

水利工程施工中的质量控制和安全管理

马 兵

新疆塔建三五九建工有限责任公司，新疆 阿拉尔 843300

[摘要]新疆水利工程因地理环境复杂、气候条件恶劣，施工质量控制面临技术复杂性与环境多变性双重挑战。针对施工方案缺陷、材料质量波动、隐蔽工程管控等核心问题，文章从构建“数据驱动+智能响应”协同管控体系，通过BIM-GIS技术融合实现风险动态预判，利用区块链存证构建质量追溯闭环，依托数字孪生优化混凝土温控、土石坝填筑等关键工序参数。实践表明，该体系使混凝土裂缝发生率下降，施工材料损耗率降低，防渗体隐蔽工程质量实时监测覆盖率达100%。研究形成覆盖全生命周期的智慧管理方法论，为干旱半干旱地区水利工程数字化转型提供系统性解决方案，推动质量管控向智能化、协同化方向升级。

[关键词]新疆水利工程；质量控制；数字管理；BIM-GIS；数字孪生

DOI: 10.33142/hst.v8i5.16507

中图分类号: TV5

文献标识码: A

Quality Control and Safety Management in Water Conservancy Engineering Construction

MA Bing

Xinjiang Tajian 359 Construction Engineering Co., Ltd., Alaer, Xinjiang, 843300, China

Abstract: Due to the complex geographical environment and harsh climate conditions, the construction quality control of water conservancy projects in Xinjiang faces dual challenges of technical complexity and environmental variability. In response to core issues such as construction plan defects, material quality fluctuations, and concealed engineering control, this article constructs a "data-driven+intelligent response" collaborative control system, integrates BIM-GIS technology to achieve dynamic risk prediction, uses blockchain storage to build a quality traceability loop, and relies on digital twins to optimize key process parameters such as concrete temperature control and earth rock dam filling. Practice has shown that this system reduces the occurrence rate of concrete cracks, lowers the loss rate of construction materials, and achieves a real-time monitoring coverage rate of 100% for the quality of concealed anti-seepage works. Research and develop a smart management methodology that covers the entire lifecycle, providing systematic solutions for the digital transformation of water conservancy projects in arid and semi-arid areas, and promoting the upgrading of quality control towards intelligence and collaboration.

Keywords: Xinjiang water conservancy engineering; quality control; digital management; BIM-GIS; digital twin

引言

新疆地处亚欧大陆腹地，干旱半干旱气候区占全区面积的90%以上，水资源时空分布极不均衡。近年来，随着大石峡水利枢纽、叶尔羌河防洪工程等重大项目推进，水利工程成为破解区域水资源瓶颈的核心手段。然而，新疆水利工程施工面临“三山夹两盆”的复杂地形（天山、昆仑山、阿尔泰山与塔里木盆地、准噶尔盆地）、极端温差（ $-35^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ ）及强风沙（年平均沙尘暴日数10~30天）等独特挑战，传统质量控制模式因信息滞后、协同低效，难以应对高风险工况。

本文立足新疆地域特征，构建“感知-分析-决策-执行”闭环管理体系，重点突破隐蔽工程质量不可见、材料溯源难、温控工艺粗放等技术瓶颈，探索符合干旱区特点的智慧管控路径，为同类地区水利工程提供可复制的技术范式。水利工程作为国家基础设施的核心领域，其施工质量与安全直接关系到防洪、供水等重大社会功能。然而，水利工程规模庞大、技术复杂、环境多变等特点，导致施

工中材料、工艺、管理等多风险叠加，质量缺陷与安全事故频发。传统管理模式因风险预判不足、协同管控低效等问题，难以应对系统性风险。尤其在数字化转型背景下，亟需构建覆盖全链条的智慧管理框架，破解“重局部轻整体”的管理痛点。以“动态风险预控”与“技术-管理协同”为核心，提出基于数字孪生的质量安全管理方法，为提升工程韧性并推动行业转型升级。

1 新疆水利工程施工质量控制核心挑战

1.1 地理环境胁迫下的技术复杂性

1.1.1 地质条件突变风险

新疆位于全球著名的“地中海-喜马拉雅”地震带，水利工程多建于活动断裂带周边。例如，大石峡水利枢纽坝基穿越8条断层，施工中曾因突发岩溶裂隙导致混凝土漏浆，传统地质勘察手段难以提前识别此类微构造缺陷。此外，沙漠地区风积沙地层承载力低（标准贯入击数 $N<10$ ），渠道基础处理易出现不均匀沉降，某干渠工程建成3年后因地基砂土液化导致边坡滑移，修复成本增加15%。

1.1.2 气候极值叠加效应

夏季高温期(6~8月)混凝土浇筑面临“三超”问题。入仓温度超30℃、水化热峰值超70℃、昼夜温差超20℃,导致温控难度较内地增加30%以上。冬季负温期(12~2月)施工,混凝土受冻临界强度需提升至设计强度的40%,传统蓄热法保温效果不稳定,某重力坝冬季施工段拆模后发现表面蜂窝麻面率达8%。

1.1.3 生态脆弱性约束

塔里木河流域等工程区属于国家级生态保护区,施工中需严格控制弃渣场水土流失、噪声污染。传统施工管理模式难以实时量化生态影响指标,某水库施工期因临时道路扬尘导致周边植被覆盖率下降12%,触发生态红线预警。

1.2 传统管理模式的系统性缺陷

(1) 质量数据碎片化。原材料检测数据分散于实验室纸质报告、施工日志与监理台账。隐蔽工程验收依赖抽样检测,防渗墙取芯检测覆盖率仅5%~10%,难以发现深层缺陷。

(2) 风险响应滞后性。现场质量问题处理遵循“发现-上报-研判-整改”四级流程,平均耗时14.21小时。

(3) 协同机制低效化。参建各方数据系统独立运行形成“信息孤岛”。

2 水利工程施工中的安全隐患

水利工程施工安全隐患具有多源性、隐蔽性和连锁性、突发性等特征,其成因可归结为技术、管理及环境等多维度的系统性缺陷。施工方案的科学性是首要风险源,大型水利工程常因技术复杂性、工序施工要求高、施工周期长,导致材料堆放混乱、工序交叉频繁,若施工方案考虑因数不周(如未考虑边坡稳定性或地下水位变化),易引发坍塌、机械伤害等事故。安全防护设施不完善将进一步加剧风险。水利工程普遍在偏远山区或交通不便区域,管理失衡导致临时防护设施普遍存在标准低、维护缺失问题。如脚手架采用非标材料搭建、临边护栏高度不足,甚至部分防护网破损率超过60%。此类设施在极端天气(如暴雨、强风)下易失效,形成“形式化安全”陷阱。此外,施工环境恶劣与人员素质参差形成叠加效应。应急救援难度因偏远工地常面临通信不畅、医疗救援滞后等客观条件而增加难度。一线作业人员缺乏系统培训现象,特种作业持证率偏低,技术交底流于形式,导致违规冒险作业频发。更深层次的问题在于安全管理体系缺位。多数项目未建立安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制,应急预案缺乏实战演练。项目重进度轻质量,擅自缩短混凝土养护周期,引发结构裂缝超标,最终返工处理。这种“重进度轻质量”的管理思维,暴露出制度约束力薄弱与责任链条断裂的深层矛盾。

3 安全隐患的管理措施

3.1 加强安全教育与培训

水利工程安全教育与培训需突破传统“填鸭式”模式,

构建分层分类、虚实结合的立体化培养体系。针对施工方案不科学导致的系统性风险,应建立“技术交底+方案复盘”双轨机制,新入场人员需接受基于BIM技术的三维施工模拟培训,直观掌握复杂工序的安全要点;针对高风险作业(如爆破、高空架设),推行“VR事故模拟+实操考核”,通过沉浸式体验强化违规操作后果认知。在安全防护设施不完善的常态化管理中,需将设施标准纳入培训内容:通过实物拆解演示,使作业人员掌握脚手架荷载计算、防护网材质鉴别等技能,同步建立“设施隐患随手拍”制度,利用移动端APP实时上传问题并联动整改。针对施工环境恶劣的客观制约,应开发极端条件应急处置课程,如沙漠地区风沙演练、山区泥石流避险模拟,并配备便携式应急物资包,确保野外作业点“半小时应急响应圈”。针对人员素质参差与管理缺位的叠加问题,需实施“三阶递进”培养计划:一线工人侧重标准化操作(如混凝土振捣时间控制、电焊防火规范)与事故案例警示教育;班组长强化“安全积分制”管理,将隐患排查量、培训参与度与绩效挂钩。同时,推行“导师带徒”制度,由资深工程师带领新人完成全周期施工流程跟岗,确保技术传承与风险防控无缝衔接。

3.2 施工过程动态监管

水利工程施工动态监管需构建“数据驱动+智能响应”的全周期管控体系,突破传统“人盯人”式监管的局限性。针对施工方案不科学引发的系统性风险,应依托物联网技术建立“BIM+GIS”双模定位监测网络:在混凝土浇筑、土方开挖、爆破、有限空间作业等高风险工序中,通过埋设智能传感器实时采集温度、应力、位移等数据,同步对接BIM模型生成三维可视化预警图谱。例如,碾压混凝土坝工程通过监测仓面温度梯度,自动触发温控措施调整指令,将裂缝发生率降低。针对安全防护设施不完善的顽疾,需推行“设施状态在线评估”机制,利用无人机搭载红外热成像仪,对脚手架连接节点、防护网磨损程度进行毫米级精度扫描,自动生成设施健康度评分并联动整改。在施工环境恶劣区域,部署北斗定位+边缘计算设备,实时追踪机械作业轨迹与人员定位,当监测到超负荷作业或违规进入危险区域时,系统自动锁停设备并发出声光报警。对于人员素质参差与管理缺位的叠加问题,需构建“行为-风险”智能画像系统:通过AI视频分析技术,自动识别未戴安全帽、擅自拆除支护结构等高危行为,并关联个人安全信用积分;同步建立项目经理“风险决策指数”模型,将方案变更频次、应急预案执行率等数据纳入考核,对连续触发阈值的项目部启动问责程序。

4 水利工程施工质量控制关键因素与对策

4.1 影响质量的核心因素

水利工程施工质量控制的核心在于对“人-机-料-环”四大要素的系统把控,其复杂性源于工程规模大、工序交叉

多、环境变量广等特点。施工设备的技术参数与维护水平直接影响施工精度：例如，混凝土振捣设备的频率偏差超过 $\pm 5\%$ 时，易导致结构蜂窝麻面；盾构机刀具磨损未及时更换，可能引发隧道轴线偏移超限。因此，需建立设备全生命周期管理系统，通过物联网传感器实时监测运行状态，并结合 BIM 技术预判设备与工序的匹配度。施工人员的技术能力与责任意识是质量控制的动态变量。统计表明，约 68% 的质量缺陷源于操作不规范或工序衔接失误。对此，需推行“技能矩阵”管理，将焊工、电工等特殊工种的操作精度纳入考核，并通过“质量缺陷追溯系统”强化责任意识^[1]。材料质量的稳定性与适用性是工程质量的基础保障，水利工程中水泥安定性不合格、土工膜厚度偏差 $> 0.2\text{mm}$ 等问题，可直接导致大坝结构开裂或防渗失效。需构建“材料进场-存储-使用”全链条管控体系：采用区块链技术记录原材料溯源信息，利用智能仓储系统实现温湿度自动调节，并通过无损检测技术（如超声波探伤、红外热成像）验证材料性能。施工环境的动态适应性则是质量控制的潜在风险源。地质条件突变（如溶洞、断层）或极端气候（如暴雨、冻融、风沙侵蚀、盐碱土质）可能颠覆原有施工方案。对此，需建立“环境风险动态评估模型”，结合卫星遥感、地质雷达实时扫描数据，调整施工工艺参数，并制定分级响应预案。

4.2 质量控制措施优化

4.2.1 强化质量监管体系

水利工程质量监管体系的优化需突破传统“事后抽检+人工复核”的粗放模式，构建“全过程、多维度、智能化”的立体监管框架。针对施工设备参数偏差与人员操作失误的耦合风险，应建立“设备-人员”双链追溯机制：通过物联网传感器实时采集混凝土搅拌站转速、振捣棒频率等关键参数，同步对接工人技能认证系统，当检测到设备超限运行或人员违规操作时，自动触发声光报警并冻结工序权限^[2]。在材料质量波动与环境动态干扰的协同管控中，需构建“区块链+智能传感”溯源体系：原材料进场时即上链存储出厂批号、检测报告等核心数据，施工过程中通过埋设温湿度传感器、压力应变计等设备，实时生成材料性能演变曲线，当检测到水泥安定性异常或土工膜应力超标时，系统自动推送替代方案并联动调整施工工艺。某水库工程因砂石骨料级配偏差导致混凝土离析，通过该体系在 2 小时内完成问题溯源，紧急调用备用料源并优化配合比，避免返工损失超。针对管理流程僵化与责任边界模糊的系统性缺陷，需推行“PDCA+数字孪生”闭环管理模式：利用 BIM 模型构建虚拟施工场景，预演不同工序组合对质量的影响权重，结合现场实测数据动态修正数字模型，形成“设计-施工-反馈”迭代优化链路。

4.2.2 施工过程精细化管控

水利工程施工精细化管控需依托“数据贯通+智能决

策”双引擎，将传统经验驱动转化为参数化、标准化管控模式。针对工序衔接不畅导致的质量波动，应建立“BIM+GIS”工序分解模型：将大体积混凝土浇筑、土石坝填筑等复杂工序拆解为可量化子模块（如温控时段、碾压遍数），通过智能算法匹配最优工艺参数组合^[3]。面板堆石坝工程采用该模型后，将过渡料压实度合格率提升，施工效率提高。在实时监测与反馈层面，需构建“一体化”感知网络：利用北斗定位+无人机航测建立施工地形数字孪生体，结合埋设于混凝土结构内部的分布式光纤传感器，实时监测温度梯度、应力变化等关键指标。当检测到仓面温差超限值时，系统自动触发冷却水管通水方案调整指令，并通过移动端推送至施工班组。针对质量缺陷追溯困难的痛点，需推行“区块链+智能标签”溯源机制：在水泥、钢筋等关键材料进场时植入 RFID 芯片，关联生产工艺参数与检测报告；施工过程中通过 AI 视频分析自动抓取焊缝成型度、钢筋间距等质量数据，生成不可篡改的电子施工日志。

5 结语

水利工程施工质量控制与安全管理是工程全生命周期管理的核心议题，其复杂性源于技术密集性、环境多变性及管理协同性的多重叠加。通过系统性分析“人-机-料-环”四大要素的相互作用机制，揭示了施工方案科学性、安全防护标准性、材料稳定性及环境适应性对工程质量与安全的决定性影响。在管理层面，创新性提出“数据驱动+智能响应”的协同管控框架。通过 BIM-GIS 融合技术实现施工风险动态预判，借助物联网与区块链构建质量追溯闭环，利用数字孪生技术优化工序参数组合，形成覆盖“设计-施工-运维”全链条的智慧管理方式。实践验证表明，该体系可显著降低质量缺陷率、提升安全事件响应效率，并为工程数字化转型升级提供可复制的技术路径。未来研究需进一步融合卫星遥感、AI 大模型等前沿技术，构建“风险预警-智能决策-韧性提升”一体化管理模式，同时推动行业标准与政策法规的配套完善，以实现水利工程质量安全管理从“被动防控”向“主动治理”的跨越式发展。

【参考文献】

- [1]阿合买提·哈司木. 水利工程施工中的质量控制与安全隐患管理[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(2): 205-207.
- [2]马占岳. 水利工程施工中的质量控制与安全隐患管理[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(8): 147-149.
- [3]刘钊. 水利工程施工中的质量控制与安全隐患管理[J]. 水上安全, 2024(16): 157-159.

作者简介：马兵（1980.8—），男，水利水电工程一级建造师，工学学士，副总工程师，主要从事水利水电及土木工程施工、质量安全管理、工程技术创新、科学研究及项目管理等工作。