基于 ITD - K-means - 小波包法的爆破振动信号降噪研究①

申宇宙[1]，张云鹏[2,3]，马海越[2]

(1.华北理工大学 应急管理与安全工程学院，河北 唐山 063210；2.华北理工大学 矿业工程学院，河北 唐山 063210；3.河北省矿业开发与安全技术重点实验室，河北 唐山 063210)

摘　要：针对实测爆破振动信号中噪声干扰的问题，提出了一种爆破振动信号降噪方法。该方法基于固有时间尺度分解(ITD)算法，将信号分解为多个 IMF 分量；引入 K-means 算法进行聚类处理，计算各类别信号的相关系数值，识别含噪信号类别；通过小波包法对含噪信号进行降噪处理并重构，得到纯净信号。采用该方法对仿真信号和实测信号进行降噪验证，结果表明，在仿真信号降噪实验中，相较于传统的小波包法、CEEMDAN 法和 ITD 法，ITD - K-means - 小波包法的信噪比(17.241 dB)最大，均方根误差(9.71×10^{-2})最小；在实测信号降噪实验中，经 ITD - K-means - 小波包法处理后的信号在中低频段(0~60 Hz)保留了更多的优势主频能量，有效抑制了 120 Hz 以上的高频噪声。

关键词：爆破；振动信号；降噪；固有时间尺度分解(ITD)；K-means 算法；小波包法；信噪比；仿真信号

中图分类号：TD235　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.007

文章编号：0253-6099(2026)01-0044-07

Noise Reduction of Blasting Vibration Signal Based on ITD - K-means - Wavelet Packet Method

SHEN Yuzhou[1], ZHANG Yunpeng[2,3], MA Haiyue[2]

(1. *School of Emergency Management and Safety Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063210, *Hebei, China*; 2. *College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063210, *Hebei, China*; 3. *Hebei Provincial Key Laboratory of Mining Development and Safety Technology, Tangshan* 063210, *Hebei, China*)

Abstract: For solving noise interference in the measured blasting vibration signals, a noise reduction technique is proposed. Based on the Intrinsic Time-Scale Decomposition (ITD) algorithm, the signal is firstly decomposed into several Intrinsic Mode Functions (IMFs). And the K-means clustering is then used to calculate the correlation coefficient value for identifying the types of signal with noise. The wavelet packet method is used to denoise and reconstruct the types of signal with noise, so as to obtain desired signal. This technique was used to verify the noise reduction effect for both simulated and measured signals. The results show that in the noise reduction test for simulated signals, the ITD - K-means - wavelet packet method can achieve the highest signal-to-noise ratio (17.241 dB) and the smallest root mean square error (9.71×10^{-2}), compared with the traditional wavelet packet method, the CEEMDAN method and the ITD method. The noise reduction test for measured signals shows that after processing with the ITD - K-means - wavelet packet method, the signal in the low-to-medium frequency band (0 - 60 Hz) can retain more energy of dominant frequency, thus high-frequency noise (>120 Hz) can be effectively suppressed.

Key words: blasting; vibration signal; noise reduction; Intrinsic Time Scale Decomposition (ITD); K-means algorithm; wavelet packet method; signal-to-noise ratio; simulated signal

在露天矿爆破作业中，受开采环境复杂性和监测设备误差等影响，实际采集的爆破振动信号中混杂了大量噪声，噪声与有效信号相互叠加，导致有效信号的特征信息严重被掩盖，干扰后续信号的处理与分析。

① **收稿日期**：2025-08-20
基金项目：河北省教育厅在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZBS2023124)；河北省自然科学基金(E2016209388)
作者简介：申宇宙(2000—)，男，山西长治人，硕士研究生，主要从事爆破领域研究。E-mail:2087699959@qq.com
通信作者：张云鹏(1963—)，男，河北唐山人，教授，博士，博士研究生导师，主要从事爆破领域研究。E-mail:2286744895@qq.com

因此,对爆破振动信号实施有效的降噪处理,对后续时频分析的准确性具有重要意义[1-2]。

传统信号降噪方法主要通过直接剔除高频的本征模态函数(intrinsic modal function,IMF)分量实现,但这可能会导致信号中部分有效成分被剔除,进而引发信号失真的问题。为了有效降噪,许多学者进行了深入研究,取得了较为丰硕的研究成果。例如,采用K-means算法[3]、完整集合经验模态分解算法[4]、CEEMDAN 分解方法[5]等单一方法对信号进行降噪;通过多尺度排列熵识别含有噪声的 IMF 分量[6-7],提出了新的降噪方法。小波包法在信号分析方面表现出较强的降噪性能[8],部分学者提出了组合降噪方法。文献[9]结合经验模态分解和小波包法降噪,有效抑制了微震信号中的噪声成分。文献[10]采用CEEMDAN 分解方法与小波包法,成功对爆破振动信号进行降噪处理,并保留了信号的关键特征信息。文献[11]结合经验模态分解算法(EMD)和小波包法的自适应降噪方法,通过互相关函数来优化降噪参数,弥补了小波基函数不能自适应的缺点。随着机器学习在信号分析领域的广泛应用,为了进一步提高现有研究方法的降噪效果,许多学者提出了采用智能优化算法改进其参数选取随机性较大等问题的思路。文献[12]利用鲸鱼优化算法对变分模态分解法(variational modedecomposition,VMD)进行优化,解决了 VMD 中参数难以选择的问题。文献[13]结合粒子群算法和小波阈值去噪的改进变分模态分解方法,成功从含噪微震信号中提取有效信息并准确识别了岩体破裂信号与爆破振动信号。文献[14]建立基于 VMD 算法的光滑降噪模型方法,成功解决了隧道爆破振动信号中高频噪声较多、信息易被掩盖的问题。

上述方法具有较好的爆破振动信号降噪效果,但并未真正解决信号掺杂噪声的问题。近年来,希尔伯特-黄变换方法在爆破振动信号分析方面得到了广泛应用,降噪效果得到了显著提升,但该方法在信号分析前期采用 EMD 算法分解信号时容易出现端点效应问题,阻碍了该方法后续分析结果的准确性。文献[15]针对处理非稳定、非线性信号的时频分析问题,提出了固有时间尺度分解(intrinsic time scale decomposition,ITD)算法,该算法有效克服了 EMD 算法中存在的端点效应以及傅里叶变换分辨率受限等局限性,同时降低了计算的复杂性,划分的分量波形失真更小,能够更准确反映原始信号的特征,为信号处理提供了一种更为准确和高效的方法。文献[16]通过比较 EMD 与 ITD 算法对振动信号的处理结果,发现 ITD 算法的降噪效果更好且处理时间更短。

本文采用 ITD 算法对信号进行处理,得到 IMF 分量,使用 K-means 算法对其进行聚类分析,利用小波包法对含噪信号进行降噪处理并重构,得到纯净信号。K-means 算法作为一种无监督聚类算法[17],其核心在于对数据进行有效的聚类分析,可用于区分 IMF 分量中的含噪信号和有效信号,为后续的降噪处理提供指导。最后,通过对仿真信号与实测信号进行降噪处理,验证该方法的有效性。

1　ITD - K-means - 小波包法降噪原理

1.1　ITD 算法

ITD 算法基于信号的局部极值特征来构建信号的上下包络线,对其进行平滑处理获得中间包络线,并计算中间包络线与原始信号之间的均方误差。当均方误差足够小时,该中间包络线即被视为原始信号的一个 IMF 分量。通过重复这一迭代过程,可以逐个从原始信号中提取 IMF 分量,直到剩余信号无法再分解为 IMF 分量为止。

假定原始信号 X_t,定义基线提取算子 L,旋转分量提取算子 H,分解过程可表示为:

$$X_t = LX_t + (1 - L)\,X_t = L_t + H_t \tag{1}$$

式中:L_t 为基线分量;H_t 为固有旋转分量。

1)确定原始信号 X_t 序列的极值点 X_k 及其对应的时间 $\tau_k(k = 1,2,3,\ldots,N)$,且 $\tau_0 = 0$,其中 N 为极值点个数。

2)在时间段 $(\tau_k,\tau_{k+1}]$ 上定义分段线性基线提取算子 L 为:

$$LX_t = L_t = L_k + \left(\frac{L_{k+1} - L_k}{X_{k+1} - X_k}\right)(X_t - X_k) \tag{2}$$

$$L_{k+1} = \alpha\left[X_k + \left(\frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k}\right)(X_{k+2} - X_k)\right] + (1 - \alpha)\,X_{k+1} \tag{3}$$

式中 α 为线性缩放参数,$0 < \alpha < 1$,通常取 $\alpha = 0.5$。

3)固有旋转分量 H_t 计算式为:

$$H_t = (1 - L)\,X_t = X_t - L_t \tag{4}$$

4)将基线信号 L_t 作为新输入信号继续分解,直至基线信号为单调信号时,停止分解。

1.2　K-means 算法

K-means 算法是一种通过迭代的“分配-更新”机制实现聚类的分析方法,其核心在于将数据按照特定标准划分为预先设定的 K 个簇,使得各个簇内数据相似度较高,而不同簇间数据相似度较低。该算法具有结构简单、效率高等优点。聚类过程如下。

1）在数据集中随机选取 K 个样本点作为初始簇中心 $E_j(j=1,2,3,\cdots,k)$ 。

2）计算每个数据点 $h_i(t)$ 到各簇中心点的欧氏距离 $d[h_i(t),E_j]$ ，并分配给距离最近的簇中心，欧氏距离计算公式为：

$$d[h_i(t),E_j]=\sqrt{[h_1(t)-E_1]^2+[h_2(t)-E_2]^2+\cdots+[h_i(t)-E_j]^2} \tag{5}$$

3）计算各簇内所有样本点的均值，并将该均值作为新的簇中心。

4）重复步骤 2）和 3），直至达到收敛条件，输出最终聚类结果。

引入平方误差和（sum of squared errors，SSE）作为度量聚类质量的目标函数，SSE 越小表明类别内样本相似度越高，SSE 计算公式为：

$$\mathrm{SSE}=\sum_{j=1}^{k}\sum_{h_i(t)\in E_j}d[h_i(t),E_j] \tag{6}$$

1.3 ITD - K-means - 小波包法联合降噪

首先，运用 ITD 分解算法将信号分解，获得多个 IMF 分量；其次，使用 K-means 算法对 IMF 分量进行聚类，运用相关系数识别出含噪声的信号类别并通过方差贡献率进行校核；最后，利用小波包法对含噪信号进行降噪处理，将降噪后的信号与有效信号重构，得到纯净信号。

2 仿真信号分析

2.1 仿真信号构建

为验证 ITD - K-means - 小波包法用于爆破振动信号降噪的可行性，构造仿真信号 $y(t)$，对其进行降噪分析。仿真信号表达式为：

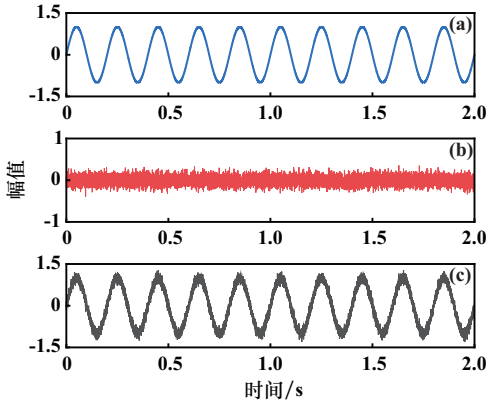
$$\begin{cases}y_1(t)=\sin(10\pi t)\\ y_2(t)=0.1\mathrm{randn}(1,100\,00)\\ y(t)=y_1(t)+y_2(t)\end{cases} \tag{7}$$

式中：t 为时间，采样频率为 5 000 Hz；$y_1(t)$ 为低频正弦信号，频率为 5 Hz，振幅为 1；$y_2(t)$ 为均值为 0、标准差为 0.1 的高斯白噪声。

爆破振动信号如图 1 所示，对原始信号加入噪声之后，信号波形表现出大量不规则毛刺，严重破坏了原始信号的平滑性，说明噪声对信号的干扰较为明显。

2.2 ITD - K-means - 小波包法降噪实现

对仿真信号进行 ITD 分解，得到 7 个 IMF 分量，如图 2 所示。由图 2 可知，IMF1～IMF3 分量存在大量不规则波动，具有明显的噪声特征，IMF5分量具有与



（a）原始信号；（b）高斯白噪声；（c）加噪后仿真信号

图 1 爆破振动信号

Fig. 1 Blasting vibration signal

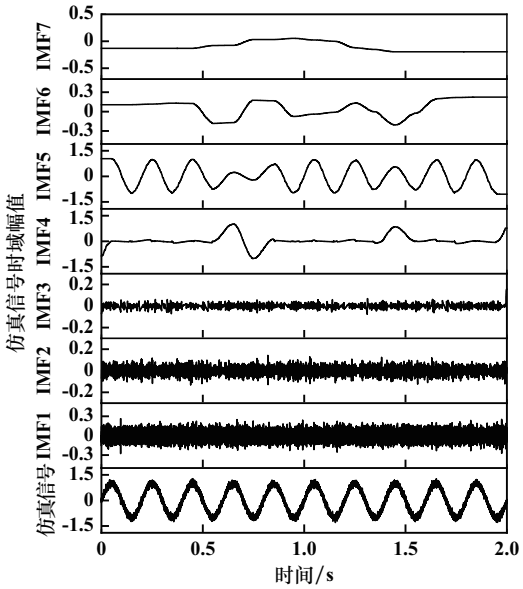


图 2 IMF 分量信号图

Fig. 2 IMF weight signal diagram

原始信号相似的波形，该分量较好地保留了原始信号的特征信息。

为了进一步区分含噪分量，采用 K-means 算法对 IMF1～IMF7 分量进行聚类分析，绘制不同 K 值所对应误差平方和的变化曲线，如图 3 所示。随着 K 值增加，SSE 减小幅度逐渐变缓，曲线到达拐点时，认为此时为最佳的 K 值。K 值为 3 时，SSE 曲线出现拐点，因此，将聚类类别设置为 3 类。

不同类别信号如图 4 所示，类别 1、2 信号波形光滑，类别 3 信号毛刺较多，与仿真信号相似性较差。

计算各类别信号与原始爆破振动信号的相关系数，衡量信号之间的相似程度，设定阈值为 0.3，用于筛选含噪信号与有效信号，即相关系数小于 0.3 表示噪声信号较高，认定为含噪信号；反之，认定为有效信号。

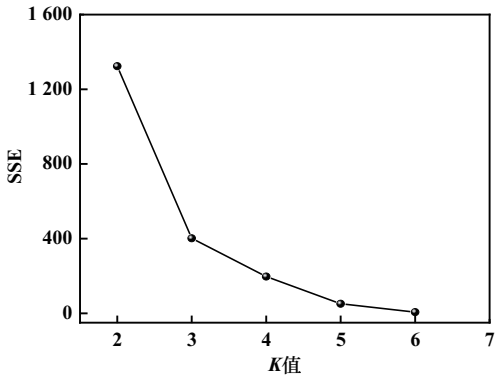


图 3　不同类别的误差平方和

Fig. 3　Sum of squares for errors of different types

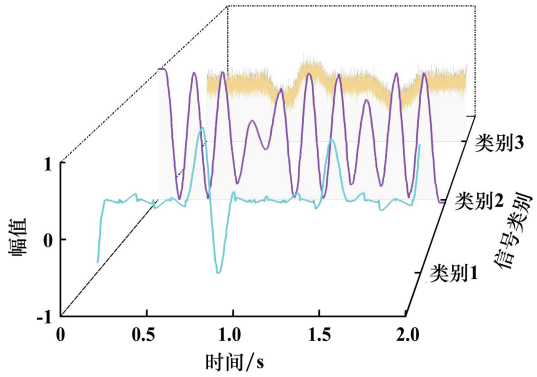


图 4　不同类别信号

Fig. 4　Signal classifications

不同类别信号的相关系数如图 5 所示。由图 5 可知,类别 3 信号的相关系数小于阈值 0.3,因此,可将类别 3 信号初步定义为含噪信号,其他 2 个类别信号定义为有效信号。

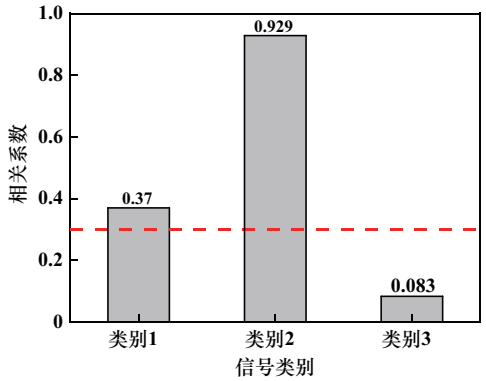


图 5　不同类别信号的相关系数

Fig. 5　Correlation coefficients of different types of signals

引入方差贡献率对 K-means 算法分析结果进行校核,以确保其聚类结果的合理性。方差贡献率通过量化每个特征对总体的贡献程度,从而有效选择特征数据,提高模型准确性。不同类别信号的方差及方差贡献率的计算式如下:

$$D_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_i^{\,2} - \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_i\right)^2 \tag{8}$$

$$\eta = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^{n} D_i} \times 100\% \tag{9}$$

式中:D_i 为方差;C_i 为 n 维向量;η 为方差贡献率。

不同类别信号的方差贡献率如表 1 所示。由表 1 可知,类别 3 信号的方差贡献率仅为 0.052,远小于类别 1、2 信号的方差贡献率。综上,可以认定类别 3 信号为含噪信号类别。

表 1　不同类别信号方差贡献率

Table 1　Variance contribution rates of different types of signals

信号类别	方差贡献率
类别 1	0.186
类别 2	0.761
类别 3	0.052

利用小波包分析算法对类别 3 信号进行降噪处理,选择“db8”小波基函数对其进行 5 层分解[18],采用软阈值函数进行量化。将降噪后的类别 3 信号与类别 1、2 信号重构,得到纯净信号。

2.3　降噪效果评价

通过计算降噪前后信号信噪比与均方根误差,评价其降噪效果。信噪比可以反映信号功率与噪声功率间的相对强度,信噪比越高,表示信号中的噪声干扰越小,信号越纯净。均方根误差是衡量降噪前后信号之间差异的指标,均方根误差越小,表示降噪后信号与原始信号间的偏差越小。信噪比及均方根误差计算公式为:

$$\mathrm{SNR} = 10 \times \lg\left\{\frac{\sum_{i=1}^{n} C_i(t)^2}{\sum_{i=1}^{n} [C_i(t) - C_i^*(t)]^2}\right\} \tag{10}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} [C_i(t) - C_i^*(t)]^2} \tag{11}$$

式中 $C_i^*(t)$ 为降噪后信号。

为了验证 ITD - K-means - 小波包法降噪的有效性,利用小波包法、CEEMDAN 法、ITD 法分别对仿真信号进行降噪处理,降噪后信号与原始信号波形图对比如图 6 所示,不同方法的降噪效果评价指标如表 2 所示。由图 6 可知,经 ITD - K-means - 小波包法降噪后得到的纯净信号,波形相对平滑,与原始信号波形相似度更高。由表 2 可以看出,ITD - K-means - 小波包法的信噪比最大,均方根误差最小。

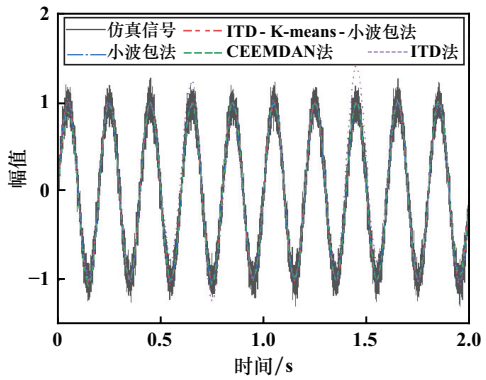


图 6 降噪后信号与仿真信号对比

Fig. 6 Comparison of signal after noise reduction and simulated signal

表 2 降噪效果评价指标

Table 2 Evaluation indicators for noise reduction effect

方法	信噪比/dB	均方根误差/10^{-2}
ITD - K-means - 小波包法	17.241	9.71
小波包法	17.081	9.89
CEEMDAN 法	16.428	10.60
ITD 法	12.479	17.10

3 工程实例应用

以某露天矿山生产爆破为工程背景，爆破参数如表 3 所示。使用 TC-4850N 爆破测振仪进行信号采集，采样频率为 5 000 Hz，采样时间为 2 s，原始爆破振动信号如图 7 所示。

表 3 爆破参数

Table 3 Blasting parameters

总爆破量/万 t	最大段药量/kg	孔数	孔距/m	排距/m
3.2	275	45	4.5	3

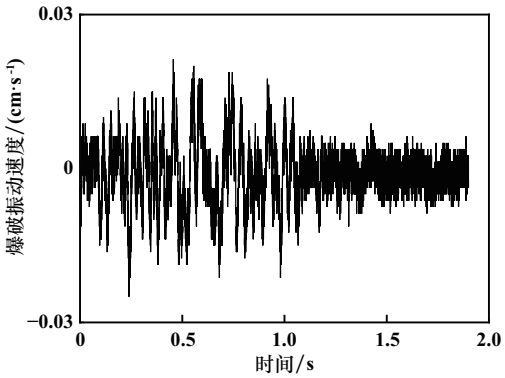


图 7 原始爆破振动信号

Fig. 7 Original blasting vibration signal

针对原始爆破振动信号，利用 ITD 法将其分解为 7 个 IMF 分量及 1 个残余分量，如图 8 所示。由图 8 可以看出，IMF1 和 IMF2 分量波形不稳定，存在异常毛刺，具有明显的噪声干扰特征，IMF3～IMF5 分量与原始爆破振动信号的波形特征具有较高的相似性。采用 K-means 算法对 IMF1～IMF8 分量进行聚类分析，通过手肘法确定最佳聚类数为 5 类。不同类别信号如图 9 所示。由图 9 可知，类别 1、3 和 5 信号波形光滑，有效保留了较多原始信号信息，类别 2 和类别 4 信号具有明显的噪声信息特征。

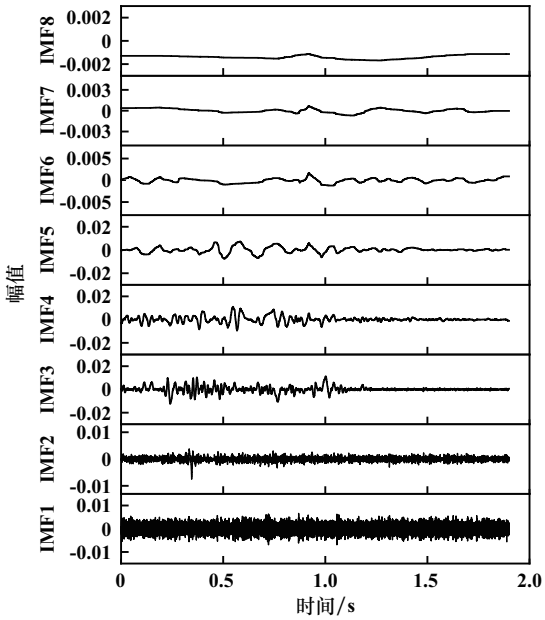


图 8 IMF 分量信号图

Fig. 8 IMF weight signal diagram

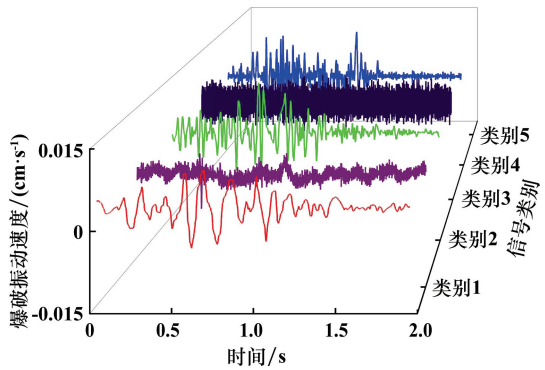


图 9 不同类别信号

Fig. 9 Different types of signals

不同类别信号的相关系数及方差贡献率如表 4 所示，类别 2 和类别 4 信号的相关系数均小于 0.4，方差贡献率均小于 0.2，因此，可将类别 2 与类别 4 信号定义为含噪信号，其他三类信号定义为有效信号。

表 4　不同类别信号的相关系数及方差贡献率

Table 4　Correlation coefficients and variance contribution rates of different types of signals

信号类别	相关系数	方差贡献率
类别 1	0.544	0.234
类别 2	0.378	0.050
类别 3	0.749	0.269
类别 4	0.366	0.180
类别 5	0.561	0.267

采用“db8”小波基函数,对类别 2 和类别 4 信号分别做 5 层分解,引入软阈值函数进行量化处理。将经降噪后的类别 2、4 信号与类别 1、3、5 信号进行重构,得到纯净信号。不同方法降噪后的信号与降噪效果指标分别如图 10 和表 5 所示。由图 10 可知,经 ITD - K-means - 小波包法降噪后的纯净信号平滑性更好,基本消除了信号中存在的噪声分量,降噪效果更为理想。由表 5 可以看出,ITD - K-means - 小波包法的信噪比最大,均方根误差最小,说明信号中有效信号成分的损失最小。

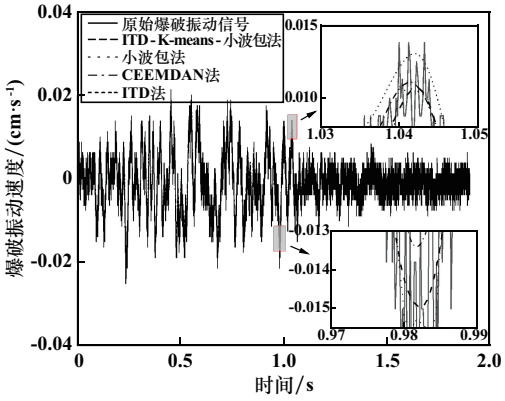


图 10　不同降噪方法处理后的信号对比

Fig. 10　Comparison of signals processed by different noise reduction techniques

表 5　不同降噪方法降噪效果指标对比

Table 5　Comparison of indicators for noise reduction effect by different noise reduction techniques

方法	信噪比/dB	均方根误差/10^{-3}
ITD - K-means - 小波包法	7.585	2.27
小波包法	6.802	2.46
CEEMDAN 法	5.548	2.78
ITD 法	5.156	2.83

不同降噪方法对原始爆破振动信号处理过后的频谱图如图 11 所示,不同降噪方法在中低频段(0~60 Hz)的原始信号无较大变化,原始信号主频峰值处(频率 7 Hz 处),ITD - K-means - 小波包法处理后的信号幅值最大,说明该方法保留了更多的优势主频能量;在 120 Hz 以上高频段,随着频率的增加,信号的能量均逐渐降低,其中经 ITD - K-means - 小波包法处理后的信号能量明显更低,说明与其他方法相比,该方法对高频噪声的抑制效果更为显著。因此,经 ITD - K-means - 小波包法处理后的信号在保留更多优势主频的同时,也有效抑制了高频噪声,且平滑性更好。

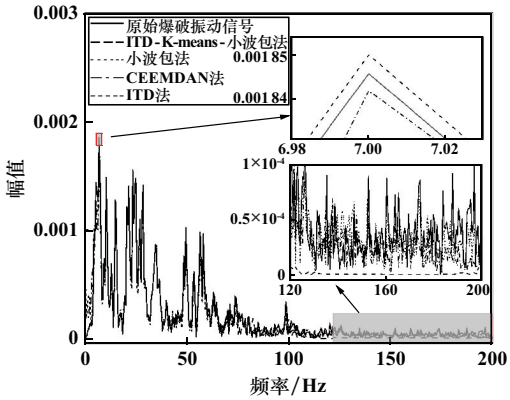


图 11　不同降噪方法信号频谱图

Fig. 11　Spectra of signals processed by different noise reduction techniques

4　结论

1) ITD - K-means - 小波包法融合了 ITD 算法信号分解的优越性、K-means 算法良好的聚类性能及小波包法在降噪处理上的优势,为信号降噪处理提供了一种新方法。

2) 与小波包法、CEEMDAN 法和 ITD 法相比,ITD - K-means - 小波包法在仿真信号和实测信号降噪实验中的信噪比最大、均方根误差最小,降噪效果最好。

3) 通过频谱分析,发现经 ITD - K-means - 小波包处理后的信号在中低频段(0~60 Hz)保留了更多的优势主频能量,对 120 Hz 以上高频噪声的抑制效果更为显著,为后续对爆破振动信号的分析奠定了基础。

参考文献(References):

[1] 李启月,王宏伟,王靖博,等. 基于 EEMD 和小波阈值法的爆破振动信号预处理研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):28-31.
LI Qiyue, WANG Hongwei, WANG Jingbo, et al. Pretreatment of blasting vibration signal based on EEMD and wavelet threshold method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(3):28-31.

[2] 黄港,郑禄林,王英乐,等. 基于 ICEEMDAN-盲源分离联合的微震信号降噪方法研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):24-29.
HUANG Gang, ZHENG Lulin, WANG Yingle, et al. Research on microseismic signal denoising based on ICEEMDAN and blind source separation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):

24-29.

[3] 闫鹏,张云鹏,田婕,等. 基于 CEEMDAN-K-means 算法的爆破振动信号去噪研究[J]. 爆破, 2023,40(3):184-190.
YAN Peng, ZHANG Yunpeng, TIAN Jie, et al. Blasting vibration signal denoising based on CEEMDAN-K-means algorithm[J]. Blasting, 2023,40(3):184-190.

[4] 田婕,张云鹏,闫鹏,等. 基于 CEEMD 的露天深孔爆破振动信号降噪光滑模型[J]. 爆破, 2024,41(2):143-150.
TIAN Jie, ZHANG Yunpeng, YAN Peng, et al. A noise reduction smooth model of vibration signal of open-pit deep-hole blasting based on CEEMD[J]. Blasting, 2024,41(2):143-150.

[5] 康怡泽,姚颖康,董润龙,等. 基于 ICEEMDAN-多尺度排列熵的拆除爆破振动信号降噪研究[J]. 振动与冲击, 2024,43(13):275-287.
KANG Yize, YAO Yingkang, DONG Runlong, et al. De-noising of demolition blasting vibration signals based on ICEEMDAN-multiscale permutation entropy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(13):275-287.

[6] 周红敏,赵事成,王慧珍,等. 基于 LMD-MFE-SVD 的松动爆破降噪分析[J]. 爆破, 2023,40(4):174-182.
ZHOU Hongmin, ZHAO Shicheng, WANG Huizhen, et al. Noise reduction analysis of loosening blasting vibration signal based on LMD-MFE-SVD[J]. Blasting, 2023,40(4):174-182.

[7] 黄智刚,吕虎波,林一庚,等. 基于 CEEMDAN-MPE 算法的隧道爆破地震波信号降噪方法及应用[J]. 爆破, 2020,37(4):138-144.
HUANG Zhigang, LYU Hubo, LIN Yigeng, et al. Denoising method of tunnel blasting seismic wave signal based on CEEMDAN-MPE algorithm and its application[J]. Blasting, 2020,37(4):138-144.

[8] 路亮,龙源,谢全民,等. 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[J]. 振动与冲击, 2014,33(5):165-169.
LU Liang, LONG Yuan, XIE Quanmin, et al. Application of lifting wavelet packet decomposing algorithm based on optimal basis in blasting vibration signal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(5):165-169.

[9] 林鑫,李彪,杨春鸣,等. 基于 WPD-EMD-WPD 的地下工程微震信号降噪方法研究[J]. 工程地质学报, 2024,32(2):581-589.
LIN Xin, LI Biao, YANG Chunming, et al. Research on denoising method for microseismic signals of underground engineering based on WPD-EMD-WPD[J]. Journal of Engineering Geology, 2024,32(2): 581-589.

[10] 王海龙,赵岩,王海军,等. 基于 CEEMDAN-小波包分析的隧道爆破信号去噪方法[J]. 爆炸与冲击, 2021,41(5):125-137.
WANG Hailong, ZHAO Yan, WANG Haijun, et al. De-noising method of tunnel blasting signal based on CEEMDAN decomposition-wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(5):125-137.

[11] 石志远,徐卫明,周波,等. 基于经验模态分解和小波阈值的自适应降噪方法[J]. 海洋测绘, 2021,41(6):54-57.
SHI Zhiyuan, XU Weiming, ZHOU Bo, et al. A self-adapting denoising method based on empirical mode decomposition and wavelet threshold[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2021,41(6): 54-57.

[12] 贾皓琦,黄永辉,张智宇. 基于 WOA-VMD-MPE 算法的矿山爆破振动信号降噪研究及应用[J]. 有色金属工程, 2023,13(12): 151-162.
JIA Haoqi, HUANG Yonghui, ZHANG Zhiyu. Research and application of noise reduction of mine blasting vibration signal based on WOA-VMD-MPE algorithm[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023,13(12):151-162.

[13] 邓红卫,申一鹏. 基于变分模态分解和粒子群算法的微震信号降噪方法[J]. 矿冶工程, 2021,41(1):7-10.
DENG Hongwei, SHEN Yipeng. Noise reduction method for microseismic signal based on variational mode decomposition and particle swarm algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(1):7-10.

[14] 彭亚雄,刘广进,苏莹,等. 基于变分模态分解算法的隧道爆破振动信号光滑降噪模型[J]. 振动与冲击, 2021,40(24):173-179.
PENG Yaxiong, LIU Guangjin, SU Ying, et al. A smooth denoising model of tunnel blasting vibration signal based on VMD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(24):173-179.

[15] MARK G FREI I O. Intrinsic time-scale decomposition: Time-frequency-energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals[J]. Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007,463(2078):321-342.

[16] VOZNESENSKY A, KAPLUN D. Adaptive signal processing algorithms based on EMD and ITD[J]. IEEE Access, 2019,7:171313-171321.

[17] HAN P, WANG W Q, SHI Q Y, et al. A combined online-learning model with K-means clustering and GRU neural networks for trajectory prediction[J]. Ad Hoc Networks, 2021,117:102476.

[18] MING P, LU J, HU S W, et al. Determination of the optimal decomposition layer of wavelet de-noising based on signal band feature[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2019,55(1):39-47.

引用本文:申宇宙,张云鹏,马海越. 基于 ITD - K-means - 小波包法的爆破振动信号降噪研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):44-50.
SHEN Yuzhou, ZHANG Yunpeng, MA Haiyue. Noise reduction of blasting vibration signal based on ITD - K-means - wavelet packet method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):44-50.