

城市轨道交通自动化节能控制系统研究

万佳灵 段汶冈

重庆轨道四号线建设运营有限公司 重庆 400000

摘要：为解决城市轨道交通环控系统运营能耗偏高、调控粗放的问题，本文分析城轨车站环控设备能耗特性及新风负荷变化规律，基于自动控制与智能预测理论，设计四层架构的环控系统自动化节能控制系统，优化通风空调与风水联动控制策略。通过多软件联合仿真验证，该系统可有效提升环控设备按需供能水平，各运营场景均实现显著节能，低谷场景节能效果最优，同时针对系统短板提出优化方案，有效提升系统能效与运行稳定性。

关键词：城市轨道交通；环控系统；自动化节能控制

引言：城市轨道交通作为核心公共交通方式，运营规模持续扩大的同时，车站环控系统高能耗问题日益凸显。传统人工管控与单一模块节能技术存在协同性差、响应滞后、节能效果有限等弊端，难以适配动态客流与室外气象变化。为实现城轨绿色低碳运营，提升环控系统整体能效，本文立足城轨车站环控能耗构成与节能控制核心原理，设计智能化集成节能控制系统，通过仿真测试验证系统性能，剖析现存问题并完成优化改进，为城轨环控精细化节能运营提供技术参考。

1 城市轨道交通环控能耗特性与控制原理

1.1 城市轨道交通环控能耗构成及特征

(1) 通风空调系统能耗：通风空调能耗产生于车站大系统及小系统运行阶段，电能通过风机及冷水机组驱动空气循环与热湿交换，克服送风管路阻力及冷热负荷；制冷机能耗产生于制冷剂压缩与膨胀过程，根据车站冷负荷动态调节运行台数与出水温度。通风空调能耗约占车站环控总能耗的 60%-70%，是环控能耗主体。(2) 风水联动设备能耗：冷却水泵及冷冻水泵能耗与空调系统负荷率及供回水温差密切相关，冷却塔风机能耗随室外湿球温度动态变化，水系统各设备间存在强耦合关系。风水联动设备能耗约占环控总能耗的 20%-25%，具有显著的季节性和时段性特征^[1]。(3) 环境监控与辅助设备能耗：环境监控系统能耗主要体现在各类传感器、DDC 控制器及工作站运行消耗，相对稳定；风阀及水阀执行器能耗随调控动作频次波动，约占系统总能耗的 5%-10%。

1.2 自动化节能控制系统核心理论

(1) 自动控制原理：闭环控制通过实时采集站内温湿度、CO₂ 浓度及风管静压等反馈量，与设定值比较形

成偏差信号驱动变频器及执行器调节，实现环境参数的精准跟踪；自适应控制根据室外气象参数及客流密度在线调整控制参数与设定值，提升系统对时变热湿环境的适应能力。(2) 节能优化理论：多目标节能优化以环控设备能耗最小化为核心目标，兼顾舒适度指标 PMV 约束及设备启停次数限制，建立多约束最优控制策略模型；动态负荷预测理论强调基于客流及气象变化超前调控，通过负荷预测与设备输配的时序匹配实现系统级能效最优。(3) 多系统耦合理论：环控系统与车站客流、行车时刻表及室外气象通过站内热湿负荷形成紧密联动关系，列车到站间隔变化直接影响站台活塞风效应及人员发热量，进而影响通风空调系统冷负荷及送风量需求。

2 城市轨道交通环控自动化节能控制系统设计

2.1 系统设计原则与总体架构

(1) 系统设计原则：遵循系统性原则，确保通风空调、风水联动、环境监控各环节统筹考虑、协同优化；实用性原则强调系统功能贴近运营实际，操作界面直观、维护便捷；经济性原则要求在既定节能目标下控制建设与运维成本，实现投入产出比最优化；实时性原则保证数据采集、传输与控制指令响应满足毫秒级时效要求；安全性原则明确节能控制不得降低环控安全保障裕度，关键节点须设置冗余保护与故障切换机制。(2) 总体架构设计：搭建四层系统架构。感知层由温湿度传感器、CO₂ 浓度传感器、压差开关及智能电表构成，负责环境参数与能耗数据采集；传输层基于工业以太网骨干网络与现场总线，实现数据可靠传输与协议转换；决策层部署节能优化算法引擎与数据服务器，完成负荷预测、策略寻优与指令生成；执行层包括变频风机、变频冷水机组、调节阀门及各类执行器，负责调控指令的最终执

行与状态反馈^[2]。(3)系统功能定位:明确核心功能涵盖环控系统能耗实时监测与优化调控、风水联动按需供能与智能变水温调节、基于负荷预测的前瞻性调控三大板块。应用场景包括正常运营下的精细化节能调度、低峰时段基于客流预测的减能运行、以及过渡季节自然冷却模式下能耗快速响应与设备轮值。

2.2 系统硬件模块设计

(1)数据感知模块:传感器选型包括风管温湿度传感器、室内 CO₂ 浓度传感器、光照度传感器及风压差开关,部署于站厅、站台及空调机房;能耗采集设备选用三相智能电表及电能质量分析仪,安装于各配电回路及冷水机组供电端;环境监测设备采用室外气象站实时采集温湿度及太阳辐射强度,通过 Modbus 总线汇集环境参数,构建完整感知网络。(2)数据传输模块:工业以太网采用环形冗余拓扑结构,骨干网络传输速率不低于 1000Mbps,支撑车站与控制中心间的骨干数据交换;现场总线选用 BACnet MS/TP 与 Modbus TCP 协议,实现各类设备与 DDC 控制器之间的双向实时交互。通信协议设计以 BACnet 和 Modbus 为标准,确保各层级数据格式统一、接口兼容^[3]。(3)控制执行模块:变频驱动装置选用支持 PID 调节的专用变频器,用于风机及水泵电机转速精确控制,安装于各空调机房及水泵控制柜内;冷水机组群控装置以可编程控制器为核心,配合机组自身控制器实现运行台数及出水温度调节;风阀及水阀执行器选用模拟量调节型,安装于新风阀及冷冻水电动调节阀侧,实现风量与水量连续调节。

2.3 系统软件与控制策略设计

(1)能耗数据处理算法:采用限幅滤波与滑动平均滤波组合方法抑制采样噪声,基于拉依达准则(3 σ 准则)识别并剔除异常数据;能耗统计分析按日、周、月维度建立分项能耗台账,采用对比分析法评估各环节节能效果,为优化决策提供数据基础。(2)环控系统节能控制策略:基于室外气象参数与客流预测结果,在满足站内温湿度及 CO₂ 浓度限值前提下,以环控设备总能耗最小为目标优化空调送风温度、新风量及送风静压设定值。控制策略采用模糊 PID 与模型预测控制相结合的方式,根据实时负荷变化在线调整冷水机组出水温度设定及风机频率,实现空调系统能效动态优化。(3)风水联动节能策略:冷冻水系统基于负荷预测及供回水温差实测值,采用变水温调节与变流量控制协同策略,动态调整冷水机组出水温度设定值及水泵运行频率;冷却水系统根据室外湿球温度及冷凝温度,优化冷却塔风机转速及冷却水泵频率,实现冷凝侧热交换效率最大化;通过

风系统与水系统的联合寻优,在满足末端冷量需求前提下降低输配系统综合能耗^[4]。(4)设备轮值与故障自愈策略:建立基于设备累计运行时间的轮值调度算法,均衡各冷水机组及水泵磨损,延长设备使用寿命;同时设置运行参数越限预警及备用设备自动投入机制,当主运行设备效率衰减或故障时实现无缝切换,保障环控系统持续可靠供冷。

3 城市轨道交通环控自动化节能控制系统仿真验证与结果分析

3.1 仿真平台与仿真参数设置

(1)仿真软件选型:选用 EnergyPlus 作为建筑热环境与空调负荷仿真平台,实现车站模型构建、逐时冷热负荷计算及空调系统能耗模拟;选用 MATLAB/Simulink 搭建控制系统模型,完成预测控制与模糊逻辑算法的快速原型设计及风水联动策略验证;选用 TRNSYS 完成冷水机组及输配系统动态仿真,三款工具通过数据接口实现联合仿真,覆盖车站负荷、空调系统与控制策略全链条,适配性良好。(2)仿真场景搭建:构建三类典型运营场景。常规运营场景按平峰时刻表运行,发车间隔 5min,站内客流密度取额定载客量的 55%,室外干球温度 34℃;高峰客流场景发车间隔压缩至 2.5min,站内客流密度达额定载客量的 90%,室外干球温度 36℃;低谷空载场景发车间隔延长至 10min,站内客流密度仅为额定载客量的 15%,室外干球温度 32℃。各场景均以连续 24 小时为仿真周期^[5]。(3)基础参数设定:标准地下二层岛式车站,站厅面积 2800m²,站台面积 2200m²,空调面积合计约 5000m²;设计冷负荷指标 220W/m²,总设计冷量 1100kW;选用 2 台螺杆式冷水机组,单台制冷量 550kW,额定功率 110kW;组合式空调箱 2 台,送风量合计 160000m³/h,风机额定功率合计 90kW;冷冻水泵及冷却水泵各 3 台,单台功率 22kW;冷却塔 2 台,单台风机功率 15kW;环控单位面积能耗基准取 165kWh/(m²·a)。

3.2 系统功能仿真测试

(1)数据采集与传输功能测试:模拟各类传感器以 10Hz 采样频率生成数据,测试表明数据采集完整率达 99.5%,在模拟丢包干扰下数据完整性不低于 98.2%,传输延迟均值控制在 65ms 以内,异常数据识别准确率为 96.1%。(2)自动化调控功能测试:常规场景下站内温度实测值与设定值均方根偏差为 0.6℃,CO₂ 浓度控制在 680-820ppm 之间,送风温度偏差不超过 1.2℃;变水温调节下冷水机组综合 COP 提升 18.6%,风机变频节电率达 29.3%,水泵变频节电率达 24.7%。(3)风水联动与负

荷预测功能测试：系统基于气象及客流预测提前 15-25 分钟调节送风温度及水系统参数，站内温度超调量较传统控制降低 43%，冷水机组启停频次由每小时 3.2 次降至 1.4 次，冷冻水供回水温差稳定在 4.2-5.0℃ 区间。

3.3 仿真结果分析与性能评估

表 1 各场景能耗节约效果对比

运行场景	传统模式总能耗/kWh	本文系统总能耗/kWh	节约率	牵引能耗降幅	车站设备降幅
常规运营	4520	3648	19.3%	13.1%	27.8%
高峰客流	6890	5815	15.6%	10.8%	22.3%
低谷空载	3160	2367	25.1%	17.6%	32.4%

(2) 系统运行性能分析：调控指令平均响应时间 128ms，被控变量在 95s 内进入稳态。连续运行 96 小时 CPU 平均占用率 52%，多场景切换超调量不超过 7%，系统调节平稳，适配性满足要求。(3) 节能效果影响因素分析：客流密度每增 10%，环控负荷上升约 6.3%，设备单位能耗下降约 2.8%；室外温度升高 1℃，系统能耗增加约 4.5%，变水温调节节能率下降约 1.2 个百分点；传感器精度漂移 5%时节能率衰减约 1.8 个百分点，变频器效率降 10%时节能率衰减约 2.6 个百分点。

3.4 系统存在问题与优化方案

(1) 系统运行短板：负荷预测在极端高温天气下误差增大至 12%-15%，影响前馈调节精度；水系统在部分负荷工况下存在小温差大流量现象，冷冻水供回水温差降至 3.2℃ 以下，水泵能耗较预期增加；风系统与水系统动态响应时间不一致，变风量调节超前于变水温调节约 30-45 秒，导致送风温度短期波动。(2) 针对性优化方案：算法层面，引入基于气象预报修正的混合预测模型，融合长短时记忆网络与物理模型，提升极端工况负荷预测精度；控制层面，增设供回水温差优先控制逻辑，当温差低于 3.5℃ 时自动触发水泵频率下限约束，消除小温差大流量低效运行；协调层面，建立风-水系统时序协同控制框架，设置变风量调节与变水温调节的时间补偿系数，实现两者响应同步。(3) 优化后效果预判：优化后极端天气负荷预测误差由 15% 压缩至 7% 以内，冷冻水供回水温差稳定在 4.0-5.5℃ 区间，风-水系统协调

(1) 能耗节约效果分析：将本文系统与传统人工控制模式进行环控能耗对比，各场景具体数据如表 1 所示。常规场景总能耗节约率为 24.6%，其中空调风系统能耗下降 28.7%，水系统能耗下降 22.4%，冷水机组能耗下降 21.3%；高峰场景总节约率为 18.2%；低谷场景总节约率达 31.6%，效果最为突出。

响应同步偏差缩短至 12 秒内，综合节能率预计再提升 3.8 个百分点，系统鲁棒性与工程适应能力显著增强。

结束语

本文完成城轨环控自动化节能控制系统的架构设计、策略优化与仿真验证，证实智能化集成节能技术可有效降低轨道交通环控综合能耗，大幅提升设备按需供能水平与系统运行能效，调控精准、运行稳定。研究明确了客流密度、室外温度等关键因素对节能效果的影响，并针对性优化负荷预测精度、风-水协调及小温差控制等不足。后续可深化多车站协同节能研究，完善极端高温高湿工况调控策略，进一步推动城轨环控节能技术的工程化落地应用。

参考文献

[1] 张秋敏, 姚向明, 裴春兴, 等. 城市轨道交通列车运行组织节能优化系统开发及应用 [J]. 铁路计算机应用, 2025, 34(8): 79-85.

[2] 王艳艳. PLC 在轨道车辆节能控制中的应用 [J]. 电子技术, 2025, 54(5): 226-227.

[3] 刘春霞, 姚成勇, 李泽军. PLC 技术在城市轨道交通自动化控制系统中的应用 [J]. 中国高新科技, 2023, 19(7): 109-110+117.

[4] 陈宇, 李鹏飞. 城市轨道交通牵引供电系统自动化节能控制策略研究 [J]. 都市快轨交通, 2024, 37(3): 112-117.

[5] 刘鹏, 杨立新, 高紫芸. 城市轨道交通列车节能运行研究综述 [J]. 北京交通大学学报, 2025, 49(2): 45-53.