

AVO 技术进展

宋建国¹, 王艳香¹, 乔玉雷², 王 慧²

(1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 东营 257061)

(2. 胜利油田有限公司物探研究院, 东营 257060)

摘 要 AVO 技术是 Zoeppritz 方程在地球物理勘探中的重要应用. 本文在回顾 Zoeppritz 方程及其简化形式的基础上对 AVO 技术的最近发展进行了介绍. AVO 技术是利用地震资料研究岩性和含油气性不可或缺的工具. 近年来 AVO 理论和技术发展呈现新的方向, 主要表现在以下几个方面: 利用多波多分量地震数据进行纵波、横波、转换波的 AVO 分析, 预测储层的含气性和检测裂缝发育; 利用 AVO 技术定量表征岩性和储层的流体性质; 进行 3D AVO 分析研究等. 本文对此进行了介绍, 并对 AVO 技术的前景进行了展望.

关键词 AVO 技术进展, Zoeppritz 方程, 检测裂缝, 储层预测

中图分类号 P631 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2008)02-0508-07

Advances in AVO technique

SONG Jian-guo¹, WANG Yan-xiang¹, QIAO Yu-lei², WANG Hui²

(1. Faculty of Geo-Resource and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

2. Shengli Geophysical Research Institute, SINOPEC, Dongying 257060, China)

Abstract AVO technique is an important application of Zoeppritz's equation in geophysical exploration. After brief reviewing Zoeppritz's equation and its simplified equations, this paper introduces recent development of AVO technique. AVO technique is a vital tool of utilizing seismic data to explore lithology and hydrocarbon. Modern AVO theory and technique present new aspects such as: using P-wave, S-wave and converted wave AVO analysis of multi-component seismic data to predict gas and detect fracture; using AVO technique to characterize lithology and fluid character quantitatively, to progress 3D AVO analysis, and so on. This paper also prospects the future development of AVO technique.

Keywords advances in AVO technique, Zoeppritz's equation, fracture detection, reservoir prediction

0 引 言

地震勘探一直以来都是寻找油气的主要方法. 从人们开始利用地震波研究地球内部结构以来, 地震勘探的理论和应用技术有了很大的发展. 进入 20 世纪 80 年代后, 又出现了一些新的地震方法来探测油气, 利用 AVO 技术直接寻找油气就是其中的一种. AVO 技术研究地震反射振幅随炮检距(或入射角)变化而变化的规律, 用以估算界面泊松比, 推断地层岩性和含油气情况. 从 AVO 技术最初用于识别“亮点”等振幅异常开始到今天, 特别是近几年来, 该技术的发展和应用, 使该技术在油气勘探领域中处于不

可替代的地位.

1 Zoeppritz 方程及其简化形式发展历程

Zoeppritz 方程^[1]是 AVO 技术研究的理论基础. 但由于该方程比较复杂, 一直没能得到直接的应用.

Muskat 和 Meres^[2]发表了经典论文《弹性介质中平面波的反射和透射系数》, 指出“平面波的反射和透射系数是入射角的函数”, 当深度一定时, 入射角和炮检距成正比关系. 由于当时技术条件的限制, 这一发现没有立即在地震勘探工作中得到应用, 但给以后的实际应用打下了基础. Kofoed^[3]研究了泊松比对两个各向同性介质之间的反射界面所产生的

反射系数的影响,给出了将泊松比与反射系数直接联系起来的 Zoeppritz 近似方程. Bortfeld^[4] 利用地层厚度趋于零来逼近单界面的方法计算了平面纵波和透射波的反射系数,给出了区分流体和固体的简化公式. Aki 和 Richards^[5] 给出了用界面上下纵横波速度和密度相对差值表示的纵波反射系数公式.

Hiltemen^[6] 对 Bortfeld 近似公式进行了修改,给出了反射振幅的近似表达式. 如果两层介质密度相同,可以得到更简单的结果,该公式第一次给出了能够满足大多数地球物理介质的近似反射系数,提供了复杂问题简单化的途径.

Ostrander^[7] 用实际模型证明了泊松比对反射振幅的影响. 在 Koefoed 及 Ostrander 等基础上,人们又进行了更深入的研究. Shuey^[8] 给出了用不同角度项表示的反射系数近似公式,用显式方程表达了纵波反射系数与介质弹性参数及入射角之间的关系,使 AVO 异常的识别由定性阶段进入定量阶段,带动了 AVO 技术的深刻变革,是目前应用最为广泛的一种近似方法.

Smith 和 Gidlow^[9] 则对 CMP 道集的加权迭加 AVO 反演方法进行了研究. Hilteman 在 Shuey 近似方程的基础上给出了基于 $\Delta\sigma$ 的反射系数近似表达式,将泊松比及其变化与反射系数建立联系,可以不受约束的提取泊松比等有关岩性参数,并识别流体的存在,使叠前 AVO 分析和反演进入新的阶段.

郑晓东^[10] 杨绍国^[11] 分别给出了平面弹性波反射和透射的统一公式,阐明了转换波和非转换波动力学特征的差异. Mallick^[12] 给出了以射线参数和孔隙流体反射系数表示的反射系数方程,可用于研究孔隙流体的变化. Fatti^[13] 给出了以相对波阻抗表示的近似方程,可以准确的应用于入射角小于临界角的情形. 但是,利用该方法进行参数反演时需要垂直入射的纵、横波反射系数.

Goodway^[14] 给出主要体现拉梅常数对碳烃化合物敏感程度的反射系数公式. Xu 和 Bancroft^[15] 结合 Richards 及 Goodway 等方法利用拉梅常数,体积模量等给出了反映流体异常的各弹性参数的相对变化的隐式反射系数公式,Gray^[16] 则将 Richards 近似表达为拉梅常数的显式形式. Yanghua Wang^[17,18] 利用射线参数和慢度关系对 Richards 近似式进行了变换,利用弹性参数的二次函数给出了反射系数近似式,该近似方法完全采用了速度和密度及其相对变化关系对 Zoeppritz 方程进行表示,利用该近似可以同时估计反射界面两侧纵、横波速

度的变化及其纵、横波速度比值等三个参数.

(以上关于 Zoeppritz 方程简化形式的具体公式请参见本文附录.)

2 AVO 技术最近进展

AVO 技术是一种叠前振幅分析技术,它利用 Zoeppritz 方程或其近似方程对叠前数据进行反演、估算 AVO 属性参数,建立油气检测的 AVO 标志. 在地震数据解释中,AVO 分析起着十分重要的作用,其最终目标是从目的层的地震反射信息中获取弹性参数^[19]. AVO 分析方法包括正演^[20~23] 和反演^[24~26]. 通过 AVO 正演模型得到的属性能为地震资料的采集提供重要的信息. 近年来,广角反射^[27] 作为地震勘探获得野外高质量地震数据的一种重要方法,愈来愈受到人们的关注,研究广角反射波的 AVO 特征有十分重要的意义^[28]. AVO 反演方法是能更为合理地提取隐藏在地震信息中的岩性参数,预测岩性和烃类的重要途径. AVO 分析能提供叠后处理无法提供的油气藏信息,已成为岩性勘探和储层预测的有力手段. 如果在实验和观测数据的基础上进行正演和反演研究,总结规律,还可以帮助我们利用反射地震资料来划分岩性,确定沉积相带,识别储层的含油气变化情况^[29].

目前,AVO 技术在以下几个方面已经获得较为成功的应用:(1)用 AVO 零炮检距剖面做叠后岩性研究;(2)识别亮点、平点和暗点;(3)薄互层情况下,用含油气砂岩的 AVO 特征来预测油气;(4)预测碳酸盐岩储层的孔隙度和流体性质等. 近年来,AVO 的应用又有新的发展,主要表现在以下几个方面:

2.1 利用多波多分量地震数据,进行纵波、横波、转换波的 AVO 分析,预测储层的含气性和检测裂缝发育,是 AVO 技术应用的主要发展方向

描述弹性各向同性介质的最主要的 3 个参数是 P 波速度、S 波速度和密度,利用 P 波 AVO 资料进行反演,只能确定 P 波和 S 波的阻抗参数,如果没有密度参数,就不能准确求取速度参数. 在油气检测和油藏描述中,介质的弹性参数十分重要,这些参数与岩性和流体成分有关. 随着多分量勘探技术的不断发展,高质量的 PS 波资料使真正的弹性波 AVO 反演成为可能. 黄中玉,赵金州^[30] 利用 Larsen 和 Jin 给出的 P 波阻抗和 S 波阻抗函数:

$$R_{pp}(\theta) = \frac{(1 + \tan^2 \theta)}{2} \frac{\Delta I}{I} - 4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta J}{J} - \left[\frac{1}{2} \tan^2 \theta - 2 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (1)$$

$$R_{ps}(\theta, \varphi) = \frac{-\alpha \tan \varphi}{2\beta} \left[\left(1 + 2\sin^2 \varphi - \frac{2\beta}{\alpha} \cos \theta \cos \varphi \right) \times \frac{\Delta \rho}{\rho} - \left(4\sin^2 \varphi - \frac{4\beta}{\alpha} \cos \theta \cos \varphi \right) \frac{\Delta J}{J} \right]. \quad (2)$$

提出了改进的射线追踪法,用多人入射角道集建立反演矩阵,对理论数据进行P波、PS波联合AVO反演,得到相当好的P波层速度、S波层速度和密度参数,为进一步进行实际数据的反演计算奠定了基础.

李景叶等^[31]推导了多波时移地震AVO反演油藏饱和度和压力变化的方程,综合了反射纵波和反射横波信息,有效地压制时移地震数据中的不确定性因素,提高了反演的精度,获得了可信度较高的流体饱和度变化和有效孔隙压力变化,将地震数据从

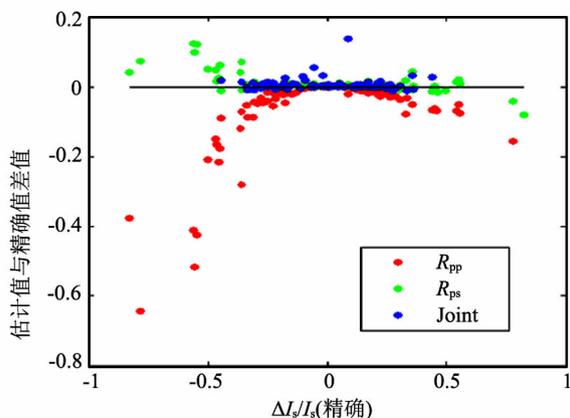


图1 利用线性拟和方法,分别对纵波反射振幅,横波反射振幅以及纵波、转换波联合数据进行反演得到的横波波阻抗误差

Fig. 1 Error in $\Delta I_s / I_s$, as obtained from synthetic R_{pp} amplitudes, R_{ps} amplitudes and joint data by the pseudo-linear theory

利用转换波数据与纵波、横波数据进行反演相比,结果精确度高,效果较好.如果用线性或二次拟和的方法提取较高精度的 R_{ps} ,上述方法的精确度能得到改善,与传统的Aki-Richards方法相比较,反演结果减少了纵波成像的不确定性,获得了更多的岩性信息.利用改进的近似公式提高AVO分析及参数反演的精度依然是AVO理论的研究热点^[34].

2.2 利用AVO特征识别非亮点气层

Ostrander(1984)首先提出利用反射系数随入射角变化识别“亮点”型含气砂岩,Ostrander的发现也标志着实用AVO技术的出现.近年来,AVO技术已不仅仅用于识别亮点气层,人们也开始对非亮点气层的AVO特征进行研究.C. P. Ross^[35]等在

定性描述提高到定量解释.

姜秀娣等^[32]提出一种角度部分叠加资料同时反演纵波速度和泊松比的方法.以角度部分叠加资料为基础,利用地震波振幅随入射角变化与弹性参数间的关系,基于非线性最优化理论,采用测井约束逐道外推技术依次求得角度剖面每个点的纵波和泊松比值,为地震资料的岩性及含气性解释提供了丰富的参数信息.

Chuck Ursenbach, CREWES^[33]通过试验计算发现:利用多分量或联合AVO反演能提高波阻抗估计的精确度(图1,图2).

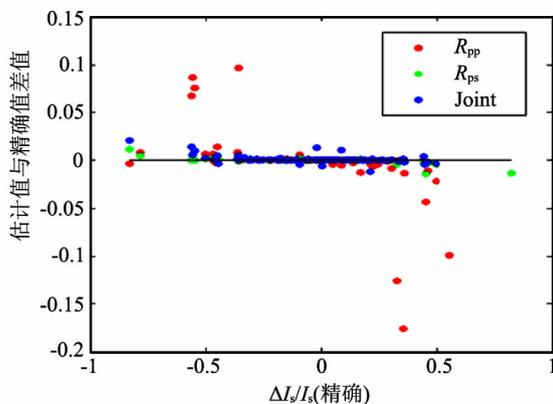


图2 利用二次拟和方法,分别对纵波反射振幅,横波反射振幅以及纵波、转换波联合数据进行反演得到的横波波阻抗误差

Fig. 2 Error in $\Delta I_s / I_s$, as obtained from synthetic R_{pp} amplitudes, R_{ps} amplitudes and joint data by the pseudo-quadratic theory

共AVO属性剖面上分析非亮点地震数据,把非亮点AVO响应分为两类:有相位反转与无相位反转,有相位反转的称为2p类波阻抗含气砂岩,没有相位反转的称为第2类波阻抗含气砂岩.他们利用叠前响应特征,产生了更为有效的AVO属性剖面-FN剖面(在减小背景场响应的同时突出气层响应),FN剖面的计算如下:

$$FN = \sum_{\theta=\theta_f}^{\theta_{\max}} a_f - c_1 \sum_{\theta=0}^{\theta_n} a_n, \quad (3)$$

式中 a_n, a_f 分别为近道、远道振幅叠加, c_1 是由含气砂岩类型决定的常数值, $c_1=0$ 为第2类含气砂岩, $c_1=1$ 为2p类波阻抗含气砂岩. $\theta_n, \theta_f, \theta_{\max}$ 也是由含气砂岩类型、相位极性决定的.对第2类砂岩,由于

近道叠加振幅可以忽略,直接使用远道叠加就很好,而 2p 类气藏响应用近道叠加减去远道叠加,与常规处理后具有低振幅响应特征的剖面相比较,可以识别储层内充气孔隙流体的存在。

2.3 3D AVO 分析技术的应用

近年来,随着大量三维地震数据的采集,国外已有不少三维 AVO 处理和应用的例子。早在 1997

年, Antonio C. B. Ramos 等就介绍了应用于煤层气藏的裂缝检测的 3DAVO 分析技术和模型技术^[36]。我国各油田也开展了 3D AVO 分析研究。在我国松辽盆地北部薄互层地质条件下,成功的应用了 3D AVO 分析技术,在该区检测油气异常,分析识别火山岩储层等^[37],并首次探索性地利用 3D AVO 剖面进行火山喷发期次研究问题。

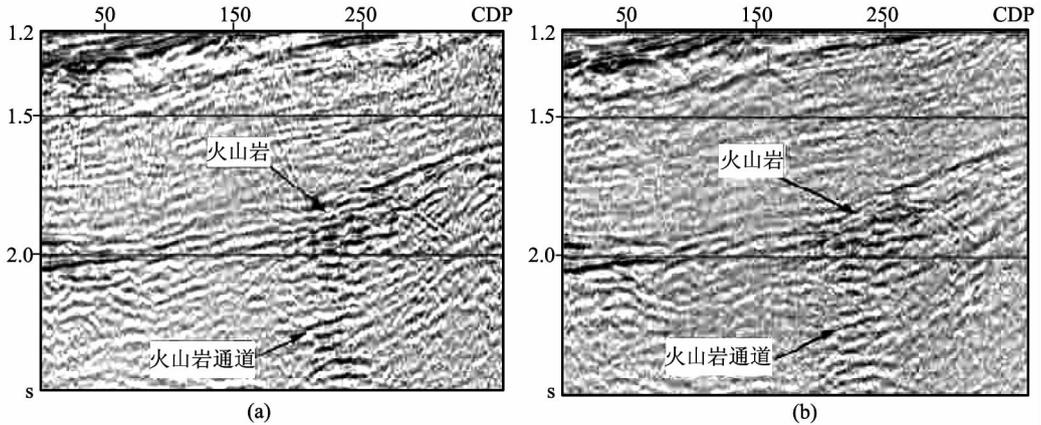


图 3 Inline142 线 AVO 处理剖面

(a)炮检距为 600~1000 m 的叠加剖面; (b)炮检距为 1000~1400 m 的叠加剖面

Fig. 3 Processed AVO section of Inline142

图 3(a)是经三维 AVO 处理的 Inline142 线炮检距为 600~1000 m 的叠加剖面。在地震资料采集中,近炮检距道的能量总是大于远炮检距道的能量。因而,地震反射能量随反射时间的增加应该是逐渐减弱的,然而在该剖面的下部,其能量突然增强。由图 3(b)可看出(即 Inline142 线炮检距为 1000~1400 m 的叠加剖面),随炮检距的增加,反射波能量趋于降低,所以我们可知该处是一高阻抗特殊地质体反射。通过研究该工区宋深 1 井可知,该高速地质体为火山岩,火山喷发的通道显示清楚,而在 Inline142 线的常规叠加剖面上却无此现象。

通过上例,我们认识到:3D AVO 分析技术在识别特殊的地质体(高阻抗)有其独特的优势,其准确程度优于反演和其它叠后属性分析方法。3D AVO 分析技术在大庆地区的成功应用,预示着该技术有着巨大的潜力。

2.4 用叠前偏移数据进行 AVO 研究

常规叠后波阻抗反演方法是在叠后数据体上实现的,不能得到可靠的波阻抗和其他岩性信息^[38],也很少考虑各相异性存在的情况。苑书金^[39]在研究各向同性介质的弹性阻抗的基础上,导出了弱各向

异性介质中的弹性阻抗方程,提出了地震各向异性介质中用弹性阻抗进行储层参数建模的技术路线和框架。

AVO 研究的是振幅随偏移距的变化关系,进行 AVO 分析,关键在于叠前地震数据的精细处理和恢复以及保持相对振幅信息^[40,41]。

理论上,使用偏移^[42]方法,可以在成像点计算出反射系数和反射角,使 AVO 分析结果在地质条件变化不是太大的地区比较理想,但如果选择不正确的偏移参数,就会造成错误的 AVO 信息。各种 AVO 属性,如交绘图等都依赖于叠加道集的相位,交绘图可以分析任意两个 AVO 属性因子的变化规律,分析已钻探区内利用一口井或多口井的 AVO 属性的相似性进行横向预测,确定可能的含油气层范围,预测未知的含气层以及更深入分析探区 AVO 异常的性质,其准确程度影响着数据的亮点标识。影响叠前偏移的因素还有很多,在实际应用中,要尽量消除各种因素的影响,使偏移效果最好,这样,进行 AVO 分析时,才能尽可能的准确。

3 发展前景

经过多年的研究发展,AVO 理论技术已发展的比较成熟,应用范围也越来越广泛.基于中小角度入射的理论方面已经取得了很大进展,在处理及分析方面也取得了长足的进步.近年来,AVO 技术的进展主要涉及 AVO 理论上、AVO 正演模拟技术、AVO 参数反演技术、方位 AVO 分析技术,此外薄互层及非砂岩储层、非亮点气层的 AVO 特征研究等应用方面发展也较快,使得叠前 AVO 属性提取与分析正逐步成为常规工作.随着勘探难度的增大及计算机技术的发展,国外许多公司已经将叠前时间偏移技术逐步和 AVO 处理相结合,国内,随着油气田的进一步勘探和开发,在速度变化大的区域将叠前时间偏移应用于 AVO 资料处理是一种趋势.

三维地震资料 AVO 分析技术比较成熟,但主要适用于小角度和中等角度的入射角,由于距离目标层比较远、观测数据信噪比、分辨率比较低,其效果不是十分理想.近年来,在井间地震资料的处理中发现明显的 AVO 特征.由于井间地震资料信噪比高、分辨率高,为 AVO 技术的发展提供了有利方向.但井间地震中入射角较大,传统 AVO 方法不是十分适用.开展大角度入射下 AVO 理论研究必将推动 AVO 技术的进一步发展.研究 VSP、井间地震等距离目标层近但入射角较大的高信噪比数据 AVO 处理分析技术,是目前 AVO 技术发展的新方向.

附录:

Zoeppritz 方程的简化形式

1. Bortfeld(1961)^[4]利用地层厚度趋于零来逼近单界面的方法计算了平面纵波和透射波的反射系数,给出了区分流体和固体的简化公式:

$$A_{pR} \cong \frac{1}{2} \ln \left[\frac{v_{p2} \rho_2 \cos \theta_1}{v_{p1} \rho_1 \cos \theta_2} \right] + \left[\frac{\sin \theta_1}{v_{p1}} \right]^2 [v_{s1}^2 - v_{s2}^2] \times \left[2 + \frac{\ln \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} \right]}{\ln \frac{v_{p2}}{v_{p1}} - \ln \left[\frac{v_{p2} v_{s2}}{v_{p1} v_{s1}} \right]} \right], \quad (1)$$

其中, θ_1 和 θ_2 分别为反射角和透射角.

2. Aki 和 Richards(1980)^[5]给出纵波反射系数公式:

$$R_{pp} = \frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\sec^2 \theta}{2} \frac{\Delta \alpha}{\alpha} - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta \beta}{\beta}, \quad (2)$$

其中

$$\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1, \Delta \beta = \beta_2 - \beta_1, \Delta \rho = \rho_2 - \rho_1, \\ \alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2, \beta = (\beta_1 + \beta_2)/2, \\ \theta = (\theta_2 + \theta_1)/2, \rho = (\rho_2 + \rho_1)/2,$$

$\frac{\Delta \alpha}{\alpha}, \frac{\Delta \beta}{\beta}, \frac{\Delta \rho}{\rho}$ 都比较小,所有的角度都是实数.

3. Hiltmen(1983)^[6]对 Bortfeld 近似公式进行了修改,给出了反射振幅的近似表达式,如果两层介质密度相同,可以得到简单的结果,即体现速度及密度相对变化的近似:

$$R_{pp}(\theta) = \frac{1}{2} [1 - 4v_s^2 p^2] \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{1}{2 \cos^2 \theta} \frac{\Delta v_p}{v_p} - 4v_s^2 p^2 \frac{\Delta v_s}{v_s}, \quad (3)$$

其中

$$\Delta v_s = v_{s2} - v_{s1}, v_s = (v_{s2} + v_{s1})/2, \\ \rho = (\rho_2 + \rho_1)/2, \theta = (\theta_2 + \theta_1)/2, \\ p = \frac{\sin i_1}{v_{p1}} = \frac{\sin i_2}{v_{p2}} = \frac{\sin j_1}{v_{s1}} = \frac{\sin j_2}{v_{s2}}.$$

4. Shuey^[8]给出了用不同角度项表示的反射系数近似公式:

$$R_{pp}(\theta) \approx R_{p0} + \left[A_0 R_{p0} + \frac{\Delta \sigma}{(1 - \sigma)^2} \right] \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta v_p}{v_p} [\tan^2 \theta - \sin^2 \theta], \quad (4)$$

其中 $\sigma = \lambda/2(\lambda + \mu) = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ 为泊松比,

$$R_{p0} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta v_p}{v_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right] = \frac{1}{2} \ln(v_p \rho)$$

为法向入射的反射系数,当入射角较小且 $v_p/v_s \approx 2$ 时,反射系数具有以下线性形式:

$$R = A + B \sin^2 \theta, \quad (5)$$

式中 R 为反射系数, A 为垂直入射时的纵波反射系数, B 为拟合直线中的斜率,即 AVO 梯度, θ 为入射角和透射角的平均值.

5. Smith 和 Gidlow^[9]利用 CMP 道集的加权迭加进行 AVO 反演,给出如下形式的反射系数表达式:

$$R_{pp}(\theta) = A(\theta) \frac{\Delta v_p}{v_p} + B(\theta) \frac{\Delta v_s}{v_s}, \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} A(\theta) = \frac{5}{8} - \frac{1}{2} \left[\frac{v_s}{v_p} \right]^2 \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \tan^2 \theta \\ B(\theta) = -4 \left[\frac{v_s}{v_p} \right]^2 \sin^2 \theta \end{cases}$$

6. Hiltman(1989)在 Shuey 近似方程的基础上给出了基于 $\Delta \sigma$ 的近似式:

$$R_{pp} = R_{p0} \cos^2 \theta + \frac{\Delta \sigma}{(1 - \sigma)^2} \sin^2 \theta, \quad (7)$$

其中

$$R_{p_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta v_p}{v_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right), R_{s_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta v_s}{v_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right).$$

7. 郑晓东^[10] 杨绍国^[11] 分别给出了平面弹性波反射和透射的统一公式:

$$R_{pp}(\theta) = A_0^R + A_2^R \sin^2 \theta + A_4^R \sin^4 \theta, \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} A_0^R = C_{p_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta(\rho v_p)}{\rho v_p}, \\ A_2^R = C_\alpha - 4 \left[\frac{v_s}{v_p} \right]^2 [C_{s_0} + C_\beta], \\ A_4^R = C_\alpha; \\ C_\alpha = \frac{1}{2} \frac{\Delta v_p}{v_p}, \\ C_{s_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta(\rho v_s)}{\rho v_s}, \\ C_\beta = \frac{1}{2} \frac{\Delta v_s}{v_s}. \end{cases}$$

8. Mallick(1993)^[12] 给出了以射线参数 p 及 $\Delta\mu/\rho$ 表示的平面 p 波的反射系数:

$$R_{pp} = R_f(p) - \frac{2\Delta\mu}{\rho} p^2 + \left(\frac{\Delta\mu}{\rho} \right)^2 q_{\alpha_1} q_{\beta_2} p^2, \quad (9)$$

其中

$$R_f(p) = \frac{\rho_2 q_{\alpha_1} - \rho_1 q_{\alpha_2}}{\rho_2 q_{\alpha_1} + \rho_1 q_{\alpha_2}},$$

$$\begin{cases} R_{pp}(\theta) = \frac{1}{4} (1 + \tan^2 \theta) \frac{\Delta(\lambda + 2\mu)}{(\lambda + 2\mu)} - \sin^2 \theta \frac{\Delta 2\mu}{(\lambda + 2\mu)} + \frac{1}{4} (1 - \tan^2 \theta) \frac{\Delta \rho}{\rho}, \\ R_{pp}(\theta) = \frac{1}{4} (1 + \tan^2 \theta) \frac{\Delta(k + \frac{4}{3}\mu)}{(k + \frac{4}{3}\mu)} - \sin^2 \theta \frac{\Delta 2\mu}{(k + \frac{4}{3}\mu)} + \frac{1}{4} (1 - \tan^2 \theta) \frac{\Delta \rho}{\rho}. \end{cases} \quad (12)$$

Gray(1999)^[16] 将 Richards 近似表达为拉梅常数的显式形式:

$$\begin{cases} R_{pp}(\theta) = \left[\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \right] \sec^2 \theta \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \times \left(\frac{1}{2} \sec^2 \theta - 2 \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \mu}{\mu} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \sec^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho}, \\ R_{pp}(\theta) = \left[\frac{1}{4} - \frac{1}{3} \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \right] \sec^2 \theta \frac{\Delta k}{k} + \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \times \left(\frac{1}{3} \sec^2 \theta - 2 \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \mu}{\mu} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \sec^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho}. \end{cases} \quad (13)$$

12. Yanghua Wang^[17,18] 利用射线参数和慢度关系对 Richards 近似进行变换,利用弹性参数的二次函数给出了反射系数近似形式:

$$R_{pp} = R_f - \left[\frac{2\Delta\mu}{\rho} - (1 - R_f) q_\alpha q_\beta \left(\frac{\Delta\mu}{\rho} \right)^2 \right] p^2 - \left[2R_f \left(\frac{\Delta\mu}{\rho} \right)^2 - 2q_\alpha q_\beta \left(\frac{\Delta\mu}{\rho} \right)^3 + (1 - R_f) q_\alpha q_\beta \left(\frac{\Delta\mu}{\rho} \right)^2 \right] p^4. \quad (14)$$

为流体对流体的反射系数;

$$q_\alpha = \sqrt{\frac{1}{v_p^2} - p^2} \text{ 和 } q_\beta = \sqrt{\frac{1}{v_s^2} - p^2}$$

分别为 p 波和 S 波的平均垂直慢度, p 为射线参数.

9. Fatti^[13] 给出了以相对波阻抗表示的近似方程:

$$R_{pp}(\theta) = \frac{1}{2} (1 + \tan^2 \theta) \frac{\Delta I_p}{I_p} - 4 \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \sin^2 \theta \frac{\Delta I_s}{I_s} - \left[\frac{1}{2} \tan^2 \theta - 2 \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (10)$$

10. Goodway(1997)^[14] 给出主要体现拉梅常数对碳氢化合物敏感程度的公式:

$$R_{pp}(\theta) = A - B - C, \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} (1 - \tan^2 \theta) \frac{\sqrt{(\lambda_2 + 2\mu_2)\rho_2} - \sqrt{(\lambda_1 + 2\mu_1)\rho_1}}{\sqrt{(\lambda + 2\mu)\rho}}, \\ B &= -4 \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} \sin^2 \theta \frac{\sqrt{\mu_2 \rho_2} - \sqrt{\mu_1 \rho_1}}{\sqrt{\mu \rho}}, \\ C &= - \left(\frac{1}{2} \tan^2 \theta - 2 \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho}. \end{aligned}$$

11. Xu 和 Bancroft^[15] 结合 Richards 及 Goodway 等方法利用拉梅常数, 体积模量等给出了反映流体异常的各弹性参数的相对变化的公式:

参 考 文 献 (References):

[1] 殷八斤, 曾源, 杨在岩. AVO 技术的理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995, 68~76.

[2] Muskat M, Meres M W. Reflection and transmission coefficients for plane waves in elastic media[J]. Geophysic, 1940, 5 (2): 115~149.

[3] Koefoed O. On the effect of Poisson's ratios of rock strata on the reflection coefficients of plane waves[J]. Geophysical Pros-

- pecting, 1955, 3:381~387.
- [4] Bortfeld R. Approximation to the reflection and transmission coefficients of the plane longitudinal and transverse waves[J]. *Geophysical Prospecting*, 1961, 9:485~502.
- [5] Aki K, Richards P G. Quantitative seismology theory and methods[M]. USA, 1980, 144~154.
- [6] Hilteman F. Seismic lithology[J]. *SEG-continuing education*, 1983, 115.
- [7] Ostrander, W. J. Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence[J]. *Geophysics*, 1984, 1637~1648.
- [8] Shuey R T. A simplification of the Zoeppritz equations[J]. *Geophysics*, 1985, 50(4):609~614.
- [9] Smith G C, Gidlow P M. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas[J]. *Geophysical Prospecting*, 1987, 35:993~1014.
- [10] 郑晓东. Zoeppritz 方程的近似及其应用[J]. *石油地球物理勘探*, 1991, 26(2):129~144.
- [11] 杨绍国, 周熙襄. Zoeppritz 方程的级数表达式及近似[J]. *石油地球物理勘探*, 1994, 29(4):399~412.
- [12] Mallick. A simple approximation to the P-wave reflection coefficient and its implication in the inversion of amplitude variation with offset data[J]. *Geophysics*, 1993, 58:544~552.
- [13] Fatti J L, *et al.* Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis[J]. *Geophysics*, 1994, 59:1362~1376.
- [14] Goodway B, Chen T, Downton J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters, “ μ ” and “ λ fluid stack”, from P and S inversions [J]. *CSEG Expanded Abstracts*, 1997, 148~151.
- [15] Xu Y, Bancroft J C. AVO case study: extraction of Lamé's parameters from vertical component seismic data[R]. 1998.
- [16] Gray D. Bridging the gap: using AVO to detect changes in fundamental elastic constants[J]. 59th Ann Internet Expanded Abstract of 59th SEG Mtg, 1999, 852~855.
- [17] Wang Y H. Approximations to Zoeppritz equations and their use in AVO analysis[J]. *Geophysics*, 1999, 64:1920~1927.
- [18] 孙鹏远, 孙建国, 卢秀丽. P-P 波 AVO 近似对比研究: 定性分析[J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(增刊):164~171.
- [19] 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.
- [20] Chang T S, Kue C W, Canales L, Shih C C, Geco W. Forward modeling attribute analysis for AVO and prestack depth migration[J]. *SEG 72th Conference & Exhibition-Salt Lake City, Utah*, 2002.
- [21] Li Y Y, Downton J, Veritas, Xu Y. Practical aspects of AVO modeling[J]. *The Leading Edge*, 2007, 295~311.
- [22] Wandler A, Evans B, Link C. AVO as a fluid indicator: a physical modeling study[J]. *Geophysics*, 2007, 72(1):9~17.
- [23] 阮爱国, 李家彪, 初凤友, 等. 海底天然气水合物层界面反射 AVO 数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(6):1826~1835.
- [24] Downton J E. Seismic parameter estimation from AVO inversion[M]. *Geology and Geophysics*, 2005, 41~83.
- [25] Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation[M]. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005, 57~99.
- [26] Veire H H, Borgos H G, Landro M. Stochastic inversion of pressure and saturation changes from time-lapse AVO data [J]. *Geophysics*, 2006, 71(5):81~92.
- [27] 王志, 贺振华, 黄得济, 等. 高速屏蔽层下弱反射层地震勘探——广角反射[J]. *勘探地球物理进展*, 2002, 25(5):23~27.
- [28] 王志, 贺振华, 黄德济, 等. 广角反射波场特征研究及正演模型分析[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(1):116~121.
- [29] 张璐, 印兴耀, 孙成禹. 双相介质的 AVO 正演模拟[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(2):319~322.
- [30] 黄中玉, 赵金州. 纵波和转换波 AVO 联合反演技术[J]. *石油物探*, 2004, 43(4):319~323.
- [31] 李景叶, 陈小宏, 郝振江, 等. 多波时移地震 AVO 反演研究 [J]. *地球物理学报*, 2005, 48(4):902~908.
- [32] 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(2):47~51.
- [33] Crewes U C. University of calgary can multicomponent or joint AVO inversion improve impedance estimates? [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2003, 161~164.
- [34] 孙鹏远. AVO 技术新进展[J]. *勘探地球物理进展*, 2005, 28(6):432~438.
- [35] Ross C P, Kinman D L. Nonbright-spot AVO: Two examples [J]. *Geophysics*, 1995, 60(5):1398~1408.
- [36] Ramos A C B, Davis T L. 3-D AVO analysis and modeling applied to fracture detection in coalbed methane reservoirs [J]. *Geophysics*, 1997, 62(6):1683~1695.
- [37] 付雷, 李勤学, 崔凤林, 等. 3DAVO 分析在松辽盆地北部末站地区的应用研究(C). *国际地球物理会议论文集. CPS/SEG*, 2004.
- [38] 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):92~95.
- [39] 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.
- [40] Ye Z, Gray S, Cheadle S, Anderson P. Veritas DGC Inc. Factor affecting AVO analysis prestack migration gathers (C). *SEG Int'l Exposition and Annual Meeting San Antonio*, 2001, 9~14.
- [41] Roden R, Castagna J, Jones G. The impact of prestack data phase on the AVO interpretation workflow—A case study [J]. *The Leading Edge*, 2005.
- [42] 金胜汶, 许士勇, 吴如山. 基于波动方程的广义屏叠前深度偏移[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(5):684~690.