

# 轨道交通信号系统安全技术研究

刘 祎

(北京市地铁运营有限公司通信信号分公司 北京 100082)

**摘要** 文中从轨道交通信号系统的安全优化角度出发,提出了基于现有技术的5项具体优化措施,包括基于机器学习的故障预测与自适应维护、低延迟无线通信技术应用、多传感器融合与自动化驾驶技术优化、智能化信号调度与拥堵预警系统优化以及基于大数据分析的智能安全监控系统优化。通过引入先进的技术手段,结合轨道交通信号系统现有架构的优化,能有效提高轨道交通系统的安全性、运行效率以及应急响应能力。该研究为轨道交通信号系统的进一步安全提升提供了理论依据和技术支持。

**关键词:** 轨道交通;信号系统;安全优化

**中图分类号** TP309

## Research on Safety Technology of Rail Transit Signal System

LIU Yi

(Beijing Subway Operation Co., Ltd., Communication Signal Branch, Beijing 100082, China)

**Abstract** This paper proposes five specific optimization measures based on existing technologies from the perspective of safety optimization of rail transit signal systems: machine learning based fault prediction and adaptive maintenance, low latency wireless communication technology application, multi-sensor fusion and automated driving technology optimization, intelligent signal scheduling and congestion warning system optimization, and intelligent safety monitoring system optimization based on big data analysis. By introducing advanced technological means and optimizing the existing architecture of the rail transit signal system, the safety, operational efficiency, and emergency response capabilities of the rail transit system can be effectively improved. The research in this paper provides theoretical basis and technical support for further safety improvement of rail transit signal systems.

**Key words** Rail transit, Signalling system, Security optimization

## 0 引言

轨道交通作为现代城市交通的重要组成部分,承担着日益增长的出行需求。随着轨道交通系统的规模和复杂性的增加,如何确保其安全高效地运行,成为了轨道交通发展的核心问题之一。信号系统作为轨道交通中的关键组成部分,负责列车运行的调度和控制,对于保障列车安全运行至关重要。传统的轨道交通信号系统虽然能满足基本的运行要求,但在高密度、大流量的运营环境下,其安全性、灵活性和应急响应能力仍然存在不足。随着信息技术、通信技术、人工智能等技术的快速发展,轨道交通信号系统的安全优化已成为研究热点。本文将基于现有轨道交通信号系统技术的基础上,提出5项具体的安全优化技术,并探讨其实现方式和应用前景。

## 1 轨道交通信号系统的基本构成

车站信号是轨道交通系统中重要的信号设施,主要用

于指示列车的进站、停站、发车等操作,确保列车在车站内的安全运行。线路信号则是设置在轨道线路上的信号装置,负责指示列车当前线路的运行状态,确保列车与前方的列车保持安全距离,避免发生碰撞。列车控制系统是轨道交通信号系统的核心,通过实时监控和调度列车运行过程中的速度、位置等信息,保障列车安全运行。

## 2 轨道交通信号系统安全技术

### 2.1 自动列车控制系统(ATC)

在轨道交通领域,自动列车控制系统(ATC)十分重要,其核心在于以自动化手段确保列车行驶的安全性。中央控制系统与轨道、列车设备相互协作,共同构成了ATC系统的工作原理。列车在运行过程中,依赖轨道上的ATC系统信号设备,以实现信息传输;而列车接收设备则依据所接收的信号,适时调整列车的速度与定位。当列车驶入信号点区域,ATC系统即刻启动,对前方轨道进行严密监控,评估是

否存在障碍或列车停车情况,随后智能调整列车运行速度,以确保行车安全。列车系统依据既定的速度限制和最低安全间距,确保各列车间维持恰当的间距,以防止碰撞事故的发生。在上海、北京与广州等城市的地铁运营,普遍采纳ATC技术,以优化运营效能,确保行车安全<sup>[1]</sup>。

## 2.2 基于通信的列车控制系统(CBTC)

无线通信技术的列车控制系统(CBTC)依托实时数据交换,可以精确调度并控制列车运行。运用无线通信技术,CBTC系统能实现与地面控制中心的信息互动,确保列车实时掌握自身及前方列车的位置与状态。列车运行状态的实时计算与速度、位置的数据同步,系统据此动态调整运行间隔,有效规避了因信号延迟或错误传递而引发的安全风险。在探究北京地铁13号线的案例中,采用CBTC技术对列车进行调度与控制,显著提升了列车运行间隔,将3 min间隔缩短至1.5 min,从而极大地增强了运输效能。

## 2.3 列车防撞系统(TCAS)

列车间碰撞事故的预防依赖于集成了多种技术的防撞系统,其功能是通过传感器技术的应用来保障列车行驶安全。TCAS系统依托雷达、激光传感器及超声波传感器等装置,对列车前方障碍物及他车状态进行实时监测。在系统侦测到潜在碰撞风险之际,即刻启动警报,并迅速启动紧急制动程序,降低车速,以规避事故的潜在发生。实时监控与邻近列车系统互动的TCAS系统,可以掌握自身列车位置,并通过信息交换获取前车速度与距离等关键数据,进而算出列车间的最小安全间距,并据此实时调节车速。

## 2.4 信号灯自动化控制系统(VMS)

VMS即信号灯自动化控制系统,作为一种智能化信号管理系统,它能实时监控并灵活调整轨道的信号灯状态,保障列车安全运行。列车位置、交通流量与线路状况共同作用,VMS系统实时反馈,对交通信号信息进行动态展示,适时调控红绿灯状态。VMS系统在运行时,实时搜集列车速度、位置及信号状况等关键数据,据此动态调整并计算最佳的信号设置。在交叉口与车站等复杂场所,VMS系统依据列车实际运行状态动态调节信号灯,有效规避信号冲突与操作疏忽引发的意外。以北京市地铁第四号线为参照,VMS系统通过精确调节列车到站与离站的时间差,显著提升了车站的运作效能,同时大幅降低了交通事故的发生频率。

## 2.5 电力供应监控与冗余系统

在轨道交通信号系统中,电力供应监控与冗余设施构成了其安全运行的根本保障,即便遭遇电力中断或故障,该系统亦能维持其正常运作。在主电源故障情形下,主电源与备用电源构成的电力冗余体系可实现自动切换,以保障信号系统的稳定运行。实时监控功能的冗余系统,能监测电力系统运行状态,在电力供应异常时,触发警报或自动电源切换,确保信号设备的不间断运行。以北京地铁系统为

示范,该系统采纳了多层电力冗余设计理念,不仅配置了主供电与备供电,且增设了UPS不间断电源系统,以便在突发断电情况下,为信号系统及核心设施提供临时电力保障,确保其持续运作<sup>[2]</sup>。

## 3 轨道交通信号系统的安全优化技术

### 3.1 基于机器学习的实时故障预测与自适应维护系统

运用轨道交通信号设备所搭载的传感器,能实现对运行数据的实时搜集,该数据涵盖温度、振动、湿度、压力等多维度的信息,能将所搜集到的数据传输至后台服务器。采用机器学习算法对相关数据进行解析,系统可自动辨识设备运行中异常的常态,同时结合历史信息与现有状态,预估设备可能出现的故障风险。算法针对信号灯控制系统的传感器数据展开分析,探究其温度波动模式,进而评估电气故障风险,并提前部署报警与维修计划。基于设备的使用状态、保养周期及历史故障信息,机器学习模型可实施自适应调整策略,以优化维护时效与更换周期,进而降低突发故障风险及设备因超负荷运作而引发的问题几率。

### 3.2 低延迟无线通信技术的应用与优化

在轨道交通信号系统中,列车与地面控制中心间的信息交互有时会遭遇延时困扰,尤其是在密集线路与高速运行条件下,将5G通信技术融入轨道交通信号系统,将开辟一条低延迟、带宽广阔的通信路径。在无线通信网络基础设施的升级过程中,引入5G技术,以其高速数据传输与低延迟特性,替换掉陈旧的通信系统架构。5G技术能助力提升数据传输容量,允许多量列车实现同步在线数据交换,确保列车与地面控制中心间的通信近乎实时无缝。数据传输延迟的优化举措显著降低了信号失误率,特别是在列车高速运行过程中,该优化技术可实时调整车速与列车的具体位置,有效防范因信号滞后而引发的安全风险。

### 3.3 多传感器融合与自动化驾驶技术优化

在列车防撞系统领域,普遍采用单一类型传感器(诸如雷达或激光传感器)进行监测。然而,面对隧道、交叉口等复杂环境,此类传感器往往易受干扰或产生误判。借助激光雷达(LiDAR)、摄像头、红外传感器、超声波传感器等多重传感器,通过数据融合技术对传感器数据予以综合剖析,实现更精确的环境认知。列车配备的传感器能全面监测周边障碍物、轨道状况以及其他列车的位置,显著增强其应对复杂环境的适应能力。在遭遇如大雾、大雨等恶劣天气情境下,系统可以融合多种传感器信息,提升其距离精准判定与障碍物探测性能。当列车驶入暗道,红外探测器能弥补摄像头在昏暗条件下的不足之处;而激光雷达能提供更精准的三维空间数据,以此优化列车的行驶速度与车距,有效规避因信号系统失误而引发的交通事故<sup>[3]</sup>。

### 3.4 智能化信号调度与拥堵预警系统优化

实施智能化信号调度及拥堵预警系统,可以提升整体效率。在现行的信号系统架构中融入实时数据采集机制,涉及列车即时定位、运行速率及乘客流动等要素。因此,借助大数据技术及算法模型可以对列车出现的拥堵状况进行前瞻性预测。调度系统与列车间实时信息实现了智能互联,据此可以灵活调整发车时序与停车时限,有效规避车站及交叉点处的列车拥堵问题。拥堵风险预判精准的智能调度系统,能针对高峰期或特殊事件期进行及时识别,并通过调整列车调度策略(如临时缩短列车间隔,临时增加列车运力等措施)灵活应对突发状况。

### 3.5 高精度同步定位与集成控制优化

在高速或复杂环境下,传统的轨道系统基于固定信号点与列车位置推算定位机制,容易导致误差,尤其在遭遇信号干扰或恶劣天气时,列车的实时位置判断易受影响。该优化策略采纳了GPS与地面基站协同,融合惯性导航系统(INS)与卫星导航系统(GNSS)的定位技术,显著提升了列车定位的准确性。在高度密集的城市轨道交通网络中,系统通过融合多元数据源,保障了每列车运行位置与状态的精确监测。基于高精度定位的集成控制优化,自动化调度系统可以根据列车的实时位置与速度,灵活调整列车运行策略,从而确保列车间安全间隔不受外界影响,并提升列车

(上接第36页)

### 4.3 对比分析

为验证系统性能优势,本文选取了目前广泛使用的3种主流定位增强系统进行对比测试,分别是SBAS系统、传统RTK系统和PPP系统。在相同测试条件下,本系统在定位精度、实时性和可靠性等方面均表现出明显优势(见图1)。特别是在复杂电磁环境下,本系统的抗干扰能力显著优于其他系统。通过计算定位误差的统计特性,本系统的误差分布更接近高斯分布,标准差更小,说明系统稳定性更好。

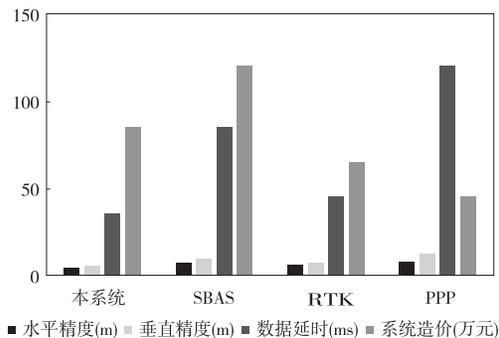


图1 各系统性能对比

调度的响应速度与灵活性<sup>[4]</sup>。

## 4 结语

随着城市轨道交通系统的快速发展,信号系统的安全性和运行效率已成为提升整体服务质量和保障乘客安全的关键因素。通过引入机器学习、低延迟通信、多传感器融合和智能化调度等先进技术,轨道交通信号系统的安全性能可以得到显著提升。基于这些优化措施,不仅能减少突发事件和故障的发生,还能实现更精确、更高效的运行管理,进一步提高系统的应急响应能力和故障预测能力。未来,随着技术的不断发展和应用,这些优化方案将在轨道交通领域得到广泛应用,为建设更加安全、智能、高效的轨道交通系统提供有力支持。

### 参考文献

- [1] 张艾铃. 轨道交通信号系统安全技术及发展分析[J]. 企业科技与发展, 2023(1): 49-52.
- [2] 王宗琰. 轨道交通信号系统中信息安全技术的应用[J]. 网络安全技术与应用, 2021(6): 126-127.
- [3] 陆人杰. 信息安全技术在轨道交通信号系统中的应用[J]. 科技创新导报, 2020, 17(16): 140, 154.
- [4] 刘湘国, 刘昌录. 轨道交通信号系统安全技术的发展与现状探究[J]. 江西建材, 2020(3): 145-146.

## 5 结语

基于卫星通信的空中交通实时定位数据增强方法,提升了定位精度、实时性及可靠性,可有效满足复杂空域环境下的空管需求。未来,需进一步优化数据融合算法,提升链路传输效率,从而为多场景应用和系统适应性带来更多可能性,为卫星通信在航空交通中的智能化发展奠定基础。

### 参考文献

- [1] 毛琳, 韩冬冬, 孟芬. 5G通信技术在卫星导航定位中的应用研究[J]. 家电维修, 2024(6): 59-61.
- [2] 王增福, 邵毅, 祁登亮, 等. 一种基于一致性的分布式天基雷达组网空中目标高度估计与定位方法[J]. 雷达学报, 2023, 12(6): 1249-1262.
- [3] 夏楠, 高丹阳, 邢宝辉, 等. 基于外辐射源的空中目标直接定位算法[J]. 通信学报, 2023, 44(6): 117-124.
- [4] 熊仁和. 基于多无人机的民航无线电干扰源定位方法研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
- [5] 张祺显. 基于喷泉码的卫星通信方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.