

拉梅常数反演在四维地震监测中的应用

王新红

(中国石化集团公司胜利石油管理局物探公司, 山东 东营 257000)

摘要: 在 4D 地震监测中, 储层特性的变化主要是通过拉梅常数的变化才最终表现为地层速度和实际地震响应的变化, 因此, 在一定条件下, 拉梅常数应当是储层特定变化最直接和灵敏的标志。本文详细叙述了拉梅常数反演的方法, 并将其应用于实际 4D 地震资料的反演和解释中。良好的反演结果表明拉梅常数反演用于 4D 地震监测是切实可行的。

关键词: 拉梅常数; 切变模量; 反演; 4D 地震监测

中图分类号: P315.01 文献标识码: A

0 引言

到目前为止, AVO 技术可以说已经相当成熟了, 尽管 AVO 处理和解释中仍然存在许多难题, 但越来越多的专家学者已经将 AVO 技术作为岩性和油气定量预测的关键技术之一。在油藏四维地震监测中, 储层特性的变化主要表现为储层内孔隙流体类型、饱和度、温度、压力以及岩石孔隙度和渗透率的变化。这些储层参数与岩石压缩性和刚性等基本岩石特性之间存在密切的关系, 而这些岩石特性又与常规的地震属性如振幅和速度等存在着联系。由于岩石的压缩性和刚性主要是通过基本的弹性常数—拉梅常数来描述的, 因此, 拉梅常数常常被应用于各种地质情况的油藏勘探、开发以及详细的油藏特征的描述^[1]。Goodway 曾提出反演 λ^0 和 μ^0 的 LMR 方法, 并得到了同行的推崇。Gray 等人以参数 $\Delta\lambda/\lambda$ 、 $\Delta\mu/\mu$ 和 $\Delta\rho/\rho$ 重新列出了 Zoeppritz 方程 Aki 和 Richards 的近似表达式^[2,3], 它们分别是拉梅常数的反射系数、剪切模量反射系数和密度反射系数。Anderson 和 Gray 采用 $\lambda^0-\mu^0$ 交会图划分地震岩性^[4]。Gray 等在 1999 年研究工作的基础上对 Goodway 的方法进行了改进^[5], 提出了一种新的方法。这种新的方法在不引入密度参数的情况下提取 λ 和 μ , 因此不存在因为密度参数的引入而导致的非单值性。利用该方程进行 AVO 反演使研究人员可以根据常规叠前 P 波地震数据提取反射系数 $\Delta\lambda/\lambda$ 和 $\Delta\mu/\mu$ 。利用叠后振幅反演方法, 可以将这些反射

系数转换得到单独的基本岩石特性 λ 和 μ 。模型和实际应用表明, 该方法预测的 λ 和 μ 近似于 λ 和 μ 的测井结果, 该方法比目前由其他方法得到的结果更为稳健。与此同时, Connolly 提出了一种与入射角有关的弹性波阻抗 (Elastic Impedance, EI) 概念^[6], 这使得平面 P 波在有入射角情况下, 其反射系数有着与垂直入射相似的表达方式。Whitcombe 对弹性阻抗函数进行了修改, 得到了一个新的归一化弹性阻抗方程^[7,8], 这一修改消除了维度随入射角的变化, 使得弹性阻抗的维度和声阻抗趋于一致, 从而使函数更加稳定。该方法在孔隙流体和岩性预测中取得了成功。Santos 等提出了一种求取非零偏移距阻抗估计的新方法^[9], 可以用于非零偏移距地震资料的标定。他们将这种方法称为反射阻抗 (reflection impedance, RI)。模型试验表明, RI 方法能恢复准确的反射系数曲线。当用于生成依赖于角度的阻抗时, 与 EI 方法相比, RI 方法的精度和判别准确度均较高。鉴于地震反演在孔隙流体和岩性预测中的成功应用, 本文针对叠前四维地震资料进行了拉梅常数反演的探索性研究, 希望能够更好地揭示储层动态变化, 进而为四维地震资料解释技术的发展提供指导。

1 拉梅常数反演方法

传统的 AVO 和岩石物理分析是提取和分析纵、横波速度的异常变化来确定孔隙流体和岩性的变化。纵、横波速度和密度对反射系数的重要性, 可

* 收稿日期: 2004-08-25

作者简介: 王新红(1964—), 男(汉族), 山东省莱西县人, 胜利石油管理局物探公司高级工程师, 主要从事石油地震勘探工作。

以从平面波的 Zoeppritz 方程中看出。此外,从弹性波波动方程可知,纵、横波速度主要与岩石密度和弹性模量相关。因此,直接考虑拉梅系数比采用地震波速度能更好地反映岩石物理特征。地震的纵波速度与含孔隙流体岩石特征的关系是靠体变模量 K 联系在一起的,体变模量 K 和纵波速度都包含了最敏感的流体检测因子拉梅系数(λ),但因纵波速度和体变模量中包含切变模量 μ 而减弱了 λ 的敏感性,这可以由关系式 $V_p^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$ 和 $V_s^2 = \mu/\rho$ 看出。AVO 的反演试图包含密度参数,以获取准确的弹性模量参数。但就反演的准确性而言,随未知量的增多反演精度反而降低,从而使方程的解变得不稳健,所提取的参数也更不准确。

实用中可以有 2 种途径获得拉梅系数,一是利用传统的 AVO 反演获得的 AVO 截距和梯度属性来求取岩石的拉梅系数,具体做法如下:

(1) 用反射系数的 A_{ki} 近似式或其他近似式,通过最小化振幅偏差从 NMO 校正后的叠前地震道集提取出零偏移距平面 P 波和 S 波反射振幅;

(2) 逐道采用迭代最小二乘反演获得 P 波阻抗 (I_p) 和 S 波阻抗 (I_s)。其与拉梅常数(λ, μ)和密度 ρ 具有如下关系,

$$I_p^2 = (\rho V_p)^2 = \rho(\lambda + 2\mu), \quad I_s^2 = (\rho V_s)^2 = \rho\mu$$

(3) 利用下式求解压缩模量 λ^0 和剪切模量 μ^0 。

$$\lambda^0 = I_p^2 - I_s^2, \quad \mu^0 = I_s^2$$

第二种方法则建立在弹性波阻抗 EI 反演的基础上,具体做法如下

(1) 采用下面给出的反射系数表达式,由叠前地震道集反演出 EI 系列;

$$R(\theta) = \frac{EI(\theta)_{n+1} - EI(\theta)_n}{EI(\theta)_{n+1} + EI(\theta)_n} \approx \frac{\Delta EI(\theta)}{2EI(\theta)}$$

其中, n 为层序号, $R(\theta)$ 为不同入射角 θ 的反射系数。

(2) 根据 EI 表达式从角度序列拟合出 P 波和 S 波阻抗 I_p 和 I_s ;

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

其中, $EI^2(\theta)$ 是在 P 波入射角 θ 的弹性波阻抗反演结果, K 是 V_p/V_s 的平均值。

(3) 采用与第一种方法相同的做法,换算得到压缩模量 λ^0 和剪切模量 μ^0 。

通常为了提高资料的信噪比,上述 2 种方法均

可以利用角度道集反演。本文主要采用第一种方法。

2 应用实例

2.1 工区概况

试验工区为东部油田一个蒸汽驱稠油油藏。油藏受构造及岩性双重控制,埋深较浅,油层平均埋深为 880~950m。岩石胶结疏松,成岩性差,砾石含量高。油层厚度小,一般为 15~25m,纵向上分为 3 个砂体。地震监测的目的层厚 17m,其上覆有约 50m 厚的玄武岩。蒸汽驱采用的是反九点井网试验井组,即中间一口井注汽,周围 8 口井采油,井网为 $200 \times 283m$,注采井距最短为 200m,最长为 823m。

地震野外共进行了 3 次观测,第 1 次是注汽前的基础测量,后 2 次为注汽后的监测测量,各次测量的时间间隔均为 1 年。测量均采用的是三线七炮一束线的观测方法,每线 40 道,道距 40m,检波器实行点式组合,埋置于 0.4m 的坑中,地下 CDP 网格为 $5 \times 10m$,平面展布面积为 $80 \times 1000m$ 。

2.2 应用效果分析

图 1、图 2 分别显示了研究区内注汽井同一测线,由不同时间测量的地震资料反演获得的 λ_ρ 和 μ_ρ 剖面图,不难看出,在 λ_ρ 剖面中,位于 CDP94~CDP294、时间 0.85s~0.9s 范围内的弹性参数表现出逐年减弱的趋势,且弱异常区域横向展布范围不断扩大。相应,在 μ_ρ 剖面中,表现出弹性参数值明显增大的趋势。进一步对比分析发现,拉梅系数异常区恰好与注汽区相吻合,这说明拉梅系数反演可以较好地反映注蒸汽动态变化范围。

3 结束语

在 4D 地震监测中,储层特性的变化主要是通过弹性参数的变化才最终表现为地层速度和实际地震响应的变化,因此,从某种意义上讲,弹性参数应当是储层特性变化最直接和灵敏的监测标志。本文针对实际 4D 地震资料所进行的弹性参数反演和 4D 地震异常的解释,揭示了弹性参数反演用于 4D 地震监测的可行性。但是,应当指出的是本文的研究仅仅是初步的尝试性的,所得的结论还主要停留在定性解释的基础上,尚未完全定量化。因此,相关的研究工作还有必要进一步深入和继续。

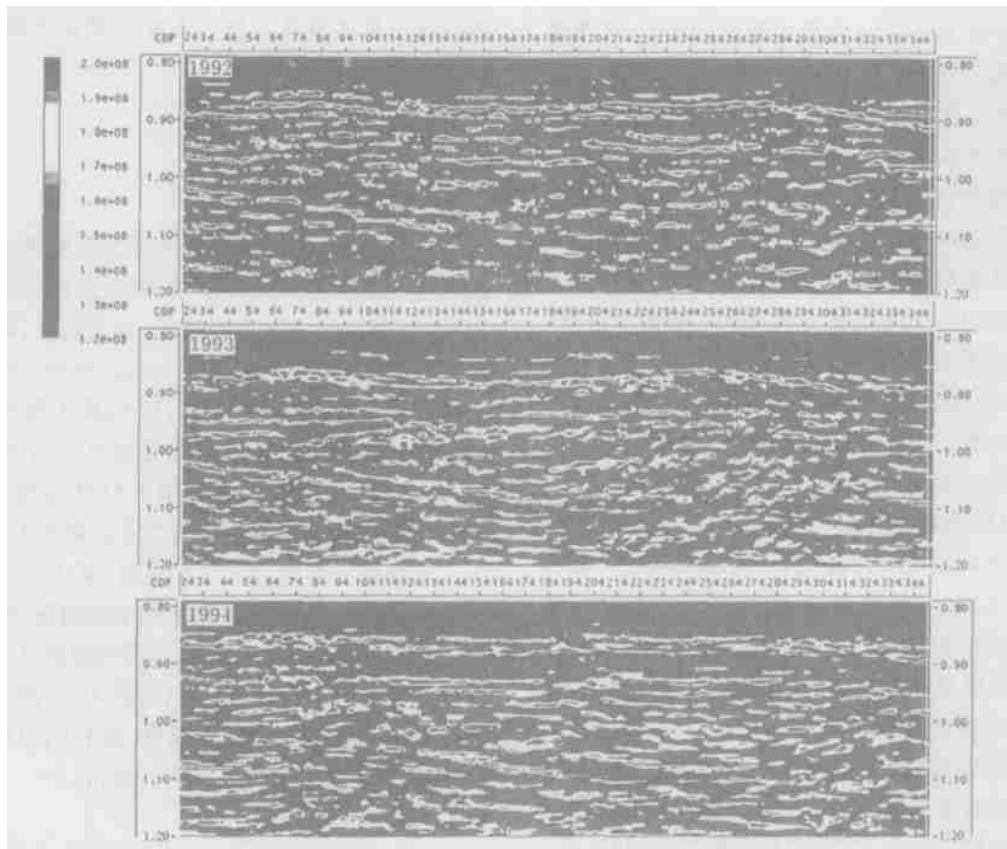


图1 拉梅系数 λ_p 剖面比较图

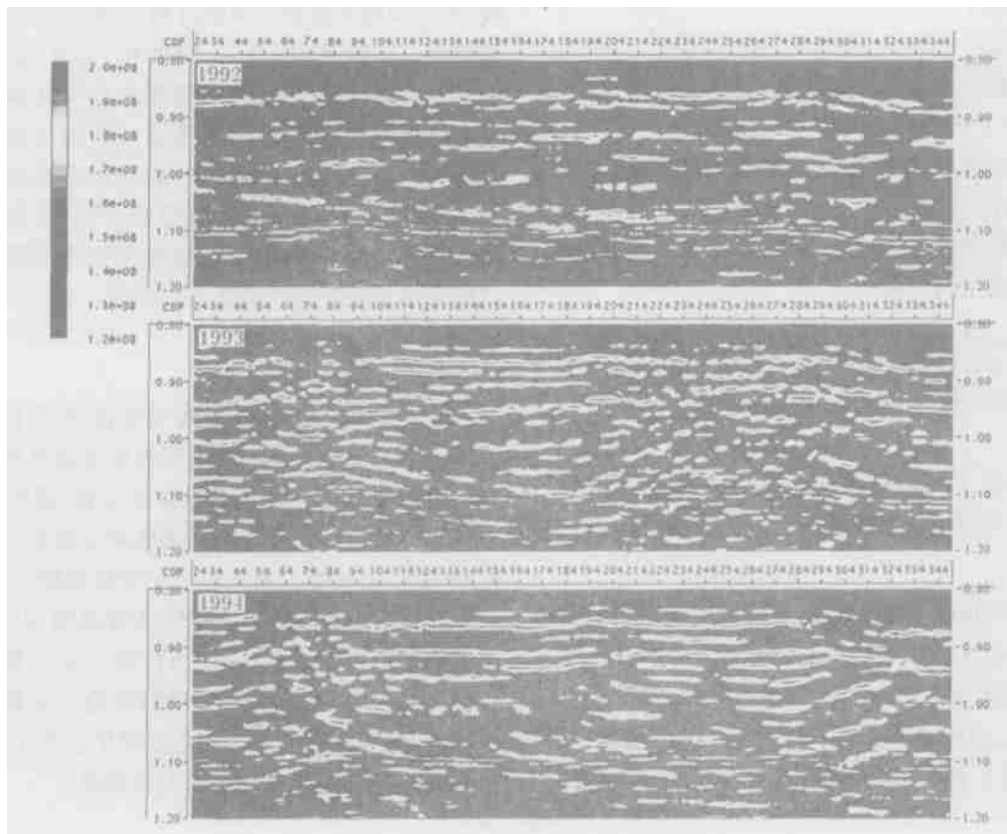


图2 剪切模量 μ_p 剖面比较图

参考文献:

- [1] Goodway, W., Chen, T., and 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[J]. 67th Annual. Internat. Mtg SEG, Expanded Abstract, 1997(1): 183-186.
- [2] Gray, F. D., Goodway, W. N. and Chen, T. Bridging the Gap: Using AVO to detect changes in fundamental elastic constants[J]. 69th Annual Internat. Mtg. SEG., Expanded Abstracts, 1999, 852-855.
- [3] Aki, K., and Richards, P. G. Quantitative seismology[J]. theory and methods. W. H. Freeman and Co., 1980, 144-154
- [4] Anderson P. F., Gray F. D. Using LMR for Dual Attribute Lithology Identification[J]. Expanded Abstract of 71st Annual. Internat. SEG. Mtg. 2001, 201-202.
- [5] Gray D., Elastic Inversion for Lamé Parameters[J], 72nd Annual. Internat. Mtg SEG, Expanded Abstract, 2002, 213-216.
- [6] Connolly P. N. Elastic Impedance[J]. The Leading Edge 1999, 18(4): 438-452.
- [7] Whitcombe D. N. Elastic Impedance Normalization[J]. Geophysics, 2002, 67(1): 60-62.
- [8] Whitcombe D. N, Connolly P. N. Reagan R L, *et al.* Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction[J]. Geophysics, 2002, 67(1): 63-68.
- [9] Santos L. T., Tygel M. and Ramos A. C. B. Reflection Impedance[J]. 67th Annual. Internat. Mtg SEG, Expanded Abstract, 2002, 225-228.

Application of Lamé constant Inversion in 4D Seismic Monitoring

WANG Xin-hong

(Geophysical Exploration and Development Corporation of Shengli Petroleum
Administrative Bureau, SINOPEC, Dongying 257100, China)

Abstract: In 4D seismic monitoring, the variation of reservoir features is mainly indicated by the changes of Lamé constant, and eventually represented as velocity of layer and seismic response. Hence, Lamé constant should be the most direct and sensitive indication for the variation of reservoir features under certain condition. In the paper, inversion methods of Lamé constant are introduced and used actually in the inversion of 4D seismic monitoring data. The results show that it is feasible to use Lamé constant inversion into 4D seismic monitoring.

Key words: Lamé constant; shear modulus; inversion; 4D seismic monitoring