

PP 波和 PS 波联合反演研究进展

张春涛, 王尚旭

中国石油大学(北京)资源与信息学院物探重点实验室, 北京 102249

摘要 随多波多分量地震勘探的发展, PP 波和 PS 波联合反演方法研究在近年取得了一定进展。PS 波是 S 波的一种, 无法在流体中传播, 因此对岩石结构的内部构造更为敏感。联合使用 PP 波和 PS 波数据, 可以提高从多波地震数据中推导弹性阻抗和岩石性质参数的能力, 减少地震反演中的不确定性。本文综述近年 PP 波和 PS 波联合反演方法的发展。简述了 PP 波和 PS 波联合反演的基本理论, 所有的联合反演方法都是基于 PP 波和 PS 波反射系数的 Aki-Richards 近似公式。其次, 常用联合反演方法的算法及其反演结果参数。因为使用了相互独立的 PP 波和 PS 波数据, 联合反演方法的算法比单独的 PP 波反演更为稳定。展望了 PP 波和 PS 波联合反演方法的发展趋势。

关键词 联合反演; 最小二乘法; 奇异值分解; 加权叠加

中图分类号 P631.4

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)10-0106-05

Review of Joint Inversion of PP and PS Waves

ZHANG Chuntao, WANG Shangxu

Geophysics Key Lab, Information & Resource Faculty, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The joint inversion of PP and PS waves are widely studied in recent years with the developments of multi-wave and multi-component seismic explorations. As a kind of S wave, PS wave can not propagate through fluids and therefore is more sensitive to the internal structure of rock fabrics. The combined use of PP and PS wave data might provide better means to identify elastic impedance and rock property parameters from multi-wave seismic data and thereby to reduce the uncertainty in the seismic inversion. The recent research developments in the joint inversion methods of PP and PS waves are reviewed in this paper. Firstly, a brief introduction of the basic theory of the joint inversion methods is given. All joint inversion methods are based on the Aki-Richards approximated linear expressions of PP and PS wave reflection coefficients. Secondly, the algorithms and the inverted results of elastic parameters of the joint inversion methods are discussed. Comparing to inversion methods using PP wave only, the algorithms of the joint inversion methods are more stable by combining the two independent PP and PS wave seismic data. At last, the further development of the joint inversion methods is commented.

Keywords joint inversion; least square; singular value decomposition; weighted stacking

0 引言

在研究储层性质时, 可以用纵波(P)速度 α 、横波(S)速度 β 和密度 ρ 等弹性参数来研究储层的岩性和孔隙流体的性质^[1]。如果能够从地震勘探数据中得到精确的弹性参数, 就可以对储层的性质进行详细的研究。常规的横波振幅随偏移距变化(AVO)的反演仅使用了反射纵波(PP)地震数据, 从 PP 波叠前地震数据中提取纵横波速度和密度参数来研究储层岩性和孔隙流体。但很多研究表明, 从 PP 波数据中只能反演出 2 个弹性参数, 一般很难得出密度比^[2-3]; 并且利用 PP 波数据来

反演具有多解性, 需要增加其他约束。

近年来, 随着数字三分量检波器采集技术的发展, 多波多分量地震勘探技术得到了广泛的应用。在多波多分量地震勘探中, 可以得到质量较好的转换反射波(PS)记录, 研究人员对利用 PS 波进行 AVO 反演的方法做了大量研究^[4-7]。PS 波是 S 波的一种, 由于 S 波无法在流体中传播, 因此对岩石孔隙流体性质的变化不敏感, 更依赖于岩石骨架的性质。如果利用 PP 波和 PS 波地震数据进行联合反演, 可以减少反演结果的多解性, 提高解释的精度。

收稿日期: 2010-03-22

作者简介: 张春涛, 博士研究生, 研究方向为多波多分量地震勘探方法、各项异性偏移方法, 电子信箱: Chuntao.zhang@hotmail.com; 王尚旭(通信作者), 教授, 研究方向为油藏综合地球物理实验与技术、复杂区地震资料处理技术、地震信息分析, 电子信箱: wangsx@cup.edu.cn

1 纵横波联合反演的物理基础

纵横波联合 AVO 反演的物理基础是 Zoeppritz 方程。根据应力连续和位移连续的边界条件求解波动方程并引入反射系数和透射系数, P 波入射到弹性分界面时的反射及透射振幅分配应当满足 Zoeppritz 方程^[8]

$$\begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & -\cos\phi_1 & \sin\theta_2 & -\cos\phi_2 \\ \cos\theta_1 & -\sin\phi_1 & \cos\theta_2 & \sin\phi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{\alpha_1}{\beta_1} \cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 \beta_2^2 \alpha_1}{\rho_1 \beta_1^2 \alpha_2} \sin 2\theta_2 & -\frac{\rho_2 \beta_2^2 \alpha_1}{\rho_1 \beta_1^2} \cos 2\phi_2 \\ -\cos 2\phi_1 & \frac{\beta_1}{\alpha_1} \sin 2\phi_1 & \frac{\rho_2 \alpha_2}{\rho_1 \alpha_1} \cos 2\phi_2 & \frac{\rho_2 \beta_2}{\rho_1 \alpha_1} \sin 2\phi_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{PP} \\ R_{PS} \\ T_{PP} \\ T_{PS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ \cos 2\phi_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\rho_1, \alpha_1, \beta_1$ 和 $\rho_2, \alpha_2, \beta_2$ 分别为上、下层介质的密度、纵波和横波速度; θ_1 为纵波入射角和反射角, θ_2 为纵波透射角; ϕ_1, ϕ_2 分别为转换横波的反射角和透射角; R_{PP}, T_{PP} 分别为纵波的反射系数和透射系数; R_{PS}, T_{PS} 分别为转换横波的反射系数和透射系数。

式(1)形式复杂,无法求得反射系数和透射系数与有关参数的明确关系。因此,对 Zoeppritz 公式进行近似,其中最常用的是 Aki-Richards 近似公式^[9]。在界面两侧弹性系数变化不大且 P 波入射角 θ 、PS 波的反射角 φ 不超过临界角或达到 90° 的情况下, Aki 等^[9]对 Zoeppritz 方程进行了一阶近似,得到固体-固体分界面上的 PP 波反射系数和 PS 波反射系数近似公式

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta) &\approx \frac{1}{2\cos^2\theta} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \frac{\Delta\beta}{\beta} + \frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \right) \frac{\Delta\rho}{\rho} \\ R_{PS}(\theta, \varphi) &\approx \frac{-\alpha \tan\varphi}{2\beta} \left[\left(1 - \frac{2\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta + \frac{2\beta}{\alpha} \cos\theta \cos\varphi \right) \frac{\Delta\rho}{\rho} - \left(\frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta - \frac{4\beta}{\alpha} \cos\theta \cos\varphi \right) \frac{\Delta\beta}{\beta} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1, \alpha = (\alpha_2 + \alpha_1)/2, \beta, \rho$ 与之相同。

由式(2)、式(3)可得, PS 波反射系数 R_{PS} 比 PP 波反射系数 R_{PP} 更依赖于 S 波速度,因此联合反演可以提高对 PS 波反射系数 R_{PS} 的计算精度。联合反演利用了 PP 波和 PS 波 2 个地震数据体,反演参数的信噪比有很大提高。

2 纵横波联合反演方法

纵波 AVO 反演方法的基本原理是基于 Smith 等^[10]提出的加权叠加方法,通过 PP 波数据的加权叠加来计算纵波和横波波阻抗以及其他的相关参数。Fatti 等^[11]做了进一步的研究,取消了对 Gardner 公式的依赖并且包含了密度项。Stewart^[12]将加权叠加的思想用于联合反演,给出了实际的纵横波联合反演方法。在此基础上,很多研究者进行了进一步

的研究和应用,取得了良好的效果^[13-20]。纵横波联合反演需要的数据是 PP 波的共中心点(CMP)道集和 PS 转换波的共转换点(CCP)道集,反演的弹性参数有纵横波速度比($\Delta\alpha/\alpha, \Delta\beta/\beta$)、纵横波波阻抗比($\Delta I/I, \Delta J/J$)、与拉梅常数有关的项($\Delta(\lambda\rho)/\lambda\rho, \Delta(\lambda/\mu)/(\lambda/\mu)$)等。

2.1 两参数联合反演

Smith 等^[10]的加权叠加方法广泛用于 PP 波 AVO 分析,能够反演纵横波速度比。将式(2)重新组合,得

$$R_{PP}(\theta) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) - 2 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \left(2 \frac{\Delta\beta}{\beta} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \tan^2\theta \quad (4)$$

根据 Gardner 公式 $\rho = a\alpha^{1/4}$, 得 $\Delta\rho/\rho = 0.25\Delta\alpha/\alpha$, 将其代入式(4)得

$$R_{PP}(\theta) \approx \left(\frac{5}{8} - \frac{1}{2} \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \tan^2\theta \right) \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \frac{\Delta\beta}{\beta} \quad (5)$$

在 CMP 道集上,利用式(5)进行拟合,与道集上的实际振幅数据 R_{PP}^* 的方差为

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \left(A_i \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + B_i \frac{\Delta\beta}{\beta} - R_{PPi}^* \right)^2 \quad (6)$$

其中, $A_i = \frac{5}{8} - \frac{1}{2} \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta_i + \frac{1}{2} \tan^2\theta_i, B_i = -4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta_i; R_{PP}^*$ 是地震振幅, $i=1, 2, \dots, n, n$ 为 CMP 道集的道数。

求使得 ε 最小的 $\Delta\alpha/\alpha$ 和 $\Delta\beta/\beta$, 即令 $\partial\varepsilon/\partial\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) = 0$ 且

$\partial\varepsilon/\partial\left(\frac{\Delta\beta}{\beta}\right) = 0$, 得

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (A_i^2) & \sum_{i=1}^n (A_i B_i) \\ \sum_{i=1}^n (A_i B_i) & \sum_{i=1}^n (B_i^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \\ \frac{\Delta\beta}{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (A_i R_{PPi}^*) \\ \sum_{i=1}^n (B_i R_{PPi}^*) \end{bmatrix} \quad (7)$$

求解式(7),得到反演公式为

$$\begin{cases} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \sum_{i=1}^n \left[R_{PPi}^* \frac{A_i \sum_{j=1}^n (B_j^2) - B_i \sum_{j=1}^n (A_j B_j)}{\sum_{j=1}^n (A_j^2) \sum_{j=1}^n (B_j^2) - \sum_{j=1}^n (A_j B_j) \sum_{j=1}^n (A_j B_j)} \right] \\ \frac{\Delta\beta}{\beta} = \sum_{i=1}^n \left[R_{PPi}^* \frac{B_i \sum_{j=1}^n (A_j^2) - A_i \sum_{j=1}^n (A_j B_j)}{\sum_{j=1}^n (A_j^2) \sum_{j=1}^n (B_j^2) - \sum_{j=1}^n (A_j B_j) \sum_{j=1}^n (A_j B_j)} \right] \end{cases} \quad (8)$$

式(8)是一个加权叠加。权系数随偏移距和时间变化,同时依赖于纵波速度模型 α 、纵横波速度比模型 α/β 、CMP 道集的几何观测系统。

利用式(5)进行计算过程中,使用下面的近似条件。

1) 将式(5)应用于 CMP 道集,需要计算道集上的每一点的入射角。这可以利用射线追踪来计算,但是需要给定一个 P 波层速度曲线,同时假设地层水平。这里的速度曲线可以从

叠加速度或测井信息中导出。

2) 对于式(5)中的因子 β^2/α^2 进行近似。利用 Castagna 等^[1]给出泥岩线性关系 $\alpha \approx 1360 + 1.16\beta$, 再结合上面的 P 波层速度曲线, 可以得到 CMP 道集各个样点的纵横波速度比 β/α 。

Stewart^[12]在 Smith 方法的基础上, 同时利用式(2)和式(3)进行联合反演, 得到 $\Delta\alpha/\alpha$ 和 $\Delta\beta/\beta$ 。其基本原理是利用最小二乘法, 并利用 Gardner 公式消去密度项。

$$R_{PP}(\theta) \approx \frac{1}{8} \left(1 - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta + \frac{4}{\cos^2\theta} \right) \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \frac{\Delta\beta}{\beta} \quad (9)$$

$$R_{PS}(\theta) \approx -\frac{\alpha \tan\varphi}{8\beta} \left(1 - \frac{2\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta + \frac{2\beta}{\alpha} \cos\theta \cos\varphi \right) \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\alpha \tan\varphi}{2\beta} \left(\frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta - \frac{4\beta}{\alpha} \cos\theta \cos\varphi \right) \frac{\Delta\beta}{\beta} \quad (10)$$

已知某个反射的真实振幅为 R_{PS}^*, R_{PP}^* , 则均方误差为

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \left[\left(R_{PP}^* - A_i \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - B_i \frac{\Delta\beta}{\beta} \right)^2 + \left(R_{PS}^* - C_i \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - D_i \frac{\Delta\beta}{\beta} \right)^2 \right] \quad (11)$$

令 $\partial\varepsilon/\partial\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) = 0, \partial\varepsilon/\partial\left(\frac{\Delta\beta}{\beta}\right) = 0$, 求解式(11), 可以得到

$\Delta\alpha/\alpha$ 和 $\Delta\beta/\beta$ 的反演公式。

在利用反演公式计算时, 同样需要给定纵波速度-深度模型和纵横波速度比 α/β 模型, 然后可以利用射线追踪来确定入射角、反射角和透射角。利用 $\Delta\alpha/\alpha$ 和 $\Delta\beta/\beta$ 的反演公式就可以联合 CMP 道集和 CCP 道集以求取纵横波速度。

Larsen^[14]利用波阻抗公式 $I = \alpha\rho, \Delta I/I = \Delta\alpha/\alpha + \Delta\rho/\rho$ 和 $J = \beta\rho, \Delta J/J = \Delta\beta/\beta + \Delta\rho/\rho$, 将式(2)、式(3)化简, 并利用 Gardner 公式消去密度项, 得到

$$R_{PP} = \frac{(1+\tan^2\theta)}{2} \frac{\Delta I}{I} - 4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \frac{\Delta J}{J} \quad (12)$$

$$R_{PS} = -\frac{\alpha \tan\varphi}{10\beta} \left(1 + 2\sin^2\varphi - 2 \frac{\beta}{\alpha} \cos\theta \cos\varphi \right) \frac{\Delta I}{I} + \frac{\alpha \tan\varphi}{\beta} \left(2\sin^2\varphi - 2 \frac{\beta}{\alpha} \cos\theta \cos\varphi \right) \frac{\Delta J}{J} \quad (13)$$

用 P 波和 S 波阻抗简化式(2)、式(3)可能会对最终的反演结果带来一定的误差。Gidlow 等^[21]认为, 式(3)在入射角 $\theta < 35^\circ$ 且速度比 α/β 在 1.5~2.0 时比较精确。利用最小二乘法, 可以得到 $\Delta I/I, \Delta J/J$ 的反演公式^[14]。

2.2 三参数联合反演

两参数联合反演利用 Gardner 公式消去了密度比项, 因此反演的结果带有误差, 也缺乏对密度项的应用。在有些情况下密度项是不可缺少的, 因此有必要考虑三参数联合反演。联合反演在增加了 PS 波地震数据后对于反演结果增加了约束, 这样联合三参数反演的结果比单独反演精确。Mahmoudian 等^[19]给出了一种利用奇异值分解来进行反演纵横波阻抗和密度的方法, 并且利用模型数据, 将其反演方法的结果与两参数联合反演和仅用 PP 波的反演结果分别进行了对比, 这 3 种反演方法的区别在于反演的结果参数以及反演使用的数据, 而反演算法都采用了奇异值分解算

法; 从与两参数联合反演方法的对比结果看, 两方法反演的 $\Delta I/I$ 和 $\Delta J/J$ 的结果相近, 但是三参数联合反演方法的优势在于能够反演出 $\Delta\rho/\rho$, 丰富了反演的结果; 从与仅用 PP 波的反演结果对比结果看, 三参数联合反演方法的反演结果明显要好, 结果更为可靠。Veire 等^[22]给出了利用最小二乘法反演纵横波速度与密度的方法, 并应用于实际地震数据中, 取得了较好的效果。

Mahmoudian 利用了波阻抗形式的 Aki-Richards 近似公式, 但是保留了密度项, 简称为

$$R_{PP} \approx A \frac{\Delta I}{I} + B \frac{\Delta J}{J} + C \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (14)$$

$$R_{PS} \approx D \frac{\Delta\rho}{\rho} + E \frac{\Delta J}{J} \quad (15)$$

其中

$$A = \frac{(1+\tan^2\theta)}{2}$$

$$B = -4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta$$

$$C = -\left[\frac{1}{2} \tan^2\theta - 2 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \right]$$

$$D = -\frac{\alpha \tan\varphi}{2\beta} \left(1 + 2\sin^2\varphi - 2 \frac{\beta}{\alpha} \cos\theta \cos\varphi \right)$$

$$E = -\frac{\alpha \tan\varphi}{2\beta} \left(4\sin^2\varphi - \frac{4\beta}{\alpha} \cos\theta \cos\varphi \right)$$

利用奇异值分解来求取 3 个参数。首先, 从地震数据得到相应的偏移距上的反射系数, 然后利用 Aki-Richards 近似公式把它们表示成含有 3 个未知参数的 $2m$ 个线性方程。

$$\begin{bmatrix} R_{PP1} \\ \vdots \\ R_{PPm} \\ R_{PS1} \\ \vdots \\ R_{PSm} \end{bmatrix}_{2m \times 1} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_m & B_m & C_m \\ 0 & E_1 & D_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & E_m & D_m \end{bmatrix}_{2m \times 3} \begin{bmatrix} \frac{\Delta I}{I} \\ \frac{\Delta J}{J} \\ \frac{\Delta\rho}{\rho} \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (16)$$

其中, 反射系数向量为 $y = (R_{PP1} \cdots R_{PPm} R_{PS1} \cdots R_{PSm})^T$, 则式(16)化简为 $y = Ax$ 。A 是一个利用已知的地震速度模型和入射角计算的 $2m \times 3$ 矩阵, $x = (\Delta I/I \quad \Delta J/J \quad \Delta\rho/\rho)^T$ 是未知参数向量。现在反演问题变成了求解方程组来得到 x 。如果能够求得矩阵 A 的广义逆矩阵 H, 就可得到 x 的解: $\hat{x} = Hy$ 。这里利用 SVD 来求解 A 的广义逆。

Veire 等^[22]提出的三参数联合反演, 同样利用 Aki 和 Richard 的近似公式, 但是最小平方的定义有所不同, 加入了一个与记录噪声情况有关的权系数。

$$LS = (1-w) \sum_{i=1}^n [R_{PS}^*(\theta_{P,i}, \theta_{S,i}) - R_{PS}(\theta_{P,i}, \theta_{S,i})]^2 + w \sum_{j=1}^m [R_{PP}^*(\theta_{P,j}) - R_{PP}(\theta_{P,j})]^2 \quad (17)$$

其中, R_{PS} 是利用近似公式计算出的反射系数, R_{PS}^* 是校准过的振幅, 用来代替反射系数。w 为加权因子, 取值范围 $0 \leq w \leq 1$,

用来反映 PP 波和 PS 波数据的质量。如果 PP 波数据的噪声比 PS 波小, w 取大于 0.5, 反之取 w 小于 0.5。

对式 (17) 求 $\Delta\rho/\rho$, $\Delta\alpha/\alpha$ 和 $\Delta\beta/\beta$ 的偏导数, 并令其等于 0 来求取最小值, 得到方程组

$$B \times \begin{bmatrix} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} & \frac{\Delta\beta}{\beta} & \frac{\Delta\rho}{\rho} \end{bmatrix} = b \quad (18)$$

B 为 3×3 的对称矩阵, 仅与入射角 θ 、P 波和 S 波速度有关, b 与从 PP 波和 PS 波反射系数有关, 同样是入射角的函数。 B 和 b 具体的表达式见文献[22]。

在得到方程组之后, 利用奇异值分解(SVD)来求解方程组。SVD 适合于求解病态的线性方程组, 可以增加方程的稳定性。在计算的过程中, 从 PS 波到 PP 波数据的同相轴旅行时标定是反演中的关键点。如果标定不准确, 将会导致计算的速度比和密度比结果产生误差。而旅行时标定需要得到纵横波速度比 α/β 随深度的变化关系, α/β 深度模型也是反演中需要输入的参数。此外, 该方法需要对地震振幅进行校准以代表反射系数。

2.3 反演结果参数

为了研究岩石的物理特性, 得到初步的反演结果 $\Delta\alpha/\alpha$ 、 $\Delta\beta/\beta$ 或 $\Delta I/I$ 、 $\Delta J/J$ 后, 进一步推导了一系列的参数。Smith 等^[10]利用 $\Delta\alpha/\alpha$ 、 $\Delta\beta/\beta$ 或 $\Delta I/I$ 、 $\Delta J/J$ 求得了伪泊松比 $\Delta q/q$ 和流体因子 ΔF 。

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - \frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{\Delta I}{I} - \frac{\Delta J}{J} \quad (19)$$

$$\Delta F = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - K \frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{\Delta I}{I} - K \frac{\Delta J}{J} - \frac{\Delta\rho}{\rho} \left(1 - K \frac{\beta}{\alpha} \right) \quad (20)$$

K 是 α 和 β 的线性关系常数, 满足 Castagna 等^[11]的泥岩线性关系时, $K=1.16$ 。对于水饱和和岩石来说, ΔF 接近于 0; 但是当砂岩含气时, ΔF 会在顶端表现负异常, 在底部为正异常。

Goodway 等^[23]认为, 把反演的地震速度项转换为拉梅常数 λ 和 μ 对了解岩石的性质更有帮助。 λ 、 μ 代表抗压缩性和刚度, 与沉积岩的孔隙度和岩性直接相关。如果岩石孔隙中含有流体如水或油, 会使岩石的抗压缩性增大; 如果含气则抗压缩性较低。刚度代表抗剪切形变的大小, 例如页岩的刚度比砂岩的小, 因此页岩比砂岩更易受剪切作用的影响。

根据 Goodway 的理论, 拉梅系数可表示为: $\lambda = \alpha^2 \rho - 2\beta^2 \rho$, $\mu = \beta^2$ 和 $\lambda \rho = I^2 - 2J^2$, $\mu \rho = J^2$, 或

$$\frac{\Delta(\lambda \rho)}{\lambda \rho} = \frac{2}{\alpha^2 - 2\beta^2} \left(\alpha^2 \frac{\Delta I}{I} - 2\beta^2 \frac{\Delta J}{J} \right) \quad (21)$$

$$\frac{\Delta(\lambda \mu)}{\lambda \mu} = \frac{2\alpha^2}{\alpha^2 - 2\beta^2} \left(\frac{\Delta I}{I} - \frac{\Delta J}{J} \right) \quad (22)$$

$$\frac{\Delta(\mu \rho)}{\mu \rho} = 2 \frac{\Delta J}{J} \quad (23)$$

Aki-Richards 近似公式可变为拉梅系数和密度的形式

$$R_{PP}(\theta) \approx \left[\frac{(\alpha^2 - \beta^2)}{4\alpha^2 \cos^2 \theta} \right] \frac{\Delta(\lambda \rho)}{\lambda \rho} - \frac{\beta^2}{\alpha^2} \left(\frac{1}{4 \cos^2 \theta} - 2 \sin^2 \theta \right) \cdot \frac{\Delta(\mu \rho)}{\mu \rho} - \left[\frac{1}{2} \tan^2 \theta - 2 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (24)$$

$$R_{PS}(\theta, \varphi) \approx \frac{-\alpha \tan \varphi}{2\beta} \left[\left(1 + 2 \sin 2\varphi - \frac{2\beta}{\alpha} \cos \theta \cos \varphi \right) \frac{\Delta\rho}{\rho} - \left(2 \sin 2\varphi - \frac{2\beta}{\alpha} \cos \theta \cos \varphi \right) \frac{\Delta(\mu \rho)}{\mu \rho} \right] \quad (25)$$

3 纵横波联合反演评述

相比 P 波反演, 纵横波联合反演具有很多优点。由于增加了转换横波数据, 提高了反演结果的可靠性和精度; 转换波地震记录更多地依赖于横波阻抗, 提高了对横波阻抗的计算精度; 联合反演方法的抗噪性比 PP 波反演要好, 在有噪声时, 联合反演也可得到稳定的结果。但纵横波联合反演中也存在很多问题。

1) 反射系数的精度问题。Aki-Richards 近似公式的应用条件是在界面两侧弹性系数变化不大且入射角不超过临界角的情况下, 对于弹性系数差异大或偏移距较大的情况必然会产生误差。另外, Aki-Richards 近似公式对 R_{PS} 的 R_{PP} 精度要差, 很多学者对 R_{PS} 的近似进行了研究^[24-27]。

2) 入射角的计算误差问题。入射角的计算误差对联合反演的结果影响很大。对于水平地层, 反射振幅表现为双曲线, 可以按照偏移距分布利用叠加速度来计算入射角; 但对于倾斜地层, 这样计算明显有误差。入射角的误差会使得反演的密度比和速度比产生误差, 对于复杂地区应当采用更好的方法来计算入射角。

3) 纵横波速度比的假设问题。在纵横波联合反演中, 需要已知纵横波速度比随深度的变化曲线。很多情况下都假设纵横波速度比为常数, 但实际其随岩性和所含流体的不同变化很大。在已知纵波速度的情况下, 可以利用经验公式来计算横波速度; 陈天胜等^[28]给出了一种速度比值扫描的方法来求得速度比。

4) 纵波与转换横波的同相轴匹配问题。同相轴匹配问题是纵横波联合反演中一个非常重要的问题, 需要将转换波记录压缩到与纵波记录同样的时间。比较常用的方法是采用解释的方式, 通过匹配在 PP 波和 PS 波剖面上拾取的同相轴来计算 PS 时间拉伸因子。也可以利用 VSP 来制作可靠的速度-深度模型, 然后用来相关 PP 波和 PS 波同相轴。

纵横波联合反演今后的发展趋势为: ① 提高转换波反射系数 R_{PS} 的近似精度, 寻找新的近似公式; ② 处理中严格采用真振幅处理, 提高纵横波同相轴相关的精确性; ③ 进一步利用三维地震数据, 发展三维的联合反演方法; ④ 将纵波反演中的非线性方法引入到纵横波联合反演中来反演储层的弹性参数和所含流体; ⑤ 取消地下介质各向同性的假设, 利用纵横波联合反演储层的各向异性参数。

4 结论

随着地震采集技术的发展及成本的降低, 越来越多的工区进行了多波的采集, 因此迫切需要一种可靠的纵横波联合

反演方法。本文提到的方法都是基于 Aki-Richards 近似公式, 并且利用最小二乘法构造超定方程组。虽然在具体的解法上有一定的差异, 但可归结为加权叠加的范畴。就目前的研究状况看, 利用纵横波联合反演仍然处在试验阶段, 纵横波联合反演方法仍有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Castagna J, Bazle M, Eastwood R. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in elastic silicate rocks [J]. *Geophysics*, 1985, 50: 571-581.
- [2] Ursin B, Tjaland E. Information content of the elastic reflection matrix[C]//Expanded abstracts of 62nd annual internat SEG Mtg. New Orleans: The Society of Exploration Geophysicists, 1992: 796-799.
- [3] Lines L R. Density contrast is difficult to determine from AVO[R/OL]. 1998, <http://www.crewes.org/ForOurSponsors/ResearchReports/1998/1998-47.pdf>.
- [4] 周竹生. P-SV 波和 SH 波的 AVO 分析 [J]. 石油地球物理勘探, 1993, 28(4): 430-438.
Zhou Zhusheng. *Geophysical Prospecting*, 1993, 28(4): 430-438.
- [5] 胡中平. 用 P-SV 波 AVO 特性判别油气异常 [J]. 石油地球物理勘探, 1995, 30(5): 653-658.
Hu Zhongping. *Oil Geophysical Prospecting*, 1995, 30(5): 653-658.
- [6] 李正文, 胡光岷. P-SV 波 AVO 分析 [J]. 成都理工学院学报, 1996, 23(4): 73-79.
Li Zhengwen, Hu Guangmin. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1996, 23(4): 73-79.
- [7] Jin S, Cambois G, Vuillemoz C. Vuillemoz. Shear-wave velocity and density estimation from PS-wave AVO analysis: Application to an OBS dataset from the North Sea[J]. *Geophysics*, 2000, 65(5): 1446-1454.
- [8] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
LU Jimeng. The principle of seismic exploration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993
- [9] Aki K, Richards P G. Quantitative seismology: Theory and Methods[M]. New York: W.H. Freeman and Company, 1980.
- [10] Smith G C, Gidlow P M. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas[J]. *Geophysical Prospecting*, 1987, 35: 993-1014.
- [11] Fatti J L, Vail P J, Smith G C, et al. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique[J]. *Geophysics*, 1994, 59: 1362-1376.
- [12] Stewart R R. Joint P and P-SV inversion [R/OL]. 1990. <http://www.crewes.org/ForOurSponsors/ResearchReports/reports.php?year=1990>.
- [13] Larsen J A, Margrave G F, Lu H X. AVO analysis by simultaneous P-P and P-S weighted stacking applied to 3C-3D seismic data [C]//Expanded abstracts of 69th annual internat SEG Mtg. Houston: The Society of Exploration Geophysicists, 1999: 721-724.
- [14] Larsen J A. AVO inversion by simultaneous PP and PS inversion[D]. Calgary: University of Calgary, 1999.
- [15] Ozdemir H, Ronen S, Olofsson B, et al. Simultaneous multicomponent AVO inversion[C]//Expanded abstracts of 71st annual internat SEG Mtg. San Antonio: The Society of Exploration Geophysicists, 2001: 269-272.
- [16] Margrave G F, Stewart R R, Larsen J A. Joint PP and PS seismic inversion[J]. *The Leading Edge*, 2001, 20: 978-982.
- [17] Zhang H, Margrave GF, Brown RJ. Joint PP-PS inversion at Pikes Peak oil field, Saskatchewan[R/OL]. 2002. <http://www.crewes.org/ForOurSponsors/ResearchReports/2002/2002-60.pdf>.
- [18] 黄中玉, 赵金州. 纵波和转换波 AVO 联合反演技术 [J]. 石油物探, 2004, 43(4): 319-322.
Huang Zhongyu, Zhao Jinzhou. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2004, 43(4): 319-322.
- [19] Mahmoudian F, Margrave G F. Three parameter AVO inversion with PP and PS data using offset binning[C]//Expanded abstracts of 74th annual internat SEG Mtg. Denver: The Society of Exploration Geophysicists, 2004: 721-724.
- [20] Jin S. Characterizing reservoir by using jointly P- and S-wave AVO analyses [C]//Expanded abstracts of 69th annual internat SEG Mtg. Houston: The Society of Exploration Geophysicists, 1999: 687-690.
- [21] Gidlow P M, Smith G C, Vail P J. Hydrocarbon detection using fluid factor traces: A case history [C]//Expanded abstracts of the joint SEG/EAGE summer workshop. Montana: The Society of Exploration Geophysicists, 1992: 78-89.
- [22] Veire H H, Landro M. Simultaneous inversion of PP and PS seismic data[J]. *Geophysics*, 2006, 71(3): R1-R10.
- [23] Goodway B, Chen T, Downton J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters, " $\lambda\mu$ ", " $\mu\rho$ " and " λ/μ fluid stack", from P and S inversions[C]//Expanded abstracts of 68th annual internat SEG Mtg. Dallas: The Society of Exploration Geophysicists, 1997: 148-151.
- [24] Ramos C B. Useful approximations for converted wave AVO [J]. *Geophysics*, 2001, 66(6): 1721-1734.
- [25] 孙鹏远, 孙建国, 卢秀丽. P-SV 波 AVO 分析 [J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(2): 131-135.
Sun Pengyuan, Sun Jianguo, Lu Xiuli. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38(2): 131-135.
- [26] 孙鹏远, 孙建国, 卢秀丽. P-SV 转换波 AVO 加权叠加反演 [J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(3): 271-274.
Sun Pengyuan, Sun Jianguo, Lu Xiuli. *Oil Geophysical Prospecting*, 2004, 39(3): 271-274.
- [27] 孙鹏远, 孙建国, 卢秀丽. P-SV 波反射系数近似及其 AVO 属性特征 [J]. 地球学报, 2006, 27(1): 85-89.
Sun Pengyuan, Sun Jianguo, Lu Xiuli. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(1): 85-89.
- [28] 陈天胜, 刘洋, 魏修成. 纵波和转换波联合 AVO 反演方法研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 33-37.
Cheng Tiansheng, Liu Yang, Wei Xiucheng. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2006, 30(1): 33-37.

(责任编辑 刘志远)