

# 各向异性介质共炮域高斯束偏移

刘 强 张 敏\* 李振春 张 凯 肖建恩 丁鹏程

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580)

刘强,张敏,李振春,张凯,肖建恩,丁鹏程. 各向异性介质共炮域高斯束偏移. 石油地球物理勘探,2016,51(5): 930-937.

**摘要** 在 Zhu 等提出的基于相速度的各向异性高斯束偏移方法的基础上,修改了运动学和动力学射线追踪方程,并且通过对射线追踪方程中的系数进行近似,简化了动力学射线追踪方程,实现了基于相速度的各向异性介质共炮域高斯束叠前深度偏移成像。通过各向异性水平层状模型分析了各向异性参数对本文研究方法的影响,证明各向异性介质偏移成像需要获得准确的速度场和各向异性参数场,这是实现各向异性偏移成像的关键。二维 Hess VTI 模型试算结果表明,本文方法能够对复杂的各向异性地质构造进行有效成像,充分证明了方法的有效性。与传统的基于弹性参数的各向异性介质高斯束偏移成像方法相比,本文方法在计算效率和适应性方面具有更多优势,更适合处理实际地震资料。

**关键词** 各向异性 高斯束偏移 共炮域 运动学射线追踪 动力学射线追踪

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.05.013

## 1 引言

地球介质为各向异性介质,而传统的勘探地震学主要以地球介质为完全弹性和各向同性的物理假设为基础。在各向异性介质条件下,如果采用传统的针对各向同性的深度偏移算法会引起成像误差,断面等陡倾反射界面成像质量差<sup>[1,2]</sup>。随着地球物理处理和解释技术的发展,尤其是多波多分量和大炮检距勘探技术的应用,地震各向异性研究成为目前勘探地球物理学研究的发展趋势<sup>[2]</sup>。高斯束偏移(Gaussian Beam Migration,GBM)方法是一种改进的 Kirchhoff 偏移成像方法,不仅具有射线类方法的较高的计算效率,还具有接近于波动方程类方法的成像精度<sup>[3]</sup>。因此高斯束偏移成像的研究一直受到业界的关注。

对高斯束的研究较早,Cerveny 等<sup>[4-7]</sup>在 20 世纪 70~80 年代将高斯束引入到地球物理学中。随后,Hill<sup>[8,9]</sup>分别研究了叠后高斯束深度偏移和共炮域叠前深度高斯束偏移。Gray<sup>[10]</sup>将高斯束偏

移进一步扩展到适应性更强的共炮域中,后来又对真振幅偏移进行了研究<sup>[11]</sup>。李振春等<sup>[12]</sup>、Yue 等<sup>[13]</sup>、郭朝斌等<sup>[14]</sup>分别对共角度域保幅高斯束、起伏地表条件下高斯束偏移和弹性波高斯束偏移进行了研究。关于各向异性的研究,自 20 世纪 70 年代 Cerveny<sup>[4]</sup>提出各向异性介质中的射线传播理论就已经开始。此后,Alkhalifah<sup>[15]</sup>通过修改运动学和动力学追踪方程,实现了各向异性叠后高斯束偏移。近年来,Zhu 等<sup>[16-18]</sup>对各向异性运动学和动力学射线追踪进行了深入研究,提出了基于相速度的共炮域各向异性高斯束偏移方法。该方法同传统的基于弹性参数的各向异性高斯束偏移方法<sup>[1,15]</sup>相比,计算效率和精度更高,但仍存在计算较复杂的问题。段鹏飞等<sup>[19]</sup>实现了 TI 介质角度域高斯束叠前深度偏移方法,由于其计算过程中需要输出角道集,因此计算效率较低。

本文在 Zhu 等<sup>[16,17]</sup>提出的基于相速度的各向异性高斯束偏移方法的基础上,修改了运动学和动力学射线追踪方程,并且通过对射线追踪方程中的系数进行近似,简化了动力学射线追踪方程,实现了

\* 山东省青岛市开发区长江西路 66 号中国石油大学(华东)工科楼 C 座 651, 266580。Email:18266200368@163.com

本文于 2015 年 12 月 1 日收到,最终修改稿于 2016 年 6 月 27 日收到。

本研究受国家自然科学基金(41204086, 41374122, 41504100)、山东省自然科学基金(ZR2013DL012)和中国石油大学(华东)研究生创新工程项目(YCXJ2016007)联合资助。

基于相速度的各向异性介质共炮域高斯束叠前深度偏移成像,进一步提高了算法的计算效率。通过对各向异性水平层状模型进行试算,分析了各向异性参数对各向异性介质高斯束偏移的影响;二维 Hess VTI 模型试算结果证明了方法的有效性。

## 2 高斯束叠前深度偏移

各向异性高斯束叠前深度偏移与各向同性高斯束叠前深度偏移的成像原理基本相同,两者的区别在于射线追踪。如同其他偏移方法,高斯束偏移成像也是基于地震波场  $\Phi(\mathbf{r}, \omega)$  满足标量波动方程的假设,即

$$\nabla^2 \Phi(\mathbf{r}, \omega) + \frac{\omega^2}{v^2(\mathbf{r})} \Phi(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (1)$$

式中:  $v(\mathbf{r})$  为地下介质中点  $\mathbf{r}$  处速度;  $\Phi(\mathbf{r}, \omega)$  为地震波场,该波场值由有界积分确定

$$\Phi(\mathbf{r}, \omega) = \frac{-1}{2\pi} \iint dx' \frac{\partial G^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)}{\partial z'} \Phi(\mathbf{r}', \omega) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{r}' = (x', 0)$  表示地表 ( $z' = 0$ ) 检波点的位置;  $G^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$  为格林函数,表示点  $\mathbf{r}'$  处的震源在点  $\mathbf{r}$  处的地震响应。

Hill<sup>[9]</sup> 的研究表明,点  $\mathbf{r}'$  处的震源产生的地震波场在点  $\mathbf{r}$  处的高频近似解为

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \approx \frac{i\omega}{2\pi} \iint \frac{dp'_x}{p'_z} u_{GB}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{p}', \omega) \quad (3)$$

式中  $u_{GB}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{p}', \omega)$  为震源点  $\mathbf{r}'$  处激发的高斯束,其中矢量  $\mathbf{p}'$  表示射线方向。式(3)要求射线中心的初始点与震源点保持一致,因此当射线束中心不在震源点  $\mathbf{r}'$  而在其附近的  $\mathbf{r}_0$  处时,需要在积分中插入一个相移因子以补偿相移的影响

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \approx \frac{i\omega}{2\pi} \iint \frac{dp'_x}{p'_z} u_{GB}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0, \mathbf{p}', \omega) \times \exp[-i\omega \mathbf{p}' \cdot (\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0)] \quad (4)$$

为了在式(2)所示的 Kirchhoff 偏移叠加式中使用式(4),需要将式(2)中的积分范围分为小的积分区域,以保证使用式(4)时积分区域中心点  $\mathbf{r}_0$  接近震源点  $\mathbf{r}'$ 。为了减小计算误差, Hill<sup>[9]</sup> 引入以下高斯函数

$$\frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left| \frac{\omega}{\omega_l} \right| \left( \frac{a}{\omega_l} \right)^2 \sum_L \exp \left[ - \left| \frac{\omega}{\omega_l} \right| \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{L}|^2}{2\omega_l^2} \right] \approx 1 \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{L}$  表示束中心位置;  $a$  为束中心间隔;  $\omega_l$  为高斯束的宽度;  $\omega$  为频率。

本文束中心间隔取为

$$a = 2\omega_l \sqrt{\frac{\omega_l}{\omega_h}} \quad (6)$$

为了保证在初始方向上充分采样,采样率大小可取为

$$\Delta p_x = \frac{1}{\omega_l \sqrt{\omega_l / \omega_h}} \quad (7)$$

式中  $\omega_h$  为最大束宽。

由 Nowack 等<sup>[20]</sup> 和 Gray<sup>[10]</sup> 的研究可知,共炮域叠前深度偏移成像公式为

$$I_s(\mathbf{x}) = C \sum_L \int d\omega \iint dp_x^d U(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, \mathbf{L}, \mathbf{p}^d, \omega) \times D(\mathbf{L}, \mathbf{x}_s, \mathbf{p}^d, \omega) \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{x}$  为地下成像点;  $\mathbf{x}_s$  为震源位置;  $\mathbf{p}^d$  为束中心处的射线参数;  $D(\mathbf{L}, \mathbf{x}_s, \mathbf{p}^d, \omega)$  为高斯时窗的共炮域道集上的局部倾斜叠加;系数  $C$  为一个与束中心网格相关的常数;  $U(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, \mathbf{L}, \mathbf{p}^d, \omega)$  为共炮域的高斯束成像算子,可表示为

$$U = \frac{-i\omega}{2\pi} \iint \frac{dp_x^s}{p_z^s} u_{GB}^*(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, \mathbf{p}^s, \omega) u_{GB}^*(\mathbf{x}, \mathbf{L}, \mathbf{p}^d, \omega) \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{p}^s$  为震源处的射线参数;  $u_{GB}^*(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, \mathbf{p}^s, \omega)$  和  $u_{GB}^*(\mathbf{x}, \mathbf{L}, \mathbf{p}^d, \omega)$  分别为震源和检波点处对应的地下波场的高斯束,前者为从震源  $\mathbf{x}_s$  到成像点  $\mathbf{x}$  处的算子,后者为从束中心  $\mathbf{L}$  到成像点  $\mathbf{x}$  处的算子。

通过对所有的成像值  $I_s$  叠加得到最终的共炮域成像结果。

## 3 各向异性射线追踪

实现各向异性高斯束偏移的关键在于运动学和动力学射线追踪。运动学射线追踪主要用于计算中心射线路径和走时,而动力学射线追踪则用于计算射线的振幅和波前。Cerveny<sup>[4]</sup> 和 Hanyga<sup>[21]</sup> 分别推导出一种基于弹性参数的各向异性运动学和动力学射线追踪方程,然而其计算过程相对复杂。Zhu 等<sup>[16,17]</sup> 以相速度的形式重新给出了广义各向异性介质中运动学和动力学射线追踪方程,其系数计算仍然较复杂。本文在 Zhu 等<sup>[16,17]</sup> 的研究基础上,修改了运动学和动力学射线追踪方程,并且改进了段鹏飞等<sup>[19]</sup> 的简化思路,进一步提高了计算效率和成像精度。

### 3.1 运动学射线追踪

Cerveny<sup>[4]</sup> 的基于弹性参数的运动学射线追踪

方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{d\tau} = a_{ijkl} \mathbf{p}_l \mathbf{g}_j \mathbf{g}_k \\ \frac{dp_i}{d\tau} = -\frac{1}{2} \frac{\partial a_{mjkl}}{\partial x_i} \mathbf{p}_m \mathbf{p}_l \mathbf{g}_j \mathbf{g}_k \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\tau$  为旅行时;  $a_{ijkl} = \frac{c_{ijkl}}{\rho}$  为密度归一化的弹性参数;  $\mathbf{g}$  为极化矢量;  $\mathbf{p}_i = \frac{\partial \tau}{\partial x_i}$  为慢度矢量。对式(10)

右边的函数计算十分耗时,并且在每一步计算中都需要求解特征值问题。为了解决传统射线追踪方程中存在的上述不足,Zhu等<sup>[16]</sup>以相速度的形式重新给出了广义各向异性介质中的运动学追踪方程

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{d\tau} = V_i \\ \frac{dp_i}{d\tau} = -\frac{\partial \ln v}{\partial x_i} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $v$  为相速度;  $V_i$  为群速度( $i=1,2$ )。

式(11)的具体计算过程可以参考 Tsvankin<sup>[22]</sup>给出的近似解。该方法由于不需要求解每一点处对应的特征问题的解,可以消除求取弱各向异性介质弹性参数的不确定性<sup>[23]</sup>,提高了方法的适应性。

### 3.2 动力学射线追踪

对于各向异性介质来说,动力学射线追踪更为复杂。Hanyga<sup>[21]</sup>给出了一种基于弹性参数的各向异性动力学射线追踪方程,其求解过程较复杂。根据 Zhu等<sup>[16]</sup>的研究,可以得到射线中心坐标系下各向异性动力学射线追踪方程

$$\begin{cases} \frac{dQ_M}{d\tau} = A_{MN} Q_N + B_{MN} P_N \\ \frac{dP_M}{d\tau} = -C_{MN} Q_N - D_{MN} P_N \end{cases} \quad (12)$$

式中  $Q_M$  和  $P_M$  为动力学射线追踪参数,相关系数由下式给出

$$\begin{cases} A_{MN} = \frac{\partial^2 \ln v}{\partial y_N \partial q_M} \\ B_{MN} = \frac{\partial \bar{V}_N}{\partial q_M} \\ C_{MN} = v^{-1} \frac{\partial^2 v}{\partial y_M \partial y_N} \\ D_{MN} = \frac{\partial^2 \ln v}{\partial y_M \partial q_N} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $y_M$  和  $y_N$  为射线中心坐标系下的坐标;  $q_M = \frac{\partial \tau}{\partial y_M}$ ;  $\bar{V}_N$  为射线中心坐标系中群速度矢量  $\mathbf{V}$  的分量。

与基于弹性参数的动力学射线追踪方程相比,动力学射线追踪方程(式(12))更为简单,只需计算相应的相速度和群速度导数,计算效率更高,但其相关系数的计算过程(式(13))仍然较复杂。段鹏飞等<sup>[19]</sup>在动力学射线追踪时,借用各向同性介质算法,在其传播方向上考虑各向异性的影响,沿着相速度矢量的方向计算该高斯束上的振幅。由于上述做法对系数做了较大近似,不利于提高算法的计算精度和计算效率。为此,本文改进了段鹏飞等<sup>[19]</sup>的做法,得到以下相关系数表达式

$$\begin{cases} A_{MN} = D_{MN} = 0 \\ B_{MN} = \frac{\partial \bar{V}_N}{\partial q_M} \\ C_{MN} = \frac{1}{v} \frac{\partial^2 v}{\partial y_M \partial y_N} \end{cases} \quad (14)$$

经过近似,使高斯束振幅能量增强,进一步提高了算法的计算效率。由于本文方法在运动学射线追踪过程中没有做近似,因此不会影响射线追踪路径和走时。

## 4 模型试算

在研究相速度的各向异性运动学和动力学射线追踪算法基础上,实现了共炮域各向异性高斯束叠前偏移成像方法。通过各向异性水平层状模型分析各向异性参数对本文研究方法的影响。同时,通过二维 Hess VTI 模型进一步证明方法的有效性。

### 4.1 各向异性水平层状模型

本文建立了一个各向异性水平层状模型(图1),分析各向异性参数对文中方法的影响。利用各向异性有限差分正演模拟方法得到 qP 波地震记录(图2)。分别采用共炮域各向同性和各向异性高斯束叠前偏移方法进行测试,得到高斯束叠前深度偏移成像结果(图3)。由图可见:①由于忽略了各向异性的影响,各向同性高斯束叠前深度偏移不能使反射波准确归位(图3a);②各向异性高斯束叠前深度偏移的归位准确,成像效果较好(图3b);③在不考虑各向异性参数  $\epsilon$  ( $\epsilon=0$ ) 影响时,大炮检距位置处成像明显上翘,成像结果不准确(图3c),在不考虑各向异性参数  $\delta$  ( $\delta=0$ ) 影响时,反射波不能正确归位,成像结果不准确(图3d),且各向异性参数  $\epsilon$  对 qP 波偏移成像影响更大,两侧成像结果上翘更明显。因此,对各向异性介质进行偏移成像时,不仅

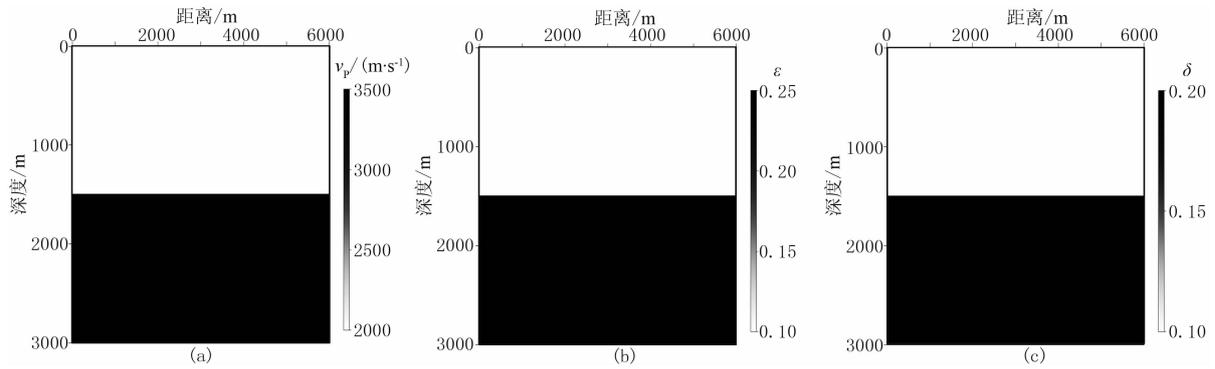


图 1 各向异性水平层状模型

(a)  $v_p$ ; (b)  $\epsilon$ ; (c)  $\delta$

模型网格数为  $601 \times 301$ , 网格尺寸为  $10\text{m} \times 10\text{m}$

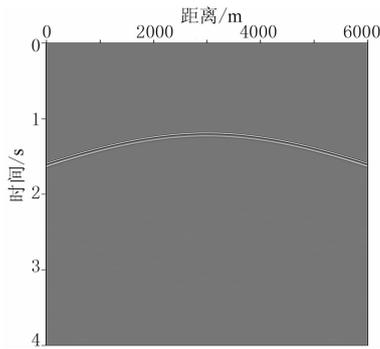


图 2 qP 波地震记录

采样时间为 4s, 采样间隔为 1ms; 采用中间放炮方式, 每炮 601 道接收, 共 1 炮, 道间隔为 10m

需要精确的射线追踪算法, 还需要准确的速度场和各向异性参数场。

### 4.2 二维 Hess VTI 模型

为了验证本文的共炮域高斯束叠前深度偏移成像方法对复杂地质模型的有效性, 采用国际标准的二维 Hess VTI 模型进行偏移成像试算。图 4 为二维 Hess VTI 模型 qP 波速度场及其各向异性参数场。此模型中存在高速盐丘, 断层、尖灭等构造。

图 5 为二维 Hess VTI 模型高斯束叠前深度偏移结果。由图可见: 由于忽略了各向异性参数的影响, 各向同性高斯束偏移得到的成像剖面质量较差,

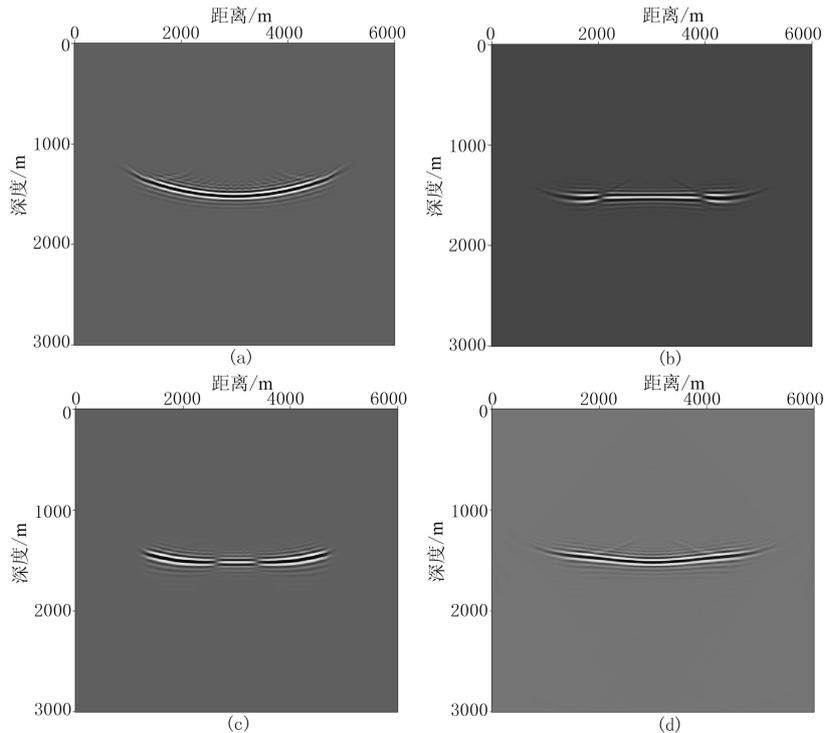


图 3 高斯束叠前深度偏移成像结果

(a) 各向同性; (b) 各向异性; (c)  $\epsilon=0$ ; (d)  $\delta=0$

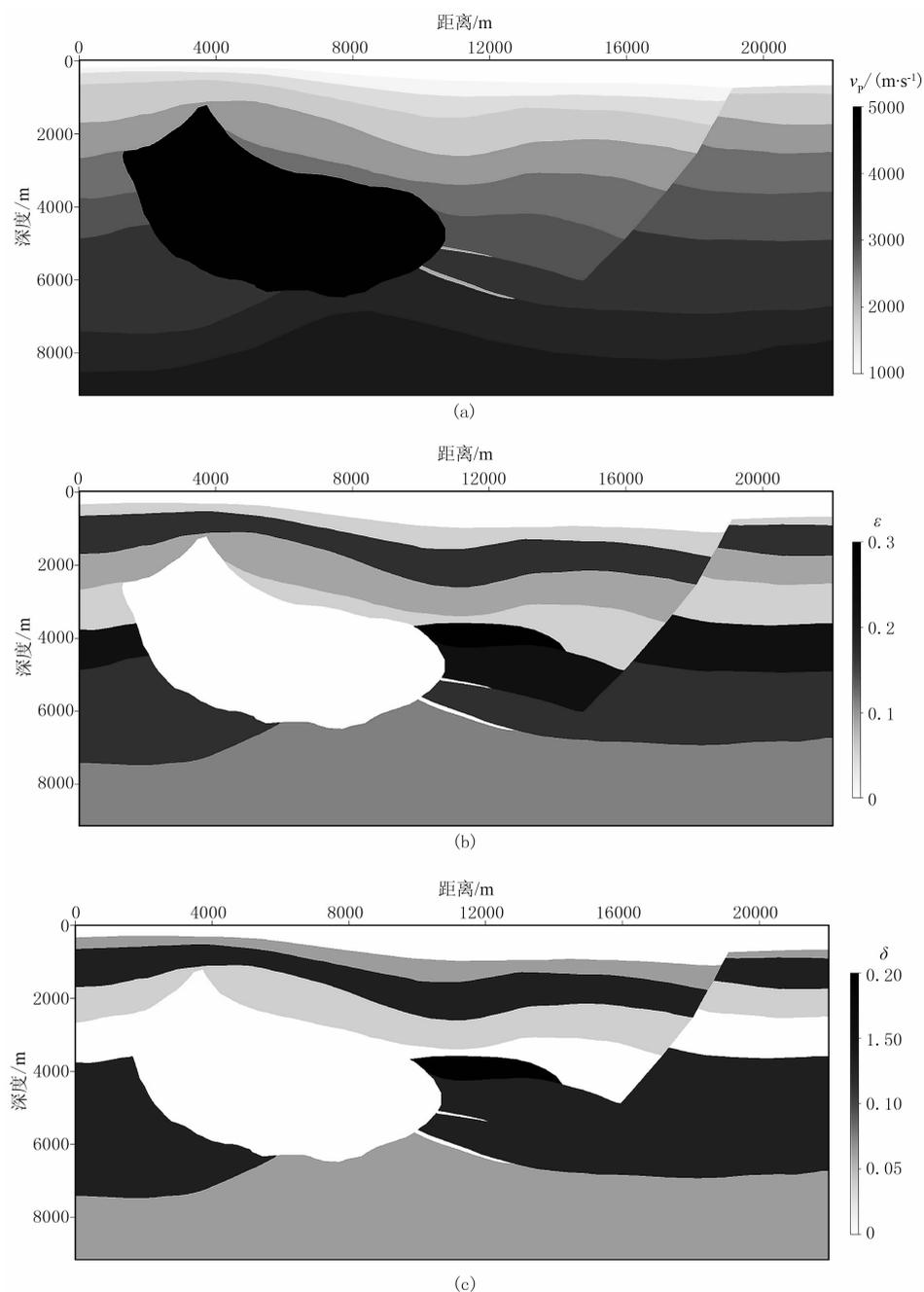


图4 二维 Hess VTI 模型 qP 波速度场及其各向异性参数场

(a)  $v_p$ ; (b)  $\epsilon$ ; (c)  $\delta$

模型网格数为  $3617 \times 1500$ , 网格尺寸为  $6.096\text{m} \times 6.096\text{m}$ , 共 720 炮合成数据; 炮间距为  $30.480\text{m}$ , 道间隔为  $12.192\text{m}$ , 采样时间为  $7.992\text{s}$ , 采样点数为 1332, 时间采样间隔为  $6\text{ms}$ ; 采用左边放炮方式

剖面中存在明显的成像噪声干扰(图 5a); 采用文献[17]的方法(图 5b)和本文方法(图 5c)得到的各向异性高斯束叠前深度偏移剖面同相轴清晰, 断层、高速盐丘得到很好成像, 最终的成像质量明显提高, 且后者的同相轴能量更强, 信噪比更高, 剖面更清晰。

为了更好地说明本文方法的优势, 将二维 Hess

VTI 模型高斯束叠前深度偏移结果(图 5)中的局部(矩形框)放大显示(图 6)。由图 6 可见: 各向同性高斯束偏移结果中出现反射波不能准确归位、绕射波不能完全收敛、能量不聚焦等问题(图 6a); 采用文献[17]的方法得到的结果中反射波能够准确归位, 绕射波可以更好地收敛, 但存在同相轴能量弱、保幅性不够理想等问题(图 6b); 采用本文方法得到

的成像结果中反射波可更准确地归位,绕射波可以更好地收敛,断层及尖灭等构造成像更准确(图 6c)。总体来说,应用本文的各向异性介质高斯束叠前深度偏移方法得到的成像结果的整体成像质量明显提高,但也存在绕射波收敛不完全的现象,这需要在今后的研究中进一步改进和解决算法的适应性,以更好地改善成像效果。

为了更好地说明本文的追踪算法在计算效率方面的优势,对各向同性高斯束偏移方法、文献[17]的方法以及本文方法的计算效率进行测试分析。表 1 为二维 Hess VTI 模型几种偏移方法的计算效率对比。由表可见,本文的各向异性高斯束偏移方法有效提高了计算效率。

二维 Hess VTI 模型试算结果表明,本文采用

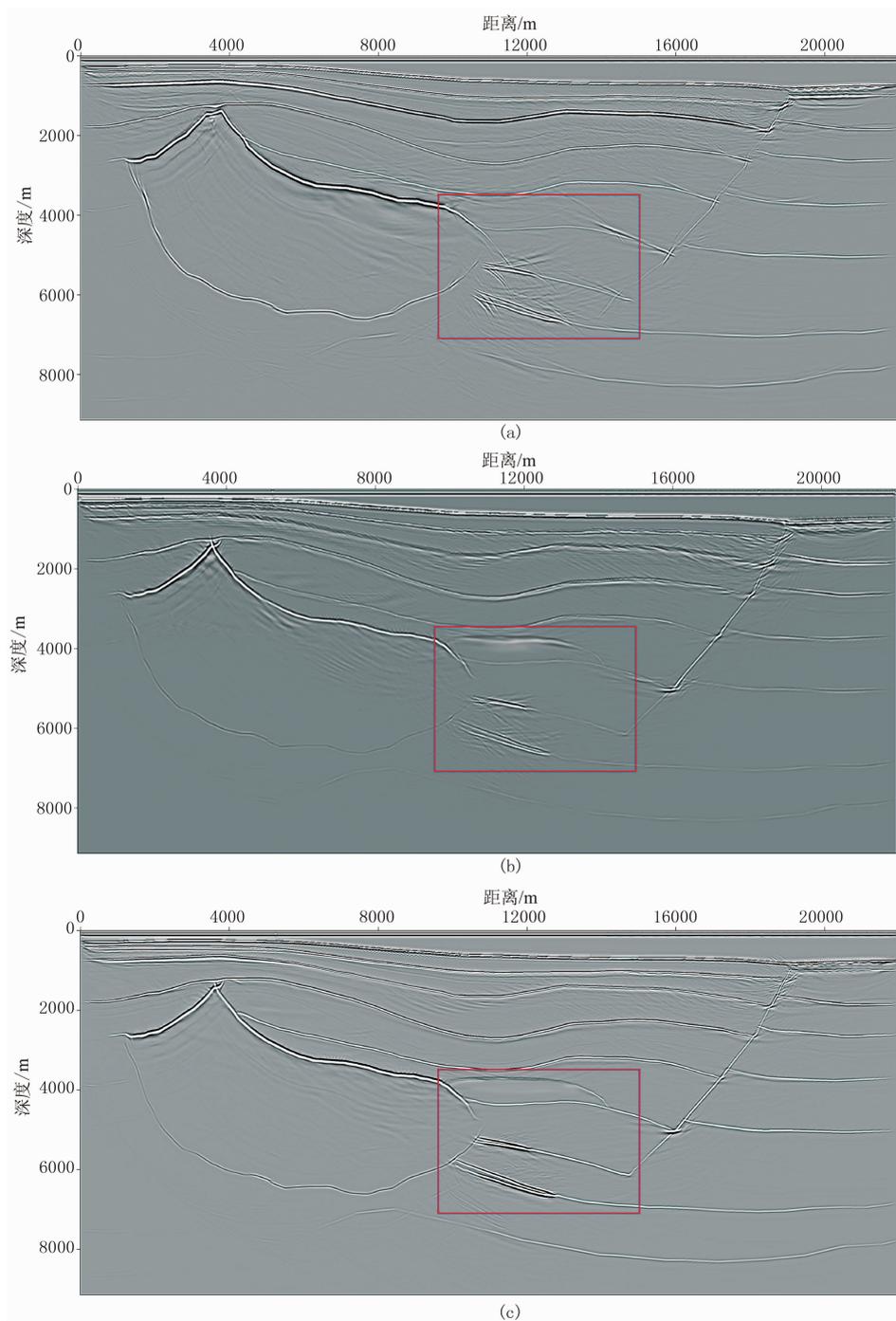


图 5 二维 Hess VTI 模型高斯束叠前深度偏移结果  
(a)各向同性; (b)各向异性<sup>[17]</sup>; (c)本文方法

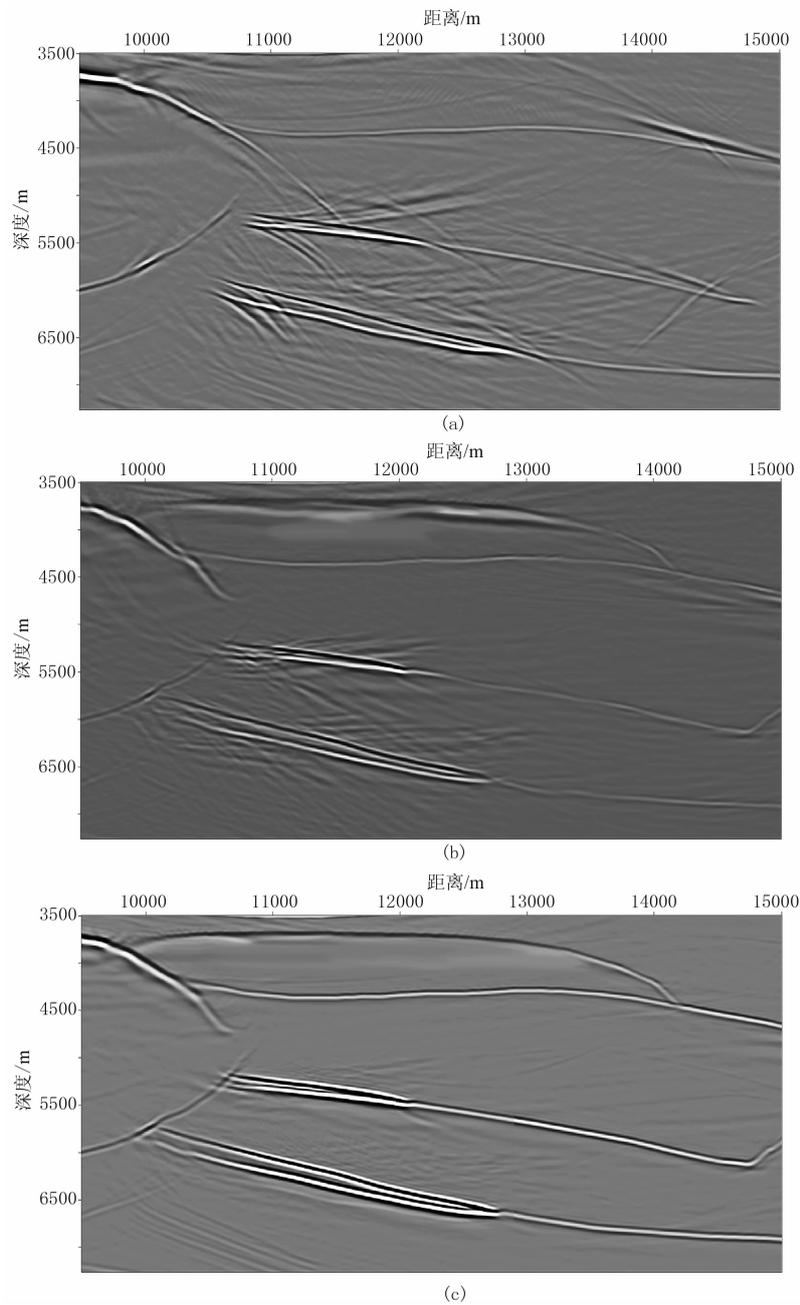


图6 二维 Hess VTI 模型高斯束叠前深度偏移结果局部放大显示  
(a)各向同性; (b)各向异性<sup>[17]</sup>; (c)本文方法

表1 二维 Hess VTI 模型几种偏移方法的计算效率对比

方 法	平均每炮计算时间/s
各向同性高斯束偏移	654
各向异性高斯束偏移 <sup>[17]</sup>	496.2
本文的各向异性高斯束偏移	447

的共炮域各向异性高斯束叠前偏移成像方法能够对复杂的各向异性地质构造较好地成像,并且具有较高的计算效率,充分证明了方法的有效性。

## 5 结论与认识

在前人研究的基础上,修改了各向异性介质运动学和动力学射线追踪方程,同时在求解动力学射线追踪方程中,应用改进的简化近似系数提高了计算效率,改善了 Zhu 等<sup>[17]</sup>提出的各向异性介质高斯束偏移成像方法。本文提出的共炮域各向异性高斯束偏移成像方法提高了方法的灵活性和对地震观测

系统的适应性。

通过各向异性水平层状模型分析了各向异性参数对本文方法的影响,再次证明各向异性介质偏移成像需要获得准确的速度场和各向异性参数场,这是实现各向异性偏移成像的关键。二维 Hess VTI 模型试算结果表明,本文方法能够对复杂的各向异性地质构造进行有效成像,充分证明了方法的有效性。与传统的基于弹性参数的各向异性介质高斯束偏移成像方法相比,本文方法在计算效率和适应性方面具有更多优势,更适合处理实际地震资料。

感谢 SEG 提供文中使用的理论模型数据,感谢中国石油大学(华东)地震传播与成像(SWPI)课题组的支持与帮助!

#### 参 考 文 献

- [1] 段新意,李振春,黄建平等.各向异性介质共炮域高斯束叠前深度偏移.石油物探,2014,53(5):579-586.  
Duan Xinyi, Li Zhenchun, Huang Jianping et al. A prestack Gaussian beam migration in common-shot domain for anisotropic media. GPP, 2014, 53(5): 579-586.
- [2] 吴国忱.各向异性介质地震波传播与成像.山东东营:中国石油大学出版社,2006.
- [3] 岳玉波.复杂介质高斯束偏移成像方法研究[学位论文].山东青岛:中国石油大学(华东),2011.
- [4] Cerveny V. Seismic rays and ray intensities in inhomogeneous anisotropic media. Geophysical Journal Royal Astronomical Society, 1972, 29(1): 1-13.
- [5] Cerveny V, Poppov M M, Psencik I. Computation of wave fields in inhomogeneous media Gaussian beam approach. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1982, 70(1): 109-128.
- [6] Cerveny V and Psencik I. Gaussian beam in two dimensional elastic inhomogeneous media. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1983, 72(2): 417-433.
- [7] Cerveny V and Psencik I. Gaussian beams in elastic 2D laterally varying layered structures. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1984, 78(1): 65-91.
- [8] Hill N R. Gaussian beam migration. Geophysics, 1990, 55(11): 1416-1428.
- [9] Hill N R. Prestack Gaussian beam depth migration. Geophysics, 2001, 66(4): 1240-1250.
- [10] Gray S H. Gaussian beam migration of common shot records. Geophysics, 2005, 70(4): S71-S77.
- [11] Gray S H and Bleistein N. True-amplitude Gaussian-beam migration. Geophysics, 2009, 74(2): S11-S23.
- [12] 李振春,岳玉波,郭朝斌等.高斯波束共角度保幅深度偏移.石油地球物理勘探,2010,45(3):360-365.  
Li Zhenchun, Yue Yubo, Guo Chaobin et al. Gaussian beam common angle preserved-amplitude migration. OGP, 2010, 45(3): 360-365.
- [13] Yue Yubo, Li Zhenchun, Zhang Ping et al. Prestack Gaussian beam depth migration under complex surface conditions. Applied Geophysics, 2010, 7(2): 143-148.
- [14] 郭朝斌,李振春,岳玉波.高斯束成像技术与应用.石油物探,2011,50(1):38-44,58.  
Guo Chaobin, Li Zhenchun, Yue Yubo. Gaussian beam migration and its application. GPP, 2011, 50(1): 38-44, 58.
- [15] Alkhalifah T. Gaussian beam depth migration for anisotropic media. Geophysics, 1995, 60(5): 1474-1484.
- [16] Zhu Tianfei, Gray S H and Wang D. Kinematic and dynamic raytracing in anisotropic media: theory and application. SEG Technical Program Expanded Abstract, 2005, 24: 96-99.
- [17] Zhu Tianfei, Gray S H, Wang D. Prestack Gaussian-beam depth migration in anisotropic media. Geophysics, 2007, 72(3): S133-S138.
- [18] Zhu Tianfei. Dynamic raytracing in homogeneous anisotropic media. GeoCanada 2010-Working with the Earth, 2010, 1-4.
- [19] 段鹏飞,程玖兵,陈爱萍等. TI 介质局部角度域高斯束叠前深度偏移成像.地球物理学报,2013,56(12): 4206-4214.  
Duan Pengfei, Cheng Jiubing, Chen Aiping et al. Local angle-domain Gaussian beam prestack depth migration in a TI medium. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4206-4212.
- [20] Nowack R, Sen M K, Stoffa P L et al. Gaussian beam migration for sparse common-shot and common-receiver data. SEG Technical Program Expanded Abstract, 2003, 22: 1114-1117.
- [21] Hanyga A. Gaussian beams in anisotropic elastic media. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1986, 85(3): 473-504.
- [22] Tsvankin I. Seismic Signatures and Analysis of Reflection Data in Anisotropic Media. Pergamon Press Inc, 2001.
- [23] Thomsen L. Weak elastic anisotropy. Geophysics, 1986, 51(10): 1954-1966.

(本文编辑:刘勇)

#### 作 者 简 介



刘强 硕士研究生,1990年生;2014年6月毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程(物探)专业,获学士学位;2014年9月至今在中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业攻读硕士学位,研究方向为各向异性介质正演与偏移成像方法。