

基于多源数据的城市地面形变监测与应用研究

武丽梅 关沧海 司朝瑞 王金硕

黑龙江第一测绘工程院

DOI:10.12238/gmsm.v8i3.2192

[摘要] 城市快速发展过程中,地面沉降与形变现象逐渐演变为威胁城市安全运行与长期规划的主要潜在风险,例如建筑结构稳定性受损、地下管网变形等问题频发。传统监测手段因数据采集范围有限、更新周期较长且精度不足,面对现代城市精细化管理的需求已显现明显短板。为解决这一问题,本研究设计了一套融合多维度信息的新型监测体系,通过整合卫星遥感影像、地面激光雷达扫描、GNSS定位数据及地下传感器网络等多源异构数据,结合协同采集机制与全流程处理技术,实现对毫米级地表微小位移的持续追踪与风险预警。

[关键词] 多源数据; 城市地面; 形变监测; 应用研究

中图分类号: X830.7 文献标识码: A

Research on Urban Ground Deformation Monitoring and Application Based on Multi-source Data

Limei Wu Canghai Guan Chaorui Si Jinshuo Wang

Heilongjiang First Surveying and Mapping Engineering Institute

[Abstract] In the process of rapid urban development, ground subsidence and deformation have gradually evolved into major potential risks threatening the safe operation and long-term planning of cities. For example, problems such as damage to the stability of building structures and deformation of underground pipelines occur frequently. Traditional monitoring methods have obvious shortcomings in meeting the needs of modern urban refined management due to their limited data collection range, long update cycle and insufficient accuracy. To address this issue, this study designs a new monitoring system integrating multi-dimensional information. By integrating multi-source heterogeneous data such as satellite remote sensing images, ground laser radar scanning, GNSS positioning data and underground sensor networks, combined with collaborative acquisition mechanisms and full-process processing technologies, it realizes continuous tracking and risk early warning of millimeter-level surface micro-displacements.

[Key words] multi-source data; urban ground; deformation monitoring; application research

城市形变监测的主要内容包括地表沉降、建筑物倾斜、道路变形等。其中,地表沉降是最常见的城市形变现象之一,它可能由多种因素引起,如地下水开采、地铁施工、高层建筑建设等。建筑物倾斜则可能由地基沉降、结构设计缺陷、施工质量问题等因素引起。道路变形则可能由交通荷载、地基沉降、排水不畅等因素引起。随着城市发展越来越快、人口不断增多,现在城市的空间布局和土地利用正发生着翻天覆地的变化。高楼大厦越盖越密,地铁线路像蜘蛛网一样交错,再加上市政管道不断延伸、地下空间开发越来越频繁,这些都给城市地面带来了不小的负担。自然因素也不容忽视,地壳运动让地层结构慢慢变化,雨水长期渗透,再加上过量开采地下水,这些都在无声无息地改变着地表稳定状态。在这些因素共同推动下,地面变形现象越来越

常见,小问题可能让道路开裂、管道破损,严重的话会导致房屋歪斜、地基下沉,甚至引发安全事故。杭州去年就有地铁施工区域出现地面塌陷,导致周边商铺墙体开裂的案例。所以说,要想守护大家的生命财产安全,同时推进城市长远发展,建立快速准确的地面变形监测体系已经成为必须重视的基础工作。

1 城市地面形变监测的必要性

城市形变监测是城市建设和运营过程中必不可少的一项工作。通过采用先进的测量技术和手段,实现对城市基础设施的持续、高精度变形观测和数据分析,可以为城市规划、建设和管理提供科学决策依据,保障城市的安全和稳定。

1.1 协同保障城市运行安全

现代城市空间分布着轨道交通、高层建筑、道路桥梁等立

体化基础设施,地下管网系统更是承载着供水供电供气等重要民生功能。这些设施能否正常运作,主要取决于地基的承载能力是否稳定,如果某些区域出现超出预期的不均匀沉降或侧向位移,就可能导致建筑结构产生裂缝,严重时甚至会造成整体失稳。部分老旧城区因长期抽取地下水,加上软土基础的自然压缩作用累积,常会出现路面凹陷和市政管道破裂现象,这类情况不仅带来经济损失,还会对居民安全构成潜在威胁。新建高层建筑若选址存在地质隐患,随着时间推移可能产生持续性沉降,进而引发楼体倾斜等危险状况。通过多源数据协同分析技术对重点区域实施全天候动态监测,能够及时捕捉形变发展趋势,有效阻断灾害形成链条,推动安全管理模式从事后处置转向事前预警,从源头上增强城市运行体系的抗风险能力。

1.2 支撑科学规划与可持续发展

新型城镇化建设推进过程中,政府部门重点关注土地资源配置与生态环境保护问题,通过合理规划工业园区、城市绿地及交通节点布局,推动经济发展动能转化与民生质量同步改善。我国不同区域地质条件存在显著差异,如岩溶地貌发育区、深厚软土分布带及历史采空区等复杂情况普遍存在,这种多样性导致城乡规划无法套用统一模式,必须采取差异化应对策略。若忽视地质条件特殊性进行无序开发,容易引发重大安全风险,并导致难以修复的生态环境问题。多源数据协同监测技术可系统呈现不同功能区在气候变化、水文作用及工程活动影响下的演变规律,为土地空间优化和建设项目选址提供可靠参考。通过整合多维度监测数据,能够有效识别潜在风险区域,并为基础设施科学规划提供技术支撑。

1.3 推动创新技术研发与行业规范升级

科技创新不仅是推动社会进步的重要力量,更是破解复杂工程难题的必经之路。传统监测阶段存在明显短板,受限于观测设备精度不足和监测周期不稳定,特定区域的突发性形变现象常常出现监测盲区。当前遥感卫星组网规模持续扩大,本地传感器灵敏度和云计算处理能力显著增强,这为开发响应更快、精度更高、成本更优的监测体系提供了技术支撑。具体表现为卫星InSAR技术结合自动化处理流程,可将数据更新频率压缩至小时级别;人工智能算法辅助下的图像解译系统,能有效区分建筑沉降与管线泄漏等不同成因的形变特征。跨领域数据融合实践正在倒逼行业标准体系革新,推动建立统一的质量评估指标和数据处理规程。

2 基于多源数据的城市地面形变监测与应用研究

2.1 案例概况

当前城市扩张速度越来越快,居民区、商业体密集分布,地下管线等基础设施规模持续扩大,这些变化使得地面沉降问题逐渐成为影响城市安全的重要隐患。在A市这类典型大中型城市中,不论是地铁换乘枢纽、地下综合管廊,还是密集的高层建筑群,都面临着地质构造变动、地下水资源开发、建筑施工扰动等多重因素引发的沉降隐患,具体表现为局部区域下沉、特定地块隆起或地面水平位移等不同形态。本次研究重点选取交通主干

道及其周边区域,将卫星雷达干涉测量、无人机激光雷达扫描、GPS连续观测站与精密水准测量等结合,形成立体监测网络。分析近五年遥感影像与历史实测数据,发现三个典型沉降异常带,并揭示了深层土壤扰动、地下水位波动与工程荷载共同作用的复杂影响机制。例如在核心道路沿线,周边工地频繁开挖基坑与持续超采地下水叠加作用,导致某些区域每年出现几毫米到几厘米的累积沉降,这类微小变化传统监测手段往往难以捕捉。

该区域具有两个典型特征:一是建成区覆盖住宅、商业、工业等多种功能片区,二是地下空间开发强度突出,既存密集管网系统又有新建轨道交通设施。过去十年来,由于缺少统一监测体系,对地面沉降的应对往往局限于事后补救,难以及时预警和主动防控。本次创新引入的融合监测模式,成功实现从毫米级形变捕捉到灾害成因追溯的全链条解析,特别是发现某商业综合体周边因地下水位骤降导致的渐进式沉降,这类案例为后续风险防控提供了重要参考。

2.2 监测应用流程

为了更好地展现基于多源数据的城市地面形变监测实际操作流程,并结合上述案例特点,可以将整个过程划分为“目标设定与需求分析——数据采集与处理——模型构建与分析——成果应用与决策支持”四个环节,每个环节既独立又紧密衔接,共同形成完整闭环。

2.2.1 明确监测目标与需求

在初始阶段需确定形变监测工作具体目标,既要识别可能存在较大风险区域,也要跟踪重点工程在建设期及后续运营阶段产生的沉降变化,同时综合评估人类活动对地表稳定产生的整体影响。结合地方实际管理需求,与相关部门协商确定优先级排序,比如学校医院周边居民区这类人群密集场所需要优先保障,其次再考虑高速公路主干道和市政设施维护。对于涉及文物保护单位或生态保护区这类敏感区域,数据采集精度要求更高、监测间隔需要更短,这样能够更快发现异常变化并触发预警响应机制。该阶段需要项目组实地勘察并与业务主管部门充分沟通,确保后续工作方向明确且具有可操作性。

2.2.2 多源异构数据协同采集

在设定具体监测目标后,系统启动多源数据采集工作。优先选用卫星雷达干涉技术(InSAR)开展全域扫描,该技术不仅能完整覆盖数十至上百平方公里区域范围,其接近亚厘米级别的垂直精度特征,对捕捉长时间跨度下的地面形变趋势具有较强适用性。为应对建筑物遮挡、信号干扰等问题,同步采用无人机搭载激光雷达设备,重点针对核心城区建筑立面实施补充扫描,显著提升局部区域的空间细节呈现效果。同时在关键控制点位及典型地质剖面布设GPS连续观测站与高精度电子水准仪,通过持续监测微小位移变化,较好弥补了遥感手段在实时动态响应方面存在的延迟局限。各类采集数据经标准化归档后进入处理流程,期间结合定期外业巡查机制,组织技术人员实地核查疑似异常点位,例如检查路基裂缝发育情况、道路表面鼓包变形程度以及地下管线连接处的错位现象。通过融合多种技术手段与人工

验证,有效提升监测结果的综合判读精度,降低单一传感器可能产生的误判风险。在系统架构层面,横向建立跨业务线的标准化数据接口实现实时共享,纵向依托云端平台完成历史数据的结构化存储,为后续开展回溯分析提供必要的数据支撑。

2.2.3 数据融合处理与模型构建

在获取各类原始观测数据后,如何有效整合这些数量庞大、格式多样的信息成为核心挑战。具体操作时,首先需要通过坐标系转换与时空基准校准,把不同来源的遥感图像、高程剖面数据、水准测量点统一到相同参考框架,这样横向对比才能保持基准一致;接着运用专用融合算法,对数据重叠区域的干扰信号进行降噪插值,让不同精度的测量结果实现自然过渡。比如某区域InSAR监测显示明显沉降信号,但同期GPS观测数据未见异常,这时就需要核查设备是否出现故障,或者是否存在施工干扰引发的瞬时假象。

为直观展现空间演变特征,可建立三维数字高程模型配合时间序列图谱,揭示不同区域随季节更替或极端天气事件影响的动态变化规律。模型训练时通过持续调校参数,使模拟结果既符合实测数据绝对值,又能准确捕捉变化趋势与突发波动。某年夏季特大暴雨后,某低洼路段突发快速凹陷现象,这种突发状况需综合高分辨率航拍影像与持续水准监测曲线才能准确定位诱因。对于长周期缓慢累积型沉降,结合长期连续卫星影像观测,否则很难发现风险逐渐积聚。

2.2.4 结果解译发布与动态应用

完成系统化数据处理分析后,相关成果将通过多维途径实现应用转化。面向政府管理部门,首先生成易于理解的热力地图报表,便于日常巡查调度工作展开。具体操作上,可将最近三个月主要道路的平均沉降速率直观显示在数字底图上,帮助非专业人员快速定位重点监测区域。对于重点民生问题和舆情关注点,建议通过官方信息平台定期发布简明解读文件,既能让公众准确了解地质灾害防治进展,又能逐步提升群众防灾意识和应急能力。研究机构与企业研发团队则可依托开放型数据库系统,持续开展深度数据挖掘与算法创新,推动智能监测技术迭代升级。需要特别关注的是,在实践应用中必须建立动态反馈机制,当出现突发险情或异常信号时,应及时启动专项核查流程,将现场勘查数据快速整合至主控平台,同步调整监测优先级或临时

增设高精度传感器。例如某市新区曾因施工震动引发建筑裂缝,市政部门立即启动应急响应,在常规监测基础上调派无人机进行夜间高密度三维扫描,两小时内完成全部建筑安全评估,有效控制事态恶化并妥善安置受波及居民。

3 结语

总之,传统被动监测模式正加速向智能预警体系过渡,卫星遥感、InSAR等技术系统逐步成熟,在杭州、深圳等地的地铁沉降监控、桥梁位移预警等场景中已取得初步应用成效。随着人工智能算法不断迭代升级,多源数据融合程度持续深化,预计未来三年内可实现厘米级精度、分钟级更新的动态感知网络。值得关注的是,气象、国土、应急管理部门间的协同工作机制尚需完善,特别是在数据共享协议、联合预警平台等关键环节仍存在提升空间。建议后续重点突破深度学习算法适配性难题,建立跨行业数据流通规范,通过政企协同模式推动科研成果转化应用,为我国智慧城市建设和灾害防治能力提升提供持续技术保障。

[参考文献]

- [1]杨馨,李益敏,冯玥雯.基于PS-InSAR技术的昆明地铁4号线沿线地面沉降监测研究[J].地理空间信息,2024,22(8):107-110.
- [2]王羽.基于InSAR技术的典型形变灾害监测与风险评估方法及其应用研究[D].安徽理工大学,2024.
- [3]欧阳双艳.时序InSAR技术在城市地表形变监测中的应用及风险评估[D].东华理工大学,2022.
- [4]夏锦,张鹏,郑晓慧,等.宿州西水源地地面沉降不同时序InSAR监测对比分析[C]//中国地质学会.2021年全国工程地质学术年会论文集.南京工业大学交通运输工程学院;南京智慧岩土工程技术研究院;中铁上海设计院集团有限公司;南京师范大学,2021:113-123.
- [5]刘强.时序InSAR技术在中型城市地表形变时空特征应用及预测分析[D].东华理工大学,2021.
- [6]董华伟.基于SBAS-InSAR技术的焦作地面沉降监测及分析[D].长安大学,2021.

作者简介:

武丽梅(1990--),女,汉族,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,职称:工程师、注册测绘师,研究专业方向:地面形变和遥感智能解译监测及应用。