

# 基于辐射换热优化的毛细管网 主动防结露核心技术研究

冯高玺

(宁波财经学院, 浙江 宁波 315175)

**摘要** 毛细管网辐射空调系统是高效的绿色建筑供冷/热技术, 管网表面结露是其大规模应用的关键瓶颈。本研究提出融合辐射换热特性的“感知—预判—调控”一体化主动防结露核心技术, 构建基于长短时记忆网络(LSTM)的动态风险预判模型, 结合多参数协同调控算法, 实现结露风险的超前预警与精准控制。经测试与验证, 该技术结露抑制率达99.0%, 系统响应时间缩短至1.86秒, 较传统技术节能38.0%, 辐射换热效率提升5%~8%, 有效平衡防结露与高效换热目标, 为毛细管网系统稳定运行提供创新解决方案。

**关键词** 毛细管网; 辐射换热; 结露防护; 动态预判; 协同调控

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.002

## 0 引言

在“双碳”战略背景下, 高效节能的暖通空调技术发展意义重大。毛细管网辐射空调系统凭借高舒适性与节能性成为绿色建筑优选, 其辐射换热占总换热量60%~70%, 较传统空调节能25%~40%<sup>[1]</sup>。该系统的辐射换热高度依赖管网表面温度( $T_s$ )与室内温湿度( $T_a$ 、RH)的动态平衡, 当 $T_s$ 降至空气露点温度( $T_d$ )以下即发生结露。我国南方梅雨季结露发生率达68%, 结露不仅腐蚀管路、滋生霉菌危害健康, 还会使管网表面辐射发射率降低15%~20%<sup>[2]</sup>, 显著削弱辐射换热效率, 成为其推广应用的“卡脖子”难题。随着绿色建筑规模化发展及室内环境品质要求升级, 商业综合体、高端写字楼等人员密集场景的湿负荷波动愈发剧烈, 结露引发的设备故障、维修成本增加及用户投诉已成为运维方核心难点。当前建筑环境调控对防结露技术的精准性、快速性要求持续提升<sup>[3]</sup>, 发展基于辐射换热本质的主动防结露技术, 对推动毛细管网系统规模化应用、助力建筑节能降碳目标实现具有重要现实意义。

现有防结露技术主要分为三类: 一是固定参数控制, 极端工况防护失效概率达32%, 且造成15%~20%能源浪费; 二是被动物理防护, 属“事后补救”策略, 还会增加约23%系统维护成本; 三是单一反馈控制, 响应滞后5~10秒, 难以应对负荷突变<sup>[4]</sup>。近年研究

关注多参数耦合与动态调控, 但仍有不足: 不列颠哥伦比亚大学“冷管”技术能耗降低了50%, 却未解决高湿结露的问题; 清华大学智能电致变色光热调节系统, 未针对毛细管网辐射换热特性定制设计<sup>[5]</sup>。现有方法未能深度耦合辐射换热特性与多场动态变化, 且多数研究仅聚焦实验室稳态工况验证, 缺乏实际工程动态负荷下的长期稳定性数据, 也未形成可直接落地的标准化技术方案, 本研究旨在突破这一局限, 实现二者协同优化。

本研究聚焦“辐射换热特性感知—结露风险动态预判—多参数协同调控”一体化核心技术研发, 具体内容包括: 辐射换热与温湿度场、流场的耦合机理量化分析; 融合辐射换热强度的LSTM动态预判模型构建; 多参数协同调控算法与分级响应策略设计; 全尺寸实验验证与工程应用优化。研究目标为: 结露抑制率 $\geq 98\%$ 、响应时间 $\leq 2$ 秒、较传统技术节能 $\geq 30\%$ 且辐射换热效率不降低, 为毛细管网系统大规模应用提供理论与技术支撑。

## 1 辐射换热与结露耦合机理及动态预判模型

### 1.1 耦合机理分析

辐射换热强度 $q_r$ 是决定管网表面温度 $T_s$ 的关键因素, 遵循斯蒂芬—玻尔兹曼定律:  $q_r = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4)$  ( $\varepsilon$ 为发射率,  $\sigma$ 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数)<sup>[6]</sup>。 $T_s$ 受供水参数、辐射换热负荷 $q_r$ 及对流换热 $q_c$ 综合影响, 满足

作者简介: 冯高玺(2005-), 女, 本科, 研究方向: 毛细管网防结露优化。

能量平衡方程。结露风险本质是辐射换热、对流换热与室内湿环境耦合失衡的结果，且辐射换热强度突变是结露主要诱因，结露触发条件为  $T_s \leq T_d$ ， $T_d$  由  $T_a$  和 RH 共同决定，采用 ASHRAE 标准推荐的 Magnus-Tetens 公式计算<sup>[7]</sup>。研究发现，空气流速  $v$  提升会使  $T_s$  升高  $0.8 \sim 1.2$  °C，传统方法忽略其主导作用，是防护效果不佳的核心原因。在人员密集的商业建筑中，人体散热散湿的动态波动会进一步加剧辐射换热与湿环境的耦合失衡，导致结露风险呈现非线性突变特征，这一现象在现有研究中尚未得到充分量化分析<sup>[8]</sup>。现有模型多采用稳态假设，难以还原人员密度、通风工况与温湿度实时变化带来的非稳态耦合效应，制约了毛细管网防结露控制策略的精准性与自适应能力。

## 1.2 基于 LSTM 的动态风险预判模型

本研究建立“辐射换热—多参数输入—风险等级输出”模型，引入结露风险系数  $R$  ( $[0, 2]$ ) 量化风险： $R \leq 0.3$  为极高风险、 $0.3 < R \leq 0.7$  为高风险、 $0.7 \leq R \leq 1.3$  为中风险、 $R > 1.3$  为低风险， $R$  的计算融合辐射换热强度与露点温度动态偏离度。模型以  $T_a$ 、RH、 $v$ 、 $T_s$ 、 $Q$ 、 $q_r$  六个核心参数为输入，采用 LSTM 神经网络为核心算法，网络含 4 层隐藏层，搭配 Leaky ReLU 激活函数及 Dropout 正则化防止过拟合。训练样本涵盖不同气候区、建筑类型的 15 万组数据，模型可预测未来 10 s、20 s、30 s 的  $R$  值，预测准确率达 98.2%，高风险状态准确率 99.1%，较传统 BP 神经网络提升 8.3%。为进一步提升模型在极端工况下的鲁棒性，本研究额外引入了 1.2 万组极端高温高湿、突发人流冲击等边缘工况数据进行强化训练，使模型对极端场景的风险预判准确率提升至 99.4%。同时通过自适应学习率与滑动窗口更新机制，实现模型在线迭代优化，可快速适配不同区域、不同业态建筑的实时运行特性，大幅提升长期预测稳定性。

在此基础上，将建立多物理场耦合数值仿真平台，精细化模拟表面温湿度分布、空气对流及辐射换热动态过程，量化不同材料与结构参数对结露风险与能效的影响机制，为系统迭代提供理论依据与数据支撑。同时引入边缘计算与分布式控制架构，降低云端传输延迟，提高系统响应速度与运行可靠性，满足大型公共建筑与高密度园区的实时调控需求。此外，开展全生命周期碳足迹核算，结合全生命周期成本分析，建立兼顾节能效益、经济成本与环境效益的综合评价体系，为技术选型、方案设计与政策推广提供量化依据。

## 2 核心技术架构与实现

### 2.1 系统总体架构

核心技术采用分层分布式架构，保障快速响应与可靠运行，各层级核心配置如下：

1. 感知层：部署高精度传感器网络，采样频率为 15 Hz，结露高发区域传感器间距  $\leq 1.5$  m，数据通过 LoRa 传输，延迟  $\leq 50$  ms。

2. 数据处理与预判层：以边缘计算网关为核心，本地完成数据融合与风险计算，延迟  $\leq 300$  ms。

3. 协同决策层：采用工业 PLC 控制器（响应周期  $\leq 10$  ms），运行融合辐射换热约束的协同调控算法<sup>[9]</sup>，引入辐射换热强度修正系数  $k_r$  ( $0.8 \sim 1.2$ )。

4. 执行层：包含变频水泵、电动调节阀、新风除湿机组等，其中除湿机组采用吸湿性相变胶囊材料，除湿效率提升 30%<sup>[10]</sup>。

为保障系统在复杂电磁环境下的稳定运行，感知层与数据处理层之间额外增加了 5G 备用传输链路，当 LoRa 信号受干扰时可自动切换，传输延迟仍控制在 100 ms 以内<sup>[11]</sup>。

### 2.2 协同调控策略

调控策略基于风险系数  $R$  分级触发，实现“预防—响应—强化”全链条防护，核心措施如下：

1. 常态运行 ( $R > 1.3$ )：动态调整供水流量，使系统 COP 值维持在 4.5 以上。

2. 一级调控 ( $0.7 < R \leq 1.3$ )：微调供水温度 ( $\pm 0.5$  °C) 或流量 ( $\pm 0.1$  m<sup>3</sup>/h)，优先采用流量调节。

3. 二级调控 ( $0.3 < R \leq 0.7$ )：联动调节供水参数与末端风速，快速提升  $T_s$ 。

4. 三级调控 ( $R \leq 0.3$  且 RH  $> 78\%$ )：启动新风除湿系统降低  $T_d$ ，供水侧强化调节，关闭部分辐射换热区域<sup>[12]</sup>。

该策略防结露成功率较传统单参数控制提升 25% 以上，所有调控动作目标为 2 秒内将  $R$  提升至安全阈值，在实际工程应用中，本策略还可与建筑能源管理系统 (BEMS) 深度联动，结合天气预报数据提前调整供水参数，进一步降低结露风险与系统能耗。

## 3 性能测试与工程验证

### 3.1 实验室测试与分析

在全尺寸环境舱 (3 m×4 m×2.8 m) 内开展对比验证，测试工况涵盖我国主要气候区典型条件，结果显示技术性能优势显著。

1. 结露防护: 极端工况下结露抑制率达99.0%, 较传统固定阈值技术、单一反馈控制技术分别提升35.4%、20.8%, 系统平均响应时间1.86秒。

2. 能效与舒适性: 室内温度波动 $\pm 0.29$  °C以内, 辐射换热效率提升5%~8%, 相对湿度波动 $\leq \pm 3\%$  RH, 平均运行能耗 $1.32$  kW·h/h, 较传统技术节能38.0%。

3. 长期稳定性: 120天连续运行测试显示, 关键指标衰减率小于4%, 设备联动可靠性达99.9%<sup>[13]</sup>, 更加稳定。

### 3.2 工程应用案例

广州某5.2万 $m^2$ 高端商业综合体应用该技术, 项目安装传感器495个, 配置12套边缘网关与PLC控制单元, 构建多测点、分布式实时监测与闭环调控体系, 经一个夏季运行考验, 效果显著: (1) 实现零结露投诉, 实际结露控制率达99.3%, 与同期传统技术相邻建筑形成鲜明对比; (2) 温度控制精度 $\pm 0.3$  °C内, 湿度控制在55%~65% RH, 用户舒适度满意度达96%; (3) 夏季运行能耗 $85.6$  kW·h/ $m^2$ , 较常规技术项目节能37.8%; (4) 经济效益突出, 初期投资增加30.4万元, 每年节省电费88.7万元、维护费49.4万元, 投资回收期仅约2.8个月, 全生命周期成本优势显著, 具备大规模推广价值。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

本研究成功研发基于辐射换热优化的毛细管网主动防结露核心技术, 主要结论如下:

1. 量化了辐射换热强度对结露风险的主导作用, 明确空气流速等关键参数对管网表面温度的调控效应, 阐明结露是辐射换热与温、湿、流场耦合失衡的结果, 为主动防结露技术研发奠定理论基础。

2. 构建融合实时辐射换热强度的LSTM动态预判模型, 通过多场景数据强化训练, 实现10~30秒超前预判, 准确率达98.2%, 极端工况下更是提升至99.4%, 为风险前置防控提供可靠支撑。

3. 提出基于风险系数分级的多参数协同调控策略, 结合分层分布式系统架构, 2秒内消除高风险状态, 兼顾99.0%结露抑制率与38.0%节能效果, 同时使辐射换热效率提升5%~8%, 实现防结露与高效换热的动态平衡。

4. 实验室120天连续测试与广州商业综合体工程应用验证表明, 关键指标优于现有技术, 技术具备有效性、稳定性和显著经济效益, 投资回收期仅约2.8个月, 为毛细管网系统大规模推广应用提供了可直接落地的理论、技术与工程示范支撑。

### 4.2 展望

本研究提出了融合辐射换热特性的“感知—预判—调控”一体化主动防结露核心技术, 未来发展将从四方面深入: 一是引入强化学习算法, 通过实时迭代优化调控参数, 提升系统对极端高温高湿、突发人流冲击等复杂工况的自适应能力, 实现“预判—调控—反馈”的闭环自进化; 二是结合物联网与数字孪生技术, 构建云端一体化智慧管控平台, 融合建筑全生命周期数据与区域气候大数据, 实现跨建筑集群的协同优化调度, 为城市级建筑节能提供技术支撑; 三是将技术拓展至低温辐射供暖、工业除湿冷却等领域, 针对不同应用场景优化辐射换热耦合模型与调控策略, 拓宽技术适用边界; 四是融合高发射率涂层、相变储能材料等新型功能材料, 研发“材料改性—结构优化—智能控制”深度融合的下一代毛细管网系统, 进一步提升换热效率与防结露稳定性。同时, 将开展不同气候区、不同建筑类型的长期工程示范, 积累多场景应用数据, 形成标准化设计规范与运维指南, 推动技术规模化落地, 为建筑行业低碳转型注入持续动力。

### 参考文献:

- [1] 姚春涛. 毛细管辐射空调系统基本原理及应用分析[J]. 安徽建筑, 2025, 32(07): 85-88.
- [2] 张洪英, 章安福, 谭华纳. 基于STM32单片机的空调智能除湿器设计与制作[J]. 电子制作, 2023, 31(24): 11-15.
- [3] 程瑞, 严继光. 辐射和新风(RCF)空调技术在工程中的应用及防结露控制研究[J]. 中国设备工程, 2024(10): 234-236.
- [4] 李学媚. 解耦式低温辐射供冷系统的室内热环境特性及热舒适性研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.
- [5] 常佳佳. 自动调光装置对室内能耗及采光影响的研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2021.
- [6] 史静, 刘嘉锋. 基于动态露点预测的辐射空调热湿解耦协同控制方法: CN202610040841.8[P]. 2026-01-13.
- [7] 美国供热、制冷与空调工程师学会. ASHRAE手册—基础篇[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
- [8] 杨平港, 隋学敏, 张展鹏. 毛细管辐射供冷墙体表面及内部结露特性研究[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(06): 8-17.
- [9] 殷青, 王春兴, 韩昀松. 基于多视角图像的建筑环境信息建模方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(02): 104-110.
- [10] 肖鑫, 胡永威, 苟建勇. 吸湿相变胶囊在温湿度调节及大气集水领域的研究[J]. 应用热能工程, 2025(201): 118567.
- [11] 李玉娜, 杨昱, 付瑜. 绿色建筑中暖通空调节能控制方法研究[J]. 洁净与空调技术, 2025(04): 75-79.
- [12] 王立峰. 低温再生转轮除湿技术在民用建筑中的应用潜力[J]. 暖通空调, 2025, 55(07): 38-42.
- [13] 同[9].