

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-632-07

相变辅助蒸发冷却机房 空调运行参数影响实验研究

阳章琴 袁嘉利 张祖敬

(贵州大学土木工程学院 贵阳 550025)

【摘 要】 相变辅助蒸发冷却技术通过相变材料蓄存夜间低温冷量, 在白天高温时段与蒸发冷却协同作用, 可延长自然冷源利用时长, 降低空调系统对机械制冷的依赖, 显著削减数据中心制冷能耗。为了优化相变辅助蒸发冷却技术在机房降温中对出口温湿度调控的结果, 通过实验研究了进口温度、进口相对湿度、喷淋流量和风速等操作参数对系统性能的影响。结果表明: 出口温度与进口温湿度、风速呈正相关, 与喷淋流量呈负相关, 出口湿度与进口温湿度、喷淋流量呈正相关, 与风速呈负相关; 进口温度为 35℃ 时, 出口湿度接近 80% 控制目标; 进口湿度增加 20%, 出口湿度升高 16%, 进口湿度变化对出口湿度影响较大; 喷淋流量增加 0.08L/min, 出口温度降低 1.8℃ 且湿度上升 8%, 风速增加 0.8 m/s, 出口温度升高 3.0℃ 且湿度下降 7%, 需控制喷淋流量和风速以避免出口湿度或温度超标。这些发现对系统的优化设计和运行具有重要指导意义, 通过界定相变与蒸发冷却的协同调控区间, 可提升系统稳定性, 有效解决湿润地区数据中心蒸发冷却过湿问题, 助力实现更高效、更环保的数据中心冷却方案。

【关键词】 蒸发冷却; 相变储能; 数据中心; 运行参数; 温差

中图分类号 TU831.3 文献标志码 A

Experimental Study on the Influence of Air Conditioning Operating Parameters in Data Center Air Conditioners with Phase Change Assisted Evaporative Cooling

Yang Zhangqin Yuan Jiali Zhang Zujing

(The School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, 550025)

【Abstract】 Phase change-assisted evaporative cooling technology can extend the utilization time of natural cold sources, reduce the dependence of air conditioning systems on mechanical cooling, and significantly reduce the energy consumption of data center cooling. In order to optimize the results of phase change-assisted evaporative cooling technology on the outlet temperature and humidity control in the cooling of the computer room, the effects of inlet temperature, inlet relative humidity, spray flow rate and wind speed on the system performance were studied through experiments. The results showed that the outlet temperature was positively correlated with the inlet temperature, humidity and wind speed, and negatively correlated with the spray flow, and the outlet humidity was positively correlated with the inlet temperature, humidity and spray flow, and negatively correlated with the wind speed. When the inlet temperature is 35℃, the outlet humidity is close to the control target of 80%. The inlet humidity increased by 20%, the outlet humidity increased by 16%, and the change of inlet humidity had a great impact on the outlet humidity.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52168013); 贵州省研究生科研基金项目 (2024YJSKYJJ114)

作者简介: 阳章琴 (2001.01-), 女, 硕士研究生, E-mail: 2797600145@qq.com

通讯作者: 张祖敬 (1987.01-), 男, 博士研究生, 副教授, E-mail: zjzhang3@gzu.edu.cn

收稿日期: 2025-07-01

The spray flow rate increased by 0.08L/min, the outlet temperature decreased by 1.8℃ and the humidity increased by 8%, the wind speed increased by 0.8 m/s, and the outlet temperature increased by 3.0℃ and the humidity decreased by 7%. By defining the collaborative regulation interval of phase transition and evaporative cooling, the system stability can be improved, the problem of evaporative cooling over-humidity in data centers in humid areas can be effectively solved, and a more efficient and environmentally friendly data center cooling scheme can be realized.

【Keywords】 Evaporative cooling; Phase change energy storage; Data center; Operational parameters; Temperature difference

0 引言

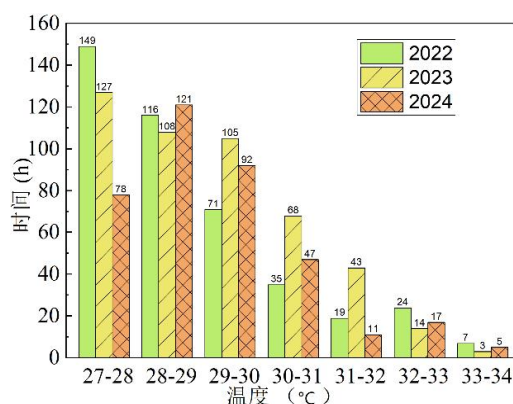
小型数据机房、智算中心等需要消耗大量能源确保服务器和硬件设备的冷却^[1],以确保系统的高效运行和数据的安全存储,伴随机房芯片的不断优化,机房内的温度要求范围逐渐扩大,蒸发冷却设备在数据中心机房空调系统中将扮演重要的角色^[2]。相关实践表明,蒸发冷却技术应用于数据中心,可降低其空调对电力需求,提高在同等电力容量下IT机柜的安装数量,初投资可节省1/2、维护费用节省2/3、运行费用节省3/4^[3]。

蒸发冷却技术是一种节能和可持续发展的制冷技术^[4],但是数据中心需要全年供冷且环境要求严格,单独依靠蒸发冷却无法满足全年供冷需求^[5],一般需结合机械制冷,且该技术存在过湿问题。蒸发冷却^[6]与相变储能^[7]耦合系统作为先进高效的环境控制技术,已在多领域广泛应用。它结合蒸发冷却高效降温,相变热能存储能力,通过相变材料的融化与凝固过程有序储存与释放冷量,取代传统机械制冷,助力湿润温和地区数据中心利用自然冷源实现全年免费制冷;且相变材料通过吸收空气显热实现被动降温,显著降低蒸发段制冷量,以减少蒸发过程所需加湿量,可以有效克服蒸发冷却过湿问题,具有成本效益高、安装维护简便等优势^[8]。但该系统性能受多种操作参数影响,如进口温度、进口相对湿度、喷淋流量和风速等。其中,高温环境下系统需更多能量散热^[9];高湿度会降低水分蒸发速率,影响冷却效率^[10];喷淋流量影响冷却介质与空气接触效果^[11];风速过高会减少水分停留时间^[12],削弱冷却增湿作用。

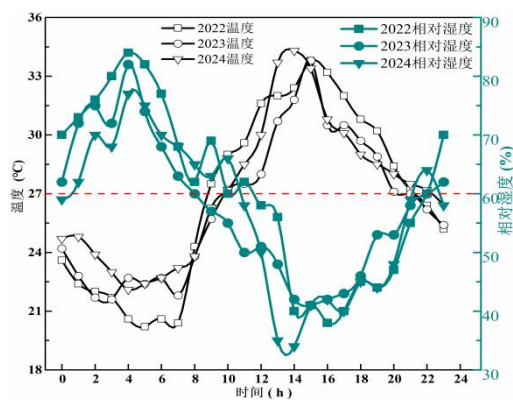
因此,深入研究这些操作参数对系统性能的影响,对实现系统优化设计与运行意义重大,既能提升能效、降低能耗,保障环境舒适度与设备稳定运行^[13],又契合全球节能减排与可持续发展需求,助力绿色发展。

1 方法

1.1 贵安地区数据中心现状



(a) 超27℃气温时长统计



(b) 最高气温日温湿度变化

图1 贵安新区高温气象参数统计

Fig.1 Statistics of high-temperature meteorological parameters in Gui'an New Area

作为“东数西算”工程规划的国家数据中心集群之一,贵安新区数据中心集群依托当地气候凉爽、能源丰富、地质条件稳定等生态优势,已引进华为等26个数据(智算)中心。贵阳在夏季平均气温仅23.4℃^[14]、平均相对湿度约80%^[15],昼夜温差较大,整体属于亚热带湿润温和型气候^[16]。近三年,贵阳地区室外气温超过27℃的年均累计时长在500h以内,如图1(a)所示。值得注意的是:

贵阳极端高温日的平均气温略低于 27°C ，气温为 27°C 时相对湿度在 $55\%\sim 65\%$ 之间；气温超出与未超出 27°C 的时段几乎相等，平均气温分别为 30.5°C 与 22.6°C ，如图 1 (b) 所示。可见，如何储存夜间低温新风的冷量并用于冷却白天的高温新风，是贵安地区数据中心避免蒸发冷却过湿现象，实现低能耗持续性免费制冷的技术途径之一。

1.2 相变辅助蒸发冷却机房空调原理

相变材料蓄冷凝固与吸热融化的物理现象，为储存夜间低温新风冷量并用于冷却白天高温新风提供了有效途径^[17]。为此，本研究拟发展一种风墙式数据中心相变蓄冷耦合直接蒸发冷却空调系统（以下简称“蓄冷空调”），工作原理如图 2 所示。夜间运行时，室外低温新风经风机引入后，先与多孔相变板换热，促使其放热蓄冷；空气温度升高后，经直接蒸发冷却降温，再对无孔相变板进行蓄冷（相变板放热凝固），最终将温度略高于室外新风且满足要求的空气送入机房。白天运行时，室外高温新风经风机引入后，先经多孔相变板预冷，再经直接蒸发冷却降温，随后由无孔相变板进一步降温（相变板同步吸热融化），最终将符合数据中心送风标准的空气送入机房。

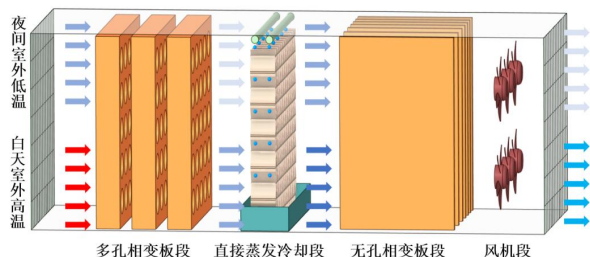


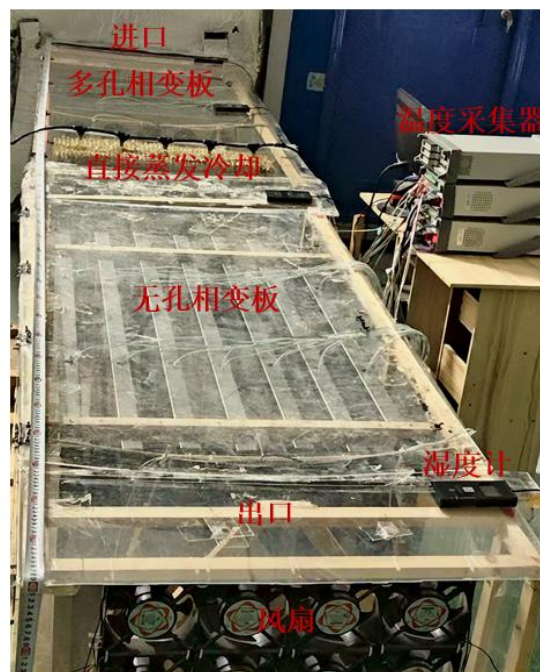
图2 相变辅助蒸发冷却机房空调原理

Fig.2 The principle of phase change assisted evaporative cooling for computer rooms

1.3 蓄冷空调测试样机参数

蓄冷空调测试样机是由透明丙烯酸材质构成的一个长 4m ，宽 0.65m ，高 0.65m ，厚 5mm 的通风通道，通风通道由直接蒸发冷却段和相变段组成。喷淋段设置 5 个材质为镀镍铜，孔径为 0.35mm 的喷头；相变板段设有 3 块尺寸为长 0.64m ，宽 0.6m ，厚 0.2m 的多孔相变板和 7 块尺寸为长 1.15m ，宽 0.59m ，厚 0.03m 的无孔相变板，相变板均由 1mm 厚不锈钢板制成；直接蒸发冷却段设置有多孔相变板与无孔相变板之间，如图 3 (a)

所示。板内装有石蜡相变材料，如图 3 (b) 所示，石蜡物性参数如表 1 所示。



(a) 蓄冷空调测试样机



(b) 相变材料

图3 蓄冷空调测试样机及相变材料

Fig.3 Test prototype of cold storage air conditioning and phase change material

Fig.5 Experimental operation platform

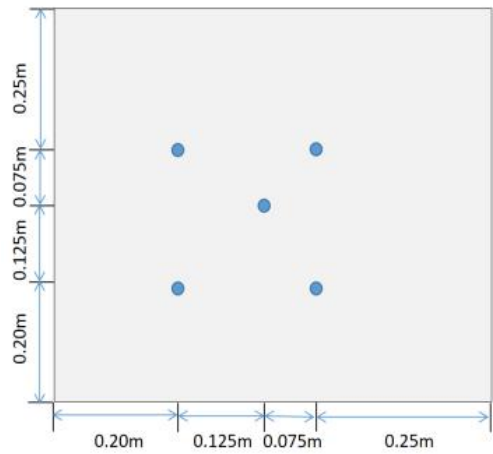


图 6 空气温湿度测点分布横截面

Fig.6 Cross-section of the distribution of air temperature and humidity measurement points

表 2 设备主要设计参数

Table 2 Main design parameters of the equipment

设备名称	设备类型	不确定度	范围	备注
温度采集器	MIK-6000F	读数值 $\times 0.5\% + 1^\circ\text{C}$	$-200\sim 800^\circ\text{C}$	工作环境: $20\sim 90^\circ\text{C}$
热电偶	Pt1000	$\pm 0.01^\circ\text{C}$	$-50\sim 200^\circ\text{C}$	线长: 3m
转子流量计	DFG-6T	$\pm 4\%$	$40\sim 400\text{mL/min}$	螺纹接口: M18 $\times$ 1.5G1/4 “1/4” BSP
水泵	隔膜泵	——	60W	理论扬程: 50m, 吸程高度: $\leq 1.5\text{m}$
风扇	SF8025ATa	$\pm 0.05\text{m}^3/\text{min}$	$2\text{m}^3/\text{min}$	工作环境: $-10\sim 60^\circ\text{C}$
叶轮式风速计	FLUKE-925	满量程 $\pm 2\%$	$0.40\sim 5.00\text{m/s}$	工作环境: $0\sim 50^\circ\text{C}$
加湿器	XH-806C	——	6kg/h	额定电压: 220V, 频率: 50Hz, 功率: 600W
湿度计	ZL-TH10TP	$\pm 3\%$	$0\sim 99\%\text{RH}$	工作环境: $-20\sim 50^\circ\text{C}$

1.5 实验工况设计

本实验采用控制变量的实验分析方法,在控制其他因素不变的情况下,只改变其中一个因素的参数。设置了 4 因素 5 水平的单因素实验设计表,具体实验工况设计如表 3 所示。

表 3 实验工况设计表

Table 3 Experimental working condition design table

编号	进口温 度/ $^\circ\text{C}$	进口相对 湿度/ $\%$	喷淋流量 /(L/min)	进风速度 /(m/s)
1	28	40	0.08	1.6
2	30	40	0.08	1.6
3	32	40	0.08	1.6
4	34	40	0.08	1.6
5	35	40	0.08	1.6
6	32	35	0.08	1.6

续表 3 实验工况设计表

Table 3 Experimental working condition design table

编号	进口温 度/ $^\circ\text{C}$	进口相对 湿度/ $\%$	喷淋流量 /(L/min)	进风速度 /(m/s)
7	32	45	0.08	1.6
8	32	50	0.08	1.6
9	32	55	0.08	1.6
10	32	40	0.06	1.6
11	32	40	0.1	1.6
12	32	40	0.12	1.6
13	32	40	0.14	1.6
14	32	40	0.08	1.2
15	32	40	0.08	1.4
16	32	40	0.08	1.8
17	32	40	0.08	2

2 结果与分析

2.1 进口温度对系统性能的影响

在进风相对湿度为40%、风速为1.6m/s、喷淋流量为0.08L/min,改变进风温度的条件下进行2小时实验。

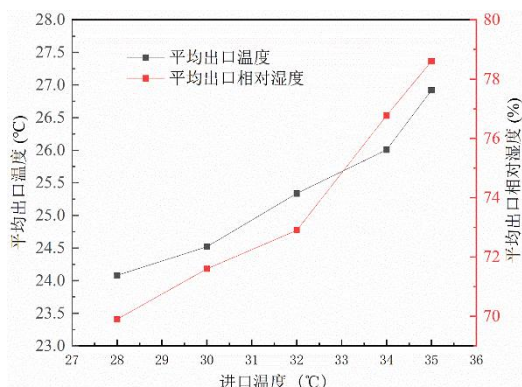


图7 不同进口温度下系统出口平均温湿度

Fig.7 The average outlet temperature and humidity under different inlet temperatures

从图7可以看出,随着进口温度的增加,蒸发冷却与相变储能耦合系统的平均出口温度和平均出口相对湿度均呈现出上升的趋势。具体分析如下:随着进口温度从28℃增加到35℃,平均出口温度从约24℃上升到约27.5℃,这表明随着进口温度的升高,出口温度也随之升高,但上升幅度相对较小,显示出一定的降温效果。随着进口温度从27℃增加到35℃,平均出口相对湿度从约70%上升到约78%,这表明随着进口温度的升高,出口相对湿度也随之增加,显示出系统在高温条件下更有效地增加了空气中的水分含量。在进口温度为35℃时,出口相对湿度达到约78%,接近80%的控制目标。这表明在高温条件下,系统能够较好地控制相对湿度,满足数据中心的送风要求。

2.2 进口相对湿度对系统性能的影响

在进风温度为32℃、风速为1.6m/s、喷淋流量为0.08L/min,改变进风相对湿度的条件下进行2小时实验。

从图8可以看出,随着进口相对湿度的增加,蒸发冷却与相变储能耦合系统的平均出口温度和平均出口相对湿度都呈现出增加的趋势。具体分析如下:随着进口相对湿度从35%增加到55%,平均出口温度从约24.8℃上升到约26.5℃,这表明随着进口相对湿度的增加,出口温度也随之升高,但上

升幅度相对较小,显示出一定的温度控制效果。随着进口相对湿度从35%增加到55%,平均出口相对湿度从约72%上升到约88%,这表明随着进口相对湿度的增加,出口相对湿度显著增加。随着进口相对湿度的增加,平均出口温度呈现出增大的趋势,这是因为随着相对湿度的增加,湿膜表面与空气中的水蒸气压差减小,蒸发速率降低,水分蒸发需从空气中吸收的热量降低,表明随着进口相对湿度的增加会降低系统的冷却效率。

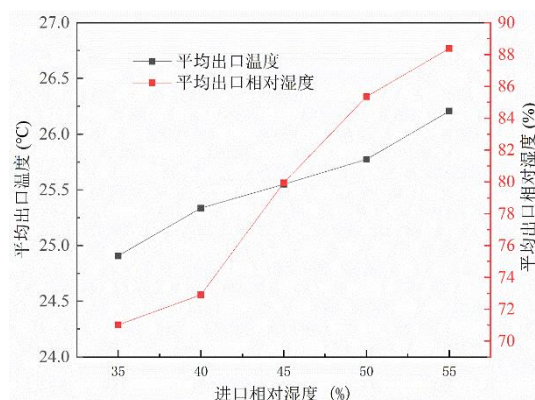


图8 不同进口相对湿度下系统出口平均温湿度

Fig.8 The average outlet temperature and humidity under different inlet relative humidity levels

2.3 喷淋流量对系统性能的影响

在进风温度为32℃、风速为1.6m/s、进风相对湿度为40%,改变喷淋流量的条件下进行2小时实验。

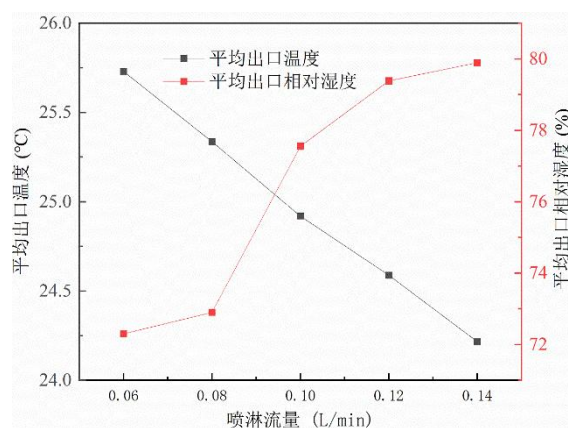


图9 不同喷淋流量下系统出口平均温湿度

Fig.9 The average outlet temperature and humidity under different spray flow rates

从图9可以看出,随着喷淋流量的增加,蒸发冷却与相变储能耦合系统的平均出口温度呈现出

下降的趋势,而平均出口相对湿度呈现出上升的趋势。具体分析如下:随着喷淋流量从 0.06L/min 增加到 0.14L/min,平均出口温度从约 25.8℃ 下降到约 24.0℃,这表明随着喷淋流量的增加,出口温度显著降低,显示出系统在增加流量时具有较好的降温效果。随着喷淋流量从 0.06L/min 增加到 0.14L/min,平均出口相对湿度从约 72% 上升到约 80%。随着喷淋流量的增加,平均出口温度呈现出减小的趋势,这可能是由于喷淋流量增大,加速了湿膜的水分蒸发,从而增强了热传导和对流换热,使得降温效果增大,随着喷淋流量的增加,喷淋段水分的蒸发速率增加,导致空气中的水蒸气含量增加,从而使得出口的相对湿度增大。这是因为相对湿度是空气中实际含水量与该温度下空气最大含水量的比值,随着喷淋流量的增加,空气中水分的饱和度增加,从而使得相对湿度增加。

2.4 风速对喷淋系统性能的影响

在进风温度为 32℃、进风相对湿度为 40%、喷淋流量为 0.08L/min,改变风速的条件下进行 2 小时实验。

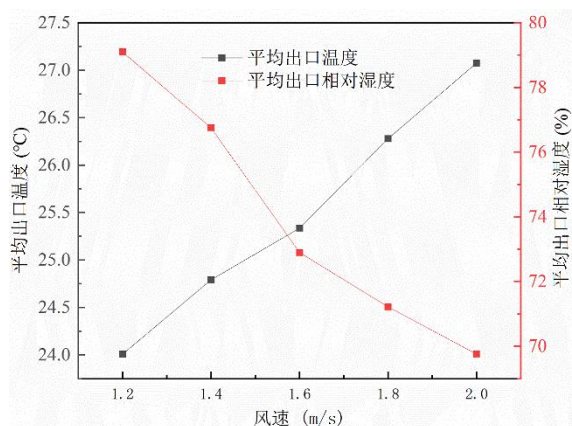


图 10 不同进风速度下系统出口平均温湿度

Fig.10 The average outlet temperature and humidity under different air speeds

从图 10 可以看出,随着风速的增加,蒸发冷却与相变储能耦合系统的出口平均相对湿度逐渐降低,而平均出口温度逐渐升高,显示出系统在不同风速条件下的性能变化。具体分析如下:随着风速从 1.2m/s 增加到 2.0m/s,平均出口温度从约 24.0℃ 上升到约 27.0℃。随着风速从 1.2m/s 增加到 2.0m/s,平均出口相对湿度从约 77% 下降到约 70%。这表明随着风速的增加,出口相对湿度显著降低,

显示出风速增加导致空气与湿膜的接触时间减小,从而减少了湿膜中水分的蒸发,使得相对湿度降低,同时也减弱了系统的降温效果。

3 结论

相变辅助蒸发冷却技术具有延长自然冷源利用时长,降低空调系统对机械制冷的依赖,减少数据中心制冷能耗的优点。为了优化该技术在机房降温中对出口温湿度调控的结果,本实验研究了进口温度、进口相对湿度、喷淋流量和风速四个操作参数对蒸发冷却与相变储能耦合系统性能的影响。实验结果表明,这些参数对系统的降温效果和增湿效果都有显著影响。具体结论如下:

(1) 出口温度随进口温湿度和风速的增大而上升,随喷淋流量的增大而减小;出口湿度随进口温湿度和喷淋流量的增大而上升,随风速的增大而减小。

(2) 进口温度从 28℃ 增至 35℃ 时,系统平均出口温度从约 24℃ 升至约 27.5℃;平均出口相对湿度从约 70% 升至约 78%,当进口温度为 35℃ 时,出口湿度接近 80% 控制目标。

(3) 进口相对湿度从 35% 增加到 55%,平均出口相对湿度从约 72% 上升到约 88%,对系统出口相对湿度结果影响较大。

(4) 喷淋流量从 0.06L/min 增至 0.14L/min 时,系统平均出口温度从约 25.8℃ 降至约 24.0℃,平均出口相对湿度从约 72% 升至约 80%。实际运行中应避免使用较大的喷淋流量,造成出口湿度超标。

(5) 风速从 1.2m/s 增至 2.0m/s 时,系统平均出口温度从约 24.0℃ 升至约 27.0℃,平均出口相对湿度从约 77% 降至约 70%。实际应用中需控制运行风速,避免因风速过大导致出口温度超标。

本实验研究针对蒸发冷却与相变储能耦合系统,这一系统在现代环境控制领域中具有重要的应用价值,尤其是在数据中心、智能建筑和工业设施等对温度和湿度控制要求极高的场合。以上这些发现为系统的优化设计和运行提供了关键指导,通过界定相变与蒸发冷却的协同作用区间,可提升系统稳定性,有效解决湿润地区数据中心蒸发冷却过湿问题,推动实现更高效、更环保的数据中心冷却方案。

(下转第695页)