

任意广角方程逆时偏移及其在煤田资料中的应用

鲁统祥¹, 何兵寿¹, 沈骥千²

(1. 中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 江苏煤炭地质物测队, 江苏 南京 210000)

摘要:利用任意广角方程逆时延拓的高阶有限差分格式实现了纵波资料的叠前逆时深度偏移,给出了稳定性条件及吸收边界条件;采用归一化互相关成像条件,在成像条件的计算中摒弃双程波方程,采用单程波方程对检波点逆时延拓波场和炮点正向延拓波场进行计算,得出了最佳归一化互相关成像条件。该算法在煤田资料偏移处理中,对较深处的构造清晰成像,取得了较好的应用效果。

关键词:任意广角方程;逆时偏移;成像条件

中图分类号:P631.41

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2013)01-0018-08

Reverse-time Migration of Arbitrarily Wide-angle Wave Equations and Its Application in the Coal Field Seismic Data

Lu Tongxiang¹, He Bingshou¹, Shen Jiqian²

(1. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;
2. Geological Geophysical Exploration and Mapping, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: Based on the arbitrarily wide-angle wave equations, a reverse-time propagation scheme was applied in the prestack reverse-time depth migration, the stability conditions and the absorbing boundary ones of the equations were also given. With the double wave equation abandoned in the imaging conditions, an optimal normalization imaging condition was concluded by using the single wave equation to calculate the reverse time wave field and the forward wave field. The method has obtained distinct imaging and good results in the migration of the coal field data.

Key words: arbitrarily wide-angle wave equations; reverse-time migration; imaging condition

地震勘探技术在煤田地质勘探中发挥了重要作用。目前,随着目标勘探区构造复杂程度不断增加,常规成像技术已经不能满足工业生产的需要。业界逐渐趋向于利用叠前深度偏移技术来解决地下复杂构造成像,逆时偏移技术因其具有高保真性和算法不受倾角限制等特点而备受青睐。

基于双程波方程的逆时偏移算法是当前逆时偏移领域的研究重点。目前,双程波方程逆时偏移算法已趋于成熟,但在工业应用上鲜见成功实例,主要原因有:①与其他算法相比,逆时偏移需要更大的计算机内存,且运算效率较低;②建立精确的层速度模型是逆时偏移取得较好效果的重要前提,但目前尚无完善的层速度模型建立方法;③基于双程波方程的逆时偏移算法本身存在固有缺陷,无法完全消除层间反射干扰。前

收稿日期:2012-04-09

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40839901);国家自然科学基金项目(41174087,40804021);国家油气重大专项项目(2011ZX05005-005-010);天然气水合物资源勘查与试采工程("127"工程)(GZH201100307-02-01)

作者简介:鲁统祥(1988—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事地球探测与信息技术方面的研究。

E-mail:lutongxiang808@163.com

何兵寿(1973—),男,甘肃民勤人,教授,博士后,主要从事地震波叠前偏移技术与多波多分量地震技术方面的研究。

E-mail:hebingshou@sina.com

等^[5] 推导的高阶有限差分格式可以得到:

$$u_{i,j+1}^k = 2u_{i,j+1/2}^k - u_{i,j}^k; \quad (2)$$

$$u_{i,j+1/2}^k = -\frac{c\Delta t}{\Delta z} \mathbf{H}_1 (u_{i,j}^{k+1} - u_{i,j}^{k-1} - u_{i,j+1/2}^{k+1}) - \mathbf{H}_2 (u_{i,j+1/2}^{k+1} - 2u_{i,j+1/2}^k) + \frac{c^2\Delta t^2}{\Delta x^2} \mathbf{H}_3 \sum_{m=-M}^M \alpha_m u_{i+m,j+1/2}^k. \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{Ld}, \mathbf{H}_2 = \mathbf{L}(\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2), \mathbf{H}_3 = \mathbf{L}\mathbf{A}_2, \mathbf{L} = (\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 + \frac{c\Delta t}{\Delta z}\mathbf{D})^{-1}.$$

其中: i, j, k 为离散点序号; $\Delta x, \Delta z$ 和 Δt 分别为空间 x, z 和时间 t 上的差分步长; $\mathbf{D} = \mathbf{dd}^T$; M — 差分阶数的一半, m — 差分系数。

式(3) 的稳定性条件为

$$c\Delta t \leq \min(\Delta x, \Delta z). \quad (4)$$

2.2 任意广角方程逆时偏移的吸收边界条件

式(2) 与式(3) 的计算需要相邻网格点的波场值,但在边界位置处,外侧网格点不存在,因此截断边界处必须采用特殊算法解决波场逆时延拓问题,这就是边界条件。本文采用何兵寿等^[6] 推导出的任意广角方程逆时延拓的吸收边界条件。

3 任意广角方程逆时偏移的成像条件

成像条件计算是逆时偏移技术的重要内容。依据 Chattopadhyay^[7] 与何兵寿等^[8] 的研究成果,互相关成像条件在双程波方程逆时偏移领域得到较好的偏移效果,而何兵寿等^[8] 沿用归一化互相关成像条件,在互相关运算时对检波点逆时延拓波场采用单程波方程计算,但对炮点正向延拓波场仍采用双程波方程计算,在任意广角方程逆时偏移领域得到较好的偏移效果。

Claerbout^[9] 提出了上、下行波互相关成像条件,其实质是炮点正向延拓波场与检波点逆时延拓波场的互相关运算,但逆时偏移中应用该成像条件时,偏移结果的振幅与反射系数不存在严格对应关系,保幅效果差。为克服这一局限,Kaelin 等^[10] 采用炮点波场对偏移结果进行校正,这一成像条件又称为归一化互相关成像条件:

$$Image(x, z) = \frac{\sum_{t=0}^{t_{\max}} u_{x,z}^t \xi_{x,z}^t}{\sum_{t=0}^{t_{\max}} (\xi_{x,z}^t)^2}. \quad (6)$$

其中: $Image(x, z)$ — 对应位置的偏移成像结果; t — 时间; t_{\max} — 记录长度; u — 接收点记录逆时延拓波场值; x, z — 空间坐标; ξ — 双程波方程炮点正向延拓波场值。

式(6) 中分母项与地震波正向传播过程中的能量损失有关,能量损失越大,分母值越小。因此,相对于上、下行波场互相关成像条件,式(6) 能够有效地补偿深层地震波能量损失,得到更保真的偏移效果。

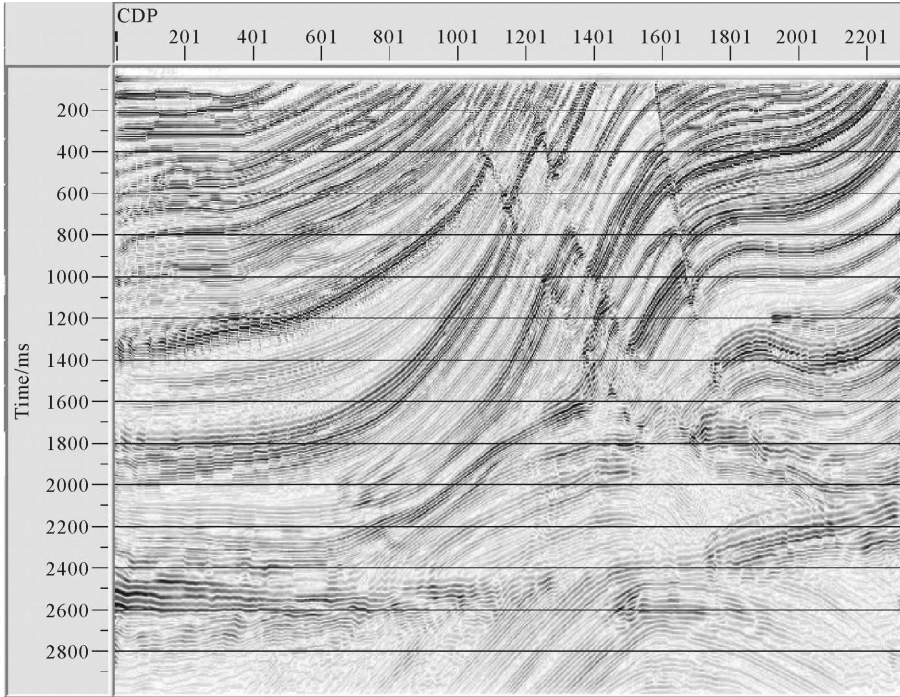
在非均匀介质中,地震波在界面处入射时,双程波入射产生透射波的同时会产生反射波,而单程波入射后为完全透射。因此,式(6) 利用双程波方程进行波场延拓时必然会有反射波引起的能量损失,可以预见,单程波方程可以解决这个问题。基于上述分析,本文在归一化互相关成像条件计算中,利用单程波方程来计算炮点正向延拓波场:

$$Image(x, z) = \frac{\sum_{t=0}^{t_{\max}} u_{x,z}^t \psi_{x,z}^t}{\sum_{t=0}^{t_{\max}} (\psi_{x,z}^t)^2}. \quad (7)$$

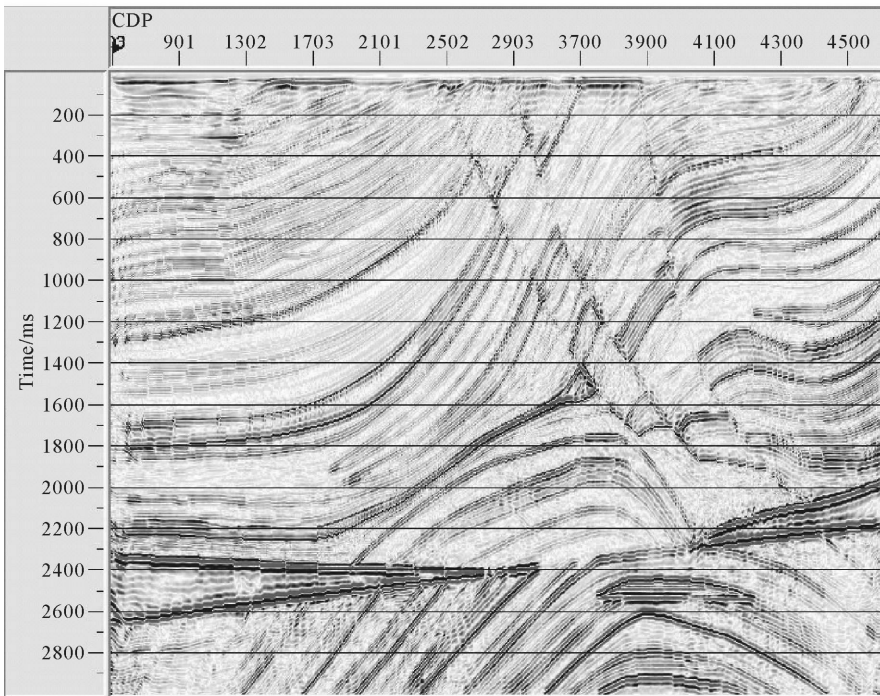
其中: ψ — 单程波方程炮点正向延拓波场。

分别利用式(6)和式(7)对 Marmousi 模型进行成像效果测试,图 1 为两种方法对 Marmousi 模型的成像

效果对比图,其中图 1(a)为利用式(6)所得的偏移结果,图 1(b)为利用式(7)所得的偏移结果。从图中可以看出,对炮点正向延拓波场采用单程波方程所得的偏移剖面,深度在 1500~3000 m,构造成像更为清晰,更容易辨别。



(a) 公式(6)偏移结果图



(b) 公式(7)偏移结果图

图 1 Marmousi 模型偏移结果对比图

Fig. 1 Contrast of the Marmousi model migration result

4 实际资料偏移处理

利用本文算法对煤田某工区实测二维地震数据进行处理,图 2 为原始数据单炮记录。对研究区原始数据进行面波去噪、地表一致性校正和静校正处理等预处理,并对数据进行常规叠加,图 3 为预处理后的单炮记录,图 4 为常规处理后得到的叠加剖面。

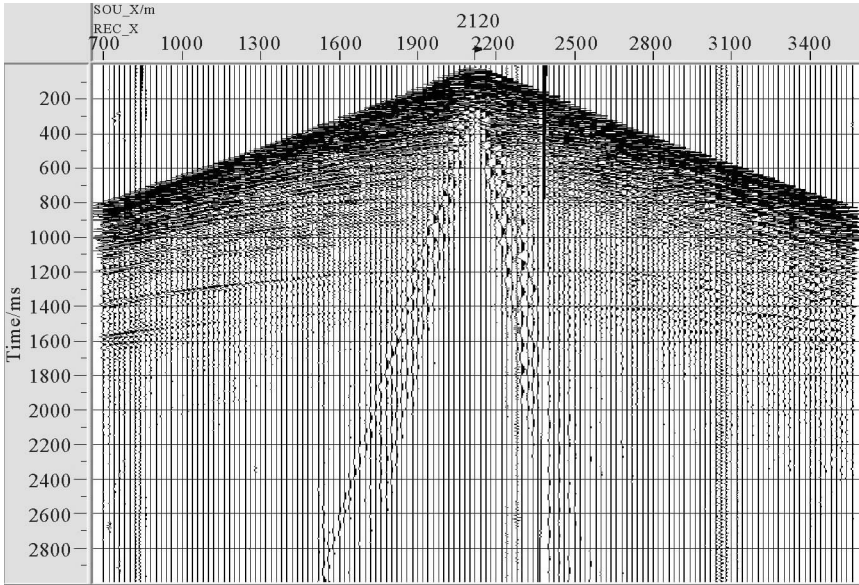


图 2 原始数据单炮记录图

Fig. 2 Original shot

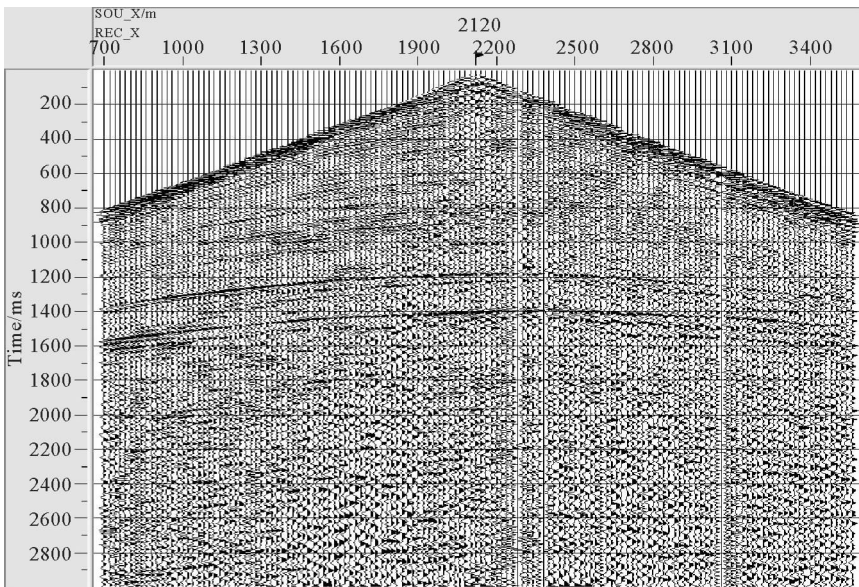


图 3 预处理后的单炮记录图

Fig. 3 Shot after preprocess

采用任意广角方程逆时偏移算法对该段数据进行叠前逆时深度偏移,偏移时采用的参数如下:网格大小为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,方程(1)中取 $n=2, c_1=c, c_2=4c$,空间上采用 12 阶中心差分,时间上采用 2 阶中心差分,边界处镶边 3 层,在炮域内进行地震波场偏移。

图 5 为针对该段数据所建立的深度域层速度模型,本文对研究区数据进行任意广角方程逆时偏移和有限差分法叠前深度偏移都采用了该速度模型。图 6 为各种叠前偏移算法对该研究区数据进行偏移后所得到的叠加剖面对比图,其中,图 6(a)为对该数据采用叠前时间偏移方法所得到的偏移叠加剖面,图 6(b)为采用有限差分叠前深度偏移算法所得到的叠加剖面,图 6(c)为采用任意广角方程逆时偏移算法对各炮集偏移后抽取共成像点道集并叠加所得到的逆时偏移叠加剖面。通过对比图 6(a),6(b),6(c)不难看出,叠前深度偏移比叠前时间偏移更准确地反映地下构造;两种叠前深度偏移算法都能较准确地反映地下构造,且得到的剖面构造形态基本上一致,而任意广角方程叠前逆时深度偏移算法得出的剖面构造形态更清晰,更容易辨别。

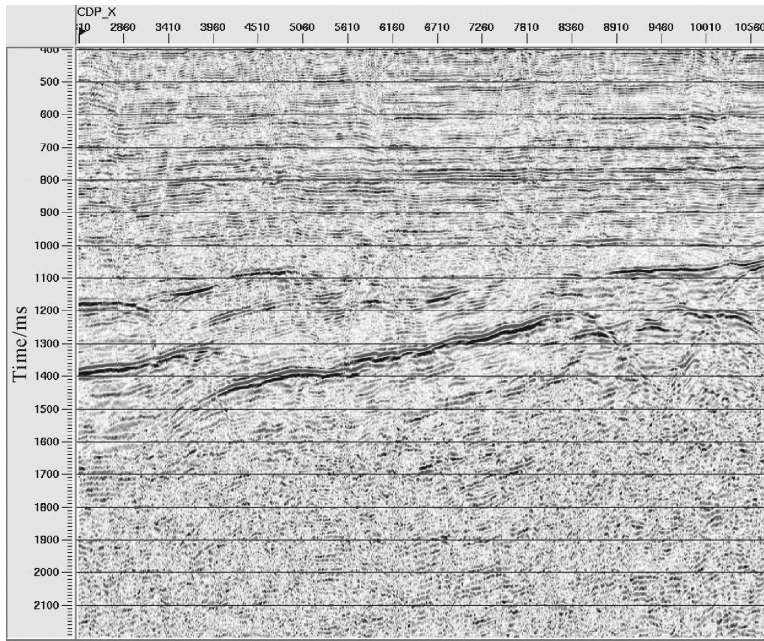


图 4 常规叠加剖面图

Fig. 4 The normal stack section

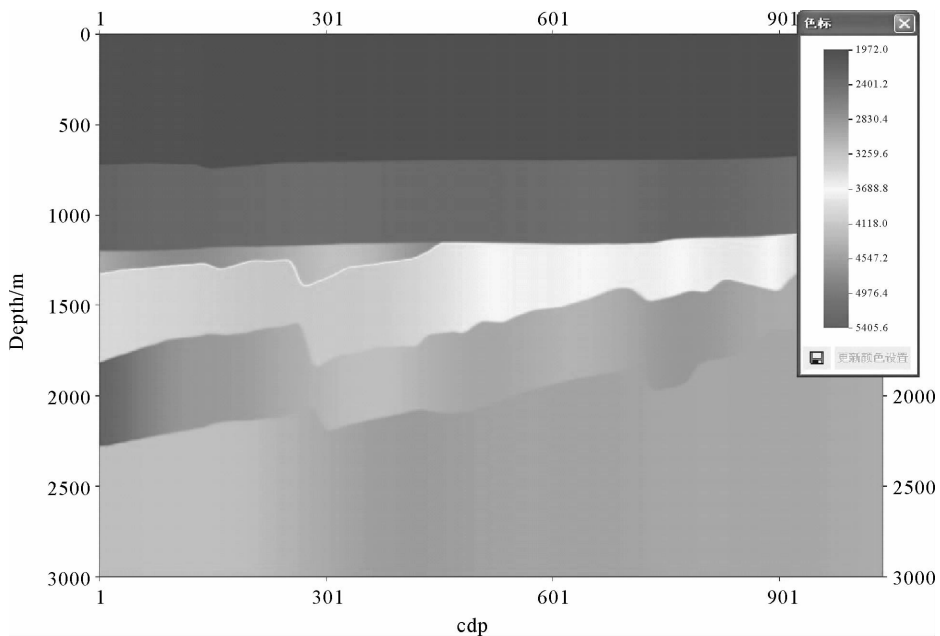
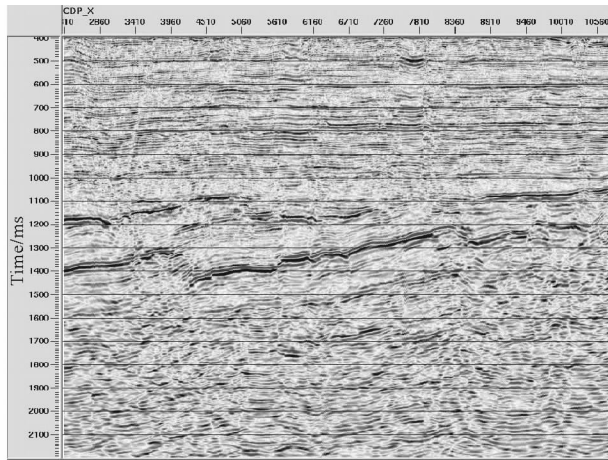
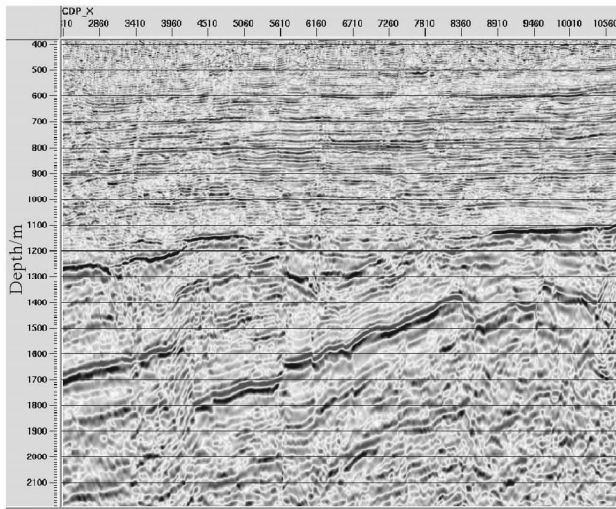


图 5 深度域层速度模型图

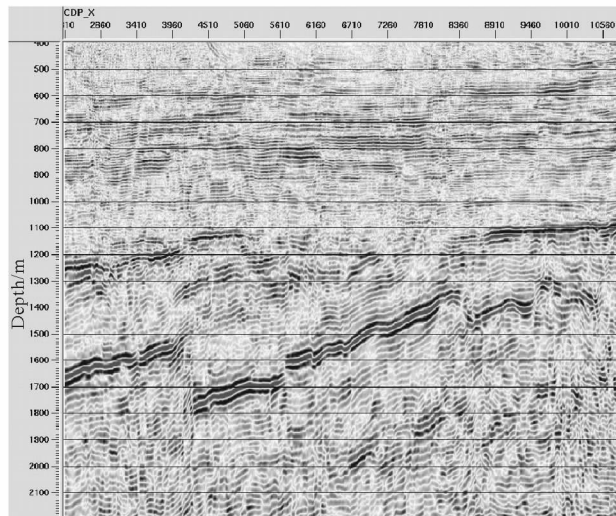
Fig. 5 Depth domain interval velocity model



(a) 叠前时间偏移剖面
(a) Prestack time migration stack result



(b) 有限差分法叠前深度偏移结果
(b) Finite difference method prestack depth migration stack result



(c) 任意广角方程叠前逆时深度偏移结果
(c) Arbitrarily wide-angle wave equation reverse-time migration stack result

图 6 各种偏移算法所得到叠加剖面结果对比图

Fig. 6 Stack result of different migration method

5 结论

1)在归一化互相关成像条件中,炮点正向延拓波场使用单程波方程和双程波方程的偏移成像效果不同,模型测试结果表明,波场延拓过程中使用单程波方程能够取得更好的成像效果。

2)对该煤田研究区数据的偏移处理结果对比表明,任意广角方程逆时偏移相对于叠前时间偏移和其他叠前深度偏移方法能够更为精确地成像。

参考文献:

- [1]Guitton A, Kaelin B, Biondi B. Least-squares attenuation of reverse-time-migration artifacts[J]. *Geophysics*, 2007, 72(1): 19-23.
- [2]Fletcher R P, Fowler P J, Kitchenside P, et al. Suppressing unwanted internal reflections in prestack reverse-time migration [J]. *Geophysics*, 2006, 71(6): 79-82.
- [3]Kwangjin Y, Kurt J. Reverse-time migration using the Poynting vector[J]. *Exploration Geophysics*, 2006, 59(1): 102-107.
- [4]Murthy N, Guddati A, Homayoun Heidari. Migration with arbitrarily wide-angle wave equations[J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): 61-70.
- [5]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 Bingshou, Zhang Huixing, Zhang Jing. Prestack reverse-time depth migration of arbitrarily wide-angle wave equations [J]. *Earthquake Science*, 2008, 30(5): 491-499.
- [6]何兵寿,张会星,张建军.任意广角声波方程逆时偏移的吸收边界条件[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(1): 106-109.
He Bingshou, Zhang Huixing, Zhang Jianjun. Absorbing boundary conditions of arbitrarily wide-angle acoustic equations reverse-time migration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 106-109.
- [7]Chattopadhyay S, Memechan G A. Imaging conditions for prestack reverse-time migration[J]. *Geophysics*, 2008, 72(3): 81-89.
- [8]何兵寿,张会星,范国苗.双程声波方程逆时深度偏移[J]. *物探化探计算技术*, 2010, 32(2): 113-119.
He Bingshou, Zhang Huixing, Fan Guomiao. Reverse-time depth migration of two way acoustic wave equations [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 32(2): 113-119.
- [9]Claerbout J F. Toward a unified theory of reflector mapping[J]. *Geophysics*, 1971, 36(3): 467-481.
- [10]Kaelin B, Guitton A. Imaging condition for reverse time migration[J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2007, 26: 2594-2598.

(责任编辑:高丽华)