

文章编号: 1671-8585(2007)03-0179-06

各向异性弹性参数的广义非线性反演方法

孙银行, 乐友喜

(中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东东营 257061)

摘要: 在非线性最优化理论的基础上结合地球物理反演问题, 提出各向异性弹性参数的广义非线性反演方法。结合各向异性弹性参数反演, 推导出反演所需的梯度向量, 梯度向量中 Jacobi 矩阵各个元素的求取是利用与正演完全相同的方法, 并构造了一个公式, 从单位阵开始来修改函数的海色矩阵的逆矩阵, 这样, 不用求海色矩阵及其逆阵就能求函数的极小值, 减少了计算量, 给出了实际的反演结果。地质模型的反演结果证明, 该方法可行的, 且反演精度高, 具有较好的发展前景。

关键词: 各向异性; 弹性参数; 全波场反演; 海色矩阵

中图分类号: P631.443

文献标识码: A

地面叠前全波场炮集记录是地震勘探中采集的第一手原始资料, 它包含面波、直达波、各类反射波、衍射波及其他一切波动效应, 含有最充分的地震波运动学和动力学信息, 因此, 采用叠前全波场资料来反演各向异性弹性参数, 对于减少反演的多解性、提高解的精度有着重要意义。并且, 叠前全波场反演无需进行波场的识别与分离及其他有关处理工作, 因而极大地减轻了处理中的困难和处理人员的工作量, 也减少了处理中的人为因素。叠前全波场反演的优越性已引起了研究者的兴趣, 杨顶辉等^[1]用有限差分法对全波场各向异性弹性参数反演进行了研究, 但只实现了用 qSH 波资料反演一个 2 层 TI 模型的垂向和水平速度; 张秉铭等^[2]在杨顶辉等的研究基础上做了进一步改进, 利用两分量炮集记录反演了一个 3 层 TI 模型的 C_{11} 和 C_{33} 两个弹性参数。张美根等^[3]用有限元法对全波场各向异性弹性参数反演进行了研究, 反演了 TI 介质与 qP 波和 qSV 波有关的 C_{11} , C_{13} , C_{33} 和 C_{55} 四个弹性参数。以上工作在反演时用的都是广义线性反演。

广义线性反演将非线性的地球物理问题用泰勒公式展开, 去掉二次以上的项, 得到线性化的系统, 然后采用迭代法求解。该方法简单易行, 计算效率非常高, 因而长期以来深受人们的青睐。经过多年的研究, 该方法在解的惟一性和稳定性等方面取得了实质性的进展, 在许多地球物理反演问题中取得了较好的应用成果。

随着地球物理学的发展, 人们发现地球物理问题往往是非线性的, 去掉二次以上的项所得到的线性化系统与实际问题有较大的偏差, 在进行反演的过程中会出现一些难以解决的问题, 例如反演时阻

尼系数难以确定, 收敛速度很慢, 陷入局部极小的可能性增大, 解估计的分辨率难以有充分的保证等等。如果在泰勒展式中取二次项得到一个二阶非线性系统, 导出广义非线性反演方法, 那么其解空间的性质、状态均优于线性反演方法。但长期以来由于受数学理论发展的限制, 人们往往认为地球物理问题的广义非线性反演遵循的规律要比广义线性反演复杂得多, 使用迭代方法难以解决问题。

本文在非线性最优化理论的最新进展基础上, 结合地球物理反演问题, 提出广义非线性反演的一系列方法技术。结合层状模型各向异性弹性参数反演, 推导出反演所需的梯度向量, 梯度向量中 Jacobi 矩阵的各个元素的求取利用了与正演完全相同的方法^[2], 并构造一个公式, 从单位阵开始来修改函数的海色矩阵的逆矩阵, 这样, 由于不用求海色矩阵及其逆阵而能够求函数的极小值, 减少了计算量。文中给出了实际的反演结果。理论模型和实际资料的反演表明, 本方法是求解地球物理反问题的一种有效手段。

1 方法原理

使用非线性最优化理论导出广义非线性反演方法的第一步是将地球物理反问题转化为一个最优化问题, 其最简单的途径是构造如下目标函数

$$f(\mathbf{C}) = \|\mathbf{U}(\mathbf{C}) - \mathbf{U}_d\|$$

式中: \mathbf{C} 是由待反演的地下参数构成的参数向量;

收稿日期: 2006-08-16; 改回日期: 2006-12-31。

第一作者简介: 孙银行(1978—), 男, 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院地球探测与信息技术专业在读硕士, 主要从事地球物理各向异性方面的研究。

$U(\mathbf{C})$ 为模型响应; U_d 是实际的地表观测数据, 由 \mathbf{C} 可通过正演求得 $U(\mathbf{C})$ 。在函数 $f(\mathbf{C})$ 极小点 \mathbf{C}^* 的第 k 次近似点 $\mathbf{C}^{(k)}$ 处展开 $f(\mathbf{C})$ 为二次函数

$$f(\mathbf{C}) \approx h(\mathbf{C}) = f(\mathbf{C}^{(k)}) + \nabla f(\mathbf{C}^{(k)}) (\mathbf{C} - \mathbf{C}^{(k)}) + \frac{1}{2} \nabla^2 f(\mathbf{C}^{(k)}) (\mathbf{C} - \mathbf{C}^{(k)})^2$$

式中: $\nabla f(\mathbf{C}^{(k)})$ 为 $f(\mathbf{C})$ 在 $\mathbf{C}^{(k)}$ 处的梯度; $\nabla^2 f(\mathbf{C}^{(k)})$ 为 $f(\mathbf{C})$ 在 $\mathbf{C}^{(k)}$ 处的海色矩阵。以二次函数 $h(\mathbf{C})$ 逼近 $f(\mathbf{C})$, 并以 $h(\mathbf{C})$ 的极小点修正 $\mathbf{C}^{(k)}$, 得到牛顿法的迭代式

$$\mathbf{C}^{(k+1)} = \mathbf{C}^{(k)} + \mathbf{P}^{(k)}$$

其中

$$\mathbf{P}^{(k)} = -\nabla^2 f(\mathbf{C}^{(k)})^{-1} \nabla f(\mathbf{C}^{(k)})$$

$\nabla^2 f(\mathbf{C}^{(k)})^{-1}$ 为 $f(\mathbf{C})$ 在 $\mathbf{C}^{(k)}$ 处的海色矩阵的逆矩阵。若记

$$\begin{aligned} \mathbf{g}^{(k)} &= \nabla f(\mathbf{C}^{(k)}) \\ \mathbf{G}_k &= \nabla^2 f(\mathbf{C}^{(k)}) \\ \mathbf{H}_k &= \nabla^2 f(\mathbf{C}^{(k)})^{-1} \end{aligned}$$

则有

$$\mathbf{P}^{(k)} = -\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k)}$$

若 $f(\mathbf{C})$ 在 $\mathbf{C}^{(k)}$ 处的海色矩阵 \mathbf{G}_k 对称正定, 则其逆阵 \mathbf{H}_k 也对称正定, 则 $\mathbf{P}^{(k)}$ 为 $f(\mathbf{C})$ 的下降方向。继续下去有

$$\mathbf{C}^{(k+2)} = \mathbf{C}^{(k+1)} + \mathbf{P}^{(k+1)}$$

其中

$$\mathbf{P}^{(k+1)} = -\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{g}^{(k+1)}$$

而 $\mathbf{g}^{(k+1)}$ 为函数在 $\mathbf{C}^{(k+1)}$ 处的梯度, \mathbf{H}_{k+1} 为函数在 $\mathbf{C}^{(k+1)}$ 处的海色阵的逆阵, 这样就需用函数 $f(\mathbf{C})$ 的二阶偏导求 \mathbf{H}_{k+1} 。广义非线性反演是一个循环迭代、逐步逼近的过程, 其主要工作量在计算海色矩阵和求解方程组上。由于地球物理问题一般都较为复杂, 计算包含二阶导数的海色矩阵工作量非常大, 而海色矩阵是一个与初始猜测模型有关的量, 每一次循环迭代过程都必须重新计算, 因此减少海色矩阵的计算工作量是提高广义非线性反演速度的关键。本文将给出一个修正 \mathbf{H}_k 的修正矩阵 $\Delta \mathbf{H}_k$, 使

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \Delta \mathbf{H}_k$$

而不必求函数的海色阵及其逆阵。具体构造及证明过程见附录 A。

2 TI 介质弹性参数反演

2.1 正演问题

在反演 TI 介质弹性参数之前, 先研究反演中

所用到的正演, 本文采用伪谱法作波场正演模拟。在二维 TI 介质中, 地震波波动方程可表示为

$$\begin{cases} C_{66} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + C_{55} \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + f_y \\ \mathbf{P} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial X^2} + \mathbf{Q} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial X \partial Z} + \mathbf{R} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial Z^2} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} + \tilde{\mathbf{F}} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & C_{55} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & C_{13} + C_{55} \\ C_{13} + C_{55} & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} C_{44} & 0 \\ 0 & C_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_z \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_z \end{bmatrix} \end{aligned}$$

如果令

$$\begin{cases} \mathbf{L}_1 = \left(C_{66} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + C_{55} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right)^{-1} \\ \mathbf{L}_2 = \left(\mathbf{P} \frac{\partial^2}{\partial X^2} + \mathbf{Q} \frac{\partial^2}{\partial Z \partial Z} + \mathbf{R} \frac{\partial^2}{\partial Z^2} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right)^{-1} \end{cases}$$

则式(1)可以改写为

$$u_y = \mathbf{L}_1 F_y \quad (2a)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{L}_2 \mathbf{F}^0 \quad (2b)$$

式中: F_y 和 \mathbf{F}^0 为力源函数; \mathbf{L}_1 和 \mathbf{L}_2 是非线性算子矩阵。显然, 解正演问题的过程就是通过偏微分算子 \mathbf{L}_1 和 \mathbf{L}_2 将力源 F_y 和 \mathbf{F}^0 投影到解析空间的过程。式(2a)表述了正演模拟 SH 波传播的方程, 式(2b)描述了正演模拟 P 波和 SV 波耦合在一起传播的方程。

2.2 Jacobi 矩阵的建立

根据常规反演理论可以推知, 任何反演方法中, Jacobi 矩阵的建立是反演方法成功与否的关键, 其中包括 Jacobi 矩阵建立的基本原理和 Jacobi 矩阵中各个参数的分布问题, 以及 Jacobi 矩阵中各个参数间的相干性等等问题。

根据上面讨论过的 TI 介质中的弹性波波动方程式(2a)和式(2b), 可以得到各个弹性参数相对于各个位移分量之间的偏导数, 这些偏导数将组成反演方法中的 Jacobi 矩阵的元素。根据式(2a)和式(2b), 并忽略外力不计, 分别用弹性参数作为变量进行偏微分求导, 整理后得到下列等式

$$\begin{cases} \left[N \frac{\partial^2}{\partial x^2} + L \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \frac{\partial u_y}{\partial N} = -\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \\ \left[N \frac{\partial^2}{\partial x^2} + L \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \frac{\partial u_y}{\partial L} = -\frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \\ \left[N \frac{\partial^2}{\partial x^2} + L \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \frac{\partial u_y}{\partial \rho} \\ = \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \left[N \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + L \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right] \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \left[\mathbf{P} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \mathbf{Q} \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} + \mathbf{R} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial A} = - \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial A} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial x^2} \\ \left[\mathbf{P} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \mathbf{Q} \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} + \mathbf{R} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial C} = - \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial C} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial z^2} \\ \left[\mathbf{P} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \mathbf{Q} \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} + \mathbf{R} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial F} = - \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial F} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial x \partial z} \end{cases} \quad (4)$$

式中: A, C, F, N 和 L 是用来描述 TI 介质的弹性参数; ρ 为 TI 介质的密度; u_y 为在 y 方向上的位移分量。

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_z \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

如果令

$$r_1 = - \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}, \quad r_2 = - \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2},$$

$$r_3 = \frac{1}{\rho} \left[N \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + L \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right],$$

$$\mathbf{R}_1 = - \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial A} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial x^2},$$

$$\mathbf{R}_2 = - \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial C} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial z^2},$$

$$\mathbf{R}_3 = - \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial F} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial x \partial z}$$

并根据式(1)、式(3)和式(4),则

$$\frac{\partial u_y}{\partial N} = \mathbf{L}_1 r_1, \quad \frac{\partial u_y}{\partial L} = \mathbf{L}_1 r_2, \quad \frac{\partial u_y}{\partial \rho} = \mathbf{L}_1 r_3 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial A} = \mathbf{L}_2 \mathbf{R}_1, \quad \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial C} = \mathbf{L}_2 \mathbf{R}_2, \quad \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial F} = \mathbf{L}_2 \mathbf{R}_3 \quad (6)$$

如果用式(5)和式(6)分别与式(2a)和式(2b)相比较,可以发现它们之间有着极大的相似之处,也就是式(2a)与式(5)以及式(2b)与式(6)的表达式基本相同,即它们的解析表达式基本相同,都是通过偏导数差分算子 \mathbf{L}_1 和 \mathbf{L}_2 将震源函数 F_y, F^0 和 $r_1, r_2, r_3, \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3$ 投影到解析空间得到。如果把式(5)和式(6)右边的 $r_1, r_2, r_3, \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3$ 看作是震源项,那么式(5)和式(6)的解就是反演中所需要 Jacobi 矩阵中的各个参数;并且最为重要的是,利用式(5)和式(6)求解反演中所需要的 Jacobi 矩阵中的各个参数的过程,就是与上述的利用式(2)进行正演过程相同的过程。也就是说,反演中所需求取的 Jacobi 矩阵中的各个参数,可以通过与正演方法相同的方法求取。它通过对式(5)和式(6)的数值求解即可得到。在求得 Jacobi 矩阵 $\frac{\partial \mathbf{U}(\mathbf{C}^{(k)})}{\partial \mathbf{C}}$ 之后,根据公式

$$\mathbf{g}^{(k)} = \nabla f(\mathbf{C}^{(k)}) = 2(U(\mathbf{C}^{(k)}) - U_k) \frac{\partial \mathbf{U}(\mathbf{C}^{(k)})}{\partial \mathbf{C}}$$

即可求取梯度向量 $\mathbf{g}^{(k)}$ 。利用本文所给的公式(见附录 A)修正 \mathbf{H}_k , 其初始矩阵可取单位阵 \mathbf{E}_n , 即 $\mathbf{H}_0 \approx \mathbf{E}_n$, 这样修正 \mathbf{H}_{k+1} 就不必求函数 $f(\mathbf{C})$ 的海色矩阵及其逆阵。

反演弹性参数的计算程序如下。

对于 $\min f(\mathbf{C})$, $x \in R^n$, 梯度 $\mathbf{g}^{(k)} = \nabla f(\mathbf{C}^{(k)})$:

① 取初值 $\mathbf{C}^{(0)}$, 初始矩阵 $\mathbf{H}_0 = \mathbf{E}_n$ 为单位阵, 计算 $\mathbf{g}^{(0)}$, $\mathbf{P}^{(0)} = -\mathbf{H}_0 \mathbf{g}^{(0)} = -\mathbf{g}^{(0)}$, $\mathbf{C}^{(1)} = \mathbf{C}^{(0)} + \mathbf{P}^{(0)}$, 令 $k=0$;

② 求 $\mathbf{g}^{(k+1)}$, $\mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{g}^{(k+1)} - \mathbf{g}^{(k)}$, $(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})^T \mathbf{y}^{(k)}$, 若 $(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})^T \mathbf{y}^{(k)} < 0$ 时, 转步骤④;

③ 若 $(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})^T \mathbf{y}^{(k)} \leq 0$, 转④, 否则转⑥;

④ 计算 $\Delta \mathbf{H}_k = - \frac{(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})^T}{(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})^T \mathbf{y}^{(k)}}$,

$\mathbf{H}_{(k+1)} = \mathbf{H}_k + \Delta \mathbf{H}_k$, $\mathbf{P}^{(k+1)} = -\mathbf{H}_{(k+1)} \mathbf{g}^{(k+1)}$, $\mathbf{C}^{(k+2)} = \mathbf{C}^{(k+1)} + \mathbf{P}^{(k+1)}$;

⑤ 若 $\|\mathbf{g}^{(k+1)}\| < \varepsilon$ 停, 否则 $k=k+1$, 转②;

⑥ 线性搜索 $\min f(\mathbf{C}^{(k)} + \lambda \mathbf{P}^{(k)})$, 令 $\mathbf{C}^{(k+1)} = \mathbf{C}^{(k)} + \lambda \mathbf{P}^{(k)}$ 转②。

3 数据实例

在该实例中,模型由3层地层组成,如图1所示。其中的第1、第2层为 TI 介质,第3层为各向同性介质,各地层的弹性参数见表1。计算中整个网格的节点数为 800×800 , 网格长度 $\Delta x = \Delta z = 10 \text{ m}$, 时间采样间隔为 $\Delta t = 1 \text{ ms}$ 。震源为集中力源,位于网格中的(80, 1)处,震源子波采用 Ricker 子波。

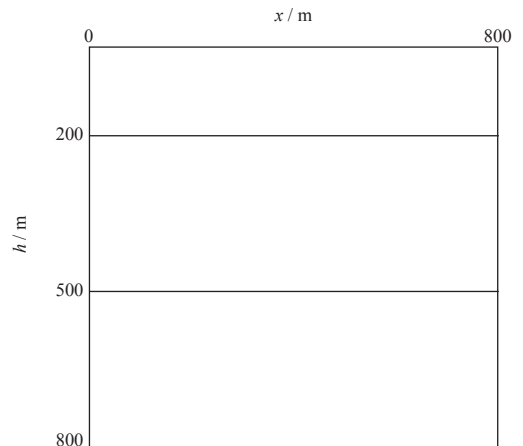


图1 模型的几何结构

表1 模型弹性参数

| 介质编号 | $C_{11}/10^{10} \text{ Pa}$ | $C_{13}/10^{10} \text{ Pa}$ | $C_{33}/10^{10} \text{ Pa}$ | $C_{35}/10^{10} \text{ Pa}$ | $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
|------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 第1层 | 3.988 2 | 1.621 8 | 2.890 0 | 0.855 6 | 2 500 |
| 第2层 | 4.729 1 | 1.980 0 | 3.477 3 | 1.057 0 | 2 540 |
| 第3层 | 4.586 4 | 1.528 8 | 4.586 4 | 1.528 8 | 2 600 |

在实际生产中,通常只能较方便地给出地层的P波速度和S波速度,因此我们给出的初始模型各层均为各向同性地层,它们的速度跟真实模型各层的qP波和qSV波的垂向速度相比,约有10%~20%的误差(表2),可以看出,相应的弹性参数也有很大偏差。图2为利用理论模型弹性参数正演得到的弹性波场位移。

表2 层状各向同性初始模型弹性参数 10^{10} Pa

| 介质编号 | C_{11} | C_{13} | C_{33} | C_{35} |
|------|----------|----------|----------|----------|
| 第1层 | 3.610 0 | 1.298 8 | 3.610 0 | 1.155 6 |
| 第2层 | 4.696 5 | 1.914 9 | 4.696 5 | 1.390 8 |
| 第3层 | 6.500 0 | 2.166 6 | 6.500 0 | 2.166 7 |

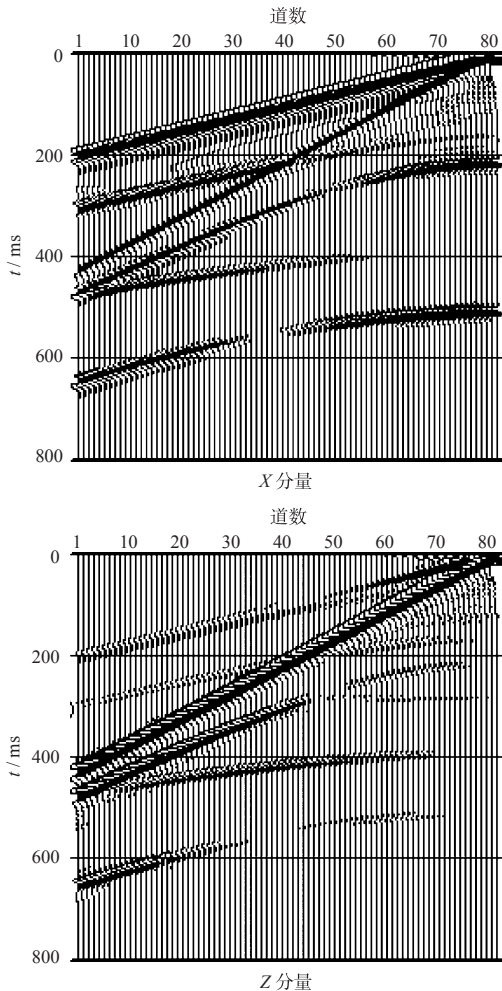


图2 利用理论模型弹性参数正演得到的弹性波场位移

表3是迭代反演的最后结果。可以看出,各向同性层和各向异性层都被准确地反演出来,反演结果很好地收敛到真实模型上。图3是与最终反演结果相对应的弹性波场位移。

表3 模型弹性参数反演结果 10^{10} Pa

| 介质编号 | C_{11} | C_{13} | C_{33} | C_{35} |
|------|----------|----------|----------|----------|
| 第1层 | 3.988 2 | 1.621 8 | 2.890 0 | 0.855 6 |
| 第2层 | 4.729 2 | 1.980 2 | 3.477 2 | 1.056 7 |
| 第3层 | 4.586 2 | 1.529 2 | 4.586 7 | 1.528 5 |

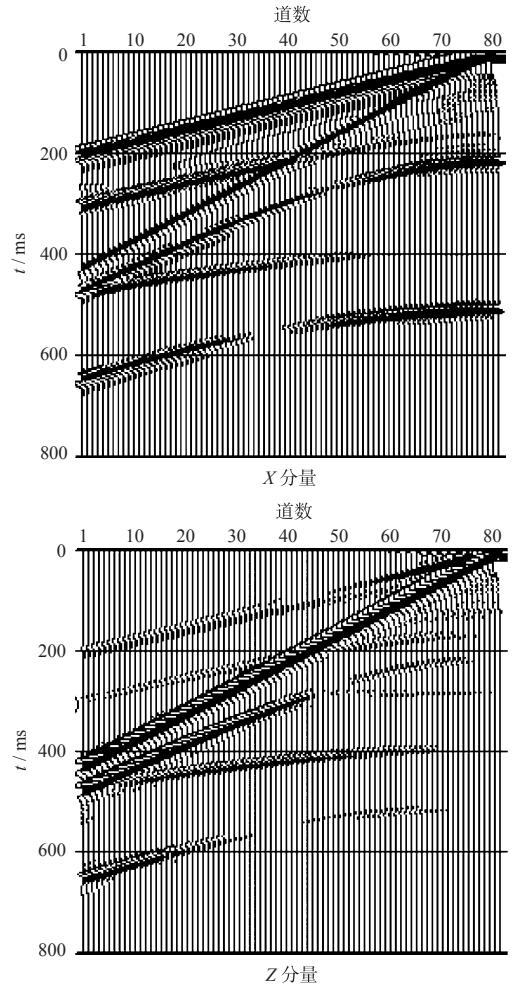


图3 与最终反演结果相对应的弹性波场位移

4 结论

1) 本文结合非线性最优化理论提出的广义非线性反演是一种有效的地球物理反演方法,可以广泛地应用于各种地球物理反问题的求解。

2) 广义非线性反演是一种快速的反演算法,与每次迭代只取泰勒展开式一阶项的线性反演方法相比,广义非线性反演每次迭代精确到泰勒展开式二阶项,这样可极大地减少迭代次数,加快收敛

速度,而不计算海色矩阵及其逆阵减少了计算量并加快了反演的速度。采用广义非线性反演可以比较方便地解决反演稳定性问题,对于各向异性弹性参数的反演来说,这一点尤为重要。

3) 广义非线性反演要求原始资料具有较高的信噪比,若结合测井资料进行约束反演则效果更佳。总之,广义非线性反演不仅能提高反演速度、减小反演过程中陷入局部极小的可能性,而且可以比较方便地提高反演的稳定性。理论模型和实际资料的反演结果均证明,该方法是一种较好的值得推广的地球物理反演方法。

4) 为减小计算量、降低反演的多解性,本文假定模型已知。实际勘探中,常规处理解释可参照一个比较准确的工区几何结构模型,但是,这个模型会有一些的误差,该误差对反演结果的影响程度及如何克服,需进一步研究。本文全波场各向异性弹性参数反演数据多,计算量大,要想达到实用化的目标,需进一步提高反演系统的计算效率,减少对计算机系统内存的需求量。

参 考 文 献

- 1 杨顶辉,滕吉文,张中杰. 各向异性动力学方程反演新算法[J]. 地震学报, 1997, 19(4): 376~382
- 2 张秉铨,张中杰. 一种新的地层弹性参数直接反演方法[J]. 地震学报, 2000, 22(6): 654~660
- 3 张美根,王妙月,李小凡. 时间域全波场各向异性弹性参数反演[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 94~100
- 4 胡光岷,贺振华,黄德济. 广义非线性反演及其应用[J]. 石油物探, 2000, 39(2): 44~51
- 5 王一铁. 牛顿法的一种变尺度形式[J]. 济南大学学报, 1998, 8(2): 53~56
- 6 杨顶辉,滕吉文,张中杰. 各向异性问题数值模拟中的交替算法[J]. 地震学报, 1996, 18(1): 48~54
- 7 张美根. 各向异性弹性波正反演问题研究:[学位论文][D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2000
- 8 傅旦丹,何樵登,刘一峰等. 一种新的全局最优化反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(4): 536~542
- 9 周辉,何樵登. 非线性各向异性波形反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 1995, 30(6): 725~735
- 10 李正文,胡光岷,蒲勇. 地震数据多参数约束反演及应用[J]. 石油地球物理勘探, 1994, 29(5): 581~587

附录 A

当构造的 \mathbf{H}_{k+1} 为对称正定时, $\mathbf{P}^{(k+1)} = -\mathbf{H}_{k+1}\mathbf{g}^{(k+1)}$ 仍为下降方向,利用迭代式 $\mathbf{C}^{k+2} = \mathbf{C}^{(k+1)} + \mathbf{P}^{(k+1)}$ 仍可求得极小点,其构造如下。

在 $\mathbf{C}^{(k+1)}$ 处展开 $f(\mathbf{C})$ 为二次函数,有

$$f(\mathbf{C}) \approx f(\mathbf{C}^{(k+1)}) + \nabla f(\mathbf{C}^{(k+1)})(\mathbf{C} - \mathbf{C}^{(k+1)}) + \frac{1}{2} \nabla^2 f(\mathbf{C}^{(k+1)})(\mathbf{C} - \mathbf{C}^{(k+1)})^2$$

从而有 $\nabla f(\mathbf{C}) \approx \nabla f(\mathbf{C}^{(k+1)}) + \nabla^2 f(\mathbf{C}^{(k+1)})(\mathbf{C} - \mathbf{C}^{(k+1)})$, 代入 $\mathbf{C} = \mathbf{C}^{(k)}$ 有

$$\nabla f(\mathbf{C}^{(k)}) \approx \nabla f(\mathbf{C}^{(k+1)}) + \nabla^2 f(\mathbf{C}^{(k+1)})(\mathbf{C}^{(k)} - \mathbf{C}^{(k+1)})$$

式中: $\nabla f(\mathbf{C}^{(k+1)})$ 为 $f(\mathbf{C})$ 在 $\mathbf{C}^{(k+1)}$ 处的梯度,记为 $\mathbf{g}^{(k+1)}$; $\nabla^2 f(\mathbf{C}^{(k+1)})$ 为 $f(\mathbf{C})$ 在 $\mathbf{C}^{(k+1)}$ 处的海色矩阵,记为 $\mathbf{G}^{(k+1)}$,其逆阵记为 $\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{G}_{k+1}^{-1}$,并记 $\mathbf{P}^{(k)} = \mathbf{C}^{(k+1)} - \mathbf{C}^{(k)}$,有 $\mathbf{g}^{(k)} \approx \mathbf{g}^{(k+1)} - \mathbf{C}_{k+1}\mathbf{P}^{(k)}$, $\mathbf{g}^{(k+1)} - \mathbf{g}^{(k)} = \mathbf{G}_{k+1}\mathbf{P}^{(k)}$ 再记 $\mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{g}^{(k+1)} - \mathbf{g}^{(k)}$,则有

$$\mathbf{P}^{(k)} = \mathbf{H}_{k+1}\mathbf{y}^{(k)} \quad (\text{A1})$$

令 $\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \Delta\mathbf{H}_k$, 有 $\mathbf{P}^{(k)} = (\mathbf{H}_k + \Delta\mathbf{H}_k)\mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{H}_k\mathbf{y}^{(k)} + \Delta\mathbf{H}_k\mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{H}_k(\mathbf{g}^{(k+1)} - \mathbf{g}^{(k)}) + \Delta\mathbf{H}_k\mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)} - \mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k)} + \Delta\mathbf{H}_k\mathbf{y}^{(k)}$, 利用牛顿迭代式,有 $\mathbf{C}^{(k+1)} - \mathbf{C}^{(k)} = \mathbf{P}^{(k)} = -\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k)}$, 故而 $-\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k)} = \mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)} - \mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k)} + \Delta\mathbf{H}_k\mathbf{y}^{(k)}$, 从而有

$$\Delta\mathbf{H}_k\mathbf{y}^{(k)} = -\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)} \quad (\text{A2})$$

令 $\mathbf{u}^{(k)\top}\mathbf{y}^{(k)} = 1$, 由式(A2)有 $\Delta\mathbf{H}_k\mathbf{y}^{(k)} = -\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)}(\mathbf{u}^{(k)\top}\mathbf{y}^{(k)}) = (-\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)}\mathbf{u}^{(k)\top})\mathbf{y}^{(k)}$, 对比等式两端有

$$\Delta\mathbf{H}_k = -\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)}\mathbf{u}^{(k)\top} \quad (\text{A3})$$

当要求 $\Delta\mathbf{H}_k$ 对称时,即 $(\Delta\mathbf{H}_k)^\top = \Delta\mathbf{H}_k$, 设 \mathbf{H}_k 对称时有 $(\Delta\mathbf{H}_k)^\top = -\mathbf{u}^{(k)}\mathbf{g}^{(k+1)\top}\mathbf{H}_k = -\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)}\mathbf{u}^{(k)\top} = \Delta\mathbf{H}_k$,

令 $\mathbf{u}^{(k)} = \lambda_k\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)}$ 时,则 $\mathbf{u}^{(k)\top} = \lambda_k\mathbf{g}^{(k+1)\top}\mathbf{H}_k$ (λ_k 为实数),代入上式两端,均有 $-\lambda_k\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)}\mathbf{g}^{(k+1)\top}\mathbf{H}_k$, 故而 $\Delta\mathbf{H}_k$ 对称,由于 $\mathbf{u}^{(k)\top}\mathbf{y}^{(k)} = 1$ 代入 $\mathbf{u}^{(k)\top} = \lambda_k\mathbf{g}^{(k+1)\top}\mathbf{H}_k$ 有 $\lambda_k = \frac{1}{\mathbf{g}^{(k+1)\top}\mathbf{H}_k\mathbf{y}^{(k)}}$, 所以 $\mathbf{u}^{(k)} = \lambda_k\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)} =$

$\frac{\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)}}{\mathbf{g}^{(k+1)\top}\mathbf{H}_k\mathbf{y}^{(k)}}$ 代入(A3)式得

$$\Delta\mathbf{H}_k = -\frac{\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)}\mathbf{g}^{(k+1)\top}\mathbf{H}_k}{\mathbf{g}^{(k+1)\top}\mathbf{H}_k\mathbf{y}^{(k)}} = -\frac{(\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)})(\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)})^\top}{(\mathbf{H}_k\mathbf{g}^{(k+1)})^\top\mathbf{y}^{(k)}} \quad (\text{A4})$$

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \Delta\mathbf{H}_k = \mathbf{H}_k - \frac{(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})^T}{(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})^T \mathbf{y}^{(k)}} \quad (\text{A5})$$

由 \mathbf{H}_k 对称性及 $\Delta\mathbf{H}_k$ 构造式, 显然 \mathbf{H}_{k+1} 对称。可以证明, \mathbf{H}_k 对称正定, 当 $\mathbf{g}^{(k)} \neq 0 (k=1, 2, \dots, n)$ 且满足 $(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})^T \mathbf{g}^{(k)} \leq 0$ 时, $\mathbf{H}_{(k+1)}$ 为正定或半正定。

利用本公式修正 \mathbf{H}_k , 其初始矩阵可取单位阵 \mathbf{E}_n , 即 $\mathbf{H}_0 \approx \mathbf{E}_n$, 这样修正 \mathbf{H}_{k+1} 就不必求函数 $f(\mathbf{C})$ 的海色矩阵及其逆阵。利用 DFP (Davidon Fletcher Powell) 方法求极值, 是很有效的方法, 但必须进行线性搜索, 线性搜索的工作量大, 而利用本方法求极值, 一般不用线性搜索 (但当 $(\mathbf{H}_k \mathbf{g}^{(k+1)})^T \mathbf{g}^{(k)} > 0$ 时, 需要进行线性搜索, 使计算继续), 同样可求函数极值。

中国地质大学(武汉)能源地球物理研究所 招聘启事

为加快学科发展与研究所建设, 中国地质大学(武汉)能源地球物理研究所现面向社会高薪招聘下列人才(见中国地质大学(武汉)人事处主页)。

一、工程岗位

工作内容: ①地震资料数据处理工程师; ②地震资料地质解释工程师。

要求: ①踏实的工作作风; ②优良的团队合作精神; ③8年以上工作经验; ④处理工程师熟练掌握 Ω 等地震数据处理系统, 解释工程师熟练掌握通用解释软件; ⑤负责并承担过大型处理或解释项目。

薪资待遇: ①基本年薪 15~20 万, 外加工作量提成(具体面议); ②该岗位由能源地球物理研究所自行招聘。

二、科研与教学岗位

学科名称: 地球物理学

研究方向: ①地震-测井-地质学; ②地震学与地震勘探; ③地震波传播与成像。

学科名称: 地球探测与信息技术

研究方向: 地球信息科学与技术。

学科名称: 构造地质学

研究方向: 应用构造学。

学科名称: 能源地质工程

研究方向: ①石油勘探构造分析; ②沉积学与储层地质学; ③层序地层学与隐蔽圈闭预测。

学科名称: 物理学

研究方向: ①波动物理学; ②光学; ③声学。

学科名称: 应用数学

研究方向: 偏微分方程与反演。

学科名称: 计算机科学

研究方向: ①计算机软件与理论; ②软件工程。

学科名称: 工程力学

研究方向: 弹性波理论与应用。

要求: ①相关学科博士学位; ②坚定的科学理念与踏实的工作作风; ③优良的团队合作精神。

薪资待遇: ①聘任人员享受学校薪酬待遇; ②另所内待遇面议。

应聘者需提供的资料: ①中、英文简历, 近期免冠 1 寸照片 1 张; ②论文发表情况(目录); ③主要代表作 3 篇(部);

④学位证书等其他重要证书材料的复印件。

三、联系方式

工程岗位应聘者直接电话或 E-mail 联系。

科研与教学岗位应聘者请将应聘材料(书面及电子版)发至下列地址, 并注明申请方向。

电话: (027)61063450, (027)62011604

电子邮件: wenhuiy@mail.cug.edu.cn

联系人: 张老师 於老师

地址: 湖北省武汉市鲁磨路 中国地质大学(武汉)能源地球物理研究所