

自动驾驶背景下城市轨道交通信号控制系统适应性改造

李 鹏

中国铁路通信信号上海工程局集团有限公司 上海 200040

摘 要: 随着自动驾驶技术在城市轨道交通领域的逐步推广,传统信号控制系统面临着适应性挑战。本文深入探讨了自动驾驶背景下城市轨道交通信号控制系统的现状与需求,分析了现有系统在应对自动驾驶时存在的问题,并结合实际案例提出了相应的适应性改造策略,旨在提升信号控制系统的智能化水平,确保城市轨道交通在自动驾驶模式下的安全、高效运行。通过对相关技术和实践的研究,为城市轨道交通的可持续发展提供技术支持与决策参考。

关键词: 自动驾驶;城市轨道交通;信号控制系统;适应性改造

1 引言

城市轨道交通作为城市公共交通的骨干,在缓解交通拥堵、减少环境污染、提升城市运行效率等方面发挥着至关重要的作用。近年来,随着科技的飞速发展,自动驾驶技术逐渐从概念走向现实,并在城市轨道交通领域得到了越来越广泛的应用。自动驾驶技术能够实现列车的自动运行、自动控制和自动监控,有效提高运营效率、降低运营成本、提升服务质量^[1]。然而自动驾驶技术的应用也对城市轨道交通信号控制系统提出了更高的要求。传统的信号控制系统已难以满足自动驾驶模式下的高精度、高可靠性和高智能化的需求,因此,对信号控制系统进行适应性改造成为推动城市轨道交通自动驾驶发展的关键环节。

2 城市轨道交通信号控制系统概述

2.1 信号控制系统的组成与功能

城市轨道交通信号控制系统主要由列车自动控制(ATC)系统、计算机联锁(CI)系统等组成。ATC系统是核心,含列车自动防护(ATP)、自动运行(ATO)、自动监督(ATS)子系统。ATP负责安全防护,防超速、冒进信号;ATO实现列车自动启停、加减速等;ATS监控调度列车,确保按运行图行驶^[2]。计算机联锁系统控制道岔、信号机等设备,依据联锁逻辑保证列车进路安全,防敌对进路。

2.2 传统信号控制系统的工作原理

传统系统多采用基于轨道电路的固定闭塞或准移动闭塞技术。固定闭塞将轨道划分为固定闭塞分区,每区仅容一列车,列车通过轨道电路传占用信息,后方车据此定速和停车位置。准移动闭塞在其基础上,通过车地通信动态调整间隔,但闭塞分区划分仍固定。传统系统保障了安全运营,但有局限性,如固定闭塞间隔大限制通过能力,通信带宽有限难满足自动驾驶数据传输需求^[3]。

3 自动驾驶对城市轨道交通信号控制系统的新要求

3.1 更高的安全性与可靠性

在自动驾驶模式下,列车的运行完全依赖于信号控制系统的指令。一旦信号控制系统出现故障或错误,可能会导致列车追尾、碰撞等严重事故。因此,自动驾驶要求信号控制系统具备更高的安全性和可靠性。这就需要采用冗余设计、故障-安全技术等手段,确保系统在任何情况下都能安全可靠地运行。

3.2 高精度的列车定位与控制

为了实现列车的精确自动驾驶,信号控制系统需要能够实时、准确地获取列车的位置信息,并对列车进行高精度的控制。传统的列车定位方式精度有限,难以满足自动驾驶的要求。因此,需要采用更加先进的定位技术,如卫星定位、惯性导航、应答器定位等多种技术的融合,以提高列车定位的精度和可靠性。同时信号控制系统还需要具备更加精确的速度控制和停车控制能力,确保列车能够在规定的位置准确停车,满足乘客上下车的需求。

3.3 强大的数据处理与传输能力

自动驾驶模式下,列车需要实时接收和处理大量的信息,包括线路状况、前方列车位置、运行指令等。同时列车自身的运行状态信息也需要及时反馈给控制中心。这就要求信号控制系统具备强大的数据处理与传输能力。一方面,需要采用高性能的计算机硬件和先进的算法,对海量的数据进行快速处理和分析;另一方面,要建立可靠、高速的通信网络,确保数据的实时、准确传输^[4]。

3.4 智能化的运营管理与决策支持

自动驾驶背景下的城市轨道交通信号控制系统应具备智能化的运营管理与决策支持功能。通过对列车运行数据、设备状态数据、客流数据等多源信息的实时采集和分析,系统能够自动优化列车运行计划、调整列车发

车间隔、预测设备故障等，实现智能化的运营管理。同时为运营人员提供决策支持，帮助他们及时、准确地做出决策，提高运营效率和服务质量。

问题类别	具体表现
系统架构与通信瓶颈	架构封闭，接口和协议厂商定制，开放性、兼容性差；带宽不足，数据传输延迟
定位精度与可靠性不足	精度有限，复杂环境或故障时可靠性受影响，难满足自动驾驶要求
设备老化与技术更新滞后	设备老化，故障率高、维护难；技术滞后，无法适配自动驾驶新需求
运营管理与维护模式不适应	基于人工经验和定期检修，难满足自动驾驶的精细化、智能化需求，易致故障

5 适应性改造策略与实践

5.1 系统架构升级与通信优化

5.1.1 采用开放式架构

为了提高信号控制系统的开放性和兼容性，应采用开放式架构设计。通过制定统一的通信接口和协议标准，打破各子系统之间的壁垒，实现不同厂商设备之间的互联互通和信息共享。如采用基于工业以太网的通信架构，利用标准的TCP/IP协议进行数据传输，使得不同厂家的设备能够方便地接入系统，提高系统的集成度和可扩展性。同时开放式架构也有利于系统的升级和维护，降低系统的总体成本。

5.1.2 引入先进通信技术

针对通信瓶颈问题，应积极引入先进的通信技术，如5G、LTE-M等。5G通信技术具有高带宽、低延迟、大连接的特点，能够满足自动驾驶模式下大量数据的实时传输需求。通过在轨道交通沿线部署5G基站，实现车地之间的高速通信，可大幅提高列车运行状态信息和控制指令的传输效率，确保列车运行的安全性和稳定性。LTE-M（长期演进-轨道交通）则是专门为轨道交通行业定制的通信技术，它在保障通信可靠性的同时也能提供较高的带宽和较低的延迟，适用于城市轨道交通信号控制系统的通信需求^[5]。

5.2 高精度定位系统的引入与融合

5.2.1 多种定位技术融合

为了提高列车定位的精度和可靠性，应采用多种定位技术融合的方式。如将卫星定位（如GPS、北斗）、惯性导航、应答器定位等技术相结合。卫星定位技术具有全球覆盖、定位精度较高的优点，但在地下隧道等遮挡环境下信号容易受到影响；惯性导航技术则不受外界环境干扰，但存在定位误差随时间积累的问题；应答器定位技术精度高、可靠性强，但需要在轨道沿线安装大量的应答器，成本较高。通过将这几种技术融合使用，可以充分发挥各自的优势，弥补彼此的不足。当列车在地面运行时，主要依靠卫星定位获取位置信息；进入地下隧道后，自动切换到惯性导航和应答器定位相结合的方法，

4 现有信号控制系统在自动驾驶背景下的适应性问题

现有信号控制系统在自动驾驶背景下存在诸多适应性问题，详情如下表：

式，确保列车在任何环境下都能实现高精度定位。

5.2.2 建设高精度定位基础设施

为了支持多种定位技术的融合应用，需要建设相应的高精度定位基础设施。如在轨道沿线合理布置应答器，确保列车在关键位置能够获得精确的定位信息。同时对于卫星定位信号较弱的区域，可以通过建设差分基站等方式，提高卫星定位的精度。此外，还应加强对定位系统的校准和维护，定期对定位设备进行检测和校准，确保定位数据的准确性和可靠性。通过建设高精度定位基础设施，能够为列车自动驾驶提供可靠的位置信息保障。

5.3 设备更新与智能化升级

5.3.1 老旧设备更新换代

针对设备老化问题，应制定合理的设备更新计划，逐步淘汰老旧设备，更换为性能更先进、可靠性更高的新型设备。在设备选型时，应充分考虑自动驾驶的需求，选择具备智能化功能、易于维护和升级的设备。如采用新型的智能信号机，它不仅能够实现传统信号机的显示功能，还能通过内置的传感器实时监测自身的工作状态，并将信息上传至控制中心，便于及时发现和处理故障。同时新型的智能信号机还支持远程控制和配置，提高了运营管理的灵活性和效率。

5.3.2 智能化功能升级

除了设备更新，还应应对信号控制系统进行智能化功能升级。利用大数据、人工智能、云计算等技术，为信号控制系统赋予智能化的分析和决策能力。如通过大数据分析技术对列车运行数据、设备状态数据等进行深度挖掘，预测设备故障的发生概率，提前进行维护，实现从定期检修向状态检修的转变^[6]。同时利用人工智能算法优化列车运行控制策略，根据实时的客流情况和线路状况，自动调整列车的运行速度和发车间隔，提高运营效率和服务质量。

5.4 运营管理与维护模式创新

5.4.1 智能化运营管理平台建设

为了适应自动驾驶背景下的运营管理需求，应建设

智能化的运营管理平台。该平台通过集成列车运行监控、设备管理、客流分析等多个子系统,实现对城市轨道交通运营的全面、实时监控和管理。运营人员可以通过该平台实时了解列车的运行状态、设备的工作情况以及客流的变化趋势,及时做出决策。智能化运营管理平台的建设,提高了运营管理的效率和科学性,降低了运营成本。

5.4.2 基于状态的维护模式应用

传统的定期检修维护模式已无法满足自动驾驶系统对设备可靠性的要求,应逐步推行基于状态的维护模式。通过在信号设备上安装各种传感器,实时采集设备的运行状态数据,如温度、振动、电流等。利用数据分析技术对这些数据进行处理和分析,判断设备的健康状况,预测设备故障的发生时间。当设备出现潜在故障风险时,及时安排维修人员进行针对性的维修,避免设备突发故障。

6 案例分析

6.1 上海地铁2号线信号系统改造项目

上海地铁2号线作为上海的重要交通干线,客流量巨大。随着城市的发展和自动驾驶技术的推进,对其信号控制系统进行改造迫在眉睫。该项目采用了“双信号系统”方案,即在既有TBTC(基于轨道电路的列车控制)系统的基础上,叠加CBTC(基于通信的列车控制)系统。轨旁设备全部升级为新系统,列车上同时支持新CBTC系统并兼容既有信号系统,使列车能在新老系统间无缝切换。

在改造过程中,面临着既有信号系统技术封闭、接口开放困难等问题。上海地铁通过与外方厂商的艰苦谈判,以“替换系统”为筹码,成功实现了技术接口开放。同时项目团队采取了多项创新举措,如实施“正线留车”措施,为调试争取更多时间;安排多次多车演练,提高人员对新系统的适应能力等。

改造完成后,上海地铁2号线的信号控制系统智能化水平大幅提升,实现了“边运营,边增能,边改造”的目标。新的信号系统在安全性、可靠性和运营效率方面都取得了显著成效,为上海地铁的可持续发展提供了有力支撑。

6.2 北京地铁燕房线全自动运行项目

北京地铁燕房线是国内首条采用自主化全自动驾驶系统的线路。其信号控制系统采用了先进的CBTC技术,并结合了多项创新技术,以满足全自动运行的需求。在列车定位方面,采用了高精度的应答器定位和惯性导航融合

技术,确保列车定位精度达到厘米级。通信系统则采用了LTE-M技术,实现了车地之间的高速、可靠通信。

为了实现智能化的运营管理,燕房线构建了综合监控系统,将列车运行、设备状态、环境监控等信息进行集成,通过大数据分析和人工智能算法,实现了列车运行计划的自动优化、设备故障的提前预警和智能诊断等功能。同时在维护模式上,采用了基于状态的维护策略,通过对设备状态数据的实时监测和分析,实现了精准维护,提高了设备的可靠性和可用性。

北京地铁燕房线的全自动运行项目为国内城市轨道交通自动驾驶的发展提供了宝贵的经验,其信号控制系统的成功应用,展示了自动驾驶技术在城市轨道交通领域的巨大潜力。

7 结论与展望

随着自动驾驶技术在城市轨道交通领域的深入应用,对信号控制系统进行适应性改造已成为必然趋势。通过分析现有系统问题,提出了系统架构升级、通信优化、引入高精度定位系统、设备更新与智能化升级及运营管理与维护模式创新等针对性策略,经实际案例验证,这些策略在提升信号控制系统安全性、可靠性、智能化水平和运营效率方面成效显著。未来,城市轨道交通信号控制系统将更智能化、自动化、高效化。5G技术普及将提升数据传输能力,助力更高级别自动驾驶;人工智能等技术的广泛应用,将实现更精准的列车控制和智能化运营管理。同时需加强技术创新与标准制定,提高系统兼容性和开放性,降低改造成本,推动行业可持续发展。总之,这一改造是复杂长期任务,需各方共同努力,为城市轨道交通智能化发展奠定基础。

参考文献

- [1]王蕾,任奕臻,哈云霞.城市轨道交通信号智能化运维自动控制系统设计[J].自动化与仪器仪表,2022,(07):217-220.
- [2]高文.城市轨道交通信号自动控制系统发展现状[J].数字通信世界,2019,(09):151.
- [3]王凌莉.探究城市轨道交通信号控制系统[J].中国设备工程,2023,(08):117-119.
- [4]王博新.浅析城市轨道交通车辆段信号系统自动控制模式[J].铁道建筑技术,2015,(S1):348-349+352.
- [5]张国浩.地铁列车自动驾驶(ATO)系统信号控制策略优化[J].人民公交,2024,(16):186-188.
- [6]才让草.基于通信控制系统(CBTC)的城市轨道交通信号控制系统研究[J].信息系统工程,2020,(09):18-19.