

基于叠前地震反演的流体识别方法研究进展

印兴耀* 曹丹平 王保丽 宗兆云

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580)

印兴耀,曹丹平,王保丽,宗兆云. 基于叠前地震反演的流体识别方法研究进展. 石油地球物理勘探,2014,49(1):22-34,46.

摘要 地震流体识别是指利用地震资料对储层含流体特征进行识别和描述,而地震叠前反演是储层流体识别和评价的有效途径。本文在评述现有地震叠前反演方法的基础上,分析优选储层流体敏感参数的必要性,论述了基于地震岩石物理理论的敏感流体因子的构建和评价方法,探讨了基于数据驱动和模型驱动的地震流体识别方法及其适用条件。理论研究和实际应用均表明:流体有效识别要以流体因子构建及敏感性分析为基础,选择有效的流体敏感参数及评价方法,明确目标储层有效流体因子;以地震反演为技术保障,研发可靠的叠前地震反演策略和适用的反演方法。

关键词 叠前反演 流体因子 岩石物理 弹性阻抗 敏感性评价

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

利用地震资料描述储层流体是一项综合性强、与实际资料联系紧密且需长期研究的课题。究其原因,是研究对象的特殊性、地下埋藏条件的复杂性以及相应数学物理方程反演的多解性。利用地震资料研究岩石孔隙单元所贮存流体的类型和特性,通常是在岩石物理理论指导下将与储层流体有关的异常特性表征为流体因子,再依托流体因子实现介质孔隙流体的类型判识。在基于地震资料估算流体(指示)因子时,不确定性以及多解性贯穿于整个计算过程,且复杂的孔隙流体类型、骨架类型、孔隙度等因素均可能造成流体识别假象,因此从不同角度出发研究敏感流体因子的构建模式以及相应的估算方法具有重要意义。

现阶段常用流体因子的计算方式多基于弹性参数的间接组合运算,此类流体识别的质量主要取决于两方面,一是参与计算的弹性参数是否可靠;二是构建的流体因子对孔隙流体类型是否敏感且稳定。考虑到叠前地震反演是提取基础弹性参数的主要手

段,通过改进反演方法可较好地提高弹性参数可靠性;另外,受地震反问题固有的“病态解”等不确定性影响,基于间接组合的流体因子不可避免地会造成累计误差,而流体因子反演可较好地解决这个问题。基于双相介质岩石物理理论构建敏感流体因子,通过研究它与地震波动反射特征的内在联系,直接利用叠前地震资料实现流体因子反演,可提高流体因子的指示敏感性及其估算的可靠性。

地震反演是获取地下介质弹性参数的有效途径。根据所采用地震资料的不同,地震反演可分为叠后反演和叠前反演。叠后反演利用叠后地震资料,主要反演地层纵波信息;叠前反演利用叠前地震资料所包含的丰富信息,除反演纵波信息外,还可估计地层横波、密度、岩石模量、流体敏感参数、物性参数、各向异性参数、吸收参数等信息。在叠前地震反演中,据采用的地震正问题解析表达式不同,可分为基于波动方程的叠前反演和基于地震波精确反射系数方程及其近似的叠前反演等。其中,基于波动方程的叠前地震反演方法受计算效率及稳定性限制,在实际资料处理中尚未得到广泛应用,在面向储层的参数估计中,目前还是以 AVO/AVA 反演为主;

* 山东省青岛市经济开发区长江西路中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,266580。Email:yinxingyao62@163.com

本文于2013年11月9日收到,最终修改稿于同年12月31日收到。

本研究受国家“973”项目(2013CB228604)和国家油气重大专项(2011ZX05030-004-002、2011ZX05019-003和2011ZX05009-003-004)联合资助。

据反演策略不同,基于地震波反射系数方程及其近似的叠前反演方法又可分为 AVO/AVA 反演和弹性阻抗反演。据地下介质等效模型的特性,可分为均匀/非均匀介质、各向同性/各向异性介质、弹性/非弹性介质,以及它们之间的相互组合介质的叠前地震反演等。

本文在论述现有叠前地震反演方法的基础上,回顾了流体因子概念的提出及其发展史,讨论了流体因子的构建、分类方法及其敏感性评价策略,从数据驱动和模型驱动两个角度分析了获取流体因子的方法及其适用条件,并重点论述了基于叠前反演的地震流体识别方法。

2 叠前地震反演方法

如上所述,据采用的正演算子不同,叠前地震反演可分为基于波动方程的叠前反演和基于地震波精确反射系数方程及其近似的叠前反演等,而后者又可分为 AVO/AVA 反演和弹性阻抗反演。

2.1 AVO/AVA 反演方法

AVO/AVA 反演是指利用叠前共中心点(CMP)炮检距道集、共反射点(CRP)炮检距道集、角度部分叠加道集或超道集进行地层参数估计的叠前地震反演方法。据采用反射系数方程类型不同,可分为基于纵波反射系数方程的纵波 AVO(PP-AVO)反演和基于纵横波反射系数方程的纵横波 AVO 联合(PP-PS-AVO)反演方法等。由于横波地震资料存在采集成本高、信噪比低、难以与纵波资料匹配等问题,目前尚未得到广泛应用。据采用反射系数方程近似阶数和优化方法不同,可分为线性和非线性 AVO 反演。线性 AVO 反演一般采用反射系数线性近似方程,虽然受限于 AVO 线性近似方程的各近似条件,如假设界面两侧弹性参数变化较小、适用于中小角度入射情况等,但由于它具有计算效率高、稳定性好等优点,一直是人们的研究热点并在实际应用中发挥着重要作用。为克服常规线性 AVO 反演在界面两侧弹性参数强变化情况下精度不足等问题,Rabben 等^[1]发展了基于弹性参数二阶近似反射系数方程的非线性反演方法,Kurt^[2]采用广义线性反演方法讨论了精确反射系数方程纵横波联合反演方法,Causse 等^[3,4]提出最优化 AVO 反演方法,杨培杰等^[5]发展了基于支持向量机(SVM)算

法的精确反射系数方程 AVO 反演方法,Zong 等^[6]基于纵波反射系数显式方程,实施了界面两侧纵横波速度、密度六参数非线性直接反演。据采用的反演理论不同,可分为确定性和概率化 AVO 反演,概率化反演以贝叶斯理论^[7]和模糊集合理论^[8]为主。贝叶斯反演理论在地球物理反演中应用广泛,该方法分别假设模型参数和似然函数服从某种先验分布,通过求解后验概率密度函数实现反演估计。在反演实现上,可采用蒙特卡洛马尔科夫链(MCMC)等随机算法实现多解估计^[7],也可采用最大后验概率分布法(MAP)实现最优解估计^[9]。

在反演数据域方面,Buland 等^[10]发展了 τ - p 域 AVO 反演方法;在反演所用地震信息方面,Wilson 等^[11]和 Zhang 等^[12]发展了频变 AVO 反演方法;在直接反演方面,Zong 等^[6]突破常规优化思路,发展了基于精确反射系数方程的非线性 AVO 直接反演方法。此外,杨绍国等^[13]基于精确 Zeoppritz 方程级数表达式讨论了多层纵横波联合反演方法;钟森^[14]基于 Aki-Richard 线性近似方程,采用最小二乘反演算法实现了纵横波速度反演;王晓华等^[15]采用广义非线性反演算法讨论了纵横波联合的 AVO 反演方法及应用;孙鹏远等^[16]讨论了 P-SV 波加权叠加反演;孟宪军等^[17]研究了非线性纵、横波速度反演方法;熊定钰等^[18]探讨了基于 Zeoppritz 方程 Shuey 近似式的 AVO 属性拟合反演方法;陈建江等^[19]研究了层状介质三项 AVO 反演反演方法;Yin 等^[20]提出了点约束稀疏脉冲叠前地震反演;杨培杰等^[5,21]发展了非线性二次规划叠前三参数 AVO 反演和 AVA 三参数同步反演;张世鑫等^[22,23]研究了最优化 AVO 反演、基于岩石物理模型约束的 AVO 反演等;印兴耀等^[24]提出了基于流体弹性阻抗方程的孔隙流体参数叠前反演方法;Zong 等^[25]发展了基于平滑背景约束的 AVO/AVA 反演方法,提高了 AVO 反演在非均质储层预测和流体识别中的适用性。

2.2 弹性阻抗反演方法

基于道集的 AVO/AVA 反演方法对资料信噪比要求较高,为了更好地应用于实际生产,基于部分角度叠加道集的弹性阻抗反演方法应运而生。20 世纪 90 年代初,弹性阻抗(Elastic Impedance,简称 EI)^[26]首次由英国 BP 石油公司提出并应用于勘探开发评价。Connolly^[26]认为弹性阻抗可理解为任

意入射角度下的广义声阻抗,非零入射角弹性阻抗与零入射角声阻抗的差异可作为评判是否为有利AVO响应的重要标准之一。Cambois^[27]实现了从弹性阻抗中反演地层弹性参数,并认为与常规AVO反演相比,弹性阻抗反演的抗噪性优于常规AVO反演。一方面,从弹性阻抗提取地层弹性参数可克服常规AVO反演因未考虑子波变化而引起的反演误差;另一方面,利用不同角度叠加数据的弹性阻抗反演具有常规叠后波阻抗反演^[28]的特征,反演稳定性优于利用炮检距或入射角道集的AVO反演。但Mallick等^[29~31]认为,利用拟合方法从弹性阻抗中获取弹性参数,即使是在仅含2%噪声时,也会带来很大误差。Duffaut等^[32]利用Connolly的定义方法给出了横波弹性阻抗(SEI)概念,认为纵横波弹性阻抗联合反演是一种更稳定的纵横波速度比预测方法。考虑到Connolly定义的弹性阻抗在不同角度存在量纲不同的问题,Verwest等^[33]将弹性阻抗定义为纵横波速度和射线参数的函数,Savic等^[34]利用该方程实现了不同角度的弹性阻抗反演。同样为解决量纲问题,Whitecombe^[35]提出了标准化弹性阻抗的方法,同时为克服弹性阻抗在最大入射角上的限制,又提出了扩展弹性阻抗的概念。Martins^[36]证实了弹性阻抗反演在实际应用中的潜力,并推导了弱各向异性介质弹性阻抗方程。Ma等^[37~39]对广义弹性阻抗、Zoeppritz弹性阻抗等进行了研究,对弹性阻抗方法进行了改进,推出适用于常规资料、非零炮检距条件下纵波反射系数递推公式。倪逸^[40]结合相邻层速度和密度的不同变化规律,提出了基于范数动态可调的弹性阻抗计算方法,可看作是对扩展弹性阻抗的改进。甘利灯等^[41]对从不同近似式中推出的弹性阻抗方程的精度做了对比分析。Lu等^[42]讨论了不同入射角情况下的弹性阻抗反演方法。

印兴耀等^[43]提出利用Connolly弹性阻抗方程从三个角度反演结果中提取纵、横波速度和密度参数的方法,并得到纵、横波阻抗,拉梅常数,泊松比等岩性参数,从而进行地下储层的展布情况及含油气性预测。王保丽等^[44]将弹性阻抗反演和参数提取方法应用于实际资料并取得良好效果。为了得到更准确的岩石弹性参数,减小间接计算的累计误差,人们希望从反演结果中直接提取岩石物性参数。王保丽等^[45]还提出了基于Gray近似的弹性波阻抗反演

方法,通过对Gray近似方程^[46]进行积分推导出新的弹性阻抗方程,表示为拉梅常数、密度和入射角的函数,通过反演和参数提取直接得到拉梅常数,达到了减小间接计算累计误差的目的。李爱山等^[47]发展了两个角度弹性阻抗参数提取方法,为深层小炮检距资料反演提供了方法依据。印兴耀等^[24]发展了基于孔隙流体参数的弹性阻抗方程,并在储层流体识别中得到较好的应用。宗兆云等^[48~50]探索了弹性阻抗反演在碳酸盐岩储层和碎屑岩流体识别中的应用,并发展了基于贝叶斯理论的弹性阻抗反演方法,同时借助该方法提高了反演结果的稀疏性,并在实际应用中讨论了该方法在非均质碳酸盐岩储层预测中的可行性及可靠性。Zong等^[51]还提出了弹性阻抗随炮检距/入射角变化(Elastic impedance Variation with Offset or incident Angle,简称EVO/EVA)叠前地震反演方法,提高了弹性阻抗反演的稳定性,较好地解决了Mallick^[30,52]指出的常规弹性阻抗反演存在的不稳定性问题。

2.3 基于波动方程的叠前地震反演方法

基于水平层状介质假设的AVO/AVA反演及弹性阻抗反演在储层预测中得到了广泛应用,但因实际地下介质并非水平层状,故基于波动方程的叠前地震反演方法也成为目前研究热点之一。基于波动方程的叠前地震反演正演算子包括有限差分法/有限元法、积分法和反射率法等。其中基于有限差分法/有限元法或积分法的叠前地震反演方法主要用于地震速度建模,在储层预测及流体识别中则应用较少。基于反射率正演算子的叠前地震反演算法在储层预测中得到广泛研究,Stolt等^[53]基于波动理论,采用加权叠加的方法讨论了如何从反射地震资料中估计弹性参数。Mallick等^[54,55]采用反射率法作为正演方程,利用遗传算法实现了AVO波形反演。由于基于反射率正演算子的叠前地震反演也是在水平层状介质假设条件发展起来的,且反演算法非线性较强,很难在实际资料中得到理想的反演预测结果,因此也限制了该类方法在储层预测及流体识别中的应用。

3 流体因子构建

3.1 流体因子的概念及其构建

流体因子(fluid factor)实质上是表征储层流体

特征的一种属性,通常是在岩石物理理论指导下,建立的与孔隙流体特征有关的异常特性表征,流体识别则指依托流体因子实现储层含流体类型的判识,因此,流体因子构建是储层流体识别技术的关键。流体因子最早由 Smith 等^[56]提出,并特指由纵横波速度相对变化量的权差运算构成的一种参数。随着流体因子在储层预测中的推广应用,流体因子这一概念已不单指某种特定的参数,而是被赋予更为宽泛的含义,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”,因此对于不同工区,流体因子既有共性也有较大差异,需通过流体因子敏感性分析开展统计分析。

自 Smith 等^[56]提出可利用叠前数据获取流体因子以来,Goodway 等^[57]提出了用于流体异常识别的 $\lambda\text{-}\mu\text{-}\rho$ 技术。Hedlin^[58]基于 Murphy 等^[59]的著作融入了地震纵、横波阻抗信息,提出孔隙模量方法。Hilterman^[60]介绍了流体因子概念并总结了 Goodway 和 Hedlin 等的成果。Biot^[61]和 Gassmann^[62]分别考虑了多孔流体饱和岩石情况下的流体因子构建方法;Krief 等^[63]评判这两种方法都导出了相同的结论。Russell 等^[64]总结前人观点,利用 Biot-Gassmann 方程改写了饱和流体条件下的纵波速度方程,推导出反映孔隙流体类型的参数,即流体因子;在多孔弹性介质岩石物理理论指导下,将该流体因子直接用于判识储层孔隙流体类型。Smith 等^[65]根据叠前 AVO 分析,提出了流体因子角度和交会图角度的概念,通过两种角度计算来得到流体因子。宁忠华等^[66]在总结分析前人方法的基础上,研究了高阶流体因子构建方法。Quakenbush 等^[67]联合了泊松比和密度属性,提出了泊松阻抗的概念。通常,流体因子表示为纵、横波阻抗等属性参数组合的形式,通过弹性阻抗反演及参数提取,可得到不同的属性参数。将提取的参数与流体识别方法相结合,则可更加有效地进行储层预测与流体识别。通过研究发现,对常规固结成熟的碎屑岩储层,Gassmann 流体项具有较高的流体指示敏感性,张世鑫^[68]则在实际资料应用中发现对于固结程度较为复杂的地区来说,由于受储层孔隙度影响,Gassmann 流体项会产生一定的孔隙流体识别假象。

3.2 流体因子分类

宁忠华等^[66]以波阻抗量纲的幂次方为基础,把流体因子分为波阻抗量纲的零次方类、波阻抗量纲

的一次方类和波阻抗量纲的二次方类,并把流体因子统一表示为纵横波阻抗组合的形式。除此之外,本文按流体因子的物理基础进行了如下分类。

3.2.1 基于弹性理论的流体因子

孔隙流体对岩石的拉伸和压缩具有力学影响,因此作为反映岩石受外力发生形变的拉梅参数、体积模量等基本特征参数在一定程度上可以反映孔隙流体的弹性效应。在储层预测与流体识别中最常用的弹性模量是拉梅参数 λ 和 μ ,其中表示不可压缩性的 λ 对孔隙流体比较敏感,而刚性模量 μ 不受孔隙流体影响,仅与岩石骨架有关,多用于指示岩石骨架性质。泊松比是反映岩性和含油气性的重要参数,它是用岩石横向压缩与纵向拉伸的比值来表示的。泊松比对地层岩性及所含流体是一个反应灵敏的参数。当孔隙度达到 25% 以上时,由水饱和的沉积储层的泊松比和由气饱和的泊松比差异非常明显,所以可利用泊松比参数的这种特性来判别流体的性质。除了单一的弹性参数外,还可利用它们的组合作为新的流体敏感参数,如 $\lambda\rho$ 、AVO 分析得到的 P 、 G 属性及其组合、泊松阻抗等。

3.2.2 基于孔隙介质理论的流体因子

常规流体因子多是基于单相介质理论提出的,而从双相介质岩石物理理论出发则可以更好地研究孔隙流体对介质岩石弹性性质的影响,为敏感流体因子的构建提供更好的指导。

Russell 等^[64]基于 Biot-Gassmann 理论提出表征储层孔隙流体类型的 Russell 流体因子,在消除了密度项影响后,直接将 Gassmann 流体项作为流体因子参与孔隙流体的识别,并取得了较好的应用效果。Gassmann 流体项可表示为

$$f = \frac{\left(1 - \frac{K_d}{K_s}\right)^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1 - \phi}{K_s} - \frac{K_d}{K_s^2}} \quad (1)$$

其中: K_d 为干岩石体积模量; K_s 为骨架体积模量; K_f 是孔隙流体等效体积模量,若有多相流体则可利用 Wood 公式计算。显然, K_f 直接表征了流体特征,但由于与孔隙骨架耦合在一起而存在计算困难的问题。

由于 Gassmann 流体项 f 不仅与流体的弹性效应有关,还受矿物基质模量、干岩骨架模量以及孔隙度等岩石固体参数(刚性参数)的综合影响,因此, Gassmann 流体项 f 对固结成熟、孔隙度变化不大

的储层具有较高的流体指示敏感性,但是在固结不成熟、孔隙度变化较大的地区,利用 f 进行流体识别时仍然会受储层孔隙度影响而产生一定程度的流体识别假象。为了尽可能降低流体识别假象,可考虑用 Gassmann 流体项中的 K_f 对流体信息进行单独表征以提高流体指示精度^[68]。

3.2.3 基于各向异性理论的流体因子

在裂隙型储层流体因子构建方面,Schoenberg 等^[69] 给出了流体指示因子的表达式为

$$f_a = \frac{K_n}{K_t} \approx g \frac{\Delta_n}{\Delta_t} \quad (2)$$

其中: K_n 为法向柔度; K_t 为切向柔度; Δ_n 为法向弱度; Δ_t 为切向弱度; g 为无裂缝介质中纵横波速度比的平方。

而对于线性、扁平型裂缝,Hudson^[70] 把流体因子的表达式简化为

$$f_a = \frac{7}{8} \left[1 + \frac{5\zeta}{2\pi\alpha} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: α 为裂缝的纵横比,即裂缝孔径与裂纹直径的比值; $\zeta = k'/k$, k 和 k' 分别为岩石骨架和填充物的不可压缩系数。

对于与等分孔液压相关的裂缝,Bakulin 等^[71] 把流体因子表达式定义为

$$f_a = q \frac{3 - 2g}{4(1 - g)} \quad (4)$$

其中

$$q = \frac{1 - \zeta}{1 - \zeta [1 - (A_p \bar{\phi}_p + A_c \bar{\phi}_c)]}$$

这里, $\bar{\phi}_p$ 和 $\bar{\phi}_c$ 分别表示相对主方向孔隙度和裂缝孔隙度。

3.3 流体因子敏感性分析

不同的流体因子考虑不同的介质特征,这些因

子在不同区域不同地质条件下表现出不同的敏感特征。流体因子的敏感性可通过岩石物理交会图分析及流体因子的数学表达式随物性参数的变化规律进行评价,从图 1 所示的 $\lambda\rho-\mu\rho$ 交会图中可看出砂岩具有低 $\lambda\rho$ 值和高 $\mu\rho$ 值,且含气砂岩相比于含油砂岩和含水砂岩具有低 $\lambda\rho$ 和高 $\mu\rho$,由此可见, $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 参数可较好地区分岩性和含气砂岩,但是无法有效地区分含油砂岩和含水砂岩。

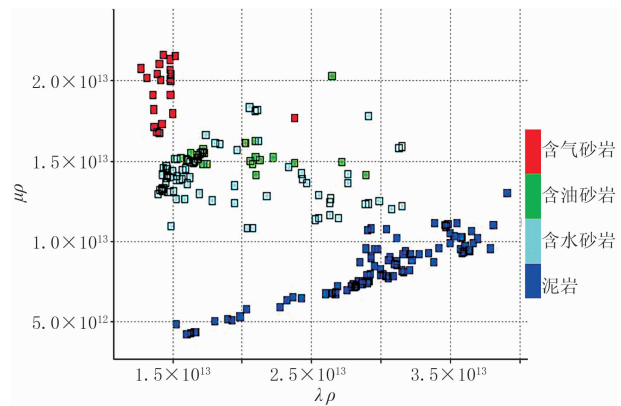


图 1 $\lambda\rho-\mu\rho$ 交会图

Dillon 等^[72] 提出一套流体敏感性分析方法,即敏感指示系数等于含油流体因子与含水流体因子平均值之差与含油流体因子标准差的比值,即

$$S = \frac{\bar{f}_o - \bar{f}_w}{f} \quad (5)$$

根据该方法可统计分析比较 $\mu\rho, I_p, \lambda\rho, f, \sigma, I_p^2 - cI_s^2$ (c 为干岩石纵横波速度比的平方) 和 $\lambda-\mu$ 等因子的流体指示系数。表 1 为利用 M 区实际测井资料由上式计算得到的几项流体因子敏感指示系数;图 2 是其统计直方图,通过比较可知 Gassmann 流体项 f 对该区的流体指示较为敏感,表明在该区利用 f 进行储层流体识别有较大优势。

表 1 流体因子敏感度统计

		$\mu\rho = I_s^2$ $10^{12} \cdot (\text{Pa} \cdot \text{kg/m}^3)$	I_p $10^6 \cdot (\text{m/s} \cdot \text{kg/m}^3)$	$\lambda\rho = I_p^2 - 2I_s^2$ $10^{12} \cdot (\text{Pa} \cdot \text{kg/m}^3)$	f $10^{10} \cdot \text{Pa}$	σ	$I_p^2 - cI_s^2$ $10^{12} \cdot (\text{Pa} \cdot \text{kg/m}^3)$	$\lambda-\mu$ $10^9 \cdot \text{Pa}$
含油砂岩	平均值	20.9	7.00	7.52	1.66	0.20	4.21	-4.81
	标准方差	3.58	0.544	2.00	0.68	0.016	1.58	1.04
含水砂岩	平均值	14.9	7.05	16.40	5.55	0.262	12.70	0.652
	标准方差	1.43	1.30	1.99	0.518	0.0126	1.26	0.495
流体指示系数		1.68	0.0876	4.43	5.73	3.82	5.38	5.26

注:流体指示系数定义为油水属性的平均值之差与油层属性的标准方差之比

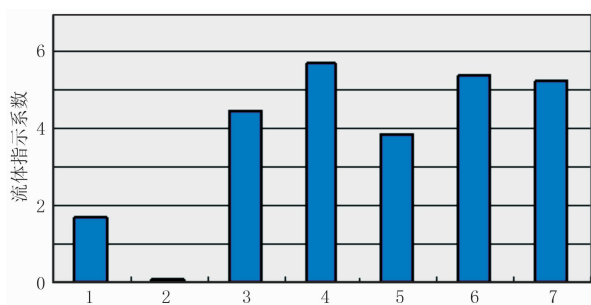


图 2 流体指示系数对比图

1. $\mu\rho$; 2. I_p ; 3. $\lambda\rho$; 4. f ; 5. σ ; 6. $I_p - cI_s$; 7. $\lambda - \mu$

通过基于交会图分析的定性描述和基于流体敏感系数的定量分析可知,相比较常规的基于弹性理论的流体因子来说,基于孔隙介质理论建立的 Gas-smann 流体项 f 能够较好地表征孔隙流体对岩石介质的弹性影响,其主要原因在基于孔隙介质理论的流体因子受岩石固体骨架等因素的影响远小于基于弹性理论提出的其他相关流体因子。

4 基于叠前反演的流体识别方法

将流体因子与地震资料相结合是直接利用地震资料进行储层预测和流体识别的必然趋势,其中模型驱动和数据驱动均是利用地震资料进行流体识别的有效途径。模型驱动是指针对地下介质地质地球物理特征,选择合理的流体因子和边界条件建立流体因子地震波反射系数方程,再利用地震反演方法实现流体因子估计的过程。数据驱动是指基于信号理论,选择合适的数据信号变换方法,直接从地震数据中提取出能够指示储层含流体特征的地震属性参数的过程,该方法可实现对地震资料蕴含的表征信息的直接提取。具体来讲,基于数据驱动的地震流体识别可利用信号的相关表示理论(如稀疏表示),选择合理的信号原子或字典,实现与储层流体直接关联的属性参数估计。相比数据驱动,采用基于模型驱动的叠前地震反演方法进行储层流体识别具有更坚实的地球物理理论基础。

4.1 基于数据驱动的地震流体识别方法

基于数据驱动的地震流体识别方法是基于信号理论直接从地震数据中提取与流体相关的地震信息实现的过程,包括与地震信号振幅、频率、相位等直接或间接关联的信号提取或分析方法。如利用高于周围振幅的强反射振幅寻找地下含气层的“亮点”技

术便是基于数据驱动的地震流体识别方法的代表。此外,还有许多其他烃类识别方法,即所谓“暗点”、“相位反转”和“平点”等技术。在实际应用中,人们也逐渐发现了“亮点”等技术存在的局限性与多解性,进而促进了 AVO 技术的发展。利用反射系数随入射角变化的特征判识“亮点”型含气砂岩的技术,标志着实用 AVO 技术的出现,也是利用地震 AVO 技术进行流体识别的开端。特别是随着针对 Zoeppritz 方程的近似方程的出现,使得 AVO 属性分析技术逐渐成为储层烃类检测中的主流技术。为了充分发掘 AVO 信息的潜力,更多的基于 AVO 属性技术的流体识别方法应运而生,比如基于 AVO 截距和梯度交会图的烃类检测方法、AVO 烃类检测因子方法等。基于叠前地震资料 AVO 特征的流体识别技术,无论是“亮点”技术还是 AVO 属性分析技术,都是对储层含流体特征的“定性”描述,随着油气藏勘探难度的提高和勘探领域对定量描述的要求,这些“定性”分析技术已经无法满足现阶段的勘探需求。

在与地震资料的频率特征相关的地震流体识别方面,人们逐渐发现了地层吸收参数及频变特征参数在流体识别中的潜力。自从 Futterman^[73] 在 1962 年将岩石对地震波的吸收衰减论述为地层的基本属性以来,针对介质品质因子 Q 的研究逐渐引起学者们的重视,目前地层吸收属性分析可以为岩性、含流体性和岩石物理性质提供可靠依据,并作为现阶段一项重要技术广泛应用于储层预测与流体识别领域。Pride 等^[74,75] 提出渗透率与地层吸收有关,同时表明可用地层的吸收属性来指示含油气特征,特别是岩石的岩性特征、渗透率、流体流动、流体饱和度信息无法从地震波的速度以及 AVO 振幅属性中体现,而地震波的吸收衰减属性正是这些多种岩石特征的一种综合表示。Bath^[76] 提出了基于谱比法的 Q 值计算方法;Gladwin 等^[77] 基于地震波衰减过程中的脉冲增宽现象,提出了利用上升时间原理提取 Q 值方法。Tonn^[78] 利用合成 VSP 资料对常用的 10 种 Q 值计算方法进行了比较,发现 Q 值的提取强烈依赖于地震资料品质,且所有方法都是建立在一系列的假设条件之上,没有一种普遍适用的方法可以用来提取可靠的 Q 值。周辉等^[79] 提出一种用地震波频谱计算 Q 值的方法;赵宪生等^[80] 提出基于相邻层间地震子波相关性的 Q 值计算方法;

Dasgupta等^[81]提出一种从CMP道集中计算Q值的QVO方法,吸收了叠前CMP道集的AVO分析方法;Zhang^[82]利用PFVO方法从叠前地震道集中提取地层吸收参数;王小杰等^[83]利用叠前地震数据的地层Q值估计进行流体识别;Sun^[84]提出基于全波形广义线性反演的Q值计算方法,但苛求地震资料的高品质;李宏兵等^[85]结合黏弹性介质地震波传播方程,在小波尺度域推导出地震波能量衰减公式,实现了基于反射地震资料的Q值直接计算方法;Zhang等^[86]提出了RGQA(Reflectivity Guided Q Analysis)的Q值计算方法。纵观品质因子Q的发展历程,其计算方式逐渐走向时频分析与反演算法相结合的道路,计算精度和可靠性也逐步得到提高,并且已经逐渐成为储层预测和流体识别的有效技术手段。

地震波的强衰减过程必然伴随谱能量的衰减而产生速度频散现象,且在饱含不同流体类型的储层中传播时会表现出不同的频谱规律特征,因此速度频散程度可作为有效流体因子开展储层流体识别。现阶段,用于解释速度频散机理的岩石物理模型、利用频散特征进行储层特征描述方法研究已成为现阶段国内外研究的前沿课题。常规基于频散特征的储层特征描述多借助于时频分析技术,时频分析作为展现非平稳信号频率域与时间域联合分布特征的信号分析手段,其结果的质量直接影响着基于吸收衰减特征的流体识别效果。时频分析的思想最早是由Gabor^[87]于1946年提出,为时频分析技术的发展奠定了坚实基础。Taner等^[88]在1979年提出“低频阴影”的概念,并结合实际资料发现了含气储层下方会出现低频强能量团的现象;Castagna等^[89]则利用时频分析手段实现了含气储层的“低频阴影”检测;Ebrom^[90]总结了可能造成“低频阴影”的十大因素,指出地震资料处理等人为因素也可能导致“低频阴影”现象的产生;Korneev等^[91]结合物理模型模拟的实验数据,从理论角度解释了“低频阴影”现象;Odebeatu等^[92]通过研究认为速度频散是造成“低频阴影”的主要原因。Dilay等^[93]发现地震资料在含气层段会出现明显的高频衰减;Mitchell等^[94,95]基于Dilay等发现的现象提出能量吸收分析技术(Energy Absorption Analysis, EAA),即依据地震波高频成分能量的衰减程度识别储层的含烃类异常特征。Lichman等^[96]进一步发展了Mitchell

等提出的EAA技术,并通过实验讨论了孔隙流体分别是气体和液体时的能量吸收机制,同时利用瞬时子波的频谱进行了高频衰减特征分析。陈学华等^[97]进行了低频阴影的数值模拟与检测。Wilson等^[98]提出了一种较为实用的频散属性计算方法,并结合模型分析和实际应用验证了提取的速度频散属性在油气识别方面的有效性。吴小羊^[99]利用基于伪平滑Wigner-Ville分布的频谱分析技术与AVO反演技术相结合进行频散属性的反演,张世鑫等^[100]进一步通过纵波速度频散属性的反演直接开展储层预测与流体识别。陈学华等^[101]开展了叠前分角度道集的瞬时谱差异信息提取及应用研究,在实际应用中取得了较好效果。

4.2 基于模型驱动的地震流体识别方法

基于模型驱动的地震流体识别方法是在构建流体因子基础上,针对流体因子特征实现对地震反射系数的模型参数化,建立由流体因子直接表达的地震反射特征方程,最终通过地震反演方法实现从叠前地震数据中直接进行流体因子估计的过程。

4.2.1 地震反射系数模型参数化

地震反射系数的模型参数化是利用地震反演方法开展流体识别的基础,合理的模型参数选择直接影响流体因子正问题的解析表达形式及利用叠前地震反演进行流体识别的合理性和可靠性。目前,针对Zoeppritz公式的精确求解已经取得了长足的进展,但是在实际资料应用中还存在诸多的难题需要解决。更为有效的模型参数化方法则是从Aki-Richard近似式^[102]出发,将流体因子或与流体信息相关的参数融入AVO反射系数近似表达式。

Gidlow等^[103]发展了基于地层纵横波阻抗和密度的反射系数近似式,认为地层拉梅参数在某些情况下可直接进行储层流体识别,由此发展了用体积模量和拉梅参数表示的反射系数近似式^[57];Russell等^[104]和Zong等^[105]基于孔隙弹性理论,采用不同思路建立了用孔隙流体参数(或流体因子)表示的反射系数近似方程,该方程中引入的干岩石纵横波速度比参数使得该方程呈弱非线性;宗兆云等发展了利用纵横波模量表示的孔隙弹性理论,建立了孔隙流体参数与纵横波模量间的直接关系,推导出与地层纵横波模量直接关联的反射系数线性近似式^[49];为避免间接计算带来的累积误差,还进一步推导出与地层杨氏模量、泊松比和密度直接关联的地震波

反射系数线性化近似方程,用于指导非常规油气藏甜点识别^[106]。

在这些与流体因子相关的反射系数近似中,最为典型的当属由 Russell 等基于孔隙弹性理论所提出的包含 Gassmann 流体项的反射系数近似式

$$R_{PP}(\theta) = \left[\left(\frac{1}{4} - \frac{\gamma_{dry}^2}{4\gamma_{sat}^2} \right) \sec^2 \theta \right] \frac{\Delta f}{f} + \left[\frac{\gamma_{dry}^2}{4\gamma_{sat}^2} \sec^2 \theta - \frac{2}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \mu}{\mu} + \left[\frac{1}{2} - \frac{\sec^2 \theta}{4} \right] \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (6)$$

式中: f , μ 和 ρ 分别表示界面两侧介质的 Gassmann 流体项、剪切模量和密度平均值; Δf , $\Delta \mu$ 和 $\Delta \rho$ 则分别表示界面两侧 Gassmann 流体项、剪切模量和密度的差值; $\gamma_{dry}^2 = (v_p/v_s)_{dry}^2$ 表示干岩石纵横波速度比的平方; $\gamma_{sat}^2 = (v_p/v_s)_{sat}^2$ 表示饱和流体岩石纵横波速度比的平方。Russell 等通过模型试算表明该近似公式在入射角小于 50° 的范围内完全能满足精度要求。该近似公式与常规近似的 AVO 反射系数的最大区别是将孔隙流体的弹性效应直接包含在近似式中,由于利用 Gassmann 流体项 f 和剪切模量 μ 可较好地地区分不同的岩性和流体类型,因此将流体项 f 融入到反射系数表达式中较好地奠定了利用地震资料进行流体因子反演的基础,从而实现 Gassmann 流体项以及剪切模量等参数的叠前地震直接反演,也使得流体识别更加直观和方便。

同时也应该看到 f 存在固液两相耦合的问题,受到岩石骨架固有固体效应(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会造成一定的畸变,因此针对流体因子的反射系数模型参数化应该考虑更多的岩石物理特征并建立起与流体特征更为直接的联系,比如考虑流体体积模量 K_g 、黏弹性介质衰减因子 Q 以及频散参数等。针对流体因子特征对反射系数进行模型参数化是采用反演方法估计流体因子的关键,通过在反射系数建立过程中充分考虑流体及复杂介质特征,实现对真实地层中地震振幅及频率信息随炮检距变化特征参数化表征,以更好地利用叠前反演方法实现流体因子的反演与提取。

4.2.2 基于叠前反演的地震流体识别方法

考虑到地震反演问题本身固有的“病态解”以及

“多解性”等问题,仅仅利用地震资料反演得到储层弹性参数的精确解是不可能的。因此,基于这些弹性参数通过间接代数组合的流体因子在计算过程中不可避免地会造成计算误差的累积,为了更好地将叠前地震反演方法与流体识别进行有效结合,提高反演质量,有必要针对流体因子开展 AVO 反射系数模型参数化之后的反演方法研究。Chi 等^[107]提出了利用叠前 AVO 反演进行拉梅参数直接反演的方法,Russell 等^[104]实现了对 Gassmann 流体项的直接反演。但因 AVO 反演对资料品质要求较高,故在储层预测和流体识别中往往通过弹性阻抗方程开展参数反演。基于常规弹性阻抗反演思路,王保丽等^[45]推导了以拉梅参数表示的弹性阻抗公式,提高了拉梅参数的反演精度;印兴耀等^[24]提出了包含 Gassmann 流体项 f 的弹性阻抗方程,通过弹性阻抗直接反演高精度的流体项 f ,提高了流体识别的可靠性,奠定了直接利用地震反演方法来实现流体因子反演与提取的基础。

针对流体因子的叠前地震 AVO 反演最重要的是如何建立叠前 CMP/CRP 道集与待反演参数之间的数学表达式,下面研讨基于 Russell 等提出的包含 Gassmann 流体项的反射系数近似式描述如何实现流体因子的 AVO 反演。对于 N 道的 CMP 道集数据来说,可针对 AVO 反射系数近似式中的三个参数 $\Delta f/f$ 、 $\Delta \mu/\mu$ 、 $\Delta \rho/\rho$ 建立矩阵方程

$$\begin{bmatrix} R_{PP}(t, \theta_1) \\ R_{PP}(t, \theta_2) \\ \vdots \\ R_{PP}(t, \theta_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(t, \theta_1) & c_2(t, \theta_1) & c_3(t, \theta_1) \\ c_1(t, \theta_2) & c_2(t, \theta_2) & c_3(t, \theta_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_1(t, \theta_N) & c_2(t, \theta_N) & c_3(t, \theta_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f/f \\ \Delta \mu/\mu \\ \Delta \rho/\rho \end{bmatrix} \quad (7)$$

该矩阵方程描述了反射系数随角度变化时与流体项信息之间的关系,通过开展 AVO 反演即可得到 $\Delta f/f$ 、 $\Delta \mu/\mu$ 、 $\Delta \rho/\rho$, 类比于常规 AVO 反演来说这三项信息相当于流体因子的反射系数,通过对时间进行积分即可得到 Gassmann 流体项 f 、剪切模量 μ 和密度 ρ 。

基于地震振幅随炮检距变化的 AVO 反演不仅可反演出近似式中的流体项信息,同时还考虑了叠前地震资料中丰富的振幅和频率信息,根据 Wilson

等提出的反射系数构建方式,从 Shuey 两项反射系数近似式出发,可导出包含表征纵波速度频散程度和频散程度随炮检距变化梯度等两个频散属性的反射系数近似式,从而建立了针对频散参数的反演方程。当然,在对频散属性进行反演之前首先需要得到叠前道集不同频带的信息,通常可以采用连续小波变换等分频方法对叠前地震道集进行时频分析,从而选择合适的优势频带,然后进行分频处理以得到相应频带的叠前道集。由此可见,基于 AVO 技术的流体因子反演方法不仅能够有效地反演出常规流体因子,也能针对地震吸收衰减参数 Q 开展反演,同时还能够获取与流体信息密切相关的频散参数,为实现基于叠前地震反演方法的流体识别奠定了基础。

因 AVO 反演对资料品质要求较高,故对低信噪比资料而言,通过 AVO 反演方法获取流体因子是很难进入实际应用的,而基于角度部分叠加数据的弹性阻抗反演则能较好地解决此问题。因此,引入弹性阻抗实现流体因子的反演有利于加强对实际资料的分析与应用。根据 Russell 等给出的基于孔隙弹性理论的包含 Gassmann 流体项的反射系数近似式,印兴耀等推导出包含 Gassmann 流体项 f 的弹性阻抗方程^[24]

$$EI(\theta) = EI_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{a(\theta)} \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^{b(\theta)} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{c(\theta)} \quad (8)$$

其中: $a = \left(\frac{1}{2} - \frac{\gamma_{\text{sat}}^2}{2\gamma_{\text{dry}}^2} \right) \sec^2 \theta$; $b = \frac{\gamma_{\text{dry}}^2}{2\gamma_{\text{sat}}^2} \sec^2 \theta - \frac{4}{\gamma_{\text{sat}}^2} \sin^2 \theta$;
 $c = 1 - \frac{\sec^2 \theta}{2}$; f_0, μ_0 和 ρ_0 分别定义为 f, μ 和 ρ 的平均值。类比于叠后波阻抗反演流程,可将不同角度的弹性阻抗反演认为是叠后波阻抗反演的再现,而反演需要的资料一般是叠前角道集、测井资料与地质资料,其具体的反演算法多样,但总体流程大致可分为四部分,即叠前地震资料预处理、测井资料预处理、角度子波的提取和弹性阻抗反演。

在得到绝对弹性阻抗数据体之后需要基于 EI 值与待反演参数之间的关系来提取相应的信息。经过标准化的弹性阻抗方程中,三个弹性参数与弹性阻抗之间是非线性的指数关系。为了简化求解方法,对公式进行对数变换,将其转化为线性方程组形式。考虑到入射角度相同时,各采样点所对应的系数是相同的,且不随时间发生变化。通过将纵横波速度与密度之前的系数分别用 $a(\theta), b(\theta)$ 和 $c(\theta)$ 表

示,考虑同一道地震数据的不同采样点(假设有 n 个采样点),可建立井旁道资料与测井曲线之间关系的矩阵

$$\begin{bmatrix} \ln \frac{f(t_1)}{f_0} & \ln \frac{\mu(t_1)}{\mu_0} & \ln \frac{\rho(t_1)}{\rho_0} \\ \ln \frac{f(t_2)}{f_0} & \ln \frac{\mu(t_2)}{\mu_0} & \ln \frac{\rho(t_2)}{\rho_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \ln \frac{f(t_n)}{f_0} & \ln \frac{\mu(t_n)}{\mu_0} & \ln \frac{\rho(t_n)}{\rho_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\theta) \\ b(\theta) \\ c(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \frac{EI(t_1, \theta)}{EI_0} \\ \ln \frac{EI(t_2, \theta)}{EI_0} \\ \vdots \\ \ln \frac{EI(t_n, \theta)}{EI_0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

求解该矩阵可获得适用于研究区的系数 $a(\theta), b(\theta)$ 和 $c(\theta)$,针对不同入射角度分别计算便可得到三个角度($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)所对应的系数,从而实现针对实际工区中 Gassmann 流体项 f 、剪切模量 μ 以及密度参数 ρ 的反演与提取。

将流体弹性阻抗方法应用于胜利 Y3 工区,该工区构造较为复杂,其地理位置在东营凹陷东部,主要处于中央隆起带的东部,自西南向南被三条近东西向分布的二级断层切割成四个台阶带,其内部小断层发育对油气分布有较大影响,进行储层预测与剩余油气挖潜的难度较大。该实例以 Y3 工区的沙二段为研究目标,在通过岩石物理分析确定 Gassmann 流体项具有较高流体指示敏感性的基础上,采用流体弹性阻抗反演方法对储层进行含流体识别。

利用得到的 Gassmann 流体项 f 对沙二段 V 砂体(Es_2^5)进行含烃异常检测,得到过井剖面 and Es_2^5 砂体的 f 值平面分布图(图 3 和图 4)。该区属断块型油气藏,油气受断层封堵作用主要分布在断层的下降盘,从图中可看到区内 Es_2^5 砂体被两个断层切割,含油气区域(图中 f 低值区)主要集中在断层的下降盘,符合该区地质背景。结合测井和钻井资料的解释结果,图中的储层预测结果与以上钻遇结果较吻合,验证了方法在储层流体识别方面的可靠性。

通过上述 AVO 反演和弹性阻抗反演可看出, Gassmann 流体项 f 在储层流体识别方面的确有很

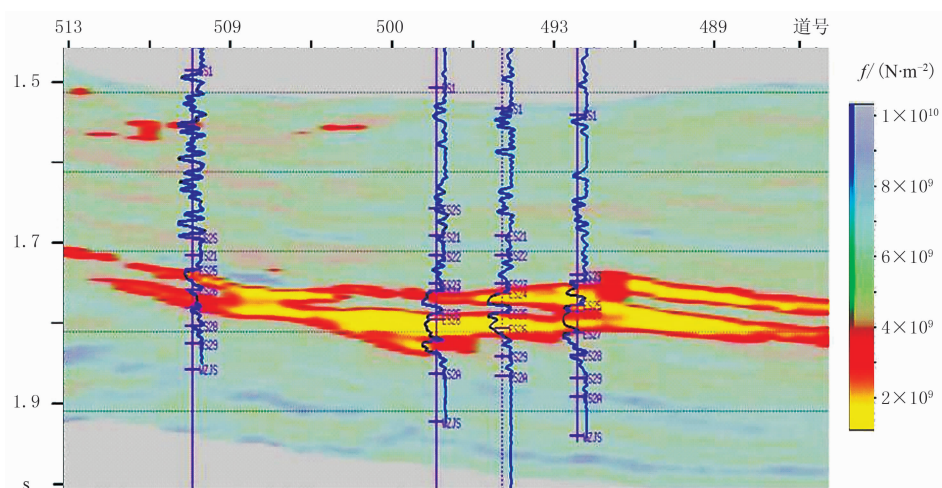
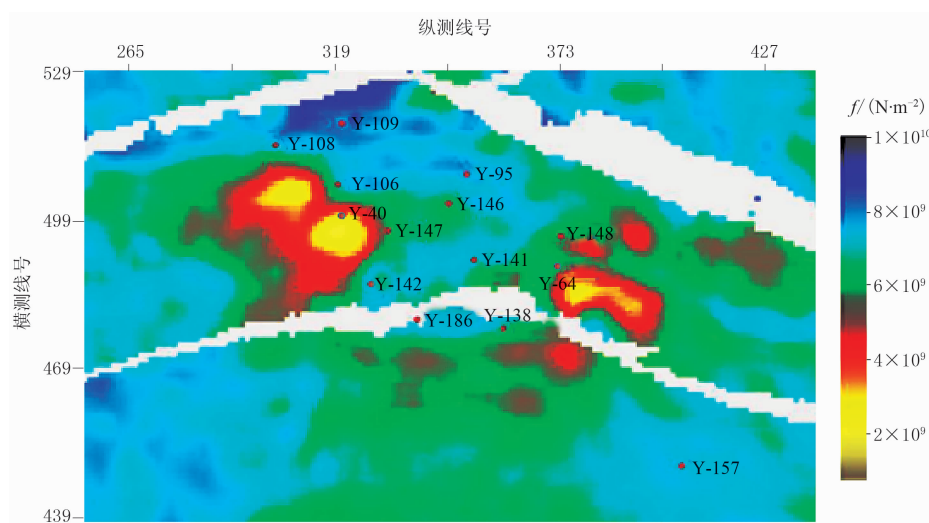


图 3 胜利 Y3 工区 Gassmann 流体项反演剖面

图 4 E_s_2 砂体的 Gassmann 流体项平面分布图

好的应用效果。但其本身存在固、液两相耦合问题，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。

5 结束语

综上所述,利用叠前反演方法直接获取流体因子参数是利用地震资料开展流体识别的可靠途径,其中针对流体因子特征所开展的反射系数模型参数化是最为关键的环节,在此基础上可直接针对叠前 CMP/CRP 道集资料应用 AVO 反演方法获取可靠的流体因子信息;在更为广泛的实际资料应用中借助弹性阻抗则可更为有效地反演出稳定可靠的流体因子参数,从而更精确地实现流体因子的反演与提取。

参考文献

- [1] Rabben T E, Tjelmeland H, Ursin B. Non-linear Bayesian joint inversion of seismic reflection coefficients. *Geophysical Journal International*, 2008, 173(1):265-280.
- [2] Kurt H. Joint inversion of AVA data for elastic parameters by bootstrapping. *Computers & Geosciences*, 2007, 33(3):367-382.
- [3] Causse E, Riede M, van Wijngaarden A J et al. Amplitude analysis with an optimal model-based linear AVO approximation: Part I — Theory. *Geophysics*, 2007, 72(3):C59-C69.
- [4] Causse E, Riede M, van Wijngaarden A J et al. Amplitude analysis with an optimal model-based linear AVO approximation: Part II — Field data example. *Geophysics*, 2007, 72(3):C71-C79.
- [5] 杨培杰, 印兴耀. 基于支持向量机的叠前地震反演方法. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(1):37-41.

- Yang Peijie, Yin Xingyao. Prestack seismic inversion method based on support vectormachine. *Journal of China University of Petroleum*, 2008, 32(1): 37-41.
- [6] Zong Z, Yin X, Wu G. Direct nonlinear inversion of seismic reflection coefficients for layer parameters. // EAGE Annual Meeting, Copenhagen, 2012.
- [7] Buland A, Omre H. Bayesian linearized AVO inversion. *Geophysics*, 2003, 68(1): 185-198.
- [8] Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2005.
- [9] Downton J E, Lines L R. Three term AVO waveform inversion. // SEG Annual Meeting, Denver, 2004.
- [10] Buland A, Landrø M, Andersen M et al. AVO inversion of troll field data. *Geophysics*, 1996, 61(6): 1589-1602.
- [11] Wilson A, Chapman M, Li X Y. Frequency-dependent AVO inversion. // SEG Annual Meeting, Houston, 2009.
- [12] Zhang S, Yin X, Zhang G. Dispersion-dependent attribute and application in hydrocarbon detection. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011, 8(4): 498-507.
- [13] 杨绍国, 周熙襄. Zoeppritz 方程的级数表达式及近似. *石油地球物理勘探*, 1994, 29(4): 399-412.
Yang Shaoguo, Zhou Xixiang. Series expression and approximation of Zoeppritz equation. *OGP*, 1994, 29(4): 399-412.
- [14] 钟森. AVO 反演纵、横波速度. *石油地球物理勘探*, 1995, 30(3): 373-378.
Zhong Sen. Estimation of P and S velocities by AVO inversion. *OGP*, 1995, 30(3): 373-378.
- [15] 王晓华, 许云. 多波层状介质 AVO 广义线性反演及应用. *石油地球物理勘探*, 1995, 30(增刊 1): 1-12.
Wang Xiaohua, Xu Yun. AVO generalized linear inversion of multi-wave layered medium and its application. *OGP*, 1995, 30(S1): 1-12.
- [16] 孙鹏远, 孙建国, 卢秀丽. P-SV 转换波 AVO 加权叠加反演. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(3): 271-274.
Sun Pengyuan, Sun Jianguo, Lu Xiuli. AVO weighted stack inversion of P-SV converted wave. *OGP*, 2004, 39(3): 271-274.
- [17] 孟宪军, 姜秀娣, 黄捍东等. 叠前 AVA 广义非线性纵、横波速度反演. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(6): 645-650.
Meng Xianjun, Jiang Xiudi, Huang Handong et al. Generalized nonlinear P wave and S wave velocity inversion of prestack AVA. *OGP*, 2004, 39(6): 645-650.
- [18] 熊定钰, 钱忠平, 赵波. 拟合 AVO 属性反演. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(6): 646-651.
Xiong Dingyu, Qian Zhongping, Zhao Bo. Inversion of fitting AVO attributes. *OGP*, 2005, 40(6): 646-651.
- [19] 陈建江, 印兴耀. 基于贝叶斯理论的 AVO 三参数波形反演. *地球物理学报*, 2007, 50(4): 1251-1260.
Chen Jianjiang, Yin Xingyao. Three parameter AVO waveform inversion based on Bayesian theorem. *Chinese J Geophys*, 2007, 50(4): 1251-1260.
- [20] Yin X, Yang P, Zhang G. A novel prestack AVO inversion and its application. // SEG Annual Meeting, Las Vegas, 2008.
- [21] 杨培杰, 穆星, 印兴耀. 叠前三参数同步反演方法及其应用. *石油学报*, 2009, 30(2): 232-236.
Yang Peijie, Mu Xing, Yin Xingyao. Prestack three term simultaneous inversion method and its application. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(2): 232-236.
- [22] 张世鑫, 印兴耀, 孔国英. 基于模型的最优化 AVO 反演研究. *中国地球物理学会第二十五届年会*, 安徽合肥, 2009.
Zhang Shixin, Yin Xingyao, Kong Guoying. Study on optimal model based on AVO inversion. // Chinese Geophysical Society twenty-fifth Annual Meeting, Hefei, Anhui, 2009.
- [23] 张世鑫, 印兴耀, 孔国英等. 基于岩石物理模型的最优化 AVO 三参数同步反演方法. *中国海上油气*, 2010, 22(5): 300-304.
Zhang Shixin, Yin Xingyao, Kong Guoying et al. An optimal simultaneous inversion method for AVO with three parameters on a petrophysics model basis. *China Offshore Oil and Gas*, 2010, 22(5): 300-304.
- [24] 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. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(3): 373-380.
Yin Xingyao, Zhang Shixin, Zhang Fanchang et al. Utilizing Russell Approximation based elastic wave impedance inversion to conduct reservoir description and fluid identification. *OGP*, 2010, 45(3): 373-380.
- [25] Zong Z, Yin X, Wu G. Robust AVO inversion for elastic modulus and its application in fluid factor calculation. // SEG Annual Meeting, San Antonio, 2011.
- [26] Connolly P. Elastic impedance. *The Leading Edge*, 1999, 18(4): 438-452.
- [27] Cambois G. AVO inversion and elastic impedance. // SEG Annual Meeting, Calgary, 2000.
- [28] Gluck S, Juve E, Lafet Y et al. High-resolution impedance layering through 3-d stratigraphic inversion of poststack seismic data seismic inversion using sonic and density log guided spectrally enhanced seismic data. *The Leading Edge*, 1997, 16(9): 1309-1315.
- [29] Mallick S, Huang X, Lauve J et al. Hybrid seismic inversion: A reconnaissance tool for deepwater exploration. *The Leading Edge*, 2000, 19(11): 1230-1237.
- [30] Mallick S. Hybrid inversion, elastic impedance inversion, and prestack waveform inversion. // SEG Annual Meeting, San Antonio, 2001.
- [31] Mallick S, Mukhopadhyay P K, Padhi A et al. Prestack waveform inversion-the present state and the road ahead. // SEG Annual Meeting, Denver, 2010.
- [32] Duffaut K, Alsos T, Landro M et al. Elastic impedance inversion in practice. *The Leading Edge*, 2000, 19(11): 1222-1229.
- [33] Verwest B, Masters R, Sena A. Elastic impedance inversion. // SEG Annual Meeting, Calgary, 2000.
- [34] Savic M, Verwest B, Masters R et al. Elastic impedance inversion in practice. // SEG Annual Meeting, Calgary, 2000.
- [35] Whitcombe D N. Elastic impedance normalization.

- Geophysics, 2002, 67(1): 60-62.
- [36] Martins J. An approach for elastic impedance in weakly anisotropic media. // SEG Annual Meeting, Salt Lake City, 2002.
- [37] Ma J, Morozov I B. The exact elastic impedance as a ray-path and angle of incidence function. // SEG Annual Meeting, Huston, 2005.
- [38] Ma J, Morozov I B. A fluid detection study from Zoeppritz elastic impedance. // SEG Annual Meeting, New Orleans, 2006.
- [39] Ma J, Morozov B. The exact elastic impedance for P-SV wave. // SEG Annual Meeting, San Antonio, 2007.
- [40] 倪逸. 弹性波阻抗计算的一种新方法. 石油地球物理勘探, 2003, 38(2): 147-150.
- Ni Yi. A new method for calculation of elastic wave impedance. OGP, 2003, 38(2): 147-150.
- [41] 甘利灯, 杜文辉, 刘江丽等. 弹性阻抗的概念及其精度分析. 中国地球物理学会第十九届年会, 江苏南京, 2003.
- Gan Lideng, Du Wenhui, Liu Jiangli. The concept of elastic impedance and accuracy analysis. // Chinese Geophysical Society Nineteenth Annual Meeting, Nanjing, Jiangsu, 2003.
- [42] Lu S, McMechan G A. Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas. Geophysics, 2004, 69(1): 164-179.
- [43] 印兴耀, 袁世洪, 张繁昌. 从弹性波阻抗中提取岩石物性参数. CPS/SEG 2004 国际地球物理会议, 北京, 2004.
- Yin Xingyao, Yuan Shihong, Zhang Fanchang. Petrophysical parameters extracted from the elastic wave impedance. // CPS/SEG 2004 International Geophysical Conference, Beijing, 2004.
- [44] 王保丽, 印兴耀, 张繁昌. 弹性阻抗反演及应用研究. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 89-92.
- Wang Baoli, Yin Xingyao, Zhang Fanchang. Elastic impedance inversion and its application. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 89-92.
- [45] 王保丽, 印兴耀, 张繁昌. 基于 Gray 近似的弹性波阻抗方程及反演. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 435-439.
- Wang Baoli, Yin Xingyao, Zhang Fanchang. Gray approximation based elastic wave impedance equation and inversion. OGP, 2007, 42(4): 435-439.
- [46] Gray D, Goodway B, Chen T. Bridging the gap: Using AVO to detect changes in fundamental elastic constants. // SEG Annual Meeting, Huston, 1999.
- [47] 李爱山, 印兴耀, 陆娜等. 两个角度弹性阻抗反演在中深层含气储层预测中的应用. 石油地球物理勘探, 2009, 44(1): 87-92.
- Li Aishan, Ying Xingyao, Lu Na et al. Application of elastic impedance inversion with two angle stack gathers to predict gas-bearing reservoir of mid-deep layer. OGP, 2009, 44(1): 87-92.
- [48] 宗兆云, 印兴耀, 吴国忱. 拉梅参数直接反演技术在碳酸盐岩缝洞型储层流体检测中的应用. 石油物探, 2011, 50(3): 241-246.
- Zong Zhaoyun, Yin Xingyao, Wu Guochen. Application of Lamé parameter direct inversion in fluid identification for carbonate GPP, 2011, 50(3): 241-246.
- [49] 宗兆云, 印兴耀, 吴国忱. 基于叠前地震纵横波模量直接反演的流体检测方法. 地球物理学报, 2012, 55(1): 284-292.
- Zong Zhaoyun, Yin Xingyao, Wu Guochen. Fluid identification method based on compressional and shear modulus direct inversion. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1): 284-292.
- [50] 宗兆云, 印兴耀, 张繁昌. 基于弹性阻抗贝叶斯反演的拉梅参数提取方法研究. 石油地球物理勘探, 2011, 46(4): 598-604.
- Zong Zhaoyun, Yin Xingyao, Zhang Fanchang. Elastic impedance Bayesian inversion for lamé parameters extracting. OGP, 2011, 46(4): 598-604.
- [51] Zong Z, Yin X, Wu G. Elastic impedance variation with angle inversion for elastic parameters. Journal of Geophysics and Engineering, 2012, 9(3): 247-260.
- [52] Mallick S. Amplitude-variation-with-offset, elastic-impedance, and wave-equation synthetics — a modeling study. Geophysics, 2007, 72(1): C1-C7.
- [53] Stolt R H, Weglein A B, Abd Elhadi Y E. Migration and inversion of seismic data. Geophysics, 1985, 50(12): 2458-2472.
- [54] Mallick S. Inversion of amplitude-versus-offset data using a genetic algorithm. // SEG Annual Meeting, New Orleans, 1992.
- [55] Mallick S, Dutta N C. Shallow water flow prediction using prestack waveform inversion of conventional 3d seismic data and rock modeling. The Leading Edge, 2002, 21(7): 675-680.
- [56] Smith G C, Gidlow P M. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas. Geophysical Prospecting, 1987, 35(9): 993-1014.
- [57] Goodway B, Chen T, 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. // SEG Annual Meeting, Denver, 1997.
- [58] Hedlin K. Pore space modulus and extraction using AVO. // SEG Annual Meeting, Calgary, 2000.
- [59] Murphy W, Reischer A, Hsu K. Modulus decomposition of compressional and shear velocities in sand bodies. Geophysics, 1993, 58(2): 227-239.
- [60] Hilterman F J. Seismic Amplitude Interpretation, 2001 distinguished instructor short course. SEG, 2001.
- [61] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155-164.
- [62] Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres. Geophysics, 1951, 16(4): 673-685.
- [63] Krief M, Garat J, Stellingwerff J. A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full-waveform sonic). The Log Analyst, 1990, 31(11): 355-369.
- [64] Russell B H, Hedlin K, Hilterman F J et al. Fluid-property discrimination with AVO: A biot-gassmann

- perspective. *Geophysics*, 2003, 68(1): 29-39.
- [65] Smith G C, Gidlow M. The fluid factor angle and the crossplot angle. // *SEG Annual Meeting, Dallas*, 2003.
- [66] 宁忠华, 贺振华, 黄德济. 基于地震资料的高灵敏度流体识别因子. *石油物探*, 2006, 45(3): 239-241.
Ning Zhonghua, He Zhenhua, Huang Deji. High sensitive fluid identification based on seismic data. *GPP*, 2006, 45(3): 239-241.
- [67] Quakenbush M, Shang B, Tuttle C. Poisson impedance. *The Leading Edge*, 2006, 25(2): 128-138.
- [68] 张世鑫. 基于地震信息的流体识别方法研究与应用 [博士学位论文]. 山东青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
Zhang Shixin. *Methodology and Application of Fluid Identification with Seismic Information*[D]. China University of Petroleum (East China), Qindao, Shandong, 2012.
- [69] Schoenberg M and Sayers C. Seismic anisotropy of fractured rock. *Geophysics*, 1995, 60(1): 204-211.
- [70] Hudson J A. Overall properties of a cracked solid. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1980, 88(1): 371-384.
- [71] Bakulin A, Grechka V and Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data — Part I: HTI model due to a single fracture set. *Geophysics*, 2000, 65(1): 1788-1802.
- [72] Dillon L, Schwedersky G, Vásquez G et al. A multi-scale dhi elastic attributes evaluation. *The Leading Edge*, 2003, 22(10): 1024-1029.
- [73] Futterman W I. Dispersive body waves. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67(13): 5279-5291.
- [74] Pride S R, Berryman J G. Linear dynamics of double-porosity dual-permeability materials — I: Governing equations and acoustic attenuation. *Physical Review E*, 2003, 68(3): 036603.
- [75] Pride S R, Berryman J G. Linear dynamics of double-porosity dual-permeability materials — II: Fluid transport equations. *Physical Review E*, 2003, 68(3): 036604.
- [76] Báth B. *Spectral Analysis in Geophysics*. Elsevier Science, 1982.
- [77] Gladwin M T, Stacey F. Anelastic degradation of acoustic pulses in rock. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1974, 8(4): 332-336.
- [78] Tonn R. The determination of the seismic quality factor Q from VSP data; A comparison of different computational methods. *Geophysical Prospecting*, 1991, 39(1): 1-27.
- [79] 周辉, 渠广学, 杨宝俊. 用地震波频谱计算 Q 值的新方法. *长春地质学院学报*, 1994, 24(4): 461-467.
Zhou Hui, Qu Guangxue, Yang Baojun. New methods for calculating Q value using spectrum of seismic record. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1994, 24(4): 461-467.
- [80] 赵宪生, 黄德济. 地震记录的 Q 值正演模拟与反滤波. *石油物探*, 1994, 33(2): 42-48.
Zhao Xiansheng, Huang Deji. Forward modeling and filtering for Q of seismograms. *GPP*, 1994, 33(2): 42-48.
- [81] Dasgupta R, Clark R A. Estimation of Q from surface seismic reflection data. *Geophysics*, 1998, 63(6): 2120-2128.
- [82] Zhang C. *Seismic Absorption Estimation and Compensation*[D]. The University of British Columbia, 2008.
- [83] 王小杰, 印兴耀, 吴国忱. 基于叠前地震数据的地层 Q 值估计. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(3): 423-428.
Wang Xiaojie, Yin Xingyao, Wu Guochen. Estimation of stratigraphic quality factors on prestack seismic data. *OGP*, 2011, 46(3): 423-428.
- [84] Sun S. *Determination of Seismic Attenuation from Surface and Downhole Measurements*[D]. Oklahoma: University of Oklahoma, 2000.
- [85] 李宏兵, 赵文智, 曹宏等. 小波尺度域含气储层地震波衰减特征. *地球物理学报*, 2004, 47(5): 893-899.
Li Hongbing, Zhao Wenzhi, Cao Hong et al. Characteristics of seismic attenuation of gas reservoirs in wavelet domain. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(5): 893-899.
- [86] Zhang C, Ulrych T. Reflectivity guided Q analysis for reservoir description. // *SEG Annual Meeting, Houston*, 2009.
- [87] Gabor D. *Theory of communication — Part I: The analysis of information. Electrical Engineers — Part III: Radio and Communication Engineering*, *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1946, 93(26): 429-441.
- [88] Taner M T, Koehler F, Sheriff R E. Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 1979, 44(6): 1041-1063.
- [89] Castagna J P, Sun S, Siegfried R W. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*, 2003, 22(2): 120-127.
- [90] Ebro D. The low-frequency gas shadow on seismic sections. *The Leading Edge*, 2004, 23(8): 772.
- [91] Korneev V A, Goloshubin G M, Daley T M et al. Seismic low-frequency effects in monitoring fluid-saturated reservoirs. *Geophysics*, 2004, 69(2): 522-532.
- [92] Odebeatu E, Zhang J, Chapman M et al. Application of spectral decomposition to detection of dispersion anomalies associated with gas saturation. *The Leading Edge*, 2006, 25(2): 206-210.
- [93] Dilay A, Eastwood J. Spectral analysis applied to seismic monitoring of thermal recovery. *The Leading Edge*, 1995, 14(11): 1117-1122.
- [94] Mitchell J T, Derzhi N, Lichma E. Energy absorption analysis: A case study. // *SEG Annual Meeting, Denver*, 1996.
- [95] Mitchell J T, Derzhi N, Lickman E. Low frequency shadows: The rule, or the exception? // *SEG Annual Meeting, Dallas*, 1997.
- [96] Lichman E, Goloshubin G. Unified approach to gas and fluid detection on instantaneous seismic wavelets. // *SEG Annual Meeting, Dallas*, 2003.

- difference modeling. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013, 32:3439-3443.
- [65] Liu Yang and Sen M K. A hybrid absorbing boundary condition for elastic staggered-grid modeling. Geophysical Prospecting, 2012, 60(6):1114-1132.
- [66] Ren Zhiming and Liu Yang. A hybrid absorbing boundary condition for frequency-domain finite-difference modeling. Journal of Geophysics and Engineering, 2013, 10(5):054003(16pp).
- [67] 严红勇, 刘洋. 基于时空域自适应高阶有限差分的声波叠前逆时偏移. 地球物理学报, 2013, 56(3):971-984
Yan Hongyong and Liu Yang. Acoustic prestack reverse time migration with the adaptive high-order finite-difference method in time-space domain. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3):971-984.
- [68] Yan Hongyong and Liu Yang. Visco-acoustic prestack reverse-time migration based on time-space domain adaptive high-order finite-difference method. Geophysical Prospecting, 2013, 61(5):941-954.
- [69] Yan Hongyong and Liu Yang. Pre-stack reverse-time migration based on the time-space domain adaptive high-order finite-difference method in acoustic VTI

medium. Journal of Geophysics and Engineering, 2013, 10(1):015010(10pp).

[70] Ren Zhiming and Liu Yang. Multi-scale full waveform inversion using the second generation wavelet. 75th EAGE Conference Extended Abstracts, 2013, WP1010.

(本文编辑:宜明理)

作者简介



刘洋 教授, 1972年生; 1993年本科毕业于江汉石油学院物探专业, 1998年获石油大学(北京)应用地球物理专业博士学位, 2008~2009年在美国德克萨斯大学奥斯汀分校做访问学者。1998年博士毕业留校任教至今, 主要从事波动方程正演和偏移、地震各向异性、地面和VSP多分量地震、地震波吸收衰减及地震资料高分辨率处理等方面的研究。

(上接第34页)

- [97] 陈学华, 贺振华, 文晓涛等. 低频阴影的数值模拟与检测. 石油地球物理勘探, 2009, 44(3):298-303.
Chen Xuehua, He Zhenhua, Wen Xiaotao et al. Numeric simulation and detection of low frequency shadow. OGP, 2009, 44(3):298-303.
- [98] Wilson A, Chapman M, Li X Y. Frequency-dependent AVO inversion. // SEG Annual Meeting, Houston, 2009.
- [99] 吴小羊. 基于频谱分析技术的频散 AVO 反演研究 [博士学位论文]: 中国地质大学, 2010.
Wu Xiaoyang. Frequency dependent AVO Inversion using Spectral Decomposition Techniques [D]: China University of Geosciences, 2010.
- [100] 张世鑫, 印兴耀, 张广智等. 纵波速度频散属性反演方法研究. 石油物探, 2011, 50(3):219-224.
Zhang Shixin, Yin Xingyao, Zhang Guangzhi et al. Inversion method for the velocity dispersion-dependent attribute of P-wave. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(3):2019-224.
- [101] 陈学华, 贺振华, 赵岩等. 叠前分角度道集的瞬时谱差异信息提取及应用. 石油地球物理勘探, 2012, 47(1):89-94.
Chen Xuehua, He Zhenhua, Zhao Yan et al. Instantaneous spectral difference anomaly extraction on prestack multi-angle gathers and its application. OGP, 2012, 47(1):89-94.
- [102] Aki K, Richards P G. Quantitative Seismology. Freeman, 1980.
- [103] Gidlow P M, Smith G C, Vail P. Hydrocarbon detection using fluid factor traces: A case study: How useful is amplitude-versus-offset(AVO) analysis? // Joint SEG/EAEG summer research workshop, 1992, 78-89.

- [104] Russell B H, Gray D, Hampson D P. Linearized AVO and poroelasticity. Geophysics, 2011, 76(3):C19-C29.
- [105] Zong Z, Yin X, Wu G. AVO inversion and poroelasticity with P- and S-wave moduli. Geophysics, 2012, 77(6):N17-N24.
- [106] 宗兆云, 印兴耀, 张峰等. 杨氏模量和泊松比反射系数近似方程及叠前地震反演. 地球物理学报, 2012, 55(11):3786-3794.
Zong Zhaoyun, Yin Xingyao, Zhang Feng et al. Reflection coefficient equation and prestack seismic inversion with Young's modulus and Poisson ratio. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11):3786-3794.
- [107] Chi X G, Han D H. Fluid property discrimination by AVO inversion. // SEG Annual Meeting, New Orleans, 2006.

(本文编辑:朱汉东)

作者简介



印兴耀 享受国务院政府特殊津贴专家, 教授, 博士生导师, 1962年生; 1982年本科毕业于华东石油学院物探专业, 1989年获兰州大学无线电物理与无线电电子学专业硕士学位, 1998年获中国科学院地球物理研究所固体地球物理专业博士学位; 长期从事油气地球物理勘探方法研究, 已发表论文200余篇(其中SCI、EI检索80余篇); 现在中国石油大学(华东)从事地球物理领域的教学和科研工作。