

宽城台定点形变气压干扰小波分析及干扰排除

王嘉琦¹ 孙澎湃¹ 任俊峰¹ 袁国旭¹

1 河北省地震局承德中心台,河北省承德市殊相寺村,067000

摘 要: 通过小波分解对宽城台定点形变仪器受气压干扰的典型事件进行分析,得出气压干扰在不同频段对不同仪器的干扰特征,并通过小波阈值去噪对各测项受气压干扰的观测数据进行干扰排除,取得较好的效果。
关键词: 小波分析;气压干扰;阈值;去噪
中图分类号: P315 **文献标识码:** A

宽城地震台是定点形变台站,建台以来各测项观测资料质量较好。通过分析观测日志可知,在宽城台定点形变资料的干扰因素中,自然环境干扰是主因,其中气压干扰出现的频率较高。本文分析宽城台定点形变仪器的观测资料,选取各测项相同时间段受气压干扰的典型事件,利用小波分析方法将潮汐波分解成不同频段的信息,通过识别分析高频和低频信息,得出能够被清晰辨别的固体潮畸变信息成分与受干扰噪声成分^[1-2],再采用小波阈值去噪消除气压的影响,从而提高观测数据的质量,对地震前兆异常的识别有一定的作用。

1 台站基本情况

宽城地震台位于河北省宽城满族自治县宽城镇岔路,海拔 310 m,属燕山构造带,受马兰峪大背斜控制,位于宽城盆地边缘。台站基岩岩性为震旦系硅质灰岩,走向近 EW,沿节理透水,地貌上为高山区。仪器所处山洞的洞顶覆盖层厚度为 20~40 m,有少量植被,洞内年温差为 0.5℃^[3]。

宽城台的定点形变观测仪器共有 5 套,分别为 DSQ 水管倾斜仪、VS 垂直摆倾斜仪、VP 垂直摆倾斜仪,SS-Y 伸缩仪和 TJ-2 体应变仪,其中伸缩仪和水管仪于 2015-12 由“九五”公用数据采集器升级为“十五”智能化仪器,VP 型垂直摆倾斜仪安装于 2016-11。各仪器基本信息见表 1。

2 观测资料小波分析

气压变化影响一般来自于气温的变化,气温变化使大气压产生波动,导致洞腔内的空气出现

振荡,从而使形变观测仪器的数据发生变化^[4]。通过对宽城台定点形变观测数据的观察与分析可知,其观测曲线受气压影响的主要变化形态为不同幅度的抖动。

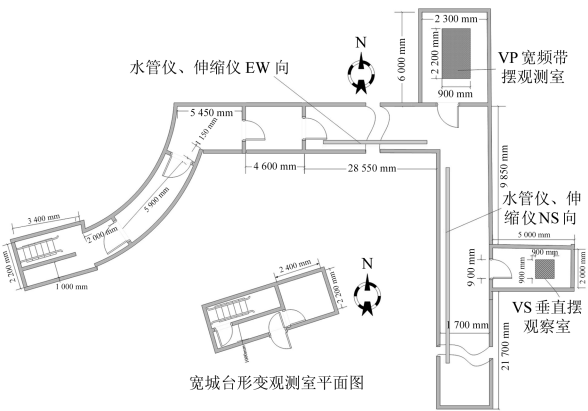


图 1 宽城台山洞平面图
Fig. 1 Ichnography of Kuancheng station cave

表 1 宽城台定点形变仪器基本信息
Tab. 1 Basic information of fixed point deformational instruments of Kuancheng station

| 仪器型号 | 洞进深/m | 基线长度/m | 分辨率 |
|------------|-------|-------------------|---------------------|
| DSQ 型水管倾斜仪 | 75 | EW=23.69,NS=28.39 | 0.000 5" |
| SS-Y 伸缩仪 | 75 | EW=23.69,NS=28.39 | <1×10 ⁻⁹ |
| VS 垂直摆倾斜仪 | 75 | — | 0.000 1" |
| VP 垂直摆倾斜仪 | 75 | — | 0.000 1" |

2.1 小波变换的基本原理

对连续小波变换进行离散化处理可以增加计算的可行性,离散小波变换通常只对尺度因子 a 及平移因子 τ 进行离散化处理^[5]。在连续小波变

换的计算中,通常将小波母函数表示为:

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi[(t-\tau)/a] \quad (1)$$

式中, $a, \tau \in R, a \neq 0, \psi$ 为可容许的。设定 $a > 0$, 相容性条件的表达式变为:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (2)$$

将离散小波变换中的尺度因子 a 和连续平移因子 τ 表示为:

$$a = a_0^j, \tau = ka_0^j \tau_0, j \in Z \quad (3)$$

式中, a_0 为扩展步长。假设 $a_0 > 1$, 且为常数, 则对应的离散小波函数 $\psi_{j,k}(t)$ 的表达式为:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi\left(\frac{t - ka_0^j \tau_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j} t - k\tau_0) \quad (4)$$

离散小波变换的系数表达式为:

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \quad (5)$$

2.2 小波基的选择

小波分析首先要选取适合的小波基函数, 不同的小波基函数会对信号处理的结果产生不同的影响。在实际应用中, 较为常用的小波基函数有 Haar 小波、Daubechies 小波、Biorthogonal 小波、Coiflet 小波、Symlet 小波、Morlet 小波和 Meyer

小波等, 选择小波基函数的一般原则为紧支撑性、对称性和正则性(光滑性)^[6]。本文利用定点形变观测仪器 1 d 的分钟值数据, 根据数据特点将其处理后的重构信号与原始信号的误差大小进行判定, 选取最优的小波基函数。选取水管仪北南分量数据, 分别采用不同的小波基进行计算, 得出不同小波基重构后的平均误差, 结果见表 2。由表可知, Haar 小波在时域上是不连续的; Meyer 小波不是紧支撑的, 误差较大; Daubechies 小波(db5)与 Symlet 小波(sym5)具备较好的正则性, 在连续性、支集长度、滤波器长度方面表现较好, 能够在一定程度上减少信号分析和重构时的相位失真, 误差较小。选取 db 族小波不同长度的滤波器进行计算, 结果见表 3。由表可知, db1~db3 小波紧支撑长度较小, 光滑度不够, 重构误差较大; db4~db6 小波误差较小, 能够较好地顾及正交小波的紧支集和平滑性; db7~db9 小波紧支集区间变大, 重构结果较为光滑, 但小波基的局部性下降, 误差也逐渐增大。综上所述, 选取 db5 小波为小波基函数。

表 2 不同小波基的误差结果

| 小波基 | Haar | db5 | sym5 | Meyer |
|------------------|----------|---------|---------|---------|
| 平均误差/ 10^{-12} | 13.421 0 | 2.051 1 | 4.064 5 | 6.199 2 |

表 3 db 族小波误差结果

Tab. 3 Error results of db family wavelet

| 小波基 | db1 | db2 | db3 | db4 | db5 | db6 | db7 | db8 | db9 |
|------------------|----------|-----------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|----------|
| 平均误差/ 10^{-12} | 13.421 0 | -14.193 0 | 6.079 5 | -1.452 0 | 2.051 1 | -2.669 5 | 8.321 2 | 2.597 9 | -5.996 9 |

选取宽城台水管仪北南分量的分钟值数据, 利用 db5 小波基函数进行离散小波变换, 分解为 8 个层次, 并对其进行重构, 结果见图 2。由图可知, 原始数据和重构后的数据曲线形态一致, 只有微小的误差, 表明本文选用的小波基具有一定的紧支集、平滑性和对称性, 符合小波变换的要求。

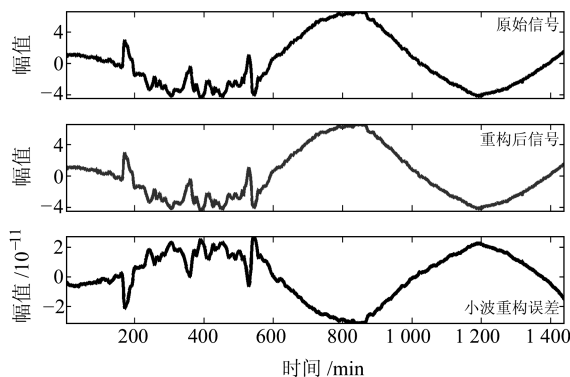


图 2 水管仪北南分量分钟值小波重构及其误差

Fig. 2 Wavelet reconstruction and error of the minute value of water tube tiltmeter of NS component

2.3 观测资料的选取与处理

选取宽城台 4 套定点形变观测资料中受气压干扰的典型事件为研究对象, 利用小波分析方法分析气压干扰因素。根据前兆处理系统的记录日志, 选择宽城台 2017-06-02 数据, 该观测日内各测项观测资料均因气压变化产生了不同程度的干扰。分别对受气压变化影响的各测项观测数据进行小波分析, 对结果中不同频段的细节与原始曲线进行对比, 结果见图 3。根据结果可知: 1) VS 垂直摆北南向气压干扰频段主要分布在细节 3~7, 东西向气压干扰频段主要分布在细节 2~6; 2) 水管仪北南向气压干扰频段主要分布在细节 2~7, 东西向气压干扰频段主要分布在细节 3~6; 3) 伸缩仪北南向气压干扰频段主要分布在细节 3~7, 东西向气压干扰频段主要分布在细节 3~7; 4) VP 垂直摆北南向气压干扰频段主要分布在细节 2~6, 东西向气压干扰频段主要分布在细节 4~6。经过小波分析细节可以看出, 宽城台各

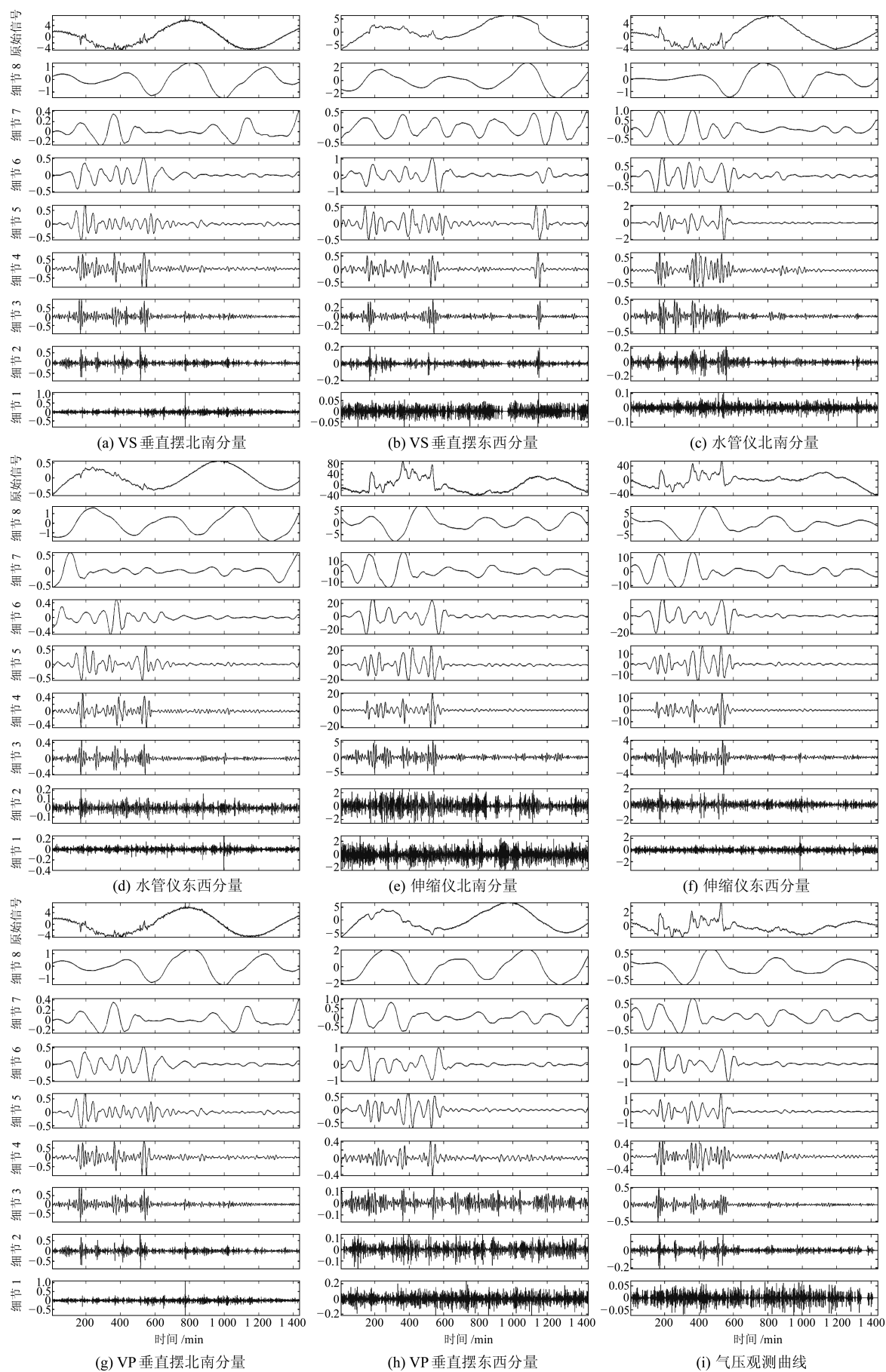


图3 各观测仪器受气压干扰原始曲线及小波分析细节

Fig. 3 Wavelet analysis details and original curves affected by atmospheric pressure of all instruments

定点形变测项的气压干扰变化特征存在较强的一致性,受干扰的细节频段大致相同,摆式仪器受气压干扰程度较小。

3 小波阈值去噪

小波阈值去噪是利用信号频率与噪声频率的不同进行去噪处理。在对原始信号进行小波分解时,分解后的有效信号小波系数较大,噪声的小波系数较小,因此需选取一个合适的阈值,将大于阈值的小波系数认为是分解后的有效信号予以保留,小于阈值的小波系数则认为是噪声置零,从而达到去噪的目的^[7]。由上述分析可知,正常观测数据的频率较低,信号比较平稳;气压干扰的频率较高,含干扰的部分基本都分布在细节 2~7 中。对不同频率的小波细节采用不同的阈值进行处理,再对信号进行重构就可去除原始信号中的噪声^[8]。

小波阈值去噪处理的基本步骤为:

1)采用 db5 小波对原始信号进行小波分解,由于气压干扰的频率较宽,故将小波分解为 8 层,得到不同频率的小波细节。

2)不同的阈值选取有不同的去噪效果,结合不同阈值的去噪效果和干扰信号的特点选取固定形式阈值(fixed form threshold),公式为:

$$\text{thr} = \sqrt{2\lg(n)} \cdot \sigma \tag{6}$$

式中, n 为信号长度, σ 为噪声强度。

3)阈值函数是修正小波系数的规则,不同的阈值函数体现了不同的小波系数处理策略^[9]。为保留更多的细节,本文选用软阈值函数。

4)由于定点形变仪器数据格值不同,且受气压变化影响的程度不同,结合上述小波分解受干扰细节,尽可能保留固体潮和背景噪声,得出不同仪器在不同细节的阈值(表 4)。

5)将经过处理之后的小波系数进行重构,获得去噪之后的信号,如图 4 所示。

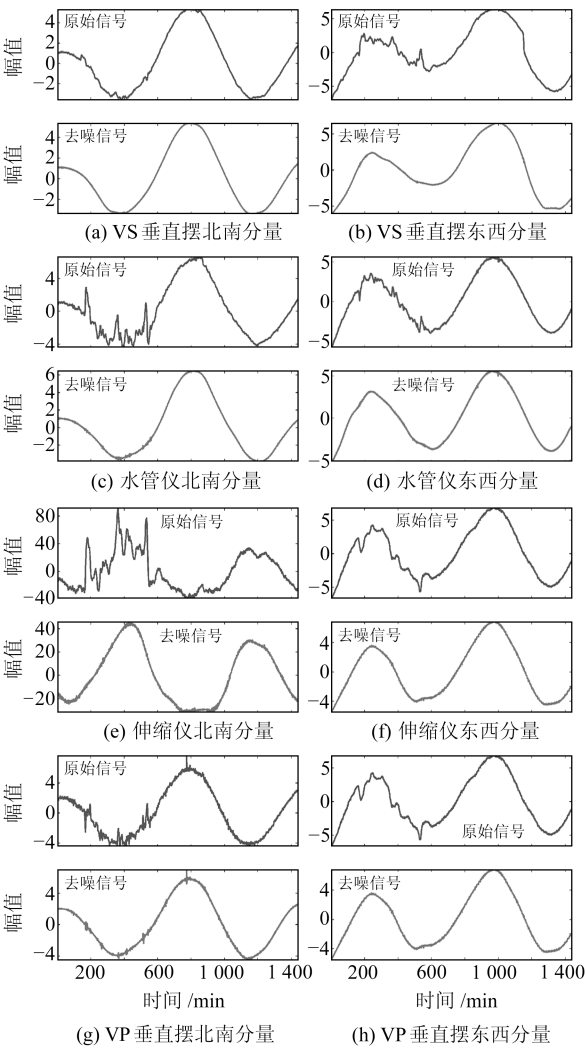


图 4 各观测仪器受气压干扰原始信号及去噪信号对比

Fig. 4 Comparison of original signals and denoising signals affected by atmospheric pressure of all instruments

由图 4 可知,通过小波阈值去噪后的信号基本去掉了气压干扰对原始信号的影响,去噪效果很好,去噪后的信号光滑度高,基本抑制了噪声的高频信号,保留了仪器的背景有效高频信号,能观测到清晰的固体潮等有效信息。

表 4 定点形变仪器小波阈值

Tab. 4 Threshold of fixed-point deformational instrument

| | 细节 1 | 细节 2 | 细节 3 | 细节 4 | 细节 5 | 细节 6 | 细节 7 | 细节 8 |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VS 垂直摆北南分量 | 0 | 0 | 0.491 | 0.676 | 0.923 | 1.121 | 1.012 | 0 |
| VS 垂直摆东西分量 | 0 | 0 | 0.921 | 2.276 | 2.389 | 7.128 | 4.893 | 0 |
| 水管仪北南分量 | 0 | 0 | 1.133 | 2.508 | 9.107 | 6.172 | 10.74 | 0 |
| 水管仪东西分量 | 0 | 0 | 1.196 | 1.828 | 3.220 | 3.132 | 0 | 0 |
| 伸缩仪北南分量 | 0 | 2.003 | 12.31 | 62.21 | 111.8 | 186.2 | 183.1 | 0 |
| 伸缩仪东西分量 | 0 | 0.527 | 9.011 | 45.07 | 84.61 | 146.7 | 140.4 | 86.88 |
| VP 垂直摆北南分量 | 0 | 0.210 | 2.610 | 3.313 | 3.579 | 3.330 | 2.567 | 0 |
| VP 垂直摆东西分量 | 0 | 0 | 0 | 1.302 | 3.287 | 6.859 | 10.34 | 0 |

4 结 语

由宽城台定点形变仪器各测项小波分析的结果可知,小波分解后的各频段数据基本都与同频段上的气压变化特征存在较强的一致性;各测项的观测数据受干扰的细节频段大致相同;利用小

果可知,小波分解后的各频段数据基本都与同频段上的气压变化特征存在较强的一致性;各测项的观测数据受干扰的细节频段大致相同;利用小

波阈值去噪后的信号基本去掉了气压干扰对原始信号的影响,去噪效果显著,去噪后的信号曲线光滑度高,基本抑制了噪声的高频信号,保留了仪器的背景有效高频信号,具有更好的视觉效果,能清晰观测出固体潮等有效信息,对定点形变观测资料的前兆信息识别有一定的作用。

参考文献

- [1] 王勇,刘备,刘严萍,等.基于小波变换的GPS水汽与气象要素相关性分析[J].大地测量与地球动力学,2017,37(7):721-725(Wang Yong,Liu Bei,Liu Yanping,et al. Correlation Analysis of GPS PWV and Meteorological Elements Based on Wavelet Transform[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017,37(7):721-725)
- [2] 茅远哲,马栋,张国苓,等.河北形变观测中大气环境干扰因素频谱特征研究[J].四川地震,2016(4):35-40(Mao Yuanzhe, Ma Dong, Zhang Guoling, et al. The Frequency Spectrum of Atmospheric Environmental Interference in Hebei Tidal Deformation Observation[J]. Earthquake Research in Sichuan, 2016(4):35-40)
- [3] 任俊峰,孙澎涛,袁国旭,等.宽城地震台水管倾斜仪端点一致性分析[J].地震地磁观测与研究,2016,37(4):111-116(Ren Junfeng, Sun Pengtao, Yuan Guoxu, et al. The Endpoints Consistency Analysis of Water Tube Tiltmeter at Kuancheng Seismic Station[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016, 37(4):111-116)
- [4] 马栋,牛安福,袁淑芳,等.据频谱特征分析短时气压波动对体应变的影响[J].内陆地震,2011,25(3):67-74(Ma Dong, Niu Anfu, Yuan Shufang, et al. Analysis on the Influence of Short-Term Atmospheric Pressure Fluctuation on Body Strain Data Based on Spectrum Characteristics[J]. Inland Earthquake, 2011, 25(3): 67-74)
- [5] 刘建明,李志海,孙甲宁,等.基于小波分析提取地倾斜异常特征[J].地震,2016,36(1):38-48(Liu Jianming, Li Zhihai, Sun Jianing, et al. Extraction of Ground Tilt Anomalies Based on Wavelet Analysis[J]. Earthquake, 2016, 36(1):38-48)
- [6] 曾宪伟,赵卫明,师海阔,等.利用小波包变换对地震信号进行时频分析时小波基函数的选取[J].地震研究,2010,33(4):323-328(Zeng Xianwei, Zhao Weiming, Shi Haikuo, et al. Selection of Wavelet Basis Function in Process of Time-Frequency Analysis of Earthquake Signals using Wavelet Packet Transform[J]. Journal of Seismological Research, 2010,33(4):323-328)
- [7] 王旭,王昶.一种改进小波阈值去噪方法的研究[J].大地测量与地球动力学,2017,37(10):1038-1041(Wang Xu, Wang Chang. Improved Wavelet Threshold De-Noising Method Research[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(10): 1038-1041)
- [8] 郭思,郭科,陈聆,等.基于小波变换新阈值函数的地震资料去噪方法[J].成都理工大学学报:自然科学版,2014,41(3):378-381(Guo Si, Guo Ke, Chen Ling, et al. Seismic Data De-Noising Method Based on a New Threshold Function of Wavelet Transformation[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2014, 41(3):378-381)
- [9] 李英,张淑贞,许康生.小波降噪方法在地震信号处理中的应用[J].西北地震学报,2006,28(2):159-162(Li Ying, Zhang Shuzhen, Xu Kangsheng. Application of Wavelet Transfer in Seismic Signal Denoise[J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(2):159-162)

Wavelet Transform and Interference Elimination of Fixed-Point Deformation Pressure Interference of Kuancheng Station

WANG Jiaqi¹ SUN Pengtao¹ REN Junfeng¹ YUAN Guoxu¹

¹ Chengde Seismic Station of Hebei Earthquake Agency, Shuxiangsi Village, Chengde 067000, China

Abstract: Through wavelet decomposition, the typical events of the fixed-point deformation instruments of Kuancheng station are analyzed by atmospheric pressure interference. We obtain the characteristics of atmospheric pressure interference on different instruments in different frequency bands. We eliminate interference and achieve better results.

Key words: wavelet transform; pressure disturbance; threshold; denoising

About the first author: WANG Jiaqi, assistant engineer, majors in earthquake precursory monitoring, E-mail: wjq6020373@163.com.