

宜昌地震台山洞伸缩仪干扰分析

况春利, 涂先新, 王 慧

Interference analysis of the cave extensometer at Yichang seismic station

Kuang Chunli, Tu Xianxin, and Wang Hui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-119>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一款简易SS-Y伸缩仪检测盒研发及应用

Development and application of a simple detection box on SS-Y extensometer

地震科学进展. 2021(8): 376–378

不同地震台站水管倾斜仪数据资料对比分析

Comparative analysis of water pipe inclinometer data of different seismic stations

地震科学进展. 2020(11): 15–20

地震台站基础信息完善及应用分析

Analysis on the perfect and application of basic information of seismic stations

地震科学进展. 2021(9): 413–420

基于决策树算法的水位观测干扰识别模型

Groundwater observation interference recognition model based on decision tree algorithm

地震科学进展. 2019(11): 27–34

北京地电网典型干扰及影响因素浅析

Analysis of typical interference and influence factors of Beijing geoelectric field observation network

地震科学进展. 2021(12): 560–568

嘉祥地震台山洞防潮措施探索

Exploration on the moistureproof measures for the tunnel of Jiexiang seismic monitoring center station

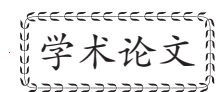
地震科学进展. 2020(8): 25–29



关注微信公众号，获得更多资讯信息

况春利, 涂先新, 王慧. 宜昌地震台山洞伸缩仪干扰分析 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(5): 331-338. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-119

Kuang C L, Tu X X, Wang H. Interference analysis of the cave extensometer at Yichang seismic station[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(5): 331-338. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-119



宜昌地震台山洞伸缩仪干扰分析*

况春利^{1,2,3)*} 涂先新^{1,2,3)} 王 慧^{1,2,3)}

- 1) 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 湖北武汉 430071
- 2) 湖北省地震局, 湖北武汉 430071
- 3) 湖北省地震局宜昌地震监测中心站, 湖北宜昌 443100

摘要 宜昌地震台新型 SS-Y 伸缩仪安装至今运行已有 10 年, 本文采用 Venedikov 调和函数方法对宜昌地震台山洞观测 SS-Y 伸缩仪 2014—2022 年数据资料进行分析。结果表明: 伸缩仪数据内在质量较好, 两个分量潮汐因子远大于 1; 且 NS 分量观测精度优于 EW 分量。通过地球物理台网数据跟踪分析平台发现, 宜昌台 2014—2022 年间 SS-Y 伸缩仪数据预处理前有各类干扰存在。经综合分析, 归纳为 4 大类干扰因素(观测系统、自然、场地、人为)影响, 数据曲线形态表现多具有突跳、台阶、断记、错误数据、同步趋势等基本特征。在对 2021 年 2 月 21 日发生的场地环境干扰进行数据滤波处理后, 两个分量可清晰记录到尖脉冲爆破干扰。对这些干扰特征的归类甄别, 可为台站形变伸缩仪数据日后预处理准确识别及异常判定提供参考。

关键词 SS-Y 伸缩仪; 数据曲线; 干扰特征; 归类甄别

中图分类号: P315.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2024)05-0331-08

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2023-119

Interference analysis of the cave extensometer at Yichang seismic station

Kuang Chunli^{1,2,3)}, Tu Xianxin^{1,2,3)}, Wang Hui^{1,2,3)}

- 1) Institute of Seismology, China Earthquake Administration (Key Laboratory of Earthquake Geodesy), Hubei Wuhan 430071, China
- 2) Hubei Earthquake Agency, Hubei Wuhan 430071, China
- 3) Yichang Seismic Monitoring Center Station of Hubei Earthquake Agency, Hubei Yichang 443100, China

Abstract The new SS-Y extensometer has been in operation for 10 years at Yichang seismic station. Data obtained by the extensometer over the period of 2014 to 2022 at Yichang seismic station were analyzed using the Venedikov harmonic analysis method. The results showed that the internal quality of the data was good. The values of the tide factor of M_2 wave of the two components were much greater than 1. The observation accuracy of the NS component is higher

* 收稿日期: 2023-08-29; 采用日期: 2023-11-02。

基金项目: 湖北省地震局(中国地震局地震研究所)基础科研基金项目(306337-37)资助。

* 通信作者: 况春利(1995-), 女, 助理工程师, 主要从事地震监测及前兆分析预报工作。E-mail: 1291980721@qq.com。



than that of the EW component. According to the geophysical network observation data tracking and analysis platform, it was found that there were various types of interference of SS-Y extensometer over the period of 2014 to 2022. After comprehensive analysis, it can be summarized into the influence of four categories of interference factors (observation system, natural environment, site environment and human interference), and the curve was mostly characterized by sudden jumps, steps, breaks, error data, synchronous trend changes and so on. Such as, after filtering processing of the site environmental interference occurred on February 21, 2021, the two components can be clearly recorded to the sharp pulse explosion interference. The classification and screening of these interference characteristics can provide a reference for the accurate identification and abnormal determination of the station data in the future.

Keywords SS-Y extensometer; data curve; interference characteristics; classification

0 引言

开展地震预测预报研究工作,关键是寻找地震前兆信息,其中大地变形观测作为一种连续监测观测站附近地壳运动或微变形工具,是获得地震前兆信息的重要手段。伸缩仪作为大地变形观测的重要技术手段之一,是通过测量两点间基线长度的位移增量来确定大地应变状态^[1]。SS-Y 伸缩仪连续监测地壳浅层变形的动态变化过程,一方面是为研究地震孕育过程地壳变形提供实测数据;另一方面为研究现今地壳运动、地球固体潮及地球形状参数等提供科学数据。早期用于大地形变观测的目视伸缩仪是我国的第一代地形变观测仪器,1983 年中国地震局地震研究所研制出了第二代观测仪器 SSY-II 石英伸缩仪,1998 年又一次研究出新型应变观测 SS-Y 伸缩仪。新型 SS-Y 伸缩仪是在原有高灵敏度基础上,采用高精度电涡流及差动变压器位移传感器原理,达到提高仪器格值稳定性。

2013 年宜昌地震台(下文简称宜昌台)形变观测安装了武汉地震科学仪器研究院研制的新型 SS-Y 伸缩仪,运行至今已有 10 年。10 年来,台站新型 SS-Y 伸缩仪观测资料在全国质量评比中连续多年获第一名。但是,过去对宜昌台 SS-Y 伸缩仪观测数据曲线扰动分析总结较少,为有效甄别干扰及异常,充分应用数据资料服务于地震预测预报,十分有必要有效掌握宜昌台伸缩仪常见干扰的特征。通过应用中国地震台网中心地球物理台网数据跟踪平台对台站数据存在的常见干扰与表现特征进行综合分析,归纳总结,很大程度地填补了宜昌台 SS-Y 伸缩仪数据在识别干扰方面的空缺。本文聚焦宜昌台升级改造后安装的新型 SS-Y 伸缩仪观测资料,并收集台站多年来常见的典型干扰现象与数据曲线扰动特征进行综合分析,依据数据跟踪平台判定指标,从干扰曲线数据中提取有效的异常信息,也为台站地震预测预报研究提供真实有用的地球物理基础数据。

1 宜昌台简介

宜昌台为国家基准地震台,位于宜昌市夷陵森林公园旁侧,邻近周围现有已建或在建的 4 座大型水电站(三峡、葛洲坝、隔河岩和水布垭)。构造上属黄陵断块东南端,周边有 4 个断裂带(新场古老背斜、天阳坪逆冲、雾都河、远安)交汇穿过。宜昌台周围区域地质构造情况如图 1 所示。新型 SS-Y 伸缩仪安装在台站观测山洞内,洞体基岩为下白垩统石门组砾岩,岩性坚硬,胶结完好。山洞过道进深达 200 m,洞内南北走向 32 m,东西走向 51 m,西北走向 100 m,洞顶覆盖厚度达 35 m,常年洞内温度 18.7℃ 左右,相对湿度 80%~90%,进洞口 7 道船舱密封门,洞内空气对流干扰小、温湿度恒定,温差日变 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$,年变 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$,山洞形变观测环境十分理想。

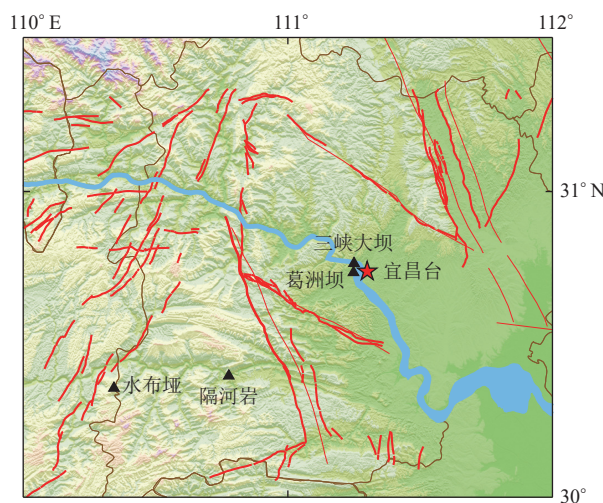


图 1 宜昌地震台附近地质构造

Fig. 1 Geological structure around Yichang seismic station

2 资料分析

2.1 正常背景

宜昌台 SSY-II 石英伸缩仪从 2007 年 7 月投入观

测以来,运行正常;2013 年完成升级改造,同年 10 月 23 日更新安装新型 SS-Y 伸缩仪运行至今,目前运行稳定,固体潮记录清晰,具有较好的远震、强震映震能力。图 2 为 2020 年 6 月 3 日无干扰状态下 24 小时

两个分量记录分钟值数据曲线光滑连续,日变周期明显。考虑伸缩仪经升级改造前后仪器存在一些差异性,本文选择了 2014—2022 年的观测数据及出现的干扰进行综合分析。

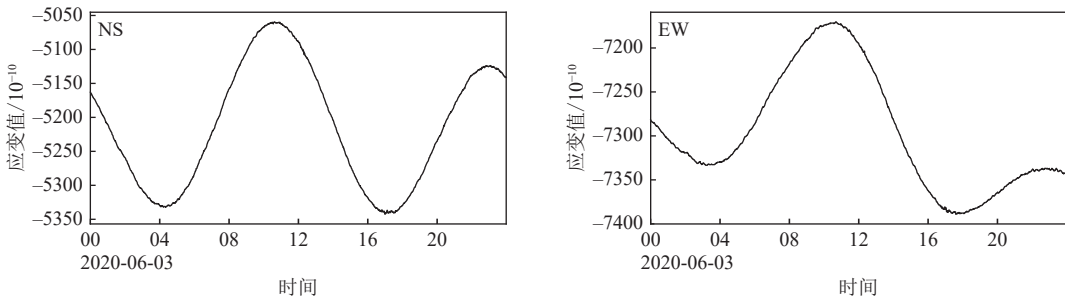


图 2 宜昌台伸缩仪观测分钟值曲线

Fig. 2 Observational minute-sampled curve of extensometer at Yichang seismic station

将伸缩仪数据曲线中不同固体潮波群分离开,采用 Venedikov 设计的奇偶数字滤波器方法,对数据进行滤波,基于最小二乘法获得数据曲线中两个分量的潮汐波振幅因子、相位滞后(称 Venedikov 数字滤波调和法)。由于宜昌台位于中纬度地区,可选择具有最大信噪比的半日波 M_2 波作为评价伸缩仪观测数据内在质量的指标参数^[2]。本文对宜昌台伸缩仪 NS、EW 两个分量 2014—2022 年数据整点值进行调和函数分析计算,得到年尺度 M_2 波潮汐因子、 M_2 波潮汐因子相对中误差(M_2 潮汐因子与 M_2 潮汐因子中误差的比值),计算结果见表 1。NS 分量潮汐因子极差 $R=0.85883$, 大于 EW 分量潮汐因子极差

$R=0.3631$, 表明 EW 分量潮汐因子变化振幅较小、数据稳定性好。两分量潮汐因子相对中误差在 2014—2022 年间均小于 0.03, NS 分量相对中误差 0.00587~0.01751, EW 分量相对中误差 0.01895~0.02952, 根据《地震及前兆数字观测技术规范》中的标准,误差值愈小,观测精度愈高,显然 NS 分量观测精度高于 EW 分量。宜昌台 2014—2022 年伸缩仪观测数据内在质量达到优良以上。我们知道,应变固体潮汐因子观测值与理论值之比理论上接近于 1,而从表 1 结果可看出,两分量潮汐因子远远大于 1,一种原因可能是计算时选用模型与真实地球存在较大差异,另一种原因可能是计算过程中没有排除海潮、气压等因素对数据的影响^[3]。

表 1 2014—2022 年宜昌台伸缩仪 M_2 波潮汐因子及相对中误差

Table 1 Factor and the Root Mean Square (RMS) of M_2 tidal factor of extensometer of Yichang seismic station over the period of 2014 to 2022

年份	NS		EW	
	潮汐因子	相对中误差	潮汐因子	相对中误差
2014	6.50167	0.01751	6.13712	0.02717
2015	6.11866	0.01421	6.04921	0.02952
2016	6.21623	0.00587	6.13296	0.02843
2017	6.25104	0.00804	6.11564	0.02879
2018	6.26086	0.00814	5.94051	0.02714
2019	5.64184	0.01502	5.85488	0.02429
2020	5.79676	0.00635	5.87081	0.02377
2021	5.99786	0.01088	5.86043	0.01895
2022	6.26727	0.01159	6.21798	0.02134

2.2 干扰分析

根据地球物理台网观测数据跟踪分析平台,统计 2014—2022 年宜昌台伸缩仪数据受干扰事件类型及曲线表现特征,具体描述见表 2,主要影响因素有观测系统、自然环境、场地环境和人为干扰。根据这 4 类干扰因素,我们分别从中选取具有代表性的事件数据曲线及其变化特征进行综合分析,为日后从干扰曲线中甄别并有效提取异常信息提供基础依据,为识别地球物理场地形变数据异常提供判定依据。

2.2.1 观测系统干扰

台站新型 SS-Y 伸缩仪观测系统主要由数采主机、采集程序、传感器、标定器、UPS 电源及数据线缆等构成,常见故障主要出现在硬件部分。由于外界环境潮湿引起仪器元器件老化、主机电路板损坏、性能不稳均属观测系统故障^[4]。经近几年干扰数据统计,宜昌台伸缩仪观测系统主要有数采主板、采集程

表 2 2014—2022 年伸缩仪主要干扰事件分类

Table 2 Classification of major interference events of extensometer over the period of 2014 to 2022

序号	干扰类型	记录条数	干扰因素	曲线特征
1	观测系统	6	数采、探头、传感器、UPS故障	断记、突跳、畸变、错误数据
2	自然环境	26	雷电、气压、雷雨	阶变、与气压曲线同步式固体潮畸变
3	场地环境	2	水库水位涨落、采石场爆破	台阶、单点阶变
4	人为干扰	37	进洞、仪器调零、标定、布置VP线缆、山洞优化改造	错误数据、台阶、畸变、突跳

序、传感器探头、UPS 电源出现故障，使其原始数据曲线上多有突跳、畸变、断记、错误数据等表现。依据伸缩仪形变学科相关处理要求，在小范围时段内对突跳数据曲线进行去突跳操作预处理，而在大范围时段内的畸变、断记、错误数据等则进行剔除相应时段原始曲线预处理，以保证观测数据精度，当然，

这样会使得数据连续率降低。2019 年 6 月 15 日，因台站 UPS 电源出现故障，伸缩仪两个分量原始曲线在 02:48—09:16 时段出现缺数，断数 6 个多小时；来电后数据在 09:17—10:18 时段又出现大幅度波动，造成曲线漂移过大，数据出错。更换 UPS 电源后，观测系统正常，数据曲线恢复常态(图 3)。

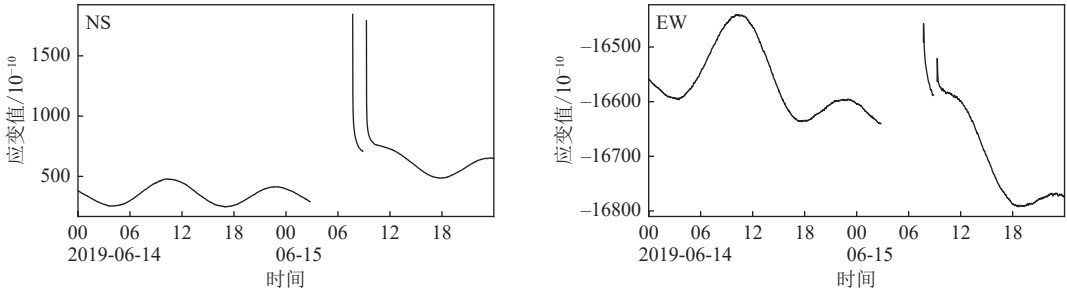


图 3 UPS 电源故障对伸缩仪两个分量数据曲线影响

Fig. 3 Interference curves of extensometer affected by UPS power failure at Yichang seismic station

2.2.2 自然环境干扰

从表 2 宜昌台伸缩仪主要干扰事件中，对其中的 26 条自然环境干扰，根据不同自然影响进行分类统计得到图 4。宜昌台伸缩仪受到的自然环境影响有气压、雷电、雷雨，其中气压变化引起的伸缩仪数据曲线畸变占比达 80% 以上。本文拟选择各类典型自然环境干扰进行分析。

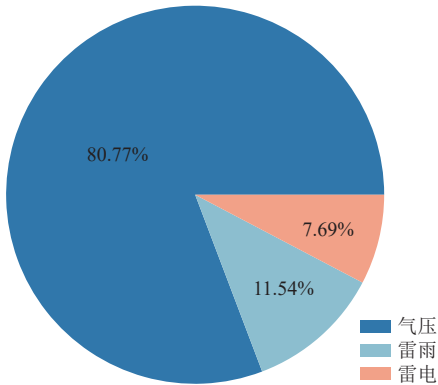


图 4 自然环境干扰统计

Fig. 4 Natural environment interference statistics

(1)雷雨干扰分析。宜昌位于湖北省西南部，属于亚热带季风湿润气候，雨水丰沛，多在夏季，较长降雨期一般发生在 6—7 月，四季分明，雨热同季，全年无霜期较长，年均降雨量 992.1~1401.1 mm。相关研究表明，降雨时一些水顺地表流走，还有些会从岩石、土层缝隙渗入地层，使得地表局部岩石吸水膨胀，孔隙压力变化，由于岩石渗透率不同，从而使岩石发生不均匀变形^[5-6]。雷雨期，宜昌地区岩石孔隙与岩土层中水系丰富，洞体覆盖岩土层重量会发生微变化，致使伸缩仪场地出现相应的微倾斜。2018 年 7 月 27 日宜昌台伸缩仪两个分量在 16:20—17:45 受同时段出现雷暴雨影响引起固体潮小幅畸变(图 5)，气压最大突变达 5.7 hPa，累计降雨量 55.2 mm；伸缩仪 NS、EW 两个分量数据曲线伴随暴雨、气压突跳而出现同步抖动，EW 分量更为敏感，变化幅度更大。17:45 后气压恢复正常，伸缩仪两分量数据曲线恢复正常。

(2)雷电干扰分析。雷电过程产生的感应磁场会使得在周边金属网格中产生感应电荷，高强度的感

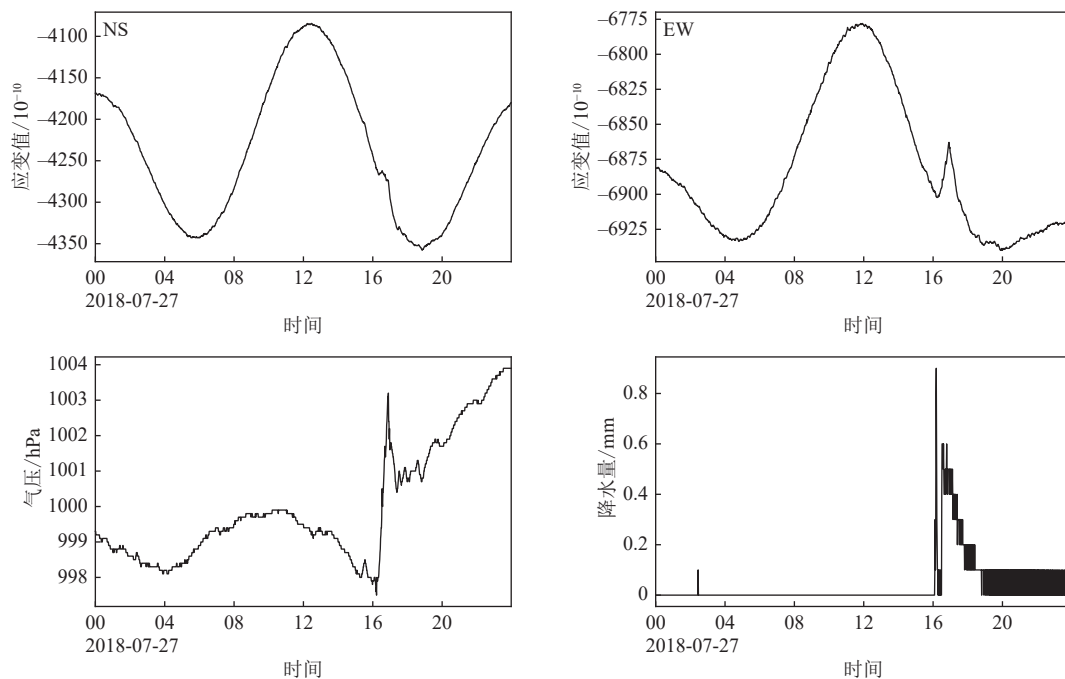


图5 宜昌台伸缩仪雷雨干扰曲线

Fig. 5 Interference curve of extensometer affected by thunderstorm at Yichang seismic station

应电荷在金属网格中形成瞬间高压电场, 从而对仪器内部弱电设备放电^[7], 根据有关资料统计, 发现台站伸缩仪在2014年、2016年经历过两次较大雷电过程影响。例如: 2016年7月27日18:00—22:00宜昌台周边经历一次强雷电过程影响, 伸缩仪两个分量原始曲线在18:00和21:00左右有两次向下、向上固体潮曲线台阶扰动, 与宜昌台测震资料核实确定, 此

时段内台站辖区及周边无地震、较大爆破等发生, 时段内雷电活动频繁, 判定宜昌台伸缩仪受雷电干扰, 由图6数据曲线可知, 伸缩仪EW分量受雷电影响产生的幅度变化最大, EW分量对雷电更敏感。2018年宜昌台实施优化改造时, 对台站防雷系统进行升级改造, 之后台站SS-Y伸缩仪两个分量数据曲线不再受雷电影响。

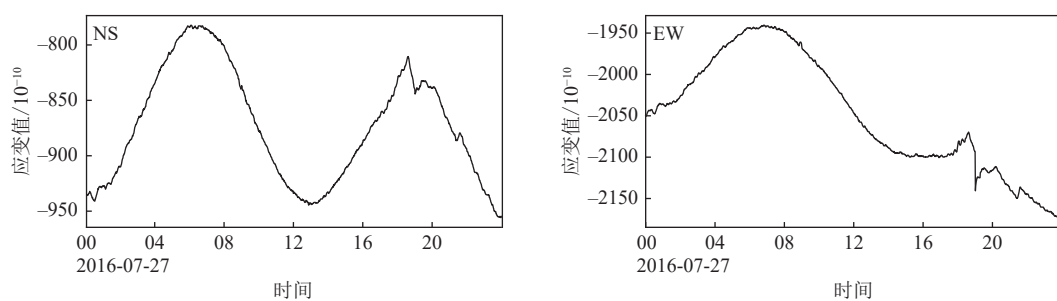


图6 宜昌台伸缩仪两个分量受雷电干扰曲线

Fig. 6 Interference curves of extensometer affected by lightning at Yichang seismic station

(3) 气压干扰分析。气压干扰影响宜昌台伸缩仪观测环境是占比最多、最易发生的一种干扰类型。外界环境大气压力的剧烈变化, 引起气体通过地表上下运移, 使得地面负荷增减, 导致岩石应力状态发生变化, 从而对伸缩仪产生影响^[8]。气压影响特点主要表现在: 固体潮观测曲线与瞬间气压变化、气流波动强度及持续时间基本同步, 很少出现长时间的趋势

性变化, 伸缩仪多分量固体潮形态同步出现短时扰动、畸变、趋势转折等变化, 很少出现数据大幅度的台阶和数据抖动情况。2019年4月25日, 受到气压短时大幅波动影响, 伸缩仪NS、EW两个分量出现了固体潮畸变, 表现形式与气压变化同步(图7)。

2.2.3 场地环境干扰

宜昌台附近大约5 km处有一小采石场, 周边地

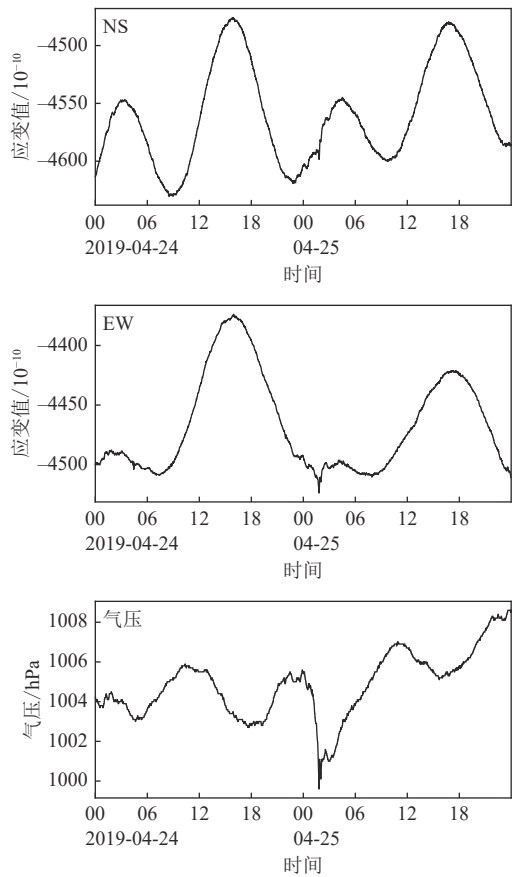


图 7 宜昌台伸缩仪气压干扰曲线

Fig. 7 Interference curves of extensometer affected by the pressure at Yichang seismic station

区有已建或在建的 4 座大型水电站(三峡、葛洲坝、

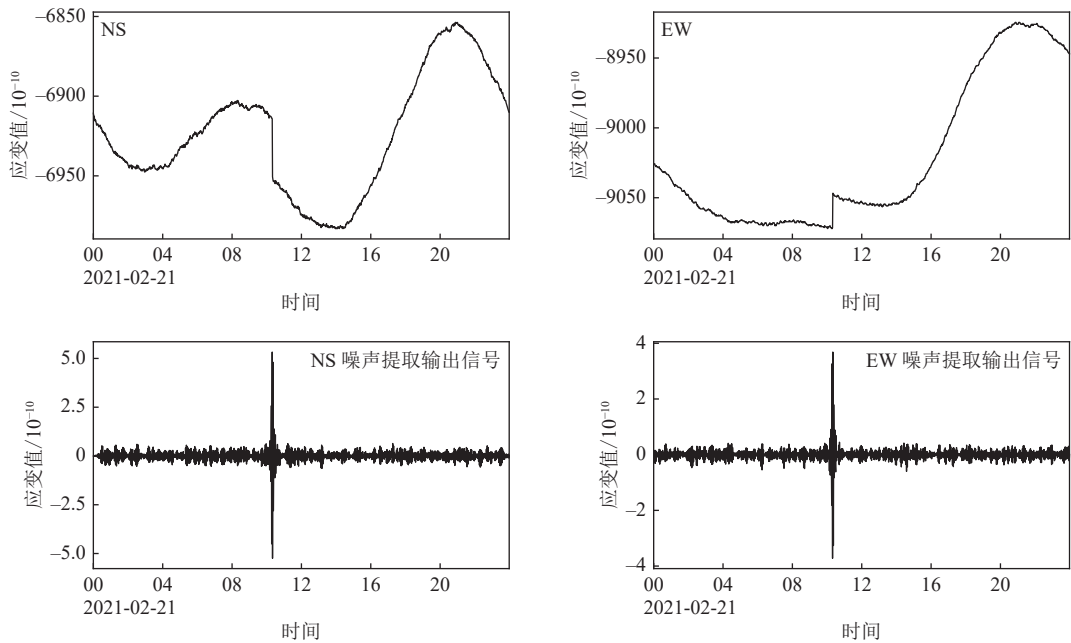


图 8 宜昌台伸缩仪爆破干扰曲线

Fig. 8 Interference curves of extensometer affected by the explosion at Yichang seismic station

隔河岩和水布垭), 它们是邻近可能的场地振动干扰源, 振动干扰存在一定随机性。2021 年 2 月 21 日, 宜昌台洞内形变仪、应变仪数据出现不同程度的错动掉格现象, 图 8 为此时刻 SS-Y 伸缩仪数据曲线变化图, NS 分量曲线阶变量为 -36.2×10^{-10} , EW 分量曲线阶变量为 24.6×10^{-10} 。经对观测系统、自然环境、人为和同震效应排查, 并与湖北地震台监测台网测震记录数据核对, 发现是由在台站 NNW 向, 方位角 330° , 距离 3.3 km 处采石场爆破所致, 震级 $M_L 2.3$; 爆破结束后, SS-Y 伸缩仪两个分量数据曲线恢复正常。随后对两个分量数据进行巴特沃斯带通滤波, 获得干扰时段高频噪声图。滤波后两个分量清晰记录是一个尖脉冲爆破干扰, 为短时尖峰。

爆破干扰甄别, 除观察数据曲线、带通滤波数据曲线变化特征外, 还可从宜昌市应急管理局提前收集到周边矿区有关爆破信息(爆炸时间、炸药量等)。对疑似爆破干扰, 应及时落实干扰异常, 做好记录日志。2014 年至今, 台站周边场地环境干扰仅发生过两次, 宜昌台周边观测环境质量良好。日常可通过台站测震记录、周边水库蓄水水位变化相关分析, 排除场地环境振动干扰或水位压变化干扰。

2.2.4 人为干扰

宜昌台山洞内除 SS-Y 伸缩仪外, 还有水管倾斜仪、垂直摆、测震仪等, 其中水管倾斜仪和垂直摆位置距 SS-Y 伸缩仪洞室最近, 人员进洞需要对洞室水

管倾斜仪、垂直摆、伸缩仪进行日常运维(检修、校准、超限调零等), 难免互相影响从而造成人为干扰, 宜昌台伸缩仪人为干扰事件较多。有时对洞内其他仪器供电、洞内照明布线、密封门维修等振动干扰都会引起伸缩仪数据曲线产生畸变。人为干扰多引起数据曲线产生突跳、台阶、缺数等特征, 比较容易识别, 这与人为活动时间点有关, 数据曲线受干扰程

度通常采取去突跳、去台阶、去除成片坏数据预处理方式来保证观测数据精度。分析人员可以通过进洞日志记录, 判断是否人为干扰。2021年9月13日台站人员进洞对伸缩仪调零标定, 在调零标定过程中, 08:55—16:39时段数据曲线明显出现突跳, 使得正常曲线幅度发生突变, 经对检定数据进行缺数处理后, 预处理数据曲线恢复正常(图9)。

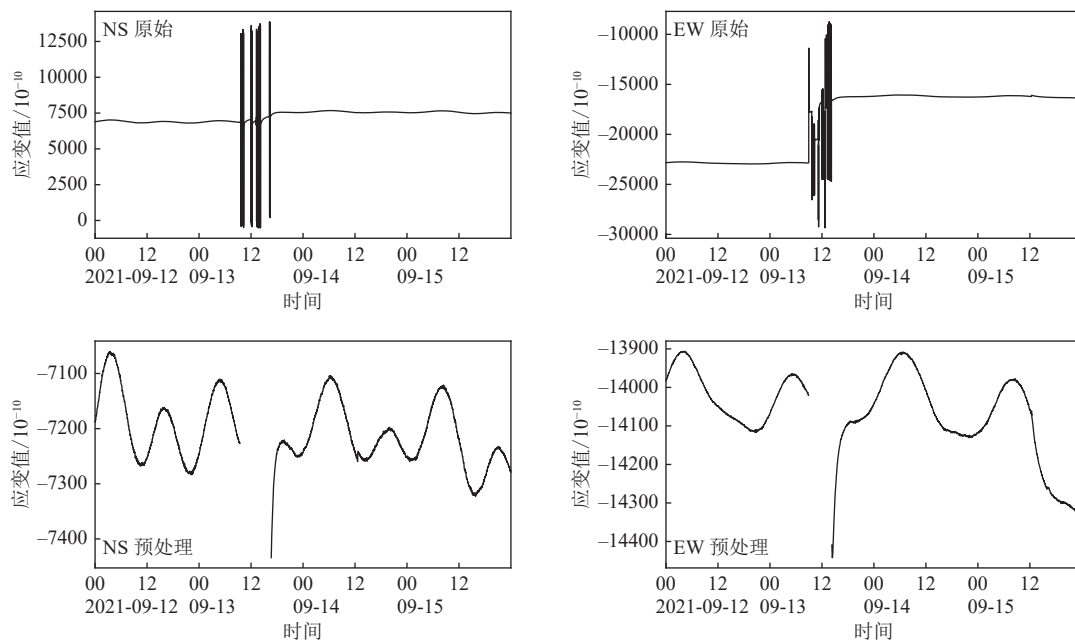


图9 宜昌台 SS-Y 伸缩仪人为干扰曲线

Fig. 9 Human interference curves of extensometer at Yichang seismic station

3 小结

综上所述, 宜昌台 SS-Y 伸缩仪 2014—2022 年观测数据质量优良, 为台站及区域地震监测提供了真实有效的监测资料。NS 分量数据精度优于 EW 分量, 而 EW 分量数据较 NS 分量更稳定; 但 M_2 波潮汐因子远大于 1, 这可能与数据在误差分析计算中未能排除环境气压变化对数据影响有关。

宜昌台 SS-Y 伸缩仪典型干扰特征综合分析表明:

(1) 宜昌台伸缩仪数据干扰成因可分为观测系统、自然环境、场地环境和人为干扰 4 大类, 其中自然环境、人为干扰为主要干扰源。

(2) 为有效降低 SS-Y 伸缩仪观测系统故障引起的干扰, 应配置仪器数采主机、探头等主要备机备件, 定期检查维护, 一旦出现故障, 及时更换, 保障连续率。

(3) 仪器自然环境干扰主要因素是受气压影响,

干扰曲线通常为阶变状、或与干扰源同步的小幅波动。

(4) 表现为错动掉格、台阶数据曲线, 应对观测系统、自然、场地环境变化因素逐一排查, 必要时可引入数字信号处理技术方法, 识别干扰。

(5) 人为干扰数据曲线常以突跳、台阶、缺数为主, 分析人员根据日志记录时间, 很容易判断人为进洞时间造成干扰, 避免误判仪器故障。日常检定运维时, 台站人员应做好进洞前各项准备, 缩短洞内时间。

通过宜昌台伸缩仪历年不同干扰分析判断, 归纳总结, 对 SS-Y 伸缩仪各类干扰因素可能引起数据曲线畸变有一个初步认识, 当然, 还可通过对各类干扰小波法、时频分析与定量化方法描述各类干扰频谱特征, 从干扰数据中提取有效的地球物理异常信息, 更好地为地震监测预报服务, 为其他台站伸缩仪识别数据干扰, 提高数据质量提供有益借鉴。

参考文献

- [1] 张娜, 龚燕民. SS-Y 型伸缩仪环境干扰的异常研究 [J]. 地震科学进展, 2022, 52(2): 84-88
Zhang N, Gong Y M. Research on environmental disturbance of SS-Y extensometer[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2022, 52(2): 84-88
- [2] 郭昱琴, 曾涛, 杨世杰, 等. 五指山形变台定点形变观测资料内在精度分析 [J]. 地震科学进展, 2023, 53(6): 278-284
Guo Y Q, Zeng T, Yang S J, et al. Internal accuracy analysis of fixed-point deformation observation data of Wuzhishan deformation station[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2023, 53(6): 278-284
- [3] 张英杰, 江永建, 李晓鹏, 等. 河北涉县台伸缩仪稳定性及资料与映震分析 [J]. 地震工程学报, 2018, 40(增刊 1): 112-116
Zhang Y J, Jiang Y J, Li X P, et al. Stability and reflecting earthquake analysis of the extensometer at Shexian seismic station[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2018, 40(S1): 112-116
- [4] 郝冉, 杨驰, 刘冬冬, 等. 徐州地震台伸缩仪观测干扰分析 [J]. 地震科学进展, 2022, 52(12): 587-592
Hao R, Yang C, Liu D D, et al. Interference analysis of the extensometer observation at Xuzhou seismic station[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2022, 52(12): 587-592
- [5] 何应文, 杨建文, 石宝文, 等. 降雨变化对云县台垂直摆倾斜仪的影响分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(4): 426-432
He Y W, Yang J W, Shi B W, et al. Analysis of disturbance characteristics from rainfall on vertical pendulum tiltmeter at Yunxian seismic station[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(4): 426-432
- [6] 陈敏, 郭欣, 郑许东. 重庆台倾斜潮汐形变干扰异常与震兆异常的识别 [J]. 大地测量与地球动力学, 2007(增刊 1): 79-83
Chen M, Guo X, Zheng X D. Recognition of disturbance and seismic anomaly from tilt tide deformation at Chongqing seismostation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007(S1): 79-83
- [7] 李波, 陈阳, 白世达, 等. 个旧地震台 VP 垂直摆倾斜仪观测干扰研究 [J]. 高原地震, 2021, 33(4): 49-55
Li B, Chen Y, Bai S D, et al. Observation interference of VP vertical pendulum tilt-meter at Gejiu seismic station[J]. *Plateau Earthquake Research*, 2021, 33(4): 49-55
- [8] 孙伶俐, 李明, 龙涛. 大气环境变化对地壳形变观测的影响研究 [J]. 地震研究, 2014, 37(3): 412-418, 489
Sun L L, Li M, Long T. Research on influence of atmospheric environmental change on crustal deformation observation[J]. *Journal of Seismological Research*, 2014, 37(3): 412-418, 489