

智慧养护背景下公路桥梁工程管理优化与实践

侍文龙

内蒙古交通集团有限公司阿拉善分公司 内蒙古 阿拉善盟 750306

摘要：为破解传统公路桥梁养护管理模式滞后、信息化水平低、技术落地不足等行业痛点，本文立足智慧养护数字化、精准化、主动化、闭环化核心特征，系统剖析当前工程管理的现存问题及成因。从信息化体系、养护模式、技术人才、管控考核四个维度提出优化策略，并结合 316 国道实际工程案例验证方案实效，为公路桥梁智慧化、精细化、全生命周期养护管理提供实践参考。

关键词：智慧养护背景；公路桥梁工程；管理优化；实践

引言：随着交通基础设施高质量发展推进，公路桥梁服役环境复杂、荷载压力增大，传统依赖人工经验的被动养护模式，已难以适配现代化路桥运维需求。智慧养护依托物联网、大数据、数字孪生等技术，成为路桥工程管理转型核心方向。本文结合行业发展现状，梳理传统管理短板，针对性提出优化对策，并依托实际工程实践验证可行性，助力路桥养护从被动处置向主动预判、数据驱动转型。

1 智慧养护与公路桥梁工程管理基础理论与现状

1.1 智慧养护核心概述

(1) 智慧养护是以数据驱动为内核的新型管养范式，其核心特征体现为“四化”：数字化实现设施状态全要素表达，精准化聚焦病害靶向处治，主动化强调基于感知的预防性干预，闭环化形成检测到处治的全链条追溯。(2) 支撑智慧养护的关键技术涵盖：物联网与智能感知完成数据采集，大数据分析挖掘劣化规律，人工智能辅助病害识别与方案比选，数字孪生构建物理与虚拟双向映射，四类技术协同构筑“感知—分析—诊断—决策”闭环。(3) 与传统养护的差异核心在于：决策依据从经验类比转向数据驱动，作业模式从计划修、故障修转向状态修、预测修，管理粒度从定性描述深化至构件级量化，响应时效从事后处置前移至主动预警。

1.2 公路桥梁工程管理核心内容

(1) 全生命周期管理贯穿桥梁服役全过程，涵盖建设施工期（质量形成与数据建档）、日常巡检期（外观与初步评估）、病害处置期（检测与加固实施）、养护运维期（系统性保养）、退役管控期（拆除或改造决策），各阶段数据须有效传递累积。(2) 核心管理维度聚焦五方面协同：质量管理保障结构服役性能，安全管

理防控运营风险，成本管理优化全寿命周期费用，进度管理协调养护与交通保通，信息化管理打通数据流通与业务在线协同^[1]。

1.3 传统公路桥梁工程管理现状

(1) 管理模式以被动式养护为主导，遵循“病害出现—现场核查—制定方案—组织实施”的响应逻辑，决策高度依赖工程师个人经验，缺乏系统性数据支撑与前瞻性研判。(2) 运维全流程呈现“巡检靠眼看、检测靠人记、养护按类派、决策凭经验”的典型特征，信息化程度低，纸质台账与离线报表仍为主要载体，数据孤岛严重，信息传递链长、损耗大。(3) 行业标准虽已建立以《公路桥涵养护规范》为代表的技术框架，但主要面向定期检查与分类评定，针对实时监测数据融合、动态阈值设定、智能决策验证等新需求存有标准空白，动态调整能力明显不足。

2 智慧养护背景下公路桥梁工程管理现存问题与成因分析

2.1 信息化管理体系不完善

(1) 信息系统碎片化问题突出，建设、养护、运营等阶段采用不同软件平台，数据库独立、接口标准各异，导致各部门数据无法有效共享互通，形成严重的信息孤岛。(2) 数据采集缺乏统一规范，不同检测手段获取的数据格式、精度、频次参差不齐，且多依赖人工填报，更新滞后严重，历史纸质台账电子化进程缓慢，缺乏贯穿全生命周期的标准化数据管控体系。(3) 现有信息化平台功能多局限于静态档案存储与基础报表生成，缺乏动态分析、趋势预测与辅助决策能力，无法支撑从建设到退役的全生命周期闭环管理需求。

2.2 养护管理模式较为滞后

(1) 养护决策仍以“不坏不修、坏了再修”的被动抢修模式为主导, 依赖定期计划而非实时状态触发, 预防性养护理念虽被提出, 但实际落实中因缺乏精准预警依据而流于形式。(2) 养护作业流程标准化程度较低, 从病害识别、方案制定到质量验收各环节执行口径不一, 智能化技术仅在少数试点工程中应用, 整体覆盖率和常态化运行水平严重不足。(3) 管养分离改革推进不彻底, 养护单位与管理部门权责交叉, 信息传递链条冗长, 统筹协调效率低下, 严重制约智慧养护闭环管理效能的发挥^[2]。

2.3 技术应用与人才配置短板

(1) 智能监测、数字孪生等核心技术多停留在科研示范与局部试点阶段, 受限于传感器布设成本、数据通信稳定性及模型验证不足等因素, 规模化落地应用场景有限。(2) 现有从业人员多为传统路桥工程或管理类专业出身, 对大数据分析、AI 模型应用等新技术理解不深, 缺乏既懂业务又懂数据的智慧养护复合型人才, 供需结构性矛盾突出。(3) 智能化设备运维能力薄弱, 前端感知设备故障率高、校准维护不及时, 数据质量难以保障, 技术应用“最后一公里”执行效果与预期存在较大落差。

2.4 管控机制与考核体系不健全

(1) 智慧养护专项管理制度尚不完善, 行业层面缺乏针对数字化巡查、在线监测预警等新型作业模式的规范指引与技术标准, 制度供给滞后于技术发展步伐。(2) 绩效考核体系仍沿用传统养护的定性化指标, 未能将数据覆盖率、预警响应时效、预测准确率等智慧化能力指标纳入考核框架, 难以有效牵引管理行为转型。(3) 监督管控力度不足, 对智能化养护执行过程缺乏实时跟踪与效果评价机制, 考核结果与整改落实脱节, 管理闭环尚未形成, 执行落地缺乏刚性约束。

3 智慧养护背景下公路桥梁工程管理优化策略

3.1 构建一体化智慧信息化管理体系

(1) 搭建覆盖路桥全生命周期的智慧管理平台, 将结构监测数据、日常巡查记录、维修加固档案、行政管理台账等多源信息统一集成至同一数据底座, 实现“一桥一档”动态化、可视化的集中管控, 为科学决策提供坚实的数据基础。(2) 建立贯穿数据采集、传输、存储、共享与更新全链条的标准化机制, 统一数据格式与接口规范, 明确各环节责任主体与操作流程, 打通规划、建设、养护、运营等阶段之间的信息壁垒, 实现跨部门数据无障碍流通与协同调用, 从根本上破除数据孤

岛问题。(3) 依托大数据分析技术, 对桥梁结构响应、环境荷载作用、病害演化规律等多源异构数据进行深度关联挖掘与趋势预测, 通过可视化大屏实现桥梁健康状态分级预警与动态展示, 为管理人员提供直观、及时、精准的数据支撑与辅助决策依据。

3.2 创新智能化养护管理运行模式

(1) 全面推行预防性智慧养护模式, 基于实时监测数据与历史劣化规律, 构建病害风险预测模型, 科学研判病害发展趋势, 在病害尚处萌芽阶段即实施精准干预处治, 变“事后抢修”为“事前防控”, 有效延长桥梁服役寿命并降低全生命周期养护成本。(2) 优化养护全流程闭环管理机制, 构建覆盖“感知—分析—决策—执行—评估”各环节的一体化管控链条, 确保每项工作成果均以数据形式实时反馈至管理平台, 形成持续优化的循环改进路径, 实现养护作业从计划编制到效果验证的全过程可追溯管理^[3]。(3) 完善管养协同机制, 厘清养护单位、管理部门、技术支撑方等多元主体的职责边界与信息交互规则, 建立跨部门联席会议与定期信息通报制度, 优化资源配置与调度流程, 切实破解条块分割、多头管理难题, 全面提升多主体统筹管理效率。

3.3 强化核心技术落地与人才队伍建设

(1) 以实用为导向, 有序推广物联网智能感知、数字孪生仿真建模、AI 辅助病害识别等核心技术的规模化工程应用, 优先选取典型桥梁开展示范工程建设, 在实践中总结经验、优化方案, 形成可复制、可推广的技术实施路径与成熟应用模式。(2) 搭建多层次人才培养与引进体系, 联合高校与科研机构开设智慧养护专题培训课程, 系统提升从业人员在数据分析、模型应用、平台操作等方面的专业能力, 建立内部选拔与外部引进并重的人才配置机制, 加快培育既精通路桥工程业务又具备数字化素养的复合型专业人才。(3) 建立智能化设备常态化运维保障机制, 明确前端传感器、数据传输设备、平台服务器等关键设施的巡检校准周期、故障处置流程与备件管理规范, 配备专职运维技术人员, 确保技术系统长期稳定可靠运行, 为智慧养护应用落地提供持续有力的技术支撑。

3.4 完善智慧养护管控与考核评价机制

(1) 加快制定适配智慧养护新模式的专项管理制度与行业实施规范, 明确数字化巡查作业标准、在线监测预警阈值设定方法、智能辅助决策评估准则等关键内容, 填补现有制度体系中的空白, 使智慧养护各项工作有章可循、有规可依。(2) 构建多维度智慧养护绩效

考核体系,将数据覆盖率、预警响应及时率、预测准确率、闭环处置率等智慧化能力核心指标纳入考核范畴,建立考核结果与薪酬激励、评优评先紧密联动的奖惩机制,以绩效导向有效牵引传统管理行为向智慧化方向转型^[4]。(3)建立常态化监督巡查与动态优化调整机制,实行日常督查、专项检查与年度综合评估相结合的立体化监督模式,对发现的问题即时通报整改,定期开展管理效能综合评估,依据评估结果动态优化管理策略与措施,形成“监督—反馈—整改—提升”的螺旋式上升格局,持之以恒推动智慧养护管理质量持续提升。

4 工程实践案例分析

4.1 案例工程概况

(1)本文以 316 国道老河口段 AI+ 无人机桥梁路面高效巡检养护融合项目为分析案例。该项目路段全长 17.244 公里,核心节点河谷汉江公路大桥全长 4701.5 米、主跨 420 米,日均车流量 1.2 万辆,重载货车占比高达 28%。原有养护管理模式以传统人工巡检为主,受限于 72 米高空锚固点、深水墩柱等巡检盲区,存在效率低、覆盖不全、高空作业安全风险突出等突出问题。(2)该项目为湖北省国省干线高质量养护交通强国建设试点的关键实践,于 2025 年 7 月正式启动。建设目标锚定“智慧化、自动化、精准化”方向,旨在通过 AI 与无人机技术融合,构建覆盖全路段的无人值守智慧巡检体系,推动公路养护从“人工巡检”向“智能防控”、从“被动维修”向“主动预防”转型。

4.2 智慧养护管理优化方案落地实施

(1)智慧管理平台方面,项目采用“机场全自动+智能闭环”技术路线,建成 B/S 架构的 AI 自动巡检作业平台,整合指挥调度、航线规划等核心模块。同时搭建数字孪生底座,实现病害数据与空间模型的动态关联。平台操作手册与教学视频均已编制完成,系统全流程自动化能力全面落地。(2)智能化技术落地方面,经多轮实地勘察与技术论证,在沿线精准部署 3 套大疆机场 3 及配套高性能无人机,搭建起覆盖全路段的无人值守巡检网络。针对路面裂缝、坑槽、桥梁伸缩缝破损、排水系统、交安设施锈蚀等 12 类路桥病害开发 AI 识别模型。截至 2026 年 4 月中旬,项目已完成 12 条巡检航线规划与 12 类典型病害 AI 模型训练。(3)管理模式与考核机制方面,项目建立了“巡检—识别—报告—推送”全流程

数字化闭环管理机制^[5]。系统试运行平稳高效,2026 年 3 月,项目核心成果 G316 国道无人机自动监测大模型系统已正式向中国版权保护中心提交软件著作权申报并获受理。

4.3 应用效果对比分析

(1)管理效率显著提升。相较于传统人工巡检,“AI+ 无人机”模式实现无人值守、自动起降、盲区全覆盖,无需封路占道、不影响正常通行。传统数天的巡检工作量压缩至数小时完成,综合识别精度稳定达 85%,后期可提升至 90% 以上。病害识别准确率与巡检效率均实现质的飞跃。(2)养护质量与安全水平有效提升。系统可对 12 类路桥病害实现自动识别与量化分析,显著提升早期病害发现率与处置效率。传统人工巡检难以覆盖的高空锚固点、深水墩柱等盲区实现全覆盖监测。养护模式从“被动维修”加速向“主动预防”转型。(3)实践中仍存在优化空间:AI 模型识别精度有待随现场数据持续采集与病害样本库扩充而迭代优化;多源数据融合与应用场景拓展仍需进一步完善;后续需重点完善养护闭环管理、加快技术优化与成果转化,力争打造可复制、可推广的智能养护示范样板。

结束语

本文聚焦智慧养护场景下公路桥梁工程管理升级需求,全方位剖析行业现存短板,构建了多维度、可落地的管理优化体系。经工程实践证实,智能化养护模式可大幅提升巡检效率、消除运维盲区、降低养护风险。未来需持续迭代智能识别模型、深化多源数据融合应用,完善闭环管控机制,打造标准化智慧养护样板,推动公路桥梁工程管理高质量可持续发展。

参考文献

- [1] 王景全,李锐,张凯.智慧养护驱动下公路桥梁运维管理体系优化研究[J].公路交通科技,2024,41(09):178-185.
- [2] 陈曦,周建林.基于数字孪生的公路桥梁智慧养护管理模式构建[J].中外公路,2025,45(02):201-207.
- [3] 赵文涛.智慧交通背景下桥梁工程精细化养护管理实践与优化[J].施工技术,2024,53(18):96-100.
- [4] 刘鑫,杨明.公路桥梁智慧养护风险管控与管理效能提升研究[J].铁道建筑,2023,63(12):145-149.
- [5] 吴浩宇.大数据技术在公路桥梁智慧养护管理中的应用实践[J].交通科技,2025,19(03):156-160.