

水利工程项目中施工质量控制的智能化方法

张向辉 陆发兵

南水北调东线山东干线有限责任公司 山东 济南 250102

摘要: 本文针对水利工程施工多工序交叉、隐蔽工程多等特点及传统管控的痛点,梳理了BIM、物联网、大数据等智能化核心技术基础,构建“感知-数据-应用-展示”四层管控框架,提出关键工序管控、风险预警溯源等智能化方法。结合实际应用现状,分析技术、管理、人员层面的现存问题,给出落地保障措施与优化方向,为水利工程施工质量从被动管控向主动预防转型提供可靠技术支撑与实践参考。

关键词: 水利工程项目; 施工质量控制; 智能化方法

引言: 水利工程是关乎民生与生态的重要基础设施,其施工质量直接决定工程安全与运行效能。当前水利工程施工工序复杂、隐蔽工程多,传统人工管控模式存在精度低、响应慢、数据碎片化等问题,难以适配现代工程建设需求。随着智能技术的快速发展,将其融入施工质量控制,成为破解管控难题、提升工程质量水平的关键路径,本文就此展开深入探讨。

1 水利工程施工质量控制现状及智能化应用基础

1.1 水利工程施工质量控制特点与难点

(1) 施工特点方面,水利工程涉及土石方开挖、地基处理、大坝浇筑、隧洞衬砌等多工序交叉作业,露天作业比重大,施工强度随水文气象条件动态波动,隐蔽工程(如基础处理、锚固注浆、防渗墙)覆盖面广,质量形成过程不可逆,后期检测手段有限。(2) 传统管控难点突出表现为:质量检验以事后检测为主,过程管控缺乏连续监测手段,各类质量记录分散于纸质或孤立电子文档中,数据碎片化严重;风险预警依赖人工经验,响应滞后;质量溯源需翻阅大量资料,效率低、准确性差。(3) 质量影响因素涵盖“人、机、料、法、环”五维度:人员技能与质量意识参差不齐,机械设备状态波动,原材料性能差异,施工工艺参数控制偏差,以及水文地质与气候环境的随机干扰,多因素耦合作用增加质量控制的复杂度。

1.2 传统施工质量控制模式及存在问题

(1) 传统管控流程以人工巡检、抽样检测和事后验收为主线,质量评定依赖有限样本,难以全面反映施工实体质量分布。(2) 核心问题表现在管控精度不足(抽样覆盖率低)、实时性差(检测结果滞后于施工进度)、信息化程度弱(数据流转靠人工填报)、各参建单位协同管理缺失,质量信息孤岛现象严重。(3) 质量隐患成因可归纳为管理制度体系不完善(责任落实不到

位)、技术手段落后(缺乏在线监测与自动预警)、过程数据支撑不足(无法支撑精准追溯与持续改进)。

1.3 施工质量智能化管控核心技术基础

(1) BIM三维建模技术通过构建水利工程全尺寸参数化模型,实现施工过程可视化交底、碰撞检查及质量验收要素的数字化绑定,为质量管控提供统一的几何与属性数据底座。(2) 物联网感知技术集成温湿度、压力、位移、应变等传感器,GNSS高精度定位及智能监测设备,对施工现场人、机、料、环境状态进行实时数据采集与边缘处理,打通物理空间与信息空间的数据通道。(3) 大数据与人工智能技术对海量施工质量数据进行清洗、关联挖掘与模型训练,实现质量缺陷模式识别、风险趋势预测及智能辅助决策,提升质量管控的前瞻性与精准度^[1]。(4) 数字孪生技术基于BIM和实时感知数据,构建工程虚拟映射场景,通过动态仿真模拟不同施工工况下的质量演变规律,支持偏差预警、方案优化与闭环控制,推动质量管控从被动应对向主动预防转型。

2 水利工程施工质量智能化控制核心方法与体系构建

2.1 施工全过程智能化质量管控框架设计

(1) 总体架构采用“感知层、数据层、应用层、展示层”四层智能化管控架构。感知层负责现场多源数据的实时采集与边缘预处理;数据层承担异构数据的汇聚、清洗、存储与标准化治理;应用层封装各类智能分析与业务决策模型;展示层实现质量态势的可视化呈现与分级推送,四层协同形成完整技术闭环。(2) 管控原则涵盖实时性、精准性、闭环性、可溯源性、协同性五项基本原则。实时性要求数据采集与传输达到近实时响应;精准性要求监测精度满足质量验收规范标准;闭环性强调“监测—预警—处置—核验”的完整管理回路;可溯源性确保每道工序、每批次材料可追踪至具体责任人与操作参数;协同性推动多方参建单位基于统一平台实现质量

信息共享联动^[2]。(3)全周期管控逻辑贯穿事前智能预判、事中动态监测、事后智能核验三个环节。事前基于BIM与历史数据开展质量风险预判,优化施工资源配置与工艺方案;事中依托物联网感知体系对关键工序参数实施连续跟踪与偏差预警;事后通过智能核验与数据比对自动生成质量评估报告,实现全过程质量闭环管理。

2.2 关键施工工序智能化质量控制方法

(1)土石方填筑智能碾压管控应用GNSS高精度定位智能碾压系统,在压路机行进过程中实时监测碾压轨迹、遍数、行进速度及压实度参数,结合实时检测装置自动生成碾压质量云图,精准识别欠压薄弱区域并及时提示补压处置,有效保障填筑均匀性与密实度,消除局部质量隐患。(2)混凝土施工智能管控在大体积混凝土浇筑与养护环节部署温度传感器阵列、湿度传感器及振捣智能监测终端,实时采集混凝土内部温度梯度、表面湿度及振捣棒插入深度与持续时间等关键参数,发现温度应力超标或振捣不充分时自动预警,有效防范温度裂缝与蜂窝麻面等质量缺陷,保障混凝土结构耐久性。

(3)隐蔽工程智能巡检依托移动端智能巡检系统,按预设工序节点完成检查任务,现场拍照、录像及检测数据实时上传云端,定位与时间戳双重认证确保数据真实可溯,从根本上解决隐蔽工程事后取证难、质量追溯难的长期困扰。(4)工程结构变形智能监测在基坑、边坡、隧洞及大坝等关键部位布设自动化位移计、测斜仪及沉降监测设备,实现数据高频自动采集与无线传输,结合阈值模型与变化速率模型实时感知异常趋势,为施工安全与质量稳定提供动态数据支撑,保障工程结构安全^[3]。

2.3 基于大数据的质量风险智能预警与溯源方法

(1)质量数据库搭建系统整合原材料进场检验、配合比数据、设备运行参数、工序验收记录及环境监测等全维度质量信息,构建结构化、标准化的施工质量数据仓库,实现跨类型数据的关联融合,为深度挖掘分析提供高质量数据基础。(2)智能风险预警模型基于历史质量缺陷样本与实时监测数据,运用随机森林、梯度提升树、支持向量机等机器学习算法训练风险识别模型,挖掘质量隐患的隐性关联规律与特征模式,实现施工前风险预判与施工中超限参数的及时预警,有效推动质量防控由被动应对向主动干预转变。(3)质量问题智能溯源利用数据链条的串联特性,当质量偏差发生时沿“材料批次→施工机组→环境条件→工艺参数”等多维度链条反向追溯,快速锁定致因环节并生成溯源报告,辅助管理人员精准整改和责任界定,形成从问题发现到根源解决的完整链条。

2.4 BIM+数字孪生协同质量管控方法

(1)BIM模型质量参数关联将质量验收标准、规范限值及检查项清单等结构化质量信息嵌入BIM模型各构件属性中,使每一构件成为质量信息的承载单元,支持按构件自动提取质量标准并辅助现场验收判定,实现质量要求与工程实体的精准映射。(2)数字孪生动态仿真利用实时感知数据驱动BIM模型与施工现场同步联动,构建虚实映射的数字孪生体,动态模拟施工进度与质量参数演变过程,实现施工方案的虚拟推演比选,提前发现工艺缺陷并持续优化质量管控方案,减少现场返工损失^[4]。(3)多专业协同管控基于BIM+数字孪生平台打通设计、施工、监理、建设单位之间的数据壁垒,各参与方基于统一模型实时共享质量信息、问题整改与验收结论,实现跨专业高效协同,确保质量管控目标统一、信息对称、行动一致,全面提升工程质量管理水平。

3 水利工程项目中施工智能化质量控制应用保障与优化策略

3.1 智能化管控应用现存问题

(1)技术应用问题突出表现在技术融合度不足、部分场景适配性差、智能化设备覆盖率低。BIM、物联网、AI等技术的集成应用尚处于探索阶段,各类系统之间接口标准不统一,数据互通困难;部分智能化设备和算法针对水利工程复杂多变工况的适应性有待提高,野外恶劣环境下设备稳定性难以保证;中小型水利项目智能化设备投入有限,关键工序覆盖不全。(2)管理体系问题表现为智能化管控制度不完善、流程不规范、权责划分不清晰。现有质量管理体系大多基于传统管控模式制定,缺乏针对智能化管控的系统性制度设计;智能预警的处置流程、数据质量责任界定等环节缺乏明确规范,导致智能化手段难以真正嵌入日常质量管理流程。(3)人员与成本问题聚焦于专业技术人才匮乏与智能化设备投入成本较高。既懂水利施工又掌握智能化技术的复合型人才严重不足,基层操作人员对智能系统的使用能力参差不齐;智能监测设备初期采购及后期运维费用较高,对项目成本构成压力,影响推广积极性。

3.2 智能化质量管控落地保障措施

(1)技术保障方面,优化技术融合方案,适配水利工程复杂施工场景。针对不同工程类型和施工条件,制定分层分级的技术选型标准与系统集成规范,打通BIM、物联网、AI等模块之间的数据接口,提升各技术单元之间的兼容性与协同效率。加强智能设备在高温、高湿、强振动等恶劣工况下的适应性改造,确保感知层数据采集的准确性与连续性,使技术方案与现场实际紧密契

合。(2)制度保障方面,建立智能化质量管控标准、验收规范与管理制度。制定智能监测数据在质量验收中的法律效力认定标准,明确数据采集频率、精度要求、预警分级及处置流程等操作规范。将智能化管控要求纳入项目质量责任体系,厘清建设、施工、监理各方在智能管控中的具体职责,建立以数据为依据的质量评定与验收机制,为智能化手段在质量管控中的合规应用提供完备的制度支撑^[5]。(3)人才保障方面,开展专业技能培训,培育智慧水利施工管理人才队伍。建立分层分类的培训体系,面向管理层开展智能化管理理念与决策方法培训,面向操作层开展设备操作、数据判读与异常处置等实务技能培训。加强与高校和科研机构的合作,引进和培养既精通水利施工工艺又掌握智能化技术的复合型骨干人才,为智能化质量管控提供持续的人力资源保障。(4)设备保障方面,完善智能设备运维体系,保障数据采集精准稳定。建立设备全生命周期管理制度,涵盖采购选型、进场校验、定期校准、日常维护与报废更新等各环节。部署设备运行状态自诊断功能,实现对传感器漂移、通信中断、电量不足等异常状态的自动识别与报警,建立快速响应维修机制,确保感知层数据长期稳定可靠,为上层分析与决策提供高质量数据基础。

3.3 智能化管控方法优化与发展趋势

(1)技术优化方面,深化AI、物联网、数字孪生等技术深度融合,提升智能化决策水平。推动边缘计算与云计算协同,增强现场实时响应能力;优化AI算法模型对水利复杂工况的适应性,提升质量风险识别精度与预测可靠性。(2)体系优化方面,构建全生命周期智能化质量管控闭环体系。将智能化管控从施工阶段向前延伸

至设计阶段,向后延伸至运维阶段,形成覆盖工程质量全生命周期的数据链与管理链,实现质量问题的源头预防与持续改进。(3)发展趋势方面,呈现无人化施工、全域智能监测、智慧化质量监管一体化发展方向。无人碾压、无人机巡检等自动化作业方式逐步普及;空天地一体化监测网络实现全方位感知;政府监管部门与项目参建方基于统一数据平台实现质量监管的协同化与智慧化,推动水利工程质量管控向更高水平迈进。

结束语

智能化技术为水利工程施工质量控制注入了新动能,有效解决了传统管控的诸多短板。尽管目前在技术融合、管理体系、人才储备等方面仍存在不足,但通过完善保障措施、优化技术方案,其应用价值将持续凸显。未来,随着数字孪生、无人化作业等技术的深化应用,水利工程质量管控将实现全域智能、全程可控,为水利事业高质量发展筑牢坚实质量根基。

参考文献

- [1]朱佳辉,张鑫伟,韩毅.水利工程项目中施工质量控制智能化方法[J].水利科技与经济,2026,32(2):134-138.
- [2]赵阳.人工智能在水利工程施工质量隐患识别中的应用研究[J].人民黄河,2024,46(3):118-122.
- [3]王景博,于琦.基于BIM+GIS技术的智能建造系统在水利工程项目群中的应用研究[J].水利建设与管理,2025,13(9):78-83.
- [4]陈明远.BIM+GIS技术在深埋隧洞施工质量追溯中的应用[J].隧道建设(中英文),2024,26(1):201-207.
- [5]刘俊峰.大型水利工程参建方协同管控平台构建与应用[J].施工技术,2023,30(12):145-149.