

# 用 P-SV 波叠加剖面合成横波层速度剖面

甘永忠\*

(辽河油田勘探开发研究院)

## 摘 要

甘永忠. 用 P-SV 波叠加剖面合成横波层速度剖面. 石油地球物理勘探, 1995, 30(1): 56~61

本文从 Zoeppritz 方程的精确解出发, 导出了 P-SV 波反射系数的高精度近似表达式, 证明 P-SV 波的反射振幅正比于  $\Delta V_s/V_s$ 。这里,  $V_s$  为反射界面两侧横波层速度的平均值;  $\Delta V_s$  为两侧横波层速度的差值。文中将 P-SV 波共转换点水平叠加改进为共转换点拟合叠加, 得到正比于  $\Delta V_s/V_s$  的叠加振幅。仿照纵波勘探中的波阻抗技术, 利用 P-SV 波拟合叠加剖面(或其偏移归位剖面)逐层向下递推反演, 再加上适当的标定, 便可获得横波层速度剖面。

主题词 P-SV 波 叠加剖面 波阻抗 层速度剖面

## ABSTRACT

Gan Yongzhong. Deriving a S-wave interval-velocity section from P-SV wave stack section. OGP, 1995, 30(1): 56~61

The desirable approximate expression of P-SV wave reflection coefficient is deduced from the accurate solution of Zoeppritz's equation. Then, the reflection amplitude of P-SV wave is proved to be directly proportional to  $\Delta V_s/V_s$ , where  $V_s$  is the average interval velocity of shear waves at the both sides of reflector, and  $\Delta V_s$  is the interval velocity difference of the shear waves. The horizontal stack of common conversion points of P-SV waves is changed into fitting stack of these common conversion points to result in stacked amplitudes which are directly proportional to  $\Delta V_s/V_s$ . People can obtain S-wave interval-velocity section by imitating wave impedance technique in P-wave exploration, namely, by making downward layer by layer recursion inversion and calibration of fitting-stacked (or migrated) section of P-SV waves.

Subject heading: P-SV wave, stacked section, wave impedance, interval-velocity section

## 引 言

随着石油工业的迅速发展, 要求用地震方法对地下岩石特性、裂缝、油藏特征等进行描述,

Gan Yongzhong, Computer Center, Research Institute, Liaohe Petroleum Administration, Xinglongtai, Panjin City, Liaoning Province, Postcode: 124010

本文于 1994 年 4 月 11 日收到, 修改稿于同年 5 月 15 日收到。

本项目由国家自然科学基金会、中国科学院、中国石油天然气总公司、大庆石油管理局联合资助。

已成为迫切的研究课题。在多波勘探中,目前利用较多的是横波速度信息。它与纵波速度联合使用,可以判断地层的孔隙率和泊松比等。横波分裂是预测裂缝的重要信息。目前,激发横波多数采用爆炸震源,少数采用横波可控震源,记录时多采用三分量检波器。在这种记录中,主要是反射纵波和 P 波入射 SV 波反射的 P-SV 波。

通常,利用 P-SV 波求取横波层速度的方法有两类:一类是利用来自同一层位的 P 波和 P-SV 波的相对时差,从纵波速度推算出横波速度,但这需要事先进行层位对比。在有 VSP 观测井的附近对比还比较容易,在远离 VSP 井的地方,如果不能预先知道纵、横波速度,层位对比将很困难。在构造复杂或资料信噪比较低的地区,这种对比几乎是不可能的。另一类方法是通过动校正速度分析获得 P-SV 波的叠加速度,然后利用与 Dix 公式相似的公式求取横波层速度;或者直接利用叠前道集通过射线追踪来计算层速度。但这类方法的分辨率有限,难以满足岩性预测的需要。

P-SV 波资料处理的一个重要步骤是共转换点水平叠加,它能有效地增强信噪比,但由于叠加振幅的动力学特征与岩层弹性的关系不明确,妨碍了叠加剖面在岩性解释方面的进一步应用。

众所周知,纵波共反射点水平叠加剖面的振幅与纵波波阻抗有简单的关系,以此为基础导出了极有实用价值的纵波波阻抗技术。能否也赋予 P-SV 波叠加剖面更明确的动力学意义,并导出与纵波波阻抗技术相类似的岩性反演技术?本文从理论上对这个问题进行了探讨,获得了一些有意义的认识。

## P-SV 波反射系数的近似

据文献 1,并经反复验证,在固体—固体分界面上,P 波入射时,SV 波的位移反射系数为

$$R_{P-SV} = 2V_{P1}\cos\alpha_1(abV_{P2}V_{S2} + cd\cos\alpha_2\cos\beta_2)P/D \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= \rho_2 - \rho_1 - dP^2 & b &= \rho_2 - dP^2 \\ c &= \rho_1 + dP^2 & d &= 2(\rho_2V_{S2}^2 - \rho_1V_{S1}^2) \\ D &= EF + GHP^2 \\ E &= V_{P2}b\cos\alpha_1 + V_{P1}c\cos\alpha_2 & F &= V_{S2}b\cos\beta_1 + V_{S1}c\cos\beta_2 \\ G &= V_{P1}V_{S2}a - d\cos\alpha_1\cos\beta_2 & H &= V_{P2}V_{S1}a - d\cos\beta_1\cos\alpha_2 \end{aligned}$$

其余各参数的含义见图 1。

令

$$\begin{aligned} \Delta V_P &= V_{P2} - V_{P1} & \Delta V_S &= V_{S2} - V_{S1} \\ V_P &= (V_{P1} + V_{P2})/2 & V_S &= (V_{S1} + V_{S2})/2 \\ \Delta\rho &= \rho_2 - \rho_1 & \rho &= (\rho_1 + \rho_2)/2 \end{aligned}$$

在一般地质情况下,可以假设

$$\left| \frac{\Delta V_P}{V_P} \right| \ll 1, \quad \left| \frac{\Delta V_S}{V_S} \right| \ll 1, \quad \left| \frac{\Delta\rho}{\rho} \right| \ll 1$$

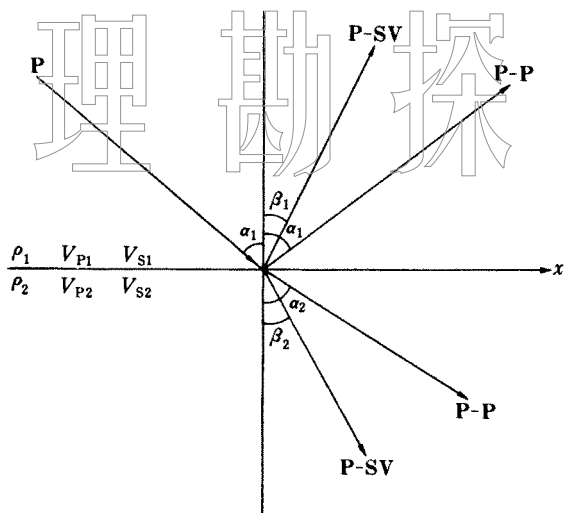


图 1 弹性界面上纵波入射时的反射与透射

则在式(1)中有

$$\alpha_1 \approx \alpha_2 \triangleq \alpha, \quad \beta_1 \approx \beta_2 \triangleq \beta$$

当入射角  $\alpha_1$  小于  $90^\circ$  且在发生全反射之前,  $GH$  相对于  $EF$  是高阶小量, 所以有

$$D \approx EF \\ \approx 4V_P V_S \rho^2 \cos \alpha \cos \beta$$

在式(1)中还有

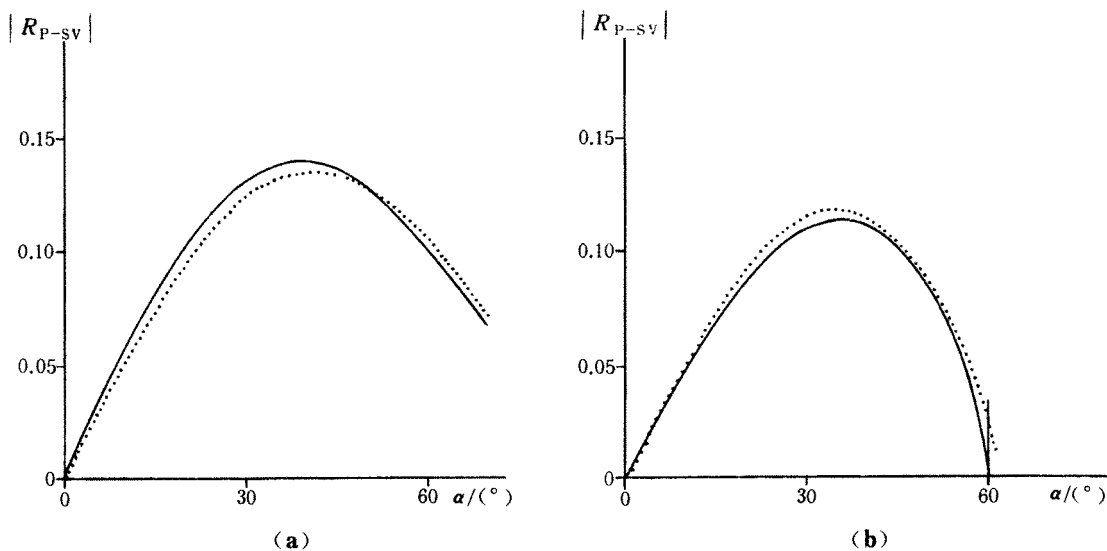
$$b \approx c \approx \rho \\ d \approx 2(2V_S \rho \Delta V_S + V_S^2 \Delta \rho) \\ P \approx \frac{\sin \alpha}{V_P} \approx \frac{\sin \beta}{V_S}$$

对  $R_{P-SV}$  作进一步近似, 得

$$R_{P-SV} \approx [V_P V_S (\Delta \rho - d P^2) + d \cos \alpha \cos \beta] P / (2 V_S \rho \cos \beta) \\ = \left[ \frac{\Delta \rho}{2 \rho} \sin \alpha + \left( \frac{2 \Delta V_S}{V_S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \sin \beta \cos(\alpha + \beta) \right] / \cos \beta \quad (2)$$

大量数值计算表明, 式(2)是对式(1)的一个很好的近似, 如图2所示(图中,  $\alpha$  是入射角, 实线由式(1)算得, 虚线由式(2)算得)。由图2可见, 在出现全反射(这时  $|R_{P-SV}|$  急剧转折)之前, 二者非常接近。由经验知道, 在常规 P-SV 波勘探排列范围内, 目的层段上不会出现全反射。因此, 式(2)的精度足以满足生产的要求。

如果我们只关注横波速度  $V_S$  的变化, 可以设法消去式(2)中的密度项。根据工区内的地层

图 2  $R_{P-SV}$  的精确公式与近似公式的对比

图中: (a) 参数为:  $\rho_1 = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_2 = 2.3 \text{ g/cm}^3$ ,  $V_{P1} = 7000 \text{ m/s}$ ,  $V_{P2} = 6000 \text{ m/s}$ ,  $V_{S1} = 4000 \text{ m/s}$ ,  $V_{S2} = 3500 \text{ m/s}$ ; (b) 参数为:  $\rho_1 = 2.3 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_2 = 2.6 \text{ g/cm}^3$ ,  $V_{P1} = 6000 \text{ m/s}$ ,  $V_{P2} = 6800 \text{ m/s}$ ,  $V_{S1} = 3300 \text{ m/s}$ ,  $V_{S2} = 3800 \text{ m/s}$

岩性和地球物理资料,总可以统计出经验关系

$$\rho = kV_s^m$$

其中  $k, m$  为经验参数。代入式(2)得

$$R_{P-SV} \approx \frac{\Delta V_s}{V_s} \left[ \frac{m}{2} \sin \alpha + (2 + m) \sin \beta \cos(\alpha + \beta) \right] / \cos \beta \quad (3)$$

式(3)简洁地说明, P-SV 波的反射振幅与横波层速度的关系,它是下一步拟合叠加和层速度反演的出发点。

## P-SV 波共转换点拟合叠加

对给定的共转换点,可以得到一个共转换点道集  $s_i(t), i=1, 2, \dots, M$ 。经动校正后,可以通过水平叠加来提高信噪比。但我们有更进一步的需要,在提高信噪比的同时,希望获取式(3)中的  $\Delta V_s/V_s$ 。对道集内的第  $i$  道,在抽取共转换点道集的过程中,已经较精确地得到了该道对应的入射角  $\alpha_i$  和反射角  $\beta_i$ 。设入射波振幅为  $A(t)$ ,由式(3)得预期的反射波为

$$f_i(t) = k_i c(t)$$

这里

$$k_i = \left[ \frac{m}{2} \sin \alpha_i + (2 + m) \sin \beta_i \cos(\alpha_i + \beta_i) \right] / \cos \beta_i \quad (4)$$

$$c(t) = \frac{\Delta V_s}{V_s} A(t) \quad (5)$$

使  $f_i(t)$  与  $s_i(t)$  最佳拟合,建立目标函数

$$\Phi = \sum_{i=1}^M [f_i(t) - s_i(t)]^2$$

让  $\Phi$  达到极小,即令

$$\frac{\partial \Phi}{\partial c(t)} = 0$$

得

$$2 \sum_{i=1}^M [k_i c(t) - s_i(t)] k_i = 0$$

解得

$$c(t) = \frac{\sum_{i=1}^M k_i s_i(t)}{\sum_{i=1}^M k_i^2} \quad (6)$$

式(6)即是 P-SV 波共转换点拟合叠加的公式。已知共转换点道集  $s_i(t)$  及其各道对应之入射角  $\alpha_i$  和反射角  $\beta_i$  时,先由式(4)算出  $k_i$ ,再由式(6)拟合叠加得到  $c(t)$ 。与共转换点水平叠加相比,基本上不增加计算工作量。 $c(t)$  正比于  $\Delta V_s/V_s$ ,这与 P-P 波水平叠加后振幅正比于波阻抗差相类似,因而可以借用波阻抗反演技术求取  $V_s$  剖面。

反演  $V_s$  剖面

这里仅讨论一维问题。经拟合叠加后,得到 P-SV 波叠加剖面。现取其中一道  $c(t)$ , 在单个反射界面时,由式(5)知

$$c(t) = B(t - \tau) \frac{\Delta V_s(\tau)}{V_s(\tau)}$$

其中: $B(t)$ 为入射子波; $\tau$ 为用 P-SV 波双程时表示的界面深度。在多层界面时,记

$$R(t) = \frac{\Delta V_s(t)}{V_s(t)}$$

忽略多次反射和波型转换以及透射损失,则有

$$c(t) = B(t) * R(t)$$

假设经反褶积和振幅保真处理后, $B(t)$ 被压缩成单脉冲,振幅为  $A$ ,则

$$c(t) = A \cdot R(t)$$

写成离散时间形式,有

$$c_i = A \cdot R_i \quad (7)$$

$$R_i = \frac{V_{s_i} - V_{s_{i-1}}}{V_{s_i} + V_{s_{i-1}}} \quad (8)$$

式中:下标  $i$  代表  $i\Delta t$  ( $\Delta t$  为采样间隔)时刻的值。已知  $c_i$ , 要反演  $V_{s_i}$ , 必先确定  $A$ , 这实际上是将叠加剖面标定为反射系数的过程。对井旁道  $c_i$ , 假定由 VSP 或其它手段获得了  $(N_1 - 1)\Delta t$  到  $N_2\Delta t$  时间段的横波层速度测量值  $V_i, i = N_1 - 1, N_1, \dots, N_2$ 。由此可以算得一个反射系数序列

$$r_i = \frac{V_i - V_{i-1}}{V_i + V_{i-1}} \quad i = N_1, N_1 + 1, \dots, N_2 \quad (9)$$

令  $R_i$  与  $r_i$  最佳逼近,即使

$$\Phi = \sum_{i=N_1}^{N_2} (R_i - r_i)^2 = \sum_{i=N_1}^{N_2} \left( \frac{1}{A} c_i - r_i \right)^2$$

达到极小,由

$$\frac{\partial \Phi}{\partial A} = 0$$

解得

$$A = \frac{\sum_{i=N_1}^{N_2} c_i^2}{\sum_{i=N_1}^{N_2} r_i c_i} \quad (10)$$

进而可由地震记录算得反射系数

$$R_i = c_i / A \quad (11)$$

$A$  值在纵向上(深度方向)是常数,在平面上由控制井的数量而定。只有一口控制井时, $A$  只能取常数;有多口控制井时, $A$  可以由多井值内插求取。设地震记录的起始时间为  $m\Delta t$ , 记录长度为  $N\Delta t$ , 则由式(8)可得各时刻的横波层速度

$$V_{s_i} = V_0 \prod_{j=m}^i \frac{1 + R_j}{1 - R_j}, \quad i = m, m + 1, \dots, N \quad (12)$$

式中, $V_0$ 为起算时刻的横波层速度。下面推算  $V_0$ , 相当于对反演结果进行标定。建立目标函数

$$\Phi = \sum_{i=N_1}^{N_2} (V_{Si} - V_i)^2$$
$$\frac{\partial \Phi}{\partial V_0} = 0$$

解得

$$V_0 = \frac{\sum_{i=N_1}^{N_2} W_i V_i}{\sum_{i=N_1}^{N_2} W_i^2} \quad (13)$$

其中

$$W_i = \prod_{j=m}^i \frac{1 + R_j}{1 - R_j}$$

由井中资料算出  $A$  和  $V_0$  后,就可由 P-SV 波拟合叠加剖面反演出  $V_s$  剖面。

显然,上述求  $A$  和  $V_0$  的方法也适用于 P-P 波勘探中的波阻抗技术。进一步借用波阻抗技术中的低频补偿技术,就可以获得完整的横波层速度剖面。

### 参 考 文 献

- 1 Aki K I and Richards P G. *Quantitative seismology*, W H Freeman and Co, 1980: 144~154
- 2 Tessmer G et al. Processing of P S reflection data applying a common conversion point stacking technique. *Geophysical Prospecting*, 1990, 38(2): 267~286
- 3 郑晓东. AVO 理论和方法的一些新进展, 石油地球物理勘探, 1992, 27(3): 305~317

·消息·

## 以色列帕拉代姆(PARADIGM) 地球物理公司在京举行隆重开业仪式

以色列帕拉代姆(PARADIGM)地球物理公司于1994年12月9日在北京建国饭店举行了隆重开业仪式。中国石油天然气总公司、中国海洋石油总公司、物探局、石油勘探开发研究院、胜利油田、大港油田、华北油田、地矿部和煤田地质局等单位的代表参加了开业仪式。SHELL和 EXXON 公司代表及以色列使馆的官员也出席了开业仪式。PARADIGM 公司总裁 E. WEISS 先生、北京办事处总经理 TRABLUS 先生、原中国石油天然气总公司总地质师阎敦实先生分别在仪式上致词。

PARADIGM 地球物理公司是一家世界领先设计计算机辅助勘探软件的公司,它的销售对象覆盖了世界上各主要石油公司。该公司的模型处理技术能使油公司在以往视为勘探禁区寻找油气和矿产,并且极大地减少了勘探风险。该公司的软件产品能为地球物理学家研究下列复杂结构和地层环境作出决策:冲断层、盐下地层成像;断层遮挡、强烈横向速度变化地区。

作为12家大石油公司的11家已经选择了该公司 Geodepth 软件,此软件已成为建立速度模型和深度成像领域当之无愧的领先者。

PARADIGM 地球物理公司的总部设在以色列,在休斯敦、伦敦、北京等地均设有分公司。

— 江