

基于 CEEMDAN-IWT 的冲击波压力信号降噪方法

陈家辉, 孔德仁

(南京理工大学机械工程学院 南京, 210094)

摘要 针对实测爆炸冲击波信号中包含大量噪声信号,对试验结果分析及弹药爆炸毁伤威力评估造成一定影响等问题,提出了一种基于自适应噪声完备经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise,简称 CEEMDAN)和改进的小波阈值(improved wavelet threshold,简称 IWT)的冲击波信号联合降噪方法。首先,将待处理信号通过 CEEMDAN 进行模态分解,得到系列本征模态分量(intrinsic mode functions,简称 IMFs);其次,对传统的小波阈值方法进行改进,通过计算各分量每层分解并重构后的信号信噪比(signal noise ratio,简称 SNR),定量确定最佳分解层数以提高降噪精度;然后,利用 IWT 对含噪的 IMFs 进行阈值降噪处理并重构,进而实现信号降噪;最后,对 CEEMDAN-IWT 方法的降噪性能开展相关试验验证。研究结果表明:相比于经验模态分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)、小波阈值、CEEMDAN 等方法,采用 CEEMDAN-IWT 方法降噪后,信号信噪比分别提高了 32.18、6.85 和 22.19 dB,且均方根误差最低;降噪前后冲击波正压作用时间与比冲量的最大相对偏差分别为 1.31% 和 0.86%,峰值上升最大滞后时间为 0.002 ms,各表征参量在降噪前后的偏差值明显低于其他降噪方法。可见,CEEMDAN-IWT 方法在有效去除噪声信号的同时,能够最大程度地保留原始信号特征信息,降噪效果优于其他降噪方法,其计算效率可满足工程测试中对批量数据的处理要求。

关键词 信号处理;冲击波;完全自适应噪声集合经验模态分解;改进的小波阈值

中图分类号 TJ410.6;TH701

引言

冲击波作为弹药爆炸的重要毁伤元,是定量评估弹药爆炸毁伤威力的重要指标^[1-2]。由于在爆炸场强振动冲击、热冲击影响下,实测冲击波压力信号中含有大量噪声,严重影响测试结果及分析,因此需要对实测冲击波信号进行有效的去噪处理。

信号降噪方法主要包括快速傅里叶变换(fast Fourier transform,简称 FFT)、FIR 滤波器、小波变换(wavelet transform,简称 WT)、EMD、集总经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition,简称 EEMD)等^[3-5]。FFT 只能在频域内对信号进行分析,无法准确分辨时域内突变信号与噪声信号特征,采用巴特沃斯和贝塞尔等滤波器进行低通滤波时,通过 FFT 计算截止频率时因无法完全消除信号中的毛刺信号,导致其降噪效果不佳^[6]。小波变换在时域和频域内对信号进行分析,可达到较好的降噪效果^[7],但过度依赖于小波基函数和分解层数的选择。EMD 通过自适应识别信号可有效提取信号特征信息^[8],但分解得到的 IMFs 存在模态混叠,对降噪效果有一定影响^[9]。EEMD 方法可有效解决模

态混叠问题,但该方法前提是要确定信号信噪比,对低频含噪信号降噪效果不佳。文献[10-11]提出的 CEEMDAN 方法通过向待处理信号中添加有限次高斯白噪声来增强模态分解的鲁棒性,降低模态混叠现象,但仍无法彻底消除,直接剔除高频模态分量后对信号进行重构,仍会造成有效信息丢失,影响降噪效果。为了实现更好的信号降噪效果,学者们提出了希尔伯特-黄变换与 Bessel^[12]、鲸鱼优化算法-变分模态分解与小波阈值^[13]、经验小波变换和奇异值分解^[14]、CEEMDAN 与主成分分析^[15]等联合降噪方法。

基于 CEEMDAN 方法可增强模态分解的鲁棒性、降低模态混叠的优点,笔者针对冲击波压力信号提出了一种 CEEMDAN 和改进的小波阈值联合降噪方法。采用该方法分别对模拟和实测的冲击波压力信号进行降噪处理,并与其他方法的降噪效果进行对比,以验证所提出方法的有效性。

1 CEEMDAN-IWT 联合降噪方法

信号降噪流程如图 1 所示。首先,采用 CEEM-

DAN 方法将待处理信号分解,得到一系列 IMF,并计算各 IMF 的相关系数 R 和方差贡献率 Contr_i ;其次,定量分析并确定含噪的 IMF,通过 IWT 对该系列 IMF 进行降噪处理;最后,将所有 IMF 进行重构,得到降噪后信号。

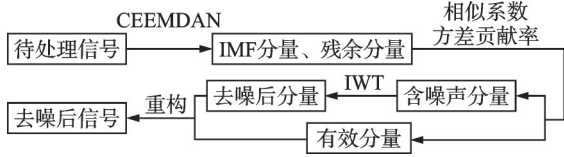


图1 信号降噪流程

Fig.1 The process of signal noise reduction

$$R = \frac{\sum_{k=1}^n \text{IMF}_i(k) s_i(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (\text{IMF}_i(k))^2 \sum_{k=1}^n s_i^2(k)}} \quad (1)$$

$$\text{Contr}_i = \frac{D(\text{IMF}_i)}{\sum_{k=1}^n D(\text{IMF}_i) + D(r(n))} \times 100\% \quad (2)$$

其中: IMF_i 为第 i 个 IMF 分量; $s_i(k)$ 为原始信号与 $\text{IMF}_i(k)$ 的差值; $D(\cdot)$ 为信号方差; $r(n)$ 为残余分量; n 为信号序列长度。

CEEMDAN 具体计算方法可见文献[11]。

改进的小波阈值算法原理是将待处理信号进行多层分解,通过计算每层分解并重构后的信号信噪比来确定最佳分解层数,采用选定的小波基和最佳分解层数对待处理信号进行分解和阈值降噪处理。

最佳分解层数判定准则如下:将待处理信号进行 n 层小波分解 ($i = 1, 2, \dots, n$),当分解层数小于最佳分解层数时,每层分解得到的细节系数均为噪声信号,若重构后信号的信噪比满足 $\text{SNR}_i < \text{SNR}_{i+1}$ 时,继续向下分解;当分解层数大于最佳分解层数时,分解后的细节系数中包含有效信号信息,重构后信号的信噪比明显降低,此时停止分解,并记最佳分解层数为 i 。

确定小波基函数和最佳分解层数之后,为最大程度地保留信号特征,采用硬阈值处理方法进行降噪处理^[16],并将 SNR 和均方根误差 (root mean square error, 简称 RMSE) 作为降噪效果评价指标。一般 SNR 越大, RMSE 值越小,则降噪效果越好,信号失真越少。

2 仿真分析

为验证 CEEMDAN-IWT 方法对冲击波压力信号降噪的可靠性和有效性,构建模拟冲击波压力信

号 $y(t)$, 其具体表达式为

$$y(t) = \frac{A}{\omega \sqrt{2\pi} t} e^{\frac{(-\ln(\frac{t}{a}))^2}{\omega^2}} \quad (3)$$

其中: t 为时间, 设置其范围为 $0 \sim 10$ ms; A 为信号幅值, $A = 1.4$; ω 为峰值衰减速率, $\omega = 0.55$; a 为信号上升时间, $a = 1.2$ 。

模拟冲击波压力曲线如图 2 所示, 采样率设为 1 MHz。通过添加不同信噪比的高斯白噪声, 得到添加噪声的模拟冲击波压力信号曲线如图 3 所示。通过 FFT 对曲线进行频谱分析, 得到添加噪声的模拟冲击波压力信号频谱如图 4 所示。

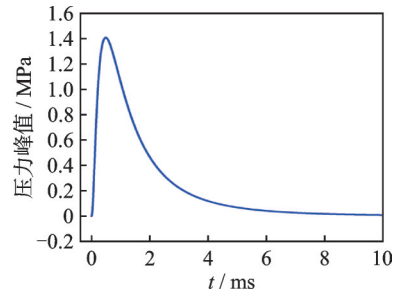


图2 模拟冲击波压力曲线

Fig.2 Simulated shock wave pressure curve

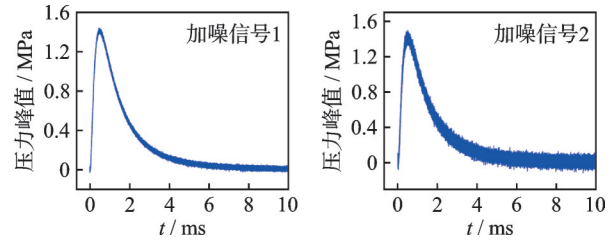


图3 添加噪声的模拟冲击波压力信号曲线

Fig.3 Simulated shock wave pressure signal with noise

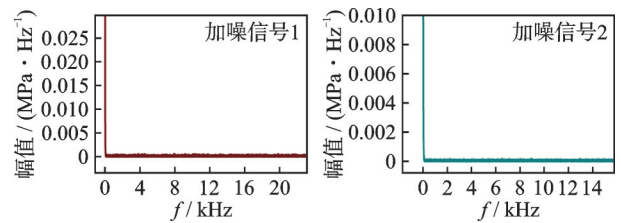


图4 添加噪声的模拟冲击波压力信号频谱

Fig.4 Spectrum diagram of simulated shock wave pressure signal with noise

以加噪信号 1 为例, 通过 CEEMDAN 对信号进行分解, 设置添加的高斯白噪声标准差为 0.2, 添加噪声次数为 200, 迭代次数为 2 000^[17], 含噪的模拟冲击波压力信号分解得到的 IMF 分量如图 5 所示。含噪的模拟冲击波压力信号分解后的 IMF 分量频谱图如图 6 所示。利用式 (1)、(2) 计算各分量的相关系数和方差贡献率, 如表 1 所示。

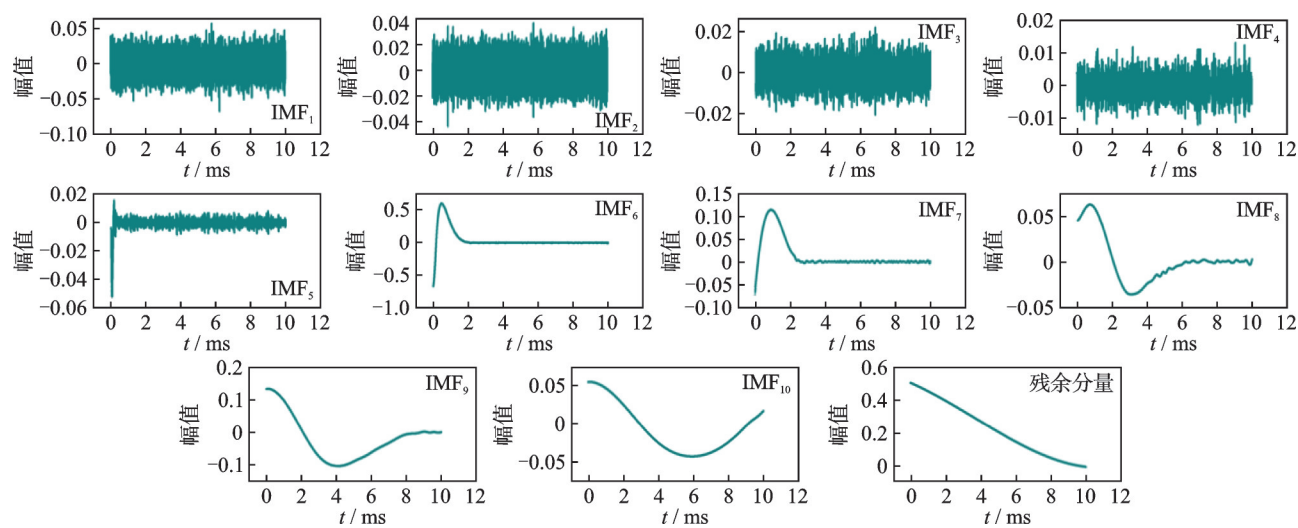


图5 含噪的模拟冲击波压力信号分解得到的IMF分量

Fig.5 IMF component of the simulated noisy shock wave pressure signal decomposition

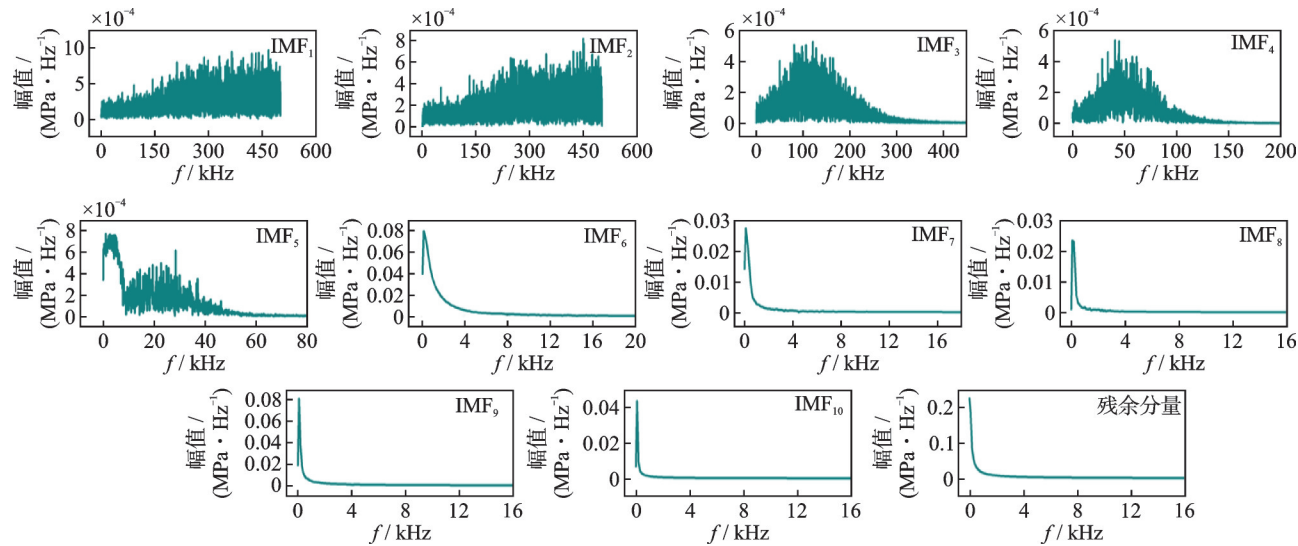


图6 含噪的模拟冲击波压力信号分解后的IMF分量频谱图

Fig.6 The spectrum diagram of IMFs after decomposing the simulated noisy shock wave pressure signal

表 1 IMF 各分量的相关系数和方差贡献率

Tab.1 The correlation coefficient and variance contribution rate of IMFs of the simulated signal

信号	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₅	IMF ₆
相关系数	0.024	0.029	0.003	0.003	0.015	0.615
方差贡献率	3.6×10^{-3}	0.002	5.3×10^{-4}	2.1×10^{-4}	3.9×10^{-4}	0.394
信号	IMF ₇	IMF ₈	IMF ₉	IMF ₁₀	残余分量	
相关系数	0.865	0.621	0.299	0.484	0.390	
方差贡献率	0.02	0.012	0.079	0.018	0.470	

结合文献[11]可知,当信号分解后各分量的相关系数大于0.5且方差贡献率大于0.3时,表示该分量中主要包含有效信息特征,无需阈值降噪处理。相关系数和方差贡献率越小,说明分量中包含的噪声信息越多。结合表1可知,IMF₁~IMF₅分量的相关系数和方差贡献率均较低,说明噪声信号分布在其中;IMF₆的相关系数为0.615,方差贡献率为0.394,

可判断有效信息主要集中在该分量;IMF₇~IMF₁₀的相关系数虽高,但其方差贡献率明显低于IMF₆,说明该系列分量中含有少量噪声信号。因此,除IMF₆外,利用改进的小波阈值方法对其余分量进行降噪处理。其中,小波基函数选取具有较好支撑性、正则性的“db8”函数^[10],通过计算每层分解并重构后的信号信噪比,确定最佳分解层数为2,采用硬阈值

对含噪分量进行降噪处理,并将所有分量进行重构。降噪后的模拟冲击波压力信号曲线以及频谱分别如图 7、8 所示。

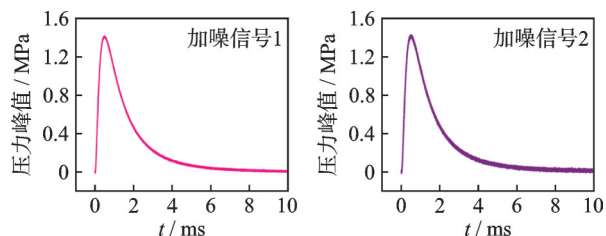


图 7 降噪后的模拟冲击波压力信号曲线

Fig.7 Denoised simulated noisy shock wave pressure signal

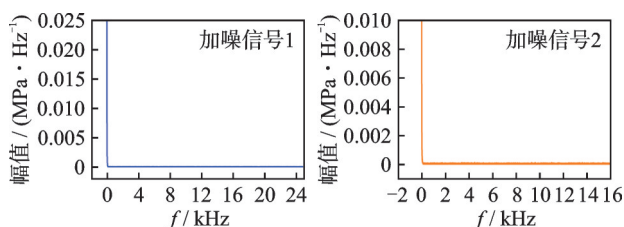


图 8 降噪后的模拟冲击波压力信号频谱图

Fig.8 Spectrum diagram of denoised simulated noisy shock wave pressure signal

可以看出,降噪后的波形其噪声明显减少,曲线更加光滑。降噪前频谱曲线在 0~20 kHz 内均存在较多噪声信号,降噪后频谱曲线在 0~10 kHz 内存在少量噪声信号;在大于 10 kHz 频率范围内,噪声信号基本被滤除,降噪效果明显。

计算降噪前后信号的信噪比和均方根误差,并与小波阈值(硬阈值)、EMD 及 CEEMDAN 降噪后的计算结果进行对比,降噪效果对比如表 2 所示。

表 2 降噪效果对比

Tab.2 Comparison of noise reduction effect						
评价指标	信号类型	降噪前	小波阈值	EMD	CEEMDAN	本研究方法
SNR/ dB	加噪信号 1	32.06	32.64	2.90	33.45	38.84
	加噪信号 2	22.23	26.42	3.20	29.34	36.35
RMSE/ MPa	加噪信号 1	0.01	0.009	0.32	0.008	0.003
	加噪信号 2	0.03	0.008	0.38	0.007	0.005

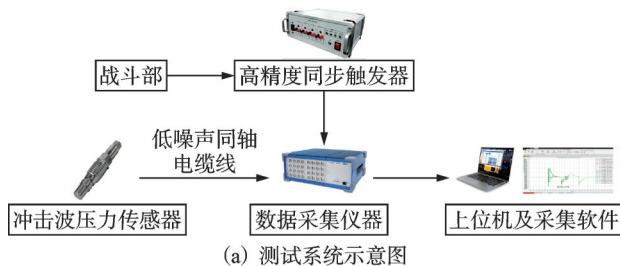
由表 2 可知,采用不同的降噪方法对含噪的模拟冲击波压力信号进行降噪,采用笔者提出的 CEEMDAN-IWT 方法降噪后的信号信噪比最高,均方根误差最小,降噪效果最佳。相比于小波阈值、EMD、CEEMDAN 方法,降噪后信号信噪比最大提高了 14.12、35.94 和 5.39 dB, RMSE 最大降低了 0.003 MPa、0.375 MPa 和 0.002 MPa。可见,采用 CEEMDAN-IWT 对冲击波压力信号进行降噪,降噪

后的信号信噪比明显提高,均方根误差下降明显,降噪效果明显优于其他方法,且经 CEEMDAN-IWT 降噪后的波形与原始波形的相关系数可达到 99.7%。

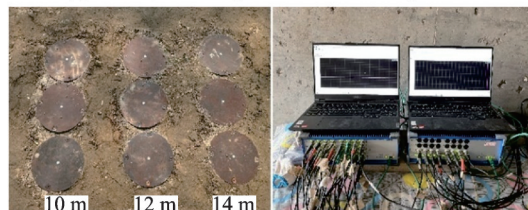
3 冲击波压力信号降噪效果分析

3.1 试验测试

为进一步验证 CEEMDAN-IWT 方法对冲击波压力信号的降噪效果,在开展某型战斗部静爆试验时,对冲击波地表反射压进行测量。在距离爆心 10、12 和 14 m 处各布设 3 个压力测点,同一爆心距离处的测点序号依次记为 1、2 和 3。选用 PCB 公司 113B26 型号 ICP 型压电式压力传感器,其谐振频率大于 500 kHz,上升时间小于 1 μ s。试验时将传感器安装在固定底座上,保证传感器敏感表面、安装底座的水平面与地面齐平。数据采集仪器选用 ELSYS 公司生产的 TraNET 408S 型号,其内部集成 ICP 信号调理模块。传感器通过低噪声同轴电缆线直接与数据采集仪器连接,无需外接调理器。利用高精度同步触发器提供爆炸零时刻触发信号。试验时信号采样率设为 1 MHz,测试系统及试验现场如图 9 所示。



(a) Test system diagram of shock wave pressure



(b) 试验现场
(b) Test site diagram

图 9 测试系统及试验现场

Fig.9 Test system of shock wave pressure and test site diagram

试验测得的原始冲击波压力曲线如图 10 所示。当压力传感器受到强冲击振动或自然破片、碎石等击中测试组件或线缆接头时,导致测试信号中包含大量噪声信号,如图 10(a)~(c)所示。当受到干扰较小时,测试信号中的噪声和毛刺明显减少,如图 10(d)所示。当原始测试曲线含有较多噪声和毛刺时,极大影响了冲击波超压峰值、比冲量等参量的准确获取。

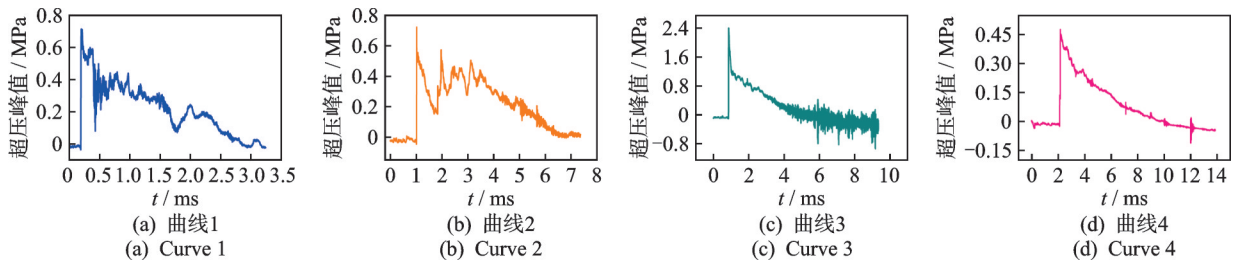


图 10 原始冲击波压力曲线

Fig.10 Original measured shock wave pressure curve

图 11 为原始冲击波压力频谱图。通过对信号进行频谱分析,可进一步计算谐波分量占原信号能量的百分比,通常认定大于等于 95% 的频带为信号

有效频带。由图 11 可知,冲击波压力信号有效频带主要集中在 0~20 kHz 低频范围内,且信号中包含较多高频噪声。

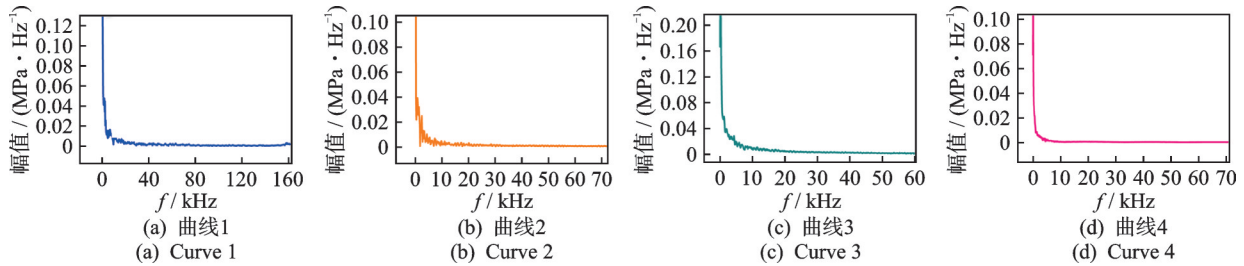


图 11 原始冲击波压力频谱图

Fig.11 Spectrum diagram of original measured shock wave pressure curve

3.2 冲击波压力信号降噪

由于实测的各测点冲击波压力曲线含噪特征大多如图 10(d) 曲线所示,因此以图 10(d) 曲线为例,采用 CEEMDAN-IWT 方法对信号进行降噪处理。通过 CEEMDAN 对信号进行分解,相关参数设置与处理与含噪模拟冲击波压力时一致。实测冲击波压力信号分解得到的 IMF 分量如图 12 所示。图 13 为实测冲击波压力信号分解后的 IMF 分量频谱图。表 3 为冲

击波压力信号各 IMF 分量的相关系数与方差贡献率。

由图 12、13 及表 3 可知:IMF₁~IMF₅ 中包含大量噪声信号,其余分量中噪声含量明显减少;IMF₆ 和 IMF₇ 的相关系数分别为 0.225 和 0.123,明显大于其余分量,且其方差贡献率相比于其余 IMF 分量较高,可判断有效信号主要集中在 IMF₆ 和 IMF₇ 分量中;虽然 IMF₈~IMF₁₀ 相关系数较低,但方差贡献率明显高于其余分量;IMF₁₀ 分量的方差贡献率甚至达到了 0.544,判断 IMF₈~IMF₁₀ 中含有少量噪声信

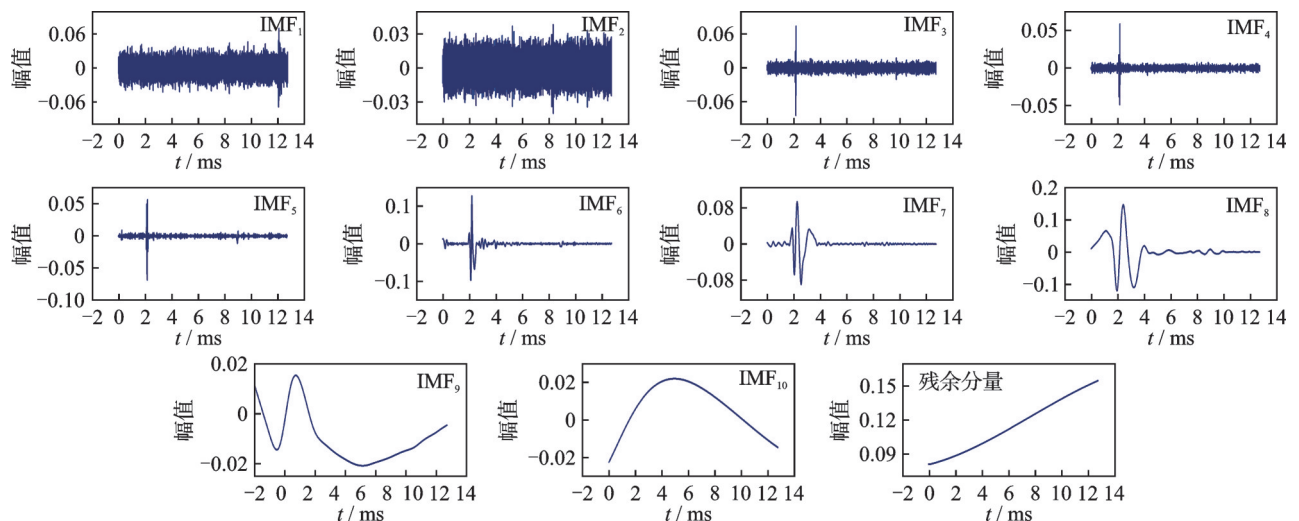


图 12 实测冲击波压力信号分解得到的 IMF 分量

Fig.12 The IMF's component of measured shock wave signal decomposition

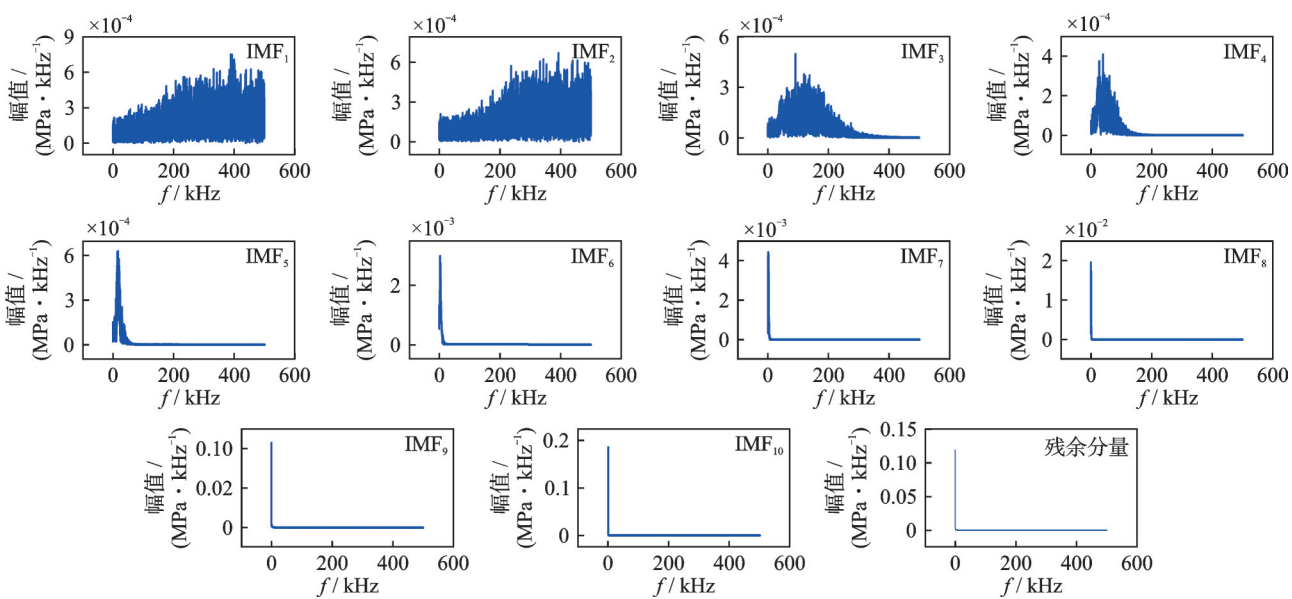


图 13 实测冲击波压力信号分解后的 IMF 分量频谱图

Fig.13 The spectrum diagram of IMFs after decomposing measured shock wave signal

表 3 冲击波压力信号各 IMF 分量的相关系数与方差贡献率

Tab.3 The correlation coefficient and variance contribution rate of IMFs of measured shock wave pressure signal											
信号	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₅	IMF ₆	IMF ₇	IMF ₈	IMF ₉	IMF ₁₀	残余分量
相关系数	0.081	0.071	0.038	0.007	0.009	0.225	0.123	0.034	0.089	0.044	0.095
方差贡献率	0.013	0.011	0.002	7.367×10^{-4}	0.001	0.014	0.018	0.116	0.259	0.544	0.021

号。同样,将相关系数大于 0.5 且方差贡献率大于 0.3 的分量视为有效信号分量,其包含的噪声信号特征极少。对于不满足上述条件的各分量,利用改进的小波阈值方法进行降噪处理。其中,小波基函数选取“db8”,通过计算每层分解并重构后的信号信噪比,确定最佳分解层数为 3,采用硬阈值进行降噪,

并对降噪后的各分量进行重构。

采用 CEEMDAN-IWT 方法对图 10 中信号进行降噪处理,得到降噪后的冲击波曲线及其波形频谱如图 14、15 所示。降噪后的压力波形更加平滑,噪声及毛刺明显减少,降噪前后波形相关系数均可达到 99.6% 以上。计算信号有效频带并与降噪前相

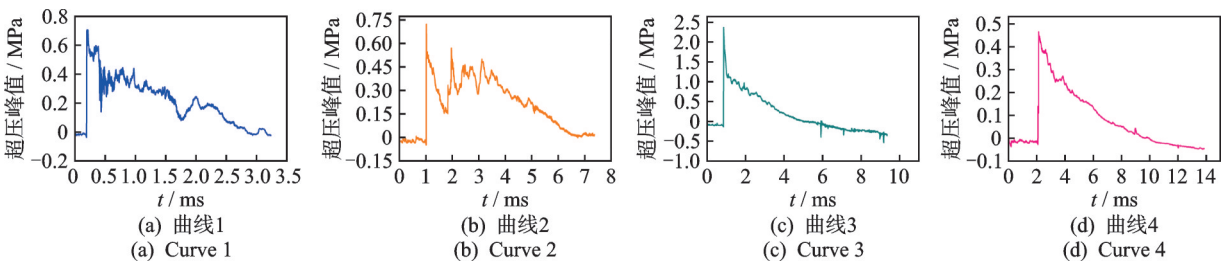


图 14 CEEMDAN-IWT 降噪后冲击波曲线

Fig.14 The denoised shock wave pressure curve by CEEMDAN-IWT

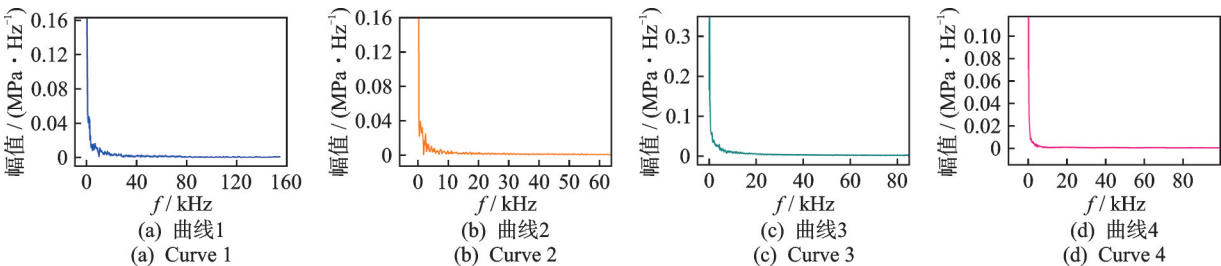


图 15 CEEMDAN-IWT 降噪后波形频谱图

Fig.15 The denoised waveform spectrum by CEEMDAN-IWT

比,可知噪声信号被有效滤除,且保留了 0~20 kHz 内的有效信号。可见,CEEMDAN-IWT 方法在有效去除高频噪声的同时,还可保留信号的基本特征,降噪效果良好。

为定量评价 CEEMDAN-IWT 方法对实测冲击波压力信号的降噪效果,计算了降噪后信号的信噪比和均方根误差,并与小波阈值(硬阈值)、EMD 及 CEEMDAN 这 3 种方法的降噪效果进行对比,如表 4 所示。可见,利用笔者提出的方法降噪后,相比于 EMD、小波阈值及 CEEMDAN 方法,信噪比最大可提高 32.18、6.85 和 22.19 dB,均方根误差最大降低 0.333 MPa、0.012 MPa 和 0.035 MPa,降噪效果明显优于其他方法。

表 4 降噪效果对比					
Tab.4 Evaluation of the noise reduction effect					
评价指标	信号类型	小波阈值	EMD	CEEMDAN	本研究方法
SNR/ dB	曲线 1	27.62	4.21	18.21	29.79
	曲线 2	28.74	3.97	15.32	31.29
	曲线 3	26.57	4.36	19.24	33.42
	曲线 4	29.53	3.89	13.88	36.07
RMSE/ MPa	曲线 1	0.014	0.34	0.034	0.008
	曲线 2	0.019	0.34	0.042	0.007
	曲线 3	0.015	0.28	0.029	0.007
	曲线 4	0.010	0.22	0.031	0.003

以图 10(d)为例,采用不同方法对原始实测冲击波压力曲线进行降噪,降噪后的冲击波压力曲线如图 16 所示。可以看出,通过 EMD 方法降噪后的压力曲线在压力峰值上升前时刻,曲线有明显的下降特征,与原始曲线发生明显相位偏移,这是由于经

验模态分解信号时,模态分量存在混叠所造成的。经小波阈值与 CEEMDAN 方法降噪前后,冲击波压力曲线变化趋势基本保持一致,而经小波阈值降噪后的曲线明显发生偏离,且在峰值上升时刻曲线变化缓慢。采用 CEEMDAN 方法降噪后的曲线虽上升阶段及整体变化特征更接近原始信号,但仍包含一定的噪声信号,未达到理想的降噪效果。

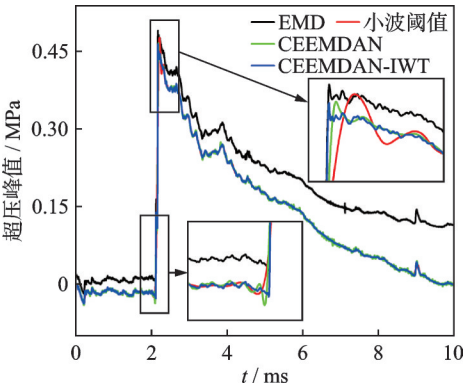


图 16 降噪后的冲击波压力波形
Fig.16 The denoised shock wave pressure waveform

为进一步验证原始实测冲击波压力曲线经 CEEMDAN-IWT 方法降噪后,能否准确表征弹药爆炸毁伤威力,采用上述降噪方法对原始曲线进行了降噪处理,并读取了降噪前后冲击波压力的各表征参数特征值。降噪前后冲击波超压峰值、比冲量结果对比如表 5 所示。降噪前后冲击波正压作用时间、峰值上升时间结果对比如表 6 所示。

由表 5、6 可知:①原始冲击波压力信号经小波阈值、EMD、CEEMDAN 及 CEEMDAN-IWT 等方法降噪处理后,超压峰值最大分别降低了 8.82%、9.8%、8.29% 和 7.35%,降噪后峰值结果基本相等,

表 5 降噪前后冲击波超压峰值、比冲量结果对比										
Tab.5 Comparison of shock wave overpressure peak and specific impulse results before and after noise reduction										
测点 位置 序号	降噪前		小波阈值		EMD		CEEMDAN		本研究方法	
	超压峰值/ MPa	比冲量/ (Pa·s)	超压峰值/ MPa	比冲量/ (Pa·s)	超压峰值/ MPa	比冲量/ (Pa·s)	超压峰 值/MPa	比冲量/ (Pa·s)	超压峰值/ MPa	比冲量/ (Pa·s)
10 m-1	0.502	1 130.6	0.496	1 118.4	0.491	—	0.476	1 110.8	0.492	1 127.8
10 m-2	0.514	1 121.4	0.502	1 107.4	0.499	—	0.497	1 106.4	0.5	1 117.6
10 m-3	0.518	1 126.8	0.504	1 112.6	0.486	—	0.501	1 109.8	0.499	1 120.5
12 m-1	0.336	850.6	0.312	834.5	0.327	837.7	0.318	829.6	0.321	846.5
12 m-2	0.321	840.9	0.314	826.4	0.294	829.2	0.299	819.7	0.308	835.3
12 m-3	0.329	841.5	0.316	821.6	0.31	—	0.311	824.6	0.321	836.9
14 m-1	0.217	624.3	0.204	604.5	0.209	—	0.199	601.2	0.211	619.4
14 m-2	0.204	629.7	0.186	609.4	0.184	610.8	0.191	606.4	0.189	624.3
14 m-3	0.225	634.1	0.206	612.6	0.204	—	0.212	613.5	0.211	631.2

表 6 降噪前后冲击波正压作用时间、峰值上升时间结果对比

Tab.6 Comparison of shock wave positive pressure action time and peak rise time before and after noise reduction ms										
测点 位置 序号	降噪前		小波阈值		EMD		CEEMDAN		本研究方法	
	正压作用	峰值上升	正压作用	峰值上升	正压作用	峰值上升	正压作用	峰值上升	正压作用	峰值上升
	时间	时间	时间	时间	时间	时间	时间	时间	时间	时间
10 m-1	8.375	0.056	7.350	0.159	—	0.148	8.035	0.543	8.265	0.058
10 m-2	8.364	0.054	7.341	0.169	—	0.159	8.069	0.539	8.261	0.055
10 m-3	8.371	0.055	7.354	0.165	—	0.139	8.132	0.549	8.342	0.056
12 m-1	10.265	0.054	9.156	0.159	9.164	0.134	9.997	0.536	10.216	0.056
12 m-2	10.231	0.056	9.064	0.160	9.183	0.139	9.879	0.551	10.213	0.057
12 m-3	10.198	0.051	9.158	0.172	—	0.129	9.994	0.541	10.109	0.053
14 m-1	12.297	0.059	11.195	0.158	—	0.146	12.023	0.548	12.284	0.060
14 m-2	12.329	0.060	11.113	0.157	10.987	0.164	11.489	0.552	12.321	0.062
14 m-3	12.318	0.057	11.204	0.152	—	0.123	12.117	0.546	12.297	0.059

无明显差异;②由于 EMD 降噪后压力曲线与原始信号明显发生偏离,绝大部分测点的压力曲线经过 EMD 处理后,无法获取正压作用时间与比冲量值,因此不对 EMD 降噪后的正压作用时间和比冲量作进一步分析;③相比于原始信号,经小波阈值、CEEMDAN 及所提出方法降噪后的冲击波比冲量与正压作用时间分别最大降低了 3.398%、3.00%、0.86% 和 12.24%、10.88%、1.31%;④相比于其他降噪方法,采用 CEEMDAN-IWT 方法降噪后的冲击波超压峰值、比冲量与正压作用时间等参量与原始信号特征值的偏离程度最小;⑤经小波阈值、EMD、CEEMDAN 方法降噪后的冲击波超压峰值上升时间明显滞后于原始信号,与降噪前相比,最大延迟分别可达 0.121、0.105 和 0.495 ms,而采用 CEEMDAN-IWT 方法降噪后的冲击波压力峰值上升时间与原始信号最大仅差 0.002 ms。由此证明,笔者提出的降噪方法可有效去除高频噪声,降噪效果良好,信号失真程度小且能最大程度地保留原始信号的特征信息。

由于开展冲击波压力测试试验成本高、工程量大,试验次数有限,故试验时通常布设较多测点以便获取更多数据。为了验证所提出方法的计算效率能否适用于批量数据处理,为此与小波阈值、EMD 和 CEEMDAN 等方法的计算时长进行对比。各处理方法的计算时长如表 7 所示。可以看出,所提出方法的计算时长明显增加,这是由于在待处理信号基础上多次添加高斯白噪声进行迭代计算和分解,对每个模态分量迭代计算其最佳分解层数,并进行小波阈值降噪处理所造成的,但是其计算时长均可保持在 5 s 以内,计算效率满足工程中对数据处理的要求。

表 7 各处理方法的计算时长

Tab.7 Comparison of the computing time of each processing method s				
测点序号	小波阈值	EMD	CEEMDAN	本研究方法
1	0.127	0.398	3.531	4.712
2	0.126	0.42	3.513	4.624
3	0.128	0.426	3.426	4.326
4	0.131	0.413	3.641	4.685
5	0.137	0.430	3.218	4.854
6	0.129	0.389	3.654	4.843
7	0.139	0.400	3.642	4.762
8	0.134	0.396	3.459	4.953
9	0.132	0.394	3.552	4.876

4 结 论

- 1) 在小波阈值过程中通过计算每层分解并重构信号的信噪比,定量确定最佳分解层数,去除了人为设置分解层数带来的主观影响,更有利于信号达到最佳的降噪效果。
- 2) 采用 CEEMDAN-IWT 方法对模拟和实测的冲击波压力信号进行降噪,降噪后信号信噪比明显升高,均方根误差下降明显。相比于 EMD、小波阈值和 CEEMDAN 方法的降噪效果,降噪后信号的信噪比最高,均方根误差最低,信号失真程度最小,降噪效果最优。
- 3) 与小波阈值、EMD 和 CEEMDAN 等方法的降噪效果相比,笔者所提出方法能更好地保留原始冲击波信号的表征参量特征,降噪前后冲击波正压作用时间与比冲量的最大相对偏差分别为 1.31% 和 0.86%,峰值上升最大滞后时间为 0.002 ms,各表

征参量在降噪前后的偏差值明显低于其他降噪方法,且计算效率满足工程测试中对批量数据处理的要求。

参 考 文 献

- [1] LI Liping, KONG Deren, SU Jianjun, et al. Damage effects analysis for explosion shock wave based on energy spectrum [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015(21): 71-75, 81.
- [2] HONG X W, LI W B. Energy spectrum of explosion shock wave signals of multi-layer composite charge [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(11): 2243-2251.
- [3] ZHAI M Y. Seismic data de-noising based on the Fourier transformation [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 109: 62-70.
- [4] 赵玲, 孟阳, 蒋振霖, 等. 结合小波变换与注意力机制的轴承故障诊断 [J]. 振动、测试与诊断, 2025, 45(3): 430-437.
ZHAO Ling, MENG Yang, JIANG Zhenlin, et al. Bearing fault diagnosis combining wavelet transform and attention mechanism [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(3): 430-437. (in Chinese)
- [5] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [6] 张衍芳. 冲击波信号处理方法的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [7] XIE Y G, LIAO X L, CUI H B, et al. Wavelet analysis on shock wave response of a real ship subjected to non-contact underwater explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(1): 99-106.
- [8] MA H W, ZHANG D W, CAO X G, et al. Vibration signal de-noising method based on empirical mode decomposition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(22): 38-40.
- [9] 曹莹, 段玉波, 刘继承, 等. 多尺度形态滤波模态混叠抑制方法 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20(9): 110-116.
CAO Ying, DUAN Yubo, LIU Jicheng, et al. Multi-scale morphological filtering method for mode mixing suppression [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(9): 110-116. (in Chinese)
- [10] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2011: 4144-4147.
- [11] REN H J, WEI C, TAN Z Q, et al. Denoising of rolling vibration signals based on CEEMDAN-IAWT method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(13): 199-207, 268.
- [12] 刘宇, 李新娥, 崔春生, 等. 去除爆炸冲击波信号高频噪声的联合处理方法 [J]. 探测与控制学报, 2023, 45(2): 61-66.
LIU Yu, LI Xine, CUI Chunsheng, et al. A joint processing method of removing high frequency noise from shock wave signal [J]. Journal of Detection and Control, 2023, 45(2): 61-66. (in Chinese)
- [13] ZHANG W P, FU M, ZHANG H Y, et al. Application of improved WOA-VMD algorithm in underwater acoustic signal denoising [J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(1): 138-146.
- [14] 王彤洲, 崔春生, 刘双峰, 等. 基于经验小波变换和奇异值分解的冲击波降噪方法 [J]. 探测与控制学报, 2023, 45(2): 67-72.
WANG Tongzhou, CUI Chunsheng, LIU Shuangfeng et al. Shock wave noise reduction method based on empirical wavelet transform and singular value decomposition [J]. Journal of Detection and Control, 2023, 45(2): 67-72. (in Chinese)
- [15] 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 Jian, YOU Wenbin, DING Yonghong, 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)
- [16] YANG Z Z, LIN J Z, WANG K, et al. Denoising of concrete acoustic emission signals based on CEEMD-wavelet packet adaptive threshold [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(3): 139-149.
- [17] ZHOU Z, ZHANG J, CHENG R, et al. Improving purity of blasting vibration signals using advanced empirical mode decomposition and wavelet packet technique [J]. Applied Acoustics, 2022, 201: 109097.



第一作者简介:陈家辉,男,1997年9月生,博士生。主要研究方向为动态参量测试。

E-mail: jhchen1997@163.com

通信作者简介:孔德仁,男,1964年10月生,博士、教授。主要研究方向为动态参量测试,现代传感器技术及系统等。

E-mail: derenkong@hotmail.com