

既有地铁线路信号系统升级改造难点及解决方案

刘耀宇¹ 秦海鸣²

1. 徐州地铁运营有限公司, 中国·江苏 徐州 221000

2. 徐州轨道交通运营有限公司, 中国·江苏 徐州 221000

摘要: 城市地铁是城市公共交通的主要载体, 在长时间高负荷运行中, 早期投入使用的信号系统渐渐出现设备老化、技术制式落后、功能扩展性差、安全冗余度低等状况, 不能适应目前大客流运载、高密度发车、全自动运行的城市轨道交通发展需要。既有地铁线路信号系统升级改造不同于新建线路信号工程, 在保证线路正常运营、控制施工风险、适应既有土建和设备布置的基础上进行, 存在新旧系统兼容难、运营施工冲突多、现场施工条件受限、全流程调试校验繁杂等诸多现实难题。本文根据国内多条既有地铁线路信号改造工程实践, 对既有地铁信号系统升级改造的主要特点和存在的问题进行梳理, 在系统兼容适配、施工组织控制、现场工艺改进、运维体系建设四个方面提出有针对性、可操作性的改造方案, 以解决既有有线改造中遇到的技术障碍和工程难题, 提高地铁信号系统改造的质量、运营安全性和施工效率, 为国内类似城市轨道交通既有信号升级改造提供理论参考和实践借鉴。

关键词: 既有地铁信号系统; 信号系统升级改造; 系统兼容; 施工控制

Difficulties and solutions of upgrading and reconstruction of existing metro line signal system

Liu Yaoyu¹, Qin Haiming²

1. Xuzhou Metro Operation Co., Ltd, China Jiangsu Xuzhou 221000

2. Xuzhou Rail Transit Operation Co., Ltd, China Jiangsu Xuzhou 221000

Abstract: Urban subway is the main carrier of urban public transport. In the long-term high load operation, the signal system put into use in the early stage gradually appears the conditions of aging equipment, backward technical system, poor functional expansibility and low safety redundancy, which can not meet the development needs of urban rail transit with large passenger flow, high-density departure and fully automatic operation. The upgrading and reconstruction of the signal system of the existing metro line is different from the signal engineering of the new line. It is carried out on the basis of ensuring the normal operation of the line, controlling the construction risk, and adapting to the existing civil engineering and equipment layout. There are many practical problems, such as the difficulty of compatibility between the old and new systems, many operation and construction conflicts, limited site construction conditions, and complex debugging and verification of the whole process. According to the signal reconstruction engineering practice of many existing metro lines in China, this paper sorts out the main characteristics and existing problems of the upgrading and reconstruction of the existing metro signal system, and puts forward targeted and operable reconstruction schemes in four aspects: system compatibility and adaptation, construction organization control, on-site process improvement, and operation and maintenance system construction, so as to solve the technical barriers and engineering problems encountered in the reconstruction of existing lines, improve the quality, operation safety, and construction efficiency of the reconstruction of Metro signal system, and provide theoretical and practical reference for the signal upgrading and reconstruction projects of similar urban rail transit existing lines in China.

Keywords: Existing metro line signal system; Upgrading and reconstruction of signal system; System compatibility; Construction control

0 引言

国内城市地铁网络经过数十年大规模建设, 大批 2000 年到 2015 年建成的地铁线路正处在设备大修和系统更新阶段, 信号系统是地铁行车指挥、列车控制、安全防护的关键基础设施, 它的好坏直接影响到地铁运营的安全性、准

点率以及运力上限。早期地铁信号系统大多使用传统的固定闭塞、准移动闭塞制式, 设备硬件陈旧、软件封闭, 故障率逐年上升, 运维成本不断加大, 不能适应目前全自动运行、智能运维、高密度发车的行业发展趋势。为保证轨道交通运营的安全性以及提高运能, 各个城市正在对已建

成的地铁线路信号系统进行改造升级。与新建线路可以统筹规划、全封闭施工、全新设备组网的建设模式不同的是,既有地铁线路改造要遵循不停运、少影响的核心原则,在既有设备制式、隧道土建条件、运营时段、多专业交叉施工等各方面受到限制的情况下进行,因此改造工程会遇到很多非常规的技术和施工难题。目前我国既有线信号改造还存在着技术方案适应性差、施工组织不合理、新旧系统切换风险大、后期运维衔接不畅等种种问题,在部分线路改造过程中也曾出现过信号干扰、数据交互异常、运营延误等状况。因此,本文根据已有地铁信号改造工程的行业现状和实际操作经验,对改造的核心难点进行分析,提出一套完整的改造方案,帮助既有地铁信号系统安全、高效、平稳地升级。

1 既有地铁线路信号系统升级改造整体概况

既有地铁线路信号系统升级改造属于安全性、功能性、时效性、经济性的系统工程,主要目的就是通过硬件设备更新、软件系统升级、控制逻辑改善,更换掉老旧落后信号设备,更新闭塞控制制式,提高列车运行控制精度和安全冗余,保留原有线路土建及部分可用设备的使用价值,防止重复建设造成浪费。目前国内既有地铁信号改造主要以传统 TBTC 系统升级为 CBTC 系统、半自动运行模式升级为全自动运行模式为主,部分超期服役线路需要完成全线信号设备、车载设备、轨旁设备、通信接口的全部更新。相比新建地铁信号工程,既有线改造具有很强的特殊性,全程要与既有线路的土建结构、设备布置、车辆制式、运营时刻表相适应,不能按标准施工程序进行。大部分老旧地铁线路在建设阶段没有预留后期改造所需要的设备空间、线缆通道和电力负荷,设备机房空间狭小、轨旁设备布置杂乱、老旧线缆敷设无规范台账,大大增加了改造施工的难度。同时地铁是城市核心公共交通,全线停运改造不可行,所有的新设备安装、布线、调试、系统切换只能在夜间短暂的天窗期内完成,施工时间短、作业强度大、交叉工序多,极易造成施工疏漏和安全隐患。另外,国内早期地铁信号设备大多依靠进口品牌,各个线路、各个批次的设备厂家、技术协议、通信接口各不相同,制式碎片化现象严重,无统一的行业改造标准,造成改造方案无法批量复用,需要对每一条线路的设备现状进行量身定制,从而加大了改造的技术难度和工程成本。从整体上看,既有地铁信号系统升级改造一直存在着技术适配难、施工空间小、运营限制严、标准不统一的行业共性问题,是影响地铁老旧线路智能化、安全化升级的主要瓶颈。

2 既有地铁线路信号系统升级改造核心难点

2.1 新旧信号系统兼容性不足

新旧系统兼容问题成了既有地铁信号升级改造的主要技术难题。国内早期的地铁线路信号系统品牌众多,进口设备和国产设备、传统的固定闭塞系统和新型 CBTC 系统之间存在着本质上的差别,大部分老旧设备的接口是封闭的,没有公开的适配协议,厂商的技术壁垒比较高,不能直接和新型信号系统进行数据互通。改造期间要采取新旧系统并行过渡的施工方式,新旧车载设备、轨旁设备、ATS 调度系统同时在线工作,很容易造成信号数据冲突、指令叠加、通信干扰等状况。同时部分老旧线路存在多批、多种列车混跑的情况,不同的列车车载信号设备参数、适配标准不一样,新型轨旁信号系统不能同时适配所有的车型,容易造成列车定位不准、速度检测异常、信号丢失等问题。新旧系统安全控制逻辑、故障判别标准、应急处置机制不一致,在系统切换过程中存在单点故障扩散的风险,数据交互出现异常就会直接对全线列车调度和行车安全造成影响,严重的还会导致运营故障的发生。由于大部分老旧线路原始施工资料、设备参数台账缺失,技术人员不能准确掌握已有的设备运行参数和接口标准,前期勘测的适配难度大,从而加大了系统兼容改造的不确定因素。

2.2 不停运施工模式下运营与施工矛盾显著

既有地铁线路担负着城市超大客流运输的任务,全线停运改造会带来严重的公共交通瘫痪和经济损失,因此不停运改造、天窗期施工是所有既有线信号升级的硬性要求,也是工程实施的主要难点。国内地铁常规天窗期只有每天的夜间 2 到 4 个小时,有效作业时间非常短,施工人员只能在短时间内完成设备安装、线缆敷设、接线调试、隐患排查等一系列工作,作业节奏快、容错率低,容易出现施工收尾不彻底、设备调试不到位等问题。施工和日间运营高度交叉,夜间施工的线缆遗留、设备临时布置、轨道作业痕迹如果清理不到位,就会直接危及日间列车运行安全,日间列车高频次通过产生的振动、电磁干扰,也会对夜间新安装的精密信号设备造成影响,使设备参数偏移、调试数据失效。另外,信号改造牵涉到通信、供电、车辆、土建等诸多专业交叉施工,各个专业施工时序、作业空间互相占用,协调难度大,容易造成工序冲突、工期延误等状况。为了保证运营服务质量,在改造期间要严格控制列车晚点、停运等运营风险,施工安全管控标准比新建工程高很多,大大缩小了施工操作的空间,加大了工程实施的难度。

2.3 既有现场条件受限, 设备改造适配难度大

老旧地铁线路建设标准低, 现场土建与设备布置不能满足新型信号系统安装的要求, 是改造工程落地的主要障碍。早期地铁设备机房、隧道设备预留空间狭小, 建设阶段没有考虑后期设备升级的需求, 新型信号设备体积、功耗、散热要求都比老旧设备高很多, 造成设备无法安装、散热不良、电力负荷不足等状况。隧道内部线缆布设密集、管线布置杂乱, 新旧线缆互相缠绕重叠, 没有规范的分隔通道, 新增的信号线缆敷设困难, 电磁串扰问题容易发生, 信号传输不稳定。部分隧道弯道、坡道、轨旁设备基础为早期施工定型结构, 不能适应新型计轴设备、应答器、无线通信设备安装标准, 需要对既有土建结构进行微调, 但是隧道土建改造空间小、施工风险大, 不能开展大规模整改作业。除此之外, 老旧线路长时间运行之后, 轨旁设备、线缆存在老化腐蚀、移位变形、隐蔽破损等隐性问题, 前期人工勘测很难全面发现, 改造施工时很容易造成原有的设备故障, 引起返工整改, 严重干扰施工进度和改造质量。

3 既有地铁线路信号系统升级改造解决方案

3.1 构建分级兼容过渡体系, 规避新旧系统交互风险

由于新旧信号系统存在兼容性问题、数据交互不稳等状况, 须要创建分级适应、物理隔离、平滑过渡的系统改造技术方案, 从源头处消除系统兼容的危险。改造前期要对全线的设备进行精细化的勘测, 全面了解已有的信号设备型号、通信协议、接口参数、列车制式等, 补齐缺少的设备台账和技术资料, 针对多品牌、多制式设备现状, 制定出相应的差异化适配方案。对接口封闭的老旧进口设备, 抛弃整体替换的高风险模式, 用专用协议网关和信号隔离装置来完成新旧系统通信数据的单向、受控交互, 完全消除数据冲突和信号干扰的问题。另外建立独立的新旧系统并行运行架构, 划分出专门的网络通道和数据传输区间, 用物理隔离的方式把新旧设备的供电、通信线路分开, 防止电磁串扰和指令叠加。对多车型混跑的场景进行优化新型信号系统适配参数, 输入全线所有列车车载设备参数, 进行多轮车型适配仿真测试, 保证轨旁系统和不同型号的列车精确匹配。改造过程采取“局部试点、全线推广”的切换方式, 先选取单个站点、单个区间做新旧系统切换试点, 检验系统运行稳定、数据交互准确, 然后慢慢推进全线改造, 创建系统回退机制, 一旦出现适配故障, 立刻切换到原有的系统上, 保证运营安全。

3.2 优化天窗期施工组织, 平衡施工与运营关系

为了克服不停运改造模式下施工时长少、工序冲突、

安全风险大的难题, 必须创建起细致化的、标准化的天窗期施工控制体系, 最大限度地利用有限的作业时间。首先对施工工序进行优化, 提前编制每日天窗期施工专项方案, 将大型施工工序拆分为多个部分, 把设备预制、线缆裁剪、参数调试等前期准备工作转移到地面车间完成, 夜间天窗期只进行现场安装、对接、核验工作, 大大提高夜间施工效率。其次实行分区、分段、分时作业模式, 将全线线路分成若干个作业区间, 确定各个区间施工内容、作业人员和完成时间, 防止多专业交叉作业互相影响, 建立多专业协同沟通机制, 每天进行施工交底和复盘, 统一施工时序, 解决工序冲突。同时严格落实施工安全清理制度, 制定标准化收尾流程, 每日施工结束后对轨道作业面进行清理、排查设备隐患、核验设备状态, 保证无施工遗留物、无设备异常, 保证日间正常运营。

3.3 精细化适配现场条件, 优化设备安装改造工艺

针对现场施工条件受限、设备适配难度大等问题, 采用精细化工艺优化和适配改造的方式解决土建和设备的布局问题。根据老旧线路机房、隧道空间狭窄的特点, 选择小型化、低功耗、高集成度的新型信号设备, 改善设备布置方案, 用叠装、侧装等适合安装的方式, 在机房空间上合理规划, 提高设备机房的供电和散热系统的性能, 满足新设备运行的电力和环境要求。对隧道线缆杂乱问题进行全线线缆梳理规整工作, 划分新旧线缆专用敷设通道, 用屏蔽线缆代替传统线缆, 增设电磁隔离防护装置, 降低电磁串扰对信号传输的影响。对隧道弯道、坡道、设备基础不符合新设备安装要求的地段, 使用定制化的支架、微调基座等适配构件, 不需要大范围的土建改造就可以实现设备的精确安装, 避免土建改造的风险。创建起初期全面的隐患排查体系, 用人工探测、设备检测、动态试验等方式, 对既有线缆、轨旁设备的隐性故障展开全方位排查, 提早做好老旧破损设备、线缆的预处理整改工作, 防止单纯依靠施工中出现的原设备故障引发问题, 保证施工连续性与改造质量。

3.4 搭建全周期调试运维体系, 保障改造长期稳定

为了保证信号系统改造后可以正常运行, 必须建立覆盖改造调试、过渡期运维、后期常态化保障的全周期运维体系。在改造调试阶段建立仿真测试、静态核验、动态试运行三级校验体系, 先用仿真平台模拟全线运行情况, 完成系统逻辑、数据交互、故障反应全方位检测, 然后进行现场静态设备核对和全线动态空载试运行, 逐条排查系统漏洞和设备隐患, 保证改造后系统功能完全满足要求。新

旧系统切换期间,由专人 24 小时值守,实时监测系统工作状况,采集信号数据和设备运转参数,及时处置微小故障及参数超出范围的情形,持续优化系统的匹配参数,慢慢提升新系统的工作稳定性。改造后建立完善的设备运维台账,对新型信号系统设备参数、故障特征、运维标准进行梳理,搭建智能化运维监测平台,实现设备状态实时感知、故障提前预警,取代传统的人工巡检模式,降低运维成本。

4 结语

既有地铁线路信号系统升级改造属于城市轨道交通提质增效、安全升级的重要工程,同时又是技术性、复杂性、风险性交织在一起的系统性工程。本文根据既有线改造工程实际情况,从系统兼容过渡、施工组织优化、现场工艺适配、全周期运维保障四个方面提出一体化解决方案,有效地解决了既有地铁信号改造的技术和工程难题。随着轨道交通智能化技术的不断进步,既有地铁信号改造会朝着标准化、智能化、低风险的方向发展,用数字化仿真、智

能适配、无人化调试等新技术来不断改善改造方案,给城市轨道交通网络安全稳定运行赋予有力支撑。

参考文献:

- [1] 刘颖超. 深圳地铁 3 号线既有信号系统升级改造项目研究[J]. 人民公交, 2025(18): 119-121.
- [2] 韩臻, 姜磊, 李硕. 北京地铁既有线列车跨线信号系统的方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(11): 108-114.
- [3] 刘鑫, 罗运真. 深圳地铁 3 号线既有信号系统更新改造方案研究[J]. 现代城市轨道交通, 2023(11): 96-99+113.
- [4] 王立志. 浅谈西安地铁 14 号线与既有机场线信号系统贯通方案[J]. 铁道通信信号, 2023, 56(12): 89-93.
- [5] 王建文. 地铁既有线路信号系统改造转辙机过渡倒接方案[J]. 铁路计算机应用, 2025, 24(8): 64-66.

作者简介: 刘耀宇 (1991.10-), 男, 汉族, 江苏徐州人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 城轨信号设备维护。