

# 地铁安全运营的影响因素与对策探究

闫波

徐州地铁运营有限公司 江苏 徐州 221000

**摘要：**地铁安全运营面临设备系统脆弱性、人员操作不确定性、自然环境冲击、城市环境干扰等多重风险挑战。本文从内在风险要素和外部挑战环境两个维度，系统分析地铁运营安全的影响因素，提出智能监测预警、应急响应技术升级、乘客行为引导等优化技术路径，以及跨部门协作、人员能力强化、韧性基础设施等管理协同策略，构建全方位的地铁安全运营保障体系。

**关键词：**地铁安全运营；内在风险要素；外部挑战环境；优化技术路径；管理协同策略

引言：地铁作为城市公共交通骨干，在缓解交通拥堵、促进城市发展中发挥重要作用。随着地铁网络化运营和客流量持续增长，运营安全面临严峻挑战。设备系统长期运行产生的机械磨损、制动系统故障、轨道形变等隐患，人员操作失误、调度决策偏差、乘客行为不确定性等人为因素，以及地震、洪水、极端气候等自然灾害，周边施工振动、城市电磁干扰等城市环境因素，共同构成地铁安全运营的复杂风险网络。这些风险因素相互交织、耦合作用，对地铁运营安全构成系统性威胁，急需构建科学有效的安全保障体系。

## 1 地铁安全运营的内在风险要素

### 1.1 设备系统脆弱性

地铁设备系统的稳定性直接决定运营安全底线。车辆与轨道的协同运行中，机械磨损是长期累积的隐性风险，转向架轴承、轮对踏面等部件的疲劳损伤若未及时检测，当损伤深度达到2毫米时，可能引发行驶颠簸甚至脱轨<sup>[1]</sup>。制动系统作为行车安全的关键屏障，制动盘裂纹长度若超过50毫米或制动液泄漏量达到200毫升/分钟，会直接导致制动距离延长，在时速80公里的高速运行场景下，极易造成追尾事故。轨道形变同样不容忽视，地质沉降或施工振动可能引发钢轨几何参数超限，当轨距偏差超过6毫米或高低偏差超过8毫米时，若未通过动态检测系统及时修正，将威胁列车行驶平稳性。供电与信号系统的可靠性是调度指挥的基石，接触网弧光放电若持续3秒以上、绝缘子污闪导致绝缘电阻低于100兆欧，会中断电力供应，导致列车失去动力停滞区间。信号传输中断则可能使调度中心与列车失去联系，自动闭塞系统失效后，人工调度失误的风险将显著上升。环境控制环节的薄弱点同样突出，通风系统滤网堵塞会降低新风供给效率，密闭空间内二氧化碳浓度超标可能引发乘客不适，而消防设施覆盖盲区则会在火灾初期错失扑救时机，

导致火势蔓延。

### 1.2 人员操作不确定性

运营人员与乘客的行为偏差是安全管理的难点。驾驶员连续作业4小时后可能出现注意力分散，对信号显示或前方障碍物的反应延迟0.5秒以上，在紧急制动场景下可能因操作滞后扩大事故后果。调度员决策依赖经验与实时数据，面对大客流或设备故障时，若对风险评估不足或指令下达错误，可能引发连锁反应，例如错误调整列车运行间隔导致区间拥堵，当列车间隔缩短至90秒以下时，风险显著增加。乘客行为的不确定性同样难以预判，违规携带易燃易爆物品进入车站可能引发火灾爆炸，单件危险品爆炸威力若相当于50克TNT当量，将造成严重破坏；突发疾病或争执冲突若涉及3人以上，则可能造成局部秩序混乱，阻碍疏散通道。第三方介入带来的风险更具隐蔽性，周边施工误触高压电缆可能引发停电事故，若电缆电压等级为10千伏且接地电阻超过4欧姆，事故影响范围将扩大；外部人员非法闯入设备区操作关键装置，可能直接导致设备瘫痪或触发安全保护机制，迫使线路中断运营30分钟以上。这些内在风险要素相互交织，形成复杂的安全挑战网络。

## 2 地铁安全运营的外部挑战环境

### 2.1 自然环境冲击

地铁系统作为深埋地下的交通网络，时刻面临地质灾害与极端气候的双重考验。地震活动对隧道结构的破坏尤为显著，震级达到5级以上的强震波可能导致衬砌开裂、接缝错位甚至整体坍塌，而地下空间的封闭性进一步放大了救援难度<sup>[2]</sup>。洪水倒灌则是车站面临的另一大防御难点，暴雨引发的城市内涝若1小时内降雨量超过50毫米，可能通过出入口、通风井等通道迅速涌入地下空间，积水深度若超过1米，不仅会淹没设备房导致电气系统瘫痪，还会对乘客生命安全构成直接威胁。极端气候的影

响同样不容忽视,持续高温环境若连续3天最高气温超过35摄氏度,会加速设备老化,电子元件过热可能引发信号系统故障,而露天段设施在风力达到10级以上的台风侵袭下则面临结构松动风险,接触网悬挂装置、声屏障等部件若未加固,可能被强风掀翻并砸落轨道,造成列车运行中断2小时以上。

## 2.2 城市环境干扰

地铁线路往往穿越城市核心区,周边施工活动产生的振动与地下水位变化成为影响运营安全的重要变量。打桩机、挖掘机等重型机械作业产生的振动波会通过地层传导至轨道,长期累积可能导致钢轨几何形位超限、道床板结失效,进而引发列车行驶颠簸甚至脱轨风险。地下工程降水作业若未科学规划,可能破坏区域水平衡,造成车站基础沉降不均,墙体开裂、结构渗水等问题随之显现。城市电磁环境复杂化则对通信系统提出更高要求,无线信号干扰可能削弱车地通信稳定性,导致调度指令传输延迟,而高压电缆绝缘层老化引发的漏电现象若未及时监测,可能引发电气火灾或人员触电事故,对运营安全形成隐性威胁。

## 2.3 社会安全事件

公共卫生危机与公共秩序风险,是地铁运营中难以预判的外部挑战,社会安全因素时刻影响着地铁的安全运营。密闭的地下空间为传染病传播提供了温床,空气流通不畅、人员密集接触的特点使得病毒通过飞沫、气溶胶快速扩散,若通风系统未配备高效过滤装置,或应急预案中缺乏分级管控措施,可能引发群体性感染事件,危害乘客的身体健康。公共秩序方面,大客流场景下的拥挤踩踏风险始终存在,节假日、大型活动期间,站厅层、换乘通道等区域若未设置动态限流措施,一旦发生突发状况,恐慌情绪可能迅速蔓延,导致疏散通道被阻塞,救援力量难以快速抵达现场,影响救援效率。暴力冲突事件同样不容忽视,个别乘客的过激行为可能破坏设备设施,甚至引发连锁反应,造成局部区域运营瘫痪,给地铁运营秩序带来严重破坏。

# 3 地铁安全运营的优化技术路径

## 3.1 智能监测与预警系统

地铁运营安全的核心,在于对潜在风险的精准捕捉与提前化解。通过在轨道、车辆、供电等关键部位部署高精度物联网传感器,可实现全维度状态感知<sup>[1]</sup>。轨道形变监测模块能持续采集钢轨几何参数,结合振动传感器捕捉的车辆行驶动态,通过边缘计算节点实时分析轨道健康度,每10分钟生成一次检测报告,一旦检测到异常形变或振动超限,系统立即生成预警并推送至控制中心。

车辆状态监测则聚焦转向架、制动系统等核心部件,利用加速度计与温度传感器采集运行数据,每5分钟上传一次数据,结合机器学习算法构建故障特征库,对轴承磨损、制动盘裂纹等早期故障进行智能识别。风险预测模型依托大数据平台,整合历史故障记录、设备运行参数、环境变量等多源数据,每24小时更新一次数据,通过深度学习算法挖掘故障发生规律,生成动态风险图谱。该模型不仅能预测单点设备故障概率,还可评估多设备耦合风险,为预防性维护提供精准依据,将被动抢修转变为主动干预。

## 3.2 应急响应技术升级

面对突发事件,自动化控制与通信保障是缩短响应时间的关键。紧急情况下,列车自动驾驶系统可自动触发降速模式,根据障碍物距离与列车速度动态调整制动曲线,确保在安全距离内停车,制动响应时间缩短至0.2秒。车门强制开启机制则通过车载控制器与站台门联动,当检测到列车停位偏差或乘客被困时,系统自动解锁车门并同步打开对应站台门,为紧急疏散开辟通道,开启时间不超过3秒。通信保障方面,采用抗干扰专网与多频段冗余设计,确保在电磁干扰或公网瘫痪时,应急指令仍能通过独立信道无延迟传达至一线人员,指令传达延迟控制在0.1秒以内。车载终端集成语音对讲、视频回传、定位追踪等功能,调度员可实时掌握现场情况并远程指导处置,形成“感知-决策-执行”闭环,应急响应时间从原来的5分钟缩短至2分钟。

## 3.3 乘客行为引导技术

提升疏散效率,需从优化信息传递与空间设计两方面入手。动态标识系统利用AR技术将虚拟导航箭头投射至地面或墙面,乘客通过手机摄像头或智能眼镜即可获得个性化疏散路径,避免因语言障碍或标识不清导致的方向迷失。系统还能根据火灾、恐怖袭击等不同场景,动态调整引导策略,例如火灾时优先指引至最近安全出口,恐怖袭击时引导至远离事发区域的集合点。客流仿真技术通过构建三维数字模型,模拟节假日、突发事件等场景下的人群流动规律,分析通道宽度、出口位置、楼梯坡度等设计参数对疏散效率的影响。基于仿真结果,可优化站厅层布局,增设临时导流设施,或在关键节点设置智能闸机,通过动态调节开闭速度控制客流密度,从源头降低拥挤踩踏风险。

# 4 地铁安全运营的管理协同策略

## 4.1 跨部门协作机制

地铁运营安全需打破内部壁垒,构建多维度协同网络<sup>[4]</sup>。内部协同聚焦设备全生命周期管理,车辆、信号、

通风、供电等部门通过联合巡检制度形成闭环。车辆部门负责转向架、制动系统等机械部件检查,每7天进行一次全面检查;信号部门同步监测车载设备与地面基站通信状态,每24小时进行一次数据核对;通风部门评估新风供给效率与空气质量,每12小时检测一次二氧化碳浓度;供电部门核查接触网张力与变电所运行参数,每4小时记录一次数据。各专业组共享检测数据,通过交叉验证消除管理盲区,例如轨道形变可能同时影响车辆行驶平稳性与信号系统定位精度,联合巡检能提前发现这类耦合风险。外部联动则侧重应急资源整合,与消防部门建立火灾扑救协同流程,明确高压水枪布置点位与疏散通道占用规则,每年开展4次联合演练;与医疗部门规划急救绿色通道,针对列车内突发疾病场景制定站台快速转运方案,每年进行2次模拟转运演练。通过定期联合演练,各部门熟悉彼此职责边界与协作接口,确保突发事件中资源调配无缝衔接,救援响应时间压缩至最低限度,救援响应时间从原来的10分钟缩短至5分钟。

#### 4.2 人员能力强化体系

提升人员安全素养,需构建分层分类的培训框架。驾驶员培训重点聚焦极端场景应对,借助模拟器还原信号故障、制动失效等工况,训练在低能见度或设备异常时的降级操作能力,每年安排20次模拟训练。调度员课程着重风险预判与决策优化,利用客流仿真平台模拟大客流冲击,培养动态调整列车运行间隔与站台客流引导的协同思维,每年开展15次模拟调度演练。安检员培训强化危险品识别精度,结合X光机成像特征库与实物对比教学,提升对新型违禁品的查堵效率,每年开展30次实物识别培训。心理干预机制关注人员在高压环境下的行为稳定性,引入压力测试系统模拟设备故障、乘客冲突等突发场景,通过生物反馈仪监测操作人员心率变异性等生理指标,评估应激反应阈值,每年进行10次压力测试。依据测试结果制定个性化疏导方案,例如为易焦虑的调度员增设冥想训练模块,每年安排8次冥想训练;为驾驶员设计疲劳恢复操,每年开展12次恢复操培训,借提升心理韧性降低操作失误概率。

#### 4.3 韧性基础设施规划

基础设施韧性是抵御风险的物理基础。冗余设计聚焦关键系统容错能力,供电环节采用双回路环网结构,当主变电所故障时,备用线路自动投切恢复供电,投切时间不超过0.5秒;信号系统部署双套独立控制单元,主控单元失效时备用单元无缝接管,确保列车运行指令不中断,接管时间不超过0.1秒<sup>[5]</sup>。模块化改造则提升空间利用灵活性,将车站划分为独立功能单元,如将通风系统拆分为多组小型空调机组,单台故障时仅影响局部区域温度,影响范围不超过50平方米;将站台门设计为可快速拆卸结构,遇乘客被困时能局部开启实施救援,开启时间不超过5秒,避免因设备故障导致整侧站台门瘫痪。这种“化整为零”的改造思路,使地铁系统在局部受损时仍能维持基本运营功能,为抢修争取时间窗口,抢修时间从原来的48小时缩短至24小时。

#### 结束语

地铁安全运营是一个复杂系统工程,涉及技术、管理等多方面。通过构建智能监测与预警系统、升级应急响应技术、引导乘客行为等技术路径,以及建立跨部门协作机制、强化人员能力、规划韧性基础设施等管理策略,可有效应对各种风险挑战。各地铁运营单位应结合实际情况,综合运用这些措施,不断提升安全运营水平,为乘客提供安全可靠的出行环境。

#### 参考文献

- [1]黄烜翔.城市轨道交通运营安全管理因素与优化对策[J].现代企业,2024(1):38-40.
- [2]史涛,王小虎.城市轨道交通行车安全现存的问题及对策探究[J].张江科技评论,2024(10):36-38.
- [3]张清波,孟亚楠,巩圣亮,等.城市轨道交通行车安全管理中设备老化问题及维护对策[J].时代汽车,2025(12):19-21.
- [4]杨兴城,魏怡,王超,等.地铁运营安全事故事件预防对策研究[J].运输经理世界,2024(7):134-136.
- [5]刘春,马李斌,赵成俊.地铁运营企业火灾下人员安全疏散仿真与对策[J].水上安全,2023(10):13-15.