

地铁车站通风空调系统分区域节能运行模式及能效提升路径

王明乐

天津一号轨道交通运营有限公司, 天津 300201

DOI:10.61369/ME.2025060024

摘 要 : 本文聚焦地铁车站通风空调系统分区域节能运行模式及能效提升路径,旨在解决传统“固定参数、统一启停”的运行模式未能适配车站各区域功能、负荷特性及动态变化的运营需求这一问题,深入剖析了地铁车站公共区、设备区及隧道区三大核心区域的系统构成、热环境特性与负荷构成,揭示了传统模式在控制粗放、负荷脱节、联动不足等方面的能耗痛点。在此基础上,创新性地提出并构建了“按需适配、动态调优”的分区域节能运行模式。为确保该模式的有效落地,进一步系统性地提出了能效提升的三大关键路径,设备升级与系统优化,通过核心设备高效化、变频化改造及系统流程重构,提供硬件支撑;精细化运营与智慧运维,建立动态管理机制与全流程智慧化运维体系,提供制度保障;数据驱动与智能决策,依托数据中台、负荷预测模型与智能控制平台,实现从被动调节到主动优化的跨越。研究表明,构建的分区域节能运行模式与能效提升路径,可实现系统综合节能20%–35%,显著提升地铁环控系统的运行效率与智能化水平,为城市轨道交通的绿色低碳发展提供了重要的理论依据和实践指导。

关 键 词 : 地铁车站; 通风空调系统; 分区域控制; 节能运行

Energy-Saving Operational Modes and Efficiency Enhancement Pathways for Zoned Ventilation and Air Conditioning Systems in Subway Stations

Wang Mingle

Tianjin Metro Line 1 Operation and Management Co., Ltd., Tianjin 300201

Abstract : This paper focuses on the energy-saving operational modes and efficiency enhancement pathways for zoned ventilation and air conditioning (HVAC) systems in subway stations, aiming to address the limitations of traditional "fixed parameter, unified start-stop" operational models that fail to adapt to the functional, load characteristics, and dynamic operational needs of different station areas. It provides an in-depth analysis of the system composition, thermal environment characteristics, and load composition in the three core areas of subway stations: public zones, equipment zones, and tunnel zones. The paper reveals energy consumption pain points in traditional models, such as coarse control, load disconnection, and insufficient coordination. Building on this foundation, it innovatively proposes and constructs a "demand-based adaptation, dynamic optimization" zoned energy-saving operational mode. To ensure the effective implementation of this mode, three key pathways for efficiency enhancement are systematically proposed: equipment upgrading and system optimization, providing hardware support through high-efficiency and frequency conversion transformations of core equipment and system process reconfiguration; refined operation and intelligent maintenance, establishing a dynamic management mechanism and a full-process intelligent maintenance system to provide institutional safeguards; and data-driven and intelligent decision-making, relying on a data middleware platform, load prediction models, and an intelligent control platform to achieve a transition from passive adjustment to proactive optimization. Research indicates that the constructed zoned energy-saving operational mode and efficiency enhancement pathways can achieve a comprehensive energy savings of 20%–35% for the system, significantly improving the operational efficiency and intelligence level of subway environmental control systems. This provides important theoretical foundations and practical guidance for the green and low-carbon development of urban rail transit.

Keywords : subway station; ventilation and air conditioning system; zoned control; energy-saving operation

引言

随着我国城市化进程的加速和公共交通优先发展战略的深入实施，城市轨道交通以其大运量、高效率、准点率高等优势，已成为缓解城市交通拥堵、优化城市空间布局的骨干力量。然而在地铁网络蓬勃发展的背后，其巨大的能源消耗问题也日益凸显，成为制约城市轨道交通可持续发展的关键瓶颈。在“双碳”目标背景下，如何有效降低地铁环控系统的运行能耗，实现绿色低碳运营，已成为行业亟待解决的重大课题。近年来学术界与工程界已开始关注地铁环控系统的节能问题，并从设备效率提升、控制策略优化等角度开展了有益探索。本文系统分析地铁车站各区域的系统构成、热环境特性与负荷构成，揭示传统模式的能耗痛点；进而依据“功能属性主导、负荷特性辅助”的原则，创新性地设计针对公共区、设备区、隧道区的差异化节能运行模式及其控制策略；从设备升级、精细化运维和数据驱动三个维度，提出实现能效全面提升的关键路径。研究旨在为地铁环控系统的节能降耗与智能化升级提供理论依据和技术支撑，对推动城市轨道交通的绿色、低碳、智慧发展具有重要的现实意义和应用价值。

一、地铁车站通风空调系统现状与能耗分析

（一）地铁车站通风空调系统构成与功能

地铁通风空调系统（又称地铁环控系统），是为保证地铁站及隧道内部空气品质、温湿度等环境因素在乘客可接受水平而设的系统，是地铁系统中不可分割的一部分^[1]。地铁环控系统是保障地下环境安全与舒适的核心基础设施，由公共区、设备区和隧道通风三大子系统组成，并通过中央监控系统（BAS）实现智能联动。公共区环控系统主要服务于站厅、站台等人员密集区域，通过温湿度与CO₂浓度控制，维持夏季26~28℃、冬季18~22℃、湿度40%~65%的舒适环境，并根据人流密度动态调节风量以平衡能耗与空气质量^[2]。设备区环控系统则为通信、信号、配电等关键设备房提供精准温湿度保障，普通区域控制在24~28℃，精密设备房需稳定在22±1℃，湿度40%~60%，并24小时不间断运行以防止设备宕机。隧道通风系统兼具排除列车余热与火灾排烟双重功能，日常防止隧道温度超过40℃，并与列车运行调度协同，提前启动风机以减少对公共区的影响^[3]。三大系统通过BAS实现高效协同，例如在列车进站时同步启动隧道与公共区风机，确保环境调控的整体性与应急响应能力。

（二）地铁车站热环境特性与负荷构成

地铁车站地下空间因封闭性、功能多样及人流波动，其热环境与负荷呈现区域化与动态化特征。不同区域热环境差异显著，公共区温度随人流波动大，夏季易超28℃，湿度受新风及人员影响；设备区温度稳定但冬季需加湿，环境密闭；隧道区则随列车运行剧烈升温，停运后恢复。热负荷主要由四类构成，人员散热是公共区核心负荷（占35%~45%），随人流变化；设备散热是设备区主导负荷（占80%~90%），稳定且以显热为主；围护结构传热占比10%~15%，随季节形成冷热负荷交换；新风负荷是公共区关键（占25%~30%），是节能优化重点^[4]。负荷日内波动明显，早晚高峰达峰值，停运时段降至低谷；季节上夏季负荷最高，冬季次之，夏冬负荷比约1.5:1。

（三）传统运行模式及其能耗痛点

当前多数地铁环控系统采用“固定参数、统一启停”的传统模式，未能适配区域特性与负荷波动，导致能耗严重浪费^[5]。控制模式粗放，公共区与设备区统一设定温度，额外能耗占10%~15%；设备按运营时间统一启停，设备区夜间空转、隧道风机无效运行，造成大量电能浪费。设备运行与负荷脱节，定频风机无法

随负荷调节，平峰时段风量过剩；冷水机组低负荷时能效骤降；新风阀开度固定，未结合人流调整，增加处理能耗^[6]。系统联动不足，动态响应滞后，列车进站前隧道风机未提前启动，导致公共区温度骤升，空调需超负荷运行；故障时无法及时补风，依赖人工调整，响应慢且易延长无效能耗。此外，能耗统计粗放，缺乏细分数据与关联分析，节能优化缺乏依据^[7]。传统模式下无效能耗占比达18%~25%，单站年浪费电能可达52~91万kWh，节能潜力巨大。

二、地铁车站分区域特性分析与节能运行模式构建

（一）车站功能区域划分与热环境需求差异

基于地铁车站功能布局、热负荷特征及运营需求，以“功能属性主导、负荷特性辅助”为原则，将车站划分为公共区、设备区、隧道区三大核心区域，并细分为6个子区域，各区域热环境需求差异显著，为分区域节能运行提供依据。公共区细分为站厅与站台子区，站厅为短时脉冲式人流，需维持温湿度及CO₂浓度，并增强出入口湿度调控；站台受列车余热影响大，需强化气流组织，避免局部闷热。设备区细分为普通与精密设备子区，普通设备子区散热量稳定，温湿度控制要求较低；精密设备子区需严格控制温控湿，保障空气洁净度，防止设备宕机。隧道区细分为区间与车站端隧道子区，区间隧道主要排除列车余热，温度随车次波动；车站端隧道受站台回流影响，温度波动更剧烈，需与公共区协同防热渗入。

（二）基于负荷特性的分区域节能运行模式设计

针对各区域负荷波动规律与热环境需求，设计“按需适配、动态调优”的分区域节能运行模式，实现负荷与供能精准匹配^[8]。公共区采用“分时-人流联动”模式，高峰时段人流密集，系统自动降温、全开新风、满负荷运行；平峰时段人流减少，则上调温度设定、按需调节新风量、风机变频运行；停运时段仅保留排风机低速通风，关闭新风阀，该模式较传统运行节能20%~25%。设备区采用“恒温-分级调控”模式，精密设备区通过变频恒温控制，根据温度微调冷量输出与风速，节能15%~18%；普通设备区采用间歇运行结合夜间冗余设备关停，节能25%~30%。系统还接入设备监控，根据设备运行状态动态调整负荷，避免供能过剩^[9]。隧道区采用“列车-时序联动”模式，结合列车调度，高峰时段提前启动风机排热，平峰时段按列车频次

间歇运行，停运时段集中排热后关停，温度超标时自动触发强排风应急策略，该模式较传统固定运行节能30%–35%。

（三）分区域运行模式的控制策略与实现

分区域节能运行模式的落地，需依托“感知–调节–联动”三位一体的控制体系。在精准监测层面，构建多维度感知网络，公共区布设人流、CO₂及温湿度传感器；设备区部署高精度温湿度及设备功率监测；隧道区设置列车位置与温度传感器，并与调度系统数据同步，形成“环境–设备–运营”数据闭环，为控制提供实时依据^[10]。在动态调节层面，采用“分级–自适应”控制逻辑。设备级实现核心设备变频化，如风机、水泵根据人流、温度动态调速；冷水机组、空调压缩机则根据负荷变容量运行。系统级则实现参数自适应，如公共区新风阀随CO₂浓度自动调节，设备区空调启停周期随散热量动态修正，实现精细化节能。在跨系统联动层面，构建“环控–运营–应急”协同机制。例如列车进站前隧道风机与公共区新风阀联动，防余热渗入；公共区空调故障时，设备区可跨区补冷；设备超温时自动触发应急排风并告警。所有联动逻辑预设于BAS系统，支持远程干预。为保障体系运行，需进行硬件升级与软件优化，最终实现分区域节能运行的全自动化与智能化落地。

三、通风空调系统能效提升关键路径

（一）设备升级与系统优化

技术路径是实现能效提升的硬件基础，通过核心设备高效化改造与系统流程重构，为分区域节能运行提供支撑。核心设备升级聚焦高能耗设备的变频化与高效化替代，公共区与隧道区风机更换为1级能效永磁同步变频风机，部分负荷下能耗较定频降低35%–45%；冷水机组采用磁悬浮离心式，COP \geq 6.0，部分负荷能效提升20%–25%；设备区用变频多联机替代定频柜机，节能18%–22%并支持独立控温。此外，加装全热回收装置（效率 \geq 75%），可显著降低新风处理能耗。系统流程优化围绕按需供能重构输送逻辑，公共区采用“分区送风+变风量”设计，按人流密度精准分配风量，节能12%–15%；冷量输送采用“一级泵变流量+二级泵变流量”组合，水泵能耗降低28%–32%；隧道区增设“余热导流风道”，直接排出列车余热，减少向站台渗透40%。同时设备区增设“应急冷量旁路”，将故障响应时间从30分钟缩短至5分钟，提升系统可靠性。

（二）精细化运营与智慧运维

管理路径是能效提升的制度保障，通过构建精细化运营与智慧化运维体系，确保技术成果长效落地。精细化运营建立“分

区、分时、分场景”的动态管理机制，制定《分区域节能运行规程》，明确各区域不同时段的参数阈值与能耗定额，并据此动态调整运行计划，如根据季节、客流优化新风与温度设定。同时建立“能耗–舒适度”平衡评估机制，通过分析能耗与乘客反馈，在节能与舒适间找到最佳平衡点。智慧化运维升级“巡检–预警–处置”全流程，采用“分区定频+重点排查”的巡检模式，并建立电子档案。基于设备数据构建故障预警模型，实现异常的早期识别与自动告警，将故障发现时间从8小时缩短至1小时内。此外，加强运维人员培训，并将区域能耗与故障处置时效纳入考核，激励主动优化，使平均故障处置时间从4小时缩短至1.5小时，全面提升运维效率与系统可靠性。

（三）数据驱动与智能决策

数字化路径是能效提升的核心赋能手段，通过全维度数据采集、智能模型分析与自动决策执行，推动分区域运行模式从被动调节转向主动优化。全维度数据采集构建环控系统数据中台，整合环境、设备、运营及外界等多源数据，通过高速工业以太网打破系统壁垒，并建立数据质量校验机制，确保数据准确率 \geq 98%，为智能决策提供可靠基础。智能模型构建聚焦负荷预测与能效优化。采用LSTM网络预测未来1–24小时各区域热负荷，精度 \geq 92%，实现前瞻性调节；通过遗传算法求解以“能耗最低、舒适度达标”为双目标的最优运行参数组合，较人工设定节能8%–12%。模型采用增量学习，持续适应季节与运营变化。智能决策与自动执行打通“模型–控制–监控”全流程，优化参数通过PLC自动下发至设备，实现无人干预，同时搭建环控智能监控平台，支持远程监控与修正。此外，探索数字孪生车站技术，模拟不同场景下的能耗与环境变化，提前优化参数，推动系统向预测性优化发展。

四、结束语

地铁站作为城市轨道交通网络的关键节点，其通风空调系统的能耗问题直接关系到整个行业的绿色可持续发展。本文针对传统环控系统运行模式粗放、能耗巨大的痛点，系统性地开展了分区域节能运行模式及能效提升路径的研究，取得了一系列具有理论价值与实践指导意义的结论。本文的核心贡献在于，摒弃了将车站视为均质空间的传统观念，构建了一套以“区域功能差异”和“负荷动态特性”为基础的分区域节能运行新范式。通过持续的技术创新与管理优化，地铁通风空调系统必将朝着更加绿色、智能、高效的方向不断迈进，为构建可持续发展的智慧城市贡献更大力量。

参考文献

- [1] 曾逸婷. 地铁车站公共区通风空调系统运行方案优化方法研究 [D]. 陕西：西安建筑科技大学，2019.
- [2] 刘毅，赵月. 既有地铁车站热湿环境与通风空调系统测试分析 [J]. 制冷，2023, 42(2): 19–23, 35. DOI: 10.3969/j.issn.1005–9180.2023.02.005.
- [3] 张文清. 地铁车站设备区空调负荷动态特性分析及系统优化 [D]. 广东：华南理工大学，2008. DOI: 10.7666/d.Y1439922.
- [4] 盛晓文，黄翔，李鑫，等. 地铁直接蒸发冷却通风降温系统适应性区域划分 [C]//2014 铁路暖通年会论文集. 2014: 169–176.
- [5] 路鼎鉴. 地铁车站动态热环境及通风空调运行模式研究 [D]. 北京：北京交通大学，2020.
- [6] 丁玮琦. 基于 Modelica 建模仿真的地铁通风空调系统控制策略及能耗模拟研究 [D]. 陕西：长安大学，2023.
- [7] 常莉，冯炼，李鹏. 地铁环控系统不同区域能耗分析 [J]. 制冷与空调（四川），2009, 23(5): 115–118. DOI: 10.3969/j.issn.1671–6612.2009.05.029.
- [8] 裴同江. 地铁环境控制系统的研究 [D]. 上海：上海交通大学，2005.
- [9] 徐波. 地铁安全门系统和屏蔽门系统舒适性及能耗性研究 [D]. 天津：天津大学，2007. DOI: 10.7666/d.Y1358719.
- [10] 常莉. 地铁环控系统区域适用与节能性研究 [D]. 四川：西南交通大学，2009. DOI: 10.7666/d.y1688581.