

水利工程运行管理中的安全隐患及预防措施

张潇爽

郑州水务建设投资有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 水利工程运行管理中安全隐患多样,涵盖结构、设备、管理机制及环境人为因素。结构隐患如坝体渗漏、混凝土老化;设备隐患如机电故障、自动化失灵;管理隐患如责任体系缺失、应急预案不完善;环境隐患如极端气候、非法采砂。预防措施包括强化安全责任落实,完善监测预警体系,定期设备维护,推进工程加固与智能化改造,加强应急演练与区域联防,利用新技术提升管理数字化水平,确保工程安全高效运行。

关键词: 水利工程;运行管理;安全隐患;预防措施

引言:水利工程作为国家基础设施的关键构成,对保障民生、促进经济发展意义重大。然而,在其长期运行管理过程中,受自然环境变化、设备老化、人为活动等多种因素影响,各类安全隐患逐渐凸显。这些隐患不仅威胁着水利工程的自身安全与稳定运行,还可能引发严重的次生灾害,对周边地区人民生命财产安全造成巨大损失。因此,深入剖析水利工程运行管理中的安全隐患,并探寻科学有效的预防措施,已成为当前亟待解决的重要课题。

1 水利工程运行管理安全隐患分类与成因分析

1.1 结构安全隐患

1.1.1 主要隐患与成因

坝体渗漏多因施工时防渗结构存在缺陷、地基处理不彻底,或长期受水压力作用导致裂隙扩大,水流沿缝隙渗透;混凝土老化源于长期暴露在风吹、日晒、冻融环境中,水泥胶体逐渐分解,表面出现碳化、开裂,强度大幅下降;金属结构腐蚀则与水环境中的氯离子、氧气发生电化学反应有关,尤其是闸门、启闭机等水下或潮湿环境中的金属部件,易出现锈蚀剥落,影响结构承载能力。

1.1.2 案例

某小型水库大坝建成运行20年后,因坝体土料中蚁穴密集,形成隐蔽渗流通道,雨季水位上涨时,水流沿蚁穴渗透引发管涌事故。现场勘查发现,蚁穴最深达坝体内部3米,导致坝体局部土体流失,出现直径1.2米的塌陷坑,经紧急填充防渗材料、加固坝体后才控制险情,事故根源为长期未开展坝体生物隐患排查。

1.2 设备设施隐患

1.2.1 主要隐患与成因

机电设备故障常因长期高负荷运行、润滑不足、零部件磨损导致,如水泵轴承损坏、电机绝缘层老化;自

动化控制系统失灵多源于传感器故障、软件程序漏洞或线路接触不良,导致监测数据失真、设备远程控制失效,影响工程调度精度。

1.2.2 数据

据水利部门统计,近五年全国水利设备平均故障率为8.7%,其中机电设备占比62%(水泵、电机故障居多),自动化控制系统占比28%,其他辅助设备占比10%;故障率较高的场景集中在汛期(12.3%)和冬季低温期(10.5%),主要因设备负荷骤增、低温影响部件性能^[1]。

1.3 管理机制隐患

1.3.1 主要隐患与成因

安全责任体系缺失表现为部分单位未明确岗位安全职责,出现问题时推诿扯皮;应急预案不完善体现在预案内容笼统、未结合工程实际,缺乏针对性和可操作性,且未定期更新,难以应对突发险情。

1.3.2 对比分析

实行“一岗双责”安全管理体制的工程,安全事故发生率仅为3.2%,设备维护及时率达95%;而未建立健全管理体制的工程,安全事故发生率高达15.8%,设备维护及时率不足60%,两者安全绩效差异显著。

1.4 环境与人为因素

1.4.1 主要隐患与成因

极端气候(如强降雨、台风、高温干旱)易导致水位骤升引发漫坝、坝体边坡失稳,或使混凝土结构热胀冷缩加剧开裂;非法采砂破坏河道河床稳定,影响坝基安全;人为破坏(如偷盗设备部件、违规操作)直接威胁工程运行安全。

1.4.2 模型分析

通过气候水文模型模拟显示,若区域年均降雨量增加10%,水库校核洪水位将超出原设计阈值1.5米,漫坝风险提升40%;气温升高2°C,混凝土坝体表层裂缝发生率

将增加25%，需重新调整水库调度方案和安全监测指标。

2 水利工程运行管理中的安全隐患识别与评估方法

2.1 传统检测技术

(1) 人工巡检通过专业人员现场查看，重点排查坝体裂缝、闸门变形、设备异响等显性隐患，优势在于灵活度高、可实时判断隐患严重程度，但受限于人员经验和视野，难以发现坝体内部、水下结构等隐蔽问题，且巡检效率低，大型工程单次巡检需耗时数周。(2) 无损检测技术则通过物理手段实现非破坏性检测，其中超声波检测利用声波传播特性，可探测混凝土内部空洞、钢筋锈蚀情况，检测深度可达2-5米；雷达探测通过电磁波反射原理，能精准定位坝体渗漏通道、地下蚁穴等隐患，在某水库坝体检测中，雷达探测曾成功发现3处直径超过0.5米的隐蔽空洞，为后续加固提供了精准数据支撑。

2.2 智能监测技术

2.2.1 技术类型与优势

物联网传感器网络通过部署水位、渗压、位移等传感器，实现24小时实时数据采集，数据传输延迟可控制在10秒内，能及时捕捉坝体微小变形、渗流量异常等隐患前兆；BIM建模技术构建工程三维模型，整合设计、施工、运维数据，可直观展示结构应力分布，提前预判混凝土老化、金属结构疲劳等问题；数字孪生技术则通过物理实体与虚拟模型的实时映射，模拟极端气候、设备故障等场景下的工程响应，为隐患处置提供决策支持^[2]。

2.2.2 应用案例

三峡工程智能监测系统融合物联网、BIM与数字孪生技术，在坝体布置了超过5000个传感器，实时监测坝体位移、应力、渗流等200余项指标。系统可自动识别数据异常，如当某区域渗流量超出阈值10%时，立即触发预警并推送至管理平台，同时通过数字孪生模型模拟渗漏扩散路径，辅助制定封堵方案。该系统运行以来，将隐患发现时间从传统巡检的数天缩短至分钟级，重大隐患处置效率提升60%。

2.3 风险评估模型

2.3.1 常用模型原理

层次分析法(AHP)通过构建目标层(安全风险评估)、准则层(结构安全、设备状态等)、方案层(具体隐患)的层级结构，采用两两比较法确定各指标权重，量化评估隐患风险等级，适用于多因素、多目标的风险决策；模糊综合评价法针对水利工程隐患的模糊性(如“裂缝严重程度”“设备老化程度”)，通过建立模糊评判矩阵，将定性描述转化为定量数据，提高评估结果的客观性，在小型水库风险评估中应用广泛。

2.3.2 动态风险评估框架设计

框架以“数据采集-风险分析-等级划分-预警响应”为核心流程，首先整合智能监测系统实时数据与人工巡检记录，形成动态数据库；其次结合AHP与模糊综合评价法，定期(每月/每季度)更新指标权重与评判标准，适应工程状态变化；最后根据评估结果将风险划分为低(I级)、中(II级)、高(III级)三个等级，对应启动日常监测、专项排查、应急处置等响应措施，实现风险的动态管控。

3 水利工程运行管理中的安全隐患预防措施体系构建

3.1 工程加固措施

3.1.1 核心加固技术应用

坝体灌浆防渗技术通过向坝体或地基裂隙注入水泥浆、化学浆液等材料，填充空隙并形成连续防渗体，按灌浆方式可分为帷幕灌浆、固结灌浆和接触灌浆。其中帷幕灌浆多用于坝基防渗，能有效阻断地下水渗透通道，降低坝体渗漏风险；固结灌浆则通过提高坝体岩体或土体密实度，增强结构整体承载能力，适用于混凝土坝、土石坝的坝体加固。结构补强加固技术针对混凝土结构裂缝、强度不足等问题，采用粘贴钢板、外包混凝土、预应力加固等方式，修复受损部位并提升结构性能，例如对老化闸墩采用外包钢筋混凝土加固，可使承载能力提升30%-50%，延长工程使用寿命^[3]。

3.1.2 新材料技术创新

纳米改性混凝土通过在普通混凝土中掺入纳米SiO₂、纳米TiO₂等颗粒，优化混凝土微观结构，提高其抗渗性、抗冻性和抗腐蚀性，实验数据显示，添加3%纳米SiO₂的混凝土，抗渗等级可提升1-2级，抗冻融循环次数增加200次以上，适用于水位变动区、侵蚀性水环境中的坝体浇筑与修补。碳纤维加固材料凭借高强度、轻量化、耐腐蚀的特性，广泛应用于混凝土梁、柱及金属结构加固，其抗拉强度是普通钢筋的7-10倍，且施工便捷，无需大型设备，可在不影响工程正常运行的情况下完成加固作业，有效解决传统加固材料重量大、施工周期长的问题。

3.2 设备维护策略

3.2.1 预测性维护(PHM)技术应用

PHM技术通过整合设备运行数据、传感器监测数据(如温度、振动、电流)，结合机器学习算法构建故障预测模型，实现从“事后维修”“定期维修”向“预测维修”的转变。在水利机电设备中，通过安装振动传感器实时监测水泵轴承振动频率，当数据超出正常阈值时，模型可提前1-2周预测轴承磨损故障；利用温度传感器监测电机绕组温度，结合热传导模型分析绝缘层老化趋势，避免因电机烧毁引发工程停运。此外，PHM技术可通过数

据分析优化维护周期,减少不必要的停机维护,降低维护成本30%以上^[4]。

3.2.2 备品备件优化配置模型

基于设备故障频率、维修周期、采购周期等参数,构建备品备件库存优化模型,采用ABC分类法将备件分为关键备件(A类)、重要备件(B类)、一般备件(C类)。对A类备件(如大型水泵叶轮、闸门启闭机电机)采用“安全库存+紧急采购通道”模式,确保库存满足突发故障需求;对B类备件(如传感器、阀门)采用“经济订货批量”模型,平衡库存成本与缺货风险;对C类备件(如螺栓、密封圈)采用“集中采购+最小库存”模式,减少资金占用。同时,通过建立区域备件共享平台,实现同类型工程备件调剂,提高备件利用率,降低整体库存成本25%-40%。

3.3 管理优化方案

3.3.1 安全标准化管理体系建设

以ISO55000资产管理标准为核心,结合水利工程特点构建安全标准化体系,涵盖设备全生命周期管理、安全责任落实、作业流程规范等内容。在设备管理方面,建立“设备身份档案”,记录设备采购、安装、维护、报废全流程信息,实现可追溯管理;在责任落实方面,明确从管理层到一线员工的安全职责,签订安全责任书,将安全绩效与考核挂钩;在作业规范方面,制定《水利工程安全操作手册》,规范巡检、维护、启闭等作业流程,避免违规操作引发隐患。通过体系认证的水利工程,安全事故发生率可降低50%以上,设备平均无故障运行时间延长40%。

3.3.2 区块链技术在水务数据管理中的应用

利用区块链去中心化、不可篡改、可追溯的特性,构建水利工程数据管理平台,整合监测数据、维护记录、巡检报告等信息。数据上传时通过加密算法生成唯一哈希值,确保数据不被篡改,解决传统数据管理中“数据孤岛”“数据造假”问题;通过智能合约实现数据共享授权,例如向监管部门开放实时监测数据访问权限,向维修单位开放设备维护记录,提升协同管理效率。此外,区块链技术可用于工程质量追溯,记录混凝土浇筑、材料采购等关键环节数据,为隐患溯源提供可靠依据,增强管理透明度与公信力^[5]。

3.4 应急能力提升

3.4.1 基于情景模拟的应急演练设计

结合水利工程常见隐患(如坝体渗漏、设备故障、极端气候灾害),构建多场景应急演练方案,采用“桌面推

演+实战演练”结合模式。桌面推演通过模拟隐患发生过程,组织各部门人员讨论应急处置流程、职责分工、资源调配,梳理预案漏洞;实战演练则还原真实场景,如模拟水库漫坝险情,演练人员快速完成水位监测、闸门启闭、人员疏散、物资调配等操作,检验预案可行性与人员协同能力。演练后通过复盘分析,优化应急预案,例如针对演练中暴露的“物资运输延迟”问题,调整物资储备点布局,缩短应急响应时间。

3.4.2 区域联防联控机制构建

以流域或行政区域为单位,建立水利工程安全联防联控体系,明确区域内各工程管理单位、应急管理部门、气象部门、交通部门的职责与协作流程。建立统一的应急指挥平台,实现监测数据共享、险情信息互通,例如当某水库监测到水位超警时,平台可自动向上下游水库、沿岸乡镇推送预警信息;组建区域应急救援队伍,整合各单位救援设备(如冲锋舟、抽水机、加固材料)与专业人员,实现资源集中调配,避免重复建设。同时,制定区域联合应急响应预案,明确不同等级险情的联动处置流程,提高跨单位、跨区域应急处置效率,降低灾害损失。

结束语

水利工程运行管理中的安全隐患排查与预防是一项长期且艰巨的任务,关乎国计民生与生态安全。通过系统分析结构、设备、管理及环境等多维度隐患,并针对性地提出工程加固、智能监测、标准化管理及应急联动等综合措施,可显著提升工程风险抵御能力。未来需持续强化技术创新与管理升级,推动水利工程向智能化、精细化方向转型,构建“预防-监测-处置”全链条安全体系,为经济社会高质量发展提供坚实的水安全保障。

参考文献

- [1]余磊.水利工程运行管理中的安全隐患分析与预防措施分析[J].水上安全,2025(3):37-39.
- [2]周子靖.水利工程运行管理中的安全隐患及预防措施[J].价值工程,2025,44(18):24-26.
- [3]张健.水利工程施工中的质量控制与安全隐患管理[J].水上安全,2023(5):173-175.
- [4]樊志德.新时期水利工程运行管理标准化建设对策研究[J].水上安全,2024,(21):19-21.
- [5]张海亮.水利工程施工中的质量控制与安全隐患管理[J].模型世界,2024(4):153-155.