

文章编号: 1001-1749(2024)02-0127-10

# 基于贝叶斯理论的粘弹介质 AVF 衰减反演方法

周 单

(中石化石油物探技术研究院有限公司, 南京 210003)

**摘要:** 笔者通过引入贝叶斯反演框架, 将 AVF 分析融入反演机制之中, 以地质、测井、地震解释资料作为先验信息, 构建从粘弹性参数到地震数据的似然函数, 以后验概率的形式给出反演结果, 从而建立了一种适合地下地质模型与参数估计的粘弹性介质反演方法。首先通过简化 Aki-Richards 公式, 并引入粘弹性介质中两个新的衰减参数  $Q_p$  和  $Q_s$ , 推导出粘弹性介质 AVF 的近似表达式; 然后从粘弹性介质下线性化的 AVF 公式出发, 基于贝叶斯反演的框架, 将初始模型中的先验信息以及测井曲线的互相关信息加入到数据反演中来, 得到要求解的后验概率模型。通过理论模型数值实验和实际工区应用表明, 该方法可以对地下介质的纵横波衰减进行直接反演, 衰减异常能够指示可能的含气储层, 从而为储层预测提供了更多的信息, 降低了预测的风险。

**关键词:** 贝叶斯; 粘弹介质; AVF 反演; 品质因子 Q

**中图分类号:** P631.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.02.01

## 0 引言

地震波的能量衰减和频散一直贯穿着传播过程, 在含油气地层更为明显<sup>[1-6]</sup>。地震波频散现象总是发生在衰减的介质中, 地震波衰减由两部分组成: 散射衰减和本征衰减。弹性介质的非均质性导致散射衰减, 而本征衰减则由地层岩性的变化引起, 而地层岩性也包括其中的含流体性质, 主要有: 含孔隙度、渗透率、含流体饱和度和粘滞性等, 因而本征衰减在指示含气储层和流体方面有很大的作用<sup>[7]</sup>。Rapoport 等<sup>[8-10]</sup> (1994, 1997, 2004) 讨论了衰减及速度频散分析应用于油气检测技术的巨大潜力。Pride (2003) 等<sup>[11]</sup> 证明了地震波衰减可以用非均匀性所引起的流体流动来解释。这些研究验证并证明了衰减的原因和影响, 但是, 定量估计的工作却仅在模型实验方面进行了尝试, 这是不够的。一方面, 实际中影响衰减的情况很多, 而且计算时参数之间又相互关联; 另一方面, 以渗透率、孔隙形状为例的一

些参数, 在模型实验中很重要, 但在实际勘探中却很难测量。因此, 学者们针对衰减的估算进行了大量深入的研究。

地层的粘弹性衰减特性常常用品质因子 Q 来表征, 不论是从地震资料处理的角度还是储层精细描述的角度而言, Q 都是非常有用的参数。马昭军 (2005)<sup>[12]</sup> 总结了地震波衰减估计的主要方法, 包括早期的谱比法、频移法、利用面波的近地表 Q 值反演, 以及高静怀 (2009)<sup>[13]</sup> 提出的瞬时频率提取介质因子的方法等。Bird (2010)<sup>[14]</sup> 从 Q 对反射系数影响的角度出发进行了针对性研究, 主要思路是先假设上覆地层为弹性介质, 以 Aki 和 Richards (2002)<sup>[15-16]</sup> 提出的使反射系数与频率相关联的 Q 值表达式为基础, 采用线性近似公式进行反演获得 Q 值与速度值。该方法对 Q 值估算的研究做出了巨大的贡献, 但是由于地震资料本身分辨率的限制, 导致反演得到 Q 值的分辨率较低, 在实际应用中, 对其准确性难以评价。

针对上述问题, 滕龙 (2014)<sup>[17]</sup> 以 AVA 随机反

收稿日期: 2023-05-26

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U19B6003)

作者简介: 周单(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事储层预测与油藏描述工作, E-mail: zhousdan@hotmail.com。

演的理论框架为基础,结合贝叶斯理论,以模型数据作为先验信息,进行了进一步探索,取得了较好的效果。笔者在此基础上,通过简化 Aki-Richards 公式,并引入粘弹性介质中两个新的参数  $Q_p$  和  $Q_s$ ,推导出粘弹介质中 AVF 的近似表达式;然后从线性化的 AVF 公式出发,将 AVF 反射系数与 Q 阻抗相结合,并基于贝叶斯反演的框架,将初始模型中的先验信息以及测井曲线的互相关信息加入到数据反演中来,得到要求解的后验概率模型,从而建立了一种适合地下地质模型与参数估计的粘弹性介质 AVAF 反演方法。

## 1 方法原理

### 1.1 粘弹性介质中 AVF 近似关系表达

粘弹性介质中 AVA/AVF 近似关系分析是在弹性介质波传播的基础上进一步加入了 Q 的因素<sup>[18-19]</sup>。弹性介质中 AVA 分析是基于地下反射点处是局部平面的物理假设,将广义的逆散射退化到地下界面处,并且只考虑纵波和横波两种波在界面处的相互转化。粘弹性介质中的研究引入了两个新的参数  $Q_p$  和  $Q_s$ ,同时它们对纵横波相速度的影响都分别可以用一个常 Q 模型表达出来,在这个基础上进行 AVF 反射系数的研究并且对其加以线性化。

在弹性介质中,Zoeppritz 的方程导出是利用了在反射界面处应力和应变的连续性来导出的。Zoeppritz 方程有许多种近似形式,Ursin(2002)<sup>[20]</sup>利用层状介质中波的传播规律得到了精确的 P 波反射系数,并且利用微扰理论对精确的反射系数进行了线性化,其形式如下:

$$r_{DPP} = \frac{1}{4V_p^2 q_p^2} \frac{\Delta M}{M} - 2V_s^2 p^2 \frac{\Delta \mu}{\mu} + \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{4V_p^2 q_p^2} \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1)$$

其中, $V_p, V_s$  分别为纵波速度与横波速度; $q_p, p$  分别为纵波的垂直慢度与射线参数; $M, \mu, \rho$  分别为两层界面的平均体积模量、剪切模量、密度; $\Delta M, \Delta \mu, \Delta \rho$  分别为两层界面的体积模量差、剪切模量差、密度差。体积模量、剪切模量与  $V_p, V_s$  的关系为:

$$\begin{cases} \frac{\Delta M}{M} = 2 \frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \\ \frac{\Delta \mu}{\mu} = 2 \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \end{cases} \quad (2)$$

将式子(2)带入到(1)中就可以得到常见的 Aki-Richards 近似<sup>[21]</sup>:

$$r_{DPP} = \frac{1}{2 \cos^2 \theta} \frac{\Delta V_p}{V_p} - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{1}{2} \left( 1 - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3)$$

式子(1)和式子(3)是等价的。根据泥岩线公式将 Aki-Richards 近似进行进一步的化简:

$$V_p = aV_s + b \quad (4)$$

这样就得到了:

$$r_{DPP} = A(\theta) \frac{\Delta V_p}{V_p} + B(\theta) \frac{\Delta V_s}{V_s} + C(\theta) \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (5)$$

利用 Aki-Richards 的 AVA 近似公式时,角度项不需要展开,只需展开速度的变化项,速度采用下面的表达形式:

$$\frac{1}{V(\omega)} = \frac{1}{V_r} H(\omega) \quad (6)$$

其中上式表示的是 Aki-Richards(2002)常 Q 模型的时候, $H(\omega)$ 的定义为:

$$H(\omega) = 1 + Q^{-1} \left[ \frac{i}{2} - \frac{1}{\pi} \log \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right) \right] \quad (7)$$

将式子(6)(7)带入 Aki-Richards 公式中可以得到:

$$r_{DPP} = \frac{1}{\cos^2 \theta} \frac{V_{p2r} H_{p2}^{-1}(\omega) - V_{p1r} H_{p1}^{-1}(\omega)}{V_{p2r} H_{p2}^{-1}(\omega) + V_{p1r} H_{p1}^{-1}(\omega)} + \frac{1}{2} \left( 1 - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} - 8 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta \frac{V_{s2r} H_{s2}^{-1}(\omega) - V_{s1r} H_{s1}^{-1}(\omega)}{V_{s2r} H_{s2}^{-1}(\omega) + V_{s1r} H_{s1}^{-1}(\omega)} \quad (8)$$

式子(8)中的速度差项进行展开,展开的形式与式子(3)有所区别,展开条件如下:

$$\begin{cases} \frac{V_{p2r}}{V_{p1r}} \rightarrow 1, \frac{H_{p2}(\omega)}{H_{p1}(\omega)} \rightarrow 1 \\ \frac{V_{s2r}}{V_{s1r}} \rightarrow 1, \frac{H_{s2}(\omega)}{H_{s1}(\omega)} \rightarrow 1 \end{cases} \quad (9)$$

在式子(9)的条件下将纵波反射和横波反射可以展开成:

$$\begin{cases} \frac{\Delta V_p}{V_p} = \frac{\Delta V_{pr}}{V_{pr}} - \frac{\Delta H_p(\omega)}{H_p(\omega)} \\ \frac{\Delta V_s}{V_s} = \frac{\Delta V_{sr}}{V_{sr}} - \frac{\Delta H_s(\omega)}{H_s(\omega)} \end{cases} \quad (10)$$

将上式带入方程(8)中就可以得到粘弹性介质下的线性化的 AVA/AVF 关系式:

$$r_{DPP} = \left\{ \frac{1}{2 \cos^2 \theta} \frac{\Delta V_{pr}}{V_{pr}} - 4 \frac{V_{sr}^2}{V_{pr}^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta V_{sr}}{V_{sr}} \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} \left( 1 - 4 \frac{V_{sr}^2}{V_{pr}^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} \Big\} + \\
& \left\{ - \frac{1}{2 \cos^2 \theta} \frac{\Delta H_p(\omega)}{H_p(\omega)} + 4 \frac{V_{sr}^2}{V_{pr}^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta H_s(\omega)}{H_s(\omega)} \right\}
\end{aligned} \quad (11)$$

将上式进行进一步线性化, 存在着式子(12)的线性形式:

$$\begin{cases} \frac{\Delta H_p(\omega)}{H_p(\omega)} = F_p(\omega) (\mathbf{Q}_{p2}^{-1} - \mathbf{Q}_{p1}^{-1}) \\ \frac{\Delta H_s(\omega)}{H_s(\omega)} = F_s(\omega) (\mathbf{Q}_{s2}^{-1} - \mathbf{Q}_{s1}^{-1}) \end{cases} \quad (12)$$

这样式子(11)可以化为:

$$\begin{aligned}
r_{DPP} = & \left\{ \frac{1}{2} \frac{\Delta V_{pr}}{\cos^2 \theta V_{pr}} - 4 \frac{V_{sr}^2}{V_{pr}^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta V_{sr}}{V_{sr}} \right. \\
& + \frac{1}{2} \left( 1 - 4 \frac{V_{sr}^2}{V_{pr}^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} \Big\} + \\
& \left\{ - \frac{1}{2 \cos^2 \theta} F_p(\omega) (\mathbf{Q}_{p2}^{-1} - \mathbf{Q}_{p1}^{-1}) + \right. \\
& \left. 4 \frac{V_{sr}^2}{V_{pr}^2} \sin^2 \theta F_s(\omega) (\mathbf{Q}_{s2}^{-1} - \mathbf{Q}_{s1}^{-1}) \right\}
\end{aligned} \quad (13)$$

上式是粘弹性介质中的 AVAF 近似方程。

## 1.2 基于贝叶斯理论的 AVF 反演

以三参数 AVO 反演为例, 先验概率分布通过多元高斯概率函数来表示<sup>[22]</sup>:

$$\begin{aligned}
P(\mathbf{X} | I) = & \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 |C_X|}} \exp \\
& \left\{ - \frac{1}{2} [\mathbf{X} - \langle \mathbf{X} \rangle]^T C_X^{-1} [\mathbf{X} - \langle \mathbf{X} \rangle] \right\}
\end{aligned} \quad (14)$$

其中, 先验模型的协方差矩阵表示为:

$$\mathbf{C}_X = \begin{bmatrix} \sigma_{R_\alpha}^2 & \sigma_{R_\alpha R_\beta} & \sigma_{R_\alpha R_d} \\ \sigma_{R_\alpha R_\beta} & \sigma_{R_\beta}^2 & \sigma_{R_\beta R_d} \\ \sigma_{R_\alpha R_d} & \sigma_{R_\beta R_d} & \sigma_{R_d}^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

期望和协方差是高斯分布所必须的参数, 其中, 期望代表先验信息最可能的模型, 可以通过对速度分析、测井数据平滑来获取, 而协方差则是模型不确定性的度量, 也可以通过测井数据计算获取, 它们的计算方法是: ①标定后获取反射系数序列; ②对其平滑平均后作为均值; ③选取一个时窗, 计算关于均值扰动量的自相关。

由贝叶斯理论可知, 三项 AVO 反演的后验概率分布满足式(16):

$$P(x | d, I) \propto P(d | x, I) P(x | I) \quad (16)$$

由于不显式地关心  $\sigma_N$ , 因此上式右侧两个概率分布函数边缘化为:

$$\begin{aligned}
P(d | \mathbf{X}, I) \propto & \exp \left\{ - \frac{1}{2} [g(\mathbf{X}) - d_{obs}]^T C_d^{-1} [g(\mathbf{X}) - d_{obs}] \right\} \\
P(\mathbf{X} | I) \propto & \exp \left\{ - \frac{1}{2} [\mathbf{X} - \langle \mathbf{X} \rangle]^T C_X^{-1} [\mathbf{X} - \langle \mathbf{X} \rangle] \right\}
\end{aligned} \quad (17)$$

最大后验概率对应如下目标函数极小值问题:

$$\begin{aligned}
S(\mathbf{X} | d, I) = & \frac{1}{2} \left\{ [g(\mathbf{X}) - d_{obs}]^T C_d^{-1} [g(\mathbf{X}) - d_{obs}] + \right. \\
& \left. [\mathbf{X} - \langle \mathbf{X} \rangle]^T C_X^{-1} [\mathbf{X} - \langle \mathbf{X} \rangle] \right\}
\end{aligned} \quad (18)$$

地层岩性的非完全弹性, 即粘弹性, 导致了地震波在传播中产生吸收衰减, 而地层岩性的不同以及其含流体性质的不同, 又会导致不同的衰减作用, 这使得纵横波的衰减因此蕴含了大量的岩性和所含流体性质的信息。笔者基于贝叶斯反演的框架, 将初始模型中的先验信息以及测井曲线的互相关信息加入到数据反演中来, 得到要求解的后验概率模型, 即最终的反演结果。

在应用贝叶斯理论来进行反演之前, 首先将表示“衰减”反射地震记录的正过程描述出来, 将粘弹性介质中线性化了的 AVF 公式成完整的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} R_{\theta_1 f_1} \\ R_{\theta_1 f_2} \\ \vdots \\ R_{\theta_i f_j} \\ R_{\theta_i f_{j+1}} \\ \vdots \\ R_{\theta_M f_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta_1} & D_{\theta_1} & E_{\theta_1} & A_{\theta_1 f_1} & B_{\theta_1 f_1} \\ C_{\theta_1} & D_{\theta_1} & E_{\theta_1} & A_{\theta_1 f_2} & B_{\theta_1 f_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{\theta_i} & D_{\theta_i} & E_{\theta_i} & A_{\theta_i f_j} & B_{\theta_i f_j} \\ C_{\theta_i} & D_{\theta_i} & E_{\theta_i} & A_{\theta_i f_{j+1}} & B_{\theta_i f_{j+1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{\theta_M} & D_{\theta_M} & E_{\theta_M} & A_{\theta_M f_N} & B_{\theta_M f_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta V_{pr}}{V_{pr}} \\ \frac{\Delta V_{sr}}{V_{sr}} \\ \frac{\Delta \rho}{\rho} \\ \Delta \mathbf{Q}_p^{-1} \\ \Delta \mathbf{Q}_s^{-1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中:  $A_{\theta_i f_j} = - \frac{1}{2 \cos^2 \theta_i} F_p(f_j) I$ ,  $B_{\theta_i f_j} = 4 \sin^2 \theta_i F_s$

$$(f_j) \begin{bmatrix} \frac{V_{sr}^2}{V_{pr}^2} \end{bmatrix},$$

$$C_{\theta_i f_j} = \frac{1}{2 \cos^2 \theta_i} I,$$

$$D_{\theta_i} = -4 \sin^2 \theta_i \begin{bmatrix} \frac{V_{sr}^2}{V_{pr}^2} \end{bmatrix};$$

$I$  是单位阵,

$$\begin{bmatrix} V_{sr}^2 \\ V_{pr}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{sr_1}^2}{V_{pr_1}^2} & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \frac{V_{sr_m}^2}{V_{pr_m}^2} & \\ 0 & & & \end{bmatrix}$$

将矩阵方程(20)中的解向量全部转化为阻抗的自然对数的形式,其中:

$$\begin{cases} \frac{\Delta V_{pr}}{V_{pr}} = L [\ln V_{pr}] \\ \frac{\Delta V_{sr}}{V_{sr}} = L [\ln V_{sr}] \\ \frac{\Delta \rho}{\rho} = L [\ln \rho] \end{cases} \quad (21)$$

这样粘弹性介质中 AVF 公式(20)可以化成:

$$\begin{bmatrix} R_{\theta_1 f_1} \\ R_{\theta_1 f_2} \\ \vdots \\ R_{\theta_i f_j} \\ R_{\theta_i f_{j+1}} \\ \vdots \\ R_{\theta_M f_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta_1} L D_{\theta_1} L E_{\theta_1} L A_{\theta_1 f_1} D B_{\theta_1 f_1} D \\ C_{\theta_1} L D_{\theta_1} L E_{\theta_1} L A_{\theta_1 f_2} D B_{\theta_1 f_2} D \\ \vdots \\ C_{\theta_i} L D_{\theta_i} L E_{\theta_i} L A_{\theta_i f_j} D B_{\theta_i f_j} D \\ C_{\theta_i} L D_{\theta_i} L E_{\theta_i} L A_{\theta_i f_{j+1}} D B_{\theta_i f_{j+1}} D \\ \vdots \\ C_{\theta_M} L D_{\theta_M} L E_{\theta_M} L A_{\theta_M f_N} D B_{\theta_M f_N} D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln V_{pr} \\ \ln V_{sr} \\ \ln \rho \\ Q_p^{-1} \\ Q_s^{-1} \end{bmatrix} \quad (22)$$

将上式中的反射系数褶积不同频率的分频子波,就得到了分频的地震信号,其正过程写成下面的矩阵形式:

$$d_{obs} = S A m \quad (23)$$

基于上式的正演公式,在贝叶斯反演的框架下进行弹性参数和非弹性参数的估计,粘弹性介质中参数反演的推导与粘声介质中参数反演是一致的,后验期望和方差分别为:

$$\mu_{\hat{m} | \hat{d}_{obs}} = \mu_{\hat{m}} + (S \hat{A} \Sigma'_{\hat{m}})^T \Sigma_{\hat{d}_{obs}}^{-1} (\hat{d}_{obs} - \mu_{\hat{d}_{obs}}) \quad (24)$$

$$\Sigma_{\hat{m} | \hat{d}_{obs}} = \Sigma_{\hat{m}} - (S \hat{A} \Sigma'_{\hat{m}})^T \Sigma_{\hat{d}_{obs}}^{-1} (S \hat{A} \Sigma'_{\hat{m}}) \quad (25)$$

由此,我们以后验概率分布的形式给出了粘弹性介质 AVF 反演的解。后验概率的期望为最大概率解(MAP),方差代表了解的不确定性。对于反演目的层,通常根据已有的测井或地质信息首先给出一个初始模型,也就是先验信息  $\mu_{\hat{m}}$ ,它对应的是与频率无关的粘弹性参数。

## 2 模型实验

针对实际地震勘探中常常出现的薄互层问题,笔者设计了一套砂岩层由厚到薄的楔形体,首先针对这一套模型参数(表 1)建立地震正演模型;然后通过频率域褶积算子模拟角度域地震数据;最后在贝叶斯框架下进行 AVF 反演。图 1 是楔形模型的五个粘弹性参数图。

表 1 楔形模型参数表

	$1/Q_p$	$1/Q_s$	$V_p /$ (m/s)	$V_s /$ (m/s)	Rho/ (kg/m <sup>3</sup> )
砂岩储层	0.1	0.2	2 800	1 450	2 650
泥岩	0.01	0.01	3 000	1 500	2 750

楔形模型的时间厚度从 0 s 到 0.1 s,使用这个衰减模型建立正演 AVF 反射系数,然后再使用频率域的褶积过程来正演地震道集。对这个地震道集和合成地震道集的子波进行分频处理,构建分频率域的地震正过程。接下来的贝叶斯反演就是基于分频率域的正过程算子进行的,初始模型是在模型上进行了平滑,其平滑效果如图 2 所示。

通过贝叶斯反演最后得到图 3 的反演结果,可以看出弹性参数的反演是相对稳定的,这是由于弹性参数的敏感性较粘弹性参数的敏感性要强得多。而  $Q_p$  和  $Q_s$  参数的反演在层的厚度较厚时是相对稳定的,当反射层的厚度进入到临界厚度时,反射波产生了谱干扰,严重影响了反演结果,使得反演结果出现错误的收敛,这是由物理本质决定的。可以考虑增加反演的正则化项,加入更多的先验信息,来反演低于临界厚度时候的情况。

## 3 实际应用

### 3.1 基于测井资料的 AVA 与 AVF 反演分析

为讨论方法对于复杂介质的适用性,基于实际测井数据及合成地震数据开展了 AVA 及 AVF 反演研究。其中,测井的纵、横波速度和密度为实测值,纵波衰减和横波衰减因子为基于常规测井资料的估算结果<sup>[16]</sup>。

在进行反演之前,首先利用粘弹性介质反射系数近似式(13)计算频率-角度域的反射系数,将该反射系数与子波进行褶积得到所需要的地震记录。在褶积过程中,将 30 Hz 主频的雷克子波分别与固定角度、频率变化的反射系数和固定频率、角度变换的反射系数进行褶积,得到用于反演的角度域 AVA

道集和频率域 AVF 道集。接下来,我们将分别在角度域进行 AVA 反演,在频率域开展 AVF 反演,反演的目的参数包括:纵、横波速度,密度,纵、横波衰减因子等五个参数。

为了考量方法的抗噪性,实验中分别设置了信噪比为 100、10 和 3 进行反演。

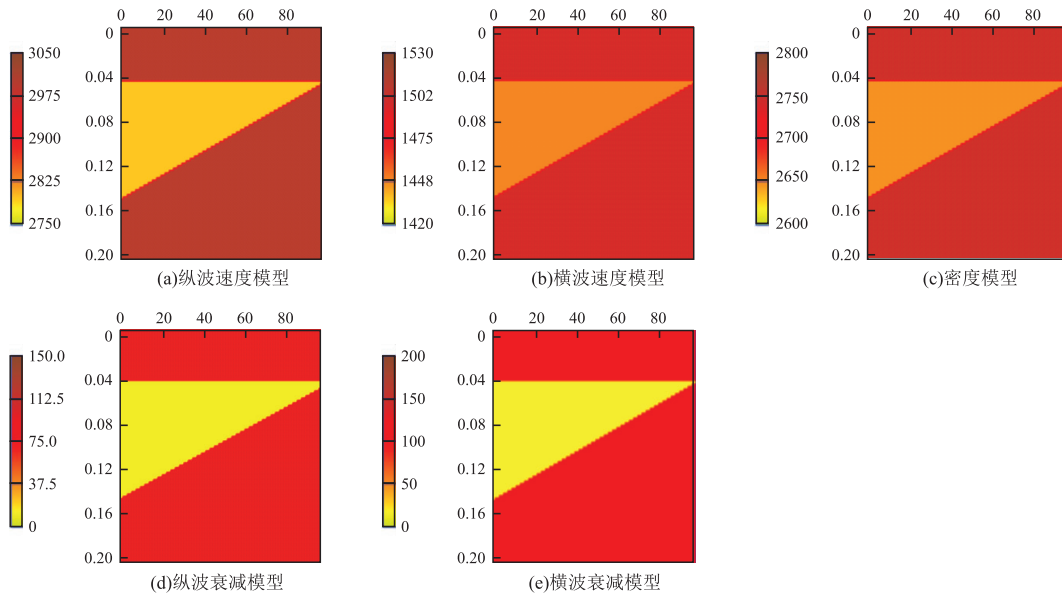


图 1 楔形模型参数

Fig. 1 Wedge model parameters

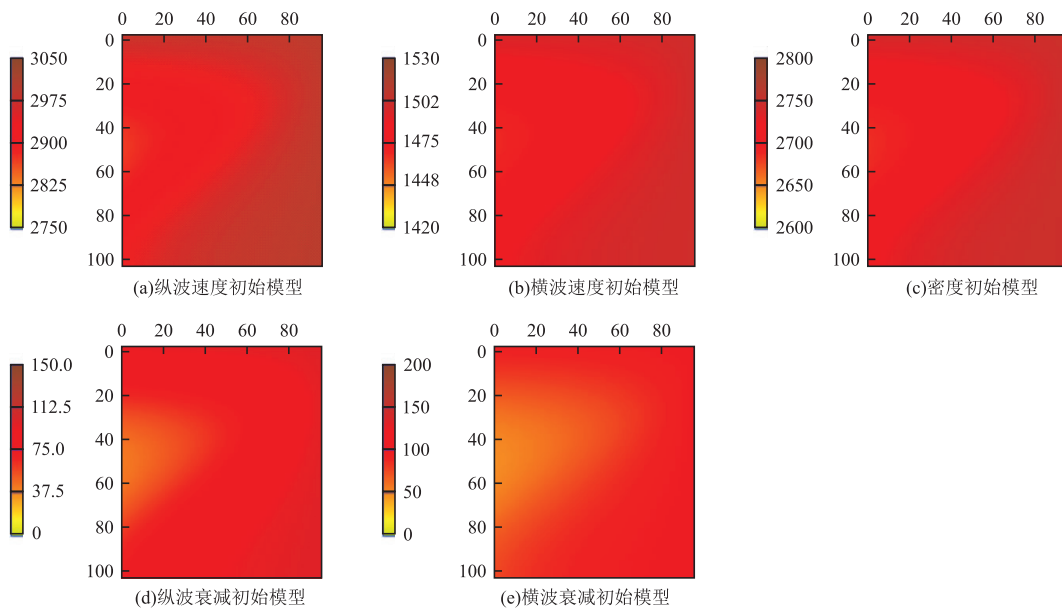


图 2 AVAF 反演初始模型

Fig. 2 AVAF inversion initial model

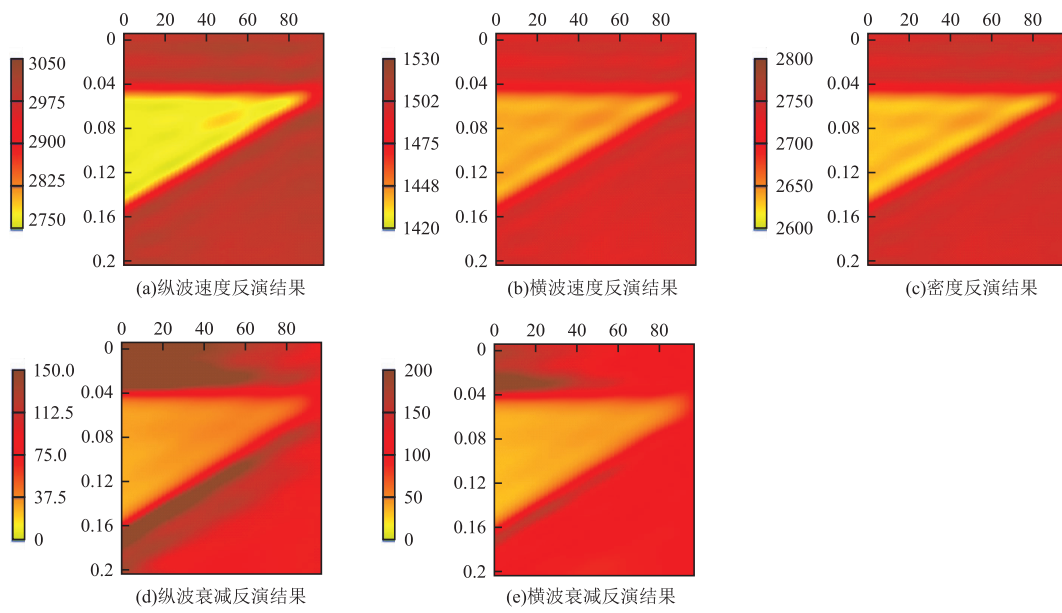
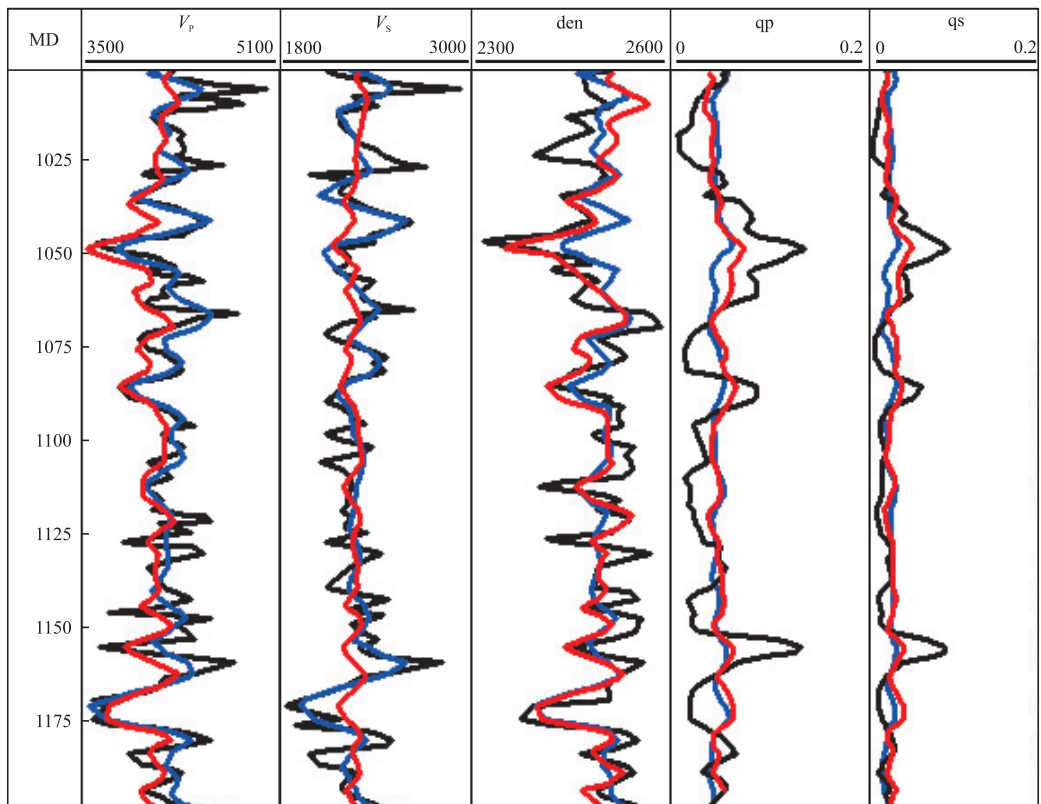


图 3 AVAF 反演结果

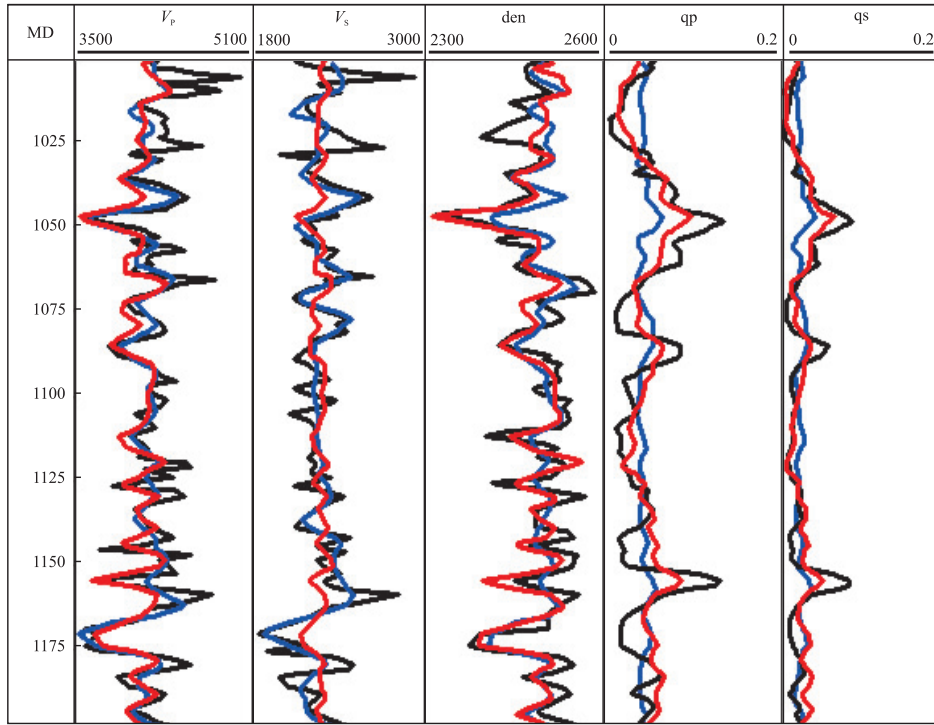
Fig. 3 AVAF inversion result



黑色:原始数据;蓝色:AVA 反演结果;红色:AVF 反演结果

图 4 信噪比为 3 时 AVA/AVF 反演对比

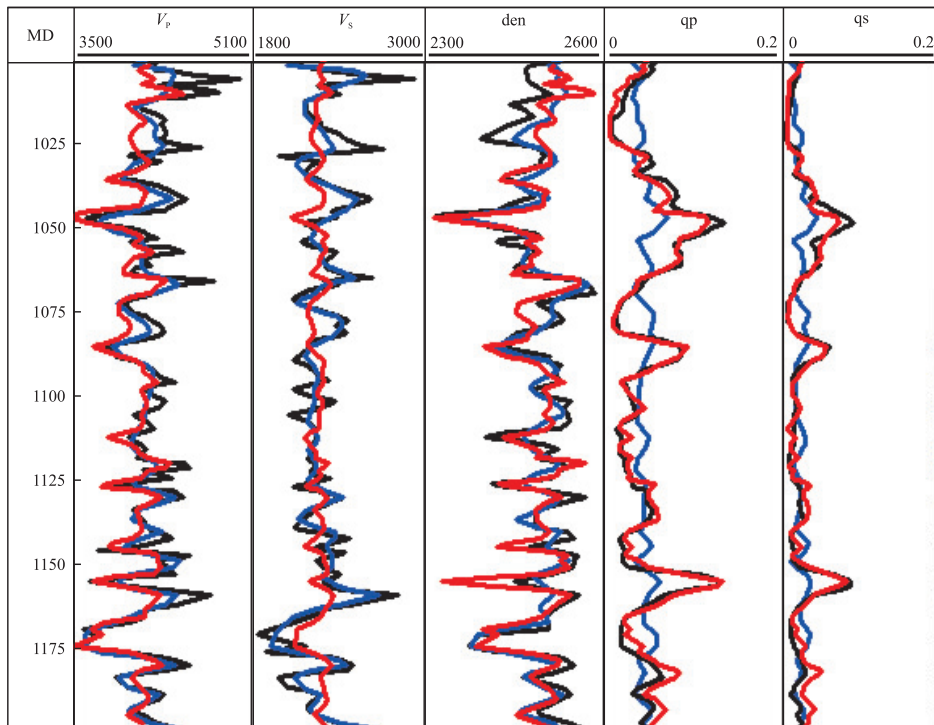
Fig. 4 Comparison of AVA/AVF inversion when SNR is 3



黑色:原始数据;蓝色:AVA 反演结果;红色:AVF 反演结果

图 5 信噪比为 10 时 AVA/AVF 反演对比

Fig. 5 Comparison of AVA/AVF inversion when SNR is 10



黑色:原始数据;蓝色:AVA 反演结果;红色:AVF 反演结果

图 6 信噪比为 1 000 时 AVA/AVF 反演对比

Fig. 6 Comparison of AVA/AVF inversion when SNR is 1 000

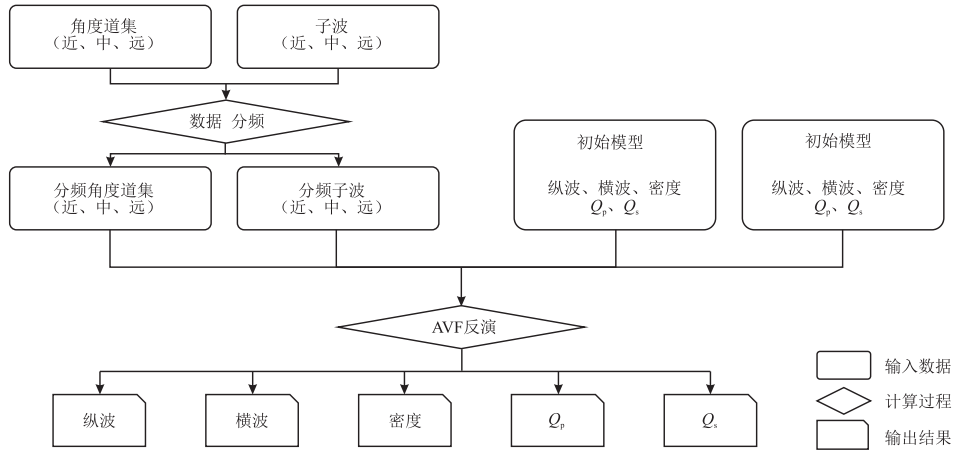
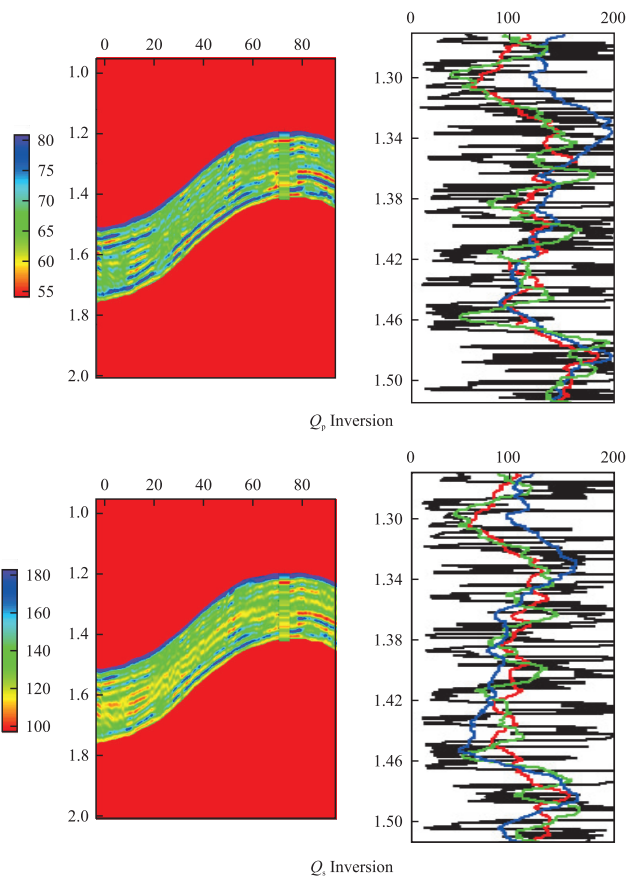


图 7 AVF 反演流程

Fig. 7 AVF inversion process



左为反演剖面,右为井旁道反演与测井曲线对照:蓝色为 AVA 反演结果,红色为 AVAF 反演结果,黑色为实际测井值,绿色为测井平滑曲线

图 8 AVF 反演  $Q_p$ 、 $Q_s$  结果与测井曲线对照

Fig. 8 Comparison between  $Q_p$ 、 $Q_s$  results of AVF inversion and log curve

图 4、图 5 和图 6 中是不同信噪比条件下的 AVA 与 AVF 道集反演结果的对比分析,可以看到在信噪比较高时,AVA 反演可以准确地反演出弹性参数,但是,随着信噪比变差,弹性参数的结果也

变差,但即使是信噪比为 3,反演结果仍然可以接受。但是对于粘弹性参数,常规角度域的 AVA 反演并不能有效预测,需要更多频率域的信息,这与我们的认识是一致的;同时可以看到利用 AVF 的信

息能很好地将纵波、横波的衰减值反演出来,而弹性参数也能有一定的结果,但是差于用 AVA 来反演弹性参数的结果。

### 3.2 实际资料应用

为了考察方法的实用性,将文中的方法应用于川西某三维工区。目标储层位于川西凹陷须五段,该储层段具有分布广、厚度大、含气量大的特征,但同时该储层段砂泥岩还具有频繁互层、厚薄不等、非均质性较强等特征,而且流体信息的加入对岩石弹性性质的影响相对骨架和孔隙的影响要小很多,从而不容易根据弹性参数来准确表征流体信息,而地震波衰减特性则更多是体现流体特征,因此开展 AVF 反演可以对含气性进行有效预测。与叠前 AVO 反演不同,AVF 反演需要在频率域进行,因此频率域道集的提取是反演的基础,在计算效率上,根据分频算法的不同,计算效率也不同。本文采用 S 变换加上分频反变换的方式进行频率域道集的抽取,反演的目的是纵波品质因子和横波品质因子,反演流程如图 7 所示。利用振幅随频率的变化信息我们可以得到较为准确的地下衰减特征(图 8),剖面上暖色为品质因子较小,即衰减较大的地层;冷色为品质因子较大,即衰减较小的地层。同样,也提供了通过地震资料(AVF)反演得到的衰减参数与测井资料计算的对比图。二者在同一尺度上的变化趋势基本一致,AVA 与 AVF 的衰减反演结果与测井平滑曲线的相关系数分别为 76%和 87%,充分验证了 AVF 衰减反演方法的正确性。

## 4 结论

基于贝叶斯理论,以地质、测井、地震解释资料作为先验信息,构建从粘弹性参数到地震数据的似然函数,以后验概率的形式给出反演结果,建立了一个粘弹性介质纵横波衰减因子的反演方法。通过理论模型数值实验和实际工区应用,得出如下结论:

1)粘弹性介质反射界面处地震波反射的振幅及反射系数不仅随入射角产生变化,同时也随频率变化,在考察来自储层的反射时不仅应考虑 AVO 效应同时也应当考虑 AVF 效应。通过常规 Zoeppritz 方程无法描述粘弹性介质反射界面处所发生的反射与入射现象,需要引入粘弹性介质反射透射方程。

2)角度域 AVA 反演可用于准确反演弹性参数  $V_p$ ,  $V_s$ , 密度的变化,且具有良好的抗噪性;而频率域 AVF 反演对于粘弹性参数则更为敏感,可用于

反演衰减参数  $Q_p$  和  $Q_s$  的变化,值得注意的是,AVF 反演对于信噪比的要求较高,当资料品质较高时反演的结果具有较高的可信度。对于实际资料反演,建议采用常规 AVO 反演弹性参数进行岩性识别,利用 AVF 反演衰减参数进行流体预测工作。

3)基于贝叶斯理论的 AVF 反演技术,可以对地下介质进行纵横波衰减参数的直接反演,纵横波衰减异常的地层往往预示着可能的含气储层,该方法可以为储层预测提供了更多的信息,大幅减低了预测的风险。

### 参考文献:

- [1] 王小杰. 基于叠前地震资料地层吸收参数提取方法研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2009.  
WANG X J. The study on methods of layer absorbing parameters extraction based on prestack seismic data [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009. (In Chinese)
- [2] RICKER N. The form and laws of propagation of seismic wavelets[J]. Geophysics, 1953, 18(1):10-40.
- [3] MURPHY W F III, WINKLER K W, KLEINBERG R L. Acoustic relaxation in sedimentary rocks: Dependence on grain contacts and fluid saturation[J]. Geophysics, 1986, 51(3):757-766.
- [4] O'CONNELL R J, BUDIANSKY B. Viscoelastic properties of fluid-saturated cracked solids[J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(36):5719-5735.
- [5] PALMER I, TRAVIOLIA M. Attenuation by squirt flow in undersaturated gas sands [J]. Geophysics, 1980, 45(12):1780-1792.
- [6] TOKSÖ Z M N, JOHNSTON D, TIMUR A. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: Laboratory measurements [J]. Geophysics, 1979, 44(4):681-690.
- [7] 滕龙,程玖兵. 基于常规测井数据的纵波本征衰减估计[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2):688-695.  
TENG L, CHENG J B. Estimation of P-wave intrinsic attenuation from well data[J]. Progress in Geophys, 2012, 27(2):688-695. (In Chinese)
- [8] RAPOPORT M B. Interpretation of seismic inelasticity effects in oil and gas prospecting[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1995, 14(1):683-685.
- [9] RAPOPORT M B. Oil prospecting using seismic attributes as predictors of reservoir properties and fluid saturation[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1997, 23(2):606-610.

- [10] RAPOPORT M B, RAPOPORT L I, RYJKOV V I. Direct detection of oil and gas fields based on seismic inelasticity effect[J]. *The Leading Edge*, 2004, 23(3):276—278.
- [11] PRIDE, R. Permeability dependence of seismic amplitudes[J]. *The Leading Edge*, 2003, 1(6):518—525.
- [12] 马昭军,刘洋. 地震波衰减反演研究[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(4):1074—1082.  
MA Z J, LIU Y. A summary of research on seismic attenuation[J]. *Progress in Geophys*, 2005, 20(4):1071—1082. (In Chinese)
- [13] 高静怀,杨森林,王大兴. 利用 VSP 资料直达波的包络峰值处瞬时频率提取介质品质因子 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3):853—861.  
GAO J H, YANG S L, WANG D X. Quality factor extraction using instantaneous frequency at envelope peak of direct waves of VSP data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3):853—861. (In Chinese)
- [14] BIRD C, INNANEN K, LINES L, et al. Determination of anelastic reflectivity: how to extract seismic AVF information [R]. CREWES Research Report, 2010(22): 1071—1076.
- [15] 李振振. AVF 反演方法研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2015.  
LI Z Z. The Study of AVF Inversion[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015. (In Chinese)
- [16] 张广智,李振振,赵阳,等. AVF 反演 Q 值方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(5):2293—2300.  
ZHANG G Z, LI Z Z, ZHAO Y, et al. The study of AVF inversion for Q value extraction[J]. *Progress in Geophys*, 2015, 30(5):2293—2300. (In Chinese)
- [17] 滕龙,程玖兵. 贝叶斯框架下联合 AVA 反演与统计岩石物理的储层参数估计[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(4):729—738.  
TENG L, CHENG J B. Bayesian petrophysical-properties estimation with AVA inversion and statistical rock physics[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(4):729—738. (In Chinese)
- [18] INNANEN K A. Inversion of the seismic AVF/AVA signatures of highly attenuative targets[J]. *Geophysics*, 2011, 76(1):R1—R14.
- [19] BIRD C. Amplitude-variation-with frequency (AVF) analysis of seismic data over anelastic targets [D]. Calgary: University of Calgary, 2012.
- [20] URSIN, B, STOVAS A. Reflection and transmission responses of a layered isotropic viscoelastic medium: Geophysics[J]. *Geophysics*, 2002, 67(3):307—323.
- [21] AKI K, RICHARDS P G. *Quantitative seismology* [M]. California: University Science Books, 2002, 4—5.
- [22] 刘勇. 基于地震数据的页岩储层地应力预测方法研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2018  
LIU Y. Research on stress prediction of shale based on seismic data[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018. (In Chinese)
- [23] RUSSELL B, HAMPSON D, SCHUELKE J, et al. Multi-attribute seismic analysis [J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(10):1439—1443.

## AVF attenuation inversion method for viscoelastic media based on bayesian theory

ZHOU Shan

(Sinopec Geophysical Research Institute Co., Ltd, Nanjing, 210003, China)

**Abstract:** In this paper, a viscoelastic medium inversion method suitable for underground geological model and parameter estimation is established by introducing Bayesian inversion framework, integrating AVF analysis into the inversion mechanism, using geological logging seismic interpretation data as prior information, constructing the likelihood function from viscoelastic parameters to seismic data, and giving the inversion results in the form of a posterior probability. Firstly, by simplifying Aki-Richards formula and introducing two new attenuation parameters  $Q_p$  and  $Q_s$  in viscoelastic medium, the approximate expression of AVF in viscoelastic medium is derived. Then, starting from the linearized AVF formula in a viscoelastic medium, based on the framework of Bayesian inversion, the prior information in the initial model and the cross-correlation information of the logging curve are added to the data inversion. The posterior probability model is obtained through numerical experiments of theoretical models and practical applications, which show that this method can directly invert the attenuation of vertical and horizontal waves of underground media. The attenuation anomalies can indicate the possible gas-bearing reservoirs, thus providing more information for reservoir prediction and reducing the risk of prediction.

**Keywords:** bayes; elastic medium; AVF inversion; quality factor Q