

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局



(10) 国际公布号
WO 2019/019565 A1

(43) 国际公布日
2019年1月31日 (31.01.2019)

- (51) 国际专利分类号:
G01V 1/30 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2018/072533
- (22) 国际申请日: 2018年1月13日 (13.01.2018)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201710615340.9 2017年7月26日 (26.07.2017) CN
- (71) 申请人: 山东科技大学(SHANDONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国山东省青岛市经济技术开发区前湾港路579号, Shandong 266590 (CN)。
- (72) 发明人: 张杏莉(ZHANG, Xingli); 中国山东省青岛市经济技术开发区前湾港路579号, Shandong

266590 (CN)。 卢新明(LU, Xinming); 中国山东省青岛市经济技术开发区前湾港路579号, Shandong 266590 (CN)。 贾瑞生(JIA, Ruisheng); 中国山东省青岛市经济技术开发区前湾港路579号, Shandong 266590 (CN)。 彭延军(PENG, Yanjun); 中国山东省青岛市经济技术开发区前湾港路579号, Shandong 266590 (CN)。 赵卫东(ZHAO, Weidong); 中国山东省青岛市经济技术开发区前湾港路579号, Shandong 266590 (CN)。

- (74) 代理人: 青岛智地领创专利代理有限公司(QINGDAO ZHIDILINGCHUANG PATENT AGENCY CO., LTD); 中国山东省青岛市经济技术开发区香江路110号高科技创业中心215室(联系人: 韩玉昆), Shandong 266590 (CN)。
- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,

(54) Title: ENERGY DISTRIBUTION CHARACTERISTIC BASED MINE MICROSEISMIC SIGNAL IDENTIFICATION METHOD

(54) 发明名称: 一种基于能量分布特征的矿山微震信号识别方法

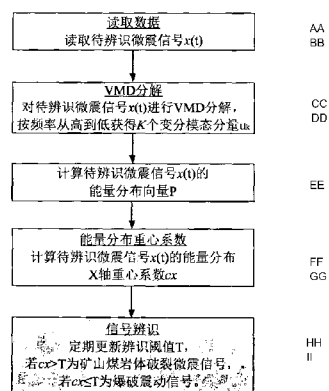
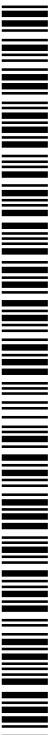


图1

(57) Abstract: A energy distribution characteristic based mine microseismic signal identification method, relating to the technical field of signal analysis and identification. The method comprises the following steps: reading a microseismic signal $x(t)$ to be identified; performing VMD decomposition on the $x(t)$ to obtain a number K of variational mode components arranged in a descending order of frequencies; calculating the band energies of the various mode components, extracting the energy percentage values of the various mode components in the original signal to form an energy distribution vector P ; calculating an energy distribution X-axis center-of-gravity coefficient cx on the basis of the energy distribution vector P ; identifying the mine microseismic signal according to an identification threshold T ; if $cx > T$, the microseismic signal is a mine coal-rock mass rupture microseismic signal; and if $cx \leq T$, the microseismic signal is a blast vibration signal; and finally, self-adaptively updating the value of the identification threshold T . The method can effectively distinguish the coal-rock mass rupture microseismic signal and blast vibration signal, and has the characteristics of strong self-adaptability and high accuracy.

(57) 摘要: 一种基于能量分布特征的矿山微震信号识别方法, 属于信号分析及识别领域, 包括如下步骤: 读取待识别微震信号 $x(t)$; 对 $x(t)$ 进行VMD分解, 得到 K 个按照频率从高到低顺序排列的变分模态分量; 计算出各模态分量的频带能量, 提取各模态分量占原信号的能量百分比值构成能量分布向量 P ; 以能量分布向量 P 为基础计算出能量分布 X 轴重心系数 cx ; 根据识别阈值 T 识别矿山微震信号, 若 $cx > T$ 为矿山煤岩体破裂微震信号, 若 $cx \leq T$ 为爆破震动信号; 最后对识别阈值 T 的值进行自适应更新。该方法能有效区分煤岩体破裂微震信号和爆破震动信号, 具有自适应性强、准确性高等特点。

AA READ DATA
BB READ A MICROSEISMIC SIGNAL $x(t)$ TO BE IDENTIFIED
CC VMD DECOMPOSITION
DD PERFORM VMD DECOMPOSITION ON THE MICROSEISMIC SIGNAL $x(t)$ TO BE IDENTIFIED TO OBTAIN A NUMBER K OF VARIATIONAL MODE COMPONENTS U_k ARRANGED IN A DESCENDING ORDER OF FREQUENCIES
EE CALCULATE AN ENERGY DISTRIBUTION VECTOR P OF THE MICROSEISMIC SIGNAL $x(t)$ TO BE IDENTIFIED
FF ENERGY DISTRIBUTION CENTER-OF-GRAVITY COEFFICIENT
GG CALCULATE AN ENERGY DISTRIBUTION X-AXIS CENTER-OF-GRAVITY COEFFICIENT CX OF THE MICROSEISMIC SIGNAL $x(t)$ TO BE IDENTIFIED
HH SIGNAL IDENTIFICATION
II PERIODICALLY UPDATE THE IDENTIFICATION THRESHOLD T ; IF $CX > T$, THE MICROSEISMIC SIGNAL IS A MINE COAL-ROCK MASS RUPTURE MICROSEISMIC SIGNAL AND IF $CX \leq T$, THE MICROSEISMIC SIGNAL IS A BLAST VIBRATION SIGNAL



WO 2019/019565 A1

BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

一种基于能量分布特征的矿山微震信号辨识方法

技术领域

本发明属于信号分析及识别领域，具体涉及一种基于能量分布特征的矿山微震信号辨识方法。

背景技术

微震监测是近年来发展起来的先进且行之有效的煤岩动力灾害监测手段，它能够对煤岩体微震活动实时、连续、在线监测，形成微震监测数据。由于矿山环境复杂，存在现场背景噪声、爆破震动等大量干扰信号，使得微震监测系统无法准确识别并记录有效微震事件，后期需要依靠技术人员人工识别出有效微震事件，严重影响了微震监测系统的识别效率。由于煤矿爆破作业经常发生，而煤岩体微震和爆破震动波形又极为相似，采用人工识别方式，经常出现误处理，识别难度大。

目前，针对矿山微震信号波形识别的常用时频分析法包括傅立叶变换、小波变换、小波包变换、频率切片小波变换和 EMD 等，传统傅立叶变换主要用于分析周期性平稳信号，对包含尖峰和突变的随机性、非平稳性微震信号分析效果欠佳；小波分析能同时进行时频分析，但需要选择合适的小波基才能达到较好的分解效果；EMD 能较好地处理随机非平稳信号，但 EMD 方法存在边界效应及模态混叠现象，导致 EMD 具有不稳定性和不唯一性。这些方法用于信号分析时均存在一定程度的弊端，为信号辨识增加了难度，误判率高。

发明内容

针对现有技术中存在的上述问题，本发明提出了一种基于能量分布特征的矿山微震信号辨识方法，采用变分模态分解（VMD）对信号进行时频分析。VMD 是一种新的信号分解方法，相比于其它模态分解技术，它具有坚实的理论基础，消除了模态混叠问题，克服了现有技术的不足，具有良好的频域自适应分解效果。

为了实现上述目的，本发明采用如下技术方案：

一种基于能量分布特征的矿山微震信号辨识方法，包括如下步骤：

步骤 1：读取待辨识微震信号 $x(t)$ ，其中， $t=1, 2, \dots, N$ ， N 为微震信号的采样点个数；

步骤 2：对待辨识微震信号 $x(t)$ 进行 VMD 分解，得到 K 个按照频率从高到低顺序排列的变分模态分量 $\{u_1, \dots, u_k, \dots, u_K\}$ ：

对待辨识微震信号 $x(t)$ 采用 VMD 分解为 K 个变分模态分量，约束条件为使各个模态的估计带宽之和最小，且各模态之和等于待辨识微震信号 $x(t)$ ，约束变分模型描述为式(1)和式(2)：

$$\min_{\{u_k\}\{w_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] \right\|_2^2 \right\} \quad (1);$$

$$\text{s. t. } \sum_k u_k = x(t) \quad (2);$$

其中, $x(t)$ 表示待辨识的微震信号, $\{u_k\} := \{u_1, \dots, u_K\}$ 代表分解得到的 K 个有限带宽的变分模态分量, $\{w_k\} := \{\omega_1, \dots, \omega_K\}$ 表示各分量的频率中心, $\delta(t)$ 为狄拉克(Dirac)函数, $*$ 表示卷积, $j^2 = -1$; 式(2)中, $\sum_k := \sum_{k=1}^K$ 为对所有的变分模态求和;

为求解式(1)和式(2)的最优解, 引入扩展的 Lagrange 将约束变分问题变为非约束变分问题, 其表达式为式(3):

$$L(\{u_k\}, \{w_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \|x(t) - \sum_k u_k(t)\|_2^2 + \langle \lambda(t), x(t) - \sum_k u_k(t) \rangle \quad (3);$$

其中, α 为二次惩罚因子, $\lambda(t)$ 为拉格朗日乘法算子;

求解该变分问题的具体步骤如下:

步骤 2.1: 定义变分模态分量个数 K 值与惩罚因子 α 的值;

步骤 2.2: 初始化 $\{\hat{u}_k^1\}$, $\{\omega_k^1\}$, $\{\hat{\lambda}^1\}$, $n=0$;

步骤 2.3: 令 $n=n+1$, 执行整个循环;

步骤 2.4: 执行内层第一个循环, 根据式(4)更新 u_k ;

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{x}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4);$$

其中, $\hat{x}(\omega)$ 为待辨识微震信号 $x(t)$ 的傅立叶变换, $\hat{x}(\omega) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} x(t) e^{-j\omega t} dt$;

步骤 2.5: 令 $k=k+1$, 重复步骤 2.4, 直到 $k=K$, 结束内层第一个循环;

步骤 2.6: 执行内层第二个循环, 根据式(5)更新 ω_k ;

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (5);$$

步骤 2.7: 令 $k=k+1$, 重复步骤 2.6, 直到 $k=K$, 结束内层第二个循环;

步骤 2.8: 执行外层循环, 根据式(6)更新 λ ;

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left(\hat{x}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right) \quad (6);$$

其中, τ 为拉格朗日乘法算子 $\lambda(t)$ 的更新步长参数;

步骤 2.9: 重复步骤 2.3 至步骤 2.8, 直到满足迭代停止条件如式(7)所示, 结束整个循环, 输出结果, 得到 K 个变分模态分量;

$$\sum_k \left(\frac{\|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} \right) < \varepsilon \quad (7);$$

其中, ε 为求解精度;

步骤 3: 计算待辨识微震信号 $x(t)$ 的能量分布向量 P ;

根据公式(8)计算各模态分量 u_k 对应的能量 E_k ;

$$E_k = \int_{i=1}^N |x_{ik}(t)|^2 dt = \sum_{i=1}^N |x_{ik}(t)|^2 \quad (8);$$

其中, $x_{ik}(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K; N$ 为采样点个数, K 为变分模态个数) 表示模态分量 u_k 时序序列的离散点幅值;

根据每个模态分量 u_k 的能量以及待辨识微震信号 $x(t)$ 的总能量, 可以得到模态分量 u_k 的能量百分比值 $P(k) = E_k / \sum_{i=1}^K E_i$, 从而得到该微震信号的能量分布向量 P , 即 $P = [P(1), \dots, P(k), \dots, P(K)]$;

步骤 4: 计算待辨识微震信号 $x(t)$ 的能量分布 X 轴的重心系数 cx ;

根据公式(9)计算能量分布 X 轴重心系数 cx ;

$$cx = \frac{\sum_{i=1}^K (P(i) * i)}{K} * \sum_{i=1}^K P(i) \quad (9);$$

步骤 5: 根据辨识阈值 T 识别待辨识微震信号 $x(t)$, 若 $cx > T$ 为矿山煤岩体破裂微震信号, $cx \leq T$ 为爆破震动信号;

步骤 6: 自适应更新辨识阈值 T 的值;

根据方程组(10)更新辨识阈值 T ;

$$\begin{cases} T_1 = \min(W_1), \\ T_2 = \max(W_2), \\ \text{若 } T_1 > T_2, T = \frac{T_1 + T_2}{2}. \end{cases} \quad (10);$$

其中, W_1 为训练集中煤岩体破裂微震信号的 cx 值集合, W_2 为训练集中爆破震动信号的 cx 值集合。

本发明原理如下:

为实现煤岩体破裂微震信号和爆破震动信号的有效分类辨识, 本发明利用两种微震信号能量分布差异显著的特点, 首先读取待辨识微震信号并进行 VMD 分解, 得到 K 个按照频率从高到低顺序排列的变分模态分量; 计算出各模态分量的频带能量, 提取各模态分量占原信号的能量百分比值构成能量分布向量 P ; 以能量分布向量 P 为基础计算出能量分布 X 轴重心系数 cx ; 根据辨识阈值 T 识别矿山微震信号, 若 $cx > T$ 时, 检测微震信号为矿山煤岩体破裂微震信号, 若 $cx \leq T$ 时, 检测微震信号为爆破震动信号。该方法可以实现对煤岩体破裂微震信号和爆破震动信号的有效辨识。

本发明采用以上技术方案, 与现有技术现比, 具有以下优点:

本发明依据 VMD 良好频谱分解特征对矿山微震信号进行自适合剖分, 依据煤岩体破裂

微震信号和爆破震动信号在不同频段上能量分布的显著差异，通过计算微震信号能量分布 X 轴重心系数，实现对两类矿山微震信号的有效辨识，该方法具有算法简单、自适应性和实时性强的特点，具有很好的技术价值和应用前景。

附图说明

图 1 为本发明一种基于能量分布特征的矿山微震信号辨识方法的流程图。

图 2 为待辨识微震信号 $x(t)$ 的示意图及其时频图。

图 3 为待辨识微震信号 $x(t)$ 经 VMD 分解后得到的 6 个变分模态分量示意图及其时频图。

图 4 为待辨识微震信号 $x(t)$ 的能量分布直方图。

图 5 为 15 组煤岩体破裂微震测试信号的能量向量、重心系数及其辨识结果图。

图 6 为 15 组爆破震动测试信号的能量向量、重心系数及其辨识结果图。

图 7 为测试组微震信号分类识别结果。

具体实施方式

下面结合附图以及具体实施方式对本发明作进一步详细说明：

一种基于能量分布特征的矿山微震信号辨识方法，其流程如图1所示，具体包括如下步骤：

步骤 1：读取待辨识微震信号 $x(t)$ ，其中， $t=1, 2, \dots, N$ ， N 为微震信号的采样点个数；

步骤 2：对待辨识微震信号 $x(t)$ 进行 VMD 分解，得到 K 个按照频率从高到低顺序排列的变分模态分量 $\{u_1, \dots, u_k, \dots, u_K\}$ ：

对待辨识微震信号 $x(t)$ 采用 VMD 分解为 K 个变分模态分量，约束条件为使各个模态的估计带宽之和最小，且各模态之和等于待辨识微震信号 $x(t)$ ，约束变分模型描述为式(1)和式(2)：

$$\min_{\{u_k\}\{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] \right\|^2 \right\} \quad (1);$$

$$\text{s. t. } \sum_k u_k = x(t) \quad (2);$$

其中， $x(t)$ 表示待辨识的微震信号， $\{u_k\} := \{u_1, \dots, u_K\}$ 代表分解得到的 K 个有限带宽的变分模态分量， $\{\omega_k\} := \{\omega_1, \dots, \omega_K\}$ 表示各分量的频率中心， $\delta(t)$ 为狄拉克(Dirac)函数，* 表示卷积， $j^2 = -1$ ；式(2)中， $\sum_k := \sum_{k=1}^K$ 为对所有的变分模态求和；

为求解式(1)和式(2)的最优解，引入扩展的 Lagrange 将约束变分问题变为非约束变分问题，其表达式为式(3)：

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \|x(t) - \sum_k u_k(t)\|_2^2 + \langle \lambda(t), x(t) - \sum_k u_k(t) \rangle \quad (3);$$

其中， α 为二次惩罚因子， $\lambda(t)$ 为拉格朗日乘法算子；

求解该变分问题的具体步骤如下：

步骤 2.1：定义变分模态分量个数 K 值与惩罚因子 α 的值；

步骤 2.2：初始化 $\{\hat{u}_k^1\}$, $\{\omega_k^1\}$, $\{\hat{\lambda}^1\}$, $n=0$ ；

步骤 2.3：令 $n=n+1$ ，执行整个循环；

步骤 2.4：执行内层第一个循环，根据式(4)更新 u_k ；

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{x}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4);$$

其中， $\hat{x}(\omega)$ 为微震信号 x 的时序序列 $x(t)$ 的傅立叶变换， $\hat{x}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_R x(t) e^{-j\omega t} dt$ ；

步骤 2.5：令 $k=k+1$ ，重复步骤 2.4，直到 $k=K$ ，结束内层第一个循环；

步骤 2.6：执行内层第二个循环，根据式(5)更新 ω_k ；

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (5);$$

步骤 2.7：令 $k=k+1$ ，重复步骤 2.6，直到 $k=K$ ，结束内层第二个循环；

步骤 2.8：执行外层循环，根据式(6)更新 λ ；

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left(\hat{x}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right) \quad (6);$$

其中， τ 为拉格朗日乘法算子 $\lambda(t)$ 的更新步长参数；

步骤 2.9：重复步骤 2.3 至步骤 2.8，直到满足迭代停止条件如式(7)所示，结束整个循环，输出结果，得到 K 个变分模态分量；

$$\sum_k \left(\frac{\|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} \right) < \varepsilon \quad (7);$$

其中， ε 为求解精度；

步骤 3：计算待辨识微震信号 $x(t)$ 的能量分布向量 P ；

根据公式(8)计算各模态分量 u_k 对应的能量 E_k ；

$$E_k = \int_{i=1}^N |x_{ik}(t)|^2 dt = \sum_{i=1}^N |x_{ik}(t)|^2 \quad (8);$$

其中， $x_{ik}(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K$; N 为采样点个数， K 为变分模态个数) 表示模态分量 u_k 时序序列的离散点幅值；

根据每个模态分量 u_k 的能量以及待辨识微震信号 $x(t)$ 的总能量，可以得到模态分量 u_k 的能量百分比值 $P(k) = E_k / \sum_{i=1}^K E_i$ ，从而得到该微震信号的能量分布向量 P ，即 $P = [P(1), \dots, P(k), \dots, P(K)]$ ；

步骤 4：计算待辨识微震信号 $x(t)$ 的能量分布 X 轴的重心系数 cx ；

根据公式(9)计算能量分布 X 轴重心系数 cx ；

$$cx = \frac{\sum_{i=1}^K (P(i)*i)}{K} * \sum_{i=1}^K P(i) \quad (9);$$

步骤 5: 根据辨识阈值 T 识别待辨识微震信号 $x(t)$, 若 $cx > T$ 为矿山煤岩体破裂微震信号, $cx \leq T$ 为爆破震动信号;

步骤 6: 自适应更新辨识阈值 T 的值;

根据方程组(10)更新辨识阈值 T:

$$\begin{cases} T_1 = \min(W_1), \\ T_2 = \max(W_2), \\ \text{若 } T_1 > T_2, T = \frac{T_1 + T_2}{2}. \end{cases} \quad (10);$$

其中, W_1 为训练集中煤岩体破裂微震信号的 cx 值集合, W_2 为训练集中爆破震动信号的 cx 值集合。

如图 2 所示, 步骤 1 获取以时间(s)为横轴, 振幅为纵轴, 采样频率 $fs=1000\text{Hz}$ 的待辨识微震信号 $x(t)$, $t=1*1/fs, 2*1/fs, \dots, 5000*1/fs$, 微震信号采样点数据见表 1。

表1 监测信号采样点数据 (可以存储于Excel表中)

序号	采样点(N)	振幅
$1*1/fs$	1	4.34E-08
$2*1/fs$	2	1.69E-07
$3*1/fs$	3	1.41E-07
$4*1/fs$	4	-2.43E-07
$5*1/fs$	5	-6.50E-07
...	...	
$4999*1/fs$	4999	-6.10E-06
$5000*1/fs$	5000	-6.25E-06

按照步骤2的VMD算法对待辨识微震信号 $x(t)$ 进行变分模态分解, 取 $K=6$, 二次惩罚因子 $\alpha = 2000$, 分解后的6个变分模态分量及其时频谱如图3所示。

按照步骤 3 的方法, 计算出各模态分量的频带能量, 提取各模态分量占原信号的能量百分比, 得到该微震信号的能量分布向量 P , 即 $P = [0.02, 0.09, 3.01, 1.45, 13.41, 82.02]$ 。

按照步骤 4 的方法, 应用公式(9)计算待辨识微震信号 $x(t)$ 的能量分布 X 轴重心系数 cx , 得到 $cx = 0.957$, 图 4 为该微震信号的能量分布直方图, 图中黑色实心圆为该微震信号的能量分布平面重心位置。

按照步骤 5 的方法, 根据辨识阈值 $T=0.56$ 以及待检测微震信号 $x(t)$ 的 $cx = 0.957$ 对该待测微震信号进行辨识, 因为 $cx > T$, 所以, 该待检测微震信号 $x(t)$ 辨识为煤岩体破裂微震信号。

测试组中分别给出了 15 组煤岩体破裂微震信号和 15 组爆破震动微震信号, 煤岩体破裂微震测试信号的能量向量、重心系数及其辨识结果如图 5 所示; 爆破震动微震测试信号的能

量向量、重心系数及其辨识结果如图 6 所示。根据检测结果，该测试组共 30 组微震信号，其中 29 组辨识正确，1 组辨识错误，辨识正确率为 96.67%。测试组微震信号分类识别结果如图 7 所示。

按照步骤 6 的方法，将测试组数据加入已有训练组中，对辨识阈值自适应更新为 $T=0.61$ ，以继续提高辨识正确率。

微震信号是非平稳随机信号，其频率分布较为分散，不同种类的微震信号在不同频带能量分布差异显著，因此可根据这一特点，提取微震信号的能量分布向量，通过计算能量分布重心系数并与辨识阈值进行对比，即可实现对待测微震信号的分类辨识。

当然，上述说明并非是对本发明的限制，本发明也并不仅限于上述举例，本技术领域的技术人员在本发明的实质范围内所做出的变化、改型、添加或替换，也应属于本发明的保护范围。

权利要求书

1、一种基于能量分布特征的矿山微震信号辨识方法，其特征在于：包括如下步骤：

步骤 1：读取待辨识微震信号 $x(t)$ ，其中， $t=1, 2, \dots, N$ ， N 为微震信号的采样点个数；

步骤 2：对待辨识微震信号 $x(t)$ 进行 VMD 分解，得到 K 个按照频率从高到低顺序排列的变分模态分量 $\{u_1, \dots, u_k, \dots, u_K\}$ ：

对待辨识微震信号 $x(t)$ 采用 VMD 分解为 K 个变分模态分量，约束条件为使各个模态的估计带宽之和最小，且各模态之和等于待辨识微震信号 $x(t)$ ，约束变分模型描述为式(1)和式(2)：

$$\min_{\{u_k\}\{w_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] \right\|^2 \right\} \quad (1);$$

$$\text{s. t. } \sum_k u_k = x(t) \quad (2);$$

其中， $x(t)$ 表示待辨识的微震信号， $\{u_k\} := \{u_1, \dots, u_K\}$ 代表分解得到的 K 个有限带宽的变分模态分量， $\{w_k\} := \{w_1, \dots, w_K\}$ 表示各分量的频率中心， $\delta(t)$ 为狄拉克(Dirac)函数，* 表示卷积， $j^2 = -1$ ；式(2)中， $\sum_k := \sum_{k=1}^K$ 为对所有的变分模态求和；

为求解式(1)和式(2)的最优解，引入扩展的 Lagrange 将约束变分问题变为非约束变分问题，其表达式为式(3)：

$$L(\{u_k\}, \{w_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \|x(t) - \sum_k u_k(t)\|_2^2 + \langle \lambda(t), x(t) - \sum_k u_k(t) \rangle \quad (3);$$

其中， α 为二次惩罚因子， $\lambda(t)$ 为拉格朗日乘法算子；

求解该变分问题的具体步骤如下：

步骤 2.1：定义变分模态分量个数 K 值与惩罚因子 α 的值；

步骤 2.2：初始化 $\{\hat{u}_k^1\}$ ， $\{\omega_k^1\}$ ， $\{\hat{\lambda}^1\}$ ， $n=0$ ；

步骤 2.3：令 $n=n+1$ ，执行整个循环；

步骤 2.4：执行内层第一个循环，根据式(4)更新 u_k ：

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{x}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4);$$

其中， $\hat{x}(\omega)$ 为待辨识微震信号 $x(t)$ 的傅立叶变换， $\hat{x}(\omega) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} x(t) e^{-j\omega t} dt$ ；

步骤 2.5：令 $k=k+1$ ，重复步骤 2.4，直到 $k=K$ ，结束内层第一个循环；

步骤 2.6：执行内层第二个循环，根据式(5)更新 ω_k ：

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (5);$$

步骤 2.7：令 $k=k+1$ ，重复步骤 2.6，直到 $k=K$ ，结束内层第二个循环；

步骤 2.8: 执行外层循环, 根据式(6)更新 λ ;

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau(\hat{x}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega)) \quad (6);$$

其中, τ 为拉格朗日乘法算子 $\lambda(t)$ 的更新步长参数;

步骤 2.9: 重复步骤 2.3 至步骤 2.8, 直到满足迭代停止条件如式(7)所示, 结束整个循环, 输出结果, 得到 K 个变分模态分量;

$$\sum_k \left(\frac{\|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} \right) < \varepsilon \quad (7);$$

其中, ε 为求解精度;

步骤 3: 计算待辨识微震信号 $x(t)$ 的能量分布向量 P ;

根据公式(8)计算各模态分量 u_k 对应的能量 E_k ;

$$E_k = \int_{i=1}^N |x_{ik}(t)|^2 dt = \sum_{i=1}^N |x_{ik}(t)|^2 \quad (8);$$

其中, $x_{ik}(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K; N$ 为采样点个数, K 为变分模态个数) 表示模态分量 u_k 时序序列的离散点幅值;

根据每个模态分量 u_k 的能量以及待辨识微震信号 $x(t)$ 的总能量, 可以得到模态分量 u_k 的能量百分比值 $P(k) = E_k / \sum_{i=1}^K E_i$, 从而得到该微震信号的能量分布向量 P , 即 $P = [P(1), \dots, P(k), \dots, P(K)]$;

步骤 4: 计算待辨识微震信号 $x(t)$ 的能量分布 X 轴的重心系数 cx ;

根据公式(9)计算能量分布 X 轴重心系数 cx ;

$$cx = \frac{\sum_{i=1}^K (P(i) * i)}{K} * \sum_{i=1}^K P(i) \quad (9);$$

步骤 5: 根据辨识阈值 T 识别待辨识微震信号 $x(t)$, 若 $cx > T$ 为矿山煤岩体破裂微震信号, $cx \leq T$ 为爆破震动信号;

步骤 6: 自适应更新辨识阈值 T 的值;

根据方程组(10)更新辨识阈值 T :

$$\begin{cases} T_1 = \min(W_1), \\ T_2 = \max(W_2), \\ \text{若 } T_1 > T_2, T = \frac{T_1 + T_2}{2}. \end{cases} \quad (10);$$

其中, W_1 为训练集中煤岩体破裂微震信号的 cx 值集合, W_2 为训练集中爆破震动信号的 cx 值集合。

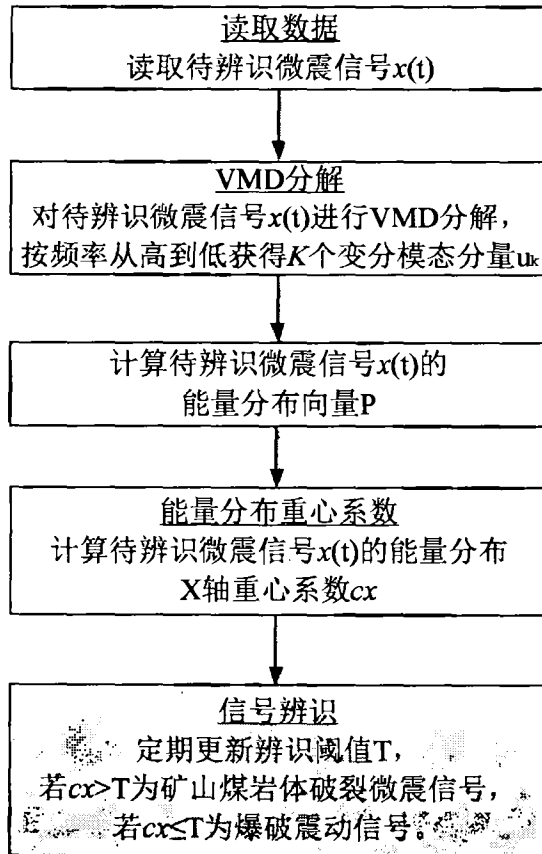


图1

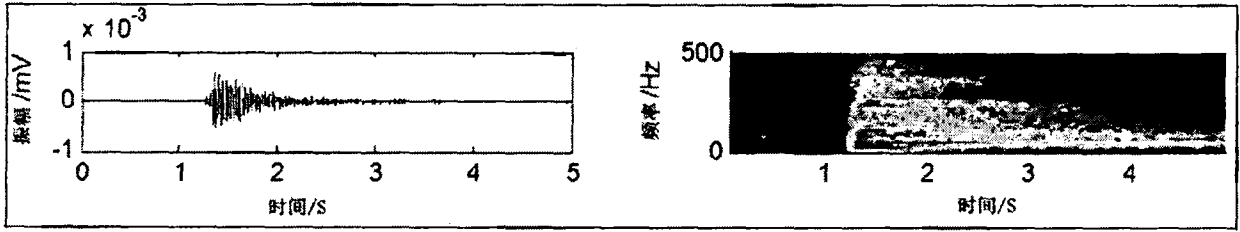


图2

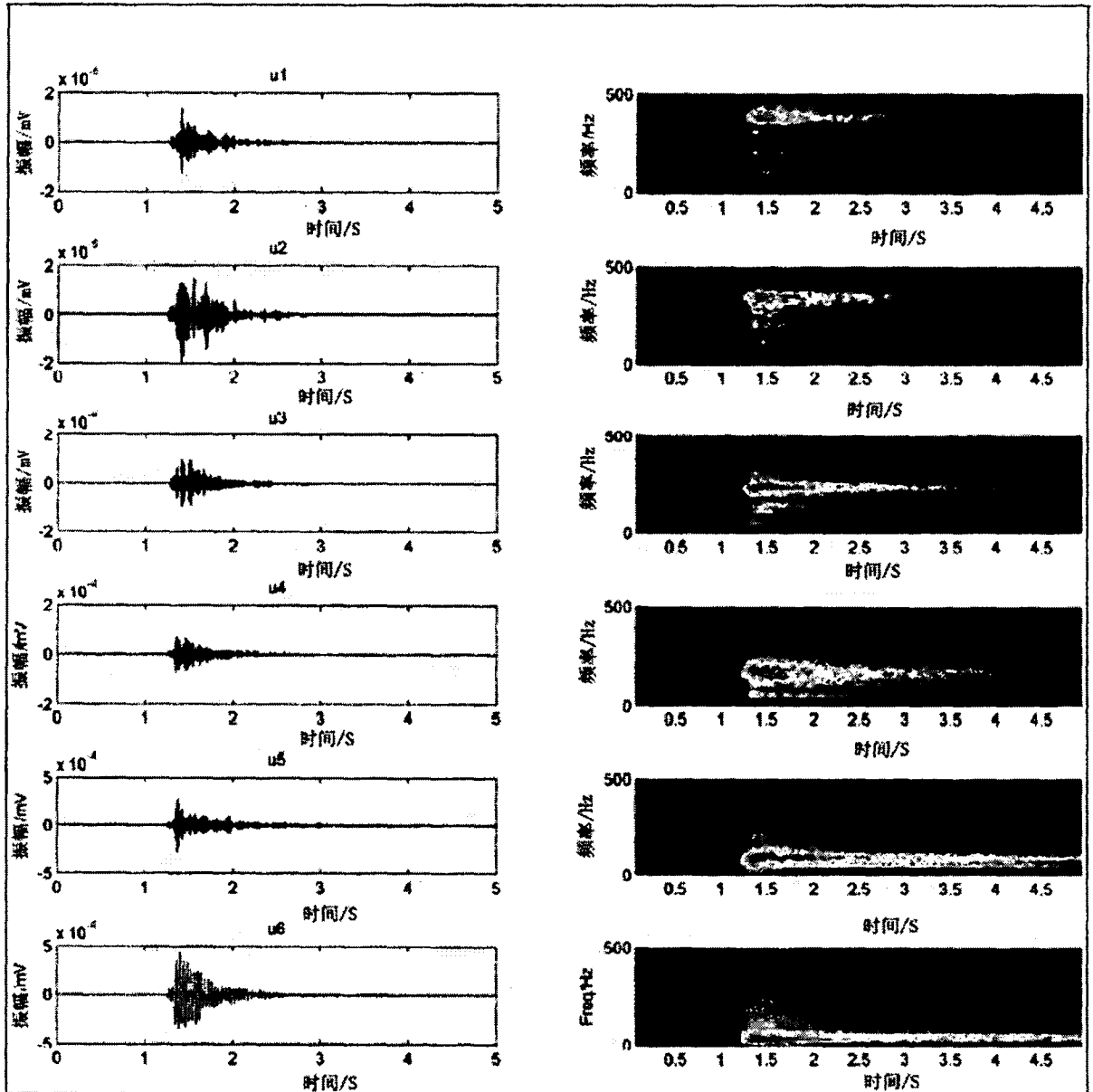


图3

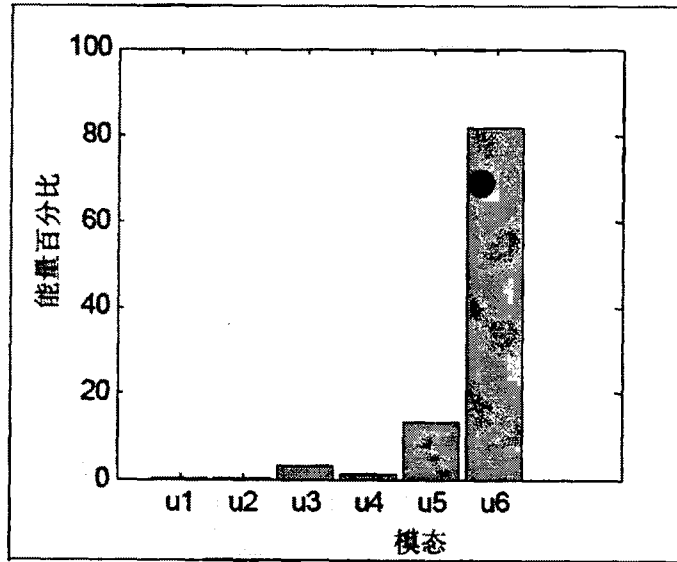


图4

事件编号	煤岩体破裂微震 VMD 分量能量值						重心系数	辨识结果
	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)		
1	1.03	4.57	1.29	56.14	33.76	3.21	0.71	煤岩体破裂微震
2	0.02	0.09	3.04	1.53	13.2	82.12	0.96	煤岩体破裂微震
3	0.75	4.68	3.55	8.37	80.0	2.65	0.78	煤岩体破裂微震
4	1.42	8.41	2.11	47.28	37.38	3.40	0.70	煤岩体破裂微震
5	0.04	0.13	0.08	5.25	12.18	82.32	0.96	煤岩体破裂微震
6	0.39	1.82	1.00	57.28	12.35	27.16	0.77	煤岩体破裂微震
7	1.10	4.53	4.77	16.12	28.45	45.03	0.84	煤岩体破裂微震
8	0.35	0.89	0.44	33.23	47.91	17.18	0.80	煤岩体破裂微震
9	1.42	8.41	2.11	47.28	37.38	3.40	0.70	煤岩体破裂微震
10	0.51	1.54	0.38	30.26	18.06	49.25	0.85	煤岩体破裂微震
11	0.56	3.19	0.78	65.03	20.66	9.78	0.72	煤岩体破裂微震
12	0.87	4.37	1.36	66.47	9.53	17.40	0.72	煤岩体破裂微震
13	0.34	0.89	0.44	33.04	48.20	17.09	0.80	煤岩体破裂微震
14	0.92	3.00	0.85	67.20	16.27	11.76	0.72	煤岩体破裂微震
15	0.01	0.01	0.28	0.29	9.40	90.01	0.98	煤岩体破裂微震

图5

事件 编号	爆破振动 VMD 分量能量值						重心 系数	辨识 结果
	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)		
1	12.49	62.88	10.15	6.18	5.52	2.78	0.40	爆破震动
2	6.92	64.93	7.11	15.34	1.72	3.98	0.42	爆破震动
3	9.59	64.79	15.01	5.09	3.83	1.69	0.39	爆破震动
4	56.48	23.23	13.17	2.77	0.91	3.44	0.30	爆破震动
5	34.65	45.30	10.02	5.11	1.39	3.53	0.34	爆破震动
6	16.35	54.80	11.65	8.66	1.80	6.74	0.41	爆破震动
7	0.36	2.96	71.43	11.65	7.09	6.51	0.57	煤岩体破裂微震
8	29.80	40.16	7.05	15.26	5.65	2.08	0.39	爆破震动
9	0.31	43.12	40.29	12.93	0.64	2.71	0.46	爆破震动
10	7.75	43.95	19.04	15.13	4.97	9.16	0.49	爆破震动
11	7.13	17.45	63.64	8.82	2.28	0.68	0.47	爆破震动
12	3.50	34.85	45.71	8.02	7.33	0.59	0.47	爆破震动
13	1.11	1.43	76.49	13.74	5.70	1.53	0.54	爆破震动
14	2.50	26.81	59.22	9.13	1.37	0.97	0.47	爆破震动
15	8.84	42.30	31.29	10.08	4.27	3.22	0.45	爆破震动

图 6

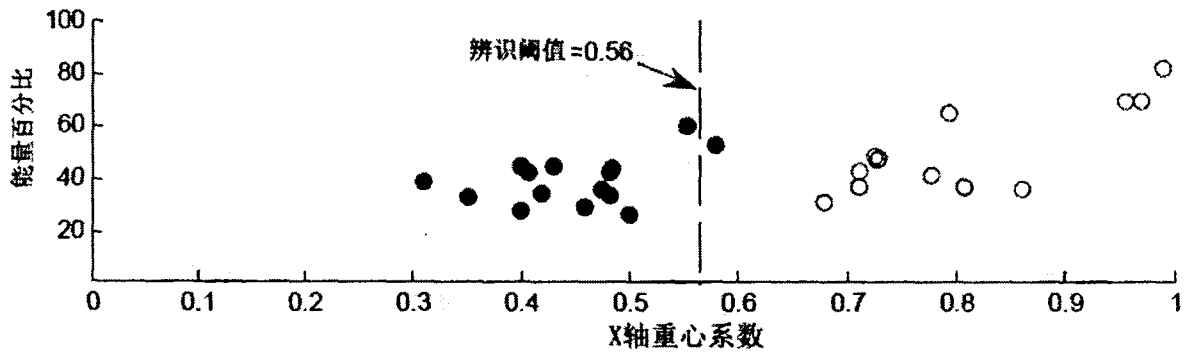


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2018/072533

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01V 1/30 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01V

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI; EPODOC; CNKI; CNPAT: 能量, 分布, 特征, 微震, 矿山, VMD, 变分, 分解, 频率, 模态, 分量, 阈值, variational, mode, decomposition, time, frequency, earthquake, energy, distribution, characteristic, microseismic, identify, threshold, value

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 107505652 A (UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF SHANDONG) 22 December 2017 (22.12.2017), claim 1	1
A	CN 106814396 A (UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF SHANDONG) 09 June 2017 (09.06.2017), description, paragraphs [0006]-[0037], and figure 1	1
A	CN 106483563 A (PETRO CHINA CO., LTD.) 08 March 2017 (08.03.2017), entire document	1
A	CN 105740840 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 06 July 2016 (06.07.2016), entire document	1
A	WO 2013169937 A1 (OCTAVE RESERVOIR TECHNOLOGIES, INC.) 14 November 2013 (14.11.2013), entire document	1

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search
05 March 2018

Date of mailing of the international search report
04 April 2018

Name and mailing address of the ISA
State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao
Haidian District, Beijing 100088, China
Facsimile No. (86-10) 62019451

Authorized officer
DENG, Xiaobei
Telephone No. (86-10) 53962606

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2018/072533

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 105956526 A (UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF SHANDONG) 21 September 2016 (21.09.2016), entire document	1
A	CN 106556865 A (CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 05 April 2017 (05.04.2017), entire document	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2018/072533

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 107505652 A	22 December 2017	None	
CN 106814396 A	09 June 2017	None	
CN 106483563 A	08 March 2017	None	
CN 105740840 A	06 July 2016	CN 105740840 B	22 February 2017
WO 2013169937 A1	14 November 2013	US 2015057937 A1	26 February 2015
CN 105956526 A	21 September 2016	None	
CN 106556865 A	05 April 2017	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/072533

<p>A. 主题的分类</p> <p>G01V 1/30(2006.01)i</p> <p>按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类</p>																										
<p>B. 检索领域</p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>G01V</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))</p> <p>WPI;EPODOC;CNKI;CNPAT; 能量, 分布, 特征, 微震, 矿山, VMD, 变分, 分解, 频率, 模态, 分量, 阈值, variational, mode, decomposition, time, frequency, earthquake, energy, distribution, characteristic, microseismic, identify, threshold, value</p>																										
<p>C. 相关文件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 107505652 A (山东科技大学) 2017年 12月 22日 (2017 - 12 - 22) 权利要求1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106814396 A (山东科技大学) 2017年 6月 9日 (2017 - 06 - 09) 说明书第【0006】-【0037】段, 附图1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106483563 A (中国石油天然气股份有限公司) 2017年 3月 8日 (2017 - 03 - 08) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105740840 A (中南大学) 2016年 7月 6日 (2016 - 07 - 06) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>WO 2013169937 A1 (OCTAVE RESERVOIR TECHNOLOGIES, INC.) 2013年 11月 14日 (2013 - 11 - 14) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105956526 A (山东科技大学) 2016年 9月 21日 (2016 - 09 - 21) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106556865 A (成都理工大学) 2017年 4月 5日 (2017 - 04 - 05) 全文</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> <p><input type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。 <input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p> <p>* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件</p>			类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 107505652 A (山东科技大学) 2017年 12月 22日 (2017 - 12 - 22) 权利要求1	1	A	CN 106814396 A (山东科技大学) 2017年 6月 9日 (2017 - 06 - 09) 说明书第【0006】-【0037】段, 附图1	1	A	CN 106483563 A (中国石油天然气股份有限公司) 2017年 3月 8日 (2017 - 03 - 08) 全文	1	A	CN 105740840 A (中南大学) 2016年 7月 6日 (2016 - 07 - 06) 全文	1	A	WO 2013169937 A1 (OCTAVE RESERVOIR TECHNOLOGIES, INC.) 2013年 11月 14日 (2013 - 11 - 14) 全文	1	A	CN 105956526 A (山东科技大学) 2016年 9月 21日 (2016 - 09 - 21) 全文	1	A	CN 106556865 A (成都理工大学) 2017年 4月 5日 (2017 - 04 - 05) 全文	1
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																								
PX	CN 107505652 A (山东科技大学) 2017年 12月 22日 (2017 - 12 - 22) 权利要求1	1																								
A	CN 106814396 A (山东科技大学) 2017年 6月 9日 (2017 - 06 - 09) 说明书第【0006】-【0037】段, 附图1	1																								
A	CN 106483563 A (中国石油天然气股份有限公司) 2017年 3月 8日 (2017 - 03 - 08) 全文	1																								
A	CN 105740840 A (中南大学) 2016年 7月 6日 (2016 - 07 - 06) 全文	1																								
A	WO 2013169937 A1 (OCTAVE RESERVOIR TECHNOLOGIES, INC.) 2013年 11月 14日 (2013 - 11 - 14) 全文	1																								
A	CN 105956526 A (山东科技大学) 2016年 9月 21日 (2016 - 09 - 21) 全文	1																								
A	CN 106556865 A (成都理工大学) 2017年 4月 5日 (2017 - 04 - 05) 全文	1																								
国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期																									
2018年 3月 5日	2018年 4月 4日																									
ISA/CN的名称和邮寄地址	受权官员																									
中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	邓晓蓓																									
传真号 (86-10)62019451	电话号码 (86-10)010-53962606																									

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/072533

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	107505652	A	2017年 12月 22日	无			
CN	106814396	A	2017年 6月 9日	无			
CN	106483563	A	2017年 3月 8日	无			
CN	105740840	A	2016年 7月 6日	CN	105740840	B	2017年 2月 22日
WO	2013169937	A1	2013年 11月 14日	US	2015057937	A1	2015年 2月 26日
CN	105956526	A	2016年 9月 21日	无			
CN	106556865	A	2017年 4月 5日	无			

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)