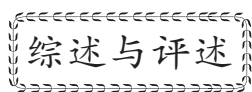


唐婷婷, 余思, 陈江贻. 天然地震与人工爆破特征识别研究综述[J]. 地震科学进展, 2021, 51(9): 385-394. doi:10.3969/j.issn.2096-7780.2021.09.001

Tang Tingting, Yu Si, Chen Jiangyi. Identification of characteristics of earthquake and explosion: A research review[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2021, 51(9): 385-394. doi:10.3969/j.issn.2096-7780.2021.09.001



天然地震与人工爆破特征识别研究综述^{*}

唐婷婷^{*} 余 思 陈江贻

(江西省地震局, 南昌 330039)

摘要 近年来,天然地震与人工爆破特征识别作为地震事件分类识别的关键技术之一,随受关注度的不断提升获得了长足的发展。文中针对该研究方向出现的识别特征和特征提取方法进行了整体综述,以期为进一步深入研究天然地震与人工爆破特征识别以及拓展其应用领域奠定一定的基础。

关键词 天然地震; 人工爆破; 识别特征; 特征提取

中图分类号: P315 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2021)09-0385-10

doi: 10.3969/j.issn.2096-7780.2021.09.001

Identification of characteristics of earthquake and explosion: A research review

Tang Tingting, Yu Si, Chen Jiangyi

(Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330039, China)

Abstract In recent year, the identification of characteristics of earthquake and explosion is one of the key technologies for earthquake event classification and recognition, and has made to a considerable development and progress. The overall review of existing identification and characteristic extraction method is carried out, in order to establish a platform for identification of characteristics of earthquake and explosion future researches.

Keywords earthquake; explosion; identification characteristics; characteristic extraction

引言

非天然地震事件主要包括爆破、塌陷、矿震、核试验等,其中爆破是非天然地震事件中记录最多的事件类型。小震级天然地震与小当量矿山爆破波形相似,地震监测工作人员直接依据记录到的波形很容易产生误报现象,影响地震速报时间、速报精度、地震编目以及天然地震的监测预警。因此,地震类型的识别具有十分重要的科学意义和现实意义,如何快速正确区分天然地震和人工爆破成为亟待解决的

问题。

自 20 世纪 50 年代以来,多种地震与爆破的识别特征、特征提取和识别方法等相继提出并得到广泛研究,地震事件识别精度持续提升。地震事件识别主要包括 3 个基本步骤,即地震事件信号预处理、地震特征提取与地震事件分类(图 1)。其中地震事件波形特征提取是地震事件分类识别的关键步骤,通过特征提取得到表达能力强、抗噪能力好的有效特征仍然是地震信号处理领域的研究难点和热点之一。

^{*} 收稿日期: 2021-07-08; 采用日期: 2021-08-12。

^{*} 通信作者: 唐婷婷(1990-),女,工程师,主要从事地震监测研究。E-mail: tang_5168@163.com。

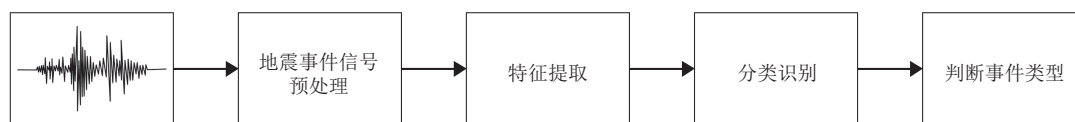


图1 地震事件识别的主要步骤

Fig. 1 The main procedures of earthquake identification

1 地震事件识别特征

目前,针对如何识别天然地震与人工爆破的特征很多,如发震时间、地点,初动方向等。现将所有常用特征及其适用性进行系统总结如下(表1)。实际应用中,依靠单项特征判别地震与爆破识别速度快,而根据研究区域事件数据特点及处理数据所用算法筛选合适的多个特征共同组合成适合该区域的综合识别特征,其涵盖的信息更为丰富,更有利于提高地震与爆破识别的准确性。

2 地震事件特征提取方法

人工爆破与天然地震识别方法一般要从原始地震数据中提取特征,再将这些提取的特征以特征量的形式输入到分类器进行地震事件类型分类。特征提取方法作为地震事件人工智能识别的核心内容得到快速发展,地震事件倒谱域、时间域、频率域等有

效特征提取方法不断拓展,主要包括倒谱分析、傅里叶变换、小波变换和希尔伯特-黄变换。

2.1 基于倒谱分析的特征提取法

倒谱是对数倒频率谱的简称,用来描述地震和爆破引起的地震回波,可用下面的式子来表示:

$$F(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \lg |F(\omega)|^2 e^{-i\omega\tau} d\omega,$$

具体计算过程如图2所示。Bogert 等^[1]最早提出基于倒谱分析的天然地震与人工爆破识别方法。该方法通过对大量天然地震与人工爆破的地震记录实施倒谱分析,提取事件的倒谱参量 C , 根据天然地震 C 值大,人工爆破 C 值小进行识别^[2-3]。陈银燕^[4]将语音识别的方法运用到天然地震和人工爆破识别中,从地震与爆破波形中提取美尔倒谱系数(简称 MFCC)特征和线性预测倒谱系数特征(简称 LPCC)识别事件类型,实验结果表明,该特征具有一定的可行性和有效性。

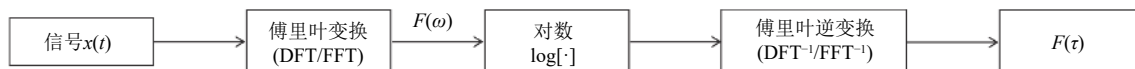


图2 倒谱计算过程

Fig. 2 Cepstral calculating process

2.2 基于傅里叶变换的特征提取法

傅里叶变换是时频分析的基础,在时频分析研究中得到广泛应用。傅里叶变换可以得到信号对应的频谱,但完全丢失时间信息,因此,为了反映地震事件信号的时变特征,一般采用短时傅里叶变换得到地震事件信号频率随时间的变化情况^[5]。短时傅里叶的基本思想是用一个固定长度的窗函数对信号进行截取,并对窗函数内的信号进行傅里叶变换,即可得到该时刻该段信号的傅里叶变换。通过窗函数在整个时间轴上的平移,最终得到不同时刻的傅里叶变换,即信号频率分布随时间的变化关系。其基本运算公式如下:

$$STFT_x(n, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(m)w(n-m)e^{-j\omega m} dm$$

或

$$STFT_x(n, \omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(m)w(n-m)e^{-j\omega m}$$

式中, $\omega(n-m)$ 为采用的时间窗, n 为时间点, ω 为频率点, m 为变换参数。

常见的窗函数主要包括:矩形窗、三角窗、海明窗和高斯窗。因海明窗计算迅速且第一旁瓣相对主瓣衰减更快,能量集中在主瓣可减小频率泄露,因此,一般选择海明窗作为窗函数对地震事件信号进行时频计算。崔鑫等^[6]、荣伟健等^[7]、高家乙等^[8]利用短时傅里叶变换发现天然地震的时频呈现“多峰”特征,人工爆破则相对“少峰”,天然地震的时频峰值分布在较宽的频率范围内,人工爆破的峰值则分布在低频的狭窄范围内。

2.3 基于小波变换的特征提取法

令 $L^2(R)$ 表示定义在实轴上、可测的平方可积函数空间,对于任意信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (a, b \in R, a \neq 0)$$

表 1 天然地震与人工爆破常用识别特征
Table 1 The common characteristics for earthquake and explosion identification

特征参数	具体特征	数据处理方法	人工爆破	天然地震	优点	缺点	参考文献
事件波形直观特征	发震时间、地点规律		①时间一般通常具有规律性; ②部分人工爆破地点固定,如采石场	发震时间、地点随机	直观明了	适用范围限于爆破时间、地点固定地区	[9-11]
	短周期面波 (瑞利型 Rg 波)		在 S 波之后往往有较大周期的瑞利面波,呈正弦波状态的波	瑞利面波不发育	直观明了	①近场爆破产生的面波不是完全的瑞利波 ②辅助判据,无法定量	[12-13]
	水平分量振幅比	为了减弱震源大小、传播路径、台站方位角以及震中距的影响,P 波与 S 波幅值比一般采用经过震中距衰减校正后的各台记录的平均值 $\frac{P \text{ 波最大振幅}}{S \text{ 波最大振幅}} = \frac{\sum \text{衰减校正后的各台记录的幅值比}}{\text{台数}}$	P_0/S_m : 人工爆破 > 天然地震 P_m/S_m : 人工爆破 > 天然地震 可根据样本数据计算得到最优阈值		减小震级、地震仪的放大倍数、频率特性影响	①主要利用相应波段上孤立点的测量信息,具有一定的局限性 ②需要通过克里金方法进行路径校正,减弱传播路径差异影响	[14-20]
	P 波初动方向	P 波初动判断准则: ①初动向上 $\geq 80\%$, 清晰初动 记为 1, 偏向爆破; ②初动向下 $\geq 50\%$, 清晰初动 记为 -1, 偏向地震; ③处于中间的记为 0, 无法通过初动判断事件类型	近台 ($\Delta \leq 100 \text{ km}$) P 波垂直分量初动方向向上 有象限分布, P 波垂直分量初动方向可能向上,也可能向下		直观明了	受震级、地球介质结构等因素影响,部分波形记录初动不清晰,部分人工爆破 P 波初动向下	[18, 20]
	尾波持续时间 (从最大 S 波振幅开始到接近噪声水平的时间段)	每一事件各记录台站尾波持续时间的平均	尾波持续时间短 体波震级相同的天然地震与人工爆破: 天然地震 > 人工爆破	尾波持续时间长	尾波持续时间 量取直观方便	只适用于天然地震与人工爆破震级相等的情况	[11, 18]

续表 1

特征参数	具体特征	数据处理方法	人工爆破	天然地震	优点	缺点	参考文献
震源参数特征	倒谱参数	倒谱分析	①倒谱图单调下降, 无非零峰值 ②倒谱参量 $C < 1$	①多峰值分布 ②倒谱参量 $C > 1$	使用全波列信号, 对滤波带宽不敏感	依赖合理有效的传播路径介质衰减模式	[2-4, 21]
	拐角频率	波谱分析方法	体波震级相同的天然地震与人工爆破同类波相比: 天然地震 $>$ 人工爆破			与震级存在一定相关性, 具有一定局限性	[22-23]
	最大振幅 卓越周期	波谱分析方法	平均卓越周期约 0.7 s 平均卓越周期约 0.3 s				[22, 24]
	优势频率	①短时傅里叶变换 ②Hilbert-Huang 变换 ③非线性赵-阿特拉斯-马克斯(Zhao-Atlas-Marks)时频分析方法	一般处于低频段, 一般处于高频区, 能量衰减慢 顶峰频率平均值: 天然地震 $>$ 人工爆破			受震中距影响	[6-8, 25-28]
	能量比	小波包变换	人工爆破 $>$ 天然地震			小波变换选取基函数需要通 过实验方法验证, 工作量较大	[18-19, 29-30]
	P 波瞬时频率	非稳态 WD 理论	瞬时频率平稳	瞬时频率不稳定			
		瞬时频率复杂度公式 $IFC = \sum_{i=1}^N (g_{i+1} - g_i)^2$					
		g_i : 瞬时频率曲线上各拐点的值		天然地震 $>$ 人工爆破	可根据样本数据 计算得到最优阈值, 定量分析		[9, 31]
		Hilbert-Huang 变换				计算复杂	[32-35]
	自相关系数	三分向的自相关系数计算结果和	人工爆破 $>$ 天然地震				
震源参数特征	波形复杂度 C	$C = \int_A^B X(t)^2 dt / \int_A^B X(t)^2 dt$ $X(t)$ 为 t 时刻的波形幅值, 分母取为从第 A 时刻到第 B 时刻的波形样本幅值和, 分子取为从第 B 时刻到第 C 时刻的波形样本幅值和	人工爆破 $>$ 天然地震	人工爆破 $>$ 天然地震			[32, 34-35]
	频谱比	$SR = \frac{\int_{L_1}^{H_1} x(f) df}{\int_{L_2}^{H_2} x(f) df}$ $x(f)$: 傅里叶频谱中频率 f 处幅值的模; H_1, L_1 : 低频段的上下限; H_2, L_2 : 高频段的上下限	天然地震 $>$ 人工爆破			受震源到台站间的射线传播 路径和地球介质的非均匀性 影响	[32, 34-35]

式中, $W_f(a, b)$ 为连续小波变换系数; a 为时间尺度因子, 反映小波的周期长度; b 为时间位置因子, 反映时间上的平移。

小波变换是地震事件提取特征向量比较常见的一种方法, 目前基于小波变换的特征提取已经做了大量的研究。刘希强等^[36]用精细构造小波分解信号“能量”线性度 DWEL 识别天然地震和人工爆破。和雪松等^[37]用小波包将信号变换到频域, 再用奇异

值作为统计工具, 提取天然地震和人工爆破的能量识别因子。为了弥补小波变换在高频部分分辨率差的问题, 曾宪伟等^[29]用小波包方法对信号空间进行多尺度分解, 得到信号在不同频带上的能量分布, 定义小波包分量比(不同频带能量比)为特征向量。针对窗长对识别率存在影响的问题, 黄明汉等^[38]通过对地震和爆破事件经 4 层小波包变换, 提取不同窗长的香农熵特征进行分类检验, 研究结果确定信号

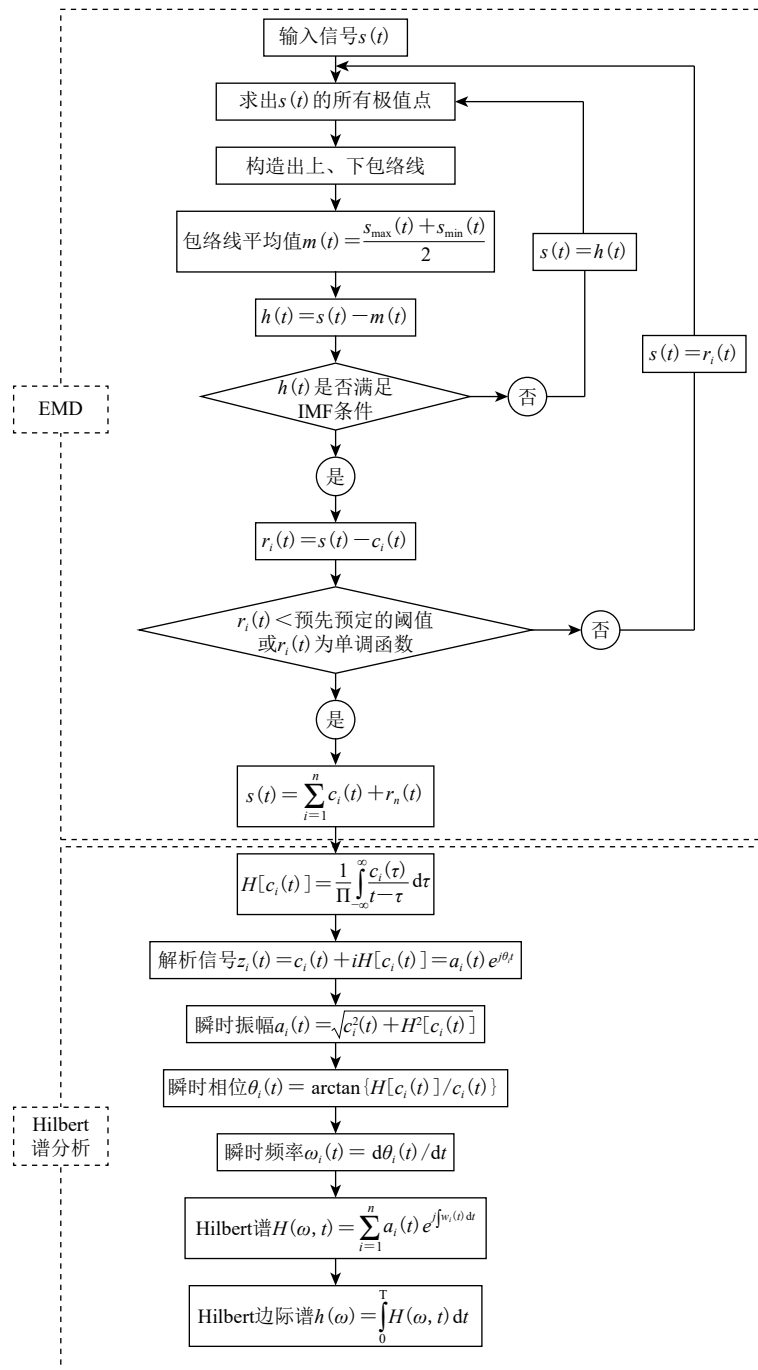


图3 希尔伯特-黄变换流程图

Fig. 3 The flow chart of Hilbert-Huang transform (HHT)

窗长度最佳值为 2000。

2.4 基于希尔伯特-黄变换(HHT)的特性提取法

希尔伯特-黄变换是一种新的具有自适应性的时频分析方法^[39],包括经验模态分解(EMD)和 Hilbert 谱分析两大块内容。经验模态分解具有良好的局部特征和自适应性,适用于非平稳信号的滤波和去噪, Hilbert 变换可以获得具有物理意义的瞬时频率,图 3 是希尔伯特-黄变换流程图。结合天然地震和人工爆破信号非平稳、非线性的特性以及 HHT 变换的优势,王玥琪^[27],李锐^[30]基于 HHT 算法对 IMF 分量进行 Hilbert 变换,求得瞬时频率构造特征空间识别天然地震与人工爆破。陈奇^[40]提出基于 EDM 的小波阈值去噪方法为了提高地震数据信噪比,最大限度保留有用信息,再利用 VAR-AIC 算法结合时间窗法提取地震波形特征。

2.5 基于深度学习的特征提取法

近年来,作为一种多层神经网络学习算法,深度学习因对输入样本数据强大的特征自动提取能力受到广泛关注。在天然地震和人工爆破分类识别实际应用中,深度学习将特征提取、特征选择和特征分类等功能有机统一,实现了性能与效率的整体优化。深度学习模型中的卷积神经网络有效克服过拟合问题且训练难度低,因而近年来在地震事件研究领域应用广泛。卷积神经网络结构的网络输入是地震事件波形图像,输出是其识别结果,输入图像经过若干个“卷积”和“采样”加工后,在全连接层网络实现与输出目标之间的映射(图 4)。Perol 等^[41]第一个提出基于地震记录的卷积神经网络应用于诱发地震取

得良好效果。陈润航等^[42]提出以梅尔频率倒谱系数图作为卷积神经网络(CNN)的输入,对神经网络进行训练后用来对地震和爆破进行识别。周少辉等^[43]直接选用原始地震波形作为卷积神经网络模型训练与测试的输入数据进行深度学习训练,并分别采用目前主流的 AlexNet、VGG16、VGG19 和 GooleNet 4 种卷积神经网络结构进行学习训练,结果表明, AlexNet 网络结构的效果最好。卷积神经网络达到一定深度后继续增加层数会出现难以训练和性能退化的问题,而加入辅助模块可以有效缓解过深网络训练中退化与梯度消失问题。隗永刚等^[44]提出了具有残差学习模块的残差网络模型应用于天然地震和人工爆破识别,将波形的全部功率谱作为模型训练与测试的输入数据,直接应用深度学习技术从波形功率谱中学习出爆破和地震的频谱特征,在保留原始信息的同时提高了地震事件的识别能力。Mousavi 等^[45]提出基于分级注意力机制、长短期记忆网络和残差网络结合的网络模型,研究结果证明了基于深度神经网络模型较人工拾取方法拥有更快的检测速度和更高的识别精度。高中强^[46]在残差结构中添加 SE 模块建立 ResNet 深度增强模型,通过 SE 模块显示的建模通道间的相互依赖关系自适应重新校准通道间的特征响应,确保更好的提取地震事件图像中“高质量”特征。李进^[47]提出了基于多尺度模块和收缩模块混合的残差神经网络模型 DRISN,并与 Res Net、Google Net 深度卷积网络模型等进行实验对比,发现 DRISN 深度卷积网络模型地震事件识别效果更好。

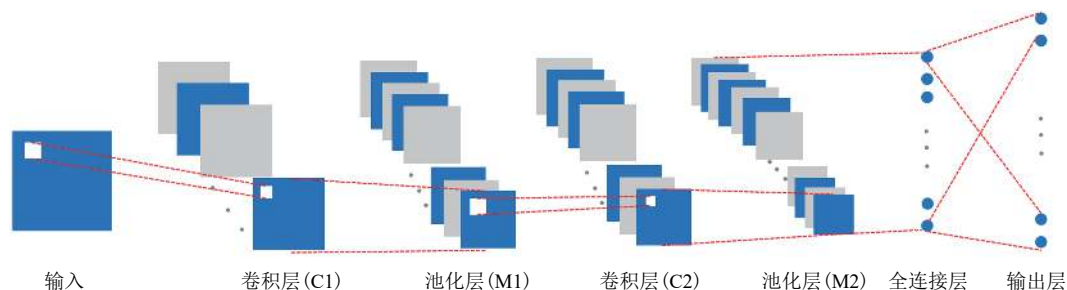


图 4 卷积神经网络结构示意图

Fig. 4 The structure diagram of convolutional neural network

3 结语

天然地震与人工爆破分类识别是目前地震事件分类识别领域的研究热点,而与天然地震与人工爆破分类识别相关的研究是一个较为复杂的过程。从

特征参数的提取、特征的选择与降维分析,到最终的语音情感识别,每一步都至关重要。其中,天然地震与人工爆破识别特征的提取作为分类识别整个过程的开始阶段,占据十分重要的地位,其提取特征的准

确与否决定最终的分类识别效果。

本文通过对天然地震与人工爆破识别特征提取的综述,发现目前虽然已经取得一些成就,但仍存在很多问题值得进一步研究,概括如下:

(1)大规模地震事件数据库构建问题,尤其是人工爆破数据库问题。目前不同研究者采用的地震事件数据库不尽相同,虽然分类识别结果精度较高,但涉及的训练集和测试集数据有限,限制了分类模型的泛化能力。加之深度学习通常需要海量训练样本数据支持才能避免过拟合,数据集也是开发、训练和改进算法的关键。因此,亟需构建大型专业地震事件

数据库,增加数据集体量。

(2)特征挖掘是可提升的方向。天然地震与人工爆破识别领域中不同研究者通过实验提出不同特征,但是现有典型特征较少,多为时间域、频率域特征,近期没有提出类似或更优的广泛适用的特征,故特征挖掘需要进一步加强。

(3)特征提取方法需改良,设计应用性能更好的深度模型。为了使基于深度学习的天然地震与人工爆破识别能够从服务器迁移到移动端,需要将基于深度学习的地震事件识别模型进行轻量化处理,缩短天然地震与人工爆破识别时间。

参考文献

- [1] Bogert B P, Healy M J R, Tukey J W. The quefrency analysis of time series for echoes: Cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum and saphe cracking[J]. Proceeding of the Symposium on Time, 1963, 15: 209-243
- [2] 魏富胜,黎明.震源性质的倒谱分析[J].地震学报,2003,25(1): 47-54
Wei Fusheng, Li Ming. Cepstrum anlysis of source character[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(1): 47-54
- [3] 郭祥云,王淑辉,魏富胜.小震级地震事件的倒谱差异[J].地震地磁观测与研究,2010,31(1): 12-16
Guo Xiangyun, Wang Shuhui, Wei Fusheng. Difference cepstrum of smaller magtutide earthquake[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2010, 31(1): 12-16
- [4] 陈银燕.基于HMM和GMM天然地震与人工爆破识别算法研究[D].桂林:广西师范大学,2011
Chen Yinyan. A research on algorithms for discriminating earthquake and explosion based upon HMM and GMM[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2011
- [5] Gabor D. Theory of communication[J]. J. Inst. Electr. Eng., 1946, 93: 429-457
- [6] 崔鑫,许力生,许忠淮,等.小地震与人工爆破记录的时频分析[J].地震工程学报,2016,38(1): 71-78
Cui Xin, Xu Lisheng, Xu Zhonghuai, et al. Time-frequency analysis of records of small earthquakes and explosions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1): 71-78
- [7] 荣伟健,赵建明,董祎玮,等.曹妃甸地震台网天然地震与人工爆破时频分析[J].地震地磁观测与研究,2017,38(5): 39-43
Rong Weijian, Zhao Jianming, Dong Yiwei, et al. Time frequency analysis of earthquakes and explosions recorded by Caofeidian seismic network[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2017, 38(5): 39-43
- [8] 高家乙,刘晓峰,闫睿.河南平顶山平煤矿区天然地震、爆破、塌陷时频特征分析[J].地震地磁观测与研究,2020,41(3): 67-74
Gao Jiayi, Liu Xiaofeng, Yan Rui. Time-frequency analysis of seismic records generated by natural earthquakes, blasts, and collapses near Pingmei mine based on STFT[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2020, 41(3): 67-74
- [9] 张博.爆炸和地震的识别研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2013
Zhang Bo. Research on earthquakes and explosions identification[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2013
- [10] 杨芳,朱嘉健,刘智,等.广东地区地震与爆破事件识别方法研究[J].华南地震,2016,36(3): 110-115
Yang Fang, Zhu Jiajian, Liu Zhi, et al. Study on identification methods between earthquakes and explosions occurred in Guangdong region[J]. South China Journal of Seismology, 2016, 36(3): 110-115
- [11] 王惠琳,李志雄,徐晓枫,等.琼北确定性人工爆破与天然地震识别判据[J].地震地磁观测与研究,2017,38(4): 75-80
Wang Huilin, Li Zhixiong, Xu Xiaofeng, et al. Discrimination criterions of doubtless explosions and earthquakes in northern Hainan area[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2017, 38(4): 75-80
- [12] 库尔哈奈克.地震图解析[M].刘启元,吴宁远,修济刚,译.北京:地震出版社,1992

- Kulhanek Ota. Anatomy of Seismograms[M]. Translated by Liu Qiyuan, Wu Ningyuan, Xiu Jigang. Beijing: Seismological Press, 1992
- [13] 包宝小, 贾宝金, 刘芳, 等. 乌兰浩特地震台典型地震事件震相特征分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(1): 33-39
- Bao Baoxiao, Jia Baojin, Liu Fang, et al. Analysis of seismic characteristics of Wulanhot seismic event[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2020, 41(1): 33-39
- [14] Pomeroy P W, Best W J, McEvilly T V. Test ban treaty verification with regional data: A review[J]. Bull. Seismol. Soc. Amer., 1982, 72(6B): S89-S129
- [15] 潘常周, 靳平, 王红春. P/S 震相幅值比判据对低震级地震事件的适用性检验[J]. 地震学报, 2007, 29(5): 521-528
- Pan Changzhou, Jin Ping, Wang Hongchun. Applicability of P/S amplitude ratios for the discrimination of low magnitude seismic events[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(5): 521-528
- [16] 潘常周, 靳平, 肖卫国. 利用克里金技术标定新疆及附近地区 P/S 震相幅值比及其在地震事件识别中的应用[J]. 地震学报, 2007, 29(6): 625-634
- Pan Changzhou, Jin Ping, Xiao Weiguo. Calibration of P/S amplitude ratios for seismic events in Xinjiang and adjacent areas based on a bayesian kriging method[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(6): 625-634
- [17] 边银菊, 黄汉明, 郭永霞. 明灯一号及邻近地区地震与爆炸的识别[J]. 地震地磁观测与研究, 2010, 31(5): 49-55
- Bian Yinju, Huang Hanming, Guo Yongxia. Identification of earthquakes and explosions in Bright Lamp No. 1 and its nearby area[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2010, 31(5): 49-55
- [18] 王婷婷. 地震和爆破识别判据及识别方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2012
- Wang Tingting. The recognized criteria and methods research on earthquakes and explosions identification[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2012
- [19] 蔡杏辉, 张燕明, 陈惠芳, 等. 基于小波特征和神经网络的天然地震与人工爆破自动识别[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(6): 634-639
- Cai Xinghui, Zhang Yanming, Chen Huifang, et al. Automatic identification of earthquake and explosion based on wavelet transform and neural network[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(6): 634-639
- [20] 马丽. 青海东部地区非天然地震识别与波形特征分析[J]. 高原地震, 2020, 32(4): 40-46
- Ma Li. Identification and waveform analysis of non-natural earthquakes in eastern Qinghai Province[J]. Plateau Earthquake Research, 2020, 32(4): 40-46
- [21] Baumgardt D R, Ziegler K A. Spectral evidence for source multiplicity in explosions: Application to regional discrimination of earthquakes and explosions[J]. Bull. Seismol. Soc. Amer., 1988, 78(5): 1773-1795
- [22] 郑秀芬, 傅瑀, 许绍燮. 地震记录中小爆破的识别与判据研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 27(5): 29-33
- Zheng Xiufen, Fu Yu, Xu Shaoxie. The discrimination and criteria study between blasts and small earthquakes[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2006, 27(5): 29-33
- [23] 张萍, 魏富胜, 潘科, 等. 爆破与地震的拐角频率比较[J]. 地震地磁观测与研究, 2009, 30(5): 20-25
- Zhang Ping, Wei Fusheng, Pan Ke, et al. Comparison of corner frequency between explosion and earthquake[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2009, 30(5): 20-25
- [24] 李发, 张佑龙, 汪贵章, 等. 安徽及周边地区小爆破的识别与判据研究[J]. 华北地震科学, 2012, 30(2): 43-47
- Li Fa, Zhang Youlong, Wang Guizhang, et al. Research on Identification of small explosions in Anhui and its surrounding area[J]. North China Earthquake Sciences, 2012, 30(2): 43-47
- [25] 张帆. 地震波时频谱分析及其在爆破识别中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006
- Zhang Fan. Seismic signal time-frequency analysis and its application to blast distinguishing[J]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006
- [26] 张丽芬, 廖武林, 曾夏生, 等. 三峡重点监视区构造地震与矿震时频分析谱特征分析[J]. 地震地质, 2009, 31(4): 699-706
- Zhang Lifan, Liao Wulin, Zeng Xiasheng, et al. Analysis of time-frequency characteristics of wave spectrum between tectonic earthquake and mine earthquake[J]. Seismology and Geology, 2009, 31(4): 699-706
- [27] 王玥琪. 不同类型事件宽频带地震仪记录的频谱特征研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2015
- Wang Yueqi. Study on frequency spectrum characteristics of different type events record by broadband seismograph[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2015

- [28] 陈晓龙, 陈继锋, 蒲举, 等. 兰州市红古区非天然地震记录特征分析[J]. 地震工程学报, 2021, 43(3): 545-550
Chen Xiaolong, Chen Jifeng, Pu Ju, et al. Characteristics of non-natural earthquake records in Honggu district, Lanzhou[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 545-550
- [29] 曾宪伟, 赵卫明, 盛菊琴, 等. 应用小波包识别宁夏及邻区的地震和爆破[J]. 地震研究, 2008, 31(2): 142-148
Zeng Xianwei, Zhao Weiming, Sheng Juqin, et al. Using wavelet packet to discriminate earthquakes and explosions in Ningxia and Neighboring areas[J]. Journal of Seismological Research, 2008, 31(2): 142-148
- [30] 李锐. 天然地震与人工爆破的特征提取及识别算法研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2010
Li Rui. Research of features extraction and recognition algorithm of earthquake and explosion[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2010
- [31] 薛思敏. 地震波形希尔伯特-黄变换特征提取与震源类型识别研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2020
Xue Simin. Research on seismic wave's hilbert-huang transform feature extraction and seismic event source type discrimination[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2020
- [32] 邱宏茂, 刘俊民, 范万春. 基于BP神经网络的地震信号识别分类[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(7): 74-76
Qiu Hongmao, Liu Junmin, Fan Wanchun. Discrimination and classification of seismic signals based on BP neural network[J]. Computer Applications and Software, 2005, 22(7): 74-76
- [33] Kuyuk H S, Motosaka M. Real-time ground motion forecasting using front-site waveform data based on Artificial neural network[J]. Journal of Disaster Research, 2009, 4(4): 260-266
- [34] 赵静. 天然地震与人工爆破波形特征提取与识别算法研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2011
Zhao Jing. Research of seismic wave feature extraction and recognition algorithm of earthquake and explosion[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2011
- [35] 任涛, 林梦楠, 陈宏峰, 等. 基于Bagging集成学习算法的地震事件性质识别分类[J]. 地球物理学报, 2019, 62(1): 383-392
Ren Tao, Lin Mengnan, Chen Hongfeng, et al. Seismic event classification based on bagging ensemble learning algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1): 383-392
- [36] 刘希强, 沈萍, 张玲, 等. 用小波变换能量线性度方法识别天然地震与爆破或塌方[J]. 西北地震学报, 2003, 25(3): 204-209
Liu Xiqiang, Shen Ping, Zhang Ling, et al. Using method of energy linearity in wavelet transform to distinguish explosion or collapse from nature earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2003, 25(3): 204-209
- [37] 和雪松, 李世愚, 沈萍, 等. 用小波包识别地震和矿震[J]. 中国地震, 2006, 22(3): 425-434
He Xuesong, Li Shiyu, Shen Ping, et al. A wavelet packet approach to wave classification of earthquakes and mining shocks[J]. Earthquake Research in China, 2006, 22(3): 425-434
- [38] 黄明汉, 边银菊, 卢世军, 等. v-SVC算法在地震与爆破识别及窗长度选取中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 2010, 31(3): 24-31
Huang Minghan, Bian Yinju, Lu Shijun, et al. v-SVC algorithm applied in earthquake and explosion recognition and the choice of window length[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2010, 31(3): 24-31
- [39] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc. R. Soc. Lond., 1998, 454: 903-995
- [40] 陈奇. 时间窗法提取地震波形特征的算法研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2018
Chen Qi. A research on algorithms for seismic wave feature extraction by the time window method[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2018
- [41] Perol T, Gharbi M, Denolle M. Convolutional neural network for earthquake detection and location[J]. Science Advances, 2018, 4(2): e1700578
- [42] 陈润航, 黄明汉, 柴慧敏. 地震和爆破事件源波形信号的卷积神经网络分类研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1331-1338
Chen Runhang, Huang Minghan, Chai Huimin. Study on the discrimination of seismic waveform signals between earthquake and explosion events by convolutional neural network[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(4): 1331-1338
- [43] 周少辉, 蒋海昆, 李健, 等. 基于深度学习的地震事件分类识别——以山东地震台网记录为例[J]. 地震地质, 2021, 43(3): 663-676
Zhou Shaohui, Jiang Haikun, Li Jian, et al. Research on identification of seismic events based on deep learning: Taking the records

- of Shandong seismic network as an example[J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(3): 663-676
- [44] 隗永刚, 杨千里, 王婷婷, 等. 基于深度学习残差网络模型的地震和爆破识别[J]. *地震学报*, 2019, 41(5): 646-657
Wei Yonggang, Yang Qianli, Wang Tingting, et al. Earthquake and explosion identification based on deep learning residual network mode[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2019, 41(5): 646-657
- [45] Mousavi S M, Ellsworth W L, Zhu W Q, et al. Earthquake transformer—an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3952
- [46] 高中强. 基于深度学习的震源类型识别方法[D]. 河南: 信阳师范学院, 2020
Gao Zhongqiang. Research on source type identification methods based on deep learning[D]. Henan: Xinyang Normal University, 2020
- [47] 李进. 基于深度神经网络模型的地震信号识别研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2021
Li Jin. Seismic signal recognition based on deep neural network model[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2021