

文章编号: 0253-2697(2009)02-0232-05

叠前三参数同步反演方法及其应用

杨培杰^{1,2} 穆星¹ 印兴耀²

(1. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院 山东东营 257015; 2. 中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061)

摘要: 叠前三参数同步反演的优势是可以同时获得地层的纵波、横波和密度信息,进而定量描述储层的流体饱和度。提出了一种叠前三参数同步反演的新方法。该方法基于 Zoeppritz 近似方程和贝叶斯参数估计理论,用协方差矩阵来描述参数间的相关程度,然后用参数间的岩石物理关系对反演结果进行约束,从而得到稳定、准确、可靠的解。仿真实验和实际应用表明,该反演方法鲁棒性好,为储层的进一步识别提供了更多的物性参数。

关键词: 三参数同步反演方法;协方差矩阵;贝叶斯参数估计理论;岩石物理约束;仿真实验

中图分类号: P631.445

文献标识码: A

Prestack three-term simultaneous inversion method and its application

YANG Peijie^{1,2} MU Xing¹ YIN Xingyao²

(1. Research Institute of Geological Science, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257015, China;

2. College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The prestack three-term simultaneous inversion method can be used to simultaneously acquire the information of P-wave impedance, S-wave impedance and density to quantify fluid saturation of reservoir. A new prestack three-term simultaneous inversion method was developed on the linearized approximation of the Zoeppritz equation and Bayesian parameter estimation theory. The covariance matrix was used to describe the degree of the correlation between parameters. The petrophysical relations of parameters were used to constrain the inversion results. The more steady, accurate and reliable solutions were obtained. The simulation test and practical application of this method show that all inverted parameters are almost perfectly retrieved for reservoir description.

Key words: three-term simultaneous inversion method; covariance matrix; Bayesian parameter estimation theory; petrophysical constraint; simulation test

一般来说,纵波对孔隙流体的变化较敏感,而横波主要与岩石骨架有关,流体的变化对其影响较小^[1]。纵波速度的变化是以非线性的方式响应储层流体饱和度,而密度却以线性的方式响应储层流体饱和度。叠前三参数同步反演的优势是可以同时获得纵波、横波以及密度的信息,进而定量地描述储层的流体饱和度。然而,叠前反演问题都是高维的和严重病态的,并且容易受噪声和采集过程中不确定因素的影响,因此为了获得稳定可靠的解,必须对反演过程进行合理的约束^[2]。

叠前反演方法大体可分为3类:①基于波动方程的叠前反演^[3-7]。到目前为止,该类反演方法在理论上还不成熟,并且由于其计算过程复杂、计算效率低,在实际的应用过程中会产生许多复杂问题,因此并没有广泛应用;②基于 Zoeppritz 方程或其近似方程的叠前

反演^[8-13]。该类反演结果稳定、分辨率高、可控制性强,在实际中得到了应用,但是到目前为止,还很难形成一种真正实用且有效的方法;③弹性阻抗反演^[14-16]。该类反演方法简洁、方便、效率高、可操作性强,是目前应用最广泛的叠前反演方法,但是由于该方法使用部分叠加的角道集资料,因此反演的精度不够,特别是在有微弱噪声存在的情况下,横波和密度的反演效果不够理想^[17]。因此需要对现有的叠前反演方法进行完善,以进一步提高叠前反演分辨率、稳定性以及抗噪能力。

笔者在前人研究的基础上,提出了一种新的基于 Zoeppritz 近似方程和贝叶斯估计理论的叠前三参数同步反演方法,以期为进一步的储层识别提供更加准确、可靠的地质弹性参数信息。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB209605)资助。

作者简介: 杨培杰,男,1972年11月生,2008年获中国石油大学(华东)博士学位,现在中国石化胜利油田分公司地质科学研究院从事地震反演、属性分析及储层预测方面的研究。E-mail: pjyang1972@163.com

1 正演模型的建立

Gidlow 等^[18]对经典的 Zoeppritz 近似方程进行重新整理,得到如下的近似方程:

$$R(\bar{\theta}) = \sec^2 \bar{\theta} \cdot R_p - 8\bar{v} \sin^2 \bar{\theta} \cdot R_s + (4\bar{v}^2 \sin^2 \bar{\theta} - \tan^2 \bar{\theta}) \cdot R_d \quad (1)$$

式中: $R(\bar{\theta})$ 为与角度有关的反射参数; $\bar{\theta}$ 为分界面的入射角和透射角的平均值; R_p 为纵波阻抗反射系数; R_s 为横波阻抗反射系数; R_d 为密度反射系数; \bar{v} 为横波速度与纵波速度的比值。

为了简化问题,首先考虑只有一个界面、两个偏移距(偏移距 r_1 和偏移距 r_2)的情况,则式(1)可表示为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_p \\ r_s \\ r_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: y_k 为第 k 个偏移距的地震数据, $k=1, 2$; r_p, r_s, r_d 分别是纵波阻抗、横波阻抗、密度的反射系数向量; A_k, B_k, C_k 是与角度有关的变量,可由式(1)求得。

将子波引入公式,并进一步将问题扩展到 M 个偏移距、 N 个界面的情况,则可以得到如下的公式

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{WA}_1 & \mathbf{WB}_1 & \mathbf{WC}_1 \\ \mathbf{WA}_2 & \mathbf{WB}_2 & \mathbf{WC}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{WA}_M & \mathbf{WB}_M & \mathbf{WC}_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_p \\ r_s \\ r_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{W} 为子波矩阵, \mathbf{d} 为叠前共中心点(CMP)道集。将式(3)简记如下:

$$\mathbf{d} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{r} \quad (4)$$

由于地层的纵波阻抗、横波阻抗和密度之间是统计相关的,因此需要应用三者之间的协方差矩阵对参数进行去相关处理。将待反演的参数之间的协方差矩阵 \mathbf{C}_r 表示为:

$$\mathbf{C}_r = \begin{bmatrix} \sigma_p^2 & \alpha_{p,s} & \alpha_{p,d} \\ \alpha_{p,s} & \sigma_s^2 & \alpha_{s,d} \\ \alpha_{p,d} & \alpha_{s,d} & \sigma_d^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: σ_p^2 为纵波阻抗反射系数的方差, $\alpha_{p,s}$ 为纵波阻抗反射系数与横波阻抗反射系数之间的协方差,其他类推。

由于这 3 个变量间是相互关联的,因此协方差矩阵的非对角线上的元素不为零。对该协方差矩阵进行奇异值分解可得:

$$\mathbf{C}_r = \mathbf{V} \Sigma \mathbf{V}^T = \mathbf{V} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (6)$$

式(6)的协方差矩阵是对于单个界面的。假定反射系数是不变的且独立的,那么可直接将协方差矩阵延伸为 N 个时间采样,产生 $3N \times 3N$ 的稀疏协方差矩阵 \mathbf{C} ,特征向量分析也可容易地扩展为 $3N \times 3N$ 的情况,则对式(4)做如下的变换:

$$\begin{cases} \mathbf{G}' = \mathbf{G} \cdot \mathbf{V} \\ \mathbf{r}' = \mathbf{V}^{-1} \mathbf{r} \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{V} 是由式(6)中的 \mathbf{V} 组合而成。

2 反演目标函数的建立

对于反射系数正则化约束项的选择,前人已经做过许多的研究,比较常用的有 P 范数约束、Huber 约束、Sech 约束和 Cauchy 约束^[19]。这些约束项在寻找强反射体以及抗噪能力上表现出了较好的优势,但对弱反射有一定的压制作用。然而,随着高分辨率地震勘探技术向寻求复杂型、隐蔽型油气藏领域的进展,不仅需要获得大幅度、体现主要层位信息的强反射体,同时还需要获得能体现隐蔽型油气藏的弱反射信息。因此,上述的约束准则与提高地震资料的分辨率,弄清楚薄层反射的初衷是相悖的,必须对这些约束进行改进,以提高资料的分辨率和不压制弱反射之间达到一个平衡。

假设参数服从 Cauchy 分布,然后对 Cauchy 约束进行改进,以进一步提高反演结果的分辨率:

$$p_{\text{cauchy}}(\mathbf{r}') = \frac{1}{(\pi\sigma)^N} \prod_{i=1}^N \left[\frac{1}{1 + (\mathbf{r}'_i - \bar{\mathbf{r}}')^2 / \sigma^2} \right] \quad (8)$$

式中: σ 为方差, N 为时间采样数据的个数。

假设似然函数服从高斯分布,利用贝叶斯理论^[20-22]可将似然函数与先验分布结合起来:

$$P(\mathbf{r}' | \mathbf{d}, \alpha_n, I) \propto \exp\left[-\frac{\|\mathbf{d} - \mathbf{G}'\mathbf{r}'\|^2}{2\sigma_n^2}\right] \cdot \prod_{i=1}^N \left[\frac{1}{1 + (\mathbf{r}'_i - \bar{\mathbf{r}}')^2 / \sigma^2} \right] \quad (9)$$

式中: α_n 为地震数据噪声的方差; I 为先验信息。求上式的最大值等同于求下面的最小解:

$$\min J(\mathbf{r}') = J_C(\mathbf{r}') + J_{\text{Cauchy}}(\mathbf{r}') = \|\mathbf{d} - \mathbf{G}'\mathbf{r}'\|^2 + 2\sigma_n^2 \sum_{i=1}^N \ln(1 + (\mathbf{r}'_i - \bar{\mathbf{r}}')^2 / \sigma^2) \quad (10)$$

地层纵波阻抗、横波阻抗和密度的反射系数之间并不是独立的,一般认为它们之间的关系近似线性,但是不同区块、不同岩性的岩石纵、横波阻抗和密度的反射系数关系往往不相同。

下面以纵波阻抗反射系数和横波阻抗反射系数为例,通过最小二乘法利用测井曲线拟合出这两者之间的线性关系:

$$R_p = l_{ps} \cdot R_s + m_{ps} \quad (11)$$

式中: l_{ps} 和 m_{ps} 为经验常数。

对目标函数式(10)加入式(11)的约束, 则可得到^[2]:

$$\min J(\mathbf{r}') = J_C(\mathbf{r}') + J_{\text{Cauchy}}(\mathbf{r}') + J_{ps}(\mathbf{r}') \quad (12)$$

式中: $J_{ps}(\mathbf{r}')$ 表示纵波阻抗反射系数和横波阻抗反射系数间的关系约束。

最后, 将纵波阻抗反射系数与密度反射系数、横波阻抗反射系数与密度反射系数之间的岩石物理关系约束考虑在内, 则最终的目标函数可表示为:

$$\min J(\mathbf{r}') = J_C(\mathbf{r}') + J_{\text{Cauchy}}(\mathbf{r}') + J_{ps}(\mathbf{r}') + J_{pd}(\mathbf{r}') + J_{sd}(\mathbf{r}') \quad (13)$$

式中: $J_C(\mathbf{r}')$ 表示实际 CMP 道集与模型生成的 CMP 道集间的拟合程度; $J_{\text{Cauchy}}(\mathbf{r}')$ 用来约束解的稀疏程度; $J_{ps}(\mathbf{r}')$ 、 $J_{pd}(\mathbf{r}')$ 、 $J_{sd}(\mathbf{r}')$ 为参数间的岩石物理关系约束^[2]。该目标函数是非线性的, 但是这种非线性程度较弱, 所以可采用反复重加权最小二乘法^[23] 以一种

线性叠代的方式解决这种非线性问题。

3 模型验证

图 1(a)、图 1(b) 和图 1(c) 分别为纵波速度、横波速度和密度参数的二维地层模型, 在约 1.2 s 时间上的 CDP30~70 之间有一个气层; 在约 1.8 s 时间上的 CDP20~150 之间有一个油层。它们都表现出了纵波速度和密度降低, 而横波速度基本不变的特征。

采用完整的 Zoeppritz 方程生成反射系数, 并且与主频 40 Hz 的混合相位子波(图 3 中的蓝色实线)进行褶积生成叠前 CMP 道集, 信噪比(SNR)为 4:1。为了说明笔者提出的方法的有效性, 用带噪的子波(图 3 中的红色虚线, SNR=4)而不是用实际子波来(图 3 中的蓝色实线)进行反演。

图 2(a)、图 2(b)、图 2(c) 为相应的叠前反演结果。从图 1 和图 2 对比可以看出, 反演效果较好, 气层、油

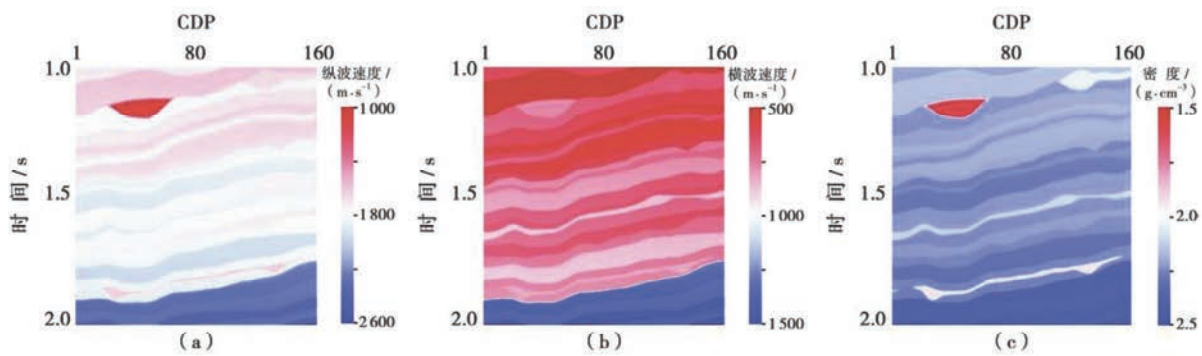


图 1 二维地层模型

Fig. 1 2D geological model

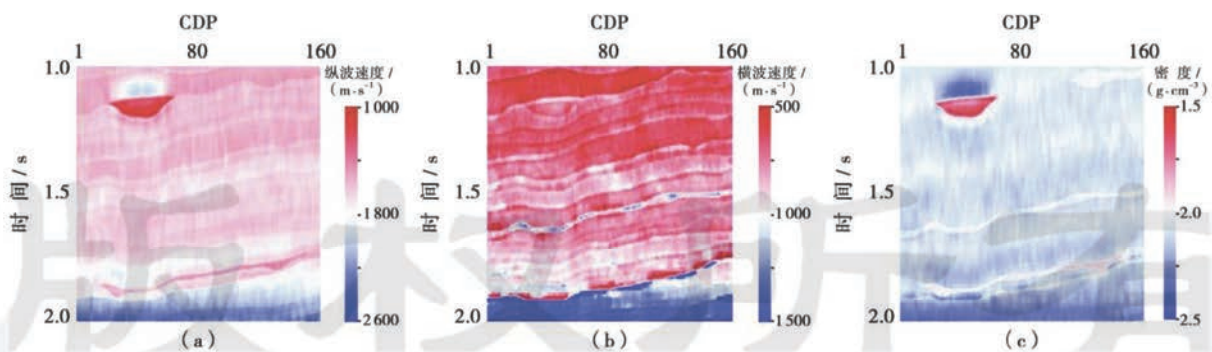


图 2 二维地层模型的叠前三参数反演结果

Fig. 2 Prestack three-term simultaneous inversion results in 2D geological model

层以及地层的起伏形状都得到了比较完整的恢复。

4 实际应用

在进行实际叠前反演之前, 需要对地震数据进行真振幅处理, 包括去除多次波、几何扩散校正、地表一致性反褶积、振幅补偿等。并假设处理后的层间多次

波、各向异性的影响可以忽略不计, 然后再经过保幅叠前偏移处理, 这样, 每一个叠前道集均可以看成是一维地层的响应。

实际资料来自内陆某勘探工区, 工区目标油气层主要分布在新近系的馆陶组, 工区面积约 100 km²。对解释的层间数据进行叠前三参数同步反演, 其中一

条测线的反演结果如图 4 所示。图 4(a) 和图 4(c) 中的黑色曲线分别为纵波阻抗和密度测井曲线, 图 4(a) 中的白色箭头处标出了两套油层的位置。由图 4 可以看出, 油层 1 相应地层的纵波阻抗明显降低, 地层的密度也降低, 而相应地层的横波阻抗并没有明显的降低; 油层 2 相应地层的纵波阻抗明显降低, 地层的密度也降低, 而相应地层的横波阻抗没有降低, 反而有点升高, 具有油藏的典型特征, 而且反演的井旁道和测井曲线对应的很好。

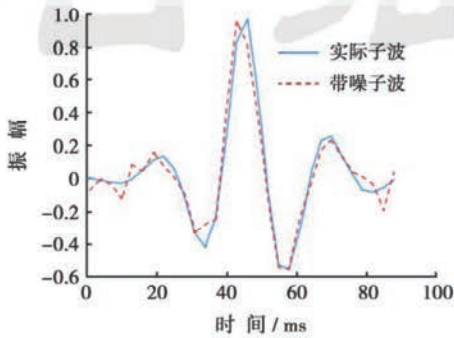


图 3 实际子波和反演用的带噪子波

Fig. 3 Original wavelet and noisy wavelet for inversion

图 5 是油层 1 三个反演数据体的沿层切片, 白色箭头指出了油层的位置。图 6 是油层 2 三个反演数据体的沿层切片, 黄色箭头指出了油层的位置。由图 5、图 6 也可以看出, 油层的纵波阻抗和密度明显降低, 而横波阻抗变化不明显。

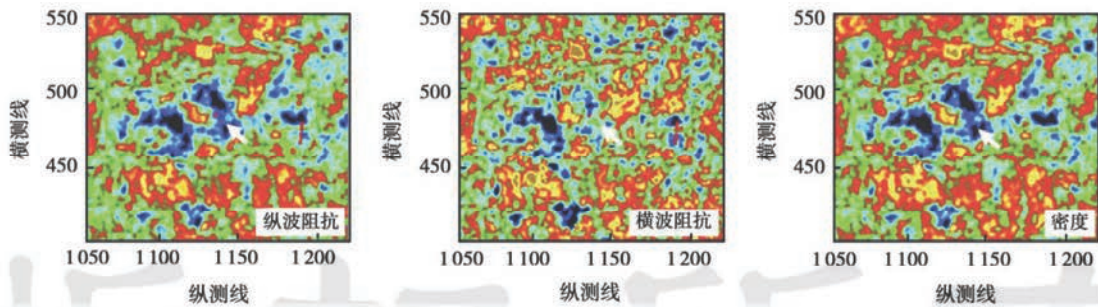


图 5 油层 1 沿层切片

Fig. 5 Horizon slices of reservoir 1

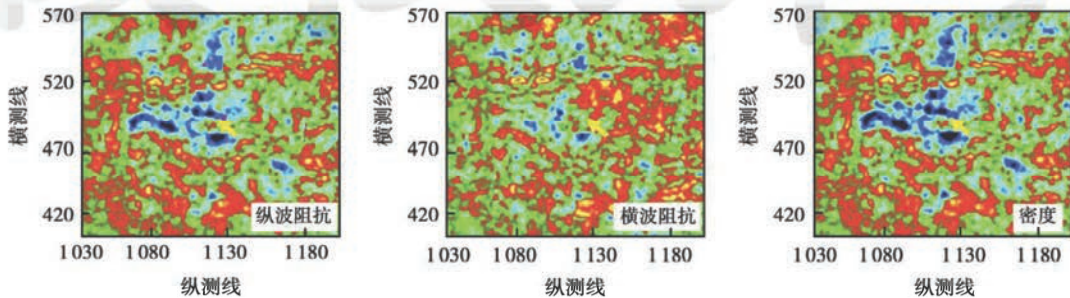


图 6 油层 2 沿层切片

Fig. 6 Horizon slices of reservoir 2

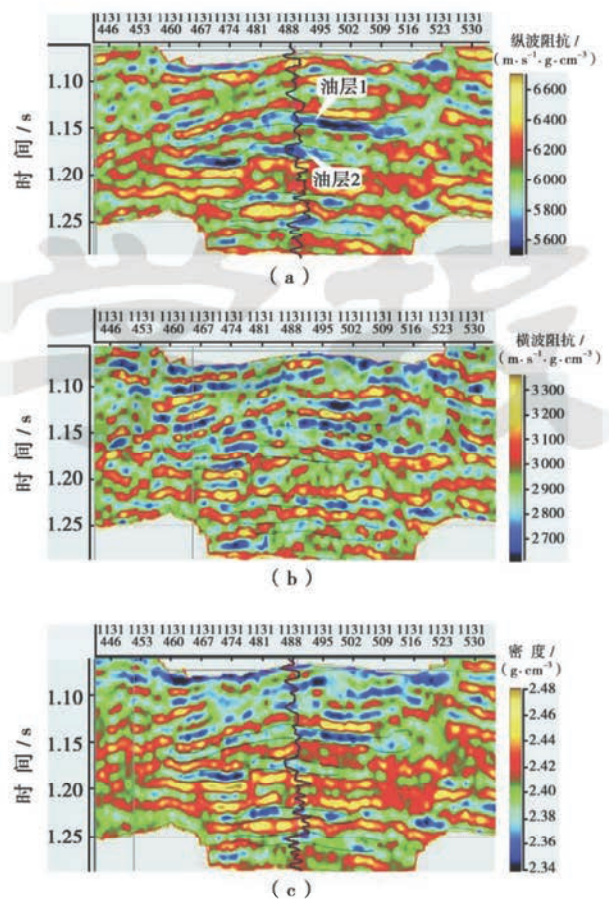


图 4 实际资料的叠前三参数反演结果

Fig. 4 Prestack three-term inversion results of practical data

5 结论

提出了一种新的叠前三参数同步反演的方法。该方法是基于贝叶斯参数估计理论,整合似然函数以及参数的先验分布,用协方差矩阵来描述参数间的相关程度,同时,用岩石物理关系对反演结果进行约束,最终得到了稳定、准确、可靠的反演结果,为进一步的储层识别提供了更加准确、可靠的物性参数。

参 考 文 献

- [1] Downton J E. Seismic parameter estimation from AVO inversion [D]. Calgary: University of Calgary, 2005.
- [2] 杨培杰. 地震子波盲提取与非线性反演[D]. 东营: 中国石油大学, 2008.
Yang Peijie. Seismic wavelet blind extraction and non-linear inversion[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2008.
- [3] Sen M K, Stoffa P L. Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing[J]. Geophysics, 1991, 56(10): 1624-1638.
- [4] Stoffa P L, Sen M K. Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: Inversion of plane-wave seismograms[J]. Geophysics, 1991, 56(11): 1794-1810.
- [5] Mallick S. Model-based inversion of amplitude variations with offset data using a genetic algorithm[J]. Geophysics, 1995, 60(4): 939-954.
- [6] Mora P. Nonlinear two-dimensional elastic inversion of multi-offset seismic data[J]. Geophysics, 1987, 52(9): 1214-1228.
- [7] Shi Yumei, Zhao Wenzhi, Cao Hong. Nonlinear process control of wave-equation inversion and its application in the detection of gas[J]. Geophysics, 2007, 72(1): R9-R18.
- [8] Simmons J L Jr, Backus M M. Waveform-based AVO inversion and AVO prediction error[J]. Geophysics, 1996, 61(6): 1575-1588.
- [9] Buland A, Omre H. Bayesian linearized AVO inversion[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 185-198.
- [10] Hampson D P, Russell B H, Bankhead B. Simultaneous inversion of pre-stack seismic data[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005, 24: 1633-1637.
- [11] Hampson D P. AVO inversion, theory and practice[J]. The Leading Edge, 1991, 10(6): 39-42.
- [12] 杨培杰, 印兴耀. 基于支持向量机的叠前地震反演方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(1): 37-41.
Yang Peijie, Yin Xingyao. Prestack seismic inversion method based on support vector machine[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(1): 37-41.
- [13] 沈凤, 钱绍新, 刘雯林, 等. AVO多参数反演在气层检测和储层定量研究中的应用[J]. 石油学报, 1994, 15(2): 11-20.
Shen Feng, Qian Shaoxin, Liu Wenlin, et al. The application of AVO multiple parameter inversion in gas sand detection and reservoir quantitative examination[J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(2): 11-20.
- [14] Connolly P. Elastic impedance[J]. The Leading Edge, 1999, 18(4): 438-452.
- [15] Whitecombe D N, Connolly P A, Reagan R L, et al. Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction[J]. Geophysics, 2002, 67(1): 63-67.
- [16] 王保丽, 印兴耀, 张繁昌. 弹性阻抗反演及应用研究[J]. 地球物理学进展[J]. 2005, 20(1): 89-92.
Wang Baoli, Yin Xingyao, Zhang Fanchang. Elastic impedance inversion and its application[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 89-92.
- [17] Mallick S. AVO and elastic impedance[J]. The Leading Edge, 2001, 20(10): 1094-1104.
- [18] Gidlow P M, Smith G C, Vail P J. Hydrocarbon detection using fluid factor traces: A case study[C]. Joint SEG/EAEG Summer Research Workshop Technical Program and Abstracts, 1992: 78-89.
- [19] Walden A T. Non-Gaussian reflectivity, entropy and deconvolution[J]. Geophysics, 1985, 50(12): 2862-2888.
- [20] Zheng J. Statistical view point of Bayesian school[J]. Bulletin des Sciences Mathematiques, 1994, 7: 36-38.
- [21] Lindley O V. Introduction to probability and statistics from a Bayesian view point. Part 1: Probability; Part 2: Inference[M]. London: Cambridge University Press, 1965.
- [22] Urych T J, Sacchi M D, Woodbury A. A Bayes tour of inversion: A tutorial[J]. Geophysics, 2001, 66(1): 55-69.
- [23] Youzwishen C F. Non-linear sparse and block constraints for seismic inversion problems[D]. Edmonton: University of Alberta, 2001.

(收稿日期 2008-06-31 改回日期 2008-08-18 编辑 王 秀)