

# 提升小波包最优基分解算法在爆破振动信号分析中的应用研究

路亮<sup>1,2</sup>, 龙源<sup>1</sup>, 谢全民<sup>1,3</sup>, 刘好全<sup>1</sup>, 赵长啸<sup>1,3</sup>, 李兴华<sup>1</sup>

(1. 解放军理工大学 野战工程学院, 南京 210007; 2. 中国人民解放军 72351 部队, 山东 莱芜 271109;

3. 武汉军械士官学校 弹药修理与销毁教研室, 武汉 430075)

**摘要:** 针对工程爆破网络监测与预报系统对精度、效率的要求, 提出将提升小波包最优基分解算法应用于爆破振动信号的降噪处理及能量特征提取。在提升小波包多尺度变换的基础上, 通过对最优基搜索算法的改进满足了复杂信号在线处理对算法的需求, 结合应用实例验证了该算法能够有效滤除实测信号中的干扰噪声, 并准确获取信号在各频带的能量分布特征。提升小波包最优基分解算法在爆破振动信号分析中的应用为爆破振动危害的研究和控制提供了分析基础和技术支持, 具有良好的应用前景。

**关键词:** 爆破振动; 提升小波包; 最优基; 降噪; 能量特征

**中图分类号:** TD235.1; O384

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.13465/j.cnki.jvs.2014.05.030

## Application of lifting wavelet packet decomposing algorithm based on optimal basis in blasting vibration signal analysis

LU Liang<sup>1,2</sup>, LONG Yuan<sup>1</sup>, XIE Quan-min<sup>1,3</sup>, LIU Hao-quan<sup>1</sup>, ZHAO Chang-xiao<sup>1,3</sup>, LI Xing-hua<sup>1</sup>

(1. College of Field Engineering, University of Science & Technology of PLA, Nanjing 210007, China;

2. 72351 Troops, PLA, Laiwu 271109, China;

3. Department of Ammunition and missile, Wuhan Ordnance N. C. O Academy of PLA, Wuhan 430075, China)

**Abstract:** Lifting wavelet packet decomposing algorithm based on optimal basis was applied in de-noising blast vibration signals and analysis of energy distribution in order to ensure the accuracy and efficiency of an engineering blasting network monitoring and forecasting system. Based on lifting wavelet packet multi-scale transformation, an improved search algorithm for optimal basis was used, it met the needs of online processing of complicated signals. In application examples, noise was filtered with the lifting wavelet packet decomposing algorithm, and the energy distribution of every frequency band was acquired precisely. The application of the proposed algorithm in analysing blasting vibration signals provided a study basis and technical supports for study and control of blasting vibration hazards.

**Key words:** blasting vibration; lifting wavelet packet; optimal basis; de-noising; energy features

随着工程爆破技术在市政工程中的大力开发和利用, 如何减小和控制爆破振动对施工环境及周边建(构)筑物的危害已成为爆破振动安全研究领域亟需解决的问题, 作为该领域的重要组成部分, 爆破振动信号分析既是研究控制爆破振动危害的基础, 也是科学制定抗震措施的前提。爆破振动信号作为各种频率成分振动波的混合体, 经过复杂场地介质的滤波、放大作用后一般携带有能反映场地特性和爆破特征的重要信息, 因此, 为使爆破振动安全判据制定更加科学、完整, 需要对信号中蕴含的时频、能量分布等重要特征信息进行准确提取<sup>[1-3]</sup>。然而, 由于爆破振动测试易受外

部环境和测试仪器的影响, 获取的信号中往往掺杂有干扰噪声, 只有通过信噪分离算法将有效的信号信息从中提取出来, 才能保证爆破振动特征提取的可靠性和准确性。

爆破地震本身短时、突变、频率丰富的特点以及爆破区域场地、边界等条件的多变性加大了对爆破振动信号分析及特征提取的难度, 并且传统的第一代小波变换由于不能根据信号特点选取适应的小波基来识别振动信号特征使其无法满足复杂信号在线处理的需要, 然而, 提升算法能够通过构造具有希望特性的小波函数从而得到与待分析信号相匹配的滤波器组, 可以满足工程爆破大型网络化测试系统与控制平台对算法效率和精度等方面的要求。

提升算法(Lifting scheme)作为一种二代小波(Second Generation Wavelet, SGW)构造方法, 继承了经典小

基金项目: 国家自然科学基金(51178460); 国家青年基金项目(51204071)

收稿日期: 2013-12-17 修改稿收到日期: 2013-03-06

第一作者 路亮男, 博士生, 1983年生

波变换多分辨率的特性,变换仅在时域进行,可以实现原地运算,具有占用空间小、变换速度快、易于逆变换等优点<sup>[4-7]</sup>。目前在机械振动信号分析、故障诊断等方面的应用已比较成熟,段晨东<sup>[8]</sup>等通过提升算法准确提取了隐含在机械振动信号中的故障特征;周瑞<sup>[9]</sup>提出了一种基于二维第二代小波变换的机械振动信号压缩方法。近年来,谢全民<sup>[2]</sup>等学者尝试将提升算法引入到爆破振动信号的分析中,并取得了较为满意的效果。本文将在提升算法的基础上构造基于插值细分法的二代小波 SGW(6,6),并依据小波包变换思想,通过把改进最优基搜索算法引入到爆破振动信号的分析中,对提升算法在信噪分离以及能量特征分析等方面的应用效果进行了探讨,并取得了一些具有借鉴意义的结论。

### 1 提升小波包变换及相关算法

#### 1.1 提升小波包变换

依据提升算法原理<sup>[6,10-11]</sup>以及小波包变换的定义,插值细分小波 $(N, \tilde{N})$ 的提升小波包变换过程可分为分解和重构两步。对于数据长度为 $2^M$ 的信号其分解步骤可归纳为:① 将 $j$ 尺度下小波包分解的第 $n$ 个节点系数 $(j, n) n=0, 1, \dots, 2^j - 1$ 分裂为奇样本 $d_{n0}^j$ 和偶样本 $d_{ne}^j$ 。② 利用预测器,由 $d_{ne}^j$ 预测 $d_{n0}^j$ ,其预测误差即为第 $(j+1, 2n+1)$ 节点的系数。

$$d_{2n+1}^{j+1}[k] = d_{n0}^j[k] - \sum_{l=1}^N P[l]d_{ne}^j[k+l-N] \quad (1)$$

式中, $P[l] (l=1, 2, \dots, N)$ 为预测器系数, $K=1, 2, \dots, 2^{M-j-1}$ 。③ 利用更新器,用第 $(j+1, 2n+1)$ 节点的系数更新 $d_{ne}^j$ 即可得到第 $(j+1, 2n)$ 节点的系数。

$$d_{2n}^{j+1}[k] = d_{ne}^j[k] + \sum_{l=1}^N U[l]d_{2n+1}^{j+1}[k+l-\tilde{N}] \quad (2)$$

式中, $U[l] (l=1, 2, \dots, \tilde{N})$ 为更新器系数。

提升小波包变换的重构过程为分解过程的逆运算,可直接由分解过程得到,重构过程的预测器系数 $P$ 和更新器系数 $U$ 与分解过程相同。提升小波包变换的两层分解与重构过程如图1所示。

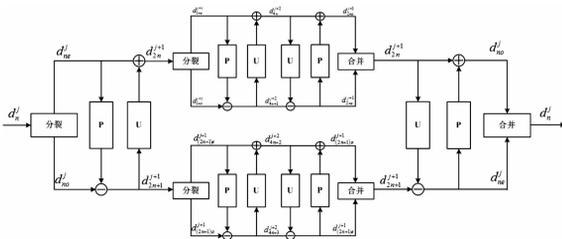


图1 提升小波包两层分解与重构过程

Fig.1 Decomposition and reconstruction of two level wavelet package transform with lifting scheme

### 1.2 二代小波构造

根据 Lagrange 插值定理<sup>[12]</sup>,已知 $N+1$ 个点 $x_0, x_1, \dots, x_N$ 的函数值为 $y_0, y_1, \dots, y_N$ ,且 $y_i=f(x_i), i=0, \dots, N$ ,则存在唯一一个次数不大于 $N$ 的多项式 $L_n(x)$ ,使得 $L_n(x_i)=f(x_i)$ ,那么 $L_n(x) = \sum_{i=0}^N y_i L_{n,i}(x)$ ,其中 $L_{n,i}(x) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^N \frac{x-x_k}{x_i-x_k}$ 。

对于一个已知的插值点 $x, L_{n,i}(x)$ 是常数,它与函数值 $y_i$ 无关,插值点 $x$ 对应的函数值是已知的 $N+1$ 个函数值 $y_0, y_1, \dots, y_N$ 的线性组合。令 $P_i=L_{n,i}(x), x$ 对应的函数值为 $y$ ,则 $y = \sum_{i=0}^N P_i y_i$ ,该式说明新的函数值是由已知的一组函数值预测得到的,当 $x_0, x_1, \dots, x_N$ 和 $x$ 确定后, $\{P_i\}$ 是唯一的,且 $\sum P_i=1$ 。

每一次细分时,取 $N(N=2D, D$ 为正整数)个已知的样本 $y_{j,k-D+1}, \dots, y_{j,k}, y_{j,k+D}$ ,假设这些样本是等时间间隔采样的,它们对应的采样时刻分别为 $x_k+1, x_k+2, \dots, x_k+N, x_k$ 为任意的起始时间,细分产生的新的采样值处于这些已知样本的中间位置。插值点为: $x = x_k + (N+1)/2$ ,这样预测器系数可由式 $L_{n,i}(x)$ 确定,即

$$P_i = L_{n,i}(x) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^N \frac{(N+1)/2 - i}{k - i} \quad (3)$$

根据式(3)即可求得 SGW(6,6)的预测器系数如表1所示。更新器系数可直接由预测器系数除以2得出。预测器 $P$ 和更新器 $U$ 确定后,分别根据式(1)、式(2)经过迭代运算后便可得到小波函数 $\psi(x)$ 与尺度函数 $\phi(x)$ 。

表1 SGW(6,6)的预测器系数

Tab.1 Predict coefficient of second generation wavelets (6,6)

$N, \tilde{N}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
6,6	0.011 7	-0.097 70	0.585 9	0.585 9	-0.097 70	0.011 7

### 1.3 移频算法

基于等效滤波器概念<sup>[9]</sup>,提升小波变换的分解过程等效于信号经过高、低通滤波后再进行隔点采样,由于逐层隔点采样会导致每进行一层分解采样频率降低 $1/2$ ,当其低于 Nyquist 频率时,高频成分继续分解会发生频率折叠,从而造成严重的频带错位,使分析结果失真。文献[13-14]中根据混频的原因提出了一种移频算法,将其引入提升小波包变换,则分解步骤中的式(1)和式(2)变为:

$$d_{2n+1}^{j+1}[k] = (-1)^k (d_{n0}^j[k] - \sum_{l=1}^N P[l]d_{ne}^j[k+l-N])$$

$$d_{2n}^{j+1}[k] = d_{ne}^j[k] +$$

$$\sum_{l=1}^N (-1)^{k+l-N} U[l] d_{2n+1}^j[k+l-\tilde{N}] \quad (5)$$

同理,重构步骤可由式(4)、式(5)逆运算求得。

## 2 最优基搜索算法

小波包基的选择直接影响提升小波包变换的应用效果<sup>[13-14]</sup>,目前小波包基的搜索算法主要采用基于最小熵标准的小波包基选择法,该算法使用对数能量熵作为信息代价函数  $En$ ,定义第  $(j,n)$  节点小波包系数的对数能量熵为  $En(d_n^j) = \sum_{k=1}^{2^{M-j}} \log(d_n^j[k])^2$ 。其中应用最广泛的搜索过程其分解和搜索步骤是独立进行的,即要完成二叉树的两次独立遍历,直到搜索过程中判定被删除的节点才能释放其占用的资源,空间效率较低。本文将引入一种改进搜索算法,其空间利用率高,更适合复杂信号的在线处理。其搜索过程中的提升小波包分解与最优基搜索同时进行,通过及时释放非最优基节点系数所占空间以提高空间效率,其执行过程可归纳为:① 从根节点自上而下、从左至右分解的同时,从下至上、从左至右进行最优基搜索;② 最优基搜索时,比较子节点信息熵值之和  $En1$  与其父节点信息熵值  $En2$  的大小。若  $En1 \geq En2$ ,则置父节点为叶子节点并删除所有子节点,同时释放存储空间;否则用子节点的信息熵值之和  $En1$  代替父节点的信息熵值,同时释放父节点系数存储空间;③ 重复上述过程直到回到根节点。

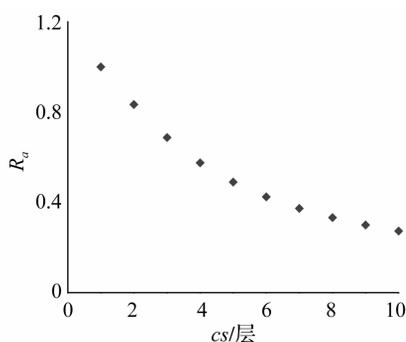
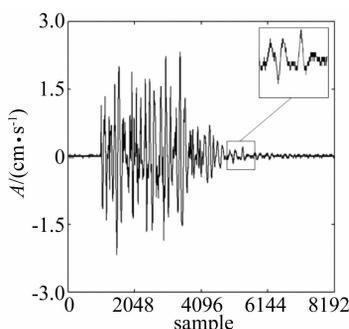
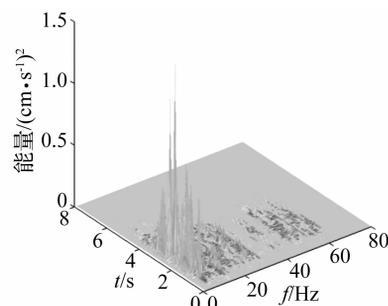


图2  $R_a$  与  $CS$  之间关系图



(a) 时域曲线图



(b) 时频能量谱图

Fig. 2 Relation chart between  $R_a$  and  $CS$

Fig. 3 Time-history curve and time-frequency-energy spectrum of measurement vibration signal

### 3.1 在爆破振动信号降噪中的应用

#### 3.1.1 降噪算法

基于提升小波包最优基分解算法的爆破振动信号的降噪步骤可分为:

(1) 在确定的分解层数  $CS$  下对信号进行提升小波包分解,同时根据最优基算法,选取代价函数最小的节点系数,最后得到信号  $S$  的最优小波包基;

(2) 对最优基下的各节点系数进行阈值量化。由于爆破振动信号具有很强的时频局部性,而软阈值处

为说明改进搜索算法的优越性,本文将通过比较两种算法的空间复杂度以验证其空间效率。设信号长度为  $2^M$ ,提升小波包分解层数为  $CS$ ,则原始搜索算法的空间复杂度为  $O[(CS+1)2^M]$ ;改进后的搜索算法所需的存储空间为:

$$2^M + 2 \times 2^{M-1} + 2 \times 2^{M-2} + \dots + 2 \times 2^{M-CS} = 2^M \times (1 + 1 + 2^{-1} + \dots + 2^{-(CS-1)}) = 2^M \times (3 - 2^{-(CS-1)}) \quad (6)$$

因此,改进算法的空间复杂度为  $O[(3 - 2^{-(CS-1)})2^M]$ ,则两种最优基搜索方法的存储空间之比为:

$$R_a = \frac{(3 - 2^{-(CS-1)})2^M}{(CS+1)2^M} = \frac{3 - 2^{-(CS-1)}}{CS+1} \quad (7)$$

由式(7)可得  $R_a$  与  $CS$  之间的关系如图2所示。由图2可知,随着  $CS$  的增大,改进算法的空间效率较原始搜索算法明显提高,当  $CS=5$  时,  $R_a=0.49 < 0.5$ ,说明改进后搜索算法的空间效率提高了1倍以上。

## 3 算法应用研究

图3(a)为结合某市政开挖工程采集的一实测爆破振动信号  $S$  的时程曲线图,试验仪器采用 Exp4850 型爆破振动测试仪,采样频率设为 1 024 Hz,采样点数 8 192,由振动波形可以看出,信号中掺杂有由测试系统自身带来的方波干扰。图3(b)为该信号的时频能量谱图,从该图也能发现(48~65) Hz 的频段区间内存在高频噪声分量。

理后的信号相对平滑并会造成边缘模糊等失真现象,因此,本文采用硬阈值函数作为阈值量化函数。硬阈值函数的表达式为:

$$\bar{d}_n^j[k] = \begin{cases} 0, & |d_n^j[k]| \leq \tau \\ d_n^j[k], & |d_n^j[k]| > \tau \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\tau$  为阈值,  $d_n^j[k]$  为第  $(j,n)$  节点的系数,  $\bar{d}_n^j[k]$  为阈值量化后的系数,其中  $\tau$  可由下式确定:

$$\tau = \sigma \sqrt{2 \log(2^M)/2^M} \quad (9)$$

其中,噪声方差  $\sigma$  可由中位数估计法确定:

$$\sigma = \text{median}(d_n^j[k]) / 0.6745 \quad (10)$$

其中,  $\text{median}(\quad)$  为中位数函数。

(4) 利用阈值量化后的小波包节点系数对信号逐层进行重构。

### 3.1.2 算例验证

利用 1.2 节构造的  $SGW(6,6)$ , 对信号  $S$  进行 3 层提升小波包分解, 同时按照第 2 节确定的算法进行最优基搜索并得到与最优提升小波包基对应的节点系数如图 4 所示。对图 4 中的节点系数进行阈值量化后再逐层进行重构即可得到如图 5(a) 所示的信噪分离信号  $\hat{S}$ , 结合图 5(b) 能够看出, 降噪算法在较好地保留信号细节信息的同时, 对于干扰信号起到了很好的抑制作用, 高频噪声能量已基本被消除。

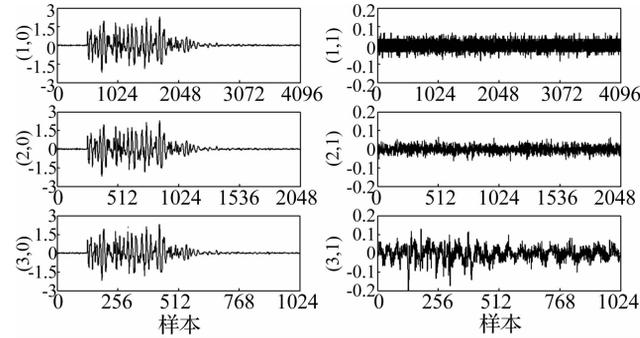


图 4 最优提升小波包基各节点系数

Fig. 4 Node coefficients of optimum lifting wavelet packet basis

### 3.1.3 信噪分离性能分析

为定量评价提升小波包最优基分解算法的信噪分离效果, 文中引入信噪比 (SNR)、均方根误差 (RMSE)、峰值误差 (PE) 三项评价指标。

$$SNR = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N s^2(n)}{\sum_{n=1}^N [\hat{s}(n) - s(n)]^2} \right\} \quad (11)$$

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\hat{s}(n) - s(n)]^2 \quad (12)$$

$$PE = \max_{n=1}^N (|\hat{s}(n) - s(n)|) \quad (13)$$

式中,  $N$  为信号的采样点数,  $s(n)$  为原始信号,  $\hat{s}(n)$  为信噪分离后的信号。原始信号经过降噪处理后, 信噪比越高, 均方根误差及峰值误差越小, 说明该算法的信噪分离性能越好。根据式 (11) ~ (13) 可求得信噪分离后的信号相对原始信号  $SNR = 32.6717$ ,  $RMSE = 0.1056$ ,  $PE = 0.0708$ , 由此可见, 提升小波包最优基分解算法在爆破振动信号降噪中能够获得较高的信噪比和较小的误差, 具有良好的信噪分离性能。

## 3.2 在爆破振动信号能量特征分析中的应用

在很多情况下, 单一的质点振动速度指标不能完全反映建(构)筑物可能承受的破坏情况, 而目标的破坏与结构响应是爆破震动引起的振动速度、频率、持续

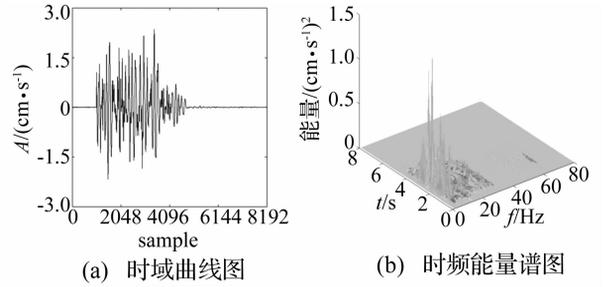


图 5 信噪分离后信号的时程曲线及时频能量谱图

Fig. 5 Time-history curve and time-frequency energy spectrum of de-noising signal

时间以及目标自身动力响应特性等因素综合作用的结果<sup>[15]</sup>, 因此, 本文将在提升小波包最优基分解算法的基础上, 通过对能量特征分布的分析综合考察振动速度、频率及持续时间共同作用对建(构)筑物的影响。

### 3.2.1 爆破振动信号能量特征分析原理

爆破振动信号  $s(i)$  经提升小波包  $j$  层分解后, 可得到  $2^j$  个频带上的子空间信号, 则  $s(i)$  可由这些子空间的正交和表示, 即:

$$s(i) = \sum_{n=0}^{2^j-1} d_n^j = d_0^j + d_1^j + d_2^j + \dots + d_{2^j-1}^j \quad (14)$$

根据 Parseval 定理<sup>[16]</sup>, 由式 (18) 可得爆破振动信号的能量为:

$$E_{j,n} = \int |d_n^j|^2 dt = \sum_{i=1}^m |x|^2 \quad (15)$$

式中,  $E_{j,n}$  为爆破振动信号分解到第  $j$  层第  $n$  个节点的频带能量,  $m$  为爆破振动信号的采样点数,  $x$  为  $d_n^j$  的幅值, 因此, 信号分解到第  $j$  层时, 各频带能量占总能量的百分比为:

$$E(n) = \frac{E_{j,n}}{\sum_{n=0}^{2^j-1} E_{j,n}} \times 100\% \quad (16)$$

由式 (14)、(15) 可知, 爆破振动信号可由提升小波包分解成不同频带的振动分量, 从而反映了频率在爆破震动中的影响, 且频带能量同时又是该频带振动分量的振动速度和作用时间的共同作用的结果, 因此, 能量特征分析在反映爆破振动信号振动速度、频率及作用时间对建(构)筑物影响方面具有一定的优势。

### 3.2.2 爆破振动信号不同频带的能量分布特征

选用  $SGW(6,6)$  对 3.1.2 节信噪分离后的爆破振动信号  $\hat{S}$  进行 5 层提升小波包分解, 得到 32 个小波包 (5,0) ~ (5,31), 对应的节点系数如图 6 所示。利用节点系数及式 (15)、(16) 即可计算得到 32 个小波包对应的相对能量分布图, 根据图 7 可知, 爆破振动信号  $\hat{S}$  的主要能量分布在 (5,0) ~ (5,3) 四个小波包对应的频带内, 这四个频带内的能量占信号总能量的比例达到 99.76%, 说明信号  $\hat{S}$  的能量分布趋于低频段。

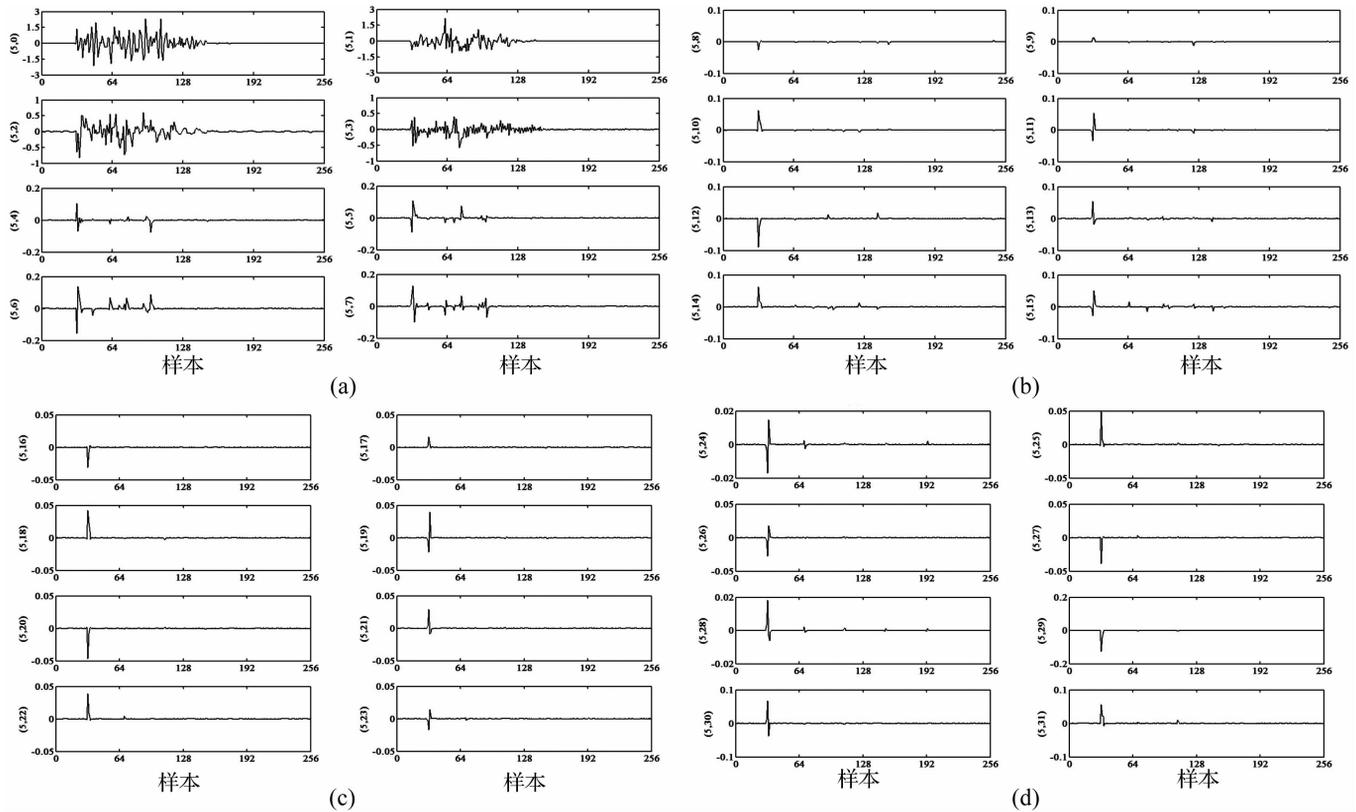


图 6 提升小波包 5 层分解对应的节点系数

Fig. 6 Node coefficients of 5-level-decomposition based on lifting wavelet packet

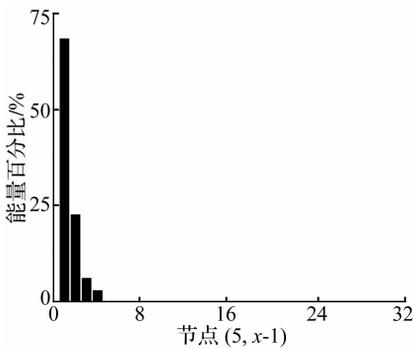


图 7 爆破振动信号  $\hat{S}$  的能量分布规律

Fig. 7 Percent of energy distributing of blasting vibration signal

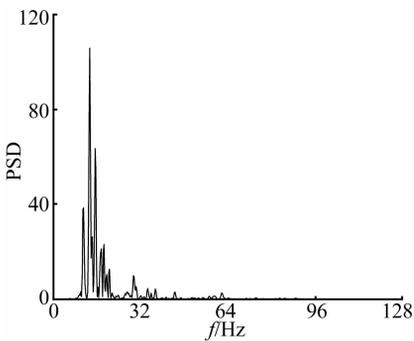


图 8 功率谱密度

Fig. 8 Power spectrum density

从功率谱密度图 8 中能够看出, 信号  $\hat{S}$  的主要能量集中在 (0 - 16) Hz、(16 - 32) Hz、(32 - 48) Hz 及 (48 - 64) Hz 这四个低频带区间内, 并且随着区间内频率的增大, 功率谱密度逐渐减小, 这与图 7 中的能量分

布规律相一致。由于建(构)筑物的自振频率一般较低, 因此, 爆破振动信号  $\hat{S}$  的能量分布集中于低频带内容易引发被保护目标的共振从而加剧破坏。

### 4 结 论

(1) 根据小波包变换具有多分辨率分析的特点, 依据插值定理设计二代小波  $SGW(6,6)$ , 通过在分解过程中引进移频算法, 有效解决了提升小波包变换时可能出现的相位失真及频率混叠现象;

(2) 改进的最优基搜索算法使得提升小波包的分解与最优基搜索过程同时进行, 通过释放非最优基节点的小波包系数, 很大程度上提高了算法的空间效率, 当分解层数  $CS \geq 5$  时, 其空间利用率提高 1 倍以上, 因此, 应用改进最优基搜索算法的提升小波包分解具有更好的在线信号处理性能;

(3) 提升小波包最优基分解算法能够快速有效滤除实测爆破振动信号中掺杂的噪声干扰, 通过定量分析验证了该算法信噪分离效果理想, 为后续的信号分析奠定了基础;

(4) 针对传统判据指标单一的特点, 通过将信噪分离后的信号分解到不同频带上, 获得了爆破振动信号  $\hat{S}$  的能量特征分布, 为研究爆破地震对建(构)筑物动态响应影响的综合判据提供了前提。

可以考虑根据战术的需要人为地控制攻角的取值范围,以实现指标的最优化。

(3) 随进弹在从硬介质向软介质侵彻时,介质界面加速了侵彻弹的偏转作用。

#### 参考文献

- [1] 华 恭,欧林尔. 弹丸作用和设计理论[M]. 北京:国防工业出版社,1976:19-29.
- [2] 曾必强,姜春兰,王在成. 反跑道动能弹斜侵彻机场多层跑道的三维数值模拟[J]. 兵工学报,2008,28(12):1433-1437.  
ZENG Bi-qiang, JIANG Chun-lan, WANG Zai-cheng. 3D Numerical simulation of oblique penetration of antirunway penetrator to a multilayer runway target[J]. Journal of China Ordnance, 2008, 28(12):1433-1437.
- [3] 姜春兰,邢郁丽,王在成,等. 串联反跑道子弹药随进级结构参数优化[J]. 北京理工大学学报,2000,20(5):647-650.  
JIANG Chun-lan, XING Yu-li, WANG Zai-cheng, et al.

#### (上接第169页)

综上所述,基于最优基分解的提升小波包算法具有效率高、精度好、易于实现等优点,更加适合于复杂信号的在线处理,具有较好的应用前景,能够满足工程爆破大型网络化测试系统与控制平台对算法的要求。

#### 参考文献

- [1] 李洪涛,舒大强. 爆破振动衰减规律的影响因素[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(1):79-82.  
LI Hong-tao, SHU Da-qiang. Influential factors analysis of blasting vibration attenuation law[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005,38(1):79-82.
- [2] 谢全民,龙源,钟明寿. SGWT在爆破振动信号信噪分离中的应用研究[J]. 振动与冲击,2012,1(31):24-28.  
XIE Quan-min, LONG Yuan, ZHONG Ming-shou. Application of SGWT in separation of noises from a blasting vibration signal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,1(31):24-28.
- [3] 路 亮,龙 源,钟明寿. FastICA算法在低信噪比爆破振动信号信噪分离中的应用研究[J]. 振动与冲击,2012,17(31):33-37.  
LU Liang, LONG Yuan, ZHONG Ming-shou. Separating noise from a blasting vibration signal based on fast ICA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,17(31):33-37.
- [4] 张德丰. MATLAB小波分析[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [5] 姜洪开,何正嘉,段晨东. 基于提升方法的小波构造及早期故障特征提取[J]. 西安交通大学学报,2005,39(5):494-498.  
JIANG Hong-kai, HE Zheng-jia, DUAN Chen-dong. Wavelet construction based on lifting scheme and incipient fault feature extraction[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005,39(5):494-498.
- [6] Sweldens W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelet [J]. SIAM Journal on Mathematics

Optimizing structure parameters of following bomb of tandem anti-runway submunition[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2000, 20(5):647-650.

- [4] 杨冬梅,王晓鸣. 反机场弹药斜侵彻多层介质靶的三维数值仿真[J]. 弹道学报,2004,16(3):83-87.  
YANG Dong-mei, WANG Xiao-ming. 3D-numerical simulation of anti-runway bomb penetrating multilayer medium [J]. Journal of Ballistics, 2004, 16(3):83-87.
- [5] 朱 剑,汪文革,王鹏华. 无控子弹侵彻机场跑道数值仿真[J]. 弹箭与制导学报,2011 31(1):103-106.  
ZHU Jian, WANG Wen-ge, WANG Peng-hua. The numerical simulation about penetration effect of unguided ammunition to airfield runway[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2001, 31(1):103-106.
- [6] LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual [M]. California: LSTC, 2003.
- [7] 王在成. 串联装药对机场跑道毁伤效应研究[D]. 北京:北京理工大学,2012.

Analysis, 1997, 29(2): 511-546.

- [7] Claypoole R L, Davis G M, Sweldens W, et al. Nonlinear wavelet transforms for image coding via lifting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(12):1449-1458.
- [8] 段晨东,张建丁. 基于第二代小波变换的转子碰摩故障特征提取方法研究[J]. 机械科学与技术,2006,25(10):1229-1232.  
DUAN Chen-dong, ZHANG Jian-ding. Study of the fault feature extraction method for rotor rub-impact based on the second generation wavelet transform[J]. Mechanical Science and Technology, 2006,25(10):1229-1232.
- [9] 周 瑞. 基于第二代小波的机械故障信号处理方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [10] Sweldens W, Schröder P. Building your own wavelets at home [DB/OL]. [http://cm.bell-labs.com/who/wim/papes.html/at home](http://cm.bell-labs.com/who/wim/papes.html/at%20home), 1998-01-05.
- [11] Sweldens W. The Lifting Scheme: A Custom-design construction of biorthogonal wavelets [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1996, 15(3):186-200.
- [12] 邓建中,刘之行. 计算方法(第二版)[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [13] Coifman R, Wickerhauser M V. Entropy-based algorithms for best basis selection. IEEE Transaction on Information Theory, 1992, 38(2):713-718.
- [14] 曹建军. 基于提升小波包和改进蚁群算法的自行火炮在线诊断研究[D]. 石家庄:军械工程学院,2007.
- [15] 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 Wave, 2006,26(3):222-227.
- [16] 周德廉,邵国友. 现代测试技术与信号分析[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2005.