

# The Application and Challenges of Modern Subway Signal Technology in Urban Transportation

Jinghao Li

Taiyuan Rail Transit Line 1 Construction and Operation Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

## Abstract

Modern subway signal technology plays a crucial role in urban transportation. With the widespread application of train control systems (CBTC), autonomous driving subway technology, and signal integration systems, the operational efficiency, safety, and intelligence level of subway systems have significantly improved. However, with the application of these advanced technologies, new challenges have also emerged. The maintenance challenges brought about by system complexity require technical personnel to have higher operational skills; Network security threats continue to escalate, and signal systems face risks of data transmission interruptions and hacker attacks; During the process of technological upgrading, compatibility issues between existing devices and new technologies gradually emerge, affecting the overall coordination of the system. This paper analyzes these issues and explores the future development direction and response strategies of subway signal technology, providing ideas and references for urban traffic management.

## Keywords

subway signal technology; automatic train control system; autonomous driving; signal integration system

## 现代地铁信号技术在城市交通运输中的应用与挑战

李景浩

太原轨道交通一号线建设运营有限公司, 中国·山西太原 030000

## 摘要

现代地铁信号技术在城市交通运输中扮演着至关重要的角色。随着列车自动控制系统（CBTC）、自动驾驶地铁技术和信号集成系统的广泛应用，地铁系统的运行效率、安全性与智能化水平显著提升。然而，随着这些先进技术的应用，新的挑战也随之出现。系统复杂性带来的维护难题要求技术人员具备更高的操作水平；网络安全威胁不断升级，信号系统面临数据传输中断和黑客攻击的风险；技术升级过程中，旧有设备与新技术之间的兼容性问题逐步显现，影响系统的整体协调性。论文通过分析这些问题，探讨地铁信号技术的未来发展方向与应对策略，为城市交通管理提供思路与参考。

## 关键词

地铁信号技术；列车自动控制系统；自动驾驶；信号集成系统

## 1 引言

现代城市交通的飞速发展，推动了地铁系统的技术革新，尤其在信号技术的应用上，变革尤为显著。从CBTC的引入，到全自动驾驶地铁的逐步推广，再到信号集成系统的深入应用，城市轨道交通变得更加智能和高效。这些技术不仅改善了列车的调度和控制，也优化了整体运营能力。然而，伴随技术进步而来的，是一系列复杂的新问题。

## 2 现代地铁信号技术在城市交通运输中的应用

### 2.1 列车自动控制系统（CBTC）的应用

传统的地铁信号系统依赖轨道电路，基于固定的分区

控制列车进出，而CBTC则突破了这一局限，它的核心优势在于移动闭塞技术的应用，打破了传统的“固定块区”模式，实现了列车之间的动态间隔控制。具体而言，CBTC通过连续监测每列车的速度、位置及加速状况，实时调整列车间的安全距离，使列车运行不再受到固定区段的限制，从而大大缩小了列车间的间隔时间，这种动态调整不仅提高了线路的通过能力，尤其在客流高峰时段，更能显著增加单位时间内的载客量，优化城市地铁系统的运行效率。

此外，现代城市的交通密集度不断增加，列车安全性的保障成了一个极为紧迫的问题。通过精准的定位和速度监控，CBTC能够快速检测并响应突发状况，提前介入以避免列车追尾、碰撞等事故。CBTC系统中的列车保护功能使得地铁运营时，任何异常情况都能立即触发应急制动，确保系统的高安全性，同时，系统具备自检与诊断功能，能够自动排除或提示潜在的故障，减少因人为操作失误导致的安全隐

【作者简介】李景浩（1995-），男，中国山西运城人，本科，助理工程师，从事交通运输地铁信号研究。

患。而且 CBTC 的应用在节能环保方面的潜力也逐渐显现，通过智能化控制列车加速、制动的过程，CBTC 能够优化能耗，尤其是在能量回收机制上，系统可以在列车减速过程中将动能转化为电能回馈至电网，减少整体能源消耗。

## 2.2 自动驾驶地铁技术的发展

自动驾驶地铁技术的核心在于其高度集成的感知与决策能力，通过多种传感器，如激光雷达、超声波传感器和摄像头，系统可以对地铁周边环境进行实时监测，这包括对轨道和列车运行状态的监控，还涉及对车内外复杂环境的感知，比如列车密度、天气状况、乘客流量等。所有这些数据被快速传递至控制中心，由强大的算法系统进行处理和分析，进而生成精确的指令，实现对列车行驶全过程的自动控制，这种感知与决策的闭环设计使列车运行更加高效、安全，尤其是在高峰时段，自动驾驶系统能够根据实时客流情况调整发车间隔，有效避免了传统手动操作带来的延误和拥堵问题。与此同时，传统地铁系统依赖于人工操作，尽管司机受过专业培训，但仍可能因为疲劳、注意力分散等人为因素导致操作失误。而自动驾驶系统通过连续监测列车位置、速度、加速度等关键数据，并结合预设的安全参数，能够在任何可能出现危险的情况下主动介入，进行紧急刹车或减速等操作，最大限度地降低事故发生概率。例如，系统能迅速识别前方轨道上的障碍物或异常状况，并根据情况采取相应的安全措施，而不依赖于人工判断。

传统地铁需要大量司机、调度员和维护人员，尤其是长时间、连续运行的情况下，对人力的需求极为庞大，但是在自动驾驶系统下，列车的运营几乎完全实现自动化，司机的角色逐步被系统替代，调度也由智能系统完成，这可以减轻人力成本，提高系统的可靠性和稳定性，避免人工操作的波动性。自动驾驶技术还为城市交通运营提供了更灵活的模式，比如在乘客流量较少的时段，可以通过智能调度减少列车的发车次数，从而达到节能降耗的目的。

## 2.3 信号集成系统的应用

信号集成系统的核心在于将轨道交通系统中的各种信号设备、列车自动化控制系统（如 CBTC）、调度控制中心，以及轨道、站台监控系统进行有效的整合，形成一个统一的综合管理平台。通过这种系统，地铁运营者可以实时监控整个网络的运行状态，精确掌控列车的运行、停靠和发车等细节，如列车的速度调节、停车位置、与其他列车的安全距离等细节，不再依赖于分散的局部信号系统，而是通过统一的集成系统进行整体协调。而且在传统的地铁系统中，不同线路或区域的信号设备相互独立运行，调度员需要手动进行操作和协调，容易出现信息滞后或调度失误。而在信号集成系统的支撑下，所有运行信息可以在瞬间内被采集和分析，调度指令也能被实时传递至列车和相关设备，这意味着，无论是常规运营中的列车调度，还是突发情况下的应急指挥，集成系统都能通过对全网实时数据的分析，做出最优的决策，

比如，当某一列车出现故障时，集成系统可以迅速识别问题，自动调整其他列车的运行计划，避免网络瘫痪或大面积延误。

## 3 现代地铁信号技术在应用中的挑战

### 3.1 系统复杂性带来的维护难题

现代地铁信号技术涉及多种高精度的设备，如列车自动控制器、无线通信模块、复杂的轨道传感系统等，所有这些子系统都必须在一个高度集成的环境中协同工作。例如，CBTC 系统的无线通信模块与列车控制系统密切相关，当通信信号受到干扰或中断时，列车的自动控制功能就会受到影响。这种情况下，维护团队需要迅速识别问题的根源，结合多个技术领域，进行全面的故障排查和修复。同时，信号集成系统作为地铁运营的神经中枢，将多个独立的信号控制子系统连接在一起，实现了不同技术平台的融合和协调，然而，这种集成性的背后也意味着任何一个子系统的升级或调整，都会对整个信号系统产生深远影响，在实际维护中，系统更新或软件升级往往需要进行全系统的兼容性测试，确保所有子系统能够继续保持无缝连接<sup>[1]</sup>。这种测试过程不仅烦琐，还涉及大量的模拟运行和故障排查工作，任何细微的疏漏都可能引发系统瘫痪，因此，维护团队在进行技术升级时，不仅需要熟练掌握各个子系统的运行原理，还必须具备全局视角，能够预判系统之间的可能冲突，并通过严谨的测试与验证，确保升级过程中不会产生新的问题。

此外，随着地铁系统的不断扩展，维护工作的复杂性进一步加剧，地铁网络的不断扩展意味着信号系统的覆盖范围越来越广，设备的数量和种类也越来越多，新的线路引入到既有的地铁网络中，往往需要进行大量的信号设备兼容性调试和系统整合工作。不同的线路可能使用不同的信号设备和技术标准，这就要求维护团队在处理日常故障时，不仅需要应对设备种类的多样性，还必须考虑不同设备之间的兼容性问题。例如，某些旧线路可能采用的是传统的信号系统，而新线路则使用了更加先进的 CBTC 技术，这种情况下，如何在保持旧设备正常运行的同时，确保新设备能够与现有系统无缝集成，成为维护工作中的一大难题，这种复杂性无形中增加了日常维护的工作量，也对维护团队的技术整合能力提出了更高的要求。

### 3.2 网络安全问题的威胁

当前，地铁信号系统中的数据传输主要通过无线网络实现，车站与列车、列车与列车之间的协调，依靠着不断流动的海量数据。这一机制本质上需要系统保持极高的连通性和可靠性，然而，这种实时传输的数据链一旦被恶意入侵或篡改，整个地铁运营将面临失控的风险。黑客通过破坏网络通信、操控信号指令或植入恶意代码，可能导致列车位置信息的错误传递或列车调度的紊乱。在这种情况下，列车的自动化系统无法判断出错指令是否为恶意攻击的结果，

从而可能导致错误的列车速度控制、轨道切换异常等严重事故，如恶意攻击者如果通过破解 CBTC 系统，干扰列车之间的通信，将极有可能引发列车追尾或脱轨事故。这种网络攻击的隐蔽性和难以防范性，给地铁系统的安全运行蒙上了巨大的阴影<sup>[2]</sup>。而且不同的信号子系统、调度中心和设备制造厂商，往往采用各自不同的通信协议和安全机制，这为网络安全的统一防护带来了巨大挑战，现代地铁系统在扩展和升级的过程中，不同系统之间的接口和兼容性可能成为网络攻击的突破口。例如，在旧有线路与新建线路的融合过程中，可能出现的网络接口不兼容问题，导致某些子系统的防护能力不足，被攻击者乘虚而入。恶意软件或病毒一旦通过某个薄弱环节渗透到信号系统内部，便能快速传播并影响整个系统的运作。

更为复杂的是，地铁系统不仅涉及通信网络的安全，还要面对物联网设备与工业控制系统的安全风险，物联网设备（如传感器、摄像头）负责收集大量与列车、轨道及车站设施相关的数据，这些数据被整合进信号控制系统中，实时决定列车的运行状态。物联网设备一旦遭受攻击，可能导致数据篡改、信号干扰或系统瘫痪。例如，攻击者通过篡改传感器数据，让信号系统错误判断列车的速度或位置，进而发出错误的调度指令，造成列车撞击或脱轨事故。

针对这些潜在的威胁，地铁信号系统的网络安全防护需要从根本上进行重构和强化，传统的防火墙、加密措施和访问控制虽然能够在一定程度上提供基础防护，但面对越来越复杂和高技术化的网络攻击手段，仍然存在防护不足的问题。有效的防护策略应当包括多层次、多维度的防御机制。例如，在信号系统内部设置冗余防护结构，当某一层防护被突破时，系统能够依赖其他冗余机制继续保持正常运行。同时，实时的人侵检测与智能监控机制，可以通过 AI 算法与大数据分析，及时发现和拦截异常数据传输与异常操作行为。通过对系统数据流的持续监控，能够提前识别潜在的攻击信号，并采取应急措施，将潜在威胁消除在萌芽状态。

### 3.3 技术升级带来的兼容性问题

技术升级带来的兼容性问题首先表现在新老设备间的技术标准差异上，老旧线路常常采用不同厂商的设备，其设

计标准和通信协议可能与新技术的要求存在显著差异，例如，传统的轨道电路技术依赖于固定的分区控制，而 CBTC 系统则采用移动闭塞技术，这种本质上的差异导致新老设备在信息传递和处理方式上难以协调。这意味着任何新技术的引入，都需要对既有系统进行大规模的改造和调整，这种改造并非只是简单的硬件替换，更多涉及复杂的系统重新架构和接口调整。而且地铁信号系统通常由多个独立的子系统组成，包括列车控制、轨道监控、调度管理等，技术升级往往伴随着软件版本的更新，新系统引入的同时，旧有软件的代码兼容性问题也随之而来。例如，自动驾驶地铁技术的引入需要对现有的控制软件进行重新设计，而老旧系统的软件架构可能并不支持这种高层次的自动化操作<sup>[3]</sup>。不同的版本、不同的厂商之间，如何协调接口协议，确保数据传输的稳定性和准确性，成为技术升级中的关键难题。软件的升级一旦处理不当，可能会引发系统指令延迟、数据丢失甚至误操作的风险，这种风险在信号系统中尤为致命，可能直接影响列车运行的安全性。

## 4 结语

综上所述，现代地铁信号技术的快速发展，为城市轨道交通提供了前所未有的便利与安全保障，然而，伴随这些技术应用而来的复杂问题，同样不容忽视。系统的复杂性带来了高成本的维护压力，网络安全问题则使得智能系统面临潜在的巨大风险，技术升级过程中的兼容性挑战则进一步加剧了系统管理的难度。为了实现地铁信号技术的长远发展，城市轨道交通管理者需要在技术选择、系统维护及安全防护方面进行深入思考，并通过灵活的策略与科学的规划，化解这些新兴挑战，实现地铁交通的高效与稳定。

### 参考文献

- [1] 邵东波,焦爱莉,倪麒麟.基于LTE-M技术改造既有地铁信号专用无线通信系统的研究[J].铁道通信信号,2024,60(8):64-69.
- [2] 翟阿南.探究地铁信号系统的维护方法与维修技术[J].通讯世界,2024,31(6):139-141.
- [3] 夏建勇.地铁信号系统信息安全防御技术研究[J].电气化铁道,2024,35(3):82-85+89.