

时间域全波场各向异性弹性参数反演

张美根 王妙月 李小凡 杨晓春

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101

摘要 从各向异性弹性波的有限元正演方程出发, 导出了反问题中时间域雅可比矩阵求解的计算公式. 它具有与时间域有限元正演方程相同的表达形式, 故可通过有限元正演计算来获得雅可比矩阵. 研究了有限元正演算法的效率和精度、吸收边界条件等方面的问题, 以提高反演系统的效率和精度. 在此基础上, 实现了叠前全波场各向异性弹性参数反演. 计算表明, 在初始模型偏离真实模型较大的情况下, 层状模型和横向不均匀模型的反演结果均能准确地收敛到真实模型上.

关键词 时间域 各向异性弹性波 弹性参数 全波场反演

文章编号 0001-5733(2003)01-94-07 中图分类号 P631 收稿日期 2001-11-17, 2002-04-04 收修定稿.

FULL WAVEFIELD INVERSION OF ANISOTROPIC ELASTIC PARAMETERS IN THE TIME DOMAIN

ZHANG MEIGEN WANG MIAOYUE LI XIAOFAN YANG XIAOCHUN

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract From the finite element equation of anisotropic elastic waves, an expression is derived for directly calculating the Jacobi matrix. It has the same form as the finite element forward modeling equation. So all the elements of Jacobi matrix can be got through finite element forward modeling. To improve the efficiency and accuracy of the inversion system, problems such as the efficiency and accuracy of the forward modeling system, absorbing boundary conditions and so on, are also studied. Finally, anisotropic model inversion is carried out with the finite element inversion system. The inversion results of a stratified model and a transversely heterogeneous model accord with real models very well, even though the initial models have great deviations.

Key words Time domain, Anisotropic elastic wave, Elastic parameter, Full wavefield inversion.

1 引言

近二三十年来, 基于声波和各向同性弹性波的物质参数反演理论得到了快速发展^[1,2]. 在现有的反演方法中, 走时反演因其稳定性好、计算量较小等优点在理论上和实际应用中都已取得可喜成果^[3~7], 但走时反演只利用了一定类型波场的走时信息, 并且走时只对速度的长波长部分敏感, 因此走时反演得到的是一种经过圆滑的分辨率较低的结果. 要想更多地利用地震波的运动学和动力学信息, 以获取分辨率较高的结果, 只有选择波形反

演^[8,9]. 对于各向异性地震波来说, 波速随传播方向和介质各向异性的强弱发生复杂的变化, 在弱各向异性介质中, 可以通过近似算法来得到波的走时和射线路径, 从而进行走时成像反演^[6,7]. 当介质的各向异性较强时, 计算走时和射线路径就变得极其困难, 相应的走时反演也就难以实现. 因而, 研究波形反演技术对各向异性介质显得尤为重要.

目前, 各向异性波波形反演方面的工作还不是很. 何樵登等^[10]研究了层状裂隙介质的遗传算法反演问题; 周辉等^[11]对各向异性波形的最优化反演方法做了理论研究; 傅旦丹等^[12]采用坐标扰动法进行了一维正交各向异性介质的波形反演; Sen 等^[13]、

基金项目 国家杰出青年基金(40025412)、中国科学院百人计划(10010120)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX-07)联合资助.

作者简介 张美根, 男, 1970年生, 2000年中国科学院地质与地球物理研究所博士毕业. 主要从事各向异性地震波的正反演、地震资料处理与解释以及散射波理论等方面的研究. E-mail: mgzhang@c-geos.ac.cn

Plessix^[14]和 Ji 等^[15]在 $-P$ 域内对层状 TI(横向各向同性)介质进行了反演研究;de Hoop 等^[16]研究了基于 GRT(广义拉当变换)的三维散射波线性渐近各向异性参数反演. 以上工作都不是地面叠前全波场反演,然而,地面叠前全波场炮集记录是地震勘探中采集得最多的第一手原始资料,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,对于减小反演的多解性、提高解的精度有重要意义. 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. 对叠前全波场反演的优越性已开始引起了研究者的兴趣,杨顶辉等^[17]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 波资料反演一个两层 TI 模型的垂向和水平速度;张秉铭等^[18]对杨顶辉等的方法做了进一步发展,利用两分量炮集记录反演了一个三层 TI 模型的 C_{11} 和 C_{33} 两个弹性参数. 鉴于有限元算法的高精度性及其在地震波正反演方面的成功应用^[19,20],本文利用有限元方法实现了各向异性弹性参数的时间域叠前全波场反演. 许琨等^[21]的同期工作采用类似方法实现了频率域声波介质的单参数反演.

2 方法原理

2.1 反问题线性方程组的建立

按非线性问题线性化的反问题求解的一般步骤,首先对将要求解的二维区域参数化,反映在本文的有限元反演系统中,就是将待求解模型剖分成一系列小单元,在每一小单元内,取各弹性参数为常数. 设参数化之后模型的弹性参数向量 $C = (C_1, C_2, \dots, C_L)^T$, L 为总参数的个数,则参数化之后的非线性方程组为

$$U_k = U_k(C), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

其中, U_k 为第 k 个观测值, K 为资料点数目或方程个数. 如果可以根据先验知识给出模型参数的初始猜测为 $C_0 = (C_1^0, C_2^0, \dots, C_L^0)^T$, 则在 C_0 点,可以把 (1) 式用 Taylor 级数进行展开为

$$U_k = U_k(C_0) + \sum_{l=1}^L \frac{\partial U_k(C_0)}{\partial C_l} (C_l - C_l^0) + \sum_{l=1}^L \frac{\partial^2 U_k(C_0)}{\partial C_l^2} \frac{(C_l - C_l^0)^2}{2!} + \dots \quad (2)$$

将 (2) 式中二次以上的项忽略掉,就可得到线性化的反演表达式

$$U_k = U_k(C_0) + \sum_{l=1}^L \frac{\partial U_k(C_0)}{\partial C_l} (C_l - C_l^0), \quad (3)$$

其中, $U_k(C_0)$ 为模型参数为 C_0 时第 k 点的理论正演结果.

令

$$C = \begin{bmatrix} C_1 - C_1^0 \\ C_2 - C_2^0 \\ \dots \\ C_L - C_L^0 \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_{11x} - u_{11x}(C_0) \\ u_{11z} - u_{11z}(C_0) \\ \dots \\ u_{1Nx} - u_{1Nx}(C_0) \\ u_{1Nz} - u_{1Nz}(C_0) \\ \dots \\ u_{M1x} - u_{M1x}(C_0) \\ u_{M1z} - u_{M1z}(C_0) \\ \dots \\ u_{MNx} - u_{MNx}(C_0) \\ u_{MNz} - u_{MNz}(C_0) \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_{11x}(C_0)}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial u_{11x}(C_0)}{\partial C_L} \\ \frac{\partial u_{11z}(C_0)}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial u_{11z}(C_0)}{\partial C_L} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial u_{1Nx}(C_0)}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial u_{1Nx}(C_0)}{\partial C_L} \\ \frac{\partial u_{1Nz}(C_0)}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial u_{1Nz}(C_0)}{\partial C_L} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial u_{M1x}(C_0)}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial u_{M1x}(C_0)}{\partial C_L} \\ \frac{\partial u_{M1z}(C_0)}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial u_{M1z}(C_0)}{\partial C_L} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial u_{MNx}(C_0)}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial u_{MNx}(C_0)}{\partial C_L} \\ \frac{\partial u_{MNz}(C_0)}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial u_{MNz}(C_0)}{\partial C_L} \end{bmatrix}$$

其中, M 为总道数, N 为每道的采样点数, A 为雅可比矩阵, 又称灵敏度矩阵, u_{ijx} 与 u_{ijz} 分别表示第 i 道第 j 个采样点的观测值的 x 分量和 z 分量, $u_{ijx}(C_0)$ 与 $u_{ijz}(C_0)$ 分别表示第 i 道第 j 个采样点在 C_0 点的理论正演值的 x 分量和 z 分量. 这时,由 (3) 式有

$$U = A C, \quad (4)$$

(4) 式即为反演方程的矩阵形式. 通过求解 (4) 式,

可以获得对初始模型参数的修正值 C , 通过迭代求解, 直至修正量小到可以忽略, 就可以得到模型参数的逼近值.

2.2 雅可比矩阵的求解

由(4)式可知, 反演的一个关键点是求解雅可比矩阵. 本文采用精度高、灵活性好的有限元素法求取雅可比矩阵. 弹性波的有限元方程为

$$MU' + KU = F, \quad (5)$$

其中, M , K , F 与 U 分别为质量矩阵、为刚度矩阵、为节点外力向量与为节点位移向量, U' 为 U 对时间的二阶导数.

将(5)式两边同时对弹性参数 $C_l (l = 1, 2, \dots, L)$ 求偏导, 有

$$M \frac{\partial U'}{\partial C_l} + K \frac{\partial U}{\partial C_l} + \frac{\partial K}{\partial C_l} U = 0, \quad (6)$$

这里, 称 $\frac{\partial K}{\partial C_l}$ 为刚度矩阵对弹性参数 C_l 的刚度偏导数矩阵. 令 $G_l = \frac{\partial U}{\partial C_l}$, $R_l = -\frac{\partial K}{\partial C_l} U$, 则(6)式变为

$$MG'_l + KG_l = R_l. \quad (7)$$

以上表明, 通过正演得到了模型各节点各时刻的波场数据之后, 就可以通过(7)式再利用有限元正演系统获得地面各接收点不同时刻对应 C_l 的雅可比矩阵系数. 经过多次正演即可求出全部弹性参数对应的雅可比矩阵系数, 将它们组合在一起就形成了求解反问题的雅可比矩阵.

2.3 反演方程组的求解

得到了雅可比矩阵之后, 由实际观测资料与迭代模型的正演波场相减得到 U , 从而可进行反演方程组(4)的求解. 关于线性方程组的求解有多种方法, 由于在地球物理反问题中, (4)式往往具有欠定病态的特征, 故在反演系统中采用阻尼最小二乘 QR 分算法求解. 它是一种比较成熟的算法, 在此不再赘叙. 利用求得的 C 修改迭代模型, 重复迭代反演过程, 直到获得最后的稳定解.

3 反演系统中的几个技术要点

3.1 弹性参数的刚度偏导数阵的计算

记弹性参数 $C_l (l = 1, 2, \dots, L)$ 的总体刚度偏导数矩阵为 K , 即

$$K = \frac{\partial K}{\partial C_l}, \quad (8)$$

式中, K 为总体刚度矩阵.

根据总体刚度矩阵的形式, 有

$$K = \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{N_e} K_e \right)}{\partial C_l} = \sum_{j=1}^{N_e} \frac{\partial K_e}{\partial C_l}, \quad (9)$$

式中, K_e 为单元刚度矩阵, N_e 为单元总个数. (9)式表明, 只要分别求出各单元刚度矩阵对 C_l 的偏导数阵, 然后采用集成总体刚度矩阵相同的办法来组合全体单元刚度矩阵的偏导数阵, 便可以得到弹性参数 C_l 的总体刚度偏导数阵 K .

将 $K_e = B^T C B d_s$ 代入(9)式得

$$\frac{\partial K_e}{\partial C_l} = \sum_{s_e} B^T \left(\frac{\partial C}{\partial C_l} \right) B d_s, \quad (10)$$

式中 C 为单元介质的弹性矩阵, $B = LN$, L 为偏导数算子矩阵, N 为插值函数矩阵. 由(10)式可知, $\frac{\partial K_e}{\partial C_l}$ 只与单元形状和位移插值函数的形式有关, 与单元介质的物性无关.

3.2 吸收边界条件

人工截断边界上吸收边界条件的好坏对波场正反演问题有重要作用. 本文采用廖振鹏使用的离散透射边界^[22]和 Sarma 衰减边界^[23]的组合边界.

令 $x = 0$, $x = a$, $z = h$ 分别表示模型的左边界、右边界和底边界, 则廖振鹏离散透射边界的二维表达形式为

$$\begin{cases} U(0, z, t + \tau) \\ = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} C_i^n U(iv \tau, z, t - (i-1)\tau), \\ U(a, z, t + \tau) \\ = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} C_i^n U(a - iv \tau, z, t - (i-1)\tau), \\ U(x, h, t + \tau) \\ = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} C_i^n U(x, h - iv \tau, t - (i-1)\tau). \end{cases} \quad (11)$$

其中, $U(0, z, t + \tau)$, $U(a, z, t + \tau)$, $U(x, h, t + \tau)$ 分别表示 $t + \tau$ 时刻左边界、右边界和底边界节点的位移值, v 为人工透射速度, n 为边界条件的阶数, $C_i^n = \frac{n!}{(n-i)! i!}$, 等式右边所取的 U 值点通常不会正好落在网格节点上, 故需利用网格节点进行插值计算, 本文采用的是二次内插.

Sarma 衰减边界是在有限元方程中引入 Rayleigh 阻尼衰减项得到的, 其形式为

$$MU' + CU + KU = F, \quad (12)$$

式中, C 为衰减(阻尼)矩阵. 在边界部位的吸收带内, $C = M + K$, M 为吸收系数; 对于其他节点, $C = 0$.

研究表明^[10], 透射加衰减组合边界是一种较好的吸收边界处理方案, 对于各向异性波, 它具有较好的吸收效果和稳定性能.

由于 G_i 在空间的分布也是一种场, 其有限元求解过程类似于位移场的传播, 故可采用与位移场相似的吸收边界条件.

3.3 正演系统的效率和精度

在反演中, 为提高正演系统的效率和精度, 采取了如下措施:

(1) 在相同节点的情况下, 矩形单元的计算精度要比三角形单元高许多^[24], 同时考虑到设计震源和边界处理的方便性, 采用相同大小正方形单元剖分求解区域. 由于正方形单元的长短边之比为 1, 故避免了解的方向性偏差.

(2) 以集中质量矩阵代替协调质量矩阵, 避免了由于有限元方程求解带来的巨大的矩阵求逆运算, 同时也减少了数值计算误差引入的可能性.

(3) 采用动态内存管理和灵活的数据类型分配技术, 提高了系统的灵活性和精度.

4 模型反演计算

下面通过两个理论模型的反演实算来验证本文有限元各向异性弹性参数反演系统的可行性与可靠性. 考虑到在实际生产中, 常规解释结果可以较为准确地给出地下介质的初步几何结构, 为此, 按几何

结构进行物性分块. 认为同一几何结构分块中的有限元各单元具有相同的物性, 以减少未知数的个数, 从而大大减少了内存使用量和计算量, 同时也提高了反演的稳定性和精度. 在下面的反演模型中, 各向异性介质是最为常见的一类重要的各向异性介质—— π 介质. 反演时, 假定震源子波和介质的密度均已知, 只反演与 qP 波和 qSV 波有关的 C_{11} , C_{13} , C_{33} 和 C_{55} 这 4 个参数.

4.1 模型 (均匀层状模型)

图 1a 为 3 层均匀层状模型, 其物性参数见表 1, 表中给出了弹性参数和 Thomsen 参数两种形式. 其中, 介质 1、2 为 π 介质, 介质 3 为各向同性介质.

图 1(b, c) 是采用有限元法制作的地面观测记录. 炮点位于模型地表中点, 震源为爆炸源, 震源子波为高斯子波, 道间距为 5m, 采样间隔为 0.5ms. 图 1(b, c) 经过了振幅增强处理, 但反射波还是很弱, 面波及直达波都很强, 它们的真实强度要比层界面反射波高出 2~3 个数量级, 这种资料对反演方法是一个很大的挑战.

由于实际生产中, 通常只能较方便地给出地层的 P 波和 S 波初始速度, 而且要求初始速度与真实模型能够有较大的偏差. 因此, 这里给出一个匀速各向同性模型作为初始模型. 设定的初始速度 $V_P = 3800.0\text{m/s}$, $V_S = V_P/\sqrt{3} = 2194.0\text{m/s}$. 显然, 这个初始模型与真实模型有很大偏差.

表 2 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.

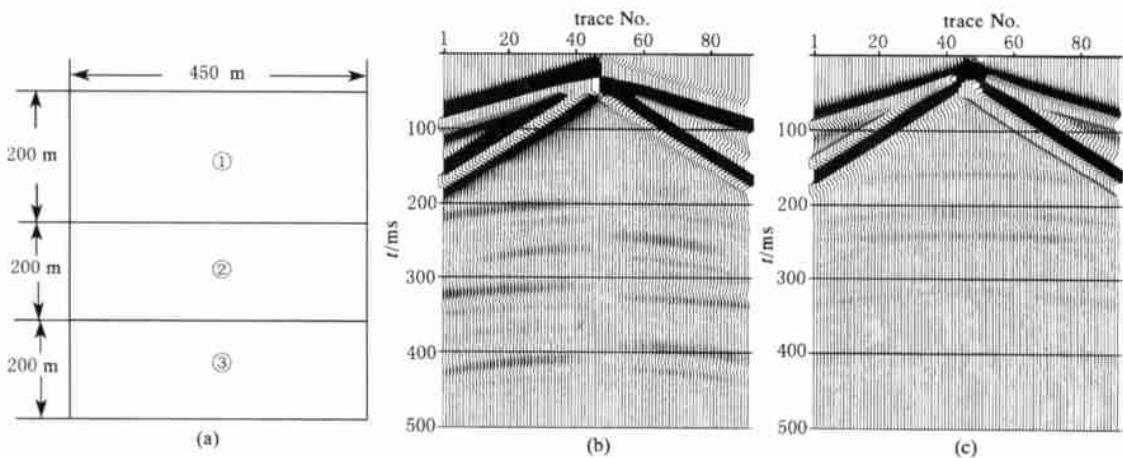


图 1 模型 几何结构及合成炮集记录

(a) 模型 ; (b) x 分量; (c) z 分量.

Fig. 1 The geometrical structure and synthesized shot gather sections of model

表 1 模型 物性参数

Table 1 The physical parameters of model

介质编号	$C_{11}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$C_{13}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$C_{33}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$C_{55}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$\rho/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	ν	ν	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
3.9882	1.6218	2.8900	0.8556	3400.0	1850.0	0.19	0.17	2500	
4.7291	1.9800	3.4773	1.0570	3700.0	2040.0	0.18	0.20	2540	
4.5864	1.5288	4.5864	1.5288	4200.0	2424.9	0	0	2600	

注: $C_{11}, C_{13}, C_{33}, C_{55}$ 为介质的弹性参数, ρ, ν, ν, ρ 为 Thomsen 参数, ρ 为密度, 下同.

表 2 模型 反演结果

Table 2 The inversed result of model

介质编号	$C_{11}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$C_{13}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$C_{33}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$C_{55}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$\rho/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	ν	ν
3.9882	1.6218	2.8900	0.8556	3340.0	1850.0	0.19000	0.17000	
4.7290	1.9800	3.4773	1.0570	3700.0	2040.0	0.17999	0.19998	
4.5861	1.5284	4.5863	1.5288	4200.0	2424.9	-0.00003	-0.00007	

4.2 模型 (横向不均匀模型)

横向不均匀模型的反演比层状模型的反演具有更重要的实际意义, 难度也更大. 图 2(a) 是模型的几何结构, 其物性参数见表 3. 对于此模型, 采用与模型 相同的正演方式得到了合成地面观测记录 (图 2(b, c)). 可以看出, 剖面中的反射信号很弱, 淹没在能量极强的面波和直达波之中. 反演时, 也采用一个与真实模型有很大偏差的匀速各向同性模型作为初始模型. 初始模型的速度为: $V_P = 3900\text{m/s}$,

$V_S = V_P/\sqrt{3} = 2251.7\text{m/s}$. 表 4 是反演迭代稳定后的结果, 它同真实模型能够较好地吻合, 表明本文反演系统能够较精确地反演复杂的横向不均匀模型.

为检验本文反演系统的抗噪能力, 在图 2(b, c) 合成记录中加入约为反射波能量的 50% 左右的随机噪声, 得到了含噪声剖面 (图 3), 采用与上面相同的匀速各向同性初始模型, 对含噪声资料进行反演, 表 5 是最后的反演结果. 可以看出, 本文反演系统具有一定的抗噪能力, 对含噪声资料能得到较好的

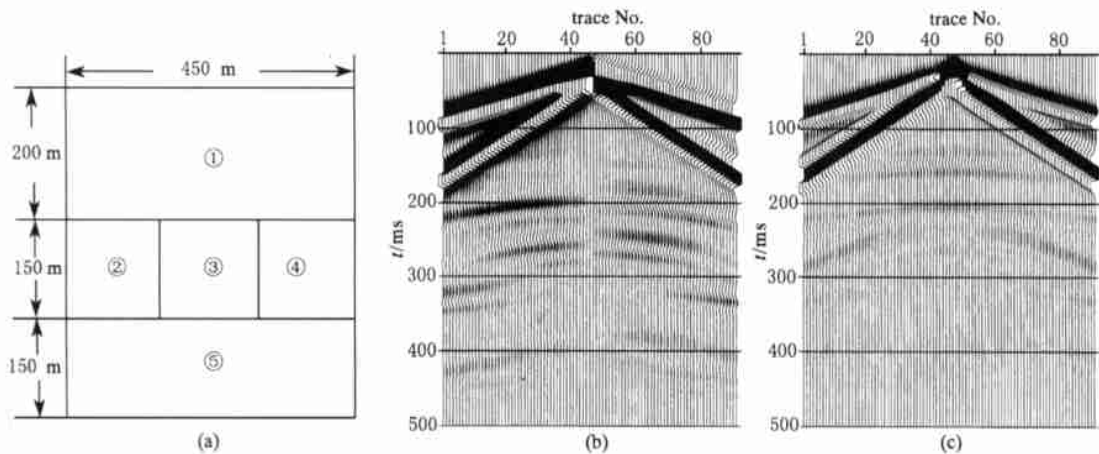


图 2 模型 几何结构及合成炮集记录
(a) 模型 ; (b) x 分量; (c) z 分量.

Fig. 2 The geometrical structure and synthesized shot gather sections of model

表 3 模型 物性参数

Table 3 The physical parameters of model

介质编号	$C_{11}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$C_{13}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$C_{33}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$C_{55}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$\rho/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	ν	ν	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
3.9882	1.6218	2.8900	0.8556	3400.0	1850.0	0.19	0.17	2500	
4.7291	1.9800	3.4773	1.0570	3700.0	2040.0	0.18	0.20	2540	
4.1280	1.3760	4.1280	1.3760	4000.0	2309.4	0	0	2580	
4.7291	1.9800	3.4773	1.0570	3700.0	2040.0	0.18	0.20	2540	
4.5864	1.5288	4.5864	1.5288	4200.0	2424.9	0	0	2600	

结果。反演结果也表明,噪声对波形反演的影响随介质所处深度的增加(即信噪比的减小)而增大。

表 4 模型 反演结果

Table 4 The inversed result of model

介质编号	$C_{11}/(10^{10}\text{N m}^{-2})$	$C_{13}/(10^{10}\text{N m}^{-2})$	$C_{33}/(10^{10}\text{N m}^{-2})$	$C_{55}/(10^{10}\text{N m}^{-2})$	$\rho/(\text{m s}^{-1})$	$\rho'(\text{m s}^{-1})$		
3.9882	1.6218	2.8900	0.8556	3400.0	1850.0	0.19000	0.17000	
4.7291	1.9800	3.4772	1.0570	3700.0	2040.0	0.18001	0.20002	
4.1280	1.3760	4.1280	1.3760	4000.0	2309.4	0.00000	0.00000	
4.7291	1.9800	3.4772	1.0570	3700.0	2040.0	0.18001	0.20001	
4.5869	1.5292	4.5864	1.5288	4200.0	2424.9	0.00005	0.00010	

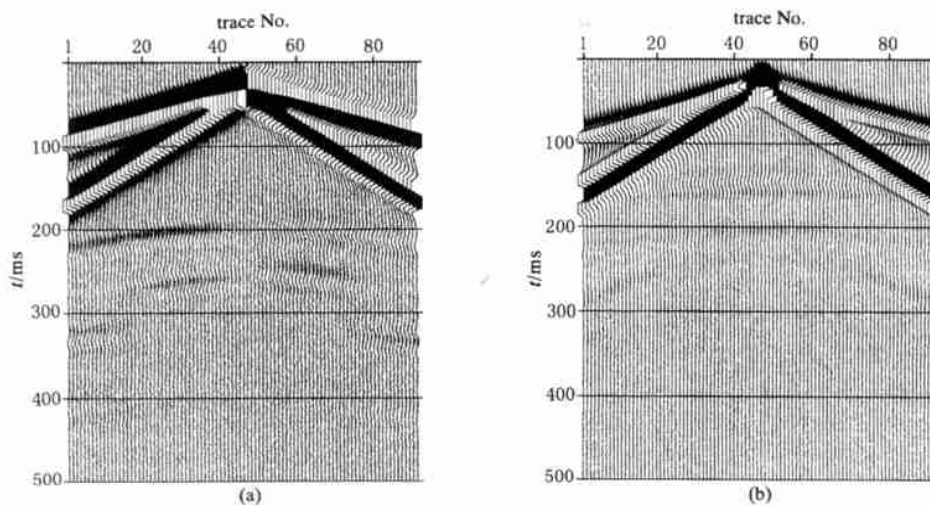


图 3 模型 含随机噪声合成记录

(a) x分量; (b) z分量.

Fig. 3 Synthesized noise-bearing shot gather sections of model

表 5 模型 含噪声资料反演结果

Table 5 The inversed result of model with noise-bearing data

介质编号	$C_{11}/(10^{10}\text{N m}^{-2})$	$C_{13}/(10^{10}\text{N m}^{-2})$	$C_{33}/(10^{10}\text{N m}^{-2})$	$C_{55}/(10^{10}\text{N m}^{-2})$	$\rho/(\text{m s}^{-1})$	$\rho'(\text{m s}^{-1})$		
3.9878	1.6215	2.8901	0.8556	3400.1	1850.0	0.18990	0.16981	
4.7243	1.9968	3.4976	1.0545	3710.8	2037.5	0.17537	0.19553	
4.1765	1.3732	4.1309	1.3737	4001.4	2307.5	0.00552	-0.00247	
4.7176	1.9844	3.4782	1.0563	3700.5	2039.3	0.17816	0.20067	
4.5021	1.5357	4.5772	1.5196	4195.8	2417.5	-0.00821	-0.00054	

5 结论与讨论

5.1 从时间域有限元正演方程出发,导出了直接计算雅可比矩阵的表达式,它具有较高的计算精度。虽然其计算费时,但由于采取了一系列提高正演效率的措施,使本文方法仍有较高的计算效率。另外,本文的透射加衰减边界条件具有较好的吸收效果和稳定性能,它进一步保证了反演系统的精度。

5.2 在初始模型偏离真实模型较大的情况下,层状模型和横向不均匀模型的反演结果均能准确地收敛

(真实模型),表明本文反演方法具有较高的精度。含噪声资料的反演结果也能较好地逼近真实模型,表明反演系统具有一定的抗噪能力。由于反演时所用资料为包括面波、直达波和各类反射波在内的全波场资料,含有最充分的地震波运动学和动力学信息,避免了波场识别与分离的困难,因而本文反演方法在各种地震勘探中均有较好的实用化前景。

5.3 为减小计算量、降低反演的多解性,本文模型假定已知。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,这个模型多少会有一些的误差,该误差对反演结果的影响程度

及其如何克服,需进一步研究. 实际资料中存在各种噪声,将影响波形反演的精度和稳定性,因此提高反演系统的抗噪能力是全波场反演的一项重要内容.

5.4 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,减少系统的内存量.

参考文献

- [1] Tarantola A 著. 反演理论——数据拟合和模型参数估算方法. 张先康等译. 北京:学术书刊出版社,1989
Tarantola A. Inverse Theories——Data Fitting and Model Parameter Estimation Methods (in Chinese). Translated by ZHANG Xiann Kang, Beijing: Academica Books and Periodicals Press, 1989
- [2] 杨文采,李幼铭编著. 应用地震层析成像. 北京:地质出版社, 1993
YANG Wencai, LI Youming. Applied Seismic Tomography (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1993
- [3] Bois P, LaPorte M, Lavergne M, et al. Well-to-well seismic measurements. *Geophysics*, 1972, **37**(3): 471~480
- [4] Peterson J E, Paulsson B N P, McEvilly T V. Applications of algebraic reconstruction techniques to crosshole seismic data. *Geophysics*, 1985, **50**(10): 1566~1580
- [5] Bregman N D, Bailey R C, Chapman C H. Crosshole seismic tomography. *Geophysics*, 1989, **54**(2): 200~215
- [6] Chapman C H, Pratt R G. Traveltime tomography in anisotropic media——. Theory. *Geophys. J. Int.* 1992, **109**(1): 1~19
- [7] Pratt R G, Chapman C H. Traveltime tomography in anisotropic media——. Application. *Geophys. J. Int.* 1992, **109**(1): 20~37
- [8] Zhou C, Schuster G T, Hassanzadeh S, et al. Elastic wave equation traveltime and waveform inversion of crosswell data. *Geophysics*, 1997, **62**(3): 853~868
- [9] Pratt R G. Seismic waveform inversion in the frequency domain, part 1: Theory and verification in a physical scale model. *Geophysics*, 1999, **64**(3): 888~901
- [10] 何樵登,陶春辉. 用遗传算法反演裂隙各向异性介质. 石油物探, 1995, **34**(3): 46~50
HE Qiaodeng, TAO Chunhui. Inverting fractured anisotropic media through a genetic algorithm. *Prosp. for Petroleum* (in Chinese), 1995, **34**(3): 46~50
- [11] 周辉,何樵登. 非线性各向异性波形反演方法. 石油地球物理勘探, 1995, **30**(6): 725~735
ZHOU Hui, HE Qiaodeng. Nonlinear waveform inversion in anisotropic medium. *Oil Geophys. Prosp.* (in Chinese), 1995, **30**(6): 725~735
- [12] 傅旦丹,何樵登,刘一峰等. 一种新的全局最优化反演方法. 石油地球物理勘探, 2000, **35**(4): 536~542
FU Dandan, HE Qiaodeng, LIU Yifeng, et al. A novel global-optimized inversion method. *Oil Geophys. Prosp.* (in Chinese), 2000, **35**(4): 536~542
- [13] Sen M, Xia G. Parameter estimation in anisotropic media. In: *Ann. Mtg. Abstracts, Soc. Expl. Geophys.*, 1997, 1559~1562
- [14] Plessix R E. A full waveform inversion example in VTI media. In: *Ann. Mtg. Abstracts, Soc. Expl. Geophys.*, 1998, 1562~1565
- [15] Ji Y, Singh S. Anisotropy from waveform inversion of multi-component data using a hybrid method. In: *Ann. Mtg. Abstracts, Soc. Expl. Geophys.*, 1999, 796~799
- [16] de Hoop M V, Spencer C, Burridge R. The resolving power of seismic amplitude data: An anisotropic inversion/migration approach. *Geophysics*, 1999, **64**(3): 852~873
- [17] 杨顶辉,滕吉文,张中杰. 各向异性动力学方程反演新算法. 地震学报, 1997, **19**(4): 376~382
YANG Dinghui, TENG Jiwen, ZHANG Zhongjie. A new anisotropic dynamic equation inversion method. *Acta Seismologica Sinica*, 1997, **19**(4): 376~382
- [18] 张秉铭,张中杰. 一种新的地层弹性参数直接反演方法. 地震学报, 2000, **22**(6): 654~660
ZHANG Bingming, ZHANG Zhongjie. A new way of directly elastic parameters inversion. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, **22**(6): 654~660
- [19] 张美根. 各向异性弹性波正反演问题研究[博士论文]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2000
ZHANG Meigen. Study on the forward and reverse problems of anisotropic elastic waves [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2000
- [20] 张美根,王妙月. 各向异性弹性波有限元叠前逆时偏移. 地球物理学报, 2001, **44**(5): 711~719
ZHANG Meigen, WANG Miaoyue. Prestack finite element reverse-time migration for anisotropic elastic waves. *Chinese J. Geophys.*, 2001, **44**(5): 711~719
- [21] 许琨,王妙月. 声波方程频率域有限元参数反演. 地球物理学报, 2001, **44**(6): 852~864
XU Kun, WANG Miaoyue. Finite element inversion of acoustic wave equation in frequency domain. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(6): 852~864
- [22] 廖振鹏,黄孔亮,杨柏坡等. 暂态波透射边界. 中国科学, 1984, **6**(A): 556~564
LIAO Zhenpeng, HUANG Kongliang, YANG Bopo. Transparent boundary condition for transitory wave. *Science in China* (in Chinese) 1984, **6**(A): 556~564
- [23] Sarma G S, Mallick K, Cadhinglajkar V R. Nonreflecting boundary condition in finite-element formulation for an elastic wave equation. *Geophysics*, 1998, **63**(3): 1006~1023
- [24] 蒋友谅. 有限元法基础. 北京:国防工业出版社, 1980
JIANG Youliang. Basis of the Finite Element Method (in Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 1980