

杜向东. 综合利用岩石模量与品质因子信息进行储层流体识别[J]. CT 理论与应用研究, 2013, 22(3): 409-420.
Du XD. Reservoir fluid identification utilizing the information of rock modulus and quality factor[J]. CT Theory and Applications, 2013, 22(3): 409-420.

综合利用岩石模量与品质因子 信息进行储层流体识别

杜向东[✉]

(中海油研究总院, 北京 100027)

摘要: 以地震资料为主体的储层流体识别技术对现阶段油气勘探具有重要意义。本文利用岩石模量参数与品质因子作为储层流体指示因子, 从提高流体指示因子估算可靠性的角度出发, 分别研究了基于弹性阻抗反演的弹性模量参数直接估算方法与基于小波域 QVO 的品质因子估算方法。岩石模量参数直接估算方法在充分利用弹性阻抗反演高抗噪性与实用性的同时, 有效地避免了间接累计误差的影响。品质因子的估算方法基于零相位子波假设, 通过对小波域叠前品质因子的归零处理消除叠加平均效应。通过模型试算验证两种方法的流体判识可行性; 并且结合实际资料进一步表明岩石模量与品质因子信息的综合应用可以提高储层流体的检测质量。

关键词: 流体识别; 叠前反演; 弹性模量; 品质因子

文章编号: 1004-4140 (2013) 03-0409-12 中图分类号: P 631 文献标志码: A

随着隐蔽岩性油气藏以及深海油气藏勘探开发工作的不断发展, 储层流体识别技术在减小勘探风险、降低开发成本中的作用日益凸显。以地震资料为主体, 结合地质、测井等信息, 利用地球物理方法计算流体指示因子是实现储层流体识别的主要技术手段^[1-11]。

考虑到不确定性以及多解性始终贯穿于流体指示因子的计算过程, 研究可靠的流体指示因子计算方法可以提高流体的识别精度。针对介质弹性性质类流体指示因子的提取, 学者们围绕流体指示因子与叠前反演的有效结合进行了研究, Chi 等^[12]提出了基于叠前 AV0 反演的拉梅参数直接估算思路; 王保丽等^[13]推导了以拉梅参数表示的弹性阻抗公式, 为拉梅参数直接反演提供了理论基础; 印兴耀等^[14]推导了带有 Gassmann 流体项的弹性阻抗公式, 通过流体项的直接提取提高了流体识别的可靠性。针对吸收衰减类流体指示因子的提取, 学者们结合时频分析技术研究了品质因子计算, 王西文等^[15]研究了小波域的拟吸收系数计算方法; 李宏兵等^[16]则推导了小波尺度域的地震波能量衰减公式, 此类方法在增强计算稳定性的同时, 提高了计算结果的时频分辨率。

本文研究了以地震信息为主体的介质拉梅模量与品质因子参数的可靠估算方法, 在估算拉梅模量参数方面, 基于包含拉梅模量参数的弹性阻抗方程, 在贝叶斯反演理论框架下充分利用先验信息的 Cauchy 分布对弹性阻抗的反演进行正则化约束, 利用反演得到的弹性阻抗数据体直接估算介质拉梅模量参数, 避免了常规计算方法的误差累计过程; 在估算品

收稿日期: 2013-03-18。

基金项目: 国家科技重大专项 (2011ZX05030-004)。

质因子 Q 方面研究了基于叠前地震资料的小波域的 QVO 计算方法, 利用线性回归得到最终的品质因子 Q , 消除了常规基于叠后资料方法的叠加效应影响。由于油气储层埋藏条件非常复杂且单一类型的流体因子具有一定的流体判识局限性, 本文综合利用得到的介质模量参数与品质因子进行储层的流体识别, 通过模型试算与某实际资料的应用, 发现两种信息的交互验证可以有效提高储层的流体识别质量。

1 基于叠前 EI 反演的模量参数估算方法

Connolly^[17]1999 年首次提出了弹性阻抗 (Elastic Impedance, EI) 的概念, 并给出了包含纵横波速度和密度参数的弹性阻抗方程, 具体表示形式如公式 (1) 所示:

$$EI(\theta) = V_p^{(1+\tan^2 \theta)} V_s^{-8k \sin^2 \theta} \rho^{(1-4k \sin^2 \theta)} \quad (1)$$

其中, V_p 、 V_s 和 ρ 分别表示介质纵横波速度与密度; θ 是入射角度; k 是横波速度与纵波速度之比平方 (即 V_s^2 / V_p^2) 的平均值。

Whitcombe^[18]对公式 (1) 进行了标准化处理, 解决了弹性阻抗数值量纲随入射角度变化剧烈的问题。由于弹性阻抗反演在抗噪性和稳定性方面优于叠前 AV0 反演, 基于弹性阻抗反演的储层参数估算方法已成为现阶段叠前地震反演的主要技术之一。

为了将叠前 EI 反演更好地应用于储层流体识别, 一些学者对 EI 公式进行了改进, Whitcombe^[19]提出了扩展弹性阻抗的方法; Ma 等^[20]提出了精确弹性阻抗的概念; 王保丽等^[13]基于 Gray 近似推导了新的弹性阻抗方程, 为拉梅参数的直接反演提供了理论基础。考虑到第一拉梅模量参数可以较好地表征储层岩石的孔隙流体特征, 利用 EI 反演提取第一拉梅模量参数作为流体指示因子, 可以为储层流体识别提供岩石物理意义更为明确数据支撑。

1.1 贝叶斯理论框架下的 EI 反演

王保丽等^[13]基于 Gray 反射系数近似公式推导的 EI 方程为:

$$EI(\theta) = \lambda^{\left(\frac{1}{2}-k\right) \sec^2 \theta} \mu^{k(\sec^2 \theta - 4 \sin^2 \theta)} \rho^{\left(1 - \frac{1}{2} \sec^2 \theta\right)} \quad (2)$$

其中, λ 、 μ 和 ρ 分别表示介质第一拉梅模量参数、剪切模量与密度; θ 是入射角度; k 是横波速度与纵波速度之比平方 (即 V_s^2 / V_p^2) 的平均值。

通过标准化处理消除了角度对 EI 量纲的影响, 方便了不同角度 EI 之间的异常分析以及最终的模量参数提取。标准化之后的方程为:

$$EI(\theta) = A_0 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^a \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^c \quad (3)$$

其中, $A_0 = (8\lambda_0 \mu_0 \rho_0^2)^{\frac{1}{4}}$; $a = \left(\frac{1}{2} - k\right) \sec^2 \theta$; $b = k(\sec^2 \theta - 4 \sin^2 \theta)$; $c = 1 - \frac{1}{2} \sec^2 \theta$ 。

为了实现 EI 反演, 本文在贝叶斯反演理论框架下, 通过求解最大后验概率分布来构建 EI 反演的目标函数。根据贝叶斯理论得到的 EI 参数 m 的后验概率分布可表示为:

$$P(\mathbf{m} | \mathbf{d}, \mathbf{I}) = \frac{P(\mathbf{d} | \mathbf{m}, \mathbf{I}) P(\mathbf{m} | \mathbf{I})}{P(\mathbf{d} | \mathbf{I})} \quad (4)$$

其中, $P(\mathbf{m} | \mathbf{d}, \mathbf{I})$ 是后验概率密度函数; 向量 \mathbf{d} 表示叠前角度部分叠加数据向量; 向量 \mathbf{m} 表示待反演参数向量; \mathbf{I} 表示地质约束信息, 即测井先验信息; $P(\mathbf{m} | \mathbf{d}, \mathbf{I})$ 是似然函数, 一般表示为正演记录与实际观察数据之差, 即噪声的分布; $P(\mathbf{m} | \mathbf{I})$ 是先验分布, 用来表示待反演参数的分布; $P(\mathbf{m} | \mathbf{I})$ 是边缘分布, 作为常数在后续推导中可以被忽略。

考虑到地震记录中的噪声信息一般服从正态分布假设, 且相互独立, 因此选用 Gauss 分布为似然分布, 而为了保护地下的弱反射信息, 在此假设先验分布服从 Cauchy 分布, 利用贝叶斯公式得到包含反演参数 (即基于公式 (3) 计算的反射系数) \mathbf{m} 的后验概率密度函数为:

$$P(\mathbf{m} | \mathbf{d}) = \propto K_1 K_2 \cdot \exp\left(-\frac{-(\mathbf{Gm} - \mathbf{d})^T (\mathbf{Gm} - \mathbf{d})}{2\sigma_n^2}\right) \cdot \prod_{i=1}^N \left(\frac{1}{1 + m_i^2 / \sigma_m^2}\right) \quad (5)$$

其中,

$$K_1 K_2 = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_n} \cdot \frac{1}{(\pi \sigma_m)^N}$$

σ_n 是叠前角度部分叠加数据的噪声方差; σ_m 是模型参数方差; N 是地震采样点数; \mathbf{G} 是正演子波矩阵; \mathbf{m} 是待反演参数矩阵; \mathbf{d} 是叠前角度部分叠加数据矩阵。

对式 (5) 取对数, 并通过求导最小化处理, 最终得到如下反演目标函数,

$$(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \varepsilon \mathbf{Q}) \mathbf{m} = \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (6)$$

其中: $\varepsilon = \frac{4\sigma_n^2}{\sigma_m^2}$, \mathbf{Q} 是斜对角加权矩阵, 即

$$\mathbf{Q} = \text{diag}\left(\frac{1}{(1 + m_1^2 / \sigma_m^2)^2}, \frac{1}{(1 + m_2^2 / \sigma_m^2)^2}, \dots, \frac{1}{(1 + m_{3N}^2 / \sigma_m^2)^2}\right)$$

式 (6) 中的 $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ 用于约束模型褶积记录与实际观测数据之间的吻合程度, $\varepsilon \mathbf{Q}$ 是用来约束反射系数的稀疏程度, 得到的反演结果是相应角度 θ 的反射系数, 为了约束反射系数与 EI 之间的吻合程度, 基于道积分的思想在目标函数中加入 EI 约束, 得到最终的反演目标函数, 即

$$(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \varepsilon \mathbf{Q} + \lambda \mathbf{P}^T \mathbf{P}) \mathbf{m} = (\mathbf{G}^T \mathbf{d} + \mathbf{P}^T \boldsymbol{\eta}) \quad (7)$$

其中, λ 是约束系数; \mathbf{P} 是积分算子矩阵; $\boldsymbol{\eta}$ 是相应角度 EI 模型的数据矩阵。

循环迭代求解公式 (7) 得到反问题的最优解, 即入射角度 θ 下的反射系数 \mathbf{m} , 将其代

入式 (8) 即可得到最终的 EI 数据 $EI(\theta, t)$ 。

$$EI(\theta, t) = EI(\theta, t_0) \exp \left(2 \int_0^t m(\tau) d\tau \right) \quad (8)$$

其中: t 是时间采样点; t_0 是起始时间。

1.2 拉梅模量参数估算方法

基于 EI 与拉梅模量参数之间的关系可以直接估算相应的弹性参数。由式 (3) 知道弹性参数与 EI 之间的非线性关系不利于参数估算, 利用对数变化可将其转化为线性形式, 然后根据井旁道反演结果与 Backus 平均处理之后的测井数据计算相应的权重系数 $a(\theta)$, $b(\theta)$ 和 $c(\theta)$, 具体计算公式如下:

$$\begin{pmatrix} \ln\left(\frac{\lambda(t_1)}{\lambda_0}\right) & \ln\left(\frac{\mu(t_1)}{\mu_0}\right) & \ln\left(\frac{\rho(t_1)}{\rho_0}\right) \\ \ln\left(\frac{\lambda(t_2)}{\lambda_0}\right) & \ln\left(\frac{\mu(t_2)}{\mu_0}\right) & \ln\left(\frac{\rho(t_2)}{\rho_0}\right) \\ M & M & M \\ \ln\left(\frac{\lambda(t_n)}{\lambda_0}\right) & \ln\left(\frac{\mu(t_n)}{\mu_0}\right) & \ln\left(\frac{\rho(t_n)}{\rho_0}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a(\theta) \\ b(\theta) \\ c(\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ln\left(\frac{EI(t_1, \theta)}{EI_0}\right) \\ \ln\left(\frac{EI(t_2, \theta)}{EI_0}\right) \\ M \\ \ln\left(\frac{EI(t_n, \theta)}{EI_0}\right) \end{pmatrix} \quad (9)$$

针对不同的入射角度分别进行计算, 便可得到三个角度 (分别为 θ_1 、 θ_2 和 θ_3) 对应的九个系数 (即 $a(\theta_1)$ 、 $b(\theta_1)$ 、 $c(\theta_1)$; $a(\theta_2)$ 、 $b(\theta_2)$ 、 $c(\theta_2)$; $a(\theta_3)$ 、 $b(\theta_3)$ 、 $c(\theta_3)$)。将九个系数代入公式 (10) 并求解, 通过结果的指数化处理即可得到任意采样点处的拉梅模量参数与密度参数。

$$\begin{pmatrix} a(\theta_1) & b(\theta_1) & c(\theta_1) \\ a(\theta_2) & b(\theta_2) & c(\theta_2) \\ a(\theta_3) & b(\theta_3) & c(\theta_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ln\left(\frac{\lambda(t)}{\lambda_0}\right) \\ \ln\left(\frac{\mu(t)}{\mu_0}\right) \\ \ln\left(\frac{\rho(t)}{\rho_0}\right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ln\left(\frac{EI(t, \theta_1)}{EI_0}\right) \\ \ln\left(\frac{EI(t, \theta_2)}{EI_0}\right) \\ \ln\left(\frac{EI(t, \theta_3)}{EI_0}\right) \end{pmatrix} \quad (10)$$

2 基于叠前 QVO 的品质因子估算方法

品质因子作为反映储层介质吸收特性的重要参数, 能够较好地减小仅依靠弹性模量参数进行储层流体识别的多解性。基于粘弹介质模型, 假设地震波为平面波入射, 且震源为零相位子波情况, 则可将地震波在频域表示为:

$$f(\omega) = \exp\left(\frac{-(\omega - 2\pi f_1)^2}{\tau}\right) \exp(-i\omega t) \exp\left(\frac{-\omega t}{2Q}\right) \quad (11)$$

其中, ω 是角频率; t 是传播时间; Q 是品质因子; $\exp\left(\frac{-(\omega-2\pi f_1)^2}{\tau}\right)$ 为主频为 f_1 零相位子波的频域表示形式, 其中 τ 是能量衰减率, 可设为常数。

考虑到 Morlet 小波的频域表示形式为 $G(\omega) = \exp\left(-(\omega-2\pi f)^2\right)$, 则地震记录的 Morlet 小波变换为:

$$W(a, b) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega) \overline{G(a\omega)} e^{ib\omega} d\omega \quad (12)$$

其中, a 是尺度参数; b 是平移参数。

通过积分运算可以得到:

$$W(a, b) = 2\pi \left(\frac{a\tau\pi}{1+\tau a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{\tau \left(\xi + i \frac{b-t}{2} \right)^2}{1+\tau a^2} - \left(\frac{f_1^2}{\tau} + f^2 \right) \right) \quad (13)$$

其中, $\xi = \frac{2\pi f_1}{\tau} - \frac{t}{4Q} + 2a\pi f$ 。

对不同的尺度参数 a , 计算最大值 $|W(a, b)|_{\max}$ 对应的平移参数数值, 即令 $\frac{\partial |W(a, b)|^2}{\partial b} = 0$, 计算得到 $b = t$ 。将其代入公式 (13), 可以得到:

$$|W(a, t)|_{\max} = 2\pi \left(\frac{a\tau\pi}{1+a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{\tau \left(\frac{2\pi f_1}{\tau} - \frac{t}{4Q} + 2a\pi f \right)^2}{1+\tau a^2} - \left(\frac{f_1^2}{\tau} + f^2 \right) \right) \quad (14)$$

假设地震波传播到研究目的层上下界面所用的时间分别是 t 和 t_1 , 则每个尺度的两界面的 $|W(a, b)|_{\max}$ 比值为:

$$\frac{|W(a, t_1)|_{\max}}{|W(a, t)|_{\max}} = \exp \left(\frac{-\left(\frac{2\pi f_1}{\tau} + 2a\pi f \right) \frac{(t_1-t)}{2Q} + \frac{t_1^2 - t^2}{16Q^2}}{\frac{1}{\tau} + a^2} \right) \quad (15)$$

考虑到 Q 要远大于 $t_1^2 - t^2$, 因此省略 $\frac{t_1^2 - t^2}{16Q^2}$, 将公式 (15) 进一步简化, 得到:

$$\frac{|W(a, t_1)|_{\max}}{|W(a, t)|_{\max}} = \exp \left(\frac{-\left(\frac{\pi f_1}{\tau} + a\pi f \right) \frac{(t_1 - t)}{Q}}{\frac{1}{\tau} + a^2} \right) \quad (16)$$

对公式 (16) 两边取对数, 得到:

$$\ln \left(\frac{|W(a, t_1)|_{\max}}{|W(a, t)|_{\max}} \right) = \left(\frac{-\pi \tau \left(\frac{f_1}{\tau} + af \right)}{1 + \tau a^2} \right) \left(\frac{(t_1 - t)}{Q} \right) \quad (17)$$

令 $N = \frac{\pi \tau \left(\frac{f_1}{\tau} + af \right)}{1 + \tau a^2}$, $\Delta t = t_1 - t$, 则公式 (17) 可以变为:

$$\ln \left(\frac{|W(a, t_1)|_{\max}}{|W(a, t)|_{\max}} \right) = -N \frac{\Delta t}{Q} \quad (18)$$

相比较假设震源子波为脉冲信号的常规方法, 公式 (18) 的主要差别即考虑了零相位地震子波的情况, 通过参数 N 使得方法更具有实际意义。对于选定的研究目的层, Δt 为常数, 利用 $\ln \left(\frac{|W(a, t_1)|_{\max}}{|W(a, t)|_{\max}} \right)$ 和 N 的线性回归即可估算相应的品质因子 Q 。

考虑到叠后资料在进行叠加的过程中会造成振幅与频率信息的丢失, 从而影响频率与吸收衰减之间的关系, 降低了品质因子的估算精度。为了消除叠加效应, 将以上基于零相位子波假设的小波域品质因子估算方法应用于叠前地震道集, 地震波的衰减是随传播路径逐步累加的, 基于叠前道集估算的品质因子也一定是随偏移距变化的, 在此通过归零处理以获取零偏移距处的真实 Q 值。

假设地震波的传播时间符合经典的正常时差方程, 即

$$\Delta t_1 \approx \frac{x^2}{2V^2 t_0} \quad (19)$$

其中, x 表示偏移距; V 表示平均速度。

由式 (18) 知道, 零偏移距的频谱比斜率 s 为 $-\frac{N \Delta t}{Q}$, 此时的 Q 表示零偏移距的品质因子。而在水平方向上, 不同偏移距处, 频谱比斜率 s 则近似为:

$$s \approx -\frac{N(\Delta t_1 + \Delta t)}{Q} \quad (20)$$

将公式 (19) 代入上式, 可以得到:

$$s \approx -\frac{N\Delta t}{Q} - \frac{N x^2}{2QV^2 t_0} \quad (21)$$

此时的 Q 表示特定偏移距处的品质因子, 在此假设小排列的情况品质因子的变化幅度很小, 由公式 (20) 可以近似认为频谱比斜率值随偏移距的平方呈线性变化, 因此利用进一步线性回归即可得到零偏移距处的品质因子 Q 。

3 模型试算

为了验证拉梅模量参数与品质因子估算方法的可行性, 在此基于 Marmousi2 的部分模型正演模拟地震记录。如图 1 所示, 模型中时间轴 1.3~1.4 s, 道号 500~700 之间是一个含气层, 时间轴 2.4~2.6 s, 道号 500~1000 之间是一个含油层。图 2 所示是经过角度部分叠加之后的三个角度数据剖面, 从图中可以看到含气层与含油层有较为明显的显示。

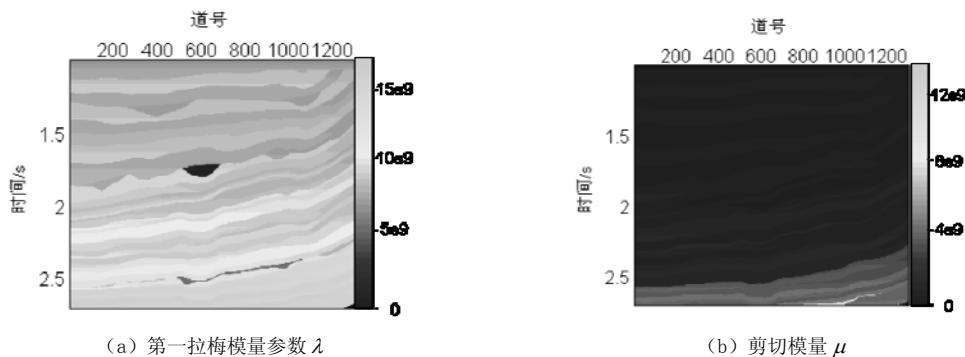


图 1 Marmousi2 模型
Fig. 1 Marmousi2 model

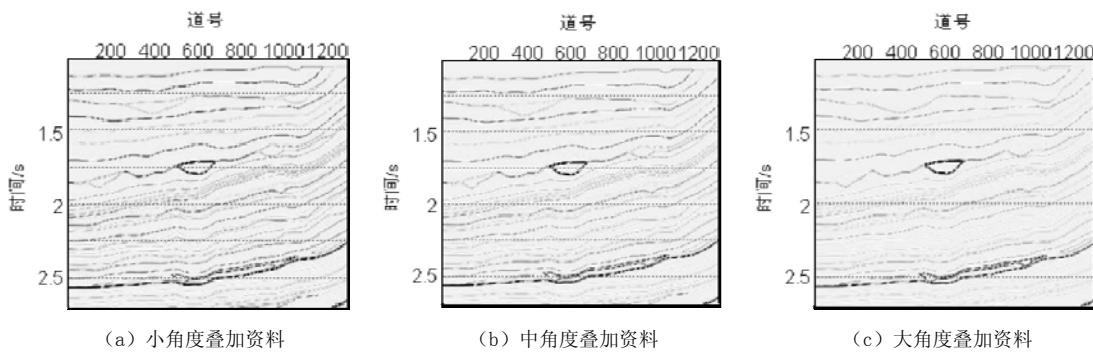


图 2 基于 Marmousi 2 模型的三个角度部分叠加
Fig. 2 The partial stack seismic data of Marmousi 2 model

在三个角度地震资料中加入 20% 的白噪声, 利用本文提出的拉梅模量参数估算方法从中直接提取拉梅参数, 得到的第一拉梅模量参数 λ 如图 3 所示, 从图中可以看到反演的 λ 与实际模型基本吻合, λ 数值在气层和油层位置有较为明显的低值异常显示, 并且气层的 λ 数值要低于油层数值, 即反演结果符合实际岩石物理意义。通过与模型数据进

行比较, 可以知道本方法提取的 λ 对储层流体类型有较为敏感的指示能力, 并且具有较好的抗噪能力。

图 4 是利用本文研究的基于小波域的 QVO 技术估算的品质因子 Q 剖面, 从图中可以看到, 品质因子对储层含流体类型有较好的指示, 在气层和油层位置显示低值异常, 并且气层的品质因子要低于油层, 即含气储层的衰减程度要高于含油储层。但与图 3 进行比较, 发现品质因子对地层格架与接触关系的描述能力要低于第一拉梅模量参数。通过该模型试算, 不仅验证了两种方法的可行性与在流体识别中的有效性, 还说明综合两种方法对储层流体结果进行交互验证, 可以提高储层流体识别的可靠性。

4 实际应用

将本文提出的方法应用于某实际工区。已知该工区油气运聚条件较好, 油气运移方式以沿断层的垂向运移为主, 以沿厚砂层的横向疏导为辅, 受断层封堵影响, 油气圈闭以半背斜圈闭、断垒圈闭以及断块圈闭为主。

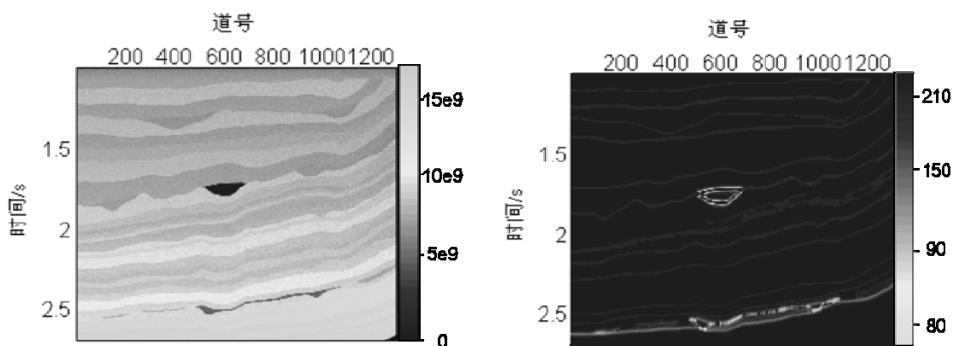


图 3 直接估算的第一拉梅模量参数 λ

Fig. 3 The first Lame parameter λ obtained by direct estimation method

图 4 利用小波域 QVO 计算得到的品质因子 Q

Fig. 4 The quality factor Q obtained by wavelet-domain QVO

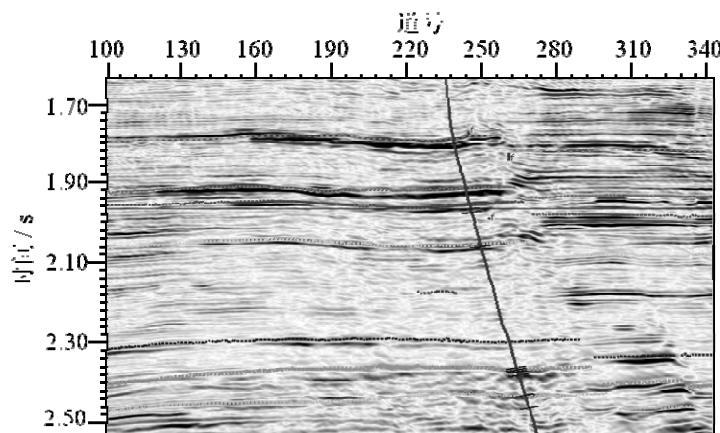


图 5 研究测线的叠后地震剖面

Fig. 5 The poststack seismic section of test line

图 5 为研究测线的叠后地震剖面, 根据钻井资料知道受断层封堵作用控制, 在断层的上升盘的 1.8 s 和 1.92 s 有两处含气砂岩, 在地震资料呈现“亮点”。

通过井资料岩石物理分析第一拉梅模量参数 λ 可以较好地指示该工区的含气砂岩储层, 图 6 为第一拉梅模量参数与剪切模量之间的交会统计分析图, 从图中可以看出气层的第一拉梅模量参数呈现低值, 但是受砂岩组分差异的影响, 单纯依靠 λ 仍然无法完全区分含气砂岩与含水砂岩。

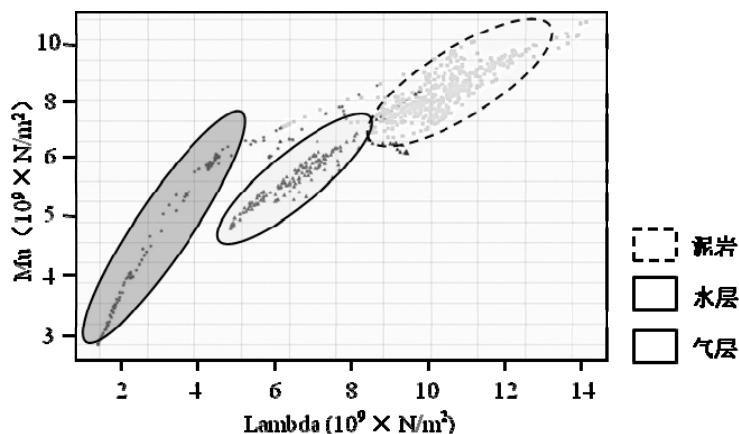


图 6 拉梅参数交会统计分析

Fig. 6 The crossplot analysis of Lame parameters

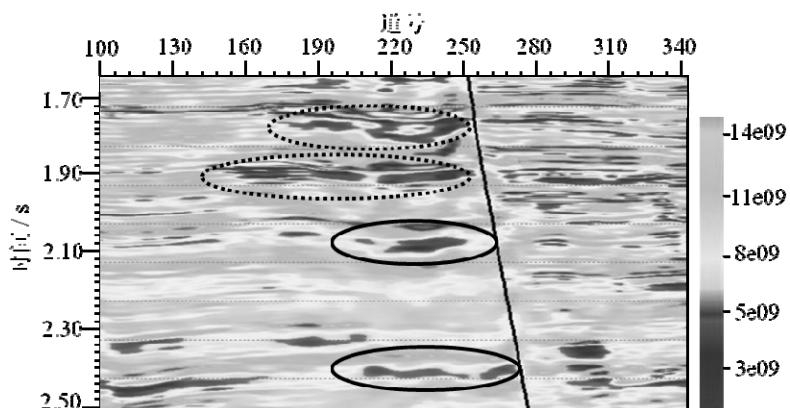


图 7 研究测线的第一拉梅模量参数剖面

Fig. 7 The First Lame parameter section of test line

利用本文研究的拉梅模量参数直接估算方法计算图 5 所示测线的第一拉梅模量参数 λ , 结果如图 7 所示, 由图中黑色虚线椭圆所示区域看出, 在 1.8 s 和 1.92 s 的两处含气砂岩位置处有明显低值 λ 区域, 且与上下地层和断层的接触关系也有较为清晰的显示。但是, 在红色虚线椭圆指示位置, 即在断层上升盘的 2.1 s 和 2.45 s 的水层同样呈现为低 λ 值储层, 这与岩石物理统计分析结果也是一致的, 其主要原因是砂岩组分差异影响了深层砂岩的弹性模量参数, 使其呈现出与浅层相似的异常数值区间。

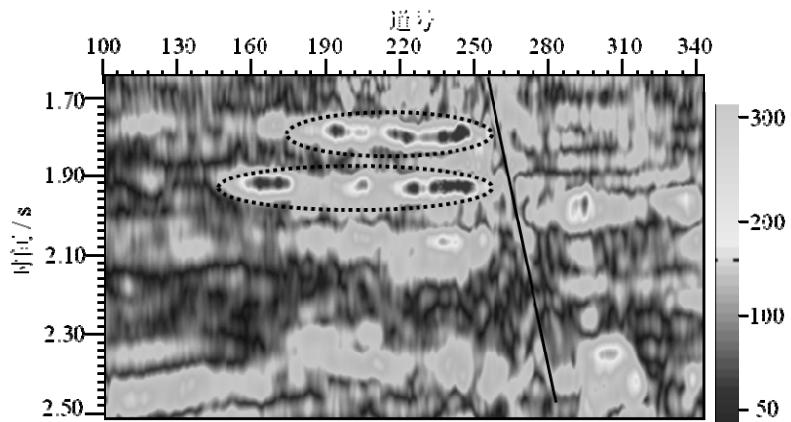


图 8 研究测线的品质因子剖面
Fig. 8 The quality factor section of test line

利用品质因子对储层流体识别结果进行进一步验证, 通过本文研究的小波域 QVO 技术估算图 5 所示测线的品质因子, 结果如图 8 所示。图 8 中黑色虚线椭圆所示区域, 上升盘的 1.8 s 和 1.92 s 两处砂岩有明显的低值品质因子异常, 即表征衰减剧烈的含气砂岩储层, 其与钻井结果吻合较好, 而且上升盘的 2.1 s 和 2.45 s 两处没有强衰减显示, 从而较好地弥补了由于岩石组分差异对 λ 参数造成的流体判识局限性, 降低了储层流体识别的多解性。

5 结论

本文研究了拉梅模量参数和品质因子的稳健估算方法, 利用第一拉梅模量参数 λ 与介质品质因子 Q 的流体敏感指示特性对储层流体识别进行综合评价, 提高了储层流体识别的精度。通过研究得到如下结论:

- (1) 在贝叶斯反演理论框架下的 EI 反演可以利用 Cauchy 先验正则约束提高 EI 反演的可靠性, 基于 EI 方程直接估算拉梅模量参数可以较好避免常规方法引入的累计误差, 提高拉梅模量参数的估算精度;
- (2) 基于小波域的 QVO 技术利用与实际情况相似的零相位子波, 通过不同偏移距品质因子的归零处理消除常规基于叠后资料方法的叠加平均效应, 提高了品质因子的估算精度;
- (3) 综合利用岩石的弹性模量与品质因子参数, 可以从不同的角度发掘储层的孔隙流体信息, 通过结果的交叉补充验证能够较好地提高流体识别质量。

参考文献

- [1] Russell BH, Gray D, Hampson DP. Linearized AVO and poroelasticity[J]. Geophysics, 2011, 76(3): 19–29.
- [2] Smith GC, Gidlow PM. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas[J]. Geophysical Prospecting, 1987, 35(8): 993–1014.
- [3] Gidlow PM, Smith GC, Vail PJ. Hydrocarbon detection using fluid factor traces, a case study: How useful is AVO analysis[C]//Joint SEG/EAEG Summer Research Workshop, SEG/EAEG, Technical Program and Abstracts, 1992: 78–89.
- [4] Fatti JL, Smith GC, Vail PJ, et al. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis:

- A 3-D seismic case history using the Geostack technique[J]. *Geophysics*, 59(1): 1362–1376.
- [5] Gray D, Goodway B, Chen T. Bridging the gap: Using AVO to detect changes in fundamental elastic constants[C]//69th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1999: 852–855.
- [6] Goodway B, Chen T, Downton J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters, “ $\lambda\rho$ ”, “ $\mu\rho$ ”, & “ λ/μ fluid stack”, from P and S inversions[C]//67th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1997: 183–186.
- [7] Quakenbush M, Shang B, Tuttle C. Poisson impedance[J]. *The Leading Edge*, 2006, 25(2): 128–138.
- [8] 宁忠华, 贺振华, 黄德济. 基于地震资料的高灵敏度流体指示因子[J]. 石油物探, 2006, 45(3): 239–242.
- Ning ZH, He ZH, Huang DJ. High sensitive fluid identification based on seismic data[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2006, 45(3): 239–242.
- [9] Castagna JP. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons[J]. *The Leading Edge*, 2003, 22(2): 120–127.
- [10] 边树涛, 董艳蕾, 郑浚茂. 地震波频谱衰减检测天然气技术应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(3): 296–300.
- Bian ST, Dong YL, Zheng JM. Study on application of seismic frequency spectrum attenuation to detect natural gas[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42(3): 296–300.
- [11] Mitchell JT, Derzhi N, Lichman E. Energy absorption analysis: A case study[J]. 66th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1996: 1785–1788.
- [12] Chi XG, Han DH. Fluid property discrimination by AVO inversion[C]//76th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2006: 2052–2056.
- [13] 王保丽, 印兴耀, 张繁昌. 基于 Gray 近似的弹性波阻抗方程及反演[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 435–439.
- Wang BL, Yin XY, Zhang FC. Gray approximation-based elastic wave impedance equation and inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42(4): 435–439.
- [14] 印兴耀, 张世鑫, 张繁昌, 等. 利用基于 Russell 近似的弹性波阻抗反演进行储层预测与流体识别[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 373–380.
- Yin XY, Zhang SX, Zhang FC, et al. Utilizing Russell approximation-based elastic wave impedance inversion to conduct reservoir description and fluid identification[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(3): 373–380.
- [15] 王西文, 杨孔庆, 杨午阳, 等. 基于小波变换拟瞬时吸收系数的计算方法和应用[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(增刊): 205–209.
- Wang XW, Yang KQ, Yang WY, et al. One method for frequency-division obtainment of instantaneous characteristics of seismic signals in wavelet domain, and its application[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, 37(S0): 205–209.
- [16] 李宏兵, 赵文智, 曹宏, 等. 小波尺度域含气储层地震波衰减特征[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 892–898.
- Li HB, Zhao WZ, Cao H, et al. Characteristics of seismic attenuation of gas reservoirs in wavelet domain[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(5): 892–898.
- [17] Connolly P. Elastic impedance[J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(4): 438–452.
- [18] Whitcombe DN. Elastic impedance normalization[J]. *Geophysics*, 2002, 67(1): 60–62.
- [19] Whitcombe DN. Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction[C]//70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts. 2000: 63–67.
- [20] Ma JF, Morozov IB. The exact elastic impedance[C]//CSEG 2005 Annual Meeting Abstracts, 2005: 224–227.

Reservoir Fluid Identification Utilizing the Information of Rock Modulus and Quality Factor

DU Xiang-dong[✉]

(CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: The technology of reservoir fluid identification based on seismic data plays an important role in the recent hydrocarbon exploration. Utilizing the rock modulus parameter and quality factor as reservoir fluid indication factor, we research two methods to raise the reliability of estimated fluid indication factor, which are the elastic modulus parameter direct estimation method based on elastic impedance inversion and quality factor estimation method based on the wavelet-domain QVO technology, respectively. Besides taking full advantage of elastic impedance inversion to have high signal-noise-ratio and practicability, the rock modulus direct estimation method can diminish negative effect of accumulative error. Based on the assumption of zero phase wavelet, the quality factor estimation avoids the stack effect using the return-zero process of quality factors estimated from prestack wavelet-domain. The model test shows the viability of the two methods, and real data example illustrates further that the utilization of both information of rock modulus and quality factor can improve the quality of reservoir fluid identification.

Key words: fluid identification; prestack inversion; elastic modulus; quality factor



作者简介: 杜向东[✉] (1968—), 男, 中海油研究总院高级工程师, 1991年7月毕业于中国石油大学地球物理勘探专业, 学士学位, 2003~2008年攻读中国科学院地质与地球物理研究所固体地球物理博士, 获博士学位, 长期从事地球物理技术和方法研究以及海洋油气勘探综合评价工作, Tel: 010-84522646, E-mail: duxd@cnooc.com.cn。