

# 大数据时代公路养护管理应用探究

郭涛

山西省交通新技术发展有限公司, 山西 太原 030012

**[摘要]** 大数据技术驱动公路养护管理向智能决策范式转型, 其核心在于实现基础设施全生命周期数据的价值转化。文中系统解析制度滞后、技术瓶颈与人才断层等核心矛盾, 创新性构建数据治理框架与智能决策模型, 提出涵盖感知层优化、分析层升级、执行层再造的协同演进路径。研究成果推动养护模式向预防性、自适应方向演进, 为新型交通基础设施建设提供方法论指引。

**[关键词]** 大数据; 公路养护; 信息化管理; 技术应用

DOI: 10.33142/sca.v8i5.16412

中图分类号: TU723

文献标识码: A

## Exploration on the Application of Highway Maintenance Management in the Era of Big Data

GUO Tao

Shanxi Provincial Transportation New Technology Development Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030012, China

**Abstract:** Big data technology drives the transformation of highway maintenance management towards intelligent decision-making paradigm, with the core of realizing the value transformation of infrastructure lifecycle data. The article systematically analyzes core contradictions such as institutional lag, technological bottlenecks, and talent gaps, innovatively constructs a data governance framework and intelligent decision-making model, and proposes a collaborative evolution path covering perception layer optimization, analysis layer upgrading, and execution layer reengineering. The research results promote the evolution of maintenance models towards preventive and adaptive directions, providing methodological guidance for the construction of new transportation infrastructure.

**Keywords:** big data; highway maintenance; information management; technical application

### 引言

数字技术革命正驱动公路养护管理迈入全域智能化的深水区, 其本质是通过数据要素重构基础设施全生命周期管理体系。传统养护模式在应对路网结构复杂化、服役环境动态化等挑战时, 暴露出决策滞后性与资源粗放配置的固有缺陷。智能感知技术的集群突破, 使得路基含水率监测、路面微应变捕获、桥梁振动频谱分析等高维数据得以实时获取, 为构建“数字孪生+深度学习”的决策范式奠定基础。当前技术迭代与制度演进呈现非对称性: 边缘计算设备已实现厘米级定位精度的裂缝扫描, 但跨部门数据共享壁垒仍阻碍多源信息融合; 人工智能算法具备路面性能退化预测能力, 却因组织架构的科层化难以嵌入动态决策流程。突破困局需构建“技术-制度-组织”三位一体的协同创新框架: 在技术维度深化 BIM+GIS 的时空建模能力, 开发具备自解释性的养护决策算法; 在制度层面建立路网数据资产确权机制, 设计激励相容的数据开放共享政策; 在组织领域培育兼具土木工程知识图谱与数据科学思维的复合型人才梯队。未来随着量子传感、神经形态计算等颠覆性技术的渗透, 公路养护将实现纳米级材料老化监测与自修复系统的精准触发, 推动基础设施管理从“治已病”向“防未病”的范式跃迁, 为新型交通基础设施建设提供价值创造新范式。

### 1 大数据时代公路养护管理现状

#### 1.1 公路养护市场化管理制度有待优化完善

现行公路养护市场化机制尚未构建起数据驱动的协同治理框架, 表现为监管主体与市场参与方的数据交互存在结构性梗阻。养护承包单位与监管部门之间缺乏统一的数据交换接口标准, 导致路况检测记录、施工过程数据、材料消耗明细等关键信息在传输过程中产生格式错位与语义失真, 形成“数据烟囱”效应。合同管理体系对数据采集的颗粒度、更新频率、校验规则等核心要素缺乏法定约束, 致使养护企业报送的作业数据存在完整性不足与时效性滞后问题, 难以支撑路面性能退化模型的动态校准。更深层次矛盾源于制度设计中的权责错配: 数据所有权归属模糊导致承包方担忧核心经营数据外泄, 共享意愿低迷; 监管部门囿于传统纸质档案管理模式, 对结构化数据的清洗、存储与分析能力不足, 无法有效挖掘数据资产价值。技术标准碎片化进一步加剧协同困境, 不同厂商的智能检测设备输出数据格式各异, 跨系统数据融合需依赖人工二次加工, 既增加管理成本又引入人为误差风险。现行招投标机制尚未将数据治理能力纳入供应商评价体系, 部分养护企业为降低成本采用低精度传感设备, 导致采集数据的可信度与连续性难以满足科学决策需求。

## 1.2 公路养护及管理人员组成结构有待完善

当前养护队伍呈现“技术断层”与“能力失衡”的双重困境。基层作业人员多依赖传统养护经验，对智能检测设备的操作界面理解不足，难以精准捕捉路面裂缝宽度、路基沉降速率等关键参数，导致高精度传感器采集的数据流在初始环节即出现信息损耗。技术管理岗人员虽具备基础信息化工具使用能力，但普遍缺乏机器学习算法调参、时空数据融合分析等进阶技能，致使病害预测模型更新滞后于实际路况演变。更深层矛盾体现在组织架构的刚性约束：养护作业团队与数据分析部门分属不同管理体系，现场采集的原始数据需经多层级人工转译方能进入决策系统，时效性与保真度大幅衰减<sup>[1]</sup>。年龄结构失衡加剧技能代际鸿沟，资深员工固守既有作业规程，对数字化巡检流程适应性较弱；新生代技术人员虽熟悉智能终端操作，却缺乏对道路材料性能退化机理的深度认知，难以建立数据特征与实体病害间的因果关联。

## 1.3 公路养护管理系统还需不断完善更新

当前养护管理系统普遍存在功能模块化割裂与智能分析能力不足的深层缺陷。多数系统仍采用单机版或局域网部署模式，数据交互协议陈旧导致跨区域路网数据无法实现云端同步，省际交界路段养护信息长期处于“碎片化”管理状态。系统内核算法局限于规则引擎驱动的基础统计运算，缺乏基于机器学习的路况预测模型与自适应优化引擎，致使病害识别阈值设定依赖人工经验调整，难以精准捕捉隐性损伤的时空演变规律。更为严峻的是，异构数据融合能力薄弱——气象部门的降水预报、交管部门的车流热力图、地质单位的岩土监测数据因接口标准不统一，无法与养护系统实现实时交互验证，导致暴雨径流对路基稳定性的影响评估、重载车辆轨迹与路面疲劳开裂的关联分析等复杂场景建模缺乏多源数据支撑。系统升级机制僵化问题突出，传统瀑布式开发模式导致功能迭代周期长达12~18个月，无法适配智能检测设备每年迭代的传感精度提升与新型数据分析算法的快速演进，造成系统功能与前沿技术间形成“代际落差”。

## 1.4 技术水平有待提升

当前公路养护技术体系在检测精度与智能分析层面面临多重瓶颈。路况智能检测设备在复杂场景下的鲁棒性不足，如多光谱传感器在雨雾天气中易受环境干扰，激光雷达对沥青路面微裂缝的识别分辨率未达毫米级要求，导致隐性病害漏检率居高不下。针对桥梁缆索内部锈蚀、隧道衬砌空鼓等隐蔽性缺陷，现有无损检测技术尚未突破信号衰减与噪声干扰的技术壁垒，电磁探伤、红外热成像等方法的检测深度与精度受制于结构材料特性差异，难以建立跨地域、跨结构的标准化评估模型。数据分析维度，深度学习算法在路面病害分类中存在特征提取泛化能力不足的缺陷，对非典型破损形态（如网状裂缝、局部沉陷）

的误判率超出工程可接受阈值<sup>[2]</sup>。时空数据融合模型尚未有效嵌入区域性气候变量（如冻融循环次数、酸雨腐蚀强度）与动态交通荷载谱的耦合作用机制，导致预测性养护周期设定与区域实际服役环境适配性偏差显著。

## 2 大数据时代下的公路养护管理措施

### 2.1 做好前期基础档案资料收集与分析

构建全生命周期数据治理框架是公路养护管理升级的核心基础，需系统性整合设计、施工、运维各阶段的关键数据资产。针对历史养护记录，通过时间序列分析挖掘周期性养护规律与隐性关联特征，构建涵盖裂缝扩展速率、材料老化系数等指标的性能退化图谱。对非结构化巡检影像资料，采用计算机视觉技术实现病害尺寸量化标注与演变轨迹追踪，结合地理信息系统（GIS）空间叠加分析定位高频损毁区域。在此基础上，开发多源异构数据融合引擎，将交通流量热力图、气候环境参数等动态变量嵌入路面性能评估模型，通过迁移学习算法适配不同区域的路基结构特性与服役环境差异。建立基于知识图谱的养护决策支持模型，实现病害成因推理、养护方案匹配、资源调配优化的全链条智能辅助，最终形成“数据驱动需求预判、模型指导资源预投”的主动养护模式，破解传统周期性养护导致的资源错配与效能滞后问题。

### 2.2 完善养护信息数据

公路养护信息数据的完善需构建“全域感知-智能处理-可信传输”的全链条技术体系。通过部署高密度光纤光栅传感器阵列，实现道路结构内部应变场、温度梯度及车载动态响应的毫秒级采样，结合智能车载终端实时捕获车辆振动频谱与轨迹分布特征，形成覆盖“静荷载-动荷载-环境荷载”的多维感知网络。卫星合成孔径雷达（SAR）与无人机载激光雷达（LiDAR）协同作业，构建毫米级精度的路表三维形变场模型，通过时序干涉测量技术追踪边坡滑移、路基冻胀等渐变型病害的时空演化规律。针对多源异构数据融合难题，需建立涵盖数据采集、传输、存储的全生命周期标准框架，强制规范激光雷达点云密度阈值、红外热像仪温度分辨率、振动传感器采样频率等核心参数，开发支持 OPC UA、MQTT 等多协议转换的边缘网关设备，破解不同厂商检测设备的“数据方言”壁垒。边缘计算层部署轻量化 AI 模型，执行振动信号小波降噪、热成像非均匀性校正、点云数据配准等预处理操作，并基于自适应阈值算法实时过滤设备漂移、电磁干扰导致的异常数据流。通过区块链技术构建分布式数据存证链，利用智能合约实现从边缘节点到云平台的数据传输过程可追溯、可验证，确保养护数据的完整性与司法可信度。中心数据库采用时空立方体架构组织多模态数据，支持按地理网格、时间切片、物理维等多重索引方式调取信息，为深度学习模型的训练优化与养护决策的数字孪生推演提供高纯度数据原料<sup>[3]</sup>。该体系通过“端-边-云”协同计算与“空-天-地”

立体感知的深度融合,实现从微观材料性能退化到宏观路网健康状态的跨尺度数据贯通,为预防性养护提供精准信息基底。

### 2.3 加强大数据公路养护管理系统建设

公路养护管理系统的智能化升级需以“技术架构-业务逻辑-安全机制”三位一体的协同演进为核心战略。在技术架构层面,采用云原生技术栈重构系统底层,基于Kubernetes 容器编排实现计算资源的弹性伸缩,通过服务网格(Service Mesh)架构优化模块间通信效率,确保每秒万级数据点的实时处理能力。开发具备自主进化能力的智能养护平台,集成路面性能退化预测、多目标优化决策、全寿命周期成本分析等核心功能模块,其中路面状况指数计算引擎融合了时序卷积网络(TCN)与注意力机制,可精准捕捉不同气候区路面的非线性退化特征。业务逻辑层构建“数据驱动决策”闭环,通过API网关无缝对接交通管理部门的实时车流热力图、气象部门的雷达反射率数据以及环保机构的空气污染指数,利用时空图神经网络(ST-GNN)建立多源异构数据关联模型,实现从局部病害到路网级风险的跨尺度推演。针对极端天气场景,系统部署灾害响应数字孪生体,集成WRF气象模式输出、路基渗流有限元模型与微观交通仿真参数,通过深度强化学习(DRL)算法动态生成兼顾通行安全、经济成本与生态影响的应急养护方案。安全体系采用零信任架构,结合国密算法实现数据传输端到端加密,依托区块链技术构建养护作业全流程存证链,确保施工记录、材料检测报告等关键信息的不可篡改性。为提升系统扩展性,建立开放式API生态,支持第三方智能检测设备即插即用,通过标准化数据接口协议(如OpenAPI 3.0)实现多品牌激光雷达、红外热像仪的数据无缝接入。开发低代码运维管理界面,允许养护单位自定义算法插件与业务规则引擎,结合持续集成/持续部署(CI/CD)流水线实现功能模块的敏捷迭代。更深层的技术突破聚焦于认知智能领域:基于神经符号系统(Neural-Symbolic Systems)构建可解释性决策模型,将专家经验编码为符号规则库,与深度学习网络的模式识别能力形成互补;引入联邦学习框架实现跨区域路网数据的隐私安全共享,通过迁移学习技术解决小样本路段的模式泛化难题。

### 2.4 利用大数据为公路养护决策者提供技

构建基于数字孪生的路网养护决策支持系统需深度融合多源感知技术与智能分析能力。通过激光雷达点云扫描与BIM模型轻量化重构技术,建立毫米级精度的道路数

字孪生体,实时映射路面结构层应力分布、路基含水率变化及附属设施服役状态。在孪生体中嵌入材料老化动力学模型,结合历年环境腐蚀数据模拟沥青胶结料氧化进程与水泥混凝土碳化深度演变规律,实现结构性性能退化的跨时空推演。深度学习算法通过挖掘十年期养护日志、车载传感器流数据与气象灾害记录间的非线性关联,构建考虑极端天气冲击、重载交通累积损伤、地质活动扰动的多因素耦合预测模型,动态优化各路段预防性养护阈值<sup>[4]</sup>。开发交互式仿真推演平台,支持决策者以“假设分析”模式模拟不同养护策略下路网性能的长期演变轨迹,通过可视化界面直观对比资金投入效益比与路况指数提升曲线。引入强化学习机制使系统具备自优化能力,能根据实际养护效果反馈自动调整模型参数,逐步逼近区域路网养护的最优资源配置方案。

## 3 结语

大数据技术正驱动公路养护管理向认知智能阶段深度演进,其本质是通过数据要素重构“感知-诊断-决策-执行”的价值闭环。当前亟需突破的关键在于构建技术创新的制度生态:在数字孪生底座上实现基础设施全要素镜像,依托智能合约建立养护作业的自动化触发机制;通过联邦学习框架打通跨部门数据壁垒,形成覆盖规划、施工、运维的协同治理网络。更深层变革需同步推进组织架构适应性改造,培育兼具土木工程知识、数据科学素养与系统思维的复合型人才梯队,构建“技术迭代-标准更新-制度优化”的协同演进机制。未来随着量子计算、神经形态芯片等颠覆性技术的渗透,公路养护将实现纳米级病害预测与自修复材料的精准布设,最终形成“全域感知实时响应、资源调配全局最优、设施寿命自主延长”的智慧交通生态体系,为新型基础设施建设提供范式参考。

### [参考文献]

- [1]孙万雨.大数据时代公路养护管理应用探究[J].智能建筑与智慧城市,2024(11):182-184.
- [2]薛永康.大数据时代下公路养护管理应用探讨[J].居业,2021(8):187-189.
- [3]李潇.大数据时代下公路养护管理的有效应用[J].中国储运,2023(4):199-200.
- [4]武俊宝.大数据时代公路养护管理应用探究[J].中国公路,2023(24):54-55.

作者简介:郭涛(1988.9—),毕业院校:太原科技大学,所学专业:机械设计制造及自动化,当前就职单位:山西省交通新技术发展有限公司,职称级别:副高级工程师。