

水利工程施工与维修养护中的安全管理创新

马 兵

新疆塔建三五九建工有限责任公司，新疆阿拉尔 843000

[摘要]水利工程的施工安全与维修养护直接关系国家基础设施安全与民生福祉。针对当前水利工程施工和维修中面临的复杂环境与传统管理模式的落后带来的施工安全风险。文章构建“全周期管控-技术创新-智能监管”三位一体的安全管理体系。在施工阶段，聚焦水利工程技术、混凝土加固及密实、防渗处理等关键工艺的安全技术要点，提出基于数字孪生与智能监测的风险防控策略；在维修养护阶段，剖析设施老化、有限空间作业等风险特征，建立“预测性维护-动态应急-知识进化”的现代化管理框架。研究成果为提升水利工程本质安全水平提供理论支撑与实践路径。

[关键词]水利工程；施工安全；维修养护；智能监管；风险防控

DOI: 10.33142/hst.v8i6.16924

中图分类号: TU7

文献标识码: A

Innovation of Safety Management in Water Conservancy Engineering Construction and Maintenance

MA Bing

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

Abstract: The construction safety and maintenance of water conservancy projects are directly related to the safety of national infrastructure and the well-being of the people. In response to the complex environment and outdated traditional management models faced in the current construction and maintenance of water conservancy projects, there are construction safety risks. The article constructs a three in one security management system of "full cycle control - technological innovation - intelligent supervision". During the construction phase, focus on the safety technical points of key processes such as water conservancy engineering technology, concrete reinforcement and compaction, and anti-seepage treatment, and propose risk prevention and control strategies based on digital twins and intelligent monitoring; During the maintenance phase, analyze the risk characteristics such as facility aging and limited space operations, and establish a modern management framework of "predictive maintenance - dynamic emergency - knowledge evolution". The research results provide theoretical support and practical paths for improving the intrinsic safety level of water conservancy engineering.

Keywords: water conservancy engineering; construction safety; maintenance and upkeep; intelligent supervision; risk prevention and control

引言

在“双碳”目标与新基建战略背景下，水利工程正从传统防洪灌溉功能向智能化、生态化、多功能化、景观营造等复合系统转型。这种功能转型推动工程建设呈现三大特征，即空间向上，深层向下、横向向跨流域管网延伸。技术层面融合智能感知与绿色建材创新，运维要求上需统筹物理设施耐久性与生态系统稳定性。面对深基坑支护变形控制、高流速水下结构抗冲耐磨、老化设施智能诊断等新挑战，使得传统安全管理模式在风险识别精准度、过程监管实时性、应急响应协同性等方面显现出系统性不足，特别是对隐蔽工程隐患的滞后发现与跨专业风险的割裂管控，已成为制约工程安全效能提升的瓶颈。

空间维度上，跨流域长距离调水对水利工程施工安全控制要求更加严格。技术维度上，智能感知、绿色建材等新技术应用带来风险识别与管控模式变革；运维维度上，老龄化设施占比增加，需统筹结构安全、生态修复与应急响应的协同管理。

随着转型使得传统安全管理模式也存在系统性短板：隐患识别依赖经验，缺乏实时性与精准性；各阶段风险管控未形成全周期联动机制；应急响应缺乏多部门协同与技术赋能。基于此，构建时间维度上贯通规划、施工、运维阶段的风险传导路径。横向整合技术、管理、环境要素的交互影响，立体维度依托 BIM+GIS+AI 技术构建智能决策中枢，旨在实现从水利工程安全管理由“被动事故处置”到“主动风险预防”的升级。

1 施工阶段安全管理核心技术与策略

1.1 围堰工程

围堰工程是水利工程施工中常用的施工措施。其施工的安全性，直接影响水利工程的质量、安全和经济效益。围堰类型的选择应结合项目所在工程水文地质条件与自然环境。土石围堰适用于浅水缓流区域，通过分层碾压确保结构密实度。钢板桩围堰在深水急流工况展现优势，其连续墙结构可有效抵御水力冲击。施工中需重点控制防渗体系构建，采用黏土心墙与复合土工膜组合工艺，结合实

时渗流监测系统,实现挡水结构与排水系统的动态平衡。在潮汐河段工程中,需建立水位涨落预测模型,优化围堰顶高程与边坡稳定性设计。

1.2 混凝土加固技术

混凝土加固技术是对存在质量问题水利工程结构的重要施工措施。是保障水利工程安全的重要保证。水工混凝土加固需遵循“现场诊断-方案批准-实施”的技术路线。加固技术的选用需与存在缺陷相适应。结构强度提升和缺陷加固可采用碳纤维和注浆;环氧树脂浸渍主要用于裂缝修补。预应力锚杆技术可恢复深层结构完整性,其张拉控制需考虑徐变效应与温度应变的耦合影响。在泄洪建筑物加固中,研发抗空蚀纳米改性混凝土,配合超高压喷涂工艺,使修补层与基体形成梯度过渡界面,显著提升抗冲刷性能。

1.3 防渗墙防渗处理

在水利工程中,渗漏是重要的质量安全问题。防渗处理技术被广泛应用于水利工程的施工环节。该技术的优势在于,能够从过程中有效控制墙体的密实度和抗渗路径,同时确保水工结构较高的耐久性和安全性。防渗处理技术在施工过程中实施,具有较强的灵活性和环境适应性。它可以根据不同的施工地点和水利施工环境,采取具有针对性的控制措施^[1]。

2 水利工程施工阶段的安全管理策略

2.1 安全管理体系的建立

水利工程施工阶段安全管理体系的构建需遵循“预防为主、综合治理、过程管控、责任闭环”的原则。建立隐患排查治理、安全风险分级管控,将隐患按危险性划分为红、橙、黄三级响应状态,配套差异化的处置流程与资源调配方案。空间管控维度推行网格化立体监管,纵向划分项目指挥部、工区、作业面三级管理单元,横向整合施工、监理、监测多方责任主体,通过植入定位芯片的智能安全帽实现“人员-机械-环境”的实时三维态势感知。创新引入区块链存证技术,将参建单位的安全行为数据上链固化,实现项目安全管理与工程款支付的自动关联,建立“履约保证-过程考核-终期评价”的全链条激励约束机制。

2.2 安全技术措施与管理手段

水利工程施工阶段安全技术措施与管理手段深度融合,采取智能监测与精准调控技术,构建起覆盖全作业场景的立体化防护体系。深基坑工程引入监测参数自适应优化机制,同步联动自动化降水设备的智能启停控制,实现地下水位波动幅度压缩至毫米级精度。高空作业安全防护体系升级为智能物联模块,整体升降平台集成北斗定位与风速感知功能,可识别秒内的失稳状态并触发机械制动,形成“主动预警-被动防护”的双重保障机制。特种设备安全管理向预测性维护转型,构建振动、温度、噪声多源信号融合的故障诊断体系,建立早期故障的量化识别阈值,

实现从采购验收到报废处置的数字溯源。

2.3 施工现场风险识别与防控

水利工程施工现场风险防控通过系统性技术融合与动态管理机制,构建“源头识别-空间管控-智能预警”全流程防护体系。将工程实体解构为工艺单元与风险要素的矩阵网络,通过工作分解结构细化施工流程节点,同步建立风险分解结构映射模型,实现临边作业、深基坑、滑坡等安全风险精准匹配。建立大体积混凝土浇筑等关键工序与施工安全的融合考虑。风险可视化层面建立四维动态分布图谱,结合时间维度与空间坐标对风险区域实施分级管理。红色高危区执行“双监护+双审批”制度,即作业人员资质审查与设备状态核查并行、施工方案专家论证与应急预案联合审核。橙色警戒区采用智能物联监控,通过定位芯片与 AI 视频分析实时追踪人员轨迹与设备运行状态^[2]。针对季节性风险,构建气象-水文-地质多源数据融合预警平台,建立降雨强度-地表径流-地质变形的联动响应机制。当监测到短时强降雨信号时,智能决策系统自动触发三级响应。一级预警启动施工区域排水泵站与防洪挡板;二级响应限制高风险作业并疏散非必要人员;三级响应切断设备电源并激活应急通讯频段。地质风险防控领域创新应用多频段地质雷达扫描技术,结合无人机摄影生成的高精度实景模型,构建地下隐伏构造与地表变形场的三维动态映射系统,识别地质异常体的空间展布规律,为支护参数动态优化与开挖时序调整提供决策支持。

2.4 施工人员安全教育与培训

水利工程施工人员安全教育与培训体系通过技术创新与管理优化实现能力全面提升。构建沉浸式虚拟实训平台,融合 VR/AR 技术模拟高空坠落、有限空间作业等典型风险场景,结合体感反馈装置增强事故体验的真实性,强化施工人员的风险直觉反应。建立分层分类的岗位资质认证机制,针对深基坑支护、大坝灌浆等情景,建立集成三维动画演示与智能考核系统,实现理论教学与实操训练的深度融合。日常安全管理推行四阶循环法:场景还原识别隐患、根因分析制定对策、情景模拟应急处置、复盘优化防控方案,形成动态迭代的风险预判能力培养模式。创新安全行为积分管理制度,将个人防护装备规范使用、危险源主动报告等行为量化赋分,通过区块链技术实现安全表现的不可篡改记录,积分结果与工资深度绑定,构建“能力提升-行为规范-工资”三位一体的长效激励机制。

3 水利工程维修养护阶段的安全管理策略

3.1 维修养护作业的风险特征

水利工程维修养护阶段的风险防控需构建多维度技术,针对设施老化与环境作用的耦合风险实施精准干预。水闸启闭系统钢丝绳的隐性损伤检测突破传统目视检查局限,采用脉冲涡流与漏磁复合探伤技术,通过电磁场扰动信号解析钢丝内部断丝率与腐蚀深度,实现非接触式连

续监测。涵洞检修作业环境安全管控引入分布式光纤气体传感网络,在有限空间内布设甲烷、硫化氢等多参数检测节点,结合智能通风连锁系统,形成有毒气体浓度超标自动预警与应急排风机制。水库大坝护坡维修期间库水位调控创新应用流固耦合数值模型,综合考虑水位骤降速率、坡体渗透系数与植被固坡效应的相互作用,建立基于安全系数的动态泄洪决策算法。输水管道维修作业的水锤效应防控体系,研发压力波传导特性与阀门响应时间的匹配模型,通过先导式智能减压阀组的多级协同控制,实现瞬态压力冲击的梯度消解^[3]。

3.2 设备运行与维护的安全规范

水利工程设备运行维护的安全关系其功能、安全运行的重要保障。深度融合智能监测与全生命周期管理理念,构建起水利工程设备运维的安全“感知-诊断-决策”的闭环管控机制。设备健康管理突破传统阈值预警模式,通过振动频谱分析与温度场重构技术建立多物理场耦合诊断模型,精准识别水泵机组轴承早期磨损与转子不平衡等隐性故障。特种设备退役评估体系引入微磁检测与声发射技术,构建金属疲劳损伤与应力腐蚀的跨尺度评价指标,结合服役环境大数据建立剩余寿命预测算法,为设备更新决策提供量化依据。

3.3 现场安全检查与隐患排查

水利工程维修养护阶段的安全检查与隐患排查体系是确保水利工程结构安全、设备可靠的重要工作。构建起“智能诊断-闭环治理-知识进化”的全流程防控机制。设施状态评估突破传统经验判断模式,通过多光谱成像与超声波层析技术融合,建立混凝土碳化深度、钢筋锈蚀分布与结构承载力的多参数耦合模型,形成基于损伤演化的动态风险分级标准。智能巡检系统研发仿生六足机器人,集成激光诱导击穿光谱与太赫兹波探测模块,实现结构内部蜂窝状缺陷与微裂纹的亚毫米级识别精度。隐患治理流程创新应用 PDCA-5W1H 复合分析法,在计划阶段运用鱼骨图追溯失效机理,执行环节部署增强现实(AR)辅助维修系统,检查阶段引入数字孪生比对验证技术,处理环节构建隐患知识图谱实现跨工程案例的自学习优化。知识管理系统开发语义关联引擎,通过自然语言处理技术抽取历史隐患数据特征,建立“缺陷类型-成因链-处置方案”的三维关联规则库,当检测到新型隐患时自动匹配相似案例并生成处置建议。

3.4 养护期突发事件的应对策略

水利工程养护期突发事件应对体系构建“智能感知-动态推演-协同处置”的全链条应急响应机制,深度融合新一代信息技术与工程安全管理需求。在应急资源调度层

面,突破传统平面化储备模式,构建四位一体立体监控网络。高空部署具备红外热成像功能的巡检无人机群,实时监控库区渗漏点与边坡变形;地面依托智能仓储机器人系统实现防汛物资的自动分拣与无人车配送;水下布设声呐监测阵列,精准感知管涌与结构裂缝发展。物资储备库引入数字孪生技术,通过物资存量、运输路径、需求热力的多源数据融合,动态优化储备品类与区域分布,形成“需求牵引-智能匹配-弹性补给”的物资保障模式。溃坝风险防控领域创新研发多尺度耦合仿真平台,集成水文气象大数据、地质力学模型与工程数字孪生体,运用深度强化学习算法模拟洪水演进过程,不仅预测淹没范围,更可推演溃坝冲击波对下游桥梁、城镇的次生灾害链^[4]。预警系统突破单一阈值报警局限,建立风险熵值评估模型,通过贝叶斯网络动态计算不同情景的发生概率与损失权重,生成包含人员疏散优先级、工程抢险时序、交通管制方案的三维应急决策树。应急决策支持系统开发知识图谱驱动的智能推演引擎,将历史案例库、专家经验规则、应急预案文本进行语义关联,构建“事件-成因-处置-效果”的四维关系网络。当险情发生时,增强现实(AR)指挥平台可叠加显示工程内部结构损伤、救援力量分布与实时环境参数,通过自然语言交互快速调取最佳处置方案。

4 结语

水利工程安全管理的现代化转型需要技术创新与管理变革双轮驱动。未来应深化 BIM、物联网与人工智能技术的融合应用,构建智慧安全管控平台。同时完善安全管理标准体系,培育专业化的第三方安全服务机构。通过建立全员参与、全程可控、全域覆盖的安全管理新格局,切实提升水利工程本质安全水平,为经济社会可持续发展提供坚实保障。

【参考文献】

- [1]孙维全.水利工程施工与维修养护中的安全管理策略[J].水上安全,2025(3):1-3.
 - [2]马晓辉.水利工程维修养护存在的问题及对策[J].现代物业(中旬刊),2018(9):215.
 - [3]刘志国.水利施工中的智能化技术应用研究[J].水上安全,2025(3):71-73.
 - [4]钱明海,谢传宝.水利水电工程涵闸工程施工管理与维修养护浅析[J].水电站机电技术,2020,43(11):205-206.
- 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。