

# 基于 Fatti 近似的弹性阻抗方程及反演

王保丽<sup>1</sup>, 印兴耀<sup>1</sup>, 张繁昌<sup>1</sup>, 李爱山<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 东营 257061; 2. 中海石油研究中心国际研究部, 北京 100027)

**摘要** 用 Connolly 的弹性阻抗(EI, elastic impedance)公式进行反演只能直接得到纵、横波速度和密度的信息, 然后才可间接计算得到纵横波阻抗等其它的参数数据体, 这样便增加了一步误差使数据的准确性降低. 本文首先针对该方法的这些缺点和不足, 提出了以 Zoeppritz 方程的 Fatti 近似为基础一种新的弹性阻抗公式, 由该公式可得到比用 Fatti 近似更准确的反射系数, 然后对这个公式进行了标准化以实现不同角度的弹性阻抗间量纲的统一, 最后用标准化后的公式进行了反演, 从反演得到的不同角度的弹性阻抗数据体中可直接提取得到纵横波阻抗数据体. 应用实例表明用这种方法提取得到的纵横波阻抗更加稳定、准确, 而且能很好地反映储层信息. 这种新的方法是对以 Connolly 公式为基础的传统方法的改进.

**关键词** Fatti 近似, 弹性阻抗反演, 标准化, 岩性参数

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)02-0192-06

## Elastic impedance equation based on Fatti approximation and inversion

WANG Bao-li<sup>1</sup>, YIN Xing-yao<sup>1</sup>, ZHANG Fan-chang<sup>1</sup>, Li Ai-shan<sup>2</sup>

(1. Department of Geo-resources and Information, China University of Petroleum (East China), DongYing 257061, China;  
2. International Research Dept. CNOOC Research Center, Beijing 100027, China)

**Abstract** Using Connolly's Elastic Impedance equation for inversion, only P-wave velocity, S-wave velocity and Density information can be obtained directly, then other parameters data such as P-Impedance and S-Impedance can be calculated indirectly, so this conventional inversion method increases one step error which reduces accuracy of the data. We propose a new elastic impedance equation based on the Fatti Zoeppritz approximation to address the conventional inversion method's deficiencies, using this new equation can obtain more accurate reflectivity than Fatti approximation. This equation has been normalized to unify the elastic impedance dimensions at different angles and used for inversion. P- and S-Impedance can be extracted directly from the elastic impedance data of different angles obtained from inversion using the linear relation between P- and S-Impedance and elastic impedance. The application example shows that the P- and S-Impedance extracted using this new method are more stable and correct and can recover the reservoir information very well. The new method is an improvement on the conventional method based on Connolly's equation.

**Keywords** Fatti approximation, elastic impedance inversion, normalization, lithologic parameter

### 0 引言

近年来,为更好地描述地下储层的信息,人们在地球物理反演方面做了许多改进<sup>[1~19]</sup>. 为提高资料的信噪比,有效利用横波的信息,基于 Zoeppritz 方程的 Aki-Richards (1980) 近似, Connolly (1999) 提

出了与角度有关的弹性阻抗方程,它是纵横波速度、密度和入射角度的函数<sup>[20]</sup>. 利用 Connolly 的弹性阻抗方程可反演得到不同角度的弹性阻抗数据体,从这些数据体中可直接提取得到纵横波速度和密度数据体,用提取得到的纵横波速度和密度参数进而可计算得到纵横波阻抗等其它的参数数据体<sup>[21]</sup>.

收稿日期 2007-02-10; 修回日期 2007-05-20.

基金项目 国家 863 课题项目(2006AA0AA102)资助.

作者简介 王保丽,女,1981年生,山东金乡人,在读博士,主要从事地球物理反演方面的研究. (E-mail:wbl727@yahoo.com.cn)

在无噪音的情况下,基于 Connolly 的弹性阻抗公式可反演得到准确的纵横波速度,随着噪音的增加,所得的纵横波速度的误差也随之增加. Mallick 等人也指出,存在 2% 的随机噪音时,用该弹性阻抗公式进行反演已不能提取得到合理的弹性参数<sup>[22~24]</sup>. 实际的地震数据都是有噪音的,有的地震数据的信噪比还很低,由此反演得到的弹性阻抗数据难免也是有误差的. 因此,用有误差的弹性阻抗数据体所得到的纵横波速度也存在误差,那么由有误差的纵横波速度进而得到的其它参数的准确性也是令人怀疑的. 为得到更加准确的反映地下储层信息的岩石物理参数数据体,希望能直接得到纵横波阻抗等其它的参数数据体.

Zoeppritz 方程的 Fatti 近似是纵横波阻抗的函数<sup>[18]</sup>,本文基于该近似得到可直接反演纵横波阻抗的弹性阻抗公式,进而用该公式进行弹性阻抗反演,直接获得纵横波阻抗数据体.

## 1 基于 Fatti 波阻抗近似的弹性阻抗公式的推导

Zoeppritz 方程的 Fatti 波阻抗近似式为<sup>[25]</sup>:

$$R(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \tan^2\theta) \frac{\Delta I_P}{I_P} - 4\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \sin^2\theta \frac{\Delta I_S}{I_S} - \left(\frac{1}{2}\tan^2\theta - 2\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \sin^2\theta\right) \frac{\Delta\rho}{\rho}, \quad (1)$$

其中  $I_P = \alpha\rho$  是声波阻抗,  $I_S = \beta\rho$  是横波阻抗,  $\Delta I_P/2I_P$  是垂直入射的 P 波阻抗反射系数,  $\Delta I_S/2I_S$  是垂直入射的 S 波阻抗反射系数,  $\theta$  是入射角的值. 与其它近似公式相比,该公式适用于高角度的入射角(小于 50 度).

### 1.1 基于 Fatti 波阻抗近似的推导

对波阻抗的小到中等变化,用波阻抗的对数值表示的反射系数是准确的.

$$R(\theta) \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta EI}{EI} \approx \frac{1}{2} \Delta \ln(EI),$$

式中  $EI$  是弹性阻抗.

以公式(1)为基础,可得:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Delta \ln(EI) &= \frac{1}{2}(1 + \tan^2\theta) \frac{\Delta I_P}{I_P} \\ &\quad - 4\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \sin^2\theta \frac{\Delta I_S}{I_S} \\ &\quad - \left(\frac{1}{2}\tan^2\theta - 2\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \sin^2\theta\right) \frac{\Delta\rho}{\rho}. \end{aligned}$$

用  $K$  表示  $\beta^2/\alpha^2$ , 重新整理可得:

$$\frac{1}{2} \Delta \ln(EI) = \frac{1}{2}(1 + \tan^2\theta) \frac{\Delta I_P}{I_P} - 4K \sin^2\theta \frac{\Delta I_S}{I_S}$$

$$- \left(\frac{1}{2}\tan^2\theta - 2K \sin^2\theta\right) \frac{\Delta\rho}{\rho},$$

接下来用  $\Delta \ln(x)$  来替换  $\Delta x/x$ ;

$$\begin{aligned} \Delta \ln(EI) &= (1 + \tan^2\theta) \Delta \ln(I_P) \\ &\quad - 8K \sin^2\theta \Delta \ln(I_S) \\ &\quad - (\tan^2\theta - 4K \sin^2\theta) \Delta \ln(\rho). \end{aligned}$$

若将  $K$  作为常数就可以将所有的项合并成  $\Delta S$  的形式.

$$\begin{aligned} \Delta \ln(EI) &= \Delta \ln I_P^{(1+\tan^2\theta)} + \Delta \ln I_S^{(-8K \sin^2\theta)} \\ &\quad + \Delta \ln \rho^{(4K \sin^2\theta - \tan^2\theta)} \\ &= \Delta \ln (I_P^{(1+\tan^2\theta)} I_S^{(-8K \sin^2\theta)} \rho^{(4K \sin^2\theta - \tan^2\theta)}). \end{aligned}$$

最后取积分并指数化(即:替换掉等式两边的微分项和对数项),把积分常数设为 0:

$$EI = I_P^{(1+\tan^2\theta)} I_S^{(-8K \sin^2\theta)} \rho^{(4K \sin^2\theta - \tan^2\theta)}, \quad (2)$$

把上式写成下面的形式为:

$$EI = I_P^a I_S^b \rho^c,$$

其中

$$a = 1 + \tan^2\theta$$

$$b = -8K \sin^2\theta$$

$$c = 4K \sin^2\theta - \tan^2\theta.$$

### 1.2 弹性阻抗方程的标准化

与 Connolly 公式类似,上面推导出的公式也存在求取的弹性阻抗 ( $EI(\theta)$ ) 值随角度的变化在量纲尺度上有很大变化的问题. 这不利于进行不同角度的  $EI(\theta)$  值之间的对比以及与波阻抗 (AI) 值的对比. 在综合分析 AI 与 EI 时,首先要将 EI 变换到 AI 的量纲尺度上,这给实际工作带来了不便<sup>[26]</sup>. 为了克服这个问题,消除入射角变化对量纲尺度的影响,要对推导出的弹性阻抗公式进行标准化处理.

为了消除入射角变化对尺度的影响,引入了三个参考常数  $I_{P_0}$ 、 $I_{S_0}$  和  $\rho_0$ , 并把 EI 函数[方程(2)]修改为:

$$EI(\theta) = \left(\frac{I_P}{I_{P_0}}\right)^a \left(\frac{I_S}{I_{S_0}}\right)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^c. \quad (3)$$

如果这些常数值被定为  $I_P$ 、 $I_S$  和  $\rho$  曲线的平均值,这样求得的  $EI(\theta)$  就会在单位 1 附近变化. 这一修改去掉了函数对尺度的依赖性并使函数更加稳定. 如果用因子  $I_{P_0}$  进一步标定这个函数, EI 的尺度变得与 AI 一样,并且  $EI(\theta)$  能够正确地计算出声阻抗在  $\theta=0^\circ$  时的值  $I_P = \alpha\rho$ .

$$EI(\theta) = I_{P_0} \left[ \left(\frac{I_P}{I_{P_0}}\right)^a \left(\frac{I_S}{I_{S_0}}\right)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^c \right], \quad (4)$$

其中

$$a = 1 + \tan^2\theta$$

$$b = -8K \sin^2\theta$$

$$c = 4K \sin^2\theta - \tan^2\theta.$$

为获得 EI 的新的归一化形式,已有效地用因子  $I_{P_0}^{1-a} I_{S_0}^{-b} \rho^{-c}$  标定了原先定义的 EI[方程(2)]. 由于反射系数定义为

$$R(\theta) = \frac{EI(\theta)_{n+1} - EI(\theta)_n}{EI(\theta)_{n+1} + EI(\theta)_n}.$$

从弹性阻抗的反射系数定义中可推演出把标定因子应用到 EI 中并没有改变计算的反射系数,方程(4)关于反射系数的计算精度与(2)式计算的结果相同. 因为标定因子既在方程的分子上又在方程的分母上出现. 因此这个修改既不能减小也不能提高 EI 函数的精确度. 对 EI 的归一化使  $EI(\theta)$  值与 AI 在同一个尺度上,既可以与 AI 相对比,也可以进行不同入射角情况下的 EI 值的对比,最终得到一些有意义的属性信息.

从 EI 的新的归一化形式[方程(4)]中推算出对于  $I_P$ 、 $I_S$  和  $\rho$  的值分别等于  $I_{P_0}$ 、 $I_{S_0}$  和  $\rho_0$  的地层,这个地层的弹性阻抗随着入射角  $\theta$  的增加保持为常数值  $I_{P_0} = \alpha_0 \rho_0$ ,即该地层的声阻抗值. 因此,可以通过让  $I_{P_0}$ 、 $I_{S_0}$  和  $\rho_0$  的值等于储层地层的特征值而使储层顶部岩石的 EI 函数值保持为常数<sup>[27]</sup>. 这样, EI 函数就不会随着  $\theta$  剧变,从而实现不同的 EI 值的直观对比.

### 1.3 反射系数的对比

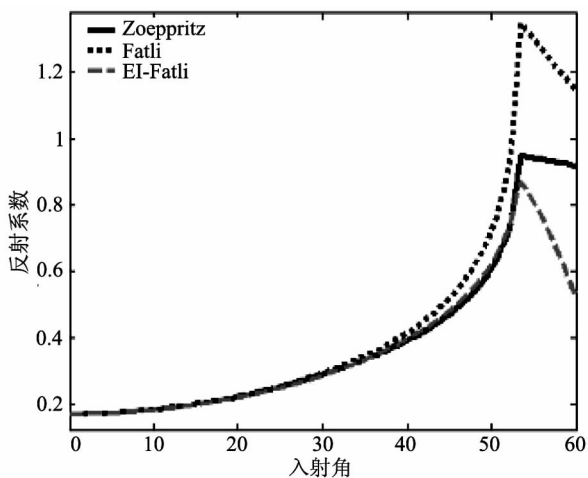


图1 负波阻抗界面时,用精确的 Zoeppritz 方程(粗的实线)、Fatti 近似(点线)和以 Fatti 近似为基础推导出的弹性阻抗(短虚线)计算的反射系数.

Fig. 1 At negative impedance interface, the reflectivity calculated using exact Zoeppritz equation (thick real line)、Fatti approximation (dash dotted line)、elastic impedance based on Fatti approximation (short dashed line).

下面以 Ostrander(1984)所构造的含气砂岩模型<sup>[28]</sup>为例,对新的弹性阻抗公式进行定量分析,模型参数如表 1 所示.

表 1 Ostrander(1984)的三层含油气砂岩与页岩模型  
Table 1 Ostrander (1984) three layers gas-bearing sandstone and shale model

地层	$\alpha$ (m/s)	$\beta$ (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma$	$\alpha/\beta$
页岩	3048	1244	2.400	0.4	2.45
含气砂岩	2438	1625	2.140	0.1	1.50
页岩	3048	1244	2.400	0.4	2.45

在上述含气砂岩模型中,将上覆页岩、下伏含气砂岩的反射界面称为负波阻抗界面,而上覆砂岩、下伏页岩的反射界面为正波阻抗界面. 以该模型为基础,分别用精确的 Zoeppritz 方程、Fatti 近似和以 Fatti 近似为基础推导出的弹性阻抗计算了不同界面处的反射系数.

从下面两幅图中可以看出,由弹性阻抗公式计算得到的反射系数与用精确的 Zoeppritz 方程计算出的反射系数匹配很好.

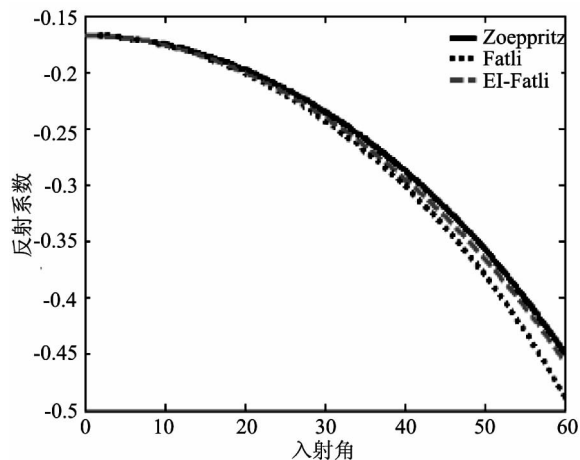


图2 正波阻抗界面时,用精确的 Zoeppritz 方程(粗的实线)、Fatti 近似(点线)和以 Fatti 近似为基础推导出的弹性阻抗(短虚线)计算的反射系数.

Fig. 2 At positive impedance interface, the reflectivity calculated using exact Zoeppritz equation (thick real line)、Fatti approximation (dash dotted line)、elastic impedance based on Fatti approximation (short dashed line).

## 2 反演实例分析

### 2.1 弹性阻抗反演流程

用公式(4)进行的弹性阻抗反演与基于 Connolly 的弹性阻抗方程进行的反演相类似. 它们都需要经过地震资料处理、测井资料处理、角度子波的提取和弹性阻抗反演几部分<sup>[29]</sup>, 具体的反演流程如下图所示:

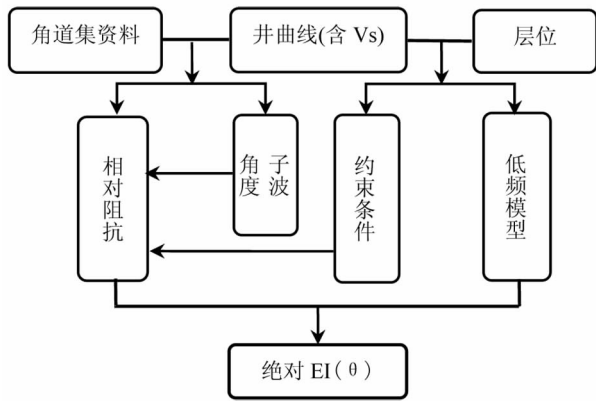


图 3 弹性阻抗反演流程图

Fig. 3 The flow of elastic impedance inversion

(1)地震资料处理. 在进行弹性阻抗反演之前必须通过建立不同角度的角度道集而将地震数据的偏移距数据体转化为角度道集数据体(部分角道集叠加);

(2)测井资料处理. 为了约束角道集的反演, 在对测井资料进行处理时, 可用已有的声波、剪切波、密度曲线和储层地震数据所能提供的角度根据方程(4)计算出井旁道弹性阻抗(EI)伪测井曲线. 在弹性阻抗反演处理过程中, 弹性阻抗伪测井曲线除用来作为约束外, 还可以弥补地震波传播过程中损失的频率成分;

(3)角度子波的提取. 考虑到子波随炮检距的变化, 做弹性阻抗反演时, 要对每个角度道集分别提取不同的角度子波;

(4)弹性阻抗反演. 在进行弹性阻抗反演之前, 需要用角道集部分叠加资料与井旁道相应入射角的弹性阻抗并利用解释的地震层位作为控制进行外推, 从而建立不同角度的低频模型; 用弹性阻抗曲线与角度子波相对应的角道集部分叠加数据体进行约束, 这样可以获得相对弹性阻抗. 与实际的绝对波阻抗相比, 相对弹性阻抗还缺少低频成分, 因此需将前面得到的低频成分加入到相对弹性阻抗中.

### 2.2 岩性参数的提取

提取岩性参数需对方程(4)进行求解, 由于此方程式是非线性的, 若直接求解, 势必带来不少的麻烦, 为此可将方程(4)进行变换, 使之成为线性形式. 将方程(4)两边取对数, 则有:

$$\ln \frac{EI(\theta)}{A_0} = a(\theta) \ln \frac{I_P}{I_{P_0}} + b(\theta) \ln \frac{I_S}{I_{S_0}} + c(\theta) \ln \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (5)$$

在角度相同的情况下, 同一岩石物性参数在各采样点处所对应  $a(\theta)$ 、 $b(\theta)$ 、 $c(\theta)$  相同, 因此, 上式变为:

$$\ln \frac{EI(t, \theta)}{A_0} = a(\theta) \ln \frac{I_P(t)}{I_{P_0}} + b(\theta) \ln \frac{I_S(t)}{I_{S_0}} + c(\theta) \ln \frac{\rho(t)}{\rho_0}. \quad (6)$$

采用井旁道弹性阻抗曲线和  $\lambda$ 、 $\mu$ 、 $\rho$  曲线, 对某个角度的各采样点可得到系数  $a(\theta)$ 、 $b(\theta)$ 、 $c(\theta)$ . 因此对三个不同角度的弹性阻抗数据, 可得到 9 个常数  $a(\theta_1)$ 、 $b(\theta_1)$ 、 $c(\theta_1)$ ;  $a(\theta_2)$ 、 $b(\theta_2)$ 、 $c(\theta_2)$ ;  $a(\theta_3)$ 、 $b(\theta_3)$ 、 $c(\theta_3)$ . 将它们分别带入(6)式, 可得:

$$\left\{ \begin{aligned} \ln \frac{EI(t, \theta_1)}{A_0} &= a(\theta_1) \ln \frac{I_P(t)}{I_{P_0}} + b(\theta_1) \ln \frac{I_S(t)}{I_{S_0}} \\ &\quad + c(\theta_1) \ln \frac{\rho(t)}{\rho_0}, \\ \ln \frac{EI(t, \theta_2)}{A_0} &= a(\theta_2) \ln \frac{I_P(t)}{I_{P_0}} + b(\theta_2) \ln \frac{I_S(t)}{I_{S_0}} \\ &\quad + c(\theta_2) \ln \frac{\rho(t)}{\rho_0}, \\ \ln \frac{EI(t, \theta_3)}{A_0} &= a(\theta_3) \ln \frac{I_P(t)}{I_{P_0}} + b(\theta_3) \ln \frac{I_S(t)}{I_{S_0}} \\ &\quad + c(\theta_3) \ln \frac{\rho(t)}{\rho_0}. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

利用方程组(7)可获得各道任一采样点处的  $I_P$ 、 $I_S$ 、 $\rho$ .

### 2.3 实例分析

利用上面的方法对胜利油田某地区的实际地震资料进行了应用研究, 该地区的气藏储层为沙河街组三角洲前缘相块状砂岩, 主要以河口坝组成的厚层块状砂岩为主.

本文首先分别采用 Connolly 方程和新的弹性阻抗方程这两种方法对该地区的实际测井资料进行了研究, 图 4 是在无噪音情况下分别用两种方法直接由弹性阻抗获得的纵横波速度和纵横波阻抗. 图 5、图 6 是在噪音分别为 2% 和 5% 时获得的.

从图 4~图 6 可以看出: 在无噪音的情况下, 两

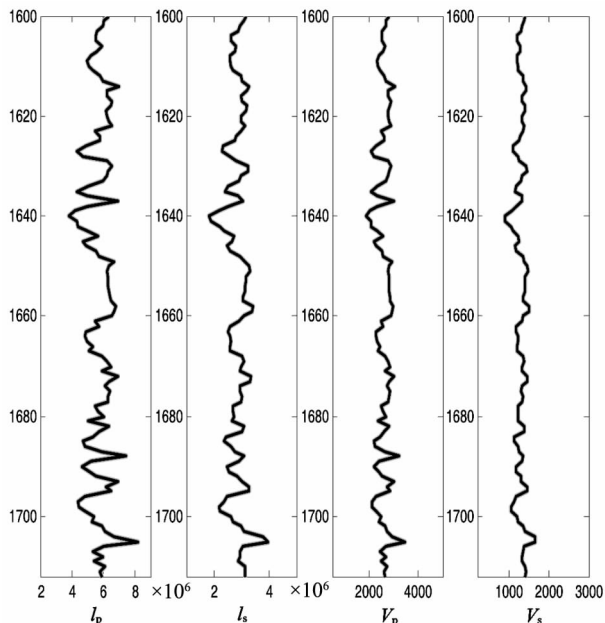


图4 无噪音时,用新方法直接获得的纵横波阻抗和用传统方法直接获得的纵横波速度和密度,粗的绿线是初始井曲线,细的黑线是反演得到的井曲线。

Fig.4 When noise-free, the P- and S- Impedance obtained directly using the new method and the P- and S-velocity using the conventional method, thick green logs are original logs, thin black logs are inverted logs.

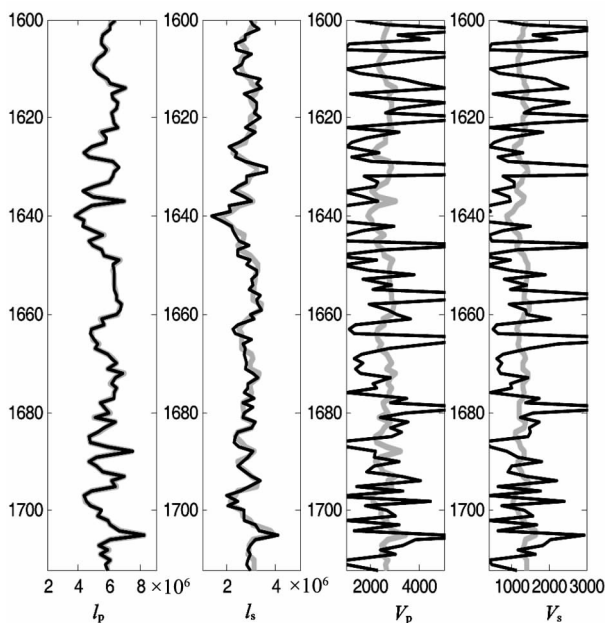


图5 加入2%的噪音时,用新方法直接获得的纵横波阻抗和用传统方法直接获得的纵横波速度和密度,粗的绿色曲线是初始井曲线,细的黑色曲线是反演得到的井曲线。

Fig.5 With 2% noise, the P- and S- Impedance obtained directly using the new method and the P- and S-velocity using the conventional method, thick green logs are original logs, thin black logs are inverted logs.

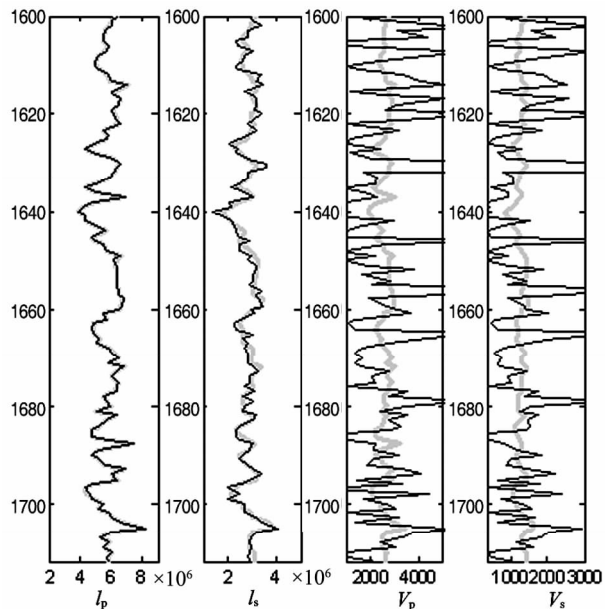


图6 加入5%的噪音时,用新方法直接获得的纵横波阻抗和用传统方法直接获得的纵横波速度和密度,实线是初始井曲线,虚线是反演得到的井曲线。

Fig.6 With 5% noise, the P- and S- Impedance obtained directly using the new method and the P- and S-velocity using the conventional method, thick green logs are original logs, thin black logs are inverted logs.

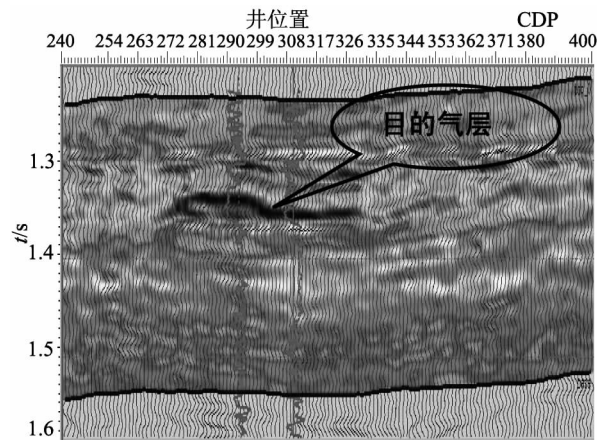


图7 过连井线的纵波阻抗剖面.在井位置处插入了由这个井的纵波声波和密度曲线计算得到的精确的纵波阻抗曲线,可以看出反演结果与精确的井曲线吻合很好.从反演剖面上能识别出含气储层。

Fig.7 An inverted P-Impedance profile through two wells. At the well locations, the exact P-Impedance log calculated from the P-wave sonic, S-wave sonic, and density curves for this well is inserted. Note that the inversion results at the well locations fit well with the exact curve.

种方法都可以很好地反演出初始井曲线,随着噪音的增加,用新的方法反演出的纵波阻抗误差仍然很小,横波阻抗开始有些误差,这主要是由于横波阻抗的指数较小的原因。而用传统方法在有 2% 的噪音时,反演出的纵横波速度就已经有了很大的偏差。

由测井信息可知该地区的气层有低的  $I_P$  值,目的气藏储层在 1.35 s 附近,图 7 显示的是从反演得到的弹性阻抗数据体中直接提取得到的纵波阻抗数据体剖面,从图中可明显看出目的气层的位置。

### 3 结 论

(1)以 Fatti 近似为基础提出了一种用纵横波阻抗表示的新的弹性阻抗公式,并对该公式进行了详细推导。为使不同角度弹性阻抗间的量纲统一,对这个公式进行了标准化处理,用标准化后的公式进行反演,可以直接从反演得到的弹性阻抗体中提取得到纵横波阻抗剖面。

(2)对 Ostrander 的含气砂岩模型进行的分析表明用推导出的弹性阻抗公式可计算得到的稳定的反射系数,所得结果比用 Fatti 近似计算得到的反射系数更加准确。

(3)在相同的噪音情况下,用该弹性阻抗公式进行反演可得到比纵横波速度更准确、可靠的纵横波阻抗数据体,用所得的反演结果可进一步预测地下储层特性,为地震勘探开发提供更加准确、可靠的地下储层信息。

(4)用 Connolly 的弹性阻抗公式来反演阻抗数据体,需要经过两步反演,首先反演出纵横波速度,然后才可计算得到阻抗数据,而且由于累积了误差使得所得结果的准确性降低,而利用本文的公式只需经过一步即可反演得到阻抗数据体,而且所得的结果也更加准确可靠。

### 参 考 文 献 (References):

[1] 张霖斌,姚振兴.层状介质的声波波动方程反演[J].地球物理学进展,2000,15(2):22~29.  
 [2] 杨辉,戴世坤,宋海斌,等.综合地球物理联合反演综述[J].地球物理学进展,2002,17(2):262~271.  
 [3] 敬荣中,鲍光淑,陈绍裘.地球物理联合反演研究综述[J].地球物理学进展,2003,18(3):535~540.  
 [4] 杨立强,宋海滨,郝天姚.基于 BP 神经网络的波阻抗反演及应用[J].地球物理学进展,2005,20(1):34~37.  
 [5] 宋维琪.利用多分辨率小波网络方法进行伪井反演[J].地球物理学进展,2005,20(1):38~41.  
 [6] 姜秀娣,刘洋,魏修成,等.一种同时反演纵波速度和泊松比的方法[J].地球物理学进展,2005,20(2):314~318.

[7] 杨光大,陈湛文.地震资料波阻抗多尺度融合反演[J].地球物理学进展,2005,20(3):718~723.  
 [8] 马昭军,刘洋.地震波衰减反演研究综述[J].地球物理学进展,2005,20(4):1074~1082.  
 [9] 张宏兵,尚作萍,杨长春,段秋梁.波阻抗反演正则参数估计[J].地球物理学报,2005,48(1):181~188.  
 [10] 李景叶,陈小宏,郝振江,芮振华.多波时移地震 AVO 反演研究[J].地球物理学报,2005,48(4):902~908.  
 [11] 卢明辉,唐建侯,杨慧珠,胡彬.正交各向异性介质 P 波走时分析及 Thomsen 参数反演[J].地球物理学报,2005,48(5):1167~1171.  
 [12] 王云专,杨立伟,李素华.剩余时差校正及泊松比反演[J].地球物理学进展,2006,21(1):214~218.  
 [13] 蒋鸿亮,陈湛文,陈小宏.高分辨率 AVO 反演技术研究[J].地球物理学进展,2006,21(2):478~482.  
 [14] 苑书金,于常青.各向异性介质中的弹性阻抗及其反演[J].地球物理学进展,2006,21(2):520~523.  
 [15] 张宏兵,杨长春,尚作萍.基于软约束模式的波阻抗反演[J].地球物理学进展,2006,21(3):837~844.  
 [16] 王德利,何樵登,韩立国.单斜介质中方位 NMO 速度 Thomsen 参数反演方法研究[J].地球物理学报,2006,49(1):249~255.  
 [17] 徐海浪,吴小平.电阻率二维神经网络反演[J].地球物理学报,2006,49(2):584~589.  
 [18] 陈勇,韩波.时间推移地震反演的连续模型与算法[J].地球物理学报,2006,49(4):1164~1168.  
 [19] 吴建平,明跃红,王榕楠.川滇地区速度结构的区域地震波形反演研究[J].地球物理学报,2006,49(5):1369~1376.  
 [20] Connolly P. 1999. Elastic impedance [J]. The Leading Edge, 1999, 18(4):438~452.  
 [21] 印兴耀,袁世洪,张繁昌.从弹性波阻抗中提取岩石物性参数 [A].CPS/SEG 2004 国际地球物理会议论文集[C],CPS/SEG 2004 国际地球物理会议,北京,2004,河北:中国石油学会物探专业委员会及美国地球物理学家学会,2004:788~790.  
 [22] Mallick, et al. Hybrid seismic inversion: A reconnaissance exploration tool [J]. 1999, SEG Expanded Abstracts.  
 [23] Mallick S, Huang X, Lauve J, Ahmad R. Hybrid seismic inversion: a reconnaissance tool for deepwater exploration [J]. The Leading Edge, 2000, 1230~1237.  
 [24] Mallick S, Western G, Houston T. U. S. AVO and elastic impedance [J]. The Leading Edge, 2001, 1094~1104.  
 [25] Jan L F, George C S, Peter J V, Peter J S, Philip R L. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique [J]. Geophysics, 1994,59(9):1362~1376.  
 [26] 倪逸.弹性波阻抗计算的一种新方法[J].石油地球物理勘探,2003,38(2):147~150,155  
 [27] Whitcombe D N. Elastic impedance normalization [J]. Geophysics, 2002, 67: 60~62.  
 [28] Ostrander W J. Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence [J]. Geophysics, 1984, 49(10):1637~1648.  
 [29] 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,2005,20(1):89~92.