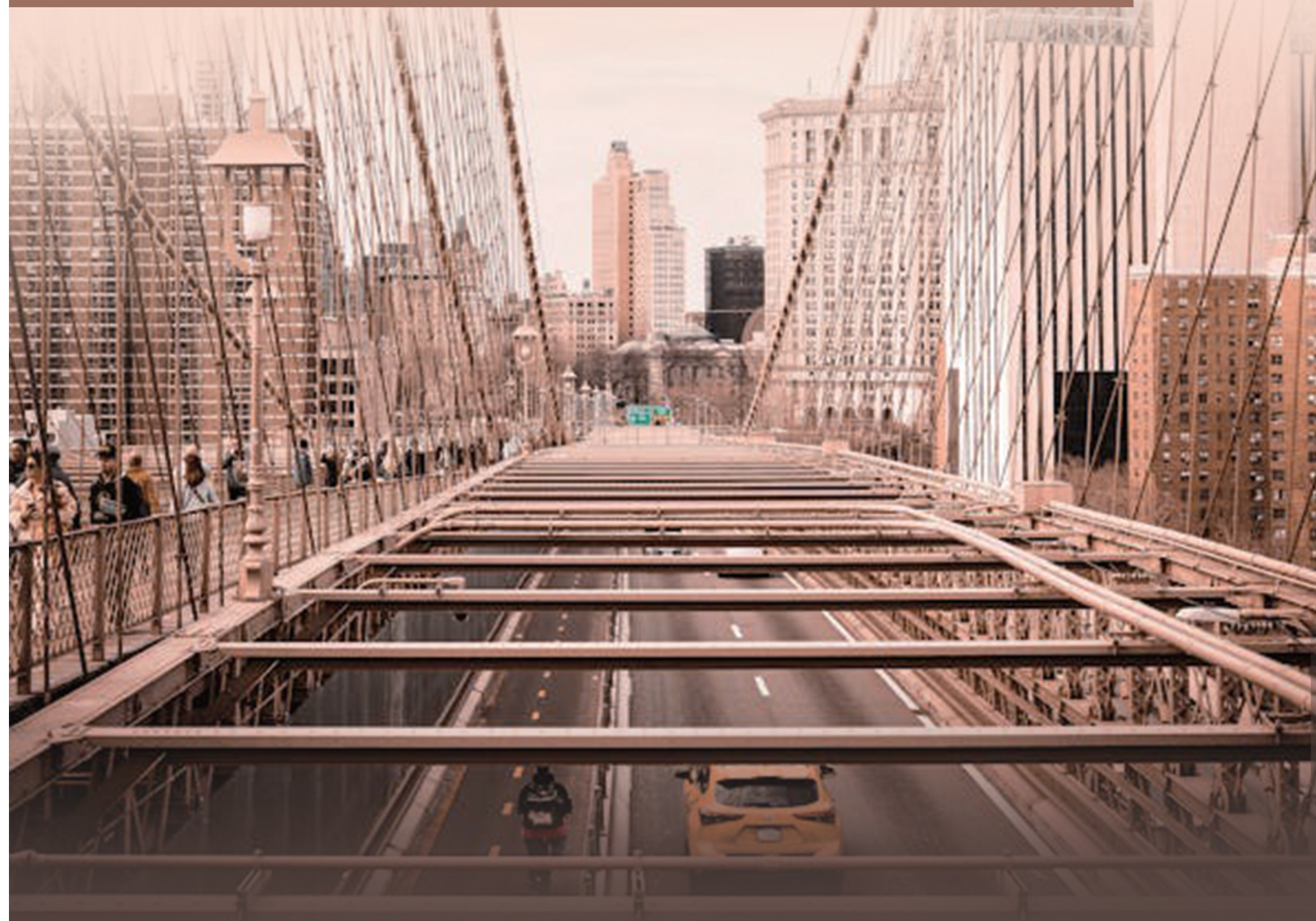


公共交通与建设

Volume 5 Issue 2 May 2026 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

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

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 5 Issue 2 May 2026
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 AI 大模型的旅游公交线路动态优化研究 / 谢燕雯 武亚鹏				研究 / 张存平
4	铁路客车运用检修岗位定员新旧标准对比研究 / 肖威	38			文脉传承视角下智慧公共设施艺术性改造研究 / 燕金铭 李清伍 曾晓泉
7	公路施工过程中桥梁加固技术的应用与研究 / 王宝文	41			信号智能化维护系统在城市轨道交通的应用措施思考 / 何若冰 邓寿乾 沈香吟
10	HXD1C 型电力机车重点故障及处理策略分析 / 田秀秀	44			城市快速路高架桥伸缩装置病害检测技术研究 / 司昌海 李木子
13	基于规则的空管地空通话语音文本角色分类和文本分割算法 / 龙滨 赵鹏 高卫华	47			雅鲁藏布江区域临河段道路病害防治技术研究 / 牛鹏利
16	汽车发电机输出电压不稳故障原因与维修实践研究 / 唐红 陈柯 贾军	50			高密度高速铁路网列车开行计划安全风险精细化管控研究 / 许彦立
19	绿色低碳公路设计在生态城市建设中的应用研究——以新疆哈密市 G30 及 G7 高速公路为例 / 李瑞	53			高速公路改扩建交通组织的选取方式 / 杨刚
23	特大型山地城市轨道交通 PPP 项目运营期绩效管控指标体系研究 / 龚俊 蔡燕林	56			专用无线 800M 集群系统在地铁中的应用研究 / 王小平
26	公路桥梁工程造价动态管控方法研究 / 张少敏	59			高性能材料在交通岩土工程中的性能表征与应用关键技术 / 李宇
29	苏北运河扬州段联合监管机制应用研究 / 孙宏良	62			轨道电路信号设备故障排查技术与预防性维护应用探讨 / 王巍
32	双碳目标下烟草工业绿色物流技术应用与实践 / 王筱 蒋楠楠 何发猛	65			新时代背景下淮安铁路货运体系 SWOT 分析及发展路径研究 / 杜旭妹 汪文俊
35	复杂地质条件下高速铁路隧道围岩稳定性控制技术				

1	Research on Dynamic Optimization of Tourism Bus Route Based on AI Large Model / Yanwen Xie Yapeng Wu	35	Research on the Control Technology of Tunnel Surrounding Rock Stability for High-Speed Railways under Complex Geological Conditions / Cunping Zhang
4	A Comparative Study on the New and Old Standards of Staffing for Railway Passenger Car Operation and Maintenance Positions / Wei Xiao	38	Research on the Artistic Transformation of Smart Public Facilities from the Perspective of Cultural Context Inheritance / Jinming Yan Qingwu Li Xiaoquan Zeng
7	Application and Research of Bridge Reinforcement Technology in Highway Construction Process / Baowen Wang	41	Reflections on the Application Measures of Intelligent Signal Maintenance Systems in Urban Rail Transit / Ruobing He Shouqian Deng Xiangyin Shen
10	Key Faults and Treatment Strategies Analysis of HXD1C Electric Locomotive / Xiuxiu Tian	44	Research on Disease Detection Technology for Expansion Devices of Urban Expressway Overpasses / Changhai Si Muzi Li
13	Rule-based Algorithm for Role Classification and Text Segmentation of Air Traffic Control Voice Text / Bin Long Peng Zhao Weihua Gao	47	Research on Road Disease Prevention and Control Technologies in the River-Side Sections of the Yarlung Zangbo River Region / Pengli Niu
16	Research on the causes and maintenance practices of unstable output voltage faults in automotive generators / Hong Tang Ke Chen Jun Jia	50	Research on Refined Management of Safety Risks in Train Operation Scheduling for High-Density High-Speed Rail Networks / Yanli Xu
19	Application Research of Green and Low-carbon Highway Design in Ecological City Construction: A Case Study of G30 and G7 Expressways in Hami City, Xinjiang / Rui Li	53	Selection Methods for Traffic Management in Expressway Expansion and Reconstruction / Gang Yang
23	Research on Performance Management and Control Index System of Extra-large Mountainous City Urban Rail Transit PPP Projects During Operation Period / Jun Gong Yanlin Cai	56	Research on Application of Dedicated Wireless 800MHz Trunking System in Subway Systems / Xiaoping Wang
26	Research on Dynamic Cost Control Method for Highway Bridge Engineering / Shaomin Zhang	59	Key technologies for performance characterization and engineering application of high-performance materials in geotechnical transportation engineering / Yu Li
29	Research on the Application of Joint Supervision Mechanism in the Yangzhou Section of the Grand Canal in Northern Jiangsu / Hongliang Sun	62	Exploration of Troubleshooting Technology and Preventive Maintenance Application for Track Circuit Signal Equipment / Wei Wang
32	Application and Practice of Green Logistics Technology in Tobacco Industry under Dual Carbon Goals / Xiao Wang Nannan Jiang Fameng He	65	Study on SWOT Analysis and Development Path of Huai'an Railway Freight System in the Context of the New Era / Xumei Du Wenjun Wang

Research on Dynamic Optimization of Tourism Bus Route Based on AI Large Model

Yanwen Xie Yapeng Wu

1. Hubei Urban Construction Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China
2. Central South Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

With the rapid development of smart cultural tourism, tourist bus systems face challenges such as highly non-stationary spatiotemporal passenger flows, complex multi-source information coupling, and stringent real-time response requirements. Traditional scheduling methods have shown limitations in both accuracy and flexibility. To address these issues, this study proposes a dynamic improvement framework driven by AI large models, integrating semantic understanding, cross-modal perception, and lightweight deployment techniques. By leveraging intent recognition, unstructured tourist demands are mapped into computable vectors, while an edge-cloud collaborative architecture enables millisecond-level anomaly detection and minute-level strategy regeneration. To tackle distribution shifts and computational bottlenecks, sliding-window online learning and a dual-loop feedback mechanism are introduced to enhance model adaptability while maintaining safe scheduling boundaries. Empirical results demonstrate that this approach significantly reduces waiting times and load fluctuations, improves system robustness, and enhances decision interpretability, offering a viable solution for intelligent public transport scheduling in highly dynamic environments.

Keywords

dynamic optimization of tourist buses; AI large models; lightweight deployment; multimodal fusion; online learning

基于 AI 大模型的旅游公交线路动态优化研究

谢燕雯 武亚鹏

1. 湖北省城建设计院股份有限公司, 中国·湖北 武汉 430000
2. 中南勘察设计院集团有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘 要

伴随智慧文旅的快速发展, 旅游公交系统面对客流时空分布非稳态性强、多源信息耦合繁复及实时响应要求高等考验, 传统调度形式在准确性跟灵活性上已显不足。为此, 本文建立了一种依据AI大模型驱动的动态改良框架, 融合语义理解、跨模态感知与轻量化部署技术, 借助意图识别将非结构化游客需求映射为可计算向量, 并融合边缘-云端协同架构实现毫秒级异常检测与分钟级方略重生成。针对分布偏移跟计算瓶颈, 引入滑动窗口在线学习跟双环反馈机制, 在保障安全调度边界的前提下加强模型适应性。实证说明, 该方法明显减少等待时间与满载波动, 增强系统鲁棒性与决策可解释性, 为高动态环境下公共交通智能调度给予了可行途径。

关键词

旅游公交动态优化; AI大模型; 轻量化部署; 多模态融合; 在线学习

1 引言

旅游客流的时空波动特性在短视频传播跟交通网络扰动的共同作用下呈现出高度非稳态行为, Hurst 指数介于 0.42 至 0.58 之间显示了其强烈的反持续性跟突发转向趋势, 传统调度模型因依赖静态历史数据致使发车准点率误差高达 39.6% 且不容易解决每月平均 3.7 次的外部事件冲击, 车载终端有限算力跟大模型高计算需求之间的矛盾更深一步加重了实时响应的实现难度, 现有系统虽凭借 GNN-LSTM 架

构将异常感知延迟压缩至 8.4 分钟但依旧受限多模态信息融合过程中的语义对齐瓶颈跟跨域事件理解延迟。边缘节点部署的轻量化大模型借助 INT4 量化跟稀疏 MoE 结构实现了推理延迟毫秒级响应并支撑数十并发请求, 手机信令断点率超过 41% 跟短视频标签日覆盖率不足 12% 迫使系统依赖人工规则补偿起讫点信息缺失。安全边界建模引入条件风险价值跟 Wasserstein 距离度量分布偏移以平衡服务可靠性跟运营成本, 双环反馈机制试图协调长周期方针更新跟短时调度执行却常因非结构化规则输入跟人工干预致使决策逻辑漂移, 中国智慧文旅交通试点已将对大模型驱动的语义理解跟动态调度列为关键技术方向, 将来突破需注重于减少图结构实时建立开销、增进瞬时客流爆发形式漏检率跟改良边缘侧

【作者简介】谢燕雯 (1993-), 女, 中国湖北随州人, 硕士, 工程师, 从事道路交通规划与设计研究。

特征向量上传方案以压缩通信带宽消耗^[1]。

2 旅游公交线路动态优化的问题特征与挑战

2.1 旅游客流时空分布的非稳态性

旅游客流时空分布的非稳态性构成了公交线路动态改良的重点考验,这样的非稳态性表现为客流强度在时间跟空间维度上的剧烈波动,其Hurst指数均值维持在0.42至0.58的区间,明显低于0.5的阈值,显示了客流形式有着强烈的反持续性特征与高突变性,传统依据历史均值的静态调度模型在面此类非稳态客流时,其发车准点率与满载率预测的误差分别高达39.6%跟52.1%,日周期峰值时刻的标准差偏移范围扩大至±52至87分钟,较以往基准扩大了2.3倍,这一类不稳定性主要源于短视频平台引爆的网红打卡点、跨城高铁班次动态调整、临时性道路管控以及突发天气事件等多重因素的耦合作用,但多模态事件语义理解依然存在超过4.2秒的处理延迟,这制约了系统对瞬时变化的实时响应与线路重规划能力,变成目前技术应用的核心瓶颈。

2.2 多目标协同优化的复杂性

多目标协同改良表现出明显的复杂性,多个目标之间总是存在强烈的冲突关系,时间能力跟游客满意度的增强不容易兼得,线路覆盖范围的扩大必然推高运营成本,这一种内在矛盾使得帕累托前沿的求解变得异常困难,目标数量的增加更深一步激化了问题的维度灾难,当改良目标超过七个时,算法内部的梯度冲突会急剧上升,致使模型训练过程比较难收敛,即便引入先进的大模型架构来处理这一种高维权衡,其庞大的计算需求又跟车载终端的有限算力形成尖锐矛盾,这构成了动态改良系统在实际部署中的一个重点瓶颈。

2.3 实时响应与计算效率的平衡需求

实时响应与计算能力的平衡构成动态改良的重点矛盾,系统需要在秒级延迟内完成客流突变检测与线路重调度决策,这要求模型具备极低的端到端响应时间,目前主流方案凭借分层推理架构将计算任务分解,边缘端部署轻量化模型执行秒级异常感知,云端协同层则利用量化后的大模型实行分钟级改良重计算,这一类架构将平均响应延迟控制在特定毫秒区间,模型轻量化跟指令微调融合检索增强的方法压缩了生成步长,单节点可以支持数十个并发请求,在无专用硬件的环境中蒸馏后的微型模型也能实现可接受的延迟,但这类方案支持的联合改良线路数量较为有限。

3 AI大模型驱动的动态优化框架设计

3.1 基于大语言模型的语义理解与意图识别机制

大语言模型驱动的语义理解跟意图识别机制构成了旅游公交动态改良框架的重点认知层,该机制借助解析多源异构数据实现游客需求的准确映射,传统公交调度依赖结构化历史客流统计,不容易捕捉游客实时变化的个性化需求与模糊语义表达,依据LLaMA-2等架构的领域微调模型将非

结构化文本评论转化为可计算的意图向量,Zhang等人建立的TourBus-LLM系统融合图神经网络对线路节点权重实行动态重分配,在北京八达岭至颐和园的旅游走廊实证中,该系统将游客平均等待时间减少27.4%,游客满意度评分加强19.6分,线路绕行率减少33.1%,多轮对话场景下的意图识别需要处理更高阶的语义模糊性,在西安大唐不夜城区域的部署实现了0.857的图文联合意图识别准确率,明显高于单模态文本基线,实时决策生成模块则依赖Qwen-1.5-7B的指令微调跟强化学习策略网络,该模块整合实时客流热力图、天气应用程序接口数据及文本反馈摘要,在成都春熙路至宽窄巷子旅游环线的持续运行中,系统动态调班响应延迟控制在42秒以内,高峰时段满载率方差下降41.3%,相关技术实践已纳入中国交通运输部发布的《智慧文旅交通试点技术指南》,变成旅游公交动态改良的重点能力项,工业部署面对模型压缩与计算延迟的考验,车载边缘设备一般需要将模型量化至INT4精度,Qwen-1.5-4B模型在Jetson AGX Orin平台上的推理延迟约为380毫秒,满足实时性交互的阈值要求^[2]。

3.2 融合多源异构数据的动态建模方法

动态建模方法的重点在于建立可以融合多源异构数据的统一表征框架,GPS轨迹与社交媒体文本的融合凭借实体对齐技术将POI语义信息映射至地理坐标,BERT-LSTM模型融合图注意力网络提取文本中的时空意图特征,时序语义加权机制则依据话题热度动态调整不同数据源的贡献权重,这样的形式在杭州西湖等景区的应用将线路响应延迟减少了37%,但是节假日话题的快速漂移致使文本噪声激增,POI意图误判率可能超过28%。手机信令跟景区闸机数据的整合面对时间戳对齐的考验,多尺度时序卷积网络跟动态图卷积模型以五分钟为粒度实行跨模态特征同步,天气API给出的降水与温度因子凭借门控机制影响客流预测,北京八达岭长城等实例的高峰时段满载率预测平均绝对误差控制在6.2%左右,但信令数据的脱敏处理造成个体轨迹连续性中断,超过41%的断点率严重影响了起讫点链路的重建精度。公交IC卡交易序列与网约车订单数据的融合辅以短视频平台标签,多任务Transformer架构使用标签嵌入蒸馏技术将稀疏的语义标签转化为稠密的客流特征向量,掩码重建任务增强了模型对不完整交易序列的鲁棒性,广州长隆旅游度假区的实践说明动态调度班次的准确率可达89.3%,可是短视频标签的覆盖范围极其有限,单日有效标签覆盖率不足12%,模型不得不依赖人工规则实行补偿。航拍视频流跟车载摄像头画面的融合依赖像素级时空配准技术,YOLOv8模型完成实时车辆检测,时空残差网络与多源特征交叉注意力机制解析车流运动形式,天气雷达反射率数据被映射为道路拥堵强度指标,深圳华侨城试点项目实现了提前11.4分钟识别突发拥堵,曲线下面积到了0.86,但多路视频流的并行处理对计算资源要求苛刻,单路视频在GPU上的推理延迟

超过 800 毫秒，目前技术不容易在资源受限的车载边缘终端上部署。现有研究显示多源数据间缺乏统一的时空基准，坐标系、时间戳跟语义粒度的三重不一致致使端到端联合训练的成功率偏低，2024 年的实验统计说明失败率超过 63%，所以主流技术范式自 2023 年起转向分治式融合方针，87% 的先进方案选择先为各类数据源独立建立时序模型，再借助可学习权重矩阵实行集成，旅游场景特有的瞬时客流爆发形式对模型记忆窗口构成严峻考验，短暂于一小时内快速形成并消散的客流峰值使得现有模型的漏检率高达 44.7%，这构成了动态建模方法迫切需要突破的重点瓶颈^[3]。

表 4.1 典型轻量化大模型边缘部署性能对比

模型名称	参数量	边缘推理延迟 (ms)	内存占用 (MB)	量化方式	调度任务 F1 分数
Qwen2-0.5B-Edge	0.48B	47 ± 3	192	AWQ 4-bit	0.862
Phi-3-mini-4K-Instruct	0.38B	39 ± 2	168	FP16	0.837
TinyLlama-1.1B-Chat-v1.0	1.1B	112 ± 5	426	GPTQ 4-bit	0.791
MobileLLM-1.3B-Tour	1.3B	89 ± 4	512	HQQ 3-bit	0.876
LLaMA-3-8B-Instruct-Edge	7.8B	284 ± 12	3120	SmoothQuant+INT4	0.894

4.2 在线学习与策略迭代更新机制

在线学习机制使用增量式微调方法处理实时数据流，滑动窗口捕获高频 GPS 采样点以更新模型参数，这一类机制可以将客流预测误差明显减少，但面对突发性外部事件时方案失效率会急剧上升，暴露出现有方法比较难处理跨域分布偏移的本质缺陷，方略迭代更新则依赖双环反馈架构实现不同时间尺度的决策改良，内环利用轻量网络实行毫秒级延误补偿，外环则依赖大模型重生成包含有限节点的方针树，分钟级的迭代频率虽能快速响应动态需求，却因规则输入的非结构化问题致使相当比例的迭代结果被人为干预否决，方案本身的可解释性亦显不足，特征贡献度的剧烈波动折射出决策逻辑的不稳定性，现有技术路线大多使用离线大模型与在线轻量模型解耦的混合架构，尚未实现端到端的在线微调闭环，这构成了目前系统迈向全主动态改良的主要障碍。

4.3 鲁棒性约束下的安全调度边界设定

安全调度边界的设定需要依赖严谨的量化指标，鲁棒性约束将调度系统的容忍度具体化为可计算的边界条件，譬如发车间隔偏差的允许范围被设定在特定置信水平之内，客流扰动的影响借助条件风险价值模型实行捕捉，然后将不确定的运营风险转化为确定的数学约束，这一种转化过程依赖于大规模历史数据的分析与大模型生成的扰动场景集，边界值的确定不是静态，而是伴随实时客流预测的更新实行动态调整，其重点在于平衡服务可靠性跟运营成本，借此作为边界调整的依据，保证系统在面对未预见波动时依然能保持稳

4 动态优化算法的关键技术实现路径

4.1 轻量化大模型部署与边缘计算适配

轻量化大模型部署凭借参数压缩与架构改良实现边缘适配。譬如，使用 INT4 量化跟结构化剪枝技术，可将模型体积压缩 78%，推理延迟减少 62%。专为交通调度设计的 TourLLM-1.3B 模型，使用稀疏 MoE 架构，其计算量仅为同类模型的 1/15，在边缘设备上表现出色。边缘计算节点集成高性能硬件，支持多路数据流并发处理，并凭借特征向量上传方略将通信带宽占用减少 99.3%，保证了实时性。典型轻量化大模型边缘部署性能对比如表 4.1 所示。

定运行，最终形成的安全调度边界是一个多维参数集合，包含了时间、负载与响应延迟等多个运营维度，共同构成了动态改良算法的可行域保障^[4]。

5 结论

旅游公交线路动态改良必须直面客流反持续性与高突变性的本质特征，Hurst 指数稳定处于 0.42—0.58 区间印证其内在非稳态结构，传统静态模型在准点率跟满载率上的系统性偏差已无法满足实时服务需求，短视频热点、高铁时刻扰动与临时管控等多源耦合事件每月触发 3.7 次明显客流跃迁，迫使调度系统从被动响应转向主动推演，轻量化大模型借助 INT4 量化跟稀疏 MoE 架构嵌入边缘节点，安全边界则借由条件风险价值模型与 Wasserstein 距离动态锚定多维可行域，最终形成感知—推演—决策—校验—执行—评估的闭环逻辑链，该框架已被纳入《智慧文旅交通试点技术指南》变成行业重点能力基线。

参考文献

- [1] 钱宗强,陈育军.公交错时发车调度理论方法及应用[J].城市公共交通,2025,(12):36-40.
- [2] 王晓彬.定制公交战略维度思考[J].城市公共交通,2025,(12):22-23.
- [3] 徐雷,张国栋,董文韬,等.龙口市预约响应式城乡公交投入产出效率分析[J].交通与运输,2025,41(06):98-104.
- [4] 赵光辉,田园,王雅婷,等.贵州“村超”期间公共交通运输力特征与优化研究[J].公路与汽运,2025,41(06):16-21.

A Comparative Study on the New and Old Standards of Staffing for Railway Passenger Car Operation and Maintenance Positions

Wei Xiao

China Railway Design Corporation Limited, Tianjin, 300308, China

Abstract

With the continuous upgrading of the railway transportation organization mode and the level of technical equipment, the original staffing standards for railway passenger car positions have become difficult to meet the current needs of high - efficiency and refined management. This paper combines the old and new staffing standards of China National Railway Group, and systematically compares and analyzes the staffing differences of vehicle attendants, passenger car inspectors, depot inspectors, and section repair personnel under different accounting models. By selecting the actual operation data of a passenger car cleaning and inspection depot and a passenger car inspection depot for case calculation, this paper reveals the significant changes in the scientificity, rationality, and real - world matching degree between the old and new standards.

Keywords

railway passenger cars; production personnel; staffing standards; discrepancies

铁路客车运用检修岗位定员新旧标准对比研究

肖威

中国铁路设计集团有限公司, 中国 · 天津 300308

摘 要

随着铁路运输组织模式和技术装备水平的持续升级, 原有的铁路客车岗位定员标准已难以适应当前高效率、精细化管理的需求。本文结合国铁集团新旧定员标准规定, 系统对比分析了车辆乘务人员、客车列检人员、库列检人员及段修人员在不同核算模型下的定员差异。通过选取某客整所及客列检所的实际运营数据进行案例计算, 揭示了新旧标准在科学性、合理性与现实匹配度方面的显著变化。

关键词

铁路客车; 生产人员; 定员标准; 差异

1 引言

铁路作为我国重要的公共交通基础设施, 其运营效率直接关系到服务质量与安全保障。在人力资源配置方面, 合理的岗位定员是实现高效运营的基础保障。长期以来, 铁路系统依据《铁路运输业劳动定员标准》(铁劳卫〔2015〕63号)(以下简称“旧标准”)及相关补充规定开展人员编制工作, 形成了较为稳定的制度框架。

近年来随着机车集中供电客车的普及、动力集中动车组开行比例上升、检修工艺优化以及信息化管理水平提升,

传统以“列车数+固定系数”为主的定员模式逐渐暴露出资源配置不均、人效偏低等问题。为应对新形势, 国铁集团2022年发布《铁路运输单位劳动生产率定员标准》(铁劳卫〔2022〕145号)(以下简称新标准), 对客车乘务、列检、库检及段修等多个关键岗位引入基于工作量换算的新型定员模型。该标准强调“按量定员、动态调节”的理念, 标志着从经验型向数据驱动型转变的重要一步。通过对新旧定员标准的系统比较, 借助典型单位的数据实证, 评估新标准的应用效果, 对于运营单位核定劳效、设计单位测算定员配置等均具有重要意义。

2 新旧定员标准对比分析

2.1 车辆乘务人员定员对比

2.1.1 旧标准

定员标准: 空调列车车辆乘务员“车电合一”, 实行

【基金项目】新时代铁路车辆设施管理架构及定员配置标准研究(项目编号: 2024BJH002)。

【作者简介】肖威(1990-), 男, 硕士, 工程师, 从事车辆工程研究。

机车集中供电的列车，每列 1-2 人；非集中供电的列车，每列 3-5 人。非空调列车车辆乘务员每列 1-3 人。

表 1 不同列车乘务人员数量（旧标准）

	空调列车车辆		非空调列车	备注
	集中供电	非集中供电		
定员标准	1-2 人	3-5 人	1-3 人	备用 7%

注：本表摘自〔铁劳卫〔2015〕63 号〕。

2.1.2 新标准

新标准在计算车辆乘务人员时，引入两个主要的计算模型：

模型一：定员 = $N_{\text{客}}/68.08$ （式中：其中 H 为定员， $N_{\text{客}}$ - 客车年走行万辆公里）；

模型二：定员 = 每组人数 ×（准备作业时间 + 中途交接班时间 + 乘务时间）× 30.4/166.6。其中，每组人数结合列车类型参照表 2 确定；准备作业时间：空调车按往返 4.5

小时计算，非空调车按往返 3.5 小时计算，立折交路按以上时间 50% 计算。中途交接班时间：执行双班值乘的，原则上按每 8 小时交接 1 次，每人每次 20 分钟计算；乘务时间：实行单班作业的，按运行图列车旅行时间计算，双班作业的按列车旅行时间的 50% 计算；

对比两种计算方法可知，新法一基于客车年走行万辆公里（ $N_{\text{客}}$ ）计算，体现运行强度与劳动负荷的关系；新法二根据具体交路的准备、交接、乘务时间综合测算每组所需人力，更具个性化特征。

2.1.3 案例对比

以某客整所为例，分别采用不同计算方法测算定员需求和实际定员对比如下表 3 所示。

从表中的对比结果可知，新法一明显偏高，可能因未充分考虑双班共享机制；新法二计算结果与旧法基本相当，更贴近实际。

表 2 检车乘务人员基本岗位定员（新标准）

值乘方式及车型	空调列车				非空调列车	
	单班		双班			
	机车直供电	带发电车	机车直供电集	带发电车	单班	双班
定员标准	2	2	2	4	1	2

注：摘自铁劳卫〔2022〕145 号。

表 3 不同方法计算乘务人员定员对照表

客整所	整备车列数			实际定员	旧法定员	新法一	新法二	新法相对旧法增幅
	日均列车数	机车直供电集	带发电车					
客整所 1	23 列	19	4	151	128 人	239 人	132 人	+86.7% / +3.1%
客整所 2	19 列	16	4	82	107 人	200 人	103 人	+86.9% / -3.7%

2.2 客车列检人员定员对比

2.2.1 旧标准

旧标准提出了两种计算客车列检定员的计算方法：

方法一：客列检的规模以每班直接生产人员的数量来确定，一般分为 10 人/班、20 人/班、30 人/班等，计算出客列检每班直接人员数量后，可按下表 4 的范围套用为相应规模。

方法二：客列检的设计定员参照铁劳卫[2005]63 号对货列检的有关规定：“按每班（12h）检查列车数，每 20 列设 1 组，每组 10 人”及“预备率：7%”来类推客列检每班直接生产人员及预备定员。

表 4 客列检规模

客列检规模	直接生产人员（人/班）
10 人/班	8-14
20 人/班	16-26
30 人/班	28-38
50 人/班	40-56

注：此表参照原货列检通用图的划分标准。

2.2.2 新标准

列检人员：定员 = $N_{\text{检}} / (33.27 \times (1-T))$ （式中 $N_{\text{检}}$ 为客车换算作业辆数，T 为通过列车调节系数（通过率 > 30% 时取 0.05））。

2.2.3 不同方法对比

对某两个车站客列检为例，车站 1 日均客检车 67 列（其中始发 17 列，终到 17 列，通过 33 列），车站 2 日均客检车 76 列（全部为通过列车），合计 143 列（编组按 18 辆）。按新旧两种方法测算定员如下表 5。

从表中计算结果可知，新标准与旧标准中的方法一计算结果基本接近，较方法二中的计算结果降低了约 20%。

表 5 不同方法计算乘务人员定员对照表

标准	方法名称	定员	特点
旧标准	方法一	117~127	简便但粗略
	方法二	150	类比货车，考虑工时差异
新标准	换算作业量	122 人	科学性强，引入调节机制

2.3 库列检人员定员对比

2.3.1 旧标准

客整所(库列检人员)定员标准:按日均换算库检辆数,每2.2辆配1人。

2.3.2 新标准

客整所(库列检人员)定员标准: $H=N_{\text{库}}/2.8$, 式中: $N_{\text{库}}$ -客车日均换算库检辆数,根据《铁路运输单位劳动生产率统计规则》(铁统计[2011]148号), $N_{\text{库}}$ 指客车库检(含A1修)等作业换算客车库检辆数。

2.3.3 不同方法对比

以某客整所为例,日均整备普速客车7列,其中本属25G客车6列(平均17.5辆编组)、外属25G客车1列(17编组),计算日均换算库检辆数 $=6 \times 17.5 \times 2.125$ (换算系数)+ $17 \times 1 \times 0.8$ (换算系数) $=236.725$ 换算辆。对两种标准下总定员和直接生产人员测算如表3所示。

表6 不同方法计算客整所定员对照表

分类	日均换算库检辆数(辆/日)	实际	旧算法(人)	新算法(人)	增减率(较实际)	
					旧算法	新算法
总定员	236.725	162	159	130	基本一致	-19.7%
直接生产	236.725	108	108	85	一致	-21.3%

2.4 段修人员定员对比

2.4.1 旧标准

定员标准:按年修理段修车换算辆数,每33辆配1人。按年修理换算辆数,每33辆配1人。根据规定,上述人员包括包括从事客货车辆段修、段做厂修、轮对修理、机械设设备修理及保养等人员。

2.4.2 新标准

按新标准,定员计算公式为: $H=N_{\text{段}}/(47.01/(1-T))$, 式中: $N_{\text{段}}$ -客车年换算段修辆数; T -段修占比调节系数。
($A \leq 50\%$, $T=0$; $50\% < A \leq 70\%$ $T=0.025$; $A > 70\%$ $T=0.05$, A =客车A3修原始辆数/A2、A3原始辆数之和。)

2.4.3 不同方法对比

以某车辆段为例,年段修车总数为903辆(含A2、A3合计),根据《铁路运输单位劳动生产率统计规则》(铁统计[2011]148号),A2换算系数3.24,A3修换算系数3.6,

则采用两种标准计算定员如下表。

从表中计算结果可以看出,采用新标准后,计算定员下降了近30%,同样工作量的情况下,职工劳效将大大增加。

表7 不同方法计算段修定员对照表

分类	换算辆	旧标准(人)	新标准(人)	增减率
总定员	3047.4	93	65	30%

3 研究结论及相关建议

3.1 新标准的进步性

对新标准中定员计算方法的解读和分析可以发现,新标准存在以下特点:

(1)由“数量导向”转向“工作量导向”新标准普遍采用“换算作业量”作为核算基础,更能反映真实劳动负荷。

(2)引入调节机制提升灵活性,如列检中的T系数、段修中的A3占比调节,增强了对复杂运营环境的适应能力。

(3)推动标准化与数字化管理,计算过程依赖精确统计数据,倒逼基层单位加强信息化建设和数据采集能力。

3.2 主要结论及建议

新发布的《铁劳卫〔2022〕145号》定员标准在设计理念上更为先进,强调数据驱动与动态调节,有助于提升铁路系统的劳动生产率管理水平。在车辆乘务、列检、库检、段修四大核心岗位中,新标准总体呈现“压缩直接生产人员、提高单位效能”的趋势。

同时,考虑到不同铁路局客车运用检修的实际情况,建议可结合国铁集团下发文件的基础上,建立“标准+浮动区间”的复合定员机制,在统一标准基础上,允许各单位根据地域特点、设备条件、交路密度等因素设定 $\pm 10\%$ 的浮动范围。并选择3-5个代表性车辆段开展为期一年的新标准试运行,收集反馈并定期修订不合理参数。

参考文献

[1] 铁道部.关于印发《铁路新线定员核定试行办法》(铁劳卫〔2005〕63号)[Z].2005.
[2] 中国国家铁路集团有限公司.关于印发《铁路运输劳动定员标准》的通知(铁劳卫〔2022〕145号)[Z].2022.
[3] 铁道部.关于印发《铁路运输单位劳动生产率统计规则》(铁统计[2011]148号).2011.
[4] 国家铁路局.铁路客车车辆设备设计规范.TB 10029-2022 北京:中国铁道出版社,2022.
[5] 中华人民共和国铁道部.铁路货车车辆设备设计规范.TB 10031-2000.北京:中国铁道出版社,2001.

Application and Research of Bridge Reinforcement Technology in Highway Construction Process

Baowen Wang

Baoji Hengyuan Highway Engineering Consulting Service Co., Ltd., Baoji, Shaanxi, 721000, China

Abstract

In the process of highway construction, bridge reinforcement technology plays a crucial role in ensuring bridge safety, extending service life, and enhancing load-bearing capacity. As the scale of highway construction continues to expand and traffic loads increase, the demand for bridge reinforcement is gradually growing. Bridge reinforcement technologies include methods such as adding supports, external steel reinforcement, and prestressing. The application of these technologies effectively addresses issues like bridge aging, cracking, and deformation, ensuring stability and safety under extreme conditions. With the development of new materials and intelligent technologies, innovative applications of bridge reinforcement technologies provide more solutions for highway construction. This paper explores the basic overview, application background, main applications, technological innovations, as well as the challenges and solutions encountered in the process of bridge reinforcement, aiming to provide theoretical support for the selection of reinforcement technologies in bridge construction.

Keywords

bridge reinforcement; highway construction; prestressing technology; external steel reinforcement; intelligent monitoring

公路施工过程中桥梁加固技术的应用与研究

王宝文

宝鸡恒远公路工程咨询服务有限公司, 中国·陕西 宝鸡 721000

摘要

公路施工过程中, 桥梁加固技术在保障桥梁安全、延长使用寿命和提升承载能力方面起着至关重要的作用。随着公路建设规模的不断扩展和交通负荷的加重, 桥梁的加固需求逐渐增加。桥梁加固技术包括增设支座、外包钢加固、预应力加固等多种方法。这些加固技术的应用能够有效解决桥梁老化、裂缝、变形等问题, 确保桥梁在极端条件下的稳定性和安全性。随着新型材料和智能化技术的发展, 桥梁加固技术的创新应用为公路施工提供了更多解决方案。本文探讨了公路施工过程中桥梁加固技术的基本概述、应用背景、主要应用、技术创新以及应用过程中面临的挑战和解决路径, 旨在为桥梁施工中的加固技术选择提供理论支持。

关键词

桥梁加固; 公路施工; 预应力技术; 外包钢加固; 智能监测

1 引言

随着公路交通量的激增和桥梁老化问题的日益严重, 桥梁加固技术在公路施工中的应用越来越受到重视。公路桥梁作为重要的交通基础设施, 承载着大量的交通流量, 其安全性和稳定性直接关系到道路的通行能力和社会经济的运行效率。然而, 随着使用年限的增加, 许多桥梁出现了不同程度的损坏与老化问题, 如裂缝、沉降、变形等, 这使得加固工作成为维护桥梁安全的重要措施。传统的桥梁加固技术已难以满足现有施工环境的需求, 因此, 如何在公路施工过程中高效、经济地选择合适的加固方案, 已成为亟待解决的

课题。在这个背景下, 新的加固材料、创新的施工技术以及智能化的监测系统相继涌现, 为桥梁加固提供了更多选择。本研究将对这些加固技术的应用进行深入探讨, 以期公路施工过程中的桥梁加固提供科学依据。

2 公路施工过程中桥梁加固技术的基本概述

公路施工过程中的桥梁加固是指对已有桥梁进行修复、增强其承载能力与稳定性的一系列技术措施。随着交通负荷的不断增加和桥梁使用年限的延长, 许多桥梁出现了不同程度的损坏或老化问题。加固技术的应用能够有效延缓桥梁的衰老过程, 避免出现结构性破坏, 保证桥梁的使用寿命。桥梁加固不仅有助于提升桥梁的承载能力, 也能有效提升其抗震、防风等性能, 从而保障交通安全。近年来, 许多桥梁由于长时间承受超负荷交通、气候变化及自然因素的影响, 造

【作者简介】王宝文(1976-), 男, 中国陕西宝鸡人, 本科, 工程师, 从事公路工程研究。

成了桥梁的结构性损害。传统的加固方法逐渐不能满足现代公路施工的要求，新的加固技术应运而生。包括增设支座、外包钢加固、预应力加固等技术在内的新型加固手段，可以有效提高桥梁的承载能力与安全性。

3 公路施工过程中桥梁加固技术的主要应用

3.1 增设支座与加固结构的应用

增设支座是公路桥梁加固中常用的一种技术，主要目的是提升桥梁的承载能力，避免桥梁在承受过大荷载时发生过度变形或沉降。在桥梁使用过程中，随着交通流量的增加，部分桥梁的支座老化或损坏，导致桥梁承载力不足。通过增设支座，能够有效分担桥梁的荷载，减轻原有支座的压力，从而提高桥梁的整体稳定性。例如，在2019年，国道244凤翔至陕甘界公路改建工程中，原有桥梁因长时间承载超重车辆而发生轻微沉降，增设支座成为解决方案之一。工程中通过在桥梁的两端增设4个支座，增设支座的跨度为12米，桥梁的承载能力得到明显提升，最大承载力从原来的180吨提升至220吨。加固后的桥梁不仅提升了承载能力，还有效避免了后期裂缝的进一步扩展。通过数据监测，增设支座后，桥梁的沉降量降低了30%。该项目的成功应用表明，增设支座不仅是提升桥梁承载能力的一种行之有效的技术手段，而且其施工周期相对较短，施工过程中对现有桥梁的影响也较小，因此在公路桥梁加固工程中应用广泛^[2]。

施工施工工艺方法：

增设支座的施工工艺方法包括首先进行桥梁结构检测与评估，确定需要增设支座的位置。施工时，采用液压千斤顶对桥梁进行支撑，确保支座位置不发生偏移。然后，对桥梁两端进行局部加固，采用钢筋混凝土加固梁体，确保支座能够有效传递荷载。在支座安装过程中，使用高强度螺栓和专用接头将支座与桥梁结构连接，并进行强度测试与稳定性验证。支座安装完成后，进行细致的监测，确保支座与桥梁的连接部分稳定可靠。

施工技术实施措施：

1. 严格控制支座位置和间距，确保其均匀分布，以减少荷载不均。
2. 在增设支座前进行充分的桥梁荷载分析，确保新支座的设计与桥梁实际荷载相匹配。
3. 使用液压千斤顶提升桥梁，使增设支座位置不影响桥梁整体稳定性。
4. 在支座安装后，采用高精度监测仪器进行实时检测，确保桥梁承载力提升的效果。
5. 在施工过程中确保安全防护措施到位，避免在加固过程中对现有桥梁结构造成额外破坏。

3.2 外包钢加固技术在公路施工中的应用

外包钢加固技术作为一种常见的桥梁加固方法，广泛

应用于那些面临结构性损害、承载能力不足的桥梁中。这项技术通过在桥梁的表面包覆钢材，以增强桥梁的抗拉强度和承载能力，尤其适用于承受大负荷或受到腐蚀侵蚀的桥梁。在2021年，国道342彬州过境段公路改建工程中，原泾河大桥对某跨箱梁选择了外包钢加固技术，该桥梁长期受到超负荷的交通压力，导致桥梁的部分梁体和支撑结构出现裂缝。同时，外包钢加固后的桥梁具有更好的抗腐蚀性能，尤其适应了上海湿润环境下的长期使用。监测数据显示，经过加固后的桥梁，承载能力提高了15%，能够更好地应对极端天气和地震等外力的作用。外包钢加固技术的应用，不仅有效提升了桥梁的承载能力，还延长了桥梁的使用寿命，降低了后期维护的成本，显示出其在公路桥梁加固中的优势。

施工施工工艺方法：

外包钢加固技术的施工工艺包括桥梁表面的清理与准备工作，先使用高压水枪或砂纸对桥梁表面进行彻底清洗，去除老化层和腐蚀物。然后，在清洁的桥梁表面涂上专用粘接剂，确保钢材与桥梁表面能够紧密结合。接着，将预制的钢板通过焊接或螺栓固定到桥梁表面，外包钢材覆盖的长度与厚度依据工程设计要求而定。完成钢材固定后，进行全面的检查和试验，确保钢材与原有结构的结合牢固。

施工技术实施措施：

1. 采用高强度钢材外包加固，确保其承载能力与抗拉强度达到设计要求。
2. 施工前进行桥梁表面处理，确保粘接剂与桥梁表面的完美结合。
3. 在钢材包覆过程中，采用专业的施工设备和工艺确保钢材覆盖的完整性与均匀性。
4. 在加固完成后，进行必要的结构检测，包括钢板的结合强度测试，确保外包钢加固层的牢固性。
5. 加固后的桥梁要进行长期监测，特别是在施工后的初期，确保钢加固层能够与原桥梁结构共同工作。

3.3 预应力加固技术在公路施工中的应用

预应力加固技术作为桥梁加固的主要手段之一，能够显著提高桥梁的抗弯、抗剪能力，尤其适用于承载力不足或出现结构性破坏的桥梁。该技术通过在桥梁关键位置施加预应力，能有效减轻桥梁的内力，使桥梁结构更加稳定。在2024年，S368谷城县庙盛公路改建中，原对湾大桥因车流量增加而导致承载能力不足，该桥梁的桥墩和上部结构出现了裂缝。为解决这一问题，工程中采用了预应力加固技术。通过预应力加固，桥梁的抗震能力也有所提高，使得其在极端天气或地震情况下的稳定性增强。数据表明，加固后的桥梁沉降量减少了35%，裂缝得到了有效修复，并且桥梁的服务寿命延长了25年以上。预应力加固技术的应用，成功提升了桥梁的结构安全性，并满足了日益增长的交通需求，详见表1。

表 1 选取工程公路桥梁加固技术数据分析表

项目	原有承载力 (吨)	加固后承载力 (吨)	支座增设数量	桥梁沉降量变化 (%)	承载能力提升 (%)
增设支座应用	180	220	4	-30%	22.22%
外包钢加固应用	180	207	6	-	15%
预应力加固应用	150	180	-	-35%	20%
外包钢加固后抗震能力提升	180	220	6	-	25%
预应力加固后桥梁寿命延长	150	180	-	-	20%

施工技术工艺方法：

预应力加固技术的施工工艺方法主要包括在桥梁的关键位置设置预应力钢绞线。首先，在桥梁梁体中钻孔，并进行适当的清理与加固处理，然后根据设计要求布置预应力钢绞线。接着，将钢绞线张拉并固定，在张拉过程中需要监控张拉力的大小和均匀性。张拉完成后，通过注入水泥浆对钢绞线进行包裹，确保预应力传递给梁体。最终，进行整体验收，检查加固后的桥梁是否满足设计要求。

施工技术实施措施：

1. 进行详细的结构检测与荷载分析，确保预应力加固方案的合理性。
2. 在桥梁梁体中钻孔时，必须确保孔的精度与位置的准确性，以免影响预应力钢绞线的安装。
3. 使用液压千斤顶进行钢绞线的张拉，并确保张拉过程中力度均匀，避免局部过度张拉。
4. 在张拉完成后，通过灌注高强度水泥浆对钢绞线进行包裹，使预应力得以均匀分布。
5. 对加固后的桥梁进行细致的检测与监测，确保加固效果的稳定性和长期耐用性。

4 公路施工过程中桥梁加固技术的应用创新

4.1 新型加固材料在公路施工中的创新应用

新型加固材料的应用为桥梁加固技术带来了许多创新解决方案。近年来，SikaWrap® CFRP 系统是一种基于碳纤维增强聚合物的加固技术，广泛应用于建筑、桥梁和基础设施的加固与修复。作为一种高强度、轻质、耐腐蚀的新型材料，广泛应用于公路桥梁加固中。与传统材料相比，SikaWrap® CFRP 系统是一种基于碳纤维增强聚合物的加固技术，广泛应用于建筑、桥梁和基础设施的加固与修复。在抗腐蚀性方面表现突出，尤其适用于湿润或盐碱环境中，因此在沿海和桥梁腐蚀严重的地区得到广泛应用^[3]。

4.2 智能监测与加固技术的创新融合

智能监测与加固技术的结合，使得桥梁加固的效果更

加精准，施工过程更加科学化。2021 年郴州涇河大桥桥梁加固施工中，成功应用了智能监测技术与加固技术的融合。该项目中，桥梁采用了外包钢加固技术，在加固施工的同时，配备了实时监测系统，监测系统通过传感器实时监测桥梁的应力、位移和沉降等数据。通过与加固方案的结合，施工方能够根据实时数据对桥梁加固效果进行调整，确保加固效果最大化。加固后的桥梁沉降量减少了 50%，应力分布更加均匀。智能监测系统的实时反馈，为加固技术的优化提供了科学依据，确保了加固后的桥梁在长期使用中的安全性。这种技术融合不仅提高了桥梁加固的精确性，还为后期维护提供了数据支持，能够及时发现潜在问题，进行有效的修复和优化。

5 结语

公路施工过程中桥梁加固技术的应用，不仅有效提高了桥梁的承载能力和使用寿命，也为道路交通的安全性提供了强有力的保障。通过增设支座、外包钢加固、预应力加固等技术手段，桥梁结构得到了显著改善，满足了现代化交通需求。随着新型加固材料和智能监测技术的不断发展，桥梁加固技术在应用创新方面取得了突破，为加固效果提供了更精确的评估和优化手段。绿色环保技术的融入，也使得公路桥梁加固更加符合可持续发展理念。未来，随着技术的不断进步和应用实践的深入，公路桥梁的加固技术将更加完善，为道路基础设施的安全运行提供更加坚实的保障。

参考文献

[1] 王玉春.公路桥梁施工过程中预应力技术的应用研究[J].黑龙江交通科技,2020,43(08):104-105.

[2] 李永强.现代公路施工建设中桥梁加固施工技术的应用研究[J].四川水泥,2019,(10):42.

[3] 秦洋洋,赵晴.浅谈预应力技术在公路桥梁施工过程中的应用[A].2019年4月建筑科技与管理学术交流会论文集[C].《建筑科技与管理》组委会:2019:177-178.

[4] 任志彬.预应力检测技术在公路桥梁施工过程中的应用[J].居舍,2019,(03):95.

Key Faults and Treatment Strategies Analysis of HXD1C Electric Locomotive

Xiuxiu Tian

Shandong High-Speed Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

The HXD1C electric locomotive is a six-axle, 7200 kW AC-driven main-type locomotive used in China's trunk freight transport, long-term undertaking traction tasks on mountainous trunk lines, heavy-load sections, and high-density freight operations. This locomotive adopts an overall solution featuring coordinated operation of traction converters, auxiliary converters, network control systems, and modular high-voltage equipment, with high system integration. Its faults often exhibit characteristics such as multiple interlocks, rapid main circuit breaker tripping, intense repeated alarms, and significant challenges in on-site diagnosis. Any abnormalities in the pantograph, high-voltage insulation, auxiliary power supply, or braking air source linkage can directly impact traction establishment, mid-trip maintenance, and safe parking. This paper analyzes representative key faults encountered during the operation of HXD1C electric locomotives and proposes corresponding handling strategies based on field maintenance logic.

Keywords

HXD1C electric locomotive; key faults; handling strategies; analysis

HXD1C 型电力机车重点故障及处理策略分析

田秀秀

山东高速轨道交通集团有限公司, 中国 · 山东 济南 250000

摘 要

HXD1C型电力机车是中国干线货运中的六轴7200 kW交流传动主型机车, 长期承担山区干线、重载区段和高密度货运牵引任务。该型机车采用牵引变流器、辅助变流器、网络控制系统与模块化高压设备协同工作的总体方案, 系统集成度高, 故障往往具有联锁多、跳主断快、重复报警强和现场判断难度大的特点。受电弓、高压绝缘、辅助供电以及制动风源链路一旦异常, 通常会直接影响机车牵引建立、途中维持和安全停车。本文围绕HXD1C型电力机车运用中具有代表性的重点故障展开分析, 并结合现场检修逻辑提出对应处理策略。

关键词

HXD1C型电力机车; 重点故障; 处理策略; 分析

1 引言

HXD1C 型电力机车是铁路电力机车车型中的一种, 依托自主化交流传动平台研制功率较大, 车体采用整体承重结构及模块化设计, 最高运行速度可达每小时 120km, 同时通过网络化控制、双受电弓高压布置和模块化牵引供电系统, 具备 7200 kW 持续功率和 120 km/h 运营能力, 已在中国多条货运干线承担重载牵引任务^[1]。随着系统集成程度提高, 现场故障已不再单纯表现为某一器件损坏, 而更多体现为气路、电路、控制逻辑与状态反馈相互耦合。基于这一特点, HXD1C 型电力机车故障分析必须立足运用现场, 从故障现象、触发条件和系统关联三个层面同步展开。

【作者简介】田秀秀(1990-), 女, 中国山东济宁人, 硕士, 工程师, 从事铁路货运运输研究。

2 HXD1C 型电力机车重点故障

2.1 受电弓升弓异常

受电弓升弓异常是 HXD1C 型电力机车运用中较为突出的故障类型, 现场最常见的表现并非单一的完全无法升弓, 而是升弓失败、升起后不能保持以及刚刚建立高压又自动降弓等连续性异常。HXD1C 车顶设有两套 TSG15B 型受电弓, 升弓前需依靠微机显示屏确认感应电压后方可实施作业, 这说明该故障既与弓体机械状态有关, 也与气路压力建立、控制阀动作和反馈信号保持密切相关。实际运用中, 一旦保压不稳或联锁状态识别出现波动, 机车便容易出现受电弓动作存在但高压通道不能稳定维持的现象, 进而影响主断闭合和后续牵引建立, 故障特点具有突发性和反复性。

2.2 高压绝缘检测报警

高压绝缘检测报警是 HXD1C 型电力机车中直接影响高压建立和主断状态的一类重点故障, 现场通常表现为升弓

后高压绝缘检测装置迅速报警, 6A 终端同步报码, 机车随即出现主断拒合或自动断开的现象。这类故障的复杂之处在于, 既可能来源于车顶母线、受电弓及相关高压部件绝缘状态下降, 也可能与检测回路本身的参数漂移、软件适配偏差和信号判断失准有关。已有运用案例表明, 部分机车在控制软件升级后, 当网压升至一定数值即触发异常报警, 说明该故障并不总是单纯的硬件击穿, 而常带有检测逻辑与实际状态不一致的特征。由于该故障直接作用于主断控制链, 故障一旦出现, 机车往往不能顺利维持高压供电^[2]。

2.3 辅助变流器故障停机

辅助变流器故障停机是 HXD1C 型电力机车运用中影响范围较广的一类电气故障, 其典型特征是微机连续报码、复位后短时恢复、运行一定时间再次报故障, 严重时伴随主断自动断开和辅助设备失电。辅助变流器承担机车多类辅机供电任务, 故障一旦发生, 往往不是单个局部设备异常, 而是会牵连通风、冷却、充电和泵类负载工作状态同步波动。高原 HXD1C 型电力机车运用案例显示, 辅助变流器均压电阻异常时, 相关测点电压会持续下滑, 电压下降到阈值后主断路器自动断开, 并反复报码。由此可见, HXD1C 辅助变流器故障具有明显的中间电压失衡特征, 且在运行负载作用下更容易暴露, 这类故障对机车持续运行能力影响十分直接。

2.4 制动与风源系统异常

制动与风源系统异常在 HXD1C 型电力机车上具有较强的现场关联性, 往往表现为总风压力建立缓慢、制动缸压力响应不正常、制动缓解迟滞或操纵指令与压力变化不一致。HXD1C 司机室制动显示装置可实时显示均衡风缸、列车管、总风缸、流量和制动缸等压力参数, 这表明该类故障并不是单一阀件问题, 而是供风、控制和执行链路共同作用后的结果。货运电力机车制动系统可靠性本就高度依赖风源稳定, 而机车空气压缩机又长期处于高温、多尘、振动和间歇工作环境中, 因而风压建立能力下降、泄漏增大和反馈失真常会叠加出现。对于 HXD1C 而言, 这类故障直接关系到途中制动建立、缓解一致性和停车控制稳定性, 属于运用中必须重点盯控的故障类型。

3 HXD1C 型电力机车重点故障的处理策略

3.1 建立受电弓气电联查处置流程

针对 HXD1C 型电力机车受电弓类故障处置要把升弓条件核对、执行链路排查和复测确认放在同一顺序内完成。第一, 机车报出升弓失败后, 司机应先在微机主屏核对网压是否已出现约 3 kV 感应电压, 再检查端位选择、初始化状态以及高压接地开关、受电弓隔离开关、A10 总风缸截断塞门、F114 控制电源自动开关和紧急按钮状态, 先把未满足升弓前提的故障剥离出来, 避免一开始就拆查弓上部件; 这一环节若主屏条件已缺项, 后续气路、电空阀和弓体动作检查都应暂缓, 并同步核对操纵端是否选择正确^[3]。第二,

HXD1C 配用 TSG15B 单臂气囊式受电弓, 升弓链条本身就包括气囊、快排阀和车内气阀板, 因此进入执行阶段后, 应按压缩空气入口、K75 和 K74 电控阀、U99 钥匙位、调压与节流部件、快排阀、升弓气囊的次序逐段查风。常用处置资料明确控制风缸最低气压不得低于 400 kPa, 若进风表与回风表读数不一致, 应优先判定车顶支路、接头或膜囊附近存在漏风, 而不是先怀疑控制板件失效。第三, 对升起后自行降弓的机车, 不能只看弓体是否落下, 还要把快排阀后分出的压力开关支路与 ADD 相关反馈一并核对, 结合控制阀板接线、插头压接和抖动痕迹判断是否存在瞬时反馈中断; 蓄电池电压低于 77 V 时, 低压控制稳定性下降, 也容易把原本短时的反馈波动放大成自保护降弓。第四, 故障排除后必须连续完成升弓、保弓、降弓三种工况复测, 确认受电弓升起后压力保持稳定、主断动作与显示一致、降弓后风压释放正常, 再核对司机显示屏状态变化与现场实际动作是否同步; 只有动作链、反馈链和显示链三者闭合一致, 方可恢复机车上线。

3.2 实行高压绝缘分段检测与复位隔离

处理 HXD1C 型电力机车高压绝缘报警时, 应把故障切入点放在分段判别和受控复位上, 先把真实绝缘下降、局部接地和检测链误报分开。第一, 机班接到报警后先核对微机网压、主断状态、6A 告警和弓位信息是否同步, 再按车顶设备、绝缘检测箱、主回路三层顺序排查; HXD1C 车顶布置两台受电弓、两台高压隔离开关, 并在隔离开关与主断之间设置 JDZXW2-25 型电压互感器, 检查时应先定边界、后定部件、再定是否隔离, 不能在故障性质未清前连续合主断。第二, 静态检查要把受电弓底架绝缘件、车顶母线支撑绝缘子、电压互感器外表、高压电缆引出端作为同一路径连续查看, 重点看雨雪后潮湿、煤尘油污附着、瓷件裂纹、端部松动和放电痕。对曾经发生污闪的区段机车, 还要注意互感器接线端、避雷器邻近和母线转角部位是否存在沿面脏污带。发现闪络炭化、护套破损或接头爬电距离明显变差时, 应先隔离故障侧, 再换另一弓位做对比验证。第三, 对重复误报机车不能只按外部绝缘处理, 6A 高压绝缘检测箱本身具有自检和 CAN 传输链路, 自检异常时不能进入有效检测; 已有运用案例表明, 个别 HXD1C 在 C4 软件升级后网压升至 18.8kV 即触发报警, 处置时必须把参数版本、采样一致性、报警阈值和显示端报码对应关系一并核对, 必要时调取同批次机车参数做横向比对^[4]。第四, 复位恢复必须按低压确认、升弓、主断建立、连续观察逐级推进, 确认微机界面已有感应电压后再升弓, 升弓后应完成一次完整高压建立观察, 并盯看主断闭合是否稳定、6A 是否再次报码、网压曲线是否突降, 只有报警链、主断链和显示链保持一致, 方可结束本次处置。

3.3 围绕中间电压失衡开展辅变模块化处置

围绕 HXD1C 型电力机车中间电压失衡开展辅变模块

化处置时,现场判断不能停留在单次复位是否成功,而应把TGF54辅变的输入、直流支撑与输出链条连成一体核对。第一,机车报码后应同步调取显示终端与事件记录信息,先分清是两台辅变中哪一台先报码、哪一台随后进入降级供电,再对照辅助绕组输入是否处于AC470V正常允许波动范围内,检查中间电压是瞬时跌落、缓慢下坠还是周期性摆动,并记录波动幅值,因为HXD1C型电力机车每台车设2台TGF54辅助变流器,单台额定容量248kVA,正常工况下一台承担VVVF,另一台承担CVCF,报码先后顺序基本可以反映故障起点位于整流侧还是负载侧。第二,若故障具有重复性,应把检查面收紧到支撑电容、均压电阻、采样板、插件件和门极驱动回路,重点测量同桥臂、同母排两侧及采样反馈值是否一致,特别要核对均压电阻阻值漂移、采样插件松脱和板卡供电波动,因为中间环节一旦出现分压失衡,常先表现为检测值偏移,随后才发展为模块保护。第三,对已形成稳定触发规律的机车,不宜反复强制带故障投入,应按运行区段和当班负载情况实施故障辅变隔离,由健全辅变转入CVCF集中供电,先保住440V恒频负载和必要冷却、通风、泵类及充电回路,再撤并非必须负载,避免在中间电压未恢复均衡时再次叠加压缩机或风机冲击。第四,处理结束后必须连续完成空载、分组带载和切换复测,至少核对440V输出、VVVF侧10~60Hz调频响应、辅机起动电流波动及同类报码是否清零,若复测中中间电压仍有不对称摆动,即使短时不再报码,也应回段更换对应模块或采样部件,不再上线观察。

3.4 按制动链路和风源链路分层排查

在HXD1C型电力机车制动与风源异常处理中,应把压力数据、阀件动作和记录信息放到同一条链路上核对,先分清风源侧失压还是制动侧失控,再进入针对性检修。第一,司机和检修人员接到异常后,应先在LCDM制动页面连续比对均衡风缸、列车管、总风缸和制动缸显示值,重点看列车管能否稳定跟随均衡风缸变化。对配有CCB II制动配置的机车,本机投入状态下BP应达到ER设定值附近,允许偏差为 $ER \pm 7 \text{ kPa}$,若ER已变化而BP、BC不同步,则故障点多不在机械制动单元,而在控制或传感环节。第二,若总风建立迟缓、反复掉压或升压无力,应先转入风源链检

查。HXD1C空气压力调节器开断值为 $900 \pm 20 \text{ kPa}$,闭合值为 $750 \pm 20 \text{ kPa}$,低于 $680 \pm 20 \text{ kPa}$ 时两台压缩机投入, $950 \pm 20 \text{ kPa}$ 为安全阀动作值,因此现场应按压缩机启停顺序、干燥器通畅性、总风缸排水和管路泄漏点逐项核对。第三,若总风缸压力保持在下限以上,而常用制动、追加制动或缓解响应仍不正常,就应把重点落到制动控制链,先调取事件记录和故障代码,核对ERCP、BPCP、16CP等模块状态,再结合阀件动作时刻与压力曲线变化,查明是命令未发出、发出后未转换为列车管控制,还是制动缸建立后不能按指令回落。第四,故障消除后不能只做一次缓解试验,应按缓解、常用、追加、紧急顺序复试,并把总风缸充至不低于 750 kPa 、列车管充至 500 kPa 后再校验显示值和实测值的一致性,若复试中压力建立速度、回落幅度与操纵位次仍有迟滞或跳变,就不能结束处理^[9]。

4 结语

HXD1C型电力机车故障处理的难点,不在于单一部件更换本身,而在于高压、辅助、制动和反馈信号之间存在明显耦合。受电弓升弓异常、高压绝缘报警、辅助变流器停机以及制动风源异常之所以在运用中反复出现,往往与环境应力、模块状态漂移和现场判断顺序不当同时有关。对HXD1C型电力机车而言,先读故障信息、再划系统边界、后做分段验证的处理思路,更符合一线运用和回段检修实际。后续运用段还应把故障代码积累、修后复测和重复故障闭环记录进一步做细做实。

参考文献

- [1] 孟辉,郭花花.HXD1C型机车牵引系统典型故障分析及研究[J].现代科技研究,2025(1).
- [2] 赵国德.HXD1B,HXD1C型电力机车常见故障及处理[J].探索科学,2020(4):51-51.
- [3] 王祥,陈智.电力机车HXD1C型机车辅逆故障[J].中国战略新兴产业,2020(34):218-219.
- [4] 周嘉煜,郑新火.HXD1C机车预见性C1修修制改革浅析[J].广西铁道,2020(1):2.
- [5] 陈亚东.HXD1C型机车DK-2制动机一典型问题的分析及对策[J].铁道机车与动车,2023(9):44-45.

Rule-based Algorithm for Role Classification and Text Segmentation of Air Traffic Control Voice Text

Bin Long Peng Zhao Weihua Gao

Chongqing Branch of Southwest Regional Air Traffic Management Administration, Chongqing, 401120, China

Abstract

In response to the prevalent issues of mixed voice recognition, role identification, and segmentation difficulties between air traffic controllers and pilots in air traffic control (ATC) speech recognition applications, this paper proposes a rule-based algorithm for ground-air communication speech role classification and communication text segmentation. The algorithm designs a communication template system that includes universal labels such as aircraft call signs and numerical combinations, as well as logical symbols. On the template side, an abstract syntax tree is used to parse the communication templates. On the communication text side, the recognized text is preprocessed first, and then the role determination and automatic segmentation of mixed voice text are achieved through a sequential matching algorithm. This method effectively solves the problems of role identification and mixed dialogue segmentation between air traffic controllers and pilots, providing a technical approach for semantic understanding, normative analysis, and automatic error correction in ATC speech applications.

Keywords

air traffic control speech recognition; role classification; text segmentation; rules; dialog template; matching; Abstract Syntax Tree

基于规则的空管地空通话语音文本角色分类和文本分割算法

龙滨 赵鹏 高卫华

民航西南地区空中交通管理局重庆分局, 中国·重庆 401120

摘要

针对空管语音识别应用中普遍存在的管制员与飞行员语音混合、角色识别和分割困难的问题, 本文提出一种基于规则的地空通话语音角色分类和通话文本分割算法, 该算法设计了一套包含航空器呼号、数字组合等通用标签及逻辑符号的通话模板体系, 在模板侧采用抽象语法树对通话模板进行解析, 在通话文本侧通过对识别文本先进行预处理, 再通过顺序匹配算法实现对混合语音文本的角色判定与自动分割。该方法有效地解决了管制员、飞行员语音的角色识别和混合对话分割问题, 为空管语音的语义理解、规范性分析及自动纠错等应用场景提供了一种技术途径。

关键词

空管语音识别; 角色分类; 文本分割; 规则; 通话模板; 匹配; 抽象语法树

1 引言

在空管中, 我们不少场景需要用到管制语音识别, 如管制员通话用语规范性分析、通话错误提醒、字幕生成等等。在空中交通管制领域, 管制员同飞行员的通话通常是通过话音交换系统, 经 VHF 设备进行地空通信。现有的语音交换系统均提供录音接口, 我们可以使用录音接口通道实现地空对话的语音识别。由于现有的内话系统没有提供管制员和飞行员通话单独的语音输出通道, 经语音识别的话音文本是管制员和飞行员的混合对话, 如果不进行对话角色分离和文本切割, 得到的是一大段文字, 难以区分出说话人的角色, 需要人工识别。这样我们面临一个难题: 能否将管制员和飞行

员的通话角色分离出来?

首先考虑采用 AI 训练的方式对识别的文本进行分离, 我们选取 1800 条真实的管制通话文本进行训练, 每条通话文本对应一种角色: 管制员、飞行员和混合, 分别采用 BERT、BERT+CNN、BERT+RNN、BERT+RCNN、BERT+DPCNN 进行训练, 实测效果非常不理想, 采用 BERT 算法, 总准确率只能达到 37% 左右, 也就是比随机猜测高一点, 其他的算法也没有明显提升。分析原因, 一方面 BERT 算法本质上是单纯的根据分词的关联进行多维距离计算, 也就是根据各种分词的频次和距离进行推算, 没考虑上下文, 不易分出混合情况; 另一方面需要足够的样本, 可能需要几万或十几万以上的样本才能才能到达较高的百分比。获取大规模的真实语料需要大量的人工标注, 人力成本太高, 因此需要考虑另辟蹊径。

由于管制和飞行的话语在语言表达、用词前后顺序和

【作者简介】龙滨 (1976-), 男, 中国重庆人, 硕士, 高级工程师, 从事空中交通管理通信、导航、监视研究。

句式结构上一些明显的特征和差异,绝大部分对话是可以判断出角色的。我们以行标《空中交通无线电通话用语》(MH/T4014-2003)为蓝本,尝试通过建立一套分类规则算法,以实现管制员、飞行员语音的分类和切割。

2 设计文本角色分类和分割算法需要遵循的原则

(1) 如果某句话不确定是谁说的,就不要纳入规则。避免判断角色错误。(2) 设计规则应该有一定容错性,比如:下高度{某高度}保持,在实际通话时,可能说成:下降到{某高度}保持、下到{某高度}保持、下{某高度}等等。(3) 合理处理对于语气词,比如:啊,呃,嗯,哎之类。由于语气词可能出现句前、句中和句末,它的出现会中断模板匹配。建议删除处理。

3 通话模板设计

为实现分类和文本分割,我们需要设计管制员通话模板和飞行员通话模板。在模板中,我们设计了四种模板符号。

3.1 模板标签

根据作用同,我们设计了一些通用模板标签,作为模板占位符:1) <航空器呼号>,这是由航空公司简称+多个数字或英文字母的组合。我们需要对航空公司名称做一个列表进行枚举,如:东方、国航、南方等。航空器呼号由于无法枚举,宜采用匹配方式,这里的数字和英文字母组合包含幺、两、三、四、五、六、拐、八、九、洞以及26个英文字母组成的数字。2) <数字组合>,用于应答机编码、高度、频率、速度、气压(QNH和QNE)、航向、时间等,比如:应答机编码:五拐两幺,表示二次码为5721;高度:拐两,表示7200米;频率:幺两五点拐,表示频率125.7MHz;速度:两九洞,表示速度290公里/小时。中文数字组合应包含文字:幺、两、三、四、五、六、拐、八、九、洞、一、二、七、点、十、百、千、整点。数字组合应该采用算法对连续出现的数字进行识别,并按连续原则,形成一个数字组合。3) <进离场程序>,用于识别进离场程序,应该配置一个进离场程序列表。如:VYK-1A、NHW-2D等。4) <跑道号>,用于识别跑道,应列表枚举,比如:洞两左、两洞左等。5) <固定点>,比如导航台呼号、航路点、定位点、重要点等固定点名称。如:EKIVI、LKO等。应该配置一个本管制区范围内用到的固定点列表。同一个固定点要有三种表示,比如EKIVI,应包含EKIVI,也应包含ECHO KILO INDIA VICTOR INDIA,和EKIVI ECHO KILO INDIA VICTOR INDIA,这是因为实际通话中三种说法都会出现。6) <航路>,航路名称:如G595。应列表枚举。7) <本管制单位呼号>,比如:成都、区域、进近、重庆进近、塔台、地面、放行、机坪等。应列表枚举。8) <移交管制单位呼号>,比如:西安、万州等。同本管制区分,

是为了更好的匹配飞行员的通话模板。应该配置一个列表。9) <进近种类>,如:目视、VOR、盲降、RNP、LOC等,应该配置一个列表。10) <灯光类别>,如:跑道边灯、跑道入口灯、入口翼排灯、接地地带灯、跑道中线灯和跑道末端灯等。应该配置一个列表。11) <机型>,比如重型、中型、轻型等。应该配置一个列表。12) <滑行位置>,如:ZULU三,用语中如:在<滑行位置>{外}等待。有字母呼号+数字组合组成。由算法识别。13) <飞行情报区>,用语中如:由于<飞行情报区>FIR有干扰。应该配置一个列表。14) <滑行路线>,由滑行位置和滑行道号的多个组合形成。通过算法匹配。15) <字母呼号>,可以用于通报代号、滑行道号等。应该配置一个列表。包含26个字母:ALPHA、BRAVO、CHARLIE等。16) <RNAV-RNP程序>,本管制区用到的RNAV和RNP程序,配置一个列。17) <机型>,如:波音七三七八百、空客三二〇等,通常用于活动通报。18) <xxx>表示识别文本中的不确定文本。用于不确定文字组合的匹配。<xxx>应该是语音识别后,通过空格或符号分割出来的其中一小段文字,而不是包含所有不确定文本。

3.2 模板符号

不同于《空中交通无线电通话用语》中的通话符号,我们自行设计几种符号:1) 标签占位符<...>,如<标签名>,即上述采取的标签占位符名称,用于区分特定用途的文本。2) 中括号[],表示文本中一定会出现的文字,通常配合|使用。比如:[加速|减速]到<数字组合>3) 大括号{},可选片段,表示可能会出现的文字。如:<航班号>预计<进离场航线>{进场}。4) 或|,字面枚举,表示多个文字的或关系。如:<航班号>[上升|下降]率<数字组合>,因为{起飞|落地}间隔,[上升|下降]表示上升或下降的文字必须出现一个;{起飞|落地}表示可能出现三种情况之一:空,起飞、落地。上述的符号可以组合嵌套使用。比如:{[上升|下降]率[小于|大于|不小于|不大于]<数字组合>},<航班号>{现在}[左|右]转飞<固定点>{自主领航},<航班号>离开<数字组合>[上|上升|下|下降]{到}{高度}<数字组合>{保持},注意[收听|守听]相似航班号{预计[进离场航线][进场|进港]}<航班号>。

示例:四川八八三两沿CHARLIE向北滑联系重庆塔台幺两八点两再见|管制员。CHARLIE向北幺幺八两四川八八三两再见|飞行员。对于示例,我们需要各设计一个管制员通话模板和一个飞行员通话模板,可以设计如下:管制员通话模板:<航空器呼号>沿<字母呼号>向[北|南|东|西|东北|西北|西南|东南]滑行联系<本管制单位呼号><数字组合>{再见},飞行员通话模板:{沿}{字母呼号}向[北|南|东|西|东北|西北|西南|东南]<航空器呼号>{再见}

4 地空通话模板文本匹配算法

我们先研究已经进行角色分类文本的匹配算法,在此基础上,再研究分割算法。我们需要对模板侧和文本侧进行分别处理。

4.1 模板侧处理

管制员和飞行员的通话模板采用抽象语法树(AST)进行处理,将每调模板解析为AST节点。也就是把整个模块,映射为一颗树。处理时,将节点分为5类:1)顺序节点SEQ,由多个子节点按顺序组成。2)字面量节点LIT,用于直接匹配具体文本。3)枚举节点ALT:在多个备选文本中二择一或多择一(正则实现为分组)。4)可选节点OPT:子节点有可能整体出现也可能不出现。5)占位符节点PLACEHOLDER:也就是上述的<航空器呼号>。所有的模板处理完毕后,进行正则编译并构建为一个模板集合。方便对文本集中处理。

4.2 文本侧处理

而文本侧的处理应先按照以下顺序,先进行预处理,再进行标签提取。主要包含以下几个过程:1)标点归一化。将中英文中常见的标点替换为空格并压缩空白字符。

2)删除语气词:常用的语气词包括:哦 呃 好 啊 喔 嗯 额 哎 对 欸等,这些词由于可能出现在任何地方,会影响匹配,需要进行删除处理。另外,有些常说的单次,如好的,好嘞,谢谢,收到等词,建议也当做语气词进行处理。实测删除并不会影响匹配。3)重复词压缩。对于相邻的重复字和词,进行去重。重复词一般是通话人员口误。4)识别主要标签:①确定航空器呼号(航班号);②每行对话应该先搜索先根据航空公司名称,如果后面有数字或英文字母的组合(不超过4位),则分割出航空器呼号;③识别本场管制区呼号。由于本管制单位呼号,通常不多且较为明显,容易区分;④识别进离场程序。由于进离场航线包含固定点,应该在固定点之前先识别进离场航线,避免被判定是固定点。⑤识别滑行线路。由于滑行线路包含滑行位置,应该在滑行位置之前先识别滑行线路,避免被判定是滑行位置。⑥分步依次识别固定点、跑道号、航路、RNAV-RNP程序、滑行位置、进近种类、灯光类别、机型、飞行情报区、字母呼号。⑦在上述识别的过程中,建立设置一个对比模板,在识别的时候,用上述识别出的标签替换原文本。如:海南拐五六拐成都雷达已识别 下降到拐两保持 下降率大于两千,替换为:<航班号> <管制区> 雷达已识别 上升到<数字组合>保持 下降率大于<数字组合>。经过上述处理,转换的对比模板,同模板有了一定相似性。

3、匹配处理:对已处理文本,对已经编译模板的进行

完整匹配,采用正则式判定是否符合模板结构。对于满足管制员的对话,我们可以输出为1,对于满足飞行员的对话,我们可以输出为4,如果不匹配,我们可以输出为0。

5 地空通话模板文本分割算法

上面是对某句已知航空通话对象的对话模板进行的匹配,在我们实际使用时,接收到的语音文本通常是混合的,比如我们从语音记录仪提取的某个时间段的数据,在设置一定的静默时间(如150ms)的情况下,实测通过语音分割,仍然会存在语音混合的情况。此时我们需要对这种混合语音进行分割,切分成管制员和飞行员的分别对话。数据分割包括文本预处理,和模板逐一匹配。

文本预处理:混合文本的预处理同上述匹配算法文本侧的预处理类似,也包括标点归一化、删除语气词、重复词压缩。

顺序文本匹配和切割:从对话语句的最开头进行文本匹配。当匹配到一个模板时,将文本进行切割。然后对剩下的文本进行再次模板匹配,并循环进行切割。按这种方式切割,仍有可能存在一个文本可以匹配多个模板的情况,导致切割就会有多重可能,此时须逐一尝试多种组合,直到找到一种能完全匹配的组合。

6 改进方向

基于本文算法,我们更希望在设置合理模板模版以避免多种组合的发生。这就需要我们在新模板输入时,将新模板同已有模板进行比对分析,一方面新模板不能命中到已有模板,另一方面,已有模板也不能命中到新模板。

参考文献

- [1] 郑诚,唐思琪.结合标签语义和对比学习的小样本文本分类[J/OL].小型微型计算机系统,1-14[2025-12-05].<https://doi.org/10.20009/j.cnki.21-1106/TP.2025-0319>.
- [2] 赵海燕,曹杰,陈庆奎,等.层次多标签文本分类方法[J].小型微型计算机系统,2022,43(04):673-683.DOI:10.20009/j.cnki.21-1106/TP.2021-0658.
- [3] 崔海越,李延玲.基于BERT模型的多标签文本分类[J].高师理科学刊,2025,45(08):18-24.
- [4] 孙晓瑜.基于机器学习的文本分类与标签预测算法[J].吉林大学学报(信息科学版),2025,43(04):837-843.DOI:10.19292/j.cnki.jdxp.2025.04.010.
- [5] 贾桂敏,申玉茜,周熹龙.基于层级规则树与特征融合的陆空通话规范性检验模型[J/OL].北京航空航天大学学报,1-15[2025-12-05].<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0041>.

Research on the causes and maintenance practices of unstable output voltage faults in automotive generators

Hong Tang Ke Chen Jun Jia

Chongqing Gas Mine, Southwest Oil and Gas Field Branch, China National Petroleum Corporation, Chongqing, 400021, China

Abstract

The automobile generator is an important power supply part of the vehicle's electrical system, and the stability of the generator's output voltage is related to the battery life, normal operation of onboard electronic devices, and vehicle driving safety. This article focuses on the unstable output voltage faults of generators commonly used in passenger and commercial vehicles. Based on the maintenance experience of some commonly used vehicle models, the causes of the faults are analyzed from four aspects: mechanical faults, electrical component failures, line abnormalities, and external load interference. A standardized diagnostic process is established to provide operational references for the automotive maintenance industry, help avoid vehicle faults caused by unstable voltage, and improve the reliability of the entire vehicle's electrical system.

Keywords

automobile generator; unstable output voltage; fault diagnosis; maintenance practice; vehicle electrical system

汽车发电机输出电压不稳故障原因与维修实践研究

唐红 陈柯 贾军

中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司重庆气矿, 中国 · 重庆 400021

摘 要

汽车发电机是整车电气系统的重要供电部分, 发电机输出电压的稳定性同蓄电池寿命、车载电子设备的正常工作和整车行驶安全有关。本文针对目前乘用车、商用车常用的发电机输出电压不稳定故障, 结合一些常用车型的维修经验, 从机械故障、电气元件失效、线路异常、外部负荷干扰四个方面分析故障原因, 建立标准化的诊断流程, 给汽车维修行业提供操作上的参考, 帮助避免电压不稳造成的车辆故障, 提高整车电气系统的可靠性。

关键词

汽车发电机; 输出电压不稳; 故障诊断; 维修实践; 整车电气系统

1 引言

随着汽车电气化、智能化程度不断提高, 车载电控单元、影音系统、辅助驾驶设备等用电负荷越来越大, 发电机输出电压稳定性要求也越来越高^[1]。正常工况下汽车发电机的输出电压应该保持在 13.5-14.5V 之间, 如果超过这个范围就认为是电压不稳定, 轻则引起蓄电池亏电、灯光闪烁、电子设备卡顿, 重则引发控制系统失效、线路烧毁, 严重时还会造成行驶途中抛锚。本文选取多款主流乘用车实际维修案例为依据, 对电压不稳故障的主要原因进行分析, 并对诊断和维修流程进行改进, 克服传统维修更换、轻排查的弊端, 提高故障维修的准确性以及经济性。

2 汽车发电机输出电压不稳的核心故障原因

汽车发电机输出电压不稳定不是单一原因造成的, 是机械传动、内部电气、外部线路、整车负荷等多环节故障叠加造成的^[2]。根据目前车型设计特点以及维修大数据, 可以将故障原因分为四类, 每一类对应着某款车型的典型故障场景, 有很强的实用性及操作性。

2.1 机械传动系统故障: 最常见的外部诱因

机械传动故障属于发电机电压不稳定的外在原因, 大多出现在传动皮带及张紧机构上, 常见于长期行驶的越野车、商用车, 电压会随着发动机转速的变化而变化明显, 怠速电压低, 加速电压忽高忽低。第一, 发电机皮带松动、磨损或者老化打滑, 丰田普拉多、皮卡等常在非铺装路面上行驶的车型, 由于底盘振动频繁, 皮带张紧度容易衰减, 长时间使用后皮带表面龟裂、弹性下降, 运转时会出现间歇性打滑, 造成发电机转速与发动机转速不同步, 直接引起输出电

【作者简介】唐红(1973-), 男, 技师, 从事汽车驾驶、维修、技术改革、新能源等研究。

压波动。第二,皮带张紧轮失效,别克商务、丰田考斯特等商用车,张紧轮轴承磨损、弹簧弹性失效后,不能保持皮带恒定张力,高速行驶时皮带跳动加剧,发电效率急剧下降,电压稳定性彻底失控。第三,发电机安装支架松动,长城500、皮卡等重载车型,长时间颠簸造成支架固定螺栓松动,发电机运转时晃动,不但会影响传动效率,还会拉扯内部线路,间接引起电压异常。此类故障不需要拆解发电机,通过外观检查就可以初步判断,维修成本低但是容易被维修人员忽略。

2.2 发电机内部电气元件失效:核心故障根源

发电机内部元件老化、损坏是电压不稳的主要原因,占总故障量的65%以上,也是维修的重点和难点,主要是电压调节器、整流器、碳刷滑环、定子转子绕组这四个主要部件。

电压调节器故障是主要的诱因,它是控制发电机输出电压的中枢,它的作用就是稳定励磁电流,保证电压不变^[3]。目前主流车型大多采用内置式集成电路调节器,相比于传统的外置式来说,体积小、集成度高,但是耐热性、抗干扰性要求高。别克商务、丰田考斯特等长时间怠速运行的车型,发动机舱温度高容易造成调节器内部基准电压漂移、三极管击穿,产生电压过高(超过15V)或者过低(低于13V)的情况;长城500、丰田普拉多等大功率用电车型,调节器负荷大,容易造成PWM控制信号失效,电压随用电负荷变化而剧烈波动。

整流器和绕组故障也经常发生,发电机内部会产生交流电,需要通过整流器将交流电转换成直流电供整车使用,如果整流二极管单个或者批量损坏,就会出现半波整流、缺相故障,造成输出电压纹波,电压不稳定并伴有电磁干扰。定子绕组匝间短路、断路,转子励磁绕组磨损断线,多由于长期高温、绝缘老化造成,丰田考斯特这类营运车辆年行驶里程长,绕组绝缘层容易老化破损,出现三相电流不平衡、电压忽高忽低。碳刷和滑环磨损严重,多发生在行驶里程超过10万公里的车辆上,碳刷磨损到原来的1/3以下,滑环表面烧蚀、积碳,造成励磁电流接触不良,怠速时电压经常出现波动,加速后有所改善但仍然不稳定。

2.3 外部线路与连接故障:易漏诊的隐性诱因

线路故障为隐性故障,维修时容易把线路故障当作发电机本体故障,造成不必要的更换费用,电压不稳定现象时好时坏^[4]。其一,发电机输出端子、蓄电池正极桩头、搭铁线接触不良,丰田普拉多、皮卡等越野车型涉水、颠簸后端子氧化、锈蚀,搭铁线虚接,造成线路电阻增大,电压传输损耗不均,产生电压波动;别克商务、长城500等车型线束包裹层老化破损,导线裸露,容易出现间歇性短路,使电压更加不稳定。其二,线束插接件松动、针脚退针,车载线路长时间振动,发电机和电控单元的通讯插接件接触不良,调节器控制信号传输中断,不能正常调节电压。第三,保险丝、继电器接触不良或者老化,发电机励磁电路保险丝虚接都会

造成励磁电流不稳定,从而影响发电效率,用万用表测量线路电压和电阻就可以准确找到故障点。

2.4 整车用电负荷与外部干扰:特殊场景诱因

随着车载用电设备的增加,不合理地安排负荷以及外部干扰都会造成电压不稳,属于智能化车型的一种新的故障。第一,超负荷用电,私自加装大功率射灯、逆变器、车载冰箱等设备,长城500、皮卡、丰田普拉多改装爱好者居多,加装后用电负荷超过发电机额定功率,造成输出电压被迫下降,并且随着设备的启停而大幅度波动。第二,车载电控系统干扰,当下车型发动机ECU和发电机调节器联动控制,ECU故障或者传感器信号异常,就会错误地调节发电机励磁电流,造成电压不稳定,别克商务、丰田考斯特等车型带有多路电控系统的车辆,该类故障较为常见。第三,蓄电池老化失效,蓄电池是电压缓冲单元,极板硫化、容量衰减后,不能稳定发电机输出电压,即使发电机正常,也会出现电压波动,常常和发电机故障同时发生,需要同时排查。

3 汽车发电机输出电压不稳的标准化诊断流程

根据指定车型维修经验,创建出“先外后内、先简后繁、先测后拆”的标准化诊断流程,防止盲目拆解更换,提高维修效率,降低成本,全程使用万用表、汽车诊断仪、红外测温仪等常规工具来适应各种维修厂的实操要求。

3.1 初步外观与静态检查

第一步检查机械传动部件,查看发电机皮带是否松动、磨损、龟裂,用手按压皮带,正常挠度应为10-15mm,超过范围则调整张紧度或者更换皮带;检查张紧轮转动是否顺畅、有无异响、支架螺栓是否松动。第二步检查线路及连接部位,查看发电机输出端子、蓄电池桩头、搭铁线有无氧化、锈蚀、松动,线束有无破损、插接件是否牢固,清理氧化层并紧固端子。第三步检测蓄电池的工作状态,查看电解液液位(免维护蓄电池看电眼),测量静态电压,正常12.2~12.7V,低于12V为蓄电池亏电或者老化,需要先充电或者更换。

3.2 动态电压测量

启动发动机,保持怠速状态,用万用表直流电压档测量蓄电池正负极两端电压,正常应为13.5~14.5V;缓慢加速到2000r/min,观察电压变化,稳定在13.8~14.2V为正常,若电压低于13V、高于15V,或随转速、负荷大幅波动,判定为发电机故障。开启大灯、空调等大功率用电设备,再测量电压,如果电压明显下降并且不能恢复,说明发电机发电能力不足或者调节器故障。对于别克商务、丰田考斯特等电控车,用汽车诊断仪连接到发动机上读取发电机电压值,和实际测量的电压进行对比,找出ECU和调节器之间的通讯问题^[5]。

3.3 发电机本体专项检测

外部排查没有发现异常时,对发电机进行内部检测。

用万用表测量碳刷长度、滑环电阻,碳刷磨损超过规定限度时更换;测量定子绕组电阻,三相绕组阻值应均匀,阻值相差过大表示绕组短路或者断路;检测整流二极管,正向导通、反向截止为正常,单个或者多个二极管损坏则更换整流器。重点检测电压调节器,用专用检测仪测量基准电压和控制性能,判断调节器是否失效。利用红外测温仪检测发电机运转时的温度,异常高温处就是故障点,准确找到内部故障元件。

4 典型车型维修实践与案例分析

根据丰田普拉多、别克商务、长城 500、皮卡、丰田考斯特五款车型实际维修案例,针对不同的故障原因给出不同的维修方案,体现维修实践的差异化、精准性。

4.1 丰田普拉多越野车型维修案例

故障车辆是行驶里程为 50 万公里的丰田普拉多,反馈怠速时车灯闪烁、车载中控屏卡滞、加减速时电压忽上忽下、蓄电池常常出现亏电现象。怠速电压为 12.8V,加速时最大值为 14.8V,波动超过 2V。发电机皮带松动、表面有轻微龟裂、搭铁线端子锈蚀。维修方案为更换新的发电机皮带,调节张紧度,清除搭铁线端子氧化层并紧固,补充蓄电池电量。维修之后再测电压,怠速 13.9V,加速稳定 14.1V,故障完全消除。该车型由于长期的越野颠簸,传动部件和线路容易松动,维修的重点首先应该检查外部的机械和线路故障,不能随意拆解发电机。

4.2 别克商务 MPV 维修案例

故障车辆是行驶里程为 9 万公里的别克商务 GL8,故障现象为行驶中电压突然上升,仪表盘电瓶灯闪烁,车载电子设备时有时无。动态测量电压,怠速 15.2V,超过正常值,诊断仪数据流没有通信故障。拆解发电机检测出内置式电压调节器三极管击穿、基准电压失常,整流器单个二极管老化。维修方案为更换新的内置式电压调节器、整流器,复装发电机调试,电压稳定在 14.0V,故障消除。该车型发动机舱空间小,发电机散热不好,调节器容易高温损坏,维修时主要注意内部电气元件老化的问题。

4.3 长城 500 硬派越野车型维修案例

故障车辆为改装过大功率射灯和车载电台的长城 500,行驶里程 6 万公里,故障现象为开启改装设备后电压突然降到 12.5V,关闭后电压缓慢回升但仍有波动。检测结果表

明发电机额定功率不能满足改装负荷要求,蓄电池容量衰减,不能起到缓冲作用。维修方案为拆除大功率改装的违规设备,换新原厂规格的蓄电池,检查发电机碳刷和滑环,清除积碳后复装。复测电压,打开原厂用电设备后稳定在 13.8V,故障消除。该车型改装需求大,超负荷用电是电压不稳定的主要原因,维修时要同步规范用电负荷,严禁私自改装。

4.4 丰田考斯特营运客车维修案例

故障车辆为行驶里程 17 万公里的丰田考斯特,长时间怠速接送乘客,故障表现为电压一直偏低,怠速时 12.9V,加速时最高 13.5V,蓄电池严重亏电。发电机拆解检测时碳刷磨损到极限、滑环表面严重烧蚀、定子绕组绝缘层老化。更换碳刷、滑环,修复定子绕组绝缘层,更换老化线束,复装后调试。维修之后电压稳定在 14.0V,解决了由于长期行驶造成内部元件过度磨损的问题。营运车辆行驶里程长、工况恶劣,定期对发电机内部易损件做检修工作,防患于未然。

5 结语

汽车发电机输出电压不稳定是目前商用车中常见的一种电气故障,其产生的原因包括机械、电气、线路、负荷等各方面因素,维修时要按照科学的诊断流程来开展工作,不能盲目地进行更换,而应该根据车型的工作情况准确找到故障点。本文以多款主流车型维修为依托,对各种故障原因的维修方案及预防措施进行了验证,提高了汽车维修行业实操效率,也给合理用车、定期保养提供指导。随着汽车电气化技术不断升级,发电机故障诊断会越来越智能,之后需要结合电控技术来改进故障检测方式,提高维修的准确性,保证整车电气系统的正常运转。

参考文献

- [1] 陶鑫. 满足RVC通信协议的汽车发电机调节器设计[D]. 沈阳工业大学, 2023.
- [2] 李倩, 张航斌. 汽车发电机智能电压控制系统研究[J]. 时代汽车, 2019, (02): 147-148.
- [3] 徐文培. 大功率低温升汽车交流发电机调节器集成模块[D]. 沈阳工业大学, 2021.
- [4] 陈帅. 基于CAN总线的汽车发电机智能调节器研究[D]. 长安大学, 2019.
- [5] 张子旭. 汽车发电机智能调节系统[D]. 长安大学, 2022.

Application Research of Green and Low-carbon Highway Design in Ecological City Construction: A Case Study of G30 and G7 Expressways in Hami City, Xinjiang

Rui Li

Hami Ruizhong Highway Engineering Co., Ltd., Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract

Against the backdrop of global climate change and the “dual carbon” goals, green and low-carbon highway design has emerged as a key driver for eco-city development. This study systematically examines the core concepts and technical frameworks of green low-carbon highways, analyzes domestic and international case studies, and proposes three design strategies—full lifecycle low-carbonization, ecological integration, and intelligent coordination—while exploring their practical implementation pathways in eco-cities. The research demonstrates that through interdisciplinary innovation and policy support mechanisms, green low-carbon highways can effectively facilitate urban resource efficiency, ecological restoration, and the achievement of carbon neutrality objectives.

Keywords

green highway; low-carbon design; eco-city; sustainable transportation

绿色低碳公路设计在生态城市建设中的应用研究——以新疆哈密市 G30 及 G7 高速公路为例

李瑞

哈密市瑞忠公路工程有限公司，中国·新疆哈密 839000

摘 要

在全球气候变化与“双碳”目标背景下，绿色低碳公路设计成为生态城市建设的重要抓手。本文系统梳理了绿色低碳公路的核心理念与技术体系，结合国内外典型案例，提出全生命周期低碳化、生态融合、智能协同三大设计策略，并探讨其在生态城市中的实践路径。研究认为，通过多学科交叉创新与政策机制保障，绿色低碳公路可有效促进城市资源集约、生态修复与碳中和目标实现。

关键词

绿色公路；低碳设计；生态城市；可持续交通

1 研究背景及意义

从全球趋势来看，交通碳排放面临着严峻挑战，根据 IPCC 第六次评估报告，交通领域碳排放占全球总排放量的 24%，其中公路运输贡献超过 70%。随着全球城市化进程加速，私家车保有量激增，交通碳排放问题日益突出。若不采取有效措施，到 2050 年，交通碳排放可能增长 60% 以上。因此，推动绿色低碳公路设计成为全球交通减排的关键路径之一。

就我国政策而言，“十四五”规划中高站位地对绿色交通体系进行了战略部署，明确提出要构建低碳、高效、可持续发展的综合交通体系，设定了 2030 年前碳达峰、2060 年前

碳中和的“双碳”目标。交通运输部《绿色交通“十四五”发展规划》进一步要求，优化公路网络布局，推广低碳铺装材料，发展智慧交通系统等。这些政策为绿色低碳公路设计提供了明确的政策支持和实施框架。

根据现实需求，传统公路建设的生态矛盾日益凸显，传统公路建设导致生态破碎、热岛效应加剧，与生态城市目标相悖，生态城市强调“低环境影响、高资源效率”。公路切割自然栖息地，导致生物廊道断裂、物种多样性下降；沥青路面吸热性强，加剧城市高温，与生态城市的降温目标相冲突；传统施工依赖高能耗材料（如水泥），碳排放强度高。面对新形势新格局新发展，目前亟需探索公路设计与生态城市的协同发展路径，进一步完善绿色基础设施规划方法论，为生态城市提供可复制的技术路径。

【作者简介】李瑞（1989—），男，回族，中国新疆哈密人，本科，工程师，从事道路桥梁研究。

2 国内外研究进展

2.1 国际实践

(1) 欧洲“生态廊道”理念：德国 A20 高速公路建设中采用了“生态补偿”策略，全线设置 30 余处野生动物通道（包括桥梁式、隧道式），并恢复沿线湿地与森林植被，形成连续的生境网络，有效缓解“生态屏障效应”。据德国联邦交通部数据显示，动物-车辆碰撞事故减少 60%，通过碳汇植被种植，公路沿线年固碳量达 1.2 万吨 CO₂。这对国内绿色生态交通网络建设具有较强的借鉴意义，可考虑将生态廊道设计纳入中国山区或城郊公路规划，缓解生物栖息地碎片化问题。

(2) 美国智能路面技术：加州在 101 号公路试点路面嵌入光伏模块与 LED 指示灯，同时支持动态无线充电，配套储能系统可供电网调峰。低碳效益可观，每公里光伏路面年发电量可达到 40 万度，相当于减排 300 吨 CO₂，通过智能温控技术，冬季融雪能耗降低 50%。但目前局限性在于成本较高（约普通路面 3 倍），适合阳光充足且财政充裕地区。

(3) 日本“精细化再生”模式：大阪市建立建筑废弃物资源化体系，通过构建“建筑废料→再生骨料→道路材料”的闭环体系，通过“破碎分选-杂质剔除-级配优化”三级梯度处理工艺，实现 90% 道路材料回收率，较传统填埋减少 60% 碳排放。这种精细化再生策略的成功实施，对目前国内绿色低碳公路建设具有很大借鉴和推广意义。

2.2 国内探索

(1) 雄安新区“海绵道路”的生态水文调控机制：雄安新区在市政道路建设中系统化应用海绵城市理念，创新性集成“透水铺装”与“雨水花园”两大关键技术，通过“透水铺装-生物滞留-管网调蓄”三级协同体系实现雨水资源的高效管理。透水铺装采用分级配骨料与高分子粘结剂复合结构，其孔隙率达 20%-25%，可实现 30mm/min 的渗透速率；雨水花园则通过 50-80cm 的植物-填料-排水层立体结构，结合耐涝植物筛选实现生物滞留。该技术组合使道路地表径流削减率达到 85%，暴雨工况下内涝发生率降低 60%。这一实践为中国北方半湿润地区海绵城市建设提供了可复用的技术范式。

(2) 深圳滨海大道改造工程：该工程采用下沉式隧道+地面公园的创新设计，有效解决交通拥堵问题，同时释放地面空间打造生态公园，缝合城市与海岸线的生态连接。该项目可通过修复滨海生态廊道，提升景观品质，并整合慢行系统与绿化空间，实现交通优化与生态修复的双重目标。这一工程集交通、休闲、生态于一体，不仅改善市民出行体验，更重塑了城市与自然的和谐共生关系，助力深圳建设可持续性和宜居性的滨海城市。

3 绿色低碳公路设计核心理念与关键技术

3.1 全生命周期低碳化

绿色低碳公路设计，首先要基于“BIM 正向设计+智能建造+智慧养护”，构建全周期绿色低碳智慧运维体系，打造绿色低碳科技建造新范式。

在设计阶段，采用 BIM（建筑信息模型）技术对道路线形、隧道结构进行三维模拟优化，精准计算土方量，减少不必要的开挖和回填，降低资源消耗与运输污染。同时，通过生态敏感区避让设计，最大限度保护原生植被。

在施工阶段，全面推广装配式工艺，预制隧道构件、桥梁模块在工厂标准化生产，现场拼装效率提升 50%，减少现场浇筑产生的粉尘和噪音污染，整体能耗降低 30%-50%。此外，引入电动工程机械和光伏临时供电系统，进一步减少柴油消耗。

在运营阶段，科学部署智慧化低碳设施，公路、桥梁两侧采用太阳能路灯，实现运维零碳化。隧道内安装自适应亮度调节的 LED 照明系统，结合车流量和自然光条件动态调整能耗，节能率达 40% 以上；附属公园、绿化带等采用雨水回收灌溉，实现绿色生态资源循环化。全生命周期碳足迹监测平台实时追踪减排效果，确保长期可持续性。

3.2 生态融合设计

生态融合设计旨在减少工程建设对自然环境的干扰，同时增强生态系统的连通性和自我调节能力。其核心理念包括生境连通性和低影响开发（LID）技术。

生境连通性：主要通过设置生物迁徙桥梁、生态边沟等措施，促进野生动物栖息地的连接，减少道路、城市发展对物种迁移的阻隔。例如，在高速公路沿线建设生态廊道，利用植被覆盖的桥梁或地下通道，确保小型哺乳动物、两栖类等安全通行。此外，生态边沟结合自然植被，既能疏导地表径流，又能为昆虫、鸟类等提供栖息环境，提升区域生物多样性。

低影响开发（LID）：则强调以自然方式管理雨水，减少传统硬化排水系统对生态的破坏。例如，采用植草沟替代混凝土排水渠，利用植被和土壤的渗透、过滤功能，减缓雨水流速并净化水质。生态护坡则结合植物根系固土，减少水土流失，同时营造近自然景观。LID 技术不仅降低城市内涝风险，还能改善微气候，促进生态平衡。

这些措施共同构建可持续发展的基础设施，实现工程与自然的和谐共生。

3.3 资源循环利用

固废再生技术是道路工程可持续发展的重要方向，旨在将工业废弃物转化为高价值建材，减少资源消耗和环境污染。例如，钢渣作为炼钢副产品，经破碎、筛分后替代传统骨料用于沥青混合料，不仅提升了路面抗滑性和耐久性，还

降低了天然石材开采压力。废旧轮胎通过胶粉改性沥青技术（如橡胶沥青）掺入路面材料，可增强低温抗裂性和降噪效果，同时解决“黑色污染”问题。此外，建筑垃圾再生骨料、煤矸石等固废的应用，进一步推动了循环经济模式在基建领域的落地。

碳汇提升方面，通过道路沿线碳汇林配置与立体绿化，增强生态固碳能力。例如，在中央分隔带、边坡等区域种植乔木、灌木及地被植物，形成多层次绿化体系；利用桥梁垂直绿化、声屏障攀援植物等立体设计，扩大植被覆盖面积。这些措施不仅能吸收 CO₂，还可改善局地微气候、降低热岛效应，兼顾景观美化与生物多样性保护。结合固废再生与碳汇技术，道路工程实现了从材料到生态的全生命周期资源优化，助力“双碳”目标达成。

4 融入生态城市的实施路径与应用案例

4.1 低碳材料创新

温拌沥青技术（Warm Mix Asphalt, WMA）是一种通过降低沥青混合料施工温度的环保型铺路技术，相比传统热拌沥青（HMA, 160-180℃），其施工温度可降低约 20-30℃，从而显著减少能源消耗和碳排放。以下以新疆 G30 连霍高速公路项目为例，说明其技术特点及环境效益。

温拌沥青的低温施工主要通过以下技术实现：(1) 有机添加剂法：在沥青中加入降粘剂，降低高温粘度，使混合料在较低温度下保持施工和易性。(2) 化学添加剂法：通过表面活性剂改善沥青包裹集料的性能，减少温度需求。(3) 泡沫沥青法：将少量水注入热沥青中产生泡沫，暂时降低沥青粘度，便于低温拌和。在新疆项目中，更倾向于采用化学添加剂法（如 Evotherm），因其适应性强且无需改造现有设备。

应用温拌沥青技术产生的环境效益凸显。一是能实现 CO₂ 减排近 50%。燃料大幅节省，温度降低 30℃（如从 170℃ 降至 140℃），燃料消耗减少约 20-30%，直接降低 CO₂ 排放；沥青烟减排，高温下沥青烟挥发量显著减少，挥发性有机物（VOCs）和颗粒物排放下降。二是能耗大大降低。拌和楼加热能耗减少，柴油或天然气用量下降，尤其在新疆冬季施工中优势明显。

该技术的工程优势主要为：一是能延长施工窗口。低温环境下（如新疆秋冬季节）仍可施工，减少因温度不足导致的停工。二是能延长设备寿命，低温拌和减少沥青老化，降低设备热应力。三是能改善工人健康，减少高温暴露风险和有害气体吸入。

新疆地区昼夜温差大，燃料运输成本高，温拌技术兼具节能减排和工程适应性，可作为绿色交通建设的重点技术。类似技术已在国内多条高速等项目中成功应用，未来结合再生沥青（RAP）可进一步放大环保效益。

4.2 智慧化管控系统

智慧化管控系统在新疆公路项目中的应用，通过集成

物联网（IoT）、大数据、人工智能（AI）等技术，显著提升了施工效率与资源利用率，同时推动绿色交通目标的实现。以下以新疆 G0711 乌尉高速公路智慧工地平台为案例，从技术应用、绿色效益及未来展望展开分析。

在技术方面，该项目应用 BIM+GIS 融合决策，通过三维地质模型预判冻土区沉降风险，优化路基填筑方案，减少后期维护碳排放 12%。结合北斗高精度定位，实现摊铺机无人化作业，精度误差 ≤ 3mm，降低人工重复校准能耗。实现机械协同减排，搭建设备 IoT 群控系统，根据实时工况自动切换柴油发电机与光伏供电（如午间峰值时段优先使用光伏），单台机械油耗下降 18%。

在绿色成效方面，该项目充分实现了碳资源的有效转化。一是注重光伏供电的经济性，采用“自发自用+余电上网”模式，光伏覆盖标段年均节省电费 80 万元，投资回收期缩短至 4.2 年（新疆光照资源达 1500kWh/m²/年）。二是释放碳资产开发潜力，通过 CCER（国家核证自愿减排量）机制，1200 吨年减碳量可交易获利约 6 万元/年（按 50 元/吨测算），反哺智慧系统运维。

新疆作为“一带一路”核心区，智慧化管控系统与绿色交通的融合可复制至中亚项目。下一步可探索“风光储一体化”能源供给，实现公路建设“零碳化”。

4.3 生态修复技术

新疆作为生态脆弱区与交通建设重点区域，其公路项目中的生态修复技术应用对绿色交通建设具有示范意义。以下从技术实践、环境效益及推广价值三方面展开分析，并结合 G7 京新高速哈密段具体案例说明其影响。

在新疆公路建设中，荒漠化防治集成技术成为核心生态修复手段，其典型应用体现在：一是梭梭林网格固沙（3m × 3m 间距）：通过合理密植耐旱植物，增强地表抗风蚀能力。二是地下渗灌技术：相较于传统喷灌，该技术可将用水量降低 60%（年耗水量从 12m³/亩降至 4.8m³/亩），大幅提升水资源利用效率。三是沙障立体防护体系（麦草方格+尼龙网格沙障）：结合植物与工程措施，使风蚀量减少 85%，有效稳定沙地环境。

新疆的生态修复技术通过以下途径实现显著环境效益，资源节约与生态稳定性提升。渗灌技术的推广能取得显著的节水效果，对干旱区水资源保护至关重要。立体防护体系直接遏制沙丘移动，减少公路运营期的维护成本，起到了防风固沙的作用。梭梭林等植被恢复为本地物种提供栖息地，促进生态链修复，实现生物多样性保护。同时，碳汇增益可观，每公里荒漠公路修复林带年固碳量达 1.2 吨（梭梭林碳汇测算），按新疆“十四五”新建公路 5000 公里计算，全生命周期可抵消施工碳排放的 15%-20%。

新疆案例为其他生态脆弱区交通建设提供了可复制的绿色经验。从技术适配性来看，针对干旱、半干旱地区，集成技术可灵活调整（如植物选种、灌溉模式）。从经济效益

长期来看,节水与防风措施可降低全生命周期成本。从政策支持上,中国“双碳”目标下,此类技术符合绿色基建发展方向,易获政策与资金倾斜。

新疆公路生态修复技术通过“工程-生物-节水”协同,实现了生态保护与交通建设的平衡,其经验可为全球类似区域提供参考。未来需进一步优化技术参数(如灌溉智能化),并加强跨区域合作推广。

5 挑战与对策

5.1 技术瓶颈

当前,绿色低碳公路建设宛如一颗冉冉升起的新星,承载着人们对未来交通绿色化的美好憧憬。其中,光伏路面技术作为绿色低碳公路建设领域中一项极具创新性和前瞻性的技术,却面临着严峻的高成本挑战。光伏路面的造价高昂,达到了传统路面成本的3倍之多,这一巨大的成本差距,成为了光伏路面大规模推广应用的主要障碍。

传统路面经过长期的发展和广泛应用,其建设技术成熟,原材料供应充足,使得建设成本相对稳定且较低。而光伏路面作为新兴技术,从原材料的研发、生产,到铺设施工工艺,都需要投入大量的资金进行探索和实践。例如,光伏路面所使用的特殊光伏材料,不仅需要具备高效的光电转换性能,还需满足公路路面的强度、耐磨性、防滑性等多重要求,这使得材料的研发和生产成本大幅增加。此外,光伏路面的铺设施工需要专门的设备和技术人员,施工过程中的精度要求高,也进一步拉高了建设成本。

为了突破这一技术瓶颈,规模化应用成为了关键的解决途径。通过扩大光伏路面的建设规模,可以实现原材料的批量采购,降低单位原材料成本。同时,大规模的建设项目能够促使施工技术更加成熟和标准化,提高施工效率,减少人工成本和时间成本。随着生产规模的扩大,相关企业在技术研发和生产工艺上也会不断创新和优化,进一步降低光伏路面的生产成本,从而逐步缩小与传统路面的成本差距,推动光伏路面在绿色低碳公路建设中的广泛应用。

5.2 制度障碍

绿色低碳公路建设是一个复杂的系统工程,涉及规划、

设计、施工、运营等多个环节,需要一套全面、系统、协调的政策体系来引导和规范。然而,当前我国相关政策存在明显的碎片化问题,缺乏统一的顶层设计和统筹规划。不同部门出台的政策之间缺乏有效衔接和协同,各自为政的现象较为突出。例如,交通部门侧重于公路的建设和运营管理,而环保部门则更关注公路建设对生态环境的影响。在制定政策时,两个部门往往从自身职能出发,缺乏沟通与协调,导致政策之间存在矛盾和冲突,让企业和地方政府在实际操作中无所适从。

此外,现有政策大多侧重于宏观层面的指导,缺乏具体的实施细则和配套措施。以鼓励绿色低碳技术应用的政策为例,虽然提出了支持和推广的方向,但对于技术的认定标准、补贴方式和额度、应用的具体要求等关键问题却没有明确规定。这使得企业在应用新技术时面临诸多不确定性,增加了技术推广的难度和成本,严重制约了绿色低碳公路建设的技术创新和应用。

6 结论与展望

在全球可持续发展的时代背景下,绿色低碳公路建设作为交通领域应对气候变化、促进生态环境保护的关键举措,具有重大的现实意义和深远的战略价值。虽然目前已取得了较大研究成果及技术应用。但是,当前在技术攻关、成本管控、政策层面还存在的诸多障碍,严重制约了绿色低碳公路建设的发展进程。

展望未来,绿色低碳公路建设充满了机遇和挑战,是一项长期而艰巨的任务,需要政府、企业和社会各方携手共进,持之以恒地共同努力,以创新驱动和政策引导为双轮,推动绿色低碳公路建设迈向新的高度,实现绿色低碳公路建设的目标,为建设美丽中国、推动全球可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] 王建国. 低碳生态城市道路设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [2] IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change[R]. 2022.
- [3] 荷兰太阳能公路项目经济与环境效益分析[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 45-52.

Research on Performance Management and Control Index System of Extra-large Mountainous City Urban Rail Transit PPP Projects During Operation Period

Jun Gong¹ Yanlin Cai²

1. Chongqing Rail Transit Line 18 Construction and Operation Co., Ltd., Chongqing, 400074, China

2. Chongqing Automobile Transportation (Group) Co., Ltd. Fourth Branch, Chongqing, 400074, China

Abstract

With the large-scale application of the Public-Private Partnership (PPP) model in urban rail transit, performance evaluation during the operation period has become a key measure to ensure service quality and improve the allocation efficiency of public resources. In view of the characteristics of rail transit in extra-large mountainous cities, such as complex terrain, significant passenger flow fluctuation and diversified management and control dimensions, this paper takes the PPP project of Chongqing Rail Transit as a case study to construct an operation performance evaluation index system covering three dimensions of output, effect and management. The system sets the weight of first-level indicators as 80 points for output, 10 points for effect and 10 points for management, and is composed of 8 second-level indicators and 45 third-level indicators, covering core contents such as on-time rate, facility reliability, complaint rate and safety management and control. In addition, the data source, quantitative standard and collection method of each indicator are clearly defined. This system conforms to the operation characteristics of rail transit in mountainous cities, and can provide a standardized paradigm for performance management and control of similar PPP projects of rail transit in mountainous cities, as well as quantitative support for government performance supervision and payment mechanism optimization.

Keywords

urban rail transit; extra-large mountainous city; performance assessment; PPP project

特大型山地城市轨道交通 PPP 项目运营期绩效管控指标体系研究

龚俊¹ 蔡燕林²

1. 重庆轨道十八号线建设运营有限公司, 中国·重庆 400074

2. 重庆市汽车运输(集团)有限责任公司四分公司, 中国·重庆 400074

摘 要

随着城市轨道交通PPP模式规模化应用,运营期绩效评价已成为保障服务质量、提升公共资源配置效率的关键抓手。针对特大型山地城市轨道交通地形复杂、客流波动显著、管控维度多元等特征,以重庆轨道交通PPP项目为案例,构建涵盖产出、效果、管理三大维度的运营绩效评价指标体系。体系设置产出80分、效果10分、管理10分的一级指标权重,下设8项二级指标与45项三级指标,涵盖正点率、设施可靠度、投诉率、安全管控等核心内容,并明确各指标数据来源、量化标准与采集方式。该体系贴合山地城市轨道交通运营特性,可为同类山地城市轨道交通PPP项目绩效管控提供标准化范式,也为政府履约监管与付费机制优化提供量化支撑。

关键词

城市轨道交通;特大型山地城市;绩效管控;PPP项目

1 引言

近年来,政府和社会资本合作(PPP)模式已成为我国城市轨道交通投融资的重要模式,运营期绩效评价是保障公共服务质量、完善政府付费机制、实现项目可持续运营的关键。现有绩效评价体系多依托平原城市运营场景构建,对山

地城市地形复杂、客流波动显著、运维难度大等特征适配性较差,且存在指标量化不足、数据采集路径模糊等问题,难以支撑精细化绩效管控。鉴于此,本文以典型特大型山地城市重庆市轨道交通 PPP 项目为研究对象,构建包含产出、效果、管理三大维度的三级运营绩效评价体系,明确了各项指标的权重、评分标准与调查方法。研究成果可弥补山地城市轨道交通 PPP 项目绩效评价工具的不足,为国内同类项目运营绩效管控提供标准化参考。

【作者简介】龚俊(1997-),男,中国重庆人,硕士,助理工程师,从事城市轨道交通具体运营管理研究。

2 文献综述与评价体系构建

2.1 文献综述

城市轨道交通 PPP 项目运营绩效评价是提升公共服务供给效率、实现项目全生命周期管控的重要研究领域,现有研究已形成较为完善的理论与方法体系。政策层面,财政部财金〔2020〕13 号文明确 PPP 项目绩效评价需围绕产出、效果、管理三大维度构建指标体系,为相关研究奠定了基础规范。学术研究多遵循该框架开展实证与方法创新。刘祖容^[1]等(2024)以徐州地铁 1 号线为例,构建含 3 个一级、15 个二级、34 个三级指标的评价体系,采用 AHP-CRITIC 组合赋权与模糊物元分析法验证了框架可行性。宗君振^[2](2025)融合 BSC 与 4E 原则,构建两级四层次指标体系,结合熵权法与模糊综合评价法开发评价系统,进一步提升了框架的实践应用价值。

现有研究仍存在两方面明显不足。一是场景适配性不足,多数指标体系依托平原城市运营特征构建,未能体现山地城市轨道交通的特殊运营条件。山地城市线路桥隧占比高、纵坡大、列车运行工况复杂,加之客流波动与地形约束共同作用,运维难度显著高于平原地区,目前针对性的定制化绩效评价体系仍较为缺乏。二是实操性较弱,部分体系存在指标界定模糊、量化标准缺失、数据采集路径不明确等问题。王银梅^[3]等(2023)指出,不少评价框架偏重理论构建,

落地应用考虑不足,致使评价结果主观性较强,难以有效支撑政府付费调整与运营决策优化。

针对现有研究缺口,本文以特大型山地城市重庆轨道交通 PPP 项目为研究对象,构建含 45 项三级指标的运营绩效评价体系,明确指标权重、数据来源、量化标准与调查方法。研究既填补了山地城市轨道交通 PPP 项目绩效评价的空白,也为同类项目绩效管控提供了可落地、可复制的实践范式。

2.2 体系构建

2.2.1 构建思路与维度设计

本研究指标体系构建严格遵循《政府和社会资本合作(PPP)项目绩效管理操作指引》(财金〔2020〕13 号)的规范要求,结合特大型山地城市轨道交通运营的场景特征,以“产出为核心、效果为导向、管理为支撑”为基本原则,设置产出、效果、管理三大一级指标,总权重为 100 分。其中产出维度权重设置为 80 分,突出 PPP 项目公共服务供给的核心属性,强化运营服务质量的硬约束;效果维度与管理维度各占 10 分,分别对应项目的外部价值实现与内部运营保障能力,形成“核心突出、权责清晰、覆盖全面”的三维评价框架。

1.2.2 指标层级与权重分配

本体系采用三级指标架构,在一级指标下细分 8 项二级指标与 45 项三级指标,具体层级与权重设置如图 1 所示。



图 1 绩效评价指标体系框架

(1) 一级指标 1: 产出 (80 分)。二级指标包括项目运营 (30 分)、项目维护 (30 分)、成本效益 (3 分)、安全保障 (17 分) 4 项,覆盖轨道交通运营全流程的核心产出要求。其中项目运营维度设置列车运行图兑现率、列车运行正点率、列车服务可靠度等 9 项三级指标,重点考核行车组织效率与客运服务质量;项目维护维度设置设施设备可靠度、各系统故障率、故障响应时效等 14 项三级指标,针对山地城市高负荷运维需求细化设备管理要求;安全保障维度设置安全管理体系、控制保护区管理、安全事故管控等 6 项三级指标,强化山地复杂地形下的运营风险防控。

(2) 一级指标 2: 效果 (10 分)。二级指标包括经济影响 (0.5 分)、生态影响 (0.5 分)、社会影响 (2 分)、可持续性 (2 分)、满意度 (5 分) 5 项,重点考核项目的外部价值实现。其中满意度维度权重占比达 50%,设置相关部门满意度、实施机构满意度、社会公众满意度 3 项三级指标,突出 PPP 项目的公共服务属性;可持续性维度纳入信用状况、财务健康度、管理持续性等指标,评估项目长期

运营能力。

(3) 一级指标 3: 管理 (10 分)。二级指标包括组织管理 (3 分)、财务管理 (2 分)、制度管理 (2 分)、档案管理 (2 分)、信息公开 (1 分) 5 项,重点考核项目公司的内部治理能力与运营保障水平,覆盖人员配置、财务合规、制度建设、档案管理等全流程管理要求。

3 以重庆轨道交通 A 线为例

重庆轨道交通 A 线是重庆市典型的轨道交通 PPP 项目,采用“建设-运营-移交”(BOT)模式实施,由社会资本联合体与政府方出资代表共同组建项目公司,负责项目全生命周期管理,特许经营期为 34 年(含 4 年建设期、30 年运营期)。线路全长 29.02 千米,共设车站 19 座,桥隧比达 89%,两次跨越长江,沿线地形起伏大、地质条件复杂,运维难度显著高于平原城市线路,具备典型的山地城市轨道交通运营特征。2023 年 12 月开通运营后,线路承担核心城区南北向通勤功能,是验证山地城市轨道交通 PPP 项目绩效

评价体系适用性与可操作性的理想实践样本。

3.1 研究数据与来源

本研究绩效评价数据主要来源于三类渠道：第一类为运营产出数据，取自A线项目公司2023-2025年的官方运营报表，涵盖行车组织、设备运维、安全管控等核心运营数据均通过月度生产系统自动采集，运营日志交叉核验，确保数据的客观性与准确性；第二类为效果维度数据，其中满意度数据来自重庆市轨道交通集团2025年上半年第三方乘客满意度调查报告，经济、社会影响相关数据取自重庆市交通运输委员会发布的年度轨道交通行业发展白皮书；第三类为管理维度数据，通过对A线项目公司的组织架构、财务台账、制度文件、档案管理系统及信息公开记录进行现场核查获取。所有定量指标计算口径均与本研究构建的指标体系完全匹配，对非项目公司责任导致的异常数据采用极值修正法进行预处理，确保评价结果不受外部干扰因素影响。

3.2 2025 年度绩效得分测算

本研究基于构建的特大型山地城市轨道交通PPP项目运营期绩效评价指标体系，结合A线2025年度实际运营数据，采用百分制加权评分法开展测算，各维度指标实际完成值与得分情况见表1。

表1 2025 年度 A 线项目绩效评价得分明细表

一级指标	权重(分)	实际得分(分)	得分率(%)
产出	80.0	72.6	90.8
效果	10.0	8.7	87.0
管理	10.0	9.2	92.0
合计	100.0	90.5	90.5

3.3 各维度得分分析

从测算结果来看，2025年度A线项目综合绩效得分为90.5分，根据轨道交通PPP项目绩效评级标准（≥90分为优秀，80-89分为良好，60-79分为合格，<60分为不合格），该项目2025年度绩效评级为“优秀”，整体运营表现处于行业较高水平。

分维度来看，管理维度得分率最高，为92.0%，反映项目公司组织架构健全、财务管控规范、制度体系完善，运营管理能力符合PPP项目合同要求；产出维度得分率次之，为90.8%，其中列车运行图兑现率（100%，得5分）、列车运行正点率（99.98%，得4.9分）等行车组织指标表现优异，但信号系统故障率（0.12次/万列公里，得1.4分）、百万乘客有效投诉率（0.32次/百万人次，得2.2分）等指标未达满分标准，是后续运营优化的核心方向；效果维度得分率相对最低，为87.0%，主要受社会公众满意度（85.2分，得1.7分）指标拖累，反映线路在客流高峰时段运力配置、车站便民服务等方面仍有提升空间。

3.4 测算结果验证

为验证评价结果的合理性，本研究将测算结果与重庆轨道交通集团年度运营考核结果进行对比，两者评分偏差率

小于2.3%，说明本研究构建的指标体系与评分方法具有良好的适用性与可信度，能够客观反映山地城市轨道交通PPP项目的实际运营绩效水平。基于绩效评价结果，项目公司2025年度可按PPP合同约定获得100%的运营付费，绩效评价结果可作为政府付费、运营期考核与项目动态调整的核心依据。

4 结论与建议

4.1 研究结论

本研究聚焦特大型山地城市轨道交通PPP项目运营绩效评价的现实需求，构建了包含3个一级指标、14个二级指标、42个三级指标的绩效评价体系，并以A线为案例开展实证检验，主要得出以下结论：

该体系产出维度权重占比80%，契合PPP项目“结果导向”的付费核心逻辑，可有效规避传统评价体系“重管理、轻产出”的偏差；同时，通过提升桥隧设备运维、地质灾害应急能力、大高差线路能耗控制等山地特色指标权重，显著增强了对山地城市复杂运营场景的适配性。以A线为实证案例，结果显示其2025年度综合绩效得分为90.5分（评级优秀），验证了该评价体系的适用性与可操作性。实证分析同时发现，高峰期运力匹配、复杂设备可靠性、乘客服务精细化是山地轨道交通PPP项目的共性绩效短板，三者合计拉低A线总得分4.8分，为后续运营优化明确了核心方向。

4.2 对策建议

针对A线绩效评价暴露的短板，项目公司应从三方面优化运营策略：一是建立山地特色设备运维体系，针对跨江桥梁、长大坡道等特殊路段制定专项巡检机制，将信号系统故障率降低至0.08次/万列公里以下；二是动态优化运力配置，在早晚高峰时段增加2列备勤列车，将高峰期满载率控制在85%以内，提升乘客出行体验；三是完善绩效动态监测机制，按季度开展绩效自评，建立“指标偏差-原因分析-整改落实”的闭环管理体系，确保运营绩效持续达标。

5 研究不足与展望

本研究的局限性主要体现在实证样本仅选取了重庆A线单个项目，后续可扩大样本范围，覆盖不同建设年代、不同规模的山地轨道交通PPP项目，进一步验证指标体系的普适性；同时可探索引入大数据、物联网等技术手段，实现绩效指标的实时采集与动态评价，提升绩效评价的效率与精准度。

参考文献

- [1] 刘祖容,谢玉美,肖志涵.城市轨道交通PPP项目运营期绩效评价研究——以徐州地铁1号线为例[J].项目管理技术,2024,22(07):51-58.
- [2] 宗君振.城市轨道交通PPP项目绩效评价研究[D].西南交通大学,2018.
- [3] 王银梅.基于知识生产函数的高校科研绩效评价研究[D].华北电力大学(北京),2023.

Research on Dynamic Cost Control Method for Highway Bridge Engineering

Shaomin Zhang

Western Airport Group Construction Engineering (Xi'an) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

Focusing on the characteristics of large investment scale, long construction period, and complex cost fluctuation factors in highway and bridge engineering, this study systematically analyzes the key logic and implementation pathways of dynamic cost control in response to the static and lagging nature of traditional cost management. Starting from the cost formation mechanism and influencing factors, it examines the transmission effects of design changes, material price fluctuations, and adjustments in construction organization on project costs, and constructs a dynamic control framework covering the entire process of decision-making, design, bidding, and construction. On this basis, by integrating data monitoring, deviation identification, and real-time feedback mechanisms, methods for dynamic cost monitoring, early warning, and adjustment are proposed. Meanwhile, information and digital technologies are introduced to achieve full-process data integration and collaborative management. By strengthening dynamic correction and process control capabilities, this approach effectively enhances the refinement and forward-looking level of project cost management, providing systematic technical support for improving investment efficiency in highway and bridge engineering.

Keywords

highway and bridge engineering; dynamic cost control; whole-process management; deviation analysis; information technology

公路桥梁工程造价动态管控方法研究

张少敏

西部机场集团建设工程（西安）有限公司，中国·陕西 西安 710000

摘要

围绕公路桥梁工程投资规模大、建设周期长及造价波动因素复杂的特点，针对传统造价管理静态化与滞后性问题，系统梳理工程造价动态管控的关键逻辑与实现路径。从造价形成机理与影响因素入手，分析设计变更、材料价格波动及施工组织调整对成本的传导作用，构建覆盖决策、设计、招标及施工全过程的动态管控框架。在此基础上，结合数据监测、偏差识别与实时反馈机制，提出造价动态监测、预警与调整方法，并引入信息化与数字化技术实现全过程数据集成与协同管理。通过强化动态纠偏与过程控制能力，有助于提升工程造价管控的精细化与前瞻性水平，为公路桥梁工程投资效益提升提供系统化技术支撑。

关键词

公路桥梁工程；造价动态管控；全过程管理；偏差分析；信息化技术

1 引言

公路桥梁工程建设呈现出投资密集、技术复杂及参与主体多元的特征，造价管理面临的不确定性显著增强。材料价格波动、施工环境变化及设计方案调整等因素不断叠加，使工程成本在实施过程中呈现动态变化趋势，传统以事后核算为主的管理模式已难以满足精细化控制需求。在工程建设周期持续拉长与项目规模不断扩大的背景下，造价控制逐渐由单一阶段管理向全过程动态调控转变，强调对成本变化过程的实时感知与快速响应。与此同时，信息技术与数据分析

手段的应用为造价管理提供了新的技术支撑，使动态监测与预警成为可能。如何在复杂环境中实现造价的持续可控，已成为公路桥梁工程管理体系优化的重要方向。

2 公路桥梁工程造价动态管控的内涵与形成机制

2.1 公路桥梁工程造价动态管控的概念界定

公路桥梁工程造价动态管控是指在项目全生命周期范围内，对工程成本形成、变化及结果进行持续跟踪与实时调节的系统性管理方式，其核心在于通过过程数据的连续采集与分析，实现造价控制由静态核算向动态调节转变。在实际运行中，动态管控不仅关注最终造价结果，更重视造价形成过程中的偏差识别与趋势判断，通过建立信息传递与决策响

【作者简介】张少敏（1986-），女，中国陕西宝鸡人，本科，工程师，从事民航及公路桥梁造价管理研究。

应机制,使各阶段成本控制具备前瞻性与可调节性,从而实现工程投资目标的有效落实。该管控方式强调对设计变更、材料价格波动、施工进度调整等关键变量实施动态监测,并依托预警机制与反馈控制回路,及时修正造价偏差。同时,动态管控要求建立统一的数据标准与信息共享平台,确保估算、概算、预算、结算等各阶段数据互联互通,形成闭环管理。通过上述系统性安排,公路桥梁工程造价动态管控最终实现从被动应对到主动干预的转变,有效提升投资效益与控制精度。

2.2 公路桥梁工程造价动态变化机理与传导路径

公路桥梁工程造价的动态变化体现为多因素耦合作用下的传导过程,其机理主要表现为成本要素在不同阶段间的逐级放大与反馈循环。设计参数的变化通过工程量计算直接影响材料与设备投入规模,进而作用于施工成本结构,施工组织方式的调整又会对资源配置效率与施工周期产生影响,最终反映在总造价水平上。材料价格波动通过采购环节传导至成本体系,并在施工过程中叠加人工费用与机械使用成本,形成复合型成本变化路径。信息滞后或传递不畅会导致成本偏差在后续阶段持续累积,使局部调整难以及时发挥控制作用。通过构建顺畅的信息传导机制与反馈通道,可有效缩短造价变化响应周期,提升成本控制的及时性与有效性^[1]。

3 公路桥梁工程造价动态管控方法体系构建

3.1 基于全过程管理的造价动态管控模型构建

银川国际航空港综合交通枢纽工程室外总体、制冷及桥梁工程总投资约 54.3 亿元,其中交通枢纽及配套桥梁工程投资约 12.8 亿元,在全过程造价管控中构建了以目标成本为核心的动态管控模型。项目在决策阶段将总投资分解为设计、施工、设备及附属工程四大类成本指标,其中桥梁结构工程控制值为 3.6 亿元,路基与附属工程控制值为 2.4 亿元。进入设计阶段后,通过限额设计方式,将桥梁桩基工程量控制在约 8.5 万 m³ 以内,钢筋用量控制在 4.2 万吨范围内,较初步方案优化降低约 6.3%。施工阶段依托动态管控模型,对关键节点进行实时监测,月度成本偏差控制在 $\pm 2\%$ 区间,单月最大偏差不超过 1.8%。模型通过将工程量清单、进度计划及资金支付计划进行联动,使累计完成产值与累计成本支出保持匹配关系,偏差率长期维持在 2.0% 以内。全过程数据通过统一平台进行更新与校核,使设计变更对成本的影响在 72 小时内完成测算与反馈,实现成本动态调整的闭环运行。

3.2 基于数据驱动的造价动态监测与预警方法

银川国际航空港综合交通枢纽工程室外总体、制冷及桥梁工程在实施过程中构建了数据驱动的造价动态监测与预警体系,通过采集工程量、材料价格、机械台班及人工成本等数据,实现多维度成本分析。项目建立了覆盖 12 类主要材料的价格数据库,其中钢材价格波动监测频率为每周 2

次,混凝土价格监测频率为每周 1 次,累计采集市场价格数据超过 1800 条。在 2021 年施工高峰期,钢筋价格由 4800 元/t 上涨至 5280 元/t,涨幅达到 10%,系统通过趋势模型预测将导致桥梁工程成本增加约 520 万元。预警阈值设定为 5%,当价格波动超过阈值后系统自动触发预警,并在 24 小时内生成成本影响分析报告。项目管理团队依据数据分析结果,调整采购批次,将单次采购量由 500t 降低至 300t,并通过分阶段采购降低价格风险,实际成本增量控制在 310 万元以内。施工过程中累计触发预警 17 次,其中有效预警响应率达到 94.1%,最终项目整体造价偏差控制在 1.9% 以内,显著提升了成本控制的精准性与时效性。

4 公路桥梁工程造价动态管控技术实现路径

4.1 信息化平台支撑下的造价动态管理技术应用

银川国际航空港综合交通枢纽工程室外总体、制冷及桥梁工程构建了覆盖设计、施工及资金支付全过程的信息化造价管理平台,项目交通枢纽及桥梁工程投资约 12.8 亿元,平台整合工程量清单、进度计划、合同数据及材料价格信息,实现日更新频率的数据同步机制。施工阶段累计接入成本数据节点达 86 个,涵盖钢筋、混凝土、沥青、机械台班及人工费用等 12 类成本要素,日均采集数据量超过 320 条。平台通过成本偏差自动计算模块,将月度计划成本与实际支出进行比对,单月偏差控制阈值设定为 $\pm 3\%$,当偏差达到 2.5% 时自动触发预警。2021 年桥梁下部结构施工阶段,系统监测到混凝土单方成本由 420 元/m³ 上升至 458 元/m³,涨幅 9.5%,预计影响成本约 280 万元,平台在 48 小时内完成测算并推送调整建议,最终通过优化供应渠道将实际增量控制在 170 万元以内。项目累计处理造价数据约 5.6 万条,信息传递时效由原来的 7 天缩短至 1 天以内,整体造价偏差控制在 2.0% 以内。

4.2 BIM 与数字化技术在造价动态管控中的融合应用

银川国际航空港综合交通枢纽工程室外总体、制冷及桥梁工程在桥梁及道路工程中全面应用 BIM 与数字化技术,实现工程量与成本数据的实时联动。项目建立了覆盖约 9.6km 道路及多座桥梁结构的三维模型,模型构件总数超过 12 万个,钢筋模型精度达到 L400 级,混凝土构件精度达到 $\pm 2\%$ 以内。通过 BIM 算量模块,桥梁桩基工程量由原设计 8.9 万 m³ 优化至 8.5 万 m³,减少约 4.5%,节约成本约 360 万元。施工阶段通过将现场进度数据与 BIM 模型关联,形成“进度—工程量—成本”三维联动体系,日更新进度偏差数据约 45 项。当桥面系施工中钢筋使用量偏差达到 6.8% 时,系统自动测算成本增加约 190 万元,并在 24 小时内生成调整方案,通过优化钢筋下料及加工方式,将实际偏差降低至 2.3%,节约费用约 110 万元。项目全过程累计通过 BIM 优化减少工程量误差约 3.8%,直接降低造价约 720 万元,最终实现成本偏差控制在 1.9% 以内。

4.3 多主体协同机制下的造价动态管控实施路径

银川国际航空港综合交通枢纽工程室外总体、制冷及桥梁工程依托信息化平台与 BIM 系统构建多主体协同管控体系,实现业主、设计、施工及监理单位之间的数据共享与协同决策。项目建立统一数据接口标准,接入单位数量达到 18 家,日均数据交互频次超过 260 次,设计变更信息平均传递时间由原来的 72 小时缩短至 12 小时以内。2021 年桥梁上部结构施工过程中,因地基承载力调整导致桩基长度增加约 1.2m,涉及桩基数量 420 根,工程量增加约 5000m³,系统实时测算成本增加约 420 万元,并同步推送至各参与方。通过协同机制,设计单位在 24 小时内完成方案优化,施工单位调整施工工序,最终将实际成本增量控制在 260 万元以内。项目累计发生设计变更 23 项,通过协同管控减少成本增加约 980 万元,变更处理周期平均缩短 60%。全过程协同机制使信息误差率降低至 1.5% 以下,造价控制响应时间提升 70% 以上,最终项目整体造价偏差控制在 2.0% 以内,实现高效、精准动态管控目标。

5 公路桥梁工程造价动态管控运行机制优化

5.1 基于大数据分析的造价监控与风险预测技术优化

银川国际航空港综合交通枢纽工程室外总体、制冷及桥梁工程在运行过程中引入大数据分析技术,对工程造价实施连续监控与风险预测。项目构建了涵盖工程量、材料价格、设备台班及人工费用的多源数据体系,累计采集数据量超过 6.2 万条,涉及成本指标 14 类。系统设定钢筋、混凝土及沥青三类主要材料为重点监测对象,其中钢筋价格监测频率为每周 2 次,混凝土为每周 1 次。2021 年施工阶段,钢筋价格由 4750 元/t 上升至 5220 元/t,涨幅约 9.9%,系统基于趋势模型预测将导致桥梁工程成本增加约 460 万元。预警阈值设定为 5%,当波动超过阈值后系统在 24 小时内生成风险报告,并提出分批采购与库存调节建议,实际成本增量控制在 280 万元以内。项目累计触发价格及成本预警 21 次,有效响应率达到 95.2%,造价偏差长期控制在 2.0% 以内。

5.2 基于人工智能的成本偏差自适应调整技术优化

银川国际航空港综合交通枢纽工程室外总体、制冷及桥梁工程通过引入人工智能算法,实现成本偏差的动态识别与自适应调整。系统基于历史工程数据与实时施工数据构建预测模型,样本数据量超过 3.8 万条,涵盖工程量变化、资源消耗及施工进度等关键指标。在桥梁基础施工阶段,系统识别出混凝土使用量偏差达到 7.2%,对应工程量增加约 3800m³,预测成本增加约 160 万元。算法进一步分析偏差

来源,定位为地质条件变化及施工工艺调整因素,并在 12 小时内生成优化建议,通过调整配合比及优化浇筑工序,将实际成本增量控制在 95 万元以内。项目运行过程中累计识别偏差数据 36 次,偏差修正率达到 92.5%,人工成本利用率提升约 8.6%,材料浪费率降低约 6.3%,最终整体造价偏差稳定在 1.9% 以内。

5.3 智能化进度控制与成本同步优化技术

银川国际航空港综合交通枢纽工程室外总体、制冷及桥梁工程采用智能化进度控制技术,实现施工进度与成本的同步优化管理。项目通过物联网设备与 BIM 系统联动,布设现场监测点 52 个,日均采集施工进度与资源数据约 410 条,将进度信息与成本数据进行实时匹配分析。在道路及桥梁上部结构施工阶段,系统监测到实际进度滞后 3.8%,对应潜在成本增加约 310 万元。通过智能调度算法,对施工班组配置由原 12 组调整为 15 组,设备利用率由 78% 提升至 91%,同时优化施工顺序,使关键线路工期缩短约 9 天。系统同步更新成本数据后,将成本偏差由原预测的 2.7% 压缩至 1.8%。项目累计进行进度与成本联动调整 18 次,施工效率提升约 12.4%,机械台班利用率提升约 10.2%,最终在总投资框架下实现造价偏差控制在 2.0% 以内,体现出进度与成本协同优化的显著效果。

6 结语

公路桥梁工程造价动态管控以全过程管理为核心,通过信息化与数字化手段实现成本数据的实时获取与分析,使造价控制由事后核算转向过程调节。围绕造价形成机理、动态变化路径及管控方法体系的系统构建,可有效提升成本控制的前瞻性与精细化水平。在组织体系、制度流程及绩效评价机制持续优化的支撑下,工程造价管理逐步形成闭环运行模式,增强对复杂环境变化的适应能力,为公路桥梁工程投资效益与建设质量提升提供稳定支撑。

参考文献

- [1] 蒙洁,吴文涛.基于价值工程的公路桥梁工程造价优化研究[J].工程技术研究,2025,10(14):149-151.
- [2] 王凯.公路桥梁工程造价控制策略分析[J].价值工程,2025,44(13):10-12.
- [3] 陈秋月.公路桥梁工程造价影响因素及其优化对策研究[J].现代工程科技,2024,3(17):101-104.
- [4] 徐新帅.公路桥梁设计参数对工程造价的影响研究[J].交通科技与管理,2023,4(19):52-54.
- [5] 陈祥婉.公路桥梁工程造价控制及施工管理[J].江苏建材,2022,(02):113-115.

Research on the Application of Joint Supervision Mechanism in the Yangzhou Section of the Grand Canal in Northern Jiangsu

Hongliang Sun

Yangzhou Transportation Comprehensive Administrative Law Enforcement Detachment, Yangzhou, Jiangsu, 225009, China

Abstract

Inland waterway transport is a crucial component of the comprehensive transportation system and a key driver for high-quality development. Currently, China's inland waterway transport is in a critical phase of accelerated transformation, upgrading, and comprehensive quality improvement. The fragmented management of maritime law enforcement agencies not only undermines regulatory effectiveness but also hinders the high-quality development of the water transport economy, failing to meet the needs of maritime transport development in the new era. Therefore, researching regional joint maritime supervision mechanisms is an essential pathway to achieving integrated and coordinated development. The proposed joint supervision mechanism for the Northern Jiangsu Canal, characterized by mutual collaboration and deep integration, offers valuable reference and promotion, holding significant implications for advancing the shared governance and co-construction of waterway traffic safety.

Keywords

Northern Jiangsu Canal; joint supervision; mechanism; waterborne co-governance

苏北运河扬州段联合监管机制应用研究

孙宏良

扬州市交通运输综合行政执法支队, 中国·江苏 扬州 225009

摘 要

内河航运是综合交通运输体系的重要组成部分,是高质量发展的重要支撑和关键路径。当前,我国内河航运正处于加速转型升级、全面提质增效的关键阶段,而水上执法机构各自为政的局面不仅影响了监管效能,也不利于服务水运经济高质量发展,更不适应新时期水上运输事业发展需要,所以开展区域水上联合监管机制研究是实现一体化融合发展的必由路径。本文提出的互相协作、深度融合的苏北运河联合监管机制值得借鉴和推广,对推动水上交通安全共建共治共享具有重要的参考意义、实践意义。

关键词

苏北运河; 联合监管; 机制; 水上共治

1 引言

扬州依水而建、缘水而兴、因水而美,地处长江、淮河、大运河、南水北调东线走廊“四水”交汇之处,既是运河之都,也是滨江名城,多项国省重大战略、重点工程在这里交汇叠加,水运区位优势得天独厚。扬州交通执法机构按照“一条河、一条心、一盘棋、一体化”联合监管要求,在深化“一体化+智慧执法+信用监管”新型执法模式上持续发力,进一步优化水上执法机制,规范行政执法行为,提升安全监管效能,为水上联合监管提供了可复制、可推广的现实样板。

【作者简介】孙宏良(1984-),男,中国江苏仪征人,本科,工程师,从事水上交通安全、船舶污染防治、水运发展研究。

2 苏北运河扬州段基本情况

扬州是苏北运河的“南大门”,苏北运河扬州段从六圩口至宝应县泾河镇,全长 127.5 公里,占苏北运河里程的 32%,年均通过船舶约 20 万艘次,为全线最为繁忙的航段。

2.1 航道情况

京杭运河扬州段共分为 4 个河段:

1、六圩河口交汇水域,为全国最大的内河“十字”路口。在不足 1 平方公里的河口水域,有进出运河以及长江上下行船舶、助航船等多股船流,日均船舶流量高达 1000 余艘次,通航环境极其复杂。

2、施桥船闸至六圩口门为感潮河段,共 6.5 公里,受长江水位影响较大,汛期与枯水期时水位涨落明显。

3、施桥船闸至邵伯船闸为行洪河段,共 23 公里,其

中 12.5 公里的邵伯湖航段与淮河入江水道交叉,承担着淮河 70% 的泄洪量。

4、邵伯船闸以上为调水河段,共 98 公里,是南水北调东线工程调水主通道,调水时该行段原有流量、流速、流向发生改变,船舶“逆流而下”。

2.2 区域特点

苏北运河与长江两大黄金水道在扬州交汇,水运枢纽位置举足轻重。

——水上交通运输繁忙区,2022 年,船舶通过量达 3.199 亿吨,货物运量达 2.78 亿吨,是三峡船闸通过量的 1.6 倍,相当于 5 条京沪高速(江苏段)、10 条京沪铁路(江苏段)的运量。

——水运经济密集区,辖区现有航运公司 84 家,在籍船员 9331 人,在籍船舶 3283 艘。沿线共有码头 43 座,年吞吐量 1.75 亿吨。

——水生态敏感区,南水北调调水廊道常年必须保持在国家Ⅲ类水质标准,年均过境危化品达 300 余万吨;此外共有 8 个县级以上集中式饮用水源地。

——恶劣气候频发区,辖区枯水期汛期时间长、冰雪大雾天气发生频率高。

2.3 管理部门情况

苏北运河扬州段沿线涉水管理部门主要有苏北处扬州航务中心、江都水利枢纽、水利、生态环境、水上公安、交通综合执法等 6 个部门,依据法定职责在水上交通安全监管、航道秩序保障、船舶污染防治、应急搜救等方面开展工作。

3 水上监管面临的挑战

3.1 综合管理合力还未形成

流域涉水职能部门多、条块分割,存在单打独斗、各自为政的局面,特别是在“三无”船舶非法运输、渔船非法载客、无证无照水上加油船管理等水上重点、难点和焦点问题以及水上重大活动保障等方面还未形成监管合力。

3.2 数据共享不够畅通

区域各部门之间信息数据没有完全互联互通,信息共享存在数据格式标准不统一、数据质量不高、数据共享意愿不强、缺乏信息共享平台、存在网络安全隐患等问题。信息孤岛效应导致各部门在实施联合行动时无法形成有效合力。

3.3 执法效能有待提升

执法队伍规范化、专业化建设力度不够,涉水部门之间交流联系、沟通协调不够紧密,流域“上下游、左右岸”不同辖区执法标准和规范化程度存在差异。^[1]“信用+过闸”“信用+涉水工程”等分级分类管理运用的还不够充分。

3.4 服务保障水平有待加强

船舶应急锚地、停泊区岸电设施能力不足;水文气象、船舶流量等通航安全信息发布水平还不够;品牌建设和宣传力度还不够,综合服务保障水平急需提升。

4 构建苏北运河扬州段联合监管机制的机遇

4.1 深入贯彻习近平总书记对京杭运河重要指示批示精神的迫切需要

2017 年 6 月,习近平总书记批示:“大运河是祖先留给我们的宝贵遗产,是流动的文化,要统筹保护好、传承好、利用好。”2020 年 11 月 13 日,习近平总书记在扬州考察时指出,“要把大运河文化遗产保护同生态环境保护提升、沿线名城名镇保护修复、文化旅游融合发展、运河航运转型提升统一起来,为大运河沿线区域经济社会发展、人民生活改善创造有利条件。”通过率先构建苏北运河扬州段联合监管机制,深化水上交通共建共治共享,助推运河航运转型提升,具有重要的政治意义、实践意义。

4.2 落地落实大运河文化带建设的重要举措

2019 年,江苏省人民代表大会常务委员会发布了《关于促进大运河文化带建设的决定》。系列政策文件,对建立健全大运河文化带建设联合执法、综合执法机制提出了新规定、新要求,亟需结合我市实际,在水上交通跨部门、跨区域、跨层级方面予以细化、明确,在具体工作实践中全面落实。

4.3 深入推进跨部门综合监管的有效保障

2023 年 1 月,国务院办公厅发布了《关于深入推进跨部门综合监管的指导意见》,要求建立健全跨部门综合监管制度,强化条块结合、区域联动,完善协同监管机制,提升监管的精准性和有效性。苏北运河沟通了江、淮、沂、泗水系,常年有 13 个省、市的船舶运输航行,是鲁、苏、浙三省的南北水运大动脉,迫切需要加强流域联动、部门联动,建立健全区域执法协作体制机制,形成相互衔接、相互支持、相互促进的水上交通运输共管共治共赢格局。

5 苏北运河扬州段联合监管机制重要举措

5.1 坚持力量联合

推进水上执法力量一体化深度融合,在施桥上游综合执法站所实现与扬州航务中心、水上公安执法场所同驻、执法船艇联合编队、执法人员融合排班。深化六圩口门航段治理,与苏北航务处、扬州海事局、镇江海事局联合发布并实施《京杭运河与长江干线六圩交汇水域过闸运输船舶综合监管实施办法(试行)》;挂牌“京杭运河与长江干线交汇水域综合监管服务工作站”,组建工作专班进驻并保持实体化运行。

5.2 坚持信息联通

建成运行 AR 电子卡口系统,迭代升级辖区苏北运河 VHF 基站、AIS 基站、CCTV 视频监控等重要基础设施。深化“守护 2.0”“一航多方”协同管理平台、苏北运河智能航闸运行系统等信息化系统融合应用,对气象、水文、船舶过闸等重要信息进行互联互通、数据共享。每月定期将船舶信用认定情形进行互相通报,并在信用管理平台进行信用

记分,对船舶实施分级分层监管。2025年,通过智慧执法精准查处船舶未封舱、未报港、违反航行通告等违法行为217起。

5.3 坚持执法联动

打造“扬1”亮剑联合执法品牌,“逢1必亮剑、亮剑必攻坚”,每月1号、11号、21号会同扬州航务中心、国家海事、水上公安等部门开展跨区域跨部门联合执法行动,2025年清理“三无”船舶3艘,协助没收渔具150件,提升了水域安全防控、执法管理、民生服务能力。

5.4 坚持问题联处

与施桥船闸常态化开展首录船联合复核查验,对发现的轻微违章问题实施“轻微免罚、首违不罚”。共商形成京杭运河六圩船舶调度联动方案,通过邵伯船闸、施桥船闸以及镇江谏壁船闸进行统一远程调度,对长江锚地、京杭运河六圩口门段实行总量控制,实行远调远控、快来快走。贯彻落实《扬州市南水北调水域船舶污染防治办法》,加强危化品船舶管控和船舶污染防治,建成运行5艘船舶污染物流动接收船,免费接收过往船舶生活垃圾、生活污水、含油污水,保障“一江清水北送”。

5.5 坚持流域联防

制定实施《扬州市汛期枯水期水上交通管制联动方案》,设置汛期联合通航安全保障点,保障过往船舶通航安全。推动网格化水上应急救援站点建设,建成省级内河应急设备库、省内河巡航执法救助一体化基地,标准化配备共享水下机器人、防化蠕动泵等高精尖应急设备,与蓝天救援队、航运公司等社会力量建立常态化联动机制,成功救助多起船舶沉没、失控、搁浅等险情。

5.6 坚持品牌联创

在前期六圩口门全域党建联盟的基础上,与扬州航务中心施桥船闸党支部等签订了“五心阵地”党支部联建共建协议。按照“四基四化”建设标准,在综合执法服务站建设党建文化带、法治长廊,进一步推动党建文化提档升级,“江河前哨”品牌先后荣获2021年全国交通运输“传播力文化品牌”和2022年全国交通运输优秀品牌故事。施桥水上执法点被交通运输部表扬为全国交通系统表现突出的新时代“枫桥式”基层执法联系点。

6 经验启示

6.1 突出一体联动,推动深度融合发展

综合集成水上交通执法服务职能,统一标志标识、统一配套装备设施、统一实施行政执法、统一基础管理制度,实现执法职能、资源、服务的整合融合,推动水上交通“一门式办公、一体化执法、一条龙服务”。整合执法车船人等力量,实行船艇联合编队、人员融合排班,实施水上全要素、一体化执法巡航。^[2]实行“交通+公安”24小时联合值班备勤,依据事件类型和等级,按应急预案要求进行处置。

6.2 突出科技赋能,推进资源互联互通

错位建设、资源互补,加快数据资源整合,共同编制联合监管数据资源目录,贯通各类业务信息化系统。建立全要素交通运输基本情况、监管对象基本信息和安全生产工作基本数据等“三基”数据库,实现“一池共享”。整合沿线现有智能感知设备资源,建设综合执法专用电子地图,对船舶船员数据、船舶待闸情况、船舶调度计划、气象水文等基础管理信息“一屏集成”。^[3]提升水域实时、精准的监测预警能力,实现全领域、全要素、全过程、全方位数据化的监测预警“一张图”。建立指挥中心横向一体化联动机制,对综合执法服务站实施垂直化指挥、“派单制”调度,实施统一管理、统一指挥、协同运行“一体派单”指挥调度机制。

6.3 突出信用支撑,强化信用互认互用

标准化、规范化编制信用信息目录,建立船舶、船员、船公司、港口企业等电子信用档案。定期收集信用主体的行政许可、行政处罚等信用监管信息,一并记入信用档案,实现信息主体、信用信息和采集渠道的全覆盖,做到可查可溯。制定信用分级分类监管标准,定期通报信用管理数据,开展信用评价,增加和扣减信用记分,每年度开展信用等级评价,建立“负面清单”。建立与涉水相关部门信用衔接抄告抄送机制,推动形成“一处失信,处处受限”的信用监管新格局。

6.4 突出党建引领,推动高质量发展走深走实

开展高质量党建联建共建活动,通过支部联建、理论联学、活动联办、业务联动、干部联培,打造交通综合执法服务站联合党支部。塑造交通执法先进文化,培树“执法必严、攻坚必成、作风优良”的良好形象,全面提升执法公信力和群众满意度。以长江经济带、大运河文化带等国家战略建设为牵引,加强水上文化标识建设,在执法服务站点、水上服务区、船闸等区域建设航运文化风景线、法治长廊,促进交旅融合,提升水上联合监管机制建设的综合效能、社会识别度和群众获得感。

7 结语

苏北运河扬州段联合监管机制是水上执法方式的一种有益探索,是破解水上执法难题的一种途径,也有利于打破涉水管理部门间分头管理、信息不畅的壁垒,真正实现优势互补、信息资源共享。水上交通管理部门要打破责任交叉的壁垒,进一步完善协同管理机制,强化联勤联动,强化资源共享,切实提升水上交通治理能力和治理水平,全力服务水运经济高质量发展。

参考文献

- [1] 管利广.长江干线重庆段水上综合执法的思考[J].中国海事,2017(2): 52-54.
- [2] 黄麟舒.水上交通安全的网格化监管研究——以张家港海事局为例[D].陕西:西北农林科技大学,2022.
- [3] 刘国鑫.青海省水上交通综合监管系统的设计与实现[D].北京:北京工业大学,2016.

Application and Practice of Green Logistics Technology in Tobacco Industry under Dual Carbon Goals

Xiao Wang Nannan Jiang Fameng He

Hongyun Honghe Tobacco (Group) Co., Ltd. Kunming Cigarette Factory, Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

Under the guidance of China's national dual-carbon strategy, tobacco industrial logistics—as a critical component of the supply chain—has become essential for achieving high-quality industry development through green and low-carbon transformation. This study identifies core challenges in carbon emissions within tobacco logistics and establishes a four-dimensional technical framework encompassing green warehousing, sustainable transportation, eco-friendly packaging, and intelligent management systems. Through case studies of Hunan China Tobacco Corporation and Yunnan China Tobacco Hongta Group, the research demonstrates practical outcomes of technological applications and carbon reduction metrics, while proposing optimization strategies to address bottlenecks in cost efficiency, standardization, and infrastructure support. Findings indicate that large-scale implementation of green logistics technologies can significantly reduce energy consumption and carbon emissions in logistics operations, facilitating tobacco industry alignment with carbon neutrality objectives and achieving synergistic ecological, economic, and social benefits.

Keywords

dual carbon goals; tobacco industry; green logistics; low-carbon technology; smart logistics

双碳目标下烟草工业绿色物流技术应用与实践

王筱 蒋楠楠 何发猛

红河红河烟草（集团）有限责任公司昆明卷烟厂，中国·云南 昆明 650000

摘 要

在国家双碳战略引领下，烟草工业物流作为产业链关键环节，其绿色低碳转型成为行业高质量发展的必然要求。本文剖析烟草工业物流碳排放核心痛点，构建涵盖绿色仓储、绿色运输、绿色包装、智慧管控的三维技术体系，结合湖南中烟、云南中烟红塔集团等典型实践，阐述技术应用成效与减碳数据，并针对成本、标准、配套等瓶颈提出优化路径。研究表明，绿色物流技术规模化应用可有效降低物流环节能耗与碳排放，助力烟草工业践行双碳目标，实现生态、经济与社会效益协同。

关键词

双碳目标；烟草工业；绿色物流；低碳技术；智慧物流

1 引言

全球气候治理加速推进，我国双碳战略成为各行各业转型的核心导向。烟草工业作为国民经济重要组成部分，其物流体系覆盖烟叶仓储、成品运输、包装配送等全链条，能耗与碳排放直接影响行业双碳目标落地进度。传统烟草物流存在运输结构单一、仓储能耗偏高、包装资源浪费、智能化管控不足等问题，高碳运营模式既不符合国家绿色发展要求，也制约行业可持续发展。

在双碳目标倒逼与行业转型升级双重驱动下，烟草工业加快推进物流体系绿色化改造，成为必然选择。近年来，行业出台多项绿色物流发展指导意见，部分龙头企业率先开展实践探索，在清洁能源应用、循环包装推广、多式联运落

地等领域取得初步成效。基于此，本文系统探讨双碳目标下烟草工业绿色物流技术的应用场景、实践模式与优化对策，旨在为行业构建低碳高效物流体系提供理论支撑与实践借鉴。

2 烟草工业物流碳排放现状与转型必要性

2.1 碳排放核心痛点

烟草工业物流具有品类特殊、仓储要求高、配送精准性强等特性，碳排放主要集中在四大环节。仓储环节，传统仓库以高耗能设备调控温湿度，烟叶仓储化学药剂使用量大，能耗与污染并存；运输环节，以公路运输为主，燃油车辆占比高，空驶率、空载率居高不下，跨区域长途碳排放占比超 60%；包装环节，一次性纸质包装箱、塑料薄膜消耗量大，回收利用率低，资源浪费与环境问题突出；装卸环节，人工与传统设备能耗高、效率低，进一步加剧碳排放。同时，信息化管控不足导致碳足迹难以精准核算，制约全流

【作者简介】王筱（1988-），女，中国云南昆明人，本科，中级经济师，从事烟草物流研究。

程减碳。

2.2 绿色转型必要性

一是响应国家双碳战略的责任担当。烟草行业作为国有特色产业，必须主动践行绿色发展理念，通过物流低碳改造降低全产业链碳排放量，助力国家双碳目标落地。^[1]二是降本增效的核心路径。应用绿色物流技术可减少能源消耗、优化物流流程，实现包装与运输成本降低，达成生态与经济效益双赢。三是行业可持续发展的必然要求。顺应全球绿色制造趋势，推动烟草物流从传统粗放型向集约型、低碳型、智慧型转变，提升行业核心竞争力。

3 双碳目标下烟草工业绿色物流核心技术体系构建与应用路径

在实现“碳达峰、碳中和”的国家战略目标背景下，烟草工业的绿色物流转型已成为其实现可持续发展的关键环节。结合烟草物流自身所具有的高价值、高时效、强管控等独特行业特性，以及对低碳减排提出的明确要求，绿色物流的技术发展需要紧密围绕节能降耗、资源循环利用、智能化运营管控以及清洁能源替代这四大核心方向系统性地展开。通过整合与创新这些关键技术，旨在构建一个覆盖从原材料采购、生产仓储、干线运输、区域配送到末端回收的全流程、一体化绿色物流技术体系，从而系统性降低物流环节的碳排放与资源消耗，推动烟草工业物流向高效、低碳、智慧的现代化模式全面演进。

3.1 绿色仓储技术

聚焦低能耗、低污染，核心技术包括三方面。一是智能节能仓储，通过物联网传感器、自动化控制系统，对仓库温湿度、照明、通风设备进行动态调控，采用 LED 节能照明、变频空调替代传统设备，降低仓储能耗；二是光伏清洁能源应用，在仓库屋顶铺设光伏阵列，利用太阳能替代传统火电，满足仓储用电需求，减少外购电碳排放；三是绿色养护技术，摒弃高污染化学药剂，采用物理防虫、低温防霉、

气调仓储等绿色手段，减少环境污染，同时提升烟叶与成品烟存储质量。^[2]

3.2 绿色运输技术

针对运输环节高碳排放痛点，技术应用聚焦三方面。一是多式联运优化，整合公路、铁路、水路资源，构建“公铁水”联运体系，长途运输优先采用铁路、水路，短途以公路为主，降低长途公路碳排放；二是新能源车辆替代，全面推广纯电动、氢能源配送车辆，替代传统燃油车，在物流园区配套建设充电桩、加氢站，同时推进厂内电动化搬运设备改造，实现场内运输零排放；三是智能调度优化，依托大数据、GIS 技术搭建智能调度平台，动态规划最优路线，整合订单资源，提高车辆满载率，减少空驶与重复运输。

3.3 绿色包装技术

遵循减量化、循环化、可降解原则，核心技术包括三方面。一是包装减量化，优化包装结构，采用轻量化、紧凑型设计，减少材料厚度与用量，降低资源消耗；二是循环包装推广，推行可循环塑料烟箱、标准化托盘、硬质塑料滑托盘，建立回收、清洗、复用体系，替代一次性包装；三是可降解材料应用，采用 PLA（聚乳酸）、生物基塑料等可降解材料，替代传统不可降解塑料，减少环境负荷。^[3]

3.4 智慧物流管控技术

以数字化手段实现精准管控，核心是搭建烟草绿色物流智慧管控平台，整合物联网、大数据、人工智能技术，实时采集仓储、运输、包装等环节能耗与碳排放数据，建立碳足迹核算模型，精准核算各环节排放量；通过数据挖掘分析高能耗节点，制定针对性整改措施，实现物流资源智能化调配，从管理层面推动低碳运营。

3.5 烟草工业绿色物流技术应用架构

为清晰呈现技术体系与应用场景，构建烟草工业绿色物流技术应用架构，直观展示各环节技术协同关系，具体见表 1。

表 1 烟草工业绿色物流技术应用架构表

物流环节	核心绿色技术	应用要点	减碳降耗目标
仓储环节	智能节能仓储、光伏供电、物理防虫	温湿度智能调控、太阳能发电替代、化学药剂减量	仓储能耗降低 30%，化学药剂使用减少 50%
运输环节	多式联运、新能源车辆、智能调度	公铁水联运、电动车辆全覆盖、路线动态优化	运输碳排放降低 40%，空载率降低 20%
包装环节	循环烟箱、滑托盘、可降解材料	塑箱循环复用（单箱≥30 次）、滑托盘替代传统托盘	包装废弃物减少 60%，包装成本降低 25%
管控环节	智慧管控平台、碳足迹核算	全流程能耗监测、碳排放精准核算、流程优化	实现全链碳管控，运营效率提升 15%

4 烟草工业绿色物流实践案例分析

4.1 湖南中烟绿色物流实践

湖南中烟聚焦包装、运输、托盘三大核心领域，打造全链减碳体系。包装环节，推行可循环塑料烟箱，单箱循环使用超 30 次，2025 年循环利用卷烟包装箱 208.32 万箱，其

中塑料烟箱 106 万箱，实现包装源头减碳；运输环节，打造行业首个公水联运试点线路（常德 - 四平），单件运费较纯公路降低 25%，单趟碳排放降幅超 80%，规模化公铁联运截至 2025 年底累计减碳超 5400 吨；托盘环节，创新采用塑料滑托盘，车辆装载率从 70% 提升至 95% 以上，减少

资源消耗与装卸能耗。

4.2 云南中烟红塔集团实践

红塔集团构建全链条绿色物流体系。仓储环节，建立物理防虫“三防体系”，推行磷化铝熏蒸精准施药技术，2024年减少磷化铝用量1497kg，降幅11.74%，同时推进全自动无人化仓库建设，实现无灯、无纸、零接触作业，降低仓储能耗；运输环节，推广新能源车辆，开展跨厂顺路拼车、公铁联运，2024年公铁联运量同比增长120.35%，省内成品移库减少33%；包装环节，深化循环烟箱回收，2024年循环利用烟箱360余万只，节约采购成本3000余万元。

4.3 实践成效总结

案例表明，绿色物流技术应用可实现“减碳+降本+提效”三重效益。湖南中烟公水联运单趟碳排放降幅超80%，红塔集团循环烟箱年节约成本3000余万元。同时，企业通过“技术+管理”双轮驱动，完善循环体系、优化管理制度，形成可复制的绿色物流模式，为行业提供实践参考。

5 发展瓶颈分析

5.1 技术推广成本偏高

光伏仓储、新能源车辆、智能管控平台等技术前期投入高，中小型企业资金压力大；循环包装、绿色养护初期投入高于传统模式，短期经济效益不明显，制约规模化推广。

5.2 行业标准体系不完善

缺乏统一的绿色物流建设标准、碳足迹核算标准，各企业建设水平不均，核算口径不统一，难以实现行业整体低碳管控；循环包装、多式联运跨区域协同标准缺失，制约资源共享。

5.3 配套设施与人才不足

新能源充电桩、多式联运枢纽等配套设施建设滞后，无法满足发展需求；行业缺乏兼具物流、低碳、数字化能力的复合型人才，技术研发与运营能力不足。

5.4 全产业链协同不足

物流涉及烟叶供应商、工业企业、零售户等主体，各环节协同度低，包装回收、运输追踪缺乏全链联动，仅靠工业企业单方推进难以实现全链条减碳。

6 优化路径

6.1 加大政策扶持，降低推广成本

国家烟草专卖局设立绿色物流专项资金，对技术应用

企业给予补贴、税收优惠；鼓励产学研合作，研发低成本高效能技术，推动光伏、新能源技术国产化，降低设备与运维成本。

6.2 完善标准体系，规范行业发展

制定烟草绿色物流建设规范、碳核算标准、技术应用指南，统一核算口径与考核指标；建立循环包装、多式联运专项标准，推动资源共享与互联互通，将绿色指标纳入企业考核。

6.3 强化配套建设，培育专业人才

统筹建设充电桩、多式联运枢纽、包装回收中心，完善绿色配套体系；开展校企合作，开设绿色物流相关专业，培养复合型人才；加强内部培训，提升从业人员技术操作与碳管控能力。

6.4 推动全链协同，构建绿色生态

建立产业链协同机制，推动供应商、工业企业、零售户联动，共同推进循环包装、联合运输；搭建绿色物流共享平台，实现全链条碳追踪与资源调配，加强行业交流，推广先进实践。

7 结语

双碳目标为烟草工业绿色转型提供了明确方向，绿色物流作为关键环节，其技术创新与实践应用任重道远。当前，烟草工业绿色物流已从初步探索迈向规模化推进阶段，绿色仓储、运输、包装、管控技术的应用，有效破解了传统物流高能耗、高排放难题，取得显著生态与经济效益。但技术成本、标准体系、配套设施、产业链协同等问题仍制约高质量发展，需行业各方协同发力，持续优化技术应用、完善标准规范、强化资源保障、推动全链联动。

未来，随着双碳战略深入推进与技术持续创新，烟草工业需进一步深化绿色转型，以技术创新为核心、管理优化为保障，加快构建低碳、高效、循环、智慧的现代绿色物流体系，持续降低物流环节碳排放，助力国家双碳目标落地，为我国制造业绿色转型贡献行业力量。

参考文献

- [1] 冯紫晖.湖北中烟物流管理体系优化研究[D].中南财经政法大学,2023.
- [2] 王宇凡,韩菁.烟草工业企业智慧物流效率评价体系研究[J].中国管理信息化,2023,26(11):120-124.
- [3] 杨芳,戴恩勇,吴堪.双碳目标下湖南省物流业绿色发展路径及对策[J].物流技术,2024,43(09):36-43.

Research on the Control Technology of Tunnel Surrounding Rock Stability for High-Speed Railways under Complex Geological Conditions

Cunping Zhang

China Railway No.12 Engineering Group Co., Ltd. Second Engineering Company, Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

High-speed railway tunnels have a wide range of passages and are affected by various factors such as geological stratum evolution. They are prone to encountering complex geological conditions such as karst, soft rock, fractured fault zones, and high ground stress. Each type of geological feature has distinct engineering characteristics: karst geological formations have developed caves and underground rivers; soft rock geological formations have low rock strength and are prone to softening when exposed to water; fractured fault zones have loose rock masses and abundant groundwater; high ground stress geological formations have exceeded the standard of ground stress. Different complex geological conditions correspond to different potential stability hazards of surrounding rock, mainly including water and mud gushing, surrounding rock collapse, large deformation, and rockburst, which pose risks to construction safety and project quality. This paper, based on engineering practice, classifies and summarizes the types and core characteristics of complex geological formations, analyzes the manifestations and hazards of surrounding rock stability hazards under various geological conditions, and proposes targeted control technologies, which can ensure the safety of high-speed railway tunnel construction.

Keywords

high-speed railway tunnels; complex geological conditions; control of surrounding rock stability

复杂地质条件下高速铁路隧道围岩稳定性控制技术研究

张存平

中铁十二局集团第二工程有限公司, 中国·山西 太原 030000

摘 要

高速铁路隧道穿越范围广, 受地层演变等多种因素影响, 易遭遇岩溶、软岩、断层破碎带、高地应力等复杂地质。各类地质具有鲜明工程特性: 岩溶地质溶洞、暗河发育, 软岩地质岩体强度低、遇水易软化, 断层破碎带岩体松散且地下水富集, 高地应力地质地应力超标。不同复杂地质对应差异化围岩稳定性隐患, 主要包括突水突泥、围岩坍塌、大变形、岩爆等, 危害施工安全与工程质量。本文结合工程实际, 分类梳理复杂地质类型及核心特性, 剖析各类地质下的围岩稳定性隐患表现与危害, 提出针对性的控制技术, 能保障高铁隧道施工安全。

关键词

高速铁路隧道; 复杂地质条件; 围岩稳定性控制

1 引言

随着高速铁路建设向山区延伸, 隧道穿越的地质条件愈发复杂, 复杂地质引发的围岩稳定性问题成为制约施工安全、进度与质量的核心瓶颈^[1]。系统分类复杂地质类型、明确各类地质下的围岩稳定性隐患, 是开展风险防控、优化支护技术的前提。本文基于高铁隧道施工实际, 重点分析常见复杂地质类型及对应围岩隐患, 能为后续围岩稳定性控制提供科学依据, 助力高铁隧道工程安全高效推进。

【作者简介】张存平(1996-), 男, 中国山西大同人, 本科, 助理工程师, 从事高速铁路隧道建设研究。

2 复杂地质条件分类及围岩稳定性隐患

2.1 高速铁路隧道常见复杂地质类型

结合实际施工情况, 高铁隧道最常见的复杂地质类型主要有岩溶地质、软岩地质、断层破碎带地质、高地应力地质四类, 各类地质均有鲜明工程特性, 对隧道施工及围岩稳定性造成较大影响。

岩溶地质是高铁隧道中较为多发的复杂地质, 多分布在碳酸盐岩地层区域, 主要特点是溶洞、溶蚀裂隙、暗河发育, 由地下水长期溶蚀形成。这类地质里, 溶洞大小不一, 小的仅数十厘米, 大的可形成长数十米、宽数米的大型溶腔, 部分溶洞内填充黏土、碎石或积水。溶蚀裂隙呈网状分布, 破坏岩体整体性, 成为地下水渗透的主要通道。暗河分布区

域水流持续,水压与涌水量不稳定,施工风险极高,部分隧道单日最大涌水量可超5万立方米。

软岩地质在高铁隧道建设中十分常见,主要包含膨胀岩、软弱夹层、泥质岩层三类,核心特点是岩体强度低、遇水易软化、变形性强。膨胀岩遇水膨胀、失水收缩的特性明显,岩体结构松散,遇水后强度大幅下降,易产生膨胀变形。软弱夹层多处于岩层之间,厚度从几厘米到数米不等,由泥质、页岩等软弱物质构成,力学性能差,易发生滑动变形。泥质岩层以泥质成分为主,岩体致密性差、渗透性强,遇水后呈软塑状,承载力大幅降低,给隧道开挖和支护带来很大挑战。

断层破碎带地质由地壳构造运动形成,主要特点是破碎岩体分布广、地下水富集。破碎带内岩体被断层切割得十分破碎,多呈碎块状、粉末状,整体性差、力学强度低、稳定性弱。

2.2 不同复杂地质下围岩稳定性隐患

不同复杂地质的岩体结构、力学性能、水文条件差异明显,使得围岩稳定性隐患呈现不同特点。明确各类地质对应的隐患类型、表现形式及危害,是做好风险防控的关键。

岩溶地质的围岩稳定性隐患主要体现为突水突泥、围岩坍塌、溶洞顶板失稳三类,且隐患发生突然、危害程度高。突水突泥是最主要的隐患,多因开挖揭露溶洞、暗河或溶蚀裂隙,地下水携带泥砂、碎石涌入隧道,导致施工停滞、设备损坏,严重时引发人员伤亡。围岩坍塌源于溶蚀裂隙破坏岩体整体性,加之地下水渗透软化,岩体强度下降,开挖后失去支撑引发,多为局部塌方或大规模冒顶。溶洞顶板失稳则是由于顶板岩体受上覆岩层压力和开挖扰动,当顶板厚度不足、强度不够时,易发生坍塌,进而影响隧道整体稳定。

软岩地质的围岩稳定性隐患核心是围岩变形和支护结构损坏,主要包括围岩大变形、蠕变、支护结构受压破坏。围岩大变形是最典型的隐患,因软岩强度低、塑性强,开挖后岩体应力重新分布,易产生明显收敛变形,超出允许范围会缩小隧道断面,影响施工运营。蠕变是软岩在长期应力作用下的缓慢变形,持续时间长,会逐步累积并作用于支护结构。支护结构受压破坏则是因为软岩变形产生的压力超过支护承载力,表现为钢拱架扭曲、混凝土衬砌开裂剥落等,严重威胁施工安全。

断层破碎带地质的隐患主要是岩体松散易坍塌、地下水渗透软化围岩,两类隐患相互叠加,风险极高。破碎带内岩体破碎、强度低,开挖后易发生边墙坍塌、掌子面塌方,且范围大、治理难。

3 不同复杂地质条件下围岩稳定性控制技术

3.1 岩溶地质隧道围岩稳定性控制技术

岩溶地质隧道围岩稳定控制的核心的是防范突水突泥、围岩坍塌及溶洞顶板失稳,施工需严格遵循先探测、后加固、

再开挖原则,搭建超前探测预判、超前支护加固、溶洞专项处理、衬砌优化防护全流程管控体系,兼顾堵水防渗与岩体加固双重需求。

超前地质探测是首要环节,核心是精准捕捉岩溶分布、发育规模及水文状况。掌子面围岩数码成像技术依托高清设备与智能识别算法,可快速判定岩体完整性、溶蚀裂隙及充填物类型,实时反馈地质动态。随钻测量系统结合钻孔作业,同步采集钻孔轨迹、岩体强度等数据,精准定位溶洞、暗河位置,提前预判风险,两类技术协同应用能实现岩溶地质精准探测^[2]。

超前支护是核心手段,针对溶蚀裂隙、溶洞周边岩体及地下水开展预先加固。超前注浆堵水采用水泥-水玻璃双液注浆材料,注浆压力1.5至2.5MPa,范围覆盖掌子面前方10至15米,形成注浆帷幕阻断渗水、提升岩体整体性。管棚支护用于大型溶洞区域,选用直径108毫米无缝钢管,长度15至20米,间距30至50厘米,构建刚性支护体系。小导管注浆适用于中小型裂隙,直径42毫米、长度3至5米,梅花形布置,形成稳固加固圈。

溶洞处理采用差异化方案:直径<3米的小型溶洞用C25混凝土分层回填,清理松散充填物并振捣密实。直径≥3米的大型溶洞,且积水丰富时,先泄水降压,再用钢筋混凝土框架结合回填混凝土加固,必要时设迂回导坑。初期支护采用C25以上钢纤维喷射混凝土,I20b型钢拱架配合锚杆,二次衬砌采用C30钢筋混凝土,受力集中区加密钢筋并铺设防水层,保障长期稳定。

3.2 软岩地质隧道围岩稳定性控制技术

围岩改性是基础,通过物理化学方式改善软岩结构。注浆加固应用最广泛,采用水泥-水玻璃双液浆,膨胀岩注浆压力1.0至1.5MPa,孔间距1.5至2.0米。泥质岩层注浆前预喷水湿润,掺入粉煤灰优化浆液,增强黏结性。经改性处理后,软岩抗压强度提升30%至50%,有效遏制遇水软化,为后续施工奠定基础。

抗大变形支护采用刚柔结合体系,可缩性型钢拱架为关键构件,设置可缩接头,可缩量50至100毫米,释放应力避免拱架损毁。锚喷网联合支护作为辅助,C25喷射混凝土厚度20-25厘米,8毫米钢筋网间距20×20厘米,22毫米中空注浆锚杆长度4-5米,梅花形布置,形成协同受力体系。二次衬砌延后施作,待形变速率≤0.5毫米/天再施工,采用C30钢筋混凝土,提升整体承载能力。

蠕变控制采用分级支护、应力释放与监测反馈协同方式:分级支护分初期、临时、二次衬砌三级,逐步释放应力。应力释放孔孔径100毫米、深度5-8米,间距2-3米,减缓蠕变速率。每5-10米设监测点,实时监测围岩收敛与拱顶下沉,动态调整参数。施工工法遵循“短进尺、弱爆破、快封闭、勤量测”,进尺0.5-1.0米,爆破震动速度≤1.5cm/s,开挖后4小时内封闭支护,每天监测2-3次。应用表明,围

岩收敛量可控制在 50 毫米内, 支护无损毁。

3.3 断层破碎带隧道围岩稳定性控制技术

断层破碎带隧道控制核心是防止岩体坍塌及地下水软化围岩。遵循超前加固、强化支护、控水防渗、优化工法原则, 结合岩体松散、地下水富集特点, 搭建全流程管控体系, 保障施工安全。

超前加固是前置环节, 根据断层规模采用差异化技术。中小型断层用 42 毫米小导管注浆, 长度 3-5 米、间距 30-40 厘米, 水泥-水玻璃双液浆压力 1.2-2.0MPa, 胶结松散岩体形成加固圈。大型断层采用深孔注浆, 钻孔深度 10-15 米、孔径 108 毫米, 压力 2.0-3.0MPa, 扩大加固范围。地下水丰富断层用帷幕注浆, 环形布置注浆孔, 帷幕厚度 ≥ 3 米, 实现堵水与加固双重效果。

破碎岩体支护采用刚柔协同体系, 格栅拱架加 C25 喷射混凝土为核心, 快速封闭岩体防坍塌。22 毫米全长粘结式锚杆长度 4-6 米, 间距 1.5-2.0 米, 深入稳定岩体, 增强支护整体性。破碎极严重区域增设临时钢支撑, 强化支护效果。

地下水控制采用排水降压与堵水防渗结合: 排水孔孔径 80 毫米、深度 5-8 米, 间距 2-3 米, 将地下水引入排水系统, 压力控制在 0.5MPa 内。初期支护与二次衬砌间铺设 ≥ 1.5 毫米 EVA 防水板, 设置止水带, 涌水量大区域增设集水坑抽水。施工工法按需选择: 断层宽度 < 5 米用台阶法, 进尺 1.0-1.5 米。5-10 米用 CD 法, 分左右分步开挖支护。 > 10 米用 CRD 法, 分四部分交叉开挖。应用表明, 无坍塌、涌水事故, 围岩形变量 ≤ 40 毫米。

3.4 高地应力地质隧道围岩稳定性控制技术

高地应力隧道控制重点是控制岩爆、挤压、压裂和支护开裂, 秉承卸压为先、支护合适、动态控制原则, 根据深埋、集中应力的特点, 建立岩爆防控制衡、支护水平适应、施工支护卸压一体化防控机制^[3]。岩爆防控采取应力释放、超前

卸压和柔性支护方法。钻孔卸压法采取于掌子面、边墙打径向钻孔, 口径 100~120 毫米, 深 5~8 米, 间距 2~3 米, 减小弹性应变能释放, 防控即时型岩爆。超前卸压采取 10~15 米深的超前钻孔和预裂爆破, 控制炸药量, 防止应力瞬间释放。柔性支护采用可缩性型钢拱架和 C25 以上钢纤维喷射混凝土等包容岩爆的冲击能量。

支护优化以增强承载能力, 提高匹配能力为关键, 选用较硬的材料: 初期支护用 C30-C35 钢纤维喷射混凝土、I22b 以上的型钢拱架、25mm 强度高的中空注浆锚杆等。优化初始受力方式, 拱架间距为 60~70 厘米, 锚杆梅花布置, 应力集中区加密。二次衬砌加厚 C30 钢筋混凝土, 加强方钢、优化断面受力等。

施工卸压同样采用分步开挖、施工卸压槽的做法: 台阶法施工或 CRD 法施工, 台阶法进尺 1.0—1.5 米, CRD 每一分部进尺 ≤ 1.0 米, 开挖后立即封闭。巷帮卸压槽深 600 毫米、高 400 毫米, 间距 2—3 米。底部卸压槽在中上部、留 1.5 米以上的稳定区, 充填矸石后再浇筑混凝土, 传导应力。

4 结语

结合高速铁路隧道施工实践, 系统梳理了岩溶、软岩、断层破碎带、高地应力四类常见复杂地质的工程特性, 深入剖析了各类地质下的围岩稳定性隐患及危害, 明确了不同复杂地质的隐患差异与控制技术。

参考文献

- [1] 祝塘, 李剑. 复杂地质条件的隧道围岩稳定性分析[J]. 交通科技与管理, 2021 (35): 100-101.
- [2] 马文华, 张堂杰, 范鹏举, 等. 断层破碎带几何参数对公路隧道围岩稳定性的影响研究[J]. 国防交通工程与技术, 2026 (02): 28-34.
- [3] 武剑峰, 王建, 赵震. 埋深对高地应力软岩隧道围岩稳定性的影响机制研究[J]. 科技资讯, 2025 (24): 156-160.

Research on the Artistic Transformation of Smart Public Facilities from the Perspective of Cultural Context Inheritance

Jinming Yan Qingwu Li Xiaoquan Zeng*

School of Architecture and Art, Guangxi Arts University, Nanning, Guangxi, 530007, China

Abstract

In the wave of smart city construction, urban public facilities are facing the dual challenges of homogenization and the disappearance of cultural identity. Taking Nanning City as a case study, this research constructs a "physical-non-physical" cultural context dual-dimensional translation framework, proposes a three-in-one overall strategy of "cultural IP leadership - smart platform support - scene-based creation", and puts forward modular design strategies for five core facilities. It also establishes a C-E-G-T performance evaluation system. This research aims to provide theoretical references and practical guidelines for the transformation of public facilities from "functional components" to "cultural business cards" and "smart terminals" in the process of smart city construction in Nanning and similar cities.

Keywords

cultural context inheritance; smart city construction; public facility design; Nanning

文脉传承视角下智慧公共设施艺术性改造研究

燕金铭 李清伍 曾晓泉*

广西艺术学院建筑艺术学院, 中国·广西 南宁 530007

摘要

在智慧城市建设浪潮中, 城市公共设施面临同质化与文化身份消逝的双重挑战。本研究以南宁市为案例, 构建"物理-非物理"文脉双维转译框架, 提出"文化IP引领-智慧平台支撑-场景化营造"三位一体的总体策略, 并针对五类核心设施提出模块化设计策略, 建立C-E-G-T绩效评估体系。本研究旨在为南宁乃至同类型城市在智慧化进程中, 实现公共设施从"功能构件"向"文化名片"与"智慧终端"的转型提供理论参考与实践指南。

关键词

文脉传承; 智慧城市建设; 公共设施设计; 南宁

1 研究背景与问题提出

1.1 研究背景

智慧城市作为现代城市发展的重要方向, 其核心在于通过信息技术与城市治理的深度融合, 提升城市治理水平与居民生活质量, 并推动城市可持续发展^[1]。目前智慧城市建设已成为提升城市治理能力的核心战略, 但当前实践中, 以城市公共设施为代表, 存在较强"重技术、轻人文"的倾向。市政设施智能化不仅是智慧城市建设的基础性工程, 更是推动城市高质量发展的核心驱动力^[2]。公共设施呈现"千城

一面"的同质化现象, 割裂了市民与城市的情感联系。南宁作为壮族文化核心区与东盟门户, 城市定位跃升对公共空间品质提出更高要求, 亟需探索文化、功能与智慧技术融合的设计路径。

1.2 国内外研究现状

国外方面, 巴塞罗那"超级街区"计划强调系统化街道家具设计与低技术高体验; 新加坡"智慧国"计划推动跨部门数据共享与包容性标准, 将TOD与公共艺术协同。

国内方面, 张兵提出城市规划"地方性"理论, 强调回应地域特征; 王澍探索传统营造技艺的当代转译, 提供"非复古的传承"方法论; 李雄系统阐述西南民族文化符号提取与场景营造策略; 莫伯治的岭南建筑"环境共生"理念对南方城市公共设施设计具有重要指导意义。深圳通过设计竞赛引入创新, 建立全生命周期数字化管理; 杭州提炼"宋韵"文化IP进行当代转译, 构建文化节点网络。但现有智慧设施多聚焦技术集成, 艺术化、文化性与环境协调性常被忽视。

【基金项目】2024年度国家级大学生创新创业训练计划项目“推进智慧城市建设——南宁城市公共设施艺术设计改进探索与实践”（项目编号：202410607028）。

【作者简介】燕金铭（2004-），男，中国山西运城人，本科，从事风景园林研究。

表 1 四城市案例借鉴要点矩阵

城市	核心策略	艺术化 / 文脉手段	智慧化应用	对南宁的核心启示
巴塞罗那	公共空间再分配，步行优先	街道家具、铺装、色彩的系统化设计，社区微更新	低技术、高体验，侧重交通管理与规则	①空间重于技术 ②系统化的视觉设计导则
新加坡	平台化治理，包容性	TOD 与公共艺术协同，一体化设计	全国性传感平台(SNSP)，跨部门数据共享	①加强顶层设计与数据整合 ②将“包容性”作为硬性标准
深圳	数字政府驱动，市场化创新	城市家具品质提升，通过设计竞赛引入创新	平台化治理，AI 赋能，全生命周期数字管理	①设立城市设计竞赛 ②建立高标准供应商库
杭州	文化网络构建，核心 IP 塑造	“宋韵”文化的当代转译，公共艺术与地标营造	侧重文化导览、数字内容与活动运营	①提炼并系统化应用“南宁文化 IP” ②构建“文化节点网络”

1.3 南宁现状与问题

研究团队于 2024 年 3 月至 6 月实地调研 127 处点位，发放问卷 320 份，回收有效问卷 298 份，诊断出四大问题：文化表达方面，仅 12% 设施含明显地方元素，73% 的文化应用为表面装饰，新老城区风格差异度达 68%，缺乏统一设计导则；功能布局方面，五象新区设施密度为老城区的 2.3 倍，同一街道设施风格统一率不足 30%，智慧化设施覆盖率仅 8.5%；人文关怀方面，无障碍设施达标率 41%，67% 座椅缺乏遮阳，微气候适应性不足；智慧化应用方面，跨部门数据共享率不足 20%，技术与文化融合度评分仅 2.1/5，多为“点状”示范未形成网络。

1.4 研究意义

理论意义在于整合文脉主义与岭南建筑学派理论，响应张兵关于“地方性”理论的本土化实践呼吁，为西南少数民族地区城市公共设施设计提供理论框架。实践意义在于助力南宁塑造国际化城市形象，推动公共设施从“功能构件”向“文化名片”和“智慧终端”转变。研究成果可为桂林、柳州、贵阳、昆明等同类型城市借鉴，避免“千城一面”，实现文化传承与技术创新的协同发展。

2 理论框架：“物理 – 非物理”文脉双维转译模型

文脉是区域发展中积淀的特征集合，涵盖气候、地形、建筑实体等要素^{[3]281}，具体可分为物理与非物理两大维度。其中，物理文脉指向地形地貌、街道肌理等可见元素，非物理文脉则包含历史事件、文化传统等精神内核。

物理文脉转译需呼应南宁地域特色，契合邕江蜿蜒态势、青秀山葱郁风貌及“绿城”植被特点，沿江设施采用流动造型与蓝绿色调，公园灯具可借鉴植物生长形态设计。同时需区分不同区域特质，三街两巷历史街区骑楼肌理需搭配小巧精致、砖木石材质的设施，东盟商务区设施则可走现代简约路线，通过细节维系城市关联。

非物理文脉转译需将壮族“三月三”、宾阳炮龙节等民俗，以及壮锦、铜鼓、花山岩画等文化符号，经抽象、几何化等设计手法转化为可感知形态。建议搭建标准化“南宁文化符号库”，为设施设计提供统一且灵活的视觉支撑，并借助导视二维码、灯光投射等方式，推动文脉传承从被动观

看转向主动参与。

新文脉主义下的城市更新需注重文脉连续性，兼顾各区域文化背景与建成环境现状，考量文脉对地域人文及文化传播的影响^[4]。智慧技术可作为连接历史与当下的纽带，通过数字化叙事与交互设计，将静态文化符号转化为动态空间体验，拓展文脉传承路径，助力场所精神当代营造，实现历史文化与城市生活的深度融合。

3 实践路径设计

实践路径遵循“顶层设计—系统构建—分类实施—保障机制”的逻辑链条，形成从宏观策略到微观落地的完整设计体系。

3.1 顶层设计：三位一体总体策略

本文提出“文化 IP 引领 - 智慧平台支撑 - 场景化营造”三位一体的总体策略，作为南宁市公共设施系统升级的核心指导框架。其中，文化 IP 引领是价值核心，提炼南宁“壮锦几何”“绿城生态”“东盟交融”三大核心文化基因，构建包含图形、色彩等在内的视觉识别系统，赋予设施独特在地文化属性^[5]。智慧平台支撑作为技术根基，通过多源数据融合构建居民画像、提供精准服务，搭建全市统一智慧管理平台，实现设施数字化、动态化管控。场景化营造为空间载体，打破单一功能设计模式，结合四类城市空间定义多元活动场景，将各类设施整合配置，满足特定场景使用需求。

3.2 系统构建：文化符号库与设计导则

在数字技术推动文化遗产传播转型的背景下，构建南宁文化符号库是文化 IP 落地的关键，需联合多领域专家完成文化元素的现代化转译。符号库核心图形源自壮锦、铜鼓、花山岩画，经简化抽象形成标准化图形；色彩体系以绿城生态色为基础，搭配壮族服饰特色色与国际化银灰；同时探索传统与新型材料的结合路径^[6]。基于该符号库，更新南宁市公共设施设计导则，明确各类设施在不同区域的设计原则、样式、材质等要求，兼顾全龄友好指标，确保全市设施风格统一且各具特色。

3.3 分类实施：五大设施模块化设计

采用模块化设计理念，将各类设施拆解为基础结构、功能拓展、文化皮肤三大模块，实现标准化生产与个性化配置的有机统一。智慧公交站亭、模块化城市座椅、多功能智

慧路灯、分类垃圾桶及整合导视系统，均以标准化基础结构为依托，可根据需求选配充电、监控、环境监测等拓展功能。文化层面，各类设施分别融入壮锦、铜鼓、花山岩画及本地植物等文化元素，遵循城市色彩体系；导视系统增设多语言标识与智慧查询功能，全面提升设施的实用性与文化性。

3.4 保障机制：实施策略与人文细节

3.4.1 分区差异化策略

根据南宁城市空间特征将公共设施设计计划分为四类管控区。历史文化核心区如三街两巷为传统骑楼街区尺度小巧，设施风格传统精致，材料以砖木石为主，智慧化功能适度隐藏，强调历史叙事。现代商务展示区如东盟商务区为高层建筑群尺度宏大，设施风格现代简约，材料以金属玻璃为主，智慧化功能显性展示，强调国际形象。生态休闲游憩区如南湖青秀山为自然山水环境，设施形态有机仿生，材料生态友好，强调与自然融合，融入生态教育功能。居住生活服务区为日常生活空间人流稳定，设施强调全龄友好与邻里交往，模块化组合灵活，鼓励社区参与定制。

3.4.2 时序渐进式更新策略

借鉴巴塞罗那织补理论与有机更新理念避免大拆大建。近期一至两年重点完善五象新区等新建区域设施体系形成示范，在老城区选择一至两个节点进行微更新试点。中期三至五年逐步扩展至主要商业街道滨水空间，建立智慧管理平台并投入运行。远期五至十年实现全市覆盖，形成完整的文

化 IP 识别系统与智慧设施网络。

3.4.3 社区参与式设计策略

建立政府主导专业支持社区参与三方协作机制，在设施选型文化元素选择等环节引入公众投票与工作坊，鼓励社区居民参与设施的日常维护与文化内容更新，建立市民设施管家志愿服务体系增强社区归属感。

3.4.4 全龄友好设计细节

全龄友好设计需兼顾多方面细节：无障碍设计中，地面设施不得占用盲道，站亭座椅区需预留不小于 1.5 米的轮椅通行宽度及回转空间，信息查询界面与按钮高度控制在 0.8-1.1 米以适配轮椅使用者与儿童。老年友好方面，座椅高度设为 42-45 厘米且可选装扶手，导视字体不小于 30pt、对比度≥ 4.5:1，坡道与台阶旁需设扶手。儿童友好要求儿童活动密集区设置适配儿童尺度、造型趣味的设施，所有设施边角圆角半径≥ 10 毫米。气候适应性上，利用绿城优势布置林荫设施，站亭顶棚出挑≥ 1.2 米，采用透水铺装与植草沟防积水，选用耐腐蚀抗霉变材料适配湿热环境。

4 C-E-G-T 绩效评估体系

建立涵盖文化遗产、公众体验、治理效能、技术创新四维度的绩效评估指标体系，采用基线调查加定期追踪模式，项目实施前全面采集基线数据，之后每年或每两年追踪评估对比变化发现问题指导优化。

表 1 绩效评估指标体系（C-E-G-T 模型）

维度	一级指标	二级指标示例	评估方法
C- 文化遗产	文化识别度	公众对文化元素的认知率、游客文化形象评分	问卷、访谈
	文脉叙事性	核心 IP 覆盖率、片区设计场景符合度	方案审核、专家评审
E- 公众体验	使用满意度	舒适、便利、安全性评分，特殊人群满意度	满意度调研、焦点小组
	空间活力	公共空间停留时长、社交行为频率	传感器分析、行为观察
G- 治理效能	可达与公平	无障碍设施覆盖率、15 分钟文化圈达标率	实地普查、GIS 分析
	运营效率	设施故障修复时间、照明能耗变化率、公众参与采纳率	平台数据、部门报告
T- 技术创新	智慧化水平	智慧设施占比、跨部门数据接口调用频次	项目资料、后台数据
	系统稳定性	年均无故障运行时间 (MTBF)	运维日志

5 结论与展望

本研究恪守“技术为用、文化为魂、人为本”的核心原则，核心创新体现在三方面：整合斯特恩文脉主义与莫伯治岭南建筑地域性理念，构建“物理 - 非物理”文脉双维转译模型；提出“文化 IP 引领 - 智慧平台支撑 - 场景化营造”三位一体实践路径，以及“基础结构 + 功能拓展 + 文化皮肤”模块化设计思路；建立 C-E-G-T 四维绩效评估体系，将文化遗产纳入智慧设施评价范畴。研究存在一定局限，文化符号参数化设计、智慧平台技术架构等细节及设施成本效益分析仍需深化，需建立长期机制追踪设施对城市经济社会资本的间接影响。未来技术发展将赋予公共设施新功能，但“服务于人、赋能场所、代言文脉”的核心不变。

参考文献

[1] 刘亚慧.科技赋能城市高质量发展：基于 11 个“新城建”试点城市的调研分析[J].广西城镇建设, 2024 (7): 43-47.

[2] 薛舒以,李雪婷.智慧城市建设中市政设施智能化建设路径研究[J].新城建科技,2026,35(01):31-33.

[3] Echenique M, Crowther D, Lindsay W.A spatial model of ur ban stock and activity[J].Regional Studies,1969,3(3).

[4] 赵赛文,王梓懿,谢帆.新文脉主义视角下徐州城市更新设计策略研究[J].艺术百家,2022,38(03):164-170.

[5] 朱文娟.数字技术赋能智慧城市建设的设计策略[J].鞋类工艺与设计,2025,5(17):153-155.

[6] 付海娟.数字艺术视域下的黄河文化符号转译机制[J].炎黄地理, 2025,(11):58-60.

Reflections on the Application Measures of Intelligent Signal Maintenance Systems in Urban Rail Transit

Ruobing He Shouqian Deng Xiangyin Shen

Chongqing Transportation Construction Co., Ltd., Chongqing, 400043, China

Abstract

Urban rail transit plays a vital role in urban public transportation by alleviating ground traffic congestion and enhancing operational efficiency. The signaling system is intrinsically linked to train operations, necessitating the implementation of an intelligent signaling maintenance system that integrates IoT, big data, and AI technologies. This system enables real-time monitoring of operational status, intelligent fault early warning, and comprehensive lifecycle management, thereby significantly improving maintenance effectiveness. This article analyzes the application strategies of intelligent signaling maintenance systems in urban rail transit, aiming to elevate maintenance standards and ensure safe, reliable operations across the entire urban rail network.

Keywords

intelligent signal maintenance system; urban rail transit; application measures

信号智能化维护系统在城市轨道交通的应用措施思考

何若冰 邓寿乾 沈香吟

重庆交通建设管理有限公司, 中国 · 重庆 400043

摘 要

城市轨道交通在城市公共交通运行中发挥了重要作用,能够缓解地面交通压力,提高交通运行效率。信号系统与列车运行情况息息相关,需要引进智能化信号维护系统,对物联网、大数据技术、人工智能技术等进行联合应用,实现信号系统运行状态的实时监测、故障智能预警,并实现信号系统全生命周期管控,有效提升信号系统维护效果。文章主要对信号智能化维护系统在城市轨道交通中的应用措施进行分析,从而有效提升城市轨道交通信号维护水平,实现整体城市轨道交通的安全可靠运行。

关键词

信号智能化维护系统;城市轨道交通;应用措施

1 引言

随着城镇化进程的加快,城市轨道交通全自动运行线路规模逐渐扩展,同时对信号系统维护模式提出了更高的要求,传统的人工巡检、故障被动处置方式已经不适合新时期发展需求。本文以 FAO 全自动信号系统为研究对象,对信号智能化维护系统在城市轨道交通中的应用策略进行分析,提出适配城市轨道交通场景的落地优化措施,推动城市轨道交通信号维护系统的数字化转型发展。

2 信号智能化维护系统在城市轨道交通中的应用意义

FAO 全自动运行信号系统是城市轨道交通领域当前技术层级最高的信号控制系统,区别于传统自动化等级较低的

信号系统,FAO 系统可实现列车从发车、行驶、停靠、开关门到折返的全流程无人干预运行,是支撑城市轨道交通智能化转型的核心基础设施。FAO 系统取消了车上乘务人员,所有行车调度、运行控制均由信号系统自主完成,对信号设备的运行可靠性、故障处置时效性提出了远高于传统线路的要求。传统的信号系统维护模式存在的问题,包含:维护方式以人工定期巡检为主,对维护人员的经验判断过度依赖,难以提前识别设备隐性故障,仅仅能够进行事后处置,维修模式较为被动;此外,FAO 系统设备点多面广,包含数百个核心子设备,人工巡检效率较低,容易出现漏检错检现象;故障发生后需要多个部门系统定位排查,故障处置时间较长,容易引起大面积运营延误问题^[1]。针对这种情况,需要依托物联网、大数据分析技术、人工智能技术构建信号智能化维护系统,以便对信号系统设备的运行状态进行实时监测,提前预警潜在故障,精准定位故障位置,有效提升整体城市轨道交通运维水平,保障行车安全,提升运营效率需求,实现全生命周期管理,促进城市轨道交通可靠性运行。

【作者简介】何若冰(1986—),女,中国陕西西安人,本科,高级工程师,从事信息化及轨道交通研究。

其中，信号智能化维护系统核心架构如表1所示。

表1 信号智能化维护系统核心架构

层级	核心组成	主要功能
端侧采集层	各类传感器、通信接口、数据采集模块	采集信号设备的电压、电流、温度、板卡状态、通信时延等多维度运行数据，实现全设备点位的数据接入
边缘计算层	车站边缘节点、数据预处理单元	完成原始数据清洗、格式转换、本地逻辑判断，实现轻量级故障的本地快速处置，减少云端算力消耗
云端分析层	大数据存储平台、AI分析引擎、运维管理中台	开展设备健康度评估、故障预警预测、全生命周期数据管理，生成运维决策方案

3 信号智能化维护系统在城市轨道交通中的应用路径

3.1 设备状态实时监测

城市轨道交通信号系统发生故障频率较高的设备有转辙机、信号机、轨道电路。针对不同设备的具体情况，智能化维护系统采取相适应的应对措施：针对转辙机，对该设备运行过程中的电流曲线、功率曲线等数据进行全面采集，并根据转辙机的动作时间、摩擦力等参数，对该设备的卡阻、缺油、接触不良等潜在隐患进行精准识别，如果在监测过程中发现转辙机动态电流呈现持续上升状态，则表面该设备的机械摩擦力阻力过大，需要提前预警，如在天窗点进行维护，确保其正常运转。针对信号机设备，需要对点灯电流波动情况进行实时监测，精准识别灯丝断丝的潜在隐患，防止信号灯非正常灭灯引起的行车停车问题^[2]。针对轨道电路问题，需要对其发送端电压、接收端电压等状态进行实时监测，精准识别轨道电路分路不良、设备老化问题，以便提前处置，防止列车占用检测错误问题。信号智能化维护系统在FAO系统中的应用，需要利用统一数据接口标准，把各个分散的子系统数据进行集中接入，改变以往数据孤岛问题。如可以对车载控制器中的无线通信时延、应答器接收误差等数据进行实时监测和动态采集，一旦数据偏离正常阈值，就会第一时间触发异常提醒，提醒维护人员及时处理，避免故障升级引发行车事故。

3.2 设备故障诊断

在人工智能算法的基础上，智能化维护系统对故障进行提前预警，并对历史故障数据进行整合分析，构建数据预测模型，以便对设备故障进行提前预警，落实信号系统预测维修模式。现阶段城市轨道交通中常见的预测模型包含长短期记忆网络、支持向量机、随机森林算法等^[3]。针对信号系统常用的继电器设备，FAO系统中继电器的动作次数超过上万次，触点磨损、接触不良故障较为多见。针对这种情况，智能化维护系统需要采集继电器动作时的电压电流波形，并将其与正常波形比较分析，以便提前识别触点老化等隐性故

障，向维护人员发出预警信号，以便提前更换，减少突发故障引起的紧急停车问题。此外，信号智能化维护系统构建轨道交通信号系统的故障诊断知识库，对不同设备的典型故障模式、诊断流程等内容进行综合整合，为后续快速定位、修复故障提供依据。此外习题还可以给出相应的维修方案，如更换关键部件、调整参数等，实现故障诊断过程的自动化、智能化，提高故障排查速度，减少对列车正常运营的影响。

3.3 全生命周期运维管理

信号智能化维护系统在FAO系统中的运用，可以对设备采购入库、进场验收、安装调试、运行维护、报废更换等全生命周期数据进行统一存储和管理，形成完整的设备健康档案，在系统中详细记录设备型号、供应商、安装位置、安装时间、调试参数等数据信息，同时要自动记录设备运行数据、维护记录、故障处置记录等。运维人员需要结合信号系统全生命周期数据，分析不同品牌、不同型号设备的实际使用寿命和故障发生率，为后续设备采购、更新改造提供数据支撑。通过结合设备健康度自动生成运维计划，结合设备状态进行差异化巡检，减少无效运维工作量，控制运维成本，促进系统维护精准性^[4]。当设备接近设计使用寿命时，要结合长期运行数据评估设备的健康状态，预测剩余使用寿命，即利用健康评估数据判断故障程度、利用趋势数据预测判断故障动态、利用已知累计里程和维修履历提取特征参数，进而预测设备剩余寿命，提前维护人员及时更换。通过全生命周期管理，管理人员可以全面掌握所有信号设备的状态，合理安排维护计划，避免过度维护增加运营成本，也避免维护不足引发安全隐患。

3.4 故障快速定位抢修

当信号系统出现突发故障后，智能化维护系统能够快速定位故障位置，并给出精准诊断，为后续抢修工作的开展提供依据。信号智能化运维系统能够对多元数据进行交叉验证，并直接锁定故障设备与故障点，并精准判断故障类型，缩短故障范围，减少现场逐一排查时间，提高抢修效率^[5]。此外系统还能够对该设备同类型故障历史处置记录进行自动调取，生成标准化的抢修方案，为一线维护人员抢修工作的开展提供技术指导。在该系统支持下，还可以利用AR技术远程协助强求工作，后台专家可以通过实时画面指导现场操作，提高抢修效率，减少故障引发的运营延误。

3.5 通信网络的智能化运维

通常情况下，城市轨道交通信号系统采用数字化、网络化架构，并利用工业以太网对不同信号设备之间进行数据交互，只有保障通信网络的安全性能促进信号系统的可靠运行。信号智能化维护系统能够实时监测信号通信网络的关键指标，如网络带宽利用率、丢包率、端口状态等，并分析网络流量特征，以便精准识别潜在的网络异常、网络攻击等疾患问题，快速定位通信网络故障位置。此外还能够统一管理网络配置信息，对网络配置变更历史进行详细记录，一旦

出现网络故障，就会第一时间回溯变更内容，提高故障排查效率。还能对车地无线通信系统各个位置的信号强度、信噪比等进行实时监测，精准识别信号盲区和干扰源，为后续干扰排查、调整天线位置提供指导。信号智能化维护系统在城市轨道交通中的应用效果如表 2 所示。

表 2 智能化信号维护系统的应用效果

效果维度	具体成果
安全性大幅提升	-线路故障率下降 30% 以上 -列车晚点时长缩短 40%
运营效率明显提高	-高峰时段客运量增加 15% 以上 -乘客平均等候时间下降 20%
维护成本显著降低	-维修成本降低 25% 左右 -人工成本下降 30% 以上
管理决策更加智能化	-线路运行状况全面可视化 -为管理人员提供科学决策支持

3.6 协同调度管理

在信号智能化维护系统支持下构建线网级的智能化维护平台，以便对各个线路信号设备运行状态进行统一监测，实现各类资源的统一调度。尤其可以通过强化学习算法，对列车运行状态数据和各个车站客流分布情况进行实时采集和分析，线网指挥中心能给利用平台实时勘察所有线路信号系统的健康状态，实现行车调度系统、乘客信息系统的联动，一旦线路出现轻微设备故障，系统会自动向调度系统发送调整建议，并调度附近线路的维护人员、备件库存信息，辅助指挥中心调度应急抢修资源，提高应急处置效率，减少对运营的影响。当系统识别到某一个道岔设备出现异常预警后，自动调度后续列车避让该道岔，通知维护人员在运营间隙前

往处置，完全不影响正常运营秩序。同时还可以对所有线路的设备故障数据进行汇总分析，总结故障发生规律，提前采取预防性维护措施，强化运维管理工作的针对性和有效性。

4 结论

综上所述，信息时代，FAO 全自动信号系统在城市轨道交通中得到广泛应员工你，推动了城市轨道交通的智能化发展。信号智能化维护系统在 FAO 全自动信号系统中的应用，能够提高运维效率，强化轨道交通运营安全性和可靠性，尤其可以实时监测设备状态、实现提前预警诊断，实现全生命周期运维管理，减少故障出现几率，为城市轨道交通高质量发展创建良好条件。

参考文献

[1] 郑涛. 智能化技术在地铁信号系统维护中的应用探索 [J]. 中国设备工程, 2025, (06): 33-35.

[2] 陈佳民. 全自动运行系统中信号系统与站台门的集成控制方案研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (34): 70-72.

[3] 周理. 信号智能化维护系统在城市轨道交通的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (11): 160-162.

[4] 冯浩楠,姜庆阳,刘剑,等. 城市轨道交通全自动运行信号系统设计与实现[C]// 中国智能交通协会. 第十四届中国智能交通年会论文集 (2) . 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所;国家铁路智能运输系统工程技术研究中心;中国铁道科学研究院集团有限公司;北京华铁信息技术有限公司,; 2019: 14-19.

[5] 徐德龙,韩安平,徐杰. 高速铁路信号系统运维数据可视化和智能化研究[C]// 中国智能交通协会. 第十五届中国智能交通年会科技论文集 (1) . 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所,; 2020: 266-277.

Research on Disease Detection Technology for Expansion Devices of Urban Expressway Overpasses

Changhai Si Muzi Li

Changchun Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130000, China

Abstract

The expansion joints of urban expressway viaducts are subjected to prolonged exposure to high-frequency traffic flow, repeated impacts, rainwater erosion, and temperature cycles. These joints not only facilitate the release of beam end displacements but also directly affect the bridge deck's smoothness, drainage performance, and driving comfort, making them one of the most wear-prone components in urban bridge maintenance. Current standards for urban and highway bridges include expansion joints among the key subjects for routine inspections, periodic examinations, and specialized tests, with inspections focusing on issues such as loose connections, abnormal deformation, damage, detachment, leakage, blockages, and resulting vehicle jolting. Drawing on the common types of expansion joints used in China's urban expressway viaducts and on-site maintenance experience, this paper analyzes common defects and corresponding inspection techniques, with particular emphasis on the inspection criteria for steel components, anchorage zone concrete, waterproofing and drainage systems, and fastening connection systems, aiming to establish a defect identification approach more aligned with the practical operations of urban bridges.

Keywords

urban expressway; elevated bridge; expansion device; structural defects; detection technology; research

城市快速路高架桥伸缩装置病害检测技术研究

司昌海 李木子

长春市市政工程设计研究院（集团）有限公司，中国·吉林 长春 130000

摘 要

城市快速路高架桥伸缩装置长期处于高频车流、重复冲击、雨水侵蚀和温度循环共同作用之下，既承担梁端位移释放功能，又直接影响桥面平整性、排水性与行车舒适度，因此一直是城市桥梁养护中的高损耗部位。现行城市桥梁和公路桥梁相关标准均将伸缩装置列入经常性检查、定期检测和特殊检测的重要对象，检查重点集中于连接松动、异常变形、破损、脱落、漏水、阻塞以及由此引起的跳车等现象。结合中国城市快速路高架桥常见装置类型及现场养护经验，本文围绕常见病害和对应检测技术展开分析，重点讨论型钢构件、锚固区混凝土、止水排水系统和紧固连接体系的检测要点，以期形成更贴近城市桥梁运营实际的病害识别路径。

关键词

城市快速路；高架桥；伸缩装置；病害；检测技术；研究

1 引言

桥梁伸缩装置是桥梁结构的活动构件，设置在梁端构造薄弱的部位，直接承受车辆荷载的反复作用，同时又多暴露于大自然环境中，受到各种自然因素的影响，因此，伸缩装置易损坏、难修补。同时伸缩装置位于梁端构造相对薄弱且受车轮直接作用的位置，病害一旦发展，往往先表现为异响、跳车、渗漏或局部破损，继而向梁端混凝土、支承区域和桥面铺装扩展。中国现行养护与检测标准已明确，城市桥梁检测评估应按照经常性检查、常规定期检测和结构定期检

测分级实施，并将伸缩装置纳入桥面系重点检查范围^[1]。对于城市快速路高架桥而言，检测工作的关键不在于是否“看见病害”，而在于能否把表现异常、几何变化、材料劣化与功能失常对应起来，避免仅凭单一现象作出片面判断。

2 城市快速路高架桥伸缩装置常见病害分析

2.1 型钢边梁变形断裂

城市快速路高架桥交通量大、重车比例高、制动和并线频繁，伸缩装置中的边梁、中心梁、梳齿板等钢构件长期承受轮载冲击与反复振动，最易出现局部翘曲、挠曲变形和焊接部位开裂等问题。病害初期通常表现为局部高差增大、缝口不顺直、车辆通过时异响增强，随后会发展为边角掉块、齿板啃边、型钢开焊，严重时还会出现单元件断裂或局部脱

【作者简介】司昌海（1993-），男，中国吉林安图人，本科，高级工程师，从事交通工程研究。

空。对城市高架而言,这类病害往往不是一次性失效,而是在高频荷载下逐步积累,其突出特点是早期不一定伴随大面积破坏,但对通行平顺性的影响出现得很早,且容易与桥面铺装局部病害相互叠加。

2.2 锚固区混凝土开裂剥落

伸缩装置锚固区处于钢构件、混凝土和铺装层三者交接位置,受力路径复杂,既承受轮载冲击,又承受温度位移传递和局部约束效应,因此在运营桥梁中极易出现开裂、碎边、坑洞、剥落和表层松散。城市快速路高架桥车速高、通行连续,一旦锚固区表层松动,车轮冲击会迅速把局部缺损坏扩大成块状破坏,使原本集中在边角位置的病害向纵向和横向扩展。此类病害的一个典型特征是,早期往往从锚固区与桥面铺装交界处开始,随后向锚固槽内部发展,表面看似只是局部掉角,实际上常伴随内部脱空、保护层削弱或锚筋周边混凝土损伤^[2]。

2.3 止水系统破损渗漏

伸缩装置的止水带、密封橡胶带和排水通道长期暴露于雨水、泥沙、油污和温差环境中,随着橡胶老化、嵌塞磨损或缝内杂物堆积,极易出现排水不畅、封水失效和持续渗漏。城市快速路高架桥一旦出现这类病害,影响并不限于缝口本身,还会把水分引入梁端、盖梁顶面或支座附近,诱发表面泛碱、钢件锈蚀和局部污染。其现场表现通常为缝下挂水、梁端潮湿、雨后局部持续滴水以及缝口有明显泥沙沉积。对高架桥而言,这类病害隐蔽性较强,因为桥面上看到的可能只是轻微积水,而真正的问题往往发生在缝下水构件和梁端排水路径上。

2.4 螺栓松动滑丝

紧固件病害在城市快速路高架桥伸缩装置中十分常见,尤其是锚固螺栓、连接螺杆和配套垫片部位,长期受振动、冲击和雨水侵蚀后,容易发生松动、缺失、滑丝或局部失稳。当紧固体系刚度下降后,伸缩装置的受力会重新分配,随之出现局部下陷、异常伸缩、位移不均和车辆通过异响增强等问题。与型钢断裂相比,这类病害更容易在早期被忽视,因为构件外形可能尚完整,但装置工作状态已经异常。城市快速路高架桥由于昼夜交通持续、桥面污染物多,紧固件病害常与杂物阻塞、锈蚀和局部变形同时出现,最终使伸缩功能下降并加剧其他病害的发展。

3 城市快速路高架桥伸缩装置病害检测技术

3.1 型钢裂损检测

针对边梁、中心梁和梳齿板的变形、开焊与裂纹,检测工作应先从工作状态入手,再落到裂损本体。第一,检测人员应依照经常性检查要求先做通行状态普查,重点查看缝口是否阻塞卡死、钢构件是否锈蚀断裂、联结部件是否松动,以及车辆通过时是否伴随异响和跳车,并把病害与具体车道、轮迹带和制动区位置对应记录,同步拍摄缝口平面、

侧面和梁端下缘照片,避免后续仅凭单一角度误判。第二,对疑似变形段应进行几何复测,地方养护规程要求每季度宜观测伸缩装置的水平错位和竖向升降,并在每年气温最高、最低时测量间隙是否符合设计要求,因此现场不能只测一次缝宽,而应结合季节温度、桥位朝向和历次记录判断是否存在异常卡阻或变形累积。第三,对肉眼可见或疑似裂纹部位,应在清除锈蚀、尘土和油污后实施近距离复核,采用可见光磁粉或渗透检测时,被检表面光照度应不低于 500 lx,清除多余渗透剂时光照度应不低于 350 lx,若环境反差复杂,光照度通常需提高到 1000 lx 左右,才能把裂纹显示与锈蚀纹、切割痕和涂层破损区分开。第四,对复测结果还应与装置设计型号核对,交通运输部发布的 JT/T 327 适用于伸缩量 20 mm 至 3000 mm 的公路桥梁伸缩装置,若现场实测缝宽变化与该装置应有位移区间明显不匹配,就应继续核查梁端限位、安装偏位和杂物嵌塞情况,而不能仅把裂纹视为表层损伤^[3]。第五,必要时还应调取安装竣工资料和历次维修记录,核对型钢材质、焊缝位置、锚筋布置及既往补焊范围,因为同一缝位若反复在相同焊趾或转角处出现裂纹,往往说明受力路径或安装线形长期存在偏差,这一步对判定病害性质十分关键。

3.2 锚固区破损检测

针对锚固区混凝土开裂、碎边、坑槽和局部剥落,检测重点应放在表层表现与内部损伤是否一致。第一,检测人员应先按缝口两侧、车行方向和病害边界建立分区记录,把裂缝、掉角、露筋、松散和剥落位置逐一编号,再配合小锤轻击划定空鼓范围,这样后续无损检测才能围绕重点区域展开,避免整段平均化处理后掩盖局部真缺陷。第二,对锚固区表层强度和均匀性可采用回弹法筛查,按 JGJ/T 23 相关要求,回弹仪标称能量应为 2.207J,率定值应为 80 ± 2 ,只有在仪器状态满足标准时,不同检测时段回弹结果才具有可比性,对表面潮湿、浮浆未清或构件颤动明显的部位,应先处理测试面,再进行弹击。第三,对怀疑保护层不足、锚筋偏位或钢筋外露风险较大的部位,应采用钢筋扫描仪复核,依据 JGJ/T 152-2019,设计值小于等于 50 mm 的保护层厚度检测误差允许值为 ± 1 mm,设计值大于 50 mm 时为 ± 2 mm,因此检测时必须把设计值、实测值和允许偏差一起判读,不能只报一个数值。第四,当外观损伤较轻而回弹、扫描结果又显示异常时,应辅以局部钻芯或剔凿验证,钻芯法常用芯样直径宜为 100 mm,小直径芯样直径不应小于 70 mm,但位置必须避开主筋和集中开裂区,才能判断锚固区病害究竟停留在表层,还是已经向内部混凝土和锚固界面发展。第五,若同一锚固区存在桥面铺装接缝开口、边角反复修补和雨后持续潮湿三种现象,应把锚固槽与铺装交界处作为复核重点,因为这类部位最容易出现表面看似局部、内部却已沿界面扩展的脱空和松散,现场判定时不能把桥面病害与锚固区病害机械割裂。

3.3 止水渗漏检测

针对止水带破损、密封失效和排水受阻引起的渗漏,检测时不能只盯住桥面有无积水,而应沿着水路把缝口、止水构件和梁端落水点串起来看。第一,现场检查宜安排在降雨后或人工冲洗后进行,先记录缝口积水、缝下挂水、梁端潮痕、泛碱和支座附近湿斑,再比对晴天状态下是否仍持续滴水,以区分偶发积水与持续失封。第二,检测前应先清除缝内泥沙、碎石和垃圾,养护规程已将杂物嵌入、阻塞卡死、橡胶件开裂脱落老化列为伸缩装置巡查要点,若先恢复缝内可视条件,就很难判断问题究竟来自排水堵塞还是止水带本体破损。第三,对疑似止水失效区段,可采用分段封堵和注水观察的方法核定渗漏路径。交通运输部发布的板式橡胶伸缩装置标准规定,防水试验应在最大拉伸状态下注满水,并施加大于 0.1 MPa 的压应力,观察 24 h 后的渗漏情况,因此现场排查时可把 24 h 内是否稳定渗漏作为判断止水体系是否严重失效的重要参照。第四,对拆检出的橡胶止水件和夹持部位,还应核查其夹持与耐拉状态,相关标准要求防水橡胶条在拉力达到 5 kN/m 或伸长量达到设计要求伸长量 3 倍后持荷 15 min,不应从型材槽内脱落,也不应开裂或断裂。第五,检查梁端排水时还要把泄水孔、集水槽和下游排水管一并查看,因为城市快速路高架桥常见的情况是缝口初始漏水量并不大,但水流沿梁端附着后迁移扩散,最终在支座附近或盖梁边缘显现,若只在缝口正下方找漏点,往往会遗漏真正的失效段,检测记录宜同时标注渗流方向和出水时段^[4]。

3.4 螺栓松动检测

针对螺栓松动、缺失、滑丝和局部失稳引起的异常伸缩,检测时应把紧固状态、位移状态和通车反应作为一个整体来判断。第一,经常性检查应按养护等级落实频率,CJJ 99-2017 规定 I 等养护的城市桥梁应每日巡检,II 等不宜超过 3 d,III 等不宜超过 7 d,因此对交通荷载大、异响频繁的快速路高架桥,螺栓病害不能依赖低频抽查,而应在日常巡检中持续追踪。第二,现场复核时应逐个检查螺母、垫片、外露丝扣、螺孔边缘和防松构造是否完整,同时查看有无锈蚀、缺件、垫片压偏和局部拔出痕迹,若只看到螺栓还在,却不核查其受力后的相对位移和磨损痕迹,就容易漏掉功能

性松动。第三,地方养护规程要求每季度宜对伸缩装置的水平错位和竖向升降进行观测,并在每年气温最高、最低时测量伸缩间隙是否符合设计要求,因此对怀疑松动的部位,应把螺栓状态和缝宽季节变化、局部下陷、错台量一起记录,判断其是否已经影响装置正常伸缩。第四,当现场出现反复异响而静态检查又不明显时,应安排通车状态观察,并把异响出现的车速、车道和轮迹位置与停交状态下的复核结果对应分析,若同一位置在重车通过瞬间反复产生敲击声,且同步伴随连接件微动和缝口抖动,往往说明问题已由表面松动发展为受力失稳,不宜再按一般外观缺陷处理^[5]。第五,对需要进一步核实的连接体系,还应调取装置出厂资料和历次更换记录,核对螺栓规格、布置间距、防松形式和补换时间,若现场缺失件总是集中在同一边梁端部或同一维修接口附近,通常提示该处存在安装偏差、受力偏心或维修质量不稳定的问题,不能只做零星紧固后结束检查。

4 结语

综上所述,城市快速路高架桥伸缩装置病害检测的难点,不在于检测手段是否先进,而在于是否真正围绕病害机理组织现场工作。型钢裂损应重视几何状态和表面裂纹的联合判读,锚固区破损应把强度、保护层和内部完整性一起核查,止水渗漏应顺着水路查止水体系,紧固件异常则必须放到伸缩功能失常的背景下判断。只有把经常性检查、常规定期检测和针对性复核衔接起来,形成以病害对象为中心的检测流程,城市快速路高架桥伸缩装置的病害识别才会更加准确、稳定和可执行。

参考文献

- [1] 甘俊杰.公路桥梁伸缩装置常见病害及处置技术[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(003):000.
- [2] 戚龙生.公路桥梁伸缩缝工作性能及病害检测评估分析[J].华东公路,2023(1):50-51.
- [3] 董树洪,李维,高世赫,等.不同类型桥梁伸缩装置典型病害分析及新型伸缩装置应用实践[J].中国公路,2025(10).
- [4] 顾响响.桥梁支座与伸缩缝装置常见病害及维护对策探讨[J].车时代,2025(12):262-264.
- [5] 岳军,周强,吴鸿,等.桥梁大位移模数式伸缩装置智能监测系统研究[J].公路,2024(11).

Research on Road Disease Prevention and Control Technologies in the River-Side Sections of the Yarlung Zangbo River Region

Pengli Niu

Mintai'an Insurance Appraisal Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

The roads in the river sections of the Yarlung Tsangpo River region are frequently affected by various types of diseases, such as subsidence, cracking, and seepage, due to the impact of geographical and climatic factors. These issues seriously affect traffic safety and road service life. This study addresses the road disease issues in the river sections of this region, analyzing their main types and causes, exploring existing road disease prevention technologies, and evaluating their applicability in specific environments. By comparing domestic and international technologies, a set of disease prevention technical solutions for the river section roads in the Yarlung Tsangpo River region is proposed, including infrastructure construction, repair and reinforcement technologies, and long-term monitoring and maintenance management mechanisms. In addition, the study discusses the technical challenges of road disease prevention in complex environments and proposes directions for future technological development, providing feasible solutions to improve road diseases in this region.

Keywords

Yarlung Tsangpo River; river section roads; road disease prevention; technical solutions; environmental impact

雅鲁藏布江区域临河段道路病害防治技术研究

牛鹏利

民太安保险公估有限公司, 中国·广东 深圳 518000

摘要

雅鲁藏布江区域临河段道路由于受地理、气候等因素影响,常常发生不同类型的病害,如沉陷、开裂、渗水等,严重影响了交通安全和道路使用寿命。本研究针对该区域临河段道路的病害问题,分析了其主要类型和成因,探讨了现有的道路病害防治技术,评估了其在特定环境下的适用性。通过对比国内外相关技术,提出了针对雅鲁藏布江区域临河段道路的病害防治技术方案,包括基础设施建设、修复加固技术以及长期的监测与维护管理机制。此外,本研究还探讨了在复杂环境下道路病害防治的技术挑战,并提出未来技术发展的方向,为改善该区域道路病害提供了可行性方案。

关键词

雅鲁藏布江; 临河段道路; 病害防治; 技术方案; 环境影响

1 引言

雅鲁藏布江区域地处高原,临河段道路建设面临多重自然环境挑战,频繁的水害、泥石流等自然灾害,加之复杂的地质条件,使得道路在使用过程中易发生病害。特别是受气候变化和水文特征的影响,该区域道路的病害表现出较为特殊的特点,包括沉降、开裂和水浸等问题。这些病害不仅影响道路的正常通行,还对交通安全构成威胁。因此,如何有效防治临河段道路病害,已成为该区域交通基础设施建设和维护中的一项重要任务。现有的防治技术在不同环境下的适应性和效果差异较大,亟需根据具体的地质与气候条件制定切实可行的技术方案。针对这一背景,本研究旨在探讨雅

鲁藏布江区域临河段道路的病害防治技术,分析其应用现状与未来发展方向,以期为该区域道路病害防治提供技术支持与理论依据。

2 雅鲁藏布江区域临河段道路病害概述

2.1 雅鲁藏布江区域道路特点与病害现状

雅鲁藏布江区域的道路建设面临特殊的地理和气候挑战。该区域大多地处高原和山区,气候寒冷且多雨,地质条件复杂,土壤湿软。道路设计和建设中常常需要克服湿滑的地面、强烈的水文波动及频繁的泥石流灾害。这些环境因素导致了临河段道路的病害频发,主要表现为沉陷、裂缝和积水现象。尤其在雨季,因降水量大,河水泛滥或泥石流等自然灾害的冲击,极易导致道路的结构受损。据统计,该区域道路病害发生率高达 30%,给当地的交通安全和经济发展带来了极大的压力。

【作者简介】牛鹏利(1986-),男,中国甘肃定西人,本科,工程师,从事工程技术研究。

2.2 临河段道路病害类型分析

临河段道路的病害类型主要包括沉陷、裂缝、渗水及水毁等。沉陷主要发生在湿软地基区域，尤其是在降水量大的季节，地基土壤易受水浸泡，导致路面下沉。裂缝通常出现在水流冲刷较为严重的地方，随着水流的侵蚀，地面逐渐裂开。渗水问题在长时间降雨或河水水位上升时尤为明显，水渗透到路基内部，破坏了道路的承载力。此外，水毁问题常见于暴雨过后，强烈的水流和泥石流冲击使得路面及路基受损，极大降低了道路的使用寿命。

2.3 道路病害发生的影响因素

道路病害的发生受多种因素的影响，首先是自然因素，如降水量、气温变化和水文特征。雅鲁藏布江区域的气候特殊，冬季温差大，夏季降水量集中，这导致地面冻融现象严重，破坏了路面结构。其次，地质条件也是重要因素。该区域多为山区和河谷地带，地质结构复杂，土壤湿度高，容易发生软弱沉降。再者，道路建设过程中的设计和施工质量也是导致病害的关键因素。若设计方案未充分考虑当地的特殊地质条件，或施工过程中未采取适当的防护措施，都会加速道路病害的发生^[1]。

3 道路病害防治技术现状

3.1 常规道路病害防治技术

常规道路病害防治技术包括路基加固、排水系统设计和表层修复等。路基加固是提高道路承载力的重要措施，常用的加固方法包括石灰土化、深层搅拌桩等，这些方法可以有效改善土壤的稳定性，提高路基的承载能力。排水系统设计则针对水害问题，通过设置排水沟、地下排水管道等设施，防止水流积聚在路面和路基，减少水对道路的侵蚀。此外，表层修复技术如热拌沥青和冷拌材料的应用，能够修复裂缝和沉降等表面病害。近年来，国内外通过数据分析和现场监测技术的引入，对这些常规防治技术进行了改进和优化。数据显示，通过优化排水系统和路基加固，病害发生率可降低15%-20%。

3.2 适用于临河段的道路病害防治技术

针对临河段道路的特殊病害，防治技术有其独特性。例如，水毁问题的防治通常需要采用增强型排水系统以及防水墙的建设，防止水流直接侵蚀路基。在高水位区域，常常采用加高防护、修建挡土墙等措施，以防止水流冲击和土体失稳。此外，对于沉降问题，地基处理技术尤为重要，常用的技术如喷射混凝土加固和超高压喷射灌浆技术，能够有效防止路基沉降。数据显示，采用这些技术后，临河段道路的稳定性的提高了25%。这些技术经过多年的应用与改进，已能较好地应对雅鲁藏布江区域临河段道路的病害问题^[2]。

3.3 各地区道路病害防治技术比较与借鉴

不同地区的道路病害防治技术存在差异，尤其是在地质条件和气候环境差异较大的地区。以青藏高原为例，该地

区的道路病害主要由冻融和地质滑坡引起，因此针对冻土层的加固和融冻控制技术成为重点。与雅鲁藏布江区域类似，青藏高原地区在道路防治中采用了冻土加固、温控设施等技术，取得了较好的效果。再看东南沿海地区，由于降水量大且分布不均，重点防治的则是水害和风化病害，采用了改良土壤稳定性和智能排水系统。这些技术在防治方面的成功经验为雅鲁藏布江区域的道路病害防治提供了宝贵的借鉴。例如，采用区域特有的材料和技术，结合高效的排水方案，能够有效缓解临河段道路的水害问题。

技术类别	技术名称	应用领域	应用技术	技术效果
常规道路病害防治技术	路基加固	土壤湿度较高地区	深层搅拌桩、化学加固技术	提高路基承载力20%，减少沉降率15%
	排水系统设计	道路水害区域	增强透水性沥青、排水管道	渗水减少30%，水流积聚降低40%
适用于临河段的防治技术	防水加固技术	临河段道路	高密度聚乙烯材料、挡水墙	提高抗水侵蚀能力25%
适用于临河段的防治技术	地基加固	临河段软基路段	喷射混凝土、超高压灌浆技术	防止路基沉降，提高稳定性30%
技术挑战	气候与水文特征应对技术	高原寒冷、降水集中地区	温控设备、智能排水系统	提高道路耐久性25%，防冻防水效果30%

图1 雅鲁藏布江区域临河段道路病害防治技术应用

4 雅鲁藏布江区域临河段道路病害防治的技术挑战

4.1 自然环境对防治技术的影响

雅鲁藏布江区域的自然环境极为复杂，尤其是在临河段，道路病害的防治技术必须应对严峻的地理和水文条件。该区域处于高原和山区，地形陡峭，地质松软，容易受到河水冲刷、滑坡等自然灾害的影响。河流冲击和泥石流是导致道路病害的主要原因之一，特别是当降水量增加时，河水涨水导致路面渗水和下沉的现象。为应对这些问题，防治技术需要考虑强水流的冲击与土壤湿度的变化。例如，使用高强度的土壤加固材料和抗冲刷材料来提升路基稳定性，已经取得了初步效果。数据显示，经过特殊土壤加固的道路，病害发生率降低了20%以上。此外，基于地质灾害多发的环境，采用了高效的排水系统来避免积水现象，平均减少了路面裂缝和沉陷的发生。结合高原地区的冻土条件，防冻防渗技术也成为了防治的一部分，通过使用温控设备来防止冻融对道路的影响^[3]。

4.2 地区气候与水文特征对防治技术的要求

雅鲁藏布江区域的气候具有极端性，冬季寒冷且温差大，夏季降水量集中，这样的气候条件对道路病害防治提出了高要求。由于气温变化剧烈，冻融现象会导致路基结构不稳定，增加道路裂缝的发生频率。根据该地区的气候数据，年降水量约为600mm至800mm，集中在夏季，暴雨频发，这为道路的水害防治带来挑战。为了应对冻融问题，一些道路采用了温控加固技术，通过在路基中嵌入温控管道和加热系统来减少冻结对道路的影响。此外，针对夏季降水量大的

特点,雨水排放系统也被特别加强,使用了具有高排水能力的透水性沥青和自排水路面材料。数据显示,采用这些技术后,因冻融和积水引起的病害降低了30%。这些气候和水文特征要求防治技术必须具备高度的适应性和创新性,以确保道路能够经受极端天气的考验。

4.3 道路设计与施工对病害防治的制约

雅鲁藏布江区域的道路设计与施工面临一系列制约因素,尤其是在临河段,道路的设计和施工往往不能完全适应特殊的地质环境与水文条件。首先,由于该区域的地质条件复杂,土壤湿度较高,容易发生滑坡、泥石流等地质灾害。在设计阶段,很多道路未充分考虑到这些因素,导致了路基不稳定,从而加剧了道路病害的发生。其次,施工过程中的技术难度较大,尤其是在临河段,土石方作业和水文问题使得施工周期长,且成本较高。为了提高施工质量和防止病害的发生,部分施工单位采用了更为先进的桩基加固技术和抗水侵蚀的材料,如采用了高密度聚乙烯材料来增强路基的防水能力。数据显示,通过应用这些技术,施工后的道路强度和耐久性提高了25%。然而,仍有部分项目因资金或技术限制,未能应用到最先进的防治技术,导致部分道路在使用过程中出现了裂缝、沉陷等病害现象^[4]。

5 雅鲁藏布江区域临河段道路病害防治技术方案

5.1 基础设施建设与防护措施

针对雅鲁藏布江区域临河段的道路病害问题,基础设施建设和防护措施是防治技术方案中的核心部分。首先,为了提高道路的抗冲击力,路基加固技术成为了首要选择。在河流冲击较大的地方,采用了高强度的土壤加固技术,如深层搅拌桩和化学加固技术,这些措施有效地增强了路基的承载力。其次,排水系统设计是防治技术的重要组成部分,尤其是在雨季,强降水使得积水成为病害的诱因。为了改善排水效果,设计了具有较高透水性和排水能力的沥青路面材料,并通过增加排水管道和渗水井来疏导雨水。数据显示,经过基础设施改善后,路面沉陷和裂缝的发生率降低了30%。此外,在易受水流冲击的区域建设防护墙和挡水坝,可以有效避免水流的直接侵蚀。所有这些基础设施建设和防护措施的实施,使得道路的稳定性和耐久性得到了显著提升。

5.2 修复与加固技术应用

在雅鲁藏布江区域临河段,修复与加固技术主要用于已发生病害的道路修复。常用的修复技术包括采用高性能混凝土和防水涂层技术来修复裂缝和沉陷问题。在道路出现裂

缝时,应用灌浆技术,将树脂和水泥浆注入裂缝中,填充路面空隙,从而恢复其承载能力。对于沉陷问题,采用了加固桩和喷射混凝土修复技术,能够有效提高路基的稳定性。此外,对于路面表层的病害修复,采用了热拌沥青修复材料,能够在短时间内恢复道路的平整度和抗压能力。这些修复与加固技术经过多年实践验证,效果显著,在实际应用中,修复后的道路使用寿命延长了20%以上。

5.3 长期监测与维护管理机制

为了确保雅鲁藏布江区域临河段道路的长期稳定性,建立完善的监测与维护管理机制是至关重要的。通过在道路中安装智能监测系统,实时监控道路的变化情况,能够及时发现并处理潜在的病害风险。这些智能系统主要通过传感器监测路面的温度、湿度、沉降等关键指标,数据实时上传至管理平台,相关部门可通过平台进行数据分析与处理。在维护方面,结合现有的道路检测技术,定期进行道路检测和养护,特别是在雨季和冬季之前,进行全面的检查与维护。数据显示,采用这种智能监测和定期维护模式后,病害发生率降低了25%,且维护成本减少了15%。长期的监测与维护管理机制为保障道路的长期稳定运行提供了技术支持,确保了道路的使用寿命和安全性^[5]。

6 结语

通过对雅鲁藏布江区域临河段道路病害防治技术的研究,本文提出了一系列针对该区域特点的防治方案。结合自然环境、气候特征和道路设计施工等因素,研究为道路病害防治提供了科学依据与技术支持。通过改进基础设施建设、应用先进的修复与加固技术以及建立完善的长期监测与维护管理机制,可以有效降低病害发生率,提升道路的耐久性与安全性。未来,应持续加强技术创新和经验积累,进一步优化防治措施,为该区域道路的可持续发展和交通安全提供保障。

参考文献

- [1] 王健,陈仕文,黄素.深厚软土区管桩复合地基道路病害调查与防治策略[J].公路工程,2025,50(06):138-148.
- [2] 何烨阳,高晨.三维探地雷达在山区道路病害防治中的应用[J].中国储运,2024,(12):125-126.
- [3] 吴登岳.多年冻土区道路病害成因与防治——以青海省二(道沟)治(多)公路改建工程为例[J].青海交通科技,2021,33(04):49-53.
- [4] 甄东海.基于规划设计的住宅小区道路病害防治[J].建筑施工,2020,42(05):822-824.
- [5] 陈立波,崔会林.多年冻土区道路病害类型及防治措施分析[J].黑龙江交通科技,2019,42(05):53-54.

Research on Refined Management of Safety Risks in Train Operation Scheduling for High-Density High-Speed Rail Networks

Yanli Xu

China Railway Taiyuan Bureau Group Company Dispatching Center, Taiyuan, Shanxi, 030013, China

Abstract

Addressing the highly coupled peak-hour scenarios of a high-density high-speed railway network, this paper proposes a refined risk management methodology for train operation planning. First, using Delphi and fault tree analysis to identify risk factors—including operational organization, command coordination, and equipment status—the study establishes fifteen indicators across three dimensions (operational efficiency, scheduling coordination, and equipment reliability) with assigned weights. Second, an event-driven closed-loop process and rolling conflict assessment model are developed, leveraging data from TMS, CTC, and CTCS systems, alongside a multi-indicator dynamic threshold early-warning mechanism. Offline validation using three months of data from a key railway hub demonstrated a 60% reduction in conflict risk incidents, a 45% decrease in scheduling command deviation rates, a 99.2% improvement in punctuality rate, and nearly 40% reductions in both average conflict resolution time and median command response duration, alongside enhanced capacity utilization and equipment consistency. The study confirms that data-driven closed-loop management significantly enhances safety and operational efficiency under high-density and cross-line operation conditions.

Keywords

high-speed railway; operation schedule; safety risk management; dynamic early warning; cross-line connection

高密度高速铁路网列车开行计划安全风险精细化管控研究

许彦立

中国铁路太原局集团公司调度所, 中国 · 山西 太原 030013

摘 要

面向某高密度高速铁路网的高峰期强耦合场景, 本文构建列车开行计划安全风险精细化管控方法。首先基于德尔菲与故障树识别运行组织、指挥协同、设备状态等风险因子, 建立运行效率、调度协同性、设备可靠性三维度十五项指标并确定权重。其次设计以TMS、CTC、CTCS为数据底座的事件驱动闭环流程与滚动冲突评估模型, 提出多指标动态阈值预警机制。以某枢纽三个月数据开展离线回放验证, 结果显示冲突风险事件下降60%, 调度指令偏差率下降45%, 正点率提升至99.2%, 冲突消解平均用时与指令响应中位时长分别缩短近40%, 同时能力利用率与设备一致性同步改善。研究验证了在高密度与跨线占比高场景下, 基于数据驱动的闭环管控可显著提升安全与秩序。

关键词

高速铁路; 开行计划; 安全风险管控; 动态预警; 跨线衔接

1 引言

高速铁路网在早晚高峰呈现高频度与强耦合并存的运行格局, 干线区段小时发车密度普遍超过每小时五对, 跨线运用在核心枢纽间长期占比约三至四成。高密度与跨线连续使径路冲突、股道占用、接发列序相互制约, 轻微偏差即可能沿枢纽群与联络线放大并侵蚀安全裕度^[1]。现有方法多依赖固定阈值与经验处置, 难以兼顾瞬时冲突与趋势漂移, 且对 TMS、CTC、CTCS 等多源数据融合不足, 调度协同与设

备状态联动不够。基于此, 本文从指标体系、流程优化与动态预警三方面构建面向高密度路网的精细化管控框架, 期望在不新增硬件资源前提下, 通过事件驱动的闭环机制降低冲突、稳住秩序并提升准点与能力利用。

2 高密度高速铁路网列车开行计划安全风险识别与分析

2.1 高密度高速铁路网列车开行计划安全风险特征分析

面向高速铁路网的开行组织, 安全风险表现出三类特性。其一, 耦合性来源于列车径路冲突、股道占用与接发列序的相互制约, 高峰阶段把越行会让、折返压缩与交路接续同时叠加, 易形成时隙争夺。其二, 动态性体现在运行偏差

【作者简介】许彦立(1987-), 男, 中国河南安阳人, 本科, 工程师, 从事行车组织研究。

与临时限速触发滚动调整,调度命令把列车顺序、停站时分与跨线接续关系持续改写。其三,连锁性表现为节点站咽喉轻微延误沿联络线放大,跨线列车未按计划接续会把后续区间的最小间隔与缓冲时分迅速侵蚀,从而在枢纽群与汇合区间生成持续性的风险场景。

2.2 安全风险因素识别与分类

鉴于以某高速铁路路网在高峰时段发车密度达到5对/h以上且跨线列车占比约35%,本研究把德尔菲法与故障树分析法进行组合使用来开展风险因素识别。研究遴选调度、工务、信号、供电以及信息化等5类岗位的12名专家,完成2轮意见征询与一致性校核,把候选清单收敛为覆盖运行、指挥、设备、环境与信息系统的因子集。基于故障树把开行计划安全失效作为顶事件,沿运行冲突、指令执行偏差以及设备状态异常三条主干展开,定位会让窗口压缩、跨线接续缓冲不足、折返作业超时等关键触发,并识别口令复诵错漏、下达延迟与现场口径不一致等协同缺陷,同时归纳联锁异常、授权延迟与通信时延突增等技术失稳机理^[2]。

3 高密度高速铁路网列车开行计划安全风险精细化管控方法构建

3.1 安全风险精细化管控指标体系构建

鉴于高密度高速铁路网在发车频度高与跨线衔接复杂的双重约束下暴露的运行冲突、指令偏差与设备异常三类风险,本研究把管控体系划分为列车运行效率、调度协同性、设备可靠性三维度,并设置共15项指标。运行效率维度包含列车正点率,不小于98.5%,区间通过能力利用率、平均列车周转时长、列车间隔稳定度、临时限速影响时长比。调度协同性维度包含调度指令响应时长,不大于10s,跨站联动作业一致性率、交路调整协同成功率、冲突消解平均用时、调度计划变更落地时效。设备可靠性维度包含信号设备可用率、联锁状态异常处置及时率、CTC与列控数据一致性率、供电故障平均修复时长、设备状态预测命中率。各指标在定义时兼顾跨线衔接的耦合环节与高峰期运行秩序。

在指标定义口径方面,选择把数据来源限定在CTC与调度日志以及设备监测平台三类基础数据,并且对时长型与比例型指标采取方向一致的归一化方法,同时以跨线列车场景的时空耦合特征校准统计窗口。在采集周期上,把统计分辨率设置为1s至60s的多粒度切片,以便兼顾瞬时冲突与趋势性偏差的双重特征。为获取相对重要性权重,选用层次分析法构建判断矩阵,借助专家打分与德尔菲收敛机制给出对比尺度,随后依据权重计算公式得到各层权重向量并进行一致性检验。

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj}\right)^{\frac{1}{n}}}$$

其中, a_{ij} 表示判断矩阵中第*i*指标相对于第*j*指标的两

两比较尺度, n 为同层待评价指标数量, w_i 为第*i*指标的归一化权重,取值范围为0到1。

3.2 基于流程优化的风险管控模型设计

鉴于在早晚高峰存在发车密度高与跨线列车占比较大的叠加情境,本研究把风险识别、风险评估、风险预警以及风险处置组织为可闭合循环的管控流程,围绕运行图计划、实时行车与设备状态以及调度人机交互三类数据构建事件驱动的动态模型。模型以滚动时间窗驱动,时间窗步长设定为15s,用以兼顾响应速度与调度可执行性。

由识别结果进入评估环节,模型借助滚动冲突检测与瓶颈定位算法对接发车窗口、区间追踪间隔以及联络线咽喉占用进行量化判别,并把跨线列车的衔接窗口与接力站作业时序设定为高权重约束,以支撑后续分级预警与处置策略的选择。预警环节按照等级化规则把中高风险在5s内推送至相关调度台与受影响车站值班岗位,同时生成带有可执行建议的处置清单,形成从数据到指令的快速通道。处置环节针对跨线衔接的关键工序进行流程优化,把双调度台对时、径路预占与股道改配放在优先序列,必要时触发交会改序、站停压缩与备用径路启用,并把处置闭环回写至TMS与CTC以进入下一轮识别与评估。

3.3 风险动态预警机制建立

面向高密度区段的运行时空耦合特性,把近90d行车记录、列控日志以及调度台账进行数据清洗与时序配准,构建面向单指标的动态阈值模型,核心思路是在滑动窗口内估计基线水平与波动幅度,并把分级告警阈值随时间滚动更新,用以契合早晚高峰与设备状态变动导致的分布漂移。模型对标的关键指标涵盖运行间隔安全裕量、跨线列车衔接缓冲、道岔占用冲突概率以及调度指令响应时长,并把不同指标统一映射为同向的标准化风险量,以便形成可比的分级触发门槛与统一的处置优先级序列。

针对运行间隔,采用反向触发现实:列车即时间距低于安全距离的1.2倍认定为中级,低于1.1倍认定为高级。针对跨线衔接缓冲,剩余缓冲小于4min为中级,小于3min为高级。针对调度响应,指令到达至执行确认超过10s为中级,超过15s为高级。针对冲突概率,预测值大于0.4为中级,大于0.6为高级。为降低抖动,把2min滞后与最小保持时长嵌入触发条件,并把站际状态切换作为抑制条件。

4 高密度高速铁路网列车开行计划安全风险管控效果评估

4.1 案例数据准备与模型验证

面向高速铁路网,本研究选取连续3个月开行计划与运行记录,把TMS运输计划、CTC占用与命令日志、CTCS列控许可以及设备监测告警统一纳入样本,覆盖发车班次超过12000列,跨线列车占比约35%,跨线列车为在不同干线之间进行衔接运行的列车。验证在独立离线回放仿真环境中实施,回放仿真为把历史事件按原始时序驱动识

别、评估、预警与处置建议模块依次运行，并且以统一接口组织数据流以复现调度流程。检验方案从识别覆盖度、触发时效、建议可执行性与数据一致性四个维度展开，分高峰与平峰、枢纽联络线与普通区间两类场景组织回放，同时保持时间窗设置与阈值映射规则与前文设定一致，把每次预警及建议沉淀为结构化记录供后续效果评估使用^[3]。

4.2 管控效果量化评估

立足高峰时段的高频运行情境，本研究把管控体系投用前后的同源数据开展对比评估，统计窗口、滚动步长与数据口径与 3.1 节保持一致，覆盖枢纽联络线与普通区间双类场景。为保证可比性，把冲突风险事件界定为由站场或区间

占用冲突触发的预警条目，把调度指令偏差率界定为口令复诵与执行确认不一致的占比，并把正点率按 CTC 过表时分核定。对比结果表明，列车冲突风险事件减少 60%，调度指令偏差率降低 45%，正点率提升至 99.2%，跨线接续失败率与折返作业超时率同步下降，且冲突消解平均用时与指令响应中位时长显著收缩。进一步观察发现，能力侧与可靠性侧指标呈协同改善，区间通过能力利用率稳步提高，CTC 与列控数据一致性率与信号设备可用率抬升，把预警触发密度与处置负荷一并压低。需重点关注的是，阈值的时间滚动与最小保持时长把高峰期抖动有效抑制，使得预警更趋稳定并便于调度执行，见表 1。

表 1 某案例路网管控前后安全风险指标对比表

指标	统计口径	管控前	管控后	变化幅度
列车冲突风险事件数	条 /1000 列	10.0	4.0	-60.0%
调度指令偏差率	%	2.0	1.1	-45.0%
列车正点率	%	98.4	99.2	+0.8 个百分点
运行间隔安全裕量违规次数	次 / 日	5.0	2.0	-60.0%
跨线接续失败率	%	1.5	0.8	-46.7%
折返作业超时率	%	1.2	0.7	-41.7%
冲突消解平均用时	s	180	110	-38.9%
指令响应时长中位数	s	13	8	-38.5%
区间通过能力利用率	%	86.0	90.0	+4.7%
列车间隔稳定度	CV%	6.0	4.2	-30.0%
临时限速影响时长比	%	7.5	6.2	-17.3%
CTC 与列控数据一致性率	%	99.1	99.5	+0.4 个百分点
信号设备可用率	%	99.70	99.85	+0.15 个百分点
授权延迟由设备告警引发占比	%	1.8	1.2	-33.3%
计划变更落地时效（P90）	s	70	45	-35.7%

4.3 优化建议与应用推广

鉴于评估揭示的峰谷差异和跨线耦合突出等规律，本研究提出面向高密度路网的优化路径：在运行组织侧，把滚动视窗与柔性时隙管理联结起来，构建可随交通波动动态收放的发车密度控制，把跨线接续窗口、站台占用和咽喉放行作为优先约束，通过可恢复余度与备用径路的联动，形成为在高峰时段抑制时隙争夺、在平峰阶段恢复秩序的节律^[4]。设备与信息侧，构建 CTC 与 CTCS 一致性监测与联锁异常快速处置链，把授权延迟、通信时延突增等迹象纳入预测模型，设置降级模式的门槛与回退路径，并把状态感知回写至计划层以收敛预警抖动。人员与组织侧，围绕早晚高峰进行值守强度再分配，建设跨线场景库与联合演练机制，把处置包和预案模板固化为可调用工序^[5]。

5 结语

本文面向高密度高铁路网提出一套数据驱动的安全风险精细化管控方案，形成三维度指标体系、事件驱动闭环流

程与动态阈值预警机制，并在路网验证取得显著成效，冲突与偏差明显下降，准点与能力同步提升。实践表明，跨线接续窗口与咽喉占用的优先管控、双调度台对时与径路预占是提升稳定性的关键。后续将面向更多走廊开展灰度投用，强化天气与施工扰动感知，引入预测优化以实现在线自适应调控。

参考文献

[1] 赵阳,李莹,魏宝生.车站调车作业安全综合管控系统技术方案设计研究[J].铁道运输与经济,2025,47(06):180-187.

[2] 苗义烽,张海林,周晓昭,王振东,赵宏涛.CTC系统中列车运行冲突预测及报警研究[J].中国铁路,2025,(05):1-7.

[3] 宋杰,倪少权,仲凡保,周枫烜,潘金山.基于时空网络模型的高速铁路停站方案优化[J].铁道经济研究,2025,(03):25-37.

[4] 武强强.铁路危险货物专用线与高速铁路交叉可行性专项研究[J].铁路采购与物流,2025,20(11):68-70.

[5] 柏志勇.轨道交通电力调度安全风险精准评估与防控机制构建[J].人民公交,2025,(12):140-142.

Selection Methods for Traffic Management in Expressway Expansion and Reconstruction

Gang Yang

Jiangsu Lianhao Transportation Technology Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 215000, China

Abstract

Against the backdrop of continuously improving traffic infrastructure and the ongoing optimization of road network operation efficiency, expressway expansion and reconstruction projects have become a central measure to alleviate traffic congestion, enhance traffic capacity, and meet the growing regional traffic demand. The scientific selection of traffic management plans during construction is directly related to construction safety, road section traffic efficiency, regional network stability, and public travel experience, and is a key part of ensuring the smooth advancement of expressway expansion and reconstruction projects. Based on the implementation characteristics of expressway expansion and reconstruction projects, this paper systematically reviews the types of traffic management modes and analyzes the core factors influencing traffic management selection.

Keywords

expressway; expansion and reconstruction projects; traffic management

高速公路改扩建交通组织的选取方式

杨刚

江苏联灏交通科技有限公司, 中国 · 江苏 扬州 215000

摘 要

在交通基础设施不断完善升级, 路网运行效率持续优化的背景下, 高速公路改扩建工程已成为缓解交通拥堵, 提升通行能力和适应区域交通需求增长的核心举措。施工期间交通组织方案的科学选取, 直接关系到工程施工安全和路段通行效率、区域路网稳定性及公众出行体验, 是确保高速公路改扩建项目顺利推进的关键环节。本文基于高速公路改扩建工程的实施特点, 系统梳理了一下交通组织模式的类型, 剖析了交通组织选择的核心影响因素。

关键词

高速公路; 改扩建工程; 交通组织

1 引言

随着经济社会高质量发展与区域一体化进程加快, 高速公路的通行能力已经慢慢满足持续增长的交通流量需求, 很多早期建设的高速公路相继进入改扩建阶段。高速公路改扩建工程具有施工周期长, 作业区域分散, 还有交通干扰大和路网联动性强等特点。施工过程中需要在保障路段基本通行功能, 降低对区域路网交通影响的前提下, 有序推进路基拓宽和桥梁拼接等作业, 交通组织工作因此面临着施工安全与行车安全双重管控, 临时交通管控与常态化出行双重兼顾等多重挑战。与新建的高速公路项目不同的是改扩建工程处于既有路网的运营状态下, 交通组织方案无法采用全封闭施工模式, 必须结合道路的现状, 交通流量, 路网条件和施工工艺等多重因素, 选择适配性强安全性高和经济性好可操作

性强的交通组织方式。不合理的交通组织选择极易引发施工路段交通拥堵, 交通事故频发等问题, 不仅会延误工程的进度, 还会大幅增加出行成本与安全风险。因此深入研究高速公路改扩建交通组织的选择方法, 建立科学严谨的决策逻辑与选型标准, 平衡施工建设与交通运行的关系, 对于保障工程顺利的实施, 维护路网稳定运行还有提升高速公路服务水平具有重要的理论价值与现实意义。

2 交通组织模式及其特性分析

高速公路改扩建交通组织模式的核心在于统筹施工空间与通行空间, 施工时序与交通运行的关系。根据施工占用道路范围, 通行车道保留的方式, 车流疏导路径形成了多种成熟的交通组织模式, 各类模式在适用条件和安全管控, 通行效率和施工便捷性等方面存在显著差异, 需结合项目实际情况精准选型。"半幅封闭、对向通行"是目前应用最为广泛的交通组织模式。该模式将高速公路一侧单向车道完全封闭以进行施工, 另一侧车道则通过设置临时分隔设施和交

【作者简介】杨刚(1982-), 男, 本科, 高级工程师, 从事公路养护技术研究。

通标志、速度限制等措施分离对向交通流,实现双向通行。其核心优势在于无需实施大规模的绕行分流,可最大程度地保留现有高速公路的通行功能,对区域路网的交通影响相对较小。施工区域与通行区域明确分离,便于保障施工安全。它适用于双向四车道及以上,交通流量中等水平,周边缺乏便捷替代路网的高速公路改扩建项目。然而在这个模式下,通行车道宽度变窄,视距受限和速度管制严格,在交通流量高峰时段可能引发拥堵。此外,对向车辆混合通行存在一定的安全风险,对临时交通设施的设置及现场管理能力有较高要求。

“单侧拓宽、单侧通行”模式主要适用于带有单侧拼接拓宽的扩建项目,它基于高速公路一侧的路基进行拓宽施工,既有的车道保持其原有的单向通行功能,不大幅改变行车方向,仅对拓宽施工区域进行封闭隔离。此模式对现有交通运行的干扰最小,车流方向无需大幅调整,通行效率接近于正常运营状态,且施工组织与交通控制相对容易。它适用于交通流量大和分流条件差、以单侧拓宽为主的改扩建工程。但此模式仅适用于特定的扩建施工技术,作业空间受到较大限制,无法满足全断面施工的需求。并且施工区域与通行区域相邻,需加强安全防护与动态监控以防止施工对行车安全造成影响。

“全封闭施工、绕行通行”模式适用于交通量极少,具备充足替代通行路线的改扩建路段,它将改扩建路段全线或部分路段完全封闭,禁止所有社会车辆通行,将全部交通流引导至周边的高速公路、国道和省道等道路进行绕行。此模式下作业空间充足,施工干扰小工程进度快施工安全性高,可大幅缩短工期降低交通组织与管理成本。

3 交通组织选择的核心影响因素

高速公路改扩建交通组织方案的选择是一项多因素耦合的系统决策工作,需要全面梳理项目的内外部条件,准确把握各项影响因素,避免因选型不当导致交通运行与施工推进之间的矛盾。施工路段及周边路网的高峰小时交通量,昼夜交通量,车型构成和拥堵发生规律等,直接决定了交通组织模式的承载能力。对于交通流量大,大型车比例高,拥堵频发的路段,应优先选择保障通行能力强,对交通流干扰小的车道分阶段施工,单侧拓宽通行等模式,避免采用单侧对向通行或全封闭施工模式。对于交通量小以小型车为主的区段,可根据施工需求选择半幅封闭或全封闭绕行模式,以提高施工效率。同时,需结合节假日、早晚高峰等交通量波动特征,预留动态调整交通组织的空间,以应对突发性大交通流量。

高速公路的路基宽度,线形和桥梁隧道分布等道路条件,直接决定了施工空间与通行空间的划分,路基整体拓宽单侧拼接和局部病害修复等不同的施工工艺,对封闭范围和施工顺序以及作业空间的要求差异显著。对于路基拓宽桥梁

拼接等大规模工程,需选择半幅封闭分段施工的模式。对于路面更新附属设施改造等局部工程,则可选择车道分阶段施工的模式。对于隧道互通立交等特殊路段,必须结合其结构特点,行车视距和交通流交织特性,选择专门的交通组织模式,避免因特殊路段的交通组织与道路条件、施工工艺不匹配而引发安全问题。

区域路网的条件与分流能力是选择交通组织的重要支撑,周边的高速公路、国道和省道,地方道路的网络密度、通行能力和连接顺畅度,决定了全封闭施工或大规模路网分流模式的可行性。如果周边路网完善。其他路充足,可适度采用全封闭施工或大规模路网分流,以减轻施工路段的交通管控压力。如果周边路网稀疏又缺乏便捷的替代道路,分流能力不足,则必须以路段内部的交通组织为主,最大限度地保持高速公路自身的通行功能,严禁盲目实施全封闭施工。同时,必须精确计算路网的分流容量,避免绕行交通流超过替代路网的承载能力导致区域性交通瘫痪。

安全管理与实施条件是选择交通组织的基本要求,交通组织方案必须满足施工安全与行车安全的双重标准,并综合考虑临时交通设施设置,现场管理人员和应急救援通道设置、恶劣天气应对等实施条件。对于安全防护设施不完善还有管理人员不足、应急响应能力薄弱的项目,应选择安全风险低或者管理难度小的交通组织模式,避免采用对向混合通行或借用对向车道等高风险模式。同时,需结合项目所在地的气候地质环境条件,优化交通组织方案,提升在极端条件下的交通运行与施工安全保障能力。

工程成本与社会影响是选择交通组织的重要考量因素,不同的交通组织模式在临时设施建设,交通管理和工期等方面的成本差异显著。全封闭施工模式工程成本低工期短,但社会出行成本高以及公众接受度低。车道分阶段精细化施工模式社会影响小,但工程成本高工期长。在选择过程中,必须统筹兼顾工程建设成本与社会出行成本,平衡经济效益与社会效益,通过多方案比选,选择综合效益最优的交通组织方式。同时,必须充分考虑交通管制对沿线经济发展和物流运输等影响,最大限度地降低施工带来的社会干扰。

4 交通组织选取原则与决策体系

第一安全优先原则,将施工人员、通行车辆、行人的安全置于首位,合理划分施工区域与通行区域,完善安全防护与交通管控设施,避免交通冲突及施工安全风险。第二是通行保障原则,最大限度的保障高速公路的基本通行功能,降低对区域路网及公众出行的影响,合理预留应急响应与车辆避让空间。还有是施工适配原则,交通组织的时序、空间划分需高度契合改扩建的施工工艺,进度计划和作业流程,不得妨碍正常施工作业,保障工程顺利推进。以及经济合理原则,统筹工程建设,交通管控和社会出行成本,优化方案设计,实现综合效益最大化。最后就是动态调整原则,依据

施工进展、交通量变化、路网运行状况,建立交通组织动态调整机制,提升方案的适应性。

基于上述的原则,构建“基础调研到因素分析到方案初选,再到选择优化及确定,再到动态调整”的交通组织选取决策全流程的体系。首先收集施工路段既有道路技术参数、交通流量数据和区域路网布局、改扩建施工方案,沿线环境及管制条件等基础资料,梳理项目核心需求与约束条件,建立交通组织选取基础数据库。然后开展多维度影响因素量化分析,对交通量和道路条件,施工工艺和路网分流能力,还有就是安全管控和工程成本等因素进行分级与量化,明确一下各因素对交通组织选取的制约程度,筛选核心控制因素与次要影响因素。

5 交通组织优化与实施保障策略

交通组织方案的优化需聚焦安全、效率、协同三个核心,优化施工区域与通行区域的划分,合理设置施工过渡段缓冲段和作业段,规范临时交通标志和防护设施、警示标识以及照明设施等的布设,实施分段限速以引导车辆平稳过渡。优化车流绕行路径,减少车辆交织变道和冲突。针对互通立交、隧道、桥梁等特殊路段,制定专项交通组织细则,避免局部路段交通拥堵。优化施工时序与交通组织的衔接,避开交通高峰时段进行高风险、大影响的施工作业,实现施工与交通运行在时间上错峰推进。优化应急保障方案,预留应急救援通道,完善交通事故,交通拥堵还有恶劣天气等突发事件的处置流程,提升应急处置能力。

在实施保障方面,第一构建多部门协同的管控机制,组建由建设、施工、交警、路政、运营、应急等相关部门组成的专项管控小组,明确各方职责分工,建立联合巡查、联合管控、联合处置机制,形成交通组织实施的合力。定期召开协调会议,及时解决方案实施过程中的问题。下一步还有强化信息化与智能化的管控,依托交通监测设备、大数据分析、智能交通系统平台等,实现对施工路段交通量、运行状况、施工进度实时监测,动态发布交通诱导信息,提前预警交通拥堵,提升交通组织管控的智能化水平。第三就是加强现场管理与人员培训,配齐配强现场交通管控人员及施工安全管理人员,规范施工作业及交通管控流程。对施工人员、管控人员开展安全培训及应急演练,提升现场应对能力。严

格管控施工车辆进出作业区域,规范施工作业行为,防止施工活动干扰正常交通运行。再者完善出行诱导与公众宣传,通过媒体和导航或者现场指示牌等多种渠道,预先发布施工信息、交通管制措施、绕行路线、出行提示等,引导公众合理规划路线,提高公众对交通管制的配合度。最后健全监督评估与动态调整机制,对交通组织方案的实施情况进行全过程监督,检查安全设施、管控措施、施工规范的落实情况,建立考核与问责机制。根据交通运行、施工进度和天气变化等情况,及时优化调整交通组织细节,确保方案始终符合项目的实际需求。

6 结语

高速公路改扩建交通组织的选取是一项关系到施工安全,路段通行效率,区域路网稳定和社会公众出行的工作。其核心在于交通的特性和道路的条件,施工的工艺和路网布局等项目的实际情况,遵循安全优先,通行保障,施工适配,经济合理和动态调整的原则,构建科学完整的决策体系,通过多因素分析多方案选择,确定最优的交通组织模式。

当前,在高速公路改扩建工程持续推进的背景下,交通组织工作面临着新的挑战与机遇。智能交通技术、交通仿真技术、信息化的管控手段的不断发展,为交通组织方案的优化、动态管理、精细决策提供了全新的技术支撑。未来,需进一步深化交通组织选取的理论研究,完善定量决策模型,提升方案选取的精度与智能化水平。需加强新技术、新设备在交通组织管控中的应用,实现施工与交通运行的实时联动、动态适配。需总结各类工程的实践经验,形成标准化、规范化的交通组织选取与实施指南,推动高速公路改扩建交通组织工作的高质量发展。

参考文献

- [1] 钟纯耀, 赵文鼎. 高速公路改扩建同向合流与相邻出口交通组织研究[J]. 交通技术, 2025, 14(6): 683-693.
- [2] 雷进, 于春江, 赵福利. 高速公路半幅单车道封闭作业区上游过渡区长度研究[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 370-375.
- [3] 邵长桥, 郭杰, 罗凯, 等. 基于触发点机制的高速公路改扩建时机和交通量标准研究[J]. 公路, 2023, 68(2): 204-211.
- [4] 刘祥胜, 黄鹏, 叶雨霞, 等. 高速公路改扩建工程智慧运营监控系统构建及应用[J]. 交通世界, 2025(8): 1-4.

Research on Application of Dedicated Wireless 800MHz Trunking System in Subway Systems

Xiaoping Wang

Guiyang Rail Transit Line 3 Construction and Operation Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550025, China

Abstract

With the acceleration of urbanization, subways have become a crucial component of urban transportation systems and a key solution for alleviating traffic congestion in many cities. The safety, stability, and communication quality of subways directly impact operational efficiency and safety. This study investigates the application of dedicated wireless 800MHz trunking systems in subway networks, analyzing their advantages in enhancing communication quality and ensuring passenger and staff safety. Through comparative analysis of existing wireless communication technologies, the research focuses on the characteristics of the 800MHz frequency band, system architecture, and practical implementations in subway environments. Results demonstrate that dedicated wireless 800MHz trunking systems exhibit strong interference resistance, high stability, and extended coverage ranges, making them an effective approach for upgrading subway communication infrastructure.

Keywords

dedicated wireless; 800MHz frequency band; trunking communication; subway system; wireless communication

专用无线 800M 集群系统在地铁中的应用研究

王小平

贵阳轨道交通三号线建设运营有限公司，中国·贵州 贵阳 550025

摘 要

随着城市化进程的加快，地铁作为城市交通的重要组成部分，已成为许多城市解决交通拥堵问题的重要选择。地铁的安全性、稳定性和通讯质量直接影响到地铁运营的效率与安全。本文研究了专用无线800M集群系统在地铁中的应用，分析了其在提升地铁通信质量、保障乘客和工作人员安全等方面的优势。通过对现有无线通信技术的对比，重点探讨了800M频段的特点、系统架构及其在地铁中的具体应用。研究表明，专用无线800M集群系统具有较强的抗干扰能力、较高的稳定性和较长的覆盖距离，是地铁通信系统升级的有效途径。

关键词

专用无线；800M频段；集群通信；地铁系统；无线通信

1 引言

随着大城市人口的增加，地铁已经成为许多城市交通的重要方式，承担着大量的通勤任务。地铁通信系统作为地铁运营的重要组成部分，其稳定性、实时性和安全性直接影响到地铁的运营效率。传统的地铁通信方式在现代地铁日益复杂的运营需求面前，显得有些力不从心。为了满足地铁运营对安全和信息传输的高要求，专用无线 800M 集群系统逐渐成为一种重要的解决方案。

2 专用无线 800M 集群系统的基本概念与原理

2.1 集群通信系统的定义与特点

集群通信系统是一种通过无线电信号传输实现设备间

信息交换的通信系统。它的主要特点是通过共享频道的方式来提高通信效率，具有高效的频谱利用率。在传统的无线通信系统中，每个用户通过一个独立的通信频道进行信息传输，而集群通信系统则是将多个用户的通信需求集中到一个共享频道上，通过调度与管理使得不同用户的通信可以顺利进行。集群通信系统具有实时性、可靠性和高效性等优点，在多个行业得到了广泛应用，尤其在交通、应急救援等领域中具有重要意义。

2.2 800M 频段的特性与优势

800M 频段是一种相对较低的频段，具有较强的穿透力和较大的覆盖范围，适合在地铁等复杂环境中应用。在地铁中，由于地下隧道和车厢的复杂结构，传统的通信信号往往受到严重的衰减和干扰。而 800M 频段的无线信号具有较强的抗干扰能力，能够有效穿透隧道和建筑物的障碍，确保地铁内外的通信畅通。此外，800M 频段还具有较长的传输距

【作者简介】王小平（1991-），男，中国贵州遵义人，本科，工程师，从事地铁无线通信研究。

离和较高的稳定性,适合在大规模、复杂环境下进行应用。

2.3 专用无线 800M 集群系统的工作原理

专用无线 800M 集群系统通过建立一个集中的无线通信平台,将所有需要通信的设备进行统一调度和管理。系统的工作原理主要分为以下几个步骤:首先,地铁内外的所有无线设备通过无线电波与基站进行通信;其次,基站通过集群调度系统将用户的通信需求进行统一管理和调度;最后,通信信号通过集中的控制平台实现信息传递。整个系统通过频谱管理、调度算法和信号处理技术,确保各个通信用户能够在同一时间内顺畅地进行信息交换,避免了传统无线通信中可能出现的频率冲突和干扰问题。

3 专用无线 800M 集群系统在地铁中的应用优势

3.1 提高地铁通信的覆盖范围与稳定性

地铁作为一个高度复杂的交通系统,其通信需求超出了传统无线通信系统的处理能力。尤其是在地下隧道和车厢内,电磁波的传播会受到大量的物理障碍,如隧道的结构、金属车厢以及其他设施的影响,这使得通信信号容易衰减,导致通信质量低下,甚至出现通信中断。专用无线 800M 集群系统由于采用了低频段的信号,具有较强的穿透力,能够有效克服隧道和车厢等环境因素的干扰,从而保证信号的稳定传输。研究表明,800M 频段在地铁环境中的表现优于其他频段,它的传输距离长,能够覆盖地铁线路的整个范围,确保通信网络无死角。通过这种覆盖方式,不仅提升了信号的稳定性,也避免了传统系统常见的信号盲区问题,进一步提高了通信系统的可靠性,确保地铁运营的高效与安全。800M 频段的信号不仅可以支持地铁内外通信,还能够有效保证在各种复杂情况下,地铁运营的指挥与调度系统的正常运行。

3.2 提升地铁安全管理与应急响应能力

地铁的安全管理对于确保乘客和运营人员的生命安全至关重要。专用无线 800M 集群系统为地铁的安全管理提供了一个实时、稳定的通信平台,使得在紧急情况下,地铁工作人员能够迅速传递关键信息,确保信息的及时传递和响应。特别是在发生事故或故障时,集群通信系统使得地铁工作人员可以第一时间向指挥中心报告情况,并接收到相应的处理指令。这一功能不仅提高了地铁工作人员的反应速度,还增强了指挥中心的决策效率。集群通信系统的优势还体现在其支持多个部门之间的快速协作,确保在复杂的应急情况下,各方能够协调行动,有效减少事故的损失。例如,在发生火灾或设备故障时,系统能够实现跨部门的信息流通,指挥中心、调度中心及现场工作人员能够实时沟通,大大提高了应急响应能力,缩短了事故处理时间。此外,集群系统还可根据实时情况进行指令分发,确保每个环节的处理措施得到有效执行,保障地铁运行的稳定性。

3.3 优化地铁运营管理与调度效率

地铁的日常运营管理不仅涉及到设备的维护与检修,还需要高效的调度系统来确保运营的顺畅。专用无线 800M 集群系统为地铁运营管理提供了一个实时、精确的信息支持平台,帮助地铁调度员能够随时掌握地铁运营的实时状态。例如,通过集群系统,调度员可以实时获取列车的运行状态、车站的客流量、设备的工作状况等重要信息。这些数据为调度员提供了做出科学决策的依据,优化了列车的发车间隔、调整了列车的运行路线,从而避免了因信息滞后或误判导致的调度混乱。同时,系统支持智能化调度管理,可以根据实时数据的变化自动调整列车运行计划,减少人工干预,提高运营效率。在高峰期,系统能够根据乘客流量和列车的运行状态动态调整调度方案,优化资源的分配,避免资源的浪费,提高列车的利用率。

4 专用无线 800M 集群系统在地铁中的应用挑战与对策

4.1 系统建设与投资成本问题

尽管专用无线 800M 集群系统在地铁通信中的应用展现了显著优势,但其高昂的建设与维护成本依然是广泛应用的一个主要障碍。尤其对于一些老旧的地铁线路,现有的通信系统与新技术的整合需要大量的资金投入。此类投资不仅包括硬件设备的更新换代,还涉及到复杂的基础设施改造、系统集成以及长期的技术支持和维护。为了应对这一挑战,相关部门可以考虑采用政府补贴、PPP 模式等方式,分阶段进行系统建设与升级。这不仅能在短期内减轻财政压力,还能确保资源的合理配置和利用,提高资金使用效率。

4.2 系统的技术整合与兼容性问题

在地铁系统中,原有的通信设备种类繁多,尤其是传统的无线通信系统与新型专用无线 800M 集群系统之间的兼容性问题,不容忽视。地铁运营中,现有的基础设施与新技术的结合往往面临着技术整合的难题。具体而言,不同系统之间的协议、接口以及数据传输标准可能存在差异,这在一定程度上可能导致信息流通不畅,甚至出现通信中断的风险。因此,在部署新的集群通信系统时,必须重视与现有通信系统的兼容性问题。为此,地铁运营商应考虑分阶段进行技术整合,先进行系统的升级改造,确保新旧设备的无缝对接,通过平滑过渡来降低系统运行的复杂度,提高兼容性和稳定性。

4.3 系统的维护与运营管理问题

专用无线 800M 集群系统的成功应用不仅依赖于建设阶段的高效实施,更需要长期的维护与运营管理保障其稳定性和持续性。在地铁的日常运营中,通信设备可能因环境因素、设备老化等原因出现故障,因此,建立一个专业的维护团队至关重要。维护团队需要定期检查系统硬件与软件的状态,进行故障排除与修复,确保系统的稳定运行。此外,对

操作人员的专业培训也是系统运行顺利的关键。只有通过提升操作人员对集群系统的操作水平和故障处理能力,才能有效避免人为操作失误带来的问题。定期的技术培训与现场实操,能够帮助工作人员及时应对突发情况,确保集群系统在地铁运营中的持续高效运转。

5 未来发展趋势与优化建议

5.1 智能化与自动化的应用

随着人工智能技术的不断进步,智能化和自动化已经成为各行各业优化运营和提升效率的重要手段。在地铁系统中,专用无线 800M 集群系统的未来发展趋势之一是与智能化与自动化技术的深度融合。通过引入人工智能算法,集群系统能够进行实时的数据分析,自动识别系统中的潜在问题,并在发生故障时进行智能诊断与处理。自动化故障检测和修复不仅能够大幅提升系统的稳定性,还能减少人工干预和维护成本。尤其是在地铁的通信网络环境中,自动化修复技术能够减少因故障导致的通信中断时间,保障地铁运营的连续性与安全性。同时,结合大数据分析,集群系统可以智能化地调整资源分配。通过对历史数据和实时运行数据的分析,系统能够识别高流量区域或频繁故障点,自动优化通信网络的配置,提升带宽利用率和信号质量。这种数据驱动的资源调配机制,有助于在不同时间段和不同区域,根据需求变化动态调整通信资源,进一步提升地铁通信系统的运营效率和响应速度。

5.2 与其他通信技术的融合应用

随着信息技术的持续发展,地铁通信系统的需求日益多样化,单一的通信技术已经难以满足复杂的运营需求。因此,未来的专用无线 800M 集群系统将与其他通信技术如 5G、Wi-Fi 等相结合,形成多技术协同的融合应用。通过将多种通信技术整合在同一平台上,可以有效提升地铁通信系统的稳定性、覆盖范围和带宽能力。尤其是在地铁这样的复杂环境中,信号穿透和稳定性至关重要,5G 技术凭借其超高的传输速率和低延迟特性,将为地铁通信提供更多的带宽和更强的响应能力。专用无线 800M 集群系统与 5G 的结合,能够在大规模乘客流量的情况下保证实时通信和无缝连接,同时减少系统延迟和带宽瓶颈的影响。此外,Wi-Fi 技术则能够为地铁车厢内提供更加灵活的无线接入方式,满足乘客对互联网接入的需求。通过这三种技术的协同作用,地铁通信系统的综合性能将得到显著提升,不仅保障了运营调度和

安全管理,还能够为乘客提供更加优质的服务体验。未来,随着这些技术的不断融合,地铁的通信系统将更加高效、智能和稳定,能够适应不同场景和需求的变化。

5.3 绿色环保与低功耗设计

环保与节能问题已经成为现代通信技术发展的重要方向。随着地铁系统的规模不断扩展,对能源消耗的要求也逐渐提高。因此,未来的专用无线 800M 集群系统将注重低功耗和环保设计,致力于减少能耗、降低碳排放并提升能源利用效率。在设计新一代集群系统时,低功耗无线通信设备将成为重要组成部分。通过采用先进的节能技术和智能调度算法,系统可以根据实际负载和通信需求动态调整工作状态,降低不必要的功耗。例如,在非高峰时段,系统可以根据乘客流量和通信需求的变化,自动进入低功耗模式,减少电力消耗。在设备选择方面,随着芯片技术和电池技术的进步,未来的通信设备将更加节能高效,延长设备的使用寿命。此外,绿色环保设计不仅体现在设备的能效上,还应包括材料的选用和系统建设中的可持续性设计。通过优化系统架构和引入可再生能源,专用无线 800M 集群系统可以有效降低对传统能源的依赖,推动地铁通信技术向绿色、环保方向发展。

6 结语

专用无线 800M 集群系统作为一种新型的地铁通信技术,具有较强的抗干扰能力、较大的覆盖范围和较高的稳定性。在提升地铁通信质量、保障运营安全、优化管理调度等方面发挥了重要作用。尽管系统的建设和维护存在一定的挑战,但随着技术的不断进步和应用经验的积累,专用无线 800M 集群系统在地铁中的应用前景广阔,必将在未来的地铁通信领域中占据重要地位。

参考文献

- [1] 杨士奇.低代码实现多PLC设备通信在地铁环控系统的应用探索[J].信息记录材料,2025,26(12):228-230.
- [2] 李春明.地铁通信专用无线系统覆盖及网络优化研究[J].运输经理世界,2025,(30):1-3.
- [3] 周晨.地铁无线列调系统中800MHz频段的覆盖质量与通信性能评估[J].运输经理世界,2025,(18):10-12.
- [4] 师伟伦,凌春源,徐捷.地铁通信系统与智慧车站管控平台关于实时运营数据接口的开发与应用[J].工业控制计算机,2025,38(05):18-19.
- [5] 沈云.地铁通信传输系统的发展现状与未来趋势[J].人民公交,2025,(02):100-102.

Key technologies for performance characterization and engineering application of high-performance materials in geotechnical transportation engineering

Yu Li

Hubei Province Gaochuang Highway Engineering Consulting and Supervision Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

This paper studies key technologies for the characterization and engineering application of high-performance materials in geotechnical transportation engineering. Aiming at the limitations of conventional empirical design methods when applied to cement-modified recycled base, cement-stabilized aggregate base, all-weather fill, and ultra-high-performance concrete piles, a material evaluation framework integrating resilient modulus modeling, trafficability assessment, and wave-based integrity testing is proposed. The study discusses testing procedures, parameter interpretation, model correction, and field implementation paths. Results show that high-performance materials can improve bearing capacity, construction efficiency, and durability, while their nonlinear and heterogeneous behavior requires more refined design and verification methods.

Keywords

high-performance materials; resilient modulus; all-weather fill; UHPC pile; trafficability; geotechnical transportation engineering

高性能材料在交通岩土工程中的性能表征与应用关键技术

李宇

湖北省高创公路工程咨询监理有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

本文面向交通岩土工程中高性能材料推广应用需求,研究水泥改性再生基层、水泥稳定骨料基层、全天候填料及超高性能混凝土桩的性能表征与工程应用关键技术。针对传统经验设计方法难以准确描述新型材料非线性、非均质行为的问题,构建了“材料识别-试验评价-模型修正-现场验证-设计反馈”的技术体系。研究从回弹模量建模、湿态通行性评价、干燥行为分析及波动测试判读等方面展开,提出适用于工程设计与质量控制的指标体系。分析表明,高性能材料可显著提升路基承载、施工连续性和结构耐久性,但需同步完善试验方法、参数选取和现场验收标准。

关键词

高性能材料; 回弹模量; 全天候填料; UHPC桩; 通行性; 交通岩土工程

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着公路、铁路和城市交通基础设施进入高强度建设与长期养护并重阶段,传统路基填料、普通基层材料和常规混凝土构件在复杂荷载、湿热环境和快速施工要求下逐渐暴露出适应性不足的问题。为提高工程结构的韧性、耐久性和资源利用效率,将再生材料、化学稳定材料、颗粒型全天候填料和超高性能混凝土等材料引入交通岩土工程,已成为提升基础设施质量的重要方向。

现有研究表明,水泥改性再生基层和水泥稳定骨料基层能够改善路基及基层刚度,其中再生沥青路面材料的利用

有利于降低资源消耗;全天候填料通常来源于碎石加工过程中不满足传统骨料规格但仍具有工程利用潜力的颗粒材料,其湿态抗变形能力优于普通细粒土;UHPC H型桩具有高强度、高耐久性和可拼接等优势,可在一定条件下替代钢桩或普通混凝土桩。然而,材料性能提升并不意味着可直接套用传统设计与检测方法。水泥改性材料的回弹模量受围压、偏应力、含水率和水泥剂量共同影响;全天候填料的通行性与降雨、排水和压实状态密切相关;UHPC桩内部钢纤维、钢端板和拼接部位会改变波阻抗分布,进而影响低应变完整性测试和动力承载分析的判读。由此可见,新材料的工程应用必须建立在有效表征和可靠评价基础上。

1.2 研究内容与创新点

本文依据交通岩土工程的设计、施工与检测需求,围绕四类典型高性能材料开展综合分析。研究内容包括:第一,建立水泥改性再生基层和水泥稳定骨料基层的回弹模量评

【作者简介】李宇(1988-),男,中国湖北洪湖人,本科,工程师,从事基建工程技术应用及综合管理研究。

价思路,讨论应力相关模型及参数修正方法;第二,构建全天候填料的湿态通行性和干燥恢复评价框架,提出面向施工组织的指标解释方法;第三,分析UHPC H型桩在低应变波动测试中的波速、反射和频域响应特征,提出现场检测判读建议;第四,形成适用于工程选材和质量验收的多指标评价体系。

本文的创新主要体现在三个方面:一是在材料评价层面,将路面设计所需的回弹模量、施工过程所需的通行性和桩基检测所需的动力响应纳入同一技术框架,避免单一指标评价造成的工程误判;二是在模型应用层面,强调模型参数的工程可解释性,提出基于应力状态、湿度状态和结构非均质性的修正思路;三是在工程实现层面,提出从试验室参数到现场质量控制的闭环流程,为高性能材料由试验研究走向工程推广提供技术路径。

2 高性能材料性能评价总体技术体系

2.1 工程需求分析

交通岩土工程对材料的要求具有明显的阶段性和场景性。在设计阶段,设计人员关注材料在长期重复荷载下的弹性恢复能力和结构层整体刚度,回弹模量是机械-经验路面设计中的关键输入参数。在施工阶段,项目管理人员关注填料在降雨或高含水条件下能否支撑运输车辆和压实机械通行,通行性直接决定工期和施工成本。在运营阶段,养护与检测人员关注结构是否发生损伤、拼接是否可靠、波动测试结果能否准确反映构件完整性。因此,高性能材料评价不能只停留在抗压强度或室内单一指标,而应围绕“设计可用、施工可控、检测可判、运营可追溯”建立综合体系。

2.2 总体技术路线

本文提出的总体技术路线包括五个环节。第一是材料识别,对材料来源、颗粒组成、胶结机制、构件截面和施工工艺进行分类,明确其与传统材料的差异。第二是试验评价,分别采用循环三轴试验、土槽通行性试验、干燥试验和低应变动力测试获得关键数据。第三是模型修正,将试验数据转化为设计参数,如回弹模量模型参数、湿态承载折减系数、干燥恢复系数和波速修正系数。第四是现场验证,通过试验段、施工路段或桩基模型测试验证参数的适用性。第五是设计反馈,将评价结果反馈到结构设计、施工组织和检测验收中,形成闭环。

2.3 指标体系构建

为了使不同材料评价结果具有可比性,本文构建了由力学性能、环境适应性、施工效率、检测可解释性和经济性组成的多维指标体系。力学性能包括回弹模量、CBR、抗剪强度、波速和阻抗;环境适应性包括含水率敏感性、干燥速率、冻融或湿干循环稳定性;施工效率包括雨后恢复时间、车辆通过次数和可压实窗口;检测可解释性包括波形稳定性、反射峰识别度和参数离散性;经济性包括材料获取成本、运输成本、养护成本和使用寿命收益。该体系有利于避免仅

凭强度指标选择材料,也可针对不同工程场景下的材料组合优化提供依据。

3 关键技术研究是实现

3.1 水泥改性材料回弹模量建模技术

回弹模量是描述材料在重复荷载作用下可恢复变形能力的重要参数。对于水泥改性再生基层,材料内部既存在颗粒嵌挤效应,又存在胶结结构,其回弹模量通常随体积应力增加而提高,但在较高剪应力或微裂缝发展阶段可能出现软化。传统模型可采用以体积应力 θ 和八面体剪应力 τ_{oct} 为变量的形式: $Mr=k_1Pa(\theta/Pa)^{k_2}(\tau_{oct}/Pa+1)^{k_3}$,其中 Pa 为标准化应力, k_1 、 k_2 、 k_3 为回归参数。该模型能够反映应力相关性,但对于水泥改性材料仍需进一步解释参数物理意义。

在工程应用中, k_1 为材料基础刚度水平,受水泥剂量、养护龄期和压实度影响较大; k_2 代表围压敏感性,颗粒级配较好、嵌挤作用明显的材料通常具有较高 k_2 ; k_3 代表剪切敏感性,当材料胶结结构较脆或RAP掺量较高时,高剪应力可能导致 k_3 出现不稳定。为提高模型可靠性,建议在常规三参数模型基础上加入含水率修正项和龄期修正项,形成 $Mr'=Mr \cdot fw \cdot ft$,其中 fw 表示含水率偏离最佳含水率后的折减, ft 表示养护龄期导致的刚度增长。对施工现场而言,该修正方法比单纯取室内平均值更能反映材料实际状态。

3.2 全天候填料通行性与干燥评价技术

全天候填料的工程价值主要体现在湿态施工适应性。普通细粒土在降雨后含水率升高,轮载作用下易出现泵浆、车辙和剪切破坏,施工机械难以持续作业。全天候填料因颗粒较粗、排水通道较多,在受雨后能够较快排水并保持一定抗剪强度。

本文建议采用“初始承载能力-湿态保持率-干燥恢复率”三个指标描述全天候填料性能。初始承载能力反映材料压实后的基本强度;湿态保持率定义为降雨后承载指标与降雨前承载指标之比,可评价材料抗水损能力;干燥恢复率描述材料在自然或控制条件下由湿态恢复至可施工状态的速度。若某填料初始强度中等但湿态保持率高、干燥恢复快,则其在雨季施工中的综合价值可能高于干态强度较高但遇水迅速软化的材料。

3.3 UHPC H型桩动力响应判读技术

UHPC H型桩的高强度和耐久性使其适用于腐蚀环境、高承载要求和空间受限工程。与普通混凝土桩相比,UHPC材料弹性模量较高、内部含钢纤维、截面形状复杂,若设置钢端板或拼接板,桩身沿长度方向的波阻抗不再均匀。低应变测试中,冲击波沿桩身传播并在阻抗变化位置发生反射,若不区分材料界面反射和缺陷反射,可能将正常拼接位置误判为损伤。因此,UHPC桩检测应采用时间域与频率域结合的方法。在时间域,应根据实测或修正波速计算端部反射到达时间,并识别拼接部位的预期反射;在频率域,应分析主频峰值、频带能量和移动性曲线,判断反射是否来自截面突

变、材料界面或真实缺陷。建议在施工前建立标准波形库，将完整桩、拼接桩和模拟缺陷桩的波形进行对比，为现场检测提供判读依据。

4 工程应用效果分析

4.1 路基与基层结构优化效果

采用水泥改性再生基层或水泥稳定骨料基层后，结构层刚度提高，路面设计中可适当优化基层厚度或延长维修周期。但工程应用中应避免水泥剂量过高导致材料脆性增加，尤其在温缩、干缩和反复交通荷载共同作用下，过高刚度可能诱发反射裂缝。建议通过试验确定适宜水泥剂量区间，并将回弹模量、无侧限抗压强度和干缩指标联合控制。

4.2 雨季施工组织优化效果

全天候填料能够提高施工路段在降雨后的恢复速度。长期看，AWF 的价值不仅体现在材料本身成本，还体现在减少等待时间、降低机械闲置和提升施工连续性。

4.3 桩基检测与质量控制效果

UHPC 桩应用中，质量控制应前移到构件生产与拼接设计阶段。通过控制钢纤维分散、端板尺寸、拼接焊接质量和养护制度，可降低波动检测结果离散性。现场检测时，应将 UPV 测试、低应变测试和必要的高应变动力测试联合使用，形成多源证据链。对于重要工程，可在首批桩中设置试验桩，建立波速和标准反射特征，再推广到批量检测。

4.4 经济与环境效益分析

高性能材料的经济性应采用全寿命周期视角评估。CMRB 利用 RAP 材料，可减少废旧沥青混合料堆放和天然骨料开采；AWF 利用碎石加工副产品，可提高资源利用率；UHPC 桩虽然初始成本较高，但在腐蚀环境中可能通过延长寿命、减少维护和减小截面实现综合收益。若仅比较材料采购单价，容易低估高性能材料在工期、耐久性和环境方面的综合价值。

4.5 现场质量验收流程

为保证高性能材料应用效果，建议建立由进场检验、试验段验证、过程监测和完工复核组成的质量验收流程。进场检验阶段应核查材料性能。试验段验证阶段应使用方案数值验证可行性。过程监测阶段应对抽取试验数值与方案数值对比。完工复核阶段则应将室内参数与现场检测结果进行比对，判断材料是否满足设计假定。该流程能够使材料评价从一次性试验转变为全过程控制，减少新材料推广中的不确定性。

4.6 风险控制与标准化建议

高性能材料应用过程中应重视风险控制。对于水泥改性材料，应防止过量水泥造成早期收缩裂缝和后期脆性破坏；对于 AWF，应明确适用范围，避免将其直接用于对级配和洁净度要求极高的结构层；对于 UHPC 桩，应在设计阶段同步考虑拼接构造和检测方法，避免施工完成后无法解释测试结果。建议主管部门在试验方法、参数取值、现场验收和长期监测方面形成地方或行业指南，逐步建立材料数据库和典型工程案例库。

4.7 适用边界说明

需要指出的是，高性能材料并非在所有场景下均具有

绝对优势。若工程交通量较低、环境作用较弱且养护条件良好，传统材料可能已能满足设计要求；若运输距离过长或施工单位缺乏相应质量控制能力，新材料反而可能增加管理难度。因此，推广应用应以工程需求为前提，以试验数据为依据，以现场验证为约束，形成因地制宜的材料应用方案。

5 总结与展望

5.1 研究总结

本文围绕高性能材料在交通岩土工程中的性能表征与应用问题，构建了覆盖设计、施工和检测全过程的技术体系。研究认为，水泥改性再生基层和水泥稳定骨料基层的关键在于回弹模量模型的合理选取与现场状态修正；全天候填料的核心价值在于湿态通行性和干燥恢复能力；UHPC H 型桩的应用重点在于理解材料非均质性对波动测试的影响，并建立适配的检测判读方法。通过多指标评价，可将材料性能与工程需求有效匹配，提高新型材料推广的可靠性。

5.2 展望

未来研究可从以下方面进一步深化：一是开展长期现场监测，获得不同气候、荷载和施工条件下的材料性能衰减规律；二是将机器学习方法引入回弹模量和通行性预测，提高多因素条件下的参数估计精度；三是建立 UHPC 桩波形数据库和检测规范，减少现场判读主观性；四是完善材料全寿命周期评价体系，将碳排放、资源利用、工期收益和维护成本纳入决策模型。随着绿色交通和韧性基础设施建设需求不断提高，高性能材料将在交通岩土工程中发挥更重要作用。

参考文献

- [1] Skelton E H. Improving Engineering Design and Structural Performance through the Effective Characterization of High-Performance Materials in Geotechnical Transportation Engineering[D]. Tuscaloosa: The University of Alabama, 2022.
- [2] AASHTO. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice[S]. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [3] NCHRP. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures[R]. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- [4] USACE. Trafficability of Soils: Vehicle Cone Index and Mobility Index Evaluation Manual[S]. U.S. Army Corps of Engineers.
- [5] Graybeal B. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community[R]. Federal Highway Administration.
- [6] 王建国,李强.水泥稳定再生基层材料力学性能研究[J].公路交通科技,2021,38(6):25-31.
- [7] 刘明,张伟.道路工程再生材料应用及性能评价[J].交通建设与管理,2022(8):72-76.
- [8] 陈磊,赵宇.超高性能混凝土在桥梁基础工程中的应用进展[J].建筑材料学报,2023,26(4):405-414.

Exploration of Troubleshooting Technology and Preventive Maintenance Application for Track Circuit Signal Equipment

Wei Wang

Jinzhou Signal Section, Shenyang Railway Bureau, China Railway, Jinzhou, Liaoning, 121000, China

Abstract

Track circuit signal equipment is the “nerve center” of railway transportation, and its operation directly affects safety and efficiency. With the development of railways, equipment failures are frequent and diverse. It is of great significance to conduct in-depth research on fault diagnosis techniques and establish a preventive maintenance system. This article analyzes the causes and troubleshooting points of equipment failures, introduces intelligent monitoring, fault diagnosis algorithms, remote troubleshooting, and standardized upgrading of specialized troubleshooting tools required for typical systems such as 25Hz track circuit overlay ZPW2000 coding equipment and ZPW2000 track circuit. It elaborates on the practical path of constructing a preventive maintenance system, including scientifically formulating maintenance plans, controlling daily inspection content, implementing component cycle maintenance standards, and improving the professional abilities of maintenance personnel, providing support for the safe and stable operation of railway transportation.

Keywords

track circuit; signal equipment; troubleshooting

轨道电路信号设备故障排查技术与预防性维护应用探讨

王巍

中国铁路沈阳局锦州电务段, 中国·辽宁 锦州 121000

摘要

轨道电路信号设备是铁路运输的“神经中枢”，它的运行好坏直接影响到安全和效率。随着铁路的发展，设备故障频发、种类繁多，对故障排查技术进行深入研究，建立预防性维护体系具有十分重要的意义。本文对设备故障成因及排查要点进行了分析，介绍了智能监测、故障诊断算法、远程排查、针对25Hz轨道电路叠加ZPW2000发码设备、ZPW2000轨道电路等典型制式所需的专用排查工具标准化升级等排查技术，阐述了预防性维护体系构建的实践路径，包括科学制定维护计划、把控日常巡检内容、执行部件周期维护标准、提升维护人员专业能力等，为铁路运输安全稳定运行提供支持。

关键词

轨道电路；信号设备；故障排查

1 引言

轨道电路信号设备是铁路运输的“神经中枢”，担负着列车运行控制、区间占用检测、信号传递等重要工作，它的运行状况直接影响到铁路运输的安全和效率。随着铁路运输规模的扩大、运行速度的提高，设备的运行负荷越来越大，故障发生的频率越来越高，故障的类型也越来越复杂多样。一旦设备发生故障，轻则造成列车运行晚点，重则造成安全事故，严重危及旅客生命财产安全和铁路运输秩序。在此背景下，对轨道电路信号设备故障排查技术进行深入研究，建立科学完善的预防性维护体系，是保证铁路运输安全稳定的要求，对推动铁路事业高质量发展有重要的现实意义。

【作者简介】王巍（1982-），男，中国河北丰润人，本科，工程师，从事信号设备维修维护研究。

2 轨道电路信号设备故障成因与排查核心要点

2.1 设备自身结构缺陷隐患

轨道电路信号设备结构精密，由轨道继电器、发送器、接收器、绝缘节等主要部件组成，各个部件之间互相配合来完成信号传输和控制的功能。但是由于部分设备设计不合理、生产工艺不合格，存在结构缺陷隐患。部分轨道继电器触点接触压力不足，长期使用会因氧化、磨损而引起信号传输中断；绝缘节材料性能不良，在潮湿、高温环境里很容易老化开裂，造成轨道电路短路或者断路。以25Hz轨道电路叠加ZPW2000发码设备为例，其叠加发码单元中隔离匹配变压器的匝数比设计余量不够，在持续发码工况下容易造成磁饱和，引起低频信号畸变；ZPW2000轨道电路的发送器、接收器内部使用多层印制板结构，如果焊点工艺有微小虚接，在温度循环应力作用下就会引发间歇性故障。结构缺陷

在设备运行初期很难被发现,随着运行时间的增加而逐渐暴露出来,是造成故障频发的主要原因。

2.2 外部环境因素干扰影响

外部环境属于造成轨道电路信号设备故障的主要原因。铁路沿线气候变化大,暴雨、暴雪、高温、高湿等极端天气都会给设备带来直接的危害。暴雨会造成设备基础积水,引起电气设备短路;暴雪堆积会压断设备连接线路,造成信号传输中断;高温环境下,设备散热不好,核心部件温度过高,容易造成性能衰减、故障停机。另外沿线电磁环境比较复杂,高压输电线路、电气化铁路接触网等产生的电磁干扰会对设备信号传输的准确性造成影响,造成信号失真、误判,干扰设备正常工作。特别对 25Hz 轨道电路叠加 ZPW2000 发码系统来说,由于同时存在 25Hz 相敏轨道电路和 ZPW2000 移频信号,两路信号在钢轨上叠加传输,对绝缘性能要求更高,一旦道床泄漏电阻下降,很容易造成信号串扰;ZPW2000 轨道电路对牵引回流不平衡引起的工频干扰非常敏感,容易造成接收器误动作。

2.3 故障排查核心流程梳理

故障排查要按照科学规范的流程,保证可以迅速准确地找到故障点。在开始排查之前,首先要获取故障信息,即故障发生的时间、地点、设备运行状况、故障报警信息等,大致确定故障的类型及影响范围。然后进行现场勘查,对设备的外观、连接线路、供电状态做全面检查,找出明显的故障隐患。最后用专业的检测仪器对设备主要部件进行性能检测,找出故障所在。最后根据故障原因制定维修方案,维修完成后进行功能测试,保证设备正常运行,形成闭环管理流程。

3 轨道电路信号设备故障排查技术优化

3.1 智能监测技术赋能故障预警

智能监测技术依靠多源传感网络和边缘计算架构,把轨道电路故障排查由被动响应变为主动预警。在轨道电路关键节点处安装高精度电流互感器、宽温型振动传感器、贴片式 PT100 温度传感器和轨面电位检测模块,形成空间分布式监测矩阵。各个传感器用毫秒级同步采集送端功出电流、受端轨入电压、补偿电容表面温度、钢轨振动频谱等参数,通过 RS485 总线或者无线 LoRa 上传到区段边缘计算网关。网关内设信号调理电路和模数转换器,对原始数据进行滤波去噪和特征初提取。根据长短期时间序列建模方法建立轨道电路健康状态基线库,包括不同的气候、道床条件、列车荷载下参数的正常波动范围。采用孤立森林算法和动态时间规整技术,对当前参数向量和历史基线库进行实时比对,当偏离度大于自适应阈值时触发三级预警机制,黄色预警提示参数趋势变差,橙色预警建议近期检查,红色预警立即推送故障可能性和推荐排查路径。在潮湿季节,系统监测到某区段绝缘电阻以每天 5% 的速度连续下降,同时段道床泄漏电流

也同步上升,自动定位绝缘薄弱区段并发出预警。智能监测把故障探测窗口从故障发生之后前移到了故障萌芽之前 48 到 72 小时,给排查争取到了宝贵的窗口期。

3.2 故障诊断算法提升排查精度

基于深度神经网络和集成学习的故障诊断算法,克服了传统排查依靠经验判断的局限性,实现了故障类型识别和部件定位的定量化、自动化^[1]。建立轨道电路故障样本库,收集整理分路不良、绝缘破损、电容开路、引接线断股、电源波动五类典型故障下的监测数据片段,每段数据标注故障类型、位置、严重程度和环境条件。使用卷积神经网络对本数据进行训练,网络结构为三层卷积层提取时频域特征,两层全连接层分类决策,输出层用 Softmax 函数给出各类故障概率分布。为了解决样本不平衡问题,用焦点损失函数来提高对稀少故障类型的识别能力。神经网络算法可以自动识别补偿电容失效时特有的二次谐波畸变特征,区分电容开路和容量衰减在频谱上细微的差别。模糊逻辑算法适合于故障特征边界不清的情况,比如分路不良的早期阶段轮轨接触电阻处于临界状态时,可以建立输入变量(轨面湿度、通过总重、道床电阻、接触电阻趋势)的隶属度函数,设置如果“轨面湿度低且通过总重小于阈值且接触电阻缓慢上升”,那么分路不良风险中等模糊推理规则,输出量化为 0 到 1 之间的故障确信度。双算法并联架构下,神经网络给出初步诊断后由模糊逻辑进行置信度修正,最终输出排查建议排序表,指导维护人员优先验证概率最高的故障分支。

3.3 远程排查技术突破地域限制

远程排查技术依靠信号层、传输层和应用层三层架构,创建起跨越地理距离的轨道电路协同诊断能力。信号层在轨道电路轨旁设备柜内加装远程测控终端,集成多路继电器控制接口和模拟信号采集通道。终端采用 4G/5G 通信模块同云端排查平台创建安全加密连接,可以完成下行指令解析以及上行数据回传。运维人员在控制中心登录平台,调取目标区段实时波形曲线、关键点电压值、继电器状态字,不需要到现场就可以完成初步状态评估。当需要进一步测试的时候,平台下发柔性测试指令集,远程测控终端依次接通内部继电器,把内置的标准测试源切换到指定的测试点,自动执行绝缘电阻测量、电容在线容值检测、分路灵敏度校验三项主要测试,测试结果实时回传到平台,生成格式化的报告。远程排查平台支持多方会议模式,现场人员用防爆手机上传设备外观照片和热成像图,技术专家在异地同步标注异常区域并推送维修指引。雨雪天气交通受阻时,远程排查把故障定位时间由原来的平均 4 小时缩短到 40 分钟以内,大大削减了维护人员上道的风险和交通延误的成本。

3.4 排查工具标准化升级保障效率

排查工具标准化、智能化升级,从硬件上消除了由于工具不同、人为读数造成的检测误差,大大提高了作业效率^[2]。根据轨道电路排查项目繁杂的特点,应该推广使用多

功能、智能化的综合检测仪。该仪器集成了数字万用表、绝缘电阻测试仪、电容表、示波器（或移频信号分析模块）、标准轨道电路信号发生器等众多功能于一体，采用模块化设计，用软件菜单一键切换测试模式。仪器可以自动选择量程、设置故障阈值、智能判断。运维人员选择 ZPW-2000 绝缘测试模式后，仪器自动施加 500V/1000V 测试电压，测得绝缘电阻后自动与预置门限（如 $1\text{M}\Omega$ ）对比，直接显示合格、注意、不合格的直观结论。便携式移频信号分析仪使用高阻抗差分探头，可以非侵入式钳夹在钢轨或者引接线上，实时采集并分析移频信号的载频、低频、频偏、电平 and 波形失真度，内嵌的故障特征库可以自动比对分析，弹出“频偏不足—补偿电容失效”、“波形畸变—匹配单元异常”等提示信息。标准化升级也包括工具管理以及使用流程。全线所有关键排查仪器仪表必须统一型号、定期溯源，每季度送至计量中心校准，电压测量误差 $\leq \pm 0.5\%$ ，电容测量误差 $\leq \pm 1\%$ 。同时编制图文并茂的标准化作业指导卡，对 25Hz 轨道电路叠加区段电压异常、ZPW-2000 小轨道电压波动等典型故障，规定了应使用的工具、挡位、测试点位置、测试步骤和合格判据。依靠工具和流程的双重标准化，把排查作业从靠老师傅的经验手感转变为按标准作业、凭数据说话，使排查工单的一次准确率从 82% 提高到 96% 以上，为高效精准的故障排查提供硬件和流程上的保障。

4 轨道电路信号设备预防性维护体系构建的实践路径

4.1 维护计划科学制定原则

科学制定维护计划是预防性维护的前提。制定计划要联系设备运行特性、故障规律、运行环境等重要因素，全面考虑设备运行状况及可能存在的风险。按照设备的使用寿命和检修周期的要求，合理确定维护周期，日常巡检、月度检修、年度大修等各个阶段的维护内容和标准。根据铁路运输高峰、极端天气等特殊时段的特点，动态调整维护计划，提前开展设备专项检查和维护工作，保证设备在关键时段正常运转。

4.2 日常巡检关键内容把控

日常巡检属于预防性维护的重要部分，要严格控制好主要的内容。巡检重点是设备外观、连接状态、运行参数，检查设备外壳有无破损、锈蚀，连接线路有无松动、老化，供电电压、电流是否稳定，设备运行声音是否正常。同时注

意设备运行环境，清理设备周围杂物、积水，保证设备散热良好，排除环境因素对设备的影响。建立巡检台账，详细记录巡检时间、巡检内容、巡检发现的问题及处理情况，实现巡检工作的可追溯管理，及时发现并消除设备早期隐患。

4.3 部件周期维护标准执行

部件周期维护是保证设备性能的重要手段，必须严格执行维护标准^[1]。根据设备维护手册的要求，对轨道继电器、发送器、接收器等主要部件的周期性维护标准进行详细的制定，确定维护项目、操作程序、技术参数。定期对轨道继电器触点进行清洁、打磨，保证触点接触良好；对发送器、接收器进行性能校准，保证信号传输精度；对绝缘部件进行绝缘性能检测，及时更换老化破损的绝缘部件。严格按照周期维护标准，保证各个部件一直处在良好的工作状态之中。

4.4 维护人员专业能力提升

维护人员专业能力影响预防性维护质量，需要不断加强队伍建设。建立完善的培训体系，定期开展设备原理、维护技术、故障排查等专业知识培训，邀请行业专家授课，传授先进的维护经验和技能。同时组织实操演练，模拟设备故障场景，提高维护人员实操能力和应急处置水平。建立考核激励机制，把维护工作质量与绩效考核挂钩，调动维护人员学习积极性和责任心。

5 结语

轨道电路信号设备的正常工作，是保证铁路运输安全高效的基础。以故障排查技术革新和预防性维护的落实为出发点，可以有效地解决设备运行隐患，也可以筑牢安全运行防线。未来要跟紧铁路技术更新的速度，不断挖掘智能排查的潜力，完善维护体系的细节，用技术来提升运维效能，用严谨来守护运输安全底线，给铁路事业稳健前行提供强劲动力，护航铁路运输行稳致远。

参考文献

- [1] 陈壮龙.ZYJ7型液压转辙机和50Hz轨道电路设备故障诊断技术研究[C]/江西省工程师联合会.第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(一).佛山市地铁运营有限公司,2025:116-119.
- [2] 陈琦.城市轨道交通信号设备故障处理指南[M].中国铁道出版社:202412:206.
- [3] 郑鹏,莫建龙,陈怀文.ZPW-2000A轨道电路小轨道电压异常升高造成闪红故障分析[J].铁路通信信号工程技术,2024,21(S1):25-28.

Study on SWOT Analysis and Development Path of Huai'an Railway Freight System in the Context of the New Era

Xumei Du Wenjun Wang

Huai'an Railway Construction Office, Huai'an, Jiangsu, 223001, China

Abstract

Starting from the goal of accelerating the development of Huai'an railway freight transport, this paper uses the SWOT method to analyze the opportunities and threats faced by Huai'an railway transport, as well as the main internal strengths and weaknesses, and preliminarily proposes the development path of Huai'an railway freight system through research. This provides theoretical support and decision-making reference for the green and low-carbon development of railway logistics in Huaian City.

Keywords

railway freight transport; SWOT Method; develop-ment path

新时代背景下淮安铁路货运体系 SWOT 分析及发展路径研究

杜旭妹 汪文俊

淮安市铁路建设办公室, 中国·江苏 淮安 223001

摘 要

本文以加快淮安铁路货运发展为目标,运用SWOT方法分析淮安铁路运输面临的机遇与威胁,以及内部存在的主要优势和劣势,初步研究并提出淮安铁路货运体系发展路径,为淮安市铁路货运发展实现绿色低碳提供理论支撑合决策参考。

关键词

铁路货运; SWOT方法; 发展路径

1 引言

交通运输是国民经济中基础性、先导性、战略性产业,是畅通国民经济循环的重要保障,是现代流通体系的核心组成。建设交通强国已成为我国重大战略决策,为统筹推进交通强国建设,中共中央、国务院印发《交通强国建设纲要》,提出推动交通发展由追求速度规模向更加注重质量效益转变,由各种交通方式相对独立发展向更加注重一体化融合发展转变,由依靠传统要素驱动向更加注重创新驱动转变,构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化综合交通体系,建设现代化高质量综合立体交通网络,构建便捷顺畅的城市(群)交通网,构筑多层次、一体化的综合交通枢纽体系^[1]。

铁路在我国经济社会发展中发挥了重要的作用,是我国国民经济发展的“大动脉”,随着我国“八纵八横”的高铁骨架基本构建完成,铁路网络形态已覆盖主要经济据点,为大范围内开展铁路物流运输业务创造了条件。铁路货运的

高质量发展,是发挥铁路在中长途运输中的技术经济优势和骨干作用,实现国家绿色发展的要求,也是生产供给侧改革重点。

2 淮安铁路货运体系发展 SWOT 分析

SWOT 分析法是将企业经营复杂的外部环境和内部条件归结为机会和威胁、优势和劣势 4 个方面,并对其进行分析科学匹配。S(Strengths)、W(Weakness)、O(Opportunities)和 T(Threats) 分别代表优势、劣势、机遇、威胁。优势和劣势分析主要着眼于企业内部和竞争对手的分析,机遇和威胁注重外部因素对企业的影响^[2]。

2.1 发展优势分析(S)

2.1.1 区位优势

淮安地处长江三角洲北翼和江苏省北部中心,是江淮生态经济区、大运河文化带、淮河生态经济带“一区两带”战略实施交汇区,也是长三角区域一体化发展、推进长江经济带建设的重要承接点。在 2021 年中共中央、国务院发布的《国家综合立体交通网规划纲要》中,淮安是 6 条主轴之一——京津冀至长三角主轴上的重要节点城市,区位优势突出^[3]。

【作者简介】杜旭妹(1986-),女,中国甘肃酒泉人,硕士,工程师,从事铁路规划设计研究。

淮安市区位优势，与连云港、徐州、宿迁、盐城等苏北主要城市距淮安铁路货运枢纽体系 规划研究离均不大于 200km，与南京、扬州、镇江、泰州等苏中南城市也在 200km 左右，是苏北中心城市，南京都市圈紧密圈层城市，邻江近海，为南下北上的交通要道，交通区位优势明显，随着徐宿淮盐、连淮扬镇等项目的建成，淮安作为江苏省的重要交通枢纽的地位进一步得到巩固，也逐渐成为长江三角洲北部地区的区域交通枢纽，如图 1 所示。

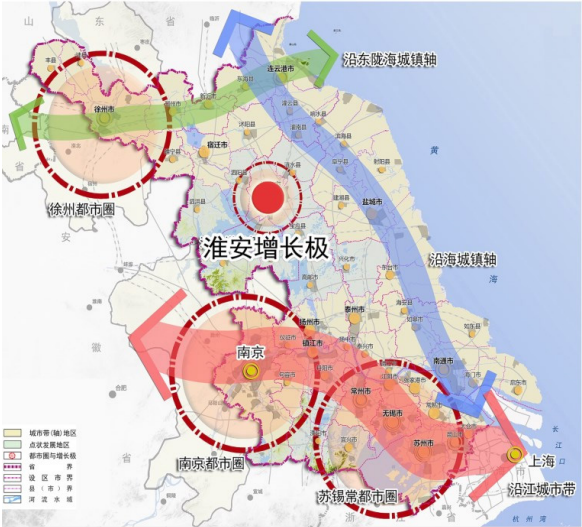


图 1 淮安地理位置示意图

2.1.2 路网优势

淮安地处苏北平原中部，淮河下游，位于江苏北部及

毗邻省份区域中心的位置。既有新长、宿淮、徐宿淮盐和连淮扬镇铁路在淮安市交汇，确定了淮安在苏北地区铁路中心节点地位；根据国家发展和改革委员会、交通运输部和 中国铁路总公司联合印发的《中长期铁路网规划》，淮安位于纵向高速铁路主通道京沪通道（北京~天津~东营~潍坊~临沂~淮安~扬州~南通~上海）和普通区际快捷大能力通道长三角~西北通道（三门峡经禹州至江苏沿海港口铁路）交汇点上^[4]。未来淮安地区将形成“米”字形放射状的铁路网格局，在路网中的地位将更加重要，交通优势更加凸显，淮安将是江苏省乃至华东路网中重要的铁路交通节点。

2.2 发展劣势分析（W）

2.2.1 铁路货运设施不健全

淮安铁路地区内无综合性铁路货场，既有铁路货运设施规模小、功能弱，无法满足城市发展的运输需求。同时目前淮安市铁路货运设施未考虑综合性物流设施发展建设，仅停留在基础货运层面。铁路货运缺乏与其他交通运输方式发展缺少市场竞争力。

2.2.2 普速货运线路标准低

淮安市是内既有铁路货运线路为新长铁路与宿淮铁路，线路技术标准如表 1。

新长铁路与宿淮铁路均为内燃线路单线，线路设计标准较低，通过能力差，且新长铁路跨江通道问题尚未解决，宿淮铁路所在三洋通道尚未打通，影响了淮安地区与前后方铁路通道沟通，影响淮安市铁路运量的提升与货运枢纽功能的发展。

表 1 现状淮安地区普速铁路主要技术标准表

线别	区段	年度	铁路等级	正线数目	最小曲线半径（m）	限制坡度（‰）	牵引类型	机车类型	到发线有效长（m）	牵引质量（t）	闭塞类型
新长铁路	新沂 - 靖江南	既有	I 级	单线	1000 困难 600	4	内燃	DF4	850	4000	半自动
	江阴北 - 长兴南	既有	I 级	单线	1000 困难 600	4	内燃	DF4	850	4000	半自动
宿淮铁路	符离集 - 袁北	既有	I 级	单线	2000	6	内燃	DF4	850	4000	半自动

2.3 发展机遇分析（O）

2.3.1 淮安市产业发展机遇

在淮安市产业转型升级中，淮安市第二产业将持迈向中高端，现代产业体系发展。目前淮安市工业总产值过万亿、四大主导产业产值均过千亿、战略性新兴产业产值翻一番，高新技术产业产值占规模以上工业比重达到 33%。现代农业发展水平达到 90%，创建国家现代农业示范区。在产业升级中将进一步产生对现代综合物流产业的需求，满足。

2.3.2 铁路物流发展机遇

近年来，为提升铁路货运市场竞争力，国铁集团一直进行不断的改革与发展，促进铁路货运向适应现代物流发展需求方向进行发展。其中重点是优化服务流程、调整运输组织方案，巩固铁路运输在大宗货物运输上的市场地位，开拓

铁路货运向综合性物流行业发展道路，通过快运班列、集装箱运输、特种货物运输、高铁快运等形式进一步发掘铁路货运在其他货运运输品类的潜在市场。

目前，淮安市第二产业快速发展，既需要满足工业发展的煤炭、矿石等生产原料，同时需要将多种工业产品外运的现代铁路物流体系，迎合了当前铁路物流发展的重大机遇。

2.4 发展威胁分析（T）

2.4.1 周边城市铁路物流发展威胁

淮安市周围相邻徐州市、蚌埠市、南京市都是大型铁路枢纽，相关铁路货运设施较为完善，路网地位更高，其中徐州、蚌埠已经建成综合性铁路物流基地，其吸引范围与淮安市铁路货运吸引范围有一定重叠，对淮安市铁路货运发展

具有一定威胁。

2.4.2 水运对铁路运输发展威胁

水路运输是五大运输方式(即铁路、公路、水路、航空、管道)之一,适于运送煤炭、粮食、矿建材料等散装、大件物资,特别是长途的、时间上没有特殊要求的大宗货物,更适合水路运输,具有“运量大、投资省、能耗低、占地少”等优势。

淮安市域湖泊密布,河道纵横交错,水运资源丰富,是江苏内河水运较为发达地区之一。据资料统计,2023年淮安市完成港口货物吞吐量 7863.45 万吨,增长 4.24%,完成集装箱吞吐量 51.28 万标箱,增长 8.44%,占江苏省内河集装箱总量的 33.58%[5];水运已经成为淮安经济发展、城市基础设施建设的有力保障,是淮安市社会经济发展的重要依托。其在大宗货物运输市场对淮安市铁路货运发展产生一定威胁,如图 2 所示。



图 2 淮安铁路货运体系发展 SWOT 分析

3 淮安货运枢纽体系发展路径研究

3.1 深化总图布局,确定场站分工

以打造现代化综合物流枢纽为目标,结合淮安市国土空间规划及区域铁路网规划,对淮安铁路地区总图货运格局进行调整,根据交通走廊及物流产业布局,优化货运场站布点,制定货运场站分工,完善物流功能区;根据多式联运需求,优化地区专支线布局。

3.2 加强货运设施配置,提高物流效率

补强铁路货运设施配置,提高货运场站作业效率,满

足多种货物品类的运输需求,提高物流效率。

3.3 拓展铁路物流功能,提升货运服务水平

依托地区内既有铁路货运设施以及规划货场等,拓展并强化仓储、加工、流通、贸易等物流核心功能,提升货运服务水平,做好前瞻规划,在场区规划、信息化建设等方面预留后期发展条件,为打造综合性物流枢纽提供充足的发展空间。

3.4 探索多式联运,开拓发展物流新模式

立足发展优势,坚持打造苏北交通综合枢纽的城市功能,积极探索铁路货运多式联运发展方向,开展内陆港口水铁联运与空铁联运研究,发挥地区优势,打造现代化物流枢纽,实现多种交通运输方式协同发展,建立规模化、专业化的集疏运分拨配送体系,逐步形成可供其它项目参考的作业流程和服务规范。

4 结论

淮安地区发展铁路货运的优势与劣势并存,机会与威胁同在;随着淮安市经济的快速发展与铁路货运改革的不断深入,利用淮安市的区位优势与路网优势,淮安市铁路货运具有良好的发展前景;通过改善地区货运设施与线路标准,发挥铁路运输优势,与公路、水运差异化定位,可以挖掘铁路运输市场潜力,提高市场竞争力。综合分析,淮安市铁路货运发展优势远大于劣势,机遇远多于威胁。

参考文献

- [1] 《交通强国建设纲要》[EB/OL]. (2014-09-19). http://jtysj.changsha.gov.cn/cssglgl/zfxgk/fdzdgknr/lzyj/bmgzdzd2017/201909/t20190930_3493405.html
- [2] 周新军,中国铁路运输市场未来发展的SWOT分析[J].《当代经济管理》,2015,37(03)18-22.
- [3] 中共中央 国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. (2021-03-03). https://www.jingyuan.gov.cn/zfxgk/fdzdgknr/jyghgy/xjgh/zxkjyqygh/art/2023/art_ec5c62ab1af0497898c73c63e08022f6.html
- [4] 关于印发《中长期铁路网规划》的通知[EB/OL]. (2016-07-13). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201607/t20160720_962188_ext.html
- [5] 淮安市志编纂委员会办公室.淮安年鉴(2024)[M].南京:江苏人民出版社,2024.