

基于时序 InSAR 和 GIS 技术的城市地表沉降分布式监测研究

Research on Distributed Monitoring of Urban Land Subsidence based on Time Series InSAR and GIS Technology

潘 杰

(秦皇岛市测绘大队, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 针对地下水开采和地质结构变化等情况导致的地表塌陷问题, 研究了一种综合时序 InSAR 和 GIS 技术的城市地表沉降分布式监测方法。基于传统的 InSAR 技术运用孔径雷达合成三维空间信息图像, 通过差分处理图像干涉相位。利用 GIS 技术与时序相结合, 识别提取特征 PS 点构建时序形变图像, 分析解缠相位关系, 修正地形图像基线参数, 精确计算地表沉降平均值和单位沉降量, 实现对观测区进行具体的分布式监测分析。通过实验证明, 研究的方法能够有效实现对复杂地形区域的地表沉降分布式监测, 与实际监测误差不超过 0.8%, 具有良好的应用效果和监测效率。

关键词: 地表沉降分布式监测; 时序 InSAR 技术; GIS 技术; 地表沉降速率

中图分类号: TM267 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 03-0016-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.016

PAN Jie

(Qinhuangdao Surveying and Mapping Trade Society, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Aiming at the problem of surface subsidence caused by groundwater exploitation and geological structure changes, a distributed monitoring method for urban surface subsidence using temporal InSAR and GIS techniques was studied. Based on traditional InSAR technology, three-dimensional spatial information images are synthesized using aperture radar, and the image interference phase is processed by differential processing. Using GIS technology combined with time series, identify and extract feature PS points to construct a time series deformation image, analyze the unwrapped phase relationship, modify the baseline parameters of the terrain image, accurately calculate the average value of surface subsidence and unit subsidence, and achieve specific distributed monitoring and analysis of the observation area. The experimental results show that the proposed method can effectively achieve distributed monitoring of surface subsidence in complex terrain areas, with an error of no more than 0.8% compared to actual monitoring, and has good application effects and monitoring efficiency.

Keywords: distributed monitoring of surface subsidence; time series InSAR technology; GIS technology; surface subsidence rate

0 引言

地下资源开采与城市发展建设导致地表荷载不断增加, 容易造成地表沉降问题, 近年来我国路面塌陷, 房屋地基塌陷等问题频发, 给人们的生活, 交通出行带来很大困扰, 甚至对人身安全造成了威胁, 为了有效解决这一安全问题,

作者简介: 潘杰 (1980—), 男, 本科, 高级工程师, 秦皇岛市测绘大队, 研究方向: 工程测量。

收稿日期: 2023-03-24

对地面进行沉降监测, 分析其变形规律, 及时预测并控制地面沉降的发生, 是当前沉降灾害主要的防治措施, 也是国家在地质灾害研究中关注的热点。

文献 [1] 利用分布式光纤传感技术在隧道中构建分布式监测方法, 基于共轭量理论对隧道内沉降区域进行应变测量, 计算变形数据完成分布式沉降检测。由于监测受光纤设备传感距离限制, 在大规模远距离监测工作中局限性较多, 监测准确率不高。文献 [2] 采用的 SBAS-InSAR 技术在目标区域设定多个目标采样点, 提取样本数据设定多阈值参数, 将实际目标点变形数据与阈值参数进行对比, 对沉降水平进行判定。但该方法需要大量人工选点, 操作难度和成本较高, 工作周期长。

针对传统方法的不足, 提出了一种基于时序 InSAR 和 GIS 技术的监测方法, 对城市地表沉降进行分布式监测。

1 时序 InSAR 和 GIS 技术原理分析

1.1 时序 InSAR 技术原理

时序 InSAR 技术是利用雷达探测获取地理传感图像, 通过孔径雷达合成三维空间信息图像, 具有高精度、大范围、可持续等技术特点, 在当前许多大规模工程监测工作中得到广泛应用。

时序 InSAR 技术针对传统 SBAS-InSAR 探测技术在长时间地表监测过程中容易受到环境因素影响等问题进行了优化, 在沿用了差分技术构建三维地表影像的基础上, 引入散射雷达差分干涉测量方法, 使地表监测能够避免大气噪声、时空失序等客观因素干扰, 实现长期稳定的地表监测与图像获取工作。

时序 InSAR 技术的实用原理是根据沉降区域的关键特征, 从采集到的图像中提取出一幅作为核心主图像, 与其他相关图像进行匹配, 分析多个图像之间的干涉关系, 通过差分处理方法获取图像干涉相位:

$$\varphi(x) = \varphi_d(x) + \varphi_b(x) + \varphi_q(x) + \varphi_a(x) + \varphi_n(x) \quad (1)$$

式中, $\varphi_d(x)$ 为监测区地形空间贡献值, $\varphi_b(x)$ 为图像样本点形变相位, $\varphi_q(x)$ 为图像变换过程中大气噪声的干扰相位, $\varphi_a(x)$ 为散射雷达差分相位, $\varphi_n(x)$ 为所有图像序列对应时序相位。

去除干扰因素后得到地表形变图像, 在保持影像相位稳定的条件下选取时序干涉测量 PS 点。将散射雷达信号数据合并为一整个特征数据堆进行 PS 点识别, 根据 SLC 散射数据光谱特征划分 PS 点属性单位, 计算方差和平均值衡量特征点的优化相位:

$$X = \operatorname{argmax}\{X_0^k T X_d\} \quad (2)$$

$$X_0^k T X_d = \operatorname{lin} X_n \quad (3)$$

式中, X 为 PS 特征点的优化相位, X_n 为对应时间序列特征点相位, X_0 和 X_d 分布代表 PS 点的特征向量和最大特征分量, K 为约束迭代次数, T 为特征点时序。判断优化相位是否在属性阈值内, 通过光谱对剩余差分相位进行滤波, 确定图像 PS 点位置的选择:

$$\varphi_d = \varphi_{lin} + \varphi_{no} \quad (4)$$

其中, φ_d 表示特征点的实际相位变量, φ_{lin} 表示优化相位的线性相关的变量, φ_{no} 为滤波剩余相位的非线性相关变量, 代入观测变量数值计算特征点变形数据。

1.2 GIS 技术分析

GIS 技术主要对时序 InSAR 技术获取的图像进行关键特征提取, 针对观测地区各阶段地形沉降特征与速度, 叠加多层图像突出展示沉降区域的变化情况, 调整不同色相表示不同程度的沉降区域, 并标记其中的关键特征点。同时, 对于工作人员特别关注的区域也可进一步识别提取, 划出独立范围, 帮助工作人员更直观快速的了解观测区地表沉降的总体分布和基本规律。基于时序 InSAR 技术进行 GIS 分析需要将二者有效结合, 具体流程如图 2 所示:

GIS 技术提取出的形变信息需要进一步计算, 得到沉降区域整体平均沉降量、单位沉降量, 计

市政工程

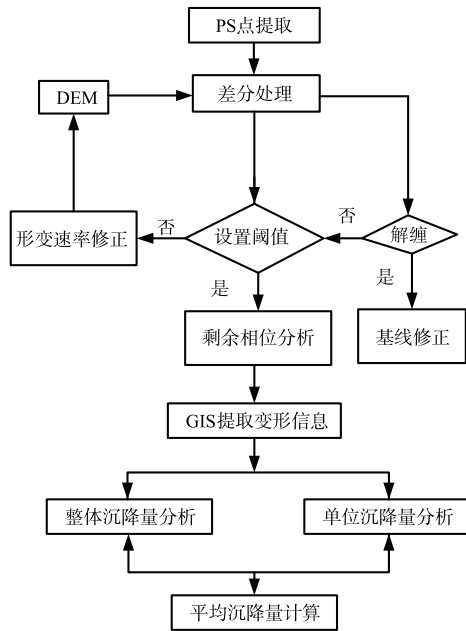


图1 时序 InSAR 技术与 GIS 分析流程图

Fig. 1 Flow chart of timing InSAR technology and GIS analysis

算公式为:

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^n \lambda_i S_i \quad (5)$$

式中, \bar{S} 表示沉降区域整体平均沉降量, λ_i 为特征点时序排列顺位系数, S_i 为特征点时序形变沉降量。基于整体沉降量导入单位权重, 计算单位沉降量为:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \lambda_i S_i \cdot \delta^x \quad (6)$$

式中, ΔS 表示区域地表单位沉降量, δ^x 为时序形变权重参数。通过上述公式计算出地表各区域沉降参数, 进行具体分布式监测分析。

2 城市地表沉降分布式监测

2.1 研究区域概况

研究区域在某大运河畔。该大运河在我国交通体系在我国交通体系中拥有重要战略地位, 是南水北调工程中的关键部分, 对我国经济文化社会的发展产生重要影响, 同时也关系着我国河道结构的稳定和生态环境的协调, 在抗洪防洪, 运水防旱等工作中起着重要作用。正因为京杭大运河的功能与特性, 使周边地区的地质结构越发不稳定, 地下水流动率高, 土壤松散, 导致地表塌陷

问题越来越严重。沧州市主要地形为河道冲积平原, 平均海拔在 15 m 左右, 观测区卫星遥感图像如下:

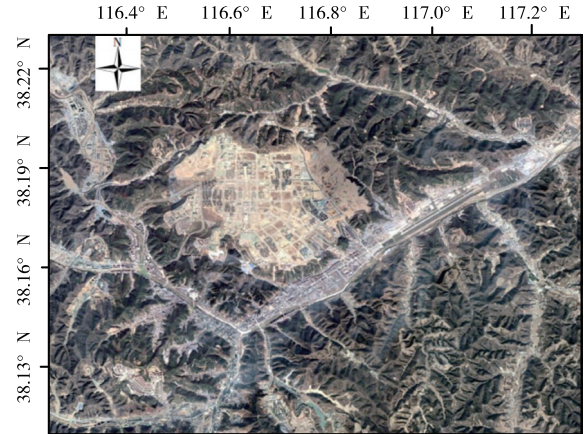


图2 某市卫星遥感图像

Fig. 2 Satellite remote sensing image of a City

2.2 时序 InSAR 地表沉降监测及数据处理

通过卫星和雷达传感器监测, 获取观测区近几年内的地形单视复数图像, 利用时序 InSAR 方法对多个图像进行时序处理。通过 VV 方法将影像数据极化, 采用 C 段滤波对图像进行降噪, 沉降分析选择降轨的轨迹方向。原始图像尺寸为 8.406 m, 通过 DEM 精确后去除了多余的地形干扰相位, 使分辨率提高, 影像方位尺寸提高到 16.381 m, 进行时序 InSAR 分析时, 图像与主图像进行匹配的误差率也控制在 0.5 像素范围内, 得到时序变化图像如下:

利用特征分解和基线检验法分析区域变形干涉范围基线图, 见图 5。设定基线时间参数为 300 天, 空间参数为 2500 m, 通过 MCF 对阈值内多项参数相位进行解缠, 生成 268 对相位组合:

由图 4 可知, 设定基线时间参数为 300 天, 空间参数为 2500m, 通过 MCF 对阈值内多项参数相位进行解缠, 生成 268 对相位组合, 由此得到区域变形干涉范围。

将时序 InSAR 方法处理得到的沉降图像和信息数据导入到 GIS 程序中, 整合叠加影像绘制整个区域地表沉降的时序形变图像, 提取关键参考样本点位置并标记。

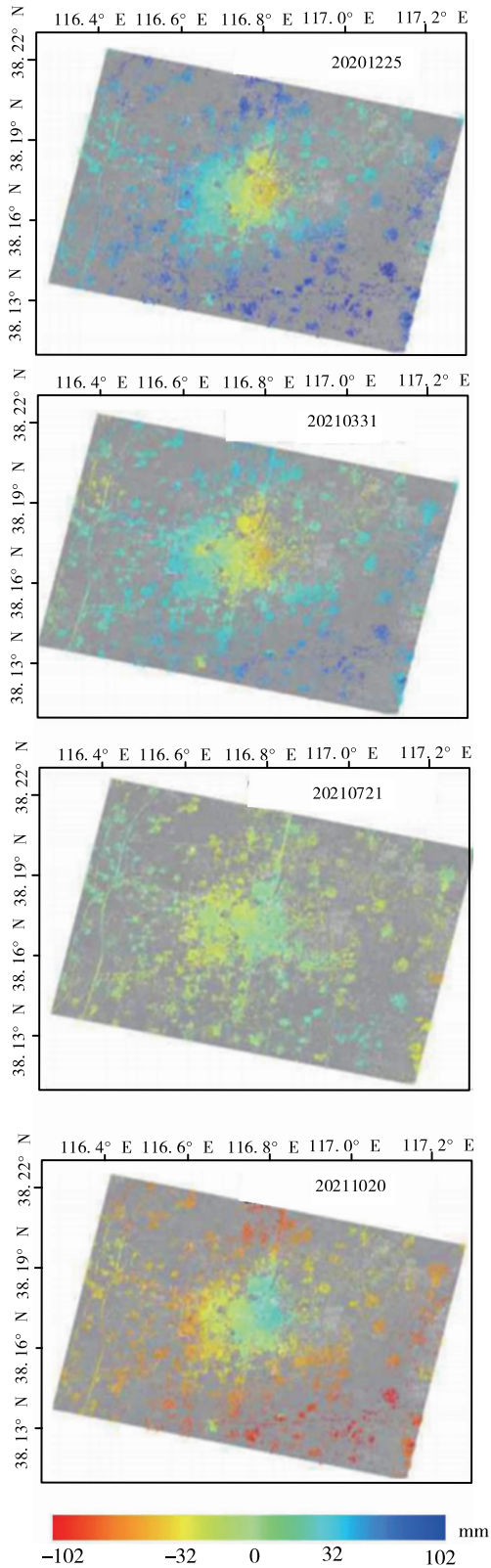


图 3 观测区域地表沉降时序变形图
Fig. 3 Time sequence deformation diagram of surface subsidence in the observation area

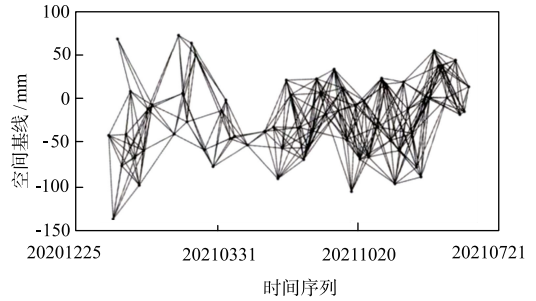


图 4 区域变形干涉范围基线图
Fig. 4 Baseline plot of the regional deformation interference range

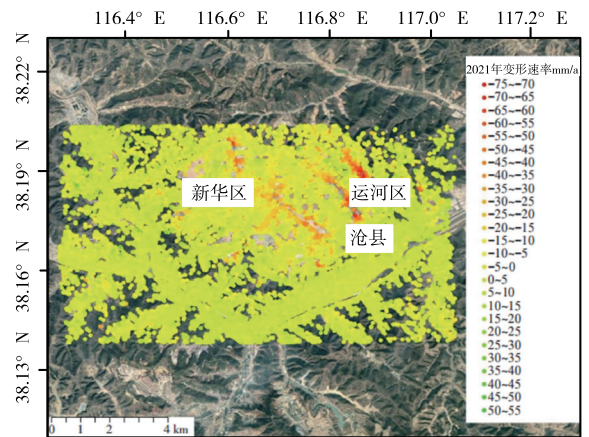


图 5 观测区地表沉降 GIS 时序变形图像
Fig. 5 GIS temporal deformation image of surface subsidence in the observation area

从图 6 可以看出, 观测区域大部分地区都存在地表沉降现象, 主要集中在河道附近地区, 与河道距离越小, 沉降程度越大, 三个参考区域中运河区沉降程度明显高于沧县和新华区。将数据导入 GAMMA 软件进行处理, 计算观测区分布式沉降速率:

$$V = \frac{V_a E_a + V_c E_c}{E} \quad (7)$$

式中, V 表示观测区地表沉降速率, E 表示观测区地表沉降时间周期, V_a 和 V_c 分别表示特征点局部沉降速率和整体沉降速度分量, E_a 和 E_c 分别表示特征点局部沉降时间和整体沉降时间分量。代入观测特征 PS 点时序变量权值, 计算观测区分布式沉降速率平均值:

$$\bar{V} = \frac{i=1}{n} VE \cdot \mu_N \quad (8)$$

式中, \bar{V} 表示观测区分布式沉降速率平均值,

市政工程

μ_N 为特征点时序变量权值。计算观测周期内各区域平均沉降速率，绘制得到沧州市地表变形速率如图 7 所示：

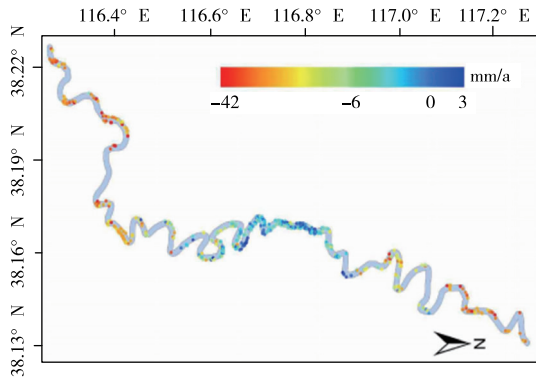


图 6 观测区域平均沉降速率

Fig. 6 Average sedimentation rate in the observed area

从 2020 年 12 月 25 日到 2021 年 10 月 20 日，观测区内靠近运河的地区沉降速率较大，平均为 32 mm/a，市区内包括其附属县城的沉降问题也比较严重，沉降速率在 12 mm/a 左右，M 区和远离市区的经济开发区沉降速率最慢，普遍低于 4 mm/a。这一观测与分析结果与沧州市基本地形结构和环境变化情况相吻合。

总体看来该区域沉降问题比较严重，各个区域受地质条件影响沉降速率不同，但整体情况在三年内一直处于地表沉降过程中，将会对该区域交通经济发展和社会生活稳定会造成不确定性影响，也会直接影响运河的输水抗洪功能和城市生态环境的平衡稳定。

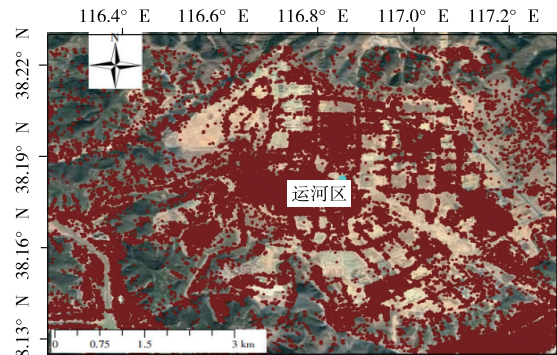
3 试验研究

为了验证所研究方法的有效性，设计了对比试验监测区域内分布式沉降情况，并与传统的光纤传感技术和 SBAS-InSAR 监测方法进行对比分析。研究选用了欧洲空间局 33 景的 C 段滤波 SAR 卫星图像，扫描宽度为 12 km，调整提高地表分辨率到 30 m×30 m，根据地形选取多个采样点装置传感设备进行监测。

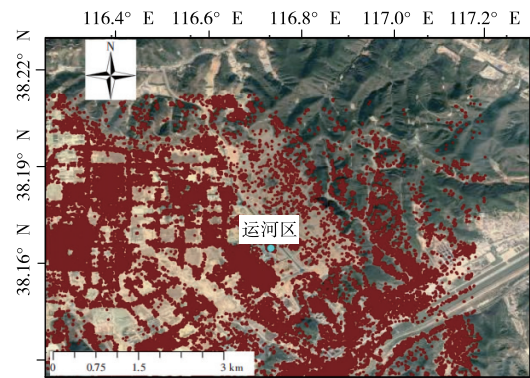
3.1 试验图像对比

基于相同的观测传感设备，将监测所得形变数据信息导入到处理系统，通过三种分析方法获

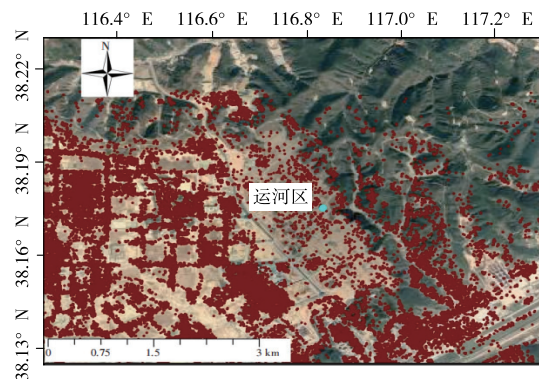
取到的地表沉降变形范围监测图像如下：



(a) 时序 InSAR 方法



(b) 光纤传感技术方法



(c) SBAS-InSAR 监测方法

图 7 地表沉降监测范围图像对比

Fig. 7 Image comparison of the surface subsidence monitoring range

如图所示，研究方法对区域内地表沉降与形变监测结果更加准确，通过叠加强度影像方法获取到的图像更加全面完整，除了运河区等主要沉降区域，城区外距离较远的区域也有监测覆盖。而其他两种传统方法分析得到的监测图像主要展示出城区内和运河流域的沉降形变信息，对于沉

降问题不严重的区域的图像表示不全面, 达不到目前地形分布式监测的要求。

3.2 试验结果与分析

随机提取观测区内某一观测点监测数据进行分析, 按照时间序列对比三种方法监测数据变化趋势, 得到数据变化对比结果如图所示:

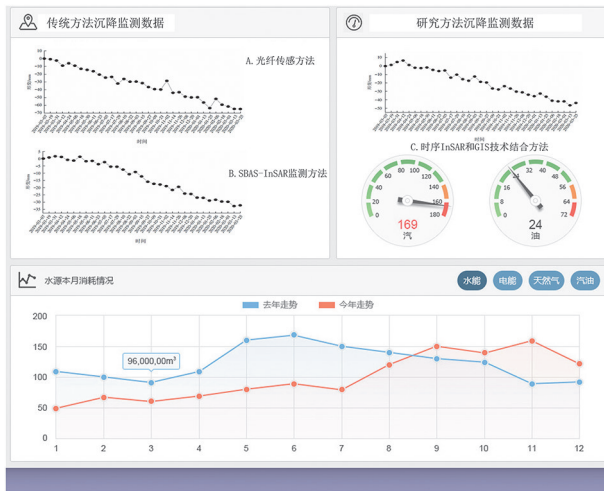


图 8 观测区地表沉降时序变化形变数据

Fig. 8 Time deformation data of surface subsidence in the observation area

从上图可以看出, 研究的基于时序 InSAR 和 GIS 技术的城市地表沉降分布式监测方法的数据处理与分析结果更精准, 与实际监测所得的形变数据误差率不超过 0.8%。而光纤传感技术所得监测数据存在明显误差, 受到观测区域地形条件影响, 该观测点距离运河位置较近, 地质结构不稳定, 地表沉降形变并不是匀速变化, 会存在假性沉降问题, 即土壤湿度增加导致地表土层密度降低, 但还未发生地表沉降, 因此光纤传感监测方法容易受土壤密度变化误导从而判断出地表结构发生变形。SBAS-InSAR 监测方法分析数据准确率较低, 与实际变形数据对比只有 70% 左右, 因为该方法对于地表变形区域的数据采用大量相关性分析, 导致数据惯性影响较大, 准确率不高。

综上所述, 研究的基于时序 InSAR 和 GIS 技术的城市地表沉降分布式监测方法对于地表沉降分布式监测图像更加全面具体, 时序监测形变数据准确率高, 能够有效实现对复杂地质区域的地表沉降分布式监测与分析, 具有良好的应用效果和监测效率。

4 结束语

针对传统方法在地表沉降监测不精准、效率低的弊端, 提出了一种基于时序 InSAR 和 GIS 技术的城市地表沉降分布式监测方法, 得出以下结论:

(1) 选用时序方法对卫星地理影像进行叠加强度处理, 获取观测区地形三维空间信息图像, 引入时序因素, 有效提高图像的分辨率和时空范围。

(2) 利用 GIS 技术与时序相结合, 提取图像特征点, 进一步精确地表沉降平均值和单位沉降量, 有利于提高沉降监测速率计算精准度。

通过试验证明, 研究的方法能够有效满足地表沉降分布式监测需求, 但通仍存在一些局限性:

(1) 该监测方法对监测传感设备要求较高, 除了卫星与雷达监测之外仍需要大量地质监测传感器。受环境条件影响, 长期不间断的监测会对设备造成诸多损耗, 操作成本高。未来研究应进一步优化局部地质信息雷达探测的精度, 优化监测资源配置和成本投入。

参 考 文 献

- [1] 武建, 王涛, 李波, 等. 基于分布式光纤传感的盾构隧道沉降监测方法研究 [J]. 河南科学, 2021, 39 (6): 51-57.
- [2] 刘泽洲, 卢才武, 章赛, 等. 基于多阈值目标提取的时序 InSAR 矿区地表沉降监测研究 [J]. 中国矿业, 2022, 31 (8): 76-85.
- [3] 李治斌, 党星海, 蔡明祥, 等. 基于 PSInSAR 技术的珠海市地表沉降监测与归因分析 [J]. 自然灾害学报, 2021, 22 (1): 102-108.
- [4] 王洪明, 李如仁, 覃怡婷, 等. 基于时间序列 InSAR 技术监测矿区多特征地表形变研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33: 1-8.
- [5] 汪生燕. 基于 PS-InSAR 技术的城市地表沉降监测 [J]. 地理空间信息, 2020, 18 (9): 59-67.
- [6] 李伟学. 基于时序 InSAR 技术的三峡大坝及周边地区形变监测 [J]. 水力发电, 2021, 04 (5): 101-107.
- [7] 高辉, 罗孝文, 吴自银, 等. 基于时序 InSAR 的珠江口大面积地面沉降监测 [J]. 海洋学研究, 2020 (2): 038-045.

(下转第 111 页)

击数量的增加, 每秒的字节传输数量呈现稳步增长趋势, 能够较好地完成用户查询且系统运行良好, 即使用户同时点击量为 1000 次时, 本文系统的每秒字节传输数量依旧最高, 且运行良好, 字节传送稳定; 而其他两种系统随着用户点击数量的增加, 每秒的字节传输数量均会出现显著的波动情况, 由此说明本文系统承载力较好。

5 结论

根据本文设计的基于 SSH2 框架的智慧建筑施工信息查询系统, 得出以下几点结论:

(1) 本文系统功能全面详细且硬件页面直观、便捷易于操作处理, 同时还具有大量个性化的有关建筑施工信息服务, 增强用户体验。

(2) 该系统查询建筑施工信息广泛, 且信息分布全面较为均匀, 信息节点间的关联性较强, 检索速度较快且覆盖范围较广。

(3) 性能测试证明, 此系统所用查询时间较短, 整体耗用较少, 并且在大量建筑施工信息扩充的环境下也能保证较高的查全率和精准度。

参 考 文 献

[1] 周文, 贾金原. 一种 SVM 学习框架下的 Web3D 轻量级模型

检索算法 [J]. 电子学报, 2019, 47 (1): 92-99.

- [2] 赵鹏, 张亮, 胡菡, 等. 微信环境下智慧旅游信息系统设计与实现 [J]. 地理空间信息, 2019, 17 (2): 38-40.
- [3] MA H. The construction path and mode of public tourism information service system based on the perspective of smart city [J]. Complexity, 2020, 4 (3): 12-17.
- [4] 刘俊, 但文红, 程东亚, 等. 云南省农业可持续发展评价及其子系统耦合协调性关系研究 [J]. 生态经济, 2020, 36 (4): 107-115.
- [5] 张磊, 张欣. 基于煤炭产业的多元生态结构发展研究 [J]. 能源与环保, 2019, 41 (2): 111-114.
- [6] 张锦坤, 杨孟飞, 乔磊, 等. 基于有限状态机的操作系统需求层形式化验证 [J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45 (2): 48-55.
- [7] 张腾, 李常宝, 李晓辉, 等. 基于弹性搜索的异构多表联查方法 [J]. 信息技术, 2020, 44 (12): 148-151+157.
- [8] 张礼庆, 郭栋, 吴绍岭, 等. 一种最大化内存共享与最小化运行时环境的超轻量级容器 [J]. 计算机研究与发展, 2019, 56 (7): 1545-1555.
- [9] 李祚泳, 魏小梅, 汪嘉杨. 同型规范变换的不同预测模型具有的兼容性和等效性 [J]. 环境科学学报, 2020, 40 (4): 1517-1534.
- [10] 卢岩. 大数据环境下的高校就业信息管理系统设计 [J]. 信息技术, 2021 (5): 5-11.
- [11] 赵宏伟. 基于智能数据分析的电子档案转递查询方法 [J]. 信息技术, 2021 (9): 39-44.

(上接第 105 页)

- [8] 蒲川豪, 许强, 蒋亚楠等. 延安新区地面沉降分布及影响因素的时序 InSAR 监测分析 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2020, 45 (11): 11-19.
- [9] 于书媛, 杨源源, 张鹏飞, 等. 运用时序 InSAR 技术监测合肥市地面沉降及断裂活动 [J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41 (4): 115-123.
- [10] 钟储汉, 王强, 王霞迎, 等. 基于 InSAR 技术的东营市地面沉降监测及多诱发因素分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41 (7): 012-018.
- [11] 许强, 蒲川豪, 赵宽耀, 等. 延安新区地面沉降时空演化特征时序 InSAR 监测与分析 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2021, 46 (7): 131-137.
- [12] 赵峰, 张雷听, 王腾, 等. 城市地表形变的双极化 Sentinel1 数据极化时序 InSAR 技术监测 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2022, 47 (9): 82-90.
- [13] 栾元重, 梁耀东, 纪赵磊, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术采动地表沉降监测与分析 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (10): 17-25.
- [14] 夏锐, 李铁, 张景发, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的 M 矿区沉降监测与建筑群安全性研究 [J]. 自然灾害学报, 2022 (3): 031-036.
- [15] 陈有东, 张立峰, 何毅, 等. 升降轨 Sentinel-1A 时序 InSAR 的中川国际机场地表形变监测与分析 [J]. 工程地质学报, 2022 (3): 030-037.