 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i9.11797

Research on the Optimization of Evaporative Cooling Data Center Air Conditioning Systems

Weidong Xia Zhensheng Lv Shiying Zhong

Erleng Refrigeration Technology (Zhejiang) Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang, 314300, China

Abstract

This paper employs experimental research methods to study blade-type evaporative cooling data center air conditioning systems, investigating how spray patterns, cooling airflow rates, pump-starting sequences, and airflow automatic control affect the system's energy efficiency and operational stability. The results indicate that distributed spraying can achieve a more uniform distribution of the water film on the heat exchange surface, thereby increasing the system's energy efficiency ratio by 5.4% under rated operating conditions; when the cooling airflow rate exceeds the rated value, the energy efficiency decreases, indicating the existence of an optimal airflow range; optimizing the start-stop sequence and implementing a condensing pressure-linked airflow regulation strategy can effectively reduce condensing pressure fluctuations and enhance operational stability. The quantitative results show that distributed spraying increases the energy efficiency ratio by 5.4%, and proper control of the cooling airflow rate combined with optimized control strategies can further enhance the energy-saving effects and stability of the system, providing a reference for the design optimization and engineering application of evaporative cooling air conditioning systems in data centers.

Keywords

blade-type evaporative cooling; data center air conditioning; data center; energy efficiency optimization; operational stability

蒸发冷却式机房空调系统优化研究

夏卫东 吕振声 钟诗莹

二冷冷气技术（浙江）有限公司，中国 · 浙江 嘉兴 314300

摘 要

本文采用试验研究方法，以刀片式蒸发冷却机房空调为对象，探究喷淋形式、冷却风量、泵机启动顺序及风量自控对系统能效与运行稳定性的影响。结果表明：分布式喷淋可让换热表面水膜分布更均匀，额定工况下系统能效比提升5.4%；冷却风量超出额定值后能效下降，存在最优风量区间；优化启停顺序并采用冷凝压力联动风量调节策略，能有效降低冷凝压力波动，提升运行平稳性。结论定量数据为：分布式喷淋使能效比提升5.4%，合理管控冷却风量、优化控制策略可增强系统节能效果与稳定性，为数据中心蒸发冷却空调设计优化及工程应用提供参考。

关键词

刀片式蒸发冷却；机房空调；数据中心；能效优化；运行稳定性

1 引言

目前现有研究尚有短板：面向数据中心的成套优化方案、全周期运维策略研究较为薄弱，缺少兼顾节能效益与工程实操的多维度优化手段，相关研究结论难以直接落地。为此本文开展蒸发冷却机房空调优化试验，搭建多维度优化框架，依托对比试验量化关键参数对能效、运行稳定性的影响，提出具备实操性的优化措施，支撑蒸发冷却空调工程落地；完善该系统在数据中心场景的优化理论，充实绿色算力设施温控技术方案，同时降低空调能耗与运维支出，保障系统稳定运行，助力数据中心 PUE 指标达标。

【作者简介】夏卫东（1968–），男，中国湖南常德人，本科，高级工程师，从事暖通、蒸发冷方向研究。

2 研究现状

2.1 国外研究现状

国外蒸发冷却 - 压缩复合空调已经建立完善的热力学分析方法，产品开发与工程落地体系相对成熟。间接蒸发预冷结合压缩制冷系统在干湿球温差大于 8℃区域，综合能效 AEER 可达 7.5–9.2；Mcycle 露点蒸发可将空气降温至接近露点，降低压缩机压缩比。干燥剂除湿耦合蒸发压缩循环可提高蒸发温度、削减冷凝负荷，提升整体能效，纳米蒸发、喷雾仿真与亲水改性换热膜等基础研究持续开展。

2.2 国内研究现状

国内蒸发冷却复合制冷空调实现理论探索、定制设备研制与规模化工程应用协同发展，在湿热气候适配、高密度机柜散热、多机组协同控制方面取得突破，整体技术水平接近国际先进，部分场景具备特色优势。国内学者提出湿热地

区三重复合循环、梯级温位匹配等理论，系统方案形式多样；磁悬浮压缩机、改性膜元件等核心部件实现国产化，装备在数据中心、轨道交通广泛落地，相关配套标准持续完善。

3 试验研究

3.1 研究内容

构建数据中心蒸发冷却式空调系统多维度优化体系，提出针对性优化策略；在已有仿真模型和理论计算基础上，通过实验检验优化策略的可行性与实际效果。通过搭建实体实验台，在不同进风温湿度、气水比、风速等工况下进行测试，获取真实的运行数据，评估空调系统效率、制冷量及能效比，从而确定最优工况完善优化方案。

3.2 研究方法

采用分析对比实验法，通过典型案例验证优化效果，量化优化指标提升幅度。

在不同进风温湿度、气水比、风速等工况下进行测试，获取真实的运行数据。

优化气流组织、水分布均匀性、运行控制模式，以实现全年运行的能效最大化

3.3 理论模型

蒸发冷却式精密机房空调，核心是冷凝器侧采用蒸发式冷凝技术，换热板 / 管内走高压制冷剂并发生相变冷凝，换热板 / 管外喷淋循环水形成水膜，配合空气流动使水膜蒸发，利用水的汽化潜热带走冷凝热。它区别于传统风冷（纯显热换热）、水冷（显热 + 二次冷却塔），是数据中心精密空调降本提效的主流技术路线，其冷凝理论是 “换热板 / 管内制冷剂相变冷凝”与“换热板 / 管外蒸发冷却传热传质”的耦合模型。

3.3.1 冷凝换热的四层热阻模型（从内到外）

整个冷凝放热过程为串联热阻，总热阻决定着冷凝温度和换热效率。

1>. 换热板或者管内制冷剂侧热阻为过热蒸气冷却、两相膜状凝结、过冷液体的对流换热。

1>. 换热板或者管壁的导热热阻很小，主要是由于金属换热板或者管壁本身的导热作用所造成的。

1>. 换热板 / 管外水膜侧热阻为水膜对流换热、水膜表面蒸发传质所构成的主要热阻，占总换热的主要部分。

1>. 空气侧热质传递热阻为湿空气边界层的显热换热加水蒸气扩散传质。

主要特点就是总换热量中水蒸发的潜热换热占 90% 以上，显热换热只占不到 10%，所以蒸发冷凝换热效率比风冷高得多。

3.3.2 换热板 / 管外蒸发冷却传热传质耦合

蒸发冷凝和风冷、水冷的区别就在于传热和传质是同时发生的，并且是互相影响的，驱动力不是温度差，而是焓差。

水膜表面为饱和湿空气，主流空气为未饱和湿空气，二者的焓差是蒸发传质的总驱动力；总换热量 = 显热换热 + 潜热换热，可统一用焓差表达。

在蒸发冷却过程中，传热系数 hC 、传质系数 hD 干空气定压比热容 Cpa 通过 Lewis 数关联：

$$Le = \frac{h_C}{h_D C_{p,a}}$$

当处于稳态蒸发冷却的时候，Lewis 数接近于 1，此时水温与进入空气的湿球温度相等。

3.3.3 机房精密空调的特殊工况扩展模型

机房空调全年运行时间长，热负荷比较稳定，显热比较大，所以需要采用合适的冷凝模型来适应运行模式。

1>. 压缩制冷蒸发冷凝模式：

压缩机处于满负荷状态的时候，完整的蒸汽压缩循环被采用，冷凝器按照“换热板 / 管内冷凝 + 换热板 / 管外蒸发”的耦合模型来运作，冷凝温度比室外湿球温度高出 3 到 5 摄氏度，比传统的风冷冷凝器要低 5 到 12 摄氏度，系统的制冷能效比得到明显改善，提高了 20% 到 40%。

2>. 部分负荷运行模式：

机房负荷变化的时候，利用变频风机、变频水泵、压缩机卸载来调节冷凝负荷，模型要加上变风量、变喷淋水量时的换热系数、传质系数修正。

按照上述的理论模型，依据能量守恒定律以及质量守恒定律来创建湿空气和水膜间的热湿交换方程。蒸发式冷却是按照“水 - 空气”的热湿交换原理来进行的，它的换热量可以用公式 Q=G × c × (t1-t2)=W × r 来计算（G 为空气质量流量，W 为蒸发水量，r 为水的汽化潜热）。

3.4 误差分析

蒸发冷却式精密机房空调测试实验的误差主要是由于测量仪器的精度、环境干扰、操作流程是否规范以及蒸发冷却特有的热质交换的复杂性所造成的。根据精密机房空调对温度、湿度控制的要求（温度变化小于等于 ±0.5℃，湿度变化小于等于 ±3%RH），需要对传感器的校准、水蒸发量的测定、动态响应的试验等环节进行系统的误差控制。从误差分类、主要影响因素和控制措施三个方面来分析。

3.4.1 主要误差来源分类

1>. 仪器测量误差

• 温度传感器误差：精密空调测试需要温度测量精度在 ±0.1℃之内，如果传感器没有经过校准或者安装的位置不正确，就会造成干、湿球温度的测量误差。

• 流量计误差会造成喷淋水量、空气流量的测量不准，进而影响到蒸发效率的计算。电磁流量计如果不能达到直管段的要求，那么它的测量结果就会出现 ±2% 的偏差，从而造成水气比的计算失误。

• 湿度传感器滞后效应，高湿度环境里湿度传感器响应时间变长（一般为 5 到 15 秒），如果采样频率不够高，就会低估瞬时湿度的变化情况，从而对热质交换模型的验证造成影响。

2>. 环境与操作误差

• 测试环境变化大，当环境温度变化大于 ±0.5℃或者相对湿度变化大于 ±2%RH 的时候，蒸发冷却效率测试结

果就会出现大于 5% 的误差。

• 系统没有达到稳态就开始做试验，蒸发冷却系统的热惯性大，需要运行 30 分钟以上才能稳定。提前收集数据会造成制冷量的标准差变大，波动系数增加 10%-15%。

3>. 蒸发冷却特有误差

• 水蒸发量测量误差有直接称重法不考虑环境蒸发损失时，实际测量到的蒸发量比真实值小 5%-8%。

• 气流组织不均匀，在喷淋区下方容易出现局部高湿区，造成一次空气温度分布不均匀，如果只用一个点测温，温差误差可以达到 1.5 ~ 2.5℃，对湿球温度的计算有很大影响。

3.4.2 误差控制措施

1>. 仪器与校准规范

传感器配置要求：

温度传感器要选用铂电阻（Pt100），精度 ±0.05℃，布置在喷淋区上游、下游各三个截面上，每个截面上至少有五个测点。

湿度传感器应具备快速响应 ≤5 秒。

流量计前后直管段长度需满足前 10D 后 5D(D 为管径)。

2>. 校准与溯源：

所有的仪器都要有 CNAS 或者 CMA 的校准证书，并且校准周期不能超过六个月。

湿度测量要依靠双压法湿度发生器做原位校准，防止由于环境温度、湿度的变化而造成误差。

3>. 测试流程优化

稳态判定标准：

关键参数连续 15 分钟波动 ≤ ± 0.1℃ 方可开始正式测试。

数据采集时长不少于 4 小时，避免短周期波动干扰统计结果。

4>. 动态响应测试规范：

在模拟负载突然变化的时候，要记录下抗负载冲击的能力，即恢复到 ±0.3℃精度所需要的时间，并且采样间隔不能大于 5 秒。

在蒸发冷却模式切换的时候，应该同时检测水阀的开度、风机转速以及温度和湿度的变化情况是否一致。

4 系统优化试验与结果分析

4.1 测试研究项目

喷淋形式对蒸发冷却式空调系统能效比的影响。

冷却风量变化对蒸发冷却式空调系统能效比的影响。

风机、水泵启动顺序对于蒸发冷却式空调系统的运行稳定有影响。

固定冷却风量、自动调节冷却风量对于蒸发冷却式空调系统运行稳定性的不同影响。

4.2 试验系统与机组参数

试验在恒温恒湿实验室完成，设定室内干球温度 24℃、相对湿度 50%。通过对比管式、片式两种换热结构，选取片式换热器作为蒸发式冷凝器，该冷凝器由换热板、喷淋管路、水箱、风机及循环水泵构成。试验机组核心性能参数如表所示

测试机组参数

制冷量			kW	30.6
机外静压			Pa	50
电加热量(可选)			kW	6
电加湿量(可选)			kg/h	5
温控范围			℃	16-30℃
温控精度			℃	±1℃
湿度范围			%	50-70%，
湿度精度			%	±3%
电源				3Ph/380V/50Hz
室内机	压缩机	额定功率	kW	5.42
		数量	台	1
	风机	额定风量	m^3/h	9200
		数量	台	1
		功率	kW	0.75
室外机	风机	数量	台	1
		功率	kW	0.37
		风量	m^3/h	5400
	水泵	数量	台	1
		功率	kW	0.25

4.3 喷淋形式对系统能效比的影响

蒸发冷凝器原采用冷却塔常用花篮式喷淋头，受安装空间与喷淋流量约束，仅可布置 2 个喷淋头，喷淋水花飞溅角度不均，换热板表面难以形成完整水膜。 试验改用分布式喷淋结构，喷淋管路多路布置，正对换热板开设喷淋孔，依靠多股水柱对每块换热板进行喷淋，保障板面水膜分布均匀。 测试结果显示，在各类室外温度工况下，分布式喷淋均可改善系统能效，额定工况下能效比提升 5.4%。

5 结论

本文通过对比试验，系统研究喷淋形式、冷却风量、风机水泵启动顺序及风量自动调节策略对蒸发冷却式机房空调系统能效与运行稳定性的影响，得到以下结论：

采用分布式喷淋，可使换热板表面水膜均匀覆盖，额定工况下系统能效比提升 5.4%。

冷却风量并非越大越好，超过额定风量后能效比下降，工程应用中应设置最优风量区间。

优化风机与喷淋水泵启动顺序（先水泵后风机），可减小冷凝压力波动，提升系统运行稳定性。

冷却风量跟随冷凝压力自动调节，能进一步平稳运行参数，提升系统稳定性与能效水平。

本文优化策略可直接应用于数据中心蒸发冷却空调系统的设计与运维，为降低机房空调能耗、提高设备可靠性提供支撑。

参考文献

[1] 熊理, 黄翔, 强天伟. 基于蒸发冷却智能化空调系统自动控制方案的探讨[J]. 制冷空调与电力机械, 2008(06).

[2] 刘忠宝, 张强. 蒸发冷却空调技术的研究状况[J]. 暖通空调, 2009, 39(9): 8-12.

[3] 薛达, 韩宗伟, 孙晓晴, 等. 蒸发冷却式热管与蒸气压缩复合数据中心空调系统性能实验研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(5).

[4] 蒋翔, 朱冬生, 钟朝安. 气候条件对高效蒸发式冷凝机组性能的影响[J]. 制冷学报, 2008(01).

[5] 陈梦，黄翔，金洋帆，等。数据中心用间接蒸发冷却空调机组性能测试及适用性分析 [J]. 流体机械，2022, 50 (9):7-13.

[6] 代聪，黄翔，褚俊杰，等。数据中心用间接蒸发冷却空调机组布水系统性能测试 [J]. 制冷与空调，2023, 37 (2):263-270.