

基于 CEEMDAN-Hilbert 变换的水下爆炸信号 时频分析方法研究

樊涛,王宪楠,吴岩,赵爽,郭策安,张健

(沈阳理工大学 装备工程学院,沈阳 110159)

摘要: 研究水下爆炸冲击波信号的时频特性,对于舰艇利用弹药水下爆炸信号对抗自导鱼雷具有重要的实际意义。本文针对 EMD-Hilbert 方法中经验模态分解(EMD)存在模态混叠的问题,提出 CEEMDAN-Hilbert 方法实现水下爆炸冲击波信号精确的时频分析。在水深 100 m 处单发炸药爆炸,产生爆炸信号的频率主要分布在 56.5 kHz 以下的低频段,特别是 0~28.3 kHz 以下的能量最大,高于 56.5 kHz 的能量较少。通过与 EMD-Hilbert 方法相比,CEEMDAN-Hilbert 方法在 28.3~56.5 kHz 频段的能量分布会更加明显,具有一定的优越性。

关键词: 水下爆炸;CEEMDAN-Hilbert 变换;Hilbert 谱;本征模态分量

中图分类号: O381 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.05.004

Research on Time-frequency Analysis Method of Underwater Explosion Signal Based on CEEMDAN-Hilbert Transform

FAN Tao, WANG Xiannan, WU Yan, ZHAO Shuang, GUO Cean, ZHANG Jian

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: The study on the time-frequency characteristics of underwater explosion shockwave signals is of great practical significance for ships to utilize the underwater explosion signals of munitions against self-guided torpedoes. The CEEMDAN-Hilbert method is proposed to realize the accurate time-frequency analysis of underwater explosion shockwave signals in response to modal aliasing in the empirical modal decomposition(EMD) of the EMD-Hilbert method. In a single explosion at the depth of 100 m in the water, the frequency of the generated explosion signal is mainly distributed in the low frequency band below 56.5 kHz, especially the energy below 0~28.3 kHz is the largest, and the energy higher than 56.5 kHz is less common. By comparing with the EMD-Hilbert method, the energy distribution of CEEMDAN-Hilbert method in the frequency band of 28.3~56.5 kHz will be more obvious, which has certain superiority.

Key words: underwater explosion; CEEMDAN-Hilbert transform; Hilbert spectrum; eigenmode component

水声干扰弹是一种反鱼雷武器,水下连续爆炸时能有效地干扰自导鱼雷,为己方舰船提供规避时间。水下爆炸信号特性研究有助于提高水声

干扰弹的威力,具有重要意义。

水下爆炸信号具有非平稳性、持续时间短、突变快、频带宽等特点。目前,对瞬态非平稳信号的

处理方法有维格纳分布^[1]、傅里叶变换^[2]、短时傅里叶变换^[3]、分数阶傅里叶变换^[4]、小波变换^[5-6]、HHT 变换等^[7-9]。维格纳概率分布由于在计算中不涉及窗函数,因此在分析多分量信号时容易受到交叉项的干扰;傅里叶变换分析信号时,会丢失信号的时间信息;短时傅里叶变换分析信号时,通过对信号进行加窗处理,窗函数需要保持固定不变;分数阶傅里叶变换是傅里叶变换的一种扩展形式,当信号的频谱有较强的跳变或间断时,分数阶傅里叶变换可能会出现信号泄露事件,导致结果无法准确表达出信号的频谱特性;小波变换能够很好地反映信号的局部特征,但是小波变换在窗口内必须是平稳的,小波基的有限长也会造成信号能量的泄露。因此,上述方法处理水下爆炸的非平稳信号具有局限性。

1998年,Huang等^[10]提出了 Hilbert-Huang 变换,该方法的原理是先对信号进行经验模态分解,然后将分解出来的本征模态分量(intrinsic mode function, IMF)进行 Hilbert 变换,得到信号的时频分布图。由于信号分解出来的本征模态分量 IMF 之间会出现模态混叠现象^[11],Wu等^[12]提出了集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD),虽然 EEMD 能有效抑制模态混叠,但是在分解过程中添加的辅助白噪声最终需要增加集合平均次数来抵消,导致计算耗时长,重构误差大。Yeh等^[13]提出了互补集合经验模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD),CEEMD 算法是在原信号中加入不同的白噪声,加入噪声次数为集总平均次数。分别对原信号加噪声和减噪声信号做经验模态分解(EMD),求平均值,用于抵消信号中加入的噪声。CEEMD 是对 EEMD 的优化,集总平均次数会减少,重建后的信号噪声明显减少。通常情况,集总平均次数越多,重构后的信号噪声越小。完全自适应噪声集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise analysis, CEEMDAN)是通过加入自适应噪声,改变分解过程,减少了 IMF 分量中的残余噪声,克服了 EEMD 的缺点,提高操作效率,较好地保留了原始信号的信息。费鸿禄等^[14]通过引入 CEEMDAN-小波阈值的方法对爆破振动信号进行处理,通过对比 EMD-小波阈值、EEMD-小波阈值等分解方法,发现 CEEMDAN-小波阈值的方法对爆破振动信号的处理更具优越性。窦春红等^[15]通过对比 CEEMDAN 能量熵、

EMD 能量熵、EEMD 能量熵等方法对齿轮箱故障信号进行分析排查,发现 CEEMDAN 能量熵方法更具优越性。顾程等^[16]提出 CEEMDAN 分解结合能量熵的方法对故障信号进行提取,能够有效地识别出不同故障信号。

由于水下爆炸压力信号的复杂特征,本文将 CEEMDAN 分解方法应用于水下爆炸冲击波压力信号的分析中,旨在从本质上得到水下爆炸冲击波压力信号的组成和特点,提出 CEEMDAN-Hilbert 变换的时频分析方法分析水下爆炸信号的特点。

1 基本理论

1.1 EMD 的基本原理

EMD 分解是 HHT 方法中的核心,HHT 方法包含 EMD 分解和 Hilbert 变换两部分,对非平稳信号的处理效果较好,但存在模态混叠现象,导致信号时频分析时出现缺陷。因此,通过 EMD-Hilbert 和 CEEMDAN-Hilbert 两种方法进行对比,探索水下爆炸压力信号传播特点。

EMD 分解是依靠自身的时间尺度对信号进行分解,得到一组从高频到低频的 IMF 分量^[17],将待分解信号 $S(t)$ 分解为 i 个本征模态分量和一个残值 R ,表达式为

$$S(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + R \quad (1)$$

对于每一个本征模态分量,都必须满足两个条件:信号中极值点的个数与过零点的个数相差不超过 1 个;信号中任意时间点局部极大值与极小值的平均值必须为 0,当分解结束时,信号不能存在极值点。

1.2 CEEMDAN 的基本原理

将待分解的原始信号 $y(t)$ 加入标准差为 ε 的高斯白噪声 $z(t)$ 得到新的合成噪声 $Y(t)$ ^[18-20]。

$$Y(t) = y(t) + \varepsilon z(t) \quad (2)$$

将 $Y(t)$ 进行 CEEMDAN 分解,得到 $IMF1$ 。用原始信号 $y(t)$ 去除 $IMF1$,得到第一阶段的残余信号 $r(t)$ 为

$$r(t) = y(t) - IMF1 \quad (3)$$

将残余信号 $r(t)$ 作为 $y(t)$,重复执行公式(2)到公式(3),直到程序结束,最终得到 n 个 IMF 分量和一个残差 R 。EMD 分解后, n 个 IMF 分量中可能会出现模态混叠现象,EEMD 和 CEEMD 分解在解决模态混叠问题时,会使白噪声存在于 IMF

分量中。CEEMDAN 能够较好地解决此问题。首先,CEEMDAN 在信号进行 EMD 分解的过程中添加自适应的高斯白噪声,并非在待分解信号中直接添加;其次,CEEMDAN 分解是在得到 n 个 IMF 分量后计算总体平均,最终得到一组从高频到低频的 IMF 分量。因此,CEEMDAN 分解非常适合处理水下爆炸信号。

1.3 Hilbert 变换

将 CEEMDAN 分解得到的 IMF 分量进行 Hilbert 变换,得到每个 IMF 分量的瞬时频谱,通过加和所有 IMF 分量的瞬时频谱得到 Hilbert 谱 $H(w, t)$ [21-23]。

$$H(w, t) = \text{Re} \left[\sum_{i=1}^n a_i(t) \exp(j\varphi_i(t)) \right] \quad (4)$$

式中: $a_i(t)$ 为解析信号的幅值; $\varphi_i(t)$ 为解析信号的相位; j 表示虚数单位; w 为频率。

对 Hilbert 谱 $H(w, t)$ 进行积分运算,得到信号的边际谱为

$$h(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(w, t) dt \quad (5)$$

2 水下爆炸冲击波压力信号仿真

水下爆炸数值仿真有计算规模较大、载荷作用时间长等特点,对仿真软件的要求比较高,AT-UODYN 在水下爆炸方面的计算稳定性较好,能够解决固体、流体、气体以及相互耦合作用等非线性动力学问题,在水中兵器威力仿真以及舰船等目标物抗爆炸冲击等数值模拟方面具有重要价值。因此,本文采用 AUTODYN 软件对深水环境下 TNT 炸药的爆炸过程进行仿真,获得水下爆炸冲击波压力时程曲线。

2.1 数值计算模型

数值模拟的水域为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 炸药为半径 41.6 mm 的 TNT 裸装球形装药 (500 g), 采用中心起爆的方式,通过改变水的初始内能达到模拟水深 100 m 处的爆炸效果。为了简化计算,建立二维对称模型,取模型的 $1/2$ 进行建模。为了模拟无限水域,边界条件设置为流出 (Flow_out), 采用欧拉 (Euler) 算法进行数值模拟计算,采用毫米-毫克-毫秒 (mm-mg-ms) 单位制进行建模。

张社荣等 [24] 提出了一种新的网格尺寸方法,采用炸药半径的 $1/3$ 作为数值模拟网格大小,精度可以满足工程精度要求。本文采用的网格尺寸为 5 mm , 网格尺寸小于炸药半径。图 1 为水下爆炸仿真模型。

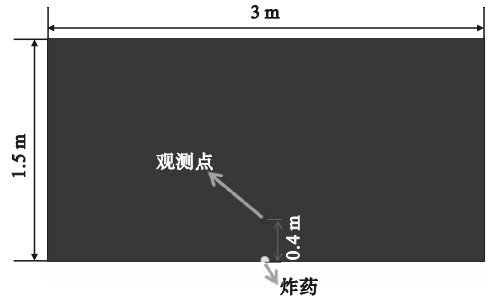


图 1 水下爆炸仿真模型

Fig. 1 Underwater explosion simulation model

2.2 水的状态方程

采用多项式状态方程描述水,当水为压缩状态 ($\mu \geq 0$) 时,方程为

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 E \quad (6)$$

式中: p 为水所受到的压力; μ 为水的压缩比; ρ_0 为初始密度; A_1, A_2, A_3, B_0, B_1 为材料常数; E 为水的比内能。当水为拉伸状态 ($\mu < 0$) 时,方程为

$$p = T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0 E \quad (7)$$

式中 T_1 和 T_2 为材料常数 [25]。比内能 E 计算公式为

$$E = \frac{\rho gh + p_0}{\rho B_0} \quad (8)$$

式中: ρ 为水的密度; g 为重力加速度; h 为水的深度; p_0 为大气压。当水深为 100 m 时, E 为 $3.8618 \times 10^3 \text{ J/kg}$ 。水状态方程参数如表 1 所示。

表 1 水状态方程参数

Table 1 Parameters of water state equation

| A_1/GPa | A_2/GPa | A_3/GP | B_0 | B_1 | T_1/GPa | T_2/GPa |
|------------------|------------------|-----------------|-------|-------|------------------|------------------|
| 2.20 | 9.54 | 14.57 | 0.28 | 0.28 | 2.20 | 0.00 |

2.3 炸药的状态方程

TNT 炸药采用 JWL 状态方程进行描述,具体表达式为

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V} E' \quad (9)$$

式中: P 为爆轰产物的压力; V 为相对比容; E' 为 TNT 炸药比内能; A, B, R_1, R_2 和 ω 为状态方程的参数 [25]。炸药状态方程参数如表 2 所示。

表 2 炸药状态方程参数

Table 2 Parameters of explosive state equation

| A/GPa | B/GPa | R_1 | R_2 | ω |
|----------------|----------------|-------|-------|----------|
| 371.20 | 3.23 | 4.15 | 0.95 | 0.30 |

2.4 仿真结果

图 2 为观测点 1 处水下爆炸冲击波压力时程曲线,从图中可以看出, TNT 炸药起爆的压力峰值为 $1.21 \times 10^5 \text{ kPa}$ 左右。

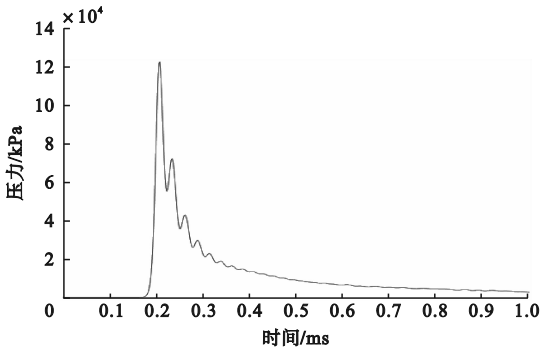


图2 水下爆炸压力时程曲线

Fig.2 Underwater explosion pressure time history curve

对于自由场中水下爆炸冲击波的传递, Cole^[26]和 Zamyshlyayev^[27]总结了水下爆炸冲击波经验公式为

$$P_{\max} = \begin{cases} 44.1 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{1.5}, & 6 \leq r \leq 12 \\ 52.4 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{1.13}, & 12 < r \leq 240 \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{\max} 为冲击波峰值压力,MPa; R 为测点到爆心的距离,m; R_0 为炸药初始半径,m; r 为相对距离, $r=R/R_0$; W 为TNT炸药质量,kg。

为了验证数值模拟的准确性,表3给出了经验得到的冲击波峰值压力以及数值模拟得到的冲击波峰值压力对比。

由表3可知,两者误差较小,在0.81%左右,验证了仿真信号的准确性。

表3 经验 P_{\max} 与数值模拟 P_{\max} 对比

Table 3 Comparison of empirical P_{\max} and numerical simulation P_{\max}

| 经验 P_{\max} /kPa | 数值模拟 P_{\max} /kPa | 误差/% |
|--------------------|----------------------|------|
| 1.21×10^5 | 1.23×10^5 | 0.81 |

3 水下爆炸压力信号时频分析

3.1 CEEMDAN 分解

对水下爆炸压力信号 y_1 进行 CEEMDAN 分解,得到的 IMF 分量如图3所示。

通过图3可知:水下爆炸信号按照时间尺度被分解成8个IMF分量和一个残值;随着分解的进行,IMF分量的频率逐渐下降,相应地波长越来越长;IMF1到IMF3为信号的高频部分,与原信号的形状特征相似。IMF4到IMF6为信号相对优势的频段,信号幅值最长,所包含信号能量最多;IMF7到IMF8为信号低频部分;残值代表着信号的整体趋势。

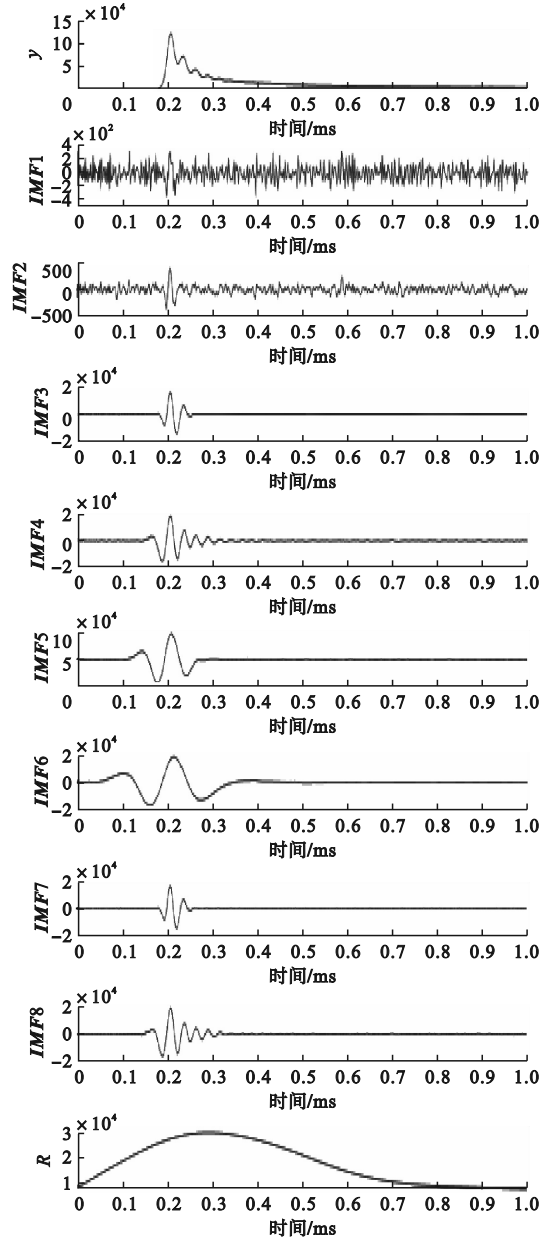


图3 CEEMDAN 分解得到的 IMF 分量

Fig.3 IMF component obtained by CEEMDAN decomposition

对同一水下爆炸信号使用 EMD 方法进行分解,图4为信号 EMD 分解得到的 IMF 分量。由图4可见,IMF分量中存在时间尺度范围很宽,但形态又各不相同的信号,会导致后续的时频分析出现缺陷。

图5是 CEEMDAN 分解重构信号以及重构信号与原始信号的误差分布。从图5(a)可以看出,重构信号保留着原始信号的形状特征,与原始信号保持高度的一致性。从图5(b)可以看出,原始信号与重构信号的误差量级在 10^{-11} 左右,说明采用 CEEMDAN 分解方法研究水下爆炸信号较为合适。

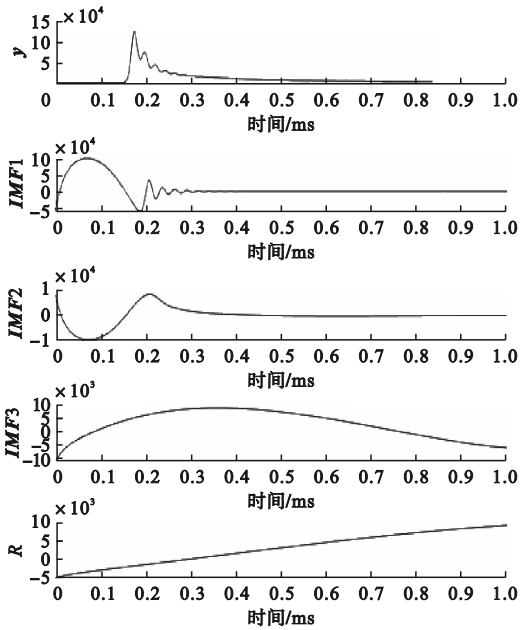
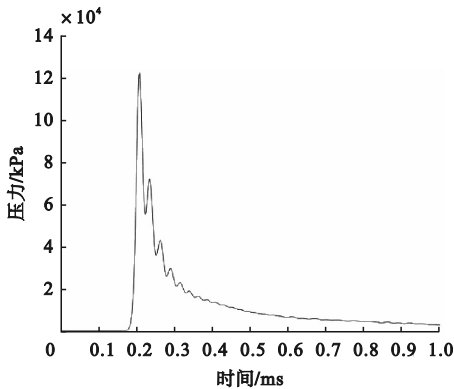
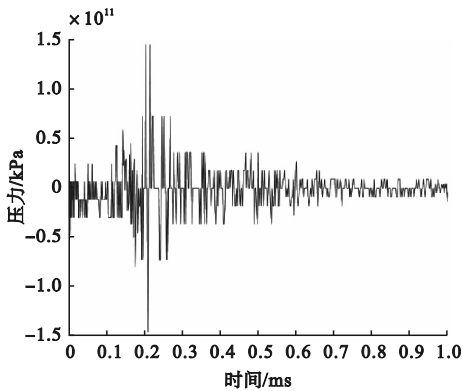


图4 EMD分解得到的IMF

Fig. 4 IMF component obtained by EMD decomposition



(a) 分解重构信号



(b) 误差分布

图5 CEEMDAN分解重构信号与误差分布

Fig. 5 CEEMDAN decomposition and reconstructed signals with error distribution

3.2 水下爆炸信号的 Hilbert 谱

水下爆炸信号通过 Hilbert 谱能够反映信号时间、瞬时频率和幅值之间的关系。

图6为水下爆炸信号经CEEMDAN分解后得到的Hilbert谱,信号频率是经过归一化之后的结果。从图中可以看出:信号的能量主要集中在0~0.6 ms之间,这是因为水下爆炸冲击波压力信号是一个突变快、持续时间短的信号;由于信号的采样频率为565 kHz,因此信号能量主要集中在56.5 kHz以下的低频区,且在0~28.3 kHz之间分布广泛,在28.3~56.5 kHz之间分布比较稀疏;频率大于56.5 kHz的能量比较少。信号能量与频率在0~0.26 ms之间处于上升趋势,之后是下降趋势,与图3信号分量随着时间的持续进行中信号的幅值、频率变化是一致的。

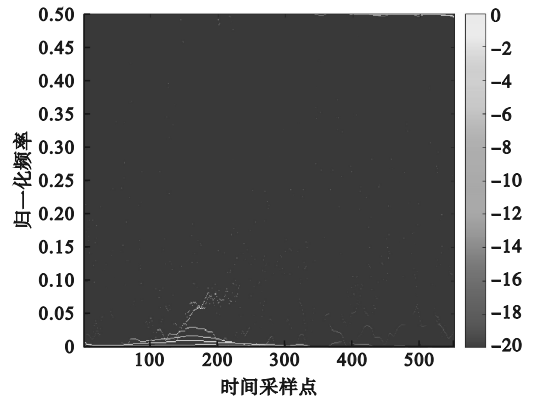


图6 CEEMDAN-Hilbert 谱

Fig. 6 CEEMDAN-Hilbert spectrum

图7为水下爆炸信号经过EMD分解后得到的Hilbert谱,从图中可以看出,在信号的低频部分以及高频部分能够较好地反映出信号的能量特征,在信号28.3~56.5 kHz的中频部分不能完全反映出信号的特征,与EMD分解的模式混叠现象导致信号时频分布混淆有关。

3.3 水下爆炸信号的边际谱

边际谱可以准确反映信号的实际频率,对Hilbert谱时间轴进行积分得到。把描述水下爆炸信号时间-频率-幅值的关系转变为描述频率-幅值的关系,能够进一步验证水下爆炸信号Hilbert谱的正确性。边际谱如图8所示。

由图8可以看出,信号高频部能量较弱,低频部能量较强,且爆炸信号的能量主要集中在56.5 kHz以下。

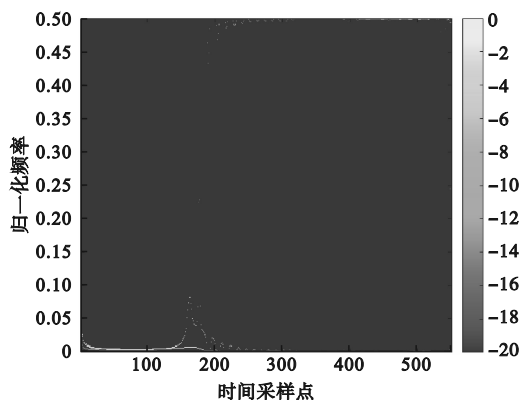


图7 EMD-Hilbert 谱

Fig. 7 EMD-Hilbert spectrum

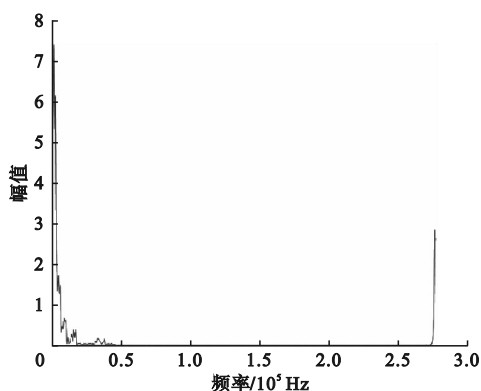


图8 边际谱

Fig. 8 Marginal spectrum

4 结论

本文使用 AUTODYN 软件对水下爆炸过程进行仿真,得到水下爆炸压力信号,利用 CEEMDAN-Hilbert 变换方法对其进行分析,得到以下结论。

1) 水下爆炸压力信号是一个持续时间短、突变快的非平稳信号。TNT 炸药起爆的压力峰值为 1.21×10^5 kPa 左右。

2) CEEMDAN 分解不需要设定任何基函数,通过对信号进行 CEEMDAN 分解,得到 8 个本征模态分量和 1 个残值,发现水下爆炸冲击波压力信号所包含的频率成分较为丰富。通过对信号重构,得到的重构误差量级仅仅为 10^{-11} kPa 左右,能够较好反映信号的原始特征,说明 CEEMDAN 分解有很强的自适应性,非常适合分解水下爆炸冲击波压力信号。

3) 通过分析水下爆炸压力信号的 Hilbert 谱发现,水下爆炸压力信号的能量主要集中在 $0 \sim 28.3$ kHz 之间的低频部分,频率高于 56.5 kHz 的能量分量较少,对比 EMD-Hilbert 时频分析方法,

CEEMDAN-Hilbert 方法在 28.3 ~ 56.5 kHz 频段的能量分布更加明显,具有一定的优越性。

参考文献 (References):

- [1] 马彦斌,吴祈耀. 维格纳分布在脑电信号处理中的应用[J]. 北京理工大学学报,1995,15(2):175-178.
MA Y B, WU Q Y. Application of Wigner distribution in electroencephalography (EEG) signal processing [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1995, 15(2): 175-178. (in Chinese)
- [2] 张淑杰,张维维,奚云琪,等. 基于傅里叶变换的心电信号频谱分析[J]. 信息系统工程,2012(1):133-134.
ZHANG S J, ZHANG W W, XI Y Q, et al. Spectrum analysis of ECG signal based on Fourier transform [J]. CC News, 2012(1):133-134. (in Chinese)
- [3] 向强,秦开宇. 基于线性正则变换与短时傅里叶变换联合的时频分析方法[J]. 电子学报,2011,39(7):1508-1513.
XIANG Q, QIN K Y. A time-frequency analysis method based on linear canonical transform and short-time Fourier transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1508-1513. (in Chinese)
- [4] 徐伟,许传,马艳秋,等. 一种基于分数阶傅里叶变换的主动声自导回波检测方法[J]. 舰船科学技术,2022,44(2):161-165.
XU W, XU C, MA Y Q, et al. An active acoustic homing echo detection method based on the fractional Fourier transform [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(2): 161-165. (in Chinese)
- [5] 文莉,刘正士,葛运建. 小波去噪的几种方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2002,25(2):167-172.
WEN L, LIU Z S, GE Y J. Several methods of wavelet denoising [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2002, 25(2): 167-172. (in Chinese)
- [6] 李志农,朱明,褚福磊,等. 基于经验小波变换的机械故障诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(11):2423-2432.
LI Z N, ZHU M, CHU F L, et al. Mechanical fault diagnosis method based on empirical wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2423-2432. (in Chinese)
- [7] 苏秀红. HHT 在爆炸振动信号处理中的应用[J]. 电子设计工程,2016,24(10):156-158,162.
SU X H. The application of HHT in blasting signal processing [J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(10): 156-158, 162. (in Chinese)
- [8] 关晓磊,颜景龙. 爆破振动信号的 HHT 时频能量谱分析[J]. 爆炸与冲击,2012,32(5):535-541.
GUAN X L, YAN J L. The HHT time-frequency power spectrum analysis of the blasting vibration signal [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(5): 535-541. (in Chinese)
- [9] 杨仁树,高祥涛,车玉龙,等. 基于 HHT 方法的爆炸应变波时频分析[J]. 振动与冲击,2014,33(10):17-21.
YANG R S, GAO X T, CHE Y L, et al. Joint time-frequency analysis of blast strain wave based on Hilbert-Huang transformation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(10): 17-21. (in Chinese)
- [10] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [11] 曹莹,段玉波,刘继承,等. 多尺度形态滤波模式混叠抑制方法[J]. 电机与控制学报,2016,20(9):110-116.
CAO Y, DUAN Y B, LIU J C, et al. Multi-scale morphological filtering method for mode mixing suppression [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(9): 110-116. (in Chinese)

- [12] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition; a noise-assisted data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [13] YEH J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition; a novel noise enhanced data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2010, 2(2): 135-156.
- [14] 费鸿禄, 山杰. CEEMDAN-小波阈值法在爆破振动信号处理中的应用[J]. *爆破*, 2022, 39(3): 41-47, 164.
- FEI H L, SHAN J. Application of CEEMDAN-wavelet threshold method in blasting vibration signal processing[J]. *Blasting*, 2022, 39(3): 41-47, 164. (in Chinese)
- [15] 窦春红, 赵光胜, 寇兴磊. 基于 CEEMDAN 能量熵的齿轮状态识别[J]. *机械传动*, 2018, 42(1): 102-105.
- DOU C H, ZHAO G S, KOU X L. Condition identification of gears based on CEEMDAN energy entropy[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2018, 42(1): 102-105. (in Chinese)
- [16] 顾程, 董强, 黄科, 等. 基于 CEEMDAN 能量熵的故障特征提取方法[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(35): 15624-15630.
- GU C, DONG Q, HUANG K, et al. Fault feature extraction method based on CEEMDAN and energy entropy[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(35): 15624-15630. (in Chinese)
- [17] 蒋玲莉, 谭鸿创, 李学军, 等. 基于 CEEMDAN 排列熵与 SVM 的螺旋锥齿轮故障识别[J]. *振动测试与诊断*, 2021, 41(1): 33-40, 198.
- JIANG L L, TAN H C, LI X J, et al. Fault diagnosis of spiral bevel gear based on CEEMDAN permutation entropy and SVM[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(1): 33-40, 198. (in Chinese)
- [18] 张健, 尤文斌, 丁永红, 等. 基于 CEEMDAN-PCA 的冲击波信号降噪研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2022, 42(4): 24-28.
- ZHANG J, YOU W B, DING Y H, et al. Research on noise reduction of shock wave signal based on CEEMDAN-PCA[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2022, 42(4): 24-28. (in Chinese)
- [19] 杨智中, 林军志, 汪魁, 等. 基于 CEEMDAN-小波包自适应阈值混凝土声发射信号降噪研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(3): 139-149.
- YANG Z Z, LIN J Z, WANG K, et al. De-noising of concrete acoustic emission signals based on CEEMD-wavelet packet adaptive threshold[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(3): 139-149. (in Chinese)
- [20] 张冉, 张鹏, 赵锋. 基于 CEEMDAN-SG 的爆炸冲击波去噪算法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(10): 119-125.
- ZHANG R, ZHANG P, ZHAO F. CEEMDAN-SG based blast shock wave denoising algorithm research[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(10): 119-125. (in Chinese)
- [21] 贾虎, 郑伟花, 罗强. 基于 HHT 的金属导爆索水下爆炸信号时频特性研究[J]. *工程爆破*, 2015, 21(3): 5-8, 17.
- JIA H, ZHENG W H, LUO Q. The characteristics of time frequency signal based on Hilbert-Huang transform in underwater explosion by metal detonating cord[J]. *Engineering Blasting*, 2015, 21(3): 5-8, 17. (in Chinese)
- [22] 李祥龙, 赵泽虎, 王建国, 等. 基于 EMD-HHT 和小波理论的地下浅孔爆破振动规律研究[J]. *有色金属工程*, 2021, 11(12): 100-108.
- LI X L, ZHAO Z H, WANG J G, et al. Research on vibration law of underground shallow hole blasting based on EMD-HHT and wavelet theory[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021, 11(12): 100-108. (in Chinese)
- [23] 宋肖龙, 高文学, 季金铭, 等. 基于 EEMD-HHT 变换的爆破损伤分析方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2887-2896.
- SONG X L, GAO W X, JI J M, et al. Blasting damage analysis method based on EEMD-HHT transform[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2887-2896. (in Chinese)
- [24] 张社荣, 李宏璧, 王高辉, 等. 水下爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸确定方法[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(8): 93-100.
- ZHANG S R, LI H B, WANG G H, et al. A method to determine mesh size in numerical simulation of shock wave of underwater explosion[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(8): 93-100. (in Chinese)
- [25] 孟龙, 黄瑞源, 王金相, 等. 小当量梯恩梯水下爆炸气泡脉动的数值模拟[J]. *兵工学报*, 2020, 41(S1): 64-71.
- MENG L, HUANG R Y, WANG J X, et al. Numerical simulation of bubble pulsation of small-scaled TNT in underwater explosion[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(S1): 64-71. (in Chinese)
- [26] COLE R H. *Underwater explosions*[M]. Princeton: Princeton Univ. Press, 1948.
- [27] ZAMYSHLYAYEV B V. *Dynamic loads in underwater explosion*[M]. Washington Dc: Naval Intelligence Support Center Washington Dc Translation Div, 1973.

(责任编辑:和晓军)

(上接第19页)

- [10] 刘砚菊, 宋鑫, 宋建辉, 等. 基于图像中物体骨架形状特征的目标匹配[J]. *沈阳理工大学学报*, 2019, 38(3): 73-77.
- LIU Y J, SONG X, SONG J H, et al. Target matching based on object skeleton shape features in the image[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2019, 38(3): 73-77. (in Chinese)
- [11] YANG C Z, FANG L C, YU Q, et al. A learning robust and discriminative shape descriptor for plant species identification[J]. *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, 2023, 20(1): 39-51.
- [12] ZHU W T, TIAN Y, YU H P, et al. The verification method of low voltage station topology recognition based on DTW algorithm[C]//2021 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA). Dalian, China: IEEE, 2021: 14-17.
- [13] CAI S X, LU Z X, CHEN B X, et al. Dynamic gesture recognition of A-mode ultrasonic based on the DTW algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(18): 17924-17931.
- [14] 王超, 龙英文, 殷炜宏, 等. 改进 DTW 下界函数的距离度量方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(23): 316-326.
- WANG C, LONG Y W, YIN W H, et al. Research on distance measurement method of improved DTW lower bound function[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(23): 316-326. (in Chinese)
- [15] 胡大盟. 图像轮廓的特征描述及其单目标识别方法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2016.
- [16] 向敏, 王军伟. 一种基于顺序形状上下文的轮廓匹配方法[J]. *舰船电子工程*, 2019, 39(7): 128-132.
- XIANG M, WANG J W. A novel approach for contour matching based on ordered shape contexts[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(7): 128-132. (in Chinese)
- [17] 韩敏, 郑丹晨. 基于模糊形状上下文特征的形状识别算法[J]. *自动化学报*, 2012, 38(1): 68-75.
- HAN M, ZHENG D C. Shape recognition based on fuzzy shape context[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(1): 68-75. (in Chinese)

(责任编辑:和晓军)