

智能化公路质量管理研究

刘建涛¹ 杜亚娜²

1. 山东省交通运输厅 山东 济南 250000

2. 菏泽市公路事业发展中心 山东 菏泽 274000

摘要：智能化公路质量管理作为新一代信息技术与基础设施建设深度融合的产物，是提升工程品质、保障运营安全、实现可持续发展的核心驱动力。梳理国内外智能化公路质量管理的理论研究成果与实践应用现状，深入剖析当前面临的关键问题及其根源，提出具有实践指导意义的发展对策。结合物联网、大数据、人工智能、建筑信息模型等前沿技术趋势，对智能化公路质量管理的未来发展方向进行战略性展望，为我国公路工程的高质量发展提供有益参考。

关键词：智能化质量管理；人工智能；公路工程

1 引言

传统的公路质量管理模式高度依赖人工巡检、事后抽检和纸质文档，存在效率低下、主观性强、信息滞后、溯源困难等固有弊端，难以满足现代化大型复杂工程对“精益建造”和“本质安全”的迫切需求。以物联网、大数据、人工智能、建筑信息模型、5G等为代表的智能科技正引领一场深刻的行业变革。智能化公路质量管理，通过全要素、全过程、全参与方的数字化、在线化、智能化，实现质量数据的自动采集、实时分析、智能预警与协同决策，构建一个“可感知、可预警、可追溯、可决策”的智慧化质量控制体系。

2 国内外智能化公路质量管理发展现状

2.1 国外发展现状

发达国家在智能化质量管理领域的探索起步较早，已形成相对成熟的技术体系和应用模式。

2.1.1 美国

注重全生命周期数据集成与性能预测。通过BIM与GIS结合，实现项目宏观地理信息与微观构件信息的无缝集成。利用先进的无损检测技术（如探地雷达、激光断面仪）自动采集路面厚度、平整度等数据，基于历史大数据建立性能预测模型，为养护决策提供科学依据。美国联邦公路局推动的“Every Day Counts”计划，加速了3D建模、无人机测绘等创新技术在质量管控中的普及。

2.1.2 欧洲

强调标准化与可持续发展。英国率先发布BIM标准，强制要求公共工程项目使用BIM Level 2，极大地促进了设计阶段的质量冲突检测和施工阶段的可视化交底。德国在“工业4.0”理念下，探索预制装配式构件的智能化生产与质量追溯，并在施工中广泛应用智能压实技术，

通过安装在压路机上的GPS和传感器，实时监控碾压遍数、温度与压实度，确保路基路面压实质量。

2.1.3 日本与新加坡

聚焦精细化管理与机器人应用。日本在隧道、桥梁等复杂工程中广泛应用传感技术进行施工期结构健康监测，预防质量安全事故。新加坡作为“智慧国”，强制要求建筑项目提交BIM模型，探索基于数字孪生的资产管理模式。试点使用无人机和机器人进行高空、危险区域的自动化巡检。

2.2 国内发展现状

我国智能化公路质量管理在国家政策驱动和大型工程引领下，呈现出快速追赶、局部领先的态势。

2.2.1 政策支持力度空前

交通运输部相继印发《关于推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见》、《数字交通“十四五”发展规划》等文件，明确提出推动BIM、大数据等技术在公路设计、施工、养护全生命周期的应用。

2.2.2 关键技术应用百花齐放

BIM技术应用深化。从最初的三维可视化，发展到与进度、成本集成的5D管理。在施工阶段，利用BIM进行工艺模拟、技术交底，有效减少了返工。部分项目已实现将质检资料与BIM构件关联，实现质量问题的快速定位与闭环管理。

物联网技术大规模部署。在智慧工地场景中，已普遍应用传感器对混凝土养护温度、湿度、边坡位移、深基坑变形等进行实时监测；对沥青混合料拌合、运输、摊铺温度进行全过程监控；对关键施工机械（如摊铺机、压路机）进行定位与工作状态监控。

大数据与人工智能初步探索。一些领军企业和科研

院所开始构建工程质量大数据平台,对海量检测数据进行分析,挖掘质量通病与施工参数之间的关联规律。AI图像识别技术被用于识别现场安全隐患(如未戴安全帽)和质量缺陷(如裂缝、蜂窝麻面),实现了从“人防”到“技防”的转变。

2.2.3 标杆项目示范效应显著

以港珠澳大桥、北京大兴国际机场、延崇高速、杭绍甬智慧高速等为代表的国家级重大工程,积累了宝贵的实践经验,为行业树立了标杆。

3 当前存在的主要问题

尽管发展迅猛,但我国智能化公路质量管理的全面、深度应用仍面临一系列严峻挑战,制约其效益的充分发挥。

3.1 “数据孤岛”与“信息壁垒”问题突出

设计、施工、监理、检测及业主等参建方往往使用不同的软件平台和数据结构,缺乏统一的数据标准和交互接口,形成一个个“信息孤岛”。BIM模型常常在设计阶段完成后便被“束之高阁”,沦为“展示模型”,未能发挥其作为协同工作核心的价值。

3.2 技术应用呈现“碎片化”与“表层化”

当前许多项目的智能化应用是孤立的、点状的,未能形成覆盖“人、机、料、法、环”全要素的集成化、系统化解决方案,缺乏强大的数据治理、分析和挖掘能力,使得海量数据停留在“沉睡”状态,难以转化为支撑质量预警、趋势预测和优化决策的深层知识。

3.3 标准体系与法律法规建设相对滞后

国家层面尚未建立覆盖数据编码、格式、传输、交换和安全的统一标准化体系。电子档案、电子签章的法律效力,以及物联网传感器自动采集数据在司法举证中的有效性等问题,尚未在法律层面得到完全明确,阻碍了管理流程的无纸化和数字化进程^[1]。

3.4 初始投入成本高昂,投资回报测算模糊

部署一套完整的智能化质量管理体系,涉及高昂的硬件采购、软件开发、系统集成和后期运维成本。对于中小型施工企业或项目而言,初始投资压力巨大。更为关键的是,智能化投入带来的长期效益(如减少返工浪费、降低运营风险、延长工程寿命、提升品牌价值)难以在短期的项目核算中精确量化,影响了投资主体的决策积极性。

3.5 跨界复合型人才储备严重不足

智能化质量管理要求从业者既要精通土木工程的专业知识,又要熟悉信息技术、数据科学的相关技能。目前,高等教育体系在“智能建造”领域的学科交叉融合

尚在探索中,社会上既懂工程又懂数据的复合型人才极度稀缺,成为制约技术落地和创新的最关键瓶颈^[2]。

4 问题产生的原因分析

上述问题的产生,是技术、管理、经济和产业生态等多重因素交织作用的结果。

4.1 技术层面

系统整合难度大,专用算法不成熟。各类硬件传感器、软件平台由不同厂商提供,技术路线、数据协议各异,缺乏开放性和互操作性,系统集成面临巨大挑战。同时,适用于公路工程特定场景的大数据分析模型和人工智能算法(如用于预测混凝土长期强度的AI模型)尚处于研发初期,缺乏经过大量工程数据训练的、可靠的专用模型库和知识库。

4.2 管理层面

传统路径依赖与协同机制缺失。长期以来形成的条块分割、以纸质流程为中心的管理模式具有强大的惯性,与智能化管理所要求的跨组织、扁平化、数据驱动的协同工作流不匹配。各参与方出于数据主权、商业秘密和责任的考虑,缺乏共享数据的意愿和动力。项目管理理念尚未从根本上从被动应对、事后处理转向主动预防、过程可控。

4.3 经济层面

价值评估体系与商业模式不健全。在现行的工程招投标和造价管理体系下,智能化投入通常被列为一项额外成本,其产生的隐性效益和长期价值未能在计价定额和合同条款中得到合理体现和回报。缺乏清晰的商业模式来保障投入方能够分享全生命周期内因质量提升而带来的价值红利^[3]。

4.4 产业生态层面

产业链协同不足,标准迭代缓慢。整个建筑产业的数字化水平参差不齐,从设计软件商、设备制造商到施工企业、运维单位,尚未形成数据互通、价值共享的协同生态。标准制定通常滞后于技术创新的速度,导致市场出现“先乱后治”的局面,增加了集成的复杂性和成本。

5 推进智能化公路质量管理的对策建议

5.1 强化顶层设计,加快构建统一的标准规范体系

由交通运输主管部门牵头,联合行业协会、领军企业,加速制定覆盖公路全生命周期的数据字典、编码规则、交换接口和安全标准。尽快出台强制性与推荐性相结合的BIM模型交付标准、审查机制及数字化归档规定。推动建立以项目数字孪生模型为核心的一站式协同管理平台,从制度和技术上双管齐下,打破信息壁垒。

5.2 聚焦关键环节,推动技术攻关与集成创新

设立国家级或省部级科研专项,鼓励形成“产、学、研、用”创新联合体,重点攻关低成本、长寿命、自供能的智能传感器技术,基于BIM+GIS+IoT的多元数据融合技术,基于机器学习的质量风险智能诊断与预测模型,以及基于区块链技术的质量数据可信存证与溯源系统。目标是实现从单个环节的“单点智能”向项目全链条的“系统智能”跃升。

5.3 创新商业模式,完善激励机制与政策环境

探索将智能化管理投入与工程质量保险、履约担保费率挂钩的“质安险”等创新模式。在工程招投标和工程造价改革中,考虑增设智能化管理措施费,或推行“优质优价”政策。率先在政府投资项目中试行基于BIM模型和电子档案的竣工验收备案制度,为全面数字化交付积累经验。

5.4 培育产业生态,加强跨界复合型人才培养

支持大型总承包企业构建开放平台,吸引中小微企业、科技公司加入,形成协同创新的产业生态圈。推动高等院校设立“智能建造”相关专业和课程,促进土木工程与计算机、自动化等学科的深度交叉。加强对在职工程师的信息化技能培训,通过举办职业技能大赛、认证培训等方式,快速打造一支适应智能化发展需求的人才队伍^[4]。

5.5 坚持示范引领,实施分步推进与差异化策略

继续在国家级重大工程、智慧高速公路建设中开展智能化质量管理的全面应用示范,并系统总结形成技术指南、标准图集和典型案例库。对于中小型常规项目,鼓励其从“智慧工地”管理、混凝土智能温控、张拉压浆智能控制等需求迫切、见效快的单点模块入手,逐步扩展应用范围,降低初始投入风险和门槛。

6 未来发展趋势展望

展望未来,随着技术的不断突破和应用的持续深化,智能化公路质量管理将向更高阶段演进。

6.1 数字孪生成为质量管控的核心底座

高保真、轻量化、具有实时数据驱动能力的公路数字孪生体将成为标准配置。物理实体的任何状态变化(如沉降、应变)都会实时映射到虚拟模型中,从而实现质量的实时诊断、预测性维护和方案模拟优化。

6.2 AI向自主决策与自适应控制演进

人工智能将不再局限于辅助分析,而是向“AI+执行”发展。例如,AI系统能够根据实时监测的路基含水

率数据,自动调整碾压参数并向智能压路机发出指令;或根据图像识别出的摊铺缺陷,自动规划修复机器人的作业路径。

6.3 “无人化”作业场景从试点走向常态

在5G/5G-A、高精度定位等技术的支撑下,无人机群进行自动化巡检与测绘,无人驾驶的摊铺机、压路机集群协同作业,以及机器人进行桥梁检测、隧道清洗等高危作业将日益普及,实现“黑灯工地”,极大提升质量控制的精度和一致性。

6.4 区块链技术构筑可信质量溯源网络

从原材料产地、生产、运输到施工、养护,每一个关键质量环节的检验数据都将以不可篡改的方式记录在区块链上,形成完整的、可信任的“质量链”,为质量责任界定、保险理赔和可持续供应链管理提供强大支撑。

6.5 平台化与服务化降低应用门槛

质量管理功能将越来越多地以“平台即服务”或“软件即服务”的云服务模式提供。中小企业无需巨额前期投入,即可根据项目需求订阅所需的数据分析、风险预警等服务,促进先进技术的普惠化应用,提升行业整体水平。

7 结论

智能化公路质量管理是公路工程行业迈向高质量发展的必由之路。它正经历着从概念普及到实践深耕、从工具应用到模式创新的关键时期。面对当前存在的挑战,需要行业各方凝聚共识,以标准为引领,以技术为引擎,以人才为根本,以机制为保障,协同推动管理理念、技术体系与产业生态的深刻变革。唯有如此,才能牢牢把握新一轮科技革命的历史机遇,铸就更多经得起时间检验的平安百年品质工程,为交通强国建设奠定坚实基础。

参考文献

- [1]王乾坤, 刘俊. 基于数字孪生的智慧工地框架构建与应用研究[J]. 土木工程与管理学报, 2023, 40(1): 1-8.
- [2]张峰, 陈建国. 基于区块链的工程项目质量溯源模型研究[J]. 工程管理学报, 2022, 36(4): 1-6.
- [3]丁烈云. 智能建造引领建筑产业变革[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 467-475.
- [4]郭红领, 黄铭丰. 人工智能在建设工程安全管理中的应用与挑战[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 1-14.