



# Least-squares split-step migration based on frequency-division encoding

Huang, Jianping; Sun, Yunsong; Li, Zhenchun; Cao, Xiaoli; Li, Chuang

China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

## Abstract

Phase encoding is one of the important strategies to improve mass data processing efficiency and it has been gradually used in seismic prestack migration imaging and full waveform inversion. We propose in the paper a new migration approach based on frequency-division encoding. Based on encoding shot records in the frequency domain before migration, we implement the least-squares split-step migration with frequency-division encoding. We get the following observations by model tests: 1The validity of the method is proved by SEG/EAGE salt model processing; 2Through the comparison of the imaging results with different encoding schemes, we find that frequency-division encoding can not only obtain high-quality migration, but also improve the efficiency of migration of mass data.

**Keywords:** phase encoding prestack migration imaging dynamic encoding frequency-division encoding least-squares

Received 2013-06-03;

# 一种基于分频编码的最小二乘裂步偏移方法

黄建平\* 孙郢松 李振春 曹晓莉 李 闯

(中国石油大学(华东), 山东青岛 266580)

黄建平, 孙郢松, 李振春, 曹晓莉, 李闯. 一种基于分频编码的最小二乘裂步偏移方法. 石油地球物理勘探, 2014, 49(4): 702-707.

**摘要** 相位编码是提高海量数据处理效率的重要策略, 目前已逐步用于地震叠前偏移成像和全波形反演研究。本文在传统静态和动态编码的基础上, 在频率域对炮集采用分频方式进行编码, 实现了一种基于分频编码方式的最小二乘裂步偏移方法。通过模型试算及不同编码方式的对比得到如下几点认识: ①通过对国际标准盐丘模型成像试处理, 验证了方法的正确性; ②通过对不同编码方式的成像效果对比表明, 本文介绍的分频编码方式既能获得较好的偏移效果, 又能在一定程度上提高海量数据偏移成像效率。

**关键词** 相位编码 叠前偏移成像 动态编码 分频编码 最小二乘

**中图分类号**: P631 **文献标识码**: A

## 1 引言

随着勘探开发走向精细化, 三维高密度采集获取的海量数据已经逐步从 100G 量级向 T 量级发展<sup>[1,2]</sup>。海量数据的高效处理方法逐步成为研究人员关注的焦点。出现了大量实用性很强且能有效减少计算量、提高计算效率的波动方程叠前深度偏移方法<sup>[3~7]</sup>。

近年来一种将炮集先组合成超道集后进行偏移的方法代替了传统的分别对单个炮集进行偏移的成像方式, 引起人们的关注<sup>[8,9]</sup>。传统偏移的计算量是每炮单独偏移计算量与总炮数的乘积; 而基于超道集的偏移方法减少了偏移次数, 使得计算量大幅减少。简单应用超道集偏移方法也会存在一些不足: 多个道集同时偏移会产生较为严重的由不同道集相干项引起的串扰噪声耦合效应, 偏移结果中存在偏移假象, 无法获取高品质的偏移结果。为此人们提出了许多解决办法, 其中最为重要的是在成像过程中引入相位编码策略, 并综合运用各种编码方式消除串扰噪声。总的来说, 这些基于编码方式

的叠前深度偏移方法兼具较高的成像效率和成像精度。

20 世纪 90 年代初, Rietveld 等<sup>[10,11]</sup>提出可通过使用控制照明的方法合成面炮记录, 对其进行传统的偏移处理, 在目标区域能够得到较好的成像结果。随后 Morton 等<sup>[12]</sup>提出对超道集进行偏移代替单个炮集偏移可减少计算量, 但是偏移结果只有进行多次迭代优化才能有好的效果, 未能显示出其在计算量上的优势。Romero 等<sup>[13]</sup>引入相位编码的概念, 通过消除交叉项去除串扰噪声, 并在逆时偏移方法中实现, 在系统分析编码函数性质基础上, 提出了几种编码策略。Jing 等<sup>[14]</sup>提出一种极性编码方式, 即可在多炮同时偏移过程中随机对炮集乘上一个极性, 以降低成像串扰噪声。Krebs 等<sup>[15]</sup>将相位编码方法应用于全波形反演中, 得到了与传统方法相同质量的反演结果, 而其计算量较常规全波形反演方式减小约一个数量级。Tang 等<sup>[16]</sup>、Dai 等<sup>[17]</sup>对超道集应用最小二乘偏移方法, 成像效率明显提高。Schuster 等<sup>[18]</sup>、Godwin 等<sup>[19]</sup>、Huang 等<sup>[20]</sup>对相干项进行分析, 指出了超道集偏移中不同编码函数与相干项强度的关系。黄建平等<sup>[21~24]</sup>实现了基于超

\* 山东省青岛市长江西路 66 号中国石油大学工科楼 C 座 639 室, 266580。Email: jphuanchina@gmail.com

本文于 2013 年 6 月 3 日收到, 最终修改稿于 2014 年 5 月 29 日收到。

本研究受国家“973”项目(2014CB239006, 2011CB202402), 国家自然科学基金项目(41104069, 41274124), 山东省自然科学基金项目(ZR2011DQ016)及中央高校基本科研业务经费专项(R1401005A)联合资助。

道集的最小二乘偏移方法,并成功应用于碳酸盐岩储层的高精度成像及近地表保幅成像。

相位编码方法的本质是在产生串扰噪声的相干项中使编码函数两两正交,从而达到消除相干项的目的,但上述方法中的相位编码函数大多只能近似满足这一要求。本文利用分频复用的编码方法(频率编码)对炮集进行编码,能够真正满足编码函数的正交性。将这种编码方法用在偏移中,结合最小二乘迭代优化能在大幅度减少计算量的同时得到较好的成像结果。

## 2 方法原理

基于对 Lippman-Schwinger 方程的 Born 近似,一个震源在  $x_s$  点,检波点在  $x$  点的地震道在频率域可以表示为

$$d(x|x_s) = \int G(x|x')m_0(x')G(x|x_s)W(\omega)dx' \quad (1)$$

式中:  $G(b|a)$  表示从  $a$  到  $b$  的格林函数;  $m_0(x')$  表示反射系数;  $W(\omega)$  表示震源谱。式(1)可以表示为矩阵,即

$$d_s = W_s(\omega)\underline{L}_s m \quad \forall s = 1, \dots, S \quad (2)$$

式(2)通常也被表示为

$$d_s = L_s m \quad \forall s = 1, \dots, S \quad (3)$$

式中:  $L_s = W_s(\omega)\underline{L}_s$ ;  $d_s$  是一个  $G \times 1$  的向量,代表第  $s$  个炮集;  $W_s(\omega)$  是一个标量,表示第  $s$  个震源的谱;  $L_s$  是  $G \times M$  矩阵,代表第  $s$  个炮集的叠前正演算子;  $\underline{L}_s$  是  $L_s$  除以  $W_s(\omega)$  的结果;  $m$  是  $M \times 1$  的向量,表示反射模型。上述公式都是频率域的表达式。对超炮道集进行偏移一般包括以下三个步骤:

(1)对不同的道集进行相位编码。第  $s$  个震源乘以一个相位编码函数  $N_s$ ,得到编码后的震源

$$\tilde{W}_s(\omega) = N_s W_s(\omega) \quad (4)$$

编码后的第  $s$  炮道集可以表示为

$$\tilde{d}_s = N_s d_s \quad (5)$$

(2)将不同的道集求和形成超炮道集

$$\tilde{d} = \sum_{s=1}^S \tilde{d}_s = \sum_{s=1}^S N_s d_s = \tilde{L} m \quad (6)$$

式中:  $\tilde{L} = \sum_{s=1}^S N_s W_s(\omega)\underline{L}_s = \sum_{s=1}^S N_s L_s$ 。

(3)将超炮道集进行偏移。通过对超道集  $\tilde{d}$  运

用伴随算子  $\tilde{L}^*$  得到偏移成像结果  $\tilde{m}$

$$\tilde{m} = \tilde{L}^* \tilde{L} m = \sum_{s=1}^S \sum_{q=1}^S N_s^* N_q W_s^*(\omega) \underline{L}_s^* \underline{L}_q m \quad (7)$$

式中“ $*$ ”表示共轭。将式(7)表示为两项之和,即

$$\tilde{m} = \hat{m} + c \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \hat{m} = \sum_{s=1}^S |N_s|^2 |W_s(\omega)|^2 \underline{L}_s^* \underline{L}_s m \\ = \sum_{s=1}^S |W_s(\omega)|^2 \underline{L}_s^* \underline{L}_s m \\ = \sum_{s=1}^S L_s^* L_s m \\ c = \sum_{s=1}^S \sum_{q \neq s}^S N_s^* N_q W_s^*(\omega) W_q(\omega) \underline{L}_s^* \underline{L}_q m \end{cases}$$

式(8)中第一项  $\hat{m}$  是式(7)中指数  $s$  和  $q$  相同时的结果,表示传统的单炮偏移结果,为正确的成像点;第二项  $c$  是式(7)中指数  $s$  和  $q$  不同时的结果,即串扰噪声,它是由在成像时运用互相关成像条件时,不相关的震源波场与接收波场互相关产生的。

以前的方法一般是通过设计编码函数  $N$ ,使其满足  $N_s^* N_q \approx 0 (s \neq q)$ ,从而消除串扰噪声。本文方法是对震源的频率范围进行划分,将每炮分成一个独有的频率段,使偏移的炮集在频谱中不会重叠,即满足  $W_s^*(\omega) W_q(\omega) = 0$ ,从而消除相干项  $c$ 。

在波场外推过程中,由于要对震源进行分频,因此频率域的偏移方法更容易实现,本文采用裂步法偏移算子,先在频率—波数域采用相移处理,再在频率—空间域采用时移校正,即

$$\begin{cases} P_l(k_x, z, \omega) = P(k_x, z, \omega) e^{-i\Delta z \sqrt{(\omega u_0)^2 - k_x^2}} \\ P(x, z + \Delta z, \omega) = P_l(x, z, \omega) e^{-i\Delta z \Delta u(x)} \end{cases} \quad (9)$$

在迭代优化中使用最速下降法,此时目标函数为

$$f(\hat{m}) = \frac{1}{2} \sum_{\gamma=1}^{M_{\text{ga}}} \|\tilde{L}^{(k,\gamma)} \hat{m} - \tilde{d}^{(k,\gamma)}\|^2 \quad (10)$$

式中:  $k$  为迭代次数;  $\gamma$  为超道集个数;  $M_{\text{ga}}$  表示超炮道集总数。

第  $k+1$  次迭代更新的反射系数模型为

$$\hat{m}^{(k+1)} = \hat{m}^{(k)} + \alpha^{(k)} \mathbf{g}^{(k)}$$

其中:  $\alpha$  为迭代步长;  $\mathbf{g}$  为迭代梯度,分别为

$$\alpha^{(k)} = \frac{\|\mathbf{g}^{(k)}\|^2}{\sum_{\gamma=1}^{M_{\text{ga}}} \|\tilde{L}^{(k,\gamma)} \mathbf{g}^{(k)}\|^2} \quad (11)$$

$$\mathbf{g}^{(k)} = - \sum_{\gamma=1}^M \tilde{\mathbf{L}}^{(k,\gamma)*} [\tilde{\mathbf{L}}^{(k,\gamma)} \hat{\mathbf{m}} - \tilde{\mathbf{d}}^{(k,\gamma)}] \quad (12)$$

### 3 理论模型试算

#### 3.1 计算模型参数

在编程方法的基础上,首先对算法的正确性和适应性进行了测试。测试采用国际标准的 SEG/SALT 模型,模型的主要参数为:深度方向 150 个采样点,水平方向 645 个采样点。计算参数为:震源为主频为 30Hz 的雷克子波,频率范围设置为 0~75Hz。观测系统的设计:总炮数为 320 炮,645 道检波器接收,分为 2 个超道集,每个超道集 160 炮。通过速度模型和常密度假设计算得到反射系数模型(图 1),由图可见,模型中反射系数界面非常清晰,盐丘形态显示完整,盐丘下部断层也很清楚。需要强调的是:本文采用的最小二乘裂步法偏移方法中,最小二乘正、反算子只考虑一次反射波的传播,

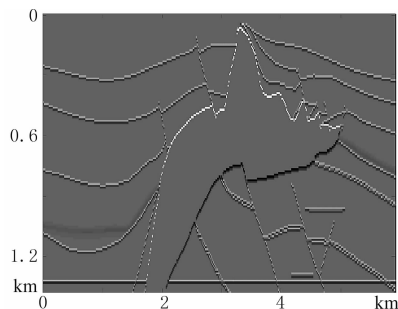


图 1 反射系数模型

对比不同编码方式的偏移结果如图 3 所示。图 3a 是基于常速度模型采用随机相位编码方式迭代 20 次得到的偏移剖面,常速度取值为 2657.3m/s;图 3b 是基于相同的常速度模型采用分频编码结合随机相位编码方式得到的偏移剖面。由图 3a 和图 3b 可以看出,两种编码策略对应的偏移结果都能较好的刻画盐丘模型中的主要构造特征,成像结果中串扰噪声较弱。图 3c 是基于真速度模型采用随机相位编码方式得到的偏移剖面;图 3d 是基于真速度模型采用分频编码结合随机相位编码方式得到的偏移剖面。由图 3c 和图 3d 也可以看出,基于真速度模型,两种编码策略在 20 次迭代后也能得到较好的成像结果。综上所述,通过两种初始模型以及两类不同编码策略的对比,证实了本文分频算法的正确性和实用性。

因此用来偏移的数据也是只含有一次反射波的数据。图 2 是采用传统单炮依次偏移算法得到的成像结果。下文分别基于静态编码(每次迭代对炮集进行一次新的编码)和动态编码(每次迭代的编码情况保持不变)策略,对比传统编码与分频编码方式的成像效果和计算效率。

#### 3.2 静态编码方式对比

分别选用背景速度为常速度模型和真速度模型测试方法对模型的适应性,并使用随机相位编码方式与分频编码和随机相位编码相结合的编码方式分别进行测试,对比分频编码方式在效果及计算效率上的优越性。

常速度背景模型的偏移实现过程为:数据由常速度模型(真速度模型的平均值)和真反射系数模型得到,并用常速度模型对此数据偏移得到反射系数;而真速度模型的偏移实现过程为:数据是由真速度模型和真反射系数得到,并用真速度模型对此数据偏移得到反射系数。

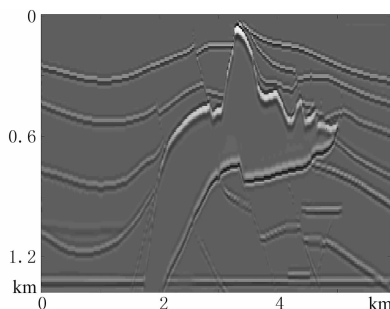


图 2 传统方法得到的偏移结果

图 4 是采用静态编码各种不同方法的模型收敛曲线对比图。从收敛曲线可以看出,分频编码方式的收敛速度更快。

#### 3.3 动态编码方式对比

类似于静态编码策略,本文也测试了分频方法用于动态编码策略的实用性。动态编码过程针对每一次迭代,将参与偏移的超道集中的每炮重新分配频率片段和相位延时,要保证在同一个超道集中各炮的频率分配各不相同。

从动态编码的结果可以得到和静态编码相同的结论,除此之外,还发现相同迭代次数的动态编码效果要比静态编码更优,如迭代 20 次的偏移结果显示静态编码结果还存在一些背景噪声,而动态编码的结果非常清晰(图 3a 与图 5a,图 3b 与图 5b,图 3c 与图 5c,图 3d 与图 5d)。

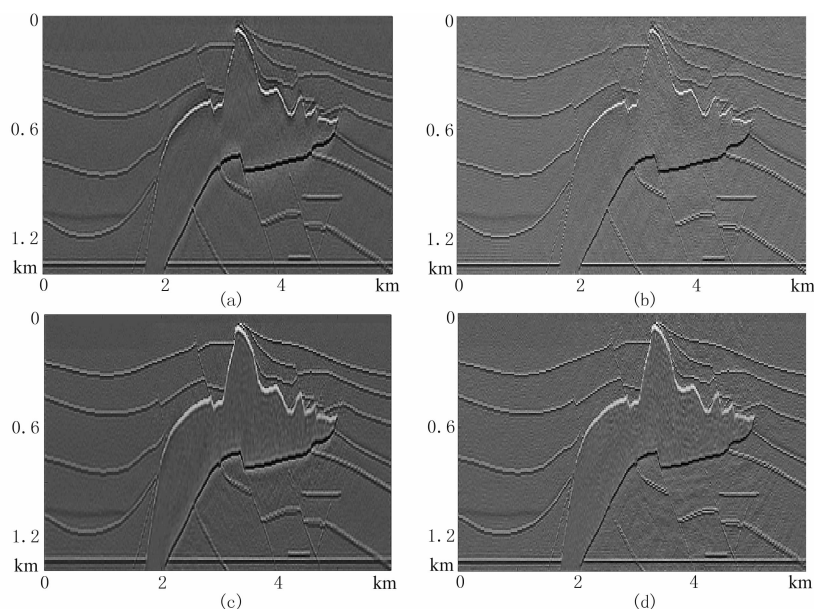


图 3 静态编码方式各方法偏移结果

(a)常速度模型、随机相位编码迭代 20 次；(b)常速度模型、分频+随机相位编码迭代 20 次；  
(c)真速度模型、随机相位编码迭代 20 次；(d)真速度模型、分频+随机相位编码迭代 20 次

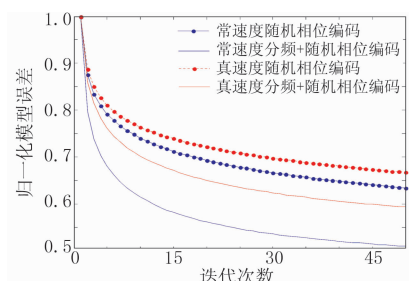


图 4 静态编码各方法收敛曲线对比

应用传统裂步法偏移的成像(图 2)要进行 320 次偏移, 计算时间为 1742s; 基于常速模型、静态编码、随机相位编码迭代 20 次的成像(图 3a、图 3b)耗时 199s; 真速度模型、动态编码、分频加随机相位编码迭代 20 次的成像耗时 392s。由此可见, 基于本文方法的计算效率有较大幅度提高。从收敛曲线可以看出, 分频编码方式的收敛速度更快(图 6)。

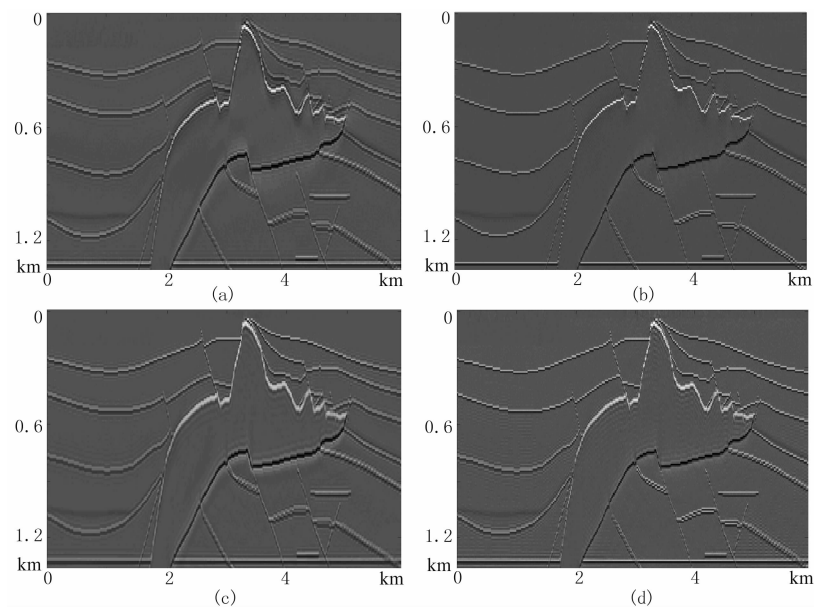


图 5 动态编码方式各方法偏移结果

(a)常速度模型、随机相位编码迭代 20 次；(b)常速度模型、分频+随机相位编码迭代 20 次；  
(c)真速度模型、随机相位编码迭代 20 次；(d)真速度模型、分频+随机相位编码迭代 20 次



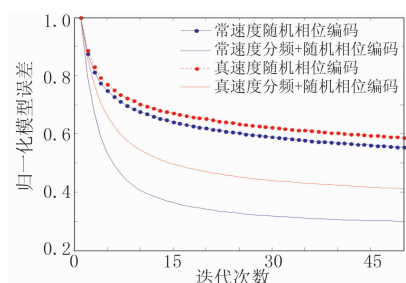


图6 动态编码各方法收敛曲线

## 4 结论

合成炮记录偏移能减少偏移次数,大幅度提高计算效率,通过模型试算及不同编码方式的对比,得到如下几点认识:

(1)分频复用的编码方式能够使合成炮记录中的相干项两两正交,从而较好地压制超道集偏移中的串扰噪声,提高成像质量;

(2)通过编码的超道集偏移在压制串扰噪声的基础上可极大地提高成像效率,将分频的编码方式引入最小二乘偏移方法中,通过不断迭代以优化成像结果,二者的结合在兼顾计算效率的同时可得到高品质的成像剖面;

(3)采用多次、动态的编码方式迭代可以得到更好的收敛效果。且引入分频策略后,成像收敛速度显著提高。

当然也应该看到,本文方法只将分频复用的编码方式与随机相位编码方式相结合,并与单纯的随机相位编码方式进行对比。在今后的研究中,将进一步与不同的编码方式相结合,力求找到一种在计算效率和成像精度上更优的编码方式。

## 参考文献

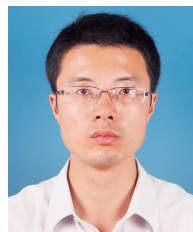
- [1] 赵改善. 我们需要多大和多快的计算机. 勘探地球物理进展, 2004, 27(1): 22-28.  
Zhao Gaishan. How big and fast computer can meet our need? Progress in Exploration Geophysics, 2004, 27(2): 121-124.
- [2] 刘振武等. 中国石油高密度地震技术的实践与未来. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 129-135.  
Liu Zhenwu et al. Practices and expectation of high-density seismic exploration technology in CNPC. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 129-135.
- [3] 刘红伟等. 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 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.
- [4] 叶月明等. 基于稳定成像条件下的保幅偏移. 石油地球物理勘探, 2009, 44(1): 28-32.  
Ye Yueming et al. Amplitude-preserved prestack depth migration based on stable imaging condition. OGP, 2009, 44(1): 28-32.
- [5] 叶月明, 李振春, 全兆岐. 起伏地表条件下的合成平面波偏移及其并行实现. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 622-628.  
Ye Yueming, Li Zhenchun, Tong Zhaoqi et al. Synthetic plane wave migration in relief surface condition and implementation in parallel way. OGP, 2007, 42(6): 622-628.
- [6] 陈生昌, 王汉闯, 余德平. 地震数据广义随机合成的偏移成像. 石油地球物理勘探, 2012, 47(6): 868-872.  
Chen Shengchang, Wang Hanchuang, She Deping. Migration of generalized random synthesis of seismic data. OGP, 2012, 47(6): 868-872.
- [7] 张叔伦, 孙沛勇. 快速面炮记录叠前深度偏移. 石油地球物理勘探, 2002, 37(4): 333-338.  
Zhang Shulun, Sun Peiyong. A fast pre-stack depth migration on areal shot records. OGP, 2002, 37(4): 333-338.
- [8] Shulun Zhang et al. Prestack migration of areal shot records with mix phase encoding. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2003, 22: 1031-1034.
- [9] 陈生昌, 马在田. 广义地震数据合成及其偏移成像. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1144-1149.  
Chen Shengchang, Ma Zaitian. Generalized synthesis of seismic data and its migration. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1144-1149.
- [10] Rietveld W E A and Berkhouit A J. Depth migration combined with controlled illumination. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1992, 11: 931-934.
- [11] Rietveld W E A, Berkhouit A J. Prestack area 1 shot record migration in 2-D and 3-D. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1993, 12: 895-898.
- [12] Morton S A, Ober C C. Faster shot-record depth migrations using phase encoding. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1998, 17: 1131-1134.
- [13] Romero L A et al. Phase encoding of shot records in prestack migration. Geophysics, 2000, 65(2): 426-436.
- [14] Jing et al. Encoding Multiple Shot Gathers In Prestack Migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2000, 19: 786-789.
- [15] Krebs J R et al. Fast full-wavefield seismic inversion using encoded sources. Geophysics, 2009, 74(6): WCC177-WCC188.
- [16] Tang Yaxun and Biondi B. Least-squares migration/inversion of blended data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28: 2859-2863.
- [17] Dai W, Boonyasiriwat C, Schuster G T. 3 D multi-source least-squares reverse time migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010, 29: 3120-3124.

- [18] Schuster G T et al. Theory of multisource crosstalk reduction by phase-encoded statics. *Geophys J Int*, 2011, 184(3):1289-1303.
- [19] Godwin J and Sava P. A comparison of shot-encoding schemes for wave-equation migration. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2011, 30:32-36.
- [20] Huang Yunsong and Schuster G T. Multisource least-squares migration of marine streamer and land data with frequency-division encoding. *Geophysical Prospecting*, 2012, 60(4): 663-680.
- [21] 黄建平等. 复杂介质最小二乘叠前深度偏移成像方法研究. *地球物理学进展*, 2013, 28(6):2977-2983.  
Huang Jianping et al. The least square pre-stack depth migration on complex media. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(6):2977-2983.
- [22] 黄建平等. 基于裂步 DSR 的最小二乘偏移方法研究. *吉林大学学报地球科学版*, 2014, 44(1):369-374.  
Huang Jianping et al. The study of least-square migration method based on split step DSR. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2014, 44(1): 369-374.
- [23] 黄建平, 李振春, 孔雪等. 碳酸盐岩裂缝型储层最小二乘偏移成像方法研究. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1-9.  
Huang Jianping, Li Zhenchun, Kong Xue et al. A study of least square migration imaging method for fractured-type carbonate reservoir. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5):1-9.
- [24] 黄建平等. 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.  
Huang Jianping et al. Least square reverse time migration in high resolution imaging of near surface. *OGP*, 2014, 49(1):107-112.

(本文编辑:金文昱)

## 作者简介



黄建平 博士生导师, 1982 年生; 1999 年进入中国科技大学地球物理专业学习, 2008 年获该校理学博士, 2009 年至今在中国石油大学(华东)地球科学与技术学院物探教研室工作; 2012 年入选中国石油大学骨干教师人才建设工程, 2012 年首届“青年科技奖”获得者; 2014 年获教育部霍英东青年教师奖。国家自然科学基金评审专家, 山东省自然科学基金评审专家。长期从事复杂介质地震波正演模拟、绕射波分离成像、高斯束偏移及最小二乘偏移方法研究。近年来在 EPSL、EAGE、SEG、科学通报、地球物理学报、石油地球物理勘探等国内外著名杂志及会议发表论文 80 余篇。主持国家自然科学基金 2 项、“973”课题 2 项、山东省自然科学基金 1 项, 国家油气重大专项课题 3 项。申请国家发明专利 4 项, 授权软件著作权 18 项。

## 本期广告索引

东方地球物理公司	封 2, 插 1
东方地球物理公司研究院处理中心	插 2~4
环波软件公司	插 5~7
美国 ION 地球物理集团公司	插 8
CGG	插 9
Seisware	插 10
GTC	插 11
中油油气勘探软件国家工程研究中心有限公司	插 12, 13
恒泰艾普石油天然气技术服务股份有限公司	插 14
北京网格天地软件技术有限公司	插 15, 16
中石化石油工程地球物理有限公司胜利分公司	插 17, 18
中国石化胜利油田物探研究院	插 19, 20
大庆钻探工程公司地球物理勘探公司	插 21~23
东方地球物理公司研究院地质研究中心	插 24, 25, 封 4
东方地球物理公司油藏地球物理研究中心	插 26, 27
CNPC 物探重点实验室	插 28, 封 3



## Least-squares split-step migration based on frequency-division encoding

Huang Jianping, Sun Yunsong, Li Zhenchun, Cao Xiaoli, Li Chuang  
China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

## References

- [1] 赵改善. 我们需要多大和多快的计算机[J]. 勘探地球物理进展. 2004, 27(1): 22-28
- [2] Zhao Gaishan. How big and fast computer can meet our need? Progress in Exploration Geophysics, 2004, 27(2): 121-124.
- [3] 刘振武等. 中国石油高密度地震技术的实践与未来. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 129-135.  
Liu Zhenwu et al. Practices and expectation of high-density seismic exploration technology in CNPC[J]. Petroleum Exploration and Development. 2009, 36(2): 129-135
- [4] 刘红伟等. 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 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.
- [5] 叶月明等. 基于稳定成像条件下的保幅偏移[J]. 石油地球物理勘探. 2009, 44(1): 28-32 [浏览](#)  
Ye Yueming et al. Amplitude-preserved prestack depth migration based on stable imaging condition[J]. OGP. 2009, 44(1): 28-32 [浏览](#)
- [6] 叶月明, 李振春, 仝兆岐. 起伏地表条件下的合成平面波偏移及其并行实现[J]. 石油地球物理勘探. 2007, 42(6): 622-628 [浏览](#)  
Ye Yueming, Li Zhenchun, Tong Zhaoqi et al. Synthetic plane wave migration in relief surface condition and implementation in parallel way[J]. OGP. 2007, 42(6): 622-628 [浏览](#)
- [7] 陈生昌, 王汉闻, 余德平. 地震数据广义随机合成的偏移成像[J]. 石油地球物理勘探. 2012, 47(6): 868-872 [浏览](#)  
Chen Shengchang, Wang Hanchuan, She Deping. Migration of generalized random synthesis of seismic data[J]. OGP. 2012, 47(6): 868-872 [浏览](#)
- [8] 张叔伦, 孙沛勇. 快速面炮记录叠前深度偏移. 石油地球物理勘探. 2002, 37(4): 333-338.  
Zhang Shulun, Sun Peiyong. A fast pre-stack depth migration on areal shot records. OGP, 2002, 37(4): 333-338.
- [9] Shulun Zhang et al. Prestack migration of areal shot records with mix phase encoding. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2003, 22: 1031-1034.
- [10] 陈生昌, 马在田. 广义地震数据合成及其偏移成像[J]. 地球物理学报. 2006, 49(4): 1144-1149  
Chen Shengchang, Ma Zaitian. Generalized synthesis of seismic data and its migration. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1144-1149.
- [11] Rietveld W E A and Berkhout A J. Depth migration combined with controlled illumination. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1992, 11: 931-934.
- [12] Rietveld W E A, Berkhout A J. Prestack area1 shot record migration in 2-D and 3-D. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1993, 12: 895-898.
- [13] Morton S A, Ober C C. Faster shot-record depth migrations using phase encoding. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1998, 17: 1131-1134.
- [14] Romero L A et al. Phase encoding of shot records in prestack migration[J]. Geophysics. 2000, 65(2): 426-436
- [15] Jing et al. Encoding Multiple Shot Gathers In Pre-stack Migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2000, 19: 786-789.
- [16] Krebs J R et al. Fast full-wavefield seismic inversion using encoded sources. Geophysics, 2009, 74(6): WCC177-WCC188.
- [17] Tang Yaxun and Biondi B. Least-squares migration/inversion of blended data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28: 2859-2863.
- [18] Dai W, Boonyasiriwat C, Schuster G T. 3D multi-source least-squares reverse time migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010, 29: 3120-3124.
- [19] Schuster, G. T., et al. Theory of multisource crosstalk reduction by phase-encoded statics. Geophys J Int. 2011, 184(3): 1289-1303
- [20] Godwin J and Sava P. A comparison of shot-encoding schemes for wave-equation migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30: 32-36.
- [21] Huang, Y. and Schuster, G T. Multisource least-squares migration of marine streamer and land data with frequency-division encoding. Geophysical Prospecting, 2012, 60(4): 663-680.
- [22] 黄建平. 复杂介质最小二乘叠前深度偏移成像方法研究. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 2977-2983.  
Huang Jianping et al. The least square pre-stack depth migration on complex media. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 2977-2983.
- [23] 黄建平. 基于裂步DSR的最小二乘偏移方法研究. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(1): 369-374.  
Huang Jianping et al. The study of least-square migration method based on split step DSR. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(1): 369-374.
- [24] 黄建平, 李振春, 孔雪等. 碳酸盐岩裂缝型储层最小二乘偏移成像方法研究. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1-9.  
Huang Jianping, Li Zhenchun, Kong Xue et al. A study of least square migration imaging method for fractured-type carbonate reservoir[J]. Chinese Journal of Geophysics. 2013, 56(5): 1-9



[25] 黄建平等.最小二乘逆时偏移在近地表高精度成像中的应用[J].石油地球物理勘探.2014,49(1):107-112 [浏览](#)

Huang Jianping et al. Least square reverse time migration in high resolution imaging of near surface[J].OGP.2014,49(1):107-112 [浏览](#)

Copyright 2010 by OGP