

# 说明书

## 一种地震相干层析成像方法

### 技术领域

5 本发明涉及地震勘探技术领域，尤其涉及一种地震相干层析成像方法。

### 背景技术

准确获取地下介质的速度参数是地震勘探的核心问题之一，为勘探开发深层超深层油气，必须获得深层地质介质的精细速度场。

10 现有使用天然地震初至走时层析成像反演获得的速度场精细度不够，精度不高；使用人工反射地震走时数据测算地下介质速度，需要有测井或 VSP 资料约束标定，无法准确获得并未钻达层位或无井地区的介质速度；使用人工反射地震的层析成像方法，因巨大的计算需求和高度的非线性，无法适用于深层条件。

15 因此，以上获取深层地质介质的精细速度场的方式均无法满足深层超深层油气勘探需求。

### 发明内容

20 为了解决现有技术的问题，本发明实施例提供了一种地震相干层析成像方法。所述技术方案如下：

一种地震相干层析成像方法，包括：

利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差；

25 根据获取到的地震炮道集中的同相轴相干时差，结合射线路径差的非线性层析迭代方法，获取慢度场；

对获取到的慢度场求倒数，生成速度场。

进一步的，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差，包括：

在第  $is$  个地震炮集中，第  $ig$  个检波器和其相邻的检波器的地震记录分别为  $d_{is,ig}(it)$  和  $d_{is,ig+1}(it)$ ；

其中， $it$  为时间采样点号， $it$  取整数， $it$  范围为  $1 \leq it \leq lt$ ， $lt$  为地震道总的时间采样点；

5 之后，进行 Hilbert 变换，得到，

$$d_{h1}(it) = \sum_{i\tau=-Lh}^{Lh} h(i\tau) d_{is,ig}(i\tau - it)$$

$$d_{h2}(it) = \sum_{i\tau=-Lh}^{Lh} h(i\tau) d_{is,ig+1}(i\tau - it)$$

其中， $d_{h1}$  和  $d_{h2}$  分别为  $d_{is,ig}$  和  $d_{is,ig+1}$  的 Hilbert 变换结果， $i\tau$  为计算过程中的临时变量， $Lh$  为 Hilbert 算子长度， $h$  为 Hilbert 算子， $h$  为：

10 
$$h(i\tau) = \begin{cases} 0, i\tau \text{ 为偶数} \\ \frac{2}{\pi i\tau}, i\tau \text{ 为奇数} \end{cases}$$

包络信号  $e_1(it)$  和  $e_2(it)$  分别为：

$$e_1(it) = \sqrt{d_{is,ig}^2(it) + d_{h1}^2(it)} \quad e_2(it) = \sqrt{d_{is,ig+1}^2(it) + d_{h2}^2(it)}。$$

15 进一步的，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差，还包括：

为了弱化振幅因素对相干时差提取的影响，对包络信号  $e_1(it)$  和  $e_2(it)$  进行如下处理，

$$e_1'(it) = e_1(it) / a$$

$$e_2'(it) = e_2(it) / b$$

20 其中， $e_1'(it)$  和  $e_2'(it)$  为  $e_1(it)$  和  $e_2(it)$  处理后的结果， $a$  和  $b$  分别为  $e_1(it)$  和  $e_2(it)$  时间序列上的振幅绝对值的最大值。

进一步的，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差，还包括：

25 计算  $e_1'(it)$  和  $e_2'(it)$  在局部时间窗范围内的对齐误差  $D(it1, it2)$ ，

$$D(it1, it2) = \sum_{i\tau=-Lw}^{Lw} (e_1'(it1 + i\tau) - e_2'(it2 + i\tau))^2$$

其中， $it1$  和  $it2$  分别为  $e_1'(it)$  和  $e_2'(it)$  在计算过程中的时间采样点号， $it1$  和  $it2$  为整数，取值范围为  $1 \leq it1 \leq lt$ ， $1 \leq it2 \leq lt$ ； $Lw$  为计算对齐误差时的半时窗长度。

进一步的，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差，还包括：

利用动态时间规整方法中的二阶对称公式，计算递归累积误差和  $A(it1, it2)$ ，

$$A(it1, it2) = D(it1, it2) + g$$

$$5 \quad \text{其中，} g = \min \begin{cases} A(it1-1, it2-2) + D(it1, it2-1) \\ A(it1-1, it2-1) \\ A(it1-2, it2-1) + D(it1-1, it2) \end{cases}。$$

进一步的，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差，还包括：

第一个地震道的  $it1$  时刻与第二个地震道的  $it2$  时刻的相干时差为  $\Delta t(it1)$ ，

$$10 \quad \Delta t_{is, ig}(it1) = (it2 - it1) * dt$$

其中， $dt$  为地震道采样时间间隔。

进一步的，在每一行上搜索相干性最高的元素时需要遵循以下条件：

①当某行上存在多个最小值时，取最靠近对角线的元素；

②相邻两个时间点的相干时差需满足：

$$15 \quad it1 * dt + \Delta t_{is, ig}(it1) \leq (it1+1) * dt + \Delta t_{is, ig}(it1+1)。$$

在同一炮集中，将上述方法应用于每一组相邻地震道，即可获得每一个地震道的相干时差；另外，在后续的层析成像步骤中，应用的相干时差通常是某一地震同相轴的相干时差；因此，需要沿同相轴提取相干时差；在第  $is$  个炮集中的第  $ig$  个地震道上给定一个同相轴的种子点  $it3$ ，其对应的相干时差为  $\Delta t_{is, ig}(it3)$ ，那么其临近的下一地震道  $ig+1$  的同相轴点  $it4$  为，

$$it4 = it3 + \Delta t_{is, ig}(it3) / dt。$$

这一地震道的同相轴点处的相干时差为  $\Delta t_{is, ig+1}(it4)$ ；同样地，可以用相同的方式追踪下一道的同相轴点；在该炮集中的所有地震道上进行追踪，即可获得该同相轴对应的所有相干时差。

25 进一步的，根据获取到的地震炮道集中的同相轴相干时差，结合射线路径差的非线性层析迭代方法，获取慢度场，包括：

对速度场划分网格，沿横向  $x$  方向一共划分  $nx$  个网格，其网格序号用  $ix$  表示，沿深度  $z$  方向一共划分  $nz$  个网格，其网格序号用  $iz$  表示，在网格  $ix, iz$  内的速度为  $v^{ix, iz}$ ，其对应的慢度为  $s^{ix, iz} = 1 / v^{ix, iz}$ ；

第  $ig$  和  $ig+1$  个检波器在网格  $ix, iz$  内的射线长度分别为  $l_{is,ig}^{ix,iz}$  和  $l_{is,ig+1}^{ix,iz}$ ，射线在该网格内传播的时间分别为  $l_{is,ig}^{ix,iz} s^{ix,iz}$  和  $l_{is,ig+1}^{ix,iz} s^{ix,iz}$ ；

将射线在所有网格内传播的旅行时累加起来，即可得到第  $ig$  和  $ig+1$  个检波器上的总旅行时  $t_{is,ig}$  和  $t_{is,ig+1}$ ，

5

$$\sum_{ix=1}^{nx} \sum_{iz=1}^{nz} l_{is,ig}^{ix,iz} s^{ix,iz} = t_{is,ig}$$

$$\sum_{ix=1}^{nx} \sum_{iz=1}^{nz} l_{is,ig+1}^{ix,iz} s^{ix,iz} = t_{is,ig+1}$$

进一步的，根据获取到的地震炮道集中的同相轴相干时差，结合射线路径差的非线性层析迭代方法，获取慢度场，包括：

地震工区中所有炮点和检波点对应的线性方程形成一个线性方程组，写成  
10 如下矩阵形式，

$$\Delta \mathbf{L} \mathbf{s} = \Delta \mathbf{t}$$

其中，

$$\Delta \mathbf{L} = \begin{bmatrix} \Delta l_{1,1}^{1,1} & \cdot & \Delta l_{1,1}^{1,nz} & \cdot & \Delta l_{1,1}^{ix,1} & \cdot & \Delta l_{1,1}^{ix,nz} & \cdot & \Delta l_{1,1}^{nx,1} & \cdot & \Delta l_{1,1}^{nx,nz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta l_{1,ng}^{1,1} & \cdot & \Delta l_{1,ng}^{1,nz} & \cdot & \Delta l_{1,ng}^{ix,1} & \cdot & \Delta l_{1,ng}^{ix,nz} & \cdot & \Delta l_{1,ng}^{nx,1} & \cdot & \Delta l_{1,ng}^{nx,nz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta l_{is,1}^{1,1} & \cdot & \Delta l_{is,1}^{1,nz} & \cdot & \Delta l_{is,1}^{ix,1} & \cdot & \Delta l_{is,1}^{ix,nz} & \cdot & \Delta l_{is,1}^{nx,1} & \cdot & \Delta l_{is,1}^{nx,nz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta l_{is,ng}^{1,1} & \cdot & \Delta l_{is,ng}^{1,nz} & \cdot & \Delta l_{is,ng}^{ix,1} & \cdot & \Delta l_{is,ng}^{ix,nz} & \cdot & \Delta l_{is,ng}^{nx,1} & \cdot & \Delta l_{is,ng}^{nx,nz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta l_{ns,1}^{1,1} & \cdot & \Delta l_{ns,1}^{1,nz} & \cdot & \Delta l_{ns,1}^{ix,1} & \cdot & \Delta l_{ns,1}^{ix,nz} & \cdot & \Delta l_{ns,1}^{nx,1} & \cdot & \Delta l_{ns,1}^{nx,nz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta l_{ns,ng}^{1,1} & \cdot & \Delta l_{ns,ng}^{1,nz} & \cdot & \Delta l_{ns,ng}^{ix,1} & \cdot & \Delta l_{ns,ng}^{ix,nz} & \cdot & \Delta l_{ns,ng}^{nx,1} & \cdot & \Delta l_{ns,ng}^{nx,nz} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{s} = [s^{1,1} \quad s^{1,nz} \quad s^{ix,1} \quad s^{ix,nz} \quad s^{nx,1} \quad s^{nx,nz}]^T$$

15

$$\Delta \mathbf{t} = [\Delta t^{1,1} \quad \Delta t^{1,ng} \quad \Delta t^{is,1} \quad \Delta t^{is,ng} \quad \Delta t^{ns,1} \quad \Delta t^{ns,ng}]^T$$

$ns$  为总的炮点数量， $ng$  为总的检波点数量， $\mathbf{s}$  为慢度向量。

设计如下非线性迭代流程来同时更新慢度和射线路径；

第一步：设置初始慢度模型  $\mathbf{s}_0$ ，即第 0 次迭代的模型；

第二步：进行第  $k$  次迭代， $k \geq 1$ ；利用第  $k-1$  次迭代的慢度模型  $\mathbf{s}_{k-1}$  进行射线  
20 追踪，进而更新射线路径，形成新的层析方程组，然后得到反演的模型  $\mathbf{s}_k$ ；

第三步：判断  $\sum_{ix=1}^{nx} \sum_{iz=1}^{nz} (s_k^{ix,iz} - s_{k-1}^{ix,iz})$  是否小于设定的阈值  $\varepsilon$ 。若小于，则层析收敛，迭代终止；若大于，则  $k = k+1$ ，重复第二步。

本发明实施例提供的技术方案带来的有益效果是：

本发明利用反射波的走时信息实现深层速度场的估计，结合高精度的相干时差获取方法，获得高精度的深层速度场。

5

## 附图说明

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他的附图。

10

图1是本发明实施例提供的一种地震相干层析成像方法示意图。

## 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，下面将结合附图对本发明实施方式作进一步地详细描述。

15

本发明实施例提供了一种地震相干层析成像方法，包括：

步骤101，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差；

步骤102，根据获取到的地震炮道集中的同相轴相干时差，结合射线路径差的非线性层析迭代方法，获取慢度场；

20

步骤103，对获取到的慢度场求倒数，生成速度场。

具体的，动态时间规整方法是一种在语音信号处理中常用的方法，它通过非线性方法测量两个时间序列的相干性，即相似性，进而获得两个时间序列的时间差。

25

语音信号处理中采用逐点比对的方式来获取时间序列的相干性。但语音信号和地震信号有显著的不同。地震信号是以反射子波为子集的时间序列，反射子波具有一定的时间延续度；地震信号在采集过程中通常引入各类噪音。若对地震信号进行逐点对比来获取地震道间时差，将严重降低其稳定性和可信度。

为此，针对地震信号，提出通过衡量时窗内包络的相干性来获得时间差。对地震信号求取包络能够降低噪音对时差估计的影响，提高其可信度；采用局部时

30

窗内的包络数据来衡量相干性遵循子波的特征，提高其稳定度。

在本实施例中，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差，包括：

5 在第  $is$  个地震炮集中，第  $ig$  个检波器和其相邻的检波器的地震记录分别为  $d_{is,ig}(it)$  和  $d_{is,ig+1}(it)$ ；

其中， $it$  为时间采样点号， $it$  取整数， $it$  范围为  $1 \leq it \leq lt$ ， $lt$  为地震道总的时间采样点；

之后，进行 Hilbert 变换，得到，

$$10 \quad \begin{aligned} d_{h1}(it) &= \sum_{i\tau=-Lh}^{Lh} h(i\tau) d_{is,ig}(i\tau-it) \\ d_{h2}(it) &= \sum_{i\tau=-Lh}^{Lh} h(i\tau) d_{is,ig+1}(i\tau-it) \end{aligned}$$

其中， $d_{h1}$  和  $d_{h2}$  分别为  $d_{is,ig}$  和  $d_{is,ig+1}$  的 Hilbert 变换结果， $i\tau$  为计算过程中的临时变量， $Lh$  为 Hilbert 算子长度， $h$  为 Hilbert 算子， $h$  为：

$$h(i\tau) = \begin{cases} 0, i\tau \text{ 为偶数} \\ \frac{2}{\pi i\tau}, i\tau \text{ 为奇数} \end{cases}$$

包络信号  $e_1(it)$  和  $e_2(it)$  分别为：

$$15 \quad \begin{aligned} e_1(it) &= \sqrt{d_{is,ig}^2(it) + d_{h1}^2(it)} & e_2(it) &= \sqrt{d_{is,ig+1}^2(it) + d_{h2}^2(it)} \end{aligned}$$

在本实施例中，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差，还包括：

20 在地震资料采集过程中，有可能由于接收器环境差异等原因导致记录的能量存在显著的不同，为了弱化振幅因素对相干时差提取的影响，对包络信号  $e_1(it)$  和  $e_2(it)$  进行如下处理，

$$\begin{aligned} e_1'(it) &= e_1(it) / a \\ e_2'(it) &= e_2(it) / b \end{aligned}$$

其中， $e_1'(it)$  和  $e_2'(it)$  为  $e_1(it)$  和  $e_2(it)$  处理后的结果， $a$  和  $b$  分别为  $e_1(it)$  和  $e_2(it)$  时间序列上的振幅绝对值的最大值。

25 在本实施例中，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差，还包括：

计算  $e_1'(it)$  和  $e_2'(it)$  在局部时间窗范围内的对齐误差  $D(it1, it2)$ ，

$$D(it1, it2) = \sum_{i\tau=-Lw}^{Lw} (e_1'(it1+i\tau) - e_2'(it2+i\tau))^2$$

其中， $it1$  和  $it2$  分别为  $e_1'(it)$  和  $e_2'(it)$  在计算过程中的时间采样点号， $it1$  和  $it2$  为

整数，取值范围为  $1 \leq it1 \leq lt$ ， $1 \leq it2 \leq lt$ ； $Lw$  为计算对齐误差时的半时窗长度。该公式测量局部波形的相干性，而非单点振幅的相干性，更符合地震数据的特征。

在本实施例中，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差，还包括：

5 利用动态时间规整方法中的二阶对称公式，计算递归累积误差和  $A(it1, it2)$ ，

$$A(it1, it2) = D(it1, it2) + g$$

$$\text{其中， } g = \min \begin{cases} A(it1-1, it2-2) + D(it1, it2-1) \\ A(it1-1, it2-1) \\ A(it1-2, it2-1) + D(it1-1, it2) \end{cases}。$$

上述递归累积误差和是一种衡量信号相干性的非线性因子，当递归累积误差和越小时，说明信号的相干性强；当递归累积误差和越大时，说明信号的相干性弱。所有的递归累积误差和  $A(it1, it2)$  组成一个  $lt \times lt$  的方阵，其每一行代表第二个地震道  $e_2'$  中的各个局部时窗包络与第一个地震道  $e_1'$  的某一局部时窗包络的相干性。比如  $it1$  这一行，它代表第二个地震道  $e_2'$  中的各个局部时窗包络与  $e_1'$  的  $it1$  时刻的局部时窗包络的相干性。为了获得两个地震道间的相干时差，需在该矩阵上从最后一行到第一行逐行搜寻相干性最高的元素，即搜索  $A(it1, it2)$  每一行上的最小值。

在本实施例中，利用基于时窗包络相干性的动态时间规整方法，获取地震炮道集中的同相轴相干时差，还包括：

在第  $it1$  行上，其相干性最强的元素为第  $it2$  个元素时，第一个地震道的  $it1$  时刻与第二个地震道的  $it2$  时刻的相干时差为  $\Delta t(it1)$ ，

$$20 \quad \Delta t_{is, ig}(it1) = (it2 - it1) * dt$$

其中， $dt$  为地震道采样时间间隔。

在本实施例中，在每一行上搜索相干性最高的元素时需要遵循以下条件：

①当某行上存在多个最小值时，取最靠近对角线的元素；

②相邻两个时间点的相干时差需满足：

$$25 \quad it1 * dt + \Delta t_{is, ig}(it1) \leq (it1 + 1) * dt + \Delta t_{is, ig}(it1 + 1)。$$

在同一炮集中，将上述方法应用于每一组相邻地震道，即可获得每一个地震道的相干时差。另外，在后续的层析成像步骤中，应用的相干时差通常是某一地震同相轴的相干时差。因此，需要沿同相轴提取相干时差。在第  $is$  个炮集中的第  $ig$  个地震道上给定一个同相轴的种子点  $it3$ ，其对应的相干时差为  $\Delta t_{is, ig}(it3)$ ，那么其临近的下一地震道  $ig+1$  的同相轴点  $it4$  为，

$$it4 = it3 + \Delta t_{is,ig}(it3) / dt。$$

这一地震道的同相轴点处的相干时差为  $\Delta t_{is,ig+1}(it4)$ 。同样地，可以用相同的方式追踪下一道的同相轴点。在该炮集中的所有地震道上进行追踪，即可获得该同相轴对应的所有相干时差。

- 5 在本实施例中，根据获取到的地震炮道集中的同相轴相干时差，结合射线路径差的非线性层析迭代方法，获取慢度场，包括：

对速度场划分网格，沿横向  $x$  方向一共划分  $nx$  个网格，其网格序号用  $ix$  表示，沿深度  $z$  方向一共划分  $nz$  个网格，其网格序号用  $iz$  表示，在网格  $ix,iz$  内的速度为  $v^{ix,iz}$ ，其对应的慢度为  $s^{ix,iz} = 1/v^{ix,iz}$ ；

- 10 第  $ig$  和  $ig+1$  个检波器在网格  $ix,iz$  内的射线长度分别为  $l_{is,ig}^{ix,iz}$  和  $l_{is,ig+1}^{ix,iz}$ ，射线在该网格内传播的时间分别为  $l_{is,ig}^{ix,iz} s^{ix,iz}$  和  $l_{is,ig+1}^{ix,iz} s^{ix,iz}$ ；

将射线在所有网格内传播的旅行时累加起来，即可得到第  $ig$  和  $ig+1$  个检波器上的总旅行时  $t_{is,ig}$  和  $t_{is,ig+1}$ ，

$$\sum_{ix=1}^{nx} \sum_{iz=1}^{nz} l_{is,ig}^{ix,iz} s^{ix,iz} = t_{is,ig}$$

$$\sum_{ix=1}^{nx} \sum_{iz=1}^{nz} l_{is,ig+1}^{ix,iz} s^{ix,iz} = t_{is,ig+1}$$

15

上述两个公式做差可得，

$$\sum_{ix=1}^{nx} \sum_{iz=1}^{nz} \Delta l_{is,ig}^{ix,iz} s^{ix,iz} = \Delta t_{is,ig}$$

其中， $\Delta t_{is,ig} = t_{is,ig+1} - t_{is,ig}$  为相干时差， $\Delta l_{is,ig}^{ix,iz} = l_{is,ig+1}^{ix,iz} - l_{is,ig}^{ix,iz}$  为网格  $ix,iz$  内的射线路径差，由常规射线追踪获得。

- 20 在本实施例中，根据获取到的地震道沿层相干时差，结合射线路径差的非线性层析迭代方法，获取慢度场，包括：

地震工区中所有炮点和检波点对应的线性方程形成一个线性方程组，写成如下矩阵形式，

$$\Delta \mathbf{L} \mathbf{s} = \Delta \mathbf{t}$$

- 25 其中，



$$\begin{aligned}
\Delta \mathbf{L} = & \begin{bmatrix} \Delta l_{1,1}^{1,1} & \Delta l_{1,1}^{1,nz} & \Delta l_{1,1}^{ix,1} & \Delta l_{1,1}^{ix,nz} & \Delta l_{1,1}^{nx,1} & \Delta l_{1,1}^{nx,nz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta l_{1,ng}^{1,1} & \Delta l_{1,ng}^{1,nz} & \Delta l_{1,ng}^{ix,1} & \Delta l_{1,ng}^{ix,nz} & \Delta l_{1,ng}^{nx,1} & \Delta l_{1,ng}^{nx,nz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta l_{is,1}^{1,1} & \Delta l_{is,1}^{1,nz} & \Delta l_{is,1}^{ix,1} & \Delta l_{is,1}^{ix,nz} & \Delta l_{is,1}^{nx,1} & \Delta l_{is,1}^{nx,nz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta l_{is,ng}^{1,1} & \Delta l_{is,ng}^{1,nz} & \Delta l_{is,ng}^{ix,1} & \Delta l_{is,ng}^{ix,nz} & \Delta l_{is,ng}^{nx,1} & \Delta l_{is,ng}^{nx,nz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta l_{ns,1}^{1,1} & \Delta l_{ns,1}^{1,nz} & \Delta l_{ns,1}^{ix,1} & \Delta l_{ns,1}^{ix,nz} & \Delta l_{ns,1}^{nx,1} & \Delta l_{ns,1}^{nx,nz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta l_{ns,ng}^{1,1} & \Delta l_{ns,ng}^{1,nz} & \Delta l_{ns,ng}^{ix,1} & \Delta l_{ns,ng}^{ix,nz} & \Delta l_{ns,ng}^{nx,1} & \Delta l_{ns,ng}^{nx,nz} \end{bmatrix} \\
\mathbf{s} = & \begin{bmatrix} s^{1,1} & s^{1,nz} & s^{ix,1} & s^{ix,nz} & s^{nx,1} & s^{nx,nz} \end{bmatrix}^T \\
\Delta \mathbf{t} = & \begin{bmatrix} \Delta t^{1,1} & \Delta t^{1,ng} & \Delta t^{is,1} & \Delta t^{is,ng} & \Delta t^{ns,1} & \Delta t^{ns,ng} \end{bmatrix}^T
\end{aligned}$$

$ns$  为总的炮点数量,  $ng$  为总的检波点数量,  $\mathbf{s}$  为慢度向量。

- 5 射线路径差矩阵  $\Delta \mathbf{L}$  由射线追踪获得, 相干时差向量  $\Delta \mathbf{t}$  由步骤 1 获得。采用数学上常用的代数重建方法求解所示的线性方程组即可获得慢度向量  $\mathbf{s}$ 。

所示的层析方程与常规层析方程具有明显的区别:

- (1) 常规层析利用射线路径, 而利用射线路径差;
- (2) 常规层析的时差是观测旅行时与计算旅行时之差, 而利用道间时差;
- 10 (3) 常规层析求解慢度更新量, 而直接求解慢度;
- (4) 常规层析通常利用透射波路径, 利用反射波路径。

成立的条件是射线追踪的路径与地震波的真实路径相同。这一假设条件在实际情况下通常无法成立, 因为射线追踪使用的慢度场并非真实慢度场。因此, 设计如下非线性迭代流程来同时更新慢度和射线路径:

- 15 第一步: 设置初始慢度模型  $\mathbf{s}_0$ , 即第 0 次迭代的模型。

第二步: 进行第  $k$  次迭代,  $k \geq 1$ 。利用第  $k-1$  次迭代的慢度模型  $\mathbf{s}_{k-1}$  进行射线追踪, 进而更新射线路径, 形成如所示的层析方程组, 然后得到反演的模型  $\mathbf{s}_k$ 。

第三步: 判断  $\sum_{ix=1}^{nx} \sum_{iz=1}^{nz} (s_k^{ix,iz} - s_{k-1}^{ix,iz})$  是否小于设定的阈值  $\varepsilon$ 。若小于, 则层析收敛, 迭代终止; 若大于, 则  $k = k+1$ , 重复第二步。

- 20 最后, 迭代结束后将最终获得的慢度场求倒数, 即可获得最终估计的速度场。

本发明利用反射波的走时信息实现深层速度场的估计, 结合高精度的相干

时差获取方法，获得高精度的速度场。

需要说明的是，术语“包括”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含，从而使得包括一系列要素的商品或者系统不仅包括那些要素，而且还包括没有  
5 明确列出的其他要素，或者是还包括为这种商品或者系统所固有的要素。在没有更多限制的情况下，由语句“包括一个……”限定的要素，并不排除在包括所述要素的商品或者系统中还存在另外的相同要素。

以上所述仅为本发明的较佳实施例，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、改进等，均应包含在本发明的  
10 保护范围之内。