

蔡明刚,姚陈,王海宁等. 三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集时距及参数估计. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2432-2440. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.027.

Cai M G, Yao C, Wang H N, et al. Moveout and parameter estimation of converted waves at CMP gathers from 3D dipping interface. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(7): 2432-2440. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.027.

三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集时距及参数估计

蔡明刚^{1,2}, 姚 陈¹, 王海宁¹

1 中国地震局地质研究所, 北京 100029

2 中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室, 北京 100029

摘 要 在 PS 转换波资料处理过程中, 往往需要联合 P 波资料提供相应的模型. 在实际应用中存在 P 波和 PS 转换波层位对比困难. 本文仅利用 PS 转换波数据, 通过三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集精确时距关系推导了近似时距解析表达式; 分析了 PS 波的精确与近似时距关系随测线方位、界面倾角与倾向的变化规律及其拟合误差; 并讨论了近似时距关系的三个时距参数随方位的变化特征; 理论上给出描述时距的三维倾斜界面倾角、倾向、深度、纵波速度和横波速度这 5 个独立参数的估计方法, 并通过理论模拟数据证明了该方法的可行性.

关键词 PS 波, 层位对比, 三维倾斜界面, CMP 道集, 参数估计

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.027

中图分类号 P631

收稿日期 2011-03-08, 2012-06-11 收修定稿

Moveout and parameter estimation of converted waves at CMP gathers from 3D dipping interface

CAI Ming-Gang^{1,2}, YAO Chen¹, WANG Hai-Ning¹

1 *The Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

2 *Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China*

Abstract In the processing of converted wave data, P-wave data is often needed to be jointed to provide the corresponding model. In the practical application, there is a difficulty in confirming P-wave and PS-wave from the same reflector. In this article PS-wave data is only used and the approximated moveout analytical expressions of PS-waves are derived at the CMP gathers for the three-dimensional dipping interface. The properties and fitness error are discussed about exact and approximate PS moveout which change with survey azimuths, dipping angles and dip orientations. Furthermore, a theoretical parameter estimation method is also given. The five parameters which are dip angle, dip orientation, depth, P-wave velocity and S-wave velocity are used to describe the relation of travel time and distance. An example from a synthetic model is used to show that this parameter estimation method is feasible.

Keywords PS wave, Horizon calibration, 3D dipping interface, Common Middle Point (CMP) gather, Parameter estimation

1 引言

从 20 世纪 90 年代以来,国内外在海洋四分量 and 陆地三分量地震勘探方面开展了大量研究,内容涉及数据采集、资料处理和解释等各个环节^[1-15]. 由于传统的纵波资料无法提供与岩性识别和裂隙描述等问题有关的横波信息,而纯横波勘探又受制于横波激发费用,因此,目前纵波激发多分量接收成为有效提取地下介质横波信息的主要途径. 纵波激发多分量接收地震数据不仅记录到 P 波,同时还记录到 PS 转换波,即纵波震源激发 P 波向下传播到阻抗差界面上形成的转换 SV 波,有时也被称为 C 波^[16]. 因 PS 转换波在气云成像、岩性识别以及裂隙描述等方面的优势,使得它的研究和应用越来越受关注^[15,17].

目前,多波多分量采集技术显著提高,但处理和解释技术相对滞后^[11]. 其中,PS 转换波时差不对称、转换点散、极性反转、近地表速度结构复杂以及各向异性对地震波激发和传播的影响^[18-24]是造成其速度分析和成像困难的主要原因^[15-17,25-27].

PS 转换波资料处理,无论是动校叠加还是叠前时间偏移都需知道相应的速度模型,其中一个重要参数是纵横波速度比. 目前获取这个参数需要联合 P 波和 PS 转换波叠加剖面^[11]. 但这种联合处理方法的最大困难是如何进行 P 波和 PS 转换波资料的层位对比^[26]. 与单波同相轴对比原则相比,多波层位对比有其特殊性^[28-30]. 因纵波和转换波资料在信噪比、传播路径以及波形、振幅、频率、相位和偏振等动力学特征上均不同,造成层位的解释与对比有一定的难度^[12],目前仍很难做到 P 波和 PS 转换波层位的一一对应.

对 PS 波 CMP 道集, Tsvankin 和 Grechka^[31-32]详细讨论了倾斜界面 VTI 介质条件下的时距特征,并结合 P 波资料进行相应的参数估计. Tsvankin 和 Grechka 研究的基础是 PS 转换波时距的参数方程. 虽然此方程对时距关系是精确的,但不是我们通常所熟悉的关于走时和偏移距的显式表示. 特别是对于 PS 转换波 CMP 道集 NMO 速度沿用传统的定义在时距的顶点位置通过泰勒展开求取,而顶点位置又随测线方位变化,且参数估计所用到的 PS 转换波时距的顶点位置是通过数值计算获得的,没有明确的解析表达式,以上结果限制了独立利用 PS 转换波进行参数估计及 PS 转换波成像. 因此,开展独立的 PS 转换波成像方法研究与参数估计对多波

多分量的发展具有重要意义.

本文仅利用 PS 转换波资料,推导出三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集时距的显式关系,在满足时距近似精度的前提下,给出 PS 转换波时距顶点位置的解析表达式,同时在零偏移距位置对精确走时关系进行泰勒展开获得校正速度. 利用上述三个参数(顶点位置及校正速度)及三维地震勘探多方位数据估计三维倾斜界面倾角、倾向和 CMP 点的界面深度以及纵波速度和横波速度. 在此参数估计的基础上可直接进行 PS 转换波成像,或转为 CCP 叠加成像以及进行叠前时间偏移成像,且可与传统的 P 波资料处理结果进行对比. 虽然目前的 PS 转换波成像方法与参数估计讨论多集中于各向异性介质,但各向同性作为各向异性的背景和基础,考虑各向同性介质条件下 PS 转换波独立成像及参数估计仍对多波多分量技术的发展具有重要参考价值,特别是考虑三维倾斜界面造成的走时及叠加速度的方位效应对各向异性效应的理解很有帮助.

2 理论方法

精确的时距关系以及参数化的近似表达式,方便我们解析讨论 PS 转换波的时距特征,并利用这些特征进行参数估计,发展 PS 转换波的独立成像方法. CMP 道集抽取不依赖模型,且在常规地震勘探获得普遍应用,并取得较好的效果. 结合当前的三维地震勘探,我们推导出给出三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集的精确时距及参数化的近似时距解析表达式.

2.1 精确时距关系

理论上,PS 转换波 CMP 道集即使在水平界面条件下,其时距已不再是双曲. 采用图 1 所示右手坐标系, x_1 轴指向下倾方向, x_3 轴垂直 x_1 轴向下. P 波从地表 S 点激发,向下传播,在界面上 C 点转换

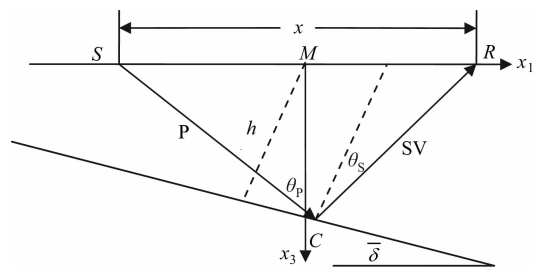


图 1 倾斜界面 P-SV 转换波传播示意图
Fig. 1 The Cartoon of P-SV converted wave propagation for dipping interface

为 SV 波, 向上传播到地表 R 点接收, M 为炮点和检波点的中点. 在 Tsvankin^[31,32] 时距关系的基础上, 将在 $x_1\alpha x_3$ 坐标系下定义的慢度通过坐标变换为依界面法线定义的射线参数, 可得到各向同性介质三维倾斜界面条件下, PS 转换波 CMP 道集时距关系:

$$t = \frac{2(\xi + \eta)[(p^2 + \xi\eta)\cos\bar{\delta} + p(\eta - \xi)\sin\bar{\delta}]}{2\xi\eta\cos\bar{\delta} + p(\eta - \xi)\sin\bar{\delta}}h, \quad (1)$$

$$x = \frac{2p(\xi + \eta)}{2\xi\eta\cos\bar{\delta} + p(\eta - \xi)\sin\bar{\delta}}h. \quad (2)$$

其中, $\xi = \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} - p^2}$, $\eta = \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - p^2}$, x 代表炮到检波点的距离, t 为相应的走时, h 为地表 CMP 点到三维倾斜界面的垂直距离, α 和 β 分别为 P 波和 SV 波速度, p 为射线参数, $\bar{\delta}$ 为三维倾斜界面视倾角, 其大小跟界面倾角 δ 、倾向 ϕ 和测线方位 φ 有关.

射线参数 p 的定义如下:

$$p = \frac{\sin\theta_p}{\alpha} = \frac{\sin\theta_s}{\beta},$$

其中, 入射角 θ_p 和反射角 θ_s 分别为入射 P 波和反射 SV 波与三维倾斜界面法线的夹角, 因此, 射线参数总是非负值.

三维倾斜界面视倾角 $\bar{\delta}$ 具体表示如下:

$$\sin\bar{\delta} = \sin\delta\cos(\phi - \varphi). \quad (3)$$

这里, 测线方位取炮点到检波点的射线方位, 倾向的定义由 Aki 和 Richards 的定量地震学教科书中^[33] 给出. 当测线方位与倾斜界面倾向垂直时, 视倾角等于零; 当测线方位在倾斜界面倾向方位上的投影与倾向方位一致时, 即上倾放炮, 下倾接收, 视倾角为正, 相反时, 即下倾放炮, 上倾接收, 视倾角为负; 当测线方位与倾向方位重合时, 视倾角等于真倾角; 当测线方位与倾向方位相反时, 视倾角等于负的真倾角.

方程(1)和(2)都是由 5 个独立参数表示的, 包括三个界面形态参数(三维倾斜界面深度、倾角和倾向)和两个速度参数(纵波速度和横波速度). 据此很容易正演计算三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集走时, 而不必采用费时的两点射线追踪方法. 在方程推导过程中, 射线参数和炮检距取非负数, 而视倾角有正负之分. 需要特别说明的是, 本文所采用的视倾角定义与 Tsvankin 系列文章里面视倾角的定义相反, 这样做的目的是为了在以后各向异性的研究中可统一使用右手坐标系, 为相应理论的推导提供便利. 为了与前人的研究作比较, 我们可以取负视倾角

时的炮检距为负偏移距, 而取正视倾角时的炮检距为正偏移距. 但基于三维地震勘探数据采集面激发面接收的特点以及构造形态的未知性, 我们统一采用正偏移距, 这样可将双边接收时出现的正负偏移距问题归结为正负视倾角的问题, 而突出三维地震勘探的方位效应.

本文考虑的是各向同性介质 PS 转换波 CMP 道集时距, 主要特征与 Tsvankin^[31] 文章 VTI 介质条件下相似, 即时距顶点位置偏离零偏移距位置. 需要指出的是时距顶点的位置在各向同性介质时只会出现在下倾放炮上倾接收的情况下, 而与 VTI 介质条件下略有不同. 另外, 还需要强调的是 PS 转换波 CMP 道集时距随测线方位的变化而变化, 这将对 5 个独立参数的估计提供必要的理论基础.

2.2 参数化的近似时距

对于三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集时距特征分析以及 5 个参数的估计, 精确解太复杂, 不利于时距特征分析和参数估计. 因此, 我们对精确解在非远偏移距的条件下做近似, 以便获得简洁的、参数化的时距关系.

PS 转换波路径不对称, 不能像纯波那样按炮检距的偶次项作泰勒展开. 因此, 将走时 t 在 $x = 0$ 处做如下形式的泰勒展开, 得到

$$t = t_0 + \frac{dt}{dx}\Big|_{x=0}x + \frac{1}{2}\frac{d^2t}{dx^2}\Big|_{x=0}x^2 + \dots, \quad (4)$$

其中,

$$t_0 = \frac{h}{\alpha}(1 + \gamma), \quad (5)$$

$$\gamma \equiv \frac{\alpha}{\beta}, \quad (6)$$

t_0 为 CMP 点处的 PS 转换波自激自收时间, γ 为纵、横波速度比.

根据(1)和(2)式, 可以推导出:

$$\frac{dt}{dx}\Big|_{x=0} = \frac{(\gamma - 1)\sin\bar{\delta}}{2\alpha}, \quad (7)$$

和

$$\frac{d^2t}{dx^2}\Big|_{x=0} = \frac{\gamma\cos^2\bar{\delta}}{h\alpha(1 + \gamma)}. \quad (8)$$

这里, (7)式与 Tsvankin^[31] 的结果符号相反, 这是因为视倾角正负的定义不同造成的. 从(7)式可以看出, 三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集走时关于偏移距的一阶导数一般情况下在零偏移距处不等于零, 这意味着走时关于零偏移距是不对称的.

将(7)和(8)式代入(4)式, 等式两边平方, 去掉 x 的高次项, 得到三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道

集近似时距关系为

$$t^2 = t_m^2 + \frac{(x+x_0)^2}{V_{\text{cmp,ps}}^2}, \quad (9)$$

其中,

$$t_m^2 = \frac{4\gamma\cos^2\bar{\delta}}{(\gamma-1)^2\sin^2\bar{\delta}+4\gamma\cos^2\bar{\delta}}t_0^2, \quad (10)$$

$$x_0 = \frac{2\alpha(\gamma-1)\sin\bar{\delta}}{(\gamma-1)^2\sin^2\bar{\delta}+4\gamma\cos^2\bar{\delta}}t_0, \quad (11)$$

$$V_{\text{cmp,ps}}^2 = \frac{4\alpha^2}{(\gamma-1)^2\sin^2\bar{\delta}+4\gamma\cos^2\bar{\delta}}. \quad (12)$$

分析(10)–(12)三式,可发现它们满足如下关系:

$$t_0^2 = t_m^2(\varphi) + \frac{x_0^2(\varphi)}{V_{\text{cmp,ps}}^2(\varphi)}. \quad (13)$$

这样(9)式给出的三维倾斜界面 PS 转换波时距可用三个时距参数描述,其中 $V_{\text{cmp,ps}}$ 称为 PS 转换波 CMP 道集的校正速度. 上述参数化的近似时距关系表明,三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集时距关系可近似为双曲线. 从(11)式可知:当 $x_0 < 0$ 时,即下倾放炮上倾接收时,双曲线存在顶点 $(x_{\min}, t_{\min}) = (-x_0, t_m)$,其位置所在的最小到时 t_{\min} 不是零偏移距的自激自收时间 t_0 ,取得最小到时的偏移距为 $x = -x_0$; 当 $x_0 > 0$ 时,即上倾放炮下倾接收时,当 $x = 0$ 时,PS 转换波时距取得最小到时,根据(13)式可知, $t_{\min} = t_0$.

需要强调的是,从(10)式和(11)式可看出,时距的顶点位置 (x_{\min}, t_{\min}) 随纵、横波速度比、三维倾斜界面深度、倾角、倾向以及测线方位的变化而变化. 按照传统的 NMO 速度的定义,在 x_{\min} 处展开, $V_{\text{cmp,ps}}(x_{\min})$ 不能构成一个独立方程而不利于参数估计. 另外,当界面视倾角为负值,且绝对值较大时,如 $\gamma = 2$, $|\bar{\delta}| > 53^\circ$ 时^[25], PS 转换波时距的最小值不存在,无法获得传统意义上的 NMO 速度. 因此,本文在零偏移距位置作泰勒展开,而不是在最小到时位置展开,即使在陡倾角的情况下,精确时距依然可用上文三个时距参数表示的时距关系近似.

如果 $\gamma=1$, (9)式可变为

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{\alpha^2/\cos^2\bar{\delta}}, \quad (14)$$

此为倾斜界面条件下 P 波 CMP 道集精确时距关系^[34].

如果 $\bar{\delta} = 0$, (9)式则为

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{\alpha\beta}, \quad (15)$$

此为水平界面或测线方向垂直于界面倾向时 PS 转换波时距关系. 比较(9)式和(15)式可知,当地下界

面倾斜时,由于 x_0 的存在(陡倾角时, x_0/x 较大),它造成的动校正量无法忽略,这是传统 PS 转换波 CMP 道集基于水平界面时距处理难以成像的一个重要原因.

2.3 近似时距精度及三个时距参数随测线方位的变化特征

近似时距的精度直接影响参数估计的合理性. 下文通过给定的模型(见表 1),分别计算 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 和 360° 等 8 个测线方位下精确时距和近似时距(图 2),讨论相应测线方位的拟合误差(图 3)及影响拟合误差的因素. 同时,利用(10)式、(11)式和(12)式计算三个时距参数,分析它们随测线方位($0^\circ \sim 360^\circ$)的变化特征(图 4).

表 1 三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集时距计算模型

Table 1 The model of calculating P-S moveout at CMP gather from 3-D dipping interface

模型	界面形态参数			速度参数	
	倾角($^\circ$)	倾向($^\circ$)	深度(m)	纵波速度(m/s)	横波速度(m/s)
1	30	300	1000	2000	1000

图 2 和图 3 表明,(9)式在 $x/h < 1$ 时可很好拟合 PS 转换波 CMP 道集时距关系. 其中,图 2(e–h),视倾角为正值,时距最小到时的零偏移距的自激自收时间,这与上文的理论分析一致. 图 2(a–d),视倾角为负值,最小到时的位置偏离零偏移距. 若以纵轴为对称轴将图(a–d)翻转 180° ,将偏移距作为负值,分别与图(e–h)正偏移距合并,可得传统意义上的正负偏移距时距关系图.

图 3 是图 2 中近似时距与精确时距的拟合误差. 从图中可看出,视倾角为正值时,近似走时一般小于精确走时(若视倾角很小,近似走时可大于精确走时),拟合误差相对较小;视倾角为负值时,近似走时大于精确走时,拟合误差相对较大. 基于表 1 所给模型,在 $x/h < 1$ 时,近似时距相对精确时距的最大拟合误差约 ± 20 ms.

从不同模型数值计算结果分析,拟合误差大小与界面深度、视倾角、纵波速度、横波速度和偏移距有关. 一般情况下,偏移距和纵、横波速度比越大拟合误差越大. 视倾角绝对值从小变大时,拟合误差先减小后增大;当视倾角绝对值超过某一角度,走时最小值不存在,走时随偏移距的增大而减小时,视倾角绝对值越大拟合误差反而减小. 相同的偏移距,深度越大,拟合误差越小. 相同的纵、横波速度比,纵、横波速度越大,拟合误差越小.

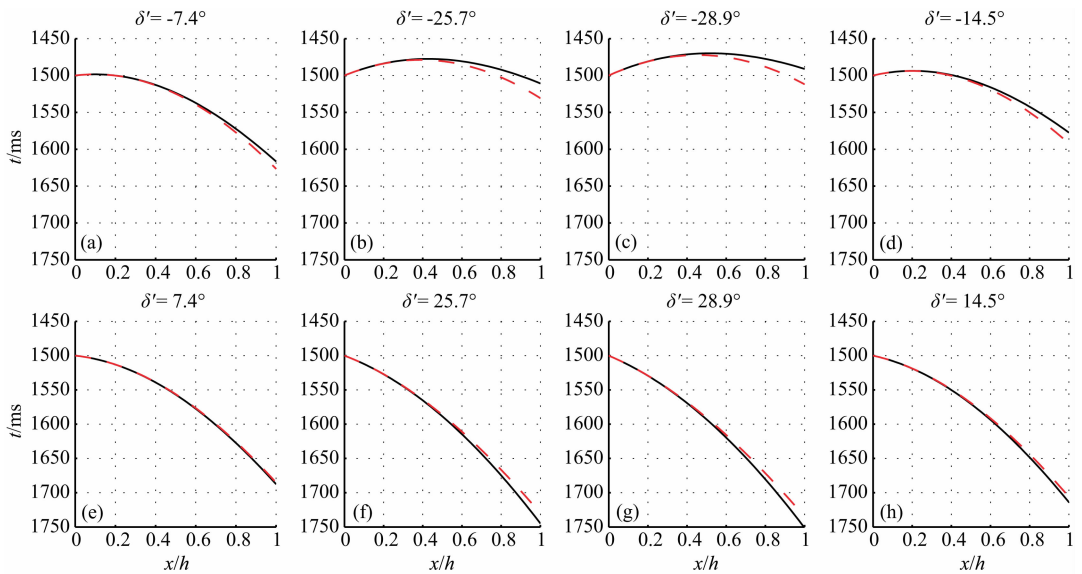


图 2 多方位 PS 转换波 CMP 道集时距

(a)–(h) 测线方位分别为 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ 和 360° 。横轴为炮检距与 CMP 到三维倾斜界面的垂直距离之比; 纵轴为走时; 实黑线是(1)和(2)式计算的精确时距, 虚红线是(9)式计算的近似时距; δ' 为视倾角, (a)–(d) 视倾角为负; (e)–(h) 视倾角为正。

Fig. 2 The moveout of P-SV converted wave from the different survey azimuth

The survey azimuth of (a)–(h) is $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ and 360° , respectively. The x-axis is the ratio of the offset and the perpendicular distance from CMP to 3D dipping interface. The y-axis is traveltime (unit, ms). The black solid line is the exact traveltime calculated by expression (1) and (2). The red dotted line is the approximate traveltime calculated by expression (9). δ' is the apparent dip angle. The δ' of (a)–(d) is negative and of (e)–(h) is positive.

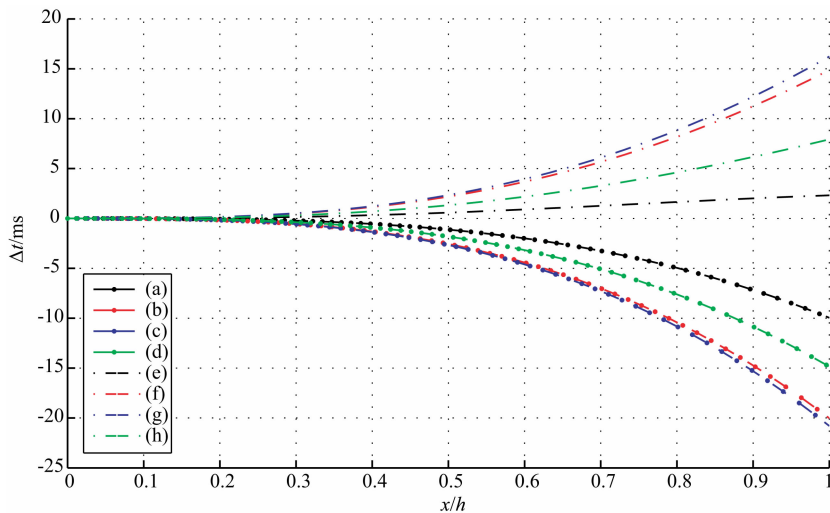


图 3 时距误差

横轴与图 2 相同; 纵轴 $\Delta t = t^{(\text{exact})} - t^{(\text{approx})}$, 单位 ms; 图例(a)–(h)与图 2 相对应。

Fig. 3 The error between the exact and approximate traveltime

The x-axis is the same as Fig. 2. The y-axis is $\Delta t = t^{(\text{exact})} - t^{(\text{approx})}$ (unit, ms). The illustration is corresponding with Fig. 2.

图 4 为三个时距参数随测线方位的变化特征。图 4a 是(11)式 x_0 随测线方位变化的计算结果, 蓝线表示视倾角大于零, 红线表示视倾角小于零。从解析表达式和计算结果分析可知, $|x_0|$ 与界面深度、界面视倾角以及纵横波速度比有关, 与纵、横波速度无关。界面深度、视倾角和纵、横波速度比越大,

$|x_0|$ 越大; 沿倾向方位 $|x_0|$ 最大, 走向方位 $|x_0|$ 为零。对表 1 给的模型, 即使倾角 5° , 沿倾向方位 $|x_0|$ 为 70m, 相当于深度的 7%, 倾角 20° , $|x_0|$ 可达 30%, 而倾角 45° , $|x_0|$ 甚至可达 100%。图 4b 是(10)式 t_m 随测线方位变化的计算结果。从图中可看出, 只有当视倾角绝对值较大时(如,

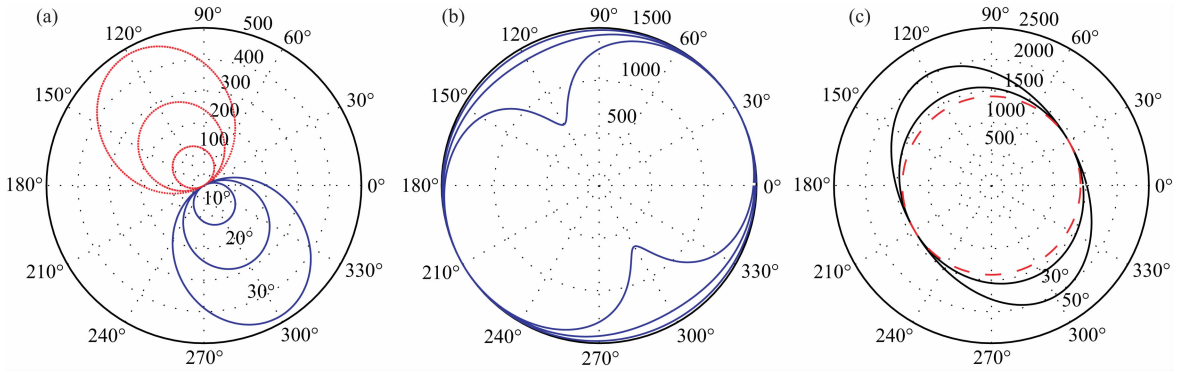


图 4 时距参数方位变化

(a)、(b)和(c)分别表示 x_0 、 t_m 和 $V_{\text{cmp,ps}}$ 随测线方位的变化;(a)中蓝线表示正值,红线表示负值;从圆周到圆心倾角分别为 30° 、 20° 和 10° ;
(b)中从圆周到圆心倾角分别为 30° 、 50° 和 80° ;(c)中黑线为 $V_{\text{cmp,ps}}$,红线为 $\sqrt{\alpha\beta}$;从圆周到圆心倾角分别为 50° 和 30° 。

Fig. 4 The parameter x_0 , t_m and $V_{\text{cmp,ps}}$ varying with survey azimuth

(a)、(b) and (c) is x_0 , t_m and $V_{\text{cmp,ps}}$ varied with survey azimuth;(a): the blue line represent positive data and red line represent negative data. The dip angle is 30° , 20° and 10° from the circumference to the center of the circle, respectively. (b): The dip angle is 30° , 50° and 80° from the circumference to the center of the circle, respectively;(c): the black line represent $V_{\text{cmp,ps}}$ and red line represent $\sqrt{\alpha\beta}$. The dip angle is 50° and 30° from the circumference to the center of the circle, respectively.

$|\delta| > 50^\circ$), $\Delta = t_m - t_0$ 才有明显变化. 图 4c 是(12)式校正速度 $V_{\text{cmp,ps}}$ 随测线方位变化的计算结果. 从(12)式分析可知, 当 $\gamma = 5.828$ 时, $V_{\text{cmp,ps}} = \sqrt{\alpha\beta}$; 当 $\gamma \neq 5.828$ 时, $V_{\text{cmp,ps}}$ 随测线方位的变化是椭圆; 当 $\gamma < 5.828$ 时, 椭圆长轴沿界面倾向, 短轴沿界面走向; 当 $\gamma > 5.828$ 时, 椭圆长轴沿界面走向, 短轴沿界面倾向. 图 4c 是 $\gamma = 2$, 不同倾角下 $V_{\text{cmp,ps}}$ 随测线方位的变化图. 从图中可看出, 倾角越大, 椭圆长轴越大, $V_{\text{cmp,ps}}$ 随测线方位的变化越大.

3 参数估计

从(10)、(11)和(12)式可知, 三个参数 t_m^2 、 x_0 和 $V_{\text{cmp,ps}}^2$ 均与测线方位有关, 理论上可通过某测线方位的时距数据求得这三个参数. 分析(13)式可知, 给定两个不同的测线方位, 在 $x_0 \neq 0$ 时, 三个参数 t_m^2 、 x_0 和 $V_{\text{cmp,ps}}^2$ 共构成 6 个方程, 而仅有 5 个是独立的. 利用这 5 个独立方程, 可估计三个界面形态参数和两个速度参数.

3.1 界面倾向估计

给定同一个 CMP 点两个不同测线方位 φ_1 和 φ_2 的 PS 转换波数据, 只要 $x_0(\varphi_2) \neq 0$, 可定义参数

$$a \equiv \frac{x_0(\varphi_1)}{V_{\text{cmp,ps}}^2(\varphi_1)} \bigg/ \frac{x_0(\varphi_2)}{V_{\text{cmp,ps}}^2(\varphi_2)},$$

联立(11)式、(12)式和(3)式, 则三维倾斜界面倾向表示为

$$\tan\phi = \frac{\cos\varphi_1 - a\cos\varphi_2}{a\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1}. \quad (16)$$

从(16)式可看出, 三维倾斜界面倾向有两个解, ϕ 和 $\phi + \pi$. 此时综合考虑(11)式和(3)式的正负可唯一确定倾向方位.

特殊情况下, 如果所有的测线方位均使得 $x_0 = 0$, 那么根据(11)式和(3)式可知, $\delta = 0$ 时地下介质水平. 此时, PS 转换波时距关系由(15)式表示, 与测线方位无关, 仅仅通过 PS 转换波数据无法分别确定纵波和横波速度. 如果只有某两个测线方位使得 $x_0 = 0$, 那么(11)式和(3)式可知, $\cos(\phi - \varphi) = 0$, 从而界面倾向 $\phi = \varphi + \frac{\pi}{2}$, 或 $\phi = \varphi + \frac{3\pi}{2}$. 同样利用(11)式和(3)式可唯一确定倾向方位. 由此可见, 多方位 PS 转换波数据是独立进行参数估计的保障.

3.2 界面倾角估计

同倾向的估计类似, 当 $x_0(\varphi_2) \neq 0$ 时, 定义参数

$$b \equiv \frac{x_0^2(\varphi_1)}{V_{\text{cmp,ps}}^2(\varphi_1)t_m^2(\varphi_1)} \bigg/ \frac{x_0^2(\varphi_2)}{V_{\text{cmp,ps}}^2(\varphi_2)t_m^2(\varphi_2)},$$

即只要给定的两个测线不在同一条直线上, 根据(13)式和(3)式可知, $t_{\min}(\varphi_1) \neq t_{\min}(\varphi_2)$, $b \neq 1$. 在 3.1 节参数估计的基础上再联立(10)式, 则三维倾斜界面倾角表示为

$$\sin^2\delta = \frac{1}{1-b} \left[\frac{1}{\cos^2(\phi - \varphi_2)} - \frac{b}{\cos^2(\phi - \varphi_1)} \right]. \quad (17)$$

3.3 纵、横波速度比估计

在视倾角不等于零时, 联立(10)式、(11)式和

(12)式,有

$$\frac{x_{\min}^2(\varphi)}{V_{\text{cmp,ps}}^2(\varphi)t_{\min}^2(\varphi)\tan^2\bar{\delta}} = \frac{(\gamma-1)^2}{4\gamma}, \quad (18)$$

式左边为可求量,是关于纵、横波速度比 γ 的一元二次方程. 如果将 $\gamma \equiv 1/\bar{\gamma}$, 代入(18)式,有

$$\frac{x_{\min}^2(\varphi)}{V_{\text{cmp,ps}}^2(\varphi)t_{\min}^2(\varphi)\tan^2\bar{\delta}} = \frac{(\bar{\gamma}-1)^2}{4\bar{\gamma}}, \quad (19)$$

形式与(18)式完全相同,说明(18)和(19)式的两个根分别是 γ 和 $\bar{\gamma}$.

3.4 纵波速度及 CMP 点到三维倾斜界面的垂直距离估计

将 3.1、3.2 和 3.3 的结果代入(12)式,给出纵波速度表达式

$$\alpha^2 = \frac{1}{4}V_{\text{cmp,ps}}^2[(\gamma-1)^2\sin^2\bar{\delta} + 4\gamma\cos^2\bar{\delta}]. \quad (20)$$

同时,再利用(5)式、(13)式和(18)式,得 CMP 点到三维倾斜界面的垂直距离

$$h = \frac{\alpha}{1+\bar{\gamma}}t_0. \quad (21)$$

3.5 数值计算

对表 1 给定的模型,若利用近似时距数据可准确估计相应的 5 个独立参数. 因近似时距与精确时距往往存在不同程度的误差,通过计算不同测线方位的精确走时,取其中两个测线方位下的时距数据(见表 2),在不考虑时距拾取误差的情况下,利用上述参数估计方法,对上述 5 个独立参数进行估计,计算结果见表 3.

表 2 参数估计时距数据

Table 2 The data used to parameter estimation

测线方位(°)	偏移距(m)	时间(ms)
3	0	43.1 204.6 1500 1503 1518
12	0	42.5 202.2 1500 1501 1515

表 3 参数估计结果

Table 3 The result of the parameter estimation

模型	界面形态参数			速度参数	
	倾向(°)	深度(m)	纵波速度(m/s)	横波速度(m/s)	
1	26.4	300	983.4	2073	959

数值计算结果表明,利用理论精确时距数据求解三个时距参数,进而估计界面形态和速度参数是可行的,解稳定且唯一确定. 考虑实际数据拾取误差,上述参数估计误差在实际资料处理中,可发展相应的反演算法,通过多方位多道时距数据约束,求取最优参数;且求解的过程完全独立于 P 波处理结

果,避免了联合 P 波和 PS 转换波数据遇到的层位对比困难. 同时,相应的参数估计可作为 CCP 叠加和偏移的初始模型.

4 结 论

在三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集精确时距关系基础上,本文推导给出其近似解析表达式,讨论了 PS 转换波时距特征、拟合误差和三个时距参数的方位变化,并利用此解析表达式提出 5 个独立参数的估计方法,可获得以下结论:

(1) 三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集在视倾角为中、小角度且为负值时,存在最小到时. 最小到时小于零偏移距自激自收时间,但随方位变化不明显. 最小到时所在位置偏离零偏移距,随方位变化明显,与界面深度、视倾角以及纵横波速度比有关,与纵、横波速度无关,特别对视倾角绝对值很敏感;

(2) 近似时距为双曲,在 $x/h < 1$ 时,可很好拟合精确时距. 拟合误差与界面深度、视倾角、纵波速度、横波速度和偏移距有关. 一般情况下,偏移距和纵、横波速度比越大拟合误差越大;相同的偏移距,深度越大,拟合误差越小;相同的纵、横波速度比,纵、横波速度越大,拟合误差越小;视倾角为正时,即上倾放炮下倾接收拟合误差小,视倾角为负时,即下倾放炮上倾接收拟合误差相对较大;

(3) 理论上,利用参数化的近似时距关系,通过两个测线方位 PS 转换波数据可完全唯一获得描述三维倾斜界面 PS 转换波 CMP 道集时距的 5 个独立参数,分别为界面倾角、倾向、深度、纵波速度和横波速度,避免了联合 P 波和 PS 转换波资料面临的层位对比困难.

参考文献(References)

- [1] 何汉漪,朱宏彰. 海上多波地震技术及其应用. 北京: 中国海洋石油总公司, 1999.
He H Y, Zhu H Z. Marine multicomponent seismology and its applications (in Chinese). Beijing: CNOOC, 1999.
- [2] Li X Y, MacBeth C. Fracture detection with marine P-S mode conversion: Proceedings of the Offshore Technology Conference, 1999, Houston, TX, Paper no. 10941MS.
- [3] Li X Y, Yuan J. Converted-wave moveout and parameter estimation for transverse isotropy. 61st Conf, Eur. Assn. Geosci. Eng. Extended Abstracts, 1999: 4-35.
- [4] Caldwell J. Marine multicomponent seismology. *The Leading Edge*, 1999, 18(11): 1274-1282.
- [5] Zhu X. Recent advances in multicomponent processing. *The*

- Leading Edge*, 1999, 18(11): 1283-1289.
- [6] 张中杰. 多分量地震资料的各向异性处理与解释方法. 哈尔滨: 黑龙江教育出版社, 2002.
Zhang Z J. Multi-Component Seismic Data Processing and Interpretation for Anisotropy (in Chinese). Haerbin: Heilongjiang Education Press, 2002.
- [7] 董敏煜. 多波多分量地震勘探. 北京: 石油工业出版社, 2002.
Dong M Y. Multi-Wave and Multi-Component Seismic Exploration (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [8] 徐丽萍, 杨勤勇. 多波多分量地震技术与展望. 勘探地球物理进展, 2002, 25(3): 47-52.
Xu L P, Yang Q Y. On the development and prospect of multiwave multicomponent seismology. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2002, 25(3): 47-52.
- [9] Stewart R R, Gaiser J E, Brown R J, et al. Converted-wave seismic exploration; methods. *Geophysics*, 2002, 67(5): 1348-1363.
- [10] Stewart R R, Gaiser J E, Brown R J, et al. Converted-wave seismic exploration; Applications. *Geophysics*, 2003, 68(1): 40-57.
- [11] Li X Y, Yuan J. Converted-wave moveout and conversion-point equations in layered VTI media; theory and applications. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 54(3-4): 297-318.
- [12] 张永刚, 王赞, 王妙月. 目前多分量地震勘探中的几个关键问题. 地球物理学报, 2004, 47(1): 151-155.
Zhang Y G, Wang Y, Wang M Y. Some key problems in the multi-component seismic exploration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(1): 151-155.
- [13] Dai H, Li X Y. The effects of migration velocity errors on traveltimes accuracy in prestack Kirchhoff time migration and the image of PS converted waves. *Geophysics*, 2006, 71: s73-s83.
- [14] 季玉新, 魏修成, 陈天胜. 关于多波多分量地震资料极性问题的讨论. 石油物探, 2010, 49(1): 99-103.
Ji Y X, Wei X C, Chen T S. Discussion on the polarity of multi-component seismic data. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2010, 49(1): 99-103.
- [15] Tsvankin I, Gaiser J, Grechka V, et al. Seismic anisotropy in exploration and reservoir characterization: An overview. *Geophysics*, 2010, 75(5): 75A15-75A29.
- [16] Thomsen L. Converted-wave reflection seismology over anisotropic inhomogeneous media. *Geophysics*, 1999, 64(3): 678-690.
- [17] Gaiser J E. Advantages of 3-D PS-wave data to unravel S-wave birefringence for fracture detection. 70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2000: 1201-1204.
- [18] 蔡晓刚, 蔡明刚. 弦截迭代法在求取 P-S 转换波转换点位置和旅行时中的应用—以单一水平界面 VTI 介质为例. 石油物探, 2012, 51(1): 79-85.
Cai X G, Cai M G. Application of secant iterative method for calculating P-S wave converted-point position and travel time: case study of VTI medium with single horizontal reflector. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2012, 51(1): 79-85.
- [19] 蔡晓刚, 姚陈, 陈晓非. 各向异性 ATI 介质剪切位错源地震矩张量. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1772-1782.
Cai X G, Yao C, Chen X F. Seismic moment tensors in anisotropic ATI media; shear faulting. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(7): 1772-1782.
- [20] 蔡晓刚. 裂隙参数对衰减各向异性影响的数值模拟. 地震地质, 2011, 33(3): 694-705.
Cai X G. The effect of crack parameters on attenuation anisotropy: numerical modeling. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2011, 33(3): 694-705.
- [21] 蔡晓刚. 各向异性 ATI 介质地震矩张量理论研究. 国际地震动态, 2011, 395(11): 46-48.
Cai X G. The theoretical studies on seismic moment tensor in anisotropic ATI media. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2011, 395(11): 46-48.
- [22] 蔡晓刚. 各向异性 ATI 介质剪切位错点源 P 波远场辐射. CT 理论与应用研究, 2011, 20(4): 433-452.
Cai X G. Far-field P-wave radiation pattern from ATI shear dislocation; theoretical studies. *CT Theory and Applications* (in Chinese), 2011, 20(4): 433-452.
- [23] 蔡晓刚. 各向异性 ATI 介质地震矩张量研究. 地壳构造与地壳应力文集, 2011, 23: 1-14.
Cai X G. An introduction to seismic moment tensor research in ATI anisotropic media. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics* (in Chinese), 2011, 23: 1-14.
- [24] 蔡晓刚. 各向异性介质断层震源等效体力. 地壳构造与地壳应力文集, 2011, 23: 15-27.
Cai X G. Equivalent body-forces and static deformation of fault sources for anisotropic medium. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics* (in Chinese), 2011, 23: 15-27.
- [25] Grechka V, Tsvankin I, Bakulin A, et al. Joint inversion of PP and PS reflection data for VTI media: A North sea case study. *Geophysics*, 2002, 67(5): 1382-1395.
- [26] Grechka V, Tsvankin I. PP+PS=SS. *Geophysics*, 2002, 67(6): 1961-1971.
- [27] Grechka V, Tsvankin I. The joint nonhyperbolic moveout inversion of PP and PS data in VTI media. *Geophysics*, 2002, 67(6): 1929-1932.
- [28] 贺振华, 何樵登, 黄德济等. 多波资料综合解释方法研究的若干进展. 矿物岩石, 1997, 17(4): 76-93.
He Z H, He Q D, Huang J D, et al. Recent advances in integrative interpretation using seismic multiwave data. *Journal of Mineralogy and Petrology* (in Chinese), 1997, 17(4): 76-93.
- [29] 黄德济, 贺振华, 赵宪生. 多波层位对比的原则与方法. 物探化探计算技术, 1996, 18(3): 194-205.

- Huang D J, He Z H, Zhao X S. Principles and methods in seismic layer correlation using multiwave reflective data. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 1996, 18(3): 194-205.
- [30] 马劲风, 傅旦丹, 刘一峰等. 转换波人工合成地震记录制作及纵、横波层位对比. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(1): 60-67.
- Ma J F, Fu D D, Liu Y F, et al. Making c-wave synthetic seismogram and comprasion of P-wave and S-wave's layer. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2004, 39(1): 60-67.
- [31] Tsvankin I, Grechka V. Dip moveout of converted waves and parameter estimation in transversely isotropic media. *Geophys. Prosp.*, 2000, 48(2): 257-292.
- [32] Tsvankin I, Grechka V. 3D description and inversion of reflection moveout of PS-waves in anisotropic media. *Geophys. Prosp.*, 2002, 50(3): 301-306.
- [33] Aki K, Richards P G. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. San Francisco: Freeman, 1980.
- [34] Levin F K. Apparent velocity from dipping interface reflections. *Geophysics*, 1971, 36(3): 510-516.

(本文编辑 汪海英)