

一种基于爆破振动信号小波分析的爆破危害评判新方法

刘敦文, 粟闯, 龚运高

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 基于 Matlab 小波分析软件, 利用小波包良好的时频局部化性质对现场监测的爆破振动信号进行能量分析, 得到爆破振动信号不同频带上的能量分布。根据爆破振动信号在传播过程中能量的变化规律及爆破振动信号的频带能量分布与爆破振动影响的密切关系, 据爆破振动信号主振频率所在频域能量和受控结构自振频率所在频域能量, 提出一种新的基于爆破振动信号小波分析的爆破危害评判方法。将计算实测点的爆破危害评定参数 α 与在该点观测到的建筑物的 α 进行对比。研究表明: 当 $\alpha > 0.235$ 时, 建筑物受损; 随着 α 增大, 建筑物受损情况加剧。

关键词: 爆破振动; 小波分析; 能量分析; 爆破危害; 综合评判方法

中图分类号: TD235.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)04-1574-04

New method for blasting hazards evaluation based on wavelet analysis of blasting vibration signals

LIU Dun-wen, SU Chuang, GONG Yun-gao

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

Abstract: Based on wavelet analysis software of Matlab, the energy of the monitoring blasting vibration signals was studied by means of the wavelet packet analysis, which had high resolvability and localization, and the energy distribution of blasting frequency bands was obtained. According to the energy variety regulation of blasting vibration signals in the dissemination process and the close relation between energy distribution for different frequency bands and the blasting vibration effect, a new method for blasting hazards evaluation based on the wavelet analysis of blasting vibration signals was proposed from the aspect of the energy on dominant frequency bands and natural frequency bands of controlled structure. The assess parameter of blasting vibration hazards α was compared with the actual impaired situation of building. The results show that the building is damaged when $\alpha > 0.235$. With the increase of α , the impaired situation of building is intensified.

Key words: blasting vibration; wavelet analysis; energy analysis; blasting damage; integrative evaluation method

爆破地震效应的控制与评价、爆破地震安全判据已成为爆破工程界重要的研究课题^[1-2]。以单一-质点峰值振动速度作为爆破振动安全评定标准或采用保护对象所在质点峰值振动速度和主振频率的爆破振动判据局限性大^[3]。目前, 对爆破振动的研究主要集中在提高爆破强度预测精度上, 对于爆破振动输入结构的能

量和爆破振动能量在地震效应中作用的研究则很少, 未能很好地利用多参数来进行综合评判^[4]。徐国元等^[3]从各频带能量分布的角度提出了基于小波变换的爆破地震安全能量分析法。但是, 此方法存在各频带特征频率接近度难以确定的不足。为此, 本文作者在考虑爆破振动幅值、频率、持续时间、能量多参数基础上,

收稿日期: 2009-08-12; 修回日期: 2009-11-10

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ3030); 中南大学前沿研究计划资助(2010QZZD001)

通信作者: 刘敦文(1971-), 男, 湖南祁东人, 教授, 从事采矿与岩土工程、安全工程研究; 电话: 0731-88879612; E-mail: liudunwen@163.com

提出以爆破危害评定参数 α 来评判爆破振动对受控结构物影响的方法。

信号经小波包分解后不同频域的能量, 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^[7]。

1 小波分析与能量分析基础理论

1.1 小波分析的基本理论

小波分析是通过在不同分解水平下窗口大小随分解水平而改变的小波函数对信号进行时域局部化分析。设 $\Psi(t) \in L^2(R)$ (其中: $L^2(R)$ 为能量有限的信号空间, 其傅里叶变换为 $\hat{\psi}(\omega)$), 当 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足允许条件 (完全重构或恒等分辨) 时,

$$C_{\psi} = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

称 $\Psi(t)$ 为一个基本小波函数或母小波函数。将 $\Psi(t)$ 平移和伸缩可以得到 1 组小波。对于连续的情况, 小波为:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R, a \neq 0 \quad (2)$$

式中: a 为尺度因子; b 为平移因子。

对于离散情况, 小波为:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (3)$$

由式(2)和(3)可以看出: 小波函数非任意, 也非唯一, 因此, 小波基的选择是小波分析在实际应用中的一个重要问题^[5]。

1.2 各频域的能量百分比

将被分析信号分解到第 n 层, 设与 $S_{n,j}$ 对应的能量为 $E_{n,j}$, 则有:

$$E_{n,j} = \int |S_{n,j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{j,k}|^2 \quad (4)$$

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

$$E_0 = \sum_{i=0}^{2^n-1} E_{n,i} \quad (5)$$

各频域的能量占被分析信号总能量的比例为^[6]:

$$\beta_j = \frac{E_{n,i}}{E_0} \times 100\% \quad (6)$$

其中: $j=0, 1, 2, \dots, 2^n-1$ 。这样, 由式(4)~(6)可以得到

2 一维小波能量分析

2.1 小波分析

以中枢隧道为工程实例, 对其爆破振动进行监测, 由于 Daubechies 小波系列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^[8-9], 因此, 本文选用 Daubechies 小波系列中的 db8 小波基对所测爆破振动信号进行离散小波分析。在 Matlab6.5 中选用小波基函数 db8 将实测的各信号进行深度为 7 的小波包能量分析, 图 1 所示为典型爆破振动信号。

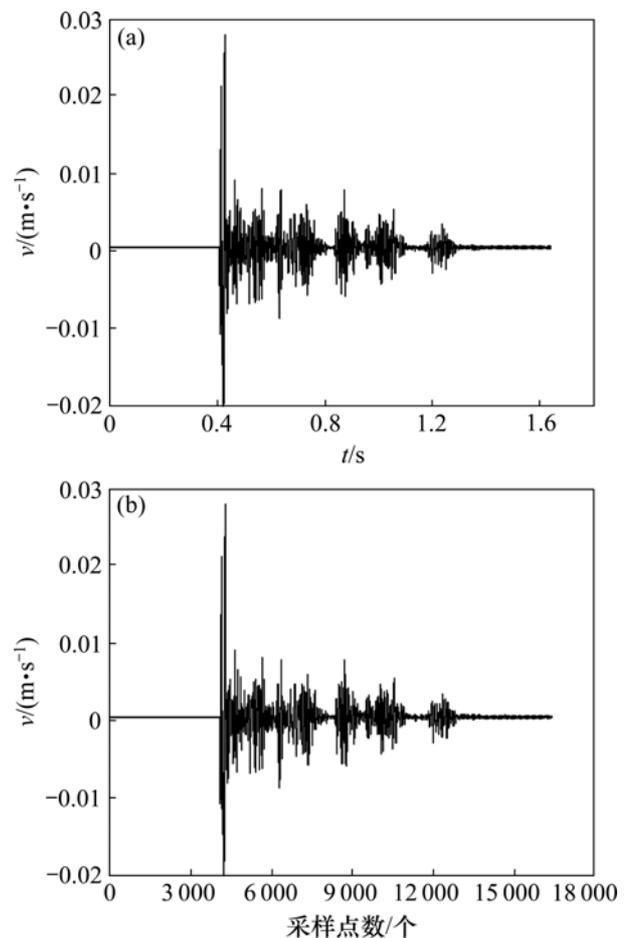


图 1 实测爆破振动信号

Fig.1 Blasting vibration signals

2.2 一维小波能量分解

采用最小工作频率为 5 Hz 爆破振动记录仪, 信号

表 1 能量分解后各频域能量比例

Table 1 Proportion of energy corresponding to different frequency domains

%

频域/Hz	信号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0~39.062 5	18.78	1.78	11.44	1.17	4.40	6.64	2.90	18.90	0.73
39.062 5~78.125 0	1.53	21.10	15.81	12.78	71.60	36.30	18.51	15.97	7.24
78.125 0~117.187 5	21.23	21.68	10.26	18.95	2.41	17.03	5.09	8.17	5.11
117.187 5~156.250 0	6.52	32.14	8.50	46.73	20.57	14.68	26.96	18.71	53.81
156.250 0~195.312 5	1.59	0.22	5.12	3.37	0.01	4.12	1.23	4.60	7.75
195.312 5~234.375 0	4.62	0.54	11.19	3.97	0.05	5.71	2.87	3.53	3.81
234.375 0~273.437 5	28.71	19.75	6.62	5.48	0.58	6.28	12.45	4.66	2.80
273.437 5~312.500 0	12.98	1.69	8.43	3.49	0.35	4.40	3.56	4.87	4.78
...

的采样频率设为 10 kHz, 根据采样定理^[10], 其奈奎斯特(Nyquist)频率为 5 kHz。当信号分解到第 7 层时, 共有 2^7 个小波, 对应于 128 个频域, 最小频域为 0~39.062 5 Hz。根据式(4)~(6)编写 Matlab 计算程序, 运行后得到不同频域的能量所占比例^[11-12], 如表 1 所示(频域能量比例极小的未列出)。

爆破地震效应影响的一个重要因素是输入结构物的振动能量^[13]。在一次爆破所引起的地震中, 输入结构物的总能量主要与该结构物的基本振动周期有关。当爆破地震波的频率等于或接近建筑结构的自振频率时, 将产生共振, 容易导致结构发生破坏。受控结构在爆破地震作用下, 考虑在整个振动历程中输入结构物的振动能量, 与结构物自振频率相关的等速能量谱尤为重要。

在爆破振动效应中, 低频部分的能量对结构的影响最明显。由表 1 可知: 爆破振动信号能量 70% 以上集中在 300 Hz 以下频域, 因此, 在评定爆破振动对结构的危害时, 从各频域能量分布进行研究是必要的。

在安全爆破规程中, 用质点峰值振动速度和主振频率作为评价各种爆破对不同类型建(构)筑物和其他保护对象的振动影响的标准, 此判定标准没有深入考虑爆破振动能量的因素。爆破振动信号最大振动速度以及主振频率能量比例见表 2。可见: 信号 8 的峰值振动速度最大, 其主振频域能量仅占总能量的 8.17%, 说明爆破振动能量分布与振速分布不存在严格的一致性。

在综合爆破主振频率、受控结构物自振频率、爆破振动各频域能量分布的情况下, 对爆破危害进行评

表 2 爆破振动信号峰值振速与主振频域能量比例

Table 2 Peak particle velocity and percentage of energy corresponding to main vibration frequency domain of blasting vibration signals

信号	主振频率/Hz	能量比例/%	峰值振速/(cm·s ⁻¹)
1	166.016	1.59	2.582
2	93.384	21.68	1.604
3	130.615	8.50	1.612
4	93.994	18.95	3.975
5	59.204	71.60	5.431
6	81.177	17.03	2.746
7	95.215	5.09	0.739
8	93.994	8.17	7.234
9	90.942	5.11	6.264

判: 定义主振频率频域能量与自振频率频域能量之和与总能量的比值为爆破危害评定参数 α 。则有:

$$\alpha = \frac{E_b + E_g}{E_o} \quad (7)$$

式中: E_b 为爆破主振频率所在频域的能量; E_g 为受控结构自振频率所在频域的能量; E_o 为总能量。

3 爆破危害评定参数 α 的计算与检验

爆破振动测试中各测点的建筑物结构相同或相

近,自振频率均分布在 0~39.062 5 Hz 频域,根据表 1 及式(7),便可求得其爆破危害评定参数分别为: $\alpha_1 = 0.204$, $\alpha_2 = 0.235$, $\alpha_3 = 0.199$, $\alpha_4 = 0.201$, $\alpha_5 = 0.760$, $\alpha_6 = 0.237$, $\alpha_7 = 0.080$, $\alpha_8 = 0.271$, $\alpha_9 = 0.058$ 。信号 1, 2, 3, 4, 7, 9 所在测点处 α 较小,建筑物无损坏;信号 5 所在测点处建筑物受损最严重,信号 8 所在测点处的峰值振动速度最大,但此点建筑物受损程度不如信号 5 所在测点处严重,信号 6 所在测处建筑物受损轻微,即 $\alpha_5 > \alpha_8 > \alpha_6$ 。

4 结论

(1) 通过对现场监测的爆破振动信号进行 db8 小波分析,得出 0~5 kHz 各频域的能量分布,并可知信号 70% 以上的能量集中在 300 Hz 以下低频部分。

(2) 在考虑爆破振动的幅值、频率、持续时间三要素基础上,从爆破振动信号主振频率所在频域的能量和受控结构自振频率所在频域的能量角度的角度,提出以爆破危害评定参数 α 来评判爆破振动对受控结构物影响的方法。当爆破危害评定参数 $\alpha > 0.235$ 时,测点处建筑物有损坏,并且随着 α 增大,建筑物受损程度加剧。爆破危害评定参数的计算结果与实际情况相吻合,表明该方法评判爆破危害具有较高的可靠性。

参考文献:

- [1] 张立国, 龚敏, 于亚伦. 爆破振动频率预测及其回归分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(2): 187-189.
ZHANG Li-guo, GONG Min, YU Ya-lun. Forecast and regression analysis of blasting vibration frequency[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(2): 187-189.
- [2] MA Guo-wei, HAO Hong, ZHOU Ying-xin. Assessment of structure damage to blasting induced ground motions[J]. Engineering Structures, 2000, 22(10): 1378-1389.
- [3] 徐国元, 中国生, 熊正明. 基于小波变换的爆破地震安全能量分析法的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 24-27.
XU Guo-yuan, ZHONG Guo-sheng, XIONG Zheng-ming. Study and application of energy analysis method for blasting seismic safety based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 24-27.
- [4] 钟祖良, 刘新荣, 梁宁慧, 等. 质点振动速度与主振频率在爆破监测中的应用[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(4): 38-41.
ZHONG Zu-liang, LIU Xin-rong, LIANG Ning-hui, et al. Discussion on application of the peak particle velocity and main vibration frequency in blast vibration monitoring[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(4): 38-41.
- [5] 凌同华, 李夕兵, 陈文胜. 基于小波分析的爆破地震效应评估[J]. 振动与冲击, 2007, 26(2): 124-126.
LING Tong-hua, LI Xi-bing, CHEN Wen-sheng. Evaluation of blast seismic effect based on wavelet analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(2): 124-126.
- [6] 凌同华, 李夕兵. 爆破振动信号不同频域的能量分布规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(2): 310-312.
LING Tong-hua, LI Xi-bing. Laws of energy distribution in different frequency bands for blast vibration signals[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2004, 35(2): 310-312.
- [7] 宋光明, 曾新吾, 陈寿如, 等. 爆破振动小波包时频特征提取与发展规律[J]. 有色金属, 2003, 55(1): 115-117.
SONG Guang-ming, ZENG Xin-wu, CHEN Shou-ru, et al. Time frequency characteristics extracting and expanding rules of blasting vibration with wavelet packets analysis[J]. Nonferrous Metals, 2003, 55(1): 115-117.
- [8] 凌同华, 李夕兵. 基于小波分析的爆破震动灾害控制[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(增刊): 326-328.
LING Tong-hua, LI Xi-bing. Initiative control of blast on wavelet vibration damage based transform[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(Supple): 326-328.
- [9] 陈寿如, 宋光明, 史秀志, 等. 近河堤采矿爆破的震动监测与控制[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(1): 136-138.
CHEN Shou-ru, SONG Guang-ming, SHI Xiu-zhi, et al. Controlling blasting ground vibration near bank[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(1): 136-138.
- [10] 娄建武, 龙源, 徐全军. 小波分析在结构物对爆破振动响应的能量分析法中的应用[J]. 世界地震工程, 2001, 17(1): 64-66.
LOU Jian-wu, LONG Yuan, XU Quan-jun. Study on the wavelet analysis applied in structure response to blasting vibration[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001, 17(1): 64-66.
- [11] 程康, 徐学勇. 爆破振动频率对地震效应影响的试验研究[J]. 爆破, 2003, 20(3): 79-81.
CHENG Kang, XU Xue-yong. Experimental research on influence of blasting vibration frequency on its vibration effect[J]. Blasting, 2003, 20(3): 79-81.
- [12] 陈庆, 王宏图, 胡国忠. 隧道开挖施工的爆破振动监测与控制技术[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 964-966.
CHEN Qing, WANG Hong-tu, HU Guo-zhong. Monitoring and controlling technology for blasting vibration induced by tunnel excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 964-966.
- [13] 杨年华, 刘慧. 近距离爆破引起的隧道周边振动场[J]. 工程爆破, 2000, 6(2): 5-8.
YANG Nian-hua, LIU Hui. Vibration field at tunnel contour induced by a close-in blasting[J]. Engineering Blasting, 2000, 6(2): 5-8.

(编辑 赵俊)