

水利工程运行期风险识别、评估与应急响应机制构建

崔 灏

杭州余杭林业水利投资有限公司 浙江 杭州 311100

摘要：水利工程运行期面临自然环境、工程结构、运行管理及外部干扰等多重风险。本文构建了风险识别体系，涵盖风险源分类、识别方法及关键因子提取；搭建风险评估模型，包括评估维度、量化方法及等级划分；设计了应急响应机制，涉及管理体系、预案制定与能力建设；并构建全周期管理机制，涵盖风险防控闭环、数字化平台及组织保障。通过系统研究，为水利工程安全运行提供全面理论支持与实践指导。

关键词：水利工程；运行期风险；风险识别；风险评估；应急响应机制

引言：水利工程作为基础设施的重要组成部分，其安全运行直接关系到防洪安全、水资源供给及生态环境稳定。然而，在长期运行过程中，水利工程受自然环境变化、工程结构老化、运行管理不当及外部干扰等多重因素影响，面临诸多潜在风险。这些风险不仅可能引发工程失效，造成重大经济损失，还可能对周边生态环境及社会稳定产生深远影响。因此，构建科学有效的水利工程运行期风险识别、评估与应急响应机制，成为保障水利工程安全运行的迫切需求。

1 水利工程运行期风险识别体系

1.1 风险源分类框架

水利工程运行期风险源的识别需基于系统性思维，从多维视角构建分类框架。自然环境风险涵盖地质构造活动引发的地基沉降、滑坡等灾害，以及气象条件变化导致的极端降雨、洪水超标、温度骤变等影响。这些自然因素相互交织，对水利工程产生复杂且多样的影响，是风险识别中不可忽视的重要部分。工程结构风险聚焦于建筑物本体及附属设施，包括混凝土碳化、钢筋锈蚀等材料性能退化现象，闸门启闭机卡阻、水泵效率下降等设备功能异常，以及地基不均匀沉降引发的结构变形^[1]。工程结构作为水利工程的主体，其稳定性直接关系到整个工程的安全，需重点关注。运行管理风险涉及人为因素与制度缺陷，如调度方案与实际工况不匹配造成的过载运行，维护周期不合理导致的隐患累积，以及人员操作规范执行不到位引发的突发故障。人为因素和管理制度的不完善往往是引发风险的潜在因素，需加强管理和规范。外部干扰风险则包含第三方施工破坏、生态演变引发的库岸侵蚀，以及社会活动导致的工程保护范围被侵占等问题。外部干扰具有不确定性和难以预测性，对水利工程的安全运行构成潜在威胁。

1.2 风险识别方法论

风险识别需整合多学科技术手段，形成动态化、精准化的方法体系。多源数据融合分析通过集成传感器实时监测数据、工程档案历史记录及领域专家经验知识，构建多维数据矩阵，利用机器学习算法挖掘潜在关联规律。多源数据融合能够充分利用各种信息，提高风险识别的准确性和全面性。动态风险图谱构建技术以地理信息系统为平台，叠加工程结构信息、环境监测数据及风险演化模型，生成可视化风险分布图，实现空间-时间双维度风险追踪。可视化风险分布图使风险情况一目了然，便于及时采取应对措施。基于BIM的工程健康诊断方法通过建立三维数字化模型，集成结构应力、变形、渗流等监测参数，运用有限元分析模拟工程状态，量化评估结构安全性。BIM技术为工程健康诊断提供了直观、精确的模型，有助于深入了解工程结构状况。物联网感知与智能预警技术部署各类传感器网络，对水位、水质、设备振动等关键指标进行实时采集，通过边缘计算实现异常数据快速识别，结合云计算平台完成风险等级判定与预警信息推送。物联网技术实现了实时监测和智能预警，为风险防控提供了及时有效的支持。

1.3 关键风险因子提取

风险因子提取需兼顾工程特性与运行环境，构建层次化指标体系。结构安全性指标涵盖混凝土强度、钢筋保护层厚度等材料性能参数，以及结构位移、裂缝宽度等变形监测值。运行稳定性参数包括设备振动频率、温度场分布等状态量，以及流量、水位等过程控制变量。环境适应性要素涉及降雨强度、洪水频率等气象水文指标，以及库区泥沙淤积、水质变化等生态参数。管理有效性维度包含维护计划执行率、应急预案完备度等制度性指标，以及人员培训合格率、操作规范符合度等人为因素指标。各维度指标通过主成分分析、熵权法等方法进行权重赋值，形成综合风险评估基准。

2 水利工程风险评估模型构建

2.1 评估维度设计

水利工程风险评估需构建多维分析框架,以全面刻画风险特征^[2]。风险可能性分析通过故障树分析追溯事件根源逻辑链,利用事件树分析推演故障传播路径,量化不同场景下风险事件发生概率。风险可能性分析能够提前预估风险发生的概率,为风险防控提供前瞻性指导。后果严重性评估从功能、经济、生态三方面展开,功能损失维度聚焦工程防洪、灌溉、发电等核心功能失效程度;经济影响维度涵盖直接维修成本、间接社会经济损失及长期效益折损;生态破坏维度分析水质恶化、生物栖息地改变等环境影响范围与持续时间。后果严重性评估全面考虑了风险发生后对工程功能、经济和生态的影响,有助于制定合理的应对措施。风险耦合机制研究关注多因素交互作用,揭示地质条件与极端气象叠加引发的连锁反应,解析设备老化与操作失误共同导致的突发故障,探究管理缺陷与外部干扰协同放大的系统性风险。风险耦合机制研究能够深入了解风险的复杂性和关联性,为全面防控风险提供理论支持。

2.2 量化评估方法

量化评估需融合多学科技术手段,提升评估精度与适应性。层次分析法通过构建递阶结构模型,将复杂风险分解为多层次指标体系,利用两两比较确定权重,实现定性指标的量化转化。模糊综合评价引入隶属度函数处理不确定性信息,通过模糊运算综合多维度评价结果,适用于边界模糊的风险场景。蒙特卡洛模拟基于概率分布生成大量随机样本,模拟风险变量波动对系统的影响,计算失效概率与可靠度指标。可靠性分析采用故障模式影响及危害性分析方法,识别关键薄弱环节,评估系统整体可靠性水平。机器学习驱动的风险预测模型利用历史数据训练神经网络、支持向量机等算法,挖掘风险演化规律,实现未来风险趋势预测。脆弱性-恢复力综合评估框架从系统抗干扰能力与灾后修复能力双视角出发,构建包含结构冗余度、应急资源储备、恢复效率等指标的评估体系。

2.3 风险等级划分标准

风险等级划分需兼顾静态特征与动态演化特性。静态风险分级体系依据风险可能性与后果严重性二维矩阵,划分高、中、低风险区域,明确不同等级风险管控优先级。动态风险调整机制引入实时监测数据与风险预警信息,根据工程状态变化、环境条件波动等因素,动态修正风险等级,实现分级标准自适应更新^[3]。风险演化路径预测通过构建系统动力学模型或贝叶斯网络,模拟

风险因子相互作用过程,预判风险等级跃升临界点,为提前干预提供依据。

3 应急响应机制设计

3.1 应急管理体系架构

水利工程应急管理体系需构建分层分类的响应框架。三级响应机制依据风险等级划分,常规响应针对日常监测异常,通过标准化流程在24小时内处置一般性隐患;紧急响应对突发故障或局部灾害,30分钟内启动专项应急预案并调配区域内5类以上资源;危机响应对重大工程险情或跨流域灾害,15分钟内实施全流域联动管控并启动最高级别应急措施。应急指挥系统设计采用集中与分散相结合模式,设立1个常设指挥中心统筹决策,依托5个工程现场指挥部实现快速处置,通过200台以上移动指挥终端保持信息实时互通。跨部门协同机制打破行政壁垒,建立水利、气象、交通、能源等8个部门数据共享平台,明确应急状态下30项职责分工与20类资源调配规则,形成统一指挥、分工协作的应急网络。

3.2 应急预案制定原则

应急预案制定需遵循科学性与实用性并重原则。情景-任务-资源匹配模型通过风险情景构建,明确不同场景下应急任务清单,匹配对应资源保障方案,确保预案可操作性。情景-任务-资源匹配模型使应急预案更加贴合实际,提高了预案的实用性和可操作性。模块化预案库建设将预案分解为通用模块与专项模块,通用模块涵盖组织架构、响应流程等基础内容,专项模块针对特定风险类型设计技术措施,通过模块组合快速生成针对性预案。模块化预案库建设提高了预案的灵活性和适应性,能够快速应对不同类型的风险。预案动态优化方法建立“评估-修订-验证”闭环机制,定期开展预案演练效果评估,根据工程变化、技术更新及演练反馈调整预案内容,引入大数据分析技术挖掘历史应急数据规律,为预案优化提供量化依据。预案动态优化方法能够使预案不断完善,始终保持科学有效,提高应对风险的能力。

3.3 应急能力建设路径

应急能力建设需聚焦技术装备与保障体系升级。智能监测预警网络整合卫星遥感、无人机巡查、地面传感器等多源数据,构建“空天地”一体化监测体系,利用人工智能算法实现异常数据自动识别与风险等级判定。智能监测预警网络能够实现对水利工程的全方位、实时监测,提高风险预警的及时性和准确性。快速抢险技术装备研发配备模块化堵漏装置、自动化清淤设备、便携式发电照明系统等专用工具,提升现场处置效率。快速抢险技术装备能够快速有效地应对各种突发情况,减少

损失^[4]。应急物资储备体系实施“分级储备+动态调配”模式,根据工程分布与风险特征确定储备品类与数量,建立区域性应急物资调度平台,实现跨区域资源快速调配。应急物资储备体系能够确保在应急状态下有足够的物资供应,提高应急保障能力。虚拟仿真演练平台运用数字孪生技术构建工程三维模型,模拟洪水漫坝、设备故障等典型场景,支持多部门联合演练与处置方案验证,降低实战演练成本并提升协同能力。

4 全周期管理机制构建

4.1 风险防控闭环系统

水利工程全周期风险防控需构建动态闭环管理体系。PDCA循环管理模型通过计划、执行、检查、处理四阶段形成持续改进链条,计划阶段明确风险防控目标与措施,执行阶段落实监测预警与日常维护任务,检查阶段开展风险评估与绩效审计,处理阶段针对发现的问题制定改进方案并纳入下一周期计划。风险信息共享平台整合工程监测数据、隐患排查记录、应急处置报告等多源信息,建立统一数据标准与共享接口,实现跨部门、跨层级信息实时流转,为风险研判提供数据支撑。持续改进机制建立“问题识别-根源分析-对策制定-效果验证”的标准化流程,定期开展管理评审与技术复盘,将改进成果转化为制度规范或技术标准,推动风险管理水平螺旋式上升。

4.2 数字化管理平台架构

数字化平台是全周期管理的重要技术载体。风险数据库建设采用分布式存储架构,集成工程基础信息、风险识别结果、评估报告、应急预案等结构化与非结构化数据,运用数据治理技术确保数据完整性、准确性与时效性。决策支持系统开发融合大数据分析、机器学习等技术,构建风险预测模型与智能决策引擎,为调度方案优化、应急资源调配等提供量化依据,支持多方案比选与可视化展示。移动端应急管理系统开发轻量化应用,集成风险预警推送、现场信息上报、处置指令下达等功

能,实现应急状态下管理人员与现场人员的实时互动,提升应急响应效率。

4.3 组织保障体系

组织保障是全周期管理有效实施的基础^[5]。风险管理责任制明确各级管理主体职责边界,将风险防控指标纳入绩效考核体系,建立“一岗双责”制度,确保责任落实到岗到人。专业人才培养机制构建“理论培训+实践锻炼+技术交流”三位一体培养体系,定期组织风险管理专题培训,鼓励参与行业标准制定与技术攻关,培养既懂工程技术又精通风险管理的复合型人才。社会力量参与渠道拓展公众监督与协作路径,建立工程保护范围公示制度,开通隐患举报专线,组建志愿者队伍参与日常巡查与应急演练,形成政府主导、社会协同的共治格局。

结束语

水利工程运行期风险识别、评估与应急响应机制的构建,是保障工程安全、提升运行效益的关键举措。通过系统识别风险源、精准评估风险等级、科学设计应急响应流程,并构建全周期管理机制,能够实现对水利工程风险的全面防控与动态管理。这一机制的完善与实施,不仅有助于提升水利工程的安全性、可靠性,还能为水利行业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]陈丹丹,李海雷.水利工程安全风险管理与控制策略研究[J].治淮,2025(3):94-96.
- [2]杨晓燕.水利工程风险评估与应对策略[J].农村经济与科技,2025,36(9):102-104,119.
- [3]陈莉莉.水利工程风险评估与应对策略[J].建材发展导向,2023,21(20):39-41.
- [4]王文文.水利工程全周期施工管理中的风险评估模型构建[J].模型世界,2025(5):4-6.
- [5]杨寅,严行云,徐浩,等.水利工程建设中安全度汛的风险评估与应对策略研究[J].水上安全,2025(3):164-166.