

■ 油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助

基于蒙特卡洛和神经网络的 AVO技术研究及应用

Research and Application of AVO Technology
Based on Monte Carlo and Neural Network

王兴建 曹俊兴 李跃刚◎编著



科学出版社

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助

基于蒙特卡洛和神经网络的 AVO 技术研究及应用

王兴建 曹俊兴 李跃刚 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在着重分析岩石物理理论和 Zoeppritz 方程及其简化形式所构成的 AVO 正反演和属性分析的基础之上,从 AVO 属性分析、叠前反演、多属性融合三个方面用蒙特卡洛和神经网络对 AVO 技术进行拓展研究。AVO 属性分析可对碎屑岩沉积环境下的岩性流体性质进行识别,但由于存在一个大范围的岩性导制类似的 AVO 效应,预测只能定性分析。针对这一问题,提出基于蒙特卡洛方法的 AVO 属性定量分析方法。把非线性的神经网络方法引入叠前反演中。当地层横向岩性变化较大时,神经网络的自适应能力能够描述地震属性参数与岩性参数的关系。发展基于概率神经网络的叠前多属性融合技术,该技术能直接寻找井和地震数据之间的联系,这种联系不仅存在于叠后数据中,更多的存在于叠前数据中,这种联系可以是线性的,但更符合实际的是非线性的。

本书可供从事油气地球物理勘探、石油地质专业方向的研究生和科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

基于蒙特卡洛和神经网络的 AVO 技术研究及应用 / 王兴建, 曹俊兴, 李跃刚编著. —北京: 科学出版社, 2015.7

(油气藏地质及开发工程丛书)

ISBN 978-7-03-045284-9

I. ①基… II. ①王… ②曹… ③李… III. ①油气勘探-地震勘探-研究 IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 177500 号

责任编辑: 杨 岭 黄 桥 / 责任印制: 余少力

责任校对: 韩雨舟 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年8月第一版 开本: 787×1092 1/16

2015年8月第一次印刷 印张: 7 3/4

字数: 220千字

定价: 79.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

AVO (amplitude versus offset, 振幅随偏移距的变化) 技术是利用叠前道集上地震振幅随炮检距(或入射角)的变化来研究岩性和物性。其理论基础是岩石物理理论和 Zoeppritz 方程。岩石物理理论所涉及的弹性参数使 AVO 属性分析和弹性参数反演有了具体而现实的物理意义; Zoeppritz 方程回答波在水平界面反射的能量分配问题, 该方程的简化形式使 AVO 属性分析具有丰富的内容。

AVO 实用技术是 20 世纪 70 年代随着“亮点”技术所存在的局限性日益突显而孕育而生的。到 80 年代初, Ostrander 首先提出利用反射系数随入射角的变化识别“亮点”型含气砂岩, 他注意到: 含气砂岩反射振幅随偏移距增加而增加, 含水砂岩反射振幅随偏移距增加而减少, 这一现象的发现丰富了烃类检测的技术思路, 激起人们对 AVO 现象的极大兴趣。AVO 技术逐渐发展为三方面的内容: AVO 正演、AVO 属性分析、AVO 反演。

AVO 正演一般来说是建立在岩石物理理论和 Zoeppritz 方程基础之上的射线追踪正演方法。岩石物理理论主要指 Gassmann 和 Biot 独立发展的波在流体饱和岩石中传播的理论, 即 Biot-Gassmann 方程及其改进形式。

AVO 属性分析来源于根据不同的岩性参数对 Zoeppritz 方程的简化。AVO 属性分析用得最多的是 Shuey 简化公式, 即所谓的截距—梯度理论。在实际应用中, 可以从叠前地震数据中抽取角道集, 得到截距和梯度, 通过代数运算可得出各种属性参数, 属性参数以交汇图的形式显示出来, 达到检测异常的效果。Rutherford 和 Williams 把这些异常分为四类, 这四类异常现已成为人们检测含油气性的模板。实际上, 利用 AVO 属性来描述 AVO 异常时, 由于 AVO 属性存在不确定性, 使 AVO 异常存在一个大范围的岩性导制类似的 AVO 响应, 定量的 AVO 属性描述更具有实际意义。

AVO 反演是精细储层描述的必要技术手段, 是实现定量 AVO 分析的有效途径。利用该技术人们可以提取有效的、能够反映地层岩性变化的重要参数, 所以对此也进行了深入的研究。发展了包括弹性波组抗反演(Larsen, 1999)、多分量 AVO 反演(Ronen and Liner, 2000)等。

本书在着重分析岩石物理理论和 Zoeppritz 方程及其简化形式所构成的 AVO 正反演和属性分析的基础之上, 从 AVO 属性分析、叠前反演、多属性融合三个方面用蒙特卡洛和神经网络对 AVO 技术进行拓展研究, 并结合苏里格庙地区苏 14 井区的实际问题进行分析。

本书得到油气藏地质及开发工程国家重点实验室的资助, 深表谢意。

由于编者水平和学识有限, 书中难免有不足和疏漏之处, 敬请读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 AVO技术现状	1
1.2 AVO技术研究目的与应用研究立题依据	4
1.2.1 研究目的	4
1.2.2 应用研究立题依据	5
1.3 AVO技术研究方法和技术路线	5
1.4 AVO技术主要研究成果及创新点	7
1.4.1 主要研究成果	7
1.4.2 创新点	8
第2章 AVO理论方法	9
2.1 AVO技术岩石物理基本理论	9
2.2 AVO正演理论	18
2.3 AVO属性分析	28
2.4 AVO弹性参数反演理论	35
第3章 苏14井区沉积模式和储层物性特征	41
3.1 区域地质概况	41
3.2 沉积模式	42
3.3 储层物性特征	46
3.4 面临的主要问题	47
第4章 高保真叠前地震资料处理	49
4.1 原始资料分析	49
4.2 处理技术思路	50
4.3 主要处理技术及效果	51
第5章 AVO属性蒙特卡洛定量分析	56
5.1 流体替换建模	56
5.2 合成记录	58
5.3 AVO属性分析	60
5.4 蒙特卡洛方法	63
5.5 AVO属性蒙特卡洛定量分析	64
5.5.1 方法步骤	66
5.5.2 预测过程	67

第 6 章 叠前弹性参数及神经网络反演研究及应用 72

6.1 弹性波阻抗反演 72

6.2 叠前纵横波联合反演和 LMR 弹性参数反演 75

6.3 叠前神经网络反演 80

6.3.1 方法原理 80

6.3.2 应用实例 81

6.4 叠前反演小结 84

第 7 章 多属性融合技术 91

7.1 方法原理 91

7.2 方法步骤 96

7.3 应用实例 97

结论 108

参考文献 109



第 1 章 绪 论

随着勘探开发程度的不断提高,岩性与隐蔽油气藏成为勘探与开发的主要目标,其主要特征是储层性质越来越复杂,越来越多的储层在声波上没有明显的特征,如我国很多地方存在砂泥岩波阻抗差异很小的薄互层、特殊储集岩体(火成岩和变质岩等)、深部潜山储集体、大面积低渗透薄互层等。这些问题使利用叠后地震处理技术解决地质问题的能力和精度受到了限制,因为在叠后地震处理中叠加损失了重要的地震原始信息。叠前地震数据包含大量的有用信息,而 AVO 技术恰好能够从叠前地震数据中尽可能多地获取与地层岩性和含油气性有关的信息,因此是一门适应勘探发展需要的、具有巨大发展潜力的技术。

1.1 AVO 技术现状

AVO 技术是最近几十年发展起来的一项新的地震勘探技术,该技术是利用叠前道集上地震振幅随炮检距(或入射角)变化来研究岩性和物性,其理论基础是 1919 年发表的固体分界面的反射和透射理论——Zoeppritz 方程。虽然其理论基础早在 1919 年就已经诞生,但实用的 AVO 技术在 20 世纪 60 年代地震多次覆盖和数字技术的出现之后才成为可能。

20 世纪 70 年代随着“亮点”技术所存在的局限性日益突显,AVO 实用技术孕育而生。“亮点”技术使地震烃类检测能力有了很大提高,但随着该技术的实践,人们开始注意到它的局限性,因为某些特殊岩性体也可以在地震剖面上形成强反射而成为“亮点”,并不是如“亮点”技术所认为的是油气藏所致。80 年代初, 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,他注意到:含气砂岩反射振幅随偏移距增加而增加,含水砂岩反射振幅随偏移距增加而减少,这一现象的发现丰富了烃类检测的技术,激起人们对 AVO 现象的极大兴趣。

勘探地球物理协会(Society of Exploration Geophysicists, SEG)迅速印刷了有关 AVO 问题的简易教材,并先后出版三本关于 AVO 理论和技术方面的文集和专著。20 年来,AVO 技术不断成为人们研究的热点,SEG《前缘》杂志曾多次出版专集探讨 AVO 的理论、方法和技术。总的来说,AVO 技术包含三方面的内容:AVO 正演、AVO 属性分析、AVO 反演。

AVO 正演一般来说是建立在岩石物理理论和 Zoeppritz 方程基础之上的射线追踪正演方法。岩石物理理论主要指 Biot(1941)和 Gassmann(1951)独立发展的波在流体饱和的岩石中传播的理论,即 Biot-Gassmann 方程及其改进形式。Biot-Gassmann 方程可用于计算多孔介质饱含不同流体成分的地震速度。它通过已知的岩石基质、骨架和孔隙流体的

体积模量来计算流体饱和的多孔介质的弹性模量,根据岩石骨架性质计算流体替换对地震性质的影响。对于多孔介质,基质指的是构成岩石的矿物成分,骨架指的是岩石样品的格架,孔隙流体可以是气、油、水或三者的混合物。显然,该理论认为岩石不是单一的介质,而是由岩石骨架、饱含流体的孔隙所组成的多相介质,改写了由波动方程推导出的单一介质的速度表达式,使动力学参数和岩性更好地联系起来。但 Biot-Gassmann 方程也是对地下岩石介质的一种近似,该方程计算只适合于低频率情形,它要求满足:①岩石(基质和骨架)在宏观上是均匀的;②所有的孔隙内部是连通的;③孔隙充填无摩擦的流体;④岩石-流体系统是封闭的;⑤孔隙流体不与岩石固体部分发生作用,例如,不软化和硬化骨架。岩石介质由于有孔隙、裂缝、各向异性、孔隙填充物的存在,导致岩性发生了很大变化,不同状态岩石固有参数的确定仍是研究的热点之一。Zoeppritz 方程全面考虑了平面纵波和横波入射在水平界面两侧产生的纵横波反射和透射能量之间的关系,解析了平面波反射系数与入射角的关系,但其只适用于层状介质,对于介质内部则无能为力,所以基于波动方程的叠前正演才是人们追求的目标。

同时,Zoeppritz 方程由于在数学上的复杂性和物理上的非直观性,难于直接看清各参数对反射系数的影响以及分析介质参数对振幅系数的贡献。因此很多学者从不同的方面对 Zoeppritz 方程进行简化,以便明确反映不同的岩性参数,这也构成了 AVO 属性分析的基本内容。Richards 和 Frasier(1976)从位移和压力连续角度对 Zoeppritz 方程进行了近似,Aki 和 Richards(1980)在经典著作《定量地震学》中,通过利用射线参数和角度增量的近似关系,给出了和上述类似的弱反射近似公式。Shuey(1985)给出了用不同角度项表示的突出泊松比的反射系数近似表达形式;Smith 和 Gidlow(1987)在假设介质速度和密度满足经验公式条件下的加权叠加分析方法;Verm 和 Hilterman(1995)在 Shuey 近似方程的基础上通过假设反射界面两侧的平均泊松比近似为 $1/3$ 的情况下,给出了突出泊松比的另一种近似。杨绍国(1994)通过对 Zoeppritz 方程的幂级数展开,给出了物理意义明确的反射系数近似公式;Mallick(1993)通过对 Zoeppritz 方程射线参数形式的一阶近似,给出了用射线参数表示的反射系数近似形式;Fatti(1994)给出了以相对波阻抗变化表示的近似方法。这些反射系数的不同岩性组合的表达式还在不断改进之中,而且已经扩大到包括转换波在内的多波的形式。AVO 属性分析用得最多的是 Shuey 简化公式,即截距-梯度理论。在实际应用中,可以从叠前地震数据中抽取角道集,得到截距和梯度,通过代数运算可得出各种属性参数,它们以交汇图的形式显示出来,达到检测异常的效果。Rutherford 和 Williams(1989)把这些异常分为四类,这四类异常现已成为人们检测含油气性的模板。实际上,利用 AVO 属性来描述 AVO 异常时,由于 AVO 属性存在不确定性,使 AVO 异常存在有一个大范围的岩性导制类似的 AVO 响应,定量的 AVO 属性描述更具有实际意义。

AVO 反演是精细储层描述的必要技术手段,是实现定量 AVO 分析的有效途径。利用该技术人们可以提取有效的、能够反映地层岩性变化的重要参数,所以也对此进行了深入的研究。

就 AVO 反演发展过程方面,Simmons 和 Backus(1994)提出基于波形的一步法线性反演;Malkin(1999)在传统的稀疏脉冲反演的基础上,提出 Eigenvector-Basis Expansion

波阻抗反演方法; Wang(1999)在给出射线参数表示的反射系数公式的基础上, 讨论了利用该公式同时反演三个岩性参数的可能性和可靠性。Jin(1999, 2000)利用实际数据的 PP 波和 P-SV 波联合反演讨论了多参数储层反演的方法, 并指出利用这种方法可以有效地识别和区分孔隙流体。Larsen 等(1999)利用 PP 波和 P-SV 波联合加权叠加理论讨论了同时反演纵、横波阻抗的方法。Ronen 和 Liner(2000)在他们的基础上, 提出了多分量 AVO 反演理论, 并讨论了利用该方法同时反演纵、横波阻抗及归一化密度、速度和拉梅参数的可行性。Kelly 和 Ford(2000)提出了 PP 波和 P-SV 波角度叠加反演的理论, 并指出这种角度叠加反演是最简单、最有效的 AVO 反演方法, 如果借助于各种岩性参量之间的关系, 利用该方法则能够反演更多的岩性参数。在国内, 许多等(2001)和唐建明(2002)也对线性、非线性 AVO 反演理论进行了较深入的研究。

在 AVO 岩性参数反演方面, 许多地球物理学家提出了多种不同的反演方法和理论。参数反演所用波的类型主要可以分为单波 AVO 和多波 AVO。单波 AVO 主要是利用单一的 PP 波或 P-SV 波进行参数反演。多波 AVO 主要是指结合 PP 波、P-SV 波(或 SS 波, SH 波等)联合反演。在多波 AVO 反演方面, 许多地球物理学家进行了深入的研究(Knapp et al., 2002; Jin et al., 1999; Jin et al., 2000; Larsen, 1999; Kelly and Ford, 2000; 杨绍国, 1994; 杨慧珠和阴可, 1996; 唐建明, 2002; 孙鹏远等, 2003)。目前生产上主要采用单一的 PP 波进行岩性参数反演, 包括 AVO 属性反演、交会图分析和加权叠加反演等。参数反演所用的方法主要分为线性反演和非线性反演等。线性反演方法主要包括最小二乘法、共轭梯度法和归一化线性反演等; 非线性反演方法主要指近年来发展起来的神经网络、遗传算法、模拟退火算法等。最小平方反演方法(最小二乘法)是一种最常见的 AVO 反演分析方法, Parson(1986), Smith 和 Gidlow(1987), Ferguson(1996), Goodway 等(1997)等都利用该方法进行岩性参数反演。其中, Smith 和 Gidlow(1987)的加权叠加方法是早期非常成功的反演方法, 它利用纵波反射系数(Aki-Richards 近似式)和 Gardner 等(1974)得出的经验关系, 用最小平方反演方法得到 $\Delta v_p/v_p$ 和 $\Delta v_s/v_s$ 叠加剖面。另外, 也有许多学者利用 Zoeppritz 方程的线性近似式反演两个或三个弹性参数, 如 Stolt 和 Weglein(1985), de Nicolao 等(1993), Ursin 和 Tjaland(1993, 1996)等。

反演方法还可以分为基于算子的(或直接反演方法)和优化的(或基于模型的)反演方法两类, 蒙特卡洛技术如模拟退火法(Kirkpatrick et al., 1983; Rothman, 1985, 1986; Aarts and Korst, 1989; Basu and Frazer, 1989; Frazer and Basin, 1990; Sen and Stoffa, 1992; 赵改善, 1992; 张霖斌等, 1997; 顾汉明等, 1999; 许云书, 2004)和遗传算法(Holland and John, 1975; Frazer and Basu, 1990; Berg, 1990; Sen and Stoffa, 1991; Sen and Stoffa, 1992; Smith et al., 1992; Mallick, 1992a, 1992b, 1993; Nolte and Frazer, 1994)都是非线性基于模型的反演方法, 它们采用随机搜索过程来估算参数, 属于非线性多参数反演。Mallick(1995, 1999)利用 Shuey(1985)和 Mallick(1993)提出的 P 波反射系数近似公式采用遗传算法对基于模型的 AVO 反演进行了研究。

近年来, 在研究三维 AVO 分析方面也取得了不错的成果, 利用三维密度差异体或速度差异体等 AVO 属性体大大提高了 AVO 烃类分析能力, Schmidt 和 Skidmore(2001)

从常规的纵波三维数据体中反演出纵波速度变化比、横波速度变化比和密度变化比三个弹性参数来预测油气田的含烃区域以及含烃饱和度的情况,取得了较好的效果。随着多波地震勘探的发展,多波多分量 AVO 技术也将成为 AVO 技术发展的一个重要方面。Ruger 和 Tsvankin(1996)以及 Ruger(1997)给出了各向异性 Zoeppritz 方程的比较精确并且实用的近似公式,并利用该近似公式讨论了方位 AVO 及裂隙检测等问题(Ruger, 1996, 2001),各向异性 AVO 技术逐步得到发展(Philippe et al., 2004)。随着野外采集中排列长度的增大,AVO 分析中逐渐开始利用远偏移距信息,发展了广角 AVO 分析技术。

综观整个 AVO 技术的发展历程,我们可以看到自 20 世纪 80 年代以来,AVO 技术在这个方面都取得了前所未有的成绩,进入到精细描述储层的实用阶段。

1.2 AVO 技术研究目的与应用研究立题依据

1.2.1 研究目的

AVO 技术作为地震油藏描述的一项先进技术,已取得不小的成就,现已拥有一套比较成熟的处理、解释模式。但由于受地层岩性、油气规模和地震信号中噪声的影响,也经历了许多失败和挫折,其存在的主要问题可归纳如下:①反射振幅同时受多种弹性参数的综合影响,如果孤立地用某一个或几个参量来定性表征反射振幅随偏移距的变化规律势必会有一定的片面性,甚至会出现错误的结果;②在应用 AVO 技术时,影响振幅变化的因素不能得到最大限度的校正和补偿也影响了 AVO 技术的应用效果;③在 AVO 分析过程中,人为假设纵、横波速比近似为 2,这在很大程度上限制了其应用范围,甚至还可能造成很多假象;④基于 Zoeppritz 方程的近似公式大多都是弱反差近似,对于岩性差异较大的地层,这些近似公式将会出现较大的误差,这很可能影响了 AVO 参数反演的精度和可靠性;⑤AVO 分析技术是建立在平面波理论基础之上的,对于复杂地层或复杂介质,平面波理论是否可以通过简单的补偿来正确描述球面波的特征还有待进一步深入研究;⑥对于同一地震资料,不同处理人员可能会反演出不同的地层弹性参数,也就是说,地球物理反演方法本身的不确定性很可能影响了 AVO 技术的应用效果;⑦另外,目前陆上勘探资料的低信噪比也是影响 AVO 应用效果的另一主要因素。当然,问题会随着人们认知的不同而出现更多,但无非需要从以下几个方面促进 AVO 技术的不断发展:①理论的不完善,包括传播理论和岩石物理理论;②叠前振幅的保真问题,由于 AVO 技术依赖于振幅随偏移距的变化,真实的振幅信息是 AVO 技术的基础;③从定量的角度研究 AVO 异常情况,因为 AVO 属性分析只是定性的 AVO 分析,存在岩性导致的 AVO 效应;④提高 AVO 反演精度,利用储层参数对油气藏进行精细描述。本书拟从振幅保真问题、AVO 属性定量分析、非线性叠前反演、多属性融合四个方面对 AVO 技术进行更进一步的分析研究。

AVO 技术所利用的叠前数据保留了丰富的信息,可以同时提供纵、横波速度、密

度、泊松比等弹性参数与各向异性参数信息,为复杂储层的地震描述和精细油藏描述提供了有力的武器,它的进一步开发应用必将带来巨大的经济和社会效益。

1.2.2 应用研究立题依据

苏里格气田是目前我国发现的一个超大型气田,是西部大开发的龙头工程——“西气东输”的主力气田之一,同时也是陕京二线工程的最主要的资源基础。苏14区块位于苏里格气田中区南部,面积为 850 km^2 。2006年该区块部署采集高精度二维地震23条测线375 km,满覆盖240 km;完成钻井30口,集中在区块南部。为扩大产能,勘探区域向北部扩展。2007年计划新建产能 $4.0\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,在北部部署高精度二维开发地震测线37条850 km。

苏14井区同整个苏里格庙地区一样,气藏类型是受控于上古生界河流、三角洲砂体的大型低孔、低渗岩性气藏;主力气层为二叠系下石盒子组盒8段、山1段。从前期钻井和勘探开发来看,气田主要存在以下几个问题:

(1)储集砂体非均质性强,连续性较差。造成了单井控制储量低、气井产量低、压力下降快、稳产能力较差。但在整体低丰度的背景下存在一定的储量相对富集区,优选富集区块是尽早实现规模效益开发的基础和前提条件,也就是需要确定储层的含气饱和度。

(2)地表条件差,地震观测数据采集要求高,数据质量不高,振幅保真难度大。

(3)经测井解释研究工作表明,气层与致密砂岩存在较大的波阻抗差;气层与泥岩的波阻抗有较大的重叠;致密砂岩与泥岩存在一定的波阻抗差。显然,通过叠后资料处理解释工作无法完成气层与泥岩的有效区分。

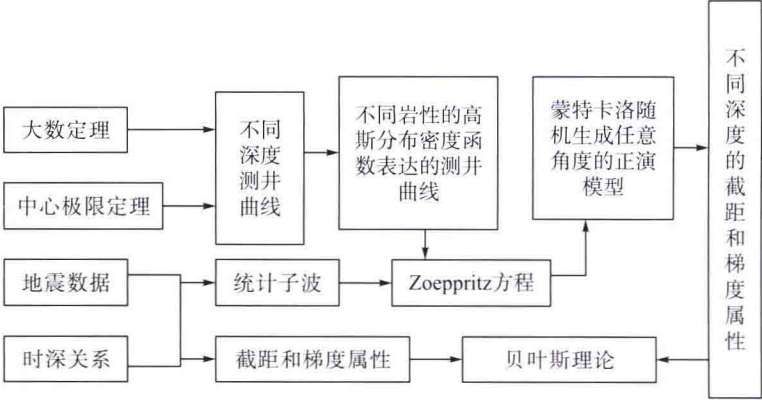
(4)含气的有效储层厚度在井间变化较大,厚的近20 m,薄的不到3 m,单井有效厚度小于5 m的约占总有效储层厚度的30%。薄层识别不易。

本书针对气田勘探开发形势的需要和AVO技术具有的含丰富岩性和储集层信息的优点,在系统研究和发展AVO技术的基础之上,对苏14井区进行实际应用研究,为气田实际生产解决储层预测中的难题起到很好的示范作用。

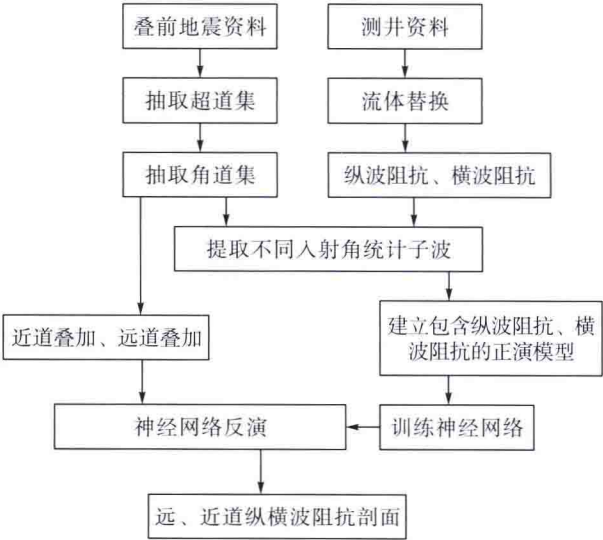
1.3 AVO 技术研究方法和技术路线

本研究遵循先理论分析创新、然后实际应用验证的逻辑思想。首先对AVO处理技术进行系统研究,认为AVO处理技术主要包括AVO正演、AVO属性分析、AVO反演三方面,对它们所涉及的方法原理进行详尽的阐述。在阐述的基础上,针对苏里格气田勘探开发所遇到的问题,把蒙特卡洛方法引入AVO属性分析中,发展了定量的AVO属性分析方法,并应用在三维叠前数据上;在AVO反演方面,将神经网络方法应用到叠前弹性参数反演中,提高了反演的分辨率;在AVO属性分析中,利用概率神经网络进行多属性融合分析,得到储层参数。具体采用如下的技术路线。

1. 基于蒙特卡洛方法的 AVO 属性定量分析



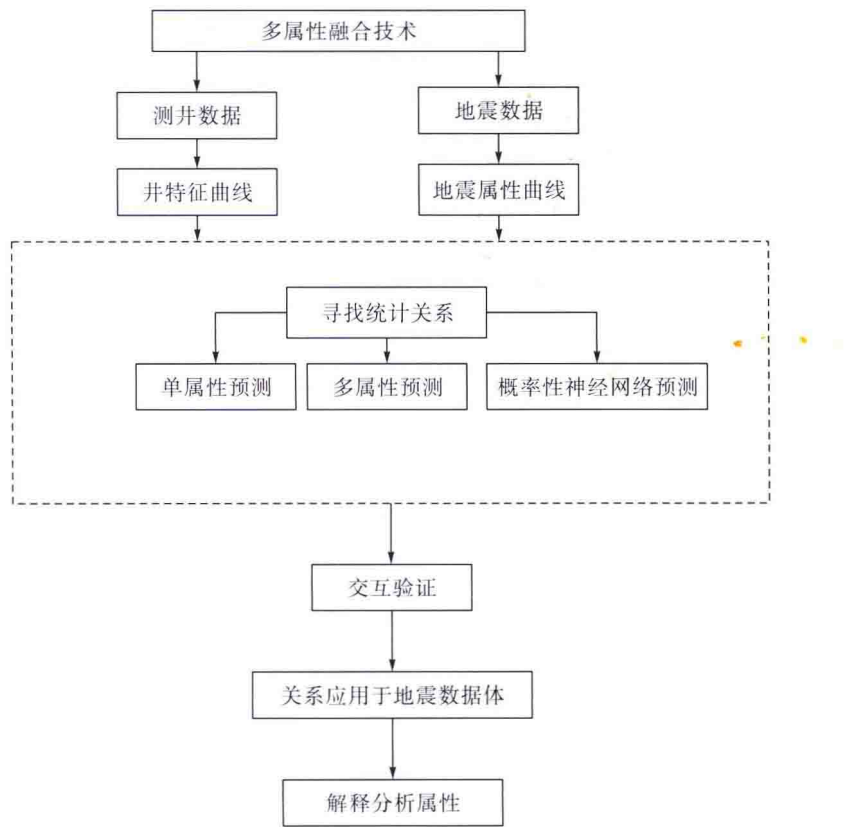
2. 叠前神经网络反演



在上述技术路线的基础上，还允许得到密度、拉梅常数、剪切模量、纵横波速度等，利用这些岩性参数可以很好地区分岩性和含气性情况。

3. 基于概率神经网络方法的多属性融合

基于概率神经网络方法进行多属性融合，在该技术中挖掘了如下特点：①直接预测物理属性，如孔隙度等，而不是从反演的波阻抗中得到；②把属性融合技术应用到叠前数据上，而不仅仅局限在叠后数据中；③把非线性方法应用到确立测井资料和地震数据的关系中。



1.4 AVO 技术主要研究成果及创新点

1.4.1 主要研究成果

(1)系统研究 AVO 技术基础理论，并把其归纳为三个方面：AVO 正演、AVO 属性分析、AVO 反演。AVO 技术得益于岩石物理理论的建立，岩石物理理论经历了从单相介质向双相介质的发展过程，使流体替换建模得以实现。Zoeppritz 方程全面考虑了平面纵波和横波入射在水平界面两侧产生的纵、横波反射和透射能量之间的关系，解析了平面波反射系数与入射角的关系。岩石物理理论和 Zopeeritz 方程使 AVO 正演得以实现。对 Zoeppritz 方程进行各种形式的简化，体现不同的弹性参数对反射系数的贡献，构成了 AVO 属性定性分析的内容。在 AVO 正演的基础上，重点分析弹性波阻抗反演和纵横波联合反演。

(2)通过对苏里格气田苏 14 井区测井资料分析、沉积模式和储层物性的研究，认为该井区产气层为下二叠统山西组山 1 段至中二叠统下石盒子组盒 8 段，为砂泥岩地层。这是一个低压、低渗透、低丰度，以河流砂体为主体储层的大面积分布的岩性气藏。研究区盒 8 砂体属辫状河沉积，山 1 砂体属曲流河沉积。盒 8 储层的砂岩孔隙度主要分布于 5%~12%，平均为 8.95%；渗透率主要分布在 $0.06 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为

$0.735 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。山 1 储层的砂岩孔隙度一般为 $5\% \sim 11\%$ ，平均为 8.5% ；渗透率一般为 $0.065 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $0.589 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

(3)研究了叠前地震资料处理技术，针对苏 14 井区 2005 年采集的二维资料质量不高的特点，对其进行去噪、振幅恢复、剩余静校正等处理，并形成一套叠前振幅处理的方法流程。

(4)发展了基于蒙特卡洛方法的 AVO 属性分析，把 AVO 属性分析从定性分析提高到定量分析的阶段。利用测井曲线进行趋势分析得出不同岩性参数的概率密度函数，基于蒙特卡洛方法生成概率统计模型，按照不同深度得到砂岩不同流体的概率分布图。对叠前地震数据提取目的层计算得到泊松比属性图，选取不同区域对模型得到的概率分布图进行校准。用贝叶斯公式计算不同流体的概率值，达到定量分析的目的，并进行了实际应用。

(5)把非线性的神经网络方法引入到叠前反演中。基于近道和远道叠加的基础上，对苏 14 井区 30 条测线进行神经网络反演，并把训练的神经网络推广到没有井的苏 14 井区北部，得到北部区域的岩性剖面。

(6)研究了基于概率神经网络的多属性融合技术。在分析单属性预测和多属性预测的基础上，利用非线性的概率神经网络方法把属性预测引入到叠前数据，进行自然伽马、孔隙度等参数预测，并应用到整个苏 14 井区。

1.4.2 创新点

(1)提出基于蒙特卡洛方法的 AVO 属性定量分析方法。AVO 属性分析可对碎屑岩沉积环境下的岩性流体性质进行识别，但由于存在一个大范围的岩性导制类似的 AVO 效应，预测只能定性分析。基于蒙特卡洛方法的 AVO 属性定量分析方法利用测井曲线进行趋势分析得出不同岩性参数的概率密度函数，并生成概率统计模型，按照不同深度得到砂岩不同流体的概率分布图。两者的本质区别是 AVO 属性分析是用测井数据在不同偏移距上的外推得到的，而 AVO 属性定量分析是认为测井数据与地震数据之间满足贝叶斯理论得到的。

(2)把非线性的神经网络方法引入到叠前反演中。神经网络是以径向基函数为内核建立地震属性和测井特征属性之间的映射关系，当地质岩性类别变化或地震参数修改时，该神经网络会自动适应新的变量，调整权系数，直到收敛。当地层横向岩性变化较大时，神经网络地震储层能够描述地震属性参数与岩性参数关系。针对苏里格庙地区苏 14 井区地层非均质性强、砂泥岩互层的情况，应用概率神经网络进行岩性反演分类，取得了很好的效果。

(3)发展了基于概率神经网络的多属性融合技术。近年来，随着勘探开发工作从寻找大型油气田向精细开采已有油气田的转变，多属性融合技术越显重要。突破传统的属性融合方法，拟在三个方面取得新的发展：①直接预测物理属性，如孔隙度等，而不是从反演的波阻抗中得到；②把属性融合技术应用到叠前数据上，而不仅仅局限在叠后数据中；③把非线性方法应用到确立测井资料和地震数据的关系中。通过对苏里格地区的测井、钻井资料的各类参数综合分析，在 AVO 反演的基础上，实现了储层物性参数的预测，如孔隙度、含气饱和度、渗透率等。

第 2 章 AVO 理论方法

2.1 AVO 技术岩石物理基本理论

AVO 技术是利用叠前道集上地震振幅随炮检距(或入射角)的变化来研究岩性和物性,它能够得到地层界面上、下介质的密度、纵波速度和横波速度,即三参数,进而可以计算分析得到岩性和流体参数。

AVO 技术包含三方面的内容: AVO 属性分析、AVO 正演、AVO 反演。这三方面的技术需要实际采集叠前地震资料和根据测井得到的岩性参数作为处理对象。对于叠前地震资料需要保幅处理和偏移距道集向角道集转换等理论;对于岩性参数需要岩石物理模型和流体替换建模等理论。AVO 纵横波速度是 AVO 理论讨论的重点参数。

波在岩石中传播的速度是和岩石的变形程度和形式有关的。岩石的变形有两种形式,即拉压变形和剪切变形(图 2-1)。

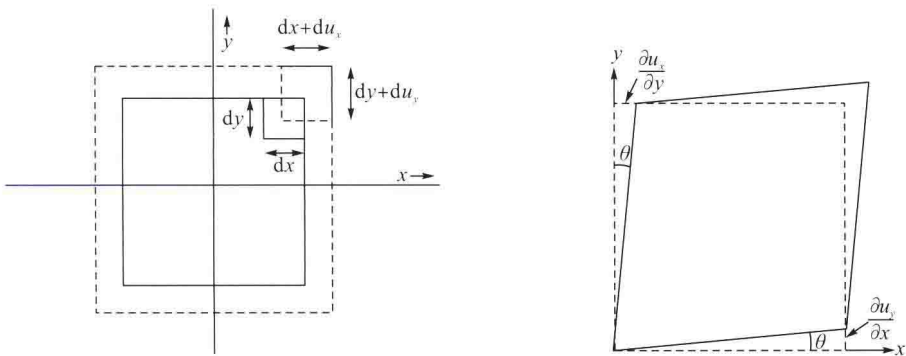


图 2-1 岩石的两种变形形式

岩石的变形程度是用应变来确定的,引起应变的力称为应力,在岩石变形的弹性极限以内,应力和应变之间的关系是由胡克定理来描述的:

$$\sigma = c\epsilon \tag{2-1}$$

式中, σ 为应力, c 为弹性常数, ϵ 为应变。在单向拉压的情况下, c 为体积模量,用 k 来表示。在纯剪切的情况下, c 为剪切模量,用 μ 来表示。

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_{xx} & p_{xy} & p_{xz} \\ p_{yx} & p_{yy} & p_{yz} \\ p_{zx} & p_{zy} & p_{zz} \end{bmatrix} \tag{2-2}$$

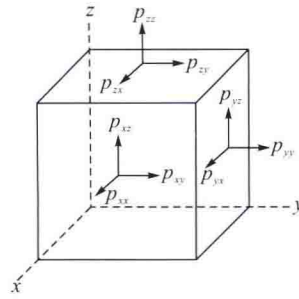


图 2-2 岩石微元受力示意图

由图 2-2, 对于一个岩体微元来说, 有 9 个可能的应力分量, 但根据剪应力互等定理, 只有 6 个是独立的, 3 对切应力互等, 即 $p_{xy} = p_{yx}$ 、 $p_{xz} = p_{zx}$ 及 $p_{yz} = p_{zy}$ 。

同样, 与应力对应的, 有 9 个可能的应变分量, 也只有 6 个是独立的, 3 对切应变互等, 即 $e_{xy} = e_{yx}$ 、 $e_{xz} = e_{zx}$ 及 $e_{yz} = e_{zy}$ 。

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

在完全各向异性弹性情况下, 一般的应力与应变关系在弹性模量矩阵中包含 21 个分量, 如下所示:

$$\begin{bmatrix} p_{xx} \\ p_{yy} \\ p_{zz} \\ p_{yz} \\ p_{xz} \\ p_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ 0 & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ 0 & 0 & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & C_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{zz} \\ e_{yz} \\ e_{xz} \\ e_{xy} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

对于各向同性情况下, 矩阵形式要简单得多, 只包括 9 项, 只有 2 个独立值, 称为 Lamé 系数 λ 和 μ :

$$\begin{bmatrix} p_{xx} \\ p_{yy} \\ p_{zz} \\ p_{yz} \\ p_{xz} \\ p_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{zz} \\ e_{yz} \\ e_{xz} \\ e_{xy} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

把静态的应力应变关系变换为动态的速度影响包括两步:

(1) 通过 Newton 定律: $F = ma$ 引入动量。

(2)引入质量，因为质量(m)是密度与体积的乘积。
最终的形式是波动方程：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2-6}$$

式中， v 为速度，是 ρ 、 λ 和 μ 的函数。

从波动方程可以导出和弹性参数相关的速度方程：

$$v = \left(\frac{M}{\rho}\right)^{1/2} \tag{2-7}$$

式中， M 为体积模量； ρ 为密度。典型介质的体积模量如表 2-1。

表 2-1 典型介质的体积模量

类型	数值	单位
石灰岩	60	GPa
砂岩	40	GPa
空隙砂岩	0.9	GPa
水	2.38	GPa
油	1.0	GPa
气	0.021	GPa

若 $M=\lambda+2\mu$ ，则可得到

$$v_P = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}\right)^{1/2} \tag{2-8}$$

若 $M=k+4/3\mu$ ，则可得到

$$v_P = \left(\frac{k + 4/3\mu}{\rho}\right)^{1/2} \tag{2-9}$$

若 $M=\mu$ ，则可得到

$$v_S = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{1/2} \tag{2-10}$$

岩石物理另外一个重要的参数是泊松比 σ ，令 $\gamma=\left(\frac{v_P}{v_S}\right)^2=k/\mu+4/3$ ，则 σ 可定义为：

$\sigma=\frac{\gamma-2}{2(\gamma-1)}$ ，图 2-3 定义了泊松比与纵横波速度比的交汇图。

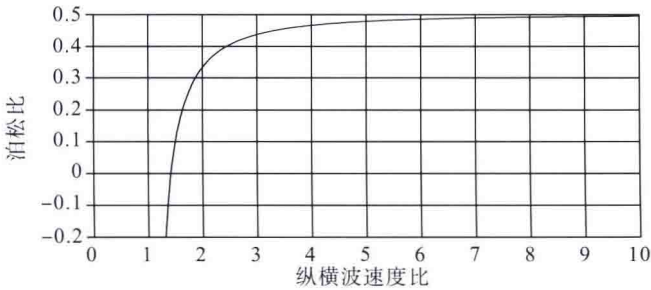


图 2-3 纵横波速度比与泊松比交汇图(CGG, AVO 反演资料)