

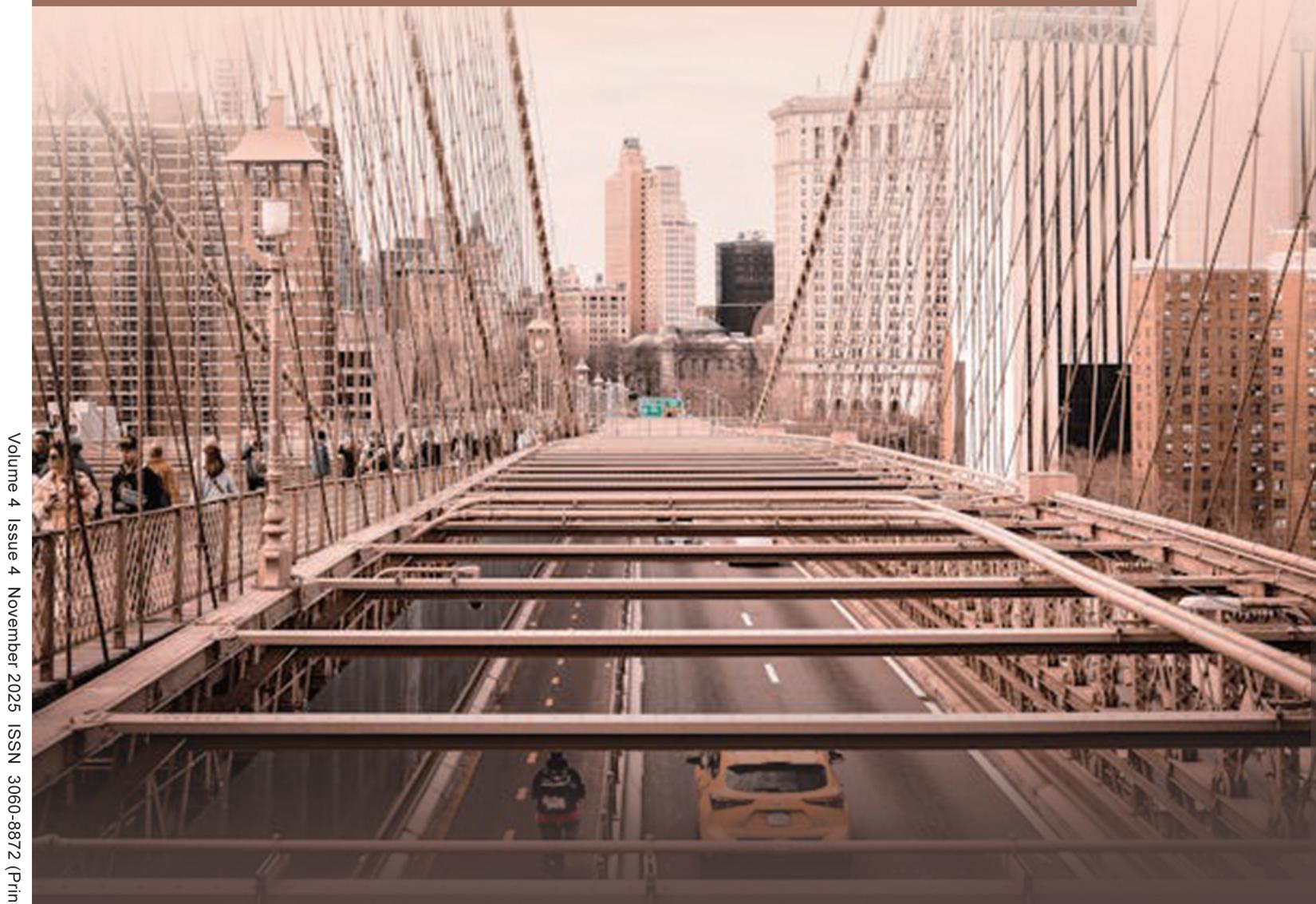
04
2025



公共交通与建设

公共交通与建设

Volume 4 Issue 4 November 2025 ISSN 3060-8872 (Print) 2811-0390(Online)



Volume 4 Issue 4 November 2025 ISSN 3060-8872 (Print) 2811-0390(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.

Tel.: +65 62233839

E-mail: contact@nassg.org

Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



中文刊名：公共交通与建设
ISSN：3060-8872（纸质） 2811-0390（网络）
出版语言：华文
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/ptc>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Public Transportation and Construction
ISSN: 3060-8872 (Print) 2811-0390 (Online)
Language: Chinese
URL: <http://journals.nassg.org/index.php/ptc>
Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《公共交通与建设》征稿函

期刊概况：

中文刊名：公共交通与建设
ISSN: 3060-8872 (Print) 2811-0390 (Online)
出版语言：华文刊
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/ptc>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure
www.cnki.net

出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
Email: info@nassg.org
Tel: +65-65881289
Website: <http://www.nassg.org>



出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 中国知网（CNKI）、谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

公共交通与建设

Volume 4 Issue 4 November 2025
ISSN 3060-8872 (Print) 2811-0390 (Online)

主 编

武瑞娟

Ruijuan Wu

编 委

王同科 Tongke Wang

罗学荣 Xuerong Luo

黎光明 Guangming Li

- 1 基于北斗卫星定位及短报文通信的列车接近远程预警关键技术
/陈朋 张斌 程国林 闫保振 纪旭东
- 7 交通运输企业安全管理体系有效性评价与提升路径
/徐文武
- 10 物联网技术在高速公路收费机电设备运维中的应用
/朱恒
- 13 数字化背景下铁路运输收入票据管理创新路径研究
/李颖
- 16 智能化技术在动车运用所的应用前景
/李儒鑫
- 19 普通国省道路网监测与应急处置平台的运营服务流程优化研究
/李涛
- 22 关于机车走行部监测装置数据综合分析利用标准的研究
/孙敏轩
- 26 汽车结构变形特征在交通事故力学鉴定中的应用
/林志坚
- 29 南京内河港高淳港区固城作业区 PPP 项目推进研究
/陈辉
- 32 山区公路生态边坡防护系统设计优化研究
/赵捷琛
- 35 高填方路堤的基本特征及边坡稳定性分析
/林文俊 王志明
- 39 道路沥青路面裂缝养护技术分析
/黄景涛
- 42 影响高速公路养护效果的因素与改进策略分析
/包鑫
- 45 “百千万工程”背景下东莞市解决镇村停车难问题的现状及对策研究
/刘小慧
- 48 宁波港口物流发展研究分析
/杨磊 王江华
- 51 数据驱动的铁道行车安全预警模型构建及在运输组织中的应用
/苏江英
- 54 轨道交通关键材料的技术创新与产业应用
/李海龙
- 57 智慧交通背景下高速机电工程系统协同控制与优化策略
/景淑祎
- 60 公路桥梁预防性养护管理策略研究
/蒋海洋
- 63 国能自有铁路在甘其毛都口岸煤炭运输中的效能分析
/曹磊森
- 66 数字孪生赋能国省道智慧化转型：衢州 315 国道的实践与启示
/林汉忠
- 69 智能化技术在铁路车辆段检修作业中的应用实践
/韩龙龙
- 72 高速公路龟速车现象及其对交通安全影响研究
/吕春荣
- 75 道路改建工程下穿既有线铁路安全技术研究
/余常俊
- 80 轨道交通通信信号干扰抑制技术的创新与实践
/王亚坤
- 83 港口与航道工程大体积混凝土施工中的温度裂缝风险评估与控制
/王中平
- 86 国省道工程合同管理关键问题与优化路径研究
/朱杰
- 89 物联网在智慧交通发展中的应用措施分析
/冶金辉
- 92 应急抢救车辆的性能优化与改装技术探讨
/卢彦卫
- 95 盐城地区普通国省道建养一体化方案研究
/王新东 朱艳 班长凯
- 99 路桥隧施工关键工序质量控制要点及实践应用研究
/胡廷树
- 102 复杂地质条件下隧道钻爆施工参数优化与围岩稳定性分析
/魏云
- 105 轨道交通盾构施工沿线沉降监测技术优化与工程应用
/张磊 杨玉龙
- 108 高速公路机电工程信息化系统构建与应用探析
/肖翔 张航
- 111 高速公路建设全生命周期管理的关键节点与治理逻辑研究
/赵忠波
- 114 机动车查验技巧与创新研究
/穆艳丽
- 117 高铁自动驾驶对调度指挥的影响探究
/陈永兵

- 1 Key technologies for train approach remote warning based on Beidou satellite positioning and short message communication / Peng Chen Bin Zhang Guolin Cheng Baozhen Yan Xudong Ji
- 7 Evaluation and Improvement Paths for the Effectiveness of Safety Management Systems in Transportation Enterprises / Wenwu Xu
- 10 The Application of Internet of Things Technology in the Operation and Maintenance of Electromechanical Equipment for Expressway Toll Collection / Heng Zhu
- 13 Innovation path of railway transportation revenue ticket management under digital background / Ying Li
- 16 The application prospect of intelligent technology in the use of EMU / Ruxin Li
- 19 Research on Operation Service Process Optimization of National and Provincial Road Network Monitoring and Emergency Response Platform / Tao Li
- 22 Research on comprehensive analysis and utilization standard of locomotive running gear monitoring device data / Minxuan Sun
- 26 Application of vehicle structure deformation characteristics in mechanical identification of traffic accident / Zhijian Lin
- 29 Research on the Promotion of the Nanjing Inland Port Ga-ochun Port Area Gucheng Working Area PPP Project / Hui Chen
- 32 Study on design optimization of ecological slope protection system for mountain road / Jiechen Zhao
- 35 Basic characteristics and slope stability analysis of high fill embankment / Wenjun Lin Zhiming Wang
- 39 Technical analysis of road asphalt pavement crack maintenance / Jingtao Huang
- 42 Analysis of Factors Affecting the Effectiveness of Expressway Maintenance and Improvement Strategies / Xin Bao
- 45 Research on the Current Situation and Countermeasures of Solving the Parking Problem in Towns and Villages under the Background of “Ten Million Project” / Xiaohui Liu
- 48 Research and analysis on port logistics development in Ningbo / Lei Yang Jianghua Wang
- 51 Construction of data-driven railway traffic safety early warning model and its application in transportation organization / Jiangying Su
- 54 Technological Innovation and Industrial Application of Critical Materials in Rail Transit / Hailong Li
- 57 Coordinated Control and Optimization Strategies for High-Speed Electromechanical Engineering Systems in the Context of Smart Transportation / Shuyi Jing
- 60 Research on Preventive Maintenance Management Strategies for Highway Bridges / Haiyang Jiang
- 63 Effectiveness analysis of state-owned railway in coal transportation at Ganqimadu port / Leisen Cao
- 66 Digital Twin Empowers the Intelligent Transformation of National and Provincial Roads: Practices and Insights from Quzhou's National Highway 315 / Hanzhong Lin
- 69 Application of intelligent technology in railway vehicle depot maintenance / Longlong Han
- 72 Study on the Phenomenon of Slow-Moving Vehicles on Expressways and Their Impact on Traffic Safety / Chunrong Lv
- 75 Safety technology for road reconstruction projects passing under existing railway lines / Changjun Yu
- 80 Innovation and Practice of Interference Suppression Technology for Rail Transit Communication Signals / Yakun Wang
- 83 Risk assessment and control of temperature cracks in large volume concrete construction of port and waterway engineering / Zhongping Wang
- 86 Research on key problems and optimization paths of na-

- tional highway project contract management / Yun Wei
/ Jie Zhu
- 89 Analysis of the application measures of Internet of things in the development of Intelligent Transportation / Jinhui Ye
- 92 Discussion on Performance Optimization and Modification Technology of Emergency Rescue Vehicles / Yanwei Lu
- 95 Research on the Integrated Plan of Construction and Maintenance of Ordinary National and Provincial Roads in Yancheng Area / Xindong Wang Yan Zhu Changkai Ban
- 99 Research on Key Quality Control Points and Practical Application of Key Processes in Road, Bridge and Tunnel Construction / Tingshu Hu
- 102 Optimization of tunnel drilling and blasting construction parameters and analysis of surrounding rock stability under complex geological conditions / Yongbing Chen
- 105 Optimization and Engineering Application of Settlement Monitoring Technology along the Subway Shield Construction Line / Lei Zhang Yulong Yang
- 108 Exploration on the Construction and Application of Information System for Expressway Mechanical and Electrical Engineering / Xiang Xiao Hang Zhang
- 111 Research on key nodes and Governance Logic of life cycle management of Expressway Construction / Zhongbo Zhao
- 114 Research on Motor Vehicle Inspection Techniques and Innovations / Yanli Mu
- 117 Research on the Impact of High-speed Rail Autonomous Driving on Dispatching and Command / Yongbing Chen

Key technologies for train approach remote warning based on Beidou satellite positioning and short message communication

Peng Chen¹ Bin Zhang² Guolin Cheng² Baozhen Yan² Xudong Ji²

1. China Railway Information Technology Group Co., Ltd., Beijing, 100038, China

2. China Railway Information Engineering Group Co., Ltd., Beijing, 100044, China

Abstract

This paper investigates critical technologies for remote train warning systems in railway construction projects without public network coverage, utilizing BeiDou satellite positioning and short message communication. By analyzing the limitations of traditional safety protection methods in railway engineering, we developed a remote early-warning network for construction sites through the BeiDou-3 system's high-precision positioning and reliable communication capabilities in non-networked areas. The system employs BeiDou positioning technology to capture real-time coordinates of both trains and workers, transmitting location data and warning

Keywords

BeiDou satellite positioning; BeiDou short message communication; LoRa self-organizing network; No public network coverage; Railway construction safety; Train approach warning; GIS geographic information system

基于北斗卫星定位及短报文通信的列车接近远程预警关键技术

陈朋¹ 张斌² 程国林² 闫保振² 纪旭东²

1. 中国铁路信息科技集团有限公司, 中国·北京 100038

2. 中铁信息工程集团有限公司, 中国·北京 100044

摘要

本文针对无公网覆盖的铁路营业线施工工程, 研究基于北斗卫星定位及短报文通信的列车接近远程预警关键技术。通过分析传统铁路施工安全防护技术的局限性, 结合北斗三号系统在无公网区域的高精度定位和可靠通信能力, 构建了一套覆盖施工现场的列车远程预警信息网络。系统利用北斗卫星定位技术获取列车和施工人员的实时位置信息, 经由北斗短报文通信传输方式实时交互位置和预警信息; 通过GIS地理信息系统对列车运行轨迹进行精确分析, 预测列车接近施工区域的安全距离; 在施工现场配备级联组网的告警装置, 确保施工安全管控人员能够及时获取预警信息。本文详细介绍了系统架构设计、关键技术实现、调度中心远程监控技术以及实际应用效果, 为提升施工现场的技术防护能力, 保障营业线施工安全提供了有效解决方案。

关键词

北斗卫星定位; 北斗短报文通信; LoRa自组网; 无公网覆盖; 铁路施工安全; 列车接近预警; GIS地理信息系统

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着我国铁路建设行业的快速发展, 铁路营业线施工安全问题日益凸显。铁路施工过程中, 列车接近施工区域是造成施工安全事故的主要原因之一。特别是在无公网覆盖的复杂地形区域, 如山区、隧道、峡谷等, 传统的铁路施工安全防护技术面临诸多挑战。传统的铁路施工安全防护主要依赖人工防护, 存在信息传递滞后、定位精度低、无法实时监控等问题。在无公网覆盖区域, 现有智能预警系统因依赖移动通信网络而无法正常工作, 导致施工安全风险增加。

近年来, 北斗卫星导航系统的建设与应用取得了重大突破。北斗三号系统不仅具备高精度定位能力, 还具有独特

【基金项目】中国铁路信息科技集团有限公司科技研究开发计划合同《北斗短报文系列终端设计及研制》研究成果（项目编号: WJZG-CKY-2024038 [2024Y07]）; 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划合同《铁路行业北斗短报文应用场景及实施关键技术研》研究成果（项目编号: N2024X024）。

【作者简介】陈朋 (1972-), 女, 中国北京人, 硕士, 正高级工程师, 从事铁路网信新技术应用研究。

的短报文通信功能，可在无公网覆盖区域实现信息传输。将北斗卫星定位及短报文通信技术应用于无公网覆盖施工区域的列车接近远程预警，可有效解决传统防护方法的不足，提升铁路施工安全水平。

国内外学者对铁路施工安全预警技术进行了大量研究。在定位技术方面，GPS、GLONASS 等卫星导航系统被广泛应用于铁路施工安全监测，但这些系统在无公网区域存在信号覆盖不足、定位精度不稳定、定位信息无法回传等问题。在通信技术方面，4G、5G 等公网通信技术在铁路安全预警中得到应用，但在无公网覆盖区域无法使用。

北斗卫星导航系统在铁路安全领域的应用研究逐渐增多。研究表明，北斗三号系统在亚太地区定位精度优于 5 米，短报文通信容量提高 10 倍，单次通信能力达 1000 个汉字，且具有全球覆盖、高可靠性等优势。此外，北斗短报文通信时延约为 0.5 秒，点对点通信时延为 1-5 秒，适合在无公网覆盖区域进行安全预警信息传输。

1.2 研究内容与创新点

本研究首先分析了当前铁路施工安全防护技术的现状，对比了传统人工防护方式信息滞后、可靠性差与现有智能预警系统过度依赖公网覆盖的局限性，阐明了在无公网区域构建新型预警系统的必要性。在此基础上，论文深入研究了北斗卫星定位及短报文通信技术的原理，论证了其全球覆盖、不受公网限制的独特优势，为系统提供了核心的技术支撑。进而，我们设计了一套完整的基于北斗的列车远程预警系统架构，详细阐述了地面监测点、车载终端、调度中心平台及级联式告警装置等关键组件的功能与交互机制。其中，调度中心远程监控技术实现了对列车运行状态的实时可视化监控与预警决策；通过融合北斗短报文与 LoRa 等技术的多模式通信方案，有效解决了无公网区域信息传输的难题；而创新的铁路里程 - 坐标转换算法与列车接近趋势辅助测算模型，则显著提升了预警的精确性与及时性。最后，通过对系统应用效果的测试分析，验证了其可靠性与有效性，并针对当前不足提出了未来的优化方向，为提升铁路施工安全防护水平提供了行之有效的解决方案。

本研究的核心创新在于针对无公网覆盖区铁路施工安全这一行业痛点，提出了一个多技术深度融合的系统性解决方案。其创新性主要体现在三个方面：首先，在通信架构上，提出了“北斗短报文 + LoRa”的协同异构传输模式，兼具北斗的全球覆盖性与 LoRa 的本地低功耗大容量优势，成功解决了铁路无公网环境下数据可靠传输的难题；其次，在算法层面，研发了基于铁路里程 - 坐标转换的动态预警模型，实现了从抽象地理信息到铁路业务逻辑的精准映射，大大提高预警准确率；最后，在工程应用上，自主研发了支持级联组网的低功耗告警装置，并通过实际业务环境中的长期稳定运行，实现了该技术在复杂铁路业务场景从“实验室验证”到“工程化应用”的重大突破，为行业应用提供了可复制、

可推广的完整解决方案。

2 基于北斗的列车远程预警系统总体架构

2.1 系统需求分析

本系统的设计源于对铁路营业线施工，特别是在无公网覆盖区域施工中安全痛点的深刻洞察。传统人工防护方式存在信息传递滞后、定位精度低、无法实时监控等问题，而依赖公网的智能预警系统在山区、隧道、峡谷等复杂地形中可能失效，致使施工安全风险陡增。因此，构建一套不依赖公网、能够实现高精度定位与可靠通信的远程预警系统，是保障铁路施工安全的迫切需求。

2.1.1 功能性需求

本系统的功能性需求核心在于构建一个闭环的“感知 - 通信 - 决策 - 执行”远程预警体系。首先，系统需具备高精度的时空信息感知能力，能够实时获取列车与施工人员在无网区域的精确位置信息（厘米级至米级），为后续分析提供数据基础。其次，系统必须拥有完全不依赖公网的双向可靠通信能力，确保前端监测数据与中心预警指令的稳定、及时传输，彻底打破信息孤岛。再次，系统需集成远程分析与实时预警功能，通过融合 GIS 与铁路里程标信息，对列车运行轨迹进行精确分析，动态计算安全距离，并实现临近临界点的自动、多级预警触发。

在预警信息的发布与呈现层面，系统需支持现场多模态与远程多途径的信息发布机制，即通过级联组网的声光电报警装置确保现场施工人员全员感知，同时通过短报文、平台弹窗等方式通知远端管控人员。为实现全局指挥与控制，调度中心需具备全景可视与决策支持能力，依托 BIM+GIS 数字孪生平台直观展示列车、人员、电子围栏等全要素动态，赋能调度员进行精准决策。最后，系统应提供完备的数据追溯与效能评估功能，完整记录历史数据以支持事后回放、查询与分析，为安全事故溯源与安全管理优化提供核心数据依据。

2.1.2 非功能性需求

在非功能性需求方面，系统需满足一系列严苛的性能与质量指标，以确保其在复杂铁路施工环境中的实用性与可靠性。首先，系统必须具备高精度与高可靠性，在结合地基增强服务后，开阔区域定位精度需优于 0.5 米，复杂环境下亦需稳定在米级以内，同时系统整体可用性应高于 99.9%，确保关键预警功能持续有效。其次，预警信息的端到端传输延迟需严格控制在秒级（依托北斗短报文约 0.5 秒及点对点 1-5 秒的通信能力），以满足对高速列车接近的实时预警要求。然后，所有野外部署设备需具备一定的环境适应性与耐久性，工作温度范围应覆盖 -20°C ~ 60°C，防护等级至少达到 IP67 的工业级或军工级标准，以抵御沿线恶劣自然环境的侵蚀。此外，为降低运维成本，无人值守的现场传感与告警设备需采用超低功耗设计，单次供电续航时间不低于 3 个

月。最后，系统必须采用多级加密通信链路、数据传输校验及平台防火墙等多重安全措施，构筑坚固的防御体系，确保数据与运行安全。

2.2 系统总体架构设计

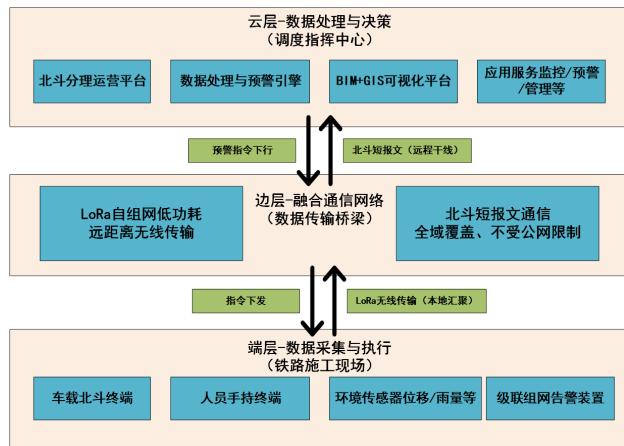


图 1-1 总体架构图

为实现无公网覆盖区域列车接近远程预警的核心功能，本文设计了一套基于“云 - 边 - 端”协同理念的三层系统总体架构，如图 1-1 所示。该架构自上而下由数据处理与决策层、融合通信网络层和数据采集与执行层组成，通过数据流的双向交互，构建了一个从信息感知、融合传输到决策与执行的完整闭环。

2.2.1 数据采集与执行层（终端层）

数据采集与执行层是系统的神经末梢，部署于铁路施工沿线现场，负责前端数据的采集与最终预警指令的执行。该层主要包括：

车载北斗终端：安装于运营列车机车内部，集成高精度北斗定位 + 北斗短报文通信模块，用于实时获取列车的位置、速度与运行方向等关键信息。

人员手持终端：配备给现场施工人员，具备定位和紧急报警功能，实现人员位置的实时追踪与管理。

地面监测传感器：包括位移计、雨量计等各类传感器，用于采集施工区域的环境状态数据。

级联组网告警装置：布设在施工区域关键节点，是预警信息的最终执行单元。它集成了北斗短报文接收、LoRa 通信模块及声光报警器，能够接收指令并发出多模态（声、光、语音）报警，提醒人员避险。

2.2.2 融合通信网络层（边层）

融合通信网络层是连接前端与后台的桥梁，是解决无公网覆盖区域通信难题的核心。本系统创新性地采用了“北斗短报文 + LoRa 自组网”的融合通信模式：

LoRa 地面自组网：在铁路沿线部署多个 LoRa 节点，形成星型或网状拓扑的本地无线网络，负责将终端层采集的数据在本地进行大面积、低功耗的汇聚与传输，其无障碍通信距离可达 20 公里，有效覆盖施工区域。

北斗短报文通信：作为远程干线通信通道，负责在无公网环境下实现数据的跨地域、超远距传输。部署于现场的汇聚终端（网关）接收来自 LoRa 网络的数据，经压缩与协议封装后，通过北斗短报文系统将数据上传至调度中心；同时，接收并解析下行指令，再通过 LoRa 网络分发至各执行终端。这种融合模式兼具了 LoRa 的低成本、高容量和北斗的全球覆盖、不受公网限制的双重优势。

2.2.3 数据处理与决策层

数据处理与决策层是系统的“智慧大脑”，部署于铁路局调度中心，负责数据的处理、分析、可视化与决策指挥。其核心是北斗分理级运营服务平台，主要包含以下模块：

数据接收与处理模块：负责接收通过北斗短报文回传的各类数据，进行解密、解压缩和数据清洗，为上层应用提供高质量的数据源。

预警分析引擎：是系统的核心算法模块。它基于 GIS 地理信息系统，融合铁路里程标与坐标转换算法，实现对列车运行轨迹的精确分析；通过列车接近预警模型，动态计算安全距离，远程判定预警等级，并自动生成预警指令。

可视化监控与决策支持模块：采用 BIM+GIS 技术构建铁路线路与施工场景的数字孪生模型，将列车位置、人员分布、实时轨迹、预警信息、电子围栏等要素进行一体化、全景式可视化展示，为调度员提供直观的全局态势感知和决策支持。

系统管理模块：负责用户权限、终端设备、历史数据、日志等的综合管理，支持预警信息的追溯回放与统计分析。

系统数据传输路径：数据采集与执行层的数据经由 LoRa 自组网汇聚至汇聚终端，终端对数据进行压缩与打包后，通过北斗短报文上传至数据处理与决策层；平台层的预警指令则通过相反的路径（北斗→汇聚终端→LoRa）下行分发至现场的告警装置执行。这一双向闭环流程，确保了在无公网环境下预警信息传递的及时性与可靠性，有效保障了铁路营业线的施工安全。

2.3 硬件组成

2.3.1 终端层硬件

终端层硬件部署于铁路施工一线，直接负责数据采集与指令执行，主要包括：

车载北斗终端：内置高精度北斗定位模块（支持 B2b-PPP 服务）和北斗 RDSS 通信模块，安装于机车驾驶室内，实时获取并上报列车的位置、速度、方向等状态信息。

人员手持终端：为现场作业人员配备，集成北斗定位模块、LoRa 通信模块及紧急报警按钮，具备人员位置实时上报、接收文本预警信息和一键求救功能。

环境监测传感器：包括边坡位移计、雨量计、振动传感器等，负责采集施工区域的环境安全数据，并通过内置的 LoRa 模块进行无线传输。

级联组网告警装置：是本系统的特色硬件。集成了北

斗 RDSS 通信模块、LoRa 自组网模块、高性能蓄电池、超亮 LED 灯珠、高音贝蜂鸣器及语音合成模块。其设计满足工业级标准，防护等级达 IP67，工作温度范围 -20℃ ~ 60℃，在低功耗模式下续航能力可达 3 个月以上，确保在恶劣环境下稳定工作。

2.3.2 网络层硬件

汇聚终端（网关）：作为通信网络的核心枢纽，是连接 LoRa 自组网与北斗卫星网络的关键设备。其采用户外型机箱设计，内置 LoRa 网关模块和北斗 RDSS 通信模块，并具备一定的边缘计算能力，负责对 LoRa 网络内采集的数据进行汇聚、预处理、压缩和协议封装，然后通过北斗短报文上传至中心平台；同时，接收并解析下行指令，分发至目标终端。

2.3.3 中心层硬件

服务器集群：部署于铁路局调度中心，包括应用服务器（承载业务逻辑与预警算法）、数据库服务器（存储时空数据与业务数据）、通信前置服务器（负责与北斗运营服务中心接口对接）等，为平台软件提供高性能、高可用的计算与存储环境。

监控工作站：为调度员提供人机交互界面，通常配备多块大屏幕，用于显示 BIM+GIS 可视化地图、预警信息、设备状态等。

2.4 软件组成

2.4.1 终端嵌入式软件

运行于各终端设备（车载、手持、传感、告警装置）中，基于轻量级实时操作系统（RTOS）开发。主要完成北斗定位数据的采集与初步解算、LoRa/ 北斗通信协议栈的封包与解包、低功耗策略控制（如休眠唤醒机制）、以及声光报警信号的驱动控制等功能。其核心特点是高实时性、高稳定性和平资源占用。

2.4.2 平台后端服务软件

平台后端采用微服务架构，包含以下核心服务模块：

数据接收与处理服务：负责接收通过北斗短报文回传的加密数据流，进行解密、解压缩、校验和数据清洗，生成标准化数据供后续服务使用。

预警分析引擎服务：是系统的算法核心。内置铁路里程-坐标转换算法、列车接近趋势预测模型和动态安全距离计算模型，实时处理列车与人员位置信息，智能判定预警等级并生成预警指令。

地理信息服务：基于 GIS 平台（如 ArcGIS 或开源引擎）进行开发，提供电子地图服务、空间分析（如点线距离计算、电子围栏判断）、路径规划等能力。

设备管理服务：对所有在线终端进行全生命周期管理，包括设备注册、状态监控（在线 / 离线）、远程参数配置、故障诊断与日志记录。

数据存储与管理服务：使用关系型数据库存储业务数

据，用时序数据库存储海量的位置轨迹与传感器数据，并提供高效的历史数据查询与回溯功能。

2.4.3 平台前端应用软件

采用 Web 技术开发，为调度员提供可视化的监控门户。其核心是基于 BIM+GIS 的数字孪生可视化模块，将铁路线路模型、实时列车与人员位置、预警信息、视频监控画面等要素融合在一张图中进行全景展示，支持地图缩放、平移、轨迹回放、设备筛选等交互操作。同时，提供预警信息发布、应急指挥调度、报表统计等功能界面。

2.4.4 通信协议与接口

系统采用北斗 2.1 版本接收机协议进行扩展，数据结构包含帧头、命令字、目的地址、加密后的应用数据体和校验码等字段，确保了数据传输的可靠性与安全性。

3 系统关键技术研究与实现

3.1 北斗定位与短报文通信关键技术

3.1.1 高精度定位技术

系统采用北斗三号系统提供的 PPP-B2b 服务（精密单点定位服务），通过 L 波段北斗 GEO 卫星播发精密轨道和钟差改正数，使用户终端在无需互联网支持的情况下，实现静态厘米级、动态分米级的高精度定位。在无公网开阔区域，其定位精度均值可达 0.12 米（标准差 0.10 米）。针对复杂环境（如峡谷、林区），采用多频相位模糊度固定（MCAR）理论算法，有效提升窄巷模糊度的固定率约 20%，缩短固定时间，确保在多数恶劣环境下定位精度仍能稳定在米级以内，满足铁路安全预警对定位精度的苛刻要求。

3.1.2 短报文通信技术

系统利用北斗系统独有的 RDSS（无线电测定业务）功能进行短报文通信。其通信流程为：用户终端将包含接收方 ID 和加密通信内容的询问信号经卫星中继至地面控制中心；地面中心解密后再加密，并入站广播电文经卫星转发给接收方。北斗三号短报文通信能力实现跨越式提升，区域通信能力每次可达 14000 比特（约 1000 汉字），全球通信能力达 560 比特（约 40 汉字），通信时延约为 0.5 秒，点对点通信时延为 1-5 秒。这种全天候、全域覆盖、抗干扰强、安全加密的通信能力，成为无公网条件下数据传输的“生命线”。

3.2 多模态融合通信技术研究

3.2.1 协同工作机制

数据上行（现场→中心）：部署于现场的各类传感器（位移、雨量等）和人员终端，通过 LoRa 无线自组网（最佳通信距离 20 公里）将数据汇聚至汇聚终端（网关）。网关对数据进行打包、压缩后，通过北斗短报文上传至调度中心。

指令下行（中心→现场）：调度中心的预警指令通过北斗短报文下发至现场的汇聚终端，终端再通过 LoRa 网络将指令分发至指定的告警装置或手持终端，触发声光报警。

3.2.2 数据压缩技术

为克服短报文长度限制，提高传输效率，采用基于固

定位长和 RLE (游程编码) 算法的混合压缩编码技术。该算法将预警区域坐标点集队列进行 4 等分, 以子队列中点为中心做差值得到增量点集, 再找到最大增量并求出步长, 最终将每个增量转换为整数形式的步数, 从而大幅压缩数据量, 压缩率通常控制在 30%-40%, 且压缩误差 ($0.001^\circ \sim 0.01^\circ$) 在预警应用中可完全忽略。这使得预警区域和内容信息可被封装在一个短报文包体内高效传输。

3.3 列车接近预警算法与模型研究

远程预警算法是系统的决策核心, 其关键在于将抽象的经纬度坐标转化为铁路业务专用的里程标信息, 并进行精准的趋势预测。

3.3.1 铁路里程 - 坐标转换算法

由于铁路线路具有强烈的“一维”线性特征, 而北斗提供的是二维地理坐标, 必须建立两者间的精确映射关系。算法首先建立包含铁路线路所有关键点公里标及其对应经纬度的电子地图数据库; 然后, 通过北斗获取列车实时坐标; 最后, 采用最近邻点匹配结合线性插值的算法, 将该坐标匹配到电子地图上最接近的线路点, 从而换算出精确的公里标位置, 为后续计算提供基础。

3.3.2 列车接近趋势预测与多级预警模型

安全距离动态计算模型: 预警阈值并非固定值, 而是根据列车实时速度、轨道坡度、天气条件等因素动态调整的动态值。例如, 列车速度为 120km/h 时, 安全距离阈值设为 2000 米; 速度提升至 200km/h 时, 阈值相应增大至 3000 米。

多级预警机制: 系统根据计算出的实时安全距离, 实施分级预警:

一级预警(提醒): 列车进入预设的早期预警区域, 系统向现场发出温和提醒。

二级预警(警告): 列车接近关键安全距离, 系统触发高声级警报和闪光。

三级预警(紧急): 列车即将进入极度危险区域, 系统触发最高级别报警, 并可直接联动广播系统发布疏散指令。

3.4 级联组网告警装置设计

现场告警装置是预警信息的最终执行单元, 其设计的可靠性直接关系到施工人员的生命安全。

3.4.1 级联组网架构

装置采用星型或网状拓扑进行级联组网。多个告警装置通过 LoRa 自组网与一个汇聚终端(网关)通信, 网关则负责通过北斗短报文与中心交互。这种设计支持大规模部署, 单网关可覆盖大量前端装置, 且具备故障自愈能力: 当单一节点故障时, 网络可自动重构路由, 确保报警信息可通过其他路径传输, 极大提升了系统的鲁棒性。

3.4.2 硬件功能与性能指标

装置集成了北斗 RDSS 通信模块、LoRa 模块、高亮 LED 灯、高音喇叭和语音合成模块。其关键性能指标包括:

定位精度: 结合地基增强, 可达亚米级。

通信距离: LoRa 节点间最大距离 20 公里。

电池寿命: 采用低功耗设计, 在待机和工作模式下, 续航可达 3 个月以上。

环境适应性: 工作温度 $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$, 防护等级 IP67, 满足户外恶劣环境使用需求。

当装置接收到预警指令后, 能同步触发爆闪灯、高分贝警笛和语音播报(如“上行列车接近, 请立即下道!”), 确保不同岗位、不同位置的施工人员都能清晰感知风险。

4 总结与展望

4.1 研究总结

本研究针对无公网覆盖区域铁路营业线施工安全防护的重大需求, 系统性地研究并构建了一套基于北斗卫星定位及短报文通信的列车接近远程预警系统。主要研究成果与结论如下:

设计并实现了一套完整的预警系统解决方案: 提出了“云 - 边 - 端”三层系统总体架构, 成功将北斗三号高精度定位与短报文通信、LoRa 自组网、GIS/BIM 可视化、远程预警算法等多技术融合, 攻克了无公网环境下“位置如何准、信息如何通、预警如何智”的核心难题, 形成了覆盖信息感知、融合传输、决策与执行的闭环体系。

突破了多项关键技术: 实现了基于北斗 PPP-B2b 服务的亚米级高精度定位; 创新性地采用北斗短报文与 LoRa 的融合通信模式, 构建了不受公网约束的可靠数据传输通道; 研发了基于铁路里程 - 坐标转换算法和动态安全距离模型的远程预警算法; 设计了支持级联组网的低功耗告警装置, 提升了系统的可靠性与覆盖范围。

通过了充分的实践验证: 通过在铁路局无公网试验段的实地部署与长达三个月的测试, 验证了系统在隧道、山区、多车追踪及极端天气等复杂场景下的可靠性和实用性。

综上所述, 本研究不仅理论上可行, 更通过了工程实践的检验, 为解决长期困扰铁路行业无公网地区施工安全防护的痛点, 提供了技术自主、安全可靠、经济高效的完整解决方案, 显著提升了铁路营业线施工的安全防护水平。

4.2 展望

尽管本研究取得了预期成果, 但仍有持续优化和深入探索的空间。基于当前系统的局限性与技术发展趋势, 未来工作可从以下几个方面展开:

增强复杂环境下的定位可靠性: 针对隧道、峡谷等卫星信号连续遮挡区域, 研究北斗与惯性导航(INS)、UWB(超宽带)、轨旁信标等技术的融合定位方案, 实现全域、全时无缝覆盖, 彻底消除定位盲区。

优化通信性能与成本: 一方面, 探索新一代北斗短报文协议的应用, 以进一步降低通信时延、提升传输效率。另一方面, 研究 5G-R(铁路 5G 专网)与北斗的互补融合机制,

在有公网覆盖区利用 5G-R 的大带宽、低时延特性传输高频数据，在无网区自动无缝切换至北斗，实现最优资源配置与成本控制。

提升系统智能化和主动预警能力：引入人工智能和机器学习算法，对历史运行数据、施工计划、环境数据进行深度挖掘与分析，实现从“列车接近后报警”到“施工风险提前预测”的转变，构建更主动、更前瞻的智能安全防护体系。

推动设备低成本化与标准化：目前高精度定位终端及伪卫星等设备成本仍较高。未来应致力于核心元器件的国产化替代和规模化生产，降低单点成本。同时，积极推动行业技术标准与设备规范的建立，促进系统的互联互通和大规模推广应用。

拓展应用场景：本系统架构与技术方案不仅适用于施工防护，亦可扩展应用于铁路沿线地质灾害监测、基础设施健康监测、应急抢险通信指挥等领域，具有广阔的应用前景和巨大的社会经济效益。

随着北斗系统的不断完善、“交通强国”战略的深入

推进以及物联网、人工智能技术的融合发展，基于北斗的铁路安全预警技术必将朝着更精准、更智能、更经济、更融合的方向演进，为构建现代化、智能化的中国铁路安全体系提供技术支撑。

参考文献

- [1] 袁永平.铁路营业线施工安全防护技术研究[J].运输经理世界,2023,(22):164-166.
- [2] 关达,白铭.铁路营业线施工智能安全防护管理系统研究[J].铁道标准设计,2020,64(12):25-30.DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.202009180001.
- [3] 祝启峰.列车接近报警系统在朔黄铁路的应用[J].神华科技,2011,9(05):79-82.
- [4] 张安安,郑萍,李晖,等.基于北斗卫星导航技术的列车定位和辅助行车安全系统设计[J].江西科学,2017,35(05):805-809. DOI:10.13990/j.issn1001-3679.2017.05.030.
- [5] 金耀,张贺,王泽林,等.北斗短报文发展与应用[J].邮电设计技术,2024,(03):53-57.

Evaluation and Improvement Paths for the Effectiveness of Safety Management Systems in Transportation Enterprises

Wenwu Xu

湖北船舶质量认证有限公司，武汉，430022，中国

Abstract

As an important support for the economic operation of modern society, the safety management level of transportation enterprises is directly related to public safety, people's lives and property, as well as the sustainable development of enterprises. This study conducts a systematic assessment of the effectiveness of the safety management system in transportation enterprises. It analyzes the operation status of the system from multiple dimensions such as system implementation, organizational management, personnel quality, technical equipment, and external collaboration, and identifies influencing factors. The improvement paths were proposed, including optimizing the organizational structure and management mechanism, enhancing personnel capabilities, strengthening technical equipment and information support, improving external collaboration, and establishing a dynamic improvement mechanism. The research aims to provide operational safety management optimization solutions for transportation enterprises. Through scientific evaluation and continuous improvement, it aims to achieve efficient operation of the safety management system, reduce accident risks, and thereby ensure the safe operation of enterprises and the healthy development of the industry.

Keywords

交通运输企业；安全管理；有效性评价；提升路径

交通运输企业安全管理体系有效性评价与提升路径

徐文武

中国船舶质量认证有限公司湖北分公司，中国·湖北 武汉 430022

摘要

交通运输企业作为现代社会经济运行的重要支撑，其安全管理水平直接关系到公共安全、人员生命财产及企业可持续发展。本研究对交通运输企业安全管理体系的有效性进行系统评估，从制度执行、组织管理、人员素质、技术装备及外部协同等多个维度分析体系运行状况，识别影响因素，提出了优化组织结构与管理机制、提升人员能力、强化技术装备与信息化支撑、健全外部协同及建立动态改进机制等提升路径；研究旨在为交通运输企业提供可操作的安全管理优化方案，通过科学评价和持续改进，实现安全管理体系的高效运行，降低事故风险，从而保障企业安全运营和行业健康发展。

关键词

交通运输企业；安全管理；有效性评价；提升路径

1 引言

交通运输企业作为现代经济社会运行的重要支撑，其安全管理水平直接关系到公共安全、人员生命财产以及企业可持续发展^[1]。然而，随着运输规模扩大、运输工具类型多样化以及运营环境复杂化，交通运输安全管理面临的挑战日益突出。企业内部安全管理体系建设虽已逐步完善，但在实际运行中仍存在制度执行不力、隐患排查不到位、风险控制机制不健全等问题，导致事故风险难以有效降低。因此，对交通运输企业安全管理体系的有效性进行系统评价，能够发现潜在薄弱环节，明确改进方向，从而提升安全管理水平与

应急处置能力。

2 交通运输企业安全管理体系有效性评价

交通运输企业内部运行风险防控的法宝，关系到员工的自身安全、设备的安全、自身的社会信誉等等，基于科学有效的评价手段，对安全管理体系进行全面的评价考核，发现不足，改进措施，提升体系的不断改善。在指标体系构建完成后，需通过数据收集和实证分析对体系运行效果进行全面评价。

2.1 制度运行管控状况分析

主要从安全巡查记录、隐患排查治理记录和隐患排查治理闭合情况分析，如安全巡查是否按照规定的频次开展了巡查，整改方案是否得到了有效的贯彻落实，日常考核是否正常等。制度执行有效说明该体系可以落实在日常的运营当

【作者简介】徐文武（1981—），男，中国湖北枣阳人，本科，工程师，从事交通运输安全研究。

中制约人员行为和控制风险^[2]。

2.2 事故和险情统计分析

针对事故发生率、险情处理时效性、损失控制等数据开展统计分析，对体系运行进行量化评价。事故发生少、险情处理得当和损失控制较好，说明该安全管理体系有较强可操作性和预防控制作用；相反则说明该体系运行存在不足，需要加强改进和处理。

2.3 安全文化及行为评价

企业安全文化建设内部环境的好坏将直接影响体系的实际运行效果。良好的安全文化可以促使员工自动遵守安全规章制度、主动参与培训和演练、主动上报安全隐患和事故苗头等，可以增强体系的实际运行效果，通过员工问卷调查、安全行为的观察、培训参与情况进行安全文化的落实情况评价。

2.4 信息化管理效能评价

信息化管理平台主要依托智能化、数字化技术等作为安全管理支撑，通过对信息化系统风险管理、风险预警通知、数据分析及决策支持功能实际应用情况的评价，衡量体系信息获取和决策响应效率，比如监控是否覆盖要点部位、预警消息是否及时精准、数据分析是否实际应用到风险管控环节等^[3]。

3 影响安全管理体系有效性的关键因素

安全管理体系是交通企业的正式运行系统，安全管理体系在运行过程中受很多内、外因素影响，通过对影响因素的把握与分析，可以明确方向，实施更加精准的改善，提升交通安全管理体系的效果。可以从以下四个方面展开。

3.1 组织与管理因素

组织结构与管理机制是安全管理体系能否高效运转的基础。首先，企业内部安全管理职责分工不明确，会导致安全责任落实不到位。例如，驾驶部门、维修部门和安全管理部门在日常操作中若缺乏清晰的分工和权责界定，安全隐患容易在部门交叉环节被忽视，事故风险累积。其次，管理流程繁琐或缺乏标准化，也会降低体系运行效率。部分企业在安全检查、隐患排查及事故报告流程中存在重复或冗余环节，使得管理人员难以及时响应。再次，企业文化建设不足亦是关键因素。安全文化是体系运行的软约束，高度重视安全的组织文化能够促进员工主动识别风险、遵守规章制度，而文化薄弱则可能导致员工安全意识淡薄、违规操作频繁^[4]。

3.2 人员素质与行为因素

人力资源是交通运输安全管理首要的风险源，员工的安全意识、安全教育也是造成安全管理混乱的危险因素。一是个别员工由于缺乏安全意识、作业偷工减料等原因，操作不按照行为规程、作业标准进行，或对行为规程、作业标准存在侥幸心理，从而给员工人身和单位财产埋下安全隐患。二是安全管理制度中缺少安全教育培训，有培训但都是理论授课，没有相关实践活动，一些新员工习惯性动作的改变、

突发情况下的应急处理措施等仍停留在纸上空谈，相关应急演练的制度不健全。三是安全作业时间过长导致安全疲劳。工作时间长、疲劳、焦虑等状况会在很大程度上影响到人们对安全的判断。在突发事件面前，安全水平迅速降低，不能对车辆正确地操作。

3.3 技术与装备因素

安全管理体系的主要支撑是技术装备，装备配置不足或者质量状况差将直接制约安全管理体系的有效性。一方面是运输设备的老化或技术落后增加了运输设备事故的风险。如船体、货车、轨道车辆超期服役，相关技术设备的磨损和老化，技术性能指标未能达到安全性能的要求，增加了设备事故风险发生的可能性。另一方面，信息技术手段和监控等设备的缺失也影响安全管理体系的安全性与前瞻性。现代交通运输企业借助 GPS 定位与监控设施、故障预警和故障诊断与分析等技术平台，如果这些技术手段不健全或不能及时维护，将可能导致风险无法预警，事故无法及时加以防范。另一方面，企业设备日常维护与应急维护不健全。如果企业没有针对设备定期检修与应急维护机制，就有可能导致关键时刻设备出现问题与故障无法及时维修，增加了运营设备的风险。

3.4 外部环境与制度因素

交通运输安全管理除了受企业管理自身的影响、制约以外，还会受外部环境因素、法规制度约束的影响。一是有关的政策法规和行业规范不够健全、变化滞后，直接影响着企业安全管理制度建设的科学性、可执行性，有些企业在标准更新变化的情况下还无法与最新的安全标准相适应。二是交通管理工作本身，社会安全管理部分执法力量以及信息传递的滞后性；第三个原因就是外部环境因素的影响，包括社会环境、自然环境的影响，尤其是交通安全管理所依赖的复杂气象条件、复杂的道路环境以及水文环境、交通密度等情况直接影响到交通运输体系的正常运行，要求体系本身具有更高的适应性及预先防范能力。

4 交通运输企业安全管理体系提升路径

在企业安全管理体系完善中，应从管理过程健全、人员素质提高、技术支撑力度和外部合作协调等环节出发，进而全面提升安全生产运行体系的管理效果。

4.1 优化组织结构与管理机制，强化体系运行效率

做好企业内部管理结构和制度安排是健全安全体系的必要手段。首先，需要严格落实安全管理责任，提高企业安全管理职能的层次性和权责清晰度，在不同部门之间建立安全管理链条；在组织内部，应该建立健全不同部门、不同岗位的具体岗位责任制，并将其安全管理责任延伸到安全生产中的每一个环节或每一个岗位中。其次，合理管控安全管理流程与标准化安全管理要求，消除安全管理成本浪费点，优化安全管理流程、信息管理上报形式，形成定量的表格、

模板以及清单，从而有效提升企业安全生产管控要求的规范化、标准化水平。最后，做好企业安全生产文化建设。安全工作需要通过多种渠道工作在企业生产过程中，而这种手段最可靠的方式则是通过定期的安全宣传、安全生产典型案例或故事的教育宣传、科学实施安全激励措施、调动员工安全参与制度建设等措施让企业的员工能够真正参与到单位安全文化建设中，充分发挥自身的积极作用。

4.2 提升人员素质与行为规范，降低人为失误风险

首先，企业应当针对各岗位制定差异化、分层次培训方法，包括理论、情景模拟、实操、紧急情况反应培训等，同时与定期的考核相结合，及时检验培训效果。其次，在安全教育方面。对员工进行安全教育、事故案例剖析以及行为养成教育等，让员工建立对制度的认知、理解与实践，营造关注、关注以及风险防范意识。三是轮班管理方面，关注到工作人员疲劳问题，通过组织轮班模式优化、休息管理和智能化监测穿戴，对员工的精神状态进行持续监测，并及时预警，避免员工在发生疲劳因素的情况下而发生作业差错。最后是由心理咨询管理与激励管理对个人及负责的反馈和奖惩。结合心理保健、应急演练激励、责任追踪的管理思路，促使员工在发生事故及危难情况下不慌乱处理。

4.3 强化技术装备与信息化支撑，提高体系保障能力

首先，做好运载工具的养护和淘汰升级。企业可制定船舶、车辆、轨道设备等核心运载工具的定期检查和整机寿命管理方案，对核心运载工具及时进行淘汰或升级改造，提高其抗风险能力。二是信息监控与预警系统建设。可通过GPS设备定位技术、智能化监视设备、数据监测、故障预测系统实现对运输状态的及时监控、异常事件的预警，同时在运载工具出现异常现象的发现在第一时间预警给运输人员，从而指导运载人员采取相应的防范措施。三是应急维护和及时响应机制。企业在进行各类运载工具维修与维护时应该配备专用维修设备、抢修队伍及远程专家支持等，以便在出现运载工具异常现象时能实现及时检测、修复。四是安全装备专用化，如对运输危险物质或复杂地形运输事故中配备有针对性的救援设备等^[5]。

4.4 健全外部协同机制与制度保障，增强体系适应性

首先，强化与政府部门监管机构与协会的信息交流，及时将企业运行情况、航道情况传至政府监管部门与协会信息共享平台，提前识别预警，对早期风险进行预防。其次，要健全行业标准与预案：依照国家或行业关于提升安全要求

的最新法规和标准，不断修订内部管理体系标准，并将灾害事件、事故应急预案中需要明确的应急协作关系、资源配置、信息发布和信息报告等内容写入预案，并对应急体系流程、制度不断改进或完善，对体系的动态调整。三是优化外部行业资源共享平台：通过在应急体系中，对接相邻运输企业、救援单位和应急服务单位（如拖车、救援船、医务用车等），建立资源共享机制，在真实的场景中和多部门共同参与条件下，检验应急体系的运行状态，发现隐患，进一步动态调整流程和制度，最终完善体系，使之适应外部环境的变化。

4.5 建立动态评估与持续改进机制，实现体系优化闭环

首先，建立安全系统管理评价体系，组建安全系统管理评价队伍，定期开展体系运行状况的指标评价、事故信息评价及管理审计，将日常生产运行过程中的安全工作进行全面、量化的分析评价。其次，将体系运行过程中评价不合格的问题及绩效进行定期整改立项，明确安全绩效的提升策略及开展安全绩效的改进活动。最后，运用信息系统实现评价和持续改进。强化信息系统管理手段，对日常运行中的数据进行分析、提出问题并产生警报信息，真正做到预警并促进改进。

5 结语

交通运输企业安全管理体系的有效运行关系到企业安全、员工生命财产以及社会公共安全。针对现存问题，需要优化组织结构与管理机制、提升人员素质、强化技术装备与信息化支撑、健全外部协作以及建立动态评估和持续改进机制等提升路径；通过科学评价和针对性改进，企业能够持续优化安全管理体系，实现安全运行和应急处置能力提升，为行业发展和公共安全提供可靠保障。

参考文献

- [1] 张祎龙.新时期公共交通企业安全管理的思考[J].城市公共交通,2023,(06):37-39+44.
- [2] 李婷.新时代交通运输安全管理存在问题及解决策略研究[J].汽车测试报告,2025,(05):151-153.
- [3] 储鑫.交通运输重点领域安全检查要点研究[J].运输经理世界,2025,(04):79-81.
- [4] 茅春艳.宁波水路运输行业管理部门履行航运企业安全管理职能现状研究[J].中国航务周刊,2024,(16):51-53.
- [5] 刘生豪.HN航空公司飞行安全风险管理研究[D].海南大学,2023.

The Application of Internet of Things Technology in the Operation and Maintenance of Electromechanical Equipment for Expressway Toll Collection

Heng Zhu

Guangxi Communications Investment Group Liuzhou Expressway Operation Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi, 545001, China

Abstract

Expressways are an important driving force for national economic development. The rapid development of expressways has put forward higher requirements for the operation and maintenance of mechanical and electrical equipment. Against this backdrop, this paper studies and analyzes the traditional manual operation and maintenance sites and pain points of expressway toll collection electromechanical equipment. As an important component of the new generation of information technology, the core of the Internet of Things is to achieve the interconnection and intercommunication between people and things, as well as among things themselves. This article conducts an in-depth discussion on the operation and maintenance technology, platform architecture, and application functions of expressway toll collection electromechanical equipment based on the Internet of Things. Through specific technical principles, architecture design, and functional implementation, it demonstrates the innovative role of Internet of Things technology in the operation and maintenance mode of toll collection electromechanical equipment, providing practical references for the upgrade of expressway operation and maintenance under the background of smart transportation.

Keywords

Internet of Things Technology Expressway; Operation and maintenance of charging electromechanical equipment

物联网技术在高速公路收费机电设备运维中的应用

朱恒

广西交通投资集团柳州高速公路运营有限公司，中国·广西柳州 545001

摘要

高速公路是国家经济发展的重要驱动力，高速公路快速发展对机电设备运维提出了更高要求。在此背景下，本文研究就高速公路收费机电设备传统人工运维现场与痛点进行分析。物联网作为新一代信息技术的重要组成部分，其核心是实现人与物、物与物的互联互通。本文从基于物联网的高速公路收费机电设备运维技术、平台架构、应用功能三方面展开深入探讨，通过具体技术原理、架构设计及功能落地，论证物联网技术对收费机电设备运维模式的革新作用，为智慧交通背景下高速公路运维升级提供实践参考。

关键词

物联网技术；高速公路；收费机电设备运维

1 引言

我国高速公路发展迅速，路程长、环境复杂、高速公路车流量持续增加，高速公路收费机电设备数量激增、分布分散且面临环境复杂。传统运维依赖人工巡检，存在四大痛点：一是故障发现滞后，常靠司机反馈，易引发车道拥堵；二是排查效率低，人工成本高；三是管理粗放，设备寿命凭经验判断；四是人工运维管控缺乏全局性。当前背景下，高速公路收费机电设备传统人工运维难以适配智慧交通发展

需求，亟需技术革新。物联网是新一代信息技术的重要组成部分，其核心是实现人与物、物与物的互联互通，本次研究中就物联网技术在高速公路收费机电设备运维中的应用进行介绍和分析。

2 高速公路收费机电设备传统运维现状与痛点

高速公路收费机电系统是保障通行效率的核心基础设施，高速公路收费机电设备分布广、数量多、工况复杂，传统人工运维模式已暴露出明显短板。

2.1 故障发现被动、通行影响显著

传统人工运维以“故障后报修”为主，缺乏实时监测手段。当收费设备出现问题时，需等待现场收费员上报或车

【作者简介】朱恒（1983—），男，中国广西柳州人，本科，工程师，从事高速公路机电、网络、通信研究。

主反馈，再安排运维人员赶赴现场排查，响应时长过长，据文献资料，传统人工运维下，高速公路收费机电设备故障从发生到修复超过3小时，单次故障甚至影响上千余辆车次通行，严重降低通行体验，甚至引发大型交通事故^[1]。

2.2 人工巡检效率低、成本高

传统人工运维模式多采取定期巡检模式，组建专门运维对位，以“按路段排班、逐车道排查”的方式开展工作，人力成本较高，单次巡检耗时长，整体运维效率低下。人工巡检存在明显“感知盲区”，对于计重传感器内部磨损、车道控制器芯片温度异常等隐性故障难以及时发现，经常出现“巡检时设备正常、实际使用中突发故障”的问题。

2.3 管理碎片化，缺乏全局管控

人工运维模式下，高速公路收费机电设备管控呈现碎片化模式。当前不同路段高速公路收费机电设备来自不同厂商，像ETC设备多为华为、金溢，计重设备多是中航电测，各厂商设备数据格式不统一。这些数据还分散存储在各路段管理系统中，未整合形成全局数据库。

当跨路段设备出现关联性故障，运维人员无法借助统一数据平台快速定位故障根源，只能逐路段、逐设备排查，严重降低故障修复效率，影响高速公路通行顺畅。

2.4 设备老化预测难，运维计划性差

收费机电设备平均使用寿命为5-8年，但受工况差异影响，老化速度不同。传统运维坚持“固定年限更换”原则，缺乏基于设备实际状态的老化预测，导致部分设备未到年限已频繁故障，部分设备超期使用仍性能良好，造成资源浪费^[2]。

3 基于物联网的高速公路收费机电设备运维技术

3.1 传感器技术

传感器技术，能实时捕捉高速公路收费机电设备运行状态，采集设备实施运行数据。传感器主要包括了温度传感器、压力传感器、振动传感器等，采集设备实时数据，并将数据传输到中心控制系统，实现对设备情况的全面、实施掌握^[3]。应用传感器网络能够分析设备运行数据来及早识别设备故障，例如对车道控制器、ETC天线等核心设备，嵌入温湿度与电流电压传感器，监测内部温度和供电稳定性，及时预警硬件过载风险；ETC门架装振动传感器，捕捉震动导致的结构松动，避免设备损坏；计重设备内部署磨损传感器，监测组件损耗，提前发现影响称重精度的故障。借助传感器有效实现全面、实时运维和预警式运维。

3.2 数据采集与传输技术

数据采集与传输技术是连接传感器和运维平台的关键，借助数据采集和传输技术解决收费机电设备多源数据整合与稳定传输问题。数据采集时，因收费机电设备来自不同厂商，数据格式存在差异，需通过数据采集与传输技术实现数据格式的标准化。此外，依托大数据分析能力，分析监测数

据潜在规律与发展趋势，还能够为设备故障预测、运行性能优化及维护计划制定提供科学且可靠的决策依据。数据分析通过整合设备历史运行数据与实时监测数据，能够构建针对性的预测分析模型。该模型可精准捕捉设备运行中的异常征兆，提前识别潜在故障风险——例如通过分析设备长期温度波动、电流变化等数据，预测硬件老化引发的故障，从而让运维人员在设备事故前介入，采取预防性措施，最大限度降低故障对通行的影响^[4]。数据分析还为运维策略的优化提供了重要助力。对设备运行数据的深度剖析，能够清晰呈现设备的实际负载状态，基于数据制定的维护计划，既能避免过度维护造成的资源浪费，又能防止因维护不足导致的设备故障，降低运维成本。

3.3 实时监测与远程监控技术

实时监测与远程监控技术实现对设备状态的远程掌控与快速干预。实时监测技术集中展示全网收费机电设备关键指标和核心参数，支持按路段、故障类型等多维度筛选，让运维人员快速掌握全局状态。当设备参数超出预设阈值，如控制器温度超60℃、ETC天线信号强度不足，系统推送预警，明确标注设备位置、异常参数与可能影响，帮助运维人员精准定位。远程监控技术则聚焦故障预诊断与远程干预，减少现场巡检频次。运维人员可通过平台远程登录设备操作系统，查看通信超时记录、错误代码等运行日志，定位网络中断、软件配置错误等故障常见非硬件原因，借助系统完成非硬件故障一键维修。

4 基于物联网的高速公路收费机电设备运维平台架构

采用“四层架构”设计，从感知层、网络层、平台层到应用层，各层协同工作，构建完整的运维体系。

4.1 感知层

感知层是物联网运维平台的核心数据来源，主要功能是采集收费机电设备及周边环境的原始数据。其关键组成包含三类设备：一是设备状态感知设备，即温湿度、电流电压、振动、信号强度等传感器，直接安装在设备本体或内部，实时获取硬件状态与功能运行数据；二是身份识别设备，为每台收费机电设备分配唯一标识（如RFID标签、二维码），通过专用阅读器或手机APP扫码，快速确认设备身份并关联台账信息（如型号、安装时间、保修期限）；三是环境感知设备，如降雨量、能见度、粉尘传感器，部署在设备周边，采集影响设备运行的环境数据，为设备防护提供支撑。感知层需满足“全面覆盖、稳定采集”要求，确保每台核心收费设备都配备对应感知设备，根据设备特性设定采集频率，保障数据采集成功率，避免因数据缺失影响运维判断。

4.2 网络层

网络层是连接感知层与平台层的关键数据传输通道，负责感知层数据上传与平台层控制指令下发，架构遵循“分

层组网、多网备份”原则^[5]。本地接入网覆盖收费站及周边，通过工业以太网交换机连接设备与边缘网关，实现数据本地汇聚；区域传输网覆盖沿线设备，采用双模传输模块，将数据传至区域级边缘节点；骨干传输网通过专线汇总区域节点数据至运维云平台，借助VPN保障传输安全稳定。同时，网络层具备网络状态监测功能，实时追踪链路带宽、丢包率与延迟，链路故障时自动切换备份链路；边缘节点设数据缓存功能，网络中断时暂存数据，恢复后自动补传，避免数据丢失。

4.3 平台层

平台层是运维平台的“大脑中枢”，负责数据存储、计算、分析，实现数据的整合分析和应用支持。数据存储与管理采用分布式数据库架构，分为实时数据库与历史数据库：实时数据库记录设备实时运行数据，满足设备实时监测需求；历史数据库存储设备历史运行数据、故障记录、运维工单等数据，支持运维决策。数据计算分析部署实时与离线引擎：实时引擎判收费机电设备数据阈值、检测异常，给予检修预警和提示；离线引擎深析历史数据，统计设备故障率、关联故障与环境因素，借模型预测设备寿命，支撑预防性维护。

4.4 应用层

应用层是平台与用户的交互界面，针对一线运维人员、管理人员、决策人员等不同角色，提供差异化应用功能，实现运维业务全流程数字化。设备监控中心面向所有运维人员，运维人员可通过平台查看设备实时参数、历史故障等信息；故障管理系统识别收费机电设备故障给予故障红色提醒，运维人员在线接收维修信息，到指定地点完成维修并上传维修记录；预防性维护系统立足于设备运行数据对设备寿命故障进行分析和预测，生成更换建议与巡检提醒建议；决策分析系统为管理人员提供设备在线率、月度故障统计、平均修复时长、运维成本分析等可视化报表，支持自定义报表生成，通过数据挖掘发现潜在问题，为运维策略优化提供依据。

5 物联网技术在高速公路收费机电设备运维中的应用功能

5.1 设备状态实时监测与预警

物联网技术应用解决传统人工运维故障发现滞后问题，实现全设备、全参数实时监测与精准预警。例如，针对ETC门架、车道控制器、计重设备及费显屏、车牌识别相机等辅助设备，分别监测核心运行参数，参数异常时立即触发预警，预警机制明确设备位置、异常参数、可能影响与处

置建议，同时在平台地图以红色闪烁标识故障设备，关联设备编号、负责人员及历史故障记录，助力运维人员快速定位、规划路线，缩短响应时间，降低故障对通行的影响。

5.2 故障诊断及预测性维护

依托数据联动分析与历史数据库，平台自动判断故障类型与根源，准确率高。复杂故障通过设备拓扑图展示关联关系，辅助判断故障是否扩散，并调取历史故障记录与维修方案参考。远程预诊断支持运维人员远程登录设备后台查看运行日志、发送测试指令，线上解决多数非硬件故障；预测性维护基于数据分析技术，科学预测设备寿命与故障风险，生成预防性更换建议与提前巡检计划，更换老化部件，降低突发故障率。

5.3 远程控制与智能决策支持

远程控制可解决软件配置错误、通信链路中断等非硬件故障，通过远程重启设备、调整参数、刷新显示、校准设备等操作，大幅缩短修复时间，减少现场运维工作量。智能决策支持自动统计关键运维指标，生成多维度可视化报表，从设备、路段、成本维度提供数据参考；通过数据挖掘发现潜在问题并给出优化建议，助力管理人员制定科学运维计划，优化资源配置，提升运维智能化水平与效率。

6 总结

高速公路收费机电设备传统运维存在故障发现被动、人工巡检效率低、管理碎片化、设备老化预测难等痛点，难以适配智慧交通发展。物联网技术通过传感器、数据采集传输、实时监测远程监控等技术，构建四级运维平台，实现技术革新。传感器实时掌握设备状态，数据传输技术实现数据高效传输和整合，平台层分析决策，快速处置和维修。物联网技术应用于高速公路收费机电设备运维，设备故障响应与修复时间缩短，运维成本降低，设备稳定性与通行效率提升，为智慧交通下高速公路运维升级提供有力支撑。

参考文献

- [1] 郑文礼. 基于物联网技术的高速公路机电设备智能监控与运营管理[J]. 张江科技评论, 2024, (12): 93-95.
- [2] 刘博. 高速公路机电设备运维信息化管理探究[J]. 中国设备工程, 2024, (16): 60-62.
- [3] 张璐. 高速公路项目智能机电设备运维管理系统研究[J]. 交通世界, 2024, (12): 174-176.
- [4] 陈志英. 基于物联网和大数据应用的高速公路机电系统数字监测与运维[J]. 运输经理世界, 2023, (21): 160-162.
- [5] 刘阳. 基于物联网的高速公路机电设备智能运维系统关键技术及设备研发. 广西壮族自治区, 广西交科集团有限公司, 2023-07-04.

Innovation path of railway transportation revenue ticket management under digital background

Ying Li

China Railway Xi'an Bureau Group Co., Ltd. Revenue Audit Brigade, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

Ticket management is the core content of railway transportation revenue management. The management principle of “Controlling by numbers and controlling funds by tickets” has established the fundamental position of ticket management in transportation revenue management. Standardized and scientific ticket management is a key element in ensuring the integrity of transportation revenue and the security of funds, while the development of digitalization has brought brand-new solutions to ticket management. This paper focuses on the enabling role of digitalization in the management of railway transportation tickets, explores a new path for transportation revenue ticket management based on Data Warehouse(DW), and conducts an analysis of the application value of the full-life-cycle digital ticket management system in aspects such as demand forecasting, intelligent audit and security of transportation revenue, so as to provide references for railway enterprises to improve transportation revenue efficiency and achieve high-quality development.

Keywords

ticket management; railway transportation revenue; digital transformation

数字化背景下铁路运输收入票据管理创新路径研究

李颖

中国铁路西安局集团有限公司收入稽核大队，中国·陕西 西安 710000

摘要

票据管理是铁路运输收入管理的核心内容，“以号控票、以票控款”的管理原则奠定了票据管理在运输收入管理的基础性地位。规范科学的票据管理是保证运输收入完整和资金安全的关键要素，而数字化发展为票据管理带来全新的解决方案。本文聚焦数字化对铁路运输收入票据管理的赋能作用，探索基于数据仓库（DW）的运输收入票据管理全新路径，进而分析全生命周期数字化票据管理体系在需求预测、智能稽查、进款安全等方面的应用价值，为铁路企业提升运输收入效能、实现高质量发展提供参考。

关键词

票据管理；铁路运输收入；数字化转型

1 引言

随着数字经济的蓬勃发展和铁路企业市场化物流体系的加速建设，运输收入票据管理工作的重心从大量纸质票据向电子信息数据管理逐渐转变。铁路 12306 和 95306 系统的上线及推广，率先开启了以技术革新为引擎的客运移动售票、货运商务电子化的全新时代，也向收入票据管理提出了新的要求和目标。在此背景下，运用大数据、人工智能等数字化技术对票据管理进行全面改造升级，构建统一集中、高效监督的票据管理体系，成为铁路企业提升管理效能、防控经营风险、优化资源配置的必然选择。

【作者简介】李颖（1988—），女，中国陕西西安人，硕士，经济师、审计师，从事运输收入管理、内部审计研究。

2 数字化转型驱动下的铁路运输收入票据管理变革需求

2.1 铁路票据管理的重要地位

铁路运输收入票据是铁路企业为收取客货运输费用制证的结算单据，以及用于核算运输收入的原始凭证。按不同载体运输收入票据分为两大类：以印刷或打印形式为载体的铁路纸质票据、以电子数据信息形式体现的铁路电子票据。“以号控票、以票控款”的管理原则，奠定了票据管理在整个运输收入管理工作中的基石地位，科学规范的票据管理更是收入核算准确、资金流转安全和管理过程可控的坚实保障^[1]。

2.2 传统票据管理模式面临的挑战与困境

2.2.1 传统铁路票据体系复杂，票据种类繁多

货运包括货物运单、运费杂费收据等；客运包括软纸票、磁卡票、列车移动补票、行李票、包裹票等；军事运输使用

的代用票、军运后附凭证等；预付款业务使用的预付款存入凭证、抵用（退款）凭证；定额小票包括退票报销凭证、站台票、人身保险定额专用发票等等。

2.2.2 各个管理系统相对独立，存在信息孤岛

票据跟随运输组织跨多个系统流转，各系统往往由不同部门主管，对应的系统独立开发，编码规则、数据格式、存储方式不统一，导致跨系统壁垒、流转断点，信息共享协调困难，跨部门查询票据信息需切换系统，看似数据化，实则“数据脱节”^[2]。

2.2.3 票据账需手工录入销号，作业效率不高

目前，伴随货运集中制票、货装一体化，货运票据已基本实现电子化，客运进站系统采用身份证识别自动闸机的广泛应用，纸质客票虽逐渐萎缩，但客运车站点多线长，用量规模依旧很大，纸质票据在票据管理系统中仍依赖手工销号、人工审核，工作量大、重复工作的矛盾突出^[2]。

2.3 数字化票据管理的转型思路

铁路收入票据管理的数字化发展，不仅是行业发展的迫切需求，更是创新驱动发展理念的生动实践。通过科技创新、模式重构与管理统一，票据数据的海量存储、高效处理及深度分析得以实现。这一过程中，需打破信息孤岛式的票据管理模式，制定统一的数据标准，提升数据整合与共享能力，构建集成化票据管理系统，确保数据衔接贯通与实时同步。其核心在于借助人工智能、机器学习等先进技术，推动票据管理从半自动化迈向智能化，实现票据存储、销账、分析、备份、监控、归档等全环节的智能运作，研究选取数据仓库作为解决票据数字化管理的新路径，达成票据管理的精细化、集成化与智能化目标^[3]。

3 基于数据仓库的全生命周期票据管理平台构建路径

3.1 分布式数据仓库架构设计与优化

在数字化转型背景下，探索引入分布式数据仓库 Data Warehouse(DW) 技术如 GreenPlum、StarRocks 等来应对海量票据数据的存储处理需求。研究采用大规模并行处理架构 (MPP) 的可行性，这种架构能够将数据和计算任务分布到多个节点并行执行，有望实现处理能力的线性扩展。在架构设计探索中，综合考虑根据业务特点和数据特征，将不同类型票据数据分配到不同计算节点的方案，以期实现负载均衡和资源优化利用，有能力处理和应对如春运集中售票、自然灾害导致的大规模退票等突发状况。

数据分布策略的研究可以从多个维度展开：一是按时间维度进行分区，研究按月、年对已使用的业务票据研究，按全流程将不同时期票据数据存储在不同分区的技术方案，有助于历史数据归档和提高查询效率；二是考察按业务类型分布的可行性，研究将客运、货运票据分别存储的技术路径，以便于实现专业化管理。存储优化是提升系统性能的重要研究方向，可以探索支持的列式存储和行式存储混合模式的数

据仓库，在票据管理中的应用前景。可以通过提取近五年票据使用数据开展试点研究，根据不同数据访问模式选择最适合的存储方式：对于需要频繁聚合分析的数据，可以试验采用列式存储来提高查询效率；对于需要频繁单条记录查询的数据，可以测试行式存储的效果。

3.2 多源异构数据的集成与治理机制

铁路收入票据业务涉及众多异构系统，数据集成是平台建设需要重点探索的技术难题。首先开展全面的数据源调研工作，探索建立涵盖客运售票系统、货运制票系统、物流调度体系、财会信息系统、收入票据审核系统等各类数据源的集成框架。研究数据源的数据架构、更新周期、数据质量等特征，抛弃“统一所有数据”的幻想，转为建立“票据用数据字典”为后续的集成方案设计提供依据。

在抽取、转换、装载 (ETL) 过程的研究中，可以探索多种技术路径：抽取环节可以研究获取票据相关数据的稳定通道，探讨支持全量（按年）和增量（按月、日）抽取的技术方案，以确保数据的完整性和时效性；转换环节需要深入研究如何解决不同系统间数据结构差异的问题，将各系统中不同字段统一映射成“票据维度表”，形成可控的“票据语言”；装载环节可以试验优化票据数据加载方式的各种技术手段，研究如何在提高加载效率的同时减小对源系统的影响。

数据质量控制机制的建立需要系统性的研究和探索。建议构建多层次的数据质量管理框架，探索在数据采集、传输、存储、处理各个环节进行质量监控的技术方案。可以研究建立数据质量评估指标体系，包括完整性、一致性、准确性、时效性等多个维度^[4]。

3.3 分析能力建设与可视化展示

“数字化全程可控”的管理模式为票据分析能力建设提供可能。以票据使用为基础的运输收入分析设计包含票据用量、收入金额、异常情况等指标，提取指标设置趋势分析、阈值设定、异常数据筛查的多层次分析维度，而不是简单地票据总账、明细账等报表生成，而是可以分析如“不同年龄段旅客的购票偏好”“不同去向、品类的货运收入质量”等深层问题。

可视化展示是票据管理系统的主要功能。展示界面可结合不同层级票据管理人员的管理权限、业务需求、使用习惯，构建仪表盘、报表、图表等多种形式的数据展示界面，支持从不同角度和层级查看票据数据。可视化交互功能为提供数据分析探索的灵活性，支持管理人员通过鼠标拖曳、点击等简单操作，自助式地进行数据筛选、分组、聚合等分析操作，快速得到所需的分析结果，降低数据使用门槛和数据利用难度。

3.4 票据全生命周期数字化管理体系

通过搭建基于数据仓库的票据管理平台基本实现铁路票据的全生命周期管理，即通过数字信息化手段实现从票据

计划到归档等全部管理环节的监测和控制，从而提高工作效率和控制力度。数字化票据管理可以实现“全程留痕”，通过数字化技术重构“号-票-款”的管理逻辑，将“票号”确定为具有强关联性、不可篡改的“身份证号码”，遵循预

设的编码规则生成票号，确保“每号唯一”；票据流转时每一次状态变更都与票号深度绑定，做到“号随票动”；票据对应的进款到账后，系统自动提取到账记录中的票据信息，让票据成为运输进款的“锚点”。

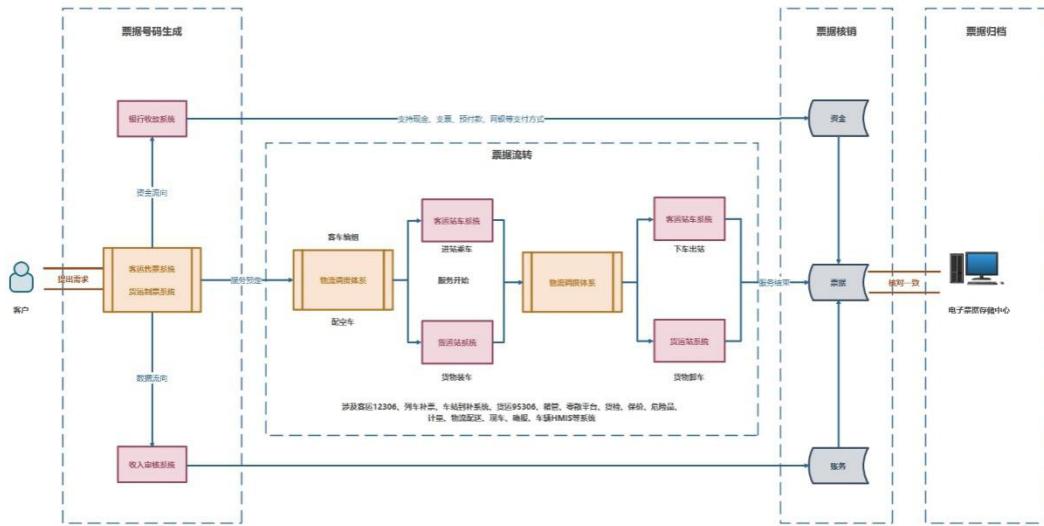


图1 数字化票据流转示意图

4 数字化票据管理的应用价值

4.1 智能需求预测

票据需求预测计划解决超储、脱销的问题，将历史用票情况、季节性变化规律、业务发展变化趋势等作为基础数据，自动生成票据的需求预测结果，从而制定合理、准确的票据请领计划。基于机器学习算法实现智能推荐预测功能，系统结合历史数据和分析结果，得出不同的分析维度和指标，预测业务趋势，基于历史用票规律预测当期所需的票量等信息来帮助管理人员做好票源储备准备^[5]。

4.2 智能化稽查

智能化稽查是数字化票据管理系统建设的目标之一，将稽查方式从被动式发现转变为基于异常模型的主动发现，通过将机器学习技术引入票据管理，自动学习正常情况下的各种票据使用模式，识别使用方式与使用地点偏离正常模式的各种异常使用情况并进行稽查；建立风险评估模型，根据风险值的不同设置不同业务的票据使用风险等级，获得不同级别票据使用风险值，用于指导稽查力量的优先级配置；生成稽查结果报告，基于不同级别的稽查结果自动生成票据业务稽查报告，包括存在问题、风险水平、整改方案等。

4.3 运输进款安全

传统票据管理模式存在对票据伪造、篡改、丢失、延迟核销等风险，直接影响运输进款的完整性、真实性。数字化票据管理通过技术手段将风险点前置防控，实现对进款安全的系统性保障，让票据成为连接运输业务与进款完整安全的关键纽带。改变传统模式中，如人工开票填错金额、收款

后延迟核销票据等问题，数据化票据体系可以预设如运价上浮、特殊人群优惠等条件与票据匹配，通过“自动计算+实时校验”等功能，从源头杜绝“有票无款、票款不符、款到不核”的威胁进款安全的问题。

5 结语

在铁路“六个现代化体系”建设背景下，现代化物流体系已初见雏形，正是运输收入票据管理数字化转型的重要时机。依托数据仓库的全生命周期票据管理体系是紧跟客货运输组织改革步伐的全新探索，是落实“财务运营中心”建设“发挥业财融合和数智化功能”要求的具体实践。未来，随着人工智能、区块链等前沿技术的迭代升级与深度应用，铁路票据管理必将实现更高维度的智能化升级与现代化变革。

参考文献

- [1] 胡煜琦.基于现代化物流转型的铁路运输收入管理研究[J].中国管理信息化,2025,28(08):25-28.
- [2] 蒋晓燕.信息技术在铁路运输收入票据管理中的应用[J].铁道运营技术,2016,22(04):63-65.
- [3] 何衍霞.铁路企业运输收入管理内部控制的有效策略 [J]. 高铁速递,2023(2):107-10
- [4] 黄献.提升高速铁路车站运输收入管理质量的对策[J].铁道运输与经济,2016,38(10):67-71.
- [5] 潘小春 肖懿 刘峰骏.区块链电子票据在非税收入中的应用优化探索——以云南省为例[J].会计之友,2022,(08):150-156.

The application prospect of intelligent technology in the use of EMU

Ruxin Li

China Railway Chengdu Bureau Group Co., Ltd. Guiyang Rolling Stock Depot, Guiyang, Guizhou, 550005, China

Abstract

As railway transportation advances toward high-speed and intelligent development, maintenance operations in EMU depots face new opportunities and challenges. Intelligent technologies, leveraging advanced approaches such as artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), and big data analytics, can significantly improve maintenance efficiency, reduce operational costs, and enhance safety protection levels. This paper provides a detailed analysis of the fundamental concepts, main categories, and development status of intelligent technologies. It examines the limitations of traditional maintenance models and the necessity for intelligent transformation, with a focus on key application areas including fault prediction, automated detection, and intelligent decision-making. Implementation pathways are proposed from aspects such as data collection, algorithm development, and system integration. Finally, the paper summarizes the primary benefits, potential challenges, and advancement strategies brought by intelligent technologies, offering theoretical references for the intelligent construction of EMU depots.

Keywords

Intelligent technologies; EMU depots; Maintenance operations; Fault prediction; Automated detection; Intelligent decision support

智能化技术在动车运用所的应用前景

李儒鑫

中国铁路成都局集团有限公司贵阳车辆段，中国·贵州 贵阳 550005

摘要

铁路运输朝着高速化、智能化方向前进的时候，动车运用所的地勤检修维护工作碰到新的机会和难题，智能化技术凭借人工智能，物联网，大数据分析这些先进手段，可以明显改进检修速度，削减运维花费，改善安全保护水平，本文细致剖析了智能化技术的基本概念，主要种类和发展状况，探讨了地勤检修维护传统模式的不足之处和智能化转型的必要性，重点研究了故障预测，自动化检测，智能决策等关键应用方向，从数据搜集，算法创建，系统整合等方面给出实施路径。最后，本文总结了智能化技术带来的主要效益、潜在挑战及推进策略，为动车运用所的智能化建设提供理论参考。

关键词

智能化技术；动车运用所；地勤检修；故障预测；自动化检测；智能决策支持

1 引言

铁路运输属于国家关键的基础设施，它的安全性与效率同经济社会发展直接相关联，动车运用所是动车组检修维护的主要场所，担负着保证列车安全运行的重大责任，随着列车运行密度加大，技术日趋复杂，传统的地勤检修模式已经不能满足高效率，高精度的运维需求，近些年来，像人工智能，物联网，大数据这样的智能化技术飞速发展，给动车运用所的运维模式革新提供了技术支持，通过智能化转型，可以做到检修过程的精准化，自动化和智能化，进而改善运维质量与效率，本文旨在系统探讨智能化技术在地勤检修维护中的应用前景，分析其理论基础、应用方向及实施路径，

以期为行业技术升级提供参考。

2 智能化技术概述

2.1 智能化技术的基本概念

智能化技术是基于现代信息技术，模仿人的智能行为来完成某项工作并做出决定的一种技术，它主要依靠计算机的算法、传感器网络以及数据处理的方法，去达到对一个复杂系统进行感知、分析与控制的目的。智能化技术不仅仅包含传统自动化技术的延续，它还注重系统自身的学习与适应能力，借助各种技术手段，智能化系统可以从海量数据当中提炼出有用的信息，并且依靠这些信息来做判断或者决策，在工业界里面，智能化技术已然成为促使生产效率提升以及运维模式发生改变的关键力量。

2.2 智能化技术的主要类型

智能化技术种类繁多，最具有代表性的有三种，即人

【作者简介】李儒鑫（1994-），男，中国贵州遵义人，本科，初级工程师，从事高铁动车组随车机械师培训研究。

工智能技术、物联网技术和大数据分析技术。人工智能技术利用机器学习、深度学习等方式，让系统拥有识别、预测和决策的能力。物联网技术依靠传感器网络和设备相连，把物理世界变成数字映射，并做到即时监控。大数据分析技术侧重于从大量数据中找出规律和趋势，给运维决策给予数据支撑，而且，边缘计算，数字孪生，自动化机器人等技术也是智能化体系的关键部分，这些技术彼此交融，形成了智能化运维的技术基础。

2.3 智能化技术的发展现状

目前智能化技术已经广泛应用于各个工业领域，在制造业中，智能生产线可以对生产过程中的数据进行实时采集与分析，从而达到优化调控的目的，在能源领域，智能电网可以通过预测性维护以及故障诊断来提升整个系统的运行可靠性。铁路行业智能化技术的应用正处在发展期，不过已经体现出很大的潜力，国内外不少铁路公司正在试着创建智能化检修系统。例如，广州局采用了一套动车组智能巡检机器人系统，它配备了先进的视觉图像采集单元和数据处理中心，能够实现实时采集、数据传输以及整理分析。这套系统利用先进的传感器装置和分析算法，让动车组检修已从初期的“人主机辅”，转变为“机主人辅”，在提高检修质量的同时，有效降低了地勤机械师的劳动作业强度。采用先进的传感器装置和分析算法，慢慢朝着从传统的定时检修到状态修，预估修的方向迈进，智能化技术在铁路运维方面的深入应用还需继续推动。

3 地勤检修维护的现状及挑战分析

3.1 地勤检修维护的主要内容

地勤检修维护属于保证动车组安全运行的关键部分，它的工作内容包含诸多方面，日常检查涉及对车体，走行部，制动系统等重要部件执行视觉检查并开展功能测试，定期检修依照运行里程或者时间周期，开展更为细致的部件检测及替换。专项检修针对特定系统或者部件展开，比如牵引系统，网络控制系统等等，故障处理是在出现异常情况的时候所实施的应急修理工作，这些事情都是地勤检修维护体系当中必不可少的部分，需要耗费不少的人力和技术方面的资源。

3.2 传统检修模式的局限性

传统检修模式主要依靠人工检查与定期维修，存在明显局限性，第一，人工检查会受人员经验，疲劳程度等主观因素干扰，致使漏检或者误判，第二，定期维修依照固定周期，未充分考量设备实际状况，导致维修不足或者过度维修。而且，传统模式下的数据处理能力不足，不能对历史运维信息进行有效的挖掘和利用，决策过程大多依靠人工经验，缺少科学的数据支持，这些局限性使传统检修模式很难符合高密度，高效率的运行需求。

3.3 智能化转型的必要性

面对传统模式的局限，智能化转型成为行业发展必然

趋势，智能化技术能提升检修精度和效率，自动化检测设备可以减少人为误差，智能化技术可以优化维修计划，智能化技术可以提升资源利用效率，智能化技术可以实现基于数据的预测性维护。更重要的是智能化系统可以实现对设备状态的实时监控以及早期预警，从而避免出现重大的故障情况。动车组高级修智能化信息管理系统在传统检修模式的基础上加入了智能化、信息化技术，以数字化贯穿全检修过程，以关键环节智能化为核心，以网络互联为支撑，实现了动车组检修过程的智能管控和信息化管理，对提高动车段检修效率和检修质量具有重要作用，对推进检修行业智能化、信息化建设具有借鉴意义。

4 智能化技术的核心应用领域

4.1 故障预测与健康管理

故障预测与健康管理是智能化技术的重要应用方向，动车组重要部位装有传感器网络，系统可以随时获取设备运转数据，这些数据通过处理和分析就能体现设备性能衰退规律以及故障出现征兆。依靠机器学习算法，系统可创建起设备健康状态评判模型，进而达成对剩余使用寿命的预测，此种预测性维持手段既可免除突发故障，又能改善部件替换的最佳时间，从而明显改进维修经济性，健康管理系统还能为维修决策提供科学依据，提升运维管理的精细化水平。

4.2 自动化检测与诊断

自动化检测技术采用机器视觉、激光测量等先进技术，可以对部件的状态进行检测，相比于人工检测，自动化设备具有更高的检测精度和一致性，可以检测到人眼难以察觉的微小缺陷。智能诊断系统依靠专家知识和历史数据创建故障诊断模型，一旦检测到异常数据，就能迅速找出故障原因并给出解决办法，这样的自动诊断过程让故障处理时间大幅缩减，检修效率得以提高，同时，系统还能不断学习新的故障模式，持续提升诊断能力。

4.3 智能调度与维护决策

智能调度系统通过剖析检修任务，资源情况，设备状态等诸多要素，来创建最恰当的检修规划，它会考量人员技能，设备是否可用，时间窗口等限定条件，进而做到检修资源的合理安排。在维护决策上，智能化系统依靠多目标优化算法，均衡安全，成本，效率等方方面面的影响要素，决策支持系统给管理者提供可视化的分析成果和方案意见，助力做出科学合理的运维决策，系统围绕动车组高级修的计划管理、工艺管理、作业管理、质量管理、人员管理、设备管理和物料管理等方面，通过现场作业指导和检修过程数据采集，对动车组检修提供全面的信息化覆盖和智能化的信息协作，最终实现动车组高级修全过程的检修管理信息化。

5 实施路径与技术支持

5.1 数据采集与处理技术

高质量的数据采集是智能化应用的基础，要对动车组

的关键部位安装各种类型的传感器，随时收集振动、温度、压力等物理参数，还要把已有的检修设备的数据输出集成起来，形成一个完整的数据采集网络。数据处理技术涵盖数据清洗、特征提取、数据融合等内容，采集到的原始数据经常带有噪声和异常值，所以要用算法预先处理，特征提取是从原始数据里挖掘有价值信息的重要步骤，给后面分析给予输入，数据融合技术可以综合多种来源的数据，形成全面的设备状态描述。

5.2 智能算法与模型构建

智能算法是智能化系统的动力核心，机器学习算法可以从历史数据中学习设备运行规律，建立状态评估和故障预测模型，深度学习算法对高维数据和非线性问题处理能力较强，适合复杂系统建模。模型搭建要顾及动车组系统的特点，牵扯到诸多部件耦合，运行环境多变等状况，集成学习手段可以融合多个模型的优势，从而提升预测的准确性，而且要创建起模型更新的制度，使系统能够适应设备老化和运行条件的变化。

5.3 系统集成与平台建设

系统集成是智能化应用的重要部分，要把数据采集设备、分析算法、决策支撑等各个功能模块融合起来，建成一个统一的运维平台，平台创建的时候要按照标准化、模块化的准则，做到系统的可扩充性、兼容性。运维平台要有可视化界面，便于用户查阅设备状况，接收警报消息，制订修理计划，还要具备数据管理、权限把控、系统监视等辅助功能，通过系统整合，平台创建，最终形成完整的地勤检修智能化解决方案。

6 发展前景与应对策略

6.1 技术应用的主要效益

智能化技术应用会带来很多效益，在安全上，早期故障预警和准确诊断，行车安全事故风险能大幅下降，在经济上，预测性维护优化维修资源分配，过度维修和突发维修的成本可减少。从效率上讲，自动化检测与智能调度可缩减检修时长，从而提升动车组的利用程度，智能化系统还可累积大量的运维数据，为技术改进和优化设计提供数据支持。这些效益共同促进了铁路运维水平的整体提升。

6.2 面临的潜在挑战

智能化技术应用也遇到一些问题，技术上，动车组系统复杂，建立准确预测模型难，数据质量上，传感器数据要可靠完整，人才上，缺少既懂铁路又懂智能的复合型人才。

管理上，传统运维模式的改变需要时间，可能会有组织架构调整的阻力，投资上，智能化系统建设需要较大的前期投入，投资回报周期长，安全方面，网络安全和数据隐私保护也需要特别关注。此外，系统运行稳定性与极端工况下

的适应性仍需验证。标准体系不完善也制约了技术的规模化推广，各系统间的接口兼容性问题亟待解决。这些挑战需要通过持续的技术创新和管理优化来逐步克服。

6.3 推进发展的策略建议

为了推动智能化技术的应用，就要采取全面的策略，技术研发上要加大对关键技术的攻关力度，提升算法的准确性与可靠性，人才培养上要创建跨学科的培训体系，培育复合型的技术人才。标准建设上要加快有关技术标准的制定，促使系统彼此之间实现联通，政策扶持方面要完善鼓励技术创新的政策，实施途径上可以采取逐步推进的方法，从试点应用逐步推广到全面实施。通过这些策略的综合实施，能够有效推动地勤检修维护的智能化转型。

7 结语

智能化技术给动车运用所地勤检修维护带来革命性变革机遇，利用故障预估，自动检测，智能决策等技术，可以显著提升检修工作品质与效率，然而，智能化转型是个体系工程，要靠技术创新、人才培养、管理优化等多种因素协同推动。未来，随着技术慢慢成熟并得到广泛应用，智能化运维系统会越发完善且可靠，动车运用所应当抓住技术发展的机遇，大力推进智能化建设进程，给铁路运输安全高效运转提供强有力的支持，而且还要持续关注技术发展动态，不断改进和完善智能化运维体系。

参考文献

- [1] 谢运清.动车组智能化调度与协同运行平台设计研究[J].运输经理世界,2025,(18):160-162.
- [2] 张辉.动车段(所)控制集中系统智能化研究及设计[J].铁道标准设计,2024,68(11):185-190.
- [3] 马建军.京张高速铁路智能化服务关键技术研究与冬奥科技保障应用示范[J].铁道运输与经济,2022,44(09):1-10.
- [4] 付翔,王岳,王小中,等.复兴号高速动车组便携式智能化车钩检测装置[J].铁道车辆,2022,60(01):112-115.
- [5] 王凯,刘成瑞.动车组智能化网络控制系统研究[J].智慧轨道交通,2021,58(05):13-18.
- [6] 张笑天.动车组高级修智能化信息管理系统研究[J].铁道车辆,2020,58(11):37-39+6.
- [7] 卢万胜,荣剑.高速铁路动车组列车办客股道智能化系统研究[J].中国铁路,2020,(02):52-56.
- [8] 赵红卫,高枫,穆瑞琦,等.智能高速动车组关键技术现状及展望[J].中国铁路,2024,(07):77-86.
- [9] 邓海,张国芹,张岩,等.下一代高速智能化动车组研发构想[J].城市轨道交通研究,2022,25(02):11-15.
- [10] 梁建英.开启智能化轨道交通装备新时代[J].科学,2020,72(02):17-22+64+4.

Research on Operation Service Process Optimization of National and Provincial Road Network Monitoring and Emergency Response Platform

Tao Li

Qingdao Transportation Technology Information Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266100, China

Abstract

This study focuses on the operational service processes of maintenance units within monitoring and emergency response platforms, targeting the national and provincial road networks. It clarifies the separation of responsibilities between maintenance projects and operational service projects. Addressing issues such as decentralized operational entities and lack of coordination mechanisms in multiple regions, this paper systematically identifies process bottlenecks and proposes optimization strategies from three dimensions: inter-departmental coordination, collaboration between highway development centers and operational units, and internal management of operational units. The research findings demonstrate that optimization approaches involving process reengineering and system integration can effectively enhance response efficiency and platform usability, providing theoretical support for building a collaborative and efficient road operation service system.

Keywords

National/provincial highways; Road network monitoring; Emergency response; Operational processes; Process optimization

普通国省道路网监测与应急处置平台的运营服务流程优化研究

李涛

青岛交通科技信息有限公司，中国·山东 青岛 266100

摘要

本研究以普通国省道路网为对象，聚焦监测与应急处置平台中运营单位的运营服务流程，明确维保项目与运营服务项目的职责分离。基于当前多地存在运营服务主体分散、协同机制缺失等问题，本文从管理部门协同、公路事业发展中心与运营单位协同、以及运营单位内部管理三个层面，系统识别流程瓶颈并提出优化策略。研究结果显示，以流程重构和系统集成手段的优化路径能有效提升响应效率和平台实用性，为构建协同高效的道路运营服务体系提供理论支撑。

关键词

普通国省道；道路网监测；应急处置；运营流程；流程优化

1 引言

随着交通网络的不断扩展与交通流量的持续增长，普通国省道路网面临的运行压力和突发事件风险日益增加，建立高效的监测与应急处置平台成为保障交通安全与畅通的重要手段。相较于高速公路，普通国省道的运营服务模式更为复杂，技术运维、监测与应急响应等职责多由地市级运营单位承担。目前，多数地区将“维保服务项目”与“运营服务项目”分开管理，前者侧重设备设施巡检、保养、功能性检查与维修，后者聚焦视频监控轮巡、信息监控、信息发布

与报送、数据预警与事件处置、数据统计与分析等，二者之间职责衔接不畅，信息流转不顺，形成了职责分离、流程割裂的运行格局。在现有运行体系中，平台的运营服务流程存在协同效率低、数据传递滞后与响应机制不健全等问题，制约了其在实际应急管理中的应用效果。尤其是在管理部门之间、公路事业发展中心与运营单位之间，以及运营单位内部的多层次协作中，缺乏系统性的流程支撑与技术机制保障，成为当前道路交通应急管理体系中的关键短板。因此，开展面向普通国省道路网、以运营单位为研究主体的运营服务流程优化研究，不仅有助于提升平台的响应能力和管理水平，更有助于从流程重构与协同机制出发，推动道路交通治理体系向标准化、智能化与高效协同方向发展。

【作者简介】李涛（1979-），男，中国山东日照人，本科，工程师，从事交通运输领域，绿色低碳发展研究。

2 现状分析

普通国省道路网监测与应急处置平台作为支撑交通运行管理的重要工具，其运营服务流程在实际应用中已具备一定基础。在管理模式方面，平台多由交通运输主管部门主导，依托地方运营单位与相关技术服务机构协同推进，形成以行政管理为主导、运维执行为支撑的运行格局。但在实际运行过程中，职能边界模糊、任务分工不清晰、响应协调机制缺失等问题仍时有发生，严重影响了应急效率与流程闭环的实现。在运维支撑方面，平台集成了视频监控、气象感知、路面检测与通信传输等子系统，具备较强的感知与数据采集能力。但系统间互联互通程度有限，数据仍呈现分散化和异构化特征，难以构建统一共享的数据底座，制约了多源数据的融合应用。尤其是在多地实际工作中，维保服务项目与运营服务项目分属不同单位，职责界面未有效衔接，导致平台运行在“设施维护”和“事件处置”两个环节之间存在空档，影响问题闭环处理与平台全周期功能的实现。在流程运行方面，监测预警、信息研判、响应处置与事后评估等业务环节虽已基本建立，但在多部门协同、信息流转及时性、指令执行闭环等方面仍存在明显短板。流程标准化程度不高、事件处置路径不清晰、反馈链条不完整等问题在多地平台中普遍存在，难以满足复杂、多变的交通突发事件快速响应需求[1]。

3 存在问题

3.1 管理部门之间协同流程不畅

普通国省道路网监测与应急处置平台的建设普遍依托多部门共同参与，包括交通运输主管部门、公安交警、气象、水利、应急管理等管理单位，职责体系复杂、条线分明，运行中各单位在目标认知、信息共享与处置响应上的协调机制不健全，存在职责划分交叉或模糊的问题。平台管理部门往往缺乏统一的调度指挥权，导致突发事件发生时响应路径存在偏差，难以及时形成一致的应对指令。管理部门间沟通协调渠道不畅，任务衔接缺乏闭环设计，不同单位在事件识别、信息流转、现场处置等环节缺乏流程支撑，形成“各自为政”的运行模式。部分地区在应急联动体系建设方面缺少统一规范，事件发生后需临时协商与职责划分，影响了整体应急效率。在区域层面，地市交通管理单位与省级平台之间信息壁垒明显，响应存在滞后，跨区域事件难以实现统一调度。由于缺乏统一规则和标准，不同单位往往依据经验制定方案，协同质量依赖于人为判断，缺少制度化、可复制的流程体系[2]。

3.2 公路事业发展中心与运营单位之间配合机制弱

公路事业发展中心路网监测与应急处置服务处作为平台运行的管理中枢，在信息汇总、预警发布、调度指令等方面发挥着关键作用。但在实际运行中，其与地市级运营单位之间缺乏标准化的任务下达流程和信息闭环机制，导致任务链条易断、响应路径不清晰。运营单位作为一线执行主体，

往往无法及时获取完整的事件背景信息，影响判断和快速响应的准确性。在任务反馈与处置结果归档方面，平台缺少流程接口与评价机制，信息无法有效回流，影响事后评估、绩效考核及模型优化。由于管理部门与执行单位间接口割裂，导致平台虽具备联动功能，但在实际操作中响应链断裂、应急处置脱节的现象频发。基于此平台在信息系统设计上更多面向指令传达，缺乏对运营单位执行过程的全过程监管与可视化跟踪支持，无法实现调度-执行-反馈的闭环管理，影响平台实效[3]。

3.3 运营单位内部流程标准化程度低

当前地市级运营服务单位内部在任务分派、流程管理、数据上报等方面缺乏统一规范。市级路网中心与各区（县级市）分中心之间管理机制松散、标准不一，部分单位仍依赖传统电话、手工记录等方式进行任务调度，导致响应效率低、执行质量不可控。各区县分中心的人员配备、技术能力、设备条件差异明显，形成运营服务能力的“洼地效应”，不利于全域统一应对突发事件。部分地区运营单位未建立内部标准作业流程（SOP），处置流程依赖个人经验，存在碎片化管理现象。缺乏系统支撑的流程体系使得数据采集、响应执行、后评估等环节彼此孤立，不能形成可追溯、可优化的运营链条。基于此运营单位内部多未建立数据驱动的绩效反馈机制，事件处置过程及结果难以在平台形成有效沉淀，不利于形成持续改进的服务闭环，整体运营质量难以保障[4]。

4 优化策略

4.1 管理部门间流程优化策略

构建以区域交通运输主管部门为核心的联动响应机制，是提升跨部门协同效率、打通管理层级壁垒的关键路径。建议在现有平台管理体系中引入“一体化调度中心”模式，通过统一指令下达、统一任务分发和统一信息共享，实现纵向贯通与横向协同相结合的响应体系，确保突发事件处置时各单位职责明晰、流程顺畅。在技术实现层面，可通过构建跨部门指令联发系统，将事件通知、任务推送和反馈环节嵌入平台功能模块中，实现流程可视、信息对称。针对典型突发事件（如恶劣天气、严重拥堵、重大设施故障等），制定具备操作流程、责任单位与响应时限的“协同处置图谱”，将原先依赖人工判断的协同转化为标准化操作。在省市两级平台间，应推动调度接口标准化建设，实现信息与任务的双向贯通，避免信息传导与任务指令延迟或失真。此外，协同机制应涵盖企业运维和社会资源，鼓励将地方运维企业、应急抢险队伍、第三方监测服务单位纳入统一响应体系。结合区域交通特征和应急能力，平台还可部署可视化应急资源调度界面，实现“资源一图展示、任务一键下发”，提升应急调度的直观性与实效性[5]。下图1为普通国省道路网协同响应机制结构图。

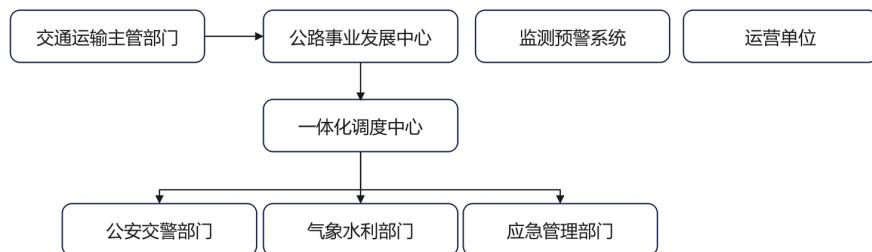


图 1：普通国省道路网协同响应机制结构图

4.2 公路事业发展中心与运营单位协同机制优化

要打通平台管理中枢与执行单位之间的协同链条，必须重构发展中心与运营单位的沟通、任务与反馈机制。建议以“信息互通+响应协同+过程跟踪”为主线，建立“任务下达—执行监控—结果反馈”闭环式运营机制，明确各级响应流程接口。首先，应在平台中构建“任务驱动模块”，由发展中心根据事件等级与类型自动触发相应任务模板，指令分发至对应运营单位。运营单位需依托平台回传任务进展与完成状态，并与视频监控、物联网感知设备联动，实现过程留痕、结果核验。平台应支持双向状态更新，允许发展中心实时掌握执行动态，保障决策精准。其次，建议建设“评价与归档机制”，对运营单位的每次响应任务自动生成处置报告，涵盖任务完成情况、资源调用、异常说明与响应成效。该机制可作为平台日常考核、绩效评价、资源匹配优化的重要依据，推动运营单位主动提升执行质量。在数据支持方面，发展中心应推动各类运维数据纳入统一平台，强化历史数据沉淀，支持事件规律建模与协同规则迭代优化，最终实现以数据驱动的资源调度与决策支持 [5]。

4.3 运营单位内部流程提升路径

运营服务质量的稳定性与一致性，根本在于各级运营单位内部流程是否规范、标准、闭环。当前市级路网中心与区（县级市）分中心在任务调度、数据处理、执行管理等方面差异较大，建议从以下三方面优化其内部流程体系：

一是统一流程标准。应制定适用于各级运营单位的标准操作规程（SOP），涵盖事件接收、任务分发、现场处置、结果反馈等环节，减少人为判断差异带来的执行偏差。平台应提供标准化流程模板与操作指引，并支持单位自定义特例处理流程，实现“标准化+灵活性”的融合。

二是智能化调度与数据支撑能力建设。建议在设备前端推进感知设施智能化改造，配置具备边缘计算功能的路侧单元，实现初步事件筛选与本地数据过滤，减轻平台中心负担。各级单位平台系统应升级为支持结构化与非结构化数据融合、视频图像与传感器数据同步处理的架构，提升信息获取的全面性与时效性。

三是数据驱动的内部考核机制。建议运营单位内部建立响应任务执行轨迹记录与绩效分析机制，为每一任务设立唯一标识与进度跟踪状态，结合任务完成时间、响应精度、资源投入、异常处理等多维指标形成量化考核，推动内部自

我优化与责任明确。

此外，应鼓励市级中心对区县分中心实行统一数据接口、指标评价与平台对接规范，以数据为纽带提升区域联动响应的统一性和指令执行的高效性，最终形成具有“统筹调度+属地响应”特征的高效运营服务体系 [7]。

5 结论

本研究以普通国省道路网为对象，聚焦运营单位在监测与应急处置平台中的运营服务流程，系统分析了管理模式、职责划分及流程运行现状，明确指出当前存在的职责交叉、响应协同不足、流程割裂与信息闭环缺失等突出问题。针对运营服务体系中管理部门之间、公路事业发展中心与运营单位之间、运营单位内部三大关键协同层面，分别提出了具有针对性的优化策略。研究建议通过构建统一调度机制，规范任务接口，提升管理部门之间的联动效率；建立中枢—执行联动模型，完善发展中心与运营单位的信息交互与响应闭环；推动运营单位内部流程标准化与智能化建设，增强基层单位的执行力和协同响应能力。整体策略从流程、机制与数据三个维度系统发力，为平台构建高效、规范、可追溯的运营服务体系提供路径参考。研究成果有助于厘清多层级、多主体参与下的职责边界与协作机制，提升普通国省道路网突发事件响应效率与服务质量，推动交通应急治理体系向数字化、智能化、协同化方向迈进。

参考文献

- [1] 吴海,莫小霞,江鸿,等. 基于PS-InSAR技术的城市道路网沉降监测及形变分析——以南宁市主城区为例[J].交通世界,2025,(Z2):7-11.
- [2] 赵振宇. 交通运输部路网监测与应急处置中心组织“一支部一品牌”创建活动席位就是战位[J].中国纪检监察,2024,(14):24-25.
- [3] 李岩,王继峰,陈莎,等. 国家城市道路网可靠性监测平台的设计与实现[J].城市交通,2023,21(06):45-52.
- [4] 中国主要城市道路网密度与运行状态监测报告（2022年度）[J].城乡建设,2023,(01):70-80.
- [5] 程璟蓉. 普通国省道结构性修复方案研究[J].交通世界,2025,(14):35-37.
- [6] 谢玮. 普通国省道改扩建下穿高速公路设计方案研究[J].安徽建筑,2025,32(03):172-175.
- [7] 柏伟炜. 普通国省道三维数字化采集与建模技术应用[J].智慧城市,2025,11(02):49-51.

Research on comprehensive analysis and utilization standard of locomotive running gear monitoring device data

Minxuan Sun

Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330038, China

Abstract

The PHM + Wheel System (Wheel Fault Prediction and Health Management System) integrates pre-alarm data from locomotive axle monitoring devices, TPDS, and wheelset online detection systems to predict wheel failures and manage maintenance. This study adopts a probabilistic framework and statistical methodology to analyze pre-alarm data from HXD2 locomotives in railway depots monitored by TPDS, along with polygonal data from non-landing lathe inspections before wheel overhauls. Through deep data mining, we propose practical applications of TPDS polygonal alarm data in the PHM + Wheel System to enhance maintenance efficiency.

Keywords

TPDS; Locomotive axle monitoring devices; Wheel fault prediction and health management; Wheel polygonal data.

关于机车走行部监测装置数据综合分析利用标准的研究

孙敏轩

南昌轨道交通集团有限公司，中国·江西南昌 330038

摘要

PHM+车轮系统（车轮故障预测及健康管理系统）综合了机车车载走行部监测装置、TPDS及轮对在线检测系统的预报警数据以对机车车轮进行故障预测及健康管理，此次研究以概率为世界观、以统计为方法论，统计分析了TPDS监测的机务段配属HXD2型机车车轮预报警数据及车轮镟修前不落轮车床检测的多边形数据并深度挖潜，提出了PHM+车轮系统对TPDS多边形报警数据的利用建议，以提高PHM+车轮系统运维机车车轮对的水平。

关键词

TPDS、机车车载走行部监测装置、车轮故障预测及健康管理、车轮多边形

1 研究背景

对铁路货运机车车轮运用状态进行动态监测的主要装置为TPDS及车载走行部监测装置，两者监测机车车轮踏面伤损及多边形特征并发出不同等级的报警，但两者监测的报警数据与真实的机车车轮状态的对应关系尚无统计数据支持并形成定论，一是由于机务段缺少车轮多边形检测设备，无法对预报警车轮进行形位尺寸检测；二是TPDS与车载走行部监测装置之间无预报警数据通讯，形成信息孤岛，无法进行数据衍生及深度对比挖潜；三是机务段轮对技术管理人员对两系统报警数据与车轮实际状态的对应关系及量化情况关注较少。本次研究意在通过对配属HXD2型机车TPDS检测的多边形预报警数据、轮对镟修前机车不落轮车床检测的径跳量及多边形阶次幅值数据进行横向关联性及对比分析，查找PHM+车轮管理系统利用上述报警数据进行车轮

健康评估存在的不足，完善优化PHM+车轮管理系统对车轮进行健康评估的当前判据及维度，形成完备评估车轮健康状态的诊断策略，提高PHM+车轮系统对车轮健康状态评估的全面性、科学性。

2 研究内容

PHM+车轮系统利用车载走行部监测装置的踏面损伤各级报警数据、TPDS检测装置多边形各级报警数据及踏面损伤各级报警数据、轮对在线自动检测系统检测的踏面损伤擦伤及尺寸数据，全面诊断车轮健康状态，诊断结果分为“关注”及“异常”供轮对技术管理人员进行管理决策；具体健康状态评估划分简表如下：

从表中可以看出存在两个问题：

一是诊断判据不全面：PHM+车轮系统缺少对车载走行部监测装置检测的车轮多边形结果的运用，而机务段配属的HXD2型机车车轮故障中，车轮多边形与踏面损伤均为车轮故障主要矛盾，所以，状态评估中须增加车载走行部监测装置发出的车轮多边形各级报警数据；当然，若TPDS检

【作者简介】孙敏轩（1990-），女，中国甘肃定西人，工程师，从事地铁车辆检修研究。

测的车轮多边形的准确性、灵敏度优于车载走行部检测装置时，评估车轮多边形特征时则以 TPDS 为主。

二是诊断结果待核实：PHM+ 车轮系统对 TPDS 检测的多边形信息关注级别较高，即车轮多边形预警不少于 1 次立刻判定为关注，多边形一级或二级报警时，车轮健康结果立刻判定为异常，PHM+ 车轮系统是否存在对 TPDS 发出的车轮多边形预警及一级报警过分关注的问题有待核实。

基于上述两个问题，确定研究内容为运达及唐智的车载走行部监测装置的灵敏度对比、摸清 TPDS 装置检测的车轮多边形各级报警与车载走行部监测装置报警的重叠情况、摸清 TPDS 监测多边形数据与车床检测的多边形实际情况的多维对比，基于以上统计分析提出 TPDS 各级报警数据参与车轮健康评估的建议。

表 1：PHM+ 车轮系统根据各系统的报警信息评估车轮健康状态的等级划分简表

报警来源	伤损类型	报警级别	次数	健康结果	
				关注	异常
车载走行部监测装置	踏面损伤	踏面预警	N≥7	✓	
	踏面损伤	1 级报警	1≤N≤6	✓	
	踏面损伤	1 级报警	N≥7		✓
	踏面损伤	2 级报警	N≥1		✓
TPDS	多边形	踏面预警	N≥1	✓	
	多边形	1 级报警	N≥1		✓
	多边形	2 级报警	N≥1		✓
	踏面损伤	踏面预警	N≥7	✓	
	踏面损伤	1 级报警	1≤N≤6	✓	
	踏面损伤	2 级报警	N≥7		✓
	踏面损伤	2 级报警	N≥1		✓
轮对在线自动检测系统	踏面损伤	一级报警	N≥1	✓	
	踏面损伤	二级报警	N≥1		✓
	踏面擦伤	报警		✓	
	踏面剥离	报警		✓	
	尺寸检测	报警		✓	

3 研究结果

3.1 运达及唐智的车载走行部监测装置的灵敏度对比

统计不落轮车床检测出 HXD2 型机车车轮多边形阶次在 17 至 18 阶之间，且镟修无踏面剥离的车轮检测数据，分别统计成都运达公司及北京唐智公司的车载走行部装置发出踏面预警时车轮径跳量及多边形幅值，具体如下图：

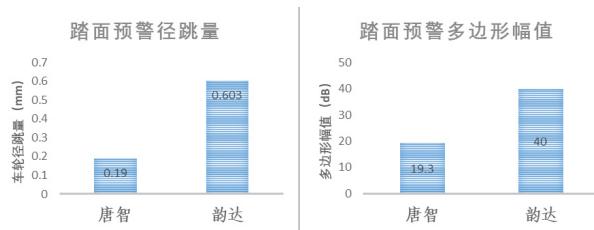


图 1：运达及唐智的车载走行部监测装置发出踏面预警时车轮位尺寸对比

图 1 显示运达公司车载走行部监测装置发出踏面预警时车轮径跳及多边形幅值约为唐智公司监测装置发出踏面预警时的 2 倍之多，车轮故障提前预警作用弱于唐智公司的车载走行部监测装置，已通过运达公司优化报警诊断策略解

决该问题。

3.2 TPDS 与车载走行部监测装置报警重叠率统计分析

分类、分级分别统计 7 月份机务段配属 HXD2 型机车被 TPDS 与车载走行部监测装置监测到的车轮多边形与踏面伤损的重叠率，汇总如下图：

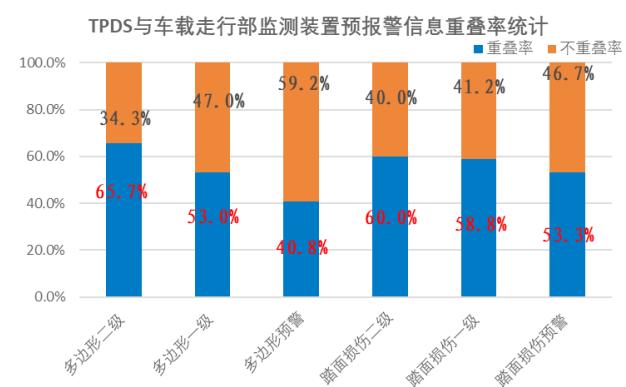


图 2：7 月 HXD2 型机车 TPDS 与车载走行部监测装置报警重叠对比图

图2说明两种设备检测车轮故障(多边形及伤损)的重叠率随着故障严重性的增加而提高。

3.3 TPDS 多边形报警数据与车床检测多边形数据对比分析

筛选出7月份机务段配属HXD2型机车车轮镟修前5天内,TPDS发出的该车轮最高级别的多边形报警信息,按照报警级别分别计算冲击当量平均值,再按照报警级别分类统计多边形报警车轮在镟修前机车不落轮车床检测的多边形幅值及车轮径跳量,最后将TPDS发出的车轮多边形报警信息与车床检测的车轮多边形尺寸信息进行对应汇总整理,

具体如表2:

将表2的“5T装置监测的冲击当量平均值”、“车床实际测量的多边形幅值平均值(dB)”、车床实际测量的车轮径跳(mm)均按照下列方式作图:将预警与一级报警对比,一级报警与二级报警制作柱状图对比,再分别将前者之差(预警与一级报警)及后者(二级报警与一级报警)之差也绘制在对应柱状图的上方,形成如图3、图4、图5的TPDS各级报警冲击当量、报警车轮实测径跳量、实测多边形幅值的对比图。

表2: TPDS 车轮多边形报警数据与不落轮车床检测对应数据汇总表

项目	5T 装置报警级别	多边形预警	多边形一级	多边形二级
样本数量(个)		57	44	19
5T 装置监测的多边形阶次(阶)		16.5	17.0	15.8
车床实际测量的多边形阶次(阶)		17.7	17.7	18.7
阶次误差		-1.20%	-0.70%	-2.90%
5T 装置监测的冲击当量平均值		16.7	17.8	21.5
车床实际测量的多边形幅值平均值(dB)		28.05	29.01	30.95
车床实际测量的车轮径跳(mm)		0.261	0.272	0.471

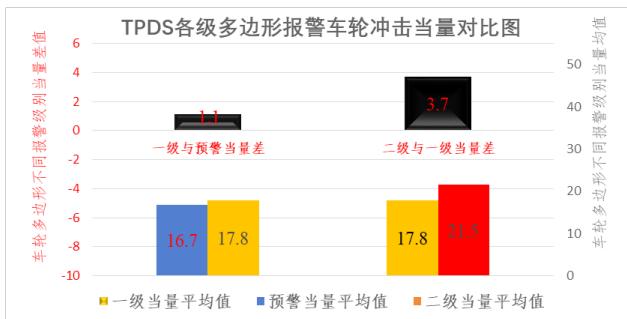


图3: TPDS 各级多边形报警车轮冲击当量对比图

图3显示TPDS预警级别随着冲击当量增加的而升级,多边形预警升级为一级的当量跨距远小于一级升级为二级的当量跨距,也说明预警发展到一级报警所需的时间远小于一级报警恶化为二级报警的时间。

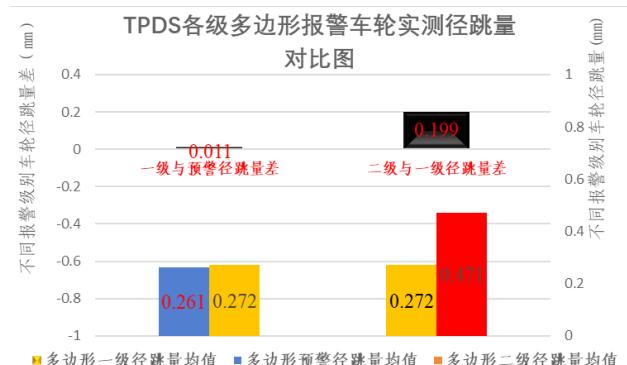


图4: TPDS 各级多边形报警车轮实测径跳量对比图

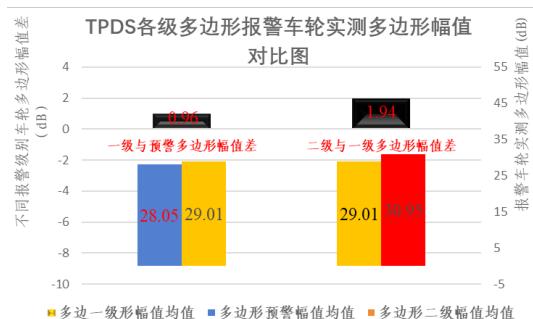


图5: TPDS 各级多边形报警车轮实测多边形幅值对比图

图4及图5显示TPDS发出多边形预警级别随着车轮径跳量、高阶多边形(阶数不小于10阶)幅值增加的而提高报警级别,多边形预警升级为一级时车轮径跳量及多边形幅值跨距远小于一级报警升级为二级报警的径跳及多边形幅值跨距(径跳量:前者跨距0.011mm,后者跨距:0.199mm;多边形幅值:前者跨距0.96dB,后者跨距1.94dB),量化的数据说明一级报警升级为二级报警的过程中,车轮长期处于多边形的恶劣工况。

综上,形成以下建议:

1.PHM+车轮系统应针对不同的车载走行部监测装置对车轮故障报警灵敏度地不同设置不同的车轮健康诊断策略,排除不同监测装置灵敏度不同造成的不能真实反应车轮多边形幅值及径跳的问题,使系统更精准地判断车轮健康状态。

2.TPDS发出车轮多边形预警到一级报警、一级报警到二级报警时车轮径跳量及高阶多边形幅值跨距相差较大,建

议增加一级报警后车轮运用跟踪限制条件,如车轮观察运用时间或多边形一级报警次数判据,防止车轮多边形在未发展至二级报警前长期处于恶劣工况。

3.TPDS 发出车轮多边形预警时的车轮径跳及多边形幅值与一级报警时相差较小,建议将 PHM+ 车轮系统的车轮健康状态评估等级划分简表按下表修改。

报警来源	伤损类型	报警级别	原有判据			建议判据		
			次数	健康结果		次数	健康结果	
				关注	异常		关注	异常
TPDS	多边形	踏面预警	N≥1	√		N≥1		
	多边形	1 级报警	N≥1		√	N≥1	√	
	多边形	1 级报警				N≥10		√
	多边形	2 级报警	N≥1		√	N≥1		√

参考文献

- [1] 石珮挺, 杨延锋, 杨兴宽, 等.HXD2 型机车车轮踏面斜裂纹产生机制及旋修对策研究[J].铁道机车车辆, 2024(02):130-137.
- [2] 宁有波, 张宏, 吴斯, 等。机车车轮故障预测及健康管理技术研究 [J]. 铁道技术监督, 2018 (05):31-36.
- [3] 温世湖。基于 PHM 技术的机车车轮检修策略优化技术研究及应用 [D]. 中国铁道科学研究院, 2022.

Application of vehicle structure deformation characteristics in mechanical identification of traffic accident

Zhijian Lin

Guangdong Heng'an Judicial Appraisal Institute, Yunfu, Guangdong, 527300, China

Abstract

Automobiles are subjected to instantaneous high-energy impacts during traffic accidents, and their structural deformation characteristics record the force transmission paths and energy dissipation trajectories during collisions, serving as crucial physical evidence in accident mechanics identification. By systematically analyzing the plastic deformation, fracture morphology, and residual strain patterns of metal components in different vehicle sections, key parameters such as collision direction, velocity, and contact location can be inferred to provide scientific support for accident reconstruction and liability determination. Structural deformation characteristics not only reflect the magnitude and distribution of collision forces but also reveal the temporal sequence of loading and energy dissipation mechanisms. With the widespread application of high-strength steel and multi-material body structures, vehicle mechanical responses have become increasingly complex, making the accurate interpretation of deformation traces critical to the objectivity of identification conclusions. Interpreting automotive deformation characteristics based on mechanical principles can enhance the scientific rigor and standardization of accident identification.

Keywords

vehicle structure; deformation characteristics; traffic accident; mechanical identification; collision reconstruction

汽车结构变形特征在交通事故力学鉴定中的应用

林志坚

广东恒安司法鉴定所，中国·广东云浮 527300

摘要

汽车在交通事故中承受瞬时高能冲击，其结构变形特征记录了碰撞过程中的受力轨迹与能量传递路径，是交通事故力学鉴定中重要的物证依据。通过对车辆各部位金属构件的塑性形变、断裂形貌及残余应变模式进行系统分析，可反推出碰撞方向、速度与接触位置等关键参数，为事故再现与责任划分提供科学支撑。结构变形特征不仅反映了碰撞力的大小与分布，还揭示了受力时间序列及能量耗散规律。随着高强度钢与多材料车身的普及，车辆结构力学响应愈加复杂，变形痕迹的精准识读对鉴定结论的客观性具有决定性作用。基于力学原理解读汽车变形特征，能够提升事故鉴定的科学化与规范化水平。

关键词

汽车结构；变形特征；交通事故；力学鉴定；碰撞重构

1 引言

交通事故的力学鉴定是事故调查和责任认定的核心环节，其科学性直接影响到鉴定结果的公正性与权威性。汽车在碰撞过程中会经历瞬间的能量冲击，结构构件在高应变速率下发生复杂的塑性变形和断裂损伤，这些残余变形特征为还原事故过程提供了关键物理证据。长期以来，事故鉴定往往依赖目测经验与痕迹比对，存在主观性强、定量性不足的问题。随着车辆结构材料的多样化与轻量化发展，传统经验方法难以准确解析变形机理，需要引入力学分析框架，系统评估车身变形与碰撞载荷的对应关系，以实现碰撞过程的可

计算重构。围绕汽车结构变形特征的力学解读展开研究，将为事故鉴定提供客观、可量化的判断依据。

2 汽车结构变形特征的力学基础

2.1 车身结构材料的力学性能与变形模式

车身结构由高强度钢、铝合金、复合材料等多类材料构成，具有不同的屈服强度、延展性与断裂韧性，其力学性能直接决定碰撞中的变形行为。高强度钢的屈服强度普遍在 500MPa 以上，在受冲击载荷时能够保持较高刚度并延缓整体屈服，形成集中塑性变形区，而铝合金的屈服强度约为 250MPa，延展性较高，更易产生均匀塑性流动，能通过大面积吸能降低冲击峰值。复合材料在冲击中呈脆性断裂特征，可通过分层剥离吸收能量，但破坏不可恢复。车身的变形模式取决于构件截面几何与材料性能的耦合作用，纵梁等

【作者简介】林志坚（1970-），男，中国广东高要人，本科，工程师，从事痕迹鉴定（交通事故痕迹物证鉴定）研究。

承载构件多呈轴向压溃折叠模式，门槛梁和防撞梁等横向构件多产生弯曲塌陷模式，外覆盖件则表现为薄板鼓包与撕裂特征，不同部位的变形响应共同构成能量耗散路径，影响整车的碰撞防护性能与力学鉴定依据。

2.2 碰撞载荷作用下的结构受力传递路径

汽车在碰撞瞬间产生的冲击力会沿结构构件的连接路径传递，形成应力波在车身中的扩散网络，受力传递路径的特征决定变形区域分布及能量吸收效率。车辆前纵梁与副车架构成初级吸能路径，其截面惯性矩大，在冲击载荷达到50kN时开始产生局部屈曲折叠，吸收碰撞能量并延缓传递至乘员舱。中段地板梁、门槛梁及B柱形成次级载荷传递通道，在100kN载荷下保持结构完整性以保护乘员舱空间。顶部横梁、A柱和车顶框架承担抗弯抗扭作用，可抵抗侧向撞击产生的60kN横向载荷。受力传递过程呈现出由外向内、由局部至整体的逐级衰减特征，能量在各级构件的塑性变形中逐步耗散，使乘员舱保持相对稳定的几何形态，为碰撞后结构形变痕迹与受力顺序的判断提供物理依据。

2.3 塑性铰区与局部屈曲在变形过程中的作用

车身构件在碰撞冲击中会在应力集中位置形成塑性铰区，使局部区域产生大角度塑性转动并消耗动能，这是控制结构可控变形的关键机制。纵梁端部、地板横梁节点及副车架连接处常设计为厚度较薄的诱导区，当受到70kN以上轴向冲击载荷时先行屈服，形成折叠褶皱并产生塑性铰，从而避免高载荷直接传入乘员舱区域。局部屈曲通常出现在板壳结构如车门外板、翼子板等区域，当应力达到材料屈服强度的1.2倍时会迅速鼓包塌陷，产生波纹状凹痕形态，既释放能量又作为碰撞方向和受力顺序的判据。塑性铰区与局部屈曲的分布反映了载荷流动路径，其变形形态稳定且可复现，是力学鉴定中判断碰撞能量分布与构件失效模式的重要依据。

3 汽车结构变形特征的识别与测量技术

3.1 残余变形几何特征的形态学分析

残余变形的几何特征为碰撞能量分布提供定量信息，可通过形态学参数进行系统分析。纵梁的轴向压缩量常在250~400mm范围，褶皱波长约为80mm，说明其承担了超过30kJ的能量吸收；A柱的侧向弯曲位移约为60mm，残余转角5°，代表其在侧向碰撞中抵抗了约40kN的横向载荷。外覆盖件如发动机盖在冲击后呈抛物鼓包形态，最大凹陷深度常达90mm，边缘撕裂长度约为150mm，可反推撞击位置与力集中区域。形态学分析中常用轮廓提取与截面重构技术，将测得的凹陷深度、折皱间距、残余转角等参数输入有限元模型校核碰撞力，能以几何特征匹配法确定受力路径，为力学鉴定提供定量支撑。

3.2 车身断裂、折叠与压溃痕迹的判读方法

车身在碰撞后会遗留断裂、折叠与压溃痕迹，通过对

这些宏观与微观特征的判读可重建碰撞事件的动力学过程。断裂面通常呈现45°剪切特征，金属晶粒拉伸纹理清晰，当冲击速度超过12m/s时多发生在门槛梁、纵梁等承载部件，表明瞬时载荷已超过150kN。折叠区可见周期性褶皱，褶皱波峰间距约为70mm，对应构件在塑性区形成多次屈曲，能量吸收率可达70%。压溃区域体积密度增加30%，常见于发动机舱前端的溃缩盒，内腔完全塌陷形成蜂窝状结构，代表构件承受了高轴向压缩力并耗散动能。判读过程中结合断裂金相分析、折叠几何匹配与压溃厚度测量，可重建受力顺序与载荷大小，为事故鉴定提供物理依据。

3.3 基于三维重建的变形量化测量技术

三维重建技术能实现车身变形的高精度量化测量，为力学鉴定提供客观数据支撑。通过激光扫描获取点云数据，可在1mm精度内重现碰撞后车体外形，将变形区域体积差与原始设计模型比对计算体积压缩率，如纵梁前段压缩体积为0.015m³，吸能量约为28kJ。采用结构光扫描可快速获取复杂弯曲区域的凹陷深度，精度达0.5mm，可测得A柱最大位移为62mm，残余转角为6°。摄影测量技术通过多视角重构模型提取变形边界轮廓，结合有限元反演算法求解载荷分布，能计算出局部应变集中区域的等效应力值达380MPa。三维重建不仅提高了测量精度，还可实现变形过程的时序回溯，为碰撞载荷路径推演和力学参数反算提供了可量化的技术途径。

4 交通事故力学鉴定中变形特征的判定价值

4.1 变形深度与碰撞能量吸收关系的推断

车身结构在碰撞中承受的动能会转化为材料的塑性变形功，变形深度与能量吸收量存在稳定的对应关系，可作为事故载荷强度的重要判据。纵梁等轴向受压构件在碰撞过程中发生褶皱折叠，其压缩深度与单位长度吸能呈正比，压缩200mm可吸收约18kJ动能，而达到400mm时吸能可超过35kJ。A柱和B柱等弯曲构件在横向撞击中产生侧向位移，其残余弯曲量反映横向动量输入，位移达到60mm通常意味着作用力超过40kN。外覆盖件的鼓包深度也能表征碰撞能量集中区域，局部凹陷超过90mm说明该点局部受力极大。通过建立构件变形深度与能量吸收的经验函数，可将事故现场的残余形变量化为碰撞动能，为力学鉴定提供客观参数支撑。

4.2 结构变形分布与碰撞方向的对应分析

碰撞载荷在车身结构中沿特定路径传递，不同方向冲击会在构件上形成差异化的变形分布特征，通过分析这些特征可判定碰撞方向。正面碰撞时，变形集中于纵梁和溃缩盒，呈现轴向压溃褶皱形态，地板梁出现均匀鼓包；侧向碰撞则造成A柱、B柱和门槛梁的大角度弯曲，变形区域偏向车体一侧，伴随地板横梁横向位移；后部撞击常导致后纵梁屈曲与后备箱地板上拱，后桥固定点周围出现放射裂纹。变形

分布的不对称性还能揭示碰撞角度，若左前纵梁压溃长度为350mm而右侧仅为120mm，则推断冲击角度约为30°。通过构建变形分布特征图谱，将各部位变形程度、范围与碰撞角度和方向匹配，可为鉴定中重建事故动力学过程提供判据。

4.3 局部变形痕迹与接触位置重构的关联性

局部变形痕迹记录了撞击点的瞬时受力状态，是重构接触位置的重要依据，可通过几何参数与载荷模型推算接触区域范围。车门外板出现椭圆形鼓包，最大凹陷深度为92mm，长轴方向指向来车运动方向，可确定接触点位于车门中段偏前；保险杠表面压痕宽度为380mm，中心压入量为75mm，结合模态分析可反推出接触位置位于纵梁前端偏左150mm处；前翼子板撕裂口长度为160mm，金属晶粒拉伸率达到18%，说明冲击集中点位于翼子板弧顶，接触速度约为11m/s。通过高精度摄影测量和点云重建提取这些痕迹的空间坐标，结合有限元反演算法求解载荷施加位置，可实现接触位置的精确重构，为事故力学鉴定提供定量空间参照。

5 汽车结构变形特征在事故责任认定中的应用

5.1 多车碰撞中车辆受力先后顺序的推演

在多车连环碰撞事故中，车辆间的相互作用呈现出复杂的力学耦合关系，受力先后顺序的判定直接影响责任划分的准确性。通过分析不同车辆的结构变形痕迹，可以推演碰撞力传递的时间序列。前车若后纵梁发生连续褶皱压溃，压溃深度达到320mm，后地板出现上拱而前部几乎无形变，说明其在初次受力时承受了后车的主要冲击力。后车若前纵梁呈不对称折叠且褶皱间距明显大于正常压溃形态，发动机舱地板无二次波纹叠加，代表其只在初撞时释放动能而未遭受后续冲击。中间车辆的变形形态更能体现受力顺序，其后纵梁折痕若位于前纵梁褶皱之下，表明先承受后车冲击而后遭前车反弹，若两处褶皱相互交叠并呈交错层级，则说明受力为双向同时作用。

5.2 变形痕迹与行驶速度估算的力学推理

车辆行驶速度是交通事故责任划分的重要参数，结构变形痕迹可作为推算速度的物理依据。车辆在碰撞过程中，动能转化为结构的塑性变形功，变形程度与初始速度存在稳定的力学对应关系。纵梁作为主要吸能构件，其压溃深度与吸收能量近似呈线性关系，当纵梁压溃量达到300mm时吸能约为28kJ，对应碰撞速度约为32km/h，当压溃量为500mm时吸能超过50kJ，对应速度可达48km/h。车门外板的鼓包深度可反映局部能量输入，当凹陷深度为85mm时局部应变约为16%，对应碰撞速度约25km/h，若达到120mm

则应变提升至23%，速度可达35km/h。通过将现场提取的几何形变数据输入有限元反演模型进行动能匹配分析，可得到碰撞初速度的区间值，并与制动痕迹、车载记录仪数据交叉校核，有助于构建多源验证的速度推理链条，为事故鉴定提供客观支撑。

5.3 变形对安全约束系统失效判断的参考价值

安全约束系统的有效性直接关系到乘员伤害程度，其触发与功能发挥高度依赖车身结构在碰撞中的变形响应，分析结构变形参数能够辅助判断约束系统是否存在失效。车辆前纵梁在压溃量达到450mm时前端加速度峰值可达32g，若安全气囊未触发说明碰撞传感器线路可能因结构断裂而失效，属于结构变形导致的系统未动作。乘员舱地板纵向上拱45mm会使安全带下锚点上移15mm，安全带力臂缩短将导致约束力下降20%，乘员胸部加速度峰值可能由25g上升至30g。B柱在侧向碰撞中横向位移达到70mm会使侧气囊展开通道受阻，充气压力不足仅为设计值的60%，导致展开延迟超过20ms。通过比对结构变形量与安全系统设计的触发阈值和动作时序，可以判定约束系统是否因结构过度变形、传感器延迟或布线路径受损而未能正常工作，从而区分事故责任是由驾驶行为、产品缺陷或维护不当引起，为事故处理中的责任界定提供科学支撑。

6 结语

汽车结构在交通事故中所呈现的变形特征，蕴含着完整的力学信息链条，是重构碰撞过程和判定受力状态的重要物证。通过对车身材料性能、受力传递路径、塑性铰区和局部屈曲等机理的系统解析，能够揭示结构在冲击载荷作用下的响应规律，并为变形痕迹的识别与量化提供理论基础。将残余几何特征、断裂折叠形貌与三维重建数据纳入力学鉴定模型，可实现对碰撞能量、方向、接触位置的精准推演，为速度估算、受力时序判定及安全约束系统效能评估提供客观依据。以变形特征为核心的力学鉴定方法，提升了事故分析的科学性和量化水平，为司法鉴定与责任认定建立起技术支撑框架，对完善交通事故处理机制具有重要意义。

参考文献

- [1] 马晓臣.自动驾驶汽车交通事故侵权责任分配的困境及其缓和——以三层保险结构的架构为例[J].交通节能与环保,2019,15(06):66-72.
- [2] 李长杰.汽车交通事故中牙齿损伤及修复的仿真研究[D].导师:阮世捷.天津科技大学,2019.
- [3] 李炳涛.汽车结构材料对道路交通事故救援影响探析[J].消防技术与产品信息,2017,(06):47-49.
- [4] 王笑.大客车前部结构碰撞仿真试验及结构安全性评价[D].导师:简晓春.重庆交通大学,2012.

Research on the Promotion of the Nanjing Inland Port Gaochun Port Area Gucheng Working Area PPP Project

Hui Chen

Nanjing Port Port Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210011, China

Abstract

The Nanjing Inland Port Gaochun Port Area Gucheng Working Area project is a transportation infrastructure PPP project jointly invested and constructed by the local government and social capital, and it is also one of the key projects in Nanjing, with good economic, social, and demonstration effects. Affected by changes in the economic environment and policy adjustments, the progress of the project has been hindered. This article argues the feasibility and necessity of the project construction from the perspectives of implementing transportation planning, serving industrial layout, and supporting economic development, providing support for the project's resumption of work and construction, and offering a reference model for the continued promotion of similar projects.

Keywords

port planning, investment control, feasibility, necessity

南京内河港高淳港区固城作业区 PPP 项目推进研究

陈辉

南京港港务工程有限公司，中国·江苏南京 210011

摘要

南京内河港高淳港区固城作业区项目是地方政府与社会资本方共同投资建设的交通基础设施PPP项目，也是南京市重点工程之一，具有良好的经济效应、社会效应与示范效应。受经济环境变化及政策调整影响，项目推进受阻。文章从执行交通规划、服务产业布局、助力经济发展等角度论证了项目建设的可行性与必要性，为项目复工复产提供支撑，为类似项目的继续推进提供参考样本。

关键词

港口规划 投资控制 可行性 必要性

1 引言

南京内河港高淳港区固城作业区项目（以下简称：固城作业区项目）是由高淳区交通运输局、中交第三公路工程局有限公司及南京港（集团）有限公司以 PPP+BOT+ 使用者付费 + 可行性缺口补助模式实施的区域交通基础项目，建设资金以项目资本金 + 融资方式解决，并成立了项目公司负责融资、建设、运营及移交等工作。

2 项目规划建设情况

2.1 建设地点

项目位于南京市高淳区固城街道和东坝街道境内，芜申运河北岸，沛桥河两侧，规划的高淳港区固城作业区，距上游宁宣高速约 430m。

2.2 建设规模

2.2.1 总投资情况

项目总投资约 9.23 亿元，其中建安设备费约 5.92 亿元。

2.2.2 码头部分

工程拟拆除沛桥河口门处排涝站并移址至挖入式港池北侧重建，利用现有沛桥河向两侧拓宽形成挖入式港池，于港池东侧建设 10 个 1000 吨级泊位及其对应的配套设施，设计通过能力为 241 万吨 / 年。

2.2.3 陆域部分

后方陆域布置集装箱堆场、件杂货堆场、拆装箱库、件杂货仓库、物流交易库、生产辅助及管理区等。

2.2.4 装卸设备

码头部分设置集装箱岸桥、多用途门机、普通门机；陆域部分设置集装箱门式起重机、集装箱正面吊及配套的牵引车、平板车、叉车等作业机械设备。

2.2.5 疏港路

为构建货运卡口集疏运通道，在港区出入口处新建长 1.05km 的疏港路，实现港区与外部路网的衔接。

【作者简介】陈辉（1982—），中国江苏海安人，本科，工程师，从事码头项目的续建推进研究。

2.3 建设情况

2.3.1 手续情况

项目于2017年8月启动项目可行性研究；2018年2月取得立项批复；2019年3月纳入江苏省财政厅PPP项目库，2021年5月正式推进建设工作；2022年1月取得码头工程施工图设计批复；2022年7月取得用地批复；2023年8月取得文物保护意见。

2.3.2 施工情况

项目于2023年11月份正式开工建设，完成陆域形成约12万平方米，码头主体墙身浇筑510延米，累计完成施工产值约6000万元。

2.3.3 推进情况

受经济环境变化及政策调整影响，特别是2023年11月国务院颁布了《关于规范实施政府和社会资本合作新机制的指导意见》，明确要求PPP项目中“政府付费只能按规定补贴运营、不能补贴建设成本”“不得通过可行性缺口补助、承诺保底收益率、可用性付费等任何方式，使用财政资金弥补项目建设和运营成本”。文件颁布后银行全面暂停了PPP项目贷款业务，导致项目融资工作无法推进，项目因建设资金缺口巨大而于2024年5月暂停。

2025年8月，国务院出台《关于规范政府和社会资本合作存量项目建设和运营的指导意见》，对支持PPP项目建设提出了“坚持问题导向、分类施策、降本增效，规范PPP存量项目建设和运营，支持提升公共服务和民生保障水平”的总要求，为解决固城作业区项目推进存在的困境提供了政策支撑。

依此背景，项目公司以新政策为抓手，开拓创新、主动作为，积极协调政府、股东、银行等单位，想方设法解决项目融资难题，竭尽全力开展建设方案优化，力推项目复工复产。

3 项目建设必要性研究

受经济发展、政策调整及规划预期等的影响，特别是项目暂停后，部分单位、人员对项目的建设规模甚至必要性提出质疑。为此，项目公司深入思考、多方调研、科学测算，认为该项目的建设依然是必要的。

3.1 融入水运江苏战略的主动作为

江苏省人民政府于2023年4月、2024年3月分别印发《关于加快打造更具特色的“水运江苏”的意见》和《加快打造更具特色的“水运江苏”三年行动计划(2024—2026年)的通知》。提出进一步发挥江苏水运优势，打造更具特色的

“水运江苏”，实现由水运大省向水运强省高质量转变的总体要求。意见和行动计划中对近远期江苏全省港口、航道及水运经济的发展给出了战略性规划和指导。其中与固城作业区项目息息相关的要求主要有：

3.1.1 加快打造畅通高效的内河航道网

到2026年建成二级及以上航道里程超1100公里，三

级及以上干线航道里程达到2800公里，通达全省87%以上的县（市、区），内河集装箱运输核心通道全面贯通。

3.1.2 打造协同一体的长三角世界级港口群北翼

加快建设规模化、集约化内河港口，优先采用挖入式港池布置，促进港产城融合发展。抓住内河干线航道网建设契机，推进千吨级码头建设，重点加快内河港口的集装箱作业区建设。

3.1.3 打造经济开放的水运物流网

完善多式联运通道布局，重点打造沿新亚欧大陆桥、沿江、沿海铁水联运通道，沿江、沿运河海江河联运通道，向东形成衔接国际近远洋航线的海向多式联运网络，向西形成直达中西部主要城市、长江中上游港口、衔接中欧班列的陆向多式联运网络。以太仓港区、龙潭港区为核心枢纽，加快形成江海河联运通道格局。

固城作业区所依托的芜申运河航道，是连通南京以上长江经济带与苏锡常、沪嘉甬经济发达区域最为便捷的内河航道主通道，已经纳入江苏省干线航道“三改二”的规划，预计2027年完成航道等级提升。而固城作业区的建成投运，可以充分发挥喂给港节点效能，使高淳区的货物能够便捷通达太仓、上海等枢纽港，为地方企业降低物流成本提供交通基础设施支点。

高淳区作为南京市水运条件较为优异的辖区，理应积极主动融入水运江苏规划之中，更好地发挥航道、航运优势，并逐步提升为港航综合优势，加快推进固城作业区项目的建设正是主动作为的积极表现形式。

3.2 完善区域综合交通体系的必然需求

依据《高淳区国土空间交通专项规划编制（2021-2035年）》的设定，高淳区的区域与对外交通规划目标为：构筑与长三角中心城市快速衔接的“铁、公、水、空”立体交通网络，打造苏浙皖三省“一体化”省际枢纽城市，支撑南京“国际性综合交通枢纽”向南辐射。

3.2.1 铁路系统

规划形成“一横两纵”高速铁路网络，规划里程约82千米，在固城街道规划高淳高铁站。“一横”为常芜方向预控通道，“两纵”为宁宣高速铁路、宁杭铁路二通道。

3.2.2 公路系统

规划形成“两横两纵”高速公路网络和“三横五纵”干线公路网络。高速公路网包含溧芜高速、宁广高速、宁宣高速、宁黄高速；干线公路网包含古檀大道、芜太公路、南部干线、西部干线、宁高新通道、宁宣公路等。

3.2.3 港口水运

以芜太运河二级航道为骨架，秦淮河、水阳江航道等为次骨架，打造结构合理、干支通畅、连城达港、通江入湖的航道网布局，发展成为南京南部地区重要的水运物资中转集散中心。

规划形成“两主两辅”4处内河作业区，以固城和小花

作业区为主，水阳和桠溪作业区为辅的内河作业区群。

高淳区内的公路系统网络已基本构建完成，铁路系统规划正在国家及省市统一部署下有序推进，港口水运的发展布局也已经纳入“水运江苏”规划。固城作业区的建设符合高淳综合交通体系规划要求，能够填补高淳区公铁水综合交通基础设施中港口的空白，对高淳区综合交通基础设施的建设与完善十分必要。

3.3 服务企业降本增效的实际举措

高淳区航道条件优异，但港口码头缺乏，未能有效服务地方企业的实际运输需求。由于缺少运价低、运量大的水运选择项，区内企业物流成本高企。水运成本仅为陆运成本的1/7-1/3，以集装箱为例，从高淳至上海洋山港，集装箱的汽运价格约5000元/标箱，水运价格约1500元/标箱，高淳区每年向上海方向的集装箱运输量约为2万标箱，仅此一项，即可降低运输成本7000万元。固城码头建成投运后，必将改变高淳区内企业运输方式的架构，助力企业降本增效。

4 项目推进研究

2025年8月国务院出台的《关于规范政府和社会资本合作存量项目建设和运营的指导意见》明确提出了“分类分级推进实施”和“保障合理融资需求”的具体指导，为项目继续推进带来了希望。项目公司和政府方抓住政策利好，一方面争取采用不同融资方式解决资金缺口，另一方面主动开展方案优化以降低项目整体投资，为项目复工复产创造条件及争取机会。

4.1 项目融资

项目公司及社会资本方密切保持与中国银行、江苏银行、宁波银行等大型国有及商业银行的沟通联系，持续推进项目贷款申请工作，着力解决项目建设的资金缺口。银行表示，待总行对相关政策的解读和实施细则出台后可推进下一步融资。

4.2 设计优化

项目公司结合市场环境变化，对项目建设内容和投资规模进行梳理评估，有序推进项目方案优化，以期合理调整建设规模和投资安排，切实降低项目投资总额。

4.2.1 吞吐量测算

对2020年《工程可行性研究报告》分析，原设计吞吐量测算基准年度2017年高淳区的GDP与港口吞吐量数据和实际发展情况基本吻合，证实原工可报告中港口吞吐量测算的方法正确，即港口吞吐量与GDP存在内在关联；后疫情

时代，随着经济复苏政策落地和经济刺激措施发力，高淳区经济实现稳步回升，2024年全区GDP已恢复至627亿元，超过2017年的实际水平，展现出强劲的恢复能力和增长韧性；原配套服务的重点企业，如江苏统一、高淳陶瓷、冠盛汽配等，经过结构调整和产能优化，发展态势持续向好，生产规模稳中有升，对原材料输入和产成品输出的水运需求得以延续并进一步增强。

经过对高淳区内的开元食品、永和高分子、冠盛汽配、华玻光电、海太欧林、仁厚科技、沃尔德特钢、凯瑞汽车部件、贝斯特金属等39家代表性企业走访调研，统计货运总量约190万吨，集装箱出运量约11000标箱。

从长期趋势看，高淳区产业基础稳固，水运需求基本面未发生改变。规划设计单位分析测算：近期高淳区水运吞吐量约100万吨（不含散货），集装箱年吞吐量约2.5万标箱。随着经济复苏和产业升级，未来物流总量及水运量仍将保持稳定增长。

4.2.2 方案优化方向

根据对高淳区近远期港口吞吐量的测算，结合项目原有的设计，项目公司拟定了“分期实施、分期验收、分期运营”的项目建设方案，拟将项目分两期进行建设。一期工程实施内容包括：码头主体、水系勾连、防洪圈、办公楼、生活楼、集装箱堆场、拆装箱库及疏港路等，投产3-5个泊位。二期工程根据高淳区经济发展、码头运营情况等再行建设，内容包括：杂货堆场、件杂货仓库、物流交易库等。

5 结论

综合分析论证，固城作业区的建设是可行的也是必要的，在政府方、社会资本方的共同努力下，抓住政策利好、强化互补合作、打通融资渠道，加快推进固城作业区项目的复工复产工作，以早日达到项目建成投产的目标，能够补足交通基础设施短板、助力区域经济发展。

参考文献

- [1] 《港口工程建设管理规定》
- [2] 江苏省人民政府《关于加快打造更具特色的“水运江苏”的意见》
- [3] 江苏省人民政府《加快打造更具特色的“水运江苏”三年行动计划（2024—2026年）的通知》
- [4] 《江苏省干线航道网规划（2023—2035年）》
- [5] 《高淳区国土空间规划交通专项规划编制（2021—2035年）》
- [6] 财政部《关于规范政府和社会资本合作存量项目建设和运营的指导意见》

Study on design optimization of ecological slope protection system for mountain road

Jiechen Zhao

Xingbian Fumin Affairs Center, Zhongke Town, Ximeng, Yunnan, 665706, China

Abstract

This study focuses on the design and optimization of ecological slope protection systems for mountainous roadways, emphasizing the coordinated principles of stability and ecological conservation. Through comprehensive geological surveys, optimized vegetation selection, drainage system upgrades, and innovative geotechnical materials, the research achieves simultaneous advancement in slope mechanical stability and ecological restoration. The paper proposes a design philosophy of site-specific adaptation and integrated management, highlighting the organic combination of multiple technical approaches to enhance protective effectiveness and ecological benefits. This work provides scientific evidence and technical support for slope protection in mountainous roadways, contributing to safer highway operations, environmental protection initiatives, and the green sustainable development of mountain transportation infrastructure.

Keywords

mountain road; ecological slope protection; geological investigation

山区公路生态边坡防护系统设计优化研究

赵捷琛

云南省西盟县中课镇兴边富民事务中心，中国·云南西盟 665706

摘要

本文围绕山区公路生态边坡防护系统设计优化展开研究，重点探讨了稳定性与生态保护的协调原则，通过详实的地质勘察、植被种类优化、排水系统改进及土工材料创新等方法实现边坡的力学稳定与生态恢复同步推进，文章提出因地制宜和综合治理的设计理念，强调多技术手段的有机结合，以提升防护效果和生态效益，本文为山区公路边坡防护提供科学依据和技术支持，这有助于保障公路安全运营，促进生态环境保护，推动山区交通建设的绿色可持续发展。

关键词

山区公路；生态边坡防护；地质勘察

1 引言

山区公路建设过程中，边坡稳定性直接关系到道路安全和生态环境保护，传统的边坡防护方法多以刚性结构为主，易破坏自然生态，导致水土流失和植被破坏，而随着生态文明建设的推进，如何实现边坡防护与生态环境的协调发展成为研究热点，基于此山区公路生态边坡防护系统设计优化旨在结合地质特性和生态需求，采用多样化、生态化的防护措施，提高边坡稳定性，促进植被恢复，减少环境破坏，实现公路安全与生态保护的双重目标。

2 山区公路生态边坡防护系统设计的概述

山区公路生态边坡防护系统设计是一种融合工程技术

与生态环境保护的综合性方案，旨在保障边坡的稳定性同时维护和恢复自然生态环境。该系统通常包括植物护坡、透水排水结构、土工材料以及生物工程措施等多种技术手段，通过合理设计实现边坡防护与生态修复的有机结合。生态边坡防护不仅注重边坡的力学稳定，还强调植被覆盖和土壤保持，防止水土流失，提升生态系统的自我修复能力。山区公路在设计过程中需充分考虑地质条件、气候环境和植被生长特点，结合当地资源因地制宜地选用防护材料和植被种类，设计整体目标是构建一个稳定、安全、绿色的边坡环境，促进山区公路可持续发展，提升公路沿线生态环境质量，减少施工和维护成本，兼顾工程效益与生态效益^[1]。

3 山区公路生态边坡防护系统设计的基本原则

3.1 稳定为首要

山区公路生态边坡防护系统设计中，“稳定为首要”原则是保障公路安全运营的基础，边坡的稳定性直接关系到

【作者简介】赵捷琛（1995-），哈尼族，男，助理工程师，从事农村公路建设与管理研究。

道路的使用寿命和行车安全，若边坡失稳则可能引发滑坡、崩塌等地质灾害，严重威胁人员和财产安全，因此在设计过程中必须对边坡的地质条件、力学特性进行全面细致的勘察，准确掌握土壤类型、岩石强度、地下水状况等关键参数。基于这些数据，合理选用边坡支护结构和防护措施，通过科学合理的工程措施最大限度地提升边坡的整体稳定性，为公路运营提供坚实保障^[2]。

稳定为首要，需在生态边坡防护中平衡工程稳固与生态修复：边坡植被可增强表层土壤结合力、减少侵蚀，其根系还能固土提升边坡抗剪强度，辅助工程结构稳固边坡。因此，在保障边坡结构安全的前提下，应优先采用生态工程措施，如种植适应性强、根系发达的植物，结合生物网格、生态袋等新型材料，构建生态—工程复合防护体系。此外，边坡排水设计是稳定关键，合理设置排水管道与沟渠可降低地下水压力，避免边坡因水分饱和失稳。通过多重技术协同，既能确保边坡力学稳定性，又能实现生态可持续，凸显“稳定为首要”的设计核心。

3.2 生态优先

山区公路生态边坡防护系统设计中，“生态优先”原则强调在保障边坡稳定的基础上最大限度地保护和恢复自然生态环境，山区地形复杂，生态环境脆弱，传统的刚性防护结构往往破坏植被和土壤结构，导致水土流失和生物多样性下降，因此设计时应优先采用生态工程措施，通过生态优先的设计理念实现边坡防护与环境保护的有机结合，推动山区公路建设向绿色、可持续方向发展^[3]。

生态优先需贯穿山区公路边坡防护施工与维护，减少环境干扰：设计科学施工方案，以分期施工、同步生态修复避免大规模开挖与植被破坏；优选本地适生植物，保障其生态功能与长期稳定性。维护阶段加强生态监测，及时修复受损植被与结构，确保生态健康。通过全面贯彻生态优先原则，既能提升边坡防护效果，又能保护修复山区生态，实现经济与生态效益双赢。

3.3 因地制宜

山区公路生态边坡防护系统设计中的“因地制宜”原则，强调根据不同地区的自然条件和具体环境特点，采取针对性的防护措施，以达到最佳的防护效果和生态恢复效果。山区地形复杂多变，设计时必须充分调研，分析当地的地质结构、降雨特征、植被状况等因素，结合实际情况选择合适的边坡防护技术和植被种类，例如在岩石裸露较多的地区，重点采用机械加固结合生态绿化的复合防护措施；而在土质松软、降雨量大的区域，则应强化排水系统设计，同时选择适应性强的耐水植物进行护坡，通过因地制宜的设计有效避免“一刀切”方案带来的资源浪费和环境破坏，提升系统的科学性和可行性。

因地制宜还体现在材料选择和施工工艺上，针对不同的地质和气候条件应选用当地丰富且环保的材料，如竹材、

木材、生物基土工格栅等，既降低施工成本，又减少对环境的负面影响，工作人员在施工过程中应结合地形条件设计合理的施工步骤，避免大规模土方开挖和对自然植被的破坏，保证生态系统的完整性和恢复能力，同时因地制宜的维护管理策略也十分重要，根据不同地区的气候变化和植被生长规律制定科学的养护计划，及时处理病虫害和土壤侵蚀问题，通过精准的区域适应性设计和管理最大化提升山区公路边坡防护系统的稳定性和生态功能，实现工程安全与生态保护的协调统一。

3.4 综合治理

山区公路生态边坡防护系统设计中，综合治理原则强调多种技术手段和生态措施的有机结合，以实现边坡的稳定和生态环境的可持续发展，单一的防护措施往往难以全面应对复杂的地质和气候条件，容易造成局部失效或生态破坏，综合治理则通过机械加固、生物工程、排水控制和植被恢复等多方面协同作用，形成互补优势，例如在边坡易滑区结合锚杆支护和生态护坡网格，同时配套排水系统和适宜的植被种植，既增强边坡的力学稳定，又提升生态功能，因此综合治理能够有效防止水土流失、减少环境破坏，确保边坡防护系统的整体性和长效性。

综合治理还需要统筹规划和科学管理，结合工程建设与生态保护的双重目标，在设计阶段应充分调研环境状况和潜在风险制定多方案比选，优化技术组合，在施工过程中应同步推进生态恢复措施，减少对自然环境的扰动，养护管理阶段则需定期检查各项措施的运行状态，及时修复损坏部分，保障综合治理体系的持续有效，因此综合治理不仅提升了边坡的安全性能，也促进了区域生态环境的恢复与提升，实现山区公路建设的安全、环保和可持续发展目标。

4 山区公路生态边坡防护系统设计优化的方法

4.1 地质勘察详实

山区公路生态边坡防护系统设计优化中，地质勘察详实是确保设计科学性和工程安全性的基础，山区地形复杂多变，边坡土质、岩层结构、断层裂隙及地下水情况各异，这些因素直接影响边坡的稳定性和防护措施的选择，因此开展全面、细致的地质勘察显得尤为重要。勘察工作应包括地质结构分析、土壤物理力学性质测试、地下水动态监测等内容，通过钻探、取样、现场测试和实验室分析相结合，获得准确的边坡地质信息，详实的地质勘察能够帮助设计人员全面掌握边坡潜在的失稳机理，识别地质灾害风险点，为后续设计提供科学依据，提高防护系统的针对性和有效性。

优化地质勘察流程和技术手段同样关键，利用现代地质勘察技术能够更精准地描绘边坡内部结构和变化趋势，减少盲区和遗漏，同时勘察数据应动态更新和反馈，结合工程施工进展不断修正设计方案，确保防护措施适应实际地质条件，合理安排勘察周期和深度，避免过度勘察导致成本增加，

也防止勘察不足带来安全隐患，通过详实且科学的地质勘察能够为山区公路生态边坡防护系统设计提供坚实的基础保障，实现工程的安全稳定与生态环境的和谐共存。

4.2 植被种类优化

山区公路生态边坡防护系统设计优化中，植被种类优化是提升生态防护效果和边坡稳定性的重要措施，由于山区环境复杂多变，不同地区的气候条件、土壤性质和水分状况各不相同，选择适应性强、根系发达且生态功能优良的植物种类，能够有效增强边坡的抗侵蚀能力和土壤固定能力，优化植被种类应结合当地生态特点，优先选用本地耐旱、耐寒、抗风化的草本和灌木类植物，这些植物不仅能快速覆盖裸露边坡，还能形成稳固的根系网络，增加土体的内聚力，同时山区公路生态边坡防护系统应考虑植物的生态功能，如改善土壤结构、促进微生物活动和提高生物多样性，确保生态边坡的可持续发展。

植被种类优化还需注重植物的组合搭配和层次结构设计，通过多样化的植物配置，合理搭配草本、灌木和乔木不仅增强了植被的抗逆性，还能构建更稳定的生态系统，提高边坡的生态韧性，不同植物的根系深度和生长周期互补，有助于实现对边坡不同深度土壤的加固和保护，此外在种植过程中应根据具体环境条件调整播种密度和时间，促进植物的快速成活和健康生长，通过科学合理的植被种类优化不仅提升了边坡防护的生态效益，也增强了整体防护系统的稳定性和美观性，实现山区公路生态边坡的绿色可持续发展。

4.3 排水系统改进

在山区公路生态边坡防护系统设计优化中，排水系统改进是确保边坡稳定和防止水害的重要环节，山区降雨集中且强度大，地表和地下水的排泄不畅容易导致边坡土体饱和、抗剪强度下降，进而引发滑坡和崩塌，改进排水系统首先应科学规划地表排水和地下排水两大部分，地表排水设计应设置合理的排水沟渠、截水墙等设施，及时将雨水引导至安全区域，防止水流直接冲刷边坡表层土壤，同时通过合理布置排水管道和集水井保障地下水能够顺畅排出，降低土体孔隙水压力，完善的排水系统不仅减轻了水的侵蚀和渗透压，还能有效保护植被根系，促进生态恢复。

排水系统的改进还需结合现代技术和生态理念，提升系统的智能化和环保性，采用透水性好的生态排水材料既能保证排水畅通，又有助于雨水下渗和补充地下水，减缓径流速度，减少洪涝风险，同时山区公路生态边坡防护系统设计可结合智能监测设备实时监测水位和排水情况，及时发现堵塞或渗漏问题，保障排水系统的长期稳定运行，此外在设计

过程中应充分考虑雨季和干旱季节的水文变化，合理设置调节设施，确保系统在不同气候条件下均能有效发挥作用，通过科学优化排水系统既保障了边坡的结构安全，也促进了生态环境的可持续发展。

4.4 土工材料创新

山区公路生态边坡防护系统设计优化中，土工材料创新是提升边坡稳定性和生态功能的重要手段，传统土工材料如混凝土、钢筋等刚性材料虽然具有较强的力学性能，但往往对生态环境造成较大破坏，随着环保理念的发展，新型绿色土工材料逐渐应用于边坡防护设计中，例如生物降解型土工格栅、生物基复合材料和植物纤维土工布等材料不仅具备良好的机械强度，还能够促进植物根系的生长和土壤微生物的活性，从而实现工程稳定性与生态修复的双重目标，创新材料的使用能够改善土壤结构，增强土体抗剪强度，同时减少对环境的负面影响，推动边坡防护向绿色、可持续方向发展。

土工材料的创新还体现在材料功能的多样化和适应性上，针对不同的边坡环境和地质条件，研发具备防水、防腐蚀和自修复功能的复合材料，提高材料在复杂环境下的耐久性和使用寿命，同时山区公路生态边坡防护系统设计可以结合现代材料科学技术，以实现边坡防护结构的智能响应和实时监测，提升系统整体性能，此外创新的土工材料还应注重成本效益，推动本地资源的合理利用，降低施工和维护成本，通过不断引入和优化新型土工材料能够有效提升山区公路生态边坡防护系统的稳定性，实现工程效益与生态效益的有机统一。

5 结语

山区公路生态边坡防护系统设计必须坚持稳定、安全与生态保护相结合的原则，通过科学合理的设计和优化措施实现边坡的长期稳定和生态环境的可持续发展，只有注重因地制宜、综合治理和创新应用才能有效应对复杂多变的山区地质条件，保障公路安全运营的同时促进生态文明建设，推动山区公路建设迈向绿色发展新阶段。

参考文献

- [1] 杨逊.山区公路高边坡开挖与防护设计研究[J].交通科技与管理, 2024.
- [2] 唐高华,程良,陈欣然,等.山区高速公路路堑高边坡落石计算与临时防护设计研究[C]//土木工程建造行业科技论坛(2024)暨第十五届中建八局科技论坛论文集.2024.
- [3] 蒙礼超.山区高速公路路基边坡防护方案比选分析[J].西部交通科技, 2023(2):58-60.

Basic characteristics and slope stability analysis of high fill embankment

Wenjun Lin¹ Zhiming Wang²

1. Xiangtan County Transportation Bureau, Xiangtan, Hunan, 411200, China
2. CCCC Third Navigation Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

Abstract

To evaluate the safety of high-fill embankments under various conditions, a stability analysis was conducted on the slope section of a highway project. The study first examined the fundamental characteristics of the embankment and simulated its stability using FLAC3D software under four operational scenarios. Results indicated that under initial design conditions, the embankment maintained overall structural integrity meeting safety standards, effectively resisting loads from daily traffic and environmental factors. However, in this terrain, the slope platform provided limited stabilization benefits. When simulating rainwater infiltration leading to fill saturation, the embankment's stability significantly deteriorated with markedly increased slope sliding risks. To ensure long-term safety and reduce risks, three remediation measures are recommended: embankment reinforcement, optimization of drainage systems, and traffic management implementation. This research provides a robust basis for the maintenance and reinforcement of high-fill embankments.

Keywords

road engineering; high fill embankment; basic characteristics; stability analysis

高填方路堤的基本特征及边坡稳定性分析

林文俊¹ 王志明²

1. 湘潭县交通运输局, 中国·湖南湘潭 411200
2. 中交第三航务工程局有限公司, 中国·上海 200000

摘要

为了评估高填方路堤在不同条件下的安全性, 针对某公路项目斜坡段的高填方路堤进行了稳定性分析。首先探讨了路堤的基本特征, 并运用FLAC3D软件模拟了其在四种工况下的稳定性。结果表明, 在初始设计状态下, 路堤整体结构稳固, 满足安全标准, 能够有效抵御日常交通和环境条件带来的负荷。但在该地形条件下, 边坡平台对稳定性提升的作用有限。在模拟雨水渗透导致填料饱和的情况下, 路堤的稳定性显著下降, 边坡滑移风险显著增加。为保障路堤的长期安全, 为降低风险, 建议从加固路堤、优化防排水系统、实施交通管理三方面采取处治措施。研究为高填方路堤的维护和加固提供了有力的依据。

关键词

道路工程; 高填方路堤; 基本特征; 稳定性分析

1 引言

高填方路堤具有填筑高度大、沉降周期长、稳定性差等特点。这些特性使其在施工及后续的运营阶段极易发生边坡失稳、垮塌等一系列工程问题, 严重威胁到市政道路的整体安全性和耐久性^[1-5]。边坡失稳不仅会影响道路的结构完整性, 还可能对周边环境和人员安全造成隐患, 因此, 在公共交通道路建设的历程中, 保障高填方路堤的稳定性始终占据着核心地位^[6-8]。本文基于某城市公路工程项目中的高填方路堤案例, 系统研究了高填方路堤的稳定性问题。通过对

工程数据的分析和施工过程的跟踪, 识别出影响其稳定性的关键因素, 并针对发现的问题提出针对性的解决方案。该研究不仅为类似市政道路工程提供了实践指导, 也为高填方路堤的安全设计和后续管理提供了理论依据和技术支持。

2 工程概况

2.1 路况

项目某区段紧邻一条交通繁忙的低级别公路, 对道路的安全性和行车舒适性提出了更高要求。线路走向大致为南北方向, 所在区域地形复杂多变, 崎岖不平, 高低落差明显, 地形起伏较大, 且沿线分布着多个急弯和陡坡。山坡属于陡峭坡地, 坡面上存在大量冲沟, 这些冲沟在长期水流冲刷和自然侵蚀作用下逐渐加深、加宽地表植被覆盖较为广泛, 以

【作者简介】林文俊 (1981-), 男, 中国湖南湘潭人, 本科, 工程师, 从事公路工程施工技术研究和管理研究。

杂草、乔木为主，其中包括一些耐旱性强、适应性高的灌木和树种。

2.2 工程地质

该路段地层分布为如表1所示。

表1 地层分布情况

地层位置	地层类型	岩石特征描述	厚度范围	颜色	岩石类型	硬度 / 承载力类别
山体中部	华力西期花岗岩 (γ42)	全风化层质地松软，轻微触碰即破碎；强风化层：结构破碎，硬度略增但易碎	全风化层：2.0 ~ 5.0m 强风化层：3.0 ~ 8.0m	全风化层为红褐色；强风化层为浅红色	全风化层：Ⅲ类硬土 强风化层：Ⅳ类软岩	全风化层：Ⅲ类硬土 强风化层：Ⅳ类软岩
山体中部表层	第四系残积层 (Q4dl)	主要由中、粗粒花岗石构成，含水量较高	0.2 ~ 3.0m	灰褐色	Ⅲ类硬土	Ⅲ类硬土
河谷地表及过渡地带	第四系冲积层 (Q4al+dl)	含水量大，密度适中	不定	浅灰色	Ⅱ类土	σ₀=120kPa

该区域水系不丰富，地表径流较少，且地下水埋藏深度较深，普遍超过5.0米，基本不会对路堤施工过程产生直接影响。因此，施工中无需考虑地下水的排水处理问题，减少了相应的施工成本和工序复杂度。道路西侧紧邻河谷区域，相比之下水系较为丰富，但该河谷区域的大部分土地已被开垦为农田，水流流速较慢，未形成明显的水流侵蚀现象，对路堤施工同样未构成威胁或干扰。

2.3 路堤概况

该路段路堤的构筑过程主要依赖于削坡收脚技术和阶梯式布局，旨在通过优化边坡结构来增强自然边坡的稳定性。削坡收脚技术通过对坡脚部分的切削和调整，逐步降低边坡坡度，减少坡面受到的垂直荷载，使得填土的重量可以更均匀地分布到坡面上，降低边坡整体的滑移风险。

在施工过程中，采取了逐步收缩坡脚区域的策略，以便有效分散填土所带来的荷载压力。这一措施不仅减小了坡脚的应力集中，还为填土提供了稳固的基础。与此同时，在边坡表面布置阶梯，使得坡面结构分级，形成台阶状。阶梯式布局能够增加坡面的粗糙度和抗滑阻力，有助于防止土体滑移。同时，每一层台阶能够起到拦截和缓冲雨水径流的作用，减少水流直接对坡面的冲刷侵蚀，进一步提升边坡的整体稳定性。通过削坡收脚和阶梯式布置相结合，该路段路堤在施工过程中得到了有效的稳定性保障。

3 工程基本特征

该工程因排水系统的建设进度延迟，未能及时投入使用，导致路堤在随后降雨侵袭中遭遇严重的雨水渗透问题。大量雨水不断渗透到路堤填料内部，填料的含水量大幅上升，进而显著增加其容重，导致材料的抗剪强度逐渐减弱。由于填料密度和湿度的变化，填方的稳定性受到削弱，难以有效抵抗外部压力。

3.1 变形监测

该路段高填方路堤变形情况主要体现在边坡变形、坡面防护损坏、路堤沉降三个方面。在左侧区域，排水沟与坡脚部位出现明显开裂，裂缝周围伴有大量细小裂纹，显示出土体的不稳定性。部分位置的坡面防护设施受到破坏，混凝

土拱形骨架部分垮塌，无法继续提供支撑。与此同时，截水沟也受到了影响，部分区域产生了1.0~1.5厘米宽的裂缝。在路堤的局部区域，尤其是中间区域，出现了显著的沉降现象。中部沉降量最大，而两侧的沉降相对较小。这种不均匀沉降进一步加剧了边坡的变形风险。以上变形情况表明，该路段高填方路堤的边坡稳定性和结构完整性受到严重威胁，需要及时采取加固和修复措施。

3.2 工程质量分析

3.2.1 钻芯取样分析

通过取样分析，对路堤填料的力学性能、密实度及填层厚度等关键指标进行了全面检测。检测结果表明，填料的抗压强度和剪切强度均达到并符合相关规范及设计标准要求。且各层填料厚度一致性较好，无明显不均匀情况。但填料在填筑过程中含水量较高，接近饱和状态。

3.2.2 探地雷达分析

探地雷达（Ground Penetrating Radar, GPR）能够穿透不同地质材料并反射回信号，通过分析这些反射波形，可以获得地下目标物体的深度、形状及位置等信息，该工程测点布置方式如图1所示，以确保覆盖整个路堤结构的关键区域。检测结果显示，检测过程中未发现内部存在空洞或其他显著的质量缺陷，检测结果与钻芯取样分析一致。雷达测点布置图详见图1所示

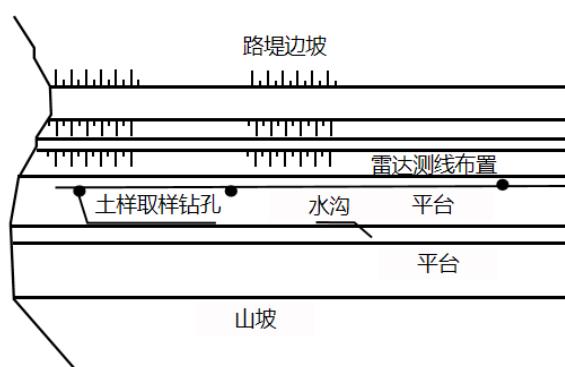


图1 雷达测点布置图

4 工程稳定性分析

为了全面评估路堤在不同工况条件下的稳定性表现，本文利用 FLAC3D 软件构建了一个长度 100 米、高度 40 米

的数值模型。模型的尺寸和结构特征均根据实际路堤情况进行设置，以确保模拟结果的准确性和代表性。计算模型如图 2 所示。相关的材料参数如表 2 所示。

表 2 模型参数

地层及填料	天然重度 γ / (kN · m ⁻³)	饱和重度 γ / (kN · m ⁻³)	泊松比 μ	天然状态		饱和状态	
				黏聚力 c/kPa	内摩擦角 ϕ (/°)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 ϕ (/°)
填土层	19.30	20.40	0.32	21.0	12	16.0	9.0
粉质土	20.40	21.10	0.34	14.0	20	11.0	16
细角砾	22.40	23.40	0.34	2.0	24	1.50	19
花岗岩（全风化）	19.40	21.80	0.31	23.0	21	17.0	17
花岗岩（强风化）	24.40	25.70	0.34	650.0	44	41.0	36
基床表填料层	19.50	20.30	0.34	30.0	9	23.0	7
基床底填料层	19.30	20.10	0.32	21.0	12	16.0	9
基床底层填料	19.50	20.30	0.34	30.0	9	23.0	7

在模型边界条件的设定中，顶部和临坡侧面均设置为自由边界，以模拟自然边坡的受力情况。靠山一侧的侧面施加侧向位移约束，防止模型在计算过程中产生非物理性侧移；模型底部则设置为竖向位移约束，以模拟实际地基条件下的稳定性。

全，满足长期使用的可靠性需求。进一步分析显示，临山侧增设的边坡平台对路堤的整体安全性影响不显著，说明在该地形条件下，边坡平台对稳定性提升的作用有限。然而，当路堤填料在饱和状态下，安全系数降至 0.87，低于规范所要求的最低安全标准，边坡的抗滑性能显著减弱。

5 应对策略

针对该高填方路堤的滑坡风险，从加固路堤、优化防排水系统、实施交通管理三方面提出处治措施。

(1) 对现有路堤进行加固处理，如增加支撑结构、提升填料的密实度或引入加强筋等，以增强其整体稳定性，确保其在长期使用过程中保持安全可靠^[9]。

(2) 合理布局防排水设施，确保路堤顶部的雨水能够顺利通过临山侧的排水设施排出，减少雨水对路堤的冲刷和侵蚀^[10]。建议定期检查和维护排水设施，防止堵塞或损坏，以保证系统在高降雨条件下的排水效率。

(3) 治理期间，限制车辆通行，以减轻施工期间的边坡负荷。待治理完成并经质量评估合格后，再逐步恢复通车。

6 结论

本文以实际工程为例，首先定性分析了该工程的实际状况，并运用 FLAC3D 软件，模拟计算了在始设计状态下设有边坡平台，饱和状态下设有边坡平台，初始设计状态下未设边坡平台，以及饱和状态下未设边坡平台四种工况条件下的稳定性表现，结论如下：

(1) 通过实地勘查发现，路堤边坡发生了显著的结构性变形，出现了坡面防护结构的损坏和局部区域的沉降，可能导致进一步的结构变形甚至滑移风险。

(2) 为了评估填料的质量，采用了钻芯取样和探地雷达分析手段，检测了填料的力学性能、密实度和层厚度等关键指标，检测结果表明整体稳定性良好，内部无明显质量问题。

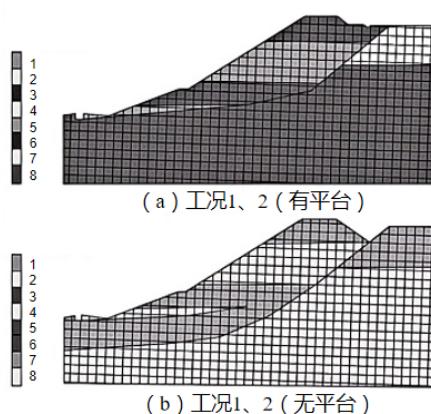


图 2 不同工况数值计算模型

为了评估不同条件下高填方路堤边坡的稳定性，根据工程实际情况，对以下四种工况进行了模拟分析：初始设计状态下设有边坡平台，饱和状态下设有边坡平台，初始设计状态下未设边坡平台，以及饱和状态下未设边坡平台。不同工况下堤边坡安全系数如表 3 所示。

表 3 安全系数计算

计算工况	安全系数
工况 01	1.25
工况 02	0.87
工况 03	1.24
工况 04	0.87

由表 3 可知，初始设计的路堤安全系数达到 1.15 以上，其整体稳固性较高，边坡结构在正常自然条件下能够保持安

(3) 利用FLAC3D软件在不同工况下对边坡进行了模拟分析,结果表明,路堤在初始设计条件下整体结构稳固,满足安全标准,然而,在模拟雨水渗透导致填料饱和的情况下,路堤的稳定性显著下降。

(4) 针对上述发现的问题,建议增加支撑结构、提升填料的密实度或引入加强筋等,并定期检查和维护排水设施,防止堵塞或损坏,减少交通荷载的影响,保障施工过程中的安全性,以增强路堤的整体稳定性。

参考文献

- [1] 宋晓.填方路堤滑坡病害分析与处治[J].福建建材,2023(5):66-68.
- [2] 王江荣,梁永平,任泰明,等.暴雨工况下的已加固黄土高填方路基边坡稳定性评价[J].水利规划与设计,2020(12):108-113.
- [3] 瞿竹,姬同旭,刘双墉.降雨入渗条件下斜坡高填方路基稳定性分析[J].路基工程,2020(1):81-84.
- [4] 黄亚飞,盖卫鹏,赵丽娟.山区土石混合高路堤快速填筑与沉降抑制技术[C]//2022年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册).《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司,2022:4.
- [5] 谭恒程,邱林,谢红平,等.高填方路堤常见病害成因及防治方法分析[J].四川水泥,2021(4):331-332.
- [6] 纪伟杰,张西.公路高边坡稳定性分析与加固措施研究[J].城市道桥与防洪,2020(1):24-26+8-9.
- [7] 贺林林,周莉,梁越.库水位骤降与桩基作用对高填方岸坡稳定性影响研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):959-966.
- [8] 侯超.高填方路堤稳定性与沉降监测分析[J].山西交通科技,2023(4):24-26+95.
- [9] 杜英亮.软基高填方路堤稳定性影响因素分析及对策[J].四川水泥,2022(10):215-217.
- [10] 雷云,李闯.山区市政道路高填方路堤设计分析探讨[J].公路,2021,66(8):95-98.

Technical analysis of road asphalt pavement crack maintenance

Jingtao Huang

Jinhua Xinchang Highway Maintenance Engineering Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang, 321000, China

Abstract

With the rapid development of socio-economy and improvement in living standards, road engineering plays a vital role. The construction quality of road projects directly impacts travel experience and spatial interaction efficiency of economic factors. Asphalt pavement, renowned for its high smoothness, driving comfort, and easy maintenance, has been widely adopted in China's road engineering. However, prolonged heavy loads inevitably cause various road defects in asphalt pavements, reducing their service life and potentially leading to traffic accidents. Particularly, crack issues are common during the construction and operation of asphalt roads. This paper provides an effective discussion on maintenance technologies through detailed analysis of crack patterns and causes in asphalt pavement construction, aiming to offer valuable references for improving maintenance quality.

Keywords

road engineering; asphalt pavement; cracks; maintenance technologies

道路沥青路面裂缝养护技术分析

黄景涛

金华市鑫畅公路养护工程有限公司，中国·浙江金华 321000

摘要

社会经济的快速发展以及人们生活水平的提升，道路交通工程发挥着至关重要的作用，道路工程的建设质量直接影响着人们的出行体验以及经济要素的空间交互效率。沥青路面具备平整度高、行车舒适、维护简单等优势，在我国的道路工程中广泛应用。而长期的高负荷下沥青路面也无可避免地会产生一系列道路病害，降低沥青道路的使用寿命，严重时还会引发交通事故。尤其是裂缝问题在道路沥青路面建设与运行过程中较为常见。文章结合对道路沥青路面裂缝形式及成因的详细分析，对相关养护技术的应用进行了有效探讨，希望能够为提高道路沥青路面养护质量提供有益参考。

关键词

道路工程；沥青路面；裂缝；养护技术

1 引言

当前的道路工程建设中沥青路面施工较为普遍，并表现出施工便捷、路面平整、行驶噪声小等应用优势。然而在实际施工过程中，受到施工管理、材料应用、温度控制、摊铺技术应用等因素的影响，沥青路面的施工质量与施工设计存在一定距离，尤其是裂缝问题更是严重制约着沥青路面的使用寿命。随着社会经济发展、人民生活出行等对于道路交通的需求不断提升，也对沥青路面质量提出了更高要求^[1]。因此，必须重视加强对道路沥青路面裂缝问题的高度重视，采取有效的养护措施，尽可能地降低裂缝问题的发生概率，避免影响交通出行，确保行车安全。

2 道路沥青路面裂缝的表现形式

由于施工材料、施工技术、施工管理等因素的影响，

沥青路面在经过长时间的使用之后，往往会出现各种各样的裂缝问题。导致沥青路面裂缝问题的原因较为复杂，裂缝的形式也是多种多样，裂缝养护技术的应用必须结合对具体裂缝成因的分析，准确把握裂缝的表现形式，才能取得良好的养护成效。一般来说，沥青路面裂缝主要包括反射性裂缝、脆性裂缝、温缩性裂缝、疲劳性裂缝这四种类型。不同类型的裂缝情况对于道路产生的危害也各不相同，这就要求在实际的养护工作中需结合对裂缝具体成因的考虑，选择合适的养护技术。除此之外，一旦道路沥青路面出现裂缝，还会进一步引发坑槽、沉陷等各种道路病害。因此，裂缝养护措施必须做到及时、有效，最大限度地遏制裂缝问题的发展，确保道路路面的长期、正常、安全使用。

3 道路沥青路面裂缝问题成因

3.1 土基与基层方面的原因

深入分析沥青路面裂缝问题成因，准确把握裂缝因素，才能制定出针对性的养护措施，避免裂缝问题的反复发生、反复养护，增加道路工程的运维成本，也会对正常的交通秩

【作者简介】黄景涛（1991—），男，中国浙江金华人，本科，工程师，从事公路工程研究。

序产生不良影响。土基和基层方面的原因是较为常见的裂缝问题诱因。土基与基层受到原来道路路基结构的影响，并且路基承担着道路结构及其上部荷载的所有压力，必须确保路基强度与稳定性满足交通荷载要求。若是在道路工程的前期施工中出现路基质量不达标问题，则道路沥青路面的使用必然会受到影响，引发裂缝问题^[2]。在实际施工中，施工深度不足、软弱土基处理不当、填筑不够密实、填料的使用存在较大差异等，都是道路土基较为常见的质量问题，也是后续沥青路面出现不均匀沉降，路面结构失衡，形成开裂裂缝的重要原因。就当前我国大部分道路结构情况而言是以半刚性基层类型为主，对应的裂缝问题主要为干燥收缩裂缝。路面基层混合料中的水分随着使用年限的增加而逐渐减少，逐渐累积形成干缩裂缝。路面基层干缩变形的原因较为复杂，除了内部水分的丧失之外，水泥、石料等使用过多，施工温度把控不当等，也会对路面基层结构产生影响。

3.2 面层与层间结合方面的原因

道路沥青路面的面层会受到沥青集料规格、质量级配等的影响，若是原材料的使用把控不当，也极易出现裂缝问题。加上温度变化会对沥青材料的使用质量产生较大影响，若是温度过低则极易出现沥青路面开裂现象。而若是沥青加热温度过高或者加热时间过长，则会造成沥青材料老化、摊铺温度不足等问题，降低沥青材料之间的粘结效果，进而在后续的使用过程中出现开裂现象。同时，由于道路路基承担着面层与层间的全部负荷，一旦基层遭到破坏则会对各个面层间的连接效果产生不良影响，如下基层表面产生浮土、基层间出现粘结不均等，这些都会引发裂缝问题。特别是基层与面层之间连接效果不良的位置，裂缝问题尤为明显。

3.3 结构组合和温度变化方面的原因

道路沥青路面会受到车辆、行人等各种荷载的长期影响，沥青路面的损耗持续增加。这也是道路沥青路面采用分层铺筑施工的重要原因。为充分满足路面承载要求，沥青路面的结构组合往往需要结合使用情况、结构受力、土基支撑等因素，合理增加组合力度，实现沥青路面荷载的由上而下的实现结构受力递减的目标。沥青路面结构组合能够结合功能互补需求进行多元化组合，组合的方式也会对沥青路面产生较大影响，比如若是结构组合缺乏合理性，则会削弱沥青路面的整体强度，影响后续的运行安全^[3]。除此之外，在温度出现较大变化的情况下，沥青路面内部不同结构产生内部应力，一旦内部应力聚集超出沥青路面的约束力，将会出现结构面层开裂的问题。在后续的养护过程中也需要结合基层、面层等不同区域温度变化情况及其产生的影响，选择合适的养护措施。

4 道路沥青路面裂缝养护技术应用

4.1 沥青再生技术

道路沥青路面的养护需结合具体裂缝类型选择针对性

的养护技术，才能实现养护效果最大化，取得节约成本、确保交通顺畅、提高道路使用寿命等多重效益。沥青再生技术在道路沥青路面裂缝养护中的应用主要是通过将一定量的再生剂、新沥青添加进混合料当中，进一步恢复原来沥青的物理、化学性质，进而实现对路面性能的有效改变、强化。该技术在道路沥青路面裂缝养护中应用重点在于结合路面与裂缝实际对新沥青、再生剂二者添加比例科学调配。比如沥青路面老化轻且裂缝少时可适当降低再升剂添加量，而当面对老化重且裂缝多路面则增加再升剂添加量。沥青再生技术的应用在沥青路面的抗氧化、抗拉效果方面的优势较为明显。尤其是沥青路面在使用过程中不可避免会产生损耗、氧化问题，出现疲劳裂缝。提高沥青路面的抗氧化性能则能够从根本上降低疲劳裂缝产生的概率，提高沥青路面的使用寿命。

4.2 微表处养护技术

在道路沥青路面裂缝养护过程中，微表处养护技术的应用也是较为广泛且重要，特别是在高等级公路的养护中有着较高的技术应用价值。微表处养护技术在沥青路面裂缝养护中有着重要的应用，主要是利用了聚合物的改性特征，实现对沥青及其内部矿物填料的充分乳化，同时通过合理添加矿物填料、乳化剂等物质，实现沥青路面整体性能的有效提升。同时该技术在道路沥青路面裂缝养护中应用能够通过对混合料配方灵活调配，使其可以满足多种复杂的裂缝状况和路面性能要求。微表处养护技术的应用需要借助对专业施工设备的使用进行摊铺，能够得到更为平整的、耐磨的、防水的裂缝养护效果^[4]。这一技术的广泛应用，效果较为显著，能够明显提高沥青路面的顺畅度，并且对于沥青路面裂缝损伤能够实现高效率的区域摊铺施工，得到较好的整体修复效果，养护成效显著。

4.3 热沥青灌缝撒料养护技术

热沥青灌缝撒料养护技术在沥青路面表层裂缝的修补方面有着较好的应用效果，并且操作较为简单，只需通过对沥青热炉与喷涂装置的操作即可完善对裂缝问题的修补、养护，不仅不会对道路的正常通行产生较大影响，而且能够以较小的施工空间、较短的施工时间、较快的施工速度完成裂缝问题的修复，快速恢复沥青路面的通车性能。在具体的施工中，先结合沥青路面裂缝状况及现场气候选择适宜的沥青材料，从而获取良好的粘结性和耐久性。随后需要做好对养护区域的全面清理，将裂缝中的杂物全部清理干净，以免对养护效果产生不利影响。同步开展沥青加热熔化工作，该过程重点在于充分依据技术方案要求严控温度，防止高温造成沥青出现老化。完成清缝之后需要加热熔化沥青，然后将配置好的沥青倒入裂缝当中，按照作业标准将细节料铺洒在裂缝处充分填充以确保补缝牢固性，随后进行摊平保证沥青与细节料紧密结合以形成平整、密实的修补面，最后查验合格且沥青充分冷却，方可恢复通行。

4.4 开槽灌缝养护技术

在道路沥青路面裂缝养护过程中，开槽灌缝养护技术较为常用，借助对专业设备在裂缝区域按照指定规格进行修复槽的集中挖掘，其中修复槽的宽度与深度都需严格按照预设标准要求进行把控。完成挖槽后，将融化好的裂缝修补胶导入槽中进行裂缝修补，待凝固后实现对沥青路面的有效修复。开槽灌缝养护技术的应用效果较好，有助于提高沥青路面的使用寿命，但仅能用于对表层裂缝的修补养护，若是裂缝的深度扩大，则需对养护技术进行合理调整。同时，在实际应用中需要对施工材料、环境等因素把控予以高度重视，做好全面的调查、监督，以免对养护效果造成不良影响。比如，槽截面深度需要控制在2cm以内，实施标准化挖掘。若是养护过程中的外界温度较低，则需采用专业设备做好对开槽位置的充分预热，确保修补胶能够和原路面实现紧密结合。完成施工之后还需对密封胶的冷却情况进行仔细观察，确保维修养护强度达标之后才能恢复通行。

4.5 贴缝灌缝养护技术

在道路沥青路面裂缝养护过程中，贴缝灌缝养护技术的应用流程主要如下：首先是进行放样处理。基于对沥青路面裂缝宽度、深度、走向等情况的全面勘察，严格落实工作，同时详细标注出施工区域，做好相应的清表、清理工作。其次，借助专业设备对沥青裂缝进行加热至施工要求的标准温度，随后立即进行灌溉养护。通常需要借助对灌缝机的使用将特殊材料填充到裂缝位置，使得填充材料和路面结合。最后是需要采用纤维布对沥青路面修补位置进行覆盖，然后用橡胶锤进行捶打、锤实，将内部的气泡充分排除，实现纤维布和路面之间的紧密衔接，利用纤维布的弹性与耐磨性对修补位置进行养护。完成各项操作之后等待15分钟即可恢复通行。该技术应用时须注意以下几点：一是沥青加热时做好温控，避免温度达不到要求而造成沥青与裂缝无法充分融合；二是特殊材料填充作业上除确保填充连续均匀外，应特别注意不得出现断层或是空隙；三是铺设纤维布务必做到平整无褶皱且力度均匀进行捶打，这样才能确保保证纤维布紧密贴合路面。

4.6 灌缝改性沥青养护技术

这一技术的应用主要是采用改性材料，如SBS、SBR、PE等填入裂缝区域，然后立即均匀撒布一层单一粒径的耐磨碎石，最后碾压成型。整个养护施工具备成本较低，能有效封闭路面，提高抗滑性能的优势，在沥青路面裂缝预防性养护中有着较为广泛的应用。而且使用同步碎石封层车等专业设备，将改性沥青粘结料的喷洒和碎石的撒布同步进行，使碎石能更好地嵌入沥青膜中，得到更好的粘结效果，提高裂缝修补位置的粘结性、防水性和抗滑性更出色^[5]。在沥青路面结构尚好，仅仅遭受轻微病害时，改性沥青养护技术的应用能够有效延缓路面损坏，延长使用寿命，具备较高的养护作业性价比。对于沥青路面已经出现明显的结构损坏，需要将裂缝的原有面层进行铣刨之后，再用高温改性沥青材料进行铺筑，实现消除裂缝的目的。不同的改性剂有着不同的适用场景与使用要求，需要结合养护、修复的实际情况选择合适的改性剂，才能取得较好的养护效果。

5 结语

综述可知，随着道路交通压力不断增加，对道路工程建设提出了更高要求。沥青路面作为现代道路工程的主流类型，需要重视做好裂缝养护。施工单位需要准确识别裂缝类型与成因，进而采取针对性的养护技术，实现最佳的养护效果，为延长沥青路面使用寿命，确保通行质量提供保障。

参考文献

- [1] 张屾.市政道路沥青路面裂缝养护技术分析[J]. 2024(8):199-201.
- [2] 房维倩.道路桥梁工程中沥青路面裂缝施工处理技术探思[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术, 2024(003):000.
- [3] 李彬.裂缝灌缝技术在沥青路面养护中的应用[J].人民交通, 2023(14):0084-0086.
- [4] 苏峰.沥青路面裂缝灌缝技术在公路养护中的应用[J].大众标准化, 2023(10):97-99.
- [5] 房维倩.道路桥梁工程中沥青路面裂缝施工处理技术探思[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术, 2024(003):000.

Analysis of Factors Affecting the Effectiveness of Expressway Maintenance and Improvement Strategies

Xin Bao

Huize Branch of Qujing Management Office, Yunnan Communications Investment and Construction Group Co., Ltd., Qujing, Yunnan, 654200, China

Abstract

The safety and efficiency of highway traffic are closely related to socio-economic development and people's livelihood. Therefore, it is particularly important to carry out effective maintenance work for highways. Factors such as the natural environment, traffic flow, application of maintenance technology, and management level directly impact the effectiveness of highway maintenance. This article elaborates on the purpose of highway maintenance, analyzes relevant factors affecting the effectiveness of highway maintenance based on common maintenance technology applications, and further explores effective improvement strategies, aiming to provide useful references for enhancing the quality of highway maintenance.

Keywords

highway maintenance; technology application; influencing factors improvement strategy

影响高速公路养护效果的因素与改进策略分析

包鑫

云南交通投资建设集团有限公司曲靖管理处会泽分处，中国·云南 曲靖 654200

摘要

高速公路的通车安全与通行效率与社会经济与民生发展息息相关，做好高速公路的养护工作也显得尤为重要。而自然环境、交通流量、养护技术应用及管理水平等都会对高速公路的养护效果产生直接影响。文章阐述了高速公路养护的目的，基于常见养护技术应用，分析了影响高速公路养护效果的相关因素，进而对相关改进策略进行了有效探讨，以期能够为提高高速公路养护质量提供有益参考。

关键词

高速公路养护；技术应用；影响因素；改进策略

1 引言

高速公路发挥着区域连接的桥梁作用，是区域经济发展不可或缺的保障条件。新的发展时期下，高速公路的运行也需要与时俱进进行提升，以满足日益提升的要求。而传统的高速公路养护仍然存在严重的养护管理不到位的问题，严重影响高速交通的效率与安全，以及严重缩短工程使用寿命。因此，从多角度对影响高速公路养护效果的因素进行综合的、深入地剖析，进而制定出针对性地改进策略，对于提高高速公路养护质量，优化高速公路交通系统运行而言有着十分重要的现实意义^[1]。

2 高速公路养护目的

养护是高速公路运行过程中较为重要的环节之一，并

且会对高速公路的实际应用效果产生直接影响。对高速公路进行养护最直接的目的就是防止、减少裂缝、变形、沉降等各种公路病害问题的发生。高速公路病害是交通事故频繁的重要原因，需要切实做好对高速公路的养护管理，来确保交通安全。在实际养护高速公路的过程中，需要先综合考虑当地的气候、地质这些因素，再深入现场进行仔细勘察，如此才能制定出科学合理的养护方案，切实提高高速公路的病害防治效果。另外，做好高速公路的养护管理工作，也是延长其使用寿命的重要措施。经过科学的养护管理，能够大幅降低高速公路出现大规模的病害维修、重建而产生的费用成本，延长高速公路的使用时间，提高高速公路建设与运行的社会效益与经济效益。

3 常见的高速公路养护技术类型

3.1 开槽灌缝养护

就当前中国的高速公路使用与运营情况而言，路面开裂的问题较为常见。遭遇下雨天气，雨水、积水等便会顺直

【作者简介】包鑫（1988—），男，中国云南罗平人，本科，工程师，从事高速公路养护管理研究。

裂缝渗透到高速公路的深层结构当中，破坏其内部的结构，进而导致出现路面空鼓、高低不平、沉降等问题。开槽灌浆养护方法的应用对于高速公路的裂缝防治有着较为显著的作用，减少这类病害带来的不良影响。这一方法具体操作起来也并不复杂，先使用专业的开槽设备，沿着裂缝开出合适的槽口；然后用灌缝机把加热融化后的聚合物密封材料灌进槽里；最后则是做好后续养护，等到密封材料凝固成型后封闭裂缝即可。这种方法的应用能切实保障较好的裂缝修复与养护效果，提高高速公路的使用寿命。

3.2 薄层罩面养护

薄层罩面养护，主要是借助专业的摊铺机对混合料进行摊铺施工，对高速公路中的车辙、裂缝、坑洼等病害问题进行修复处理，是提前预防路面损坏较为有效的养护办法。薄层罩面养护施工需要将罩面的厚度控制在3cm左右。同时，薄层罩面养护技术的实际应用又划分为热薄罩面和冷薄罩面这两种类型，需要结合病害实际情况注意做好区分选择与使用。热薄罩面是用热拌沥青来进行施工，修复效果更好，但缺点是成本高、施工花费的时间也更长；而冷薄罩面则是采用乳化沥青，或者使用改性乳化沥青来施工，能够获得较快的施工效率，以及具备环保性优势，在当前的高速公路养护中较为常用。

3.3 稀浆封层养护

稀浆封层也是高速公路养护施工较为常用的方法之一。这种方法的实际应用，第一步需要按照相关标准做好原材料的调配工作。实际调配时，要重点检查沥青、水泥、集料、乳化剂这些材料的质量，同时控制好各种材料的用量，保证配出来的混合料完全符合设计标准要求^[2]。施工人员应对路面情况予以充分掌握，确保技术、措施等的应用正确、合理。比如，高速公路的细小裂缝则应使用细封层技术进行修复养护；若路面的问题比较严重，则采用粗封层技术进行处理。如此才能确保高速公路较好的养护质量。

4 影响高速公路养护效果的相关因素

4.1 养护技术

现在，使用现代化的机器设备来进行高速公路养护，已经成了这个领域的主流发展方向，现代机械设备化的养护方式能明显提高高速公路的养护的效率和质量。在养护工作开始前需要选择合适的机械操作系统，同时根据公路类型、特点等制定针对性的施工方案，以确保养护施工达到预期效果。目前，中国也就高速公路养护引进了许多先进设备，但是这些设备在操作上存在一定难度，施工人员尚未能够熟练操作，导致了施工不规范等问题，限制了这些先进设备的优势作用的发挥。同时也有些单位存在养护方法老旧、机械设备利用水平较低等问题，也严重影响了高速公路养护的整体效率。此外，养护施工机械设备的使用与现代自动化技术的融合程度较低，自动化、智能化技术优势与中国的高速公路

养护结合不足，限制了养护效果的提升。

4.2 养护管理标准

高速公路的养护管理有着一定的标准要求，而养护管理标准的不统一、不完善是当前影响高速公路养护效果的一大因素。中国的高速公路养护管理具备一定的制度基础，交通管理等相关部门已针对高速公路养护制定相关规范，为实际养护工作提供指导。但就实际的养护效果而言，养护管理标准的应用仍存在突出问题。不少单位没有很好地根据养护项目实际严格执行养护规范要求，出现养护标准不统一等问题，导致养护效果差强人意。比如，在使用薄层罩面养护技术进行高速公路的坑洼问题养护过程中，部分企业在实操环节未严格按照技术应用标准把控养护质量，出现养护层厚度不达标问题——既存在厚度不足3厘米的情况，也有远超3厘米的现象。上述问题直接导致两方面不良后果：一是养护效果大打折扣，难以保障高速公路通行安全与使用寿命；二是造成养护成本无端增加，降低了养护工作的经济性与合理性。

4.3 养护操作

高速公路养护操作不规范的问题较为常见，严重影响了养护效果。一方面，养护施工前，负责的单位未全面摸清、掌握养护路段的地质、水文、天气等情况，对公路平时的运行状况和具体的病害问题，缺乏全面的考察和合理的预判，这无疑增添养护方案制定与实施难度。另一方面，完善方案的指导效益也是影响高速公路养护效果的重要因素。经验主义是许多施工单位的通病，在实际养护施工前未制定合理的养护方案，整个养护过程混乱无序^[3]。此外，面对复杂多样的高速公路的病害种类，养护施工人员在养护方法、技术等的选择方面缺乏科学选择与严格把控，导致高速公路的养护效果不佳。

4.4 管理人员素质

养护人员专业水平也是直接影响高速公路养护效果的重要因素。而养护人员专业水平与综合素质不高是当前许多养护单位头疼的问题，也严重困扰着高速公路养护工作的高质量开展。具体主要体现在以下三个方面：第一，不少养护人员本身对于高速公路养护目的、要求、原则等知之甚少，在实际作业过程中的责任意识不强；第二，高速公路养护有着较高的技术要求，而许多养护人员缺乏充足的技能培训，甚至有些未掌握基础的养护知识与操作技能；第三，高速公路养护还面临着养护人员年龄偏大、可持续发展能力不足等困境，不利于高速公路养护作业的长期发展。

5 高速公路养护效果的改进策略

5.1 加强机械设备的合理使用

高速公路的养护不可避免地涉及诸多机械设备的使用，科学的设备管理是提高养护效率与养护质量的重要保障。对此，高速公路养护工作需高度重视先进机械设备的引进应

用，通过提升养护施工的机械化作业水平，既能有效减轻养护人员的工作负荷，又能推动养护作业实现标准化、规模化开展，从而切实提高整体养护质量与成效。在做好机械设备合理配置的基础上，需同步强化操作人员专技培训，确保其能够充分熟练掌握进口设备的操作使用，以及做好设备操作规范及安全注意事项的专项培训，以此确保机械化养护的效果得到充分发挥。另外，高速公路养护作业的机械化需要进一步将信息化技术融入进去，使得设备操作变得更自动化、更智能。值得注意的是，不管是设备刚开始使用前，还是公路养护工作完成后，都需严格按照规范要求仔细检查设备的各类仪表和部件，做好数据分析与施工经验总结，持续优化高速公路养护的机械化操作，为后续更好地使用机械设备提高高速公路养护效果打下扎实的基础。

5.2 健全完善养护管理标准

针对高速公路养护工作混乱无章而导致的养护效果不佳的问题，需要制定完善的、统一的管理标准，为养护工作指明方向。一方面，标准的制定需要严格依据国家和行业相关规定，再结合具体的养护项目进行细化制定，使得养护工作符合市场要求，做到规范有序。另一方面，制定的标准也需贴合养护项目的实际情况，明确每个项目的养护指标，日常才能将高速公路养护做实、做细。除此之外，还需根据标准制定一套严格的考核制度，做好养护管理的定期检查，保障较好的高速公路养护效果。

5.3 强化养护过程管控

加强高速公路养护过程管控，是确保较好养护效果的必然要求。在养护作业前，相关人员需全面勘察公路所在区域，摸清当地的地质、水文情况，同时了解清楚施工区域的气候条件，明确养护工作的有利条件和限制因素，以此为基础制定科学的养护方案。在方案中需清晰明确养护的标准、选定适用的养护技术，明确公路病害的处理要求、预期效果等，如此方可为实际养护工作提供清晰指导。在实际养护作业时，需要结合高速公路的实际使用情况做好精准施策，尤其是要重点处理常见、高频病害。比如，在进行裂缝问题处理与养护时，平时大多采用沥青灌缝施工^[4]。这种方法在操作上较为简单，并且见效较快，在防止裂缝变大上的效果显

著，但缺点也较为明显，通常在一两年后就需重新灌缝，无法从根本上解决问题。因此，实际处理高速公路的病害问题时，不能只靠老办法，而是需要做好针对性分析。需要综合考虑高速公路的剩余寿命、修补后的运行寿命、养护成本等经济、技术相关的因素，制定最优处理方案。

5.4 提升养护人员专业素养

提高高速公路养护效果，需要重视养护人员专业能力的提升，采取有效措施提高养护工作人员在学习、实践方面的主观能动性，高速公路养护需要充足的人力保障。对此，需要重视加大高素质养护人才引进力度，采取针对性措施吸纳年轻人才，以有效改善养护队伍年龄偏大，可持续发展动力不足的问题。同时，应重视强化养护人员的专业培训组织与管理。培训不能片面重视专业技能的提升，还要同步重视提升整体职业素养，强化责任意识，确保其在实际工作中将养护措施都一一做实做细。除此之外，在日常工作中还要做好对养护人员的考核和激励，完善考核与激励机制来调动全员积极性，让高速公路养护的实际效果越来越好。

6 结语

综述可知，规范、标准、到位的高速公路养护，不但能够有效延长公路的使用年限，而且是保障车辆行驶安全、舒适的重要措施。面对新的发展时期，高速公路维护和运营相关单位、企业、人员，需要深刻认识养护工作的重要性，准确把握影响养护效果的相关因素，在技术应用、方案制定、人员培训等方面精准下药，切实提高高速公路养护的整体效果，保障交通的稳定、安全。

参考文献

- [1] 周扬,陈然.影响高速公路养护效果的因素分析与改进策略[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2023(4):4.
- [2] 闫晓山.影响高速公路养护效果的因素分析与改进策略[J].2022.
- [3] 杨杰.高速公路养护管理存在的问题及对策分析[J].交通科技与管理, 2021(33):0103-0104.
- [4] 唐尧.高速公路沥青路面养护关键技术[J].Urban Architecture & Development, 2025, 6(20).

Research on the Current Situation and Countermeasures of Solving the Parking Problem in Towns and Villages under the Background of “Ten Million Project”

Xiaohui Liu

Dongguan Polytechnic, Dongguan, Guangdong, 523000, China

Abstract

Under the strategic guidance of the “Hundred-Thousand-Million Project”, addressing parking challenges in towns and villages of Dongguan City has become a critical task for enhancing development quality and optimizing public services. This paper thoroughly analyzes the current parking situation in Dongguan’s towns and villages, revealing prominent issues such as severe shortage of parking spaces, chaotic management order, lagging planning and construction, and low intelligentization levels. It proposes systematic solutions from multiple dimensions including policy, planning, construction, management, and technology, aiming to provide practical breakthrough strategies for resolving parking dilemmas in Dongguan’s towns and villages, thereby promoting comprehensive improvement in transportation environment and overall development level.

Keywords

Hundred-Thousand-Million Project; Towns and villages of Dongguan City; Parking difficulties; Countermeasure research

“百千万工程”背景下东莞市解决镇村停车难问题的现状及对策研究

刘小慧

东莞职业技术学院，中国·广东 东莞 523000

摘要

在“百千万工程”的战略指引下，东莞市镇村停车难题的破解成为提升镇村发展质量、优化民生服务的关键任务。本文通过深入剖析东莞市镇村停车现状，揭示了停车位供给严重不足、管理秩序混乱、规划与建设滞后、智能化水平低等突出问题，并从政策、规划、建设、管理、技术等多维度提出系统性解决对策，旨在为东莞市镇村停车困境提供切实可行的破局思路，推动镇村交通环境与综合发展水平的全面提升。

关键词

百千万工程；东莞市镇村；停车难；对策研究

1 引言

“百县千镇万村高质量发展工程”（简称“百千万工程”）作为推动广东城乡区域协调发展的重大战略举措，致力于促进镇的特色化建设以及村的宜居宜业转型。2024年4月19日，东莞市“百千万工程”指挥部颁布《东莞市“百千万工程”2024年工作要点》（以下称《工作要点》）。《工作要点》

中指出要将镇村停车难”纳入“百千万工程”六大专项行动之一重点突破。随着东莞市机动车保有量的持续迅猛增长，镇村的停车供需矛盾日益突出，停车难问题不仅导致车辆乱停乱放，影响镇村的市容村貌与交通秩序，还对居民的日常出行、商业活动以及公共服务的高效开展造成了诸多阻碍。因此，深入研究并有效解决东莞市镇村停车难问题，对于落实“百千万工程”，实现镇村的高质量发展、精细化管理以及宜居环境打造具有重要的现实意义。

2 东莞市镇村停车现状分析

2.1 停车供需矛盾突出

2.1.1 机动车保有量持续增长

近年来，东莞市机动车保有量呈现出迅猛的增长态势。截至2024年底，已达到约441.46万辆，比上年末增长6.1%。

【基金项目】东莞职业技术学院校级基金课题青年课题《“百千万工程”背景下东莞市解决镇村停车难问题的现状及对策研究》（项目编号：2024d141）。

【作者简介】刘小慧（1990-），女，中国甘肃兰州人，讲师，从事交通运输规划与管理研究。

在镇村地区，随着居民生活水平的提高、镇村经济的发展以及公共交通便利性的相对不足，越来越多的家庭选择购置机动车，导致镇村机动车保有量增速尤为显著。例如在塘厦镇，截止到2023年5月，机动车保有量已达16.8万辆，体量庞大，且由于其地理位置靠近深圳，深广惠及外省通勤车辆的涌入，使得塘厦镇日均车辆预计高达20万辆以上。这种持续快速增长的机动车保有量给镇村停车资源带来了巨大的压力。

表一 近五年东莞的机动车保有量（万辆）

年份	机动车保有量（单位：万辆）	机动车增长率
2020	340.96	5.4%
2021	364.85	7%
2022	391.54	7.3%
2023	412.48	7.65%
2024	441.46	6.1%

2.1.2 停车位供给严重不足

截至2023年10月底，东莞市机动车泊位约为212.46万个，全市泊车比约为0.52，即每两辆机动车仅对应一个停车位。在镇村层面，该矛盾更为突出。塘厦镇辖区现有停车位5.2万个，车均停车位占比仅为0.26，停车位供需差距极大。根据实地调研结果，参与调研的镇村居民，对于停车难六大原因中选择“停车位数量不足”的比例最高，达到29.94%，显著高于其他选项，反映出停车位供给缺口是当前停车难问题的核心矛盾；同时，超过七成受访者因找不到停车位感到困扰，而“停车位数量不足”占29.94%，被公认为首要原因，尤其在镇村商业集中区、老城区及人口密集社区表现突出。2024年部分镇街已实施的停车位增设措施，虽使55.25%的受居民感到寻位难度降低，但居民对规划科学性与管理精细化的期待仍未完全满足。

2.2 停车管理不规范

2.2.1 乱停乱放现象普遍

东莞市镇村区域停车管理相对滞后，存在乱停乱放、长期占位等现象。部分区域如商业街区、医院周边停车矛盾尤为突出，缺乏有效的管理机制。由于停车位不足，大量车辆无奈违规停放，甚至占用消防通道、人行道等重要公共空间。在一些镇村的农贸市场周边，商户为了方便经营，将车辆随意停放在市场出入口及周边道路，导致交通堵塞，行人通行困难。在居民住宅区，车辆停放在道路两旁，原本狭窄的道路变得更加拥堵，影响居民正常出行，一旦发生紧急情况，救援车辆难以顺利通行。部分机动车驾驶人交通安全意识欠缺，随意将车辆停放在禁止停车区域或未按规定停放，进一步加剧了停车管理的难度与混乱程度。

2.2.2 围村收费问题存在弊端

据统计截至2021年8月5日，东莞市共有124个村（社区）实施“围村收费”，违规占用269.7公里的公路，部分村社区存在闸口设置及停车泊位划设不规范、不合理，收费

政策不公平现象，停车管理的监管和服务缺位等问题。多个镇街随后进行自查自纠，整改部分涉嫌违规收费的路段及设备设施。虽然经过整治，情况有所改善，但围村收费问题依然复杂。一方面，部分村（社区）在收费标准制定上缺乏科学依据，存在收费过高或收费标准不统一的情况；另一方面，在收费管理过程中，服务质量参差不齐，部分村（社区）未能将收取的费用合理用于停车设施建设与管理的改善，引发居民不满。此外，围村收费在一定程度上限制了外来车辆的通行与停放，对镇村的商业交流与经济发展产生了一定的负面影响。

2.3 资源利用不充分

在镇村建设过程中，缺乏对机动车保有量增长趋势的科学预测，未能将停车设施规划纳入镇村整体发展规划的重要范畴。镇村区域存在大量闲置土地和边角地未被有效利用。以东部产业园片区东坑镇、松山湖片区寮步镇、水乡新城片区望牛墩三镇为例，规划路外公共停车场实际建成率均低于10%。停车建设实施立体开发不足，由于立体停车设施建设成本高、技术要求复杂、审批流程繁琐等原因，镇村在建设立体停车设施方面积极性不高。部分镇村对停车设施建设的资金投入有限，缺乏多元化的投资渠道，难以满足大规模停车设施建设的资金需求。这些因素共同制约了东莞市镇村停车设施的建设进程，使得停车资源难以有效增加，停车难问题得不到根本性缓解。

2.4 停车智能化水平低

东莞市镇村停车信息化建设整体较为缓慢。大部分镇村停车场缺乏智能化管理系统，无法实时掌握停车位的使用情况、车辆进出信息等。根据调查，年轻群体（18-30岁）对共享车位和智慧停车期待度高达53.90%。在镇村停车场内，智能引导系统的缺乏也是一个突出问题。许多停车场未设置车位引导标识、电子显示屏等设备，车主进入停车场后，无法快速准确地找到空闲停车位，导致车辆在停车场内盲目行驶，增加了停车场内的交通拥堵与能源消耗。在一些大型镇村商业中心或活动场所周边，由于缺乏智能引导，车辆在周边道路上排队等待进入停车场，进一步影响了周边道路的交通秩序。智能引导的缺乏不仅降低了停车设施的使用效率，也给车主带来了极大的不便，影响了镇村的交通服务质量与居民生活体验。

3 “百千万工程”背景下东莞市解决停车难的主要措施

3.1 盘活存量资源，增加停车供给

东莞市积极响应“百千万工程”关于盘活存量资源的号召，利用更多闲置地块拓展停车空间。2025年，东莞计划新增路外停车位4万个，并结合“百千万工程”聚焦典型引领，培育不少于100个停车规范管理典型村（社区）。石碣镇持续推动镇中心片区智慧停车楼建设项目，预计建设

400余个停车位，供周边市民车辆停放。

3.2 引入智慧管理，提升停车效率

多个镇村开始引入智慧停车管理系统，通过价格杠杆引导车辆快停快走，杜绝长期占位现象。清溪镇将引入智慧停车管理系统，为车位日常维护、清洁提供资金保障。南村镇市头村对智慧停车系统进行升级改造，集成高清车牌识别等前沿技术，实现从车辆进入、停放、缴费到离村的全程智能化管理。

3.3 推动资源共享，优化停车布局

停车治理作为镇村基础设施建设与公共服务提升的重要组成部分，与“百千万工程”的目标紧密相连。东莞出台停车资源共享“新规”，要求住宅小区、医院、学校、商业街区等停车矛盾突出的区域，周边经营性公共停车场原则上应全天开放；机关、事业单位在保障内部安全和秩序的前提下，应将其全部或部分停车设施错时对外开放。这种“错时共享”模式有效提高了停车资源利用率。

4 对策及建议

4.1 加强政策引导与法规完善

4.1.1 制定专项停车政策

东莞市政府应尽快出台针对镇村停车治理的专项政策，明确镇村停车设施建设与管理的目标、任务与责任主体。在政策中，对停车设施的规划布局、建设标准、运营管理、收费政策等方面做出详细规定，为镇村停车治理提供明确的指导。设立镇村停车设施建设专项奖励资金，对积极推进停车设施建设、取得显著成效的镇村给予资金奖励，激发镇村的积极性。制定鼓励社会资本参与镇村停车设施建设与运营的优惠政策，如给予税收减免、土地优先供应、一定期限的特许经营权等，吸引更多社会资金投入到停车领域。

4.1.2 完善停车管理法规

进一步完善东莞市停车管理法规体系，明确对各类停车违法行为的处罚标准与执法程序。针对镇村停车管理中的突出问题，如乱停乱放、违规占用公共道路停车、围村收费不规范等，制定专门的法规条款进行约束。加强对镇村停车管理执法人员的培训，提高执法水平，确保执法的公正性与规范性。建立健全停车管理投诉举报机制，鼓励居民对违法停车行为、违规收费行为等进行举报，相关部门应及时受理并进行查处，维护良好的停车秩序与居民的合法权益。

4.2 结合镇村发展科学规划停车设施布局

在制定镇村停车设施规划时，要紧密结合镇村的整体发展规划。充分考虑镇村的产业布局、人口分布、交通流量等因素，对停车需求进行科学预测。在商业集中区、工业园区、学校、医院、文化活动中心等停车需求大的区域，优先规划建设停车场。根据镇村的地形地貌与土地利用现状，合理确定停车场的位置与规模。在老旧村落改造、新区建设中，将停车设施作为重要配套设施进行同步规划、同步建设。例如，在镇村商业区规划中，可结合商业综合体建设地下停车场，在学校周边规划建设临时停车场，满足接送学生车辆的停车需求。

4.3 优化不同区域停车配置

根据镇村不同区域的功能特点与停车需求差异，优化停车配置。在镇村中心区域，由于商业活动频繁、人流量大，停车需求集中且紧张，应加大停车设施建设力度，提高停车供给比例。可建设大型立体停车场、多层次停车场等，增加停车位数量。在住宅区，根据居民户数与车辆拥有量，合理配建停车位，鼓励建设地下停车位与地面停车位相结合的停车设施。对于一些人口密度较低、停车需求相对较小的偏远镇村区域，可适当降低停车设施建设标准，但也要确保基本的停车需求得到满足。同时，加强不同区域之间停车设施的互联互通，通过智能停车管理系统，实现停车资源的共享与调配。

5 结论

在“百千万工程”背景下，东莞市通过盘活存量资源、引入智慧管理、推动资源共享等措施，在解决镇村停车难题上取得了一定成效。但面对持续增长的停车需求，仍需进一步加强政策引导与法规完善、结合镇村发展规划科学规划停车设施布局、优化不同区域停车配置，形成长效机制。未来可借鉴其他地区先进经验，结合东莞实际，探索更具特色的镇村停车解决方案，为“百千万工程”的深入推进提供有力支撑。

参考文献

- [1] 李岩.公共管理视角下核心城区停车难问题分析与治理讨论[J].人民公交, 2025(6).
- [2] 公共管理.河北省N县H镇事权承接困境及优化路径[D]. 2024.
- [3] 龚宇.城市停车管理制度现存问题与完善路径[J].辽宁警察学院学报, 2024(6).

Research and analysis on port logistics development in Ningbo

Lei Yang Jianghua Wang

Hubei Automobile Industry College, Shiyan, Hubei, 442002, China

Abstract

This paper analyzes the current development status of Ningbo Port's logistics sector, including policy support and changes in logistics scale. It highlights that while the port has seen sustained growth in throughput and freight volume in recent years, challenges remain such as over-reliance on traditional operations, inadequate smart infrastructure, insufficient momentum for green transformation, and lagging regional coordination mechanisms. To address these issues, the paper proposes recommendations including advancing functional transformation, strengthening smart infrastructure, systematically promoting green transition, and optimizing regional coordination mechanisms. These measures aim to drive the development of Ningbo Port's logistics toward comprehensive, intelligent, green, and integrated directions, thereby enhancing its global competitiveness and sustainable development capabilities.

Keywords

Ningbo port logistics; intelligent transformation; green logistics; regional coordination

宁波港口物流发展研究分析

杨磊 王江华

湖北汽车工业学院，中国·湖北 十堰 442002

摘要

本文分析了宁波港口物流的发展现状，包括政策扶持情况、物流规模变化，并指出宁波港口物流近年来在吞吐量和货运量上持续增长，但存在港口功能偏重传统作业、智慧化基础设施薄弱、绿色转型动力不足及区域协同机制滞后等问题。针对这些问题，本文提出了推进港口职能转型、夯实智慧化基础设施、系统推进绿色转型及优化区域协同机制等建议，旨在推动宁波港口物流向综合化、智慧化、绿色化和一体化方向发展，提升其全球竞争力和可持续发展能力。

关键词

宁波港口物流；智慧化转型；绿色物流；区域协同

1 引言

宁波港作为中国重要的沿海港口之一，近年来在国家及地方政策的大力支持下，物流发展取得了显著成效。随着“一带一路”倡议的深入实施和长三角一体化发展战略的推进，宁波港的国际物流地位不断提升，货物吞吐量和货运量持续增长。然而，面对国际港航竞争环境和区域港口竞合发展态势，宁波港口物流在功能拓展、智慧化建设、绿色转型及区域协同等方面仍存在诸多挑战。本文旨在通过分析宁波港口物流的发展现状，揭示其存在的问题，并提出针对性的发展建议，以期为宁波港口物流的可持续发展提供参考。

2 宁波港口物流发展现状

近年来，国家及地方陆续出台的一系列政策措施，为

宁波港口物流的高质量发展提供了制度保障与方向引导。2013 年入选国家“一带一路”重点港口建设的宁波港口，无论是在促进宁波港发挥国际枢纽港作用的定位上还是在“一带一路”建设国家战略指引下更大力度地构建全球供应链体系吸引国际货源集纳基础上的外贸资源集聚方面，都显著促进了宁波港港口吞吐能力提升和外向型物流服务功能的完善。

2015—2017 年政府还引入了国家多式联运示范工程、通关制度改革试点和港口基础设施补助等具体的项目措施来推动物流通道结构升级及港口功能升级。

在“十四五”期间对港口业发展有更大引导作用的政策措施更加突出技术进步和绿色升级，如 2021 年加速智慧港口建设步伐，宁波港加快推进自动化码头建设、5G 和区块链技术应用，着力实现信息可视、作业智能；岸电建设及清洁燃料推进作为 2022 年政策发力点也是对港口综合环境效益的重视。此外，《长三角区域一体化发展规划》落地至今，宁波港与区域内港口间的协同发展机制持续完善、区域

【作者简介】杨磊（1998—），男，中国江苏南通人，在读硕士，从事物流与供应链管理研究。

物流一体化进程不断加快，为打造全方位、立体性、便捷度、安全系数以及环保性能优异的综合枢纽提供了可能。

宁波港口物流的规模情况

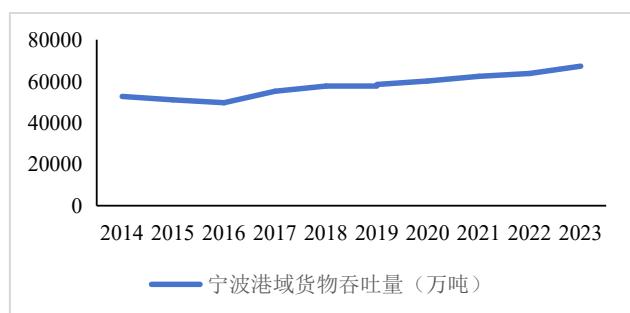


图 1-1 宁波港域货物吞吐量

由图 1-1 可以看出，近年来，宁波港域货物吞吐量总体呈现缓慢上涨趋势。据统计，2014 年宁波港域吞吐量为 52646 万吨，截止 2023 年，宁波港域货物吞吐量已经提升至 67238 万吨，增长幅度显著，虽然在 2015 年和 2016 年稍微出现下跌，但是并没有打乱总体缓慢上涨的趋势，可以发现宁波港口在经历了一段小的调整和变化之后，其结构优化、功能拓展之下，缓缓进入了一个平稳的上涨期。

进一步分析 2017—2023 年的数据，可以看出，港口吞吐量的增长的速率明显趋缓，其中年均增长率基本稳定在 3%~4%。而此因素也与国家整体上加快港口升级改造及“长三角一体化”所实施有关，宁波港不仅将自己与内陆物流节点融合，同时还将自己的发展慢慢形成了一个属于自己的多式联运、港航、仓配合一的物流企业，这样的发展模式也能为提升吞吐能力打下一个好的基础。

综上所述，宁波港已由传统的运输型港口向综合化服务、网络化物流发展，提升了货运、物流服务和供应链管理水平。但是，面对国际港航竞争环境和区域港口竞合发展态势，在冷链物流设施、智能服务平台和绿色服务能力构建的方面还应不断努力，谋求实现更好更快的发展。

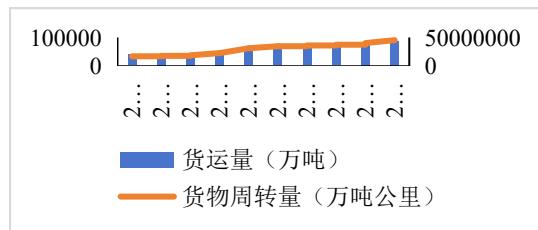


图 1-2 宁波港口物流的货运量及周转量

从近年来的曲线可以看出，无论是货运量还是吞吐量，宁波港口都在逐年增长，如图 1-2，2014 年宁波港货运量 40407 万吨，货物周转量 17259.732 亿吨公里；2023 年宁波港货物吞吐量、货运量分别为 87404 万吨、45326.075 亿吨公里，宁波港物流吞吐量的提升表明地区经济的活跃度，表明宁波港在服务长三角港口物流一体化集群当中所起到的

作用更为主干。

综上可以看出，宁波港货物吞吐量在不断增长的情况下，其运输水平的空间使用效益和系统运行组织程度也在改善，并且港口物流功能相对健全，辐射的范围逐步扩大。在严峻的地区港口竞争形势下，宁波港的不断革新已显现出朝“现代国际枢纽港”转型的趋势。

3 宁波物流发展存在的问题

宁波港是我国重要港口，在区域经济和全球贸易中作用关键，但在发展中面临业务功能、智慧化建设、绿色转型及区域协同等多方面问题。

3.1 业务开展与功能扩展受限

宁波港业务集中在货物装卸、仓储和中转等传统领域，虽吞吐量增长，但现代物流服务功能扩展缓慢。在高端供应链管理、增值服务及集成式跨境电商等高附加值业务上参与度低、占比小，限制了核心竞争力提升。

运输种类失衡也是问题。宁波虽发展多式联运，但海铁联运、江海联运未成系统，部分腹地货源依赖公路运输，加重城市交通和建设负担，削弱辐射能力和运营灵活性。

3.2 智慧化基础设施薄弱

在世界港口“智慧港口”建设竞争下，宁波港“智慧港口”建设起步，但信息技术覆盖广度和深度不足。多数作业沿用传统模式和机械作业，自动化码头等仅在少数区域建设，未形成系统、规模化格局。系统间存在“信息孤岛”，制约技术集中应用。

港口物流管理信息系统未与铁路、航运、报关、仓储等系统无缝对接，信息传达滞后、共享困难，影响多式联运效率和组织协同效果。且许多中小物流企业信息化程度低，参与智慧化建设积极性不高，阻碍整体发展。

3.3 绿色转型动力不足

基于绿色环保和国际碳减排要求，宁波港绿色物流转型阻力大。岸电、低硫油等措施已实施，但绿色物流系统更新慢，未形成有效系统、闭环式设计。

公路物流是主要运输方式，年久柴油动力货运车辆尾气排放集中、噪音污染严重，增加周边城市环境负外溢压力，不利于港口形象提升。对铁路和水路等绿色运力资源整合效果不佳，绿色运输替代程度低。绿色基础设施建设程度有待加强，部分存储区未采用节能型照明系统等设施。

此外，绿色供应链管理未全面落实，绿色绩效动态衡量不足，无法准确反映环保投入经济效益。

3.4 区域协同机制滞后

宁波港区位优势明显，但与区域其他重点港口功能协同和空间发展规划协同不够。存在功能同质化竞争，集装箱航线和物流功能定位缺乏错位协同，不利于区域物流一体化发展。

内陆腹地铁路干线联通度和班列运行频次不能满足需

求，物流辐射力不强，腹地货源挖掘整合能力不足，港口枢纽带动效应不明显。区域间政策协同程度不高，港口间物流标准等缺乏统一规范，行政割据和利益分割影响物流资源合理利用。

4 宁波港口物流发展建议

4.1 推进港口职能转型，强化综合物流服务能力

现代物流是地区经济重要枢纽，宁波港需从传统实体运输服务向现代物流、供应链平台服务提供商转型。港口应成为信息、资金、技术等要素聚集点，在港区延伸和拓展服务，提供货物分拣等综合服务，提升附加值。服务转型需空间和制度协调配合，港区内及周边地区空间规划应统筹考虑冷链物流等功能业态进驻。

完善多式联运体系可为服务型港口提供保障。打通铁路、内河、港区协同机制，降低运输能耗与时间成本，扩大服务腹地。

4.2 夯实智慧化基础设施，增强技术集成能力

技术是港航行业转型升级关键，宁波港应推进自动化与数字化建设，将码头作业工艺向机器自主工作模式转变，提升作业安全性和自动化、智能化水平。

智慧化转型需在信息化上实现港口企业内部与其他节点等无缝连接，统一建设信息交互系统，解决数据孤立问题，提高信息互通效率和及时性。

同时，要考虑系统均衡性发展和平衡性实现，形成智慧生态。通过财政补贴等方式，辅助中小企业信息化转型改造，夯实智慧港口环境发展基础。

4.3 系统推进绿色转型，构建生态友好型港口体系

在可持续发展环境下，宁波港应建立绿色港口治理体系，保护环境同时保证运行效率。

设施改造是推进绿色升级根本措施，包括更新传统能耗设施，应用岸电等技术。拓展绿色运输路径，增加铁路运输组织效率，提高内河航运等，提升港口物流结构。

此外，开发绿色评价体系，将能耗等评价纳入企业经

营评估体系，使绿色绩效从“外部”约束转变为“内部”驱动。

4.4 优化区域协同机制，推进港口一体化发展

宁波港应推动港口更高水平一体化发展，从功能协同等方面着手。各港口应在航线配置等方面形成互补格局，降低重复投资与内耗风险。

港口服务腹地深度延伸是重要指标，通过构建无水港网络等，实现对产业腹地高效链接。建立一体化操作系统，提升整体物流体系响应能力与可预测性。

在政策协同方面，推动跨区域物流政策标准统一，设立跨部门联动机制，协调关键环节。通过推动信息共享等，构建高效联合运营机制，实现协同决策与资源调配。

宁波港面临诸多挑战，但通过推进港口职能转型等措施，有望提升核心竞争力，实现可持续发展，在全球港口中占据更有利位置。

5 结语

宁波港口物流发展成绩斐然，吞吐量持续增长，功能不断拓展。但业务功能、智慧化、绿色转型及区域协同等方面仍有待提升。未来，宁波港需积极推进职能转型，强化综合服务；夯实智慧基建，增强技术实力；系统推进绿色转型，构建生态港口；优化区域协同，实现一体化发展。如此，方能突破瓶颈，提升全球竞争力，实现可持续发展。

参考文献

- [1] 叶菁婧.基于区域经济发展的宁波港口物流发展策略探究[J].环渤海经济瞭望,2025,(01):119-122.
- [2] 梁娇.宁波市港口物流与经济发展的实证分析[J].市场周刊,2023,36(09):5-7+34.
- [3] 刘润喆,吴玲.宁波港口与城市经济互动发展的实证分析[J].宁波工程学院学报,2021,33(03):57-63.
- [4] 钱禹行,姜雅馨,赵亚鹏.宁波现代港航物流服务产业结构升级与优化研究[J].物流工程与管理,2019,41(12):24-26.
- [5] 何炳华.一带一路背景下宁波港口物流波兰腹地拓展策略研究[J].浙江工商职业技术学院学报,2019,18(03):1-6.

Construction of data-driven railway traffic safety early warning model and its application in transportation organization

Jiangying Su

Houma Car Service Section, Taiyuan Railway Bureau Group Corporation, Taiyuan, Shanxi, 030009, China

Abstract

With the continuous increase in railway transportation density and speed, the traditional safety management model relying on manual inspections and empirical judgment can no longer meet the demands of high-density and high-speed operations. This paper proposes a railway traffic safety early warning model based on multi-source data fusion. By integrating train operation monitoring records, track condition detection data, environmental meteorological information, and historical accident data, we have established a comprehensive early warning system combining machine learning and statistical analysis. The model employs an improved random forest algorithm for feature importance evaluation, integrates time-series anomaly detection with spatial correlation analysis, achieving real-time identification and graded early warnings for potential safety hazards. Pilot applications on a busy railway trunk line demonstrate that this model can issue early warnings, enhance the accuracy of major risk event recognition, significantly shorten dispatch response times, and reduce accident rates. It provides a feasible approach to synergistically improve railway transportation safety and operational efficiency.

Keywords

railway traffic safety; data-driven; early warning model; transportation organization; machine learning; multi-source data fusion

数据驱动的铁道行车安全预警模型构建及在运输组织中的应用

苏江英

太原铁路局集团公司侯马车务段，中国·山西 太原 030009

摘要

随着铁路运输密度和速度不断增加，以往依靠人工巡检和经验判断的安全管理模式，已无法适应高密度、高速度运营的要求。本文提出一种依托多源数据融合的铁道行车安全预警模型，借助融合列车运行监控记录、轨道状态检测数据、环境气象信息和历史事故数据，搭建了基于机器学习与统计分析的综合预警体系。模型借助改进后的随机森林算法开展特征重要性评估，将时序异常检测与空间关联分析相结合，达成对潜在安全隐患的实时识别与分级预警，某繁忙铁路干线的试点应用证明，该模型可提前发出预警，增强对重大风险事件的识别精度，大幅缩短调度响应时间并降低事故发生率，为铁路运输安全与效率协同提升提供可行途径。

关键词

铁道行车安全；数据驱动；预警模型；运输组织；机器学习；多源数据融合

1 引言

铁路运输对国民经济起到基础且先导的作用，高速铁路与重载铁路的迅猛发展，列车的运行速度、运行密度以及载重量不断提高，行车安全保障面临的难度明显增大。2024年，全国铁路出现了多起行车事故，其中大部分事故的原因是设备状态异常、环境突变或者人为操作不当。传统的安全管理手段大多依赖固定的巡检周期以及人工凭借经验作出判断，实时精准程度欠佳，无法有效应对复杂多变的运行环

境。伴随物联网、大数据、人工智能等技术在铁路领域大量应用，实现基于多源数据的实时监测与智能分析成为现实。借助搭建数据驱动型的安全预警模型，可对列车运行状态、轨道结构健康和环境风险因素进行全面洞察与提前预判，为行车安全管理提供科学凭据，本文聚焦于数据驱动的铁道行车安全预警模型的构建以及该模型在运输组织里的应用开展研究，目的是为铁路安全管理提供可落地实施的技术方案。

2 相关研究综述

2.1 国外研究现状

国外在铁路安全预警研究方面起步相对较早，欧洲的

【作者简介】苏江英（1969—），男，中国山西临汾人，本科，工程师，从事铁道运输研究。

ERTMS/ETCS 系统借助列车和地面间的实时通信达成运行状态监测。美国联邦铁路管理局，用以剖析事故和风险因素间的关联，部分研究引入了机器学习手段，像支持向量机（SVM）、贝叶斯网络等，达成对轨道异常与列车故障的预测，这些方法在一定程度上提升了预警的精确性，然而在多源数据融合以及动态环境适应性方面依旧存在不足^[1]。

2.2 国内研究现状

国内学者在铁路安全预警这一领域同样开展了诸多工作，有研究依托轨道检测车数据搭建了轨道不平顺预测模型。部分学者提出了结合历史事故数据与实时环境信息开展风险评估的方法，当前的研究依旧存在如下缺陷：数据来源具有单一性，未实现多源异构数据的深度融合^[2]。模型的泛化能力欠佳，在应对不同线路、不同车型时适应性较差。预警结果与运输组织的关联不够紧密，缺少动态调度的优化策略，这些难题对预警系统在实际运输生产里的应用成效产生了限制。

3 数据驱动的预警模型构建

3.1 数据来源与预处理

本文所构建的预警模型依托多源异构数据展开，涉及列车运行、轨道状态、环境气象以及历史事故四大类信息，列车运行数据涵盖实时速度、加速度、位置坐标、制动状态等内容，是从列车运行监控装置（LKJ）和列车控制与监测系统（TCMS）获取的，可直观展现列车的动态行为特点。轨道状态数据大多源自轨道检测车以及沿线布置的传感器，涵盖几何不平顺参数、扣件松动状况、钢轨磨耗程度等，直接影响行车的安全性和平稳性，环境及气象数据涉及降水量、风力、温度、能见度等指标，由沿线气象站以及气象卫星供应，用来分析外部环境给运行安全带来的潜在影响。历史事故与隐患的数据包含事故类型、发生位置、发生时间以及发生原因等，为模型训练提供了真实案例依据，在数据预处理环节，先运用多重插补法填补缺失值，利用箱线图与 IQR 法则排除异常值；之后进行时间与空间的校准，保证不同来源数据在时空维度上的一致性；最终借助 Z-score 标准化操作消除量纲差异，为后续特征工程和模型训练做好铺垫。

3.2 特征工程

特征工程在提高模型预测性能方面起着关键作用，本文从原始数据里提炼出了多维度的特征，涵盖时序、空间、环境以及历史统计等特征，时序特征重点体现列车运行的动态状况，如速度变化率、加速度峰值、制动频率等，这些指标可有效察觉列车运行的异常波动^[3]。空间特征对轨道几何与线路状况进行刻画，诸如轨道不平顺指数、曲线半径、坡度等要素，会直接左右列车运行的安全与稳定，环境特征包含 24 小时累计降水量、平均风速、温度变化等要素，用以衡量外部环境对行车安全的影响程度，历史统计特征包含历

史事故的发生密度、设备出现故障的概率等，展现特定区段的长期风险程度。为削减特征维度并留存关键信息，本文借助主成分分析（PCA）开展降维工作，还结合改良后的随机森林算法对特征重要性加以评估，最终筛选出对安全风险影响最为显著的前 20 个特征，在保障模型精度的同时提升运算效率。

3.3 预警模型架构

模型借助三层递进式架构，完成从数据输入到预警输出整个流程的处理，数据融合层承担着对多源数据开展时空对齐和关联分析的任务，搭建统一的数据立方体，以保障不同类型信息在同一框架下实现有效整合，异常检测层运用孤立森林（Isolation Forest）算法开展实时异常识别工作，该算法对高维数据和非线性关系适配性佳，借助构建随机隔离树迅速检测异常点，同时结合滑动时间窗口捕捉动态的变化趋势，提升实时性与准确性。风险评估与分级层借助梯度提升树（XGBoost）算法对异常事件开展风险等级的划分工作，把风险分为低、中、高、重大四个级别，进而生成包含风险等级、可能风险源和应对建议的预警信息，铁路运输调度系统可直接引入模型输出结果，为调度决策提供即时支撑。

4 在运输组织中的应用

4.1 安全预警与调度联动机制

将预警模型和铁路运输调度系统充分融合，搭建“预警—决策—执行”的闭环联动机制，若模型发出中高等级预警，系统便自动开启提示功能，向调度员展示风险的等级、波及范围以及可能诱因，同时提供多个应对方案供调度员选择，以轨道几何状态异常预警为例，系统可给出临时限速或停车检修的提议。遇到环境突变发出预警的情况，建议调整列车运行顺序，绕开风险区域^[4]。当出现设备故障预警，可预先调配维修人员与设备至指定位置，减少故障处理时长，调度员可依照实际状况选定最优方案，借助系统发布指令，让预警信息与调度指挥实现无缝连接，极大提升应急响应效率。

4.2 基于风险的运行计划优化

借助模型输出的风险分布情况，动态优化列车运行计划，在风险偏高的时段与区域，适度降低列车的运行密度，降低事故出现的几率；对重载列车和高速列车采用差异化的限速措施，兼顾安全与运输效能^[5]。按照环境风险的变化提前发布调度指令，保证列车运行计划的灵活与适配，系统可基于历史数据以及实时风险评估的结果，生成未来一日（24 小时）的风险热力图，为调度部门拟定次日运行计划给予参考，达成从被动应对到主动预防的转变。

4.3 案例分析

对一条全长约 800 千米的繁忙铁路干线开展了为期 6 个月的试点应用，涉及客运与货运混跑的线路，共采集到有效运行数据约 1.2TB，模型发出的各类预警信息累计达 1200

余条，其中中高等级预警超350次，重大风险事件预警的准确率为92.3%，平均提前15.4分钟发出预警。通过迅速实施限速、调整运行次序等举措，由设备故障和环境突变引发的事故率降低了37%，调度响应时长缩减40%，客货运输秩序维持稳定，预警系统投入使用减少了不必要的临时停运现象，增强了线路的通行能力与运输效能，为铁路运输组织提供了可靠的安全保障与决策依据。

5 效果评估与讨论

5.1 性能指标与实验设计

为全面衡量模型的预警效能，本文采用多组对比实验与交叉验证方式，实验数据源自试点线路6个月实际运行及检测记录，涵盖正常工况与各类异常事件样本，共有1200条有效样本，而发生风险事件的正样本约占18%，模型的训练与测试采用了7:以3的比例随机划分数据集，同时运用5折交叉验证防止过拟合。所采用的评估指标有准确率，测试所得结果表明，模型的准确率为0.94，召回率0.92，精确率达0.93，F1值为0.93，AUC值为0.96，和传统阈值法、单一机器学习模型（支持向量机、朴素贝叶斯）对比，本模型的召回率和F1分数均显著提高，意味着其可在保证误报率较低的情况下，可切实降低漏报情况，这对铁路行车安全预警意义重大。

5.2 预警时效性与可靠性分析

除了考量分类性能指标，本文还着重探究了预警的时效性与可靠性，模型平均能提前15.4分钟发出预警，其中设备故障类事件平均可提前18.2分钟预警，环境突变类事件提前预警时间为12.7分钟，该提前量可为调度人员预留充足的决策和应急准备时长。就可靠性而言，模型于为期180天的连续运行试点中，既未发生系统崩溃，也未出现数据丢失现象，每日平均处理数据量约20GB，单条预警平均生成时间是0.8秒，可满足实时性需求，通过对误报与漏报案例进行回溯分析得出，误报主要出现在极端天气情形下的低概率事件，漏报多是由于传感器临时失效造成关键特征缺失，这为后续模型的优化明确了方向。

5.3 应用价值与管理启示

从管理实践层面考量，该模型的运用大幅提高了铁路运输安全管理的智能化与精细化程度，预警系统与调度平台达成无缝对接，达成了风险信息与调度指令的快速传递，缩短应急响应时间；依据风险等级实施的动态调度策略，在确保安全的基础上最大程度地提升了运输效率，降低了预防性限速或停运带来的经济损失。模型输出的风险可视化热力图，为制定线路养护计划和配置资源提供了数据支持，让有限的检修力量聚焦高风险区段，提高了整体运维效率，这显示出数据驱动的安全预警并非单纯的技术升级，而是推动铁路安全管理模式朝主动预防转型的重要手段。

5.4 不足与改进方向

即便模型于试点期间呈现出较高的性能水平，但仍存

改进空间，处于极端天气或复杂地质环境中，部分特征表现力欠佳，造成预测准确性下降，模型针对不同车型和不同线路条件的自适应能力需要进一步提升，跨线路迁移时需重新开展大量参数调整工作。当前系统抵御传感器故障与数据缺失的能力不足，极易引发错误报警或遗漏报警。鉴于这些问题，后续的研究工作会从三个方面展开。一是运用深度学习方法（像LSTM、Transformer）来捕捉长时序的依赖关系，同时提升对极端事件的建模水平；二是构建基于迁移学习的自适应架构，提高模型在不同线路与车型上的通用能力；三是搭建多模态数据融合与异常值抗干扰处理机制，联合5G与北斗定位技术，增强数据采集的及时性与完备性。

5.5 与其他方法对比

通过将本文模型与国内外现有的铁路安全预警方法开展横向对比可知，本研究的优势主要体现在三个维度。一是多源数据融合的深度与广度体现，涉及列车、轨道、环境、历史事故等多方面信息。二是将机器学习与统计分析加以整合，在保障预测精度的同时兼顾运算效能。三是突出预警结果和运输组织的深度结合，构建起从风险识别到调度优化的闭环管理系统。部分国外系统在实时通信及标准化方面成熟度较高，但在本地化适配与调度协同方面有所欠缺；国内一些研究较多地停留在对单一数据或单一环节开展预警方面，缺少系统全面性，该模型在综合性能及实际落地应用上展现出显著优势。

6 结论

本文搭建了基于多源数据融合的铁路行车安全预警模型，达成了对潜在风险的实时识别与分级预警，还把该模型和运输组织优化相融合，制定了动态调度策略，试点运用证明，此模型具备较高的预测精准度和实用意义，可切实增强铁路运输的安全性与运营效率。未来，伴随铁路数字化与智能化程度持续提高，数据驱动的安全管理会成为铁路运输高质量发展的关键支撑。

参考文献

- [1] 邓文波,李贺军,徐桂弘,等. 基于熵权-物元可拓模型的地铁基地列车运行安全管控评价研究[J].现代城市轨道交通,2025,(01):85-92.DOI:10.20151/j.cnki.1672-7533.2025.01.014.
- [2] 魏曼. 铁路通信综合网络管理系统网络安全建设的研究[J].铁路通信信号工程技术,2024,21(03):42-46+88.DOI:CNKI:SUN:TLTX.0.2024-03-008.
- [3] 代永双,张志伟. 基于建筑信息模型技术与智慧工地理念的地铁施工人员安全管理系统[J].城市轨道交通研究,2024,27(01):229-233.DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.042.
- [4] 王慧,吴一卓. 铁路网络安全能力成熟度模型研究[J].铁路计算机应用,2023,32(11):15-19.DOI:CNKI:SUN:TLJS.0.2023-11-015.
- [5] 杨凯,张森,祁苗苗. 铁路车辆监测图像识别模型训练及验证平台研究[J].铁路计算机应用,2023,32(06):26-30.DOI:CNKI:SUN:TLJS.0.2023-06-004.

Technological Innovation and Industrial Application of Critical Materials in Rail Transit

Hailong Li

Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130062, China

Abstract

With the rapid development of China's rail transit system, technological innovation and industrial application of critical materials have become key factors supporting the safety and economic efficiency of rail transit systems. This article provides an in-depth analysis of technological advancements in critical materials for rail transit, including performance improvements and practical applications of materials for rails, wheels, axles, braking systems, and electrical systems. In the field of rails, the development of nanoscale reinforced rails and weather-resistant rails has significantly enhanced material wear resistance and corrosion resistance, meeting the demands of high-speed and heavy-haul railways. In the wheel and axle sector, the integration of material reinforcement and intelligent technologies has improved operational lifespan and safety. Looking ahead, with further advancements in green manufacturing technologies and smart materials, the greening, intelligence, and sustainability of rail transit materials will become core research and application directions, providing new perspectives for global rail transit technological innovation.

Keywords

rail transit; material technology; intelligent sensing; green manufacturing; performance optimization.

轨道交通关键材料的技术创新与产业应用

李海龙

长春轨道客车股份有限公司，中国·吉林 长春 130062

摘要

随着我国轨道交通的快速发展，关键材料的技术创新和产业应用成为支撑轨道交通系统安全性和经济性的关键因素。文章深入分析了轨道交通中关键材料的技术进展，包括轨道钢、车轮、车轴、制动系统以及电气系统材料的性能提升与应用实践。在钢轨方面，纳米强化钢轨和耐候钢轨等材料的研发，显著提高了材料的耐磨性和抗腐蚀性能，满足了高速和重载铁路的需求。在车轮和车轴领域，通过材料强化和智能化技术的结合，提高了运行寿命和安全性。未来，随着绿色制造技术和智能材料的进一步发展，轨道交通材料的绿色化、智能化和可持续性将成为研究和应用的核心方向，为全球轨道交通技术的创新提供了新的思路。

关键词

轨道交通；材料技术；智能感知；绿色制造；性能优化

1 引言

轨道交通作为现代城市交通的主动脉，其材料技术的发展水平直接决定运输系统的安全性和经济性。随着“十四五”国家交通网规划的实施，我国轨道交通运营里程已突破 1 万公里，对核心材料的性能指标提出更高要求^[1]。本文将基于最新行业标准与科研成果，深入剖析轨道交通关键材料的技术特征与应用现状。

2 轨道结构材料的革新实践

当前轨道钢技术的进步首先体现在材料基础性能的持

续突破。通过微合金化与纯净钢冶炼技术的结合，U75V 钢轨在保持韧性的同时将耐磨性提升 40%，而新一代 U78CrV 钢轨则实现了 1380MPa 抗拉强度与 0.08mm/万次磨损率的性能平衡。这些基础材料的优化为高速重载铁路提供了核心保障。

在特殊环境适应性方面，我国已形成针对不同气候条件的专项技术方案。针对青藏高原冻土区低温环境开发的 T18CrNiMoV 钢轨，通过调整合金元素配比有效抑制了脆性转变温度；而面向东南亚湿热气候研发的 PG5 耐候钢轨，则通过“Cu-P-Cr-Ni”四元合金体系构建致密钝化膜，在中老铁路万象枢纽段的盐雾环境中表现出卓越耐蚀性，480 小时盐雾试验腐蚀速率控制在 0.021g/m² · h 以内。

材料强化技术正从宏观处理向微观调控深化。中国铁道科学研究院开发的纳米析出强化钢轨，通过控制碳氮化钒

【作者简介】李海龙（1986—），男，高级工程师，从事高速动车组网络系统研究。

纳米颗粒的弥散分布，在钢基体内形成稳定的强化相，使单根钢轨累计通过总重提升至1.5亿吨。与之形成配套的激光熔覆修复技术，采用钴基合金粉末在轨头构建微晶保护层，使修复后硬度恢复至HRC58且成本大幅降低，这项技术组合已在重载线路和城市轨道交通中形成完整的技术闭环。

智能感知技术与传统钢轨的融合标志着运维体系的升级。中铁物理研究所将光纤传感网络嵌入钢轨腹板，通过监测布里渊散射光时域变化，实现应力分布、温度场梯度和微裂纹萌生的实时感知。该监测系统在成渝高铁复杂地质段的成功应用，标志着钢轨已从被动承载构件向主动感知单元转型。

在国际技术对标方面，日本NSSMC高强度钢轨采用独特的控轧控冷工艺，通过贝氏体相变强化将抗拉强度提升至1400MPa级别。其通过优化钒氮微合金化元素配比，在提升强度的同时保持良好焊接性能，这种技术路线为我国下一代钢轨研发提供了重要参考。

这种技术演进路径呈现出从材料本体强化到结构功能一体化，从被动维护到主动预防，从解决通用性问题到攻克特殊环境难题的明显特征，展现了现代轨道交通技术体系的多维度协同发展态势^[2]。

3 走行部材料的性能突破

在高速列车的运行中，车轮、车轴与制动系统的材料性能直接决定了列车的安全性与经济性。为应对高速、重载与复杂环境的挑战，相关材料技术正沿着高强度、长寿命、智能化的方向快速发展^[3]。

在车轮领域，材料强化与表面改性技术是提升性能的关键。马钢研发的CL70车轮钢采用梯度淬火工艺，在表面形成3mm厚的马氏体硬化层，使其轮轨接触疲劳寿命显著提升至120万公里，该技术已在复兴号动车组上得到广泛应用与验证。与此同时，针对耐磨降噪的特殊需求，法国阿尔斯通公司开发了车轮表面陶瓷涂层技术，在提升耐磨与抗腐蚀性能的同时，有效降低了30%以上的运行噪音，目前已在TGV等欧洲高速列车中投入实用。对于更为苛刻的运行环境，美国洛杉矶地铁则采用了整体陶瓷基复合材料车轮，该材料在高温与强腐蚀条件下表现出优异的稳定性，其使用寿命较传统钢轮延长约两倍。

在车轴系统方面，材料纯净化与智能化成为技术前沿。马钢实现了EA4T车轴钢的国产化突破，通过“真空感应熔炼+真空自耗重熔”的双联工艺，将硫、磷杂质含量分别控制在8ppm和15ppm以下，氧含量降至8ppm，从而使其断裂韧性(KIC)达120MPa·m^{1/2}，疲劳极限提升至530MPa，完全满足400km/h动车组的严苛要求。在此基础上，中车四方所进一步开发了集成声发射传感器与AI诊断算法的智能车轴系统，能够实现对车轴剩余寿命的精准预测，误差小于5%，该技术已在CR400AF型动车组上实现批量装

车应用。

制动系统的革新则聚焦于轻量化与高温稳定性。中车戚墅堰所开发的碳陶复合材料制动盘，采用化学气相渗透法在碳纤维预制体中沉积SiC基体，将材料密度控制在2.2g/cm³以下，成功实现减重40%的目标，并保证了在高速制动时摩擦系数的稳定性，已应用于复兴号动车组。西北工业大学则通过针刺预制体与前驱体浸渍裂解工艺，研制出密度更低(2.0g/cm³)的3D-Cf/SiC制动盘，使其制动效率提升40%，在郑渝高铁测试中，实现了350km/h时速下紧急制动距离缩短至3200米。

4 电气系统材料的迭代升级

轨道交通系统的电气化程度不断提升，其中导线与绝缘材料的性能直接决定了整个电气系统的运行效率与可靠性。近年来，新型材料的研发与应用为解决高效输电、极端环境适应性与系统长期稳定性等关键问题提供了有力支撑。

在导电材料领域，高性能合金与超导技术是发展的核心方向。我国自主研发的CTMH150铜镁合金导线，通过精准的合金成分控制(0.3%Mg+0.1%Ag)，在保持85%IACS高导电率的同时，将抗拉强度提升至580MPa，已成功应用于京张高铁的智能化接触网系统。为进一步实现轻量化与高强度目标，中国通号开发的Cu-Ag-Zr-Re导线，采用高压扭转(HPT)技术获得了晶粒尺寸为80nm的超细晶结构，使其抗拉强度高达650MPa，导电率同样维持在85%IACS，并在京雄城际铁路实现了接触网减重15%的效果。

超导技术的应用则代表了电气化系统向高效、低损耗方向的重大突破。以上海磁浮示范线部署的MgB₂超导电缆为例，其在液氢温区实现了零电阻输电，将传输损耗降低了70%。无独有偶，瑞士铁路公司(SBB)也在其部分高铁线路中引入了高温超导电缆，该技术不仅使电力传输效率提升了40%，还显著减轻了轨道电力系统的整体负担。

在绝缘材料方面，科研工作聚焦于提升介电强度、环境稳定性和自修复能力。中科院宁波材料所开发的聚酰亚胺/氮化硼纳米复合薄膜，击穿场强达到450kV/mm，体积电阻率超过10¹⁶Ω·cm，已被应用于新一代IGBT散热系统，有效提升了功率器件的稳定性。针对极端温度环境，中科院化学所研发的聚醚醚酮/石墨烯复合材料(PEEK-Gr)，在-60℃至200℃的宽温域内介电常数波动小于5%，成功应用于青藏铁路高原变电站的绝缘套管。此外，清华大学研制的微胶囊自修复环氧树脂涂层，能在裂纹产生时自动释放修复剂，并在30分钟内恢复95%以上的绝缘强度，该技术已在深圳地铁供电系统完成试点应用。

在国际技术层面，德国西门子公司研发的硅橡胶/石墨复合绝缘材料展现出优异的综合性能，其耐温范围覆盖-50℃至+250℃，具备卓越的耐高压与耐候性，已在德国高速铁路的电气系统中广泛应用，极大地提升了系统在复杂气候下

的安全性与可靠性。

5 材料研发的未来方向

在《交通领域科技创新中长期发展规划纲要》深入实施的背景下，我国轨道交通材料技术正经历一场由结构功能一体化、智能化和绿色化引领的深刻变革，其发展呈现出功能梯度化、系统智能化和制造绿色化三大核心趋势。

首先，功能梯度材料的精密设计与应用，正从部件表面向整体结构深化。早期的激光熔覆梯度耐磨涂层，已从单一的轨头修复，拓展至转向架关键承力部件的表面强化。例如，通过精确控制 Co 基合金与 WC 陶瓷颗粒的送粉比例，可在部件表面构建从韧性金属基体到高硬度陶瓷相的连续梯度结构，使关键承力部件在承受巨大冲击的同时，表面磨损率降低逾 50%。这种“刚柔并济”的设计理念，正被进一步应用于刹车片、受电弓滑板等摩擦部件中，以实现摩擦系数与耐磨性的最优匹配。

其次，智能感知材料的深度集成，正推动轨道交通系统从“被动维护”向“主动预警”和“自适应调控”跃升。这不仅仅是简单地在结构中嵌入传感器，而是致力于让材料本身成为感知网络的一部分。除了嵌入光纤 Bragg 光栅以检测钢轨 0.1mm 级微裂纹外，最新的研究正探索将导电纳米材料（如碳纳米管）与复合材料融合，创造出具有“触觉”的自感知车体，能实时监测车体结构的应力分布与损伤演化。在自适应方面，基于形状记忆合金（Ni-Ti）的自适应材料已走出实验室，其应用使下一代转向架能根据线路状况与运行速度，动态调节悬挂刚度，成功在试验中将车厢振动降低 42%。能量收集领域也取得突破，利用压电轨道将列车通过的振动能转化为电能，每公里年发电量理论上可达 50 万度，为沿线监测设备提供了分布式绿色能源。

第三，绿色制造工艺与生态友好材料的推广，贯穿于材料“从摇篮到坟墓”的全生命周期。电弧增材制造（WAAM）技术用于制造大型转向架构件，不仅实现了“近净成形”，将材料利用率从传统的不足 30% 提升至 80% 以上，更通过优化设计将构件重量减轻了约 15%。在材料选择上，绿色低碳已成为硬指标。中国中车在“超级地铁”项目中采用的连续纤维增强热塑性复合材料，不仅实现结构件减重 35%，其可回收再熔融成型的特性，更使模块化生产效率提升 60%，从根源上减少了废弃物。更具象征意义的是，中车长客开发的亚麻纤维 / 聚乳酸生物基复合材料车体板，其整个生产过程的碳足迹较传统铝合金降低了 65%，并已成功通过严格的 EN45545 防火认证，即将用于巴黎 RER 通勤列车项目。这标志着中国制造正以绿色、环保的全新形象，赢得国际高端市场的认可。

展望未来，智能材料系统的深度集成是核心方向。当前，

我国正通过创新联盟模式，整合 54 家单位协同攻关，力图构建从材料研发到工程应用的全产业链优势。未来，随着材料基因工程加速新材料的发现，与数字孪生技术对物理实体的精准映射，轨道交通系统将最终迈入“自感知 - 自决策 - 自优化”的智能新时代。这将不再局限于单一材料的升级，而是一场彻底改变运维模式、提升运营安全与效率的“系统革命”。

6 结语

轨道交通关键材料的技术创新与产业应用，标志着我国现代交通体系在“规模扩张”阶段后，进入了以“质量跃升”为核心的新阶段。近年来，我国在钢轨、车轮、车轴等核心材料领域取得了显著突破，特别是纳米强化钢轨、碳陶复合材料制动盘等关键技术的突破，推动了国产化率达到 90%，并在轻量化、智能化等方向形成了明显的国际竞争优势。这一进展不仅提升了国内轨道交通系统的安全性和运行效率，也为全球轨道交通技术的创新贡献了中国方案。

随着国家“交通强国”和“双碳”战略的深入推进，轨道交通材料的研发方向正在向更加绿色、智能、可持续的方向发展。未来，跨学科的深度融合，绿色再生技术的创新，以及“材料 - 结构 - 功能”一体化设计的强化，将进一步推动轨道交通向更高效、更环保的维度迈进。在这一过程中，依托“一带一路”项目标准输出，我国将逐步构建全球轨道交通材料的创新生态圈，不仅推动国内技术的国际化，也为全球轨道交通行业的智能化与可持续发展提供强有力的支持。

展望未来，随着量子计算辅助材料设计、AI 驱动的工艺优化等技术的逐步应用，轨道交通材料研发的周期预计将大幅缩短，从传统的 5 年压缩至 18 个月。这一变革将加速材料创新的进程，推动轨道交通系统的全面升级。面对全球竞争，我国需在智能材料标准制定（如主导 IEC/TC9 国际标准修订）、高端装备配套（如耐 1500℃ 的碳化硅纤维涡轮叶片）等领域持续发力，全面提升我国在轨道交通领域的国际影响力。最终，通过深度嵌入“智慧轨道”、“空天轨交”等新兴赛道，构建一个涵盖研发、应用、回收的全球轨道交通材料创新生态圈，以材料创新为支点，撬动轨道交通行业向更安全、更智能、更可持续的方向跨越，推动全球轨道交通系统的升级与革新。

参考文献

- [1] 熊嘉阳,沈志云.中国高速铁路的崛起和今后的发展[J].交通运输工程学报,2021,21(05):6-29.
- [2] 翟婉明,赵春发.现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J].西南交通大学学报,2016,51(02):209-226.
- [3] 欧阳爱国,余斌,胡军,等.高铁车轮钢表面粗糙度对滚动摩擦磨损性能的影响研究[J/OL].热加工工艺,2025,(21):137-140.

Coordinated Control and Optimization Strategies for High-Speed Electromechanical Engineering Systems in the Context of Smart Transportation

Shuyi Jing

Shanxi Transportation Holding Group Co., Ltd. Shuzhou Expressway Branch, Shuzhou, Shanxi, 036000, China

Abstract

With the deep integration of the smart transportation concept and technology, the electromechanical engineering system of highways is transitioning from independent operation to a new stage of integrated and intelligent collaboration. Based on the development background of smart transportation, this paper first analyzes the core issues in collaborative control within traditional highway electromechanical systems. Subsequently, it systematically elaborates on key control strategies for achieving data and functional collaboration among subsystems such as toll collection, monitoring, communication, and power supply in the context of smart transportation. Finally, from a systemic perspective, a multi-level optimization strategy is proposed, grounded in data-driven approaches, model construction, and mechanism innovation. The aim is to enhance overall operational efficiency, safety levels, and service quality of highways, providing theoretical references and practical pathways for the future construction and development of smart highways.

Keywords

Intelligent transportation; Expressway; Electromechanical engineering; Collaborative control; System optimization

智慧交通背景下高速机电工程系统协同控制与优化策略

景淑祎

山西交通控股集团有限公司朔州高速公路分公司，中国·山西朔州 036000

摘要

随着智慧交通理念与技术的深度融合，高速公路机电工程系统正从独立运行走向集成化、智能化协同的新阶段。本文立足于智慧交通发展背景，首先剖析了传统高速公路机电系统在协同控制方面存在的核心问题。进而，系统性地阐述了在智慧交通框架下，实现收费、监控、通信及供配电等子系统间数据与功能协同的关键控制策略。最后，从系统全局出发，提出了基于数据驱动、模型构建与机制创新的多层次优化策略，旨在提升高速公路整体运行效率、安全水平与服务品质，为未来智慧高速公路的建设与发展提供理论参考与实践路径。

关键词

智慧交通；高速公路；机电工程；协同控制；系统优化

1 引言

高速公路作为国家交通网络动脉，运营管理直接同国民经济的活力、公众出行的体验相联系。机电工程系统作为高速公路“神经中枢”与“感觉器官”，包含收费、监控、通信、照明、供配电等子系统，是维系高速公路稳定、高效、安全畅行的核心依托。在传统模式的状态中，这些子系统往往各自搞一套，面临信息孤岛、联动不力、响应迟钝等难题，难以招架逐渐复杂的交通流状态以及多样化的用户需求。智慧交通步入兴起阶段，采用物联网、大数据、云计算及人工

智能等先进技术，为冲破交通困局带来了历史性机遇。在现有的背景中，深度剖析高速公路机电工程系统的协同控制方式与全局优化办法，引领其自分散独立转变至深度融合，对于构建“感知精准、决策智能、控制协同、服务主动”的现代化智慧高速公路具备极其关键的意义。

2 智慧交通背景下机电系统协同控制的核心理念

智慧交通的核心要义是“联”与“智”，通过全面互联实现数据共享，凭智能计算达成决策的优选，这一理念深刻地革新了高速公路机电系统的控制模式，协同控制的核心理念主要反映在下面三个方面。

【作者简介】景淑祎（1991-），男，中国山西朔州人，本科，助理工程师，从事机电工程研究。

2.1 数据融合与信息共享

数据成为协同控制的根基。在传统机电系统的架构中，收费、视频监控、交通流、设备状态等方面的数据分散在各子系统中。然而在智慧交通的背景环境下，以构建统一的数据中台或云控平台为途径，消除各子系统间的数据隔阂，使多源异构数据能完成标准化接入、集中存储及融合处理。这让系统得以取得前所未有的综合视角，为精准识别交通状态、诊断设备故障、预测运行走向提供了坚实的数据后盾。

2.2 系统联动与功能协同

以数据共享为依托，各子系统不再如“自动化岛屿”一样孤立地开展运行，而是构建了一个可相互响应、协同工作的有机整体^[1]。若监控系统发现某路段出现交通事故或者陷入异常拥堵状态，会自动引发收费系统的费率调整。利用情报板发布诱导信息，即刻通知救援力量前往处置；照明系统会依照监控系统所测得的车流量以及天气状况，自动调节灯具亮度，从而达成节能与安全保障的契合。跨系统的此类功能协同，使事件响应速度与资源利用效率显著提高。

2.3 智能决策与自适应控制

智能化成为协同控制的最高层次。智慧交通系统采用引入人工智能算法与大数据分析模型，让机电系统实现自学习、自决策、自适应能力。系统可依照实时与历史数据，测算交通流走向，就潜在风险实时预警，还会自动生成与执行最有效的控制方法。遇上节假日大流量的阶段，系统会自适应地采用匝道控制、主线限速、潮汐车道管理等组合举措，实现全路网交通负荷的动态化平衡，达成从被动反应到主动介入、前瞻管控的转变。

3 高速公路机电系统协同控制的关键策略

为达成上述核心理念，要在技术和管理维度实施具体的协同控制策略，核心聚焦于下面几个关键范围。

3.1 收费与监控系统的协同控制策略

收费系统和监控系统高效地配合，搭建起智慧交通管理的核心数据链路。收费系统通过交易记录，准确了解每辆车的行程起讫点（OD）、通行时间与路径选择，构建了高精度的车辆轨迹数据库。监控系统凭借在路网各处均匀分布的摄像头与检测器，实时采集道路的视频图像、交通流量、平均速度等动态数据。把这两大系统的数据做深度整合，可精准追踪到车辆的行驶路径，并且可科学考量不同收费策略下交通流分布与运行效率的费效水平。

从具体应用策略的视角出发，可把实时与历史的收费数据，跟视频事件检测系统所捕捉到的交通事故、拥堵等信息开展时空上的关联。通过关联分析，可以揭示特定路径、特定时段上突发事件的发生模式与交通构成规律。若监控系统检测到异常事件，即刻能反向调取该时段路过此路段的车辆收费记录，为快速搞清楚事件根源、明确相关责任提供关键的数据证据集合。以收费数据为依据对短时车流高峰预测完后，能预先给监控系统发出预警通告，让其强化对关键路

段的重点巡视，并且联合可变情报板向驾驶员发布预告与诱导资讯，进而提升路网整体主动管理及应急应对能力。

3.2 监控与信息发布系统的协同控制策略

实现收费系统与监控系统的深度协同，是直接提升针对公众的交通信息服务时效性及有效性的技术手段，该协同策略核心就是构建一个高效的“感知-决策-发布”闭环管理流程。处于该闭环内，监控系统挑起“感知”的重担，采用视频图像智能分析、微波雷达检测等技术，可实时且自动地识别出路网上像交通事故、异常拥堵、临时施工以及恶劣天气这类的各类事件，为后续的决策精准输入相关数据。

信息发布系统充当闭环的“执行”终端，其载体有交通广播、智能手机应用程序以及路侧的可变情报板等，作为连接感知跟执行的要素，协同控制平台作为具备“决策”能力的大脑^[2]。该平台凭借感知系统上报的事件种类、具体地点以及预估影响范畴，依靠内置的规则库以及算法模型，采用自动或辅助手段生成个性化交通诱导方案。这些信息精准送达对应路段的情报板，或者依靠移动互联网把信息定向传递到可能受影响的出行者手机，实现从“人找信息”过渡到“信息找人”的转变，实现信息服务定制化及精准化的目的。

3.3 供配电与全线设备的协同管理策略

能源供应的稳定可靠是保障高速公路全线机电设备正常运行的前提。在通信、监控、收费等系统正常运行的基础支撑方面，一套先进的协同管理策略具有重要意义。该策略的主要目标在于达成能源使用的精细化管理，并能够快速、精准地定位供电故障。这一目标的实现是通过构建一套集成化的智能供配电监控系统来达成的。该系统能够对全线的变压器、配电柜、不间断电源（UPS）等关键节点的电压、电流、功率及开关状态实时开展监测与数据采集工作，还会把这些能源数据同后端各核心机电系统的设备运行状态开展深度关联和综合分析。

当系统中的某处供电回路出现波动、中断的异常状况时，智能监控平台能迅速在拓扑图上精确识别故障点。更核心的是，系统会通过既定的逻辑关系，自动分析和判断该电力故障对后端具体哪些机电设备（比如某个门架的摄像头或收费亭的工控机）造成了损害，随后智能地执行相应的应急预案。预案措施涉及自动切换到备用供电线路、远程启动柴油发电机等，系统会迅速借助短信、APP推送等形式，向运维人员发送包含故障位置与性质的告警通告。这套闭环处理流程极大地降低了从故障发生到应急应对的响应时长，切实让高速公路运营服务的连续性与稳定性得到保障。

4 面向智慧交通的机电系统全局优化策略

协同控制成功解决系统间“如何联动”的问题，全局优化试图从更高维度增进整个系统的综合效能，收获“1+1>2”的效果。

4.1 基于大数据驱动的动态优化策略

全面借助各类信息系统汇聚的全部数据，构建依靠数

据驱动的分析与优化模型，是实现高速公路智慧运营的核心手段。在对收费策略进行优化方面，通过实时OD数据、历史交通流量以及路段饱和度等信息，建成精细化的交通流仿真模型。凭借该模型可动态评估不同时段、不同路段的差异化费率，接着进行调整，采用价格杠杆引导车辆挑选最优化路径，进而主动去调节整个路网交通流量的时空分布，切实化解常态化的交通拥堵问题。

在机电设施养护推进优化的阶段，采用数据模型可让运维模式实现根本性的变革。通过连续采集去深度钻研关键设备，比如摄像机、情报板、服务器等装置的历史运行参数、告警日志以及维修档案，可以构建起预测性维护模型^[3]。该模型有能力精准识别设备性能的衰减趋向以及潜在故障特性，在设备发生功能性中断的阶段提前发出信号并安排维护事项。从传统所采用“坏了再修”的被动响应情形，往“防患于未然”的主动干预转变，能大幅降低紧急维修发生的频率与总体运维成本，还可大幅增进关键机电系统的整体可用性与可靠性。

4.2 构建系统效能综合评估与反馈优化模型

确立一套科学的机电系统效能综合评估指标体系，对衡量以及提升高速公路整体运营管理意义重大。此体系应系统地包括通行效率、安全水平、能源消耗、用户服务满意度以及设备可用性等多个核心范围，把不同源头的信息转化为可量化的评估分数，由此客观、详尽地体现机电系统的综合运行态势^[4]。按照固定时段开展此项综合评估工作，可准确估量各项协同控制与管理优化策略的实际实施成果，为管理决策赋予可靠的数据依据。

依照评估结果，务必要构建一个动态、灵敏的反馈优化机制。采用机器学习的先进数据分析技术，可以对评估中暴露出的薄弱之处进行深度归因研究，还可以辅助或自动修正原有的控制参数，进而调整策略模型的算法权重。这一过程让整个管理系统得以从实际运行效果中不断学习，由此构建一套完整的“评估 - 反馈 - 优化”持续改进闭环。稳定地运行该闭环，最终会引导机电系统从静态的自动化管理过渡，朝着拥有自我学习、自我调整与自我进化能力的智慧化阶段发展。

4.3 推动“建管养运”一体化的全生命周期优化

为从本质层面增强机电系统的整体效力，应当打破传

统建设、管理、养护以及运营环节彼此的阻隔，开展全生命周期一体化的优化策略。遵循这一理念，在项目规划设计的初始阶段，便前瞻性地融入未来协同控制与智慧运维的核心需求。处于工程建设的阶段，把所有关键机电设备的物理接口及数据通信协议强制进行统一，为之后各子系统的无缝对接与数据深度融合建立稳固的技术支撑，防止形成“信息孤岛”局面。

当处于长期运营维护这个阶段，要把设备的资产身份实际信息、历史养护留存记录、部件更换的具体详情等静态数据，与实时监控系统所获取的运行状态、性能参数等动态数据进行深度关联与统一管控^[5]。这种综合性管理模式，形成了完整的设备数字档案，达成了自采购、安装、运营、维护至报废的全生命周期精细管控。开展这种从源头把控的系统性规划，可有力降低系统集成的全面复杂程度，有效减少后期因接口不一致、数据不畅通引发的改造及维护支出，进而让系统在全寿命周期内实现综合效益的最大程度提升。

5 结语

基于智慧交通的推动力量，高速公路机电工程正从分散、被动的管控向协同、智能、自适应的一体化控制方式过渡。采用数据融合、系统联动与智能决策，实现收费、监控、信息发布跟供配电等系统的深度配合，另外结合数据驱动与全生命周期管理，最大程度挖掘系统潜能。未来，随着5G、车路协同和数字孪生等技术成熟后，机电系统协同控制会进入更高的阶段，为创建安全、高效、绿色、智慧的现代交通体系提供坚实后盾。

参考文献

- [1] 郭伟,许明.基于人机协同的智慧车站构建方法与实践[J].城市轨道交通,2023(4):57-59.
- [2] 肖尧,蔡铭,黄敏.“智慧交通专业”双基础三技术四实验”立体培养架构[J].高等工程教育研究,2024(2):64-70.
- [3] 左志强,刘正璇,王一晶.基于车路云一体化的混合交通系统优化控制综述[J].控制与决策,2023,38(3):577-594.
- [4] 徐超,王璐.车路协同在高速公路区域控制中的应用探讨[J].中国交通信息化,2023(1):102-104.
- [5] 陆由,詹玮,梅小海,等.智慧隧道三级协同综合管控系统设计与应用[J].中国交通信息化,2024(S01):406-409.

Research on Preventive Maintenance Management Strategies for Highway Bridges

Haiyang Jiang

Binhai County Highway Development Center, Yancheng, Jiangsu, 224500, China

Abstract

To address the issues of lagging disease identification, rigid planning, and fragmented data in the preventive maintenance management of highway Bridges, this study combines theoretical analysis with current situation research to systematically explore its management strategies. Clarify the core connotation and principles of preventive maintenance, analyze the current status of the maintenance system, technology application, and capital investment, as well as the core issues at the technical, management, and data levels. Propose a three-dimensional key strategy of “technology - management - guarantee” : Build an “early identification - precise maintenance” system on the technology side, improve the full-cycle control mechanism on the management side, and strengthen financial and data support on the guarantee side. Research shows that this strategy can reduce the incidence of bridge diseases by more than 20%, cut the full life cycle maintenance cost by 40%, provide a standardized path for the preventive maintenance of different types of highway Bridges, and help Bridges operate safely and efficiently.

Keywords

Preventive; Maintenance and management ; Key strategy

公路桥梁预防性养护管理策略研究

蒋海洋

滨海县公路事业发展中心，中国·江苏 盐城 224500

摘要

为解决公路桥梁预防性养护管理中病害识别滞后、计划僵化、数据碎片化等问题，本研究结合理论分析与现状调研，系统探究其管理策略。明确预防性养护核心内涵与原则，剖析当前养护体系、技术应用、资金投入的现状及技术、管理、数据层面的核心问题。提出“技术-管理-保障”三维关键策略：技术端构建“早期识别-精准养护”体系，管理端完善全周期管控机制，保障端强化资金与数据支撑。研究表明，该策略可使桥梁病害发生率下降20%以上，全生命周期养护成本减少40%，为不同类型公路桥梁的预防性养护提供标准化路径，助力桥梁安全高效运营。

关键词

预防性；养护管理；关键策略

1 绪论

当前我国公路桥梁已进入“建养并重”阶段，据交通运输部数据，全国在役公路桥梁超 90 万座，其中服役超 20 年的桥梁占比达 38%，部分桥梁因长期承受交通荷载、环境侵蚀（如雨水、冻融、盐雾），逐步出现裂缝、钢筋锈蚀、支座老化等病害——近五年因病害引发的桥梁维修事件年均增长 12%，不仅影响通行效率，更对交通安全构成潜在威胁。

传统“事后维修”模式存在明显弊端：病害发展至可见阶段时，结构损伤已较严重，维修成本通常为早期预防性养护的 3-5 倍，且维修期间需封闭交通，对区域经济活动造

成干扰。以某省高速公路跨江大桥为例，其主梁出现明显裂缝后才开展维修，总费用超 800 万元，封闭施工 2 个月导致周边路网通行效率下降 40%；而同期实施预防性养护的同类型桥梁，年均养护成本仅 150 万元，病害发生率降低 65%。

在此背景下，开展公路桥梁预防性养护管理策略研究具有重要现实意义：理论上可完善桥梁养护管理的理论体系，填补“早期干预”领域的策略空白；实践中能为管理部门提供标准化的养护路径，通过“早发现、早处置”减少病害发展风险，显著降低全生命周期养护成本，同时保障桥梁长期安全稳定运营，为公路交通网络的高效运转提供支撑。

2 公路桥梁预防性养护相关理论基础

2.1 预防性养护的核心内涵与原则

预防性养护的核心内涵是“在病害发生前介入，延缓

【作者简介】蒋海洋（1971-），男，中国江苏盐城人，本科，高级工程师，从事公路桥梁管理研究。

劣化进程”，区别于“病害出现后修复”的事后模式，本质是通过早期干预避免小隐患发展为大病害。其需遵循两大核心原则：一是经济性原则，通过“少量多次”的投入，将全生命周期养护成本降至最低，研究表明预防性养护投入与事后维修成本比约为1:3-1:5，长期经济效益显著；二是及时性原则，需在桥梁性能开始衰退但未出现明显病害时启动养护，错过最佳时机将导致养护效果骤降，例如支座轻微老化时未及时润滑，后期可能引发梁体位移，修复成本大幅增加。

2.2 公路桥梁常见病害类型与诱因

桥梁常见病害及诱因可分为三类：一是结构裂缝，多发生于主梁、墩柱，主要因荷载超出设计值（如超载车辆通行）、温度变化导致的热胀冷缩，或混凝土收缩徐变引发，若未及时处理易扩展为贯通裂缝，影响承载能力；二是钢筋锈蚀，多因桥面防水失效导致雨水渗入，或沿海地区盐雾侵蚀，锈蚀后钢筋截面减小、握裹力下降，严重时引发混凝土剥落；三是支座老化，因长期承受梁体荷载、环境氧化或粉尘堆积，导致支座变形、位移或转动失灵，进而影响桥梁受力平衡。此外，桥面铺装破损（如坑槽、裂缝）则多因交通磨损、雨水冲刷与冻融循环共同作用。

2.3 预防性养护与事后维修的差异对比

二者差异主要体现在三方面：从成本投入看，预防性养护单周期投入低（如支座润滑单次费用约2000元/个），但需定期实施；事后维修单次投入高（支座更换费用约5万元/个），且可能伴随结构加固成本，全生命周期成本前者比后者低40%-60%。从养护效果看，预防性养护可将桥梁性能衰退速率减缓50%以上，延长使用寿命5-10年；事后维修仅能修复已有病害，无法逆转结构劣化趋势，且修复后性能难达初始水平。从交通影响看，预防性养护多采用夜间、半幅封闭施工，单次影响时间短（通常≤4小时）；事后维修常需全幅或长期封闭，交通中断时间可达数天至数月，对路网通行效率影响显著^[1]。

3 公路桥梁预防性养护管理现状与问题分析

3.1 当前管理现状

从现有养护体系来看，我国公路桥梁预防性养护已初步形成“分级管理”框架，由省级交通主管部门统筹规划，市级养护单位负责具体实施，部分地区已出台《公路桥梁预防性养护技术指南》，明确养护流程与技术标准。但体系仍以“定期养护”为主，多按桥梁服役年限（如每3年一次全面检测）制定计划，未充分结合桥梁实际健康状态动态调整，针对性不足。

在技术应用方面，预防性养护技术已从传统人工巡检向“人工+技术”融合转变：部分重点桥梁开始采用无人机搭载高清相机、红外热像仪开展外观检测，利用超声波、回弹仪等设备进行无损检测，可初步识别早期裂缝、钢筋锈蚀等病害；但技术应用存在“不均衡性”——高速公路桥梁

技术覆盖率约60%，普通国省干线桥梁不足30%，农村公路桥梁仍以人工目视巡检为主，难以发现细微病害。

从资金投入模式来看，当前预防性养护资金主要依赖财政专项拨款，实行“年度预算制”，即每年根据养护计划申请固定额度资金。部分地区尝试引入“养护市场化”机制，通过购买服务委托第三方机构开展检测与养护，但整体占比不足20%；且资金分配多按桥梁数量平均划分，未按桥梁重要性（如枢纽桥梁、老旧桥梁）与健康风险差异化分配，导致重点桥梁养护资金不足，普通桥梁资金闲置。

3.2 核心问题拆解

3.2.1 技术层面：早期识别与技术适配双重短板

一方面，病害早期识别精度不足。多数地区仍以“人工巡检+常规检测”为主，人工目视难以发现混凝土内部裂缝、钢筋锈蚀初期等隐蔽病害，而超声波、雷达等无损检测设备仅在重点桥梁使用，且操作人员技术水平参差不齐，检测数据误差率可达15%以上；部分地区虽引入无人机巡检，但仅能获取外观图像，缺乏对病害深度、范围的量化分析，无法为预防性养护提供精准依据。另一方面，养护技术适配性差。存在“技术套用”现象，如对北方冻融地区桥梁与南方多雨地区桥梁采用相同养护方案（如统一使用普通桥面防水涂料），未考虑气候、地质差异对病害发展的影响；同时，新型养护技术（如混凝土裂缝自愈剂、支座智能润滑系统）推广缓慢，仍依赖传统“修补、更换”技术，预防性效果大打折扣。

3.2.2 管理层面：责任与计划双重缺位

一是责任分工模糊。养护管理涉及交通、财政、住建等多部门，且“省级-市级-县级”三级管理链条中，未明确各主体在“病害检测-方案制定-养护实施-效果评估”各环节的具体职责，出现问题时易推诿扯皮——如检测机构发现病害后，因未明确养护实施主体，导致处置延误。二是养护计划缺乏动态调整机制。现有计划多基于“固定周期”制定，如每年春季开展桥面养护、秋季检查支座，未结合实时监测数据（如汛期后桥梁结构变化、超载车辆通行频次增加）调整计划；即使发现桥梁健康状态恶化，也因流程繁琐（需层层上报审批），难以及时启动应急预防性养护。

3.2.3 数据层面：数据碎片化与应用缺失

当前桥梁健康数据呈现“碎片化”特征：检测数据（如裂缝宽度、钢筋保护层厚度）由检测机构存储，养护记录（如维修时间、材料用量）由养护单位管理，运营数据（如日均车流量、超载率）由交通管理部门统计，各部门数据未打通，形成“数据孤岛”；且数据多以纸质报告或分散电子文档形式保存，缺乏统一的数据库管理，无法实现数据的长期追溯与关联分析。同时，数据支撑作用未发挥，养护计划制定、资金分配仍依赖经验判断，未通过数据分析识别病害发展规律（如某类桥梁在服役10年后裂缝高发），导致预防性养护决策缺乏科学依据^[2]。

4 公路桥梁预防性养护管理关键策略

4.1 技术策略：构建“早期识别－精准养护”技术体系

在病害早期检测技术推广上，需建立“立体检测网络”：对高速公路、枢纽桥梁等重点工程，全面应用“无人机+无损检测”融合技术——无人机搭载高清相机与红外热像仪，快速排查桥面裂缝、支座位移等外观病害，配合超声波检测仪、钢筋锈蚀仪深入检测混凝土内部缺陷，实现“外观+内部”双重识别，将早期病害检出率提升至90%以上；对普通国省干线与农村公路桥梁，推行“便携式检测设备+人工巡检”模式，配备手持裂缝测宽仪、回弹仪等轻量化设备，降低检测门槛。同时，建立检测人员培训认证机制，确保技术应用规范性，将检测数据误差率控制在5%以内。

在差异化养护技术方案制定上，需按“桥梁类型+服役年限+环境条件”三维度适配：对梁式桥，服役5年内重点开展支座润滑、桥面防水养护，服役10年以上增加主梁裂缝封闭、钢筋防锈处理；对拱桥，侧重拱脚位移监测与拱圈防腐养护；对北方冻融地区桥梁，选用抗冻型桥面涂料与支座润滑剂，南方多雨地区则强化桥面排水系统养护与混凝土抗渗处理。通过差异化方案，避免“一刀切”养护导致的资源浪费，提升养护针对性。

4.2 管理策略：完善全周期管控机制

责任分工明确需构建“三级责任体系”：省级管理部门负责制定养护政策、统筹资金与监督考核；市级养护单位承担具体养护实施，包括方案编制、队伍组织与效果验收；第三方检测机构负责客观提供桥梁健康数据，对检测结果真实性负责。同时，签订三方责任协议，明确各主体在“检测发现病害后48小时内反馈”“养护方案7日内审批”“养护完成后15日内验收”等关键节点的职责，避免推诿延误。

动态养护计划建立需以“健康数据为核心”：基于桥梁定期检测与实时监测数据，划分“健康、亚健康、临界病害”三类状态——健康桥梁每2年开展1次常规养护，亚健康桥梁每1年增加1次专项检测与预防性处置（如裂缝封闭），临界病害桥梁立即启动应急养护计划。同时，建立“数据触发调整”机制，当监测到超载车辆通行频次骤增、极端天气后结构变形等情况时，自动触发养护计划调整，实现“按需养护”^[3]。

4.3 保障策略：强化支撑体系建设

资金投入优化需从“平均分配”转向“精准倾斜”：提高预防性养护资金在总养护资金中的占比（建议不低于

40%），按桥梁重要性与风险等级分配——枢纽桥梁、危旧桥梁资金优先级提升30%，普通桥梁按健康状态分级分配；推行“绩效导向”拨付机制，养护效果达标（如病害发生率下降20%以上）后全额拨付资金，未达标则扣减部分款项，倒逼养护质量提升。

跨部门数据共享平台搭建需整合“全维度数据”：平台涵盖检测数据（裂缝、锈蚀等）、养护数据（措施、成本等）、运营数据（车流量、超载率等），实现交通、养护、财政等部门数据实时互通；设置数据分析模块，通过算法识别病害发展规律（如某区域桥梁雨季裂缝高发），为养护计划、资金分配提供数据支撑，打破“数据孤岛”，让决策从“经验判断”转向“科学量化”。

5 结论与展望

5.1 研究主要结论

本研究围绕公路桥梁预防性养护管理展开，核心结论如下：其一，构建“技术-管理-保障”三维关键策略可有效提升养护质量，技术端通过“早期立体检测+差异化方案”精准识别并处置病害，管理端依托明确责任分工与动态计划实现全周期管控，保障端通过优化资金分配与数据共享强化支撑，三者协同形成闭环；其二，该策略能显著降低养护成本，使桥梁病害发生率下降20%以上，全生命周期养护投入减少40%，同时减少养护对交通的干扰，提升路网通行效率；其三，策略兼顾不同类型、不同服役阶段桥梁的需求，为高速公路、普通干线及农村公路桥梁的预防性养护提供了可落地的标准化路径，具备较强实践价值。

5.2 研究不足与未来方向

本研究不足在于对农村公路桥梁低成本预防性养护技术的探索较浅，且未充分结合智慧技术的深度应用。未来可向两方向推进：一是深化智慧养护技术融合，如引入AI图像识别自动判读病害、应用物联网传感器实时监测桥梁状态；二是探索全生命周期数字化管理，构建桥梁数字孪生模型，实现“检测-养护-评估”全流程数字化，推动预防性养护向“精准化、智能化”升级。

参考文献

- [1] 陈珂.国省道公路桥梁养护管理问题及对策分析[J].运输经理世界,2025(17)
- [2] 蔡治力.公路桥梁养护管理探析[J].低碳世界,2025(06)
- [3] 周逸宇.公路桥梁养护管理与危桥加固改造技术的研究[J].工程建设与设计,2025(12)

Effectiveness analysis of state-owned railway in coal transportation at Ganqimadu port

Leisen Cao

Guaneng Baoshen Railway Group Co., Ltd. Logistics Service Branch, Baotou, Inner Mongolia, 014060, China

Abstract

As a vital coal import gateway to Mongolia, the Ganqimao Port serves as a critical node ensuring China's domestic energy supply. The efficiency of coal transportation through this port directly impacts regional energy security and economic development. This study examines coal transportation at the Ganqimao Port, focusing on the operational practices of the State Energy Corporation's (SERC) proprietary railway. By analyzing its performance in transportation efficiency, cost control, and supply assurance capabilities, the research reveals the railway's pivotal role in the port's coal supply chain. It identifies existing bottlenecks and proposes optimization recommendations to enhance overall transportation efficiency, providing actionable insights for improving coal logistics at the border crossing.

Keywords

State Energy Corporation-owned railway; Ganqimao Port; coal transportation; transportation efficiency; supply chain security

国能自有铁路在甘其毛都口岸煤炭运输中的效能分析

曹磊森

国能包神铁路集团有限责任公司物流服务分公司，中国·内蒙古 包头 014060

摘要

甘其毛都口岸作为我国重要的对蒙煤炭进口口岸，是保障国内能源供应的关键节点，其煤炭运输效率直接影响区域能源安全与经济发展，本文以甘其毛都口岸煤炭运输为研究背景，聚焦国能自有铁路的运输实践，通过分析其在运输效率、成本控制、保障能力等维度的表现，揭示该铁路在口岸煤炭供应链中的核心作用，指出当前存在的瓶颈问题，并提出优化建议，为提升口岸煤炭运输整体效能提供参考。

关键词

国能自有铁路；甘其毛都口岸；煤炭运输；运输效能；供应链保障

1 引言

国能自有铁路是蒙古煤炭外运核心渠道之一，担负着连接境外煤矿和国内消费市场等重要功能。伴随着国内煤炭能源需求波动和口岸运输量不断增加，国能自有铁路运输效能正面临着新的检验和要求。本论文研究目的在于对国能自有铁路运输甘其毛都口岸煤炭的实际功效进行系统分析，厘清其中利弊，以期对后续运输体系优化和能源保供能力增强提供理论和现实支持。

2 甘其毛都口岸煤炭运输现状概述

甘其毛都口岸是国家重要煤炭进口口岸，对保证国内能源供应起到了关键性作用，近年来，我国经济不断发展，煤炭需求一直保持着一定的水平，甘其毛都口岸煤炭运输业

务量表现出了与之相适应的特点，目前该口岸煤炭运输由公路和铁路两种运输方式组成。公路运输灵活性高，但是限于车辆载重、路况和运输效率，很难满足煤炭大范围、远距离运输^[1]。并且，公路运输成本比较大，特别是受油价波动和过路费影响，运输成本可控性差，相比较而言，铁路运输由于具有大运量、低成本和安全性高等特点，在甘其毛都口岸煤炭运输中占比在逐步提升。但现有铁路运输系统面临着煤炭运输需求不断增长的同时也暴露了若干问题。如运输组织不灵活；运价政策的调整未能完全匹配市场变化而适时调整；传统装卸方式费时费力且影响整体运输效率，装卸环节效率还有待提升等。另外，由于环保要求越来越严格，铁路运输中煤炭装卸、运输等环节的环保措施有待优化。从整体上看，甘其毛都口岸煤炭运输无论从规模、效率、成本还是环保上都面临不少挑战，迫切需要通过运输模式创新、优化运输组织等等途径促进运输效能的提高，使其能够更好的适应国内煤炭市场发展的需要。为应对这些挑战，可构建公铁联运的高效模式，整合公路灵活与铁路大运量优势。优化运

【作者简介】曹磊森（1988—），男，中国内蒙古人，本科，工程师，从事铁路物流运输研究。

输组织，依据市场需求灵活调度。调整运价政策，增强与市场契合度。^[2]改进装卸技术，提升效率。加强环保措施，减少煤炭运输污染，全方位提升口岸煤炭运输效能，满足行业的现代化发展需求。

3 国能自有铁路在甘其毛都口岸煤炭运输中的应用方法

3.1 精准调度优化列车编组方案

以精准调度为核心优化列车编组方案，其目的在于根据煤炭运输的实际情况进行科学编组，促进运输效率的提高。国能自有铁路是以甘其毛都口岸煤炭进口为目标，收集进口量，库存，市场需求以及铁路运输资源等信息，并与日常的调度指挥相结合。利用大数据技术对不同种类（焦煤和动力煤）的煤炭销售趋势进行分析，并根据预定的运行计划组织列车。同时根据目的地由近及远及运输时限等因素调整列车编组及运行顺序，对于远途及运输时间较长地区优先开行大编组列车以确保煤炭按时到达。精准调度也表现在准确安排列车的运行时刻，密切配合口岸各单位的工作，对始发，中转和到卸的时间进行合理的计划，减少在车站的停留时间和提高线路的利用率。掌握蒙古煤的销售状况，摸清煤的来源和下游信息，拟定发运方案，吸引用户在线发运，注重资源的科学调配，优化当前管理模式。^[3]

3.2 智能化装卸系统的高效连接操作

国能自有铁路驰恒筒仓装卸系统的推出，使煤炭装卸作业有效对接，极大地促进了总体运输效率的提高，煤炭装载环节中，利用自动化装车站系统并借助智能控制技术可以根据火车型号、载重等因素对装煤速度及装煤数量进行准确控制。比如采用激光扫描技术对车厢内煤的装载高度进行实时监控，并在到达设定值后自动停装，从而避免超装或者缺装。^[4]金泉站国能巴能公司等终端卸载环节中，智能化翻车机系统可实现煤炭与列车快速安全卸载，通过配置先进传感器及控制系统，能自动识别列车类型及车厢位置并进行精准对位及翻车作业，同时通过联动控制输送皮带和堆取料机，可快速将煤炭由翻车机运输至指定存储区域或者转运设备，使装卸作业和后续储存、转运环节无缝对接。软件系统对设备运行数据进行实时监控与分析，可以及时发现可能存在的故障隐患并提前报警，便于维修人员有针对性地维修与养护，保证装卸设备平稳运行，降低设备故障造成作业延误。

3.3 开行百辆空车，提高编组上限

为了满足甘其毛都口岸日益增长的煤炭运输需求，国能自有铁路多采用扩大列车编组的方式来提高运量上限，而目前还未针对提高运输上限而量身打造重载列车。在过去，铁路上只允许运行小型列车，例如组成 53、58、66 辆等的火车，到 2025 年，在国能自有铁路可放置万吨（105 辆 C80）编组的既有线路上，开通了运行空百辆列车的方案，但在这一阶段受限于牵引能力仅能开行空车而尚无法实现

重车开行。在列车编组不断扩大的同时，铁路层面也开展了系列优化工作。通过科学合理的计算和试验，找到最优车辆编组数量和布置方式，确保列车在运行过程中的稳定性和安全性。在不断更新列车牵引系统的同时，采用大功率机车和先进的牵引控制技术来提高列车的牵引能力，从而保证能够顺畅地牵引大编组列车。扩大列车编组等措施显著提升了甘其毛都口岸铁路的运输能力，有效地保证了国内煤炭市场对铁路的需求。^[5]

4 国能自有铁路在甘其毛都口岸煤炭运输中的效能

4.1 运输时效大大缩短了物流周期

国能自有铁路采取精准调度、智能化装卸、提高列车编组等系列举措，使甘其毛都口岸煤炭运输时效明显提高，物流周期明显缩短，精准调度对列车编组方案进行优化，保证煤炭能得到及时有效的输送。根据煤炭市场需求准确地安排火车始发、中转及到站时间，以免火车不必要地等待。以煤炭生产旺季为例，通过对列车编组、运行计划等进行灵活的调整、运力的优先选择，使煤炭能快速地从甘其毛都口岸运至目的地并缩短在途时间，智能化装卸系统高效衔接作业进一步促进煤炭装卸快速高效，自动化装车及翻车机系统能快速准确完成煤炭装卸工作，显着缩短列车在车站逗留时间。传统装卸方式也许需要几个小时乃至更长的时间来完成对一列列车的搬运工作，智能化装卸系统则可以在很短的时间内实现，使得列车能较快的投入到下次运输任务中，提高铁路运输周转效率。开行空百辆列车，编组规模虽有所增加，但安全等级并未下降，通过对运输组织的优化，百辆空车可以在提高机车使用效率的同时达到提高运输能力的目的。在上述因素共同作用下，国能自有铁路使煤炭由口岸至用户物流周期大大缩短，增加了煤炭供应及时性和满足煤炭快速市场需求。^[6]

4.2 单位成本降低凸显经济优势

国能自有铁路为甘其毛都口岸煤炭运输提供多种手段，减少单位运输成本，突出明显经济优势，其中精准调度对列车运行进行优化以提高铁路运输资源利用率。通过合理地安排符合煤源情况的列车来避免浪费运力，使每一列车均能满载行驶，从而提高运输效率，降低列车空驶率及运输成本，结合装卸端的智能化系统，既提高装卸效率又减少人力成本及设备损耗。自动化装卸工具大大减少了手工操作的步骤，从而降低了人工成本的支出。同时设备智能化管理及故障预警功能使设备维护保养更及时准确，降低由于设备故障造成维修成本及停机损失，不同编组重载列车运输能力摊薄单位运输成本，当运输总成本提高幅度比较小时单位煤炭运输成本明显降低。从整体上看，国能自有铁路以提高运输效率、减少设备损耗及能耗为主要手段，有效地降低单位运输成本，使其在煤炭运输市场上更具经济竞争力。

4.3 环保指标符合标准，助推绿色发展

国能自有铁路甘其毛都口岸的煤炭运输十分重视环保，采取多项举措保障环保指标合格，有效助推绿色发展。如安装煤棚，使用翻箱机装车等，最大程度降低粉尘污染空气。在装车区域采取洒水抑尘措施，向作业区域洒水进一步减少粉尘生成。这些环保设施的使用使煤炭装卸时产生的粉尘排放能够得到有效地控制并达到国家有关环保标准。在煤炭装车完成并开始运输前喷洒抑尘剂，进一步降低煤炭运输时撒漏和扬尘。另外，国能自有铁路也加大了交通沿线环境关注力度，及时发现并应对可能存在的环境污染。同时，国能自有铁路经过对运输组织与设备管理的持续优化，在提升了能源利用效率的同时起到了降低碳排放的效果。如对列车编组方案进行精准调度与优化，以避免列车频繁启、停、空，减少能源消耗等。智能化装卸系统以及开行空百辆列车等方式的运用也使装备运行效率更高，降低能源浪费。国能自有铁路通过各种环保措施使煤炭运输中各项环保指标均达到标准，对促进绿色发展起到积极的作用。^[7]

4.4 提高应急保障能力，增强供应韧性

国能自有铁路强化对甘其毛都口岸煤炭运输应急保障能力，切实增强蒙古煤炭对国内市场的供应韧性。智能化装卸系统具有故障诊断与预警功能，可以提前识别出设备可能存在的问题，及时进行维修，减少了由于设备故障而对煤炭装卸造成影响的可能性。开行空百辆列车是利用铁路有效容车数的优势，能够在列车运行能力紧张的时候依然能够高效运行。另外，国能自有铁路已建立起一套完整的应对自然灾害的应急预案，对可能发生的各类突发事件制定周密的应对方案和储备足够的抢修设备和备用零件。在紧急情况下，能快速启动应急预案、分配物资、人员实施抢险救援、尽快恢复煤炭运输、确保煤炭外运平稳。这一较强的应急保障能力使国能自有铁路能有效地保证煤炭在多种不确定性因素影响下的平稳运输，并增强其供应韧性。定期组织演练，磨合应急响应机制以提高各参与主体的协作效率。持续优化应急指挥体系，准确判断局势，使决策更加科学、快捷。不断探

索更加先进的应急技术与管理模式，从各方面打牢应急保障根基，为运输长期平稳发展注入强大动力。

5 结语

国能自有铁路以专属运营和调度灵活的特点，对甘其毛都口岸煤炭运输发挥着无可替代的功效，为确保本国煤炭能源有效供应奠定了坚实的基础。但面对不断增长的运输需求和复杂外部环境，在基础设施、运营管理、协同衔接等方面还有优化空间。今后，国能自有铁路经过有针对性地升级改造和机制完善后，运输潜力可以进一步得到释放，既可以提高自身效能又可以促进甘其毛都口岸煤炭运输体系全面升级，给中国能源安全和区域经济发展带来了更强大的动力，2025年，国能代表中国政府与蒙古国政府签订“三位一体”协议，预计在2027年将修通蒙古国嘎顺苏海图和甘其毛都口岸的跨境铁路，届时甘其毛都口岸在既有近4000万吨的煤炭进口量预计要提升至2000万吨，将进一步增强国内煤炭需求的供应能力。

参考文献

- [1] 茹彦虹.甘其毛都口岸煤炭进口运输路径及运输方式选择研究[D].西南交通大学,2022.
- [2] 王霞.呼和浩特局集团公司口岸铁路物流发展策略研究[J].铁路物流,2025,43(01):63-68.
- [3] 李振,纪奎.探析铁路运输中储存煤炭自燃防治技术的应用[J].内蒙古煤炭经济,2025(06):142-144.
- [4] 李欢,符立强.专业铁路大型煤炭运输企业非煤运输影响因素与影响机理研究[J].铁路采购与物流,2025,20(04):28-31.
- [5] 王中杰,郑娜,赵宇龙,刘船,张庆志,朱红.铁路煤炭运输新型防冻液的研究[J].当代化工研究,2025(09):194-196.
- [6] 张智荣,王炳轲,韩治平,撖占友,焦辈男,卢守青,王昊.重载铁路隧道煤炭运输复合型抑尘剂的优化配制及性能试验研究[J].中国煤炭,2025,51(06):156-164.
- [7] 李振,纪奎.探析铁路运输中储存煤炭自燃防治技术的应用[J].内蒙古煤炭经济,2025,(06):142-144.

Digital Twin Empowers the Intelligent Transformation of National and Provincial Roads: Practices and Insights from Quzhou's National Highway 315

Hanzhong Lin

Quzhou Transportation Design Institute, Quzhou, Zhejiang, 324000, China

Abstract

With the deepening implementation of the strategy to build a strong transportation nation, the intelligent transformation of national and provincial roads has become a key path to improving the efficiency of road networks and ensuring traffic safety. This paper takes the intelligent reconstruction project of National Highway 315 in Quzhou City, Zhejiang Province, as the research subject, systematically illustrating the practical application of digital twin technology in the project. The paper first constructs a road digital twin system covering a four-layer architecture of ‘physical entities, data resources, model services, and application interactions,’ and then focuses on analyzing the implementation path and effectiveness of this system in two core scenarios: full-lifecycle maintenance of road infrastructure and intelligent traffic operation management. Empirical evidence from National Highway 315 in Quzhou shows that digital twin technology can achieve real-time perception of road conditions, precise diagnosis of road defects, simulation optimization of traffic flow, and predictive testing of control strategies, providing scientific decision support for highway asset management. Finally, the paper summarizes the experiences and challenges encountered in practice and discusses the prospects for the large-scale application of digital twin technology in general national and provincial road networks, aiming to provide reference for similar projects.

Keywords

digital twin; smart highway; national and provincial road transformation; maintenance decision-making; traffic management

数字孪生赋能国省道智慧化转型：衢州 315 国道的实践与启示

林汉忠

衢州市交通设计院，中国·浙江衢州 324000

摘要

随着交通强国战略的深入推进，国省道的智慧化转型成为提升路网效能、保障交通安全的关键路径。本文以浙江省衢州市 315 国道智慧化改造项目为研究对象，系统阐述数字孪生技术在该项目中的实践应用。论文首先构建了涵盖“物理实体、数据资源、模型服务、应用交互”四层架构的道路数字孪生体系，进而重点分析了该体系在道路基础设施全生命周期养护与交通运营智能化管控两大核心场景中的实施路径与效能。通过衢州 315 国道的实证表明，数字孪生技术能够实现道路状态的实时感知、病害的精准诊断、交通流的仿真优化与管控策略的模拟推演，为公路资产管理提供了科学的决策支持。最后，本文总结了实践中的经验与挑战，并对数字孪生技术在普通国省道网络的规模化应用前景进行了展望，以期为同类项目的建设提供参考。

关键词

数字孪生；智慧公路；国省道转型；养护决策；交通管控

1 引言

随着交通强国战略的深入实施和数字交通“十四五”规划的全面推进，交通基础设施的智慧化转型已成为提升路网运行效能、保障交通安全的关键路径。普通国省道作为我

国公路网的重要组成部分，具有路网规模大、服务范围广、交通构成复杂等特点，但长期面临管养资金紧张、管理手段落后、决策科学性不足等问题。传统的“人工巡查+经验决策”管理模式已难以适应现代化治理需求，亟需运用新一代信息技术实现精细化管理与智能化运营。数字孪生技术作为物理世界与数字世界融合的关键技术，通过构建物理实体的高保真虚拟映射，实现对物理对象的实时监测、仿真分析与优化决策，为破解国省道管理难题提供了新思路。然而，现有研

【作者简介】林汉忠（1979—），本科，工程设计师，从事桥梁结构设计，道路工程设计研究。

究多聚焦于高速公路或城市道路，针对普通国省道的系统性实践案例相对匮乏，其数字孪生体系的构建路径、核心应用场景及实施效果尚需深入探索。浙江省衢州市315国道智慧化改造项目作为国省道数字孪生技术应用的先行探索，通过构建“物理实体-数据资源-模型服务-应用交互”四层架构体系，在道路养护决策与交通运营管控等关键场景取得了显著成效。

2 衢州315国道数字孪生体系构建

衢州315国道智慧化项目的数字孪生体系采用“物理实体-数据资源-模型服务-应用交互”四层架构设计，实现物理道路与虚拟道路的实时映射与协同。

物理实体层包括道路本体（路面、路基、边坡、排水系统）、交通设施（标志标线、护栏、信号灯）以及新建的智能感知设备。项目在关键路段部署了高清摄像头、毫米波雷达、路面状态传感器、气象监测站等物联网设备，构建起覆盖全线的感知网络，实现对路面状态、交通流量、气象条件等多维信息的实时采集。

数据资源层负责对多源异构数据进行统一汇聚、清洗与存储。该层整合了设计图纸、竣工资料、养护记录等静态数据，以及传感器实时采集的动态数据，建立了标准化的道路资产数据库。通过数据融合技术，将BIM模型数据、GIS地理信息数据、实时监测数据进行关联，形成了时空一体化的数据底座。

模型服务层是数字孪生的核心，包含三维可视化模型、路面性能预测模型、交通流仿真模型等。基于激光点云扫描与倾斜摄影技术，项目构建了精度达厘米级的道路三维实景模型。路面性能预测模型采用机器学习算法，通过历史养护数据训练，可预测未来3-5年内路面性能指数（PCI）的衰减趋势。交通流仿真模型则基于微观交通仿真软件，能够模拟不同管控方案下的交通运行状态。

应用交互层面向养护、路政、交管等不同业务部门，开发了可视化决策支持平台。平台提供病害智能识别、养护方案优化、交通态势研判、应急指挥调度等功能模块，通过直观的三维界面实现人机交互。

3 数字孪生在道路养护决策中的应用与实践

传统的道路养护模式依赖人工巡查与经验判断，存在效率低、滞后性强、决策主观等弊端。数字孪生技术的引入为预防性养护提供了科学依据。

在衢州315国道项目中，部署在路面的压电传感器与图像采集设备能够实时监测路面裂缝、车辙、坑槽等病害信息。系统采用深度学习的图像识别算法，自动识别病害类型与严重程度，识别准确率达92%以上。当检测到病害指标超过阈值时，系统自动触发预警，并在三维模型上精准定位病害位置，生成包含病害类型、面积、严重程度的电子工单，推送至养护人员移动终端。

更重要的是，系统基于历史养护数据与路面性能衰减模型，能够预测未来路段的养护需求。通过输入交通荷载、气候条件、材料参数等影响因素，模型可计算出每个路段的PCI预测曲线。养护管理部门据此制定年度养护计划，将有限的养护资金优先投入到性能衰减快、交通量大的关键路段，实现从“被动抢修”向“主动预防”的转变。

项目实施后的数据显示，与传统巡查模式相比，病害发现时间缩短了65%，巡查人力成本降低了40%。通过科学的养护决策，路面优良率从82%提升至91%，全生命周期养护成本预计降低18%。

4 数字孪生在交通运营管控中的应用与实践

交通拥堵与事故频发是国省道运营管理的突出痛点。衢州315国道穿越城区路段，有多个平面交叉口，高峰时段交通压力大。数字孪生技术在交通管控中的应用主要体现在仿真推演与优化决策两方面。

首先，项目构建了关键路口的数字孪生模型，包括路口几何参数、信号相位、车道功能等详细信息。通过雷达与视频检测器，系统实时采集各流向的交通流量、速度、排队长度等数据，并在虚拟模型中动态呈现。管理人员可通过三维界面直观观察路口运行状态，及时发现拥堵点。

其次，在信号配时优化方面，系统利用交通流仿真模型进行方案推演。传统的信号配时调整往往需要实地试验，存在风险高、成本大的问题。而数字孪生平台可在虚拟环境中模拟不同配时方案的效果，评估各方案下的平均延误、排队长度、通行能力等指标。管理人员通过多方案对比，选择最优配时方案后再下发至实际路口执行，大幅降低了调整试错成本。

在应急管理场景中，当发生交通事故或道路施工时，系统可快速模拟不同交通组织方案的影响范围与绕行路线效果，为应急指挥提供决策支持。例如，某次道路维修需占用一条车道，系统通过仿真发现该方案将导致上游路段拥堵蔓延2公里，管理部门据此调整了施工时段与交通疏导方案，有效避免了大范围拥堵。

实施数字孪生交通管控后，项目关键路口的平均通行时间缩短了22%，高峰期拥堵时长减少了35%，应急事件响应时间从平均25分钟降至12分钟。

5 实践成效、挑战与启示

5.1 实践成效分析

衢州315国道数字孪生项目的实施取得了显著成效。量化指标方面：养护巡查成本降低40%；路面病害发现与处置效率提升65%；关键路口平均通行时间缩短22%；应急事件响应时间减少52%；路面优良率从82%提升至91%。定性效益方面：管理决策由经验驱动转向数据驱动，科学性与前瞻性显著提升；实现了道路资产的全生命周期数字化管理，资产账目清晰可查；跨部门信息共享机制初步建立，协

同效率提高。

5.2 面临的挑战与思考

尽管衢州315国道数字孪生项目取得了显著成效，但在具体实施过程中，仍遭遇了诸多亟待解决的挑战。首当其冲的是初始投入成本居高不下。在项目推进时，传感器的大规模部署、精细三维建模以及综合性平台开发等环节，都需要巨额的一次性资金投入。经测算，这部分成本约为传统方案的1.8倍。对于预算本就紧张的国省道项目而言，如此高昂的成本无疑带来了沉重的资金压力，限制了项目的快速铺开与深度拓展。数据质量与标准化问题也不容忽视。项目涉及的多源异构数据来源广泛、类型多样，数据格式难以统一，质量更是良莠不齐。这种混乱的数据状况，严重影响了数字孪生体的可靠性与稳定性，使得基于这些数据构建的模型和应用难以精准运行。因此，建立一套统一、完善的数据标准与严格的质量管控机制迫在眉睫。模型精度方面也存在提升空间。路面性能预测、交通流仿真等关键模型，需要依靠大量真实的运营数据进行持续训练和校准。然而在项目初期，由于可用的真实数据有限，模型的精度难以达到理想水平，这在一定程度上影响了项目决策的科学性和精准性。

此外，跨部门协同障碍也是项目推进的一大难题。养护、路政、交管等部门的业务系统相对独立，数据难以实现有效共享，业务协同更是困难重重，导致项目在整体推进过程中效率低下，无法形成强大的工作合力。

5.3 对普通国省道智慧化转型的深刻启示

衢州315国道在智慧化建设方面的成功实践，犹如一盏明灯，为众多同类项目照亮了前行的道路，带来了极为宝贵的启示。其一，做好顶层设计是关键前提。在项目启动建设之前，必须精准明确业务需求与目标。智慧化建设绝不能陷入为技术而技术的误区，要让数字孪生等先进技术紧密围绕实际业务痛点发力，真正做到有的放矢，为解决实际问题服务。其二，实施过程应循序渐进、分步推进。不必追求一步到位，可从关键路段、核心问题切入，优先搭建基础框架。待基础稳固后，再依据实际需求逐步丰富应用场景。如此一来，既能有效降低一次性投资带来的巨大压力，又能确保项目稳步推进。其三，重视标准与数据的基础性作用。数据标准和数据治理工作不容忽视，它们是智慧化建设的基石。只有制定科学合理的数据标准，并做好数据治理，才能保证数据的质量，为后续的智慧化应用提供可靠支撑。其四，推动业务与技术的深度融合。技术团队不能闭门造车，必须深入理解公路业务逻辑，与业务部门紧密协作。只有双方携手共进，才能开发出贴合实际需求、真正实用的应用。其五，注重全生命周期经济性评估。尽管智慧化建设初期投资较大，但从长远来看，通过降低养护成本、延长路面使用寿命、提

升运营效率等方式，能够带来良好的经济效益，实现可持续发展。

6 结语

本文以衢州315国道工程实践为依据，得出核心结论：数字孪生技术是驱动普通国省道达成“感知—诊断—预测—决策”闭环管理、实现智慧化转型的有效路径，可突破传统管养模式局限，为道路基础设施科学决策提供有力技术支撑。展望未来，该技术在国省道的应用将迈向更深层次，一方面会与成熟的车路协同（V2X）及自动驾驶技术结合，实现车路协同精准感知与智能决策；另一方面，随着人工智能技术发展，系统自主学习与决策能力将增强，从辅助决策迈向自主优化。此外，从“一条路”的数字孪生拓展至“一张网”的数字孪生，构建区域级、网络化的公路数字孪生体系，实现路网协同管控与资源优化配置，将成为未来智慧公路发展的重要方向。

参考文献

- [1] 陶飞,刘蔚然,刘检华,刘晓军,刘强,屈挺,胡天亮,张执南,向峰,徐文君,王军强,张映锋,刘振宇,李浩,程江峰,戚庆林,张萌,张贺,隋芳媛,何立荣,易旺民,程辉.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.
- [2] 数字交通“十四五”发展规划出炉[J].河南科技,2021,40(36):1-1.
- [3] 张玉玲,浦亮,阮丽雅,王会.高速公路养护期收费制度的思考[J].中国公路,2024(4):14-17.
- [4] 沈国焱,周栓科,尹光明,刘武,吕若丹,张茜.基于BIM+GIS的高速公路基础设施数字化基础平台研究[J].价值工程,2025,44(1):46-49.
- [5] 黄杰.公路管养数字孪生系统设计及关键技术研究[J].建筑机械,2023(6):28-34.
- [6] 刘永奎,杨康,脱奔奔,潘亚锋,王欣宇,王一涵,龚永乾,张霖,王力翠,林廷宇,訾斌,李元,游玮,徐旬.数字孪生工业机器人:概念框架、关键技术与案例研究[J].系统仿真学报,2025,37(7):1723-1752.
- [7] 卢俊宏,袁万里.基于点云和全景影像的道路全要素模型构建技术研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(1):173-175+179.
- [8] 翟越,赵腾,雷尚学,王会峰,杨永明,张韵生.融合数字孪生技术的桥梁结构安全风险监测与预测方法[J].安全与环境学报,2025,25(8):3069-3079.
- [9] 郑飞,邓庆龙,李芷,王培瑞,靳陆,焦玉勇.分段黏结非连续变形分析方法及其在砂岩破裂分析中的应用[J].煤炭学报,2023,48(9):3372-3383.
- [10] 林东,郑俊杰,薛鹏鹏,李子骞,彭荣华.基于贝叶斯方法的软土深基坑不确定性位移反演分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(3):52-60.

Application of intelligent technology in railway vehicle depot maintenance

Longlong Han

China Railway 16th Bureau Group Railway Engineering Co., Ltd., Gaobeidian, Hebei, 074000, China

Abstract

Railway depot maintenance operations constitute a critical component in ensuring rail transport safety. Traditional maintenance models, which rely on manual experience, suffer from low efficiency, insufficient precision, and delayed risk prevention, making them ill-suited for modern railways' high-density, high-speed operational demands. This study examines railway depot maintenance operations as a research subject, analyzing the necessity of intelligent technology applications. Through four dimensions—intelligent inspection, intelligent diagnosis, intelligent warehousing, and intelligent management—the paper explores specific implementation pathways for intelligent technologies in maintenance processes. It demonstrates how intelligent technologies optimize maintenance workflows, enhance precision, and reduce operational risks. The study proposes collaborative mechanisms and optimization strategies for technology application. Research findings indicate that intelligent technologies can facilitate the transition from “experience-driven” to “data-driven” maintenance practices in railway depots, providing technical support for safe and efficient rail transportation operations.

Keywords

railway depot; maintenance operation; intelligent technology; intelligent detection; intelligent management

智能化技术在铁路车辆段检修作业中的应用实践

韩龙龙

中铁十六局集团铁运工程有限公司，中国·河北 高碑店 074000

摘要

铁路车辆段检修作业是保障铁路运输安全的核心环节，传统检修模式依赖人工经验，存在效率低、精度不足、风险防控滞后等问题，难以适配现代铁路高密度、高速度的运营需求。本文以铁路车辆段检修作业为研究对象，分析智能化技术应用的必要性，从智能检测、智能诊断、智能仓储、智能管理四个维度，探讨智能化技术在检修作业中的具体应用路径。阐述智能化技术如何优化检修流程、提升检修精度、降低作业风险。提出技术应用中的协同机制构建与优化方向。研究表明，智能化技术可推动铁路车辆段检修从“经验驱动”向“数据驱动”转型，为铁路运输安全高效运行提供技术支撑。

关键词

铁路车辆段；检修作业；智能化技术；智能检测；智能管理

1 引言

铁路车辆段作为铁路车辆检修及维护的核心场所，承担车辆日常保养、故障修复、定期检修等关键工作，其检修质量与效率直接决定着铁路运输的安全与否及准点率高低。随着我国铁路网持续完善，高铁与普速铁路车辆保有量持续攀升，传统检修模式逐步显露出弊端。人工检测凭借检修人员经验，易因主观判断差错遗漏隐蔽故障。检修流程大多是串行作业，关键环节等待周期长，整体效率欠佳。作业进行时欠缺实时风险监控，易因操作失误引发安全事故。

智能化技术的迅速发展为铁路车辆段检修作业升级造

就了契机。应用计算机视觉、物联网、大数据、人工智能等技术，可达成检修数据的自动采集、故障的精准诊断以及流程的智能优化，助力检修作业迈向“自动化、精准化、高效化”转型进程。本文依照铁路车辆段检修作业的实际需求，全面探讨智能化技术的应用实践，为检修作业实现提质增效给予参考。

2 铁路车辆段检修作业智能化技术应用的必要性

2.1 解决传统检修效率低的问题

传统铁路车辆段检修作业期间，车辆拆解、部件检测、故障排查等环节多借助人工操作，且各环节的衔接需借助人工协调，存在诸多等待时长。例如，车辆轮对检测，需人工推动检测设备逐对开展，单次检测耗费时间长，查询与调取

【作者简介】韩龙龙（1988—），男，中国河北高碑店人，本科，工程师，从事铁路运输研究。

部件库存需人工核对台账，易出现错拿及漏拿情形。智能化技术可凭借自动化设备替换人工操作、依靠信息化系统优化流程衔接，极大缩短检修所需周期，增进整体作业成效。

2.2 弥补人工检测精度不足的缺陷

铁路车辆关键部件故障往往有隐蔽性，诸如轴承、制动系统、轮对等，人工检测仅能借助外观观察、简单工具测量加以判断，难以察觉内部微小缺陷。如轴承内部磨损、轮对踏面细微裂纹等故障，人工检测极易出现遗漏，而这些故障若未及时予以处理，极有可能引发严重安全事故。智能化技术依靠高精度传感器、计算机视觉等方式达成，发现部件细微异常，精准识别出故障，加大检修精度。

2.3 强化检修作业风险防控能力

铁路车辆段检修作业涉及诸如重型设备操作、高压电路检修等高危环节，传统作业里风险监控依靠人工巡视，存在监控盲区且具有滞后性。车辆举升作业时，若支撑装置存在异常未及时被发觉，易引发车辆坠落。高压电路检修期间，若未实时留意电路状态，存在触电风险隐患。智能化技术借助实时数据采集、风险预警系统达成，提前判明作业风险，保证作业安全无虞。

2.4 适配铁路车辆检修规模化需求

伴随铁路车辆保有量的增多，车辆段检修任务量迅猛增长，传统“一人一岗”作业模式对大量检修人员有需求，且难以适应高峰期检修要求。智能化技术凭借设备自动化及流程智能化，降低对人工的依赖，增进单位时间检修的水平，适应规模化检修需求，与此同时削减人力成本。

3 智能化技术在铁路车辆段检修作业中的应用路径

3.1 智能检测技术实现部件缺陷自动识别

智能检测技术依靠自动化设备与高精度感知手段，替换人工实现车辆部件检测。轮对智能检测采用的是计算机视觉与激光扫描技术，车辆进入检修线的瞬间，自动采集轮对踏面与轮缘的三维数据，利用图像识别算法对比标准参数值，识别踏面磨损、裂纹与轮缘厚度异常等相关缺陷，无需人工去拆解与测量，检测过程只需数分钟^[1]。轴承智能检测借助超声波探伤与振动传感器，实时采集轴承运行时振动频率、声波信号，依靠大数据分析对比正常轴承信号特征，甄别轴承内部磨损、滚珠损伤等故障情形，防止人工检测出现主观性偏差。制动系统智能检测借助压力传感器、位移传感器监测制动管路压力及制动闸瓦位移，自动判定制动系统有无泄漏、闸瓦磨损超标等状况，同时模拟制动相关过程，测定制动响应时间及制动力，保证制动系统性能达到要求。

3.2 智能诊断技术：推动故障分析智能化

智能诊断技术借助大数据及人工智能算法，实现对故障原因的自动分析以及检修方案的精准推荐。整合与分析故障数据以构建铁路车辆故障数据库，结合历史检修、部件寿命及运行工况数据，运用机器学习算法挖掘故障规律，如剖

析不同运行里程下轴承故障的高发类型，成为预防性检修的凭据。车辆检修期间开展实时故障诊断与预警，智能诊断系统实时采集检测数据，一旦检测到部件异常，自动找出数据库中的故障案例进行匹配，对故障原因进行分析，并推送相应检修方案。预防性诊断跟寿命预测凭借分析部件运行数据与损耗规律，预测部件剩余可用寿命，比如依据轮对磨损速率、运行里程，预先判定轮对更换时机，防止故障突发情况，完成“事后修复”至“事前预防”的转型。

3.3 智能仓储技术优化检修物资管理

智能仓储技术借助物联网及自动化设备，实现对检修部件的精准管理和高效调度。智能库存管理将RFID标签粘贴在检修部件上，如轴承、闸瓦、螺栓等。仓储货架安装RFID阅读器，实时记录部件库存数量、存放位置以及入库时间，依靠仓储管理系统自动更新库存台账，无需人工去盘点，同时开展库存预警设置工作，若部件数量低于阈值则自动提醒补货^[2]。自动化物资调度采用AGV以及智能分拣系统，检修工位提出部件需求时，系统自动规划AGV行驶路径，从货架提取对应部件并运抵工位，防止人工搬运产生耗时及错拿风险，尤其适合针对重型部件进行调度。部件溯源管理运用区块链技术记载部件采购、入库、检修、更换的全流程数据，若某部件存在质量问题，能快速追溯其来源及使用轨迹，利于责任界定及同类部件排查，增强物资管理规范性。

3.4 智能管理技术：优化检修全流程管控

智能管理技术借助信息系统与数据集成，实现对检修作业全流程的可视化及智能化管控。智能编制检修计划依据车辆运行里程、故障记录、检修周期，智能管理系统自动产出车辆检修计划，合理安排检修工位、设备及人员，杜绝资源矛盾，例如依照多辆车的检修需求，优先将故障风险高、运营需求紧急的车辆安排至检修线^[3]。作业过程的实时监控借助工位终端、视频监控及人员定位系统实现，实时采集检修作业的进度、人员位置及设备状况，在监控中心予以可视化展示，管理人员可借助远程方式查看各环节进展，若出现进度滞后，如某工位未在规定时间内完成、人员违规操作。实施检修质量追溯管理，创建检修质量档案，记录每辆车的检修项目、检测数据、故障处理成果及检修人员信息，若车辆投入运营后出现检修关联故障，可追踪至具体的检修环节与责任人员，同时借助质量数据分析，实现检修流程与标准的优化。

3.5 应急处理技术：铁路货车故障应急及时性

在铁路货车检修中，一旦智能检测或人工巡检发现故障，应立即启动应急处理流程。首先，由现场检修人员根据智能诊断系统提供的故障定位和风险等级，快速隔离故障部件，防止故障扩大。对于关键走行部件如轮对、轴承、制动系统等，应采取临时加固或更换措施，确保车辆在回送或下线检修过程中的安全。同时，通过智能管理系统记录故障信息、处理过程及更换部件的编号，实现全流程追溯。对重大或复杂故障，应组织技术人员联合研判，结合历史数据和运

行工况制定最优维修方案。故障处理完成后，需通过复检确认设备性能达标，并由系统更新车辆健康状态，以便调度部门及时安排回库或投入运用。这样的闭环管理，可有效缩短故障处置时间，降低运输风险，保障铁路货车运行安全。

4 智能化技术应用的协同机制与优化方向

4.1 构建多技术协同应用机制

智能化技术在铁路车辆段检修作业中的运用并非孤立状态，必须构建“检测-诊断-仓储-管理”的协同机制。智能检测生成的部件相关数据、智能诊断输出的故障相关数据、智能仓储的物资相关数据、智能管理的流程相关数据，需依靠统一数据平台集成，实现数据的彼此共享，如智能诊断系统借助智能检测数据开展故障分析，智能管理系统凭借故障数据调整检修计划。各智能化技术应用环节应实现顺畅衔接，例如智能检测识别轮对出现故障后，智能诊断系统自动剖析故障原因并给出替换方案，智能仓储系统同步取出备用轮对，智能管理系统针对工位作业计划进行调整，推动故障处理高效推进^[4]。智能化设备应跟检修人员协同开展工作，比如智能检测设备探测到故障后，提示检修人员开展重点核查，检修人员依据智能诊断方案实施维修，维修后借助智能管理系统确认作业完成，形成以“设备辅助-人工执行-系统确认”为内容的协同模式。

4.2 智能化技术应用的优化方向

4.2.1 提升技术适配性与稳定性

部分智能化技术在复杂检修环境里易受干扰，有待进一步优化。车辆段粉尘多、光线不足的环境下开展计算机视觉检测，识别精度也许会下降，须改进图像采集设备的防尘、补光功能。车辆段高频设备运行环境的振动传感器，容易受到干扰信号的影响，要优化信号滤波算法，增进数据准确性。

4.2.2 推动技术标准化与模块化

当前铁路车辆段智能化技术应用多采用定制化方案，不同车辆段以及不同车型的智能化设备与系统兼容性差劣，应推动技术标准化。制定智能检测设备的参数标准，同时采用模块化的设计方式，诸如智能诊断系统根据不同车型的故障特征，灵活变换算法模型，加大技术通用性。

4.2.3 加强检修人员智能化技能培养

智能化技术应用须检修人员具备设备操作、数据解读、

故障处理的综合能力，当下部分检修人员对智能化设备不熟，容易造成设备利用率低、故障误判。需强化人员培训，开展智能化设备操作、数据分析、故障诊断等课程。同时借助“老带新”及“实操演练”方式，提高人员智能化技能水平，保证技术落地达成预期效果^[5]。

4.2.4 强化数据安全与隐私保护

智能化技术应用牵涉大量检修数据与设备数据，部分数据呈现敏感性，如车辆核心部件参数、检修工艺等，应加强对数据安全的保护。确立数据分级分类机制，对敏感数据实施加密存储。实施访问权限设置，关键数据的查看与操作仅限授权人员。定期实施数据安全检测，预防数据泄露及篡改风险，维护智能化技术应用的安全状态。

5 结语

智能化技术给铁路车辆段检修作业带来了革命性突破，依靠智能检测实现缺陷自动识别，智能诊断推动故障分析走向精准化，智能仓储实现物资管理优化，智能管理增进流程管控效率，四大技术协同开展，可有效处理传统检修模式效率低、精度不足、风险防控滞后等问题，助力检修作业迈向“数据驱动、智能高效、安全可靠”的转型之路。中铁十六局集团铁运工程有限公司作为铁路运输与检修领域的重要参与主体，在智能化技术应用实践期间，需不断优化技术适配性、助力标准化建设、提升人员技能水平，充分实现智能化技术的价值。未来伴随5G、数字孪生等技术的进步，铁路车辆段检修作业还会实现“虚拟仿真检修”“远程协同检修”等更高级别的智能化应用，为铁路运输安全、高效运行给予更坚实保障，推动我国铁路事业高质量前行。

参考文献

- [1] 刘光禄.如何运用智能化技术优化铁路车辆制造系统检修[J].人民公交,2024,(02):31-34.
- [2] 马冬,林庆城,李浩铭,等.智能眼镜在铁路车辆运维行业的应用[J].黑龙江科学,2022,13(22):109-111.
- [3] 潘明辉.铁路5T安全监控系统智能化开发研究[J].智慧轨道交通,2021,58(06):15-18.
- [4] 李伟,祁书慧.无人值守技术在铁路车辆轮轴检修中的应用与研究[J].铁道车辆,2021,59(05):119-121.
- [5] 张杰,向勇,李宝志,等.车辆检修工业4.0基础初探[J].铁道车辆,2021,59(03):110-113.

Study on the Phenomenon of Slow-Moving Vehicles on Expressways and Their Impact on Traffic Safety

Chunrong Lv

Suzhou Hali Environmental & Safety Technology Service Co., Ltd., Suzhou Branch, Jiangsu, Suzhou, 215000, China

Abstract

Slow-moving vehicles on expressways have become a prominent problem threatening traffic safety and travel efficiency. Based on review research, combined with relevant laws and regulations, law enforcement cases and existing research results, this paper defines the connotation and identification standards of slow-moving vehicles, analyzes their causes, discusses their impacts on traffic safety, and sorts out the effectiveness and dilemmas of current governance practices. The study finds that slow-moving vehicles are essentially low-speed behaviors dominated by subjective illegality, manifested in two forms: below the statutory speed limit or seriously mismatched with the traffic flow speed. The main causes include drivers' cognitive biases, distracted driving, misunderstanding of rules and insufficient law enforcement. By exacerbating speed differences, inducing traffic flow disorder and fostering "road rage", slow-moving vehicles significantly increase the risk of rear-end collisions and side scratches, and reduce travel efficiency by more than 15%. To address the core contradiction of "laws exist but the public is unaware", this paper proposes a three-dimensional governance path of "cognitive correction, technological empowerment and precise law enforcement", providing theoretical reference for optimizing expressway traffic order and upgrading safety management.

Keywords

expressway; slow-moving vehicle; traffic safety; traffic laws and regulations; cognitive bias

高速公路龟速车现象及其对交通安全影响研究

吕春荣

苏州哈里环境安全技术服务有限公司，中国·江苏苏州 215000

摘要

高速公路龟速车已成为威胁道路交通安全与通行效率的突出问题。本文基于综述研究，结合法规、案例及现有成果，界定龟速车内涵与认定标准，剖析成因、探讨安全影响，梳理治理成效与困境。研究发现，龟速车本质是主观违法性主导的低速行为，表现为低于法定限速或与车流速度严重失配；驾驶人认知偏差、分心驾驶、规则误解及执法不足是主要成因；其通过加剧速度差、诱发车流紊乱、滋生“路怒”，显著提升追尾、剐蹭风险，且导致通行效率下降15%以上。针对“法有规定，民却不知”的核心矛盾，提出“教育纠偏、技术赋能、执法精准”三维治理路径，为高速公路交通秩序优化与安全管理升级提供理论参考。

关键词

高速公路；龟速车；交通安全；交通法规；认知偏差

1 引言

截至 2025 年，我国高速公路总里程已突破 20 万公里，但伴随路网扩容与机动车保有量增长，“龟速车”现象愈发凸显，其隐蔽性、传导性危害打破车流稳态，埋下多重安全隐患，相关话题在社交平台引发广泛讨论，部分案例还引发驾驶冲突热点。我国相关法规虽对高速最低车速及车道使用有明确规定^[1]，但“法有规定，民却不知”的认知偏差普遍存在，导致龟速车引发的事故占比持续攀升，因此系统梳理其本质特征、影响机制与治理现状，可为交管部门完善管控

策略、纠正驾驶人认知偏差提供支撑，具有重要现实意义。本文采用文献研究法与案例分析法，检索权威媒体报道、执法数据及研究成果，围绕“现象界定 - 成因解析 - 影响评估 - 治理路径”构建框架，重点分析“规则认知与执行断层”问题。

2 龟速车的定义与特征

2.1 龟速车的定义

龟速车并非单纯慢速行驶，核心区别在于主观违法性与危害性，公安部道路交通事故研究中心将其界定为两种情形：一是违反最低限速规定，即高速行驶低于 60 公里 / 小时或左侧快速车道低于该车道最低限速；二是与车流速度严重失配，正常通行条件下远低于车流平均水平，该界定排除恶劣天气、拥堵等客观必要低速，凸显人为致险本质。

【作者简介】 吕春荣（1987-），男，中国江苏盐城人，本科，工程师，从事安全相关咨询培训研究。

2.2 认定标准

实践中各地已形成量化认定体系，成都通过AI算法整合ETC数据与视频感知信息，以“速度明显低于限速及平均车速、且被多次超越”为核心依据^[2]，如成温高架路某车辆以43公里/小时行驶，低于67公里/小时的平均车速且1分钟内被7辆车超越即被认定；上海结合无人机巡查，将分心驾驶导致的低速行驶纳入违法认定，实现“行为+速度”双重判定，这些标准为执法提供依据并明晰了与正常低速的边界。

2.3 典型特征

龟速车还呈现场景集中性与行为关联性特征，场景上多发生于左侧快速车道、长上坡路段及匝道出入口，60%的投诉指向“快车道慢驶”；行为上80%以上伴随分心驾驶、长期占道等违法，部分货车为省油刻意低速形成持续速度差；节假日高峰时段其数量显著增加，与流量攀升叠加加剧通行压力^[3-4]。这些特征共同作用，使龟速车通过制造速度差、破坏车流稳态、诱发驾驶冲突等，对高速公路交通安全形成多维度影响，成为提升道路安全运行水平的突出障碍。

3 高速公路龟速车现象的成因解析

3.1 驾驶人认知偏差与能力不足

认知误区是龟速车产生的首要主观因素。调查显示，约43%的驾驶人不清楚快车道最低限速规定，部分人错误认为“未超速即不违规”，甚至将低速行驶等同于安全驾驶^[5]。新手驾驶人因经验不足产生紧张情绪，倾向于在左侧快速车道低速行驶以减少观察负担，却忽视速度差带来的风险。这种“慢即是安”的认知偏差，直接导致合法合规的速度控制意识缺失。

3.2 分心驾驶与不良驾驶习惯

分心驾驶已成为龟速车的主要行为诱因^[6]。一线交警执法数据显示，行驶缓慢且方向飘忽的车辆中，多数驾驶人存在浏览手机、拨打电话等行为，部分甚至双手脱离方向盘。此类行为不仅降低车速，更导致路况响应延迟，形成“移动路障”。此外，驾驶人因路线不熟减速查导航、因自私心理长期占用快车道避免变道等不良习惯，均加剧了龟速车现象。

3.3 法规认知缺失与执行困境

“法有规定，民却不知”的规则传导断层尤为显著^[7]。《道路交通安全法实施条例》明确高速最低车速不得低于60公里/小时，但沪渝高速执法案例中，驾驶人陈某在超车道低速行驶，被处罚时仍不知自身违法。这种认知缺失与驾考体系对最低限速及车道使用规则考核不足密切相关。同时，执法难度大导致威慑力不足，2024年全国慢车占道处罚案例不足超速处罚的1%，客观上助长了侥幸心理。

3.4 车辆与环境客观因素

车辆性能缺陷与突发状况构成龟速车的次要成因。部分老旧车辆动力衰减、新能源车辆电量不足，均难以达到正常车速^[8]。莆炎高速长上坡路段，货车驾驶人因省油刻意减

速至30公里/小时，远超正常速度波动范围，最终引发追尾事故。此外，导航系统不完善也间接导致问题，部分导航仅提示“靠左行驶”，未明确车道速度差异，误导驾驶人在快车道低速行驶。

4 龟速车对高速公路交通安全的影响

4.1 加剧速度差风险，提升事故发生率

速度差是高速公路事故的核心诱因，龟速车则是人为制造速度差的主要源头。快车道车辆若以低于最低限速20%的90公里/小时行驶，与后方正常车流的速度差可达30-40公里/时，追尾风险提升300%。公安部道路交通事故研究中心分析指出，高速状态下后方驾驶人难以及时识别前方龟速车，易错过最佳制动时机引发连环追尾。莆炎高速案例中，前车从80-90公里/时骤降至30公里/时，直接导致后方货车碰撞受损。同时，龟速车迫使后方车辆频繁从右侧或应急车道超车，显著增加侧面剐蹭风险。

4.2 破坏车流稳态，诱发“幽灵拥堵”

龟速车打破车流连续性，引发无事故状态下的“幽灵拥堵”且具有传导效应^[9]。日本名古屋大学实验证明，单辆车异常减速可引发后方10公里车流“波浪式停滞”。2024年沪昆高速8小时拥堵，根源便是一辆占道慢车的突然刹车。量化研究显示，车速每降低10公里/小时，道路通行能力下降约15%；节假日高峰时段，单辆龟速车即可导致后方5公里以上车流积压，既降低通行效率，又使车流密集区域处于“走走停停”的高风险状态。

4.3 滋生驾驶冲突，诱发“路怒”情绪

龟速车恶化驾驶体验，极易升级为道路冲突。沪渝高速案例中^[10]，后车因前车低速行驶闪灯提醒，竟引发前车驾驶人在超车道停车理论的危险行为。对8名驾驶年龄5-12年驾驶人的调查显示，所有受访者均有因前车低速产生愤怒情绪的经历，部分人还采取过加速逼近、连续鸣笛等危险应对方式。“路怒”蔓延形成“龟速车-情绪失控-危险驾驶”的负面循环，严重破坏道路通行秩序。

4.4 造成多重经济与社会成本

龟速车带来显性与隐性双重成本损失。经济层面，每公里高速因慢车拥堵1小时，直接经济损失超200万元，涵盖燃油损耗、物流延误等；2024年国庆假期，全国高速因慢车导致的经济损失预估达37亿元。社会层面，拥堵延长导致驾驶人疲劳度上升，进一步降低驾驶安全性；应急车辆因拥堵无法快速通行的案例时有发生，削弱公共服务响应效率。这些成本叠加，使龟速车问题成为影响交通系统可持续运行的公共性问题。

5 高速公路龟速车治理的实践与困境

5.1 法规体系与执法实践进展

我国已形成针对龟速车的法规框架，《道路交通安全法实施条例》明确最低限速标准，《机动车驾驶证申领和使

用规定》将低速行驶列为记分项目，可处200元罚款并记3分。执法层面，多地探索多元化管控：上海启用无人机巡航抓拍，某点位日均取证分心驾驶违法30起；成都研发AI治理系统，通过多源数据碰撞30秒内完成认定，采取“LED提醒+短信预警+精准处罚”模式；湖北对多次违规者发送提示短信，实现教育与警示结合。

5.2 当前治理面临的核心困境

治理仍存三重突出困境：一是认知纠偏滞后，多数被处罚驾驶人对“低速违法”认知空白，如部分驾驶人低速占道被查时竟不知违规，反映规则普及不足；二是认定标准场景适配性差，山区高速坡道等特殊路段，合理低速与违法龟速的界定缺乏细化标准，易引发争议；三是协同机制缺失，驾驶培训、货运企业监管等前端环节与执法衔接不畅，企业对“省油低速”的默许削弱了治理成效。

6 基于“认知－技术－执法”的治理路径建议

6.1 强化认知纠偏，筑牢规则意识防线

针对“民却不知”的核心矛盾，需将驾驶人认知教育贯穿全周期^[11]。驾驶培训阶段，增加最低限速、分车道行驶等规则的教学比重，设置高速龟速车场景实操考核，从源头建立“速度匹配即安全”认知。后期管理中，利用高速服务区、收费站电子屏滚动播放龟速车危害案例与法规解读，结合违法告知短信推送规则说明，实现“处罚一次、教育一片”。同时，对货运企业、网约车平台开展专项培训，纠正“低速省油”错误导向，压实企业主体责任。

6.2 赋能智慧技术，提升管控精准效能

以技术破解认定难、取证难问题，推广成都“多源数据融合”模式^[12]，整合ETC检测、卫星定位与视频监控数据，构建全路网龟速车实时识别模型，通过“速度差阈值+被超越频次”双重指标精准认定。扩大无人机执法覆盖范围，重点部署于龟速车高发路段，利用AI算法自动识别分心驾驶，提升非现场执法效率。优化导航服务，在高速入口及车道切换处增加“本车道最低限速”提示，对持续低速车辆通过导航APP主动推送速度预警。

6.3 优化执法机制，构建梯度管控体系

建立“教育优先、惩戒为辅”的差异化执法模式^[13-14]，参考“首违警告”制度，对首次违规且无严重违法的驾驶人以提醒教育为主；对多次违规、伴随分心驾驶或引发事故的，依法记分罚款，探索“三次以上加倍处罚”标准。加强区域执法协同，建立全国龟速车违法信息共享平台，实现“一处违法、全国预警”。定期发布治理白皮书，公开违法数据与典型案例，强化社会监督与舆论引导，营造“拒绝龟速、安全通行”氛围。

7 结语

高速公路龟速车现象是驾驶人认知偏差、技术管控不足与执法力度薄弱共同作用的结果，其对交通安全的危害不

亚于超速行驶，既通过扩大速度差直接提升事故风险，又通过破坏车流稳态间接引发拥堵与驾驶冲突。“当前”法有规定，“民却不知”的现状凸显了规则传导与认知培育的紧迫性。

治理龟速车问题，必须突破“重处罚、轻治理”的单一执法思维，构建“认知纠偏-技术赋能-执法精准”的三维治理体系。认知纠偏层面，需搭建全周期教育机制，在驾考阶段强化最低限速规则考核，通过高速路沿线标识、新媒体科普等渠道破除“慢即是安全”的认知误区；技术赋能层面，依托智慧交通系统实现实时监测，利用区间测速、智能抓拍等技术精准识别龟速车辆；执法精准层面，实施差异化处罚策略，结合情节轻重细化裁量标准，同时强化执法震慑，培育驾驶人规则敬畏心。

唯有三维体系协同发力，才能从根源上遏制龟速车现象，实现高速公路“速度与安全并重、效率与秩序统一”的运行目标。未来，可进一步开展龟速车速度差与事故率的量化研究，通过实证数据为管控标准细化、治理措施优化提供更坚实的理论支撑，推动治理效能持续提升。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国道路交通安全法实施条例[Z].2004-04-30.
- [2] 邬林桦. 无人机取证，整治分心“龟速车”[N]. 解放日报,2025-08-07(007).
- [3] 项向荣. 驾驶时玩手机补妆谨防龟速车成活靶子[N]. 钱江晚报,2025-04-22(016).
- [4] 谢炜. 行车安全预警机器人在保障高速公路交通安全中的实践与探索[J]. 汽车画刊,2024,(12):78-80.
- [5] 程燕. 浅谈高速公路行车安全科普宣传的重要性[J]. 上海公路,2025,(01):217-219+238.
- [6] 钟颐. 治理『龟速车』是一次驾驶文明的升级[J]. 时代邮刊,2025(12):28.
- [7] 夏俊森. 龟速警告灯亮起,无法行车[J]. 汽车维修技师,2025(9):87-88.
- [8] 颜沫. 高速公路上“龟速”行车,酿成事故也能构成犯罪[J]. 新农村,2018,(01):37.
- [9] 张敏,陈嘉乐,张驰,等. 基于航拍数据的高速公路出口匝道行车安全性评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2024,44(4):108-118.
- [10] 李亚军. 高速公路交通安全隐患排查与事故预防技术创新应用与研究[J]. 警察技术,2022,(03):85-89.
- [11] 张炯. 高速公路交通安全若干问题研究[J]. 黑龙江交通科技,2020,43(11):216+218.
- [12] 汪建华. 高速公路交通安全现状分析及管理对策[J]. 人民交通,2018,(10):50-51.
- [13] 李绪飞. 高速公路ETC系统运行效率与改进策略探讨[J]. 汽车周刊,2025,(10):71-72+70.
- [14] 高超. 基于ETC门架数据的车辆运行态势分析[J]. 交通科技,2025,(03):100-104.

Safety technology for road reconstruction projects passing under existing railway lines

Changjun Yu^{1,2}

1.CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300461, China

2. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710065, China

Abstract

The road from the passenger transport hub in the south of Yulin City to the industrial park in the north of Luchuan County passes under the existing railway line from Yiyang City to Zhanjiang City. Due to the increase in urban traffic volume, the original 2-4.5m frame box culvert needs to be removed and replaced with a 2-8m frame bridge as the right half of the urban road. At the same time, a new frame bridge with a jacking height of 2 to 8 meters is built 300 meters away from the original road as the left half of the urban road. Based on this engineering example, this paper summarizes the safety guarantee technologies for the demolition and replacement of old frame box culverts and the construction of new frame Bridges without interrupting the safe operation of existing railway lines, covering aspects such as the establishment of safety institutions, monitoring and surveillance, stress relief, line reinforcement and demolition, construction train operation, anti-track circuit connection, on-site safety management, and process control of procedures.

Keywords

Reconstruction and expansion; railway frame bridge; jacking; replacement; safety

道路改建工程下穿既有线铁路安全技术研究

余常俊^{1,2}

1. 中交第一航务工程局有限公司，中国·天津 300461

2. 中交第二公路工程局有限公司，中国·陕西 西安 710065

摘要

玉林南客运枢纽至陆川北工业园区道路下穿既有线益阳至湛江铁路，因城市交通量增长，需要将原有的2-4.5m框架箱涵拆除后置换成2-8m框架桥，作为道路的右半幅，同时距原道路300m顶进2-8m框架桥作为城市道路的左半幅。结合该工程实例，从安全机构建立、监控监测、应力放散、线路加固与拆除、施工行车、防轨道电路联电、现场安全管理、工序过程控制等环节，总结了在不中断既有线铁路安全运营前提下，从事旧框架箱涵拆除与置换及新建框架桥的安全保障技术。

关键词

改扩建；铁路框架桥；顶进；置换；安全

1 工程概况

玉林南客运枢纽至陆川北工业园区道路下穿既有线益阳至湛江铁路，因城市交通量增长，需要将原 24.5m 宽的道路拓宽为 60m 城市主干道，并以分离式路线下穿既有线益湛铁路。须将原有 2-4.5m 框架箱涵拆除并置换成 2-8m 框架桥，同时距原道路 300m 顶进 2-8m 框架桥作为道路的左幅。框架桥沿公路走向长均为 17m，纵轴线与益湛 A、B 线交角均为 91°。垂直于线路外侧均采用 80cm 钢筋混凝土板加固^[1]，全挖空顶进法施工。以 19 根灌注桩为支撑桩，其

中 2*2m 方桩 7 根，φ1.5m12 根，桩长 9 ~ 14m。左幅框架桥施工完毕，将原下穿既有线益湛铁路框架箱涵的交通流诱导至左幅，拆除既有框架箱涵后顶进 2-8m 框架桥满足右幅拓宽要求。待拆除的框架箱涵为 2-4.5m 钢筋混凝土结构：长 16m、宽 11m、高 3.8m；顶板厚 50cm、中墙厚 80cm、边墙厚 50cm，两端八字墙均长 3m，有 1m 高的混凝土护栏和防护网^[1]。

按铁路有关部门要求，新建框架桥顶进与既有框架桥拆除置换期间，不得中断铁路安全运营，施工干扰大，风险高，务必精心组织、规范施工，采取切实可行的安全防护技术。下面是几个重要阶段的安全技术：

- (1) 施工区域安全防护技术；(2) 施工行车安全技术；
- (3) 支撑柱施工安全技术；(4) 应力放散安全技术；(5) 线路加固安全技术；(6) 防轨道电路联电安全技术；(7)

【作者简介】余常俊（1964-），男，中国湖北红安人，本科，教授级高级工程师，从事公路、铁路与市政工程施工技术管理研究。

管线迁移的安全技术；（8）框架桥拆除安全技术；（9）基坑开挖安全技术；（10）框架桥顶进安全技术；（11）路桥过渡段施工安全技术。

2 准备工作

2.1 发布信息、宣示施工

开工前以专题会议、新闻报道、通告等形式，发布道路施工信息及交通改道通告，并沿框架箱涵上下游各300m市政道路边设置蓝底白字的公示牌、警示牌，提醒过往行人及车辆绕行施工区。

2.2 成立组织机构，落实安全责任

参建单位务必贯彻执行“安全第一，预防为主”的方针^[2]，成立安全管理机构，完善岗位责任制，成立各级应急救援管理小组，实行领导带班制度。施工负责人、安全总监深入现场加强领导，做好安全管理工作。

道路改建工程指挥部成立安全管理委员会；项目部成立安全小组，安全组长负责施工中主要问题的决策及协调，项目部安全总监对施工全过程安全行为进行监督、检查；施工负责人认真贯彻安全协调会精神，落实安全技术；驻站联络员将列车运行情况及时通知工地防护员并保持与铁路管理部门的联系；工地防护员负责施工期间的安全防护检查工作，及时向施工负责人通报列车运行情况、封闭和开通时间；现场安全员负责施工管段的安全检查，杜绝违章。现场工程师及时解决施工中的技术问题；其他相关人听从指挥，各守其职。

2.3 安全培训与安全交底

驻站联络员、防护员、专职安全员和工班长由正式员工担任，参加铁路有限公司业务培训，经考试合格持证上岗；业主方组织监理、施工方学习铁路线施工的相关规定，贯彻业主有关文件，制定各分项工程实施的安全管理办法、应急技术，经考试合格持证上岗；项目部全体参建人员须经岗前三级安全培训，考试合格才能上岗；特殊工种作业人员须经专业培训考试合格后持证上岗^[2]。

各分项工程及重要工序开工前，除书面交底外还应班前交底。项目经理部通过安全讲座、技术交底、班前交底、安全检查等形式，提高参建人员的综合素质^[3]。

2.4 安全协调会、签订安全协议

工程建设指挥部针对施工各工序环节组织由铁路主管单位、业主、设计、监理、施工方、交通局、所属城镇等有关人员参加的安全生产协调会，提前协调好各方关系。

开工前，业主方与监理、施工单位分别签订《安全生产协议书》^[2]；项目经理部与作业队签订《安全生产协议书》；业主和施工单位分别与工务段、电务段、供电段、车务段、通信段等相关设备管理单位和行车组织单位签订《施工安全协议书》^[4]，明确各自责任与义务，明确安全防范内容、技

术及分工协作、应急事故的处置办法等。

2.5 技术准备

2.5.1 线路踏勘，制定方案

为确保顶进框架桥和既有框架桥置换有序进行，在铁路管理相关部门的相关人员陪同下，业主利用“天窗”时间，组织施工、监理单位相关人员依据施工图设计文件现场调查和施工测量，了解施工区线路设备及管线分布现状，逐一登记，制定施工方案。

2.5.2 上报方案，办理施工许可证

施工单位认真研究施工图设计文件及有关涉铁施工的法律法规，编写施工组织设计、专项方案，组织有关设计、监理、施工及铁道局有关专家对专项施工方案进行论证，将施组、专项方案、施工计划上报监理、业主及所属铁路局有关部门逐级审批，主动联系本段铁路管理部门，按规定办理营业线施工许可证^[3]。

2.5.3 申报天窗

根据总体施工计划与实际进度申报月施工计划，在月底计划中明确“天窗”计划^[3]；根据施工计划申报某日施工所需“天窗”点、封锁计划和慢行45km/h计划。

2.6 监控监测

2.6.1 既有线铁路监控

在待加固线路两端20m铁路路基上布设沉降观测点，每个便梁支墩钢轨柱上以及盖梁上设1个沉降位移观测点；在线路路肩处间距5m设置路基沉降位移观测点，路基观测桩采用Φ20mm螺纹钢制作，埋深2m。用全站仪及水准仪进行坐标及高程监测，施工期间观测频次不少于2h/次，施工结束，继续观测时间不少于3d，每12h观测一次并形成记录，发现路基沉降或隆起应及时汇报^[5]。

框架桥顶进与置换期间，每趟列车通行后应立即测出线路平、纵、横的变形量，便梁基础沉降观测每天不少于4次，若线路几何尺寸发生变化应立即上报整修。

2.6.2 基坑监测

临近铁路营业线施工，专人负责基坑监控监测。在基坑四周坡顶及受基坑影响范围的线路路肩，按5m间距以Φ20mm钢筋桩为沉降观测桩，打入深度2m，对桩编号并测量原始数据。在支护基坑的桩板墙上设置观测点，观测水平位移、沉降，基坑开挖、挡墙、后背墙、框架桥预制与顶进等施工环节，观测频率为每天2~3次，将观测值与原始值比较，如超过规定值应停止施工，速与监理和设备管理单位分析原因，制定补救技术，同时做好地下水位监测工作。

2.6.3 桥梁监控

在相邻上跨铁路的立交桥桥墩上作出明显的观测标志^[1]，施工期间每天对桥墩进行沉降观测、水平位移观测、倾斜观测不少于2次，发现异常立即停止施工，启动应急预案并向监理、业主单位、铁路主管部门汇报情况。

3 几个重要的安全技术

3.1 施工区安全防护

3.1.1 地方道路安全防护

新建框架桥施工期间,用高1.8m、厚2mm的蓝色镀锌波形钢板作围栏将工区隔离,外侧标明施工内容并设标识牌,围挡上设安全警示灯,专人24h值班。左幅施工完毕具备开放交通条件后,安放诱导标志将右幅交通诱导至左幅并专人24h指挥交通;距框架箱涵中心300m上下游市政道路外侧面对前进方向,立“前方施工”、“禁止通行”等反光牌封闭右幅交通,再从事框架箱涵拆除与置换。非施工人员不得进入工区,施工人员、材料、机械进出工区由防护员跟随进出,框架桥置换完毕具备开放交通条件才能拆除相关安全防护设施开放交通。

3.1.2 铁路栅栏网拆建安全防护

施工人员、材料、机械进出施工区需上报专项防护方案,办理相关手续。拆除栅栏网、安设新临时栅栏网时,在开口处派专人24h昼夜看守。施工人员、机械、材料进出铁路栅栏,须有工地防护员随同进出,禁止非施工人员、机械、车、牲畜等进入工区。施工完毕恢复栅栏网,请监理、设备管理单位验收。

3.2 管线迁移

施工前会同设备管理单位、市政管线设备权属单位对管线进行调查,由权属方书面明确地下管线位置,协商管线迁移及保护方案。利用“施工天窗”,在设备管理单位安全监督员、监理、技术人员等监督下以人工开挖方式将影响施工的光缆、电缆、抬起后套上PVC管,架设在纵梁外侧三角架上并设置醒目标志;影响工作坑的管线采用钢支架固定跨越工作坑;需入沟敷设的电缆由电务部门对相应的设备进行测试校核,开挖中遇不明电缆应及时通知设备管理单位确认,采取可靠保护后继续施工;对需改迁的管线划定位置、确定割接点,做好标识与记录;既有电缆迁改割接至新路径后,应按要求敷设标识牌。施放电缆时,防止电缆盘旋转伤人。施工中线路设备养护维修小组专人对管线、设备监控、修整,发现问题及时处理,施工完毕将标识去除并设立新标识。

3.3 施工行车安全技术

绘制现场防护图,提前一个月向铁路主管部门上报安全防护方案。封锁线路要点作业及慢行点作业时,设置驻站联络员和工地防护员,防护员上岗须带齐防护用品,配备专用通信设备保持联络^[4],驻站联络员应及时准确地向工地防护员传达调度指令,工地防护员与驻站联络员通话时应复诵并记录通话内容;收到驻站联络员发出的列车预报、确报,工地防护员应立即通知施工负责人组织地面人员撤离至铁路线以外的安全区,并加强警戒监视来车。因施工需要或计划变更,工地防护员应立即通知驻站联络员,由驻站联络员及时通知行车调度员、车站值班员,经行调批准调整后方可

实施。

距施工区两端20m、800m分别设置减速标、移动减速信号牌,24h慢行防护。施工期间,前沿防护员在距施工区800m加强警戒,及时发来车预报、确报信号与信息。列车到达前15min停止作业,所有人员、机具设备等均应撤离至安全地带,列车过后可继续施工。工区两端由6名防护员24h执行机工联控,限速45km/h^[5]。限速期间来车,工地防护员应在减速始点,向列车司机显示黄色信号旗或黄色信号灯(如图1)。

若施工区的停车防护信号尚未撤除或待避工作尚未做好而列车迫近时,前沿防护员应立即向列车显示红色信号旗(灯)拦停列车^[6](如图2)并通知工区防护员,工区防护员立即距来车方向20m铁道中心插上红旗(灯),旋即通知驻站联络员及邻近车站封闭区间。驻站联络员、防护员应坚守岗位,临时离岗须有人换岗且经车站值班员批准,施工终止时间前务必询问施工负责人能否按时开通,如需延长长时间或限速运行,应提前与车站值班员联系^[7]。

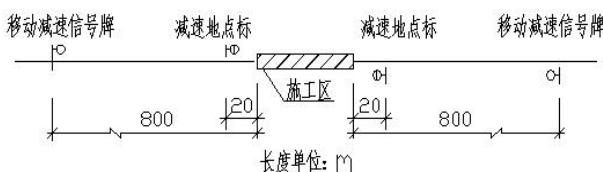


图1 移动减速信号布设示意图

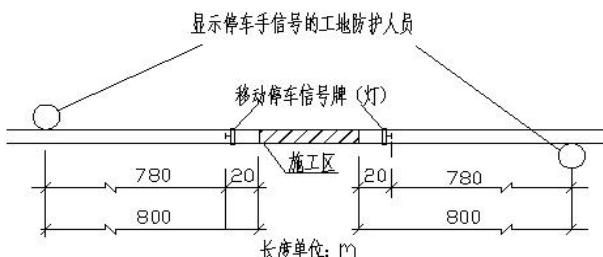


图2 移动停车信号布设示意图

3.4 支撑桩施工安全技术

挖孔桩直径与桩长由地基承载力检算结果确定。发现地质情况与设计资料不相符,应重新验算调整桩长。

参建人员应穿反光防护服,听从工地防护员指令进入或撤离至安全区,机械、工具、材料不得侵限;下钢筋笼及混凝土灌注选择在自然“天窗”或批复的“施工天窗”。遇岩石应采用风镐凿除或用空心钻沿柱位四周取芯,逐步清除岩石;支撑桩采取隔位施工法,当某孔在灌注混凝土时,邻近桩位停止挖孔;混凝土未达到设计强度,相邻桩位不得挖孔^[5]。

3.5 应力放散安全技术

应力放散前,按规定向车站值班员申请办理封锁施工手续,在“天窗”内组织施工区线路调查,清除影响钢轨伸缩的障碍物,施工命令下达后,拢口组、撞轨组、扣件组就位,有条不紊地从事松轨、切轨、换轨、撞轨、复紧扣

件等系列工作。根据设计要求高温锁定低温放散^[4]，锁定轨温从原锁定轨温35°放到45°^[1]。

线路锁定完毕立即检查线路锁定是否满足设计要求，请工务段、电务段等专业部门对口检查，满足开通条件后报设备管理、运输部门批准，方可开通线路限速通行。第一列、第二列限速45km/h，执行机工联控；线路开通的第二天对线路进行整修。

3.6 线路加固与拆除安全技术

3.6.1 线路加固

按批准的施工计划在“天窗”内专人对通讯设备、防护旗、灯、短路铜线等全面清点，确认符合要求后方可封锁作业；在工务部门监控下抽换钢枕；股道间施工应在两线间设置警戒绳，施工人员及所有机具材料不得侵入邻线。

D12、D16m便梁采用120T汽车吊机架设，D24便梁采用220T汽车吊架设。吊装作业严格执行“十不吊”原则；穿横梁用的简易平台支架应采取防倾覆技术，用完及时撤离现场。线路加固前后及过程中，项目部安全总监、施工负责人应组织有关人员对工区和线路设备状态进行检查，并报请铁路相关部门检查验收，确认满足放行列车条件后，开通线路，将施工防护改为慢行信号。线路开通后，线路加固设备养护维修小组按规定巡检、修整线路。

3.6.2 设备拆除

框架桥的三角区施工结束、路桥过渡段加固完毕，经报验同意封锁线路后回碴、串实，提前联系工务段用大机进行捣固，逐步拆除线路纵横梁、整修线路，拆除及整修完毕报请监理、铁路有关部门验收合格后开放铁路交通，逐级提速至正常速度。

3.7 防轨道电路联电安全技术

安装便梁时，所有配件及撬棍等金属物件不得与横梁构成联电状态；抽取轨枕安放横梁时，应在钢轨下支垫大块绝缘橡胶板，安装横梁扣件时，横梁与基本轨间的联结扣件应用绝缘配件；纵梁与横梁之间应垫上绝缘胶垫；钢轨与纵梁之间应使用绝缘扣件连接；使用加固零件应防止零件相互搭接接触钢轨或钢轨联结件；联结好的扣件周围禁止放靠铁件等易导电的物品；金属工具不得同时接触两根钢轨；撬棍应配绝缘套管，撬棍、千斤顶等金属工具下应支垫胶垫；应及时清除扣轨梁和基本轨之间、横托梁和扣轨之间的杂物，避免下雨受潮联电。涉及轨道电路、通讯信号设施的维修作业，应请电务人员跟踪指导^[4]。在轨道电路区段，严禁使用无绝缘装置的道尺等危及行车安全的机具进行线路作业。线路上电缆接线盒、绝缘接头、信号灯等设施应严加保护。

3.8 框架桥拆除安全技术

挡墙施工、线路加固完毕，封闭交通后采取切割法拆除既有框架箱涵。先利用绳锯切割护栏，然后用碟锯将中隔墙与底板分离，再利用绳锯切割中隔墙上部及顶板，主体结构拆除后采取碟锯切割八字墙。利用液压破碎锤破碎混凝土

块，由装载机清理装车运出。列车通行时停止施工，撤离工作区。施工期间做好监控监测及边坡防护工作。

3.9 线下基坑开挖安全技术

管线改迁结束，在基坑临边处设置安全防护栏杆、安全网、安全标志及警示灯；线路加固验收合格，设备单位安全监督员、监理到场再施工。用挖掘机开挖土石方，采用挖掘机带炮头凿除或空心钻配劈裂机清除石方，用桩板墙支护基坑两侧；材料和土方堆放距坑边不小于1.2m，高不过1.5m。搞好基坑排水及边坡防护，下雨前用彩条布覆盖线路边坡；雨天派专人巡视线路，发现塌方、裂缝等异常情况及时组织抢险。现场备足草袋、钢轨桩、挡土板等应急物资以备基坑边坡塌方时使用。基坑开挖后应尽快施工框架桥主体，加强防护^[6]。

3.10 顶进施工安全技术

线路加固完毕，框架桥达到设计强度可从事顶进施工，顶进中应随挖随顶、放坡施工，严禁超挖。工作面不得长时间暴露，遇大雨应停止作业，用蓬布将开挖面盖好以防塌方。

顶进液压系统的各部件，应单体试验合格后方可安装，安装完毕必须试顶，当液压系统发生故障时，严禁在工作期间检查和调整；顶进期间经常对便梁支座、横向限位装置、横向联结系统、便梁配件及路基边坡进行检查；每次顶进前应检查液压系统、顶柱（铁）安装和后背墙变化情况；每顶进一进尺，应观测轴线和高程至少1次，及时纠偏；应仔细观测各观测点变化情况，发现异状立即停止施工，待问题处理后再作业；有列车行驶立即停止施工，每顶完一镐或列车通过后，应巡查、测量线路，发现异状立即整修。

顶进期间严禁施工人员接近或跨越顶铁；顶进中注重基坑降水，保持基底干燥；顶进期间严禁超压超顶程工作，每当油泵油压升高5~10Mpa时，应停泵观察，若有异常应及时处理；如发生危及铁路行车安全的情况，应遵循“先防护、后处理”的原则^[5]。出现基坑坍塌时，所有人员应立即撤出作业面，工地防护员及时通知驻站联络员向铁路有关部门汇报情况，等候处理意见。顶进结束及时对三角区、路桥过渡段及箱身顶部线路进行处理。

框架桥顶进及置换期间，工地防护员时刻提防机械碰撞便梁，防护员未到场禁止施工，机械钥匙由防护员保管；设备定人、定机、定岗并严格执行班前交底、交接检、日常检查等制度。

3.11 过渡段作业及注浆安全技术

过渡段地基加固在框架桥顶进完毕进行，采用A组填料按30cm分层回填夯实。在慢行点内对框架桥两侧路桥过渡段压密注浆，钻孔和作业人员严禁侵入限界。为防注浆引起线路隆起，路肩下1m内不注浆。列车靠近时停止注浆，撤离至安全区，列车过后继续施工。

注浆期间加强路基观测、包括路基面及轨顶标高变化、冒浆点位置、地面异常等并做好监控记录。注浆期间路基每

日观测不少于4次。

4 注意事项

(1) 加强安全教育与巡视，严格按《普速铁路工务安全规则》进行防护，为减少封道次数，将左右幅框架桥施工纳入同一个工区统一管理。

(2) 加强协调与沟通，大型设备、构件穿越铁路应向铁路运营部门申请线路封锁点，不得在封锁点外施工。

5 结语

在不中断铁路正常运营的前提下从事框架桥的新建与置换工程，对安全管理极具挑战性，施工风险远高于常规的工程，应做好以下几点：

(1) 务必遵守铁路有关部门的规定，强化安全管理^[2]。

(2) 保证线路稳定及防联电是难点，确保行车和施工安全是控制重点。施工区的光缆、电缆、信号电缆、电力电缆等管线，应调查清楚，认真落实改移、防护工作。

(3) 施工时应专人对线路、轨道几何尺寸进行检查、监测，发现异常及时整改。

(4) 爱岗敬业，敬畏生命，严格按批准的施工计划组织施工并搞好个人防护及施工区防护。一旦发生行车安全或人身伤亡事故，应按铁路公司有关事故报告、调查、处理的程序和权限调查处理。

参考文献

- [1] 玉林市城南客运枢纽至陆川北部工业园二期园区公路下穿益湛铁路工程施工图设计 中铁第五勘察设计院集团有限公司 [R]2019.
- [2] 余常俊，铁路立交桥转体法施工安全技术研究 [J] 铁道建筑 2010(7):41-43.
- [3] 铁路桥涵工程施工安全技术规程 (TB10303-2020) 中国铁道出版社有限公司 北京.
- [4] 玉林市民主南路下穿益湛铁路工程实施性施工组织设计广西宁铁工程有限责任公司[R]2019 (11).
- [5] 西安至合肥段西外环立交桥顶进施工专项方案 中铁电气化局集团有限公司[R]2015.
- [6] 新龙路立交桥工程施工安全防护专项方案镇江普天旺桥梁顶进工程有限公司 [R] 2017 (6).

Innovation and Practice of Interference Suppression Technology for Rail Transit Communication Signals

Yakun Wang

Beijing Railway Signal Co., Ltd., Beijing, 100070, China

Abstract

As the core support for rail operation control, dispatching command and passenger service, the stability of the communication and signal system directly determines the operational efficiency and safety of the line. This paper takes the communication signal interference problem of on-board equipment in rail transit as the core. Starting from the generation mechanism and evolution characteristics of interference, it classifies and analyzes three types of interference sources: electromagnetic radiation, equipment coupling, and transmission links, and reveals the dynamic evolution law of interference with the operation stage and the hierarchical penetration influence mechanism. Furthermore, the direction of technological innovation is explored from four dimensions: anti-interference design of vehicle-mounted hardware, optimization of production processes, product testing and verification, and type tests. Propose practical paths for full life cycle management, implementation of key scenarios, coordinated promotion of standards, and talent cultivation, and look forward to the development trends of intelligence, integration, and greenness, providing theoretical support and practical references for enhancing the anti-interference capabilities of train control on-board equipment such as CTCS3-300T and CTCS3-400T.

Keywords

Rail Transit; Communication Signaling; Interference Suppression; Shielding Protection; Multi-system Coordination

轨道交通通信信号干扰抑制技术的创新与实践

王亚坤

北京铁路信号有限公司，中国·北京 100070

摘要

通信信号系统作为轨道行车控制、调度指挥与旅客服务的核心支撑，其稳定性直接决定线路运行效率与安全。本文以轨道交通车载设备通信信号干扰问题为核心，从干扰生成机理与演化特征入手，分类剖析电磁辐射、设备耦合、传输链路三类干扰来源，揭示干扰随运营阶段动态演化的规律及层级化渗透影响机制。进而从车载硬件抗干扰设计、生产工艺优化、产品测试验证、型式试验四个维度探讨技术创新方向。提出全生命周期管理、关键场景落地、标准协同推进、人才培养的实践路径，并展望智能化、集成化、绿色化发展趋势，为CTCS3-300T、CTCS3-400T等列控车载设备抗干扰能力提升提供理论支撑与实践参考。

关键词

轨道交通；通信信号；干扰抑制；屏蔽防护；多系统协同

1 引言

伴随中国轨道交通朝着网络化、智能化、高速化迈进，列控车载设备已从单一信号接收与执行单元，升级为集行车控制、数据记录、故障诊断、人机交互于一体的综合控制平台。无论是CTCS3-300T的高速运行控制，还是CTCS3-400T的高密度发车协同，均依赖通信信号的稳定传输。然而，车载设备在运行中易受干扰，不仅引起误码率上升、传输延迟增加，更可能导致控制指令丢失、行车模式切换异常等安全隐患。传统的单一干扰抑制手段已难以应对复杂电磁

环境下的多源干扰问题，从硬件设计、生产工艺、测试验证全流程提升抗干扰能力，成为保障轨道交通安全高效运行的关键。

2 轨道交通通信信号干扰的生成机理与演化特征

2.1 干扰的核心来源分类

轨道交通通信信号干扰来源具备多种样式，可依据生成主体与作用方式分成三类。其一为电磁辐射干扰，主要是由牵引供电系统与大功率电气设备所致。列车启动及制动时的牵引变流器，电流迅速变动引发宽频段电磁辐射，频率跨度从几十kHz到几百MHz，与车载无线通信模块（2.4GHz CBTC、4G/5G）工作频段重叠，导致信号解调产生失真后

【作者简介】王亚坤（1987-），男，中国河南许昌人，本科，工程师，从事轨道交通通信信号研究。

果。车辆高压部件及外部环境释放的电磁能量，也会对车载天线、接收机等设备造成干扰。

其二为设备耦合造成的干扰。因车载设备安装空间紧凑，干扰凭借传导与电场耦合得以传播。供电电缆与信号电缆平行敷设时，高频电流借助分布电容与互感在信号电缆中感应出干扰信号；机箱内部金属结构件之间的电场耦合也会影响敏感电路^[1]。

其三为传输链路干扰。车载设备与地面系统之间的无线链路易受隧道多径效应、外部信号入侵影响；车载内部线束若屏蔽不良或接地不合理，会引入串扰与反射。此外，高速数据传输接口（如以太网、MVB总线）在信号完整性不佳时，也会成为干扰传播的通道。

2.2 干扰的演化规律与影响机制

轨道交通通信信号干扰并非以静态形式存在，而是依据运营阶段、列车状态、设备老化动态演进，设备处于效能最优状态。干扰主要源自牵引供电系统等固定源头，电磁辐射强度波动不超过5%，影响范围集中于牵引变电所周边500米的区域。3至5年后，车载线缆屏蔽层磨损、接插件氧化、电路板元器件性能漂移等问题出现，令系统抗干扰能力弱化。原本微弱的设备耦合干扰渐渐增大，影响范围延伸到整个车站及隧道区间。列车发车间隔小于2分钟的高峰时段，牵引供电系统负荷增长，令电磁辐射强度提升20%~30%。列车高密度运行，无线信道信号流量有所增长，干扰信号跟有用信号碰撞概率上涨三到五倍，干扰的突发性与随机性明显增强。

3 轨道交通通信信号干扰抑制技术的创新方向

3.1 屏蔽防护技术的升级与突破

车载硬件抗干扰设计是抑制干扰的基础途径，必须从电路、结构、元器件选型三方面进行优化。就电路设计而言，采用分层接地与光电隔离技术，将信号地、电源地、屏蔽地分开布局；敏感信号链路使用差分传输与EMI滤波器；电源模块采用宽压输入与低纹波设计，增强对电压波动和高频干扰的抑制能力。就结构设计而言，机柜采用2mm镀锌钢板并喷涂电磁屏蔽涂料，关键接口使用IP67带屏蔽的连接器；内部线缆采用双层屏蔽线与金属波纹管防护，减少外部辐射与内部串扰^[2]。就元器件选型而言，选用符合EN 50155、IEC 61373标准的车规级元器件，确保在宽温、振动、冲击环境下的稳定性；高频电路器件需满足低寄生参数要求，降低辐射发射。

3.2 信号传输链路的抗干扰优化

生产工艺优化是保障硬件抗干扰性能的关键环节。电路板制造方面，采用高密度PCB设计，优化走线布局以减少回路面积；对高速信号线实施阻抗控制与差分对等长设计；焊盘与过孔处理满足车规可靠性标准。线缆线束生产方面，制定标准化线束加工流程，确保屏蔽层360°连续接地；对线束分支处进行额外屏蔽处理，避免干扰泄露；采用自动

化压接与导通测试，提升一致性与可靠性。机柜装配方面，机柜内部金属件通过多点低阻抗接地实现等电位连接；安装导电衬垫确保机箱接缝处的电磁密封；关键模块间加装隔离板，抑制内部干扰耦合。

3.3 多系统协同管控技术的创新应用

产品测试验证是确保抗干扰性能的重要手段。ICT测试可对电路板进行在线检测，发现开路、短路、元件错装等制造缺陷，确保硬件基础质量。功能测试通过搭建车载设备功能测试平台，模拟不同速度、不同信号强度下的设备运行状态，验证通信、控制、诊断功能的稳定性。EMC测试按照EN 50155、EN 50121-3-2标准进行，包括辐射发射（RE）、射频辐射抗扰度（RS）、静电放电（ESD）、电快速瞬变脉冲群（EFT）等项目^[3]。环境测试进行高低温、湿热、振动、冲击、盐雾等环境适应性测试，验证设备在恶劣条件下的抗干扰与可靠性。

3.4 设备与系统的抗干扰设计创新

设备及系统具备的抗干扰能力乃是抑制干扰的关键保障，需要从硬件、软件、架构三方面实现创新。硬件设计贯彻电磁兼容（EMC）标准，电路借助分层接地手段，对信号地、电源地、屏蔽地予以分开设置，关键电路借助光耦、隔离变压器阻断干扰传导。电源模块采用宽范围稳压及低通滤波设计，应对电压波动及高频干扰。设备机箱采用2mm厚镀锌钢板制作而成，表面进行电磁屏蔽涂料喷涂作业，电缆接口采用带屏蔽且防水的IP67连接器，能适应雨雪潮湿环境。软件算法优化加大信号处理能力，信号接收环节借助自适应滤波算法，实时形成反向抵消信号，干扰抑制比≥30分贝。主备控制单元数据处理阶段采用Turbo码、LDPC码等差错控制算法，依靠10%-20%冗余内容，错误率≤15%时可实现数据恢复率≥98%。系统架构搭建冗余容错架构，采取双机热备架构的模式，主备设备借助高速链路实现数据实时同步，主设备故障时，毫秒级即可切换上线；关键传输链路实施双链路备份举措，2.4GHz无线链路及光纤链路实现冗余，切换时间少于100ms。系统依据模块化实施拆分，数据采集、信号处理等模块独立开展运行并进行光耦隔离，杜绝局部故障扩散。

型式试验与质量管控是产品投入运营的最后保障。型式试验按照铁路产品特定技术要求，完成全套型式试验，包括功能安全测试、EMC测试、环境测试、可靠性测试，确保产品满足上线运营条件。质量管控方面，建立生产过程质量追溯系统，对元器件批次、生产工序、测试数据进行全流程记录；实施SPC（统计过程控制）监控关键工艺参数，及时发现异常趋势。同时，将电磁兼容设计要求纳入产品技术规范，从源头把控抗干扰性能。

4 轨道交通通信信号干扰抑制技术的实践路径

4.1 全生命周期的干扰抑制管理体系构建

轨道交通通信信号干扰抑制贯穿产品设计、生产、测试、

交付、运维的全生命周期阶段，形成“预防—控制—优化”闭环管理格局。预防前期阶段，在方案设计与详细设计阶段进行EMC仿真分析（如CST、FEKO），提前优化电路布局与屏蔽结构，同时引入故障模式与影响分析(FMEA)方法，针对车载设备关键模块可能存在的干扰风险点进行预判，制定针对性设计预案，从源头降低干扰隐患^[4]。

生产控制环节，严格依照工艺文件及检验标准予以执行，凭借ICT、功能测试、EMC预测试及时发现隐患；在生产进程里施行首件检验、巡检、末检三级质量管控，实现产品一致性，又建立起关键工序的工艺参数数据库，实时对比研究参数波动与干扰测试结果的关联性，依照抗干扰需求动态调整工艺参数值。

优化后续阶段，构建设备健康状态监测体系，凭借车载记录数据与地面分析平台的结合，掌握设备抗干扰性能的变化动态，事先预警潜在风险；按时开展干扰数据分析及工艺优化，始终提升产品抗干扰能力，每季度对运营反馈的干扰案例进行收集，安排技术团队梳理全生命周期各环节管控死角，更新管理流程以及技术标准。

4.2 关键场景的干扰抑制技术落地

轨道交通各场景的干扰特征差别明显，应拟定差异化技术落地办法，高速运行情形重点改进无线通信链路抗衰落能力，凭借优化天线布局、采用波束赋形技术以提升信号质量，同时往车载设备无线模块中添加自适应功率调节单元，按照列车运行速度与信号强度动态调整发射功率大小，防止高速移动时信号频繁中断或失真。

高密度发车态势强化车载设备数据处理效能，维持多车交汇时通信稳定状态；借助信道聚合技术把多个空闲信道整合成宽信道，加大抗干扰力度，再者搭建高密度发车模拟测试环境，模拟不同发车间隔情形下的信号交互场景，检测车载设备于高并发信号传输当中的抗干扰冗余水平，针对数据缓存与冲突解决算法实施优化。

复杂电磁环境下强化机箱屏蔽及线束防护，降低外部干扰形成的耦合；给关键模块实施光电隔离与电源滤波操作，提高系统整体抗干扰水平，于隧道出入口、牵引变电所周边等强电磁干扰地带，为车载设备添装专用电磁屏蔽罩，与地面基站的信号增强装置相配合，搭建“车地协同”干扰防护网阵，进一步降低复杂环境对设备的干扰程度^[5]。

4.3 技术创新与标准体系的协同推进

搭建多方协同的标准研发体系，与高校、科研机构、设备厂商及运营企业组建抗干扰标准工作组，每年举行2至3次研讨活动。围绕车载硬件抗干扰设计，规定接地、屏蔽、滤波等设计规范；面向生产工艺，制定PCB设计、线束加工、机柜装配等工艺标准；针对测试验证，统一EMC测试方法、环境测试条件与判定准则，为技术升级留出空间。

4.4 人才培养与技术交流机制建设

在人才培养方面，构建高校、企业与科研机构协同架构。高校为“轨道交通信号与控制、通信工程专业开办”电磁兼容与抗干扰技术课程，涉及干扰机理、抑制技术以及标准规范，纳入MATLAB干扰仿真及虚拟EMC测试实验。企业内部开展车载硬件设计、生产工艺、测试验证专项培训，提升工程师实战能力。在技术交流方面，构建常态化平台，每年开展一届抗干扰技术论坛，邀请诸多专家交流车载设备抗干扰设计经验、生产工艺优化案例、测试验证方法等实用技术，推动行业整体水平提升。

5 未来发展趋势与展望

未来轨道交通通信信号干扰抑制技术会朝着智能化、集成化方向深度拓展。智能化方面，AI技术会全面渗透至干扰抑制各环节，依托深度学习的干扰识别算法可达成干扰源米级的定位，主动生成最优的抑制方案。依据历史数据，AI驱动的预测性维护可提前判断设备老化引发的抗干扰能力下降，预先实施改造，减少突发故障的发生频次。

集成化方面，列控车载设备内置的干扰监测及抑制模块中，干扰抑制技术将跟通信信号系统、行车控制系统深度融合，CTCS3-300T/400T等列控车载设备将内置干扰监测及抑制模块，可独立达成“干扰识别—算法优化—参数调整”全流程，无需外部干涉，响应用时<50ms。干扰抑制功能会与列车自动驾驶系统携手联动，以干扰强度为依据动态调整行车速度与间距，维护运行安全状态。

6 结语

轨道交通通信信号干扰抑制技术的创新及实践，是顺应数字时代轨道交通发展需求、保障线路安全高效运行的核心难题。列控车载设备迈向智能化升级关键阶段，通信信号系统的复杂程度以及重要性不断加大，干扰抑制技术面临着新的机遇及挑战。未来需始终加强技术研发及标准建设，引领技术向智能化、集成化、绿色化实现转型，筑牢中国轨道交通网络安全稳定运行的坚实根基。

参考文献

- [1] 陈艳.轨道交通无线通信网络传输信号干扰智能抑制方法研究[J].长江信息通信,2025,38(05):217-219.
- [2] 刘希高,杨世武.基于多导体传输线的高速铁路站内机车信号邻线干扰研究[J].铁道学报,2024,46(10):76-85.
- [3] 李守杰,曹义斌,董海萍.多种干扰下轨道通信信号高精度自动化监测系统[J].微型电脑应用,2024,40(08):159-163.
- [4] 杜晓鑫.轨道信号干扰分析仪的特点及应用[J].铁路通信信号工程技术,2023,20(S1):117-121.
- [5] 刘安波.ZPW-2000型轨道电路频率干扰典型案例的分析与处理[J].铁路通信信号工程技术,2020,17(S1):16-20.

Risk assessment and control of temperature cracks in large volume concrete construction of port and waterway engineering

Zhongping Wang

Dongdong Hongye Construction Group Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang, 314400, China

Abstract

The construction of large-volume concrete in port and waterway engineering projects is influenced by multiple factors including structural dimensions, heat of hydration characteristics, and marine environmental conditions. Temperature-induced cracking exhibits distinct temporal and regional patterns. During the early hardening stage, the internal temperature of concrete rises progressively with accumulated heat of hydration. Meanwhile, external factors such as tidal fluctuations, sea breeze cooling, and diurnal temperature variations create significant thermal gradients between the concrete's interior and exterior. This thermal disparity leads to stress concentration and subsequent crack formation. To reduce the probability of temperature-induced cracking, this study aims to provide technical guidance for hydraulic concrete construction, thereby enhancing both engineering quality and service reliability.

Keywords

Mass concrete; Temperature cracking; Port engineering; Hydration heat; Risk control

港口与航道工程大体积混凝土施工中的温度裂缝风险评估与控制

王中平

东栋宏业建设集团有限公司，中国·浙江 嘉兴 314400

摘要

港口与航道工程中的大体积混凝土施工受结构尺度、水化热释放特性与海洋环境多因素叠加影响，温度裂缝风险具有显著的阶段性与区域性特征。在硬化早期，混凝土内部温度随水化热累积不断升高，而外部受潮汐变化、海风冷却和昼夜温差影响，内部与外部形成较大温差，导致约束应力集中并诱发裂缝。为降低温度裂缝发生概率，本文的研究旨在为水工混凝土施工提供技术依据，提升工程质量与服役可靠性。

关键词

大体积混凝土；温度裂缝；港口工程；水化热；风险控制

1 引言

港口与航道工程在施工过程中广泛采用大体积混凝土，其结构厚度大、约束条件强、凝结速度快，温度裂缝问题成为工程质量控制的重点。混凝土在水化过程中产生大量热量，导致内部温度迅速升高，而海洋环境中昼夜温差、潮汐波动及湿热气候，使外界温度呈现频繁变化，内部外部温差进一步扩大，产生较大的温度应力。如果应力无法有效释放，将引发早期裂缝，进而影响结构的密实性、耐久性和长期使用安全。随着工程规模不断增长，传统温控措施已难以完全适应复杂水工环境，对温度裂缝形成机理、风险评估方式和控制策略提出了更高要求。开展针对性的技术研究，有助于

构建精准的温控体系，提高港口与航道工程的质量管控水平，为工程安全运营奠定坚实基础。

2 港口与航道工程大体积混凝土施工的结构特征识别

2.1 大体积混凝土结构的规模参数与构造特性

港口与航道工程中的大体积混凝土结构具有体量大、厚度高和约束程度强的特点。典型结构厚度普遍达到 1.8 米至 3.5 米，单次浇筑量常超过 3000 立方米，部分码头或沉箱基础一次浇筑量甚至接近 6000 立方米。厚大结构导致内部散热路径增长至 1 米以上，水化热在 48 小时内可使核心温度升至 65℃ 至 78℃，而表层受风冷和水气影响温度保持在 20℃ 至 32℃ 区间，形成显著的内外温差。结构中钢筋配置密度高、刚度强，使内部自由变形空间被显著限制，温度应力释放困难。几何构造如转角、台阶、节点与施工缝位置复杂，应力容易在这些区域集中，裂缝萌生概率增大。水工

【作者简介】王中平（1987-），男，中国浙江平湖人，本科，高级工程师，从事港口与航道工程研究。

结构的施工节段长、整体尺寸大，使材料收缩与水化升温的累计效应叠加，进一步提升裂缝风险。通过识别这些规模与构造特征，可为温控方案制定提供基础依据。

2.2 施工环境条件对温度场分布的影响因素

港口与航道工程位于内河与湿热、多风、潮汐频繁变化的海岸带环境，外界条件对混凝土温度场分布影响显著。施工区域昼夜温差通常达到8℃至12℃，高湿度保持在70%至90%区间，风速常在4米/秒至9米/秒波动，使表层散热速度加快。潮汐水温一般为16℃至22℃，涨潮阶段海水与结构直接接触，使表面温度短时间内下降5℃至10℃。降雨、海雾与太阳辐射交替影响，造成混凝土表层温度在一天内出现4℃至8℃跳跃式波动。相较之下，内部水化热集中，温升幅度可维持在25℃至40℃范围，内外温差不断扩大，使温度场呈现明显非均匀性。不同施工时段的环境差异，如夜间浇筑、潮间带施工或高温季施工，会显著改变温度分布形态，使外界条件成为影响温控设计的关键因素^[1]。

3 港口与航道工程大体积混凝土温度场演化规律评估

3.1 水化热释放过程的时空变化规律分析

大体积混凝土在水化反应中呈现明显的温度峰值特征，核心区域温升速度在浇筑后前24小时可达到每小时1.2℃至1.8℃，温度峰值通常在48至60小时出现，峰值温度常在65℃至78℃区间。不同位置温度分布呈现明显梯度，距表面20厘米处较核心温度低15℃至20℃，距结构外表5厘米范围温度进一步下降至表层温度，仅为20℃至32℃。水化热释放曲线在底板、墙体、节点位置呈现差异，底板因散热困难温升幅度最高，可维持高温状态超过72小时，而墙体靠近空气散热快，高温持续时间通常不超过48小时。水化反应速率受水泥矿物成分影响，C3S含量从45%增加到55%会使峰值温度上升约6℃。不同部位的温度演化规律决定了温控措施的差异化需求，是裂缝风险预测的重要依据。

3.2 外界环境温度、潮汐与风压条件的共同作用机制

外界环境对混凝土温度演化具有强制性影响，其作用可在短时间内显著改变表层温度。空气温度在一天内变化幅度常达到8℃至12℃，若结构暴露于高温太阳辐射，表层温度可瞬间升高4℃至6℃，而夜间受风冷作用，表层可能在两小时内下降3℃至5℃。风速在4米/秒至9米/秒变化时，表层散热系数可提高30%以上，加速温度下降。潮水温度为16℃至22℃，涨潮浸泡时结构表面温度骤降幅度可达5℃至10℃。风压变化引发空气流动增强，使表层换热量增加约15%至25%，表层温度随风压波动出现1℃至3℃摆动。外界环境的多因子叠加作用使混凝土表层温度呈现强时变性，与内部缓慢变化的温升形成明显耦合差异，为裂缝风险创造条件。

3.3 温度梯度、约束应力与应力集中分布特征

大体积混凝土内部外部温差常维持在25℃至35℃范

围，导致结构内部形成显著温度梯度，温度梯度峰值常达到12℃/米至18℃/米。由于结构刚度大、钢筋布置密集，自由变形受限，当温差达到28℃至32℃时内部拉应力可达到1.8兆帕至2.6兆帕，接近或超过混凝土早期抗拉强度1.5兆帕至2.0兆帕，裂缝风险大幅提升。节点、转角、台阶位置因几何突变产生局部应力集中，应力集中系数可达1.4至1.8，局部拉应力增长约0.3兆帕至0.6兆帕。底板与墙体交界处因约束最强，往往成为温度裂缝的主要萌生区域。不同浇筑段因温度升降不同步，会形成界面拉应力，界面应力峰值可达2.0兆帕左右。温度梯度与约束效应的叠加构成裂缝形成的核心动力，对温控设计提出严格要求^[2]。

4 港口与航道工程大体积混凝土温度裂缝风险诊断

4.1 温度裂缝类型识别与形成条件判定

大体积混凝土中常见的温度裂缝类型包括表面收缩裂缝、贯穿性拉裂缝和界面温差裂缝。表面裂缝多发生在浇筑后24小时至72小时，表层温度下降幅度达到5℃至10℃时即可能产生拉应力，使表层应力达到1.0兆帕至1.5兆帕并引发裂缝。贯穿性裂缝与内部温升幅度密切相关，当内部温度短时间内从25℃升至70℃时，内部膨胀受周围混凝土约束形成较大应力，拉应力可达到2.0兆帕至2.5兆帕，超过早期抗拉能力后裂缝贯通。界面温差裂缝主要发生在分块浇筑界面，当新老混凝土温差达到20℃以上时界面会出现1.6兆帕至2.2兆帕的拉应力。裂缝类型与温度梯度、收缩变形和结构约束共同作用相关，通过识别温差幅度、应力发展速率和结构约束特征，可实现裂缝形成条件的精准判定，为风险分级提供基础。

4.2 水化热峰值与温差临界值的风险阈值分析

水化热峰值温度对裂缝风险具有核心影响，内部温度一旦超过70℃至78℃区间，内部膨胀量将显著增加，使应力增长速度提升约30%。温差是判定裂缝风险的关键指标，当核心与表面温差处于25℃至30℃范围时，裂缝概率迅速提升；当温差超过35℃时，拉应力可达到2.4兆帕以上，明显超过多数C30至C40混凝土早期抗拉强度。底板温差临界值通常在30℃左右，墙体因散热快临界值约为26℃。施工缝区域因约束条件叠加，其温差临界值更低，仅为18℃至22℃。水化热峰值与温差阈值之间的组合决定裂缝风险等级，例如峰值达到72℃且温差超过32℃时应判定为高风险区。通过将温度峰值、温差幅度和早期强度参数进行量化分析，可形成大体积混凝土裂缝风险的临界判定体系，为温控措施提供参数依据^[3]。

4.3 施工工序、材料性能与结构刚度导致的风险叠加效应

大体积混凝土裂缝风险受到施工节奏、材料特性与结构刚度共同影响，并呈叠加放大效应。快速浇筑使混凝土内部升温速率达到每小时1.5℃至1.8℃，若覆盖保温滞后超过

2小时，表层降温可加速3℃至5℃，导致内外温差快速扩大。材料性能如水泥C3S含量从45%提升到55%将使峰值温度升高6℃左右，若骨料含水率降低至0.2%，其吸热能力下降，使温升进一步增长3℃至4℃。结构刚度越大，约束系数越高，底板与墙体交接位置的约束系数可达1.6至1.8，使拉应力提高0.4兆帕至0.7兆帕。施工时间安排也有明显影响，如高温时段浇筑使表面温度在短时间内波动4℃至6℃，与内部升温叠加导致更大温差。三类因素相互作用，可能使综合裂缝风险提升40%至60%，需在施工过程中进行系统协同控制。

5 港口与航道工程大体积混凝土温度裂缝控制技术

5.1 材料选配与水化热调控的技术路径

大体积混凝土调控水化热可通过合理选择水泥品种、骨料性能和掺合料比例实现。采用水化热较低的矿渣水泥或粉煤灰水泥可使峰值温度下降8℃至12℃，掺入粉煤灰与矿渣粉比例控制在25%至50%区间可有效延缓水化反应速率。骨料选择密度高、含水率稳定的材料能提升混合物热稳定性，使内部温升降低3℃至5℃。减水剂与缓凝剂的协同使用可减少胶凝材料用量约10%，从而降低总放热量。通过调控水灰比至0.38至0.42范围，可在保证强度的前提下减少水化热积聚。材料预冷可进一步降低入模温度，使初始温度下降4℃至6℃，降低早期温差。采用上述材料路径能有效降低水化热峰值与温差幅度，为裂缝控制奠定基础。

5.2 温控防裂施工工艺的过程性控制措施

温控措施应覆盖浇筑、保温和降温全过程。控制入模温度在18℃至22℃区间，可降低后期温升幅度。分层浇筑厚度保持在30厘米至50厘米范围内，有助于散热均衡，避免局部温度集中。采用覆盖保温材料，使表层降温速率降低40%至60%，保持外表温度稳定。冷却水管技术在底板厚度超过2米时可显著降低核心温度，使峰值下降8℃至15℃。洒水养护在风速超过6米/秒环境下应适当延长周期，以保持湿润度稳定。夜间浇筑可避免强烈太阳辐射影响，使表层温度变化幅度从6℃降低至2℃左右。全过程跟踪温度变化并依据温度曲线调整保温措施，可减少温差梯度，维持

结构处于安全温控范围内^[4]。

5.3 结构分缝、合理分块与后浇带设计的技术策略

结构合理分缝与分块是控制温度应力的重要路径。将浇筑区块尺寸控制在6米至12米范围，可减少体积膨胀累计效应，使内外温差降低约20%。设置后浇带可使不同节段温升变形错开，后浇带宽度通常保持在0.8米至1.2米，可吸收部分温度变形。伸缩缝布置在应力集中区域，可减少拉应力峰值0.3兆帕至0.5兆帕。节点与转角区域可通过设置减力槽降低局部刚度，使应力集中系数从1.8降低至1.3左右。墙体与底板交界处引入柔性连接层，可缓解约束，使温度应力降低15%至25%。通过合理结构设计与分段浇筑策略，可显著降低整体温度裂缝风险，提高结构耐久性与安全性。

6 结语

本研究围绕港口与航道工程大体积混凝土施工中的温度裂缝风险展开系统分析，从结构特征、环境作用、温度场演化、裂缝机理与控制技术等方面构建了较为完整的技术论体系。通过对温度梯度、约束应力、界面效应等关键因素的量化研究，进一步明确了温差临界值、水化热峰值和结构刚度对裂缝形成的决定性影响，并提出材料优化、施工工艺调控与结构分段设计协同的综合控制路径。研究强调监测手段在施工期温控中的核心作用，通过数据化手段实现风险预警与动态调整，可显著提升温控措施的精准性和有效性。总体来看，加强对大体积混凝土温度行为的全过程管理，对于保障港口与航道工程的结构安全、耐久性能与服役可靠性具有重要意义，为工程建设实践提供了方法支撑与技术方向。

参考文献

- [1] 李翔.港口航道整治工程大体积混凝土护坡施工技术探讨[J].珠江水运,2025,(10):71-73.
- [2] 于占秋.港口航道工程大体积混凝土裂缝施工控制技术研究[J].珠江水运,2025,(08):138-140.
- [3] 李厚平.分析港口与航道工程大体积混凝土施工裂缝控制[J].珠江水运,2024,(12):43-45.
- [4] 王文.港口与航道工程大体积混凝土裂缝防治技术分析[J].珠江水运,2024,(08):118-120.

Research on key problems and optimization paths of national highway project contract management

Jie Zhu

Dongdong Hongye Construction Group Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang, 314400, China

Abstract

With the continuous advancement of national and provincial highway construction, contract management has become a critical component throughout project implementation. Effective contract management ensures that projects are completed on schedule and meet required quality standards while reducing legal risks, financial risks, and adverse impacts caused by engineering changes. However, many current highway projects still face issues such as incomplete contract clauses, unclear risk allocation, and even contract disputes. This study analyzes the key problems in present contract management practices for national and provincial highway projects and proposes optimization pathways. The discussion focuses on enhancing contract planning, strengthening contract execution monitoring, and improving information transparency to support more efficient and standardized contract management.

Keywords

National and provincial highway projects; Contract management; Risk control; Optimization pathway; Digital technology

国省道工程合同管理关键问题与优化路径研究

朱杰

东栋宏业建设集团有限公司，中国·浙江 嘉兴 314400

摘要

随着国省道工程建设的不断推进，合同管理在项目实施过程中扮演着至关重要的角色。有效的合同管理能够确保项目按期、按质完成，并降低法律风险、财务风险以及工程变更的负面影响。然而，当前许多国省道工程在合同管理中仍存在诸如合同条款不完备、风险分配不明确，甚至发生合同纠纷。本文通过分析现阶段国省道工程合同管理中的关键问题，提出了优化路径，重点探讨了完善合同策划、加强合同执行监控、提升信息透明度等优化措施。

关键词

国省道工程；合同管理；风险控制；优化路径；数字化技术

1 引言

国省道工程作为重要的基础设施项目，直接影响区域经济发展和社会生活质量。随着我国道路建设规模的逐步扩大，工程项目的复杂性和施工管理的难度不断增加，合同管理的地位日益突出。合同管理不仅仅是合同条款的制定与签署，它涉及到项目实施全过程的风险管理、资源配置、进度控制和质量监督等多个方面。近年来，国省道工程在合同管理中暴露出了不少问题，如合同条款的不完善、履约管理的薄弱、信息不对称等，严重影响了项目的顺利推进和利益相关方的权益保障。因此，如何解决现有的合同管理难题，推动合同管理体系的优化与创新，已成为提升国省道工程项目管理水平的关键所在。

2 国省道工程合同管理体系的构成要素

2.1 合同文件结构与条款设置的核心内容

国省道工程合同的核心内容不仅仅是合同条款的具体描述，还涵盖了项目实施的基本框架、履约要求、责任分配及法律保障等多方面内容。合同文件的结构通常包括总则、合同条款、附件和补充协议等部分。总则部分明确了合同的基本原则、双方权利义务、违约责任和争议解决方式；合同条款则详细规定了项目实施过程中的具体条款，如施工进度、质量要求、材料采购、付款方式等；附件与补充协议通常用于进一步补充和完善合同条款，确保施工中出现的具体问题得到及时解决。通过精确的条款设置和结构合理的合同文件，可以有效减少项目实施中的争议，确保合同双方的权益得到合理保障^[1]。

2.2 合同履约机制与风险责任分配框架

在国省道工程的合同管理中，履约机制和风险责任的分配是至关重要的。履约机制通常包括各方责任的明确、履

【作者简介】朱杰（1989—），男，中国浙江海宁人，本科，工程师，从事合同管理研究。

约期限的规定及违约责任的具体执行标准。合同中需设立明确的履约节点和考核标准，以确保工程各阶段的按时完成。风险责任分配框架则依据工程的特点和实际情况，合理地将各类风险分配给不同的合同方，避免风险集中和责任不明。包括施工中的质量、进度、资金和安全等方面的风险，应按照合同条款事先明确责任归属，防止在工程执行过程中产生矛盾和争议。通过完善履约机制和风险责任框架，能够在合同履行过程中实现各方利益的有效平衡，提升合同管理的执行力。

3 国省道工程合同管理的主要风险类型

3.1 合同条款不完备导致的法律与履约风险

在国省道工程合同中，条款不完备是导致法律与履约风险的一个主要因素。合同条款如果没有明确规定关键的施工要求、支付方式、工程变更等内容，会使得项目双方在执行过程中产生较大的争议。例如，项目进度延误、工程质量以及材料采购的规范不清等，都可能因为合同条款的不完善而无法得到有效解决。这种不完备的合同条款不仅容易引发履约问题，还会带来不必要的法律纠纷。因此，在合同的起草过程中，必须确保条款的完整性、清晰性和可操作性，以最大限度地降低法律和履约风险。

3.2 工程变更、签证与计量结算风险

工程变更、签证与计量结算影响国省道工程合同管理的关键风险点。工程在实施过程中，难免会遇到设计调整、施工条件变化等情况，这就要求合同中要明确如何处理变更和签证问题。若相关条款不够完善或双方没有达成一致，可能会导致项目成本超支、施工进度受阻。计量结算的过程中，若没有明确规定计量标准和结算流程，容易出现费用争议，导致双方无法就最终支付金额达成一致。因此，合理、明确地处理变更签证和结算问题，是减少相关风险的重要手段。

3.3 施工进度、质量与安全责任界定风险

施工进度、质量与安全的责任界定是国省道工程合同管理中的另一个关键风险领域。若合同中没有对项目进度、质量标准和安全责任进行明确划分和约定，可能会导致各方在项目执行过程中推卸责任，最终影响施工效果。尤其是在质量控制和安全管理方面，若没有详尽的条款规定和严格的责任追究机制，可能会在施工过程中因疏忽造成质量问题，甚至引发安全事故，造成巨大的经济损失和法律责任。因此，必须在合同中对施工进度、质量和安全责任做出细致明确的界定，并制定完善的监督和处罚措施^[2]。

4 国省道工程合同管理存在的关键问题

4.1 项目前期合同策划深度不足的问题

在许多国省道工程中，项目前期合同策划的深度不足，常常导致项目实施过程中出现诸多问题。项目合同策划不仅要对项目的总体目标进行规划，还应详细考虑施工中的每一个环节，包括时间安排、资金管理、人员调配等。如果策划

阶段未能充分分析潜在风险，忽视合同条款的细节，后期施工时很容易出现合同争议。预见性不足的合同策划将使项目在执行过程中面临诸如资金短缺、资源调度不合理等问题，因此，合同策划应更加细致、全面、系统化。

4.2 合同执行过程信息不对称与监管滞后问题

合同执行过程中，信息不对称和监管滞后是影响项目顺利进行的重要因素。在一些国省道工程中，由于项目各方的信息流通不畅，导致项目实施中各项数据与进展无法及时反馈给相关部门或负责人。信息的不对称使得问题无法第一时间得到有效处理，进而影响工程进度和质量。此外，监管滞后问题也是导致合同管理失效的重要原因之一。未能在合同执行过程中进行实时监督和动态调整，容易导致问题积累并影响最终的项目结果。有效的信息流通和及时的监管手段，对于提高合同执行过程的效率至关重要。

4.3 合同纠纷处理机制不健全的问题

国省道工程项目中，合同纠纷处理机制的不健全是一个普遍问题。许多项目在合同履行过程中，未能及时建立起有效的纠纷解决机制，导致出现争议时缺乏规范的处理程序。通常，项目双方会因合同条款的不明确或履约过程中出现的分歧而发生冲突，若缺少预先约定的争议解决方式，问题就会积累，最终可能通过司法途径解决，导致工程的延期和额外费用的增加。完善的纠纷处理机制能够帮助各方在发生争议时通过协商、调解、仲裁等方式迅速解决，避免诉讼风险并确保项目顺利推进。

5 国省道工程合同管理优化的制度路径

5.1 合同策划深度提升与标准化条款体系构建

合同策划的深度提升需要从项目立项阶段开始介入，通过细化项目需求、梳理施工流程、明确资源配置方式等内容，形成系统化的合同策划方案。标准化条款体系的构建应在大量工程实践的基础上进行，通过汇集合同风险点、总结典型条款漏洞、提炼行业共性要求，形成适用于国省道工程的合同条款库。条款库可涵盖工程质量、进度、支付节点、风险分配、变更控制、验收标准等内容，以模板化方式提供给项目单位使用。通过在合同文本编制阶段嵌入标准化条款体系，可有效减少随意性，避免条款设置不当带来的法律风险，并确保不同项目之间的合同管理标准保持一致，提高合同履行的可控性^[3]。

5.2 合同执行全周期监督与动态控制机制完善

全周期监督机制的建立依赖明确的流程设计与持续的过程控制，通过将合同执行划分为签订、实施、验收、结算等阶段，构建全过程监督链条。动态控制机制需要依托实时信息采集与跟踪技术，将施工进度、质量信息、材料使用、资金支付等关键数据纳入监督系统，实现合同执行情况的持续监测。在项目执行中，通过对偏差进行动态比对，可及时进行措施调整，确保履约目标得以实现。同时，在制度层面

建立问题反馈、现场核查、应急处置、责任追踪等机制，保障监督活动可落到实处。动态控制机制能够有效提高合同执行透明度，降低管理盲区，推动合同管理由事后处置向过程控制转变。

5.3 合同争议预防与快速处理机制构建

合同争议预防机制应在合同编制阶段提前介入，通过设置清晰的权责界定条款、变更处理条款、验收标准条款、费用结算条款等方式，减少产生争议的可能性。快速处理机制需构建多层次争议解决体系，通过建立项目级协商机制、管理单位调解机制、行业组织仲裁机制，为争议的分级处置提供路径。项目执行过程中，可引入合同争议台账制度，将争议事项分类登记、风险等级标注、处理时限明确，确保争议问题快速闭环。在制度设计中，还需加入证据管理要求，通过资料归档、影像资料留存、会议纪要规范化，提升争议解决的依据质量，使合同争议处理更加及时、高效、规范化。

6 国省道工程合同管理优化的技术路径

6.1 合同管理数字化系统的建设与应用

数字化系统在合同管理中的应用依托信息化平台，实现合同文本管理、履约信息采集、进度跟踪、费用核算、变更签证等模块的自动化处理。系统可整合BIM技术、GIS位置数据、移动终端采集技术，通过电子化方式记录合同执行全过程，使数据在平台内自动关联、自动分析，实现合同执行情况的可视化展示。在实际应用中，可通过OCR技术识别合同文本，通过区块链技术确保合同数据不可篡改，通过电子签章实现合同签署的规范性。数字化系统能够提高信息流通效率，减少人工干预，使合同管理更加高效透明，为管理单位提供可靠的数据依据。

6.2 数据驱动的合同风险识别与预警模型设计

风险识别与预警模型依托大数据分析技术，通过采集合同履约过程中的多维度数据，包括进度偏差数据、现场质量检测数据、支付节点数据、变更记录等，构建风险指标体系。模型设计可采用机器学习中的随机森林模型、梯度提升模型或神经网络模型，对风险发生概率进行预测，同时利用关联规则挖掘算法识别风险之间的内在关联。模型在运行中将实时数据输入系统，通过预测输出高风险环节，并触发预警提示。预警系统可通过阈值设定、颜色标识、自动生成报

告等方式向管理者传递风险信号，使合同管理从经验判断向数据判断转变，提高合同履约风险控制能力。

6.3 基于全过程管理的智能决策支持平台构建

智能决策支持平台通过集成数据采集、数据分析、模拟预测和辅助决策等功能，为合同管理提供技术支持。平台可结合BIM建模技术构建工程全过程数字模型，通过物联网传感器采集现场数据，利用云计算实现大规模数据实时处理。系统可基于知识图谱构建合同知识体系，并利用推理算法对合同疑点、质量偏差和进度风险进行研判。平台中的预测模块可采用仿真算法，对工程成本变化、进度延误概率和施工风险进行模拟，为管理者提供决策建议。智能决策支持平台能够实现合同管理流程自动化、风险分析智能化、决策建议精准化，使合同管理的技术支撑能力持续增强^[4]。

7 结语

国省道工程合同管理在工程建设全过程中具有基础性、关键性作用，其管理水平直接影响项目投资效益、施工质量与安全运行。面对当前合同策划深度不足、执行过程信息滞后、风险分配不合理以及争议处理不畅等突出问题，加强制度建设与技术创新已成为必然趋势。通过完善合同策划体系、细化条款标准、强化全过程监督与争议快速处理机制，可有效提升合同管理的制度效能。同时，依托数字化技术、智能分析模型与决策支持平台构建技术化管理体系，有助于实现合同履约状态的实时监测和风险的提前识别。制度与技术的协同优化将推动国省道工程合同管理向精准化、透明化、智能化方向发展，为工程建设的高质量推进提供坚实保障。

参考文献

- [1] 张炳娟.道路桥梁工程施工合同风险管理优化研究[J].现代工程科技,2025,4(13):181-184.
- [2] 谭丽竹.道路桥梁工程合同管理对结算准确性的影响及优化策略研究[A].2024新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(四) [C].《中国建筑金属结构》杂志社有限公司:2024:23-24.
- [3] 程秋连,文安飞,周俊杰,夏金刚,王旭.道路工程项目施工单位合同管理问题及解决措施[J].工程技术研究,2022,7(18):132-134.
- [4] 梁凯,孙珺.市政道路工程全过程造价控制及合同管理措施[J].大众投资指南,2021,(12):50-51.

Analysis of the application measures of Internet of things in the development of Intelligent Transportation

Jinhui Ye

XinJiang Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830006, China

Abstract

with the continuous improvement of urbanization, the rapid growth of the number of motor vehicles and the continuous expansion of residents' demand for mobility, the problems of traffic congestion, rising energy consumption, frequent accidents and low efficiency of traffic management have become increasingly prominent. As an important direction of urban governance modernization, smart transportation is becoming a key strategy to promote the digital, intelligent and refined management of transportation system. The Internet of things technology provides basic technical support for the construction of intelligent transportation by virtue of its comprehensive perception, real-time transmission, intelligent processing and collaborative control capabilities. This study shows that smart transportation enabled by the Internet of things can not only improve road traffic efficiency and reduce the incidence of accidents, but also promote the optimization of traffic energy structure, improve urban operation efficiency, and provide a sustainable development path for the modernization of urban governance.

Keywords

Internet of things; Intelligent transportation; Vehicle road coordination; Intelligent perception; Modernization of traffic management.

物联网在智慧交通发展中的应用措施分析

冶金辉

新疆交通规划勘察设计研究院有限公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830006

摘要

随着城市化水平不断提高、机动车数量快速增长和居民流动需求持续扩大，交通拥堵、能耗上升、事故频发与交通管理效率低下等问题日益凸显。智慧交通作为城市治理现代化的重要方向，正成为推进交通体系数字化、智能化和精细化管理的关键策略。物联网技术凭借全面感知、实时传输、智能处理和协同控制等能力，为智慧交通建设提供了基础性技术支撑。本研究表明，物联网赋能下的智慧交通不仅能够提升道路通行效率、降低事故发生率，还能够推动交通能源结构优化，提高城市运行效能，为城市治理现代化提供可持续发展路径。

关键词

物联网；智慧交通；车路协同；智能感知；交通管理现代化

1 引言

随着新型城镇化战略的不断深化，城市居民对交通效率、安全性与舒适性的需求不断增长。但在机动车保有量持续攀升、城市路网结构受限、传统交通管理方式滞后的背景下，交通拥堵、交通事故频发、能耗高企等问题成为制约城市发展关键瓶颈。通过传感器网络、智能网联设备、无线通信系统和云平台的深度融合，物联网能够实现对道路设施、车辆运行、交通流状态以及环境要素的实时、连续和高精度监测，并借助云边协同、人工智能算法实现智能分析与控制决策。智慧交通作为物联网技术的重要实践场景，已在

城市治理、产业升级和居民出行中发挥深远影响。本文旨在为智慧交通建设提供理论参考与实践方案。

2 物联网技术为智慧交通提供的核心支撑

2.1 全域感知体系构建与交通状态可视化能力提升

物联网技术对智慧交通最基础、最关键的支撑来自其构建全域感知体系的能力。交通系统本身具有参与主体多元、运行状态复杂、空间流动性大以及不确定性强等典型特征，使得传统依赖人工巡查或定点采集方式的交通管理难以实现全局且连续的状态掌握。而物联网通过高度分布式的传感器网络，使交通要素从“不可视”走向“可视化”和“可量化”，形成智慧交通运行的数字底座。在道路交通环境中，温湿度、降雨强度、能见度等环境要素由环境传感设备实时监测，道路结构与桥梁健康由压力与光纤传感器持续记录，车辆速度、车距、车道占有率等流量参数通过地磁检测器、

【作者简介】冶金辉（1984—），男，中国新疆人，本科，高级工程师，从事智慧交通、机电工程、交通信息化、地质灾害监测研究。

激光雷达、毫米波雷达等设备实现精准采集。依托多模态数据采集方式，交通管理系统能够同时获取宏观、中观和微观层面的交通运行信息：宏观层面可以掌握路网整体流量分布与运行趋势，中观层面能够识别区域拥堵节点、瓶颈路段及车流组织特征，微观层面则可以洞察车辆行为模式及异常事件。这一体系使交通状态从局部、静态监测转变为连续、立体、实时监测，使交通系统运行在空间与时间维度上均实现了高透明度。

在此基础上，通过感知数据的空间映射，可以构建实时交通数字地图，展示路网的动态运行态势。高速发展的视觉识别技术与传感器融合算法使感知精度不断提高，道路异常事件如逆行、急刹车、占道停车等可被实时识别，环境变化如雨雪、大雾等天气也能够第一时间触发预警提示。全域感知体系使交通管理从低频抽样式数据依赖转变为高密度、全覆盖的数据驱动，使决策部门能够及时、准确掌握关键交通参数并进行主动管理。随着传感器边缘计算能力的提升，更多数据可在本地进行结构化处理，从而减少通信压力，提高系统响应速度，最终形成可用于智能决策的高价值交通数据资源。可以说，全域感知体系不仅奠定了智慧交通数据基础，更为交通运行优化、协同调控与智能决策提供了信息保障。

2.2 实时通信网络构建与交通协同响应效率提升

在构建全域感知体系之后，物联网为交通系统提供的第二项核心支撑是实时、高可靠的通信能力，它是智慧交通“快速响应”与“协同联动”的关键。随着城市交通主体数量持续增长，交通数据规模呈指数级扩大，传统通信方式不仅时延高、带宽不足，而且难以满足车辆移动性强、环境变化快的通信需求。而5G-V2X、LTE-V2X、NB-IoT、LoRa等物联网通信技术的引入，使交通系统构建起“车—路—云”一体化通信网络，将动态交通环境中的复杂信息流连接成高速流畅的数据通道。车辆可以依托车载单元实时与路侧单元通信，获取信号灯相位、前方拥堵状况、道路施工信息及事故风险预告，从而调整驾驶策略并提高行驶安全性；路侧设施可以将感知信息通过无线网络实时传输至交通控制中心，并接收来自控制中心的指令，对信号配时、诱导信息或道路管控方式进行更新；交通管理云平台则可快速整合来自车辆、道路和区域系统的数据，实现交通态势推断、管控策略生成以及指令下发。

3 物联网在智慧交通基础设施中的应用措施

3.1 智能化交通基础设施建设

智慧交通体系的有效运行依赖于具备高感知度、高可靠性和高响应性的智能化基础设施，而物联网技术的广泛嵌入为传统道路系统赋予了自感知、自诊断与自调节的能力。在道路、桥梁、隧道、交叉口及综合交通枢纽等关键节点部署多类型智能感知设备，可实现对交通环境、交通行为与交

通设施状态的连续观测与实时分析，从而构建出以基础设施智能化为核心的智慧交通底座。首先，智能路灯与交通信号灯通过集成光照传感器、图像采集设备、车流监测模块及双向通信单元，能够在持续监测交通流量、环境光照和行人分布等信息的基础上实现亮度与信号配时的自适应调节。一方面，这类设备可在车流高峰期提升照明强度与放行效率，从而增强道路的可视性与交通安全；另一方面，在低流量时段通过降低亮度与优化时段配时以减少能源消耗，实现交通效率与节能效益之间的平衡。

其次，路侧智能单元（RSU）的广泛部署使车路协同系统具备了实时通信的基础条件。作为连接车辆、云控平台与交通管理中心的关键节点，RSU可实现车—路—云多向信息交换，及时接收车辆运行状态、定位信息和车载感知数据，并将道路危险信息、信控策略及交通事件通告传递给车辆，使交通管理从“事后响应”向“实时协同”转变。这种高频、高精度的结构健康监测技术使道路设施具备了实时诊断能力，为科学养护、精准修复与生命周期管理提供了数据支持，显著减少因结构老化、荷载突变或天气影响导致的安全风险。智慧停车设施的建设有效缓解了城市“停车难、找位难”的顽疾。基于物联网的车位检测传感器、视频识别系统与电子支付系统协同运行，实现车位占用状态的实时更新、停车需求的动态分配以及无感支付的自动结算，使停车资源能够在更大范围内实现时空优化配置。通过与城市交通大脑的平台化联动，停车数据还可反向为交通预测、拥堵分析及区域车流平衡提供重要依据，进一步提升城市路网运行效率^[1-2]。

3.2 交通信号智能化控制系统

交通信号控制系统在城市交通运行中扮演着关键调度角色，其智能化水平直接决定路网运行效率与交通秩序质量。传统信号控制模式通常基于固定配时方案或周期性优化策略，难以适应当下路网的复杂性与动态性，尤其在交通需求呈现波动加剧、多模式交通参与者共存及交通事件频发的背景下，其局限性愈加凸显。物联网技术通过实时采集车流量、排队长度、平均车速、行人密度及异常事件数据，为智能信号控制提供了高时效、高精度的动态输入，使交通控制从经验驱动转向数据驱动与算法驱动。

在此基础上，智能信号控制系统能够结合人工智能算法、自适应控制模型与区域协同机制，形成多层次的精细化控制逻辑。首先，通过对主干道路段实施绿波带协调，系统可根据连续路段的实时流量、车队速度与道路通行能力动态调整信号配时，使车辆队列以最小停次实现连续通过。这不仅提升了主干道的通行效率，也有效降低了车辆因频繁启停造成的能耗与污染排放。其次，基于事件触发的信号控制机制使系统能够在事故、多车追尾、道路施工、恶劣天气等交通扰动发生时自动调整控制策略^[3]。大量实践表明，基于物联网的智能信号控制系统能够显著改善城市交通运行状况，

其应用可使车辆延误时间降低约10%—30%，排队长度缩短、车辆通行速度提高，进一步提升整体路网的运行稳定性与服务水平。由此可见，以物联网为核心驱动的智能信号控制已成为智慧交通建设中最具成效的关键应用之一。

4 物联网驱动的智慧交通运行管理优化机制

4.1 基于全域数据融合的交通运行监测与预警机制

在智慧交通体系从基础设施智能化迈向系统级协同的过程中，交通运行管理的核心转变体现在由“事后处置”向“实时监测—动态评估—前瞻预警”演化，而这一转变的基础正是物联网深度参与下的全域数据融合能力。随着视频监控、毫米波雷达、激光雷达、地磁检测器、RSU、车载终端以及移动通信设备在交通网络中的普及，交通管理部门得以构建起覆盖主干道、公共交通走廊、交通枢纽和关键节点的多源数据采集体系。在这一体系中，车辆运行状态、交通流量、道路环境、设施健康状况及出行需求等信息实现了高频、连续和结构化采集，使交通运行状态呈现出可视化、透明化和动态化的特征^[4]。基于物联网数据的融合处理机制能够有效支持交通运行分析与态势识别。通过对多源数据进行清洗、聚合与时间空间匹配，管理平台可在宏观层面识别城市路网的拥堵分布及演化趋势，在中观层面分析路段流量结构、节点瓶颈形成机制，在微观层面监测车辆排队长度、平均延误与车道占有率等关键指标。

在此基础上，预警机制成为智慧交通运行管理的重要功能。依托物联网实时数据与机器学习预测模型，系统能够在拥堵、事故风险、设施故障、恶劣天气等事件发生前实现前瞻识别通过识别某一关键路段流量的异常增长趋势，可提前触发疏堵策略，避免大区域拥堵扩散。全域预警能力不仅提升了管理的主动性，还为公共安全、应急管理与出行服务提供了更高的可靠性保障。

4.2 交通资源协同调度与智能优化机制

在交通需求不断增长且结构日益复杂的背景下，提升交通系统整体运行效率已成为智慧交通建设的关键目标。物联网技术通过实现交通资源的实时感知、互联共享与优化配置，使协同调度成为可能，从而构建出跨设施、跨模式、跨区域的综合交通运行优化机制。其核心逻辑是围绕道路、停车设施、公共交通、信号系统以及应急资源等多要素，实现供需匹配、动态调节与服务优化。

首先，在路网层面，协同调度体现在交通流的跨节点、跨路段优化分配。依托物联网数据的动态输入，系统可实时掌握各路段的通行能力、饱和度与排队情况，并通过与信号控制系统联动形成区域级的协调调度策略。与传统的静态诱导相比，这种动态调度方式能够在交通状态变化的早期阶段迅速干预，避免拥堵在空间上的扩散^[5]。其次，在停车资源层面，物联网通过车位感知传感器、电子收费设备以及停车诱导系统的协同运行，使城市停车资源实现数字化统筹调度。对于核心商业中心、轨道交通接驳点、综合交通枢纽等需求密集区，系统能够通过实时数据分析车辆进入需求并合理引导车辆至空闲车位，从而缓解区域内的循环找位导致的次生拥堵。再次，在公共交通领域，协同调度机制可基于客流监测、公交到离站时间、道路通行速度等数据，动态调整车辆发车间隔、线路换乘衔接及调拨备用车辆，以实现公共交通服务供给的自适应优化。在高峰时段，系统可根据实时客流变化调度加班车，在干线出现拥堵时动态调整绕行路径；在运输枢纽客流集中释放时，还可通过跨线路协同调度减少乘客候车时间，提高公交系统的总体运行效率。

5 结语

物联网技术作为智慧交通建设的核心技术基础，为交通系统提供了全面感知、实时通信、智能分析与协同控制等能力，实现了从被动式管理向主动式调控、从静态管理向动态优化、从孤立系统向协同体系的根本转变。通过构建智能基础设施、推进车路协同、优化交通调度、强化安全管理和实现多源交通数据融合，智慧交通能够显著提升道路通行效率、降低交通事故、减少能耗排放并促进城市治理现代化。

参考文献

- [1] 肖竞辉.基于物联网的智慧交通实践[J].通讯世界,2022,29(7):140-142.
- [2] 苗晨钟.“物联网+智慧交通”在交通运输行业治理中的应用研究[J].运输经理世界,2024,(34):64-66.
- [3] 李冠豪.基于物联网的智慧交通系统建设探讨[J].信息通信,2020,33(9):230-231.
- [4] 韩丽,闫红岩.一种基于物联网的智慧交通事件检测算法[J].太原理工大学学报,2011,42(4):365-368.
- [5] 赵伟,刘言菊.物联网开关在智慧交通中的应用浅析[J].中国交通信息化,2020,(S1):52-53.

Discussion on Performance Optimization and Modification Technology of Emergency Rescue Vehicles

Yanwei Lu

Unit 66058, Tianjin, 301799, China

Abstract

Emergency rescue vehicles, as the core equipment for the military to carry out fault repair, on-site rescue and mission support for large vehicles and armored vehicles, are the key support for rapid repair and equipment transfer in emergency scenarios such as training exercises, sudden tasks and battlefield environments. Their technical level directly reflects the practical combat capability of the military's emergency support system. In emergency scenarios where the “golden time for repair” determines the effectiveness of the mission, vehicles not only need to have outstanding driving performance of “being fast, stable and able to enter the mission site”, but also need to integrate a full set of repair functions of “being able to detect, repair and support”, while meeting the intelligent dispatching requirements of multi-unit collaborative repair in the military. The research results of this paper can provide technical references for the development of emergency repair equipment for the military, military modification enterprises and support institutions, and contribute to the construction of the emergency support system of China's military.

Keywords

Emergency rescue vehicles; performance optimization; modification technology; pre-hospital emergency care; disaster relief

应急抢救车辆的性能优化与改装技术探讨

卢彦卫

66058 部队，中国·天津 301799

摘要

应急抢救车辆作为部队遂行大车、装甲车故障抢修、现场抢救及任务保障的核心装备，是训练演习、突发任务、战场环境等紧急场景下实施快速抢修与装备转运的关键支撑，其技术水平直接反映部队应急保障体系的实战能力。在“抢修黄金时间”决定任务成效的应急场景中，车辆不仅需要具备“快得起来、跑得稳当、进得去任务现场”的卓越行驶性能，更需集成“能检测、能抢修、能保障”的全套抢修功能，同时满足部队多单元协同抢修的智能调度需求。本文研究成果可为部队应急抢修装备研发、军工改装企业及保障机构提供技术参考，助力中国部队应急保障体系建设。

关键词

应急抢救车辆；性能优化；改装技术；院前急救；灾害救援

1 引言

在部队训练演习、野外驻训及突发任务、战场应急处置中，应急抢修车辆承担着大车、装甲车故障快速抢修、现场抢救与装备转运的关键职能，是连接任务现场与后方保障基地的“保障纽带”。随着中国部队应急保障体系不断完善，对抢修车辆的性能要求日益提高，不仅需要具备卓越的行驶与拖曳性能以适应复杂地形（山地、泥泞、战场路段），还需集成先进的抢修设备与智能协同系统，满足故障检测、现场维修、多单元协同等多元化保障需求，凸显了车辆性能优化与专业改装的迫切性。

2 应急抢救车辆性能现状与核心瓶颈

2.1 基本性能构成

应急抢救车辆的性能体系主要包括行驶性能、承载拖曳性能、抢修适配性能与安全防护性能四个核心维度。行驶性能涵盖动力输出、加速性能、制动性能与通过性能，决定车辆在不同路况下的机动能力；承载拖曳性能体现为底盘承载能力、拖曳力矩与稳定性，需满足抢修设备、工具、人员及故障车辆拖曳的载重需求；抢修适配性能包括抢修作业舱空间布局、设备集成度、供电可靠性、工具存储适配性等，直接影响抢修操作效率；安全防护性能涉及被动安全（如防撞、防冲击结构）与主动安全（如防抱死制动系统、稳定控制系统），同时涵盖战场/野外环境下的特殊防护需求，保障行驶与抢修过程中人员、设备及故障装备的安全。

【作者简介】卢彦卫（1986—），男，中国天津人，本科，技师，从事车辆维修与抢救研究。

2.2 核心性能瓶颈分析

2.2.1 动力系统适配性不足

多数部队应急抢修车辆基于通用军车底盘改装，发动机功率储备有限，在满载医疗设备与人员、行驶于爬坡路段或泥泞路面时，易出现动力不足、加速迟缓等问题。某型急救车在山区救援中，满载状态下爬坡速度不足15km/h，显著延误救援时间；部分车辆变速箱换挡逻辑不合理，频繁换挡导致动力输出中断，影响行驶稳定性。

2.2.2 底盘通过性与稳定性欠缺

传统抢救车辆底盘离地间隙小、悬挂系统减震效果差，在崎岖山路、积水路段等复杂路况行驶时，易发生托底、侧倾等风险。某野外驻训抢修案例中，抢修车辆因底盘托底导致液压抢修设备管路破损，无法开展后续作业；部分车辆制动系统热衰减明显，长时间高强度拖曳或复杂路况行驶后制动效能下降，存在安全隐患。

2.2.3 抢修作业舱设计不合理

抢修作业舱空间利用率低，抢修工具、检测设备摆放杂乱，导致发动机拆解、底盘维修、零部件更换等核心操作空间狭窄，2-3名抢修人员难以同时开展协同作业；舱内通风、温控系统效果不佳，夏季野外高温环境下舱内温度超过38℃，冬季低温时缺乏有效保温，既影响抢修人员操作效率，也降低精密检测设备（如发动机故障诊断仪）的性能稳定性；抢修设备与工具的固定装置简陋，车辆行驶或拖曳过程中易发生晃动、碰撞，导致工具损坏、设备精度下降。

2.2.4 供电与通信系统可靠性差

车载供电系统多采用单一发电机供电，缺乏备用电源，一旦发电机故障将导致医疗设备停运；供电系统电压不稳定，易损坏精密医疗设备如监护仪、呼吸机等；远程通信系统信号覆盖范围有限，在偏远地区无法实现与医院的实时数据传输，影响远程诊断与指导。

2.2.5 安全防护性能不足

部分抢救车辆未设置专用防撞结构，发生碰撞事故时易导致医疗舱变形；舱内未配备应急逃生装置，极端情况下难以快速撤离；车载医疗废物与尖锐器械存放不规范，易引发二次伤害。

3 应急抢救车辆核心性能优化技术

针对上述性能瓶颈，需从动力系统、底盘系统、供电系统与安全系统四个维度开展系统性优化，提升车辆整体性能与救援适应性。

3.1 动力系统优化

动力系统优化以提升动力输出、燃油经济性与环境适应性为目标。发动机升级方面，选用大功率、低排放的涡轮增压柴油发动机，替代传统自然吸气发动机，如将原2.8L自然吸气发动机升级为3.0T涡轮增压发动机，最大功率从100kW提升至160kW，扭矩从280N·m提升至450N·m，显著增强动力储备；优化发动机ECU控制策略，

调整喷油量与点火正时，提升低转速扭矩输出，改善爬坡与起步性能。

变速箱匹配方面，采用手自一体变速箱替代手动变速箱，减少换挡操作强度，提升行驶平顺性；针对救援场景优化换挡逻辑，增加运动模式与越野模式，运动模式下延迟换挡以提升动力输出，越野模式下增强低速扭矩传递。

辅助动力装置集成方面，加装液压助力转向系统与电子节气门，提升操控便捷性与响应速度；配备发动机预热系统，解决低温环境下发动机启动困难问题，确保寒冷地区救援作业正常开展。

3.2 底盘系统优化

底盘系统优化重点提升通过性、稳定性与承载能力。悬挂系统升级方面，采用空气悬挂替代传统钢板弹簧悬挂，通过调节空气弹簧气压适应不同路况，提升减震效果与行驶舒适性；增加横向稳定杆，减少车辆转弯时的侧倾幅度，提升行驶稳定性。

底盘强化方面，升高底盘离地间隙至220mm以上，增强复杂路况通过性；采用高强度钢板加固车架，提升承载能力，使车辆最大载重从3.5吨提升至5吨，满足更多医疗设备装载需求；优化制动系统，采用盘式制动器替代鼓式制动器，配备制动间隙自动调整装置与ABS+EBD系统，提升制动效能与安全性，制动距离从50km/h制动时的20m缩短至15m。

轮胎配置优化方面，选用全地形越野轮胎，增强泥泞、砂石路面的抓地力；配备胎压监测系统与防爆轮胎，避免行驶过程中轮胎故障导致的救援延误。

3.3 供电系统优化

供电系统优化以提升供电可靠性、稳定性与续航能力为核心。构建“主电源+备用电源+储能装置”的多冗余供电系统，主电源采用大功率发电机，备用电源配备柴油发电机组与锂电池储能系统，确保任一电源故障时可快速切换，保障医疗设备持续供电。

电源管理系统升级方面，安装智能电源分配器，实现各设备供电优先级管理，优先保障生命支持设备供电；配备电压稳定器与滤波器，确保输出电压波动范围控制在±5%以内，避免电压不稳定损坏精密医疗设备；集成太阳能充电板，利用车顶空间实现清洁能源补充，提升续航能力。

3.4 安全系统优化

安全系统优化涵盖主动安全与被动安全两个层面。主动安全优化方面，加装前向碰撞预警系统、车道偏离预警系统与倒车影像系统，提升行驶过程中的风险识别能力；配备电子稳定程序（ESP）与牵引力控制系统（TCS），减少湿滑路面侧滑与甩尾风险。

被动安全优化方面，医疗舱采用高强度防撞框架结构，车门加装防撞梁，提升碰撞防护能力；舱内设置应急逃生窗与自动灭火装置，确保极端情况下人员安全撤离；优化医疗设备固定方式，采用防震支架与快速锁紧装置，防止车辆行驶过程中设备晃动碰撞；规范医疗废物存放，配备专用密封

收纳箱与锐器盒，降低二次伤害风险。

4 应急抢救车辆专项改装技术

4.1 医疗舱模块化改装

抢修作业舱采用模块化设计，分为驾驶区、抢修作业区、设备检测区与工具储物区，各区域独立布局且相互连通。抢修作业区作为核心区域，预留足够操作空间，确保2-3名抢修人员可同时开展发动机拆解、底盘维修等协同作业，舱内宽度不小于2.4m，高度不小于2.0m；配备可升降、可旋转的抢修作业平台，调节范围为40-100cm，适配不同部位维修需求；作业平台采用双重锁定装置，确保车辆行驶或拖曳过程中固定牢固。

设备检测区采用分层式布局，上层安装发动机故障诊断仪、底盘检测终端等小型精密设备，下层放置便携式焊接机、液压泵站等大型设备，设备接口统一采用军用标准设计，便于快速连接与更换；工具储物区设置分类收纳柜，按维修流程分区存放拆装工具、备用零件、耗材等，采用透明柜门与标识化管理，便于快速查找。

抢修作业舱环境控制系统优化方面，配备高效冷暖空调系统，实现舱内温度精准控制（温度范围保持在15-28℃）；安装强制通风系统与空气过滤装置，降低舱内油污、粉尘浓度；采用降噪设计（舱内噪音控制在65dB以下），为抢修人员提供良好作业环境。

4.2 医疗设备集成改装

医疗设备集成以“实用化、智能化、兼容化”为原则，配备涵盖生命支持、诊断监测、急救治疗的全套设备。生命支持设备包括便携式呼吸机、多功能除颤监护仪、心肺复苏机等，均选用小型化、轻量化产品，减轻车辆载重压力；诊断监测设备配备心电图机、超声诊断仪、血糖检测仪等，支持数据实时存储与传输；急救治疗设备包括输液泵、注射泵、吸引器等，具备精准控制功能。

设备接口标准化改装方面，统一医疗设备供电接口与数据接口，采用国际通用标准，确保不同品牌设备可兼容使用；在设备区设置专用电源插座与数据接口，数量不少于10个，满足多设备同时工作需求；配备设备固定支架与快速连接装置，实现设备快速拆装与固定。

智能化设备集成方面，加装车载中央控制系统，实现医疗设备参数实时监测与远程控制；集成车载超声与心电图数据传输模块，可将患者生命体征数据实时传输至医院，为院内救治提供准备依据；配备急救导航系统，结合实时交通信息规划最优救援路线，缩短转运时间。

4.3 特殊任务场景专项改装

针对部队不同任务场景，开展差异化专项改装，提升车辆环境适应性。山地抢修车辆改装方面，进一步升高底盘离地间隙至280mm以上，配备四轮驱动系统与差速锁，增强复杂地形通过性；加装大功率绞盘（牵引力≥10吨），便于车辆自救与故障装备拖曳；抢修作业舱配备保温装置与

高原供氧设备，适应山区低温、低氧环境。

水域附近抢修车辆改装采用全车身防水防腐处理，车身与底盘喷涂军用防腐涂层，电气系统具备IP67防水等级；配备浮渡辅助装置，确保车辆在浅水区（水深不超过1.5m）可正常行驶；抢修作业舱配备除湿系统，防止潮湿环境导致设备故障。

战场抢修车辆改装方面，车身喷涂迷彩伪装涂层，作业舱关键部位加装轻型防弹装甲（防护等级≥B4）；通信系统升级为抗干扰卫星通信模块，确保战场环境下与指挥中心通信畅通；加装快速修复工具组与应急备件储备箱，提升战场快速抢修能力；集成战场态势感知终端，实时接收战场环境预警信息。

4.4 智能系统集成改装

智能系统集成是提升救援协同效率的关键，主要包括智能调度、远程医疗与车况监测三大模块。智能调度模块集成GPS定位系统与无线通信系统，可实时显示车辆位置、行驶状态与医疗设备情况，调度中心通过平台实现车辆智能调度与任务分配，提升救援响应速度；远程医疗模块配备高清视频会议系统与医疗数据传输系统，医护人员可通过车载终端与医院专家实时沟通，获取专业救治指导；车况监测模块安装多传感器，实时监测发动机、变速箱、供电系统等关键部件状态，出现故障时自动报警并推送故障信息至运维平台，便于及时维修。

智能化辅助功能加装方面，配备车载无人机起降平台，可快速放飞无人机勘察救援现场，获取现场图像与视频信息；安装自动消毒系统，救援任务完成后可对医疗舱进行紫外线或雾化消毒，消毒时间不超过30分钟，提升防疫安全性；集成电子病历系统，实现患者信息快速录入、存储与查询，便于多科室协同救治。

5 结语

应急抢救车辆当前存在动力适配性不足、底盘稳定性欠缺、医疗舱设计不合理、供电通信可靠性差等性能瓶颈，严重影响救援效率与安全性；通过动力系统升级、底盘系统强化、供电系统优化与安全系统完善等核心技术，可显著提升车辆基本性能。未来研究可从以下方向展开：一是聚焦新能源应急抢救车辆，研究电动化、氢燃料动力系统的优化与改装技术，提升车辆环保性与续航能力；二是开展改装方案经济性评估，建立成本-性能优化模型，实现改装效益最大化。

参考文献

- [1] 刘晔,许琳,曹梅,等. 全院抢救车标准化管理实践[J].中国卫生质量管理,2017,24(05):6-8.
- [2] 洪丹,张得时,关秋霞,等. PDCA质量管理在抢救车全院标准化管理中的应用[J].临床合理用药杂志,2017,10(05):161-162.
- [3] 韩慧,沈丽娟,邹晓月,等. 基于优化封存管理技术的抢救车改装及应用[J].护理与康复,2016,15(12):1203-1205.

Research on the Integrated Plan of Construction and Maintenance of Ordinary National and Provincial Roads in Yancheng Area

Xindong Wang Yan Zhu Changkai Ban

Yancheng Highway Development Center, Yancheng, Jiangsu, 224000 China

Abstract

In order to implement the requirements for high-quality development of highway maintenance in Jiangsu Province, Yancheng City is exploring a new integrated model of construction and maintenance for ordinary national and provincial road major and medium-sized maintenance projects, in order to break through traditional models, save costs, and extend the service life of highways. This model is based on mature performance maintenance and asset management contracting (PBC) localization attempts. Unlike traditional models, it uses contractors meeting or exceeding the lower limit of existing performance standards as the basis for payment. Taking Yanfeng Expressway and Yanfu Expressway as examples, this article elaborates on the three-stage process of preparation, implementation, and summary, as well as quarterly performance assessment, maintenance inspection and other assessment management methods. It studies maintenance decisions for roadbed, pavement, etc., and applies “four new technologies” such as semi flexible injection pavement. This model is of great significance for promoting high-quality development of highway maintenance in Yancheng. Enriched the connotation of “Su style maintenance”.

Keywords

highway; cost; Integrated construction and maintenance

盐城地区普通国省道建养一体化方案研究

王新东 朱艳 班长凯

盐城市公路事业发展中心，中国·江苏 盐城 224000

摘要

为落实江苏省公路养护高质量发展要求，盐城市探索普通国省道大中修养护工程建养一体化新模式，以突破传统模式、节约成本、延长公路寿命，该模式基于成熟的性能养护和资产管理承包模式（PBC）本土化尝试，与传统模式不同，以承包商达到或超现有性能标准下限作为付款依据，文中以盐丰快速路和盐阜快速路为案例，阐述了准备、实施、总结三阶段流程，及季度履约考核、养护检查等考核管理方法，研究了路基、路面等养护决策，应用了半柔性灌入式路面等“四新技术”，该模式对推动盐城公路养护高质量发展意义重大，丰富了“苏式养护”内涵。

关键词

公路；成本；建养一体化

1 引言

江苏省为深入贯彻落实交通运输部和全省交通运输工作会议要求，破解养护发展难题，提升养护管理效能，全面推进公路养护管理高质量发展，研究制定了一系列长周期养护试点方案^[1]。

盐城市作为全省地域面积最大、公路里程最长城市，依据江苏省厅文件精神要求，积极探索建养一体化管理新模式，突破传统养护模式向基于性能的养护模式发展，以节约养护成本，进一步延长公路使用寿命。

2 研究方向

什么是建养一体化养护管理模式？其中，“建”指新建和大中修建设工程，即广义上包括新建工程建养一体化和大中修养护工程建养一体化。

本次主要研究方向为大中修养护工程建养一体化管理新模式。

大中修养护工程建养一体化有多种实现路径，其中相对成熟的是基于性能的道路养护和资产管理承包模式（PBC）。传统承包管理模式中，道路养护管理机构作为当事人通常规定所采用的专业技术、技术方法、材料规格、材料数量以及执行道路养护所需要的时间等，最终基于投入的数量来决定投入的支付款。而与传统方法不同，PBC 的定义为看管和维护道路资产的一项强有力措施，其付款的金额可以是承包商大于或等于现有性能标准的下限。

【作者简介】王新东（1977-），男，中国江苏盐城人，本科，高级工程师，从事公路及水运研究。

本项目提出的普通国省道大中修养护工程建养一体化管理模式即基于 PBC 模式的一种本土化尝试^[2]。

2.1 案例介绍

2.1.1 盐丰快速路

343 国道大丰至盐都段建设工程起自大丰城西，现沪丰大道与 226 省道交叉处，向西与沈海高速公路、盐通高铁交叉，跨通榆河、新长铁路，经刘庄折向北，跨老 204 国道，串场河，经便仓镇，下穿规划盐泰锡常宜铁路，经伍佑街道，与规划 331 省道交叉后折向西，止于与 125 省道交叉处，路线全长 25.005 公里。

2.1.2 盐阜快速路

204 国道阜宁花园至亭湖新兴段建设工程起自阜宁县 204 国道与香港路交叉处北，向南经沟墩镇与 233 省道、黄沙港交叉，经上冈镇，与 232 省道交叉、下穿新长铁路，经新兴镇，下穿徐宿淮盐高铁，跨盐靖高速公路，止于与 349 省道交叉处南，接 204 国道盐城西绕城段，路线全长 41.40 公里。

2.2 项目实施流程

盐丰、盐阜快速路建养一体化的实施流程分为三个阶段，首先是准备阶段，然后是实施阶段，最后是总结阶段，建养一体化实施过程中需要严格执行这三个阶段内容，同时需要建立相应的考核管理制度，保证每个阶段的顺利实施。

2.2.1 准备阶段

首先对盐丰、盐阜快速路的基本情况开展摸底工作，梳理清楚现状路面技术状况水平、日常养护等等相关的情况。然后制定盐丰、盐阜快速路建养一体化方案，包括各方职责权限、资质要求、考核管理、养护方案、合同测算、过程管理、风险管理等等方面的内容。

建养一体化管理办法，在很大程度上可以帮助主管部门更好的去管理各个项目。在准备阶段，针对建养一体化执行和管理工作，进行规范、科学的管理措施制定，明确管理流程、考核目标、计量支付等内容，以保障建养一体化工作的顺利开展，提高公路养护、管理水平，延长道路使用寿命，提高公路经济社会效益、运行效率和运营安全水平，使养护工程能够适应市场的发展和变化，构建现代养护管理模式即建养一体化管理新模式，提升行业管理水平、提升公众出行体验。

2.2.2 实施阶段

建养一体化管理周期内，应结合季度、年度工作目标，加强养护巡查，做好巡查记录，严格按照江苏省普通国省道养护手册，执行国家基本建设程序、工程建设标准强制性条文以及有关公路工程建设的法律、法规、规章、规范、标准、规程、定额和合同的要求，完成各项日常养护、小修保养工作，并修补工程中的任何缺陷。

建养一体化管理考评，应按季度或年度进行阶段考核和结算，参照约定实施方案及管理办法要求，严格按照江苏

省普通国省道养护手册，对日常养护和养护工程进行考核，结合考评情况按比例、按阶段进行计量支付。

建养一体化项目的验收考评应严格按照约定的考核指标对承包项目质量及养护技术状况进行评定和考核。总承包期末，在工程通过交竣工验收后，发包人根据终期考核情况进行计量支付，支付基数为剩余所有工程款项（缺陷责任期内的质量保证金除外）^[3]。

2.2.3 总结阶段

总结阶段主要是在项目实施过程中、项目承包周期结束后及时总结方案特色、工作成效和经验总结等工作亮点，强化跟踪督导，加强示范引领，形成盐城市普通国省道大中修工程建养一体化项目工作成果，固化相关养护制度、技术规范和管理经验等，进一步丰富“苏式养护”品牌内涵。

2.3 考核管理方法研究

针对建养一体化实施流程中的重要节点，需要有详细的项目考核管理办法进行把关，相关人员需要做到严格监督，发现问题时更需要严格惩治。

1) 季度合同履约考核。由市公路中心养护科统一组织和部署考核工作的开展，并上报江苏省公路水路建设市场信用信息服务系统。

2) 季度养护检查。由咨询单位于每季度末对总承包单位每季度日常养护工程进行不同侧重点的季度检查，根据检查结果，形成检查通报，并依据季度综合评分对总承包单位进行季度扣罚。

3) 季度检测考核。由市公路中心每季度进行一次道路巡查车检测，根据考核目标和罚款标准进行扣罚。

4) 年度考核。每年度年末，由咨询单位对项目道路开展道路路况检测、养护工程质量评估、日常养护及机械化养护质量评估等工作，协助业主开展年度养护管理考核工作，按照年度考核目标，考核内容包括路况考核、日常养护考核、养护工程考核、养护安全考核、突发事件应急考核等。

5) 若出现考核不通过的，需要进行返修整改的，相关费用由总承包单位自行承担。

6) 建养一体化工作周期内，原有公路养护工程、日常养护巡查考核管理办法均适用于本项目。

7) 若因非总承包单位原因，导致的承包范围内路面缺陷的，在考核期时，不进行扣罚，但若总包单位存在上报不及时或安全风险没及时进行安全防护的其缺陷应纳入缺陷扣罚范围。

8) 每季度、年度考核处罚结果由市公路中心下发，主送总承包单位，抄送县、区分中心和计量审核单位。

9) 因总承包单位养护不到位，导致养护质量出现以下情况的，业主单位有权单方面解除合同，并有权视情节严重程度追究承包养护企业相关责任。

①路面技术状况指标 PQI 出现连续两年低于养护目标均值 2 分以上。

②日常养护季度综合评分连续两个季度低于80分，或累计四个季度低于80分且未及时整改。

③负有主要责任的重大安全事故、廉政问题等其他可以解除合同的情形。

2.4 养护决策

建养一体化方案实施过程中的养护决策主要包括了路基养护决策、路面养护决策、桥涵养护决策及沿线设施养护决策，在制定这些决策时，需要依据相关行业规范以及相关案例，经过一系列充分论证后，进行科学决策。

2.4.1 路基养护决策

在公路工程建设中，路基的建设是一项基础性工作，它的重要性在于它直接决定着公路工程的承载力与稳定性。一条公路，它的路面的稳定性及其它使用性能往往取决于路基的好坏。路基如果出现排水不畅通，或者是构造物出现一定程度的损坏了，都会直接造成路面的损坏。

针对建养一体化项目路段，需制定科学合理的路基养护技术体系，要强调经常性、及时性和预防性，定期进行路基检查，及时准确地掌握路基状况，采取适当的措施预防可能发生的路基病害。

①根据路基日常养护检查结果，制定针对性的小修保养措施，见表。

表1 路基小修保养措施

序号	工程项目	损毁状况	养护措施
1	路肩	有异物存在于土路肩、硬路肩	日常清理养护
2	边坡	边坡坍塌或者边坡上形成冲沟	填土拍实
3	防护工程	断裂、倾斜、松动、局部坍塌等出现于挡墙等圬工体	砌石防护维修
		挡墙等圬工体勾缝脱落	勾缝维修
4	排水设施	排水系统淤积	清淤排堵

②路基养护工程主要针对影响路基正常功能，存在安全隐患的硬路肩大面积破坏、边坡失稳、挡土墙等构造物损坏、排水设施不同程度损坏等进行养护维修，见表。

表2 路基养护工程方案

序号	工程项目	损毁状况	养护方案
1	路肩	硬路肩大面积破坏	拆除硬路肩，混凝土重新浇筑
2	边坡失稳	边坡滑塌，路基整体滑动	预应力锚杆、抗滑桩、预应力锚索框架等加固方式
3	防护工程	挡土墙发生倾斜、鼓肚、滑动或下沉	锚固法、分层多次高压注浆预应力锚固技术、微型锚杆桩技术、一杆三用技术等加固措施
4	排水设施	排水系统损坏	拆除重建
5	路堤	路基连续大面积沉陷	高聚物注浆加固

③水毁应急修复工程

公路交通领域的常见灾害有很多，其中比较严重的自

然灾害之一，就是公路的路基水毁，路基水毁的发生有这样两个特点：不确定性和不可预见性。需在限定的时间内清除塌方、落石，确保项目路的正常通行，然后针对水毁路段的工程特点，按照“削坡减载、固脚强腰、加强排水、封闭坡面”的原则实施水毁路基修复。

2.4.2 路面养护决策

结合路面检测评价结果、江苏省普通国省道养护工程科学决策实施意见（试行），拟定本次盐丰（G343）、盐阜（G204）快速路大中修养护对策。

①路面结构强度较差路段（PSSI < 80）：需结构性修复（铣刨重铺面层+上基层）；

②基层性能、结构完整性较差（基层材料性能、芯样完整性）：需局部结构性修复；

③路面破损严重路段、平整度较差路段、车辙较差路段（PCI≤80, RQI≤85, RDI≤80）：需面层功能性修复（铣刨重铺面层）；

④路面破损较差，且平整度、车辙较好路段（80 < PCI≤85, 且 RQI > 85, RDI > 80）：需上面层功能性修复（铣刨重铺上面层）；

⑤路面破损、平整度、车辙较好路段（PCI > 85, 且 RQI > 85, RDI > 80）：可采用预防性养护方案；

处治路段之间的间距在200m以内（包括200m），从维修后平整度控制方面考虑，该200m一并进行处理；此外应对灯控路口路段车病害专项处理；同时为保证养护工程整体质量，避免路段重复性维修，在处治路段内的原小修保养路段（现状尚好）一并进行处治^[4]。

2.4.3 桥涵养护决策

桥涵养护工作应结合桥梁的养护检查等级开展，对桥梁检查中发现的病害应制订相应的养护维修方案并及时处治。建养一体化工作周期内的桥涵主要针对日常养护工作进行，包括桥面铺装及防水层、护栏、伸缩装置、排水系统、桥头搭板的养护与维修，涵洞的疏通和清理，相关配套设施的更换及维修。

2.4.4 沿线设施养护决策

交通设施在日常使用中，经常会出现诸如交通标志的损坏、防撞护栏的缺失、路面标线的磨损等问题，交通设施养护过程中需要针对这些问题一一进行检查，在发现问题后及时进行保养维修，问题严重时需要及时更新改造。

绿化养护过程中，需要每年对全线的树木进行修剪、治虫、刷白、施肥、抗旱等工作；适时对公路所属的主线边坡草坪、站区、互通草坪进行修剪；定期对于缺水枯死苗木进行补栽完善^[5-6]。

2.5 四新技术应用

建养一体化方案实施过程中需要与时俱进地利用好各项新技术，努力提升整个方案的科学性、合理性，为项目提高效率、增加效益。

2.5.1 老路铣刨料利用

存在病害的原沥青路面需进行维修，如果用传统的方法将大量翻挖、铣刨的沥青混合料废弃，一方面造成环境污染，另一方面对于我国这种优质沥青较为匮乏的国家来说是一种资源的极大浪费。养护过程中建议对经铣刨、挖除下来的沥青面层材料进行再生利用。既节约了材料，又能保护环境，做到了资源的可持续发展。

2.5.2 沥青混合料温拌技术

温拌降低出料温度30℃以上的特点给厂拌热再生带来革命性的创新空间。在根除送料通道堵塞和产能瓶颈的同时，提高旧料利用比例、显著降低工艺过程造成的老化又进一步保证性能。

这项技术可在低温季节施工（可在0-10度施工），减少温度离析；提高再生料比例（温再生）；改善水稳定性、高温稳定性；降低沥青老化，延长使用寿命；节能减排，实现资源节约和持续发展的设计理念。

2.5.3 免振、免养水泥稳定碎石

震动已经成为我国交通施工中新的环境公害之一，通过进行添加外掺剂，免振压水泥稳定碎石实现了在不通过振动压实的情况下，使其压实度达到规定要求。

传统水泥稳定碎石基层需要保水养护7天，这期间需要封闭交通，影响了同行效率。在水泥稳定碎石中添加一种免养生添加剂，可以改善水泥稳定碎石的性能指标，解决了需要保水养护7天的问题^[7]。

2.5.4 半柔性灌入式路面

这项技术的原理是骨料之间存在相互嵌挤的作用，通过沥青的粘弹性和灌注的水泥基材料共同来形成一种复合材料，能够帮助路面在荷载作用下有更好的表现。与普通沥青混凝土路面相比，半柔性路面材料有更好的高温稳定性。另外，半柔性路面的低温抗裂性能、抗疲劳性能、抗滑性能、耐磨性能均较好。

2.5.5 渗固磨耗层

其主要原理为预先采用撒布的渗固组分恢复老化沥青路面的性能，后通过特制的改性乳化沥青拌合料铺筑形成的一种耐久性磨耗层。其渗固剂通过自身独特的结构及掺添比

例，实现了上面层3-4cm范围内的全深度还原，既提供了层间的粘结，也达到了封水的作用；改性乳化沥青拌合料通过添加特殊改性材料，相较于传统乳化沥青产品，整体的石料裹附能力、防水损能力、成型速度、抗剥落能力更佳。

2.5.6 改性地聚合物注浆

这项技术利用一体化注浆平台，通过钻孔经由不同的作用力将改性地聚合物压入到基层和路基中，在这个过程中，会将路基中原本存在的水及空气排除，挤密路基土，同时通过与土体发生化学反应生成网络状结石体，在这个过程中重新形成的道路结构强度和密实度比较高，水稳定性也比较好。

由于其能够与沥青材料良好结合，在公路半刚性基层间和沥青层间，加铺该织物可有效延缓路面反射裂缝的产生、抑制裂缝扩展，提高沥青路面使用寿命。

3 结语

总而言之，在新的养护市场发展形势下，盐城市普通国省道大中修养护工程建养一体化管理模式具有其发展的迫切性和必要性，其对于未来盐城公路养护事业更好、更快地发展具有显著的推动意义。

参考文献

- [1] 金伟忠.谈新形势下加强公路养护施工规范化管理[J].交通企业管理,2025,40(06):101-103.
- [2] 郭静.基于高速公路日常养护的管理模式分析[J].交通科技与管理,2023,4(22):177-179.
- [3] 朱玉祝.道路维修中建设单位的全过程质量管理优化[J].中国建筑金属结构,2025,24(15):112-114.DOI:10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.15.039.
- [4] 鲍曦露,刘涛.高速公路路面常见病害成因与养护措施研究[J].汽车周刊,2025,(12):36-38.
- [5] 张宏.公路工程施工及养护技术研究[J].工程建设与设计,2023,(10):201-203.DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.05.265.
- [6] 程小玲.高速公路养护建议[J].交通世界,2016,(33):102-104. DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2016.33.049.
- [7] 刘伟.免振免养水泥稳定碎石综合技术应用分析[J].运输经理世界,2025,(06):19-21.

Research on Key Quality Control Points and Practical Application of Key Processes in Road, Bridge and Tunnel Construction

Tingshu Hu

Yunnan Jiaotou Public Construction Energy Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

With the acceleration of transportation infrastructure construction, quality control of road, bridge, and tunnel engineering has become the core to ensure safety and extend service life. This study focuses on the quality control of key construction processes, using various methods such as literature research and case analysis to systematically sort out the core key processes of roads, bridges, and tunnels. It clarifies the quality control points of each process in terms of material selection, process parameters, and process monitoring, and deeply analyzes the mechanism of the five influencing factors of personnel, materials, equipment, environment, and management. By combining three representative cases of highways, large bridges, and extra long tunnels, the effectiveness of control points is verified, and problems and experiences are summarized. Four improvement strategies are proposed to build a scientific and perfect quality control system, providing practical reference for similar projects and helping the industry to refine and standardize quality control.

Keywords

road, bridge, tunnel construction; Key points of quality control; Practical application; enhancement strategy

路桥隧施工关键工序质量控制要点及实践应用研究

胡廷树

云南交投公建能源工程有限公司，中国·云南昆明 650000

摘要

随着交通基础设施建设提速，路桥隧工程质量控制成为保障安全、延长寿命的核心。本研究聚焦其施工关键工序质量控制，采用文献研究、案例分析等多种方法，系统梳理道路、桥梁、隧道三大类工程核心关键工序，明确各工序在材料选择、工艺参数、过程监测等方面的质量控制要点，深入分析人员、材料、设备、环境、管理五大影响因素作用机制。结合高速公路、大型桥梁、特长隧道三类代表性案例，验证控制要点有效性并总结问题与经验，提出四大提升策略，构建科学完善的质量控制体系，为同类工程提供实用参考，助力行业质量管控精细化、标准化发展。

关键词

路桥隧施工；质量控制要点；实践应用；提升策略

1 引言

随着经济发展与城市化推进，路桥隧工程作为交通基础设施核心，对区域经济协同、民生保障意义重大，但施工受多重因素影响，质量控制面临挑战。本研究围绕其施工关键工序质量控制展开，先梳理施工流程识别关键工序，从原材料、工艺参数、过程监测等维度剖析控制要点，再通过多个代表性工程案例总结经验、分析问题并提出改进措施，最终构建涵盖管理制度、流程及责任追溯机制的完整质量控制体系。研究综合运用文献研究法奠定理论基础，结合案例分析法实现理论与实践结合，通过实地调研获取一手数据，借助专家访谈拓宽思路，确保研究科学有效，为同类工程提供

实用参考，助力行业可持续发展^[1]。

2 路桥隧施工关键工序质量控制要点

道路施工质量控制要点中，路基填筑作为基础直接关乎道路稳定性与使用寿命，核心把控材料选择、填筑厚度及压实度检测：材料优先选用透水性好、强度高、压缩性小的砂砾石、碎石土等，粘性土需控制在最佳含水量范围，严禁使用腐殖土等不合格材料，必要时添加石灰改良，某高速公路通过勘察土源、选合格填料并改良粘性土保障材料质量；填筑厚度结合填料、设备及设计要求确定，每层不超 30-50 厘米，需保证平整度与横坡度，某市政道路以 35 厘米分层填筑并整平，为压实奠基；压实度采用灌砂法等规范检测，按每 1000 平方米不少于 2 点频率检测，不合格及时处理，某国道改建工程通过专业检测确保压实度达标；路面摊铺需从摊铺机参数调整、摊铺速度控制、碾压工艺选择入手：摊

【作者简介】胡廷树（1990-），男，中国云南昭通人，本科，助理工程师，从事公路施工研究。

铺机参数根据路面结构等调整，保障布料均匀、振捣充分、摊铺精度，某城市快速路经反复调试提升质量；摊铺速度控制在2-6米/分钟，匀速连续作业，某高速公路优化混合料供应确保稳定摊铺；碾压遵循“先轻后重、先静后振、先慢后快”原则，分初压（轻型静压2-3遍，1.5-2公里/小时）、复压（重型及振动压实4-6遍，3-5公里/小时）、终压（轻型静压2-3遍，2-3公里/小时）三阶段，某机场跑道精准把控工艺满足高标准要求。

桥梁施工质量控制要点中，基础施工需把控地基承载力检测、钢筋加工安装及混凝土浇筑：地基承载力通过标准贯入试验等确定，某大型桥梁用载荷试验数据后以强夯法加固；钢筋加工严控尺寸参数，连接方式符合要求，安装确保位置、数量等达标，某城市桥梁通过抽样检验、数控加工等保障质量；混凝土浇筑前检验原材料并确定配合比，浇筑中振捣密实，大体积混凝土采取温控措施，某跨江大桥通过分层浇筑与温控避免裂缝；上部结构中预制梁需控外观与尺寸偏差，采用高精度钢模板，控制混凝土坍落度与振捣，加强养护并精准测量尺寸；现浇箱梁需先检查模板钢筋，分层浇筑（每层不超30厘米），振捣棒插入下层5-10厘米，控制坍落度160-200mm、浇筑温度5-30℃，夏冬季采取对应温控措施，养护不少于7天，某城市立交桥按规范施工确保强度与整体性。2.3隧道施工质量控制要点中，洞身开挖需控超欠挖与优化爆破参数：超欠挖采用全站仪等设备精准定位，加强人员培训，某高速公路隧道用光面爆破技术严控参数；爆破参数根据围岩等条件综合确定，某铁路隧道针对不同围岩调整参数，采用微差爆破等优化工艺；支护施工需把控锚杆锚固力、喷射混凝土强度与厚度及二次衬砌钢筋保护层厚度：锚杆选用合格材质，确定合理长度与间距，某山岭隧道严格检验安装并检测锚固力；喷射混凝土严控原材料与配合比，控制喷射压力与厚度；二次衬砌精准布置钢筋，控制保护层厚度，模板安装达标，混凝土浇筑振捣密实并养护，全面保障隧道稳定与安全^[2]。

3 影响路桥隧施工质量的因素分析

人员、材料、设备、环境、方法、管理六大因素共同影响路桥隧施工质量：人员因素是核心，施工人员需具备扎实专业知识与熟练操作技能，如钢筋焊接需精准把控参数，同时需强责任心以严格执行质量标准，施工管理人员的组织协调与决策能力也直接关乎施工计划落实与问题解决；材料质量是基石，水泥、钢材等原材料的强度、耐久性需符合设计规范，存储中需针对性防护（如水泥防潮、钢材防锈），采购环节要选择优质供应商并严格检验进场材料；施工设备的性能与维护状况至关重要，先进设备能保障施工精度（如摊铺机影响路面平整度），需建立健全设备管理制度，定期维护保养并规范操作，避免故障导致工期延误与质量隐患；环境因素中，地质条件（如断层、软土地基）需针对性采取

支护或加固措施，气候条件（高温、低温、强风暴雨）需通过原材料温控、添加外加剂、保温养护等方式降低不利影响；施工方法是保障质量的关键手段，需结合工程类型、地质条件与设计要求科学制定，贯穿施工全流程，在道路施工中，路基填筑需遵循“分层摊铺、分层压实”原则，管理因素贯穿全程，完善的质量管理体系能明确责任与落实控制措施，合理的施工组织需科学安排施工顺序、配置人材机，严格的质量检验需明确标准方法，确保及时发现并整改问题，全方位保障工程质量与安全。

4 路桥隧施工关键工序质量控制的实践应用案例

4.1 某高速公路施工案例

该高速全长150公里，途经多地形，以路基填筑和路面摊铺为质量控制核心。路基填筑中，平原段基底强夯至压实度95%以上，丘陵段换填1-2米砂砾石，选用含泥量≤5%的砂砾土和8%-10%石灰改良土，分层30厘米填筑压实6-8遍，压实度达96%以上。路面摊铺采用ABG8820摊铺机，调试参数后以3-4米/分钟匀速作业，碾压分三阶段实施，最终路面压实度≥98%，平整度标准差≤0.5mm。工程指标达标，运营无明显病害，但需加强人员培训与质量体系完善。

4.2 某大型桥梁施工案例

该桥全长2.5公里，主桥为斜拉桥、引桥为连续箱梁，基础与上部结构是控制重点。基础采用1.5米桩径钻孔灌注桩，以冲击钻+回旋钻攻克孤石与砂层难题，严控泥浆参数（比重1.1-1.3、粘度18-22秒），混凝土坍落度18-22厘米连续浇筑，柱体质量达标。主桥悬臂浇筑用菱形挂篮（预压控形），线形偏差≤±5mm；引桥满堂支架现浇强化地基处理与支架搭设，结构质量优良。工程克服复杂地质难题，但需优化施工场地规划与人员安全培训。

4.3 某特长隧道施工案例

该隧道全长8公里，最大埋深1200米，穿越断层与岩溶区，以洞身开挖和支护为关键。钻爆法施工中，依地质优化爆破参数，微差爆破控制超欠挖（超挖≤10厘米、欠挖≤5厘米）。初期支护采用锚杆+喷射混凝土+钢支撑联合体系，湿喷混凝土厚度20-25厘米；二次衬砌用液压台车分层浇筑，坍落度16-20厘米，养护≥14天。隧道指标达标、无渗漏水，但需合理安排施工时与设备维护。

5 提升路桥隧施工关键工序质量控制的策略

5.1 加强人员培训与管理

施工人员的技术水平和质量意识是工程质量的核心保障，加强人员培训与管理是质量控制的首要任务。施工单位需构建多层次培训体系，覆盖新员工入职培训、在职人员技术提升培训及管理人员专项培训：新员工培训聚焦工程流程、规范及安全要求；在职人员按岗位精准施策，如摊铺机

操作人员侧重设备操作与故障排除，钢筋工强化加工与连接技术；管理人员培训聚焦质量管理与施工组织，提升统筹能力。为提升培训效果，采用传统课堂讲授、现场示范、在线学习平台、VR/AR 实操模拟等多元化教学方式，邀请行业专家通过案例分析解读质量控制难点。建立科学考核与激励机制，从工作质量、效率、安全意识等维度全面评估，对优秀人员给予物质奖励与晋升优先，不合格者再培训或调整岗位，以双重激励激发全员责任心，提升队伍整体素质。

5.2 严格材料与设备管理

材料与设备作为施工物质基础，其质量直接决定工程安全与耐久性，需从采购、检验、存储及设备运维全流程管控。材料采购环节，应制定精准采购计划，依据工程进度合理规划数量与时间，全面评估供应商信誉、产能及产品质量，优先选择优质供应商并签订质量保证协议，明确责任义务。材料检验需建立完善制度，配备专业人员与先进设备，对进场材料开展外观、尺寸、性能全维度检验，水泥、钢材等关键材料需抽样送检，不合格材料坚决退货，杜绝流入施工现场。材料存储按特性分类管理，水泥存放于干燥通风仓库，钢材采取防雨防锈措施，建立库存管理制度，定期盘点检查，防止材料变质损坏。设备管理方面，构建健全管理制度，制定详细维护保养计划，明确内容、时间及责任人，日常做好清洁、润滑、检修，及时更换磨损部件，确保设备处于良好运行状态。结合技术发展适时更新设备，引进自动化、高精度施工设备，如数字化预应力张拉设备，提升施工效率与质量控制精度，降低人为误差^[3]。

5.3 优化施工技术与工艺

科技创新是提升质量控制水平的关键途径，需积极引进应用新技术、新工艺，优化传统施工模式。道路施工中，推广智能摊铺技术，通过传感器与控制系统实时监测并自动调整摊铺厚度、平整度及压实度，减少人为影响；应用温拌沥青技术，在低温下实现混合料拌和摊铺，降低能耗与污染，提升路面压实性能与耐久性。桥梁施工领域，BIM 技术的应用实现全流程可视化管理，通过三维模型优化施工方案、预判潜在问题，施工中对比现场实际与模型数据，实时监控进度与质量，减少变更返工；节段预制拼装技术将桥梁结构分节工厂预制、现场拼装，兼具施工快速、质量易控、环境影响小等优势，显著提升施工效率与结构精度。

隧道施工中，信息化施工技术通过布置传感器实时监测围岩变形、应力及地下水参数，数据分析后为施工决策提

供科学依据，超预警值时及时启动支护措施；盾构法施工技术在软土地层中实现快速、安全、环保掘进，适配复杂地质条件，减少对周边环境的扰动，保障施工安全与质量。

5.4 强化施工质量管理体系

完善的质量管理体系是质量控制的制度保障，需构建全流程、全覆盖管控机制。施工单位依据法律法规与行业标准，制定含质量手册、程序文件、作业指导书及质量记录的体系文件，分别明确方针目标、规范管理流程、细化工序要点、提供追溯依据，确保管理有章可循。明确各岗位职责，项目经理为第一责任人统筹质量，技术负责人主导技术方案与问题解决，质检部门负责检验监督，施工班组及操作人员对岗位质量直接负责，形成全员参与、全过程控制格局。施工前会审图纸、组织技术交底、评审施工方案；施工中严格执行“三检制”，关键工序实行旁站监理，严控合规性。按国家行业规范验收分项、分部及单位工程，提供完整资料，验收合格方可推进；不合格工程需分析原因、落实整改并重新验收，筑牢质量防线。通过体系化、标准化管理，确保工程质量全程可控、符合要求。

6 结语

本研究明确路桥隧施工核心关键工序：道路的路基填筑（材料、厚度、压实度）与路面摊铺（设备参数、速度、碾压工艺），桥梁的基础（地基承载力、钢筋、混凝土）与上部结构（预制梁质量、现浇箱梁浇筑），隧道的洞身开挖（超欠挖、爆破参数）与支护（锚杆锚固力、喷射混凝土、二次衬砌），并提出针对性质量控制要点。经高速公路、大型桥梁、特长隧道三类案例验证，要点有效保障工程安全稳定，指标符合规范。研究存在案例覆盖不全、新技术研究不深等局限，未来可引入 AI、大数据等技术，完善质量管理体系、强化人员培训，提升质量控制精细化水平。

参考文献

- [1] 周纪宏.浅议道路改造施工监理质量控制要点[C]//中国智慧工程研究会.2025工程新技术与新方法经验交流会论文集.苏州市水利建设监理有限公司;,2025:294-296.DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.061442.
- [2] 宋永海.公路桥梁施工关键技术要点与质量控制措施研究[J].运输经理世界,2025,(12):86-88.
- [3] 李献民,李志双,史向群.隧道施工规范化管理控制[M].中国铁道出版社:202207:391.

Optimization of tunnel drilling and blasting construction parameters and analysis of surrounding rock stability under complex geological conditions

Yun Wei

Yunnan Jiaotou Public Construction Energy Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

To address the challenges of tunnel drilling and blasting construction safety and surrounding rock stability under complex geological conditions, this study focuses on the optimization of drilling and blasting parameters and the analysis of surrounding rock stability. It employs a comprehensive approach, incorporating theoretical analysis, ANSYS and FLAC3D numerical simulations, and engineering case verification. The study dissects the impact mechanisms of geological factors such as faults, soft rocks, and water inrush on drilling and blasting parameters, clarifying the adaptive relationships between rock lithology, joint fissures, groundwater, explosive unit consumption, and blasthole spacing. It optimizes parameters for different geological sections, adopting a strategy of “more holes, less charge” for soft surrounding rock sections and presplitting blasting for high geostress areas. A stability analysis system is established, incorporating limit equilibrium method, numerical analysis method, and monitoring indicators such as displacement and stress. Verification through two typical tunnel projects shows that after optimization, the blasting vibration velocity is reduced to 15-30mm/s, the overexcavation is limited to $\leq 100\text{mm}$, and the maximum deformation of the surrounding rock is $< 20\text{mm}$, significantly enhancing stability. The results provide scientific guidance for tunnel construction in complex geological conditions and have engineering application value.

Keywords

Complex geology; Tunnel drilling and blasting construction; Numerical simulation; On-site monitoring

复杂地质条件下隧道钻爆施工参数优化与围岩稳定性分析

魏云

云南交投公建能源工程有限公司，中国·云南昆明 650000

摘要

为解决复杂地质条件下隧道钻爆施工安全与围岩稳定性难题，本研究聚焦钻爆参数优化与围岩稳定性分析，综合理论分析、ANSYS及FLAC3D数值模拟、工程案例验证等方法开展研究。剖析断层、软岩、涌水等地质对钻爆参数的影响机制，明确岩性、节理裂隙、地下水与炸药单耗、炮孔间距的适配关系；优化不同地质段参数，软弱围岩段采用“多打眼、少装药”，高地应力区采用预裂爆破，建立含极限平衡法、数值分析法及位移、应力等监测指标的稳定性分析体系。经两个典型隧道工程验证，优化后爆破振动速度15-30mm/s，超挖量 $\leq 100\text{mm}$ ，围岩最大变形量 $< 20\text{mm}$ ，稳定性显著提升，成果为复杂地质隧道施工提供科学指导，具工程应用价值。

关键词

复杂地质；隧道钻爆施工；数值模拟；现场监测

1 引言

在基础设施建设中隧道工程应用广泛，但复杂地质条件（断层破碎带、软弱围岩等）及不合理钻爆参数易引发塌方等事故，国内外多有相关案例。围岩失稳会造成重大经济损失与安全风险，因此研究钻爆参数优化与围岩稳定性意义重大。本文将分析地质、设计等因素对爆破参数的影响，运

用数值模拟等方法优化参数、建立围岩力学模型，探究二者内在关系，同时结合文献研究与工程案例验证，为隧道施工提供科学指导。

2 复杂地质条件对隧道钻爆施工的影响

隧道工程中常见的复杂地质条件包括断层、软岩、涌水、岩溶、高地应力、瓦斯地层等，“据《中国隧道建设地质灾害统计报告（2024）》，我国西部地区 70% 的山区隧道会遭遇复杂地质条件，其中断层破碎带出现概率达 30%，西南某高速隧道就因穿越多条断层破碎带多次发生坍塌。这些

【作者简介】魏云（1988-），男，中国云南昭通人，本科，工程师，从事公路施工研究。

地质各有危害：断层带岩体破碎、强度低，软岩易变形软化，涌水和岩溶易引发突水突泥，高地应力可能导致岩爆，瓦斯地层存在爆炸风险。地质条件通过岩石物理力学性质、节理裂隙、地下水等影响钻爆参数：硬岩炸药单耗（如花岗岩 $0.8\text{-}1.2\text{kg/m}^3$ ）高于软岩（如页岩 $0.3\text{-}0.5\text{kg/m}^3$ ），节理裂隙间距小于 0.5m 时炮孔间距需控制在 $0.3\text{-}0.4\text{m}$ ，涌水地段岩体含水量高，炸药能量易被水体吸收导致爆破效率下降，因此炸药单耗需增加 $10\%\text{-}20\%$ ，同时需选用抗水炸药保障爆破效果，软岩区爆破振动速度需控制在 $15\text{-}20\text{mm/s}$ 内。复杂地质给施工带来多重挑战：超欠挖问题突出，某隧道超挖量达设计值 20% ；爆破振动易引发围岩坍塌，且减振措施效果受地质不确定性影响；施工面临坍塌、瓦斯爆炸等多重安全风险；同时需采取超前支护等特殊措施，导致效率低下，某隧道因岩溶和涌水工期延长6个月、成本增加 30% ，严重影响工程安全、质量与进度。

3 复杂地质隧道钻爆施工参数优化案例分析

某山区高速公路隧道全长 3500m ，为双向四车道设计，穿越地质极复杂：进口段 500m 为断层破碎带（宽 $50\text{-}80\text{m}$ ，岩体完整性指数 <0.3 ，涌水量 $50\text{-}80\text{m}^3/\text{d}$ ），洞身 1500m 为页岩-泥岩互层软弱围岩（抗压强度 $3\text{-}10\text{MPa}$ ，遇水易软化），出口段 1000m 为高地应力区（最大水平主应力 $25\text{-}30\text{MPa}$ ，花岗岩易发生岩爆）。初始钻爆方案采用台阶法开挖，炮孔直径 42mm ，掏槽眼/辅助眼/周边眼深度分别为 $1.5\text{m}/1.2\text{m}/1.2\text{m}$ ，间距 $0.5\text{m}/0.6\text{m}/0.4\text{m}$ ，单孔装药量 $0.8\text{kg}/0.6\text{kg}/0.3\text{kg}$ ，微差起爆时间 $50\text{-}75\text{ms}$ 。实施后问题突出：断层破碎带及软弱围岩段平均超挖量 $200\text{-}300\text{mm}$ （超规范 10cm 限值），超挖 30cm 以上断面占比分别达 40% 和 30% ；围岩损伤深度 $1.0\text{-}1.5\text{m}$ ，爆破振动速度 $3\text{-}5\text{cm/s}$ ，高地应力区岩爆频发，造成人员受伤、工程停工^[1]。通过ANSYS与FLAC3D数值模拟结合现场试验优化参数：断层破碎带及软弱围岩段，掏槽眼/辅助眼/周边眼深度调整为 $1.2\text{m}/1.0\text{m}/1.0\text{m}$ ，间距缩至 $0.4\text{m}/0.5\text{m}/0.3\text{m}$ ，炸药单耗分别降至 0.8kg/m^3 、 0.6kg/m^3 ，周边眼采用不耦合装药（系数 1.5 ），微差时间调整为 $75\text{-}100\text{ms}$ ；高地应力区采用预裂爆破（预裂孔间距 0.3m ，先于主炮孔起爆）。

优化后成效显著：断层破碎带及软弱围岩段爆破振动速度降至 $1.5\text{-}2.5\text{cm/s}$ （符合规范），平均超挖量控制在 10cm 内；高地应力区岩爆频率与强度大幅降低，围岩稳定性显著提升，支护结构受力优化，保障了施工安全与进度。

4 隧道围岩稳定性分析理论与方法

4.1 围岩稳定性的影响因素

围岩稳定性由地质因素与工程因素共同决定，地质因素为内在基础，工程因素是关键外部影响。地质因素核心包括岩体结构、岩石强度和地下水状况：岩体结构控制破坏形态，软弱结构面不利组合易引发坍塌，某隧道曾因三组结构

面不良组合导致岩块塌落；岩石强度以单轴饱和极限抗压强度为核心，软岩较坚硬岩石更易变形破坏；地下水会软化岩石、冲蚀结构面充填物，某隧道穿越富水断层破碎带时，便因地下水引发大规模坍塌。工程因素主要涉及隧道形状尺寸与施工方法：同一围岩条件下，跨度越大稳定性越差，圆形断面受力最优，某大跨度隧道因跨度问题出现变形裂缝；施工方法影响围岩扰动程度，普通爆破法扰动大，控制爆破法、掘进机法扰动小，某隧道经施工方法优化后，稳定性显著改善。

4.2 围岩稳定性分析的理论模型与方法

当前主流围岩稳定性分析方法包括极限平衡法、数值分析法和地质力学模型法，三者各有优势与适配场景。极限平衡法是经典方法，核心基于岩土体受力分析，通过比较滑动面抗滑力与滑动力计算安全系数。该方法假设岩土体为刚体、忽略变形，需先确定潜在滑动面，经受力分解与抗剪强度计算得出结果，其优点是概念清晰、计算简便，易被工程技术人员掌握，适用于地质条件简单、精度要求不高的小型隧道，可快速完成初步评估，但因忽略岩土体变形特性与应力-应变关系，复杂地质下结果可靠性较低。数值分析法是近年主流，含有限元法、有限差分法等，适用于复杂地质与大型隧道。有限元法通过ANSYS、ABAQUS等软件离散求解域，模拟围岩应力、应变及位移；有限差分法借助FLAC3D等软件处理岩土大变形问题，可综合考虑多因素，精确模拟力学行为，为施工优化提供科学依据，但需准确获取地质与力学参数，计算复杂且依赖专业软件与技术人员，成本较高。地质力学模型法通过物理模型试验，按相似准则制作含围岩与支护结构的模型，模拟开挖与支护过程并采集数据，能直观反映受力与破坏过程，结果可靠性高，可补充数值分析与理论计算，适用于重要复杂隧道，但模型制作成本高、试验周期长，相似性难以完全保证，成果推广受限^[2]。

4.3 围岩稳定性监测与评估指标

隧道施工中，实时监测与科学评估是安全保障关键，核心涵盖位移、应力及锚杆轴力监测。位移监测为核心手段，通过拱顶沉降和周边收敛的大小、速率及趋势判断稳定：拱顶沉降反映拱顶变形，周边收敛体现围岩相对变形。某隧道初期拱顶沉降速率 5mm/d 、周边收敛 3mm/d 且持续增长，经加强支护后趋于稳定。行业标准：速率 $>1.0\text{mm/d}$ 需强化支护， $0.2\text{-}1.0\text{mm/d}$ 需加强观察， $<0.2\text{mm/d}$ 基本稳定。应力监测通过压力盒、应变计等采集数据，聚焦围岩与支护受力，若喷射混凝土应力、锚杆轴力超设计强度，易致失稳，某隧道经增加锚杆、加厚喷射混凝土后应力降低。锚杆轴力监测反映支护与围岩相互作用，轴力异常增长提示失稳风险，某隧道因及时处理轴力急剧上升问题，成功避免事故。

综上，围岩稳定性需综合考虑地质与工程双重因素，选用适配的分析方法，结合多维度监测数据与科学评估指标，才能及时发现风险、采取有效措施，保障隧道施工安全与长期稳定。

5 复杂地质隧道围岩稳定性分析案例研究

案例工程的围岩条件与施工概况：本案例隧道全长 5.2 公里，地处构造复杂区域，穿越砂岩、页岩、泥岩及断层破碎带，是区域重要交通枢纽。各段围岩特性差异显著：砂岩段长 1.8 公里，单轴抗压强度 30-50MPa，节理裂隙影响岩体完整性；页岩段长 1.5 公里，强度 10-20MPa，遇水易软化泥化；泥岩段长 1.2 公里，强度 5-10MPa，具明显流变特性。施工采用台阶法与 CD 法结合：砂岩段用台阶法（上台阶 3.5-4.0m、下台阶 2.5-3.0m），控制开挖扰动；软弱围岩段用 CD 法分侧开挖，及时施作支护。受地质条件影响，平均月进度 50-70 米，砂岩段可达 70-80 米，软弱围岩段仅 30-50 米。

基于数值模拟的围岩稳定性分析：利用 FLAC3D 建立三维模型（轴线方向 100 米，左右各 50 米，上下至地表及隧道底以下 30 米），采用 Mohr-Coulomb 本构模型，依据现场与室内试验确定力学参数，分阶段模拟开挖及支护过程（初期支护为 20cm 喷射混凝土 + 3.5m 长锚杆，间距 $1.0m \times 1.0m$ ；二次衬砌为 400mm 钢筋混凝土）。模拟结果显示：隧道开挖后围岩应力重分布，砂岩段最大主应力 10-15MPa，软弱围岩段达 20-25MPa；位移方面，砂岩段拱顶沉降 5-10mm、周边收敛 8-15mm，软弱围岩段分别为 20-30mm、30-50mm；塑性区范围砂岩段 0.5-1.0m，软弱围岩段 2.0-3.0m 且向深部发展。

现场监测结果与稳定性评价：施工中布置监测断面，采用全站仪、水准仪、压力盒等监测位移、应力及支护受力。监测数据与模拟结果趋势一致：砂岩段实测值与模拟值偏差 $\leq 10\%$ ，软弱围岩段因地质复杂性存在一定偏差，但变化规律相符。整体来看，当前施工与支护措施下围岩稳定性可控：砂岩段位移和应力变化小，支护效果良好；软弱围岩段虽位移、应力较大，但通过及时支护保障了稳定。仅部分软弱围岩段受地下水影响，变形和应力增大。

综合评价后提出改进措施：软弱围岩段优化施工方法、缩短台阶长度、加强支护；断层破碎带采用超前注浆加固。措施实施后，有效保障了隧道施工安全与顺利推进。

6 钻爆施工参数与围岩稳定性的关联分析

6.1 钻爆施工参数对围岩稳定性的影响规律

钻爆参数（装药量、爆破顺序、炮孔间距）直接影响围岩应力、变形及破坏模式。装药量与爆破振动速度呈立方根正比（装药量翻倍，振动速度约增 1.26 倍）：装药量过大易产生大量微裂纹，破坏围岩完整性，某隧道因装药量过大导致围岩损伤深度超 2m；装药量过小则岩石破碎不均，引发局部应力集中。爆破顺序需遵循“先掏槽、后辅助、再周边”原则，掏槽眼创造自由面，周边眼控制轮廓，顺序错误会导致围岩过早失稳，某工程因先起爆周边眼引发坍塌。炮孔间距与岩性适配：坚硬岩石可适当增大，软弱岩石需减小，如花岗岩隧道间距 0.5m 效果良好，页岩隧道需调

整至 0.3m^[3]。

6.2 基于围岩稳定性的钻爆参数优化策略

优化需平衡安全与成本，综合地质、设计、设备等因素，通过理论分析、数值模拟及现场试验确定方案。软弱围岩采用“多打眼、少装药”原则：减小炮孔直径、增加数量，使能量均匀分布，炸药单耗较坚硬围岩降低 20%-30%，某软弱围岩隧道将炮孔直径从 42mm 减至 38mm，孔数增 20%，单耗降 25%，有效控振。推广光面 / 预裂爆破技术：光面爆破通过优化周边眼参数保障轮廓平整，预裂爆破先形成裂缝减弱主爆影响，某隧道采用光面爆破后超挖量从 150mm 降至 50cm 内。实施动态调整机制：利用爆破振动监测仪、全站仪等设备，实时监测振动速度与围岩变形，及时优化装药量、起爆顺序等参数。

6.3 工程实例验证

选取穿越断层破碎带、软弱围岩的某高速隧道验证优化效果。初始参数因未适配复杂地质，导致围岩最大变形量达 50mm，局部出现裂缝。通过 FLAC3D 数值模拟与现场试验优化参数：炮孔直径减至 38mm，孔数增 20%，炸药单耗降 25%，采用光面爆破（周边眼间距 0.3m，不耦合系数 1.5），优化起爆顺序（先掏槽后辅助再周边，微差时间 75-100ms）。

优化后成效显著：爆破振动速度从 50-80mm/s 降至 20-30mm/s（符合规范），围岩最大变形量控制在 20mm 内，裂缝数量与宽度明显减少。长期监测显示围岩稳定性良好，但仍存在部分区域爆破效果待提升、施工条件变化影响参数适配等问题。后续需进一步优化炮孔布置与装药结构，加强地质及施工条件动态监测，确保参数实时调整。

7 结语

本研究聚焦复杂地质条件下隧道钻爆施工参数优化与围岩稳定性分析，通过理论、数值模拟及工程实例结合，明确了地质因素与钻爆参数的内在联系，优化后爆破振动速度降至 1.5-2.5cm/s，超挖量控制在 10cm 内。运用 FLAC3D 建立三维模型，结合现场监测评价围岩稳定性，验证了数值模拟的可靠性，揭示了钻爆参数对围岩稳定性的影响规律，提出优化策略后围岩最大变形量小于 20mm，稳定性显著提升。研究存在数值模型参数与实际有偏差、监测数据准确性受影响、成果普适性待验证等不足。未来将完善数值模拟方法、优化监测方案、扩大研究样本，同时引入人工智能等技术，推动施工参数优化与围岩稳定性分析智能化。

参考文献

- [1] 姜涛.复杂不良地质条件下特长隧道钻爆施工关键技术[J].交通世界,2025,(17):126-128.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.17.007.
- [2] 张平智.复杂地质条件下长大隧道钻爆法施工实践研究[J].现代工程科技,2025,4(08):29-32.DOI:10.26929/j.cnki.issn.2097-1672.2025.08.008.
- [3] 杨微.复杂地质条件下钻爆法隧道施工技术[J].工程机械与维修,2022,(01):208-211.

Optimization and Engineering Application of Settlement Monitoring Technology along the Subway Shield Construction Line

Lei Zhang¹ Yulong Yang²

1. PowerChina Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing, 100070, China

2. Northwest Survey and Design Institute of China Electric Power Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

Subway shield tunneling, which traverses densely built urban areas and complex geological conditions, is prone to pipeline ruptures and structural cracks due to settlement along the route. Settlement monitoring serves as the primary safety measure. This study investigates optimization strategies for traditional monitoring technologies, addressing issues such as insufficient accuracy, data delays, and incomplete coverage. By refining the monitoring index system, optimizing sensor deployment, developing real-time data processing models, and enhancing early warning mechanisms, a precise and effective settlement monitoring framework is established. Using a subway shield tunnel section as a case study, the optimized monitoring technology achieved a 30% improvement in accuracy and reduced early warning response time to within 5 minutes, preventing three instances of excessive settlement. These findings provide technical support for settlement control in subway tunnel construction, thereby enhancing the safety of urban underground engineering projects.

Keywords

rail transit shield; construction line; settlement monitoring technology; optimization engineering strategy

轨道交通盾构施工沿线沉降监测技术优化与工程应用

张磊¹ 杨玉龙²

1. 中电建铁路建设投资集团有限公司, 中国·北京 100070

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

轨道交通盾构施工由于穿越城市密集建筑群、复杂的地质条件，沿线沉降容易造成管线破裂、建筑物开裂等安全问题，沉降监测是保证施工安全的主要手段。本文对传统监测技术精度不足、数据滞后、覆盖不全等开展监测技术优化研究。优化监测指标体系、改善传感设备布置、创建实时数据处理模型并完善预警体系，塑造起精确有效的沉降监测技术体系。以某地铁盾构区间为工程案例，采用优化技术监测，监测精度提升30%，预警响应时间缩短至5分钟内，避开了3次沉降超标风险。研究成果可以给地铁隧道施工沉降控制提供技术支撑，提高城市地下工程施工的安全性。

关键词

轨道交通盾构；施工沿线；沉降监测技术；优化工程策略

1 引言

伴随着我国城市化进程的加速，地铁建设已经进入高密度发展的阶段，盾构法因为施工效率高、对地面干扰小等优点，成为了地下线路施工的主要工艺。但是盾构施工过程中刀盘切削土体、管片拼装及同步注浆等环节容易破坏土体的平衡，造成沿线沉降，若沉降量超过控制标准，会对周边建筑物、地下管线、桥梁等基础设施造成不可逆的损害。近些年来，由于多地地铁盾构施工沉降监测缺失或者不到位

而出现安全事故，造成重大经济损失和社会影响。传统的沉降监测依靠人工布点、光学仪器测量，存在着监测频率低、数据传输滞后、复杂区域覆盖不到等缺陷。因此，亟待进行沉降监测技术的改进研究，创建适合盾构施工特点的监测体系，保证工程安全，降低施工风险。

2 轨道交通盾构施工沿线沉降监测的重要意义

2.1 保障工程结构施工安全

盾构施工时，隧道结构自身是否稳定，其沉降状况也存在联系，持续发生沉降时，管片接缝会漏水，管片出现裂缝，隧道遭到坍塌。经过精确沉降监测，可以了解隧道结构以及周边土体的变形规律，及时察觉管片位移，沉降速率突

【作者简介】张磊（1985—），男，中国黑龙江哈尔滨人，本科，副高级工程师，从事城市轨道交通施工管理研究。

然改变等异常状况。根据监测数据对盾构推进参数进行调整，例如推进速度、土仓压力、同步注浆量等，可以有效地使隧道结构沉降控制在设计允许范围内。某地铁盾构区间施工过程中，实时监测到隧道拱顶沉降速率突然增大到 8mm/d ，立即修改同步注浆配比、放缓推进速度，避免了管片开裂事故，充分体现沉降监测对工程结构安全的保障作用^[1]。

2.2 保护周边基础设施安全

城市轨道交通线路大多穿越人口密集、基础设施密集的区域，盾构施工沿线上分布大量建筑物、地下管线、高压电缆等各类设施，这些设施对沉降十分敏感。如老旧建筑物基础承载力低，沉降量超过 20mm 就会出现墙体开裂；地下燃气管线沉降超标，接口处易泄漏并引发爆炸。沉降监测根据不同基础设施设置不同的监测点，拟定不同标准。实时跟踪基础设施的沉降数据，在接近预警阈值的时候及时采取干预措施，例如用袖阀管注浆加固土体。盾构工程穿越老城区时，对沿线的12栋老旧建筑、30条地下管线进行专项监测，使沉降量控制在 10mm 以内，保证了周边基础设施的安全^[2]。

2.3 提升施工过程风险管控水平

盾构施工风险存在隐蔽、突发等特点，而沉降属于施工风险的一种重要外在体现形式。创建起沉降监测数据同风险等级的联系模型，当监测数据到达不一样的预警级别时，就自动引发对应应急反应。以沉降速率到达 5mm/d 的时候发出黄色警报，安排技术人员去现场查看；沉降速率达到 10mm/d 时触发红色警报，停止施工并制定加固方案。同时监测数据可以用来作为施工风险评估的依据，通过分析沉降规律来预测可能出现风险的地方，比如穿砂层时容易突沉，事先做出相应的预防措施，实现从被动处理到主动预防的转变。

2.4 为后续工程提供技术参考

沉降监测产生的大量数据，不同地质条件下的沉降规律数据、施工参数的沉降规律数据、监测技术的应用效果数据等，具有重大的学术研究和工程实践意义。对监测数据进行统计分析，可以得到不同地质类型（黏土层、砂层、卵石层）和沉降量的关系模型，确定盾构施工参数的最优点范围。可以为后续的同类工程施工提供参考，相同地质条件下施工时可以直接采用优化后的监测方案施工参数，缩短工程筹备时间，降低技术研发成本。监测技术改进的经验可以促进行业监测标准的改进，提高我国轨道交通盾构施工的整体水平^[3]。

3 轨道交通盾构施工沿线沉降监测技术优化策略

3.1 优化监测指标体系设计

传统的监测指标主要为地表沉降、隧道拱顶沉降等，指标单一不能全面反映沉降风险。优化后的监测指标体系采取分层监测加上专项监测的方式，分层监测包含地表沉降、

地层分层沉降、隧道结构沉降（拱顶、拱底、侧墙），专项监测依照不同的风险源来设置，即建筑物倾斜率、管线沉降差、邻近桥梁墩台沉降。同时加入动态指标调整，按照施工阶段（盾构始发、正常推进、接收）以及地质情况改变来调整指标权重，比如穿越富水砂层时把地层分层沉降速率权重加大到40%，穿越建筑物密集区时把建筑物倾斜率当作核心监测指标。经由指标体系改良，达成对沉降风险的全方位，立体化监测。

3.2 改进监测设备部署与选型

对于传统设备检测精度低、数据传输迟滞的问题，进行设备选型和部署的优化。地表监测使用GNSS实时动态监测系统，配合静力水准测量仪，对地表沉降进行实时采集、自动传输，监测精度达到 $\pm 0.5\text{mm}$ ；地层内部采用光纤光栅传感技术，在盾构机刀盘后方及隧道周边土体中布置光纤光栅传感器，对地层变形进行连续监测，解决传统点式监测覆盖不足的问题；隧道结构监测采用无线倾角传感器和收敛计，传感器采用LoRa无线通信技术实现数据实时上传，减少线缆布设对施工的干扰。同时优化设备的部署密度，根据风险评估的结果采取不同的布点方式，对高风险区域（建筑物基础周边等）的监测点间距缩小到 5m ，对一般区域的间距扩大到 15m ，在保证监测精度的前提下减少设备投入成本^[4]。

3.3 构建实时数据处理与分析模型

传统的数据处理方式是人工录入和离线分析，处理时间为24小时，不能满足实时预警的要求。优化之后创建起“数据采集-传输-处理-分析”一体化平台，利用边缘计算技术在现场对原始数据实施预处理，剔除噪声数据并剔除异常值，经由5G通讯技术将处理过的数据上传到云端服务器，云端平台配备BP神经网络模型，融合历史监测数据，地质参数，施工参数等众多数据，达成沉降量的短期预估。模型的预测精度为92%，可提前12小时预测沉降趋势的发展。开发数据可视化系统，采用曲线图、热力图等数据可视化方式，将监测数据和预测结果形象地显示在屏幕上，方便管理人员随时掌握沉降情况^[5]。

3.4 完善分级预警与应急响应机制

根据优化后的监测指标以及数据处理结果来建立四级预警机制（蓝色、黄色、橙色、红色），确定各个等级预警的触发条件、响应流程和处置措施。蓝色预警（沉降速率 $\leq 3\text{mm/d}$ ）：增加监测频率，每2小时采集一次数据；黄色预警（ $3\text{mm/d} < \text{沉降速率} \leq 5\text{mm/d}$ ）：派技术人员现场勘查，寻找沉降原因调整施工参数；橙色预警（ $5\text{mm/d} < \text{沉降速率} \leq 10\text{mm/d}$ ）：停止盾构推进、用袖阀管注浆加固土体；红色预警（沉降速率 $> 10\text{mm/d}$ 或者累计沉降量超设计限值）：启动应急预案、疏散周边人员、开展专项加固。另外建立预警信息联动发布系统，用手机APP、短信、现场声光报警器等多种方式同时发布预警信息，使相关人员可以及时应对。

轨道交通盾构施工沉降监测优化技术的工程应用案例

4 工程概况

某城市的地铁3号线一期工程盾构区间，全长为2.8km，用土压平衡盾构机施工。区间穿越的地层主要是粉质黏土层、中粗砂层、卵石层，穿越中粗砂层段长约800m，该地层渗透性好、土体稳定性差，容易出现涌水涌砂、沉降超标的状况。该区间沿线有18栋多层建筑，为了保证施工安全，本工程采用本文优化的沉降监测技术体系。

4.1 优化监测方案实施

根据工程特点来优化监测方案：选取地表沉降、地层分层沉降、隧道拱顶侧墙沉降、建筑物倾斜率、管线沉降差五项主要监测指标；在设备布置上，地表设32个GNSS观测点、18个静水准点，中粗砂层段每20米布设一组光纤光栅传感器，隧道内部每5环布设一套无线倾角传感器和收敛计，建筑物及管线周边共布设45个专项监测点；数据处理采用边缘计算加云端平台的方式实现数据每10分钟自动采集、处理和上传；利用BP神经网络模型实时预测沉降趋势；预警机制分为四级预警，明确各个等级的响应流程并对施工人员开展专项培训。

4.2 监测结果与风险管控效果

工程施工期间，优化监测技术体系共采集有效数据12.6万组，发现3次沉降异常情况，第一次是盾构推进到K1+250处中粗砂层时地表沉降速率突然增大到6.2mm/d，出现橙色预警，技术人员通过查看监测数据和地质资料分析判断是同步注浆量不够，在及时将注浆量由3.5m³/环增加到4.2m³/环后24小时沉降速率降到2.8mm/d；第二次是K1+830处老旧建筑监测点倾斜率达到0.003，出现黄色预警，采用袖阀管注浆加固建筑物基础，加固后倾斜率控制在0.001以内；第三次是管线监测点沉降差达到12mm，出现黄色预警，调整盾构推进速度从8cm/min降到5cm/min，沉降差慢慢降到8mm。整个施工过程中，地表最大沉降量22mm、建筑物最大沉降量15mm、管线最大沉降量10mm，都在设计允许范围内。

4.3 技术应用效益分析

该工程采用优化监测技术之后，取得明显的技术和经济效益，安全效益方面成功避开3次重大安全风险，没有出现建筑物开裂、管线泄漏等事故，周边环境安全得到保障，效率效益方面监测数据处理时间由原来24小时缩短到现在的10分钟，预警响应时间平均缩短到8分钟，施工效率提高15%，盾构推进速度从日均8环提高到10环，成本效益方面虽然优化监测设备投入比传统监测高18%，但是因为避免了事故损失、减少了返工、工期提前等带来的效益有860万元，投资回报率320%，技术效益方面获得中粗砂层盾构施工沉降监测宝贵数据，为后续类似工程提供参考监测方案和施工参数。

5 结语

综上所述，轨道交通盾构施工沿线沉降监测是保证工程安全、周边环境稳定的必要环节，传统沉降监测技术已经不能满足复杂地质、密集城区施工的要求。本文通过对监测指标体系的优化、监测设备布置与选型的优化、建立实时数据处理模型、完善预警机制，形成一套沉降监测技术优化体系，解决传统沉降监测技术精度低、响应慢、覆盖范围不全等问题。工程应用案例表明，该优化技术能明显提高监测精度和预警效率，使沉降风险控制在设计范围内，并且可以降低施工成本，提高施工效率。

参考文献

- [1] 上海轨道交通22号线南港越江超大直径盾构区间隧道贯通[J].隧道与轨道交通,2024,(04):55.
- [2] 鲁冬冬,王玉福,郑明申,等.城市轨道交通盾构区间自由设站法平面控制测量方法研究[J].城市勘测,2024,(06):179-182.
- [3] 高云龙.轨道交通郊区区间下穿国铁方案的对比分析[J].山东交通科技,2024,(06):100-103+110.
- [4] 徐军平,楼岱,林吉,等.综合管廊盾构小距离上穿既有运营盾构隧道结构变形数值模拟及施工控制[J].浙江交通职业技术学院学报,2024,25(04):1-7.
- [5] 郭敏,许人骥,刘茹,等.盾构施工辅料中有毒有害化学物质环境风险管理建议[J].生态与农村环境学报,2024,40(12):1567-1573.

Exploration on the Construction and Application of Information System for Expressway Mechanical and Electrical Engineering

Xiang Xiao¹ Hang Zhang²

1. Zhejiang Jinhua Yongjin Qushang Expressway Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang, 321000, China

2. Zhejiang Jiaotou Expressway Construction Management Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

Currently, the construction of electromechanical engineering on highways in China is booming. In order to improve the operational efficiency of electromechanical production equipment, the electromechanical engineering information system has emerged. The new system changes the traditional mode of manual inspection and passive response, and adopts a new mode of intelligent automation, integration, and proactive prevention. This article will discuss the construction architecture of the information system for highway electromechanical engineering, and explore the application scenarios and methods of its system technology, such as intelligent monitoring and operation scheduling platform, monitoring system platform, intelligent inspection system, holographic perception system, electromechanical operation and maintenance comprehensive management system, etc. These systems all adopt advanced intelligent information technology and have a relatively wide range of technological radiation. Finally, we look forward to the future development direction of system construction and operation.

Keywords

expressway; Mechanical and electrical engineering information system; Building architecture; Intelligent inspection; Holographic perception

高速公路机电工程信息化系统构建与应用探析

肖翔¹ 张航²

1. 浙江金华甬金衢上高速公路有限公司, 中国·浙江 321000

2. 浙江交投高速公路建设管理有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

摘要

当前中国高速公路机电工程建设如火如荼, 为实现机电生产设备运行效率提高, 机电工程信息化系统应运而生。新系统一改传统中人工巡检与被动响应的固有模式, 而是采用智能自动、集成化、主动预防新模式。本文将泛谈高速公路机电工程信息化系统的构建架构, 探讨其系统技术的应用场景以及应用方法, 如智慧监测以及运维调度平台、监控系统平台、智能巡检系统、全息感知系统、机电运维综合管理系统等。这些系统均采用了目前先进的智能信息化技术, 且技术辐射范围相对较广。最后, 展望系统构建与运行的未来发展走向。

关键词

高速公路; 机电工程信息化系统; 构建架构; 智能巡检; 全息感知

1 引言

现代高速公路机电工程信息化系统已经引入大量信息化技术, 例如监控、巡检、感知等分支系统不但智能化水平高, 而且还能全方位跟踪高速公路车辆运行状态, 为某些突发事故状况给出客观评价, 精准计算提供条件。同时, 该系统具有较高的运维效率, 可以保障所有机电工程设备安全稳定运行, 它的系统核心架构内容复杂, 非常值得深入研究。

2 高速公路机电工程信息化系统的基本架构构建

高速公路机电工程信息化系统的信息化水平高, 基本满足从云技术、边缘技术到端对端技术的三位一体系统, 技术架构比较完整。其中, 更集成了大量前沿技术, 满足高效率生产管理运维要求。从云、边到端, 系统的基本架构构建内容如下:

2.1 云——云计算与大数据信息化系统架构

系统的云计算与大数据信息化系统架构内容表现丰富, 其中的核心架构分层就包括中心云与区域云两种。前者负责统一管理系统基本架构, 它的决策分析以及 AI 训练能力较强; 后者负责融合云计算、大数据智算流程, 它的多云化管

【作者简介】肖翔 (1988-) , 男, 中国浙江衢州人, 本科, 工程师, 从事机电工程、高速公路建设信息化研究。

理机制健全且可以存储海量数据。

在区域云周边，还有边缘云，它是系统分支架构的关键。边缘云的公路路段部署能力较强，所以主要用于收费站部署，具有较强的本地实务数据以及业务处理能力。边缘云的低时延响应速度较快，可以配合工艺协议兼容使用。边缘

云所对应的边缘设备终端比较复杂，包括情报处理器、摄像机、传感器等，它们还被接入区域云，负责管理物联网 IoT 网关，解析诸多协议内容，采集状态数据以及相关指令^[1]。

云计算与大数据信息化系统架构拥有多个核心业务环节，具体参考表 1 内容。

表 1 云计算与大数据信息化系统架构核心业务内容

云计算与大数据信息化系统架构项目	云计算与大数据信息化系统架构内容
智慧收费站、云收费平台	部署一体化设备，简化运维稳定运行机制，满足收费业务快速上线要求
视频云联网与 AI 分析机制	创建视频云联网与 AI 分析机制，存储海量视频数据，分析事件智能检测机制与结果
全生命周期运维平台	设立云计算与大数据数字档案，记录采购设备从生产运行到报废全过程。建立设备健康预测模型，建立全生命周期运维精准养护平台
一体化监控与应急指挥管理机制	分析气象环境、设备状态等多维数据，通过可视化大屏调整“一图统览”功能应用，满足一键应急预案启动应用要求

2.2 边——物联网与全面感知信息化系统架构

在系统边缘，分支系统主要为物联网系统，系统中的传感器设备部署较为丰富。例如在隧道、门架等部署位置均处于边端位置，可以实现对设备的专门调整优化，环境参数表现多元，可以满足全息采集技术应用需求。

例如在物联网巡检系统中，诸如“灵机”、“灵犀”等智能巡检系统属于中国自主研发系统，系统的二维码安全外网数据比较丰富，可以满足自动巡检与数据传输要求，并配合微信自动派单。该智能巡检系统的巡检频率水平较高，可以达到 3 分钟 / 次的高巡检效率，响应速度相当理想。

2.3 端——人工智能与数字孪生信息化系统架构

最后是端，系统包含人工智能 AI 端以及数字孪生端，二者都遵循 AI 算法自动检测故障，捕捉高速公路行车异常状况。例如，采用两种技术的异常状况识别率高达 96% 以上，配合数字孪生技术构建高速公路的隧道三维可视化模型，满足隧道的映射以及监控工作要求。除此之外，地理信息系统 GIS 端则负责管理系统以及行车状态信息，并将状态信息与电子地图相互结合，满足机电设备的空间信息可视化定位要

求，智能化管理技术水平较高。

3 高速公路机电工程信息化系统的应用场景与技术方法

在中国，高速公路机电工程信息化系统已经在多个省份地区被使用，且实践应用成果卓越。下文主要结合系统应用场景，分析其具体技术应用方法。

3.1 云计算与大数据信息化系统的应用场景与技术方法

系统的云计算与大数据信息化分支系统应用技术水平较高，它的应用场景主要是高速公路的机电系统智慧监测以及运维调度平台。在平台上，所集成的大数据、云计算 AI 机器人可以满足对高速公路的全域监控管理，一旦发现问题统一报警，并分层调度大数据内容，具体分层参考设备侧所部署的传感器展开，传感器的数据采集能力较强，可以在网络边缘侧实现初步数据处理，实时分析云端海量大数据，深度挖掘并智能调度“通算 + 智慧”一体化云平台，支撑系统模型构建智能化训练机制，完成云计算推理任务。该套系统的核心功能满足了四大智能化技术跨越，具体参考表 2。

表 2 云计算与大数据信息化系统的应用场景与技术实践方法

云计算与大数据信息化系统核心功能	云计算与大数据信息化系统功能内容
状态感知可视化功能	采用云计算 + 数字孪生技术构建比例为 1:1 的三维可视化模型，满足设备状态“一图统览”功能要求
运维模式主动化功能	分析 AI 算法应用情况，了解性能参数发展趋势，满足预测性维护机制，解决故障发生前预警问题。目前，国内某些地区的高速公路平台利用 AI 模型预判故障问题，系统故障主动发现率大幅度提高
故障处置协同化功能	建立平台自动故障诊断机制，智能生成工单分析系统运维机制，压缩维修与响应时间
决策支持数据化功能	建立平台收费与监控决策支持机制，构建并运行数据分析模型。满足设备更新与资源调配要求，建立决策量化参考机制

3.2 物联网与全面感知信息化系统的应用场景与技术方法

3.2.1 物联网与全面感知信息化系统及其应用场景

物联网与全面感知信息化系统拥有比较灵活的应用场景，例如智能巡检系统应用场景或者供配电一体化管控应用

场景。例如在中国众多大高速工程项目中，隧道全息感知系统应用范围广泛，它的综合应用 AI 以及机器视觉算法发挥了作用，在隧道综合管控平台中主要负责构建高速公路路网，重点管控高速公路车辆。在隧道中，它可以通过物联网与全面感知系统实现对车辆的状态立体化、可视化监控，

搭建隧道控制综合运维系统。该套系统是中国从美国、日本等国家借鉴的先进技术系统，它的系统信息共享功能表现突出，配合以太网以及图像处理通信技术突破固有技术瓶颈，满足隧道监控一体化操作要求，对高速公路隧道中可能发生的交通状况进行及时预判。如果交通事故已经发生，系统中的感知信息化分支系统则能发挥作用，报警调度相关救援人员参与现场救援活动。在计算机网络信息监控操作过程中，主要联动相关责任人员快速采取措施。客观讲，当前绝大部分高速公路隧道都安装了隧道综合管控平台，该系统所发挥的交通运营压力缓解作用显而易见，对隧道内安全形成以及系统安全功能应用最大化有极大利好。根据系统实际操作结果，它的最快响应时间仅为 24s^[2]。

3.2.2 二级计算机系统及其应用场景

为确保系统响应快速，与物联网、传感器有效联动，系统还专门设计了一套二级计算机系统。该系统专门服务于中下级网与上级网相互连通应用场景，且下级网部分采用双环光纤操作，最速响应时间低于 10s。同时，还配合系统安装了一套无线通信以及电力交通控制系统，二者都能实现第一时间火灾报警，并配有 10 个子系统平台，模拟系统响应全过程，并满足画面监控与显示要求。系统的中央计算机控制中心则能够直接控制一级计算机系统，这一系统的主要工作任务是采集数据系统内容，形成双机备份，利用软件模块分析数据内容。例如，系统的 MTBF 指标可以达到 10000H 以上，如此可以至少提高高速公路的营运能力水平约 30%。所以说，该系统的信息化运营能力水平极高，可以实现对高速公路的科学运维。

3.3 人工智能与数字孪生信息化系统的应用场景与技术方法

人工智能 AI 技术可以与数字孪生技术相互配合，共同打造高速公路机电工程信息化系统，它的主要应用场景为工程中的机电运维综合管理系统。该系统便于技术工作人员操作，因为它采用微信 App 小程序报修平台，技术工作人员随时都能报修并查看系统以及设备故障问题，构建一套“四维一体化”的巡检技术体系，满足系统的全流程线上闭环管理技术要求。

例如，数字孪生技术负责在系统所设计的数字虚拟空间中模拟构建真实物理的高速公路机电工程映射，实现与系统之间的交互式反馈，打造闭环管理数字监控模型。该模型的主要任务是定期检查高速公路的隧道、路面以及桥梁安全状况，配合集成安装的传感器、摄像头分析桥梁状态，分析交通流数据以及周边环境数据等。以高速公路机电工程的基本映射为例，数字孪生技术所提供的指挥功能表现比较全面，可以为技术人员直观且全面观察路段工程运行状况提供直观参考^[3]。

另外采用人工智能 AI 技术，该技术的应用范围更广，可以为系统提供智能化机器学习功能，解算视觉观察成果，建立深度学习分析机制。机电工程信息化系统的感知水平较高，可以分析并决策高速公路的实际运行状况，基于系统感知建立公路管理“智慧大脑”，它的数字孪生技术对海量数据处理能力较强，可以为系统提供某些智能化、信息化、自动化解决技术方案。以临金高速公路临安至建德段为例，该项目隧道综合管控平台的节能智能化控制技术水平较高，配合数字孪生技术集成高速公路上所有车辆的车流量数据。以 AI 算法为基础，动态控制高速公路隧道中的照明以及通风系统。当隧道中车辆较少时，系统可以提供自动调暗灯光方案，并同时降低通风系统的风机运行频率。如此看来，系统的精细化节能水平较高，可以降低系统的综合运维成本。

该系统的人工智能技术与数字孪生技术相互融合打造了全新的机电工程信息化系统，这一融合并非简单的技术堆砌，而是强调建立技术感知、映射与控制决策闭环。该套闭环的规划与设计内容丰富，可以通过数字孪生技术衍生创建 BIM 信息模型，配合 GIS 地理信息系统构建高速公路的完整三维数字模型，准确模拟不同方案下的高速公路管理技术细节。就目前看，临金高速公路临安至建德段项目隧道综合管控平台全面通过 AI 人工智能算法等仿真优化计算方案，可以对系统摄像头、传感器布设点位进行动态调整，最大限度提高系统监控效率以及覆盖范围。该系统能够有效预测高速公路的交通流量增减情况，为运营单位缓解监控工作压力。

4 结语

在高速公路建设项目中，针对机电工程信息化系统持续优化相当重要，要基于设备灵活应用属性与稳定性来提出一系列系统信息化技术机制，建立基于云、边、端的综合技术应用体系。在该套技术体系中，主要希望提出对高速公路的不良管理机制的技术性解决方法，所以数字孪生技术、AI、云计算、大数据等技术方法都有用武之地，可以切实满足对项目运行中交通运维、交通事故的有效预判。如果事故已经发生，也能快速报警规划提出救援方案，保证其它车辆安全通过事故路段。所以，本文所研究工程项目内容具有科学价值，可以为未来的机电工程项目建设提供技术性参考，提高高速公路整体运行效率。

参考文献

- [1] 陈曦.信息化背景下高速公路机电工程通信系统技术的应用研究[J].移动信息, 2025, 47(5):43-45.
- [2] 郭志荣.论基于物联网技术的高速公路机电设备智能监控系统[J].微型计算机, 2025(4):22-24.
- [3] 徐野.现代通信技术在高速公路机电工程信息化建设中的应用[J].今日自动化, 2024(3):125-127.

Research on key nodes and Governance Logic of life cycle management of Expressway Construction

Zhongbo Zhao

Xinjiang Communications Investment Construction Management Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830501, China

Abstract

as a typical project with high capital density, complex participants and large governance cycle span in the national infrastructure system, the full life cycle management ability of expressway construction directly affects the regional transportation supply efficiency, social and economic circulation speed and long-term asset value maintenance ability. This paper mainly focuses on the characteristics of the whole life cycle of highway construction, analyzes from four aspects: stage structure, key node identification, cross stage governance logic and digital tool system, and constructs the system framework of “value identification - Technology Governance - system closed loop - information return”, in order to provide theoretical reference and engineering enlightenment for highway project governance.

Keywords

highway construction; Life cycle management; Key nodes; Governance Logic

高速公路建设全生命周期管理的关键节点与治理逻辑研究

赵忠波

新疆交投建设管理有限责任公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830501

摘要

高速公路建设作为国家基础设施体系中资金密度高、参与主体复杂、治理周期跨度大的典型工程，其全生命周期管理能力直接影响区域交通供给效率、社会经济流转速度与资产价值长期保持能力。本文主要围绕高速公路建设的全生命周期特征，从阶段结构、关键节点识别、跨阶段治理逻辑与数字化工具体系四个方面展开分析，并构建“价值识别—技术治理—制度闭环—信息回流”的系统框架，以期为高速公路项目治理提供理论参考与工程启示。

关键词

高速公路建设；全生命周期管理；关键节点；治理逻辑

1 引言

高速公路建设作为我国综合交通体系的重要基础，其生命周期呈现跨部门协同密集、投资规模庞大、运维周期长的典型特征。随着交通需求结构演变、区域经济网络扩张及“双碳”约束强化，高速公路管理模式正由以建造为中心的线性治理，向以全寿命价值创造为导向的系统治理转型。传统管理模式将前期决策、勘察设计、施工建设与运营维护割裂，导致信息不能跨阶段流动，风险在后期集中暴露，难以形成治理闭环。生命周期管理强调基于阶段耦合的逻辑，通过关键节点识别、责任链条重构与数字化工具嵌入，使建设行为能够兼顾工程性能、资产价值与社会效益，为实现高速公路高质量建设与可持续运营提供方法支撑。

2 高速公路建设生命周期的结构与价值演化

2.1 生命周期阶段划分与功能逻辑

高速公路项目生命周期通常包括前期决策、勘察设计、施工建设、竣工交付与运营维护五大阶段，部分地区将资产更新与改扩建纳入第二生命周期，以形成“建设—运营—再建设”的宏观演进链条^[1]。不同阶段具有不同功能定位与价值目标：前期阶段决策目标以社会效益与投资回收平衡为核心，强调交通需求预测、经济收益率与生态约束之间的协调；设计阶段则承担工程性能上限设定的作用，其关键在于材料寿命、结构冗余与施工可达性之间的均衡；施工阶段强调质量实现、工期控制与风险释放，是治理体系作用最集中、指标最容易因扰动而偏离的阶段；竣工交付阶段的功能不仅是工程形态完成，更是责任边界与运维机制的制度转移；运营阶段重在性能保持、服务提升与资产增值，是衡量生命周期治理是否成功的最终指向。生命周期管理的核心在于不将阶段割裂，而是在阶段之间建立信息与责任传导，使治理逻辑

【作者简介】赵忠波（1985-），男，中国山东菏泽人，本科，高级工程师，从事公路工程项目管理研究。

从线性推进转向循环反馈。

2.2 生命周期风险的分布规律与动态传导

生命周期内的风险呈现非均衡、时变与累积特征。前期决策阶段由于信息不完整，存在交通量预测偏差与投资规模偏置的系统性风险；设计阶段在技术假设、材料模型与耐久性计算方面可能形成潜在缺陷，若不通过校核试验量化，将在后期形成不可逆的结构衰退；施工阶段的不确定性则集中爆发，如地质变化、气候扰动、设备能力与施工组织偏差等，往往导致施工质量与设计预期产生偏离；运营阶段的风险则体现为荷载累积、腐蚀扩散及材料疲劳的时序效应^[2-3]。风险在不同阶段之间存在传导机制，例如软土地基在设计中忽略湿度与固结时间，会导致施工期沉降控制失效，进一步在运营期形成路面开裂和结构支撑衰退，使建设成本向长期养护成本迁移。生命周期治理的要点在于通过阶段耦合控制，实现风险在源头被识别、在中段被抑制、在后期被可视化，从而避免集中爆发。

3 高速公路建设管理中的关键节点识别与治理策略

3.1 投资边界约束与社会效益均衡机制

决策节点是高速公路全生命周期治理中影响最深远的环节，其功能不仅在于确定项目立项与投资规模，更在于为后续设计、施工与运营阶段设定可实现的目标空间。传统决策模式往往依赖中观层面的车流预测模型与静态经济评价指标，以净现值、投资回收期等财务量化指标作为立项依据。但在交通需求结构快速变化、区域产业布局频繁调整和新型交通方式不断出现的背景下，单一的预测模型难以准确刻画未来通行需求的波动幅度，易导致投资不足或过度建设，从而在长期运营中引发资金沉淀、收益下降或交通能力不足的问题。因此，决策阶段必须引入动态情景模拟、敏感性分析与跨区域交通网络弹性评价，以形成更具稳健性的决策框架^[4]。

在投资边界确定过程中，需将生态环境约束、碳排放成本、土地利用效率与社会影响因素纳入扩展成本体系，使投资评价从传统的工程经济逻辑转变为综合社会效益逻辑。决策节点的治理关键在于建立“前期决策—设计约束—运维反馈”的闭环结构，通过制度化问责机制将设计单位、建设单位与运营单位的绩效考核纳入前期决策质量评估范围，从而避免前端信息误判引发后端阶段的无效成本。在此基础上，现代高速公路决策应推动从“工程立项”向“区域发展战略工具”的治理定位转变，使高速公路建设成为推动区域产业集聚、优化资源配置与促进城乡融合发展的基础性平台。

3.2 寿命导向的结构配置与信息回流机制

设计节点是高速公路生命周期中技术含量最高、对长期性能影响最直接的环节，其治理价值在于通过结构体系、材料配置与设计假设的优化，实现工程实体性能上限的科学

设定。传统设计体系虽已形成标准化与规范化模式，但其局限在于偏重指标达标与施工经济性，而对材料老化、长期疲劳行为及环境侵蚀机制关注不足，使工程在运营期容易出现性能衰退快、维护成本高等问题。寿命导向设计理念要求将全寿命性能作为核心目标，通过长期车流谱、温度荷载组合、腐蚀环境等级与材料耐久模型构成综合参数体系。例如在路面结构中，应基于车辙发展模型及粘弹性分析合理匹配沥青材料等级；在桥梁设计中，应将钢筋腐蚀扩散模型、应力幅值分布及疲劳极限概率纳入可靠性校核，从而形成工程性能与使用寿命的定量耦合关系^[5]。

除了设计参数本体的优化之外，更关键的治理逻辑在于构建运营信息回流机制，使设计假设不再停留于静态模型，而是能够在运营阶段通过监测数据获得动态验证。为此，设计阶段需预置监测接口布局、信息采集频率与数据格式标准，使结构健康监测系统能够无缝嵌入工程实体，实现“建设即监测、监测即校核”的技术闭环。在数字化工具支撑下，通过BIM—GIS融合平台与数字孪生模型，可将设计参数、施工工况与运营状态同步映射，实现结构行为的虚实联动与长期性能演化追踪。制度层面应强化设计单位的寿命责任机制，对因设计假设偏差导致的结构早期衰退建立责任追溯路径，以确保设计环节真正承担起生命周期治理的技术源头责任。

4 高速公路施工与交付阶段的动态治理机制

4.1 过程质量闭环与风险释放控制

施工阶段处于高速公路生命周期治理的执行中心，其核心任务不仅在于实现设计图纸的实体化，更在于在动态环境中控制质量偏差、吸收前期阶段可能累积的技术与组织风险。传统施工管理侧重事后验收与规范校核，忽视施工过程的动态波动性，使得质量偏差在阶段内难以及时发现，从而在竣工后表现为结构性能的不确定性。现代施工治理应以过程闭环管理为理念，通过实时监测、模型预测与反馈调节构建“目标—执行—验证—修正”的动态机制。例如，在软土地基处理中，采用预加载结合监测沉降曲线的方式，可根据固结速率与孔压消散特征动态调整荷载步序，避免因固结不足导致后期路基变形扩散；在隧道施工中，通过围岩分级实时识别、应力释放规律解析与支护参数迭代，可有效降低爆破扰动引发的围岩失稳风险。

施工治理的另一关键维度是质量责任链与数据可追溯体系的构建。材料性能、施工机具状态、工序衔接质量与环境因素均需纳入统一的质量评价体系，通过数字化工具实现信息同步采集与自动校核，从而避免人为经验“掩盖”质量波动。质量数据应建立跨主体共享机制，使监理单位、设计单位与建设单位均能基于同一数据源实现实时校核，形成施工行为的透明化治理结构。同时，施工阶段的风险释放应通过精细化组织管理来实现，包括对关键工序设定风险阈值、

建立动态调度机制、强化分包责任边界等，以防止因组织不协调导致工程节点性风险扩大。通过上述路径，施工节点能够实现质量偏差的即时反馈与风险的提前释放，使工程实体性能在施工阶段即得到有效保障。

4.2 性能量化评估与责任边界转移

竣工交付节点在高速公路生命周期中具有制度转换与责任重构的双重功能，其治理核心不在于“项目完成”，而在于是否能够在工程性能、质量责任与未来维护机制之间形成清晰的界面。传统交付模式往往依赖外观检查、局部指标测试和结构完整性评定，无法充分反映工程长期服役能力，使得部分潜在缺陷在运营期才逐步暴露，导致维护压力加剧甚至风险事件发生。因此，交付节点应从静态验收向性能导向评估转型，通过综合量化指标体系评估工程实体的长期耐久性与服务能力。

交付阶段的治理逻辑还体现在责任边界的制度化划分中。设计单位应对寿命预测误差承担相应责任，施工单位需对潜在工艺缺陷提供质量保证，运营单位则需在明确的性能基准下开展维护活动。通过绩效约束机制，可将责任主体在全生命周期中的行为纳入统一评价体系，使其激励方向与长期性能目标保持一致。与此同时，交付节点应通过信息回收机制，将施工过程数据、材料批次信息与现场测试结果纳入数字孪生平台，使工程的初始状态能够在虚拟模型中得到准确表达，为运营期性能仿真、病害预测与维护策略优化提供数据基础。最终，交付节点由单一质量认定环节转变为全生命周期治理的制度枢纽，使工程资产在进入运营阶段前即具备透明、可靠与可追溯的性能基础。

5 运营维护阶段的价值回流与生命周期治理工具体系

5.1 结构衰退模型与维护干预策略

高速公路运营阶段表现出典型的“荷载累积—材料损伤—性能衰退”链式机制，维护策略不能依赖经验判断与事后修补，而需基于寿命模型进行科学干预。路面系统中，车辙增长与裂缝扩展可通过PMS模型进行预测，并在适宜窗口实施薄层罩面或局部更换，而非待破坏发展到不可修复阶段再进行整体重构；桥梁结构中，通过腐蚀环境指数、钢筋失重率与疲劳累积函数计算剩余寿命，可在承载极限前进行补强，从而避免运营封闭造成社会成本溢出。维护决策必

须综合经济、技术与交通社会属性，例如山区隧道的封闭会导致区域物流链断裂，从而产生间接损失，维护窗口需以社会成本最小化为准则，而非仅根据工程成本最小化。

5.2 生命周期治理的数字化与制度化实现路径

生命周期管理的现代实现依托信息系统与组织制度双轮驱动。在工具层面，BIM与GIS融合可将空间信息、材料参数与时间演化形成三维表达，实现设计参数、施工过程与交通状态的动态映射；数字孪生技术则通过传感器回流、车流识别与结构应力建模构成虚实联动体系，使结构性能在虚拟空间实时演化，从而实现预测性维护。在制度层面，传统竣工验收制度难以覆盖长期性能，应通过性能合同、运营评价与责任链约束实现长期激励，使设计单位对寿命预测负责、施工单位对潜在缺陷负责、运营单位对维护绩效负责。通过制度化的全生命周期成本核算框架，将工程投资、维护支出与社会成本纳入同一收益体系，从根源上打破“建设短视”与“养护失能”的惯性结构。

6 结语

高速公路全生命周期管理强调“阶段联动—责任闭合—信息回流—绩效导向”的治理逻辑，其核心不在单节点优化，而在跨阶段耦合控制。通过前期决策中投资边界约束、设计阶段寿命导向参数构建、施工阶段过程质量闭环与运营阶段预测性维护策略，可形成全链条价值最大化机制。未来研究应在两方面深化，一是材料老化、荷载谱与环境暴露的耦合模型，二是将数字孪生、风险评估与资产管理嵌入政策框架，从而推动高速公路建设治理体系的现代化与智能化。

参考文献

- [1] 游小聪,张佳琦,雷跃川.关于高速公路建设企业绩效考核体系建设的思考[J].财务与会计,2019,(14):82-83.
- [2] 马书红,王元庆,岳敏,等.高速公路建设管理现代化理论研究与实践探索[J].公路交通科技,2022,39(12):239-246.
- [3] 孙付春.“双碳”背景下零碳高速公路建设探索与实践[J].公路,2024,69(12):433-439.
- [4] 熊伟,肖一鸣,米日努尔·麦麦提江.高速公路建设促进共同富裕的效能与机制[J].同济大学学报(自然科学版),2025,53(1):151-158.
- [5] 曾俊伟,闫浩,钱勇生,等.耦合视阈下陇南高速公路建设对城镇化影响的研究[J].公路工程,2018,43(6):82-85.

Research on Motor Vehicle Inspection Techniques and Innovations

Yanli Mu

The Traffic Police Brigade of Dongming County Shandong Province, Heze, Shandon, 274500, China

Abstract

Motor vehicle inspection is an important part of traffic management, which is related to vehicle safety and the efficiency of social governance. With the sharp increase in the number of vehicles and the continuous emergence of new models, the traditional inspection mode is facing challenges in terms of accuracy and intelligence. This article analyzes the problems from three aspects: inspection process, technical means and management mechanism, and proposes an optimization path based on digitalization and intelligent recognition. Research shows that the application of mobile terminal collection, image recognition algorithms and data sharing platforms can significantly improve the efficiency and accuracy of inspection, achieving a transformation from “manual experience type” to “data intelligence type”, and providing theoretical references and practical support for traffic management departments to improve the inspection system and build smart vehicle management.

Keywords

Motor Vehicle inspection; Intelligent recognition; Inspection skills; Digital management; Innovation in Traffic Management

机动车查验技巧与创新研究

穆艳丽

山东省东明县交警大队，中国·山东 菏泽 274500

摘要

机动车查验是交通管理的重要环节，关系车辆安全与社会治理效率。随着车辆数量激增和新车型层出不穷，传统查验模式在准确性与智能化方面面临挑战。本文从查验流程、技术手段与管理机制三方面分析问题，提出基于数字化与智能识别的优化路径。研究表明，应用移动终端采集、图像识别算法和数据共享平台可显著提升查验效率与准确率，实现由“人工经验型”向“数据智能型”转变，为交通管理部门完善查验体系、建设智慧车管提供了理论参考与实践支撑。

关键词

机动车查验；智能识别；查验技巧；数字化管理；交通管理创新

1 引言

机动车查验是公安交通管理工作中保障车辆安全与维护道路秩序的关键环节。查验不仅承担车辆身份识别、技术状况核实与合法性审查的职能，也是防范盗抢车、拼装车、套牌车的重要措施。近年来，公安部推行机动车查验标准化、信息化改革，推动“互联网+查验服务”与“一站式车管平台”建设，为查验模式创新提供政策基础。然而，技术更新与实操规范之间仍存在脱节，基层民警在查验实践中对复杂车型、篡改痕迹、信息伪造等问题的识别难度加大。基于此，本文结合一线查验实务与技术发展趋势，从查验技巧优化与创新机制构建两个维度展开研究，旨在提升查验科学性与智能化水平，推动机动车查验体系向精准、高效、智慧方

向发展。

2 机动车查验的现状与主要问题

2.1 查验任务的复杂化趋势

伴随机动车总量与车型种类的增长，查验任务逐渐呈现复杂化与专业化特征。新能源汽车、插电式混动车及特种改装车辆的出现，使传统查验流程难以完全适配。例如，电动车缺少发动机号信息，需通过电池编码与控制单元识别；部分进口车的 VIN 结构与国内标准不符，增加了识别难度。基层查验人员在新车型鉴别、环保标准核对及改装识别等方面经验不足，导致工作效率下降。

2.2 人工依赖度高与误差风险增加

当前查验工作仍以人工经验判断为主，查验结果易受主观因素影响。在实际操作中，部分查验环节如车架号拓印、铭牌识别、改装判定等缺乏标准化操作规程，不同查验员对同一车型的判断结果可能存在偏差。此外，手工录入数据、

【作者简介】 穆艳丽（1975-），女，中国山东东明人，本科，警务技术一级主管，从事机动车查验技巧与创新研究。

纸质档案管理等传统方式也导致信息传递延迟与数据失真。技术装备不足、信息互通性差的问题进一步放大了人工误差的风险。

2.3 信息孤岛与数据共享不畅

查验过程中涉及公安、环保、交通、市场监管等多个部门，数据来源复杂。由于各部门信息系统独立运行，接口标准不统一，车辆数据在不同平台间难以实时共享。部分地方虽建设了综合查验平台，但在数据准确率与更新频率方面仍存在滞后。信息壁垒导致查验员无法及时掌握车辆历史信息，影响查验判断的准确性与时效性。

3 机动车查验的核心技巧与关键环节优化

3.1 车辆识别与外观核验技巧

车辆识别号（VIN）作为机动车身份识别的核心信息，是查验工作中最具权威性的依据。查验员应系统掌握主流车企的 VIN 编码结构与逻辑规则，能够根据生产国、制造厂、车型及年份进行编码解析。在实际操作中，对可疑车辆需重点观察打码区域的字体深浅、间距均匀性及焊接衔接痕迹，通过灯光反射、涂层厚度检测或磁性探测等方式识别篡改迹象。铭牌核查应关注字体印刷、铆钉工艺、金属材质及位置固定方式的一致性，必要时可借助显微放大镜或光谱识别仪进行材料比对。在外观核验环节，需逐项检查车身颜色、轮胎型号、轮毂结构及改装部件，确保与登记信息、出厂参数及公告型号一致，从而有效防范非法拼装、换件或伪造行为。

3.2 发动机与底盘核查要点

发动机号和底盘号是验证车辆来源合法性与完整性的重要标识。查验员应熟悉不同品牌及车型发动机打码位置与字体工艺特征，对存在打磨、喷漆或覆盖痕迹的部位进行重点复核。疑似造假时可采用侧光照射、拓印比对或化学涂层剥离技术揭示原始编码特征。对于新能源车辆，应特别关注动力电池组编号、驱动电机及控制系统序列号，检查是否存在非法更换或私自改装现象。底盘检验中，应观察焊点分布、铆接结构和连接部件完整性，防止车辆因拼装、切割或私自加固而存在安全隐患。通过标准化操作流程与精细化检测技术，发动机与底盘核查能有效保障查验的科学性与公信力。

3.3 环保与技术参数核对方法

机动车环保核查是保障生态环保与车辆准入合规的重要环节。查验员应熟悉国六等现行排放标准及环保标识编码体系，通过 OBD 接口读取发动机控制单元（ECU）数据，核对氧传感器、三元催化器等工作状态，识别排放控制系统是否被人为篡改。对排放值异常车辆，可使用便携式尾气检测仪进行现场对比，防止伪造环保达标数据。技术参数核对应基于车辆合格证、公告信息与实车测量结果，对整备质量、外廓尺寸、功率及排量等关键指标进行交叉验证。建立参数比对数据库，可实现数据自动比对与差异报警，显著提升查验的精准性与标准化水平，为机动车监管提供科学

依据。

4 机动车查验中的技术创新与智能化应用

4.1 图像识别与 AI 算法应用

图像识别与人工智能算法的深度融合，正重塑机动车查验的技术逻辑与作业模式。传统查验依赖人工比对和经验判断，受限于主观因素与视觉疲劳，存在误判和漏检风险。AI 驱动的图像识别系统通过深度卷积神经网络（CNN）对车辆结构特征进行多维分析，能够在毫秒级完成识别与比对。OCR（Optical Character Recognition）算法可高精度读取车架号、发动机号和铭牌文字信息，避免人工录入误差，并自动与数据库进行比对校验。深度学习模型还能识别车辆外观的细微改装痕迹，如焊接线变化、颜色差异、标志偏移等，从而实现异常车辆的智能预警。基于计算机视觉技术的 AI 查验系统已可导入原厂生产图像样本与现场实拍照片进行比对，判定车辆部件是否存在更换、涂改或拼接行为。通过持续学习与数据积累，算法识别准确率可达 98% 以上，为公安机关提供高效、客观、可追溯的查验辅助决策工具，显著提升机动车查验的自动化水平与业务可信度。

4.2 移动终端与远程查验系统建设

移动终端技术的引入使机动车查验突破了空间限制，实现了“查验即服务”的新模式。借助手持式扫描仪、便携 VIN 识别仪和移动查验 APP，查验人员可在现场完成信息采集、拍照留证、二维码扫描及实时上传，构建数据即时回传与云端同步体系。系统通过无线网络与后台数据库对接，可在数秒内完成车辆信息核对与风险评估，显著提高查验响应速度。部分地区已试点远程查验平台，通过高清视频采集、远程专家复核与云端智能审核，实现非接触式查验。车主可在指定场所通过视频连线完成查验，全程留痕、可回溯，大幅减少等待时间与人力投入。该模式尤其适用于新能源车辆、二手车跨区域转入及疫情防控期间的特殊业务场景。远程查验系统还可结合人脸识别与地理定位技术，防止代办查验和虚假操作。通过移动化、远程化与智能化的有机融合，机动车查验实现了由固定窗口向分布式、实时化服务体系的转变，提升了群众满意度与行政透明度。

4.3 大数据与区块链技术的融合应用

大数据与区块链的融合为机动车查验提供了可信、可溯、智能决策的新支撑。基于大数据平台的查验系统，可整合公安、交通、海关、保险、检测机构等多部门数据资源，形成覆盖车辆生产、登记、年检、保险、维修、事故处理等环节的全生命周期信息链。系统通过数据挖掘与风险建模，可发现异常交易、频繁过户及伪造证件等潜在风险，实现精准预警与智能判别。区块链技术则在数据安全与可信传输方面发挥关键作用，其去中心化、加密哈希和时间戳机制确保车辆信息记录不可篡改、全程可追溯，解决了传统数据库在数据共享与防伪验证中的信任短板。查验系统可通过区块链

智能合约自动验证信息真实性，实现“一次登记、多方共享”。此举不仅提升了数据协同效率与业务透明度，也为建立全国统一的车辆信息可信体系奠定技术基础。大数据与区块链的深度融合推动了机动车查验从“经验管理”走向“数据驱动”的新阶段，为智慧交通与社会治理现代化提供了强有力的支持。

5 查验创新机制与管理模式构建

5.1 查验流程标准化与模块化建设

机动车查验流程的标准化与模块化建设是提升公安交管部门业务规范化与科学化的重要基础。传统查验工作存在操作不统一、环节衔接不顺畅、责任界限模糊等问题，导致效率低、出错率高。通过构建“受理—初核—实查—复核—归档”五个模块的作业体系，可以实现流程的系统化与环节的闭环管理。受理环节重在资料审核与车辆基本信息核对，初核环节关注信息一致性与可疑点筛查，实查环节确保技术检测与人工比对并行，复核环节强化质量把关与异常复检，归档环节实现数据留痕与档案数字化存储。配合数字化表单、图像采集与自动识别系统，可实现信息自动生成与全程留痕，既减少人工录入错误，也便于后期监督与追责。标准化与模块化的融合还可通过业务编码体系实现任务分配与绩效考核自动化，提升查验环节的透明度与可追溯性，促进业务质量整体提升。

5.2 查验人员培训与能力提升机制

查验人员的专业能力直接决定机动车查验的准确性与权威性。面对车型多样化、电动车普及化及信息化系统的快速更新，传统经验型培训已无法满足实际需求。应建立以岗位能力为导向的分层培训体系，将理论教学与实操训练结合。基层民警需重点掌握新车型结构识别、电动车安全部件检查、车辆识别代码（VIN）真伪判别、AI辅助查验系统操作等关键技能。通过定期举办查验技能比武、实战案例演练和专家专题讲座，形成“理论—实践—评估—反馈”的循环提升机制。同时，应将培训结果纳入岗位考核与职级晋升体系，强化学习激励与能力导向。鼓励民警参与科研项目或新技术试点，如基于图像识别的车辆异常检测模型、智能终端查验系统操作优化研究等，使培训与技术创新相结合，构建学习型、研究型的查验队伍，为查验机制的高质量发展提供人力保障。

5.3 智慧查验平台与社会协同机制

在数字化与智能化治理背景下，建设“智慧查验”综合管理平台是推动机动车查验工作现代化的重要路径。该平台应以公安交通管理信息系统为核心，整合公安、海关、保险、检测机构等部门的数据，实现车辆全生命周期信息共享。通过大数据分析与AI风险建模，可对异常车辆、频繁过户车辆或涉案嫌疑车辆进行智能预警，减少人工筛查负担。系统支持移动终端接入，民警可实现现场查验数据实时上传与核对，提高查验响应速度与准确性。同时，可探索社会协同机制，与保险公司共享维修与理赔记录，与检测企业共享检测结果，形成“部门共管、数据共用、社会共治”的新格局。建立信息安全与隐私保护机制，确保数据流转安全可控。智慧查验平台的推广不仅提升了查验业务的透明度与公信力，也有助于构建开放、协同、可追溯的机动车治理体系，为社会治理数字化提供典型范式。

6 结语

机动车查验工作是保障交通安全和社会秩序的重要防线，也是构建智慧交通与数字治理体系的基础环节。面对车辆结构复杂化与信息伪造智能化的新形势，传统查验手段亟需转型升级。研究表明，科学运用图像识别、人工智能、大数据与区块链等新技术，结合标准化管理与查验员能力提升，可实现机动车查验的高效、精准与智能化。未来，应加快查验数据平台的全国互联互通，完善法律制度保障与技术支撑体系，推动机动车查验工作从经验管理向智能监管转型，构建“科技引领、安全高效、公开透明”的新时代查验模式，为交通治理现代化提供强有力的支撑。

参考文献

- [1] 敖翔.机动车查验检验技术的发展与挑战[J].汽车与安全,2025,(08):86-93.
- [2] 张江波.人工智能技术在机动车非法改装智能化查验中的应用[J].交通科技与管理,2025,6(18):22-24.
- [3] 董世凯.机动车查验规范化建设实现路径分析[J].道路交通管理,2018,(08):42-43.
- [4] 钱进,张志伟.浅谈人工智能在机动车安检、查验监管工作中的应用[J].道路交通管理,2018,(07):36-37.
- [5] 郑震宇,夏建武.创新机动车安全技术检测工作的实践探索[J].公安学刊(浙江警察学院学报),2011,(06):94-96.

Research on the Impact of High-speed Rail Autonomous Driving on Dispatching and Command

Yongbing Chen

Dispatching Office of China Railway Beijing Group Co., Ltd, Beijing, 100038, China

Abstract

With the rapid advancement of emerging technologies such as artificial intelligence, 5G communications, and the Internet of Things, high-speed rail autonomous driving technology is undergoing a profound transformation from single train control to integrated "vehicle-ground-cloud" coordination, revolutionizing traditional dispatching systems. This paper systematically explores how autonomous driving technology enhances dispatching efficiency across different development stages, analyzes the restructuring of safety frameworks from static redundancy to dynamic adaptability through a "human-machine-environment" coupling perspective, and investigates emerging risks and countermeasures arising from technological convergence. The research demonstrates that autonomous driving technology not only significantly improves dispatching efficiency and precision but also drives the intelligent transformation of safety assurance systems, providing technical support for innovative high-speed rail transportation models.

Keywords

High-speed rail autonomous driving; dispatching command; efficiency improvement; safety assurance; intelligent coordination

高铁自动驾驶对调度指挥的影响探究

陈永兵

中国铁路北京局集团有限公司调度所, 中国·北京 100038

摘要

随着人工智能、5G通信、物联网等新兴技术的快速发展，高铁自动驾驶技术正经历从单一列车控制向“车-地-云”一体化协同的深刻变革，这对传统调度指挥系统产生了革命性影响。本文系统探讨了高铁自动驾驶技术在不同发展阶段对调度指挥效率的提升路径，从“人-机-环”耦合视角深入分析安全体系从静态冗余到动态自适应的重构过程，并探究技术融合带来的新型风险及应对策略。研究表明，自动驾驶技术不仅显著提升了调度指挥的效率和精度，还推动了安全保障体系的智能化转型，为高铁运输组织模式的创新提供了技术支撑。

关键词

高铁自动驾驶；调度指挥；效率提升；安全保障；智能协同

1 引言

高铁作为国家战略性基础设施和现代化交通运输的重要组成部分，其调度指挥系统是保障列车安全、高效运行的“神经中枢”。传统调度指挥模式以“人工决策+固定计划”为核心，在面对高密度运输、复杂路网、突发应急等场景时逐渐显现出响应滞后、协调困难等瓶颈问题。近年来，高铁自动驾驶技术的突破性发展为调度指挥系统升级提供了全新路径。从 CTCS-3 级系统的半自动化控制到 CTCS-4 级的完全自动驾驶，技术演进不断重塑着调度指挥的逻辑架构和运行模式。早期研究多聚焦于单一技术对调度效率的局部影响，而随着 5G 通信、数字孪生、人工智能等前沿技术的深度融合，调度指挥正向“主动预测”、“分布式协同”的智

能化方向转型，效率提升呈现乘数效应，安全风险也呈现出系统性、耦合性等新特征。本文旨在深入分析高铁自动驾驶技术对调度指挥系统的全方位影响，从技术架构、效率提升、安全保障等多个维度展开探讨，为高铁智能化发展提供理论支撑和实践指导。

2 高铁自动驾驶技术演进与发展阶段

高铁自动驾驶技术是集环境感知、智能决策、精准控制、车地协同于一体的复杂技术体系，其发展可分为两个主要阶段：独立自动驾驶阶段和融合自动驾驶阶段。

2.1 独立自动驾驶阶段（CTCS-3+ 级）

此阶段以列车自主控制为核心，特征体现为：第一是有限感知能力，车载传感器（包括雷达、摄像头等）主要监测列车自身状态与近距线路环境，感知范围限于列车周边 5-10 公里范围内，主要依赖地面轨道电路提供的固定闭塞信息，对远端线路状态和环境变化的感知能力有限。第二是

【作者简介】陈永兵（1985-），男，中国河南南阳人，工程师，从事高铁调度指挥技术研究与应用研究。

半自主决策机制，列车能够实现自动加减速、定点停车等基本操作，但整体运行计划仍由调度员静态编制，列车在运行过程中对计划调整的能力有限，主要作为执行终端存在。第三是车地通信依赖性强：采用LTE-R技术进行车地通信，通信延迟约500ms，列车间的信息交互需要经过调度中心中转，导致协同响应存在明显滞后，难以实现高效的列车群协同控制。

在此阶段，调度指挥仍然以“中心主导”为核心模式，自动驾驶系统主要作为执行终端，其效率提升主要体现在减少人工操作误差和标准化控制方面，对整体调度指挥体系的变革作用相对有限。

2.2 融合自动驾驶阶段（CTCS-4级及以上）

随着5G、数字孪生、人工智能等技术的深度融合，高铁自动驾驶进入“车-地-云”协同的新阶段，形成了“感知-决策-执行-优化”的完整闭环体系。

首先，在感知层上，多模态融合与全域覆盖。通过车载传感器（激光雷达、毫米波雷达、高清摄像头）与无人机巡检、地面固定监测设备的有机结合，借助5G-MEC边缘计算技术实现100ms内的多源数据融合处理，感知范围从局部扩展至全线路网，实现了对运行环境的全方位、实时感知。

其次，在决策层上，数字孪生与分布式协同。调度中心构建全要素数字孪生平台，实时映射物理世界的状态变化。列车通过车-车直接通信（V2V）技术实现自主协同决策，能够根据实时情况自主调整追踪间隔、运行时分，实现运行图的智能化动态调整。

第三，在执行层上，精准控制与动态反馈。自动驾驶系统（ATO）与列车控制系统（CTCS-4）深度耦合，实现了毫米级精度的牵引及制动控制，确保运行计划的无偏差执行。同时，系统能够将实时状态信息及时反馈至调度中心，形成闭环控制。

第四，在优化层上，预测性调度与资源适配。基于历史运行数据与实时客流预测模型，系统能够提前4-6小时生成动态运行图，并自动触发列车重联/解编、停站方案调整等调度指令，实现资源的最优配置。

3 高铁自动驾驶对调度指挥效率的多维影响

调度指挥效率的核心指标包括线路通行能力、资源配置精度、协同作业水平等。自动驾驶技术的应用实现了效率从“边际提升”到“范式革新”的跨越式发展。

3.1 线路通行能力的突破性提升

传统调度模式下的最小追踪间隔通常为3-5分钟（CTCS-3级系统）。自动驾驶技术通过以下路径实现了通行能力的显著提升。第一，在精准定位与速度控制方面，采用北斗卫星定位系统（厘米级精度）结合轮径补偿算法，实现了实时速度控制误差≤0.5km/h的高精度控制，使安全制

动距离能够精确计算，从而将列车追踪间隔压缩至2分钟以内。第二，在车-车直接通信（V2V）技术方面。融合阶段的V2V技术使列车间能够直接共享位置与速度数据，通信响应延迟从500ms大幅降低至100ms以内，显著提升了列车群的协同效率。第三，在动态间隔调整机制方面，数字孪生系统能够根据实时天气条件（如降雨、雾霾等）自动调整安全间隔参数。例如，在降雨量≥20mm/h时，系统会自动将安全间隔延长10%，有效减少了15%-20%的运力损失。

综合数据显示，融合自动驾驶技术后，高铁线路的理论通过能力可提升30%以上，同时显著降低了外部环境变化对运行秩序的影响，实现了运输能力的稳定发挥。

3.2 资源配置的精准化与动态化优化

传统调度模式依赖固定的运行图，难以实时适配客流变化和突发情况。自动驾驶技术通过“数据驱动+智能决策”实现了资源配置的精准化和动态化。首先，动态编组调度，系统支持无人化重联/解编操作，调度中心能够根据实时客流数据（如12306购票数据、车站监控视频分析）自动触发编组调整指令，实现运能与需求的精准匹配。其次，停站方案自适应优化，基于历史客流分布规律与实时上车数据，系统能够动态调整各站停站时间（如大站延长20秒、小站缩短10秒）或临时增加/取消停站，提高运行效率。第三，检修资源协同调度。数字孪生系统能够模拟不同检修天窗时段对运营的影响，结合设备状态预测（如轨道磨损程度、接触网寿命评估），动态优化天窗时间分配，实现运营与维护的最优平衡。

3.3 应急处置的智能化与快速响应

传统模式下处置突发故障或极端天气的响应周期通常长达5-10分钟。自动驾驶技术通过构建“感知-决策-执行”闭环体系显著提升了应急处置效率。多传感器融合监测列车关键部件状态，通过振动分析、温度趋势预测等算法能够提前8-12小时预警潜在故障，为调度调整预留充足时间。系统实时接入气象雷达数据，能够自动调整速度曲线（如暴雨天气下限速至80%），同时优化后续列车间隔，确保安全运行。当列车发生非致命故障时，自动驾驶系统可控制列车以低速行驶至最近车站，同时通过V2V通信通知后续列车减速避让，相比人工指挥，疏散时间可缩短40%。

4 高铁自动驾驶对调度指挥安全的深度影响

安全是高铁调度指挥的核心前提和生命线。自动驾驶技术的演进促使安全保障体系从传统的“静态冗余”向“动态自适应”的智能化方向重构。

4.1 传统调度安全保障的局限性分析

传统调度安全保障模式主要依赖“人工监控+固定冗余”机制，存在以下明显局限。自动化与智能化水平较低，信号系统之间联动性弱，人为操作失误风险较高。根据国际铁路联盟（UIC）的统计数据，约60%的传统铁路事故源

于人为操作失误。静态安全阈值设置，安全间隔、限速标准等参数多为固定值，无法根据实时风险状况进行动态调整。例如，在局部暴雨等特殊情况下，既可能因过度冗余造成运力浪费，也可能因冗余不足引发安全风险。应急响应机制滞后，事故发生后需要经过多个环节的层层上报和决策，响应周期较长，难以实现快速有效的应急处置。

4.2 自动驾驶技术对安全保障的强化效应

自动驾驶技术通过构建多重安全防线，显著提升了安全保障水平。消除人为操作误差，标准化的自动控制完全避免了司机因疲劳、判断失误等造成的人为错误。中国铁道科学研究院的测试数据显示，在复杂场景下，自动驾驶系统的操作准确率可达 99.9%。多重冗余设计，采用“硬件 + 软件 + 通信”三重冗余设计（如车载计算机配置 3 套独立单元、通信系统同时接入 5G 与 LTE-R 网络），任何单点故障都能够实现自动切换，确保系统持续可靠运行。应急响应速度显著提升，系统能够在 0.5 秒内触发紧急制动指令（人工操作通常需要 3-5 秒），结合 V2V 通信技术实现“一列车制动，多列车同步减速”的协同响应。全生命周期安全追溯，利用区块链技术记录所有调度指令、列车状态等关键信息，确保数据不可篡改且可追溯，大幅缩短事故排查时间，提高安全管理的精细化水平。

4.3 技术融合带来的新型安全风险识别

自动驾驶技术在提升效率和安全性的同时，也带来了需要重点关注的新型风险。系统复杂性导致的故障风险，高度集成的多子系统架构中，任何一个环节的故障都可能导致列车与调度中心失联，需要建立更加完善的故障诊断和容错机制。数据安全与网络攻击风险，海量数据的传输和处理高度依赖网络通信，一旦遭受恶意攻击、数据篡改或信息泄露，可能导致列车失控等严重后果。极端环境下的感知与决策风险，AI 算法主要依赖历史数据训练，在面对罕见场景（如极端寒潮、异常异物侵限）时可能出现决策偏差，需要建立更加鲁棒的决策模型。软件系统漏洞风险，庞大的软件规模可能存在未知漏洞，软件更新错误或版本不兼容也可能影响系统安全，需要建立严格的软件质量保证体系。

5 调度指挥模式的转型与人员角色变化

自动驾驶技术的广泛应用不仅改变了技术架构，也深刻影响了调度指挥的组织模式和人员角色定位。

5.1 调度指挥组织模式的转型

从集中控制到分布式协同，传统调度模式以调度中心集中控制为核心，而自动驾驶技术支持下的调度指挥更多体现为“中心统筹 + 列车自主”的分布式协同模式。从计划主导到实时优化，调度工作从传统的静态计划编制转向实时运行优化，更加注重对突发情况的快速响应和动态调整。从经

验驱动到数据驱动，决策依据从依赖调度员个人经验转向基于大数据分析的科学决策，提高了决策的客观性和准确性。

5.2 调度人员角色的重新定位

从操作执行者到监督协调者，调度员的工作重点从具体的操作执行转向对系统运行状态的监督和异常情况的协调处理。从计划制定者到策略规划者，更多精力投入到长期运行策略的制定和优化，而非日常的计划调整。从故障处置者到风险管理者，工作重心从故障发生后的应急处置转向事前的风险识别和预防。

6 未来发展趋势与挑战

6.1 技术发展趋势

人工智能深度应用，机器学习算法将在运行图优化、故障预测等方面发挥更大作用，实现更加智能化的调度决策。数字孪生技术完善，构建更加精细的全要素数字孪生模型，实现物理世界与虚拟世界的实时同步和交互。边缘计算普及，在列车和沿线部署更多边缘计算节点，降低通信延迟，提高系统响应速度。

6.2 面临的主要挑战

技术标准统一，不同厂商、不同线路的技术标准需要进一步统一，确保系统的兼容性和互操作性。网络安全保障，随着系统联网程度的提高，网络安全防护面临更大挑战，需要建立更加完善的安全防护体系。人员技能转型，调度人员需要适应新技术环境，掌握新的技能，这对人员培训提出了更高要求。

7 结语

高铁自动驾驶技术的持续演进深刻重塑了调度指挥系统的理论框架和实践模式。从独立阶段的“效率边际提升”到融合阶段的“范式革新”，调度指挥效率在通行能力、资源配置、应急响应等多个维度实现了质的飞跃。安全保障体系也从传统的“静态冗余”转向“动态自适应”的智能化模式，在有效消除传统人为操作风险的同时，也面临着系统协同复杂性、算法决策可靠性等新型挑战。未来，随着人工智能、数字孪生、5G 通信等技术的进一步成熟和融合应用，高铁调度指挥将朝着“全域智能协同”的方向持续发展，为构建安全、高效、智能的现代化高铁运输体系提供核心支撑，为交通强国建设贡献重要力量。

参考文献

- [1] 江明.高速铁路自动驾驶系统安全风险分析及发展方向[J].中国铁路, 2020(12): 11-16.
- [2] 刘文龙.高铁自动驾驶系统存在的问题及发展方向[J].科技视界, 2020(27): 19-20.
- [3] 王同军.智能高速铁路技术创新与实践[M].北京: 中国铁道出版社, 2023.