

水利水电工程施工质量与安全管理

高 磊

临泉县黄岭镇人民政府, 安徽 临泉 236400

[摘要]针对水利水电工程多工序、强耦合与分包协同导致的质量与安全闭环弱化问题,文中剖析材料抽检、工艺窗口、隐蔽验收以及风险识别等环节的薄弱点,提出以BIM为信息底座的精细化质量控制方法、以物联网为核心的施工安全风险预警体系,以及以制度、流程、作业三层联动为主线的标准化管理设计,并在西南某水利枢纽工程开展应用验证。实践数据显示,实施后质量合格率提升至 0.98,安全事故发生率由每百万工时和关键线路总工期相对基准均有下降。研究证明,数据治理与规则引擎驱动的感知-预警-处置闭环能够在进度挤压条件下稳定维持施工质量与安全水平,并实现过程透明与可追溯。

[关键词]水利水电工程; BIM; 物联网; 施工质量控制; 安全风险预警

DOI: 10.33142/hst.v9i7.20244

中图分类号: TV53

文献标识码: A

Construction Quality and Safety Management of Water Conservancy and Hydropower Projects

GAO Lei

Linquan County Huangling Town People's Government, Linquan, Anhui, 236400, China

Abstract: In response to the weakening of quality and safety closed-loop caused by multiple processes, strong coupling, and subcontracting collaboration in water conservancy and hydropower engineering, this article analyzes the weak points in material sampling, process windows, concealed acceptance, and risk identification. It proposes a refined quality control method based on BIM as the information base, a construction safety risk warning system with the Internet of Things as the core, and a standardized management design with the linkage of system, process, and operation as the main line. It has been applied and verified in a water conservancy hub project in Southwest China. Practical data shows that after implementation, the quality pass rate has increased to 0.98, and the incidence of safety accidents has decreased compared to the benchmark of per million working hours and the total duration of critical routes. Research has shown that a perception warning disposal loop driven by data governance and rule engines can stably maintain construction quality and safety levels under schedule compression conditions, and achieve process transparency and traceability.

Keywords: water conservancy and hydropower engineering; BIM; Internet of Things; construction quality control; safety risk warning

引言

水利水电工程具有建设周期长、作业面广、专业交叉多、工序耦合强等特征,施工质量与安全管理难度受导流转换、汛期水位波动、深基坑支护和大型起重作业等条件影响。尽管行业制度体系较为完备,但在材料复检、工艺窗口控制、隐蔽工程验收以及危险源动态识别等关键环节仍存在执行弹性大、信息分散和闭环不强等问题,数据采集与现场感知覆盖不足进一步削弱了基层监管能力。在数字化转型背景下,如何将 BIM 和物联网由展示与监测工具转变为面向工程控制的业务驱动平台,如何以标准化流程承载质量与安全要求并打通策划、许可、验收与回溯,

是提升现场治理效能的关键。本研究围绕上述痛点,提出基于 BIM 的精细化质量控制方法,构建以物联网为底座的安全风险预警体系,并以制度、流程、作业三层联动实现职责清晰和节拍匹配,同时建立可复核的量化评估指标体系与权重设定方法,旨在在多分包协同和进度挤压条件下实现可视、可管、可追溯的施工管理。

1 水利水电工程施工质量与安全管理的现状剖析

鉴于水利水电工程具有长链条、多工序、强耦合的施工特性,当前施工质量与安全管理呈现出制度完备而执行偏弱的结构性矛盾。在材料环节,到场抽检频次与批量匹配不足,委托检测与现场留样脱节,水泥、外加剂、钢筋

接头等关键指标复核覆盖不全;在工艺执行方面,混凝土浇筑、帷幕灌浆与止水节点等工序存在工艺窗口控制松动,首件评定与过程旁站未形成闭环,隐蔽工程验收停留在资料完备而非状态确认。总承包与专业分包界面模糊则会把质量责任链拉长,压缩工序养护周期并挤压进度。

在安全管理层面,对施工危险源进行动态识别与分级管控,仍偏重开工前清单,对导流转换、汛期高水位、深基坑支护等状态变化响应迟缓,个体防护和临边防护标准化配置不足。行业年度统计披露,2023 年质量事故发生率约为 1.2%,安全事故发生率约为 0.8%,隐患治理的韧性不足。由此推导,数据采集分散、现场感知覆盖不足以及基层监管能力差异,正在把管理从有制度拉向弱闭环。

2 水利水电工程施工质量与安全管理的关健措施

2.1 施工质量的精细化控制方法

围绕水利水电施工多工序强耦合的现实情境,研究把 BIM 当作数据驱动的三维信息集成平台来开展精细化质量控制。在设计与策划阶段构建坝段、溢洪道消力池以及帷幕灌浆等参数化构件模型,与网络计划联动形成 4D 工序模拟,把浇筑分层厚度、施工间歇、止水节点处理等过程约束显式化,并把坍落度、出机温度、入仓温差与养护时长定义为可配置的工序窗口。进一步观察发现,在运输与泵送环节选用车载拌筒扭矩推断稠度并与到场坍落度抽检进行比对,在入仓口设置红外或超声在线温度计并在大体积块体内布设光纤测温,借助无线网关把实测数据回填至构件实例,触发超限预警与旁站到位提示。从数据治理角度看,需把采集频次与工序节拍进行匹配,采用 5min 周期上传并在浇筑启动、终凝前后等关键时段增密采样,同时配置设备自检与时间同步校核,降低数据漂移对判定的干扰。结合质量管理制度,围绕首件评定、隐蔽工程验收与材料复检,配置检验批与构件一一对应的质量策划清单,现场把二维码或 RFID 与构件编码进行绑定,使检测报告、留样信息与构件状态在同一模型中形成可追溯链条。由此推导,规则引擎把相关规范与项目专用质量计划转化为可机读阈值与逻辑,系统对比实时数据与过程记录给出处置建议,并把不合格处置与复验结果闭环固化在模型版本中,使多专业协同与进度挤压条件下的质量控制得到稳定维持且信息透明。

2.2 施工安全的风险预警体系构建

立足水利水电施工涉水、深坑与起重交叉的高风险场景,本研究把物联网作为贯通现场感知、数据治理与处置执行的技术底座来构建施工安全风险预警体系。围绕基坑变形、塔吊载荷、围堰渗流与水位、边坡位移、风速以及

有毒有害气体浓度等关键危险源,进行传感器精细化布设并与 BIM 构件完成编码绑定,配套 NB-IoT 或 LoRa 与 4G 回传,边缘网关开展时间同步、设备自检与噪声剔除,采集周期按工序节拍设定常态 10s 并在导流转换、夜间大风吊装等时段增密,同时对丢包率与延迟进行在线监测。平台侧把多源数据按作业面划分为风险单元,运用规则引擎把规范阈值与项目红线参数转化为机读阈值,结合趋势变化识别与关联规则对超限、突变以及联动失稳进行联合判别,输出 4 级预警和处置清单,并在 GIS 与三维模型中生成热区与告警定位。需重点关注的是,预警不止于告知,而要把响应闭环固化到现场执行链条:对塔吊实施载荷与回转速度限幅,对深基坑联动降水与内支撑复核,对围堰在水位快速抬升时触发加高与反滤加固工序,同时把短信、语音与看板推送至班组与调度。由此推导,设备健康度、校准周期与误报率需纳入运行评估,预案演练、旁站到位与处置回执回灌到模型,使风险识别、预警与处置形成可追溯闭环,见图 1。

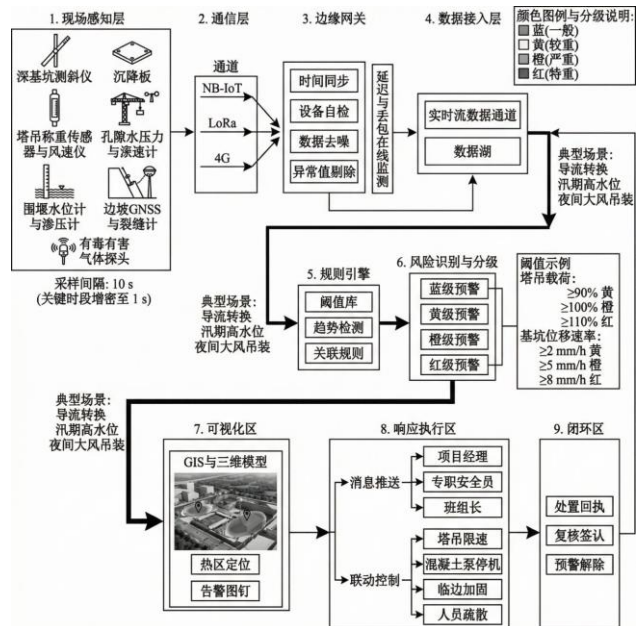


图 1 施工安全风险预警流程示意图

2.3 管理流程的标准化优化设计

鉴于工程施工链条长、岗位交互频密且分包界面易松动,本研究把管理流程标准化作为承载质量与安全要求的核心载体来开展系统优化,构建由制度、流程、作业三层联动的流程体系,把策划、许可、验收、回溯四类关口嵌入端到端主流程之中,并把各环节触发条件、时序节拍与信息回传路径加以明确。进一步观察发现,职责灰区常使闭环断裂,因而在总承包、专业分包、监理、试验室与设

备管理员等主体之间配置 RACI 矩阵, RACI 矩阵即把负责、批准、协作、被告知四类角色进行清晰分配的责任工具。围绕关键工序, 建立标准作业程序 SOP 与作业卡, 针对混凝土浇筑、帷幕灌浆、深基坑支护与起重吊装定义关键控制点、记录要素与时限约束, 把质量验收和安全检查进行固化成相应流程, 流程需与数字化底座协同, 把 BIM 模型当作流程清单生成的驱动器, 把构件编码与二维码或 RFID 进行绑定, 把物联网实测数据与规则引擎对接以触发许可开关及暂停指令, 并把偏差处置纳入变更通道, 形成现场变更发起、技术复核、规则校核、批准下达与复验归档的闭环链条。需重点关注的是时序与节拍控制, 把审批时限、抽检频次与工序窗口进行对齐, 把 T+1 归档、超期预警与重复打回的处置路径写入流程库, 同时把绩效约束与责任追溯联动到流程事件, 使其在进度挤压与多分包协同条件下, 质量与安全管理获得稳定可执行的流程支持。

3 水利水电工程施工质量与安全管理的效果验证

3.1 管理效果的量化评估指标体系

在多工序强耦合与多主体协同的施工情境下, 把质量与安全管理成效纳入可量化评估, 本研究构建了含质量合格率、安全事故发生率与工期达标率的核心指标体系, 并把数据来源限定在检验批受理台账、物联网感知平台与网络计划对比三类数据域, 以保障口径一致与追溯链条完整。考虑指标量纲差异与方向性差异, 正向指标按实值直接归一并限定于区间边界, 负向指标按项目红线或行业控制目标设定上限基准, 采用目标基准化进行方向反转, 超出上限时裁剪至零值。从权重设定角度看, 借助层次分析法构建由安全外部性、过程可控性与对生产连贯性的影响三项准则构成的判断矩阵, 完成特征向量求解与一致性检验, 使权重来源具有程序化依据且可复核。评价周期以月为单位设置在 T+1 完成归档, 关键节点如导流转换与汛期前开展加密评估, 同时把规则引擎对不合格处置与复验

回执的闭环状态纳入合规性核验。综合计算方法见下式, 指标口径与权重设定见表 1, 并在模型与流程系统中同步落地以实现自动汇总与可追溯校核。

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \times x_i$$

其中, S 表示综合得分 (单位: 分), w_i 为第 i 个指标的权重系数 (单位: 无量纲), x_i 为第 i 个指标的标准化得分 (单位: 无量纲), n 为纳入评估的指标数量 (单位: 项)。

3.2 实际工程案例的效果分析

面向西南山地河谷的一座综合性水利枢纽工程, 主坝为重力坝, 最大坝高 135m, 左岸厂房开挖深度 28m, 导流与汛限双工况交替使施工组织呈现多工序强耦合特性。本研究把 BIM 与物联网构成的数字化底座嵌入施工策划、过程控制与风险处置链条, 在浇筑、帷幕灌浆与深基坑支护环节进行工序窗口与传感回灌配置, 并把 RACI 矩阵与 SOP 固化到许可与验收主流程。围绕数据口径统一, 把检验批受理台账、物联网感知平台以及关键线路网络计划三类数据域进行贯通, 评价周期按月以 T+1 完成归档。对比实施前后, 质量合格率提升至 98%, 安全事故发生率降和关键线路总工期相对初始基准均有下降, 数据详见表 2。进一步观察发现, 运输与泵送环节选用车载拌筒扭矩与到场坍落度进行比对, 入仓口与大体块体内部布设红外与光纤测温, 塔吊与围堰侧配置载荷、水位与渗压在 线采集, 规则引擎把项目红线参数转化为机读阈值以触发限幅、加高与复核动作; 同时把二维码与构件编码进行绑定, 使检测报告与留样信息在模型中形成追溯链条。由此推导, 工序窗口的参数化约束与现场状态的实时比对, 叠加预警到处置的闭环执行与职责节拍的明确分配, 把进度挤压下的质量控制与风险治理稳定维持在可视、可管的状态。

表 1 水利水电工程施工管理效果评估指标体系表

评价维度	指标名称	定义与计算	指标属性	标准化方法	权重
质量	质量合格率	当期检验批一次合格批数除以检验批总批数	正向	直接归一, 记为 $x_i = \text{实际值}$, 区间裁剪至 $[0,1]$	0.35
安全	安全事故发生率	当期轻伤及以上事故总数除以有效工时并乘以 10^6 人小时	逆向	目标基准化, $x_i = \max\{0, 1 - \text{实际值}/\text{上限基准}\}$	0.40
进度	工期达标率	关键线路口径下实际完成量与计划完成量之比	正向	区间裁剪, $x_i = \min\{1, \text{实际值}\}$	0.25

表 2 某水利枢纽工程管理效果对比表

指标	实施前数值	实施后数值	评价口径与数据源
质量合格率	0.89	0.98	当期检验批一次合格批数占比, 数据源为检验批受理台账
安全事故发生率	0.7	0.1	每 10 ⁴ 人小时事故数, 数据源为考勤与伤害报表及监理月报整合
总工期相对基准值	1.00	0.95	关键线路实际总工期与初始控制计划之比, 数据源为网络计划对比

4 结语

本文面向水利水电工程施工质量与安全管理的结构性矛盾, 构建了 BIM 驱动的工序参数化控制、物联网贯通的风险预警与执行联动, 以及以 RACI 矩阵和 SOP 为核心的流程标准化体系, 形成以规则引擎为枢纽的感知-判别-处置-复验闭环。工程应用表明, 该体系能显著提升检验批一次合格水平, 降低百万工时事故发生率, 压缩关键线路总工期偏差, 并将检测报告、留样信息与构件状态在统一模型中全程追溯。研究强调采集频次与工序节拍匹配、设备自检与时间同步校核及预警响应现场落实, 使质量与安全控制在复杂工况下保持稳定执行。未来工作将面向更大尺度跨标段协同, 完善设备健康度与误报率运行评估, 融入多源异构数据趋势预测与异常诊断, 探索数字孪生与智能控制在导流转换、汛前调度等关键节点的应用, 并进一步将成本、环境与碳排约束纳入统一指标体系, 实现工程建设全要素精益治理。

[参考文献]

- [1]柯传芳,于胜利,张鑫鹏.水利水电工程安全监测:从理论到实践的全面解析[J].水资源保护,2025,41(3):270.
 - [2]杨金莎.水利水电设备运行管理方法探究[J].中国设备工程,2025(22):56-58.
 - [3]王勇.10 kV 电力工程施工安全管理及现场质量控制措施[J].大众标准化,2025(22):22-24.
 - [4]龙金雨,李永康.建筑项目施工风险及安全管理策略——评《建筑施工安全技术与管理研究》[J].安全与环境学报,2025,25(4):1645.
 - [5]向蓁,颜辉.基于作业条件危险性评价法的建筑给排水工程施工现场安全管理研究[J].建筑科技,2025,9(11):17-19.
- 作者简介:高磊(1992—),男,安徽临泉县人,汉族,本科学历,助理工程师,就职于临泉县黄岭镇人民政府,从事农村规划建设和服务中心工作。