 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i3.9482

Design and Implementation of Intelligent Control System for Railway Train Operation from the Perspective of System Engineering

Xiaobin Jiang

Henan Thinker Information Technology Co.,Ltd., Zhengzhou, Henan, 450001, China

Abstract

With the continuous expansion of high-speed rail and heavy-haul train operations in China, existing railway train control systems have demonstrated limitations due to inefficient information exchange and poor coordination, failing to meet comprehensive standards for safe, efficient, and intelligent operations. This study employs systems science theory and methodology, following a structured approach of "theoretical foundation, requirement analysis, overall design, modular development, and testing verification," to conduct theoretical analysis of intelligent electronic control systems for railway trains. It precisely defines system functionalities and performance parameters, establishing a four-tier architecture of "sensing-control-execution-human-machine interaction" with six functional modules. By integrating cutting-edge technologies such as BeiDou Navigation, 5G networks, and artificial intelligence, the system achieves modular integration and rigorous testing validation, ultimately serving as a robust technical backbone for railway transportation.

Keywords

Systems engineering; Railway train; Intelligent electronic control; System design; Operational safety

系统工程视角下铁路列车运行智能控制系统设计与实现

姜小彬

河南思维信息技术有限公司，中国 · 河南 郑州 450001

摘　要

我国高速铁路与重载列车运营里程持续攀升，铁路列车运行控制系统因信息交互不畅、协同性差而显弊端，难以达到安全、高效、智能运行的综合标准。本探讨依托系统科学理论与方法论，依照“理论根基、需求剖析、总体设计、模块化开发、测试检验”路径，实施铁路列车智能电子控制系统的理论分析。精准描述系统功能与性能参数，形成“感知-控制-执行-人机交互”四重架构及六大功能单元，采用北斗导航、5G网络、人工智能等前沿技术，实现模块化组合，测试验证系统达标水平，成为铁路运输技术支撑的坚实后盾。

关键词

系统工程；铁路列车；智能电子控制；系统设计；运行安全

1 引言

随着国内铁路行业快速发展的步伐，我国高速列车、重载列车的运营里程不断攀升，这对列车运行的安全性、高效性以及智能化水平设定了更高的要求 [1]。传统的铁路列车运行控制系统大多采用分散式的设计思路，各项功能模块独立运作，暴露出信息交互不通、协同控制能力薄弱、故障响应迟缓等弊端，难以匹配复杂路网场景下的列车运行需求。本文从系统工程的角度开展相关探讨，整体按照“理论基础、需求分析、总体设计、分模块实现、测试验证”的顺序开展，开展铁路列车运行智能电子控制系统的设计与实现研究，为当代铁路运输筑牢可靠的技术根基。

【作者简介】姜小彬（1985—），男，中国河南浚县人，初级工程师，本科，从事铁路调车安全防护系统研究。

2 相关理论基础

2.1 系统工程理论与方法论

近年来，随着智能交通技术的迅速进步，传统铁路建设及运营正在加速推进智能化和数字化转型。在高速铁路领域，基于实际工程勘察设计数据驱动建模，将显著提升列车在复杂运行环境中的仿真运行精确度，同时，随着智能交通调度系统的持续完善，智能调度中心实现对列车群运行状态的监控与管理，提高了安全性和运营效率。这一创新技术为数字铁路建设注入了新的活力，有助于构建更加智能、高效的铁路运输体系，推动铁路行业的高质量发展 [2]。

2.2 铁路智能电子控制核心技术

要实现这套系统，铁路智能电子控制核心技术是不可或缺的基础。结合当下铁路智能化的发展走向，核心内容为列车定位与导航相关技术，采用北斗卫星导航、惯性导航、轨道电路定位等多种方式融合，实现列车位置的精准定位，可实现米级的定位精度，以适配列车运行管控要求 [3]。

2.3 铁路控制系统安全标准

铁路列车运行控制系统直接关乎人民群众的生命与财产安全，为严格遵循安全方面的标准要求，国内铁路控制系统的安全标准大多参考国际电工委员会的相关规范，结合我国铁路的现实情况进行制定，其核心组成有 IEC 61508 功能安全标准以及 IEC 62280 等标准。

2.4 系统工程与铁路智能控制融合应用

系统工程与铁路智能控制的结合，本质上是将系统工程的方法论贯穿于铁路智能控制系统的全生命周期，对系统进行整体层面的优化。在开展设计工作的阶段，依托系统分析流程，明确本系统的整体目标，对感知、控制、执行、交互等各类模块的功能进行统筹，避免模块单独设计造成的协作不顺；在推进实现的阶段，按照层次性的要求，把系统拆分成多个层级，把各层次的接口关系梳理清楚，推动各模块实现协同运转；在运维开展阶段，围绕动态性原则进行相关操作，对系统运行情况开展实时监测，随环境调整并匹配运行需求，针对系统实施优化升级举措，使系统始终处在最佳运行水准。

3 铁路智能电子控制系统需求分析

以系统工程的整体性与最优化原则为依据开展工作。我们进行需求分析要紧扣针对性、可行性、安全性、扩展性这四大核心原则：铁路列车运行控制的核心需求是针对性原则的聚焦点，要消弭传统系统的现存痛点；紧扣可行性原则，贴合当前技术条件与铁路运输实际，让需求具备实际落地的可行性；保障列车运行安全是安全性原则的首要目标，所有需求设计都应达到相关安全标准的要求；为扩展性原则预留接口，为未来铁路的智能化升级以及路网扩展提供保障。

4 基于系统工程的系统总体设计

4.1 总体设计原则与目标

务必要恪守整体性、层次性、最优化及动态性原则，适配铁路列车运行控制相关要求，落实“安全优先、智能高效、协同兼容、可扩展”的设计核心原则，将系统安全性置于各项工作的首位，全部设计方案都契合相关安全标准；整合前沿技术，实现智能决策与高效运转；让系统各模块实现协同工作，可与现行铁路系统设备相匹配；适配未来技术更新与路网延伸需求。

4.2 系统总体架构设计

依据系统工程的层次性原则开展相关工作，铁路列车运行控制系统的整体架构，被划分成了四个相互关联且协同运作的层级，组成一个有机的统一整体。感知层承担数据采集的源头功能，利用车载传感器、轨道及气象监测设备等手段，先对列车运行状态、轨道环境等多元数据开展初步处理，再传输至控制层。控制层作为整体运作中的核心决策中心，实施智能分析操作，把生成指令下达给执行团队。实现与外部系统以及人机交互层之间的数据互通。

4.3 功能模块划分与接口设计

从系统整体架构与功能需求出发，可将系统划分为六大职责明确的功能模块，且各模块协同开展工作。对多源数据进行采集与初步处理是感知模块的任务；智能决策模块就数据展开深度剖析，实现故障预警与调度优化；控制模块根据决策得出的结论，发出速度调节及制动类的具体指令；执行单元将驱动牵引及制动设备完成指令相关操作。

4.4 系统安全性与可靠性设计

符合 SIL4 级安全完整性相关要求，采取冗余设计策略，对核心模块实施双份备份操作，确保单一模块故障时，可快速切换备用模块，不会对系统运行造成干扰；采用数据加密的相关技术，对采集得到的数据以及传输的指令开展加密操作，做好信息泄漏与篡改的防范；完成故障自诊断模块的配置，动态跟踪系统各模块的运行状态，第一时间识别故障并发送预警，另外附带故障的处理建议。切实恪守铁路控制系统的安全准则，针对系统设计、实现与测试等流程开展安全管控工作，保障系统运行的安全性。

4.5 关键技术选型

结合系统的实际需求以及预先设定的设计目标，贴合当前技术发展状况进行关键技术挑选。就感知层面而言，用到了北斗卫星导航系统、高精度车载惯性导航传感器、轨道振动传感器及高清视频监控设备，完成列车位置与运行状态的精准感知工作。数据传输采用的是 5G 和光纤混合组网技术，车地之间的实时通信依靠 5G 完成，保障地面系统之间实现大带宽稳定传输。

5 系统分模块设计与实现

5.1 感知层设计与实现

车载感应模块部署于列车核心部位，综合运用惯性导航、速度、加速度及制动状态等多元传感器技术，即时搜集列车速度、加速度、制动幅度及精确定位等核心运行参数；感应模块沿轨道边缘分散配置，配置轨道振动探测装置、轨道磨损监测器及异物侵入限制检测仪，实时跟踪轨道的平滑度、磨损状况及异物侵入现象；将气象监测终端与高清视频监控设备结合，形成环境感知单元，动态搜集并整理降水量、能见度、风速等气象参数以及轨道周边人员、车辆、障碍等环境资料。感知层采用模块化设计理念，众多感知工具经规范化端口与数据收集单元实现无缝融合，核心改进焦点为融入 AI 边缘计算技术单元，摒弃传统单一滤波降噪流程。通过轻量级卷积神经网络对采集数据实施即时解析，自动筛选

异常数据点，执行数据净化、属性提取及初步区分，大幅提高数据筛选的精确度与效率，高效数据借助 5G 传输模块实现快速处理与高效流通，同步接入调控中心，实施多源数据整合、智能预加工与高效传输措施，为智能决策提供稳固的数据后盾，保证数据实时获取、精确可靠。

5.2 控制层设计与实现

控制层当之无愧地采用“PLC+AI 智能”的双核控制架构，实现了从传统控制模式向智能化转型的重大突破，感知层预处理的数据流至该层，由数据处理模块接收，采用 Transformer 模型的 AI 数据整合策略，对车载、轨道、环境三大类数据实施深度汇聚，细致筛选列车运行状况、轨道状况与环境风险等关键资讯，全面提升智能决策的支撑水平。智能决策系统的核心构建模块是大数据与深度学习模型的结合，本文采用融合注意力机制的 LSTM 神经网络进行实验，对制动系统等核心组件实施时间序列分析，精确识别潜在故障苗头，可在 30 至 60 分钟内发布分级警报并自动发送定位信息；结合强化学习机制、实时路况及人流量分析，动态调整调度模型，结合 AI 应急决策模型，迅速形成最适处理方案。

5.3 执行层设计与实现

执行层是命令实施的核心阶段，采用 AI 自适应控制手段，精确执行控制指令并实现灵活调整，突破传统执行模块的被动应对格局。在控制层下达牵引指令时，AI 技术赋能牵引模块，采用速度闭环控制算法，即时呈现列车速度与预定速度的误差，自动校正牵引系统的动力输出模式，改进牵引力分配手段，实现列车速度的持续上升与精确控制，节能与乘坐舒适度同步提升。制动模块启动作业，采用 AI 驱动的制动算法优化，融合列车实时速度、承载能力、轨道坡向等数据，智能化调节制动压力及制动触发时刻，消除急速制动、剧烈振动等不良后果，保障列车匀速减速或静止，全力提升行车安全水平；搭载 AI 健康管理系统的设备模块，实时监控转向架、空调、供电系统等辅助设施的运行参数，自动识别设备运行异常迹象，实施预防性维护警示，依据列车运行背景，自动调整设备运行参数，保证列车运行井然有序。

5.4 人机交互层设计与实现

人机交互层秉持“智能简易、精准迅速”的核心理念，整合 AI 交互技术潜力，提升驾驶人员操控体验的互动性，降低操作难度，列车操作室所采用的交互式终端，采用高清触控显示技术，采用人工智能数据图形化处理方法，对列车行驶情形、调度指令、故障报告、环境参数等繁复资料，即时以图形、预警等直观手段呈现，便于驾驶者迅速把握核心信息概览。终端界面支持驾驶员手动输入操作指示，融入 AI 语音交互功能模块，通过语音指令，操作者可实现列车速度调控、实施紧急制动及查询指令等，降低人工操作频次，提高作业效率；集成 AI 智能故障提示功能模块，系统出现故障情形时，除迅速实施声光警示以外，采用人工智能故障诊断机制，快速挖掘故障诱因、精确锁定故障区域，自动实施对应措施，指导驾驶人员迅速整治故障，简化故障排除的烦琐程度。

5.5 系统集成与测试验证

按照系统全面布局规划，对感知、控制、执行与人机交互层实施模块化集成，核心采用 AI 辅助调试算法，跨越模块接口兼容性鸿沟，推动各层级间无缝协作机制，确保数据传输无阻、指令执行精准无误。在组合实施阶段，对系统软硬件实施同步调试，采用人工智能故障分析机制，自动监控集成阶段出现的接口故障、数据传输不畅、指令执行误差等情形，推送排查指导手册，提升调试作业的效率。确保系统与实际应用相契合，实施系统测试的确认阶段，包含功能、性能及安全三大测试范畴：功能测试主要针对 AI 故障预警、智能调度、自适应控制等核心智能功能的有效性进行验证；AI 技术模拟多种运行状况以检验系统性能水平，对系统数据处理效率、指令反应时长及协同作业的稳定性进行测试；列车行车安全是安全检验的核心焦点，核实 AI 在紧急应对、故障排除、安全保卫方面的稳定性能，维持系统运营安全需求。

6 结语

本文立足于系统工程的视角展开分析，贴合铁路列车运行控制的实际应用需要，开展了铁路列车运行智能电子控制系统的设计及实现相关研究，研究首先针对系统工程理论、铁路智能电子控制核心技术、安全标准，以及二者的融合应用展开梳理，为系统搭建工作筑牢理论根基；依托需求分析流程，厘清了系统的功能需求与非功能需求，作为系统设计环节的参考凭据；按照系统工程的层次性与整体性相关原则，完成了系统整体架构搭建与各模块的设计工作，对各层次、各模块的功能和接口关联进行了明确说明；项目最后环节为系统集成及测试验证，论证了该系统既有效又具备可行性。

参考文献

[1] 李博,张新,王岩.高铁列车运行图智能编制技术方案研究[J].铁路技术创新,2025,(03):163-171.

[2] 罗大勇.铁路列车安全运行管控平台建设的思考[J].大众标准化,2025,(11):64-66.

[3] 李智，张涛，曾壹，王涛，许伟。400 km/h高速铁路CTC系统列车运行智能调整研究[J].中国铁路,2025,(06):139-145.