

文章编号: 1671-6612 (2020) 03-297-06

# 新型蒸发冷却空调系统在数据中心的运行测试分析

田振武 黄翔 郭志成 严锦程 刘振宇

(西安工程大学 西安 710048)

**【摘要】** 针对数据中心空调系统全年不间断供冷、运行能耗高的特点, 提出一种由蒸发冷却冷水机组作为全年主导冷源, 并结合乙二醇自由冷技术的数据中心用新型蒸发冷却空调系统, 充分利用室外环境干空气能及冬季自然冷源, 实现干燥地区数据中心全年完全自然冷却。本研究的目的在于, 介绍新系统的工作原理, 分析系统运行中蒸发冷却冷水机组运行参数以及新型蒸发冷却空调输配系统在数据中心运行过程中参数变化规律, 并讨论其节能性, 为数据中心冷却工作提供新思路。以新系统实际应用工程——乌鲁木齐某数据中心(冷负荷为 2760kW)为研究对象, 选取最热月的典型日, 通过对系统进行逐时运行参数的实际测试, 得出空调系统各换热环节热量传递过程的温度、热量变化规律。在乌鲁木齐夏季最热时, 蒸发冷却冷水机组全天出水温度范围在 13.1~16.9℃, 平均值为 14.9℃, 新型蒸发冷却空调系统 COP 值为 6.65kW/kW, 相比传统机房制冷系统节能率超过 60%。

**【关键词】** 数据中心; 自然冷却; 蒸发冷却冷水机组; 蒸发冷却空调输配系统

中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Test and Analysis of New Evaporative Cooling Air Conditioning System in Data Center

Tian Zhenwu Huang Xiang Guo Zhicheng Yan Jincheng Liu Zhenyu

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048)

**【Abstract】** For data center for uninterrupted cooling air conditioning system, the characteristics of high energy consumption of the operation, put forward a kind of the evaporative cooling water chillers as cold source and throughout the year and combined with ethylene glycol free cold technology data center for new evaporative cooling air conditioning system, can make full use of the dry air outdoor environment and natural cold source in winter, dry areas data center for natural cooling completely. The purpose of this study is to introduce the working principle of the new system, analyze the operating parameters of the evaporative cooling chiller in the system operation and the variation rules of the parameters in the data center operation of the new evaporative cooling air conditioning transmission and distribution system, and discuss its energy conservation, so as to provide a new idea for the data center cooling work. Taking a data center in urumqi, a practical application project of the new system (the cooling load is 2760kW), as the research object, the typical day of the hottest month is selected, and the temperature and heat change rules of heat transfer in each heat exchange link of the air-conditioning system are obtained through the practical test of the system's time-by time running parameters. In the hottest summer in urumqi, the all-day water outlet temperature of the evaporative cooling chiller ranges from 13.1℃ to 16.9℃, with an average value of 14.9℃. The COP value of the new evaporative cooling air-conditioning system is

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目课题(编号: 2016YFC0700404)

作者简介: 田振武(1994.07-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 936391028@qq.com

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

收稿日期: 2019-06-24

6.65kW/kW, and the energy saving rate is more than 60% compared with the traditional machine room cooling system.

**【Keywords】** The data center; Natural cooling; Evaporative cooling chiller; Evaporative cooling air conditioning distribution system

### 0 引言

数据中心空调系统能耗约占数据中心总能耗的 40%左右, 是数据中心降低 PUE 的重点环节, 而自然冷源利用率低是高能耗的根本原因<sup>[1,2]</sup>。充分利用自然冷源, 开发节能高效的空调设备成为降低数据中心冷却系统能耗的趋势。

黄翔、强天伟等首次提出蒸发冷却空气—水空调系统的概念及控制方案, 用蒸发冷却冷水机组制取冷水的方法消除室内显热负荷<sup>[3]</sup>。谢晓云、江亿等建立了间接蒸发冷却冷水机组的数学模型, 测试了机组的性能, 论证了间接蒸发冷却冷水机组在我国西北地区的可行性<sup>[4]</sup>。孙铁柱、白延斌等对蒸发冷却冷水机组关键影响参数进行研究, 提出了机组出水温度的预测方法<sup>[5,6]</sup>。Clidaras J 等将海水作为该机房空调系统的冷源, 实现了完全自然冷却, 但初投资较高, 运维管理复杂<sup>[7]</sup>。夏春华等设计了数据中心空调系统用湖水直接供冷系统, 采用传统集中式冷水空调系统作为备份, 水系统供回水温设计为 15℃/20℃, 数据中心空调系统整体能效比很高<sup>[8]</sup>。

数据中心高显热、需要全年供冷等特点拓展了间接蒸发冷却技术的应用范围, 而蒸发冷却设备合理地与空调输配系统结合将给数据中心带来巨大的节能潜力。本研究结合理论基础对新型蒸发冷却空调系统进行实际运行测试, 并分析了系统的实际运行节能性, 为数据中心用蒸发冷却相关工程提供参考。

### 1 系统工作原理

数据中心机房用新型蒸发冷却空调系统由蒸发冷却与乙二醇自由冷技术耦合而成, 工作原理如图 1 所示。包括以纯水为介质的一次循环和以乙二醇溶液为介质的二次循环, 空调末端采用显热末端精密空调和蒸发冷却新风机组相并联的形式。春夏秋季工况, 关闭 B 阀、F 阀, 开启 A 阀、E 阀, 调节 C 阀、D 阀, 一次循环将间接蒸发冷却冷水机组制取的冷水送至板式换热器冷却二次循环管路的介质; 机房显热末端精密空调回水一部分进入间接

蒸发冷却冷水机组的表冷器来预冷机组进风, 之后与另一部分末端回水混合再进入板式换热器。夏季极端工况, 工作流程与春夏秋冬工况相似, 只将机房空调末端变成蒸发冷却新风机组。冬季工况, 关闭 A 阀、C 阀、F 阀, 开启 B 阀、D 阀、E 阀, 显热末端精密空调回水进入间接蒸发冷却冷水机组的表冷器之后, 直接回到机房空调末端。通过三种主要运行模式之间的切换, 实现了干燥地区数据中心机房全年完全自然冷却。

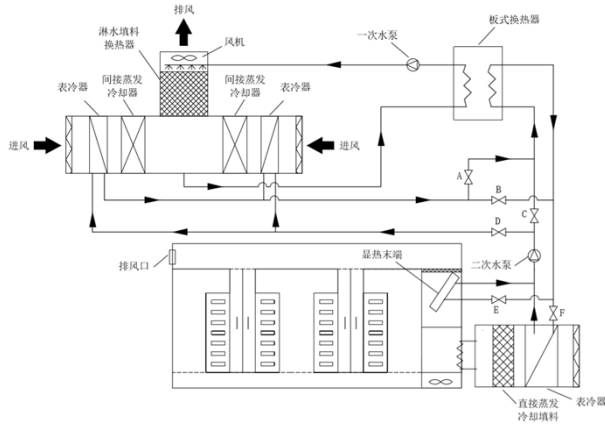


图 1 数据中心机房用新型蒸发冷却空调系统

Fig.1 New evaporative cooling air conditioning system for data center room

### 2 理论基础

对于间接蒸发冷却冷水机组来说, 相关研究通常用露点效率来表征间接蒸发冷却段性能, 露点效率是以干球温度为基础的温降效率, 可计算间接段处理空气的干球温度。本研究认为设立间接段的目的是将一次空气等湿降温, 使一次空气进入淋水填料段之前降低其湿球温度。间接段出风(即淋水填料段进风)湿球温度是淋水填料段出水温度的关键因素<sup>[9]</sup>。因此, 间接段亚湿球效率以湿球温度为基础来反映间接段温降效果, 是反映间接蒸发冷却冷水机组间接段性能的评价指标。

该新型蒸发冷却空调系统的间接蒸发冷却冷水机组, 制取冷水的过程如图 2 所示, 室外新风状态点 O 首先经过表冷器、间接蒸发冷却器两级间

接段等湿降温到达 C 状态点, 被冷却的空气随后进入淋水填料换热器与机组回水热湿交换, 机组回水由 H 点被冷却到 G 点, 淋水填料换热器中的空气最终到达 E 状态点被排出。此新型间接蒸发冷却冷水机组采用内冷式、外冷式复合间接蒸发冷却技术预冷进风, 在进入淋水填料换热器之前得到湿球温度较低的空气, 这使冷水机组出水温度低于环境湿球温度, 并且集成了乙二醇自由冷技术, 使得在机组在冬季工况下仍可稳定工作。

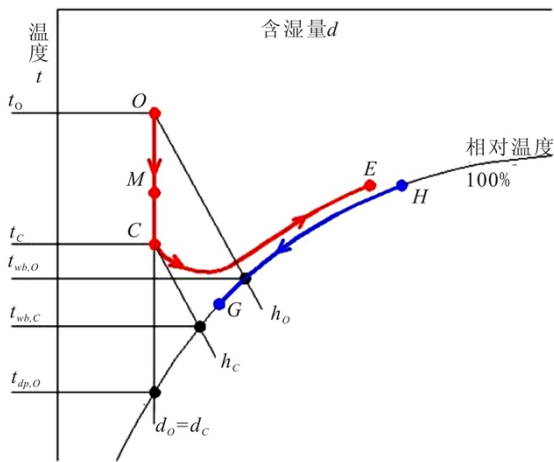


图 2 间接蒸发冷却冷水机组工作过程

Fig.2 Working process of indirect evaporative cooling chiller

间接蒸发冷却冷水机组的间接段亚湿球效率:

$$n_1 = \frac{t_{wb,o} - t_{wb,c}}{t_{wb,o} - t_{dp,o}} \times 100\% \quad (1)$$

淋水填料水侧效率:

$$n_2 = \frac{t_{wb,o} - t_g}{t_{wb,o} - t_{wb,c}} \times 100\% \quad (2)$$

间接蒸发冷却冷水机组整机效率:

$$n = \frac{t_{db,o} - t_g}{t_{db,o} - t_{wb,o}} \times 100\% \quad (3)$$

蒸发冷却冷水机组制冷量:

$$Q = CM(t_h - t_g) \quad (4)$$

式中:  $N_1$  为蒸发冷却冷水机组间接段亚湿球效率, %;  $N_2$  为蒸发冷却冷水机组淋水填料水侧效率, %;  $t_{db,o}$  为环境空气干球温度, °C;  $t_{wb,o}$  为环境空气湿球温度, °C;  $t_{wb,c}$  为间接段后出风湿球温度, °C;  $t_{dp,o}$  为环境空气露点温度, °C;  $t_g$  为蒸发冷却冷水机组出水温度, °C;  $t_h$  为蒸发冷却冷水机组回

水温度, °C;  $C$  为水的定压比热容, kJ/(kg·K);  $M$  为蒸发冷却冷水机组循环水质量流量, kg/s。

### 3 测试系统

#### 3.1 系统概况

本蒸发冷却空调系统应用于新疆乌鲁木齐开发区某数据中心, 本研究针对项目一期工程, 总冷负荷为 2767kW。系统采用 16 台复合乙二醇自然冷却的间接—直接蒸发冷却冷水机组为全年主导冷源 (N+3 冗余), 系统共设计 44 台外冷式蒸发冷却新风机组作为备份。项目于 2018 年 5 月逐步投入使用, 数据中心空调系统全天 24 小时不间断运行。乌鲁木齐属于典型温带大陆性干燥气候, 图 3、图 4 为全年、典型日逐时室外干球温度、湿球温度, 并利用 Dest 模拟软件得到该数据中心 100% 使用率状态下的冷负荷特性。

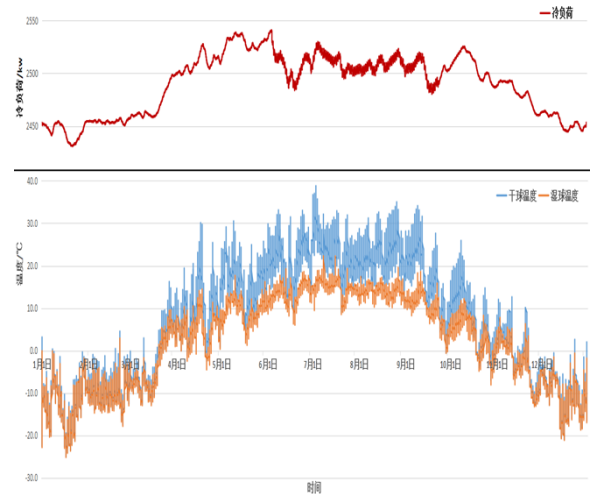


图 3 室外环境逐时干湿球温度及冷负荷变化 (乌鲁木齐全年)

Fig.3 Hourly variation of dry and wet bulb temperature and cooling load in outdoor environment (annual change in Urumqi)

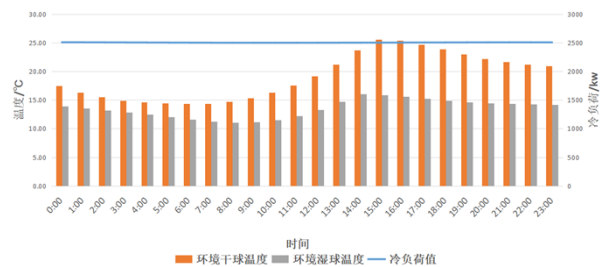


图 4 室外环境逐时干湿球温度及冷负荷变化 (乌鲁木齐典型日)

Fig.4 Hourly variation of dry and wet bulb temperature

and cooling load in outdoor environment  
(typical day in Urumqi)

建筑冷负荷的模拟结果显示,数据中心机房需全年供冷,全年最大冷负荷值为 2541kW,最小冷负荷为 2431kW,表明数据中心机房冷负荷受全年季节变化影响不大,冷负荷在典型日内几乎没有变化,机房主要产热量是服务器发热量。

3.2 数据采集

本次测试目的是监测系统夏季运行参数并进行分析。本研究的测量值为工程测量,测量值以满足系统运行需要为目的,对所能反映系统实际运行状态的关键部位进行测点布置,包括室外环境(测点 1)、蒸发冷却冷水机组间接段后(测点 2)、蒸发冷却冷水机组出水口(测点 3)、板换一次水系统供回水接口(测点 4、5)、板换二次水系统供回水接口(测点 6、7)等。各测点具体测试仪器以及测量量如下:

测点 1: 测量室外环境大气压、温湿度。大气压力采用多功能测量仪(testo480)测量,压力测量范围 700~1100hPa; 温度、相对湿度采用温湿度记录仪(testo/174H)测量,温度测量范围 -20~+70℃,湿度测量范围 0~100%。

测点 2: 测量蒸发冷却冷水机组间接段后空气温湿度、风速。温度、相对湿度采用温湿度记录仪(testo/174H)测量,温度测量范围 -20~+70℃,湿度测量范围 0~100%; 风速采用叶轮风速测量仪(testo410-1)测量,测量范围 0.4~20m/s。

测点 3: 测量蒸发冷却冷水机组出水温度,出水温度采用水温电子传感器测量,测量范围 -50~110℃。

测点 4—测点 7: 测量板换一次、二次水系统供回水温度,水温采用水温电子传感器测量,测量范围 -50~110℃。

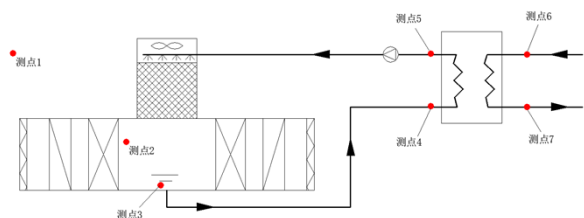


图 5 系统测试测点分布

Fig.5 Distribution of measurement points of system test

4 数据测试结果与分析

4.1 冷水机组

蒸发冷却冷水机组性能随气象条件变化的过程中(特别是夏季工况)能否满足系统的供冷需求是测试这一新型制冷系统的目的。本研究对夏季典型日(2018年8月10日),蒸发冷却冷水机组全天出水温度随室外环境参数(干球温度、湿球温度、露点温度)变化的影响进行测试,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,蒸发冷却冷水机组全天出水温度范围在 13.1~16.9℃,平均值为 14.9℃,出水温度达到亚湿球温度。蒸发冷却冷水机组全天整机效率范围在 93%~148%,平均值为 121%。在 10:00—22:00,且可以用冷幅深来描述其出水温度较稳定<sup>[10]</sup>,但是 0:00—10:00,出水温度波动较大,甚至高于环境湿球温度。观察全天环境干湿球温差的变化,0:00—10:00 时间段环境平均干湿球温差为 9.5℃,10:00—22:00 时间段环境平均干湿球温差为 13.4℃,因此干空气能品味不同,影响了蒸发冷却冷水机组出水温度性能。进而可得出,只用冷幅深、冷幅高等单一的指标来评价蒸发冷却冷水机组性能不确切。

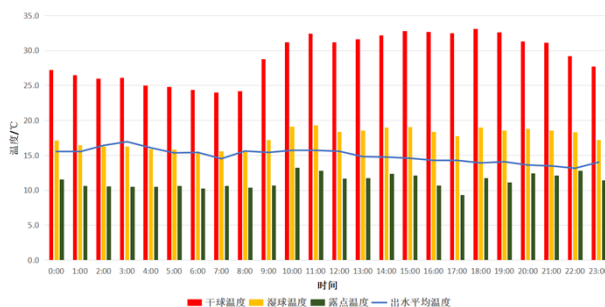


图 6 蒸发冷却冷水机组出水温度随环境参数变化趋势

Fig.6 Variation trend of outlet water temperature of evaporative cooling chiller with environmental parameters

4.2 输配系统

蒸发冷却冷水机组制取的冷水要经过输配系统送入机房空调末端才能带走机房的热量,如图 7 所示,本研究对新型蒸发冷却空调系统的制冷量及一、二次水系统供回水温度进行了全天测试记录。

从图 7 中可看出,二次水系统进出水温度变化与一次水系统进出水温度的变化规律一致,一次水系统进出水平均温度差为 5.9℃,二次水系统进出水平均温度差为 5.5℃,板换温升(即一次水进水温度与二次水出水温度之差)平均值为 1.3℃。一

次水系统的水流量平均值为  $99.5\text{m}^3/\text{h}$ , 系统制冷量平均值为  $678\text{kW}$ 。从 13:00 开始至 18:00, 系统制冷量出现低谷, 而一次、二次水系统进出水温度均随之下降, 这是因为系统在工程管理方面的原因, 一次水系统流量出现了一段时间的下降所致。从 8:00—13:00, 随着当地室外温度逐步升高, 增大水系统流量, 系统制冷量呈上升趋势。这种在固定蒸发冷却冷水机组台数的前提下升高系统流量带来的后果是打破蒸发冷却冷水机组淋水填料段最佳风水比参数, 使得其制取的冷水温度上升。因此在系统今后的运行控制过程中, 还应协调系统流量与冷水机组出水温度的关系, 使系统制冷量达到最优。

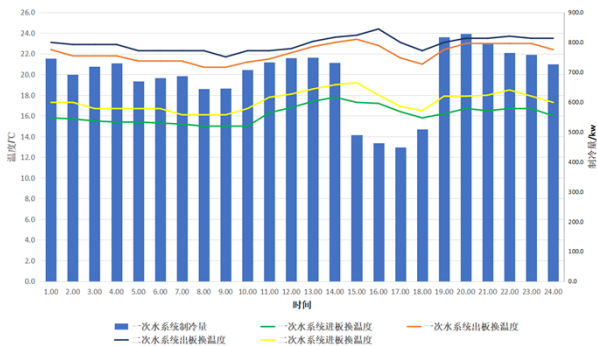


图 7 新型蒸发冷却空调水系统参数全天变化情况

Fig.7 Variation of water system parameters of new evaporative cooling air conditioning throughout the day

### 4.3 系统性能评价

#### 4.3.1 空调系统制冷性能系数

为了评价新型蒸发冷却空调系统的性能, 对整个空调系统的性能参数进行检测。在近设计工况下 (环境干球温度  $33.6^\circ\text{C}$ , 相对湿度 23.1%, 环境湿球温度  $18.2^\circ\text{C}$ ), 得到本空调系统制冷量与系统消耗总功率, 并计算出空调系统制冷性能系数结果如表 1 所示。

表 1 新型蒸发冷却空调系统性能参数实测值

Table 1 Measured performance parameters of the new evaporative cooling air conditioning system

性能指标	耗电功率 (kW)		制冷量 (kW)	COP (kW/kW)
	冷源侧	输配侧		
实测值	44.6	31.8	724.1	6.65

对于此新型蒸发冷却空调系统性能, 本研究用空调系统制冷性能系数 (COP, coefficient of refrigeration performance) 来评价<sup>[11]</sup>, COP 是衡量冷却系统冷却效率的指标, 即整个空调系统提供的

冷量与其消耗的能量之比。新型蒸发冷却空调系统 COP 值为  $6.65\text{kW}/\text{kW}$ , 节能效果显著。

#### 4.3.2 新型蒸发冷却空调系统与传统空调系统的对比分析

以本研究项目一期工程为例, 选取目前数据中心机房两种常用空调系统 (自然风冷螺杆空调系统、水冷磁悬浮离心机空调系统) 与本蒸发冷却空调系统作对比, 统计系统全年不同运行状态下所消耗的电费、水费。

表 2 新型蒸发冷却空调系统与传统空调系统全年运行费用对比

Table 2 Comparison of annual operating costs between the new evaporative cooling air-conditioning system and the traditional air-conditioning system

制冷方式	自然风冷螺杆机空调系统	水冷磁悬浮离心机空调系统	新型蒸发冷却空调系统
制冷需求 (kW)	2767	2767	2767
初投资 (万元)	1433	1532	1440
空调冷源额定运行功率 (kW)	1041	687	350
空调全年平均功率 (kW)	752	635	256
年耗电量 ( $\times 10^4\text{kWh}$ )	659	556	225
全年电费 (万元)	338	285	115
全年耗水量 ( $\text{m}^3$ )	0	54115	22140
全年水费 (万元)	0	20	8
全年运行费用 (万元)	338	318	123

注: 电费按  $0.513$  元/(kWh) 计算。

由表 2 可知, 新型蒸发冷却空调系统与传统机房空调系统初投资相当, 但其全年运行费用比自然风冷螺杆空调系统和水冷磁悬浮离心机空调系统分别低 215 万元、195 万元, 节能率为 63.6%、61.3%。

## 5 结论

(1) 以集成乙二醇自由冷技术的蒸发冷却冷水机组为全年主导冷源的数据中心机房新型蒸发冷却空调系统, 实现了干燥地区数据中心完全自然冷却, 为数据中心节能提供新思路。

(2) 对乌鲁木齐夏季典型气象日进行全天逐时测试, 得出蒸发冷却冷水机组全天出水温度范围

在 13.1~16.9℃, 平均值为 14.9℃, 蒸发冷却冷水机组性能较稳定。在室外环境变化对冷水机组产生影响的时候, 可以通过系统水流量调节制冷量。

(3) 实测近设计工况下, 新型蒸发冷却空调输配系统空调系统制冷性能系数 (COP) 为 6.65kW/kW, 相比传统机房制冷系统节能率超过 60%。

#### 参考文献:

- [1] 张海南, 邵双全, 田长青. 数据中心自然冷却技术研究进展[R]. 制冷学报, 2016, 37(4): 46-57.
- [2] 钱晓栋, 李震. 数据中心空调系统节能研究[J]. 暖通空调, 2012, 42(3): 91-96.
- [3] 黄翔, 强天伟, 武俊梅, 等. 蒸发冷却空调系统自动控制方案的探讨[J]. 暖通空调, 2003, 33(4): 109-112.
- [4] 谢晓云, 江亿, 刘拴强, 等. 间接蒸发冷水机组设计开发及性能分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(7): 66-71.
- [5] 孙铁柱, 黄翔, 文力. 蒸发冷却与机械制冷复合高温冷水机组水系统配比问题分析[J]. 流体机械, 2011, 39(5): 81-84.
- [6] 白延斌, 黄翔, 孙铁柱, 等. 气水比对蒸发冷却高温冷水机组出水温度的影响[J]. 流体机械, 2011, 39(10): 83-86.
- [7] Clidas J, Stiver D W, Hamburg W. Water-based data center: 7525207[P]. 2009-04-28.
- [8] 牛晓然, 夏春华, 孙国林, 等. 千岛湖某数据中心采用湖水冷却技术的空调系统设计[J]. 暖通空调, 2016, 46(10): 14-17.
- [9] 耿志超. 蒸发冷却冷水机组性能测试与分析[C]. 第七届全国建筑环境与能源应用技术交流大会文集, 2017: 6.
- [10] 黄翔, 孙铁柱, 白延斌, 等. 间接—直接蒸发冷却复合冷水机组出水温度特性试验研究[J]. 流体机械, 2012, 40(7): 52-55.
- [11] 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, 2017.