

水利工程运行管理中的安全隐患及预防措施

王丽君

宁夏惠农渠管理处 宁夏 银川 750001

摘要：水利工程运行管理需平衡多重目标，其安全隐患涉及设施自身、管理机制、自然环境及人员技术等方面。设施长期运行存在结构劣化与设备损伤，管理中信息传递阻滞、资源配置失衡，极端水文事件与地质灾害构成威胁，人员操作偏差和技术局限也加剧风险。预防措施包括构建全生命周期健康诊断体系、跨区域数字孪生平台，建立环境风险情景推演体系及沉浸式智能培训体系等，以提升工程安全性与管理效能。

关键词：水利工程；运行管理；安全隐患；预防措施

引言

水利工程是水资源调控与安全保障的核心设施，其运行管理的安全性关乎社会经济与生态可持续发展。当前，工程面临设施劣化、管理机制不完善、自然环境变化及人员技术不足等多重安全隐患。本文围绕这些隐患，从工程设施检查维护、信息共享协作、自然环境监测应对、人员技术提升等维度，探讨创新预防措施，为构建智慧化、韧性强的水利工程运行管理体系提供思路。

1 水利工程运行管理概述

水利工程运行管理是保障各类水利设施持续发挥功能的系统性工程，涵盖从工程日常监测到突发状况应对的全流程管控，其核心在于通过科学调度与精细维护，实现水资源调控、防洪减灾、灌溉供水等多重目标的动态平衡。现代水利工程运行管理已突破传统经验型模式，转向以数据驱动为核心的智能化管理体系，借助物联网感知设备实时采集水位、流量、结构应力等关键参数，结合水文模型与人工智能算法优化调度方案，使工程在应对极端天气与复杂水情时更具预见性。工程实体的维护保养需兼顾结构安全与生态兼容，在混凝土坝体裂缝修补中采用新型环保灌浆材料，既增强耐久性又减少对水域生态的扰动，对闸门启闭系统进行状态监测与预测性维护，可大幅降低非计划停机风险，延长设备生命周期。水资源调度管理需统筹生产、生活、生态用水需求，通过构建跨区域水网联动机制，实现丰枯互补与余缺调剂，在保障城市供水稳定的同时，预留生态基流维系河道自然形态与水生生物多样性。运行管理的创新体现在对工程全生命周期数据的深度挖掘与价值转化，利用数字孪生技术构建工程虚拟镜像，模拟不同工况下的运行状态，为改扩建决策提供精准依据，通过搭建水利工程智慧管理平台，整合分散的监测数据与业务系统，形成集监测、分析、调度、指挥于一体的闭环管理模式，使管理效率与响应速度得到质的提升。这种全维

度、精细化的管理模式，不仅能最大化发挥水利工程的社会经济效益，更能推动水资源开发利用向绿色可持续方向转型，为应对气候变化与水安全挑战提供坚实支撑。

2 水利工程运行管理中的安全隐患分析

2.1 工程设施自身隐患

水利工程设施在长期运行中，结构材料的劣化会形成潜在安全风险，混凝土坝体在干湿循环与冻融交替作用下，表面碳化深度随运行年限呈非线性增长，内部钢筋锈蚀引发体积膨胀，导致保护层剥落形成连锁破坏，这种劣化过程在水位变动区表现尤为显著，可能使坝体承载能力逐渐衰减。金属结构设备的疲劳损伤具有隐蔽性累积特征，闸门主梁在反复启闭产生的交变应力作用下，焊接接头处易萌生微观裂纹，初期难以通过常规检测发现，当裂纹扩展至临界尺寸时可能引发突发性断裂，泄洪道消力池的混凝土表面在高速水流冲刷与空蚀作用下，会形成蜂窝麻面与深蚀坑，削弱结构抗冲刷能力，若未及时修复可能导致下游河床淘刷加剧，威胁坝基稳定性。输水隧洞的衬砌结构在地质构造运动影响下，可能出现不均匀沉降引发环向裂缝，高压水流通过裂缝渗透会加剧围岩风化，形成管涌通道，对隧洞整体安全构成威胁，泵站机组的轴承密封件在长期高速运转中逐渐磨损，润滑油泄漏不仅降低润滑效能，还可能渗入水体造成局部污染，同时增加设备卡滞风险，这些设施自身的隐患往往呈现多因素耦合特征，某一部位的损伤可能通过结构传力路径引发系统性风险，需要借助无损检测技术进行深度探查才能准确识别^[1]。

2.2 管理机制不完善隐患

管理流程中的信息传递阻滞会导致安全隐患处置滞后，监测数据在多部门间流转时因格式不兼容产生信息孤岛，关键参数的分析结果无法及时反馈至调度环节，使潜在风险在累积中演变为实际危害，设备维护计划与

运行调度存在衔接断层,检修窗口期与灌溉高峰期的冲突可能导致必要的保养工作被迫延后,加速设备老化进程。资源配置失衡会放大管理漏洞,核心枢纽工程的监测设备更新频率与偏远渠系的维护投入不成比例,导致薄弱环节的隐患发现滞后,应急物资储备布局与风险分布不匹配,在突发险情时出现关键器材调度延迟,降低应急处置效率。技术标准与实际工况的适配性不足,沿用的维护规程未充分考虑工程老化后的性能变化,按固定周期开展的检修工作可能遗漏隐蔽性缺陷,不同管理单元的操作规范缺乏统一基准,在联合调度时因执行差异产生协同风险,这种机制层面的缺陷并非孤立存在,而是通过管理链条的传导效应放大单个隐患的影响范围,需要通过流程重构与资源整合构建更具韧性的管理体系。

2.3 自然环境因素隐患

气候变化引发的极端水文事件对水利工程构成复合型挑战,强降雨过程中流域产汇流速度显著加快,水库入库流量可能在短时间内突破设计洪峰,坝体在超高水位作用下承受的水压力急剧增大,同时泄洪闸门的高速水流引发的振动可能与坝体形成共振,加剧结构疲劳损伤。地质灾害的突发性对工程安全构成瞬时威胁,库区周边山体在长期雨水渗透下岩土体抗剪强度降低,可能发生滑坡或崩塌,大量松散物质涌入库区导致库容骤减,同时冲击坝前护坡结构,季节性冻土区的渠道衬砌在冻胀力作用下产生错台与裂缝,融冻期冰水渗透会加剧基土湿陷,形成恶性循环,使输水能力持续下降。水域生态系统的变化也会间接影响工程安全,水生植物在闸门槽内过度繁殖会阻碍启闭操作,其根系深入混凝土缝隙可能加速结构劣化,水体富营养化引发的藻类爆发会堵塞取水口滤网,同时增加水处理难度,这些自然因素引发的隐患具有显著的时空变异性,需要结合长期环境监测数据构建动态风险评估模型,才能提高预警的精准度与前瞻性。

2.4 人员操作与技术隐患

操作人员对复杂工况的判断偏差可能引发连锁反应,在应对突发性水位骤升时,若未能准确预判水流裹挟的漂浮物对闸门的冲击,贸然执行全开操作可能导致门体变形,而过度依赖经验值设定的启闭速率,可能与实时水压力分布形成耦合振动,危及启闭系统安全。监测技术的局限性会掩盖潜在风险,传统人工巡检难以覆盖坝体深部结构与水下部位,导致内部裂缝或管涌通道长期处于隐蔽状态,传感器网络的布设密度不足会造成数据采集盲区,关键参数的缺失使预警模型输出失真,

智能调度算法在训练过程中若未充分纳入极端水情样本,可能在超出常规工况时给出非最优决策,导致工程处于非安全运行区间。技术迭代与设备适配性不足产生新的风险点,新型监测设备与既有数据传输系统的协议冲突会造成数据丢包,预测性维护模型的算法漂移可能误判设备健康状态,使必要的检修时机被错过,这些由人员与技术交互产生的隐患,需要通过人因工程优化与技术体系重构形成互补防御机制,才能从根本上降低风险发生概率^[2]。

3 水利工程运行管理安全隐患预防措施

3.1 强化工程设施检查与维护

(1) 构建全生命周期的结构健康诊断体系,运用无人机搭载红外热成像与三维激光扫描技术,对坝体表面进行全域扫描,结合声波透射法探测内部密实度变化,通过数字建模生成结构劣化热力图谱,精准定位混凝土碳化与钢筋锈蚀的重点区域,针对水位变动区的特殊性,采用水下机器人搭载超声测厚仪开展常态化检测,实时捕捉保护层剥落的动态发展趋势,实现从表面观测到内部损伤的穿透性评估。(2) 推行设备性能衰退的预测性维护模式,在闸门主梁焊接接头处植入光纤光栅传感器,实时监测交变应力下的微应变累积,通过疲劳损伤演化模型计算剩余寿命,对泄洪道消力池采用高分子聚合物材料进行抗冲蚀加固,利用材料的自修复特性应对高速水流冲刷,在输水隧洞衬砌裂缝处应用新型柔性密封技术,通过自适应变形补偿地质沉降引发的结构位移,从被动修复转向主动防控。(3) 建设设施维护的生态兼容性技术体系,在混凝土修补中采用微生物矿化技术,利用巴氏芽孢杆菌诱导碳酸钙沉积实现裂缝自愈,避免化学灌浆材料对水体的二次污染,对泵站机组进行磁流体密封改造,消除润滑油泄漏风险的同时提升机械效率,在金属结构防腐中应用石墨烯复合涂层,通过增强耐候性延长维护周期,实现结构安全与生态保护的协同优化^[3]。

3.2 加强信息共享与协作配合

(1) 搭建跨区域的水利工程数字孪生平台,采用边缘计算技术对分散监测点的数据进行本地化预处理,通过5G切片技术构建专用传输通道,实现水位、流量、结构应力等参数的实时汇聚,运用联邦学习算法在各管理单元数据隐私保护的前提下,构建全局风险评估模型,打破信息孤岛形成的数据壁垒,使监测分析结果能即时转化为调度指令。(2) 构建动态协同的维护调度机制,基于工程运行状态的实时监测与精准评估结果,深入分析设备损耗规律及潜在故障点,运用遗传算法全面优化

设备检修窗口期,科学规划检修顺序与时间。在灌溉高峰期采用模块化检修技术,通过部件快速更换缩短停机时间。建立枢纽工程与渠系网络的联动维护模式,利用数字孪生模拟不同检修方案对整体供水能力的影响,实现局部维护与系统运行的精准适配。(3)创新技术标准的动态适配体系,基于工程老化特征建立性能衰减数据库,运用机器学习算法修正维护规程中的参数阈值,使检修周期与实际劣化速度相匹配,制定跨管理单元的操作规范映射机制,通过数字孪生平台的仿真验证统一协同调度的执行基准,避免因标准差异产生的协同风险,提升整体管理系统的韧性。

3.3 做好自然环境监测与应对准备

(1)构建气候变化自适应监测网络,在流域上游布设毫米波雷达与微波辐射计,实时捕捉强降雨过程中的云系发展与降水强度变化,结合分布式水文模型预测入库流量的非线性增长趋势,在库区周边建立地质灾害监测的光纤传感阵列,通过岩土体变形的微应变监测提前预警滑坡风险,实现极端水文事件与地质灾害的超前感知。(2)开发生态风险的动态响应技术,于渠道衬砌表面巧妙运用温控相变材料,凭借其独特的潜热交换特性,有效缓冲冻胀力对结构的冲击与破坏,保障渠道稳固。在闸门槽区域,精心部署水生植物智能清理机器人,借助先进的图像识别技术,能精准锁定并迅速清除影响闸门启闭的生物淤积。建立水体富营养化的生物调控系统,利用沉水植物群落的代谢作用抑制藻类繁殖,减少对取水口的堵塞风险。(3)建立环境风险的情景推演体系,基于历史数据与气候模型构建多维度风险矩阵,通过数字孪生模拟不同强度极端天气下的工程响应状态,预演泄洪振动与坝体共振的耦合效应,制定差异化的应对预案,在冻土区渠道应用自适应伸缩节技术,通过结构变形补偿融冻循环引发的位移,提升工程对环境变异的适应能力。

3.4 提升人员操作技能与技术水平

(1)构建沉浸式智能培训体系,利用虚拟现实技

术还原极端水情下的操作场景,通过触觉反馈设备模拟闸门启闭时的水压力变化,训练操作人员对复杂工况的预判能力,开发基于增强现实的辅助决策系统,在操作界面实时叠加水流动力学分析结果,提示潜在风险点与最优操作参数,实现经验判断与数据支撑的有机结合。

(2)优化监测技术的立体感知网络,在传统人工巡检基础上,部署爬壁机器人搭载相控阵雷达,对坝体深部结构进行三维成像检测,弥补人工检查的盲区,在传感器布设中采用拓扑优化算法,基于结构风险分布特征动态调整监测点密度,通过数据融合技术处理多源异构信息,提升预警模型的抗干扰能力。(3)推动技术体系的迭代适配机制,建立监测设备与数据系统的接口标准化模块,解决新型传感器与既有平台的协议冲突问题,运用迁移学习算法更新智能调度模型,将极端水情样本快速纳入训练集,开发设备健康度评估的数字孪生引擎,通过虚实交互校验预测性维护算法的准确性,实现技术迭代与工程运行的无缝衔接^[4]。

结语

综上所述,水利工程运行管理的安全保障需突破传统模式,通过全生命周期健康管理实现设施隐患精准防控,依托数字孪生与协同机制打破管理壁垒,结合环境监测与情景推演提升自然风险应对能力,借助智能培训与技术迭代优化人机协同。这种多维度融合的创新路径,不仅能增强工程安全韧性,更能推动水利管理向绿色智能转型,为应对水安全挑战提供可持续的系统方案。

参考文献

- [1]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.
- [2]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.
- [3]夏莉,张桂华.水利工程施工安全隐患分析及预防管理[J].建筑工程技术与设计,2020(26):2190.
- [4]杨振岐.水利工程运行管理中的隐患排查与治理策略[J].中国公共安全,2024(11):70-72.