

基于风险管理的水利施工安全管理体系构建与优化

李姗姗，支立

北京市北运河管理处，北京 101100

摘要： 本文聚焦水利施工安全管理的现实痛点，以风险管理理论为基石探索安全管理体系的创新重构路径。不同于既有研究多集中于单一风险因素或静态管理框架的局限性，本研究强调风险管理的动态耦合性与技术赋能价值，旨在通过多源数据融合、智能算法嵌入和全链条协同机制的整合，构建“识别-评估-控制-监控”一体化的安全管理体系。同时，文章结合各种前沿技术，提出安全管理体系的优化策略，力求突破传统管理中的信息孤岛、响应滞后与责任模糊等问题。

关键词： 风险管理；水利施工；安全管理体系

Construction and Optimization of Water Conservancy Construction Safety Management System Based on Risk Management

Li Shanshan, Zhi Li

Beijing North Canal Management Office, Beijing 101100

Abstract： This paper focuses on the realistic pain points of water conservancy construction safety management, and explores the innovative reconstruction path of safety management system with the risk management theory as the cornerstone. Different from the existing research focus on a single risk factors or static management framework limitations, this study emphasizes the dynamic coupling of risk management and technology can assign value, aims at through multi-source data fusion, intelligent algorithm embedded and the integration of the whole chain coordination mechanism, build "identification-assessment-control-monitoring" integration of safety management system. At the same time, the article combines with various cutting-edge technologies, puts forward the optimization strategy of safety management system, and strives to break through the traditional management of information island, response lag and responsibility fuzzy and other problems.

Keywords： risk management; water conservancy construction; safety management system

引言

作为国家基础设施建设的重要支柱，水利工程承载着防洪减灾、水资源调配、能源开发等多重使命，其施工过程往往面临复杂的地质条件、极端气候环境以及高强度的技术挑战。近年来，随着大型水利项目如抽水蓄能电站、跨流域调水工程的加速推进，施工安全管理的复杂性与不确定性显著增加^[1]。我国水利工程中的大多数事故与风险预控不足直接相关，传统“事后整改”式的安全管理模式已难以适应动态化、系统化的工程需求。如何在施工全周期中实现风险的精准识别、科学评估与高效控制，构建一套以风险管理为核心的安全管理体系，成为行业亟待突破的瓶颈。

一、水利施工安全风险的特征与分类

（一）水利施工安全风险的动态演化特征

水利工程施工安全风险呈现显著的非线性演化规律。从时空维度分析，风险状态随工程阶段推进呈现动态叠加效应。在基础开挖阶段，地质条件不确定性占主导地位^[2]。初期面临高边坡稳定性风险，温度应力控制风险逐步凸显，风险类型与等级随施工

时序动态演变。风险传播具有链式反应特征，某单一风险点的失控可能触发系统性事故。2020年某引水隧洞塌方事故即由局部岩爆引发支护失效，最终导致涌水突泥的连锁灾害，印证了风险传导的级联效应。

（二）多维度风险分类体系

基于风险源作用机理差异，可将水利施工风险解构为四大类属：自然风险、技术风险和社会风险。自然风险源于不可控环境

作者简介：

李姗姗（1987-），女，籍贯：北京密云，汉族，工程师，本科，研究方向：水工建筑物运行与维护；

支立（1983-），男，籍贯：河北衡水，汉族，助理工程师，本科，研究方向：水工建筑物运行与维护。

因素，包含极端气象、地质灾害与生态敏感区干扰三类。例如，滇中引水工程遭遇的喀斯特地貌突水问题，本质属于地质构造风险与施工技术风险的耦合作用。技术风险聚焦工程实施环节，涵盖设计缺陷、工艺失当及设备故障等维度，比如抽水蓄能电站压力钢管焊接中出现的冷裂纹缺陷^[3]。管理风险体现为组织体系缺陷，包括安全制度虚置、资源配置失衡与监管流程断裂。社会风险涉及利益相关者冲突，征地移民矛盾与舆情危机成为新型风险增长点，如某水库扩建工程因移民安置补偿纠纷导致工期延误。

二、基于风险管理的水利施工安全管理体系构建

（一）四位一体安全管理体系框架设计

水利施工安全管理体系的构建需突破传统线性管理范式，建立“风险识别－风险评估－风险控制－风险监控”四位一体的闭环系统。该框架以风险数据流为驱动，通过模块化功能集成实现管理效能的螺旋式提升。在体系运行机制上，风险识别模块负责多维度数据采集与特征提取，评估模块完成风险量化与优先级排序，控制模块实施差异化干预策略，监控模块则通过实时反馈优化系统参数^[4]。体系创新性主要体现在动态耦合机制：监控数据反向输入识别模型实现知识迭代，风险评估结果实时修正控制阈值，形成“监测－决策－执行－验证”的智能闭环。

（二）多源数据融合的风险识别模型

针对水利工程风险源的隐蔽性与关联性特征，构建基于多源异构数据融合的识别模型。模型架构包含数据感知层、特征提取层和决策输出层三个层级。数据感知层集成北斗变形监测、无人机巡检影像、环境传感器与人员定位数据，形成空天地一体化的监测网络^[5]。特征提取层采用改进的 LSTM-Attention 算法，通过时序特征提取与空间关联分析，捕捉风险演化规律。决策输出层借助贝叶斯网络实现风险耦合效应分析，突破传统单因素识别模式的局限性。在南水北调中线工程穿黄隧洞施工中，该模型成功识别出复合风险场景。通过融合地质雷达探测数据、施工机械运行状态监测信息及水文气象预报，系统提前预警了掌子面突水风险。相较于人工巡检方式，模型显著提升了风险识别覆盖率，误报率也得到了控制，验证了多源数据融合的技术优势。

（三）动态风险评估模型构建

为解决风险不确定性量化难题，引入模糊综合评价法与蒙特卡洛模拟的混合评估模型。评估体系包含 5 个一级指标和 18 个二级指标，采用改进的 G1 法确定权重分布，既考虑专家经验又融入数据驱动要素。模糊评价处理定性指标的模糊性特征，蒙特卡洛模拟通过大规模迭代计算揭示风险损失的概率分布特征，两者结合实现定性与定量评估的有机统一。在雅砻江两河口水电站大坝填筑工程中，该模型动态评估了暴雨工况下的边坡稳定性风险。通过实时接入物联网监测数据，系统每 15 分钟更新渗流压力、位移速率等关键参数，自动触发风险评估流程^[6]。评估结果显示高风险区域与后期实际发生浅层滑坡的位置高度吻合，证明模型具有较强工程适用性。动态评估机制使风险管控从定期检查转向实时响应，显著提升管理时效性。

（四）分级风险控制策略设计

基于风险评估结果实施四级管控策略，建立风险等级与管控强度的映射关系。红色级风险触发工程暂停机制，橙色级启动专项应急预案，黄色级实施工序优化调整，蓝色级维持常规监测^[7]。控制措施与工程阶段深度耦合，针对围堰施工、混凝土浇筑等关键环节设计差异化管控方案，实现资源优化配置。在滇中引水工程香炉山隧洞施工中，系统根据围岩类别变化动态调整管控等级。当 TBM 掘进至断层破碎带时，自动升级为橙色管控级别，该级别会降低掘进速度，加强超前支护措施，同步启动应急物资调配。

（五）物联网驱动的风险监控平台

设计基于边缘计算架构的智能监控平台，构建“终端感知－边缘计算－云端决策”三级协同体系^[8]。终端层部署高精度智能传感器，实现毫米级形变监测与微秒级响应。边缘节点运行轻量化识别算法，完成数据预处理与初级风险判断。云端中心集成数字孪生模型，支持多场景仿真推演与策略优化。平台创新性体现在预警规则的自适应进化机制，通过机器学习持续优化预警阈值与响应逻辑。在大藤峡水利枢纽船闸工程中，该平台成功预警左岸边坡位移异常。系统通过融合微震监测、倾斜仪数据与图像识别结果，提前发现潜在滑动面发育迹象，及时启动加固措施避免重大损失。平台的应用大幅降低了监控成本，预警准确率也得到了提升。

三、水利施工安全管理体系的优化路径

（一）动态适应原则的实践转化

水利施工安全管理的动态优化需贯穿工程全生命周期。在深基坑施工阶段，需建立地质条件与支护参数的动态匹配机制，通过实时监测地下水位、土体位移等关键指标，自动调整降水井运行频率与支护结构预应力。高边坡作业场景中，结合气象预报数据与岩体稳定性监测结果，动态切换开挖方案与防护等级。混凝土浇筑期则需构建“温度场－应力场”的双向反馈机制，根据传感器数据实时调整冷却水流量与养护方案^[9]。动态适应的本质在于将静态安全阈值转化为与施工进度、环境变量联动的函数关系，其技术支撑来源于物联网监测网络与智能决策算法的深度融合。

（二）技术协同的落地场景

BIM 技术在复杂施工场景中展现多维管控价值。对于地下厂房交叉作业区域，通过 4D 施工模拟提前发现施工机械路径冲突，优化设备调度时序。在导流隧洞衬砌施工中，基于 BIM 模型自动校核钢筋间距与混凝土浇筑量，规避质量缺陷引发的结构风险。数字孪生技术在水库大坝施工中构建虚拟映射系统，实时反演渗流场变化趋势，为防渗墙施工质量提供预判依据。区块链技术应用于工程验收环节，建立不可篡改的电子档案链，实现检测报告、材料合格证等关键数据的全流程追溯。技术集成的突破点在于构建统一数据中台，打通设计参数、施工记录与监测数据的交互壁垒。

（三）安全文化的具象化建设

人员安全素养培育应与施工场景深度结合。文化建设的核心是将抽象的安全理念转化为可执行的操作规程与可视化管控界面。针对高空作业人员开发VR沉浸式培训系统，模拟脚手架搭设失误引发的坠落场景，强化肌肉记忆与风险条件反射。在隧洞掘进作业班组推行“安全行为画像”制度，通过智能安全帽采集操作规范性数据，生成个性化改进方案^[10]。工序交接环节实施风险传递清单管理，明确围堰拆除向主体结构施工过渡时的渗流控制、结构应力监测等12项责任交接要点。设备管理维度建立健康状态指数评价体系，基于振动频谱分析、油液检测数据预测机械故障概率，实现预防性维护。

四、水利施工安全管理体系的未来发展方向

（一）标准体系的动态重构机制

水利安全标准体系需建立与技术创新同步的进化能力。针对TBM掘进施工，制定动态调整的标准框架。在硬岩地层设定刀具磨损量的预警阈值，破碎带区域明确超前注浆压力与支护时机的量化指标。设备管理标准引入健康度评价体系，基于振动频谱分析建立液压系统故障预警模型，将维修策略从“故障后抢修”转向“预测性维护”。标准验证环节构建双轨机制：数字孪生平台模拟标准适用性，现场实测数据反馈修正参数阈值。在生态敏感区域，标准体系需集成环境承载力指标，例如规定施工活动强度与植被恢复进度的量化关系，实现工程安全与生态保护的动态平衡。

（二）国际经验的本土化融合路径

国际先进技术的引进需完成适应性改造四部曲。在参数校准阶段，建立地质相似性评价模型，筛选适配技术类型；在功能优化阶段，改进设备接口标准，比如调整盾构机刀盘转速参数以适应本地岩体强度特征；在工艺重构阶段，融合传统工法，在高地

应力隧洞施工中组合新奥法监测体系与北欧支护技术；在人员培训阶段，开发虚实结合的实训系统，通过增强现实技术模拟国际设备的操作流程。引进技术时需建立标准互认机制，既要构建中外规范参数的转换公式库，又要开发智能解释系统自动匹配条款差异。输出技术时采用模块化封装策略，将核心算法与硬件适配方案分离设计，确保在不同地质条件下的快速部署能力。

（三）绿色安全协同的价值创造

生态技术创新正在重塑安全管理的价值维度。在库岸防护中，柔性生态挡墙通过植物根系加筋作用提升结构稳定性，较传统混凝土护坡减少碳排放42%。在施工过程中的绿色化改造也能形成风险防控新路径。各种新型电动工程机械可以消除燃油泄漏隐患，其低噪音特性也能同步降低工人听力损伤风险；装配式临建设施可以减少场地开挖量，从源头控制边坡失稳概率。在评价体系中将生态环境纳入考虑。采用层次分析法确定工程生态效益、安全效益、经济成本的量化关系。这种协同模式将环境外部成本内部化，通过碳交易机制使安全投入转化为可量化的经济效益。

五、结束语

水利施工安全管理是保障工程质量和人员安全的核心环节，而基于风险管理的管理体系构建与优化为行业提供了全新的解决思路。本文通过分析水利施工风险的动态演化特征和多维度分类，提出了“识别-评估-控制-监控”四位一体的安全管理体系框架，并结合各种前沿技术实现了从静态管理向动态智能管控的转变。未来，随着智能化技术的深度应用，水利施工安全将迈向精准感知、科学决策和高效响应的新阶段。同时，标准化体系的完善和国际经验的融合将进一步提升管理效能，推动绿色安全协同发展的转型目标。

参考文献

- [1]王海升,石洪娥.水利工程施工中的质量控制与安全管理体系[J].葡萄酒,2023(15):0025-0027.
- [2]周花兰.水利施工安全风险及风险控制措施[J].建筑工程技术与设计,2018.
- [3]吉祖湛.强化水利工程施工安全管理措施[J].水利规划与设计,2016(2):4.
- [4]陶丽霞.水利施工安全风险管控措施分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(11):3.
- [5]陆启庆.水利施工管理中的安全风险与改进对策[J].工程设计与设计,2019,(15):298-300.
- [6]罗黎.刍议水利施工安全风险控制措施[J].建筑工程技术与设计,2017,000(034):824.
- [7]任继锋.水利工程安全生产风险管理体系建设[J].云南水力发电,2023,39(11):300-303.
- [8]陈世庆.水利工程施工安全管理存在的主要问题与对策探微[J].建筑工程技术与设计,2017(5).
- [9]杨晓华,李盛,曾朝文.浅谈水利水电施工企业的项目风险管理[J].江西水利科技,2013,039(001):71-74.
- [10]李卓兰.水利施工管理中存在的安全风险及改进措施[J].工程技术:文摘版,2016:00121-00121.