

文章编号: 1001—1749(2011)02—0115—07

## VTI 介质隐式有限差分平面波偏移

韩利, 韩立国, 崔杰, 巩向博

(吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026)

**摘要:** 这里研究了 VTI (Vertical Transverse Isotropy) 介质隐式有限差分 (IFD) 波场外推算子和 VTI 介质平面波偏移。在文中设计了 VTI 介质 IFD 波场外推算子, 将 Taylor 分析法求得的差分系数, 作为初始解, 用非线性优化方法迭代求得算子系数。将设计的外推算子频散曲线和偏移脉冲响应与理论解进行了对比分析, 验证出外推算子有较高的精度。从各向同性介质平面波偏移理论出发, 结合 VTI 介质 IFD 波场外推算子, 将平面波偏移推广到 VTI 介质中。对 Hess VTI 标准模型拟合数据进行偏移, 偏移结果验证了平面波偏移在 VTI 介质中的有效性, 以及在加强特定陡倾界面成像方面的优势。并且, 与常规 VTI 介质叠前深度偏移相比, VTI 介质平面波偏移在保证成像质量的前提下, 大大减少了计算量, 为各向异性偏移成像研究提供了新的技术思路。

**关键词:** 平面波偏; VTI 介质偏移; 各向异性偏移; VTI 介质波场外推; 隐式有限差分算子

**中图分类号:** P 631.4      **文献标识码:** A

### 0 前言

波动方程叠前深度偏移, 可以克服 Kirchhoff 偏移多路径和低频假设的限制, 能在横向变速强烈的复杂地区产生更好的成像。但是, 波动方程叠前偏移耗时很大。为此, 许多学者研究了平面波偏移在减少计算量, 提高波动方程偏移效率上的潜力。Berkhout<sup>[1]</sup> 提出面炮偏移技术; 张叔伦等<sup>[2]</sup> 实现了傅立叶有限差分平面波偏移; Zhang 等<sup>[3]</sup> 实现 3D 延迟放炮偏移; Stoffa 等<sup>[4]</sup> 对共检波点道集和共炮道集分别作平面波偏移, 再叠加以提高成像精度; 崔兴福等<sup>[5]</sup> 利用平面波偏移进行了分角度成像和 AVA 分析; 叶月明等<sup>[6]</sup> 研究了起伏地表下的平面波偏移; Shan 等<sup>[7]</sup> 提出倾斜坐标系下平面波偏移以提高高角度成像准确度; 韩利<sup>[8]</sup> 实现对称非稳态相移法平面波偏移。平面波偏移还可以自然地产生共角度道集, 用来进行速度更新<sup>[3]</sup>。

但这些关于平面波偏移的研究, 基本都是在各向同性介质下, 没有考虑各向异性介质情况。而各向异性在石油勘探中普遍存在, 如果地下介质存在

较强各向异性而在偏移时被忽略, 反射波将不能被正确归位<sup>[9]</sup>, 甚至扭曲构造形态, 这对地层连续性和横向构造均有较大影响<sup>[10, 11]</sup>。VTI 模型可以有效地刻画地下许多沉积地质模型, 常被用来进行各向异性偏移研究。

与各向同性介质相比在 VTI 介质中波的频散关系要复杂些, 因为其传播速度依赖于相位角。所以, 在 VTI 介质波场外推经常使用相移加内插<sup>[12]</sup>或显性卷积方法<sup>[13, 14]</sup>, 因为复杂的频散关系并不增加这些方法的复杂性。但是对于相移加内插法, 需要大量的参考波场。显性卷积方法在各向同性下都很难保证稳定性, 而且需要很长的卷积滤波算子以保证精度。作者在本文选用能很好处理横向变速问题的隐式有限差分 (Implicit Finite Difference: IFD) 算法<sup>[15]</sup>。Ristow 等<sup>[16]</sup> 基于弱各向异性假设和 Taylor 分析将其拓展到 VTI 介质。为了改善精度, Liu 等<sup>[17]</sup> 在有限差分后加入了相位改正算子。Shan<sup>[18, 19]</sup> 提出了优化的方法, 将非线性问题降解为线性优化问题, 再利用线性优化解出的系数求解差分系数。作者在本文延用 Shan 避开弱各向异性假设及优化的思想, 不同的是作者直接建立非

基金项目: 国家“973”项目 (2007CB209603); 国家 863 项目 (2007AA060801)

收稿日期: 2010-07-15

改回日期: 2010-10-25

线性优化问题,并将 Taylor 序列展开法求得的系数作为初始解,直接使用非线性最小二乘求解差分系数,得到 VTI 介质中 IFD 外推算子。

首先,作者介绍了各向同性介质下的平面波偏移理论,接着阐述了在 VTI 介质中 IFD 算子系数设计,结合二者,将平面波偏移推广到 VTI 介质中。将设计的外推算子频散曲线和偏移脉冲响应,分别与理论解做了对比分析,应用 Hess VTI 标准模型数据来验证平面波偏移的有效性,并展示了平面波偏移在加强陡倾目标界面成像方面的优势。

# 1 各向同性介质平面波偏移

常规叠前偏移是通过将单个炮集进行独立偏移得到单炮成像,并通过叠加所有的单炮成像得到整个地下成像。波动方程单炮偏移过程需要两步:①将震源波场和接收波场从地表外推到地下所有的深度;②在每个深度通过对震源波场和接收波场,应用成像条件(如做互相关)得到成像。

炮集记录可以合成一个新的数据体,来表征一个现实中没有进行的物理实验。这种数据合成方法的一个重要的例子,就是组合炮集记录建立平面波震源记录。在数学上,可以通过对共检波点道集进行倾斜叠加(线性 Radon 变换)来实现:

$$R_p(p_{s_x}, r_x, z = 0, \omega) = \int R(s_x, r_x, z = 0, \omega) e^{i\omega s_x p_{s_x}} ds_x \quad (1)$$

其中  $R = R(s_x, x, z, \omega)$  是接收波场;  $s_x$  是震源位置;  $p_{s_x}$  是相应于  $s_x$  的射线参数;  $r_x$  是地表检波器位置。相应的地表平面波震源波场为:

$$S_p(p_{s_x}, r_x, z = 0, \omega) = e^{i\omega r_x p_{s_x}} \quad (2)$$

和常规波动方程炮域偏移一样,典型的平面波偏移也需要二步:①将震源波场  $S_p$  和接收波场  $R_p$ ,分别用单程波动方程独立地外推到地下所有深度点;②含有射线参数  $P_{s_x}$  的平面波成像,通过对震源波场和用圆频率  $\omega$  加权的检波波场作互相关实现:

$$I_{p_{s_x}}(x, z) = \int |\omega| S_p^*(p_{s_x}, x, z, \omega) R_p(p_{s_x}, x, z, \omega) d\omega \quad (3)$$

其中  $S_p^*$  是震源波场  $S_p$  的复共轭。

整个图像通过叠加所有  $P_{s_x}$  值的平面波成像得到:

$$I_p = \iint I_{p_{s_x}}(x, z) dp_{s_x} \quad (4)$$

因为倾斜叠加和偏移都是线性算子,在连续情

况下,平面波偏移与传统的炮剖面偏移效果一样<sup>[2]</sup>。在实际离散形式下,需要有足够数量的  $P$  值使二种成像等同。Zhang 等讨论了在平面波偏移方法实际应用中需要的共  $P$  剖面数量  $N_p$  及分量采样步长  $\Delta p$ :

$$N_p \geq \frac{N_s \Delta x_s f(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)}{v_s} \quad (5)$$

$$\Delta p = \frac{\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1}{v_s N_p}$$

其中  $f = \omega/2\pi$ ,  $N_s$  为一个共检波道集中的炮数;  $\Delta x_s$  为炮间距,所以  $N_s \Delta x_s$  为一个共检波道集的长度;入射角  $\alpha_1 \leq \alpha_s \leq \alpha_2$ ;  $v_s$  为地表速度。

# 2 VTI 介质中 IFD 算子设计

## 2.1 VTI 介质中的频散关系

VTI 介质有一个竖向旋转对称轴,相速度依赖于介质的竖向速度及相速度的传播角。在 VTI 介质中, qP - 波和 qSV - 波的相速度,可以用 Thomsen 符号表示( Tsavankin, 1996):

$$\frac{v^2(\theta)}{v_{p0}^2} = 1 + \varepsilon \sin^2 \theta - \frac{f}{2} \pm \frac{f}{2} \sqrt{\left(1 + \frac{2\varepsilon \sin^2 \theta}{f}\right)^2 - \frac{2(\varepsilon - \delta) \sin^2 2\theta}{f}} \quad (6)$$

其中  $\theta$  为波的相位角,即波传播方向与竖向轴之间的夹角;  $f = 1 - (v_{s0}/v_{p0})^2$ ;  $v_{p0}$  和  $v_{s0}$  分别为 qP - 波和 qSV - 波在竖向方向的速度。

在式(6)中,当根号前符号为正时,  $v(\theta)$  为 qP - 波的相速度,为负时,  $v(\theta)$  为 qSV - 波的相速度。

通过式(6)及相位角  $\theta$  和波数的关系,可以得到 VTI 介质中的频散关系<sup>[18]</sup>:

$$d_4 s_z^4 + d_2 s_z^2 + d_0 = 0 \quad (7)$$

其中  $s_z = k_z v_{p0}/\omega$ , 系数  $d_0$ 、 $d_2$  和  $d_4$  分别为:

$$d_0 = (2 + 2\varepsilon - f) s_x^2 - 1 - [(1 - f)(1 + 2\varepsilon)] s_x^4$$

$$d_2 = [-2(1 - f)(1 + \varepsilon) - 2f(\varepsilon - \delta)] \varepsilon_x^2 + (2 - f)$$

$$d_4 = f - 1$$

其中  $s_x = k_x v_{p0}/\omega$ 。

VTI 介质中的频散关系式(7)是一个有四个解的四次方程,其中二个解代表上行/下行 qP - 波,另外二解代表上行/下行 qSV - 波。我们只考虑 qP - 波的外推。

2.2 IFD 算子系数设计

在实际应用中,假设在 qSV - 波速比 qP - 波速度小得多时有  $f \approx 1$ , Shan<sup>[18, 19]</sup> 根据这个假设,从式(7)中简化 qP - 波的频散关系为:

$$s_z(\varepsilon, \delta; s_x) = \pm \sqrt{\frac{1 - (1 + 2\varepsilon)s_x^2}{1 - 2(\varepsilon - \delta)s_x^2}} \tag{8}$$

该频散关系虽然有一点假设,但不受弱各向异性的限制。对式(8)进行逆 Fourier 变换,得到 VTI 介质下的上行和下行单程声波方程式(9)(用  $i \frac{v_{p0}^2}{\omega} \frac{\partial}{\partial z}$  代替  $s_z$ ,用  $-\frac{v_{p0}^2}{\omega^2}(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2})$  代替  $s_x^2$ )。

$$\frac{\partial}{\partial z}P = \pm i \frac{\omega}{v_{p0}} \sqrt{\frac{1 + (1 + 2\varepsilon)\frac{v_{p0}^2}{\omega^2}(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2})}{1 + 2(\varepsilon - \delta)\frac{v_{p0}^2}{\omega^2}(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2})}}P \tag{9}$$

为了设计式(9)的 IFD 模式,需要用一个加权函数式(10)近似  $s_z$ :

$$\bar{s}_z(\varepsilon, \delta; s_x) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i (s_x^2)^i}{1 - \sum_{i=1}^n \beta_i (s_x^2)^i} \tag{10}$$

这里加权函数系数  $\alpha_i$  和  $\beta_i, i = 1, \cdots, n$ , 也可以通过 Pade 展开得到。Shan 提出用优化的方法求解,首先建立加权优化函数,并将其化为线性最小二乘可解的优化函数,在求得优化系数后进一步分裂为式(11)的形式:

$$\bar{s}_z = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{a_i s_x^2}{1 - b_i s_x^2}, \tag{11}$$

其中 系数  $a_i$  和  $b_i$  通过  $\alpha_i$  和  $\beta_i, i = 1, \cdots, n$  计算得到。

作者直接从式(8)设计加权函数式(11),建立如式(12)的优化问题。

$$\min \int_0^{s_x} \left( s_z(\varepsilon, \delta; s_x) - 1 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i s_x^2}{1 - b_i s_x^2} \right)^2 ds_x \tag{12}$$

式(12)是一个非线性优化问题,需要用非线性最小二乘法解。作者采用高斯 ~ 牛顿迭代法解<sup>[23]</sup>,利用 Taylor 展开分析算出一组  $a_i$  和  $b_i, i = 1, \cdots, n$  作为迭代的初始解,这样就可以减少迭代的计算量。在算出系数  $a_i$  和  $b_i$  后,VTI 介质中的 IFD 波场外推和各向同性下相同。

图 1 是当各向异性参数为  $\varepsilon = 0.2, \delta = 0.15$  时,对几种频散关系与 VTI 介质频散关系解析解进行的比较。在图 1 中,曲线“True”是由式(8)得到

的真实频散关系;曲线“Isotropic”是不考虑各向异性影响时的频散关系;曲线“Taylor - weak”是由 D Ristow 等<sup>[16]</sup>方法解出的频散关系。可以看出,这种近似在低相位角时拟合的很好,而在高相位角时有些偏差;曲线“Optimization”为用本文建立的优化式(12)解出的频散关系,由图 1 中可以看出,这种近似与真实频散关系几乎完全匹配,精度很高。几种近似方法在各向异性参数为  $\varepsilon = 0.2, \delta = 0.15$  时,对应的四阶优化系数( $n = 2$ )见表 1。用同样的办法也可以拟合更高阶差分系数。

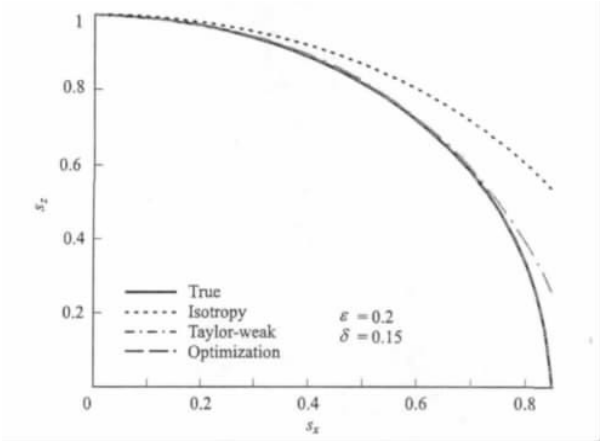


图 1 频散关系曲线比较(  $\varepsilon = 0.2, \delta = 0.15$  )  
Fig. 1 Dispersion relation comparison with  $\varepsilon = 0.2, \delta = 0.15$

表 1  $\varepsilon = 0.2, \delta = 0.15$  几种方法求出的四阶(  $n = 2$  )优化系数

Tab. 1 The coefficients of different approximately operators with  $\varepsilon = 0.2, \delta = 0.15$

$\varepsilon = 0.2$ $\delta = 0.15$	Figure	$a_i$	$b_i$
Isotropic media 80° FD	2( a )	$a_1 = 0.4572$	$b_1 = 0.2227$
		$a_2 = 0.0403$	$b_2 = 0.8740$
Taylor expansion VTI	2( b )	$a_1 = 0.2807$	$b_1 = 0.0$
		$a_2 = 0.3693$	$b_2 = 0.1009$
LSQT Optimied VTI	2( c )	$a_1 = 0.6094$	$b_1 = 0.4554$
		$a_2 = 0.0310$	$b_2 = 1.2934$

图 2( 见下页 )是在各向异性参数为  $\varepsilon = 0.2, \delta = 0.15$ , 速度  $v_{p0} = 2\,000$  m/s, 时间  $t = 0.8$  s 时,几种方法的偏移脉冲响应。其中,深色线是根据式(6)及速度时间等参数算出的理论曲线(理论曲线单程按  $t = 0.4$  s 计算)。图 2( a )是各向同性 IFD 80°差分算子对各向异性介质下的脉冲响应,从图 2( a )中可以明显看出,忽略各向异性将会带来很大误差,尤其是在横向方向误差较大;图 2( b )是由 Taylor 展开法计算得到的差分系数构建差分算

子得到的脉冲响应,从图 2( b) 中可以看出,脉冲响应与理论曲线基本吻合,但在在大角度时失真。图 2( c) 为解本文构建的非线性优化问题式( 12) 得到的差分系数得到的偏移脉冲响应,与理论曲线匹配的非常好,这就证明本文使用直接解非线性优化问题得到的差分系数非常准确。

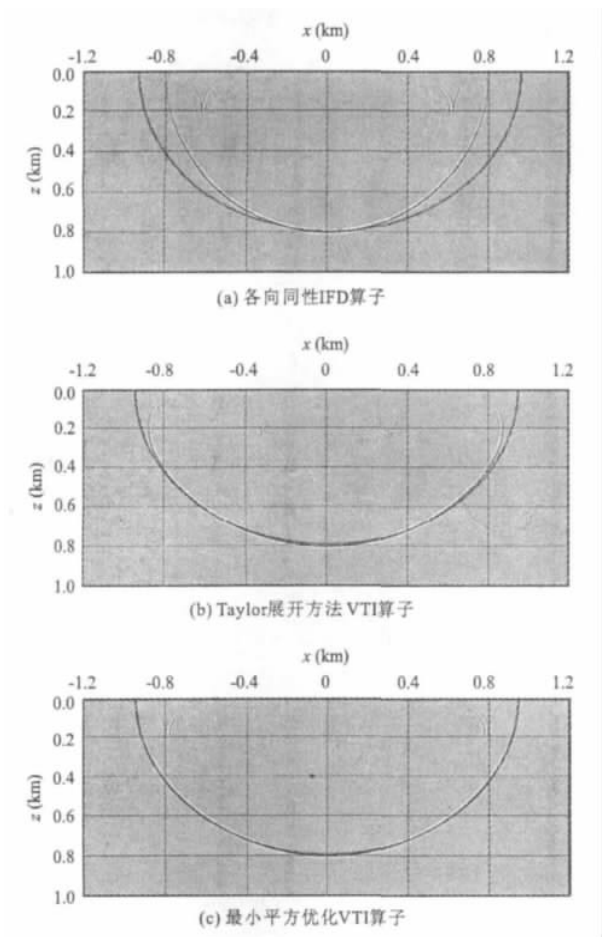


图 2 几种方法的脉冲响应,VTI 介质参数:  $v_{p0} = 2\,000\text{ m/s}$ ,  $\varepsilon = 0.2$ ,  $\delta = 0.15$ ,  $t = 0.8\text{ s}$   
Fig. 2 Impulse response of a tilted VTI media with  $v_{p0} = 2\,000\text{ m/s}$ ,  $\varepsilon = 0.2$ ,  $\delta = 0.15$ ,  $t = 0.8\text{ s}$

3 VTI 介质平面波偏移

在各向同性介质中,平面波偏移通过解上行/下行波方程,再利用式( 3) 和式( 4) 的成像过程成像。在 VTI 介质中,平面波的合成过程和成像物理过程是不变的,但应用的波传播方程不一样了。利用上面构建的 VTI 介质中 IFD 外推算子,来解 VTI 介质中声波方程( 9) 。VTI 介质中波场外推算子的精度越高,成像越精确,但算子精度越高需要求解的优化问题计算量就越大,这就使得各向异性偏移计算量一般要高于各向同性情况。应用平面波偏

移,较常规各向异性偏移大大减少了偏移的计算量。

另外,在常规 VTI 介质偏移中,由于偏移孔径的限制,单炮偏移只能加强很窄孔径内的成像,而应用平面波偏移,每一个 P 面的成像孔径是整个测线,参数  $P$  又与地下界面倾角有一定的关系,根据这一原理,对特定  $P$  参数成像,可加强地下特定角度界面的成像。

4 模拟算例

理论实验模型数据采用 Hess VTI 标准模型,拟合数据由 Amerada Hess 提供,该数据是用 Standford University SEP 实验室的有限差分正演软件正演的,不包含与地表有关的多次波。数据由 720 个炮集组成,网格间距  $dx = dz = 6.096\text{ m}$ ,炮间距  $30.48\text{ m}$ ,道间距  $12.192\text{ m}$ ,最小偏移距  $0\text{ m}$ ,最大偏移距  $7\,985.8\text{ m}$ ,采样时长为  $7.992\text{ s}$ ,采样间隔为  $6\text{ ms}$ 。模型如图 3 所示。

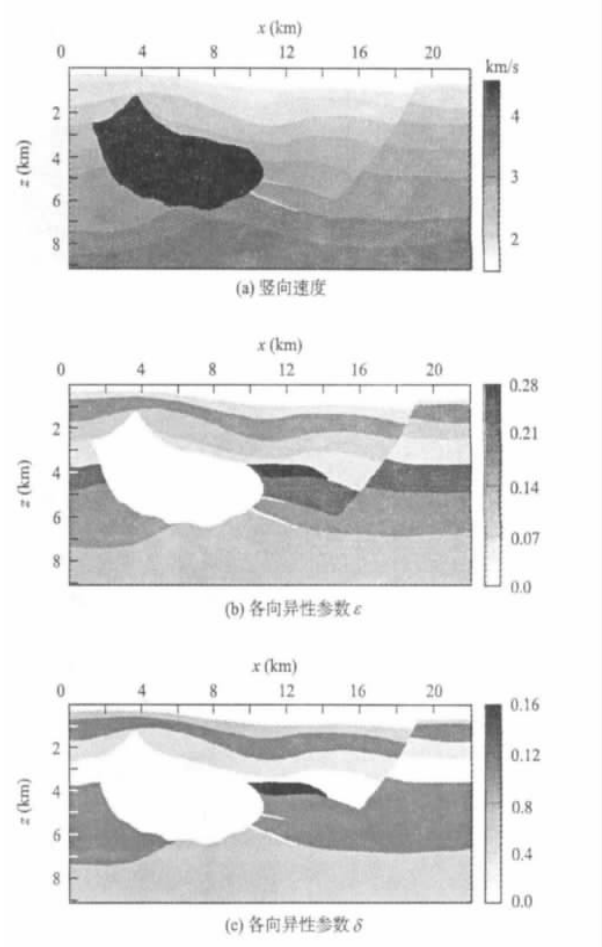


图 3 Hess VTI 标准模型  
Fig. 3 Hess VTI model

图 4 是应用各向同性介质下有限差分做的叠前深度偏移。

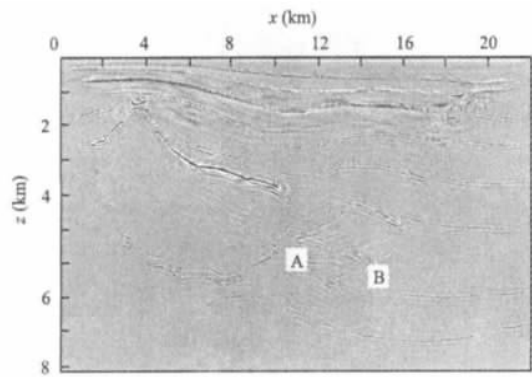


图 4 各向同性波动方程 IFD 法偏移结果  
Fig.4 Imaging obtained by Isotropic IFD operator

图 5 是使用式(12)构造的 VTI 介质中波场外推算子做的常规炮剖面法 VTI 介质叠前深度偏移。对比图 4 与图 5,从 A、B 二处可以看出,如果地下是各向异性介质,用各向同性的方程偏移不能将地质体正确归位。

根据方程(5), $N_s\Delta x_s$ 取最大偏移距长度为 7 986 m, $f$ 取 45 Hz, $\alpha$ 取正、负 30°, $v_s$ 取 1 500 m/s,则得到 $\Delta p=2.8\text{ }\mu\text{s/m}$ , $N_p=240$ 。如果 $N_s\Delta x_s$ 取小一点还可以取更少的 P 面。图 6 是用 240 个 P 面叠加得到的 VTI 介质中平面波偏移结果,与图 5 比较,平面波偏移用小于常规偏移几倍的计算量得到与之相同质量的成像。

从图 5 和图 6 可以看出,不管是常规炮剖面偏移方法还是平面波偏移方法,在盐体左腰处陡倾界面成像质量都较差。因此,通过偏移加强陡倾界面成像意义重大。

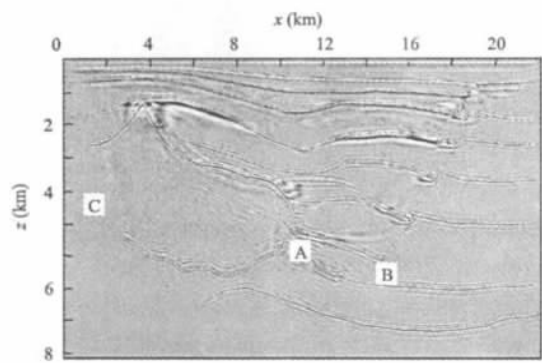


图 5 VTI 介质中传统波动方程 IFD 偏移结果  
Fig.5 Imaging obtained by conventional VTI media shot-profile method wave equation migration

图 7(见下页)是平面波偏移加强图 5、图 6 中陡

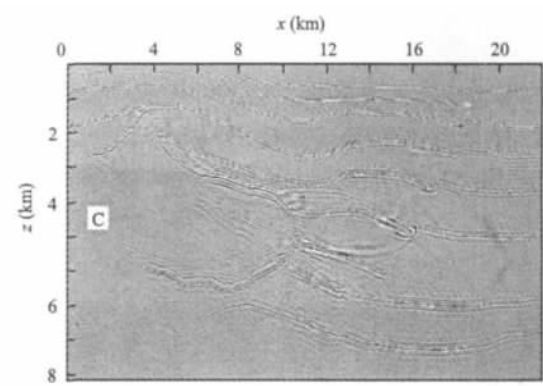


图 6 VTI 介质中平面波 IFD 法偏移结果  
Fig.6 Imaging obtained by VTI media plane wave IFD migration

倾界面 C 的说明。图 7( a) 分别为炮点在 1 738 m、3 048 m、4 816 m、6 200 m 处的单炮偏移剖面,图 7( b) 分别为  $P$  等于  $-131\text{ }\mu\text{s/m}$ 、 $-197\text{ }\mu\text{s/m}$ 、 $-262\text{ }\mu\text{s/m}$ 、 $-329\text{ }\mu\text{s/m}$  时的单 P 偏移剖面。对比图 7( a) 和图 7( b) 可以发现,受偏移孔径限制,单炮偏移不能由某一炮或几炮对地下陡倾界面进行成像加强,而在平面波偏移中,一个单 P 面偏移对与之对应倾角的地下界面成像贡献较大,通过对特定的某个或几个 P 面成像加权,就能加强特定地下界面成像。如图 7( c) 为  $P$  等于  $300\text{ }\mu\text{s/m}$  附近五个偏移剖面叠加之和,只对与之角度对应的界面成像(如界面 C)。图 7( d) 与图 7( e) 分别为平面波偏移对界面 C 加强前后的效果。由图 7 可见,陡倾界面 C 成像明显加强。

图 8(见后面)为特定陡倾界面加强后的效果,从图 8 中可以看出,陡倾界面 C 有了明显的加强。在基本没有增加计算量的情况下,在平面波偏移中,特定 P 面偏移改善了陡倾界面成像效果。

5 结论

作者在本文用优化方法设计了 VTI 介质隐式有限差分波场外推算子,将 Taylor 展开法求得的差分系数作为初始解,用非线性优化方法迭代求得差分算子系数。通过与 VTI 介质频散关系和偏移脉冲响应理论解对比分析证明,各向同性 IFD 算子在 VTI 介质偏移中会带来很大误差,尤其是在横向方向。Taylor 展开法 VTI 介质 IFD 算子在低相位角时比较准,但高相位角时有一定误差。而作者在文中用优化的方法求取的 VTI 介质 IFD 算子频散曲线和偏移脉冲响应,与解析解匹配的都非常好,这

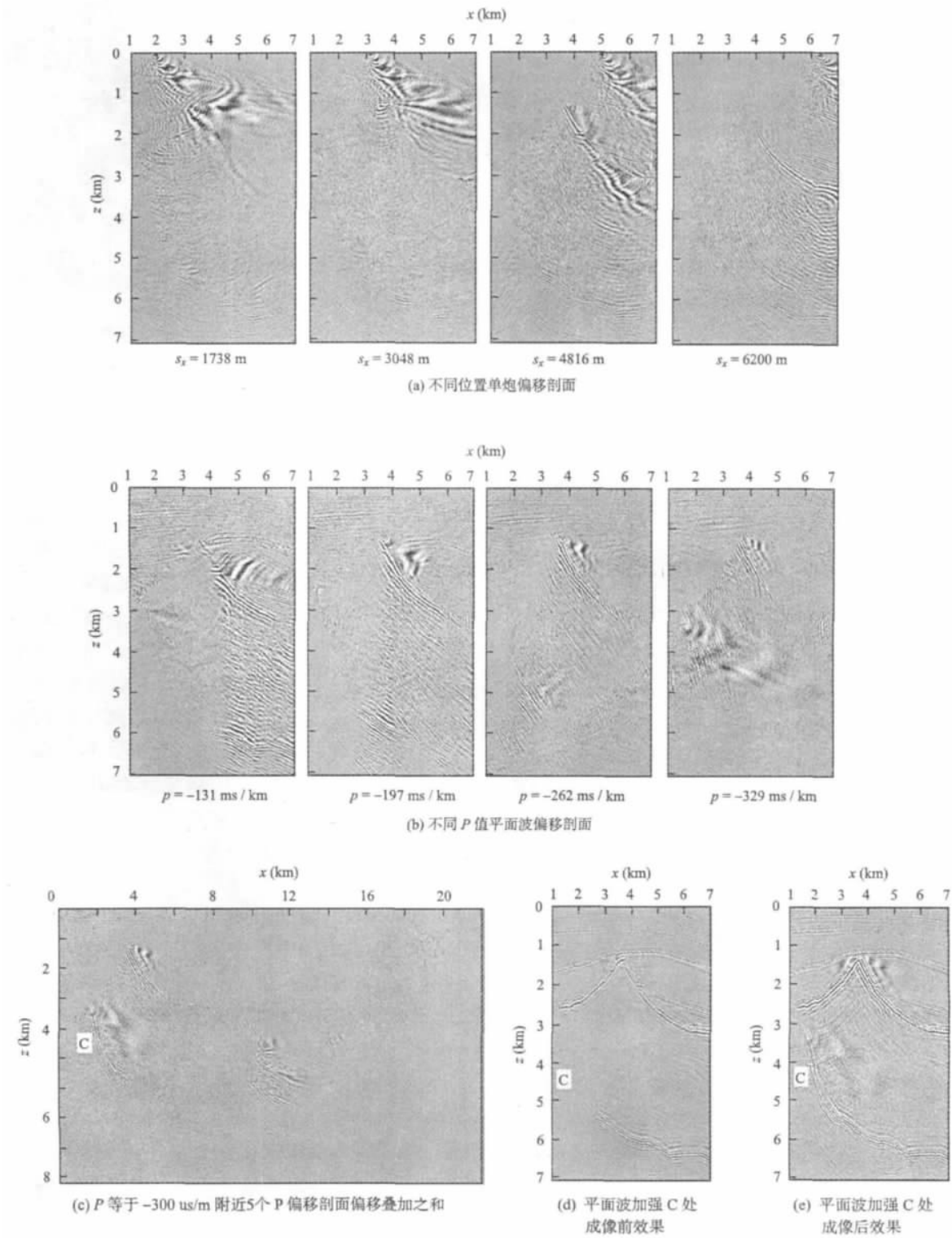


图7 平面波偏移加强特定陡倾界面成像

Fig. 7 Enhancing steep reflectors imaging by plane wave migration

也证明了设计算子的精度很高,而且不受弱各向异性假设限制。从计算量方面考虑,优化的VTI介质IFD算子比各向同性介质多出的计算量部份,为求取差分系数的部份,如果建立优化VTI差分系数库,采用表格查找系数方式,这部份时间就可忽略,而求取系数之后的计算量和各向同性下相同。

作者在文中,结合设计的VTI介质下IFD波场外推算子,将平面波偏移理论推广到VTI介质中,

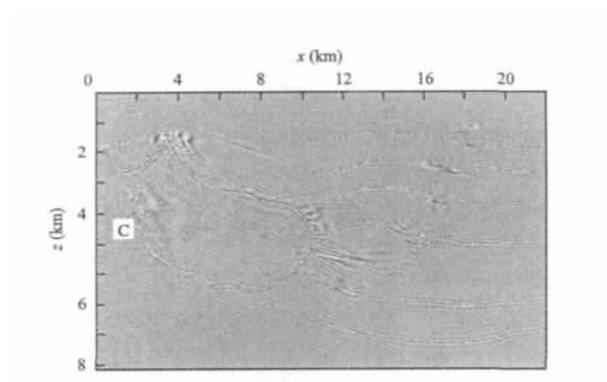


图8 特定P剖面加强陡倾界面C成像后的效果

Fig. 8 Imaging after steep reflectors enhancing by specific P migration

并将该算法用于国际标准 Hess VTI 模型。拟合数据算例表明,VTI 介质下平面波偏移在保证成像质量的同时,大大降低了计算量,这对各向异性偏移研究有重要意义。作者还给出了平面波偏移在加强特定陡倾界面成像方面的应用,平面波偏移用很少的计算量就能加强陡倾界面成像,这是常规炮剖面法偏移没有的一个优势。

#### 参考文献:

- [1] BERKHOUT A J. A real shot - record technology [J]. J Seis Expl, 1992, 1(3): 251.
- [2] 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 [J]. 石油地球物理勘探. 1999, 34(1): 1.
- [3] ZHANG Y, SUN J, NOTFORS C, et al. Delayed - shot 3D depth migration [J]. Geophysics. 2005, 70(5): E21.
- [4] STOFFA PL, SEN MK, SEIFOULLAEV RK, et al. Plane - wave depth migration [J]. Geophysics. 2006, 71(6): S261.
- [5] 崔兴福, 刘卫东, 刘桂宝, 等. 平面波偏移、分角度成像与 AVA 道集生成 [J]. 石油物探. 2007, 46(6): 615.
- [6] 叶月明, 李振春, 仝兆岐, 等. 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(06): 622.
- [7] SHAN G J, BIONDI B. Plane - wave migration in tilted coordinates [J]. Geophysics. 2008, 73(5): S185.
- [8] 韩利. 延迟激发平面波叠前深度偏移研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [9] MARTIN D, EHINGER A, RASOLOFOSAON P. Some aspects of seismic modeling and imaging in anisotropic media using laser ultrasonics: 62nd Ann. Internat. Mtg [J]. Soc. Expl. Geophys. In, 1992: 1373.
- [10] VESTRUM R W, LAWTON D C, SCHMID R. Imaging structures below dipping TI media [J]. Geophysics. 1999, 64(4): 1239.
- [11] YAN L, LINES L, LAWTON D. Influence of seismic anisotropy on prestack depth migration [J]. The Leading Edge. 2004, 23(1): 30.
- [12] ROUSSEAU J. Depth migration in heterogeneous, transversely isotropic media with the phase - shift - plus - interpolation method in 67th Ann [J]. Internat. Mtg. Soc. of Expl. Geophys. 1997: 1703.
- [13] BAUMSTEIN A, ANDERSON J. Wavefield extrapolation in laterally varying VTI media in 73rd Ann [J]. 73th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts. 2003: 945.
- [14] REN J, GERRARD C, MCCLEAN J, et al. Prestack wave - equation depth migration in VTI media [J]. The Leading Edge. 2005, 24(6): 618.
- [15] CLAERBOUT J F. Imaging the Earth's interior [M]. Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [16] RISTOW D, RÜHL T. 3 - D implicit finite - difference migration by multiway splitting [J]. Geophysics. 1997, 62(2): 554.
- [17] LIU L N, GAO H W, LIU H, et al. Wave equation depth migration with optimum split - step Fourier method in 3 - D VTI media [J]. Chinese Journal of Geophysics - Chinese Edition. 2005, 48(2): 406.
- [18] SHAN G J. Optimized implicit finite - difference and Fourier finite - difference migration for VTI media [J]. Geophysics. 2009, 74(6): 189.
- [19] SHAN G. Optimized implicit finite-difference migration for VTI media [J]. In: SEG Annual Meeting; 2006; New Orleans; 2006: 2367.
- [20] Kelley CT. Iterative Methods for Optimization [M]. SIAM Frontiers in Applied Mathematics, 1999.

作者简介: 韩利(1984 -), 男, 河北保定人, 博士, 主要从事地震偏移成像和反演方面的研究。



## ABSTRACTS

### MONITORING FRACTURES DEVELOPMENT BELT OF TIGHT RESERVOIR BY TECHNIQUE OF COHERENT WAVELET

NI Geng-sheng<sup>1,2</sup>, HE Jian-jun<sup>1</sup>, LI Qiong<sup>1</sup>, et al. (1. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Inefficient Oil and Gas Exploitation Division, Southwest Oil and Gas Company, PetroChina, Chengdu Sichuan 610017, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(2): 111

At present, exploration activity have gone into explored phase of lithologic hydrocarbon reservoir at home and abroad, and oil and gas exploration of tight carbonate or shale have showed broad potentials. The fracture is critical hydrocarbon pore volume in this tight reservoir. Firstly, we obtained seismic data volume of different frequency bands by using simulative function of seismic wavelet to make wavelet transformation with 3D seismic data volume. Secondly, we did C3 coherent transformation for 3D seismic data volume of different frequency bands. Low-frequency coherence data predominate the information of fault. By contrast, radio frequency coherence data predominate the message of minor fault or fracture which is controlled by the faults. Finally, C3 coherence data is selectively mixed together through appropriate inter-fusion coefficient. We acquired coherence data volume what can distinguish the development character of fracture by high precision, which increase the accuracy of fracture detection and reservoir prediction. **Key words:** 3D seismic; tight reservoir; C3 coherence; wavelet coherence; fracture detection

### IMPLICIT FINITE-DIFFERENCE PLANE WAVE MIGRATION IN VTI MEDIA

HAN Li, HAN Li-guo, CUI Jie, et al. (College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(2): 115

Implicit finite-difference (IFD) extrapolation operator and plane wave migration in VTI media are studied in this paper. We design VTI media IFD extrapolation operator, and obtain the differential coefficients by nonlinear optimization iteration method with Taylor expansion solution as the initial solution. We verify the high accuracy of the operator by comparing the dispersion curve and migration Impulse response of the IFD extrapolation operator with the theoretical solution. Combining the theory of plane wave migration in isotropic media with the IFD operator in VTI media, plane wave migration are extended to VTI media. Synthetic Hess VTI model data verifies the ef-

fectiveness of the method and the advantage on special steep reflectors imaging. Compared with conventional shot-profile migration in VTI media, plane wave migration largely reduces the computation cost with the same imaging quality, which provides a new way for anisotropic study.

**Key words:** plane wave migration; VTI media migration; anisotropic migration; VTI media wave field extrapolation; implicit finite-difference operator

### IMPROVING COMPUTING EFFICIENCY OF KIRCHHOFF MIGRATION BY COMPRESSING 3-D TRAVEL TIME TABLE

WANG Jun<sup>1</sup>, YANG Chang-chun<sup>2</sup>, LI Bo-tao<sup>2</sup> (1. University of Petroleum, Dong Ying 257061, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(2): 122

Travel time of seismic waves is an important parameter of Kirchhoff migration. In process of 3-D Kirchhoff migration, the enormous travel time table file is frequently read, which leads to a fairly low calculation efficiency. A method is proposed to improve the computing efficiency of 3-D Kirchhoff migration by compressing the ray tracing traveltime table: At first, a smallest rectangle region in 3-D space with regular grids is constructed, where all the travel time data points are included. Then, the 3-D cubic B-spline function is used to fit a cuboidal surface which covers all the 3-D scattered travel time data, and the values of the finite regular grids can be calculated using least square method and are stored into memory in terms of an array. Compressed sparse column method is used to save more space. When the scattered travel time data are needed by migration, they can be decompressed by liner interpolation of 3-D B-spline function. Application to real seismic data shows that the traveltime compression method can not only compress travel time data with high approximate accuracy, stable calculation result, high calculation efficiency, but also improve the numerical efficiency of Kirchhoff migration by twice because the enormous travel time table file needn't be frequently read any more.

**Key words:** kirchhoff migration; computing efficiency; 3-D travel time table compression

### APPLICATION OF VARIANCE ANALYSIS TECHNOLOGY IN ORGANIC REEF PREDICTION

QU Da-peng, XIAO Qiu-hong, ZENG Zhen, et al. (Research Institute of Exploration Southern Division Company, SINOPEC, Chengdu Sichuan 610041,