

# 水利工程运行期沉降观测与安全评估

陈炳东

(安徽省六安市淠史杭灌区管理总局史河总干渠管理局, 安徽 六安 237005)

**摘要** 水利工程长期运行受荷载、材料老化、水文地质条件演变等因素影响, 易产生不均匀沉降, 威胁结构安全与功能完整。沉降观测是运行期安全监测的主要手段, 技术体系、数据处理方法以及评价指标的科学性会影响工程风险预警和处置的效果。本文论述了水利工程运行期沉降观测技术体系, 即观测目标、观测方法选型及布点原则; 分析了数据采集、传输、修正及趋势建模等关键技术路径; 构建了以结构安全、功能完整、环境适应性为多维指标的评价体系; 提出了沉降异常分级响应、动态调控、应急加固、长期维护四种处置方案。全文突出技术集成、系统协同, 以期为水利工程全生命周期安全管理提供参考。

**关键词** 水利工程运行期; 沉降观测; 安全评估; 数据处理; 异常处置

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.029

## 0 引言

水利工程是国家基础设施的重要组成部分, 其安全稳定运行关系到防洪、供水等各项功能的实现。工程运行之后, 由于土体固结、基础蠕变等原因, 结构物会存在沉降现象, 在软基等区域不均匀沉降会引发各种问题。因此, 建立沉降观测体系并进行安全评估是水利工程运行管理的重要环节。当前新技术融合应用使沉降监测向智能化发展, 但将海量观测数据转化为安全判断并制定应对策略仍是工程实践待深入研究的课题。

## 1 水利工程运行期沉降观测技术体系

### 1.1 观测目标与核心指标

水利工程运行期沉降观测的主要目的在于动态掌握结构物及其地基变形状态, 为安全评价和决策提供量化依据。观测内容为绝对沉降量, 更关注差异沉降、沉降速率、沉降梯度等指标。差异沉降体现相邻部位或者不同结构单元的相对位移, 是判断结构协调性及裂缝风险的主要参数; 沉降速率体现变形的活跃程度,

短期内突增预示地质条件突变或者结构损伤; 沉降梯度评价局部倾斜程度, 对高耸或者敏感结构尤其重要; 长期沉降趋势经由时间序列分析显示固结完成情况和残余变形潜力。这些指标构成为沉降安全判断的多维坐标系, 根据工程类型、地质条件、设计允许值来设定阈值, 保证观测结果有工程意义和预警价值<sup>[1]</sup>。

### 1.2 观测方法与设备选型

现代水利工程沉降观测形成多层次、多源融合的技术体系, 主要有精密水准测量、静力水准仪、GNSS/GNSS-RTK、光纤光栅传感器、合成孔径雷达干涉(InSAR)和自动化沉降板等(见表1)。精密水准测量是基准控制网和关键断面高精度测量的手段, 其长期稳定性已通过验证; 静力水准仪利用连通液原理实现毫米级甚至亚毫米级连续监测, 适合于廊道等受限空间; GNSS技术具有全天候、广覆盖的优势, 可以对线性工程全域位移进行监测, 结合北斗三号可以实现厘米级实时定位; 光纤光栅传感器嵌入结构内部, 可以同时获得应变和温度信息, 实现沉降和应力耦合分析; InSAR利

表1 水利工程常用沉降观测方法性能对比

观测方法	典型精度	适用场景	主要局限
精密水准测量	$\pm 0.3 \text{ mm/km}$	基准网、关键断面	人工操作、效率低、受天气影响
静力水准仪	$\pm 0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$	廊道、厂房、隧道	需液路连通、维护复杂
GNSS/GNSS-RTK	$\pm 5 \sim 10 \text{ mm}$ (平面) $\pm 10 \sim 20 \text{ mm}$ (高程)	大坝、堤防、边坡	高程精度较低、需视空条件
光纤光栅传感器	$\pm 1 \mu \varepsilon$ (应变) 对应沉降 $\approx 0.1 \text{ mm}$	结构内部、嵌入式监测	安装复杂、成本高
InSAR	$\pm 2 \sim 5 \text{ mm/年}$	大范围地表形变	时间分辨率低、受植被/湿度影响

作者简介: 陈炳东(1978-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

用卫星遥感数据反演地表形变场,适用于大范围、无人区或者难布设地面设备区域。设备选型要兼顾精度要求、环境适应性、维护成本和数据融合能力,优先选用具有自动采集、远程传输和自诊断功能的智能传感器,建立空、天、地一体化监测网络<sup>[2]</sup>。

### 1.3 观测点布设基本原则

观测点科学布设是保证沉降数据有代表性、有效性的前提。布设要遵循重点突出、系统覆盖、动态调整这三个准则。重点突出是指在坝踵、坝趾、闸墩基础、穿堤建筑物接口、软硬土层交界处等结构关键部位加密布点,捕捉高风险区域变形特征;系统覆盖是指沿工程轴线、横断面和典型地质单元形成网格化监测网络,保证空间连续性、可比性;动态调整是根据初期观测结果和工程运行状态,对沉降异常区或者新增隐患点进行补充布设。观测点要具有良好的稳定性、可复测性,不能设置在容易受到冲刷、冻胀或者人为干扰的地方。大型水利工程应设置基准点、工作基点和观测点三级控制体系,基准点应设在稳定岩基或深层不动体上,工作基点用于日常联测,观测点直接反映结构变形。合理的布点方案可以提高监测效率,也可以给后续的数据插值、模型反演、风险分区提供空间支撑。

## 2 沉降观测数据管理与分析方法

### 2.1 数据采集与传输规范

沉降观测数据质量的好坏首先取决于采集和传输过程是否标准化、可靠。现代自动化监测系统一般采用传感器、采集器、通信模块、数据中心四个层次的结构。传感器按照预设频率(1次/小时、1次/天)输出原始信号,采集器进行模数转换、时间戳标记和初步滤波,通信模块通过4G/5G、LoRa、NB-IoT或者光纤网络把数据实时上传到云平台,数据中心对数据进行存储、校验和分发。为了保证数据的一致性,需要统一时间基准(一般采用UTC或者北斗授时)、坐标系(一般采用CGCS2000)、单位制。还需建立数据完整性检查机制,对于缺失、跳变或者超限值的进行自动报警,并支持断点续传以及冗余备份。人工观测数据要严格按外业记录规范执行,用电子手簿录入,防止转录误差。所有数据均应附有元信息,即设备ID、观测时间、环境温湿度、操作人员等,以便日后溯源以及质量评定<sup>[3]</sup>。

### 2.2 数据处理与修正技术

原始观测数据会受到系统误差和随机噪声的干扰,只有经过严格处理后才能用作分析。主要修正内容有

仪器零漂校正、温度漂移补偿、大气折射改正(GNSS高程)、潮汐负荷影响剔除(近海工程)、多路径效应抑制。对于静力水准系统还需做液体密度变化修正和管路气泡检测;InSAR数据还需做大气相位滤波和地形相位去除。数据清洗阶段使用滑动平均、小波去噪、卡尔曼滤波等算法可以抑制高频噪声,保留真实的变形信号。另外不同来源的数据需要时空配准、坐标转换,例如把GNSS三维位移投影到垂直方向,或者把光纤应变反演成等效沉降量。高质量的数据处理是趋势分析的前提,也是多源数据融合的基础,直接影响后面安全评估的准确性。

### 2.3 沉降趋势分析模型

沉降趋势分析是通过时序数据提取变形规律,预测未来状态,识别异常模式。常用的模型有时间序列分析(ARIMA、SARIMA)、机器学习方法(LSTM、GRU神经网络)、物理机制模型(Terzaghi固结理论、Biot多孔介质模型)。时间序列模型适合于平稳或者季节性沉降过程,可以拟合历史趋势并做短期预测;深度学习模型能有效地捕捉非线性、非平稳变形特征,在存在突变或者加速阶段时表现较好;物理模型虽然需要较多的参数,但是可以揭示沉降机理,适合于机理明确的土石坝或者软基工程。近些年来,融合模型(物理信息神经网络PINN)成为研究热点,把物理约束嵌入到神经网络当中,既能做到数据驱动,又能保持机理可解释性。

## 3 水利工程安全评估指标体系

### 3.1 结构安全性评估标准

结构安全性评价主要是沉降对工程承载能力、稳定性的直接影响。核心判据有沉降量是否超过设计允许值(《水工建筑物抗震设计标准》(GB 51247-2018)中对坝顶沉降的限值)、差异沉降是否造成结构开裂或者接缝失效、沉降速率是否呈加速趋势( $d^2s/dt^2 > 0$ )。对混凝土结构,还需评价沉降造成的附加应力是否大于材料的抗拉强度;对土石坝,还需结合沉降和渗流数据来判断是否引起内部侵蚀或者渗透破坏。评价标准应分等级来设定,正常态沉降稳定、速率小于0.1 mm/月,预警态沉降速率突变或接近阈值,危险态沉降超限或伴有裂缝、渗漏。除此之外,还需要使用可靠性指标(失效概率)或者安全系数折减法,把沉降效应加到整体稳定分析框架里去,从“是否超限”转变成“风险有多大”<sup>[4]</sup>。

### 3.2 功能完整性评估要点

功能完整性评价主要看沉降对工程运行效能的影响。水闸由于不均匀沉降造成闸门卡阻或者止水失效,

泵站基础倾斜造成机组振动超标,输水渠道沉降造成坡降改变或者接口错位,堤防沉降降低防洪高程。评价要联系运行参数(启闭力、振动频谱、流量损失)和沉降数据来加以联系。关键之处在于创建起“沉降—功能退化”的对应关系,比如用有限元模拟算出各种沉降状况下闸室变形和止水压缩量,或者用实测数据来拟合沉降和渗漏量的经验公式。评价结果要变成可操作的运维建议,也在于改变闸门启闭程序、加强止水检修或者改善调度方案避开高风险工况。

### 3.3 环境影响评估维度

沉降不但影响工程本身,还会对周边环境造成连锁反应。评估维度包括邻近建筑物(居民房、桥梁)基础扰动、地下管线(供水、燃气)拉伸或剪切风险、地表水系(河道、湖泊)连通性改变、生态湿地水文格局干扰。尤其在城市水利工程或者生态敏感区,需要用影响半径法或者数值模拟(FLAC3D、PLAXIS)来预测沉降扩散范围和强度。环境影响评价要融入工程的全过程管理当中,它是沉降控制目标确定的重要参照。穿越生态保护区的引水渠工程,即使结构沉降未超限,预测会致使湿地干涸的,也必须采取地基加固或者补偿性补水的措施。

## 4 水利工程运行期沉降异常应对与处置策略

### 4.1 分级响应机制

针对沉降异常要创建起“监测—预警—响应”三级联动机制。一级响应为正常波动,仅做数据复核和趋势跟踪;二级响应是沉降速率或者差异沉降接近预警值的时触发,进行专项巡查、加密观测、初步分析原因;三级响应是在超限或者伴随结构损伤时启动的,立即组织专家会诊、限制运行工况(降低库水位、暂停闸门操作),启动应急预案。响应级别要和工程的重要程度、失事后果和社会影响相适应,保证资源的精准投放<sup>[5]</sup>。该机制要嵌入智慧水利平台当中,实现自动识别并推送流程,从而缩减决策链条。

### 4.2 动态调控措施

动态调控在于通过运行参数的调整来减缓沉降的发展。例如在土石坝运行中控制库水位升降速率,防止水位突然下降造成上游坝坡失稳或者下游渗压突增,在软基堤防中采用分期加载、间歇蓄水的方式给地基充分的固结时间,在泵站群调度中均衡各机组的运行时长,减少局部基础反复荷载。此类措施成本低、见效快,但是需要根据沉降—荷载响应模型进行仿真优化,防止调控不当引起新的问题。动态调控要同时监测数据闭环联动,创建起“感知—分析—决策—执行—反馈”的智能调控回路。

### 4.3 应急加固技术

当沉降已经影响到结构安全的时,就要采取快速加固。常用的有微型桩或注浆桩托换基础提高承载力、高压旋喷桩或深层搅拌桩形成止水帷幕控制渗流侵蚀、碳纤维布或钢板粘贴修复裂缝恢复结构整体性、土工格栅加筋或反压平台稳定边坡。应急加固要快、准、稳三个字,快指施工周期短,预制微型桩可在 72 小时内完成,准指针对成因精准施策,渗流导致的管涌要优先封堵而不是单纯压重,稳指加固后持续监测验证效果。技术选型要考虑到现场情况、材料是否可以获取、后期维护是否方便。

### 4.4 长期维护与适应性管理

沉降治理不是一劳永逸的,应该纳入长期的维护体系。一方面定期更新沉降观测网,淘汰老化的仪器设备,补充新型传感器;另一方面根据多年来的观测数据修订安全阈值和评估模型,使标准不断动态发展。更重要的是推行适应性管理理念,即承认不确定性,用监测、学习、调整的循环来不断改善应对能力。建立沉降数字孪生模型,模拟不同气候情景(极端降雨、干旱)下长期变形,提前做好防护措施;设立沉降风险管理基金,保证应急资源储备。长期维护不但是技术行为,更是制度安排,要明确责任主体、资金渠道和考核机制,保证沉降防控的可持续。

## 5 结束语

水利工程运行期沉降观测及安全评价属于系统且技术密集型工作,涉及多学科交叉和多技术融合。随着智能传感等先进技术的发展,沉降监测正处在高精度、强智能、广覆盖的新阶段。但是技术进步要同管理机制、标准体系、工程实践深度融合,才能转化为风险防控能力。未来要推动观测数据标准化、评估模型通用化、处置策略智能化,创建现代化沉降安全管理体系,保证水利工程长久安全运行。

### 参考文献:

- [1] 简学兴. 水利工程中软土地基处理技术与要点管理[J]. 城市建设理论研究(电子版),2025(32):190-192.
- [2] 王常生. 水利工程软基处理问题研究[J]. 城市建设理论研究(电子版),2024(22):199-201.
- [3] 康健. 水利工程运行管理强化提升问题研究及对策建议[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(S1):346-349.
- [4] 陈祥梅,王萍. 水利工程运行与管理中的安全风险评估与控制[J]. 水上安全,2023(14):172-174.
- [5] 韩国源. 浅谈安全管理在水利工程运行过程中的重要性[J]. 水上安全,2023(09):130-132.