

水库大坝变形自动化监测技术应用

汪茂林

新疆维吾尔自治区塔里木河流域吉音水利枢纽管理中心, 新疆 和田 848409

DOI:10.61369/ETQM.2026030006

摘 要 : 本文围绕水库大坝变形自动化监测的技术体系与工程应用展开研究, 系统分析了变形机理、监测原理及相关技术标准, 构建了完整的自动化监测系统架构, 涵盖 GNSS、静力水准仪、光纤传感等多种技术手段, 并结合典型土石坝工程案例, 对系统布设、数据精度与变形特征进行了实证分析。研究表明, 自动化监测系统在提升数据连续性、响应速度与预警能力方面具有显著优势, 为实现大坝安全智能化管理提供了技术支撑与实践参考。

关 键 词 : 水库大坝; 变形监测; 自动化技术; 系统应用

Application of Automated Monitoring Technology for Reservoir Dam Deformation

Wang Maolin

Jiyin Water Conservancy Control Center, Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region,
Hetian, Xinjiang 848409

Abstract : This paper investigates the technical system and engineering applications of automated monitoring for dam deformation. It provides a systematic analysis of the deformation mechanisms, monitoring principles, and relevant technical standards. A comprehensive automated monitoring system architecture has been constructed, incorporating various technical methods such as GNSS, static leveling instruments, and fiber optic sensors. Through empirical analysis of typical earth-rock dam projects, the system's deployment, data accuracy, and deformation characteristics have been examined. The research findings demonstrate that automated monitoring systems possess significant advantages in enhancing data continuity, response speed, and early warning capabilities, thus providing technical support and practical reference for the intelligent management of dam safety.

Keywords : reservoir dam; deformation monitoring; automation technology; system application

水库大坝长期承受水位波动、温度梯度与渗流作用, 变形具有时变性与耦合性, 传统间歇式人工监测难以捕捉关键瞬态与微小趋势, 制约安全评估与预警决策。为回应流域防洪调度精细化与工程安全韧性提升的需求, 本文围绕“监—传—算—警”全链路, 系统阐释大坝变形机理、监测原理与指标体系, 构建以 GNSS、静力水准与光纤传感为核心的自动化监测技术框架, 并在黄壁庄水库开展工程化应用与精度验证, 提炼数据质量控制与模型化解译方法, 旨在为同类型工程提供可复制的技术路径与成效评价依据。

一、水库大坝变形自动化监测基础

(一) 水库大坝变形机理与变形类型

水库大坝在水压力、坝体自重及坝基变形共同作用下产生整体与局部位移, 温度变化、渗流和干湿循环又诱导附加应力, 使变形呈现明显的时变性和非线性特征。不同坝型对荷载的响应方式不同, 重力坝多表现为坝体竖向沉降与向下游水平位移, 拱坝则以拱圈受压引起的水平位移和拱脚集中变形为主, 土石坝常见坝顶不均匀沉降与横向展宽。综合工程实践, 可将变形类型概括为整体沉降与差异沉降、平面位移与转动、裂缝开合与结构错动等, 通过识别其时空分布特征及与水位、温度的相关关系, 可为

判别异常变形和演化趋势提供基础。

(二) 大坝变形监测原理与监测指标体系

大坝变形监测的基本原理是在稳定基准控制下, 获取关键测点在时间序列上的空间位置变化, 从而反映结构受荷后的真实变形响应及安全状态。传统监测依托几何水准测量、三角测量等手段获取高程和平面位移, 自动化监测则引入 GNSS、静力水准仪、光纤光栅、倾斜计等传感单元, 实现对坝顶、坝面、坝基及关键构造部位的连续观测。在指标体系构建上, 需要将几何变形与内在力学行为相联系, 通常选取坝顶水平位移、竖向沉降、断面相对位移、坝体倾斜、裂缝宽度、接缝张开量及渗压等作为核心指标, 并引入位移速率、加速度及残余变形等派生量, 通过多

指标综合可支撑后续的安全评估与预警判据建立。

（三）水库大坝变形监测的规范要求与技术标准

在工程实践中，大坝变形监测必须满足现行规范和技术标准对项目设置、布点密度、观测周期及精度等级的约束，依据大坝规模和危险性确定应开展的监测项目及允许中误差范围，并对基准点稳定性检验、仪器检定与数据复核提出明确要求。随着自动化监测的广泛应用，传统精度指标被细化为对传感器分辨率、量程、采样间隔、数据完整性和系统可靠性的定量约束，同时强调通过人工比测、冗余布点和异常值识别来实现对自动化成果的校核与追溯。在此基础上，逐步形成“规范化监测设计—标准化数据处理—制度化成果应用”的技术路线，为提升水库大坝安全运行管理的科学性提供制度保障。

二、水库大坝变形自动化监测系统与关键技术

（一）自动化监测系统总体构成与布设方案

自动化监测系统通常由感知层、传输层、数据处理与分析层三部分组成，整体架构以中心数据库为核心，联通前端测点与后台决策系统。结合图 1 所示流程，大坝监测自动化系统在感知端配置了 GNSS、静力水准仪、温度计、倾斜计等设备，分布在坝顶、坝坡、坝基等关键部位，并通过 RS485 总线将监测数据上传至现场主控单元，完成初步处理后再经 GPRS 无线模块发送至监控中心。这种“边缘计算+中心汇聚”结构确保了数据的实时性与完整性，也增强了系统的分层管理能力。

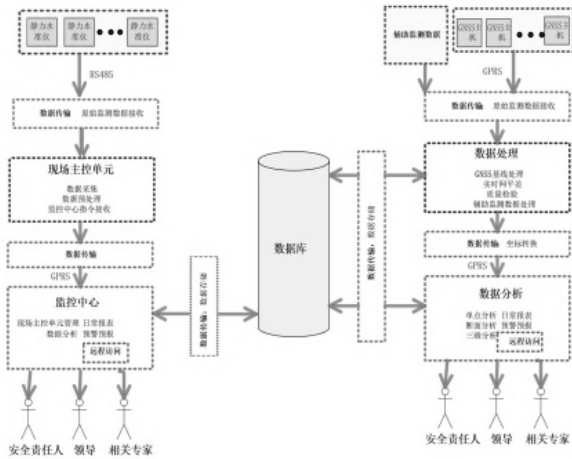


图 1 大坝变形监测自动化系统运行流程

在布设方案方面，为提升系统稳定性与故障冗余，部分监测点配置有备用电源与通讯模块，确保在主链路中断时仍能保持数据传输。系统平台具备设备状态监测、数据异常识别、图表自动生成和预警信息推送等功能，最终面向安全责任人、管理者与专家提供多层次信息服务。整体方案不仅实现了全天候、不间断的数据获取，还为基于模型的结构健康评估与智能预警打下了数据基础，显著提升了大坝运行期的风险感知能力与响应效率。

（二）典型自动化监测技术及设备选型

在水库大坝变形监测中，典型的自动化技术主要包括 GNSS 卫星定位技术、静力水准仪、光纤光栅传感技术、激光测距与全

站仪监测系统等。GNSS 技术适用于大范围高精度的水平位移监测，具有全天候、连续观测的优势，特别适用于坝顶与坝肩的面状布设；静力水准仪可实现对竖向位移的毫米级连续监测，适用于坝轴线及坝基沉降控制点的监控。光纤光栅传感器具有抗电磁干扰、灵敏度高和布设灵活的特点，可嵌入坝体内部用于温度、应变及裂缝变化的实时感知。激光测距仪和自动全站仪适用于高精度平面位移和倾斜角变化的监测，在大坝廊道、坝面及高差部位布设效果显著。设备选型需综合考虑监测对象类型、精度要求、环境适应性与系统兼容性，同时应预留冗余接口与扩展能力，以便未来拓展多维度数据集成与智能化处理。

（三）监测数据采集、传输与质量控制方法

自动化监测系统的数据采集依托各类传感器周期性采样，在现场主控单元完成初步数据整合后，通过有线或无线通信方式（如 RS485、GPRS、4G/5G）传输至远程监控平台。为提升系统稳定性，关键节点通常配置数据缓冲模块与断点续传功能，确保在通信中断情况下仍能本地存储并补传数据。数据上传至中心数据库后，将按照测点类型、时间标签及空间位置进行自动分类与入库处理，为后续分析与展示提供结构化基础。

在质量控制方面，应建立完善的异常识别与数据校核机制。系统应自动判别并剔除突变值、离群点及信号中断段，结合历史趋势模型进行合理性判断。通过对比人工监测数据、采用冗余布点交叉验证及设置“控制点一对比点一参考点”分级管理，可进一步提高数据的准确性与可追溯性。

三、自动化监测技术工程应用与效果分析

（一）工程实例概况及自动化监测方案实施

黄壁庄水库位于河北石家庄滹沱河干流，总库容 12.1 亿 m^3 ，以防洪为主，兼顾灌溉、发电、城镇供水等功能；与上游岗南水库联合调度，是华北地区重要骨干水利工程。早期大坝表面变形主要依赖 GNSS 静态测量和二等水准，每年 1 次为 1 个监测周期，2017 年起增至每年 2 次，高水位期临时加密；受天气、水位、光照等因素影响，人工观测周期长、精度稳定性不佳，难以连续反映变形动态。为解决上述问题，水库于 2022 年对主坝与副坝开展自动化改造，主副坝全长逾 8600 m，既有监测点（不含临时点）约 120 个，在此基础上形成自动化监测网络，显著提升数据的准确性、及时性与连续性。

改造方案由水平位移与垂直位移两大子系统和数据分析软件构成。水平位移采用 GNSS 连续监测，软件端包括数据处理、数据传输与存储、数据分析三大模块，实现原始数据采集、自检、本地缓存、自动解算与平差及阈值预警；垂直位移采用连通管式静力水准仪，各测点液位变化与基准点逐点累加，确定相对与绝对高程，并得到绝对沉降量。

（二）监测数据结果分析与大坝变形特征研究

综合相关规范及工程应用经验，本文提出土石坝变形监测精度控制指标如表 1 所示。结合表 1 中土石坝变形监测的精度要求，对自动化监测结果进行精度评估与合理性分析。

表1 土石坝变形监测精度控制指标

监测项目	监测部位	坝型 / 边坡类型	位移量中误差限值
水平位移 (mm)	坝顶	碾压式土石坝	± 3.0
	坝顶	面板堆石坝	± 2.5
	坝顶	超高坝 (>100m)	± 4.0
	坝基	碾压式土石坝	± 1.0
	坝基	面板堆石坝	± 0.8
垂直位移 (mm)	坝顶	所有土石坝	± 5.0
	坝基	所有土石坝	± 2.0
倾斜 (″)	坝体	心墙坝	± 10.0
	坝体	面板坝	± 8.0
	坝基	所有土石坝	± 3.0
表面裂缝 (mm)	坝体	防渗体裂缝	± 1.0
	坝体	普通裂缝	± 2.0
近坝区边坡 (mm)	岩质边坡	水平位移	± 3.0
	岩质边坡	垂直位移	± 3.0
	土质边坡	水平位移	± 5.0
	土质边坡	垂直位移	± 5.0
滑坡体 (mm)	岩质滑坡	水平位移	± 5.0
	土质滑坡	水平位移	± 8.0
	所有滑坡	垂直位移	± 5.0
	所有滑坡	裂缝	± 2.0

从监测结果来看，GNSS与静力水准仪所获取的位移变化曲线在不同测点之间具有良好一致性。以面板堆石坝为例，坝顶水平位移短期波动范围控制在 ±2.0 - 2.8mm，个别时段波动不超过 ±2.5mm，竖向沉降误差稳定在 ±4.2 - 4.8 mm，整体满足表1所列限值要求。数据稳定性较高，未出现突跳或失真现象，表明系统在土石坝复杂变形环境下仍能保持可靠运行，满足工程精度需求。

进一步分析变形特征发现，土石坝竖向变形呈现典型的时空延续性。填筑体在蓄水期发生持续沉降，运营期受库水位周期波动影响表现为弹性回弹与压密交替的循环特征，且沉降分布与坝料分区、压实度具有明显相关性。水平位移则随上游水位升高表现为向下游的渐进式位移，最大值多发生于坝体中上部，水位下降后位移回弹率约70 - 80%，体现出土石坝特有的“迟滞—恢复”变形规律。倾斜监测数据显示，心墙与坝壳之间的差异变形量控制在 ±6.0 - 8.5″ 范围内，未超过 ±10.0″ 的限值；面板接缝与防渗体裂缝宽度变化均小于 ±1.0 mm，说明坝体结构整体处于协调变形状态，未出现局部失稳或渗透破坏迹象。

（三）技术应用效果评价与优化建议

自动化监测系统的实施显著提升了工程监测效率与数据质

量，不仅实现了从周期性人工测量向连续、高频、实时监测的转变，也为大坝安全运行提供了更加全面的量化依据。监测数据表明，系统能够有效捕捉水位、温度变化引起的细微形变，其高时间分辨率弥补了人工监测对瞬时变形响应无法捕捉的不足。同时，通过与人工比测的对比验证，自动化监测的精度稳定落入规范允许范围内，尤其是在竖向沉降和水平位移的长期趋势分析中，具有更高的可靠性。此外，监测平台还实现了自动预警、设备状态巡检与图表自动生成功能，使运行管理人员得以及时掌握大坝健康状态，在提高管理效率的同时显著降低人为误差。

尽管系统运行成效显著，但仍存在可进一步优化的空间。当前监测技术体系仍以位移类指标为主，可逐步增强力学响应类监测手段，如布设应力计、渗流监测网络，以构建更加完善的“变形—渗流—应力”耦合监测模型。同时，建议在数据库平台中引入机器学习方法，对长期监测数据进行模式识别与趋势预测，提高预警的智能化水平。此外，应加强对关键传感器的冗余布设与定期校准，通过多源数据交叉验证提升系统抗干扰能力。未来，可探索与调度、气象、水文系统的数据联动分析，实现大坝安全精细化管理和区域级风险协同评估，提高工程整体的韧性与安全保障能力。

四、结论

通过对水库大坝变形自动化监测的基础理论、关键技术与系统构建方法的系统研究，本文明确了典型变形类型与控制指标，分析了 GNSS、静力水准仪、光纤应变等技术的适用性及优势，构建了集数据采集、传输、处理、分析于一体的自动化监测系统框架。工程应用表明，该系统可实现对坝体各关键部位的连续、高精度监测，能有效捕捉因水位、温度变化引起的微小形变，提升了安全监测的实时性与完整性。

通过实测数据分析，监测系统在水平位移、竖向沉降及裂缝宽度等关键参数上均满足规范精度要求，长期运行表现出良好的稳定性与可靠性。同时，平台具备图表生成、异常识别与预警推送等功能，显著提高了运行管理效率。为进一步提升系统性能，建议加强多源数据融合与智能化算法引入，拓展对应力与渗流等耦合指标的监测能力，推动水库大坝由“被动监控”向“主动预警”与“智能决策”转型。本研究可为类似工程的监测系统建设与优化提供参考与借鉴。

参考文献

[1] 潘峻峰. 智能化技术在水库大坝安全监测自动化中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (05): 177-179.
[2] 韩荣荣, 柳翔, 吴伟. 水电站大坝外部变形自动化监测技术应用现状分析 [J]. 大坝与安全, 2022, (03): 53-57.
[3] 曾超, 王迎超. 大坝变形监测中自动化技术应用 [J]. 珠江水运, 2020, (21): 5-6.
[4] 古光伟. 浅析大坝外部变形监测自动化技术的应用 [J]. 居舍, 2020, (25): 53-54.
[5] 张明晶. 横泉水库大坝表面位移变形自动化监测系统应用与分析 [J]. 山西水利科技, 2020, (03): 65-66+69.
[6] 苏凯. 刍议自动化技术在大坝变形监测中的应用 [J]. 现代物业 (中旬刊), 2019, (06): 50.