

文章编号: 1001-1455(2009)02-0194-05

爆破震动信号模极大值小波消噪方法的改进*

徐学勇^{1,2}, 程 康³

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071;

2. 武汉地震工程研究院, 湖北 武汉 430071;

3. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 针对模极大值小波消噪方法不利于所有信号特征的识别这一缺点, 对该算法进行了改进, 采用自适应的小波尺度来替换二进小波尺度, 以更好地适应测试信号消噪的要求。应用改进前、后的消噪算法分别对实测爆破震动信号进行了分析, 并将分析结果进行了比较。比较结果说明: 改进后的算法消噪效果更好, 消噪后信号同轴清晰、连续性好, 信噪比由 17.25 提高到 20.16, 可以更好地实现爆破震动信号消噪的目的。

关键词: 爆炸力学; 改进的小波变换模极大值; 自适应分解尺度; 爆破震动信号

中图分类号: O382; TD235.47

国标学科代码: 130·3520

文献标志码: A

1 引言

工程建设中越来越关注对爆破震动效应的测试工作, 但是对于采集到的爆破震动信号, 在数据的分析处理上还存在很多不足。爆破地震波经过复杂的岩土介质传播后, 往往存在着各种频率成分的干扰波, 即噪声, 因此需要对测试的信号进行消噪处理。爆破震动本质上是一个非平稳的过程, 与传统的 Fourier 变换建立的理论基础不一致, 不能反映信号在时域和频域上的细节, 无法实现对测试信号的消噪处理, 小波变换对于信号不同的频率成分具有不同的时间分辨率, 适合于非平稳信号的处理^[1-2]。

利用小波变换的消噪方法^[3-5]主要有以下 2 种: (1) 对测试信号进行多分辨分析, 保留相关尺度函数, 而将其他所有尺度函数置为零, 然后对小波系数进行重构, 以提取有用的信号, 这一方法需要预先知道所需要处理信号的所有尺度; (2) 将信号分解在各个尺度上, 提取各尺度上的模极大值点, 利用高斯白噪声小波变换的模极大值点在尺度上没有传播性这一特点, 从后来的分解尺度出发, 去除其他所有尺度上没有传播性的模极大值点, 而将有传播性的模极大值点保留, 仅用保留的模极大值点重构出信号, 就可以消除噪声。本文中将这 2 种方法结合起来, 根据有效信号和噪声在不同尺度的小波变换下, 各自的小波系数呈现不同的传播特性, 给出一种改进的模极大值小波消噪方法。

2 小波消噪基本理论

2.1 二进小波离散化

设 $L^2(\mathbf{R})$ 是实直线上平方可积 Hilbert 函数空间, 信号 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 的连续小波变换^[6]可定义为

$$W_f(a, b) = \int_{\mathbf{R}} f(t) \psi_{(a, b)}(t) dt = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbf{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中: a 是尺度因子, b 是位移, $b \in \mathbf{R}$ 。

在实际应用中, 由于计算的需要, 连续小波必须实现离散化, 当连续小波变换中的小波函数、信号和参数都取离散值时可以得到离散小波变换。信号 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 的离散小波变换可以定义为

$$W_f^k(b) = W_f(2^{-k}, b) = \int_{\mathbf{R}} f(t) \psi_{(2^{-k}, b)}(t) dt \quad \psi_{(2^{-k}, b)}(t) = 2^{k/2} \psi[2^k(t-b)] \quad (2)$$

* 收稿日期: 2007-10-19; 修回日期: 2008-01-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50639010)

作者简介: 徐学勇(1980—), 男, 博士研究生。

这相当于尺度因子 a 取二进离散数值 $a_k = 2^{-k}$ 时连续小波变换 $W_f(a, b)$ 的取值, 这时, 二进小波变换的反演公式是

$$f(t) = \sum_{\mathbf{R}} 2^k \int_{\mathbf{R}} W_f(b) T_{(2^{-k}, b)}(t) db \quad (3)$$

式中: 函数 $T(t)$ 满足

$$\sum_{\mathbf{R}} \psi(2^k \omega) T(2^k \omega) = 1 \quad (4)$$

称为二进小波的 $\psi(t)$ 的重构小波。重构小波一般不是唯一的, 但重构小波一定是二进小波。二进小波是连续小波的尺度参数 a 按二进方式 $a_k = 2^{-k}$ 的离散化, 信号的二进小波变换就是连续小波变换在尺度参数 a 只取二进离散数值 $a_k = 2^{-k}$ 时的取值。

2.2 模极大值与信号奇异性的关系

在某一尺度 x_0 下, 如果存在一点 (x_0, y_0) , 使

$$\frac{\partial W_f(x_0, y_0)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

则称点 (x_0, y_0) 是局部极值点, 且 $\frac{\partial W_f(x_0, y_0)}{\partial y}$ 在 $y = y_0$ 上有一个模极大值点, 如果对 y_0 的某一邻域内的任一点 y , 有

$$|W_f(x_0, y)| \leq |W(x_0, y_0)| \quad (6)$$

则称 (x_0, y_0) 为小波变换的模极大值点。尺度空间中所有的模极大值点的连线称为模极大值线, 模极大值与测试信号的奇异性有下面的关系^[7-8]。

设 n 为一整数, ψ 为具有 n 阶消失矩、 n 次连续可微和紧支集的小波, $f(t) \in L(c, d)$, 其中 $[c, d]$ 为某一实区间。若存在尺度 $x_0 > 0$, 使 $\forall x < 0, t \in (c, d), |W_f(x, y)|$ 没有局部极大值点, 则在区间 $(c + \varepsilon, d - \varepsilon)$ 上有 Lipschitz 指数 α 。一般来讲, 函数在某一点的 Lipschitz 指数 α 表征了该点的奇异性大小, α 越大, 该点的光滑度越高; α 越小, 该点的奇异性越大。

在爆破地震信号记录中, 地震波连续可导, 不连续的点有限, 故可以断定该点 Lipschitz 指数 $\alpha \geq 0$, 因此, 有限信号的小波变换模极大值随尺度的增大而增大。叠加在爆破记录上的白噪声的 Lipschitz 指数是负数, 其对应的小波变换模极大值随尺度的增大而减小。从而可以通过观察在不同的二进尺度之间的模极大值的变化来区分模极大值是由噪声产生的还是由有效信号产生的。

3 改进的模极大值小波消噪方法

在模极大值小波消噪算法中, 首先对所有信号进行二进尺度分解, 这不有利于所有信号特征的识别。针对这一缺点对该算法进行了改进, 提出了应用自适应的小波变换尺度来替换二进制尺度, 以便更好地适应对测试信号消噪的要求。

改进的模极大值小波消噪算法如下:

(1) 根据最佳分解尺度, 对信号进行最佳小波分解尺度的离散小波变换。把各个尺度上的小波系数赋给模极大值数组 $(x^1, x^2, \dots, x^j), j = 1, 2, \dots, J$ 。其中 J 为最大尺度, 以最大尺度上信号的模极大值点占优。

(2) 求出各尺度的模极大值点, 从最大尺度开始计算出模极大值点, 然后依次取下一分解尺度的模极大值, 每次以高一级已找到的极值点位置作为先验知识, 寻找它在本级的对应极值点。若相邻两尺度上的模极大值有相同的符号, 位置较靠近, 则后一点为前一点的传播点, 并估计出信号的模极大值点。

(3) 模极大值点给予保留, 非模极大值点置零, 即求出信号的小波系数, 去除了噪声的小波系数, 把保留的小波系数进行小波逆变换, 则得到去除噪声的小波信号。

4 自适应小波分解尺度

在小波变换中, 不同的信号存在着不同的最佳分解尺度, 他们由测试信号本身的特点决定。可以认

为,所有尺度上的小波分解结果构成了小波变换的特征空间,而某一尺度上的小波分解结果则是该特征空间的一个模式特征向量。在小波分解中,显然各尺度的结果应该尽可能地反映信号不同方面的特征,即他们应该是不同的模式特征向量。改进后的模极大值小波消噪自适应小波分解尺度的选择有 3 种方式:(1)距离最大方式,根据类聚思想,不同类之间距离越大越好,同类之间距离越小越好。依次提出距离最大方式来确定最佳尺度分解。由此可以提出一个选择尺度的方法:在小波分解中,若所有选择的尺度使所有尺度上的分解结果的距离和达到最大,则这些尺度为最优分解尺度。(2)能量最大差异方式,当多个模式类别具有相同或相近的均值时,其特征向量的平方和(能量)提供了一种分类信息。不同类型的特征向量之间的能量相差越大,则类别的可分性越好。(3)相关系数最小方式,若尺度选择不当,则不同尺度分解的结果会有很大的频率成分重叠,从而导致尺度间相关性较大。

这里以距离最大方式确定最佳小波分解尺度为例进行说明,变换两相邻的尺度距离为

$$\Delta d(s_{i+1}, s_i) = \sum_{x=1}^N [\tau w f(s_{i+1}, x) - \tau w f(s_i, x)]^2 \tag{7}$$

式中: $\tau w f(s_i, x)$ 为测试信号 $f(t)$ 在尺度 s_i 上的小波变换系数, s_{i+1}, s_i 为两相邻尺度, N 为数据点数。

根据距离最大方式求出所有相邻尺度的距离和 $\sum_{i=1}^N \Delta d(s_{i+1}, s_i)$,如果取得最大值,则为最佳分解尺度。但是当有重叠尺度出现时,只用 $\sum_{i=1}^N \Delta d(s_{i+1}, s_i)$ 作为唯一衡量标准还不够准确,为了解决这个问题,相邻尺度距离变为

$$\Delta d(s_{i+1}, s_i) = (s_{i+1} - s_i) \sum_{x=1}^N [\tau w f(s_{i+1}, x) - \tau w f(s_i, x)]^2 \tag{8}$$

式中: s_{i+1}, s_i 为所要选择的分解尺度,首先判断 $\Delta d(s_{i+1}, s_i)$ 是否有零点,如果 $s_{i+1} = s_i$,则 $s_{i+1} - s_i = 0$,此时 $\Delta d = 0$,说明有重叠的分解尺度,不能为最佳的结果。

当所有的距离都不为零时,根据式(7)求出 $\sum_{i=1}^N \Delta d(s_{i+1}, s_i)$,并求出距离和为最大值时的分解尺度,即为最佳分解尺度。

5 实例分析

图 1 为某爆破工程爆破时实测质点垂直震动速度时程曲线。做小波变换时,最优小波函数的选择是一个很重要的问题, Daubechies 小波系列函数具有良好的紧支撑性、光滑性及近似对称性等特点,已经成功地应用于分析爆破震动信号等非平稳信号问题^[10-11]。该小波系数按正整数 N 具有不同的系列,目前应用最多的是 db5 和 db8 小波系列,小波函数如图 2 所示。这里选用 db8 作为爆破震动信号小波分析的基函数,通过改进后的模极大值小波消噪算法进行分析,自适应小波分解尺度计算结果见表 1。

由式(4)可知,二进小波变换是连续小波变换在参数 a 只取二进离散数值 $a_k = 2^{-k}$ 时的取值。由表 1 可知,改进后的算法得到的分解尺度和二进制尺度差别很大。以距离最大尺度方式为例,比较采用自适应尺度和二进制尺度方式对实测信号的消噪效果,见图 3。

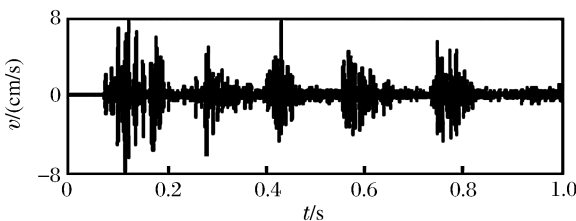


图 1 实测爆破震动信号的速度时程曲线
Fig. 1 Velocity-time curves of an original blasting vibration signal

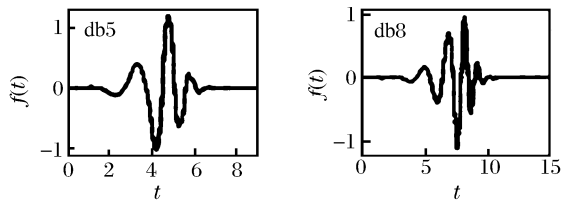


图 2 db5 和 db8 小波波形
Fig. 2 Wave forms of db5 and db8

从图 3 可以看出,应用改进后的模极大值消噪算法对信号进行处理比原算法消噪效果更好,消噪后信号更平滑、同轴清晰、连续性好,噪声得到了有效抑制。模极大值消噪算法改进前、后得到的信噪比分别为 17.25、20.16,可以看出,改进后的算法更有利于信号的提取,信噪比更高,说明消噪效果更好。

表 1 3 种方式确定的分解尺度

Table 1 Decomposition dimensions determined by the three methods

方式	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
距离最大	1	2.977	6.324	9.246	16
能量最大差异	1	1.999	4.862	8.769	16
相关系数最小	1	3.872	6.921	12.077	16

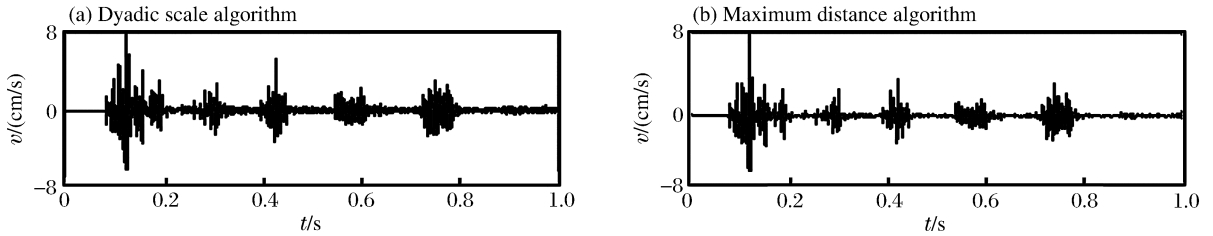


图 3 二进小波尺度和距离最大尺度的消噪效果的比较

Fig. 3 Comparison of denoising effects between dyadic scale algorithm and maximum distance algorithm

6 结 论

爆破震动信号属于非平稳信号,应用模极大值小波消噪方法可以实现消噪的目的,但该算法只能采用二进小波尺度进行分解,限制了测试信号的分析结果。采用改进后的模极大值小波消噪方法通过距离最大、能量最大差异和相关系数最小等 3 种自适用选择方式来确定最佳分解尺度,通过对实测爆破震动信号的分析,说明改进后的算法更有利于信号的提取,信噪比更高,可以更好地实现消噪的目的。

参考文献:

[1] 何军,于亚伦,梁文基. 爆破震动信号的小波分析[J]. 岩土工程学报,1998,20(1):47-50.
HE Jun, YU Ya-lun, LIANG Wen-ji. Wavelet analysis of blasting vibration signal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998,20(1):47-50.

[2] 林大超,施惠基,张奇,等. 爆炸地震效应的时频分析[J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):31-36.
LIN Da-chao, SHI Hui-ji, ZHANG Qi, et al. Time-frequency analysis of explosion seismic effects[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(1):31-36.

[3] Donoho D L. Denoising by soft thresholding[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1995,41(3):610-620.

[4] Qian S. Joint time-frequency analysis[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1999,16(2):52-60.

[5] Mallat S G. A theory for multi-dimension signal decomposition: The wavelet models[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989,11:675-980.

[6] Kchui C. An introduction to wavelets[M]. New York: Academic Press Incorporated, 1992:303-325.

[7] 田金文,高谦,杜拥军. 基于小波变换模极大值的地震信号去噪处理方法[J]. 江汉石油学院学报,2001,23(1):22-26.
TIAN Jin-wen, GAO Qian, DU Yong-jun. A seismic data processing method based on modular maximum of wavelet transform[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2001,23(1):22-26.

[8] 刘春生,张晓春. 实用小波分析[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2002:77-96.

[9] Jannoulakis A. Control method for surface blasting[J]. Mining Engineering, 1999,51(3):65-68.

[10] Mogi G, Hoshino T, Adachi T, et al. Consideration on local blast vibration control by delay blasting[J]. Journal of the Japan Explosive Society, 1999,60(5):233-239.

[11] Newland D E. Wavelet analysis of vibration: Part 2 — Wavelet maps[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1994,116(4):417-425.

- [12] 姜弢,刘庆普,胡留军.地震信号去噪的小波分析方法研究[J].哈尔滨工程大学学报,2002,23(4):86-90.
JIANG Tao, LIU Qing-pu, HU Liu-jun. Denoising of seismic signals using wavelet transform[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002,23(4):86-90.
- [13] 盛国芳,胡欣,沈毅.子波变换在信号去噪中的应用[J].探测与控制学报,2002,24(4):21-24.
SHENG Guo-fang, HU Xin, SHEN Yi. The application of wavelet transform in signal denoising[J]. Journal of Detection and Control, 2002,24(4):21-24.
- [14] 强琳,刘贵忠.利用小波变换多尺度传播特性实现地震信号去噪[J].西安交通大学学报,1998,32(1):29-32.
QIANG Lin, LIU Gui-zhong. A denoising method of seismic data based on multi-scale propagate behavior of wavelet transform[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998,32(1):29-32.

Improvement of the wavelet transform maximum modulus method for blasting vibration signals

XU Xue-yong^{1,2*}, CHENG Kang³

- (1. *Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, Hubei, China;*
2. *Wuhan Institute of Earthquake Engineering, Wuhan 430071, Hubei, China;*
3. *School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)*

Abstract: Aimed at the disadvantage of the traditional wavelet transform maximum modulus (WT-MM) denoising method not to identify all signal characteristics, an improved denoising method based on the WTMM technique was proposed, by using adaptive decomposition dimension instead of dyadic scales, to meet the signal denoising demands. The improved WTMM method and the traditional WT-MM method were applied to analyze the original blasting vibration signals. The denoised signal by the improved WTMM method is coaxially more distinct from the detected signals and has better continuity, and the signal-to-noise ratio is improved from 17.25 to 20.16. It is suggested that the improved WTMM method has better denoising effect than the traditional WTMM method.

Key words: mechanics of explosion; improved WTMM; adaptive decomposition dimension; blasting vibration signal

* Corresponding author: XU Xue-yong

E-mail address: xxy_cas@126.com