

智慧养护技术在高速公路路面维修工程中的应用研究

原 浩

河南省大道路业有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：本文指出，传统被动式、经验主导的高速公路路面维修模式已难以满足当前对安全、效率与耐久性的高要求。智慧养护技术作为新一代信息技术与公路养护深度融合的产物，正推动行业向“主动预防”和“数据驱动”转型。文章系统阐述了智慧养护的内涵与价值，剖析了其四大关键技术：智能感知巡检、大数据与 AI 决策、数字孪生/BIM/GIS 集成、自动化施工；并详述其在病害识别、决策优化、施工管理及后评价等全生命周期中的应用。同时，并分析了技术、管理、人才和标准等方面的现实挑战。最后，结合国家政策，提出促进智慧养护高质量发展的策略建议，强调其是实现高速公路养护高效、安全、可持续的必由之路。

关键词：智慧养护；高速公路；路面维修；人工智能；大数据；物联网

引言

截至 2025 年底，我国公路总里程超 540 万公里，高速公路突破 18 万公里，建成全球最大高速网。伴随路网规模扩大，养护压力剧增：早期高速进入大中修期，路面老化、疲劳损伤集中显现；交通量激增、重载车增多及极端气候频发，加速路面性能衰减。传统养护依赖人工巡检，效率低、覆盖难、主观性强；决策凭经验，缺乏数据支撑，易致“小病拖大”，维修成本高；施工管理粗放，质量与安全难保障。面对“路多、人少”的困境和公众对“畅、安、舒、美”出行的更高要求，国家出台《交通强国建设纲要》《“十四五”公路养护管理发展纲要》等政策，明确推动养护向数字化、网络化、智能化转型。智慧养护应运而生，融合物联网、大数据、人工智能、云计算、5G、北斗定位与数字孪生等技术，构建“感知—分析—决策—执行—反馈”全链条闭环管理体系，为破解传统养护难题提供系统性解决方案。

1 智慧养护技术的核心内涵与关键技术体系

1.1 智慧养护技术的定义与内涵

智慧养护并非单一技术的简单叠加，而是一种全新的养护理念和系统工程。其核心内涵可以概括为：以公路全寿命周期理论为基础，以新一代信息技术为支撑，通过对公路基础设施进行全方位、全天候、全要素的智能感知，实现养护数据的实时采集、高效传输、深度挖掘与智能分析，进而辅助甚至自主完成科学、精准、高效的养护决策与作业执行，最终达成提升公路服务品质、延长设施使用寿命、降低全生命周期成本、保障运

行安全的目标。简而言之，智慧养护就是利用“智慧大脑”（AI 与大数据）和“敏锐感官”（各类传感器），让公路养护工作变得更聪明、更主动、更精细。

1.2 智慧养护的关键技术体系

1.2.1 智能感知与巡检技术

这是智慧养护的“眼睛”和“耳朵”，负责获取海量、多源、异构的原始数据。（1）非接触式移动检测：以装备了高清工业相机、激光扫描仪（LiDAR）、惯性测量单元（IMU）和高精度 GNSS（如北斗）的智能巡检车为代表，可在正常车速下完成路面几何形态（平整度、车辙）、表面病害（裂缝、坑槽、修补）等指标的自动化、高精度采集^[1]。（2）空基巡检：利用搭载多光谱、热红外、高清可见光相机的无人机（UAV），可对桥梁、边坡、隧道进出口等人工难以到达或危险区域进行快速、灵活的巡检，尤其适用于灾后应急评估和大范围普查。（3）固定式传感网络：在关键路段、长大桥梁、特长隧道等布设分布式光纤传感器、应变计、温湿度传感器、视频监控等设备，形成永久性的健康监测系统，实现对结构应力、变形、环境参数等的长期、连续监测。

1.2.2 大数据分析 with 人工智能决策技术

这是智慧养护的“大脑”，负责将原始数据转化为有价值的决策信息。（1）数据融合与治理：整合来自移动巡检、固定传感、交通流、气象等多种来源的数据，建立统一的数据标准和治理体系，解决“信息孤岛”问题，为上层应用提供高质量的数据底座。（2）AI 病害智能识别与诊断：利用深度学习（特别是卷积神经

网络 CNN) 算法, 对采集的图像、点云等数据进行自动处理, 精准识别并分类各种路面病害, 其识别精度可达毫米级, 远超人眼极限, 并能有效发现细微的早期病害。(3) 路面性能预测与养护决策: 基于历史养护数据、交通荷载、环境因素和当前路况, 构建路面性能衰变预测模型(如马尔可夫模型、机器学习回归模型)。在此基础上, 结合多目标优化算法(如遗传算法), 综合考虑技术状况、服务水平、预算约束等因素, 自动生成最优的养护时机、养护对策和资金分配方案, 实现从“坏了再修”到“何时修、修哪里、怎么修最划算”的科学决策。

1.2.3 数字孪生与 BIM/GIS 集成技术

这是智慧养护的“虚拟映射”, 为可视化管理和模拟推演提供平台。(1) BIM+GIS 融合: 将建筑信息模型(BIM)的精细构件信息与地理信息系统(GIS)的空间位置信息深度融合, 构建高速公路的三维数字底座。所有物理实体(路面、桥梁、护栏等)及其属性信息(材料、施工日期、历次维修记录等)都在此平台上得以精确映射。(2) 数字孪生应用: 在 BIM+GIS 底座之上, 接入实时感知数据, 形成动态更新的数字孪生体^[2]。管理者可以在虚拟空间中直观查看道路状况, 模拟不同养护方案的实施效果和成本效益, 进行施工过程的预演和碰撞检查, 极大地提升了管理的直观性和前瞻性。

1.2.4 自动化与机器人化施工技术

这是智慧养护的“手脚”, 负责将决策指令高效、安全地付诸实践。(1) 智能施工装备: 如自动驾驶的压路机、摊铺机, 它们通过预设程序和实时反馈, 能实现厘米级的高精度作业, 确保压实度和平整度的均匀性。智能沥青洒布车、同步碎石封层车等也能根据路况自动调节材料用量和施工参数。(2) 养护机器人: 针对特定场景, 如隧道壁面清洗、桥梁拉索检测、路面微小病害的自动修补等, 专用的养护机器人正在研发和试点应用中, 有望在未来替代高危、高强度的人工作业。

2 智慧养护技术在路面维修工程中的具体应用

2.1 病害精准识别与状态评估

传统的人工巡检方式耗时费力, 且受主观因素影响大, 难以满足现代高速公路高频率、高精度的检测需求。智慧养护技术通过部署智能巡检系统, 彻底革新了病害识别与评估的模式。无论是装备精良的智能巡检车还是灵活机动的无人机, 在一次通行中即可完成上百公里路段的路况数据采集, 其效率是人工巡检的数倍乃至十倍。后台强大的人工智能算法能够在极短时间内

处理海量的图像和点云数据, 自动识别出裂缝、坑槽、车辙等各种病害, 并精确标注其类型、位置、尺寸和严重程度, 生成详尽的电子化报告。这种基于算法的识别方式不仅速度快, 更重要的是保证了结果的客观性和一致性, 有效避免了人眼疲劳和主观判断带来的误差。此外, 通过整合探地雷达等无损检测技术, 智慧养护系统还能穿透路面表层, 对结构层内部的脱空、含水率等隐蔽性病害进行探测, 从而实现从道路状况由表及里、全面深入的“体检”, 为后续的精准维修奠定了坚实可靠的数据基础。

2.2 科学决策与方案优化

在获取了精准、全面的路况数据之后, 智慧养护的核心优势体现在科学决策与方案优化环节。养护决策支持系统不再依赖工程师的个人经验, 而是基于强大的数据分析模型进行量化决策。系统能够利用路面性能衰变预测模型, 模拟在未来不同的交通荷载和气候变化情景下, 当前病害的演变趋势, 以及施加不同维修干预措施后的预期效果。在此基础上, 系统会启动多目标优化算法, 在有限的年度养护预算框架内, 综合考量各路段的技术状况指数、对公众服务水平的影响、以及不同维修技术的成本效益比, 最终计算出一个全局最优的维修计划^[3]。这个计划明确指出了哪些路段的哪些病害需要优先处理, 并推荐了最经济有效的维修技术, 例如微表处、铣刨重铺或结构性补强等。更有甚者, 系统还能直接根据病害分布图, 自动生成包含详细设计参数和精确工程量清单的维修方案, 极大地缩短了从检测到设计的周期, 减少了人为环节可能引入的错误, 真正实现了养护决策的科学化、精准化和自动化。

2.3 精细化施工管理与质量控制

当维修方案确定后, 智慧养护技术的应用并未停止, 而是延伸至施工全过程, 实现了精细化的管理和控制。依托于 BIM+GIS 构建的三维数字底座, 管理人员可以在施工前进行 4D(3D+ 时间) 施工模拟, 提前预演整个施工流程, 发现潜在的工序冲突、资源调配瓶颈或安全风险点, 从而优化施工组织设计。在实际施工过程中, 物联网技术被用来对关键材料进行全程追踪, 例如, 沥青混合料从拌合站出厂到运输、摊铺、碾压的每一个环节, 其温度和时间都被实时监控, 一旦偏离预设范围, 系统便会发出预警, 确保材料性能符合规范要求。对于配备了智能控制系统的施工机械, 如自动驾驶摊铺机和压路机, 其作业轨迹、速度、碾压遍数等关键工艺参数均被实时记录和分析, 确保施工严格按照既定方案执行, 从而保障了路面压实度和平整度的均匀性。

此外,通过在作业区部署智能锥桶、可变情报板等智能路侧设备,并与主流导航软件平台进行数据联动,可以提前向数公里外的过往车辆推送施工区域预警信息,引导其减速或变更车道,显著提升了施工作业区的安全防护水平,有效降低了二次事故的发生概率。

2.4 维修后评价与知识沉淀

路面维修工程的竣工并非智慧养护流程的终点,而是一个新的反馈与学习循环的开始。维修完成后,智慧养护系统会安排后续的定期智能巡检,对维修路段进行持续跟踪监测,客观评估维修的实际效果,验证当初所选维修方案的有效性和耐久性。这些宝贵的“输入-输出”数据,即维修方案与实际效果之间的对应关系,会被系统自动收集并反馈回中央数据库。随着时间的推移,这些不断积累的真实世界数据成为训练和优化性能预测模型与决策算法的最佳养料^[4]。通过这种闭环的学习机制,整个智慧养护体系能够不断地从实践中汲取经验,自我修正,自我进化,使得未来的病害预测更加准确,养护决策更加科学,维修方案更加高效。这种良性的知识沉淀与迭代升级能力,是智慧养护区别于传统模式的根本特征,也是其能够持续创造价值、保持生命力的关键所在。

3 智慧养护技术面临的挑战与对策

3.1 挑战

尽管前景广阔,智慧养护的全面推广仍面临诸多挑战。在技术和成本层面,部分高端感知设备和先进的AI算法研发成本高昂,对于资金有限的中小型公路管养单位而言,初期投入是一道不小的门槛。同时,如何有效地融合来自不同厂商、不同协议、不同格式的多源异构数据,并建立统一的数据治理体系,依然是一个亟待攻克的技术难题。在管理和机制层面,传统的金字塔式组织架构和以经验为导向的业务流程,与智慧养护所要求的扁平化、数据驱动的管理模式存在根本性冲突,这需要进行深层次的体制机制改革。此外,随着大量敏感的道路和交通数据被采集和使用,数据安全和用户隐私保护问题也日益凸显,需要建立完善的安全防护体系和法

律法规。

3.2 对策

为应对这些挑战,必须采取系统性的对策。首先,需要加强顶层设计,由国家和省级层面出台更具针对性的财政补贴、税收优惠和金融支持政策,鼓励技术创新和核心设备的国产化,降低应用门槛。其次,各级公路管养部门应主动推动内部管理变革,打破部门壁垒,重构业务流程,建立与智慧养护相适应的绩效考核和激励机制。再次,要大力加强复合型人才培养,通过校企合作、在职培训等多种途径,加快培养一批既精通公路养护专业知识又熟悉信息技术的骨干力量。最后,相关行业协会和标准化组织应加快制定和完善智慧养护领域的技术标准、数据接口规范和安全指南,为技术的互联互通和规模化、规范化应用扫清障碍。

4 结语

智慧养护技术代表了高速公路路面维修工程未来的发展方向。它通过构建一个集智能感知、数据分析、科学决策、精准执行于一体的现代化养护体系,从根本上解决了传统养护模式效率低、成本高、决策难、安全风险大等痛点问题。尽管在推广过程中会遇到技术、管理、人才等多方面的挑战,但在国家政策的强力引导和行业需求的共同驱动下,智慧养护必将迎来更加广阔的发展空间。未来,随着技术的不断迭代和生态的持续完善,智慧养护将不仅限于“修好路”,更将致力于“用好路、管好路”,为构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化公路交通体系提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 梅向阳. 互联网+智慧高速公路养护技术探索应用[J]. 中国储运,2026,(3):54-56.
- [2] 王涛静. 大数据在智慧型高速公路养护中的创新应用研究[J]. 价值工程,2025,44(35):165-168.
- [3] 邓旭东. 智慧高速公路养护管理技术的探索与实践[J]. 智能建筑与智慧城市,2025,(9):186-188.
- [4] 殷坤荣. 高速公路智慧养护管理系统设计探析[J]. 智能建筑与智慧城市,2025,(3):167-169.