

基于InSAR技术的水库库区形变长期监测与风险评估

刘志萍

云南航安工程检测有限公司 云南 昆明 650000

摘要：水库库区及其周边区域易发生地表形变，进而诱发滑坡、塌岸、坝体失稳等次生灾害，严重威胁工程安全与人民生命财产。传统形变监测手段存在空间覆盖有限、成本高、周期长等局限性。近年来，合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术凭借其全天时、全天候、高精度、大范围、非接触式等优势，在地表形变监测领域展现出巨大潜力。本文系统阐述了InSAR技术的基本原理与主要方法（包括D-InSAR、PS-InSAR、SBAS-InSAR），分析了其在水库库区形变监测中的适用性与挑战；构建了融合多源SAR数据、水文气象信息与地质资料的库区形变综合监测与风险评估框架；重点提出了面向水库工程的InSAR技术实施通用流程与质量控制体系；并在此基础上建立了基于形变特征、地质条件与水文响应的多因子风险评估模型。研究表明，InSAR技术可有效揭示水库库区毫米级/年的形变特征，为水库安全管理、灾害预警与应急决策提供科学依据和技术支撑。

关键词：InSAR；水库库区；地表形变；长期监测；滑坡；风险评估

引言

随着全球气候变化加剧与人类工程活动强度增加，水库工程面临的安全风险日益突出。水库蓄水后，库水对岸坡岩土体产生浸润、软化、浮托等作用，显著改变原有应力场与渗流场，极易诱发库岸再造、滑坡失稳等地质灾害。传统的水库形变监测方法主要包括水准测量、GPS/GNSS定位、全站仪观测以及地面倾斜仪等。这些方法虽精度较高，但普遍存在点状布设、空间覆盖不连续、人力物力投入大、难以实现大范围长期连续监测等不足，尤其在地形复杂、交通不便的山区水库应用受限。自20世纪90年代以来，合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术迅速发展，成为地表形变监测的重要工具。InSAR利用同一区域不同时间获取的两幅或多幅SAR影像进行干涉处理，通过相位差反演地表三维位置变化，具有厘米至毫米级的形变探测能力。特别是随着欧空局Sentinel-1等免费、高重访周期SAR卫星星座的运行，InSAR技术在水利工程领域的应用迎来了前所未有的机遇。

1 InSAR 技术原理与方法

1.1 基本原理

InSAR技术基于雷达波的干涉原理。当两幅SAR影像对同一地表目标成像时，其回波信号的相位差（干涉相位）包含地形信息、形变信息、大气延迟、轨道误差及噪声等。基本干涉相位可表示为：

$$\Delta\phi = \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{orb}} + \phi_{\text{noise}}$$

其中， ϕ_{def} 为地表形变引起的相位， ϕ_{topo} 为地形起伏引起的相位， ϕ_{atm} 为大气传播延迟， ϕ_{orb} 为轨道误差， ϕ_{noise} 为系统噪声与去相关噪声。

通过差分干涉（D-InSAR）可消除地形相位项（需使用外部DEM），从而提取视线向（Line-of-Sight, LOS）形变量：

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi_{\text{def}}$$

其中， λ 为雷达波长， d 为LOS方向的形变量。

1.2 主要方法

早期的差分InSAR（D-InSAR）方法适用于短期、大形变事件如地震或火山喷发的监测，但由于其对时间去相干和空间去相干高度敏感，在面对长期缓慢形变时往往难以获得可靠结果。随着研究深入，学者们发展出能够处理长时间序列SAR数据的先进方法。其中，永久散射体InSAR（PS-InSAR）通过识别时序影像中相位高度稳定的散射点（如建筑物角点、裸露岩石等），利用相位堆叠与参数估计模型反演形变时间序列，特别适用于城市或基岩出露区域^[1]。然而，在植被覆盖较广的自然地貌中，这类强散射点稀少，限制了PS-InSAR的应用效果。为克服这一局限，小基线集InSAR（SBAS-InSAR）应运而生。该方法通过构建时空基线均较小的干涉对网络，利用分布式散射体的信息，采用奇异值分解或最小二乘法求解形变速率场与高程误差，对植被覆盖区和农田等地貌更具鲁棒性。鉴于水库库区通常兼具人工构筑物、裸露岩体与植被覆盖等多种地表类型，实践中常采用PS-InSAR与SBAS-InSAR融合策略，以兼顾不同区域的监测需求，从而获得更完整、可靠的形变场。

2 水库库区形变机理与 InSAR 适用性分析

2.1 形变驱动因素

水库库区形变主要受以下因素控制：（1）库水位周期性变动：蓄水期水位上升导致岸坡孔隙水压力升高、有效应力降低；消落期水位骤降引发反向渗流，易造成坡体失稳。（2）地质构造与岩性：断裂带、软弱夹层、风化破碎带等是形变高发区。（3）降雨入渗：强降雨增加坡体含水量，降低抗剪强度^[2]。（4）人类工程活动：如削坡建房、道路开挖等扰动原始平衡。（5）冻融循环（高寒地区）：反复冻胀融沉导致土体结构破坏。上述过程通常表现为缓慢、持续的毫米级/年形变，恰好处于InSAR技术的高灵敏度探测范围内。

2.2 InSAR技术优势与挑战

InSAR技术具有全天候、全天时工作且不受云雨影响，覆盖范围广（单景可达数百公里）适合大流域监测，时间序列分析可揭示形变演化趋势，成本低（尤其利用免费Sentinel-1数据），非接触式避免对库区生态干扰等优势，但也面临植被去相干（茂密植被导致SAR信号散射随机，相位信息丢失）、大气延迟误差（水汽变化引入虚假形变信号，需校正）、LOS方向限制（仅能获取一维形变，需结合多轨道或多源数据反演三维形变）、陡峭地形阴影与叠掩（影响数据可用性）、形变非线性（库水位波动导致形变呈周期性或非线性，需采用先进时序模型如StaMPS、GIAnt处理）等挑战，针对这些挑战，可通过采用C波段（Sentinel-1）与L波段（ALOS-2）SAR数据融合（L波段穿透力更强，可缓解植被影响）、利用GACOS、ERA5等大气模型进行相位校正、结合升轨与降轨数据联合反演垂直与东西向形变、引入机器学习方法识别形变异常模式等策略优化。

3 InSAR在水库库区监测中的技术实施框架

3.1 数据选型与获取策略

开展水库库区InSAR形变监测，首要任务是合理选择SAR数据源。目前可供选择的卫星平台主要包括欧空局的Sentinel-1（C波段）、日本JAXA的ALOS-2/PALSAR-2（L波段）以及德国TerraSAR-X（X波段）等。其中，Sentinel-1因其免费开放、重访周期短（6天）、覆盖范围广，已成为水库长期监测的首选数据源；而L波段雷达因波长更长、对植被穿透能力更强，在植被茂密或地形复杂的库区具有独特优势，常用于与C波段数据融合以提升相干性。在轨道几何方面，应尽可能同时获取升轨与降轨数据，以便后续联合反演近似三维形变场。数据时间跨度建议不少于3年，以有效分离线性形变、季节性波动与非线性加速过程，并捕捉库水位多年调度周期的影响。

3.2 干涉处理流程设计

针对水库库区形变缓慢、空间异质性强的特点，推

荐采用时序InSAR方法（如PS-InSAR或SBAS-InSAR）进行处理。处理流程通常包括影像配准、干涉图生成、去地形相位、大气校正、相位解缠及时序反演等核心步骤。在干涉对选择阶段，应严格控制时空基线阈值：空间基线宜小于临界基线的60%，时间基线则根据区域去相干速度动态调整，一般不超过1-2年^[3]。对于水体覆盖区域，由于SAR信号散射特性不稳定，需在预处理阶段通过水体掩膜予以剔除，避免引入虚假相位。此外，DEM精度对形变反演影响显著，建议采用优于10米分辨率的本地高精度DEM替代全球公开产品，以减小地形残差。

3.3 大气与轨道误差校正

大气延迟是InSAR形变监测中主要的系统误差来源，尤其在湿度变化剧烈的水库区域更为突出。当前主流校正方法包括基于外部气象模型（如ERA5、GACOS）的相位改正、利用高程相关性进行线性拟合去除，或通过时序统计方法（如高通滤波）抑制低频大气信号。轨道误差则通常表现为大尺度平滑相位趋势，可通过多项式拟合或与GNSS参考点联合估计予以消除。值得注意的是，校正过程需避免过度滤波导致真实形变信号被削弱，因此应结合区域地质背景与先验知识进行参数调优。

3.4 精度验证与不确定性量化

为确保InSAR结果的可靠性，必须建立有效的精度验证机制。理想情况下，可在库区布设若干连续运行的GNSS站点，其三维位移观测值可直接用于与InSARLOS形变投影对比。若缺乏地面实测数据，则可利用已知稳定的构筑物（如大坝主体、桥梁墩台）作为内部控制点，评估形变速率的标准差。此外，还应量化各类不确定性来源，包括时间去相干噪声、大气残余误差、DEM误差传播等，并在最终成果中以置信区间或误差椭圆形式表达，为后续风险评估提供不确定性边界。

4 基于InSAR的库区风险评估模型

4.1 风险评估指标体系构建

综合考虑形变特征、地质条件与外部触发因素，建立三级评估指标：

表1 风险评估指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
形变危险性	形变速率	< 5, 5-10, > 10mm/年
	形变加速度	稳定、加速、突变
	形变范围	< 0.1km ² , 0.1-0.5km ² , > 0.5km ²
地质脆弱性	岩性	坚硬岩、软弱岩、松散堆积
	结构面	无、一般、发育
	坡度	< 20°, 20-35°, > 35°
触发敏感性	库水位变幅	低、中、高
	年降雨量	< 1000, 1000-1500, > 1500mm

4.2 风险等级划分

基于上述指标体系,利用GIS平台进行空间叠加分析,将整个库区划分为低、中、高、极高四个风险等级。低风险区主要分布于基岩完整、坡度平缓且形变稳定的区域;中风险区多位于轻微形变或局部地质条件不利的地段;高风险区则表现为形变速率超过10毫米/年且处于软弱岩层或陡坡之上;而A区因同时具备高速形变、历史滑坡记录及对水位高度敏感等特征,被划为极高风险区^[4]。该分区结果可直接服务于水库管理单位的巡查重点布设与工程治理优先级排序。

4.3 预警阈值设定

为进一步提升预警能力,本文结合形变动力学特征设定了两级自动预警阈值。当某区域连续三个月形变速率超过8毫米/年时,触发黄色预警,提示加强监测与现场核查;若形变速率突破15毫米/年或出现单月突变增量超过3毫米,则启动红色预警,建议立即采取应急避险措施。该阈值体系已具备接入现有水库安全监测信息平台的技术条件,有望实现从“被动响应”向“主动预警”的转变。

5 讨论

尽管InSAR技术在水库形变监测中展现出强大潜力,但单一技术手段仍难以全面刻画复杂的地质-水文-力学过程。未来应推动“InSAR+GNSS+无人机LiDAR+地下水监测”的多源融合监测体系,通过空-天-地协同观测,实现形变场、位移场与渗流场的联合反演,提升灾害机理认知水平。此外,当前InSAR仅提供视线向一维形变,虽可通过升/降轨数据联合反演近似获得垂直与东西向分量,但西向形变仍存在信息缺失。未来可结合偏移量追踪(Offset-Tracking)或多孔径干涉(MAI)等技术

补充水平形变信息,构建更完整的三维形变模型。值得关注的是,人工智能技术正为InSAR数据解译带来新机遇。深度学习模型如U-Net或Transformer可自动识别形变异常区域、提取形变模式并预测未来趋势,有望显著提升风险评估的智能化与自动化水平。

6 结语

本文系统探讨了InSAR技术在水库库区形变长期监测中的理论基础、通用技术实施框架与风险评估方法。研究表明,通过科学选型SAR数据、优化干涉处理流程、强化大气与轨道误差校正,并建立严格的精度验证机制,InSAR能够稳定、可靠地获取库区毫米级/年的地表形变信息。所提出的多因子风险评估模型有效融合了形变动力学、地质脆弱性与水文敏感性,可为不同规模、不同地质背景的水库提供普适性风险管控工具。未来应进一步推动InSAR与多源监测手段融合,并纳入水利工程安全管理体系,实现从“被动救灾”向“主动防灾”的战略转型。

参考文献

- [1]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,(07):148-150.
- [2]李环宇,戴陈兵,周怀斌,等.基于SBAS-InSAR技术的珊溪水库地区地表形变监测与分析[J].大地测量与地球动力学,2025,45(06):599-604.
- [3]郭子琦,韩锦琳,王媛,等.时序InSAR技术在水库监测中的应用研究[J].水利信息化,2024,(02):42-46.
- [4]张俊建,唐宇琪,邹琪.基于PS-InSAR技术的水库大坝形变监测研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(01):155-158.