DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0520-07

基于小波变换的水下连续爆炸声信号特征分析*

裴善报[1,2],刘荣忠[1],郭 锐[1]
(1.南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094;
2.安徽工业大学机械工程学院,安徽 马鞍山 243000)

摘要:为了研究水下连续爆炸声信号的特征,利用 Mallat 算法,采用离散小波变换对水下连续爆炸声信号进行了分层提取分析,讨论了水下连续爆炸声信号在各频带的能量分布状况,采用 Welch 方法实现了对水下连续爆炸声信号的功率谱特征提取,并采用离散小波变换对声信号进行时频谱特性分析。结果表明,水下连续爆炸声信号具有很强的声功率,声压级可以达到 190 dB 以上,声持续时间较长,频率范围宽、声信号的能量主要集中在频率 48 kHz 以下,其中在低频段能量更大,这些特点使其有望成为水声干扰源。

关键词:爆炸力学;声信号分析;小波变换;谱估计;水下连续爆炸;能量分布
中图分类号:O389;TB561 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

水下爆炸产生的脉冲波是高功率、宽频带及无指向的声源,传播距离较远,可作为一种水声干扰源[1]。为探求声功率大、持续时间较长、频带宽的水声干扰源,获得水下连续爆炸声信号,进行水下连续爆炸试验。

信号特征提取方法有 3 种:时域分析的特征提取法,谱估计的特征提取法和时频分析的特征提取法[2]。水下爆炸信号是非线性、非平稳信号,其特点是持续时间短、突变快。为了更好地分析水下爆炸声信号的特点,杜志鹏等[3]采用 FFT 变换对舰艇水下爆炸冲击信号进行了拟合,贾虎等[4]对纤维爆炸索水下爆炸声信号特征进行了小波分析,并取得了较理想的结果。

为了获得声压级 170 dB 以上、声持续时间 3 min、可覆盖各种声纳的工作频率的水声干扰源,本文中采用小波变换对水下连续爆炸声信号进行研究,进行小波重构信号能量分布分析、功率谱估计和时频谱分析的特征提取,对水下爆炸声信号特征进行分析。

1 小波变换

小波变换克服了短时傅里叶变换的不足,其窗口大小可随频率变化,具有对信号的自适应性,能提供非平稳信号的时域和频域的局部化信息[5],被称为信号的“数学显微镜”。小波变换的重要特点是具有多分辨率,可利用这个特点来提取信号的局部特征。

Mallat 算法主要基于多分辨率分析的多采样率滤波器组分解信号,可把信号分解为离散平滑分量和离散细节分量[6]。

1.1 信号分解过程

平滑分量 $x_k^{(j-1)}$ 与 $x_k^{(j)}$ 和细节分量 $d_k^{(j)}$ 之间的关系为:

$$x_k^{(j)}=\sum_n h_0(n-2k)x_k^{(j-1)} \qquad \text{(离散平滑逼近)} \tag{1}$$

$$d_k^{(j)}=\sum_n h_1(n-2k)x_k^{(j-1)} \qquad \text{(离散细节分量,即一维离散小波变换)} \tag{2}$$

* **收稿日期**:2013-12-31;**修回日期**:2014-01-09
基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20133219110019)
作者简介:裴善报(1978—),男,博士研究生,讲师,shanbaopei@163.com。

式中：$h_0(n-2k)$，$h_1(n-2k)$分别为低通和高通滤波系数，n、k、j 均为正整数；离散细节分量 $d_k^{(j)}$ 实际上就是二进离散栅格上的小波变换。

$$h_0(n-2k)=\langle\varphi_{0n}(t),\varphi_{1k}(t)\rangle \tag{3}$$

$$h_1(n-2k)=\langle\varphi_{0n}(t),\psi_{1k}(t)\rangle \tag{4}$$

式中：$\varphi(t)$和 $\psi(t)$分别为多分辨率分析中的尺度函数和小波函数，第一个下角标 0 和 1 分别表示上、下一层分解。

图 1(a)为信号分解示意图，$h_0(k)$为低通数字滤波的系数；$h_1(k)$为高通数字滤波的系数，它们相当于尺度函数(用于提取平滑分量)$\varphi(t)$和小波函数(用于提取细节分量)$\psi(t)$。

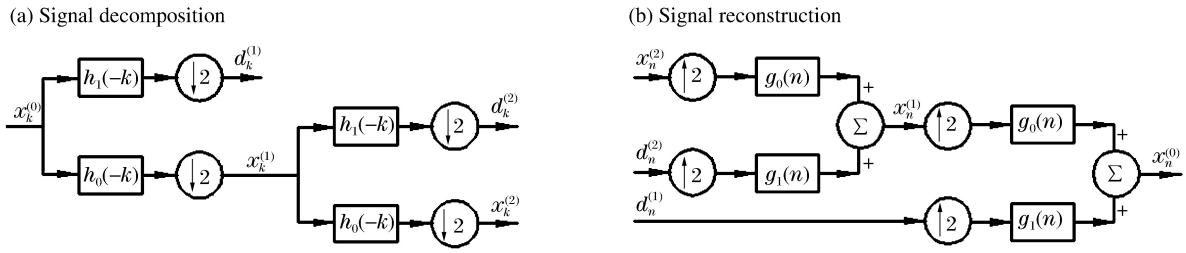

图 1 信号分解与重建示意图

Fig. 1 Schematic of signal decomposition and reconstruction

1.2 信号重建过程

信号重建公式为：

$$x_n^{(j-1)}=\sum_k g_0(n-2k)x_k^{(j)}+\sum_k g_1(n-2k)d_k^{(j)} \tag{5}$$

式中：$x_k^{(j)}$，$d_k^{(j)}$ 分别为第 j 级离散平滑分量及细节分量；$x_n^{(j-1)}$ 为由它们重建得到的第$(j-1)$级离散平滑分量；$g_0(n)$，$g_1(n)$分别为反变换对应的低通和高通滤波系数。图 1(b)为重建示意图。

2 水下连续爆炸实验

实验是在一内陆湖进行的，时间为春季。图 2 给出了实验布置图，水下连续爆炸序列源放置在船Ⅰ下面，顶部的爆炸单元深度为 40 m，每两个爆炸单元之间的距离为 3 m，每个爆炸单元为 20 g TNT，爆炸时间间隔由起爆电路控制。水听器放置在船Ⅱ下离湖面 50 m 的深度，水听器工作频率范围为 1～50 kHz，灵敏度为(－202±3) dB。两艘船由 GPS 定位，距离为 850 m。湖底基本上是平的，覆盖有淤泥和砂石，平均深度为 140 m。

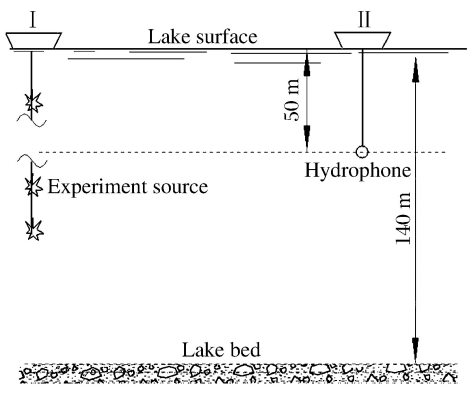

图 2 水下连续爆炸实验布置图

Fig. 2 Experiment layout of sequential underwater explosion

图 3(a)给出了水下连续爆炸的原始信号，图 3(b)是根据图 3(a)声信号获得的水下连续爆炸声压级(L_p)。从图 3(a)可看出，第 1 个声信号压力在若干微秒时间内从零上升到峰值压力(4 800 Pa)，随后近似呈指数规律衰减；一个起爆时间间隔后，下一个声信号压力从零增加到峰值压力随后呈指数规律衰减。从图 3(b)可看出，声压级可以达到 190 dB 以上，控制爆炸单元的起爆时间间隔、保证爆炸单元数目足够，声持续有效时间即为爆炸单元爆炸时间间隔之和。声压级可满足设计要求 170 dB，说明水下连续爆炸具有很强的声功率、声持续时间较长。这一特点使水下连续爆炸有望成为水声干扰源。

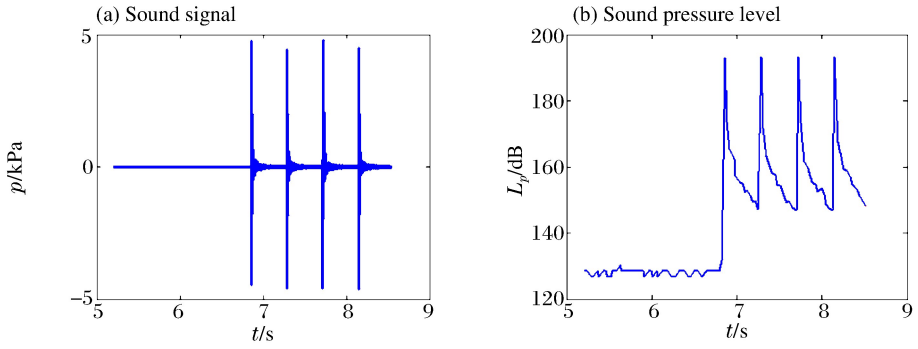

图 3 水下连续爆炸原始声信号和声压级图

Fig. 3 Sound signal and sound pressure level of sequential underwater explosion

3 水下连续爆炸声信号小波分析

信号分析的目的是采用合理的方法对水下连续爆炸声信号进行能量分布状况研究、功率谱估计和时频分析及处理，从而全面提取声信号特征信息。

3.1 信号的分解及重构

Matlab 小波分析工具包中有大量小波基函数可供选择，但对同一个问题，选择小波基不同，计算结果也不同[7]。在处理非平稳信号中运用较多的是离散 Daubechies(db)小波基函数[8]。图 4 为典型的小波分解结构的组织形式，其中：S 代表待分解信号，A 代表低频分量，D 代表高频分量。

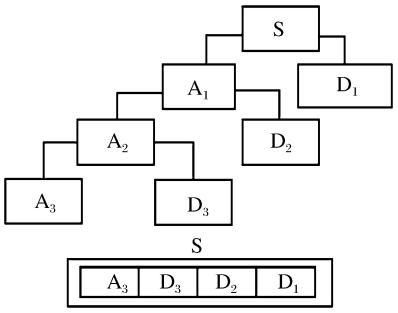

图 4 小波分解组织形式

Fig. 4 Organization form of wavelet decomposition

采用图 3(a)的水下连续爆炸声信号，利用 db8 小波基对其进行离散小波变换。水下连续爆炸声信号分解后的重构信号以及相对误差分布如图 5 所示，其中 p 为压力。从图 3(a)和图 5 中可以看出原始信号与重构信号间误差量级在 10^{-8} Pa 以下，二者具有高度的一致性，说明选取的 db8 小波基真实地反映声信号情况，可满足工程计算和分析要求。

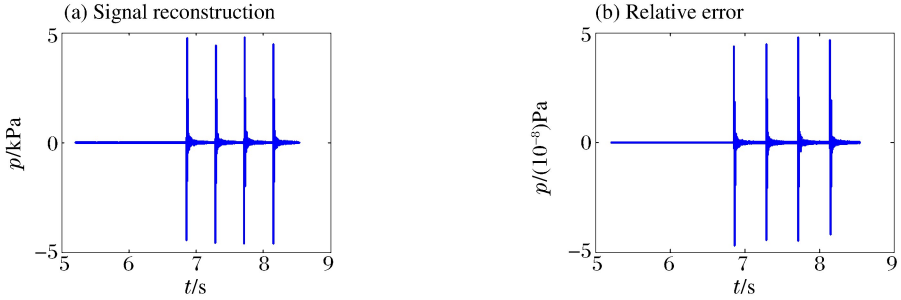

图 5 水下连续爆炸重构信号及误差

Fig. 5 Signal reconstruction and error

用 db8 小波基对水下连续爆炸声信号进行 9 个层次的分解，对应 10 个频率带。表 1 为采用 db8 小波函数进行小波分解时对应的频带表，f 为频率，图 6 为基于 db8 小波基的水下连续爆炸声信号小波分层重构信号，d_1～d_9 及 a_9 均为小波分量，其中 d_1～d_9 为高频分量，a_9 为低频分量。

表 1 频带分布表

Table 1 Distribution of the frequency band

分量	f/kHz	分量	f/kHz	分量	f/kHz	分量	f/kHz	分量	f/kHz
d_1	96～192	d_3	24～48	d_5	6～12	d_7	1.5～3	d_9	0.375～0.75
d_2	48～96	d_4	12～24	d_6	3～6	d_8	0.75～1.5	a_9	0～0.375

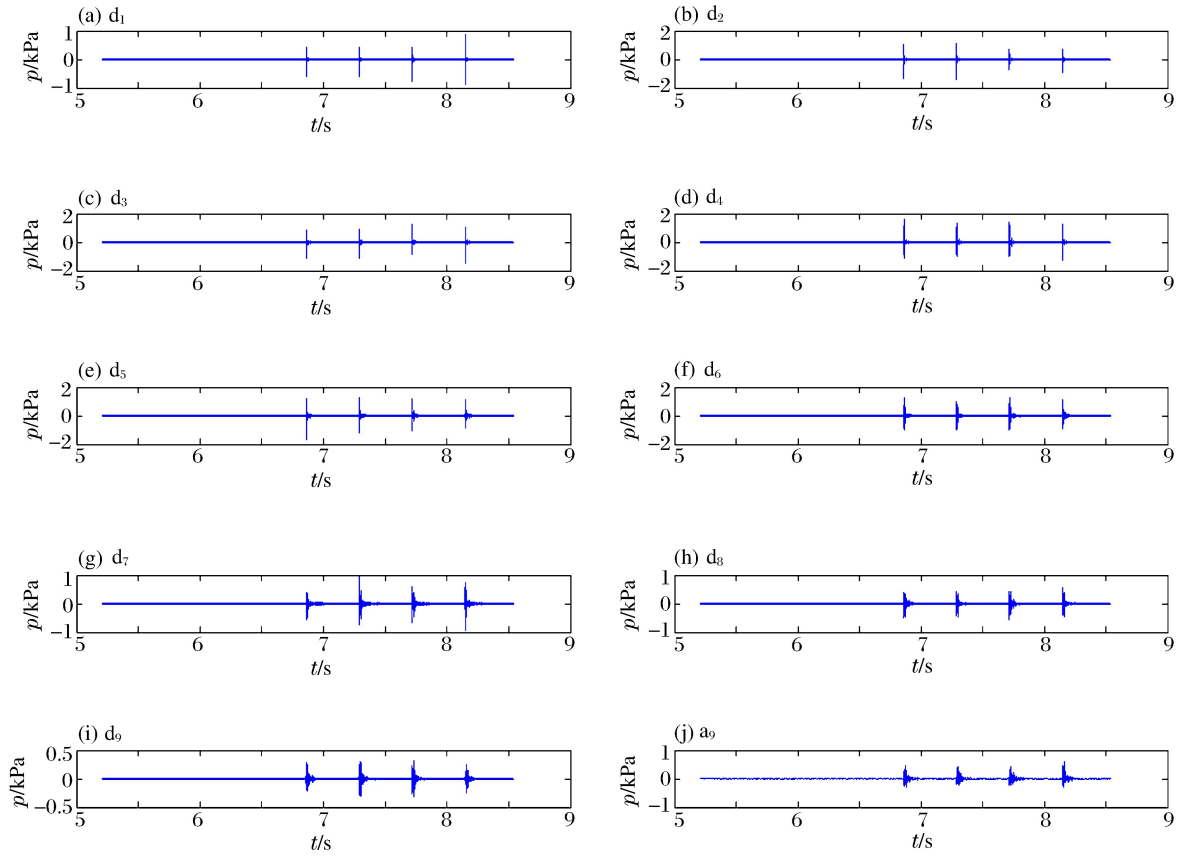

图 6 水下连续爆炸的小波分层重构信号

Fig. 6 Wavelet hierarchical reconstruction signal figure of sequetial underwater explosion

3.2 能量分布

本文中采用的二进小波时函数 $x(t)$ 满足如下分层分解关系：

$$x(t)=\sum_{i=0}^{N}G_i(t) \tag{6}$$

式中：$G_i(t)(i=1,2,\cdots,N)$ 表示函数分解出的高频部分，$G_0(t)$ 表示函数分解出的低频部分。

设爆炸声信号的总能量为 E，根据式(6)可得：

$$E=\int_{-\infty}^{\infty}x^2(t)dt=\sum_{i=0}^{N}E_i \tag{7}$$

式中：E_i 为各频带的能量。

由此得到各频率带上水下爆炸声信号的相对能量分布为：

$$K=\frac{E_i}{E} \tag{8}$$

图 7 是根据图 6 小波变换分层重构信号得到的水下连续爆炸声信号不同频带上的相对能量分布情况。从图 7 中看出，水下连续爆炸声信号能量在频带上分布比较广泛，但能量大部分集中在低频带上。

其中声信号在 a_9 及 d_9～d_4 前 7 个频带的能量占总能量的比例为 97.33%，说明水下连续爆炸声信号的能量主要集中在 24 KHz 以下。a_9 频带所占能量 34.6%，即在 375 Hz 以内频带能量最高。对比图 6 可看出，在高频带上声信号随时间的衰减较快。

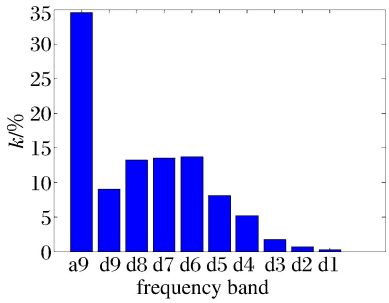

图 7 各频带相对能量分布

Fig. 7 Relative energy of each frequency band

3.3 谱估计

经典谱估计是基于 Fourier 变换的一类方法，其中获得有效应用的是 Welch 功率谱估计方法[9]。

图 8 是利用 Welch 法对水下连续爆炸声信号分析得到的功率谱，L_W 为声功率级。从图 8 可以看出，在低频段功率谱随频率的增大而衰减较快，声功率级较高；在高频段功率谱衰减缓慢，声功率级较低。水下连续爆炸声的频率范围宽，可覆盖各种声纳的工作频率，在 10 kHz 以下的声能量特别强，更适合干扰在 10 kHz 以下工作的声纳[1]。

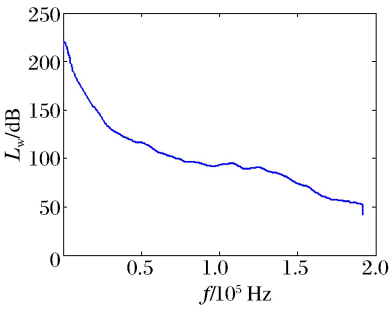

图 8 水下连续爆炸声信号功率谱

Fig. 8 Spectrum estimation of sound signal

图 9 是根据图 6 的分层重构信号，利用 Welch 方法对其进行功率谱估计，得到水下连续爆炸声信号在不同频带上的功率谱。从图 9 中可以看出，水下连续爆炸在各个频带上都有声功率。d_1 和 d_2 的声能量较小，说明能量在 48 kHz 以外的部分很少；当信号分解到 d_3 至 d_6，功率谱曲线逐渐发生了变化，声能量逐渐增强；当信号分解到 d_7 至 a_9，功率谱曲线基本一致，声能量较大，说明水下爆炸声信号的声能量主要集中在 3kHz 以内。因此水下连续爆炸声信号从 0～48 kHz 都有相当强的声功率，在低频段 3 kHz 以内能量更大。

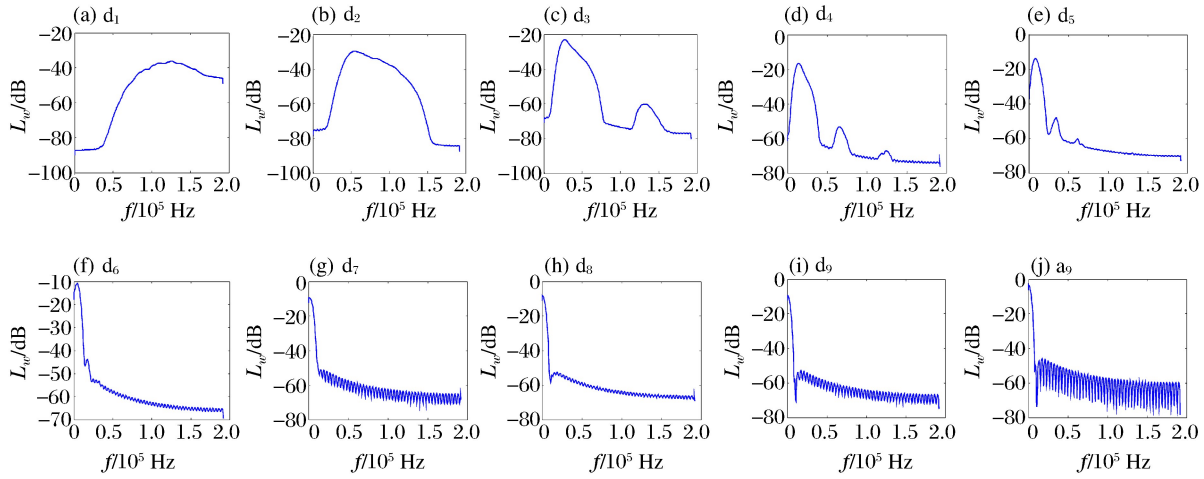

图 9 各频带的功率谱曲线

Fig. 9 Power spectrum curve of each frequency band

3.4 时频谱分析

水下连续爆炸声信号进行基于 db8 小波基变换后得到小波时频谱，其中采样频率为 96 kHz，如图 10 所示，其中 η 为小波相关系数。

从图 10 中看出小波时频谱能表现出良好的局部化特征，体现了非平稳声信号的时频分布。在小波时频谱中，除主成分外还存在大量的谐波成分，小波时频谱上的能量呈分散特征。从图 10 中看出，水下连续爆炸声信号的能量分散在 48kHz 内，在低频段能量更大。

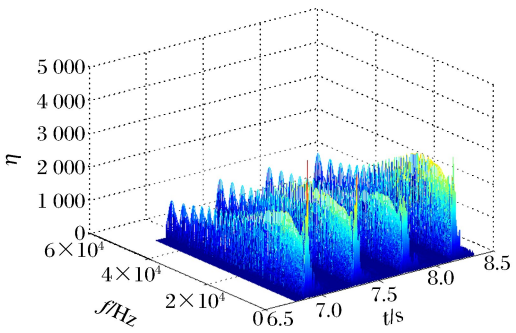

图 10 小波时频谱

Fig. 10 Time-frequency spectrum of wavelet

4 结　论

通过小波变换对水下连续爆炸声信号特征进行研究，进行了小波重构信号能量分布研究，谱估计的特征提取和时频谱分析的特征提取，有效地分析水下连续爆炸声信号特征，可得到以下结论。

(1)水下连续爆炸会产生很强的声功率，声压级可以达到 190 dB 以上，其声持续时间较长，宽频带；这些特点使水下连续爆炸有望成为水声干扰源。

(2)根据小波变换得到水下连续爆炸声信号在不同频带上相对能量分布情况、功率谱曲线及小波时频谱，3 种方法对比发现结论一致：声信号的能量主要集中在频率 48 kHz 以下，在低频段能量更大。

(3)基于小波变换的特征提取分析可以很好地适应水下连续爆炸声信号非线性、非平稳特性的要求，不仅能较全面地了解声信号频率分布及能量分布，还可以给出不同频带上声信号分量的分布及随时间衰减信息，低频部分能量较高、高频部分能量较低，为水下爆炸声信号研究提供理论依据。

参考文献：

[1] 潘正伟，焦善武，顾晓辉. 水下爆炸-高功率宽频带的水声干扰源[J]. 南京理工大学学报，1999，23(6)：507-509.
Pan Zheng-wei, Jiao Shan-wu, Gu Xiao-hui. Underwater explosion is an acoustic interference source with high power and wide band[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1999,23(6):507-509.

[2] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京：清华人学出版社，1994.

[3] 杜志鹏，汪玉，杨洋，等. 舰艇水下爆炸冲击信号拟合及应用[J]. 振动与冲击，2010，29(3)：182-184.
Du Zhi-peng, Wang Yu, Yang Yang, et al. Curve fit method for naval underwater explosion shock signal and its application[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(3):182-184.

[4] 贾　虎，沈兆武. 纤维爆炸索水下爆炸声信号特征的小波分析[J]. 振动与冲击，2011，30(9)：243-247.
Jia Hu, Shen Zhao-wu. Characteristics of underwater detonation acoustic signals of fiber-based detonating cord based on wavelet analysis and power spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(9):243-247.

[5] 李夕兵，凌同华，张义平. 爆破震动信号分析理论与技术[M]. 北京：科学出版社，2009.

[6] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992,38(2):617-643.

[7] 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]. 西安：西安电子科技大学出版，2004.

[8] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelet[J]. Communication Pure and Applied Mathematics, 1988,41(7):909-996.

[9] 康春玉，章新华，张安清. 一种基于谱估计的被动声呐目标识别方法[J]. 哈尔滨工程大学学报，2003，24(6)：627-631.
Kang Chun-yu, Zhang Xin-hua, Zhang An-qing. A distinguishing method of passive sonar target by means of spectrum estimation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003,24(6):627-631.

Analysis of characteristics of sequential underwater explosion sound signal based on wavelet transform

Pei Shan-bao[1,2], Liu Rong-zhong[1], Guo Rui[1]

(1. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan* 243000, *Jiangsu, China*)

Abstract: To obtain the characteristics of sequential underwater explosion sound signals effectively, the sequential underwater explosion sound signals have been gradually extracted by the Mallat algorithm of wavelet transform. The energy distribution of the sequential underwater explosion sound signal at different frequency ranges was discussed by adopting the discrete wavelet transform. The Welch spectrum method had been used to extract the power spectrum characteristics of sequential underwater explosion sound signals. The time-frequency characteristic was analyzed by using the discrete wavelet transform. The results show that the sequential underwater explosion has characteristics of strong sound power, longer sound duration and wide frequency range, the sound pressure level can be more than 190 dB, the energy is mainly concentrated in area of 48 kHz, with the higher energy band in the low frequency band. These characteristics show that the sequential underwater explosion can be used as a source of sound interference. The results also show that wavelet transform can be used to study the characteristics of the sequential underwater explosion sound signals reasonably so as to analyze them accurately.

Key words: mechanics of explosion; analysis of the sound signal characteristics; wavelet transform; spectrum estimation; sequential underwater explosion; energy distribution

(责任编辑 王小飞)