

文章编号: 1001-1455(2009)05-0492-05

基于功率谱的爆破地震能量分析方法^{*}

李洪涛¹, 卢文波², 舒大强², 杨兴国¹

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对爆破振动频度-能量分布的定量分析问题, 提出了一种基于功率谱的能量分析方法。功率谱密度表征了一定频率谐波分量能量的相对大小, 以此为出发点, 推导出可以表征爆破振动频度-能量分布的计算方法, 结合工程实例的分析结果表明, 利用该方法可以实现爆破振动频率构成的定量分析。同时将该方法与目前通用的小波变换能量分析方法作了比较, 两者的原理是一致的, 但基于功率谱的能量分析方法直接利用频谱分析完成从时域到频域的转化, 因此分析过程简便, 物理意义明确, 更容易理解和掌握。

关键词: 爆炸力学; 能量分析; 功率谱; 爆破地震

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

爆破技术在水利、矿山、交通和城建等行业发挥越来越重要的作用, 爆破诱发的爆破地震负面效应, 特别是爆破地震对周围建(构)筑物和设施所造成的危害, 越来越受重视。爆破地震效应研究的重点, 就是如何对爆破地震的危害作出准确而又科学的评价。爆破地震对结构的危害不仅与振动强度有关, 还与频率、持续时间等参量密切相关。爆破地震的能量综合反映了幅值和持时等特性, 通过信号分析等手段, 可以了解爆破地震能量按照频率分布的特征。爆破地震能量特征的研究中, 目前普遍采用小波变换的方法^[1-4], 但是这种方法计算过程复杂, 物理意义不容易被工程技术人员理解, 实际应用中有难度。本文中拟从最基础的频谱分析中谱密度的物理意义入手, 探讨基于功率谱的爆破地震能量分析方法。

2 基于功率谱的爆破地震能量分析原理

2.1 爆破振动频谱分析

在爆破振动频谱分析中, 用的比较多的是功率谱。功率谱函数可分为自功率谱函数和互功率谱函数, 在爆破振动谱分析中, 主要应用的是自功率谱函数。

自相关函数间接地给出了随机过程中的频率信息, 根据自相关函数的傅立叶变换及其逆变换, 并依据自相关函数的基本定义, 可以得到^[5]

$$E[f^2(\tau)] = \int_0^{\infty} W_f(f) df \quad (1)$$

式中: $f(\tau)$ 为随机过程; $W_f(f)$ 为等效的单边谱密度函数, f 为频率。

由式(1)可以看出, 随机过程 $f(\tau)$ 的均方值由谱密度 $W_f(f)$ 对 f 下的面积来确定, $W_f(f)df$ 就等于频率 $[f-df/2, f+df/2]$ 范围内的均方值, 即 $W_f(f)$ 表示随机信号 $f(\tau)$ 在每单位频带上分量的均方值。一般意义上, 功和能量与振幅的平方成正比, 所以谱密度 $W_f(f)$ 可以看作随机信号在单位频带内的谐波分量的能量按频率 f 分布的度量, 被称为功率谱密度函数^[6]。

* 收稿日期: 2008-04-28; 修回日期: 2008-09-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50539100); 教育部博士点新教师基金项目(200806101039);

四川省科技支撑计划(2008SZ0232)

作者简介: 李洪涛(1979—), 男, 博士, 讲师。

2.2 爆破振动能量

在爆破地震对建筑物的影响中,主要考虑振动的动能,对于空间中质量为 Δm 的质元,在某一时刻,爆破振动的能量可以表示为

$$E = \frac{1}{2} \Delta m v^2(t) \quad (2)$$

式中: $v(t)$ 为 t 时刻爆破振动速度。从式(2)中可以看出,爆破振动能量同振动速度成正比,略去质元质量,式(2)改写为

$$E = v^2(t) \quad (3)$$

因此,可以用爆破振动各时刻振动速度的平方来衡量某一时刻振动的能量大小。

习惯上将振动信号的能量在一定时间段上求积,作为特定时段内振动信号总能量大小的衡量指标,它表示了振动能量随时间的累积^[7]。对于爆破振动,有

$$E_T = \int_{t_1}^{t_2} v^2(t) dt \quad (4)$$

式中: E_T 表示特定时段内爆破振动的总能量, t_1 、 t_2 为计算时段的起始时刻和终了时刻。

如果考虑整个爆破振动历程,则可以得到爆破振动的总能量

$$E_0 = \int v^2(t) dt \quad (5)$$

因为爆破振动测试值是离散信号,所以式(5)可以用数值积分表示为

$$E_0 = \left(\sum v^2(t_i) - \frac{v^2(t_0) + v^2(t_m)}{2} \right) \Delta t \quad (6)$$

式中: $v(t_i)$ 为离散的爆破振动速度采样序列, t_0 和 t_m 分别为爆破振动历程的起始和终了时刻, Δt 为采样时间间隔。

2.3 爆破振动频带能量表征

在爆破振动频谱分析中,功率谱密度不代表真正物理意义上的功率或能量,但功率谱密度 $W_f(f)$ 可以看作随机信号在单位频带内谐波分量的能量按频率 f 分布的度量,即功率谱密度表征了一定频率谐波分量能量的相对大小,因此可以利用功率谱对爆破振动在一定频带范围内的能量分布进行分析。

对于爆破振动这一离散信号的频谱分析,得到的是离散频率点上的功率谱值。假设对一爆破振动信号 $v(t)$ (因为目前爆破振动测试的物理量主要是质点振动速度,所以这里用 v 来表示爆破振动过程) 进行频谱分析,得到离散化的频率值系列 f_i 和对应的功率谱密度值 $W_f(f_i)$, 则对于特定频带范围 ($f_m \leq f < f_n$) 内能量占振动总能量的比例可以表示为

$$p_{E_f} = \left(\sum_{i=m}^{n-1} W_f(f_i) \right) / \left(\sum W_f(f_i) \right) \quad (7)$$

需要指出的是,如果爆破振动测试采样频率为 f_c ,根据奈奎斯特采样定理,爆破振动频谱分析的截止频率为 $f_c/2$,所以对式(7)中的分母求和时,是从 $f=0$ 到 $f=f_c/2$ 之间的功率谱密度值求总和。

在按照式(6)计算得到爆破振动的总能量后,利用式(7)求得的能量比例可以很容易地计算出一定频带范围内的爆破振动能量值,表示为

$$E_f = p_{E_f} E_0 \quad (8)$$

因此,对于特定的爆破振动信号,在进行频谱分析后,如果将整个频率域分为若干段,联立式(6)~(8),即可求得各频率区段内的能量比例和能量大小,以及整个爆破振动历程的总能量,从而达到定量分析爆破振动频率构成的目的,克服频谱分析只能定性分析爆破振动频率分布的弊病。

3 工程实例分析

用四川成都拓普数字设备有限公司生产的 Topbox-508 振动信号自记仪和 EG-10(垂直)速度传感器进行了多场次的爆破振动测试,从中抽取一场次的信号进行分析。图1为实测爆破振动波形,爆破振

动信号采样频率为 5 kHz。测点部位距离爆区边缘 12 m,高差 3 m,传感器与基岩表面采用石膏粘结;开挖爆破采用手风钻钻孔,孔径为 42 mm,孔深 3.0 m,炸药使用 $\varnothing 32$ mm 乳化炸药药卷。

得到爆破振动数据后,按照基于功率谱的爆破振动能量分析方法,利用 Matlab 编程可以实现爆破振动的功率谱分析,继而进行爆破振动的能量特征分析。

图 2 为根据 Topbox 采集系统记录的数据,利用 Matlab 编程计算得到的功率谱。表 1 为针对图 1 中爆破振动实例波形进行能量分布特征分析的结果。

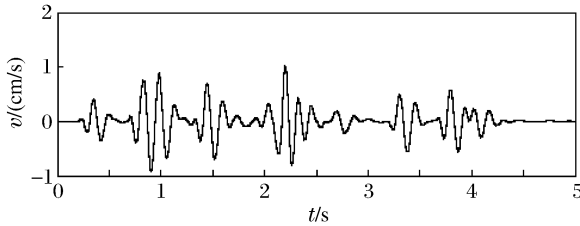


图 1 爆破振动实测历程曲线

Fig. 1 Measured blasting-vibration velocity curve

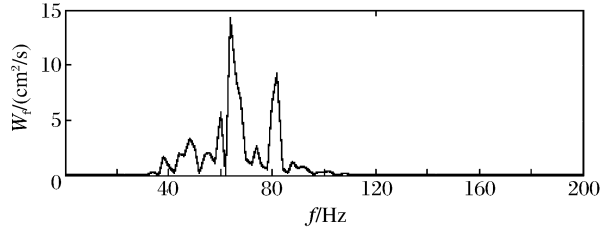


图 2 爆破振动功率谱

Fig. 2 Power spectrum of the blasting-vibration signal

从表 1 中可以清楚地看出,该爆破振动信号的能量主要集中在 40~100 Hz,该频带范围内的能量占总振动能量的 90%以上,而其他频带范围内总的能量值还不到 6%,特别是 0~10 Hz 的低频部分,其能量比例基本为 0。

在频谱分析过程中,通过时间轴控制,可以选取适当的时间区段,了解特定时段内爆破振动过程的频谱特性,继而分析该时段内爆破振动的能量分布特征。这在针对微差爆破引起的振动特性分析中特别实用。

表 1 爆破振动能量分布特征分析计算结果

Table 1 Calculated energy distribution for the blasting-vibration signal

频带/Hz	能量比例
20~10	0.000 1
10~40	0.042 1
40~100	0.943 6
100~2 500	0.014 2

4 建议方法与基于小波变换的能量分析方法比较

4.1 基于小波变换的能量分析方法

目前在爆破地震能量分析中,一般采用基于小波(包)变换的分析方法^[1-4],为了将 2 种方法进行对比,先简要介绍一下基于小波变换的能量分析方法。

由小波分析的定义和原理,连续小波变换的逆变换为^[8]

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi_R}} \int \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \tag{9}$$

根据 Moyal 定理,将式(9)两边平方,有

$$\frac{1}{C_{\psi_R}} \int \frac{da}{a^2} \int |W_f(a, b)|^2 db = \int |f(t)|^2 dt \tag{10}$$

式(10)表明,小波变换幅度平方的积分与被分析信号的能量成正比。众所周知,在非平稳随机信号的研究中,由于受 Heisenberg 测不准原理^[9]的限制,不能确定时-频相空间中某一点的瞬时能量密度,即是说某一特定时刻某一频率处的能量的说法在概念上是不存在的。但是在式(10)中,可以把 $|W_f(a, b)|^2 / (C_{\psi} a^2)$ 看作是 (a, b) 平面上的能量密度函数,由此可把 $|W_f(a, b)|^2 \Delta a \Delta b / (C_{\psi} a^2)$ 看作以尺度 a 和时间 b 为中心的,尺度间隔为 Δa 、时间间隔为 Δb 的能量。根据能量密度的概念,式(10)可以改写为

$$\int_R |f(t)|^2 dt = \int_R E(a) da \tag{11}$$

其中

$$E(a) = \frac{1}{C_{\psi_R}} \int \frac{1}{a^2} |W_f(a, b)|^2 db \tag{12}$$

由于小波变换中尺度 a 在一定意义上对应于频率,因此式(12)则给出了信号在特定频带范围内的能量总和。实际应用中,通过改变式(11)的积分上下限,使积分区间(即一定的频带范围)落在所关心待分析信号的频率范围内,就可以得到该频带内信号的能量密度随频率的分布情况,从而得到各频带能量的相对比例大小。

4.2 2种分析方法的比较

仔细研究式(12)可以发现,小波变换能量分析方法的实质是:先将爆破地震能量利用小波分解的方法,从单纯的时域转化到时-频两域上,然后再通过对每一分支按照时域或频域进行积分(合成),得到爆破地震能量在频域或时域上的分布。这种分析方法充分利用了小波变换在时-频两域展现信号特征的良好特性,整个分析过程可以简述为:先从时域转化到时-频域,然后再到频域,最终得到的是各频率成分的相对能量比例大小。因此,从原理上来说,基于小波变换的能量分析方法,最终得到的各频带能量相对大小,在划分的尺度足够大,使各频带区间大小达到频谱分析中频率离散增量时,小波变换得到的频能分布曲线跟功率谱应是一致的。这在一些利用小波变换进行爆破地震能量特征分析绘出的能量分布图中可以得到验证^[10-12]。小波变换的特点在于在时-频两域展现信号细部特征,而对于爆破地震能量分析而言,主要是研究信号的频域特征,使用小波变换方法,相当于绕了远路,而且使整个问题和计算过程复杂化。

本文中建议的能量分析方法,直接利用频谱分析完成从时域到频域的转化,而且该分析方法物理意义明确,相对于小波变换的能量分析方法,不仅分析过程简便,而且从理论上也更容易理解和掌握,是一种比较实用的爆破地震能量分析方法。

5 结 论

(1)在获得符合程序读取要求的爆破振动数据文件后,利用 Matlab 语句编制了相应的信号处理和分析程序,进行了爆破地震频谱和能量特征分析研究,证明了 Matlab 在爆破地震信号处理分析中是一种有力的工具。

(2)提出了一种基于功率谱的能量分析方法。从功率谱的物理意义出发,推导出可以表征爆破振动频度-能量分布的计算方法,利用该方法可以实现爆破振动频率构成的定量分析,克服频谱分析只能定性分析爆破振动频率分布的不足。

(3)从原理上讲,小波变换能量分析方法和本文基于功率谱的能量分析方法是一致的,但是小波变换能量分析方法实现过程比较复杂,而且物理意义不容易被理解;相对而言,本文中建议的方法不仅操作简单,而且物理意义明确,是一种实用的爆破地震能量分析方法。

参考文献:

- [1] 姜建武,龙源,徐全军.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. Study on the wavelet analysis applied in structure response to blasting vibration[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001,17(1):64-68.
- [2] 凌同华,李夕兵.单段爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析[J].振动与冲击,2007,26(5):41-43.
LING Tong-hua, LI Xi-bing. Features of energy distribution of single deck blast vibration signals with wavelet packet analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007,26(5):41-43.
- [3] 凌同华,李夕兵.多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(7):1117-1122.
LING Tong-hua, LI Xi-bing. Analysis of energy distributions of millisecond blast vibration signals using the wavelet packet method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(7):1117-1122.
- [4] 中国生,徐国元,熊正明.基于小波变换的爆破地震信号能量分析法的应用研究[J].爆炸与冲击,2006,26(3):222-227.
ZHONG Guo-sheng, XU Guo-yuan, XIONG Zheng-ming. Application research of the energy analysis method for

- blasting seismic signals based on wavelet transform[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006,26(3):222-227.
- [5] 纽兰. 随机振动与谱分析概论[M]. 方同, 译. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [6] 练友红, 王先义, 何刚, 等. 爆破振动信号的频谱分析[J]. *矿业安全与环保*, 2004,31(1):49-52.
LIAN You-hong, WANG Xian-yi, HE Gang, et al. Frequency spectrum analysis of blasting vibration signals[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2004,31(1):49-52.
- [7] 李顺群, 张吉明, 朱朝艳, 等. 考虑持时作用的地震能量表达式[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2004,23(3):306-308.
LI Shun-qun, ZHANG Ji-ming, ZHU Chao-yan, et al. Expression for earthquake energy with duration action taken in to account[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2004,23(3):306-308.
- [8] 刘贵忠, 邸双亮. 小波分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [9] 朱继梅. 非稳态振动信号分析[J]. *振动与冲击*, 2000,19(1):86-87.
ZHU Ji-mei. Analysis of unsteady vibration signal [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2000,19(1):86-87.
- [10] 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):24-28.
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):24-28.
- [11] 凌同华, 李夕兵. 爆破振动信号不同频带的能量分布规律[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2004,35(2):310-315.
LING Tong-hua, LI Xi-bing. Laws of energy distribution in different frequency bands for blast vibration signals [J]. *Journal of Central South University of Technology: Natural Science*, 2004,35(2):310-315.
- [12] 晏俊伟, 龙源, 方向, 等. 基于小波变换的爆破振动信号能量分布特征分析[J]. *爆炸与冲击*, 2007,27(5):405-410.
YAN Jun-wei, LONG Yuan, FANG Xiang, et al. Analysis on features of energy distribution for blasting seismic wave based on wavelet transform[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007,27(5):405-410.

An energy analysis method for blast-induced seismic based on power spectrum

LI Hong-tao^{1*}, LU Wen-bo², SHU Da-qiang², YANG Xing-guo¹

(1. *School of Water Resource and Hydropower, Sichuan University,
Chengdu 610065, Sichuan, China;*

2. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,
Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)*

Abstract: In order to study features of energy distribution for blasting vibration signals, an energy analysis method for blast-induced seismic based on power spectrum is put forward. In some extent, power spectrum density can be regarded as the characterization of relative size of the energy of a certain frequency harmonic. Then a method for calculating the energy-frequency distribution of blasting vibration is derived. Example analysis shows that this method is effective. And the comparative analysis shows that the principle of this method is consistent with the method based on wavelet transform. The method based on power spectrum achieves the transformation from time domain to frequency domain by using spectral analysis. So this method is simple in operation, quite clear in physical meaning, and it can be understood easily

Key words: mechanics of explosion; energy analysis; power spectrum; blast-induced seismic

* Corresponding author; LI Hong-tao

E-mail address: htl@scu.edu.cn