

水利工程项目全生命周期风险评价与预警管理

任冰心

新疆农发集团人才科技有限公司 新疆 图木舒克 844000

摘 要: 水利工程项目具有投资规模大、建设周期长、影响因素多、不确定性显著等特征,其风险管理贯穿于项目规划、设计、施工、运行等各个阶段。本文基于全生命周期理论,系统梳理水利工程项目各阶段的风险类型与演化规律,构建涵盖自然风险、技术风险、经济风险、社会风险和管理风险的多维风险评价指标体系,探讨定性定量相结合的风险评价方法,提出面向全生命周期的风险预警管理机制。研究认为,水利工程风险管理的核心在于实现从阶段式防控向全周期、全要素、全过程协同管控的转变,应当构建“识别—评价—预警—应对—反馈”的闭环管理框架,以提升工程整体韧性和安全水平。

关键词: 水利工程;全生命周期;风险评价;预警管理;风险管理

引言

水利工程作为国家关键基础设施,在防洪、水资源调配及能源供给等方面作用显著。随着“十四五”水安全保障规划的推进,工程规模与技术复杂度不断提升,而气候变化、地质复杂性及投融资多元化等因素使风险环境日益严峻,风险管理成为决定工程成败的关键。然而,当前研究与实践多聚焦于施工阶段或单一风险类型,缺乏全生命周期视角的系统审视。事实上,水利工程风险具有动态演化特征:前期决策风险可能潜伏并累积至后期爆发,施工问题往往源于设计缺陷,运行风险则常由建设隐患遗留所致。因此,必须将风险评价与预警管理纳入全生命周期分析框架,深入把握风险本质规律,实现从源头到末端的有效防控,确保工程安全与效益。

1 全生命周期视角下水利工程风险的系统分析

1.1 水利工程全生命周期的阶段划分与风险特征

水利工程建设项目的全生命周期通常可划分为四个相互衔接又各具特征的阶段:规划决策阶段、勘察设计阶段、建设施工阶段和运行维护阶段。每个阶段面临的风险类型、风险强度和风险可控程度存在显著差异。规划决策阶段的风险具有源头性和方向决定性,一旦决策失误,后续阶段难以弥补;勘察设计阶段的风险具有隐蔽性和传递性,勘察不到位或设计缺陷往往在施工或运行阶段才暴露;建设施工阶段的风险具有高发性和显性化特征,是传统风险管理的重点区域;运行维护阶段的风险具有累积性和演化性,长期低荷载运行可能导致风险的缓慢积聚而被人忽视。从全生命周期看,水利工程

风险存在“前期孕育、中期爆发、后期延续”的时序规律,各阶段风险之间存在着链式传导和耦合放大的内在机制。

1.2 水利工程主要风险类型及其演化规律

水利工程项目风险可归纳为五类基本类型,且相互耦合、共同作用。一是自然风险,包括超标洪水、地震等,具有突发性强、破坏性大及不可控程度高的特点,受气候变化影响尾部特征更突出。二是技术风险,贯穿勘察、设计、施工及材料设备全过程,前期方案缺陷易在后期逐级放大,累积效应显著。三是经济风险,表现为投资失控、资金链断裂、价格波动及收益不及预期等,因工程准公益属性常与社会风险交织^[1]。四是社会风险,涉及移民安置、征地补偿及生态环境影响等,具有涉及面广、敏感度高、化解难度大等特征。五是管理风险,源于组织协调不力、决策机制不健全等,是其他风险转化为现实损失的重要催化剂。这五类风险并非孤立存在,而是通过复杂机制相互作用:自然风险可引发技术与经济风险,社会风险加剧管理风险,而管理风险则催化各类风险的实质化损失。

2 水利工程项目全生命周期风险评价体系

2.1 风险评价的总体框架与设计原则

构建科学合理的风险评价体系,需要遵循系统性、动态性、可操作性和目的性四项基本原则。系统性要求评价体系能够全面覆盖各阶段、各类型风险,避免重要风险因素的遗漏;动态性要求评价体系能够反映风险随项目进展的演化特征,具备阶段适配能力;可操作性要求指标可量化、数据可获取、方法可实施;目的性则强

调评价服务于风险预警和决策支持,而非单纯的学术分析。基于上述原则,本文提出“三维一体”的评价框架:以项目阶段为时间轴,以风险类型为维度面,以评价方法为工具层,三者有机整合形成完整的评价体系。

2.2 风险评价指标体系的构建

风险评价指标体系是全生命周期风险评价的操作基础。本文采用“目标层—准则层—指标层”的层级结构构建指标体系。目标层为水利工程项目综合风险水平;准则层按风险类型设置自然风险、技术风险、经济风险、社会风险、管理风险五个维度;指标层则针对每个准则层进行具体展开。在自然风险维度,设置水文不确定性指标(设计洪水标准适配度、暴雨频率变化率)、地质条件指标(断层活动性、地基承载力变异性)和气象灾害指标(极端气候事件概率)等。在技术风险维度,设置勘察精度指标(地质勘探误差率、水文参数不确定性区间)、设计合理性指标(设计方案成熟度、安全裕度配置)、施工技术指标(施工方案可靠性、关键工艺成熟度)和材料设备指标(材料质量合格率、设备运行稳定性)。在经济风险维度,设置投资控制指标(概算执行偏差率、预备费动用比例)、融资风险指标(资金到位及时率、融资成本波动)和市场风险指标(建材价格敏感度、运营收益达成率)。在社会风险维度,设置移民安置指标(移民满意度、安置进度偏差)、环境影响指标(生态敏感区影响程度、水质风险等级)和公众接受度指标(舆情态势、群体性事件风险)。在管理风险维度,设置组织管理指标(管理架构合理性、人员配置到位率)、信息管理指标(信息传递效率、文档完整性)和合同管理指标(合同变更频率、索赔发生率)等。各指标权重的确定可采用层次分析法与熵权法相结合的主客观综合赋权方法,以兼顾专家经验判断和数据客观规律。

2.3 风险评价方法的选择与应用

风险评价方法的选择应根据评价目的、数据条件和阶段特征灵活确定。在规划决策和勘察设计阶段,由于不确定性因素多、定量数据有限,宜采用以专家评判为主的定性或半定量方法,如风险矩阵法、专家调查法、层次分析法等,重点识别重大源头性风险。在建设施工阶段,随着数据积累和观测信息增加,可采用更为量化的评价方法,如模糊综合评价法、故障树分析法、贝叶斯网络方法等,实现对施工安全、进度、质量等风险的精准评估^[2]。在运行维护阶段,可结合监测数据采用动态评价方法,如基于时间序列的风险趋势分析、基于贝叶斯更新的风险动态评估等。值得注意的是,水利工程

风险的复杂性决定了单一评价方法往往难以全面反映风险状况,多方法融合的综合评价模式逐渐成为趋势——例如,将层次分析法与模糊综合评价相结合,既能处理定性判断又能处理定量数据;将故障树与贝叶斯网络相结合,既能分析风险逻辑结构又能实现概率更新。

3 面向全生命周期的风险预警管理机制

3.1 风险预警管理的理论基础与运行机理

风险预警管理是指通过对风险信息的持续监测和动态评估,在风险演化为事故或损失之前发出警报并采取干预措施的管理活动。其理论基础包括危机管理理论、系统控制理论和前馈控制理论。与传统的“事后应对”模式不同,预警管理的核心在于“防患于未然”,强调对风险演化过程的主动干预。风险预警管理的运行机理可概括为“监测—识别—评价—预警—响应—反馈”六个环节的循环往复:监测环节负责风险信息的持续采集,识别环节从信息中提取风险信号,评价环节判断风险等级和发展趋势,预警环节在风险达到阈值时发出警报,响应环节实施预控措施,反馈环节将处置效果信息重新输入监测系统,形成闭环管理。

3.2 全生命周期风险预警指标体系与阈值设定

风险预警需要依托具体的预警指标和判断阈值。本文根据水利工程各阶段的风险特征,设计差异化的阶段预警指标体系。在规划决策阶段,预警重点指向源头性风险,关键预警指标包括设计洪水标准偏低风险度、工程选址地质适宜性评分、投资匡算可靠指数、生态环境敏感等级等。在勘察设计阶段,预警重点指向隐蔽性风险,关键预警指标包括地质勘察密度达标率、关键参数取值安全裕度、结构设计方案冗余度、施工可行性评价得分等^[3]。在建设施工阶段,预警重点指向显性化施工风险,关键预警指标包括围堰度汛安全风险指数、地下工程突水突泥风险等级、高边坡稳定安全系数、混凝土温控防裂风险度、施工进度偏差率、质量验收一次合格率等。在运行维护阶段,预警重点指向累积性风险,关键预警指标包括大坝变形速率变化趋势、渗流量异常波动指数、闸门启闭设备可靠性退化率、金属结构腐蚀深度、水库调度方案适应性等。预警阈值的设定应综合运用统计分析法、专家经验法和工程类比法,并根据项目实际动态调整。预警等级可划分为蓝、黄、橙、红四个级别,分别对应一般风险、较大风险、重大风险和特别重大风险,不同级别对应不同的报告路径、响应时限和处置资源调配权限。

3.3 风险预警响应机制与动态调控策略

预警的价值在于响应。健全的风险预警响应机制应当包括组织保障、预案体系和调控策略三个层面。在组织保障方面,应建立由项目法人统一领导、各参建单位协同联动的预警管理组织架构,明确各级预警的决策主体、执行主体和监督主体。在预案体系方面,应针对不同类型和级别的预警信号编制分级分类的应急预案,预案内容应具体明确,具备可操作性,并定期组织演练和修订。在调控策略方面,应采取“分级响应、动态调整”的原则——对于蓝色预警,采取常规加强措施;对于黄色预警,启动专项处置方案;对于橙色预警,成立应急指挥部统筹应对;对于红色预警,启动全面应急机制并逐级上报。特别需要强调的是,预警响应并非一次性行为,而应根据风险演化态势进行动态调控——若预警发出后风险持续恶化,应及时升级响应级别;若风险得到有效控制,经评估后可逐步降级或解除预警。

3.4 基于反馈的全生命周期风险闭环管理

全生命周期风险管理的最终价值取向在于实现从“被动应对”向“主动防控”的转变,而这一转变的关键在于建立有效的反馈学习机制。本文提出构建“双循环”反馈系统:内循环是指同一项目不同阶段之间的风险信息传递和经验反馈——施工阶段发现的勘察设计缺陷应及时反馈修正,运行阶段暴露的问题应追溯至建设阶段的责任环节,形成项目内部的“前车之鉴”;外循环是指不同水利项目之间的风险案例共享和经验互鉴——通过建立水利工程风险案例数据库和预警经验知识库,实现行业层面风险管理能力的持续提升^[4]。基于反馈的风险闭环管理,本质上是一种学习型风险管理模式,它使风险管理从一次性活动转变为持续改进的螺旋式上升过程。

4 推进全生命周期风险评价与预警管理的路径建议

基于上述理论分析,推进水利工程全生命周期风险评价与预警管理走深走实,需要从理念、制度、技术和人才四个维度协同发力。在理念层面,需要确立“风险管理就是价值创造”的核心理念,破除“风险管理是额外成本”的陈旧认知,将风险评价与预警管理纳入工程建设的必要程序和考核范畴,从源头保障资源投入。在制度层面,需要完善水利工程风险管理的法规标准体

系,制定全生命周期风险评价的技术导则和操作规程,明确各阶段风险管理的责任主体和工作要求,将风险管理履职情况纳入项目稽察和审计范围,强化制度刚性约束。在技术层面,需要加强风险评价模型方法研究和预警技术工具开发,推动物联网监测、大数据分析、人工智能等新技术与风险管理深度融合,建设智慧水利风险预警平台,提升风险监测的实时性、评价的准确性和预警的时效性。在人才层面,需要加强水利工程风险管理专业人才培养,在水利高等教育和职业培训体系中强化风险管理课程设置,培育兼具工程技术素养和风险管理能力的复合型人才,为全生命周期风险管理提供智力支撑。

5 结语

水利工程项目风险管理是一项复杂的系统工程,其本质是对工程建设运营全过程中各类不确定性因素的识别、评价、控制和应对。本文从全生命周期视角出发,系统分析了水利工程各阶段的风险特征与演化规律,构建了涵盖五类风险的综合评价指标体系,提出了面向全过程的预警管理机制框架。研究认为,实现从阶段性碎片化管理向全周期集成化管理的转变,是提升水利工程风险管理效能的关键路径。未来,随着新一轮科技革命和产业变革的深入推进,数字化、网络化、智能化技术将为水利工程全生命周期风险管理提供更加强大的技术支撑,风险管理的精准性、实时性和前瞻性有望实现质的跃升。

参考文献

- [1] 王浩,张建云,胡春宏,等.变化环境下水利工程安全保障技术研究进展与展望[J].水利学报,2022,53(10):1149-1162.
- [2] 陈祖煜,汪小刚,王玉杰,等.水利工程风险评估方法研究综述[J].岩土工程学报,2021,43(8):1377-1390.
- [3] 刘宁,张利民,李青云.基于全生命周期的重大建设工程风险管理体系构建[J].管理工程学报,2023,37(3):85-96.
- [4] 吴中如,顾冲时,苏怀智.大坝安全监测与预警技术研究进展[J].水利水电科技进展,2022,42(1):1-9.