

基于双相介质的地震流体识别

印兴耀¹, 李超¹, 张世鑫²

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中海油研究总院, 北京 100027)

摘要:为避免间接计算的累积误差,提高储层流体识别精度,根据孔隙弹性介质理论,建立基于弹性阻抗反演的流体因子直接提取方法和固液解耦流体因子叠前地震反演方法。地震波在含烃储层中传播时发生速度频散,根据中观尺度岩石物理理论,提出基于叠前反演的频散属性提取方法,实现频散属性的定量表征,将速度的频散幅度用于流体识别。该方法实际工区应用效果良好。结果表明:以双相介质岩石物理理论为基础建立流体因子,依托叠前地震反演进行储层流体识别的方法精确可靠。

关键词:双相介质; 流体识别; 弹性阻抗; 叠前地震反演; 频散属性

中图分类号:P 631.4 **文献标志码:**A

Seismic fluid discrimination based on two-phase media theory

YIN Xing-yao¹, LI Chao¹, ZHANG Shi-xin²

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: To avoid the cumulative error and to enhance the accuracy of fluid discrimination, a direct extracting approach for fluid factors based on elastic impedance inversion and a novel solid-fluid decoupled way to constructing the fluid factor with poroelastic theory were proposed. Seismic velocity dispersion is persistently observed in hydrocarbon reservoirs. Based on mesoscopic scale rock physics theory, a dispersion-dependent attribute inversion method was developed for reservoir fluid discrimination by using pre-stack seismic data. This method provides quantitative inversion scheme of the dispersion-dependent attributes with high accuracy. Applications on real data show that this fluid discrimination method which combines fluid factor based on the two-phase media theory and pre-stack seismic inversion is more accurate and stable.

Key words: two-phase media; fluid discrimination; elastic impedance; pre-stack seismic inversion; dispersion-dependent attribute

基于地震资料的储层流体识别是一项在岩石物理理论指导下将与孔隙流体有关的异常特性表征为流体因子,利用流体因子实现介质孔隙流体的类型判别的技术。20世纪七八十年代,利用“亮点”现象进行储层预测的技术得到广泛应用^[1-2]。1987年,Smith等^[3]率先提出利用纵横波速度相对变化量的加权叠加判别储层含烃异常,并给出了流体因子的概念。Goodway等^[4]提出了LMR技术,使用拉梅常数和密度进行流体指示的方法。Gassmann^[5]在一定的假设前提下,推导了表征双相介质弹性模量参数的Gassmann方程。Russell等^[6-7]指出Gassmann流体项 f 可以直接作为一项流体因子参与流体检

测。印兴耀等^[8]提出了包含Gassmann流体项的弹性阻抗方程,可以直接反演高精度的流体项。考虑到地震波经过油气储集层后表现出吸收衰减、速度频散等异常现象,可以利用地震资料中所蕴含的频率信息进行储层描述与流体识别。2009年,Wilson等^[9]基于Chapman岩石物理模型^[10]将Smith & Gidlow两项AVO反射系数近似公式看作与频率的函数,给出了频散属性表达式。吴小羊等^[11]利用基于伪平滑Wigner-Ville分布的频谱分析技术和AVO反演结合进行频散属性的AVO反演。笔者首先在双相介质岩石物理理论的基础上,研究基于弹性阻抗反演的流体因子直接提取方法以及等效流体体积

模量的直接反演方法,进一步消除多孔介质固体孔隙效应的影响,最后推导包含频散属性的反射系数近似公式,建立反演矩阵方程及相应的反演方法,进行高精度的储层流体识别。

1 基于振幅信息的流体因子

流体因子(fluid factor)的构建是储层流体识别的关键。流体因子最早由 Smith 等提出,特指由纵横波速度相对变化量权重差运算构成的一种参数。随着研究深入,流体因子这一概念已不单指某种特定的参数,可给予其更为宽泛的含义,即对某研究工区而言,能够对储层孔隙流体类型进行有效区分的参数都可以称为“流体因子”,而对于不同工区,流体因子各异,需通过流体因子敏感性分析进行统计分析。

1.1 Gassmann 流体项

相比常规的基于单相介质理论的流体因子(如泊松比 σ ,拉梅参数 λ 以及 $\lambda\rho$ 等)来说,基于双相介质理论得到的 Gassmann 流体项 f 能够更好地表

征孔隙流体对岩石介质的弹性影响,其主要体现在基于双相介质理论的流体因子受岩石固体骨架等因素的影响要远小于基于单相介质提出的流体因子。

假设固体骨架矿物相同,孔隙中包含水和气,采用流体替代方式计算两者随含水饱和度和孔隙度的变化趋势,结果如图 1(岩石孔隙饱和水和气)所示。通过比较拉梅参数 $\lambda\rho$ 与 Gassmann 流体项 f 随孔隙度和含水饱和度变化的趋势,可以看到孔隙度对 $\lambda\rho$ 的影响远大于孔隙流体类型对其产生的影响,而饱和相同孔隙流体类型的 f 数值虽然也随孔隙度产生一定的畸变,但是对流体类型的表征已经远优于 $\lambda\rho$ 。进一步地,还可比较 $\mu\rho$ 、 I_p 、 $\lambda\rho$ 、 f 、 σ 、 $I_p^2 - cI_s^2$ 和 $\lambda - \mu$ 等流体因子的流体指示系数,图 2 为某研究区实际测井资料统计得到的流体指示系数统计直方图。通过比较可知,Gassmann 流体项 f 对该工区的流体指示较为敏感,说明在该工区利用 f 进行储层流体识别有较大优势。

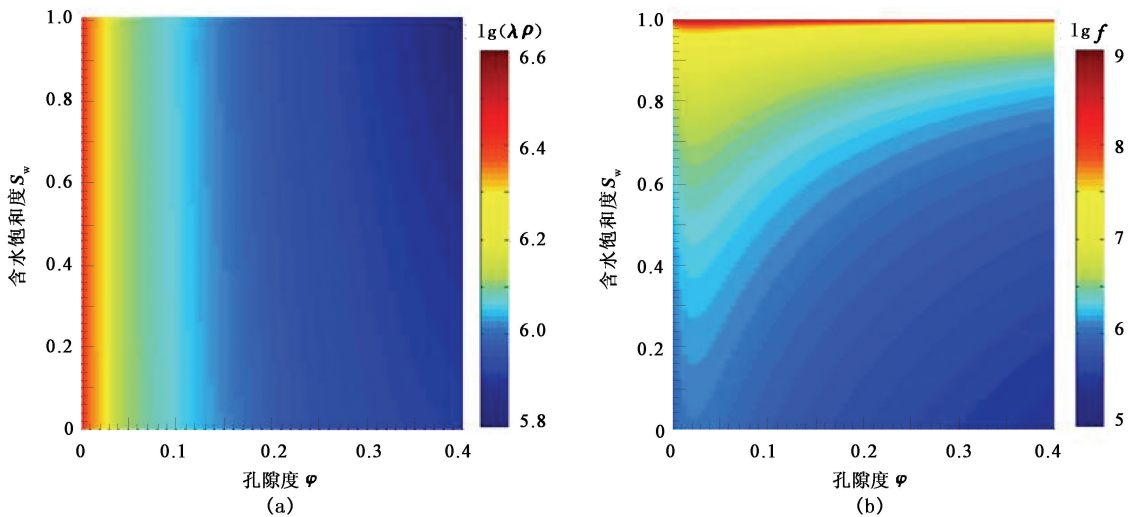


图 1 流体因子随孔隙度与含水饱和度的变化趋势

Fig. 1 Variation of fluid factor with porosity and water saturation

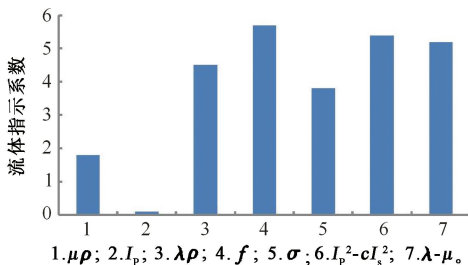


图 2 流体指示系数比较图

Fig. 2 Comparison of fluid factor indication factors

在流体因子叠前地震反演中一般考虑直接反演敏感流体因子,一方面可避免间接计算带来的累积误差^[12];另一方面,在某些情况下,还可以避免无法

反演密度参数带来的误差。

利用弹性阻抗反演方法,流体弹性阻抗方程可以表示为

$$EI(\theta) = EI_0 \left(\frac{f}{f_0}\right)^{a(\theta)} \left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)^{b(\theta)} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{c(\theta)} \quad (1)$$

其中, $a = \left(\frac{1}{2} - \frac{\gamma_{sat}^2}{2\gamma_{dry}^2}\right) \sec^2 \theta$, $b = \frac{\gamma_{dry}^2}{2\gamma_{sat}^2} \sec^2 \theta - \frac{4}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta$, $c = 1 - \frac{\sec^2 \theta}{2}$, f_0 , μ_0 和 ρ_0 分别定义为 f , μ 和 ρ 的平均值,

EI_0 是标准化因子,具体表达式为

$$EI_0 = \rho_0^{1/2} \mu_0^{1/4} f_0^{1/4} \gamma_{sat}^{2/4} (1/(\gamma_{sat}^2/\gamma_{dry}^2 - 1) + 1)^{1/4} \quad (2)$$

由方程(2)可知,当入射角 $\theta=0$ 时,标准化的弹

性阻抗取值为声阻抗 $v_p\rho$, 当入射角非零时, 标准化的弹性阻抗数值也在声阻抗 $v_p\rho$ 附近波动, 从而将 $EI(\theta)$ 数值统一到阻抗量纲, 且保证了后续参数提取的稳定性。利用大、中、小三个角度的部分角度叠加道集分别进行弹性阻抗反演, 反演得到流体弹性阻抗后联立三个角度的阻抗方程即可得到流体因子 f 。

将上述方法应用于胜利油田某工区进行含烃异常检测, 图3是反演得到的 Gassmann 流体项的过井剖面图。结合测井和钻井的解释结果, 图中的储层预测结果与钻遇结果较吻合, 验证了该方法在储层流体识别方面的可靠性。

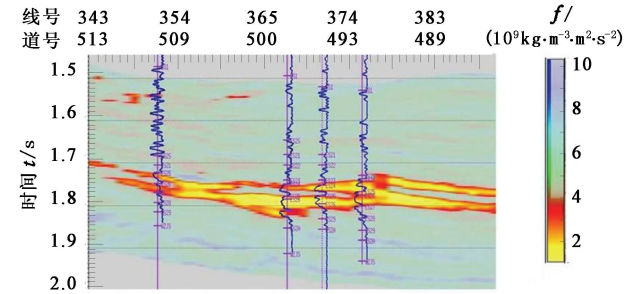


图3 Gassmann 流体项反演剖面
Fig.3 Inverted Gassmann fluid factor

1.2 流体体积模量

Gassmann 流体项本身存在固液两相耦合的问题, 由图1(b)可知, 实际上 f 除受孔隙流体影响之外, 还受到岩石骨架固有的固体效应(岩石基质、孔隙度等)的综合影响, f 随含水饱和度变化趋势受孔隙度影响有一定的畸变, 因此在某些工区的实际应用中还需要注意储层岩石的固体效应(特别是孔隙度)造成的流体识别假象。

图4所示为不同孔隙度与含水饱和度情况下的 K_f 变化趋势。从图中可以看出, K_f 与含水饱和度呈完全线性变化趋势, 且完全不受孔隙度的影响。因此, 如果采用特定的地球物理方法从地震资料中提取出流体体积模量参数 K_f , 将其作为一项流体因子参与流体识别, 即可实现固体骨架与流体弹性效应的解耦, 从而有效地提高了储层孔隙流体识别的可靠性^[13]。

Han 和 Batzle 等^[14-15]通过对碎屑岩进行岩石物理统计, 研究了 Biot-Gassmann 理论中的孔隙流体与岩石骨架的固体效应(孔隙度, 矿物模量等)对岩石模量信息的耦合作用, 提出了突出流体等效体积模量 K_f 的 Gassmann 流体项的经验公式:

$$f = G(\varphi) K_f \quad (3)$$

其中, $G(\varphi) = \frac{(1-K_n)^2}{\varphi}$, $K_n = \frac{K_{dry}}{K_m}$, 增益函数 $G(\varphi)$ 表

示岩石骨架矿物与孔隙度的综合作用。

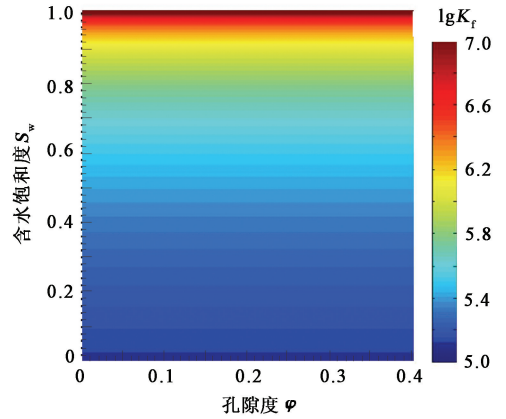


图4 流体体积模量随孔隙度与含水饱和度的变化趋势

Fig.4 Variation of fluid bulk modulus with porosity and water saturation

Nur^[16]通过大量研究指出, 对于小于临界孔隙度的岩石来说, 其干岩石的体积模量和剪切模量可以用与临界孔隙度 φ_c 有关的线性函数表示, 即临界孔隙度模型, 表达式为

$$\begin{cases} K_{dry} = K_m \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_c}\right), \\ \mu_{dry} = \mu_m \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_c}\right). \end{cases} \quad (4)$$

式中, φ_c 为临界孔隙度; K_{dry} 为干岩石的体积模量; μ_{dry} 为干岩石的剪切模量; K_m 为固体矿物基质的体积模量; μ_m 为矿物基质的剪切模量。

将式(3)、(4)带入式(1), 可建立弹性阻抗与流体体积模量之间的关系为

$$EI(\theta) = EI_0 \left(\frac{K_f}{K_{f0}}\right)^{a(\theta)} \left(\frac{f_m}{f_{m0}}\right)^{b(\theta)} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{c(\theta)} \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^{d(\theta)} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= \left(1 - \frac{\gamma_{dry}^2}{\gamma_{sat}^2}\right) \frac{\sec^2 \theta}{2}, \quad b = \frac{\gamma_{dry}^2}{2\gamma_{sat}^2} \sec^2 \theta - \frac{4}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta, \\ c &= 1 - \frac{\sec^2 \theta}{2}, \quad d = \frac{\sec^2 \theta}{2} - \frac{\gamma_{dry}^2}{\gamma_{sat}^2} \sec^2 \theta + \frac{4}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta. \end{aligned}$$

式中, K_{f0} , f_{m0} , ρ_0 和 φ_0 分别定义为 K_f , f_m , ρ 和 φ 的平均值; 标准化因子 EI_0 的具体表达式为

$$EI_0 = (K_f)^{-1/2} f_m \varphi^{-3/2} \rho^{1/2} \gamma_{sat} (\gamma_{sat}^2 - \gamma_{dry}^2)^{1/2} \quad (6)$$

利用方程(5)对4个角度的部分角度叠加道集分别进行弹性阻抗反演, 得到流体弹性阻抗后联立4个角度的阻抗方程即可得到流体体积模量 K_f 。

图5为某研究区反演得到的流体体积模量 K_f 剖面(图中所投曲线为测井解释柱状图, 红色表示气层, 蓝色表示水层, 白色表示泥岩)。其中 2.57 s

与 2.61 s 附近发育两套砂岩,测井资料显示 2.57 s 处砂岩含气,而 2.61 s 处砂岩含水。该地区的油气藏属典型的岩性-构造圈闭,但由于受古地形影响,下覆含水砂岩孔隙度高于上覆含气砂岩的孔隙度,在流体识别中易造成含流体异常假象。为克服孔隙度对流体识别造成的假象,在该工区可使用 K_f 作为一种更为敏感的流体因子进行储层流体识别。通过分析反演结果可知, K_f 与测井解释结果吻合较好,较为准确地反映出了井周围储层含流体特征及分布情况,从而说明了流体体积模量参数在该工区流体识别中的优势。

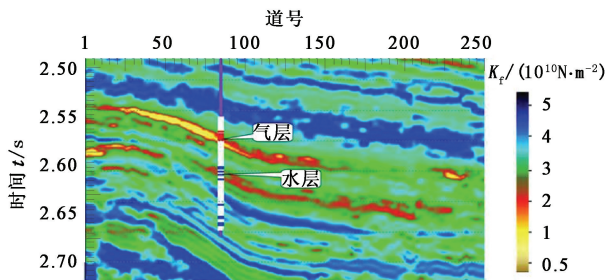


图5 流体体积模量反演结果

Fig.5 Inverted fluid bulk modulus

2 基于频率信息的流体因子

岩石物理实验和实际地震资料证明,地震波在地下介质中传播发生强衰减的过程会伴随能量衰减出现速度频散现象,将速度频散程度表征为频散属性,可以将其作为流体因子用于储层流体识别。

类比于地震波长尺度的“宏观岩石物理模型”与粒间孔隙尺度的“微观岩石物理模型”,远小于地震波长却远大于孔隙颗粒的中间尺度的岩石物理模型称为“中观尺度岩石物理理论”。中观岩石物理模型对于低频段地震波速度频散问题有较好的诠释,以此为基础研究渗透率、含水饱和度以及非均匀性等因素对速度频散的影响,可为储层流体识别提供必要的理论依据。

在此使用 Carcione 等人在 2006 年提出的周期叠置中观 White 模型。为了研究介质孔隙中的流体类型(即含水饱和度)对地震波速度频散的影响,在保持其他参数不变的前提下,改变含水与含气单元体的比重,计算得到的纵波相速度的变化趋势,结果如图 6 所示。从图中可以看到,在地震频带范围内,纵波速度频散的程度随着含水饱和度的降低而减弱,即速度频散的临界频率随含气量的增加而移向高频。通过数值比较发现,随着含水饱和度的降低,介质的低频极限速度先降低

再增加,这与零频率极限情况下的纵波速度变化趋势一致,主要原因即纵波速度受介质模量参数与密度参数的综合影响,含气量达到一定程度之后,密度的变化幅度强于模量参数的变化幅度,且储层含气之后其速度频散程度要比低频极限的纵波速度更为敏感。

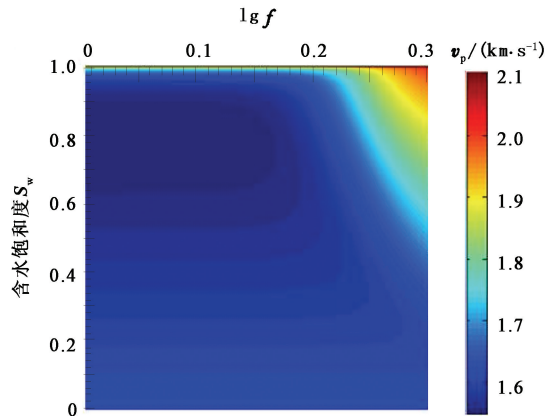


图6 纵波相速度随含水饱和度的变化趋势

Fig.6 Variation of P-wave phase velocity with water saturation

考虑到叠前地震资料包含更加丰富的振幅和频率信息,根据 Wilson 等^[9]提出的反射系数构建方式,从 Shuey 两项反射系数近似公式出发,可以推导出包含表征纵波速度频散程度和频散程度随偏移距变化梯度的两个频散属性的反射系数近似公式,建立相应的反演方程。

假设速度频散导致纵波速度随频率发生变化,而密度不受频率影响,则考虑速度频散效应,对两项 Shuey 近似公式关于频率项 f 进行一阶泰勒展开,得到如下公式(假设 f_0 是地震记录的主频):

$$\Delta R(\theta, f) = (f - f_0) D_{V_p} + D_G (f - f_0) \sin^2 \theta. \quad (7)$$

其中

$$\Delta R(\theta, f) = R_{pp}(\theta, f) - R_{pp}(\theta, f_0);$$

$$D_{V_p} = \frac{\partial}{\partial f} \left(\frac{\Delta V_p}{2V_p} \right); D_G = \frac{\partial G(f)}{\partial f}.$$

式中, D_{V_p} 为纵波速度频散程度; D_G 借鉴 AVO 梯度的意义表征纵波频散程度随偏移距的变化梯度, D_{V_p} 和 D_G 即待反演的频散属性参数。

对频散属性进行反演之前首先需要得到不同频带的叠前道集信息,采用连续小波变换的分频方法对叠前地震道集进行时频分析,选择合适的优势频带后进行分频处理,得到相应频带的叠前道集。

假设 m 个偏移距, n 个采样点和 l 个频率的情况,并将矩阵进行块化处理,得到反演矩阵:

$$\begin{bmatrix} \Delta R_1^1 \\ \Delta R_2^1 \\ \vdots \\ \Delta R_m^1 \\ \Delta R_1^2 \\ \vdots \\ \Delta R_m^2 \\ \vdots \\ \Delta R_m^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F^1 & A_1^1 \\ \Delta F^1 & A_2^1 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta F^1 & A_m^1 \\ \Delta F^2 & A_1^2 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta F^2 & A_m^2 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta F^l & A_m^l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{V_p} \\ D_G \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $\Delta R_{ii}^i (i=1, 2, \dots, l; ii=1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个偏移距, 频率为 f_{ii} 所对应的共 n 个采样点的数据列向量; $\Delta F^i (i=1, 2, \dots, l)$ 为频率 f_i 与 f_0 之差构成的斜对角矩阵; $A_{ii}^i (i=1, 2, \dots, l; ii=1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个偏移距, 频率为 f_{ii} 所对应斜对角系数矩阵; D_{V_p} 和 D_G 分别代表要反演的表征纵波速度频散程度和频散梯度的频散属性列向量。

结合小波变换的基函数与原始地震子波, 利用卷积运算的线性性质构建不同频率地震信息的子波矩阵, 引入反演过程, 得到如下方程:

$$\begin{bmatrix} D_1^1 \\ D_2^1 \\ \vdots \\ D_m^1 \\ D_1^2 \\ \vdots \\ D_m^2 \\ \vdots \\ D_m^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \Delta F^1 & W_1 A_1^1 \\ W_1 \Delta F^1 & W_1 A_2^1 \\ \vdots & \vdots \\ W_1 \Delta F^1 & W_1 A_m^1 \\ W_2 \Delta F^2 & W_2 A_1^2 \\ \vdots & \vdots \\ W_2 \Delta F^2 & W_2 A_m^2 \\ \vdots & \vdots \\ W_l \Delta F^l & W_l A_m^l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{V_p} \\ D_G \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $D_{ii}^i (i=1, 2, \dots, l; ii=1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个偏移距, 频率 f_i 与频率 f_0 对应的振幅信息组成的列向量; $W_i (i=1, 2, \dots, l)$ 为频率 f_i 对应的子波矩阵。

采用最小二乘的反演方法求解式(9), 便可以得到每个采样点上的 D_{V_p} 和 D_G 属性。

图 7 为在某工区利用基于叠前反演结果计算的 Russell 流体因子剖面。根据测井解释柱状图(其中, 红色表示气层, 绿色表示油层, 蓝色表示水层, 白色表示泥岩)可以看到, 2.61 s 和 2.64 s 附近的含油气砂岩储层显示较为明显的低值异常。但是, 从图中可以看到, 深度大于 2.6 s 的砂体的数据区间普遍偏低, 特别是 2.64 s 储层的下倾地层表现为较为明显的低值异常, 依靠单一的 Russell 流体因子无法对其进行有效的油气检测。

图 8 是利用频变 AVO 反演得到的频散属性剖面

面。与测井解释结果(各颜色代表含义同图 7)进行对比可以看到, 2.61 s 和 2.64 s 附近的两套含油气砂岩具有较为明显的频散异常显示, 且与测井解释结果有较好的匹配, 而在 2.64 s 储层下覆地层位置未出现明显的频散异常区域, 这与地质认识是一致的, 进一步降低了含油气预测的多解性。从图中还可以发现, 与常规衰减特征属性不同的是, 图 8 所示的频散属性可以较为清晰地划分储层的纵向分布, 上下边界较清楚, 其主要原因即频散属性在反演过程中消除了子波的带通滤波效应, 其分辨率比与频谱能量有关的衰减特征属性更高。

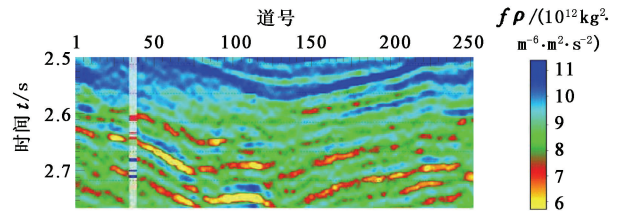


图 7 Russell 流体因子剖面

Fig. 7 Russell fluid factor section

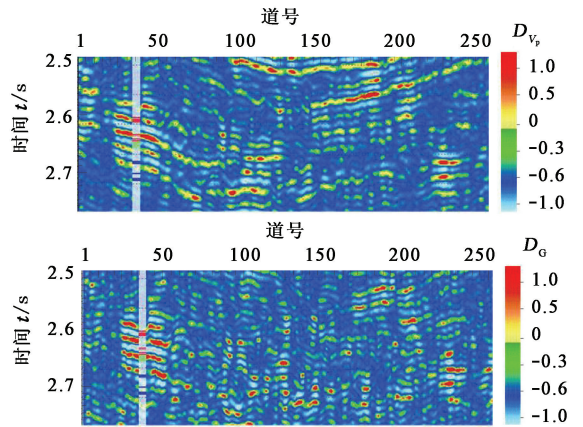


图 8 频散属性剖面

Fig. 8 Dispersion-dependent attribute sections

3 结束语

利用地震资料研究岩石孔隙单元所贮存的流体类型, 主要采用的方式是在岩石物理理论指导下将与孔隙流体有关的异常特性表征为流体因子。以 Gassmann 理论为基础, 建立了直接反演 Gassmann 流体项的方法和基于固液解耦近似的直接反演流体体积模量的方法; 基于中观岩石物理理论建立了速度频散属性的反演方法, 这些方法在实际工区应用中取得了良好的效果。这表明, 以双相介质岩石物理理论为基础, 才能获得对于储层流体有更高的敏感性的流体因子, 更好地克服识别假象, 最终得到精确可靠的流体识别结果。

参考文献:

- [1] BACKUS M M, CHEN R L. Flat spot exploration [J]. *Geophysical Prospecting*, 1975, 23(3):533-577.
- [2] OSTRANDER W J. Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence [J]. *Geophysics*, 1984, 49(10):1637-1648.
- [3] SMITH G C, GIDLOW P M. Weighted Stacking for Rock Property Estimation and Detection of GAS [J]. *Geophysical Prospecting*, 1987, 35(9):993-1014.
- [4] GOODWAY B, CHEN T, DOWNTON J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters; “ $\lambda\rho$ ”, $\mu\rho$, $\lambda\mu$ fluid stack”, from P and S inversions [C/OL]. Expanded Abstract of 67th Annual International SEG Meeting, 1997 [2012-09-01]. <http://dx.doi.org/10.1190/1.188795>.
- [5] GASSMANN F. Über die elastizität poroser medien [J]. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich*, 1951, 96:1-23.
- [6] 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.
- [7] RUSSELL B H, GRAY D, HAMPSON D P. Linearized AVO and poroelasticity [J]. *Geophysics*, 2011, 76(3):C19-C29.
- [8] 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描述和流体识别 [J]. *石油地球物理勘探*, 2010(3):373-380.
YIN Xing-yao, ZHANG Shi-xin, ZHANG Fan-chang, et al. Utilizing Russell approximation based elastic wave impedance inversion to conduct reservoir description and fluid identification [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010(3):373-380.
- [9] WILSON A, CHAPMAN M, LI X Y. Frequency-dependent AVO inversion [C/OL]. Expanded Abstract of 79th Annual International SEG Meeting, 2009 [2012-12-10]. <http://dx.doi.org/10.1190/1.3255572>.
- [10] CHAPMAN M, LIU E, LI X Y. The influence of fluid-sensitive dispersion and attenuation on AVO analysis [J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 167(1):89-105.
- [11] 吴小羊. 基于频谱分析技术的频散 AVO 反演研究 [D]. 武汉:中国地质大学地球物理与空间信息学院, 2010.
WU Xiao-yang. Frequency dependent AVO inversion using spectral decomposition techniques [D]. Wuhan: Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, 2010.
- [12] WANG B L, YIN X Y, ZHANG F C. Lamé parameters inversion based on elastic impedance and its application [J]. *Applied Geophysics*, 2006, 3(3):174-178.
- [13] 张世鑫. 基于地震信息的流体识别方法研究与应用 [D]. 青岛:中国石油大学地球科学与技术学院, 2012.
ZHANG Shi-xin. Methodology and application of fluid identification with seismic information [D]. Qingdao: School of Geosciences, China University of Petroleum, 2012.
- [14] HAN D H, BATZLE M. Gain function and hydrocarbon indicators [C/OL]. Expanded Abstract of 73th Annual International SEG Meeting, 2003 [2011-6-15]. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1817633>.
- [15] HAN D H, BATZLE M. Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities [J]. *Geophysics*, 2004, 69(2):398-405.
- [16] NUR A, MAVKO G, DVORKIN J, et al. Critical porosity: a key to relating physical properties to porosity in rocks [J]. *The Leading Edge*, 1998, 17(3):374-362.

(编辑 修荣荣)