

水利工程中水库大坝的安全管理策略研究

郝瑞涛

三门峡黄河明珠(集团)有限公司 河南 三门峡 472000

摘要: 水库大坝安全管理是保障人民生命财产、社会经济稳定与生态可持续发展的核心环节。当前大坝面临工程老化、监测技术滞后、极端气候威胁及管理短板等多重挑战。为提升安全管理水平,需采取优化策略,如通过大坝结构加固、智能监测、规范日常运行养护、应急处置提升、法规完善、风险管理及科技赋能等,构建“工程硬实力为基、风险管理为核、技术赋能为翼”的主动防御体系,实现水库风险长效可控,筑牢大坝安全防线。

关键词: 水利工程; 水库大坝; 安全管理策略

引言: 水库大坝作为水资源调控的关键基础设施,其安全管理直接关系防洪安全、供水安全与生态平衡。全球气候变化加剧了暴雨、干旱等极端事件频发,叠加我国大量建于上世纪的老旧工程存在“先天缺陷”与材料老化问题,安全风险日益严峻。监测技术滞后导致隐患难以及时捕捉,而运维资金不足、应急预案脱离实战、多头管理责任模糊等人为短板,进一步放大了溃坝灾害的潜在威胁。面对传统与非传统安全风险交织的复杂局面,亟需通过结构性维护、智能监测升级、管理机制优化、法规标准完善等综合策略,推动安全管理从被动抢险转向主动防控。本文系统剖析当前挑战,并提出七项核心优化路径,为构建现代化大坝安全保障体系提供科学支撑。

1 水利工程中水库大坝安全管理重要性

水库大坝安全管理是水利工程核心,直接关系人民生命财产安全、社会经济稳定及生态可持续发展。一旦发生溃坝、渗漏等事故,将引发洪水泛滥,淹没城镇农田,造成重大经济损失与人员伤亡。从社会经济看,大坝承担水资源调配功能,为农业灌溉、工业用水、城市供水等提供稳定水源,保障区域经济运行;若管理不善导致供水中断,将引发产业连锁反应,影响经济稳定。同时,大坝的安全运行还与生态环境息息相关,大坝通过调节径流维持生态平衡,为水生生物提供栖息地,调节局部气候并保护生物多样性。因此,必须高度重视水库大坝的安全管理,建立健全安全监测、预警及应急机制,强化日常巡查维护,确保大坝安全可控,为经济社会发展与生态保护提供坚实保障^[1]。

2 水库大坝安全管理存在的主要问题

2.1 工程老化与先天不足

我国大量水库大坝建于上世纪中期,受当时技术、材料和设计标准等局限存在“先天缺陷”。经数十年服

役,坝体材料老化如混凝土强度下降、钢筋锈蚀,土石坝填筑料胶结性能降低、石料风化等,关键金属结构如泄洪闸门、输水管道等因长期暴露于腐蚀环境,出现锈蚀、磨损、变形等问题,修复难度大、成本高。这些结构性隐患构成长期威胁,历史上如山西曲亭水库溃坝事故,正是先天缺陷叠加维护不力所致。

2.2 监测预警能力薄弱

现有的大坝安全监测体系存在明显短板。一、技术设备滞后。许多水库仍依赖传统的人工观测方法(如人工读数、皮尺测量位移),其数据采集频率低、精度低;对于坝体内部如应力应变、基础渗流难以精准获取;大量监测设备服役年限长,电子元件老化、传感器漂移失,加之部分关键设备自动化程度低,无法实现全天候实时动态监测。二、数据整合应用不足。水文、地质、结构等多源数据分散割裂,缺乏有效融合平台和分析工具;新建系统常因专业人才缺乏而“采而不用”,无法及时识别风险征兆如新疆射月沟水库溃坝教训。同时,现行的风险预警模型多基于历史常规数据训练,对超标洪水、突发地质灾害等“非常规风险”的预测能力不足。

2.3 极端气候与环境风险加剧

全球气候变化导致极端天气事件频发。罕见暴雨频创历史记录(如2021年郑州“7·20”特大暴雨、黄河中下游罕见秋汛)极大考验水库防洪能力,易造成超标洪水。同时,持续干旱导致库水位骤降,可能诱发土坝干缩裂缝。还有地震活动可能直接导致大坝结构损伤、地基失稳甚至溃决;地质灾害发生滑坡,产生的涌浪将对坝体产生猛烈冲击。大量建设标准偏低、抗风险能力较弱的中小型水库,在严峻的气候和地质灾害面前显得尤为脆弱。

2.4 运维管理与应急能力短板

2.4.1 资金与维护不足

有些中小型水库，尤其是承担灌溉、防洪等公益职能的，主要依赖有限的财政拨款，在资金分配上往往“重建轻管”，运维经费被新建项目挤占。即使是部分市场化运营的水电站，在经济效益压力下也可能有意无意地压缩安全维护成本如削减年度检修预算、推迟必要的加固工程，使得设备带病运行，导致隐患积累。

2.4.2 应急预案与演练流于形式

尽管多数大坝制定了应急预案，但内容普遍存在“模板化”问题，未能结合工程自身的具体风险特点如坝型结构差异、下游人口分布、周边环境等进行措施细化；应急演练次数少、质量低，基层人员对预警、疏散、抢险流程生疏，实战能力差（如吉林大河水库溃坝）。极易出现误判、迟报、指挥混乱、抢险不力、疏散无序等致命失误，导致小险酿成大祸。

2.4.3 公众风险意识薄弱

大坝下游及库区周边居民对溃坝风险认识不足，对预警信号（如防空警报、应急广播）不敏感。同时，缺乏便捷有效的公众监督和信息反馈机制如举报库区违规采砂、违法建设、异常渗漏点等使得一些早期、苗头性的风险难以及时传递到管理部门，错失干预先机。

2.5 管理体制与责任悬空

部分大坝存在“多头管理”问题，权责边界不清，在关键决策时易推诿拖延。监管力量薄弱或缺失，对于发现的违规行为查处整改不力。江西长罗水电站溃坝事故就是监管严重缺失、责任链条断裂的典型例证——从建设违规到管理失职再到监管缺位，环环失守，最终酿成灾难。

2.6 非传统安全威胁凸显

战争、恐怖袭击等恶意破坏行为（如2023年乌克兰卡霍夫卡水电站被炸）已成为大坝安全无法忽视的新型、极端风险，其突发性和破坏力远超常规自然灾害，对防护和应急体系提出前所未有的挑战^[2]。

3 水库大坝安全管理优化策略

3.1 加强大坝结构维护与加固

为保障大坝长期稳定运行，需对坝体表面及时开展修复与防护作业。裂缝采用压力灌浆技术填充，剥落处先清理后涂抹防护涂层，并增设耐候涂料或防护钢板以增强抗冲刷和风化能力。基础渗透问题通过帷幕灌浆技术构建防渗帷幕，降低渗透压力，预防管涌、流土等险情。基础变形则采用锚杆加固、灌注桩等方法提升承载力与抗变形能力。同时强化基础实时监测，掌握变形动态并采取针对性措施。泄洪及输水设施需定期更新维

护，闸门金属构件更换为耐腐蚀材料并升级自动化启闭系统，输水管道采用内衬修复或更换以增强抗磨损和抗腐蚀能力。此外，建立完善的定期检修制度，确保设施始终处于良好运行状态。

3.2 构建智能监测预警体系

构建完备的智能监测预警体系需从硬件升级、数据整合与智能分析三方面入手。首先，淘汰低精度仪器，部署分布式光纤传感器实现坝体应变与温度实时感知，结合无人机巡检与卫星遥感获取全景影像，布设物联网感知网络整合位移计、渗压计等传感器，达成毫米级精度动态监测。之后建立统一数据管理平台，通过自动化采集传输打破数据壁垒。核心在于构建数字孪生模型，融合实时与历史数据模拟极端工况响应，运用大数据分析 with AI 算法识别异常模式，自动生成分级预警信息。该体系通过AI驱动的智能预警模块，结合知识图谱技术关联监测点特征，实现风险态势感知与防控，最终形成覆盖监测、诊断、预警、决策的闭环管理，为大坝安全提供科学支撑。

3.3 健全运行管理机制

为保障工程设施稳定安全高效运行，需健全运行管理机制，规范日常运行管理。构建“定期巡检+动态监测”机制，定期巡检是指按照规范对水位、渗流等关键指标细致监测，动态监测是实时捕捉设施状态波动，及时察觉潜在问题。同时，制定分级养护标准，针对坝体、闸门等不同部件，考虑重要程度和运行特点划分养护等级，采用“定期检修+专项整治”机制，定期检修即全面保养，及时发现隐患维修防止问题扩大；专项整治为集中解决突出问题，全面提升设施运行质量。此外，建立制度化、程序化、专业化的日常运行管理流程是重要保障。制度化让工作有章可循，程序化确保流程规范一致，专业化要求人员具备丰富知识与技能。三者结合形成严密管理网络，为工程设施安全稳定运行保驾护航。

3.4 完善应急响应与处置能力

制定详尽且可操作的应急预案，需明确组织架构、职责分工及响应流程，涵盖洪水、地震结构破坏等突发事件应对措施。科学储备与管理应急物资，防汛沙袋、照明器材抢险备品备件等物资，定期检查维护，确保随时可用。组建由水利专家、技术人员组成的应急队伍，通过培训演练提升协同作战能力。

完善分级预警响应机制，依托广播、短信、社交媒体等多渠道发布预警信息，确保预警信息精准传达。建立跨区域、跨部门联动机制，利用5G技术与智能调度系统实现秒级信息传输，无人机三维建模辅助决策，机器

人执行高危作业以降低风险。

规范险情处置流程,结合实时数据自动生成抢险方案,事后全面评估并及时修订预案。同时,强化应急物资管理,如电网公司采用现代物流技术优化仓储配送网络,保障物资高效调配。通过信息化手段提升响应效率,如城市轨道交通应急物资储备仿真模型优化资源配置。

3.5 优化法规制度与技术标准体系

优化大坝安全管理需从法规制度与技术标准体系协同管齐下。法规上,要明确水利部门、管理单位等各方主体职责,细化权责边界,规范监测、建设等全流程操作。同时强化监督问责机制,结合汛前检查等常态化督查,对违规行为从严追责。还需健全应急管理法规,明确预案编制与演练要求,规范险情处置流程;完善应急管理与库区管控法规,保障险情处置与周边环境安全。技术标准方面,需针对不同坝型完善监测标准明确项目与设备要求。要规范监测设施建设与运维标准,保障施工质量与设备校准频率。此外,加快智能化标准制定,统一数字孪生系统数据格式与接口标准。建立安全评价体系,定期评估大坝状态,及时落实除险加固措施,通过法规与技术的双重保障提升管理效能。

3.6 建立健全大坝风险管理体系

在当下复杂多变的环境中,构建现代风险管理体系是保障大坝安全运行的关键任务。首先需确立风险管理核心理念,明确大坝风险具有客观存在性和动态变化性,它既包含工程本身的结构、功能等方面的风险,也涵盖对下游公共安全造成的潜在威胁。这种风险会受到多种因素的影响,如大坝随着时间推移逐渐老化、周边环境发生改变以及人为的干预活动等。基于此,要将风险管理确立为大坝安全管理的科学方向和必然要求,推动管理理念从传统的安全管理向现代风险管理转变,其次,扎实实施风险管理的核心流程。风险识别是基础,分析各类突发事件并评估其发生的可能性,为后续工作提供方向;风险分析借助破坏模式分析、洪水演进模拟等技术手段,预判风险事件发生所影响范围与后果的严重程度;风险评估是关键环节,将风险发生的可能性与后果的严重程度结合,科学确定风险等级,以便合理分配资源进行应对;风险监测与预警做到及时有效,通过日常巡视与针对性措施及时捕捉风险早期迹象;风险应对则需综合施策,即工程措施与非工程措施相结合,将风险控制在可接受的水平。最后,推进风险管理体系建

设,需加快法规与技术标准制定,重点解决高风险中小型水库管理薄弱问题,同时克服预案形式化、制度化不足、风险标准欠缺等制约因素,构建科学、高效的风险管理体系^[3]。

3.7 现代技术赋能大坝安全管理

在科技浪潮下,大坝安全管理需深化现代技术融合应用。物联网、分布式光纤、无人机、卫星遥感、大数据、AI、数字孪生、5G、机器人、区块链、AR/VR等前沿技术,是提升大坝安全管理的关键力量。要将这些技术深度融入监测预警、运行管理、应急响应、风险管理等六大策略的具体环节。监测预警时,借助它们实现全域感知与精准预警,让风险隐患及时暴露;运行管理中,利用数字孪生模拟运行、5G保障数据传输;应急响应中,机器人执行高危任务、AR/VR提供指导;风险管理里,区块链确保数据可信。技术融合旨在达成全域感知、精准预警、智能决策、高效处置、可信追溯和能力提升,推动大坝安全管理从“被动防御”转向“主动预警、主动防控”,全面提升安全保障能力与现代化水平,为社会稳定发展保驾护航。

结语

优化大坝安全管理,关键在于构建“主动防御、事前预警”的现代化体系。通过七项核心策略筑牢实体根基、构建智能监测、规范日常运行、强化应急响应、完善法规标准、确立风险管理、深化技术赋能形成三位一体的保障。工程硬实力是基础,风险管理软实力是核心,技术赋能是引擎。这要求摒弃被动应对,转向以风险为核心的系统防控,充分利用智能技术提升感知、预警和处置能力,并依托法规明确权责、规范流程。唯有统筹推进,方能实现风险可控,确保大坝安全长效运行,切实守护人民生命财产与水资源安全。

参考文献

- [1]张现周.智能化监控系统在水库大坝安全管理中的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(3):005-008.
- [2]周家强.水库大坝工程施工与运行安全管理的研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(12):040-043.
- [3]黄钢.水库大坝安全管理的问题及策略研究[J].东北水利水电,2024,42(5):58-61+72.