

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-001-10

翅片管预冷闭式冷却塔的结构设计与性能研究

杨顺淋¹ 黄翔¹ 叶军² 褚俊杰¹ 李潼¹ 杨崇辉³

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;

2. 西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049;

3. 江苏澜天传热科技有限公司 宜兴 214203)

【摘要】 针对智算中心液冷系统一次侧闭式冷却塔在高温高湿环境下存在的性能衰减问题, 研究基于蒸发冷却技术, 提出一种集成翅片管预冷模块的新型闭式冷却塔系统。通过理论建模与实验测试, 探究了翅片管顺流/逆流安装方式、闭塔/开塔冷水预冷模式在不同气候条件下的热工性能及自然冷却潜力。结果表明: 逆流式翅片管布置性能优势显著, 相较于顺流安装, 逆流布置在闭塔冷水预冷模式下湿球温降提升 41.7% ($\Delta T=0.5^{\circ}\text{C}$), 亚湿球效率从 11.47% 增至 20.61%; 在开塔冷水预冷模式下湿球温降提升 46.7% ($\Delta T=0.7^{\circ}\text{C}$), 亚湿球效率从 27.3% 增至 47.06%。冬季工况下翅片管可切换为空气预热装置, 有效抑制盘管冻结风险; 不预冷湿模式在冬季工况下实现了排热能力与能源效率的最佳平衡, 故推荐作为实际运行的首选策略; 夏季工况下翅片管预冷虽提升散热能力但增加能耗, 需依据热负荷和环境湿球温度动态调整运行模式。研究为智算中心提供了兼顾高效散热、防冻安全与节水节能的冷却技术方案。

【关键词】 智算中心; 液冷系统; 蒸发冷却; 翅片管预冷; 闭式冷却塔
中图分类号 TU831 文献标志码 A

Structure Design and Performance Research of Finned Tube Precooling Closed Cooling Tower

Yang Shunlin¹ Huang Xiang¹ Ye Jun² Chu Junjie¹ Li Tong¹ Yang Chonghui²

(1. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049;

3. Jiangsu Lantian Heat Transfer Technology Co., Ltd, Yixing, 214203)

【Abstract】 In view of the performance degradation of the primary side closed cooling tower of the liquid cooling system in the Intelligent Computing Center in high temperature and high humidity environment, a new closed cooling tower system with integrated fin tube precooling module is proposed based on evaporative cooling technology. Through theoretical modeling and experimental testing, the thermal performance and natural cooling potential of finned tube downstream/countercurrent installation mode and closed tower/open tower cold water precooling mode under different climatic conditions were explored. The results show that the performance advantage of the counter flow finned tube arrangement is significant. Compared with the parallel flow installation, the wet bulb temperature drop of the counter flow arrangement in the closed tower cold water precooling mode increases by 41.7% ($\Delta T=0.5^{\circ}\text{C}$), and the sub wet bulb efficiency increases from 11.47% to 20.61%; In the open tower cold water precooling mode, the wet bulb temperature drop increased by 46.7% ($\Delta T=0.7^{\circ}\text{C}$), and the sub wet bulb efficiency increased from 27.3% to 47.06%. In winter, the finned tube can be switched to air preheating device to effectively suppress the freezing risk of the

作者简介: 杨顺淋 (2001.01-), 男, 硕士, E-mail: 278600375@qq.com

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

收稿日期: 2025-06-25

coil; The non pre cooling wet mode achieves the best balance between heat removal capacity and energy efficiency in winter, so it is recommended as the preferred strategy for actual operation; Although fin tube precooling improves heat dissipation capacity but increases energy consumption in summer, the operation mode should be dynamically adjusted according to the heat load and ambient wet bulb temperature. This study provides the intelligent computing center with a cooling technology scheme that takes into account efficient heat dissipation, antifreeze safety and water and energy conservation.

【Keywords】 Intelligent Computing Center; Liquid cooling system; Evaporative cooling; Fin tube precooling; Closed cooling tower

0 引言

随着人工智能与高密度算力需求的爆发式增长,智算中心作为数字化转型的核心基础设施,正面临散热能耗与水资源消耗的双重挑战。传统风冷系统已难以满足高功率密度设备的散热需求,而冷板式液冷技术凭借其高效传热特性(供液温度可放宽至25-50℃)^[1],逐渐成为数据中心节能降碳的关键路径,相关研究已证实其显著优于空气冷却^[2-5]。然而,液冷系统的一次侧冷源选择直接影响其综合能效与可持续性。当前主流方案中,闭式冷却塔因能保障冷却水质纯净、避免结垢腐蚀风险,在电力电子、高端制造等领域备受青睐^[6-9];但其在高温高湿环境下冷却能力不足的缺陷,严重制约了在全年气候多变地区的应用推广。为突破这一瓶颈,提升闭式冷却塔在严苛工况下的性能,进风预冷技术被视为有效手段。

研究表明,通过间接蒸发等方式降低进风湿球温度可显著强化冷却塔的换热能力。田振武^[10]探讨了水侧蒸发冷却技术在数据中心的适用性及应用特点。通过论述数据中心热环境特点及机房空调系统换热过程中的温度关系,分析开式冷却塔、闭式冷却塔、蒸发冷却冷水机组在数据中心的应用实例。黄翔等^[11,12]提出了将喷雾蒸发冷凝技术应用于类闭式冷却塔形式的蒸发式冷凝器上,并在不同工况和不同城市分别对其进行性能研究和适用性分析。何锁盈等^[13]采用MATLAB编写了机械通风闭式冷却塔、直接/间接蒸发预冷进风闭式冷却塔的迭代计算程序,仿真研究了3种冷却塔在典型干热地区(新疆哈密)应用时的冷却性能和水损耗。郭志成^[14]研发一种复合乙二醇自然冷却技术的蒸发冷却冷水机组,并设计了单面进风蒸发冷却冷水机组和双面进风蒸发冷却冷水机组2种技术方案,对比分析了各自的结构特性。Reddy V S K^[15]设计了一种错流间接蒸发式空气冷却器并进行实验研究,

结果表明,较好的具有低湿度和较高温度的入口空气,会使冷却效果和冷却能力增加,入口空气表面流速越低,冷却效果越好,但冷却能力会逐渐下降。徐梦菲^[16]对比分析了喷淋预冷、填料预冷对机械通风空冷塔换热性能的影响,获得了不同工况下的优选干湿联合方案;随后,基于新疆哈密地区气象数据,获得了机械通风干湿联合冷却塔的运行调控方案。

国内外研究人员对于闭式冷却塔的研究主要在于技术原理分析,建立数学模型,对工程设计中冷却塔内的填料热工设计计算,并在我国不同地区应用的可行性和能耗分析进行了研究。目前存在的问题在于,当环境温度很高时,特别是夏季高温时段(如湿球温度30℃以上),闭式冷却塔的冷却效果变差,即使开启换热器管外的喷淋水,由于冷却能力有限,也满足不了冷却负荷需求,进而影响系统主设备的正常运行。基于此,本研究提出并实验研究一种将冷板式液冷系统与集成间接蒸发预冷模块的闭式冷却塔相结合的新型冷却方案,重点探究该预冷闭式塔的传热传质机理、结构设计及其在不同环境条件下的性能优化,旨在为智算中心提供一种兼顾高效散热、水质保障与适应性的低碳节水冷却解决方案。

1 翅片管预冷闭式冷却塔的结构原理

1.1 系统原理

随着高密度服务器在智算中心的广泛应用,其作为数智时代核心算力基础设施面临的散热挑战日益严峻。为应对这一挑战,冷板式液冷技术应运而生,该系统由热源至热汇主要可分为服务器内热源、液冷机柜、二次侧输配系统、冷量分配单元(CDU)、一次侧输配系统、冷源系统、室外热汇几个部分。

该技术体系中,当前常用的冷源形式主要包括

开式冷却塔+板式换热器、闭式冷却塔和干冷器。其中：开式冷却塔+板式换热器方案存在运行水质差（因冷却水与空气直接接触）的缺点，且需增设板换导致系统管道复杂、设备占地增加。干冷器方案设备初投资高、占地面积大。因此综合考量水质保障、系统复杂性、占地面积、运行维护及成本等因素，闭式冷却塔方案尽管初期投资和运行成本相对较高，且需注意冬季防冻和喷淋水质管理，仍凭借其封闭循环系统有效保障水质、系统架构相对简单以及占地面积小的核心优势，成为当前冷板式液冷系统的主流冷源选择。

冷却塔依靠塔外空气与内部喷淋水之间的热交换实现降温，因此环境空气的干湿球温度是其性能的关键参数。尤其在夏季高温季节，环境温度升高会导致冷却塔效率下降，其中闭式冷却塔的效率衰减最为显著。在此条件下，对闭式冷却塔的入口空气进行蒸发冷却预冷，是一种经济且节水的解决方案^[17]。为此，本文提出：在为冷板式液冷系统配备闭式冷却塔作为冷源的基础上，于其进风口处加装翅片管作为预冷段。该预冷段通过对进风空气进行间接蒸发冷却（实现等湿降温），有效降低空气的湿球温度，提升其蒸发冷却潜力。此举可进一步降低闭式冷却塔制取的冷水温度，并提升整体冷却效率。

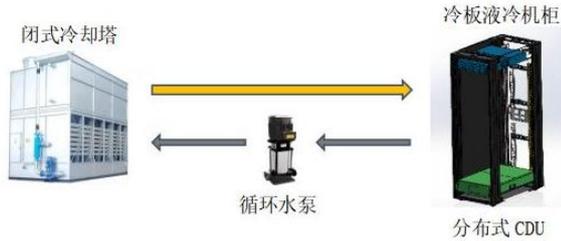


图 1 闭式冷却塔方案下的冷板式液冷一次侧冷源原理图

Fig.1 Schematic diagram of cold plate liquid cooling primary side cold source under closed cooling tower scheme

根据翅片管内冷媒来源，可将预冷模式分为闭塔冷水预冷模式和开塔冷水预冷模式，如图 2 所示。当阀 1、阀 2 开启，阀 3、阀 4 关闭时为闭塔冷水预冷模式，闭式冷却塔水箱循环水在水泵的作用下流经翅片管最后回到水箱完成循环。当阀 1、阀 2 关闭，阀 3、阀 4 开启时为开塔冷水预冷模式，开式冷却塔冷水经喷淋填料降温后，在水泵的作用下流经翅片管最后回到开式冷却塔喷淋完成循环。

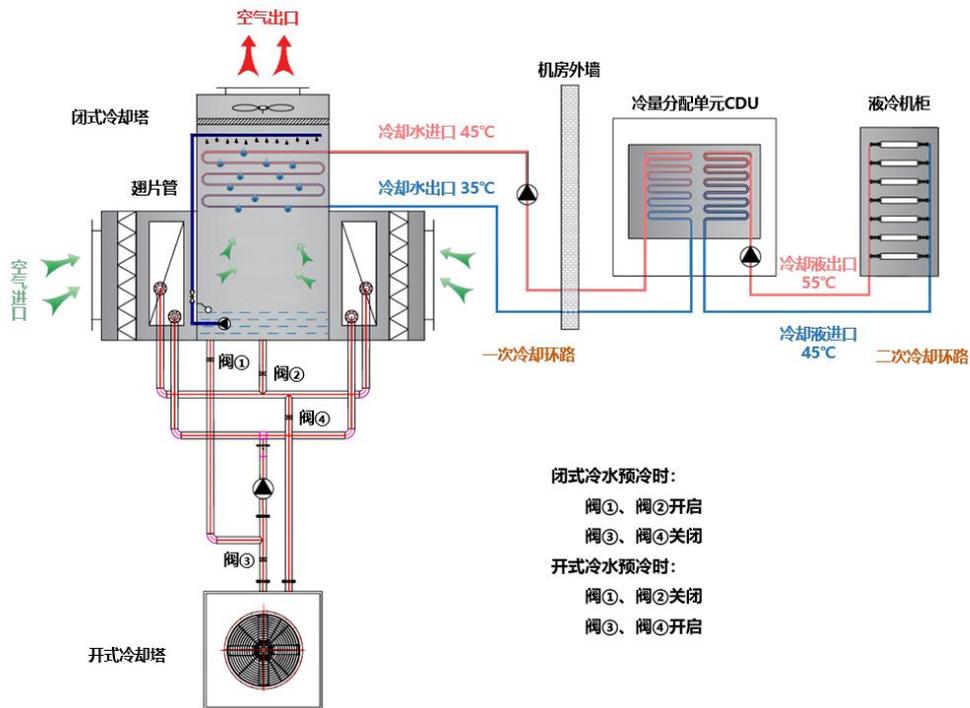


图 2 冷板式液冷系统的二次侧循环回路与闭式冷却塔的一次侧循环回路耦合图

Fig.2 Coupling diagram of secondary side circulation circuit of cold plate liquid cooling system and primary side circulation circuit of closed cooling tower



图3 整体系统实物图

Fig.3 Physical diagram of the overall system

1.2 主要数学模型及关联式

(1) 传热系数

翅片管外的空气流动在公开文献中被广泛研究,对于圆形翅片管外强制通风条件下的强制对流传热系数, Briggs 和 Young 公式被普遍应用^[18]。

$$Nu = 0.134 Re^{0.681} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{l}{b}\right)^{0.2} \left(\frac{l}{\tau}\right)^{0.1134} \quad (1)$$

式中: Nu 为空气通过翅片管束的努塞尔准数, $Nu = \frac{\alpha_o D_r}{\lambda}$; α_o 为以基管外表面积为基准的空气侧传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; D_r 为基管直径, m ; λ 为空气的导热系数, $W/(m \cdot K)$; Re 为空气通过翅片管束的雷诺准数, $Re = D_r u_{max} \frac{\rho}{\mu}$; u_{max} 为管外管束最大空气流速, m/s ; ρ 空气密度, kg/m^3 ; μ 为空气黏度, $Pa \cdot s$; Pr 为普朗特数; l 为翅片间距, m ; b 为翅片高度, m ; τ 为翅片厚度, m 。

(2) 压力降

高翅片管外空气通过管束的压力降计算如式(2)所示。

$$\Delta P_f = \frac{2 f N_r G^2}{g_c \rho \phi} \quad (2)$$

式中: ΔP_f 为空气通过管束的压力降, Pa ; f 为空气摩擦系数; N_r 为管排数; G 为窄隙流通截面的空气质量流速, $G = \rho u_{max}$, $kg/(m^2 \cdot s)$; g_c 为单位转化因数; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; ϕ 为黏度修正因数。

依据上述公式以及给定设计参数要求设计翅片管^[19], 参数如表 1 所示。

表 1 翅片管参数

Table 1 Fin tube parameters

参数	数值	单位
管径 ϕ	0.022	m
水平管中心距	0.062	m
上下管中心距	0.052	m
排数	6	排
每排管数	35.00	个
翅片高	0.014	m
翅片密度	420.00	片/m
总换热面积	1339.82	m^2

在翅片管预冷系统的实际运行中,出风温度的实测值因理论模型与实际工况的差异性而与设计值存在系统性偏差。为提升模型预测精度与工程适用性,需通过实验实测对某些参数进行修正。这一修正过程不仅能够有效降低出风温度预测误差(通常可控制在 $\pm 5\%$ 以内),还可为系统动态调节提供非线性补偿策略,最终提升翅片管预冷系统在复杂变工况条件下的热工匹配度。

表 2 设计计算理论模型的设计值、修正值与实测值对比

Table 2 Comparison of design value, correction value and measured value of design calculation theoretical model

空气参数	进风	出风		
		设计值	修正值	实测值
干球 $t_1/^\circ C$	30.55	24.8	27.6	27.4
湿球 $t_{s1}/^\circ C$	17.34	15.36	16.34	16.3
焓 $i_1/(kJ/kg)$	49.14	43.29	46.14	46.03
相对湿度 $\phi_1/\%$	26.2	36.18	30.55	31.6
含湿量/(g/kg)	7.2	7.2	7.2	7.23

通过实测参数对传热模型进行多维度修正, 最终实现理论计算与实测数据的误差被优化至 5% 以内, 验证了参数修正的有效性。

2 翅片管预冷闭式冷却塔的运行测试

2.1 试验台介绍与搭建

本试验台依托于产学研合作企业的全不锈钢冷却塔热力性能研发测试中心, 测试功率可达

3000kW, 保证测试完设备内部保持清洁。可对高精设备(直流输电、数据中心冷却设备)进行研发测试。闭式冷却塔测试原理如图 4 所示。冷却塔测试数据采集系统, 包括软件、数据采集模块、PT100 插入式铂电阻、机械通风湿球温度计、转轮风速仪等。利用水蒸汽加热内循环水, 使其温度达到某设定温度, 然后进入冷却塔进行冷却。

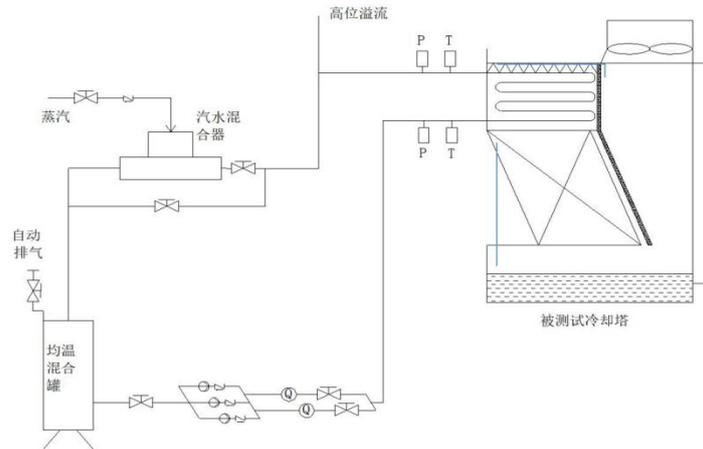
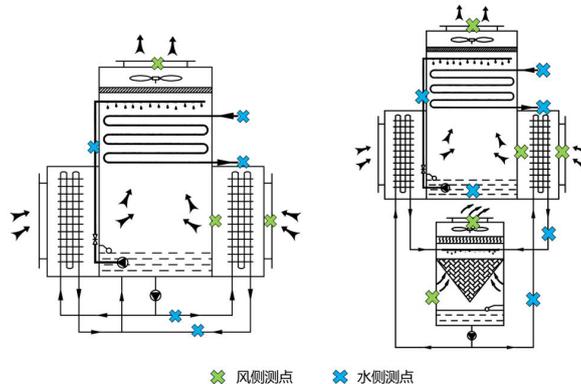


图 4 闭式循环模拟实验系统流程图

Fig.4 Flow chart of closed cycle simulation experiment system

针对闭塔冷水预冷和开塔冷水预冷两种系统模式, 本研究在翅片管、闭式冷却塔及开式冷却塔三个核心模块上分别布置了风侧与水侧测点, 如图 5 所示。翅片管进出水温度及喷淋水温度采用 WZY-1 型温度自记仪测量, 其量程为 -20°C 至 80°C , 精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。同时, 在翅片管迎风面均匀布点, 使用经校准的手持风速仪测量进风风速(量程 $0\sim 30\text{m/s}$, 精度 $\pm 0.1\text{m/s}$), 并使用德图 174H 温湿

度自记仪测量进风干湿球温度(温度量程 $-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$, 精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$; 湿度量程 $0\sim 100\%$, 精度 $\pm 3\%$)。为获取代表性数据, 翅片管迎风面被均匀划分为 18 个等面积矩形区域, 并在各区域中心点布置测点进行测量, 最终取平均值作为测量结果, 闭式冷却塔翅片管迎风面风速测点布置如图 6 所示。此外, 测量了迎风面内尺寸并计算了其迎风面积, 以此计算闭式冷却塔风量。



(a) 闭塔冷水预冷风、水侧测点 (b) 开塔冷水预冷风、水侧测点

图 5 闭塔冷水预冷模式与开塔冷水预冷模式下的风、水侧测点分布图

Fig.5 Distribution diagrams of measuring points on the air and water sides under closed-tower and open-tower cold water precooling modes



图 6 闭式冷却塔翅片管迎风面风速测点布置图

Fig.6 Layout of wind speed measuring points on windward side of finned tube of closed cooling tower

2.2 评价指标

在评估翅片管预冷闭式冷却塔整体性能时，除排热量、能效比（COP）等核心指标外，亚湿球效率^[20]亦是关键的评价参数之一。该效率特指针对翅片管预冷段性能的量化描述，其核心在于衡量该段装置对环境空气湿球温度的降低程度，具体可表述为式（5）所定义的形式。亚湿球效率的数值直接表征了预冷段效能的高低；数值越大，表明预冷段对空气的冷却效果越显著，从而使后续的闭式冷却塔更易于制备出温度趋近于环境空气湿球温度的冷却水。

$$Q = c_p m_w \Delta T_w \quad (3)$$

式中： Q 为排热量，kW； c_p 为水的定压比热容，取值为4.18kJ/(kg·°C)； m_w 为冷却水质量流量，kg/s； T_w 为冷却水入口温度与出口温度差值，°C。

$$COP = \frac{Q}{P_{pump} + P_{fan}} \quad (4)$$

式中： COP 为能效比； Q 为排热量，kW； P_{pump} 为水泵输入功率，kW； P_{fan} 为风机输入功率，kW。

$$\omega = \frac{t_{wb,0} - t_{wb,c}}{t_{wb,0} - t_{dp,0}} \quad (5)$$

式中： ω 为翅片管预冷段亚湿球效率，%； $t_{wb,0}$ 为环境空气的湿球温度，°C； $t_{wb,c}$ 为环境空气预冷后的湿球温度，°C； $t_{dp,0}$ 为环境空气的露点温度，°C。

3 测试结果与分析

3.1 翅片管顺流、逆流安装方式对比分析

3.1.1 翅片管不同安装方式

对于左侧翅片管，进口热空气先与翅片管水路中的最近端冷水换热，为顺流安装；对于右侧翅片管，进口热空气先与翅片管水路的最远端冷水换热，为逆流安装。对比两种翅片管安装方式对空气的冷却幅度差异。

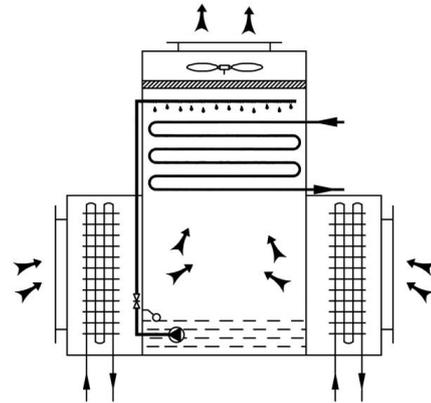
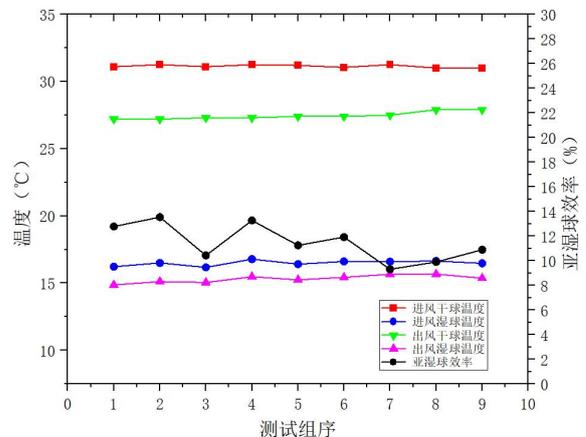


图 7 左侧翅片管顺流安装、右侧翅片管逆流安装

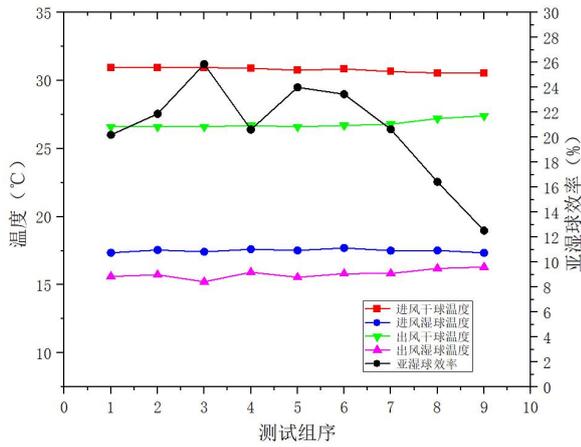
Fig.7 Downstream installation of left finned tube and countercurrent installation of right finned tube

3.1.2 闭塔冷水预冷模式

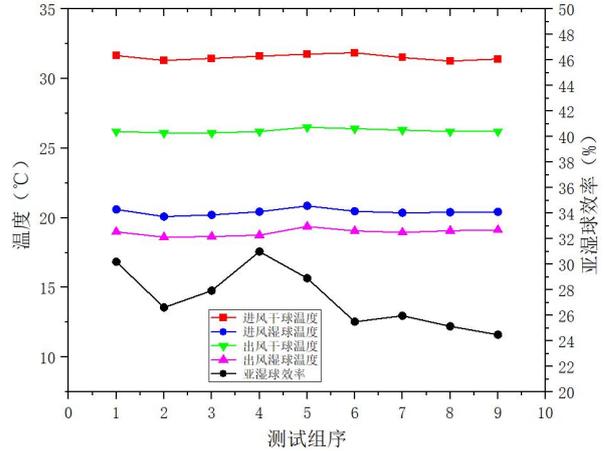
本研究在江苏省宜兴市夏季室外大气压力（100.37kPa）条件下，对闭塔冷水预冷模式下翅片管顺流与逆流两种安装方式进行了热工性能对比测试。实验聚焦于特定室外气象参数（环境干球温度31.8°C，环境湿球温度16.8°C），重点考察了不同安装方式对进风预冷效果的差异性影响，结果如图8所示。



(a) 翅片管顺流安装



(b) 翅片管逆流安装



(a) 翅片管顺流安装

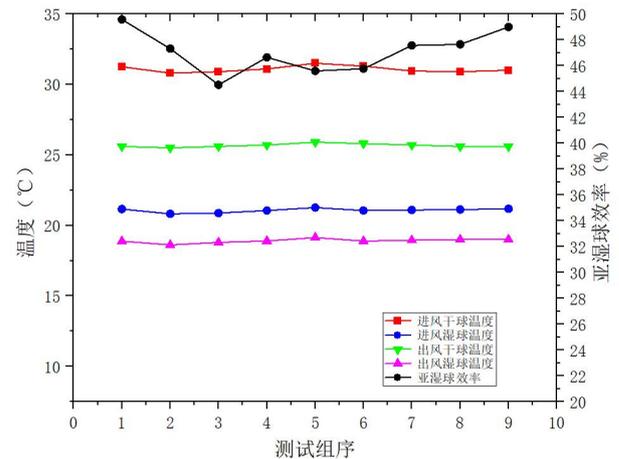
图 8 闭塔冷水预冷模式下顺流、逆流安装下的进出风干湿球温度

Fig.8 Inlet and outlet air dry wet bulb temperature under downstream and countercurrent installation under closed tower cold water precooling mode

实验数据表明: 在干球温度调控方面, 逆流布置相较顺流布置表现出更高的传热效率, 分别实现了 4.0°C 与 3.7°C 的温降, 逆流方式温降幅度提升 8.1% ($\Delta T=0.3^\circ\text{C}$); 湿球温度调控方面, 逆流布置的优势更为显著, 其温降达 1.7°C, 显著高于顺流布置的 1.2°C, 效率提升达 41.7% ($\Delta T=0.5^\circ\text{C}$)。亚湿球效率分析进一步证实了逆流布置的优越性: 顺流安装时平均及最高亚湿球效率分别为 11.47% 和 13.53%, 而逆流安装时则显著提升至 20.61% 和 25.85%。值得注意的是, 在相同进水温度 (25.4°C) 条件下, 两种安装模式均实现了出水温度稳定于 27.4°C, 获得一致的 2.0°C 温升。综合结果表明, 逆流式翅片管布置在空气干、湿球温度调控方面均展现出更优的热交换性能, 尤其在湿球温度控制维度具有更为显著的优势。

3.1.3 开塔冷水预冷模式

本研究在江苏省宜兴市夏季室外大气压力 (100.37kPa) 条件下, 对开塔冷水预冷模式下翅片管顺流与逆流两种安装方式进行了热工性能对比测试。实验聚焦于特定室外气象参数 (环境干球温度 32.3°C, 环境湿球温度 20.6°C), 重点考察了不同安装方式对进风预冷效果的差异性影响, 结果如图 9 所示。



(b) 翅片管逆流安装

图 9 开塔冷水预冷模式下顺流、逆流安装下的进出风干湿球温度

Fig.9 Inlet and outlet air dry wet bulb temperature under downstream and countercurrent installation under tower opening cold water precooling mode

实验结果表明: 在干球温度调控方面, 顺流布置与逆流布置分别实现 5.2°C 与 5.4°C 的温降, 逆流布置相较顺流布置温降幅度提升 3.8% (差值 $\Delta T=0.2^\circ\text{C}$); 湿球温度调控方面, 顺流与逆流布置对应的温降分别为 1.5°C 与 2.2°C, 逆流布置温降效率提升显著, 增幅达 46.7% (差值 $\Delta T=0.7^\circ\text{C}$)。亚湿球效率分析显示, 顺流安装时的平均与最高效率分别为 27.3% 和 31.0%, 而逆流安装时则显著提升至 47.06% 和 49.57%, 且开塔冷水预冷模式下的亚湿球效率均显著高于闭塔冷水预冷模式。水系统热力特性方面, 在初始进水温度 22.7°C 条件下, 顺流

与逆流布置的出水温度分别为 25.6℃与 26.0℃，对应温升为 2.9℃与 3.3℃，逆流布置相较顺流产生 0.4℃的额外温升。综合数据表明，逆流式翅片管在开式冷却塔冷水预冷模式系统中展现出更优异的空气干、湿球温度协同调控能力，其强化传热传质效应在水温提升维度亦得到进一步验证。

3.2 冬季工况下闭塔冷水预冷模式试验

本研究针对冬季低温特殊工况（测试地点：江苏宜兴；大气压力：100.37kPa；环境干球温度：10.1℃；环境湿球温度：7.1℃），开展了闭式冷却塔翅片管热力性能的实证分析，结果如图 10 所示。

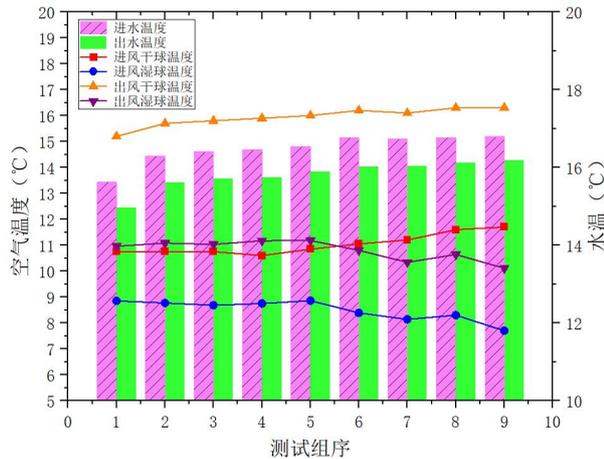


图 10 冬季工况下闭塔冷水预冷模式的温度变化

Fig.10 Temperature change of closed tower cold water precooling mode in winter

实验观测到显著的热力学行为异化：环境空气流经翅片管后，干球温度产生平均 4.9℃的显热增益，湿球温度同步上升平均 2.3℃。此温升现象与常规冷却工况下的空气降温特性形成鲜明对比，揭示了翅片管功能的季节性转换机制。水侧热力参数监测显示：在闭塔冷水预冷模式下，当平均进水温度为 16.5℃时，出水温度降至 15.8℃，实现平均 0.7℃的水温降幅。热力学逆向分析表明：该温度场的反向梯度变化源于翅片管在冬季的核心功能转型—一通入闭式冷却塔水箱冷水时，其角色由传统冷却功能转变为空气预热装置。其防冻机理在于：通过主动提升进风湿/干球温度，有效抬升盘管壁面温度，确保其持续高于空气露点温度与冰点温度的双重阈值。此策略系统性破坏了冰晶成核与生长的热力学平衡条件，从而在物理层面阻断了结露与

冻结风险。工程意义层面：本实验量化了低温环境下空气预热防冻策略的关键热力学参数（显热增益量、湿球温升量、水温降幅），为冷却塔冬季防冻^[21]调控系统的优化设计提供了理论边界条件。该运行模式实现了防冻保护与系统稳定性的协同强化，对高寒地区冷却塔的安全运行具有重要指导价值。

3.3 翅片管预冷闭式冷却塔不同运行模式分析

本研究在江苏省宜兴市（大气压力：100.37kPa）开展现场测试，针对冬、夏两季典型工况展开对比实验：

冬季工况：环境干球温度 9.5~12.3℃，湿球温度 6.2~7.3℃；

夏季工况：环境干球温度 31.3~32.3℃，湿球温度 16.8~20.6℃。

基于上述气象边界条件，对翅片管预冷闭式冷却塔系统的热工性能进行多维度实证分析。

针对翅片管预冷闭式冷却塔运行特点，系统设置四类差异化模式：不预冷干模式仅需驱动闭塔风机；不预冷湿模式需协同驱动闭塔风机与喷淋泵；闭塔冷水预冷模式在湿模式基础上增加翅片管循环泵；开塔冷水预冷模式则进一步叠加开式冷却塔风机运行。各模式对应耗能部件（含风机、泵组等）的具体功率参数如表 3 所示，其设备启停逻辑清晰体现了能耗配置的阶梯式强化特征。

表 3 翅片管预冷闭式冷却塔耗能部件功率

Table 3 Power of energy consuming components of finned tube precooling closed cooling tower

不同运行模式	闭塔风机	闭塔喷淋	翅片管循	开塔风机	总功率
	轴功率	泵功率	环泵功率	轴功率	
	/kW	/kW	/kW	/kW	/kW
不预冷干模式	22.43	—	—	—	22.43
不预冷湿模式	22.74	3.33	—	—	26.07
闭塔冷水预冷模式	22.17	3.36	5.88	—	31.41
开塔冷水预冷模式	22.37	3.30	5.81	4.64	36.12

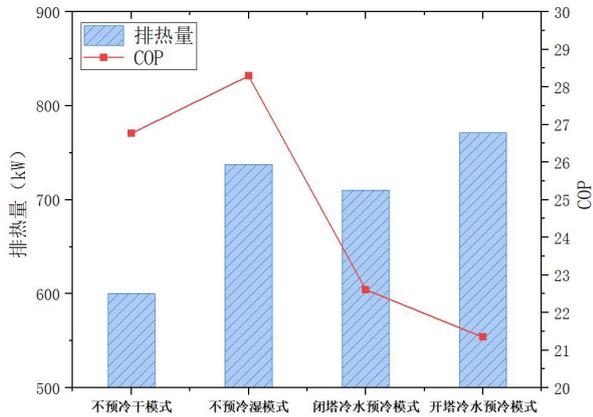


图 11 冬季工况下翅片管预冷闭式冷却塔不同运行模式分析

Fig.11 Analysis of different operation modes of finned tube precooling closed cooling tower under winter conditions

冬季工况下实验数据显示: 开塔冷水预冷模式以 770.96kW 的峰值排热量居首, 随后依次为不预冷湿模式 (737.6kW)、闭塔冷水预冷模式 (710.16kW) 以及不预冷干模式 (600.38kW)。根据 3.2 节研究所述, 在闭塔冷水预冷模式时, 翅片管在冬季的核心功能转型, 其角色由传统冷却功能转变为空气预热装置, 因此导致进风温度升高, 其提升进风温度的行为虽强化了防冻安全性, 却因空气显热增益导致排热量较不预冷湿模式降低 3.7%, 较开塔冷水预冷模式降低 7.9%。值得注意的是, 不预冷干模式的排热量仅为 600.38kW, 显著低于不预冷湿模式、闭塔冷水预冷模式和开塔冷水预冷模式, 经热力学诊断, 其核心制约因素源于换热器结构特性—采用无翅片表面结构的光管式盘管, 在仅依赖强制对流传热机制 (未启用喷淋强化换热) 时, 光管表面传热面积不足导致空气侧传热系数急剧下降, 致使风机强制对流所实现的热流密度 ($q'' \approx 2.85 \text{ kW/m}^2$) 无法满足系统热负荷需求, 最终表现为冷却水温度降幅受限 ($\Delta T < 5^\circ \text{C}$)。此现象印证了扩展表面优化设计在干工况闭式冷却塔中的工程必要性。在能效维度, 不预冷湿模式以 COP=28.3 展现最优性能, 显著高于闭塔预冷模式 (22.61) 与开塔预冷模式 (21.34)。综合排热量与 COP 的耦合分析表明: 不预冷湿模式在冬季工况下实现了排热能力与能源效率的最佳平衡, 故推荐作为实际运行的首选策略。其核心优势在于既规

避了干模式的热传递瓶颈, 又避免了预冷模式下因耗能部件的增多而引发的整体能效降低。

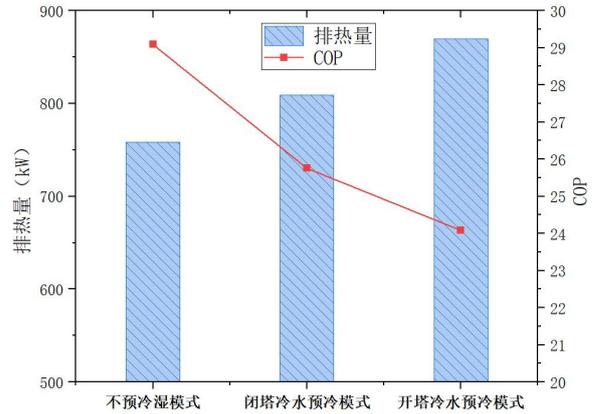


图 12 夏季工况下翅片管预冷闭式冷却塔不同运行模式分析

Fig.12 Analysis of different operation modes of finned tube precooling closed cooling tower under summer conditions

夏季工况实验数据表明: 开塔冷水预冷模式以 869.83kW 的峰值排热量居首, 闭塔冷水预冷模式 (808.89kW) 与不预冷湿模式 (758.32kW) 依次递减。基于智算场景行业主流要求的冷板液冷系统一次侧工况 (回水温度 45°C , 供水温度 35°C) [22], 计算得出翅片管预冷闭式冷却塔在三种模式下的关键运行参数: 不预冷湿模式在回水温度 45°C , 供水温度 35°C 时对应冷却水流量 65.31t/h, 以此计算闭塔预冷模式可实现供水温度 34.33°C , 而开塔预冷模式进一步降至 33.53°C 。能效分析显示, 不预冷湿模式以 COP=29.09 展现最优能源效率, 显著高于闭塔预冷 (25.75) 与开塔预冷模式 (24.08)。综合热工性能与能效的耦合评估揭示: 尽管翅片管预冷 (闭塔/开塔模式) 可分别提升排热量 6.7% 和 14.7%, 但伴随 COP 相应降低 11.5% 和 17.2%。这表明预冷强度与系统能效存在显著权衡关系, 故工程实践中需依据实际热负荷需求与环境湿球温度动态优化运行模式选择。

4 结论

(1) 逆流式翅片管布置性能优势显著: 相较于顺流安装, 逆流布置在闭塔冷水预冷模式下湿球温降提升 41.7% ($\Delta T = 0.5^\circ \text{C}$), 亚湿球效率从 11.47% 增至 20.61%; 在开塔冷水预冷模式下湿球温降提

升 46.7% ($\Delta T=0.7^{\circ}\text{C}$)，亚湿球效率从 27.3%增至 47.06%，验证了逆流结构对空气干湿球温度的协同优化能力。

(2) 光管式盘管在干模式下的局限性：不预冷干模式因光管传热面积不足，空气侧传热系数急剧下降，排热量 (600.38kW) 显著低于湿模式 (737.6kW)，凸显翅片结构对干工况的必要性。

(3) 冬季防冻机制创新：通入闭式塔冷水时，翅片管可转为空气预热装置，使进风干/湿球温度分别升高 $4.9^{\circ}\text{C}/2.3^{\circ}\text{C}$ ，抬升盘管壁温至露点以上，彻底阻断结露与冻结风险。

(4) 综合排热量与 COP 的耦合分析表明，不预冷湿模式在冬季工况下实现了排热能力与能源效率的最佳平衡，故推荐作为实际运行的首选策略。夏季工况下翅片管预冷虽提升散热能力但增加能耗，需依据热负荷和环境湿球温度动态调整运行模式。

参考文献：

- [1] T/CIE 087-2020,单相浸没式直接液冷数据中心设计规范[S].北京:中国电子学会,2020.
- [2] He W, Ding S, J Zhang, et al. Performance optimization of server water cooling system based on minimum energy consumption analysis[J]. Applied Energy, 2021,303:117620.
- [3] Zimmermann S, Meijer I, Tiwari M K. Aquasar: A Hot Water Cooled Data Center with Direct Energy Reuse[J]. Energy, 2012,43(1):237-245.
- [4] Sakanova A, Alimohammadi S, Mcevoy J, et al. Multi-objective layout optimization of a generic hybrid-cooled data centre blade server[J]. Applied Thermal Engineering, 2019.
- [5] 刘帆,陶成,李振杰,等.5G 路由器液冷系统的设计和探究[J].电子机械工程,2021,37(4):30-34.
- [6] 田哲宁,黄翔,屈名勋,等.蒸发冷却技术在数据中心液冷系统中的应用探讨[J].制冷与空调,2022,36(1):120-126.
- [7] 肖新文,郑伟坚,曾春利,等.某液冷服务器性能测试台的液冷系统设计[J].制冷与空调,2021,35(5):706-712.
- [8] 赵路平,谢洪明,徐明微,等.浸没液冷数据中心暖通设计若干思考和探讨[J].洁净与空调技术,2023,(3):42-46.
- [9] 黄翔,屈名勋.“双碳”目标下绿色数据中心冷却关键技术路径的探讨[J].制冷与空调,2022,22(3):1-10.
- [10] 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.
- [11] 黄翔,胡建,苏林,等.喷雾蒸发冷凝对空调性能影响的实验研究[J].西安工程大学学报,2024,38(5):109-116.
- [12] 黄翔,王欣,褚俊杰,等.冷凝器喷雾冷却对氟泵热管复合空调的性能影响[J].西安工程大学学报,2024,38(5):36-43.
- [13] 何锁盈,张晓楠,王怀琛,等.蒸发预冷进风闭式冷却塔的冷却性能对比研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2024,57(11):1133-1142.
- [14] 郭志成,黄翔,耿志超,等.单双面进风蒸发冷却冷水机组在数据中心的应用对比分析[J].西安工程大学学报,2018,32(3):296-301.
- [15] Reddy V S K. Design and Performance Evaluation of an Indirect Evaporative Air Cooler[J]. amaec international journal on production&industrial engineering, 2012.
- [16] 徐梦菲.机械通风干湿联合冷却塔的换热性能及其运行调控研究[D].济南:山东大学,2022.
- [17] 余志康,黄世芳,张小松,等.冷却塔冷却技术的应用与优化[J].制冷学报,2024,45(3):50-62+71.
- [18] 孙兰义.换热器工艺设计[M].北京:中国石化出版社,2015.
- [19] 常健佩,黄翔,贾晨昱,等.立管式间接蒸发冷却器的设计与适用性研究[J].流体机械,2020,48(12):68-73.
- [20] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [21] 常健佩,黄翔,安苗苗,等.蒸发冷却冷水机组的原理、性能与适用性分析[J].化工学报,2020,71(S1):236-244.
- [22] 黄翔,李潼,褚俊杰.算力时代数据中心液冷与蒸发冷的融合发展[J/OL].制冷与空调,1-10[2025-06-18].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4519.tb.20250327.1407.002.html.