

李志杰,陈智勇.基于空间相关的地震前兆数据库的信息提取与数据更新方法[J].地震工程学报,2020,42(1):123-128.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.123
LI Zhijie, CHEN Zhiyong. Information Extraction and Data Updating Method for an Earthquake Precursor Database Based on Spatial Correlation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 123-128. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.123

基于空间相关的地震前兆数据库的 信息提取与数据更新方法

李志杰¹, 陈智勇²

(1. 广东机电职业技术学院, 广东 广州 510550;
2. 广东医科大学 教育技术与信息中心, 广东 湛江 524023)

摘要: 针对当前提取地震前兆数据易受到噪声干扰,且数据库中数据更新速度较慢的问题,提出基于空间相关的地震前兆数据库信息提取与数据更新方法。利用快速 Myriad 滤波器,引入滑动窗,选择窗口数据参与到计算中,将计算结果当作目前窗口滤波输出值,实现数据滤波,由此实现信息提取的去噪处理。依据初步滤波结果,将当前数据作为中心,并确定空间窗,在横向上进行相关数据统计。针对空间窗中各数据选取滑动时窗,并对其中的数据进行 S 变换,利用指数拟合的数据传输能力参数,获取缺失数据的填充修复参数。引入曲面加权函数对填充修复参数进行平滑,根据平滑之后的填充修复参数对 S 变换数据进行更新,实现空间相关下地震前兆数据库的数据更新。实验结果表明,所提方法的数据信噪比较高,数据更新时间较短。

关键词: 地震前兆数据库; 信息提取; 数据更新; 快速 Myriad 滤波器; 滑动时窗

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)01-0123-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.123

Information Extraction and Data Updating Method for an Earthquake Precursor Database Based on Spatial Correlation

LI Zhijie¹, CHEN Zhiyong²

(1. Guangdong Mechanical & Electrical Polytechnic, Guangzhou 510550, Guangdong, China;

2. Education Technology and Information Center, Guangdong Medical University, Zhanjiang 524023, Guangdong, China)

Abstract: Seismic precursor data are easily interfered by noise and the data updating speed in a database is slow. To solve this problem, an information extraction and data updating method of a seismic precursor database based on spatial correlation is proposed in this paper. Using a fast Myriad filter, a sliding window is introduced, and window data are selected to participate in the calculation. The calculated results are regarded as the output value of the current window filter, and the data filtering and denoising of information extraction is realized. In accordance with the

收稿日期: 2019-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51386268)

第一作者简介: 李志杰(1974-),男,湖南浏阳人,本科,讲师,研究方向:信息安全技术。E-mail: bokostek@audioacoustics.org。

通信作者: 陈智勇(1980-),男,广东湛江人,硕士,实验师,研究方向:信息技术。

preliminary filtering results, the current data are taken as the center, a spatial window is determined, and then related data statistics are horizontally conducted. A sliding time window is selected for each data in the spatial window, and filling repair parameters of the missing data are obtained. A surface weighting function is introduced to smooth the filling repair parameters, and S-transform data are updated according to the smoothed filling repair parameters. Then, the data updating of the earthquake precursor database is realized based on spatial correlation. The experimental results show that the signal-to-noise ratio of the proposed method is high, and the data update time is short. Thus, the method can preliminarily realize the information extraction and data updating of the earthquake precursor database.

Keywords: earthquake precursor database; information extraction; data update; fast Myriad filter; sliding time window

0 引言

地震前兆观测中重力、形变、地磁、地下水动态等大量观测资料,为科研人员开展震源机理、区域地震孕育程度、地震活动性、地震前兆等多个地震预报相关课题研究提供依据^[1]。石伟等^[2]分析了地震前兆数据的特点和传输要求,给出了地震前兆数据传输模型,为地震前兆数据的准确传输提供了保障。高略等^[3]主要对重力固体潮信号进行了研究,利用其分析隐含的地震前兆信息,实现地震前兆信息数据提取。聂永丹等^[4]提出基于字典学习的随机噪声压制算法,将地震数据分块,每一块包含多个地震记录道在一定采样时间段内波形的信息,压制随机噪声,一定程度上避免噪声对地震数据造成干扰影响。由于前兆数据的海量、断数、干扰等因素,需要结合前兆数据的这些特点和存在的问题,研究前兆观测数据的信息提取与数据更新。

要实现准确提取信息数据并对其更新处理,需要考虑数据的抗噪能力以及数据传输过程中是否存在缺失。为此,提出基于空间相关的方法对其进行研究。为避免地震前兆数据库信息提取中的噪声干扰,对其进行滤波处理,并在滤波的基础上利用时间窗结合 S 变换,实现空间相关下地震前兆数据库的信息提取和数据更新。

1 信息提取与数据更新

1.1 地震前兆数据库的信息提取

要实现地震前兆信息的准确提取,需先对地震前兆数据进行快速滤波,从而有效提升地震前兆数据库信息经过无损恢复之后的信噪比。利用快速 Myriad 滤波器^[5],引入滑动窗,选择窗口数据参与到计算中,同时将计算结果作为目前窗口滤波输出值。

设定滤波器的窗口 $M=5$,将滤波器自变量 β 用近似值 $\hat{\beta}$ 代替, x_1, x_2, \dots, x_5 分别代表滤波器窗口的各点数据,则有:

$$\frac{x_1 - \hat{\beta}}{1 + (x_1 - \hat{\beta})^2 / K^2} + \frac{x_2 - \hat{\beta}}{1 + (x_2 - \hat{\beta})^2 / K^2} + \dots + \frac{x_5 - \hat{\beta}}{1 + (x_5 - \hat{\beta})^2 / K^2} = 0 \quad (1)$$

式中: K 代表一个线性化参数。

$$\hat{\beta} = \frac{x_1 + \dots + x_5}{5} \quad (2)$$

定义一个变量 μ_i :

$$\mu_i = 1 + \frac{(x_i - \hat{\beta})^2}{K^2} \quad (3)$$

式中: $x_i \in x_1, x_2, \dots, x_5, \mu_i \in \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_5$ 。

根据式(3),式(1)可简化为:

$$\frac{x_1 - \hat{\beta}}{\mu_1} + \dots + \frac{x_5 - \hat{\beta}}{\mu_5} = 0 \quad (4)$$

依据式(4)可得:

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^5 (x_i \prod_{j \neq i} \mu_j)}{\sum_{i=1}^5 (\prod_{j \neq i} \mu_j)} \quad (5)$$

假设窗口的长度为 $M, i \in M$ 且 $j \in M$,那么能够得到地震前兆信息的滤波结果为:

$$\hat{\beta} = K \frac{\sum_{i=1}^M (x_i \prod_{j \neq i} \mu_j)}{\sum_{i=1}^M (\prod_{j \neq i} \mu_j)} \quad (6)$$

式(6)显示的快速 Myriad 滤波法运算量比较小,稳定性比较强。在实际应用过程中,仅需给定窗口长度 M 和线性化参数 K ,依据式(6)就能够直接获取地震前兆信息的滤波结果,由此对滤波后的数据进行信息提取可有效避免噪声干扰。

1.2 地震前兆数据库的数据更新

在上述地震前兆数据库信息滤波处理的基础上,利用空间相关法对前兆信息进行数据更新^[6]。为了

提升地震前兆数据的提取精度和更新速度,有效保障地震前兆数据中相邻数据间关联程度十分关键^[7]。为此,引入空间相关的统计理念。

引入 S 变换,也可叫作 ST,其为短时傅里叶变换,即 STFT 与连续小波 WT 结合而来的,能够当成将高斯窗作为窗函数,同时随着频率不断变化的傅里叶变换而发生变化。高斯窗整体呈现出高频位置比较窄、低频位置比较宽的状态。和 STFT、WT 对比,S 变换可以在时域与频域中均具备较好的分辨率,具备无损可逆性,由此 S 变换当作时域分析工具,具有可靠性。

根据上述地震前兆信息更新的原理和步骤,将当前滤波处理后的数据作为中心对象,采用空间相关法确定空间窗,开始 S 变换分析。

S 变换的基本原理为信号 $h(t)$ 的 S 变换:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \beta h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-\Delta\tau)^2 f^2}{2}} \quad (7)$$

式中: τ 为地震前兆数据的传输时间; $\Delta\tau$ 为地震前兆数据的传输时延; f 为传输频率。

S 变换中的特性之一为其可逆性。通过在时间上进行求和获取函数的傅里叶谱:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau = H(f) \quad (8)$$

式中: H 代表希尔伯特变换函数,其高斯窗函数表达式为:

$$\begin{cases} g(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\tau^2}{2\delta^2}} \\ g(f) = \frac{1}{|f|} \end{cases} \quad (9)$$

式中: δ 为高斯窗阈值。

离散 S 变换,针对式(7)进行离散化。设定 $\tau \rightarrow T_j$, $f \rightarrow k/NT$,其中 T_j 代表第 j 个窗口的采样周期, T 为总采样周期, N 代表信号采样点的总数量, $k \in N$,表示信号采样点数量。侧离散 S 变换表达式为:

$$\begin{cases} H[k/NT] = \sum_{k=0}^{N-1} g(kT) \\ S[T_j, k/NT] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k/NT) \end{cases} \quad (10)$$

逆 S 变换原理为:因 S 变换存在无损可逆性,因此 $h(t)$ 能够根据 $S(\tau, f)$ 进行无损数据更新为:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau \right\} df \quad (11)$$

离散形式为:

$$h[kT] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \{S[T_j, k/NT]\} \quad (12)$$

地震前兆数据的处理过程中,为保证数据的信息提取精度,需要从频域与时域两方面考虑,这就要求保障地震前兆数据库中相邻数据之间的关联程度^[8]。

假设仅仅计算单一数据,会使各缺失数据的填充修复存在很大差异,还会导致相邻数据间能量均衡性变差,数据之间的关联程度降低^[9]。综上,在时间方向上基于滑动窗口时,在空间方向上同样施行加窗操作,在横向上进行多道统计,进而保障各个数据之间的稳定性。详细操作过程为:对每个地震前兆数据进行处理的过程中,将当前处理数据当作中心,针对其两边的数据选择相邻 C 数据,也就是空间窗中含有 $2C+1$ 条地震前兆数据,即式(13)中空间窗宽度为 $l=2C+1$,当前数据序数是 $Y(C+1)$,针对窗范围内每个数据均实行同样时变处理,经叠加获取的数据变化结果为 $p_i(f, \tau)$,综上,总振幅谱 $z(f, T)$ 表达式为:

$$z(f, T) = \sum_{i=1}^l p_i(f, \tau) \quad (13)$$

对式(13)计算结果中的各列向量,实行统计平均操作^[10],所得结果如式(14)所示,同时据此利用后续处理得到填充参数。

$$z(f, T_j) = \frac{1}{T} \int_{T_j-T/2}^{T_j+T/2} z(f, T) dT \quad (14)$$

通过上述的时空变换操作,针对已经获取的地震数据信息和 S 变化维度同样的叠加数据振幅进行以下操作:沿着时间方向进行遍历,对于每个数据传输频率从其峰值频率开始^[11-12],对数据传输的变化周期规律实施指数拟合操作,由此基于拟合指数函数 $\exp(-\vartheta f)$ 获取对应参数 $-\vartheta$,将 $-\vartheta$ 当作填充参数,计算数据更新的填充增益:

$$M = \exp(\vartheta f) \quad (15)$$

加权曲面平滑法运行的原理为:将待平滑填充参数 $Q_{i,j}$ 的各个点当作中心进行遍历,选择 3×3 移动窗口实行加权计算操作,中心点权值比周边点的权值要高,选择权重均值 W_{ij} 当作原中心点的代替值,如果移动窗口超出了边界,那么超出的部分利用零值填补。由此实现地震前兆数据库信息的无损更新为:

$$Q_{i,j} = \frac{\left(\sum_{i=j-1}^{j+1} Q_{i,j} + \sum_{i=j-1}^{j+1} Q_{(i+1),j} + Q_{i,(j-1)} + Q_{i,(j+1)} + 2Q_{i,j} \right) \cdot M}{\sum_{i=1}^{j+1} \sum_{j=1}^{j+1} W_{ij}} \quad (16)$$

图1中,中心点权重比窗内的其他点高,假设超出边界,则利用零值填补^[13]。以式(16)为例,设定中心点的权重是2,窗内剩余点权重是1。

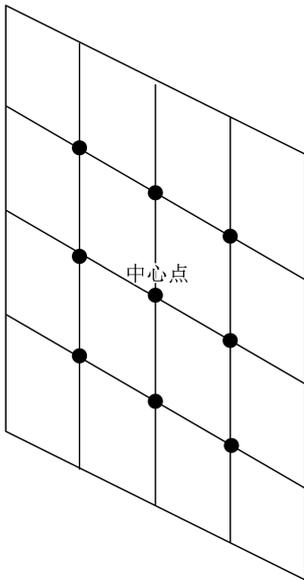


图1 曲面平滑原理

Fig.1 Surface smoothing principle

上述基于空间相关的地震前兆数据库信息提取与更新方式,依据地震前兆数据的特性,有效结合S变换和时空变换处理,得到每条地震前兆数据的填充

参数,实现地震前兆数据的准确提取,这是一个数据细节更新的过程。其拓宽了地震前兆数据频带的宽度,实现了数据提取精度的提升。

在地震前兆数据库信息缺失或者有损的情况下,将当前处理作为中心,确定空间窗,在横向上进行统计。针对空间窗中各个数据选取滑动时窗,并对其中的地震前兆数据进行S变换。利用指数拟合的数据传输能力参数,获取缺失数据填充参数。引入曲面加权函数对填充参数进行平滑,根据平滑之后的填充参数对S变换数据进行更新,完成地震前兆数据库信息的数据更新。

2 实验结果与分析

为验证基于空间相关的地震前兆数据库的信息提取与数据更新方法的可行性,进行一次相关性实验。实验中,利用 SeismicLab 工具包,得到理论模型数据。

实验主要通过数据信噪比和数据更新耗时两方面验证本文方法。其中,信噪比计算公式为:

$$S_{NR} = 10\lg(\sigma_S^2/\sigma_N^2) \quad (17)$$

式中: σ_S^2 为信号的方差; σ_N^2 为噪声方差。

将本文方法与文献中方法进行性能对比验证,不同方法下地震数据信噪比如图2所示。

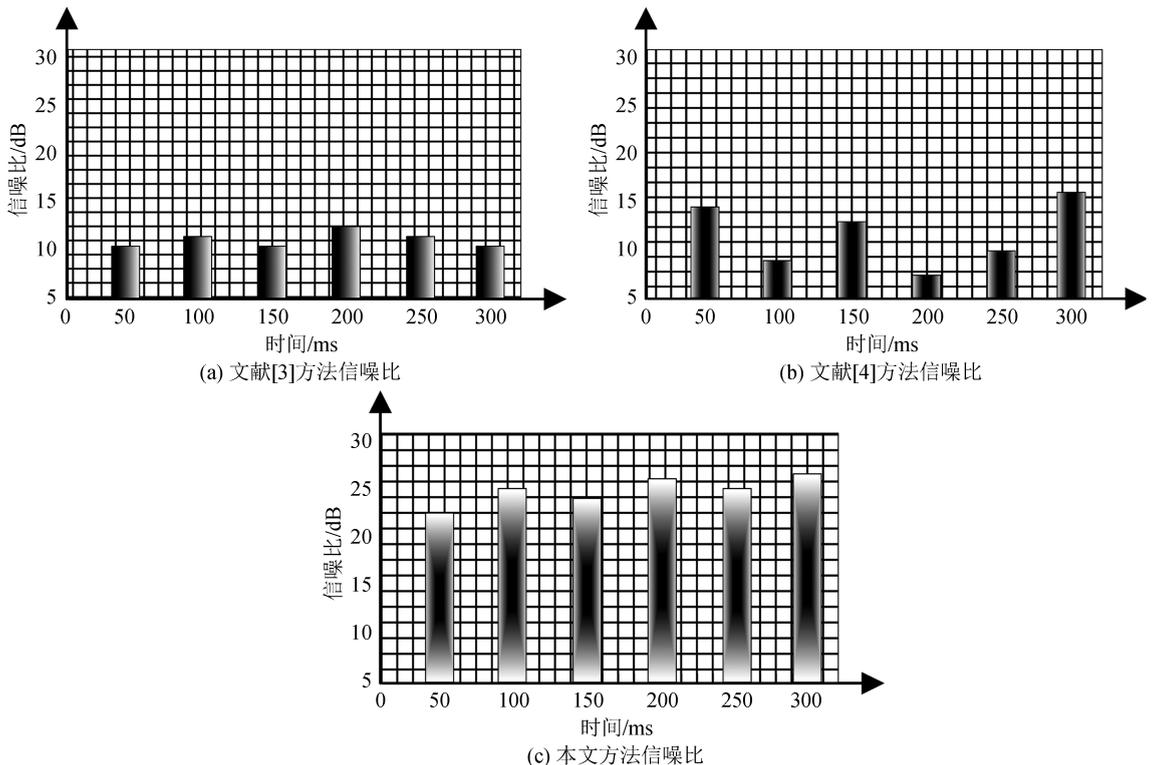


图2 不同方法信噪比对比

Fig.2 Comparison of signal to noise ratios of different methods

分析图 2 可知,文献[3]方法信噪比整体较低,可靠性不强;文献[4]方法信噪比曲线波动较大;本文方法随着时间的不断增加,信噪比曲线波动不大,且整体较高,表现出了良好的运行效果。该方法在提取数据之前,引入快速 Myriad 滤波器对地震数据进行了滤波,初步增强了方法的信噪比。针对地

震信号数据具有的短时且非平稳特性,为了提升地震前兆数据的提取精度与更新速度,进一步增强数据信噪比,利用时频分析对地震信号进行了处理。

当待更新的地震前兆数据量是一定的,测试在不同实验次数下,不同方法数据更新运行时间,结果如图 3 所示。

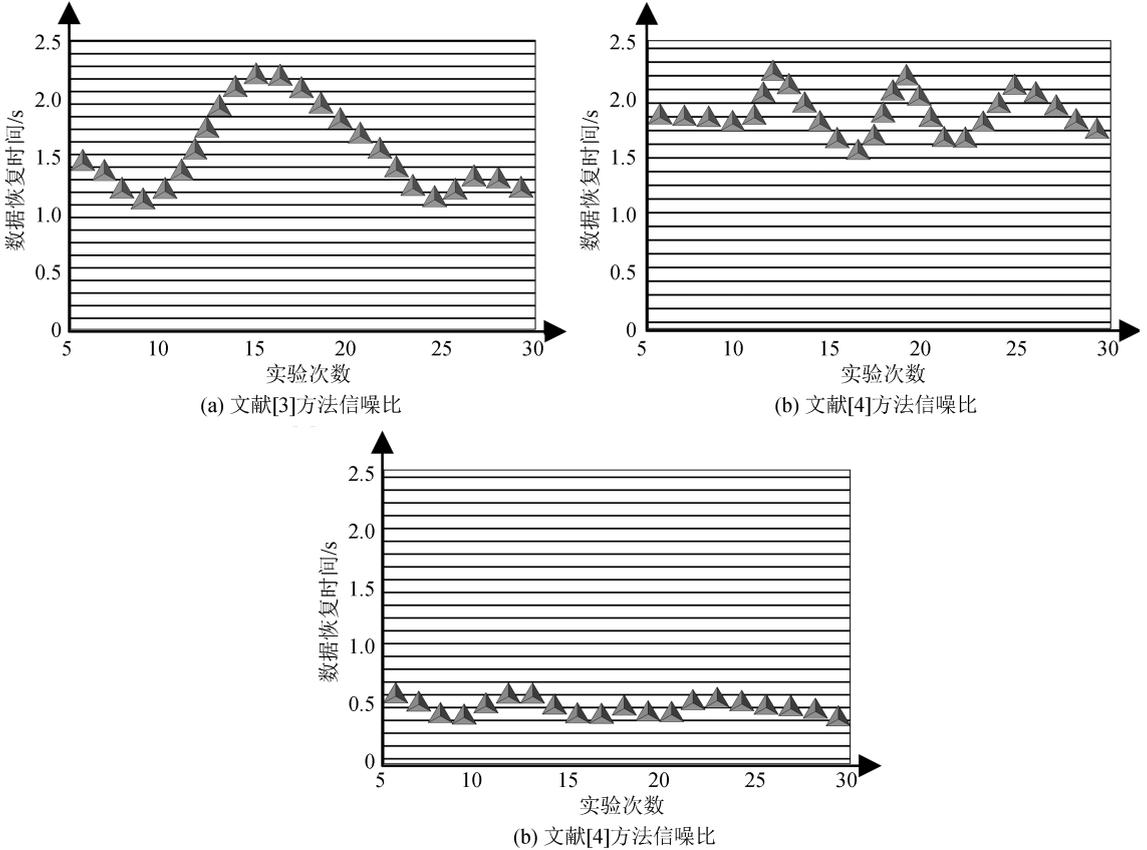


图 3 不同方法数据更新耗时对比

Fig.3 Time-consuming comparison of data updating with different methods

由图 3 可知,基于空间相关的地震前兆数据库的信息提取与数据更新方法运行耗时最少,效率最高。经由上述实验可以看出,本文提出的方法可有效提取地震前兆数据以及进行数据更新,为该领域研究提供初步参考依据。

3 结语

地震前兆信息的提取和更新意义重大,本文提出的方法利用数据滤波为数据更新奠定了基础,实现地震前兆信息更新。经实验证明,该方法可以初步实现前兆信息的无损更新,因地震前兆数据的缺失可分为规则性缺失和不规则性缺失,且地震前兆数据一般为高维数据,这使得数据更新过程在实际应用中存在困难,仍有许多待改进的地方。下一步

应将这两方面当作重点进行分析,为增强地震前兆数据库的信息提取精度和加快数据更新做进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 周浩,郑照福,程可.模拟地震前兆数据远程入库的实现[J].西北地震学报,2007,29(3):286-288.
ZHOU Hao, ZHENG Zhaofu, CHENG Ke. Realization of Long-distance Storage for Simulant Seismic Precursor Data[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(3): 286-288.
- [2] 石伟,刘治,徐宏韬.ORACLE 高级队列在地震前兆数据传输中的应用研究[J].地震地质,2005,27(3):493-499.
SHI Wei, LIU Zhi, XU Hongtao. Application of Oracle Advanced Queue on Transmission of Seismologic Precursor Observation Data[J]. Seismology and Geology, 2005, 27(3): 493-

- 499.
- [3] 高略, 全海燕. 重力固体潮信号独立成分的谱相关解调与地震前兆信息提取[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(3): 916-922.
GAO Lue, QUAN Haiyan. Cyclic Spectrum Demodulation of Independent Composition of Gravity Tide Signals and Extraction of Seismic Precursor Information[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(3): 916-922.
- [4] 聂永丹, 张岩, 唐国维. 基于字典学习的地震数据随机噪声压制算法[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(9): 123-128.
NIE Yongdan, ZHANG Yan, TANG Guowei. Random Noise Suppression Algorithm for Seismic Data Based on Dictionary Learning[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(9): 123-128.
- [5] 张良, 韩立国, 刘争光, 等. 基于压缩感知和 Contourlet 变换的地震数据重建方法[J]. 石油物探, 2017, 56(6): 804-811.
ZHANG Liang, HAN Ligu, LIU Zhengguang, et al. Seismic Data Reconstruction Based on Compressed Sensing and Contourlet Transform[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(6): 804-811.
- [6] 梁洪宝, 刘雪龙, 郭炳辉. 时序形变资料的多核函数滤波方法研究及应用[J]. 地震工程学报, 2016, 38(5): 808-814, 845.
LIANG Hongbao, LIU Xuelong, GUO Binghui. Study and Application of Multi-kernel Function Filtering Method in Time-series Deformation Data Processing[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5): 808-814, 845.
- [7] 李稳, 刘伊克, 刘保金. 基于稀疏分布特征的井下微地震信号识别与提取方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3869-3882.
LI Wen, LIUYike, LIU Baojin. Downhole Microseismic Signal Recognition and Extraction Based on Sparse Distribution Features[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10): 3869-3882.
- [8] 石双虎, 丁向晖, 齐永飞, 等. 地震勘探安全距离的标定方法研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(1): 186-190.
SHI Shuanghu, DING Xianghui, QI Yongfei, et al. Calibration Method for Safety Distance during Seismic Exploration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 186-190.
- [9] 王宏伟, 温睿智, 任叶飞, 等. 基于强震记录快速确定康定地震的震源破裂方向研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(6): 1138-1146.
WANG Hongwei, WEN Ruizhi, REN Yefei, et al. Rapid Rupture Direction Estimation of Kangding Earthquake Using Strong-Motion Recordings[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(6): 1138-1146.
- [10] 侯文龙, 贾瑞生, 孙圆圆, 等. 基于改进 Curvelet 变换的地震数据重建方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2570-2578.
HOU Wenlong, JIA Ruisheng, SUN Yuanyuan, et al. Seismic Data Reconstruction Method Based on Improved Curvelet Transform[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2570-2578.
- [11] 李广洲, 谭平, 李祥秀, 等. 飞机撞击某隔震办公楼的研究[J]. 华南地震, 2015, 35(4): 17-24.
LI Guangzhou, TAN Ping, LIXiangxiu, et al. Study on the Plane Crash on an Isolated Office Building[J]. South China Journal of Seismology, 2015, 35(4): 17-24. DOI: 10.13512/j.hndz.2015.04.003.
- [12] 秦向辉, 陈群策, 孟文, 等. 大地震前后实测地应力状态变化及其意义, 以龙门山断裂带为例[J]. 地质力学学报, 2018, 24(3): 309-320.
QIN Xianghui, CHEN Qunce, MENG Wen, et al. Evaluating Measured In-situ Stress State Changes Associated with Earthquakes and Its Implications: A Case Study in the Longmenshan Fault Zone[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(3): 309-320.
- [13] 窦若凡, 窦银科, 周云霄, 等. 基于载波相位差分技术的东南极冰川移动监测系统与应用[J]. 太原理工大学学报, 2018, 49(4): 623-627.
DOU Ruofan, DOU Yinke, ZHOU Yunxiao, et al. Application on the Antarctic Glacier Mobile Monitoring System Based on Real Time Kinematic Technique[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2018, 49(4): 623-627.