

Liu L N, Cui F L, Zhang J F. Seismic modeling with one-way wave equation in 3D complex structures. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(3): 514 ~ 520

三维复杂构造中地震波模拟的单程波方法

刘礼农¹ 崔凤林² 张剑锋¹

1 中国科学院地质与地球物理所, 北京 100029

2 中国地质大学, 北京 100083

摘 要 复杂构造中单程波与双程波方法模拟结果的比较表明, 就地震勘探中主要关心的一次反射波而言, 单程波算法已具有足够的精度. 使用单程波方程将极大地减少数值计算的计算量, 同时对介质的几何和物理参数建模也降低了要求. 单程波算法可视为深度偏移的“逆运算”, 这样可以很好地借用已知的深度偏移方法及其程序系统. 基于计算效率和计算精度的双重考虑, 本文在介质速度结构较复杂时采用显式短算子波场延拓方法, 而在介质速度结构相对简单时采用分裂步相移法. 反射系数的计算中考虑了其随入射角的变化.

关键词 三维地震模拟 单程波 显式短算子 分裂步相移

文章编号 0001-5733(2004)03-0514-07 中图分类号 P631 收稿日期 2003-04-01, 2003-12-13 收修定稿

SEISMIC MODELING WITH ONE-WAY WAVE EQUATION IN 3D COMPLEX STRUCTURES

LIU Li-Nong¹ CUI Feng-Lin² ZHANG Jian-Feng¹

1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract Numerical results demonstrate that the one-way wave equation modeling scheme exhibits sufficient accuracy in terms of primary reflected waves in comparison with the two-way wave equation scheme. The computational cost is greatly reduced by employing the one-way wave equation scheme. Moreover, only a rough velocity model is needed for implementing the one-way wave equation scheme in seismic modeling. Since the one-way wave equation modeling scheme can be considered as the inverse depth migration, we can use the current depth migration schemes and its codes. Accounting for both accuracy and computational efficiency, we use the explicit short extrapolation operator scheme in a complicated medium layer and the split step Fourier operators in a simple medium layer during depth extrapolations. Reflected coefficients are obtained by accounting for its variation with incident angles in the scheme.

Key words 3D seismic modeling, One-way wave equation, Explicit short extrapolation operators, Split step Fourier operators

1 引 言

随着勘探目标区的日趋复杂, 地震勘探方法必

需考虑地球介质的三维非均匀影响; 而为了更好地发展三维地震资料处理和成像方法, 必需正确地认识地震波在复杂三维构造中的传播路径及其运动学和动力学特征. 只有准确地分析油气储集体所产生

基金项目 国家杰出青年科学基金项目(40225010), 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-18).

作者简介 刘礼农, 1974 年生, 2002 年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所固体地球物理专业获博士学位, 现为助理研究员, 主要从事勘探地球物理研究. E-mail: lnliu@mail.igcas.ac.cn

的反射地震波场特性,才能更有效地依据地震记录对储层进行识别和圈划.基于传统褶积模型的地震波模拟方法仅考虑了介质的纵向变化,不能正确模拟地下构造产生的衍射波及侧面波的影响;而射线理论仅适用于弱非均匀,它要求在一个波长范围内介质是均匀的^[1].有限差分法可容易地处理介质纵向和横向非均匀^[2],是一种较有效的复杂介质构造的地震波模拟方法^[3],但就现行计算机的计算速度和内存而言,尚不能应用三维有限差分法解决勘探规模的地震波模拟问题.

现行的地震资料处理主要是基于分析和利用一次反射波,而多次波和表面波等其他波相均被视为噪声.因此就研究地下油气储集体的地震响应及验证地质建模而言,正确地模拟复杂介质构造的一次反射波已满足需要.基于波动方程单程波近似的单程波算法可正确模拟复杂构造的一次反射波;除了所需计算量很小外,这一方法对速度模型不像通常的波动方程方法(双程波算法)那样敏感,而这一点对地质建模的地震波模拟尤为重要.因为实际上我们仅能近似地得到地下速度构造,由较小的速度差异而引出的较多差异的地震响应将给判断地质建模的优劣带来困难.另一方面,解释人员主要利用的是零炮检距剖面,此种情况下,采用单程波方法模拟可以更方便、快速地得到模拟结果;对这一问题,即使采用双程波方法模拟,所得到的多次波亦会因叠加得到压制.

应用单程波方程模拟三维复杂构造的地震响应的关键是三维复杂构造中地震波场的深度延拓和反射系数的确定.问题一与三维叠前深度偏移方法所遇到的问题是一致的,对此文中采用了结合显式短算子法^[4]与分裂步相移法^[5]的策略.问题二的较好解决对正确获得波幅对偏移距(AVO)及波幅对入射角(AVA)效应有较重要影响,对此通过近似地估算入射角度,给出了各界面随角度变化的反射系数.为验证本文思想,给出了一个二维复杂构造的双程波有限差分法的单炮记录与本文单程波模拟结果的比较.以及应用本文单程波算法得到的我国东部某油田三维地质模型的模拟结果.

2 三维地震波模拟的单程波算法

2.1 地震波模拟的单程波和双程波方法

在仅考虑纵波响应的纵波地震勘探中,我们近似用声波方程来描述地震波在地下介质中的传播,即

$$\rho(x, y, z) \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho(x, y, z)} \nabla P(x, y, z, \omega) \right) + \frac{\omega^2}{c^2(x, y, z)} P(x, y, z, \omega) = 0, \quad (1)$$

式中 ω 为频率, z 为深度, $P(x, y, z, \omega)$ 为频率空间域中的压力, $c(x, y, z)$ 是介质速度, $\rho(x, y, z)$ 是介质密度. 这一方程描述了地震波的透射、一次反射以及多次反射等较全面的传播特性. 基于这一方程的各类地震波模拟方法即是双程波方法. 复杂介质中的这类算法一般涉及较多的计算,就现行计算机的计算速度和内存而言,对三维复杂构造尚不能大量地应用这类方法解决勘探规模的地震波模拟问题.

现行的地震资料处理主要是分析和利用一次反射波,而这一传播过程可用波动方程的单程波方程近似来描述. 若将介质沿垂向划分为若干近似不变的薄层,在这一薄层中,可得单程波方程为^[6]

$$\frac{\partial P^{\pm}(x, y, \omega)}{\partial z} = \mp j \hat{H}_1 P^{\pm}(x, y, \omega), \quad (2)$$

式中 $P^{\pm}(x, y, \omega)$ 是单程波的波场,其上标 \pm 分别代表向下和向上传播; \hat{H}_1 是平方根算子,这一平方根算子可由声波方程的 Helmholtz 算子 \hat{H}_2 求得,即

$$\hat{H}_2 = \hat{H}_1 \hat{H}_1, \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} \hat{H}_2 = & \frac{\omega^2}{c^2(x, y)} - 3 \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)^2 / 4 \rho^2 \\ & + \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} / 2 \rho + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ & - 3 \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)^2 / 4 \rho^2 + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} / 2 \rho + \frac{\partial^2}{\partial y^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

式(2)的单程波方程正确地描述了地震波在复杂介质中的传播(透射)特性. 已发展了许多求解这一单程波方程的算法,这些算法构成了现行各类深度偏移方法的基础. 本文则应用这些单程波算法发展了一个三维复杂构造的地震波模拟方法.

2.2 单程波方程解法

对一般的横向非均匀介质,不可能解析求得方程(2)的解. 仅当介质横向均匀时,可解析求得单程波方程的解(波场深度延拓公式)为

$$\begin{aligned} P^{\pm}(k_x, k_y, z_n + \Delta z, \omega) \\ = \exp(\mp j k_z \Delta z) P(k_x, k_y, z_n, \omega), \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $P^{\pm}(k_x, k_y, z_n + \Delta z, \omega)$ 是频率波数域中的单程波波场, k_z 是垂向波数, $\exp(\mp j k_z \Delta z)$ 是相移算子,对各向同性介质有

$$k_z = \sqrt{\omega^2 / c^2(z_n) - k_x^2 - k_y^2}. \quad (6)$$

通过对相移算子的不同近似可得到不同的介质横向非均匀时的解法;各类解法中介质的横向非均匀是通过将算子变换到空间域且令速度随横向坐标变化来实现的. 现行的横向非均匀介质的单程波解法主要有: Kirchhoff 积分, 分裂步相移, 隐式有限差分, Fourier 有限差分和显式短算子法等. 就三维非均匀构造而言, 显式短算子法可得到更准确的波幅值^[7]; 当介质的横向非均匀较弱时, 分裂步相移法既可得到较准确的波幅, 又有很高的计算效率. 而在地震波场模拟中, 不仅需要得到准确的走时, 也更需得到正确的波幅. 因此, 本文采用结合显式短算子法与分裂步相移法的策略来完成三维复杂构造中地震波的深度延拓. 在介质速度结构复杂或者接近目标层位时采用显式短算子法进行波场延拓, 而在介质速度结构相对简单或远离目标层位时采用计算效率较高的分裂步相移法. 这种“混合的”三维深度延拓计算策略使得我们可在保证计算精度的同时提高了计算效率.

2.2.1 显式短算子法

显式短算子法的主要思想是在频率-空间域设计一个短的一维空间算子^[4,8], 这一算子的傅氏变换(波数域上)在我们所需要的最大传播角度内(波数域上的传播区)应很好地拟合径向坐标的相移算子 $\exp[-jk_z(k_r)\Delta z]$, 其中 $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$; 而在所需要的最大传播角度以外(波数域上的衰减区)这一算子的模应大大地小于 1.0. 利用相移算子的轴对称性, 通过引入 McClellan 变换, 即可利用这个一维显式算子来实现频率-空间域上三维波场的计算^[4,7]. 令褶积算子随各节点波速的不同而变化, 即可实现横向非均匀介质中单程波场的计算.

设 $\{h_0, h_1, \dots, h_{m-1}, h_m\}^T$ 为所设计的一维空间短算子, G 为 McClellan 变换算子, 则三维波场的深度延拓可通过下式的递推和累加完成^[4]

$$P(x, y, z_n + \Delta z, \omega) = h_0 g_0 + 2 \sum_{i=1}^m h_i g_i, \quad (7)$$

$$g_i = 2g_{i-1} * G - g_{i-2}, \quad i = 2, m, \quad (8)$$

$$g_1 = P(x, y, z_n, \omega) * G, \quad g_0 = P(x, y, z_n, \omega), \quad (9)$$

式中 $*$ 号代表褶积. 在多种 McClellan 变换算子^[7]中, 计算量较少的一种 McClellan 变换算子为

$$G(x, y) = \frac{1}{8}(\delta(x - \Delta x, y - \Delta x) + \delta(x + \Delta x, y - \Delta x)$$

$$+ \delta(x + \Delta x, y + \Delta x) + \delta(x - \Delta x, y + \Delta x)) + \frac{1}{4}(\delta(x - \Delta x, y) + \delta(x + \Delta x, y) + \delta(x, y + \Delta x) + \delta(x, y - \Delta x)) - \frac{1}{2}\delta(x, y). \quad (10)$$

式(8)和(9)的褶积计算代表了二维空间域的差分.

2.2.2 分裂步相移法

分裂步相移法的基本思想是将复杂介质的速度场分裂为常速背景和层内速度扰动, 其偏移算子相应的也由频率波数域的相移算子和频率空间域的时移算子组成. 相移算子取背景速度在波数域进行波场延拓; 时移算子则在空间域中利用各点的速度扰动量修改波前来引入介质非均匀的影响. 其三维波场的深度延拓可由如下二式完成^[5]

$$\tilde{P}_1(k_x, k_y, z_n, \Delta z, \omega) = \tilde{P}(k_x, k_y, z_n, \omega) e^{ik_z \Delta z}, \quad (11)$$

$$P(x, y, z_{n+1}, \omega) = P_1(x, y, z_n, \Delta z, \omega) e^{i\omega \Delta u(x, y, z_n) \Delta z}. \quad (12)$$

式中 \sim 号代表二维傅氏变换, $k_z = \sqrt{\omega^2/c_0^2(z_n) - k_x^2 - k_y^2}$, $\Delta z = z_{n+1} - z_n$, $c_0(z_n)$ 为该层的均匀背景速度, $\Delta u(x, y, z_n) = 1/c(x, y, z_n) - 1/c_0(x, y, z_n)$ 为层内慢度扰动.

分裂步相移法的突出优点在于, 在介质横向速度变化不很大时, 它既可得到较准确的波幅, 又有很高的计算效率; 它是效率最高的三维波场深度延拓算法之一. 此外, 由于分裂步相移法的时移算子和显式短算子法均是在频率空间域上进行的, 因而两者的结合并不额外增加工作量.

2.3 反射系数计算

在地震波场模拟中, 为获得准确的地震波的波幅, 除了在波场延拓中正确处理地震波在非均匀介质中传播的弥散效应外(这正是上节着重解决的问题), 还必需正确得到各界面对地震波的反射系数. 研究表明, 反射系数是随入射角而变化的, 因此本文通过近似地估算入射角度, 在计算中使用了随角度变化的反射系数.

2.3.1 入射角度的确定

因计算效率的原因, 我们在入射角的计算中忽略了曲线传播路径的影响, 直接按直线路径计算入射角. 入射角的计算如图 1 所示, 对不同倾角的反射界面, 入射角 α 为

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{x_r - x_s}{z_r}\right) - \theta, \quad (13)$$

式中, $(x_s, 0)$ 与 (x_r, z_r) 分别是炮点与反射点坐标。反射界面的角度 θ 则由搜索的方式确定: 从 -70° 开始至 70° 结束, 每增加一个小角度量 (如 5°), 即沿该角度方向对介质的波阻抗求梯度, 梯度绝对值最小对应的角度即为 θ 。

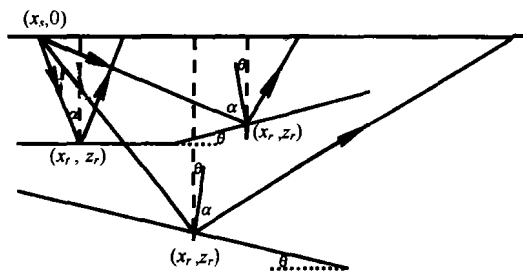


图1 水平界面及倾斜界面时确定入射角度示意图

Fig.1 Determination of incidence angles with horizontal and dip interfaces

2.3.2 反射系数计算

Zoeppritz 方程组^[9]准确地描述了入射波波幅与反射波和折射波波幅的关系, 基于这一方程已发展了几种计算固-固界面上入射 P 波的反射系数的近似公式^[9]。本文采用 Shuey 近似公式^[10], 反射系数 R 近似表示为

$$R(z_n) = R_0[1 + A \sin^2 \alpha + Q(\tan^2 \alpha - \sin^2 \alpha)], \quad (14)$$

各系数为

$$R_0 = \frac{c(z_{n+1}) - c(z_n)}{c(z_{n+1}) + c(z_n)} + \frac{\rho(z_{n+1}) - \rho(z_n)}{\rho(z_{n+1}) + \rho(z_n)},$$

$$A = \left[Q - \frac{2(1+Q)(1-2\nu_0)}{1-\nu_0} \right] + \frac{\nu(z_{n+1}) - \nu(z_n)}{R_0(1-\nu_0)^2}, \quad (15)$$

$$Q = 1 / \left[1 + \frac{\rho(z_{n+1}) - \rho(z_n)}{\rho(z_{n+1}) + \rho(z_n)} \frac{c(z_{n+1}) + c(z_n)}{c(z_{n+1}) - c(z_n)} \right],$$

$$\nu_0 = (\nu(z_{n+1}) + \nu(z_n)) / 2,$$

式(15)中 $\nu(z_n)$ 为此处介质的泊松比, 因此这一反射系数考虑了实际弹性介质的影响; 由于基于声波方程的双程波算法忽略了泊松比的影响, 就这一点而言, 本文单程波方法甚至有更好的精度。 α 较小的时候 ($\alpha < 30^\circ$), 式(14)可简化为更简单的形式^[10]

$$R = R_0(1 + P\alpha^2). \quad (16)$$

本文方法的一个很重要的应用是计算零炮检距剖面, 此时地下构造的每一个节点实际接收到多个方向的入射波, 此种情况下反射系数的计算可不必

计算入射角度, 直接取 $R = R_0$ 即可。

2.4 地震波场模拟

基于上两节的单程波和反射系数算法, 可借鉴叠前深度偏移的逆过程生成人工炮记录; 而借鉴叠后深度偏移的逆过程, 我们又可得到广泛应用的零炮检距剖面。与偏移算法不同的是, 本文应用单程波算法将波场向上延拓; 使用的延拓算子是源于相移算子 $\exp(jk_z \Delta z)$, 而不是如偏移算法那样源于相移算子的共轭算子 (反算子)。本文算法计算零炮检距剖面所需的计算量甚至少于计算一个单炮记录, 这与采用双程波方法计算多个单炮记录再经动校和叠加生成叠加剖面相比, 将节省太多的计算量; 由于多次波在叠加过程中已被压制, 本文算法所得的结果与双程波方法相比差异将更小。

2.4.1 零炮检距剖面计算

对给定速度模型计算地下构造各节点的反射系数 $R = R_0$, 若设结合分裂步相移法和显式短算子法得到的波场向上延拓算子为 F , 即

$$P(x_i, y_j, z_n, \omega) = F[P(x_i, y_j, z_{n+1}, \omega)], \quad (17)$$

由下式的递推和累加计算可得地表的地震波场 $P(x_i, y_j, z_0, \omega)$, 即

$$P(x_i, y_j, z_n, \omega) = F[P(x_i, y_j, z_{n+1}, \omega)] + f(\omega) \cdot R(x_i, y_j, z_n), \quad n = m-1, \dots, 2, 1, 0, \quad (18)$$

式中, $f(\omega)$ 为子波在频率域的函数; $R(x_i, y_j, z_n)$ 为反射系数, 定义 $R(x_i, y_j, z_0) = 0$ 。将 $P(x_i, y_j, z_0, \omega)$ 变换到时间域即得到零炮检距剖面。需指出的是, 式(18)中的波场延拓算子 F 是基于相移算子 $\exp(jk_z \Delta z)$ 设计显式短算子及分裂步相移算子而得到的, 它与深度偏移的波场深度延拓算子是不完全相同的。

2.4.2 炮记录计算

首先计算地下构造各节点的波场入射角度, 进而由给定的速度模型计算各节点的随角度变化的反射系数 $R(x_i, y_j, z_n, \alpha)$ 。采用与叠前深度偏移相同的方式将炮点脉冲 $f(\omega)$ 向下延拓, 可得下行波场为 $S(x_i, y_j, z_n, \omega)$ 。利用式(17)的波场向上延拓算子 F , 可由下式的递推和累加计算求得地表的地震波场 $P(x_i, y_j, z_0, \omega)$, 即:

$$P(x_i, y_j, z_n, \omega) = F[P(x_i, y_j, z_{n+1}, \omega)] + S(x_i, y_j, z_n, \omega) \cdot R(x_i, y_j, z_n, \alpha), \quad n = m-1, \dots, 1, 0. \quad (19)$$

将 y_j 变换到时间域即得人工炮记录. 式(19)是三维构造的炮记录计算公式, 当不考虑点 y_j 变化时, 这一公式可不经变化地用于二维.

3 数值算例

3.1 单程波与双程波方法比较

采用二维复杂构造时双程波有限差分法^[11]的单炮记录与本文单程波模拟结果进行比较. 本文方法是针对三维复杂构造发展的, 之所以采用二维模型, 是因为只有在这一情况下双程波有限差分法的模拟才较容易实现, 而这种对比已足以反应两者的不同. 二维构造的速度模型如图2, 双程波有限差分

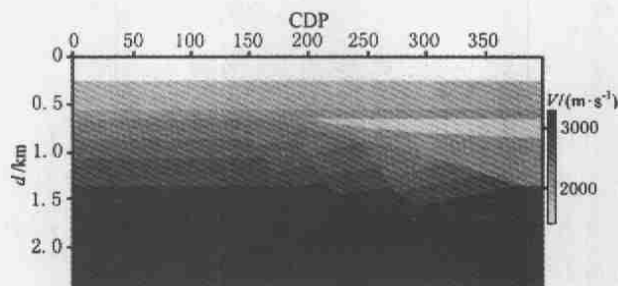


图2 单程波与双程波方法模拟结果
比较所用速度模型

Fig.2 Velocity model employed in numerical comparison
for one-way and two-way wave equation schemes

法和本文单程波算法的单炮记录的比较如图3. 即使应用数值性能很好的正三角形网格, 由于数值频

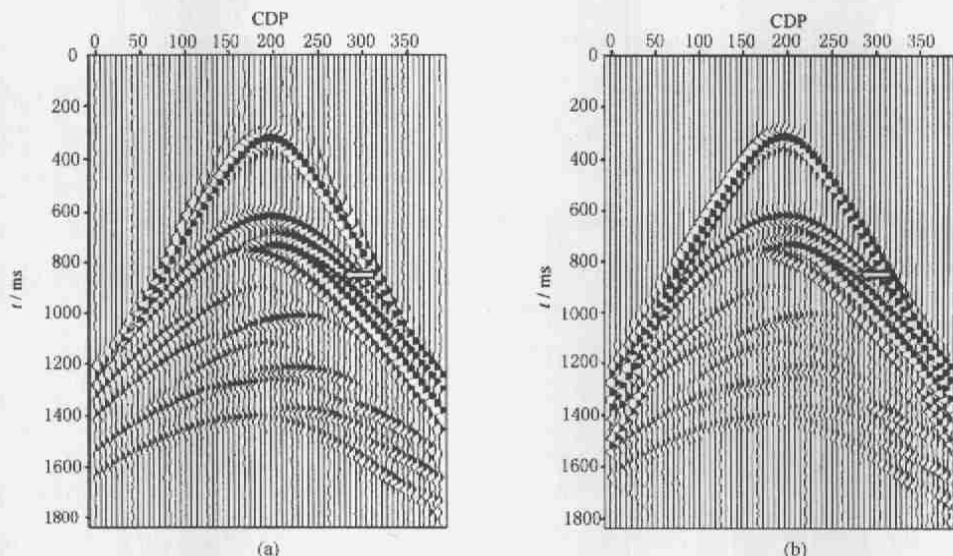


图3 单程波(a)与双程波方法(b)单炮记录模拟结果比较

Fig.3 Shot gathers for one-way (a) and two-way wave equation schemes (b)

散和稳定性要求, 有限差分法应需采用 5m 的空间离散间距和 1ms 时间采样; 而应用显式短算子法的单程波方法, 空间离散间距可采用 $dx = 20m$, $dz = 10m$, 时间采样可取为 4ms. 就图3的模拟结果, 双程波有限差分法所使用的计算时间是单程波算法的 30 多倍. 由于三维模型中显式短算子法的二维空间褶积是由 McClellan 变换完成的, 且本文方法又结合了分裂步相移法, 三维情况下两种方法在计算速度上的差异将会更大.

比较图3中双程波方法与单程波算法的炮记录可以看出, 主要反射事件均在单程波的炮记录上出现, 两者在走时和波幅上均拟合很好, 图中箭头所指的波形反转在两个炮记录上均有出现. 图4进一步给出了单程波和双程波炮记录在 CDP 为 250 处地震道的比较, 两者拟合得较好. 双程波的结果是应用

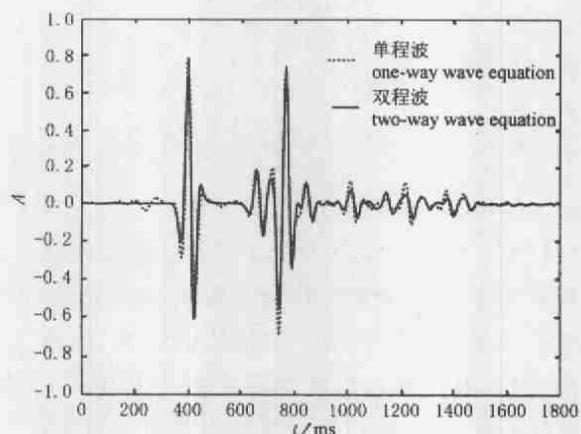


图4 单程波与双程波方法单炮记录模拟结果
在 CDP = 250 处地震道的比较(A 为振幅)

Fig.4 Comparison of the shot gathers for one-way and two-way
wave equation schemes at trace of CDP = 250

声波方程计算的,它忽略了转换波对反射的影响;而本文方法在计算反射系数时已考虑了这一因素,因此两者的一些较小的差别是可以理解的. 本文建议的单程波算法完全可满足地震勘探中地震波模拟的需要. 由于更多应用的是零炮检距剖面而不是单炮记录,这种情况下,单程波方法将更加显示其方便、快速的特性.

3.2 三维模型的零炮检距剖面

应用本文方法,计算了东部某油田三维地质模型的零炮检距剖面. 计算是在曙光天潮 1700 集群式并行机上(8 节点,每个节点双 CPU)完成的. 计算参数为:速度模型网格为 $nx = 700$, $ny = 76$, $nz = 1801$;采样间隔 $dx = 25m$, $dy = 50m$, $dz = 5m$;子波为尖峰频率为 40Hz 的 Ricker 子波, $nz \leq 600$ 时波场深

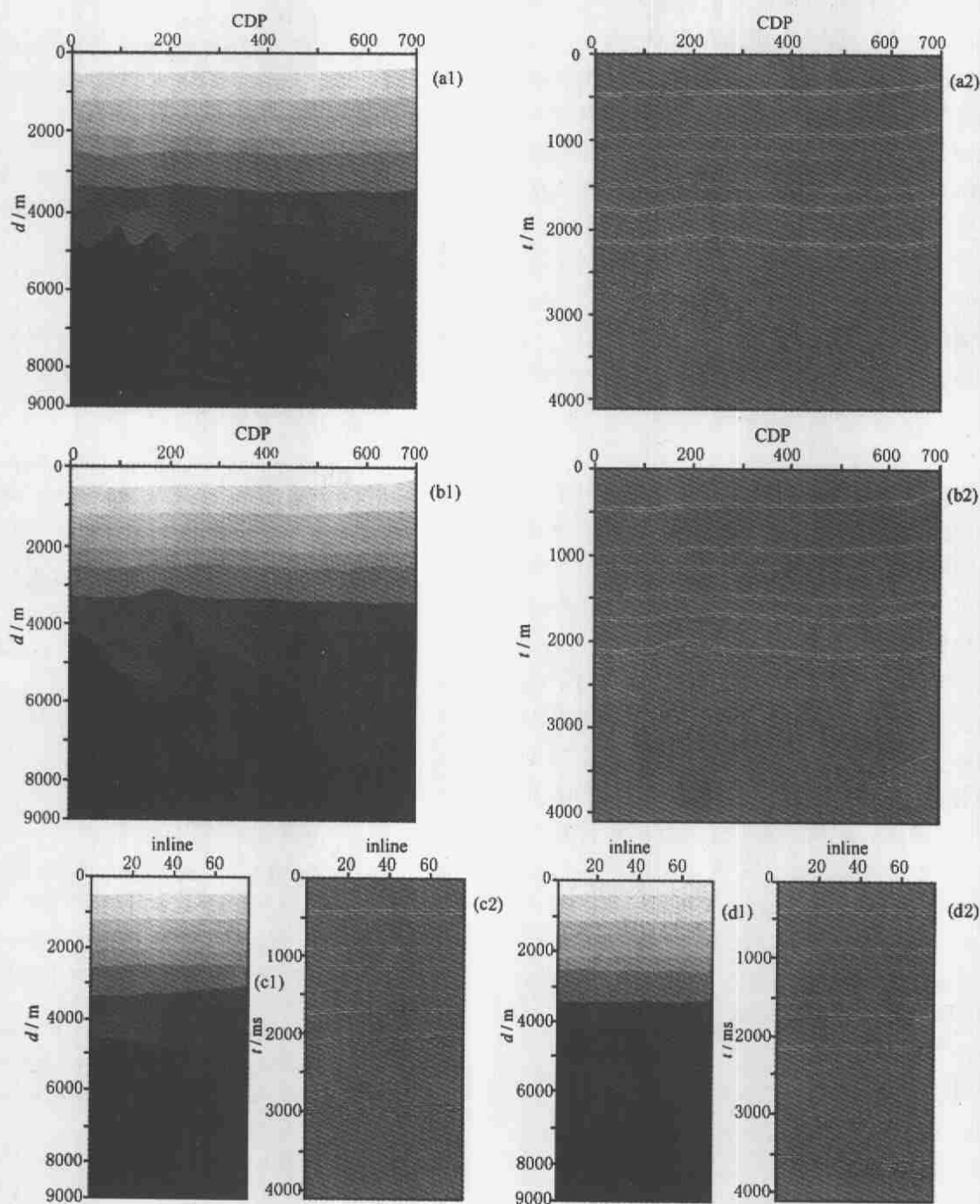


图 5 Inline110(a)、Inline166(b)、Crossline180(c)和 Crossline 560(d)测线速度模型与模拟的零炮检距剖面
a1、b1、c1、d1 为速度模型; a2、b2、c2、d2 为零炮检距剖面.

Fig.5 Modeling zero-offset section at Inline110(a), Inline166(b), Crossline180(c) and Crossline 560(d)
and the related velocity model

度延拓采用分裂步相移法, $n_z > 600$ 时波场深度延拓采用显式短算子法; 输出地震记录 $nt = 2048ms, dt = 2ms$. 计算共用时 20973s.

图 5 分别给出 Inline110, 166 处以及 Cross-line180, 560 处模拟地震剖面. 图中可以看出, 模拟记录很好地展示了断层及深部复杂构造的地震记录特征. 通过对这一模拟结果的分析利用, 可以加深对地震波在复杂三维地下构造中的传播及运动学和动力学特征的认识. 基于合成地震资料, 既可以检验各种高分辨率地震资料处理方法的效果, 也可通过设置不同的计算参数如子波主频、输出地震道采样率等, 来判定现行勘探布置和地震主频下的地震勘探识别能力, 同时也可以作为一个检验地质建模的辅助手段. 此外, 地震模拟中在输入地质模型时有选择地增加和减少各种砂体, 也可由模拟结果分析该油气储集体的地震特征, 从而更有效地依据地震记录对储层进行识别和圈划.

4 小 结

本文应用波动方程的单程波算法发展了一个三维复杂构造的地震波模拟方法. 这一方法可正确地模拟地震勘探中最关心的一次反射波. 它最重要的应用是生成零炮检距剖面; 在这一计算中该方法所需的计算量比双程波方法计算一个单炮记录还要少许多倍. 二维复杂构造下双程波有限差分法的单炮记录与本文单程波模拟结果的比较表明, 本文建议的单程波算法有很高的精度. 这一方法在程序实现上可大量地借用现行的深度偏移方法和程序系统^[12], 易于实现并行计算. 基于计算效率和计算精度的考虑, 本文采用结合显式短算子法与分裂步相移法的策略完成了三维复杂构造中地震波场的深度延拓. 若在显式短算子的设计中考虑各向异性和黏性吸收的影响^[13, 14], 则可容易地应用本文方法模拟各向异性和黏性介质中的地震波场.

参考文献

- [1] 张剑锋. 弹性波数值模拟的非规则网格差分法. 地球物理学报, 1998, 41(增): 357 ~ 366
Zhang J F. Irregular grid finite-difference method for numerical simulation of elastic wave propagation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1998, 41(Suppl.): 357 ~ 366
- [2] 谢小碧, 郑天愉, 姚振兴. 理论地震图计算. 地球物理学报, 1992, 35(6): 790 ~ 801
Xie X B, Zheng T Y, Yao Z X. Calculation of theoretical seismic image. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1992, 35(6): 790 ~ 801
- [3] 董良国, 马在田, 曹景忠等. 一阶弹性波方程交错网格高阶差分法. 地球物理学报, 2000, 43(3): 411 ~ 419
Dong L G, Ma Z T, Cao J Z, et al. Inter-grid high order difference method for one order elastic wave equation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, 43(3): 411 ~ 419
- [4] 张剑锋, 李幼铭. 三维叠前深度偏移的显式差分法. 见: 同济大学海洋地质与地球物理系主编. 反射地震学论文集. 上海: 同济大学出版社, 2000. 121 ~ 126
Zhang J F, Li Y M. Explicit 3D prestack depth migration. In: The Department of Oceanic Geological and Geophysics of Tongji University ed. Thesis Series of Reflection Seismic. Shanghai: Tongji University Publications, 2000. 121 ~ 126
- [5] Stoffa P L, Fokkema J T, Freire R M, et al. Split-step Fourier migration. *Geophysics*, 1990, 55(2): 410 ~ 421
- [6] Wapenaar C P A, Berkhout A J. Elastic Wave Field Extrapolation. Amsterdam: Elsevier Press, 1989
- [7] Hale D. 3-D depth migration via McClellan transformations. *Geophysics*, 1991, 56(6): 1778 ~ 1785
- [8] Zhang Jianfeng, Verschuur D J, Wapenaar C P A. Depth migration of shot records in heterogeneous transversely isotropic media using optimum explicit operators. *Geophysical Prospecting*, 2001, 49(1): 287 ~ 299
- [9] R.E. 谢里夫编. 勘探地震学. 初英, 李承楚译. 北京: 石油工业出版社, 1999
Sheriff R E. Seismic Exploration. Chu Y, Li C C Translate. Beijing: The Oil Industry Press, 1999
- [10] Shuey R T. A simplification of the Zoeppritz equations. *Geophysics*, 1985, 50(2): 609 ~ 614
- [11] Zhang Jianfeng, Liu Tielin. P-SV-wave propagation in heterogeneous media: grid method. *Geophysical Journal International*, 1999, 136(2): 431 ~ 438
- [12] 刘礼农, 陈树民, 高亮等. 波动方程三维叠前深度偏移并行计算流程探索. 地球物理学报, 2002, 45(增): 298 ~ 306
Liu L N, Chen S M, Gao L, et al. The parallel computation of 3D wave equation prestack depth migration. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(Suppl.): 298 ~ 306
- [13] Zhang Jianfeng, Wapenaar C P A, Verschuur D J. 3-D depth migration in VTI media with explicit extrapolation operators. 71th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded abstracts, 2001. 1085 ~ 1088
- [14] Zhang Jianfeng, Kees Wapenaar. Wavefield extrapolation and prestack depth migration in anelastic inhomogeneous media. *Geophysical Prospecting*, 2002, 50(3): 629 ~ 643