

文章编号: 1001-1455(2005)06-0528-08

爆破震动信号的小波分析与 HHT 变换*

李夕兵, 张义平, 刘志祥, 左宇军, 王卫华
(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 以实测的爆破震动信号为例, 分别应用小波分析和 HHT(Hilbert-Huang Transform)变换从不同方面进行对比分析, 讨论了爆破震动信号的特征提取和时频分布。结果表明: 小波分析和 HHT 变换都是处理非平稳信号的两种好方法, 都能很好地提取信号的主要特征信息和进行滤波、消噪。然而, 小波分析存在选择小波基的困难, 而 HHT 变换不需要预先选择基函数, 其 EMD(empirical mode decomposition)得到的 IMF(intrinsic mode function)能反映原始信号的固有特性, 通常具有实际物理意义; 小波谱的能量在频率范围内分布较宽, 而 Hilbert 能量谱能清晰地表明能量随时频的具体分布, 大部分能量都集中在有限的能量谱线上; 小波分析中时间、频率分辨率受 Heisenberg 测不准原理的限制, 而 HHT 变换中时间分辨率不变且精度很高, 其频率分辨率则可随信号内在的特性进行自适应调节。分析表明: HHT 变换在分析非平稳信号时较小波分析更具适应性, 在岩石中波的传播、衰减规律、结构动态响应特征和爆破震动破坏等研究中有着广泛的应用前景。

关键词: 爆炸力学; 时频分析; 小波分析; HHT 变换; 爆破震动信号; 谱分析

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3530

文献标志码: A

1 引言

爆破震动信号具有复杂、不规则、突变和衰减快等特点, 是一种典型的非平稳随机信号^[1~2], 如图 1 所示(采样频率 2 500 Hz)。对爆破震动信号采用各种数字信号处理方法进行分析与处理, 提取各种时、频特征信息, 是爆破研究的重要内容之一。传统的 Fourier 分析无法同时提取信号的时、频特性, 它主要适用于平稳信号, 为了分析和处理非平稳信号, 人们在改进 Fourier 分析的基础上, 提出并发展了一系列新的信号分析理论, 小波分析便是其中的热点之一。

小波分析是一种时、频分析方法, 即在时域对信号进行离散变换, 在频域进行谱分析。它在时域和频域都具有很好的局部化性质, 较好地解决了时间和频率分辨率的矛盾; 对信号的低频成分, 可用宽时窗使得时域分辨率低而频域分辨率高, 对信号的高频成分, 则可用窄时窗使得时域分辨率高而频域分辨率低, 具有“显微镜”和“望远镜”的功能^[3]。它具有诸多优点, 在爆破震动信号分析中应用日益广泛^[4~5]。但小波分析本质上没有根本摆脱 Fourier 分析的局限, 并存在选择小波基和频谱扩散的问题^[6~7]。

1998 年, 美籍华人 N. E. Huang 等人在研究瞬时频率的基础上提出了 Hilbert-Huang 变换(HHT)的信号处理方法, 它将时间信号通过经验模态分解(empirical mode decomposition—EMD)成为一组固有模态函数(intrinsic mode function—IMF), 再进行 Hilbert 变换, 得到 Hilbert 谱, 即可描绘出信号的

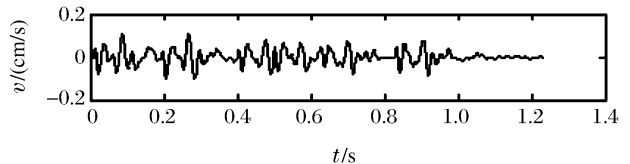


图 1 原始爆破震动信号

Fig. 1 The original blasting vibration signal

* 收稿日期: 2004-11-30; 修回日期: 2005-03-02

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490274); 国家自然科学基金项目(50174056); 和风细雨项目(2002CB412703)

作者简介: 李夕兵(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

时频图, 时频谱和幅值谱。与 Fourier 变换以正弦或余弦函数为基进行信号分解不同, Hilbert-Huang 变换在分解的过程中不需要预设基函数, 可依据数据本身的时间尺度特征进行模态分解并保留数据本身的特性, 具有自适应性。它对稳态信号和非平稳信号都能进行分析, 是对以 Fourier 变换为基础的信号处理方法的一大突破^[8]。该方法已在许多领域得到了不同程度的研究与应用^[9~10]。

本文中, 以小波分析为对比, 从多方面探讨 HHT 变换在爆破震动信号分析中的适用性和处理非平稳信号的能力。结果表明: HHT 变换为研究波在岩石中传播、衰减和结构动态响应提供了新思路。

2 小波变换

2.1 小波定义

将 $\Psi(t) \in L^2(R)$ ($L^2(R)$ 为能量有限的信号空间), 满足

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

式中: $\Psi(t)$ 为一个基本小波函数或母小波函数, $\Psi(t)$ 通过平移和伸缩可以得到一组小波。

对于连续的情况, 小波为

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi((t-b)/a) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (2)$$

式中: a 为伸缩(尺度)因子; b 为平移因子。

对于离散情况, 小波为

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

小波函数不是任意的, 也不是唯一的, 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。同一个问题小波基不同, 其结果也不同, 甚至相差很大^[11~12]。在 MATLAB6.5 小波分析工具箱中有大量小波基函数可供选择, Daubechies (简称 dbN) 小波系中的 db3、db5、db7、db8 函数, Symlets (简称 symN) 小波系中的 sym3、sym5、sym7 函数, Morlet (简称 morl) 小波及 Meyer 函数是几种常用于分析爆破震动信号的小波函数。

2.2 连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT)

任给函数 $f(t) \in L^2(R)$, 其 CWT 变换及重构公式(逆变换)为

$$W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (4)$$

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{R^+} \int_R \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (5)$$

小波变换的时频窗口中心为 $(b, \pm \omega_0/a)$, 时窗和频窗宽分别为 $a\Delta\Psi$ 和 $\Delta\Psi/a$ 。其中 b 仅仅影响窗口在相平面时间轴上的位置, 而 a 不仅影响窗口在频率轴上的位置, 也影响窗口的形状。

与函数 $f(t)$ 相应的 DWT 系数及其重构公式为

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi_{j,k}(t)} dt \quad (6)$$

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (7)$$

式中: C 是一个与信号无关的常数。与 CWT 相比, DWT 可以减小冗余度。

3 HHT 变换

HHT 方法主要由 EMD 方法和 Hilbert 变换组成。

3.1 Huang 变换

EMD 方法即 Huang 变换, 它依据信号本身的时间尺度(信号相邻峰值点之间的时差)特征, 将信号分解为含有不同时间尺度且满足以下两个定义条件的一组 IMF: (1) 对于一系列数据极值点和过零点

目必须相等或至多相差一点;(2)在任意点,由局部极大点和极小点构成的两条包络线的平均值为零。每个 IMF 可以被认为是信号中固有的一个模态函数。

由 EMD 分解得到 IMF 有多种算法,其中的一种可说明如下:(1)找出信号 $x(t)$ 的所有极大点和极小点,将其用三次样条函数分别拟合为原数据序列的上、下包络线,上、下包络线的均值为平均包络线 m_1 ,将原数据序列减去 m_1 可得到一个去掉低频的新数据序列 h_1 。一般 h_1 不是一个平稳数据序列,为此重复以上过程 n 次,使所得到的平均包络线趋于零,此时的 h_{1n} 就是第一个 IMF c_1 ,它表示信号数据中的最高频成分。(2)用 $x(t)$ 减去 c_1 得到一个去掉高频成分的新数据序列,重复步骤(1),得到一系列 c_n 和最后一个不可分解的序列 r_n , r_n 代表 $x(t)$ 的均值或趋势项。那么原序列 $x(t)$ 可表示为 IMF 分量和一个余项的和

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (8)$$

3.2 Hilbert 谱

信号经分解后得到多个 IMF 的组合,对每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换,即可得到每个 IMF 分量的瞬时频率,综合所有 IMF 分量的瞬时频谱就可获得 Hilbert 谱。先对信号 $x(t)$ 的 IMF 分量 $c(t)$ 作 Hilbert 变换得解析信号

$$z(t) = c(t) + jH[c(t)] = a(t)e^{j\Phi(t)} \quad (9)$$

幅值函数 $a(t)$ 和相位函数 $\Phi(t)$ 分别为

$$a(t) = \sqrt{c^2(t) + H^2[c(t)]} \quad (10)$$

$$\Phi(t) = \tan^{-1} \frac{H[c(t)]}{c(t)} \quad (11)$$

再求出瞬时频率

$$\omega(t) = d\Phi(t)/dt \quad (12)$$

每一个 IMF 分量进行 Hilbert 变换之后,则可把 $x(t)$ 表示成 Hilbert 谱形式

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\Phi_i(t)} \quad (13)$$

式中省去了余差 r_n , Re 表示取实部。上式把三维空间中的信号幅度表达成时间与瞬时频率的函数,即 Hilbert 谱。如果振幅的平方对时间积分,可以得到 Hilbert 能量谱

$$ES(\omega) = \int_0^T H^2(\omega, t) dt \quad (14)$$

Hilbert 能量谱提供了每个频率的能量计算式,表达了每个频率在整个时间长度内所累积的能量。

4 爆破震动信号的小波分析与 HHT 变换

信号分析的目的就是运用有效的方法对信号进行时频分析与处理,从而更详细、更全面地提取信号主要特征信息,其分析信号能力的强弱与分解过程、时频分布、突变检测、分辨率及消噪、滤波等方面密切相关。现从以下几方面对小波分析和 HHT 变换就爆破震动信号进行对比分析。

4.1 信号的分解过程及信息重构

对图 1 中的原始爆破震动信号分别进行小波分解和 EMD 分解,相应的分解结果如图 2、4 所示。图 2 中的(a)、(b)、(c)和(d)是分别选用了小波家簇中 db3、db5、sym5 及 coif3 四个不同的小波基进行分解后得到的小波分量。图中的 a_8 及 $d_1 \sim d_8$ 为小波分量,其中 a_8 为低频分量、 $d_1 \sim d_8$ 为高频分量。可以看出,针对同一原始信号,选用的小波基不同,其相应的小波分量也就不同,说明小波分量依赖所选的小波基。各小波分量的信息重构及重构后的误差如图 3 所示。

信号经 EMD 分解后得到图 4 的 $c_1 \sim c_8$ 和 R 九个分量,每一个 IMF 分量都有不同的振幅和频率(时间特征尺度),分解顺序是按频率从高至低进行的。通过 EMD 获得的 IMF 分量大都具有物理意义, c_1 表现为信号包含的白噪声, c_2 为信号的高频, c_3 、 c_4 分别为信号的优势频率子频带, $c_5 \sim c_8$ 为低频分量, R 为信号本身微弱的趋势或仪器的漂零。各 IMF 分量的信息重构及重构后的误差如图 5 所示。

4.2 信号时频谱分析

原始信号进行基于 db3 小波函数连续小波变换和 HHT 变换后对应的小波谱和 Hilbert 能量谱如图 6(a) 和 (b) 所示。它们都能表现出良好的局部化特征,描述了非平稳信号的时频分布。在小波谱中,除主成分外,还存在大量的谐波成分,是由于小波基有限长并受到测不准原理的限制,使得时频域同时为紧支区间,从而发生能量泄漏,造成小波谱上的能量呈分散特征。Hilbert 能量谱能清晰地表明能量随时频的具体分布,具有更好的局部化能力,其能量主要集中在有限的能量谱线上而小波具有相当宽的频谱分布。

从上可知,两种方法都能较好地分解原始信号,且信息重构效果好。与小波分析相比,EMD 法不要选择基函数,分解后的 IMF 分量大都具有物理意义而且该方法得到的 IMF 分量低频成分较多,有利于爆破震动信号分析。

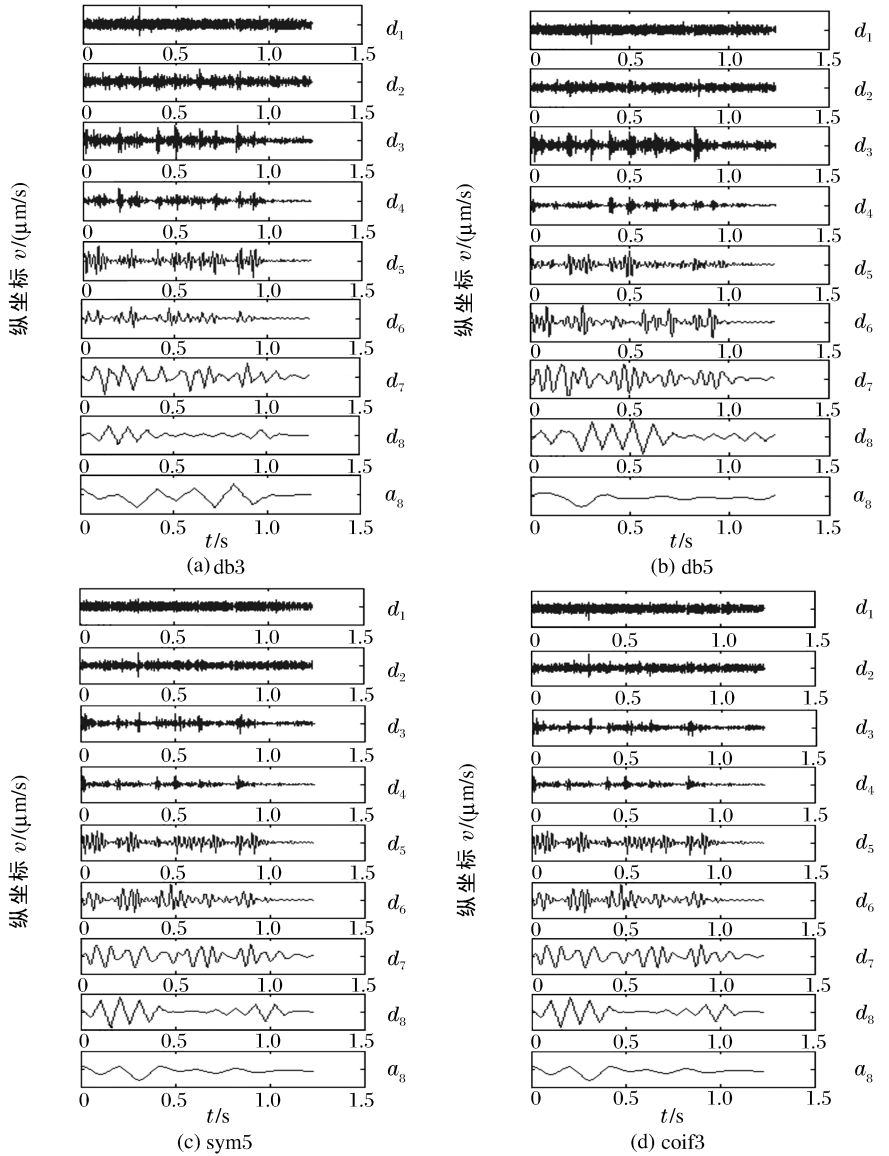


图 2 基于 db3、db5、sym5 和 coif3 小波基的小波分解

Fig. 2 Wavelet decomposition based on db3, db5, sym5 and coif3

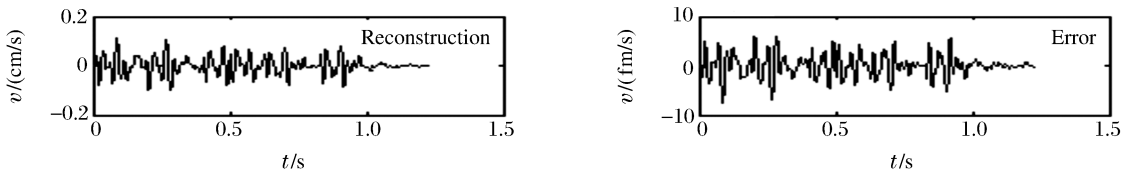


图 3 基于 sym5 的信号重构和误差

Fig. 3 Reconstruction and error based on sym5

4.3 信号突变检测

信号的突变表现为位移的急剧变化和频率的急剧变换两种形式。图 1 中信号的突变主要体现在位移方面,从图 2、4 中可看出,两种方法都能有效地检测出突变点发生的位置。位移的急剧变化表现在图 6 中小波谱和 Hilbert 能量谱上的峰值变化,在突变点附近其谱值都为最大峰值,反映了时域波形的特

征,从而确定信号的突变时刻。

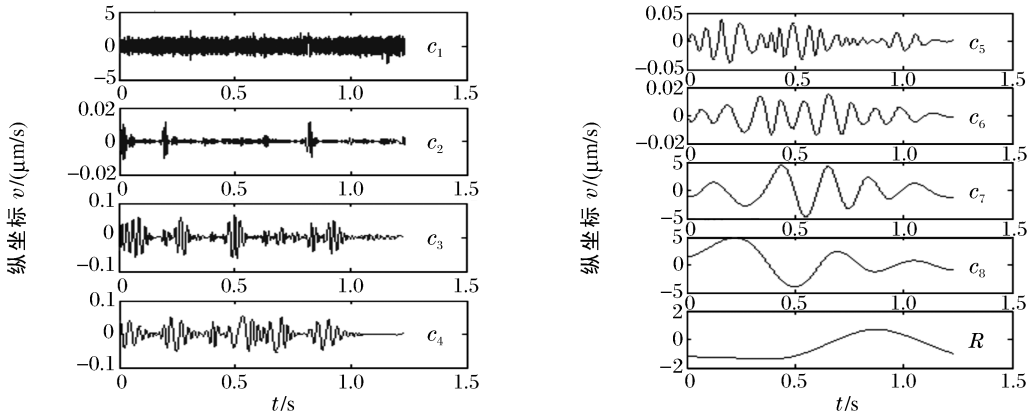


图 4 原始爆破震动信号的 EMD 分解

Fig. 4 The original blasting vibration signal based on EMD

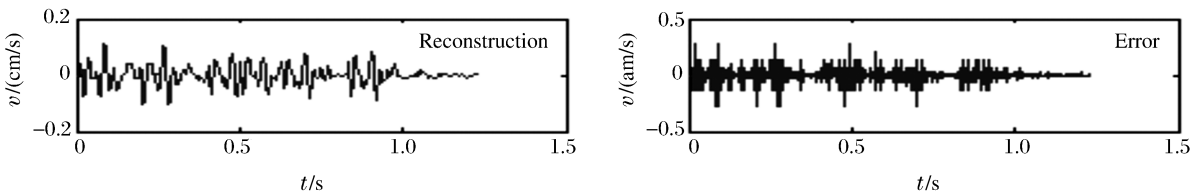


图 5 原始信号的重构及误差

Fig. 5 Reconstruction and error of original signal

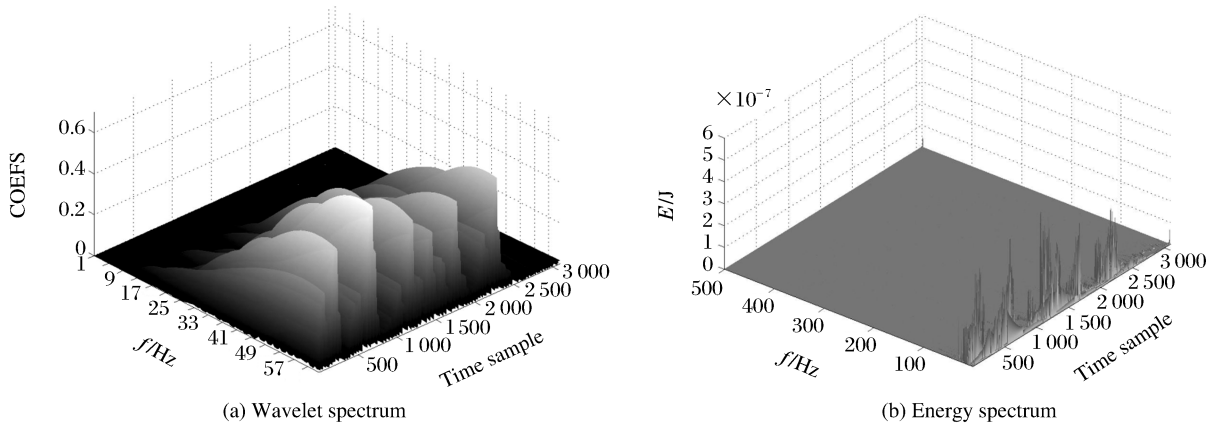


图 6 原始信号基于 db3 小波函数的小波谱和 HHT 变换的 Hilbert 能量谱

Fig. 6 Wavelet spectrum and Hilbert energy spectrum of original signal based on db3 and HHT

4.4 信号的分辨率分析

时频分布的时间和频率分辨能力的高低,是衡量时频分布方法好坏的一种主要性能指标。从小波基函数的表达式(2)中可知:当尺度因子 $a > 1$ 时, $\Psi_{a,b}(t)$ 对应为展宽的小波,其频谱缩窄并下移;当 a 值 < 1 时, $\Psi_{a,b}(t)$ 就成了缩窄的小波,其频谱展宽并上移。其窗口形状为两个矩形 $[b - a\Delta\Psi, b + a\Delta\Psi] \times [(\pm\omega_0 - \Delta\Psi)/a, (\pm\omega_0 + \Delta\Psi)/a]$, 窗口中心为 $(b, \pm\omega_0/a)$, 时窗和频窗宽分别为 $a\Delta\Psi$ 和 $\Delta\Psi/a$, 它们在各处是不一样的。其中 b 仅仅影响窗口在相平面时间轴上的位置,而 a 不仅影响窗口在频率轴上的位置,也影响窗口的形状。分析检测高频分量(a 减小),时间窗口自动变窄,频率窗口高度增加;分析检测低频分量时,时间窗口自动变宽,频率窗口高度减小,从而实现时频窗口的自适应变化,达到“数学显微镜”的作用。但时频窗口的面积受 Heisenberg 测不准原理限定为一常数,在提高时间分辨率的同时

也意味着降低了频率分辨率,反之亦然。DWT 的局部分辨能力与小波基紧紧相关,而小波基的分辨能力与小波基紧支性、正则性、对称性、消失距等多因素相关^[13]。

HHT 法中的 Hilbert 时频谱的时频分辨率与小波有所区别,其 EMD 方法认为假定信号数据长度为 T , 采样间隔时间为 Δt , 那么从数据中获得的最高频率是 $1/(n \times \Delta t)$, 其中 n 是用 Δt 来精确定义数据最高频率所需的最小数目 ($n \geq 2$)。由于 EMD 方法是对信号不断提取高频分量的过程, 每个 IMF 的频率分辨率是不一样的, 频率高的 IMF 频率分辨率低, 频率低的 IMF 的频率分辨率高, 其频率具有多样性, 它是根据信号内在的特性进行自适应调节的^[8]。

与小波的多分辨率不同, HHT 法时间分辨率不变, 其时间精度等于采样间隔, 无论高、低频都一样。而其最高分辨频率在满足香农抽样定理后完全由信号本身决定。并且 HHT 法中各 IMF 分量的时间尺度是从信号中自适应提取的, 可以为任意值, 但小波分量之间的时间尺度为 2 的倍数。图 6 中的 Hilbert 能量谱和小波谱清晰地显示了它们分辨率的差别。

4.5 消噪与滤波

由于受信号检测背景的干扰以及受信号形式和处理方法的影响, 在信号分析中, 滤波和消噪相互关联, 也成了信号处理与检测的内容之一。消噪目的是分离噪声和信号的时频谱区域, 采用适当的滤波方法将噪声从信号中清除或减弱, 从而得到较高的信噪比和获取有利的信息。消噪的传统方法是采用 Fourier 变换, 它针对平稳且明显区别于噪声谱特性的信号时效果较好, 但实际处理的大都是非平稳信号。小波变换具有时频局部化特点和滤波基选择的灵活性, 为信号消噪提供了有效的工具。CWT 能有效实现各种形式的滤波, 但计算量大, 实时性差。在工程应用中, 大都可采用 DWT。小波消噪的基本步骤如下:

- (1) 选取合适的小波基, 对含有噪声的原始信号作小波变换;
- (2) 利用软或硬门限处理相应的小波系数, 获得新的已被压缩的小波系数;
- (3) 通过小波逆变换, 获取消噪后的信号。

图 7 为原始信号采用 *coif3* 小波基变换后再进行消噪的结果。

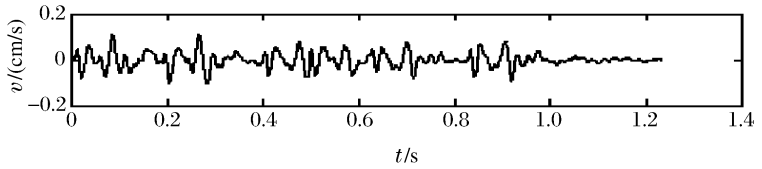


图 7 *coif3* 小波基的消噪

Fig. 7 Denoising of *coif3*

HHT 法的创新同时也给滤波和消噪带来了新的途径。EMD 是用从小到大的不同时间尺度对信号进行筛分, 所得的每一个 IMF 都包含一定范围的时间特征尺度, 就可以利用这个特征对信号进行滤波。那么根据 IMF 的特征可构造一种新的基于特征尺度参数而不是频域的时空滤波器^[14], 它能实现常见的滤波形式, 一个低通时空滤波器可表示为

$$x_{lk}(t) = \sum_{i=k}^n c_i(t) + r_n(t) \tag{15}$$

高通时空滤波器为

$$x_{hk}(t) = \sum_{i=1}^k c_i(t) \tag{16}$$

带通时空滤波器为

$$x_{bk}(t) = \sum_{i=b}^k c_i(t) \tag{17}$$

这种时空滤波器是基于 IMF 分量, 它充分保留了信号本身的非平稳性特征。同样也可用来减少和消除信号中混杂的噪声。当噪声为一个或多个 IMF 分量时, 直接利用时空滤波器进行消噪, 若噪声和信号混叠, 可设置硬(或软)门限去噪, 其过程类似小波变换中的方法^[15]。

图 8 为 HHT 法消噪、滤波的结果: 图(a)为去除 c_1, c_2 分量的消噪效果, 和小波消噪的效果很接近;

图(b)为保留 $c_3 \sim c_6$ 分量的滤波效果。可见,无论是小波分析还是 HHT 变换都能得到较好的消噪、滤波效果。由于 HHT 方法是从信号本身的尺度特征出发对信号进行分解,具有良好的局部适应性和频率瞬时性,使得基于 HHT 变换的消噪、滤波方法更具灵活性和有效性。

5 结论

(1) 小波分析和 HHT 变换都能很好地应用于具有非线性、非平稳性特性的爆破震动信号分析中,并且都能提取时程曲线的主要特征信息。

(2) EMD 直接从原始信号中按不同的时间尺度分解出反映原始信号本身固有特性的 IMF, IMF 分量通常具有实际的物理含义。EMD 不需要预设基函数,具有自适应和高效的特点。而小波分析是通过选择小波基进行分解的,其分解结果与所选的小波基密切相关,面临选择小波基的困难。

(3) 小波谱和 Hilbert 能量谱都能描述非平稳信号的能量在时频谱上的分布。在小波谱中由于小波基的有限长和受到测不准原理的限制造成频谱扩散,能量泄漏,使得能量随频率分布较宽,且只是定性的表示;而 Hilbert 能量谱能清晰地表明能量随时频的具体分布,大部分能量都集中在有限的能量谱线上。

(4) 两种方法都是完备而有效的,都具有自适应性的多分辨率分析。HHT 法时间分辨率不变且精度很高,其频率分辨率可随信号内在的特性进行自适应调节;而小波分析的时间、频率分辨率受测不准原理的限制,各自的分辨率提高是以降低对方的分辨率为代价。

(5) 小波分析与 HHT 变换在非平稳信号消噪与滤波方面都具有较好的效果。相比而言,基于 EMD 方法的消噪和滤波方法更具灵活性和适应性。

总之,通过以上的对比分析,可以看出:在分析非平稳信号时 HHT 变换较较小波分析更具适应性和优越性。相信在研究岩石中波的传播、衰减规律、结构动态响应特征和爆破震动破坏方面,HHT 方法有着广阔的应用前景。

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.
- [2] Worsey P, Rupert G. Vibration monitoring and control of blasting associated with the construction of a highway next to a show care[A]. International Society of Explosive Engineers, Proceedings of the Twenty-third Annual Conference on Explosives and Blasting Technique[C]. Las Vegas, Nevada: International Society of Explosive Engineers, 1997:111—120.
- [3] 胡昌华,李国华,刘涛,等. 基于 MATLAB6. X 的系统分析与设计——小波分析[M]. 第2版. 西安:西安电子科技大学,2004.
- [4] 娄建武,龙源,方向,等. 基于反应谱值分析的爆破震动破坏评估研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):41—46. LOU Jian-wu, LONG Yuan, FANG Xiang, et al. Study on blasting vibration damage based on response spectrum [J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(1):41—46.
- [5] 凌同华,李夕兵. 地下工程爆破振动信号能量分布的小波包分析[J]. 爆炸与冲击,2004,24(1):63—68. LING Tong-hua, LI Xi-bing. The feature of energy distribution for blast vibration signals in underground engineering wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(1):63—68.
- [6] Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis[J]. IEEE transactions on information theory,1990,36(5):961—1005.
- [7] 仲佑明,秦树人,汤宝平. 一种振动信号新变换法的研究[J]. 振动工程学报,2002,15(2):233—238. ZHONG You-ming, QIN Shu-ren, TANG Bao-ping. Study on a new transform method for vibration signal[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002,15(2):233—238.

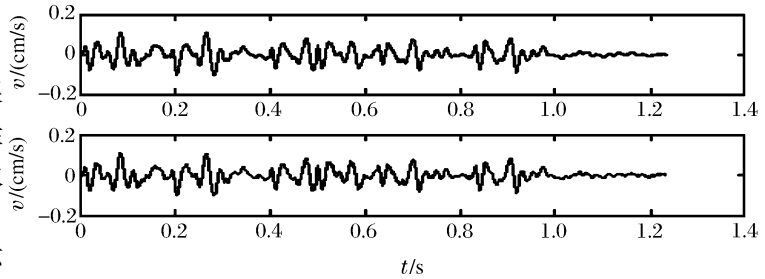


图8 基于 HHT 法的消噪与滤波

Fig. 8 Denoising and detrending based on HHT method

- [8] Huang N E, Shen Z, long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1998, 454: 903—995.
- [9] ZHAO Jin-ping, HUANG Da-ji. Mirror extending and circular spline function for empirical mode decomposition method[J]. Zhejiang University(Science), 2001, 2(3):247—252.
- [10] Shen J J, Yen W P, O'Fallon J, et al. Interpretation and application of Hilbert-Huang tranformation for seismic performance analyses[J]. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph, 2003, 25(3):657—666.
- [11] Coifman R, Wickenhauser V. Entropy based algorithms for basis selection[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2):713—718.
- [12] Mallat S G. Multi-resolution approximation and wavelet orthonormal bases of $L^2(R)$ [J]. Transaction of the American Mathematical Society, 1989, 315(4):69—87.
- [13] 何正友, 钱清泉. 基于小波变换的信号奇异性指数计算方法及其应用[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(3):12—15. HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. A computational approach to signal singularity exponent based on wavelet transform and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(3):12—15.
- [14] 谭善文, 秦树人, 汤宝平. Hilbert-Huang 变换的滤波特性及其应用[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(2):9—12. TAN Shan-wen, QIN Shu-ren, TANG Bao-ping. The filtering character of Hilbert-Huang transform and its application[J]. Journal of Chongqing University, 2004, 27(2):9—12.
- [15] Donno D. Denoising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 4(3):613—625.

Wavelet analysis and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal

LI Xi-bing^{*}, ZHANG Yi-ping, LIU Zhi-xiang, ZUO Yu-jun, WANG Wei-hua
(School of Resources and Safety Engineering, Central South University,
Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: By means of wavelet transform (WT) and Hilbert-Huang Transform (HHT), a practical blasting vibration signal was analyzed and the presented results show that both WT and HHT are efficient ways for analyzing and processing non-stationary signals, and can draw main characteristic information from signals as well as carry out wave filtration and noise elimination. In HHT the intrinsic mode function (IMF) obtained with empirical mode decomposition (EMD) can reflect the intrinsic physical characteristics of original data and it has no need of using base functions, while in WT selecting mother wavelet is a difficulty problem. Hilbert energy spectrum can clearly express the energy distribution with time and frequency in detail, and most energy are concentrated in a definitive range of time and frequency, but that of wavelet spectrum lines are distributed in a wider frequency range. Besides, the resolving power of time and frequency is restricted from Heisenberg principle in wavelet analysis, while in HHT time resolving power is precise and steady, and frequency resolving is adaptive according to signal intrinsic characteristics. Conclusion can be made that the HHT method is more adaptive than WT analysis in analyzing non-stationary signals and has a wide application on wave in rock transmitting, attenuation law, restructure dynamic response characteristics and blasting vibration damage.

Key words: mechanics of explosion; time-frequency analysis; Hilbert-Huang Transform; wavelet analysis; blasting vibration signal; wavelet functions; Hilbert spectrum

* Corresponding author: LI Xi-bing

E-mail address: xbli@mail.csu.edu.cn

Telephone: 0731-8836628