

水利工程隐蔽工程质量验收难点与数字化解决方案

邹长胜

安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

摘要: 隐蔽工程是水利工程建设关键,其质量关乎工程整体安全、耐久性与运行效能。但因施工不可见、验收窗口期短、传统监管滞后等特性,隐蔽工程质量验收面临诸多挑战。本文梳理了当前水利工程隐蔽工程质量验收的主要难点,如验收依据模糊、过程监管缺失、责任追溯难、技术手段落后等,并剖析成因。结合数字孪生、物联网、BIM、AI及区块链等新兴数字技术,构建覆盖“事前-事中-事后”全生命周期的数字化解决方案框架,通过建立数字底座、强化过程感知、实现智能预警与闭环管理,提升验收透明度、可追溯性与科学性。最后探讨了实施路径与未来展望,为水利工程建设高质量发展提供参考。

关键词: 水利工程; 隐蔽工程; 质量验收; 数字化; BIM; 物联网; 数字孪生

引言

水利工程作为国家基础设施关键部分,兼具防洪减灾、水资源调配、生态保护及能源供给等功能。“十四五”规划及2035年远景目标推进下,一批重大水利工程开工,对工程质量要求愈发严苛。在水利建设中,基础处理等大量工作属隐蔽工程,被后续工序覆盖后无法直观检查,内在质量缺陷隐蔽且滞后,威胁工程安全。传统隐蔽工程质量验收依赖纸质资料、人工旁站和阶段性抽检,存在信息割裂、主观性强、效率低等问题。近年来,行业虽愈发重视隐蔽工程,但验收实践仍有诸多痛点,阻碍工程质量提升。与此同时,BIM、物联网等数字技术正重塑工程建设管理模式。在此背景下,如何把这些先进技术融入隐蔽工程质量验收全流程,突破传统模式瓶颈,成为业界亟待攻克的核心问题。

1 水利工程隐蔽工程质量验收的主要难点

1.1 验收依据模糊,标准执行不一

水利工程隐蔽工程种类繁多,涉及地质、材料、工艺等多个专业领域。现行的验收规范虽然提供了基本原则,但在具体操作层面,如“密实度”、“连续性”、“渗透系数”等关键指标的量化判定上,往往缺乏统一、细化的技术标准。不同项目、不同监理单位甚至不同验收人员对同一标准的理解可能存在偏差,导致验收结论的主观性和随意性较强,难以保证验收结果的客观公正。

1.2 过程监管缺失,“最后一刻”验收风险高

隐蔽工程的质量是在施工过程中逐步形成的,而非仅靠最终验收一锤定音。然而,传统模式下,质量监管多集中于工序结束后的“报验”环节,即“最后一刻”验收。这种“事后把关”模式无法对施工过程中的关键参数(如灌浆压力、注浆量、混凝土浇筑温度、振捣频率等)进

行实时、连续的监控。一旦施工过程出现偏差,等到覆盖后再发现问题,返工成本极高,甚至可能造成不可逆的结构损伤。

1.3 资料真实性存疑,责任追溯困难

隐蔽工程验收高度依赖施工方提供的影像、检测报告和自检记录等资料。这些资料的真实性、完整性完全取决于施工单位的诚信度和管理水平。在利益驱动下,存在影像资料摆拍、检测数据造假、关键工序记录缺失等风险^[1]。一旦工程后期出现质量问题,由于原始过程数据缺失或不可信,很难精准定位问题发生的环节和责任人,导致责任界定不清,纠纷频发。

1.4 技术手段落后,信息孤岛现象严重

目前,隐蔽工程验收的信息载体仍以纸质文档和分散的电子表格为主。设计、施工、监理、业主等各方使用的信息系统互不兼容,形成了严重的“信息孤岛”。BIM模型、地质勘探数据、施工日志、检测报告等关键信息无法有效关联和共享。这不仅降低了协同效率,也使得基于全要素数据的综合分析和智能决策成为奢望。

1.5 人员专业能力不足,经验依赖过重

高质量的隐蔽工程验收需要具备深厚专业背景和丰富实践经验的工程师。然而,行业内高水平人才相对稀缺,部分现场监理人员对复杂隐蔽工程(如高压旋喷桩、深层搅拌桩)的工艺原理和质量控制要点掌握不足,过度依赖个人经验进行判断,难以应对新型工艺和复杂地质条件带来的挑战。

2 数字化解决方案的构建

针对上述难点,本文提出一个以“数字孪生”为核心的理念,融合多种前沿技术的数字化解决方案框架。该框架贯穿隐蔽工程的“事前策划-事中控制-事后追溯”全生

命周期,旨在实现质量验收的可视化、可量化、可追溯和智能化。

2.1 总体架构

本方案的总体架构可分为四层:(1)感知层:利用各类传感器(压力、位移、温度、湿度、视频等)、无人机、探地雷达(GPR)、智能穿戴设备等,对施工现场进行全方位、全天候的数据采集。(2)网络与平台层:通过5G、工业互联网等高速网络,将感知层数据实时上传至统一的云平台。该平台集成了BIM模型、GIS地理信息系统、项目管理信息系统(PMIS)等,构成项目的“数字底座”。(3)数据与模型层:在数字底座上,构建与物理实体完全对应的“数字孪生”模型。所有采集到的过程数据、验收数据、环境数据都将实时映射到该模型上,形成动态更新的“工程健康档案”。(4)应用与服务层:基于数字孪生模型和大数据,开发一系列智能应用,如质量预警、智能验收、虚拟巡检、责任追溯等,为各参与方提供决策支持。

2.2 核心技术与应用场景

2.2.1 BIM+GIS构建数字底座

在项目设计阶段,即建立高精度的BIM模型,并与区域GIS数据融合,形成包含精确地理位置、地质信息、周边环境的三维空间数据库。所有隐蔽工程构件(如每一根灌浆孔、每一段埋管)都在模型中拥有唯一的身份标识(ID)。这为后续所有数据的挂接和关联提供了统一的空间坐标系,彻底解决了信息碎片化问题。

2.2.2 物联网(IoT)实现过程全感知

物联网技术的应用使得对隐蔽工程施工过程的“透明化”监管成为可能。以灌浆工程为例,通过在灌浆泵上加装压力、流量和密度传感器,可以实时、连续地采集并上传每一孔段的灌浆压力、注入率、浆液配比等关键工艺参数,彻底取代了传统的人工读表和手写记录,极大提升了数据的真实性和完整性。在大体积混凝土浇筑过程中,预埋的温度和应变传感器能够实时监测内部水化热温升和应力变化,配合无人机搭载的红外热像仪进行非接触式表面温度场扫描,可有效预防温度裂缝的产生^[2]。对于土石方回填等基础处理工程,智能振动碾压设备能自动记录碾压遍数、行进速度和激振力,确保压实度满足设计要求。而在工序完成后,探地雷达等无损检测技术可对地下结构的密实度和连续性进行扫描,其结果可直接叠加到BIM模型上进行可视化对比分析,从而在覆盖之前就对潜在缺陷进行精准识别和处理。

2.2.3 数字孪生驱动智能验收

当隐蔽工程的某一工序完成后,系统会自动触发验

收流程。此时,验收人员不再需要依赖记忆翻阅厚厚的图纸和纸质记录,而是通过移动终端调取该部位对应的数字孪生模型。在这个虚拟模型中,设计意图、施工过程和验收要求被完美融合:模型清晰展示了设计规定的几何尺寸与材料规格,同时动态集成了施工过程中所有由IoT设备采集的实时数据曲线、关键节点的高清影像视频以及相关的检测报告。验收人员仿佛拥有了“透视眼”,可以进行穿透式的查验,将物理世界的施工成果与虚拟世界的设计模型进行直观、全面的对比。更为重要的是,系统内置的规则引擎能够自动将实测数据与规范阈值进行比对,一旦发现异常,如灌浆压力骤降或混凝土温控超标,便会立即发出预警,辅助验收人员聚焦关键问题,做出更加科学、客观和高效的验收决策。

2.2.4 区块链保障数据可信与追溯

在解决了数据采集和关联的问题后,如何确保这些数据从源头到归档的整个链条真实、完整、不可篡改,是建立信任机制的关键。本方案引入区块链技术,将所有从感知层采集的原始数据、施工日志、验收记录、审批意见等关键信息,一经生成即通过哈希算法加密,并分布式地写入区块链。区块链所具有的去中心化、不可篡改和全程可追溯的特性,从技术上杜绝了任何一方单方面伪造或篡改历史记录的可能性。这意味着,无论工程竣工多少年后,只要调取区块链上的相关数据区块,就能清晰、完整地还原当时施工和验收的全过程^[3]。当工程后期出现质量争议时,这套机制能够精准锁定问题发生的具体环节、时间点和责任主体,极大地提升了工程治理的公信力和纠纷处理的效率,为工程质量终身责任制的落实提供了坚实的技术保障。

2.2.5 AI赋能质量预测与优化

数字化解决方案的最高阶应用在于利用人工智能实现从“描述”到“预测”乃至“决策”的跨越。通过对海量历史工程数据和当前项目实时数据的深度学习,AI模型能够挖掘出影响隐蔽工程质量的深层次规律和关键因子。例如,模型可以学习到在特定地质条件下,采用某种灌浆压力与注入率的组合,最有可能形成连续、饱满的防渗帷幕。这种基于数据的洞察力,可以为施工方案的动态调整和工艺参数的实时优化提供前瞻性建议,将质量管理的关口从事后检验大幅前移至事前预防。此外,AI还可以对遍布工地的视频监控画面进行智能分析,自动识别工人是否规范佩戴安全防护用具、是否严格执行了关键操作步骤(如振捣时间是否充足),从而将人的行为也纳入到质量管控体系之中,构建起一个覆盖“人、机、料、法、环”全要素的智能质量管理体系。

3 实施路径与挑战展望

3.1 实施路径

要将这一先进的数字化解决方案从理念转化为普遍实践,需要系统性的推进策略。首先,行业主管部门应发挥引领作用,加快制定水利工程数字化交付、BIM深度应用、数据交互标准等方面的统一规范,为全行业提供清晰的技术路线图。其次,应采取“试点先行、示范引领”的策略,选择具有代表性的国家重大水利工程开展数字化隐蔽工程验收的深度应用试点,通过实践积累经验、验证模式、培养人才,并形成可复制、可推广的示范案例。再次,必须同步加强能力建设,对建设、施工、监理等各参与方的管理人员和技术人员进行系统的数字化技能培训,着力培养既懂工程又懂数字技术的复合型人才队伍^[4]。最后,需要构建开放共赢的产业生态,鼓励软件开发商、硬件设备制造商、科研机构与工程实践单位紧密合作,共同研发适配中国水利工程特点、成本效益合理的软硬件一体化解决方案。

3.2 面临挑战

尽管前景广阔,但全面推广数字化隐蔽工程验收模式仍面临多重挑战。首先是经济层面的挑战,初期在传感器部署、平台搭建、人员培训等方面的投入成本较高,对于部分中小型项目而言可能构成负担。其次是技术层面的挑战,不同厂商的硬件设备与软件系统之间存在的兼容性问题,可能导致数据孤岛在新的技术环境下以另一种形式重现。再次是数据治理的挑战,海量工程数据的安全存储、隐私保护以及权属界定等问题亟待建立完善的法规和制度予以规范。最后,也是最根本的,是组织文化层面的挑战,数字化转型必然会对现有的工作流程、岗位职责乃至权力结构带来冲击,需要强有力的领导力和变革管理来克服组织惯性。

3.3 未来展望

展望未来,随着5G-A/6G通信、边缘计算、更先进的无损检测与感知技术的持续演进,水利工程隐蔽工程质量验收的数字化、智能化水平将迎来质的飞跃。未来的“智慧工地”将不再是一个被动的数据采集场,而是一个

能够自主感知、自主分析、自主预警甚至自主优化的有机生命体。数字孪生模型将与物理工程实现毫秒级的同步,AI将成为每一位工程师的“超级助手”,而区块链则构筑起坚不可摧的信任基石。在这样一个高度自治、透明可信的工程环境中,每一个曾经隐蔽的角落都将无所遁形,每一项关键工序都将被精准守护。这不仅是技术的进步,更是工程文明的跃升,必将为构建安全、韧性、高效、绿色的国家现代水网提供最坚实的保障。

4 结语

水利工程隐蔽工程质量验收的困境,本质上是信息不对称、过程不可见、责任不可溯的问题。本文提出的以数字孪生为核心的数字化解决方案,通过构建统一的数字底座,利用物联网实现全过程感知,借助区块链确保数据可信,并运用AI进行智能分析,系统性地破解了传统验收模式的诸多难题。该方案不仅是技术工具的简单叠加,更是工程管理理念的深刻变革,它将推动水利工程质量管理的“被动响应”向“主动预防”、从“经验驱动”向“数据驱动”的根本性转变。尽管在推广过程中会遇到各种挑战,但其对于保障国家重大基础设施安全、提升工程建设品质的价值毋庸置疑。未来,应持续深化技术创新与制度创新的协同,加速水利工程建造方式的数字化转型。

参考文献

- [1]彭家敏.水利工程隐蔽工程质量检测技术的创新与实践[C]//中国企业文化促进会职业教育专业委员会.数字化背景下建筑企业生产与企业文化融合式发展论坛论文集.巴音郭楞蒙古自治州水利水电勘测设计有限责任公司,2025:72-74.
- [2]陈廷国.水利工程监理中隐蔽工程验收关键内容分析[J].水上安全,2025,(15):150-152.
- [3]石俊杰,黄龙.基于制度突破与技术嵌入的水利工程验收标准代际演进[J].水利技术监督,2026,(02):1-3+12.
- [4]卜微.水利工程验收阶段的质量监督工作策略[J].湖南水利水电,2024,(03):124-126.