

智慧水利信息化系统在水利工程中的应用探析

文 / 熊 峰 长江工程监理咨询有限公司 (湖北)

陈 娟 长江工程监理咨询有限公司 (湖北)

摘要: 现代水利工程建设与管理是以物联网、大数据、云技术、人工智能等现代信息技术为核心的智慧水利信息化系统技术体系; 应用该信息化系统实现工程全寿命周期内高水准的智慧化运行管理, 是现代水利工程建设与管理的有效手段。本文依托某中型水库枢纽工程建设, 阐述了智慧水利信息化系统在该中型水库建设过程在水库调度、水库工程安全监控和洪水预报预警中的应用, 为现代水利工程建设与管理的转型提出有效的技术解决方案和管理实践。

关键词: 智慧水利; 信息化系统; 水利工程

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.082

引言

当前, 国家水网建设全面展开和现代化水利建设进程不断推进, 传统的水利工程管理已经不能满足新时期水利高质量发展需求。智慧水利信息化系统建设代表了水利现代化的特征, 使用数字化、网络化、智能化技术手段实现了水利工程由被动管理到主动防范、经验决策到科学调度、从单一功能到综合效能的基本变革。

一、工程概况

某中型枢纽工程地处华北地区某大河主要支流上游, 工程投资 35.8 亿元, 主要作用包括防洪、供水、灌溉、生态综合运用。水库总库容 2.6 亿 m³, 防洪库容 0.8 亿 m³, 兴利库容 1.5 亿 m³, 枢纽工程主要包括混凝土重力坝、溢洪道、输水隧洞、泵站等主要建筑物, 大坝最大坝高

86m, 坝顶长 285m。水库控制流域面积 1850km², 多年平均径流量 4.2 亿 m³。

二、智慧水利信息化系统架构设计

“云—边—端”架构下的智慧水利信息化系统, 形成了由感知层、网络层、平台层和应用层组成的 4 层技术架构, 包括 1560 个水位计、流量计、压力计、位移计、渗压计等在内的各类传感器组成感知层, 达到工程重点部位及主要参量测点覆盖; 光纤骨干网、无线传感网、卫星通信网构成的多网融合通信网层, 解决数据传输的网络性能及可靠性要求; 基于云计算的数据中心、存储 128TB, 服务器 800CPU 核心, 计算性能 10¹²FLOPS, 应用于 10 个核心业务系统的平台层, 包括水库调度、安全监测、防洪预报、设备管理等; 应用层智慧水利系统完成水利工程的全业务链条数字化应用^[1]。

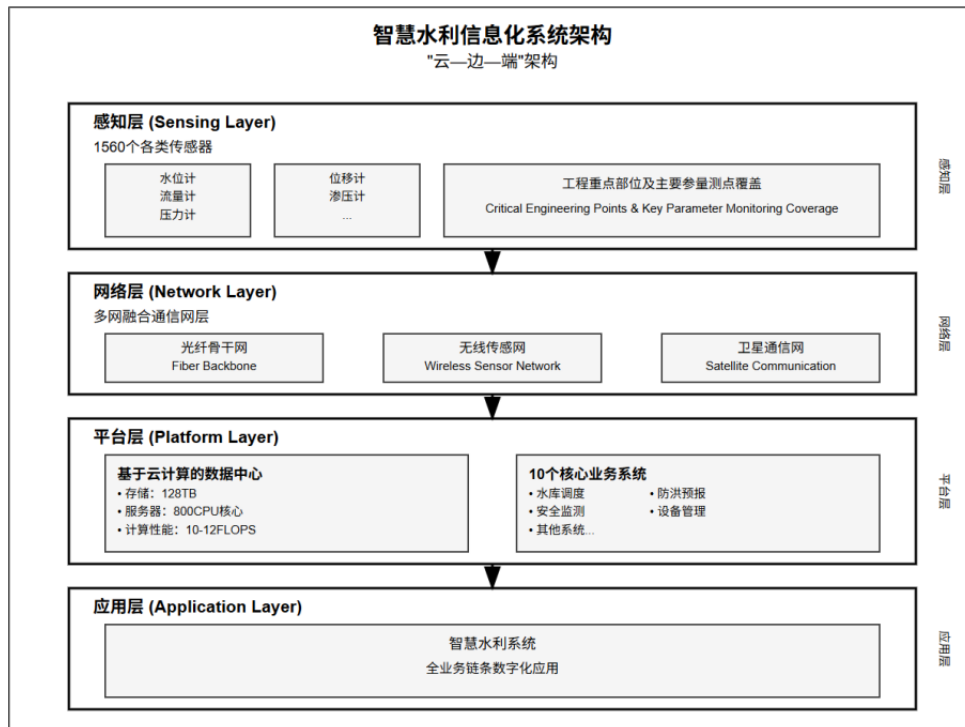


图 1 智慧水利信息化系统架构图

三、智慧水利信息化系统的应用

(一) 数据采集与传输系统

数据采集端采用分布式方式布局, 52套数据采集端位于大坝、溢洪道、输水隧洞重要监测断面, 配置高精度传感器以及智能数据采集装置^[2]。系统根据采集对象的重要性及变化特点, 配置不同的采集时间间隔, 大坝变形监测采集时间为15分钟、渗流监测采集时间为30分钟、水位流量监测采集时间为1分钟。数据采集网络采用环形冗余配置, 主网光缆通信速率为5Gbps、备用无线链路通信速率为50Mbps, 数据采集网络在主通信链路发生故障时能实现持续运行; 数据采集协议采用TCP/IP与Modbus相结合方式, 可兼容不同设备接入及转换协议。

(二) 智能调度决策系统

智慧调度决策系统建立了多目标优化调度模型, 以达到水量调度收益最大、防洪风险最小、生态流量需求满足3个目标最大化为调度原则, 在建立一个约束条件较为全面的数学模型基础上, 产生最优调度决策建议^[3]。

(1) 系统知识库的防洪调度规则35条、供水调度规则28条、生态调度规则15条, 共78条调度规则组成较为完善的决策支持。调度算法选用改进粒子群算法与模糊控制的混合智能调度算法, 通过多维参数优化解决复杂约束条件下的全局最优问题。(2) 调度模型的数学表达式为多目标优化问题, 目标函数包括供水效益最大化函数 $F_1(R)$ 、防洪安全函数 $F_2(H, Q)$ 和生态效益函数 $F_3(E)$ 。约束条件包含水位约束 $H_{min} \leq H(t) \leq H_{max}$ 、流量约束 $Q_{min} \leq Q(t) \leq Q_{max}$ 、库容约束 $V(t) = V(t-1) + I(t) - R(t)$ 等15个主要约束方程。系统接收到入库流量 $Q(t) = 850$ 立方米每秒、当前水位 $H(t) = 182.5$ 米、下游需水量 $D(t) = 120$ 立方米每秒的实时数据时求解多目标优化方程组, 计算得出最优出库流量 $R(t) = 765$ 立方米每秒, 相应的水位变化率为0.08米每小时。(3) 调度辅助决策系统实现水雨情预报、入库预报、耗水预报的模块组合, 利用LSTM网络实现72小时入库预报结果, 预测结果精度在86%。采用滚动优化算法, 每6小时对调度方案进行重新制定, 调度方案根据预报误差及实际水文情势进行优化。当入库预报流量与实际入库流量的偏差大于15%时自动进入应急调度状态, 重新制定调度最优参数。

(三) 安全监测预警系统

安全监测预警平台建立起基于多元信息融合的安全评价模型, 建立起大坝结构安全监测预警系统、渗流安全监测预警系统、水库诱发地震监测预警系统三大监测预警子系统, 实现了对水库枢纽工程安全状况的立体实时监测^[4]。

(1) 坝体关键断面布设垂线坐标仪6台、测缝计18个、测斜仪12台、应变计35个的变形监测子系统建成立体变形监测网络; 建立基于最小二乘拟合方法的大

坝变形与水位、温度、时效等因子的回归分析模型, 变形预测精度可达0.5毫米; 设置坝顶水平位移设计允许值75% (11.25毫米)、90% (13.5毫米) 预警线, 当达到黄色、红色预警等级时分别触发预警信息, 启动相应预警机制。2023年汛期大坝坝顶水平位移达8.6毫米, 垂直位移-2.3毫米, 均在大坝水平位移限值以内。(2) 渗流安全监测子系统在坝基廊道、坝体和坝后布设85个渗压计和12个量水堰, 建立了完整的渗流监测体系。系统采用有限元数值分析方法建立了三维渗流计算模型, 通过对比实测渗压值与理论计算值的偏差程度判断渗流异常。坝基渗压梯度超过0.82倍设计值或坝后渗流量超过正常值30%时, 系统自动发出渗流异常预警。(3) 地震监测系统安装了3台三分量地震仪和2台强震仪, 库区形成了地震监测网。针对库区地震特点, 构建了考虑地震烈度、距震中心距离和震源深度的坝基岩体地震影响评价模型, 监测到 \geq ML2.0级地震时自动预警, 计算得到的坝顶最大地震动加速度和大坝动力反应指标在计算安全范围内, 同时预警系统具备气象监测功能, 安装在水库区域内的8个气象站可实时采集降雨量、风速、温度等数据, 为水库防洪调度提供气象服务, 当降雨量大于等于50mm时发布蓝色预警、当降雨量大于等于100mm时发布黄色预警、当降雨量大于等于150mm时发布红色预警。

(四) 防洪调度优化分析

防洪调度优化分析系统以水文预报、实时调度、风险评估3个模块为基础, 构建了预测、调度、评估在内的一体化防洪调度综合技术, 系统基于流域水文气象观测网、数值天气预报产品、卫星遥感信息等, 建立起分布式水文模型和神经网络洪水预报模型的混合型洪水预报方法^[5]。(1) 水文模块采用新安江模型对径流进行求解, 模型参数为1995—2022年各次洪水中率定, 纳什效率系数为0.87, 确定性系数为0.89。(2) 洪水预报模块建立降雨—径流神经网络模型采用BP神经网络算法, 输入为前期降雨量、土壤含水量、河道基流等降雨入流因素(15个), 隐含层采用sigmoid函数的输出, 输出是24小时后的入库水量预报, 网络结构是15-25-10-1的四层网络。网络检验期内(2018—2023年)的预报合格率1~6h达92%, 6~12h为85%, 12~24h为78%。每小时更新1次预报结果, 用于指导防洪调度。系统运用多目标遗传算法建立防洪调度优化模型, 目标函数考虑了下游防护对象安全程度的最大化、水库蓄水量最大化、泄洪设施运行利用率均衡3个方面。约束条件包括水库水位约束、泄流能力约束、下游河道安全流量约束、闸门启闭约束等12个重要约束条件。种群规模设为100, 交叉概率设为0.8, 变异概率设为0.1, 进化代数设为500代, 并通过多次运行取最优解作为调度方案。

在2023年8月防洪调度实战检验期间, 成功经受了超标准洪水调度考验, 8月15日凌晨出现大范围强降雨,

6小时降雨达95毫米、24小时降雨达136毫米，降雨量大、强度高，并超过了设计洪水位。系统2点收到暴雨预警后及时启动防洪调度预案，预报入库12小时洪峰流量为1850m³/s，峰值时刻为当天上午10点，基于预报结果和调度优化计算结果，确定系统三阶段调度方案。第一阶段(2:00~6:00)水库水位181.2m、开启1孔溢洪道闸门，开度2.5m，泄流量450m³/s、入库760m³/s、蓄水310m³/s；第二阶段(6:00~10:00)，水库水位继续上涨，入库流量增大至1420m³/s，开启第2孔溢洪道闸门，2孔闸门开度均调为3.2m，闸前泄流量增至950m³/s，继续蓄水470m³/s；第三阶段(10:00~16:00)入库洪峰时段，闸前入库流量达1850m³/s，开启第3孔溢洪道闸门，3孔全开，最大泄流量达到2200m³/s，超过洪峰流量350m³/s开始退水。通过调度控制把洪水过程控制在库水位182.8m，较汛限水位上涨1m以下。8m，蓄洪量为1260万m³。出库洪峰流量削减到1250m³/s，削峰率为入库洪峰减小600m³/s。下游河道最高水位降低1.2m，能够保证下游85万人、6.8万hm²农田的防洪安全。风险指标计算模块实时计算调度过程坝上大坝安全风险指标始终在安全范围内0.15以下，下游防洪对象安全指标达到0.92较高水平。

表1 智慧水利信息化系统主要技术参数

| 系统模块 | 技术参数 | 数值 | 单位 |
|--------|--------|------|------|
| 数据采集系统 | 传感器总数 | 1560 | 个 |
| | 采集节点数量 | 52 | 个 |
| | 最高采集频率 | 1 | 分钟 |
| | 数据传输延迟 | <50 | 毫秒 |
| 通信网络系统 | 主干网络带宽 | 5 | Gbps |
| | 备用网络带宽 | 50 | Mbps |
| | 网络可用性 | 99.8 | % |
| 数据中心 | 存储容量 | 128 | TB |
| | 处理器核心数 | 800 | 核 |
| | 内存容量 | 256 | GB |
| 监测精度 | 变形监测精度 | ±1 | 毫米 |
| | 水位监测精度 | ±2 | 厘米 |
| | 流量监测精度 | ±1.5 | % |
| 调度系统 | 预报精度 | 82 | % |
| | 调度响应时间 | 6 | 分钟 |
| | 削峰效果 | 32.4 | % |

(五) 设备运维管理系统

设备运维管理系统构建了全生命周期的设备管理系统，通过对设备使用过程的管理，应用RFID识别、状态监测、故障诊断等技术手段实现设备的运维管理。设备运维管理各类设备1860台套，覆盖各类闸门启闭机、水泵机组、变压器、监测仪器等。通过状态监测子系统，

采用振动、温度、油液等监测参数的连续监测建立设备的健康评价模型。闸门启闭机主变压器运行温度达到70℃时，系统自动触发高温预警；水泵机组运行中的振动烈度达到4.0mm/s时，设备状态监测平台提示设备运行状态。

(六) 水质监测与生态调度

水质监测系统在库区和下游河道布置了16处自动监测站点，监测项目含pH、溶解氧、浊度、氨氮、总磷等14项，数据每小时上传一次，系统会自动识别和分析变化趋势，一旦出现某一监测指标超标地表水III类，系统就自动报警。生态调度模块基于鱼类繁殖、河道生态流量要求等编制生态调度方案，春季(3~5月份)繁殖鱼类，下泄流量不少于8~15m³/s；夏季(6~9月)丰水期，下泄流量不少于18~30m³/s；冬季(12月~次年2月)枯水期，不小于5m³/s。经过科学的生态调度，下游河段鱼类群落多样性指数由调度前的1.8提高到2.4，改善了水生态环境。

四、经济效益与社会效益分析

智慧水利信息系统建设及运行具有明显的经济与社会效益。经济方面，通过最佳调度带来年供水增加量680万m³，按照供水价格2.1元/m³计算年增收1428万元，精确的灌水调度使供水保证率提高了4%，使缺水时造成的农业损失减少。智能运维系统延长了设备使用年限，年节约维修成本95万元。社会方面，通过智能防洪系统有效地保证了下游85万人、6.8万公顷农田免遭洪水侵袭，避免了洪灾经济损失。水质监管、生态调度改善下游45km河段生态环境，提供给沿岸居民良好生活环境。

结语

水利工程中智慧水利信息化系统的应用，无疑是智慧水利现代化发展进程中的重要里程碑，通过信息、智能算法技术等构建智慧水利信息化系统，使水利工程运行管理实现智能化，在水利工程的安全性、调度效率、预报预警等方面发挥出重要作用，为保障国家水安全发挥积极的作用。

参考文献

[1] 龚振. 智慧水利信息化系统在水利工程的应用研究[J]. 水上安全, 2024(23): 85-87.
 [2] 蒋进礼. 水利工程管理中的信息化应用与智能决策支持系统的构建研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2024(10): 0001-0005.
 [3] 李群峰. 信息化系统在水利工程安全管理中的应用探讨[J]. 前卫, 2024(3): 209-211.
 [4] 吴亮. 南大水库智慧水利预测预警信息化系统建设[J]. 云南水力发电, 2024, 40(11): 193-198.
 [5] 朱长富, 甘郝新, 何宝根. 数字孪生水利工程建设动态智能监测系统研发与应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(S01): 41-47+62.