

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.06.004

基于小波包变换的爆破振动信号能量熵特征分析^{*}

王 伟^① 李兴华^② 陈作彬^① 范 磊^② 孙 飞^①

①核工业南京建设集团有限公司(江苏南京,210003)

②解放军陆军工程大学(江苏南京,210007)

[摘 要] 爆破振动信号是典型的短时非平稳随机信号。应用多分辨率特点的小波包变换对爆破振动信号进行多层分解,得到信号能量分布的细节信息。根据建立在概率统计基础上的信息熵概念,推导得到爆破振动信号能量熵计算方法。分析了4种类型爆破振动信号的能量熵,熵值由大到小为:隧道爆破、管道爆炸、台阶爆破、塌落振动。结果表明,能量熵能够反映不同类型爆破对振动信号的影响。提出将能量熵作为爆破振动信号的新特征量,为爆破振动信号特征提取、不同爆破类型振动信号识别和爆破振动预测提供一种新思路。

[关键词] 爆破振动信号;小波包变换;能量熵;特征提取

[分类号] O382;TD235.1

Characteristic Analysis of Energy Entropy of Blasting Vibration Signal Based on Wavelet Packet Transform

WANG Wei^①, LI Xinghua^②, CHEN Zuobin^①, FAN Lei^②, SUN Fei^①

① Nuclear Industry Nanjing Construction Group Co., Ltd. (Jiangsu Nanjing, 210003)

② Army Engineering University of PLA (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] Blasting vibration signal is a typical short-time non-stationary random signal. Multi-resolution wavelet packet transform is used to decompose the blasting vibration signal in multiple layers to obtain the detailed information of the signal energy distribution. According to the concept of information entropy based on probability and statistics, energy entropy calculation method of blasting vibration signal was derived. Energy entropies of four types of blasting vibration signals were analyzed. The entropy values from large to small are tunnel blasting, pipe explosion, bench blasting, and collapse vibration. The results show that energy entropy can reflect the influence of different types of blasting on vibration signals. The energy entropy is proposed as a new feature quantity of blasting vibration signal, which provides a new idea for blasting vibration signal feature extraction, vibration signal of different blasting types recognition and blasting vibration prediction.

[KEYWORDS] blasting vibration signal; wavelet packet transform; energy entropy; feature extraction

引言

爆破振动信号是典型的短时非平稳随机信号。爆破振动信号的特征能够反映爆破类型、爆破参量和场地介质信息。爆破振动信号特征提取是研究爆破振动预测、爆破振动激励下结构响应和降低爆破振动的基础。目前,爆破振动信号的特征主要包括峰值特征、频谱特征、持时特征和能量特征。很多学者对上述特征和爆破参量对信号特征的影响进行了

深入的研究。林大超等^[1]应用小波包分析方法研究了TNT集中药包地面爆炸产生的地表振动信号的时频分布情况。路亮等^[2]对实测爆破振动信号进行多尺度的提升小波包分解后,得到了各个频带的能量分布,总结了爆破振动信号频带能量的分布特征。钟冬望等^[3]结合量纲分析理论探讨了爆破振动持时影响因素,并推导出了爆破振动持时预测公式。

信息熵是信息论理论中的重要概念,是系统不确定程度的一种描述,能够反映信号随机变化的程

^{*} 收稿日期:2019-06-10
基金项目:国家自然科学基金(51608530)
第一作者:王伟(1974 -),男,高工,主要从事岩土爆破工程施工与技术管理工作。E-mail:102307388@qq.com
通信作者:李兴华(1985 -),男,讲师,主要从事爆炸力学相关研究。E-mail:379523589@qq.com

度,近年来被广泛应用于机械故障诊断^[4]、语音信号处理^[5]、矿山微震信号识别^[6]等领域。本文中,利用小波包变换方法和信息熵理论得到爆破振动信号的能量熵,分析不同类型的爆破产生振动信号的能量熵,将能量熵作为爆破振动信号的新特征量,为爆破振动信号特征提取、不同爆破类型振动信号识别和爆破振动预测提供一种新思路。

1 爆破振动信号的小波包变换

1.1 基本理论

小波包概念是 Meyer 等在小波变换的基础上提出来的。小波包分析中,对信号的低频和高频部分同时进行分解,所以与小波分析相比,它对信号的高频成分也有较高的分辨率。小波包分析为信号提供一种更精细的分析方法,将频带进行多层次的均匀划分,把信号的能量集中到更小、更均匀的频带中,时频特性比小波变换更精确^[7]。

给定正交尺度函数 $\phi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$,定义下列的递推关系:

$$\begin{cases} w_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_{0k} w_n(2t - k); \\ w_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_{1k} w_n(2t - k). \end{cases} \quad (1)$$

式中: h_{0k} 、 h_{1k} 为多分辨率分析中的滤波器系数。当 $n=0$ 时, $w_0(t) = \phi(t)$, $w_1(t) = \psi(t)$ 。以上定义的函数集合 $\{w_n(t)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 为由 $w_0(t) = \phi(t)$ 所确定的小波包。根据多尺度分析中的快速正交小波变换算法,可以得到小波包系数递推公式和小波包的重构公式。

$f(t)$ 为待分解信号,设 $G_j^n f(t) \in U_j^n$,则 $G_j^n f(t)$ 可以表示为

$$G_j^n f(t) = \sum_l d_l^{j,n} \frac{1}{2^j} w_n(2^{-j}t - l). \quad (2)$$

因为 $G_j^n f(t) = G_{j+1}^{2n} f(t) + G_{j+1}^{2n+1} f(t)$,所以小波包系数递推公式为

$$\begin{cases} d_k^{j+1,2n} = \sum_l h_{0(2l-k)} d_l^{j,n}; \\ d_k^{j+1,2n+1} = \sum_l h_{1(2l-k)} d_l^{j,n}. \end{cases} \quad (3)$$

小波包的重构公式为

$$d_l^{j,n} = \sum_k g_0(l-2k) d_k^{j+1,2n} + \sum_k g_1(l-2k) d_k^{j+1,2n+1}. \quad (4)$$

1.2 爆破振动信号的小波包变换

图 1(a) 中,信号为某核电站建设场地平整台阶爆破时采用 TC-4850 爆破测震仪采集到的爆破振动信号,采样频率为 8 kHz。根据采样定理,该信号的

奈奎斯特(Nyquist)频率为 4 kHz。由小波包分析理论可知,当对奈奎斯特频率为 ω_m 的爆破振动信号进行 i 层分解时,可以得到 2^i 个子频带,每个子频带宽度均为 $\omega_m/2^i$,第 j 个子频带所对应的频率区间为 $[(j-1)\omega_m/2^i, j\omega_m/2^i]$ 。采用 db8 小波基^[8]对图 1(a) 的爆破振动信号进行 3 层分解,得到 8 个小波包节点的重构信号,如图 1(b) ~ 图 1(i) 所示。结果发现,爆破振动信号低频带幅值要明显大于高频带信号幅值,说明爆破振动信号以低频成分为主。

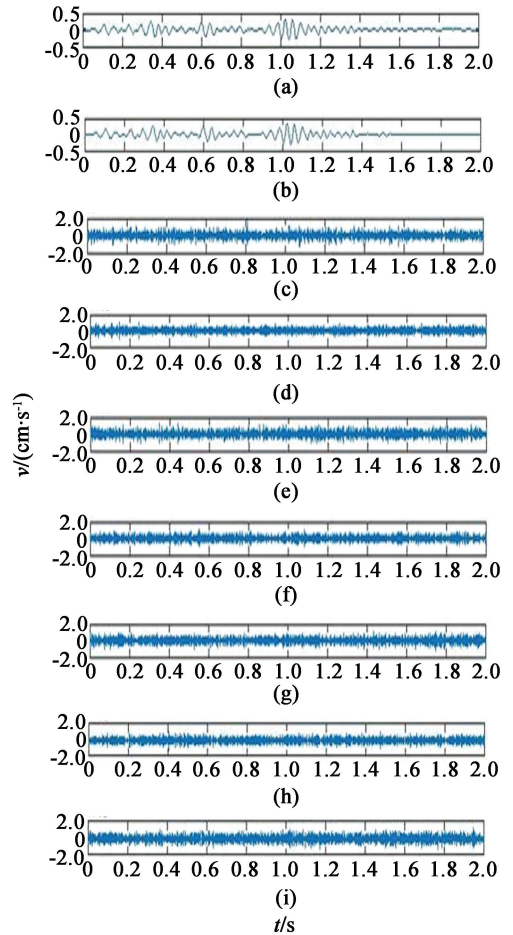


图 1 爆破振动信号的小波包变换重构信号

Fig. 1 Wavelet packet transform reconstructed signal of blasting vibration signal

为了进一步分析爆破振动信号低频成分的细节信息,将图 1(a) 的爆破振动信号进行 9 层分解,则每个频带的宽度为 7.8 Hz,爆破振动信号前 100 个频段成分的三维时频谱如图 2 所示。从图 2 可以看出,爆破振动信号成分分布在较宽的频率范围内,但也具有多个比较明显的优势频带,主要集中在低频成分。图 2 中还可以看出,每个频段内的信号幅值随着时间变化,克服了传统傅里叶变换只有频域信息的缺点,表明小波包信号分析方法具有较好的时

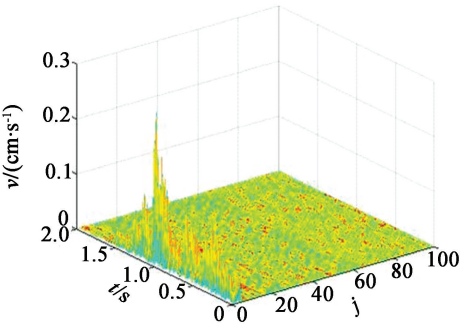


图2 爆破振动信号三维时频谱图
Fig.2 Three-dimensional time-frequency spectrum of blasting vibration signal

频分辨率,是一种更加精细的信号分析方法,为进一步研究爆破振动信号信息熵特征提供了前提条件。

2 基于小波包变换的爆破振动信号能量熵特征提取

2.1 信息熵

信息论是应用概率论、随机过程、数理统计以及近世代数、矩阵理论等方法来研究信息本质和传输规律的科学理论^[9]。1948 年,Shannon 将热力学中熵的概念引入到信息论,即 Shannon 信息熵。信息熵在平均意义上表征信源的总体特征,是对信源平均不确定度的描述。Shannon 信息熵对信源最本质的状态给出了一个科学的计量方法。

把信源用随机变量来表示,用随机变量的概率分布来描述信源的不确定性。通常把一个随机变量的所有可能的取值和这些取值所对应的概率 $[X, P(X)]$ 称为它的概率空间。假设随机变量 X 有 n 个可能的取值 $x_i(i=1,2,\cdots,n)$,各取值出现的概率为 $p(x_i)$,它的概率空间可表示为

$$\begin{bmatrix} X \\ P(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ p(x_1) & p(x_2) & \cdots & p(x_n) \end{bmatrix}。 (5)$$

随机变量的每一个可能取值的自信息 $I(x_i)$ 的统计平均值定义为随机变量的信息熵^[10]。

$$H(X) = E[I(x_i)] = \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i)。 (6)$$

2.2 小波包变换的能量熵

根据小波包分解系数重构,可以提取信号各个频带成分,假设将爆破振动信号进行 i 层分解,则信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = \sum_k S_{i,k} = S_{i,0} + S_{i,1} + S_{i,2} + \cdots + S_{i,2^i-1}。 (7)$$

式中: $S_{i,k}$ 为第 i 层分解点 (i,k) 上的重构信号,其中, $k=0,1,2,\cdots,2^i-1$ 。

第 i 层重构信号 $S_{i,k}$ 对应的能量 $E_{i,k}$ 为

$$E_{i,k} = \int |S_{i,k}|^2 dt = \sum_{j=1}^m |x_{k,j}|^2。 (8)$$

式中: $x_{k,j}(k=0,1,2,\cdots,2^i-1;j=1,2,\cdots,m)$ 为重构信号 $S_{i,k}$ 的离散点的幅值。

设被分析信号的总能量为 E_0 ,则有

$$E_0 = \sum_{k=0}^{2^i-1} E_{i,k}。 (9)$$

各频带的能量占被分析信号总能量的概率为

$$P_{i,k} = \frac{E_{i,k}}{E_0}。 (10)$$

根据信息熵理论,爆破振动信号小波包能量熵可表示为^[11]

$$H = - \sum_{k=1}^{2^i-1} P_{i,k} \log_2 |P_{i,k}|。 (11)$$

2.3 基于小波包变换的爆破振动信号能量熵特征提取

为了研究爆破振动信号的能量熵特征,选取了台阶爆破振动信号(TJ)^[12]、隧道爆破振动信号(SD)^[13]、埋地高压天然气管道爆炸产生的振动信号(GD)^[14]和建(构)筑物爆破塌落振动信号(TL)^[15]4 种类型。首先,根据4种振动信号采集时的采用频率,将信号进行不同层的小波包分解,使每个频带对应的频率宽度为7.8 Hz。再利用小波包能量特征的计算公式得到不同频带能量的分布规律,如图3所示。图3为4种类型典型振动信号前50个频带能量分布规律,可以看出,4种类型振动信号能量分布规律大体一致,大部分能量都集中在前10个频带,即0~78 Hz之内,同时都具有多个优势能量频带。4种类型振动信号能量分布的区别在于优势能量频带不同,例如台阶爆破振动信号第3个频带能量分布最多,而塌落振动信号第1个频带能量分布较多。因此,爆破振动信号的能量分布特征能够区别不同爆破类型,但是特征不够直观明显。

为了寻找直观明显的区别不同类型爆破振动信

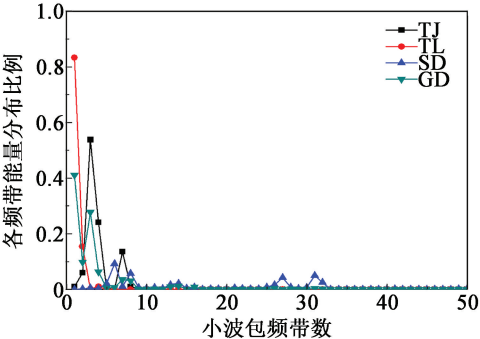


图3 不同类型爆破振动信号能量分布对比
Fig.3 Comparison of energy distribution of different types of blasting vibration signals

号的特征,将小波包能量分布和信息熵结合起来,即爆破振动信号的小波包能量熵。根据小波包能量熵的计算过程,得到了不同类型爆破振动信号的小波包能量熵,如表 1 所示。

表 1 不同类型爆破振动信号能量熵
Tab.1 Energy entropy of different types
of blasting vibration signals

| 频带 | 爆破类型 | | | |
|----|---------|---------|---------|---------|
| | 台阶爆破 | 隧道爆破 | 塌落振动 | 管道爆炸 |
| 1 | 1.787 1 | 6.054 0 | 0.783 7 | 2.645 1 |
| 2 | 2.223 1 | 6.759 0 | 1.077 3 | 2.381 3 |
| 3 | 1.396 1 | 7.017 7 | 1.057 2 | 2.261 4 |
| 4 | 1.588 4 | 6.722 0 | 1.089 3 | 2.496 1 |
| 5 | 1.502 7 | 6.975 2 | 0.724 0 | 1.929 5 |
| 6 | 1.398 0 | 6.356 1 | 1.123 0 | 2.533 6 |
| 7 | 1.745 0 | 6.218 4 | 0.788 3 | 3.630 5 |
| 8 | 1.362 0 | 7.245 1 | 0.429 7 | 4.037 9 |
| 9 | 1.408 9 | 7.060 6 | 0.430 3 | 3.635 8 |
| 10 | 1.228 7 | 6.236 5 | 0.681 8 | 3.933 9 |

从表 1 中可以看出,同种类型爆破振动信号的能量熵大体一致,不同类型爆破振动信号的能量熵数值上有一定差异,由大到小为:隧道爆破、管道爆炸、台阶爆破、塌落振动。爆破振动信号的能量熵特征能够很好地区分爆破类型。根据能量熵的极值性和最大熵定理,当各个频段能量分布出现的概率相等时,熵值最大。因此,爆破振动信号能量熵值越大,表明信号能量和频率分布越分散,由此可知,隧道爆破振动信号的能量分布比较分散。这一结论与图 3 中的曲线是一致的。

信息论中,信息熵是系统有序化程度的一个度量。系统越有序,信息熵就越低;系统越混乱,信息熵就越高。爆破振动信号的能量熵能够反映出频率分布的高与低、能量分布的集中与分散,体现了爆破振动信号频率分布和能量分布细节信息。而这些细节信息与爆破类型、爆源参数和场地介质信息密切相关,因此,能量熵能够作为描述爆破振动信号的重要特征参量。

3 结论

1)针对爆破振动信号短时、非平稳、随机的特征,将具有多分辨分析特点的小波包变换方法和建立在概率统计基础上的信息熵相结合,提出并得到了爆破振动信号的小波包能量熵。

2)分析了 4 种不同类型爆破振动信号的能量

熵,熵值由大到小为:隧道爆破、管道爆炸、台阶爆破、塌落振动,表明隧道爆破振动信号的能量分布比较分散。

3)爆破振动信号能量熵与爆破类型、爆源参数和场地介质信息密切相关,提出将能量熵作为爆破振动信号新特征量,为爆破振动信号特征提取、不同爆破类型振动信号识别和爆破振动预测提供一种新思路。

参 考 文 献

[1] 林大超,施惠基,白春华,等. 爆破震动时频分布的小波包分析[J]. 工程爆破, 2002, 8(2): 1-5.
LIN D C, SHI H J, BAI C H, et al. On time-frequency distribution of blasting vibration through wavelet packet transform[J]. Engineering Blasting, 2002, 8(2): 1-5.

[2] 路亮,龙源,谢全民,等. 爆破振动信号的提升小波包分解及能量分布特征[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 140-146.
LU L, LONG Y, XIE Q M, et al. Decomposition and energy distribution of blasting vibration signal based on second generation wavelet packet [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 140-146.

[3] 钟冬望,何理,操鹏,等. 爆破振动持时分析及微差爆破延期时间优选[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(5): 703-709.
ZHONG D W, HE L, CAO P, et al. Analysis of blasting vibration duration and optimizing of delayed time interval for millisecond blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(5): 703-709.

[4] 任玉卿,王海瑞,齐磊,等. 基于振动信号能量熵的轴承故障诊断[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(9): 283-287.
REN Y Q, WANG H R, QI L, et al. Bearing fault diagnosis method based on energy entropy of vibration signal [J]. Computer Applications and Software, 2017, 34(9): 283-287.

[5] 李乐,王玉英,李小霞. 一种改进的小波能量熵语音端点检测算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(5): 268-274.
LI L, WANG Y Y, LI X X. An improved wavelet energy entropy algorithm for speech endpoint detection [J]. Computer Engineering, 2017, 43(5): 268-274.

[6] 贾志波. 基于 SVM 的矿山微震信号分类识别方法的研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2017.

[7] 娄建武,龙源,徐全军. 基于小波包技术的爆破地震波特征提取及预报[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3): 261-267.

- LOU J W, LONG Y, XU Q J. A study on the extraction and prediction of blasting seismic wave characteristics by wavelet packets technique [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(3): 261-267.
 - [8] 李兴华, 龙源, 纪冲, 等. 基于小波包变换的高程差对爆破震动信号影响分析[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(4): 44-47.
LI X H, LONG Y, JI C, et al. Influence of height difference based on wavelet packets transformation on blasting vibration signals [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(4): 44-47.
 - [9] 王军选, 田小平, 曹红梅. 信息论基础与编码[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
 - [10] YANG Y, YU D J, CHENG J S. A rolling fault diagnosis method based on EMD energy entropy and ANN [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 294: 269-277.
 - [11] 安春兰, 甘方成, 罗微, 等. 提速道岔小波包能量熵故障诊断方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2015, 12(2): 260-274.
AN C L, GAN F C, LUO W, et al. Method of speed-up turnout fault diagnosis using wavelet packet energy entropy [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12(2): 260-274.
 - [12] 马华原, 李斌利, 郭涛. 核电站扩建工程爆破开挖振动信号的 HHT 分析[J]. *爆破器材*, 2016, 45(5): 50-55.
MA H Y, LI B L, GUO T. HHT analysis on vibration signal of blasting excavation in expansion of nuclear power station [J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(5): 50-55.
 - [13] LI X H, LONG Y, JI C, et al. Study on the vibration effect on operation subway induced by blasting of an adjacent cross tunnel and the reducing vibration techniques [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2013, 15(3): 1454-1462.
 - [14] MA H Y, LI X H, LONG Y, et al. Study on vibration characteristics of natural gas pipeline explosion based on improved MP-WVD algorithm [J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018: 1-13.
 - [15] 吕海军, 龙源, 廖昆, 等. 南京水西门高架桥爆破拆除及振动测试分析[J]. *工程爆破*, 2013, 19(3): 33-37.
LÜ H J, LONG Y, LIAO K, et al. Blasting demolition and vibration analysis of Shuiximen Viaduct in Nanjing [J]. *Engineering Blasting*, 2013, 19(3): 33-37.

(上接第 18 页)

 - [17] 屈晨曦, 葛忠学, 张敏, 等. CL-20/HATO 复合物的制备、表征及性能[J]. *含能材料*, 2018, 26(10): 850-855.
QU C X, GE Z X, ZHANG M, et al. Preparation, characterization and properties of CL-20/HATO composite [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(10): 850-855.
 - [18] 孟征, 欧育湘, 刘进全, 等. 蜜胺甲醛树脂原位聚合包覆六硝基六氮杂异伍兹烷[J]. *含能材料*, 2006, 14(5): 333-335, 339.
MENG Z, OU Y X, LIU J Q, et al. Coating of ε -HNIW with melamine formaldehyde resin by in-situ condensation polymerization reaction [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2006, 14(5): 333-335, 339.
 - [19] 王旭朋, 罗运军, 郭凯, 等. 聚叠氮缩水甘油醚的合成与改性研究进展[J]. *精细化工*, 2009, 26(8): 813-817.
WANG X P, LUO Y J, GUO K, et al. Research advances in synthesis and modification of glycidyl azide polymer [J]. *Fine Chemicals*, 2009, 26(8): 813-817.
 - [20] 邓竞科, 李国平, 罗运军. GAP 黏合剂体系交联网络结构研究[J]. *高分子学报*, 2016(4): 464-470.
DENG J K, LI G P, LUO Y J. Studies on cross-linking network structure of GAP binder system [J]. *Acta Polymeric Sinica*, 2016(4): 464-470.
 - [21] 陈腾, 李强, 郭双峰, 等. GAP-HDI/CL-20 纳米复合含能材料的制备、表征及其热分解特性[J]. *火炸药学报*, 2018, 41(3): 243-249.
CHEN T, LI Q, GUO S F, et al. Preparation, characterization and thermal decomposition behavior of GAP-HDI/CL-20 nano-composite energetic materials [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(3): 243-249.