

# 爆破振动信号不同频带的能量分布规律

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明显的持时短、突变快等特点,结合工程爆破地震监测资料,利用小波包分析良好的时频局部化性质,研究了爆破振动信号不同频带的能量分布规律,分析了爆破振动信号的能量在传播过程中随着爆破条件的改变的变化规律。研究表明:爆破振动信号的频带能量分布与爆破条件密切相关,其主振频带较宽并可划分为多个子振频带;该方法对综合研究爆破振动危害机理和爆破地震效应,特别是为构建爆破振动速度-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;爆破振动;小波包分析;能量分布;非平稳信号

**中图分类号:**TD235.1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-7207(2004)02-0316-06

## Laws of energy distribution in different frequency bands for blast vibration signals

LING Tong-hua, LI Xi-bing

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

**Abstract:** By examining considerable amounts of blast vibration data, which have distinct characteristics of short-duration and abrupt change in signal structure including its spectrum, these characteristics are attributed to typical non-stationary random signal. According to a vast amount of monitoring data from blast engineering, this paper makes full use of the characteristics that wavelet packet analysis has high resolvability and localization, and investigates the laws of energy distribution for blast vibration signals in different bands by wavelet packet analysis technique, some laws are concluded that the energy distribution of blast vibration signal varies with blast conditions during the propagation. The results show that energy distribution for different frequency bands has close relation to blast conditions, and blast vibration signal has wide dominant frequency band that can be divided into many sub-bands. This method is effective for studying the mechanism of blast vibration damage and blast seismic effect in its entirety, specially, for constituting velocity-frequency criteria.

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

收稿日期:2003-06-22

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

作者简介:凌同华(1968-),男,湖南双峰人,中南大学博士研究生,从事爆破地震效应及其灾害控制技术研究

论文联系人:凌同华,男,博士研究生;电话:0731-8877276(O),139748470263(手机);E-mail:lingtonghua@163.com

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、最主要的方法是傅里叶(Fourier)分析方法<sup>[1]</sup>。爆破振动信号具有持时短、突变快等特点,信号的结构及其频谱都是时变的,属于典型的非平稳信号<sup>[2,3]</sup>。近年来,一些研究者用小波变换处理非平稳随机信号<sup>[4,5]</sup>。但目前用小波变换处理爆破振动信号还处于起步阶段<sup>[6-8]</sup>,在此,作者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,并分析了爆破地震波在传播过程中能量的衰减规律。

### 1 小波包分析及其特点

小波分析是把信号分解成低频和低频 2 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低频 2 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,是比小波分解更精细的分解方法<sup>[9-11]</sup>。

## 2 爆破振动信号小波包分解及各频带信号的能量表征

### 2.1 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。这里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<sup>[12]</sup>,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。

### 2.2 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<sup>[13]</sup>:

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

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

设被分析信号的总能量为  $E_0$ ,则有:

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

表 1 小波包分解系数重构信号各层频带范围

Table 1 The range of frequency bands of reconstructed signal by wavelet packet coefficient

层数	$S_{i,0}$	$S_{i,1}$	$S_{i,2}$	$S_{i,j-1}$	$S_{i,j}$
1	0~625.000				625.000~1 250.000
2	0~312.500	312.500~625.000	625.000~937.500		937.500~1 250.000
3	0~156.250	156.250~312.500	312.500~468.750		1 093.750~1 250.000
4	0~78.125	78.125~156.25	156.250~234.375	...	1 093.750~1 171.875
5	0~39.063	39.063~78.125	78.125~117.188	...	1 171.875~1 210.937
6	0~19.531	19.531~39.063	39.063~58.594	...	1 210.937~1 230.469
7	0~9.766	9.766~19.531	19.531~29.297	...	1 230.469~1 240.234
8	0~4.883	4.883~9.766	9.766~14.649	...	1 240.234~1 245.117
...	...	...	...	...	...

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

各频带的能量占被分析信号总能量的比例为:

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

其中:  $j = 0, 1, 2, \dots, 2^8 - 1$ 。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。

### 3 各频带的能量分布规律

#### 3.1 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(最高采样频率为 50 kHz)和 CDJ-1 型传感器(可测频率范围为 2~500 Hz)对几个地下矿进行多次爆破振动测试,从中抽取 4 个测点(测点 1 和 2 为第 1 次爆破的测点,测点 3 和 4 为第 2 次爆破的测点)监测到的信号进行分析,其爆破条件、位置见表 2,相应的爆破振动速度时程曲线见图 1。

表 2 测试点的爆破条件

Table 2 The blast condition of measuring points

测点 编号	测点到爆心 距离/m	最大段药量 / kg	总药量 / kg	雷管段数
1	23.6	84	484	2, 4, 5, 6, 7, 9
2	57.5	84	484	2, 4, 5, 6, 7, 9
3	23.6	170	1 200	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9
4	57.5	170	1 200	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9

注:以上测点均布置在一凿岩巷道内,测点前方为采空区。

#### 3.2 爆破振动信号小波包分析

##### 3.2.1 小波基的选择

对信号进行小波包分析时,必须选择最优小波基,因为用不同的小波基分析同一个问题会产生

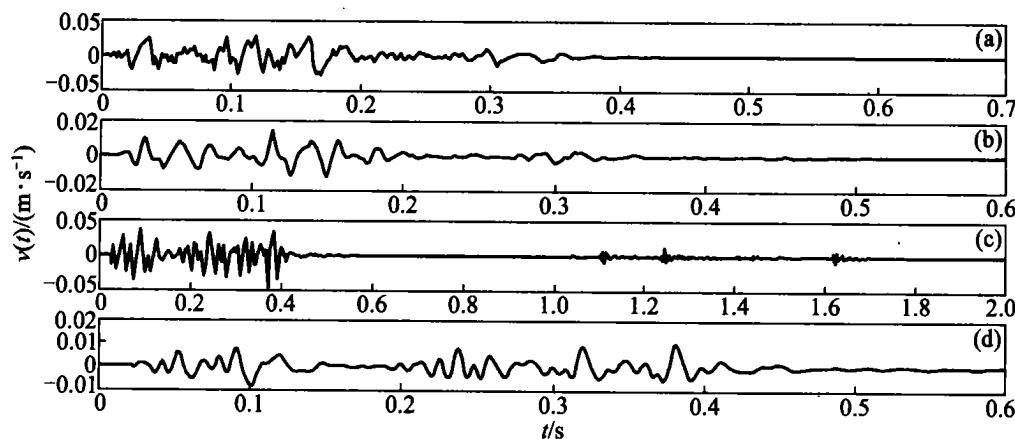
不同的结果<sup>[13]</sup>。在实际应用中,应选择衰减速度较快、波形与被分析信号有较好相似性的函数作为小波基函数,因而小波基的选择与被分析信号的性质、特征密切相关<sup>[14~15]</sup>。Daubechies 小波系列(dbN)具有较好的紧支撑性、光滑性及近似对称性,已成功地应用于分析包括爆破地震在内的非平稳信号问题<sup>[7,8,16~20]</sup>。该小波系列按正整数  $N$  具有不同的序列(dbN),目前在爆破振动信号的处理中用得最多的是 db3, db5, db7 和 db8。图 2 所示为常用于分析爆破振动信号的小波基函数图。根据以上选择小波基的要求及被分析信号的特点,选用 db8 作为本次分析的小波基函数。

##### 3.2.2 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析深度为 8 层的小波包,根据式(1)~(3)编制计算程序,运行后得到各频带能量分布图(见图 3)。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予以统计,结果见表 3。

#### 3.3 爆破振动信号在不同频带的能量分布规律

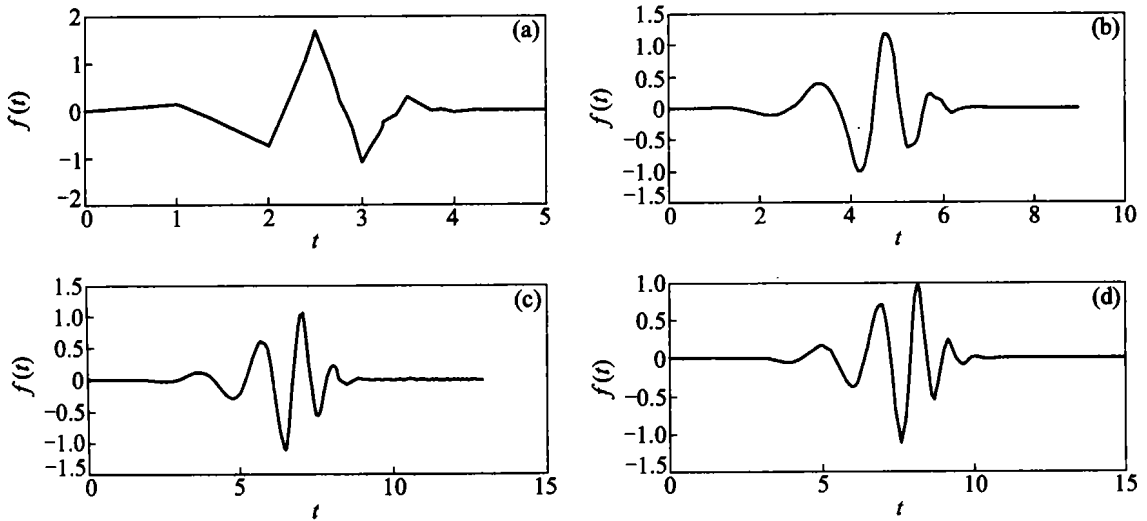
a. 从表 3 可以看出,4 个信号在 0~200 Hz 的能量占该信号总能量的比例分别为 91.93%, 98.94%, 97.16% 和 99.14% (分别将各信号在 200 Hz 以下频段上的能量百分数累加),表明爆破振动信号的能量在频域上虽然展布比较广泛,但绝大部分能量集中在频率为 0~200 Hz 的范围内,在传播过程中能量衰减迅速。其原因是地下工程结构较复杂,如节理裂隙发育,存在各种井巷和空区多等,其振动响应具有较大阻尼。



(a) —测点 1; (b) —测点 2; (c) —测点 3; (d) —测点 4

图 1 4 个测点的爆破振动时程曲线

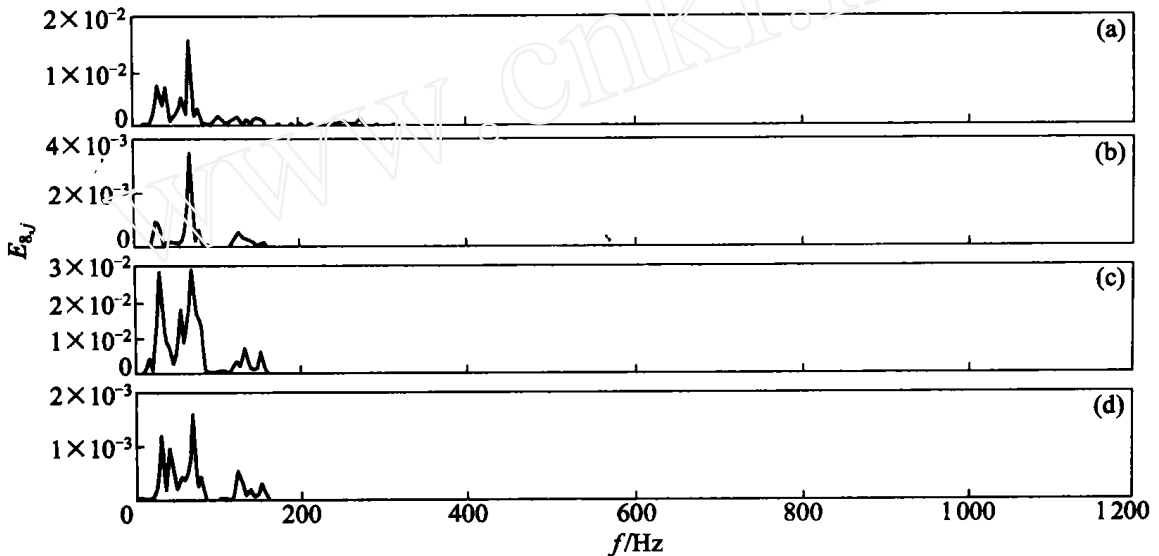
Fig. 1 The velocity vs time curves of blast vibration at 4 measuring points



(a) -db3; (b) -db5; (c) -db7; (d) -db8

图2 几种常用于分析爆破振动信号的小波函数

Fig. 2 Common wavelet functions of blast vibration analyzing



(a) -测点1; (b) -测点2; (c) -测点3; (d) -测点4

图3 爆破振动信号的频带能量分布

Fig. 3 The energy distribution of frequency bands for the blast vibration signals at measuring points

b. 表2中,4个信号在20~80 Hz的能量占其总能量的比例分别为74.15%,79.93%,81.23%和78.44%,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。可见,由于地下工程结构较复杂,导致地下工程爆破振动具有多阻尼多振型的特点。

c. 从图3可以看出,雷管段数的增加对降震有干扰作用,但离爆源越近,效果越不明显;离爆源越远,降震效果越明显;此外,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,这显然不利于构(筑)物的安全。

d. 表2中,频段为63.5~68.4 Hz时,4个测点的信号在该频段的能量百分数达到最大值,分别为22.2%,34.6%,13.73%和17.81%,但从图3可以看出,测点3和4的信号能量分布明显比测点1和2测点的要均匀,表明雷管段数增加能使爆破振动的能量趋向均匀,这从另一侧面证明了雷管段数增加,降震的效果越明显。

表 3 爆破振动信号不同频带的能量百分比

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

频段/ Hz	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	频段/ Hz	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
0 ~ 4. 883	0. 030	0. 161	0. 026	0. 151	102. 540 ~ 107. 420	1. 250	0. 021	0. 291	0. 285
4. 883 ~ 9. 766	0. 080	0. 009	0. 027	0. 012	107. 420 ~ 112. 300	0. 270	0. 152	0. 062	0. 029
9. 766 ~ 14. 648	0. 330	0. 163	1. 940	0. 347	112. 300 ~ 117. 190	0. 550	0. 410	0. 542	0. 219
14. 648 ~ 19. 530	0. 440	0. 013	0. 385	0. 175	117. 190 ~ 122. 070	1. 650	3. 261	1. 718	6. 065
19. 530 ~ 24. 414	3. 870	9. 342	7. 445	3. 272	122. 070 ~ 126. 950	2. 030	4. 972	0. 768	4. 720
24. 414 ~ 29. 297	10. 200	8. 183	13. 380	13. 420	126. 950 ~ 131. 840	0. 150	2. 555	3. 315	0. 746
29. 297 ~ 34. 180	5. 100	0. 304	3. 898	1. 722	131. 840 ~ 136. 720	1. 500	2. 221	0. 873	2. 038
34. 180 ~ 39. 063	10. 000	1. 592	3. 989	10. 800	136. 720 ~ 141. 600	0. 110	1. 650	0. 479	0. 594
39. 063 ~ 43. 945	0. 600	1. 560	1. 163	6. 104	141. 600 ~ 146. 480	1. 510	0. 648	0. 693	0. 723
43. 945 ~ 48. 828	2. 360	1. 554	1. 695	2. 000	146. 480 ~ 151. 370	1. 710	0. 522	2. 879	3. 341
48. 828 ~ 53. 711	3. 680	0. 546	8. 476	4. 691	151. 370 ~ 156. 250	1. 070	1. 495	0. 413	0. 736
53. 711 ~ 58. 594	7. 240	2. 810	3. 943	3. 970	156. 250 ~ 161. 130	0. 010	0. 003	0. 020	0. 002
58. 594 ~ 63. 477	2. 680	11. 420	8. 692	7. 403	161. 130 ~ 166. 020	0. 010	0. 003	0. 021	0. 002
63. 477 ~ 68. 359	22. 200	34. 660	13. 730	17. 810	166. 020 ~ 170. 900	0. 020	0. 003	0. 018	0. 001
68. 359 ~ 73. 242	1. 990	1. 891	7. 488	2. 570	170. 900 ~ 175. 780	0. 240	0. 003	0. 014	0. 002
73. 242 ~ 78. 125	4. 230	6. 063	7. 326	4. 678	175. 780 ~ 180. 660	0. 020	0. 004	0. 053	0. 007
78. 125 ~ 83. 008	0. 460	0. 176	0. 391	0. 027	180. 660 ~ 185. 550	0. 090	0. 009	0. 035	0. 002
83. 008 ~ 87. 891	0. 330	0. 241	0. 186	0. 044	185. 550 ~ 190. 430	0. 270	0. 003	0. 020	0. 002
87. 891 ~ 92. 773	0. 150	0. 089	0. 245	0. 026	190. 430 ~ 195. 310	0. 030	0. 004	0. 038	0. 002
92. 773 ~ 97. 657	0. 660	0. 064	0. 188	0. 014	195. 310 ~ 200. 200	0. 390	0. 027	0. 044	0. 006
97. 657 ~ 102. 540	2. 440	0. 157	0. 293	0. 384	200. 200 ~ 1 250. 000	8. 070	1. 058	2. 842	0. 864

## 4 结 论

a. 爆破振动信号的能量在频域上展布较广泛, 但绝大部分能量集中在 0 ~ 200 Hz, 在传播过程中能量迅速衰减。

b. 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, 爆破振动具有多阻尼多模态的特点。

c. 段药量增加, 结构振动的主振频带有往低频发展的趋势。工程爆破中, 构(筑)物的自振频率往往较低, 为保证安全, 必须严格控制最大段药量。

d. 雷管段数增加, 降震效果增强, 但离爆源越近效果越不明显, 离爆源越远降震效果越明显。

### 参考文献:

- [1] 张雪亮, 黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京: 地震出版社, 1981: 1 ~ 211.  
ZHANG Xue-liang, HUANG Shu-tang. Effect of blasting ground vibration [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1981: 1 ~ 211.
- [2] 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 Xian-da, BAO Zheng. Non-stationary signal analysis and pro-

cessing [M]. Beijing: Defence Industry Press, 1998: 1 ~ 12.

- [3] 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 Hong-yu. Non-stationary random signal analysis and processing [M]. Beijing: Defence Industry Press, 1999: 12 ~ 20.
- [4] Wickerhauser M V. Large-rank approximate principal component analysis with wavelets for signal feature discrimination and the inversion of complicated maps [J]. Journal of Chemical Information and Computer Science, 1994, 34(5): 1036 ~ 1046.
- [5] 刘令普, 周洪玉, 何 湃. 谈傅里叶分析和小波分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 1998, 3(6): 79 ~ 83.  
LIU Lingpu, ZHOU Hong-yu, HE Pai. On Fourier analysis and wavelet analysis [J]. Journal of Harbin University of Science & Technology, 1998, 3(6): 79 ~ 83.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Kchui C. An introduction to wavelets [M]. New York: Academic Press Inc, 1992: 297 - 333.
- [10] Mallat S G. A theory for multidimension signal decomposition: the wavelet models [J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intell*, 1989, 11: 674 - 693.
- [11] Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1990, 36(5): 961 - 1005.
- [12] 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 Yun-ping, LI Xiao. *Signals transform and processing* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1993: 8 - 12.
- [13] 胡昌华, 张军波. 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: 265 - 266.  
HU Chang-hua, ZHANG Jun-bo. *System analysis and processing based on MATLAB - wavelet analysis* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000: 265 - 266.
- [14] 何岭松. 小波函数性质及其对小波分析结果的影响 [J]. *振动工程学报*, 2000, 13(1): 143 - 146.  
HE Ling-song. Characters of wavelet and its affection to the result of wavelet transform [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2000, 13(1): 143 - 146.
- [15] 秦 叶, 陈新度, 冯文贤. 小波基的选择与振动信号分析 [J]. *广东工业大学学报*, 1997, 14(4): 57 - 60.  
QIN Ye, CHEN Xin-du, FENG Wen-xian. Selection of wavelet bases and their application in vibration signal processing [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 1997, 14(4): 57 - 60.
- [16] 娄建武, 龙 源, 徐全军, 等. 小波分析在结构爆破振动响应能量分析法中的应用 [J]. *世界地震工程*, 2001, 17(1): 64 - 68.  
LOU Jian-wu, LONG Yuan, XU Quan-jun, *et al.* Study on the wavelet analysis applied in structure response to blasting vibration [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2001, 17(1): 64 - 68.
- [17] 张仲山, 张恩山, 高春霞. 小波分析在核爆与闪电识别中的应用 [J]. *电波科学学报*, 2000, 15(4): 387 - 391.  
ZHANG Zhong-shan, ZHANG En-shan, GAO Chun-xia. The application of wavelet analysis to recognition of nuclear explosion and lightning [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2000, 15(4): 387 - 391.
- [18] 张梅军, 何世平, 谭 华, 等. 小波分析在信号预处理中的应用研究 [J]. *振动、测试与诊断*, 2000, 20(3): 211 - 215.  
ZHANG Mei-jun, HE Shi-ping, TAN Hua, *et al.* Research on the application of wavelet analysis to signal pretreatment [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2000, 20(3): 211 - 215.
- [19] 沈 松, 应怀樵, 刘进明. 用小波变换识别机械故障中的通过振动 [J]. *振动与冲击*, 1999, 18(2): 1 - 5.  
SHEN Song, YING Huai-qiao, LIU Jin-ming. Passing vibration diagnosing using wavelet transform [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 1999, 18(2): 1 - 5.
- [20] 段雪平, 朱宏平. 地震作用下结构动力响应的小波分析 [J]. *华中理工大学学报*, 2000, 28(11): 75 - 78.  
DUAN Xue-ping, ZHU Hong-ping. Application of Wavelets to structural dynamic analysis under seismic excitations [J]. *J Hua Zhong University of Sci & Tech*, 2000, 28(11): 75 - 78.