

公路养护管理智能化技术应用探讨

王洪涛

河北九门口复线建设发展有限公司 河北 秦皇岛 066000

摘要: 随着我国交通基础设施建设规模不断扩大,公路网络日益密集,传统以人工巡检和经验判断为主的公路养护管理模式已难以满足新时代高质量发展的要求。智能化技术的迅猛发展为公路养护管理带来了新的机遇与挑战。本文系统梳理了当前公路养护管理面临的主要问题,深入分析了物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)、数字孪生、5G通信等关键技术应用场景与实施路径,并结合典型案例探讨其实际成效。在此基础上,本文进一步提出了推进公路养护管理智能化转型的对策建议,包括完善顶层设计、加强数据治理、推动标准体系建设、强化人才支撑等,旨在为构建高效、精准、绿色、安全的现代化公路养护管理体系提供理论支撑与实践参考。

关键词: 公路养护;智能化;物联网;大数据;人工智能;数字孪生;智慧交通

引言

截至2024年底,我国公路总里程已突破540万公里,其中高速公路超过18万公里,位居世界第一。庞大的公路网络在支撑经济社会发展的同时,也对养护管理工作提出了更高要求。公路作为重要的公共基础设施,其性能状态直接关系到交通安全、通行效率与运营成本。然而,长期以来,我国公路养护管理普遍存在“重建设、轻养护”“重应急、轻预防”的倾向,导致养护资源分配不均、决策科学性不足、响应效率低下等问题频发^[1]。近年来,国家高度重视交通强国战略实施,《交通强国建设纲要》《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》等政策文件明确提出要推动基础设施全生命周期健康管理,加快公路养护向数字化、网络化、智能化转型。在此背景下,如何有效融合新一代信息技术,构建覆盖“感知—分析—决策—执行”全链条的智能养护体系,已成为行业亟待解决的核心课题。

1 公路养护管理面临的现实困境

1.1 养护决策依赖经验,缺乏科学依据

传统养护决策多依赖技术人员现场巡查和主观判断,缺乏对路面病害演化规律、交通荷载影响、气候环境变化等因素的量化分析,导致养护时机把握不准、方案针对性不强,易出现“过度养护”或“养护不足”现象。

1.2 检测手段滞后,数据获取效率低

常规人工巡检存在劳动强度大、覆盖范围有限、主观性强、危险性高等问题。虽然部分路段引入车载检测设备,但普遍存在数据采集频率低、实时性差、成本高等弊端,难以实现对路网状态的动态、连续监测。

1.3 信息孤岛严重,协同效率不高

公路养护涉及路政、养护、交警、气象、施工等多

个部门,但各系统间数据标准不统一、接口不兼容,导致信息难以共享,形成“数据烟囱”。跨部门协同响应机制不健全,影响应急处置与日常养护的联动效率。

1.4 预防性养护推广不足,全寿命周期成本高

由于缺乏对路面性能退化趋势的精准预测,预防性养护措施难以科学制定,往往等到病害严重后才进行修复,不仅增加维修成本,还影响交通运行。据测算,预防性养护投入1元可节省后期维修费用4-10元,但目前我国预防性养护占比仍偏低。

2 智能化技术赋能公路养护的关键路径

智能化技术通过构建“感知—传输—分析—决策—执行”的闭环体系,为破解上述困境提供了系统性解决方案。

2.1 全域感知:构建多源异构数据采集网络

智能化养护的基础在于对公路基础设施状态的全面、实时、精准感知。当前,物联网技术的发展使得在桥梁伸缩缝、边坡支护结构、沥青路面内部等关键部位部署微型传感器成为可能。这些传感器可连续采集温度、湿度、应变、位移、振动等物理参数,形成对结构健康状态的长期监测能力。例如,在高等级公路上嵌入光纤光栅传感器,不仅能实时反映路面温度场分布,还能捕捉重载车辆通过时产生的瞬时应力变化,为材料疲劳分析提供数据支撑。与此同时,移动智能巡检装备正逐步替代传统人工巡查。搭载高清摄像头、激光雷达、红外热成像仪和三维探地雷达的智能巡检车,可在正常车速下完成对路面平整度、车辙深度、基层空洞等指标的高精度测量^[2]。无人机则凭借其灵活机动的优势,广泛应用于高边坡、峡谷桥梁等人工难以抵达区域的快速巡查,显著提升了检测覆盖面与安全性。此外,借助公众参与机

制，通过车载OBD设备或智能手机APP收集车辆颠簸、异常制动等间接数据，也能构建起低成本、广覆盖的“众包式”路况感知网络，进一步丰富数据来源。

2.2 数据融合：打造公路养护大数据平台

海量异构数据的汇聚只是第一步，真正的价值在于融合与治理。现代公路养护大数据平台需整合来自固定传感器、移动巡检设备、交通流量监测系统、气象预报服务、历史养护档案以及BIM模型等多维度信息，构建统一的数据湖架构。在此基础上，通过数据清洗、去噪、时空对齐与语义标注等治理手段，消除数据冗余与矛盾，确保后续分析的可靠性。尤为重要的是，需建立基于地理信息系统（GIS）的时空数据库，将每一处病害、每一次养护作业都精确映射到空间坐标与时间轴上。这种时空关联不仅支持对单一路段性能演变的纵向追踪，也便于开展区域间横向对比分析，为制定差异化养护策略提供依据。通过可视化界面，管理者可直观掌握全路网健康状态，实现从“看不见”到“看得清”的转变。

2.3 智能分析：AI驱动病害识别与预测

在数据基础之上，人工智能技术成为提升分析深度与决策智能的核心引擎。计算机视觉算法，特别是基于深度学习的目标检测与分割模型，已能对巡检图像中的裂缝、坑槽、泛油、车辙等常见病害进行自动识别，准确率普遍超过90%。这不仅大幅减轻了人工判读负担，还显著提高了病害分类的一致性与标准化水平^[3]。更进一步，机器学习方法被广泛用于构建路面性能预测模型。通过训练随机森林、XGBoost或长短期记忆网络（LSTM）等算法，系统可综合交通量、轴载谱、降雨频率、冻融循环次数等多因素，预测未来3至5年路面使用性能指数（PQI）的变化趋势。此类预测能力是实施预防性养护的前提。同时，针对桥梁、高边坡等高风险结构，研究者还开发了基于贝叶斯网络或深度强化学习的风险评估模型，能够根据实时监测数据动态更新结构安全等级，并在风险阈值被突破时自动触发预警机制，实现从“事后处置”向“事前防控”的跃迁。

2.4 数字孪生：构建虚实映射的养护决策平台

数字孪生技术代表了智能化养护的高级形态。它通过集成BIM、GIS与IoT数据，构建出与物理公路完全对应的高保真虚拟模型——即“数字镜像”。在这个虚拟空间中，不仅可以直观展示道路几何形态、材料属性、结构组成等静态信息，还能实时映射温度、应力、交通流等动态状态。依托这一孪生体，养护管理者可在虚拟环境中对多种养护方案进行仿真推演。例如，对比铣刨加铺与微表处工艺在不同交通量条件下的使用寿命、成本

效益及施工期间的交通影响，从而选出最优解。此外，养护施工全过程也可在数字孪生平台上实现可视化管控：从任务派发、人员调度、材料进场到质量验收，所有环节均可追溯、可监控、可优化，极大提升了项目管理的透明度与执行力。

2.5 智能调度：优化资源配置与作业效率

智能化不仅体现在“看”和“想”，更在于“做”。基于AI分析结果，系统可自动生成养护任务清单，并结合实时交通状况、天气预报、施工资源分布等约束条件，利用运筹优化算法规划最优作业路线与时间窗口，实现任务的智能派单与资源的精准匹配。在作业端，无人化装备的应用正在改变传统养护模式。自动驾驶养护车可按预设路径完成清扫、洒水、融雪剂撒布等常规任务；智能摊铺机器人则能根据路面高程数据自动调整摊铺厚度，确保平整度达标；自动灌缝设备则通过视觉识别裂缝走向，实现精准注胶。这些装备不仅降低了人工成本与安全风险，还提升了作业的一致性与精度。而5G通信与边缘计算的结合，则为上述智能调度提供了底层支撑。5G的低时延特性使得巡检数据可在边缘节点就近处理，实现“秒级”病害识别与告警，大幅缩短从发现问题到启动处置的响应周期，真正实现“感知即响应”的闭环管理。

3 典型应用案例分析

3.1 案例一：浙江省“智慧高速”养护平台

浙江省在杭绍甬智慧高速试点中，部署了全覆盖的IoT感知网络与AI视频分析系统。通过无人机定期巡检+固定摄像头实时监控，结合AI算法自动识别路面病害，系统自动生成养护工单并推送至养护单位。同时，平台集成气象、交通流数据，实现“雨雪冰冻—路面结冰—撒布融雪剂”的智能联动。实施后，病害发现效率提升70%，应急响应时间缩短50%。

3.2 案例二：广东省桥梁健康监测系统

广东省在虎门大桥、南沙大桥等特大桥梁上布设上千个传感器，构建桥梁数字孪生模型。系统可实时监测主梁挠度、索力变化、支座位移等关键参数，并通过AI模型预测结构剩余寿命。2023年，系统成功预警某斜拉桥拉索锈蚀风险，避免重大安全事故，节约潜在经济损失超亿元。

3.3 案例三：北京市道路预防性养护决策支持系统

北京市交通委开发了基于大数据的预防性养护决策平台，整合近十年路况检测数据、交通量数据、气象数据等，训练LSTM神经网络预测各路段PQI变化趋势。系统按季度生成“养护优先级清单”，指导各区县科学安排

微表处、雾封层等预防性措施。2024年全市预防性养护比例提升至45%，养护资金使用效率提高20%。

4 推进公路养护智能化转型的对策建议

4.1 强化顶层设计，完善政策标准体系

建议交通运输部牵头制定《公路养护智能化发展指导意见》，明确2025—2035年分阶段发展目标、重点任务与技术路线图，统筹全国智能化养护工作。同步加快标准体系建设，围绕数据接口、设备接入协议、AI算法评估指标、信息安全防护等级等关键环节，出台统一的技术规范和管理标准，解决当前各地系统“烟囱林立”、互不兼容的问题。同时，推动将智能化养护纳入国家新基建和交通强国建设重点任务，强化政策引导与资源保障。

4.2 夯实数据基础，推动共建共享机制

数据是智能化转型的核心要素。应加快建设国家级公路养护数据中心，整合路况检测、桥梁隧道监测、气象环境、交通流量等多源异构数据，实现省、市、县三级数据的实时汇聚、动态更新与分级共享^[4]。鼓励采用“政府主导+企业运营”的数据治理模式，在确保公共安全与个人隐私合规的前提下，引入专业数据服务商参与数据清洗、标注与价值挖掘。探索建立数据资产确权与交易机制，激活数据要素潜能。

4.3 加大技术研发与示范推广力度

设立公路养护智能化专项科研基金，重点支持AI驱动的路面病害自动识别、基于数字孪生的基础设施全生命周期仿真、无人化巡检与养护装备、边缘计算与5G融合应用等前沿技术攻关。遴选江苏、浙江、广东等信息化基础较好的省份，开展“智慧养护示范区”建设，集成应用智能感知、大数据分析、预测性维护等技术，打造样板工程，并通过现场观摩、经验交流、标准输出等方式在全国复制推广。

4.4 加强复合型人才培养

推动高等教育与职业教育改革，在交通类高校增设“智能交通工程”“基础设施智能运维”等交叉学科专业，构建“交通+信息+人工智能”的课程体系。鼓励校企联

合共建实训基地和产业学院，定向培养懂养护业务、信息技术、会数据分析的复合型人才。同时，面向现有基层养护队伍，开展常态化数字技能轮训，重点提升其对智能终端、移动APP、养护管理平台的操作能力，打通智能化落地“最后一公里”。

4.5 创新投融资与绩效考核机制

探索将智能化养护投入纳入公路全寿命周期成本核算，鼓励采用PPP、EPC+O等模式吸引社会资本参与。改革养护绩效考核体系，将“预防性养护比例”“病害发现及时率”“用户满意度”等指标纳入考核，引导高质量发展。

5 结语

公路养护管理智能化是交通强国建设的重要支撑，也是提升基础设施韧性、保障人民出行安全的必然选择。通过物联网、大数据、人工智能、数字孪生等技术的深度融合，可实现从“被动响应”向“主动预防”、从“经验驱动”向“数据驱动”、从“碎片管理”向“系统治理”的根本转变。未来，随着6G、量子计算、具身智能等前沿技术的发展，公路养护智能化将迈向更高阶的自主决策与自适应优化阶段。然而，技术只是工具，真正的变革在于理念更新与制度创新。唯有坚持“以人为本、安全至上、绿色低碳、智能高效”的发展理念，统筹推进技术、管理、人才、制度协同演进，方能构建起面向未来的现代化公路养护管理体系。

参考文献

- [1]王素飞.日益智能化的公路桥梁养护管理[J].中国公路,2021,(20):58-59.
- [2]宁江涛.公路与桥梁养护管理的智能化与科学决策总结与展望[J].交通科技与管理,2025,6(13):180-182.
- [3]曹阳.数字化、智能化背景下公路综合智慧养护管理系统建设[J].智能建筑与智慧城市,2025,(01):177-179.
- [4]黄华.基于智能化技术的高速公路运营养护管理体系构建[J].汽车周刊,2025,(09):180-181+193.