智慧监测技术在大坝变形观测中的运用

郭禹彤
江苏南水科技有限公司　江苏　南京　210012

摘　要：传统大坝变形监测存在时效性弱、精度不足、难以全天候监测等弊端，无法适配现代大坝安全运维需求。本文依托大坝变形观测核心理论，阐述GNSS、InSAR、物联网及深度学习等智慧监测技术原理，搭建一体化智慧监测系统，分析其在大坝常态监测、汛期应急监测、变形风险预判中的应用。同时指出技术应用中设备抗干扰差、数据处理繁琐、预警模型适配性低等问题，并提出优化策略，展望全智能化、无人化监测发展趋势。

关键词：智慧监测技术；大坝变形观测；运用

引言：大坝是水利工程核心枢纽构筑物，其变形状态直接关乎水利工程运行安全与区域防洪防汛稳定。长期服役的大坝受水文、地质、荷载及材料老化等因素影响，易产生不可逆变形，引发安全隐患。传统人工监测模式已难以满足大坝高精度、全天候、全时段的动态监测需求。为提升大坝安全管控水平，智慧监测技术逐步替代传统监测手段。本文系统探究智慧监测技术在大坝变形观测中的应用，为水利工程安全运维提质增效。

1 大坝变形观测与智慧监测核心理论及技术体系

1.1 大坝变形观测基础理论

（1）大坝变形核心类型包括沉降、水平位移、倾斜、裂缝变形等。沉降指坝体在竖直方向的位移，水平位移分为顺河向和横河向位移，倾斜反映坝体整体姿态变化，裂缝变形则直接表征坝体局部受力或材料劣化。（2）大坝变形产生机理涵盖荷载、水文、地质、时效等影响因素。水压力、温度荷载及坝体自重是主要荷载源；库水位周期性变化改变坝体渗流场与应力场；地基岩土特性决定坝体长期稳定性；混凝土徐变及材料老化等时效因素导致不可逆变形[1]。（3）大坝变形观测核心指标包括位移量、位移速率、加速度及不均匀变形差等。安全评判标准依据设计允许值、历史变化趋势及规范限值综合确定，通常以累计位移量、日变速率及变形加速度作为预警指标。

1.2 传统大坝变形监测技术及缺陷

（1）传统人工观测采用经纬仪、水准仪及全站仪等设备，通过布设测点网进行周期性测量，水准测量用于获取高程变化，全站仪极坐标法用于平面位移测定。（2）传统监测作业流程包括现场布点、定时观测、人工记录及数据整理，适用于小范围、低频次的定期监测场景，对大坝蓄水初期及常规运行期的变形趋势把控具有一定作用。（3）传统监测模式存在时效性差、精度受限、自动化程度低及无法全天候作业等缺陷，人工观测易受气象环境和人为因素干扰，数据采集间隔较长，难以捕捉突发变形信息。

1.3 智慧监测核心技术原理

（1）GNSS卫星定位监测技术通过多星座多频信号接收，结合差分定位算法实现毫米级三维坐标解算，支持大坝全天候连续自动化变形监测。（2）InSAR遥感监测技术利用雷达干涉相位差异提取地表形变信息，具备大范围、高空间分辨率优势，适配大坝全域及库区变形态势整体分析。（3）物联网传感监测技术集成振弦式应变计、测缝计、渗压计等传感器，依托无线传感网络实现变形数据的实时采集、边缘处理与远程传输。（4）大数据与深度学习智能分析技术通过时序数据挖掘与LSTM等神经网络模型，支撑变形趋势预测、异常模式识别及安全预警决策。

2 智慧监测系统搭建及在大坝变形观测中的具体运用

2.1 智慧监测系统整体架构设计

（1）数据采集层：沿大坝坝轴线及关键监测断面布设振弦式应变计、差阻式测缝计、渗压计及静力水准仪等智能传感器，坝顶与坝肩布设多系统GNSS连续监测站（兼容GPS/BDS/GLONASS/Galileo），并辅以Sentinel-1等InSAR卫星数据定期获取全域形变信息，传感器选型严格考量量程适配、IP68防护等级及长期零点稳定性，形成"点式高精度传感+面域遥感覆盖"的立体采集网络。（2）数据传输层：构建基于5G承载网与物联网关协同的混合传输架构，前端采集单元依托RS485有线总线、LoRa低功耗广域网及光纤通信实现多链路互为热备，监测数据经国密算法加密后实时回传数据中心，断网时自动触发本地存储与断点续传机制，有效保障数据传输的高可用性、低延迟与完整闭环。（3）数据处理与分析层：搭建云边协同分布式计算平台，边缘网关完成数据预处理与

异常初筛，云端部署数据降噪、粗差剔除及缺失值插补等清洗模块，内置时序数据库与变形分析算法库，集成统计回归、时间序列分析及长短期记忆网络等智能运算框架，支持多任务并行处理与模型迭代优化[2]。（4）预警展示层：开发基于WebGIS架构的可视化决策平台，深度融合大坝BIM模型与监测测点空间分布，实现实时数据动态刷新、多维度过程曲线绘制、历史数据多条件检索、分级阈值预警（蓝/黄/橙/红四级响应）及标准化报表自动生成等功能，为运行管理人员提供直观高效的一体化操作终端。

2.2 大坝变形智能监测布设与实施流程

（1）监测点位优化布设遵循代表性、系统性与经济性协调统一的原则，依据重力坝、拱坝、土石坝等不同坝型的结构力学特征，结合坝址地形地质条件与历史变形规律，重点布设于最大坝高断面、坝踵坝趾区域、结构分缝处及地质构造薄弱带，采用有限元数值模拟辅助优化布点方案，通过敏感性分析确定最优测点间距与空间布局，实现"关键部位加密、一般部位优化控制"的科学布局，在保证监测信息完整性的前提下有效控制建设成本[3]。（2）智能监测设备安装执行标准化施工作业流程：GNSS天线采用强制对中装置精确架设并量取天线高至毫米级精度，基座浇筑严格把控平整度与垂直度；各类传感器按设计方位与埋深定位安装，同步完成线缆屏蔽防护与通道测试，设备安装后逐项进行温度补偿校准、零点漂移校准及全量程线性度测试，所有校准数据归档留存，确保初始状态准确可靠、全程可溯。（3）自动化监测作业按预设采样频率（常规时段每小时采集一次）全天候连续运行，汛期或特殊工况自动切换至高频加密模式。系统集成设备运行状态自诊断与异常报警功能，运维人员通过远程管控平台实施周期性设备巡检、采集参数在线调整及固件远程升级，建立完善的运维台账记录设备全生命周期信息，形成"自动采集—远程监控—定期维护"三位一体的常态化运行管控体系。

2.3 智慧监测技术的具体应用场景

（1）针对大坝正常运行期缓慢蠕变及温度周期性变形，GNSS静态差分技术与高精度振弦式传感器协同作业，实现亚毫米级位移量的长期连续追踪，数据积累形成大坝变形过程曲线，精准刻画坝体微小变形演化规律与季节响应特征，为长效安全评估积累可靠的基础数据，支撑设计假设验证与安全裕度分析。（2）汛期高水位运行及极端暴雨天气条件下，系统自动切换至高频加密采集模式（采样率可调至1~5Hz），实时捕捉库水位骤变、泄洪振动及强风荷载等极端工况下坝体动态变形响应，数据延迟控制在秒级以内，异常变形信息优先传输确保应急通道畅通，为防汛应急调度与抢险决策提供高时效的变形态势支撑，有效保障大坝度汛安全[4]。（3）基于多年累积的长时序监测数据，融合时间序列分解、支持向量回归及长短期记忆网络等预测模型，系统开展坝体变形趋势外推与风险预判，通过对比不同模型预测精度优选最佳方案，当监测曲线呈现异常拐点或加速变形迹象时及时触发分级预警，为预防性维护与除险加固争取宝贵时间窗口，实现大坝安全从被动响应向主动防控的转变。

2.4 监测数据处理与精度验证

（1）采用ICEEMDAN（改进的完全自适应噪声集合经验模态分解）方法将原始信号逐层分解为多个本征模态函数分量，结合小波阈值降噪对各模态分量实施软阈值处理，有效滤除环境噪声与仪器随机误差，同时通过相关系数分析识别并剔除虚假模态分量，最大限度保留真实变形特征信息，显著提升后续建模分析的输入数据质量与信噪比。（2）构建基于卡尔曼滤波最优估计的多源数据融合框架，将GNSS空间位移、传感器应变响应及InSAR面域形变场进行时空基准统一与联合解算，建立多层级融合策略实现数据级、特征级与决策级逐层融合，充分利用各类数据源的互补优势，有效弥补单一手段在时间分辨率或空间覆盖上的局限性，显著增强数据完整性与综合解算精度。（3）系统试运行期及定期校核节点，同步实施全站仪极坐标测量、精密水准测量等传统人工观测作为独立比对基准，统计分析智能监测数据与传统手段成果之间的中误差、系统偏差及相关系数，开展多测回重复观测评估监测成果的一致性，严格依照《大坝安全监测系统验收规范》验证智能监测系统的精度等级、长期稳定性与工程应用可靠性，确保智慧监测成果满足大坝安全管理实际需求。

3 智慧监测技术在大坝变形观测中应用问题分析与优化展望

3.1 智慧监测技术应用现存问题

（1）复杂水工环境下监测设备稳定性不足、易受干扰的问题：大坝多处于高湿度、强温差、多雷暴的恶劣自然环境，GNSS信号易受电离层延迟及多路径效应干扰，固定解获取率显著下降；传感器长期处于水下或冻融交替条件，零漂与温漂随时间累积逐渐加大，设备防护等级与实际工况需求间仍存在差距，部分测点数据中断或跳变现象频发。（2）多源监测数据冗余、异常数据甄别难度大的问题：GNSS、InSAR、传感器网络等多系统同步运行产生海量异构数据，各类数据存在时空基准

不统一、采样频率不一致及系统性偏差等先天差异，冗余信息与异常离群值高度混杂，传统统计方法难以有效区分真实物理变形与外界环境扰动导致的数据异常，给后续建模分析带来严峻挑战。（3）智能预警模型适配性不足、误报漏报的现存短板：现有深度学习模型多基于通用框架简单迁移应用，对大坝变形非线性、非平稳及季节周期性等特有规律针对性不强，训练样本中极端工况数据严重匮乏导致模型泛化能力有限，实际运行中频繁出现阈值触发误报警和危险变形未被识别的漏报现象并存，严重影响预警系统的可信度与实用价值。

3.2 智慧监测技术优化改进策略

（1）优化设备布设与防护方案，提升复杂环境监测稳定性：采用IP68最高防护等级设备并加装防雷浪涌保护装置，关键测点布设冗余备份传感器实现互为校验，GNSS引入多频多星座联合解算策略以有效抑制多路径误差，传感器系统定期开展原位校准与温度漂移补偿，最大限度降低环境因素对原始数据质量的干扰。（2）优化数据预处理算法，构建高效的数据筛选与融合体系：建立涵盖精度、完整度、连续性的多源数据质量评价指标体系，基于改进小波变换与孤立森林算法实现异常值自动识别与智能剔除，通过时空插值拟合与多源数据联合平差方法统一时空基准，构建自适应加权融合框架以动态确定各数据源权重，全面提升数据一致性与可靠性[5]。（3）改进深度学习预测模型，提升大坝变形预警精准度：开发融合物理信息神经网络的变形预测模型，将坝体力学本构关系作为物理约束项嵌入损失函数，引入迁移学习策略缓解极端工况样本不足问题，结合贝叶斯推断对预测结果进行不确定性量化，动态调整分级预警阈值以实现误报率与漏报率的协同优化。

3.3 行业应用发展展望

（1）物联网、AI、数字孪生技术融合下的全智能化监测发展趋势：未来将构建"感知—传输—存储—分析—决策"全链条智能化闭环体系，数字孪生体实时映射坝体变形态势并开展虚拟仿真推演，结合强化学习实现自主预警与辅助决策，推动传统被动监控模式向主动智能管控根本性转变。（2）大坝全域、全周期、无人化智慧监测体系的推广应用前景：低轨卫星星座、无人机载SAR与地面传感网协同构建天空地一体化监测体系，实现从施工期、蓄水期到运行期的全生命周期变形追踪覆盖，无人值守自动化监测模式将在全国大型水库群及中小型水利设施中逐步推广普及。（3）智慧监测技术在水利工程安全运维中的规模化应用价值：智慧监测技术将深度融入大坝安全调度、除险加固及应急抢险等核心业务流程，有效降低人工巡检运维成本，显著提升大坝风险早期识别与防控能力，为我国水利工程安全高效运行提供坚实技术底座与决策支撑。

结束语

本文系统性梳理了智慧监测技术在大坝变形观测中的技术体系、应用流程与场景，剖析了当前设备运维、数据处理、智能预警层面的现存问题，并针对性给出优化方案。智慧监测技术有效弥补了传统监测的短板，大幅提升大坝变形监测的精准性与时效性。未来需深化数字孪生、人工智能与监测技术的融合，完善全周期智慧监测体系，助力水利工程安全、智能、高效运维发展。

参考文献

[1]孙政杰.基于Prophet-GMM的大坝监测数据异常检测算法[J].人民黄河,2024,46(03):132-142.

[2]杨光,王琳,李波,等.高拱坝变形性态分析及安全监控研究进展[J].长江科学院院报,2026,43(02):157-165.

[3]欧斌,吴邦彬,袁杰,等.基于LSTM的混凝土坝变形预测模型[J].水利水电科技进展,2022,42(05):82-87.

[4]张龙威.基于BES-BiLSTM的混凝土坝变形预测[J].水电能源科学,2023,41(09):94-97.

[5]苏晓军,许增光,张野,等.基于多维数据转换的混凝土坝异常值智能识别方法[J].人民黄河,2025,47(07):131-136.