

地铁轨道通风系统技术分析 with 优化策略研究

梁日旺

上海唯智工程项目管理有限公司, 上海 200070

[摘要]在城市交通体系中,地铁是重要的组成部分。地铁轨道中通风系统更是必不可少的环节。通风系统作为保障地铁内空气质量与乘客舒适度的关键设施,其能耗问题愈发凸显。通风系统能耗在整个城市地铁整体能耗中占据相当大的比例,降低通风系统能耗,对实现城市地铁的绿色可持续发展、降低运营成本意义重大文中针对地铁轨道通风系统,分析其功能需求、运行原理及常见问题,结合工程案例探讨优化策略,旨在提升地铁通风效率,保障乘客与工作人员的舒适度和安全性。

[关键词]能耗;智能环控;精准预测;智能运维

DOI: 10.33142/ucp.v2i3.16718

中图分类号: U231.5

文献标识码: A

Technical Analysis and Optimization Strategy Research on Subway Track Ventilation System

LIANG Riwan

Shanghai Weizhi Engineering Project Management Co., Ltd., Shanghai, 200070, China

Abstract: In the urban transportation system, the subway is an important component. The ventilation system in subway tracks is an essential component. As a key facility to ensure air quality and passenger comfort in the subway, the energy consumption problem of the ventilation system has become increasingly prominent. The energy consumption of ventilation systems accounts for a considerable proportion of the overall energy consumption of urban subways. Reducing the energy consumption of ventilation systems is of great significance for achieving green and sustainable development of urban subways and reducing operating costs. This article analyzes the functional requirements, operating principles, and common problems of subway track ventilation systems, and explores optimization strategies based on engineering cases, aiming to improve subway ventilation efficiency and ensure the comfort and safety of passengers and staff.

Keywords: energy consumption; intelligent environmental control; accurate prediction; intelligent operation and maintenance

引言

研究背景:地铁的重要性不言而喻。地铁不仅是解决城市交通拥挤的有效途径,更在提升公共交通使用率、减少尾气排放、改善城市环境等方面发挥着举足轻重的作用。而做为地铁的重要组成部分通风系统,则对空气质量、温度控制、防灾救援提出了更高要求。例如:2023年,苏州轨道交通线网总客运量为53176万人次。2024年,苏州轨道交通线网总客运量为62917.60万人次。但随着城市地铁网络扩张,高峰时段客流量激增,通风系统压力增大。

研究意义:地铁轨道通风系统关乎乘客的舒适度和健康,良好的通风能减少乘客在封闭空间中的不适感。同时,它对保障地铁设备的正常运行、延长设备使用寿命也至关重要,还在紧急情况下为人员安全疏散提供了关键保障,是地铁安全运营不可或缺的一部分。

1 研究现状

1.1 国外发展

(1)早期探索:20世纪30年代前,多数地铁利用列车活塞自然通风,后因电力机车使用、散热量增加和客运量增大,环境舒适性变差。如1901年纽约地铁起初未重视强迫通风,后因温度过高问题在车站房顶设通风口,

修建风机管和通风管。

(2)技术发展:1909年波士顿地铁采用隧道顶部风管通风,车站出入口设计较大。1943年美国芝加哥地铁建设时考虑环境控制问题,工程师建立了计算列车活塞效应的方法和计算式,创造了未使用空调却能提供充分通风和宜人温度的地铁系统。

(3)现代模拟技术应用:当前,国外将CFD逐渐应用到地下空间领域,对地铁内不稳定空气动力学和热力学问题进行三维模拟研究。国际上广泛认可的地铁环控模拟软件SES,由美国交通部于1975年开发,经多次修改和功能增加,可模拟多种地铁运行工况。

1.2 国内发展

(1)草创阶段:1965年北京地铁1号线建设,当时技术条件和生产能力有限,暖通空调系统以通风为主。

(2)发展阶段:1986年上海地铁1号线开始建设,是国内第一条有空调系统的地铁,采用站台屏蔽门制式通风空调系统(缓装)。1999年后,中国进入城市轨道暖通空调现代化发展阶段,各设计院根据不同地区气候形成了自己的技术和手段。从北京地铁八通线开始,国内城市轨道交通暖通系统进入发展阶段,之后进入大规模建设阶段,地面暖通技术进步推动了城市轨道暖通系统的跳跃式发展。

1.3 现状分析

(1) 能耗现状: 苏州地铁各线路通风系统能耗数据显示, 不同线路、站点因客流量、车站规模和地理位置差异, 能耗水平有所不同。例如, 位于市中心、换乘站等客流量大的站点, 通风设备运行时间长、负荷高, 能耗明显高于郊区站点。经统计分析, 通风系统能耗占苏州地铁总能耗的 30%~40%, 是节能潜力较大的部分。

(2) 现有系统问题: 部分早期建设线路的通风设备老化, 运行效率低, 能源浪费严重。如一些风机使用年限久, 叶片磨损, 导致风量输出不足且能耗高。通风系统控制策略不够智能化, 多为预设固定模式运行, 不能根据实时客流量、室外气象条件精准调节。在客流量低峰期或室外温度适宜时, 仍维持高能耗运行状态, 造成能源不必要消耗。同时, 各线路通风系统之间缺乏有效联动与优化调度, 无法实现资源的最优配置。

2 地铁轨道通风系统概述

系统的组成及功能

2.1 组成部分

(1) 活塞通风系统: 利用列车在隧道中运行时产生的活塞效应, 推动空气流动。在地铁车站两端设置活塞风道, 与外界或相邻区间隧道进行空气交换。

(2) 机械通风系统: 由风机、风道、风阀等组成。包括区间隧道通风系统和车站公共区通风系统, 可根据需要进行送风和排风, 以调节空气环境。

(3) 空调系统: 对车站公共区和车厢内进行温度、湿度调节, 为乘客提供舒适的环境。通常由空气处理机组、空调风管、空调末端设备等组成。

2.2 功能作用

(1) 保证空气质量: 提供新鲜空气, 稀释二氧化碳、粉尘等污染物, 确保乘客和工作人员呼吸健康。

(2) 调节温湿度: 在不同季节保持适宜的温度和湿度, 提高乘客的舒适度, 同时保护设备正常运行。

(3) 控制气流组织: 合理组织气流, 防止气流短路、涡流等现象, 保证通风效果均匀。

(4) 火灾时排烟: 在发生火灾等紧急情况时, 能够迅速排出烟雾和有毒气体, 为人员疏散和消防救援提供有利条件。

2.3 运行原理

正常运行时, 活塞通风系统借助列车运行的活塞作用, 与机械通风系统配合, 实现隧道和车站内的空气循环。空调系统根据设定的温度和湿度参数, 对空气进行处理和调节。

火灾时, 通风系统会切换到火灾模式, 通过特定的风机和风道, 优先进行排烟, 并为救援通道提供正压送风, 阻止烟雾扩散。

3 地铁轨道通风系统关键技术分析

3.1 通风系统设计技术

需要根据地铁线路的长度、车站规模、客流量等因素,

精确计算通风量, 以确定通风系统的规模和设备选型。同时, 要合理设计风道布局, 使气流均匀分布, 避免出现通风死角。

3.2 风机技术

风机是通风系统的核心设备, 要求具备高效、节能、低噪等特点。根据不同的使用场景, 如区间隧道通风、车站公共区通风等, 选择合适类型的风机, 如轴流风机、离心风机等。此外, 还需具备良好的调速性能, 以根据实际需求灵活调节通风量。

3.3 气流组织优化技术

通过采用合理的送风口、回风口布置方式, 以及设置导流板、静压箱等装置, 优化气流组织, 减少气流紊流和涡流, 提高通风效率和空气质量。

3.4 智能控制技术

利用传感器实时监测隧道和车站内的空气质量、温度、湿度等参数, 根据监测数据自动调节风机的运行频率、空调的制冷/制热功率等, 实现通风系统的智能化控制, 达到节能和舒适的双重目标。

3.5 防火排烟技术

通风系统的风道、风阀等部件需采用防火材料制作, 具备良好的防火性能。在火灾发生时, 能够快速准确地切换到排烟模式, 通过开启排烟风机、关闭相关风阀等操作, 及时排出烟雾和有毒气体, 为人员疏散和消防救援创造条件。

3.6 降噪技术

采用消声器、减震器等降噪设备, 降低风机运行时产生的噪声, 减少对周围环境和乘客的影响。同时, 优化风道设计, 避免气流冲击产生噪声。

4 现存问题与挑战

能耗问题: 传统通风系统能耗高, 主要有以下两个方面:

4.1 运行管理方面

(1) 运行模式固定: 通风系统通常按照固定的时间表或预设模式运行, 不能根据实际的客流量、室外气象条件等因素实时调整通风量, 在客流量低峰或室外气候适宜时, 仍以高负荷运行, 浪费能源。

(2) 设备维护不当: 通风设备长期运行后, 若缺乏及时有效的维护保养, 会出现部件磨损、风机叶轮积尘等问题, 导致设备性能下降, 能耗增加。

4.2 设备选型与配置方面

(1) 设备能效较低: 部分通风设备选用的是能效等级较低的产品, 在运行过程中消耗较多的电能。

(2) 设备匹配不合理: 通风系统中的风机、空调机组等设备之间的匹配不够优化, 导致系统整体运行效率不高。

(3) 通风效果不均: 部分地铁站点或区间存在通风不足, 导致空气品质差、闷热等问题。

(4) 设备维护难题: 长期运行后, 风机、风道积尘, 影响效率, 且地下环境维护难度大、成本高。

(5) 新线建设与旧线改造矛盾: 新建线路可采用先进技术, 但老旧线路因空间限制、结构复杂, 改造难度大。

5 案例分析

5.1 成功案例

5.1.1 新加坡地铁智能通风控制系统具有以下技术特点和实施效果

(1) 技术特点

数据驱动：采用基于深度学习的算法，如深度 Q 网络 (DQN) 算法，通过分析大量与室内空气质量、室外空气品质、地铁运行时间表以及乘客流量等相关的数据，来制定通风控制策略。

模型模拟：利用灰箱模型定义虚拟环境，对地铁内的空气质量系统进行模拟，让智能系统在虚拟环境中学习和训练，以更好地应对实际场景中的各种复杂情况。

实时反馈与调整：借助传感器实时监测地铁内的环境参数，包括二氧化碳浓度、颗粒物浓度、温度、湿度等，根据监测数据及时调整通风系统的运行状态，实现精准的通风控制。

(2) 实施效果

节能效果显著：通过智能通风控制系统，根据实际需求动态调整通风量，避免了传统通风系统的过度通风，可降低能源消耗达 14.4% 左右。

室内空气质量提升：能将室内空气质量从不健康状态提升至可接受水平，有效控制二氧化碳浓度、颗粒物浓度等，为乘客提供了更健康舒适的出行环境。

5.1.2 苏州地铁节能通风方案具有以下技术特点和实施效果

(1) 技术特点

智能环控监控：采用智能环控监控系统，实现风水系统无感联动、精细化控制及可视化智能运维管理。如美的楼宇科技的智能控制系统采用主动寻优模型，使全系统维持在高效运行状态。

高效机房系统：以双一级能效冷水机组等为核心，如美的鲲禹磁悬浮变频离心式冷水机组运用磁悬浮轴承控制技术和高效永磁同步电机技术，通过精细的负荷匹配控制策略、全局能量优化及智能风-水协调，提高能效。

风水联动技术：在全面采用高效空调设备的同时，实行风水联调的控制手段也是降低空调能耗重要策略。突破传统空调控制中风水独立的局限，根据空调运行状况预测负荷变化趋势，自动调节以创造舒适乘车环境。

先进算法应用：达实智能的节能控制系统结合负荷预测、人工智能、模拟仿真等技术，采用空调风水系统全局优化耦合控制。

照明智能调节：部分线路采用直流供电的智能照明系统，可根据客流情况、运营模式对照明灯具的亮度及开关进行智能调节控制。

(3) 实施效果

节能效果显著：苏州地铁 6 号线年节电量预计可达约

930 万度，相当于减排二氧化碳 1 万吨；8 号线相对于传统车站空调系统单站节能率超 30%，通风空调系统实现过渡季节节能 56%，全年综合节能 28%。提升环境舒适度：通过智能调节通风量和温湿度，为乘客创造了更舒适的乘车环境。

简化运维流程：美的楼宇科技自研的 i 能效软件支持设备监测、能耗分析、数据分析等功能，实现远程监测与管理，达实智能的系统可远程值守，降低了运营人员工作强度，简化了运维流程。

5.2 问题案例

以下是一些地铁因通风设计缺陷导致运营问题的案例：

5.2.1 雅典奥摩尼亚地铁站

2015 年，希腊雅典奥摩尼亚地铁站被发现通风系统存在故障无法正常工作，2018 年也有员工对此提出投诉。2023 年，在奥摩尼亚周围发生抗议集会时有人投掷化学制品时，因通风系统不工作，站内气氛令人窒息。若隧道内发生火灾，浓烟无法逸出，人员可能因窒息死亡，且紧急出口无照明标志，人员逃生也会受影响。

5.2.2 贵阳地铁部分车站

2024 年，有贵阳市民反映地铁部分车站站台气温较高、空气不流通，像贵医站、北京路站的二层候车厅及环线转换路段，在早晚高峰时闷热难受，影响乘客的出行体验。

5.2.3 佛山地铁 2 号线

2025 年，有乘客反映佛山地铁 2 号线车厢内空气流通性差，闷热感明显。虽然这与地铁为降本增效关闭空调有一定关系，但也从侧面反映出通风系统在应对车厢内空气环境问题存在不足，无法仅依靠通风来维持舒适的环境。

6 优化策略与建议

(1) 技术层面：推广高效节能风机、优化气流组织模拟技术、采用智能监测与控制系统。

(2) 管理层面：建立定期维护制度，利用物联网技术实现设备远程监控；根据客流规律动态调整通风模式。

(3) 规划层面：在地铁新线设计阶段充分考虑通风需求，预留改造空间；对旧线逐步进行节能改造。

7 结论与展望

地铁通风系统是保障地铁安全、高效、舒适运行的关键基础设施，其重要性体现在保障人员健康、提升舒适度、保障设备运行、应对紧急情况等多个方面。针对传统系统存在的问题，研究人员提出了一系列优化策略，并在实际应用中取得了显著成效，以下为具体总结：

7.1 重要性

(1) 保障人员健康：及时排出乘客呼出的二氧化碳、人体异味及其他有害污染物，引入新鲜空气，维持良好空气质量，降低疾病传播风险。

(2) 提升乘车舒适度：有效调节地铁内的温度和湿度，结合合理的气流组织，避免闷热、潮湿等不适情况，

为乘客和工作人员创造舒适的环境。

(3) 保障设备正常运行: 为设备散热, 防止因温度过高导致设备性能下降或故障; 控制湿度, 避免设备受潮损坏, 延长设备使用寿命, 保障地铁系统稳定运行。

(4) 应对紧急情况: 在火灾、列车故障等紧急事件发生时, 迅速排出烟雾、热量和有害气体, 为人员疏散和救援工作提供有利条件, 减少人员伤亡和财产损失。

(5) 降低运营成本: 合理的通风系统设计和运行能降低能耗, 减少设备维护频率和成本, 提高地铁运营的经济效益。

7.2 优化策略

(1) 智能控制: 利用传感器实时监测环境参数, 结合大数据、人工智能等技术, 实现通风系统的智能调控, 根据实际需求动态调整通风量和运行模式。

(2) 精准设计: 充分考虑不同线路、站点的客流量变化规律、室外气象条件等因素, 进行个性化通风系统设计, 避免设备选型过大或通风模式单一。

(3) 高效设备应用: 选用高能效的通风设备, 优化设备之间的匹配和组合, 提高系统整体运行效率。

(4) 气流组织优化: 改进通风系统的气流组织设计, 确保站内和车厢内气流分布均匀, 提高通风效果。

(5) 系统集成协同: 加强通风系统与地铁其他系统(如空调系统、列车运行系统等)的集成与协同控制, 实现整体能源优化。

7.3 实际应用价值

(1) 节能降耗: 通过智能调控和高效设备应用, 显著降低通风系统的能耗, 减少能源浪费, 实现绿色低碳运营, 如苏州地铁6号线年节电量预计可达约930万度。

(2) 提升服务质量: 有效改善地铁内的空气质量和热舒适环境, 提升乘客满意度, 增强地铁的吸引力和竞争力。

(3) 保障运营安全: 优化后的通风系统在紧急情况下能更有效地发挥作用, 保障人员生命安全和地铁设施安全, 减少事故损失。

(4) 降低运维成本: 智能控制和设备优化减少了设备故障和维护需求, 降低运营维护成本, 提高地铁运营的经济效益, 如美的楼宇科技的智能控制系统实现远程监测与管理, 简化运维流程。

未来地铁通风技术将围绕智能化、绿色化、集成化方向发展, 通过技术融合与材料创新实现质的飞跃, 以下是对其发展趋势的具体展望:

7.4 深度融合人工智能与大数据

(1) 精准预测与自适应控制: 利用深度学习、强化学习算法, 结合气象数据、客流预测模型, 提前预判通风需求, 动态调整通风量与运行模式。如通过分析历史客流、天气和通风能耗数据, 训练AI模型, 在高峰来临前智能提升通风强度, 平峰期自动降低能耗。

(2) 故障诊断与智能运维: AI实时监测通风设备运行状态, 识别异常振动、电流波动等信号, 实现故障早期预警, 并通过数字孪生技术模拟故障场景, 自动生成最优维修方案, 减少人工巡检成本与停机时间。

7.5 探索新型环保通风材料

(1) 高效热交换材料: 研发新型导热系数高、质量轻的热交换材料, 用于地铁通风系统的能量回收装置, 提升显热与潜热回收效率, 降低新风处理能耗。例如气凝胶复合材料, 可在较小体积内实现高效热量交换。

(2) 净化功能材料: 开发具备吸附、分解有害污染物能力的功能性材料, 如光催化纳米涂层、改性活性炭纤维, 集成于通风管道与风口, 实现对PM2.5、甲醛、异味的实时净化, 改善地铁空气质量。

(3) 节能降噪材料: 采用多孔吸声材料、柔性消音结构等, 降低通风系统运行噪音, 同时优化材料保温性能, 减少冷热量损失, 如新型泡沫金属材料兼具降噪与结构支撑功能。

7.6 推进通风系统集成化与协同化

(1) 多系统深度耦合: 将通风系统与地铁空调、给排水、供电等系统深度集成, 构建综合环境调控平台。通过全局优化算法, 平衡各系统能耗, 例如在满足舒适度前提下, 利用通风预冷预热减少空调负荷。

(2) 车-站协同通风: 打破列车与车站通风系统的界限, 实现双向联动。如在列车进站前, 车站提前调整通风策略, 排出列车滞留的热废气; 列车运行中, 通过隧道活塞风辅助车站通风, 提升整体能效。

7.7 践行绿色低碳与可持续发展

(1) 可再生能源应用: 在地铁通风系统中引入太阳能光伏、地源热泵等可再生能源, 为通风设备供电或提供冷热源。例如在地铁出入口、车顶铺设光伏板, 直接驱动通风机, 降低对传统电力的依赖。

(2) 循环经济模式: 开发通风系统余热回收利用技术, 将排出的热量用于车站供热、生活热水等场景; 研究通风设备的模块化设计与回收再制造技术, 减少资源浪费。

[参考文献]

- [1]姚尧.轨道交通建筑能耗分析及节能措施[J].建设科技, 2022(2):34.
- [2]张英楠.苏州市轨道交通运营能耗分析及节能措施管控[J].现代城市轨道交通, 2022(4):67.
- [3]周伟军(导师:冯炼).过渡季节地铁环控模式分析研究[M].成都:西南交通大学, 2008.
- [4]刘英杰, 那艳铃.现代城市轨道交通[J].城市轨道交通研究, 2004(7):89.

作者简介: 梁日旺(1977.10—), 桂林理工大学, 电子信息工程, 就职于上海唯智工程项目管理有限公司, 专业监理工程师, 中级职称, 一级机电建造师。