

多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析

凌同华^{1,2}, 李夕兵²

(1. 长沙理工大学 公路工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 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。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满足分析要求的多段微差爆破振动信号的能量分布特征进行研究。首先, 简略地介绍了小波变换与小波包分析的特点; 其次, 对 6 条多段微差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, 总结了多段微差爆破振动信号频带能量的分布特征。该分析手段为综合研究爆破地震效应特别是为将来构建振动速度-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; 多段微差爆破; MATLAB 软件

中图分类号: O 382; TD 235.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)07-1117-06

ANALYSIS OF ENERGY DISTRIBUTIONS OF MILLISECOND BLAST VIBRATION SIGNALS USING THE WAVELET PACKET METHOD

LING Tong-hua^{1,2}, LI Xi-bing²

(1. School of Highway Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Blast vibration analysis is the foundation for studying the control of blasting vibration damage. Based on the characteristics of short-time non-stationary random signals, this paper investigates the energy distributions of blasting vibration signals by means of the wavelet packet analysis technique. In this paper, the characteristics of wavelet transform and wavelet packet analysis are briefly introduced. Then, 6 sets of blasting vibration signals of multi-interval-time in millisecond blasts are analyzed by using the wavelet packet analysis technique with MATLAB. Energy distributions for different frequency bands are obtained. The results show that the wavelet packet analysis method is an effective means for studying seismic effect induced by blasting, and is especially useful for establishing the velocity-frequency criteria.

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

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^[1-4]。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, 信号的结

收稿日期: 2003-09-18; **修回日期:** 2003-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50490272); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412703)

作者简介: 凌同华(1968-), 男, 博士后, 2004 年于中南大学资源与安全工程学院获博士学位, 主要从事岩土工程及其灾害控制技术方面的教学与研究。E-mail: lingth@csust.edu.cn.

构包括频谱都是时变的,属于典型的非平稳信号^[5,6]。长期以来囿于理论的发展,人们研究它时,只好将它简化为平稳信号(伪平稳)问题通过傅立叶变换等来处理。近年来,随着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,许多学者正对此做一些有益的尝试和探索^[7-9]。本文针对爆破振动信号的特征,对爆破振动信号进行小波包分析,指出了微差雷管段数对爆破振动信号能量分布的影响,为综合研究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。

2 小波包分析及其特点

小波包分析是把信号分解成低频和高频 2 个部分。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 2 个部分,低频中失去的信息同样由高频部分捕获,如此类推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,是一种比小波分解更为精细的分解方法。小波包分解是以严密

的数学理论和数值计算方法为基础,且已有多种著作对此给出了详细的论述^[10-12]。为简洁起见,这里不再重复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

将爆破振动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。本文中所采用的爆破振动记录仪的最小工作频率为 5 Hz。由于爆破振动信号的频率一般在 200 Hz 以下,根据采样定理^[13],信号的采样频率设为 2 500 Hz,则其奈奎斯特(Nyquist)频率为 1 250 Hz。因此,可以将分析信号分解到第 8 层,对应的最低频带为 0~4.883 Hz。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。

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^[14]

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

式中: $x_{j,k}$ ($j=0,1,2,\dots,2^8-1;k=1,2,\dots,m,m$ 为信号的离散采样点数)为重构信号 $S_{8,j}$ 的离散点的幅值。

设被分析信号的总能量为 E_0 ,则有

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 Hz

层数	$S_{i,0}$	$S_{i,1}$	$S_{i,2}$...	$S_{i,j-1}$	$S_{i,j}$
1	0~625.000					62.500~1 250
2	0~312.500	312.500~625.000	625.000~937.500			937.500~1 250
3	0~156.250	156.250~312.500	312.500~468.750			1 093.750~1 250
4	0~78.125	78.125~156.250	156.250~234.375	...	1 093.750~1 171.875	1 171.875~1 250
5	0~39.063	39.063~78.125	78.125~117.188	...	1 171.875~1 210.937	1 210.937~1 250
6	0~19.531	19.531~39.063	39.063~58.594	...	1 210.937~1 230.469	1 230.469~1 250
7	0~9.766	9.766~19.531	19.531~29.297	...	1 230.469~1 240.234	1 240.234~1 250
8	0~4.883	4.883~9.766	9.766~14.649	...	1 240.234~1 245.117	1 245.117~1 250
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

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

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

各频带的能量占被分析信号总能量的比例为

$$E_j = \frac{E_{8,j}}{E_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $j = 0, 1, 2, \dots, 2^8 - 1$ 。

这样，由式(1)~(3)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分布规律。

4 微差雷管段数对爆破振动信号能量分布的影响

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 50 kHz)和 CDJ-1 型速度传感器(可测频率范围为 2~500 Hz)进行多次爆破振动测试，从中抽取满足本文分析要求的 6 条信号进行分析，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。

4.2 爆破振动信号小波包分析

4.2.1 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，因为不同的小波基分析同一个信号会产生不同的结果^[14]。Daubechies 小波系列具有较好的紧支撑性、光滑性及近似对称性^[14-16]，并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^[7-9]。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。

表 2 测试点的爆破条件

Table 2 Conditions of blast vibration measurement

存盘号	测点到爆心的距离/m	最大段药量/kg	总药量/kg	雷管段数/段
1-a	300	850	9 800	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13
1-b	300	864	17 200	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20
2-a	340	970	5 000	2, 3, 4, 5, 6, 7
2-b	320	950	8 500	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11
3-a	315	1 000	14 000	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
3-b	325	1 020	19 000	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20

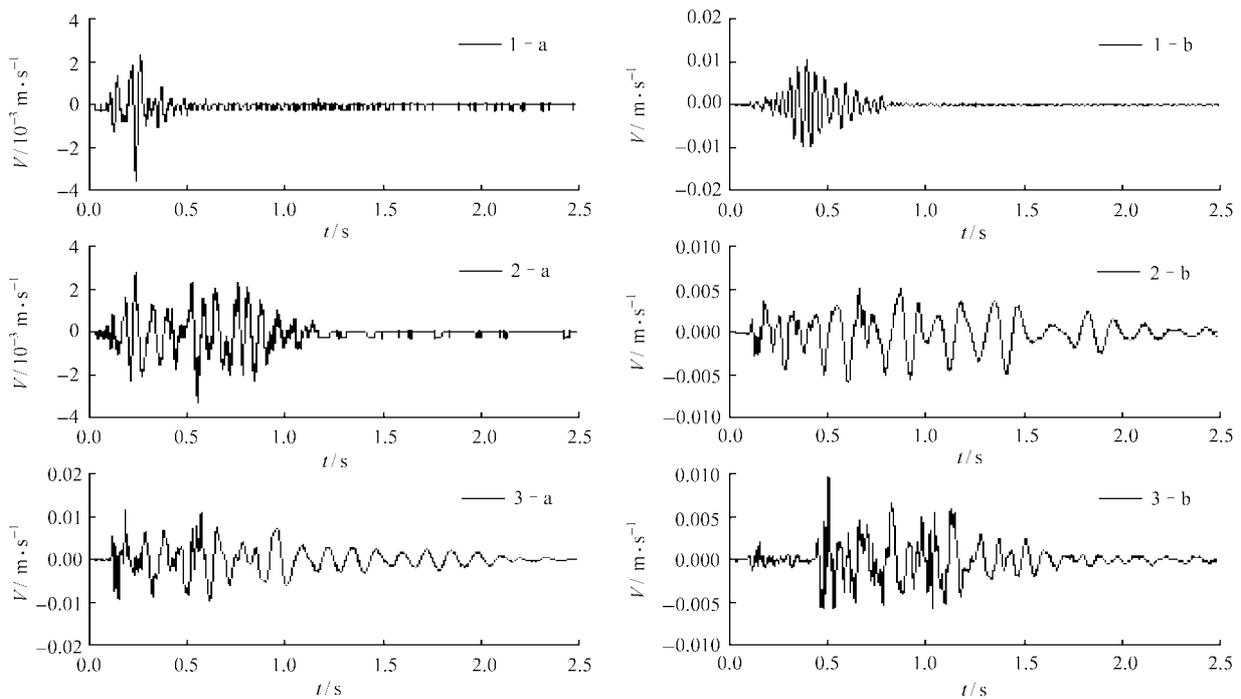


图 1 竖向振动速度时程曲线

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

4.2.2 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。根据式(1)~(3)编制计算程序,运行后得到各频带的能量分布图,见图 2(由于爆破振动信号的能量主要集中于 0~200 Hz 间,图中横轴只取到 200 Hz)。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。

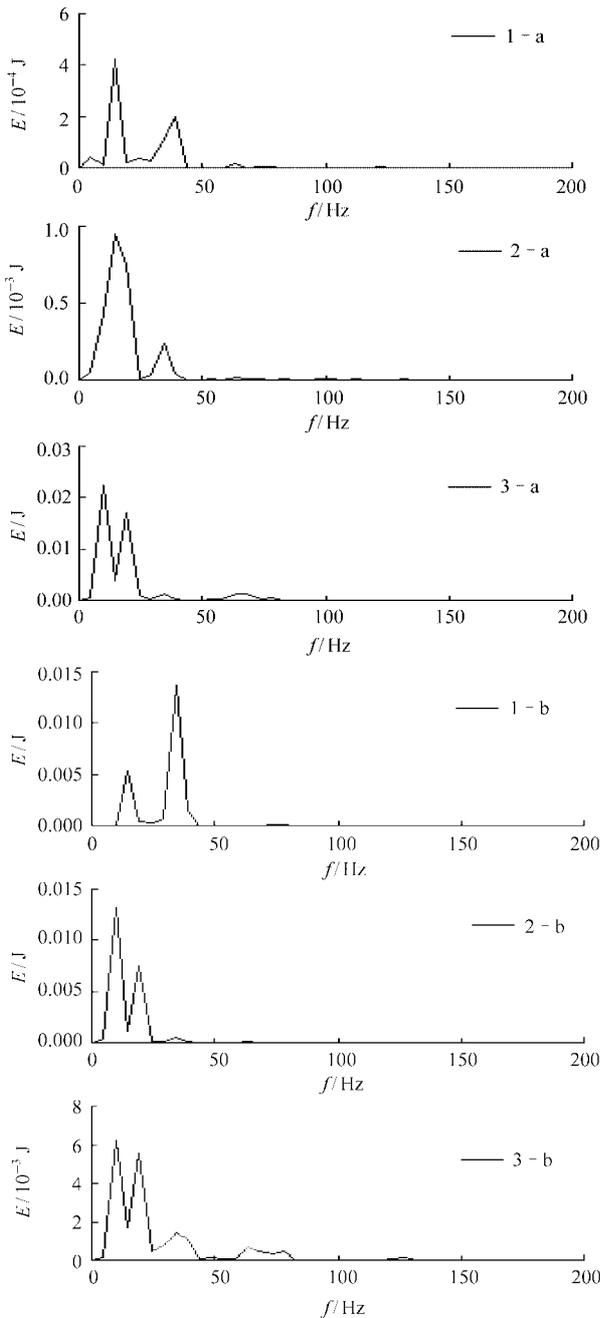


图 2 6 条爆破振动信号的频带能量分布

Fig.2 The energy distribution of frequency band for 6 blast vibration signals

4.3 微差雷管段数对爆破振动信号能量分布的影响

(1) 从图 2 和表 3 中可以看出,信号在 0~200 Hz 间的能量占该信号总能量的百分比分别为 98.95%, 99.92%, 97.37%, 99.89%, 99.93% 和 99.92%, 表明微差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于 0~200 Hz 间。

(2) 表 3 中,各信号在 5~40 Hz 间的能量占其总能量的比例分别为: 89.78%, 97.45%, 91.49%, 97.56%, 90.89% 和 86.24%, 表明微差爆破振动信号的优势能量主要分布在主振频带,主振频带又可以分成多个分振频带。

(3) 表 3 中,各信号在 200 Hz 以上的能量占其总能量的比例分别为: 1.053%, 0.083%, 2.632%, 0.107%, 0.067%, 0.046%, 表明随着雷管段数的增加,爆破振动信号的极高频成分(200 Hz 以上)所占比例减小。从表 3 还可以看出,随着雷管段数增加,极低频成分(5 Hz 以下)所占能量比例呈下降趋势。以上表明,在微差爆破中,雷管段数增加,爆破振动信号的能量有往主振频带集中的趋势。

(4) 从图 2 和表 3 中可以看出,1-a 与 1-b 在测点离爆源的距离相同、两者段药量大致相等的前提下,1-b 的能量最大峰值对应的频带比 1-a 的高,相应的能量百分比最大值对应的频带亦比 1-a 的高;同样从 2-a 与 2-b,3-a 与 3-b 的比较中,亦可以看出随着雷管段数增加,爆破振动信号的能量最大峰值对应的频率有往中高频发展的趋势,而且随着雷管段数的增加,这种趋势更加明显。由于工程结构体的自振频率往往较低,显然这对构(筑)物的安全有利。以上表明,雷管段数增加确有干扰降震的效果,在工程爆破中有条件时应尽量实施多段微差爆破。

5 结 语

(1) 小波包分析法能将爆破振动信号分解成各个子频带信号,可以通过考察各个子频带的细则情况来分析原始信号的不同频率成分所包含的特点,如各频率成分的能量分布情况、主振频带所在位置等。该分析法与建立在 Fourier 变换基础上的频谱统计分析法相比具有明显的优点。

(2) 基于 MATLAB 对多段微差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,指出了微差雷管段数对爆破振动信号的能量分布的影响。为综合研究爆破地震效

表 3 6 条爆破振动信号不同频带的能量百分比

Table 3 The percentage of energy for 6 blast vibration signals at different frequency bands

频段	1-a	1-b	2-a	2-b	3-a	3-b
0~4.883	4.447 76	0.239 955 3	1.977 870 3	1.385 944 2	1.225 885 8	0.584 576 0
4.883~9.766	0.840 72	0.080 446 5	16.225 149 0	56.969 406 0	44.270 873 0	31.365 575 0
9.766~14.648	46.165 50	24.061 143 0	35.224 010 0	5.015 565 5	7.579 542 3	8.575 149 7
14.648~19.53	2.444 70	1.815 566 1	28.057 561 0	32.057 791 0	33.617 742 0	27.896 242 0
19.53~24.414	3.853 62	0.873 356 9	0.456 694 6	0.469 959 7	2.203 243 3	2.329 869 4
24.414~29.297	2.703 60	2.666 288 8	1.311 260 4	0.645 022 3	0.573 885 2	3.731 961 6
29.297~34.18	12.243 30	61.689 991 0	8.720 170 4	1.920 674 2	2.321 934 4	7.012 609 0
34.18~39.063	21.529 70	6.281 645 4	1.495 432 6	0.486 115 9	0.329 079 2	5.331 594 0
39.063~43.945	0.127 53	0.180 435 0	0.030 243 3	0.015 127 5	0.033 452 3	0.392 486 8
43.945~48.828	0.222 51	0.036 686 8	0.035 305 9	0.016 586 5	0.160 817 8	0.528 026 8
48.828~53.711	0.152 82	0.059 293 6	0.373 010 7	0.032 225 2	0.315 700 5	0.467 745 6
53.711~58.594	0.142 87	0.113 653 7	0.063 894 6	0.043 511 8	0.304 824 3	0.468 907 0
58.594~63.477	1.427 89	0.187 043 7	0.570 065 9	0.294 885 5	2.676 640 9	3.511 252 4
63.477~68.359	0.246 68	0.142 918 3	0.353 702 5	0.133 625 7	2.742 125 2	2.402 910 8
68.359~73.242	0.309 05	0.305 441 9	0.167 787 1	0.119 186 1	0.324 436 4	1.860 625 3
73.242~78.125	0.811 18	0.851 759 8	0.100 459 5	0.169 238 5	0.766 373 3	2.288 761 9
78.125~83.008	0.019 90	0.002 908 4	0.181 238 7	0.002 147 5	0.000 857 9	0.001 806 4
83.008~87.891	0.046 71	0.002 174 7	0.146 573 0	0.002 969 9	0.000 604 4	0.001 633 7
87.891~92.773	0.034 08	0.002 322 5	0.142 738 2	0.004 709 5	0.000 907 3	0.001 896 6
92.773~97.657	0.026 73	0.003 136 5	0.194 770 7	0.002 942 8	0.000 873 5	0.001 966 6
97.657~102.54	0.055 86	0.004 236 7	0.169 911 0	0.007 166 8	0.003 057 8	0.005 238 8
102.54~107.42	0.050 44	0.004 181 8	0.048 693 4	0.001 925 8	0.002 266 7	0.005 380 3
107.42~112.30	0.016 32	0.003 916 7	0.168 118 8	0.005 086 8	0.000 895 9	0.002 774 1
112.30~117.19	0.025 01	0.002 007 8	0.077 179 2	0.003 514 1	0.001 721 1	0.006 226 9
117.19~122.07	0.295 44	0.120 015 5	0.062 806 0	0.011 383 3	0.173 307 5	0.306 653 9
122.07~126.95	0.078 49	0.065 651 1	0.086 020 3	0.014 215 1	0.137 067 9	0.535 323 3
126.95~131.84	0.098 93	0.053 949 0	0.204 190 4	0.014 424 7	0.061 741 8	0.086 196 6
131.84~136.72	0.156 30	0.028 164 6	0.116 719 4	0.008 023 3	0.045 806 8	0.078 199 3
136.72~141.60	0.060 48	0.003 496 7	0.153 337 6	0.004 411 5	0.005 630 9	0.004 727 9
141.60~146.48	0.040 40	0.002 869 2	0.124 640 3	0.006 571 4	0.010 041 9	0.032 915 2
146.48~151.37	0.043 44	0.009 045 9	0.120 384 7	0.008 921 9	0.025 063 3	0.067 662 1
151.37~156.25	0.070 92	0.010 757 4	0.119 498 2	0.008 130 2	0.010 943 9	0.055 156 1
156.25~161.13	0.016 42	0.000 558 7	0.011 576 2	0.001 019 2	0.000 477 0	0.001 033 4
161.13~166.02	0.026 19	0.001 204 5	0.005 102 1	0.000 717 5	0.000 784 3	0.002 187 7
166.02~170.90	0.021 50	0.000 905 6	0.009 935 7	0.001 280 2	0.000 803 3	0.001 374 9
170.90~175.78	0.013 91	0.001 202 6	0.007 011 1	0.001 103 8	0.000 375 8	0.000 631 3
175.78~180.66	0.015 60	0.001 277 4	0.006 456 2	0.002 035 9	0.000 522 6	0.000 810 4
180.66~185.55	0.012 44	0.000 952 1	0.005 989 2	0.001 703 3	0.000 593 1	0.001 371 0
185.55~190.43	0.017 35	0.001 668 3	0.010 664 8	0.001 031 9	0.000 758 0	0.001 415 9
190.43~195.31	0.014 24	0.001 786 9	0.010 987 0	0.000 900 0	0.000 359 6	0.001 003 7
195.31~200.20	0.020 59	0.003 204 9	0.020 492 3	0.001 404 8	0.000 710 1	0.002 000 9
>200.20	1.052 97	0.082 778 9	2.632 346 9	0.107 392 9	0.067 271 4	0.046 120 2

应特别是爆破振动速度—频率相关安全准则提供了一种实用的分析技术。

参考文献(References) :

- [1] 李玉民,倪芝芳. 地下工程开挖爆破的地面振动特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 274—278.(Li Yuming, Ni Zhifang. The characteristics on surface vibration of blasting in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 274—278.(in Chinese))
- [2] 林俊德. 爆炸地震波的频率特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增): 476—480.(Lin Junde. Analysis on frequency characteristics of explosive seismic wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(Supp.): 476—480.(in Chinese))
- [3] 张雪亮,黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京:地震出版社, 1981.(Zhang Xueliang, Huang Shutang. Effect of Blasting Ground Vibration[M]. Beijing: Earthquake Press, 1981.(in Chinese))
- [4] 方向,高振儒,龙源等. 减震沟对爆破震动减震效果的试验研究[J]. 工程爆破, 2002, 8(4): 20—23.(Fang Xiang, Gao Zhenru, Long Yuan, et al. Experimental study on the effect of damping ditch on reduction of blasting vibration[J]. Engineering Blasting, 2002, 8(4): 20—23.(in Chinese))
- [5] 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. 1—12.(Zhang Xianda, Bao Zheng. Non-stationary Signal Analysis and Processing[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 1—12.(in Chinese))
- [6] 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.(Wang Hongyu. Non-stationary Random Signal Analysis and Processing[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 12—20.(in Chinese))
- [7] 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 Yalun, Liang Wenji. Wavelet analysis for blasting seismic signals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 47—50.(in Chinese))
- [8] 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 Dachao, Shi Huiji, Bai Chunhua, et al. Time-frequency analysis of explosion seismic effects[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 31—35.(in Chinese))
- [9] 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 Wenhua, Xu Quanjun, Shen Wei, et al. Application of wavelet transform in evaluation of blasting vibration damage[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(1): 24—27.(in Chinese))
- [10] Charles K. An Introduction to Wavelets[M]. New York: Academic Press, 1992. 297—333.
- [11] Mallat S G. A theory for multi-dimension signal decomposition: the wavelet models[J]. Pattern Analysis and Machine Intel, 1989, 11: 674—693.
- [12] 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.(Chen Fengshi. Wavelet Transform and Its Application in Signal Analysis and Processing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. 7—120.(in Chinese))
- [13] 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.(Zou Yunping, Li Xiao. Signals Transform and Processing[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1993. 8—12.(in Chinese))
- [14] 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:西安电子科技大学出版社, 2000. 6—266.(Hu Changhua, Zhang Junbo, Xia Jun, et al. System Analysis and Processing Based on MATLAB—Wavelet Analysis[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000. 6—266.(in Chinese))
- [15] Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990, 36(5): 961—1005.
- [16] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[J]. Commun. Pure. and Appl. Math., 1988, 41(7): 909—996.