

# 公路养护智能化检测技术应用与发展探析

殷维春

天津市国腾公路咨询监理有限公司 300240

**【摘要】**我国公路路网规模已超500万公里，路网养护进入“存量为主、精准运维”新阶段，传统人工检测效率低、精度差、安全性不足，难以匹配重载交通与高服役要求。智能化检测技术以物联网、人工智能、激光雷达、数字孪生为核心，构建“空-天-地”一体化感知体系，实现公路病害自动识别、结构状态精准评估、养护决策智能优化，成为推动公路养护向精细化、高效化、低碳化转型的核心驱动力。本文立足公路养护检测痛点，系统梳理车载智能检测、无人机巡检、无损探测、结构健康监测等主流技术的应用原理与场景；分析技术落地中数据融合不足、设备成本偏高、标准体系滞后、人才储备短缺等瓶颈；创新提出多源数据协同融合、轻量化设备研发、全生命周期数字孪生管控、AI大模型辅助决策等发展路径；为公路养护智能化升级提供理论参考与实践支撑，助力交通基础设施长效安全运营。

**【关键词】**公路养护；智能化检测；AI识别；数字孪生；无损检测

Analysis of the Application and Development of Intelligent Inspection Technologies for Highway Maintenance  
Yin Weichun

Tianjin Guoteng Highway Consulting and Supervision Co., Ltd. Postal Code 300240

**【Abstract】**China's highway network now spans over 5 million kilometers, entering a new phase of "stock-centric, precision-oriented maintenance." Traditional manual inspection methods suffer from low efficiency, poor accuracy, and inadequate safety, making them inadequate for heavy traffic loads and stringent service requirements. Intelligent inspection technologies, leveraging IoT, artificial intelligence, LiDAR, and digital twins, establish an integrated "air-space-ground" sensing system. This enables automatic identification of road defects, precise structural condition assessment, and intelligent optimization of maintenance decisions, serving as a core driver for transitioning highway maintenance toward greater precision, efficiency, and sustainability. Addressing key challenges in highway inspection, this paper systematically examines the application principles and scenarios of mainstream technologies—including vehicle-mounted intelligent inspection, drone patrols, non-destructive testing, and structural health monitoring. It analyzes implementation bottlenecks such as insufficient data integration, high equipment costs, outdated standards, and talent shortages. The study proposes innovative solutions: multi-source data integration, lightweight equipment development, full lifecycle digital twin management, and AI-powered decision support. These findings provide theoretical foundations and practical guidance for intelligent highway maintenance upgrades, enhancing the long-term safety and efficiency of transportation infrastructure.

**【Key words】**highway maintenance; intelligent inspection; AI recognition; digital twin; non-destructive testing

## 一、引言

公路作为综合交通运输体系的核心载体，其服役状态直接关系路网通行效率与行车安全。随着我国公路服役年限增长、交通流量激增、重载车辆占比提升，路面裂缝、车辙、沉陷、桥梁老化、边坡失稳等病害呈多发频发态势，养护检测压力持续加大。传统检测依赖人工徒步、目视排查、手工记录，存在效率低（日均仅10公里）、精度差（病害定位误差米级）、风险高（高空、高危区域作业）、数据碎片化等弊端，无法满足“十四五”现代综合交通运输体系发展规划中“智能化养护”的战略要求。

近年来，人工智能、物联网、激光扫描、数字孪生等技术快速迭代，为公路养护检测提供了全新解决方案。智能化检测技术突破传统模式局限，实现非接触、自动化、高精度、全覆盖检测，检测效率较人工提升4-5倍，病害识别准确率

达90%-95%。但当前行业仍存在技术应用碎片化、数据标准不统一、设备成本昂贵、创新转化不足等问题，亟需构建系统化、协同化、可落地的智能化检测体系。基于此，本文结合工程实践与技术前沿，探析公路养护智能化检测技术的应用现状、核心瓶颈与创新路径，推动智能技术与养护业务深度融合。

## 二、公路养护智能化检测核心技术应用

### （一）车载自动化智能检测技术

车载智能检测系统是路面病害常态化检测的主流装备，集成激光断面仪、高清相机、红外传感器、北斗定位等多模块，遵循《公路路面技术状况自动化检测规程》（JTG/T E61-2014），可在正常行车速度（80-120km/h）下完成路面

裂缝、车辙、平整度、构造深度、破损率等指标同步检测。

系统通过线激光扫描获取路面三维点云数据,高清相机采集病害图像, AI 算法 (CNN、Transformer) 自动识别裂缝类型、长度、宽度, 识别精度达 1mm, 准确率超 92%。国内成熟系统包括交通部公路院 CICS、武大卓越 ZOYON 等, 单次检测宽度 3.6~3.7m, 适配高速公路、国省干线路网普查与定期检测。该技术实现“行车即检测、数据即上传”, 彻底告别人工徒步检测, 适用于长距离路网快速评估。



### (二) 无人机巡检技术

无人机搭载高清相机、激光雷达、热成像仪, 聚焦人工难以到达的桥梁上部、山区边坡、隧道洞口、高路堤等区域, 实现高危、隐蔽部位高效检测。按预设航线自动飞行, 采集高清影像与三维点云数据, AI 算法识别边坡溜塌、桥梁裂缝、支座老化、隧道渗漏水等病害, 1 公里边坡检测仅需 30 分钟, 效率提升 10 倍以上。

热成像无人机可夜间识别路面隐性裂缝、桥梁脱空、路基空洞, 弥补可见光检测局限; 多旋翼无人机搭载微型激光雷达, 生成边坡、桥梁三维模型, 精准计算变形量(毫米级)。该技术规避高空作业风险, 降低人力投入, 适用于山区公路、大跨度桥梁、高边坡路段常态化巡检。



### (三) 无损探测技术

无损探测技术以探地雷达 (GPR)、红外热成像、超声波、光纤传感为核心, 实现路基、路面、桥梁内部缺陷非开挖检测。探地雷达通过高频电磁波反射, 识别路基空洞、基层脱空、路面层间粘结不良、钢筋锈蚀等隐患, 探测深度 0.5~3m, 精度达厘米级, 是路基隐性病害检测的首选技术。

红外热成像利用材料导热差异, 检测路面脱空、隧道衬砌空鼓、桥梁混凝土内部空洞, 无需接触、快速成像; 光纤光栅传感器布设桥梁关键截面, 实时监测应变、位移、温度, 数据传输延迟<1s, 实现结构健康动态预警。无损探测技术避免开挖破坏, 精准定位内部病害, 为预防性养护提供核心数据支撑。

### (四) 结构健康智能监测技术

针对桥梁、隧道、高边坡等关键结构, 构建“传感器+物联网+云平台”实时监测体系, 实现结构状态长期跟踪与风险预警。在桥梁主梁、桥墩、支布布设应变计、加速度计、位移计, 隧道安装收敛计、渗压计, 边坡布置深部位移监测桩, 通过 5G/北斗实时传输数据至管控平台。

平台集成 AI 分析模型, 实时评估结构承载力、变形稳定性, 当监测数据超阈值时自动预警, 预警响应时间<5 分钟, 有效防范桥梁垮塌、边坡滑坡等灾害。山东、江苏等省份已建成省级桥梁健康监测平台, 接入千余座桥梁数据, 实现“监测-分析-预警-处置”闭环管理。

### (五) 数字孪生与 AI 辅助决策技术

数字孪生技术融合 BIM、GIS、物联网数据, 构建公路路网“数字孪生体”, 实现物理公路与虚拟模型实时映射、同步仿真。模型集成路面病害、结构状态、交通流量、气象环境等多源数据, 模拟病害发展趋势、养护方案效果, 优化养护时机与资源配置。

AI 大模型 (如交通综合大模型) 深度应用于养护决策, 通过海量样本训练, 自动生成病害处治方案、估算养护成本、预测养护效果, 替代传统人工经验判断。江苏交控构建“数、图、模”三位一体养护体系, 实现病害厘米级定位、养护资源智能调度, 养护效率提升 30%。



## 三、公路养护智能化检测技术应用瓶颈

### (一) 多源数据融合不足, 标准体系滞后

各类智能设备数据格式、接口不统一, 车载、无人机、雷达、传感器数据碎片化, 难以实现互联互通与深度融合。缺乏统一的数据采集、传输、存储、共享标准, 导致数据孤岛严重, 无法支撑路网级健康评估与协同决策。

### (二) 设备成本偏高, 推广应用受限

高端智能设备 (三维探地雷达、激光检测车、专业无人机) 采购成本高 (单台超 200 万元), 中小型养护单位难以承担。设备维护、校准、升级费用昂贵, 且核心零部件依赖进口, 制约技术在低等级公路与农村公路的普及应用。

### (三) AI 算法精度不足, 复杂场景适应性差

现有 AI 识别算法对光照变化、阴影遮挡、病害粘连、复杂路况适应性不足, 裂缝漏检、误检率达 5%~10%。小样本、异形病害识别能力薄弱, 缺乏针对山区、雨天、冰雪等特殊场景的优化算法, 影响检测可靠性。

#### （四）专业人才短缺，运维能力薄弱

智能化检测技术融合交通、计算机、人工智能、传感器等多学科知识，现有养护人员专业能力不足，难以胜任设备操作、数据解读、系统运维等工作。行业人才培养体系滞后，复合型技术人才缺口大，制约技术落地成效。

#### （五）技术应用碎片化，全生命周期管控缺失

当前智能检测多聚焦病害识别与数据采集，未与养护设计、施工、验收、评价全流程深度衔接，数据价值未充分挖掘。缺乏基于数字孪生的全生命周期健康管理平台，难以实现“检测-评估-养护-监测”闭环管控。

### 四、公路养护智能化检测技术创新发展路径

#### （一）构建多源数据融合标准体系

制定统一的公路养护智能检测数据标准，规范数据格式、接口、编码、传输协议，实现车载、无人机、雷达、传感器等设备数据无缝对接。搭建省级/国家级公路养护大数据共享平台，整合路网基础信息、检测数据、养护历史、交通气象数据，构建“一数一源、一源多用”的数据治理体系，支撑跨部门、跨区域数据协同应用。

#### （二）研发轻量化、低成本智能设备

聚焦中小型养护单位与农村公路需求，研发小型化、便携式、低成本智能检测设备，如手持激光裂缝仪、轻量化探地雷达、民用级巡检无人机，降低设备采购与运维成本。推动核心零部件国产化替代，突破激光雷达、高清成像、AI芯片等关键技术，提升设备性价比与自主可控能力。

#### （三）优化AI算法与大模型融合应用

基于深度学习与大模型技术，优化病害识别算法，引入多尺度特征融合、小样本学习、迁移学习等技术，提升复杂场景下病害识别精度（目标准确率 $\geq 98\%$ ）。构建公路养护专用AI大模型，融合检测数据、规范标准、工程案例，实

现病害自动分类、等级评定、方案生成、成本估算一体化决策，推动养护决策从“经验驱动”向“数据驱动”转型。

#### （四）搭建数字孪生全生命周期管控平台

深化BIM+GIS+物联网技术融合，构建覆盖“规划-设计-施工-运营-养护-报废”全生命周期的公路数字孪生平台。平台集成智能检测数据、结构健康监测数据、养护业务数据，实现路网状态实时可视化、病害发展趋势预测、养护方案仿真优化、养护资源智能调度、养护效果量化评价，形成闭环管控体系。

### 五、结论与展望

#### （一）结论

智能化检测技术是公路养护现代化转型的必然趋势，车载自动化检测、无人机巡检、无损探测、结构健康监测、数字孪生等技术的集成应用，有效解决传统检测效率低、精度差、风险高等痛点，推动公路养护从“人工巡检、事后处治”向“智能感知、预防性养护”转型。当前技术应用仍面临数据融合不足、设备成本偏高、AI算法精度有限、专业人才短缺等瓶颈，需通过标准体系构建、轻量化设备研发、AI算法优化、数字孪生平台搭建、人才培养强化等路径，突破技术落地障碍，释放技术应用价值。

#### （二）展望

未来公路养护智能化检测技术将朝着高精度、低成本、绿色化、协同化、全生命周期管控方向发展。AI大模型、数字孪生、物联网、区块链等技术深度融合，将构建“空-天-地-网”一体化智能感知网络，实现公路路网状态全息感知、病害精准预警、养护智能决策、资源高效调度。随着技术不断创新与推广应用，智能化检测将全面覆盖各级公路，助力公路养护提质增效、降本增效、绿色低碳发展，为交通强国建设提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1]交通运输部.“十四五”现代综合交通运输体系发展规划[Z].北京:交通运输部,2021.
- [2]交通运输部公路科学研究院.公路路面技术状况自动化检测规程:JTG/T E61-2014[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [3]王如意.基于智能检测技术的道路养护施工应用研究[J].交通科技与管理,2025,6(19):16-18.
- [4]石玉宝.人工智能在公路养护沥青路面检测中的应用及标准适应性[J].大众标准化,2025(14):163-165.
- [5]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.
- [6]谢智英,罗石贵.基于多级交通协同管控策略的智慧高速公路典型场景仿真与评价研究[J].公路,2024,69(9):186-196.
- [7]傅志寰,翁孟勇,张晓璇,等.我国智慧公路发展战略研究[J].中国工程科学,2023,25(6):150-159.
- [8]黄少冰,黄利雄,彭贵福.智慧交通中分布式级联融合全轨迹感知技术[J].湖南交通科技,2024,50(4):198-202.
- [9]李小峰.智能监测技术在公路养护中的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(08):123-126.
- [10]王东元.公路养护中的智能化技术应用与发展趋势[J].越野世界,2024,19(9):87-88.
- [11]董苗苗,杨静.人工智能在高速公路养护业务中的应用探究[J].IT经理世界,2024(11):78-80.
- [12]李建伟.公路桥梁智能检测技术研究进展[J].公路交通科技,2025,42(05):67-73.