

Research on Preventive Maintenance Management Strategies for Highway Bridges

Haiyang Jiang

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

Abstract

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

Keywords

Preventive; Maintenance and management; Key strategy

公路桥梁预防性养护管理策略研究

蒋海洋

滨海县公路事业发展中心，中国·江苏 盐城 224500

摘要

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

关键词

预防性；养护管理；关键策略

1 绪论

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

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

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

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

2 公路桥梁预防性养护相关理论基础

2.1 预防性养护的核心内涵与原则

预防性养护的核心内涵是“在病害发生前介入，延缓

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

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

2.2 公路桥梁常见病害类型与诱因

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

2.3 预防性养护与事后维修的差异对比

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

3 公路桥梁预防性养护管理现状与问题分析

3.1 当前管理现状

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

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

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

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

3.2 核心问题拆解

3.2.1 技术层面：早期识别与技术适配双重短板

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

3.2.2 管理层面：责任与计划双重缺位

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

3.2.3 数据层面：数据碎片化与应用缺失

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

4 公路桥梁预防性养护管理关键策略

4.1 技术策略：构建“早期识别—精准养护”技术体系

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

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

4.2 管理策略：完善全周期管控机制

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

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

4.3 保障策略：强化支撑体系建设

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

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

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

5 结论与展望

5.1 研究主要结论

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

5.2 研究不足与未来方向

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

参考文献

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