

Least square reverse time migration in high resolution imaging of near surface

Huang, Jianping; Cao, X.; Li, Z.; Sun, Y.; Li, C.; Gao, G.

Geophysics Department, Schools of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

Abstract

Near surface high resolution imaging in seismic data processing is attracting great attention. Reverse time migration (RTM) from two way wave equation is considered a good way to image the steep structure. However low frequency noise generated during the RTM imaging process is relatively high, which affects high resolution imaging of near surface. To challenge this problem, we propose in this paper a least square reverse time migration (LSRTM) method. Test results on a complex near surface velocity model indicate that LSRTM is much better than RTM for structure high resolution imaging and energy preservation.

Author keywords

Least square reverse time migration Low frequency noise Near surface Reverse time migration Steep structure

Indexed keywords

Engineering
controlled terms: Data processing Image reconstruction Least squares approximations Spurious signal noise

Complex near
surfaces

High - resolution
imaging

Imaging process

Least Square

Low-Frequency Noise

Near surfaces

Reverse time
migrations

Seismic data
processing

Engineering main
heading: Seismic prospecting

ISSN: 10007210
CODEN: SDWKE
Source Type: Journal

Document Type: Article
Publisher: Science Press

最小二乘逆时偏移在近地表高精度成像中的应用

黄建平* 曹晓莉 李振春

孙隽松 李 闯 高国超

(中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院地球物理系, 山东青岛 2 6

6 5 5 5)

黄建平, 曹晓莉, 李振春, 孙隽松, 李闯, 高国超. 最小二乘逆时偏移在近地表高精度成像中的应用. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 107-112.

摘要 近地表高精度成像方法一直是地震数字处理方法研究的热点。逆时偏移(RTM)成像方法基于双程波动方程,被认为是解决复杂构造、尤其是高陡构造成像的较好方法,然而逆时偏移方法在浅部成像过程中存在较强的低频噪声,在一定程度上影响对近地表构造的高精度成像。本文在实现最小二乘逆时偏移(LSRTM)算法的基础上,通过 RTM 及 LSRTM 算法的计算对比指出,对于近地表复杂构造成像,LSRTM 相对于 RTM 算法在主要构造恢复及能量保幅性方面具有一定优势。

关键词 近地表 逆时偏移 高陡构造 低频噪声 最小二乘逆时偏移

中图分类号: P631 **文献标识码**: A

1 引言

中国西部地区地震勘探面对的地震地质条件的复杂程度堪称世界性难题,其复杂起伏地表和风化带对地震数据处理结果的影响非常大,主要表现为复杂地表地形所产生的大量地表散射波对地震记录的严重污染及畸变无法通过简单静校正方法消除,进而导致山地地震勘探中严重的低信噪比问题^[1]。为此,有两类方法可在一定程度上解决这一问题,一类是波动方程基准面校正;另一类是从起伏地表直接进行偏移。

基于射线理论的成像方法(如 Kirchhoff 偏移、高斯束偏移)可以直接从起伏地表进行波场的偏移成像,且无需规则采集的地震数据,具有对复杂地表条件的适用性。Wiggins^[2]首先提出了适用于非水平地表地震数据的 Kirchhoff 积分延拓和偏移公式。Gray 等^[3]证明直接在起伏地表进行 Kirchhoff

偏移的成像效果要优于首先进行基准面校正,然后进行偏移的成像效果。Jager 等^[4]提出了起伏地表下的真振幅 Kirchhoff 偏移方法。Gray^[5]提出了一种适用于复杂地表条件下的高斯束偏移方法。然而,当地表高程及速度变化较大时,因静校正不准对波场造成的畸变会对后续偏移成像尤其是近地表的成像造成不利影响。随后,人们提出了一系列基于单程波方程的起伏地表成像方法,并取得了一定的应用效果^[6~12]。

与其他方法相比,逆时偏移(RTM)基于精确的波动方程而不是对其近似,用时间外推来代替深度外推。因此它具有良好的精度,不受地下构造倾角和介质横向速度变化的限制,甚至对回转波也能正确成像^[13~17]。刘红伟等^[15]针对有限差分方法处理起伏地表自由边界条件的复杂性,采用了一种简化的自由边界条件,避免了大量的逻辑判断。但是,RTM 方法在成像时,只要满足成像时间相等的点都会产生成像噪声,在浅部尤其明显^[18~20],虽然有

* 山东省青岛市经济开发区长江西路 66 号地球科学与技术学院,266555。Email:jphuanchina@gmail.com

本文于 2013 年 2 月 4 日收到,最终修改稿于同年 12 月 3 日收到。

本研究受国家“973”项目(2011CB202402)、国家自然科学基金项目(41104069,41274124)和山东省自然科学基金项目(ZR2011DQ016)联合资助。

人应用拉普拉斯滤波或者其改进方法能够一定程度上压制 RTM 成像产生的低频噪声^[21~24],但是成像结果的保幅性及地下振幅的均衡性得不到保证。这一弱点使得常规 RTM 方法很难实现近地表高精度保幅成像^[25,26]。

为此,为了进行近地表的高精度保幅成像,本文在 RTM 成像算法的基础上,引入了反演思想^[27],实现了最小二乘逆时偏移方法,将方法用于模型成像试算,并与常规 RTM 方法成像结果进行对比,验证方法在近地表高精度成像过程中的优势。

2 方法原理

偏移结果可由波场值对模型参数(本文中为波阻抗值)的偏导数与时间域观测值的零延迟互相关得到

$$\mathbf{m} = \sum_{i=1}^N \int \left[\frac{\partial \mathbf{u}_s(t)}{\partial \mathbf{m}} \right]^T \mathbf{d}(t) dt \quad (1)$$

式中: \mathbf{m} 为偏移结果; $\frac{\partial \mathbf{u}_s(t)}{\partial \mathbf{m}}$ 为波场的偏导数; \mathbf{d} 为观测数据向量; N 表示炮数。频率域偏移公式表示为

$$\mathbf{m} = \sum_{i=1}^N \int \text{Re} \left\{ \left[\frac{\partial \mathbf{u}_s(\omega)}{\partial \mathbf{m}} \right]^T \mathbf{d}^*(\omega) \right\} d\omega \quad (2)$$

其中: ω 为圆频率; $*$ 表示复共轭; Re 表示复数值的实数部分。

常规 RTM 方法通常分为三步:震源波场的正向延拓;记录波场的反向传播;再将二者相关成像。RTM 的正向延拓是通过解双程波动方程求得。以点震源为例,正向波场可以表示为

$$\mathbf{u}_s(\mathbf{x}, \omega) = G(\mathbf{x} | \mathbf{x}_s; \omega) S(\omega) \quad (3)$$

其中: \mathbf{u}_s 为正向波场; G 为格林函数; S 为震源谱; \mathbf{x}_s 为震源位置; \mathbf{x} 为位置坐标。接收数据波场可以用正演算子的共轭 G^+ 表示为

$$\mathbf{u}_r(\mathbf{x}, \omega) = \int G^+(\mathbf{x} | \mathbf{x}_r; \omega) \mathbf{R}(\mathbf{x}_r, \omega) d\mathbf{x}_r \quad (4)$$

将式(3)、式(4)得到的波场值进行互相关即得到成像结果

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}) = \int \mathbf{u}_s(\mathbf{x}, \omega) \mathbf{u}_r^+(\mathbf{x}, \omega) d\omega \quad (5)$$

将式(3)、式(4)带入式(5)得到 RTM 的成像结果

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}) = \iint [G(\mathbf{x} | \mathbf{x}_s; \omega) S(\omega)] \times$$

$$[G^+(\mathbf{x} | \mathbf{x}_r; \omega) \mathbf{R}(\mathbf{x}_r, \omega)]^+ d\omega d\mathbf{x}_r \quad (6)$$

式(6)的实数部分为

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}) = \iint [G(\mathbf{x} | \mathbf{x}_s; \omega) \sqrt{S(\omega)}]^+ \times [G(\mathbf{x} | \mathbf{x}_r; \omega) \sqrt{S(\omega)}]^+ \mathbf{R}(\mathbf{x}_r, \omega) d\omega d\mathbf{x}_r \quad (7)$$

式(7)中偏移算子是正演算子的共轭,而不是其逆,因此得到的成像值只是真实结果的一个近似。

矩阵形式表示的地震正传播的过程为

$$\mathbf{L}\mathbf{m} = \mathbf{d} \quad (8)$$

其中 \mathbf{L} 为不依赖于模型的正传播算子矩阵。为了得到与记录数据最佳匹配的偏移结果,引入最小二乘思想,定义如下误差函数

$$f(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{L}\mathbf{m} - \mathbf{d}\|^2 + \lambda \|\mathbf{m}\|^2 \quad (9)$$

其中等式右边第二项为正则化约束项, λ 为阻尼系数。最小二乘逆时偏移(LSRTM)就是通过寻找一个速度模型使得模拟数据与观测数据的差最小。式(9)可以通过梯度导引类的方法求解。式(9)的频率域表达式(略去约束项)为

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \int [\mathbf{u}_s(\omega) - \mathbf{d}(\omega)]^T [\mathbf{u}_s(\omega) - \mathbf{d}(\omega)]^* d\omega \quad (10)$$

将目标函数对模型参数求偏导得到梯度值

$$\mathbf{g}^{(k)} = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{m}^{(k)}} = \sum_{i=1}^N \int \text{Re} \left\{ \left[\frac{\partial \mathbf{u}_s(\omega)}{\partial \mathbf{m}^{(k)}} \right]^T \times [\mathbf{u}_s(\omega) - \mathbf{d}_s(\omega)]^* \right\} d\omega \quad (11)$$

共轭梯度法是解大型非线性最优化最有效的算法之一,因此本文采用共轭梯度法进行 LSRTM 偏移迭代。其思想是利用前次迭代的梯度方向对当次迭代的梯度方向进行修正,具体流程如下:

(1) 给定初始解 $\mathbf{m}^{(0)}$ 、模型误差阈值 δ 、当前迭代次数 $k=1$;

(2) 计算梯度方向

$$\mathbf{g}^{(k)} = \mathbf{L}^T [\mathbf{L}(\mathbf{m}^{(k)} - \mathbf{d})] + \lambda \mathbf{m}^{(k)};$$

(3) 求取最优步长

$$\alpha = \frac{[\mathbf{g}^{(k)}]^T \mathbf{g}^{(k)}}{(\mathbf{L}\mathbf{g}^{(k)})^T \mathbf{L}\mathbf{g}^{(k)} + \lambda \|\mathbf{g}^{(k)}\|^2};$$

(4) 更新速度模型 $\mathbf{m}^{(k+1)} = \mathbf{m}^{(k)} - \alpha \mathbf{g}^{(k)}$ 。若满足模型误差阈值则终止运算,否则令 $k=k+1$,循环流程(2)、(3)、(4),直到满足模型误差阈值,输出当前步的偏移成像结果。

3 模型试算

在实现上述方法的基础上,将本文方法用于加拿大逆掩断层模型的成像试算,模型如图 1 所示。选择此模型是因为该模型中近地表较为复杂,存在较为明显的起伏构造和横向变速,是检验成像方法保幅性的理想模型。在计算过程中,将原始模型数

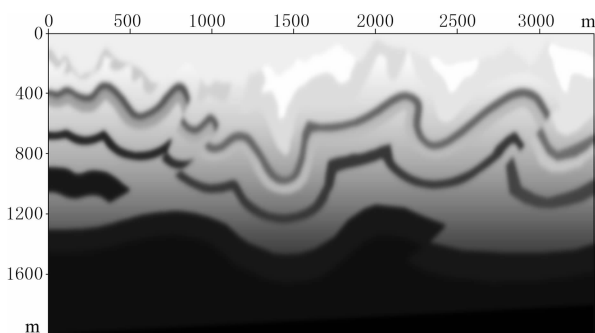


图 1 加拿大逆掩断层模型

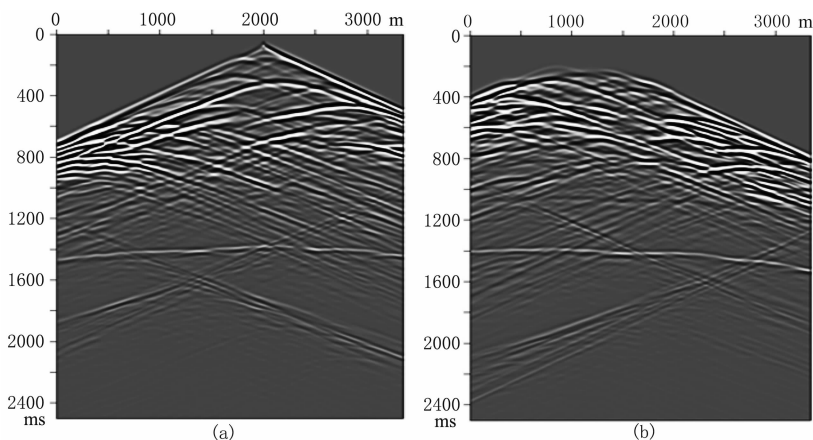


图 2 正演模拟的不同位置单炮记录

(a)2000m; (b)1000m

据进行了抽稀处理,模型网格点数为 334×200 ,计算过程中网格间距为 10m,模型水平方向尺度为 3300m,垂直方向尺度为 2000m。

通过仔细观察可知,常规 RTM 存在比较明显的震源点附近的成像噪声,如图 3b 中红线上方震源点附近的残余能量,且表层构造刻画也不是十分清晰,深部成像结果振幅也较弱。

针对常规 RTM 在近地表高精度成像中存在的不足,将本文实现的 LSRTM 算法用于该模型的成像试处理。所采用的炮记录与上文中进行常规 RTM 算法一致。图 4 给出了不同迭代次数下,LSRTM 成像计算结果,其中图 4a~图 4f 分别为迭代次数为 5,10,15,20,25 和 30 次的迭代成像结果。随着迭代次数的增加,LSRTM 成像结果得到了明显改善,

在正演计算过程中观测系统设计为:炮点初始位置为 200m 处,炮点间隔为 95m,共 32 炮激发,在地表每个网格点接收,总计 334 个接收道。模型的正演过程采用空间 8 阶、时间 2 阶的交错网格有限差分算法^[28],边界条件采用 M-CPML 算法^[29],基于已有的常规 RTM 算法^[13]。炮点位于 1000m 及 2000m,其正演记录如图 2 所示。从图 2 中可知,地表模型较为复杂,炮记录中含有非常复杂的同相轴,边界反射较弱。RTM 成像结果如图 3a 所示,从图中可以看出,基于双程波的 RTM 成像方法在保证地下构造正确成像的基础上,也会形成较强的低频偏移噪声,在一定程度上掩盖了地下的真实构造。采用拉普拉斯滤波的结果如图 3b 所示,可以看出,通过拉普拉斯滤波,低频噪声得到了很好抑制,地下主要构造凸显。

具体表现为浅部震源点附近残余能量得到了很好抑制,表层主要构造得到了精确刻画,偏移噪声得到了很好消除,且成像结果不需要进行拉普拉斯等滤波,提高了成像精度和保幅性。

成像结果与真实结果的残差随迭代次数变化的结果如图 5 所示。可以看出:①成像反演结果较为稳定;②随着迭代次数的增加,残差逐渐减小,成像结果逐渐趋近于真实模型;③随着迭代次数的增加,残差减小的速度逐渐减慢。在今后的模型试算和实际应用中应根据成像精度和计算效率综合选择合适的迭代次数。

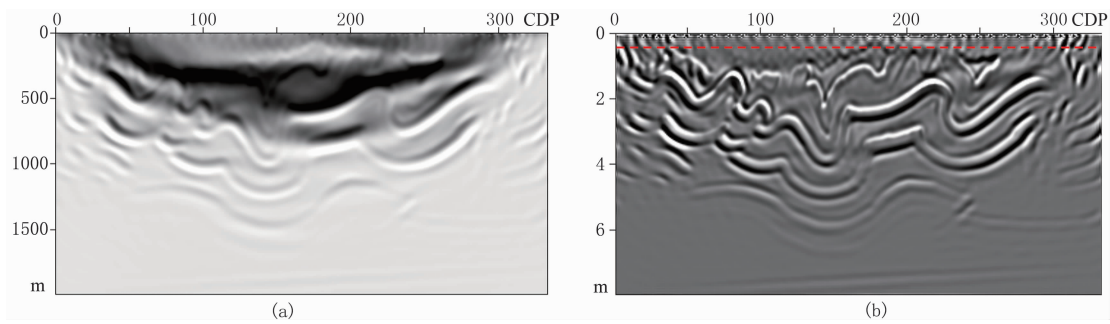


图 3 常规 RTM 偏移成像结果(a)、拉普拉斯滤波后的 RTM 偏移成像结果(b)

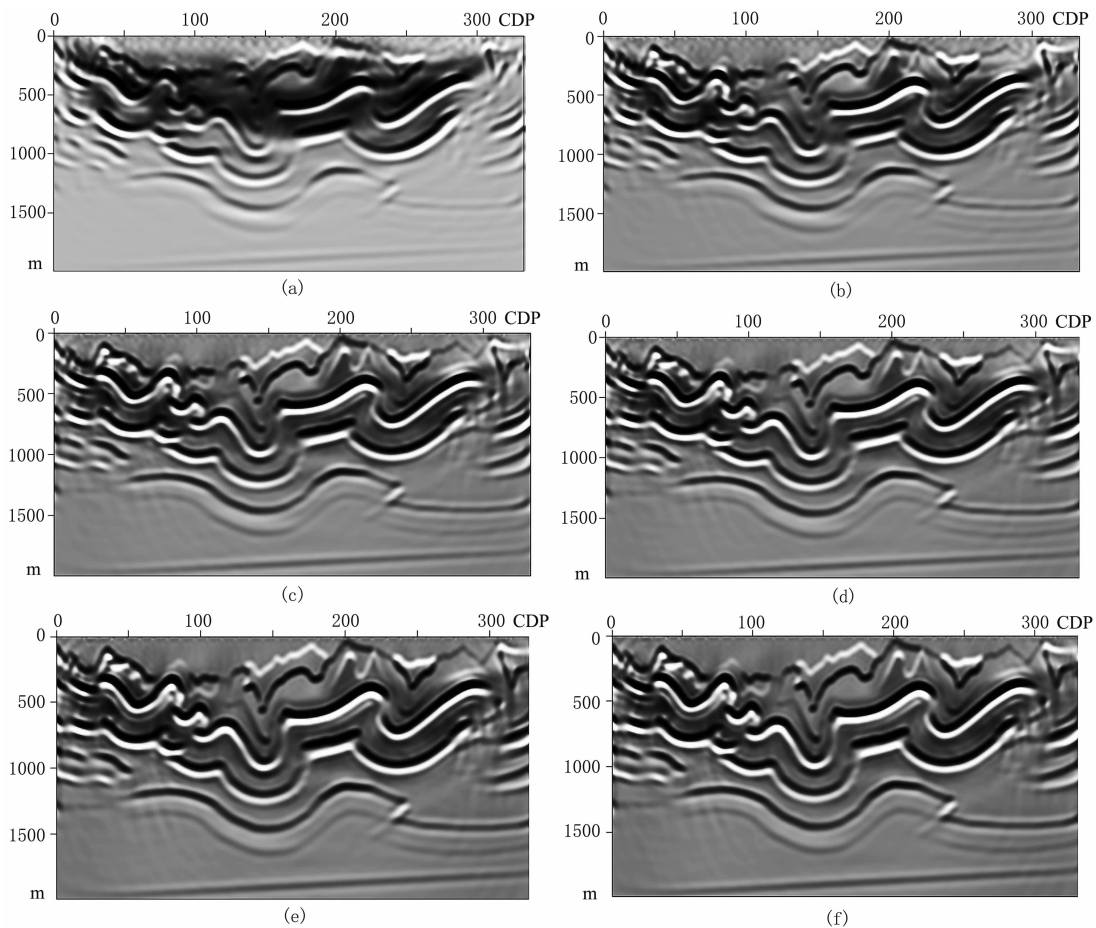


图 4 不同迭代次数下 LSRTM 成像结果

(a)5 次; (b)10 次; (c)15 次; (d)20 次; (e)25 次; (f)30 次

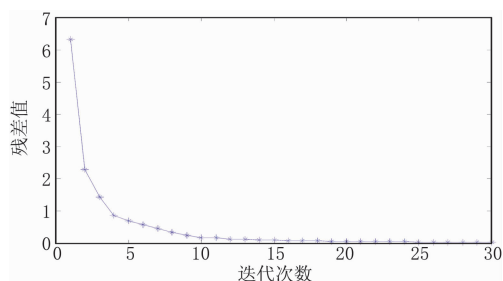




图 5 LSRTM 不同迭代次数误差随迭代次数的分布图

为了更加清晰地比较常规 RTM 与 LSRTM 在近地表成像过程中的差异,将模型和不同方法成像结果中近地表 500m 以上部分进行局部放大,结果如图 6a~图 6c 所示。由图 6 可知,30 次迭代的 LSRTM 成像结果在偏移噪声压制(红色箭头所示)、浅部构造刻画(红色虚线框内所示)、震源效应(红色线上方部分)等方面都要明显优于常规 RTM 成像效果,在近地表高精度成像过程中,LSRTM 具

References

- [1] 李振春等. 地震叠前成像理论与方法. 山东东营: 中国石油大学出版社, 2011.
- [2] Wiggins J W. Kirchhoff integral extrapolation and migration of nonplanar data[J]. Geophysics. 1984, 49(8): 1239-1248 
- [3] Gray S H, Marfurt K J. Migration from topography: Improving the near-surface image. Canadian Journal of Exploration Geophysics, 1995, 31(1-2): 18-24.
- [4] Jager C, Hertweck T, Spiner M. True-amplitude Kirchhoff migration from topography. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1999, 18: 909-913.
- [5] Gray S H. Gaussian beam migration of common-shot records. Geophysics, 2005, 70(4): S17-S77.
- [6] 杨海生. 基于起伏地表的合成炮叠前深度偏移[J]. 石油地球物理勘探. 2007, 42(4): 380-386
Yang Haisheng. Relief surface-based prestack depth migration of synthetic shot records[J]. OGP. 2007, 42(4): 380-386
- [7] 陈爱萍, 邹文, 李亚林等. 起伏地表波动方程叠前深度偏移技术. 石油物探, 2008, 47(5): 470-475.
Chen Aiping, Zou Wen, Li Yalin et al. Wave-equation pre-stack depth migration technology in rolling surface area: application case in complex area of east Sichuan. GPP, 2008, 47(5): 470-475.
- [8] 朱海波, 林柏香, 徐兆涛等. 起伏地表叠前时间偏移处理流程及其应用研究. 石油物探, 2012, 51(5): 486-492.
Zhu Haibo, Lin Boxiang, Xu Zhaotao et al. Prestack time migration scheme from rugged topography and its application. GPP, 2012, 51(5): 486-492.
- [9] 朱海波, 张兵. 起伏地表叠前时间偏移技术研究[J]. 勘探地球物理进展. 2007, 30(5): 368-372
Zhu Haibo, Zhang Bing. Prestack time migration from irregular topography. Progress in Exploration Geophysics, 2007, 30(5): 368-372.
- [10] 田文辉, 李振春, 张辉等. 起伏地表条件下的波场上延法叠前深度偏移. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(5): 19-22, 26.
- [11] Tian Wenhui, Li Zhenchun, Zhang Hui et al. Wave-field upward continuation pre-stack depth migration based on irregular topography. Journal of China University of Petroleum. 2006, 30(5): 19-22, 26.
- [12] 刘国锋, 刘洪, 李博等. 起伏地表直接叠前时间偏移[J]. 石油地球物理勘探. 2010, 45(2): 196-200
Liu Guofeng, Liu Hong, Li Bo et al. Direct prestack time migration on rugged topography[J]. OGP. 2010, 45(2): 196-200
- [13] 程玖兵, 马在田, 陶正喜等. 山前带复杂构造成像方法研究[J]. 石油地球物理勘探. 2006, 41(5): 525-529 
Cheng Jiubing, Ma Zaitian, Tao Zhengxi et al. Imaging study of piedmont complex structures. OGP, 2006, 41(5): 525-529.
- [14] 刘红伟, 李博, 刘洪等. 地震叠前逆时偏移高阶有限差分算法及GPU实现. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1725-1733.
Liu Hongwei, Li Bo, Liu Hong et al. The algorithm of high order finite difference pre-stack reverse time migration and GPU implementation. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(7): 1725-1733.
- [15] 张美根, 王妙月. 各向异性弹性波有限元叠前逆时偏移. 地球物理学报, 2001, 44(5): 711-719.
Zhang Meigen, Wang Miaoyue. Prestack finite element reverse-time migration for anisotropic. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(5): 711-719.
- [16] 刘红伟, 刘洪, 李博等. 起伏地表叠前逆时偏移理论与GPU加速技术. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1883-1892.
Liu Hongwei, Liu Hong, Li Bo et al. Prestack reverse time migration for rugged topography and GPU acceleration technology. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(7): 1883-1892.
- [17] Zhang Yu, Zhang Guanquan et al. Explicit marching method for reverse-time migration: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008, 26: 2300-2304.
- [18] 陈可洋. 基于高阶有限差分的波动方程叠前逆时偏移方法. 石油物探, 2009, 48(5): 475-478.
Chen Keyang. Wave-equation pre-stack reverse-time migration method based on high-order finite-difference approach. GPP, 2009, 48(5): 475-478.
- [19] 徐义. 格子法在起伏地表叠前逆时深度偏移中的应用. 地球物理学进展, 2008, 23, (3): 839-845.
- [20] Xu Yi. Prestack reverse-time migration by the grid method. Progress in Geophysics, 2008, 23(3): 839-845.
- [21] 李博, 刘国峰, 刘洪. 地震叠前时间偏移的一种图形处理器提速实现方法, 地球物理学报, 2009, 52(1): 245-252.
- [22] Li Bo, Liu Guofeng, Liu Hong. A method of using GPU to accelerate seismic pre-stack time migration. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 245-252.

- [23] 黄建平,周学锋等. 滑动扫描记录中压制谐波干扰方法. 中国石油大学学报, 2012, 36(2): 81-85.
Huang Jianping, Zhou Xuefeng et al. Method of harmonic noise elimination in slip sweep data. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(2): 81-85.
- [24] 刘红伟,刘洪,邹振. 地震叠前逆时偏移中的去噪与存储. 地球物理学报, 2010, 53(9): 2171-2180.
Liu Hongwei, Liu Hong, Zou Zhen. The problems of denoise and storage in seismic reverse time migration. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(9): 2171-2180.
- [25] Robin F Fletcher, Paul Fowler et al. Suppressing artifacts in pre-stack reverse time migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005, 24(1): 2049-2051.
- [26] Zhang Yu, Zhang Houzhu. A stable TTI reverse time migration and its implementation. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28: 2794-2798.
- [27] Kim Youngseo, Min D J and Shin C. Frequency-domain reverse-time migration with source estimation. Geophysics, 2011, 76(2): S41-S49.
- [28] Dai Wei, Wang Xin and Schuster G T. Least-squares migration of multisource data with a deblurring filter. Geophysics, 2011, 76(5): R135-R146.
- [29] Schuster, G.T., Wang, X., Huang, Y., et al. Theory of multisource crosstalk reduction by phase-encoded statics. Geophysical Journal International, 2001, 184(3), 1289-1303.
- [30] Huang, Jianping, Li, Z. et al. A study of least-squares migration imaging method for fractured-type carbonate reservoir. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1716-1725.
- [31] 张慧,李振春. 基于双变网格算法的地震波正演模拟. 地球物理学报, 2011, 54(1): 77-86.
Zhang Hui, Li Zhenchun. Seismic wave simulation method based on dual-variable grid. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(1): 77-86.
- [32] 田坤,黄建平等. 一种稳定的非分裂完全匹配层吸收边界条件. 石油地球物理勘探, 2014(待刊).
- [33] Tian Kun, Huang Jianping et al. A stable unsplit perfectly matched layer absorbing boundary condition, OGP, 2014(In processing.).