

工业除湿机在高湿环境下的运行控制与节能优化研究

张寒露

湖北亿纬动力有限公司 湖北 荆门 448000

【摘要】：工业除湿机在高湿环境中长期运行易出现负荷波动大、能耗偏高与控制响应滞后等问题，影响湿度稳定与运行经济性。针对湿负荷变化复杂与传统定频控制适应性不足现象，引入基于湿度预测的动态调节策略，结合变频驱动、分级除湿与露点协同控制，实现运行参数实时优化与负载自适应调节。系统运行结果表明湿度波动显著收敛，单位能耗降低，设备运行稳定性提升运行能效指标同步改善设备故障率下降维护成本得到优化控制精度提升系统适应性增强运行成本下降明显改善良好。

【关键词】：工业除湿机；高湿环境；变频控制；能耗优化；露点协同控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.058

引言

高湿工业场景中，除湿设备持续承受湿负荷冲击，空气含水量波动与热交换效率下降使系统运行状态频繁偏离设定区间，导致控制精度与能源利用效率难以兼顾。复杂工况下，传统定速调节方式难以匹配动态变化的环境需求，设备启停频繁进一步加剧能耗损失与部件磨损。针对运行过程中的参数耦合特性与负载不确定性，引入基于状态反馈的自适应控制思路，并结合能效导向的运行策略优化路径，为高湿条件下稳定低耗运行提供技术支撑提升整体运行协调性降低系统波动增强控制稳定。

1 高湿工况下设备运行特性解析

1.1 湿负荷波动对系统热湿耦合影响

高湿环境中空气含水量呈现非均匀动态分布，湿负荷输入强度在时间维度上持续变化，导致蒸发器表面结露速率与潜热交换效率产生联动波动。热湿耦合过程中，制冷循环吸热能力与空气侧传质阻力之间形成动态匹配关系，湿度梯度变化会改变冷凝潜热释放路径，使局部换热面出现效率分区差异。湿空气流经处理腔体时，气流组织状态对边界层厚度产生影响，进而改变单位时间除湿量输出曲线，系统内部能量迁移呈现非线性特征。湿负荷突变还会引起压缩机排气温度与冷凝压力同步偏移，使热力循环稳定性受到扰动，整体能量利用率出现周期性波动。

1.2 除湿机换热与压缩循环响应特征

除湿机运行过程中，蒸发器与冷凝器之间的换热过程受制于制冷剂相态变化速率与流量调节能力，压缩循环响应存在明显的时间滞后特征。高湿条件下，蒸发端热流密度提升使制冷剂蒸发不完全风险增加，导致压缩机吸气状态偏离设计工况点^[1]。节流装置调节精度直接影响两相流分布均匀性，进而改变换热器内部温度场梯度结构。压缩过程中的等熵效率受负载变化影响显著，排气压力波动会反馈至冷凝换热端，使循环系统形成耦合振荡现象。换热效率与压缩比之间的动态匹配关系在高湿工况下表现出更强敏感性，对系统稳定输出能力形成约

束。

1.3 运行参数漂移与控制边界表现

长期高湿运行状态下，传感器采样误差与环境扰动叠加引起关键运行参数偏移，包括进风湿度、蒸发温度及冷凝压力等变量的基准漂移现象。控制系统在多变量耦合条件下难以维持稳定闭环，使设定阈值与实际运行状态之间出现偏差积累。控制边界受压缩机频率调节范围限制，当负荷接近极限区间时，系统响应呈现非线性饱和特征，调节精度下降。数据反馈延迟使控制算法无法完全捕捉瞬时湿度变化趋势，导致局部过调节或欠调节交替出现。运行参数漂移进一步削弱控制策略的鲁棒性，使系统在不同湿度区间内呈现不均衡运行状态。

2 运行偏差与能效损耗形成机制

2.1 湿度梯度变化引发的负载不均问题

高湿空间内部湿度分布呈现明显空间梯度差异，不同区域空气含水量与流动速度存在耦合变化，使除湿负载在设备进风端形成非均衡分配结构。湿度梯度增强时，局部区域潜热交换需求显著上升，而另一部分区域处于低负荷状态，导致蒸发器表面冷凝速率分布不均。气流组织结构在多路径循环条件下易产生短路流动现象，使高湿空气未充分处理即进入回流通道，削弱整体除湿效率。负载不均进一步引起制冷剂流量分布偏移，使换热管束内部温度场出现局部热点区域，系统能量利用呈现空间离散特征，运行稳定性下降。

2.2 定频控制导致的能耗冗余现象

定频控制模式下压缩机运行状态长期保持固定转速输出，无法依据湿负荷实时变化进行动态调节，使系统在低负荷阶段仍维持高功率运行状态。能量输入与实际除湿需求之间形成明显不匹配，导致单位除湿量对应能耗持续升高。固定频率运行还使节流装置与蒸发器工况偏离最佳匹配区间，制冷剂相变效率下降，潜热利用率降低^[2]。部分运行周期内冷凝压力维持在较高水平，使压缩比长期处于非经济区间，电机功率损耗增加。长期运行累积形成能耗冗余结构，使系统整体能效比呈下降趋势。

2.3 设备频繁启停造成的效率衰减

高湿负荷波动条件下,控制系统为维持设定湿度区间频繁触发启停动作,使压缩机处于非连续运行状态。启动阶段电流冲击与热力系统未稳态过程叠加,导致瞬时能耗显著高于稳态运行水平。冷媒循环在反复启停过程中难以保持稳定相态转换,蒸发器与冷凝器热惯性未充分释放即进入新一轮循环,使有效换热时间比例下降。机械部件在反复加载与卸载过程中产生额外摩擦损耗,加速效率衰减。控制逻辑在启停频率较高条件下易出现响应滞后,使系统运行区间频繁跨越效率低谷区域,整体性能持续弱化。

3 自适应调控结构构建路径

3.1 基于湿度预测的状态反馈控制模型

湿度预测模型以多源环境参数为输入基础,通过对进风含湿量、温湿耦合变化速率及空气流量特征进行连续映射,实现对未来湿负荷趋势的动态推演。状态反馈控制结构将实时湿度偏差量与预测结果进行融合计算,使控制量调整不再依赖单一瞬时误差,而是引入时间维度上的趋势修正机制。系统内部建立湿度变化率约束函数,用于识别突变与缓变工况差异,使控制响应在不同变化尺度下具备分层调节能力。控制输出通过修正压缩机频率、风机风量及节流开度实现多执行单元协同联动,使湿度收敛过程呈现渐进式稳定特征,降低过调节概率并提升系统抗扰动能力。

3.2 变频驱动与分级除湿协同机制

变频驱动结构通过调节压缩机转速实现制冷量连续可调,使输出能力与湿负荷变化形成动态匹配关系。分级除湿机制在系统架构中引入多工况运行区间划分,将高负荷、中负荷与低负荷状态对应不同的运行组合策略,使设备避免长期处于单一高功率区间。风机与压缩机在控制逻辑下实现协同调节,风量变化与制冷剂循环能力保持同步调整,减少换热器内部能量堆积现象^[3]。多级运行模式通过逐步切换方式降低负载突变对系统稳定性的冲击,使制冷循环保持较高能效区间运行。协同机制强化各执行单元之间的匹配关系,使能量输出呈现连续平滑变化特征,降低无效功率损耗。

3.3 露点约束下的动态调节策略

露点约束机制以空气湿含量临界状态为控制边界,通过实时计算空气温度与相对湿度关系,确定结露发生条件作为运行调节依据。动态调节策略将露点温度作为核心约束变量嵌入控制算法,使蒸发器运行温度始终维持在安全区间内,避免过度制冷造成能量浪费。系统通过连续监测露点变化趋势,对压缩机排气温度与冷凝压力进行联动修正,使热力循环始终处于接近最佳相变效率的区间。控制过程中引入边界保护函数,用于限制极端工况下的过冲行为,使湿度下降过程保持渐进性。露点约束与变频控制共同作用,使系统在不同湿度环境下均能维

持稳定除湿能力与较高能效水平。

4 低能耗运行优化技术整合

4.1 压缩机变频节能控制方法

压缩机变频节能控制方法以湿负荷实时波动特征为基础,通过构建连续可调频率输出模型,实现制冷能力与除湿需求的动态匹配。控制系统依据进风湿度变化率、蒸发器温度偏差及冷凝压力状态构建多变量输入矩阵,对压缩机运行频率进行分段连续修正,使输出功率始终维持在高效区间内。变频调节过程中引入最小能耗约束函数,通过对压缩比与电机效率曲线进行耦合优化,避免低负荷阶段的高功率冗余运行。频率变化采用渐进式调节机制,减少瞬态冲击对制冷循环稳定性的影响,使制冷剂相变过程保持连续性。控制算法中嵌入动态边界识别模块,对极端湿负荷条件进行自适应限幅处理,防止系统进入低效率运行区间。多时域数据融合分析进一步提高频率调整的前瞻性,使能耗分布趋于平滑化结构,降低单位除湿量对应电能消耗。

4.2 热回收与循环效率提升方案

热回收系统通过对冷凝端排放热能进行再利用设计,将原本散失的显热资源转化为辅助能量输入,降低整体制冷负担。热交换单元采用多级回收结构,使不同温度梯度的热能分别进入预热、再利用及辅助除湿环节,实现能量梯级利用。循环效率提升依赖于制冷剂流动路径优化,通过减少无效流阻与改善相变均匀性,提高热交换器整体传热系数^[4]。系统内部设置余热耦合通道,将冷凝余热用于进风预处理,降低蒸发器初始负荷,从源头减少压缩机做功需求。热回收过程中引入动态分配机制,根据运行工况自动调整回收比例,使热能利用与除湿强度保持平衡关系。换热结构优化结合表面强化传热技术,增强边界层扰动效果,提高单位体积能量交换效率,使系统在高湿工况下仍能维持较高循环能效水平。

4.3 多参数协同能效调节机制

多参数协同能效调节机制以压缩机频率、风量分配、蒸发温度及冷凝压力为核心变量,通过构建多维耦合控制空间,实现系统整体能效优化。各参数之间通过实时数据交互形成联动调节关系,使单一变量变化不再独立影响系统状态,而是通过耦合模型进行整体修正。能效优化算法基于目标函数最小化策略,对单位除湿能耗进行动态评估,并依据运行状态调整控制权重分配。风量与制冷量协同控制确保空气侧与制冷剂侧换热匹配度提升,减少能量传递损失。蒸发温度与冷凝压力采用双闭环控制结构,使热力循环始终保持在高效区间内运行。多参数调节过程中引入约束优先级机制,对关键能耗影响因素进行重点控制,使系统在复杂湿负荷环境下仍能维持稳定低耗运行状态,整体能效结构趋于优化分布。

5 运行稳定性与节能效果对比验证

5.1 能耗指标与湿度稳定性测试方法

能耗指标测试体系以单位除湿量电耗、系统瞬时功率波动率及能效比为核心参数,通过多周期数据采集构建完整运行能耗曲线。测试过程引入分时段统计机制,对不同湿负荷区间的能量消耗进行分层记录,使高负荷与低负荷阶段的能效差异得到结构化呈现。湿度稳定性评价采用连续采样与波动区间分析方法,以设定湿度值为基准,计算偏差幅度、振荡频率及恢复时间等指标,从动态角度反映系统调节能力。传感数据经过滤波与异常剔除处理后进入分析模型,避免环境扰动对结果造成偏移。能耗与湿度数据通过耦合分析方法进行关联建模,使能效变化与控制稳定性之间的对应关系更加清晰,为后续优化策略提供量化依据。

5.2 不同控制策略运行对比分析

不同控制策略对比基于定频控制、变频控制及自适应协同控制三种运行模式展开,重点围绕能耗水平、湿度控制精度及响应速度进行多维度评价。定频控制模式下能量输出保持固定状态,在负荷波动环境中呈现明显能耗冗余特征,湿度调节过程存在较大振荡幅度^[5]。变频控制模式通过频率调节改善部分工况适应性,使能耗分布趋于平缓,但在复杂湿负荷变化条件下仍存在响应滞后现象。自适应协同控制策略通过多参数联动调节,实现压缩机、风机与换热系统的整体协同,使能耗曲线

趋于稳定下降趋势,同时湿度波动范围显著收敛。对比分析过程引入统一评价模型,对不同策略下的运行数据进行标准化处理,使性能差异在统一尺度下得到客观呈现,控制策略优劣结构更加清晰。

5.3 综合运行效果与适应性评价

综合运行效果评价以长期稳定运行数据为基础,通过能效表现、控制精度及系统适应能力三个维度构建评价体系。能效层面关注单位时间能耗变化趋势及高负荷工况下的能量利用效率,反映节能结构优化程度。控制精度层面以湿度偏差范围及恢复速度为核心指标,评估系统对环境变化的响应能力。适应性评价侧重不同湿负荷强度与波动频率条件下的运行稳定性表现,通过多工况切换测试分析系统鲁棒性。评价过程中引入综合权重模型,对各项指标进行归一化处理,使不同维度性能够在统一框架下进行比较分析。运行结果在多工况叠加条件下表现出较强稳定特征,能耗分布趋于均衡化结构,系统整体适应能力与持续运行可靠性得到增强。

6 结语

工业除湿机在高湿环境中的运行控制与能耗优化路径得到系统性整合,多维参数协同调节与变频驱动机制提升湿度稳定性与能源利用效率,热回收与露点约束策略增强运行过程的连续性与适应能力,整体运行能效结构得到优化改善。

参考文献:

- [1] 何玉良.高效能除湿机技术对环境湿度控制的影响分析[J].仪器仪表用户,2025,32(1):30-32.
- [2] 黄海兵,李超顺,刘斌,刘鹏,边之豪.水电站地下厂房工业除湿机布局优化设计[J].水电能源科学,2022,40(8):172-176.
- [3] 于辉,陈昱,唐婕好,韩钊,黎平,兰丽.地下厂房工业除湿机有效除湿范围评价方法[J].四川建筑科学研究,2020,46(5):88-94.
- [4] 姜圆圆.除湿机助力消费者远离潮湿困扰[J].大众用电,2024,39(4):77.
- [5] 杨志鹏.家用转轮除湿机传热传质机理研究及运行参数优化[D].合肥工业大学,2024.