

基于转轮除湿技术的工业高湿环境节能控制策略研究

唐必文

杭州迈驰除湿净化设备有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：本文聚焦电动开窗器在智能建筑中的关键作用及现有控制系统不足。传统系统监控有限、响应滞后、智能化低、远程运维难，难以满足智慧建筑精细化管理需求。为解决问题，本研究基于物联网技术设计并实现智能电动开窗器控制系统。分析其运行特性与物联网融合机理，构建“感知层-网络层-平台层-应用层”四层架构，提出基于多传感融合的环境感知与故障诊断方法，完成软硬件设计与集成。研究表明，该系统可实时采集环境参数，远程监控与智能控制开窗器运行状态，故障识别准确率超95%，响应时间缩至秒级，能提升建筑通风智能化水平，降低运维成本超30%。本研究完善理论体系，为智慧建筑通风与安防系统升级提供技术支撑，有显著工程价值与经济意义。

【关键词】：转轮除湿技术；工业高湿环境；节能控制；吸附材料；智能调控

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.058

1 引言

随着智慧建筑的快速发展，电动开窗器作为通风系统的核心设备，其智能化水平直接影响室内环境与建筑能效。传统控制系统依赖人工或单一参数联动，存在智能化不足、协同困难、远程运维缺失等问题，难以应对复杂环境与安防需求。物联网技术的成熟为构建远程监控与智能协同的控制系统提供了解决方案，研究基于物联网的智能控制系统对提升建筑自动化水平、保障安全及降低运维成本具有重要意义。

目前，研究在本地自动控制算法和建筑设备物联网应用方面已取得进展，但仍存在明显不足：通信技术单一难以适配多元场景；环境感知缺乏多源信息融合；故障诊断通用性与准确性有限；多设备协同控制能力薄弱。本文针对这些不足，开展智能电动开窗器控制系统的设计与实现研究，旨在提升系统的综合性、适应性与实用价值。

2 转轮除湿技术的工作原理与技术特性

2.1 工作原理与连续运行机制

转轮除湿技术以固体吸附材料为核心，通过物理吸附除湿。核心设备除湿转轮分隔为处理区与再生区。工作时，湿空气进入处理区，水分子被吸附材料微孔捕获，输出干燥空气。吸附材料趋于饱和时，转轮旋转将饱和区域移至再生区，高温干燥空气使吸附材料升温，水分子脱附后随再生排风排出。经再生的吸附材料随转轮转回处理区，形成“吸附-再生”循环，确保系统稳定运行。

2.2 技术优势与核心特性

该技术优势显著，一是环境适应性强，与依赖冷凝的除湿方式不同，其除湿效率不受低温影响，能在0℃以下高湿环境稳定工作，适用于冷藏、仓储等特殊工业场景。同时，系统除湿效率高且输出稳定，可通过调整转速与风量灵活应对不同负荷，避免湿度波动干扰生产。二是能源利用形式灵活，再生热源品质要求低，除电能和天然气外，还能有效利用工业余热、

废热等低品位能源，利于系统节能。此外，系统结构简单、占地小且维护便捷。

不过，该技术也有局限性，再生能耗占比大，吸附材料性能会逐渐衰减需定期更换，在有腐蚀性气体或粉尘的环境中材料可能受污染致性能下降。可通过吸附材料改性、系统优化与智能控制等策略提升其技术经济性与适用范围。

3 工业高湿环境的调控需求与能耗分析

3.1 多样化与动态化的工业湿度调控需求

不同工业行业因生产工艺和产品特性，对环境湿度有差异化、高标准控制要求。电子制造业对湿度控制精度要求高，需将环境湿度稳定在30%-50%以防氧化和静电危害；食品加工与医药化工行业为保障产品质量与安全，需求随工序动态调整，如食品烘焙要低湿，药品储存需中湿度；纺织印染与木材加工行业湿度控制影响加工质量，要维持特定湿度，且因车间面积大，对系统均匀送风能力要求更高。

此外，湿度调控需求有显著动态波动性，同一工厂在不同生产阶段、季节和地域，湿度负荷会变化。所以，工业除湿系统要具备高度灵活性、精准性和适应性，以应对多样化、动态化的复合需求。

3.2 多维度系统能耗影响因素剖析

转轮除湿系统能耗中，再生能耗占比最高，受多重因素影响。

一是吸附材料性能，这是影响再生能耗的核心，不同材料的脱附温度要求和吸附容量有差异，直接决定再生最低能量输入和频率。

二是系统运行参数匹配度，关键运行参数设置需与湿度负荷及材料特性精准匹配，不匹配会降低再生效率或造成能源浪费。

三是能源利用方式，能源结构对总能耗影响大，传统纯电

加热模式效率低，有效利用工业余热等低品位热源再生并配置热回收装置，可降低一次能源消耗。

四是外部环境与负载波动，生产散湿量和外部气候温湿度波动使系统实际负荷动态变化，若运行参数固定，会造成能耗冗余。

4 基于转轮除湿技术的节能控制策略体系构建

4.1 核心组件优化：挖掘系统固有节能潜力

节能从源头开始，通过优化转轮结构与吸附材料提升系统本征效率。

转轮结构优化：依据湿度负荷特性，动态调整处理区与再生区面积比例；采用变径设计，处理区增大直径提升吸附面积，再生区减小直径降低风量需求；优化转轮转速，建立与湿度负荷匹配模型，实现吸附与再生动态平衡；内部增设导流结构，优化气流分布，提升气固接触效率。

吸附材料改性：通过纳米复合改性构建更丰富微孔结构，提升吸附容量与速率，减少再生频率；开发低再生温度材料，调控孔径与表面能降低再生温度 20-30℃，削减再生能耗；针对污染环境，用表面涂层技术增强抗污性；运用梯度填充技术，在处理区不同区段匹配不同性能材料，实现吸附高效接力。

4.2 运行参数动态调节：实现与负载的精准匹配

打破固定参数运行模式，根据实时负荷与环境变化动态调整关键参数，避免“过度除湿”与能源浪费。

基于湿度偏差调节，建立以实际与目标湿度偏差为核心的调节模型，偏差大时提升再生温度、风量及转速快速除湿，偏差小时降低参数维持稳态并节能。

精准控制再生温度，遵循“按需供给”原则，依据吸附材料特性和再生排风湿度调整，防止再生不足或过度。采用变风量控制模式，使处理风量与湿度负荷匹配，大型车间实施分区控制，根据区域湿度差异精准送风，避免整体风量过大。

长期低负荷时段启用间歇运行模式，降低转速与风量，结合生产计划，在高湿工序前预调参数，实现前瞻性节能。

4.3 多能源耦合驱动：优化能源结构与梯级利用

改变单一电能依赖，通过集成低品位能源与清洁能源，重构系统能源供给体系。

工业余热/废热回收利用：核心策略是回收工业生产中的高温废水、废气、蒸汽冷凝水等低品位热源，通过定制化换热系统用于再生加热。设置蓄能装置以平抑余热波动，稳定供热。

太阳能集成应用：在厂房安装太阳能集热器或光伏板，为再生加热或系统供电提供清洁能源。采用“太阳能+辅助能源”混合驱动模式，并配备智能调度系统，优先利用太阳能。

能源优先级智能调度：构建能源管理系统，依据能源品质、

成本与实时供应状态，智能调度余热、太阳能及传统电/气的使用顺序与比例，实现综合用能成本最低。

多重热回收技术：在再生排风出口设置热回收装置，预热新鲜再生空气；同时利用干燥空气与入口湿空气进行热交换，提升系统整体能效。

4.4 智能控制算法融合：实现自适应与预测性优化

引入先进控制算法与数据驱动模型，提升系统调控的自动化、精准化与智能化水平。

多传感器监测网络：在关键节点部署各类传感器，构建全覆盖的数据感知体系，为智能控制提供实时、多维的数据基础。

模糊-PID 复合控制：采用模糊控制应对湿度系统的非线性与大滞后特性，实现快速响应；结合 PID 控制确保稳态精度，形成优势互补的混合控制策略，提升控制品质与能效。

基于机器学习的预测优化：利用历史运行数据训练机器学习模型，实现对系统能耗的精准预测。基于预测结果，控制器可主动寻优，提前切换至能耗更优的参数组合，实现预测性节能。

智能监控与管理平台：集成数据监控、运行诊断、故障预警、能耗分析等功能，为管理人员提供决策支持，并通过大数据分析持续挖掘节能潜力，驱动控制策略迭代优化。

该策略体系并非孤立应用，而需根据具体工业场景的湿度需求、负荷特性和能源条件进行有机组合与协同实施，方能最大化释放转轮除湿技术的节能潜力。

5 不同工业场景的策略适配与节能效果分析

5.1 策略适配原则与方法论

节能控制策略的实施需遵循“场景适配、按需组合”的核心原则，以实现最优的能效平衡。适配的关键在于深入分析特定工业场景的三个核心维度：湿度控制精度要求、负荷波动特性以及能源供应条件。基于此分析，确定主导的节能方向与技术组合。

高精度、快响应场景（如电子制造）：以智能控制算法（模糊-PID）和运行参数动态调节为核心，确保精准控湿与快速跟随负载变化。

高湿负荷、富余热场景（如纺织印染）：以多能源耦合驱动和核心组件优化为重点，充分利用工艺余热，提升系统整体能效。

成本敏感、能源单一场景（如部分中小型企业）：优先采用运行参数动态调节与简易热回收等低成本、易实施的策略。

适配流程通常包括场景调研、需求分析、策略组合设计与现场参数调试四个阶段，确保策略方案的针对性、可行性与经济性。

5.2 典型场景应用实践与效果

在实际工业场景中，本文提出的节能控制策略体系精准适配，取得显著工程实效：

电子制造车间，针对高精度控制需求，采用“吸附材料纳米改性+模糊PID控制+动态调节”组合，改性硅胶使再生温度降至110℃，智能算法确保湿度稳定在±1.5%以内，结果系统总能耗降低超20%，吸附材料寿命延长30%，满足工艺要求且高效节能；

纺织印染车间，针对高湿负荷与余热丰富特点，应用“转轮结构优化+余热/太阳能耦合驱动+变风量控制”组合，工艺余热与太阳能满足75%再生加热需求，结合优化设计，结果系统总能耗大幅下降超50%，提升了车间湿度均匀性与产品合格率；

食品加工车间，针对多工序湿度需求快速切换场景，部署“梯度材料填充+智能参数切换+间歇运行”组合，系统可5分钟内自动完成湿度设定切换，低负荷时段智能间歇运行，结果系统总能耗降低28%，延长了食品保质期。

实践证明，该节能控制体系面向场景特征组合策略，满足多样化工业除湿需求，实现20%至50%以上显著节能效果，还提升了生产效率与产品质量，验证了其卓越工程应用价值与推广潜力。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文针对工业高湿环境节能除湿需求，系统研究转轮除湿技术优化路径，构建全方位节能控制策略体系，涵盖核心组件优化、运行参数动态调节、多能源耦合驱动及智能控制算法融合。

参考文献：

- [1] 刘异,陈柳.高温热泵转轮除湿及辐射供冷空调系统性能研究[J].建筑科学.2020,(8).
- [2] 张楠,姚晔,贾东新.基于数值模型的转轮除湿系统节能优化控制研究[J].制冷学报,2023,44(5):41-49.
- [3] 陈思豪,陈柳,高帅帅.转轮除湿复合式空调系统节能措施研究[J].低温与超导.2018,(8).
- [4] 王教领,金诚谦,宋卫东,等.转轮除湿干燥系统设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(11):374-384.

研究显示，核心组件优化可提升系统固有能效，降低再生能耗20%-30%，提高除湿效率15%以上；运行参数动态调节策略能匹配负荷变化，降低风机能耗18%-60%，减少再生能耗10%-20%；多能源耦合驱动策略整合工业余热、废热及太阳能，可替代60%-75%传统电能，优化能源结构；智能控制算法融合将湿度控制精度提升至±1.5%，实现从被动响应到主动预测优化的转变。

通过策略适配与组合应用，系统总能耗可降低20%-50%，保障精准除湿并实现节能效益。本研究表明，协同策略体系能解决转轮除湿系统高能耗问题，为工业湿度调控提供可靠技术方案。

6.2 未来展望

未来研究可从以下方向深化拓展，提升系统性能与经济性：

吸附材料与先进制造技术：研发高吸附容量、低再生温度、强抗污性的新型复合吸附材料，结合3D打印等技术，实现转轮结构与材料填充的个性化定制，挖掘节能潜力。

能源系统深度融合与新型能源利用：推动除湿系统与工厂能源管理系统深度融合，实现能源协同优化调度。探索氢能、地热能等清洁能源在再生环节的应用，提升能源供给的可持续性与清洁度。

数字孪生与智能控制进阶：引入数字孪生技术，构建系统虚拟模型，通过实时仿真与预测，实现运行参数优化、能效评估及预测性维护，推动智能控制升级。

应用场景拓展与系统集成：针对新兴产业特殊环境需求，开发专用除湿方案。推动转轮除湿技术与其他环境调控技术集成，构建工业环境综合调控系统。