

基于 EMD 与峭度滤波的煤岩界面识别*

丛晓妍¹, 王增才¹, 王保平², 彭伟利¹

(1. 山东大学机械工程学院 济南, 250061)
(2. 山东交通学院机械工程学院 济南, 250023)

摘要 煤岩界面识别问题一直是制约放煤自动化发展的一项关键问题, 液压支架尾梁振动信号分析法是近年来发展较快的一种有效方法。该方法中煤和矸石信号在频域内存在差异是非常有用的信息, 但因系统低频干扰较多且两种信号差异微弱, 无法直接提取使用。通过对振动信号使用经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称 EMD) 得到多个固有模态分量(intrinsic mode function, 简称 IMF); 以峭度为准则, 选取煤和矸石差异最大的通道对信号重新合成; 使用 Hilbert 边际谱分析煤、矸石的频域范围, 以矸石频域特征区域求取带通滤波最优截止频率; 对合成后的信号进行滤波。实验结果表明, 该方法能够减少信号低频干扰、突出较高频成分, 使煤与系统干扰的低频信号视为常态被屏蔽, 而混入煤中的矸石较高频信号能够被及时识别, 实现了煤岩界面识别的目的。

关键词 经验模态分解; 煤岩界面识别; 峭度; 滤波
中图分类号 TD671; TH87

1 问题的引出

煤岩界面识别技术是实现煤炭开采自动化的关键技术, 对提高设备可靠性、保障工人安全和提高煤炭质量具有重要意义。近几年, 煤岩自动识别技术取得了许多理论与实践方面的研究进展。主要研究方法包括截割力检测法^[1-2]、记忆切割检测法^[3]、自然 γ 射线探测法^[4-6]、图像检测法^[7] 和液压支架尾梁振动信号检测法^[8]。其中, 采用分析液压支架尾梁振动信号的方法能够直接反映煤矸放落状况, 不受现场可视条件限制、无放射元素辐射危险且煤矸放落程度自由可控, 信号采集简便, 采集设备造价低, 具有非常好的应用前景。

液压支架尾梁振动信号检测法的工作原理是: 在综放采煤过程中, 煤或岩石下落撞击液压支架的尾梁, 引起尾梁振动。由于煤和岩石力学性能的差异, 其撞击尾梁引起的振动信号也存在区别, 通过检测尾梁振动的差异性达到煤岩界面识别的目的, 其核心是对煤、矸不同物质导致的尾梁振动进行有效区分^[9] (检测原理与使用仪器见图 1)。如果将煤冲击尾梁造成的系统振动作为系统常态, 混入矸石信号作为系统异常状态, 利用加速度传感器检测液压支架尾梁的振动信号来获取煤混入矸石碰撞而产生

的冲击信息, 通过诊断系统异常状态与异常程度, 能够实现对于矸石下落及矸石混杂程度的实时辨识, 从而达到煤岩界面识别的目的。王保平等^[8] 研究证明, 落煤时尾梁振动信号能量集中于低中频段, 而落矸则集中于高频部分。利用煤矸振动信号的这一特点, 理论上使用滤波方法能够区分落煤与落矸信号, 但实际上由于煤矸信号差异并不显著且系统低频干扰较多, 无法直接使用滤波方法区分信号。为解决这一问题, 笔者使用 EMD 方法将信号分解, 以峭度为区分标准对信号重新合成, 目标是削弱信号的低频成分, 突出高频特征。合成后的信号使用滤波方法检测其在较高频域内是否有分布, 即是否有矸石特征出现, 即能够识别落矸信号, 从而实现煤岩识别的目的。

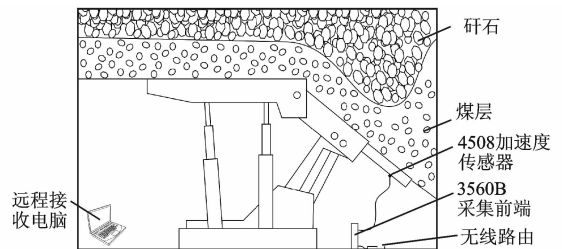


图 1 液压支架尾梁振动法检测示意图

Fig. 1 Vibration of hydraulic support tail beam detection schematic diagram

* 国家自然科学基金资助项目(51174126); 山东交通学院校基金资助项目(Z201315)
收稿日期: 2014-07-07; 修回日期: 2014-12-17

2 检测理论基础

2.1 振动信号的 EMD 经验模式分解

经验模式分解的主要思想是把一个时间序列的信号分解为不同尺度的基本模式分量,由美国学者 Huang 等^[10]于 1998 年首次提出,其本质是利用信号的特征时间尺度把复杂的多分量信号分解成单分量信号之和。待识别信号 $x(t)$ 经 EMD 分解后表示为

$$x_i(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (1)$$

即原信号 $x(t)$ 表示为一系列内禀模态函数分量和一个残余分量,该残余分量是信号的趋势项。

2.2 峭度理论

峭度是一个无量纲特征,它是对信号的一个标准化描述,对冲击信号特别敏感。峭度值 K 计算方法如下

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}\right)^4} \quad (2)$$

2.3 Hilbert 边际谱

Hilbert 边际谱代表了在整个频率范围内不同的频率对整个幅度贡献的一个测度,它表示了统计意义上全部数据长度的累加幅度^[11-12]。因此 Hilbert 边际谱能够很好的显示煤与矸石信号的频域分布,对信号求取 Hilbert 边际谱可以指导滤波截止频率的选取。

对式(1)中每个 IMF 分量做 Hilbert 变换

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

由 $c_i(t)$ 和 $H[c_i(t)]$ 可构造解析信号 $z(t)$

$$z(t) = c_i(t) + jyH[c_i(t)] = a_i(t)e^{j\phi(t)} \quad (4)$$

其瞬时幅值函数和瞬时相位函数分别为

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2[c_i(t)]} \quad (5)$$

$$\varphi_i(t) = \arctan \frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)} \quad (6)$$

如果忽略式 EMD 分解中的余量 $r_n(t)$,用瞬时幅值和瞬时频率表示原信号

$$x(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t)e^{j\varphi_i(t)} = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t)e^{j2\pi \int f_i(t) dt} \quad (7)$$

信号的幅值在瞬时频率-时间平面上的分布称

为 Hilbert 幅值谱,简称 Hilbert 谱

$$H(f, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j2\pi \int f_i(t) dt} \quad (8)$$

Hilbert 谱精确描述了信号的幅值在整个瞬时频率段随时间和瞬时频率的变化规律,进一步定义 Hilbert 边际谱

$$h(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \infty H(f, t) dt \quad (9)$$

3 实验设置

为了更好地验证该方法的有效性并获取有效区分指标,在实验室使用与现场相同的液压支架(型号 ZFS7200),通过精确控制煤与矸石下落得到确定的煤、矸冲击尾梁振动信号,使用丹麦 B&K 公司 4508 加速度传感器拾取信号。落煤、矸石、煤矸混合各采集 20 组共计 60 组数据,每类中的 10 组数据用于生成标准信号,另外 10 组作为待识别信号进行测试使用。

实验步骤如图 2 所示,主要包括:

- 1) 对采集信号进行 EMD 分解;
- 2) 计算各 IMF 的峭度值;
- 3) 取煤、矸峭度值差异较大时对应的 IMF,将这些 IMF 相加,得到合成信号;
- 4) 选择合适的滤波截止频率,对合成信号滤波;
- 5) 对滤波后信号通过傅里叶变换求出包络谱;
- 6) 将处理过的待识别信号与标准煤、矸信号特征进行比较,识别落煤、落矸和煤矸混合状态。

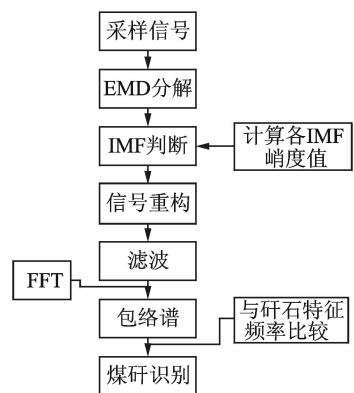


图 2 煤矸识别流程图

Fig. 2 Flowchart of the recognition of coal-rock interface

4 数据分析

从尾梁处采集煤、矸石原始振动信号,其波形如图 3 所示。

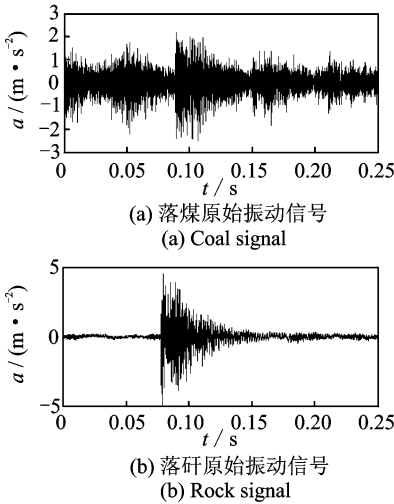


图3 煤、矸原始振动信号
Fig.3 Original vibration signals

4.1 信号 EMD 分解与重构

按照 EMD 经验模态分解原理将信号分解,如图 4 所示。 $c_1 \sim c_9$ 依次为频率由高到低的成分, r_{10} 为剩余分量,代表了信号的趋势。

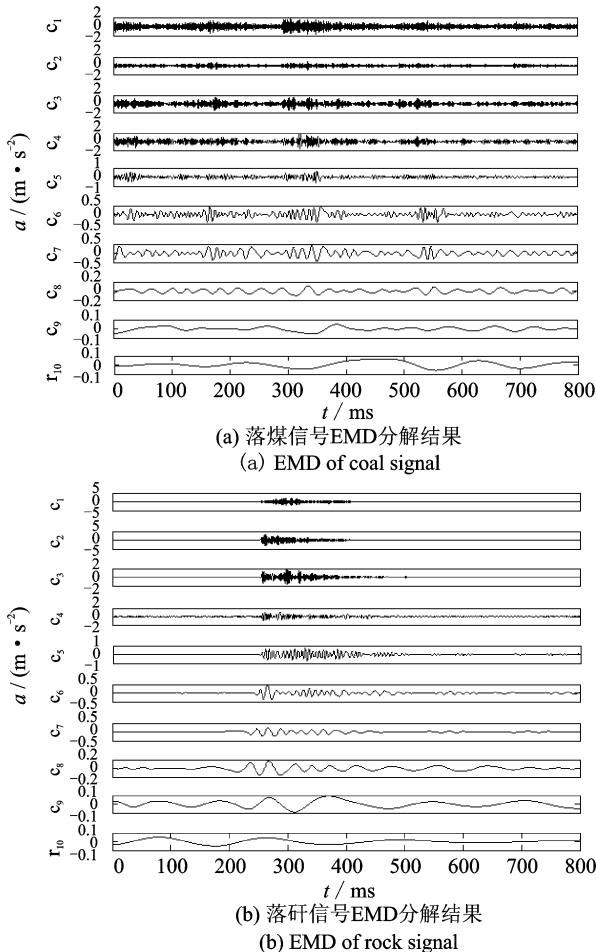


图4 煤、矸振动信号的 EMD 分解结果
Fig.4 EMD of coal and rock

根据式(2)计算煤、矸信号各 IMF 通道的峭度值(见表 1)。落矸时第 1,2,3 个固有模态函数峭度具有较大值,而落煤在第 3,4 固有模态处有较大值。即矸石信号特征在 1,2,3 通道内比较显著,落煤特征则在 3,4 通道内较为明显。为突出矸石信号特征,弱化落煤特征,笔者提取前两个 IMF 重构原信号。这样如果信号中含有矸石成分,则其低频(煤、系统干扰)被削弱,中高频(矸石)分量得以保留。

表 1 EMD 分解后前 5 通道 IMF 的峭度值
Tab.1 IMF kurtosis of the top five channels

信号种类	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₅
落煤	0.270 1	0.231 0	0.598 7	0.526 8	0.127 1
落矸	0.978 9	0.532 9	0.502 3	0.268 5	0.204 7

4.2 滤波截止频率选取与滤波显示

使用所述计算方法对落煤、落矸信号分别求取 Hilbert 边际谱(见图 5)。

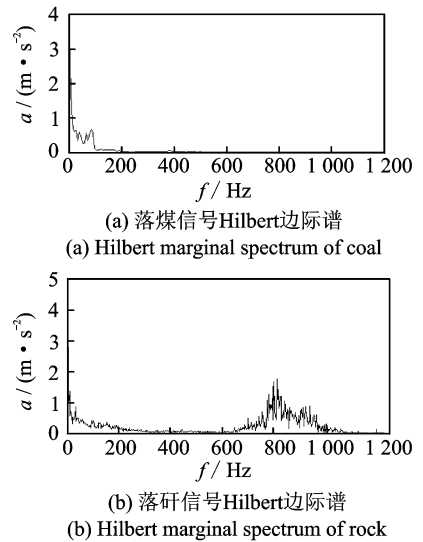


图5 煤、矸信号的 Hilbert 边际谱
Fig.5 Hilbert marginal spectrum

通过边际谱计算,落煤时尾梁振动信号的能量主要分布在频率 0~100 Hz 的低频范围内;落矸时,尾梁振动的能量分布比落煤时更为广泛,主要分布在频率 0~200 Hz 和频率 600~1 000 Hz 范围内。因此 600~1 000Hz 区域是两种信号进行区分的较优区域。

使用带通滤波截止频率为 600 Hz 和 1 000 Hz 滤波后的振动信号见图 6。为方便观察,以 600~1 000 Hz 窗口显示。

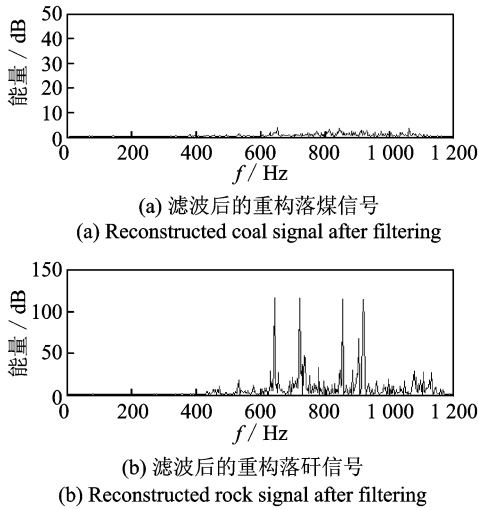


图 6 滤波后的重构落煤、落矸信号

Fig. 6 Reconstructed signals after filtering

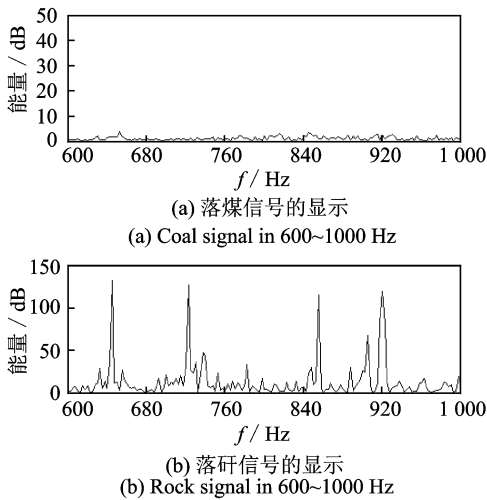


图 7 滤波后的重构信号在带通频率范围内显示

Fig. 7 Signals in bandpass frequency range

图 7 中,矸石信号在 600~1 000 Hz 范围内有明显能量分布,而煤信号在此区域几乎为零。这样,待识别信号与标准煤、矸特征比较即可判断是否有矸石下落。为验证其有效性,笔者在实验室使用了 1:1 煤矸混合物,经该方法处理后频域显示如图 8。煤矸混合物信号在 600~1 000 Hz 区域有能量分布,但幅值比矸石信号小,表明煤中混有矸石,通过肉眼观察即能作出判断。

5 结 论

1) 放顶煤落煤和落矸时,液压支架尾梁振动信

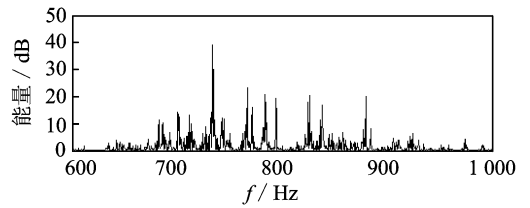


图 8 煤矸混合信号处理后在带通频率范围内的显示
Fig. 8 The treated coal-rock mixture signal in bandpass frequency range

号在频域内是不同的,主要差别在于落矸时振动信号在较高频中具有一定的成分,而落煤时振动信号同频段成分较少。因此可以依此进一步分析得到识别煤矸界面。

2) 采用 EMD 对煤矸信号进行分解得到 IMF,可用峭度为标准选取煤、矸差异最明显的 IMF 重新合成信号,这样便于下一步频率分析。

3) 对标准的落煤、落矸信号进行 Hilbert 变换,进行谱分析得到落煤、落矸信号的特征频域范围,获取能够表征落矸信号的带通滤波器的截止频率,然后对经过处理的待识别信号进行滤波,即可捕获信号中的较高频成分,即矸石下落造成的冲击,从而实现了煤岩识别的目的。

4) 实验通过结合不同混合比例的煤矸信号所形成的包络谱图,能够确定矸石下落量。包络谱信号特征明显,能够及时、准确掌握放落时间,具有较好的实用性。

参 考 文 献

[1] Ren Fang, Yang Zhaojian, Xiong Shibo. Study on the coal-rock interface recognition method based on multi-sensor data fusion technique[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(3): 321-324.
[2] Ren Fang, Yang Zhaojian, Xiong Shibo, et al. Application of wavelet packet decomposition and its energy spectrum on the coal-rock interface identification[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2003, 9(1): 109-112.
[3] 梁义维,熊诗波. 基于神经网络和 Dempster-Shafer 信息融合的煤岩界面预测[J]. 煤炭学报, 2003, 28(1): 86-90.
Liang Yiwei, Xiong Shibo. Forecast of coal-rock interface based on neural net work and Dempster-Shafer

- theory[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(1): 86-90. (in Chinese)
- [4] 王增才, 王汝琳, 徐建华. 自然 γ 射线法在采煤机摇臂调高中检测煤层厚度的研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 425-429.
Wang Zeng cai, Wang Rulin, Xu Jianhua. Research on coal seam thickness detection by natural Gamma ray in shearer horizon control[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 425-429. (in Chinese)
- [5] 秦剑秋, 孟惠荣. 自然 γ 射线煤岩界面识别传感器的理论建模及实验验证[J]. 煤炭学报, 1996, 21(5): 513-516.
Qin Jianqiu, Meng Huirong. Establishment of a theoretical model of sensor for identification of coal and rock interface by natural γ ray and underground trials [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(5): 513-516. (in Chinese)
- [6] 张俊梅, 范迅, 赵雪松. 采煤机自动调高控制系统研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(4): 415-418.
Zhang Junmei, Fan Xun, Zhao Xuesong. Automatic horizon control system of coal mining machine [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(4): 415-418. (in Chinese)
- [7] 孙继平, 余杰. 基于小波的煤岩图像特征抽取与识别[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1900-1904.
Sun Jiping, She Jie. Wavelet-based coal-rock image feature extraction and recognition[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1900-1904. (in Chinese)
- [8] 王保平, 王增才, 张万枝. 基于 EMD 与神经网络的煤岩界面识别方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 586-591.
Wang Baoping, Wang Zengcai, Zhang Wanzhi. Coal-rock interface recognition method based on EMD and neural network [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(4): 586-591. (in Chinese)
- [9] Wang Baoping, Wang Zengcai, Xu Junkai. A new coal-rock interface recognition method based on Hilbert marginal spectrum distribution characteristics[J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(19): 8137-8142.
- [10] Huang N E, Shen Z, Long S, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis[J]. Proceeding of the Royal Society, 1998, 454 (1971): 903-995.
- [11] 钟佑明, 秦树人, 汤宝平. 一种振动信号新变换法的研究[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 233-238.
Zhong Youming, Qin Shuren, Tang Baoping. Study on a new transform method for vibration signal [J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(2): 233-238. (in Chinese)
- [12] 王醇涛, 陆金铭. 运用 HHT 边际谱的柴油机故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 465-469.
Wang Chuntao, Lu Jinming. Fault diagnosis of diesel engine based on HHT marginal spectrum [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4): 465-469. (in Chinese)



第一作者简介:丛晓妍,女,1979年6月生,博士生。主要研究方向为车辆自动变速器。曾发表《Subjective evaluation of construction machinery cab's comfort based on fuzzy set theory》(《Advanced Materials Research》2011, Vol. 211-212)等论文。
E-mail: congxiaoyan@163.com

