水利工程设施运行安全维护

阿力木·沙吾提
新疆维吾尔自治区金沟河流域水利管理中心　新疆　塔城地区　832100

摘　要：水利工程设施的安全运行是国家水安全、防洪安全与供水安全的基石。随着大量水利设施进入老化期，加之极端天气频发与运行环境日趋复杂，传统以事后维修和定期检查为主的维护模式已难以满足现代安全管理需求。本文从水利工程设施运行安全维护的现实困境出发，系统分析了设施老化、风险认知碎片化、技术赋能不足及制度执行偏差等核心问题；进而构建了以全生命周期理念为统领、以风险分级管控和预防性维护为双轮驱动的维护理论框架；在此基础上，提出了安全监测智能化、检测评估标准化、数据驱动预警以及维护管理信息化等关键技术路径，并从责任落实、资金保障、人才建设和应急能力等方面完善制度供给，旨在推动水利工程运行安全维护从被动应对向主动预控、从经验管理向科学治理的转型升级。

关键词：水利工程设施；运行安全；维护管理；预防性维护

引言

我国近十万座水库及庞大堤防、水闸泵站构成国家水网核心骨架。随着大量上世纪中后期建成的设施进入老化期，加之气候变化导致极端荷载风险上升，运行安全形势严峻。尽管安全维护对延长工程寿命至关重要，但当前运管单位仍多遵循“坏了再修”的惯性模式，存在决策缺乏科学依据、资源配置不合理及隐患排查治理重发现轻根治等问题。以新疆金沟河红山水库为例，该工程总库容5344万立方米，兼具灌溉、防洪、供水及发电功能，计划2025年9月完工。建成后将控制灌溉近53万亩，并将下游防洪标准由10年一遇提升至30年一遇。然而，类似大型水库在建设期往往缺乏同步谋划的运行安全维护体系，运管单位仍多遵循“坏了再修”的惯性模式，导致维护决策缺乏科学依据、资源配置不合理以及隐患排查治理重发现轻根治等问题。近年来，物联网、大数据、无损检测等技术的发展为维护模式革新提供了技术可能，但技术与管理的融合尚不深入，制度保障亦存在短板。

1 水利工程设施运行安全维护的现状与困境

1.1 设施安全风险的多源性特征

水利工程设施的安全风险源于多种因素的叠加。一是结构老化风险，混凝土碳化、钢筋锈蚀、土石坝坝体变形及金属结构疲劳等随时间累积，导致结构承载力下降，甚至发生突然破坏。二是水力荷载风险，高水位运行、泄洪冲刷、渗流异常等可能引发坝体失稳或管涌，这类风险具有突发性和强破坏性。三是环境与地质风险，库岸滑坡、地震、冻融、生物侵蚀等外部作用持续威胁设施安全。四是设备与机电风险，闸门启闭机、泵站机组、电气控制系统等因长期运行而出现磨损、绝缘老化、操作失灵等问题，直接影响设施的可控性[1]。例如，金沟河红山水库发电厂房内装有3台机组，配套电气管路、排水管路及接地系统，其水轮机、发电机及电气盘柜的安装质量直接关系到并网发电后的安全稳定性，若机电设备维护不当或调试不到位，可能在运行中引发振动超标、绝缘击穿等事故，凸显了多源风险耦合的复杂性。这些风险并非孤立存在，往往相互耦合—— 例如，结构老化加剧渗流，渗流又加速材料劣化，形成恶性循环。

1.2 传统维护模式的主要局限

当前大量水利工程仍采用以定期检查（如汛前、汛后检查）和故障维修为主的维护模式，其局限性日益凸显。首先，定期检查的周期较长，无法及时发现突发性隐患，且检查质量依赖个人经验，缺乏标准化检测手段。其次，故障维修属于事后补救，往往造成功能中断和经济损失，尤其是对于泄洪设施，若在汛期发生故障，后果不堪设想。再次，维护决策缺乏定量依据，维修项目安排常基于主观判断，有限的维护资金难以精准投向风险最高的环节。此外，维护记录和档案管理分散，纸质资料易丢失，多年积累的运行数据和维修历史未能有效用于分析设施劣化规律，形成了“数据丰富但信息贫乏”的尴尬局面。

1.3 维护体系面临的深层矛盾

透过表面现象，安全维护还面临三组结构性矛盾。一是设施老化加速与维护投入滞后的矛盾，大量设施维修养护经费长期不足，欠账严重，部分中小型工程甚至没有专项维护资金，导致“小病拖成大病”。二是技术

手段进步与人员能力不足的矛盾，虽然自动化监测、智能检测设备逐渐普及，但基层运管人员操作和维护能力跟不上，设备闲置或数据误读现象普遍。三是安全要求提升与责任落实软化的矛盾，各级政府对运行安全日益重视，但部分运管单位责任意识淡薄，隐患排查走过场、整改流于形式，制度执行的“最后一公里”梗阻明显。

2 安全维护的理论框架与核心理念

2.1 全生命周期维护理念

水利工程设施的安全维护不应从竣工移交后才开始，而应纳入工程全生命周期管理。在建设期，应充分考虑后期维护的便利性，预留监测通道、设置检修空间、编制详尽的竣工资料。运行期是维护的核心阶段，需根据设施类型、重要程度和安全状况制定差异化的维护计划[2]。在退役或报废阶段，也应进行安全评估和处置方案设计，避免遗留安全隐患。全生命周期理念强调维护工作的连续性、系统性和前瞻性，要求建立贯穿设施一生的技术档案和健康数据库。

2.2 风险分级管控与隐患治理双重预防机制

风险分级管控是主动安全维护的核心方法。运管单位应定期开展危险源辨识和风险评估，按风险大小将设施单元划分为重大风险、较大风险、一般风险和低风险四个等级，分别制定管控措施和巡检频次。隐患治理则针对已经发现的缺陷或异常，实行登记、整改、验收、销号的闭环管理。双重预防机制的核心在于将关口前移——风险管控侧重于事前预防，隐患治理侧重于事中干预，两者相互衔接，形成“防患于未然”和“治患于初起”的协同格局。对于水利设施而言，尤其要注重渗流异常、变形加速等前兆信号的识别，将隐患消除在萌芽状态。

2.3 预防性维护与预测性维护的协同

预防性维护是按照预定计划（按时间或运行次数）进行的维修活动，如每年汛前对闸门启闭机进行保养、每五年对压力钢管进行壁厚检测等，其优点是操作规范、易于管理，但不足在于维修时机不够精准，可能造成“过度维修”或“维修不足”。预测性维护则依托在线监测和状态评估技术，根据设施实际健康状态动态决定维修时机和内容，实现“该修才修、精准维修”。两者应协同运用——对于安全裕度充足、劣化规律稳定的设施，采用预防性维护；对于重要程度高、劣化随机性强的设施，逐步导入预测性维护，在降低安全风险的同时优化全生命周期维护成本。

3 安全维护的关键技术路径

3.1 智能化安全监测体系建设

实时、连续、可靠的安全监测是科学维护的基础。应针对不同设施类型布设相应的监测项目：大坝重点监测变形（水平位移、垂直位移）、渗流（扬压力、绕坝渗流）和应力应变；水闸侧重闸墩沉降、闸门启闭力、止水密封性；堤防关注浸润线、堤身沉降和背水坡渗流；泵站则着重振动、温度、油位等机组运行参数。金沟河红山水库目前已蓄水至40余米深度，大坝主体已封顶，下闸蓄水阶段验收已通过，这一阶段正是安全监测系统发挥关键作用的时期——必须对坝体变形、渗流、坝基扬压力等指标进行高频次监测，以验证设计参数和评估初期运行状态，为后续正常蓄水及长期维护积累基线数据。在数据传输层，采用有线与无线混合组网，确保监测数据实时上传至中心数据库。在数据处理层，利用统计模型（如逐步回归）分离水位、温度等环境效应，提取结构真实的时效变形分量，为安全评估提供可靠依据。监测系统的运维本身也需要列入维护计划，定期标定传感器、校验采集模块、检查通信线路，保证监测数据“测得到、传得回、信得过”。

3.2 无损检测与快速评估技术

对于已运行多年的水利设施，定期开展无损检测是摸清结构安全底数的重要手段。混凝土结构可采用超声波检测、回弹法、冲击回波法和探地雷达，探测内部空洞、裂缝深度和钢筋保护层厚度；钢结构及金属闸门可采用磁粉检测、渗透检测和超声测厚，识别表面裂纹和腐蚀减薄部位；土石坝可采用高密度电法和瑞利波探测，检查坝体密实度和异常疏松带[3]。检测成果应与历史检测数据对比，建立劣化速率曲线，用于预测剩余寿命和确定下次检测时机。对于检测发现的一般性缺陷，应纳入日常维护计划处理；对于影响整体安全的严重缺陷，需组织专项安全鉴定，作为工程加固或降等运行决策的技术支撑。

3.3 数据驱动的异常识别与预警技术

长期运行的监测数据和维护记录蕴含着丰富的安全状态信息。利用时间序列分析和统计过程控制方法，可以识别监测数据中的趋势性变化和突变点，设定合理的阈值和预警区间。机器学习算法（如孤立森林、支持向量数据描述）能够在多维监测参数中自动发现异常模式，比单一阈值判断更为灵敏。例如，当变形、渗流和温度数据组合出现与历史正常模式偏离时，系统可提前发出预警，为人工复核和应急响应争取宝贵时间。预警系统应设定多级响应机制，根据异常严重程度自动推送不同层级的管理人员，并附带初步的原因分析和处置建议，避免信息过载导致“警报疲劳”。

3.4 维护管理信息化平台建设

将安全维护全流程纳入信息化管理平台，是提升维护效率和管理水平的关键举措。平台应具备以下功能模块：设施资产档案管理（包含设计图纸、施工资料、历次维修记录、检测报告等）；巡检任务自动派发与轨迹记录（利用移动终端打卡、拍照、填报隐患）；隐患闭环跟踪（从发现、登记、派单、整改到验收，全程可视可追溯）；维护计划编制与预算管理（根据设施安全等级和检测周期自动生成年度维护建议）；安全状况综合评分与动态展示（利用仪表盘形式呈现各设施健康状态）。平台建设应遵循“统一标准、分级应用”原则，省级平台负责数据汇总和宏观监控，基层运管单位负责操作执行和日常填报，通过数据共享打破信息壁垒，为上级监管和科学决策提供实时数据支撑。

4 安全维护的制度建设与实施保障

4.1 法规标准与责任体系完善

当前《水库大坝安全管理条例》《水闸安全鉴定管理办法》等规章在维护频次、检测方法及评价标准方面仍不够细化。建议针对不同类型和规模的设施，制定差异化维护技术标准和操作指南，明确最低监测项目、检测周期及质量要求。同时，严格落实属地责任、监管责任和主体责任，建立责任清单与履职纪实制度，将安全维护绩效纳入年度考核，对因失职导致事故的依法追责。

4.2 维护资金保障与绩效评价机制

应建立以财政预算为主、多渠道筹措的经费保障机制，将公益性设施维护费列入同级财政预算，并随设施数量和年限动态调整。对有经营收入的设施，从收益中按比例计提维护基金，专款专用[4]。推行维护项目绩效评价，量化评估资金使用效益—— 既要看投入，更要看设施安全状况改善和隐患消除情况，引导资金向高风险、急难险重项目倾斜。

4.3 专业人才队伍与技术能力建设

针对基层运管单位技术人员短缺、年龄老化、知识结构陈旧等问题，应加大专业人才引进力度，通过定向培养和岗位编制倾斜充实基层力量。强化在职培训，围绕监测设备操作、无损检测、信息化平台及应急预案演练等开展系统化培训，考核合格方可上岗。鼓励与高校、科研院所合作，通过技术咨询和联合攻关获取外部智力支持，同时建立技能竞赛和交流平台，推广先进维护经验。

4.4 应急准备与快速响应能力

须针对大坝溃决、水闸卡阻、泵站停机等典型情景编制专项应急预案，明确应急组织、物资储备、通信联络和处置流程。定期组织桌面推演和实战演练，检验物资可用性和人员应变能力，据演练结果修订预案。建立与气象、水文、应急管理等部门的信息联动机制，在极端天气和水情来临前提前部署防范，确保关键时刻能够有效响应。

5 结语

水利工程设施运行安全维护是一项兼具基础性、长期性和专业性的系统工程。本文在系统梳理当前维护实践中的问题与矛盾后，提出应以全生命周期管理为理念引领，以风险分级管控和预防性维护为双轮驱动，充分借助智能化监测、无损检测、数据驱动预警和信息化平台等技术手段，实现维护决策从经验判断向数据支撑转变、维护模式从被动应急向主动预控转变。同时，必须清醒地认识到，技术再先进也无法替代制度的刚性执行和人的责任担当—— 完善法规标准、落实资金保障、建设人才队伍、强化应急能力，是安全维护体系有效运行的四大支柱。唯有技术、制度与人才协同发力，才能真正守住水利工程设施的安全底线，为国家水安全和经济社会可持续发展提供坚实保障。

参考文献

[1]张楚汉,金峰,王进廷.我国大坝安全管理的若干关键问题与对策[J].水利学报,2022,53(5):505-515.

[2]吴中如,顾冲时,苏怀智.大坝安全监控理论与技术进展[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):1-10.

[3]王浩,王建华,秦大庸.智慧水利框架下工程安全运维模式创新[J].水利信息化,2023(4):1-8.

[4]黄强,张洪波,解建仓.水利工程运行管理中的风险分级管控体系构建[J].灾害学,2023,38(1):17-23.