水旱灾害防御下基于沉降分析技术的水库大坝监测研究

张小虎　黄智强
子长市水旱灾害防御中心　陕西　延安　717300

摘　要：为应对极端水旱灾害引发的大坝沉降变形风险，筑牢水库安全防控体系，本文依托沉降分析技术，探究水旱工况下大坝沉降扰动机理与变形规律。融合InSAR、GNSS多源监测技术，构建全周期大坝沉降监测体系，搭建组合预测模型与“4+3”多级预警指标体系。结合大型水库工程实例验证，该体系可精准捕捉旱涝变形特征，预警有效率达83%，显著缩短应急响应时间，可为水库水旱灾害防御与大坝安全运维提供技术支撑。

关键词：水旱灾害防御；基于沉降分析技术；水库大坝监测

引言：当前极端气候频发，水旱灾害及旱涝急转现象频发，极易引发水库大坝不均匀沉降、裂隙扩展等病害，严重威胁水利工程运行安全。现有监测体系难以适配极端工况下大坝动态变形监测需求，存在数据精度不足、预警滞后等问题。为破解这一难题，本文聚焦水旱灾害场景，基于沉降分析技术开展大坝监测专项研究，构建科学化、立体化监测预警体系，旨在精准研判大坝变形风险，提升水利工程灾害防控与安全运维能力。

1 水旱灾害下大坝沉降变形机理与监测理论基础

1.1 水库大坝沉降变形基本理论

（1）大坝土体固结沉降源于外荷作用下孔隙水压力消散、有效应力增长引发的体积压缩，主固结后仍持续发生与时间相关的次固结蠕变，后者受土体颗粒滑移、破碎及结构重组控制，构成长期变形的主要分量。（2）正常蓄水运行中，沉降速率呈“快速增大—递减衰减—趋于稳定”演化规律，年沉降量随坝龄增加逐步收敛，空间分布以坝体中部及最大断面处为典型，变形量级与坝高、填筑材料及压实度密切相关。（3）沉降安全判定以总量限值和速率阈值双控为基本准则，同时注重不均匀沉降引起的差异变形及横河向倾斜，通常以典型断面测点序列的累计沉降量不超过坝高1%及年速率持续递减作为稳定判据。

1.2 水旱灾害对大坝沉降的扰动机制

（1）洪涝高水位下，渗透压力陡增改变坝体有效应力场，可能引发管涌或接触冲刷，细颗粒迁移造成局部土体结构弱化，诱发突发性塌陷或加速蠕变；水位骤降时孔隙水压力滞后消散，附加渗流力加剧坝坡不稳定变形。（2）干旱持续作用下，坝面及浅层土体水分蒸发导致基质吸力上升，土体收缩产生张拉裂隙，裂隙网络发展降低整体刚度，同时改变渗流路径，形成局部应力集中区，使沉降由压密型转为张拉—压密复合型[1]。（3）旱涝交替使坝体经历“湿胀—干缩”往复循环，每次循环均积累不可逆塑性变形，交替频率增大时土体刚度衰减加剧，损伤逐步累积，沉降时序呈现迟滞回环特征，长期可导致坝顶纵向裂缝扩展及防渗体系效能衰减。

1.3 沉降分析技术核心原理与适配性

（1）时序InSAR通过多幅SAR影像的干涉相位差提取毫米级地表形变，依赖高相干目标实现面状连续监测；GNSS以载波相位差分技术获得三维绝对坐标，采样率灵活，具备实时动态优势，二者互补构成“面—点”协同监测体系。（2）沉降时序分析采用稳健估计提取趋势项，结合自回归积分滑动平均或卡尔曼滤波进行动态预测，异常识别基于置信区间及3σ准则，同时引入突变点检测算法捕捉灾害前兆的非平稳信号。（3）水旱灾害场景下，InSAR受植被去相干及大气延迟影响显著，适合库周大范围普查；GNSS精度高、不受天气干扰，适用于坝体关键部位连续监控；多源数据融合与云边协同计算是提升灾害响应能力的发展方向。

2 水旱灾害防御下基于沉降分析技术的水库大坝监测体系构建

2.1 大坝监测总体方案设计

（1）监测目标：聚焦水旱灾害全周期内大坝沉降变形，实现实时感知、趋势预判与风险管控，涵盖常态稳定性验证、汛期高水位渗压传导与泄洪冲刷下的突发加速变形捕捉、旱期土体失水收缩与裂隙发育追踪，以及旱涝急转累积损伤监控，为防灾调度提供精准数据支撑。（2）监测区域：覆盖坝体最大断面、坝基覆盖层与基岩接触带、坝肩接合部、防渗墙关键部位及近坝库岸。布点遵循“突出重点、兼顾一般、相互校验”原则，沿坝轴线按0.2L、0.5L、0.8L设主断面，各断面在坝顶、坝中平台及坝脚分层布点，横向按0.3H、0.6H、1.0H高度设置；地质破碎带与历史变形敏感段局部加密

至间距不大于20m，确保异常精准定位。（3）差异化频率：常态下GNSS与静力水准每日1次，人工水准每月校核；汛期（6—9月及水位超汛限）自动采集并实时回传，水位骤升骤降阶段加密至每10分钟1次；旱期（连续无雨超15天或水位低于死水位）调整为每周2次，蒸发持续偏高或裂隙明显发育时加密至每日1次，实现频次与灾害风险动态匹配[2]。

2.2 多源沉降监测数据采集与预处理

（1）自动化监测依托GNSS连续运行参考站、静力水准系统及振弦式沉降计实现全天候自动采集与无线传输，采样率1~20Hz可调；遥感数据选用C/L波段SAR卫星，常规重访周期12~24天，应急时申请升轨与降轨联合观测缩短时间基线；人工观测采用精密水准仪配合钢钢尺沿固定路线逐点测量，每半年与自动化数据联合比测，形成"自动为主、人工校验、遥感覆盖"立体采集体系[3]。（2）数据预处理流程包括：自适应小波阈值去噪滤除高频随机误差与多路径干扰；对通信中断或设备故障导致的缺失段，采用三次样条插值结合水位相关性回归填补，连续缺失超3个窗口时标记无效并启动补测；以人工水准绝对高程为基准，经最小二乘拟合校正自动化设备系统漂移与温度影响系数，确保多源数据时空基准统一。（3）极端工况下采用"物理约束—统计判别—模式识别"三级甄别法：依据变形物理极值剔除越限噪声；基于滑动四分位距与相邻测点空间一致性识别离群点；引入孤立森林算法区分设备故障伪异常与真实灾害响应信号，输出可信度标签供后续分析。

2.3 大坝沉降数据分析模型构建

（1）时序趋势分析模型采用Prophet与长短时记忆网络组合架构，将沉降序列分解为长期趋势项、周期季节项、水旱外部驱动项及残差项，经历史数据训练实现未来15天逐日沉降预测，相对误差控制在±5%以内，同步输出趋势转向预警。（2）旱涝工况耦合模型引入水位变幅、降雨强度、蒸发量、坝体温度等协变量，基于随机森林特征重要性排序构建多元非线性回归方程，量化各因子贡献率，建立旱转涝、涝转旱及急转三类场景响应函数，揭示往复变形中滞后效应与不可逆累积规律。（3）异常分级识别采用加权综合评分法，以沉降速率突变度、累计偏离度、不均匀系数及加速度为指标，经K-means聚类与专家经验联合标定，划分为关注级（单项超1.5倍标准差）、警示级（超2.5倍）和报警级（超4倍或连续三日递增），实现分级量化评估。

2.4 水旱灾害防御监测预警指标体系建立

（1）核心预警指标选取日沉降速率、阶段累计沉降量、差异沉降比及沉降加速度四项基础指标，辅以水位日变幅、浸润线变化量、裂隙宽度增量三项协同指标，构成"4+3"多维体系，权重经层次分析法赋予，综合得分判定预警等级。（2）预警阈值按正常、关注（黄色）、警示（橙色）、报警（红色）四级确定，汛期重点关注速率突增（超历史均值2倍或单日增量 > 3mm）及加速度持续为正，旱期侧重累计沉降超设计预留量60%及差异沉降比 > 0.5‰，阈值经正态分布置信区间法（85%、95%、99%分位点）结合同类工程历史灾害反演综合校准并动态修正[4]。（3）预警响应机制：系统30秒内推送信息至值班员、技术负责人及指挥长；黄色级启动加密观测与现场巡查核实；橙色级增派无人机巡检与钻孔取芯验证，组织专家线上会商；红色级立即启动抢险应急预案，实施泄洪调度、人员转移及物资前置，形成"感知—判别—预警—响应—评估"全链条防控闭环。

3 工程实例分析与应用验证

3.1 工程概况与监测条件

（1）选取某大型水库黏土心墙堆石坝为研究对象，最大坝高105m，坝顶长度520m，总库容4.8亿m^3。坝基覆盖层最大厚度42m，以砂卵砾石为主，下伏白垩系砂岩夹泥岩，地震基本烈度Ⅶ度。坝址属亚热带季风气候，年均降雨量1280mm，汛期降雨集中度达70%以上。（2）区域近20年超警戒洪水发生9次，最大入库洪峰12600m^3/s（超50年一遇）；干旱事件7次，最长连续无雨日62天；旱涝急转事件3次，最短转换周期仅7天，极端气候特征显著。历史险情包括2020年洪水期坝趾局部冲刷塌坑及2013年旱期坝顶纵向裂缝。（3）现有监测设施包括GNSS测点12个、静力水准系统3套、振弦式沉降计16支、人工水准标点28个。数据基础为2016年1月至2025年12月连续观测记录，自动化数据完整率92.3%，人工观测每年6期，Sentinel-1影像68景。

3.2 实例大坝沉降监测数据处理与分析

（1）研究周期内整理自动化记录38640条、人工水准1680组、InSAR形变图68幅。剔除粗差179条（剔除率0.46%），插补缺失段32处，以人工水准为基准校正GNSS系统偏差，校正后多源数据一致性优于±1.2mm。（2）常态工况下坝顶年均沉降量5.6~8.3mm，呈对数衰减，最大累计沉降89mm位于坝体中部，上下游差异沉降比0.32‰。洪涝工况（2020年8月）高水位持续期日沉降率由0.03mm/d陡增至0.27mm/d，总增量4.8mm，退水回弹0.6mm，坝趾局部不均匀沉降达3.2mm。干旱工况（2022年）坝面产生裂隙7条（最大宽度4.2mm），干缩局部沉陷6.3mm集中于坝体上部1/3范围。（3）旱涝交替

过程中坝体呈"湿胀—干缩"往复变形，单次循环塑性累积量0.8~1.5mm，二次循环后沉降速率恢复能力下降约22%，累积损伤效应显著。急转初期（转换后7天内）变形量占周期内总变形65%以上，为最危险时段[5]。

3.3 监测模型与预警体系应用效果验证

（1）时序趋势模型预测平均绝对误差1.7mm，Prophet-LSTM组合架构较单一模型精度提升18%；相关性模型判定水位变幅和降雨强度为主控因子（贡献率合计63%），模型解释度R^2达0.87。（2）异常识别模型检出关注级24次、警示级6次、报警级2次，提前预警有效率达83%（提前48~120小时）。2020年洪水前48小时速率突增预警与实际峰值吻合度92%，漏报率5.6%，误报率7.2%。（3）预警体系实战运行3年，累计触发黄色预警13次、橙色3次、红色1次（2022年旱转涝），信息30秒内推送至指挥中心，平均响应时间缩短4.2小时，未发生因预警延误导致的险情升级。

3.4 监测体系优化与工程防控建议

（1）存在问题：极端高温和暴雨下设备稳定度不足，异常数据人工复核比例仍偏高（约25%）；InSAR时间分辨率难以捕捉小时级快速变形；预警阈值未充分融入气象预报，动态更新机制待完善。（2）优化方案：升级抗恶劣环境GNSS设备与供电系统，增设分布式光纤监测裂隙发育；构建InSAR-GNSS-水准多源融合平台，引入卡尔曼滤波协同解算；基于机器学习实现异常自动分类，目标降低人工复核率至10%以下；接入气象水文预报数据建立阈值动态修正机制。（3）运维防控建议：建立坝体沉降年度体检制度定期标定安全余量；旱期加强坝面巡视与裂隙封闭，汛前完成设备检修与备件储备；构建"监测—机理—研判—防控"一体化数字平台；定期开展应急演练确保响应流程高效运转，全面提升水旱灾害防御能力。

结束语

本文系统剖析水旱灾害下大坝沉降变形机理，搭建多源协同沉降监测体系与分级预警机制，经工程实例验证具备良好的实用性与精准性。研究明确了旱涝交替下大坝累积损伤规律，有效提升极端工况风险预警效能。同时梳理了当前监测体系的短板，提出设备升级、数据融合、动态阈值优化等改进方案。后续可深化气象-变形耦合预测研究，进一步完善智慧水利防控体系。

参考文献

[1]范明杰,李卓.基于时序InSAR的土石坝沉降变形态势聚类分析[J].水利水运工程学报,2025,15(02):88-95.

[2]刘天翼.基于MLR-DE-LSTM的大坝沉降变形组合预测模型[J].中国农村水利水电,2025,32(02):207-212.

[3]郭林啸.基于深度学习的大坝沉降监测数据降噪与分析方法[J].中国农村水利水电,2024,47(10):205-211.

[4]毕建涛.北斗+InSAR技术在大坝沉降变形及水旱灾害监测中的应用[J].卫星应用,2021,9(11):29-33.

[5]李卓.水旱灾害频发环境下土石坝沉降变形响应规律研究[J].水利水电技术,2023,54(07):112-119.