

Chen X M, Wang H Z, Cheng J B, et al. Prestack depth migration by surface rotation controlled illumination. *Chinese J Geophys* (in Chinese), 2004, 47(1): 306 ~ 311

# 地表旋转控制照明叠前深度偏移

陈秀梅<sup>1</sup> 王华忠<sup>1</sup> 程玖兵<sup>1</sup> 陈生昌<sup>2</sup> 马在田<sup>1</sup> 胡中标<sup>3</sup>

1 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

2 University of California, Santa Cruz, USA

3 胜利油田物探研究院, 东营 257022

**摘要** 基于炮集数据的常规叠前深度偏移波场外推的计算量非常大, 控制照明叠前深度偏移是基于快速的组合炮技术, 通过在目的层上控制震源波场, 高效实现对地质目标的高质量成像。组合炮所需的合成算子, 由在目的层定义的震源波场反向外推到地表建立。本文提出一种更快速的地表旋转控制照明方法, 直接在地表对震源波场进行面向目标的照明控制, 实现目标区域高质量成像。该方法只需对某一核合成算子进行简单的几何旋转建立合成算子函数, 避免了复杂的波场外推。这种新的控制照明方法与快速的一般组合炮偏移效率相同, 但对复杂目标区域的成像能力显著增强。应用本文方法对 Marmousi 模型进行计算, 得到深层复杂构造非常理想的成像结果。

**关键词** 控制照明 组合炮 合成算子 震源波场

**文章编号** 0001 - 5733(2004)01 - 306 - 06 **中图分类号** P631 **收稿日期** 2002 - 11 - 07, 2003 - 08 - 15 收修定稿

## PRESTACK DEPTH MIGRATION BY SURFACE ROTATION CONTROLLED ILLUMINATION

CHEN Xiu-Mei<sup>1</sup> WANG Hua-Zhong<sup>1</sup> CHENG Jiu-Bing<sup>1</sup>

CHEN Sheng-Chang<sup>2</sup> MA Zai-Tian<sup>1</sup> HU Zhong-Biao<sup>3</sup>

1 School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

2 University of California, Santa Cruz, USA

3 Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257022, China

**Abstract** The conventional shot-record prestack depth migration costs a very expensive amount of computations for wavefield extrapolations. Based on the fast areal shot technology, the controlled illumination prestack depth migration aims to efficiently achieve the high-quality image of the target structure by controlling the source wavefield at the target. The synthesis operators needed for areal short records are obtained by inversely extrapolating the predefined source wavefield at the target upward to the surface. We propose the surface rotation controlled illumination, as a more efficient scheme of controlled illumination. This scheme performs target-oriented illumination control over source wavefield directly at the surface and can produce high-quality image of the target zones. A surface synthesis operator function is simply constructed by geometrically rotating a certain kernel synthesis operator, instead of complicated wave extrapolations. This new controlled illumination method is as efficient as the general areal shot record technology, moreover, it is more powerful to image the complicated target zone. The application of the proposed technique to the Marmousi model gives a very ideal image of the deep complex structure.

**Key words** Areal shot record, Controlled illumination, Synthesis operator, Source wavefield.

**基金项目** 国家重点基础研究发展规划项目(G19990328), 国家自然科学基金委和大庆石油管理局的联合资助(49894190 - 24)。

**作者简介** 陈秀梅, 女, 1966 年生, 1988 年毕业于吉林大学数学系, 1998 年于同济大学海洋与地球科学学院获应用地球物理硕士学位, 该校博士, 现在胜利油田物探研究院工作。主要从事物探方面的研究。E-mail: xiumeich@sina.com

## 1 引言

波动方程叠前深度偏移是复杂地质构造成像最有效的技术,然而常规炮道集偏移所需要的波场外推需要巨大的计算量,尤其是三维。1992年,Berkhout<sup>[1]</sup>提出了一种快速有效的组合炮技术,它通过某种合成算子将所有炮道集合成一个组合炮记录,再对组合炮记录应用常规的深度偏移算法进行偏移,而不需要对每个单炮进行偏移。这种合成过程大大减少了用于偏移的叠前数据量,从而极大地提高了计算效率。近年来,Zhang等<sup>[2,3]</sup>将组合炮技术分别应用于有限差分法和 Fourier 有限差分叠前深度偏移方法,提高了波动方程叠前深度偏移的计算效率,都获得了很好的成像结果。

提高复杂地质构造特别是深层构造的成像精度,是叠前深度偏移的目标。基于组合炮偏移原理,Rietveld等提出了最佳照明技术<sup>[4]</sup>,并发展成面向地质目标的控制照明技术<sup>[5]</sup>,目的是通过对目的层的震源波场进行照明控制获得目标区域的高质量成像。Zhang等<sup>[2]</sup>基于控制照明技术对 Marmousi 模型进行有限差分叠前深度偏移,改善了深层的成像。目的层震源波场的照明控制可通过构造合适的合成算子来实现。实际上,控制照明是组合炮技术的特殊情况,首先在一给定的目的层定义震源波场,然后反向外推到地表,生成所需要的合成算子;再利用地表合成算子对震源和炮道集合成组合震源与组合炮记录,最后从地表开始向下对组合波场进行外推成像。可在目的层定义不同的震源波场,重复同样的过程,最后对所有偏移结果进行叠加得到最终的成像。

以往的控制照明方法,由于震源波场仅仅在目的层进行控制,因此所有地表合成算子都是经过波场外推来计算的。Chen等<sup>[6]</sup>改进了以往的控制照明方法,发展了一种高效的精确目标照明方法,即面向目标的地表控制照明,提出了建立面向目标的地表合成算子函数的一般化公式。地表旋转控制照明是采用简单快速的几何旋转取代复杂费时的波场外推来构建地表合成算子,直接在地表实现对地质目标的照明控制。该方法只需在目的层选定(任意合适的)一种震源波场照明方式,再经反向波场外推到地表,得到一合成算子,该合成算子作为核算子。然后,通过对核算子进行简单的旋转,便可快速建立地表合成算子函数。显然,对于目的层的不同的震源照明,省却了大量的外推计算,这意味着,一般意义

(非面向目标)的组合炮方法几乎不需增加计算量便能实现目标控制照明。即组合炮技术几乎不增加计算量也能获得对目的构造的高质量成像。本文重点阐述地表旋转控制照明的方法原理,并与一般组合炮偏移方法进行比较。结合典型的 Fourier 有限差分偏移(FFD)算法<sup>[7]</sup>,对复杂的 Marmousi 模型数据进行地表旋转控制照明深度偏移数值验算,并与通常的炮道集及组合炮的 FFD 偏移结果进行比较。

## 2 组合炮偏移

### 2.1 组合炮记录的合成

野外采集的地震资料可看作点源观测数据。Berkhout<sup>[1]</sup>提出的组合炮理论是通过在地表定义合成算子,将实际的激发点源合成一种新的线源,称组合震源,并同时将对观测炮数据合成组合炮记录。这样合成的组合震源与组合炮记录相当于一次实际震源激发与接收排列的物理试验。

$z$  表示深度, $z_i$  表示第  $i$  层的深度。记位于地表  $z_0$  的点源子波矩阵为  $S(z_0)$ ,在地表  $z_0$  定义某种合成算子  $L(z_0)$ ,对震源进行如下合成得到组合震源

$$S_{\text{syn}}(z_0) = S(z_0) L(z_0). \quad (1)$$

根据 Berkhout<sup>[8]</sup>关于地震波传播的“WRW”模型,震源  $S(z_0)$  激发的炮记录  $P(z_0)$  满足方程

$$P(z_0) = X(z_0, z_0) S(z_0), \quad (2)$$

此处

$$X(z_0, z_0) = \prod_m W^-(z_0, z_m) R(z_m) W^+(z_m, z_0),$$

表示总的波场传播效应矩阵, $W^-$ 和  $W^+$ 分别是  $z_0$  与  $z_m$  间上下行波传播算子矩阵, $R(z_m)$ 是反射系数。因此组合震源  $S_{\text{syn}}(z_0)$  波场传播在地表引起的地震响应  $P_{\text{syn}}(z_0)$ ,即组合炮,也满足方程

$$P_{\text{syn}}(z_0) = X(z_0, z_0) S_{\text{syn}}(z_0). \quad (3)$$

由方程(1)和(2),组合炮记录可以写成

$$P_{\text{syn}}(z_0) = P(z_0) L(z_0), \quad (4)$$

它是由炮记录经合成算子合成得到。

如果取合成算子具有以下频率域形式

$$L(z_0) = (a_1 e^{-i\omega t_1}, a_2 e^{-i\omega t_2}, \dots, a_n e^{-i\omega t_n})^T, \quad (5)$$

则当

$$L(z_0) = (e^{-i p x_1}, e^{-i p x_2}, \dots, e^{-i p x_n})^T \quad (6)$$

时,波场的合成过程为平面波合成。这里  $a_1, a_2, \dots, a_n$  表示系数, $t_1, t_2, \dots, t_n$  表示相位延迟时间, $\omega$  是圆频率, $p$  和  $x_i$  分别表示射线参数与炮点位置。

### 2.2 组合炮偏移

由于组合震源与组合炮记录满足波动方程,可看作一次点源与其“点”炮记录的物理试验,因此可采用与用于常规炮道集相同的深度偏移方法对它们进行外推成像,即对  $S_{syn}(z_0)$  和  $P_{syn}(z_0)$  分别进行正向外推和逆向外推,之后做反射成像,图 1 显示了组合炮偏移流程. 一个组合炮的偏移计算量相当于一个单炮偏移量,因此,合成过程大大减少了用于偏移的叠前数据量,产生了高得多的偏移效率.

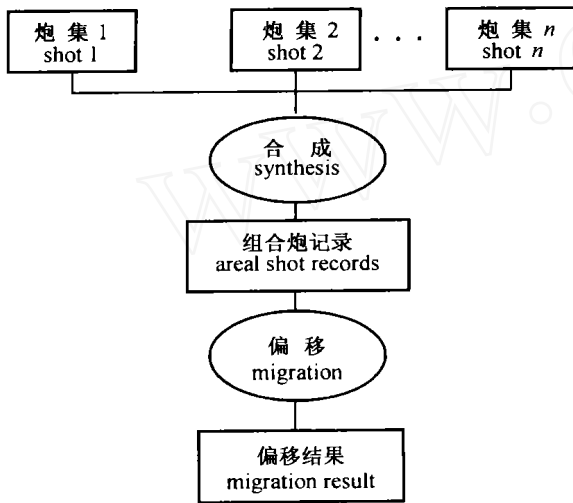


图 1 组合炮记录偏移流程

Fig. 1 Flow of areal shot record migration

## 3 控制照明技术

### 3.1 目的层控制照明

Rietveld 等<sup>[5]</sup>提出的控制照明技术,通过在目的层设置震源,并对震源波场形态(照明方向)进行控制,以快速获得目标区域的高质量成像. 对目的层震源照明的控制可通过合理构造地表合成算子来实现. 具体地说,是在目的层定义震源波场后,将它逆向传播到地表,便得到所需要的地表合成算子,进而对观测记录合成所需要的面向目标的组合炮.

选定一目的层  $z_m$ , 其相应的组合震源波场  $S_{syn}(z_0)$  满足方程式(1). 根据波的传播理论,这一组合震源波场传播到目的层  $z_m$  时,目的层合成震源有如下形式

$$S_{syn}(z_m) = W^+(z_m, z_0) S_{syn}(z_0). \quad (7)$$

将方程式(1)代入,得到

$$S_{syn}(z_m) = W^+(z_m, z_0) S(z_0) L(z_0). \quad (8)$$

因此,如果预先知道目的层的震源波场  $S_{syn}(z_m)$ , 则地表合成算子可以表示如下构造

$$L(z_0) = [S(z_0)]^{-1} F^+(z_0, z_m) S_{syn}(z_m), \quad (9)$$

其中  $F^+$  是下行波传播算子  $W^+$  的逆矩阵,可用上行波传播算子  $W^-$  的复共扼近似估计. 假设所有震源都具有相同的频率域形式  $S(\cdot)$ , 即震源矩阵

$$S(z_0) = S(\cdot) I, \quad (10)$$

式中  $I$  为单位矩阵,则地表合成算子

$$L(z_0) = S(\cdot)^{-1} F^+(z_0, z_m) S_{syn}(z_m). \quad (11)$$

在目的层  $z_m$ , 将震源波场  $S_{syn}(z_m)$  定义为

$$S_{syn}(z_m) = S(\cdot) L(z_m), \quad (12)$$

式中  $L(z_m)$  为目的层合成算子. 由(11)式,可建立地表合成算子  $L(z_0)$ , 记为  $L(z_0, z_m)$ , 则有

$$L(z_0, z_m) = F^+(z_0, z_m) L(z_m). \quad (13)$$

根据组合炮原理,将算子  $L(z_0, z_m)$  应用于炮集数据  $P(z_0)$ , 得到所需的组合炮记录

$$P_{syn}(z_0) = P(z_0) L(z_0, z_m). \quad (14)$$

相应地,地表处所需的组合震源波场为

$$S_{syn}(z_0, z_m) = S(\cdot) L(z_0, z_m). \quad (15)$$

目的层合成算子  $L(z_m)$  的定义可以选择任意的照明震源波场. 与平面波震源波场只以单一的射线参数  $p$  传播不同,震源波场  $S_{syn}(z_0, z_m)$  相当于在地面不同位置将具有不同的射线参数  $p$ , 也就是说,前者的相位延迟横向上是线性的,后者的相位延迟横向上则是非线性的,包含了上覆层的速度与构造信息. 具有这种非线性特性的面向目标的震源波场  $S_{syn}(z_0, z_m)$  更有利于目标区域的成像.

### 3.2 地表控制照明

为对目的层照明进行充分控制,需要在目的层定义一系列不同入射方向的震源波场. 如果取倾斜平面波照射,则合成算子形式为  $L(z_m) = (e^{-i p x_1}, e^{-i p x_2}, \dots, e^{-i p x_n})^T$ , 需要选择不同的射线参数  $p$ , 并将相应的震源向上外推,计算出地表处的合成算子.

为了对目的层进行充分的照明,还必需对射线参数  $p$  进行精细的采样,也就生成了相应的地表合成算子序列. 由(13)式易见,对  $p$  的采样也可以转化为对合成算子的“采样”. 基于这一思想,我们发展了一种新的面向目标的控制照明方法,即地表旋转控制照明. 这种方法只需要给出一个合适的合成算子,作为核心算子,然后直接在地表对该核合成算子作一系列旋转变换,得到所需的面向目标的合成算子序列,达到对目标区域进行不同方向的照明控制. 这个过程非常简单,快速.

首先,选择目的层  $z_m = f(x)$ , 可以是任意弯曲界面,包括断层. 然后任意选定一种照明方式(如垂

直于目的层界面的最佳入射),定义震源波场合成算子为  $L_c(z_m)$ , 逆向外推至地表,得到地表合成算子

$$L_c(z_0, z_m) = W^-(z_m, z_0) L_c(z_m). \quad (16)$$

对于控制照明,其目的层定义的震源形态可具任意性. 一般可采用对  $L_c(z_m)$  进行照射方向扰动, 显然,这种扰动也引起传播响应算子  $L_c(z_0, z_m)$  的相对扰动,反之,对传播响应算子  $L_c(z_0, z_m)$  的扰动也对应了  $L_c(z_m)$  的某种扰动. 因此可以将对目的层上震源的控制直接转变为对地表处传播响应的控制. 为此,本文将  $L_c(z_0, z_m)$  作为核算子,在时间域对它进行方向扰动,即将它绕测线方向进行不同角度的旋转,得到面向目的层的合成算子函数

$$L_d(t, z_0, z_m) = L_c(t + p(\cdot, x) x, z_0, z_m), \quad (17)$$

其中,  $p(\cdot, x)$  为核合成算子曲线相对测线  $x$  方向旋转的角度,可以是网格点  $x$  的函数  $p(x)$ . 照明参数  $p(\cdot, x)$  为核合成算子旋转后的时移量对测线方向  $x$  的变化率(或称斜率),它是直接在地表灵活控制的,关于  $x$  可以是线性的,也可以是非线性的,具有相对任意性. 由于  $L_c(z_0, z_m)$  的扰动与  $L_c(z_m)$  扰动等效,使得旋转得到的地表合成算子(公式(17))同样包含了上覆层地质信息,有利于目标区成像. 实质上,核合成算子的旋转就是对预定义的目的层照明在地表进行一系列扰动,以实现为目的层的照明方向进行充分控制,获得对目的构造的高精度成像.

在频率域,用上述生成的合成算子  $L_d(z_0, z_m)$  对观测记录进行合成,得到组合炮记录

$$P_{\text{syn}}(z_0) = P(z_0) L_d(z_0, z_m), \quad (18)$$

同样可生成相应的组合震源

$$S_{\text{syn}}(z_0, z_m) = S(\cdot) L_d(z_0, z_m), \quad (19)$$

这样便最终建立了所需的面向目标的组合震源与组合炮记录波场.

### 3.3 控制照明偏移

根据组合炮偏移理论,对上述控制照明方法,由(13)式地表合成算子合成的一对组合震源(公式(15))与组合炮(公式(14)),以及(17)式地表合成算子合成的组合震源(公式(19))与组合炮(公式(18)),可用适合于常规炮道集的偏移方法进行偏移,偏移流程如图1所示. 这里,组合波场是面向地质目标的,能够使目标区域得到更好的成像.

## 4 数值计算

对 Marmousi 模型进行了常规平面波偏移和地

表控制照明偏移数值验算. 该模型构造复杂,存在剧烈横向变速,是检验叠前深度偏移方法的通用模型. 图2是它的速度模型,  $x$  表示测线方向网格点位置,深度  $z$  的采样间隔为4m. 正演数据240炮,96道接收,炮间距与道间距25m,最小偏移距200m,记录长度3s,时间采样率4ms.

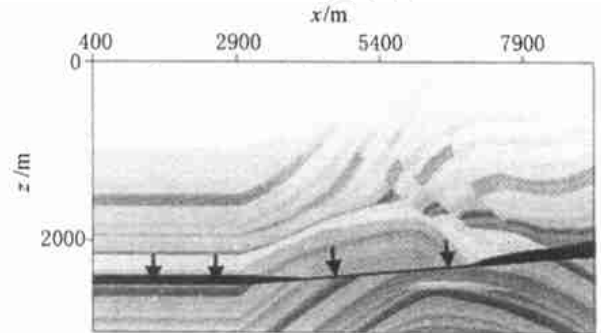


图2 Marmousi 速度模型

选2500m处黑色层底界面为目的层,如箭头所示.

Fig. 2 Marmousi velocity model

Fourier 有限差分(FFD)偏移能够很好地适用于陡倾角和剧烈横向变速的复杂地质构造的成像,以下采用 FFD 深度偏移算子对组合炮进行偏移.

### 4.1 平面波合成与偏移

平面波合成即常规的倾斜叠加. 图3a是射线参数  $p=0$  时合成的平面波剖面,图3b是该平面波的 FFD 深度成像剖面. 可以看出,在2500m以下的成像不清楚,原因是上覆层巨大的速度变化引起了震源波场变化. 图4显示了由41个射线参数  $p$  的平面波偏移后叠加得到的最终深度成像,  $p$  的范围为  $p \in (-350\mu\text{s/m}, 350\mu\text{s/m})$ . 显然,平面波 FFD 偏移得到了很好的偏移结果,浅层的三组断层和深层的储集层很清晰.

### 4.2 地表控制照明及偏移

选择一弯曲目的层如图2箭头所示,并给定垂直目的层的震源波场照明方向. 以角度增量  $\Delta\theta = \pm 1^\circ$ ,对核算子进行旋转,计算41组合成算子. 图5a显示了核算子,及其某个逆时针旋转与某个顺时针旋转后的合成算子传播响应. 核算子合成的组合炮 FFD 偏移结果如图5b. 显然,与图3b相比,目的层以下的复杂构造成像有很大改善,也就是说,一个面向目标的合成算子合成的单个组合炮的偏移比常规合成的平面波偏移能更精确地描述整个目标区域. 这是因为,在深层目的层邻近区域,面向目标的震源波场能量回聚,稳定性好,具有很强的聚焦能量,能很好地对目的层邻近区域进行反射聚焦;而平面波

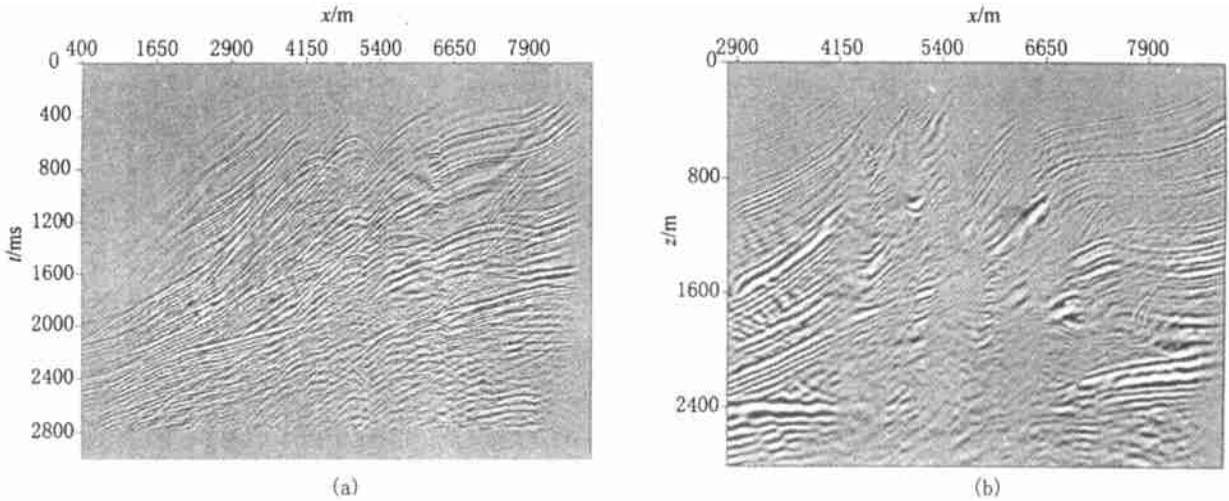


图3  $p=0$  时合成的平面波剖面 (a) 及平面波的 FFD 叠前深度偏移 (b)

Fig. 3 Plane wave section with  $p=0$  (a) and FFD depth migration of plane wave with  $p=0$  (b)

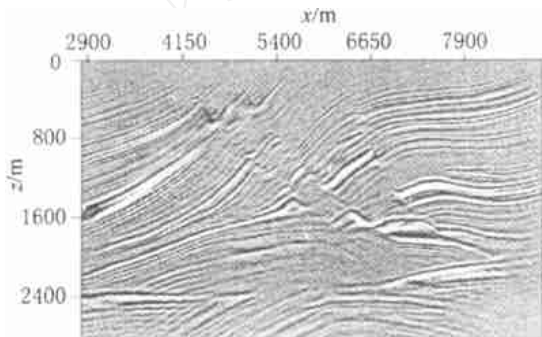


图4 对应 41 个射线参数  $p$  的范围为  $-350\mu\text{s/m} \sim 350\mu\text{s/m}$  合成平面波的最终 FFD 叠前深度偏移

Fig. 4 Final FFD prestack depth migration of 41 plane-wave shots with  $p$  ( $-350\mu\text{s/m}, 350\mu\text{s/m}$ )

的震源波场在经过复杂上覆层传播后绕射形态复杂,能量分散,稳定性趋弱,反射聚焦效果变差.与

此相反,在浅层,平面波震源波场变化不大,稳定性好,控制照明的面向目标的震源波场由于上覆层复杂介质传播效应则形态复杂些,稳定性差些,使得浅层成像效果受到削弱.当对核算子进行多次旋转,并对旋转后得到相应的成像结果进行叠加,则可以加强反射成像,同时减少弱稳定性造成的影响.

图 6 显示了这 41 组合成算子合成的组合炮记录的 FFD 深度偏移后的最终叠加结果.显然,在深层目标区域,得到了很高的成像质量,上覆层的三组大断层也很清晰.比较地表控制照明偏移(图 6)与平面波偏移(图 4),容易看出,地表控制照明技术大大改善了目的层以下的复杂构造区域(如箭头所示)的成像质量,储集体及整个背斜的反射能量聚焦显著增强,同相轴更加连续,层间的接触关系更加清晰

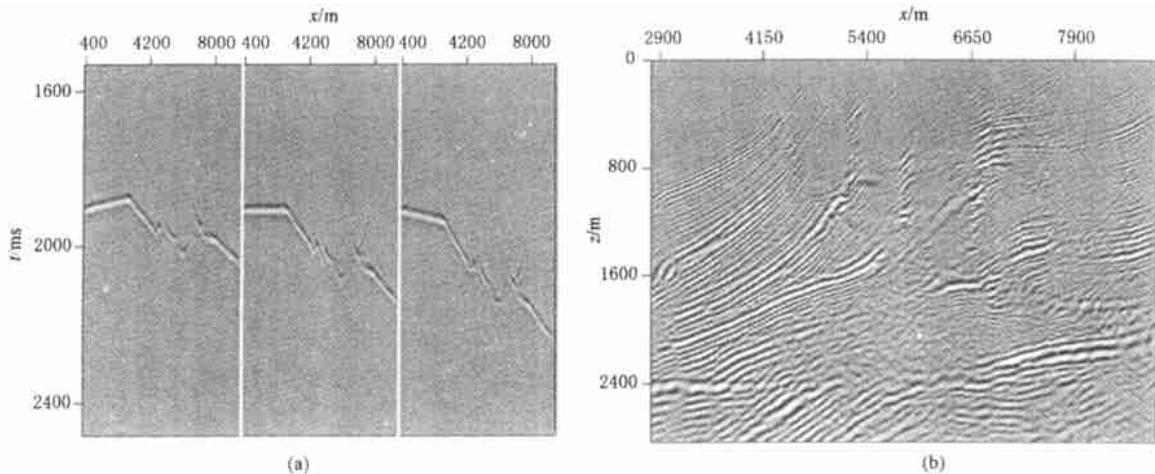


图5 合成算子响应与组合炮记录的偏移

(a) 核合成算子及其旋转后的两个合成算子响应,居中的为核合成算子;  
(b) 由核合成算子合成的组合炮记录的 FFD 深度偏移.

Fig. 5 Responses of synthesis operators and migration of areal shot record

可辨. 同时比较常规炮道集的 FFD 偏移结果(图 7), 在深层目标区域, 地表控制照明偏移获得了与炮集偏移可比拟的结果, 甚至某些局部位置更精确. 在这些偏移计算中, 地表控制照明偏移与快速的组合炮偏移计算效率相同, 却是常规炮集偏移近 10 倍高的效率.

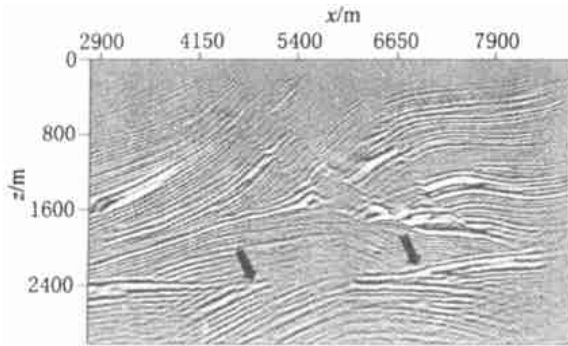


图 6 地表旋转控制照明 FFD 叠前深度偏移  
以角度增量  $= \pm 1^\circ$  对核算子进行旋转, 计算了 41 组地表  
合成算子.

Fig. 6 FFD prestack depth migration by surface rotation  
controlled illumination  $= \pm 1^\circ$

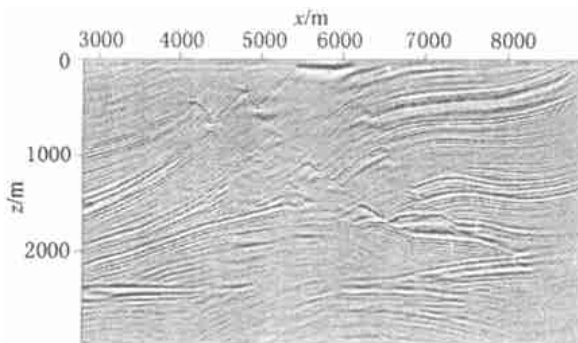


图 7 常规炮道集 Fourier 有限差分叠前深度偏移

Fig. 7 FFD prestack depth migration of conventional  
shot records

旋转角度 的范围取决于地层的最大倾角. 由于目的层形态的复杂性, 本身有一定倾角, 因此核算子的顺时针与逆时针旋转的角度范围需要参照目的层本身的倾角与最大地层倾角之间的倾角差的大小. 同时考查所选最大旋转角度对应的合成震源波场在深层目标区域传播的稳定性, 决定是否增加或减小所选的最大旋转角度.

## 5 结 论

本文提出的地表旋转控制照明偏移实现简单、快捷高效, 能够获得地质目标区域高质量的成像, 计

算效率的提高与总炮数成正比. 它用快速的几何旋转取代费时的波场外推算来建立目标照明控制所需的合成算子, 提高了控制照明技术的效率, 使得一般意义(非控制照明)的组合炮偏移能够在几乎不增加计算量的前提下, 大大提高整个目标区域的成像精度. Marmousi 模型计算表明, 在非目标区的浅层地表控制照明也能取得很好的成像. 此外, 与常规全数据的炮集偏移相比, 地表旋转控制照明偏移计算效率高得多, 且对复杂目标区域的成像更灵活, 甚至某些局部位置更精确.

控制照明的目标在于高效率地获取地质目标的高质量成像, 因此, 当对某个目标区域感兴趣时, 这种单目的层的地表控制照明偏移是一种很好的选择. 如果希望进一步获得整个剖面高质量的照明成像, 则需要选择主要区域, 适当增加目标控制层, 当然这相应地将增加计算量. 关于多目标地表控制照明问题, 见参考文献[9].

## 参考文献

- [ 1 ] Berkhout A J. Areal shot-record technology. *J. Seis. Expl.*, 1992, 1(3): 251 ~ 264
- [ 2 ] Zhang G Q, Hao X J, Zhang W S. Prestack depth migration with common-shot and synthesis-shot records. 69th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1999, 1469 ~ 1472
- [ 3 ] 张叔伦, 孙沛勇. 基于平面波合成的傅里叶有限差分叠前深度偏移. 石油地球物理勘探, 1999, 34(1): 1 ~ 7  
Zhang S L, Sun P Y. Fourier finite-difference prestack depth migration based on plane wave synthesis. *Petroleum Geophysical Prospecting* (in Chinese), 1999, 34(1): 1 ~ 7
- [ 4 ] Rietveld W E A, Berkhout A J, Wapenaar C P A. Optimum seismic illumination of hydrocarbon reservoirs. *Geophysics*, 1992, 57(10): 1334 ~ 1345
- [ 5 ] Rietveld W E A, Berkhout A J. Prestack depth migration by means of controlled illumination. *Geophysics*, 1994, 59: 801 ~ 809
- [ 6 ] Chen X M, Wang H Z, Cheng J B, et al. Prestack depth migration by surface controlled illumination in a target-oriented way. 72nd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. Expanded Abstracts, 2002, 1180 ~ 1183
- [ 7 ] Ristow D, Rühl T. Fourier finite-difference migration. *Geophysics*, 1994, 59: 1882 ~ 1893
- [ 8 ] Berkhout A J. Seismic migration: Imaging of acoustic energy by wave-field extrapolation. A Theoretical Aspects, 2nd Ed., Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1982
- [ 9 ] 陈秀梅, 王华忠, 马在田. 多地质目标地表控制照明叠前深度偏移. 石油地球物理勘探, 2003, 5: 507 ~ 511  
Chen X M, Wang H Z, Ma Z T. Prestack depth migration by multi-target surface controlled illumination. *Petroleum Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2003, 5: 507 ~ 511