

孙歧峰, 白清云. 任意广角波动方程深度偏移参数优化分析[J]. CT 理论与应用研究, 2011, 20(1): 29-38.
Sun QF, Bai QY. Depth migration based on arbitrarily wide-angle wave equation with parameters optimization[J]. CT Theory and Applications, 2011, 20(1): 29-38.

任意广角波动方程深度偏移参数优化分析

孙歧峰¹✉, 白清云²

1. 中国石油大学 (华东) 计算机与通信工程学院, 山东 东营 257061
2. 中海石油 (中国) 有限公司天津分公司勘探开发研究院, 天津 300452

摘要: 强横向变速和陡倾角介质的成像问题是地震偏移成像的难点。本文在频率-空间域利用有限差分高阶分裂法求解任意广角波动方程实现了地震偏移成像。试验表明, 参考速度的选取是影响成像精度的关键因素。脉冲响应测试表明通过优化参数任意广角波动方程能够以较低阶的方程获得较大的偏移角度。Marmousi 模型数据叠前深度偏移试验表明, 该方法能够适应强横向变速和陡倾角地质结构的成像, 参数优化后能够取得更好的成像效果。

关键词: 任意广角波动方程; 频率-空间域; 深度偏移; 参数优化

文章编号: 1004-4140 (2011) 01-0029-10 **中图分类号:** P 631; TP 301. 6 **文献标识码:** A

叠前深度偏移成像技术是解决复杂地质体成像的有效方法。叠前深度偏移方法可以分为两类^[1]: 一类是基于绕射扫描叠加原理的 Kirchhoff 积分法, 另一类是基于波动方程的偏移方法。Kirchhoff 叠前深度偏移是一种高效实用的叠前深度偏移方法^[2-3], 但当应用于速度分布过于复杂的区域时, 无法处理在复杂速度场中存在的多值走时现象, 会出现焦散或阴影区。而基于波动方程叠前深度偏移方法从根本上解决了多路径问题以及由速度变化所引起的焦散效应, 是处理复杂地质构造成像的有效工具^[4-5]。

基于波动方程理论的方法又可以分为基于双程波方程的偏移和基于单程波的偏移。基于双程波的逆时偏移^[6-8]虽然能够适应速度场任意变化且不受倾角限制, 但计算效率较低。基于单程波的偏移算法效率高, 但由于采用近似方程存在最大倾角限制。为了解决陡倾角地层的成像问题只能通过提高偏移算子的阶数和优化算子系数。马在田^[9-10]提出了高阶方程的分裂算法, 可以将高阶方程分裂为一系列串联的二至三阶方程, 解决了使用高阶方程的有限差分法偏移问题。Lee 等^[11]在高阶方程的分裂算法的基础上求出了高阶有限差分优化算子, 将精确传播角度提高到了 90°, 但其算子阶数最少要到 6 阶, 计算效率较低。Ristow 等^[12]根据横向速度对比度对每一延拓深度使用相应的优化参数, 明显提高了 FFD 算子的精度。朱遂伟等^[13-14]考虑频率、网格和延拓步长等多参量影响, 利用多参量全局优化系数的方法对傅里叶有限差分算子中的高阶有限差分校正项进行了优化, 取得了较好的效果。Guddati^[15]提出了任意广角波动方程 (Arbitrarily Wide-angle Wave Equations, AWWE), 可以通过参数优化以较低阶的方程表示较大角度的波传播。Guddati^[16]和何兵寿等^[17]基于声

收稿日期: 2010-12-24。

项目基金: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-07-0845); 山东省自然科学基金 (JQ201011, ZR2009EZ002); 山东省科技攻关计划 (2010GHY10502)。

波 AWWE 在时间-空间域对地震记录进行了偏移成像研究。2010 年孙歧峰^[18]在频率-空间域对声波 AWWE 进行求解, 实现了深度偏移成像。

本文在 Guddati^[15]的 AWWE 研究基础上, 利用有限差分高阶分裂在频率-空间域求解 AWWE 实现了叠前偏移成像, 并对二阶任意参数 AWWE 求解进行了推导。通过不同阶数和速度参数的脉冲响应测试, 对比分析了影响 AWWE 偏移角度的因素。对 Marmousi 模型数据的叠前深度偏移结果表明, 优化系数后 AWWE 偏移成像对强横向变速和陡倾角地质结构成像时能够取得更好的效果。

1 方法原理

1.1 频率-波数域 AWWE

根据 Guddati^[15]的研究成果, 对时间-空间域声波 AWWE 上行波方程中所有变量 (x, z, t) 进行傅立叶变换可以得到频率-波数域 AWWE 方程如下:

$$dk_z u - \frac{\omega}{v} [\Lambda_1 + (1 - \xi^2) \Lambda_2] U = 0 \quad (1)$$

其中:

$$\Lambda_1 = \frac{v}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{c_1} & \frac{-1}{c_1} \\ \frac{-1}{c_1} & \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} & \frac{-1}{c_2} \\ & \frac{-1}{c_2} & \ddots & \ddots \\ & & \ddots & \frac{1}{c_{n-2}} + \frac{1}{c_{n-1}} & \frac{-1}{c_{n-1}} \\ & & & \frac{-1}{c_{n-1}} & \frac{1}{c_{n-1}} + \frac{1}{c_n} \end{bmatrix}$$

$$\Lambda_2 = \frac{1}{2v} \begin{bmatrix} c_1 & c_1 \\ c_1 & c_1 + c_2 & c_2 \\ & c_2 & \ddots & \ddots \\ & & \ddots & c_{n-2} + c_{n-1} & c_{n-1} \\ & & & c_{n-1} & c_{n-1} + c_n \end{bmatrix}$$

其中: $\xi = v k_x / \omega$, $d^T = \{1, 0, \dots, 0\}_{N \times 1}$, $U^T = \{u, u_1, \dots, u_{n-1}\}_{N \times 1}$, u 为实际波场值 (单位: m), u_1, u_2, \dots, u_{n-1} 为附加层波场值 (单位: m); v 为地震波的传播速度 (单位: m/s), c_1, c_2, \dots, c_n 表示任意广角声波方程所能描述的地震波相速度 (单位: m/s), Λ_1, Λ_2 为附加层相速度矩阵, n 表示 AWWE 的阶数。

方程(1)的求解是进行偏移成像的关键。以AWWE₂方程为例,当参考速度为(c_1 , c_2)时,方程(1)如下:

$$\begin{Bmatrix} k_z u \\ 0 \end{Bmatrix} - \frac{\omega}{v} \left[\Lambda_1 + (1 - \xi^2) \Lambda_2 \right] \begin{Bmatrix} u \\ u_1 \end{Bmatrix} = 0 \quad (2)$$

消去附加层变量 u_1 ,后对 k_z 进行逆傅立叶变换,可得到:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = i \frac{\omega}{v} \left(\left(\frac{v}{2c_1} + \frac{c_1}{2v} \right) - \frac{c_1}{2v} \xi^2 - \frac{\left(\left(\frac{v}{c_1} - \frac{c_1}{v} \right) + \frac{c_1}{v} \xi^2 \right)^2}{2 \left(\left(\frac{v}{c_1} + \frac{v}{c_2} \right) + \frac{c_1 + c_2}{v} \right) - 2 \frac{c_1 + c_2}{v} \xi^2} \right) u \quad (3)$$

1.2 AWWE 方程有限差分求解

利用有限差分技术对(3)式进行求解,是在频率-空间域实现偏移成像算法的关键。方程(3)可分解为:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = i \frac{\omega}{v} \left(\frac{v}{2c_1} + \frac{c_1}{2v} \right) u \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -i \frac{\omega}{v} \left(\frac{c_1}{2v} \xi^2 + \frac{\left(\left(\frac{v}{c_1} - \frac{c_1}{v} \right) + \frac{c_1}{v} \xi^2 \right)^2}{2 \left(\left(\frac{v}{c_1} + \frac{v}{c_2} \right) + \frac{c_1 + c_2}{v} \right) - 2 \frac{c_1 + c_2}{v} \xi^2} \right) u \quad (5)$$

式(4)具有解析解。由于(5)式中含有高阶项,直接使用有限差分进行求解比较困难,采用马在田^[9-10]提出的高阶方程的分裂法进行求解。下面讨论(5)式的求解:

将 $\xi = k_x/k$,($k = \omega/v$)代入(5)式中,再令 $\frac{v}{c_1} - \frac{c_1}{v} = x_1$, $\left(\frac{v}{c_1} + \frac{v}{c_2} \right) + \frac{c_1 + c_2}{v} = x_2$,

$\frac{c_1 + c_2}{v} = x_3$ 可以得到:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{i}{2} \left(\frac{x_1^2 k^3}{x_2 k^2 - x_3 k_x^2} \right) u - \frac{i}{2} k_x^2 \left(\frac{(x_2 + 2x_1) \frac{c_1}{v} k^2 + \left(\frac{c_1^2}{v^2} - x_3 \frac{c_1}{v} \right) k_x^2}{x_2 k^3 - x_3 k k_x^2} \right) u \quad (6)$$

令 $(x_2 + 2x_1) \frac{c_1}{x_2 v} = y_1$, $\left(\frac{c_1^2}{v^2} - x_3 \frac{c_1}{v} \right) \frac{1}{x_2} = y_2$, $\frac{x_3}{x_2} = y_3$, (6) 式可以分裂为如下方程组:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{i}{2} \left(\frac{x_1^2 k^3}{x_2 k^2 - x_3 k_x^2} \right) u \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{i}{2} k_x^2 \frac{b_1}{k + a_1 k_x} u \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{i}{2} k_x^2 \frac{b_2 k}{k^2 + a_2 k_x^2} u \quad (9)$$

其中: $a_1 = 0$, $b_1 = -\frac{y_2}{y_3}$; $a_2 = -y_3$, $b_2 = y_1 + \frac{y_2}{y_3}$ 。

对式 (7) ~ 式 (9) 利用有限差分离散化,

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{u_x^{z+1} - u_x^z}{\Delta z} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{1}{2} \frac{\frac{T_x}{\Delta x^2}}{1 + a_x T_x} (u_x^{z+1} + u_x^z) \end{aligned}$$

其中, $a_x \approx 1/6$ 为差分格式中的调整系数, 可以降低频散, 提高差分精度, $T_x = (1, -2, 1)$ 为二阶偏微分算子。

对 (7) 离散化可得:

$$(1 + ib + (a + a_x + iba_x)T_x)u_x^{z+1} = (1 + ib + (a + a_x - iba_x)T_x)u_x^z \quad (10)$$

其中, $a = \frac{x_3 v^2}{x_2 \omega^2 \Delta x^2}$, $b = \frac{x_1^2 \Delta z \omega}{4 x_2 v}$ 。

对(8)离散化可得:

$$\left(1 + \left(a_x - i \frac{b_1 v \Delta z}{4 \omega \Delta x^2}\right) T_x\right) u_x^{z+1} = \left(1 + \left(a_x + i \frac{b_1 v \Delta z}{4 \omega \Delta x^2}\right) T_x\right) u_x^z \quad (11)$$

对(9)离散化可得:

$$(1 + (a_x + m - n) T_x) u_x^{z+1} = (1 + (a_x + m + n) T_x) u_x^z \quad (12)$$

式中 $m = \frac{a_2 v^2}{\omega^2 \Delta x^2}$, $n = i \frac{b_2 v \Delta z}{4 \omega \Delta x^2}$ 。

至此, 方程(4)有解析解, 方程(5)可分裂为式(10)~式(12), 利用追赶法求解。要实现深度偏移成像, 就是用上行波方程反向外推, 在每一深度层上求解方程(4)、(10)~(12), 由 $u(z)$ 求出 $u(z + \Delta z)$ 的波场值, 利用成像条件进行成像, 依次循环, 直至完成所有深度上离散点位移的求值。同理, 可以实现任意阶数和参考速度的 AWWE 偏移成像。

2 AWWE 精度分析

任意广角波动方程的精度可以通过研究波散关系以及和准确单程波方程的波散关系得到。由精确的(上行波)单程波频散方程可以得到:

$$k_z - \frac{\omega}{v} (1 - \zeta^2)^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (13)$$

在上式中, $\zeta (= v k_x / \omega)$ 代表了倾角, $\zeta = \sin \theta$ 。为了评价 AWWE 的精度, 对方程(1)进行消元, 消除式中所有的附加变量 $(u_1, u_2, \dots, u_{n-1})$, 可以得到任意广角波动方程频散关系:

$$k_z - \frac{\omega}{v} F_n(\zeta, c_1, c_2, \dots, c_n) = 0 \quad (14)$$

上式中, $F_n(\zeta, c_1, c_2, \dots, c_n)$ 代表了消除 AWWE_n 中附加变量所产生的函数, 参数为参考速度 (c_1, c_2, \dots, c_n) 。对比(13)(14)式可以发现, $F_n(\zeta, c_1, c_2, \dots, c_n)$ 是(13)中平方根运算的近似。

$$(1 - \zeta^2)^{\frac{1}{2}} \approx F_n(\zeta, c_1, c_2, \dots, c_n)$$

因此,通过对函数 $F_n(\zeta, c_1, c_2, \dots, c_n)$ 与平方根算子 $(1 - \zeta^2)^{\frac{1}{2}}$ 的对比可以分析 AWWE 方程的精度。

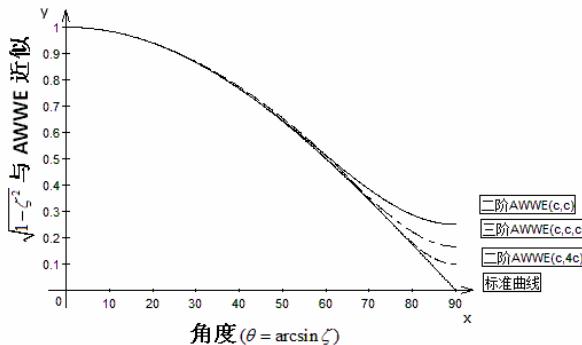


图 1 精度分析

Fig. 1 Accuracy Analysis

从图 1 可以看出 $(1 - \zeta^2)^{\frac{1}{2}}$ 与不同阶数 AWWE 和参数近似随角度误差变化趋势, 当角度小于 60° 时, 各阶 AWWE 近似都能得到较好的近似, 但随着偏移角度的增加, $\text{AWWE}_2(c, 4c)$ 算子近似要优于 $\text{AWWE}_3(c, c, c)$, $\text{AWWE}_2(c, c)$ 最差。误差分析可以看出, 如果允许误差范围为 0.01, 则 $\text{AWWE}_2(c, c)$ 偏移角度可以达到 60° , $\text{AWWE}_3(c, c, c)$ 偏移角度可以达到 70° 左右, 而优化系数的 $\text{AWWE}_2(c, 4c)$ 算子偏移角度则可以达到 85° 左右, 误差分析结果和脉冲响应实验结果相同。

3 脉冲及 Marmousi 模型试验

3.1 脉冲响应

AWWE 偏移算法的精度及影响因素可以通过对比不同阶数和参考速度下的脉冲响应曲线进行分析。脉冲响应的介质均匀且速度为 $v = 3000 \text{ m/s}$, 脉冲位置在 $x = 1100 \text{ m}$, $t = 360 \text{ ms}$ 处。图 2 中黑线表示理想的脉冲响应曲线, 为一个半圆, 灰线为实际介质中的脉冲响应曲线。

图 2 (a) 为参考速度取 $(1500 \text{ m/s}, 1500 \text{ m/s})$ 时的 AWWE_2 脉冲响应, 此时的脉冲响应曲线与理论曲线在大约 60° 以内传播角度范围重合得较好, 然后随着传播角度增大, 实际响应曲线开始内收, 且频散也随之增大。图 2 (b) 为参考速度取 $(1500 \text{ m/s}, 3000 \text{ m/s})$ 时的 AWWE_2 脉冲响应, 此时的脉冲响应曲线与理论曲线在大约 70° 以内传播角度范围重合得较好。图 2 (c) 为参考速度取 $(1500 \text{ m/s}, 4500 \text{ m/s})$ 时的 AWWE_2 脉冲响应, 此时的脉冲响应曲线与理论曲线在大约 80° 以内传播角度范围重合得较好。图 2 (d) 为参考速度取 $(1500 \text{ m/s}, 6000 \text{ m/s})$ 时的 AWWE_2 脉冲响应, 此时的脉冲响应曲线更加接近半圆。图 2 (e) 为参考速度取 $(1500 \text{ m/s}, 1500 \text{ m/s}, 1500 \text{ m/s})$ 时的 AWWE_3 脉冲响应, 此时最大偏移角度能达到 75° 左右。图 2 (f) 为参考速度取 $(1500 \text{ m/s}, 3000 \text{ m/s}, 4500 \text{ m/s})$ 时的 AWWE_3 脉冲响应, 此时已与理想脉冲曲线基本吻合。

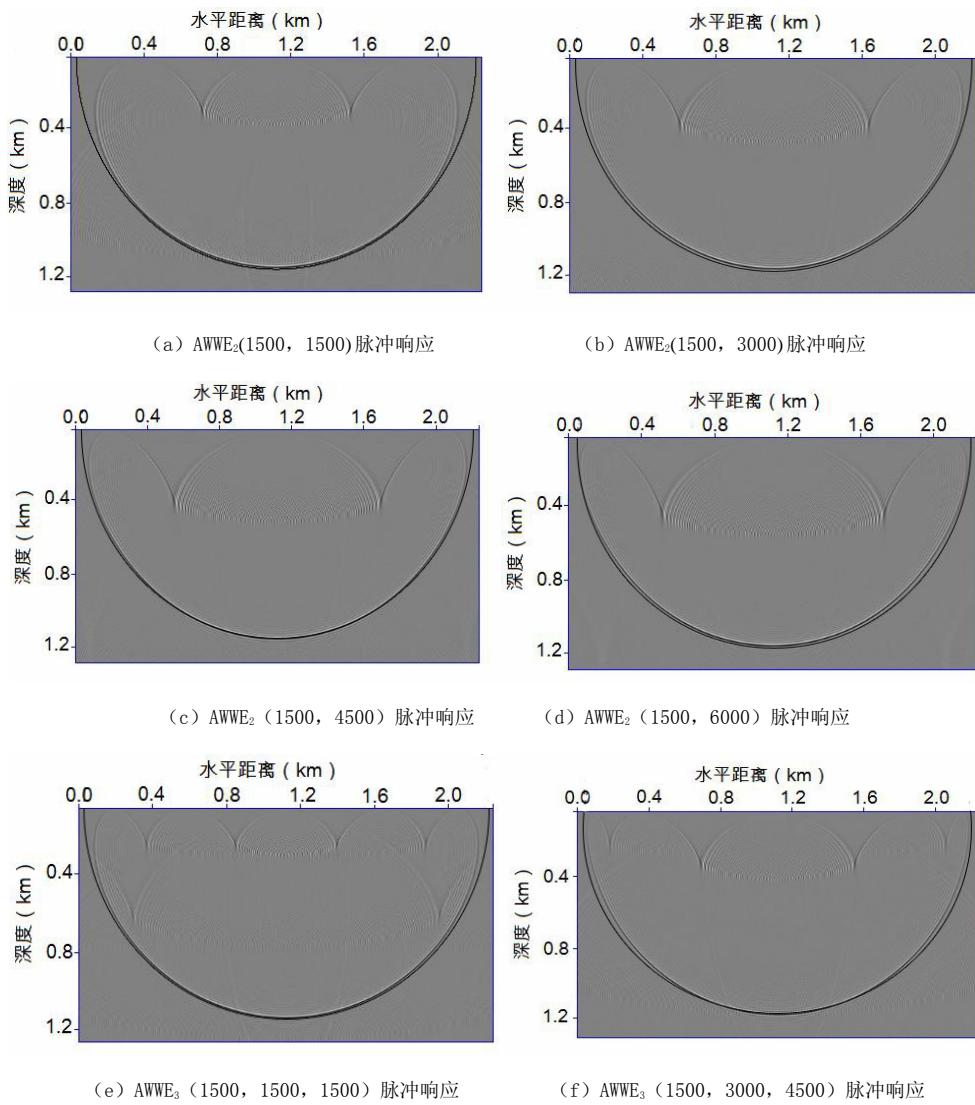


图2 不同参数下 AWWE 脉冲响应

Fig. 2 Impulse response of AWWE with various parameters

由脉冲响应试验可以看出,附加层速度的取值和方程的阶数共同影响 AWWE 所适用的最大倾角,通过优化速度的取值可以以低阶 AWWE 获得较大的偏移倾角。

3.2 Marmousi 模型

为了进一步验证速度参数对 AWWE 偏移精度的影响,用 SEG/Marmousi 模型数据体进行叠前偏移试验。模型速度场如图 3 (a) 所示,维数为 251×750 ,速度场道间距为 25 m,最大深度为 3 000 m,深度采样间隔为 4 m。选用模型的正演模拟炮记录共 240 炮,每炮 96 道接收,为右边放炮方式,道间距为 25 m,记录长度为 3 s,时间采样率为 4 ms。图 3 (b) 为采用 AWWE₂频率-空间域叠前偏移算法 ($c_1=2\,000\text{ m/s}$, $c_2=8\,000\text{ m/s}$) 得到的偏移剖面,可以看出:浅层的三套断层在成像剖面上各自的形态得到了清晰的展示,断层面整齐明晰;

中部的背斜构造也能够较准确地反映出来；底部不整合面及盐丘也在成像剖面中具有较清晰的形态和边界。图 3 (c) 为采用 AWWE₃ 频率-空间域叠前偏移算法 ($c_1 = 2000 \text{ m/s}$, $c_2 = 6000 \text{ m/s}$, $c_3 = 10000 \text{ m/s}$) 得到的偏移剖面，可以看出底部区域成像分辨率有所提高，不整合面更加清晰。通过对比分析可以发现，AWWE 频率-空间域叠前偏移能够满足复杂地质模型的地震数据处理要求，优化系数后能够取得更好的偏移效果。

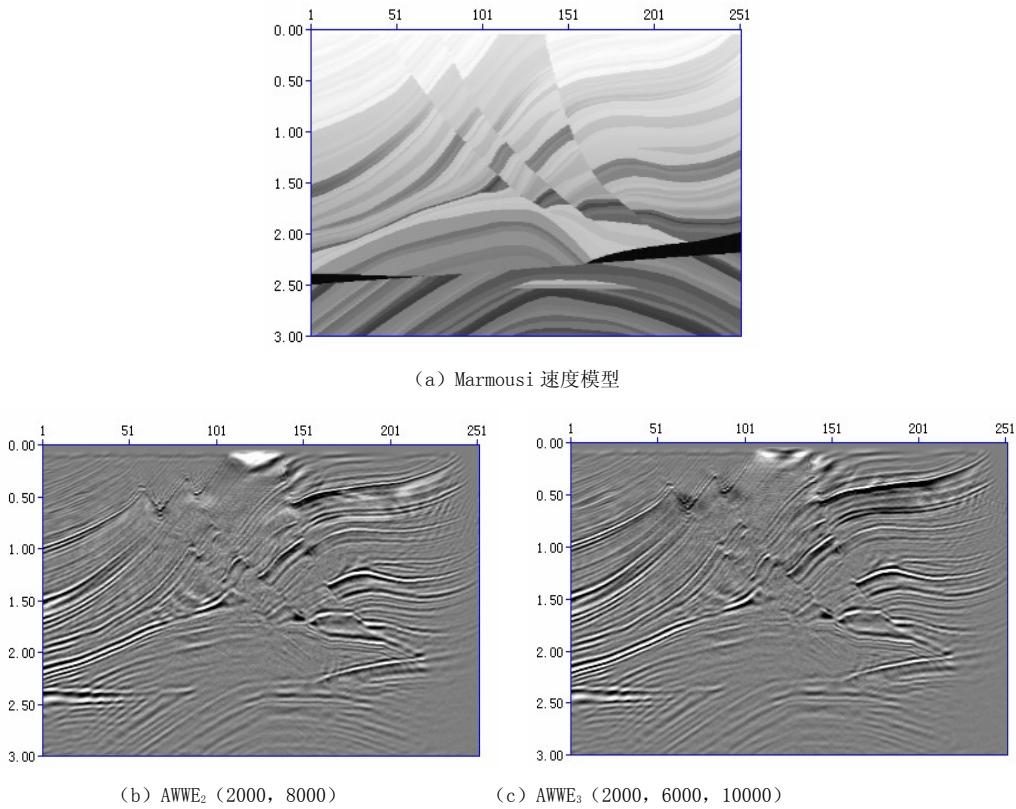


图 3 Marmousi 模型

Fig. 3 The depth migration imaging of Marmousi model

4 认识结论

AWWE 建立在对单程波方程连续分裂近似的基础上，与传统的单程波方程近似相比，AWWE 更加准确。本文通过在频率-空间域有限差分高阶分裂法求解单程声波 AWWE，实现了声波 AWWE 方程的叠前偏移成像。脉冲响应试验表明，AWWE 方程的阶数和附加层参考速度的选取是影响偏移精度的关键因素，决定了方程所能获得的最大偏移倾角。不同方程阶数和附加层参考速度取值脉冲实验表明，方程阶数相同，通过附加层速度参数优化可以使低阶 AWWE 声波方程获得较大的偏移角度。对于 AWWE₂ 偏移，当第一参考速度接近地层真实速度，而第二参考速度是真实介质速度的 2 至 4 倍时，能够取得较好的偏移效果。Marmousi 模型炮记录叠前深度偏移试验表明，该方法能够适应具有强横向变速和陡倾角的复杂地质结构，通

过选取适当的参数，模型深层成像分辨率得到了提高。与已有优化系数方法相比，AWWE 参数优化更加简单，效果更加明显。

总之，频率-空间域 AWWE 偏移能够适应复杂地质结构的成像要求，通过参数优化能够取得良好的偏移效果。

参考文献

- [1] 李振春, 张军华. 地震数据处理方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2004.
Li ZC, Zhang JH. The method of seismic data processing[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2004: 220–267.
- [2] Keho TH, Beydounw B. Paraxial ray Kirchhoff migration[J]. Geophysics, 1988, 53(12): 1540–1546.
- [3] 麻三怀, 杨长春, 孙福利, 等. 克希霍夫叠前时间偏移技术在复杂构造带地震资料处理中的应用[J]. 地球物理学进展, 2004, 23(3): 754–760.
Ma SH, Yang CC, SUN FL, et al. Application of Kirchhoff PSTM to seismic data of complex structure[J]. Progress in Geophysics, 2004, 23(3): 754–760.
- [4] 何英, 王华忠, 马在田, 等. 复杂地形条件下波动方程叠前深度成像[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(3): 13–19.
He Y, Wang HZ, Ma ZT, et al. Pre-stack wave equation depth migration for irregular topography[J]. Progress In Exploration Geophysics, 2002, 25(3): 13–19.
- [5] 马淑芳, 李振春. 波动方程叠前深度偏移方法综述[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(3): 153–162.
Ma SF, Li ZC. Review of wave equation prestack depth migration methods[J]. Progress In Exploration Geophysics, 2007, 30(3): 153–162.
- [6] Guitton A, Kaelin B, Biondi B. Least-squares attenuation of reverse-time-migration artifacts[J]. Geophysics, 2007, 72(1): S19–S23.
- [7] Boechat JB, Bulcão A. A 3D reverse-time migration scheme for offshore seismic data[C]. 77th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2007: 2427–2431.
- [8] Jones IF, Goodwin MC. Application of anisotropic 3D reverse time migration to complex North Sea imaging[C]. 77th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2007, 2140–2144.
- [9] 马在田. 高阶有限差分偏移[J]. 石油地球物理勘探, 1982, 17(1): 6–15.
Ma ZT. The finite-difference migration of higher-order equation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1982, 17(1): 6–15.
- [10] 马在田. 高阶方程偏移的分裂算法[J]. 地球物理学报, 1983, 26(4): 377–388.
Ma ZT. Splitting algorithm for high order equation migration[J]. Chinese Journal Of Geophysics, 1983, 26(4): 377–388.
- [11] Lee MW, Suh SY. Optimization of one-way wave equations[J]. Geophysics, 1985, 50: 1634–1637.
- [12] Ristow D, Ruhl T. Fourier finite-difference migration[J]. Geophysics, 1994, 59(12): 1882–1893.
- [13] 朱遂伟, 张金海, 姚振兴. 基于多参量的模拟退火全局优化傅里叶有限差分算子[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1844–1850.
Zhu SW, Zhang JH, Yao ZX. Globally optimized Fourier finite-difference operator using simulated annealing algorithm based on multi-parameter[J]. Chinese Journal Of Geophysics, 2008, 51(6): 1844–1850.
- [14] 朱遂伟, 张金海, 姚振兴. 高阶优化傅里叶有限差分算子偏移[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6): 680–687.
Zhu SW, Zhang JH, Yao ZX. High order optimization Fourier finite difference operator

- migration method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(6): 680–687.
- [15] Guddati MN. Arbitrarily wide-angle wave equations for complex media[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(3): 65–93.
- [16] Guddati MN, Heidari AH. Migration with arbitrarily wide-angle wave equations[J]. Geophysics, 2005, 70(3): S61–S70.
- [17] 何兵寿, 张会星, 张晶. 任意广角波动方程叠前逆时深度偏移[J]. 地震学报, 2008, 30(5): 491–499.
He BS, Zhang HX, Zhang J. Prestack reverse-time depth migration of arbitrarily wide-angle wave equations[J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 30(5): 491–499.
- [18] 孙歧峰. 基于任意广角波动方程的频率-空间域深度偏移方法研究[J]. CT 理论与应用研究, 2010, 19(2): 17–24.
Sun QF. The frequency-space domain depth migration based on arbitrarily wide-angle wave equation[J]. CT Theory and Applications, 2010, 19(2): 17–24.

Depth Migration Based on Arbitrarily Wide-Angle Wave Equation with Parameters Optimization

SUN Qi-feng^{1✉}, BAI Qing-yun²

1. College of Computer and Communication Engineering,
China University of Petroleum, Dongying 257061, China
2. Exploration and Development Institute of Tianjin Branch
Company, CNOOC, Tianjin 300452, China

Abstract: It is difficult to image the geological structure with strong lateral variation and steep dip. On the basis of the Arbitrarily Wide-Angle Wave Equation (AWWE), we implemented migration with finite difference high-split scheme in frequency-space domain. Optimization of the velocity parameters is a key factor in the accuracy of imaging. The test of impulse response clears that the low order AWWE can be adapted to higher steep dips by optimization of the parameters. The pre-stack migration of Marmousi data shows that the method can handle strong lateral variation and steep dip.

Key words: AWWE; frequency-space domain; depth migration; optimization of parameters

作者简介: 孙歧峰[✉] (1976—), 男, 中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院讲师, 目前在中国石油大学(华东)地球资源与信息学院地球探测与信息技术专业攻读博士学位, 主要研究地震数据处理及多分量地震偏移成像技术, Tel: 13864717907, E-mail: sunqf@upc.edu.cn。