

水利工程运行管理的安全风险评估

袁清飞

中科华水工程管理有限公司 河南 郑州 450000

摘要：随着水利建设步伐的加快，水利工程安全关乎民生大计。本文聚焦水利工程运行管理的安全风险评估。首先概述其基本概念与重要性，接着从自然环境、工程设施、管理机制、人为操作四个维度深入剖析风险，涵盖极端气象、地质灾害、工程老化、制度不健全等多方面风险因素。随后详细介绍层次分析法、模糊综合评价法等多种评估方法。旨在为水利工程运行管理提供科学的风险评估思路与手段，助力提前识别风险、采取有效防控措施，保障水利工程安全稳定运行，减少安全事故发生，维护社会公共利益与生态安全。

关键词：水利工程；运行管理；安全；风险评估

引言：水利工程作为国家基础设施建设的关键部分，在防洪、灌溉、供水、发电等诸多领域发挥着不可替代的作用，对保障经济社会可持续发展和人民生命财产安全意义重大。然而，水利工程运行管理面临着复杂多变的安全风险，自然环境的不可抗力、工程设施的老化缺陷、管理机制的不完善以及人为操作失误等，都可能引发安全事故，造成严重损失。因此，开展水利工程运行管理安全风险评估至关重要。通过科学评估，能够精准识别潜在风险，为制定针对性防控策略提供依据，确保水利工程长期安全高效运行。

1 水利工程运行管理安全风险评估概述

水利工程运行管理安全风险评估是对水利工程在运行过程中可能遭遇的各类安全风险进行系统识别、分析以及评价的过程，其核心目的在于提前洞察潜在危险，为风险防控提供科学依据，保障水利工程安全稳定运行。水利工程具有规模宏大、结构复杂、功能多样且运行环境多变等特点，这使得其运行管理面临诸多不确定性因素。这些因素既涵盖自然环境方面的极端气象灾害、地质灾害以及水文情势变化等，也包括工程自身存在的老化、缺陷问题，还有管理机制不完善和人为操作失误等人为因素。安全风险评估通过对这些风险因素进行全面梳理和深入分析，运用科学合理的评估方法，确定风险的大小、发生概率以及可能造成的损失程度^[1]。

2 水利工程运行管理安全风险识别分析

2.1 自然环境因素引发的风险

2.1.1 极端气象灾害风险

极端气象灾害，如暴雨、台风、干旱等，会给水利工程带来严峻挑战。暴雨可能引发洪水，超出工程防洪标准，导致洪水漫坝、溃坝等严重事故；台风带来的强风和暴雨组合，会冲击水利工程结构，破坏附属设施；

干旱则会使水库水位大幅下降，影响供水、发电等功能，还可能引发库岸失稳等问题。这些极端气象灾害具有突发性和强破坏性，严重威胁水利工程的运行安全。

2.1.2 地质灾害风险

水利工程所在区域的地质条件复杂多变，地质灾害风险不容小觑。地震可能导致水利工程建筑物基础松动、结构裂缝甚至倒塌；山体滑坡、泥石流等会冲毁堤防、渠道等工程设施，堵塞河道，影响工程正常运行。此外，地下水位变化、软土层沉降等地质问题，也会使水利工程建筑物产生不均匀沉降，影响其稳定性和安全性。

2.1.3 水文情势变化风险

水文情势的变化对水利工程运行影响深远。河流径流的季节性变化，会使水库水位在丰水期和枯水期差异巨大，长期的水位频繁升降可能导致坝体产生裂缝、渗漏等问题；水质变化也不容忽视，水体污染、泥沙含量增加等，会腐蚀工程设施，影响设备正常运行，降低水利工程的使用寿命和运行效益，增加安全风险。

2.2 工程设施老化与缺陷引发的风险

2.2.1 主体建筑物风险

水利工程主体建筑物，如大坝、水闸等，长期经受水流冲刷、温度变化等作用，易出现裂缝、渗漏、混凝土碳化等老化现象。裂缝可能不断扩展，降低结构强度，严重时引发溃坝等灾难性后果；渗漏会带走土石颗粒，导致坝体内部结构破坏，影响稳定性；混凝土碳化会降低钢筋保护层厚度，使钢筋锈蚀，削弱结构承载能力。

2.2.2 设备设施风险

水利工程的设备设施，像水泵、发电机、闸门启闭机等，在长期运行中，部件磨损、老化，会出现故障。水泵叶轮磨损会导致抽水效率下降；发电机绝缘老化可能引发短路，造成设备损坏甚至火灾；闸门启闭机故障

会影响闸门正常启闭,在洪水来临时无法及时泄洪,危及工程安全。设备设施的故障还可能引发连锁反应,扩大事故影响范围。

2.2.3 附属设施风险

附属设施虽不直接参与水利工程的主要功能,但对其安全运行起着重要支撑作用。如堤防的护坡、排水设施,若出现破损、堵塞,会降低堤防的防洪能力,在洪水作用下易发生坍塌;水库的观测设施老化、损坏,会导致无法准确获取水位、沉降等数据,使管理人员不能及时掌握工程运行状态,错过最佳处置时机,增加工程运行的安全隐患。

2.3 管理机制不完善引发的风险

2.3.1 制度体系不健全风险

水利工程制度体系不健全,会使管理缺乏明确规范与准则。例如,岗位责任制度不完善,会导致工作人员职责不清,工作推诿,影响工程日常维护与管理效率;操作规程不详细,操作人员可能因随意操作而引发安全事故;考核监督制度缺失,无法对管理工作的质量和效果进行有效评估与监督,使得一些问题得不到及时发现和解决,长期积累下来可能引发重大安全风险,威胁水利工程的正常运行。

2.3.2 应急管理机制薄弱风险

应急管理机制薄弱,在面对突发灾害或事故时,水利工程将陷入被动局面。缺乏完善的应急预案,当洪水、地震等灾害来临时,无法迅速、有序地开展抢险救援工作,导致灾害损失扩大;应急物资储备不足或管理混乱,在紧急时刻不能及时调配使用,影响抢险进度;应急演练不足,工作人员对应急流程不熟悉,在实战中容易出现慌乱,无法高效协作,降低应对突发事件的能力,增加水利工程的安全风险。

2.3.3 监测与预警机制缺失风险

监测与预警机制缺失,会使水利工程运行处于“盲目”状态。没有全面、准确的监测系统,就无法及时掌握工程设施的运行状况,如大坝的位移、渗漏,水库的水位变化等关键信息,不能及时发现潜在的安全隐患;预警机制不完善,即使监测到异常情况,也无法及时发出准确预警,使相关部门和人员不能提前采取防范措施,错过最佳的处置时机,可能导致小问题演变成大事故,严重威胁水利工程的安全和周边地区人民的生命财产安全。

2.4 人为操作失误引发的风险

2.4.1 运行调度操作失误风险

运行调度是水利工程管理的核心环节,操作失误会

带来严重后果。若调度人员对流域水情、雨情等信息掌握不准确,或未严格按照调度方案执行,在洪水来临时未能及时开启闸门泄洪,可能导致水库水位超限,威胁大坝安全;而在干旱时期,不合理的水量调配可能影响下游用水需求,造成水资源浪费或供需矛盾。

2.4.2 设备操作失误风险

水利工程设备操作复杂,操作失误极易引发故障甚至事故。操作人员若未接受专业培训,对设备性能、操作流程不熟悉,在启动、停止设备时可能因操作顺序错误,损坏设备关键部件;在设备运行过程中,不能及时发现异常参数并采取正确措施,会使小故障演变成大事故。例如,水泵操作不当可能导致电机烧毁;闸门启闭机操作失误可能造成闸门卡阻、断裂,影响工程正常泄洪或挡水功能。

2.4.3 巡查与维护疏漏风险

巡查与维护是保障水利工程安全运行的基础工作,疏漏会埋下安全隐患。巡查人员若责任心不强,未按照规定路线、频次进行巡查,对工程设施的裂缝、渗漏等细微问题视而不见,会使小问题逐渐恶化,最终影响工程整体安全。在维护方面,若维护人员技术不过关,或未按照维护标准进行操作,如润滑不足、部件更换不及时等,会加速设备老化,降低工程设施的可靠性,增加突发故障的风险,威胁水利工程的稳定运行^[2]。

3 水利工程运行管理安全风险评估方法

3.1 层次分析法(AHP)

层次分析法(AHP)是水利工程运行管理安全风险评估中常用的系统化分析工具。该方法通过构建层次结构模型,将复杂的评估问题分解为目标层(如水利工程总风险)、准则层(如自然环境、工程设施等风险类别)和指标层(如极端气象灾害、主体建筑物老化等具体因素),形成树状层级关系。实施时,组织专家对同一层次要素进行两两比较,依据1-9标度法量化相对重要性,构建判断矩阵并计算权重向量,通过一致性检验($CR < 0.1$)确保逻辑合理性后,逐层合成权重,最终确定各风险因素对总目标的综合影响程度。该方法将定性分析与定量计算结合,能清晰呈现风险因素的关联性,为风险防控重点的确定提供科学依据,但结果受专家主观判断影响,需结合其他方法验证。

3.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法是水利工程运行管理安全风险评估中应对不确定性与模糊性的重要工具。水利工程运行受多种因素影响,许多风险特征难以用精确数值描述,如“设备老化程度”“人员操作熟练度”等均具有模糊

性。该方法首先确定评价因素集,涵盖自然环境、工程设施、管理机制、人为操作等风险类别及其具体指标;再设定评语集,如高、中、低风险等级。通过专家打分或统计分析确定各因素对不同评语的隶属度,构建模糊评价矩阵。结合层次分析法等确定的权重向量,运用模糊合成算子(如加权平均型)进行运算,得到综合评价结果向量。该方法能将定性评价转化为定量分析,充分考虑风险因素的模糊特征,使评价结果更符合实际。但隶属度函数的构建和评语等级的划分缺乏统一标准,需结合工程实际和专家经验合理确定,必要时可进行敏感性分析以验证结果的稳定性。

3.3 故障树分析法(FTA)

故障树分析法(FTA)是水利工程运行管理安全风险评估中用于系统分析事故因果关系的有效方法。该方法以水利工程中不希望发生的顶事件(如溃坝、设备严重故障等)为分析目标,自上而下构建故障树模型,通过逻辑门(如与门、或门)将顶事件与中间事件、基本事件逐层连接,形成树状结构。基本事件涵盖自然因素(如极端洪水)、工程缺陷(如混凝土裂缝)、管理失误(如调度不当)、人为操作错误(如设备误操作)等潜在风险源。通过定性分析(如最小割集识别)确定导致顶事件发生的关键路径,通过定量分析(如概率计算)评估各基本事件对顶事件的影响程度。FTA能够直观呈现风险因素的传递路径和组合效应,帮助识别系统薄弱环节,但故障树的构建依赖专家经验,且复杂系统的分析计算量较大,需结合计算机辅助工具提高效率,常用于水利工程重大事故的预防与控制策略制定。

3.4 蒙特卡洛模拟法

蒙特卡洛模拟法是水利工程运行管理安全风险评估中处理复杂随机问题的强有力工具。该方法基于概率统计理论,通过构建输入变量的概率分布模型(如洪水流量服从P-III型分布、结构材料强度服从正态分布),利用计算机随机抽样技术生成大量随机样本,模拟水利工程在不同随机因素组合下的运行状态。例如,在评估大坝溃决风险时,可模拟洪水水位、渗流压力、混凝土老化速度等变量的动态变化过程,统计系统失效(如漫顶、渗透破坏)的发生频率,进而量化风险概率。该方法能充分考虑多变量间的相关性及不确定性传播,适用于非

线性、高维度的复杂系统分析。其优势在于无需简化系统模型即可获得概率型评估结果,但计算效率依赖样本量,且输入变量分布的准确性直接影响结果可靠性。

3.5 灰色系统理论评估法

灰色系统理论评估法是水利工程运行管理安全风险评估中针对“小样本、贫信息”不确定性问题的有效方法。水利工程系统常因监测数据不足或信息不完整,导致传统评估方法适用性受限,而灰色系统理论通过挖掘部分已知信息中的内在规律,实现对系统行为的预测与评估。该方法以灰色关联分析为核心,通过计算各风险因素与系统安全状态的关联度,量化其对整体风险的影响程度。例如,在评估大坝安全时,可将位移、渗流、应力等监测指标作为比较序列,与安全标准序列进行关联度排序,识别关键风险因素。其优势在于不依赖大量样本和典型概率分布,计算简便且适应性强。但该方法对数据预处理要求较高,需通过灰色生成(如累加生成)弱化随机性,且关联度阈值划分缺乏统一标准,需结合工程实际和专家经验综合判断,常用于水利工程安全状态的动态监测与早期预警^[3]。

结束语

水利工程运行管理的安全风险评估是保障工程长效运行与社会公共安全的关键环节。通过综合运用层次分析法、模糊综合评价、故障树分析、蒙特卡洛模拟及灰色系统理论等多元方法,可系统识别自然环境、工程结构、管理机制及人为操作等维度的潜在风险,实现从定性描述到定量计算的转化,为风险防控提供科学依据。未来需进一步融合物联网监测、大数据分析等新技术,构建动态化、智能化的风险评估体系,同时强化跨学科协作与标准规范建设,以应对气候变化与工程老化带来的新挑战,最终筑牢水利工程安全防线,支撑经济社会可持续发展。

参考文献

- [1]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.
- [2]黄学超,张鑫,王冬雪.水利工程运行安全风险分级管控体系建设的探索与实践[J].治淮,2022(1):46-48.
- [3]董晶晶.水利工程生产运行管理标准化建设探讨[J].水利电力技术与应用,2024,6(16).