

文章编号: 1001-1455(2004)01-0063-06

地下工程爆破振动信号能量分布特征 的小波包分析*

凌同华, 李夕兵

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 根据爆破振动信号具有短时非平稳的特点, 利用小波包分析技术对地下工程爆破振动信号的能量分布特征进行了研究。首先, 简略介绍了小波变换与小波包分析的特点; 其次, 基于 MATLAB (Materials Laboratory) 对段药量和爆源距离等不同条件下记录的 8 条爆破振动信号进行小波包分析, 得到了爆破振动信号在不同频带上的能量分布图; 最后, 分析了爆破振动信号能量的分布特征。本分析手段为研究地下工程爆破地震效应特别是振动速度-频率相关安全准则提供了一种有效的分析技术。

关键词: 爆炸力学; 能量分布; 小波包分析; 爆破振动; 非平稳信号; MATLAB

中图分类号: O382; TD235.1 国标学科代码: 130·3520 文献标志码: A

1 引 言

爆破振动分析是研究爆破振动危害控制的基础, 也是控制爆破振动危害的前提。以往分析和处理爆破振动信号最常用也是最主要的方法是 Fourier 分析。从众多爆破振动实地监测资料看, 爆破振动信号具有持时短、突变快等特点, 信号结构包括频谱都是时变的, 属于典型的非平稳信号^[12]。但是, 长期以来, 由于受理论发展所限, 通常都将它简化为平稳信号(伪平稳)问题, 通过 Fourier 等变换来处理。近年来, 随着科学技术的发展, 特别是新的数学工具的出现, 信号的时频表示法已广泛应用于工程技术领域, 用小波变换处理非平稳随机信号已激起了人们很高的热忱。但用小波变换处理爆破振动信号还处于起步阶段, 许多学者正对此做着有益的尝试和探索^[35]。本文中针对爆破振动信号的特征, 对地下工程爆破振动信号进行小波包分析, 取得了地下工程爆破地震波在传播过程中能量分布的某些特征。

2 小波包分析及其特点

小波分析是把信号分解成低频和高频两部分。在分解中, 低频部分失去的信息由高频部分捕获, 在下一层分解中, 又将所分解出的低频部分分解成低频和高频两部分, 低频中失去的信息同样由高频部分捕获, 如此类推下去, 可以完成更深层次的分解。从小波分解的结构可以看出, 小波变换的频率分辨率随频率升高而降低。小波包分解则不然, 它不仅对低频部分进行分解, 而且也对高频部分实施分解。小波包分解能根据信号特性和分析要求自适应地选择相应频带与信号频谱相匹配, 是小波分解更为精细的一种分解方法。小波包分解是以严密的数学理论和数值计算方法为基础, 已有较多著作对此给出了详细的论述^[68], 为简洁起见, 这里不再介绍相关的数学原理。

3 爆破振动信号小波包分解及各频带信号的能量表征

3.1 爆破振动信号小波包分解

将信号进行小波包分析时, 分解的层数视具体信号及采用的爆破振动分析仪的工作频带而定。本

* 收稿日期: 2003-03-27; 修回日期: 2003-08-19

基金项目: 国家“973”计划基金项目(2002CB412703); 国家自然科学基金项目(50174056)

作者简介: 凌同华(1968—), 男, 博士研究生, 工程师。

文中所采用的爆破振动记录仪的最小工作频率为 5Hz, 由于爆破振动信号的频率一般在 200Hz 以下, 根据采样定理^[9], 信号的采样频率设为 2500Hz, 则其奈奎斯特(Nyquist)频率为 1250Hz。因此, 可以将分析信号分解到第 8 层, 对应的最低频带为 04.883Hz。根据小波包分解算法, 采用二进尺度变换, 其对信号分解后各层重构信号的频带范围见表 1。

表 1 小波包分解系数重构信号各层频带范围

Table 1 The range for frequency band of reconstructed signal by wavelet packet coefficients

层数	$S_{i,0}$	$S_{i,1}$	$S_{i,2}$...	$S_{i,j-1}$	$S_{i,j}$
1	0625					6251250
2	0312.5	312.5625	625937.5			937.51250
3	0156.25	156.25312.5	312.5468.75			1093.751250
4	078.125	78.125156.25	156.25234.375	...	1093.751171.875	1171.8751250
5	039.063	39.06378.125	78.125117.188	...	1171.8751210.937	1210.9371250
6	019.531	19.53139.063	39.06358.594	...	1210.9371230.469	1230.4691250
7	09.766	9.76619.531	19.53129.297	...	1230.4691240.234	1240.2341250
8	04.883	4.8839.766	9.76614.649	...	1240.2341245.117	1245.1171250
...

注: $S_{i,j}$ 表示第 i 层第 j 个小波包分解系数重构信号, $j=0, 1, 2, \dots, 2^{i-1}$; $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

3.2 各频带的能量表征

将被分析信号分解到第 8 层, 设 $S_{8,j}$ 对应的能量为 $E_{8,j}$, 则有^[10]

$$E_{8,j} = \int |S_{8,j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{j,k}|^2 \quad j = 0, 1, 2, \dots, 2^8 - 1 \quad (1)$$

式中: m 为信号的离散采样点数, $x_{j,k}$ 为重构信号 $S_{8,j}$ 的离散点幅值。设被分析信号的总能量为 E_0 , 则

$$E_0 = \sum_{j=0}^{2^8-1} E_{8,j} \quad (2)$$

各频带的能量占被分析信号总能量的比例为

$$E_j = E_{8,j} \times 100\% / E_0 \quad j = 0, 1, 2 \dots, 2^8 - 1 \quad (3)$$

这样, 由(1)(3)式可以得到信号经小波包分解后不同频带的能量, 从而可以找出爆破振动信号在传播过程中能量的变化规律。

4 各频带的能量分布规律

4.1 爆破振动测试

用四川动态测试研究所生产的 EXP2850 爆破振动分析仪(最高采样频率 50kHz)和 CDJ-1 型传感器(可测频率范围为 2500Hz)对几个地下矿进行多次爆破振动测试, 从中抽取 8 个信号进行分析, 其爆破条件、测点位置见表 2, 相应的质点竖向振动速度时程曲线见图 1。表 2 中 1-a、1-b、2-a、2-b 和 3-a、3-b、4-a、4-b 分别为两个不同地下矿山的爆破振动信号的编号。

表 2 测试点的爆破条件

Table 2 Condition of blast vibration measurement

编号	测点到爆心距离/m	最大段药量/kg	总药量/kg	雷管段数(ms 延期)
1-a	51.57	2300	24231	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
1-b	63.56	2300	24231	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
2-a	50.50	1300	8500	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
2-b	62.42	1300	8500	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
3-a	23.60	84	484	2, 4, 5, 6, 7, 9
3-b	57.50	84	484	2, 4, 5, 6, 7, 9
4-a	23.60	170	1200	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9
4-b	57.50	170	1200	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9

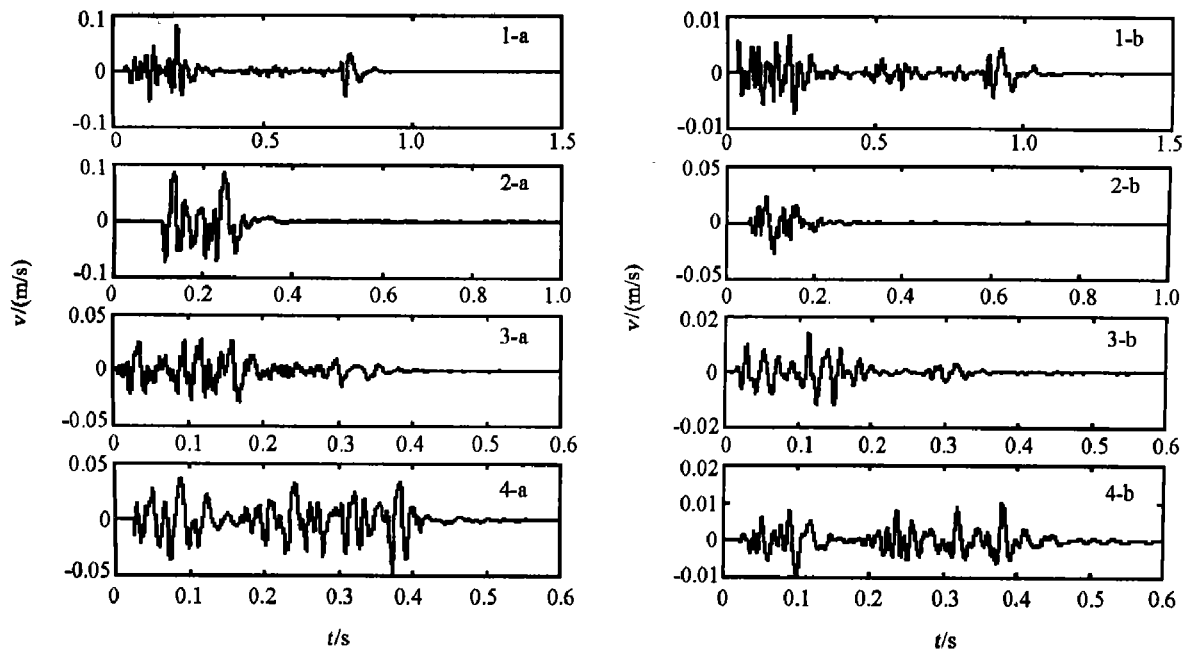


图 1 爆破振动垂向速度时程曲线

Fig.1 The vertical velocity vs time curves of 8 blast vibration signals

4.2 爆破振动信号小波包分析

(1)小波基的选择。最优小波基的选择是用小波包方法对信号进行分析时的一个十分重要的问题，因为用不同的小波基分析同一个信号会产生不同的结果^[10]。Daubechies 小波系列具有较好的紧支撑性、光滑性及近似对称性^{[10][12]}，已成功地应用于分析包括爆破地震在内的非平稳信号问题^[34]。该小波系列按正整数 N 具有不同的序列 (db N)，目前在爆破振动信号的处理中用得最多的是 db5 和 db8，这里选用 db8。

(2)小波包分析。在 Matlab6.1 的 Wavelet Toolbox 中用 db8 将图 1 所示的爆破振动信号分别进行深度为 8 层的小波包分析，根据 (1)(3)式编制计算程序，运行后得到各频带的能量分布图 (见图 2)。为便于比较，将各信号不同频带能量占该信号总能量的百分比统计于表 3。

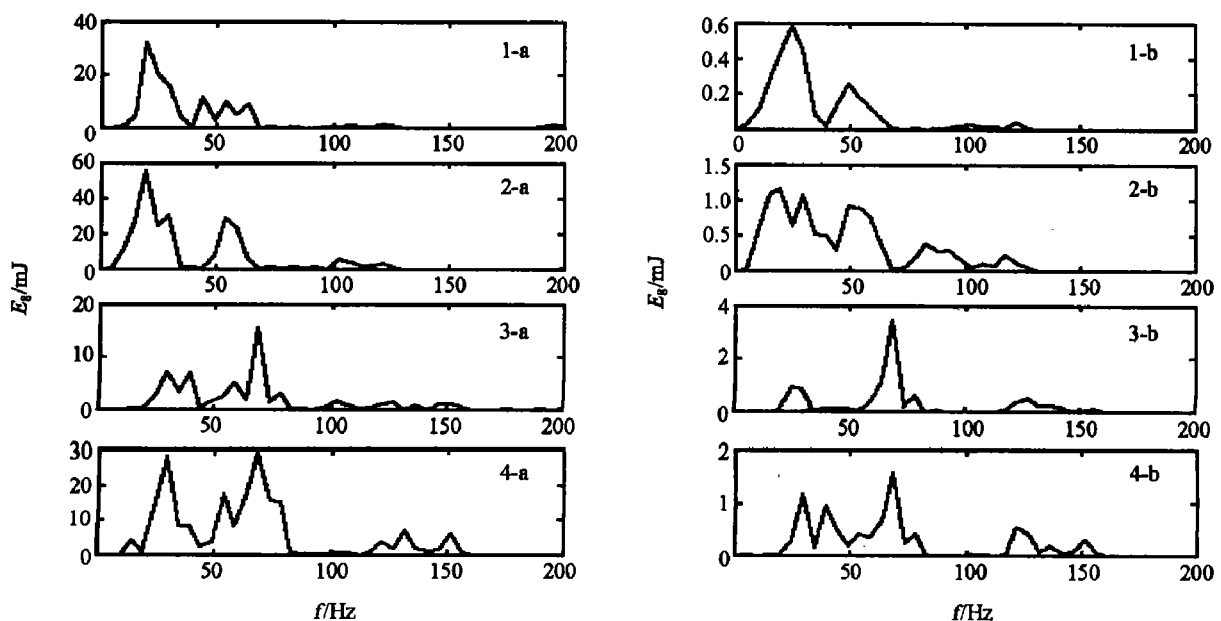


图 2 爆破振动信号的频带能量分布

Fig.2 The energy distribution of frequency band for 8 blast vibration signals

表3 爆破振动信号不同频带的能量百分比统计

Table 3 The percentage of energy for blast vibration signal at different frequency band

频段	1-a	1-b	2-a	2-b	3-a	3-b	4-a	4-b
04.883	0.080	1.045	0.256	0.212	0.030	0.161	0.026	0.151
4.8839.766	0.644	3.868	4.635	5.603	0.080	0.009	0.027	0.012
9.766014.648	3.595	9.579	10.720	9.984	0.330	0.163	1.940	0.347
14.64819.530	25.420	14.540	22.560	10.712	0.440	0.013	0.385	0.175
19.53024.414	16.060	20.170	9.888	5.830	3.870	9.342	7.445	3.272
24.41429.297	12.600	15.480	12.320	9.808	10.20	8.183	13.380	13.420
29.29734.180	2.796	2.561	0.585	4.848	5.100	0.304	3.898	1.722
34.18039.063	0.539	0.684	0.433	4.606	10.000	1.592	3.989	10.800
39.06343.945	9.323	4.507	0.343	2.721	0.600	1.560	1.163	6.104
43.94548.828	2.068	8.969	3.074	8.464	2.360	1.554	1.695	2.000
48.82853.711	7.615	6.210	11.620	8.361	3.680	0.546	8.476	4.691
53.71158.594	4.175	4.293	9.815	7.127	7.240	2.810	3.943	3.970
58.59463.477	7.063	1.890	2.345	3.213	2.680	11.420	8.692	7.403
63.47768.359	0.068	0.164	0.391	0.137	22.200	34.660	13.730	17.810
68.35973.242	0.234	0.055	0.675	0.534	1.990	1.891	7.488	2.570
73.24278.125	0.096	0.176	0.181	1.703	4.230	6.063	7.326	4.678
78.12583.008	0.502	0.076	0.434	3.433	0.460	0.176	0.391	0.027
83.00887.891	0.177	0.139	0.262	2.610	0.330	0.241	0.186	0.044
87.89192.773	0.130	0.175	0.467	2.752	0.150	0.089	0.245	0.026
92.77397.657	0.373	0.705	0.134	1.849	0.660	0.064	0.188	0.014
97.657102.54	0.195	0.949	2.207	0.497	2.440	0.157	0.293	0.384
102.54107.42	0.602	0.560	1.762	0.877	1.250	0.021	0.291	0.285
107.42112.30	0.230	0.488	0.873	0.684	0.270	0.152	0.062	0.029
112.30117.19	0.191	0.213	0.849	1.590	0.550	0.410	0.542	0.219
117.19122.07	1.129	1.512	1.472	1.138	1.650	3.261	1.718	6.065
122.07126.95	0.495	0.199	0.323	0.404	2.030	4.972	0.768	4.720
126.95131.84	0.004	0.002	0.020	0.005	0.150	2.555	3.315	0.746
131.84136.72	0.009	0.002	0.024	0.005	1.500	2.221	0.873	2.038
136.72141.60	0.011	0.002	0.032	0.003	0.110	1.650	0.479	0.594
141.60146.48	0.023	0.004	0.021	0.003	1.510	0.648	0.693	0.723
146.48151.37	0.009	0.003	0.012	0.001	1.710	0.522	2.879	3.341
151.37156.25	0.010	0.004	0.029	0.001	1.070	1.495	0.413	0.736
156.25161.13	0.017	0.007	0.007	0.001	0.010	0.003	0.020	0.002
161.13166.02	0.037	0.007	0.023	0.002	0.010	0.003	0.021	0.002
166.02170.90	0.065	0.002	0.043	0.002	0.020	0.003	0.018	0.001
170.90175.78	0.010	0.004	0.023	0.002	0.240	0.003	0.014	0.002
175.78180.66	0.028	0.003	0.015	0.001	0.020	0.004	0.053	0.007
180.66185.55	0.050	0.004	0.007	0.003	0.090	0.009	0.035	0.002
185.55190.43	0.284	0.032	0.050	0.002	0.270	0.003	0.020	0.002
190.43195.31	1.154	0.038	0.080	0.005	0.030	0.004	0.038	0.002
195.31200.20	0.290	0.075	0.307	0.002	0.390	0.027	0.044	0.006
200.201250.0	1.605	0.602	0.685	0.275	8.070	1.058	2.842	0.864

4.3 地下工程爆破振动信号不同频带能量分布规律

(1)从图2、表3可以看出,信号在0200Hz间的能量占该信号总能量的百分比分别为98.4%、99.4%、99.33%、99.73%、91.93%、98.94%、97.16%和99.14%,表明地下工程爆破振动信号的能量在频域上虽然展布比较广泛,但绝大部分能量集中在0200Hz间。

(2)表3中,各信号在1080Hz间的能量占其总能量的比例分别为:92.8%、93.2%、90.02%、87.08%、75.5%、80.3%、83.9%、79.0%,可以进一步将其划分成更多的频段,表明爆破振动信号的主振频带比较宽,主振频带又可以分成多个分振频带。

(3)从图2可以看出,信号2-a与1-a所在测点离爆源的距离大致相同,但2-a的段药量在比1-a少许多的情况下其频带能量最大值却超过了后者;同样2-b与1-b、3-b与4-b所在测点离爆源的距离大致相同,后者的段药量均比前者大,但后者的频带能量最大值却不及前者。这表明在爆破的中远区,雷管

段数增加确有干扰降震的效果(使信号的频带能量最大值降低)。但在爆破近区(如 3-a 与 4-a), 降震效果并未得到体现, 是否表明雷管段数的增加对爆破近区的干扰降震效果不明显或无效还有待研究。

(4)从图 2 及表 3 还可以看出, 段药量增加, 结构振动的主振频带有往低频发展的趋势。由于工程结构的自振频率一般较低, 显然这不利于地下工程中的构(筑)物的安全。

4.4 本分析方法的有效性检验

为验证小波包分解后的信号是否真实反映原始信号, 对分解后的信号进行重构, 重构后的信号与原信号间的误差见图 3。从图中可以看出, 重构后的信号与原信号的误差量级均在 10^{-12} 以上, 可完全满足工程计算和分析要求。因此, 本文用小波包分析对爆破振动信号进行分解的过程中, 信号的能量损失可忽略不计, 表明本文所用分析方法是可靠的。

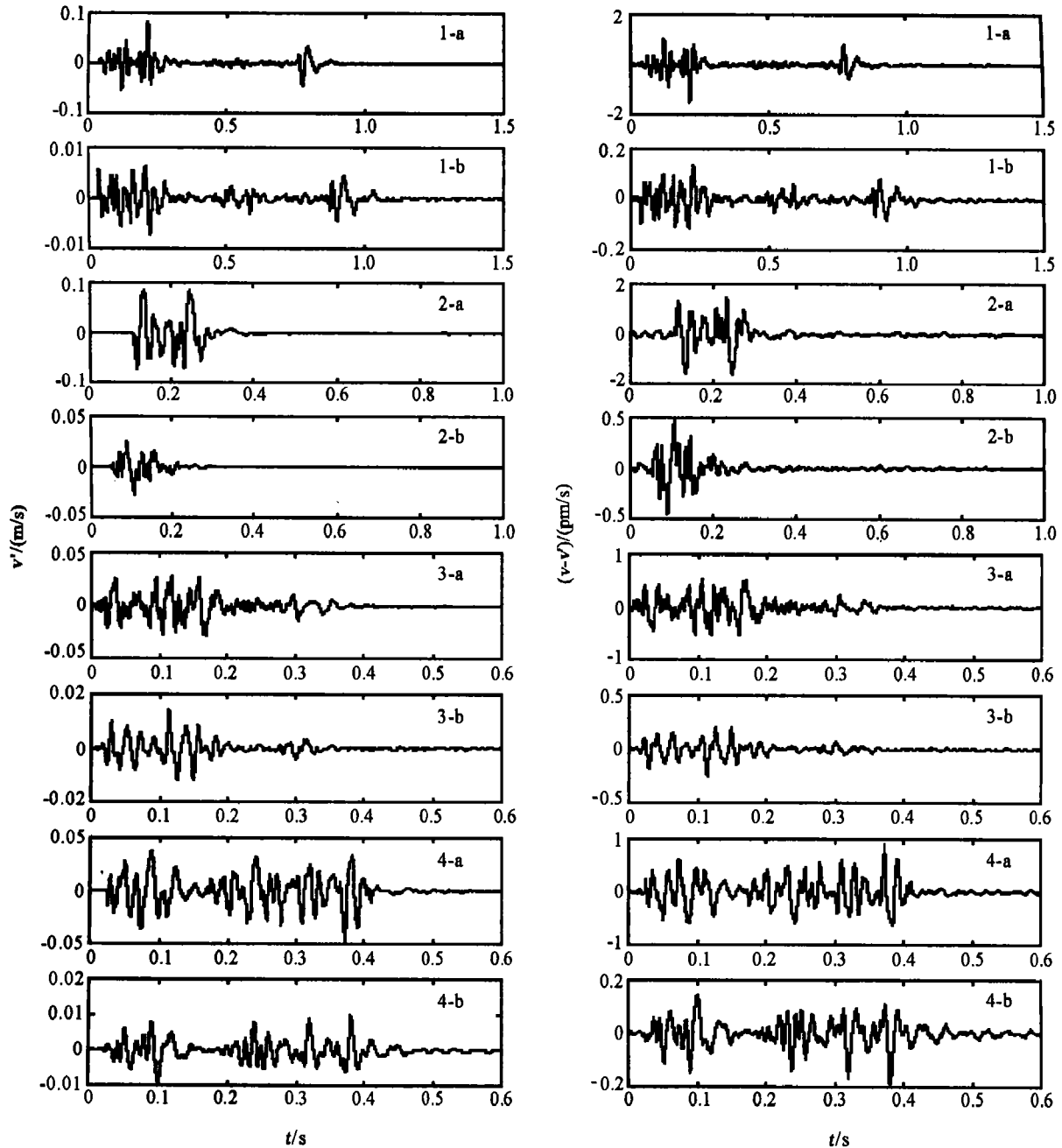


图 3 重构信号与重构误差

Fig.3 The reconstruction signals and reconstruction errors

5 结 论

利用小波包分析具有频率分辨率高的特点, 基于 MATLAB 对地下工程爆破振动信号进行深层次的小波包分析, 得到了爆破振动信号不同频段上的能量分布, 进一步指出地下工程爆破振动信号的某些

传播特征,为综合研究爆破地震效应特别是爆破振动速度-频率相关安全准则提供了实用的分析技术。

参考文献:

- [1] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 12.
- [2] 王宏禹. 非平稳随机信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 12-20.
- [3] 何军, 于亚伦, 梁文基. 爆破振动信号的小波分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 47-50.
HE Jun, YU Ya-lun, LIANG Wen-ji. Wavelet analysis for blasting seismic signals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 47-50.
- [4] 林大超, 施惠基, 白春华, 等. 爆炸地震效应的时频分析[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 31-35.
LIN Da-chao, SHI Hui-ji, BAI Chun-hua, et al. Time-frequency analysis of explosion seismic effects[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 31-35.
- [5] 黄文华, 徐全军, 沈蔚, 等. 小波变换在判断爆破地震危害中的应用[J]. 工程爆破, 2001, 7(1): 24-27.
HUANG Wen-hua, XU Quan-jun, SHEN Wei, et al. Application of wavelet transform in evaluation of blasting vibration damage[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(1): 24-27.
- [6] Kchui C. An introduction to Wavelets[M]. New York: Academic Press, Inc, 1992: 297-333.
- [7] Mallat S G. A theory for multidimension signal decomposition: the wavelet models[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11: 674-693.
- [8] 陈逢时. 子波变换理论及其在信号分析与处理中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 7-120.
- [9] 邹云屏, 李潇. 信号变换与处理[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993: 8-12.
- [10] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学, 2000: 6-266.
- [11] Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis[J]. IEEE transactions on information theory, 1990, 36(5): 961-1005.
- [12] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[J]. Communication on Pure and Applied Mathematics, 1988, 41(7): 909-996.

The features of energy distribution for blast vibration signals in underground engineering by wavelet packet analysis

LING Tong-hua^{*}, LI Xi-bing

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Based on the character of short-time non-stationary random signal, this paper studies the features of energy distribution for blast vibration in underground engineering by means of the wavelet packet analysis technique. Firstly, the characters of wavelet transform and wavelet packet analysis are briefly introduced. Secondly, eight vibration signals measured under different charge weight, distance between the explosion and measuring point etc. are analyzed by using the wavelet packet based on MATLAB (Materials Laboratory), and results of energy distribution for different frequency band are provided. Finally, some features of energy distribution of blast vibration signals are indicated. It is shown the method provides an effective tool for studying blast seismic effect in underground engineering, specially, for constituting velocity-frequency criteria.

Key words: mechanics of explosion; energy distribution; wavelet packet analysis; blast vibration; non-stationary random signal; MATLAB

^{*} Corresponding author; LING Tong-hua; E-mail address: lingtonghua@163.com; Telephone: 0731-8837855