

文章编号:1673-5005(2011)05-0051-05

基于 2D 反褶积成像条件的保幅叠前深度偏移

孔 雪¹, 李振春¹, 叶月明², 黄建平¹, 郭 倩¹

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要:为适应复杂构造和岩性油气藏勘探开发对地震处理精度的需求,提出基于 2D 反褶积成像条件的保幅叠前深度偏移方法,实现基于 2D 反褶积成像条件的保幅分步傅里叶(SSF)叠前深度偏移(PSDM)。其主要思想为:在频率-震源波数域内,将所有炮延拓到同一成像点的上行与下行波反褶积,然后对所有频率和震源求和成像。其特点是能够克服非满覆盖次数地区成像能量弱的缺陷,并提高中深层目标区域的成像质量。模型试算结果验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词:2D 反褶积; 成像条件; 保幅叠前深度偏移

中图分类号:P 631.4 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.009

Preserved amplitude prestack depth migration based on 2D deconvolution imaging condition

KONG Xue¹, LI Zhen-chun¹, YE Yue-ming², HUANG Jian-ping¹, GUO Qian¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to adapt for the exploration and development of complex structures and lithologic hydrocarbon reservoirs, a preserved amplitude prestack depth migration method based on 2D deconvolution imaging condition was presented, implementing preserved amplitude split step Fourier prestack depth migration based on 2D deconvolution imaging condition. First, the receiver wavefield was deconvolved by the source wavefield in shot-time dimensions. Then the zero lag results were extracted to form the imaging profile commanding the consistency of time and shot position. The numerical results show that this method not only enhances the imaging energy of weak imaging areas where the folds are not full, but also improves the imaging quality of deep target layers.

Key words: 2D deconvolution; imaging condition; pre-stack depth migration

从早期的 Kirchhoff 积分型真振幅偏移^[14]、到 2000 年开始的振幅保真的单程波方程偏移和逆时保幅偏移^[5-8],以及对三维非均匀介质中的真振幅偏移算子的研究^[9]等,随着 AVO 等振幅分析技术在工业界的推广应用及岩性成像等需求,保幅偏移技术有了长足的发展。波动方程保幅叠前深度偏移中成像条件极其重要,成像条件不合适,延拓方法再准确也不能达到较好的保幅效果。传统的互相关成像条件^[10]稳定但其对深层成像照明不足,并且不具有保幅性和方向性;1D 反褶积成像条件^[11-14]虽然能达到

保幅的目的,但基于这种成像条件的波动方程共炮保幅偏移最终成像质量还与覆盖次数有关,在低覆盖次数区域,成像能量较弱。为此,笔者通过对成像条件的研究,实现基于 2D 反褶积成像条件^[15-17]的保幅叠前深度偏移。

1 单程波方程保幅偏移算子

基于光滑介质假设的全标量波动方程的近似表达式,张关泉^[18]推导出包含运动学和动力学特征的单程波方程(以二维情况为例):

收稿日期:2010-10-08

基金项目:国家油气重大专项课题(2008ZX05014-001-008HZ);2011 中国石油大学(华东)研究生创新基金项目;中国石油大学自主创新科研计划项目(10CX04001A)

作者简介:孔雪(1985-),女(汉族),山东德州人,博士研究生,主要从事复杂介质成像和绕射目标成像研究。

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial z} + \Lambda\right) D(t, x, z) + \frac{v'}{2v}(I + H)D = 0, \\ \left(\frac{\partial}{\partial z} - \Lambda\right) U(t, x, z) + \frac{v'}{2v}(I + H)U = 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\Lambda = \left(\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)^{1/2}, \quad v' = \frac{\partial v}{\partial z}.$$

式中, $D(t, x, z)$ 和 $U(t, x, z)$ 分别为下行和上行波场; I 为单位算子; Λ, H 均为拟微分算子; v 为声波速度。

为了得到声压反射系数特征, 张宇(2001)^[19] 提出在成像前进行如下声压波场变换:

$$p_D = \Lambda^{-1} D, \quad p_U = \Lambda^{-1} U,$$

则声压波场满足如下真振幅单程波方程:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial z} + \Lambda - \Gamma\right) p_D(x, z; \omega) = 0, \\ \left(\frac{\partial}{\partial z} - \Lambda - \Gamma\right) p_U(x, z; \omega) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\Gamma = v'/(2v)(I + H).$$

边界条件为

$$\begin{cases} p_D(x, z = 0; \omega) = 1/2 \Lambda^{-1} \delta(x - x_s), \\ p_U(x, z = 0; \omega) = Q(x; \omega). \end{cases} \quad (3)$$

式中, x_s 为震源坐标。

由式(2)、(3) 推导出保幅分布, 傅里叶(SSF) 波场延拓算子式(以下行波为例) 为

$$\begin{aligned} \tilde{p}_d(\omega, k_x, z + \Delta z) &= \exp(-i\Delta z \sqrt{\omega^2/v_0^2 - k_x^2}) \times \\ \tilde{p}_d(\omega, k_x, z), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} p_d(\omega, x, z + \Delta z) &= \exp(-i\omega(1/v - 1/v_0)\Delta z) \times \\ p_d(\omega, x, z), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tilde{p}_d(\omega, k_x, z + \Delta z) &= \\ \left[\frac{v_0(z + \Delta z) \sqrt{1 - v_0^2(z)/\omega^2 k_x^2}}{v_0(z) \sqrt{1 - v_0^2(z + \Delta z)/\omega^2 k_x^2}} \right]^{\frac{1}{2}} \tilde{p}_d(\omega, k_x, z), \end{aligned} \quad (6)$$

$$p_d(\omega, x, z + \Delta z) = \left[\frac{v(x, z + \Delta z) v_0(z)}{v(x, z) v_0(z + \Delta z)} \right]^{1/2} p_d(\omega, x, z).$$

2 1D 成像条件

2.1 Claerbout 成像原则

依据 Claerbout 成像原则^[20], 反射层位于入射波的初至和反射波的产生时间和空间位置相同的点上。Claerbout 提出成像条件的基本公式为

$$r(x, z) = u(x, z, t_d)/d(x, z, t_d). \quad (7)$$

式中, x 为水平方向坐标; z 为深度; t_d 为下行波 $d(x, z, t)$ 的初始时间。理论上, 正确的成像条件是上下

行波场在反射层深度处的反褶积(频率域相除), 然而成像时并不知道反射层的真正位置, 所以在每一深度层处都利用方程(7) 计算其反射系数。由于下行波场传播过程中会在某些位置趋近于零值, 因此该成像条件会出现计算不稳定现象。

2.2 1D 互相关成像条件

Claerbout 给出的互相关成像条件不但效率高还可以消除方程(7) 带来的计算不稳定现象^[20]。他提出在时间域计算震源和接收波场的零延迟互相关值作为反射系数, 其表达式为

$$r(x, z) = \sum_{x_s} \sum_{\omega} U(x, z, \omega, x_s) D^*(x, z, \omega, x_s). \quad (8)$$

式中, $r(x, z)$ 为互相关零延迟系数, 由所有频率成分波场值相加得到; $U(x, z, \omega)$ 和 $D(x, z, \omega)$ 分别为接收和震源波场关于时间 t 的一维 Fourier 变换。将所有炮的成像结果在对应地下位置上叠加得到最终的成像剖面。

2.3 1D 反褶积成像条件

互相关成像条件虽然效率高、计算稳定, 但不具备保幅性和方向性, 通过在时间域引入 1D 反褶积, 将简单的互相关成像条件扩展, 其表达式为

$$r(x, z) = \sum_{x_s} \sum_{\omega} \frac{U(x, z, \omega, x_s) D^*(x, z, \omega, x_s)}{D(x, z, \omega, x_s) D^*(x, z, \omega, x_s)}.$$

这种反褶积成像条件存在明显的缺陷, 分母很小时会出现计算不稳定现象, 严重影响成像质量。许多学者做了大量的研究改进 1D 反褶积成像条件来消除这种不稳定, 通常采用的方法是在分母项加一个阻尼因子 ε , 即

$$\begin{aligned} r(x, z) &= \\ \sum_{x_s} \sum_{\omega} \frac{U(x, z, \omega, x_s) D^*(x, z, \omega, x_s)}{D(x, z, \omega, x_s) D^*(x, z, \omega, x_s) + \varepsilon^2(x, z, x_s)}. \end{aligned}$$

注意: $\varepsilon(x, z, x_s)$ 是个变量, 其计算式为

$$\varepsilon^2(x, z, x_s) = \lambda \langle D(x, z, \omega, x_s) D^*(x, z, \omega, x_s) \rangle.$$

式中, $\langle \rangle$ 为该炮当前地下位置处下行波场所有频率成分自相关函数的平均值; λ ($0 < \lambda < 1$) 是一个可变频常数。

2.4 2D 反褶积成像条件

对于 2D 反褶积成像条件, 成像点 (x, z) 处的成像结果是通过延拓至成像点的频率-震源波数域 (ω, k_x) 的上、下行波场的反褶积基于所有频率和震源波数求和得到, 也就是通过提取上、下行波场的反褶积结果中的零延迟分量来获得。因此, 延拓的上、下行波场不仅在时间上, 而且要在空间震源位置上的一致才能满足成像条件, 如下式所示:

$$r(x, z) =$$

$$\sum_{k_{x_s}} \sum_{\omega} \frac{U(x,z,\omega,k_{x_s})D^*(x,z,\omega,k_{x_s})}{D(x,z,\omega,k_{x_s})D^*(x,z,\omega,k_{x_s}) + \varepsilon^2(x,z)}$$

式中, $r(x,z)$ 为 2D 反褶积零延迟值; $U(x,z,\omega,k_{x_s})$ 和 $D(x,z,\omega,k_{x_s})$ 分别为接收点和震源波场关于炮点位置 x_s 和时间 t 的二维 Fourier 变换。为消除成像计算的不稳定性,特在分母项中引入阻尼因子 ε , 注意: $\varepsilon(x,z)$ 虽可变,但是在 (x_s,t) 面内是个定值,用公式表示为

$$\varepsilon^2(x,z) = \lambda \langle D(x,z,\omega,k_{x_s})D^*(x,z,\omega,k_{x_s}) \rangle.$$

式中, $\langle \rangle$ 为延拓至当前成像点的所有下行震源波场自相关函数关于频率 ω 和震源波数 k_{x_s} 的平均值, λ 取值范围在 0 ~ 1 区间内。

基于 2D 反褶积成像条件的叠前深度偏移简单

流程主要包括:① 首先把震源波场和炮记录分别变换到频率域,利用波场延拓算子延拓到 z 深度处并保存该波场;② 在当前 z 深度层内,对于每一横向位置 x ,抽取对该成像位置有贡献的所有震源和检波记录,变换到炮点位置波数域,应用 2D 反褶积成像条件得到该 (x,z) 位置处的成像值;③ 然后,将步骤① 保存下来的波场外推到 $z + \Delta z$ 处,重复步骤②,得到最终成像结果。

3 模型试算

3.1 简单洼陷模型试算

图 1(a) 为该模型速度场,速度场水平采样间隔 15 m,深度采样间隔 8 m,最大深度为 3 km。

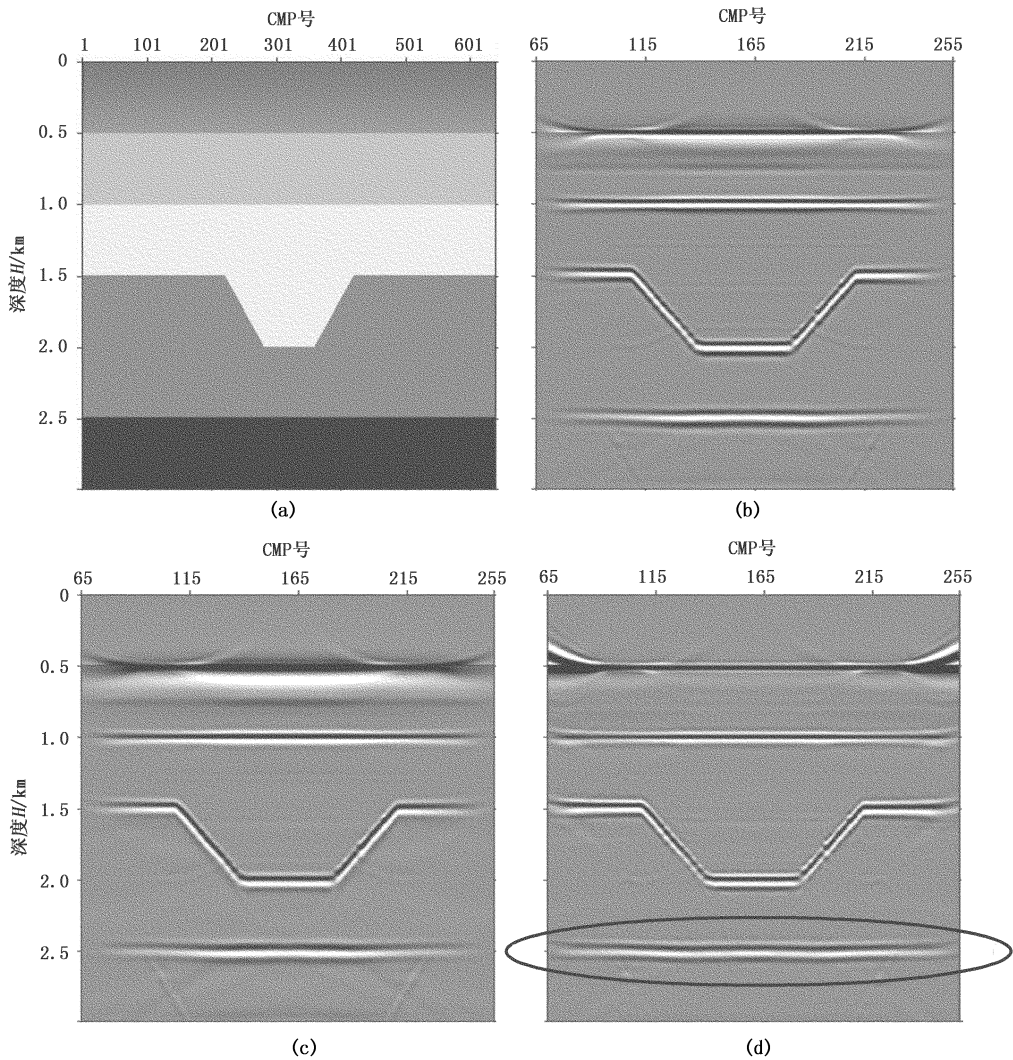


图 1 不同成像条件的洼陷模型叠前深度偏移试算结果

Fig. 1 Migration results for hollow velocity model based on different imaging condtions

炮记录采用 121 炮激发,121 道接收,750 个采样点,采样率为 4 ms,道间距 30 m,中间放炮,炮间隔为 30 m。注意波场延拓过程均采用分步傅里叶

(SSF)算子或保幅 SSF 算子,对正演炮记录进行叠前深度偏移试算,试算结果采用相同的增益显示。

图 1(b) 和(c) 分别为基于 1D 反褶积成像条件

的传统叠前深度偏移(PSDM)和保幅叠前深度偏移结果,图 1(d)为基于 2D 反褶积成像条件的保幅叠前深度偏移结果。为便于对比,提取第四层地震界面成像振幅的峰值曲线(图 2(a))。通过对比 3 条峰值曲线可以看出,保幅叠前深度偏移对中深部目的层的几何扩散等损失有一定的能量补偿作用,改善了深层区域的成像质量。图 2(b)为单层内能量振幅峰值归一化

曲线,由于洼陷侧翼的影响,洼陷下部地层的能量较平层下部位置处能量稍微弱一些。1D 反褶积型成像条件的传统 PSDM 和保幅 PSDM 成像得到的能量趋势基本相同,与 2D 反褶积偏移结果相比较可知,2D 反褶积成像条件有一定的横向能量均衡作用,提高了非满覆盖次数地区的成像能量。

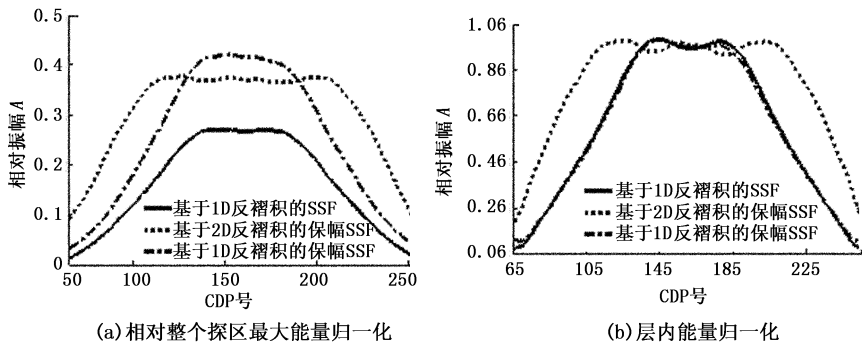


图 2 归一化能量峰值曲线对比
Fig. 2 Normalized peak amplitudes comparison for three PSDMs

3.2 Marmousi 模型试算

基于 SEG/Marmousi 模型数据进行了叠前深度偏移试验。模型速度场如图 3(a)所示,基于 Cuanza

盆地的地质构造剖面,用 2D 声波有限差分法模拟得到单炮记录。

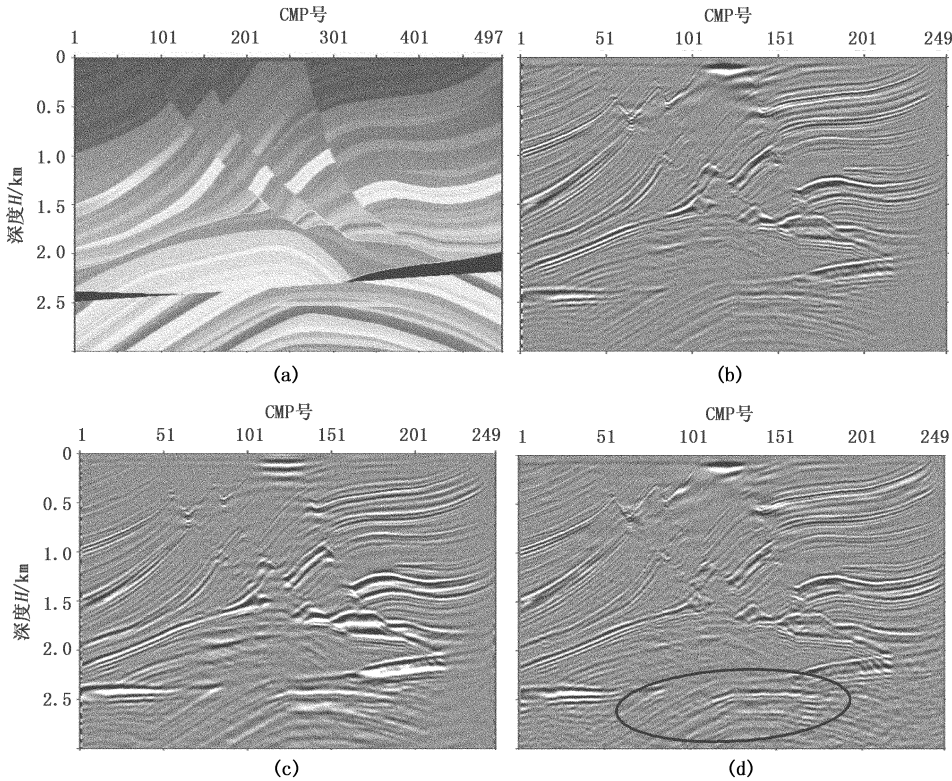


图 3 不同成像条件的 Marmousi 模型叠前深度偏移试算结果

Fig. 3 Migration results for Marmousi model based on different imaging condntions

横向 497 个采样点,纵向 750 个采样点,速度场水平采样间隔 12.5 m,深度采样间隔为 4 m,最大深度 3 km。分别采用基于 1D 反褶积成像条件的常规

PSDM 和保幅偏移以及基于 2D 反褶积成像条件的保幅偏移进行计算和对比分析,结果如图 3(b) ~ (d)所示。可以明显看到,在波场延拓过程中使用

保幅延拓算子,补偿了由于上覆浅层三大断层和中层背斜引起的深层能量损失,突显深层局部构造。由此可知,2D反褶积成像条件改善了非满覆盖次数地区的照明不足,均衡了同一深度层的能量分布。

4 结 论

(1)利用延拓的上、下行波场不仅在时间上一致,而且在空间震源位置上也一致的2D成像条件,克服了非满覆盖次数地区成像能量弱的缺陷。

(2)在2D反褶积成像条件分母项中添加阻尼因子项,可以保证成像计算的稳定性。

(3)在波场外延过程中采用保幅延拓算子,提高了中深层的偏移成像质量。

参考文献:

- [1] KEHO T H, BEYDOUN W B. Paraxial ray Kirchhoff migration[J]. *Geophysics*, 1988,53(12):1540-1546.
- [2] SCHLEICHER J, TYGEL M, HUBRAL P. 3-D true-amplitude finite offset migration [J]. *Geophysics*, 1993,58(8):1112-1126.
- [3] 孙建国. Kirchhoff型真振幅偏移与反偏移[J]. 勘探地球物理进展, 2002,25(6):1-5.
SUN Jian-guo. Kirchhoff-type true-amplitude migration and demigration[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2002,25(6):1-5.
- [4] 徐升, GILLES Lambaré. 复杂介质下保真振幅 Kirchhoff 深度偏移[J]. 地球物理学报, 2006,49(5):1431-1444.
XU Sheng, GILLES Lambaré. True amplitude Kirchhoff prestack depth migration in complex media[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006,49(5):1431-1444.
- [5] ZHANG Yu, ZHANG Guanquan, BLEISTEIN N. Theory of true-amplitude one-way wave equations and true-amplitude common-shot migration [J]. *Geophysics*, 2005,71(4):E1-E10.
- [6] 张宇. 振幅保真的单程波方程偏移理论[J]. 地球物理学报, 2006,49(5):1410-1430.
ZHANG Yu. The theory of true amplitude one-way wave equation migration[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006,49(5):1410-1430.
- [7] ZHANG Yu, JAMES Sun, SAMUEL Gray. Reverse-time migration: amplitude and implementation issues[J]. *SEG Expanded Abstracts*, 2007,26:2145-2149.
- [8] 杨午阳, ZHANG Houzhu, 茅金根, 等. F-X域弹性波动方程保幅偏移[J]. 石油物探, 2003,42(3):285-288.
YANG Wu-yang, ZHANG Houzhu, MAO Jin-gen, et al. Finite-difference migration with compensation for absorption, dispersion and transmission losses in seismic data [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2003,42(3):285-288.
- [9] 崔兴福, 张关泉, 吴雅丽. 三维非均匀介质中真振幅地震偏移算子研究[J]. 地球物理学报, 2004,47(3):509-513.
CUI Xing-fu, ZHANG Guan-quan, WU Ya-li. True amplitude seismic migration operator in 3D heterogenous medium[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004,47(3):509-513.
- [10] CLAERBOUT J F. Toward a unified theory of reflector mapping [J]. *Geophysics*, 1971,36(3):467-481.
- [11] SCHLEICHER J, COSTA J C, NOVAIS A. A comparison of imaging conditions for wave-equation shot-profile migration[J]. *Geophysics*, 2007,73(3):S219-227.
- [12] GUITTON A, VALENCIANO A. Robust imaging condition for shot-profile migration[J]. *SEG Expanded Abstracts*, 2006,25:2519-2522.
- [13] GUITTON A, VALENCIANO A, BEVE D, et al. Smoothing imaging condition for shot-profile migration [J]. *Geophysics*, 2007,72(3):S149-S154.
- [14] 叶月明, 李振春, 仝兆岐, 等. 基于稳定成像条件的保幅叠前深度偏移[J]. 石油地球物理勘探, 2009,44(1):28-32.
YE Yue-ming, LI Zhen-chun, TONG Zhao-qi, et al. Preserved amplitude pre-stack depth migration based on stable imaging condition[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009,44(1):28-32.
- [15] VALENCIANO A, BIONDI B. 2D deconvolution imaging condition for shot profile migration[J]. *SEG Expanded Abstracts*, 2003,22:1059-1062.
- [16] MUIJS R, ROBERTSSON J, HOLLIGER K. Prestack depth migration of primary and surface-related multiple reflections: part I-imaging[J]. *Geophysics*, 2007,72(2):S59-S69.
- [17] STOFFA P L, FOKKEMA J T, de LUNA Freire R M, et al. Split-step Fourier migration [J]. *Geophysics*, 1990,55(4):410-421.
- [18] 张关泉. 波场分裂、平方根算子与偏移[C]//马在田. 反射地震学论文集. 上海: 同济大学出版社, 2000: 16-20.
- [19] ZHANG Y, SUN J, GRAY S, et al. Towards accurate amplitudes for one way wavefield extrapolation of 3-D common shot records[R/OL]. (2001-12-10) [2008-12-10] <http://www.cwp.mines.edu/Abstracts/SEG01/bleistein.pdf>.
- [20] CLAERBOUT. Toward a unified theory of reflector mapping[J]. *Geophysics*, 1971,36(3):467-481.

(编辑 修荣荣)