

水利工程抽水蓄能施工中的安全风险管控

王聪穆

四川二滩国际工程咨询有限责任公司 四川 成都 610000

摘要: 水利工程抽水蓄能施工因地质条件复杂、技术要求高、交叉作业多,安全风险管控面临严峻挑战。本文系统梳理了施工安全风险管控的核心框架,涵盖风险识别、评估、应对及监控全流程。在风险识别阶段,提出结合定性、定量及混合方法构建多维度识别体系;风险评估环节重点构建动态评估模型,融合机器学习技术提升预测精度,旨在为抽水蓄能工程安全风险的系统化防控提供理论支撑与实践参考,对保障工程安全、提升建设效率具有重要价值。

关键词: 水利工程;抽水蓄能施工;安全;风险管理

引言

随着全球能源结构转型加速,抽水蓄能电站作为调节电网负荷、促进可再生能源消纳的关键基础设施,其建设规模持续扩大。然而,抽水蓄能施工涉及地下洞室开挖、高边坡处理、大坝填筑等高风险作业,加之地质条件复杂、施工环境恶劣,安全风险呈现多源性、动态性与耦合性特征。传统风险管理多依赖经验判断,存在识别滞后、评估主观、应对被动等问题,难以满足现代工程安全需求。因此,构建科学化、系统化的安全风险管理体系成为行业亟待解决的课题。

1 抽水蓄能工程施工特点与安全风险概述

1.1 抽水蓄能工程核心施工环节

(1) 上水库与下水库建设是工程的基础性工程,水库施工需先完成地形测绘与地质勘探,确定开挖边界与填筑范围。开挖阶段需处理不同地质条件下的岩土体,软岩区域需控制爆破振动以避免结构破坏,硬岩区域则需优化钻爆参数提升效率。填筑作业需分层压实,确保坝体密实度满足防渗要求,同时需兼顾边坡稳定性,通过分级放坡与支护措施降低滑坡风险^[1]。防渗工程是水库建设的核心,通常采用混凝土面板、沥青混凝土或土工膜等材料构建防渗层,施工时需严格控制接缝处理与基层平整度,防止渗漏通道形成。(2) 地下洞室群施工是工程的技术难点,交通洞作为人员与设备运输通道,需优先贯通以保障后续作业效率,其开挖需遵循短进尺、强支护原则,通过超前地质预报规避不良地质段。主厂房作为机电设备安装核心空间,需分层开挖并同步实施初期支护,待地质条件稳定后进行二次衬砌,确保结构长期稳定性。(3) 压力管道与机电设备安装是功能实现的关键,压力管道多采用钢制或混凝土内衬结构,安装前需完成管道轴线定位与支墩浇筑,安装过程中需控制焊接质量与防腐处理,避免运行阶段因应力集中或腐蚀导致

破裂。机电设备安装涵盖水轮机、发电机、变压器等核心装备,需严格遵循设备厂商技术规范与行业标准,通过精密调平与电气试验确保机组运行稳定性。(4) 输水系统爆破与支护作业贯穿工程全周期,爆破作业需根据岩性调整装药结构与起爆顺序,通过微差爆破技术降低振动对周边结构的影响。支护体系需结合地质条件选择锚杆、喷混凝土或钢支撑等单一或复合形式,施工时需确保支护与开挖面的时空匹配,避免因支护滞后引发坍塌事故。

1.2 施工安全风险分类

(1) 自然风险源于工程所在地的地质与气象条件,地质灾害是首要挑战,复杂地形可能引发滑坡,尤其在开挖边坡或填筑坝体时,岩土体稳定性受降雨、地震等因素影响显著。岩爆则多见于深埋地下洞室,硬脆性岩体在开挖卸荷后可能突然释放能量,对作业人员与设备构成直接威胁。极端天气的影响同样不可忽视,持续性暴雨可能引发洪水,冲毁临时设施或淹没作业面,而高温、严寒等极端温度条件会降低作业效率,甚至导致设备故障或人员中暑、冻伤。(2) 技术风险与施工工艺及地质条件适应性密切相关,高边坡失稳是水库施工的典型风险,若支护措施不到位或排水系统失效,边坡可能沿软弱结构面滑动,威胁下方作业区安全。地下洞室塌方多因围岩变形超出预期,初期支护强度不足或开挖顺序不合理会加剧风险。爆破振动损伤则涉及输水系统开挖,若药量控制不当或起爆顺序错误,振动波可能破坏邻近洞室或边坡,导致结构开裂或坍塌。(3) 设备风险集中于大型机械与高压系统运行,大型机械如盾构机、起重机等在复杂工况下可能发生故障,液压系统泄漏、电气元件老化或操作机构失灵均可能引发事故。高压设备如变压器、电缆的误操作或绝缘失效,会导致电弧灼伤、设备损毁甚至火灾,尤其在带电作业或设备检修时

风险更高。(4) 管理风险贯穿于施工全流程, 人员违规操作是常见诱因, 包括未佩戴安全防护装备、擅自进入危险区域或违反操作规程等行为。安全制度缺失表现为责任划分不清、培训流于形式或检查机制失效, 导致风险无法被及时发现与控制。应急响应滞后则体现在预案不完善、救援物资储备不足或演练频率过低, 事故发生时可能延误最佳处置时机。

2 安全风险识别与评估方法

2.1 风险识别技术

(1) 定性方法以专家经验与逻辑分析为基础, 专家调查法通过组织行业资深人员对施工流程、地质条件及设备状态进行系统性评估, 依托专业判断识别潜在风险源, 尤其适用于缺乏历史数据的新兴工程环节。安全检查表以标准化清单形式梳理各作业场景的安全要求, 通过逐项核对设备运行状态、操作规范及防护措施落实情况, 快速定位管理漏洞与技术缺陷。(2) 定量方法通过数学模型与算法量化风险概率及后果, 蒙特卡洛模拟基于随机采样技术模拟施工参数波动, 生成风险分布曲线以评估极端工况下的安全阈值^[2]。层次分析法将复杂风险分解为多层次指标体系, 通过两两对比确定各因素权重, 最终计算综合风险指数以实现优先级排序。模糊综合评价针对风险的不确定性特征, 引入隶属度函数处理模糊信息, 通过多级评判模型整合技术、环境与管理等多维度因素, 输出更具客观性的风险等级。(3) 混合方法通过技术融合突破单一方法局限, 结合BIM技术的三维风险可视化识别是典型代表, 该方法将工程几何模型与风险数据库关联, 通过动态模拟施工过程实时展示风险分布, 既可直观呈现高边坡位移、地下洞室收敛等物理风险的空间演化, 又能集成设备状态、人员位置等动态数据, 实现风险与作业场景的精准匹配。

2.2 风险评估模型构建

风险评估模型构建是抽水蓄能工程施工安全管理的关键环节, 其核心在于通过科学方法量化风险等级并为决策提供依据。一方面, 风险矩阵法作为传统评估工具, 以概率与后果的二维矩阵为基础, 通过定义风险事件发生的可能性及其影响程度, 将风险划分为低、中、高不同等级。该方法操作简便, 能够快速识别主要风险源, 但其静态性导致难以反映施工过程中的动态变化, 且对概率与后果的划分依赖主观判断, 可能影响评估精度。为弥补这一缺陷, 动态风险评估模型引入施工进度参数, 通过建立风险与工期的关联机制, 实时更新风险状态。该模型通常将施工流程分解为多个阶段, 分析各阶段风险因素的演化规律, 例如地下洞室开挖中, 随着埋深增加, 岩

爆风险可能逐渐升高, 而支护措施的及时实施又会降低塌方概率。通过动态调整风险权重, 模型能够更准确地反映实际工况, 为进度控制与安全管理的协同提供支持。另一方面, 随着人工智能技术的发展, 基于机器学习的风险预测方法成为研究热点。神经网络通过模拟人脑神经元连接机制, 能够处理非线性风险特征, 其多层结构可自动提取输入数据中的复杂模式。在抽水蓄能工程中, 神经网络可整合地质条件、设备状态、作业强度等多源数据, 训练后实现风险等级的智能分类。支持向量机则通过构建最优超平面实现风险分类, 其优势在于小样本条件下的高泛化能力, 尤其适用于历史数据不足的工程场景。

2.3 关键风险指标(KRI)设定

(1) 高风险作业阈值的确定需结合工程特性与行业规范, 针对爆破作业需设定振动速度安全限值, 该指标需综合考虑周边岩体性质、支护结构强度及邻近建筑物距离, 确保振动能量在岩体中传播时不会引发结构损伤或失稳。边坡位移量阈值则需根据地质勘察结果划定, 软岩边坡需设定更严格的位移控制标准, 硬岩边坡可适当放宽, 但需同步监测位移速率变化, 避免因累积变形导致整体滑移。地下洞室收敛变形、混凝土应力应变等指标同样需纳入阈值体系, 其设定需兼顾结构安全裕度与施工经济性, 防止因过度保守导致成本增加或工期延误。(2) 实时监测数据与预警机制的联动是KRI发挥效能的关键, 监测系统需覆盖高风险作业全场景, 通过传感器网络实时采集振动、位移、应力等参数, 并依托无线传输技术将数据同步至管理平台^[3]。平台内置的预警模型需根据阈值设定自动分析数据, 当监测值接近或超过安全限值时, 立即触发分级预警机制: 初级预警以短信或平台通知形式提醒现场管理人员, 中级预警需暂停相关作业并启动专项检查, 高级预警则直接联动应急预案, 组织人员撤离并启动抢险措施。联动机制需强化数据时效性与处理效率, 通过边缘计算技术实现部分数据本地预处理, 减少传输延迟。(3) KRI设定需保持动态调整能力, 随着施工进度推进与地质条件变化, 定期复核阈值合理性。例如, 地下洞室开挖初期可设定较低收敛阈值, 待初期支护完成后逐步放宽; 雨季来临前需调低边坡位移预警值, 并增加巡查频次。通过将KRI与施工进度、环境因素关联, 构建适应性更强的风险管控体系, 最终实现抽水蓄能工程安全风险的可控、在控。

3 安全风险管控策略与措施

3.1 风险规避与减轻

(1) 设计优化是风险规避的基础手段, 针对地质条

件复杂区域,可通过调整边坡角度减少岩土体下滑力,例如在软岩地段采用分级放坡结合平台设计,既能降低单级坡高带来的失稳风险,又能为支护施工提供操作空间。地下洞室布局优化则需结合岩体完整性分析,将主厂房、交通洞等关键结构布置在地质条件较好的区域,避开断层破碎带或高地应力区,同时通过合理确定洞室间距减少爆破振动叠加效应。(2) 技术改进聚焦于施工工艺创新,非爆破开挖技术如机械破碎、静态破碎剂等可替代传统爆破,避免振动对周边岩体的扰动,尤其适用于邻近建筑物或敏感地质段的开挖^[4]。智能监控系统通过集成传感器、物联网与数据分析技术,实现边坡位移、洞室收敛、设备状态等参数的实时监测,当数据异常时自动触发预警并联动应急措施,将风险响应时间从被动处置缩短至主动预防。(3) 材料升级是提升工程抗风险能力的关键,高强度支护材料如高预应力锚索、钢纤维混凝土可增强岩体自稳能力,减少支护结构失效风险。环保型防渗材料如土工膜与膨润土防水毯的复合应用,既能满足水库防渗要求,又能降低传统材料对环境的长期影响,并且其耐久性提升可减少后期维护频次,间接降低运维阶段风险。

3.2 风险转移与分担

风险转移与分担是抽水蓄能工程施工安全管理中降低主体风险敞口的重要策略,其核心在于通过市场化机制与合同约定,将部分风险转移至具备更强承受能力的第三方,同时明确各方责任边界以避免推诿扯皮。其中,保险机制是风险转移的主要工具,工程一切险可覆盖施工期间因自然灾害、意外事故导致的工程实体损失,通过支付保费将财产风险转嫁给保险公司,确保工程在遭受火灾、洪水、地震等不可抗力时能及时获得经济补偿,避免因资金短缺延误修复进度。第三方责任险则针对施工活动可能对周边环境或第三方人身财产造成的损害,通过保险赔付化解潜在纠纷,降低建设单位法律风险^[5]。保险机制的有效运行需基于科学的风险评估与保费厘定,保

险公司通过分析工程规模、地质条件、施工工艺等因素确定承保范围与费率,建设单位则需根据风险偏好选择合适险种与保额,形成风险与成本的平衡。另外,合同条款设计是风险分担的制度保障,通过在总承包合同、分包合同中明确参建各方风险责任,可避免因权责模糊导致争议。合同需详细界定不可抗力、设计变更、材料价格波动等风险事件的承担主体,因施工单位管理不善引发的安全事故,则由其自行承担损失并赔偿第三方损失。合同还应设置风险预留金或质量保证金条款,要求施工单位缴纳一定比例资金作为风险对冲,若施工期间发生质量缺陷或安全事故,建设单位可动用该资金进行修复或赔偿,剩余部分在工程验收后返还,以此约束施工单位行为。

结语

综上所述,水利工程抽水蓄能施工安全风险管理的保障工程顺利实施的核心环节。混合风险识别方法可显著提升风险覆盖度,机器学习赋能的评估模型能增强预测时效性,而设计优化与技术改进则是降低风险发生率的关键。未来,研究需进一步聚焦极端工况下的风险演化规律,探索数字孪生、区块链等新技术在风险监控中的应用,推动风险管理向智能化、精准化方向发展。

参考文献:

- [1]万成.抽水蓄能电站建设期安全管理中的人为因素分析[J].水上安全,2024,(23):154-156.
- [2]张帆,金伟,刘庆,等.抽水蓄能电站建设安全评价及其对策研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2024,46(04):547-550.
- [3]韩冬,任伟楠,周力,等.中国抽水蓄能发展形势和展望[J].人民长江,2024,55(11):39-45.
- [4]沈润泽.浅析抽水蓄能发展现状及展望[J].中国设备工程,2024(18):252-255.
- [5]李梓芳.浅谈抽水蓄能电站项目前期工作[J].水电与新能源,2023,37(7):62-65.