

高速公路交安设施智能化养护技术探讨

周 林

云南省交通科学研究院交通工程养护分公司 云南 昆明 650217

【摘要】：高速公路交安设施是保证行车安全、路网畅通的基石，养护质量的好坏直接影响到道路的运行安全水平。传统的养护模式依靠人工巡检、依靠经验判断，存在着效率低下、隐患漏检、决策滞后等缺点。物联网、人工智能、数字孪生等技术迅速发展的时候，智能化养护就成了冲破传统养护瓶颈的重要途径。本文结合国内前沿实践案例，对高速公路交安设施养护现状及现存问题进行分析，从物联网感知、无人机巡检、BIM+GIS融合、数字孪生等主要的智能化技术入手，分析智能化养护提高效率、保障安全、优化决策等效果，最后分析目前技术应用中存在的问题并提出相应的发展对策，为高速公路交安设施养护智能化转型提供技术支持。

【关键词】：高速公路；交安设施；智能化养护；物联网；无人机；数字孪生

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.039

1 引言

高速公路交安设施包含护栏、标志标线、隔离栅、隧道消防和照明设施等各类别，是形成道路安全防护体系、规范交通流秩序的基础载体。随着我国高速公路路网里程不断增长，交安设施存量规模不断扩大，再加上交通流量激增、极端天气频发等因素的影响，设施老化、损坏的速度越来越快，养护工作量和难度也越来越大。传统的养护模式以人工定期巡查、依靠经验判断故障、事后修理为主，已经不能满足现代高速公路精细化、高效化的养护要求。智能化养护依靠先进的技术手段对交安设施的全生命周期动态监测、精准诊断并且做出科学的决策，可以提高养护效率、减少作业风险、节省养护成本。本文对智能化养护技术体系进行了整理，总结出实践经验，解决了应用难题，对推进高速公路养护行业的转型升级、筑牢道路安全防线有重大意义。

2 高速公路交安设施养护现状及问题

2.1 养护现状

我国高速公路交安设施养护一直以传统模式为主，近几年来部分地区开始试点智能化技术的应用，形成传统模式为主、智能技术试点补充的格局。从养护内容上来说，主要包含设施完整性检查、损坏修复、性能提高等主要部分，护栏修复、标志标线翻新、隧道设备检修是养护的重点。从技术应用角度来讲，物联网传感器、无人机等设备开始在养护场景中得到应用，但是大多数的应用还处于单点试点阶段，并没有形成全链条、一体化的智能化养护体系。就管理模式来说，部分省份建设了养护管理平台，但是平台的整合能力不够强，多源数据不能联动使用，不能发挥好数据驱动决策的作用。

2.2 现存核心问题

(1) 巡检效率低下且风险较高：传统的巡检依靠人工徒步或者车载巡查，对地形复杂的路段、高墩桥梁等地方，巡检难度大、耗时多。山区高速公路护栏巡检，人工日均巡检里程不到20公里，高空作业、车流中作业等存在极大的安全隐患。人工巡检受视觉疲劳、经验差距等因素的影响，对细微裂缝、标志松动等隐性的隐患不能很好的发现，漏检率高。

(2) 病害诊断与决策缺乏数据支撑：传统养护中，病害程度判定、修复方案制订大多依靠养护人员的经验，主观性强、准确度低。部分养护单位虽积累了一定的巡检数据，但是数据的格式不统一，存储分散，不能实现病害发展趋势分析预测，造成养护决策滞后，大多是事后修复而不是事前预防。

(3) 养护资源配置不合理：由于缺少对病害位置和优先级的精确判断，养护资源一般平均分配，造成重点区域养护不够，普通区域浪费。隧道消防设施和路面标志标线养护优先级难以科学确定，容易出现关键设施维护不及时的问题。

(4) 技术融合与标准化不足：目前的智能化技术应用大多为单点突破，无人机巡检只用于图像采集，没有和后面的病害诊断、修复派单形成闭环；不同技术厂商的设备数据接口不统一，物联网传感器、无人机、管理平台之间不能实现数据互通，造成“信息孤岛”。同时智能化养护技术标准、数据规范还没有建立起来，造成不同地区养护水平的差别很大。

3 高速公路交安设施智能化养护核心技术

3.1 物联网感知技术

物联网感知技术是实现交安设施状态实时监测的基础，在重要的设施上设置各种传感器，形成全域覆

盖、精准感知的监测网络。感知层由振动传感器、位移传感器、光照传感器、温湿度传感器等组成，可以对护栏变形、标志松动、标线反光度、隧道照明亮度等进行实时采集；网络层采用 5G、LoRa 等通信方式，把感知到的数据传送到云端平台；应用层对数据进行清洗、分析，从而达到异常状态的预警和趋势预判。如恩利科技预警设备物联网平台把路锥碰撞报警器、预警机器人等设备接入云端，用定位技术实现设备精准定位，依靠多端联动预警机制，当检测到车辆闯入、设备移位等风险的时候，自动触发强声播报、情报板警示等响应措施，并且把预警信息推送给管理人员终端。刘家峡大桥布置振动、应变等传感器，创建桥梁健康监测系统，实时采集结构指标和环境参数，给交安设施和桥梁结构协同养护提供数据支撑。

3.2 无人机+AI 巡检技术

无人机加 AI 巡检技术冲破传统人工巡检的空间限制和效率瓶颈，达成交安设施的全面、高效、精细巡检。该技术依靠无人机搭载高清摄像头、红外热成像仪等设备，按照事先设定的航线自主开展巡检作业，采集到的图像视频数据经过边缘计算设备初步处理之后，再传送到后台 AI 分析系统，AI 系统利用深度学习算法，可以自动识别护栏变形、标志破损、标线模糊、隔离栅断裂等病害，并且生成标准巡检报告，完成病害识别、定位、分类的全流程自动化。六宾高速使用的低空无人机智能巡检系统，集成了高清摄像机、低光鱼眼视觉传感器、AI 图像识别技术，可以对路面裂缝、边坡滑塌、交安设施完整性进行 7×24 小时的巡检，效率比传统的人工提高 75% 以上。临夏公路事业发展中心研发的无人机+AI 桥梁病害智能识别系统，病害识别准确率大于 90%，可以精准捕捉宽度 0.2 毫米的小裂缝，远远超出了人工识别的极限，大大降低了漏检率。

3.3 BIM+GIS 融合技术

BIM+GIS 融合技术实现交安设施的数字化建模和空间化管理，给养护决策提供可视化的支持。BIM 技术创建交安设施的精细化三维模型，设施的尺寸、材质、安装位置等全生命周期的信息都被包含在内，GIS 技术给出宏观地理空间的框架，从而实现设施位置的精确定位以及路网全局的可视化。二者的结合可以实现 BIM 模型与真实地理环境的一一对应，进而对设施的信息实施空间化的查询、统计以及分析。成都二环路高架桥养护项目中，利用 BIM 与 GIS 技术相结合的方式创建了道路桥梁管理信息系统，巡查人员可以用移动设备准确找到病害的位置并迅速上传，管理

层能实时分派维修任务，治理人员通过系统可查看到详细的病害信息及维修方案，实现养护流程全程网络化。该系统使得养护速度提高了 8 倍，人力效率提高了 8.3 倍，财力成本节约了 4.42 倍，充分体现了技术融合的应用价值。江苏交控依靠 BIM+GIS 创建起“数、图、模”三位一体的养护格局，达成路网元素精确对应以及养护资源有效调配。

3.4 数字孪生技术

数字孪生技术创建交安设施的虚拟映射模型，达成物理实体与虚拟模型的实时互动，给养护全过程赋予数字化，智能化支撑。将物联网感知数据、无人机巡检数据、BIM 模型数据等多种数据进行融合，在虚拟空间中再现已有的设施情况，可以模拟病害的发展过程、维修效果，给养护决策提供科学依据。并且通过虚拟模型的实时更新来完成养护全过程追溯和动态管理。刘家峡大桥将无人机巡检数据同桥梁三维模型融合起来，创建起数字孪生平台，把病害的分布及发展趋向以直观的形式展现出来，形成起可追溯的桥梁管理“数字档案”，从而支持维修方案的动态优化。遂大高速隧道全息感知与安全预警系统加入数字孪生技术，把交通状况，机电设备状况实时映射到可视化平台上，可以实现设备一键巡检和联动控制，应急响应速度明显提高。

4 智能化养护技术应用实践与成效

为清晰呈现智能化养护技术的应用价值，结合国内典型案例，从巡检效率、病害识别、安全保障、成本控制四个维度，对比传统养护与智能化养护的核心成效，具体如下表所示。

表 1 智能化养护技术应用实践与成效

对比维度	传统养护模式	智能化养护模式	提升成效
巡检效率	人工日均巡检里程不足 20 公里，桥梁高空巡检需 1-2 天	无人机单次巡检覆盖范围广，六宾高速效率提升超 75%；刘家峡大桥几小时完成全桥巡检	巡检效率提升 4-8 倍，大幅缩短巡检周期
病害识别	依赖人工肉眼判断，漏检率高，仅能识别 0.5 毫米以上裂缝	AI 系统识别准确率达 90% 以上，可识别 0.2 毫米细微裂缝；隧道异常识别准确率达 95%	漏检率降低 80% 以上，识别精度提升 1 倍
安全保障	高空作业、车流中作业风险高，易发生安全事故	无人机替代人工高空作业，刘家峡大桥高空巡检频次减少 90% 以上，消除高空作业风险	养护安全系数大幅提升，基本杜绝高空作业事故
成本控制	人工成本高，资源配置不合理，重复养护现象普遍	成都二环路项目成本节约 4.42 倍；浙江交工平台使决策效率提升 50% 以上	综合养护成本降低 30%-50%，资源利用率显著提升

从具体案例来看,智能化养护技术的应用成效主要体现在三个方面。一是实现养护模式从“被动维修”向“主动预防”转型。通过实时监测与趋势分析,可在病害萌芽阶段及时预警并处置,避免小问题演变为大故障。如刘家峡大桥借助智能化系统实现桥梁病害提前诊断,养护模式从被动维修转向主动预防。二是提升养护管理的精细化水平。BIM+GIS与数字孪生技术的应用,使设施信息可视化、管理流程标准化,成都二环路项目通过智能化系统实现病害处置全流程线上化,大幅提升管理效率。三是强化应急处置能力。遂大高速的“智能柔性光幕阻拦+AI图像探测”系统,实现预警到拦截的秒级响应;六宾高速无人机可第一时间飞抵事故现场,实时回传画面并参与救援调度,大幅缩短应急处置时间。

5 智能化养护技术应用瓶颈与发展对策

5.1 主要应用瓶颈

尽管智能化养护技术已展现出显著优势,但在大规模推广应用仍面临诸多瓶颈:一是技术融合深度不足。现有应用多为单一技术试点,物联网、无人机、数字孪生等技术未能充分协同,如无人机巡检数据未与BIM模型实时联动,难以实现病害精准定位与方案优化。二是前期投入成本较高。传感器部署、无人机购置、平台开发等需要大量资金,部分中小养护单位难以承担,限制了技术推广。三是标准体系尚未完善。缺乏统一的技术标准、数据规范与评估体系,不同厂商设备接口不兼容,数据互通难度大,影响全行业智能化水平提升。四是专业人才匮乏。智能化养护需要兼具交通工程、信息技术、数据分析等多领域知识的复合型人才,现有养护人员技术水平难以满足需求。

5.2 发展对策

(1) 加强技术融合创新:推动物联网、人工智能、数字孪生等技术深度融合,构建“感知-分析-决策-执行”全链条智能化养护体系。鼓励企业研发一体化解决方案,实现无人机巡检数据与BIM+GIS模型实时对接,提升数据利用效率。如借鉴江苏交控“数、图、模”

三位一体格局,推动多源数据融合应用。

(2) 优化成本投入模式:采用“试点先行、逐步推广”的策略,优先在桥梁、隧道等重点区域部署智能化设备,降低初期投入压力。鼓励政府与企业合作,搭建区域性智能化养护平台,实现资源共享,分摊运营成本。同时,通过长期效益分析,引导养护单位认识智能化技术的成本节约优势,提升投入意愿。

(3) 完善标准与规范体系:由行业主管部门牵头,制定智能化养护技术标准、数据采集规范、设备接口标准等,统一病害分类、识别精度、数据格式等关键指标。建立智能化养护效果评估体系,推动养护工作标准化、规范化发展,缩小地区间技术差距。

(4) 强化人才培养与团队建设:构建“高校培养+企业培训+行业交流”的人才培养体系,高校增设智能交通相关专业课程,企业定期开展技术培训,提升现有养护人员的智能化操作技能。鼓励行业协会组织技术交流活

6 结论

高速公路交安设施智能化养护是交通行业数字化转型的重要组成部分,物联网、无人机、BIM+GIS、数字孪生等核心技术的应用,可有效突破传统养护模式的效率低、风险高、决策滞后等弊端,实现养护工作的精准化、高效化、安全化。国内多个试点项目的实践表明,智能化养护可大幅提升巡检效率、降低养护成本、强化安全保障,具有显著的经济与社会效益。当前,智能化养护技术应用仍面临技术融合不足、成本较高、标准缺失、人才匮乏等瓶颈。未来需通过加强技术融合创新、优化成本投入、完善标准体系、强化人才培养等措施,推动智能化养护技术大规模推广应用。随着技术的不断成熟与行业协同的持续深化,高速公路交安设施养护将全面迈入“数据驱动、智能感知、精准施策”的新时代,为建设安全、高效、智能的现代高速公路网络提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 方可.高速公路交安设施维护工程施工控制要点[J].四川水泥,2025,(07):169-171.
- [2] 王建发.高速公路交安设施维护工程施工控制要点研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(05):134-137.
- [3] 赵龙.高速公路交安设施施工创新管理分析[J].产品可靠性报告,2023,(10):102-103.
- [4] 龚伟,朱炎.高速路面养护与交安设施协调优化[J].中国公路,2024,(17):54-56.
- [5] 张学智.高速公路交安设施维护工程施工控制要点研究[J].交通世界,2023,(10):25-27.