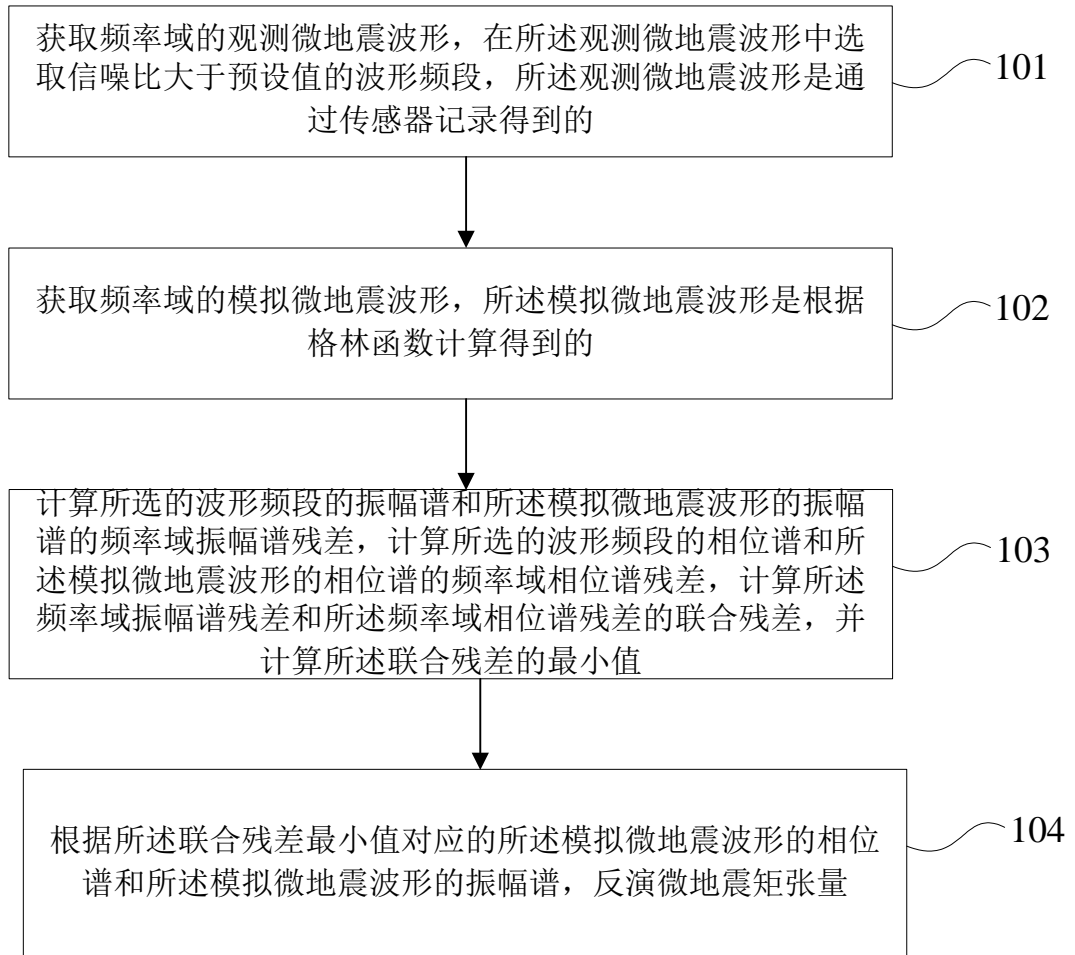


本发明实施例提供了一种微地震矩张量反演的方法及装置，其中，该方法包括：
获取频率域的观测微地震波形，在观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段，观测微地震波形是通过传感器记录得到的；获取频率域的模拟微地震波形，模拟
5 微地震波形是根据格林函数计算得到的；计算所选的波形频段的振幅谱和模拟微地震
波形的振幅谱的频率域振幅谱残差，计算所选的波形频段的相位谱和模拟微地震波形
的相位谱的频率域相位谱残差，计算频率域振幅谱残差和频率域相位谱残差的联合残
差；根据联合残差最小值对应的模拟微地震波形的相位谱和模拟微地震波形的振幅
谱，反演微地震矩张量。本申请提高了反演结果的可靠性。

10



1.一种微地震矩张量反演的方法，其特征在于，包括：

获取频率域的观测微地震波形，在所述观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段，所述观测微地震波形是通过传感器记录得到的；

5 获取频率域的模拟微地震波形，所述模拟微地震波形是根据格林函数计算得到的；

计算所选的波形频段的振幅谱和所述模拟微地震波形的振幅谱的频率域振幅谱残差，计算所选的波形频段的相位谱和所述模拟微地震波形的相位谱的频率域相位谱残差，计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差，并计算所述

10 联合残差的最小值；

根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱和所述模拟微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量。

2.如权利要求 1 所述的微地震矩张量反演的方法，其特征在于，所述预设值为 3。

3.如权利要求 1 所述的微地震矩张量反演的方法，其特征在于，还包括：

15 通过快速傅立叶变换获取所述频率域的观测微地震波形和所述频率域的模拟微地震波形。

4.如权利要求 1 至 3 中任一项所述的微地震矩张量反演的方法，其特征在于，通过以下公式计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差：

$$\varepsilon(f) = 1 - (1 - \varepsilon_{ph}(f))(1 - \varepsilon_{amp}(f));$$

20 其中， $\varepsilon_{ph}(f) = u_{ph}^{calc}(x, f) - u_{ph}^{obs}(x, f)$ ； $\varepsilon_{amp}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f) - u_{amp}^{obs}(x, f)$ ； $\varepsilon(f)$ 是联合残差， $\varepsilon_{ph}(f)$ 是所述频率域相位谱残差； $u_{ph}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的相位； $u_{ph}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的相位； $\varepsilon_{amp}(f)$ 是所述频率域振幅谱残差； $u_{amp}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的振幅； $u_{amp}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的振幅。

25 5.如权利要求 4 所述的微地震矩张量反演的方法，其特征在于，通过以下公式根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱和所述模拟微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量：

$$u(x, f) = M_{ij}(f)G_{i,j}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f)e^{ju_{ph}^{calc}(x, f)}$$

其中， $u(x, f)$ 是频率域里频率 f 在点 x 所产生的位移； $M_{ij}(f)$ 是频率 f 的微地震矩张量； $G_{i,j}(f)$ 是频率 f 包括震源至接收点间的传播效应的格林函数； i 是微地震矩张量矩阵的行； j 是微地震矩张量矩阵的列。

5 6.一种微地震矩张量反演的装置，其特征在于，包括：

第一波形获取模块，用于获取频率域的观测微地震波形，在所述观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段，所述观测微地震波形是通过传感器记录得到的；

第二波形获取模块，用于获取频率域的模拟微地震波形，所述模拟微地震波形是
10 根据格林函数计算得到的；

计算模块，用于计算所选的波形频段的振幅谱和所述模拟微地震波形的振幅谱的频率域振幅谱残差，计算所选的波形频段的相位谱和所述模拟微地震波形的相位谱的频率域相位谱残差，计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差，并计算所述联合残差的最小值；

15 反演模块，用于根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱和所述模拟微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量。

7.如权利要求 6 所述的微地震矩张量反演的装置，其特征在于，所述预设值为 3。

8.如权利要求 6 所述的微地震矩张量反演的装置，其特征在于，还包括：

20 波形变换模块，用于通过快速傅立叶变换获取所述频率域的观测微地震波形和所述频率域的模拟微地震波形。

9.如权利要求 6 至 8 中任一项所述的微地震矩张量反演的装置，其特征在于，所述计算模块具体通过以下公式计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差：

$$\varepsilon(f) = 1 - (1 - \varepsilon_{ph}(f))(1 - \varepsilon_{amp}(f));$$

25 其中， $\varepsilon_{ph}(f) = u_{ph}^{calc}(x, f) - u_{ph}^{obs}(x, f)$ ； $\varepsilon_{amp}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f) - u_{amp}^{obs}(x, f)$ ； $\varepsilon(f)$ 是联合残差， $\varepsilon_{ph}(f)$ 是所述频率域相位谱残差； $u_{ph}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的相位； $u_{ph}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的相位； $\varepsilon_{amp}(f)$ 是所述频

率域振幅谱残差； $u_{amp}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的振幅； $u_{amp}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的振幅。

10.如权利要求 9 所述的微地震矩张量反演的装置，其特征在于，所述反演模块具体通过以下公式根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱和
5 所述模拟微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量：

$$u(x, f) = M_{ij}(f)G_{i,j}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f)e^{ju_{ph}^{calc}(x, f)}$$

其中， $u(x, f)$ 是频率域里频率 f 在点 x 所产生的位移； $M_{ij}(f)$ 是频率 f 的微地震矩张量； $G_{i,j}(f)$ 是频率 f 包括震源至接收点间的传播效应的格林函数； i 是微地震矩张量矩阵的行； j 是微地震矩张量矩阵的列。

一种微地震矩张量反演的方法及装置

技术领域

- 5 本发明涉及微地震监测技术领域，特别涉及一种微地震矩张量反演的方法及装置。

背景技术

- 10 微地震监测是了解井下水力压裂效果的重要手段，震源机制的矩张量反演是了解压裂过程中裂缝破裂情况的主要工具。采用广义反透射系数方法正演理论地震记录，用矩张量描述震源属性，求解观测记录和矩张量的线性方程组，反演出震源机制解，并得到水力压裂所产生裂缝的方位和倾角等参数，为压裂裂缝的解释和压裂效果评价提供依据。

- 15 震源参数包括震源断层面的走向、倾向和倾角，震源断层两盘错动的方向、幅度，震源断层面的长度、宽度、断层破裂的扩展速度、震源主应力状态以及错动时释放的应力等。震源机制和震源参数的资料对微地震机理分析至关重要。

- 矩张量反演现有技术中有许多种方法，通常采用在时域里进行矩张量反演，要求获取高质量的三分量记录，但是由于噪音、不精确的速度模型和不合理的检波器布设等因素的影响，大量微地震虽然能被检波器记录到，却由于信噪比低不够计算地震的震源机制解，使得反演结果可靠性低。
- 20

发明内容

- 本发明实施例提供了一种微地震矩张量反演的方法，以解决现有技术中在时域里进行矩张量反演时存在的反演结果可靠性低的技术问题。该方法包括：获取频率域的观测微地震波形，在所述观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段，所述观测微地震波形是通过传感器记录得到的；获取频率域的模拟微地震波形，所述模拟微地震波形是根据格林函数模拟得到的；计算所选的波形频段的振幅谱和所述模拟微地震波形的振幅谱的频率域振幅谱残差，计算所选的波形频段的相位谱和所述模拟微
- 25

地震波形的相位谱的频率域相位谱残差, 计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差, 并计算所述联合残差的最小值; 根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱和所述模拟微地震波形的振幅谱, 反演地震矩张量。

在一个实施例中, 所述预设值为 3。

- 5 在一个实施例中, 还包括: 通过快速傅立叶变换获取所述频率域的观测微地震波形和所述频率域的模拟微地震波形。

在一个实施例中, 通过以下公式计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差: $\varepsilon(f) = 1 - (1 - \varepsilon_{ph}(f))(1 - \varepsilon_{amp}(f))$; 其中, $\varepsilon_{ph}(f) = u_{ph}^{calc}(x, f) - u_{ph}^{obs}(x, f)$; $\varepsilon_{amp}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f) - u_{amp}^{obs}(x, f)$; $\varepsilon(f)$ 是联合残差, $\varepsilon_{ph}(f)$ 是所述频率域相位谱残差; $u_{ph}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的相位; $u_{ph}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的相位; $\varepsilon_{amp}(f)$ 是所述频率域振幅谱残差; $u_{amp}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的振幅; $u_{amp}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的振幅。

- 15 在一个实施例中, 通过以下公式根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱和所述模拟微地震波形的振幅谱, 反演微地震矩张量:

$u(x, f) = M_{ij}(f)G_{i,j}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f)e^{ju_{ph}^{calc}(x, f)}$, 其中, $u(x, f)$ 是频率域里频率 f 在点 x 所产生的位移; $M_{ij}(f)$ 是频率 f 的微地震矩张量; $G_{i,j}(f)$ 是频率 f 包括震源至接收点间的传播效应的格林函数; i 是微地震矩张量矩阵的行; j 是微地震矩张量矩阵的列。

- 20 本发明实施例还提供了一种微地震矩张量反演的装置, 以解决现有技术中在时域里进行矩张量反演时存在的反演结果可靠性低的技术问题。该装置包括: 第一波形获取模块, 用于获取频率域的观测微地震波形, 在所述观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段, 所述观测微地震波形是通过传感器记录得到的; 第二波形获取模块, 用于获取频率域的模拟微地震波形, 所述模拟微地震波形是根据格林函数模拟得到的; 计算模块, 用于计算所选的波形频段的振幅谱和所述模拟微地震波形的振幅谱的频率域振幅谱残差, 计算所选的波形频段的相位谱和所述模拟微地震波形的相位谱的频率域相位谱残差, 计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差, 并计算所述联合残差的最小值; 反演模块, 用于根据所述联合残差最小值对应

的所述模拟微地震波形的相位谱和所述模拟微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量。

在一个实施例中，所述预设值为 3。

5 在一个实施例中，还包括：波形变换模块，用于通过快速傅立叶变换获取所述频率域的观测微地震波形和所述频率域的模拟微地震波形。

在一个实施例中，所述计算模块具体通过以下公式计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差： $\varepsilon(f) = 1 - (1 - \varepsilon_{ph}(f))(1 - \varepsilon_{amp}(f))$ ；其中， $\varepsilon_{ph}(f) = u_{ph}^{calc}(x, f) - u_{ph}^{obs}(x, f)$ ； $\varepsilon_{amp}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f) - u_{amp}^{obs}(x, f)$ ； $\varepsilon(f)$ 是联合残差， $\varepsilon_{ph}(f)$ 是所述频率域相位谱残差； $u_{ph}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的相位； $u_{ph}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的相位； $\varepsilon_{amp}(f)$ 是所述频率域振幅谱残差； $u_{amp}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的振幅； $u_{amp}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的振幅。

15 在一个实施例中，所述反演模块具体通过以下公式根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱和所述模拟微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量： $u(x, f) = M_{ij}(f)G_{i,j}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f)e^{ju_{ph}^{calc}(x, f)}$ ，其中， $u(x, f)$ 是频率域里频率 f 在点 x 所产生的位移； $M_{ij}(f)$ 是频率 f 的微地震矩张量； $G_{i,j}(f)$ 是频率 f 包括震源至接收点间的传播效应的格林函数； i 是微地震矩张量矩阵的行； j 是微地震矩张量矩阵的列。

20 在本发明实施例中，提出采用频率域的观测微地震波形和模拟微地震波形进行微地震矩张量反演，具体采用频率域振幅谱残差和频率域相位谱残差的联合残差进行反演；同时，在反演前在观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段，以便基于选取的信噪比高的波形频段进行反演，摒弃信噪比低的频带。使得反演结果的稳健性对噪音干扰不敏感，提高了反演结果的可靠性。

25 附图说明

此处所说明的附图用来提供对本发明的进一步理解，构成本申请的一部分，并不构成对本发明的限定。在附图中：

图 1 是本发明实施例提供的一种微地震矩张量反演的方法的流程图；

图 2 是本发明实施例提供的一种二阶矩张量的分量示意图；

图 3 是本发明实施例提供的一种具体的微地震矩张量反演方法的流程图；

图 4 是本发明实施例提供的一种微地震矩张量反演的装置的结构框图。

5 具体实施方式

为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白，下面结合实施方式和附图，对本发明做进一步详细说明。在此，本发明的示意性实施方式及其说明用于解释本发明，但并不作为对本发明的限定。

在本发明实施例中，提供了一种微地震矩张量反演的方法，如图 1 所示，该方法
10 包括：

步骤 101：获取频率域的观测微地震波形，在所述观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段，所述观测微地震波形是通过传感器记录得到的；

步骤 102：获取频率域的模拟微地震波形，所述模拟微地震波形是根据格林函数计算得到的；

15 步骤 103：计算所选的波形频段的振幅谱和所述模拟微地震波形的振幅谱的频率域振幅谱残差，计算所选的波形频段的相位谱和所述模拟微地震波形的相位谱的频率域相位谱残差，计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差，并计算所述联合残差的最小值；

20 步骤 104：根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱和所述模拟微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量。

由图 1 所示的流程可知，在本发明实施例中，提出采用频率域的观测微地震波形和模拟微地震波形进行微地震矩张量反演，具体采用频率域振幅谱残差和频率域相位谱残差的联合残差进行反演；同时，在反演前在观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段，以便基于选取的信噪比高的波形频段进行反演，摒弃信噪比低的频
25 带。使得反演结果的稳健性对噪音干扰不敏感，提高了反演结果的可靠性。

具体实施时，在所述观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段时，所述预设值可以为 3。即基于信噪比大于 3 的波形频段进行微地震矩张量反演。

具体实施时，上述微地震矩张量反演的方法，还包括：通过快速傅立叶变换获取所述频率域的观测微地震波形和所述频率域的模拟微地震波形。

具体的，可以通过传感器观测记录时域的观测微地震波形，然后，通过快速傅立叶变换将时域的观测微地震波形变换为频率域的观测微地震波形。同时，可以先根据震源至接收点间的传播效应的格林函数模拟计算时域的模拟微地震波形，然后采用快速傅立叶变换将时域的模拟微地震波形变换为频率域的模拟微地震波形。

- 5 具体实施时，可以通过以下公式计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差：

$$\varepsilon(f) = 1 - (1 - \varepsilon_{ph}(f))(1 - \varepsilon_{amp}(f)) \quad (1)$$

其中，

$$\varepsilon_{ph}(f) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_{ph}^{(i)}(f)^2 \right)}{N} \right]^{1/2} = u_{ph}^{calc}(x, f) - u_{ph}^{obs}(x, f); \quad (2)$$

10

$$\varepsilon_{amp}(f) = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_{amp}^{(i)}(f)^2 \right)}{\left(\sum_{i=1}^N |u^i(x, f)|^2 \right)} \right]^{1/2} = u_{amp}^{calc}(x, f) - u_{amp}^{obs}(x, f); \quad (3)$$

$\varepsilon(f)$ 是联合残差， $\varepsilon_{ph}(f)$ 是所述频率域相位谱残差； $u_{ph}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的相位； $u_{ph}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的相位； $\varepsilon_{amp}(f)$ 是所述频率域振幅谱残差； $u_{amp}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的振幅； $u_{amp}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的振幅。

15

上述联合残差可采用 L1 范型或 L2 范型均可。

具体实施时，在计算上述联合残差时通过对上述公式（1）求偏导数来计算联合残差的最小值，计算得到联合残差的最小值后，获得联合残差最小值对应的所选的波形频段的相位谱、所选的波形频段的振幅谱、所述模拟微地震波形的相位谱以及所述模拟微地震波形的振幅谱，进而通过以下公式根据所述联合残差最小值对应的所选的波形频段的相位谱、所选的波形频段的振幅谱、所述模拟微地震波形的相位谱以及所述模拟微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量：

20

$$u(x, f) = M_{ij}(f)G_{i,j}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f)e^{ju_{ph}^{calc}(x, f)} \quad (4)$$

其中， $u(x, f)$ 是频率域里频率 f 在点 x 所产生的位移； $M_{ij}(f)$ 是频率 f 的微地震矩张量； $G_{i,j}(f)$ 是频率 f 包括震源至接收点间的传播效应的格林函数； i 是微地震矩张量矩阵的行； j 是微地震矩张量矩阵的列。

上述公式 (4) 可以采用最小二乘法进行求解。

5 具体的， $M_{ij} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}$

m_{ij} 为常数，代表二阶矩张量 M_{ij} 的分量。若 $i=j$ ，表明力和力臂在同一方向，为无矩单力偶；若 $i \neq j$ ，表明力作用于 i 方向，力臂在 j 方向，为一个力矩为 m_{ij} 的单力偶，具体的，如图 2 所示。

现有技术中，则采用以下公式 (5) 在时域进行微地震矩张量反演：

10 $u(x, t) = M_{ij}[G_{i,j} * s(t)]$ (5)

$u(x, t)$ 为时间域里时间 t 在点 x 所产生的位移； M_{ij} 为微地震矩张量； $G_{i,j}$ 为包括震源至接收点间的传播效应的格林函数； $s(t)$ 为震源的时间函数。

以下具体描述上述微地震矩张量反演的工作流程，如图 3 所示，该方法包括：

15 1、获取微地震波的原始资料，即获取传感器观测得到的时域的观测微地震波形，同时，根据格林函数模拟时域的模拟微地震波形，对时域的观测微地震波形和时域的模拟微地震波形进行预处理；

2、通过快速傅立叶变换将时域的观测微地震波形变换为频率域的观测微地震波形，将时域的模拟微地震波形变换为频率域的模拟微地震波形；

20 3、在频率域的观测微地震波形中选取信噪比高（例如，信噪比大于 3）的频带；

4、计算频率域的模拟微地震波形的振幅谱和相位谱，计算所选频段波形的振幅谱和相位谱，计算频率域的模拟微地震波形的振幅谱和所选频段波形的振幅谱的频率域振幅谱残差，计算模拟微地震波形的相位谱和所选频段波形的相位谱的频率域相位谱残差，计算频率域振幅谱残差和频率域相位谱残差的联合残差的最小值；可以采用

25 公式 (1)、(2) 以及 (3)；

5、根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱以及所述模拟

微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量，具体可以采用公式（4），直至小于某一限定的法制，计算结束。

上述微地震矩张量反演的方法的关键在于，根据波形记录找到频率域信噪比高的频带进行计算，摒弃信噪比低的频带，从而提高反演可靠性。

5 基于同一发明构思，本发明实施例中还提供了一种微地震矩张量反演的装置，如下的实施例所述。由于微地震矩张量反演的装置解决问题的原理与微地震矩张量反演的方法相似，因此微地震矩张量反演的装置的实施可以参见微地震矩张量反演的方法的实施，重复之处不再赘述。以下所使用的，术语“单元”或者“模块”可以实现预定功能的软件和/或硬件的组合。尽管以下实施例所描述的装置较佳地以软件来实现，
10 但是硬件，或者软件和硬件的组合的实现也是可能并被构想的。

图4是本发明实施例的微地震矩张量反演的装置的一种结构框图，如图4所示，该装置包括：

第一波形获取模块401，用于获取频率域的观测微地震波形，在所述观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段，所述观测微地震波形是通过传感器记录得
15 到的；

第二波形获取模块402，用于获取频率域的模拟微地震波形，所述模拟微地震波形是根据格林函数计算得到的；

计算模块403，用于计算所选的波形频段的振幅谱和所述模拟微地震波形的振幅谱的频率域振幅谱残差，计算所选的波形频段的相位谱和所述模拟微地震波形的相位
20 谱的频率域相位谱残差，计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差，并计算所述联合残差的最小值；

反演模块404，用于根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱和所述模拟微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量。

在一个实施例中，所述预设值为3。

25 在一个实施例中，还包括：波形变换模块，用于通过快速傅立叶变换获取所述频率域的观测微地震波形和所述频率域的模拟微地震波形。

在一个实施例中，所述计算模块具体通过以下公式计算所述频率域振幅谱残差和所述频率域相位谱残差的联合残差： $\varepsilon(f) = 1 - (1 - \varepsilon_{ph}(f))(1 - \varepsilon_{amp}(f))$ ；其中，

$\varepsilon_{ph}(f) = u_{ph}^{calc}(x, f) - u_{ph}^{obs}(x, f)$ ； $\varepsilon_{amp}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f) - u_{amp}^{obs}(x, f)$ ； $\varepsilon(f)$ 是联合残差，

$\varepsilon_{ph}(f)$ 是所述频率域相位谱残差； $u_{ph}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的相位； $u_{ph}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的相位； $\varepsilon_{amp}(f)$ 是所述频率域振幅谱残差； $u_{amp}^{calc}(x, f)$ 是所述模拟微地震波形的频率 f 在 x 点的振幅； $u_{amp}^{obs}(x, f)$ 是所选的波形频段的频率 f 在 x 点的振幅。

5 在一个实施例中，所述反演模块具体通过以下公式根据所述联合残差最小值对应的所述模拟微地震波形的相位谱和所述模拟微地震波形的振幅谱，反演微地震矩张量： $u(x, f) = M_{ij}(f)G_{i,j}(f) = u_{amp}^{calc}(x, f)e^{ju_{ph}^{calc}(x, f)}$ ，其中， $u(x, f)$ 是频率域里频率 f 在点 x 所产生的位移； $M_{ij}(f)$ 是频率 f 的微地震矩张量； $G_{i,j}(f)$ 是频率 f 包括震源至接收点间的传播效应的格林函数； i 是微地震矩张量矩阵的行； j 是微地震矩张量矩阵的
10 列。

在本发明实施例中，提出采用频率域的观测微地震波形和模拟微地震波形进行微地震矩张量反演，具体采用频率域振幅谱残差和频率域相位谱残差的联合残差进行反演；同时，在反演前在观测微地震波形中选取信噪比大于预设值的波形频段，以便基于选取的信噪比高的波形频段进行反演，摒弃信噪比低的频带。使得反演结果的稳健
15 性对噪音干扰不敏感，提高了反演结果的可靠性。

显然，本领域的技术人员应该明白，上述的本发明实施例的各模块或各步骤可以用通用的计算装置来实现，它们可以集中在单个的计算装置上，或者分布在多个计算装置所组成的网络上，可选地，它们可以用计算装置可执行的程序代码来实现，从而，
20 此处的顺序执行所示出或描述的步骤，或者将它们分别制作成各个集成电路模块，或者将它们中的多个模块或步骤制作成单个集成电路模块来实现。这样，本发明实施例不限制于任何特定的硬件和软件结合。

以上所述仅为本发明的优选实施例而已，并不用于限制本发明，对于本领域的技术人员来说，本发明实施例可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内，
25 所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

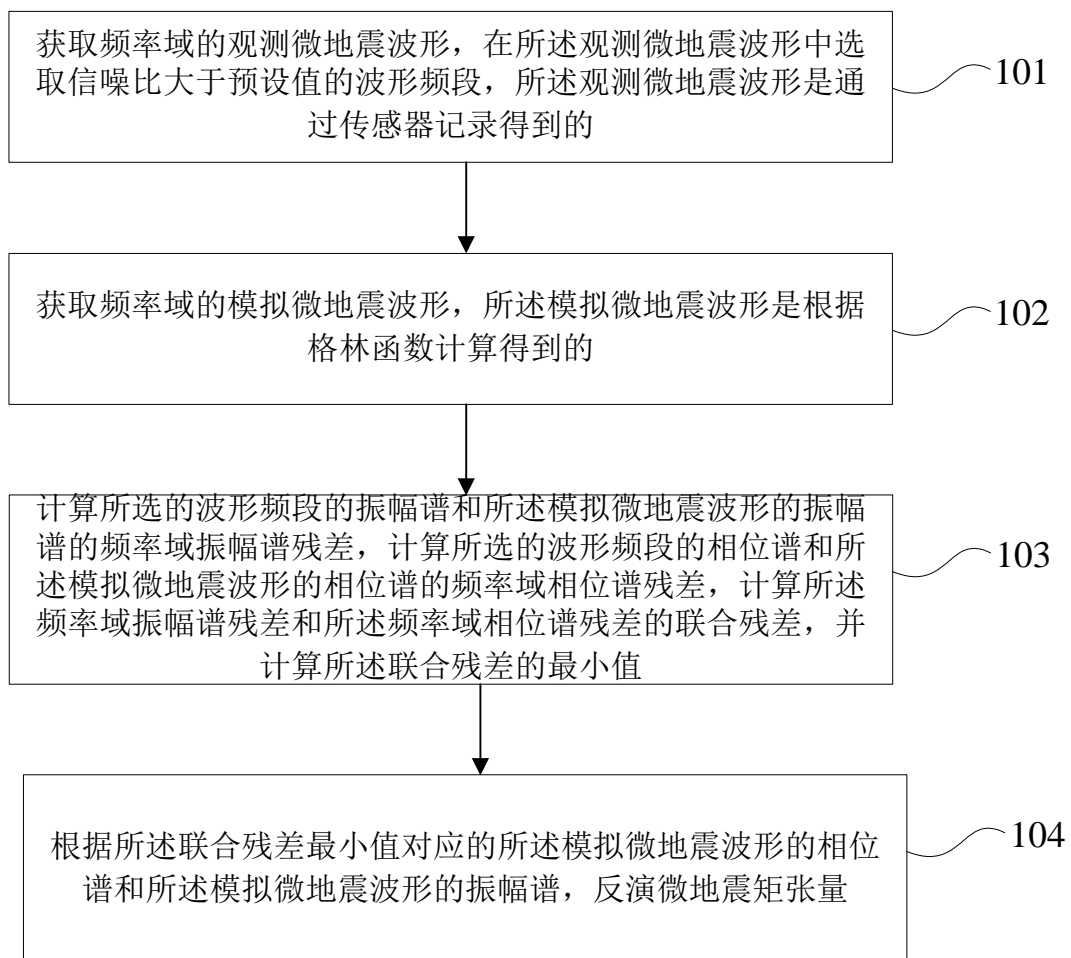


图 1

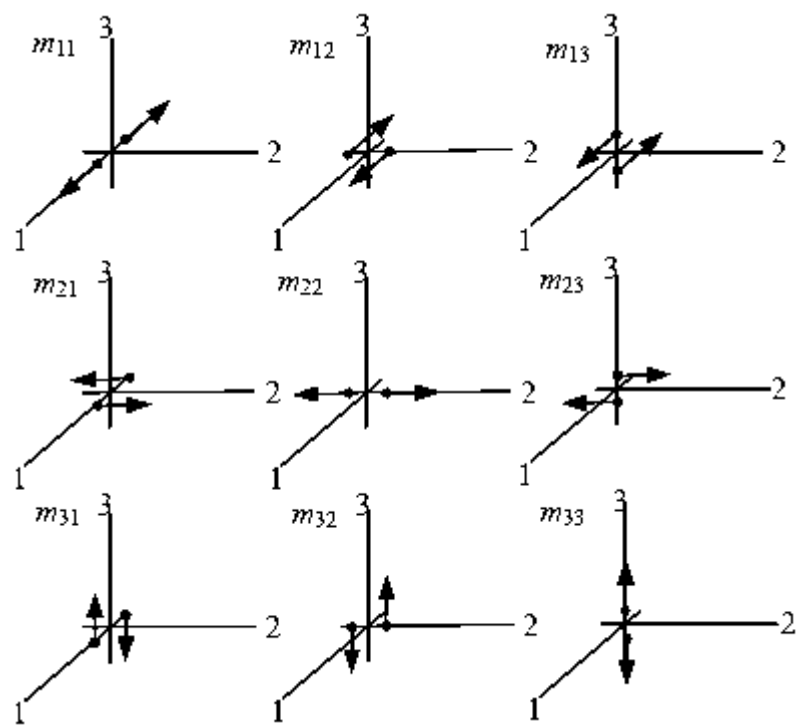


图 2

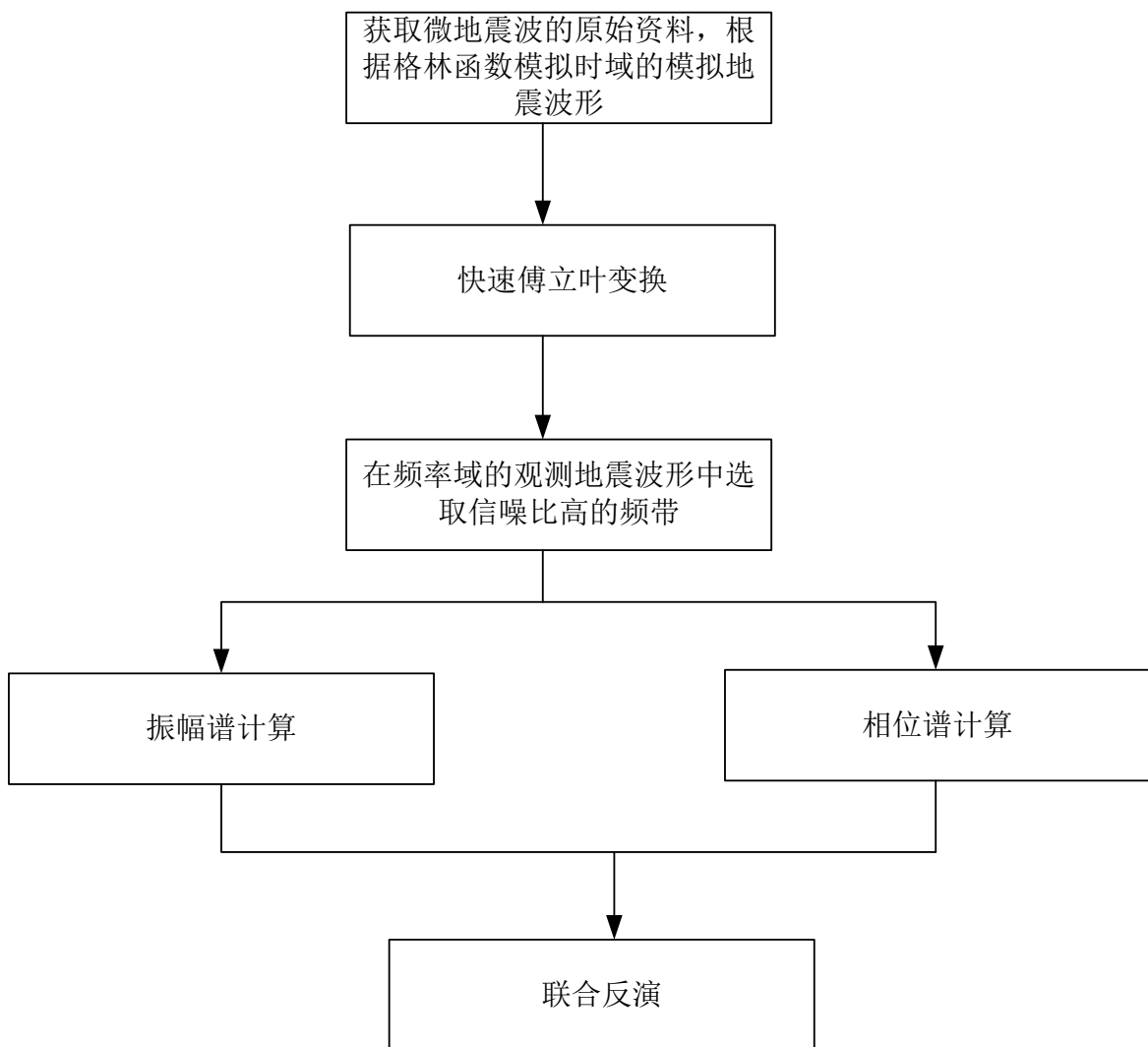


图 3



图 4