



图 1 原因度 - 中心度分析

3.2 ISM 结构模型构建

根据 DEMATEL 分析得到的综合影响关系矩阵 T，设阈

值 $\lambda=0.65$ （取矩阵 T 中所有元素的平均值），大于阈值的元素设为 1，小于等于阈值的元素设为 0，得到可达矩阵 R。通过可达矩阵的布尔运算，得到各个风险因素的可达集、先行集、交集，从而确定层级结构，其中施工技术参数控制与设备可靠性属于根本原因，它们通过影响地质环境稳定性和施工质量，进而对既有结构安全及监测系统有效性产生影响^[3]。

DEMATEL-ISM 集成分析得到 13 号线穿过 2 号线工程关键风险因素有明显的层次性、因果关联性的特征。根本原因层的土压力控制偏差（T1）、推进速度不当（T2）、盾构机械故障（E1）为整个风险系统的驱动源^[4]，土压力控制偏差的影响度最大；中间传导层的同步注浆质量（T3）起到承上启下的作用，地下水位波动（G2）在承压水环境下对施工安全构成持续威胁；结果影响层的既有结构影响（G3）、监测数据偏差（M1）为风险控制的最终目标和重要保障，既有结构影响的被影响度最高（7.89）。

表 3 ISM 层级划分结果

层级	层级名称	风险因素代码	层级特征	控制策略
L1	结果层	G3	风险承受体，保护目标	严格监测，沉降 $\leq 10\text{mm}$
		M1	信息反馈，决策依据	确保数据准确性
L2	中间层 1	G1	直接影响结果层	地质条件适应性控制
		T4	技术风险传导	加强密封检查维护
		E2	设备质量保障	设备状态实时监控
L3	中间层 2	G2	环境风险传导	承压水控制措施
		T3	关键工艺控制	注浆量 $4.0\text{m}^3/\text{环}$ 控制
		E3	监测系统保障	设备冗余配置
		M2	应急管理环节	快速响应机制
L4	根本原因层	T1	核心驱动因素	精确控制 0.343MPa
		T2	施工参数控制	严控 $1-2\text{cm}/\text{min}$
		E1	设备可靠性基础	预防性维护保养

4 结论

本研究运用 DEMATEL-ISM 集成模型对盾构穿越运营地铁隧道的关键风险因素进行系统分析^[5]，得出以下主要结论：（1）风险因素呈现明显的层次化特征。ISM 分析构建的四层递阶结构模型揭示从根本原因层（土压力控制偏差、推进速度不当、盾构机械故障）到结果影响层（既有结构影响、监测数据偏差）的风险传导机制；（2）技术风险因素是系统核心驱动源。土压力控制偏差的中心度最高（15.67），在竖向净距仅 2.2m 的极限条件下，0.343MPa 土压力精确控制对整个风险系统具有决定性作用；（3）既有结构影响是风险控制的核心目标，其被影响度最高（7.89），沉降 $\leq 10\text{mm}$ 、收敛 $\leq 5\text{mm}$ 的控制标准体现了运营安全的重要性。本研究结果为制定“技术控制为核心、设备保障为基础、监

测预警为手段”的综合风险控制策略提供科学依据，有助于实现盾构穿越运营地铁隧道的安全可控。

参考文献

- [1] 赵腾跃,陈希林,李飞. 软土-软岩复合地层工况下盾构机掘进风险分析与对策研究[J].市政技术,2025,43(07):170-178.
- [2] 丁海玲. 土压盾构近接超深基坑风险监管与实测分析[J].山西建筑,2025,51(15):80-83.
- [3] 苏宇. 软土富水地层深埋盾构隧道施工安全质量监督管理[J].山西建筑,2025,51(15):138-142.
- [4] 陆飞. 盾构机穿越重大危险源施工研究与分析——以成都轨道交通27号线一期工程为例[J].广东建材,2025,41(02):156-158.
- [5] 李军. 盾构机下穿结构物等风险源的施工控制技术[J].山西建筑,2022,48(03):151-154.

Analysis of Optimization Strategy of Highway Maintenance Technology

Jian Li

Yunnan Anjin Expressway Development Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650106, China

Abstract

With the rapid expansion of expressway networks, the significance of expressway maintenance has become increasingly prominent. This paper first reviews the current status of expressway maintenance technologies, examining key areas such as pavement, subgrade, bridges and culverts, and tunnels. Building on this foundation, it explores optimization strategies for expressway maintenance technology from four dimensions: technological innovation, management systems, scientific decision-making, and operational safety. The aim is to enhance the efficiency, quality, and safety of expressway maintenance, providing valuable references for achieving sustainable expressway operations.

Keywords

expressway; maintenance management; technical points; optimization strategy

高速公路养护技术的优化策略分析

李建

云南安晋高速公路开发有限公司, 中国·云南昆明 650106

摘要

随着高速公路网络的快速发展,高速公路养护工作的重要性日益凸显。本文首先梳理了当前高速公路养护技术的基本现状,探讨了路面、路基、桥涵、隧道等关键领域的养护技术。在此基础上,从技术创新、管理体系、科学决策和作业安全四个维度,深入探讨了高速公路养护技术的优化策略,希望有助于提升高速公路养护的效率、质量与安全性,为实现高速公路的可持续运营提供借鉴与参考。

关键词

高速公路; 养护管理; 技术要点; 优化策略

1 引言

高速公路作为现代交通运输体系的重要组成部分,其运营状态直接关系到行车安全、通行效率和社会经济发展。随着使用年限的增长和交通负荷的加剧,高速公路各类设施逐渐出现老化与损坏现象,科学高效的养护管理成为保障路网安全畅通的关键环节。当前,高速公路的养护技术虽已取得一定进展,但仍面临养护成本高、作业效率低、安全风险突出等问题。因此,系统分析现有养护技术的特点与不足,探索科学合理的优化策略,具有重要现实意义。

2 高速公路养护技术现状分析

截至2025年,全国高速公路总里程已突破19万公里,其中云南省接近1.1万公里,路网覆盖广度与密度持续提升^[1]。伴随运营年限的延长、交通量的激增以及极端天气的

频繁影响,高速公路养护工作开始向主动预防转型,相应的养护技术呈现出多维度特征。一方面,早期建设的高速公路逐步进入养护高峰期,部分路段路面出现裂缝、车辙、坑槽等结构性病害,桥梁、隧道等构造物也面临支座老化、钢筋锈蚀、渗漏水等问题;另一方面,随着智慧交通的发展,公众对高速公路通行效率、行车安全性的需求显著提高,养护作业充分确保了道路结构安全,更减少了对交通的干扰。在技术应用方面,新型技术开始逐步推广,尤其是在精细养护领域,激光检测车、无人机巡检等设备在重点路段或主干线得以广泛应用,取得了理想效果。不仅如此,在桥梁养护中,超声波检测和雷达检测等无损检测技术在钢筋锈蚀、混凝土内部缺陷排查中的价值凸显,在极大程度上破除了传统养护技术模式的局限性。尽管如此,受限于诸多主客观条件,当前高速公路养护技术水平尚有较大提升空间,信息化与智能化技术工具的应用尚且存在短板,有必要立足工程需求,创新方式方法,全面提升高速公路养护质效。

【作者简介】李建(1988-),男,彝族,中国云南新平人,本科,工程师,从事高速公路养护管理研究。

3 当前高速公路养护技术及应用要点

3.1 路面养护技术

3.1.1 预防养护

对于高速公路路面的轻微裂缝、抗滑性能不足等问题，可采用微表处技术进行预防养护，即采用改性乳化沥青、级配碎石、填料等材料混合摊铺，厚度控制在 5-10mm 为宜。在施工中，需严格控制材料配比，尤其是乳化沥青的破乳时间，需根据施工温度予以及时调整，避免低温施工导致粘结力不足，或高温施工出现泛油，并确保原路面清洁干燥，无松散杂物，否则易出现层间剥离。对于路面轻度磨损、裂缝封闭的情况，可采用稀浆封层技术，通常需在通车前确保封层完全固化，一般养护时间不少于 4 小时，防止车辆碾压造成表面破损^[2]。

3.1.2 修复养护

当路面出现坑槽、车辙、龟裂等结构性病害时，需采用修复性技术恢复路面结构强度。在热再生技术应用中，可灵活采取厂拌热再生与就地热再生等方法，前者将旧沥青混合料运回拌合站加热、筛分后重新配比使用，适用于大面积路面老化；后者直接在现场加热旧路面、翻松后掺入新料再生，适用于局部车辙、裂缝。对于冷再生技术，则直接将旧路面材料破碎后掺入水泥、乳化沥青等稳定剂，就地拌合、摊铺，适用于基层损坏或低温、缺水地区。针对局部坑槽，可将坑槽边缘切割整齐，形成矩形或正方形，深度需达到基层，避免浅补导致病害复发，并采用切割、清理、喷洒粘层油、填充新料、碾压的流程修复。路面修复养护技术关键指标如表 1 所示。

表 1 路面修复性养护技术关键指标对照表

技术类型	主要方法	关键控制参数	适用场景
热再生技术	厂拌热再生	旧料掺配比例：20%-30%；加热温度：140-160℃	大面积路面老化、结构性损坏、车辙修复
	就地热再生	加热深度：4-6cm；再生剂掺量：0.3%-0.5%	局部车辙、裂缝、表层老化修复
冷再生技术	就地冷再生	稳定剂掺量：3%-5%；含水量控制误差：±1%	基层损坏、低温或缺水地区、环保要求高路段
	厂拌冷再生	旧料破碎粒径：≤30mm；拌合均匀性要求高	中轻度路面损坏、资源循环利用项目
坑槽修复技术	传统坑槽修补	切割形状：矩形/正方形；修补深度应达基层	局部坑槽、小面积路面破损
	喷射式坑槽修补	喷射压力：0.4-0.6MPa；材料输出量可调	应急修补、冬季施工、交通干扰要求高

3.2 路基养护技术

3.2.1 路基变形修复

路基沉陷、变形等病害的修复可采用注浆加固技术，通过向路基土体中注入水泥浆、水泥砂浆等浆液，填充孔隙、胶结土体，以提升路基承载力。在施工中，需根据路基土质确定浆液浓度、注浆压力，避免压力过大导致路基隆起，并采用分段注浆方式，间隔 2-3m 设置注浆孔，确保浆液均匀扩散。针对路基局部软弱土层，可采用换填处理技术，挖除软弱土后换填碎石、砂砾等透水性材料，换填深度需超过软弱土层厚度，宽度需超出路基坡脚 0.5-1m，防止换填区边缘土体侧向挤出^[3]。再次，对于砂性土、碎石土路基的加固，则可采用强夯加固技术，通过重型夯锤自由下落产生的冲击力，压实路基土体。

3.2.2 路基排水养护

一方面，边沟、截水沟是路基排水的关键设施，需定期清淤，防止泥沙淤积导致排水不畅。对于破损的边沟，采用浆砌片石或混凝土修复，应确保修复后的边沟纵坡不小于 0.3%，确保水流顺畅，且沟壁应平整、无裂缝，避免雨水渗漏渗入路基。另一方面，盲沟、渗沟用于排除路基内部积水，需定期检查其透水性，若出现泥沙、杂草堵塞透水孔等状况，需采用高压水流冲洗或开挖清理，其碎石或砾石等填充材料需级配良好、无杂质，透水性系数应满足技术要求，同时渗沟出口需低于路基最低水位，防止积水倒灌。

3.3 桥涵养护技术

桥涵作为高速公路的关键节点，养护技术需兼顾结构安全与功能完好，重点关注桥梁上部结构、下部结构和涵洞的病害防治，包括预防养护和修复养护。其中，梁体病害通常包括裂缝、剥落、钢筋锈蚀等，应针对病害实际，采取具有技术性的方法措施进行处理，对于宽度大于 0.15mm 的受力裂缝，可在精准检测裂缝的基础上，采用压力注浆方法予以处理，确保梁体表面平整、清洁；对于桥面连续铺装修复，应事前检查防水层完整性，若防水层破损需先修复，再进行铺装层施工，铺装层与梁体间需设置粘层油，防止层间剥离，对于铺装层开裂问题，应凿除铺装层混凝土，放置钢板并补强钢筋网后重新浇筑铺装层；支座的养护分为日常维护和病害处理，日常维护包括杂物清理、防腐处理，病害处理包括采用注浆填充或加垫钢板对支座脱空进行处理，以及老化、开裂和剪切变形超限的支座实施桥梁顶升和更换新支座；伸缩缝的养护主要是日常清理、橡胶条更换，以及型钢破损更换和锚固区混凝土修复等；桥墩和桥台的养护主要是混凝土破损采用聚合物砂浆等进行修补，对混凝土裂缝可采取注胶、碳纤维布、粘贴钢板等进行处治，同时涂刷防护涂层和防腐处理；在基础养护中，基础露筋、腐蚀等病害可用环氧砂浆封闭，防冲刷防护可采用抛石防护、钢筋石笼防护，并确保防护层稳定，而对于基础沉降，除加强变形监测外，可采用注浆加固方式，避免基础不均匀受力导致墩柱倾斜，

另外还可以通过增加桩基或扩大基础等对桥墩和基础进行加固。

3.4 隧道养护技术

对于隧道裂缝修复,需结合隧道地质条件,采用地质雷达检测衬砌背后空洞,若存在空洞需先填充再修复裂缝,修复后需进行抗渗试验,确保衬砌无渗漏。隧道漏水治理需首先明确渗漏水来源,通过水位监测确定是否为地下水渗透,再针对性处理;衬砌剥落修复应先清除松动混凝土,露出新鲜混凝土面,再采用喷射混凝土修复,喷射厚度根据剥落深度确定,确保钢筋与混凝土粘结良好。对于隧道路面养护,由于其具有抗滑、耐磨、抗渗等特性,需注意隧道内通风条件差、湿度大的差异,在加强通风,避免挥发性材料在隧道内积聚,影响作业人员健康。若路面抗滑性能不足,则应进行刻槽或实施预防养护,刻槽深度为3-5mm,间距为15-20mm,确保抗滑系数(BPN)不小于60^[4],预防养护措施可采用超薄磨耗层、微表处等稀浆封层技术。

4 高速公路养护技术优化策略探讨

4.1 养护技术创新优化

针对传统热再生技术能耗高、污染大的问题,可积极推广温拌沥青再生技术,通过添加温拌剂将沥青加热温度降低30-50℃,减少碳排放与能源消耗。此外,可研发全深式冷再生技术,突破传统冷再生仅适用于基层的限制,实现路面面层与基层同步再生,将旧料利用率提升至95%以上,减少资源浪费。引入多源融合检测技术,整合激光检测车、无人机、地面三维激光扫描仪等设备,对路面平整度、裂缝、车辙,以及桥梁墩柱垂直度、隧道衬砌厚度等进行自动化检测,提升检测效率,控制检测数据精度误差。配置无人铣刨机等无人化养护作业设备,通过北斗定位、毫米波雷达进行自主路径规划与障碍物避让,减少人工安全风险。

4.2 养护管理体系优化

针对路面、路基、桥涵、隧道不同构造物,编制养护作业全流程标准手册,明确病害检测、方案设计、施工全过程管理、质量验收各环节的技术指标与操作规范,同步建立养护质量分级评价体系,从结构安全、功能、外观质量三个维度设置评价指标。按照工种固定、技能专业、设备配套原则,组建路基路面、桥涵、隧道、交安设施等专业化作业班组,每个班组配备1名技术负责人、3-5名技术工人、1套专用设备,确保班组人员熟练掌握标准化流程。建立养护设备共享平台,整合不同地区的铣刨机、摊铺机、检测车等大型设备,通过平台对设备进行预约、调度和租赁,以提升设备利用率,降低设备采购与维护成本。

4.3 养护科学决策优化

通过传感器、检测设备、人工录入等方式实时采集日

均交通量、货车比例、降雨量、气温、土壤含水率等多源数据,并采用大数据算法自动识别异常数据,由专业人员配合进行人工校验。实时更新交通荷载数据与环境数据,病害检测数据每季度更新一次,同时逐年补充养护历史数据,确保数据时效性与准确性。基于大数据中心的交通荷载、环境、病害数据,采用机器学习算法构建“养护需求预测模型,预测未来一段时期各路段的病害发展趋势,为养护计划制定提供依据,避免过度养护或养护滞后^[5]。在该基础上,针对同一病害,输入不同养护方案的技术参数、成本数据、效果数据,由模型自动推荐最优方案,真正做到科学决策、科学养护。

4.4 养护作业安全优化

明确不同养护场景的安全防护要求,设置预警区、过渡区、作业区和终止区等四级防护区域,并设置相应的安全警示装置和标识,避免因防护缺失导致交通事故。推广智能安全预警系统,在养护作业车、锥形桶上安装毫米波雷达与无线通讯模块,当过往车辆偏离车道、逼近作业区时,系统自动发出声光预警,降低碰撞风险。强化现场安全监管,每个养护作业现场配备一名专职安全员,负责检查和维护安全防护设施,监督作业人员和机械车辆安全操作,随时开展安全巡查,发现隐患立即整改。加强养护人员安全培训,开展实战化应急演练,提高养护作业人员的安全意识。根据养护作业突发事件的严重程度,制定分级应急预案,将安全事件造成的损失控制在最小范围内。

5 结语

综上所述,高速公路养护技术涉及技术更新、管理创新、科学决策和安全保障等多个层面。本文通过对当前养护技术现状的分析,从技术创新、管理体系、科学决策与作业安全等方面提出了相应的优化策略。随着技术的不断进步更新和管理体系的持续完善,高速公路养护将朝着更加精细化、智能化、绿色化的方向发展,这要求专业技术人员需进一步加强跨领域技术融合,推动养护科学化,构建全生命周期的养护管理体系,从而实现高速公路的高质量、可持续运营发展。

参考文献

- [1] 陈艳.高速公路养护作业安全风险分析及防控体系构建研究[J].微型计算机,2025,(14):178-180.
- [2] 利勇稷.聚酯纤维环氧沥青混合料在高速公路养护中的应用研究[J].西部交通科技,2024,(9):38-40.
- [3] 咎享.超薄磨耗层施工技术分析——以侯禹高速公路养护为例[J].交通世界,2024,(4):92-94.
- [4] 姚智强.就地热再生技术在高速公路养护施工中的应用[J].交通世界,2024,(28):87-89.
- [5] 周志峰,郑园园.桥梁预防性养护在高速公路养护中的应用[J].运输经理世界,2023,(28):124-126.