

水库坝体竖向沉降与水平位移联合监测方案优化探究

张治理

新疆水工技术服务有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：水库坝体的稳定性是保障工程安全运行的核心，竖向沉降和水平位移是反映坝体变形状态的两类关键监测指标。传统监测方案往往将两者分开实施，存在测点布置不协调、数据关联性弱、监测频次不匹配等问题，难以全面捕捉坝体的三维变形特征。本文从坝体变形监测的技术需求出发，系统分析了竖向沉降与水平位移的耦合关系及联合监测的必要性，探讨了监测断面与测点布置的协同优化原则、监测方法与仪器的比选策略、数据采集与处理的集成方案以及监测周期的合理确定方法，构建了基于空间关联和时间同步的联合监测技术体系，为提升水库坝体变形监测的科学性和有效性提供理论指导。

【关键词】：水库坝体；竖向沉降；水平位移；联合监测；方案优化

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.070

1 引言

水库大坝在长期运行过程中，由于自重、水压力、温度变化、地基变形等方面的影响，坝体结构会受到一定程度的变形。竖向沉降主要是反映坝体在垂直方向上压缩、地基固结变形，水平位移则是反映坝体在上下游方向、坝轴线方向的偏移^[1]。这两类变形互相联系、互相表征，是判定坝体工作状态及安全性的主要根据。监测方案缺少健全之处，不能发现异常变形，贻误了预警的时间节点，造成溃坝等严重危机^[2]。

长期以来，许多水库大坝的变形监测是竖向沉降和水平位移分项实施、独立分析的。沉降监测一般用水准测量法，水平位移监测用视准线法或极坐标法。两类监测的测点位置、观测频次、数据处理方法没有统一协调，造成监测数据之间时空联系不能形成，不能正确再现坝体三维变形场^[3]。由于自动化监测技术以及信息集成技术的不断发展，联合监测也随之出现。怎样改进监测方案，达成竖向沉降和水平位移的高效、协同、精准监测，成了当下大坝安全监测领域要解决的关键问题^[4]。

2 坝体竖向沉降与水平位移的变形机理及监测需求

2.1 竖向沉降的产生机理与监测要求

坝体竖向沉降主要是由于坝身自重压缩、地基土体固结和坝体材料的徐变所引起的。土石坝坝体填筑材料在荷载作用下会产生压缩变形，沉降量随着填筑高度的增加而增大，在蓄水后还会受到水荷载的影响产生附加沉降。混凝土坝的坝体混凝土硬化收缩、温度应力和地基不均匀沉降等都是竖向变形的主要原因。坝体各个部位的沉降量不一样，一般以坝轴线中点、河床最深处和两岸坝肩附近的沉降量最大^[5]。

竖向沉降监测的主要目的就是掌握坝体垂直变形

规律，评价地基承载力是否符合要求，判断坝体有无不均匀沉降隐患。监测要求为测点要覆盖坝体各个特征断面，最大坝高处、地形变化处、地质条件复杂处都要有测点；监测精度要达到亚毫米级，满足长期变形趋势分析的要求；监测频次要根据坝体变形速率和水库运行阶段动态调整，在蓄水初期、汛期、地震后要加密观测。

2.2 水平位移的产生机理与监测要求

坝体水平位移分为上下游方向的横向位移和沿坝轴线方向的纵向位移。上游水压力是引起坝体向下游位移的主要荷载，库水位越高，推力越大，位移量也越大。温度变化会对混凝土坝造成较大影响，低温时坝体收缩会向上游移动，高温时坝体膨胀会向下游移动。坝体内渗流压力、扬压力都会造成水平变形。另外两岸坝肩岩体蠕变也会造成坝体出现纵向位移。

水平位移监测的主要目的就是观察坝体在水平面内的移动情况以及量值变化，进而判定坝体抗滑稳定性及结构整体状况。监测要求为测点设在坝顶、坝体不同高程的廊道内及两岸坝肩，监测精度为毫米级，监测频率同沉降监测相协调，以便做关联分析。传统的方案中水平位移监测大多用人工观测的方式进行，效率低、实时性差，不能满足自动化监测的要求。2.3 联合监测的必要性

联合监测的必要性表现在以下几方面。第一，提高监测效率。沉降、位移监测点的布置要统筹规划，共用控制网、工作基点，可以减少重复设站、观测工作量。第二，加强数据相关性。同步采集沉降、位移数据，有利于建立变形之间数学关系模型，找出异常变形的原因。第三，三维变形可视化。联合监测数据可以形成坝体三维变形场，清楚地显示出坝体的变形

形态,给安全评价赋予更多方面的信息。第四,有利于自动化集成。现代测量机器人、GNSS、光纤传感等可以实现沉降与位移的同步自动监测,减少人工干预,提高数据的时效性。

3 联合监测方案优化设计

3.1 监测断面与测点布设的协同优化

联合监测方案的第一个任务就是实现测点布设的协同化。根据坝体结构特点、地质情况以及变形预测分布规律来统一布置沉降、位移观测点。基本断面一般选择坝体最大断面、地质条件变化断面和两岸坝肩断面,每个断面上从坝顶到坝脚沿高度方向布置若干测点。测点要具有沉降和位移监测功能,在同一个测点上设置可以同时测量高程和平面坐标观测标志。对重要的断面可增设加密测点来提高监测的精度。

坝顶测点应沿坝轴线等间距布置,间距按坝长而定,一般控制在一定范围内。对于拱坝,还要在拱圈方向上加密测点来监测拱向变形。坝体内部(有廊道)应在廊道顶拱、底板上布置测点,观测内部变形。两岸坝肩设表面位移测点、深部位移测点,观测坝肩岩体稳定情况。所有的测点要编号统一,建立测点信息库,测点信息包括测点坐标、高程、所在断面、监测项目等属性。

3.2 监测方法与仪器的优化选择

联合监测方案应该使用精度相匹配、数据可以兼容的监测方法和仪器。对坝顶、坝体表面变形进行监测时,选用测量机器人(自动全站仪)+固定棱镜的自动化监测系统较为合适。测量机器人可以自动照准各个测点上的棱镜,同时得到三维坐标以及沉降、位移等信息。该系统精度高、自动化程度高、可以高频次观测。对精度要求高的沉降监测,可以采用静力水准系统,静力水准系统利用连通管测量各个测点之间的高差,精度可以达到亚毫米级,特别适合于坝顶、廊道内沉降的监测。

对坝体内部变形进行监测时,可以使用活动式或者固定式的测斜仪,对不同深度的水平位移进行监测;沉降则可以用电磁式沉降仪或者光纤光栅沉降传感器进行监测。GNSS技术适合于坝体表面大范围位移监测,尤其是高坝、长坝,可以连续给出毫米级三维坐标,不需要通视,但是受卫星信号遮挡影响,在峡谷地区使用受到限制。多点位移计可以测量坝体和基岩接触面的相对位移。根据坝型、坝高、地质条件和监测精度要求,选择合适的仪器,保证不同类型的仪器数据可以集成到同一个平台上。

3.3 数据采集与处理的集成方案

数据采集要达到沉降和位移同步的目的。对自动化监测系统可以设置统一的数据采集频率,例如每小时采集一次或者根据事件触发(库水位变化、地震)自动增加采集频次。数据采集完毕之后要立刻传送到数据中心,并且执行联合平差。联合平差可以消除仪器系统误差、大气折光影响等,提高数据精度。建立变形数据库,保存各个测点的沉降量、位移量以及库水位、温度、时间等环境参数。

数据处理要包含数据预处理、变形分析、模型创建和预警判定这些部分。预处理模块用来剔除粗差、填补缺失数据、平滑滤波。变形分析模块可以计算沉降速率、位移速率、变形加速度等。模型建立模块用回归分析、时间序列分析或者神经网络等方法来建立变形量和影响因素之间统计模型或者物理模型。预警判断模块按照设定的阈值以及变形趋势来发出预警信息。所有的数据以及分析结果都要用可视化平台来呈现,产生变形曲线图、三维变形云图等。

3.4 监测周期与频次的动态优化

联合监测方案要创建动态监测周期体系,依照坝体变形状况及外部环境改变来自行调节监测频率。正常运行期可以设置固定的监测周期,每天一次或者每周一次都可以。当监测数据表明变形速率超过正常值,或者库水位快速变化、发生地震、极端降雨等事件的时候,系统就要自动加密监测,变为每小时一次或者连续监测。当变形恢复稳定之后,恢复原来的频率。

动态优化的实现要依靠建立变形速率预警阈值和事件触发规则。阈值可依据历史数据统计来确定,比如日变化量大于某个限值或者周变化量持续增大。事件触发规则要确定各种事件的判定准则以及对应的加密监测措施。另外,在汛期、蓄水初期等特殊时期可以提高基准频次。监测频次的动态调整要记入台账,供以后剖析异常变形的缘由时使用。

3.5 多源数据融合与三维可视化

联合监测最终目的就是建立坝体三维变形场。将沉降监测数据(Z方向)和水平位移监测数据(X、Y方向)结合起来,就可以得到每一个测点的三维位移矢量。利用克里金插值或者样条插值等插值算法可以得到整个坝体的位移场云图,清楚地反映出变形的分布情况。将不同时间的变形场叠加起来,就可以得到变形发展的过程。三维可视化平台能够叠加库水位、温度等环境因素的动态曲线,分析变形的动力机理。

多源数据融合要解决坐标系统一、时间同步、精

度匹配等各方面问题。应该建立统一的基准控制网，所有的监测数据都归算到同一个坐标系中。时间同步采用GPS授时或者网络时间协议来保证各个仪器所采集到的数据具有同样的时间标记。对精度差别大的数据使用加权融合的方法，高精度数据的权重要大一些。融合之后的数据可以用来建立坝体变形预测模型，给安全评价和决策支持提供依据。

4 联合监测方案的实施与质量控制

为了保证联合监测方案的顺利执行，必须有相应的技术规程以及管理制度。技术规程要规定监测仪器的安装、观测办法、数据采集频次、数据处理程序、预警阈值设定等具体要求。仪器安装要按设计位置进行，保证固定牢固、防潮防雷。首次观测要连续多次测量取平均值作为初始值。日常维护包括定期检查仪器状态、清理测点周围遮挡物、校准仪器等，具体如下表1所示。

表1 竖向沉降与水平位移联合监测方案优化要素对比

优化要素	传统分项监测方案	联合监测优化方案	预期效果
测点布置	沉降与位移测点分离设置，空间位置不重合	同一测点同步获取沉降与位移，断面统一、间距一致	提升数据时空关联性，精简测点数量
监测方法	采用水准测量与视准线法，依赖人工操作	集成测量机器人、静力水准仪及GNSS，实现自动化作业	提升观测精度与效率，支持高频次连续监测
数据采集	沉降与位移分时段采集，采样频率不匹配	采用同步触发机制，统一设定频率或按事件实时采集	增强数据时序一致性，支撑多源联合分析
数据处理	沉降与位移数据分别平差，未建立物理关联	实施联合平差，融合多源数据构建三维变形模型	精准复现坝体三维变形场，强化态势研判依据

参考文献：

[1] 刘翠.水库坝体填筑施工技术及其质量控制要点分析[J].中国水运,2024(18).
[2] 李春娟,石明,高扬.InSAR 技术在 水库变形监测中的应用研究[J].水上安全,2025(7).
[3] 方雪文.水库坝体渗漏监测技术在水电工程中的应用分析[J].工程建设与发展,2025(12).
[4] 陈静,廖健南,杨俊,等.基于物联网的水库大坝安全监测预警系统研究[J].信息产业报道,2025(10):0143-0145.
[5] 卢燕忠.基于测压管监测的东山水库坝体渗流稳定性分析[J].水利建设与管理,2026,46(1):18-23.

监测周期	固定周期执行，无法响应变形动态变化	基于实测变形速率与突发事件智能调整观测频次	优化人力物力配置，高效识别异常发展
预警机制	仅依据单一指标阈值触发报警	综合多指标阈值与变形演化趋势协同判识	显著降低误报率与漏报率，提升预警可靠性

质量控制是全过程的。仪器选用前要进行检定，精度符合要求的才能使用。观测时要记载环境状况，即温度、湿度、风速等，对会干扰测量精确度的要素加以修正。数据采集之后需要进行逻辑检验，即相邻测点的变形值不能相差太大，变形趋势要和荷载的变化趋势一致。定期开展控制网复测工作，对基准点的稳定情况进行检查。建立数据审核制度，异常数据要经过人工复核确认。

联合监测方案还要同水库安全运行管理相联系。监测数据要定期汇总成报告，上报给管理部门。当出现预警的时候，要马上启动应急预案，召集专家进行会商，采取降水位、加固等措施。监测系统运维要落实到具体的部门、人员，实行岗位责任制。

5 结语

水库坝体竖向沉降和水平位移联合监测，是提高大坝安全监测水平的一种重要方向。传统的分项监测方案存在着测点布置不协调、方法不统一、数据不同步等弊端，不能满足现代大坝安全运行的要求。本文所提出的联合监测优化方案，从测点协同布设、方法和仪器比选、同步数据采集和集成处理、动态监测周期调整、多源数据融合可视化等几个方面建立了技术体系。实行联合监测方案可以提高监测效率和数据利用率，也可以更全面、准确地反映坝体三维变形状况，给水库安全运行提供可靠的科技支持。建议有关工程单位根据自身的坝型特点以及监测条件，参照本文提出的优化思路，制订具体的联合监测实施方案，在实践中不断加以完善。