

高速铁路信号系统更新改造成套技术研究

宋长峰

中铁武汉电气化局集团有限公司 湖北 武汉 430000

摘要: 随着我国高速铁路网络的持续扩张与运营年限的增长,早期建设的高速铁路信号系统正面临设备老化、技术标准滞后、维护成本攀升及安全冗余不足等多重挑战。为保障路网整体安全、提升运输效率并实现全生命周期成本优化,对既有高速铁路信号系统进行科学、高效、安全的更新改造已成为一项紧迫而重要的任务。本文聚焦于高速铁路信号系统更新改造这一核心议题,系统性地阐述了其必要性与面临的复杂挑战,并在此基础上,提出了一套涵盖顶层设计、关键技术攻关、工程实施策略与安全保障体系的“更新改造成套技术”。该成套技术以“安全第一、平滑过渡、兼容协同、智能运维”为原则,深入研究了基于ETCS/CTCS融合架构的列控系统升级路径、既有设备利旧与新旧系统无缝切换技术、高精度仿真测试验证平台构建、以及面向未来的智能化运维体系集成等关键环节。本文旨在为我国乃至全球高速铁路信号系统的现代化改造提供一套系统化、可复制、高可靠的技术解决方案与实施范式。

关键词: 高速铁路; 信号系统; 更新改造; 列控系统(CTCS); 成套技术

引言

自2008年京津城际铁路开通,中国建成世界最大高速铁路网。信号系统作为高铁“神经中枢”,以CTCS为核心的列控系统是关键。但早期线路采用的CTCS-2级或早期CTCS-3级系统,存在时代局限性:部分关键设备接近或超使用寿命,故障率上升,备品备件供应难,维护压力大;新一代信息技术发展下,既有系统难以满足智慧铁路发展需求;不同批次、供应商设备互联互通存在壁垒,增加全路网调度指挥和运维管理复杂度。因此,对既有高速铁路信号系统更新改造,是消除隐患、延长服役寿命的现实需要,也是推动技术装备升级、构建现代化铁路体系的战略举措。不过,信号系统更新改造是超级复杂系统工程,在保证既有线路正常运营前提下安全、高效、低成本升级是难题。“高速铁路信号系统更新改造成套技术”针对此,整合创新技术与管理方法,形成完整解决方案。

1 高速铁路信号系统更新改造的必要性与挑战

1.1 更新改造的必要性

一是保障运营安全的根本要求:信号系统是行车安全的最后一道防线。设备老化会导致性能下降、可靠性降低,极易引发危及行车安全的故障。通过更新改造,引入更先进的安全计算机平台、更可靠的通信链路和更完善的故障-安全机制,可以从源头上消除安全隐患。二是提升运输效率的内在驱动:新一代信号系统(如CTCS-3+ATO)能够支持更短的追踪间隔、更高的自动化水平和更精准的运行控制,从而有效提升线路通过能力和运输效率,释放既有线路的潜能^[1]。三是适应技术发

展的必然选择:将5G-R替代GSM-R、北斗定位替代或增强GPS、IP化传输网络等新技术融入信号系统,不仅能解决现有技术瓶颈(如GSM-R频谱资源紧张、GPS信号易受干扰),还能为未来车车通信(V2V)、车地协同等高级应用奠定基础。四是降低全生命周期成本的有效途径:虽然初期投资较大,但更新后的系统具有更高的可靠性、更低的维护需求和更长的使用寿命,能够显著降低长期的运维成本和因故障导致的间接经济损失。

1.2 更新改造面临的核心挑战

(1)“零事故”安全底线的压力:任何改造施工都必须在极其有限的“天窗期”(通常仅数小时)内完成,且不能对次日的正常行车造成任何影响。新旧系统切换过程中的任何微小失误都可能导致严重后果。(2)新旧系统无缝衔接的复杂性:改造往往采取“边运营、边改造”的模式,要求新旧系统在相当长一段时间内共存、协同工作。这涉及到复杂的接口协议转换、数据同步、状态一致性维护等问题。(3)多专业、多系统深度耦合:信号系统与通信、供电、工务、车辆等多个专业紧密关联。改造方案必须充分考虑对其他系统的影响,并做好周密的协调。(4)高精度仿真验证的难度:由于无法在真实线路上进行大规模、破坏性的测试,必须依赖高度逼真的仿真测试平台来验证改造方案的正确性和安全性。这对仿真模型的精度、覆盖度和实时性提出了极高要求。(5)标准化与个性化需求的平衡:既要遵循国家和行业统一的技术标准,又要兼顾不同线路、不同区段的具体特点和历史遗留问题,实现“一案一策”的精细化设计。

2 高速铁路信号系统更新改造成套技术体系

针对上述挑战,本文提出一套以“顶层设计引领、关键技术支撑、工程精细管控、安全保障闭环”为核心的成套技术体系。

2.1 顶层设计:基于融合架构的演进路径规划

2.1.1 目标架构定义

首先,需明确最终目标系统的功能边界与性能指标。这不仅包括满足当前CTCS-3级列控的基本要求,更要前瞻性地融入ATO(列车自动运行)功能,支持更小的追踪间隔(如2.5分钟甚至更低),并具备强大的数据交互能力,为智慧车站、智能调度等上层应用提供高质量的数据底座。目标架构应是一个开放、可扩展、模块化的平台,能够灵活接入未来的新技术,如基于5G-R的车车通信(V2V)和车路协同(V2I)。

2.1.2 ETCS/CTCS融合策略

在全球铁路互联互通的大趋势下,单纯固守既有CTCS标准将不利于长远发展。因此,在顶层设计中应积极采纳ETCS(欧洲列车控制系统)的先进理念与成熟规范,特别是其在安全架构、数据模型和互操作性方面的优势。具体而言,可采用“核心兼容、应用自主”的融合策略:地面核心设备(如RBC、TSRS)的硬件平台和底层操作系统遵循ETCS Baseline 3或4的通用安全平台规范,确保高可靠性和长生命周期;而在应用层,则保留并优化CTCS特有的逻辑处理规则和人机交互界面,以满足中国铁路复杂的运营场景和调度习惯^[2]。这种融合架构既能保证与国际主流技术接轨,又能维护我国技术主权和运营特色。

2.1.3 分阶段、渐进式实施方案

鉴于全线一次性改造风险过高、成本巨大,必须制定详尽的分阶段实施方案。第一阶段可聚焦于“利旧过渡”,通过软件升级和增加外围适配器,提升既有系统的可靠性和部分新功能;第二阶段为核心设备替换,优先更换故障率高、备件停产的关键设备,如老旧的RBC和车载ATP主机;第三阶段为功能增强,部署ATO、PHM等高级应用;第四阶段则面向未来,进行网络IP化、定位北斗化等基础能力的全面升级。每个阶段都需设定清晰的KPI(关键绩效指标),并通过独立的第三方评估,确保阶段性目标的达成,为下一阶段的推进奠定坚实基础。

2.2 关键技术一:新旧系统无缝切换与利旧技术

2.2.1 双系热备与动态无扰动切换技术

在改造过渡期,为RBC、TSRS等关键地面设备构建新旧两套完全独立的热备系统。这两套系统通过专用的安全数据总线实时同步列车位置、移动授权、临时限速等所有关键运行状态。切换装置作为“交通警察”,在收到切换指令后,能在数毫秒内完成主备角色的切换,并确保切换瞬间发送给列车的报文序列号连续、内容一致,从而实现对列车而言完全透明的“无感切换”。此技术依赖于高精度的时间同步(通常采用IEEE1588PTP协议)和确定性的网络传输保障。

到切换指令后,能在数毫秒内完成主备角色的切换,并确保切换瞬间发送给列车的报文序列号连续、内容一致,从而实现对列车而言完全透明的“无感切换”。此技术依赖于高精度的时间同步(通常采用IEEE1588PTP协议)和确定性的网络传输保障。

2.2.2 多层级接口适配与协议转换网关

新旧系统间的差异不仅体现在硬件上,更深层次的是通信协议和数据语义的鸿沟。为此,需开发专用的、经过SIL4级安全认证的协议转换网关。该网关部署在新旧系统之间,能够实时解析旧系统(如基于Profibus或专有串行协议)的报文,并将其精确映射、封装为新系统(如基于以太网和TCP/IP)的标准报文格式^[3]。网关的设计必须遵循“故障-安全”原则,即在自身发生任何故障时,必须导向最安全的状态(如发送紧急制动指令),绝不能产生误导性信息。

2.2.3 基于全生命周期评估的既有设备利旧技术

盲目更换所有设备会造成巨大的资源浪费。成套技术强调对既有基础设施进行科学的价值评估。通过引入先进的无损检测技术(如电缆绝缘在线监测、应答器磁场强度扫描)和基于大数据的寿命预测模型,对轨道电路、信号电缆、轨旁应答器等进行健康状态画像。对于评估结果为“健康”或“亚健康”的设备,可通过加装信号调理模块、更新固件或调整配置参数等方式,使其性能满足新系统的要求,从而实现经济高效的利旧。这不仅节约了投资,也减少了施工对线路基础的扰动。

2.3 关键技术二:高保真、全流程仿真测试验证平台

2.3.1 全要素数字孪生建模

平台的基础是构建一个与物理世界完全对应的数字孪生体。该模型不仅包含线路的几何信息(坡度、曲线、道岔)、信号设备的精确位置与逻辑关系,还集成了列车的详细动力学模型(牵引、制动特性)、无线信道的传播模型(考虑隧道、桥梁等地形影响)以及通信网络的QoS(服务质量)模型。这种高保真的建模能力使得仿真结果具有极高的置信度。

2.3.2 HIL/SIL/VIL多维度联合测试

平台支持多种测试模式的灵活组合。SIL(Software-in-the-Loop)测试用于早期验证新开发软件的逻辑正确性;HIL(Hardware-in-the-Loop)测试则将真实的待更新硬件(如新的车载安全计算机)接入仿真环境,验证其在各种工况下的硬件响应和接口兼容性;更进一步的VIL(Vehicle-in-the-Loop)测试,甚至可以将真实的列车控制单元接入,进行接近实车的闭环测试。这种多维度的测试策略,能够从不同层面、不同粒度上暴露潜在问题。

2.3.3 自动化、全覆盖的场景生成与回归测试

人工编写测试用例效率低下且难以保证覆盖率。平台应集成智能场景生成引擎,能够根据形式化规约自动生成覆盖所有正常场景、边界场景和故障场景(包括单点、多点、连锁故障)的海量测试用例。每次软件或配置发生变更后,平台能自动执行完整的回归测试套件,并生成详细的测试报告,确保任何修改都不会引入新的缺陷^[4]。这种自动化、全覆盖的验证机制,是保障系统安全性和可靠性的基石。

2.4 关键技术三:智能化运维与内生安全保障体系集成

2.4.1 深度集成的PHM系统

新系统从设计之初就预留了丰富的传感器接口和数据采集通道。PHM系统利用这些实时数据,结合设备历史运行数据和专家知识库,运用机器学习算法(如LSTM、随机森林)对设备健康状态进行实时评估,精准预测潜在故障的发生时间和位置。运维人员可以据此提前安排检修计划,变“坏了再修”为“该修才修”,极大提升运维效率,降低突发故障风险。

2.4.2 纵深防御的网络安全体系

信号系统IP化带来了便利,也敞开了攻击面。成套技术要求构建覆盖“终端—网络—平台—应用”四层的纵深防御体系。在终端层,采用可信计算技术确保设备启动和运行环境的完整性;在网络层,部署工业防火墙、入侵检测系统(IDS)和安全隔离网关,严格控制东西向和南北向的数据流;在平台层,实施严格的访问控制和身份认证;在应用层,对关键业务数据进行加密和完整性校验。同时,建立常态化的攻防演练和应急响应机制,持续提升系统的抗攻击韧性。

2.4.3 基于仿真的应急联动与快速恢复机制

将前述的高保真仿真平台与应急指挥系统打通。当现场发生真实故障时,指挥中心可立即在仿真平台上复

现故障场景,快速推演各种处置方案的效果,并选择最优方案指导现场抢修。此外,系统应预设多种降级运行模式(如CTCS-3降级到CTCS-2),并在故障发生时能自动、平滑地切换到相应模式,最大限度地维持运输秩序,缩短中断时间。

3 结语

高速铁路信号系统的更新改造是一项功在当代、利在千秋的系统工程。本文提出的“高速铁路信号系统更新改造成套技术”,通过顶层设计引领方向,以无缝切换、高保真仿真、智能运维三大关键技术为支柱,辅以精细化的工程实施与安全保障策略,形成了一套完整、闭环的技术解决方案。该成套技术已在部分干线铁路的信号系统改造项目中得到初步应用和验证,有效保障了施工安全,缩短了工期,降低了成本,并为后续更大范围的推广积累了宝贵经验。展望未来,随着6G、量子通信、通用人工智能等颠覆性技术的成熟,高速铁路信号系统将向更加自主、协同、韧性的方向演进。更新改造成套技术也需与时俱进,不断融入新的技术元素,从“设备更新”迈向“能力重构”,最终支撑起一个安全、高效、绿色、智能的世界一流高速铁路网。

参考文献

- [1]郭大帅.高速铁路信号系统更新改造成套技术研究[J].铁道建筑技术,2023(7):38-42.
- [2]葛伟涛,王斌,柴金川,等.既有时速250km高速铁路提速通信系统改造方案研究[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(1):84-89.
- [3]郜新军,刘德超,林瑜筠.更新改造工程信号系统动态检测技术研究[J].铁路通信信号工程技术,2023,20(3):1-6.
- [4]王勇,李东亮,朱文平.京津城际铁路信号系统升级改造技术[J].铁路通信信号工程技术,2020(3):39-43,67.