

地震数据广义随机合成的偏移成像

陈生昌*^① 王汉闯^① 余德平^②

(^①浙江大学地球科学系, 浙江杭州 310027; ^②中石化石油物探技术研究院, 江苏南京 210014)

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

摘要 本文在地震数据广义合成方法技术的基础上, 把地震数据广义合成方法中的广义合成函数取为时间随机函数, 得到地震数据的广义随机合成道集和广义随机合成震源, 提出了单程波方程的广义随机合成道集偏移成像方法。根据地震数据中各个共炮点道集中炮点坐标的不同, 把广义合成函数取为与炮点坐标有关的时间随机函数, 使随机合成道集中震源激发延迟时间具有随机性, 避免随机合成道集数据中产生相干波场, 从而保证随机合成道集对地下复杂构造的适应性和偏移成像效果。数值试验和实际资料处理结果表明: 该偏移方法不仅可以取得与常规共炮点道集偏移方法相当的偏移效果, 而且还具有极高的计算效率。

关键词 地震数据 随机合成 偏移成像 高效

中图分类号: P631 **文献标识码**: A

1 引言

应用波动方程共炮点道集数据叠前深度偏移成像可以获得高质量的偏移成像结果, 但是由于边界处理而增加计算量的原因致使它的计算效率很低, 而且其计算效率还与炮道集数有关, 炮道集数越多, 计算效率越低^[1]。针对波动方程共炮点道集偏移成像的上述特点, 人们提出了一系列改进方法, 如共 p -平面波偏移成像方法^[2~5]、控制照明偏移成像方法^[6,7]、相位编码^[8,9]和小波束方法^[10]等。陈生昌等^[11,12]根据地震波场的线性叠加性质提出了对地震数据及其震源进行线性叠加的一般方案——地震数据广义合成方法, 为发展更高效、更准确、更具针对性的波动方程叠前深度偏移成像技术创造了条件。

本文在陈生昌提出的地震数据广义合成及其偏移成像方法的基础上, 结合 Berkhout 等^[13,14]提出的合成震源和合成数据及其偏移成像的概念, 把地震数据广义合成中的广义合成函数取为随机函数, 得到地震数据的广义随机合成道集和广义随机合成震源, 然后应用单程波方程对广义随机合成道集和广义随机合成震源偏移成像。通过对二维 Marm-

ousi 模型数据和实际地震数据试验, 取得了满意的结果。

2 地震数据的广义随机合成

现今的地震数据叠前深度偏移成像中, 最为常用的道集数据有共炮点道集数据、共中心点道集数据、共炮检距道集数据以及共检波点道集数据。共炮点道集数据是一种符合波场传播规律的实际观测道集, 而共中心点道集数据、共炮检距道集数据都是人为分选出来的道集。借助波场互易原理由共炮点道集数据转换或直接观测得到的共检波点道集数据, 也是一种符合波场传播规律的地震道集数据, 因此对于共检波点道集数据的偏移成像可采用与共炮点道集数据偏移成像相类似的技术与方案。在地震数据的采集过程中, 假定地下的地震响应是时不变的(不考虑时延地震数据采集), 也就是对于不同时间激发的震源, 地下系统有相同的响应函数, 因此共炮点道集和共检波点道集的地震波场满足线性叠加原理。

2.1 地震数据的广义合成

令在深度为 z 的观测面上频率域共炮点道集波

* 浙江省杭州市浙江大学地球科学系, 310027. Email: chenshengc@zju.edu.cn

本文于 2011 年 3 月 10 日收到, 最终修改稿于 2012 年 8 月 13 日收到。

本研究受国家自然科学基金项目(41074133)和国家高技术研究发展(863)计划项目(2007AA09Z323)联合资助。

场数据为 $u(s_x, s_y, g_x, g_y, z; \omega)$, 其中 (s_x, s_y) 为炮点坐标, (g_x, g_y) 为检波点坐标, ω 为频率。根据文献[11], 文献[12], 把下述线性积分变换称为地震数据的广义地震记录合成, 即

$$\bar{u}_r(\xi_x, \xi_y, g_x, g_y, z; \omega) = \int k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega) \times u(s_x, s_y, g_x, g_y, z; \omega) ds_x ds_y \quad (1)$$

式中: $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 为地震数据广义合成的核函数, 也称为广义合成函数; $\bar{u}_r(\xi_x, \xi_y, g_x, g_y, z; \omega)$ 为由共炮点地震记录波场得到的广义合成地震记录(也称为地震数据的广义合成道集)。

假定与各个共炮点道集波场对应的震源波场具有相同的频谱特性 $s(\omega)$, 则深度 z 上 (s_x, s_y) 处的震源波场 $u(s_x, s_y, z; \omega)$ 可写为

$$u(s_x, s_y, z; \omega) = s(\omega) \delta(x - s_x, y - s_y)$$

同样根据文献[11], 文献[12], 把下述的线性积分变换称为地震震源的广义震源合成, 即

$$\bar{u}_s(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y, z; \omega) = s(\omega) \int k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega) \times \delta(x - s_x, y - s_y) ds_x ds_y \quad (2)$$

式中: $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 为式(1)中的广义合成函数; $\bar{u}_s(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y, z; \omega)$ 称为地震震源波场的广义合成震源。

由线性积分变换式(1)和式(2)可知, 广义合成道集和广义合成震源分别是多个共炮点道集地震记录和多个地震震源的线性叠加。在式(1)和式(2)中, 广义合成函数 $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 是一个任意函数, 它可根据偏移成像的需要通过计算得到或人为给定。例如在平面波的偏移成像方法中, $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 就取为一个平面波函数, 在 Beam 和 Beamlet 的偏移成像方法中, $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 就取为一个 Gauss 窗口函数。

2.2 地震数据的随机合成

如果我们把式(1)、式(2)中的广义合成函数 $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 取为下述的函数, 即

$$k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega) = \delta(\xi_x - s_x, \xi_y - s_y) e^{-j\omega t_r(s_x, s_y)} \quad (3)$$

式中: $\delta(\xi_x - s_x, \xi_y - s_y)$ 为 δ 函数; $t_r(s_x, s_y)$ 表示炮点位置上的时间随机函数。

把式(3)分别代入式(1)和式(2), 得到地震数据的广义合成道集和广义合成震源, 即

$$\bar{u}_r(g_x, g_y, z; \omega) = \int \delta(\xi_x - s_x, \xi_y - s_y) e^{-j\omega t_r(s_x, s_y)} \times u(s_x, s_y, g_x, g_y, z; \omega) ds_x ds_y \quad (4)$$

$$\bar{u}_s(s_x, s_y, z; \omega) = s(\omega) \int \delta(\xi_x - s_x, \xi_y - s_y) e^{-j\omega t_r(s_x, s_y)} \times \delta(x - s_x, y - s_y) ds_x ds_y \quad (5)$$

式中: $\bar{u}_r(g_x, g_y, z; \omega)$ 为共炮点道集地震数据经广义随机合成得到的广义随机合成道集; $\bar{u}_s(s_x, s_y, z; \omega)$ 为地震震源经广义随机合成得到的广义随机合成震源。把式(4)、式(5)中的积分写成离散形式, 有

$$\bar{u}_r(g_x, g_y, z; \omega) = \sum_{s_{xi}, s_{yj}} u(s_{xi}, s_{yj}, g_x, g_y, z; \omega) e^{-j\omega t_r(s_{xi}, s_{yj})} \quad (6)$$

$$\bar{u}_s(s_x, s_y, z; \omega) = s(\omega) [e^{-j\omega t_r(s_{x1}, s_{y1})}, \dots, e^{-j\omega t_r(s_{xM}, s_{yN})}, \dots, e^{-j\omega t_r(s_{xM}, s_{yN})}] \quad (7)$$

式中: M 和 N 分别表示 x 方向和 y 方向的网格点数。

由式(6)可知, 地震数据的广义随机合成运算仅需要对炮道集地震数据进行随机时移, 然后再进行叠加。由式(7)可知, 地震震源的广义随机合成运算也仅需对震源波场进行随机时移, 然后组合在一起即可。因此, 式(6)和式(7)在计算上是稳定和便捷的。对多个震源的广义随机合成得到的广义随机合成震源是一种多震源的复合源; 对多个共炮点道集地震数据的广义随机合成得到的广义随机合成道集是一种多炮集的复合道集, 因此广义随机合成可以有效地减少道集数目。在具体的地震数据随机合成中, 我们可以选择对所有的炮道集进行随机合成得到一个合成道集, 也可以选择若干个炮道集进行随机合成得到一个合成道集。

在地震数据的广义合成中, 选取何种广义合成函数 $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 非常关键, 它会影响到广义合成道集和广义合成震源的性质。如果 $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 取为 δ 函数, 则得到的广义合成道集和广义合成震源就是不存在相干性的原单炮地震数据和原单源震源波场; 如果 $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 取为平面波函数, 则得到的广义合成道集和广义合成震源为具有最大相干性的平面波道集和平面波源; 如果 $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 取为基于炮点位置的时间随机函数的广义随机合成函数, 则得到的广义随机合成道集和广义随机合成震源是介于上述两种情况之间的波场。为了有效地对地下复杂构造偏移成像及提高计算效率, 可以选择 $k(\xi_x, \xi_y, s_x, s_y; \omega)$ 使广义随机合成操作对合成道集和合成震源引起的波场干涉具有最小相

干性甚至非相干性。合成震源波场的相干性越小,则震源对地下目标照明的空间谱越宽,相应地震数据的偏移成像噪声越小,偏移成像效果越好。

3 偏移成像

根据地震波场的线性叠加原理,由式(6)得到的广义随机合成道集相当于由式(7)得到的广义随机合成震源波场入射到地下到达反射界面产生反射,然后在观测面得到的记录波场。因此,广义随机合成道集地震数据的偏移成像可采用与共炮点地震数据偏移成像相同的方式,即在深度方向用上行波方程反向外推广义合成得到的广义随机合成道集地震数据,同时用下行波方程正向外推广义合成得到的广义随机合成震源波场,并应用时间一致性成像原理提取偏移成像结果。具体的偏移成像过程就是在深度外推中使用文献[15]提出的单程波拟线性 Born 近似波场外推算子,对广义随机合成地震数据进行深度外推和成像。由于广义随机合成可以有效地减少道集数目,因此广义随机合成道集的偏移成像相对于常规的共炮点道集的偏移成像具有计算效率高的优势。

3.1 拟线性 Born 近似波场外推算子

假定 $u(x, y, z_i; \omega)$ 为深度 z_i 上频率域的广义随机合成波场,深度 $(z_i + \Delta z)$ 上的频率域波场为 $u(x, y, z_i + \Delta z; \omega)$;再令 $(z_i, z_i + \Delta z)$ 间的速度场为 $v(x, y, z_i)$,参考速度场为 $v_0(z_i)$,速度扰动为 $\epsilon(x, y, z_i) = v(x, y, z_i) - v_0(z_i)$ 。在由 $u(x, y, z_i; \omega)$ 外推 $u(x, y, z_i + \Delta z; \omega)$ 的过程中,可把 $u(x, y, z_i; \omega)$ 作为入射波场,而 $z_i + \Delta z$ 上的波场 $u(x, y, z_i + \Delta z; \omega)$ 是由参考介质中的波场 $u_0(x, y, z_i + \Delta z; \omega)$ 和速度扰动产生的散射波场 $u_s(x, y, z_i + \Delta z; \omega)$ 组成,即

$$u(x, y, z_i + \Delta z; \omega) = u_0(x, y, z_i + \Delta z; \omega) + u_s(x, y, z_i + \Delta z; \omega) \quad (8)$$

其中 $u_0(x, y, z_i + \Delta z; \omega)$ 可利用参考速度 $v_0(z_i)$ 由下述的相移法得到,即

$$u_0(x, y, z_i + \Delta z; \omega) = F_{k_x, k_y}^{-1} \{ e^{ik_z(z_i)\Delta z} F_{x, y} [u(x, y, z_i; \omega)] \} \quad (9)$$

式中: $F_{x, y}$ 表示 x 和 y 方向上的傅里叶正变换; F_{k_x, k_y}^{-1} 表示 x 和 y 方向上的傅里叶反变换; $k_z(z_i)$ 为垂向波数,有

$$k_z(z_i) = \sqrt{\omega^2/v_0^2(z_i) - k_x^2 - k_y^2}$$

对于式(8)中的散射波场 $u_s(x, y, z_i + \Delta z; \omega)$,有

$$u_s(x, y, z_i + \Delta z; \omega) = u_b(x, y, z_i + \Delta z; \omega) \times u_0(x, y, z_i + \Delta z; \omega) / [u_0(x, y, z_i + \Delta z; \omega) - u_b(x, y, z_i + \Delta z; \omega)] \quad (10)$$

其中

$$u_b(x, y, z_i + \Delta z; \omega) = F_{k_x, k_y}^{-1} \{ \alpha \times e^{ik_z(z_i)\Delta z} \times F_{x, y} \{ [e^{i\omega v_0(z_i)\epsilon(x, y, z_i)\Delta z/2} - 1] u(x, y, z_i; \omega) \} \}$$

式中: $\alpha = (8 - 4p)/(8 - 8p + p^2)$; $p = v_0^2(z_i)(k_x^2 + k_y^2)/\omega^2$ 。

3.2 成像

应用拟线性 Born 近似波场外推算子可得到各个深度层上的广义随机合成道集波场和广义随机合成震源波场。由深度 z_i 上的广义随机合成道集波场 $\bar{u}_r(x, y, z_i; \omega)$ 和广义随机合成震源波场 $\bar{u}_s(x, y, z_i; \omega)$,应用下述的时间一致性互相关成像公式可得到一个广义随机合成道集在深度 z_i 上的偏移成像结果 $I(x, y, z_i)$,即

$$I(x, y, z_i) = \Re \left(\sum_{N_\omega} \bar{u}_r(x, y, z_i; \omega) \bar{u}_s^*(x, y, z_i; \omega) \right) \quad (11)$$

式中: \Re 为取实部; $*$ 代表复共轭运算; N_ω 为频率求和个数。

为了消除广义随机合成道集偏移成像结果中的高频随机噪声(这种噪声实质上是道集成引起的波场干涉而产生的偏移成像噪声,但有研究者认为这种噪声是合成道集偏移时不匹配的震源波场与炮点道集波场间相互作用而产生的所谓交叉相(Cross-talk^[16,17])。为保证偏移成像结果的稳定,也可应用下述带阻尼的稳定成像公式进行成像^[18],即

$$I(x, y, z_i) = \Re \left[\sum_{N_\omega} \frac{\bar{u}_r(x, y, z_i; \omega) \bar{u}_s^*(x, y, z_i; \omega)}{\bar{u}_s(x, y, z_i; \omega) \bar{u}_s^*(x, y, z_i; \omega) + \beta} \right] \quad (12)$$

式中 β 为阻尼系数。

把所有单个广义随机合成道集的偏移成像结果叠加就可得到最后的偏移成像结果,且可以有效地压制道集随机合成引起的波场干涉而产生的高频随机噪声。这种高频随机噪声在广义合成的平面波道集偏移成像结果中也是存在的,但通过对多个角度平面波源偏移成像结果叠加能有效地压制它。因此广义随机合成函数的选择与道集的多次随机合成是获得高质量广义随机合成道集偏移成像结果的重要因素。

4 数值试验

为验证广义随机合成数据偏移成像方法的正确性和实用性,分别进行了理论模型地震数据和实际地震数据的偏移成像试验。

4.1 Marmousi 模型数据试验

Marmousi 模型数据共有 240 炮,每炮 96 个接收道,炮间距为 25m,道间距为 25m,记录长度为 3s,时间采样率为 4ms。图 1 为常规的 240 个共炮点道集偏移成像结果。

根据本文提出的地震数据广义随机合成的偏移成像方法,文中采用 8 个共炮点道集随机合成一个道集,共得到 30 个随机合成道集。图 2 为 30 个随机广义合成道集的偏移结果。比较图 1、图 2 可以看出,除了存在一些高频随机噪声外,随机广义合成道集的偏移结果与常规共炮点道集的偏移结果一致,说明了本文方法的正确性。由于输入的偏移道集数目减少,所以随机广义合成道集偏移的计算效率相对于常规共炮点道集偏移的计算效率有很大的提高。在本试验中计算效率提高了近 8 倍。

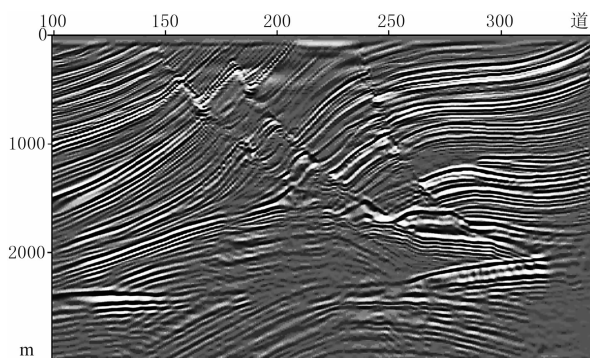


图 1 Marmousi 模型常规偏移结果

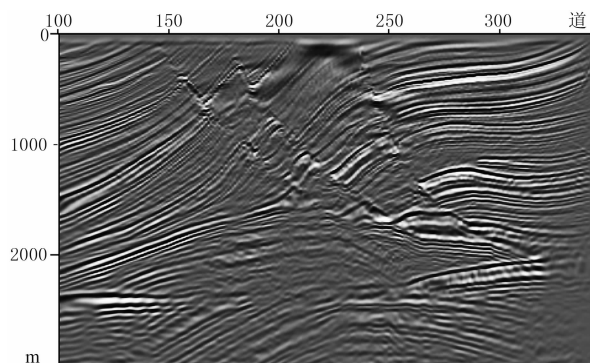


图 2 Marmousi 模型随机广义合成道集偏移结果

4.2 实际二维地震数据试验

为了进一步验证本文方法的实用性,采用的地震数据是我国南方 A 区的一条二维线,共有 440 炮,每炮 120 道,炮间距为 40m,道间距为 40m,记录长度为 5s,时间采样率为 4ms。在试验中,我们把 10 个共炮点道集随机合成一个随机合成道集,共得到 44 个随机合成道集。图 3 为由实际地震数据得到的 44 个随机合成道集的偏移结果。图 4 为 440 个常规共炮点道集的偏移结果。

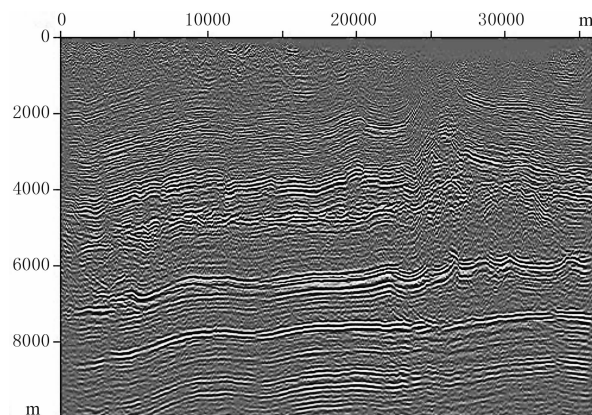


图 3 实际地震数据随机广义合成道集的偏移结果

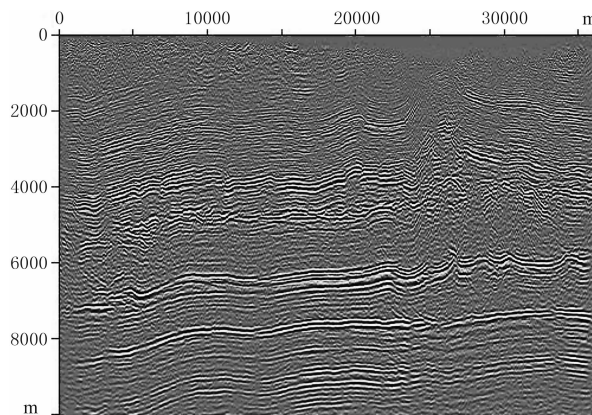


图 4 实际地震数据的常规共炮点道集偏移结果

对比图 3、图 4 可以看出,本文提出的地震数据广义随机合成偏移方法在实际地震数据中也取得了良好的偏移效果,说明了本文方法的实用性。

5 结束语

基于波场满足线性叠加原理的广义地震数据合成是共炮点道集地震数据线性叠加的一般表示,其具体的广义合成函数可根据地震数据采集系统和偏

移成像需求等因素确定。地震数据的广义随机合成的主要优势在于可有效地减少地震数据的道集数目,有利于提高偏移的计算效率。对于偏移结果中的高频随机噪声(即由道集随机合成引起的波场干涉而产生的偏移成像噪声),可以叠加多个不同随机合成道集的偏移成像结果进行压制。本文提出的地震数据广义随机合成偏移也可以利用全波方程的逆时偏移实现。

参 考 文 献

- [1] Etgen J, Gray S H and Zhang Y. An overview of depth imaging in exploration geophysics. *Geophysics*, 2009, 74(6): WCA5~WCA17
- [2] Berkhout A J. Areal shot record technology. *J Seis Expl*, 1992, 1(3): 251~264
- [3] Rietveld W E A, Berkhout A J and Wapenaar C P A. Optimum seismic illumination of hydrocarbon reservoirs. *Geophysics*, 1992, 57(10): 1334~1345
- [4] Zhang G Q, Zhang W S, Hao X J. Prestack depth migration with common-shot and synthesis shot records. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1999, 18: 1469~1472
- [5] 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*, 2001, 16(3): 58~67
Chen Shumin, Liu Hong, Li Youming. The area shot method for land 3D seismic acquisition. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2001, 16(3): 58~67
- [6] Rietveld W E A, Berkhout A J. Prestack depth migration by means of controlled illumination. *Geophysics*, 1994, 59(5): 801~809
- [7] 陈秀梅等. 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 Xiumei et al. Prestack depth migration by surface rotation controlled illumination. *Chinese J Geophys* (in Chinese), 2004, 47(2): 306~311
- [8] Romero L A. Phase encoding of shot records in prestack migration. *Geophysics*, 2000, 65(2): 426~436
- [9] Sun P Y, Zhang S L and Liu F Q. Prestack migration of areal shot records with phase encoding. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2002, 21: 1172~1175
- [10] Wu R S, Chen L. Beamlet migration using Gabor-Daubechies frame propagator. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2001, 20: 74
- [11] 陈生昌. 波动方程叠前深度偏移成像与速度建模方法研究[博士论文]. 上海: 同济大学, 2002
- [12] 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 J Geophys* (in Chinese), 2006, 49(4): 1144~1149
- [13] Berkhout A J. Changing the mindset in seismic acquisition. *The Leading Edge*, 2008, 27(7): 924~938
- [14] Berkhout A J, Verschuur D J, Blacquièrre G. Seismic imaging with incoherent wavefields. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2009, 28: 2894~2898
- [15] 陈生昌, 曹景忠, 马在田. 基于拟线性 Born 近似的叠前深度偏移方法. *地球物理学报*, 2001, 44(5): 692~698
Chen Shengchang, Cao Jingzhong and Ma Zaitian. Prestack depth migration method based on quasi-linear Born approximation. *Chinese J Geophys*, 2001, 44(5): 692~698
- [16] Schuster G T et al. Theory of multisource crosstalk reduction by phase-encoded statics. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2010, 29: 3110~3114
- [17] Dai W, Schuster G T. Least-squares migration of simultaneous sources data with a deblurring filter. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2009, 28: 2990~2994
- [18] Rietveld W E A. *Controlled Illumination in Prestack Seismic Migration* [D] thesis, Delft Univ of Technology, 1995

(本文编辑: 金文昱)