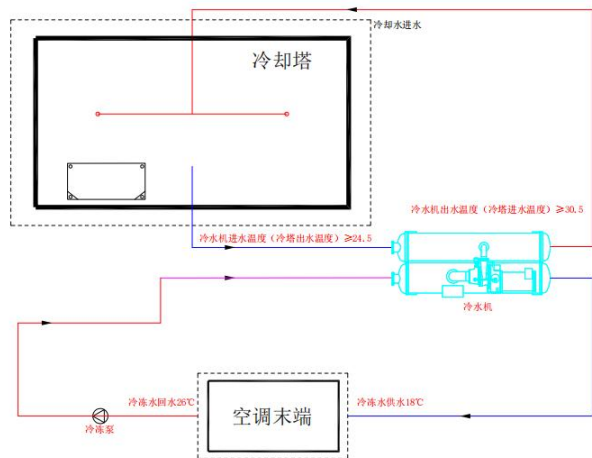


图 5 冷却系统模式：夏季模式

Fig.5 Cooling system modes: summer mode

预冷模式：冷却塔出水设定温度（18℃）<当环境露点温度+4℃<设定温度上限（22℃），冷却塔冷却水的三通阀切换到冷却水去板换的通道，冷却塔经过板换后直接进冷塔的二通阀关闭，冷却水经过板换进行一部分换热后，再进入冷机冷凝器进行热交换，热交换后的高温冷却水回到冷却塔；同时冷冻水的三通阀切换到冷冻水去板换通道，冷冻水先在板换和冷却水进行部分热交换，热交换后的低温冷冻水送到机房供末端空调使用，如图 6 所示。

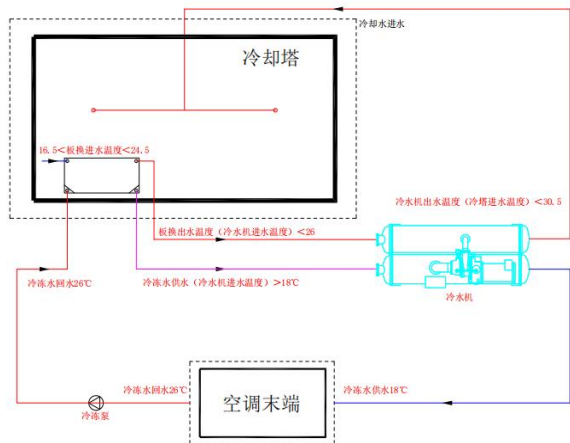


图 6 冷却系统模式：预冷模式

Fig.6 Cooling system modes: pre-cooling mode

冬季模式：当环境露点温度≤冷却塔出水设定温度（18℃）-2℃时，冷却塔冷却水的三通阀保持

直接到板换的通道不切换，打开冷却塔冷却水经过板换后直接去冷却塔进水通道，冷却水在板换和冷冻水做完热交换后，高温冷却水直接回到冷却塔；同时冷冻水的三通阀切换到冷冻水去板换通道，冷冻水在板换和低温冷却水做完热交换后经过冷机后回到机房，但此时冷机不开启，如图 7 所示。

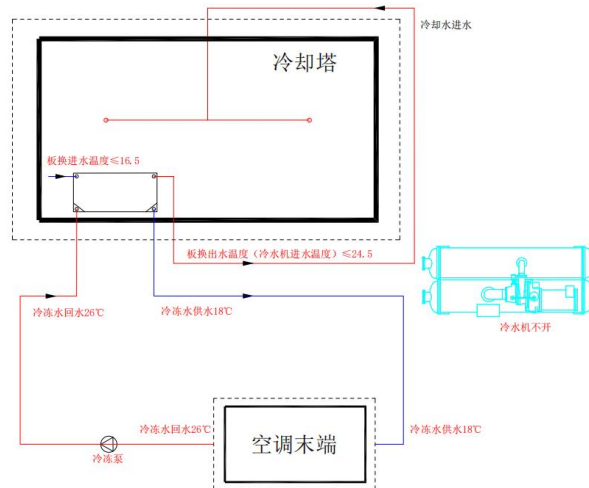


图 7 冷却系统模式：冬季模式

Fig.7 Cooling system modes: winter mode

2.4 系统能效评价

鉴于数据中心用冷却系统能效评价指标繁多，且各指标虽然名称不同，但指向内容相近。本系统在评价该系统时选取具有代表性的指标来准确评价并对比冷却系统能效，充分挖掘冷却系统节能潜力。

(1) 全年综合性能系数（GCOP_A）

GCOP 是数据中心冷却系统的能源利用效率，其计算公式按照公式（1）和公式（2）进行计算^[4]：

$$Q_{CS}=E_{DC}-E_{CS} \quad (1)$$

$$GCOP=Q_{CS}/E_{CS} \quad (2)$$

式中： Q_{CS} 为数据中心冷却系统排热量，kWh； E_{DC} 为数据中心耗电量，kWh； E_{CS} 为冷却系统耗电量，kWh，包括供电系统直接供电的制冷系统（含制冷机组、冷却塔、水泵、风机等）的电能消耗（图 8 中 B 点）、由 UPS 供电的空调末端（图 8 中 C1 点）和由 UPS 供电的水泵（图 8 中 C2 点）三部分。

全年综合性能系数（GCOP_A）按照公式（3）和公式（4）进行计算^[5]：

$$Q_{CS,A}=E_{DC,A}-E_{CS,A} \quad (3)$$

$$GCOP_A=Q_{CS,A}/E_{CS,A} \quad (4)$$

式中: $Q_{CS,A}$ 为数据中心冷却系统全年累积排热量, kWh; $E_{DC,A}$ 为数据中心耗电量, kWh; $E_{CS,A}$ 为冷却系统耗电量, kWh。

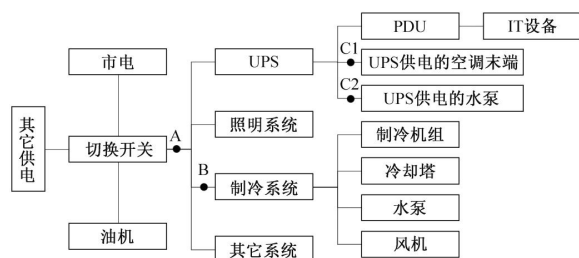


图8 数据中心能耗监测点位置

Fig.8 Location of data centre energy monitoring points

(2) 电能利用效率 (PUE)

电能利用效率 (PUE) 计算按照公式 (5) 进行计算^[6]:

$$PUE = P_{\text{total}} / P_{IT} \quad (5)$$

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。

(3) 水资源利用效率 (WUE)

水资源利用效率 WUE 计算按照公式 (6) 进行计算^[6]:

$$WUE = (\sum L_{\text{总耗水}}) / \sum P_{IT} \quad (6)$$

式中: $L_{\text{总耗水}}$ 为输入数据中心的总水量, L; P_{IT} 为数据中心中 IT 设备耗电, kWh。

3 实际应用

3.1 项目概况

深圳百旺信云数据中心项目位于深圳市南山区, 建筑面积约 6000 平方米, 设有机柜 1528 架, 常规单机架功率 6kW, 高电单机架功率 12kW, 算力区机柜单机架率最高可达 50kW。

冷却系统方面, 深圳百旺信云数据中心采用间接蒸发冷却预冷一体化架构, 系统由露点型间接蒸发冷却塔、离心式冷水机组、冷冻/冷却泵、板式换热器、末端空调及其他辅助设施组成, 同时结合冷热通道密闭模块, 全年自然冷源利用时间超过 4 000 小时, 较常规冷冻水系统提升能效 40% 以上, 大幅降低了数据中心制冷系统能耗。

3.2 系统性能评价测量

对百旺信云数据中心的消耗电能和用水量进行长时测量, 连续测试时间为一年, 即 2022 年 1 月 1 日-2023 年 1 月 1 日。

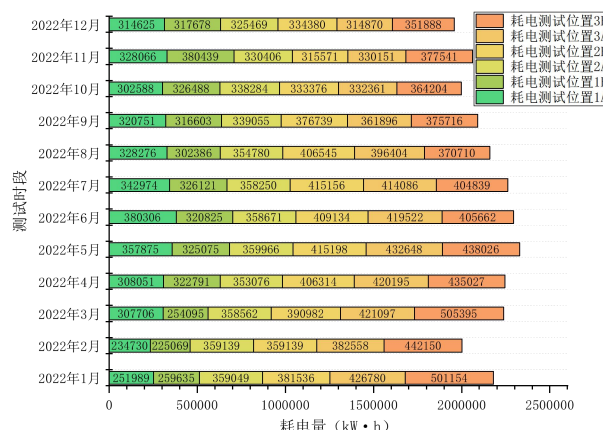


图9 百旺信云数据中心耗电量记录

Fig.9 Piovanxin Cloud Data Centre Power Consumption Records

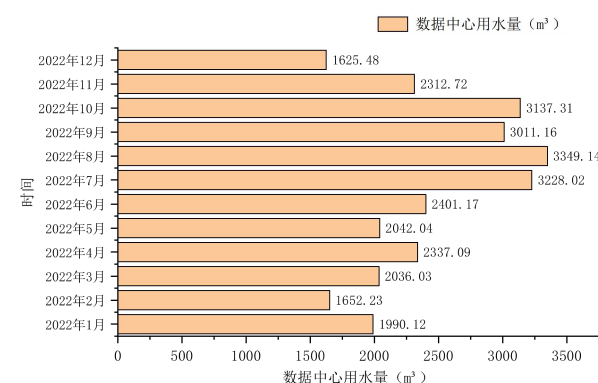


图10 百旺信云数据中心用水量记录

Fig.10 Piovanxin Cloud Data Centre Water Consumption Records

由图9和图10可知深圳百旺信云数据中心 2022 年 1 月 1 日-2023 年 1 月 1 日的总耗电量 ($E_{DC,A}$) 为 25818799kWh。总用水量为 29122.51m³。通过记录得冷却系统耗电量 ($E_{CS,A}$) 为 3375459.54kWh。IT 设备耗电量为 20951438.22kWh。

因此, 可计算得出深圳百旺信云数据中心为:

$$GCOP_A = Q_{CS,A} / E_{CS,A} = (25818799 - 3375459.54) / 3375459.54 = 6.64$$

$$PUE = P_{\text{total}} / P_{IT} = 25818799 / 20951438.22 = 1.23$$

$$WUE = (\sum L_{\text{总耗水}}) / \sum P_{IT} = 29122.51 / 20951438.22 = 1.39$$

在三种模式运行下的全年综合性能系数 ($GCOP_A$) 达 6.64, 电能利用效率 (PUE) 低至 1.23 和水资源利用效率 (WUE) 为 1.39, 结果表明, 系统充分利用了室外环境的能量在全年大部分时间实

现“自然冷却”,节能效果显著。

4 结语

综合而言,通过实际项目充分证明了数据中心间接蒸发冷却预冷一体化架构冷却系统有以下特点:

(1) 通过系统应用露点型间接蒸发冷却塔,补充了传统冷却塔的短板,实现了出水温度低于湿球温度,大幅度提高全年自然冷源利用时间;

(2) 还采用下送风列间空调,将末端二次泵内置至末端空调内部,降低了一次泵的功耗,实现末端和冷源侧的个性化负荷控制;

(3) 封闭冷热通道的气流组织可最大限度地提高机房空调系统的利用率,使系统有着高效的降温效果;

(4) 还通过实际工程测出在三种模式运行下的全年综合性能系数($GCOP_A$)达6.64,电能利用效率(PUE)低至1.23和水资源利用效率(WUE)为1.39来评价和验证该系统的节能效果,结果表明,系统充分利用了室外环境的能量在全年大部分时间实现“自然冷却”,节能效果显著,在推动数据中心蒸发冷却技术发展的同时,还为整个数据中心的节能减排做出贡献,在数据中心领域有着巨大的应用前景。

参考文献:

- [1] 倪吉,刘守亚,袁中原,等.四川省某数据中心冷却系统运行性能优化[J].制冷与空调,2023,37(3):410-416.
- [2] 陈心拓,周黎旸,张程宾,等.绿色高效数据中心散热冷却技术研究现状及发展趋势[J].中国工程科学,2022,24(4):94-104.
- [3] 耿志超,黄翔,折建利,等.间接蒸发冷却空调系统在国内外数据中心的应用[J].制冷与空调,2017,31(5):527-532.
- [4] T/CAR 9.1-2021,数据中心冷却系统-第1部分:综合性能系数($GCOP$)测试与计算方法[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [5] T/CAR 9.2-2021,数据中心冷却系统-第2部分:不同地区综合性能系数 $GCOP$ 和能效等级[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [6] 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.
- [7] Jie L, Jon K C. Indirect Dew-Point Evaporative Cooling: Principles and Applications[M]. Springer International Publishing.
- [8] Douaa A A, Nesreen G, Kamel G, et al. Sustainable Poultry House Ventilation Using Dew Point Indirect Evaporative Cooler Aided With Radiative Cooling[P]. ASME 2021 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2021 15th International Conference on Energy Sustainability, 2021.
- [9] Chi C, Ji K, Marahatta A, et al. Jointly Optimizing the IT and Cooling Systems for Data Center Energy Efficiency based on Multi-Agent Deep Reinforcement Learning[P]. Future Energy Systems, 2020.
- [10] Shi C, Wang Q. Improving Energy Efficiency in Data Center: Challenges and Prospects[C]. Singapore Management and Sports Science Institute, Singapore. Proceedings of 2015 2nd International Conference on Education and Education Research(EER 2015 V9). Singapore Management and Sports Science Institute, 2015:4.
- [11] 赵磊,范强,白本通.数据中心间接蒸发冷却技术及大温差高温冷水技术[J].制冷与空调,2021,21(6):21-24,62.
- [12] 窦海波,盛廷军,杨宜楠,等.南方地区数据中心节能架构设计——以深圳地区为例[J].节能,2022,41(11):85-90.
- [13] 国骥,朱傲,郭志成,等.山西某数据中心间接蒸发冷却系统设计[J].暖通空调,2023,53(1):78-82.
- [14] 陈聪,葛林.数据中心间接蒸发冷却技术应用与思考[J].暖通空调,2023,53(4):32-37.
- [15] 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.