

(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

(43) 国际公布日
2019 年 4 月 18 日 (18.04.2019)



(10) 国际公布号
WO 2019/071504 A1

(51) 国际专利分类号:
G01V 1/28 (2006.01)

广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道
1088号, Guangdong 518055 (CN)。

(21) 国际申请号: PCT/CN2017/105817

(22) 国际申请日: 2017 年 10 月 12 日 (12.10.2017)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 南方科技大学(SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区西丽学苑大道 1088 号, Guangdong 518055 (CN)。

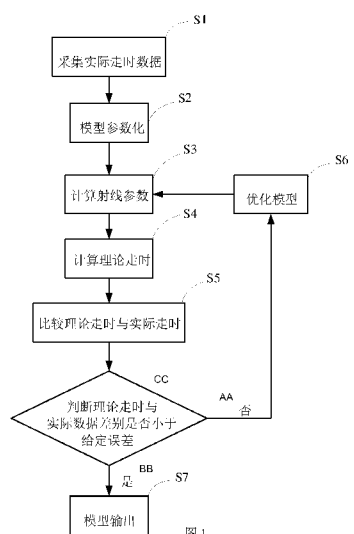
(72) 发明人: 方鑫定(FANG, Xinding); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1088 号, Guangdong 518055 (CN)。 陈晓非(CHEN, Xiaofei); 中国广

(74) 代理人: 深圳中一专利商标事务所(SHENZHEN ZHONGYI PATENT AND TRADEMARK OFFICE); 中国广东省深圳市福田区深南中路 1014 号老特区报社四楼 (5 号信箱), Guangdong 518028 (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, 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,

(54) Title: TWO-POINT RAY TRACING BASED SEISMIC TRAVEL TIME TOMOGRAPHY INVERSION METHOD

(54) 发明名称: 一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法



S1 ACQUIRE ACTUAL TRAVEL TIME DATA
S2 PARAMETERIZE A MODEL
S3 CALCULATE A RAY PARAMETER
S4 CALCULATE A THEORETICAL TRAVEL TIME
S5 COMPARING THE THEORETICAL TRAVEL TIME AND THE ACTUAL TRAVEL TIME
S6 OPTIMIZE THE MODEL
S7 OUTPUT THE MODEL
AA NO
BB YES
CC DETERMINE WHETHER THE DIFFERENCE BETWEEN THE THEORETICAL TRAVEL TIME AND THE ACTUAL DATA IS LESS THAN A GIVEN ERROR

(57) Abstract: A two-point ray tracing based seismic travel time tomography inversion method, comprising the steps of: acquiring seismic data (S1); establishing an initial one-dimensional continuous layered model in which the speed in a layer can continuously change (S2); representing a ray parameter p by a variable q , representing a hypocentral distance X as a function $X=f(q)$ of the variable q , solving the $X=f(q)$ by using the Newton iteration method (S3); calculating the direct wave travel time and the reflected wave travel time according to the ray parameter p (S4); comparing the theoretical arrival time and the actual data arrival time (S5); and adjusting the model speed parameter by means of the optimization algorithm until the difference between the theoretical arrival time and the actual arrival time meets a given error criterion (S6). According to the present invention, by establishing the one-dimensional continuous layered model in which stratum speed can continuously change, the number of division layers is greatly reduced, such that the actual stratum speed structure is described more accurately, improving the inversion calculation efficiency; and the ray parameter p is solved by using the variable q , which ensures fast and stable convergence even in the case of large incident angles.

(57) 摘要: 一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法, 包括步骤: 地震数据采集 (S1); 建立层内速度可连续变化的初始一维连续层状模型 (S2); 将射线参数 p 用变量 q 表示, 震源距 X 表示为变量 q 的函数 $X=f(q)$, 利用牛顿迭代法求解 $X=f(q)$ (S3), 根据射线参数 p 计算直达波走时和反射波走时 (S4); 比较理论到时的和实际数据到时的 (S5), 用最优化算法调整模型速度参数, 直到理论到时的和实际到时的差别满足给定的误差标准为止 (S6)。通过建立地层速度可连续变化的一维连续层状模型, 大大减少了划分层数, 使实际地层速度结构描述地更加准确, 提高了反演计算效率; 并且通过利用变量 q 求解射线参数 p , 保证了在大入射角的情况下也能快速稳定收敛。

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))。

一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法

技术领域

本发明涉及地震勘探领域，尤其涉及一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法。

5 背景技术

地震层析成像是利用地震观测数据反演研究区域速度结构的一种方法。地震层析成像的原理类似于医学 CT 技术，是根据弹性波理论及其在地层介质中的传播规律，对观测得到的弹性波在岩土体介质中的走时或波形进行反演计算，重建被测范围内岩体弹性波速度分布规律的图像，从而达到确定地层结构或圈定地质异常体的一种物探反演解释方法。基于射线理论的射线追踪法是正演算法的一种，射线追踪法基于高频近似，只计算源点到接收点的射线路径，计算效率高。反演计算一般是采用最优化算法，例如最速下降法、共轭梯度法、牛顿迭代法、随机搜索等，求解满足给定最小误差准则的最优解。

当地层速度只在深度方向上变化，水平方向上无变化时，地震层析成像可用一维速度模型描述研究区域的速度结构，即速度只是深度的函数。在近地表浅层的层析成像问题中，小区域范围内的地层速度变化一般可用一维模型近似，在地震数据采集密度不高的情况下，工程物探一般会采用基于一维模型的地震层析成像方法。现有的一维走时层析速度反演假设每层层内速度都是均匀的，通过多次迭代来得到一个层状的速度模型，一般需要划分比较多的层数才能比较准确地描述实际地层速度变化的特征。实际地层的速度变化多为非均匀且呈现出连续变化的特征，因此利用现有技术得到的结果存在固有近似性。并且层数越多需要反演的模型参数就越多，因而地震层析成像的计算量越大。另

外，在大入射角的情况下（一般震源与接收点的距离比地震信号反射深度大很多的时候会出现此情况），利用现有技术中的两点走时射线追踪牛顿迭代方法存在收敛慢或不收敛的问题。

技术问题

- 5 本发明的目的在于提供一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法，旨在解决现有技术中地震层析成像的计算量繁重和现有的两点走时射线追踪牛顿迭代方法存在的收敛慢或不收敛的问题。

技术方案

- 为解决上述技术问题，本发明是这样实现的，一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法，包括下述步骤：
- 10

 在研究区域进行地震数据采集，获取直达波走时数据和反射波走时数据；
 对研究区域进行模型参数化，建立层内速度可连续变化的初始一维连续层状模型；

- 根据所述层内速度可连续变化的一维连续层状模型，将射线参数 p 用变量 q 表示，震源距 X 表示为变量 q 的函数 $X = f(q)$ ，利用牛顿迭代法求解 $X = f(q)$ ，进而得到射线参数 p ，射线路径由射线参数 p 唯一确定，得到射线参数 p 后，计算得到理论的直达波走时和反射波走时；
- 15

- 比较计算得到的理论直达波走时和反射波走时与所述地震数据采集获得的实际的直达波走时数据和反射波走时数据，判断理论直达波走时和反射波走时与
20 时与所述地震数据采集获得的实际的直达波走时数据和反射波走时数据的差别是否满足给定的误差标准，是则进行模型输出，否则进行下一步；

 用最优化算法调整所述层内速度可连续变化的一维连续层状模型，直到计算得到的理论的直达波走时和反射波走时和实际的直达波走时数据和反射波

走时数据的差别满足给定的误差标准为止，并进行模型输出。

有益效果

与现有技术相比，本发明提供的基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法与现有技术相比存在以下有益效果：通过建立地层速度可连续变化的一维连续层状模型，使基于此模型的反演变量数可以大幅度减少，可以更加准确地描述实际地层速度结构，显著提高反演计算效率；通过将射线参数 p 用变量 q 表示，间接利用变量 q 求解射线参数 p ，使得迭代求解过程稳定，收敛快速，有效避免在大入射角的情况下迭代不收敛的问题。

附图说明

10 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其它的附图。

15 图 1 是本发明实施例提供的基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法流程图；

图 2 是本发明实施例提供的基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法连续层状模型的参数定义；

图 3 是本发明实施例提供的基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法地层模型示意图；

20 图 4 是本发明实施例提供的基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法地震勘探地表数据采集示意图；

图 5 是本发明实施例提供的基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法地表激发垂直地震剖面示意图；

图 6 是本发明实施例提供的基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法井中激发垂直地震剖面示意图;

图 7 是本发明实施例提供的基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法井间成像示意图。

5 本发明的实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白, 以下结合附图及实施例, 对本发明进行进一步详细说明。应当理解, 此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明, 并不用于限定本发明。

请参阅图 1 至图 3, 本发明实施例提供了一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法, 该方法包括下述步骤:

步骤 S1: 采集实际走时数据。在研究区域进行地震数据采集, 获取直达波走时数据和反射波走时数据;

步骤 S2: 模型参数化。对研究区域进行模型参数化, 建立层内速度可连续变化的初始一维连续层状模型;

具体地, 该层内速度可以是纵波或横波速度, 随深度递增或递减;

步骤 S3: 计算射线参数。根据层内速度可连续变化的一维连续层状模型, 将射线参数 p 用变量 q 表示, 震源距 X 表示为变量 q 的函数 $X = f(q)$, 利用牛顿迭代法求解 $X = f(q)$, 进而得到射线参数 p , 射线路径由射线参数 p 唯一确定;

步骤 S4: 计算理论走时。根据射线参数 p 计算直达波走时和反射波走时;

步骤 S5: 比较理论走时与实际走时。比较计算得到的理论直达波走时和反射波走时与所述地震数据采集获得的实际的直达波走时数据和反射波走时数据, 判断理论直达波走时和反射波走时与所述地震数据采集获得的实际的直

达波走时数据和反射波走时数据的差别是否满足给定的误差标准，是则进行步骤 S7，否则进行步骤 S6；

步骤 S6：优化模型。用最优化算法调整层内速度可连续变化的一维连续层状模型，直到计算得到的理论的直达波走时和反射波走时和实际的直达波走时数据和反射波走时数据的差别满足给定的误差标准为止。

具体地，使用的最优化算法可以为最速下降法、共轭梯度法、牛顿迭代法、随机搜索等方法；

步骤 S7：模型输出。计算得到的理论到时和实际数据到时的差别满足给定的误差标准后，进行模型输出。

本发明实施例提供的基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法建立了层内速度可连续变化的一维连续层状模型，将层内速度表示为深度的函数，此模型允许层内速度连续变化，大大减少了划分层数，从而大幅度减少了反演变量数，可以更加准确地描述实际地层速度结构，显著提高反演计算效率；并且通过将射线参数 p 用变量 q 表示，间接利用变量 q 求解射线参数 p ，使得迭代求解过程稳定，收敛快速，有效避免了在大入射角的情况下迭代不收敛的问题。

进一步地，请参考图 2，在层内速度可连续变化的一维连续层状模型中，层内速度 V_k 为深度 z 的函数，第 k 层速度函数表示为：

$$V_k = a_k z + b_k,$$

其中，下标 k 表示第 k 层， a_k 和 b_k 是需要反演的模型参数，分别为第 k 层速度函数的梯度和截距，当反演地层纵波速度模型时，层内速度 V_k 为纵波速度；当反演地层横波速度模型时，则层内速度 V_k 为横波速度；当反演地层

转换波速度模型时，则层内速度 V_k 由层内转换波属性决定其为纵波速度或横波速度，这里的转换波为纵波到横波转换波或横波到纵波转换波，该层内转换波属性为纵波属性或横波属性。

当 $a_k=0$ 时，表示在第 k 层为层内速度不变的均匀层。

- 5 进一步地，根据斯涅尔定律，震源距 X 表示为射线参数 p 的函数，震源距 X 表示为：

$$X = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \frac{\mu_k}{a_k} \left(\sqrt{p^{-2} - \varepsilon_k} - \sqrt{p^{-2} - \omega_k} \right) + (1 - \delta_k^{(a)}) \frac{\mu_k h_k}{\sqrt{p^{-2} - \varepsilon_k}} \right],$$

其中，各项定义为：

$$\varepsilon_k = \begin{cases} (a_k z^{(k-1)} + b_k)^2 & k=1,2,\dots,n \\ (a_s z^{(s-1)} + b_s)^2 & k=0 \end{cases};$$

$$10 \quad \omega_k = \begin{cases} (a_k z^{(k)} + b_k)^2 & k=1,2,\dots,n \\ (a_s z_s + b_s)^2 & k=0 \end{cases};$$

$$h_k = \begin{cases} (a_k z^{(k-1)} + b_k)(z^{(k)} - z^{(k-1)}) & k=1,2,\dots,n \\ (a_s z^{(s-1)} + b_s)(z_s - z^{(s-1)}) & k=0 \end{cases};$$

$$\mu_k = \begin{cases} 1 & k=1, \dots, s-1 \quad (\text{所有波}) \\ 0 & k=s, \dots, n \quad (\text{直达波}) \\ 2 & k=s, \dots, n \quad (\text{反射波}) \\ 1-\mu_s & k=0 \end{cases};$$

$$\delta_k^{(a)} = \begin{cases} 1 & a_k \neq 0 \\ 0 & a_k = 0 \end{cases}$$

其中, ε_k , ω_k , h_k , μ_k 和 δ_k 为中间参数, 下标 s 表示震源所在的层, 可取值范围为 1 至 n , n 为反射波反射发生所在层的标号, z_s 为震源深度, $z^{(k)}$ 表示第 k 层的深度, 下标 k 表示第 k 层, $k=0$ 项是关于震源位置的一个修正项。

进一步地, 为了避免在大入射角情况下迭代不收敛的问题, 将射线参数 p 用变量 q 表示为: $p = \sqrt{\frac{q^2}{V_M^2(1+q^2)}}$, 其中, V_M 为模拟射线路径经过地层的最大速度。

进一步地, 将震源距 X 表示为变量 q 的函数, 震源距 X 表示为:

$$X = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \tilde{\mu}_k \left(\sqrt{q^{-2} + \tilde{\varepsilon}_k} - \sqrt{q^{-2} + \tilde{\omega}_k} \right) + (1 - \delta_k^{(a)}) \frac{\tilde{h}_k}{\sqrt{q^{-2} + \tilde{\varepsilon}_k}} \right],$$

其中, 各项定义为:

$$\tilde{\mu}_k = \frac{\mu_k V_M}{a_k};$$

$$\tilde{h}_k = \frac{\mu_k h_k}{V_M};$$

$$\tilde{\varepsilon}_k = 1 - \frac{\varepsilon_k}{V_M^2};$$

$$\tilde{\omega}_k = 1 - \frac{\omega_k}{V_M^2},$$

给定震源距 X ，利用牛顿迭代法求解 $X = f(q)$ ，得到参数 q 的值，将参数 q 代回到与射线参数 p 的关系式中，即可得到射线参数 p 的值。

- 5 进一步地，牛顿迭代法求解方程 $X = f(q)$ 时， q 的初值通过以下方法获得：
将震源距 X 和变量 q 用有理函数公式逼近，有理函数公式为：

$$X = \frac{\alpha_1 q + \alpha_2 q^2}{1 + \beta_1 q + \beta_2 q^2},$$

其中，系数 α_1 ， α_2 ， β_1 和 β_2 通过有理函数公式和震源 X 的函数公式的泰勒展开式获得，利用上述有理函数公式，获得 q 的初值估算公式：

$$10 \quad q = \frac{\beta_1 X - \alpha_1 + \sqrt{(\beta_1^2 - 4\beta_2)X^2 + 2(2\alpha_2 - \alpha_1\beta_1)X + \alpha_1^2}}{2(\alpha_2 - \beta_2 X)},$$

其中，各项系数 α_1 ， α_2 ， β_1 和 β_2 的表达式分别为：

$$\alpha_1 = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \frac{1}{2} \tilde{\mu}_k (\tilde{\varepsilon}_k - \tilde{\omega}_k) + (1 - \delta_k^{(a)}) \tilde{h}_k \right];$$

$$\alpha_2 = \frac{c_0(c_0^2 + dc_{-1})}{c_{-1}^2 - c_0 c_{-2}};$$

$$\beta_1 = \frac{c_0 c_{-1} + dc_{-2}}{c_0 c_{-2} - c_{-1}^2};$$

$$\beta_2 = \frac{c_0^2 + dc_{-1}}{c_{-1}^2 - c_0 c_{-2}};$$

$$c_0 = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \tilde{\mu}_k (\delta_k^{(\varepsilon)} \sqrt{\tilde{\varepsilon}_k} - \delta_k^{(\omega)} \sqrt{\tilde{\omega}_k}) + (1 - \delta_k^{(a)}) \delta_k^{(\varepsilon)} \frac{\tilde{h}_k}{\sqrt{\tilde{\varepsilon}_k}} \right];$$

$$c_1 = \sum_{k=0}^n [(1 - \delta_k^{(a)}) (1 - \delta_k^{(\varepsilon)}) \tilde{h}_k];$$

$$c_{-1} = \sum_{k=0}^n [\delta_k^{(a)} (\delta_k^{(\omega)} - \delta_k^{(\varepsilon)}) \tilde{\mu}_k];$$

$$5 \quad c_{-2} = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \frac{1}{2} \tilde{\mu}_k \left(\frac{\delta_k^{(\varepsilon)}}{\sqrt{\tilde{\varepsilon}_k}} - \frac{\delta_k^{(\omega)}}{\sqrt{\tilde{\omega}_k}} \right) - (1 - \delta_k^{(a)}) \delta_k^{(\varepsilon)} \frac{\tilde{h}_k}{2\tilde{\varepsilon}_k^{3/2}} \right];$$

$$\delta_k^{(\varepsilon)} = \begin{cases} 1 & \tilde{\varepsilon}_k \neq 0 \\ 0 & \tilde{\varepsilon}_k = 0 \end{cases};$$

$$\delta_k^{(\omega)} = \begin{cases} 1 & \tilde{\omega}_k \neq 0 \\ 0 & \tilde{\omega}_k = 0 \end{cases};$$

利用所述 q 的初值估算公式获得初值进行迭代计算, 经过迭代得到 q 的精确解。利用此方法获得的初值精度一般能达到 95% 以上, 只需要 1 至 3 次迭代
10 就可以得到 q 的精确解。

进一步地, 得到射线参数 p 的值后, 直达波走时和反射波走时的计算公式为:

$$T = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \frac{\mu_k}{a_k} \ln \left(\sqrt{\frac{\omega_k}{\varepsilon_k}} \times \frac{1 + \sqrt{1 - \varepsilon_k p^2}}{1 + \sqrt{1 - \omega_k p^2}} \right) + (1 - \delta_k^{(a)}) \frac{\mu_k h_k}{\varepsilon_k \sqrt{1 - \varepsilon_k p^2}} \right]。$$

进一步地，请参考图 4 至图 7，在研究区域进行地震数据采集的步骤具体为：

如图 4 所示的地表地震勘探，震源和接收检波器都布置在地表；

- 5 或者为：如图 5 所示的垂直地震剖面勘探，震源在地表，接收器在井中；
 或者为：如图 6 所示的垂直地震剖面勘探，震源在井中，接收器在地表；
 或者为：如图 7 所示的井间成像勘探，震源和接收检波器在两口不同的井中。

进一步地，地震数据采集采用的地震信号是纵波、或横波、或纵波到横波
 10 的转换波，或横波到纵波的转换波。

以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1、一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法，其特征在于，包括下述步骤：

在研究区域进行地震数据采集，获取直达波走时数据和反射波走时数据；

5 对研究区域进行模型参数化，建立层内速度可连续变化的初始一维连续层状模型；

根据所述层内速度可连续变化的一维连续层状模型，将射线参数 p 用变量 q 表示，震源距 X 表示为变量 q 的函数 $X = f(q)$ ，利用牛顿迭代法求解 $X = f(q)$ ，进而得到射线参数 p ，射线路径由射线参数 p 唯一确定，得到射线
10 参数 p 后，计算得到理论的直达波走时和反射波走时；

比较计算得到的理论直达波走时和反射波走时与所述地震数据采集获得的实际的直达波走时数据和反射波走时数据，判断理论直达波走时和反射波走时与所述地震数据采集获得的实际的直达波走时数据和反射波走时数据的差别是否满足给定的误差标准，是则进行模型输出，否则进行下一步；

15 用最优化算法调整所述层内速度可连续变化的一维连续层状模型，直到计算得到的理论的直达波走时和反射波走时和实际的直达波走时数据和反射波走时数据的差别满足给定的误差标准为止，并进行模型输出。

2、根据权利要求 1 所述的一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法，其特征在于，在所述层内速度可连续变化的一维连续层状模型中，层内速度 V_k 为深度 z 的函数，第 k 层速度函数表示为：

20

$$V_k = a_k z + b_k,$$

其中，下标 k 表示第 k 层， a_k 和 b_k 是需要反演的模型参数，分别为所述第 k 层速度函数的梯度和截距，当反演地层纵波速度模型时，所述层内速度 V_k 为纵波速度；当反演地层横波速度模型时，则所述层内速度 V_k 为横波速度；当反演地层转换波速度模型时，则所述层内速度 V_k 由层内转换波属性决定其
 5 为纵波速度或横波速度，所述转换波为纵波到横波转换波或横波到纵波转换波，所述层内转换波属性为纵波属性或横波属性。

3、根据权利要求 2 所述的一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法，其特征在于，当 $a_k=0$ 时，所述层内速度可连续变化的一维连续层状模型在第 k 层为层内速度不变的均匀层。

10 4、根据权利要求 1 所述的一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法，其特征在于，根据斯涅尔定律，震源距 X 表示为射线参数 p 的函数，震源距 X 表示为：

$$X = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \frac{\mu_k}{a_k} \left(\sqrt{p^{-2} - \varepsilon_k} - \sqrt{p^{-2} - \omega_k} \right) + (1 - \delta_k^{(a)}) \frac{\mu_k h_k}{\sqrt{p^{-2} - \varepsilon_k}} \right],$$

其中，各项定义为：

$$15 \quad \varepsilon_k = \begin{cases} (a_k z^{(k-1)} + b_k)^2 & k = 1, 2, \dots, n \\ (a_s z^{(s-1)} + b_s)^2 & k = 0 \end{cases};$$

$$\omega_k = \begin{cases} (a_k z^{(k)} + b_k)^2 & k = 1, 2, \dots, n \\ (a_s z_s + b_s)^2 & k = 0 \end{cases};$$

$$h_k = \begin{cases} (a_k z^{(k-1)} + b_k)(z^{(k)} - z^{(k-1)}) & k = 1, 2, \dots, n \\ (a_s z^{(s-1)} + b_s)(z_s - z^{(s-1)}) & k = 0 \end{cases};$$

$$\mu_k = \begin{cases} 1 & k = 1, \dots, s-1 \quad (\text{所有波}) \\ 0 & k = s, \dots, n \quad (\text{直达波}) \\ 2 & k = s, \dots, n \quad (\text{反射波}) \\ 1 - \mu_s & k = 0 \end{cases};$$

$$\delta_k^{(a)} = \begin{cases} 1 & a_k \neq 0 \\ 0 & a_k = 0 \end{cases}$$

其中, ε_k , ω_k , h_k , μ_k 和 δ_k 为中间参数, 下标 s 表示震源所在的层, 可取值范围
5 围为 1 至 n , n 为反射波反射发生所在层的标号, z_s 为震源深度, $z^{(k)}$ 表示第 k 层的深度, 下标 k 表示第 k 层, $k=0$ 项是关于震源位置的一个修正项。

5、根据权利要求 4 所述的一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法, 其特征在于, 所述射线参数 p 用变量 q 表示为: $p = \sqrt{\frac{q^2}{V_M^2(1+q^2)}}$, 其中,
10 V_M 为模拟射线路径经过地层的最大速度。

10 6、根据权利要求 5 所述的一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法, 其特征在于, 将所述震源距 X 表示为所述变量 q 的函数, 震源距 X 表示为:

$$X = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \tilde{\mu}_k \left(\sqrt{q^{-2} + \tilde{\varepsilon}_k} - \sqrt{q^{-2} + \tilde{\omega}_k} \right) + (1 - \delta_k^{(a)}) \frac{\tilde{h}_k}{\sqrt{q^{-2} + \tilde{\varepsilon}_k}} \right],$$

其中，各项定义为：

$$\tilde{\mu}_k = \frac{\mu_k V_M}{a_k};$$

$$\tilde{h}_k = \frac{\mu_k h_k}{V_M};$$

$$\tilde{\varepsilon}_k = 1 - \frac{\varepsilon_k}{V_M^2};$$

$$5 \quad \tilde{\omega}_k = 1 - \frac{\omega_k}{V_M^2},$$

给定震源距 X ，利用牛顿迭代法求解 $X = f(q)$ ，得到所述参数 q 的值，将所述参数 q 代回到与射线参数 p 的关系式 $p = \sqrt{\frac{q^2}{V_M^2(1+q^2)}}$ 中，即可得到射线参数 p 的值。

7、根据权利要求 6 所述的一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法，其特征在于，牛顿迭代法求解方程 $X = f(q)$ 时， q 的初值通过以下方法获得：将所述震源距 X 和所述变量 q 用有理函数公式逼近，所述有理函数公式为：

$$X = \frac{\alpha_1 q + \alpha_2 q^2}{1 + \beta_1 q + \beta_2 q^2},$$

其中，系数 α_1 ， α_2 ， β_1 和 β_2 通过对比所述有理函数公式和所述震源距 X 的函数公式的泰勒展开式获得，利用所述有理函数公式，获得 q 的初值估算公式：

$$q = \frac{\beta_1 X - \alpha_1 + \sqrt{(\beta_1^2 - 4\beta_2)X^2 + 2(2\alpha_2 - \alpha_1\beta_1)X + \alpha_1^2}}{2(\alpha_2 - \beta_2 X)},$$

其中，各项系数 α_1 ， α_2 ， β_1 和 β_2 的表达式分别为：

$$\alpha_1 = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \frac{1}{2} \tilde{\mu}_k (\tilde{\varepsilon}_k - \tilde{\omega}_k) + (1 - \delta_k^{(a)}) \tilde{h}_k \right];$$

$$\alpha_2 = \frac{c_0(c_0^2 + dc_{-1})}{c_{-1}^2 - c_0 c_{-2}};$$

$$5 \quad \beta_1 = \frac{c_0 c_{-1} + dc_{-2}}{c_0 c_{-2} - c_{-1}^2};$$

$$\beta_2 = \frac{c_0^2 + dc_{-1}}{c_{-1}^2 - c_0 c_{-2}};$$

$$c_0 = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \tilde{\mu}_k (\delta_k^{(\varepsilon)} \sqrt{\tilde{\varepsilon}_k} - \delta_k^{(\omega)} \sqrt{\tilde{\omega}_k}) + (1 - \delta_k^{(a)}) \delta_k^{(\varepsilon)} \frac{\tilde{h}_k}{\sqrt{\tilde{\varepsilon}_k}} \right];$$

$$c_1 = \sum_{k=0}^n [(1 - \delta_k^{(a)}) (1 - \delta_k^{(\varepsilon)}) \tilde{h}_k];$$

$$c_{-1} = \sum_{k=0}^n [\delta_k^{(a)} (\delta_k^{(\omega)} - \delta_k^{(\varepsilon)}) \tilde{\mu}_k];$$

$$10 \quad c_{-2} = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \frac{1}{2} \tilde{\mu}_k \left(\frac{\delta_k^{(\varepsilon)}}{\sqrt{\tilde{\varepsilon}_k}} - \frac{\delta_k^{(\omega)}}{\sqrt{\tilde{\omega}_k}} \right) - (1 - \delta_k^{(a)}) \delta_k^{(\varepsilon)} \frac{\tilde{h}_k}{2\tilde{\varepsilon}_k^{3/2}} \right];$$

$$\delta_k^{(\varepsilon)} = \begin{cases} 1 & \tilde{\varepsilon}_k \neq 0 \\ 0 & \tilde{\varepsilon}_k = 0 \end{cases};$$

$$\delta_k^{(\omega)} = \begin{cases} 1 & \tilde{\omega}_k \neq 0 \\ 0 & \tilde{\omega}_k = 0 \end{cases};$$

利用所述 q 的初值估算公式获得初值进行迭代计算, 经过迭代得到 q 的精确解。

8、根据权利要求 1 至 7 所述的一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法, 其特征在于, 所述直达波走时和反射波走时的计算公式为:

$$T = \sum_{k=0}^n \left[\delta_k^{(a)} \frac{\mu_k}{a_k} \ln \left(\sqrt{\frac{\omega_k}{\varepsilon_k}} \times \frac{1 + \sqrt{1 - \varepsilon_k p^2}}{1 + \sqrt{1 - \omega_k p^2}} \right) + (1 - \delta_k^{(a)}) \frac{\mu_k h_k}{\varepsilon_k \sqrt{1 - \varepsilon_k p^2}} \right]。$$

9、根据权利要求 1 所述的一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法, 其特征在于, 所述在研究区域进行地震数据采集的步骤具体为:

地表地震勘探, 震源和接收检波器都布置在地表;

10 或者为: 垂直地震剖面, 震源在地表, 接收器在井中;

或者为: 垂直地震剖面, 震源在井中, 接收器在地表;

或者为: 井间成像, 震源和接收检波器在两口不同的井中。

10、根据权利要求 1 所述的一种基于两点射线追踪的地震走时层析反演方法, 其特征在于, 所述地震数据采集采用的地震信号是纵波、或横波、或纵波
15 到横波的转换波, 或横波到纵波的转换波。

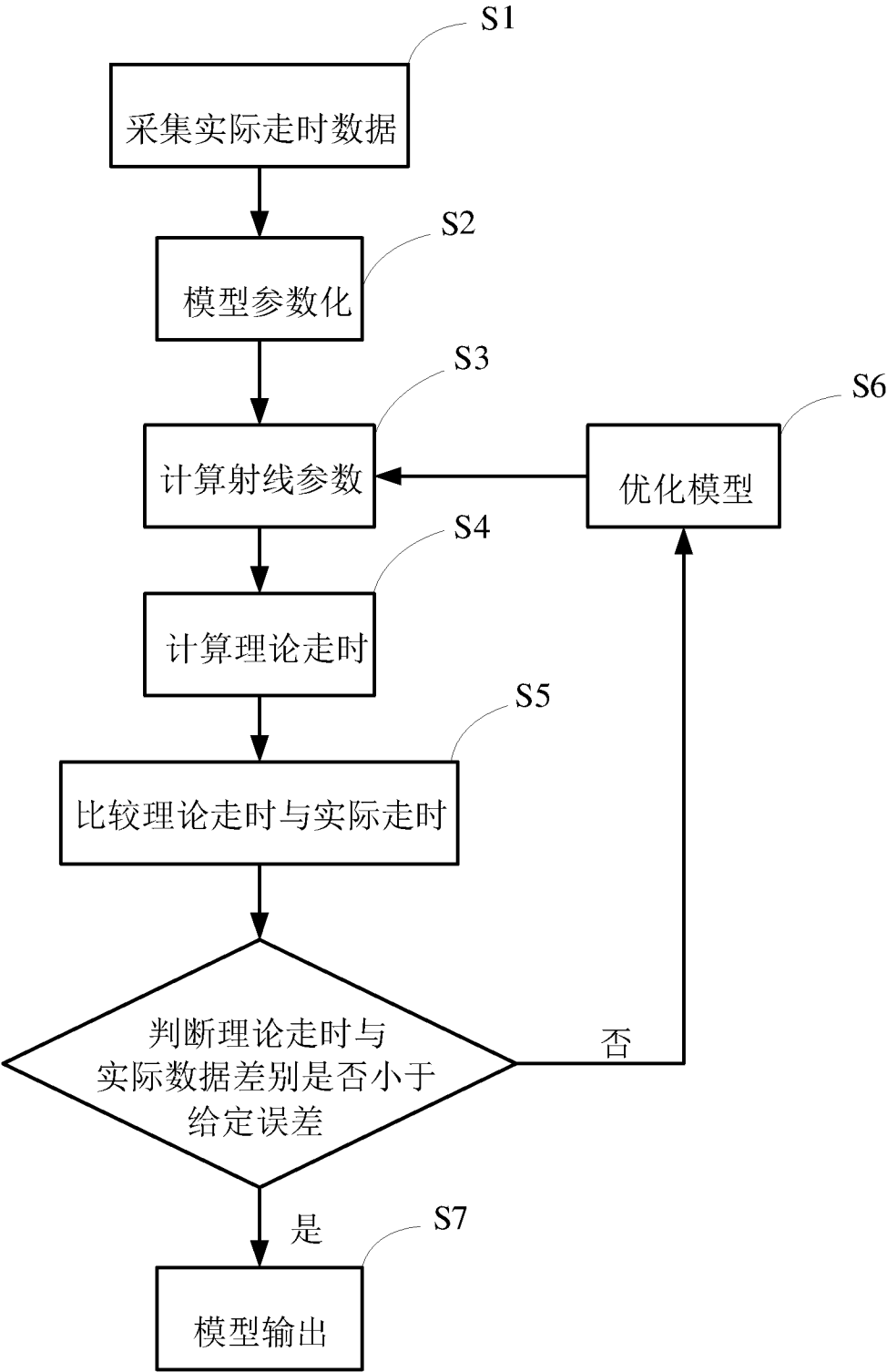


图 1

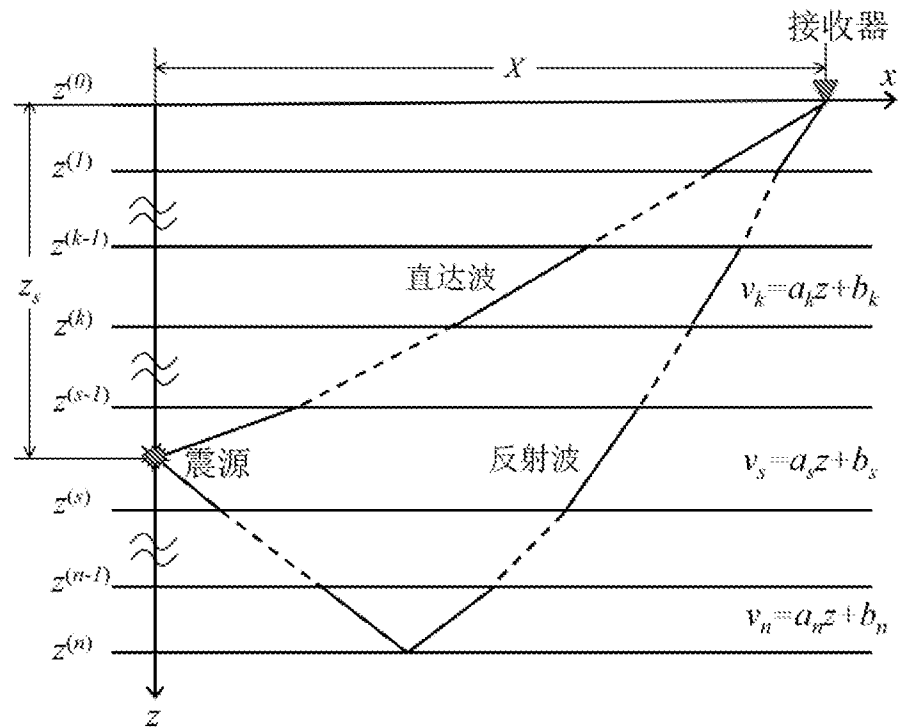


图 2

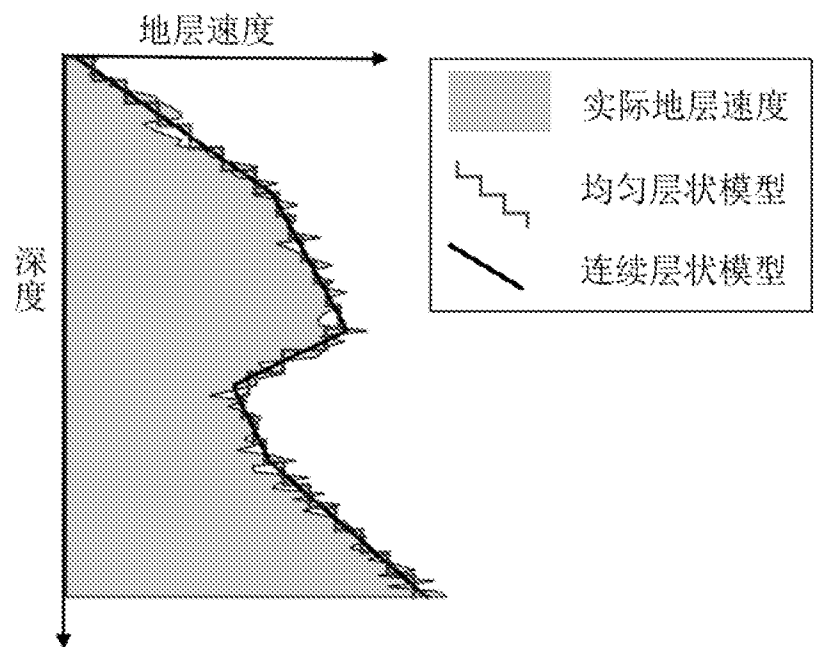


图 3

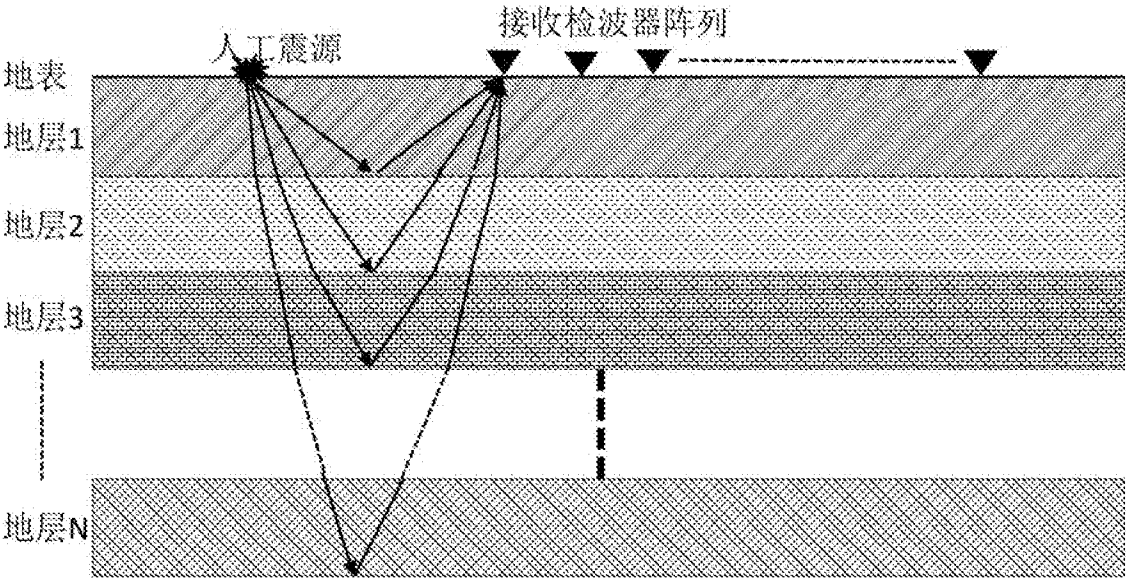


图 4

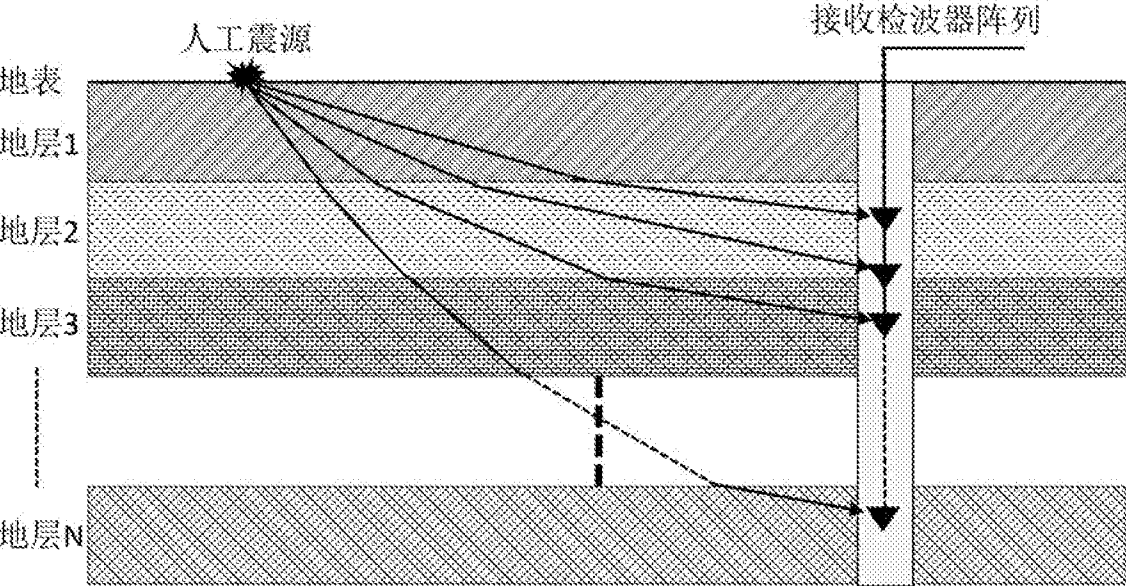


图 5

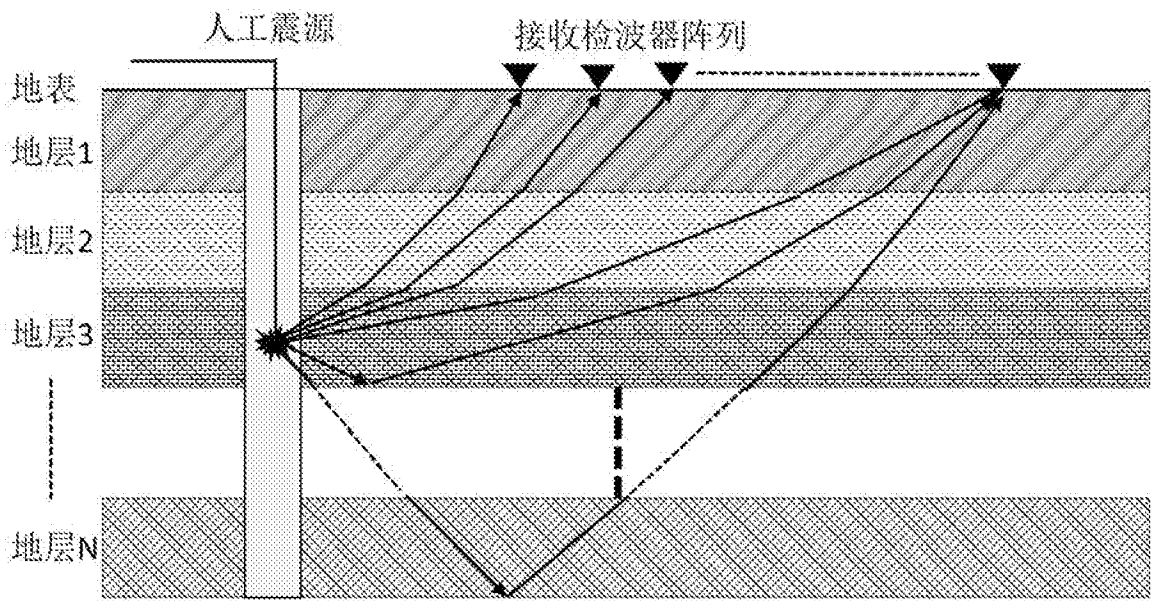


图 6

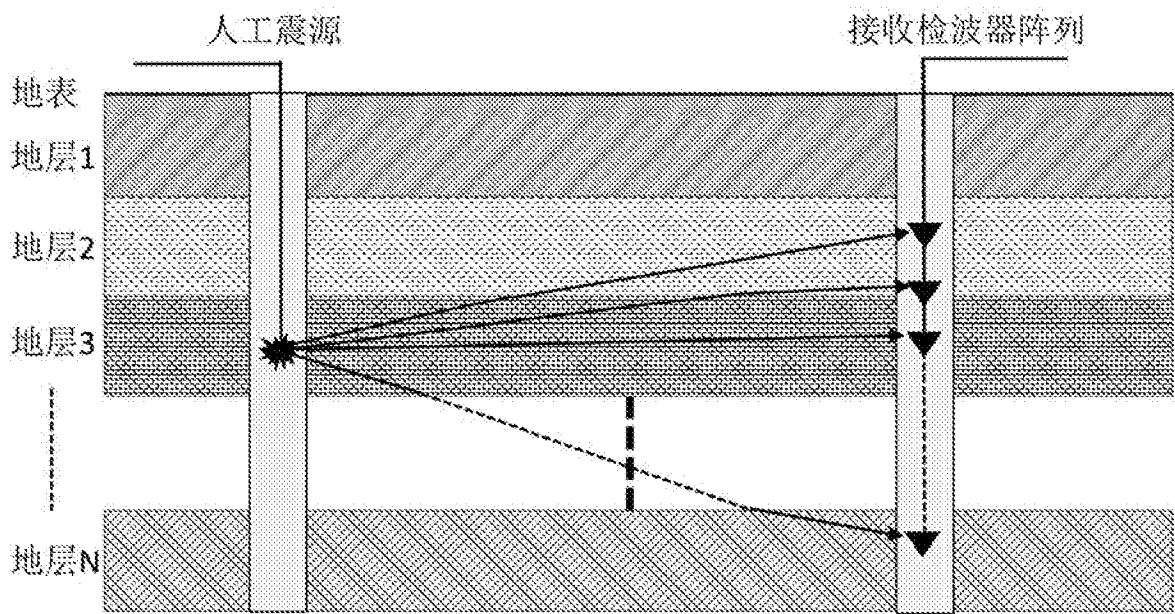


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2017/105817

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01V 1/28(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)

G01V1/-

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: 两点, 射线, 追踪, 地震, 走时, 水平, 层状, 层析, 反演, 直达波, 反射波, 速度, 模型, two, point, ray, tracing, horizontally, layer+, velocity, speed, model, chromatography, inversion, travel, time, direct, reflect+, wave, earthquake

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	田明 等 (TIAN, Yue et al.). "水平层状介质中的快速两点间射线追踪方法 (A Rapid and Accurate Two-Point Ray Tracing Method in Horizontally Layered Velocity Model)" 地震学报 (<i>Acta Seismologica Sinica</i>), Vol. 2, No. (27), 31 March 2015 (2015-03-31), ISSN: 0253-3782, pages 147-154	1-3, 9, 10
A	CN 106353793 A (CHINA PETROLEUM & CHEMICAL CORPORATION ET AL.) 25 January 2017 (2017-01-25) entire document	1-10
A	CN 105425286 A (CHINA NATIONAL PETROLEUM CORPORATION ET AL.) 23 March 2016 (2016-03-23) entire document	1-10
A	CN 105549081 A (CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM (EAST CHINA)) 04 May 2016 (2016-05-04) entire document	1-10
A	CN 102841376 A (CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM (EAST CHINA)) 26 December 2012 (2012-12-26) entire document	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"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)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"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

"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

"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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

09 April 2018

Date of mailing of the international search report

03 May 2018

Name and mailing address of the ISA/CN

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

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2017/105817

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 105589100 A (CHINA PETROLEUM & CHEMICAL CORPORATION ET AL.) 18 May 2016 (2016-05-18) entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2017/105817

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	106353793	A	25 January 2017	None			
CN	105425286	A	23 March 2016	None			
CN	105549081	A	04 May 2016	None			
CN	102841376	A	26 December 2012	None			
CN	105589100	A	18 May 2016	CN	105589100	B	09 March 2018

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/105817

A. 主题的分类

G01V 1/28(2006.01)i

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

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01V1/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

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))

WPI;EPDOC;CNKI;CNPAT: 两点, 射线, 追踪, 地震, 走时, 水平, 层状, 层析, 反演, 直达波, 反射波, 速度, 模型, two, point, ray, tracing, horizontally, layer+, velocity, speed, model, chromatography, inversion, travel, time, direct, reflect+, wave, earthquake

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	田玥 等. "水平层状介质中的快速两点间射线追踪方法" 地震学报, 第2卷, 第27期, 2015年 3月 31日 (2015 - 03 - 31), ISSN: 0253-3782, 第147-154页	1-3, 9, 10
A	CN 106353793 A (中国石油化工股份有限公司 等) 2017年 1月 25日 (2017 - 01 - 25) 全文	1-10
A	CN 105425286 A (中国石油天然气集团公司 等) 2016年 3月 23日 (2016 - 03 - 23) 全文	1-10
A	CN 105549081 A (中国石油大学华东) 2016年 5月 4日 (2016 - 05 - 04) 全文	1-10
A	CN 102841376 A (中国石油大学华东) 2012年 12月 26日 (2012 - 12 - 26) 全文	1-10
A	CN 105589100 A (中国石油化工股份有限公司 等) 2016年 5月 18日 (2016 - 05 - 18) 全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 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

国际检索实际完成的日期

2018年 4月 9日

国际检索报告邮寄日期

2018年 5月 3日

ISA/CN的名称和邮寄地址

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

传真号 (86-10)62019451

受权官员

邓晓蓓

电话号码 (86-10)53962606

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2017/105817

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	106353793	A	2017年 1月 25日	无	
CN	105425286	A	2016年 3月 23日	无	
CN	105549081	A	2016年 5月 4日	无	
CN	102841376	A	2012年 12月 26日	无	
CN	105589100	A	2016年 5月 18日	CN 105589100 B	2018年 3月 9日