

# 一种 PS 波与 PP 波反射时间匹配方法\*

李生杰<sup>1,2</sup>, 张春涛<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;  
2. 中国石油大学 CNPC 物探重点实验室, 北京 102249)

**摘要:** 多波多分量地震资料解释中, 反射纵波与转换横波反射时间关系是影响地震储层预测的关键因素之一。该文在前人研究工作基础上, 提出了利用转换波叠前道集进行纵横波速度比提取及纵波与转换横波反射时间匹配处理方法。模型资料计算结果表明, 文中所述方法可以直接由转换波道集计算得到横波速度、纵横波速度比等参数, 应用这些参数可实现纵波与转换波反射时间匹配处理。该方法具有一定的计算精度, 特别适合于水平层状地层多波多分量资料处理。

**关键词:** 转换波; 速度比; 旅行时间; 时间匹配; 速度扫描

**中图分类号:** O451 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 06-0043-05

## A Method for PS to PP Reflection Time Mapping

Li Shengjie<sup>1,2</sup>, ZHANG Chuntao<sup>1</sup>

(1. State Key Lab of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum,  
Beijing 102249, China;

2. CNPC Key Lab of Geophysical Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** PS to PP time mapping is one of key factors affecting seismic reservoir predictions in multi-component seismic interpretations. Based on prior work, a new method is presented for the ratio of compressional velocity and shear velocity scanning and PS to PP reflection time mapping with using converted-wave prestack data. Model data results show that converted-wave velocity, the ratio of compressional velocity and shear velocity can be obtained directly from converted-wave seismic gathers, and P wave and PS wave reflection time can be automatically matched by means of the method presented. It works well with model data, suits for multicomponent seismic data processing in an area with horizontal formation.

**Key words:** converted wave; the ratio of velocities; travel time; time mapping; velocity scanning.

通常, 解决反射纵波 (下称 P 波) 与转换横波 (下称 PS 波) 反射时间匹配问题常采用叠后局部标定等方法<sup>[1-2]</sup>, 即对目标层附近相关较好的 P 波与 PS 波同相轴进行匹配。此类方法对于叠前转换波时间处理比较困难<sup>[3-4]</sup>。P 波与 PS 波反射时间差异主要由反射界面上覆地层纵、横波速度与传播路径所决定<sup>[5]</sup>。因此, 处理 P 波与 PS 波反射时间关系的关键是如何准确获取纵波、转换波平均速度或它们的速度比。

根据不同介质模型, 有许多计算地震波旅行时间的方法<sup>[6]</sup>。魏修成等<sup>[7]</sup>讨论了垂向非均匀介质情况下, 不同速度模型与地震波走时关系。Ts-vankin 与 Thomsen<sup>[8]</sup>给出了各向异性介质转换波时距方程; 在此基础上 Thomasen<sup>[9]</sup>和 Pawan<sup>[10]</sup>给出了更为实用的转换波旅行时间方程。本文在前人研究工作基础上, 提出了直接利用转换波叠前道集进行纵横波速度比提取及 P 波与 PS 波反射时间匹配处理方法, 取得一定效果。

\* 收稿日期: 2011-06-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2007CB209601)

作者简介: 李生杰 (1962 年生), 男, 博士, 副教授; E-mail: richard@cup.edu.cn

## 1 基本原理

均匀水平介质情况下, P 波与 PS 波传播路径如图 1 所示。

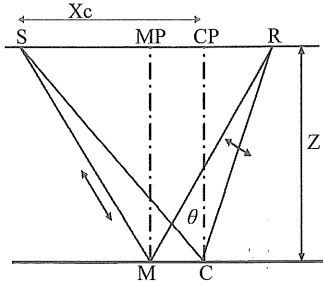


图 1 多波传播路径示意图

Fig. 1 Schematic illustrating the multi-wave ray path

图中 S 为激发点位置, R 为接收点位置, M 为纵波反射点位置, MP 为纵波反射点在地面投影位置, C 为转换波反射点位置, CP 为转换点在地面的投影位置, Z 为反射界面深度。

P 波零偏移距地震记录的传播时间  $t_{p0}$  可表示为

$$t_{p0} = \frac{2Z}{V_p} \quad (1)$$

其中  $V_p$  为纵波垂直传播速度, Z 为反射界面深度。

PS 波零偏移距地震记录的传播时间  $t_{ps0}$  可表示为

$$t_{ps0} = \frac{Z}{V_p} + \frac{Z}{V_s} \quad (2)$$

其中  $V_s$  为地层横波速度。

由 (1) 与 (2) 式可知, 同一反射界面上 P 波与 PS 波传播时间关系为<sup>[11]</sup>

$$t_{p0} = \frac{2t_{ps0}}{1 + V_p/V_s} \quad (3)$$

定义纵横波速度比  $\gamma_0$  为

$$\gamma_0 = V_p/V_s \quad (4)$$

对于层状介质, 上述速度可取纵、横波平均速度替代。

由 P 波和 PS 波传播时间关系可知, 匹配两者反射时间关系需要获取准确的地震波速度或速度比。

### 1.1 PS 波传播时间方程

Tessmer 与 Behle<sup>[12]</sup> 推导了均匀介质水平反射层情况下 PS 波旅行时间与反射点之间关系, 并在一定假设条件下给出了转换波旅行时间与纵横波速度比关系。Yilmaz<sup>[13]</sup> 推导出双平方根类型的 PS 波传播时间方程, 利用该方程可计算得到纵波速度和

转换波速度信息。但不能直接获取 PS 波速度信息。Tsvankin 与 Thomsen 给出了非双曲线型转换波传播时间方程, 该方程分别考虑了均匀介质及各向异性介质情况下, 转换波传播时间与速度、速度比及近排列位置的关系, 方程形式如下:

$$t_{ps}^2(x) = t_{ps0}^2 + A_2 x^2 + \frac{A_4 x^4}{1 + A_5 x^2} \quad (5)$$

其中  $t_{ps0}$  为零偏移距处 PS 波传播时间;  $x$  为炮检距。

$$A_2 = \frac{1}{V_{ps}^2}$$

$$A_4 = \frac{-1}{(1 + \gamma_{eff})} \left[ 2\eta \frac{(\gamma_0^2 - 1)}{\gamma_0} \gamma_{eff} + \frac{(\gamma_0^2 - 1)^2}{4(\gamma_0 - 1)} \right] \frac{1}{V_{ps}^2 \cdot t_{ps0}^2}$$

$$A_5 = \frac{-A_4 V_{ps}^2}{1 - \frac{V_{ps}^2}{V_p^2 (1 + 2\eta)}}$$

当参数  $\eta$  非常小时 (弱各向异性或均匀介质情况下),  $A_4$  与  $A_5$  可简化为:

$$A_4 = \frac{-(\gamma_0 - 1)^2}{4(\gamma_0 + 1) V_{ps}^4 \cdot t_{ps0}^2}$$

$$A_5 = \frac{-A_4 V_{ps}^2}{1 - \frac{V_{ps}^2}{V_p^2}}$$

将上述系数代入方程 (5), 可得:

$$t_{ps}^2(x) = t_{ps0}^2 + \frac{x^2}{V_{ps}^2} - \left[ \frac{(\gamma_0 - 1)^2 (V_p^2 - V_{ps}^2)}{4(V_p^2 - V_{ps}^2)(\gamma_0 + 1)t_{ps0}^2 \cdot V_{ps}^4 + (\gamma_0 - 1)^2 V_p^2 V_{ps}^2 x^2} \right] x^4 \quad (6)$$

其中  $V_p$  为纵波动校正速度;  $V_{ps}$  为转换波动校正速度。

对于水平层状各向同性介质而言, 可以用反射界面之上纵波平均速度、转换波平均速度近似  $V_p$  和  $V_{ps}$ , 因此, 方程 (6) 可进一步简化为

$$t_{ps}^2(x) = t_{ps0}^2 + \frac{x^2}{V_{ps}^2} -$$

$$\left[ \frac{(\gamma_0 - 1)^2}{4(\gamma_0 + 1)t_{ps0}^2 \cdot V_{ps}^4 + \gamma_0(\gamma_0 - 1) \cdot V_{ps}^2 \cdot x^2} \right] x^4 \quad (7)$$

方程 (7) 将转换波传播时间与纵横波速度比、转换波速度、偏移距联系起来, 使得我们利用转换波数据进行速度或速度比扫描成为可能。

### 1.2 相似系数谱计算

利用方程 (7) 可以计算得到转换波相似系数谱, 与常规纵波速度谱不同的是方程 (7) 中转换

波传播时间为零偏移距时间、转换波速度及速度比的函数，由此方程可计算得到相似系数体。所采用的相似系数公式为

$$SC = \frac{\left[ \sum_{j=k-N/2}^{k+N/2} \left( \sum_{i=1}^M f_{i,j(i)} \right) \right]^2}{M \sum_{j=k-N/2}^{k+N/2} \sum_{i=1}^M f_{i,j(i)}^2} \quad (8)$$

其中： $k$  是利用时距曲线公式计算的同相轴时间； $N$  是计算速度谱选择的时窗长度； $M$  是地震道数； $i, j$  分别为偏移距位置和样点数； $f_{i,j(i)}$  为对应点的地震振幅； $SC$  为相似系数。

## 2 模型计算分析

### 2.1 模型设计与相似系数体计算

为验证上述计算方法，我们设计了一个层状各向同性地层模型，模型各参数参见表 1。

表 1 模型参数

Table 1 parameters of The model

$H/m$	$V_{p0}/(m \cdot s^{-1})$	$V_{s0}/(m \cdot s^{-1})$	$\gamma_0$
100	3 000	1 395	2.15
900	3 500	1 636	2.15
1 700	4 000	1 878	2.14

模型参数中  $V_{p0}$ 、 $V_{s0}$  为地层纵横波速度， $H$  为地层埋藏深度， $\gamma_0$  为速度比。

根据该模型，采用射线追踪方法计算得到转换波叠前道集，见图 2a。使用方程 (7) 与 (8) 对此道集计算相似系数体，具体计算过程中，首先沿零偏移距转换波传播时间  $t_{ps0}$ ，在转换波速度 1 500 ~ 4 000 m/s 范围、速度比 2.0—3.0 之间进行扫描，建立相似系数体  $SC(t_{ps0}, V_{ps}, \gamma_0)$ ，参见图 2b。

进行速度分析时，首先沿  $\gamma_0$  轴对  $t_{ps0} - V_{ps}$  平面计算相似系数谱（见图 3a），并根据该平面中相似系数大小，拾取各个反射界面  $t_{ps0}$  时间对应处相似系数较大的转换波速度  $V_{ps}(t_{ps0})$ ；之后，根据  $t_{ps0}$  时间对相似系数体  $SC(t_{ps0}, V_{ps}, \gamma_0)$  按各  $t_{ps0}$  时间进行切片（参见图 2b），形成  $V_{ps} - \gamma_0$  平面，如图 3b 所示。

分析  $SC(V_{ps}, \gamma_0)$  上  $V_{ps}$  与速度比关系，根据相似系数计算得到一条曲线  $SC(\gamma_0)$ ，参见图 3c，拾取该曲线中相似系数最大值对应的  $\gamma_0$  值。此过程相当于给定  $V_{ps}$  和  $\gamma_0$  扫描范围来计算一个三维的数

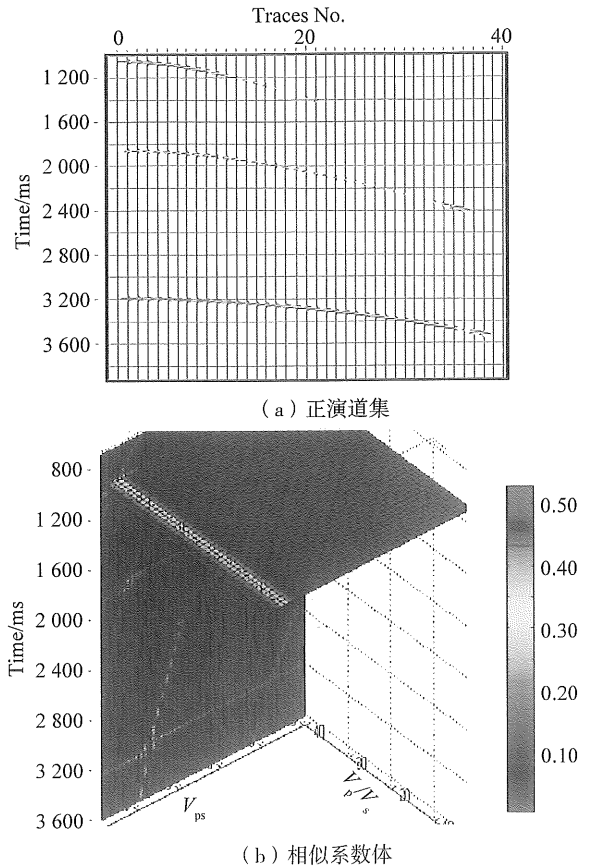


图 2 转换波相似系数数据体建立

Fig. 2 The converted-wave 3D semblance coefficient volume

据体，并且寻找一个合适的速度比与转换波速度，使得相似系数  $SC$  谱取得最大值。

### 2.2 误差分析

根据上述速度比扫描分析方法，可以对转换波道集计算的相似系数体进行速度与速度比分析，计算并拾取各个反射界面处  $V_{ps}$  和速度比  $\gamma_0$ 。速度分析方法与纵波速度谱分析方法很相近，区别是转换波速度分析是在三参数体中进行的。根据上述速度比拾取方法，对模型数据进行了速度与速度比拾取，各界面计算结果如表 2 所示。通过将本方法拾取的转换波速度、速度比与模型设计参数进行对比，对计算精度进行了分析。

表 2 速度比误差

Table 2 Velocity ratio calculation error

层位	拾取的 $\gamma_0$	原始的 $\gamma_0$	误差/%
1	2.055	2.15	-4.42
2	2.15	2.15	0
3	2.10	2.14	-1.87

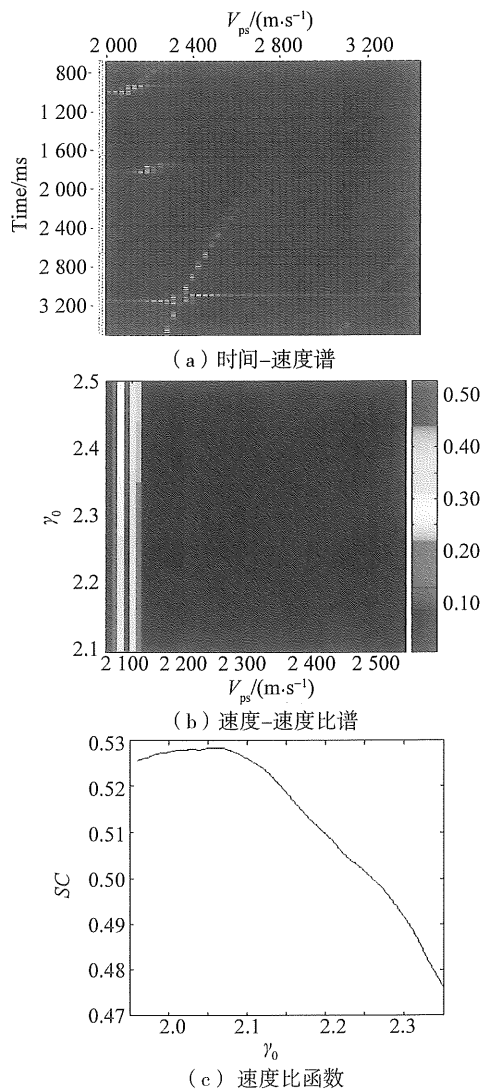


图 3 纵横波速度比扫描分析

Fig. 3 The analysis of velocity ratio scanning

表 2 中拾取  $\gamma_0$  是由模型数据计算的相似系数体进行速度分析的结果, 原始  $\gamma_0$  是模型设计所采用的速度比。对比拾取速度比与实际速度比可知, 浅层拾取速度比与实际速度比相差比较大, 但深层拾取结果与实际速度比相差比较小。

上述误差分析表明, 拾取的速度比  $\gamma_0$  与实际值比较接近, 其误差小于 5%, 说明本方法适合于层状介质下转换波速度分析。因此, 可利用本文所述速度分析的方法进行转换波速度分析, 拾取平均速度比  $\gamma_0$ 。

### 3 P 波与 PS 波时间匹配处理

通过上述方法可获得纵横波速度比, 进一步可根据方程 (3) 进行 P 波与 PS 波反射时间匹配。

根据某测井纵横波速度及密度资料, 设计了一

个 9 层水平模型。并采用射线追踪正演方法分别计算了 P 波与 PS 波道集, 并对这些道集进行了转换波速度分析与正常时间校正, 校正处理后的共中心道集 (CMP 道集) 与共转换点道集 (CCP 道集) 见图 4。

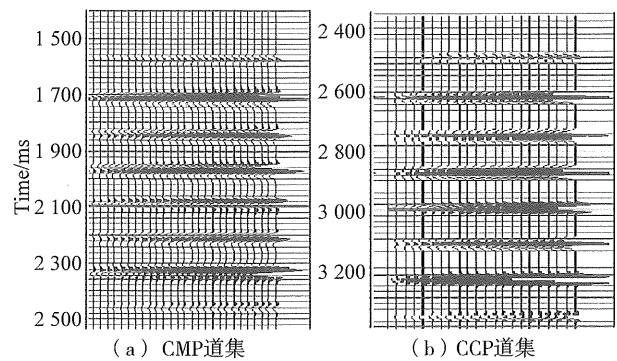


图 4 模型正演叠前道集

Fig. 4 A CMP and CCP gathers from multi-layer model

应用上述速度比拾取方法对转换波叠前道集进行了速度分析, 并采用方程 (3) 对 CMP 道集与 CCP 道集进行了时间匹配处理。具体方法如下:

- 1) 对扫描得到的  $\gamma_0$  进行插值, 建立  $\gamma_0$  随零偏移距 PS 波传播时间变化的速度比函数;
- 2) 使用方程 (3) 计算 P 波零偏移距双程传播时间  $t_{p0}$ ;
- 3) 最后, 将 PS 波时间位置样点振幅值移动到所计算的  $t_{p0}$  位置。结果见图 5 所示。

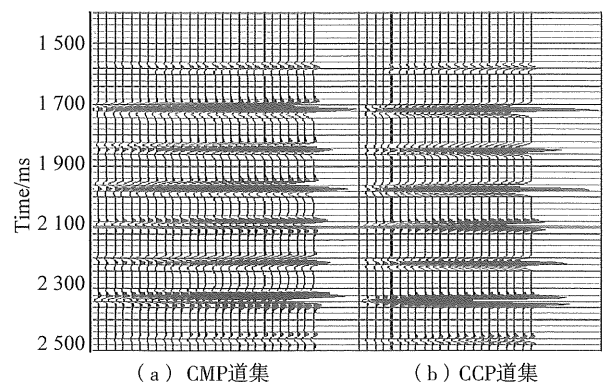


图 5 时间匹配处理后叠前道集

Fig. 5 CMP and CCP gather after PS to PP time mapping

通过将 PS 波反射时间校正到 P 波时间坐标, 实现了纵横波反射信息在同一时间坐标中显示与分析的目的。

## 4 认识与结论

本文提出了直接利用多分量资料进行P波与PS波反射时间关系匹配处理的实现方法。模型资料计算结果表明,P波与PS波反射时间关系匹配精度主要依赖于所使用的纵横波速度比,使用方程(7)可以直接由叠前转换波道集计算得到纵横波速度比,且该方法具有一定的计算精度,适合于水平层状地层地区转换波资料处理。

但是,本文所提出的速度比计算方法仅适用于横向各向同性地层条件下转换波资料处理,对于复杂地层情况,所述方法可能会引起较大计算误差。

### 参考文献:

- [1] GAISER J E. Multicomponent  $V_p/V_s$  correlation analysis [J]. *Geophysics*, 1996, 61(4): 1137 - 1149.
- [2] CHEN M, ZHAN S, WAN Z, et al. Joint poststack P - and PS-wave impedance inversion and an example from northern China [J]. *The Leading Edge*, 2009, 28(3): 332 - 338.
- [3] HELENE H V, MARTIN L. Simultaneous inversion of PP and PS seismic data [J]. *Geophysics*, 2006, 71(3): R1 - R10.
- [4] TIM J, RISHI B, ALEX M, et al. Joint PP-PS angle-stack analysis and AVA inversion in Grane Field, offshore Norway [J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(10): 1228 - 1239.
- [5] IGOR B M. Exact elastic P/SV impedance [J]. *Geophysics*, 2010, 75(2): C7 - C13.
- [6] CHAU A, EDEL K. Structural interpretation using PS seismic on the Kvitebjorn Field in the North Sea [J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(4): 402 - 407.
- [7] 魏修成, 陈雨红, 刘洋. 垂向非均匀介质中的地震波旅行时近似 [J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(2): 149 - 155.
- [8] TSVANKIN I, THOMSEN L. Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media [J]. *Geophysics*, 1994, 59(8): 1290 - 1304.
- [9] THOMSEN L. Converted-wave reflection seismology over inhomogeneous, anisotropic media [J]. *Geophysics*, 1999, 64(3): 678 - 690.
- [10] PAWAN D, ILYA T, MIKE B, et al. PS-wave moveout inversion for tilted TI media, A physical-modeling study [J]. *Geophysics*, 2006, 71(4): D135 - D143.
- [11] AKI K I, RICHARDS P G. *Quantitative seismology* [M]. Cambridge: W H Freeman and Co, Cambridge Press, 1980.
- [12] TESSMER G, BEHLE A. Common reflection point data-stacking technique for converted waves [J]. *Geophysical Prospecting*, 1988, 36(7): 671 - 688.
- [13] YILMAZ O. *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data* [M]. SEG Publications Press, 2001.