

doi: 10.11720/wtyht.2024.2608

张婧,汪勇,赵慧言,等. 基于全局自适应 MCMC 算法的裂缝型储层缝隙流体因子叠前地震反演[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 105-112. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2608>Zhang J, Wang Y, Zhao H Y, et al. Prestack seismic inversion of fluid factors in fractured reservoirs based on global adaptive MCMC algorithm[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 105-112. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2608>

基于全局自适应 MCMC 算法的裂缝型储层 缝隙流体因子叠前地震反演

张婧¹, 汪勇¹, 赵慧言¹, 衡德¹, 黄君², 张晓丹², 王文文², 贺燕冰²

(1. 四川长宁天然气开发有限责任公司, 四川 成都 610000; 2. 成都捷科思石油天然气技术发展有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 裂缝型储层通常具有各向异性特征, 其缝隙中充填流体时会表现出不同的地震响应。为了准确识别裂缝性储层缝隙流体, 为油气勘探开发后期的水力压裂过程起到重要的指示作用, 本文首先引入准裂缝法向弱度以及准裂缝切向弱度的概念并构建了一个新的缝隙流体指示因子, 结合线性滑动理论推导得到了裂缝诱导的 HTI 介质的弹性刚度矩阵表达式; 然后基于散射理论以及 Born 近似方程推导获得了弱对比界面的线性化 P 波入射各向异性反射系数方程。此外, 本文在 MCMC 算法的基础上引入了自适应策略, 提出了改进的全局自适应 MCMC 反演算法。结果表明: ①无噪时模型测试结果与测井数据达到了 90% 以上的吻合度。②实际数据反演结果与测井解释结果较为吻合, 且在目标层段钻遇油气。西南某工区模型测试以及实际资料应用结果表明, 本文提出的裂缝型储层缝隙流体因子叠前地震反演方法, 反演结果与测井解释数据吻合程度较高, 具有一定的可靠性与适用性, 可实现流体准确识别以及指示水力压裂。

关键词: 裂缝型储层; 流体识别; 全局自适应; 叠前地震反演**中图分类号:** P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2024)01-0105-08

0 引言

裂缝型储层是非常规油气勘探开发的重要对象, 含裂缝储层以及缝隙流体反演也已成为研究的重点。准确高效识别含裂缝储层的缝隙流体并评估其反演不确定性具有重要应用价值, 对非常规油气勘探开发提供一定指示作用。

对于含裂缝储层流体识别, 其关键是构建一个合理且敏感的流体指示因子。对于各向同性岩石, 基于 Gassmann^[1] 的孔隙弹性理论, 从地震数据直接估算各种流体敏感参数已实现含油气储层流体识别。其中 Russell 等^[2-3] 提出了基于纵波阻抗与横波阻抗差值的流体因子, 业界将其定义为 Russell 流

体因子并广泛应用。Yin 等^[4] 根据一个严格的经验关系式将 Russell 流体因子解耦并定义了新的流体指示因子。对于各向异性含裂缝岩石, 由于地震波对含裂缝岩石中传播方向的依赖性会导致各向异性现象, 含裂缝储层表现出的较强各向异性引起其地震响应对地震波入射角以及方位角的变化更为敏感, 提高了各向异性流体因子反演的可行性。Schoenberg 和 Douma^[5] 确定了两个裂缝弱度参数的比值为流体指示因子, 该各向异性流体指示因子已被广泛应用。Shaw 和 Sen^[6] 基于垂直裂缝介质假设, 实现流体指示因子地震 AVOA 预测。van der Neut 等^[7] 将储层 AVO 梯度项与各向异性缝隙流体联系起来, 引入了各向异性流体指示因子的反演理论。陈怀震等^[8] 综合分析了各向同性介质下的流

收稿日期: 2022-12-06; **修回日期:** 2023-10-22**基金项目:** 重庆市自然科学基金面上项目“基于成岩系统剖析的致密砂岩储层差异致密化机理及渗流差异响应研究”(cstc2021jcyj-msxmX0897); 自然资源部页岩气资源勘察重点实验室开放课题“中深层海相页岩微纳尺度非均质性及其对渗流差异的影响机理研究”(KLSGE-202102)**第一作者:** 张婧(1985-), 女, 工程师, 硕士, 从事页岩气勘探开发方面的工作。Email: hxs_800009@aliyun.com

体识别方法,从岩石物理模型出发预测获得各向异性介质流体因子。陈怀震等^[9]建立了各向异性的岩石物理模型,并通过岩石物理分析了缝隙流体与储层微观物性参数之间的关系,最终结合 AVAZ 反演得到了缝隙流体因子。谢春辉等^[10]认为利用 Ruger 提出的各向异性方程反演得到的各向异性梯度参数,与各向同性梯度参数的比值对储层流体敏感并将其定义为流体指示因子。孙炜等^[11]在直角坐标系考虑各向异性参数与 Russell 流体因子的理论,并定义了一种新的流体指示因子。Pan 等^[12]提出了拟法向弱度以及拟切向弱度的概念,并基于 EIVOA 反演得到流体模量。印兴耀等^[13]弹性参数以及各向异性参数的组合定义了一个各向异性流体因子,并应用五维地震数据实现流体因子的反演。

目前,各向异性参数反演方法主要有确定性反演以及概率化反演两种。确定性反演虽然可以通过各种全局优化算法预测最优反演参数,但难以满足复杂地下介质的综合识别^[14]。尤其是随着裂缝介质复杂程度的提高,待反演参数不断增加,增加了地震反演的不稳定性与不确定性,亟需结合概率化反演算法在准确预测模型参数的同时,分析反问题的解的不确定性^[15]。统计学反演主要是基于贝叶斯理论获得反演参数的最优解和置信区间,用于参数不确定性分析^[16-17]。最大后验概率(MAP)解是统

$$C_{HTI} = \begin{bmatrix} M(1 - \delta_N) & \lambda(1 - \delta_N) & \lambda(1 - \delta_N) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(1 - \delta_N) & M(1 - k^2\delta_N) & \lambda(1 - k\delta_N) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(1 - \delta_N) & \lambda(1 - k\delta_N) & M(1 - k^2\delta_N) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1 - \delta_T) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1 - \delta_T) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $M = \lambda + 2\mu$, $k = \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu}$, λ 和 μ 代表各向同性背景下岩石的拉梅常数; δ_N 和 δ_T 表示裂缝参数中的法向弱度以及切向弱度。裂缝法向弱度以及切向弱度参数与柔度裂缝系数的

为了去除各向异性弹性阻抗方程中各向异性参数的扰动项的指数表达式,以提高裂缝弱度参数的预测准确性,推导并定义了准法向弱度以及准切向弱度裂缝参数,公式如下:

$$\begin{aligned} {}_q\delta_N &= \frac{1}{1 - \delta_{N0}}(\delta_N + 1 - \delta_{N0}) \\ {}_q\delta_T &= \frac{1}{1 - \delta_{T0}}(\delta_T + 1 - \delta_{T0}) \end{aligned}, \quad (2)$$

Schoenberg 和 Sayers 认为 K_N/K_T 能够被当作缝

隙流体指示因子,其引入待估计参数的先验分布信息,对最大似然估计解进行了改进,有效地缓解了地震反演的不稳定性^[18]。然而,MAP 解只适用于后验概率密度分布为显式,即后验概率密度分布可以用具体的方程表征的情况,因此很难解决非线性反演问题^[19]。与 MAP 解不同,MCMC 算法不仅可以解决非线性反演问题,还适用于隐式解的反演,其应用较为广泛。理论上,MCMC 算法可以获得模型参数的全局最优解,但存在的问题是算法启动缓慢,优化过程缓慢,即使得到最优解也会继续搜索,计算效率较低^[20]。

本文以线性滑动模型为基础,基于准裂缝法向弱度以及准裂缝切向弱度定义了一个新的缝隙流体指示因子,结合散射理论和 Born 近似方程推导了包含准裂缝法向弱度以及准裂缝切向弱度的各向异性反射系数方程,应用改进的全局自适应 MCMC 反演算法实现缝隙流体指示因子叠前地震反演。

1 缝隙流体指示因子预测方法原理

在均匀各向同性背景夹杂一组对称轴为水平方向的裂缝可看作等效 HTI (horizontal transversely isotropy) 介质。基于线性滑动理论模型^[21], HTI 刚度系数矩阵可表示为:

隙流体指示因子, K_N 和 K_T 表示裂缝柔度参数,二者与裂缝法向弱度以及切向弱度之间的关系式可以表示为

$$\begin{aligned} \delta_N &= \frac{MK_N}{1 + MK_N}, \\ \delta_T &= \frac{\mu K_N}{1 + \mu K_N} \end{aligned}, \quad (3)$$

根据方程(2)和方程(3),并参照 Schoenberg 和 Sayers 的理论,定义新的缝隙流体指示因子为:

$$HFI = g \frac{{}_q\delta_N}{{}_q\delta_T}, \quad (4)$$

式中: g 表示剪切模量与纵波模量的比值。基于散射理论以及波恩近似方程^[22],任意对称的各向异性介质的入射 P 波反射系数方程 R_{pp} 可以写成一个散

射函数 S 方程的形式:

$$R_{pp}(\theta, \varphi) = \frac{1}{4\rho\cos^2\theta} S(r_0), \quad (5)$$

式中: θ 是 P 波的入射角, φ 是方位角。散射函数 S 可以表达为:

$$S(r_0) = \Delta\rho\cos 2\theta + \Delta C\boldsymbol{\eta}, \quad (6)$$

式中: $\Delta\rho$ 代表在弹性界面上的密度的扰动量, ΔC 表示刚度矩阵的扰动量, 可由方程(1)中的 C_{HTT} 计算得到, $\boldsymbol{\eta}$ 矩阵的各分量可表示为:

$$\begin{aligned} \eta_{11} &= \cos^4\varphi\sin^4\theta/\beta_s^2, \\ \eta_{12} = \eta_{21} &= \cos^2\varphi\sin^2\varphi\sin^4\theta/\beta_s^2, \\ \eta_{13} = \eta_{31} &= \cos^2\varphi\cos^2\theta\sin^2\theta/\beta_s^2, \\ \eta_{22} &= \sin^4\varphi\sin^4\theta/\beta_s^2, \\ \eta_{23} = \eta_{32} &= \cos^2\theta\sin^2\varphi\sin^2\theta/\beta_s^2, \\ \eta_{33} &= \cos^4\theta/\beta_s^2, \\ \eta_{44} &= -4\cos^2\theta\sin^2\varphi\sin^2\theta/\beta_s^2, \\ \eta_{55} &= -4\cos^2\varphi\cos^2\theta\sin^2\theta/\beta_s^2, \\ \eta_{66} &= 4\cos^2\varphi\sin^2\varphi\sin^4\theta/\beta_s^2. \end{aligned} \quad (7)$$

将方程(1), 方程(2), 方程(4), 方程(6), 方程(7)代入方程(5)即可得到缝隙流体指示因子各向异性反射系数方程具体表达形式:

$$\begin{aligned} R_{pp}(\theta, \varphi) &= a(\theta) \frac{\Delta M}{M} + b(\theta) \frac{\Delta\mu}{\mu_0} + c(\theta) \frac{\Delta\rho}{\rho_0} + \\ & d(\theta, \varphi) \frac{\Delta_q\delta_N}{\delta_{N0}} + e(\theta, \varphi) \frac{\Delta_q\delta_T}{\delta_{T0}}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中:

$$\begin{aligned} a(\theta) &= \frac{\sec^2\theta}{4}, b(\theta) = -2g\sin^2\theta, \\ c(\theta) &= \left(\frac{1}{2} - \frac{\sec^2\theta}{4}\right), d(\theta, \varphi) = -\frac{\sec^2\varphi}{4}2, \end{aligned}$$

$e(\theta, \varphi) = g\sin^2\theta\cos^2\varphi(1 - \tan^2\theta\sin^2\varphi)$, $g = \mu/M$ 。

为验证推导的反射系数方程, 我们设计了一个理论双层模型, 模型参数如表 1 所示, 并将本文推导的近似方程与 P-K^[23] 方程进行对比, 如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 入射角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内, 近似方程与 P-K 方程吻合程度高, 满足反演的精度要求。

表 1 双层模型参数

Table 1 Parameters of double-layer model

	M/GPa	μ/GPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	${}_q\delta_N$	${}_q\delta_T$
层 1	58	18	2.6	0	0
层 2	78	23	2.5	1.15	1.07

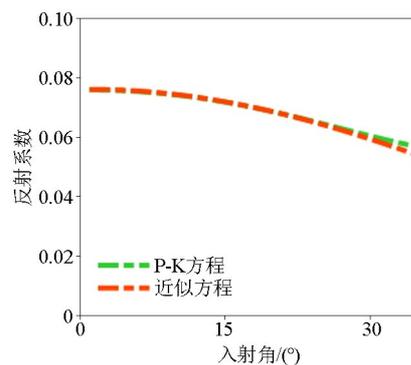


图 1 反射系数方程对比

Fig. 1 Reflection coefficient equation comparison

2 缝隙流体指示因子贝叶斯反演方法

本文的反问题可以写成:

$$s = f(m) + e \quad (9)$$

式中: s 代表方位地震数据; f 代表连接模型参数与方位地震数据的方程; m 表示待反演参数 ($M, \mu, \rho, {}_q\delta_N, {}_q\delta_T$); e 是随机噪声。

反问题的解由模型参数的后验分布给出, 该后验分布与贝叶斯框架下的先验分布和似然函数的乘积成正比。后验分布可表示为

$$\begin{aligned} p(m | s) &= \frac{p(s | m) p(m)}{p(s)} \propto \\ & p(M, \mu, \rho, {}_q\delta_N, {}_q\delta_T) \cdot p(s | M, \mu, \rho, {}_q\delta_N, {}_q\delta_T). \end{aligned} \quad (10)$$

在本研究中, 我们假设噪声满足高斯分布, 似然函数可表示为

$$\begin{aligned} p(s | M, \mu, \rho, {}_q\delta_N, {}_q\delta_T) &= \\ & \frac{1}{(2\pi\bar{\sigma}_s^2)^{\frac{N}{2}}} \exp\left\{-\sum \frac{[d - f(M, \mu, \rho, {}_q\delta_N, {}_q\delta_T)]^2}{2\bar{\sigma}_s^2}\right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

待反演参数的先验信息, 可从测井资料、岩心资料和其他地质资料中获得^[24]。本文假设待反演的五个参数满足高斯分布, 参数之间相互独立, 因此先验函数可表示为

$$\begin{aligned} p(M, \mu, \rho, {}_q\delta_N, {}_q\delta_T) &= \\ p(M) \cdot p(\mu) \cdot p(\rho) \cdot p({}_q\delta_N) \cdot p({}_q\delta_T) &= \\ & \frac{1}{(2\pi\bar{\sigma}_M^2)^{\frac{N}{2}}} \exp\left[-\sum \frac{(M - \mu_M)^2}{2\bar{\sigma}_M^2}\right] \cdot \\ & \frac{1}{(2\pi\bar{\sigma}_\mu^2)^{\frac{N}{2}}} \exp\left[-\sum \frac{(\mu - \mu_\mu)^2}{2\bar{\sigma}_\mu^2}\right] \cdot \end{aligned}$$

$$\frac{1}{(2\pi\sigma_\rho^2)^{\frac{N}{2}}}\exp\left[-\sum\frac{(\rho-\mu_\rho)^2}{2\sigma_\rho^2}\right].$$

$$\frac{1}{(2\pi\sigma_q\delta_N^2)^{\frac{N}{2}}}\exp\left[-\sum\frac{({}_q\delta_N-\mu_q\delta_N)^2}{2\sigma_q\delta_N^2}\right].$$

$$\frac{1}{(2\pi\sigma_q\delta_T^2)^{\frac{N}{2}}}\exp\left[-\sum\frac{({}_q\delta_T-\mu_q\delta_T)^2}{2\sigma_q\delta_T^2}\right] \quad (12)$$

为了降低随机模拟过程的计算复杂度,对后验分布的两侧进行对数运算。待反演参数的后验分布可表示为^[25-26]

$$g(m) = -\sum\frac{(M-\mu_M)^2}{2\sigma_M^2} - \sum\frac{(\mu-\mu_\mu)^2}{2\sigma_\mu^2} -$$

$$\sum\frac{(\rho-\mu_\rho)^2}{2\sigma_\rho^2} - \sum\frac{({}_q\delta_N-\mu_q\delta_N)^2}{2\sigma_q\delta_N^2} -$$

$$\sum\frac{({}_q\delta_T-\mu_q\delta_T)^2}{2\sigma_q\delta_T^2} - \sum\frac{[s-f(M,\mu,\rho,{}_q\delta_N,{}_q\delta_T)]^2}{2\sigma_s^2} \quad (13)$$

基于统计学经典的贝叶斯理论,本文在一般的MCMC反演算法的基础上引入全局自适应Metropolis算法,全局自适应策略的目的是用所有已经接受的建议修改提议分布,实现全局最优解的寻找与判别。改进的全局自适应MCMC反演算法总结如下:

我们假设总迭代次数 l ,非自适应阶段 n_0 和模型参数 l 。不适应阶段是指迭代开始时参数尚未收敛的时期。当 $i \leq n_0$ 时,建议分布的严格正定的协方差矩阵等于由先验信息定义的初始协方差矩阵。当 $i > n_0$ 时,根据全局自适应策略可从采样的样本点计算协方差矩阵,如式(15)所示:

$$\left(\sum_l^k\right)_i = \begin{cases} \left(\sum_l^k\right)_0, i \leq n_0 \\ s_d \text{Cov}(l_0, \dots, l_{i-1}) + s_d \varepsilon I_d, i > n_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: s_d 是待反演参数的维数,可由 $s_d=2.4^2/d$ 计算得到; ε 表示一个极小的常数,理论上保证矩阵 $\left(\sum_l^k\right)_i$ 不存在奇异值; I_d 是 d 维的单位矩阵。

假设马尔可夫链在第 i 次迭代时的更新状态为 l^i, l^{i+1} 从高斯建议分布中采样:

$$l^{(i+1)*} : N[l; l^i, \left(\sum_l^k\right)_i^{-1}] \quad (15)$$

接受概率由Metropolis-Hasting算法给出:

$$\alpha(l^i, l^{(i+1)*}) \propto \min\left[0, \frac{g(l^{(i+1)*} | s) q_1(l^{(i+1)*}, l^i)}{g(l^i | s) q_1(l^i, l^{(i+1)*})}\right] \quad (16)$$

一般来说,马尔可夫链的收敛效率取决于建议分布与目标分布的匹配程度。相较于一般的MCMC反演算法采用固定的提议分布,全局自适应策略能够根据已生成的样本点有效调整建议分布,使其能够有效拟合到目标分布,以得到全局最优解。

图2,图3,图4分别展示了不同信噪比情况下的纵波模量、剪切模量、密度、准裂缝法向弱度、准裂缝切向弱度以及流体指示因子HFI的反演结果。图2是无噪情况下5个待反演参数的反演结果,其中黑色曲线代表待反演参数的实际测井曲线,红色曲线代表模型参数反演结果。为了验证反演结果的鲁棒性,不断加入高斯噪声,图3,图4分别表示信噪比为5:1和2:1时的反演结果。从3个图中我们可以看出,在无噪时纵波模量、剪切模量、准裂缝法

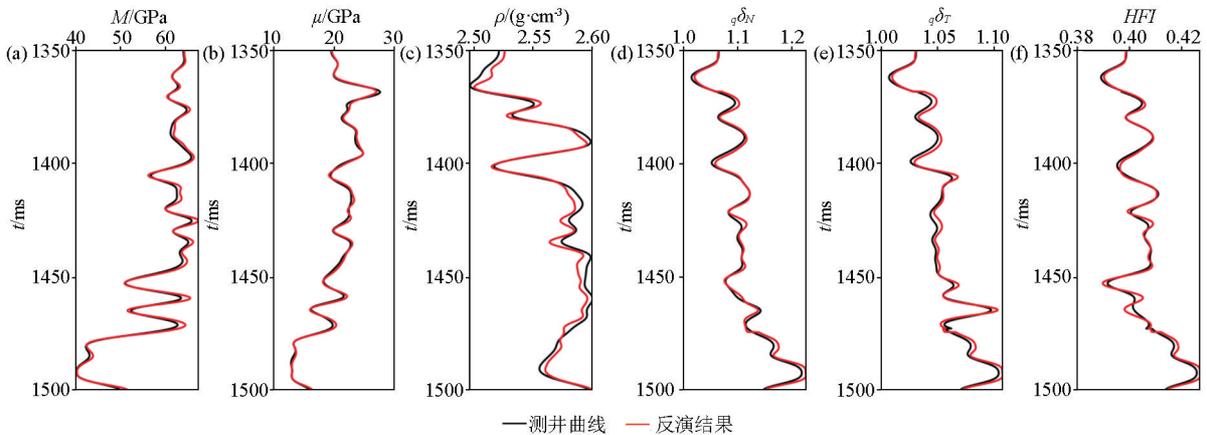


图2 无噪情况下纵波模量(a)、剪切模量(b)、密度(c)、准裂缝法向弱度(d)、准裂缝切向弱度(e)以及流体指示因子HFI(f)的反演结果

Fig. 2 Inversion results of P-wave modulus (a), shear modulus (b), density (c), normal weakness of quasi-fracture (d), tangential weakness of quasi-fracture (e), and fluid indicator factor HFI (f) without noise

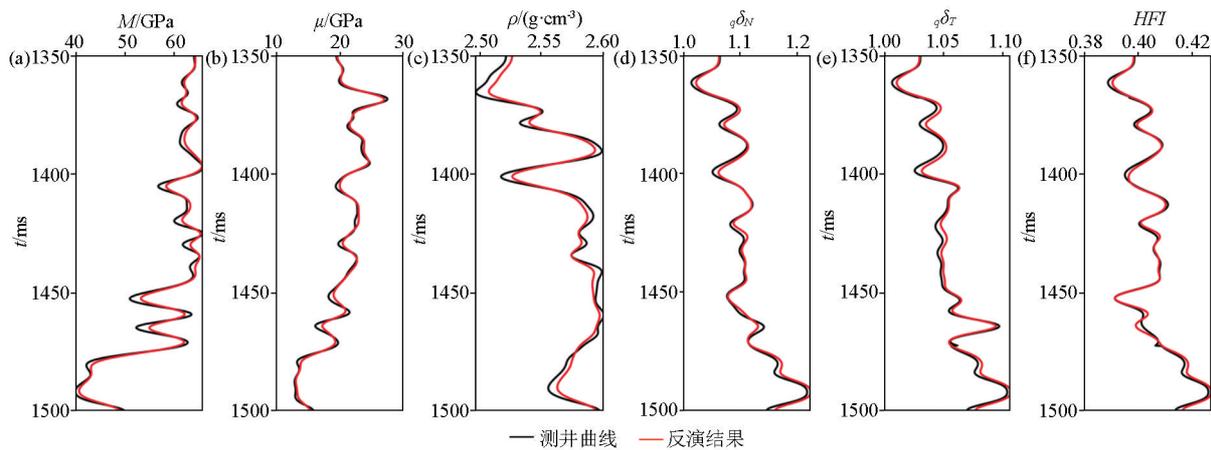


图 3 信噪比为 5:1 情况下纵波模量 (a)、剪切模量 (b)、密度 (c)、准裂缝法向弱度 (d)、准裂缝切向弱度 (e) 以及流体指示因子 HFI (f) 的反演结果

Fig. 3 Inversion results of P-wave modulus (a), shear modulus (b), density (c), normal weakness of quasi-fracture (d), tangential weakness of quasi-fracture (e) and fluid indicator factor HFI (f) when the signal-to-noise ratio is 5:1

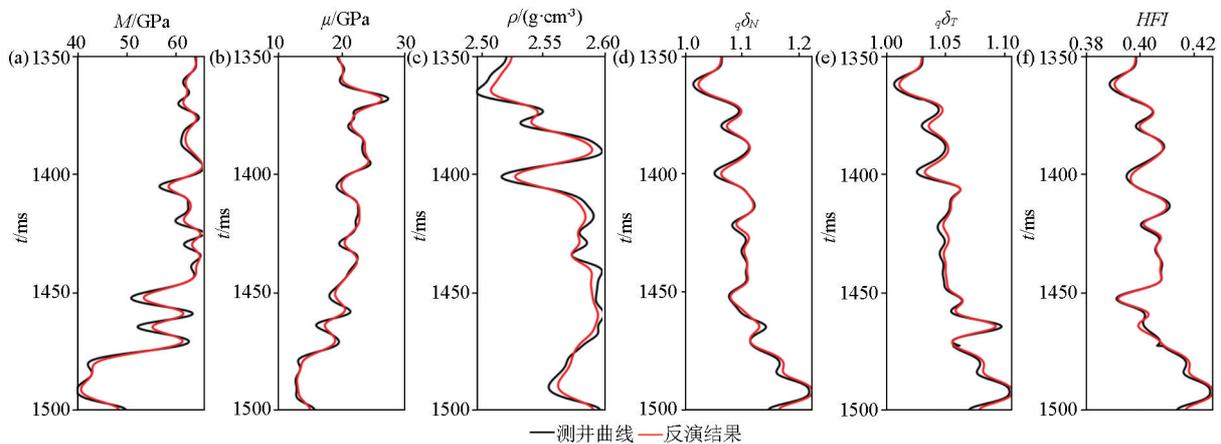


图 4 信噪比为 2:1 情况下纵波模量 (a)、剪切模量 (b)、密度 (c)、准裂缝法向弱度 (d)、准裂缝切向弱度 (e) 以及流体指示因子 HFI (f) 的反演结果

Fig. 4 Inversion results of P-wave modulus (a), shear modulus (b), density (c), normal weakness of quasi-fracture (d), tangential weakness of quasi-fracture (e) and fluid indicator factor HFI (f) when the signal-to-noise ratio is 2:1

向弱度、准裂缝切向弱度以及 HFI 的反演结果曲线与实际井数据吻合程度较高,均达到了 90% 以上,密度的反演结果与其他参数相比较差,但也实现了 85% 的吻合度,我们认为密度参数的反演结果稍差是因为其在上下界面处变化较小,在反射系数方程中贡献度较低,导致了反演结果存在一定偏差。即使信噪比为 2:1 时,纵波模量、剪切模量、准裂缝法向弱度、准裂缝切向弱度以及 HFI 的反演结果与井曲线的误差也能控制在 20% 以内,这也验证了本文所提出的反演方法的适用性与抗噪性。以缝隙流体因子 HFI 为例,将 HFI 参数的收敛过程展示如图 5 所示,纵坐标是反演结果与井曲线的相关系数,横坐标为迭代次数,可以看出迭代次数为 1 300 次时,反演结果就已实现收敛。

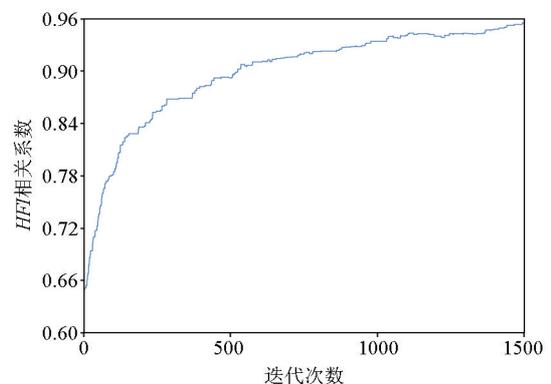


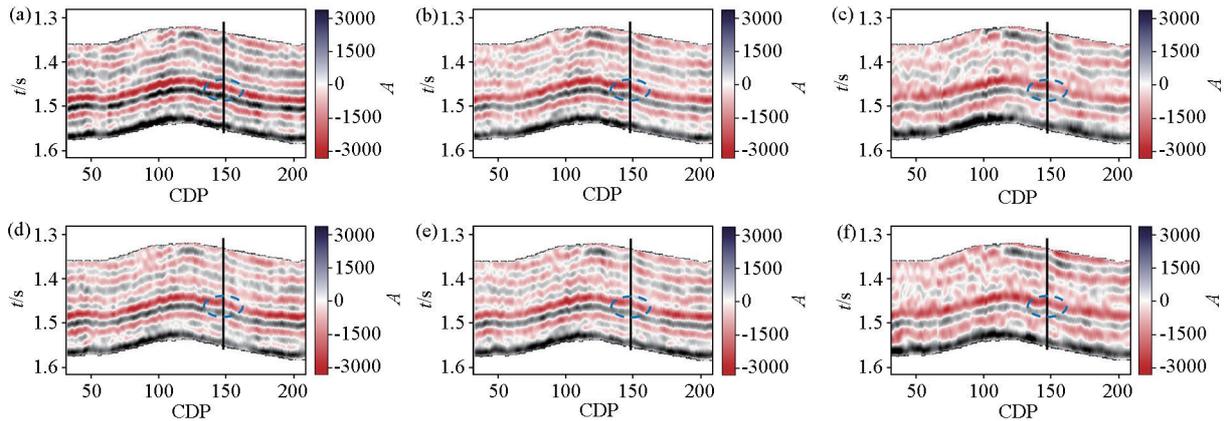
图 5 流体指示因子 HFI 收敛曲线
Fig. 5 Convergence curve of fluid indicator factor HFI

3 实际资料及应用

选取中国四川盆地某地区的方位地震资料来验

证本文所提出的反演方法的实用性。该地区优质页岩分布面积广、成藏条件较好、储层质量好,极具勘探开发前景,且本研究应用的井钻遇油气层。选择不同方位角的叠前地震实测数据进行应用,叠前地震数据在反演前已经过处理,我们假设处理后的地震数据可以忽略层间多次波以及波形转换效应。此外,我们根据井数据计算得到的纵波模量、剪切模量、密度、准裂缝法向弱度、准裂缝切向弱度以及缝

隙流体指示因子 HFI 建立低频模型,作为反演的约束并计算模型参数先验分布的均值以及方差。本文应用的方位地震数据 45° 以及 135° ,入射角为 6° 、 18° 以及 30° ,叠加地震剖面如图 6 所示,其中黑色实线表示井位置,蓝色虚线为目标层段。图 7 显示了纵波模量、剪切模量、密度、准裂缝法向弱度、准裂缝切向弱度以及缝隙流体指示因子 HFI 的实际资料反演结果。我们发现,目标层的纵波、剪切体积模量



a—入射角 6° 、方位角 45° ; b—入射角 18° 、方位角 45° ; c—入射角 30° 、方位角 45° ; d—入射角 6° 、方位角 135° ; e—入射角 18° 、方位角 135° ; f—入射角 30° 、方位角 135°
 a—angle of incidence 6° , azimuth 45° ; b—angle of incidence 18° , azimuth 45° ; c—angle of incidence 30° , azimuth 45° ; d—angle of incidence 6° , azimuth 135° ; e—angle of incidence 18° , azimuth 135° ; f—angle of incidence 30° , azimuth 135°

图 6 方位地震数据

Fig. 6 Azimuth seismic data

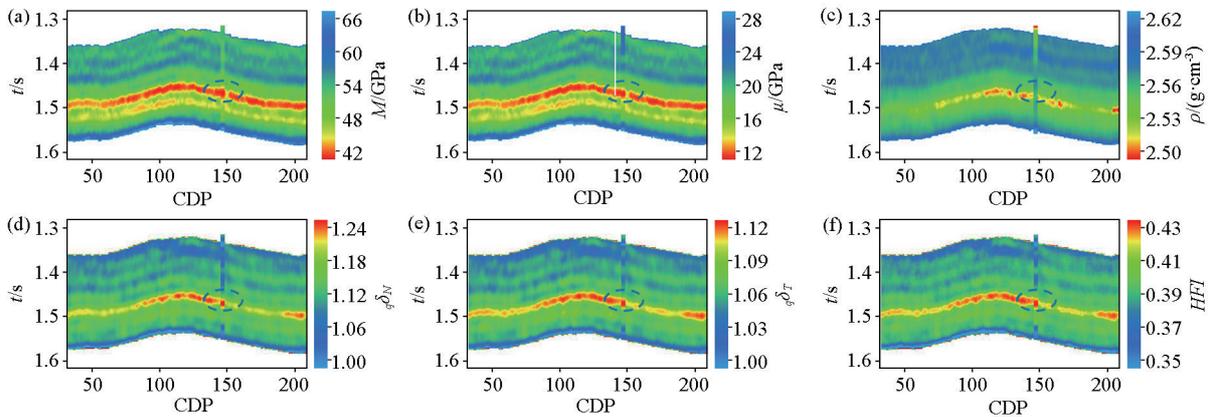


图 7 纵波模量(a)、剪切模量(b)、密度(c)、准裂缝法向弱度(d)、准裂缝切向弱度(e)以及流体指示因子 HFI (f)的反演结果

Fig. 7 Inversion results of P-wave modulus(a), shear modulus(b), density(c), normal weakness of quasi-fracture(d), tangential weakness of quasi-fracture(e), and fluid indicator factor HFI (f)

显示出较低的值,准裂缝法向弱度、准裂缝切向弱度以及 HFI 显示出较高的值,法向和切向裂缝弱度的反演结果表明该层的裂缝发育, HFI 的反演结果表明该层裂缝中充填有流体,综合分析后我们可以得到在目的层发育有裂缝,且裂缝内充填有缝隙流体,成像测井解释结果为该目的层发育有大量裂缝,钻井结果表明在目的层钻遇油气层,反演结果与测井解释结果较为符合,验证了反演方法的准确性与适

用性。

4 结论

随着油气勘探开发技术的进步,非常规资源勘探前景优越,裂缝型储层作为重点开发对象受到广泛关注。如何构建一个合理的流体因子,以精确识别裂缝性储层缝隙流体至关重要,本文对此做出一

定的研究与深入,结论总结如下:

1) 定义了新的缝隙流体指示因子,推导了包含缝隙流体因子的各向异性反射系数近似方程,在入射角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内与 P-K 方程吻合较好。

2) 应用改进的全局自适应 MCMC 反演算法反演,虽然效率上有一定提升,但仍有很大的优化空间。

3) 成像测井解释结果表明目的层发育有大量裂缝,且钻井结果表明目的层钻遇油气,与反演结果认识相同,验证了本文提出的缝隙流体指示因子能够有效指示储层流体分布情况以及本文所提出的反演方法的准确性以及适用性。

参考文献 (References):

- [1] Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. *Geophysics*, 2002, 16(4): 673-685.
- [2] Russell B H, Hedlin K, Hilterman F J, et al. Fluid-property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective [J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 29-39.
- [3] Russell B H, Gray D, Hampson D P. Linearized AVO and poroelasticity [J]. *Geophysics*, 2011, 76(3): C19-C29.
- [4] Yin X Y, Zhang S X. Bayesian inversion for effective pore-fluid bulk modulus based on fluid-matrix decoupled amplitude variation with offset approximation [J]. *Geophysics*, 2014, 79(5): R221-R232.
- [5] Schoenberg M, Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks [J]. *Geophysical Prospecting*, 1988, 36(6): 571-590.
- [6] Shaw R K, Sen M K. Born integral, stationary phase and linearized reflection coefficients in weak anisotropic media [J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 158(1): 225-238.
- [7] van der Neut J, Shaw R K, Sen M K. Estimation of the fluid indicator from azimuthal AVO gradient variations at a fractured reservoir [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007, Society of Exploration Geophysicists, 2007.
- [8] 陈怀震, 印兴耀, 张金强, 等. 基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数反演方法研究 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(10): 3431-3441.
Chen H Z, Yin X Y, Zhang J Q, et al. Seismic inversion for fracture rock physics parameters using azimuthally anisotropic elastic impedance [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(10): 3431-3441.
- [9] 陈怀震, 印兴耀, 高成国, 等. 基于各向异性岩石物理的缝隙流体因子 AVAZ 反演 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(3): 968-978.
Chen H Z, Yin X Y, Gao C G, et al. AVAZ inversion for fluid factor based on fracture anisotropic rock physics theory [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(3): 968-978.
- [10] 谢春辉, 雍学善, 杨午阳, 等. 裂缝型储层流体识别方法 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(5): 1776-1784.
Xie C H, Yong X S, Yang W Y, et al. The method for identification of fluid in fractured reservoirs [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1776-1784.
- [11] 孙炜, 何治亮, 李玉凤, 等. 一种裂缝流体因子的提出及应用 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(7): 2536-2545.
Sun W, He Z L, Li Y F, et al. A new factor of fluid-filled fractures and its application [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(7): 2536-2545.
- [12] Pan X P, Zhang G Z, Chen H Z, et al. Elastic impedance parameterization and inversion for fluid modulus and dry fracture quasi-weaknesses in a gas-saturated reservoir [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 49: 194-212.
- [13] 印兴耀, 张洪学, 宗兆云. 五维地震油气识别方法 [J]. *应用声学*, 2020, 39(1): 63-70.
Yin X Y, Zhang H X, Zong Z Y. Seismic fluid identification based on 5D seismic data [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2020, 39(1): 63-70.
- [14] 张丰麒, 刘俊州, 刘兰锋, 等. 确定性反演协同约束的叠后随机地震反演方法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(5): 1137-1149, 930-931.
Zhang F Q, Liu J Z, Liu L F, et al. The methodology of a post-stack stochastic seismic inversion with the co-constraint of deterministic inversion [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(5): 1137-1149, 930-931.
- [15] 张广智, 赵晨, 涂奇催, 等. 基于量子退火 Metropolis-Hastings 算法的叠前随机反演 [J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(1): 153-160, 9.
Zhang G Z, Zhao C, Tu Q C, et al. Prestack stochastic inversion based on the quantum annealing Metropolis-Hastings algorithm [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(1): 153-160, 9.
- [16] Buland A, Omre H. Bayesian linearized AVO inversion [J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 185-198.
- [17] 孙瑞莹, 印兴耀, 王保丽, 等. 基于 Metropolis 抽样的弹性阻抗随机反演 [J]. *物探与化探*, 2015, 39(1): 203-210.
Sun R Y, Yin X Y, Wang B L, et al. Stochastic inversion of elastic impedance based on Metropolis sampling algorithm [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(1): 203-210.
- [18] 张繁昌, 肖张波, 印兴耀. 地震数据约束下的贝叶斯随机反演 [J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(1): 176-182, 306.
Zhang F C, Xiao Z B, Yin X Y. Bayesian stochastic inversion constrained by seismic data [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(1): 176-182, 306.
- [19] 向坤, 陈科, 段心标, 等. 基于 APSO-MCMC 的叠前三参数同步随机反演方法研究 [J]. *石油物探*, 2022, 61(4): 673-682.
Xiang K, Chen K, Duan X B, et al. Stochastically simultaneous inversion of prestack data using APSO-MCMC method [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(4): 673-682.
- [20] 纪永祯, 张渝悦, 朱立华, 等. 多道随机稀疏反射系数反演 [J]. *石油物探*, 2020, 59(6): 912-917.
Ji Y Z, Zhang Y Y, Zhu L H, et al. Multi-trace stochastic sparse-spike inversion for reflectivity [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(6): 912-917.
- [21] Schoenberg M, Sayers C M. Seismic anisotropy of fractured rock [J]. *Geophysics*, 1995, 60(1): 204-211.
- [22] Shaw R K, Sen M K. Use of AVOA data to estimate fluid indicator

- in a vertically fractured medium [J]. *Geophysics*, 2006, 71(3): C15-C24.
- [23] Pšeník I, Martins J L. Properties of weak contrast PP reflection/transmission coefficients for weakly anisotropic elastic media [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2001, 45(2): 176-199.
- [24] Ulrych T J, Sacchi M D, Woodbury A. A Bayes tour of inversion: A tutorial [J]. *Geophysics*, 2001, 66(1): 55-69.
- [25] Alemie W, Sacchi M D. High-resolution three-term AVO inversion by means of a Trivariate Cauchy probability distribution [J]. *Geophysics*, 2011, 76(3): R43-R55.
- [26] Zong Z Y, Yin X Y, Wu G C. Elastic impedance parameterization and inversion with Young's modulus and Poisson's ratio [J]. *Geophysics*, 2013, 78(6): N35-N42.

Prestack seismic inversion of fluid factors in fractured reservoirs based on the global adaptive MCMC algorithm

ZHANG Jing¹, WANG Yong¹, ZHAO Hui-Yan¹, HENG De¹, HUANG Jun²,
ZHANG Xiao-Dan², WANG Wen-Wen², HE Yan-Bing²

(1. *Sichuan Changning Natural Gas Development Co., Ltd., Chengdu 610000, China*; 2. *Chengdu Jiekese Petroleum Natural Gas Technology Development Co., Ltd., Chengdu 610000, China*)

Abstract: Fractured reservoirs typically exhibit anisotropic characteristics, and their fractures show different seismic responses when filled with fluids. Accurate identification of fluids in fractured reservoirs plays a significant role in indicating the hydraulic fracturing process in the late hydrocarbon exploration and production stage. This study adopted the concepts of normal and tangential fracture quasi-weaknesses and constructed a new indicative factor for fluids in fractures. Combining the linear slip theory, this study derived the elastic stiffness matrix expression of the fracture-induced HTI medium. Based on the scattering theory and the Born approximation equation, this study derived the linearized P-wave incident anisotropic reflection coefficient equation for the weakly contrasted interface. Moreover, this study proposed an improved global adaptive MCMC algorithm by introducing the adaptation strategy into the MCMC algorithm. The results show that: (1) In the absence of noise, the model testing results were highly consistent with the log data, with a consistency degree of above 90%; (2) The inversion results of the actual data aligned closely with the log interpretation results, and hydrocarbons were discovered through drilling in the target interval. As indicated by the results of model testing and actual data application in a study area in Southwest China, the prestack seismic inversion of fluid factors in fractured reservoirs, yielding highly consistent results with log interpretation data, demonstrates certain reliability and applicability and thus can achieve accurate fluid identification and hydraulic fracturing indication.

Key words: fractured reservoir; fluid identification; global adaptive; prestack seismic inversion

(本文编辑:叶佩)