

统科学性的首要保障。

4.2 模型参数反演与不确定性分析

多源协同模型依赖大量参数驱动,包括由遥感反演获得的区域宏观参数(如地表蒸散发、地壳形变)和由地面测量反演的微观水文地质参数(如水力传导性、储水系数等)。为确保模型的科学性与实用性,必须开展系统的参数敏感性分析和不确定性定量评价。常用方法包括贝叶斯推断、蒙特卡洛模拟等,通过统计手段综合历史观测、遥感推算与现场监测数据,对模型输出的不确定性进行动态校正。多维交叉验证闭环,即“遥感—地面—模型”三重互校,显著提升了参数估算的可信度和模型鲁棒性,有效避免了单一数据源带来的系统误差,为地下水储量动态评估提供了坚实的科学依据。

4.3 动态优化与实时监测机制

随着遥感、物联网和自动化监测技术的不断发展,地下水协同评估模型正朝着智能化、实时化方向快速演进。现代模型集成自动数据采集、模型自适应调参与动态优化功能,实现对地下水储量的持续滚动更新和动态监测。通过实时采集气象、用水、地表径流等外部数据,并与地下水动态模型耦合,可对干旱区地下水资源进行前瞻性管理与多情景预警分析。模型结构、参数和数据源支持动态调整,随着观测手段和算法的进步不断自我完善。该机制不仅提升了评估的时效性和响应速度,也为区域水资源管理部门提供了更为科学、主动的决策支持工具,是未来地下水储量评估智能化、精细化管理的必然趋势。

5 典型干旱区应用案例与模型评估成效

5.1 西北内陆河流域协同模型应用

以河西走廊、塔里木盆地等西北典型干旱区为代表,协同模型应用基于 GRACE 重力卫星和 InSAR 地表形变数据,结合区域水文观测并与地质剖面资料,形成了多源数据融合的地下水储量动态评估体系。通过构建时空耦合模拟模型,能够精准反映区域地下水储量的时序变化和空间分布特征,对地下水补给、消耗与动态埋深实现全过程动态监控。该模型不仅提升了对地下水资源变化的预测能力,还为流域水资源调度、生态修复工程提供了定量化、科学化的决策依据。研究结果表明,协同模型评估结果与多期实测数据吻合度高,能有效提升干旱区地下水储量评估的时空分辨率和动态响应能力,为干旱区水资源的可持续利用和生态保护提供了坚实技术支撑。

5.2 黄河流域上游干旱带地下水评估

针对黄河流域上游干旱带,协同模型通过 GRACE 反演总水储量数据与地面观测站水位变化进行耦合,建立地

表—地下水一体化评估体系。该模型能揭示地下水补给过程、消耗路径以及埋深的动态变化,准确捕捉季节性与年际变化趋势。在模型参数优化和误差校正环节,通过水文地质调查、抽水实验与遥感观测结果的对比验证,确保评估精度和科学性。实际应用表明,模型输出与实测数据一致性高,评估误差控制在合理范围,有效提升了区域水资源配置的科学性与前瞻性。成果为黄河上游灌溉规划、用水红线制定及地下水管理政策提供了重要决策支持,显著降低了地下水过度开采和生态风险。

5.3 国际干旱区协同模型推广实践

协同模型在中亚、非洲等典型国际干旱区的推广应用,显著提升了跨境水资源的动态评估和科学管理水平。多国合作项目中,借助 GRACE、InSAR 与地面监测井等多源观测数据融合,实现了对区域地下水储量的高效动态共享和多尺度决策支持。协同模型不仅为区域水资源的可持续利用和调度提供了数据基础,也为国际流域水资源协商、生态恢复工程及水灾害预警等提供了科学工具。实践证明,协同模型具备良好的适应性和推广性,有力推动了跨境水资源管理体制创新与国际水务合作,为全球干旱区地下水资源保护和利用提供了可复制、可持续的发展范式。

6 结语

多源遥感与地面水文测量协同的干旱区地下水储量评估模型,是实现地下水科学管理与生态安全保障的关键技术路径。该模型通过多源观测数据的集成融合,有效提升了地下水储量动态监测的精度、时效性和空间覆盖能力,为干旱区水资源合理调度与政策制定提供了坚实基础。未来,应持续完善遥感与地面观测技术,推动模型智能化、自动化、精细化发展,加强跨学科合作与国际经验共享,不断提升地下水储量评估的科学水平与管理价值。

参考文献

- [1] 孙立全,郭家龙,苑紫岩,等.基于深度学习和地理分析的淤地坝遥感识别[J].农业机械学报,2025,56(09):526-535.
- [2] 尚嗣梁,陈国鹏,杨永红.无人机多源数据与机器学习协同的冻胀丘高精度识别及多尺度空间聚集研究——以美仁草原为例[J/OL].生态学报, 2026,(01):1-17[2025-09-23].
- [3] 乔锴,黄勇,权立诚,等.西藏马攸木地区多源遥感蚀变信息提取研究及找矿预测[J/OL].地质通报, 1-16[2025-09-23].
- [4] 林国敏,邓仕雄,刘继庚,等.无人机多光谱遥感技术对城市水生态环境监测研究应用进展[J].中国水运,2025,(18):87-88+117.
- [5] 邓辉婷,赵婉婷,李应裕庭,等.机器学习耦合多源变量预测农田重金属分布与生态风险[J/OL].农业环境科学学报, 1-14[2025-09-23].

The Application of GNSS and Leveling Measurement Fusion Technology in Deformation Monitoring of Water Conservancy Projects

Lijin Yang

Xinjiang Jianghai Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

In the guarantee system for the long-term safe operation of water conservancy engineering structures, deformation monitoring technology plays a key role. GNSS technology has the advantages of all-weather and highly automated real-time three-dimensional positioning, while leveling measurement has a significant advantage in vertical direction accuracy control. The integration and application of the two in deformation monitoring of water conservancy projects can not only achieve the unification of high precision and high timeliness of monitoring data, but also enhance the stability and adaptability of the monitoring system in complex environments. This paper systematically discusses the principle characteristics, fusion paths, data processing methods of GNSS and leveling technology, as well as their practical effectiveness in engineering deformation monitoring. It proposes the comprehensive advantages of fusion technology in improving monitoring accuracy, enhancing system reliability, and optimizing engineering early warning response capabilities. It emphasized the significant importance of building a standardized and intelligent integrated monitoring system for the safe operation of water conservancy projects.

Keywords

GNSS Leveling measurement Deformation monitoring Fusion technology Water conservancy project

水利工程变形监测中 GNSS 与水准测量融合技术应用

杨立晋

新疆疆海测绘科技有限公司, 中国 · 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

在水利工程结构长期安全运行的保障体系中, 变形监测技术发挥着关键作用。GNSS技术具备全天候、高自动化的实时三维定位优势, 而水准测量则在垂直方向精度控制上具有显著优势。二者融合应用于水利工程变形监测, 不仅能实现监测数据的高精度与高时效统一, 还能在复杂环境下提升监测系统的稳定性与适应性。本文围绕GNSS与水准测量技术的原理特性、融合路径、数据处理方法及其在工程变形监测中的实际效能进行系统探讨, 提出融合技术在提升监测精度、增强系统可靠性和优化工程预警响应能力方面的综合优势, 强调了构建标准化、智能化的融合监测体系对水利工程安全运行的重要意义。

关键词

GNSS; 水准测量; 变形监测; 融合技术; 水利工程

1 引言

水利工程结构长期处于自然荷载与人为扰动的综合作用下, 极易发生微小甚至隐蔽的变形过程, 若不能及时掌握其变化趋势, 将对工程安全与运行稳定性构成潜在威胁。变形监测作为防灾减灾体系的关键环节, 正逐步向高精度、自动化和实时化方向发展。GNSS 技术以其全天候、长距离、高动态性能受到广泛应用, 而水准测量则以高精度的高程控制能力在关键节点中仍具不可替代的作用。将两种技术融

合, 形成多维度、高精度的协同监测体系, 已成为当前变形监测的发展趋势。本文从技术融合出发, 探讨其在水利工程监测中的实际应用价值与优化路径, 以期为提升监测体系效能提供理论与实践支持。

2 GNSS 与水准测量技术原理概述

2.1 GNSS 定位技术的基本原理与误差来源

GNSS 定位技术通过接收多个导航卫星发射的微波信号, 基于多站观测和时间差计算出接收端的空间三维坐标, 常用系统包括 GPS、GLONASS、北斗等。GNSS 利用载波相位观测、伪距测量、星历信息与钟差数据完成定位解算, 可实现静态或动态的连续测量。其核心在于同步多个卫星与

【作者简介】杨立晋 (1984-), 男, 中国新疆奇台人, 本科, 高级工程师, 从事水利工程测量研究。

地面站的时间信息并构建几何结构以增强定位精度。在实际应用中, GNSS 系统易受多路径效应、电离层延迟、对流层折射、星历误差、天线相位中心偏移等因素干扰, 引发坐标解算偏差。基准站布设不合理、观测时间不足、设备自身噪声也可能降低测量稳定性。在变形监测中, 这些误差必须通过差分处理、滤波算法或融合校正机制加以控制, 才能保证其在工程安全监测中的实用性与高精度。

2.2 水准测量技术的测量机制与精度特性

水准测量技术主要依靠水平视线比测高差的方式确定目标点间的高程关系, 采用水准仪与配套尺子进行观测操作。通过设定观测点的已知高程作为基准, 结合前视与后视读数差值求取未知点的高程, 测量过程需要严格控制仪器整平、尺垂度和视距平衡。水准测量按精度等级可分为普通水准、中等级水准与高精度水准, 常用于水工建筑物关键部位的沉降监控。其突出特点是抗干扰能力强, 受外界电磁、气候等因素影响较小, 尤其在小范围垂直位移监测中精度可达亚毫米级。但其测程受限、作业效率低、人工参与度高等问题使其难以满足大范围、实时化需求。为提升测量效率并兼顾高精度, 需结合其他现代技术进行协同使用, 实现对高程变化的稳定追踪。

2.3 两种测量技术在变形监测中的优势互补关系

GNSS 与水准测量技术在测量机制、空间维度、适用场景等方面存在显著差异, 但二者在变形监测中的应用具有高度互补性。GNSS 技术可实现长时间、全自动的三维定位, 适用于广域布点和动态过程监测, 其数据更新频率高、响应速度快, 有助于捕捉工程结构形变的空间特征。而水准测量凭借其在垂直方向的高精度优势, 适合在关键控制点进行定期复测与高程校正, 为 GNSS 监测提供稳固的垂向控制基准。在实际工程中, 将 GNSS 数据作为主控信息, 结合水准测量结果进行高程修正与偏差拟合, 不仅能提升整体监测精度, 还能增强异常变形识别能力。两种技术融合构建的监测系统, 在空间分辨率、时间响应性与测量精度方面形成互补支撑, 为水利工程安全运行提供更加全面的技术保障。

3 水利工程变形监测的技术需求分析

3.1 水工建筑物变形监测的关键指标与变化特征

水工建筑物在运行过程中受水压、地基沉降、温度变化及荷载波动等因素影响, 可能产生位移、倾斜、沉降、裂缝等多种形式的结构变形。变形监测的核心指标包括平面位置变化、高程变化、结构应力响应及变形速率等, 需对其变化趋势、累积量和周期性波动进行持续追踪。工程早期变形幅度通常较大, 随后趋于稳定, 而突发性或加速性变形往往预示潜在结构隐患。因此, 监测系统应具备高灵敏度、高频采样与稳定的长期运行能力。变形特征具有渐进性、非线性与不确定性, 需要通过多点布控、连续测量与历史数据比对识别其发展规律。为满足这些监测需求, 技术手段需支持多

维度数据采集、高精度定位与数据自动化处理, 实现结构形变的动态可视化与预警模型构建。

3.2 传统测量方法在复杂环境下的局限性分析

在山地、峡谷、水库岸坡等地形复杂区域, 传统的水准测量、全站仪测距等方法在布设路径、视线通畅性、测量周期等方面均受到显著限制。水准路线难以连续布控, 地形遮挡、作业人员进出受限等问题增加了测量误差与作业风险。在极端气候条件下, 人工测量效率明显下降, 数据更新周期延长, 难以满足实时监控的需求。此外, 人工操作对人员经验依赖度高, 数据采集过程易产生系统性偏差, 影响监测结果的稳定性与可比性。在施工期与运行期变形速率较快阶段, 传统方法难以及时反映微小变化, 存在监测盲区与信息延迟问题。这些局限性促使工程测量从单一技术走向多源融合, 以克服环境适应性差与测量响应迟滞的瓶颈, 提高变形监测的全面性与精确性。

3.3 高频动态监测对测量系统稳定性的要求

水利工程某些关键部位在汛期、水位剧烈变化或运行负荷变化时, 结构变形表现出动态性与突发性, 要求监测系统具备高频次数据采集与实时传输能力。监测系统需长时间稳定运行, 保障数据链路不中断、数据完整性不受影响, 并具备容错能力与自校验功能, 提升异常工况下的监测可靠性。系统还需支持多类型传感器接入与数据同步处理, 提升对微小形变的识别能力。为防止误报与漏报, 必须建立完备的时空数据匹配机制与滤波算法, 对外部干扰进行有效剔除。高频监测对电源稳定、设备维护与环境适应性也提出更高要求, 系统结构设计应兼顾布设灵活性与抗干扰能力。在融合 GNSS 与水准测量的技术框架下, 动态监测体系可有效满足变形发展全过程的连续跟踪与趋势预测需要。

4 GNSS 与水准测量融合的技术路径

4.1 测量数据的坐标统一与基准转换方法

在 GNSS 与水准测量的融合过程中, 不同测量系统所获取的数据往往基于不同的空间参考框架, 需要通过坐标统一和基准转换确保数据间的可比性和一致性。GNSS 测量结果通常采用地心坐标系统或区域大地坐标系表示, 水准测量则以国家高程基准为基础, 侧重于高程数值的精细控制。将两者结合需构建包括大地高、正常高和正常高差之间转换关系的模型, 同时利用已知的公共控制点作为基准, 通过最小二乘拟合或参数平差等方法建立坐标转换模型。转换过程中需考虑椭球参数、大地水准面起伏、重力异常等多源误差影响, 以实现空间三维坐标与高程体系的精确对接。坐标统一不仅是数据融合的前提, 也是保障监测精度和动态变化趋势分析可信度的基础, 对监测系统整体稳定运行具有重要意义。

4.2 融合算法设计与差异权重的调整机制

GNSS 与水准测量的融合需要构建适应不同测量精度与