

• 处理方法 • 物理勘探 P-SV 转换波 AVO 加权叠加反演

孙鹏远^{①②} 孙建国^{①②} 卢秀丽^①

(①吉林大学地球探测科学与技术学院;②国土资源部应用地球物理波动理论与成像技术实验室)

摘要

孙鹏远,孙建国,卢秀丽.P-SV 转换波 AVO 加权叠加反演.石油地球物理勘探.2004,39(3):271~274

本文从 P-SV 转换波反射系数幂级数近似公式出发,给出了多个由不同参数组合表示的 P-SV 转换波反射系数近似式,并探讨了利用这些近似式进行 AVO 加权叠加参数反演的理论和方法。不同理论模型的加权叠加反演结果表明,在利用 P-SV 转换波 AVO 进行加权叠加反演时,直接反演纵横波速度、密度以及波阻抗信息具有较大的误差;若直接反演剪切模量 $\Delta\mu/\mu$ 和 $\Delta(\mu\rho)/(\mu\rho)$ 型流体因子,则不仅具有很高的精度,而且反演结果稳定,适用于 P-SV 转换波和多波 AVO 参数反演。

关键词 P-SV 转换波 加权叠加 参数反演 AVO 分析 反射系数近似式

引言

自 Smith 和 Gidlow (1987) 提出利用加权叠加^[1]对叠前地震资料的振幅与炮检距关系(AVO)信息进行线性反演以来,加权叠加反演一直是 PP 波 AVO 参数反演最有效的方法之一。该方法主要是根据 NMO 处理后的 CMP 道集上出现的 AVO 信息恢复地层参数,使得地层参数的反演可以利用线性最小二乘法来实现,即相当于 NMO 校正后 CMP 道集中各道的加权叠加。和其他参数反演方法相比,该方法具有快速、简单和稳定(无局部极小)的优点,而且能够改善零炮检距反射系数(声阻抗差)的结果^[2]。

为了能够利用该技术进行 P-SV 转换波的 AVO 分析和参数反演,Stewart 率先研究了 PP 波和 P-SV 转换波 AVO 加权叠加联合反演理论^[3];Larsen 探讨了利用 PP 波和 P-SV 转换波加权叠加联合反演纵横波阻抗的方法及其实际应用效果^[4]。但这些方法都采用 Gardner 经验关系式^[5]来消去或替换其他参量,加上目前 P-SV 转换波反射系数的近似精度普遍没有 PP 波的高,这就使得 P-SV 转换波的参数反演结果相对 PP 波而言更不可靠。为了

解决上述问题,本文在郑晓东给出的 P-SV 波反射系数幂级数近似公式^[6]的基础上,通过利用不同地层参数之间的关系提出了同参数组合的 P-SV 波反射系数近似公式。考虑到 $\Delta(\mu\rho)/(\mu\rho)$ 型流体因子对油气储层有更为敏感的响应^[7],本文给出了利用 $\Delta(\mu\rho)/(\mu\rho)$ 和 $\Delta\mu/\mu$ 表示的、不依赖于 Gardner 关系式的 P-SV 波反射系数近似公式。选用 6 个含油气砂岩模型对不同公式进行了 AVO 加权叠加反演,应用效果良好。

P-SV 波反射系数的不同表示形式

郑晓东给出的 P-SV 转换波反射系数公式^[6]为

$$R_{PS} \approx Asini + B\sin^3 i \quad (1)$$

其中

$$A = -2\gamma \frac{\Delta\beta}{\beta} - \left(\frac{1}{2} + \gamma \right) \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

$$B = (2\gamma^2 + \gamma) \frac{\Delta\beta}{\beta} + \left(\frac{3}{4}\gamma^2 + \frac{1}{2}\gamma \right) \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

$$\gamma = \beta/\alpha$$

$$\begin{cases} \alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2 \\ \beta = (\beta_1 + \beta_2)/2 \\ \rho = (\rho_1 + \rho_2)/2 \end{cases}$$

本文于 2003 年 3 月 14 日收到。

本文由国家自然科学基金项目(49874029)、高等学校博士学科点专项科研基金项目(97018705)、教育部回国启动基金(981303005)及教育部骨干教师资助计划长江学者专项基金联合资助。

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 \\ \Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 \\ \Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} i = (i_1 + i_2)/2 \\ j = (j_1 + j_2)/2 \end{cases}$$

这里:下脚标1表示入射波和反射波所在的介质;下脚标2表示透射波所在的介质; α_1 和 α_2 、 β_1 和 β_2 、 ρ_1 和 ρ_2 分别表示介质1和介质2中的纵波速度、横波速度和密度; i_1 和 j_1 分别表示纵波的入射角和横波的反射角; i_2 和 j_2 分别表示纵波和横波的透射角。图1展示了各向同性均匀介质中上述各种角度之间的关系。

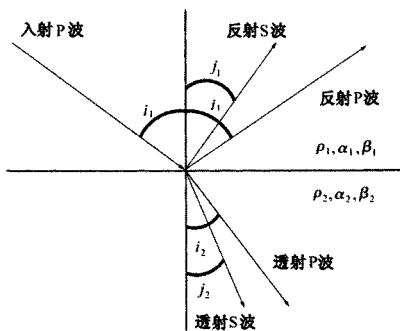


图1 平面P波的反射和透射

如果将式(1)表示成关于归一化密度和归一化横波速度的形式,则有

$$R_{PS} \approx A_1 \frac{\Delta\rho}{\rho} + B_1 \frac{\Delta\beta}{\beta} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} A_1 = -\left(\frac{1}{2} + \gamma\right) \sin i + \left(\frac{3}{4}\gamma^2 + \frac{1}{2}\gamma\right) \sin^3 i \\ B_1 = -2\gamma \sin i + (2\gamma^2 + \gamma) \sin^3 i \end{cases}$$

根据纵横波速度、密度及弹性模量之间的关系,可以将近似式(2)表示成不同弹性参数组合的形式。

借助于Gardner经验关系式

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta\alpha}{\alpha}$$

将式(2)表示成关于纵横波速度的形式,有

$$R_{PS} \approx A_2 \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + B_2 \frac{\Delta\beta}{\beta} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} A_2 = A_1/4 \\ B_2 = B_1 \end{cases}$$

根据纵横波阻抗的定义

$$I = \alpha\rho$$

$$J = \beta\rho$$

可以得到

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \\ \frac{\Delta J}{J} = \frac{\Delta\beta}{\beta} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \end{cases}$$

于是,式(2)以纵横波阻抗形式表示为

$$R_{PS} \approx A_3 \frac{\Delta I}{I} + B_3 \frac{\Delta J}{J} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} A_3 = (A_1 - B_1)/5 \\ B_3 = B_1 \end{cases}$$

根据剪切模量和横波速度之间的关系,可得

$$\begin{cases} 2 \frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{\Delta\mu}{\mu} - \frac{\Delta\rho}{\rho} \\ \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta(\mu\rho)}{\mu\rho} - \frac{\Delta\mu}{\mu} \end{cases}$$

因此将式(2)表示成关于 $\frac{\Delta\mu}{\mu}$ 和 $\frac{\Delta(\mu\rho)}{\mu\rho}$ 的形式

$$R_{PS} \approx A_4 \frac{\Delta(\mu\rho)}{\mu\rho} + B_4 \frac{\Delta\mu}{\mu} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} A_4 = A_1 - B_1/2 \\ B_4 = B_1 - A_1 \end{cases}$$

P-SV波AVO加权叠加反演原理

上述近似公式分别采用不同弹性参数描述了P-SV波反射系数随入射角的变化规律,如果不考虑这些参数的具体含义,则它们都可统一表示成下列形式

$$R_{PS} \approx M \frac{\Delta P_1}{P_1} + K \frac{\Delta P_2}{P_2} \quad (6)$$

其中: M 和 K 分别表示不同参数组合的权系数; $\frac{\Delta P_1}{P_1}$ 和 $\frac{\Delta P_2}{P_2}$ 分别表示需要反演的参数。对于上述不同表示形式的近似公式, M 和 K 分别对应 A_1 和 B_1 、 A_2 和 B_2 、 A_3 和 B_3 、 A_4 和 B_4 , $\frac{\Delta P_1}{P_1}$ 和 $\frac{\Delta P_2}{P_2}$ 则分别对应 $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ 和 $\frac{\Delta\beta}{\beta}$ 、 $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ 和 $\frac{\Delta\beta}{\beta}$ 、 $\frac{\Delta I}{I}$ 和 $\frac{\Delta J}{J}$ 、 $\frac{\Delta(\mu\rho)}{\mu\rho}$ 和 $\frac{\Delta\mu}{\mu}$ 。

如果实际的反射系数为 R_{PSi} ,参照PP波AVO加权叠加方法^[1],取式

$$\epsilon = \sum_{i=1}^N \left[R_{PS_i} - M \frac{\Delta P_1}{P_1} + K \frac{\Delta P_2}{P_2} \right]^2$$

的极小值,即可得到反演参数的最小二乘解

$$\frac{\Delta P_1}{P_1} = \sum_{i=1}^N \left[R_{PS_i} \frac{M_i \sum_{j=1}^N (K_j^2) - K_i \sum_{j=1}^N (M_j K_j)}{\sum_{j=1}^N (M_j^2) \sum_{j=1}^N (K_j^2) - \left(\sum_{j=1}^N (M_j K_j) \right)^2} \right] \quad (7a)$$

$$\frac{\Delta P_2}{P_2} = \sum_{i=1}^N \left[R_{PS_i} \frac{K_i \sum_{j=1}^N (M_j^2) - M_i \sum_{j=1}^N (M_j K_j)}{\sum_{j=1}^N (M_j^2) \sum_{j=1}^N (K_j^2) - \left(\sum_{j=1}^N (M_j K_j) \right)^2} \right] \quad (7b)$$

基于理论模型的加权叠加反演

上面给出了不同弹性参数表示的P-SV波反射系数近似式,并讨论了利用这些近似式进行AVO反演。

加权叠加反演的基本原理。为了检测上述不同近似式进行加权叠加反演的精度,我们选用6个不同含油气砂岩模型进行了反演计算。模型及其地层参数如表1所示;表2为对各模型应用不同近似式所得的反演结果,并给出其相对误差值。

从表2的反演结果可以看出,利用上述各种不同参数组合的P-SV波反射系数近似式进行AVO加权叠加参数反演时,估算纵横波速度、密度及波阻

表1 不同含油气砂岩模型及其岩性参数

模 型	地层1			地层2		
	α $m \cdot s^{-1}$	β $m \cdot s^{-1}$	ρ $g \cdot cm^{-3}$	α $m \cdot s^{-1}$	β $m \cdot s^{-1}$	ρ $g \cdot cm^{-3}$
1	3300	1700	2.35	4200	2700	2.49
2	2960	1380	2.43	3490	2290	2.14
3	8000	4600	3.38	4980	2900	2.67
4	4550	2610	2.44	3210	1600	2.39
5	2150	800	2.20	2160	810	2.21
6	4060	2030	2.40	4690	2610	2.49

表2 对表1所示模型用不同近似式进行参数反演的结果对比

近似式	不同参数		模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6
式(2)	$\frac{\Delta\rho}{\rho}$	真值	0.057851	-0.126915	-0.235819	-0.020704	0.004535	0.036810
		估计值	0.047484	-0.008523	-0.353220	-0.079356	0.003429	-0.010329
		相对误差%	17.92	93.28	49.78	283.29	24.39	128.06
	$\frac{\Delta\beta}{\beta}$	真值	0.454545	0.495913	-0.453333	-0.479810	0.012422	0.250000
		估计值	0.461054	0.404198	-0.333797	-0.423982	0.013757	0.295787
		相对误差%	1.43	18.49	26.37	11.64	10.74	18.31
式(3)	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$	真值	0.240000	0.164341	-0.465331	-0.345361	0.004640	0.144000
		估计值	0.189935	-0.034093	-1.412882	-0.317423	0.013716	-0.041315
		相对误差%	20.86	120.75	203.63	8.09	195.59	128.69
	$\frac{\Delta\beta}{\beta}$	真值	0.454545	0.495913	-0.453333	-0.479810	0.012422	0.250000
		估计值	0.461054	0.404198	-0.333797	-0.423982	0.013757	0.295787
		相对误差%	1.43	18.49	26.37	11.64	10.75	18.31
式(4)	$\frac{\Delta I}{I}$	真值	0.297851	0.037426	-0.701151	-0.366065	0.009176	0.180810
		估计值	0.237384	-0.042600	-1.766114	-0.396773	0.017142	-0.051636
		相对误差%	20.3	213.82	151.89	8.39	86.83	128.56
	$\frac{\Delta J}{J}$	真值	0.512397	0.368998	-0.689153	-0.500514	0.016958	0.286810
		估计值	0.508537	0.395674	-0.687017	-0.503339	0.017186	0.285458
		相对误差%	0.75	7.23	0.31	0.56	1.35	0.47
式(5)	$\frac{\Delta(\mu\rho)}{\mu\rho}$	真值	0.956158	0.724343	-1.206533	-0.939970	0.033912	0.560823
		估计值	1.017075	0.791348	-1.374034	-1.006678	0.034373	0.570916
	$\frac{\Delta\mu}{\mu}$	真值	0.910903	0.832133	-1.045049	-0.923761	0.029378	0.526731
		估计值	0.969597	0.799868	-1.020810	-0.927325	0.030945	0.581245
		相对误差%	6.44	3.88	2.32	0.39	5.33	10.35

抗都有很大的误差。对于参数组合 $\Delta\rho/\rho$ 和 $\Delta\beta/\beta$, 尽管这一表示形式是郑晓东幂级数近似的直接变形, 没有引入任何假设条件(Gardner 经验关系式), 但反演结果仍有很大的误差, 而且很不稳定。对于参数组合 $\Delta\alpha/\alpha$ 和 $\Delta\beta/\beta$ 及 $\Delta I/I$ 和 $\Delta J/J$, 由于利用 Gardner 经验关系式表示了 $\Delta\alpha/\alpha$ 和 $\Delta I/I$, 使得到的反演 $\Delta\alpha/\alpha$ 和 $\Delta I/I$ 具有更大的误差。这是由于 P-SV 转换波反射系数近似的精度普遍低于 PP 波反射系数近似, 而且 Gardner 经验关系式本身也引入了(原始)误差。而对于 $\Delta(\mu\rho)/\mu\rho$ 和 $\Delta\mu/\mu$ 参数组合, 由于这两个参量本身对反映储层特性比较敏感, 起到了异常放大的作用, 加上没有对原始近似再取近似, 因此反演结果几乎不受模型参数变化的影响, 而且能较好地符合实际值, 证实这种参数组合具有很高的精度和稳定性。

结 论

本文讨论了 P-SV 转换波 AVO 加权叠加反演理论, 通过理论模型检测了几种近似加权叠加反演的精度。根据上面的讨论和分析, 得出如下结论:

(1) 利用加权叠加技术进行 P-SV 转换波 AVO 反演是可行的。尽管利用由归一化横波速度和归一化密度表示的 P-SV 波反射系数近似进行加权叠加反演在理论上是可靠的, 但由于地层密度变化相对较小, 使得反演的结果不太稳定, 这也同时表明利用 AVO 信息直接反演密度信息是不可靠的。

(2) 引入 Gardner 经验关系式将使参数反演的结果不稳定。尽管利用加权叠加反演横波阻抗非常

理想, 但纵波阻抗的反演效果却很差, 因此这些方法都不宜用于 P-SV 转换波的 AVO 加权叠加反演。

(3) 利用 $\Delta(\mu\rho)/\mu\rho$ 和 $\Delta\mu/\mu$ 表示的 P-SV 转换波反射系数近似进行 AVO 反演效果最好。因为以弹性模量和流体因子组成参数组合表示的近似不仅可满足加权叠加参数反演的精度要求, 而且对不同的模型反演结果都比较稳定, 这是由于该公式既没有引入 Gardner 经验关系式, 而且其参量对反映储层特性较为敏感。

参 考 文 献

- [1] Smith G C and Gidlow P M. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas. *Geophys Prospect*, 1987, 35: 993~1014
- [2] Lortzer G J M, Dehaas J C and Berkhouit A J. Evaluation of weighted stacking techniques for AVO inversion. *Expanded Abstracts of SEG 58th Ann Internat Mtg*, 1988, 1204~1208
- [3] Stewart R R, Joint P and P-SV inversion. *The CREWES Research Reports*, 1990, 112~115
- [4] Larsen J A, Margrave G F and Lu H. AVO analysis by simultaneous P-P and P-S weighted stacking applied to 3C-3D seismic data. *Expanded Abstracts of the 59th SEG Mtg*, 1999, 721~723
- [5] Gardner G H F, Gardner L W and Gregory A R. Formation velocity and density: The diagnostic basis for stratigraphic traps. *Geophysics*, 1974, 39: 770~780
- [6] 郑晓东. Zoepritz 方程的近似及其应用. 石油地球物理勘探, 1991, 26(2): 129~144
- [7] Goodway B, Chen T and Downton J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lame petrophysical parameters, "λ", "μ" and "λ fluid stack", from P and S inversions. *CSEG Expanded Abstracts*, 1997, 148~151

(本文编辑:朱汉东)

· 外刊题录 ·

《石油物探》, Vol. 43, No. 2, 2004

- | | |
|---|------|
| P-SV 波在提取 SS 波零偏移距反射率中的应用
新型陆用压电检波器在滩浅海地区地震勘探中的
应用及效果 | 孙鹏远等 |
| 延迟震源技术在三维高分辨率地震勘探中的应用
南海琼东南工区地层吸收衰减模型研究 | 谭绍泉等 |
| 地震属性与储层参数联合优化新算法
叠前时空域线性干扰的衰减及应用 | 于世焕等 |
| 利用 VSP 资料反演地层速度的一种新途径
不同周期的地形起伏分量对叠加速度的影响 | 卢秀丽等 |
| 波形分析方法在碳酸盐岩储层预测中的应用
测井曲线精细处理解释技术在复杂储层预测中的应用 | 宋维琪等 |
| | 甘其刚等 |
| | 李文杰等 |
| | 林伯香等 |
| | 张永升 |
| | 季玉新等 |

- | | |
|---|--------------|
| 声波时差资料在天然气综合扩散系数预测中的应用
陆上地震激发因素的选择方法探讨 | 付广等
张付生等 |
| 塔河油田碳酸盐岩储层预测技术 | 王士敏等 |
| 苏北盆地高邮凹陷邵伯西地区戴南组隐蔽油藏研究
高邮凹陷北斜坡辉绿岩区解释方法研究 | 薄永德等
王军等 |
| 高分辨率三维地震资料解释技术的应用 | 丛向元等 |
| 二连盆地火成岩地区地震勘探采集方法研究与应用
黄桥—如皋地区地震采集方法效果分析 | 安学勇等
黄东定等 |
| 南海某构造二维多分量地震资料处理
焉耆盆地低信噪比地震资料处理方法 | 傅旦丹等
张亚斌 |
| 夏盐南三维静校正方法
瞬变电磁法油藏动态监测模拟 | 夏显佑等
唐新功等 |
| 十屋断陷含油气系统及勘探潜力分析
随钻地震技术综述 | 高东
姜宇东 |