

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-105-06

数据中心空气侧蒸发冷却技术性能及适用性分析

杜妍 黄翔 王颖 屈名勋 薛宁静

(西安工程大学 西安 710600)

【摘要】 总结了空气侧蒸发冷却技术在数据中心的研究现状,对直接、间接及露点间接蒸发冷却技术的工作原理进行理论分析并对三者在高湿工况下的性能进行测试,结果表明,所测蒸发式冷气机最佳风速在1.8m/s;间接蒸发冷却空调机组最佳二/一次风量比为1.5;露点间接蒸发冷却空调机组最佳二/一次风量比为1.7,并且此时效率可达到96.5%,有较好的冷却效果,但同时也要注意露点间接蒸发冷却器的风阻问题。根据三者的效率预测各自在4个典型高湿度地区的自然冷却小时数,结果表明,露点间接蒸发冷却器在四个城市的自然冷却小时数均达到6600小时以上,有较大的节能空间。

【关键词】 数据中心;蒸发冷却;露点间接蒸发冷却;二/一次风量比;适用性分析
中图分类号 TU831.5 文献标识码 A

Analysis of Performance and Applicability of Evaporative Cooling Technology on the Air Side of Data Center Du Yan Huang Xiang Wang Ying Qu Mingxun Xue Ningjing (Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710600)

【Abstract】 This paper summarizes the current research status of air-side evaporative cooling technology in the data center, theoretically analyzes the working principles of direct evaporative cooling technology, indirect evaporative cooling technology and dew point indirect evaporative cooling technology, and tests the performance of the three heat exchange core under high humidity conditions. The results show that the best wind speed of the tested evaporative air conditioner is 1.8m/s; the best second/primary air volume ratio of indirect evaporative cooling air conditioning unit is 1.5; and for the dew point indirect evaporative cooling air conditioning unit is 1.7, meanwhile the efficiency can reach 96.5%, which has a good cooling effect, but at the same time, we must also pay attention to the wind resistance of the dew point indirect evaporative cooler. According to the efficiencies of the three heat exchange core, the natural cooling hours in the four typical high-humidity areas are predicted. The results show that the natural cooling hours of the dew point indirect evaporative cooler in the four cities all reach more than 6,600 hours, which has a large energy-saving space.

【Keywords】 Data center; evaporative cooling; dew point indirect evaporative cooling; second/primary air volume ratio; applicability analysis

作者简介: 杜妍 (1997.3-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 393223830@qq.com

通讯作者: 黄翔 (1962.7-), 男, 教授, E-mail: huangx@xpu.edu.cn

收稿日期: 2021-10-11

0 引言

绿色数据中心 (Green Data Center) 是指: 在全生命周期内, 最大限度地节约资源、保护环境、减

少污染, 为电子信息设备运行和人员提供安全、可靠、健康、适用和高效使用空间的数据中心^[1]。构建绿色数据中心, 是构建新一代信息基础设施的重

要任务。蒸发冷却技术以大自然空气中的“干空气能”为驱动势，令不饱和空气与水接触发生热、质传递，水分蒸发使得空气温度降低以达到制冷的目的，由于其节能性、低碳性、经济性在数据中心目前较为推崇，其中蒸发冷却式冷水机组、间接蒸发冷却技术及机组也被列入 2020 国家绿色数据中心先进适用技术产品目录中。李婷婷等采用蒸发式冷气机对数据中心进行节能改造，并分析其在机房中应用时在结露、排风、局部热点及洁净度方面需要考虑的问题^[2]。范坤、郭少华、郭斌等从温降幅度、空气被加湿问题、安装、运行、监测、电量数据等方面分别对蒸发式冷气机应用情况进行分析^[3-5]。傅烈虎等对采用全新风自然冷却的数据中心进行热环境模拟，强调空气品质、方案经济性及运维管理在该方案中的重要性^[6]。金洋帆等从结垢原因、危害及解决措施方面对数据中心用间接蒸发冷却空调机组进行分析^[7]。薛志强、贾晨昱、胡雨等分别从与间接蒸发冷却相结合的机械补冷系统补冷量百分比确定、间接蒸发冷却技术应用于数据中心三种运行模式切换节点温度确定以及应用于实际工程情况进行分析^[8-10]。褚俊杰、刘佳莉等从二/一次风量比、淋水量、室外环境温湿度等方面分别研究其对逆流式、复合式露点间接蒸发冷却空调机组性能的影响^[11,12]。贺红霞等提出一种应用于数据中心的流道结构为逆流和叉流结合的露点间接蒸发冷却与机械制冷复合空调，并模拟了机组在高湿工况和干燥工况下的性能^[13]。宋娇娇等提出将交叉式露点间接蒸发冷却空调机组应用于机房中，对比在不同热源功率情况下机组送风对发热源表面温度的降温效果^[14]。

本文对蒸发式冷气机、间接蒸发冷却空调机组以及露点间接蒸发冷却空调机组的空气处理过程进行理论分析，并对其在高湿工况下不同风速、二/一次风量比情况下的换热性能进行测试分析，归纳三者应用于通信机房、数据中心的优劣，结合测试结果，计算了三种空调形式在福州、广州、上海、南京仅采用自然冷却的运行时间。

1 蒸发冷却技术制取冷风原理

1.1 直接蒸发冷却技术

如图 1 所示，直接蒸发冷却理想状况下， A 状态点的室外空气与水膜进行热湿交换被等焓降温

至状态点 B ，而实际的蒸发冷却并非绝热饱和过程，在该过程中，大多数空气会被处理到 C 状态点，再与少部分未与水膜接触的空气混合为 D 状态点，经风机管道温升至 E 状态点送入室内，由于机房内主要为 IT 设备产生的热量，因此送入机房内的空气近乎被等湿加热至 F 状态点后排至室外^[15]。

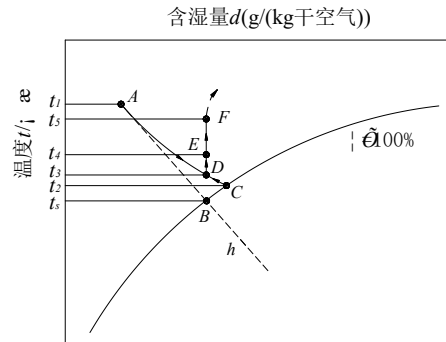


图 1 直接蒸发冷却焓湿图

Fig.1 Direct evaporative cooling enthalpy and humidity diagram

1.2 间接蒸发冷却技术

如图 2 所示为间接蒸发冷却热湿交换过程图，对于数据中心来说，间接蒸发冷却换热芯体干通道侧走一次空气（机房的循环空气），从 E 状态点被等湿冷却至 F 状态点，而二次空气（室外空气）流通过换热芯体的湿通道，与喷淋在换热壁面的水膜发生直接蒸发冷却过程并通过间壁带走机房回风热量，增焓降温至 D 状态点排至室外^[15]。

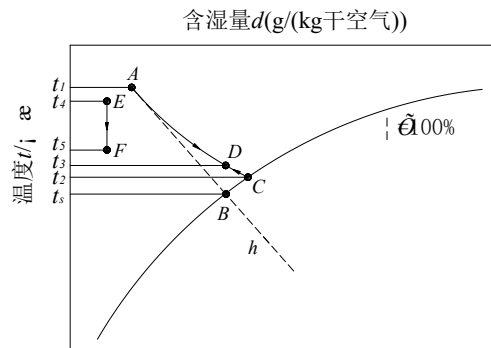


图 2 间接蒸发冷却焓湿图

Fig.2 Indirect evaporative cooling enthalpy and humidity diagram

1.3 露点间接蒸发冷却技术

对于露点间接蒸发冷却技术，如图 3 所示，由于其芯体的特殊结构处理，室外空气 A 先从二次空气干通道入口进入，其中分出一小部分空气从靠前

的预留孔洞进入二次空气湿通道, 在湿通道内与喷淋水进行蒸发冷却作用同时通过换热板的传热等湿冷却二次空气干通道剩余的空气以及一次空气, 在进行充分的热质交换作用后到达 A' 状态点, 再从湿通道出口排出, 二次空气干通道剩余的空气被等湿冷却至 B 状态点, 再分出一小部分空气从第二个预留孔洞进入到湿通道侧, 与喷淋水发生热湿交换并带走剩余的二次空气和一次空气的热量被处理至 B' 状态点排至室外, 未进入湿通道的二次空气被等湿冷却至 C 状态点继续重复上述的处理过程, 直至所有二次空气到达 D 状态点, 从最后一个预留孔洞进入到湿通道侧被处理至 D' 状态点然后排至外界, D' 状态点接近 A 状态点的露点温度, 而一次空气则是不断被二次空气湿通道发生的热湿处理过程带走显热, 从 F 状态点等湿冷却至 G 状态点, 然后送入机房^[15]。

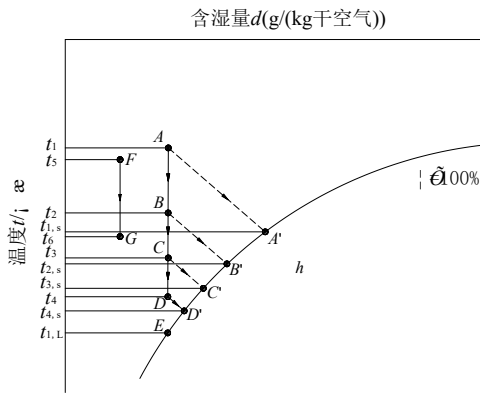


图 3 露点间接蒸发冷却焓湿图

Fig.3 Dew point indirect evaporative cooling enthalpy and humidity diagram

1.4 性能评价指标

直接蒸发冷却效率^[15] 用来描述一次空气出口

干球温度接近一次空气入口湿球温度的程度, 其计算式为:

$$\eta_{DEC} = \frac{t_{g1} - t_{g2}}{t_{g1} - t_{s1}} \times 100\%$$

式中: t_{g1} 为一次空气入口干球温度, °C; t_{g2} 为一次空气出口干球温度, °C; t_{s1} 为一次空气入口湿球温度, °C。

间接蒸发冷却效率^[15] 用来描述一次空气出口干球温度接近二次空气入口湿球温度的程度, 其计算式为:

$$\eta_{DEC} = \frac{t_{g1} - t_{g2}}{t_{g1} - t_{s1'}}$$

式中: $t_{s1'}$ 为二次空气入口湿球温度, °C。

2 测试分析

2.1 直接蒸发式冷气机

直接蒸发式冷气机如图 4 (a) 所示, 2020 年 8 月对机组性能进行测试, 设定不同的入口风速, 进风平均干球温度 34.2°C, 平均湿球温度 27.8°C, 数据分析如图 4 (b) 所示。

由图 4 (b) 可知, 机组直接蒸发冷却效率随着进口风速的增加呈先增加后降低的趋势, 当进口风速达到 1.8m/s 时, 效率最高可达到 73.85%, 其出风温度在 29.5°C, 而根据 GB 50174-2017 《数据中心设计规范》^[16] 的规定, 对于高温高湿地区, 在极端天气情况下, 蒸发式冷气机所处理空气达到的温度高于标准要求, 采用蒸发式冷气机制取的冷风送入机房不仅起不到降温效果, 还增加了房间的相对湿度, 因此需与机房专用空调联动, 根据室外环境情况切换来控制室内温湿度。

表 1 数据中心环境要求

Table 1 Data center environmental requirements

区域	要求	备注
冷通道或机柜进风区域的温度	18°C~27°C	
冷通道或机柜进风区域的相对湿度和露点温度	露点温度 5.5°C~15°C, 同时相对湿度不大于 60%	不得结露
主机房环境温度和相对湿度 (停机时)	5°C~45°C, 8%~80%, 同时露点温度不大于 27°C	

采用蒸发式冷气机与机房专用空调联动是直接

流式导致空气洁净度不高, 需做好新风过滤; 冬季温度过低, 导致新风加湿空间小, 机房环境相对湿度过低, 可配合机房回风改善^[17]; 室内形成过高的正压会影响蒸发式冷气机的运行效果, 因此需设排风装置; 对于可能产生的局部热点问题, 可连接管

道进行岗位送风以解决^[2]。

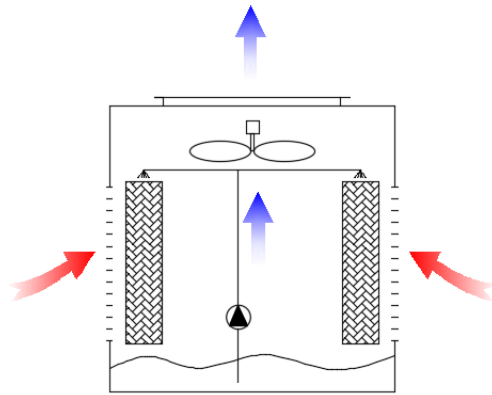


图 4 (a) 蒸发式冷气机原理图

Fig.4(a) Schematic diagram of evaporative air conditioner

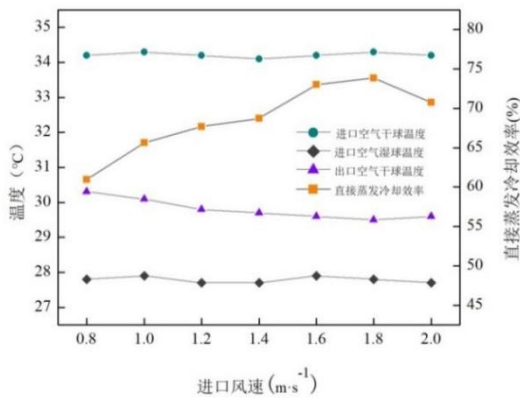


图 4 (b) 蒸发式冷气机性能测试

Fig.4(b) Performance test of evaporative air conditioner

2.2 间接蒸发冷却空调机组

间接蒸发冷却空调机组原理图如图 5 (a) 所示, 2021 年 9 月对其进行测试, 测试工况下, 机组二次空气进风平均干球温度 34.58°C, 平均湿球温度 27.97°C, 数据分析如图 5 (b) 所示。

由图 5 (b) 可知, 随着二/一次风量比的增加, 机组的间接蒸发冷却效率呈增长的趋势, 增幅逐渐变缓, 当风量比达到 1.5 时, 效率基本达到最高值 64.8%, 此时再增加风量, 效率不仅没得到提升, 还会增加风机能耗。在最佳风量比下, 一次空气出风干球温度在 30.47°C, 一次空气温降在 4.73°C。在所测参数下, 间接蒸发冷却空调机组虽未将一次空气处理至送风要求范围内, 但也可起到一定的预冷效果, 如根据所测数据, 对于 5000m³/h 送风量的机组来说, 间接蒸发冷却器可提供 7.63kW 的制冷量, 搭配机械制冷系统进行补冷, 在保证可靠性的同时可节约能耗。

对于间接蒸发冷却器, 当进口空气温湿度较高, 可利用的“干空气能”较小时会影响其效率, 可通过寻找最佳的二/一次风量比和淋水量、采用间歇性布水、对循环水进行水质处理防止其结垢^[7]、增强换热芯体亲水性或在其表面采取特殊结构处理等方式来强化换热。

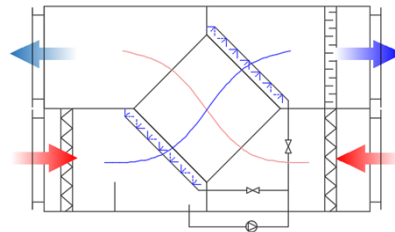


图 5 (a) 间接蒸发冷却空调机组原理图

Fig.5(a) Schematic diagram of indirect evaporative cooling air-conditioning unit

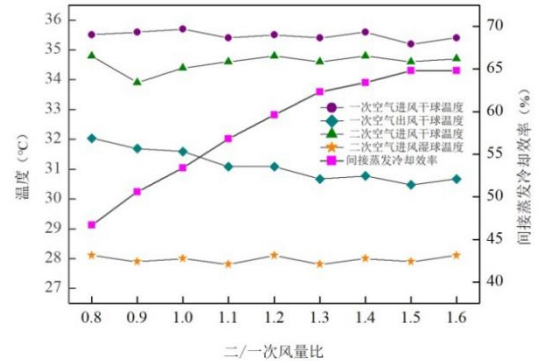


图 5 (b) 间接蒸发冷却空调机组性能测试

Fig.5(b) Performance test of indirect evaporative cooling air-conditioning unit

2.3 露点间接蒸发冷却空调机组

露点间接蒸发冷却空调机组原理图如图 6 (a) 所示, 2020 年 8 月对机组在不同二/一次风量比情况下的性能进行测试, 测试工况下, 机组二次空气进风平均干球温度 34.54°C, 平均湿球温度 27.97°C, 数据分析如图 6 (b) 所示。

由图 6 (b) 可知, 随着二/一次风量比的增加, 机组的间接蒸发冷却效率也是呈增长的趋势, 增幅逐渐变缓, 当风量比达到 1.7 时, 效率基本达到最高值 96.5%, 此时再增加风量, 效率不仅没得到提升, 还会增加风机能耗。在最佳风量比下, 一次空气出风干球温度在 28.16°C, 接近二次空气进风湿球温度, 一次空气温降在 7.24°C。在所测参数下, 露点间接蒸发冷却空调机组近乎可将空气处理至 18°C~27°C 的送风范围, 则对于一些较所测二次空

气进风参数温度和相对湿度更低一点地区, 基本在全年可实现零机械制冷。

对于强化露点间接蒸发冷却器换热性能, 也可从探究其最佳二/一次风量比、淋水量^[11,12]; 优化布水、改变风速以强化传热, 增加材料亲水性^[17]来改进。

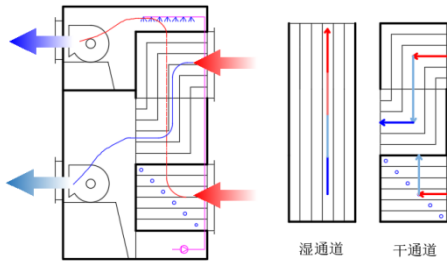


图 6 (a) 露点间接蒸发冷却空调机组原理图

Fig.6(a) Schematic diagram of dew point indirect evaporative cooling air-conditioning unit

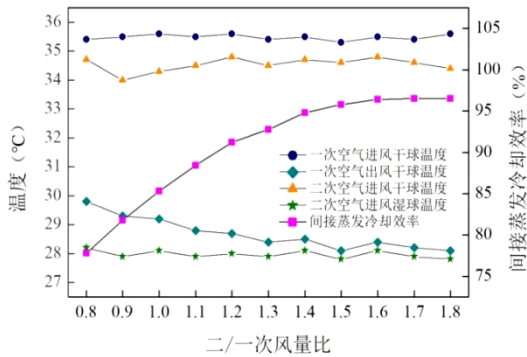


图 6 (b) 露点间接蒸发冷却空调机组性能测试

Fig.6(b) Dew point indirect evaporative cooling air-conditioning unit performance test

由于露点间接蒸发冷却机组的换热芯体干通道为强化换热制作成 Z 字型, 为预冷二次空气, 二次空气会通过孔洞, 经 90°转弯进入湿通道, 导致相同规格的机子, 露点间接蒸发冷却换热芯体产生的压降大于间接蒸发冷却换热芯体, 再加上机械制冷换热器、过滤器等部件, 会使得机组风机压降过大, 采用轴流风机无法满足压降需求, 而风量、扬程大的常规离心风机能耗过高且占地面积大, 用于机组生产得不偿失, 目前业界基本采用 EC 离心风机, 现间接蒸发冷却空调机组 120kW 制冷量规格的一次空气风量一般在 28000m³/h, 如若选择两台 EC 风机, 单台风量 14000m³/h, 如图 7 为 14000m³/h 风量, 市面上的 EC 离心风机功率随着风压增大的改变情况, 风机风压的增大会导致功率的直线上升, 而风机是全年开启的设备, 则会影

到整机的能效, 在机组设计时应充分考虑到风压的影响。

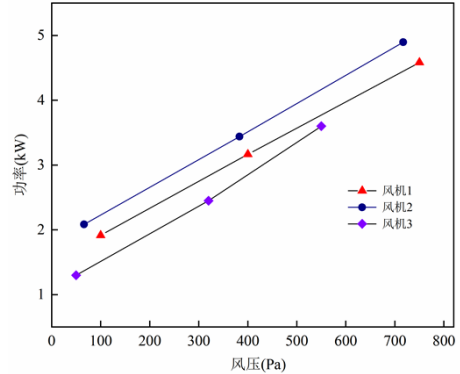


图 7 风机功率与风压关系图

Fig.7 Relationship between fan power and wind pressure

3 三种蒸发冷却方式适用性分析

3.1 蒸发式冷气机

蒸发式冷气机由于会给室内引入新风, 适用于对环境洁净度等级要求不高的机房, 设蒸发式冷气机送风状态点干球温度为 20°C^[17], 根据逐时气象参数以及在高温高湿工况所测的湿球效率, 取 73.85%, 可计算出采用蒸发式冷气机满足提供充足制冷量时的进风湿球温度 (对于干球温度低于送风湿球温度的可直接列为满足情况), 与逐时湿球温度对比, 可计算全年满足的小时数。

$$t_{s1} = t_{g1} - \frac{(t_{g1} - t_{g2}) \times 100\%}{\eta_{DEC}}$$

3.2 间接蒸发冷却空调机组

根据所测间接蒸发冷却空调机组数据, 在高温高湿地区, 其间接蒸发冷却效率取 64.8%, 根据机组一次空气送、回风要求 (38°C、25°C) 以及间接蒸发冷却效率, 结合间接蒸发冷却效率公式可计算出完全采用间接蒸发冷却空调机组可提供充足制冷量, 外界湿球温度的最高值。

$$t_{s1'} = t_{g1} - \frac{(t_{g1} - t_{g2}) \times 100\%}{\eta_{IEC}} = 17.94^{\circ}\text{C}$$

3.3 露点间接蒸发冷却空调机组

根据所测数据, 取间接蒸发冷却效率为 96.5%, 同理可计算出露点间接蒸发冷却空调机组所对应的湿球温度最高值, 由计算结果可见, 露点间接蒸发冷却空调机组对湿球温度的要求范围较间接蒸发冷却空调机组宽裕了 6.6°C。

$$t_{s1'} = t_{g1} - \frac{(t_{g1} - t_{g2}) \times 100\%}{\eta_{IEC}} = 24.53^\circ\text{C}$$

3.4 运行时长分析

由于机组所测效率均在高温高湿的环境参数下求得，选取了福州、广州、上海、南京 4 个高湿度地区，根据其全年逐时气象参数，对三个机组自身可完全提供制冷量的小时数进行统计，结果如图 8 所示。

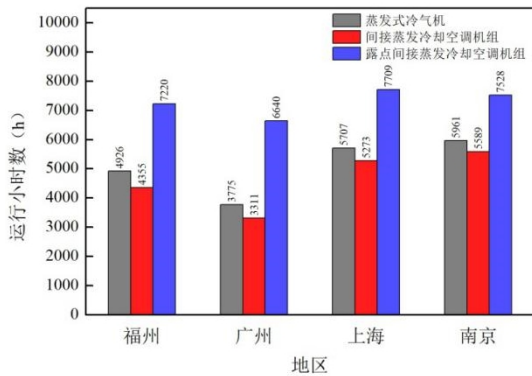


图 8 典型高温高湿地区机组自然冷却运行时间

Fig.8 Unit natural cooling operation time in typical high-temperature and high-humidity areas

4 结论

(1) 通过焓湿图的分析，实际直接蒸发冷却过程为增焓过程。相较于间接蒸发冷却，露点间接蒸发冷却由于工作空气的预冷效果，送风会实现更大的降温。

(2) 根据性能测试，得出在高温高湿工况下，蒸发式冷气机直接蒸发冷却效率在风速为 1.8m/s 时达到最高值 73.85%；间接蒸发冷却器当二/一次风量比达到 1.5 时，效率基本达到最高值 64.8%，露点间接蒸发冷却器当二/一次风量比达到 1.7 时，效率基本达到最高值 96.5%，出风温度受换热器效率、二/一次风量比、淋水量、布水形式等的影响。

(3) 通过分析得出风机功率随风压的增长基本呈线性增长趋势，露点间接蒸发冷却空调机组由于其流道的特殊性，风阻会较普通的板翅式间接蒸发冷却器大，在设计时需考虑到风机能耗问题。

(4) 预测三种机组在福州、广州、上海、南京高湿度地区完全采用自然冷却的运行时长，由于露点间接蒸发冷却空调机组可将空气处理至接近或低于湿球温度的值，其高湿度地区全年仅采用自然冷却可提供充足制冷量的时间最高可达到 7709 小时，有巨大的节能空间。

参考文献:

- [1] 黄翔.绿色数据中心高效适用制冷技术及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [2] 李婷婷,黄翔,折建利,等.东北某数据中心机房空调系统节能改造分析[J].西安工程大学学报,2017,31(3):364-368.
- [3] 范坤,黄翔,周敏,等.蒸发式冷气机在湿热地区通信基站中的应用[J].制冷与空调,2013,13(3):88-92.
- [4] 郭少华,李和仙.关于在通信机房应用蒸发式冷气机技术的研究[J].轻工科技,2013,29(1):65-66.
- [5] 郭斌.通信机房蒸发式冷气机系统介绍及经济效益分析[J].信息系统工程,2017,(9):153.
- [6] 傅烈虎,杨超,郑品迪.Facebook 数据中心热环境仿真及室内空气品质分析[J].制冷与空调,2019,19(1):17-22,35.
- [7] 金洋帆,黄翔,屈悦滢,等.数据中心间接蒸发冷却空调机组结垢原因分析及应对措施[J].制冷与空调,2021,21(1):14-19.
- [8] 薛志强,高书辰,吴刚,等.绿色数据中心间接蒸发冷却应用设计[J].信息技术与标准化,2018,(10):65-69.
- [9] 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.
- [10] 胡雨.上海某数据中心间接蒸发冷却空调系统设计[J].制冷与空调,2021,21(5):77-82.
- [11] 褚俊杰,黄翔,孙铁柱,等.逆流式露点间接蒸发冷却器性能实验研究[J].制冷学报,2019,40(1):121-127.
- [12] 刘佳莉,黄翔,孙哲,等.新型复合式露点间接蒸发冷却空调机组的试验研究[J].流体机械,2014,42(5):61-66.
- [13] 贺红霞,黄翔,何华明,等.数据中心用露点间接蒸发冷却与机械制冷复合空调的实验研究[J].制冷学报,2020,41(6):71-76.
- [14] 宋姣姣,黄翔,范坤,等.交叉式露点间接蒸发冷却空调机组应用于模拟机房的试验研究[J].流体机械,2014,42(4):67-71,22.
- [15] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [16] GB 50174-2017,数据中心设计规范[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [17] 黄翔,周海东,范坤,等.通信机房应用直接蒸发冷却空调方式的优化及节能分析[J].暖通空调,2013,43(10):28-34.
- [18] 褚俊杰,黄翔,孙铁柱,等.露点间接蒸发冷却器湿通道侧材料亲水性研究[J].棉纺织技术,2018,46(1):40-44.