

Research on the Application of Intelligent Quality Control Technology in Highway Engineering Construction

Pinglei Li

Handan Transportation Comprehensive Administrative Law Enforcement Detachment, Handan, Hebei, 056001, China

Abstract

The construction quality control of highway engineering faces practical difficulties such as low efficiency of manual inspection, difficulty in integrating scattered data, and lagging identification of quality hazards. The introduction of intelligent technology provides a new path to solve these problems. The current data collection technology has achieved the integrated application of multiple sensors, and construction process monitoring is developing towards dynamic direction. The identification of quality defects has initially acquired intelligent capabilities. However, bottlenecks such as difficulty in fusing heterogeneous data from multiple sources, limited accuracy of algorithm models, insufficient adaptability to on-site environments, and lack of standard specification systems constrain the deep application of technology. The optimization strategy needs to be carried out from the dimensions of building a full lifecycle information model platform, developing high-precision perception and detection equipment, exploring predictive maintenance mechanisms, and improving standardization systems, to promote the comprehensive implementation of intelligent control from technical pilot to engineering practice.

Keywords

highway engineering; construction quality; intelligent management and control; data fusion; predictive maintenance

公路工程施工质量智能化管控技术应用研究

李平雷

邯郸市交通运输综合行政执法支队, 中国·河北 邯郸 056001

摘要

公路工程施工质量管控面临人工检测效率低、数据分散难整合、质量隐患识别滞后等现实困境, 智能化技术的引入为破解这些难题提供了新路径。当前数据采集技术已实现多元传感器的集成应用, 施工过程监测向动态化方向发展, 质量缺陷识别初步具备智能化能力, 但多源异构数据融合困难、算法模型精度受限、现场环境适应性不足、标准规范体系缺失等瓶颈制约着技术的深度应用。优化策略需从构建全生命周期信息模型平台、研发高精度感知检测装备、探索预测性维护机制、完善标准化体系等维度展开, 推动智能化管控从技术试点走向工程实践的全面落地。

关键词

公路工程; 施工质量; 智能化管控; 数据融合; 预测性维护

1 引言

公路工程施工涉及路基压实、路面摊铺、桥梁浇筑等多道工序, 每道工序的质量都直接影响道路的使用寿命与行车安全。传统质量管控依赖人工抽检与经验判断, 检测频次受限于人力配置, 数据记录分散在纸质报表与独立系统中, 质量问题往往在隐蔽工程完成后才被发现, 返工成本高昂且影响工期。然而从技术可行性到工程实用性之间仍存在明显鸿沟, 数据孤岛现象依然存在, 算法在复杂现场环境下的鲁棒性不足, 缺乏统一的技术标准导致不同系统难以互联互通。如何将智能化技术真正嵌入施工全过程, 形成数据驱动

的质量管控闭环, 成为当前亟待解决的工程难题。

2 公路工程施工质量智能化管控的应用现状

2.1 数据采集技术的集成应用

施工现场已开始部署多类型传感器以获取关键质量参数。路基压实质量检测中, 核子密度仪、灌砂法等传统方法耗时且仅能抽检, 连续压实控制技术(CCC)通过在压路机上安装加速度传感器与GPS定位装置, 实时测量压实过程中土体的刚度变化, 每台压路机每小时可采集上万个数据点, 覆盖整个碾压区域而非局部点位。路面施工阶段, 摊铺机配备的温度传感器阵列可监测沥青混合料在整个摊铺宽度上的温度分布, 避免因局部温度过低导致的压实不足; 厚度检测装置通过超声波或探地雷达技术非接触式测量路面厚度, 数据自动上传至云端平台^[1]。

【作者简介】李平雷(1976-), 男, 中国河北成安人, 本科, 助理工程师, 从事交通运输工程研究。

2.2 施工过程的动态化监测

传统质量管控侧重于事后检测与验收,智能化技术推动管控前移至施工过程。某高速公路项目在沥青路面施工中部署了动态监测系统,摊铺机、压路机等设备的工作参数(行走速度、碾压遍数、振动频率等)通过车载终端实时上传,管理平台自动生成施工轨迹图与参数分布热力图,质量管理人员在监控中心即可掌握全线施工进度与质量状态。当某区域压实遍数未达到规范要求或碾压速度超过工艺限值时,系统自动预警并将异常位置推送至现场管理人员,督促及时整改。

2.3 质量缺陷的智能化识别

路面病害检测是公路养护的重要环节,传统人工调查方式效率低且主观性强。基于机器视觉的智能检测技术正在改变这一局面,高速相机安装在检测车辆顶部,以80公里每小时的速度行驶时连续拍摄路面图像,分辨率达到毫米级。图像数据传输至车载服务器,深度学习算法自动识别裂缝、坑槽、车辙、泛油等病害类型,标注病害位置、面积、严重程度并生成检测报告,一天可完成数百公里道路的普查工作^[2]。

3 公路工程施工质量智能化管控的技术瓶颈

3.1 多源异构数据的融合难题

施工现场数据来源于不同厂商、不同协议、不同格式的设备系统,压实数据采用二进制格式,摊铺温度数据以XML文件存储,桥梁监测数据遵循自定义通信协议,质量检测报告则为PDF或纸质文档。这些异构数据缺乏统一的数据标准与接口规范,汇聚时面临格式转换、时间戳对齐、坐标系统一等技术障碍。数据融合还涉及商业壁垒,设备厂商出于保护数据资产考虑不愿开放底层接口,仅提供汇总结果,导致精细化分析无法实施。跨系统数据关联困难,路基压实、路面厚度、材料试验数据分散在不同系统中,缺乏统一的工程桩号、施工时间、结构层位等关联字段,难以构建完整的质量追溯链条。

3.2 智能算法模型的精度局限

机器学习算法性能高度依赖训练数据的数量与质量,公路工程领域标注数据积累不足。路面裂缝识别算法需要大量人工标注的图像样本,但裂缝形态千差万别,标注标准不一致,算法应用到新项目、新路面类型、新气候条件时识别精度显著下降。混凝土外观质量检测中,蜂窝麻面、露筋、色差等缺陷特征不明显,算法容易将水渍、阴影误判为质量缺陷^[3]。预测模型面临更大挑战,施工过程受操作手法、设备状态、环境条件等随机因素影响,模型预测误差较大。深度学习模型的“黑箱”特性使得预测结果难以解释,工程师难以建立对算法的信任。

3.3 现场复杂环境的适应性挑战

公路施工现场环境条件远比实验室复杂,温度、湿度、粉尘、振动、电磁干扰等因素影响智能设备稳定运行。传感

器长期暴露在露天环境中,防护等级不足时容易进水、进尘导致故障,高温环境下电子元件性能漂移,强振动工况使传感器松动或损坏。无线通信面临信号遮挡与干扰问题,钢筋网、金属模板、大型机械设备削弱无线信号强度,数据传输出现丢包、延迟甚至中断。机器视觉算法对光照条件敏感,强光下图像过曝、阴影下图像欠曝,雨雪天气下路面积水、泥泞,相机镜头易被溅污,算法识别失效。

3.4 技术标准与规范体系的缺失

智能化管控技术尚未形成系统的标准规范体系,数据格式、通信协议、性能指标、验收标准等方面缺乏统一规定。不同项目、不同地区采用的技术方案五花八门,设备选型、系统架构、数据处理方法各不相同,形成新的“信息孤岛”。智能检测设备的精度与可靠性缺乏第三方认证机制,部分设备存在夸大宣传、性能虚标现象。工程验收阶段,传统规范要求提供实体检测数据与纸质报告,智能化系统采集的海量数据、自动生成的分析结果难以纳入现行验收体系,导致“两张皮”现象——施工过程采用智能化手段,验收环节仍需人工补测补检,智能化投入未能转化为管理效益。

4 公路工程施工质量智能化管控的优化策略

4.1 构建全生命周期的信息模型平台

打破数据孤岛需要建立统一的信息模型作为数据融合的底层架构。采用BIM(建筑信息模型)技术构建公路工程的三维数字模型,将设计阶段的几何信息、材料属性、工程量清单等数据录入模型,形成“数字孪生”的工程实体。施工阶段将压实数据、摊铺参数、检测结果等按照统一的数据标准挂接到对应的模型构件上,每段路基、每层路面、每座桥梁都关联着完整的施工质量数据。平台需要定义标准化的数据接口规范,制定公路工程数据字典,明确每类数据的命名规则、单位制式、精度要求、更新频率。设备厂商按照接口规范开发数据输出模块,确保不同来源的数据可以无缝对接。某高速公路项目在招标文件中明确要求所有智能化设备必须支持统一的数据接口,采用开放的通信协议(如OPC UA、MQTT等),避免被单一厂商锁定。平台的数据存储采用时空数据库技术,将施工数据按照时间戳与空间坐标组织,支持历史数据回溯与空间范围查询。质量管理人员可以在三维模型上点选任意位置,查看该位置在不同施工阶段的所有质量数据,追溯施工过程,定位质量问题根源。云平台还须具备强大的数据处理能力,利用分布式计算框架处理海量数据,实现数据清洗、格式转换、异常检测、统计分析等功能的自动化。

4.2 研发高精度的智能感知与检测装备

提升算法精度需要在硬件与软件两端发力。硬件层面,开发更高分辨率的相机、更高精度的传感器、更强适应性的设备。路面检测相机需要具备高动态范围成像能力,在强光与阴影同时存在的场景下仍能清晰成像;镜头需配备自清洁装置,通过气吹或雨刮及时清除镜头上的灰尘与水滴。传感

器的防护等级需达到 IP68, 确保在浸水、高温、强振动环境下稳定工作; 采用低功耗设计延长电池寿命, 减少维护频次。某项目研发的智能压路机将传感器模块集成到滚轮内部, 避免了外挂式传感器易损坏的问题, 使用寿命延长三倍。软件层面, 扩充训练数据集的规模与多样性, 采集不同地区、不同季节、不同路面材料的病害图像, 邀请多位经验丰富的工程师进行交叉标注, 提高标注的一致性。引入数据增强技术, 对原始图像进行旋转、缩放、亮度调整、噪声添加等操作, 生成更多样本。探索小样本学习、迁移学习等技术, 利用已有模型的知识加速新场景下的模型训练。开发可解释性 AI 算法, 通过注意力机制、特征可视化等手段展示模型的决策依据, 让工程师理解算法为何将某处识别为裂缝, 增强算法的可信度。建立算法性能评估体系, 在真实工程场景中持续测试算法的精度、召回率、误检率, 定期更新模型参数, 形成“数据采集—模型训练—工程验证—模型迭代”的闭环。

4.3 探索基于人工智能的预测性维护机制

质量管控不应止步于检测与记录, 而应具备预测与预警能力。利用机器学习算法分析历史施工数据与质量检测数据, 挖掘施工参数与质量结果之间的关联规律, 建立预测模型。某项目收集了近三年的沥青路面施工数据, 包括混合料温度、摊铺速度、碾压遍数、压路机吨位、环境温度、湿度等数十个参数, 以及对应的平整度、压实度、渗水系数等质量指标。采用随机森林算法训练预测模型, 输入当前施工参数后, 模型可预测该路段的最终平整度, 当预测值低于规范要求时及时预警, 指导施工单位调整参数。预测模型还可用于施工方案优化, 通过模拟不同参数组合下的质量结果, 找到最优施工工艺。桥梁结构的预测性维护更具价值, 通过分析长期监测的应变、位移、温度数据, 识别结构性能的退化趋势。某大桥的健康监测系统运行五年后, 积累了海量时间序列数据, 采用长短期记忆网络 (LSTM) 建立预测模型, 可提前三个月预测某关键截面的应力水平是否会超过预警阈值, 为养护决策提供依据。预测性维护需要与智能决策系统结合, 当预测到质量风险时, 系统自动推送整改建议、提供类似案例参考、生成处置方案, 辅助工程师快速决策。

4.4 完善智能化管控的标准化体系建设

标准缺失是制约智能化技术推广的根本性问题, 需从

行业层面推动标准体系建设。制定《公路工程智能化施工质量管控技术规范》, 明确数据采集、传输、存储、处理、应用的技术要求, 规定各类传感器的性能指标与安装规范, 统一数据格式与接口协议。建立智能检测设备的认证制度, 设立第三方检测机构对设备的精度、稳定性、环境适应性进行测试, 颁发合格证书, 禁止未经认证的设备进入工程应用。修订现行质量验收规范, 将智能化检测数据纳入验收体系, 明确智能检测与传统检测的互补关系, 规定智能检测数据的采信条件与抽检比例。某省交通运输厅试点修订了《公路工程质量检验评定标准》, 增设“智能化检测”章节, 承认连续压实检测数据的法律效力, 允许在满足覆盖率要求的前提下减少传统钻芯检测数量, 既保证了质量管控的严格性, 又降低了检测成本。推动数据开放共享, 建立省级或行业级的公路工程质量大数据平台, 汇聚各项目的施工数据与质量数据, 为算法模型训练提供数据支撑, 为工程决策提供统计分析依据, 为科研创新提供数据资源。数据开放需要平衡信息共享与商业保密的关系, 对敏感数据进行脱敏处理, 制定数据使用的权限管理与审计机制。

5 结语

公路工程施工质量智能化管控已从概念探索进入工程实践, 数据采集、过程监测、缺陷识别等方面初步展现出技术优势, 但数据融合、算法精度、环境适应性、标准规范等瓶颈依然突出。优化策略需要从信息模型平台、智能感知装备、预测性维护、标准化体系等多维度协同推进, 将智能化技术真正嵌入施工全过程, 实现从“人工抽检”到“全面感知”、从“事后验收”到“过程管控”、从“经验判断”到“数据驱动”的根本转变。这一转变不仅需要技术突破, 更需要管理理念的更新、标准规范的重构、产业生态的培育。

参考文献

- [1] 魏征. 公路工程施工质量管控的要点探讨[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(8):001-004.
- [2] 杨腾飞. 公路工程施工质量管理与控制重点探析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2025(1):074-077.
- [3] 邵声文. 公路工程路基施工质量控制关键技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2025(8):100-103.