

自然与信息工程出版社
Nature and Information Engineering Publishing Sdn Bhd

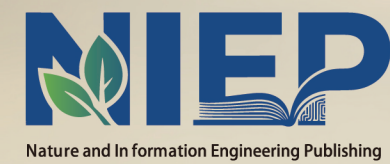
B-03A-15, One South Street Mall, Jalan OS, Taman Serdang Perdana,
43300 Seri Kembangan, Selangor Darul Ehsan.
+60 11-3978 7006
contact@zycentre.com



Journal of Highway Engineering

公路工程杂志

eISSN : 3122-6787



公路工程杂志

JOURNAL OF HIGHWAY ENGINEERING

Volume 2 Issue 1 January 2026
eISSN : 3122-6787

中文刊名: 公路工程杂志

ISSN: 3122-6787 (电子)

出版语言: 华文

期刊网址: <https://cn.niepublish.com/jhe>

出版社名称: 自然与信息工程出版社

Serial Title: Journal of Highway Engineering

ISSN: 3122-6787 (Online)

Language: Chinese

URL: <https://cn.niepublish.com/jhe>

Publisher: Nature and Information Engineering Publishing Sdn Bhd

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge
Infrastructure

版权声明 /Copyright

自然与信息工程出版社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中宇国际教育中心所有。

All articles and any accompanying materials published by Nature and Information Engineering 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). Nature and Information Engineering Publishing Sdn Bhd reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nature and Information Engineering Publishing Sdn Bhd

电子邮箱 /E-mail: contact@zycentre.com

官方网址 /Official Website: <https://niepublish.com/index.php>

地址 /Address: B-03A-15, One South Street Mall, Jalan OS, Taman Serdang Perdana,

43300 Seri Kembangan, Selangor Darul Ehsan, Malaysia



Nature and Information Engineering Publishing

《公路工程杂志》征稿函

期刊概况:

中文刊名: 公路工程杂志

ISSN: 3122-6787 (Online)

出版语言: 华文

期刊网址: <https://cn.niepublish.com/jhe>

出版社名称: 自然与信息工程出版社

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
- 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。

主 编

程建峰, 湖南省交通科学研究院, 中国

副主编

江若琳, 长沙理工大学交通运输工程学院, 中国

Yasmin Nabil, Zagazig University, Egypt

田 闽, 中冶检测认证(安徽)有限公司, 中国

编 委

郭子墨, 同济大学道路与交通工程学, 中国

Suad Hosny, Zagazig University, Egypt

Ali Shahandeh Nookabadi, Isfahan University of Technology, Iran

游鹏升, 云南通衢工程检测有限公司, 中国

1	面向智慧交通的机电系统协同控制优化研究 / 樊莹莹	31	公路工程施工安全风险防控机制优化研究 / 魏浩楠
4	山区公路路线方案比选与勘察设计优化方法分析 / 秦川林	34	桥梁工程结构检测评估方法与养护决策优化研究 / 林勇
7	高速公路绿色施工技术实践与环境影响评估 / 李平雷	37	公路桥梁施工安全管理与风险防控措施研究 / 王培剑
10	深基坑工程支护结构选型与变形监测分析 / 张婵	40	公路隧道衬砌结构病害的无损检测技术及应用探析 / 田闽 王孝平 雷鸣 唐蒸蒸 文亚巍
13	高速公路机电监控系统的安全防护与风险控制研究 / 冶金辉	43	公路改扩建工程交通组织技术与安全风险防控 / 李常攀
16	水电站汛期自然灾害评估模型构建与多目标优化调整 / 周国柱	47	支撑渗沟在公路斜坡路堤滑坡治理中的应用 / 赵小兵
19	高速公路服务区“碳中和”路径规划研究与探索—— 以青银高速济南东服务区为例 / 陈旭	50	公路工程全过程造价管理关键问题分析 / 陈晓燕
22	乡镇全路面扫路车的开发及应用 / 邹克林	53	非洲地区再生塑料改性沥青混合料性能评价及温拌工 艺适配性分析 / 杨俊
25	超高性能混凝土生产关键工艺难点突破 / 武洪强	56	公路工程高性能沥青混凝土路面施工方法研究 / 顾战利
28	纤维参数对工程水泥基复合材料力学性能与裂缝行为 的影响研究 / 高龙祥	59	水泥混凝土长寿命路面施工关键技术与质量控制研究 / 慕浩

- | | | | |
|----|--|----|---|
| 1 | Research on Collaborative Control Optimization of Electromechanical System for Intelligent Transportation
/ Yingying Fan | 31 | Research on the Optimization of Safety Risk Prevention and Control Mechanism in Highway Engineering Construction
/ Haonan Wei |
| 4 | Analysis of Optimization Methods for Route Scheme Comparison and Survey Design of Mountainous Highways
/ Chuanlin Qing | 34 | Research on Bridge Engineering Structural Detection Evaluation Methods and Maintenance Decision Optimization
/ Yong Lin |
| 7 | Practices and Environmental Impact Assessment of Green Construction Technology on Highways
/ Pinglei Li | 37 | Research on Safety Management and Risk Prevention Measures in Highway and Bridge Construction
/ Peijian Wang |
| 10 | Support Structure Selection and Deformation Monitoring Analysis for Deep Foundation Pit Engineering
/ Chan Zhang | 40 | Nondestructive Testing Technology and Application of Road Tunnel Lining Structure Diseases
/ Min Tian Xiaoping Wang Ming Lei Zhengzheng Tang Yawei Wen |
| 13 | Research on Safety Protection and Risk Control of Expressway Electromechanical Monitoring System
/ Jinhui Ye | 43 | Traffic Organization Technology and Safety Risk Prevention and Control of Highway Reconstruction Project
/ Changpan Li |
| 16 | Construction of a Natural Disaster Assessment Model for Hydropower Stations During Flood Season and Multi-Objective Optimization Adjustment
/ Guozhu Zhou | 47 | Application of Supporting Seepage Ditch in Landslide Control of Highway Slope Embankment
/ Xiaobing Zhao |
| 19 | Research and Exploration on the Path Planning of Carbon Neutrality in Expressway Service Areas—Taking Jinan East Service Area of Qingyin Expressway as an example
/ Xu Chen | 50 | Analysis of Key Issues in Cost Management Throughout the Whole Process of Highway Engineering
/ Xiaoyan Chen |
| 22 | Development and Application of Township Full-Pavement Sweeper
/ Kelin Zou | 53 | Performance Evaluation of Recycled Plastic Modified Asphalt Mixtures and Compatibility Analysis of Warm Mixing Technology in Africa
/ Jun Yang |
| 25 | Breakthrough of Key Process Difficulties in Ultra-high Performance Concrete Production
/ Hongqiang Wu | 56 | Research on Construction Method of High-performance Asphalt Concrete Pavement for Highway Engineering
/ Zhanli Gu |
| 28 | Study on the Influence of Fiber Parameters on the Mechanical Properties and Crack Behavior of Engineering Cement-based Composite Materials
/ Longxiang Gao | 59 | Research on Key Construction Technologies and Quality Control for Long-Life Cement Concrete Pavements
/ Hao Mu |

Research on Collaborative Control Optimization of Electromechanical System for Intelligent Transportation

Yingying Fan

Xinjiang Transportation Planning Survey and Design Institute CO., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Absrtact

Intelligent transportation system has complex requirements for real-time, safety and energy efficiency. The traditional isolated control mode has limitations and can not meet the requirements of global optimization and dynamic response, highlighting the necessity of collaborative control. Collaborative control can alleviate congestion, reduce accident rate and improve energy efficiency. Optimization strategies include: Multi-source Data Fusion and real-time perception, establishing unified data standards, and designing hierarchical fusion architecture; Dynamic path planning and signal collaborative optimization realize dynamic path adjustment and real-time signal matching; Energy management and green transportation work together to build a smart grid coupling mechanism and promote the application of renewable energy; Security risk early warning and emergency coordination, deployment of sensor networks to achieve real-time monitoring, establishment of standardized emergency coordination mechanism, and formation of a perfect management system.

Keywords

intelligent transportation; electromechanical system; collaborative control; optimization strategy

面向智慧交通的机电系统协同控制优化研究

樊莹莹

新疆交通规划勘察设计院有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要

智慧交通系统对实时性、安全性与能效有复合需求,传统孤立控制模式存在局限,无法满足全局优化、动态响应需求,凸显协同控制必要性。协同控制可缓解拥堵、降低事故率、提升能效。优化策略包括:多源数据融合与实时感知,建立统一数据标准,设计分层融合架构;动态路径规划与信号协同优化,实现路径动态调整与信号灯实时匹配;能源管理与绿色交通协同,构建智能电网耦合机制,推进可再生能源应用;安全风险预警与应急协同,部署传感器网络实现实时监测,建立标准化应急协同机制,形成完善的管理体系。

关键词

智慧交通;机电系统;协同控制;优化策略

1 引言

在城市化进程不断加速与汽车保有量持续攀升的当下,智慧交通作为提升城市运行效率、保障交通安全和降低能源消耗的关键手段,正受到全球范围内的广泛关注。智慧交通系统对实时性、安全性和能效提出了复合需求,传统孤立控制的机电系统模式因存在数据壁垒与决策碎片化问题,难以满足这些需求,导致交通拥堵频繁发生、事故率居高不下以及能源浪费现象严重。在此背景下,机电系统协同控制优化研究显得尤为重要。本文目的是深入探讨面向智慧交通的机

电系统协同控制优化策略,通过打破设备间的信息壁垒,实现交通系统的全局优化与动态响应,为智慧交通的可持续发展提供理论支撑与实践指导。

2 智慧交通背景下机电系统协同控制的必要性

2.1 智慧交通系统复合需求解析

智慧交通系统对实时性、安全性和能效的复合需求,是协同控制根本驱动力。实时性要求系统在毫秒级时间内完成交通流量监测、信号调整、事故预警等操作,传统孤立系统因数据传输延迟和决策分散无法满足该要求,安全性需借助多设备联动实现事故预防,比如交叉口传感器与信号灯协同可提前识别潜在碰撞风险,并触发紧急制动,能效提升依靠设备协同来优化能源分配,例如通过路灯、摄像头、充电桩的智能联动,实现按需供电和负载均衡。复合需求相互关联,实时性保障安全预警的及时性,安全性降低事故导致的

【作者简介】樊莹莹(1989-),女,中国甘肃平凉人,硕士,高级工程师,从事工程咨询(投资)/电子、信息工程研究。

能源浪费,能效提升为系统持续运行提供支撑,形成需求链条,孤立控制模式因数据壁垒和决策碎片化无法同时满足三者,凸显协同控制的必要性^[1]。

2.2 传统孤立控制模式局限剖析

传统机电系统中比如信号灯、传感器、执行器这类长期处在孤立控制状态,其存在的局限直接对智慧交通效能形成制约。信号灯独立运行时,只是基于固定配时或者单点检测做调整,没办法感知区域交通流的整体状态,容易造成“绿灯空置”和“红灯拥堵”同时出现的情况;传感器例如地磁线圈、摄像头大多用于单一功能,数据没有跨设备共享时很难形成全局交通画像,影响拥堵预测和路径规划的准确性;执行器比如可变车道标志、限速牌独立运作时缺乏和信号系统的协同,有可能出现“车道导向与信号灯指示矛盾”的冲突场景。更为关键的是,孤立系统缺少统一调度平台,各个设备按照预设规则运行,无法动态适应突发交通事件,比如事故发生时若传感器没有和执行器联动,就无法快速调整周边信号配时来疏导车流,导致二次事故风险上升,已经无法适应智慧交通对全局优化、动态响应的需求。

2.3 协同控制的价值

协同控制通过打破设备之间的信息壁垒,能够释放缓解拥堵、降低事故率和提升能效的巨大潜力。在缓解拥堵方面,协同控制可以整合信号灯、传感器和导航系统的数据,实现区域信号灯的动态配时优化,比如根据实时车流来调整绿灯时长,或者通过可变车道与信号联动引导车流避开拥堵路段,与传统固定配时相比,能够减少15%~30%的拥堵时间。在降低事故率层面,协同控制让传感器与执行器实现实时交互,当检测到车辆异常接近或者行人闯入时,可立即触发信号灯延长红灯、启动声光警示等联动措施,从而降低碰撞概率。在提升能效方面,协同控制能够优化设备能耗管理,例如根据交通流量自动调节路灯亮度、智能调整充电桩功率分配,避免设备空转造成的能源浪费,结合可再生能源接入,可实现交通系统整体能效提升20%以上。多方面的价值通过设备协同得到放大,形成“1+1>2”的系统效应,是智慧交通从“单点智能”向“全局智慧”升级的关键支撑^[2]。

3 面向智慧交通的机电系统协同控制优化策略

3.1 多源数据融合与实时感知策略

多源数据融合得建立统一的数据采集标准体系,此体系要涵盖视频监控、地磁感应、雷达测速、车载GPS等多源设备的数据格式、传输协议以及时间同步机制,以此确保不同设备采集的数据在时间维度和空间维度具备可对比性与可融合性,并构建多级数据清洗与校验模块,针对视频数据模糊噪声、雷达数据跳变误差、GPS数据漂移偏差等常见问题,采用基于统计特征的中值滤波、卡尔曼滤波等算法进行动态修正,同时结合交通流量周期性特征建立异常数据识别规则库,对超速、逆行等异常事件自动标记并触发二次

校验流程。

实时感知要围绕交通场景动态变化特性,构建高时效性且高可靠性的感知体系,所以要优化传感器部署策略,在关键路口、拥堵易发路段、事故多发区域等重点区域加密部署视频监控摄像头、毫米波雷达、地磁车辆检测器等设备,以此形成多维度、立体化的感知网络,同时借助边缘计算节点实现数据的就地处理与快速响应,进而减少数据传输延迟。需要建立自适应采样机制,依据交通流量、车速、天气条件等动态调整传感器采样频率,比如在高峰时段把视频帧率提高到每秒25帧以上,在低峰时段降低到每秒10帧,在雨雾天气增强雷达信号发射功率并调整波束角度。构建实时数据校验与补全机制,针对因设备故障、信号干扰导致的缺失数据采用时间序列插值、空间关联补全等方法进行动态修复,结合交通流理论模型对异常数据进行二次验证,确保感知数据的完整性与准确性,为机电系统协同控制提供实时、稳定、可靠的状态感知输入^[3]。

3.2 动态路径规划与信号协同优化策略

动态路径规划依靠实时交通数据的采集和分析实现路径动态调整,通过部署地磁感应器、高清摄像头、GPS浮动车等多源传感器,实时采集道路流量、车速、占有率、排队长度等关键交通参数,依托边缘计算节点开展初步数据处理与拥堵预警工作,结合历史交通数据以及天气、事件等外部因素构建交通状态预测模型,采用改进型Dijkstra算法或者A*算法实现路径成本的动态计算,在考虑行驶时间最小化的同时融入油耗优化、尾气排放控制等多目标约束条件,通过与车载导航系统、手机APP导航平台的双向通信接口,实现路径规划结果的实时推送和用户反馈接收,针对不同类型车辆实施差异化的路径推荐策略,比如在高峰时段通过诱导分流的方式减少核心区域交通压力,在平峰时段则优先推荐通行效率更高的主干道或快速路,同时结合道路施工、交通事故等突发事件的实时信息动态调整路径规划范围和推荐强度,确保路径规划结果既符合个体出行需求、又兼顾整体交通系统运行效率、通过持续的数据反馈与模型迭代,可以提升路径规划的实时性和准确性,形成感知、分析、决策、执行的控制体系,实现城市交通流的动态均衡与拥堵缓解目标。

信号协同优化策略要围绕交叉口信号控制参数动态调整开展,借助车路协同系统达成信号灯与车辆之间的实时信息交互,比如可以运用V2I通信技术,将车辆位置、速度、行驶方向等动态信息传输到信号控制系统,结合交叉口各方向交通流量实时监测所得数据,采用自适应信号控制算法动态调整信号配时的具体方案,在绿灯时长、相位切换顺序、周期长度等方面实现和交通流的实时匹配。通过区域协调控制,可以将相邻交叉口的信号灯进行联动优化,构建绿波带控制模式,从而减少车辆停车次数和等待时间。针对高峰时段,可以采用“饱和流量优先”策略延长主干道绿灯时长;

平时时段则实施“均衡分配”策略，提升交叉口整体通行效率^[4]。

3.3 能源管理与绿色交通协同策略

首先，交通规划部门需要构建智能电网跟交通机电系统的动态耦合机制，通过在交通信号灯、电子站牌以及充电桩等设备当中嵌入智能电表与能耗监测模块，实时采集设备运行功耗数据，并上传至云端管理平台，结合区域电网负荷预测模型和交通流量实时数据，动态调整交通设备的供电策略。例如，在非高峰时段降低信号灯亮度、关闭非必要电子指示牌，或者引导电动汽车在电网负荷低谷期进行充电，以此实现交通设备能耗与电网负荷的精准匹配，避免出现能源浪费和电网过载等风险。同时，可以借助峰谷电价机制激励用户参与节能调度，进而形成能源供需的良性互动。

其次，交通规划部门要大力推进可再生能源在交通场景的规模化应用，在高速公路服务区、公交场站以及轨道交通站点等交通枢纽，可以部署光伏发电顶棚和风力发电装置，将清洁能源直接接入交通机电系统的供电网络，配套安装储能电池与能量管理系统，以此实现“自发自用、余电上网”的能源自循环模式；可以对电动汽车充电桩开展双向充放电改造工作，让其在电网需要调度时，能够将车载电池的电能反向输入电网，既可以提升清洁能源的利用率，又能够增强电网的调峰能力，进而降低交通系统对传统化石能源的依赖^[5]。

3.4 安全风险预警与应急协同策略

在安全风险预警方面，交通部门可以部署多源异构传感器网络，以此实现交通环境全维度实时监测工作，借助边缘计算节点，对车路协同设备、交通信号灯、电子标志牌等机电设施运行状态，开展毫秒级数据采集与特征提取操作，结合历史事故数据与实时交通流特征构建动态风险评估模型，采用阈值预警与趋势预警双机制达成分级预警功能，其中阈值预警针对超速、急刹、设备故障等突发性风险设置三级报警阈值，趋势预警通过 LSTM 神经网络对交通拥堵、设备老化等渐进式风险进行 72 小时趋势预测，预警信息通过 5G - V2X 车路通信网络实现车端、路侧单元及中心控制

平台的三级推送，以此确保驾驶员、交通管理者及应急部门同步接收风险信息。

在应急协同方面，交通规划部门需要建立跨部门跨层级的标准化应急协同机制，通过城市交通大脑平台整合交警、消防、医疗、市政等部门数据资源，以此形成统一的应急指挥中枢，并制定涵盖交通事故设备故障、自然灾害等场景的标准化应急预案库，预案内容必须明确各参演部门职责分工、信息报送流程及资源调配规则。应急处置过程中，日常利用数字孪生系统进行预案推演与优化，战时借助 AI 决策引擎自动匹配最优处置方案并触发资源调度指令，同时建立应急通信专网保障极端情况下指令传递的可靠性，处置完成后通过区块链技术实现事件全流程溯源与责任认定，形成监测、预警、处置、评估的管理体系，确保应急协同策略的实效性可操作性，从而能够最大成都保障交通安全。

4 结语

综上所述，本研究深入分析智慧交通背景下机电系统协同控制必要性，指出传统孤立控制模式存在诸多明显局限，详细阐述协同控制在缓解拥堵、降低事故率、提升能效等方面显著价值，通过多源数据融合与实时感知、动态路径规划与信号协同优化、能源管理与绿色交通协同、安全风险预警与应急协同等策略，实现机电系统全局优化与动态响应的重要目标。未来，伴随技术不断进步，机电系统协同控制会在更多场景发挥重要作用，推动智慧交通迈向更高水平。

参考文献

- [1] 黄始南.大数据时代背景下的智慧交通规划建设探讨[J].中华建设,2024,(12):105-107.
- [2] 王嫒嫒.智慧交通对区域经济发展的促进作用及发展路径研究[J].运输经理世界,2024,(36):58-60.
- [3] 陈旭辉,刘宗明,雍乐瑶.智慧交通视域下乘用车系统集成化设计研究[J].包装工程,2024,45(22):392-400+451.
- [4] 刘君韬.城市道路智慧交通区域性融合应用的研究[J].中国战略新兴产业,2024,(36):45-47.
- [5] 雷鸣,郭小鲁.基于云计算的一体化车路云协同系统方法研究[J].信息记录材料,2024,25(11):189-192.

Analysis of Optimization Methods for Route Scheme Comparison and Survey Design of Mountainous Highways

Chuanlin Qing

Chongqing Jiaotong University Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Chongqing, 400074, China

Abstract

The terrain and geological conditions in mountainous areas are complex, and the ecosystem is fragile. The rationality of highway route planning and survey design directly affects engineering safety, economy, and ecological benefits. Traditional comparison and design methods have problems such as strong subjectivity and insufficient accuracy. Based on this, the core constraints of mountainous road construction are sorted out, and a route scheme comparison and selection system covering safety, ecology, technology and economy is constructed. Traditional experience analysis process standards, multi-objective quantitative model optimization, and technology integration and collaboration comparison and optimization strategies are proposed. At the same time, survey and design optimization methods are established from four dimensions: survey technology, route alignment, roadbed, bridges and tunnels, and ecological environmental protection, providing scientific support for mountainous road construction.

Keywords

mountainous highway routes; Scheme comparison and selection; survey and design; optimization method

山区公路路线方案比选与勘察设计优化方法分析

秦川林

重庆交通大学工程设计研究院有限公司，中国·重庆 400074

摘要

山区地形地质条件复杂，生态系统脆弱，公路路线方案与勘察设计的合理性直接影响工程安全、经济与生态效益，传统比选与设计方法存在主观性强、精准度不足等问题。基于此，梳理山区公路建设核心约束条件，构建涵盖安全、生态、技术经济的路线方案比选体系，提出传统经验研判流程规范、多目标量化模型优化、技术融合协同的比选优化对策，同时从勘察技术、路线线形、路基桥隧、生态环保四个维度建立勘察设计优化方法，为山区公路建设提供科学支撑。

关键词

山区公路路线；方案比选；勘察设计；优化方法

1 引言

山区公路是区域交通网络的重要组成部分，对促进偏远地区经济发展、提升交通可达性具有关键作用。但山区高差大、不良地质集中，公路建设面临施工难度高、安全风险大、生态保护压力突出等挑战。

2 山区公路路线方案比选体系构建原则

2.1 安全优先原则

山区的地形地质状况复杂，不良地质现象较为集中，路线方案合理与否会直接决定公路建设以及运营整个生命周期的安全水准。在方案比选进程中，要借助科学的路线布局来避开重大安全风险，着重关注路线与不良地质区域的空

间关联，保证路线走向可远离潜在的灾害源头。要充分考虑路线线形设计对行车安全产生的影响，合理设定线形指标，以保障行车过程中视线清晰以及行驶稳定。施工安全同样不能被忽视，路线方案应尽可能降低施工过程中的作业难度，减少高风险施工环节的出现。安全优先原则并非仅仅追求绝对安全，而是凭借系统的风险规避与防控，为公路建设与运营奠定坚实可靠的安全基础。它作为比选体系的前置性原则，会直接决定后续各项比选指标的合理性与可行性^[1]。

2.2 生态友好原则

山区生态系统一般呈现出脆弱性的特点，公路建设期间的路线开挖以及工程作业很容易对沿线生态环境产生干扰。生态友好原则要贯穿于路线方案比选的整个过程。此原则要求路线方案在设计时充分依照自然地形地貌，降低对原生植被的破坏以及对地表的扰动。在路线走向的选择方面，要避开生态敏感区域，最大程度保护生物栖息地和自然生态廊道。要考虑路线建设可能引发的生态问题，借助合理的路

【作者简介】秦川林（1978-），男，中国四川安岳人，本科，高级工程师，从事公路路线、路基研究。

线布局减少水土流失等生态风险。生态友好原则并非否定工程建设的必要性,而是寻找工程建设与生态保护的平衡之处,依靠对生态影响的预先判断与规避,达成公路建设与自然环境的和谐共处,为公路的长期稳定运营提供良好的生态环境支持。

2.3 技术经济协同原则

技术可行乃是路线方案的一项基本前提条件,这意味着方案要可充分地适应山区的地形地质状况,并且符合公路设计的相关规范和标准。在进行比选的过程当中,需要对路线方案所涉及到的工程技术难度加以考量,以此来保证所选用的技术方案可有效地解决山区公路建设过程中出现的复杂问题,保障工程质量以及建设效率。经济合理要求路线方案在契合技术要求的基础之上,达成建设成本与运营效益的优化平衡,需要全面地考量路线建设过程中的各项成本支出,同时还要兼顾长期运营维护的经济性,防止因为片面地追求降低建设成本而致使后期运营维护成本急剧增加。技术经济协同原则并非单纯的技术与经济指标的简单相加,而是经过系统性的统筹考量,达成技术先进性与经济合理性的有机融合,保证所选的路线方案在有实施可行性的可实现全生命周期的效益最大化。

3 山区公路路线方案比选方法优化对策

3.1 规范传统经验研判流程,构建经验传承体系

传统经验研判法进行优化的关键之处在于减少主观方面的局限性,提高流程的规范性以及经验的传承性。要构建起标准化的研判流程,清晰确定实地踏勘的主要内容以及关键节点,详细划分地形地质适配性研判的具体依据,防止研判过程出现随意性。针对经验传承不够的问题,可以搭建行业内部的经验共享平台,全面梳理同类山区公路项目的比选案例以及研判要点,提炼出可复用的研判指引。加强技术人员的专业培训,把理论知识和实地研判实践结合起来,提高研判人员对复杂地形地质条件的识别能力以及方案筛查的精准程度。借助流程规范与经验传承这两方面的优化,保留传统方法快速高效的长处,又切实降低主观误判的风险,为后续的比选工作奠定坚实基础。

3.2 优化多目标量化模型,提升评价精准度

指标体系构建要提高针对性,紧密结合山区公路建设的核心约束条件,补充生态风险预判、施工安全难度等关键指标,同时去除关联性较弱的冗余指标,以此实现全面性与精简性的平衡。权重分配应突破单一分配模式,依据项目建设定位采用分层权重设定方式,对于生态敏感区域项目提高生态协调性指标权重,对于投资受限项目强化经济合理性指标考量。另外,引入动态修正机制,结合比选过程中的实际状况与后续勘察数据,对指标权重与量化标准进行适时调整,防止评价模型僵化。借助模型的系统性优化,提高量化评价结果的精准度与可靠性,更有效地支撑方案决策^[2]。

3.3 深化技术融合应用,建立协同保障机制

技术融合协同法的优化方向在于拓展技术应用场景与构建全流程协同机制,应推动地理信息系统、遥感、三维建模等技术的深度融合,打破技术应用壁垒,实现数据资源的互联互通,提升数据采集与分析的一体化水平。强化技术在风险预判中的应用深度,通过三维地质建模精准识别隐蔽性不良地质体,借助动态模拟技术预判方案实施后的生态影响与安全风险。同时,建立技术与管理协同保障机制,明确技术应用的责任主体与流程规范,加强技术人员与工程管理人员的沟通协作,确保技术成果能够有效转化为方案优化的实际依据。通过技术融合深化与协同机制构建,充分发挥现代技术的支撑作用,提升比选工作的智能化与精准化水平。

4 山区公路勘察设计优化方法

4.1 勘察技术体系优化

勘察工作是山区公路设计的基础前提,其成果精度直接决定路线方案的合理性与工程建设的安全性。山区地形地质条件复杂,传统勘察技术易存在数据覆盖不全面、隐蔽性地质体识别不足等问题,因此亟需构建更为系统高效的勘察技术体系。优化勘察技术体系需立足山区勘察的核心痛点,通过技术融合与流程完善双轮驱动,提升勘察成果的精准度与可靠性,为后续设计优化提供坚实的数据支撑。

其一,推动多源勘察技术深度融合。整合遥感地理信息系统全球定位系统等先进技术的优势,构建空天地一体化勘察数据采集网络。遥感技术可实现大范围地形地貌与生态敏感区域的快速识别,为路线初步选线提供宏观数据支撑;地理信息系统能够对多类型勘察数据进行整合分析与空间可视化呈现,助力技术人员精准把握地形地质空间分布规律;全球定位系统则可实现勘察点位的精准定位,保障实地勘察数据的空间准确性。通过多技术协同应用,打破单一勘察技术的局限性,实现对山区复杂地形地质条件的全方位精准勘察。

其二,完善勘察流程动态优化机制。建立分层递进的勘察流程,先通过宏观勘察明确路线走廊带内的核心约束条件,再针对重点区域开展精细化勘察。强化初步勘察与详细勘察的衔接联动,将初步勘察成果作为详细勘察的依据,聚焦不良地质区域、生态敏感点等关键地段,合理调整详细勘察的范围与深度。同时,引入勘察成果动态校验机制,结合后续施工勘察反馈数据,对前期勘察成果进行复核修正,及时弥补勘察漏洞,确保勘察数据能够持续适配设计优化需求。

4.2 路线线形精准优化

路线线形精准优化需立足山区地形地质特征,以技术规范为遵循,实现线形指标与自然地形的有机融合,兼顾安全性能与经济效益的双重提升,为公路全生命周期运营奠定良好基础。

其一，强化平面线形地形适配性优化。平面线形设计应充分顺应自然地形走势，避免盲目追求直线指标而产生大规模填挖工程。优化过程中需重点考量不良地质区域的规避需求，通过合理设置曲线半径与缓和段长度，使路线平滑衔接地形起伏。同时注重线形指标的连续性与协调性，避免相邻线形指标突变导致驾驶风险提升，确保平面线形既满足技术标准要求，又能最大程度降低对自然地形的扰动^[3]。

其二，聚焦纵断面线形安全与经济平衡优化。纵断面设计需严格控制纵坡坡度与坡长，结合山区行车动力特性，合理设置坡段衔接方式，减少制动热衰退等安全隐患。优化高程控制方案，充分结合桥隧洞口位置与路基排水需求，避免高填深挖路段增多。同时加强平纵组合协调性优化，确保视线通透驾驶顺畅，实现纵断面线形在安全保障、工程成本与运营效率之间的最优平衡。

4.3 路基桥隧协同优化

路基桥隧是山区公路工程的核心组成部分，其协同性直接决定工程整体稳定性、安全性与经济性。山区地形地质复杂，路基与桥隧结构的衔接部位易成为工程薄弱环节，传统设计中各结构单独设计的模式往往导致衔接不畅、受力不均等问题。路基桥隧协同优化需立足系统工程理念，统筹考量各结构与地形地质的适配性，强化结构间的协同联动，通过设计统筹与技术协调，提升工程整体性能，降低安全风险与全生命周期成本。

其一，强化路基与桥隧衔接部位优化。衔接部位是路基与桥隧受力传递的关键节点，需重点优化过渡段设计。针对桥隧洞口与路基的衔接，合理确定过渡段的长度、填料类型及压实标准，确保衔接部位的刚度渐变，减少沉降差异引发的路面病害。同步协调桥隧基础与路基基底的受力状态，避免基础开挖对路基稳定性产生扰动，通过优化施工顺序与工艺，保障衔接部位施工质量，提升路基与桥隧结构的连续性和整体性。

其二，统筹路基桥隧结构与地质条件适配优化。结合沿线地质分布特征，统筹规划路基与桥隧的选型与布局。在不良地质区域，优先采用桥隧结构替代深挖高填路基，减少对地质环境的扰动；在地质条件较好区域，合理优化路基断面形式与桥隧跨度，实现工程规模与地质条件的适配。同时优化路基边坡防护与桥隧基础形式，使路基防护措施与桥隧基础承载力相匹配，桥隧结构选型与路基稳定性要求相协调，形成结构互补、受力均衡的协同体系^[4]。

4.4 生态环保设计优化

山区生态系统具有脆弱性和敏感性，公路建设过程中的地形扰动、植被破坏等行为易引发生态失衡问题。生态环

保设计优化是山区公路践行可持续发展理念的核心举措，需立足生态系统保护需求，将环保理念贯穿勘察设计全过程，通过科学的设计手段平衡工程建设与生态保护的关系，实现公路建设与自然环境的和谐共生，降低工程对生态系统的不利影响。

其一，强化生态避让与修复一体化设计。选线阶段需精准识别生态敏感区域，优先避让自然保护区、水源涵养地、珍稀植被生长区等关键生态节点，通过优化路线走向减少对原生生态系统的占用。对于不可避免的生态扰动区域，同步设计生态修复方案，结合区域植被类型选择适宜的乡土物种进行植被重建，构建与周边环境相适配的植被群落。同时注重生态廊道的保留与构建，保障生物迁徙通道的连续性，维护区域生物多样性^[5]。

其二，推进水土保持与污染防控系统设计。针对山区降水集中易引发水土流失的特点，优化路基边坡、沟谷路段的水土保持设计，合理设置截排水系统、拦挡工程和植被防护措施，减少工程建设引发的水土流失。同步统筹施工与运营阶段的污染防控设计，优化施工场地布局减少扬尘扩散，在临近居民区路段优化路线设计降低交通噪音影响。针对路面径流污染，设计生态缓冲带和净化设施，降低污染物对周边水体的影响，构建全流程生态环保保护体系。

5 结语

山区公路路线方案比选与勘察设计优化需立足地形地质特征与生态保护需求，通过科学构建比选体系、优化比选方法，可有效提升方案决策的合理性；从勘察到生态环保的全维度设计优化，能够保障工程安全稳定性与综合效益。未来应进一步推动智能化技术与比选设计工作的深度融合，完善动态优化机制，强化绿色低碳设计理念的实践应用，不断提升山区公路建设的精细化与可持续化水平，为山区交通基础设施高质量发展提供更全面的技术保障

参考文献

- [1] 莫建兴,凌达勇,陆海丽,等. 复杂山区高速公路路线方案设计与比选分析[J].西部交通科技,2025,(11):40-42.
- [2] 罗宇峰. 地质地形条件对山区低等级公路路线布设的限制性因素研究[J].交通科技与管理,2025,6(22):119-121.
- [3] 杨孟坤. 区域交通品牌建设与标准化体系建构——以盆周山区公路路线设计为例[J].中国品牌与防伪,2025,(11):152-154.
- [4] 饶纪锋. 山区小交通量农村公路路线安全设计综合分析和应用[J].中国公路,2025,(18):101-103.
- [5] 辛凯业. 山区公路路线设计原则及关键要点[J].四川水泥,2025,(07):220-222.

Practices and Environmental Impact Assessment of Green Construction Technology on Highways

Pinglei Li

Handan Municipal Transportation Comprehensive Administrative Law Enforcement Detachment, Handan, Hebei, 056001, China

Abstract

With the deepening advancement of ecological civilization construction, the highway industry urgently needs to transform traditional construction models. As a crucial measure for sustainable development, green construction plays a pivotal role in reducing environmental burdens and improving resource utilization efficiency. However, current green construction practices in highways face practical challenges such as high technical costs, incomplete management systems, and a lack of standardized evaluation criteria. By analyzing the core connotations of green construction and thoroughly examining the primary obstacles in practice, this study proposes optimization strategies including promoting eco-friendly materials, establishing intelligent monitoring systems, developing scientific evaluation models, and improving incentive-constraint mechanisms. These recommendations provide theoretical guidance and practical references for the standardized development of green construction in highway projects.

Keywords

expressway; green construction; environmental impact assessment; sustainable development; technological innovation

高速公路绿色施工技术实践与环境影响评估

李平雷

邯郸市交通运输综合行政执法支队, 中国·河北 邯郸 056001

摘要

随着生态文明建设的深入推进,高速公路建设亟须转变传统施工模式。绿色施工作为可持续发展的重要举措,在降低环境负荷、提升资源利用效率方面发挥着关键作用。当前高速公路绿色施工面临技术成本高昂、管理体系不完善、评价标准缺乏统一性等现实困境。通过分析绿色施工的核心内涵,深入探讨实践过程中的主要障碍,提出推广环保材料、构建智能监测系统、建立科学评价模型、完善激励约束机制等优化路径,为高速公路绿色施工的规范化发展提供理论指导和实践参考。

关键词

高速公路; 绿色施工; 环境影响评估; 可持续发展; 技术创新

1 引言

高速公路作为国家交通基础设施的重要组成部分,其建设规模和建设质量直接关系到区域经济发展和生态环境保护的协调统一。传统施工模式往往以追求工期和成本控制为主要目标,对环境保护的重视程度相对不足,导致施工过程中产生大量扬尘、噪声污染,消耗过多自然资源。绿色施工不仅仅是简单的技术改进,更是一种全新的建设理念和管理模式,涉及施工材料选择、工艺流程优化、废物处理、能源利用等多个环节。环境影响评估作为绿色施工的重要组成部分,能够科学量化施工活动对生态环境的影响程度,为施工方案的优化调整提供数据支撑。

【作者简介】李平雷(1976-),男,中国河北成安人,本科,助理工程师,从事交通运输工程研究。

2 高速公路绿色施工的核心内涵

2.1 资源节约与循环利用的原则

绿色施工的根本目标在于最大限度地减少资源消耗,实现材料的高效利用和循环再生。施工现场应建立完善的管理体系,通过精确计算和科学规划,避免材料的过量采购和积压浪费。废弃混凝土、沥青等建筑垃圾不应简单填埋或丢弃,而应通过破碎、筛分等工艺处理后重新投入使用。旧路面材料经过适当处理可以用作新路基的填料,既减少了废物产生,又降低了新材料的需求量。施工用水的回收处理同样重要,废水经过沉淀、过滤等处理程序后,可以用于道路洒水降尘、设备清洗等用途,大幅减少对新鲜水资源的消耗^[1]。

2.2 生态环境保护的首要目标

高速公路施工对生态环境的影响是多方面的,包括土壤扰动、植被破坏、水体污染、噪声干扰等。土壤保护方面,

施工过程中应尽量减少对原有土壤结构的破坏,采用分层开挖、分层回填的方式保持土壤的自然层次。表土剥离后应单独存放并覆盖防护,避免土壤养分流失。植被保护需要在开工前详细调查施工区域内的植被分布情况,对珍稀植物实施重点保护,能够移植的植物应妥善移植到安全区域。水体保护需要建立完善的污水处理和雨水收集系统,生活污水和生产废水必须经过规范处理达标后才能排放,严禁直接排入自然水体。

2.3 施工全过程的节能减排理念

节能减排贯穿于高速公路施工的全过程,施工阶段是能源消耗和污染物排放的集中期。机械设备的选择和使用直接影响能源消耗水平,应优先选择能耗低、排放少的新型设备,定期维护保养确保其处于最佳工作状态。施工工艺的优化是实现节能减排的重要途径,采用预制构件可以减少现场作业量,降低施工现场的能源消耗。冷再生技术能够在常温条件下对旧沥青路面进行再生利用,避免了传统热拌工艺的高温加热,显著降低了能源消耗^[2]。运输环节的节能同样关键,合理规划运输路线,就近选择材料供应商,可以减少运输距离和燃油消耗。

3 高速公路绿色施工的实践困境

3.1 技术应用的成本制约

绿色施工技术虽然具有明显的环境效益,但其初期投入成本往往高于传统施工技术。新型环保材料的价格普遍较高,生物沥青、再生混凝土等绿色材料的生产工艺相对复杂,导致市场价格明显高于传统材料。先进施工设备的投入也增加了项目成本,智能化监测设备、节能型施工机械的购置成本和操作维护费用都相当高昂。技术人员培训成本也不容忽视,绿色施工技术的应用需要专业技术人员具备相应的知识和技能,培训周期长、费用高等因素都增加了企业的人力成本。

3.2 管理体系的系统性不足

当前高速公路绿色施工管理体系还不够完善,缺乏系统性的管理制度和有效的协调机制。制度建设方面,虽然国家和地方政府出台了一系列关于绿色施工的政策文件,但这些政策大多停留在原则性要求层面,缺乏具体的实施细则。部门协调机制不够健全,绿色施工涉及设计、施工、监理、环保等多个部门,现实中各部门往往各自为政,缺乏有效的沟通协调。责任分工不明确也是管理体系的重要缺陷,绿色施工涉及众多环节,但相关责任主体的职责范围和责任边界往往不够清晰。

3.3 评价标准的统一性缺失

绿色施工评价标准的不统一严重制约了规范化发展。不同地区、不同项目采用的评价标准存在显著差异,缺乏统一的评价指标体系和量化标准。评价指标体系不够完善,现有的绿色施工评价多侧重于定性描述,缺乏量化的评价指标。评价方法不够科学,许多评价方法过于简化,缺乏科学

的理论基础和数据支撑,评价过程中主观因素较多。评价结果应用机制不健全,评价结果与项目验收、资质等级等环节缺乏有机联系,无法形成有效的激励约束机制^[3]。

3.4 全员环保意识薄弱

绿色施工的成功实施需要全员参与,但当前施工人员的环保意识普遍薄弱。施工一线工人对绿色施工的认识往往停留在表面层次,认为绿色施工就是多花钱、增麻烦,缺乏对其长远意义的深刻理解。管理人员虽然对绿色施工有一定认识,但往往将其视为额外负担,在面临工期压力时,容易选择牺牲环保要求。环保技能培训不足也是重要原因,许多施工人员缺乏必要的环保知识和技能,不知道如何正确使用环保材料。激励机制不健全进一步削弱了人员参与绿色施工的积极性。

4 高速公路绿色施工的优化路径

4.1 推广新型环保材料与再生技术

加快新型环保材料的研发应用是提升绿色施工水平的关键举措。应重点推广生物沥青、再生混凝土、环保型防水材料等新型材料,建立完善材料性能检测和质量控制体系,确保环保材料在保证工程质量的前提下得到有效应用。建立环保材料认证制度,对符合环保要求的材料进行统一认证和标识,为施工企业选择环保材料提供权威参考。制定环保材料应用的技术指南,明确不同类型环保材料的适用范围、使用方法和注意事项,降低施工企业应用环保材料的技术门槛。大力推广废料再生利用技术。建设专门的废料处理中心,配备先进的破碎、筛分、清洗等设备,将建筑废料加工成符合质量要求的再生材料。废弃沥青路面经过破碎和再生处理后可以用作新路面的基层材料,废弃混凝土经过处理后可以用作路基填料或制成再生混凝土。发展就地再生技术,直接在施工现场对旧路面材料进行再生处理。冷再生技术可以在常温条件下对沥青路面进行翻新,避免了传统热再生工艺的高能耗问题。就地再生不仅减少了材料运输成本,还缩短了施工周期,提高了施工效率。建立材料循环利用数据库,记录各类再生材料的性能参数、使用效果和适用条件,为后续项目选择再生材料提供数据支撑。通过数据积累和分析,不断优化再生材料的生产工艺和应用技术,提高再生材料的质量和性能。

4.2 构建全过程的智能化监测系统

建设覆盖施工全过程的智能化监测系统,实现对施工活动环境影响的实时监控和精准管理。监测系统应包括大气环境监测、水环境监测、噪声监测、生态环境监测等多个子系统,形成全方位、立体化的监测网络。大气环境监测子系统应配置PM2.5、PM10、二氧化硫、氮氧化物等污染物浓度监测设备,在施工现场及周边区域布设监测点,实时监控空气质量变化情况。当污染物浓度超过预警值时,系统应自动发出警报,提醒施工人员采取相应的污染控制措施。水环境监测子系统应监测施工现场及周边水体的水质变化,包括

pH值、浊度、化学需氧量、重金属含量等指标。对于跨越河流的桥梁工程,应在上下游设置水质监测点,及时发现施工对水环境的影响。噪声监测系统应在施工现场边界和敏感区域设置噪声监测设备,连续监测施工噪声水平。根据不同时段的噪声限值要求,系统应能够自动判断是否存在噪声超标情况,为施工噪声控制提供依据。建立监测数据管理平台,将各子系统的监测数据进行集中存储和分析。平台应具备数据可视化功能,通过图表、地图等形式直观展示环境监测结果。利用大数据分析技术,识别环境变化的规律和趋势,为施工方案优化和环境保护措施调整提供科学依据。开发移动监测应用,使项目管理人员能够通过手机或平板电脑随时查看监测数据和环境状况。应用应具备报警推送功能,当监测指标异常时及时通知相关人员,确保能够迅速响应和处理环境问题。

4.3 建立科学量化的环境影响评价模型

构建符合高速公路建设特点的环境影响评价模型,实现对绿色施工效果的科学量化评估。评价模型应综合考虑资源消耗、污染物排放、生态影响、社会效益等多个维度,建立科学合理的指标体系和权重分配方案。设计分层次的评价指标体系。第一层为目标层,即绿色施工综合效果;第二层为准则层,包括资源节约、环境保护、生态恢复、技术创新等方面;第三层为指标层,包括材料利用率、能源消耗强度、废物产生量、污染物排放浓度、植被覆盖率、水土流失量等具体指标。建立指标量化标准和评分方法。对于可直接测量的定量指标,制定明确的量化标准和评分规则;对于难以直接测量的定性指标,设计科学的评价方法和评分标准。采用专家评议、德尔菲法等方法确定各指标的权重系数,确保评价结果的客观性和准确性。开发评价模型计算软件,集成数据收集、指标计算、权重分析、结果评价等功能模块。软件应具备良好的用户界面和操作便利性,使评价人员能够方便快捷地进行环境影响评价。软件还应具备数据导入导出、报告生成、历史数据对比等功能。建立评价结果应用机制,将环境影响评价结果与项目验收、企业资质评定、招投标资格等环节建立有机联系。对于评价结果优秀的项目和企业,给予政策扶持、资金奖励、优先承接项目等激励措施;对于评价结果较差的项目和企业,采取限制承接新项目、要求整改提升等约束措施。

4.4 完善绿色施工的激励与约束机制

建立健全绿色施工激励约束机制,通过政策引导和市

场调节相结合的方式,推动绿色施工的全面发展。激励约束机制应涵盖政策激励、经济激励、技术支持、监督约束等多个方面,形成促进绿色施工发展的良好环境。制定绿色施工专项扶持政策,对采用绿色施工技术的项目给予财政补贴、税收优惠、贷款贴息等政策支持。设立绿色施工专项资金,重点支持绿色施工技术研发、设备购置、人员培训等关键环节。建立绿色施工示范项目制度,对示范效果突出的项目给予重点扶持和宣传推广。完善绿色施工市场准入机制,将绿色施工能力作为企业资质评定和项目招投标的重要条件。建立绿色施工企业信用评价体系,根据企业绿色施工表现进行信用评级,信用等级高的企业在承接项目时享有优先权。建立绿色施工技术创新平台,促进产学研合作,加快绿色施工技术的研发和产业化应用。支持高等院校和科研院所开展绿色施工技术研究,鼓励施工企业与科研单位建立长期合作关系,推动技术成果转化。强化绿色施工监督检查,建立常态化的监督检查机制。环保部门应定期对施工项目的环境保护措施落实情况进行检查,发现问题及时要求整改。建立环境违法行为举报制度,鼓励社会公众参与绿色施工监督,形成全社会共同监督的良好氛围。完善绿色施工法律法规体系,明确绿色施工的法律地位和具体要求。制定绿色施工技术规范 and 标准,为绿色施工实施提供技术依据。建立环境违法行为处罚制度,对违反绿色施工要求的行为依法进行处罚,提高环境违法成本。

5 结语

高速公路绿色施工技术实践与环境影响评估是推进交通基础设施可持续发展的重要途径。绿色施工的发展需要政府、企业、社会等各方面的共同努力,政府应加大政策支持力度,完善法规标准体系;企业应增强环保意识,加强技术创新,积极履行环境保护责任;社会应加强监督参与,推动绿色施工理念的普及推广。随着技术进步和管理水平提升,高速公路绿色施工必将迎来更加广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 姜振民.绿色建筑施工技术应用及其环境影响评估[J].工程设计与施工,2025,7(4):76-78.
- [2] 王博.绿色施工技术对调蓄水库及其环境影响的评估[J].绿色中国,2025(8):151-153.
- [3] 孙伟.高速公路养护施工中绿色环保材料的应用及其可持续性评估[J].价值工程,2025,44(4):43-46

Support Structure Selection and Deformation Monitoring Analysis for Deep Foundation Pit Engineering

Chan Zhang

Chongqing Niuyuan Construction Engineering Co., Ltd., Chongqing, 401147, China

Abstract

Deep foundation pit construction involves complex environments and high risks. The rational selection of support structures is crucial for ensuring construction safety and engineering quality, requiring comprehensive consideration of core factors such as geological conditions (e.g., soil layer characteristics, groundwater distribution), excavation depth, surrounding buildings, and underground pipeline layouts. Deformation monitoring of support structures serves as a vital safeguard for construction safety, necessitating real-time tracking of critical parameters like retaining structure displacement and surface settlement to dynamically monitor the stability of the support system and surrounding environment. This paper focuses on analyzing key selection factors including geological conditions and environmental factors, compares the applicability and advantages of mainstream support schemes, details core monitoring technologies for retaining structure horizontal displacement, surface settlement, and support axial force, and ultimately proposes scientifically feasible engineering implementation strategies to provide references for the safe and efficient advancement of deep foundation pit projects.

Keywords

deep foundation pit engineering; deep foundation pit support structure; selection; deformation monitoring

深基坑工程支护结构选型与变形监测分析

张婵

重庆牛源建筑工程有限公司，中国·重庆 401147

摘要

深基坑工程施工环境复杂、风险较高，支护结构的合理选型是保障施工安全与工程质量的关键，需综合考量地质条件（如土层特性、地下水分布）、开挖深度、周边建（构）筑物及地下管线布局等核心因素。支护结构变形监测是施工安全的重要保障，需实时跟踪围护结构位移、地表沉降等关键参数，动态把控支护体系及周边环境的稳定状态。本文重点分析地质条件、周边环境等选型关键因素，对比主流支护方案的适用场景与优劣，详细介绍围护结构水平位移、地表沉降、支撑轴力等监测技术核心内容，最后提出科学可行的工程实施策略，为深基坑工程安全高效推进提供参考。

关键词

深基坑工程；深基坑支护结构；选型；变形监测

1 引言

我国近年来城市化发展速度加快，深基坑工程规模更大、基坑更深且结构更加复杂，如果支护结构不能发挥其应有的效能，就会造成严重后果，诸如坍塌，导致周边建筑开裂等^[1]。为避免这种不良现象发生，就要对支护结构合理选型并实施变形监测，以提高深基坑工程的安全性。

2 深基坑工程支护结构选型的关键因素

2.1 地质条件

工程所在区域不同，土层分布有很大的差异。比如，

沿海地区以软土区域居多，有大量的厚层淤泥质黏土，含水量高、压缩性高且强度低，开挖施工的过程中，容易铲射跟侧向挤出现象或者底部隆起问题。这种类型的地层要求支护结构有很强的抗变形能力。通常而言，所选择的结构形式刚度大，有很强的整体性，比如，地下连续墙等，可限制墙体位移，避免渗流破坏现象。内陆地区多为砂性土或者粉质黏土，可以选用排桩结合水帷幕等，成本比较低。

2.2 地质条件

深基坑的深度超过 10m，土压力并不是线性增长，需要配置多道内支撑或者锚索。低于 10m 的浅基坑则不然，土质良好的情况下，可应用土钉墙或者放坡开挖等技术操作方法，工程造价显著降低。需要注意的是，即便深度不是很大，如果在软弱地层中，支护措施依然不能盲目简化。

【作者简介】张婵（1981-），女，中国重庆人，本科，工程师，从事土木工程研究。

2.3 周边环境

城市中心区域的基坑工程附近通常有各种建筑物，诸如楼房、厂房、市政管线等等，即便地面沉降幅度不是很大，或者墙体位移些微的位移，所造成的损害也是巨大的。

所以，这种类型的工程中，支护结构对于自身有足够的承载力，保证结构稳定，同时还要具有良好的止水性能变形特性比较低，所选择的结构类型要无缝连接，具有良好的截水效果。（表 1：支护结构选型关键因素）

表 1 支护结构选型关键因素

选型维度	核心指标	方案
地质条件	土体抗剪强度、地下水位	软土区优先地下连续墙（抗渗性强）
开挖深度	> 15m 需刚性支护	排桩 + 锚杆（适用于中等深度基坑）
周边环境敏感性	建筑物距离、管线保护要求	钢板桩（快速施工，减少扰动）

3 主流支护方案对比

3.1 地下连续墙

地下连续墙施工，所使用的主要工具是专用抓斗或者铣槽机，泥浆护壁条件下开挖沟槽，之后吊放钢筋笼并进行混凝土浇筑，形成连续墙体。墙体厚度为 0.6-1.5 米且非常整体，对于侧向土压力极具抵抗力，且具备优良的止水性能，地下水丰富且防渗要求高的场地，采用这种方法效果良好。比如，某工程基坑深度达到 34 米，地下连续墙厚度为 1.5 米，配合六道环形内支撑，不会产生渗漏且变形幅度非常小。

3.2 钻孔咬合桩 + 内支撑

该技术操作中，先施工素混凝土桩（A 桩），之后在其间进行切割咬合施工钢筋混凝土桩（B 桩），构成全封闭围护结构。由于 B 桩切割 A 桩的时候回实现物理咬合，界面密实度高，没有接缝，防水性能与地下连续墙接近。比如，某商业综合体项目中，由于场地比较狭小，不能放置大型抓斗设备，施工单位改使用全套管钻机进行直径 1 米、间距 1.75 米的咬合桩施工，结合三道钢支撑，使得最大水平位移不超过 25mm。但是，该工艺要求设备有很高的精度，

施工过程中容易产生很大的振动和噪音。

3.3 排桩 + 高压旋喷止水帷幕

排桩通常使用间距 1.2-1.8 米的钻孔灌注桩或者预制桩，采用冠梁连接方式形成整体受力体系；止水帷幕则还通过高压旋喷技术将水泥浆液注入土体，形成柱列式或者格栅式阻水屏障。这种方案具有很强的灵活性，可基于地质情况对桩长以及帷幕深度进行调整，造价低于地下连续墙的 30%-40%。实践应用中，会产生桩间漏水问题，特别是砂层或者粉土层中，旋喷桩不能正确搭接，容易导致漏通道。所以，很多工程项目需要辅助双重止水措施，通常会增设水泥搅拌桩或者注浆补强，这样就导致成本增加。

3.4 土钉墙

土钉墙是在边坡内部逐层打入钢筋或者钢管（即土钉），并与喷射混凝土面层共同发生作用，形成复合重力式挡土结构。这种方法的施工进度快，材料消耗量少。但是，这种支护方式比较被动，需要土体自身参与受力，如果遇到软土或者被雨水浸泡，容易出现整体滑移。所以，软土地基或者重要建筑物附近不能采用这种支护方式。（表 2：支护方案对比表）

表 2 支护方案对比表

支护类型	适用场景	优势	局限性
地下连续墙	软土、超深基坑（>20m）	刚度大、抗渗性强	造价高，需专业设备
钻孔咬合桩 + 内支撑	软土、需截水工程	无缝连续墙，无需额外截水措施	施工噪声大，需全套管钻机
排桩 + 高压旋喷止水帷幕	中等深度基坑（10-15m）	施工灵活，造价适中	桩间易漏水，需辅助止水
土钉墙	土质较好、浅基坑（<10m）	经济性好，施工便捷	变形较大，不适用于软土

4 变形监测内容

4.1 围护结构水平位移

围护结构水平位移通常采用测斜仪埋设于墙体内部的 PVC 测斜管中，沿深度方向每隔 0.5 米读取一次数据，绘制位移-深度曲线。在软土地区，典型的位移形态呈“弓字型”，即顶部位移较小，中部向外凸出，最大值出现在开挖面附近（约 0.5-0.7 倍开挖深度处）。

4.2 地表沉降

地表沉降可反映基坑开挖对周围土体的扰动程度。一般使用精密水准仪按固定测点进行周期性测量，精度可达 ±0.1mm。沉降曲线多呈“凹槽形”，即靠近基坑边缘沉降

最大，随距离增加逐渐减小^[2]。若沉降速率持续超过 3mm/d 或累计值逼近预警值（如 30mm），则需立即启动应急预案。在某枢纽项目中，曾因连续暴雨导致降水井失效，监测发现某断面日沉降达 4.2mm，项目部迅速组织回填反压并加强抽排水，成功避免了更大范围的地层移动。

4.3 支撑轴力

支撑轴力能够将支护系统的受力状态体现出来。钢支撑常配备振弦式或光纤式轴力计，实时传输数据至监控平台。正常情况下，轴力随开挖深度逐步增大，呈阶梯式上升。但若某次开挖后轴力突增超过设计值的 80%，则提示存在超载风险，需检查是否超挖或支撑预加力不足^[3]。某项目曾

因支撑安装滞后,导致第三道支撑初始轴力仅为设计值的50%,墙体位移迅速扩大,后经紧急补张拉才得以控制。

5 工程实施策略

深基坑工程的成功,需要采用科学有效的实施策略。具体的实施要点如下:

5.1 选型策略要前置化、精准化

深基坑工程的初步设计环节,要实施专项岩土工程分析,结合使用BIM模型,对多个方案进行比选^[4]。如果工程为软土超深基坑,可以将地下连续墙与混凝土内支撑结合使用,结合使用有限元软件模拟方式掌握不同工况下的位移场以及应力场,对支撑间距以优化,并合理配置刚度。

具体的操作中,将三维实体模型建立起来,涵盖基坑几何尺寸、土层分布、地下连续墙、混凝土内支撑以及周边环境等。设定边界条件,水平位移约束模型两侧,与基坑之间的距离超过3倍开挖深度,底部固定约束^[5]。土体应用HS-Small小应变本构模型,对于软土非线性变形以及小应变刚度衰减特性都能够精准模拟。地下连续墙以及支撑应用弹塑性梁单元,此环节要对混凝土开裂刚度折减充分考虑,折减系数0.3~0.5。

每一步开挖之后,都要对位移场重新色互助,对先撑后挖时序模拟操作。

进行敏感性分析操作过程中,对支撑水平间距以调整,比如从原来的10m调整为8m或者12,比较位移以及支撑轴力变化情况,当间距缩短,位移减小幅度介于5~15%,但是,支撑数量有所增加,就会提升成本。对支撑截面刚度进行调整,比如增大截面高度或者配筋率,刚度提升幅度达到20%,位移则会减小8~12%,但是需要对节点承载力进行验算。平衡点优化过程中,位移达到规定标准的前提下,选择允许间距的最大值。顶层支撑刚度可适当降低,承受土压力比较小,底层支撑就要相应地增强。

5.2 监测频率要动态化、差异化

频率监测中,按照常规的方法,每天进行一次观测,但是,当遇到雨季,临近有敏感设施或者出现异常征兆的时候,就要增加频率,即每天2~3次,必要的情况下,还要进行24小时持续监测。对于预警机制要分级设定,黄色预警可以达到70%限值、红色预警则会超过85%,且响应流程明确。

5.3 坚持信息化施工理念

基于实际测量所获得的数据对土体力学参数以反演,

以此为依据进行原始设计假设修正,包括开挖顺序以及支撑时机都要动态调整。

反演操作中,应用BP神经网络建立位移与土体参数的非线性映射关系。采用数值模拟方法,运行FLAC3D进行正演计算,训练样本集生成。采用正交试验方法设计参数组合,计算量会减少。

进行分区分层开挖施工中,基于反演参数对变形敏感区预测,低风险区域要优先开挖。比如,某地铁半盖挖法替代全盖挖,工期缩短8个月。支撑时机控制中,应用位移速率阈值法,如果墙体位移速率超过3mm/天时,需要提前施加支撑。预应力锚索动态张拉,根据反演结果进行锁定荷载调整,使得松弛效应减少。

开挖施工中,要分层进行、分块进行,保证对称性并限时完成,不能存在超挖抢工的问题,以真正意义上实现信息化引领,管理精细化。

6 结语

通过研究明确,深基坑工程施工过程中,要重点关注两个方面的内容,即选型适配性和监测实时性。选择支护类型的时候,要以地质勘察所获得的数据信息作为依据,且对各种支护方案比选,将最优组合确定下来。对于支护变形情况进行监测的过程中,要严格按照原则执行,并将产生的数据实时反馈至施工现场的管理人员已及时调整。随着智能技术的普及,监测智能化方向发展,主要发挥作用是智能传感设备,结合使用数值模拟技术,使得深基坑工程安全推进并提高可控性。

参考文献

- [1] 吕昊轩.深基坑工程中的支护结构选型与稳定性分析[J].陕西建筑, 2025(4):25-28.
- [2] 柯勇峰.岩土工程中深基坑支[1] 吕昊轩.深基坑工程中的支护结构选型与稳定性分析[J].陕西建筑, 2025(4):25-28.
- [2] 柯勇峰.岩土工程中深基坑支护结构优化设计与施工控制[C]//智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).2025.
- [3] 李经宇,于英霞,代均德,等.超大深基坑支护结构综合选型及变形规律研究[J].河南大学学报(自然科学版), 2023(6):53-54.
- [4] 张传虎.西宁某深基坑土钉墙支护数值模拟与现场监测[D].安徽建筑大学, 2021.
- [5] 张晓丽.深基坑咬合桩组合支护施工技术及其现场监测研究[J].工程机械与维修, 2022(3):178-181.

Research on Safety Protection and Risk Control of Expressway Electromechanical Monitoring System

Jinhui Ye

Xinjiang Communications Planning, Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830006, China

Abstract

As the core component of its (Intelligent Transportation System), expressway electromechanical monitoring system forms a collaborative chain of perception transmission calculation decision in vehicle detection, toll processing, communication exchange, energy consumption control, video monitoring and disaster warning, which is the basic support for expressway operation safety, efficiency and service ability. However, the electromechanical system shows the characteristics of high coupling, high vulnerability and chain fault propagation in the long-term operation process, which is affected not only by the physical environment, but also by network attack, hardware failure and human operation risk. According to the results of this study, for the composite architecture of "electromechanical+communication+cloud platform", the establishment of active security governance system can effectively reduce the system failure rate compared with traditional passive protection, significantly improve the timeliness of anomaly identification and the ability of operation and maintenance closed-loop, which is of great significance to improve the toughness of smart high-speed system.

Keywords

expressway; electromechanical monitoring system; network security; operation and maintenance risk

高速公路机电监控系统的安全防护与风险控制研究

冶金辉

新疆交通规划勘察设计院有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830006

摘要

高速公路机电监控系统作为ITS (Intelligent Transportation System) 核心组成, 在车辆检测、收费处理、通信交换、能耗控制、视频监控与灾害预警方面形成感知—传输—计算—决策的协同链条, 是高速公路运营安全、效率与服务能力的基础性支撑。然而机电系统在长期运行过程中呈现出高耦合、高脆弱性与链式故障传播特征, 既受物理环境作用, 也受网络攻击、硬件失效与人为操作风险影响。本研究结果针对“机电+通信+云平台”的复合架构, 建立主动式安全治理体系较传统被动式防护可有效降低系统失效率, 显著提升异常识别及时性与运维闭环能力, 对提升智慧高速系统的韧性具有重要意义。

关键词

高速公路; 机电监控系统; 网络安全; 运维风险

1 引言

高速公路机电监控系统通过对交通状态、设施运行与环境要素的实时监测, 实现信息感知、数据传输、综合分析指令下达的全过程闭环, 是智慧高速与现代交通治理体系的重要基础。然而系统规模的持续扩张与功能模块的不断耦合, 使其由单一控制单元演变为多节点、多网段、多协议并发的复杂集群。在此过程中, 传统基于设备稳定性的“点式控制”已不足以应对系统全生命周期的安全需求, 特别是在视频识别、收费清算与能源管控等核心业务深度依赖数据

与算法的背景下, 数字攻击能够直接突破物理边界, 诱发跨子系统级联故障。因此, 构建以主动预警、动态隔离和智能诊断为核心的系统化安全防护框架, 是高速公路机电运维从“监控管理”迈向“韧性治理”的必然趋势。

2 高速公路机电监控系统的总体特征与安全挑战

2.1 系统功能构成与技术架构

高速公路机电监控系统以现场感知、通信网络、中心平台和执行单元构成层次化结构, 其中交通检测器、摄像机、气象站、隧道照明、车道控制器、收费控制终端、UPS、电力系统形成底层机电载体^[1]。通过工业以太网、光纤 SDH、MPLS 和 LTE/5G 等通信链路构成数据高速通道, 由监控中心子系统完成信号聚合、数据计算与业务调度。系

【作者简介】冶金辉 (1984—), 男, 中国新疆人, 本科, 高级工程师, 从事智慧交通、机电工程、交通信息化、地质灾害监测研究。

统功能逻辑体现从“物理采集—协议封装—数据转发—策略执行”的全过程闭环，涉及视频编码、边缘计算、车牌识别算法、收费交易与权限认证模块，其横向依赖设施物理稳定性，纵向依赖链路连续性与平台可靠性。由于系统结构呈现高度耦合性，任何节点失效都可能引发多级联动，使局部故障转化为全链条中断。

2.2 运行环境对机电系统安全的影响

高速公路环境具有高温差、粉尘、潮湿、高盐雾和强电磁干扰等典型特征，尤其在山区隧道、跨海大桥等场景中机电设备长期暴露于结构振动、凝露腐蚀与电压不稳环境，易导致传感器漂移、连接器氧化、通信接口失真，进而造成数据异常与功能降级。在寒区结冰工况下，通风、照明和消防子系统的响应延迟会扩大交通事件影响范围；在高温条件下，摄像监控与车牌识别精度下降导致事故识别延迟，诱发运维反馈链条上“误报—漏报—误判”的累积效应。近年来高速公路机电系统从“单点功能控制”向“互联互通感知体系”演化，通过边缘节点—云平台协同形成多源数据处理架构^[2-3]。随着高清视频 AI 分析、收费系统电子交易、远程维护与 OTA 升级成为常态，机电系统安全威胁由线下设备故障向线上攻击延伸，呈现典型的“物理—网络复合型风险”。例如非法注入可伪造车道状态或收费数据，弱密码权限可导致视频资源泄露，平台漏洞可使控制策略遭受篡改，从而对隧道能耗控制与交通诱导形成直接安全影响。

3 机电监控系统的安全威胁分析与风险传播机制

3.1 物理层设备故障与环境侵蚀风险

物理层是机电系统最基础的风险载体，设备老化、供电不稳、接触不良、线缆破损与雷击感应均可能导致数据丢失与设备瘫痪。机电设备生命周期普遍经历“初始稳定性—性能衰减—失效突发”的曲线特征，其中传感器功能退化表现为输出噪声增大和漂移长期积累，在系统端被误认为异常事件触发，造成错误调度策略。二次供电系统稳定性是典型风险源，当隧道 UPS 失效或电能质量突变时，照明、监控与风机将同时失效，使交通管制呈现不可控状态，形成灾害性后果。IP 化架构使机电系统风险超越传统物理失效，网络攻击成为影响系统稳定性的关键因子。分布式拒绝服务（DDoS）、ARP 欺骗、端口扫描、恶意流量注入与工控协议漏洞利用均可导致链路阻塞与功能锁死。若边缘节点未隔离核心网络，攻击者可通过漏洞横向移动扩散至视频存储、收费交易与指挥调度模块，从“可视化失控”升级至“业务逻辑失控”。数据层面，伪造车牌和虚假交易行为在收费环节产生连锁财务损失，若无强一致性校验机制，将形成不可逆账务风险。

3.2 人员操作风险与风险链条传播

高速公路机电系统维护高度依赖运维人员，但现实中存在“岗位授权多、操作审计弱、人员变动频繁”的治理现象，

导致人为风险成为不可忽视的变量。未经审批的远程登录、权限共享、绕过流程的系统调整与应急策略测试均可能引发安全事件^[4]。典型事故显示，软件参数错误与操作失误导致设备连续重启，使隧道交通监视中断超过 180 分钟，诱发事故扩大与管理成本外溢。机电系统风险并非孤立存在，呈现“局部扰动—信息失真—策略错误—级联失效”的链式传播路径。视频监控失真将导致交通识别偏差，诱发交通诱导策略错误，进而导致路段拥堵加剧，引发更多异常事件；网络丢包使风机控制响应滞后，使隧道 CO 浓度监测不准，引发二次报警和设备冗余启动，形成系统资源浪费与能耗暴增。风险传播从微观组件传导至宏观决策，其耦合性决定了安全防护需要建立多维度冗余与主动防御机制。

4 安全防护体系架构分层与深度防御策略

构建高韧性的机电安全防护体系应遵循“分层隔离—功能解耦—数据可信—最小权限”原则，通过物理层、网络层、业务层与决策层进行纵深防护。在物理层建立设备冗余与隔离电源以保证底层功能连续性；在网络层通过分区隔离、虚拟网段划分、白名单控制阻断横向渗透；在业务层依托数据校验与一致性控制保障收费和调度逻辑正确性；在决策层建立算法透明度与反馈闭环，防止策略误触发扩大损害区间^[5]。

深度防御强调多重屏障叠加，将攻击成本抬升至不可接受水平。网络隔离采用“核心—传输—接入—终端”策略，通过 SDN、VLAN 与双向网闸限制跨域访问；边缘节点采用可信执行环境（TEE）与硬件加密；敏感数据采用数字签名与哈希指纹保证不可篡改；身份体系采用硬件 Token+Ukey+ 动态口令多因子认证，避免系统管理员权限集中导致的单点失控。视频数据与收费数据需采用独立存储路径，确保即便视频平台被攻陷，也不会影响收费服务链条。隧道通风与照明控制属于安全关键业务，应采用独立控制链路与双控制器架构，确保主控失效时备控可在 100ms 内切换完成；收费系统采用核心清算区封闭架构，仅允许经 CA 认证的数据进入结算池；视频监控采用边缘智能筛选策略，将可疑事件以结构化数据而非原始视频回传中心，实现“数据降维”减少攻击面与带宽压力；应急广播采用多信道冗余传输避免网络故障引发广播失效。

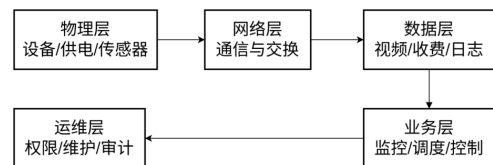


图 1 高速公路机电监控系统分层安全防护结构示意图

图 1 中的单向箭头并非简单数据流，而是体现不同层级之间的功能依赖与安全边界：物理层向网络层的箭头代表硬件状态与信息采集的单源输入，网络层向数据层的箭头体

现通信系统作为“数据承载与安全边界”的角色；数据层向业务层的垂直箭头表现算法与策略生成必须建立在可信数据基础之上；业务层向运维层的反向箭头则反映系统治理的回溯性与审计性——运维活动并不直接参与业务执行，而通过策略约束与权限控制作用于系统全链条，避免人为因素或配置错误造成事故扩大。该模型从结构上避免“数据—业务—运维”三者交叉污染，实现了工程管理所强调的职责分离、边界清晰与最小影响路径原则。

5 风险控制路径分析与系统优化路径

5.1 风险控制路径分析

风险控制的核心在于“提前感知—主动响应—动态校正”。在传感器侧构建多物理量融合框架，通过交通流指数、空气质量、能耗变化及设备振动指标联合构成状态向量，利用卡尔曼滤波与贝叶斯推断模型实现异常识别。边缘设备对视频帧、车牌序列及感测数据进行多任务学习，将事故、拥堵与设备失效转化为统一事件流，提升跨业务的风险推理能力。系统通过时序分析与滑动窗口技术匹配干扰峰值，实现“潜在故障—轻微异常—严重故障”的分级识别。基于历史故障库，采用 LSTM、GRU 与 Transformer 模型对机电设备状态进行时间序列建模，通过温度漂移、功耗变化及信号噪声指标预测失效节点。针对高能耗设备建立退化模型，输出剩余寿命估计（RUL），以提前调度维护资源；现场控制器采用灰度重启与自愈策略，当识别到软件崩溃或内存泄漏时主动解除异常，避免长时间人工介入。预测性维护通过缩短停机窗口，减少运营影响，在典型路段可减少 20% 的紧急抢修事件。风险控制应以闭环机制落实，从预警、响应、恢复到审计形成完整链条。系统自动触发分级指标：轻度异常仅生成日志；中度异常触发操作审核与远程调度；严重异常直接阻断调度策略并强制切换至安全模式。事件溯源依托链路追踪和设备指纹记录，形成“设备—操作—策略—结果”的全路径证明，防范责任追溯中的争议与合规风险。该机制在隧道连续失联案例中显示处理时长缩短 47%，显著提升应急响应效率。

5.2 工程案例分析与系统优化路径

某山区高速隧道机电系统因高湿度、复杂通风及回路

老化，导致监控脱网与风机误启动事故频发。本研究采用二次供配电隔离、通信链路多路径与边缘节点冗余策略，将传输时延降低至 18ms，通风控制误触发率下降 60%，系统维护周期从 3 个月延长至 14 个月。该案例表明：物理结构优化与网络架构分层是基础安全内核，能够从源头上降低运营风险。城市环线高速收费系统曾遭受恶意流量攻击，导致车道拥堵与结算异常。实施 VLAN 隔离、中心清算区分区与动态权限分配后，攻击者无法横向渗透至核心账务链路；结合 CA 签名与数据比对，使交易伪造率下降至近零。案例表明：数据链条可信性构建应优先于平台功能扩展，尤其要保障“视频监控—收费—调度”三大核心业务之间的逻辑边界。

6 结论

高速公路机电监控系统是交通行业数字化基础设施的重要组成部分，其安全本质上是“机电物理系统—网络通信—算法控制—运维组织”多维耦合的复杂系统问题。针对高风险运行环境和高度互联架构，传统依赖硬件冗余的被动防护已无法满足需求，需要建立主动、动态、智慧的深度防御体系。研究表明，通过分层架构与最小权限策略实现攻击面缩减，辅以多源数据融合与智能诊断改善风险识别能力，并在事件闭环与溯源体系中推进运维能力成熟，对于提升系统韧性与持续运行能力具有显著优势。未来研究应进一步围绕机电系统数字孪生、车路协同与云计算融合展开，更加重视对模型可信性的管理与对算法黑箱的审计，以实现从“局部安全”迈向“系统安全”的治理目标。

参考文献

- [1] 刘凤成.高速公路机电工程监控系统应用[J].交通世界,2018,(25):174-175.
- [2] 庄国雄.高速公路机电监控系统的设计探讨[J].科技创新与应用,2018,8(26):89-90.
- [3] 徐琼.对高速公路机电监控系统的设计的相关分析[J].建材与装饰,2018,14(44):245-246.
- [4] 孙昊.基于 ZigBee 和 4G 移动网络的高速公路机电设备监控系统[J].中国交通信息化,2019,(7):101-108.
- [5] 孙钦飞.谈高速公路机电监控系统组成、特点及隧道监控模式[J].中国新通信,2022,24(5):45-47.

Construction of a Natural Disaster Assessment Model for Hydropower Stations During Flood Season and Multi-Objective Optimization Adjustment

Guozhu Zhou

Yunnan Dianheng Asset Appraisal Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650032, China

Abstract

Against the backdrop of deepening global warming, the flood safety risks of hydropower projects in China are becoming increasingly complex. The frequent occurrence of rainstorms, the cascading effects of mountain torrents and geological disasters, and the drastic changes in watershed hydrological conditions pose severe threats to power station operations. In response to the current inadequacy of disaster forecasting capabilities under changing weather conditions—particularly the lack of multi-source information integration and reflection of disaster chain responses—it is urgently necessary to establish a comprehensive disaster warning and assessment system capable of reflecting interconnected disaster response characteristics. Under these circumstances, developing a scientific and precise disaster assessment model, along with coordinating and regulating multiple indicators, serves as a crucial pathway to enhancing the flood safety standards of hydropower projects in China.

Keywords

hydropower station flood season; natural disaster assessment model construction; multi-objective optimization

水电站汛期自然灾害评估模型构建与多目标优化调整

周国柱

云南滇恒资产评估有限公司，中国·云南 昆明 650032

摘要

在全球变暖趋势不断加深的背景下，中国水电工程的防洪安全风险日趋复杂。频繁发生的暴雨、山洪地质灾害的级联作用和流域水文条件的急剧变化，给电站运行带来了严重的威胁。针对目前天气变化下，多源信息相结合、反映灾害链式响应特征的灾害预报能力不足的问题，迫切需要构建一套完整的、可反映灾害联动响应特征的灾害预警评估系统。在这种情况下，如何建立一种科学、精确的灾害评估模式，并对其进行多个指标的协调与调控，是提高中国水电工程防洪安全水平的重要途径。

关键词

水电站汛期；自然灾害评估模型构建；多目标优化

1 引言

水电站汛期自然灾害评估是一项涉及水文气象、工程结构和调度等多个领域的综合性系统工程，具有重要的理论和现实意义。当前的水电工程运行，既要注重对传统的水文要素进行监控和预警，又要考虑地质、气象等多因素的影响机理。在此基础上，从洪水演化、边坡稳定和设备防护等多个层面，研究基于多尺度的风险评估方法。但在防洪、发电、生态流量等方面，需要考虑防洪安全、发电与生态流量等多种目标，对模型进行了动态响应与协调优化，以满足不同水文情景与风险水平下的调控需要。

【作者简介】周国柱（1982-），男，中国陕西富平人，本科，工程师，从事水利项目风险管理研究。

2 水电站汛期自然灾害评估现存问题

2.1 风险评估体系不完善

针对目前中国水电站汛期自然灾害评估方法不够完善的现状，提出了一种基于遗传算法的洪水灾害风险评估方法。在评估手段方面，大部分水电厂仍然采用单一灾害单独评估模型，对洪水、滑坡和泥石流等灾害单独进行统计，忽略了各种灾害间的联动机理。具体体现在：现有研究中，只针对暴雨-产流关系进行了研究，没有同时考虑暴雨导致的库岸滑坡失稳及其对水库蓄水与泄量的二次作用。这样分割的评估方法，不能对极端气候环境下的致灾连锁反应进行精确的预报。在资料运用上，极端事件的危险性评估过分依靠过去的历史资料，而忽略了极端事件在全球变化条件下的非一致性特征。目前在评估中所采用的防洪成果多是以站点历

史数据为基础,缺乏对流域下断面状况及人为因素的响应。在建模层次上,已有的洪水评估方法主要是基于静态的参数系统,不能针对洪水的实际情况进行动态地调整评估指标及权重。在特大洪涝灾害面前,传统的评估方法很难准确把握洪涝灾害的演化规律,造成灾害风险评估与灾害损失之间存在较大的偏差^[1]。

2.2 监测预警能力不足

针对中国水电站汛期自然灾害的特点,提出一种基于模糊综合评判的洪水风险评估方法。在流域尺度上,多数水电站的流域雨量站和水文站分布密度偏低,尤其是在沟谷型小流域,其观测区域存在极大的盲点。该地区是暴雨洪水、地质灾害易发区,因缺少相应的监控设备,无法对暴雨过程进行实时、准确地把握。在监测因素上,已有的研究多集中于传统的水文、气象指标,而对于滑坡等地质灾害的早期预警,如岸坡稳定和边坡变形等,缺乏有效的监测方法。目前,针对水库潜滑体的检测,主要是通过手工巡视及简单的定位桩法进行,其自动化水平不高,很难做到全天时、长时间的持续监控。在数据传送方面,一些监测站仍然使用常规的UUV通讯模式,在恶劣气象环境下容易受到干扰,造成重要警报消息的传递延时甚至中断。在信息处理上,多个监控系统缺少信息的整合机制,水、工情、灾情等信息分散在各个管控平台上,很难构建一个完备的态势地图。目前,中国气象灾害的早期预警指标大都是设定一个固定的数值,没有根据前期降雨和土壤水分等情况进行实时的动态调节,导致了预警时间的不确定性,有时会产生虚警,有时会漏报^[2]。

2.3 调度决策协同困难

在水电站汛期运行管理中,存在着多个不同的目标不能高效协调的问题。从洪水调控角度看,库区需同时满足上游和下游的防洪要求,但由于缺少精确的调控措施,使得库区面临困境。比如,为了保证洪水的安全储备,过分排放会造成大量的水资源浪费,从而降低了以后的电力收益;但为了保证电站的发电收益,保持高位运行,会使调节洪水的能力减弱,从而加大了工程的危险性。在信息分享方面,气象、水文和电力调度等多个领域的信息屏障还没有被彻底打通,使得重要的政策信息无法有效地流通。由于气象预测结果与调度决策体系的联系不密切,且预测时间和反应时间有较大的滞后。在面对突发的洪涝灾害时,时间滞后问题会极大地限制电网的实时性。在灾害调度上,已有的方案大都仅限于理论上的指导性,缺少对不同尺度洪水和不同灾害类型的详细作业过程。由于职能划分不明确,协同工作不完善,导致应急指挥混乱,响应缓慢。缺乏多个指标间的矛盾和协同机理,是制约水库防洪安全运行的重要因素之一。

3 水电站汛期灾害评估与优化策略

3.1 完善风险评估体系

现有的水电站汛期自然灾害评估系统具有明显的缺陷,

现有的评估方法多以单个灾种为研究对象,没有对灾害链串级影响进行综合评估。在现有评估体系中,洪水、滑坡和泥石流等灾害是独立的,评估模型只关注单个灾害对灾害的直接作用,忽略了多灾害之间的交互作用和级联机理。这样的简单方法使得灾害危险性评估与灾害损失之间有很大的偏离,很难真正体现出水电厂在复杂天气环境下的整体危险性。需要进一步完善和完善风险评估体系。当前的评估方法主要依靠历史灾情信息记录不全和标准化程度不高,尤其是对极端自然灾害的信息收集不系统。目前,中国对气象、水文、地质调查、工程运营等多个领域的的数据还没有进行有效地融合,且不同类型数据间还面临着空间尺度不匹配、格式标准不一致等问题。这一状况已成为风险评估中所需资料的品质和完备程度的限制,并将直接关系到评估结果的可信度^[3]。

评估模式对环境的动态适应能力较差。已有的研究大多采用静态的、固定的的阈值值进行评估,很难适应全球变暖下的极端天气新特点。模式中的参数更新相对较慢,不能实时地揭示下垫面变化、工程设施状态演化等动力因子对其灾害程度的影响。目前,该模式对短时强降水、局地强对流等极端事件的反应机制还不够完善,对突发性强降水、局地强对流等短期极端事件的预报和预报能力还不够强。在时间和空间上,应进一步扩展风险评估的范围。在空间尺度,已有研究主要集中在水库枢纽区,而对上游流域和下游影响区域的风险传导研究较少。在时空尺度上,现有的研究主要针对洪季这一具体时期,缺乏对“前一年”(如“后旱后暴雨”)的灾害演化过程的研究。由于其在时间和空间上的局限,使得其在全流域和全汛期的风险评估中很难支撑其整体的风险管理。灾难评估中的不确定因素需要进一步深入研究。目前对模型参数、模型结构以及输入数据的不确定性还没有进行全面的定量描述,缺少有效的不确定性传输分析手段。这不仅给评估结果的可信性带来困难,而且也会对建立在风险评估基础上的项目的可靠性造成一定的影响。尤其是在极限运行条件下,多个不确定因子的相互影响会极大地加剧真实的危险程度,但目前的评估方法尚不完善。

3.2 提升监测预警能力

提高中国水电站汛期自然灾害的监控与预警水平,必须建设一套完整的天空、地面、空中三维监控系统。在重点地区设置雨量站、水位观测站及视频监控装置,构成一条涵盖各重要支流的完整的监测链。要充分利用水文地质条件,对水文地质条件进行观测,以获取可能发生山洪灾害的预警信息为依据。在弯道和陡坡地段加大监控强度,并在边坡上设置能够进行远距离传递的振动传感器,实现边坡稳定状态的实时检测。要实现对监控资料的收集和传递,必须构建多渠道的支持体系。为了保证恶劣气象环境下通讯线路的可靠运行,提出了基于北斗系统和地基光缆相互备份的新方法。在监控结果超出预先设定的阈值时,系统会将取样频率提高,并经过一定的压缩、封装,经由优先信道传送至指挥部。

本项目拟采用高精度的多普勒测速仪、超声测高仪等先进仪器,通过对进水口进行分米级的观测,实现对进水过程的精确监测。

在产生早期预警信息时,要经历一个多层次的检查过程。在对已有的观测资料进行品质管理与离群点去除的基础上,将其输入到已有的灾情资料中。该方法通过将实际观测资料与过去灾情的相似性进行比较,从而得出本次灾情的可能性。在发生的可能性超出报警范围时,该装置将根据气象预报和地质情况等资料,提出报警草稿。经审核后的警报,根据受灾面积及危急情况,将其划分为不同等级,并经特殊渠道向有关主管单位及各单位发出。在发出警报后进行追踪和评估,形成了一个封闭的管理循环。通过对各预警区内的水文、天气状况进行实时监控,并对其等级及受灾面积进行实时更新。在此基础上,构建了基于实时监测数据的预警效应评估体系,并根据实际情况对预测结果进行修正。在每一次预警完成之后,专家组都会回顾预警的准确性、时效性以及处理结果,并把得到的经验作为改进的基础。该研究将为下垫面及气候特性演化对区域水文过程的影响提供科学依据^[4]。

3.3 创新调度决策机制

针对当前中国水电站汛期自然灾害与发电效益与生态效益协调发展的现状,亟需打破以往单指标最优解的限制,建立兼顾防洪安全与发电效益与生态效益的多维协调决策体系。该机理的关键是构建基于水文气象信息的多个水文要素综合评估和多个指标综合评估方法,实现对水文气象条件的实时监测,实现对水库调度方案的动态调控。在此基础上,建立一个由水文预测、灾情评估、最优决策三个模块组成的集成系统,并利用各个模块间的数据界面进行实时互动和反馈校正。提出了一种多层次的优化方案。第一个层次是以流域内的短时径流预报为基础,精确预估水库入库的洪涝过程,并与大坝附近的地质灾害观测资料相融合,评估各尺度洪涝的综合危险程度。第二层次,构建多目标规划模型,以最小化洪水风险、最大发电效益及最小化生态效应三个关键问题,利用带有最优决策思想的无劣排序基因算法求解 Pareto 最优解集合。将群体大小设定为 100 个,采用 500 个迭代周期,利用交叉突变等方法对求解的品质进行持续的优化,从而获得一系列的非劣解,从而构建 Pareto 前沿。

在建立 DSS 时,必须对各种不确定因素进行综合分析。在此基础上,将降雨预报误差、模型参数不确定性等多种不确定性因素融入最优模型中,构建多个可能的水文情景。在各作业周期内,将会产生多种可供选择的作业计划,并对作业计划的风险与收益作出全面的评估。在进行方案比较时,利用模糊数学方法对每一种方案进行了防洪安全度、发电保障度和生态友好度的评定,并提出了相应的优化调控方案。计划执行过程中,必须有健全的动态调节机制。通过对实际观测资料和预测资料的比较和分析,发现与预测值有很大差异时,及时进行方案再评估。在水库水位、下泄流量等重要参数逼近某一临界点时,通过设定分级报警门限,实现应急方案的调整。在项目实施中,通过对 24 h 内 24 h 内的运行规划进行动态调整,以保证实时动态的水雨况。要使该新型排产决策机制高效运作,必须制定相关的技术规范。在此基础上,提出了从数据获取到设计过程的规范化工作过程。构建电网运行方案后评估体系,通过回顾和剖析历史运行工况,对模型参数及运行规律进行动态调整,实现电网运行的科学与自适应。

4 结语

综上所述,水电站汛期自然灾害评估模型构建与多目标优化调整,将有助于提高中国水电企业应对极端气候变化的应对能力,为保障中国水利系统的安全、高效运行奠定基础。基于多源信息的高精度的新方法,通过构建数字孪生平台,完善预报预警体系,创新优化算法,促进中国水库防洪减灾工作整体水平的提高,对维护中国水资源和能源安全具有重要意义。

参考文献

- [1] 宋华等.某水电站机组汛期超出力潜力研究分析[J].水电站机电技术, 2024, 47 (11): 26-28+65.
- [2] 叶飞武.西津水电站汛期控制运行水位调整方案研究[J].红水河, 2023, 42 (06): 9-13.
- [3] 张验科等.中小水电站水库汛期运行调度多目标风险分析[J].水电能源科学, 2023, 41 (12): 58-62.
- [4] 张应超,周伟鹏.高泥沙河流径流式水电站汛期避沙运行技术及措施[J].水电站机电技术, 2023, 46 (08): 109-112+139.

Research and Exploration on the Path Planning of Carbon Neutrality in Expressway Service Areas—Taking Jinan East Service Area of Qingyin Expressway as an example

Xu Chen

Shandong Expressway Service Development Group Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250014, China

Abstract

With the acceleration of highway construction, service areas, as important supporting facilities of highways, have also achieved new breakthroughs in quantity. Nowadays, the service area has been upgraded from a 1.0 version service area with basic needs such as refueling, rest, and toileting to a comprehensive service area that integrates various functions such as catering, shopping, leisure, entertainment, and tourism. Even a large number of internet famous service areas have emerged, represented by Jiangsu Meicun Service Area and Yangchenghu Service Area. However, overall, there are still problems with homogenization in China's service area industry, such as rushing to build urban commercial complexes and neglecting internal management. Faced with the new economic and social development situation, the service area industry should seize the opportunity of the "dual carbon" goal, based on its own advantages, transform and upgrade, improve quality and efficiency, achieve the "dual carbon" goal as soon as possible, actively respond to the national policy call, and take proactive measures.

Keywords

highway engineering; service area; carbon neutrality

高速公路服务区“碳中和”路径规划研究与探索——以青银高速济南东服务区为例

陈旭

山东高速服务开发集团有限公司，中国·山东 济南 250014

摘 要

随着高速公路建设进程的加快，作为高速公路重要配套设施的服务区，也在数量上实现了新的突破。如今，服务区已经从具备加油、休息、如厕等基本需求的1.0版服务区，升级为集餐饮、购物、休闲、娱乐、旅游等多种功能于一体的综合性服务区，甚至还涌现出以江苏梅村服务区、阳澄湖服务区等为代表的一大批网红服务区。但从整体上看，我国服务区产业依然存在同质化即一窝蜂打造城市商业综合体、轻内部管理等问题。面临新的经济社会发展形势，服务区产业应该抓住“双碳”目标的机遇，立足自身的优势，转型升级，提质增效，尽早实现“双碳”目标，积极相应国家的政策号召，主动积极作为。

关键词

公路工程；服务区；碳中和

1 引言

服务区的碳中和建设目标要以服务区的实际排放量为依据，结合服务区的近 远期规划，以提高服务区的能源利用率为基础，以新能源开发利用为抓手，在保证服务区经济收益的同时，推动服务区走上绿色可持续发展的道路，顺利地实现 碳中和目标。

2 服务区“碳中和”路径的四个步骤概述

2.1 全面电气化

济南东服务区用能全面电气化是降低直接碳排放的关键。济南东服务区全面电气化主要处理好非集中采暖、炊事、生活热水、公务出行和建筑蒸汽用能等问题。济南东服务区的电气化改造主要是将使用柴油、汽油发电的设备改造为直接电力供电（例如柴油割草机改为电割草机）。柴油和汽油的燃烧所排放的二氧化碳等温室气体是服务区直接碳排放的主要来源之一。服务区的生活热水方面情况较好，不存在化石燃料烧水的情况，都是采用的电热水器。热泵热

【作者简介】陈旭（1979—），男，中国山东曲阜人，硕士，高级工程师，从事交通工程研究。

水器具有高效节能的特点,制造相同的热水量是一般电热水器的4-6倍,其年平均热效比是电加热的4倍,能源利用效率高。

2.2 采用光伏发电技术

据核算,2019年,我国陆上风电度电成本约0.315-0.565元/kWh,平均度电成本0.393元/kWh。光伏发电度电成本约0.290-0.800元/kWh,平局度电成本为0.389元/kWh。据预计,2020年我国陆上风电平均度电成本为0.287-0.539元/kWh,光伏度电成本为0.245-0.512元/kWh,预计到2025年,我国陆上风电平均度电成本0.241-0.447元/kWh,光伏度电成本为0.220-0.462元/kWh,部分地区已经与燃煤基准电价接近甚至低于燃煤电价,随着发电成本的不断下降,未来可再生能源的交易价格可期。目前,济南东服务区的耗电量已经非常高,每日的耗电量将近7800kWh。随着服务区的全面电气化,其每日的耗电量还会持续的大幅增加。济南东服务区直接碳排放减少甚至消失之后,其间接碳排放,即外购电力的碳排放将会增加,因此实现电力的自给自足是实现服务区的“碳中和”的重要举措。综上,根据服务区的特点和其地理位置,济南东服务区采用光伏发电技术是可行的^[1]。

2.3 精细化管理,节能增效

信息化的飞速发展使得人类获取信息的能力、范围和数量都急剧扩大。研制智能系统来对这些不断增长的信息进行处理、加以利用,从传统的自动化走向智能自动化,是信息化和自动化技术发展的内在需求和必然趋势。从根本上说,信息化属于生产力的范畴,信息化作为一个历史发展阶段,一般是在工业化后出现的。尽管信息技术的飞速发展和推广应用,加速了经济结构的调整、产业结构升级和产业结构的高附加值化,大大提高了劳动生产率。

2.4 林业碳汇是实现碳汇收益

作为林业碳汇中的重要组成部分,竹林碳汇是参照碳汇林实施标准,通过科学管护、合理经营,最大限度提高竹林生长量,增强其固碳能力、生态功能。而竹林碳汇交易,是通过市场化机制,实现竹林生态价值转化的有效途径。济南东服务区也可以通过探索竹林碳汇实现“碳中和”路径。

3 服务区“碳中和”路径及经济可行性分析

3.1 路径1——激进的减排路径

“碳中和”的激进减排路径指的是建设光伏发电设备和光伏储能设备的路径。该路径的实现按先后顺序为:全面电气化,光伏并网发电,服务区加装光伏储能装置,获得林业碳汇收益。该条碳中和路径的重点是要加装光伏储能装置,光伏储能装置的作用是将光伏满功率发电时产生的额外发电量储存起来,调节光伏发电不足时段以及夜间的用电需求,以此减少服务区的外购电力,实现服务区电力的自给自足。

3.2 路径2——匹配电力绿色交易市场的路径(绿证)

该路径主要包括实现电气化,光伏并网发电,服务区

通过购买绿证,证明自己使用的是绿色电力,以此实现服务区的碳中和,最后在第六年的时获得林业碳汇收益。该路径的核心是通过购买了绿证来保证服务区的用电是绿色电力,该方法存在绿证涨价的风险,其经济效益受绿证交易市场影响较大。若不加装光伏储能设备,光伏发电不足时段以及夜间的用电无法使服务区实现电力绿色化,需要外购绿电。每年剩余的2115.43吨碳排放通过购买绿证来抵消,因而每年购买绿证需要花费12.8万元。其他情况不变,林业每年可获得34.32吨碳汇。当然,林业碳汇也可用于抵消碳排放,减少购买绿证的支出。

3.3 路径3——采用PPA的碳中和路径

该路径主要包括实现电气化,光伏并网发电,服务区通过PPA交易,证明自己使用的是绿色电力,以此实现服务区的碳中和,最后在第六年的时获得林业碳汇收益。该路径的核心是通过PPA交易来保证服务区的用电是绿色电力。PPA即购电协议,在电站项目的项目融资里,购电协议是最重要的协议,其决定了风险是如何在发电商及购电方之间分配的,同时,该协议也是项目现金流的最主要来源。PPA交易容易受到市场和国家政策的影响^[2]。

3.4 路径4——新能源电站碳效益的中和路径

该路径下,同样地预测2028年将达到碳排放量4291.16吨,并且由于服务区规模和经营水平等因素限制,2028年之后碳排放量变化不大。采取电气化及节能措施减排98吨。将光伏电站开发成为CCER项目之后,其核证减排量将全部计入济南东服务区的减排量,光伏发电可以减排4193.16吨。此时济南东服务区不需要安装储能装置,光伏投资约为1440万元(要符合CCER项目额外性原则,投资收益在实际设计规划中会有所变化)。

CCER的开发周期由很多因素决定,包括项目本身质量的好坏、项目所用方法学的复杂程度、咨询的技术水平、第三方机构的流程复杂程度、国家主管机构审核的进度等等,从几个月到一年多都属于正常开发周期。

3.5 经济可行性分析

3.5.1 光伏项目投资

项目总投资:按照光伏项目容量3600kW,单位千瓦投资为4000.00元/kW,项目固定资产静态投资为1440万元。

发电收益计算:服务区所处位置建设光伏电站处于III类资源区,年有效利用小时数按照1400h计算,采用“自发自用,余电上网”模式,自发自用部分电价按照平均电价0.71/kWh元计算,自发自用的比例根据服务区日负荷功率曲线,占比按照44%计算;上网电价执行山东省脱硫煤标杆电价0.3949元/kWh计算,上网部分比例按照56%计算,全投资投资回收期约为5.85年^[3]。

3.5.2 不同碳中和路径效益分析

前文已指出服务区有4条碳中和路径可以选择,这4条路径分别是:

路径1：光伏储能的加装与使用。

此路径需要再对储能装置的建设进行投资，投资额约为480万元。加装储能装置之后，将完全采用光伏发电“自发自用，余电上网”的模式，在实现碳中和的同时能够获得光伏余电上网的收益。

路径2：匹配电力绿色交易市场的路径（绿证）

此路径将不安装储能装置，购电力部分的碳排放需要通过购买绿证来抵消，

每年购买绿证的费用约为12.8万元。该路径的核心是通过购买了绿证来保证服

务区的用电是绿色电力，该方法存在绿证涨价的风险，其经济效益受绿证交易市场影响较大。

路径3：采用PPA的碳中和路径

此路径将不安装储能装置，外购电力部分的碳排放需要通过PPA交易来抵消，每年PPA交易所支出的费用约为76.75万元。

路径4：新能源电站碳效益的中和路径

此路径需要核证成为CCER项目进行交易获得收益。但是应该考虑CCER

项目认证时的风险：目前国家仍未重启CCER项目审批，且CCER项目开发认

证的周期较长，不利于收回投资成本。

通过分析服务区4种碳中和路径的发电利用效益，可以得出第1种路径的经济效益最好。该路径为修建光伏发电与储能装置，实现服务区的用电自给自足，并且将光伏发电剩余的部分电力并入公网获取额外收益。

4 服务区“碳中和”社会效应分析

该服务区作为首批示范，开展服务经营边界范围内的温室气体排放清单编制、碳与经营目标关系模型建立、服务区经济增长脱碳、服务区“碳中和”核证等一系列工作，同时开展科学碳目标、“碳中和”路径研究及其相关核证方法学研究，形成符合服务区特点、以实现“零碳”目标的完整、科学的系统方法、标准及碳资产管理能力。济南东服务区的碳中和路径研究中提出的方法学将会在相关领域得到应用，碳中和路径中涉及到的高效节能产品得到推广应用。

为高速公路服务区行业的碳中和路径规划、可持续发展建设提供了示范。

对高速公路领域服务区的建设及可持续发展提供了可借鉴的实例，具有指导意义。随着社会上各行各业的发展，资源、能源以及环境等方面付出了巨大的代价。虽然我国幅员辽阔，各种资源储备丰富，但是大部分的资源都属于不可再生资源。在各行各业的发展过程中，人们对资源的过度开采以及使用，导致资源数量日益减少，因此，在各行各业中，

使用节能减排的技术不但符合国家提出的可持续性发展的战略，而且还能促进社会进步，进而实现各行业和环境之间的和谐发展目标。高速公路服务区是公路交通重要的服务节点，现代化服务区的建设功能齐全，同时也肩负着高速公路路段的阶段化管理工作。如充电引导、燃料续航、道路拥堵信息疏解等。现代化服务区除实现了上述惠民工程外，自身也产生了相对较大的能源消耗及温室气体排放。

济南东服务区的“双碳”目标先行先试能够起到示范效应，同时也能够为其他服务区的行动试探路径，在山东省济南东服务区的“双碳”目标示范项目是全国高速公路的先行者，能够为全国的高速公路服务区做出示范，从而带动高速公路产业的转型升级。这对高速公路的可持续发展起着至关重要的作用，能够为山东省高速公路的发展起到突破性的作用。示范项目以绿色低碳引领高速公路服务区高质量发展为总目标，按照“碳达峰”与“碳中和”一体谋划的思路，在服务区运营管理等阶段进行深入系统研究，聚焦服务区实现“碳达峰”和深度减排面临的重大挑战和重点任务，引入“科学碳目标”、“绿色电力消费100%”、“能管体系100%”等一系列先进方法学，摸清服务区的能耗及其消耗特点，研究其能源转化能力及其效率，评估服务区边界条件下的“碳资产”以及经济能力评估，最后提出“碳中和”目标要求下的“全绿色”服务区发展概念。开展高速公路集团经营边界范围内的“碳达峰”-“碳中和”路径规划、“碳中和”核证，以及路域新能源、智慧交通+智慧能源等工作，旨在为交通行业针对不同阶段的、切实可行的“双碳”目标及其实施提供有效的路径和政策建议，为交通运输领域实现“碳达峰”、“碳中和”目标做出积极贡献。高速公路服务区的先行先试将会为整个交通运输行业、甚至是整个建筑行业的低碳减排工作做出重大贡献，为国家的顺利实现“双碳”目标注入新的活力和机遇。

山东省高速公路服务区作为全国首批高速公路服务区“碳达峰”、“碳中和”规划及实施示范项目，积极响应国家的“双碳”目标号召，立足于行业的发展现状，以较高的质量要求进行服务区的“双碳”目标建设，对国家的整个高速公路服务区行业，乃至建筑行业的低碳减排发展工作都将起到引领和促进作用。

参考文献

- [1] 胡飞飞,朱韩依,赵淑铭,等.基于低碳背景下打造陕西高速公路零碳服务区[J].现代盐化工,2024,51(01):101-102+108.
- [2] 陈旭.碳中和背景下京德高速服务区的设计与建设[J].交通世界,2022,(34):14-16.
- [3] 刘睿.可持续碳中和服务区战略规划及实践[J].中国公路,2022,(20):76-77.

Development and Application of Township Full-Pavement Sweeper

Kelin Zou

Hunan Linyu Technology Development Co., Ltd., Changde, Hunan, 415100, China

Abstract

This paper focuses on the development and application of township full-pavement sweepers, detailing their development background—addressing the practical needs of narrow roads, complex road conditions, and diverse waste types in townships. The research aims to overcome the inefficiency and incomplete coverage of traditional cleaning methods. The article systematically introduces the functional characteristics and key operational points of the core components of the sweeper, with a focus on the core elements of the working device. It provides an in-depth analysis of the design logic and structural optimization of the main parameters of the sweeping mechanism and suction nozzle, while also clarifying the debugging process and standardized operating procedures to ensure stable operation of the equipment under complex township road conditions, achieving the expected operational outcomes of efficient cleaning and road surface maintenance. The content of this paper combines professionalism and practicality, offering targeted technical references for product developers of sweepers and clear operational guidance for frontline operators, making it highly valuable for reference.

Keywords

township full-pavement; sweeper; chassis; suction nozzle; sweeping mechanism

乡镇全路面扫路车的开发及应用

邹克林

湖南林宇科技发展股份有限公司, 中国·湖南 常德 415100

摘要

本文围绕乡镇全路面扫路车的开发与应用展开, 详细阐述其开发背景——立足乡镇道路狭窄、路况复杂、垃圾类型多样的实际需求, 为破解传统清扫方式效率低、覆盖不全面的痛点而研发。文中系统介绍了扫路车核心部件的功能特性及关键使用要点, 重点聚焦作业装置的核心环节, 深入剖析清扫机构与吸嘴的主参数设计逻辑、结构优化要点, 同时明确了调试流程与规范操作标准, 确保设备在乡镇复杂路况下稳定运行, 达到高效清扫、洁净路面的预期作业效果。本文内容兼具专业性与实用性, 既为扫路车产品开发人员提供了针对性的技术参考, 也为一线使用操作人员提供了清晰的实操指引, 具有重要的借鉴价值。

关键词

乡镇全路面; 扫路车; 底盘; 吸嘴; 清扫机构

1 概述

扫路车经过多年发展, 已在大中型城市主干道广泛应用, 将环卫工人从繁重体力劳动中解放出来, 其作业清扫效果好、效率高, 还保障了道路行车安全。但目前乡镇道路的清扫工作仍由人工完成, 不仅效果差、效率低, 还存在安全隐患。随着美丽乡村建设的深入, 城乡建设一体化成为国家发展战略, 尤其是现阶段全面推进乡村振兴迈出坚定步伐, 中共中央办公厅、国务院办公厅印发《农村人居环境整治提升五年行动方案(2021-2025年)》并要求贯彻落实。该方案

提出, 到2025年农村人居环境治理水平显著提升、长效管护机制基本建立, 同时将相关技术研究创新列入国家科技计划重点任务, 鼓励科研机构和企业开展新技术新产品研发。在此背景下, 针对乡镇、村组道路垃圾清扫收集与转运需求, 利用农用铰接式拖拉机底盘研发的、适配农村道路条件及经济状况的乡镇全地面扫路车应运而生。

2 乡镇全地面扫路车主要部件

乡镇全地面扫路车主要由农用铰接式拖拉机底盘、电气系统、前清水箱、喷雾降尘系统、清扫机构、动力系统、吸嘴、垃圾箱、液压系统组成。

2.1 底盘

底盘是扫路车行走驱动装置, 针对乡镇道路多窄路、

【作者简介】邹克林(1975-), 男, 中国湖南常德人, 本科, 高级工程师, 从事工程机械、环卫车辆研究。

多陡坡、多急弯的复杂路况,要求其通过性好、爬坡能力强,同时结合乡镇经济承受能力,经充分市场调研,选择广泛用于乡镇运输、具有低速大扭矩特性的农用铰接式拖拉机底盘进行改装。

2.2 电气系统

整车电控由底盘电控单元和专用工作装置电控单元两个独立部分组成。底盘电控单元涵盖了转向机构、动力启动装置、传动控制踏板组(含离合器、油门及制动踏板)、车载功能开关(照明与音响控制)以及综合仪表盘等核心部件。专用工作装置电控单元则包含电控箱(见图一)、副发动机、电气执行元件及电磁阀组,并配置了独立的总电源控制模块,该设计有效避免了车辆长期停置引发的蓄电池电量流失问题。驾驶员通过操控上述两大系统组件,即可实现扫路车全流程作业功能,包括车辆行进、路面清扫作业以及垃圾箱体倾卸等关键操作环节。其操作界面简单直观,无专业机械操作经验的人员也能快速掌握,便于乡镇灵活安排人力资源、提高工作效率。



图一 电控箱

2.3 清水箱

清水箱用于储存车载清洁水,分为前清水箱和后清水箱。前清水箱利用车载空间布置在副发动机及风机前端,可有效隔音、吸热,提升驾驶舒适度;后清水箱内置于垃圾箱中部、后下部,既增加了清水箱容积,又方便倾翻卸料。前后清水箱通过大管径水管连接,共用加水口,且各有排水口和透气口,保证加水顺畅效率高。前清水箱集成了一套智能液位监测系统,该系统由高精度水位传感装置与预警模块构成。当箱体内部水位降至预设值时,传感器发出实时预警。

2.4 喷雾降尘系统

喷雾降尘系统由加水接头、输水管、开关球阀、水过滤器、电动隔膜泵、分流阀、喷嘴等组成。水源可根据实际情况选择:通过消防栓接口、输水管注入自来水,或利用潜

水泵抽取公路附近沟渠、水塘的水。清水箱中的水经输水管、水过滤器过滤净化后,由电动隔膜泵加压,再通过分流阀分三路流向左右扫盘上的雾化喷嘴和吸嘴出风管内。雾化后的水用于润湿空气和扫盘,抑制作业时的扬尘,避免二次污染;流入吸嘴出风管的水流通过细孔形成水柱,可冲洗吸嘴出口内壁、进一步润湿灰尘,便于垃圾顺畅吸入垃圾箱。

2.5 清扫机构

路面垃圾通过清扫机构上的扫刷,被扫至吸嘴可直接吸拾的位置。清扫机构由左右清扫装置组成,采用弹簧浮动悬挂,通过油缸控制扫盘摆出和收回。清扫机构采用自适应避障机构设计,当作业过程中遇到前进方向障碍物时,其机械结构可触发弹性形变机制实现主动避让。液压马达驱动盘刷旋转,可实现三级调速,还能完成左扫、右扫和全扫等不同作业模式;可采用特制扫刷,适配不同路况并实现高效作业。

扫路车扫刷与地面的接触状态是决定清扫作业质量的关键因素。扫刷磨损后需利用链条、花兰螺丝等补偿调节机构,使磨损后的扫刷仍能保持与地面在特定接触区域的精确贴合,从而保证清扫效果。根据样车实验效果,确定以下关键参数:最大清扫宽度 2300mm、有效清扫宽度 2200mm、左右扫盘中心距 1400mm、最小清扫间距 620mm、扫刷触地宽度 $150 \pm 50\text{mm}$ 、扫刷直径 $\phi 900\text{mm}$ 、触地倾角 30° 、重叠量 $\geq 50\text{mm}$ 、吸嘴宽度 800mm,在此参数下作业,洁净率可达 95% 以上。

2.6 动力系统

动力系统由副发动机、自动离合器、皮带、风机等组成,副发动机为风机和液压油泵提供动力源,其输出功率为两者所需功率之和。风机所需功率由工作装置吸嘴吸管的风量、风压及风机效率决定;液压油泵所需功率由清扫机构扫盘马达的流量、油压及系统效率决定。副发动机与风机通过自动控制离合器连接,副发动机怠速时,离合器与输出轴自动断开,保障副发动机空载启动及熄火;液压油泵通过副发动机前侧端口直接连接,启动及熄火时无负载。该动力系统采用低排放、高效率发动机,兼顾环保与节能需求,同时通过优化清扫路线和工作模式,进一步降低能耗和运行成本。

2.7 吸嘴装置

为适应乡镇道路复杂工况,采用全浮动式三角形窄吸嘴(见图二)。吸嘴采用四连杆牵引机构,确保升降、着地平稳;左右侧加装限位挡块,保障运输转场时牢固可靠;吸嘴前后支承轮着地后,底边(刚性部分)与路面的间隙需保持在 5~10mm 左右,以保证吸拾效果。吸嘴底边与作业面的间隙调节采用行走轮高度可调机构实现,该机构通过旋拧高度调整螺栓改变行走轮与吸嘴体的相对安装高程。吸嘴体前侧装有密封橡胶板,磨损后应及时更换,以保持密封间隙。

吸嘴主要设计参数如下:

1. 吸管直径:综合考虑副发动机功率、风机风压风量

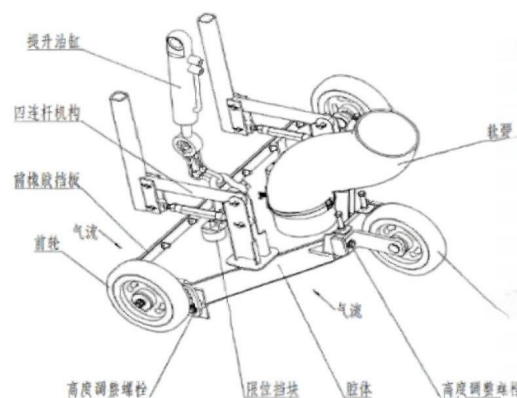
等因素,确定吸管直径为 $\phi 160\text{mm}$,吸管内平均气流速度 $\geq 30\text{m/s}$;

2. 吸嘴宽度:结合扫刷触地位置(单边重叠量 $\geq 50\text{mm}$)、空间位置及风机风量,确定最大宽度为 800mm ;

3. 内空高度:经类比分析及试验验证,确定为 85mm ,兼顾大尺寸垃圾吸拾与风量节省;

4. 吸管前腔体长度:确定为 270mm ,在保障扫净率的同时合理控制空间占用;

5. 吸管正后方底板宽度:以 $25\text{mm}\sim 35\text{mm}$ 为宜,避免气流不稳定或风阻过大导致漏吸。



图二 三角形吸嘴

2.8 垃圾箱

垃圾箱两侧板采用瓦棱结构设计,既美观又增加了强度和刚度、减轻自重。垃圾箱前端为开口型,罩过风机及副发系统;中部和后下部为清水箱,后上部为污水箱。垃圾箱后门设有排污管,排污管前装有过滤网。

垃圾箱体后下部与前中部区域分别配置吸污管路接口及气流通道接口,通过精密对接机构与吸嘴单元的气体传输管路及风机系统的负压入口实现密封连接。该连接界面采用弹性密封环结构,通过预紧力作用形成动态密封界面。密封环磨损后需及时更换。

垃圾箱举升倾翻机构集成安全联锁保护装置:在倾卸作业前,要求开启后门并完成污水排放;在箱体回位前,必须先放下支撑稳定杆,否则操作无效。当垃圾箱处于倾卸工况时,可启用手持式高压冲洗装置对箱体内部进行清洁作业。

2.9 液压系统

液压系统采用模块化集成设计,主要由以下功能组件构成:动力输入模块包含齿轮油泵及手动应急泵;执行机构由液压马达与液压缸组成;液压集成块作为核心控制单元,将多个阀件集成于一体以优化管路布局;液压油存储与散热由液压油箱承担,并通过标准化管路连接件实现各模块间的流体传输。车辆正常扫路作业时,副发动机驱动齿轮油泵提供压力油源,驱动左右扫盘旋转、吸嘴升降、垃圾箱后门开闭及倾翻复位等动作。手动应急泵作为应急辅助动力装置,当副发动机出现故障时,可人工倾翻垃圾箱和提放工作装置,便于维修。液压系统压力通过调节溢流阀调节手柄设定,调整后拧紧锁定螺母;通过集成块上的节流阀,可调整各档位扫盘转速。

3 样车作业效果验证

该扫路车将清扫作业单元配置为前置两大扫盘机构与中置三角形吸嘴的组合形式。前置两大扫盘通过对称布置实现宽幅清扫覆盖,中置三角形吸嘴则利用几何优势形成高效负压通道,两者在空间上形成紧凑的作业单元,清扫效率的显著提升,且作业飞溅少、吸净率高,可有效清扫道路上的尘土、树叶、果蔬、断砖残瓦、小石子等各类垃圾。

4 产品展望

乡镇全地面扫路车的开发积极响应了美丽乡村建设指导政策,借鉴城市扫路车成熟技术,充分结合乡镇道路作业工况,针对性选型底盘,优化布置并改进提升清扫机构、吸嘴等作业装置,是农机设备与环卫设备的有机结合体。该产品价格亲民,不仅能助力乡镇环境改善,还可出口至亚非拉等不发达国家的城镇,为改善世界人居环境贡献力量,具有广泛应用前景和显著的经济、社会效益。

参考文献

- [1] 吴继霞.GB/T 25649—2010《道路施工与养护机械设备稀浆封层机》介绍[J].机械工业标准化与质量,2012,(06):21-22+25.
- [2] 李路阳,关红艳,李勇.基于CFD的扫路车吸尘盘吸尘性能分析及结构优化[J].农业装备与车辆工程,2025,63(03):99-104+116.
- [3] 张慧莲,姜木枝.《农村人居环境整治提升五年行动方案(2021-2025)》实施进展及其影响因素——基于J省9个村庄的调查[J].中国沼气,2025,43(01):72-78.DOI:10.20022/j.cnki.1000-1166.20241223.

Breakthrough of Key Process Difficulties in Ultra-high Performance Concrete Production

Hongqiang Wu

Hefei Product Quality Supervision and Inspection Institute, Hefei, Anhui, 234000, China

Abstract

As a representative of the new generation of building materials, ultra-high performance concrete provides a new solution for modern engineering construction due to its excellent mechanical properties and durability. The production process of ultra-high performance concrete is complex, and it faces many technical problems in raw material selection, mixing and dispersion, forming and curing, which restricts its large-scale application. Based on the analysis of the practical significance of ultra-high performance concrete process breakthrough, this paper deeply analyzes the key process difficulties existing in the current production, and puts forward a systematic breakthrough strategy from the aspects of multi-material collaborative optimization, efficient mixing intelligent control, and whole process quality control, so as to provide theoretical reference and practical guidance for promoting the industrialization development of ultra-high performance concrete.

Keywords

ultra-high performance concrete ; production process ; technical difficulties ; breakthrough strategy

超高性能混凝土生产关键工艺难点突破

武洪强

合肥产品质量监督检验研究院，中国·安徽 合肥 234000

摘 要

超高性能混凝土作为新一代建筑材料的代表，其卓越的力学性能和耐久性能为现代工程建设提供了全新的解决方案。超高性能混凝土的生产工艺复杂，在原材料选配、搅拌分散、成型养护等环节面临诸多技术难题，制约了其规模化应用。本文在分析超高性能混凝土工艺突破现实意义的基础上，深入剖析了当前生产中存在的 key 工艺难点，并从多元材料协同优化、高效搅拌智能控制、全流程质量管控等方面提出了系统性的突破策略，以期为推动超高性能混凝土产业化发展提供理论参考和实践指导。

关键词

超高性能混凝土；生产工艺；技术难点；突破策略

1 引言

随着现代建筑工程向着超高层、大跨度、极端环境方向发展，传统混凝土材料已经不能满足越来越严格的要求。超高性能混凝土因为具有超高强度、优异的韧性和很好的耐久性而成为支撑重大工程的重要材料。但是，超高性能混凝土的生产工艺与普通混凝土有着本质的区别，其低水胶比、高胶凝材料用量、纤维增强等特点给生产工艺带来了前所未有的挑战。目前原材料选配的精准度不高、搅拌时纤维分散不均、成型养护工艺不稳定等问题，严重制约了超高性能混凝土的规模化生产及工程应用。因此深入研究生产工艺中的主要难点，找到行之有效的突破策略，对超高性能混凝土产

业的高质量发展具有重大的理论价值和现实意义。

2 超高性能混凝土工艺突破的现实意义

2.1 推动建筑材料领域技术革新

超高性能混凝土代表着混凝土材料发展的最高水平，工艺上的突破将会给建筑材料领域带来深刻变革。传统混凝土材料在强度、韧性、耐久性等各方面存在着固有的局限性，不能满足现代工程对材料性能的极致要求。超高性能混凝土依靠颠覆性的配合比设计和创新的工艺技术，使材料性能实现质的飞跃，为建筑材料科学开拓出新的研究领域。工艺技术的突破不但是超高性能混凝土自身发展完善的重要推动力，也可以带动原材料加工、外加剂研发、生产设备制造等上下游产业的协同创新，形成完整的技术创新链条。从宏观上看，超高性能混凝土工艺的成熟将会改变建筑材料技术范式，使建筑材料行业从经验为主走向科学为主，推动建筑材

【作者简介】武洪强（1980-），男，中国安徽宿州人，本科，工程师。

料行业高质量发展^[1]。

2.2 满足重大工程建设高性能需求

当代重大工程对于材料的性能有着史无前例的要求，而超高压混凝土工艺突破就是满足这些要求的必经之路。超高层建筑要承受巨大的竖向荷载和水平风荷载，对材料的抗压强度和整体刚度要求非常高；大跨度桥梁结构既要轻质高强又要抗裂，海洋工程、核电设施等极端环境下的结构要耐腐蚀、寿命长。超高性能混凝土由于具有综合性能优势，可以很好地应对上述工程难题，但是前提是必须突破生产工艺的技术瓶颈，实现稳定可靠的批量化生产。工艺技术成熟以后，超高性能混凝土就会从实验室走向工程现场，为港珠澳大桥、川藏铁路等国家重大工程提供坚实的材料保障，支撑我国基础设施建设迈向更高的水平^[2]。

2.3 促进绿色低碳可持续发展

在碳达峰、碳中和目标的引领下，建筑材料行业要完成绿色转型这一艰巨的任务，超高性能混凝土工艺的突破将会给行业的低碳发展带来新的动力。超高性能混凝土虽然单位体积的胶凝材料用量大，但是由于其超高强度，在满足相同的承载力要求时，结构截面可以大幅减小，材料总用量明显降低，从而实现全生命周期的碳减排效益。更值得注意的是，超高性能混凝土较好的耐久性可以延长结构使用寿命、减少维修修复、拆除重建次数，从源头上节约资源、降低环境负荷。工艺技术的突破还会促进工业废渣、尾矿等固体废物的高值化利用，实现固废资源化和材料高性能化相互配合。由此可见，超高性能混凝土工艺突破不但是技术上的进步，也是践行绿色发展理念、推动行业可持续发展的重要举措^[3]。

3 超高性能混凝土生产中存在的关键工艺难点

3.1 原材料选配与配合比优化难题

超高性能混凝土对原材料品质要求十分严格，原材料选配和配合比优化成了制约其生产的首要难题。与普通混凝土不同，超高性能混凝土采用极低的水胶比和多元胶凝材料体系，水泥、硅灰、粉煤灰、矿渣等原材料粒度分布、活性指标、化学成分有严格要求。不同产地、不同批次的原材料性能有波动，造成配合比不能实现标准化复制。超高性能混凝土需要加入多种外加剂来调节工作性能，但是外加剂之间、外加剂与胶凝材料之间存在复杂的相容性问题，配合比调整的试错成本很高。颗粒级配的优化设计更对传统的经验方法提出挑战，要在纳米尺度到毫米尺度实现密实堆积，而目前现有的理论模型不能准确地预测实际的性能。这些因素互相交织，使配合比优化成为一个系统性的难题^[4]。

3.2 搅拌工艺与纤维均匀分散性控制挑战

搅拌工艺是超高性能混凝土生产的关键工序，纤维均匀分散是搅拌工艺面临的主要难题。超高性能混凝土的低水胶比决定了它的初始状态非常黏稠，需要较长的搅拌时间才

能达到理想的流动性。搅拌过程中，钢纤维或者有机纤维容易产生团聚、缠绕，形成纤维球，严重影响材料的力学性能以及工作性能。纤维分散效果与搅拌设备类型、转速有关，也与投料顺序、搅拌时间、温度环境等有关，需要精细的工艺控制。传统的搅拌设备和工艺不能满足超高性能混凝土的生产要求，搅拌能耗高、效率低、均匀性差等问题普遍存在。另外搅拌过程中物料的实时监测手段缺乏，工艺参数的调节主要依靠人工经验，不能达到精确控制，批次间质量波动难以避免^[5]。

3.3 成型养护工艺与质量稳定性瓶颈

成型养护是超高性能混凝土性能实现的重要环节，目前成型养护工艺的质量稳定性存在明显缺陷。超高性能混凝土的水胶比较低，因此对于水分散失很敏感，在成型过程中稍有不慎就会造成表面开裂和内部缺陷。振捣密实是保证材料性能的重要措施，但是过度振捣会造成纤维定向排列和浆体离析，影响材料的各向同性。养护制度对超高性能混凝土性能的发挥起着决定性的作用，常规养护无法完全发挥其潜在强度，而蒸汽养护、热水养护等特殊养护方式所用的温度、湿度、时间等参数必须精确控制。现场施工条件复杂，理想养护条件很难保证，昼夜温差、环境湿度等变化都会对材料性能造成影响。更突出的是目前缺少超高性能混凝土的系统质量检测标准和控制体系，产品质量的稳定性不能得到保证，影响了其在重要工程中的大规模应用。

4 超高性能混凝土关键工艺难点突破策略

4.1 多元材料协同优化与精准配比技术

解决原材料选配难题的关键就是创建多元材料协同优化体系，完成配合比的精准设计和动态调节。首先应该建立原材料性能数据库，对不同产地、不同批次的原材料的物理化学性能参数进行系统的收集，包括粒度分布曲线、比表面积、活性指数、化学组成等主要指标，给配合比设计提供全面的数据支持。其次，采用改进型 Andreassen 颗粒堆积理论和分子动力学模拟技术，从微观尺度优化颗粒级配，计算不同粒径组分的体积分数和空间分布，从而达到纳米级硅灰和毫米级骨料的最佳匹配，使基体密实度达到最大。在此基础上，采用响应面法和人工神经网络算法，建立原材料性能波动与配合比调整的非线性关系模型，开发基于云计算的智能配比调整系统，根据原材料实时检测结果自动调节水胶比、砂胶比、外加剂掺量等关键参数，实现配合比自适应优化。同时深入研究聚羧酸系减水剂与多元胶凝材料体系的相容性机理，分析外加剂分子结构与吸附行为的内在联系，建立基于分子设计的外加剂优选准则，从根本上解决外加剂适应性问题，大大减少试配工作量。另外还要联合上游原材料生产企业，推进硅灰、石英粉等关键原材料生产的标准化、专业化，创建原材料质量认证体系，从源头上提高原材料品质的批次稳定性。经过上述多层次、系统化的措施综合使用之

后,能够有效地解决配合比优化这个主要问题,为超高性能混凝土稳定批量化生产打下良好的技术基础。

4.2 高效搅拌工艺与分散均匀性智能控制

解决搅拌工艺难题要从设备创新和智能控制两个方面入手,形成高效精确的搅拌工艺体系。从设备角度出发,根据计算流体力学仿真分析结果,研制适合超高性能混凝土的专用搅拌设备,改进搅拌叶片的几何形状、安装角度和运动轨迹,在搅拌筒内形成多层次的剪切流场和对流循环,提高搅拌效率和物料均匀性。参照化工行业高剪切混合的成功经验,将转子定子式高速分散装置和行星式低速混合系统结合起来,通过高速剪切来打散纤维团聚体,再在低速混合下实现纤维的三维随机分布。从设备上有效破解纤维团聚的顽疾。从工艺角度出发,应根据物料流变特性演变规律,对投料顺序、搅拌程序进行系统优化,采用干粉预混、浆体预分散、纤维后掺等分步投料工艺,配合变速搅拌程序,在不同阶段施加适宜的剪切作用,改善纤维与基体的界面结合。更重要的是建立搅拌过程的数字孪生系统,利用主轴功率实时监测、扭矩频谱分析、机器视觉图像识别等多源感知手段,建立物料状态的在线表征模型,实现搅拌均匀度的定量评价。在此基础上,采用深度强化学习算法建立工艺参数和产品性能的端到端预测模型,根据物料状态反馈信号动态调整转速、时间等控制变量,实现搅拌工艺的闭环自适应优化。除此之外,还要重视搅拌环境温度的精确控制,根据超高性能混凝土水化放热集中的特性,设置搅拌筒冷却系统和原材料预冷装置,将物料温度控制在合适范围内,避免温度过高造成工作性能变差、凝结时间异常。

4.3 成型养护工艺优化与全流程质量管控体系

突破成型养护瓶颈要依靠工艺精细化和质量管控系统化双轮驱动,创建起全流程的质量保证体系。成型工艺应根据构件的几何形状及性能要求选择最合适的成型方式,对薄壁构件、复杂形状构件重点开发触变性可调的自密实超高性能混凝土配方,通过优化黏度改性剂和稳定剂的复配方案,实现浇筑时高流动、静置后不离析的理想状态,从根本上减少对机械振捣的依赖。对必须振捣的部位,应根据离散元数值模拟结果来制定精细的振捣规程,确定振动频率、振幅、持续时间、插入深度、移动间距等主要参数的最佳组合,建立振捣能量和密实度的定量关系,既保证气泡充分排出,又防止过振造成纤维沉降、定向排列。并且使用真空辅助成型

技术,在浇筑完成后加负压环境来加速气泡的迁移和排出,消除毫米级以下微观孔隙缺陷,进一步提高基体致密性。在养护工艺上,要创建起依照水化动力学模型的分阶段智能养护制度,早期阶段采取薄膜覆盖加喷雾保湿的办法,保证表面相对湿度不低于临界值,防止塑性收缩裂缝的出现,中期按照强度发展目标,挑选标准养护、蒸汽养护或者热水浸泡等加快养护方案,对蒸汽养护工艺,要依照延迟钙矾石生成风险评价结果,细致把控静停时间、升温速率、恒温温度、恒温时间、降温速率这五个重要参数,保证胶凝材料活性被充分激发的同时,防止热损伤。在质量控制方面,应参照国际先进标准建立三级质量控制体系,即原材料进场检验、生产过程监控、成品出厂检测,制定超高性能混凝土专用质量验收标准和试验方法,完善抗压强度、弯拉强度、弹性模量、抗渗性、抗冻性等关键性能指标的检测规程。

5 结语

超高性能混凝土属于建筑材料领域的一项重大革新成果,它的产业化应用对推进工程建设高质量发展有着十分重要的意义。目前,原材料选配、搅拌分散、成型养护等主要工艺环节还存在很多难题,限制了超高性能混凝土的规模化生产。本文从推动技术革新、满足工程需求、促进绿色发展三个方面论述工艺突破的现实意义,对配合比优化、纤维分散、质量稳定性等技术难点做了详细的分析,提出了多元材料协同优化、高效搅拌智能控制、全流程质量管控等突破策略。

参考文献

- [1] 张涛.搅拌工艺对超高性能混凝土力学性能的影响[J].价值工程,2025,44(25):132-134.
- [2] 成鑫磊,穆锐,刘晓英.超高性能混凝土的制备及力学性能研究进展[J].硅酸盐通报,2024,43(12):4295-4312.
- [3] 耿春雷,董阳,左然芳,巩思宇,张栋.超高性能混凝土研究及工程应用现状[J].混凝土世界,2023,(12):74-79.
- [4] 冯元,吴赤球,吕伟,刘康宁,尹天一,刘雪,付诗媛,余睿.超高性能混凝土设计理论与磷石膏高质利用研究进展[J].混凝土与水泥制品,2024,(01):1-8.
- [5] 陈景镇,王洋,吕凯芳,刘晨凯,黄楚煌,饶邦政.装配式超高性能混凝土幕墙安装工艺研究[J].绿色建筑与智能建筑,2023,(08):30-33+45.

Study on the Influence of Fiber Parameters on the Mechanical Properties and Crack Behavior of Engineering Cement-based Composite Materials

Longxiang Gao

Shanxi Nuoxin Transportation Construction Engineering Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

As an important structural material in modern civil engineering and infrastructure construction, the service performance of Cheng cement-based composite materials is largely constrained by the microstructure and damage evolution mechanism of the materials. As the most typical damage form of cement-based materials, cracks not only determine the bearing capacity and ductility level of the material, but also directly affect its durability and long-term service safety. By introducing different types and parameter characteristics of reinforcing fibers into cement-based systems, the initiation conditions, propagation paths, and evolution modes of cracks can be changed to a certain extent, thereby achieving effective control over the mechanical properties of materials. The results of this study indicate that rational optimization of fiber parameter combinations can significantly improve the crack control ability and overall mechanical properties of engineering cement-based composite materials, providing theoretical basis and technical support for the design of high-performance and high durability cement-based materials.

Keywords

fiber parameters; engineering cement-based composite materials; crack behavior; mechanical properties

纤维参数对工程水泥基复合材料力学性能与裂缝行为的影响研究

高龙祥

山西诺信交通建设工程有限公司，中国·山西 太原 030000

摘要

程水泥基复合材料作为现代土木工程与基础设施建设中的重要结构材料，其服役性能在很大程度上受材料微观结构与损伤演化机制的制约。裂缝作为水泥基材料最典型的损伤形态，不仅决定了材料的承载能力与延性水平，而且直接影响其耐久性与长期服役安全。通过在水泥基体系中引入不同类型与参数特征的增强纤维，可在一定程度上改变裂缝的起裂条件、扩展路径及演化模式，从而实现对材料力学性能的有效调控。本研究结果表明，合理优化纤维参数组合，可显著改善工程水泥基复合材料的裂缝控制能力与整体力学性能，为高性能与高耐久水泥基材料的设计提供理论依据与技术支持。

关键词

纤维参数；工程水泥基复合材料；裂缝行为；力学性能

1 引言

随着工程结构向大跨径、高荷载与长寿命方向发展，传统水泥基材料因脆性破坏特征明显、抗裂与耗能能力有限等问题，已难以全面满足复杂服役环境下的工程需求。裂缝在水泥基材料中的产生与发展具有不可避免性，其形成往往源于材料内部微缺陷在外荷载或环境作用下的逐步扩展，并最终演化为宏观破坏。因此，如何有效延缓裂缝起裂、抑制

裂缝扩展并控制裂缝形态，已成为提升工程水泥基材料性能的关键科学问题之一。基于此，本文以工程水泥基复合材料为研究对象，围绕纤维参数—裂缝行为—力学性能之间的内在关联展开分析，力求从结构与机理层面揭示纤维增强作用的本质规律。

2 工程水泥基复合材料中纤维作用的结构基础与机理

2.1 工程水泥基复合材料的多相结构特征与应力传递基础

工程水泥基复合材料本质上属于典型的多相非均质复

【作者简介】高龙祥（1988—），男，中国山西吕梁人，本科，高级工程师，从事道路桥梁研究。

合体系，其内部由水泥水化产物构成的连续基体、骨料相、孔隙结构以及分散分布的增强纤维共同组成^[1]。在宏观尺度上，该材料表现为连续介质，而在微观与细观尺度上，则呈现出明显的结构不均匀性与力学响应差异性。水泥基体本身抗拉能力有限，内部普遍存在毛细孔隙、微裂纹及界面过渡区等结构缺陷，这些缺陷在外荷载作用下易成为应力集中源，是裂缝萌生与扩展的主要起点。

纤维的引入在材料内部构建了一种新的受力路径，使原本由基体单独承担的拉应力得以在纤维与基体之间重新分配。分散于基体中的纤维在未开裂阶段主要通过界面黏结与基体协同变形，对整体弹性模量影响有限；当微裂纹出现并逐渐扩展时，纤维开始跨越潜在裂缝面，承担部分拉应力，从而改变材料内部的应力传递机制。此种由“基体主导”向“基体—纤维协同”的应力传递转变，是纤维增强水泥基复合材料区别于普通水泥材料的结构基础。从结构层级角度看，纤维在细观尺度上的分布状态直接影响宏观力学性能的离散性与稳定性。纤维取向越均匀、空间分布越合理，其对裂缝的约束作用越稳定，有利于实现材料整体性能的可控提升。

2.2 纤维—基体界面作用机理与裂缝桥联效应

纤维增强作用的有效发挥，关键在于纤维—基体界面区域的力学行为。界面作为不同材料相之间的过渡区域，其黏结性能、摩擦特性及损伤演化规律，直接决定纤维在裂缝发展过程中的受力模式如下表1。在外荷载作用下，当裂缝尚未贯通时，纤维主要通过界面黏结力与基体共同受力；随着裂缝张开位移的增大，界面逐渐发生损伤，纤维进入以滑移与拉拔为主的工作阶段^[2]。在裂缝扩展过程中，纤维跨越裂缝面形成典型的桥联结构，对裂缝尖端区域产生反向约束力。这种桥联效应不仅降低了裂缝尖端的应力强度因子，而且显著提高了裂缝扩展所需的能量，使裂缝扩展过程由突发失稳转变为渐进发展。同时，纤维的存在促使裂缝路径发生偏转与分叉，削弱单一主裂缝的主导作用，从而实现裂缝的细化与分散。不同纤维参数条件下，界面作用机制存在显著差异。界面黏结强度较低时，纤维易发生早期滑移，桥联作用持续时间有限；界面性能适中时，纤维可在拉拔过程中持续耗能，有利于提升材料延性；界面过强则可能导致纤维脆性拉断，不利于裂后性能的发挥。因此，纤维参数与界面特性的协同优化，是实现裂缝有效调控与力学性能提升的核心机理。

表 1 不同纤维参数条件下纤维—基体界面作用特征对比

纤维参数特征	界面主要作用形式	裂缝控制效果	对力学性能的影响特征
纤维长度较短、掺量较低	界面滑移为主	裂缝集中，控制效果有限	强度提升有限，延性改善不明显
纤维长度适中、掺量合理	拉拔—摩擦协同作用	多裂缝发展，裂缝细化	强度与延性协同提升
纤维长度较长、界面过强	纤维拉断为主	裂缝延缓但耗能不足	强度提高，延性受限

3 纤维参数对裂缝演化行为的影响规律

3.1 纤维几何参数对裂缝起裂与扩展模式的影响

在工程水泥基复合材料中，裂缝的产生与扩展本质上是材料内部应力重分布与能量释放的结果，而纤维几何参数在这一过程中发挥着关键调控作用。纤维长度与长径比直接影响其跨越裂缝面的能力，是决定裂缝起裂延缓效果与扩展稳定性的核心因素。当纤维长度较短或长径比较小时，纤维在裂缝萌生初期即易发生整体拔出，其对裂缝尖端应力的削弱作用有限，裂缝往往呈现出快速贯通的特征。随着纤维长度与长径比的增加，纤维在基体中的锚固能力显著增强，在裂缝扩展过程中能够持续跨越裂缝面并提供稳定的桥联约束。这种约束作用不仅提高了裂缝起裂所需的临界应力水平，而且促使裂缝在扩展过程中发生路径偏转和分叉，使裂缝由单一主裂缝向多裂缝形态转变。裂缝扩展速率的降低与裂缝数量的增加，有利于应变能在更大范围内耗散，从而提升材料整体抗裂稳定性^[3]。

3.2 纤维体积分数与分布特征对裂缝演化形态的影响

纤维体积分数是影响裂缝空间分布特征的重要参数之一。在低体积分数条件下，纤维数量有限，难以在材料内部形成连续有效的桥联网络，裂缝在扩展过程中仍以集中化发

展为主，其宏观表现与普通水泥基材料差异不大。此时，纤维对裂缝的作用更多体现在延缓裂缝贯通时间，而非显著改变裂缝形态。

当纤维体积分数提高至一定范围后，纤维在材料内部的分布密度明显增加，裂缝在扩展过程中更容易与多根纤维发生相互作用，从而受到多点约束。这种多点桥联效应促使裂缝在不同位置重复起裂并相互竞争，使材料呈现出典型的多裂缝、细裂缝演化特征。裂缝宽度得到有效控制，裂缝扩展过程更加平缓，整体损伤演化由突发性向渐进性转变。需要指出的是，纤维体积分数并非越高越有利。过高的纤维掺量可能导致纤维分散性下降、局部团聚现象加剧，从而在材料内部形成新的弱区，反而不利于裂缝的均匀控制。因此，在工程应用中，应结合施工性能与力学需求，对纤维体积分数进行合理区间控制。

4 纤维参数通过裂缝调控对力学性能的影响

4.1 纤维参数对工程水泥基复合材料强度与破坏模式的影响

工程水泥基复合材料的宏观力学性能与其内部裂缝演化过程密切相关，而纤维参数正是通过调控裂缝行为对材料强度与破坏模式产生系统性影响。在未引入纤维或纤维参数

配置不合理的情况下，材料在受拉或受弯作用下通常表现为典型的脆性破坏特征，裂缝一旦起裂便迅速贯通，承载能力在短时间内急剧下降。合理配置纤维参数后，裂缝起裂阶段的应力集中得到有效缓解，使首裂荷载明显提高，从而在宏观层面体现为抗拉与抗弯强度的提升^[4-5]。

纤维长度与体积分数对强度发挥具有协同作用。纤维长度不足时，纤维在裂缝初期即发生滑移，难以对裂缝尖端形成有效约束；当纤维长度与长径比达到一定水平后，纤维

在裂缝扩展过程中能够持续参与受力，使裂缝扩展过程受到稳定抑制。此时，材料在达到峰值荷载前能够承受更大的变形，破坏模式由单一贯通裂缝主导转变为多裂缝逐步发展的形式，整体结构安全储备显著增强。在压缩工况下，纤维对极限抗压强度的提升幅度相对有限，但其对破坏形态的改善作用尤为明显。纤维通过抑制斜裂缝的快速发展，使材料在压缩破坏过程中保持一定的完整性，峰后承载能力得以延续，从而降低突发性失稳风险。

表 2 纤维参数变化条件下裂缝演化行为特征对比

纤维参数水平	裂缝起裂特征	裂缝扩展模式	裂缝几何形态特征
纤维长度短、体积分数低	起裂应力低，起裂早	单一主裂缝快速扩展	裂缝少且宽
纤维长度适中、体积分数合理	起裂延缓，扩展稳定	多裂缝协同发展	裂缝细密、分散
纤维长度较长、体积分数偏高	起裂延缓明显	扩展受限但局部集中	局部裂缝不均

4.2 纤维参数对延性、耗能能力及峰后力学响应的影响

延性与耗能能力是评价工程水泥基复合材料安全性与适用性的重要指标，而纤维参数通过裂缝调控作用，对这两项性能具有决定性影响。裂缝扩展过程中，纤维的拉拔、滑移及逐步断裂行为构成了材料内部持续的能量耗散机制，使应力—应变关系在峰值之后仍保持较为平缓的下降趋势。这种峰后响应特征显著区别于普通水泥基材料的瞬时失稳破坏模式。

纤维体积分数的合理提高，有助于在材料内部形成多重桥联网络，使裂缝在扩展过程中不断受到新的约束点限制，从而延长裂缝稳定扩展阶段。与此同时，纤维界面性能对延性发挥具有重要影响。界面黏结性能适中时，纤维能够在较大裂缝张开位移范围内持续拉拔，显著提升材料的变形能力与耗能水平；若界面过强导致纤维提前拉断，则材料峰后耗能能力反而受到抑制。从整体力学响应角度看，纤维参数的优化配置使工程水泥基复合材料由“强度控制型”材料向“性能协调型”材料转变，在保证必要强度水平的同时，显著提升延性、耗能能力及破坏过程的可控性。这一特性对于承受复杂荷载与极端作用条件的工程结构具有重要的工程意义。

5 结论

纤维增强是改善工程水泥基复合材料裂缝行为与力学

性能的重要手段。纤维参数通过影响裂缝起裂、扩展及演化方式，在材料损伤发展过程中发挥关键调控作用。研究表明，纤维长度、体积分数、长径比及界面性能等参数对裂缝控制效果具有显著影响，其合理匹配可促使裂缝由集中化向分散化发展，并显著提升材料的延性与耗能能力。纤维参数通过裂缝调控作用，使工程水泥基复合材料在强度、韧性与破坏安全性方面获得协同提升。相关研究成果可为高性能水泥基复合材料的设计与工程应用提供理论依据，对提升工程结构的耐久性与服役安全具有重要意义。

参考文献

[1] 李敏,路通,于禾苗,等.改性黄麻纤维协同水泥固化重金属铅污染土的强度及毒性分析[J].岩土力学,2024,45(8):2242-2250.

[2] 刘敬福,齐莉,王一,等.热挤压对喷射沉积TiC_p/ZA35复合材料力学性能的影响[J].兵器材料科学与工程,2019,42(4):68-71.

[3] 徐长伟,张华健,杨军彩.秸秆处理方式对硅酸盐水泥基秸秆复合材料力学性能的影响[J].混凝土,2021,(2):59-62.

[4] 骆宣耀,韦粤海,马雷雷,等.硅烷偶联剂改性对玄武岩纤维增强乙烯基酯树脂复合材料力学性能的影响[J].现代纺织技术,2023,31(4):103-110.

[5] 范淋,杨璽,祁小龙,等.SMAF增强PP/PVA混杂纤维工程水泥基复合材料拉伸性能[J].硅酸盐通报,2025,44(3):811-820.

Research on the Optimization of Safety Risk Prevention and Control Mechanism in Highway Engineering Construction

Haonan Wei

Construction Management Branch of Shaanxi Communications Holding Group, Xi'an, Shaanxi, 710075, China

Abstract

With China's transportation infrastructure development advancing steadily, highway construction projects have seen a gradual expansion in scale. The safety risk prevention mechanism for highway engineering consists of four key elements: organizational structure, institutional frameworks, technical systems, and support measures. However, the current mechanism faces challenges such as incomplete risk identification and assessment, fragmented responsibility implementation, weak dynamic control, and inadequate emergency response, with root causes spanning management, technology, personnel, and industry environment. To address these issues, an optimized framework has been established based on principles of systematic coordination and precision feasibility, encompassing four dimensions: organizational collaboration and process control. By improving accountability coordination, revising full-process regulations, applying intelligent technologies, strengthening personnel and financial support, and enhancing emergency response capabilities, the framework aims to boost the effectiveness of risk prevention and control.

Keywords

highway engineering; safety risk; prevention and control mechanism; optimization strategy

公路工程施工安全风险防控机制优化研究

魏浩楠

陕西交通控股集团建设管理分公司, 中国·陕西 西安 710075

摘要

随着我国交通基础设施建设持续不断地向前推进,公路工程建设规模逐步呈现出扩大的态势。公路工程施工安全风险防控机制由组织、制度、技术、保障四大要素构成,现行机制存在风险识别评估不全面、责任落实脱节、动态管控薄弱、应急处置不完善等问题,根源涉及管理、技术、人员及行业环境多层面。基于此,以系统协同、精准可行等为原则构建包含组织协同、流程管控等四维度的优化框架,通过完善权责协同、修订全流程制度、应用智能化技术、强化人员资金保障及提升应急能力等措施,实现风险防控效能提升。

关键词

公路工程;安全风险;防控机制;优化策略

1 引言

施工环境日益变得复杂起来,如地质条件有多多样性以及极端天气频繁发生等诸多因素,导致施工安全风险隐患数量有所增多,安全事故时不时就会出现,这对施工人员的生命财产安全构成了威胁,而且还会对工程建设的进度以及质量产生影响。基于此,构建科学且高效的施工安全风险防控机制成为行业发展的需求。

2 公路工程施工安全风险防控机制的现状分析

2.1 现有防控机制的构成要素

公路工程施工安全风险防控机制是一个由多维度要素

有机耦合而成的系统整体,其核心构成要素包含组织、制度、技术以及保障四大体系,组织体系作为防控工作的具体实施主体,清晰地明确了建设单位、施工单位、监理单位等参与方的层级架构以及管理权责,依靠设置专职安全管理部门与岗位,搭建起纵向可贯通、横向可以协同的管理网络^[1]。制度体系是防控工作的行为准则,它包含风险识别、评估、管控、应急处置等全流程的规范性文件,以及安全生产责任制、奖惩机制等配套制度,为风险防控给予刚性约束。技术体系是风险防控的核心支撑部分,包含风险辨识方法、监测预警技术、隐患治理手段等,借助技术工具的运用实现风险的精准管控。保障体系是防控机制得以有效运行的基础,包括人员安全培训、专项资金投入、安全设施配备等内容,为各项防控措施的实施提供资源保障,四大要素彼此相互关联、互相支撑,共同构建起现有风险防控机制的完整运行框架。

【作者简介】魏浩楠(1996-),男,中国陕西西安人,硕士,工程师,从事公路工程研究。

2.2 现有防控机制存在的问题与短板

当下公路工程施工安全风险防控机制于实际运行期间依旧存有诸多较为突出的问题,这对防控效能的充分施展形成了制约,风险识别与评估的全面程度欠缺。当前的的工作大多聚焦于常规风险点,对于复杂地质条件、极端天气等非规范风险的辨识精准度较低,评估方法多依靠经验判断,在量化分析方面有所欠缺。防控责任落实出现脱节状况,部分参与方存在责任意识淡薄、相互推诿扯皮等问题。在分包工程环节,安全管理链条出现断裂,导致防控措施难以有效向下延伸,动态管控能力较为薄弱,现有机制对施工过程中风险因素的动态变化反应滞后,缺少实时监测与动态调整机制,容易出现风险管控的空白区域。应急处置体系并不完善,应急预案的针对性与可操作性不足,应急物资储备不够充足,应急演练只是走过场,导致突发安全事件发生时难以迅速且有效地进行处置,容易造成损失的扩大^[2]。

2.3 问题产生的根源分析

当前防控机制出现问题,究其根源是管理、技术、人员以及行业环境等多个层面因素共同作用的结果。在管理层面,现行管理模式呈现出碎片化的弊端,各参与方之间缺少有效的协同联动机制,信息共享不够及时,使得防控工作出现协同方面的妨碍,部分企业安全管理理念较为滞后,重视进度和效益而轻视安全的倾向十分明显,对安全风险防控的投入不足,管理制度执行缺乏刚性约束。在技术层面,先进防控技术的推广应用不够充分,部分企业依旧依赖传统防控手段,智能化监测、大数据分析等新技术的应用场景较为有限,技术支撑能力欠缺。在人员层面,安全管理人员专业素养高低不一,一线作业人员大多是农民工,安全意识淡薄、操作不规范,并且缺乏系统的安全培训,难以契合风险防控的实际需要。在行业环境层面,行业竞争激烈导致部分企业为降低成本而压缩安全投入,同时安全监管体系不完善,监管手段单一、执法力度不足,难以形成有效的外部约束。

3 公路工程施工安全风险防控机制的优化框架构建

3.1 优化目标与原则

优化目标着重于打造一套公路工程施工安全风险防控体系,该体系要系统完备、协同高效且精准可控,实现风险识别全面化、管控流程规范化、技术应用智能化以及责任落实闭环化,以此从源头上降低安全事故发生概率,保障施工人员生命财产安全以及工程建设有序开展。优化原则方面,遵循系统性原则,全面统筹各参与方以及各环节要素,实现整体效能的提升,需遵循精准性原则,针对核心风险点以及现有短板精准施策。遵循可行性原则,结合行业发展实际状况与工程实践需求,保证优化措施可切实落地实施,还需遵循动态性原则,适应施工过程中风险因素的动态变化,保证防控机制持续适配^[3]。

3.2 优化框架的核心维度

优化框架以解决现有机制的不足之处为方向,确定四个核心维度,其一为组织协同维度,着重解决管理碎片化问题,加强各参与方的权责协同与联动。其二是流程管控维度,围绕风险全生命周期管理,重新构建从识别、评估到处置、复盘的闭环流程。其三是技术赋能维度,依靠新技术提升风险监测与预警能力,构建技术防控屏障。其四是保障支撑维度,从人员、资金、制度执行等方面强化保障,保证框架有效运行。这四个维度相互联系,共同构成了全方位、多层次的防控优化体系。

3.3 各维度的具体构成与逻辑关系

组织协同维度包含了权责清单制定、跨主体协调机制以及分包商一体化管理等一系列内容,流程管控维度有分级风险识别标准、动态评估流程以及隐患闭环整改机制等方面,技术赋能维度覆盖智能化监测系统、大数据风险分析平台以及应急响应数字化工具等,保障支撑维度涉及专业化培训体系、专项安全投入保障以及常态化考核监督机制等。各维度之间逻辑衔接较为紧密,组织协同为框架运行奠定组织基础,流程管控明确核心运行路径,技术赋能为流程落地给予技术支持,保障支撑为各维度有效运转提供底层保障,共同构成了“组织引领—流程驱动—技术支撑—保障兜底”的一个有机整体。

4 公路工程施工安全风险防控机制的优化路径与关键措施

4.1 权责划分与协同机制完善

组织体系优化的关键要点是清晰界定各参与方的权责边界以及加强协同联动,构建层级分明的权责划分体系,依据法规政策,制定精细的权责清单,明确建设、施工、监理等主体在风险防控各个环节的具体责任,消除权责交叉和空白区域。针对分包工程管理较为薄弱的情况,推行分包商安全一体化管理模式,将分包商纳入总包单位安全管理体系,同时进行安全监管与考核。搭建跨主体协同管理平台,建立定期会商、信息共享以及联合督查机制,打破企业间的信息壁垒,促进防控资源整合与优势互补,形成上下连贯、横向协同的组织管理格局,保证防控指令可高效传达且措施得以有效落实。

4.2 全流程风险管理制度修订与完善

制度体系的优化应当围绕风险全生命周期管理来构建闭环制度框架,对于风险识别阶段而言,要完善风险辨识的标准以及流程制度,明确不同工程类型、施工阶段的风险辨识范围和方法,并且强制要求开展非常规风险的专项辨识工作。在风险评估阶段,需建立分级分类的评估制度,引入量化评估方法,规范评估指标体系以及等级划分标准,以此提升评估结果的科学性与精准程度。在风险管控阶段,要健全隐患排查治理制度,明确排查的频次、整改责任以及复查

标准,实现隐患治理的闭环管理,完善制度执行监督机制,将制度落实情况纳入绩效考核范畴,构建奖惩分明的约束机制,强化制度的刚性约束,防止制度流于形式。



图 1

4.3 智能化风险识别、监测与预警技术应用

技术体系的优化将智能化升级当作核心内容,以此提升风险防控的精准程度以及时效特性。在风险识别环节中,积极推广运用无人机航拍、三维激光扫描等技术手段,再结合地质勘察所获取的数据来构建工程三维模型,最终实现对复杂地形以及隐蔽工程风险的可视化识别。在风险监测环节,着手搭建智能化监测系统,针对高边坡、桥梁桩基等关键部位布置传感器,实时采集位移、沉降、应力等数据,借助物联网技术实现数据的实时传输。在风险预警环节,开发大数据风险分析平台,整合监测数据、施工数据以及环境数据,依靠算法模型实现风险趋势的预测以及分级预警,及时将预警信息推送给相关责任人,为风险处置提供精确依据,促使风险防控从被动应对朝着主动预判转变。

4.4 人员培训、资金投入与考核评价机制建设

保障体系的优化需要从人员、资金以及考核这三个方面来构建全面的支撑。在人员培训方面,要建立起分层分类的培训体系,对于安全管理人员,开展专业技能以及管理能力的培训,而对于一线作业人员,则开展安全意识以及操作规范的培训,借助案例教学、实操演练等多种方式来提高培训的实际效果。在资金投入方面,需建立安全专项投入保障制度,明确安全投入的比例以及使用范围,包括安全设施购置、技术升级、培训教育等领域,定期开展资金使用的专项审计,以保证资金足额到位并高效使用。在考核评价方面,构建多维度的考核指标体系,包括风险识别准确率、隐患整改率、事故发生率等核心指标,实行常态化考核以及动态评价,考核结果与薪酬、评优直接关联,以此激发各主体风险防控的积极性。



图 2

4.5 应急预案完善与应急处置能力提升

应急防控体系的优化着重于提高突发安全事件的处置效率,在应急预案完善工作中,依据工程实际的风险特点来编制有针对性的预案,确定不同类型突发事件的应急响应流程、责任划分以及处置举措,详细地列出应急物资清单并制定调配方案,以此提高预案的可操作性,对于应急物资保障。构建分级储备以及跨区域调配机制,在施工现场的关键区域设置应急物资储备点,定期进行物资盘点和维护工作,保证应急物资充足且可正常使用。在应急处置能力提升方面,实行常态化的应急演练制度,结合典型事故案例开展实战演练,提高作业人员的自救互救能力以及管理人员的应急指挥协调能力,建立应急联动机制,强化与消防、医疗等部门的协同合作,打造多方联动的应急处置体系。

5 结语

公路工程施工安全风险防控对保障工程建设顺利开展起着非常关键的作用,当前现有防控机制所存在的问题是多种维度因素相互叠加而产生的,要想优化完善防控机制就得基于系统思维,全面统筹组织、流程、技术以及保障等多个维度,让它们协同发挥作用,只要明确了权责边界,强化全流程的管控,推动技术实现赋能升级,夯实保障基础并提升应急处置能力,就能有效解决现有机制存在的短板问题。未来,还需要持续推动防控机制进行动态优化,强化各个参与方之间的协同联动,切实提高风险防控的效能,帮助公路建设行业朝着高质量安全的方向发展。

参考文献

- [1] 乔通. 公路工程施工阶段的成本控制与风险管理研究 [J]. 汽车周刊, 2025, (11): 200-202.
- [2] 沈延斌. 公路工程建设中的质量控制与安全风险管理探究 [J]. 工程建设与设计, 2025, (18): 254-256.
- [3] 兰超群. 公路项目路面工程的施工安全管理探讨 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6 (18): 167-169.

Research on Bridge Engineering Structural Detection Evaluation Methods and Maintenance Decision Optimization

Yong Lin

Anhui Provincial High-grade Highway Engineering Supervision Co., Ltd., Hefei, Anhui, 231131, China

Abstract

The detection and evaluation of bridge engineering structures are crucial measures for ensuring the safe operation and prolonging the service life of bridges. As the number of bridges increases and their service years grow, the issues of structural damage and aging have become increasingly severe, making effective detection and evaluation particularly important. This paper studies the common technologies and methods for bridge structure detection and evaluation and explores strategies for optimizing bridge maintenance decisions. Through the assessment of bridge loads, bearing capacity, material performance, and other factors, combined with non-destructive testing techniques and dynamic monitoring methods, new ideas for bridge health management are proposed. The paper also analyzes the principles of bridge maintenance decision-making, priority evaluation, and selection of maintenance measures, providing a scientific basis for improving bridge engineering management. Finally, based on practical applications and challenges, the paper proposes directions for improving the optimization of bridge structure detection evaluation and maintenance decision-making.

Keywords

Bridge detection; Structural evaluation; Non-destructive testing; Dynamic monitoring; Maintenance decision-making

桥梁工程结构检测评估方法与养护决策优化研究

林勇

安徽省高等级公路工程监理有限公司, 中国·安徽 合肥 231131

摘要

桥梁工程结构的检测与评估是保障桥梁安全运行、延长使用寿命的重要手段。随着桥梁数量的增多和使用年限的增长,桥梁结构的损伤与老化问题日益严重,因此开展有效的检测评估显得尤为重要。本文研究了桥梁结构检测评估的常用技术与方法,并探讨了桥梁养护决策优化的策略。通过对桥梁荷载、承载能力、材料性能等方面的评估,结合非破坏性检测技术与动态监测手段,提出了桥梁健康管理的新思路。文章还分析了桥梁养护决策的原则、优先级评定及养护措施选择,为提高桥梁工程管理水平提供了科学依据。最后,结合实际应用与挑战,提出了桥梁结构检测评估与养护决策优化的改进方向。

关键词

桥梁检测; 结构评估; 非破坏性检测; 动态监测; 养护决策

1 引言

随着城市化进程的加快,桥梁作为重要的交通设施,其安全性和稳定性直接影响到人们的日常出行和社会经济的发展。桥梁工程的结构检测评估是对桥梁健康状况进行监测与评定的重要手段,它不仅能帮助我们及时发现桥梁结构的潜在问题,还能为养护决策提供科学依据。传统的桥梁检测方法存在一定的局限性,而新型的非破坏性检测技术与动态监测手段则能够更准确、全面地评估桥梁的性能与安全性。本文旨在探讨桥梁工程结构的检测与评估方法,并针对现有的养护决策优化提出建议,力求通过科学的评估与决策手段,确保桥梁的长期稳定运行,为桥梁养护管理提供参考。

2 桥梁工程结构检测评估概述

2.1 桥梁工程结构检测评估的目的与意义

桥梁工程结构的检测评估是保障桥梁安全、延长使用寿命的关键环节。随着桥梁建设数量的增加及使用年限的延长,桥梁在服役过程中容易受到外部环境、交通荷载以及老化等因素的影响,出现不同程度的损伤。通过科学的检测评估,可以及时发现桥梁潜在的安全隐患,避免因结构失效造成的交通事故或灾难性后果。同时,桥梁检测评估还能桥梁养护提供数据支持,合理制定养护方案,提高资金利用效率。通过评估分析,桥梁管理者能够精准了解桥梁的健康状况,确保其结构安全性、使用功能和社会效益。基于评估结果,制定合理的维修、加固与更换计划,有助于优化桥梁资产管理,提高工程经济效益^[1]。

【作者简介】林勇(1982-),男,中国安徽合肥人,工程师,从事道路与桥梁工程研究。

2.2 桥梁结构检测评估的常用技术与方法

桥梁结构检测评估涉及多种技术手段,每种技术都有其特定的应用范围和优势。常用的检测技术包括视觉检测、超声波检测、电磁波检测和声波检测等,这些技术可以有效地识别桥梁结构中的裂缝、腐蚀、错位等缺陷。视觉检测通过对桥梁外观的观察,能够初步判断桥梁的健康状况,适用于初步评估。超声波检测技术利用高频声波对桥梁构件进行穿透,能够检测到深层次的结构问题,如裂纹和腐蚀。电磁波检测适用于识别金属腐蚀和钢筋位置,能够高效检测到金属构件内部的缺陷。声波检测技术则用于评估混凝土材料的均匀性,发现潜在的内部损伤。除了这些传统检测方法,近年来,随着科技的进步,数字化检测技术和智能监测系统也开始应用于桥梁结构的实时监控,极大地提高了检测的准确性和效率。

3 桥梁工程结构检测技术

3.1 桥梁结构的视觉检测技术

视觉检测技术是桥梁检测中最常见的手段,通过人工或自动化设备对桥梁的外观进行检查,发现裂缝、腐蚀、剥落等表面损伤。它是桥梁定期检查的基础方法,通常适用于大范围的初步检查。检测过程中,检查员需要逐步检查桥梁的所有部位,包括桥面、桥墩、桥梁连接处等。通过对比前期检查记录与当前状态,分析桥梁的损伤进展情况。常用的视觉检测工具包括高分辨率相机、无人机、激光扫描仪等,能够实时捕捉桥梁外观数据并进行处理。近年来,人工智能和图像识别技术的引入,提高了视觉检测的自动化程度,能够更准确地识别细小的损伤,减少人为因素对检测结果的影响。

3.2 桥梁结构的非破坏性检测技术

非破坏性检测技术(NDT)是一种无需破坏桥梁结构的情况下进行检测的手段,主要包括超声波检测、雷达检测、声波检测和磁粉检测等。这些技术可以有效检测到结构内部的缺陷、裂缝和腐蚀情况,避免对桥梁造成二次损害。超声波检测是通过发射高频声波,探测结构内部的反射波,识别潜在的裂缝、空洞等缺陷。雷达检测技术利用电磁波对桥梁进行扫描,能够穿透混凝土,检测到内部的钢筋、裂缝以及水分渗透等问题。声波检测技术则通过声音的传播特性来分析混凝土的密实性,发现可能存在的裂缝或空洞。磁粉检测适用于检测桥梁钢结构表面及近表面的裂纹,尤其适用于钢材表面缺陷的检测。这些技术的共同优势是能够深入到结构内部进行全面的检查,特别是在面对深层损伤时,非破坏性检测技术能够提供重要的帮助。

3.3 桥梁结构的动态监测与评估技术

动态监测与评估技术是近年来发展迅速的桥梁检测技术之一,通过安装传感器对桥梁进行实时监控,采集桥梁在荷载作用下的动态响应数据。这些传感器通常包括加速度

计、应变计、位移计等,可以监测桥梁的振动、位移、应变等关键参数。通过对这些动态数据的分析,能够评估桥梁在不同荷载下的响应特征,识别桥梁潜在的结构性问题。例如,振动分析能够反映桥梁的固有频率和阻尼特性,通过对比桥梁的振动特征与设计值,分析结构是否存在松动或损伤。位移监测可以提供桥梁沉降、变形等情况的动态数据,帮助判断桥梁是否发生位移或不均匀沉降。随着监测技术的发展,越来越多的桥梁开始安装长期监测系统,实时监控其健康状态。这种技术可以在桥梁服役期间进行连续的健康监测,提供长期的性能数据,帮助决策者做出科学的养护决策^[2]。动态监测技术的优势在于能够实时反映桥梁在使用过程中的动态响应,及时发现潜在问题,减少桥梁安全隐患。

4 桥梁工程结构评估方法

4.1 桥梁结构荷载与承载能力评估

桥梁的荷载与承载能力评估直接关系到其安全性和使用寿命。根据桥梁设计规范,桥梁的承载能力通常与其材料强度、结构形式以及使用年限等因素密切相关。以某高架桥为例,经过荷载测试,发现该桥最大承载力为5000吨,远高于日常交通荷载的400吨。随着时间的推移,桥梁结构的疲劳性逐渐显现,尤其是在交通密集的城市区域。通过荷载实验与数值分析,可以得出桥梁在不同交通条件下的使用状态,并评估其结构的承载能力。荷载效应和桥梁的变形模式之间的关系可通过计算桥梁的变形幅度和振动频率来评估。例如,该桥梁的最大垂直变形为0.75 cm,而设计规范中允许的最大变形为1 cm,表明该桥梁的承载能力仍在安全范围内。此外,综合考虑桥梁的安全系数,桥梁在标准荷载下的承载能力可保证五年内不出现结构性损伤。

4.2 桥梁材料与构件性能评估

桥梁材料的性能评估涉及对桥梁构件的具体材质与受力状态的详细检测。对于钢筋混凝土桥梁,材料的强度是评估其安全性的关键因素。实验结果显示,某桥梁的混凝土抗压强度达到35 MPa,符合设计要求。钢筋的抗拉强度经检测也显示为460 MPa,未出现明显的锈蚀或断裂现象。此外,桥梁构件的疲劳性能和耐久性也需要评估。在该桥梁的长时间使用过程中,受冻融循环、盐雾侵蚀等环境因素影响,某些构件的表面可能会出现裂缝。通过超声波检测技术,对桥梁的钢筋位置、直径和锈蚀情况进行检测,发现钢筋的锈蚀程度约为5%,在安全范围内。对于桥梁关键构件的评估,采用了结构健康监测系统,该系统能够实时监控桥梁受力、位移及变形情况,以便及时发现问题,减少安全隐患。检测数据显示,桥梁构件的总体健康状况良好,材料性能未显著退化。

4.3 桥梁健康状况评估与风险预测

桥梁健康状况评估不仅依赖于检测结果,还需要考虑桥梁使用过程中可能出现的各种风险因素。通过结合结构检

测数据与环境影响分析,能够预测桥梁在未来使用中的健康状况。例如,某桥梁的健康评估表明,该桥梁在过去10年的使用过程中,其结构损伤指数(SDI)逐年上升。通过分析桥梁的裂缝增长率、钢筋锈蚀比例以及裂纹深度等参数,综合得出桥梁的健康评分为85分(满分100分)。桥梁健康评分的下降主要与交通荷载的增加、桥梁材料老化及环境污染等因素密切相关。风险预测模型利用多维度数据,如交通流量、气候变化、维护历史等,模拟未来桥梁可能发生的损伤,并预测可能的维修周期。通过风险分析,得出该桥梁在未来五年内发生重大结构性损伤的概率为2%,表明桥梁仍在可控范围内,且风险较低^[3]。

5 桥梁工程结构养护决策优化

5.1 桥梁养护决策的原则与目标

桥梁养护决策的核心在于科学合理地评估桥梁现状,确保养护资金的合理分配,并以最优的养护方案延长桥梁的使用寿命。养护决策应遵循安全性、经济性、可持续性原则。安全性原则要求所有养护措施必须保障桥梁结构的安全,防止桥梁出现坍塌或重大损坏。经济性原则则强调以最低的成本获得最佳的养护效果,避免不必要的维修和资源浪费。可持续性原则则关注桥梁长期稳定运行的能力,采用具有较长使用周期的养护材料与技术。在实际决策过程中,决策目标是通过综合评估桥梁的结构状况、环境影响以及使用条件,确定养护优先级,并制定相应的预算和养护方案。此外,养护决策还需要考虑外部因素,如交通量、气候条件等,确保养护措施能够适应未来可能的变化。

5.2 桥梁养护优先级评定与资源分配

桥梁养护的优先级评定基于桥梁的健康状况、风险分析和可用资源的情况。通过对桥梁健康状况的评估,识别出最需要养护的桥梁构件,优先处理那些损伤严重、存在安全隐患的部分。例如,某桥梁的检测结果表明,桥墩的裂缝宽度已达到2 cm,超出了设计规范的安全范围,因此该桥墩被列为优先养护对象。资源分配则依据养护优先级以及养护预算进行优化。为最大限度地提高资源利用率,养护计划通常分为短期、中期和长期三个阶段。在短期内,主要集中处理危及桥梁安全的损伤部分;中期则处理那些影响使用功能的损伤,而长期则关注桥梁的结构老化与功能更新。资源分

配过程中,政府、企业等各方应根据养护预算进行合理调配,确保每项养护任务都能得到充分的资金支持^[4]。

5.3 桥梁养护措施的选择与实施

桥梁养护措施的选择应根据桥梁损伤类型、养护目标以及技术可行性等多个因素进行决策。对于轻度损伤的桥梁,常用的养护措施包括表面修补、裂缝注浆和防水涂层等。对于中度损伤的桥梁,可能需要进行钢筋加固、混凝土修补等较为复杂的养护工作。对于严重损伤的桥梁,则可能需要进行桥梁结构的加固或更换关键构件。例如,某桥梁的桥面由于长期承受重载车辆的压力,出现了多处裂缝和变形,养护措施选择了采用新型高强度混凝土进行局部修复,并在关键部位安装钢结构加固件。实施过程中,养护团队需要严格遵循技术标准和施工流程,确保养护效果达到预期。同时,养护措施的实施还需定期检查与评估,确保其长期有效性。在养护过程中,应合理安排工期,尽量减少对交通的影响,确保桥梁养护工作的顺利完成。

6 结语

桥梁工程结构的检测评估与养护决策优化是确保桥梁安全、延长使用寿命的关键环节。通过科学的检测评估方法,可以有效识别桥梁潜在的损伤和隐患,保障桥梁结构的安全性和稳定性。同时,合理的养护决策有助于合理分配资源,优化养护措施,提升桥梁的长期使用效果。随着技术的不断进步,新的检测技术和养护方法为桥梁管理提供了更多选择,也为决策提供了更为精准的数据支持。未来,随着桥梁工程管理模式不断创新,桥梁检测评估与养护决策优化将更加高效、智能化,为桥梁的安全运营与可持续发展提供坚实保障。在此基础上,结合实际情况,持续改进养护策略和决策方法,能够进一步提高桥梁的安全性和经济性。

参考文献

- [1] 张文缘.道路与桥梁工程试验检测关键技术研究[J].城市建设理论(电子版),2025,(14):163-165.
- [2] 唐高华.公路桥梁工程混凝土结构现场检测技术分析[J].运输经理世界,2025,(14):121-123.
- [3] 李科,聂志虎,戴璐雅.钢筋混凝土桥梁无损探伤检测系统研究[J].建筑机械化,2025,46(02):100-103.
- [4] 杜学亮.钢结构桥梁工程检测技术及评估策略探讨[J].工程技术研究,2025,10(01):220-222.

Research on Safety Management and Risk Prevention Measures in Highway and Bridge Construction

Peijian Wang

Shanxi Provincial Expressway Comprehensive Administrative Law Enforcement Corps, Taiyuan, Shanxi, 030006, China

Abstract

Against the backdrop of the continuous expansion of transportation infrastructure construction scale and the increasing complexity of engineering technology, safety issues in highway bridge construction are becoming increasingly prominent. Bridge engineering generally has the characteristics of long construction period, complex working environment, and frequent high-altitude operations. The types of safety risks are diverse and the evolution process is hidden. Once the management is out of control, it is extremely easy to cause mass casualties, which seriously affects public safety and social stability. Based on this, this study believes that by constructing a construction safety management system with risk pre control as the core, strengthening dynamic control and multi-party collaborative governance throughout the entire process, the probability of bridge construction accidents can be effectively reduced, and the safety level of engineering construction can be improved.

Keywords

highway bridges; construction safety; risk prevention and control; safety management; engineering management

公路桥梁施工安全管理与风险防控措施研究

王培剑

山西省高速公路综合行政执法总队，中国·山西太原 030006

摘要

在交通基础设施建设规模持续扩大与工程技术复杂程度不断提升的背景下，公路桥梁施工安全问题日益凸显。桥梁工程普遍具有施工周期长、作业环境复杂、高空作业频繁等特点，安全风险类型多样且演化过程隐蔽，一旦管理失控，极易引发群死群伤事故，对公共安全和社会稳定造成严重影响。基于此，本研究认为，通过构建以风险预控为核心的施工安全管理体系，强化全过程动态管控与多主体协同治理，可有效降低桥梁施工事故发生概率，提升工程建设安全水平。

关键词

公路桥梁；施工安全；风险防控；安全管理；工程管理

1 引言

随着我国综合交通运输体系不断完善，公路桥梁工程在区域互联互通和经济社会发展中的基础性作用愈加凸显。近年来，特大型桥梁、复杂结构桥梁以及跨江跨海桥梁项目不断增多，施工技术难度和组织复杂性显著提升，与此同时，桥梁施工安全风险也呈现出类型多样化、诱因复合化和后果严重化的特点。实践表明，桥梁施工事故往往并非单一因素所致，而是由技术缺陷、管理失效与人员行为偏差等多种因素耦合引发，其防控难度明显高于一般房建或道路工程。因此，有必要从工程管理视角出发，对公路桥梁施工安全风险进行系统梳理，并在此基础上构建具有工程可操作性的风险防控措施体系，以期桥梁工程安全管理实践提供理论支撑

【作者简介】王培剑（1985-），男，中国山西太原人，本科，高级工程师，从事高速公路施工质量安全监督管理研究。

与方法借鉴。

2 公路桥梁施工安全风险特征与主要来源分析

2.1 公路桥梁施工安全风险的整体特征

公路桥梁施工安全风险具有显著的系统性、动态性与高危性特征，其风险生成和演化贯穿于工程建设全过程。与一般道路工程相比，桥梁施工往往涉及高空作业、深基础施工、大型构件吊装及复杂临时结构体系，施工阶段结构长期处于非成型或非完全受力状态，安全稳定性的施工工序和操作精度高度敏感。这一特性决定了桥梁施工安全风险并非孤立存在，而是由结构条件、施工方法与外部环境共同作用形成的复杂系统风险。

从时间维度看，桥梁施工安全风险呈现出明显的阶段性差异。在基础施工、高墩施工和上部结构安装等关键阶段，作业高度和施工荷载持续变化，风险水平显著高于其他工序。同时，施工环境的不确定性进一步放大了风险演化的不

稳定性,如水文条件变化、气象因素干扰以及临近既有交通设施施工等,均可能对施工安全产生叠加影响。从空间维度看,桥梁工程作业面分散且立体交叉明显,不同工序之间相互制约、相互影响,一旦局部环节发生失控,极易引发连锁反应,导致事故后果迅速扩大。因此,桥梁施工安全风险往往具有隐蔽性强、突发性高和事故后果严重等特点,对安全管理的前瞻性和系统性提出了更高要求。

2.2 公路桥梁施工安全风险的主要来源分析

在实际工程中,公路桥梁施工安全风险主要来源于技术因素、管理因素和人员行为因素的综合作用。首先,技术风险是桥梁施工安全的重要诱因之一。部分项目在施工方案编制阶段对复杂工况考虑不足,对关键工序的受力状态、施工顺序和临时结构稳定性分析不够深入,导致施工过程中存在潜在结构失稳风险。此外,施工设备选型不合理、支架和模板体系设计不规范,也可能在荷载变化过程中引发安全事故。

管理因素在桥梁施工安全风险形成中同样占据重要地位。桥梁工程参建单位多、管理链条长,若安全责任划分不清或协调机制不完善,极易形成管理盲区。一些项目在进度压力和成本约束下,对安全管理的重视程度不足,安全制度执行流于形式,隐患排查和整改缺乏闭环管理,导致风险长期积累而未被有效控制。人员行为因素是桥梁施工安全风险的重要触发条件。作业人员安全意识不足、违规操作以及对复杂施工环境适应能力不足,均可能直接诱发事故发生。尤其在高空作业和起重作业中,个体操作失误往往会迅速转化为严重安全事故。上述多类风险因素相互叠加、相互强化,使得桥梁施工安全问题具有明显的复合性特征,必须通过系统化管理手段加以防控。

3 公路桥梁施工安全管理中的现实问题分析

3.1 安全管理前移不足与风险预控机制薄弱

从当前公路桥梁工程建设实践看,施工安全管理仍然以事中控制和事后整改为主,风险管理前移不足的问题较为突出。在项目策划和施工组织设计阶段,部分工程对安全管理的重视程度明显低于质量和进度控制,安全风险识别往往停留在规范性审查层面,缺乏结合具体工程条件开展系统分析,导致高风险作业环节在进入施工阶段后才逐步暴露。

在实际施工过程中,安全管理更多依赖经验判断和现场巡查,风险预警和动态评估机制尚未健全。当施工条件发生变化,如施工工序调整、作业环境改变或气候条件异常时,安全管理措施难以及时同步更新,致使原有控制手段与实际风险水平不匹配。这种“被动应对”的管理模式,使得隐患在较长时间内处于不可控状态,增加了事故发生的可能性。

此外,一些项目虽在制度层面提出了风险分级管控和隐患排查要求,但在执行过程中缺乏统一的技术标准和操

作流程,风险识别结果难以转化为具体管理措施,风险预控机制未能真正发挥应有作用。

3.2 安全管理执行力不足与多主体协同失效

安全管理制度执行力不足是制约桥梁施工安全水平提升的另一关键问题。在多参建主体共同参与的桥梁工程中,安全管理职责虽然在合同和制度文件中有所规定,但在实际运行中仍存在责任边界模糊、管理衔接不畅的现象。施工单位、监理单位与建设单位在安全管理中的信息传递不够顺畅,部分安全问题在不同管理层级之间反复流转,未能形成高效的闭环管理[1-2]。

部分项目在安全投入和人员配置方面存在不足,安全管理岗位设置形式化,现场安全管理人员数量和专业能力与工程复杂程度不匹配,难以对高风险作业实施有效监管。在进度压力较大的情况下,安全管理往往被让位于施工进度控制,违规操作和简化流程现象时有发生,削弱了安全管理制度的约束效力。

此外,施工技术管理与安全管理之间协同不足的问题较为普遍。施工技术方案在制定过程中,往往侧重结构受力和施工效率,对施工过程中的动态安全风险考虑不充分,安全管理措施未能同步嵌入关键工序决策环节,导致技术方案在实施阶段存在安全保障不足的情况。这种管理分割状态,使得安全管理难以真正融入桥梁施工全过程。

4 公路桥梁施工安全管理与风险防控措施研究

4.1 基于风险预控的施工安全管理体系构建

针对公路桥梁施工安全风险前移不足的问题,应从管理理念和制度体系层面入手,构建以风险预控为核心的施工安全管理体系[3]。在项目策划和施工准备阶段,应将安全风险分析作为施工组织设计的重要组成部分,与进度、质量和成本控制同步开展。通过系统梳理桥梁结构特征、施工环境条件及关键工序特点,对高空作业、大型构件吊装、临时结构搭设等高风险环节进行针对性识别,明确风险等级和控制重点,为后续施工安全管理提供科学依据。

在施工实施阶段,应强化安全风险的动态管理,避免安全管理措施“一次制定、长期适用”的静态模式。随着施工工序转换和作业条件变化,及时对安全风险进行再评估,并同步调整控制措施,确保安全管理与施工实际保持一致。同时,应将风险管控要求细化落实到具体工序和作业环节,通过技术交底、安全交底等方式,使一线作业人员明确风险点和控制要求,提升风险预控措施的落地效果。

此外,应通过制度化手段推动风险管控责任的层层落实。将安全风险控制目标分解到项目管理层和作业层,明确各级管理人员在风险识别、隐患排查和整改落实中的职责,形成责任清晰、运行有序的风险预控管理链条,从制度层面保障施工安全管理体系的有效运行。为避免施工安全管理停留在静态制度层面,有必要构建以风险预控为核心的全

过程安全管理体系,将风险识别、风险评估、措施落实、过程监测与应急处置有机衔接,形成动态循环的管理机制。基于上述思路,本文构建了公路桥梁施工安全风险防控闭环管理模型,如图1所示。

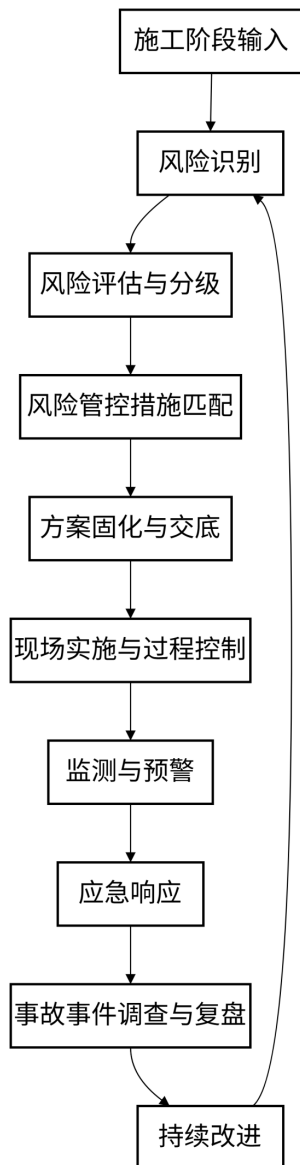


图1 公路桥梁施工安全风险防控闭环管理模型

4.2 强化技术支撑与过程管控的综合防控措施

在公路桥梁施工安全管理中,风险防控效果在很大程度上取决于技术措施与管理措施的协同水平。因此,有必要将安全管理深度嵌入施工技术决策和现场管理过程之中[4]。在施工方案编制阶段,应同步开展安全技术论证,对关键施工工艺、临时结构受力状态和施工顺序进行系统分析,确保技术方案在满足结构安全和施工效率要求的同时,具备充分的安全保障条件。

在施工过程中,应加强对关键工序和重点部位的过程管控,通过规范化的施工流程和标准化操作要求,减少人为操作偏差对安全的不利影响。对支架体系、模板系统和起

重设备等关键设施,应严格执行检查验收制度,确保其在整个使用周期内处于安全可控状态。通过引入信息化监测手段,对结构变形、设备运行状态和环境条件进行实时监测,可有效提升安全风险的预警能力,为管理决策提供数据支撑。实践中应高度重视人员安全管理在风险防控中的基础性作用。通过开展安全教育培训和岗位技能提升,使作业人员充分认识桥梁施工的高风险特性,增强安全操作意识和自我防护能力。对特种作业人员,应严格落实持证上岗和岗位责任制,避免因人员能力不足引发安全事故[5]。

在此基础上,还应完善施工安全应急管理机制,针对桥梁施工中可能出现的高风险情形,制定具有针对性的应急预案,并通过定期演练检验预案的可操作性和有效性。一旦发生突发事件,能够迅速启动应急响应,减少事故损失,防止风险进一步扩散。实践中需建立跨部门的应急联动机制,加强与当地应急管理部门、消防救援队伍、医疗机构等外部力量的协同配合,明确应急响应流程中的职责分工与信息传递路径,确保在事故发生时能实现资源快速调配与高效救援。此外,应急物资的储备与管理也至关重要,应根据桥梁施工的风险特点,针对性储备救生设备、医疗急救用品、应急照明器材等物资,并定期检查更新,保证其在紧急情况下的可用性。通过技术支撑、过程管控、人员管理与应急机制的有机结合,形成全方位、多层次的施工安全风险防控体系,切实保障公路桥梁施工的安全稳定推进。

5 结语

公路桥梁施工安全管理是一项系统性、长期性的工程,其成效取决于风险识别的前瞻性、管理制度的执行力以及技术与管理的协同水平。本文通过对桥梁施工安全风险特征与主要问题的系统分析,提出了以风险预控为核心的安全管理与防控措施,为提升桥梁工程施工安全水平提供了可行路径。未来,随着桥梁工程规模和技术复杂程度的进一步提升,有必要持续推进安全管理理念创新与技术手段应用,不断完善施工安全风险防控体系,以实现公路桥梁工程建设安全、质量与效益的协同提升。

参考文献

- [1] 赵记广. 山区高速公路高墩大跨桥梁施工安全风险防控研究[J]. 价值工程, 2026, 45(03): 52-54.
- [2] 叶文宇. 基于FAHP-指标体系法的桥梁施工复工复产安全评估[J]. 建筑安全, 2025, 40(12): 74-79.
- [3] 周若星. 高速公路桥梁施工中的地基处理技术[J]. 时代汽车, 2025, (24): 153-155.
- [4] 张志文. 高速公路桥梁施工技术与安全管理研究[C]//广西大学广西县域经济发展研究院. 2025年第五届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流会议论文集. 惠州交投公路建设有限公司, 2025: 123-124. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.087188.
- [5] 施雨捷. 公路桥梁隧道施工安全风险识别与管控措施研究[J]. 汽车周刊, 2025, (12): 157-159.

Nondestructive Testing Technology and Application of Road Tunnel Lining Structure Diseases

Min Tian Xiaoping Wang Ming Lei Zhengzheng Tang Yawei Wen

Zhongye Testing and Certification (Anhui) Co., Ltd., Ma'anshan, Anhui, 243000, China

Abstract

Road tunnel lining structure defects refer to the collective term for various issues arising during construction or operation of the integrated system comprising “initial support + waterproofing layer + secondary lining”, which bears structural load-bearing and waterproofing functions. These defects typically occur behind the tunnel's structural surface. Non-destructive testing (NDT) methods must be employed to identify and determine their location and extent, followed by verification through borehole testing to confirm the causes before implementing repair, sealing, or reinforcement measures. Based on literature review and practical experience, this paper first elucidates the necessity of applying NDT techniques to detect tunnel lining defects, then explores specific NDT application methods, aiming to provide scientific and effective guidance for the detection and treatment of such defects.

Keywords

highway tunnel; secondary lining; structural damage; non-destructive testing; ground-penetrating radar; impact elastic wave

公路隧道衬砌结构病害的无损检测技术及应用探析

田闽 王孝平 雷鸣 唐蒸蒸 文亚巍

中冶检测认证（安徽）有限公司，中国·安徽 马鞍山 243000

摘 要

公路隧道衬砌结构病害是指隧道“初期支护+防排水层+二次衬砌”这一整套承担结构受力和防水的组合体系，它是施工过程中或运营期间出现各种问题的总称。这些病害一般都发生在隧道结构面之后，必须采用无损检测方法发现、确定病害的位置及范围，经过钻孔验证病害成因后再对病害进行修补、封堵或者补强处理。有鉴于此，本文通过查阅相关文献以及结合自身工作实践背景下，首先就公路隧道衬砌结构病害实施无损检测技术的必要性进行阐述，随后针对具体无损检测技术应用展开探讨，以期给公路隧道衬砌结构病害的检测与处理提供科学、有效的指导。

关键词

公路隧道；二次衬砌；结构病害；无损检测；探地雷达；冲击弹性波

1 引言

当前，中国公路隧道处于建设运营并行阶段，二次衬砌既是承载和限界的關鍵结构构件，又是隧道防排水系统的最后一道屏障。然而，由施工工序、围岩变化和渗水环境等因素引起的衬砌背后脱空、衬砌厚度不均、施工缝脱粘、钢筋保护层偏小等问题，往往通过外观检查是“无迹可寻”的，在隧道使用一定时间后才集中爆发，比如衬砌背后的渗漏水、剥落或局部受力不均等，亟需对存在这些风险隐患区域的桩号和孔位进行分辨和测定^[1]。为此本文强调了隧道工程现场无损检测工作的分区速度、复测定位、效果验证，并认真总结无损检测的应用要点。

2 公路隧道衬砌结构病害实施无损检测技术的必要性

衬砌结构病害的治理在“结构安全与运营条件”双重驱动下愈发完善。二次衬砌既是拱脚、内轮廓的稳定与安全储备，又是保障行车空间的前提条件，一旦二次衬砌出现拱顶背后脱空、局部厚度不足或产生受力性裂缝等问题，容易引发受力不均衡现象，加上车辆长期荷载，以及在温湿变化及渗水作用下，进一步扩大衬砌薄弱部位病害，当病害处于初期可见或早期时，可采取简易处理方法，但如果出现衬砌局部松动、掉块或错台等问题，不仅安全风险骤增，还会提高封道组织、检修费用、二次返工成本。

其次，衬砌病害存在隐蔽性强的特点，如衬砌背后欠填、钢筋保护层薄等，通常这类问题发生在衬砌背后或结构内侧，早期并没有明显的外部表征，在缺陷达到一定程度后才会表现出衬砌裂缝变宽、渗漏水严重、混凝土剥落等病害

【作者简介】田闽（1992—），中国安徽安庆人，硕士，从事材料化工与技术研究。

情况。从施工质量闭环角度出发,衬砌结构病害治理不能单纯的去“修补表面”问题,而要着重反思成因,在每个施工环节建立起可追溯的质量控制链条,通过无损检测确定可能存在问题的部位,以此触发复验、补注浆、止水或者补强工作,同时依据复检结果判断处治效果是否合格,这样才能形成“发现—复核—处置—复检”闭合路线,更重要的是,此路径还可以倒逼上部工序中的质量问题控制到位^[2]。

3 公路隧道衬砌结构病害的无损检测技术及应用探析

3.1 探地雷达扫描用于厚度与背后脱空的快速分区

洞内可视面无法确定衬砌外侧界面时,可用屏蔽天线探地雷达对称布置,从进出口左右两侧沿隧道横向向中心线平行布设测线进行连续扫描,根据电磁波在不同介质界面的反射差异来识别厚度变化和空洞异常。以下对具体操作步骤进行详细说明:一是用探地雷达先给衬砌厚度及背后脱空快速分区,使得现场不再凭经验盲目钻孔,而是先圈出高风险带,然后打孔补浆。测线以纵向为主,需要测拱顶、拱腰、边墙。初排应间隔20—30m设置一个里程断面,并对整条断面线都进行粗测,一旦出现异常,先向前或者向后复测,再将测线的间距调整为1—2m精测,必要时采用同一条断面线做短距离的横向补测,旨在精确定位异常范围,将其压缩成可施工范围。另一方面,作业车或者手推车需减速匀速行走,里程轮校准后,丈量过桩号、分仓线及施工缝并同步报点,做好标记,把洞别、车道、测线编号等内容填入记录表,确保封道后仍然能够准确回到作业起点。其二,标定工作放在隧道外侧进行,否则将无法落到孔上,同时还要考虑洞内渗水或潮湿情况。在单车车头处的既定厚度范围内进行测定,标定时间零点和波速,就拿水分变化明显处来说,必须分段设定值,把渗水、潮湿的范围标出来,防止湿区误判为脱空、厚度突变现象^[3]。其三,判定要结合“现场构造”来分析,判断界面强反射、反射中断、局部能量突增等地质变化情况,注意对照已知分仓、钢筋网、钢拱架、线槽电缆沟位置,一旦现场出现疑点,在异常两侧布置平行复测线,再换不同的天线频率进行复测,必要时保证天线离壁间隙保持一致,以剔除人为因素影响。如果判定无法确定,则需安排抽条处置检查或安排人工清除查证。其四,成果服务于处治工作。针对各类异常开展“现场构造”验证点布置,根据补浆单元编号、孔位里程及环向位置清单进行治理。要求孔距宜0.8—1.2m,先小量补浆,然后反复扫测,查看异常是否消除。孔位放样时,需要用钢筋探测仪规避钢筋,优先注浆拱顶和渗水区,并做好注浆过程的压力、注浆量以及返浆点拍照存档,为后期查看奠定基础。

3.2 超声波反射与透射检测用于内部不密实与层间脱粘识别

洞内怀疑二衬存在蜂窝、夹渣或者沿施工缝脱粘时,

基于“看不见”无法判断其具体的密实情况,可通过超声检测把这种差异转变成具体的时间、波速及回波幅度数值,方便圈定可疑里程安排开孔复核,还能与其他手段(如回弹、钻孔等)相互印证,避免处置盲目性。第一,单面可测,采用反射法,按网格化布置测线,沿着裂缝、渗水点、回弹值低的区域由内往外扩散,网格大小根据衬砌厚度而定,以0.3—0.5m为宜;对于异常区域,则加密网格,每点至少测量2—3次,取较稳定值,并记录里程、环向位置和衬砌龄期,重点观察首波有无变长、波速是否呈片状降低等现象,防止单一量点值导致误判情况。第二,为了获得可靠测试数据,测前应使用砂轮将待测区域打磨平整,保证其表面清洁、干燥,同时使用统一型号、配比的耦合剂,并保持探头的压力与测距值相同。在隧洞内温度变化较大的情况下,遇到有湿气或滴水的情形要做好描述,尽可能同一点重复测量,避免把耦合不良或含水率差异当成缺陷衰减。另外,如果检修通道和边墙不能直接触及,那么可布置透射测线,助力发现不贯通、不密实的区域。具体而言,测线沿同一直线布设,起点和终点要做好标识,测量距离、线位要一致,至少留设两个正常地段作为与异常区段同条件比较的健康标段,以差值圈定异常边界,再对异常区段加密,进一步确定缺陷宽度和延伸方向。

3.3 冲击弹性波/冲击回波法用于厚度不足与注浆缺陷的频域判别

当隧洞内只能单面接触检测时,冲击回波法的最大价值就是通过“频谱主峰+回波时间”来获取衬砌厚度和背后充盈状态。第一步,打好基础:在一条平稳的质量面中,选取不大于 $\phi 4$ 的钻孔或者已知厚度的干拌无孔探,标定波速;其次相同测区的锤头重量、敲击点到拾振器的距离、拾振器固定方式要求一致,不允许换人换工具;第二步是布点和复测,以约1平方米网格推行,拱顶、拱腰等部位可采用软垫、胶等方式固定传感器,每个测点敲打三次取稳定值。当主峰相差较大时,首当其冲检查耦合、湿度、设备松动和洞内机械噪声,然后使用同里程的近距离两点互校,避免将表面疏松误判成厚度偏小;第三步是现场判读和定位。薄厚不足会导致主峰变高、回波时长变短;当背后有空腔或是注浆不到位时,界面会产生较强的反射,并且能量衰减的表现不同于参照点^[4]。所以可通过沿纵向布置连续测点,根据异常段位与分仓、注浆孔所在位置情况进行查定,异常呈带状可圈定疑似未充盈里程区间,沿着两端分别设置对照点做截面测点,能够为检验注浆或钻孔验证提供条件。尽量在行车间歇时开展工作,用橡胶作为拾振底座减震;测点用粉笔标记里程然后拍摄照片,主要记录主峰频率和回波时间;对于可疑点加密到0.5米间距,进行“正常、关注、复核”等级评定,方便班组内部交接以及后期处治跟进。

3.4 红外热成像用于浅表脱粘与渗漏通道的温差追踪

第一,利用红外热成像在检修封闭窗口内对疑似渗漏、

空鼓带做短时均匀加热或冷却,并在一定恒速下纵向扫拍,抓取异常区温差响应出现时刻、峰值和衰减速度。由于脱粘和空鼓因受力传导路径发生改变,会呈现出温差滞后的现象或局部冷斑、热点,对纵断面连续异常进行两侧横向复扫,并注明桩号位置、拱部区间,有助于形成用于验证钻孔以及封堵注浆的布孔草图。激励可使用热风机或者冷喷雾,防止出现局部烘烤产生的开裂^[5]。第二,工作前做好发射率和反射温度设置,以防出现灯具、车辆热源及金属反光造成的假热点,选择哑光或黑胶带为基准点参考,并且固定好拍摄距离,入射角度接近于垂直。同一路段尽量保证行驶速度和采样频率一致,在通风状态发生变化前后分别再采样一次做对照,影像处理可采用灰度提升、阈值分割等方法强化渗漏区域对比度,而后按照班组、复测人每日台账复标、留存备查。第三,多证据闭环应用,针对热像对浅层灵敏性更高的特点,以及较难穿透深层缺陷,需要结合渗水痕迹、白华分布、声学敲击结果,共同锁定“温差异常+水迹连续”区段,并优先安排封堵注浆或者排水疏导。与此同时,保存当日检测过程所记录的数据(包含风速、风向、风力、湿度、通风状况、布孔方式及原始热图等),方便复查、复测及养护移交。

3.5 电磁感应与电化学联合评估用于钢筋分布与锈蚀风险判别

电磁感应配合电化学测量在公路隧道衬砌结构病害检测的重要价值在于“找得到、说得清”。公路隧道衬砌由于渗水、挂灰多,且钢筋在混凝土内,以往只能靠目视开展检测。为此,我们先用电磁感应仪在校核已知保护层位置上,然后在掌子面根据里程和断面拉线做网格,同时在拱顶、拱腰及边墙分别找点,记录保护层偏薄、钢筋偏位的点位并落到桩号,供后续复测、放样^[6]。再用半电池电位测量固定“施工条件”,例如:钻孔前清除测区表面浮浆;渗水段适当浸润,不得积水;参比电极和导线要密贴,测点尽可能置于钢筋上方;出于洞内照明电缆和接地件考虑,建议在负载较小的时间段采集,禁止金属构件近距离平行布线,减少读数跳动;为保证数据对比准确度,每个测点必须连续采集2次以上,

如果读数差较大需要同步相机拍摄位置并在画面中标注测点编号;对于施工缝、变形缝、排水孔周围加密到20~30 cm点阵,确认连续异常带范围。解释结果不要只看单个值,例如,依托电位等值线图,对照保护层统计图、裂缝锈迹情况图、渗水部位图,如果呈现成片低电位且有明显界限变化,说明该段落发生锈蚀风险率大。最后,整理出有实质性意义的结果,直接作用于现场钢筋分布图、保护层厚度表、电位分区图及异常桩号表,用于班组交底与验收复核,方便把对应的剔凿修补范围、补浆点、封闭长度位置都标示清楚。

4 结语

综上所述,公路隧道衬砌病害具有隐蔽性,为此我们采用探地雷达、超声、冲击回波、红外热成像以及电磁感应—电化学等技术手段,结合现场条件进行试验,旨在提升病害精准度。即先分区、再复测、后钻孔(取芯)核实,将异常桩号、范围及处治落到实处。同时无损检测过程要把标定、布点、记录、复检作为一项重要的工作来完成,做到“发现—复核—处置—复检”的闭合循环,只有把最终检测结果对接到补浆、止水、补强等施工环节,才能从根本上提升公路隧道衬砌结构质量。

参考文献

- [1] 李艳阁.基于地质雷达无损探测技术的高速公路隧道衬砌检测[J].四川建材, 2025(6).
- [2] 田海阳.高铁隧道二次衬砌拱顶脱空处理技术及工程应用[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2024(003):000.
- [3] 包小华,袁槐岑,陈湘生,等.水下盾构隧道建造与运维技术研究现状与展望[J].现代隧道技术, 2024, 61(1):16-35.
- [4] 钟强.地下隧道工程中探地雷达在衬砌结构检测中的实践应用分析与性能评估[J].工程建设与发展, 2025(8).
- [5] 路宜驰.基于无损检测的隧道衬砌缺陷及整治方法研究[J].安徽建筑, 2025, 32(3):179-183.
- [6] 吴文丰.无损检测方法在单壳隧道衬砌中的实际应用[J].建筑机械, 2023(4):139-143.

Traffic Organization Technology and Safety Risk Prevention and Control of Highway Reconstruction Project

Changpan Li

Chongqing Yihé Enterprise Management Consulting Co., Ltd., Chongqing, 400020, China

Abstract

To address the challenges of traffic disorder and safety risks in highway reconstruction projects operating under the “construction while traffic continues” model, this study systematically establishes a research framework encompassing “technical systems, scenario applications, prevention mechanisms, and empirical validation” based on traffic flow optimization and risk pre-control theories. Through case studies like the Yongtaiwen Expressway expansion, it analyzes phased traffic management strategies and 23 high-risk procedure control measures across five categories, quantitatively demonstrating key technological effects: The dynamic traffic diversion system increased construction zone efficiency by 28%, while the tiered protection system reduced road-related accident rates by 67%. Addressing issues such as inadequate standards and insufficient dynamic risk management, the study proposes a three-dimensional optimization plan of “standard refinement, technological upgrades, and management innovation,” providing theoretical support and practical models for safe and efficient implementation of reconstruction projects in China’s transportation infrastructure development.

Keywords

highway reconstruction and expansion; traffic organization; safety risk prevention and control; simultaneous operation and construction; graded protection

公路改扩建工程交通组织技术与安全风险防控

李常攀

重庆宜合企业管理咨询有限公司，中国·重庆 400020

摘要

为破解公路改扩建工程“边通车边施工”模式下的交通秩序紊乱与安全风险叠加难题，本文基于交通流优化与风险预控理论，系统构建“技术体系-场景应用-防控机制-实证检验”的研究框架。结合甬台温高速改扩建等典型工程案例，解析分阶段交通组织技术路径与5大类23项高风险工序的防控措施，量化验证关键技术效果：动态交通导行系统使施工区通行效率提升28%，分级防护体系使涉路事故率下降67%。针对现行标准缺失、动态风险管控不足等问题，提出“标准完善-技术升级-管理创新”的三维优化方案，为交通强国建设中改扩建工程的安全高效实施提供理论支撑与实践范式。

关键词

公路改扩建；交通组织；安全风险防控；边通车边施工；分级防护

1 引言

中国公路基础设施已进入“建养并重、改扩建为主”的发展阶段。改扩建工程需在保障现有交通通行的前提下实施施工，形成“施工区与通行区交叉重叠、动态作业与固定车流交织”的复杂场景，安全风险显著高于新建工程。

本文采用“理论建构-技术解析-实证验证-优化展望”的研究逻辑，核心研究内容包括：构建分阶段交通组织技术体系，解析典型场景安全风险防控措施，量化验证关键技术效果，提出优化路径。

【作者简介】李常攀（1987-），男，中国重庆人，本科，副高级，从事建筑研究。

2 公路改扩建工程交通组织技术体系

2.1 技术体系总体架构

针对改扩建工程“施工进度动态变化、交通流量时空波动”的特征，构建“三层两维度”交通组织技术体系：“三层”即战略层（总体方案设计）、战术层（分阶段实施）、操作层（现场管控）；“两维度”即交通流导行维度与施工安全防护维度，二者通过动态反馈机制实现协同优化。

战略层聚焦总体方案设计，需结合路段功能定位、交通流量特征与施工工期制定规划，明确“保通优先、分幅实施、动态调整”的核心原则。战术层按施工进度划分为准备期、攻坚期、恢复期三个阶段，匹配差异化技术措施。操作层依托智能设备实现现场精准管控，包括交通引导、边界防护、动态预警等功能模块。

2.2 分阶段交通组织技术路径

2.2.1 准备期：基础管控技术

准备期核心任务是构建“物理隔离+信息引导”的基础管控体系。物理隔离采用“刚性防护+柔性缓冲”双重措施：主线施工区采用高度不低于1.8米的防撞护栏隔离，临时开口部设置可移动防护栏与警示标识，甬台温高速实践显示该措施使施工区侵入事故下降53%。

信息引导系统由“远端预警、中端提示、近端管控”三级组成：远端通过可变情报板发布施工预告与绕行建议，中端设置限速标志与车道变道提示，近端部署LED警示灯与语音播报设备。该系统使驾驶员对施工区的认知距离从300米提升至800米，决策时间增加1.2秒。

2.2.2 攻坚期：动态导行技术

攻坚期面临“多工序交叉作业、交通流剧烈波动”的挑战，需采用动态交通导行技术。核心措施包括：

分幅交替施工导行：针对双向四车道改扩建为六车道的场景，采用“先左幅施工再右幅施工”模式，通过临时中央分隔带调整实现车流单向通行。京沪高速应用该技术

后，施工期通行能力保持在原路段的75%以上。

动态车道管控：基于微波雷达实时监测交通流量，通过可变车道标志调整施工区车道数量。当流量超过3000pcu/h时，自动增加1条通行车道，使拥堵时长减少41%。

智能绕行诱导：结合GIS与实时交通数据，构建动态绕行路径推荐系统。甬台温高速试点显示，该系统使绕行车辆平均行程时间缩短23%，施工区流量削减18%。

2.2.3 恢复期：衔接优化技术

恢复期重点解决“施工区拆除与正常通行衔接”的过渡问题。关键技术包括：渐变段车道平顺过渡设计，采用1:20的渐变率设置车道标线，避免车辆急变道引发事故；临时设施拆除分阶段实施，先拆除内侧防护再拆除外侧设施，同步启用永久性交通标志，确保交通流平稳过渡。

3 安全风险防控核心机制与技术措施

3.1 风险识别与分级体系

基于甬台温高速等工程实践，构建“工序-场景-风险”三维风险识别模型，识别出5大类23项高风险因素(表1)：

表1 公路改扩建工程高风险因素分级表

风险类别	典型风险因素	风险等级	影响范围
路基工程	路基拼宽扰动既有路基、台背脱空	一级	路基稳定性、通行安全
桥涵工程	盖梁施工坠落、桩基施工坍塌	一级	施工人员、通行车辆
隧道工程	爆破损伤既有结构、掌子面失稳	一级	隧道结构、周边车流
涉路作业	临时开口部车辆违规进出、行人闯入	二级	施工区边界安全
设备作业	塔吊变臂侵入限界、高耸设备倾覆	一级	全域施工区安全

3.2 关键工序风险防控技术

3.2.1 路基与桥涵工程防控

针对路基拼宽风险，采用“分层碾压+实时监测”技术：每层碾压后通过压实度传感器检测密实度，确保与既有路基衔接处压实度 $\geq 96\%$ ，甬台温高速应用后未发生台背脱空问题。

盖梁施工采用“双重防护”体系：作业平台设置1.2米高防护栏杆，下方悬挂防坠网，同时在通行区上方设置防护棚，防护棚承载力不低于 5kN/m^2 ，有效防范坠落物伤人。

3.2.2 隧道改扩建防控

隧道爆破施工采用“微震控制+动态监测”技术：控制单段起爆药量 $\leq 50\text{kg}$ ，通过振动传感器实时监测爆破振动速度，确保既有结构振动速度不超过 2.5cm/s 。甬台温高速隧道改扩建应用该技术后，既有衬砌未出现裂缝损伤。

掌子面安全管控采用“地质雷达探测+AI预警”系统，提前10米探测不良地质，当检测到围岩变形速率超过 0.5mm/d 时，自动触发停工预警，避免坍塌事故。

3.2.3 涉路与设备作业防控

高耸设备作业实施“三重管控”：设备进场前进行选型改造，确保臂长不侵入通行限界；作业前核查“人员资质、设备状态、环境条件”三要素；作业中通过GPS定位与视

频监控实现全周期管控，使设备侵入限界事故下降100%。

临时开口部采用“智能管控+人工值守”模式：设置自动升降栏杆与车牌识别系统，仅允许施工车辆凭证进出，同时配备专职安全员值守，使违规进出车辆减少89%。

3.3 动态风险监测预警系统

构建“感知-分析-预警-处置”闭环监测预警系统，核心由三类技术组成：

全域感知技术：在施工区部署毫米波雷达、高清摄像头、振动传感器等设备，实现车流速度、设备位置、结构变形等数据的实时采集，感知覆盖率达98%。

智能分析模型：基于机器学习算法构建风险预测模型，对12类监测数据进行融合分析，风险识别准确率达92%。当检测到塔吊侵入限界等风险时，系统响应时间 ≤ 1 秒。

分级预警机制：设置“蓝色、黄色、红色”三级预警，蓝色预警启动现场巡查，黄色预警实施交通减速，红色预警关闭相关车道并组织疏散。该系统使风险处置效率提升40%。

4 实证效果量化分析

4.1 甬台温高速改扩建工程案例

选取甬台温高速台州北段(改扩建里程28公里)作为

研究对象，该项目采用双向四车道改六车道设计，日均流量 2.3 万辆，施工工期 18 个月，部署本文所述交通组织与风险防控技术后，关键指标显著改善（表 2）：

该项目通过应用《高速公路改扩建施工安全图册》中的分级防护措施，实现了“零重大安全事故”目标，成为全国改扩建工程的示范案例。

表 2 甬台温高速改扩建工程技术实施效果

指标类型	具体指标	实施前	实施后	改善率
通行效率	施工区平均车速（km/h）	42	58	38.1%
通行效率	高峰小时通行量（pcu）	1850	2370	28.1%
安全性能	涉路事故率（次/百万车公里）	9.6	3.2	66.7%
安全性能	高风险工序隐患发生率	28%	7%	75%
管理效率	隐患处置响应时间（min）	25	10	60%
管理效率	一线人员培训周期（天）	16	8	50%

4.2 关键技术效果专项分析

4.2.1 动态交通导行技术效果

对比不同交通组织模式的效果发现，动态导行技术在通行效率与安全性能上均优于静态模式：动态模式下施工区车速标准差为 8.2km/h，较静态模式降低 41%，说明车流更平稳；车辆变道次数减少 56%，刮擦事故下降 72%。

4.2.2 分级防护体系效果

对路基、隧道等关键工序的防护效果分析显示，分级防护体系使事故损失显著降低：一级风险工序的事故经济损失从平均 86 万元/起降至 12 万元/起，二级风险工序从 23 万元/起降至 4 万元/起，实现了风险的精准管控。

5 现存挑战与优化路径

5.1 核心挑战解析

5.1.1 标准体系不完善

现行规范未覆盖“边通车边施工”特有场景，存在三大缺口：一是交通组织方案设计缺乏量化标准，如施工区限速值确定无统一依据；二是风险分级标准不统一，不同项目对同一工序的风险定级差异达 40%；三是设备作业安全规范缺失，高耸设备与通行区的安全距离规定不明确。

5.1.2 动态管控能力不足

传统管控依赖人工巡查，存在响应滞后问题：施工区违规侵入事件平均发现时间为 8 分钟，错失最佳处置时机；混合交通流场景下，非机动车与行人闯入施工区的预警准确率仅 75%，误判率较高。

5.1.3 协同管理机制不畅

业主、施工、监理、交管等多方主体协同不足，存在“信息孤岛”：施工进度调整未及时同步至交管部门，导致交通导行方案与现场施工脱节；安全隐患信息共享率仅 38%，重复排查率达 27%。

5.2 优化路径探索

5.2.1 完善标准规范体系

由交通运输部牵头，参考《高速公路改扩建施工安全图册》经验，制定《公路改扩建工程交通组织与安全管控标准》：明确施工区车道布设、限速值等 12 项量化指标；统

一 5 大类 23 项工序的风险分级标准；规定高耸设备、临时开口部等关键环节的安全参数，形成“设计-施工-管控”全流程标准体系。

5.2.2 升级智能管控技术

融合感知技术：开发“雷达+视觉+物联网”多源感知系统，通过时空校准算法消除数据误差，使混合交通流识别准确率提升至 95% 以上。

数字孪生应用：构建施工区数字孪生体，实现“物理场景-虚拟模型”实时映射，通过仿真预演优化交通导行方案，使施工区通行效率再提升 15%。

智能联动处置：建立“预警信息-交通管控-现场处置”联动机制，当检测到风险时，自动触发可变情报板预警、车道限速、设备停机等联动措施，响应时间压缩至 3 秒以内。

5.2.3 创新协同管理模式

构建“多方协同”管理平台，整合业主、施工、交管等多方数据，实现施工进度、交通流量、隐患信息的实时共享，信息共享率提升至 90% 以上。建立“周例会+月督查”协同机制，及时解决跨主体协调问题；推行“第三方安全评估”制度，对高风险工序实施独立监督，确保防控措施落地见效。

6 结论与展望

6.1 研究结论

构建的“三层两维度”交通组织技术体系，通过分阶段精准施策，实现了改扩建工程“安全与效率”的平衡，动态导行技术使施工区通行效率提升 28% 以上。

针对 5 大类 23 项高风险工序的分级防护体系与动态监测预警系统，有效破解了“边通车边施工”的安全难题，使涉路事故率下降 67%。

现行改扩建工程仍面临标准缺失、动态管控不足、协同不畅等挑战，需通过标准完善、技术升级、管理创新的协同发力实现系统性解决。

6.2 未来展望

公路改扩建工程的安全高效实施是交通强国建设的重要支撑，未来需持续深化技术创新与管理变革，推动改扩建

工程从“经验管控”向“智能精准管控”转型，为公众提供更安全、高效的交通服务。

参考文献

- [1] 浙江省交通运输厅.高速公路改扩建施工安全图册（2025 版）[Z]. 2025.
- [2] 王建军,李向阳.甬台温高速改扩建工程交通组织与安全管控实践 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (8): 112-118.
- [3] 张勇,等.高速公路改扩建施工区风险分级与防控技术研究 [J]. 中国公路学报, 2025, 38 (7): 98-107.

Application of Supporting Seepage Ditch in Landslide Control of Highway Slope Embankment

Xiaobing Zhao

Sichuan Highway Engineering Consulting and Supervision Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

Based on the environmental and geological conditions of the landslide at the high-fill section of the Chengdu Ring Expressway (K251+160 to +280), and after analyzing the causes of landslide instability, a comparative study was conducted between the support seepage ditch and anti-slide pile solutions. The results demonstrated that the support seepage ditch offers superior drainage and protective effects while being significantly more economical. Long-term post-treatment observations confirmed no new deformation or displacement of the landslide, validating the rationality and feasibility of the treatment measures. Therefore, the support seepage ditch proves to be a more effective solution for managing landslides on soft-to-plastic slope embankments.

Keywords

slope embankment landslide; support seepage ditch; landslide control

支撑渗沟在公路斜坡路堤滑坡治理中的应用

赵小兵

四川公路工程咨询监理有限公司, 中国·四川成都 610000

摘要

在成都环线高速公路K251+160~+280路基高填方段滑坡环境地质条件基础上、分析了滑坡失稳原因的基础上,通过支撑渗沟与抗滑桩方案比较,支撑渗沟具有良好排水和防护效果,同时经济性显著,根据处治后多年观测,未发现滑坡有新的变形和位移,该滑坡的处治措施和方法是合理和可行的。因此支撑渗沟对于软塑~可塑状斜坡路堤滑坡处治具有比较优势。

关键词

斜坡路堤滑坡; 支撑渗沟; 滑坡治理

1 引言

我国西南地区山区地形复杂,地质条件脆弱,滑坡等地质灾害频发,据统计,我国山区滑坡事故占全国公路滑坡事故的80%以上,给国家和人民生命财产带来巨大的损失。为了确保山区公路的安全与畅通,工程技术人员一直在探寻有效的滑坡治理方法,支撑渗沟作为一种传统的治理手段,因其工作简便、效果显著而在实际工程中广泛应用。

2 支撑渗沟的原理

支撑渗沟是一种兼具排水与支挡功能的复合型工程结构,在公路路堤滑坡治理中具有重要应用价值。它通过疏排坡体地下水降低土体含水率,并利用自身重量与基底抗力提供抗滑力,尤其适用于地下水丰富或软弱地层类型的滑坡治理。

支撑渗沟的核心作用机理是“排水固土”与“物理支撑”。

【作者简介】赵小兵(1968-),男,中国四川南充人,高级工程师,从事公路工程研究。

其通过有效拦截和排出滑体内的地下水,降低土体孔隙水压力,从而提高滑带土及滑体的抗剪强度,增强坡体自身稳定性。同时,其结构本身也提供直接的抗滑力。

支撑渗沟成都环线高速公路K251+160~+280路基高填方段右幅滑坡治理中的应用。

3 环境工程地质条件

(1)工程概况:滑坡段地属仁寿县大化镇青岗村。该段滑坡所处位置地形主要为低山丘陵地带,线路跨缓坡果园,沿线表部覆盖残坡积含砾粉质粘土,土体呈软~可塑状。滑坡处原设计为高填方路基,最大填方高度约22m,填方前对原始斜坡进行了少量清表。路堤分三级边坡,从上至下坡率分别为1:1.5、1:1.75、1:2.00。

2015年3月该段路基填筑完成,于2015年9月6日发生大面积塌方,人工填土呈阶梯状多级开裂滑移,滑体俯冲将前缘便道拱起约2m,原果林地内多处出现裂缝,对附近居民及水渠构成严重威胁。为了防止路堤边坡进一步的滑移破坏,施工单位组织临时处置措施,将滑坡体大面积清方,

目前滑坡未见明显进一步滑动。

本工点位于四川盆地西部,属于四川盆地中南部低缓宽谷浅丘,属典型的丘陵地貌。平面整体呈舌形伸向沟渠,后缘呈弧形展布,呈“圈椅状”地貌(照2-1)。滑坡整体走向为 12° ,与公路走向基本垂直。滑坡位于丘陵缓坡之上,斜坡整体坡度约 8° ,整体呈两级台阶状地貌,第一台阶主要位于原公路裂缝带以下,平均高程约491m,地形较缓。第二台阶位于原果林一带,平均高程约478m。

3.1 地层岩性:滑坡区出露及钻孔揭露的地层岩性如下:

人工填土层(Q_4^{me}):褐灰色,较干燥,较松散,中~粗粒结构,组成物质以粉土为主,含碎石35~50%,粒径一般2~10cm,次棱角状,含角砾石5~10%,粒径一般2~6cm,次棱角状,石质成分主要为砂岩,岩芯碎粒状。

残坡积(Q_4^{cl+dl}):(含砾)粉质粘土:棕褐色、灰褐色,呈可塑状,粘性中等,可成2~3mm圆土条,偶含泥岩角砾。韧性中等,风干强度中等。零星分布于丘脊斜坡上部。

蓬莱镇组(J_{3p}):泥岩:棕红色,矿物成分以粘土矿物为主,钙泥质胶结,粉粒泥质结构,薄~中厚层状构造。岩体破碎~较破碎,手捏易碎。具饱、脱水开裂特征。

3.2 地质构造及地震

测区处于新华夏系四川沉降盆地西部,滑坡范围内无大型断裂构造通过,岩层产状: $308^{\circ} \angle 6^{\circ}$,主要发育一组陡倾角裂隙,裂隙产状为 $145^{\circ} \angle 70^{\circ}$,裂隙延伸长度一般3~8m。根据GB 18306—2001《中国地震动参数区划图》,场地地震动峰值加速度为0.1g,地震动反应谱特征周期为0.45s,对应地震基本烈度为Ⅶ度。

3.3 水文及水文地质

场地内无大的地表水体,地表水主要为塘水。

松散层孔隙水赋存于第四系覆盖层中,主要接受大气降水、溪沟水以及农田灌溉用水的补给,地下水贫乏。场区环境水对混凝土结构及其中钢筋具微腐蚀性。

4 滑坡的特征

4.1 空间形态特征

滑坡位于成都经济区环线高速简阳至蒲江段建设项目K251+160~280路基高填方段右幅,滑坡顺公路长约100m,横向宽约70m,清方前滑坡平均厚度约5m,总方量约为2.5万方,平面整体呈舌形伸向沟渠,后缘呈弧形展布,呈“圈椅状”地貌(照3-1)。

滑坡主要为填方引起,滑坡属于典型中型土质工程滑坡,滑坡后缘边界位于原公路路基一带,目前路基边缘仍有变形拉裂缝;右侧边界位于K251+160一带,该处靠小桩号方向路基填方处可能由于软弱粉质粘土厚度较薄,因此未见明显变形迹象;左侧边界位于K251+280一带,该处位于陡缓交界处,靠大桩号侧主要为山包,覆盖层较浅,滑坡处原

始地形呈“马鞍”状,中间底,两侧高,汇水较为丰富,滑坡的主滑方向主要沿原始的沟延伸方向,且该段粉质粘土厚度较厚,集水较多。前缘边界位于果林一带,滑坡发生后果林内原始地形被滑坡俯冲隆起2m高,果林内多处可见裂缝。

4.2 岩土体结构特征

滑坡体主要由人工填土构成,其物质成分主要为碎石土,碎石土粒径一般2~10cm,含量40%~55%,漂石粒径一般20~30cm,最大约50cm,含量约5%~10%,砾石粒径一般0.5~2cm,含量约15%,次棱角状,母岩成分主要以砂岩为主,中风化,局部含粉砂质泥岩,填土较均匀,局部可见少量泥。滑坡中部主要为原始的(含砾)粉质粘土,红棕色,稍湿,可塑状,手搓可成条状,岩芯呈土柱状。表部可见少量砾石,棱角状,岩性主要为泥岩或粉砂质泥岩,粒径一般0.3~1.5cm,底部粉质粘土较纯,具有一定的胶结,含水量较高,局部呈软塑状,力学性质较差。滑坡底部为侏罗系上统蓬莱镇组(J_{3p})泥岩,棕红色,矿物成分以粘土矿物为主,钙泥质胶结,粉粒泥质结构,薄~中厚层状构造。岩体破碎~较破碎,手捏易碎。具饱、脱水开裂特征。地表多出露在斜坡缓坡带及陡坡砂岩露头下部。强风化厚度一般3~6m,岩体破碎,工程性质差,中风化层岩体完整性较好。

4.3 变形特征

受特殊岩体结构的控制,加之人工扰动及降雨等因素,滑坡变形特征主要表现为人工填土的大面积垮塌,后缘拉裂缝及前缘鼓胀变形裂缝。滑坡裂缝特征如下:后缘拉裂缝呈锯齿状,弧形延伸,总体走向 187° ,延伸长度约10m,裂缝宽度一般0.5~3.6cm,最大5cm,垂直错距一般0.4~1cm,局部2cm,沿公路走向发育,上宽下窄,中部大两头逐渐尖灭;果林裂缝呈锯齿状,弧形延伸,总体走向 316° ,延伸长度约20m,裂缝宽度一般3~6cm,最大20cm,垂直错距一般2~5cm,局部15cm,间断延伸,上宽下窄,两侧羽状裂纹发育;机耕道裂缝呈锯齿状,近直线延伸,总体走向 350° ,延伸长度约8m,裂缝宽度一般1~2cm,最大4cm,垂直错距一般1~2cm,最大3cm,上部宽,下部窄,向下逐渐尖灭,宽度较均匀。根据访问调查,2015年3月该段路基填筑完成,于2015年9月6日发生大面积塌方,人工填土呈阶梯状多级开裂滑移,滑体俯冲将前缘便道拱起约2m,道路受损严重。原果林地内多处出现裂缝,对附近居民及水渠构成严重威胁。随后施工单位组织临时处置措施,将滑坡进行大面积清方卸载,并修筑截水沟及排水沟对坡体进行排水,目前滑坡未见明显进一步滑动。

5 滑坡成因机制

根据钻探揭露,滑坡内未见明显基岩出露,属于土质边坡,上部结构主要为厚3~20m的人工填土(Q_4^{me}),人工填土物质成分主要为碎石土。中部含一层3~8m厚残坡积(含砾)粉质粘土,底部为侏罗系上统蓬莱镇组(J_{3p})

泥岩。



照 3-1 清方前填方土大面积垮塌（镜向下）

受上述结构控制，斜坡在自然状况下处于稳定状态。据访问，斜坡原始地形为两侧高，中间低的“马鞍”形状地形，坡体利于汇水。填土时未对较厚的（含砾）粉质粘土进行根本性处理。填土于 2015 年 3 月完成，根据气象资料，仁寿县 4 ~ 8 月正值雨季，人工填土透水性较好，大量雨水渗入坡体，中部一层（含砾）粉质粘土起相对隔水作用，该层上部土体处于相对饱水状态，土体抗剪强度降低。填方土坡脚未采取任何支挡措施，积水半年后，处于饱和状态的土体沿（含砾）粉质粘土开始蠕滑，前缘土体开始滑动，后部较重的人工填土向前挤压。填土第一级开始滑动，随之第二级开始变形滑动，便形成了多级牵引滑动模式。

5.1 滑坡参数的计算

结合《青岗村滑坡工程地质勘察报告》及滑体反算后综合分析，该地基土的 C 、 ϕ 取值分别为：

天然工况：碎石土：容重 $\gamma = 19\text{KN/m}^3$ ，粘聚力 $C = 17\text{Kp}$ ，内摩擦角 $\phi = 25^\circ$ ；（含砾）粉质粘土：容重 $\gamma = 18\text{KN/m}^3$ ，粘聚力 $C = 18\text{Kp}$ ，内摩擦角 $\phi = 13^\circ$ 。

暴雨工况：碎石土：容重 $\gamma = 21\text{KN/m}^3$ ，粘聚力 $C = 15\text{Kp}$ ，内摩擦角 $\phi = 22^\circ$ ；（含砾）粉质粘土：容重 $\gamma = 20\text{KN/m}^3$ ，粘聚力 $C = 16\text{Kp}$ ，内摩擦角 $\phi = 11^\circ$ 。

5.2 处治方案

根据地勘报告以及设计对滑坡的试算，提出了 2 个处治方案。方案 1：设抗滑桩支挡 + 挖方回填压实；方案 2：支撑渗沟 + 挖方回填压实。

（1）抗滑桩方案

在滑坡体前缘坡脚设 27 根埋入式抗滑桩，桩长 20m，截面尺寸 $2 \times 3\text{m}$ ，嵌固段为粉砂质泥岩。桩间距 6m，桩间设挡板。

（2）支撑渗沟方案

顺填方坡脚向坡体内设支撑渗沟，支撑渗沟宽 3m，

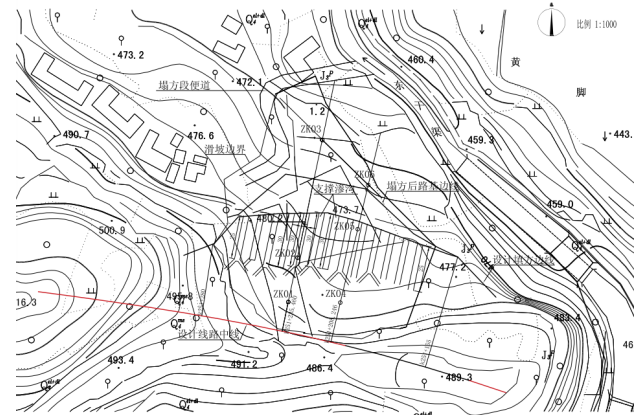
间距 6m，支撑渗沟位于原状土内，基座埋入基岩。

（3）方案比选

抗滑桩方案的优点在于施工相对简单，工程实践中常用，缺点为支挡结构工程量较大，造价较高。

支撑渗沟方案的优点在于施工简单，造价较低；缺点为需设地下渗沟排水。

经过综合比选，设计推荐采用支撑渗沟方案。



高路堤滑坡支撑渗沟处治平面布置图

5.3 滑坡治理成效

成都环线高速公路简蒲段 K251+160 ~ +280 路基高填方段右幅滑坡采用支撑渗沟 + 挖方回填压实处治，效果良好，经历 10 多年的运营，高路堤未出现开裂、滑移现象。

6 结论

支撑渗沟对于软塑 ~ 可塑状斜坡地基土处治，其造价较低，效果好，可以作为其它类型工程处治借鉴方案。

路堤地基从安全、稳定、工程造价综合分析比较，选取最经济的安全可靠的处治方案。

参考文献

- [1] 周倩,杨世刚,廖永润.支撑渗沟在山区公路滑坡治理中的应用研究[J].公路与汽运,2024,40(06):76-80.DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.014.
- [2] 霍志刚.论支撑渗沟在斜坡路堤滑坡处治中施工阶段的应用[J].科技创新与应用,2014,(15):174.DOI:10.19981/j.cn23-1581/g3.2014.15.158.
- [3] 黄宁.浅谈支撑渗沟在滑坡治理中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2016,6(8):2176-2176. DOI:10.3969/j.issn.2095-2104.2016.08.515.
- [4] 冯靖.支撑渗沟在滑坡处治中的应用[J].西南公路,2009,(2):5-7.

Analysis of Key Issues in Cost Management Throughout the Whole Process of Highway Engineering

Xiaoyan Chen

Xinjiang Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

The whole process cost management of highway engineering runs through the entire life cycle of project decision-making, design, bidding, construction, and completion settlement, and is an important path to maximize investment benefits and ensure engineering quality. Based on rich practical experience in highway engineering construction and cost control, combined with project cases such as highways, national and provincial main roads, and rural roads, the author analyzes the deep-seated problems of cost management in each stage: insufficient data volume and lagging estimation methods in the decision-making stage, insufficient application of BIM technology and formalized limit design in the design stage, loopholes in electronic transaction supervision and imperfect credit system in the bidding stage, lack of intelligent control and imbalance of green construction costs in the construction stage, lagging digital review and dispute mediation mechanism in the completion settlement stage. In response to the above issues, optimization measures are proposed from four dimensions: technological innovation, institutional improvement, process reengineering, and regulatory strengthening, to construct a full process cost management mechanism of “data support collaborative control intelligent empowerment credit constraints”, providing partial reference for the rapid development of the highway industry in the new era.

Keywords

highway engineering; whole process cost management; investment control

公路工程全过程造价管理关键问题分析

陈晓燕

新疆路桥建设集团有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

公路工程全过程造价管理贯穿项目决策、设计、招投标、施工及竣工结算全生命周期,是实现投资效益最大化与工程质量保障的重要路径。笔者基于公路工程施工与造价管控丰富实践经验,结合高速公路、国省干道、农村公路等项目案例,剖析各阶段造价管理的深层次问题:决策阶段数据量不足与估算方法滞后、设计阶段BIM技术应用不足与限额设计形式化、招投标阶段电子交易监管漏洞与信用体系不完善、施工阶段智慧管控缺失与绿色施工成本失衡、竣工结算阶段数字化审核滞后与争议调解机制不健全。针对上述问题,从技术创新、制度完善、流程再造、监管强化四个维度提出优化对策,构建“数据支撑-协同管控-智能赋能-信用约束”的全过程造价管理机制,为新时代公路行业高速发展提供部分参考。

关键词

公路工程;全过程造价管理;投资控制

1 引言

公路基础设施建设是支撑国民经济发展的“大动脉”,近年来我国公路建设规模持续扩大,2024年年末全国公路里程549.04万公里,比2023年末增加5.35万公里,总投资2.5774万亿元^[1]。据媒体报道,2025年预计完成交通固定资产投资超3.6万亿元,其中高速公路约0.8000万公里。因公路工程具有投资规模大、建设周期长(通常2-5年)、技术复杂度高、地质环境多变等特点,造价管控面临多重挑战。

【作者简介】陈晓燕(1979-),女,中国山东潍坊人,本科,副高,从事公路工程成本管控、工程造价、全过程造价、精细化管理等研究。

2 公路工程全过程造价管理关键问题深度剖析

2.1 决策阶段:基础数据不足,估算科学性与决策机制双缺失

结合实践,存在问题如下:

基础数据不足,造价控制滞后:缺乏区域化、标准化的造价数据库,投资估算所用的造价数据与市场价格数据割裂。例如,某公路项目因黄河滩区特殊地质造价数据不足,投资估算未充分考虑软土地基处理增量成本,导致后期造价超支23%^[2]。

估算方法与技术脱节:80%以上的中小型项目仍采用“类比估算法”,未引入工程量清单估算、参数估算与当下流行的AI预测结合的方式方法,对主材价格波动(如钢材、沥青价格波动幅度达15%-20%)与政策调整(如环保税、人

工费上调)的预判不足^[3]。

决策机制功利化倾向:部分地方政府为追求“政绩工程”,压缩可行性研究周期(最短仅15天),第三方咨询机构“走过场”评估,投资估算沦为“审批工具”。某县级农村公路项目因未开展交通量预测与效益分析,盲目提升建设等级标准,投资增加约3800万元。

2.2 设计阶段:技术与经济脱节,限额设计与BIM技术应用双重不足

设计阶段决定项目75%-85%的造价,是造价控制的“关键环节”,但实践中存在如下比较突出的问题:

限额设计形式化:虽行业强制推行限额设计,仅60%左右的项目将造价指标分解至专业设计环节,设计人员“重技术安全、轻经济优化”,存在冗余设计。例如,某高速公路隧道设计采用C40混凝土衬砌,经优化调整为C35混凝土+注浆加固方案,每公里造价降低128万元。

BIM技术应用少量化:中国公路学会2023年调研显示,投资额10亿元以上项目中,30%在设计阶段应用BIM技术;但施工阶段应用率不足15%,未实现“设计-造价-施工”协同。如某快速路项目因未采用BIM碰撞检测,桥梁与管线冲突导致设计变更4次,累计增加造价约1600万元。

设计与施工协同不足:设计人员施工现场经验缺失,套用标准图出图,对施工工艺经济性考虑不足。如某跨长江大桥项目设计采用现浇箱梁方案,未结合预制拼装技术,且未考虑长江汛期施工窗口期,导致施工成本额外增加约21%。

2.3 招投标阶段:规则漏洞与市场乱象并存,信用约束不足

招投标阶段是确定合同造价的“核心节点”,但当前仍存在诸多不规范现象:

招标文件编制较粗糙:工程量清单漏项、特征描述模糊问题占比达45%。某高速公路项目招标文件未明确路面基层集料级配标准,中标后施工单位以“优质集料”为由提出索赔,争议金额达860万元左右。

低价中标与围标串标乱象:28%的项目存在恶意低价中标,中标单位通过“变更增项、偷工减料”弥补利润。某二级公路项目中标单位以低于控制价28%中标,施工中擅自降低油石比,导致尚未通车沥青路面产生破损等现象,返工成本超原合同价的30%^[4]。

电子招投标监管滞后:线上交易存在“暗箱操作”空间,如投标文件雷同率达18%,部分平台未使用大数据工具进行围标比对;评标办法重价格轻履约能力,技术标权重仅占20%-30%,难以体现“优质优价”。

合同条款风险失衡:35%的施工合同未明确风险分担边界,对材料价格调整阈值(如钢材波动5%或8%调整)、工程变更计价规则、不可抗力界定等约定模糊。某项目因未约定沥青价格调整公式,施工期间沥青价格上涨22%,双方争议持续8个月未解决。

2.4 施工阶段:动态管控薄弱,智慧化与绿色施工造价失衡

施工阶段是造价动态控制的“执行环节”,也是超支高发期,核心问题包括:

工程变更管理失控:业主方前期规划不足导致变更占比达60%,施工单位利用设计漏洞提出不合理变更占比达30%;变更审批流程冗长(平均审批周期25天),签证滞后率达75%。某高速公路项目施工阶段累计变更56项,其中23项为不必要变更,增加造价约3200万元,占合同价18.7%左右。

材料成本管控失效:材料费用占造价55%-65%,但仅40%的项目建立动态监测机制。某项目因未锁定钢材采购价格,施工期间钢材价格上涨19%,直接导致材料成本超支1200万元。某项目因未及时监控混凝土浇筑量,超浇浪费达1200m³,损失超400万元。

智慧工地应用不足:仅25%的项目引入智慧工地系统,人工统计数据滞后,成本偏差发现滞后周期达15-30天。

绿色施工造价失衡:环保措施成本超支占比达35%,如某项目为满足扬尘治理要求,额外投入雾炮机、喷淋系统等设备,月增加成本28万元,但未建立绿色施工造价分摊机制^[5]。

2.5 竣工结算阶段:数字化不足,争议调解与审核机制双缺失

竣工结算阶段是造价管理的“收尾环节”,核心问题如下:

结算资料完整性不足:施工单位提交的资料缺漏率达40%,如缺少隐蔽工程验收记录(占比18%)、变更签证附件不全(占比22%),导致结算审核周期平均达120天,远超行业标准60天[13]。

数字化审核水平低:仅30%的业主单位采用BIM结算审核系统,多数仍依赖人工核算,误差率达3%-5%。某特大桥项目因人工核对钢筋工程量,遗漏计价达680万元。

争议调解效率低下:计量计价争议占比达65%(如变更计价方法分歧、规费计取争议),缺乏专业化调解机制,40%的争议通过诉讼解决,平均处理周期达18个月。

审计监督不到位:部分项目存在结算造假(如虚报工程量、重复计价),且审计标准不统一,导致造价核减率波动较大(5%-15%)。

3 公路工程全过程造价管理优化对策

3.1 决策阶段:构建数据驱动的科学决策体系

建立区域化造价数据库:由省级交通行业部门牵头,结合数字化工具,整合地形地质、材料价格、施工工艺等数据,构建诸如山区、荒漠区等动态更新的区域造价数据库,为估算提供精准支撑。

创新估算技术方法:推广“工程量清单估算+BIM参数估算+AI价格预测”融合模式,引入LSTM神经网络模

型预测主材价格波动,预备费按“基础预备费3%+涨价预备费5%”计提,提升估算精度。

完善决策监管机制:强制要求可行性研究周期不少于30天,第三方咨询机构实行“终身追责制”,建立“造价-效益-风险”三维决策模型,将投资回报率、交通量预测准确率纳入决策考核。

构建全要素风险评估体系:识别地质、市场、政策等各类风险因素,采用层次分析法(AHP)量化风险权重,制定风险应对预案(如与供应商签订价格锁定协议)。

3.2 设计阶段:推行BIM+限额设计的协同优化模式

强化限额设计刚性约束:将造价指标分解至路基、路面、桥梁、隧道等分项工程,建立“设计-造价”联动审核机制,设计概算超估算10%以上需重新论证;引入价值工程理念,在满足功能要求的前提下优化设计方案(如山区公路优先采用隧道替代高边坡)。

深化BIM技术全流程应用:构建“BIM设计-造价核算-施工模拟”协同平台,利用BIM碰撞检测减少设计冲突,通过5D BIM(3D+时间+成本)动态控制造价,大型项目BIM应用覆盖率需达100%。

建立设计与施工协同机制:推行“施工单位参与设计评审”制度,对可施工性、经济性进行专项论证;推广标准化设计图集,减少个性化设计导致的变更风险。

构建绿色设计造价模型:建立再生建材、生态防护、装配式等绿色技术的造价测算标准,将绿色成本纳入限额设计指标,通过技术优化(如再生沥青路面比传统路面降低成本8%-10%)实现绿色与经济平衡。

3.3 招投标阶段:完善规则体系与信用监管机制

规范招标文件编制:由专业造价工程师牵头编制工程量清单,采用“清单+图纸+技术规范”三位一体描述模式,明确项目特征与计价依据;评标办法采用“综合评估法”,技术标权重提升至40%-50%,突出施工组织、履约能力、绿色施工方案等指标。

遏制低价中标乱象:建立“控制价预警机制”,中标价低于控制价10%需增加履约保证金(提高至合同价20%);推行“信用评价+履约考核”联动机制,对恶意低价中标、履约不力的企业纳入黑名单,限制参与招投标。

优化电子招投标监管:建设省级统一电子招投标平台,引入大灵气反围标比对(检测投标文件雷同率、IP地址关联等),实现交易全程留痕;建立招标文件备案审核制度,重点核查清单完整性与条款合理性。

规范合同条款约定:参照《公路工程标准施工招标文件(2023版)》,明确风险分担边界(如主材价格波动 $\pm 5\%$ 以内由施工单位承担,超出部分按实调整)、变更计价规则(采用“就近原则+市场价”)、争议解决时限(60天内)。

3.4 施工阶段:构建智慧化动态管控体系

规范工程变更管理:建立“申请-审核-批准-实施-核算”闭环流程,单项变更造价超50万元需业主、监理、咨询三方联合审核;变更签证实行“实时办理+影像留存”,

要求24小时内完成初步确认,7天内办结手续。

强化材料成本管控:对接建材网等数据,建立主材价格动态监测平台,与核心供应商签订长期合作协议,关键主材(钢材、水泥、沥青)采用“甲供+锁定价”模式;推广智慧工地材料管理系统,实时监控材料消耗,钢筋损耗率控制在2%以内。

推广智慧化施工管控:全面引入智慧工地系统,集成北斗定位、视频监控、传感器等设备,实时采集工程量、材料消耗、机械台班等数据,利用BIM 5D模型动态对比实际成本与计划成本,偏差超3%自动预警。

建立绿色施工造价分摊机制:将环保措施成本按“业主承担60%+施工单位承担40%”分摊,推广节能设备租赁、再生材料回收利用等降本措施;将绿色施工成本控制情况纳入履约考核。

3.5 竣工结算阶段:打造数字化审核与高效争议解决体系

规范结算资料管理:施工单位需在竣工后45日内提交完整结算资料(含BIM竣工模型、电子清单、签证附件),业主方建立“一站式”资料审核平台,缺漏资料一次性告知,审核周期压缩至90天内。

推广数字化审核技术:全面采用BIM结算审核系统,实现工程量自动核对、变更签证关联核算,误差率控制在1%以内;建立省级结算审核标准库,统一计量计价规则。

建立多元化争议解决机制:成立由业主、监理、施工、咨询、仲裁机构组成的争议调解中心,推行“协商-调解-仲裁”三级解决模式,调解时限控制在30天内;对复杂争议引入造价鉴定专家机制。

强化审计监督力度:实现结算审计全覆盖,采用“AI审计+人工复核”模式,重点核查工程量真实性、变更签证合规性;建立审计结果公示制度,对造假单位纳入信用黑名单。

4 结语

公路工程全过程造价管理是一项系统性、动态性、技术性的复杂工作,其核心在于打破“各阶段割裂管控”的壁垒,构建“数据支撑-协同管控-智能赋能-信用约束”的全要求管理体系。本文结合实践经验,指出决策阶段数据不足与决策功利化、设计阶段技术经济脱节与BIM应用不足、招投标阶段规则漏洞与信用缺失、施工阶段智慧管控薄弱与变更失控、竣工结算阶段数字化滞后与争议低效是当前核心问题。

参考文献

- [1] 交通运输部.2024年交通运输行业发展统计公报[R].2025.
- [2] 中国公路学会.公路工程造价管理发展报告(2023)[R].2024.
- [3] 住房和城乡建设部.建设工程造价管理规范(GB/T 51262-2017)[S].2017.
- [4] 王军.山区公路项目造价超支成因及控制措施[J].中国公路学报,2023,36(4):298-306.
- [5] 李娟.基于AI的公路工程投资估算精准预测模型研究[J].公路交通科技,2022,39(11):167-173.

Performance Evaluation of Recycled Plastic Modified Asphalt Mixtures and Compatibility Analysis of Warm Mixing Technology in Africa

Jun Yang

Overseas Engineering Branch of China Railway Fifth Bureau Group Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550001, China

Abstract

Against the backdrop of continuous road infrastructure expansion and resource constraints in Africa, recycled plastic modified asphalt mixtures have emerged as a critical approach to enhancing road performance and achieving solid waste resource utilization. Considering local high-temperature climate conditions, complex material sources, and disparities in construction technology levels, this study systematically analyzes the impact of recycled plastic incorporation on mechanical properties and durability of asphalt mixtures. By integrating the technical characteristics of warm mixing technology, we conduct in-depth compatibility assessments. Experimental analyses of different plastic materials, dosage variations, and mixing temperature ranges demonstrate that rational application of recycled plastics significantly improves high-temperature stability and rut resistance of mixtures while maintaining optimal construction performance and compaction effects under warm mixing conditions. Based on African construction environments and technical constraints, we propose optimized process parameters and quality control strategies to provide theoretical foundations and engineering references for promoting recycled plastic asphalt technology.

Keywords

recycled plastics; modified asphalt; warm-mix technology; road performance; african region

非洲地区再生塑料改性沥青混合料性能评价及温拌工艺适配性分析

杨俊

中铁五局集团有限公司海外工程分公司，中国·贵州 贵阳 550001

摘要

在非洲地区道路基础设施持续扩展与资源约束并存的背景下，再生塑料改性沥青混合料逐渐成为提升路用性能与实现固废资源化利用的重要路径。针对当地高温气候条件、材料来源复杂及施工技术水平差异等特点，围绕再生塑料掺入对沥青混合料力学性能与耐久性能的影响展开系统分析，并结合温拌技术的工艺特征，对其适配性进行深入探讨。通过对不同类型塑料材料、掺量变化及拌和温度区间的试验分析，结果表明，再生塑料的合理应用能够显著改善混合料的高温稳定性与抗车辙能力，同时在温拌条件下保持良好的施工性能与压实效果。进一步结合非洲地区施工环境与技术条件，提出适宜的工艺参数与质量控制要点，为推广再生塑料沥青技术提供理论依据与工程参考。

关键词

再生塑料；改性沥青；温拌技术；路用性能；非洲地区

1 引言

非洲地区交通基础设施建设需求持续增长，道路工程面临高温环境、材料供应不稳定以及建设成本控制等多重挑战。传统沥青混合料在高温荷载作用下易产生车辙变形，影响道路使用寿命。同时，大量塑料废弃物处理压力不断加剧，资源循环利用成为重要议题。在此背景下，将再生塑料引入

沥青体系，形成改性沥青混合料，不仅能够提升路用性能，还可实现废弃资源的有效转化。温拌沥青技术因其降低拌和温度、减少能耗及改善施工环境等优势，与再生塑料改性技术存在良好的结合潜力。围绕材料性能与工艺适配展开系统研究，对于提升工程应用价值具有现实意义。

2 非洲地区再生塑料改性沥青材料体系特征分析

2.1 再生塑料类型与物理化学特性

非洲地区再生塑料来源复杂，常见类型包括聚乙烯、

【作者简介】杨俊（1986-），男，中国湖南沅江人，本科，高级工程师，从事公路、桥梁研究。

聚丙烯及聚苯乙烯等,不同材料在分子结构与热性能方面存在显著差异,对沥青改性效果产生直接影响^[1]。低密度聚乙烯具有较好的延展性,在沥青体系中易形成连续分散结构,有助于提升材料的韧性与抗裂能力;高密度聚乙烯则表现出较高刚度,能够增强混合料的抗变形性能。聚丙烯熔点较高,对温度条件较为敏感,在拌和过程中需要精确控制加热参数,以保证其充分分散并发挥改性作用。再生塑料在回收与再加工过程中,往往存在老化、杂质混入等问题,对材料稳定性产生不利影响,因此需通过预处理与分级筛选提高其均匀性与可控性。通过对不同塑料类型及其性能的系统分析,可为改性沥青配比设计提供可靠依据。

2.2 改性沥青体系结构演化特征

再生塑料掺入后,沥青体系由原有的均一结构逐步演变为多相复合结构,内部微观形态发生显著变化。在高温拌和条件下,塑料颗粒发生软化甚至部分熔融,与沥青组分形成相互交织的结构网络,使体系的整体黏度与软化点随之提高。随着塑料掺量增加,网状结构逐渐增强,对外部荷载的抵抗能力得到提升,从而改善材料的高温性能。与此同时,结构刚性的增强也可能对低温延展性产生一定影响,使材料在低温条件下更易出现脆性响应^[2]。通过对塑料粒径、掺量及拌和工艺的合理控制,可以在增强结构稳定性的同时维持必要的柔性。微观结构演化与宏观性能之间具有紧密联系,对其进行系统分析有助于实现性能调控与优化设计。

2.3 区域气候条件对材料性能的影响

非洲地区气候条件对路面材料性能具有显著影响,高温环境与昼夜温差共同作用,使沥青混合料长期处于复杂应力状态。再生塑料改性沥青在高温条件下表现出较强的抗变形能力,其内部结构稳定性有助于抵抗车辙等病害的产生。在部分区域,季节性降雨对路面耐久性构成挑战,水分渗入会削弱沥青与骨料之间的黏结强度。再生塑料材料具备一定疏水特性,可在一定程度上改善混合料的抗水损能力,提升结构稳定性。长期干热环境还会加速材料老化过程,使性能逐步衰减,合理选择抗老化性能较好的塑料类型并优化配比,有助于延长路面使用寿命。综合考虑气候因素对材料性能的影响,对于提高工程适应性具有重要意义。

3 再生塑料改性沥青混合料路用性能评价

3.1 高温稳定性与抗车辙性能分析

再生塑料的引入对沥青混合料高温性能具有显著增强作用,其机理在于塑料分子链与沥青基质之间形成较为稳定的空间结构,从而提高体系的整体刚度与抗剪切能力。在高温荷载作用下,传统沥青混合料易发生塑性流动,而改性体系能够通过结构约束抑制内部变形。车辙试验结果表明,随着塑料掺量的增加,混合料动态稳定度呈现上升趋势,抗车辙能力得到明显改善。这种性能提升使路面在重载与高温环境下仍能保持较好的形态稳定性^[3]。然而,掺量过高可能

导致材料刚性过大,影响施工压实效果及长期服役性能,因此需在性能提升与施工适应性之间进行合理平衡。通过优化配比设计,可使材料在满足高温稳定性要求的同时保持良好的综合性能。

3.2 低温抗裂性能与疲劳性能评价

在低温环境条件下,沥青混合料的抗裂能力直接关系到路面结构的耐久性,再生塑料的加入对该性能产生双重影响。一方面,塑料材料的引入提高了体系整体强度,使其在承受荷载时具备较好的抗变形能力;另一方面,过高的塑料含量会增加材料脆性,使其在温度降低时更易产生裂缝。通过间接拉伸试验与疲劳性能测试可以发现,适中掺量的再生塑料能够在保证强度的同时维持必要的延展性,使材料在循环荷载作用下具备较好的抗疲劳能力。针对低温性能不足的问题,可通过选用柔性较好的塑料类型或采用复合改性技术,对材料的结构特性进行调节,从而改善其低温韧性。合理的材料设计有助于实现强度与柔性的协调统一,使混合料在复杂气候条件下保持稳定性能。

3.3 水稳定性与耐久性能研究

在降雨集中且环境湿度较高的地区,水稳定性成为评价沥青混合料性能的重要指标。再生塑料改性体系由于塑料本身具有疏水特性,在一定程度上能够阻碍水分渗入沥青与骨料的界面,从而减缓水损害对结构的破坏。浸水马歇尔试验结果显示,改性混合料的残留稳定度明显优于传统材料,表明其在湿水环境中的抗剥离能力较强^[4]。在长期服役过程中,材料的耐久性能同样受到关注,沥青在氧化与温度循环作用下易发生老化,而塑料组分的加入能够在一定程度上延缓这一过程,降低性能衰减速度。通过综合分析水稳定性与抗老化能力,可以看出再生塑料改性沥青在复杂环境条件下具有较好的适应性,为提升道路工程耐久性提供了有效路径。

4 温拌工艺与再生塑料改性体系的协同作用分析

4.1 温拌技术机理与节能特征

温拌沥青技术通过调控材料流变特性,使混合料在较低温度条件下仍具备良好的施工性能,从而实现节能与减排目标。其机理主要体现在发泡效应、表面活性添加剂作用以及黏度调节机制等方面,能够在拌和与摊铺过程中降低沥青的内摩阻力,使骨料与结合料之间形成更为稳定的包裹结构。在再生塑料改性体系中,温拌技术的应用具有更为重要的意义。高温条件下塑料分子结构易发生热降解,影响材料性能,而降低施工温度有助于保持其物理稳定性与改性效果。同时,温拌工艺减少燃料消耗与有害气体排放,对施工环境改善具有积极作用。通过合理控制温度区间与材料配比,可在保证路用性能的前提下实现节能目标,使该技术在绿色道路建设中展现出良好的应用价值。

4.2 再生塑料对温拌施工性能的影响

再生塑料的引入改变了沥青混合料的流变特性，使其在施工过程中表现出更高的黏度与更强的结构稳定性，这对温拌施工提出了新的技术要求。在较低温度条件下，混合料的流动性可能受到一定限制，进而影响摊铺均匀性与压实效果。通过合理选择温拌添加剂类型与掺量，可以在一定程度上改善体系的流动性能，使其在施工过程中保持良好的工作性。试验结果表明，在适宜的温度范围内，再生塑料改性混合料仍能够达到较高的密实度，且压实过程具有较好的稳定性。塑料颗粒在温拌条件下的分散均匀性对性能发挥具有关键作用，需通过优化拌和时间与搅拌强度，使其在沥青基体中形成均匀分布结构。通过对材料特性与施工工艺的协同调控，可有效缓解塑料掺入带来的不利影响。

4.3 工艺参数优化与施工适应性分析

在实际工程应用中，温拌再生塑料改性沥青混合料的施工效果受多种工艺参数影响，需要结合具体环境条件进行系统优化。拌和温度的控制应在降低能耗的同时，确保塑料材料能够充分软化并与沥青形成良好结合，从而保证混合料整体性能。施工阶段需加强对摊铺温度与压实过程的动态监测，通过合理安排压实时间与压实设备组合，使混合料在适宜温度范围内完成密实化过程，避免因温度下降过快导致压实不足。在不同气候条件与施工环境下，应根据设备性能与材料特性制定差异化施工方案，以增强技术适应性。针对非洲地区高温与施工条件差异较大的特点，通过优化工艺参数与施工组织方式，可有效提升工程质量与施工效率，使该技术在多样化环境中具备良好的应用前景。

5 非洲地区工程应用中的关键问题与对策

5.1 材料来源与质量控制

再生塑料作为改性沥青的重要原料，其来源复杂且成分差异明显，直接影响材料性能的稳定性与工程应用效果。不同类型塑料在分子结构、熔融特性及耐久性能方面存在差异，若未经有效分类处理，容易在混合过程中产生相容性问题，进而影响路用性能。因此，在材料使用前需建立统一的分类与处理标准，通过清洗、破碎与筛分等工序去除杂质并控制粒径分布，使再生塑料具备较为稳定的物理性质。在此基础上，应构建系统化的质量检测体系，对其软化点、黏度、拉伸性能及热稳定性等关键指标进行评估，从而为改性配比提供科学依据。通过全过程质量控制，可以有效降低原材料波动带来的不利影响，确保再生塑料改性沥青在工程应用中的可靠性与一致性。

5.2 施工技术水平与设备适配

再生塑料改性沥青及温拌技术的推广应用，对施工技

术与设备条件提出了更高要求。在部分地区，传统施工设备在温控精度与搅拌效率方面存在不足，难以满足新型材料对施工工艺的要求，从而制约了技术优势的发挥。针对这一问题，应通过系统化培训提升施工人员对改性材料特性及温拌工艺的理解，使其能够在施工过程中准确控制温度、时间及配比参数，减少人为因素对施工质量的影响。同时，通过对现有设备进行升级或优化配置，提高加热与搅拌系统的适应能力，使设备能够与材料特性相匹配。在工程实施过程中，根据不同气候条件与施工环境合理选择设备类型与施工方案，有助于实现工艺与设备的协同运行，从而提升整体施工质量与效率。

5.3 经济性与环境效益综合评价

再生塑料改性沥青技术在资源循环利用与绿色施工方面展现出较高的应用价值，其经济性与环境效益需通过系统评价加以体现。在材料层面，再生塑料的利用能够降低对传统石油基材料的依赖，减少原材料采购成本，同时缓解废弃塑料处理压力。在施工环节，温拌技术通过降低拌合与摊铺温度，有效减少能源消耗与有害气体排放，对改善施工环境具有积极作用。在全寿命周期视角下，通过综合分析材料费用、施工成本及后期养护支出，可以发现该技术在长期使用中具备较好的成本优势。环境方面，其在降低碳排放与促进资源再利用方面的贡献，使其符合绿色基础设施发展的要求。通过对经济与环境效益的综合考量，该技术在可持续发展背景下具有广阔的推广前景。

6 结语

围绕非洲地区再生塑料改性沥青混合料的性能特征与温拌工艺适配问题展开系统分析，可以看出，两者在材料性能与施工技术层面具有良好的协同关系。再生塑料的合理应用显著提升了混合料的高温稳定性与耐久性能，而温拌技术则在降低能耗与改善施工条件方面发挥重要作用。在复杂气候与多样化施工环境下，通过优化材料选择与工艺参数，能够实现性能与施工效率的平衡。未来研究可进一步结合实际工程数据，对长期服役性能与区域适应性进行持续跟踪，为技术推广提供更加坚实的支撑。

参考文献

- [1] 路俊杰.聚合物改性热再生沥青混合料性能评价[J].福建建设科技,2024,(05):64-67.
- [2] 房聪,刘钟达,张绍源,等.废旧SMA沥青混合料再生改性剂的研发及性能评价[J].北京建筑大学学报,2022,38(04):32-38.
- [3] 余春,陈志荣.基于中法标准的改性沥青混合料性能评价[J].市政技术,2024,42(02):27-34+61.
- [4] 陈宝敏.橡胶粉高粘改性沥青及其排水沥青混合料的性能评价指标研究[D].苏州科技大学,2020.

Research on Construction Method of High-performance Asphalt Concrete Pavement for Highway Engineering

Zhanli Gu

Tianjin Baodi District Highway Maintenance Service Center, Tianjin, 301800, China

Abstract

With the continuous improvement of China's highway network, the demand for pavement durability and safety has grown significantly, necessitating urgent innovation in conventional construction methods. This study focuses on high-performance asphalt concrete pavement construction techniques, comprehensively examining existing methodological shortcomings and proposing process improvements in mixture formulation, paving temperature control, and compaction technology implementation. Through field trials and process validation, optimized procedures and parameter controls have demonstrated marked enhancements in pavement structural integrity, rut resistance, and durability. The research findings provide practical technical solutions for highway construction innovation, offering critical guidance for extending pavement service life and enhancing traffic safety.

Keywords

high-performance asphalt concrete; construction process optimization; pavement durability

公路工程高性能沥青混凝土路面施工方法研究

顾战利

天津市宝坻区公路养护服务中心, 中国·天津 301800

摘要

伴随我国公路网的持续完善, 对于路面耐久性与安全性的需求越来越增强, 迫切需要革新常规施工模式。本研究聚焦高性能沥青混凝土路面施工工艺, 全面探讨当前方法中存在的缺陷, 面向混合料配制、摊铺温度及压实技术实施工艺改善。借助实地试验与工艺确认, 改良工序和参数管控之后, 路面结构整体性、抗车辙性及耐久性都明显提高。研究成果为公路施工技术的革新给予了实用的技术方案, 对提升路面使用寿命和行车安全拥有关键引导意义。

关键词

高性能沥青混凝土; 施工工艺优化; 路面耐久性

1 引言

伴随我国公路网的持续健全, 交通运输对于路面结构性能提出了更严标准, 传统施工模式已经很难达到当代公路工程对于耐久性与安全性的苛刻要求。我国部分路段因为施工技术落后导致的路面早期病害率高至 20% 超过, 显著妨碍行车安全。国内外研究显示, 高性能沥青混凝土于提升路面整体性和防车辙性方面拥有明显优势, 然而当前工艺于混合料配制、摊铺温度控制还有压实技术方面依然具备工序不连贯、参数设置不准确等缺陷。以便达成路面施工的高效能、省能、耐久及安全目标, 学界和工程领域已经针对优化传统施工工艺开展了初期研究与实验验证。本文于前期研究前提下, 借助现场试验和工艺验证, 面向混合料适当配制、

摊铺与压实工序的参数优化开展全面研究, 目的是制定一套合理、系统的高性能沥青混凝土路面施工方法, 为今后公路工程技术革新给予实用性方案, 进而有效提升路面使用寿命和行车安全。

2 工程背景与发展需求

2.1 公路网完善与性能要求

伴随我国经济迅猛发展与交通运输需求的不断增长, 公路交通网络的规模持续扩展, 公路等级和通达度明显提高。随着交通流量的增长和重载车辆的普遍使用, 传统路面结构的使用寿命和耐久性遭遇严峻挑战。区域性气候条件的变动和复杂地质环境的出现, 亦对路面的性能提出了更严格要求。公路路面不但必需达到安全性和平顺性的基本功能, 还需拥有抗车辙、抗裂和耐久性的综合性能, 用以充足面对持久的高频率运行条件。

2.2 高性能沥青混凝土特性

高性能沥青混凝土拥有非常好的使用效果和建造成果,

【作者简介】顾战利(1976-), 男, 中国天津人, 本科, 工程师, 从事公路工程施工和公路养护工程方面的工作和研究。

这些成果都表现在高温状态下的稳固能力、低温条件下的抗裂能力、承受多次变形的能力以及能够使用很多年的使用寿命。这样的材料依靠优化胶结材料和集料的比例,成功达到了更强的粘合力量和更低的空隙比例,很好地增强了抵抗道路磨损的能力。摊铺过程中的平稳性和压实后的密实程度都非常优秀,完全符合较高的路面承重需求。耐久能力的提升主要是因为加入了改进性能的添加剂,并且采用了先进的生产技术,使得路面即使长时间使用也能够抵抗水的破坏和外界环境的腐蚀。高性能沥青混凝土能够大幅降低路面问题出现的次数,对改善路面整体质量以及增加公路的使用年限起到非常关键的作用。

2.3 技术革新驱动因素

技术革新的驱动因素首要来自公路工程领域对于更好品质路面性能的迫切需求。伴随交通负荷的提升,常规施工技术很难达到路面耐久性、平整度及抗变形能力的标准。新技术的应用可以处理当前施工工艺中具有的材料稳定性不够、摊铺质量不匀还有压实效果差的问题。当代交通对行车安全及舒适性的要求促进了高性能材料和先进施工方式的研制,给路面性能的持久改善给予了关键技术支撑。

3 材料调配与施工参数管控

3.1 混合料配制关键要素

高性能沥青混凝土的混合料配制直接影响到路面的各种使用性能,其核心要素是严谨挑选原材料并合理规划最佳配比。骨料充当路面的支撑框架,其规格和级配对于路面强度和稳定性特别关键。优良的粗骨料必须拥有强抗压强度和良好的颗粒形状,但是细骨料应当拥有适宜的颗粒级配,来确保沥青黏附性能和混合料的填充密实度。矿粉的添加比例也必须同混合料黏聚性能达到配合,保障高温稳定性和低温抗裂性能的均衡。

挑选沥青材料的时候,必须仔细研究施工环境和气候条件,全面检查材料的黏度、弹性和低温抗裂性这些重要性是否能优秀,只有这样才能确保最终的效果达到预期目标。制作沥青混合料的时候,一定要严格监控温度变化,防止因为温度太高或者太低而破坏沥青的包裹效果,导致整体质量变差。采用改性沥青技术来提升混合料的抗车辙能力和耐久性能,可以很好地满足高性能公路路面设计的具体要求。精心挑选合适的原材料,并且不断改进配比方案,这两点对于确保沥青混合料表现出优异的性能有着至关重要的作用,同时也为整个工程的顺利实施打下了坚实的基础。

3.2 摊铺温度配置要求

摊铺温度是影响沥青混凝土路面质量的一个关键因素,设置合适的摊铺温度可以明显改善混合料铺设的效果,同时让路面整体表现更加优秀。如果摊铺温度合适,混合料铺设时就能拥有足够的流动性和粘结能力,防止出现材料过于松散或者因为温度太高而造成沥青老化的问题。需要考虑材

料的具体种类、施工现场的环境条件以及设备的实际运行情况,制定出精确的摊铺温度控制标准,使用实时监控和灵活调节的方式,确保摊铺温度在整个施工区域都保持稳定。优化摊铺温度的设置方式,能有效提升路面接缝连接的效果和表面的平整程度,使得结构内部的协调性得到加强,为路面的长久耐用和行车的安全性提供坚实有力的支持。

3.3 压实工艺参数调控

调节压实工艺参数是为了让高性能沥青混凝土路面变得非常结实并且拥有优秀的力学性能,这是一个特别关键的重要环节。设置一个合适的压实温度范围,就能很好地保证沥青混凝土既不会太稀也不会太硬,这是最核心的标准,必须根据混合料的具体情况以及施工现场的天气环境来做到精确无误的管理。选择什么样的压实设备以及如何合理地进行设备布置,一定要根据工程的实际需要来进行规划,重点要重视静力压实和振动压实两种方式结合起来使用,这样才能让路面的整体平整度得到明显提升。压实的次数以及行驶的速度会直接决定材料内部结构的紧密程度,所以一定要随时关注压实度的各种具体数据,根据这些数据及时调整施工流程中的各个环节,确保最终结果完全符合设计文件的标准要求。采用改进过的压实技术方案,可以大大加强沥青路面抵抗开裂和防止路面变形的能力,从而大幅提升路面使用的舒适感受和持久耐用的使用寿命。

4 路面结构提升与性能改良

4.1 整体结构协同增强

优秀沥青混凝土路面整体构造协调性直接决定路面使用效果和使用寿命。针对普通路面建设里面结构层连接强度不够、底层支撑力量不够这些缺陷,采用统一化施工技术改进方案,实现结构层互相配合加强。基层处理阶段,挑选更好材料并且改进施工方式,确保基层拥有很高强度以及良好稳定性。使用新型界面粘合剂,提升基层跟沥青层粘结强度,减少界面分离危险。摊铺阶段,按照实时热力学数据调节速度精确程度,保证混合料匀称散布,提升结构整体密实程度。压实阶段把振动频率和轮胎压力数值进行配合调整,改善压实成果,让路面构建坚固连续结构。改进方案试验显示,这种方法明显提升路面结构层之间互相配合能力和整体稳固程度,提供更强大荷载负荷承担支持,促进路面性能获得全面进步。

4.2 抗车辙性能强化

抗车辙性能为评估高性能沥青混凝土路面品质的关键标准之一,它的提升必须自材料性能和施工工艺两方面着手。借助改进骨料级配和沥青黏结性,打造拥有强抗剪强度和优秀塑性流变性能的混合料体系。于施工阶段,严谨管理摊铺温度和压实顺序,保证混合料内部颗粒分布平衡,减少路面层间界面滑移隐患。压实期间使用高频振动和静载搭配的技术,提升密实度以及内部集料锁定效果,明显减小高温

状况下材料的横向位移。试验结果表明,工艺改进之后路试样动态稳定度明显提升,车辙深度下降,可以高效抵抗多种交通荷载工况之中的变形累积,给路面持久运用给予稳固保障。

4.3 长期耐久性能保障

为了确保高性能沥青混凝土路面能够长久保持良好的使用状态,相关研究工作特别关注如何改善材料本身的性能以及施工工艺的具体操作方式,力求通过各种方法来增强沥青混凝土的抗老化能力以及抵抗水损害的能力,尽量避免外界环境带来的破坏作用。选用抗老化效果好的添加剂来优化混合料的配方设计,进一步提高骨料与沥青粘结的牢固程度,防止裂缝出现后继续扩大或者整体结构因老化而受损。施工时采用科学合理的压实方式来保证路面达到理想的密实程度,并且让内部结构的弹性和外部形状保持良好平衡,尽量减少空气中的孔隙分布,降低水渗透的可能性。试验结果表明,采用这些技术手段之后,道路的使用寿命明显得到延长,完全能够适应高强度车辆长期碾压带来的压力,同时为路面的持久耐用提供了强有力的支持保障。

5 工程实施与应用效应

5.1 现场施工运行情况

高性能沥青混凝土路面施工的现场运行情况充分展现了改进工艺的实际成效。施工期间,认真依据设计的混合料配比方案以及温度控制流程,保证各个环节的参数精确可调。摊铺时期使用现代摊铺机械,搭配高准确度的温控手段,完成了平整铺筑与牢固成型。碾压时期借助智能碾压装置实时调节碾压参数,高效防止了部分不平或者过压等现象,确保了路面的密实程度和整体一致性。在实际施工当中,每一道工序衔接流畅,材料运输以及温度管理方法配合健全,尽可能减少施工偏差以及质量起伏。

试验段的监测结果表明,路面平整度明显提升,摊铺之后温差管理于适宜区间,密实度指标都实现或者超出预定标准。施工过程达成节约、快速运作目标,并且展现出突出的环保节约优势,给以后普及提供了坚实的技术依据。

5.2 施工作业效益反馈

施工操作效果反馈首先表现在工程质量、施工速度还有经济收益这些方面的全面提高。经过改善混合料配比和摊铺温度控制技术之后,路面平整程度和密实程度得到很大提升,形成稳定而且高质量的基础层,明显降低后期维修次数和费用支出。采用新的压实施工方法以后,设备使用效率和工作速度得到增强,缩短整个施工时间长度,减轻道路通行压力,减少各种资源消耗。针对实验路段的性能评估结果表明,路面抵抗车辙变形的能力相比过去方法提高大约百分之三十,整体使用年限延长超过百分之二十,车辆行驶过程中

的平稳程度和安全水平得到有效保证。施工技术优化方案广泛推广应用可以推动公路建设向环保方向发展并且实现长期稳定运行,同时给同类工程提供实际操作经验借鉴和参考依据。

5.3 推动普及与未来趋势

高性能沥青混凝土路面的施工技术经过改善之后,给整个行业带来了值得信赖的技术参考,这项技术的广泛应用能够明显提高路面的整体质量,同时让道路能够使用更长的时间,发挥重要作用。根据试验结果总结出来的工艺改进方案,可以作为工程项目施工的标准指导文件,促进行业技术标准的不进步和提升。随着新材料研究工作的推进和智能化施工设备的应用推广,这项技术体系将会得到更好的发展和完善,能够更好地适应复杂的道路状况和多变的天气环境带来的各种考验,为实现可持续发展的交通基础设施建设提供强有力的支持和保障。

6 结语

文章针对公路工程里面高性能沥青混凝土路面施工存在常规工艺缺点,提出好几种改善混合料配制、摊铺温度还有压实技术的具体办法。经过现场试验并且验证这些方法,实验结果表明,经过流程优化加上参数精确调整以后,路面结构完整程度、抵抗车辙能力以及耐久能力都得到很大提升,给延长路面使用年限并且提高行车舒适程度提供一套实用可靠的技术方法。实验过程中也发现一些问题,比如参数调节范围在不同环境温度变化时候不够灵活,现场施工条件经常改变对工艺稳定产生很大影响,还有少数性能指标长期效果验证还需要更多数据支持。接下来研究可以从下面几个方向继续探索,第一,加强施工工艺跟实际环境因素之间相互作用分析,建立更加准确的工艺模型。第二,深入研究材料配比多维度优化组合以及智能监控技术。第三,通过长期跟踪试验和大数据分析,进一步确认工艺改进对于路面整体性能产生作用,同时逐步推广到各种施工环境里面应用。实验成果给后面公路施工技术持续进步提供理论依据和实践指导,具备很好应用前景和推广价值。

参考文献

- [1] 鲜香荣.公路工程沥青混凝土路面施工技术[J].中国高新科技,2021,(06):65-66.
- [2] 王雪.高性能沥青混凝土路面施工质量控制与管理[J].交通科技与管理,2022,(08):0124-0126.
- [3] 金国爱.公路沥青混凝土路面施工工艺研究[J].交通科技与管理,2021,(07):0165-0166.
- [4] 王锡磊史建祥.高性能沥青混凝土路面的施工要点[J].新材料·新装饰,2021,3(19):84-85.
- [5] 赵智.公路路面施工中沥青混凝土路面碾压的施工工艺研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2022,(07):0113-0115.

Research on Key Construction Technologies and Quality Control for Long-Life Cement Concrete Pavements

Hao Mu

Overseas Engineering Branch of China Railway Fifth Bureau Group Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550001, China

Abstract

With the continuous increase in traffic loads and rising highway service standards, traditional pavement construction models can no longer meet the practical demands for high durability, low maintenance requirements, and lifecycle cost-effectiveness. Cement concrete long-life pavements have emerged as a critical development direction in road engineering due to their structural stability, strong load-bearing capacity, extended service life, and reduced maintenance frequency. The formation of long-life pavements relies not solely on material strength enhancement but is closely related to structural design, raw material control, construction techniques, joint treatment, curing management, and comprehensive quality control throughout the process. This study analyzes key construction technologies for cement concrete long-life pavements, explores the impact of core processes—including subgrade treatment, concrete mixing and paving, vibration leveling, joint construction, and curing management—on pavement durability, and proposes targeted control measures addressing common quality issues. The findings aim to provide practical references for improving cement concrete pavement construction standards and extending road service life.

Keywords

cement concrete pavement; long-life pavement; construction technology

水泥混凝土长寿命路面施工关键技术与质量控制研究

慕浩

中铁五局集团有限公司海外工程分公司，中国·贵州 贵阳 550001

摘要

随着交通荷载持续增长和公路服役标准不断提高，传统路面建设模式已难以满足高耐久、低养护和全寿命周期经济性的现实需求。水泥混凝土长寿命路面因其结构稳定、承载能力强、使用寿命长、养护频率低等优势，逐渐成为道路工程建设的重要发展方向。长寿命路面的形成并非单纯依赖材料强度提升，而是与结构设计、原材料控制、施工工艺、接缝处理、养生管理和全过程质量控制密切相关。文章围绕水泥混凝土长寿命路面的施工关键技术展开分析，探讨基层处理、混凝土拌和与摊铺、振捣整平、接缝施工、养生管理等核心环节对路面耐久性的影响，并结合常见质量问题提出针对性的控制措施，以期为提高水泥混凝土路面施工水平、延长道路服役寿命提供实践参考。

关键词

水泥混凝土路面；长寿命路面；施工技术

1 引言

在公路与市政道路建设中，路面结构的耐久性直接关系到通行安全、养护成本和工程综合效益。与普通路面相比，长寿命路面更强调在长期交通荷载、环境变化和材料老化作用下保持较高的结构稳定性与服务性能。水泥混凝土路面具有抗压强度高、整体性较好、抗水损害能力强等特点，在重载交通道路、工业园区道路及高等级公路中具有广泛应用前景。然而，在实际建设中，若施工组织不合理、工艺控制不到位、材料质量不稳定或后期养生管理不足，极易引发开裂、

断板、错台、脱皮、露骨和接缝损坏等病害，削弱长寿命目标的实现效果。基于此，有必要从施工全过程出发，对水泥混凝土长寿命路面的关键技术和质量控制要点进行系统研究，以提升工程建设质量和服役可靠性。

2 水泥混凝土长寿命路面的施工技术基础

2.1 长寿命路面的内涵及性能要求

水泥混凝土长寿命路面并不是单纯追求设计年限的延长，而是强调在较长服役周期内保持结构功能、表面性能和行车舒适性的整体协调。其核心要求体现在高承载能力、高耐久性、低病害率和较强环境适应性等方面。从工程角度看，长寿命路面需要在反复荷载作用下具备良好的抗疲劳性能，在温湿变化和冻融环境中保持较强抗裂能力，在水侵蚀和车

【作者简介】慕浩（1990-），男，中国宁夏固原人，本科，高级工程师，从事公路、桥梁工程研究。

辆磨损影响下维持较好的表面完整性。这意味着施工阶段不仅要满足强度指标,还要重视材料均匀性、结构密实性、板体稳定性和表面功能性。若将长寿命目标理解为单纯增加厚度或提高标号,往往容易忽视细部施工与长期耐久之间的内在联系。实践表明,真正决定长寿命效果的,往往是基层平整度、混凝土配合比适应性、施工连续性、接缝传荷能力和养生质量等一系列细部因素。只有在施工全过程中贯彻耐久性理念,才能使路面结构具备长期稳定服役的基础。

2.2 施工技术对路面寿命形成的决定性作用

水泥混凝土路面属于典型的现场成型结构,其质量形成过程具有一次性和不可逆性特征。拌和、运输、摊铺、振捣、整平、刻纹、切缝和养生等环节相互衔接,任何一道工序失控都可能对后续性能造成连锁影响。比如,混凝土拌和不均会导致局部强度差异和离析;运输时间过长会引起坍落度损失和和易性下降;振捣不足会形成蜂窝、孔隙和局部密实度不够;切缝时间不当则容易诱发不规则裂缝。与沥青路面相比,水泥混凝土路面对温度应力和收缩应力更为敏感,施工阶段的工艺精细化程度直接决定板体成型质量和早期裂缝控制水平。尤其在长寿命路面建设中,要求施工技术不仅满足常规规范要求,还要关注长期服役中的裂缝扩展、接缝劣化、荷载传递衰减和表层损耗问题。因此,施工技术既是结构性能落地的载体,也是长寿命目标实现的关键保障。

2.3 质量控制理念由结果验收向过程管控转变

传统施工管理中,部分工程仍存在重终检、轻过程的倾向,长寿命路面的建设要求质量控制理念发生转变,由单一结果验收转向全过程动态控制。过程控制的重点在于原材料进场检验、拌和站生产稳定性、施工设备状态、现场工序衔接、作业环境监测以及关键参数实时校核等方面。只有把质量问题消除在形成阶段,才能降低后期病害风险。例如,水灰比略有偏差、含气量不稳定、基层局部松散、模板标高误差、切缝延误等问题,在竣工时可能并不明显,但会在后期服役中逐步放大,形成早期损坏。由此可见,长寿命路面质量管理应从“合格即可”转向“稳定耐久”,把过程数据作为质量控制的重要依据,以实现施工质量与服役性能之间的有效衔接。

3 水泥混凝土长寿命路面施工关键技术分析

3.1 基层与模板施工技术是路面成型的前提

基层是路面板受力和传力的重要基础,其平整度、压实度、强度和排水条件直接影响混凝土板底支撑均匀性^[1]。若基层局部软弱、标高不准或表面起伏较大,混凝土板在荷载和温度作用下更容易出现应力集中,进而引发断板、脱空和错台等问题。因此,在长寿命路面施工中,基层处理必须做到强度稳定、表面密实、线形顺畅和排水通畅。对于半刚性基层或贫混凝土基层,应严格控制其压实质量和养护时间,避免过早上人上机导致结构扰动。模板施工同样不可忽

视。模板的刚度、直顺度、固定牢靠程度及标高控制,会直接影响路面边缘成型、板厚精度与表面平整性。模板接缝若不严密,易造成漏浆和边部缺损;模板支撑若不稳,摊铺振捣时可能发生位移,影响整体成型质量。基于此,应在施工前对基层进行复核验收,对模板进行统一校正和加固,确保后续摊铺作业具备稳定基础。

3.2 混凝土拌和、运输与摊铺技术关系板体均匀性

混凝土材料性能是长寿命路面耐久性的基础。施工中应结合设计要求与环境条件优化配合比,使强度、和易性、收缩性及抗冻耐磨性能相互协调。各类原材料需严格检验,确保性能稳定。拌和阶段应控制计量精度与搅拌时间,避免出现离析、含水率波动或坍落度不稳等问题。运输过程应缩短时间,并根据气温采取遮盖或保湿措施,防止混凝土在到场前发生性能变化。摊铺环节直接影响结构均匀性,应保证布料连续均匀并预留合理振实系数,避免局部堆料或补料现象。采用滑模工艺时,还需协调设备行进速度、振捣频率与布料量^[2]。实践表明,许多早期裂缝与表层缺陷源于材料均匀性不足与施工连续性差,因此材料生产与现场铺筑的有效衔接至关重要。

3.3 振捣整平、接缝施工与养生技术决定耐久水平

振捣与整平对混凝土路面的密实度与表面质量具有决定性影响。振捣不足会使内部孔隙增多,降低强度与抗渗性能;振捣过度则易导致骨料下沉、浆体上浮,削弱表层耐磨性。施工中应结合板厚与混凝土性能合理控制振捣参数,使结构均匀密实。整平与抹面需把握适宜时机,既保证平整度,又避免过度收浆引发表层缺陷。接缝施工关系应力释放与荷载传递,切缝时间、间距及传力构件安装精度均需严格控制,以防随机裂缝与边角破损。养生管理同样关键,保湿不足会加剧早期收缩并诱发微裂纹。上述环节相互关联,是实现路面耐久性能的关键技术基础。

4 水泥混凝土长寿命路面常见质量问题及成因分析

4.1 裂缝与断板问题的形成机理

裂缝是水泥混凝土路面最具代表性的早期病害,其产生源于材料收缩、温度变化及结构受力条件的共同作用。塑性收缩、温缩与干缩使板体内部产生拉应力,若切缝时机控制不当,应力无法在预设弱面释放,易形成不规则裂缝。同时,基层不均匀沉降或板底脱空,在车辆荷载反复作用下会诱发结构性开裂甚至断板。部分工程侧重强度指标而忽视收缩控制与施工环境影响,使板体虽满足设计要求,但耐久性明显不足。裂缝形成后,水分与杂质沿缝隙侵入,进一步引发冲刷与冻胀,导致病害持续扩展,因此需在设计与施工阶段实施全过程控制。

4.2 表层缺陷与耐久性衰减问题

表层缺陷虽不直接改变结构承载能力,但对路面使用

性能与耐久性具有持续影响。起砂、脱皮、露骨及麻面等问题，多与材料级配不当、拌和不均及养生不足有关。施工过程中若抹面过度或收浆控制不当，易导致表层浆体富集，形成结构疏松区域，在车辆磨损与环境侵蚀作用下逐渐剥落。表层性能下降会引起抗滑能力减弱与平整度劣化，并对板体完整性产生不利影响。在寒冷地区，孔隙结构与含水状态的变化还会加剧冻融破坏。因此，长寿命路面建设需将表层视为功能关键层，从材料选择到施工工艺均加以严格控制。

4.3 接缝损坏与错台病害的演变过程

接缝作为混凝土路面调节应力与传递荷载的重要构造，其性能直接关系到整体使用效果。若传力杆安装偏差或滑动受限，会削弱板间协同受力能力，使荷载作用下变形差异加大。接缝密封不良则易引发水分下渗，导致基层冲刷与板底空隙扩大，在反复荷载作用下逐步形成缝边破损与错台^[3]。错台不仅降低行车舒适性，还会引起冲击荷载集中，加速局部结构劣化。该类病害具有隐蔽性与渐进性特征，一旦形成将显著增加养护成本，因此需从设计、施工到后期维护建立系统化控制机制。

5 水泥混凝土长寿命路面质量控制措施

5.1 建立以材料稳定性为核心的源头控制体系

实现长寿命目标，必须从材料源头抓起。施工单位应建立严格的材料准入制度，对水泥品种、骨料级配、含泥量、针片状含量、外加剂适应性及掺合料活性进行系统检验，防止原材料波动对混凝土性能造成不利影响。骨料是决定体积稳定性与耐磨性的关键材料，应重点控制其强度、洁净程度和级配连续性。外加剂的使用则要经过配伍试验，避免与水泥体系产生不良反应。与此同时，应加强施工配合比的动态调整，根据气温、湿度、运输距离和现场施工节奏对用水量、外加剂掺量进行适度修正，保证混凝土到场状态稳定。源头控制不是一次性检测，而应贯穿整个施工周期，通过试验室与现场的联动机制及时修正参数，防止因材料细微波动引发质量链式反应。

5.2 强化现场施工工序协同与关键参数监测

长寿命路面施工强调连续、均衡和精细。现场管理应围绕“工序不断链、参数不失控、问题可追溯”的目标展开。拌和站、运输车辆、摊铺设备和切缝养生班组之间要保持节奏匹配，避免出现前场等待、后场积料或切缝延迟等问题。施工过程中应重点监测坍落度、振捣频率、铺筑厚度、表面平整度、切缝时间和养生覆盖状态等关键参数。对滑模施工，

还需对行进速度、模板高程控制、自动找平系统精度进行复核。对于高温、大风、降雨等不利天气，应及时调整施工时间和养护措施，必要时暂停作业。质量控制不能停留在经验判断层面，而应依托试验检测、现场记录和信息反馈实现动态管理。通过工序协同和参数监测，可有效减少因施工节奏紊乱引发的质量隐患，提高成型质量的稳定性。

5.3 完善养护验收与后评估机制

长寿命路面的质量管理不应止于施工结束，还应延伸至养护验收和初期服役评估阶段。养生期间，应保证覆盖材料完整、保湿持续、养生时间满足要求，防止表面失水和温差过大引发早期裂缝。待达到规定龄期后，除常规厚度、强度和平整度检测外，还可结合接缝顺直度、表面构造深度、芯样密实度和传力构造安装情况进行综合评估。对于重点工程，应建立初期运营观察制度，对接缝状态、裂缝发展、板角稳定性和表面磨损进行持续跟踪，及时发现潜在问题。后评估机制的意义在于把施工质量与服役表现联系起来，为类似工程积累经验，也为后续养护决策提供依据。通过形成“施工控制—竣工验收—早期评估”的闭环管理链，才能真正体现长寿命路面建设的全过程质量理念。

6 结语

水泥混凝土长寿命路面的实现，依赖于结构耐久理念、施工关键技术和全过程质量控制的协同作用。基层处理、混凝土拌和运输、摊铺振捣、接缝施工和养生管理等环节，共同决定了路面板体的成型质量和长期服役能力。实际工程中出现的裂缝、断板、表层缺陷和接缝损坏等问题，往往并非单一原因造成，而是材料波动、工艺偏差、环境影响和管理疏漏叠加的结果。要提高长寿命路面的建设水平，必须从源头材料控制入手，强化现场工序协同，重视关键参数动态监测，并建立覆盖施工、验收和早期服役阶段的完整质量管理体系。只有将耐久性要求细化到每一道工序、落实到每一项参数，水泥混凝土路面才能真正实现寿命延长、病害减少和综合效益提升的建设目标。

参考文献

- [1] 陀忠雄,胡建平,余李迪.基于水泥及沥青长寿命路面结构的碳排放研究[J].西部交通科技,2025,(08):14-18.
- [2] 林有贵,杜荣耀,何哲,等.长寿命水泥混凝土路面结构分析与应用[J].公路工程,2023,48(02):95-103.
- [3] 刘邦一.长寿命复合式沥青路面结构状态检测与疲劳寿命研究[D].东南大学,2022.