

韩文斌, 于永堂, 孙荣, 等. 基于北斗系统的地表与地下一体式沉降监测新方法[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 69–74.
[HAN Wenbin, YU Yongtang, SUN Mo, et al. Study on a New Method for Integrated Surface and Sub-surface Settlement Monitoring Based on BeiDou Navigation Satellite System[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 69–74. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2024.01.012.]

基于北斗系统的地表与地下一体式沉降监测新方法^{*}

韩文斌¹, 于永堂^{2,3}, 孙荣¹, 郑建国^{3,4}, 欧阳山³

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 3. 西安建筑科技大学交叉创新学院, 陕西 西安 710055; 4. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要: 为实现对地质灾害易发区地表沉降与地下沉降的同步、实时、自动监测, 研发了基于北斗系统的地质体地表与地下一体化沉降监测新方法。该方法融合了北斗系统、静力水准仪、分层沉降标等沉降监测技术, 监测原理如下: 在稳定区域设置北斗基准点, 在监测区域设置工作基点与监测点; 工作基点处的北斗卫星接收机与静力水准仪安装至同一桩上, 北斗卫星接收机观测工作基点处静力水准仪的绝对沉降; 监测点处的静力水准仪与分层沉降标同轴连接, 分层沉降标将深层沉降引至地面由静力水准仪观测; 北斗系统与静力水准系统同步采集数据, 数据经时间同步后分别得到工作基点和监测点的绝对沉降量。该方法成功解决了大面积沉降监测中面临的非稳定工作基点校测问题, 实现了对地质体地表与地下沉降的远程和实时监测。

关键词: 北斗卫星定位系统; 静力水准系统; 沉降监测; 分层沉降

中图分类号: X43; X915.5; P225; P642.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2024)01-0069-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2024.01.012

我国是地质灾害较严重的国家, 具有种类多、分布广、频率高、危害重等特点, 每年都因此遭受巨大的经济损失, 其中由于地下固体或流体开采引起的地面沉降灾害较为频发^[1-2]。当前对地质体的沉降监测大多重视地表沉降监测而忽视地下沉降监测, 实际上在一些场地, 地下深层沉降往往率先发生, 而后才反映在地表沉降。因此仅通过地表沉降监测难以及时发现安全隐患, 若要全面反映地质体的变形与稳定状态, 应同时建立包括地表、地下一体式监测网络, 实现从定性分析区域沉降特征到定量分析土层变形特征的转变^[3-5]。

目前, 地表沉降监测方法主要有几何水准测量法、全站仪法、合成孔径雷达干涉(InSAR)测量法、静力水准测量法、卫星定位测量法等^[6-9]。上述方法中, 几何水准测量法、全站仪法观测不连续、人工临时施测、受天气影响大, 难以及时分析沉降演化趋势和发现地质灾害隐患。InSAR测量法可观测大面积地表变形数据, 在掌握区域性场地的变形特征方面具有优势^[10], 但数据处理复杂、且受地形和大气影响大, 无法快速反应地面沉降变形情况。静力水准系统(Hydrostatic leveling sys-

tem, HLS)具有观测精度高、自动化性能好和实时测量功能强等特点^[11], 已广泛应用于大型水利枢纽、高层建筑和高速轨道等工程, 但测量时需要保证位于基准点处的储液罐不发生沉降或其发生沉降后可准确测量, 这样才能保证测量结果的准确性。HLS在大范围滑坡体、大规模地下采空区和大面积沉陷区等应用时, 常会面临无稳定基准点或基准点发生沉降后未能及时发现, 以及监测点测量值不准确等问题, 该方法以往只用于测量地表沉降, 无法实现对不良地质体的深层沉降监测。全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)可满足大规模、区域性、危险地段的沉降监测需求, 具有定位快、全天候、自动化、连续性、测站间无须通视, 适合大区域布测等优点^[12]。现有的全球导航卫星系统中, 北斗导航卫星系统(BeiDou Navigation Satellite System, 简称BDS)是我国自主研发、独立运行的全球卫星导航系统, 国家正向各行业推广和应用^[13]。利用BDS系统进行变形监测时, 需要运用合理的数据组合策略、误差改正模型、周跳探测与修复方法、参数估计方法和模糊度固定策略等数据处理方法来实现高精度定位^[14], 实现事后处理静态测量毫米

^{*} 收稿日期: 2023-07-19 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-086); 陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-499); 国家自然科学基金项目(42072302)

第一作者简介: 韩文斌(1982-), 男, 汉族, 甘肃省天水人, 正高级工程师, 主要从事地下工程及岩土工程设计研究。

E-mail: 215099068@qq.com

级精度,实时动态差分厘米级精度,广域双频接收机分米级精度,当采用特殊的观测措施、精密星历、适当的数据处理模型和软件降噪后,精度可以达到毫米级甚至亚毫米级^[15]。目前 BDS 定位测量设备成本仍偏高,在监测密度较高时,总体造价较高,限制了其规模化推广应用。因此,需要探索将 BDS 定位测量设备与其他传感器组合、同其他观测手段结合,降低监测成本,以实现更好的应用效果。分层沉降标法是通过在监测区域内钻探不同深度的钻孔,在孔内放入底端带沉降板的测杆,测杆保持垂直,外部加护管保护,逐段逐节引出地面并回填钻孔与护管之间的空隙,然后采用水准仪观测不同深度沉降标的测杆高程变化。该方法的优点是监测地层的结合性好,沉降传递直接可靠,但存在观测工作量大,观测时效性差、观测频次低等不足^[16]。

本文利用 BDS 长距离、全天候、高精度定位, HLS 高精度、高频率监测,以及分层沉降标与被测地层结合性好、可靠性高的特点,将 BDS、HLS、分层沉降标相结合,取长补短、优势互补,研发了地表与地下一体式沉降监测新方法,并通过性能测试、误差分析,对该方法的测量效果进行了检验。为北斗系统在变形监测中的应用提供了一条新思路。

1 测量原理

本文介绍的基于北斗系统的地表与地下一体式沉降监测新方法的基本原理如图 1 所示。在地质构造稳固,地势较高,无物体遮挡、无强电场和微波电磁干扰的区域设置北斗基准点,在监测区域设置工作基点与监测点;工作基点处的北斗卫星接收机与静力水准仪安装至同一工作基点桩上,利用北斗卫星接收机观测工作基点处静力水准仪(相当于原静力水准系统的基准站)的绝对沉降;监测点处的静力水准仪与地面标或分层沉降标同轴连接,测杆将深层沉降引至地面由静力水准仪观测;北斗系统与静力水准系统同步采集数据,数据经时间同步后得到工作基点的绝对沉降量,然后再由式(1)、式(2)计算各监测点的绝对沉降,最终实现对地面标及分层沉降标所监测地层的绝对沉降监测。

$$H_{ic} = H_i + H_{ig}, \quad (1)$$

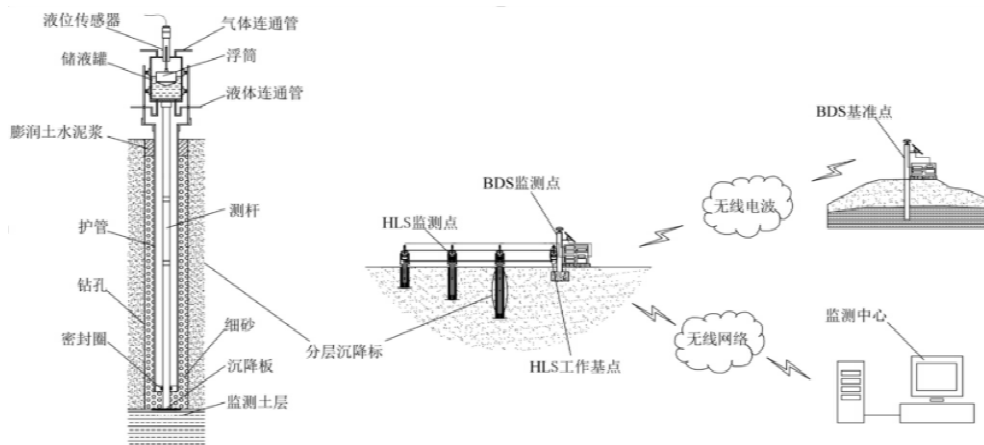


图 1 基于北斗系统的地表与地下一体式沉降监测原理

$$H_{ig} = (h_{i0} - h_{ig}) - (h_{j0} - h_{jg}). \quad (2)$$

式中: h_{i0} 为初始时刻 HLS 第 i 个监测点的储液罐液位高度(mm); h_{ig} 为测试时刻 HLS 第 i 个监测点的储液罐液位高度(mm); h_{j0} 为初始时刻 HLS 工作基点的储液罐液位高度(mm); h_{jg} 为测试时刻 HLS 工作基点的储液罐液位高度(mm); H_{ic} 为地面标或分层沉降标所监测地层的绝对沉降(mm); H_i 为 HLS 工作基点的绝对沉降(mm); H_{ig} 为测试时刻 HLS 第 i 个监测点相对于工作基点的沉降(mm)。

本沉降监测新方法的实施方式如下:

1) 监测装置组合与安装。分层沉降标与静力水准仪的组合方式见图 1。在基准点处,将北斗卫星接收机安装在基准桩上;在工作基点处,将北斗卫星接收机和静力水准仪储液罐安装至同一工作基点桩上;在监测点处,将静力水准仪的储液罐与分层沉降标的测杆同轴连接,置于扶正套筒内;将工作基点处和监测点处的静力水准仪串联,并将各储液罐采用气体和液体连通管相互连接。

2) 监测数据采集与传输。BDS 基准点和工作基点处的卫星接收机以 3~5 s 的采样频率持续接收卫星信号,再由串行端口传送至基准点上的无线电台,无线电台将卫星接收机实时接收的卫星信号同步传送至工作基点处的接收电台,电台接收基准点数据,结合工作基点处北斗卫星接收机自身观测数据,在系统内采用载波相位动态实时差分技术对数据进行定位解算,得到厘米级的定位结果,定位结果通过无线通信模块发送至服务器端。与此同时, HLS 以 5~10 min 的采样间隔时间,通过无线传输模块将 HLS 工作基点和监测点的沉降监测数据传输至监测中心服务器存储。

3) 监测数据处理与分析。服务器根据 BDS 所接收的北斗卫星信号数据解算高精度定位结果,求解过程如下:首先,进行卫星信号的周跳探测与修复,确保算法初始化解算时使用的载波相位数据为无周跳的数据;随后,建立载波相位双差观测方程,求解基准点与工作基点之间基线的双差整周模糊度候选解;最后,使用 ratio 检验法判断整周模糊度是否可靠,将通过 ratio 检验法的整周模糊度代入方程求解基线矢量,结合基准点的已知坐标,得到工作基点的高精度坐标,完成静态相对定位解算过程,得到工作基点高精度定位结果。将 BDS 和 HLS 观测数据进行时间同步处理,得到工作基点的绝对沉降量,然后再由式(1)、式(2)计算各监测点的绝对沉降。

2 性能测试

2.1 测试方法

BDS 和 HLS 的精度测试试验现场如图 2 所示。



图2 精度测试装置

本次试验所用的 BDS 系统为自主集成开发,主要设备配件包括:①接收机:采集北斗卫星数据进行实时动态定位,监测位移和沉降;②北斗天线:用于接收北斗卫星信号;③太阳能控制器:控制蓄电池充、放电;④定时开关:电源开关控制装置,用于定时重启;⑤4G 通信模块:将北斗接收机数据发送至服务器。HLS 系统采用长沙亿拓土木工程监测仪器有限公司生产 YT-DG-0310 型静力水准仪,位移测量传感器为电感调频式位移计,适用温度范围为 $-20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$,仪器量程为 100 mm,分辨率为 0.01 mm。

试验时,将 BDS 的北斗卫星接收机的天线与静力水准仪的储液罐连接成一体,通过高度游标卡尺调整并测量静力水准仪储液罐和北斗天线的高度变化。试验所用高度游标卡尺量程为 200 mm,测量精度为 ± 0.02 mm,远高于 BDS 和 HLS 的观测精度。

2.2 评价指标

鉴于高度游标卡尺的测量精度远高于 BDS 和 HLS,为此假定高度游标卡尺的观测值为“真值”,则 BDS、HLS 的绝对误差计算公式为:

$$\delta_i = |x_i - x'_i| \quad (3)$$

式中: x_i 为 BDS 或 HLS 的观测值, x'_i 为高度游标卡尺观测值。中误差是衡量观测精度的一种数字标准,亦称“均方根差”。本次利用中误差对 BDS 和 HLS 的观测精度进行直接评价,计算公式为:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2}{n}} \quad (4)$$

表1 HLS 观测精度测试结果

序号	高度游标卡尺观测值 x'_i/mm	HLS 观测值 x_i/mm	绝对误差 $ x_i - x'_i /\text{mm}$	中误差 ε/mm
1	8.060	7.80	0.26	0.28
2	7.602	7.39	0.21	
3	6.946	6.63	0.32	
4	6.156	5.90	0.26	
5	5.146	5.31	0.16	
6	2.241	2.66	0.42	

2.3 测试结果

HLS 的观测精度测试结果如表 1 所示,精度测试曲线如图 3 所示。根据前文给出的绝对误差、中误差计算公式,得到 HLS 的绝对误差范围为 0.16 ~ 0.42 mm,中误差为 0.28 mm。根据国家标准《工程测量标准》^[17]中对变形观测点高程中误差的要求,HLS 的中误差满足二等以上的变形观测要求。

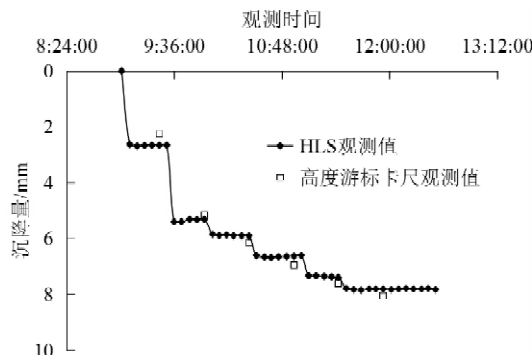


图3 HLS 精度测试曲线

BDS 有两种定位方法:当需要实时动态监测时,采用实时动态差分(RTK)方法,主要用于快速变形或缓慢变形中存在突变的变形体测量,观测精度为 ± 15 mm + 1 ppm;当需要进行高精度变形监测时,采用静态相对定位方法,主要用于变形缓慢的长期变形监测,观测精度为毫米级。实际工程中,为判断静力水准系统工作基点的稳定性,需要采用高精度的静态相对定位方法观测工作基点的沉降变形情况。当卫星历元数量为 14 000 组时,BDS 的静态相对定位观测精度测试结果如表 2 所示,精度测试曲线如图 4 所示,BDS 静态相对定位的绝对误差范围为 0.39 ~ 2.74 mm,中误差为 1.57 mm。

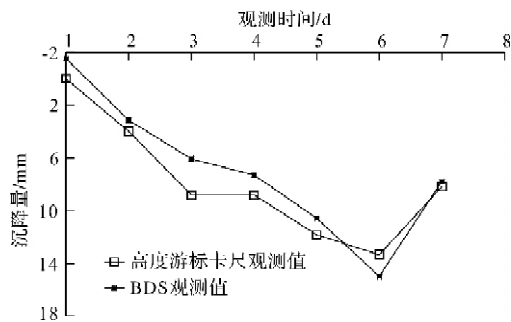


图4 BDS 精度测试曲线

表2 BDS 观测精度测试结果

序号	高度游标卡尺观测值 x'_i/mm	BDS 观测值 x_i/mm	绝对误差 $ x_i - x'_i /\text{mm}$	中误差 ε/mm
1	0.00	-1.52	1.52	
2	3.99	3.15	0.84	
3	8.82	6.08	2.74	
4	8.82	7.29	1.53	1.57
5	11.84	10.57	1.27	
6	13.34	14.97	1.63	
7	8.16	7.77	0.39	

3 误差分析

3.1 北斗系统测量误差

目前,对缓变型地面变形采用卫星定位监测时,大多采用载波相位静态相对定位方法,在理想情况下可获得较高的定位精度,然而受外部环境和仪器自身条件的限制,往往很多因素会引起定位误差,例如:①卫星载波相位整周跳变引起的误差。由于卫星信号暂时阻挡或受外界干扰,经常会出现卫星跟踪的暂时中断,发生载波相位整周跳变(简称周跳),引起后续一系列载波相位观测值发生错误,从而影响高精度定位结果。②定位数据后处理不当引起的误差。北斗监测终端设备在不同时段接收到的卫星数据质量受卫星几何分布、高空大气误差和卫星历元数量等因素的影响,不同时段定位结果时好时坏,笼统地采用整个时段所有卫星数据给出的一个定位结果,难以获得高精度定位结果。对上述误差若不采取一定措施,则无法得到稳定的高精度定位结果。因此,将北斗系统用于高填方场地地表变形监测时,需要降低定位误差,提高定位稳定性。在北斗变形监测系统监测时,集成应用了一系列消除定位误差,提高定位精度及稳定性的方法^[18-19]。首先,采用贯序极限学习机算法,进行载波相位周跳探测与修复,实现对北斗数据的预处理,保证北斗信号质量;然后,采用载波相位静态相对定位方法,给出某一时段的高精度定位结果;最后,采用层次分析法对不同时段定位结果加以分析,并运用分时段加权组合定位的后处理方式,进一步降低误差,提高定位精度。

3.2 储液罐倾斜引起的误差

静力水准仪的浮体与导杆相连,导杆伸入电感式位移计内随浮体上下自由运动。当储液罐发生垂直位移时,浮体带动导杆同步发生垂直位移。当储液罐倾斜发生时,其测量状态如图5所示。

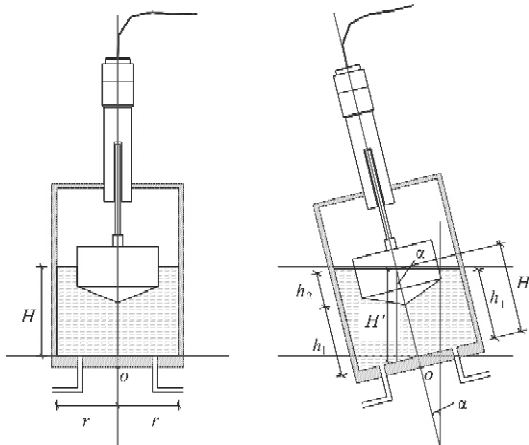


图5 储液罐倾斜时的测量状态示意图

若假定倾斜前后储液罐内的液体体积不变,则因储液罐倾斜导致的测量误差可由下式计算:

$$e = H \times (\sec \alpha - 1) \quad (5)$$

式中: e 为储液罐倾斜导致的测量误差(mm); H 为储液罐竖直状态时的液位高度(mm); α 为储液罐的倾斜角度($^\circ$)。例如,若液位高度为 200 mm,测杆倾斜角度为 5° ,则由储液罐倾斜引起的倾斜误差为 $e = 200 \times (\sec 5^\circ - 1) = 0.76$ mm。

3.3 温度引起的误差

1) 仪器构件温度变形误差的影响。若导杆和储液罐体分别由钢和铝合金制成,温度膨胀系数分别为 $\alpha_{\text{钢}} = 12.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、 $\alpha_{\text{铝}} = 23.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,两者的温度膨胀系数相差较大,当杆长为 0.2 m,温差为 10°C 时,产生温度变形差为 $l(\alpha_{\text{铝}} - \alpha_{\text{钢}})\Delta t = 0.0232$ mm。为减少该误差影响,仪器应采用膨胀系数相近的材料制成,以减小该项误差的影响。

2) 液体温差的影响。储液罐内的液体存在一定的体膨胀系数,当温度变化时,必将引起液面高度的变化,若这个变化是均匀的,采用自动化观测,观测时间基本一致,此时误差可以忽略,而对于储液罐体之间的温度差异的影响,则可在每个储液罐体中安装温度传感器,实时地测量储液罐体的温度,并和测量数据同时采集。对于液体连通管中液体温度梯度的影响,只要在安装系统时保证水管的垂直高差足够小,就可以忽略。若此变化是由于个别连通管局部受热或遇冷引起的,那么液面将会出现不均匀变化的现象,影响观测精度。此时,可在测量各容器液体的温度后对测量结果进行校正。例如,当储液罐内液体为水时,不同温度下水的密度为:

$$\rho_T = \rho_0 [1 - \beta_w (T - T_0)] \quad (6)$$

式中: ρ_T 表示温度为 T 时水的密度(g/cm^3); T 表示水的温度($^\circ\text{C}$); T_0 表示水的初始温度($^\circ\text{C}$); ρ_0 表示初始温度 T_0 时水的密度值,当温度为 $T_0 = 0^\circ\text{C}$ 时, $\rho_0 = 1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$; β_w 表示水的体膨胀系数, $\beta_w = 2.2 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ 。当温度为 20°C 时,储液罐内水柱高度为 h_{20} ,水的密度为 ρ_{20} ,由于温度变化导致水的密度变为 ρ_T ,此时引起的液面高度变化值为:

$$\Delta h = h_{20} (\rho_{20} - \rho_T) / \rho_T \quad (7)$$

4 现场应用实例

为验证本方法的实际应用效果,本次在大面积黄土高填方场地内采用本新方法进行了分层沉降监测,并传统光学水准测量结果进行了对比。本次共设置了 88.4 m、66.1 m、1.0 m 三种不同深度的沉降监测点。监测点设置在沟谷填方区的中心位置,现场勘察结果显示,试验点处的原场地上部土层为第四系全新统冲洪积层,下部为侏罗纪砂、泥岩;填筑体所用填充剂为全新世上、中

更新统风积黄土及残积古土壤,其中黄土以粉土为主,古土壤以粉质黏土为主。分层沉降标的沉降板为直径 120 mm、厚度 10 mm 的钢板,测杆为直径 32 mm 的镀锌钢管,采用直径 150 mm 的钻孔埋设,采用本新方法和水准测量方法同时观测各分层沉降标测杆的沉降变形。两种沉降监测方法的沉降观测曲线如图 6 所示,两种观测方法观测曲线的发展规律一致,相同观测时刻的沉降量差异未超过 2.0 mm,但新方法可以自动连续观测,在观测频率、时效性方面远高于传统水准测量方法。

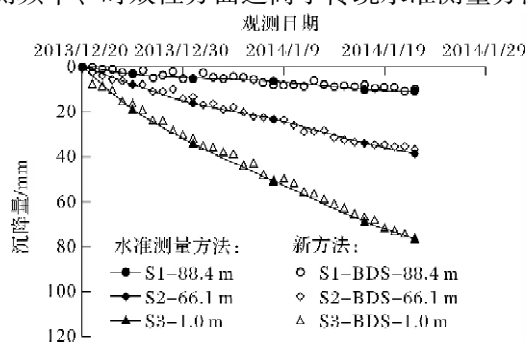


图6 两种监测方法的沉降观测曲线

5 结论与讨论

1)本监测方法集合了 BDS 长距离、全天候、高精度定位, HLS 高精度、高频率监测,以及分层沉降标与被测地层结合性好、可靠性高的特点,实现了地表和地下沉降的一体式监测。

2)本监测方法通过北斗卫星定位系统测定静力水准测量系统工作基点的高程变化,解决了大面积场地沉降监测中面临的工作基点校测问题,保证了观测结果的可靠性。

3)本监测方法的测量误差来源于北斗系统误差、储液罐倾斜误差、温度变形误差等,通过采用贯序极限学习机算法、分时段加权组合定位算法、几何修正法、温度修正法等,可降低综合观测误差。

4)本监测方法在某黄土高填方场地的沉降监测中的应用结果表明,在相同观测时刻,与传统光学水准测量值之差未超过 2.0 mm,未来可推广用于采空塌陷区、大面积沉降区等的沉降监测。

参考文献:

- [1] 陈飞. 地质灾害防治[M]. 长沙:中南大学出版社, 2017.
- [2] HERRERA - GARCÍA G, EZQUERRO P, TOMÁS R, et al. Mapping the global threat of land subsidence[J]. Science, 2021, 371(6524): 34 - 36.
- [3] 徐廷云, 杨魁, 徐骏千, 等. 天津滨海新区地面沉降多维立体监测分析方法研究[J]. 工程勘察, 2023, 51(3): 33 - 39.
- [4] 王美华, 王新新. 土体分层沉降监测技术的现状与发展趋势[J]. 建筑施工, 2016, 38(2): 232 - 234.
- [5] GAMBOLATI G, TEATINI P, FERRONATO M. Anthropogenic land subsidence[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(1): 160 - 178.
- [6] 李保平, 潘国兵. 变形监测[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2012.
- [7] 朱建军. 变形测量的理论与方法[M]. 长沙:中南大学出版社, 2004.
- [8] 周吕, 郭际明, 刘立龙. 星地 InSAR 地表沉降和建筑物变形监测分析方法及应用[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2021.
- [9] 岳建平, 方露. 城市地面沉降监控技术研究进展[J]. 测绘通报, 2008(3): 1 - 4.
- [10] 刘严萍, 王勇, 张立辉. 基于多要素大气延迟改正的 InSAR 地面沉降监测研究[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 38 - 41.
- [11] 陈德福, 聂磊. 液体静力水准仪及其应用[M]. 北京:地震出版社, 2008.
- [12] 刘美生. 全球定位系统及其应用综述(一): 导航定位技术发展的沿革[J]. 中国测试技术, 2006, 32(5): 1 - 7.
- [13] 朱永辉, 白征东, 过静琚, 等. 基于北斗一号的地质灾害自动监测系统[J]. 测绘通报, 2010(2): 5 - 7.
- [14] 侯海东, 杨艳庆, 刘垚, 等. 北斗卫星导航系统在变形监测中的应用展望[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(7): 142 - 144, 148.
- [15] 李军. 基于北斗的高精度监测系统设计与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2017.
- [16] 于永堂, 刘争宏, 张龙, 等. 拉线式深层沉降监测装置的研制[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 611 - 619.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程测量标准: GB 50026 - 2020[S]. 北京:中国计划出版社, 2021.
- [18] 夏娜, 杨鹏程, 杜华争, 等. 基于贯序极限学习机的卫星信号周跳探测与修复方法: CN103698785A[P]. 2014 - 04 - 02.
- [19] 夏娜, 宋重羲, 齐美彬, 等. 一种基于层次分析法的北斗高精度定位方法: CN106199662B[P]. 2018 - 10 - 02.

Study on a New Method for Integrated Surface and Sub - surface Settlement Monitoring Based on BeiDou Navigation Satellite System

HAN Wenbin¹, YU Yongtang^{2,3}, SUN Mo¹, ZHENG Jianguo^{3,4}, OU Yangshan³

(1. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China;

2. China United Northwest Institute for Engineering Design and Research Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

3. Institute for interdisciplinary and Innovate Research, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. China Jikan Research Institute of Engineering Investigation and

Design Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to achieve synchronous, real - time, and automatic monitoring of surface and sub - surface settlement in geological disasterprone areas, a new method for integrated subsidence monitoring of geological bodies based on the BeiDou navigation satellite system(BDS) is developed. This method integrates BDS, hydrostatic leveling system(HLS), layered settlement marker and other settlement monitoring technologies. The monitoring principle is as follows: The datum mark of BDS was set in the stable area, and the working datum mark and monitoring points are set in the monitoring area; The BDS receiver and the hydrostatic leveling instrument at the working datum mark are installed on the same pile, and the absolute settlement of the HLS at the working datum mark are observed by the BDS receiver; The hydrostatic leveling instrument at the monitoring point is coaxial connected with the lay-

ered settlement mark, which leads the deep settlement to the ground for observation by the hydrostatic leveling instrument; The BDS and the HLS collect data synchronously, and after time synchronization, the absolute settlement of the working datum mark and monitoring mark are obtained. This new method successfully solves the problem of calibration and correction of unstable working points in large-scale settlement monitoring, and achieves remote and real-time monitoring of surface and sub-surface settlement of geological bodies.

Keywords: BeiDou Navigation Satellite System; hydrostatic leveling system; settlement monitoring; layer settlement

(上接第 68 页)

- [9] 卢耀健, 刘合香, 王萌. 基于组合权重和模糊随机方法的台风灾害风险评估[J]. 模糊系统与数学, 2020, 34(2): 151-163.
- [10] 于小兵, 吴雪婧, 陈虹, 等. 基于灾害 CGE 模型的台风灾害间接经济损失评估——以广东省台风“山竹”为例[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 21-28.
- [11] 林江豪, 阳爱民. 基于 BP 神经网络和 VSM 的台风灾害经济损失评估[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 22-26.
- [12] 周纳, 刘强. 基于模糊神经网络的广东省台风灾害损失预测[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(3): 461-466.
- [13] DU X X, LI X M, ZHANG S M, et al. High-accuracy estimation method of typhoon storm surge disaster loss under small sample conditions by information diffusion model coupled with machine learning models[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 82: 1-24.
- [14] WANG K, YANG Y S, RENIERS G, et al. Predicting the spatial distribution of direct economic losses from typhoon storm surge disasters using case-based reasoning [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 68: 1-21.
- [15] ZHENG J, WANG Y M, ZHANG K, et al. A heterogeneous multi-attribute case retrieval method for emergency decision making based on bidirectional projection and TODIM[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 203: 1-13.
- [16] LIU J, MARTINEZ L, CALZADA A, et al. A novel belief rule base representation, generation and its inference methodology[J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 53(11): 129-141.
- [17] YANG L H, LIU J, WANG Y M, et al. Online updating extended belief rule-based system for sensor-based activity recognition [J]. Expert Systems with Application, 2021, 186: 1-14.
- [18] YANG L H, LIU J, YE F F, et al. Highly explainable cumulative belief rule-based system with effective [J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 240: 1-26.
- [19] YANG L H, WANG S, YE F F, et al. Environmental investment prediction using extended belief rule-based system and evidential reasoning rule [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289(6): 1-19.
- [20] 杨隆浩, 叶菲菲, 王应明. 基于扩展置信规则库联合优化的桥梁风险评估[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(7): 1870-1881.
- [21] YE F F, YANG L H, WANG Y M, Lu H T. A data-driven rule-based system for China's traffic accident prediction by considering the improvement of safety efficiency[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 176: 1-16.
- [22] YANG J B. Rule and utility based evidential reasoning approach for multiattribute decision analysis under uncertainties [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131(1): 31-61.
- [23] WANG Y M, YANG J B, XU D L. Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(3): 1885-1913.
- [24] 陈莉婷, 郑晶, 高建清, 等. 基于 FastDTW 案例检索的台风灾害应急方案生成[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 171-176.

Typhoon Disaster Direct Economic Losses Prediction Based on Cumulative Belief Rule-based System

ZHANG Kai¹, YANG Longhao², GAO Jianqing³, ZHENG Jing³

- (1. College of Information and Intelligent Transportation, Fujian Chuanzheng Communications College, Fujian 350007, China; 2. Institute of Decision Science, Fuzhou University, Fujian 350116, China; 3. College of Electronics and Information Science, Fujian Jiangxia University, Fujian 350108, China)

Abstract: In order to solve the problem of typhoon disaster direct economic losses prediction, most of the existing solutions are mainly based on the time series-based or evaluation data, which ignore the application of historical data and the interpretability of the models in the process of modeling. Therefore, this paper the extended belief rule-based (EBRB) model to typhoon disaster direct economic loss prediction are applied, and a cumulative belief rule-based (C-BRB) typhoon disaster direct economic loss prediction model based on clustering method and evidence reasoning (ER) are proposed to solve the problems of excessive belief rules and combination explosion. Finally, typhoon disaster direct economic loss prediction is carried out based on the collected typhoon disaster data. The effectiveness and feasibility of the typhoon disaster direct economic loss prediction model based on C-BRB are verified by comparing with the existing methods.

Keywords: typhoon disaster; direct economic loss prediction; cumulative belief rule base; explainable