

基于监测数据预测的桥梁长周期养护模式研究

王 刚

(白城市公路管理处, 吉林 白城 137000)

摘 要: 针对北方寒冷地区老旧桥梁病害复合化、结构恶化、养护成本激增的问题,突破传统短期碎片化养护局限,提出系统性长周期养护方案。基于2023—2025年白城市58座国省干线桥梁、151座涵洞的三位一体监测数据,构建回代误差不大于5%的线性回归预测模型,设计“数据驱动—智慧赋能—全链整合—场景适配—绩效导向”的长周期养护模式,并从技术、经济、操作三方面论证可行性。该模式通过差异化监测、系统性处置、绩效化考核协同运作,可实现病害处置合格率不小于98%,单位桥长年养护成本降17.1%,跨铁路养护协调耗时缩53.3%;2028年复合性病害发生率从96.6%降至40%,结构性裂缝发生率降至25%以下,可为北方寒冷地区同类桥梁养护提供技术框架与管理范式。

关键词: 桥梁养护;监测数据;病害预测;长周期养护;北方寒冷地区;智慧管养;跨铁路桥梁;绩效考核

中图分类号: U445.7;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0054-06

Study on Long-term Maintenance Mode of Bridges Based on Monitoring Data Prediction

WANG Gang

(Baicheng City Road Management Office, Baicheng 137000, China)

Abstract: Aiming at the problems of disease compounding, structural deterioration and surging maintenance costs of old bridges in cold northern China, the limitations of traditional short-term fragmented maintenance is broken through and a systematic long-term maintenance scheme is proposed. Based on the trinity monitoring data of 58 national and provincial highway bridges and 151 culverts in Baicheng City from 2023 to 2025, a linear regression prediction model with back-substitution error $\leq 5\%$ is constructed, and a long-term maintenance mode featuring “data-driven, smart empowerment, full-chain integration, scenario adaptation and performance orientation” is designed. And its feasibility is demonstrated from three aspects of technology, economy and operation. Through the coordinated operation of differentiated monitoring, systematic disposal and performance-based assessment, the mode can achieve a disease disposal qualification rate $\geq 98\%$, a 17.1% reduction in annual maintenance cost per unit bridge length and a 53.3% reduction in cross-railway maintenance coordination time. In 2028, the incidence of composite diseases will drop from 96.6% to 40%, and the incidence of structural cracks to below 25%, which can provide a technical framework and management paradigm for the maintenance of similar bridges in cold northern China.

Keywords: bridge maintenance; monitoring data; disease prediction; long-term maintenance; cold northern China; smart management and maintenance; cross-railway bridge; performance assessment

0 引 言

我国服役超30年的老旧桥梁存量已达总数的30%以上,截至2025年,北方寒冷地区(黑龙江、内蒙古、辽宁、吉林等)此类桥梁占比更是高达38%,普遍面临病害频发、结构性能衰减、养护效率低下等突出痛点^[1]。传统“头痛医头、脚痛医脚”的短期碎片化养护模式,难以打破“病害发生—被动修补—病害加

剧”的恶性循环,尤其在北方寒冷地区,年均冻融循环次数50~80次、极端最低气温低至 -40°C 以下的特殊气候条件,进一步加速混凝土碳化、钢筋锈蚀、支座老化等结构损伤,导致病害呈现“复合化叠加、结构性恶化、扩散速度快”的显著特征^[2]。国内外学者针对桥梁养护开展了大量研究,如李建军等^[3]总结了国外长周期养护模式的经验,但未结合北方寒冷地区冻融、重载复合环境进行技术适配;银建伟等^[4]提出桥梁全寿命周期养护托管模式,却缺乏跨铁路等复杂场景的协同机制设计;张磊等^[5]针对未应用场景的养护模式进行预测研究,但依赖理论推

收稿日期: 2026-02-15

作者简介: 王刚(1982—),男,硕士,高级工程师,从事公路桥梁养护与加固技术工作。

导,缺乏连续3年以上真实监测数据支撑,落地性受限^[6]。此外,现有研究中预防性养护占比普遍低于20%,与北方桥梁“防重于治”的养护需求不匹配^[7],且对养护成本的精细化核算与优化研究不足^[8]。

白城市地处吉林省西北部,属典型中温带大陆性季风气候,年均低温天数达120 d以上,极端最低气温-38.9℃,最大冻深1.8 m,季节性冻土覆盖范围达100%。区域内58座国省干线桥梁多建于20世纪80、90年代,设计荷载等级多为汽—20、挂—100,已远不能满足当前重载交通需求,其中跨铁路桥梁12座、连接重要经济节点的桥梁23座,养护场景涉及铁路运营安全、区域交通疏导、应急保障等多重复杂因素,养护协同难度远高于普通地区。2023—2025年专项监测数据显示,桥梁复合性病害年均增幅6.05%,结构性裂缝(不小于0.15 mm)年增幅15%,涵洞淤堵年均影响交通4次,养护成本年均上涨10%,但病害控制效果持续下滑,2025年核心病害复发率已达58%,投入产出比从2023年的1:3.2降至1:1.8,失衡问题突出。为此,本文以2023—2025年白城市桥梁真实监测数据为基础,构建病害趋势预测模型,设计覆盖“监测—预警—处置—评估”全链条的长周期养护模式,通过技术、经济、操作三方面可行性论证,明确预期效果与推广路径,为北方寒冷地区老旧桥梁养护提供科学、可操作的系统性解决方案。

1 2023—2025年病害数据特征与趋势预测

1.1 核心监测数据统计

本次研究采用“无人机巡检+人工详查+设备检测”三位一体的监测方式,覆盖白城市58座国省干线桥梁(含特大桥3座、大桥18座、中桥25座、小桥12座,总12 468.19 m)及151座涵洞(总长度3 260 m),监测周期为2023年1月—2025年12月,数据均来自白城市普通国省干线公路桥梁定期检测报告,经三级复核无数据偏差^[9]。监测设备选用行业主流高精度仪器:大疆M300 RTK无人机(搭载高清变焦相机、热成像仪,巡检精度达0.1 mm)、裂缝宽度检测仪、支座位移传感器、混凝土碳化深度测定仪^[10]。人工详查采用“分区段、分构件”的全覆盖排查方式,抽样比例100%,按“梁体—桥墩—桥台—支座—桥面系—附属设施”顺序逐一核查,重点记录病害位置、尺寸、严重程度,同步标注构件所处环境;设备检测则针对结构性裂缝、支座位移、混凝土碳化深度、钢

筋锈蚀程度等核心指标进行实时数据采集,同步记录环境参数(温度、湿度、降雨量、冻融循环次数),每月汇总1次监测数据,采用SPSS 26.0软件进行数据清洗与异常值剔除,形成月度病害分析报告^[11]。2023—2025年桥梁及涵洞核心病害统计数据见表1。

表1 2023—2025年桥梁及涵洞核心病害统计数据表

构造物	病害类型及核心特征	2023年	2024年	2025年	年均增幅
桥梁	复合性病害(单桥不少于2种病害;跨铁路桥后)	42座/ 72.4%	45座/ 77.6%	47座/ 81.0%	6.05%
	结构性裂缝不小于0.15 mm(梁体,缝宽0.4 mm)	18座/ 31.0%	22座/ 37.9%	25座/ 43.1%	15.0%
	支座老化(板式85%, 11座位移超标)	31座/ 53.4%	35座/ 60.3%	39座/ 67.2%	12.0%
	混凝土剥落(梁/台/墩,32%漏筋)	27座/ 46.6%	30座/ 51.7%	34座/ 58.6%	12.5%
涵洞	淤堵(清淤11 h/座,交通中断4次/年)	67座/ 44.4%	73座/ 48.3%	79座/ 52.3%	9.0%

1.2 病害特征分析

2023—2025年,白城市桥梁病害呈现四大显著特征:一是复合化趋势突出,复合性病害占比从72.4%提升至81.0%,三年提升8.6个百分点,单桥平均叠加2.5种病害,部分跨铁路桥梁甚至叠加3~4种病害,传统针对单一病害的修补方式导致病害短期内复发,2025年复发率升至58%,这与王丽等^[12]在低温环境下桥梁病害修复研究中得出的“单一修复技术难以遏制复合病害复发”结论一致;二是结构性隐患凸显,结构性裂缝作为影响桥梁安全的核心病害,年增幅达15%,2024年37.9%的桥梁存在影响承载力的裂缝,支座老化变形、混凝土剥落年均增幅分别达12.0%、12.5%,且相互影响形成恶性循环^[13]:支座变形导致桥面受力不均,进一步加剧混凝土剥落;混凝土剥落暴露钢筋,间接影响支座周边结构稳定性^[14];三是地域与场景关联性强,北方寒冷地区的冻融循环是加剧病害的关键环境因素——白城市年均冻融循环次数达50次以上,低温导致混凝土内部水分结冰膨胀,破坏混凝土结构致密性,加速裂缝产生与混凝土剥落,这与任翔等^[15]在冻融/盐蚀环境下混凝土性能研究中发现的“冻融循环是北方桥梁病害主导诱因”结论相符;跨铁路桥梁因需协调铁路部门预留“天窗期”,养护响应滞后,平均处置周期达15 d,病害发生率较普通桥梁高12.8%;涵洞淤堵与雨季降

雨关联性达92%,每年6—8月降雨集中期,淤堵发生率占全年的75%,且现有涵洞未设置有效防淤措施,导致淤堵反复发生^[16];四是成本与效率严重失衡,2023—2025年单位桥长年养护成本从350元/m增至420元/m,三年年均增幅约10%^[17],成本构成中,人工费用占比45%、材料费用占比35%、设备租赁费用占比15%,与交通运输部公路科学研究院发布的《公路工程项目概算预算编制办法》中北方地区养护成本构成规律一致,但养护投入的增加并未带来对应的病害控制效果,投入产出比持续降低。此外,不同类型桥梁病害差异显著:特大桥、跨铁路桥的结构性裂缝发生率较小桥高23.5%,重载交通路段桥梁的混凝土剥落发生率较普通路段高18.2%,荷载累计效应明显^[18]。

1.3 2025—2028年病害趋势预测

基于2023—2025年核心病害的发展特征,采用线性回归模型进行趋势预测,预测模型公式如下:

$$y=y_0\times(1+k)^n$$
 (1)

式中: y 为预测年病害发生数量(座); y_0 为2025年病害发生数量(座); k 为2023—2025年病害年均增幅; n 为预测年数(2026年 $n=1$,2027年 $n=2$,2028年 $n=3$)。该模型在桥梁病害预测中应用广泛,王景全等^[19]采用类似模型对胶州湾大桥耐久性进行12年监测预测,误差控制在5%以内,验证了模型的可靠性。为确保本次预测精度,采用2022年白城市桥梁病害监测数据进行回代验证,预测值与实际监测值的偏差分别为3.2%、2.8%、4.5%,均不大于5%,满足工程预测的精度要求;额外选取吉林省松原市2019~2025年桥梁病害公开数据验证,误差为4.4%,进一步验证了模型对北方寒冷地区老旧桥梁病害预测的适配性。2026—2028年核心病害发生率预测结果见表2,预测数据显示,核心病害将呈持续恶化趋势:2026年结构性裂缝发生率突破56.9%,2027年复合性病害发生率达93.1%,2028年复合性病害发生率接近97%,支座老化变形发生率达93.1%,均处于极高风险等级;混凝土剥落、涵洞淤堵、涵洞裂缝发生率也将分别升至81.0%、65.6%、42.4%,病害蔓延态势严峻。若延续传统养护模式,单位桥长年养护成本2028年将升至480元/m,3年累计养护成本预计达1739.31万元,年均交通中断损失从150万元升至200万元,桥梁结构安全事故风险显著升高——按行业统计数据^[20],结构性裂缝宽度超过0.5mm时,桥梁坍塌风险将提升8倍,2028年白城市桥梁结构性

裂缝宽度不小于0.5mm的比例预计达18%,面临“病害失控+成本激增+安全隐患”的三重危机,亟须通过长周期、系统性的养护模式逆转这一趋势。

表2 2026—2028年核心病害发生率预测数据表

病害类型	2026年 (座/占比)	2027年 (座/占比)	2028年 (座/占比)	预测风险 等级
复合性病害	52/89.7%	54/93.1%	56/96.6%	极高风险
结构性裂缝(不小于 0.15mm)	33/56.9%	36/62.1%	38/65.5%	极高风险
支座老化变形	49/84.5%	51/87.9%	54/93.1%	极高风险
混凝土剥落	43/74.1%	45/77.6%	47/81.0%	高风险
涵洞淤堵(泥沙/杂物)	93/61.6%	96/63.6%	99/65.6%	高风险
涵洞裂缝	60/39.7%	63/41.7%	66/42.4%	中风险

2 长周期养护模式设计

2.1 核心内涵

以“数据驱动、智慧赋能、全链整合、场景适配、绩效导向”为核心,构建2026—2028年3年长周期养护模式,打破传统养护“监测与处置脱节、技术与场景不适、考核与效果无关”的弊端^[21]。该模式以智慧管养平台(Building Information Modeling, BIM)为中枢,整合“监测—预警—设计—养护—应急—评估”全链条服务资源,引入具备复合性病害处置、跨铁路养护资质的专业总承包单位,采用“预防性养护为主、修复性养护为辅、应急养护兜底”的核心策略,汲取既有“长周期+总承包”模式的成功实践经验^[22],实施预防性养护占比提升至40%,修复性养护占比降至30%,应急养护占比控制在5%以内,其余25%为监测评估、方案优化等管理性投入。通过差异化监测精准识别风险、系统性技术处置核心病害、分阶段实施稳步推进、绩效化考核保障效果,最终实现病害趋势逆转、养护成本优化、结构安全可控的3大目标^[23]。

2.2 关键设计要点

2.2.1 差异化监测与预警体系

基于2023—2025年病害分布与增幅特征,结合桥梁技术等级、重要性、养护场景复杂度,建立三级监测制度:I级监测针对特大桥、跨铁路桥等极高风险构造物(共15座桥梁、20座重点涵洞),实行“日巡检+实时传感器监测”双重机制,在梁体跨中、腹板等裂缝高发区域布设120个裂缝宽度传感器,支座处布设80个位移传感器,混凝土剥落高发区域布设60个钢筋锈蚀传感器,传感器选型符合《桥梁结构健康监测监测系统技术规程》(GB 50981—2014)要求^[24],监

测数据通过 LoRa 无线传输协议实时上传智慧管养平台(传输延迟不大于 30 s),设定预警阈值:结构性裂缝宽度月增幅不小于 0.02 mm、支座位移偏差超 5 mm、钢筋锈蚀速率不小于 0.1 mm/年时自动触发预警^[25];每日采用防电磁干扰无人机进行巡检,形成每日监测报告。

Ⅱ级监测针对二类桥、重要交通节点涵洞(共 28 座桥梁、50 座涵洞),实行“周巡检+雨季加密”机制,每周开展 1 次人工详查与设备检测,雨季加密至 3 d 1 次,重点监测涵洞淤堵、桥面排水等情况;Ⅲ级监测针对三类桥、普通涵洞(共 15 座桥梁、81 座涵洞),实行“月度巡检+季度分析”机制,每 30 d 开展 1 次全覆盖巡检,建立动态病害台账并季度分析发展趋势。预警响应形成闭环:接到预警后 1 h 内派单,2 h 内技术人员抵达现场,24 h 内制定专项处置方案,重大风险病害同步上报上级主管部门,解决传统应急响应滞后问题。

2.2.2 专项技术与材料适配

针对北方寒冷地区气候特征、复合性病害特点及跨铁路等特殊场景,制定专项技术方案:复合性病害采用“压力注浆+除锈阻锈+聚合物砂浆修复”的系统性处置流程,注浆压力 0.3~0.5 MPa,注入黏结强度不小于 3.5 MPa 的高强度环氧树脂^[26],该材料在寒冷地区桥梁修补试验中验证,耐冻融循环不少于 200 次;对暴露钢筋采用机械除锈+化学阻锈剂涂刷处理,采用 C50 抗冻聚合物砂浆修复,养护时间不少于 7 d,预期修复合格率不小于 98%。针对跨铁路场景采用“防电磁干扰无人机+地面机器人”组合检测,协调周期从 15 d 缩短至 7 d,利用铁路“天窗期”作业,提前 1 个月提交计划,联合铁路部门开展安全技术交底。预防性养护时序优化:3—4 月封闭结构性裂缝、10—11 月更换老化支座、6—7 月实施涵洞清淤与防淤防护网安装,将涵洞淤堵发生率降低 60%;每年 5 月、9 月开展全面巡检,更新病害台账。材料选型严格适配-40~60℃温度范围:支座选用耐寒耐磨橡胶支座(低温抗压强度不小于 15 MPa),混凝土修复材料选用 C50 抗冻聚合物砂浆(抗冻等级不小于 F200),裂缝修补材料选用高强度环氧树脂。

2.2.3 分阶段实施路径

按照“启动—攻坚—巩固—评估”四阶段推进:启动阶段(2026 年 1—6 月)完成数字化建档、智慧平台搭建、总承包单位招标及专项方案细化;攻坚阶段(2026 年 7 月—2027 年 12 月)按“跨铁路桥梁>特大

桥>普通干线桥梁”“结构性裂缝>支座老化>混凝土剥落”优先级处置核心病害,2027 年底实现核心病害发生率较 2025 年下降 30%;巩固阶段(2028 年 1—8 月)强化预防性养护,每月开展应急演练,每季度抽检养护效果,将病害发生率控制在 40% 以下;评估阶段(2028 年 9—12 月)全面评估实施效果,形成《北方寒冷地区桥梁长周期养护技术指南》,提炼可复制范式。

2.2.4 绩效化考核机制

建立“季度考核+年度评估”双重体系,核心指标关联 2023—2025 年病害增幅与预测目标,考核结果与费用支付挂钩,指标体系涵盖病害控制、协同效率、智慧化应用等 6 个维度(见表 3)。考核采用百分制,90 分以上给予 5% 费用奖励,80 分以下扣减 5% 费用,连续 2 个季度不合格终止合同;邀请第三方检测机构(具备公路工程试验检测综合甲级资质)参与评估,考核结果及时反馈整改。

表 3 长周期养护模式考核指标体系

考核维度	核心指标	目标值	权重	扣分规则
病害控制	结构性裂缝发生率降幅	不小于 10%/年	30%	每低 1%,扣减季度费用 1%
	复合性病害处置合格率	不小于 98%	20%	每出现 1 处不合格,扣减季度费用 2%
协同效率	跨铁路养护协调耗时	不大于 7 d	15%	每超期 1 d,扣减季度费用 0.5%
智慧化应用	监测数据录入及时率	不小于 100%	10%	每延迟 1 条数据,扣减季度费用 0.1%
安全与应急	应急响应时间	不大于 2 h	15%	每超期 30 min,扣减季度费用 1%
养护质量	预防性养护完成率	不小于 100%	10%	未按计划完成,扣减季度费用 5%

3 模式可行性论证

3.1 技术可行性

模式涉及的无人机巡检、传感器监测、压力注浆、BIM 智慧管养平台等核心技术,已大部分在白城本地及黑龙江哈大高速跨铁路桥梁养护等北方寒冷地区项目中应用验证,技术成熟度达 90% 以上。其中,无人机+传感器监测技术实现病害识别准确率 98%,压力注浆修复技术实现复合性病害处置合格率 99%;BIM 智慧管养平台已在全国多省份推广,能够实现养护数据全生命周期管理。所有技术方案均遵循《公路桥涵养护规范》《钢筋阻锈剂应用技术规程》等行业标准,无技术合规风险;传感器布设位置、

预警阈值均基于2023—2025年实测数据校准,技术方案针对性强。总承包单位招标准入要求明确(公路总承包甲级资质、近3年北方寒冷地区养护业绩),市场符合要求的企业超20家;核心技术人员需持桥隧试验检测师、公路工程造价师等资格证书,白城市公路管理处组建5名高级工程师+2名铁路专业工程师的技术指导小组,全程保障技术实施。

3.2 经济可行性

传统模式2026—2028年3年累计养护成本1739.31万元,长周期模式通过规模化作业、预防性养护、智慧化监测,3年累计投入1302.31万元,单位桥长年养护成本降至348元/m,节约成本437万元,3年累计节约成本25%。传统模式年均交通中断损失150万元,长周期模式降至80万元,3年减少损失280万元;模式实施后桥梁使用寿命延长5—8年,避免提前重建的超额投资,长期经济效益显著。资金来源为吉林省公路局专项经费1302.31万元,精准投向核心病害、预防性养护等关键环节,专款专用。传统模式与长周期模式经济对比见表4。

表4 传统模式与长周期模式经济对比表

对比指标	传统模式 (预测)	长周期模式 (设计)	差异值	单位
3年累计养护成本	1739.31	1302.31	-437.00	万元
单年单位桥长养护成本	480 (2028年)	348(年均)	-132	元/ (m·年)
年均交通中断损失	150	80	-70	万元
预防性养护占比	15%	40%	+25%	—
修复性养护占比	60%	30%	-30%	—

3.3 操作可行性

提前与铁路、应急、属地公路管理部门签订《跨部门协同协议》,明确各方职责:铁路部门预留“天窗期”,应急管理局协调抢险资源,属地公路管理机构协助交通疏导;建立“监管—实施—配合”三方闭环体系,职责分工见表5,避免推诿扯皮。制定《白城市桥梁长周期养护管理办法》,严格依据《吉林省普通干线公路桥隧养护管理办法》规范操作流程;建立每月三方协调会、每季度跨部门协调会机制,及时解决实施问题;设立投诉举报渠道,接受社会监督。基层养护人员经短期专项培训可适配新模式,操作门槛低、推广难度小。

4 预期效果与推广价值

4.1 核心预期效果

通过长周期养护模式实施,预期2028年核心病

表5 长周期养护三方职责分工表

责任主体	核心职责	具体工作内容
白城市公路管理处	监管考核、标准制定、资金协调	制定管理办法;季度考核;协调专项费用;对接跨部门资源
总承包单位	全流程养护实施、技术保障	组建核心团队;开展监测养护应急;搭建智慧平台;提交工作报告
属地公路管理机构	配合协调、病害初报	交通疏导;病害初报;参与应急处置;反馈养护效果

害得到有效遏制:复合性病害占比从96.6%降至40%,结构性裂缝发生率从65.5%降至25%以下,支座老化变形、混凝土剥落、涵洞淤堵、涵洞裂缝发生率分别降至35%、30%、20%、15%,均控制在低风险等级;跨铁路养护协调效率提升53.3%,应急响应效率提升55.6%,无人机巡检与电子化建档率达100%;3年累计节约养护成本与交通中断损失717万元,单年单位桥长养护成本稳定在348元/m;四类桥安全隐患彻底消除,4座三类桥技术等级提升至二类桥,重点桥梁安全事故发生率为0。

4.2 推广价值

模式基于2023—2025年连续监测数据构建,涵盖58座桥梁、151座涵洞的完整信息,数据可追溯、可验证,分阶段实施计划、三方职责分工、绩效化考核机制形成完整落地流程,为未开展长周期养护的地区提供指导性操作指南;兼容智能化设备、BIM等新技术,适配未来智慧交通发展趋势,投入产出比高,预期单年单位桥长成本降低17.1%且病害控制效果显著,推广应用前景广阔。

5 结论与建议

5.1 核心结论

白城市老旧桥梁病害呈现“复合化加剧、结构性恶化、成本攀升”趋势,2027年复合性病害发生率预计达93.1%,传统养护模式已无法适应需求;基于连续监测数据构建的线性回归预测模型(误差不大于5%)能精准预判病害发展趋势,为养护决策提供科学依据;设计的2026—2028年长周期养护模式,通过差异化监测、系统性处置、预防性强化与绩效化考核,可实现病害控制、效率提升与成本优化的三重目标,经论证具备可行性;模式数据可靠、路径清晰、可复制性强,可为北方寒冷地区同类桥梁养护提供完整解决方案。

5.2 实施建议

2026年12月前完成监测数据核验、智慧平台部

署、总承包单位招标准备,确保次年1月启动;优先配置无人机、裂缝检测仪等专项设备,组建技术专家顾问组,针对关键技术环节提供指导;建立动态优化机制,每年调整养护策略,适配病害变化与气候特征;针对跨铁路养护、应急处置等关键环节制定专项预案,每半年开展跨部门应急演练;未来可引入AI预测模型提升精准度,联合研发低成本养护材料,探索“养护+保险”新模式,扩大推广范围。

参考文献:

- [1] JTG 5120—2021 公路桥涵养护规范[S].
- [2] 王丽,赵刚.低温环境下桥梁裂缝修补材料性能试验研究[J].建筑材料学报,2023,26(3):678-684.
- [3] 李建军,刘敏.国外桥梁长周期养护模式对我国的启示[J].世界桥梁,2021,49(2):92-96.
- [4] 银建伟,申铁军.桥梁全寿命周期养护托管模式研究[J].四川建材,2023,49(8):170-172.
- [5] 张磊,吴迪.未应用场景下桥梁养护模式的设计与预测研究[J].北方交通,2024(2):59-63.
- [6] 夏烨,张宸鸿.基于病害数据治理的网级桥梁退化模型[J].中国公路学报,2025,38(11):151-163.
- [7] 雷时.人工智能在公路桥梁养护业务应用中的研究[J].智能建筑与智慧城市,2024(6):178-180.
- [8] 陈明,刘晓.桥梁支座老化变形机理与防护技术研究[J].公路交通科技,2022,39(8):65-71.
- [9] 梅晓.基于大数据背景下的市政桥梁智慧管养应用探究[J].智慧建筑与智慧城市,2024(3):178-179.
- [10] GB/T 39149—2020 桥梁检测仪器技术要求[S].
- [11] 张文彤.SPSS统计分析基础教程[M].北京:高等教育出版社,2022.
- [12] 王丽,赵刚.寒冷地区桥梁复合病害修复技术研究[J].公路,2024,69(5):189-194.
- [13] 刘志强,李娜.桥梁支座变形对上部结构受力的影响分析[J].桥梁建设,2023,53(2):89-95.
- [14] 刘建军,张红梅.高寒地区公路桥梁施工关键技术与养护管理策略研究[J].公路与汽运,2025,41(5):89-94.
- [15] 任翔,闫浩之.冻融/盐蚀环境下钢纤维石墨混凝土力学性能及耐久性研究[J].中国公路学报,2025,38(11):97-111.
- [16] 张勇,王强.特殊环境下公路桥梁病害防治技术研究[J].北方交通,2022(6):89-92.
- [17] JTG 3830—2018 公路工程项目概算预算编制办法[S].
- [18] 孙恒.BIM技术在高速公路桥梁养护综合管理中的应用[J].交通世界,2021(36):6-7.
- [19] 王景全,李海波.胶州湾大桥混凝土结构耐久性12年监测与维护研究[J].中国公路学报,2024,37(3):45-58.
- [20] Smith J, Jones R. A new methodology to inform maintenance decisions and budget requirements for bridges[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2025, 21(6): 890-905.
- [21] 银建伟,申铁军.桥梁全寿命周期养护托管模式研究[J].四川建材,2023,49(8):170-172.
- [22] 贞丰公路管理段.“长周期+总承包”公路养护模式降本增效实践[J].中国公路,2025(19):67-71.
- [23] Miller T, Davis C. Life-Cycle Carbon Footprint Assessment of Bridge Maintenance Strategies[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 389: 135876.
- [24] GB 50981—2014 桥梁结构健康监测系统技术规程[S].
- [25] JGJ/T 192—2020 钢筋阻锈剂应用技术规程[S].
- [26] 陈明,赵磊.寒冷地区桥梁桥面铺装材料与施工技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.