DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518369

基于 HHT 的爆炸振动信号特征提取方法

张 龙 石永相 宋诗谦 焦雪杰 张 耿
(西北核技术研究所 西安 710024)

摘 要: 为研究爆炸振动信号的时频特性和能量分布规律,构建了基于 HHT 的爆炸振动信号特征提取方法,采用该方法对某次爆炸实验的振动速度信号进行了分析。结果表明:采用小波阈值法对 EEMD 分解后的高频 IMF 分量进行去噪处理,能有效去除信号中的高频噪声,提高了 Hilbert 谱分析的准确性。通过对各测点信号 Hilbert 时频谱、边际谱及瞬时能量谱的对比分析,获得了振动信号时间-频率-能量的瞬时关系及其随爆心距的变化规律。在距离爆心 80 m 范围内,振动信号能量主要分布在 0~250 ms 时间段和 0~150 Hz 频率段内。随着爆心距的增加,各测点处信号的起振时间、速度峰值时间及能量集中时段逐步滞后,振动幅值、瞬时能量及信号中的高频分量不断衰减。

关键词: 爆炸振动信号;HHT;小波阈值去噪;时频特性;能量分布
中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Feature extraction method of explosion vibration signal based on HHT

Zhang Long Shi Yongxiang Song Shiqian Jiao Xuejie Zhang Geng
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In order to research the time-frequency characteristics and energy distribution of explosion vibration signals, a HHT based feature extraction method of explosion vibration signal was constructed in this paper. And we used the method to analyze the vibration velocity signals of a certain explosion experiment. The results showed that denoising the high-frequency IMF components after EMD decomposition using wavelet threshold method could effectively remove high-frequency noise from the signal and improve the accuracy of Hilbert spectrum analysis. Through comparative analysis of the Hilbert time-frequency spectrum, marginal spectrum and instantaneous energy spectrum of the signals at each measuring point, the instantaneous relationships among time-frequency-energy and variation pattern with explosion center distance were obtained. Within a range of 80 meters from the explosion center, the vibration signal energy is mainly distributed in the 0~250 ms time range and 0~150 Hz frequency range. With the increase of distance from explosion center, the starting time, peak speed time and energy concentration period of the signals at each measuring point was gradually delayed. In addition, the amplitude of vibration, instantaneous energy and high-frequency components in the signals were gradually decayed.

Keywords: explosion vibration signal; HHT; wavelet threshold denoising; time-frequency characteristics; energy distribution

0 引 言

在爆炸实验中,爆炸能量除了对周围岩体做功外,还会以波的形式向周围传播。因此,对爆炸振动信号进行特征提取和分析,是研究岩体结构稳定性和工程安全监测的重要手段[1-2]。

为了从非平稳信号中提取相关信息,傅里叶变换、小波变换等方法得以广泛应用。然而,傅里叶变换是一种针对于平稳信号的全局变换,用于非平稳信号分析时无法准确反映信号频率的瞬时变化[3]。小波变换虽然在时频分析中具有良好的局部化特征,但分析结果受小波基函数、分解层数、阈值函数等参数的影响较大,算法自适应性较差[4]。相比之下,希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)方法是一种自适应的多分辨率分析方法,能够准确反映出非平稳信号的时间、频率、能量的瞬时特性[5-6]。该方法主要由经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和 Hilbert 谱分析两部分构成。其基本思想是采用 EMD 方法把原始信号分解成一系列本征模态函数

收稿日期:2025-03-17

(intrinsic mode function,IMF),然后对每一个 IMF 分量进行 Hilbert 变换,通过其模和幅角的时间导数获得瞬时振幅和瞬时频率,构建 Hilbert 谱,从而获得原始信号在不同尺度下的时间、频率和能量的瞬时特性[7]。

然而,当信号中存在间断或干扰时,EMD 分解常常表现出模态混叠现象,影响了后续信号分析的准确性。为此,Wu 等[8] 提出了集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition,EEMD),该方法通过在原始信号中加入白噪声的方式,有效抑制了分解过程中信号内局部极值在短时间内的频繁跳动,从而解决了间断或干扰导致的模态混叠问题。近年来,基于 EEMD 的 HHT 方法在振动信号特征提取中获得了良好的实际应用效果。尹紫红等[9]采用 EEMD-HHT 方法对冲击荷载下高铁路基振动加速度的时频特性进行了研究,获得了荷载突变时的瞬时加速度幅值及其衰减规律,并通过 Hilbert 边际谱对路基各结构层对不同频率振动信号的吸收效果进行了分析。储亚坤等[10]开展了基于不同减振衬底的水下爆炸试验,并运用 EEMD-HHT 方法对爆炸振动信号的时频特性进行了分析,得到了不同减振材料下振动信号的幅值、边际谱和能量分布,探讨了不同减振材料对振动信号时频特性和能量分布的影响。

为进一步提高信号特征提取的准确性,本文在 EEMD-HHT 方法的基础上引入了小波阈值去噪法,采用该方法对某次爆炸实验中振动速度信号的时频特性和能量分布规律进行了分析。首先,采用 EEMD 方法对信号进行分解,获得了一系列 IMF 分量及趋势项;其次,采用小波阈值法对分解出的高频 IMF 分量进行去噪处理,并对去除高频噪声和低频趋势项的 IMF 分量进行重构;最后,基于重构信号进行了 Hilbert 谱分析,对振动信号的时频特性和能量分布规律进行了研究。结果表明:采用小波阈值法对 EEMD 分解后的高频 IMF 分量进行去噪处理,能有效去除实测信号中叠加的高频噪声,提高了 Hilbert 谱分析的准确性。通过对各测点信号 Hilbert 时频谱、边际谱及瞬时能量谱的对比分析,获得了振动信号时间-频率-能量的瞬时关系及其随爆心距的变化规律。在距离爆心 80 m 范围内,振动信号能量主要分布在 0～250 ms 时间段和 0～150 Hz 频率段内。随着爆心距的增加,各测点处信号的起振时间、速度峰值时间及能量集中时段逐步滞后,振动幅值、瞬时能量及信号中的高频分量不断衰减。本文方法能够较为准确的对爆炸振动信号进行特征提取和分析,是研究爆炸振动效应的有效手段。

1　方　　法

1.1　EEMD 方法

EEMD 方法利用白噪声均匀分布的频谱特性,在原始信号中加入白噪声,使得不同时间尺度的信号成分自动映射到合适的参考尺度上。且均值为零的高斯白噪声经多次平均后可以相互抵消,因此通过总体平均法获得的 IMF 分量消除了白噪声的影响,从而有效解决了 EMD 方法的模态混叠问题。EEMD 方法的计算过程如下[11]:

1)在原始信号 $x(t)$ 中加入随机白噪声 $\delta(t)$,得到待处理信号 $X(t)$:

$$X(t)=x(t)+\delta(t) \tag{1}$$

2)对 $X(t)$ 进行 EMD 分解,获得 m 阶 IMF 分量 $c_i(t)$ 及趋势项 $r_m(t)$:

$$X(t)=\sum_{i=1}^{m}c_i(t)+r_m(t) \tag{2}$$

3)重复上述过程 n 次,获得第 i 次添加白噪声的第 j 阶 IMF 分量 $c_{ij}(t)$ 及趋势项 $r_i(t)$,对 n 个相同阶次的 IMF 分量及趋势项进行总体平均处理:

$$c_j(t)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}c_{ij}(t) \tag{3}$$

$$r(t)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}r_i(t) \tag{4}$$

4)EEMD 分解的最终结果为:

$$X(t)=\sum_{j=1}^{m}c_j(t)+r(t) \tag{5}$$

1.2　小波阈值去噪

小波阈值去噪方法具有多分辨率分析的特点,能够较好的分析信号的局部化特征,对于瞬态非平稳信号具有较好的去噪效果[12]。

在小波阈值去噪方法中,阈值估计方法和阈值函数的选取会对去噪效果产生较大影响。目前,常用阈值估计方法主要有:固定阈值(sqtwolog)、基于 Stein 无偏似然估计原理的自适应阈值(rigrsure)、启发式阈值(heursure)等[13]。其中,sqtwolog 方法获得的阈值通常较大,对小波系数进行处理时存在“过扼杀”现象;rigrsure 方法基于重建均方误差最小的估计原则,在实际应用中表现出对小波系数的“过保留”倾向[14]。Heursure 阈值估计方法有效结合了 sqtwolog 和 rigrsure 方法的优势,是小波阈值估计的优选方法。本文中选择 heursure 方法进行阈值估计,其定义如式(6)所示。

$$\lambda=\begin{cases}\sigma\sqrt{2\ln N}, & \dfrac{S-N}{N}\geqslant\dfrac{(\log_2 N)^{15}}{\sqrt{N}}\\ \min(\sigma\sqrt{2\ln N},\sigma\sqrt{Q_n}), & \text{其他}\end{cases} \tag{6}$$

其中,σ 为噪声标准差,N 为信号长度,Q_n 为小波分解系数的平方,S 为小波系数平方和,λ 为 heursure 方法确定的阈值。

对于阈值函数的选取,传统的硬阈值函数在阈值处表现出不连续性,使得去噪后的信号易出现附加震荡,形成“伪吉布斯”现象;软阈值函数对大于阈值的小波系数进行恒定压缩,使得原始信号与处理后信号的小波系数存在恒定偏差,影响了重构信号的准确性[15]。此外,软、硬阈值函

数都对小于阈值的小波系数做归零处理,使得混叠在噪声中的有用信号被完全消除,导致重构信号失真。

为克服上述软、硬阈值函数的缺陷,本文中选用加权平均阈值函数对小波系数进行处理,其函数表达形式如式(7)所示。该函数是软、硬阈值函数的线性组合,通过调节参数 μ 即可获得有效的阈值函数,既能够满足重构信号的连续性,又可以保证重构信号与原始信号的一致性。

$$\omega_{new}(j,k)=\begin{cases}(1-\mu)\omega+\mu sign(\omega)(|\omega|-\lambda), & |\omega|\geqslant\lambda\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

其中,ω 为含噪信号分解后的小波系数;λ 为选择的阈值;$\omega_{new}(j,k)$ 为经阈值函数处理后的小波系数;μ 为加权系数;$sign(\cdot)$ 为符号函数。

1.3　Hilbert 谱分析

Hilbert 谱将信号的振幅表示为瞬时频率和时间的函数,描述了其在整个频域上随时间和频率的变化规律,是一种表现时间、频率和能量联合分布的谱图[16-17]。对于原始序列 $x(t)$,其 Hilbert 变换 $y(t)$ 定义为:

$$y(t)=\frac{1}{n}P\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{x(\tau)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau \tag{8}$$

其中,P 为 Cauchy 主值。

Hilbert 变换强调 $x(t)$ 的局部性,在 $1/t$ 的基础上,构造解析信号 $z(t)$ 为:

$$z(t)=x(t)+iy(t)=a(t)\mathrm{e}^{i\theta(t)} \tag{9}$$

其中,$a(t)$ 为瞬时振幅,$\theta(t)$ 为瞬时相位,对其求导得瞬时频率 $\omega(t)$:

$$\omega(t)=\frac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

通过 EEMD 分解得到的 IMF 分量为窄带信号,符合利用 Hilbert 变换计算瞬时频率的要求。因此,原始信号 $x(t)$ 可以用其 IMF 分量的瞬时频率 $\omega_j(t)$ 和瞬时振幅 $a_j(t)$ 近似地表示成:

$$H(\omega,t)=RE\left[\sum_{j=1}^{n}a_j(t)\mathrm{e}^{i\int\omega_j(t)\mathrm{d}t}\right] \tag{11}$$

式(11)即为 Hilbert 谱的表达形式,其中 RE 为取实部运算。

1.4　有效性验证

为验证上述方法在信号特征提取中的有效性,构建了如式(12)所示的调制信号对算法进行仿真分析。

$$x=2\sin(2\pi\cdot120\cdot t)+[1+\sin(2\pi\cdot5\cdot t)]\cdot\sin[2\pi\cdot50\cdot t+0.5\cos(2\pi\cdot5\cdot t)] \tag{12}$$

仿真信号包含一个幅值为 2 的 120 Hz 正弦信号和一个 50 Hz 的调制信号。其时域波形如图 1 所示。

采用上述方法对仿真信号进行 EEMD 分解及 Hilbert 谱分析,得信号 Hilbert 时频谱如图 2 所示。由图 2 可知,信号能量主要集中在 50 Hz 和 120 Hz 频段,真实准确的反应了仿真信号的频率特性。

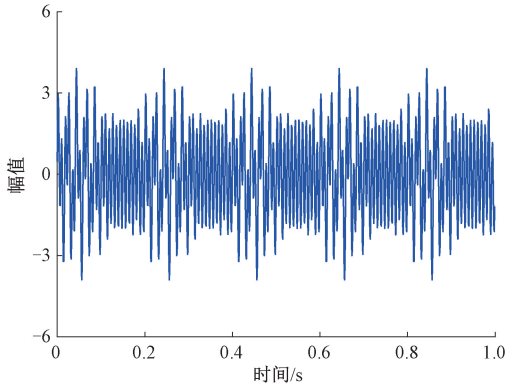


图 1　仿真信号时域波形

Fig. 1　The time domain waveform of simulated signal

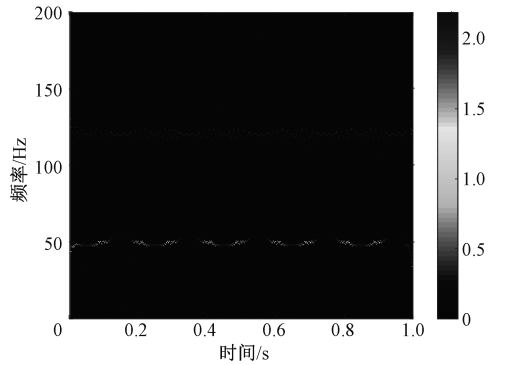


图 2　仿真信号 Hilbert 时频谱

Fig. 2　The Hilbert time-frequency spectrum of simulated signal

2　实测数据分析

在某次爆炸实验中,在距离爆心 20、40、60 m 和 80 m 处各设置一处振动速度测点,各测点自基岩起构筑 30 cm×30 cm×20 cm 混凝土平台,平台上装设一组磁电式速度传感器,传感器通过底部的安装螺钉固定在混凝土平台上,确保传感器与大地基岩具备良好的耦合性。传感器频响范围为 5～200 Hz,速度范围为 0.1～30 cm/s,测试系统采样频率设置为 10 kHz。根据历次实验数据的分析结果,传感器速度范围、频响范围及测试系统采样频率均能够完整捕捉振动信号的有效频率成分。

2.1　EEMD 分解

对各测点处的振动速度信号进行 EEMD 分解,设定白噪声幅值系数为 0.2,总体平均次数为 100 次。图 3 为 20 m 测点处速度信号的 EEMD 分解结果。由图 3 可知,信号被分解为 11 个 IMF 分量和一个趋势项。对各 IMF 分量进行分析,IMF1 和 IMF2 分量频率较高且幅值较小,分布于整个时间序列中,考虑为信号采集过程中引入的高频噪声,需对其进行去噪处理。

2.2　小波阈值去噪

采用 1.2 节构建的小波阈值法对 IMF1、IMF2 分量进

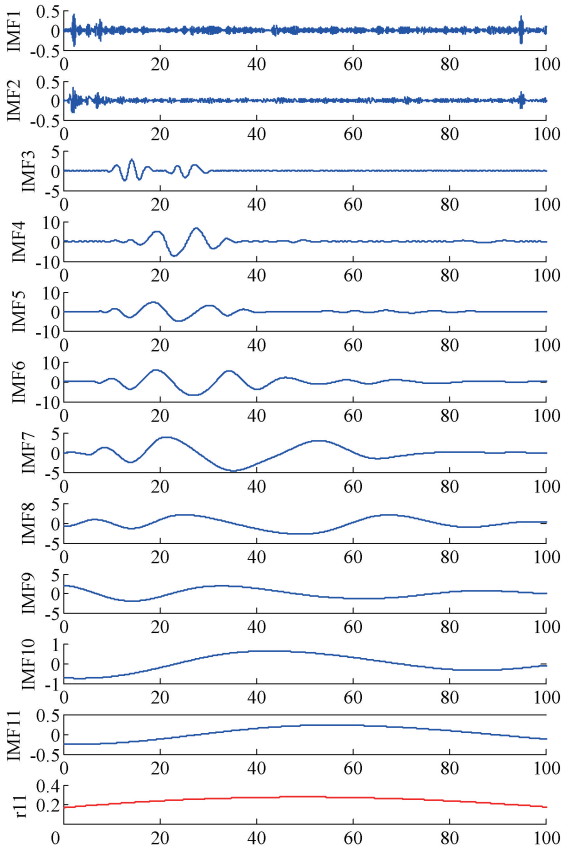


图 3　20 m 测点速度信号 EEMD 分解结果

Fig. 3　The EEMD decomposition results of velocity signal at 20 m measuring point

行去噪处理，其参数选取及计算过程如下：

采用 db5 小波基对上述两个 IMF 分量进行 6 层分解，采用 heursure 阈值估计法获取两分量的去噪阈值，利用加权平均阈值函数对小波系数进行处理。对去噪后的 IMF 分量和除趋势项外的其他分量进行重构，得重构信号与原始信号的波形对比如图 4 所示。由图 4 可知，重构信号较为完整的保留了原始信号的波动趋势，同时消除了噪声的干扰。

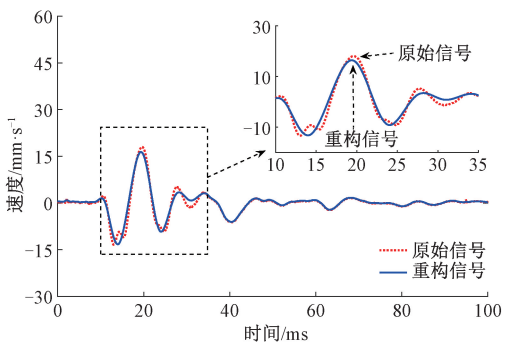


图 4　重构信号与原始信号波形对比

Fig. 4　Comparison of waveform between reconstructed signal and original signal

为验证上述去噪方法的有效性，引入信噪比（*SNR*）和均方根误差（*RMSE*）作为去噪效果的评价指标，其计算公式分别如式（13）和（14）所示。信噪比反映了重构信号与噪声信号平均功率的比值，均方根误差反映了原始信号与重构信号两者之间的离散程度，通常认为信噪比越高，均方根误差越小，则去噪效果越好[18]。

$$SNR = 10\lg \frac{\sum_{t=1}^{N} x_t^2}{\sum_{t=1}^{N} (x_t - X_t)^2} \tag{13}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{t=1}^{N} (x_t - X_t)^2 / N} \tag{14}$$

其中，x_t 为原始信号；X_t 为重构信号；N 为信号长度。

分别采用小波阈值法、EMD-小波阈值法和本文构建的 EEMD-小波阈值法对 4 个测点的振动速度信号进行去噪处理，统计各种方法的信噪比和均方根误差，结果如表 1 所示。分析表中数据可得总体规律，经 EEMD-小波阈值法处理后的信号信噪比更高且均方根误差更小，表现出最优的去噪效果。

表 1　不同方法的去噪效果对比

Table 1　Comparison of denoising effects of different methods

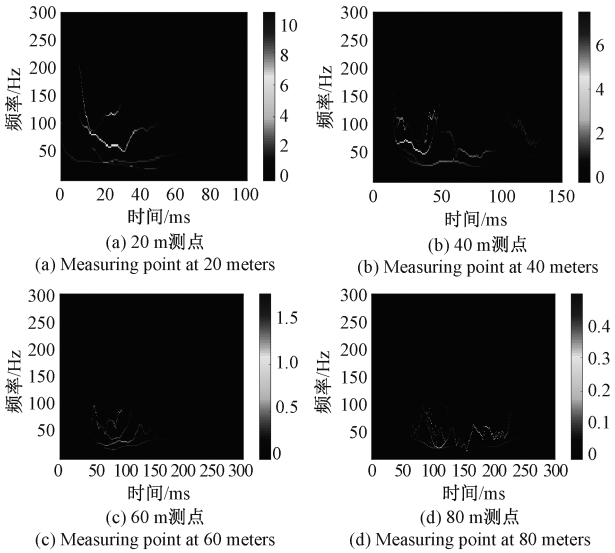
爆心距	评价指标	小波阈值法	EMD-小波阈值法	EEMD-小波阈值法
20 m	*SNR*	9.845	9.127	10.524
	RMSE	0.662	0.573	0.439
40 m	*SNR*	12.135	11.861	12.743
	RMSE	0.544	0.476	0.412
60 m	*SNR*	10.117	10.851	11.429
	RMSE	0.728	0.667	0.684
80 m	*SNR*	8.845	9.017	8.962
	RMSE	0.833	0.809	0.767

2.3　Hilbert 谱分析

对 4 个测点的重构信号进行 Hilbert 谱分析，其时频谱如图 5 所示。由图 5 可知，信号瞬时能量主要分布在 0～250 ms 时间段和 0～150 Hz 频率段内。随着爆心距的增大，信号总体强度及其中的高频分量逐渐衰减，能量集中时段不断滞后。通过时频谱可直观体现振动信号的瞬态特征，反映信号能量随频率、时间的分布情况。

Hilbert 边际谱是时频谱对时间的积分，表现为各频段信号振幅在时间上的累加，因此边际谱能够反映振动信号频率和能量的瞬时分布情况。图 6 为 4 个测点处重构信号的 Hilbert 边际谱，从图 6 中可以看出，信号能量主要集中在 0～150 Hz 频率段内，随着爆心距的增大，信号中的高频分量显著衰减，这与 Hilbert 时频谱表现的信号频率分布特征相一致。

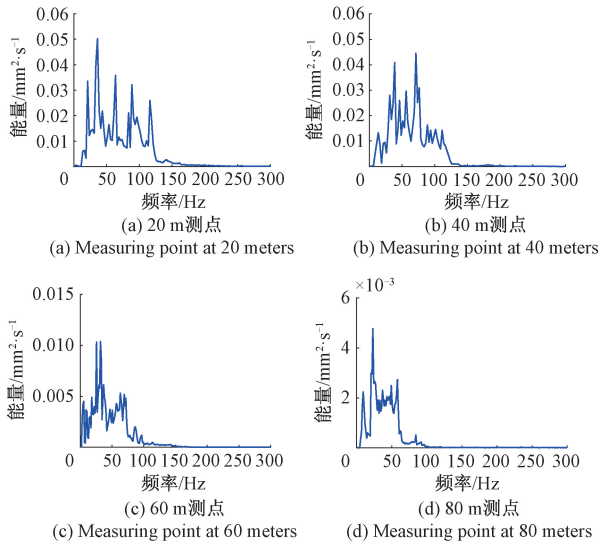
瞬时能量谱反映了信号能量随时间的分布规律。图 7



(a) 20 m测点
(a) Measuring point at 20 meters
(b) 40 m测点
(b) Measuring point at 40 meters
(c) 60 m测点
(c) Measuring point at 60 meters
(d) 80 m测点
(d) Measuring point at 80 meters

图 5　Hilbert 时频谱

Fig. 5　Hilbert time-frequency spectrum



(a) 20 m测点
(a) Measuring point at 20 meters
(b) 40 m测点
(b) Measuring point at 40 meters
(c) 60 m测点
(c) Measuring point at 60 meters
(d) 80 m测点
(d) Measuring point at 80 meters

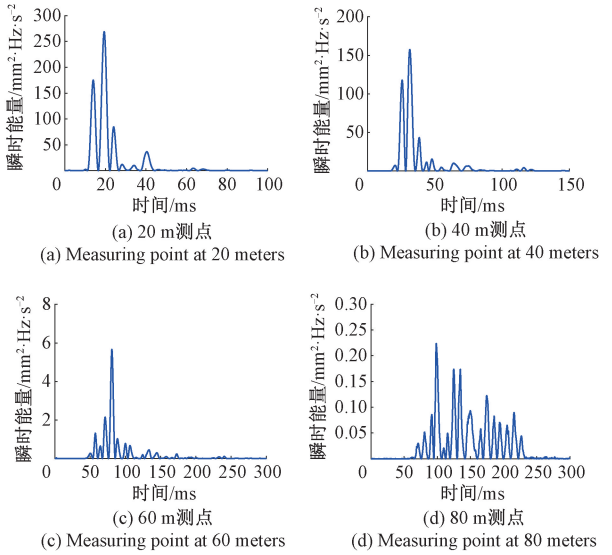
图 6　Hilbert 边际谱

Fig. 6　Hilbert marginal spectrum

为重构信号的 Hilbert 瞬时能量谱,由图 7 可知,信号能量主要分布在 0～250 ms 时间段内,随着爆心距的增大,瞬时能量幅值迅速衰减,能量集中时段不断滞后,这与 Hilbert 时频谱表现的信号能量分布特征相一致。

3　讨　　论

为更加具体的表现振动信号时域波形、频谱特性和能量分布随爆心距的变化规律,基于 4 个测点的重构信号,对其起振时间、速度峰值、峰值时间、能量集中的频段及时段等特征参数进行了对比分析,结果如表 2 所示。从时域角度看,信号能量主要分布在 0～250 ms 时间段内,随着爆心距的增加,各测点信号起振时间、峰值时间及能量集中时段



(a) 20 m测点
(a) Measuring point at 20 meters
(b) 40 m测点
(b) Measuring point at 40 meters
(c) 60 m测点
(c) Measuring point at 60 meters
(d) 80 m测点
(d) Measuring point at 80 meters

图 7　瞬时能量谱

Fig. 7　Instantaneous energy spectrum

逐步滞后,信号幅值及瞬时能量衰减迅速。从频域角度看,信号能量主要集中在 0～150 Hz 频率段内,随着爆心距的增加,信号中的高频分量逐渐衰减。

表 2　各测点时频特性及能量分布参数对比

Table 2　Comparison of time-frequency characteristics and energy distribution parameters at each measuring point

爆心距/m	起振时间/ms	速度峰值/(mm·s^{-1})	峰值时间/ms	能量集中时段/ms	能量集中频段/Hz
20	8.75	18.03	19.59	10～40	0～150
40	16.32	12.55	31.38	20～50	0～125
60	44.59	2.37	80.89	50～150	0～100
80	57.86	0.43	124.79	60～250	0～60

4　结　　论

构建了基于 HHT 的爆炸振动信号特征提取方法,采用该方法对某次实验振动速度信号的时频特性和能量分布规律进行了分析,结论如下:

在距离爆心 80 m 范围内,振动信号能量主要分布在 0～250 ms 时间段和 0～150 Hz 频率段内。通过 Hilbert 时频谱、边际谱和瞬时能量谱的对比分析,得到了振动信号时间、频率和能量的瞬时分布特性。

研究了振动信号时频特性和能量分布随爆心距的变化规律。随着爆心距的增加,各测点处信号的起振时间、速度峰值时间及能量集中时段逐步滞后,振动幅值、瞬时能量及信号中的高频分量不断衰减。

采用小波阈值法对 EEMD 分解后的高频 IMF 分量进行去噪处理,能够有效去除信号中叠加的高频噪声,基于重

构信号的 Hilbert 谱分析具有更高的准确性。

参考文献

[1] 童晓玲，曾斐宇，江轲，等. 基于 CEEMD-MPE-IMPROVED WTD 的爆炸振动信号噪声抑制方法[J]. 振动与冲击，2024，43(1)：184-192.
TONG X L，ZENG F Y，JIANG K，et al. Noise suppression method of explosion vibration signals based on CEEMD-MPE-IMPROVED WTD [J]. Journal of Vibration and Shock，2024，43(1)：184-192.

[2] MAN K，SONG Z，GAO S S. Blasting vibration signal transform in geotechnical engineering applied HHT and S Transform for time-frequency analysis[J]. Shock and vibration，2022，DOI:10.1155/2022/5255138.

[3] AVARGEL Y，COHEN I. Modeling and identification of nonlinear systems in the short-time Fourier transform domain[J]. IEEE Transactions on Signal Processing，2010，58(1)：291-304.

[4] 于洋，李赟，杨平，等. 改进小波阈值函数和 ACEWT 方法的滚动轴承故障声发射信号特征提取[J]. 振动与冲击，2023，42(17)：194-202.
YU Y，LI Y，YANG P，et al. Improved wavelet threshold function and ACEWT method for feature extraction of acoustic emission signals from rolling bearing faults[J]. Journal of Vibration and Shock，2023，42(17)：194-202.

[5] 封雷，卫炜，刘曦，等. 基于 HHT 的导弹发射冲击时频谱分析[J]. 振动、测试与诊断，2020，40(1)：148-154.
FENG L，WEI W，LIU X，et al. Time frequency spectrum analysis of shock signals generated by missile launching based on the Hilbert-Huang Transform[J]. Journal of Vibration，Measurement & Diagnosis，2020，40(1)：148-154.

[6] 张晓琳，冯晓媛，于航，等. 基于 HHT 的转动惯量测量技术研究[J]. 仪器仪表学报，2022，43(6)：38-45.
ZHANG X L，FENG X Y，YU H，et al. Research on measuring technology of moment of inertia based on HHT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2022，43(6)：38-45.

[7] YU X，DING E J，CHEN C X，et al. A novel characteristic frequency bands extraction method for automatic bearing fault diagnosis based on Hilbert Huang Transform[J]. Sensors，2015，15(11)：27869-27893.

[8] WU Z，HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition：A noised-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis，2009，1(1)：1-41.

[9] 尹紫红，曾毅，魏鸿琳，等. 弹射冲击荷载下高速铁路路基振动加速度时频特性[J]. 西南交通大学学报，2023，58(1)：219-226.
YIN Z H，ZENG Y，WEI H L，et al. Time-frequency characteristics of vibration acceleration of high-speed railway subgrade under ejection impact load [J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2023，58(1)：219-226.

[10] 储亚坤，李萍丰，梁昊，等. 减振材料对圆柱水池爆破振动规律的影响[J]. 高压物理学报，2024，38(6)：191-201.
CHU Y K，LI P F，LIANG H，et al. Influence of damping materials on blasting vibration of cylindrical pool[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2024，38(6)：191-201.

[11] 黄健，宋树祥，杨军，等. 基于 EEMD-小波阈值的分布式测温系统的研究[J]. 电子测量技术，2022，45(11)：104-108.
HUANG J，SONG SH X，YANG J，et al. Research on distributed temperature measurement system based on EEMD-Wavelet threshold[J]. Electronic Measurement Technology，2022，45(11)：104-108.

[12] 周金，高云鹏，吴聪，等. 基于改进小波阈值函数和 CEEMD 电能质量扰动检测[J]. 电子测量与仪器学报，2019，33(1)：141-148.
ZHOU J，GAO Y P，WU C，et al. Detection of power quality disturbances based on improved wavelet threshold function and CEEMD [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation，2019，33(1)：141-148.

[13] HUANG Q，DENG Q，LI Z，et al. Application of a modified wavelet threshold denoising algorithm in system identification of WPTS[J]. Journal of Power Electronics，2024，24(7)：1150-1162.

[14] 王维博，董蕊莹，曾文入，等. 基于改进阈值和阈值函数的电能质量小波去噪方法[J]. 电工技术学报，2019，34(2)：409-418.
WANG W B，DONG R Y，ZENG W R，et al. A wavelet de-noising method for power quality based on an improved threshold and threshold function [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2019，34(2)：409-418.

[15] WANG J，LI Z，WANG D. A method for wavelet threshold denoising of seismic data based on CEEMD[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum，2014，53(2)：164-172.

[16] 赵岩，朱均超，张宝峰，等. 基于 VMD 与 Hilbert 谱的旋转机械碰摩故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断，2018，38(2)：381-386.
ZHAO Y，ZHU J CH，ZHANG B F，et al. Rub-impact fault diagnosis of rotating machinery based on VMD and Hilbert spectrum[J]. Journal of Vibration，Measurement & Diagnosis，2018，38(2)：381-386.

[17] 陈露阳，尹佳雯，孙志强，等. 基于 EEMD-Hilbert 谱的气液两相流钝体绕流流型识别[J]. 仪器仪表学报，2017，38(10)：2536-2546.
CHEN L Y，YIN J W，SUN ZH Q，et al. Flow regime identification of gas-liquid two-phase flow with flow around bluff-body based on EEMD-Hilbert spectrum[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2017，38(10)：2536-2546.

[18] 孙灵芳，王彤彤，徐曼菲，等. 基于改进 CEEMD 的薄层污垢超声检测信号去噪[J]. 仪器仪表学报，2017，38(12)：2879-2887.
SUN L F，WANG T T，XU M F，et al. Thin fouling ultrasonic detection signal denoising based on improved CEEMD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2017，38(12)：2879-2887.

作者简介

张龙(通信作者)，硕士，工程师，主要研究方向为仪器科学与技术。

E-mail：zhanglonglxy@163.com