

水利工程运维管理的信息化建设与实践

陈弯弯

中国南水北调集团中线有限公司河南分公司 河南 郑州 450000

摘要：水利工程作为国家基础设施的核心组成部分，其运维管理直接关系到防洪安全、水资源调配、生态保护等国家战略目标的实现。传统运维模式依赖人工巡检与经验决策，存在数据分散、响应滞后、风险预警能力不足等问题。随着物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新一代信息技术的快速发展，水利工程运维管理正加速向智能化、主动化、协同化转型。本文系统阐述了水利工程运维管理信息化建设的核心路径，包括构建“空天地海”一体化监测网络、打造“数据中台+业务中台”、开发“云-边-端”协同应用、强化网络安全防护等；并结合三峡工程、南水北调中线工程等典型案例，深入分析了设备全生命周期管理、大坝安全智能监测、船闸智能调度、发电设备预测性维护等实践成效。

关键词：水利工程；运维管理；信息化建设；数字孪生；物联网

1 引言

水利工程作为国家基础设施的核心组成部分，承担着防洪减灾、水资源调配、农业灌溉、水力发电、生态保护等多重功能，其安全稳定运行直接关系到国家粮食安全、能源安全、生态安全及人民生命财产安全。然而，传统水利工程运维管理长期依赖人工巡检、纸质记录和经验决策，存在数据分散、响应滞后、风险预警能力不足、资源调配低效等痛点。随着物联网、大数据、人工智能、数字孪生、区块链等新一代信息技术的快速发展，水利工程运维管理正经历从“人工化”向“智能化”、从“被动应对”向“主动预防”、从“单点管控”向“全局协同”的深刻转型^[1]。信息化建设不仅提升了运维效率，降低了全生命周期成本，更增强了工程应对极端气候和突发事件的韧性，成为推动水利高质量发展的关键引擎。本文将从建设路径与典型案例两个维度，系统探讨水利工程运维管理信息化建设的实践与创新。

2 水利工程运维管理信息化建设的具体路径

2.1 构建“空天地海”一体化监测网络，实现全要素实时感知

水利工程运维涉及水位、流量、水质、设备状态、结构安全、环境气象等多源异构数据，需建立“端-边-云”协同的数据采集与传输体系。

2.1.1 地面感知层

在工程关键部位（如大坝坝体、闸门、泵站、渠道）部署物联网传感器，包括振动传感器、温度传感器、渗压计、应力计、水位计、流量计等，实现设备运行状态与结构安全的实时监测。例如，三峡工程在大坝内部埋设了1.2万个传感器，每5分钟上传一次数据，覆盖

位移、渗流、应力等30余项参数。

2.1.2 空中监测层

利用无人机搭载高清摄像头、激光雷达（LiDAR）、热成像仪等设备，定期对工件表面进行巡检，识别裂缝、渗漏、变形等缺陷。某水库通过无人机倾斜摄影技术，每季度生成坝体三维模型，与初始设计模型比对，精度误差控制在 $\pm 2\text{cm}$ 以内，成功预警了一处表面剥落隐患。

2.1.3 空间遥感层

结合卫星遥感与北斗定位技术，对库区水位、水质、植被覆盖、地质灾害等进行大范围监测。长江水利委员会通过分析卫星影像，动态跟踪长江经济带11省市的水土流失情况，为生态修复提供数据支撑。

2.1.4 水下探测层

采用声呐、水下机器人（ROV）等技术，对水工建筑物（如泄洪洞、船闸）的水下部分进行检测^[2]。小浪底水利枢纽通过水下机器人定期检查泄洪洞底板磨损情况，避免了人工潜水作业的安全风险。

2.2 打造“数据中台+业务中台”，实现全业务协同与智能决策

数据是信息化运维的核心资产，需构建“采-存-管-用”全流程管理体系。

2.2.1 数据治理与集成

通过ETL工具、API接口或数据总线，将SCADA系统、BIM模型、GIS地图、业务管理系统（如EAM、ERP）等数据源进行汇聚，建立“一数一源”的数据资产库。三峡集团开发的“智慧三峡”平台，整合了20余个专业系统的数据，形成覆盖工程全生命周期的“数字底座”。

2.2.2 智能分析与挖掘

引入大数据分析、机器学习、知识图谱等技术,构建设备故障预测、洪水预报、结构安全评估等模型。例如,某泵站利用LSTM神经网络分析水泵振动频谱,将轴承故障预测准确率提升至92%,非计划停机时间减少65%;长江水利委员会的“长江流域水情预报系统”采用卷积神经网络(CNN)处理云图数据,将洪水预报误差从15%降低至5%以内。

2.2.3 数字孪生与仿真推演

通过构建工程的虚拟镜像,在虚拟空间中模拟不同工况下的运行状态,为实际调度提供“预演”支持。三峡工程建立的数字孪生平台,可实时模拟大坝受力、库区水流、船闸通航等场景,2022年成功预警了左岸非溢流坝段一处微小裂缝,较传统人工巡检提前48天发现隐患。

2.2.4 业务协同与闭环管理

基于工作流引擎,实现巡检、维修、验收、评价等业务流程的数字化^[3]。某省大型水库通过移动APP派发巡检任务,运维人员扫描设备二维码上传数据,系统自动生成工单并跟踪处理进度,巡检效率提升50%,纸质单据使用量减少90%。

2.3 开发“云-边-端”协同的智能应用,实现全场景覆盖

2.3.1 云端平台

部署于私有云或混合云,承载数据存储、分析、决策等核心功能,支持多用户并发访问与跨区域协同。例如,南水北调中线工程的“数字孪生中线”平台,实现了1432公里渠道的统一监控与调度。

2.3.2 边缘计算

在工程现场部署边缘服务器,对实时性要求高的数据(如设备振动、视频流)进行本地处理,降低云端负载。某水电站在机组旁设置边缘节点,实现振动数据的秒级分析,故障响应时间从分钟级缩短至秒级。

2.3.3 移动终端

开发基于Android/iOS的运维APP,集成巡检任务管理、工单处理、知识库查询、视频通话等功能。运维人员通过手持终端扫描设备二维码,即可获取维护手册、历史维修记录,并实时上传巡检数据。

2.4 强化网络安全与数据安全,构建“纵深防御”体系

水利工程信息系统涉及国家安全与民生福祉,需从技术、管理、法律三方面构建安全防护网。

2.4.1 技术防护

部署防火墙、入侵检测系统(IDS)、入侵防御系统(IPS)、Web应用防火墙(WAF)等硬件设备,隔离

内外网数据;采用VPN加密通道与国密算法(如SM2、SM4)保障数据传输安全;实施身份认证、访问控制、数据脱敏等措施,防止敏感信息泄露^[4]。

2.4.2 管理机制

建立网络安全责任制,明确各级人员职责;定期开展等保2.0测评与渗透测试,2023年三峡集团“智慧三峡”平台成功抵御了12万次网络攻击;制定应急预案,每年组织至少2次网络安全演练。

2.4.3 法律合规

遵守《中华人民共和国网络安全法》《中华人民共和国数据安全法》《关键信息基础设施安全保护条例》等法规,对涉及国家秘密、个人隐私的数据进行分类分级保护。

3 实践案例分析:三峡工程信息化运维的突破与创新

3.1 案例背景

三峡工程作为世界最大水利枢纽,拥有32台700MW水轮发电机组、221.5米高的大坝、双线五级船闸等复杂设施,其运维管理面临设备数量庞大(超10万台套)、监测点位密集(超2万个)、数据流量惊人(日处理数据量达TB级)等挑战。2015年起,三峡集团启动“智慧三峡”建设,累计投入超15亿元,构建了覆盖“监测-分析-决策-执行”全链条的信息化运维体系。

3.2 具体实践

3.2.1 设备全生命周期管理:从“被动维修”到“主动预防”

(1) EAM系统建设

开发企业资产管理系统(EAM),集成设备采购、安装、运行、维修、报废全流程数据。每台设备赋予唯一数字标识,记录型号、参数、维护历史、备件库存等信息,实现“一物一码”管理。

(2) 状态检修优化

基于设备运行数据(如振动、温度、电流)与故障模式分析,制定动态维护计划。例如,对水轮发电机组,系统根据负荷率、运行时长等参数,自动调整检修周期,将定期检修转为状态检修,年维护费用从8.2亿元降至5.6亿元,降幅31.7%。

(3) 备件智能管理

通过分析历史维修数据与设备故障模式,优化库存策略。针对高频故障部件(如水轮机导轴承),系统根据磨损规律与供应商交货周期,动态调整安全库存量,备件周转率提升35%,库存资金占用减少2000万元/年。

3.2.2 大坝安全智能监测:从“人工巡检”到“数字孪生”

(1) 传感器网络部署

在大坝内部埋设1.2万个传感器，实时监测位移、渗流、应力、温度等参数。通过5G专网实现数据秒级上传，确保时效性。

(2) 异常检测算法

利用深度学习模型（如自编码器）对监测数据进行异常检测，2022年成功预警了左岸非溢流坝段一处0.3mm的微小裂缝，较传统人工巡检提前48天发现隐患。

(3) 数字孪生应用

构建大坝的三维虚拟模型，结合实时监测数据与有限元分析，模拟不同水位、地震等工况下的结构响应。2023年长江流域洪水期间，数字孪生平台模拟了大坝在超标洪水下的受力情况，为调度决策提供了科学依据，确保了工程安全。

3.2.3 船闸智能调度系统：从“经验排闸”到“AI优化”

(1) 调度算法开发

基于强化学习算法，综合考虑船舶类型、吃水深度、到达时间、货物紧急程度等10余个维度，动态优化过闸序列。系统每5分钟重新计算一次调度方案，适应实时变化。

(2) 区块链技术应用

引入区块链技术记录调度过程，确保数据不可篡改、可追溯。船舶业主可通过APP实时查询排闸进度，提升透明度与公平性。

(3) 实施成效：

单闸次平均过闸时间从120分钟缩短至85分钟，年节约船舶待闸时间超200万小时，相当于减少燃油消耗12万吨、碳排放38万吨；船舶业主满意度提升至95%以上。

3.2.4 发电设备智能运维：从“计划检修”到“预测性维护”

(1) 振动监测系统

在发电机、变压器等关键设备上部署振动传感器，实时采集频谱数据。通过LSTM神经网络模型分析振动特征，提前7~15天预测轴承、齿轮等部件的故障。

(2) 故障案例库建设

积累历史故障数据与维修方案，形成知识图谱。当系统检测到异常时，自动匹配类似案例，为运维人员提供维修建议。

(3) 经济效益提升

2021年，系统成功预警了2号机组推力轴承温度异

常，经检查发现润滑油中金属颗粒超标，及时更换油品后避免了轴承烧毁事故，直接经济效益超500万元。目前，三峡电站设备可用率保持在98.5%以上，处于国际领先水平。

3.3 实施成效

三峡工程借助信息化建设实现了运维管理的质的飞跃。在效率上，运维人员数量大幅精简，从3200人减至2500人，同时人均管理设备量提升了28%，工作效率显著提高。成本方面，年维护费用下降31.7%，备件库存资金占用也减少了25%，有效节约了运营成本。安全保障上，三峡工程连续10年达成“零重大安全事故”的佳绩，大坝安全评定等级始终保持在“正常”这一最优级别，安全性能持续增强。效益层面成果同样突出，船闸通过能力提升了25%，发电设备可用率提高2.3个百分点，年发电量超20亿千瓦时，为能源供应和经济发展做出了重要贡献。

结语

水利工程运维管理的信息化建设，是技术革新与管理变革的深度融合。从“空天地海”一体化监测到数字孪生仿真，从AI调度优化到区块链溯源，每一环节的突破都需以实际需求为导向，以技术创新为驱动。三峡工程等典型案例证明，信息化不仅提升了运维效率，更重构了水利行业的管理范式，推动了从“工程水利”向“智慧水利”的跨越。未来，随着5G、量子计算、元宇宙等前沿技术的进一步应用，水利工程运维将迈向“自感知、自诊断、自决策、自优化”的智慧化新阶段，为保障国家水安全、推动水利高质量发展提供更强支撑。

参考文献

- [1]李腾,卢鑫,阚飞,等.基于ITSS的四川省水利信息系
统运维体系构建研究[J].中国水利,2025,(11):51-58.
- [2]周杰,王凤娥,刘敬毅.基于一体化管控平台的水利
工程智能化运维系统[C]//河海大学,新疆维吾尔自治区水
利学会,新疆农业大学,石河子大学.2024中国水资源高效利
用与节水技术论坛论文集.新疆维吾尔自治区水利水电勘
测设计研究院;张家港水务局;南瑞集团(国网电力科学研究
院)有限公司;2024(03):21-29.
- [3]马宜东,赵雨森.水利行业构建一体化IT运维管理系
统[J].网络安全和信息化,2023,(07):79-80.
- [4]李坤林.水利施工设备运维管理系统.河南省,古阳建
设发展有限公司,2022,(06):50-55.