

文章编号: 1001-1986(2010)02-0054-05

TI 介质多波叠前 AVA 岩性参数反演

钟 峙¹, 李录明¹, 史运华¹, 罗 奕²

(1. 成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 介质各向异性对多波振幅随入射角变化而变化(AVA)的特征有着重要影响。根据横向各向同性(TI)介质 Zoeppritz 方程, 探讨 TI 介质中 AVA 曲线的特征, 并以此为基础, 分别利用解析广义线性反演法和扰动广义线性反演法对理论模型进行反演, 完成了对地层 P 波速度、S 波速度、密度及各向异性系数的反演。理论模型的计算验证了该方法的正确性后, 将此 TI 介质多波叠前 AVA 参数反演方法用于实际多波资料反演处理, 取得较好效果, 说明多波 AVA 参数反演方法是可行的, 对岩性预测有着重要的意义。

关键词: 多波 AVA 叠前反演; 扰动法; 解析法; 角道集

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.02.014

Multiwave pre-stack AVA parameter inversion in TI media

ZHONG Zhi¹, LI Luming¹, SHI Yunhua¹, LUO Yi²

(1. Key Lab of the Geodetection and Information Technology of the Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: AVA(Amplitude Versus Angle) plays an important part in the seismic data processing of the multi-wave. Based on the Zoeppritz's equation of the transversely isotropic media, seismic multi-wave AVA inversion of the transversely isotropic media parameter has been discussed in this paper. In the study of the AVA, inversion is the method that by use of the AVA curves measured and multi-wave AVA parameter inversion equation obtained the speed and density value of the underground P and S waves. Based on the establishment of the forward models, generalized linear inversion method is adopted to respectively analyze the two-tier and multi-level theoretical models using the analytical method and perturbation method to get the P-P wave velocity, P-SV wave velocity, stratum density and anisotropy coefficient. Model calculations show that the method is correct. Finally, we combined the actual multi-wave data to implement AVA parameters inversion. Therefore, all of the above results have proved the multi-wave AVA stratum parameter inversion discussed in this paper is feasible. It plays an important part in prediction of lithology.

Key words: pre-stack AVA inversion; perturbation Method; analytical method; AVA angle-gather

在众多的多波动力学参数中, 振幅信息是最灵敏、最具体、最能直观地反映地层的弹性参数, 但由于 P-SV 波的射线非对称性及入射角与偏移距的非线性关系, 在利用多波资料进行 AVO 反演时必须考虑入射角与反射振幅之间的关系, 即需要进行多波 AVA(Amplitude Versus Angle)分析及反演^[1]。多波 AVA 反演是根据反射界面两侧岩性变化而引起的多波振幅随入射角的变化规律, 来定量求解介质的岩性参数。AVA 在多波资料处理中有着十分重要的作用。本文以各向异性介质多波 AVA 方程为基础, 采用广义线性反演方法, 正反演迭代逼近求解地层 P 波速度、S 波速度、密度及各向异性系数, 验证了

方法的可靠性; 最后, 利用 AVA 参数反演方法对实际资料进行了反演。

1 多波各向异性 AVA 正演

弹性波在传播过程中若遇到弹性分界面会发生能量分配, Zoeppritz 方程精确描述了各向同性介质中波在弹性分界面处所满足的能量分配关系。然而, 各向同性的前提限制了它在实际地震资料处理中的应用。横向各向同性(VTI)是地震勘探中最常见的一种各向异性介质, 式(1)为精确的横向各向异性 AVA 方程(P 波入射时 VTI 介质的振幅特征方程)^[2], 在形式上式(1)与各向同性 Zoeppritz 方程相似, 但其系数

收稿日期: 2009-04-18

作者简介: 钟 峙(1982—), 男, 四川自贡人, 硕士研究生, 从事多波地震勘探和地震资料处理与反演工作。

包含了各向异性参数,形式比较复杂。具体参数表达式如下:

$$\begin{bmatrix} l_{\alpha 1} & m_{\beta 1} & -l_{\alpha 2} & -m_{\beta 2} \\ b_{\alpha 1} & b_{\beta 1} & -b_{\alpha 2} & -b_{\beta 2} \\ m_{\alpha 1} & -l_{\beta 1} & m_{\alpha 2} & -l_{\beta 2} \\ a_{\alpha 1} & a_{\beta 1} & a_{\alpha 2} & a_{\beta 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{pp} \\ R_{ps} \\ T_{pp} \\ T_{ps} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{\alpha 1} \\ -b_{\alpha 1} \\ m_{\alpha 1} \\ a_{\alpha 1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} l_{\alpha 1} &= \left[\frac{Q_{\alpha 1} + [(c_{11}^1 - c_{55}^1)p_{\alpha 1}^2 - (c_{33}^1 - c_{55}^1)q_{\alpha 1}^2]}{2Q_{\alpha 1}} \right]^{1/2}; \\ l_{\alpha 2} &= \left[\frac{Q_{\alpha 2} + [(c_{11}^2 - c_{55}^2)p_{\alpha 2}^2 - (c_{33}^2 - c_{55}^2)q_{\alpha 2}^2]}{2Q_{\alpha 2}} \right]^{1/2}; \\ l_{\beta 1} &= \left[\frac{Q_{\beta 1} + [(c_{11}^1 - c_{55}^1)p_{\beta 1}^2 - (c_{33}^1 - c_{55}^1)q_{\beta 1}^2]}{2Q_{\beta 1}} \right]^{1/2}; \\ l_{\beta 2} &= \left[\frac{Q_{\beta 2} + [(c_{11}^2 - c_{55}^2)p_{\beta 2}^2 - (c_{33}^2 - c_{55}^2)q_{\beta 2}^2]}{2Q_{\beta 2}} \right]^{1/2}; \\ m_{\alpha 1} &= \left[\frac{Q_{\alpha 1} - [(c_{11}^1 - c_{55}^1)p_{\alpha 1}^2 - (c_{33}^1 - c_{55}^1)q_{\alpha 1}^2]}{2Q_{\alpha 1}} \right]^{1/2}; \\ m_{\alpha 2} &= \left[\frac{Q_{\alpha 2} - [(c_{11}^2 - c_{55}^2)p_{\alpha 2}^2 - (c_{33}^2 - c_{55}^2)q_{\alpha 2}^2]}{2Q_{\alpha 2}} \right]^{1/2}; \\ m_{\beta 1} &= \left[\frac{Q_{\beta 1} - [(c_{11}^1 - c_{55}^1)p_{\beta 1}^2 - (c_{33}^1 - c_{55}^1)q_{\beta 1}^2]}{2Q_{\beta 1}} \right]^{1/2}; \\ m_{\beta 2} &= \left[\frac{Q_{\beta 2} - [(c_{11}^2 - c_{55}^2)p_{\beta 2}^2 - (c_{33}^2 - c_{55}^2)q_{\beta 2}^2]}{2Q_{\beta 2}} \right]^{1/2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{\alpha 1} &= c_{55}^1(q_{\alpha 1}l_{\alpha 1} + p_{\alpha 1}m_{\alpha 1}); \\ a_{\beta 1} &= c_{55}^1(q_{\beta 1}m_{\beta 1} - p_{\beta 1}l_{\beta 1}); \\ a_{\alpha 2} &= c_{55}^2(q_{\alpha 2}l_{\alpha 2} + p_{\alpha 2}m_{\alpha 2}); \\ a_{\beta 2} &= c_{55}^2(q_{\beta 2}m_{\beta 2} - p_{\beta 2}l_{\beta 2}); \\ b_{\alpha 1} &= p_{\alpha 1}l_{\alpha 1}c_{13}^1 + q_{\alpha 1}m_{\alpha 1}c_{33}^1; \\ b_{\beta 1} &= p_{\beta 1}m_{\beta 1}c_{13}^1 - q_{\beta 1}l_{\beta 1}c_{33}^1; \\ b_{\alpha 2} &= p_{\alpha 2}l_{\alpha 2}c_{13}^2 + q_{\alpha 2}m_{\alpha 2}c_{33}^2; \\ b_{\beta 2} &= p_{\beta 2}m_{\beta 2}c_{13}^2 - q_{\beta 2}l_{\beta 2}c_{33}^2. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} Q_{\alpha 1} &= \left[[(c_{11}^1 - c_{55}^1)p_{\alpha 1}^2 + (c_{33}^1 - c_{55}^1)q_{\alpha 1}^2]^2 + 4D_1p_{\alpha 1}^2q_{\alpha 1}^2 \right]^{1/2}; \\ Q_{\alpha 2} &= \left[[(c_{11}^2 - c_{55}^2)p_{\alpha 2}^2 + (c_{33}^2 - c_{55}^2)q_{\alpha 2}^2]^2 + 4D_2p_{\alpha 2}^2q_{\alpha 2}^2 \right]^{1/2}; \end{aligned}$$

$$Q_{\beta 1} = \left[[(c_{11}^1 - c_{55}^1)p_{\beta 1}^2 + (c_{33}^1 - c_{55}^1)q_{\beta 1}^2]^2 + 4D_1p_{\beta 1}^2q_{\beta 1}^2 \right]^{1/2};$$

$$Q_{\beta 2} = \left[[(c_{11}^2 - c_{55}^2)p_{\beta 2}^2 + (c_{33}^2 - c_{55}^2)q_{\beta 2}^2]^2 + 4D_2p_{\beta 2}^2q_{\beta 2}^2 \right]^{1/2};$$

$$D_1 = (c_{13}^1 + c_{55}^1)^2 - (c_{11}^1 - c_{55}^1)(c_{33}^1 - c_{55}^1);$$

$$D_2 = (c_{13}^2 + c_{55}^2)^2 - (c_{11}^2 - c_{55}^2)(c_{33}^2 - c_{55}^2);$$

$$p_{\alpha 1} = \frac{\sin(\alpha 1)}{V_{p1}(1 + \delta_1 \sin^2(\alpha 1) \cos^2(\alpha 1) + \varepsilon_1 \sin^4(\alpha 1))};$$

$$p_{\alpha 2} = \frac{\sin(\alpha 2)}{V_{p2}(1 + \delta_2 \sin^2(\alpha 2) \cos^2(\alpha 2) + \varepsilon_2 \sin^4(\alpha 2))};$$

$$p_{\beta 1} = \frac{\sin(\beta 1)}{V_{p1}(1 + \delta_1 \sin^2(\beta 1) \cos^2(\beta 1) + \varepsilon_1 \sin^4(\beta 1))};$$

$$p_{\beta 2} = \frac{\sin(\beta 2)}{V_{p2}(1 + \delta_2 \sin^2(\beta 2) \cos^2(\beta 2) + \varepsilon_2 \sin^4(\beta 2))};$$

$$q_{\alpha 1} = \frac{\sin(\alpha 1)}{V_{s1}(1 + V_{p1}^2/V_{s1}^2(\varepsilon_1 - \delta_1) \sin^2(\alpha 1) \cos^2(\alpha 1))};$$

$$q_{\alpha 2} = \frac{\sin(\alpha 2)}{V_{s2}(1 + V_{p2}^2/V_{s2}^2(\varepsilon_2 - \delta_2) \sin^2(\alpha 2) \cos^2(\alpha 2))};$$

$$q_{\beta 1} = \frac{\sin(\beta 1)}{V_{s1}(1 + V_{p1}^2/V_{s1}^2(\varepsilon_1 - \delta_1) \sin^2(\beta 1) \cos^2(\beta 1))};$$

$$q_{\beta 2} = \frac{\sin(\beta 2)}{V_{s2}(1 + V_{p2}^2/V_{s2}^2(\varepsilon_2 - \delta_2) \sin^2(\beta 2) \cos^2(\beta 2))};$$

$$c_{33}^1 = \rho_1 V_{p1}^2, \quad c_{33}^2 = \rho_2 V_{p2}^2;$$

$$c_{55}^1 = \rho_1 V_{s1}^2, \quad c_{55}^2 = \rho_2 V_{s2}^2;$$

$$c_{11}^1 = c_{33}^1(1 + 2\varepsilon_1), \quad c_{11}^2 = c_{33}^2(1 + 2\varepsilon_2);$$

$$c_{13}^1 = \sqrt{2\delta_1 c_{33}^1(c_{33}^1 - c_{55}^1) + (c_{33}^1 - c_{55}^1)^2} - c_{55}^1;$$

$$c_{13}^2 = \sqrt{2\delta_2 c_{33}^2(c_{33}^2 - c_{55}^2) + (c_{33}^2 - c_{55}^2)^2} - c_{55}^2.$$

式中 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\beta 1$ 、 $\beta 2$ 分别为 P 波反射角、透射角, SV 波反射角、透射角;上标为 1 表示上层介质的参数,上标为 2 表示下层介质的参数;下角标 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\beta 1$ 、 $\beta 2$ 分别表示反射 P 波、透射 P 波、反射 SV 波、透射 SV 波所对应的系数; ε 为 P 波各向异性; δ 为 P 波各向异性与 SV 波各项异性的相对差; ρ 为介质密度; R_{pp} 、 R_{ps} 、 T_{pp} 、 T_{ps} 分别为 P 波入射时 P 波反射系数、转换波反射系数、P 波透射系数、转换波透射系数; R_{sp} 、 R_{ss} 、 T_{sp} 、 T_{ss} 分别为 SV 波入射时 SV 波反射系数、转换波反射系数、SV 波透射系数、转换波透射系数。

利用式(1)正演方程对表 1 所示的单层模型进行正演,结果如图 1 所示。

利用该方法正演出表 2 参数所示的 1 个 CMP 点的角道集,结果如图 2 所示。

表 1 单层地质模型参数
Table 1 Monolayer geological model parameters

层序	$V_p/m \cdot s^{-1}$	$V_s/m \cdot s^{-1}$	$\rho/g \cdot cm^{-3}$		
上层	3 000.0	2 333.0	2.4	0.2	0.3
下层	2 500.0	1 500.0	2.0	0.22	0.32

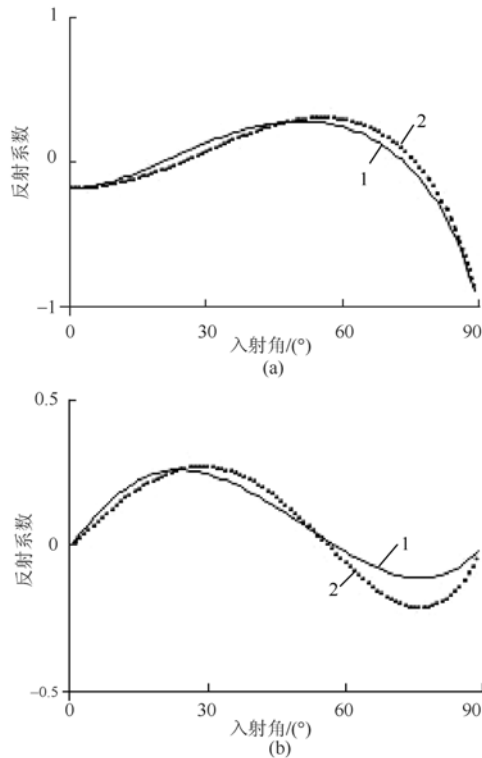


图 1 各向同性与各向异性条件下 AVA 曲线对比图

Fig. 1 the AVA curves comparison of isotropic and anisotropic conditions

a—P-P 波反射系数; b—P-SV 波反射系数;
1—各向同性结果; 2—各向异性结果

表 2 多层理论模型参数
Table 2 Multi-layer geological model parameters

层序	$V_p/m \cdot s^{-1}$	$V_s/m \cdot s^{-1}$	$\rho/g \cdot cm^{-3}$			层厚/m
1	2 000	1 350	2.0	0.030	0.020	50
2	2 500	1 550	2.1	0.031	0.022	100
3	3 400	1 900	2.2	0.032	0.024	100
4	3 000	1 750	2.3	0.033	0.026	100
5	3 800	2 000	2.4	0.035	0.027	

2 TI 介质多波 AVA 模型反演

在对所建立的模型正演基础上,利用广义线性反演方法对模型进行了反演计算。反演公式^[3]为:

$$(A + \beta I)\Delta P = J^T(F_r - F_0), \quad (2)$$

式中 $A = J^T J$; J 为 Jacobi 矩阵; J^T 为 Jacobi 矩阵的转置; β 为阻尼系数; I 为单位矩阵; F_0 为有初始模型参数正演的 AVA 曲线;

$$\Delta P = \{\Delta V_p, \Delta V_s, \Delta \rho, \Delta \varepsilon, \Delta \delta\}^T; \quad (3)$$

F_r 为实测 AVA 曲线;

$$F_r = [R|_{\alpha_1} \quad R|_{\alpha_2} \quad \cdots \quad R|_{\alpha_n}]^T; \quad (4)$$

ΔP 为所要求解的模型参数修正量

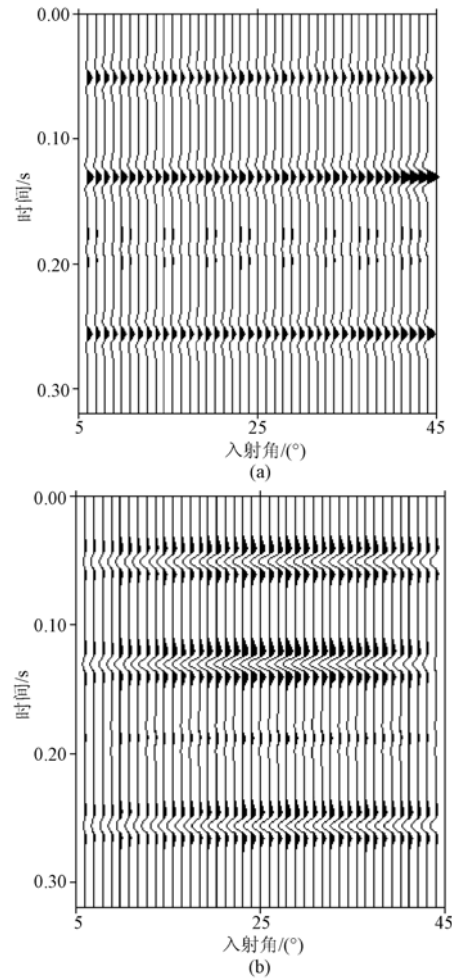


图 2 理论模型角道集

Fig. 2 The angle gather of theoretical model

a—P-P 波角道集; b—P-SV 波角道集

$$F_0 = [R|_{\alpha_1} \quad R|_{\alpha_2} \cdots R|_{\alpha_n}]^T. \quad (5)$$

式中 ΔV_p 、 ΔV_s 、 $\Delta \rho$ 、 $\Delta \varepsilon$ 、 $\Delta \delta$ 分别为 P 波速度、S 波速度、密度和各项异性系数的修正量; $R|_{\alpha_1} \quad R|_{\alpha_2} \cdots R|_{\alpha_n}$ 为实测记录中各个角度的反射系数; $R|_{\alpha_1} \quad R|_{\alpha_2} \cdots R|_{\alpha_n}$ 为正演记录中的各个角度的反射系数。

求解式(2),并进行迭代,直到满足精度。可见,建立广义线性反演方程组的关键是计算 Jacobi 矩阵 J 。在反演问题中, J 实际上是关于反射系数相对岩性参数的变化率矩阵。 J 的通用计算公式^[4]为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial R}{\partial V_p}|_{\alpha_1} & \frac{\partial R}{\partial V_s}|_{\alpha_1} & \frac{\partial R}{\partial \rho}|_{\alpha_1} & \frac{\partial R}{\partial \varepsilon}|_{\alpha_1} & \frac{\partial R}{\partial \delta}|_{\alpha_1} \\ \frac{\partial R}{\partial V_p}|_{\alpha_2} & \frac{\partial R}{\partial V_s}|_{\alpha_2} & \frac{\partial R}{\partial \rho}|_{\alpha_2} & \frac{\partial R}{\partial \varepsilon}|_{\alpha_2} & \frac{\partial R}{\partial \delta}|_{\alpha_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial R}{\partial V_p}|_{\alpha_n} & \frac{\partial R}{\partial V_s}|_{\alpha_n} & \frac{\partial R}{\partial \rho}|_{\alpha_n} & \frac{\partial R}{\partial \varepsilon}|_{\alpha_n} & \frac{\partial R}{\partial \delta}|_{\alpha_n} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 R 为反射系数; n 为角度总个数; α 为入射角。

根据计算 Jacobi 矩阵中反射系数关于岩性参数

的一阶导数的不同,又将反演法分为解析广义线性反演法和扰动广义线性反演法。解析法是对精确 TI 正演方程两边求关于岩性参数的偏导数,进而求解出反演 Jacobi 计算式,完成参数反演;扰动法反演则是利用偏导数的定义公式计算 Jacobi 矩阵。这里分别利用解析法和扰动法对表 1 的两层理论模型和表 2 的多层理论模型进行反演,结果如表 3、表 4 所示。

表 3 单层模型反演结果
Table 3 Inversion value of monolayer model

	正确值	初始值	解析反演法		扰动反演法	
			反演值	误差/%	反演值	误差/%
$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2 500	2 400	2 494	0.24	2 508	0.32
$V_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1 500	1 400	1 477	1.53	1 504	0.27
$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.0	2.1	2.012	0.60	2.007	0.35
ε	0.22	0.20	0.216	1.82	0.224	1.82
δ	0.32	0.32	0.318	0.625	0.315	1.56

对表 2 多层理论模型分别采用解析法和扰动法进行反演,由反演结果(表 4)可以看出,90%的误差都控制在 3%之内,且解析法反演的结果略优于扰动法。但在实际计算中,由于式(1)方程本身已十分复杂,如若再对其求解析偏导,就会降低计算效率。从表 3 单层模型反演结果及表 4 多层模型反演结果,可见该反演方法应用于理论模型的效果很好。

3 实际多波资料反演处理

由于实际资料相当复杂,在利用多波 AVA 参数反演方法处理实际资料时需先对实际地震记录做一些预处理:道头处理、提取极大振幅值、AVO 到 AVA 的转换、AVA 曲线拟合等来获得实际的 AVA 曲线,从而完成对实际资料的反演。

图 3 所示的 P-P 波动校正道集记录中,将 $t=1\ 208\ \text{ms}$ 附近的一个反射层作为目的层,提取 $t=1\ 208\ \text{ms}$ 附近的极大振幅值,对其进行平滑处理,并拟合出该目的层的 AVA 曲线,如图 4 所示。由上层的岩性参数反演得到下层的岩性参数如表 5 所示。

表 5 中上层模型值一般由测井或速度分析得到,再利用上层参数值反演得到下层岩性参数值。为了验证反演所得参数的准确性,将反演得到的参数值作为已知参数正演出其产生的 AVA 曲线,与从实际资料中提取的振幅经过拟合后的实际 AVA 曲线进行对比(图 5),两者的吻合程度很高。由此可见,利用多波 AVA 参数反演法对实际资料进行反演是可行的,且具有较高的可信度。

4 结 论

a. 对比研究横向各向同性(TI)介质与各向同性介

表 4 多层模型岩性参数反演结果
Table 4 Joint lithologic parameter inversion result of multi-layers model

层序	1	2	3	4	5	
$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	模型值	2 000	2 500	3 400	3 000	3 800
	初始值	1 910	2 403	3 500	3 087	3 850
	解析法反演值	2 014	2 473	3 357	2 970	3 811
	误差/%	0.70	1.08	1.26	1.00	0.29
	扰动法反演值	2 020	2 509	3 358	3 068	3 769
	误差/%	1.00	0.36	1.26	2.27	0.82
$V_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	模型值	1 350	1 550	1 900	1 750	2 000
	初始值	1 301	1 435	1 860	1 818	2 050
	解析法反演值	1 341	1 572	1 815	1 768	2 003
	误差/%	0.67	1.42	0.79	1.03	0.12
	扰动法反演值	1 328	1 503	1 950	1 689	1 964
	误差/%	1.63	2.87	1.58	3.49	1.80
$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	模型值	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
	初始值	2.05	2.16	2.26	2.35	2.4
	解析法反演值	2.01	2.12	2.23	2.32	2.40
	误差/%	0.50	0.95	1.36	0.87	0.00
	扰动法反演	2.02	2.13	2.22	2.32	2.41
	误差/%	1.00	1.43	0.91	0.87	0.004
ε	模型值	0.030	0.031	0.032	0.033	0.035
	初始值	0.030 5	0.031 5	0.032 5	0.034	0.0351
	解析法反演值	0.029 9	0.031 2	0.032 3	0.033 2	0.034 9
	误差(%)	0.33	0.65	0.94	0.60	0.29
	扰动法反演	0.032	0.031 1	0.0322	0.033 8	0.035
	误差/%	0.67	0.00	0.63	2.42	0.00
δ	模型值	0.020	0.022	0.024	0.026	0.027
	初始值	0.021 0	0.023	0.025	0.026 5	0.027 1
	解析法反演值	0.020 36	0.022 4	0.024 4	0.0262	0.027 0
	误差/%	1.50	1.18	1.67	0.77	0.00
	扰动法反演	0.021 05	0.022 7	0.024 3	0.026 3	0.027 0
	误差/%	2.50	3.18	1.25	1.15	0.00

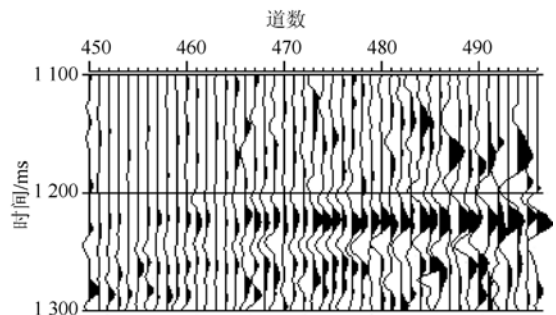


图 3 1 个 CDP 点的 P-P 波动校正道集记录

Fig. 3 Dynamic correction gather of a P-P wave of a CDP

质 AVA 曲线的差异,由于 TI 介质更接近实际地下地质条件,横向各向同性(TI)介质多波 AVA 方程更利于反演。

b. 利用扰动法 P-P 波反演及解析法 P-P 反演,分别对两层和多层理论模型进行反演,得到了 P 波速度、S 波速度、密度及各向异性参数,理论模型反演结果与所给理论值的误差都较小。此外,对实际多波资料

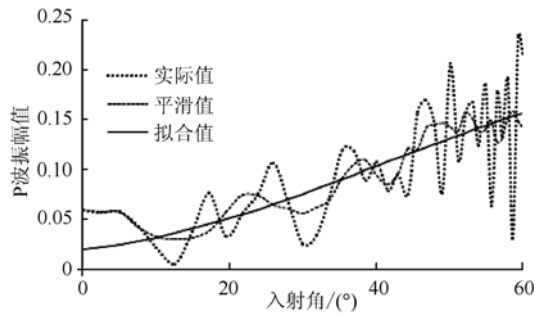


图 4 $t=1\ 208\ \text{ms}$ 目的层振幅值提取、平滑及拟合图
Fig. 4 $t=1\ 208\ \text{ms}$ target layer amplitude, its smoothing and fitting

表 5 实际资料反演参数值
Table 5 the inversion result of actual data

	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	ε	δ
上层	4529.6	2460.1	2.4	0.02	0.03
下层 (初始值)	4322.7	2461.7	2.4	0.025	0.035
下层 (反演值)	4540.4	2000.0	2.54	0.021	0.029

进行了反演，其 P 波速度，S 波速度及密度的反演精度亦较高。由此证明，利用多波 AVA 反演地层岩性参数是一种行之有效的办法。

c. 由于广义线性反演对初值要求较高，在利用 AVA 方法对实际资料进行参数反演时，需要有高品质的 CDP 道集资料，并结合本地区岩石实测资料及

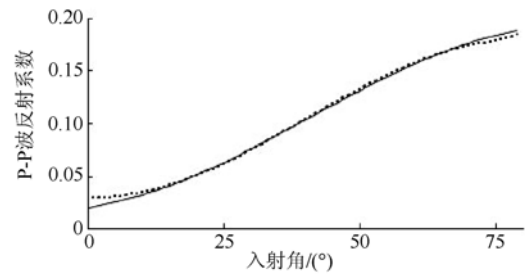


图 5 反演所得 AVA 曲线(虚线)与拟合 AVA 曲线(实线)对比图

Fig. 5 AVA curves comparison chart of inversion and fitting result

测井数据，做详细地 AVA 模型分析，以提高 AVA 反演的准确度。除此之外，进行 AVA 参数反演所用到的数学算法有待进一步改进，以降低其对初始值的要求，更好地为参数反演服务。

参考文献

- [1] 李录明, 罗省贤. 多波 AVA 岩性预测[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(2): 190–204.
- [2] 王明春, 李录明, 罗省贤. TI 介质多波 AVA 联合反演岩性参数方法及应用[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 49–52.
- [3] 雍杨, 李录明, 罗省贤. 多波 AVA 地层参数反演[J]. 矿物岩石, 2003, 23(1): 117–120.
- [4] 李录明, 罗省贤. 多波多分量地震勘探原理及数据处理方法[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1997.

(上接第 53 页)

没有在垂向上的分辨优势。这提示我们应该更好地利用电测井资料，有利于深部盲矿的探测和识别。

参考文献

- [1] DEY A ETC. Resistivity modeling for arbitrary shaped three-dimensional structure[J]. Geophysics, 1979, 44(4): 753–780.
- [2] 吴小平, 徐果明, 李时灿. 利用不完全 Cholesky 共轭梯度法求解点源三维地电场[J]. 地球物理学报, 1998, 41(6): 848–855.
- [3] 吴小平, 徐果明. 利用 ICCG 迭代技术加快电阻率三维正演计算[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(3): 62–66.
- [4] WU X P, XIAO Y F, QI C, et al. Computations of secondary potential for 3-D DC resistivity modelling using an incomplete Choleski conjugate gradient method[J]. Geophysical Prospecting, 2003, 51(6): 567–577.
- [5] 阮百尧, 村上裕, 徐世浙. 电阻率/激发极化率数据的二维反演程序[J]. 物探化探计算技术, 1999, 21(2): 116–125.

- [6] 孙洪星, 席拥军, 李大海. 二维电阻率拟断面成像反演技术研究[J]. 煤炭科学技术, 1996, 24(13): 40–43.
- [7] OLAYINKA A I, YARAMANCI U. Use of block inversion in the 2D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 45: 63–81.
- [8] PELTON W H, ETC. Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data[J]. Geophysics, 1978, 43(4): 788–803.
- [9] 熊彬, 阮百尧, 黄俊革. 直流电阻率测深中二维反演程序对三维数据的近似解释[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2003, 28(1): 102–106.
- [10] 曹新志, 张旺生, 孙华山. 我国深部找矿研究进展综述[J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 104–109.
- [11] Loke M H, Barker R D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44: 131–152.