

程玖兵,王华忠,马在田. 窄方位地震数据双平方根方程偏移方法探讨. 地球物理学报, 2005, 48(2): 399 ~ 405

Cheng J B, Wang H Z, Ma Z T. Double square root equation migration methods of narrow azimuth seismic data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(2): 399 ~ 405

窄方位地震数据双平方根方程偏移方法探讨

程玖兵, 王华忠, 马在田

同济大学海洋与地球科学学院海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092

摘 要 简单回顾双平方根 (DSR) 方程偏移一般理论之后, 介绍了适应偏移速度分析的角度域成像快速算法. 针对地震勘探中窄方位三维地震数据成像问题, 探讨了限定输入数据体或限定波场传播方向的 DSR 方程偏移方法. 数值试验表明, 共方位角偏移等 DSR 方程叠前深度偏移方法在盐体或礁体、古潜山等强横向变速地区具有很好的应用前景.

关键词 窄方位数据, 双平方根方程, 叠前深度偏移, 角度域成像, 盐丘, 古潜山

文章编号 0001 - 5733(2005)02 - 0399 - 07 **中图分类号** P631 **收稿日期** 2004 - 02 - 18, 2004 - 12 - 02 收修定稿

Double square root equation migration methods of narrow azimuth seismic data

CHENG Jiu-Bing, Wang Hua-Zhong, Ma Zai-Tian

School of Ocean and Earth Science, Tongji University; Key Laboratory of Marine Geology, MOE, Shanghai 200092, China

Abstract After reviewing the basic principle of the migration method based on double-square-root (DSR) equation, we introduce a fast angle domain imaging algorithm to facilitate migration velocity analysis. Then we discuss two approaches to migrate narrow azimuth seismic data, in which one has restriction to the input dataset, the other has limitation to the propagation direction of the seismic waves. The numerical tests show that, DSR equation migration methods such as common azimuth migration have a promising prospect in areas with strong variations of velocity, e. g., subsalt, reef and buried hill, etc.

Key words Narrow azimuth data, DSR equation, Prestack depth migration, Imaging in the angle domain, Salt, Buried hill

1 引 言

反射地震勘探的目标是通过地面观测数据推断地下构造形态与介质的物性参数. 可以想象, 在地下目标附近激发、接收到的波场经过的传播路径最短, 受到的改造最小, 能最清楚地反映目标体的地质与地球物理特征. 虽然在工程上不容易实现近源观测, 但可以通过数学手段将实际的炮点、接收点向地下

延拓, 仿真地下观测过程. 炮点和接收点重合处零时刻的波场值就是该散射点的瞬时响应, 可视其为该点的像. 基于这种“沉降观测”概念, Yilmaz 与 Claerbout^[1] 提出了以 DSR 方程为传播算子的偏移方法, 即 DSR 方程偏移. 它是除基于单程波方程的炮记录或合成面炮记录偏移以及基于全波方程的逆时偏移之外的又一种波动方程偏移方法. 通常, 它被用于叠前时间偏移处理^[2,3]. 20 世纪 90 年代中期以后, 各种双域算子被推广到了 DSR 方程偏移中, 形

基金项目 国家科技“973”项目 (G19990328) 和“863”项目 (2001AA602018-03) 资助.

作者简介 程玖兵, 男, 1974 年生, 固体地球物理学博士, 主要从事地震波传播与成像、保幅偏移与 AVO 分析方面的研究.

E-mail: cjb1206@mail.tongji.edu.cn

成了一类新的叠前深度偏移方法^[4,5].

受采集条件与经济成本限制,现代三维地震勘探仍以窄方位观测为主. 尽管在复杂介质条件下, Kirchhoff 偏移没有波动方程偏移精确^[6-8]. 但至今这类窄方位三维地震数据的叠前深度偏移处理主要还是依靠前一种方法. 这首先是源于传统 Kirchhoff 偏移在效率、观测方式适应性等方面的优点. 其次是因为理论相对成熟的单程波方程炮记录偏移效率太低,单炮接收范围外镶边(零值)道太多会增加许多额外计算,太少又不利于陡倾角地层的成像. 虽然单程波方程合成面炮偏移在计算效率上很有优势,但对 Cross-line 方向覆盖次数太低的窄方位数据而言,仍然有一些问题需要解决^[9,10]. 另外,一般的 DSR 方程(全三维)偏移算法在处理窄方位数据成像问题时也存在一些障碍. 一方面,它在五维空间进行波场延拓与成像计算,即便采用分频处理,目前的计算机内存条件还很难满足需要,而且因四维的正反傅里叶变换消耗了大部分计算时间,其效率非常低. 另一方面, Cross-line 方向上覆盖次数太低,有限的观测孔径与稀疏采样严重影响 DSR 方程全偏移的成像效果^[11].

尽管 Mosher et al.^[12] 提出的炮检距平面波偏移和 Egen et al.^[13] 提出的共炮检距 - 共方位角偏移方

法部分地克服了 DSR 方程全三维偏移的困难,但是最受勘探地球物理界认可的还是 Biondi et al.^[14,15] 提出的“方位角校正 + 共方位角偏移”方法,即先通过方位角时差 (AMO) 校正将窄方位数据转换成零方位形式,然后采用共方位角偏移进行成像. 这种方法在北海和墨西哥湾等地区盐下成像中取得了明显优于 Kirchhoff 偏移的成像效果^[16,17]. 不过,共方位角偏移理论上对地震波的传播方向有人为限制,因此在 Cross-line 方向强变速情况下不够精确.

另外,速度建模是叠前深度偏移处理至关重要的环节. 目前主要的偏移速度分析方法都以共成像道集为基础. 尽管在 DSR 方程偏移过程中输出角度域共成像道集的一般理论已经建立^[18],但其实现策略还值得进一步研究.

针对上述问题,本文将重点探讨窄方位数据的 DSR 方程偏移方法及其角度域成像快速算法,并通过数值试验检验它们的应用效果.

2 DSR 方程偏移理论与成像方法

2.1 DSR 方程波场传播算子

据文献[11,19],可用如下中点 - 半炮检距域的传播算子仿真“沉降观测”过程,即

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} &= -i s_0 u \sqrt{1 + 4^2 s_0^2 \left[\left(\frac{\partial}{\partial m_x} - \frac{\partial}{\partial h_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial m_y} - \frac{\partial}{\partial h_y} \right)^2 \right]} \\ &\quad - i s_0 u \sqrt{1 + 4^2 s_0^2 \left[\left(\frac{\partial}{\partial m_x} + \frac{\partial}{\partial h_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial m_y} + \frac{\partial}{\partial h_y} \right)^2 \right]}, \\ \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{-i s_s u}{\sqrt{1 + 4^2 s_s^2 \left[\left(\frac{\partial}{\partial m_x} - \frac{\partial}{\partial h_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial m_y} - \frac{\partial}{\partial h_y} \right)^2 \right]}} \\ &\quad + \frac{-i s_g u}{\sqrt{1 + 4^2 s_g^2 \left[\left(\frac{\partial}{\partial m_x} + \frac{\partial}{\partial h_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial m_y} + \frac{\partial}{\partial h_y} \right)^2 \right]}}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中 $u(x, m, h; z)$ 为频率域地震波场, $i = \sqrt{-1}$, ω 为圆频率, z 为深度, m_x 和 m_y 为中心点坐标矢量 m 的两个分量, h_x 和 h_y 为炮检距矢量 h 的两个分量.

$s_s(z)$ 和 $s_g(z)$ 分别为炮点和接收点处的慢度摄动量,满足

$$s_s(z) = s_s(z) - s_0(z), \quad (2a)$$

$$s_g(z) = s_g(z) - s_0(z), \quad (2b)$$

其中 $s_0(z)$ 为背景慢度, s_s 与 s_g 分别代表炮点、接收

点处的慢度.

上面这种 DSR 形式的传播算子中,一个平方根对应炮点的延拓,另一个平方根对应接收点的延拓. 传播算子求解一般采用各种双域算法^[4,5,8],其有限差分法最近刚提出来^[20]. 另外,DSR 方程偏移的波场延拓除了根据(1)式在中点 - 半炮检距域进行,也可在炮点 - 全炮检距域进行^[21,22].

2.2 角度域成像快速算法

据文献[19],DSR 方程全三维偏移采用的零炮

检距、零时间成像条件^[23]可以写成

$$I(m, z_{n+1}) = u(t = 0, m, h = 0; z_{n+1}) = \text{FT}_m \left\{ \text{d} \text{d} k_{h_x} \text{d} k_{h_y} [W \cdot u \times (\dots, k_{m_x}, k_{m_y}, k_{h_x}, k_{h_y}; z_n)] \right\}, \quad (3)$$

式中 $I(m, z_{n+1})$ 代表成像值, W 代表前面介绍的波场传播算子, k_{m_x} 和 k_{m_y} 为中心点坐标波数矢量 k_m 的两个分量, k_{h_x} 和 k_{h_y} 为炮检距波数矢量 k_h 的两个分量, FT_m^{-1} 代表相对于中心点坐标矢量的反傅里叶变换。

采用上面这种完全成像条件仅能得到偏移叠加后的地下图像。实际上,同其他叠前偏移方法一样,DSR 方程偏移除了输出构造图像,还可利用多次覆盖技术带来的数据冗余在偏移数据叠加之前输出共成像道集。在 DSR 方程偏移的波场延拓过程中,炮检距是逐步收缩的,仅采用零时间成像条件可以输出炮检距域的共成像道集。如果偏移速度非常准确,则能量主要集中在这种共成像道集的零炮检距附近。为了使共成像道集更直观、更敏感地反映偏移速度偏差和振幅随角度的变化关系,一般在 DSR 方程偏移中输出角度域的共成像道集。

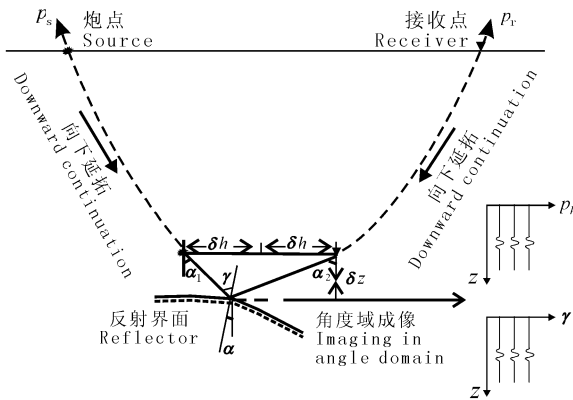


图 1 角度域成像示意图

Fig. 1 Sketch of imaging in the angle domain

以二维 DSR 方程偏移为例,当炮点、接收点延拓到反射界面附近时(图 1),波场传播的方向特征满足如下关系式^[18,24]

$$p_h = \frac{\partial t}{\partial h} = \frac{k_h}{v} = \frac{2}{v} \cos \alpha \sin \gamma, \quad (4a)$$

$$\tan \alpha = - \frac{\partial z}{\partial h} = \left| \frac{k_h}{k_z} \right|, \quad (4b)$$

其中 p_h 为炮检距射线参数, α 为反射波在界面上的入射角, γ 为局部反射界面倾角, v 为反射界面附近

介质的层速度, k_h 与 k_z 分别为炮检距波数与垂直波数。就多次覆盖数据而言,同一反射点存在若干条“炮点 - 反射点 - 接收点”路径,波场延拓过程中,炮点、接收点会沿各自的路径沉降到反射点,因此经每条路径(与 p_h 或 α 一一对应)都可以得到该反射点的像。显然,完全成像条件(3)式已经把该反射点所有路径的像叠加在一起了。若仅采用零时间成像条件,不同路径的像不叠加,而是按 p_h 或 α 排列在一起,就形成了所谓的角度域共成像道集。如果偏移速度比较准确,同一反射点不同路径的像的深度一致,共成像道集上相应同相轴应当是平直的,否则会在剩余曲率和深度误差。如果采用了保幅的波场延拓处理,角度域共成像道集还是 AVO/AVA 分析最自然的起点。

尽管(4a)、(4b)式表示的角度变换关系式很简单,但当前一般还是借助于相对繁琐的倾斜叠加分解或径向道变换^[18,24]产生角度域的共成像道集。下文将提到的共方位角叠前深度偏移为例,图 2a 概括了 In-line 方向炮检距射线参数 p_h 域共成像道集的产生过程。为了尽可能地缩短偏移速度分析的迭代周期,本文直接按(4a)式把延拓波场 $u(\omega, m, k_{h_x}, z)$ 映射到 p_h 域(采用了 Sinc 函数插值技术),再利用零时间成像条件(关于 α 求和)得到共成像道集 $I(m, p_{h_x}, z)$ 。图 2b 为相应的角度域成像流程。与传统方法相比,它以精细投影取代相对耗时的倾斜叠加分解,而且还减少了傅里叶变换次数,因此具有更高的计算效率。Yang et al.^[25]已将该算法应用于偏移速度分析,在实际资料处理中取得了很好的效果。

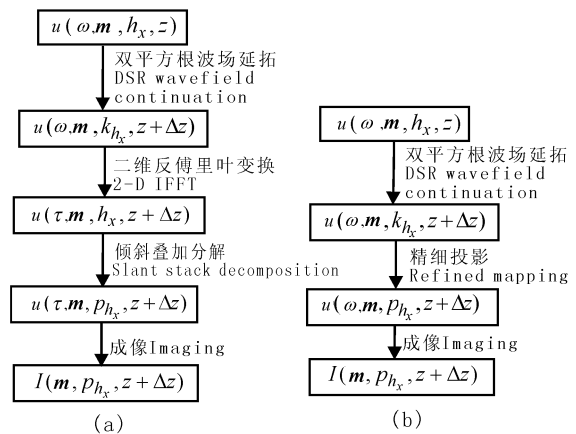


图 2 角度域成像流程图

(a) 传统算法流程;(b) 本文算法流程。

Fig. 2 Flows of imaging in angle domain

(a) Flow of traditional algorithm; (b) Flow of the algorithm in this paper.

3 窄方位数据 DSR 方程偏移方法

3.1 限定输入数据体的窄方位数据成像方法

在中点 - 半炮检距坐标系下, 三维地震数据满足如下的傅里叶变换, 即

$$u(\omega, k_m, k_{h_x}, k_{h_y}; z) = \int dh_y e^{-ik_{h_y} h_y} \times u(\omega, k_m, k_{h_x}, h_y; z), \quad (5)$$

将(5)式代入成像条件(3)式, 有

$$I(m, z) = \text{FT}_m \left\{ \int dh_y \int dk_{h_x} \int dk_{h_y} \times [W \cdot e^{-ik_{h_y} h_y} u(\omega, k_m, k_{h_x}, h_y; z=0)] \right\}, \quad (6)$$

其中关于炮检距分量 h_y 的积分可当成是所有按 Cross-line 炮检距分量分选的“限定数据体”偏移结果的叠加。

对单个“限定数据体”, 假设 $h_y \in [h_{y_0}, h_{y_1}]$, 其成像公式写成

$$I(m, z) = \text{FT}_m \left\{ \int dk_{h_x} \int dk_{h_y} W e^{-ik_{h_y} h_{y_0}} \times u(\omega, k_m, k_{h_x}, h_{y_0}; z=0) \right\}. \quad (7)$$

为了利用该“限定数据体”在 Cross-line 方向的单次覆盖特征, 一般采用稳相近似方法快速求解(7)式最内层积分. 这就是文献[26]提出的 Cross-line 共炮检距偏移方法. 它基本克服了 DSR 方程全三维偏移上述两个困难, 但不便于处理介质的横向变速问题。

当 Cross-line 炮检距分量为零时, 三维地震数据具有零方位角特征. 于是(7)式可演变成共方位角偏移算子^[15], 即

$$I(m, z) = \text{FT}_m \left\{ \int dk_{h_x} \int dk_{h_y} W \times u(\omega, k_m, k_{h_x}, h_{y_0}; z=0) \right\}. \quad (8)$$

共方位角偏移对横向变速的适应能力有很大提高, 是一种很有潜力的波动方程偏移方法^[11, 16, 17].

对一般的窄方位地震数据, 可利用 AMO 校正将其变换成零方位形式, 然后由(8)式进行共方位角偏移处理. 不过, 共方位角偏移的一个基本假设就是: 炮点、接收点的“沉降”路径在各延拓步内都是共平面的^[15]. 在横向(主要是 Cross-line 方向)强变速介质中, 即使对零方位数据, 波场传播路径常常与这种假设不符. 为了克服共方位角偏移的上述限制, Biondi^[27]提出了窄方位角偏移方法, 其主要思想就

是限定地震波的传播方向.

3.2 限定波场传播方向的窄方位数据成像方法

窄方位角偏移的理论基础仍然是(3)式表征的成像公式. 不过, 窄方位数据 Cross-line 方向覆盖次数 N_{h_y} 很小, 完全按(3)式成像会因边界效应引入假象. 虽然扩边与边界吸收处理是比较好的解决办法, 但计算成本太高. 如果假定地震波在 Cross-line 方向的有效传播角度范围是有限的, 因此适当压缩(3)式最内层积分区间的大小, 既提高了 DSR 方程全三维偏移的计算效率, 又改善了在 Cross-line 方向的成像精度. 这就是窄方位角偏移的基本思路. 它本质上是限定 Cross-line 方向传播角度的 DSR 方程全三维偏移方法. 虽然它不是共方位角偏移方法的简单扩展, 但在确定有效传播范围时, 仍然参考共方位角偏移算子的稳相路径, 把关于炮检距波数分量 k_{h_y} 的积分范围确定为

$$k_{h_y} \in \left[\left(\frac{N_{h_y}}{2} - 1 \right) k_{h_y}, \left(\frac{N_{h_y}}{2} + 1 \right) k_{h_y} \right], \quad (9)$$

其中 k_{h_y} 表示层内最小慢度与最大慢度对应的共方位角偏移算子的稳相路径的中值, k_{h_y} 为炮检距波数分量的采样步长.

4 数值试验

首先对比了共方位角偏移与窄方位角偏移在 SEG/EAGE 盐丘模型 C3 窄方位数据体上的试验情况. 图 3(a、b) 分别为采用共方位角、窄方位角叠前深度偏移方法得到的成像剖面 (Cross-line 287: $x = 9510\text{m}$). 可见, 后者在信噪比、聚焦效果方面稍优于前者. 这说明窄方位角偏移方法对改善 Cross-line 方向的成像效果有一定作用. 值得说明的是, 这种成像质量的有限改进是以数倍于共方位角偏移的计算时间为代价的.

基于对这两种窄方位数据体 DSR 方程偏移方法的总体认识, 我们在三维实际地震资料处理中仅采用性价比较高的共方位角叠前深度偏移方法. 图 4 展示了它对我国东部地区某窄方位地震数据体的应用效果. 图 4a 为传统 Kirchhoff 叠前深度偏移算法得到的成像剖面, 图 4b 为与之对应的共方位角叠前深度偏移剖面. 这两种深度偏移采用了同一个层速度模型. 显而易见, 后者在潜山形态、内幕以及断

层的成像效果上都更好一些.通常,将叠前深度偏移结果变换到时间域,可与叠前时间偏移处理结果相对比.图 4c 为西方地球物理公司 Omega 系统叠前时间偏移得到的偏移剖面,图 4d 为共方位角叠前深度

偏移对应剖面的时间域显示.可见后者古潜山披覆构造及其内幕成像大有改观.由此表明,DSR 方程共方位角叠前深度偏移对古潜山构造带的精细成像非常有效.

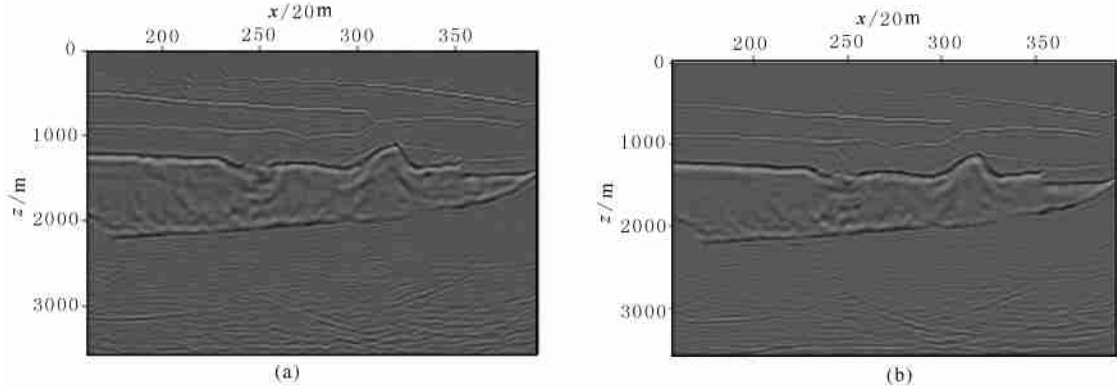


图 3 SEG/EAGE 3-D 盐丘模型窄方位数据偏移试验
(a) 共方位角偏移; (b) 窄方位角偏移.

Fig. 3 SEG/EAGE 3-D Salt model narrow azimuth dataset migration tests
(a) Common-azimuth migration; (b) Narrow-azimuth migration.

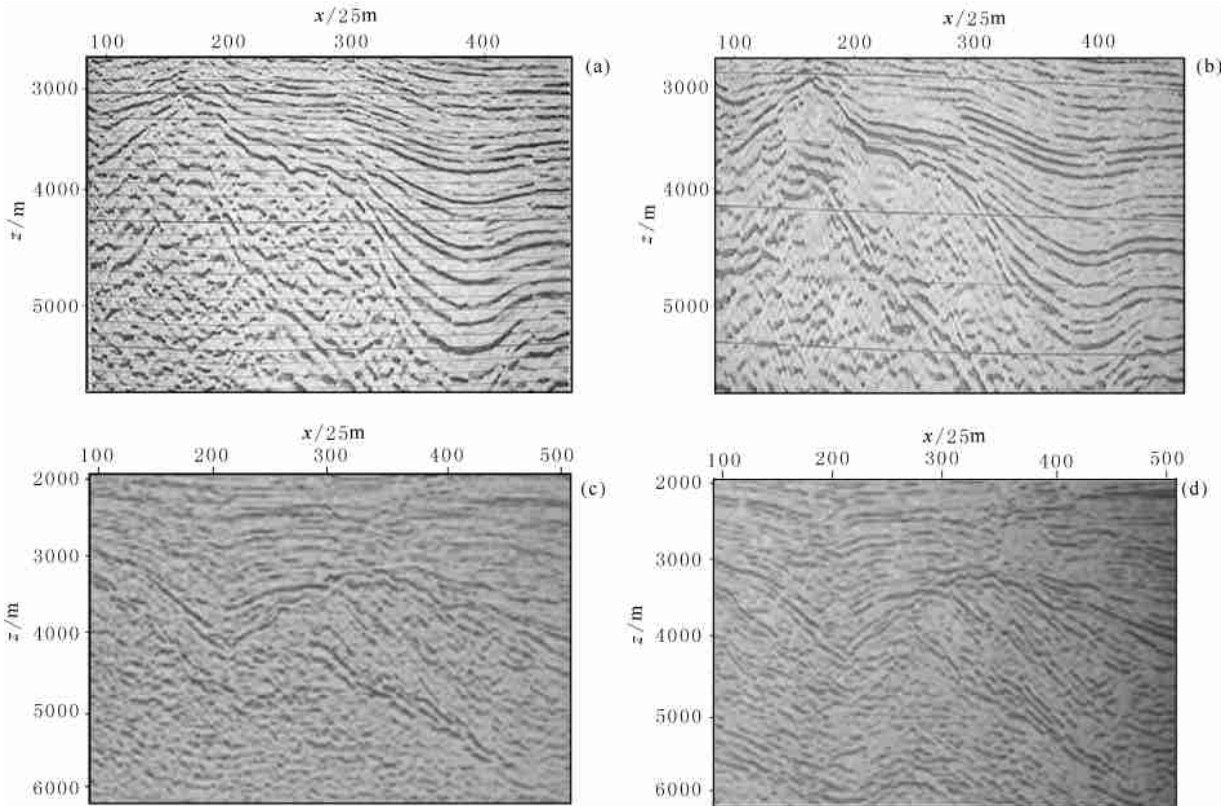


图 4 实际窄方位数据成像结果对比

(a) Kirchhoff 叠前深度偏移剖面; (b) 共方位角叠前深度偏移剖面; (c) Omega 系统叠前时间偏移剖面;
(d) 共方位角深度偏移剖面时间域显示.

Fig. 4 Comparison of imaging results on a field dataset

(a) Kirchhoff prestack depth migration; (b) Common-azimuth prestack depth migration; (c) Prestack time migration profile by the Omega system;
(d) Time domain display of common-azimuth prestack depth migration.

5 结论与讨论

DSR 方程偏移是一类近几年来备受关注的波动方程偏移方法. 窄方位地震数据的精确成像问题也一直是困扰勘探地球物理界的难题. 本文探讨了窄方位数据成像的几种 DSR 方程偏移方法, 指出它们要么限定输入数据体, 要么限定延拓波场的传播方向, 要么二者兼有. 共方位角偏移要求输入数据必须是零方位形式(通常是经过方位角校正得到的), 且对地震波的传播方向有人为限定. 尽管窄方位角偏移是针对共方位角偏移的理论缺陷提出来的, 它本质上仍然是 DSR 方程全三维偏移方法, 只不过对地震波传播方向有特殊限定而已. 它在一定程度上可提供比共方位角偏移更精确的成像结果, 但低效率、高资源耗费问题是其推广应用的障碍. 从整体性能(计算代价与成像精度)来看, 共方位角叠前深度偏移仍然是目前最有竞争力的窄方位数据成像方法之一.

本文角度域成像快速算法提高了 DSR 方程偏移算法在速度建模与地震成像中的实用性. 数值试验结果也展示了波动方程叠前深度偏移技术对盐丘、礁体、古潜山以及断裂带等复杂构造成像的应用潜力.

参考文献 (References)

- [1] Yilmaz O , Claerbout J F. Prestack partial migration. *Geophysics* , 1980 , **45** : 1753 ~ 1779
- [2] Deregowski S M , Rocca F. Geometric optics and wave theory of constant offset sections in layered media. *Geophysical Prospecting* , 1981 , **29** : 374 ~ 406
- [3] Alkhalifah T. Prestack phase-shift migration of separate offsets. *Geophysics* , 2000 , **65** : 1179 ~ 1194
- [4] Popovici A M. Prestack migration by split-step DSR. *Geophysics* , 1996 , **61** : 1412 ~ 1416
- [5] Jin S W , Wu R S. Common offset pseudo-screen depth migration. 69th Ann. Internat. Mtg. , Soc. Expl. Geophys. , Expanded Abstracts , 1999. 1516 ~ 1519
- [6] O'Brien M J , Eigen J T. Wavefield imaging of complex structures with sparse , point-receiver data. 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys. , 1998. 1365 ~ 1368
- [7] Biondi B L , Clapp R G , Prucha M , et al. 3-D prestack wave-equation imaging - a rapidly evolving technology. 64th Mtg. Eur. Assn. Geosci. Eng. , 2002 , E027
- [8] Jin S W , Mosher C , Wu R S. Offset-domain pseudoscreen prestack depth migration. *Geophysics* , 2002 , **67**(6) : 1895 ~ 1902
- [9] 陈秀梅 , 王华忠 , 程玖兵等. 地表旋转控制照明叠前深度偏移. *地球物理学报* , 2004 , **47**(2) : 306 ~ 311
- Chen X M , Wang H Z , Cheng J B , et al . Prestack depth migration by surface rotation controlled illumination. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 2004 , **47** (2) : 306 ~ 311
- [10] 陈树民 , 刘洪 , 李幼铭. 适于窄线三维地震资料的面炮方法. *地球物理学进展* , **16**(3) : 58 ~ 67
- Chen S M , Liu H , Li Y M. The area shot method for land 3-D seismic acquisition. *Progress in Geophysics* (in Chinese) , 2001 , **16** (3) : 58 ~ 67
- [11] 程玖兵. 波动方程叠前深度偏移精确成像方法研究[博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2003
- Cheng J B. On accurate imaging of wave equation based prestack depth migration[Ph.D. thesis]. Shanghai : Tongji University. 2003
- [12] Mosher C C , Foster D J , Hassanzadeh S. Offset plane wave propagation in laterally varying media. In: Hassanzadeh S , ed. *Mathematical Methods in Geophysical Imaging (V)* , *SPIE Proc.* , 1998 , **3453** : 36 ~ 46
- [13] Eigen J T. $V(z)$ F K prestack migration of common-offset common-azimuth data volumes. 68th Ann. Internat. Mtg. , Soc. Expl. Geophys. , Expanded Abstracts , 1998. 1835 ~ 1838
- [14] Biondi B , Chemingui N. Transformation of 3-D prestack data by azimuth moveout (AMO). 64th Ann. Internat. Mtg. , Soc. Expl. Geophys. , Expanded Abstracts , 1994. 1541 ~ 1544
- [15] Biondi B , Palacharla G. 3-D prestack migration of common-azimuth data. *Geophysics* , 1996 , **61** : 1822 ~ 1832
- [16] Vaillant L , Sava P , Biondi B. 3-D wave-equation imaging of a North Sea dataset: common-azimuth migration + residual migration. 70th Ann. Internat. Mtg. , Soc. Expl. Geophys. , Expanded Abstracts , 2000. 874 ~ 877
- [17] Jin S , Li Z. 3-D wave equation GSP prestack depth migration with application to a deep-water dataset from Gulf of Mexico. 72nd Ann. Internat. Mtg. , Soc. Expl. Geophys. , Expanded Abstracts , 2002. 1316 ~ 1319
- [18] Prucha M , Biondi B , Symes W. Angle-domain common-image gathers by wave-equation. 69th Annual Internat. Mtg. , Soc. Expl. Geophys. , Expanded Abstracts , 1999. 824 ~ 827
- [19] 程玖兵 , 王华忠 , 马在田. 双平方根方程三维叠前深度偏移. *地球物理学报* , 2003 , **46**(5) : 676 ~ 683
- Cheng J B , Wang H Z , Ma Z T. Double-square-root based wave equation 3D prestack depth migration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 2003 , **46**(5) : 676 ~ 683
- [20] Zhang G , Shan G. Helical scheme for 2-D prestack migration based on double-square-root equation. 71st Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys. , 2001. 1057 ~ 1060
- [21] Tannis M C , Stoffa P L , Pestana R. Prestack depth migration in the source-offset domain. 68th Ann. Internat. Mtg. , Soc. Expl. Geophys. , Expanded Abstracts , 1998. 1839 ~ 1842
- [22] 王华忠 , 程玖兵 , 马在田. 炮点 - 全偏移距域共方位角道集 3D 叠前深度偏移. CPS/SEG 2004 国际地球物理会议论文集(详细摘要) , MIG 4. 1 , 2004. 325 ~ 328
- Wang H Z , Cheng J B , Ma Z T. 3D wave equation prestack depth migration of common-azimuth data in the source-offset domain. Expanded Abstracts CPS/SEG 2004 International Geophysical Conference , MIG 4. 1 , 2004. 325 ~ 328

- [23] Claerbout J F. Imaging the Earth's Interior. Blackwell Scientific Publications. 1985
- [24] Sava P, Biondi B, Fomel S. Amplitude-preserved common image gathers by wave-equation migration. 71th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 2001. 296~299
- [25] Yang S Q, Wang H Z, Cheng J B, et al. Wave-equation migration velocity analysis based on common imaging gathers in the ray parameter domain. 73rd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. MIG P1. 7. 2003
- [26] Cheng J B, Wang H Z, Ma Z T, et al. Cross-line common-offset migration for narrow azimuth dataset. 73rd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. MIG 1. 7. 2003
- [27] Biondi B. Narrow-azimuth migration of marine streamer data. 73rd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. 2003. 897~900

《地球物理学报》稿约

《地球物理学报》创刊于 1948 年,是中国地球物理学会、中国科学院地质与地球物理研究所联合主办的有关地球物理科学的综合性学术刊物.主要刊载固体地球物理、应用地球物理、地磁和空间物理、大气和海洋地球物理,以及与地球物理密切相关的交叉学科研究成果的高质量论文.中文版为双月刊,在国内外发行,并由美国地球物理学家联合会(简称 AGU)同步发行英文网络版.作者和读者对象主要为从事地球物理学、地球科学及其他相关学科的国内外科技工作者和大专院校师生.

2002 年底荣获第二届国家期刊奖.本刊为中国科技信息研究所信息分析中心、中国科学院引文数据库等的统计源期刊和 SCIE 等国际检索系统的源期刊.

1 主要栏目

- 1.1 学术论文 报道我国以及国际地球物理各分支学科及相关边缘、交叉学科的重要研究成果,包括具有创新性的基础研究和应用基础研究成果,以及具有重大应用价值的研究成果.附中、英文摘要约 300 字,关键词 3~8 个.
- 1.2 综述或评述 介绍国内外地球物理学和相关交叉学科在某一领域或某一专题的最新研究进展或评述.6000 字以内,其余要求同 1.1.
- 1.3 研究短论 快捷报道地球物理学领域和相关交叉学科某项研究的重要阶段性成果,或主要结论,或重要发现.
- 1.4 科学论坛 开展对地球物理学和相关交叉学科以及对本刊文章某一学术观点的讨论,一般 3500 字以内.
- 1.5 学术动态 国内外有关地球物理学学术活动的报道.一般 800 字以内.“1.2”~“1.5”为不定期栏目.

2 稿件要求

- 2.1 文稿观点明确,论据可靠,层次分明,论述精练,语言准确,符合规范,求真反伪,文责自负.
- 2.2 量、符号和单位采用国家标准《量和单位》.量符号、代表变动性数字的符号以及坐标轴的符号均排斜体;矢量、张量排黑斜体;量符号的下标,凡用以上符号者排斜体,其他情况排正体.量符号在文中首次出现时,必须给出其量名称及单位.单位一律采用国际符号,排正体.地球物理学中常用的数学符号(自然对数的底 e ,圆周率 π ,转置 T ,虚数 i , d 中的 d , ∂x 中的 ∂ 等)均排正体.外文缩写词必须符合国际规范,在文中第一次出现时要说明中文含义.
- 2.3 图件 附最必要的图,每幅图注明图号.要求图件具科学性,符合规范,清晰美观,能直接用于制版.坐标轴标目的书写以规范形式“量符号/单位”表示,如 f/Hz , $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$.图中内容要中、英文并列给出.对于涉及国界的图件,必须绘制在地图出版社出版的最新地图上,或通过 www.sbsm.gov.cn 下载.最好提供能用 Coreldraw 编辑的图件.在正文中标示图的位置(画框示意),框的下方写明图号、图题和图注(中、英文并列).
- 2.4 表格 采用三线表,必要时加辅线.表号和表题(中、英文并列)置于表的上方.表中量和单位的标示形式同图.表直接列于文中,勿另置.注意表与图的内容勿重复.
- 2.5 参考文献 遵循著作权法,凡引用他人资料、数据、方法、图表以及结果、结论的,必须注明出处,列出文献,涉及版权事宜作者自负.参考文献的著录格式本刊采用“须序编码制”,著录格式详见“《地球物理学报》文后参考文献著录格式”.
- 2.6 提交文稿研究工作的基金来源(批准号),以及 100 字以内的第一作者简介.

3 注意事项

- 3.1 来稿一式两份,计算机打印.
- 3.2 投稿者可建议 3~5 名评审者(请注明学位、职称、研究领域、单位和通讯处),以及要求回避的评审者.供编辑部参考.
- 3.3 来稿如不符合以上要求,将退作者修改后再投.自留稿件底稿,刊用与否恕不退稿.作者收到本刊回执后 3 个月未接到录用通知时,可自行处理,并请告之编辑部,双方有约定者除外,勿一稿多投.
- 3.4 来稿一经发表,酌寄稿酬并酌收版面费.赠送抽印本 20 份及样刊.

来稿请寄:北京 9825 信箱《地球物理学报》编辑部 邮 编:100029

电 话:010-62007700,62007709,62007696 E-mail:actageop@mail.icgas.ac.cn