



移动阅读

李力,施万发,魏伟. 基于 VMD 的多相介质超声回波检测技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10): 2944-2950. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.1758

LI Li, SHI Wanfa, WEI Wei. Ultrasonic detection research on multiphase medium based on VMD[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2944-2950. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.1758

基于 VMD 的多相介质超声回波检测技术

李 力, 施万发, 魏 伟

(1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 高性能复杂制造国家重点实验室(中南大学), 湖南 长沙 410083)

摘 要: 提取多相介质中有效超声回波信号是实现煤岩界面识别的关键技术。利用超声波探测煤岩介质所获取的回波信噪比低且为非平稳、非线性信号, 难以有效准确的获取煤岩界面的回波波形, 进而无法有效判断煤岩分界面。传统的小波分析手段需要根据信号特点选取特定的小波基, EMD, EEMD 等自适应信号分解方法存在模态混叠及虚假分量等现象。提出利用 VMD(变分模态分解) 分析超声回波信号的组成成分, 准确获取煤岩界面的首次回波的波形与时间, 以达到识别不同介质界面和判断介质相关参数的目的。模拟仿真及实验表明, VMD 可实现更优化的信号分解效果, 实现对煤岩界面首波波形和首波时间的检测, 达到准确识别以煤岩介质为代表的多相介质分界面的目的。

关键词: 煤岩界面; 超声检测; 信号分解; VMD

中图分类号: TD823.97

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2018)10-2944-07

Ultrasonic detection research on multiphase medium based on VMD

LI Li, SHI Wanfa, WEI Wei

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing (Central South University), Changsha 410083, China)

Abstract: The detection of effective ultrasonic echo about multi-component is the key point to realizing coal-rock interface recognition. In actual ultrasonic detection, as the echo received is the signal composed of multi-component which is low SNR, non-stationary and non-linear, it's hard to accurately and efficiently get the waveform about the coal-rock boundary. Traditional wavelet transform method requires that the specific wavelet base is selected according to the characteristics of signals. Frequency aliasing and illusive components exist in adaptive decomposition methods such as EMD, EEMD etc. VMD (Variational Mode Decomposition) is proposed to analyze the components of the ultrasonic echo signal and precisely obtain the waveform and time of the first echo signal about coal-rock boundary so as to realize the interface recognition among different components as well as make the judgement of related parameters. Simulation and experiments demonstrate that VMD, able to achieve a more optimized signal decomposition effect, makes a difference in accurately identifying the interface of multi-components as represented by coal-rock.

Key words: coal-rock interface recognition; ultrasonic detection; signal decomposition; VMD

煤炭是我国的最主要能源, 随着我国煤炭开采量增加, 开采难度日益增大, 实现深部危险煤层采掘自

动化是煤炭能源持续生产的重要保障^[1]。作为采煤机自动化采掘的基础, 精准识别煤岩界面为采掘头自

收稿日期: 2017-12-12 修回日期: 2018-04-17 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2014CB046305)

作者简介: 李 力(1963—), 女, 湖南益阳人, 博士生导师, 博士。Tel: 0731-88671542, E-mail: lilicsu@vip.sina.com

动调高提供依据,从而达到提高煤炭出产量和减小采掘头的损耗等目的。鉴于超声波传播指向性好、分辨率高、穿透能力强等特点,超声波检测^[2]成为实现煤岩界面识别的手段之一,而检测回波信号是超声检测煤岩界面的基础和关键参数。

煤层构造复杂,其中存在空隙、矸石,可视为一种多相介质^[3]。同时,由于煤表面凹凸不平,在超声检测时需要液体水作为耦合剂。因此,在煤岩界面识别检测中可以认为超声波在一种在液-固-气多相介质中传播。根据多相介质间存在声阻抗差异,超声波将在不同介质界面可以产生声透射和声反射,则换能器可以接收到水煤界面和煤岩界面的反射回波信号。但由于煤层介质的不均匀性,超声波将产生漫反射和折射,至使所接受到的反射回波成分复杂。此外,超声波在非均匀介质中传播存在严重的声衰减现象,导致回波信号能量微弱。因此,从换能器所接收到的原始回波弱信号中,难以直接判别煤岩界面反射回波波形和首波时间,从而无法准确判断煤层厚度,从而给煤岩界面识别带来较大的困难。因此,多介质超声回波弱信号处理研究具有重要的理论和实际意义。

传统的小波变换由于其窗函数可变,具有良好的时频局部化特性,广泛应用在信号分析中。但鉴于窗函数在整个分析过程中不可更换,而且需要根据回波信号特点提前选好小波基,其方法缺乏一定的自适应性。而经验模态分解(EMD)^[4]、集合经验模态分解(EEMD)^[5]等自适应分解由于存在模态混叠等缺陷难以适用于复杂工程回波信号。

变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)是 Dragomiretskiy 等于 2014 年提出一种基于数学理论基础的自适应信号分解新方法^[6],其克服了 EMD 缺乏理论支持、出现模态混叠、端点效应等弊端。该方法通过循环迭代,在信号分解过程中获取约束变分问题的最优解,以确定分解所获得的固有模态分量的中心频率和带宽,实现信号各频率成分的有效分离。相比 EMD, EEMD 而言,变分模态分解(VMD)具有更好的鲁棒性,可减少模态混叠现象,适用于复杂信号的分析。在机械领域中,白堂博等^[7]运用 VMD 算法实现了旋转机械的故障信号的诊断分离;在医学领域中,UDAY Maji^[8]等利用 VMD 算法提出检测心率失常的新方法;在气象领域,范磊等^[9]提出一种基于 VMD 和蝙蝠算法关于风速区间的预测,利用 VMD 分解实际信号得到细节分量信号,提高了预测区间的精度和覆盖率。

本文提出利用变分模态分解(VMD)算法分解混叠回波信号,确定煤岩界面首次反射回波波形和回波

时间,测量煤层厚度,达到煤岩界面识别的目的。

1 超声波煤岩检测声学理论

在多相介质界面处,传播声波产生反射波,在声束垂直介质层面情况下,反射系数 R 和透射系数 T 分别为

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

$$T = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

式中, Z_1, Z_2 为不同介质的声阻抗; Z 为声阻抗, $Z = \rho v$, 其中, ρ 为密度, v 为声速。

我国煤与煤系岩石的纵波与横波的声速及密度分布情况如图 1 所示^[10]。由图 1 可知,煤的密度区间为 $1 \sim 2 \text{ g/cm}^3$, 其声速区间为 $500 \sim 2500 \text{ m/s}$; 岩的密度区间为 $2.5 \sim 3 \text{ g/cm}^3$, 其声速区间为 $2000 \sim 4500 \text{ m/s}$ 。由此表明煤与岩系的密度和声速存在明显的差异,致使煤与煤系岩石声阻抗的有明显区分度,具有较大的反射性能^[11]; 随煤与岩的密度减小,其声速将减小,表明其声衰减程度^[12]越大。此外,水的声阻抗与换能器隔膜声阻抗基本一致,具有较好的透射性能。从而,为超声波检测技术应用于煤岩界面的识别研究提供了理论基础。

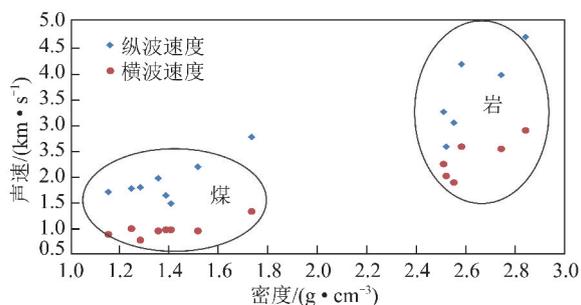


图 1 煤与煤系岩声速和密度分布

Fig. 1 Image of coal and coal series rock sound velocity and density distribution

2 变分模态分解原理

变分模态分解(VMD)理论是通过自适应准正交变换将复合信号 f 非递归地分解为一系列有限带宽的固有模态函数(imf),其表达式为

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\varphi_k(t)) \quad (3)$$

式中, $u_k(t)$ 为一组离散的子信号; $A_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的瞬时幅值; $\varphi_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的相位,且定义子信号 $u_k(t)$ 的瞬时频率 $\omega_k(t) = d\varphi_k(t)/dt$ 。

每个模态分量紧密地集中在中心频率 ω_k 附近,可以利用 H^1 高斯平滑位移信号来估算其带宽。利

用 VMD 进行信号分解时的稀疏性,可将 K 阶分解看作如下约束变分问题。

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (4)$$

$$\sum_k u_k = f \quad (5)$$

式中, u_k 为分解所得到的第 k 个固有模态分量; ω_k 为各分量的频率中心。

利用引入增广 Lagrange 函数,求取上述约束变分问题的最优解。

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} + \|f(t) - \sum_k u_k(t)\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \rangle \quad (6)$$

式中, α 为惩罚系数; λ 为 Lagrange 乘子。

利用交替方向乘子算法求解上述增广 Lagrange 函数的鞍点,即式(4)约束变分模型的最优解。通过初始化 $\{u_k^1\}, \{\omega_k^1\}, \lambda^1$,按照式(7)~(9)执行迭代循环更新 u_k^1, ω_k^1 及 λ ,直至满足式(10),则停止迭代,完成原信号 f 的分解,得到一系列子信号 $u_k(t)$ 。

$$u_k^{n+1} = \operatorname{argmin}_{u_k} L(\{u_i^{n+1}\}, \{\omega_i^{n+1}\}, \{\omega_i^n\}, \lambda^n) \quad (7)$$

$$\omega_k^{n+1} = \operatorname{argmin}_{\omega_k} L(\{u_i^{n+1}\}, \{\omega_i^{n+1}\}, \{\omega_i^n\}, \lambda^n) \quad (8)$$

式中, $k=k+1$,直至 $k=K$ 。

$$\lambda^{n+1} = \lambda^n + \tau(f - \sum_k u_k^{n+1}) \quad (9)$$

$$\sum_k \|u_k^{n+1} - u_k^n\|_2^2 / \|u_k^n\|_2^2 < \varepsilon \quad (10)$$

式中, ε 为给定整数,代表误差精度。

综上所述,VMD 可将复杂信号分解成一系列离散的分量,为工程实际中混杂回波的分解提供了理论依据。

3 VMD 分解混叠回波信号研究

3.1 超声回波信号模型

利用非对称高斯调制模型^[13] $s(t)$,以模拟超声波换能器主频为 50 kHz 回波信号。采用高频 100 kHz 正弦波 $h(t)$,以模拟超声波在水中的非线性作用^[14]所产生的高频干扰信号。将非对称高斯调制模型 $s(t)$ 、高频正弦波 $h(t)$,再加以高斯白噪声 $n(t)$ 3 种信号混叠,作为模拟混杂超声回波信号。

模拟回波信号 $x(t)$ 为

$$x(t) = s(t) + h(t) + n(t) \quad (11)$$

其中,非对称高斯调制信号

$$s(t) = \beta \operatorname{env}(t - \tau) \cos[2\pi f_c(t - \tau) + \psi(t - \tau)^2 + \varphi] \quad (12)$$

$$\operatorname{env}(t) = \exp\{-\alpha[1 - r \tanh(mt)]t^2\} \quad (13)$$

式中, $\beta=1$; $\tau=0.01$; $f_c=50\ 000$; $\psi=-1$; $\varphi=0$; $\alpha=100\ 000$; $r=0.5$; $m=16$ 。

高频正弦波信号

$$h(t) = 0.5 \sin(2\pi \times 100\ 000t) \quad (14)$$

式中,时间 t 满足 $0.01 \leq t \leq 0.012$; $n(t)$ 为高斯白噪声信号。

由式(11)所得的模拟回波信号如图 2 所示。

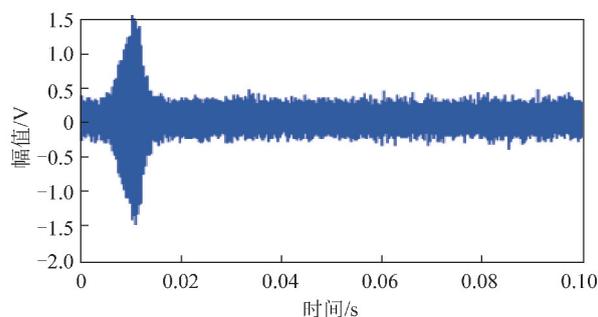


图 2 模拟回波信号

Fig. 2 Simulation of echo signal

3.2 多方法分解模拟回波信号

分别利用经验模态分解 (EMD)、小波分析及 VMD 方法对图 2 所示模拟回波信号进行分解。

在 EMD 分解中,选取包含有效信息前 4 个分量,如图 3 所示;在小波变换中,选取 db5 小波进行 5 阶分解,如图 4 所示;在 VMD 分解中,根据模拟信号状况确定为 3 层,如图 5 所示。

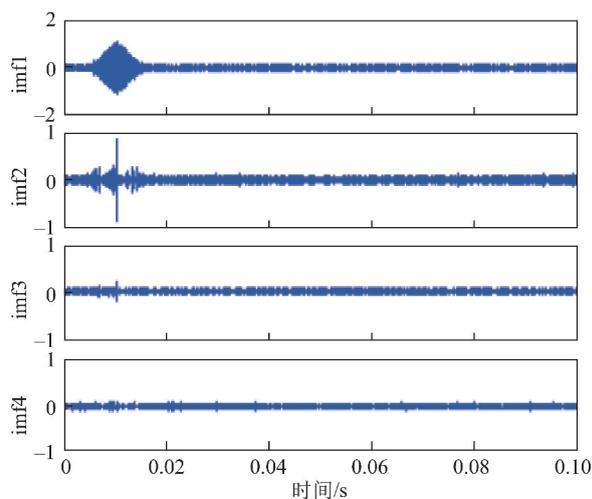


图 3 EMD 分解

Fig. 3 Image of empirical mode decomposition

分析图 3 可知,EMD 分解出的分量 imf1 中反映出模拟信号中超声回波成分(50 kHz),且回波包络较为清晰,但存在一定的噪声污染;分量 imf2 反映出

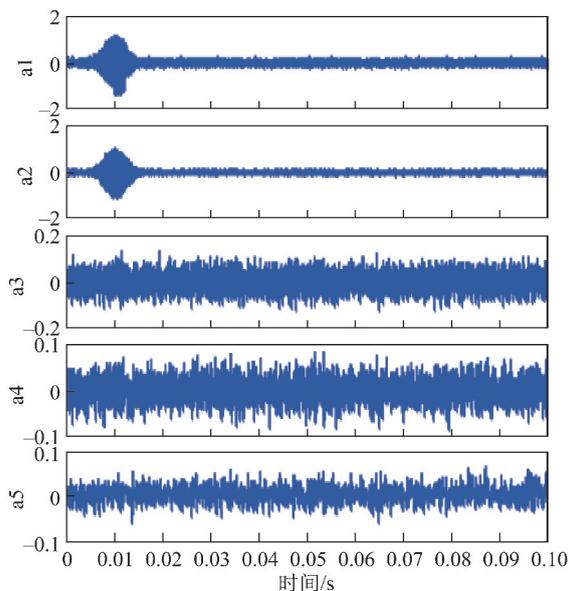


图 4 小波分解

Fig. 4 Image of wavelet decomposition

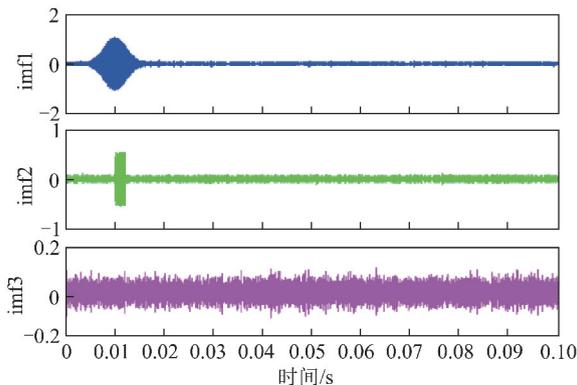


图 5 VMD 分解

Fig. 5 Image of variational mode decomposition

模拟信号中的高频(100 kHz)正弦成分但与 imf1 分量产生了模态混叠,且受噪音干扰严重;分量 imf3 中对应 imf2 波峰处出现了一定程度的 imf2 分量泄露。

分析图 4 可知,在小波分解中,信号中的高频干扰信号和超声回波成分未得到很好的分离,两者混叠在分量 a1 和分量 a2 中。

分析图 5 可知,VMD 分解得到的分量信号 imf1 和 imf2 波形轮廓清晰,表明信号受噪音干扰小,信噪比更高。同时,经 VMD 分解后所获得的频谱如图 6 所示。由图 6 可知,得到的分量信号频率主要集中在 50,100 kHz(幅值分别为 3,4 dB),与 3.1 节中构成模拟回波信号的主频信号(分量 imf1)和 100 kHz 高频干扰信号(分量 imf2)频率相符,说明模拟信号得到有效分解。

综上所述,相比经验模态分解(EMD)和小波分析,变分模态分解(VMD)克服了 EMD 及小波分析中存在的模态混叠、分量泄露等缺陷,获取的分量信号

更加清晰完整,并且信噪比相比前两者有了一定的提高;验证了 VMD 可获得更理想的分量信号,在处理混杂信号上具有优越性。

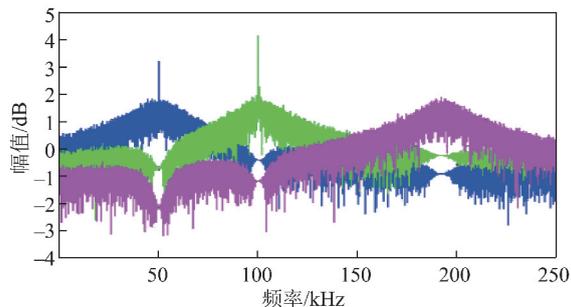


图 6 模拟信号 VMD 分解分量对应频谱

Fig. 6 Spectrum of simulation signal with VMD decomposition components

4 VMD 分解煤岩检测实验回波信号

4.1 超声波检测煤岩多相界面实验

利用超声波水耦合煤岩界面识别实验系统(图 7),开展超声波检测识别煤岩界面实验。该实验系统主要由超声波发射系统、多通道超声检测系统、水下超声换能器、模拟采煤机移动机构和供水系统等组成。



图 7 超声波水耦合煤岩界面识别实验系统

Fig. 7 Coal and rock interface identification experimental system with ultrasonic water coupling

超声换能器为自发自收探头 1 个,中心频率 50 kHz,耦合剂为水。信号采样频率为 500 kHz 煤层声速为 2 459 m/s,岩石声速为 3 348 m/s,水声速为 1 500 m/s,水耦合高度为 130 mm,煤层形状为凹形,煤层左右边距为 150 mm 处厚度为 400 mm,其中间宽 100 mm 处厚度为 350 mm,煤层上方为岩石,试样总厚度为 800 mm,被测实物如图 8 所示。

采用同步电机驱动模拟采煤机移动机构携带自发自收超声换能器以 3 m/min 速度移动,水流进入超声换能器的底部,喷向煤面而形成耦合层,同时,探头发射 50 kHz 调制正弦信号,采用美国 NI PXIe-6341 多功能数据采集卡检测回波信号,记录与保存数据。考虑到煤层凹形,检测以相邻两点距离 10 mm 为间

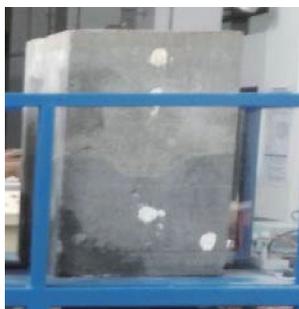


图 8 实验测量的煤岩模拟样

Fig. 8 Experiment measurement sample of coal and rock

距进行测量,共获得 40 份测量数据,将数据利用 VMD 处理后绘制相应实验曲线。

4.2 实验分析

表 1 为超声波在水和模拟样煤层中的理论传播时间。

表 1 超声波在水和煤层中的理论传播时间

Table 1 Theoretical propagation time of ultrasonic wave in water and coal seam

wave in water and coal seam			μs
水中理论传播时间	煤层中传播时间	煤岩界面首波到达时间	
173	325	498	

图 9 为样品某位置超声检测所采集的回波信号之一。分析图 9 可知,超声波原始回波信号混杂,无法从中识别出煤岩界面的回波包络。

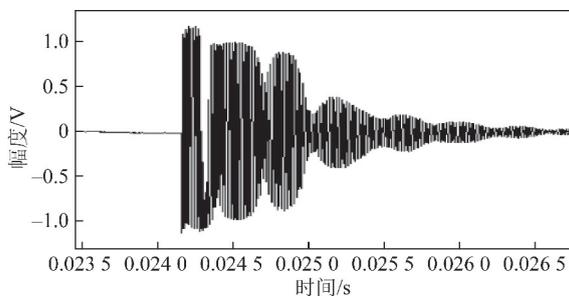


图 9 超声检测回波信号

Fig. 9 Ultrasonic detection of echo signals

采用 VMD 方法,对图 9 中的超声波原始回波信号进行分解,则获得其模态分量如图 10 所示。并将获得的 3 个 imf 模态分量进行快速傅里叶变换,获取对应频谱图,如图 11 所示。

由图 10 可知,在分量 1(imf1)中存在一个由于激励超声换能器额发射电路中电容放电所产生的冲击衰减信号。

在分量 2(imf2)中,可以看到多个明显的包络。从理论上分析,第 1 个包络应该超声波换能器的余震区,第 2 个包络为声波在水中传播至煤样底部的反射回波;第 3 个包络应该为超声波发射后煤岩界面的反

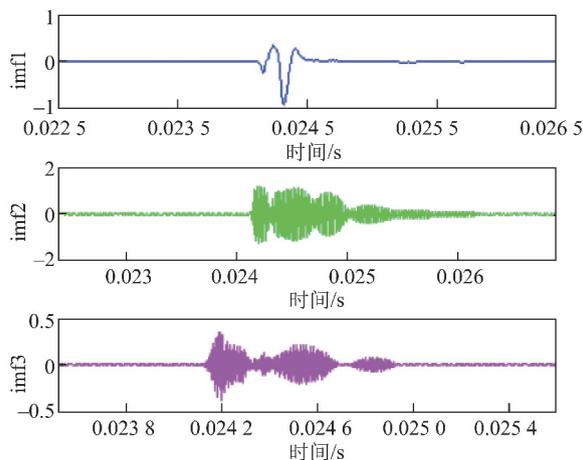


图 10 VMD 分解波形

Fig. 10 Waveform of VMD decomposition

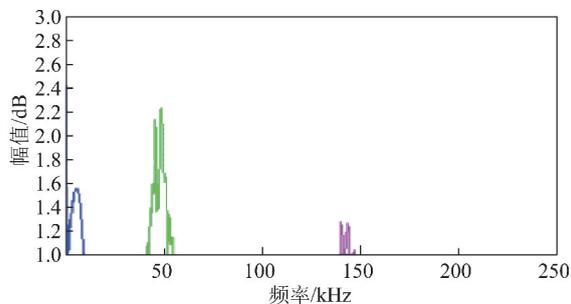


图 11 分量信号频谱图

Fig. 11 Component signal spectrum

射回波。同时,由图 11 频谱图可知,回波分解信号的频率为约 50 kHz(幅值 2.2 dB)和接近 150 kHz(幅值 1.2 dB),放电产生衰减信号频率不计;且前者能量大大高于后者,说明所接收到的回波能量主要集中在约 50 kHz 频段,这与实验探头发射的超声波主频相符,表明该分量信号中含有煤岩界面的反射回波信息,需要重点关注分量 2(imf2)。分量 3(imf3)为传播过程中由于声波的非线性作用产生的高频干扰信号。

将图 11 中实验测试回波信号 imf2 分量图放大,如图 12 所示。

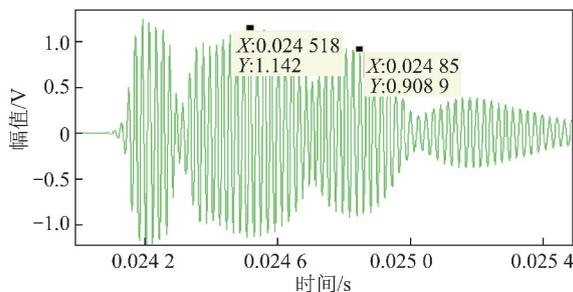


图 12 imf2 分量信号放大图

Fig. 12 Magnification of signal imf2 component

第 1 个回波包络为超声波探头的余震区,任何换能器均存在此盲区;第 2 个包络为水跟样品界面的反

射回波;第 3 个包络为煤岩界面的反射回波。由于在不同的介质存在声阻抗差异,超声波到达不同介质界面时的反射最明显,因此取回波包络信号的波峰极大值点进行分析回波到达情况。可认为第 3 个回波包络峰值点与第 2 个回波包络的峰值点的时间差值即为超声波在煤层中的传播时间(图 12),时间从 0.024 518 s 至 0.024 850 s,传播时间为 332 μ s,煤层声速为 2 459 m/s,经计算得到煤层厚度为 408 mm,表明此回波为煤岩界面的反射回波,检测误差为 2%。

利用 VMD 将实验信号进行分解后计算出每一点位置对应的煤层厚度,最后利用每个点对应的煤层厚度绘制煤岩界面的分布曲线(图 13)。

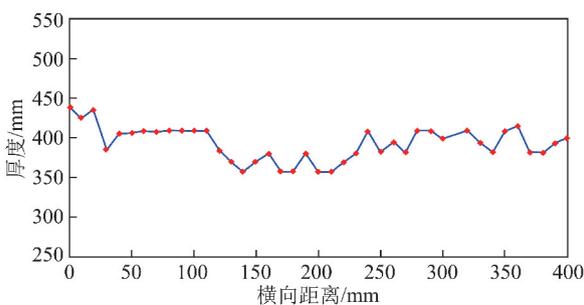


图 13 模拟样煤岩界面实验分布曲线

Fig. 13 Simulated sample experimental distribution curve of coal and rock interface

在 VMD 分解所得的样品实测煤层厚度曲线中,可知两侧区域基本平坦,厚度均在 400 mm 左右;在横向距离 150 ~ 250 mm 处有区域存在一定程度凹形,与样品实际情况基本吻合。

综上所述,VMD 方法可以处理复杂的煤岩界面的回波信号,准确地判断出煤岩界面的回波首波时间,从而确定煤层厚度,为准确识别多相煤岩界面提供了理论与技术支撑。

5 结 论

(1) 变分模态分解 VMD 作为一种新提出的且具有数学理论基础的信号处理方法,克服了传统自适应信号分解手段中模态混叠、分量泄露的缺陷,可以获取可靠的信号分量,为混叠严重和信噪比低的超声回波信号处理提供了理论基础。

(2) 构建了由非对称高斯回波模型、高频正弦波以及高斯白噪声构建的模拟超声回波信号,研究表明,相较于小波分析和 EMD 等传统方法相比,VMD 能够获取信噪比更高的分量信号,实现超声回波有效成分的提取。

(3) 利用超声波水耦合煤岩界面识别实验系统,

获得超声波在水-煤-岩多相介质中传播检测数据。

(4) 采用变分模态分解 VMD 方法处理与分析超声波回波信号,获得了准确的煤与岩的分界面,达到了煤岩界面识别的目的,研究表明,VMD 可有效分离煤岩界面的反射回波,从而确定反射回波首波到达时间,为识别以煤岩介质为代表的多相介质提供了有效的理论与技术支持。

参考文献 (References):

- [1] 吴婕萍,李国辉. 煤岩界面自动识别技术发展现状及其趋势[J]. 工矿自动化,2015(12):44-49.
WU Jieping, LI Guohui. Development status and tendency of automatic identification technologies of coal-rock interface[J]. Industry and Automation, 2015(12): 44-49.
- [2] 胡而已,胡元,邵营. 一种采煤机超声煤岩识别装置[P]. 中国专利;E21C35/24,2015-04-22.
- [3] 郭士礼,冀孟恩,朱培民,等. 多相离散随机介质模型及其探地雷达波场特征研究[J]. 地球物理学报,2015,58(8):2779-2791.
GUO Shili, JI Meng'en, ZHU Peimin, et al. Study on multiphase discrete random medium model and its GPR wave field characteristics[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2779-2791.
- [4] 刘学文,肖嵩,薛晓. 经验模态分解构造观测矩阵的方法[J]. 西安电子科技大学学报,2018,45(1):35-41.
LIU Xuewen, XIAO Song, XUE Xiao. Measurement matrix construction based on empirical mode decomposition[J]. Journal of Xidian University, 2018, 45(1): 35-41.
- [5] 刘涛,杜世昌,黄德林,等. 基于改进的集合经验模态方法振动信号分解[J]. 上海交通大学学报,2016,50(9):1452-1459.
LIU Tao, DU Shichang, HUANG Delin, et al. Vibration signal decomposition based on an improved ensemble empirical mode decomposition method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(9): 1452-1459.
- [6] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [7] 白堂博,张来斌,唐满红,等. 基于 VMD 的旋转机械故障诊断方法研究[J]. 石油矿场机械,2016,45(8):22-27.
BAI Tangbo, ZHANG Laibin, TANG Manhong, et al. Research on VMD based on fault diagnosis method for rotating machinery[J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(8): 22-27.
- [8] UDAY Maji, MADHUCHHANDA Mitra, SAURABH Pal. Characterization of cardiac arrhythmias by variational mode decomposition technique[J]. Biocybernetics and Biomedical Engineering, 2017, 37(3).
- [9] 范磊,王志农,李慧杰,等. 基于变分模态分解和蝙蝠算法-相关向量机的短期风速区间预测[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):93-100.
FAN Lei, WEI Zhinong, LI Huijie, et al. Short-term wind speed interval prediction based on VMD and BA. RVM algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 93-100.
- [10] 王赞,许小凯,张玉贵. 六种不同变质程度煤的纵横波速度特征

- 及其与密度的关系[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3754-3761.
- WANG Yun, XU Xiaokai, ZHANG Yugui. Characteristics of P-wave velocities and their relationships with density of six metamorphic kinds of coals [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3754-3761.
- [11] 李涛. 煤体结构类型的超声波判识理论与方法研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2007: 55-73.
- LI Tao. The study of ultrasonic differentiating theory and measure for coal structure types [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2007: 55-73.
- [12] 邵先杰, 孙玉波, 孙景民, 等. 煤岩参数测井解释方法-以韩城矿区为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 559-565.
- SHAO Xianjie, SUN Yubo, SUN Jingmin, et al. Logging interpretation of coal petrologic parameters: A case study of Hancheng mining area [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 559-565.
- [13] DEMIRLI R, SANIIE J. Asymmetric Gaussian Chirplet model for ultrasonic echo analysis: Ultrasonic Symposium (IUS) [A]. 2010 IEEE, SAN Diego, CA, 2010 [C]. 2010: 124-128.
- [14] 冯绍峰, 章瑞铨, 王润田. 非线性声学及其水声学中的应用[J]. 物理学进展, 1996, 16(S1): 299-302.
- FENG Shaosong ZHANG Ruiquan WANG Runtian. Nonlinear acoustics and its applications in underwater sound [J]. Progress In Physics, 1996, 16(S1): 299-302.