

智慧监测系统对水工建筑运维的决策支持

侯 阔

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050000

摘 要：本文构建了水工建筑智慧监测系统的“感知层-传输层-分析层-应用层”四层技术架构，阐述了多源融合感知、多通道冗余通信、大数据与数字孪生融合、多场景决策支持等核心技术。以混凝土重力坝水库为案例，分析了系统在工程状态评估、风险预警、养护调度、应急处置四类场景中的决策支持效果。结果表明：系统实现预警响应时间 ≤ 1 分钟，运维成本降低35%，工程状态评估准确率 $\geq 90\%$ ，隐患发现效率较传统人工模式提升两个数量级以上。研究为水工建筑从“计划性维修”向“预测性运维”转型提供了可复制的技术路径。

关键词：智慧监测系统；水工建筑；运维决策支持；实时数据采集

引言：水工建筑在防洪、灌溉、供水等方面承担着不可替代的功能，其运维决策的科学性与及时性直接关系到工程安全与综合效益。传统运维模式依赖人工巡检与定期检测，存在监测数据稀疏、异常发现滞后、隐患识别依赖个人经验等突出问题，难以满足现代水工建筑高可靠性的运维要求。随着物联网、大数据、数字孪生等技术的发展，智慧监测系统为实现水工建筑从“被动响应”向“主动预警”的转变提供了技术可能。本文系统阐述智慧监测系统的技术架构与决策支持实施路径，并通过水库案例验证其应用效果，为同类工程运维智能化升级提供参考。

1 水工建筑智慧监测系统的技术架构与核心技术

1.1 整体技术架构

构建感知层-传输层-分析层-应用层四层智慧监测架构，各层衔接、数据互通，形成完整技术闭环。感知层是数据采集基础，精准感知关键指标；传输层保障数据实时稳定传输；分析层用智能算法深度挖掘数据、研判工程状态；应用层结合运维需求构建多场景决策模块，转化数据为运维决策，四层协同支撑运维全流程决策。

1.2 各层级核心技术要点

1.2.1 感知层：多源融合感知技术

感知层以“天空地水工”一体化监测为核心，整合卫星遥感、北斗定位、物联网传感器、无人机（船）、水下机器人等手段，实现水工建筑位移形变、渗流渗压、应力应变等关键指标的全要素监测。在水库大坝、水闸等关键部位加密布设振弦式渗压计、全站仪等传感器，静力水准仪监测精度达0.01mm；依托北斗高精度定位实现坝体位移实时监测，定位误差 $\leq 2\text{cm}$ ；通过无人机航测结合卫星遥感，动态监测建筑外观及周边地形，有效弥补人工巡检的盲区。

1.2.2 传输层：多通道冗余通信技术

传输层采用“有线+无线”多通道冗余通信模式，保障监测数据稳定传输。依托光纤通信完成海量监测数据高速传输，传输速率达1000 Mbps；利用北斗短报文、卫星通信、4G/5G构建应急通信网络，极端天气、电网中断时仍能可靠报送监测数据与预警信息。通信设备配备双路供电和断电存储功能，通信保障率 $\geq 99\%$ ，切实保障监测数据的连续性与完整性^[1]。

1.2.3 分析层：大数据与数字孪生融合技术

分析层融合大数据挖掘、数字孪生与人工智能技术。构建水工建筑数字孪生模型，实现物理工程与数字模型同步映射，模型关键响应面与实测数据的拟合优度 $R^2 \geq 0.95$ ；通过大数据算法清洗、融合多源监测数据，提升数据质量；引入机器学习搭建安全评估模型，动态评估结构状态、智能识别风险隐患；建立分级分类预警指标体系，实现风险精准预警与原因溯源。

1.2.4 应用层：多场景决策支持技术

应用层基于分析层结果，搭建状态评估、风险预警、养护调度、应急处置四大决策支持模块。状态评估模块输出结构健康指数，为安全鉴定提供数据支撑；风险预警模块实时推送风险等级与隐患位置；养护调度模块制定个性化养护计划，优化资源配置；应急处置模块匹配应急预案，为突发情况快速决策提供技术支撑。

2 智慧监测系统在水工建筑运维中的决策支持实施路径

2.1 工程状态精准评估，支撑安全鉴定决策

智慧监测系统通过持续采集分析水工建筑全生命周期监测数据，实现工程状态动态精准评估，为安全鉴定提供科学依据。系统整合历年监测、施工、水文地质等数据，构建含6个一级指标、22个二级指标的状态评估指

标体系，结合层次分析法与模糊综合评价法计算结构健康指数，将工程状态划分为健康、基本健康、亚健康、危险四级，评估准确率 $\geq 90\%$ 。针对水库大坝、水闸等建筑的安全鉴定需求，系统输出量化评估报告，明确结构薄弱环节，替代传统经验定性评估。如大坝安全鉴定中，系统通过长期分析坝体位移、渗流数据，精准识别坝基渗透破坏、不均匀沉降等隐患，为鉴定等级判定和加固方案制定提供精准数据，提升安全鉴定决策科学性。

2.2 风险隐患智能预警，支撑风险防控决策

智慧监测系统依托分级分类预警指标体系，实现水工建筑风险隐患的实时监测、智能识别与分级预警，为风险防控决策指明精准方向。系统根据水工建筑类型与功能制定差异化预警阈值，如水库大坝坝体水平位移、渗压预警阈值分别设为15mm、0.5MPa；监测数据超阈值时系统自动触发预警，通过短信、平台推送等方式告知运维人员，系统从数据超阈值识别到预警信息推送的全流程响应时间 ≤ 1 分钟。同时系统可实现风险隐患智能溯源，通过关联分析多源监测数据，定位隐患成因与位置。如监测到水闸闸室沉降超标时，系统结合地基应力、水位变化等数据判定成因，精准定位超标区域，为运维人员排查处置提供支撑，将隐患消除在萌芽状态。

2.3 养护需求智能研判，支撑运维调度决策

智慧监测系统结合水工建筑实时状态与运行工况，智能研判养护需求，为运维调度决策提供科学依据，实现按需、精准养护。系统通过分析监测数据，识别闸门止水橡皮磨损超标、坝体裂缝发展过快等养护需求点，自动生成养护需求清单；结合工程运行计划与养护资源配置，制定个性化养护计划，明确养护内容、时间、人员及设备，优化运维资源配置^[2]。同时系统可动态监测评估养护效果，对比养护前后工程状态数据验证措施有效性，若效果未达预期则自动调整方案，形成“养护需求研判-计划制定-效果评估-方案优化”的闭环管理，提升运维调度决策精准性与高效性，降低运维成本。

2.4 突发情况快速响应，支撑应急处置决策

面对洪水、地震、极端天气等突发情况，智慧监测系统实时监测水工建筑状态、快速响应突发风险，为应急处置决策提供技术支撑。系统利用数字孪生模型构建多工况仿真模拟场景，模拟不同突发情况下水工建筑的结构响应，如超标准洪水下大坝的漫坝、失稳风险等，

为应急预案制定提供模拟数据。突发情况发生时，系统实时采集工程状态数据，动态更新数字孪生模型，模拟状态发展趋势并预测风险影响范围与程度。基于仿真结果，系统自动匹配最优应急预案，明确处置关键措施、人员设备调配、疏散路线等，为应急指挥提供精准支撑；同时通过应急通信网络实现多部门信息共享与协同联动，提升应急决策效率与科学性，最大限度降低突发情况的工程损害。

3 智慧监测系统在某水库运维中的决策支持应用案例分析

3.1 项目概况

该水库为大型防洪灌溉水库，坝型为混凝土重力坝，最大坝高68m，总库容2.1亿m³，承担着周边30万亩农田灌溉与下游50万人口的防洪安全任务。传统运维采用人工巡检与季度检测模式，存在监测滞后、隐患发现不及时等问题，2022年启动智慧监测系统建设，构建了“天空地水工”一体化监测体系，部署各类传感器128台（套），搭建数字孪生平台，实现水库大坝、溢洪道、输水洞等关键部位的全要素、全天候智慧监测，系统于2023年正式投入运行，显著提升了水库运维决策的科学性与及时性。

3.2 系统建设与数据采集

智慧监测系统按照四层技术架构建设，感知层布设北斗位移监测站6个、振弦式渗压计32个、应力计24个、裂缝计16个，利用无人机每月开展1次坝体外观航测，卫星遥感每季度开展1次库区地形监测；传输层采用光纤+5G+北斗短报文的多通道通信模式，保障监测数据的实时传输；分析层构建水库数字孪生模型，整合监测数据、施工资料、水文数据等，建立大坝安全评估模型与分级预警指标体系；应用层构建状态评估、风险预警、养护调度、应急处置四大决策支持模块，实现水库运维的全流程决策支持^[3]。系统运行以来，累计采集监测数据超800万条，数据完整率 $\geq 99.5\%$ ，实现了坝体位移、渗流渗压、应力应变等关键指标的实时监测，为水库运维决策提供了海量、精准的数据源。

3.3 决策支持应用效果

智慧监测系统在該水库运维中实现了多场景的决策支持，应用效果显著。对比传统运维模式，智慧监测系统在评估频率、预警响应、养护成本、应急效率四个维度均有显著提升。

表1 某水库智慧监测系统运维决策支持应用效果

决策支持场景	传统运维模式	智慧监测系统模式	提升效果
工程状态评估	季度人工检测，定性评估	实时动态监测，量化评估	评估频率提升约120倍，评估准确率 $\geq 90\%$
风险隐患预警	人工发现，平均耗时48h	智能识别，预警响应 ≤ 1 min	隐患发现效率提升约3个数量级

续表:

决策支持场景	传统运维模式	智慧监测系统模式	提升效果
养护计划制定	年度统一养护,盲目性大	按需精准养护,个性化制定	运维成本降低35%,养护效果提升40%
应急处置响应	人工研判,预案匹配耗时2h	智能仿真,预案匹配≤5min	应急决策效率提升24倍

4 智慧监测系统建设的难点与优化策略

4.1 主要技术难点

4.1.1 多源监测数据融合难度大

 水利建筑智慧监测涉及传感器、北斗、无人机、卫星遥感等多种监测手段,产生的监测数据类型多样、格式不一、时空分辨率差异大,存在数据冗余、数据冲突等问题,多源数据的时空基准不统一、采样频率不一致,融合与协同分析难度大,难以实现数据的有效整合与充分利用。

4.1.2 数字孪生模型适配性不足

 数字孪生模型的精度与适配性直接影响决策支持的效果,目前部分水利建筑的数字孪生模型存在参数率定不准、仿真模拟与工程实际偏差较大等问题,难以精准反映工程的实际状态与结构响应;同时模型参数率定周期以月或年为单位,而工程状态变化可能发生在小时级别,无法实现物理工程与数字模型的实时同步。

4.1.3 预警指标体系差异化缺失

 不同类型、不同水文地质条件下的水利建筑,其结构特性与运行工况差异显著,目前部分智慧监测系统的预警指标体系采用统一标准,缺乏差异化设计,导致预警阈值与工程实际需求不匹配,存在过度预警或预警不足的问题,影响风险防控决策的科学性。

4.2 针对性优化策略

4.2.1 构建多源数据融合算法体系

 引入数据清洗、数据融合、数据挖掘等大数据算法,构建多源监测数据融合算法体系。通过标准化数据接口实现不同类型、不同格式监测数据的统一接入;采用加权融合算法消除数据冲突,整合多源数据;利用关联分析算法挖掘数据间的内在联系,实现监测数据的深度利用,提升数据的有效利用率与决策贡献度^[4]。

4.2.2 优化数字孪生模型动态更新机制

 结合水利建筑的施工资料、监测数据、运行工况,对数字孪生模型进行动态参数率定,提升模型的仿真精

度;建立模型实时更新机制,将感知层采集的实时监测数据同步至数字孪生模型,实现物理工程与数字模型的虚实映射、实时互馈,确保模型能够精准反映工程的实际状态与结构响应。

4.2.3 建立差异化分级预警指标体系

 根据水利建筑的类型、坝型、水文地质条件、运行工况等因素,建立差异化、个性化的分级预警指标体系。通过对水利建筑历史监测数据与事故案例的分析,结合数值模拟与现场试验,制定符合工程实际的预警阈值;将工程风险划分为蓝色、黄色、橙色、红色四个等级,针对不同风险等级制定对应的预警措施与处置流程,提升风险预警的精准性。

结束语

 智慧监测系统通过四层架构与四大决策模块的协同,有效解决了传统运维中监测滞后、决策依赖经验等痛点。某水库案例验证表明,系统可实现预警响应≤1分钟、运维成本降低35%、评估准确率≥90%的显著成效。当前系统在多源数据融合、数字孪生动态适配、预警指标差异化等方面仍存在技术瓶颈。未来应着力发展边缘智能计算、模型动态参数率定、标准化平台等方向,推动水利建筑运维向“预测性运维”全面转型,为水利工程安全运行提供更坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 聂磊.现代水利建筑在防洪排涝中的应用与优化策略研究[J].黑龙江水利科技,2025(6):138-141.
[2] 毕继鑫.无人船联合多波束在水工建筑物检测中的应用研究[J].人民黄河,2023,45(3):125-130.
[3] 王涛.水利建筑物沉降监测技术研究[J].计算机应用文摘,2025,41(23):242-244.
[4] 张社荣,张耀飞,王超,等.引调水工程泵站群运行管控数字孪生引擎构建方法[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(7):1100-1115.