

水利工程建设项目全生命周期风险识别与防控策略研究

王兴东

新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州水利管理总站，新疆昌吉，831100；

摘要：水利工程风险贯穿项目全过程，具有系统性与长周期特征。本文基于全生命周期视角，分析各阶段主要风险来源，构建融合专家评估、故障树分析与风险矩阵的识别评估体系。提出以组织责任、技术防控与信息协同为基础的综合管理框架，强调BIM、物联网和人工智能在风险预警与决策支持中的应用。研究表明，唯有实现跨阶段协同与数字化赋能，才能提升风险防控的精准性与主动性，保障工程安全与效益。

关键词：水利工程；全生命周期；风险识别；风险防控；数字技术

DOI：10.69979/3060-8767.25.11.036

引言

水利工程功能重要，但建设环境复杂，风险因素多，影响周期长。传统管理常聚焦施工阶段，忽视前期决策与后期运行风险，易导致隐患累积。随着气候变化和工程规模扩大，局部问题可能引发连锁后果。单一、割裂的风险应对方式已难适应现实需求。亟需从全过程视角构建系统性防控体系。本文围绕风险特征、评估方法与技术路径展开研究，探索科学有效的风险管理模式，为提升项目本质安全提供参考。

1 水利工程全生命周期阶段划分与风险特征分析

1.1 前期与实施阶段的主要风险来源

水利工程在前期规划与立项阶段面临诸多不确定性。项目选址是否合理、流域水文资料是否完整、环境影响评估是否充分，直接关系到后续建设的可行性。若前期论证不深入，容易出现规划偏差，例如防洪标准设定偏低或灌溉范围测算不准，后期调整成本高昂。地质勘测工作若流于形式，对断层、溶洞或软弱夹层等隐患掌握不清，可能在施工中突然暴露，导致设计方案被迫变更，工期延误。进入实施阶段后，施工环境往往复杂多变，山区项目易受暴雨、山洪、滑坡等地质灾害影响，围堰溃决、基坑进水等事故时有发生。高边坡开挖、地下洞室支护等关键工序若技术方案不成熟或现场管理不到位，可能引发坍塌、透水等安全事故。同时，参建单位众多，合同界面复杂，若合同条款模糊、责任划分不清，容易在工期延误、变更索赔等问题上产生纠纷。材料价格波动剧烈，砂石、水泥等主材短期内大幅涨价，

若未设置调价机制，将直接影响项目成本控制。这些风险集中在项目建设初期到中期，一旦失控，不仅造成经济损失，还可能危及工程安全。

1.2 运营与退出阶段的长期风险特征

工程投入运行后，风险并未结束，而是转入长期积累与缓慢释放的过程。大坝、闸门、压力管道等结构长期承受水压、冲刷、冻融和化学腐蚀，材料性能逐渐退化，微小裂缝可能发展为结构性隐患，若缺乏系统性健康监测和定期维护，可能影响整体安全。调度运行依赖准确的气象预报和规范的操作流程，若对来水判断失误或应急响应不及时，可能造成下游洪灾或水库空库，影响防洪与供水功能。极端天气事件频发，如特大暴雨或持续干旱，对工程调度能力提出更高挑战。随着服役年限增长，部分设备技术落后，需进行更新改造，涉及停运、拆建和系统对接，带来新的施工与运行风险。当工程功能丧失或达到设计寿命时，面临拆除或功能转型问题，如何安全处置混凝土构筑物、恢复河道生态、避免二次污染，成为退出阶段的新课题。这些风险隐蔽性强、发展缓慢，但累积效应显著，需建立长效管理机制。

1.3 风险的系统性与连锁效应

水利工程的风险具有高度的关联性和传导性，往往不是孤立事件。前期勘测数据不准确可能导致设计缺陷，设计问题又引发施工困难，施工质量隐患则直接影响后期运行安全，形成跨阶段的风险链条。一次调度失误不仅可能造成下游受灾，还可能加速坝体疲劳，缩短工程使用寿命。某个泄洪闸门故障若未及时修复，可能迫使水库降低蓄水位，影响发电和供水效益。自然灾害如强降雨，既威胁在建工程安全，也可能超出设计防洪能力，

暴露运行管理短板。这种系统性特征表明，风险管理不能只看单点问题，必须从全生命周期出发，打通各阶段信息壁垒，建立统一的风险台账和预警机制。只有将规划、建设、运行纳入整体框架，才能实现早识别、早干预，避免小问题演变成重大事故。

2 全生命周期风险识别与评估方法体系构建

2.1 风险识别常用方法

水利工程风险来源广泛，需采用系统方法进行全面梳理。专家调查法通过组织设计、施工、运行等领域的专业人员开展研讨或函询，能够快速汇集实践经验，尤其适用于新型或复杂工程的初期风险排查。检查表法依据历史项目总结的常见风险清单，按阶段逐项核对，操作简单，适合基层单位日常使用。对于技术性强的问题，故障树分析从事故结果反向追溯，逐层分解成因，如大坝渗漏可拆解为地质、结构、施工等多个因素，有助于找准根源。流程图分析则围绕建设流程，在关键节点识别潜在风险，例如基坑开挖环节可能面临支护失效、降水不足等问题。这些方法各有特点，专家法依赖经验，检查表注重覆盖，故障树强调逻辑，流程图关注过程。实际中常组合使用，先用检查表初步筛查，再结合专家意见补充遗漏，对高风险项辅以深入分析，提升识别的全面性与准确性。

2.2 风险评估指标设计

识别风险后，需科学判断其严重程度，合理分配防控资源。评估应综合多个维度，不能仅看发生概率。概率反映风险出现的可能性，可通过历史数据或专家评分确定。影响程度衡量后果严重性，涉及工期延误、经济损失、安全威胁等方面，后果越重，优先级越高。可控性体现应对能力，包括技术手段是否有效、应急预案是否可行，某些低频但难控的风险也需重点关注。连锁效应则关注风险扩散能力，如施工震动引发边坡失稳，可能造成次生灾害，这类问题需提前防范。将这四个维度纳入评估框架，采用评分方式量化打分，再按权重计算综合风险值，有助于减少主观判断偏差，为后续管理提供依据。

2.3 评估模型选择

根据项目规模与数据条件，可选用不同评估模型。风险矩阵法将概率与影响交叉划分，直观呈现风险等级，便于管理层快速决策，适用于一般项目。层次分析法（A

HP）通过两两比较确定指标权重，支持多因素综合评价，结果更具说服力，适合复杂工程。动态贝叶斯网络能刻画因素间因果关系，并随新数据更新风险概率，实现动态预警，适用于高风险或科研型项目。实际应用中，中小型工程可主推风险矩阵，确保高效实用；重点工程可结合 AHP 深化分析；具备条件的项目可探索贝叶斯模型，逐步向智能化评估过渡。

3 水利工程风险防控体系的系统化构建

3.1 组织与制度保障

风险防控需要强有力的组织支撑和制度约束。项目初期应成立由业主牵头，设计、施工、监理及运维单位参与的风险管理小组，统一协调各阶段风险工作，避免责任分散。明确岗位职责，落实全过程责任制，确保每个环节有人负责、问题可追溯。针对重大节点如基础开挖、水库蓄水等，组织专项风险评审，严控安全条件。同时，制定切实可行的应急预案，涵盖溃坝、滑坡、超标洪水等典型风险，明确预警流程、响应措施和人员分工，定期开展演练，提升应急处置能力。通过制定项目风险管理规程，将风险识别、评估与应对纳入制度化轨道，推动防控工作从被动应对向主动管理转变。

3.2 技术与合同防控

技术手段是防控风险的关键。前期必须保证勘察设计质量，采用钻探、物探等手段查清地质条件，设计中充分考虑极端工况和结构耐久性，避免先天缺陷。施工阶段推广智慧工地，利用传感器实时监测边坡位移、混凝土温控、基坑稳定性等关键参数，实现动态预警。对高风险作业加强技术交底和现场监督，确保施工规范。合同管理应明确风险分担机制，在合同中约定材料价格调整、工期变更、不可抗力处理等条款，减少争议。对地质复杂或新技术应用项目，可设立风险准备金，用于应对突发情况。通过技术把关与合同约束相结合，提升整体抗风险能力。

3.3 信息协同机制

信息割裂易导致风险积累。应构建 BIM 与 GIS 融合的数字化平台，整合设计、施工与运维数据，实现信息贯通。BIM 模型支持三维可视化和施工模拟，提前发现潜在问题；GIS 系统集成地形、水文、地质等空间信息，辅助决策与预警。平台可实现设计变更自动同步、现场问题实时反馈、监测数据动态更新，提升协同效率。移

动端接入方便现场人员操作，历史数据积累也为后续项目提供参考。通过统一平台管理，打破“信息孤岛”，推动风险管理向精细化、智能化发展。

4 数字化转型背景下的风险防控创新路径

4.1 BIM与数字孪生技术在风险预演与模拟推演中的应用

随着信息技术的发展，BIM和数字孪生正逐步改变水利工程建设的风险管理方式。传统的设计图纸难以全面反映复杂结构的空间关系，而BIM技术通过构建三维可视化模型，能够直观展示大坝、隧洞、泵站等关键部位的布局与构造，支持施工方案的虚拟建造和碰撞检查，提前发现设计冲突或施工难点。在此基础上，数字孪生技术进一步将物理工程与虚拟模型动态关联，集成实时监测数据、气象信息和运行状态，实现对工程全生命周期的动态映射。例如，在水库蓄水前可通过数字孪生平台模拟不同水位下的坝体应力变化，评估潜在的渗漏或变形风险；在汛期来临前进行洪水演进模拟，优化调度方案。这种“先试后建”的模式大幅降低了因决策失误带来的安全隐患，使风险管理从被动应对转向主动预控，尤其适用于地质复杂、技术难度高的大型项目。

4.2 物联网与实时监测系统对大坝安全与施工风险的动态预警

施工现场和运行阶段的许多风险具有突发性和隐蔽性，依赖人工巡查往往难以及时发现。物联网技术的应用为实时监控提供了有效手段。通过在关键部位布设传感器，可连续采集大坝位移、渗压、温度、应力等数据，并通过无线网络实时传输至管理平台。一旦数值超出设定阈值，系统自动发出预警，提醒管理人员采取措施。在施工阶段，智慧工地系统可对高边坡稳定性、基坑支护受力、混凝土浇筑温控等高风险环节进行全天候监测，防止塌方、裂缝等问题发生。设备运行状态也可通过振动、电流等参数实时判断，预防机械故障。这些数据不仅提升了响应速度，也为后期分析提供了可靠依据。相比传统定期检测，物联网实现了从“静态抽查”向“动态连续感知”的转变，显著增强了对潜在风险的捕捉能力。

4.3 大数据与人工智能在趋势预测、决策支持与智

能诊断中的潜力

面对海量的监测、施工和运维数据，单纯依靠人工分析已难满足高效决策需求。大数据技术能够整合多源信息，挖掘历史数据中的规律，识别风险发生的前置信号。例如，通过分析多年水文资料和坝体变形趋势，可预测未来几年的结构变化走向。人工智能则在此基础上进一步提升智能化水平，利用机器学习算法建立预测模型，对设备故障、渗流异常等情况进行早期识别。某些系统已能根据实时数据自动判断大坝健康状态，生成诊断报告，辅助技术人员做出判断。在应急响应中，AI还可结合气象预报和流域地形，快速生成洪水影响范围和人员疏散建议，提升决策效率。虽然目前这类应用仍处于探索阶段，但其在减少人为误判、提高响应精度方面的潜力不容忽视。未来随着算法优化和数据积累，大数据与AI有望成为水利工程风险防控的重要支撑工具。

5 结论

水利工程风险管理不能局限于某一阶段，必须贯穿项目始终。风险具有跨阶段传导和多因素耦合特点，需建立系统化识别与评估机制。通过组织保障、技术手段与合同管理协同推进，夯实防控基础。BIM、物联网和人工智能等技术为风险预判与动态响应提供了新可能。未来应推动制度与技术深度融合，实现从被动处置向主动防控转变，全面提升工程的安全性、稳定性和可持续性。

参考文献

- [1] 姜庆会. 全生命周期视角下水利工程 PPP 项目财务风险识别与防范策略 [J]. 绿色财会, 2024, (09): 34-36.
- [2] 葛巍. 土石坝全生命周期风险评估与防控关键技术及应用. 河南省, 郑州大学, 2024-04-19.
- [3] 张元泽. 梯级水库群全生命周期风险识别与防控方法 [D]. 四川大学, 2021.
- [4] 刘锦程. 荒沟抽水蓄能电站工程建设全生命周期风险管理研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2021.

作者简介：王兴东，男，汉族，新疆昌吉人，本科，高级职称，研究方向：水利建设管理。