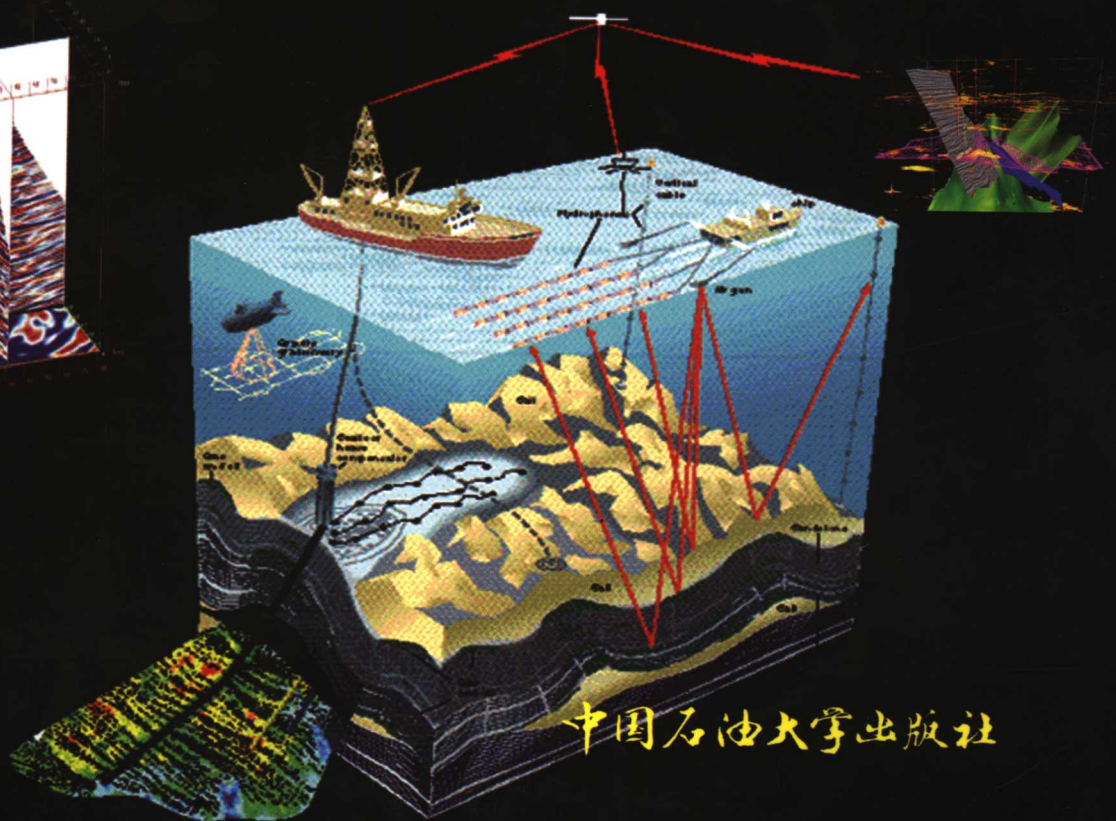




地震技术新进展

印兴耀 韩文功 李振春 王兴谋 刘洪文 编著



地震技术 (下)

新进展

印兴耀 韩文功 李振春 王兴谋 刘洪文 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地震技术新进展(下)/印兴耀等编著. —东营:中国石油大学出版社, 2006.3

ISBN 7-5636-2203-9

I. 地... II. 印... III. 地震勘探 IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 018915 号

书 名: 地震技术新进展(下)

作 者: 印兴耀 韩文功 李振春 王兴谋 刘洪文

责任编辑: 李 锋 (电话 0546 - 8392791)

封面设计: 傅荣治 (电话 0546 - 8391805)

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://cbs.hdpu.edu.cn>

电子信箱: bianwn@mail.hdpu.edu.cn

印 刷 者: 沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546 - 8391797)

开 本: 185 × 260 印张: 21.5 字数: 522 千字

版 次: 2006 年 3 月第 1 版 1 次印刷

定 价: 60.00 元

前言

近几年来,地震勘探技术得到了飞速发展,地震技术的应用已经从传统的勘探领域进入到开发领域。地震技术在采集、处理、解释等方面都有了很大进步。面对日新月异的地震技术,为掌握目前的发展现状,展望未来的发展趋势,胜利油田有限公司与中国石油大学共同开展了地震勘探新技术的发展战略研究。本书从以下 12 部分进行了分析和阐述。

地震采集是为后续的地震处理和分析提供第一手资料,它的品质直接关系到地震处理和解释成果的质量。第一章地震采集技术的发展从基础理论入手,对表层结构调查、采集设计、地震波的激发与接收、质量监控与评价和特殊地表地质条件下的数据采集等进行了讨论。值得一提的是,近年来井下地震仪器设备发展迅猛,对井间地震技术的发展起到了巨大的推动作用,所带来的井间地震数据质量的提升、采集方法的简便、采集周期的缩短直接使得井间地震技术成为一项实用的特殊地震勘探技术。

由于岩石物理是连接地震数据和储层属性与参数的桥梁,它在近年来新发展起来的一些新方法、新技术中起到了重要的作用,如四维地震、地震岩性识别、“亮点”技术和 AVO 分析等。第二章重点讨论了近年来关于岩石及其流体性质与波速关系的实验室研究方面所取得的成果,和以 Gassmann 方程为代表的岩石物理理论上的进展,这些研究结果对于怎样从地震波中获得储层参数也具有非常重要的意义。

地震波传播理论是整个地震勘探的基础,正演模拟是研究地震波在岩石介质中传播特点和传播规律的有效工具。第三章简要介绍了目前地震正演模拟的各种方法的原理和特点,重点介绍了各种射线追踪法的基本原理、有限差分数值解的差分算法、流体—固体界面上谱元素法模拟的原理和反射率法等。最后对各向异性介质和双相各向异性介质中的地震波场进行了数值模拟和简要分析。

第四章对目前地震资料处理中的两项关键技术——多次波消除技术和静校正技术进行了较为详尽的阐述。重点对反馈法和反散射法对消除不同类型多次波的原理和应用进行了比较;对模拟退火剩余静校正、分频剩余静校正、模型迭代剩余静校正等方法,以及初至波曲面拟合、初至反演、扩展广义互换法、折射波相对静校正和交互迭代静校正等方法都进行了较为系统的总结,给出了技术发展展望。

在地震成像方面,三维叠前时间偏移逐步成为常规地震处理模块;考虑到叠前深度偏移对速度模型的敏感性,偏移速度建模已成为地震工作者研究的重点;共聚焦点(CFP)成像技术和共反射面(CRS)叠加技术都取得了较好的实用效果;随着目前对地震保幅处理要求的提高,近年来,地震工作者开始研究地震保幅成像,并取得了一些突破性进展和部分实际应用成果。第五章对该领域的发展进行了综合分析和展望。

AVO技术的出现对解决“亮点”技术的陷阱提供了有利的佐证,是目前认为烃类检测中最好的手段之一。本书第六章系统地介绍了AVO技术的发展史、地震反射透射的基本原理、气层AVO分类及流体检测因子、AVO正反演方法、AVO处理和解释方法等的原理应用实例。最后对近几年来出现的弹性波阻抗反演技术的基本原理进行了介绍,并给出了实际例子。

三维地震属性体是从三维地震数据体中提取的反映运动学、动力学或统计学特征的信息,可以更准确地反演油藏特征参数,预测储层参数的空间变化。利用三维属性体来反演油藏参数,也将是新的探索和研究内容,具有很大的发展潜力。第七章主要介绍了各种地震属性的提取方法及其地质意义、相干体技术、属性优化、模式识别、定量地震相分析、储层参数估算等方法技术的基本原理及其应用,并简要分析了地震属性技术的现状及其发展趋势。

在勘探地震学中,尤其是对岩性和流体研究、砂页岩识别、各向异性分析等主导方面,许多使用转换波进行的勘探都取得了成功。多波勘探基本测量包括岩心测量、横波测井、3C VSP、正演模拟以及多分量陆地和海上观测等。综合矢量和多种模式的波的概念将会改善解释结果,尤其是与叠前偏移技术和各向异性技术相综合的情况下,处理和解释转换波数据将会变得有效和成熟。本书第八章对多波地震勘探的相关理论和方法进行了论述。

第九章井孔地震技术主要介绍了当今井孔地震学的几种主要观测技术,内容包括井间地震技术、VSP观测、随钻地震技术以及垂直电缆勘探技术等,并简要讨论了这些特殊观测方法资料处理中的关键技术,如层析成像技术、射线追踪、波场分离技术以及井孔地震技术的应用领域和发展前景。

时间推移地震技术,也称时移地震或四维地震技术,是最近十年新兴起的用于油藏管理的开发地震技术,第九章对其进行了简要阐述。本章从技术的产生,到可行性分析方法的确立,以及时移地震资料的野外采集方法、资料处理技术(尤其是资料间的匹配处理)、时移地震资料的综合解释等内容都作了相关的介绍。

第十一章介绍了地震资料并行处理技术。随着微机群技术的迅猛发展,大批量的地震资料处理急需高速度、高性能的计算机技术来配套,第十一章介绍了地震资料并行处理技术的基本概念、并行处理需要的硬件和软件环境、并行处理的模式以及并行程序设计思想和方法等内容,并结合地震资料的实际并行处理程序给出了具体的例子。

在本书的最后,基于胜利油田多年来开展的高分辨率地震勘探攻关的理论、方法和技术,对地震资料分辨率的基础理论、高精度层位标定技术和方法、高分辨率地震反演方法和应用、叠后提高地震剖面分辨率的方法和技术及地震属性分析等油气检测技术进行了全面系统的深入分析。给出了高分辨率资料解释技术在胜利油田的勘探开发中所取得的显著效果和所解决的常规三维资料难以解决的一些复杂地质问题,发现了许多小幅度构造圈闭和岩性油气藏,充分体现出高分辨率地震勘探技术攻关的效果和效益。

本书的编写工作是在中石化胜利油田有限公司和中国石油大学的部分专家和教授的共同努力下完成的。其中,韩文功教授级高工、王兴谋高工和刘洪文高工编写了第一章和第十二章,印兴耀教授编写了第二章,孙成禹副教授编写了第三章和第六章,李振春教授编写了第四章的第一节和第五章,张军华教授编写了第四章的第二节、第十章和第十一章,乐友喜教授编写了第七章,杜启振教授编写了第八章,宋建国副教授编写了第九章。本书中的大部分内容都是上述专家和教授以及课题组多年来的科研成果,体现了编写内容的先进性、前瞻

性和实用性。

在本书的编写过程中,始终得到中石化胜利油田有限公司物探研究院和中国石油大学地球资源与信息学院各级领导和有关专家的亲切关怀和大力支持,在此谨向他们表示衷心的感谢!对于文中的纰漏和不足,敬请广大专家同仁给予指正!

作 者

2005 年 5 月

目 录

第六章 AVO 分析技术	1
第一节 概述	1
第二节 AVO 分析的理论基础	4
第三节 AVO 分析的基本方法	14
第四节 AVO 的处理技术	21
第五节 AVO 分析和解释技术	30
第六节 弹性波阻抗反演技术	43
第七节 影响 AVO 分析的因素和 AVO 分析研究前缘	49
参考文献	54
第七章 地震属性技术	58
第一节 地震属性提取及分类	58
第二节 相干体技术	76
第三节 地震属性优化	82
第四节 地震属性分析方法	89
第五节 地震属性技术现状与发展趋势	112
参考文献	114
第八章 地震各向异性与多波勘探	120
第一节 前言	120
第二节 P 波成像	122
第三节 P 波表征	127
第四节 横波	130
第五节 转换波(C 波)	136
第六节 多波联合勘探	147
第七节 展望	156
参考文献	157
第九章 井孔地震技术	161
第一节 概述	161
第二节 井孔地震的观测方式及基本原理	163
第三节 井孔地震技术的应用	173
第四节 井间地震资料处理的进展	183

第五节	层析成像技术的最新进展	195
第六节	随钻地震技术	203
第七节	井孔地震技术的难点及发展趋势	222
	参考文献	225
第十章	时间推移地震技术	229
第一节	概述	229
第二节	时间推移地震的可行性分析	230
第三节	时间推移地震的野外采集技术	240
第四节	时间推移地震资料处理	245
第五节	时间推移地震资料的解释	253
	参考文献	258
第十一章	地震资料并行处理技术	259
第一节	前言	259
第二节	并行处理概述	259
第三节	并行处理的硬件环境和软件环境	265
第四节	并行处理的模式	270
第五节	并行程序设计	272
第六节	地震资料并行处理	284
	参考文献	296
第十二章	高分辨率地震勘探解释技术进展	300
第一节	高分辨率地震资料解释基础研究	300
第二节	高分辨率层位识别和标定技术	305
第三节	高分辨率地震反演技术	310
第四节	高分辨率地震综合解释技术方法和技术流程	317
第五节	高分辨率地震属性分析技术	320
第六节	高分辨率地震资料解释实例分析	324
	参考文献	333

第六章 AVO 分析技术

自 20 世纪 30 年代以来,油气勘探一直以地震反射波法为主,用地震反射剖面来确定是否有潜在油气圈闭的构造。如果油气能直接在地震剖面上检测,那么勘探就会更加有效。20 世纪 70 年代,出现了烃类直接检测的“亮点”技术。但随之而来的是“假亮点”和“非亮点”气藏给人们带来的困惑。AVO 分析是继“亮点”技术之后又一项直接根据地震信息检测油气的方法。在油气直接检测方面,它有效地解决了识别真假亮点的问题,比亮点技术更具有确定性。

由于 AVO 分析使用的是叠前数据道集,因此野外可以不额外增加采集工作量,但对数据采集的质量要求较高,一般应是高质量高分辨率的三维数据采集。同样,对处理也提出了更高的要求,需要一套严密的提高信噪比、提高分辨率、保持相对振幅的叠前数据处理方法。因此,AVO 分析处理由两个处理流程来组成:AVO 分析前叠前数据的“三高”处理流程和 AVO 分析处理流程。第一个流程的工作量大,难度也大;第二个流程工作量小,方法也相对简单。高质量的叠前数据处理,是 AVO 分析工作的基础,也是排除非油气因素 AVO 响应的最有效的方法。

近几年来,在 AVO 技术的基础上,又发展了叠前弹性波阻抗(EI)反演技术,这是一项比 AVO 技术更稳定、直接反演介质弹性参数的新技术。它的出现,为有效地利用地震叠前信息进行储层描述提供了技术支持。

第一节 概 述

一、AVO 的基本概念

在 AVO 分析中,经常提到几个基本概念,即 AVO、AVA 和 AVP。AVO 是振幅随炮检距变化(Amplitude Variation with Offset)或振幅和炮检距关系(Amplitude Versus Offset)的英文缩写,AVA 是振幅随入射角变化(Amplitude Variation with incident Angle)的英文缩写,而 AVP 则是指振幅随射线参数的变化(Amplitude Variation with ray-Parameter)。

AVO(或 AVA 或 AVP)是一项利用振幅随炮检距变化特征分析和识别岩性及油气藏的地震勘探技术。在地震勘探中,共中心点道集地震记录可以等价地用炮检距和反射界面深度来表示地震波的入射角,因此,振幅随炮检距变化(AVO)与振幅随入射角变化(AVA)是等价的概念。

在碎屑岩中寻找天然气,AVO 理论是简单明了的,碎屑岩孔隙内含天然气,会明显降低岩石的纵波(P 波)速度,而横波(S 波)速度相对保持不变。这就是说,当地层中含天然气时,会造成纵、横波速度比值的变化。这种变化必然导致在不同炮检距的反射振幅的分布有着不同的表现。

例如,含气砂岩/页岩界面或含气砂岩/含水砂岩界面,由于P波与S波速度比值的变化,入射波反射振幅的分布与不含气的常规界面入射波反射振幅的分布不同,其振幅随炮检距的增加而增加,而常规分界面上,一般随炮检距的增加而降低。这种异常的振幅响应,就成为直接检测油气的标志。

二、AVO 的基本思想

根据地震波反射和透射的理论,振幅系数随入射角变化与分界面两侧介质的地震参数有关。这一事实包含两层含义:第一,不同的岩性参数组合,振幅系数随入射角变化的特征不同。利用 AVO 正演模型,分析已知的油、气、水和岩性的 AVO 特征,有助于从实际地震记录中识别岩性和油气,定性进行地震油藏描述;第二,振幅系数随入射角变化本身隐含了岩性参数的信息。利用 AVO 关系可以直接反演岩石的密度 ρ 、纵波速度 α 和横波速度 β ,定量进行地震油藏描述。这两层含义反映了 AVO 分析的基本思想,也代表了两种最基本的 AVO 分析方法,前者称为正演方法,后者称为反演方法。叠后反演,我们只能得到纵波阻抗,而叠前反演,我们可以同时得到岩石的密度、纵波速度和横波速度,这也是 AVO 反演引人注目的原因。AVO 分析的关键是要充分挖掘和利用叠前地震记录中非零炮检距地震信息的潜力。

图 6-1 说明了 AVO 分析的基本原理,对于同一反射点而言,共中心点道集记录可用炮

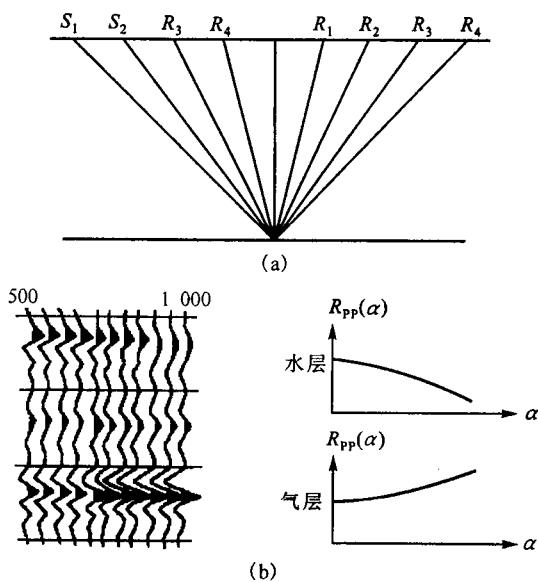


图 6-1 AVO 分析的基本原理

检距和深度等价表示入射角。对于理想的共中心点道集记录,含水砂岩 AVO 呈减少趋势,含气砂岩 AVO 呈增加趋势。不同的岩性参数组合,反射系数随入射角的变化不同。这表明:AVO 信息有助于直接检测岩性和油气。传统的地震岩性分析方法是建立在水平叠加基础上的“亮点”技术,这种技术改善了地震烃类直接检测技术,但也存在明显的局限性。叠加破坏了真实的振幅关系,损失了 AVO 隐含的横波信息。更为合理的地震岩性分析方法应该包括非零炮检距的地震信息,包括叠前振幅(或称 AVO)和叠前地震属性(或称广义 AVO)。总之,AVO 分析最重要的思想是通过分析叠前地震信息随炮检距变化特征,揭示岩性和油

气的关系。

三、AVO 发展历史

20 世纪 70 年代“亮点”技术的出现,使地震烃类检测能力有了很大提高。随着“亮点”技术的实践,人们开始注意到“亮点”技术存在的局限性,并不是所有的“亮点”都与气层有关,某些特殊岩性体也可以在地震剖面上形成强反射,出现所谓的“亮点”。因此,应用“亮点”技术进行烃类检测时,需要去伪存真。

20 世纪 80 年代初,Ostrander(1982)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炮检距增加而增加,含水砂岩反射振幅随炮检距增加而减少,这一现象的发现丰富了烃类检测的技术。虽然,理论上早已预示反射系数随入射角变化与岩性参数有关,早在 1955 年 Koefoed 就指出“不久的将来,利用反射系数曲线的形态分析岩性是可能的”,但直到 20 世纪 60 年代,地震多次覆盖和数字技术的出现,才使得这种技术成为可能。然而,由于水平叠加技术对地震信噪比的改善取得巨大成功,使得人们对 AVO 信息缺乏足够的注意力,以往几乎没有人注意到 AVO 的潜力。Ostrander 的工作标志着实用 AVO 技术的出现,激起人们对 AVO 现象的极大兴趣。SEG 迅速印刷了有关 AVO 问题的简易教材,并先后出版了 3 本 AVO 理论和技术方面的文集和专著。20 多年来,AVO 技术不断成为人们研究的热点,SEG《The Leading Edge》杂志曾多次出版专集探讨 AVO 的理论、方法和技术。Gassaway 等把 AVO 信息用于反演泊松比,直接解释岩性和油气。

1985 年,郑晓东在国内首先提出非零炮检距地震资料的正演和反演,并把 AVO 信息应用于“暗点”型气层的识别和检测。Shuey 对 Zoeppritz 的 P 波反射系数进行简化,提出一种抛物线形式的表达,这使得 AVO 属性分析和零炮检距剖面的提取得到广泛应用。Smith(1987)等提出用加权叠加方法估计流体因子和检测气层。为了充分挖掘 AVO 信息的潜力,不少研究者研究了用 AVO 属性(斜率和截距)交汇图识别岩性和油气的方法,并提出了 AVO 烃类检测因子。

Rutherford 把气层 AVO 响应分成 3 类,Castagna 等将 Rutherford 的工作推广为 4 类。为了避免 AVO 公式的复杂性,不少研究者对 Zoeppritz 方程进行简化,不同的近似表达强调 AVO 分析的不同侧面。国内郑晓东提出一种奇偶幂级数形式的近似公式,把前人的近似公式统一起来,使岩性参数分离和波型转换变得更为容易,并提出一种更一般的弹性参数反演方法——后 AVO 反演(Post AVO Inversion)。

不少研究者对 AVO 反演进行过深入的讨论。类似于声阻抗反演,Patrick(1999)提出一种与入射角有关的弹性阻抗反演,与常规的声阻抗相比,这种弹性阻抗对储层或烃类更为敏感。随着 AVO 应用的深入,人们也注意到利用双参数的 AVO 反演(P 波速度变化量和 S 波速度变换量,或 P 剖面 and S 剖面)有时无法区分低含气饱和度和高含气饱和度的气层,Kabir 建议用密度差异作为含气饱和度的指示因子,Sidmore 等也用密度参数变化量区分不同含气饱和度的气层。此外,人们还利用三维 AVO 信息检测裂缝,利用三维 AVO 属性体提高烃类检测的能力。

AVO 的提出最初仅仅是为了提高碳氢检测能力,今天 AVO 的发展已经超出了这个范畴,它已经渗透到地震勘探的各个领域。在裂缝检测、压力预测、油藏动态检测、油气预测、储层非均质性描述方面得到广泛应用。

第二节 AVO 分析的理论基础

AVO 分析的理论基础是地震波的反射和透射理论,早在 20 世纪初,描述振幅随入射角变化(简称 AVA)与介质弹性参数关系的近似理论——平面弹性波的反射和透射理论已基本建立,许多文献通过数值分析研究了振幅系数与弹性参数的关系。了解弹性分界面两侧地震波能量的分布对于理解和发展 AVO 方法是有益的,这里从精确解和近似解两个方面介绍 AVO 的基本理论。

一、Zoeppritz 方程

平面弹性波在弹性分界面上的反射和透射理论是地震勘探的理论基础,早在 20 世纪初已基本建立。我们知道,以法向入射到界面上的平面 P 波,在界面上不会转换成 S 波,通常情况下的反射系数公式就是针对这种情况导出的。除法向之外,以任何角度入射的 P 波,其中一部分能量要转换成 S 波。在反射界面上,入射波的分配可以用几个方程组之中的任何一个来表示,常用的是利用入射与反射和透射的位移幅度表示。包含反射系数描述质点位移的方程,最经典的是 Zoeppritz 方程(1919)。对于给定的反射界面,Zoeppritz 方程的解取决于两种介质中的纵横波速度和密度差异以及入射角。而纵横波速度比又直接反映在介质的泊松比上。这些研究,使人们逐渐认识到:含气砂岩的泊松比异常,可以为从地震记录中识别含气砂岩提供一种有效的手段。

不同相态介质分界面的反射和透射理论,可以在许多文献中查到,最复杂的情形是固体/固体分界面。Knott(1899)和 Zoeppritz(1919)分别给出了位移和位移形式的反射透射公式;Nafe(1957)和 Aki(1980)分别将 Knott 和 Zoeppritz 的工作推广到从分界面两侧入射 P 波和 SV 波的情形;郑晓东(1991,1992)把 Nafe 和 Aki 的工作分别推广成适合不同相态介质分界面的反射和透射统一公式。

1. 反射和透射的统一公式

假定弹性分界面两侧介质的密度为 ρ_1 和 ρ_2 ,纵波速度为 α_1 和 α_2 ,横波速度为 β_1 和 β_2 ,泊松比为 σ_1 和 σ_2 ,如图 6-2 所示。假设有一平面纵波自介质 I 以入射角 θ_1 入射到界面上,可能会产生 4 个波。它们分别是反射 P 波、透射 P 波、反射 SV 波和透射 SV 波。根据 Snell 定律,反射 P 波的反射角为 θ_1 ,设反射 SV 波的反射角为 φ_1 ,透射 P 波和透射 SV 波的透射角分别为 θ_2 和 φ_2 ,它们之间满足:

$$\frac{\sin \theta_1}{\alpha_1} = \frac{\sin \theta_2}{\alpha_2} = \frac{\sin \varphi_1}{\beta_1} = \frac{\sin \varphi_2}{\beta_2} = p \quad (6-1)$$

根据在介质分界面上的连续性条件,即界面两侧介质中质点所受的正应力、切应力、法向位移和切向位移都应该相等,据此可以得到 4 个方程。将以上 5 个波的波函数代入,并使用虎克定律和(6-2)式,经过复杂的推导后得到:

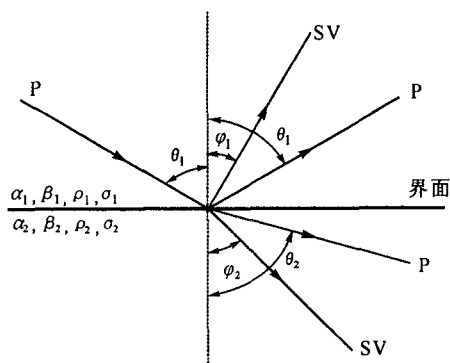


图 6-2 地震波在弹性界面上的反射和透射

$$\begin{bmatrix} \sin\theta_1 & \cos\varphi_1 & -\sin\theta_2 & \cos\varphi_2 \\ \cos\theta_1 & -\sin\varphi_1 & \cos\theta_2 & \sin\varphi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{\alpha_1}{\beta_1} \cos 2\varphi_1 & \frac{\alpha_1 \beta_2^2 \rho_2}{\alpha_2 \beta_1^2 \rho_1} \sin 2\theta_2 & -\frac{\rho_2 \alpha_1}{\rho_1 \beta_2} \cos 2\varphi_2 \\ -\cos 2\varphi_1 & \frac{\beta_1}{\alpha_1} \sin 2\varphi_1 & \frac{\rho_2 \alpha_2}{\rho_1 \alpha_1} \cos 2\varphi_2 & \frac{\rho_2 \beta_2}{\rho_1 \alpha_1} \sin \varphi_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{PP} \\ R_{PS} \\ T_{PP} \\ T_{PS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ \cos 2\varphi_1 \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

这就是著名的 Zoeppritz 方程。

推导得到 P 波的反射系数的解析解为：

$$R_{PP} = (MN - UVp^2)/D \quad (6-3)$$

其中, $M = \alpha_2 b \sqrt{1 - \alpha_1^2 p^2} - \alpha_1 c \sqrt{1 - \alpha_2^2 p^2}$

$$N = \beta_2 b \sqrt{1 - \beta_1^2 p^2} - \beta_1 c \sqrt{1 - \beta_2^2 p^2}$$

$$U = \alpha_1 \beta_2 e + d \sqrt{(1 - \alpha_1^2 p^2)(1 - \beta_2^2 p^2)}$$

$$V = \alpha_2^2 \beta_1 e - d \sqrt{(1 - \beta_1^2 p^2)(1 - \alpha_2^2 p^2)}$$

$$b = \rho_2 - p^2 d$$

$$c = \rho_1 + p^2 d$$

$$d = 2(\rho_2 \beta_2^2 - \rho_1 \beta_1^2)$$

$$e = \rho_2 - \rho_1 - p^2 d$$

反射 SV 波的反射系数、透射 P 波和透射 SV 波的透射系数也同样可以求解出来(图 6-3), 详见郑晓东先生的相关论著。平面 SV 波入射时的情形与这很相似, 在此不做详细的讨论。

公式(6-2)和(6-3)表明: 振幅系数是通过非常复杂的非线性关系把弹性分界面两侧介质的密度 ρ 、纵波速度 α 和横波速度 β 与射线参数 p 联系起来。根据 Snell 定理, 用入射角代替射线参数 p , 则由(6-2)和(6-3)式可见: 振幅系数随入射角变化与介质的弹性参数有关, 通常我们用 AVA 作为振幅系数随入射角变化的简称, 在地震勘探中等价地用 AVO 表示振幅系数随炮检距的变化。分析振幅系数和介质弹性参数的关系(6-2)和(6-3)式可见: 第一, 不同的岩性参数组合, 振幅系数随炮检距的变化的特征不同, 这意味着利用正演模型分析已知的油、气、水和岩性的 AVO 特征可以从实际地震记录中直接识别油气和岩性, 定性地进行地

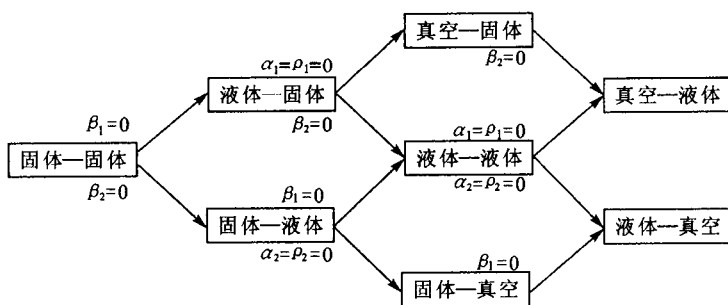


图 6-3 不同相态反射、透射边界条件关系(据郑晓东,2002)

震油藏描述;第二,振幅系数随炮检距的变化本身隐含了岩性参数的信息,利用 AVO 可以直接反演岩石的密度 ρ_1 和 ρ_2 、纵波速度 α_1 和 α_2 、横波速度 β_1 和 β_2 ,定量地进行地震油藏描述。这两层含义反映了 AVO 分析的基本思想,也代表了两种基本的 AVO 分析方法,即正演方法和反演方法。这里需要指出的是,AVA 或 AVO 并没有指明是反射波还是透射波,也没有指明是转换波还是非转换波,这意味着转换波、非转换波、反射波和透射波均存在 AVA 关系。因此,目前地震勘探中的 AVO 分析不应仅局限于反射纵波,地表、VSP、井间、多波多分量反射和透射地震记录均可用于 AVA(或 AVO)分析,(6-2)和(6-3)式是各向同性介质多波 AVO 分析的理论基础。

2. 振幅系数的信息量

从表面上看 Zoeppritz 方程(6-2)式,似乎振幅系数随入射角变化与介质的密度 ρ_1 和 ρ_2 、纵波速度 α_1 和 α_2 、横波速度 β_1 和 β_2 等有关,而实际上,在这 6 个弹性参数中,独立的只有 4 个,即密度比和 3 个速度比。因此,如果没有对介质弹性参数的先验知识,原则上讲,由振幅系数不能得到唯一的介质参数($\rho_1, \rho_2, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$),只能得到 4 个介质弹性参数的比值,这是 AVO 反演的局限性。但是,在一定的约束条件下(例如,最小平方约束)或对介质参数有足够的了解,是可以由振幅系数唯一地确定介质的属性的。若选择独立的参数是 $\frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$,

$\frac{\beta_1}{\alpha_1}, \frac{\beta_2}{\alpha_2}$, 令

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha} \quad (6-4)$$

由于纵横波速度比与泊松比 σ 存在如下关系:

$$\sigma = \frac{1 - 2\gamma^2}{2 - 2\gamma^2} \quad (6-5)$$

因此,独立的参数可以视为 $\frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \sigma_1$ 和 σ_2 。对 AVO 反演而言,如果没有足够的岩性和背景知识,虽然不能直接得到介质弹性参数($\rho_1, \rho_2, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$),但我们可以得到上下介质的密度比、纵波速度比和 2 个泊松比。选择合适的参数反演形式,有助于提高 AVO 反演的有效性和稳健性。

二、AVO 的近似表达

反射透射理论是进行 AVO 分析的基础,也是 AVO 技术应用的前提。AVO 精确理论表

明:振幅系数随入射角的变化与岩性参数的关系十分复杂,实际应用不方便。因此不少作者为简化反射和透射公式做了很多工作。虽然近似公式的表达式不尽相同,但其精度无太多差异,Bortfeld、Aki、Shuey 和郑晓东的公式适用于小弹性参数变化量情形,Ursin 和杨绍国等人的公式适用于大弹性参数变化量情形。人们总是喜欢使用那些形式简洁、物理意义明确的近似公式。近似公式是进行 AVO 反演、AVO 交汇图分析、岩性预测和烃类检测的基础。目前使用的近似公式,在弹性参数反演中,经常用的是 Aki 表达式,在 AVO 属性分析中常用的是 Shuey 表达式。下面,我们对郑晓东先生的幂级数表达式进行分析并描述 AVO 的近似。

1. AVO 的近似表达

无论是反射还是透射,转换波的振幅系数可以表示为射线参数 p 的奇次幂级数;非转换波的振幅系数可表示为射线参数 p 的偶次幂级数。若 $\left| \frac{\Delta \rho}{\rho} \right| \ll 1$, $\left| \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right| \ll 1$, $\left| \frac{\Delta \beta}{\beta} \right| \ll 1$, 忽略高次项,则 P—P 和 P—SV 反射和透射的近似表达式可以写成:

$$\begin{aligned} R_{PP} &= \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n}^R p^{2n} = \sum_{n=0}^{\infty} A_{2n}^R \sin^{2n} \theta \\ R_{PS} &= \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1}^R p^{2n+1} = \sum_{n=0}^{\infty} A_{2n+1}^R \sin^{2n+1} \theta \\ T_{PP} &= \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n}^T p^{2n} = \sum_{n=0}^{\infty} A_{2n}^T \sin^{2n} \theta \\ T_{PS} &= \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1}^T p^{2n+1} = \sum_{n=0}^{\infty} A_{2n+1}^T \sin^{2n+1} \theta \end{aligned} \quad (6-6)$$

其中, $\theta = (\theta_1 + \theta_2)/2$ 。有

$$\begin{aligned} A_0^R &= C_{P0} = C_\rho + C_\alpha \\ A_0^T &= 1 - C_{P0} = 1 - C_\rho - C_\alpha \\ A_2^R &= C_\alpha - 4\gamma^2(C_{S0} + C_\beta) \\ A_{2n}^R &= C_\alpha (n \geq 2), A_{2n}^T = C_\alpha (n \geq 1) \\ A_{2n+1}^R &= \frac{C_{2n}^R}{2^{2n}} \left[-C_\rho \gamma^{2n} - \frac{2(2n\gamma^{2n} + \gamma)(C_{S0} + C_\beta)}{2n-1} \right] \quad (n \geq 0) \\ A_{2n+1}^T &= \frac{C_{2n}^T}{2^{2n}} \left[C_\rho \gamma^{2n} - \frac{2(2n\gamma^{2n} - \gamma)(C_{S0} + C_\beta)}{2n-1} \right] \quad (n \geq 0) \end{aligned} \quad (6-7)$$

其中:

$$\begin{aligned} C_\rho &= \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \\ C_\alpha &= \frac{1}{2} \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \approx \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1} \\ C_\beta &= \frac{1}{2} \frac{\Delta \beta}{\beta} \approx \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2 + \beta_1} \\ C_{P0} &= C_\rho + C_\alpha = \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho \alpha}{\rho \alpha} \approx \frac{\rho_2 \alpha_2 - \rho_1 \alpha_1}{\rho_2 \alpha_2 + \rho_1 \alpha_1} \\ C_{S0} &= C_\rho + C_\beta = \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho \beta}{\rho \beta} \approx \frac{\rho_2 \beta_2 - \rho_1 \beta_1}{\rho_2 \beta_2 + \rho_1 \beta_1} \end{aligned} \quad (6-8)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta\sigma}{2(1-\sigma)^2} = 4\gamma^2(C_\alpha - C_\beta) = 4\gamma^2(C_{\rho 0} - C_{\sigma 0})$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha}$$

$$\Delta F = C_\alpha - k\gamma C_\beta = C_{\rho 0} - k\gamma C_{\sigma 0}$$

我们将 A_n^R 称为广义反射振幅, A_n^T 称为广义透射振幅, C_ρ , C_α , C_β , $C_{\rho 0}$ 和 $C_{\sigma 0}$ 称为岩性参数相对变化量, 分别称 C_ρ , C_α 和 C_β 为岩石密度、纵波速度和横波速度变化量, $C_{\rho 0}$ 和 $C_{\sigma 0}$ 分别为岩石的声阻抗和剪切阻抗的变化量, γ 为横波速度和纵波速度的比值, θ 和 φ 分别代表 P 波和 S 波的入射角, ΔF 为 Smith 流体因子, k 为常数。

2. AVO 近似表达的意义

公式(6-6)与(6-8)代表了不同入射波型(P波或S波)的反射和透射, 可适合于多波多分量 AVO 分析, 它是通过广义反射振幅 A_n^R 和广义透射振幅 A_n^T 来表示多波多分量地震的反射和透射特征, 其中, 偶次项的广义振幅(A_{2n}^R 或 A_{2n}^T)代表非转换波, 奇次项的广义振幅(A_{2n+1}^R 或 A_{2n+1}^T)代表转换波, 它们均是联系岩石弹性参数和反射系数及透射系数的桥梁。引入广义振幅的概念, 可使 AVO(或 AVA)的表达式变得更为简洁, 物理意义更为明确, 岩性关系更为清晰, 波形分离和参数反演更为容易。

① 转换波的反射系数 R_{ps} 和透射系数 T_{ps} 分别由广义反射振幅和广义透射振幅的奇次项(A_{2n+1}^R 和 A_{2n+1}^T)的奇次幂级数构成; 非转换波的反射系数 R_{pp} 和透射系数 T_{pp} 分别由广义反射振幅和透射振幅的偶次项(A_{2n}^R 和 A_{2n}^T)的偶次幂级数构成。利用 AVA 曲线拟合滤波容易从 AVA 信息中分离出广义振幅。有趣的是, 广义反射振幅和广义透射振幅的零次项 A_0^R 和 A_0^T 恰好等于垂直入射的反射系数和透射系数, 这意味着借助广义振幅可以分离和提取非转换波零炮检距剖面, 由(6-6)~(6-8)式我们可以分离转换波和非转换波, 重构反射波和透射波。AVA 分析不应仅局限于参数反演, 还可外推转换波和透射波信息。

② 对于非转换波 P—P, 纵波速度变化量 C_α 是影响纵波振幅的主要因素, 事实上, P—P 广义反射振幅 A_{2n}^R 和广义透射振幅 A_{2n}^T , 除了 A_2^R 外, 均与横波变化量 C_β 无关, 特别是 P—P 透射振幅是不受横波参数影响的。研究还表明, SV—SV 的广义反射振幅和广义透射振幅与 C_α 和 γ 无关, 完全由横波信息 C_β 和 $C_{\sigma 0}$ 控制, 由 SV—SV 反射是不能得到纯纵波速度变化量 C_α 的, 只能得到纯横波速度变化量 C_β 。由于 A_2^R 隐含了 C_β 的影响, 故利用 P—P 反射可以反演纯横波信息 C_β 。从这个意义上讲, P—P 反射振幅包含了比 SV—SV 反射振幅更为丰富的信息。对于转换波, 无论是 P—SV, 还是 SV—P, 其反射和透射均与 C_α 无关, 而主要受 C_β 和 $C_{\sigma 0}$ 的控制, 这意味着由转换波的振幅我们无法获得纯纵波信息 C_α , 只能得到横波信息 C_β 和泊松比。

③ 广义振幅是一个与入射角无关的参数, 它仅与岩性参数的相对变化 C_ρ , C_α , C_β , $C_{\rho 0}$ 和 $C_{\sigma 0}$ 以及 γ 有关。因此, 借助广义振幅可以进行 AVO 属性分析、岩性参数反演和多波信息外推。一般而言, 岩性参数变化量 C_ρ , C_α , C_β , $C_{\rho 0}$ 和 $C_{\sigma 0}$ 可由广义振幅 A_n^R 按下列方式计算:

$$C_\rho = A_0^R - A_4^R$$

$$C_\alpha = A_4^R$$

$$C_{\beta} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{4\gamma^2} (A_4^R - A_2^R) + (A_4^R - A_0^R) \right] \quad (6-9)$$

$$C_{\rho 0} = A_0^R$$

$$C_{\rho 0} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{4\gamma^2} (A_4^R - A_2^R) - (A_4^R - A_0^R) \right]$$

由式(6-9)可见,通过三参数的 AVO 反演(A_0^R , A_2^R 和 A_4^R),我们可以同时得到 C_{ρ} , C_{α} 和 $C_{\rho 0}$, 而由常规地震反演,我们只能得到 $C_{\rho 0}$ 。如果对纵横波速度比 γ 背景值做出某种假设,我们还可以得到横波信息变化量 C_{β} 和阻抗 $C_{\rho 0}$ 。注意到 C_{ρ} , C_{α} , C_{β} , $C_{\rho 0}$ 和 $C_{\rho 0}$ 具有相似的形式,故利用同一种数学关系,采用后 AVO 反演(郑晓东,1994)便可实现全部岩性参数反演。根据式(6-8),我们有:

$$\rho_2 = \frac{1 + C_{\rho}}{1 - C_{\rho}} \rho_1$$

$$\alpha_2 = \frac{1 + C_{\alpha}}{1 - C_{\alpha}} \alpha_1$$

$$\beta_2 = \frac{1 + C_{\beta}}{1 - C_{\beta}} \beta_1 \quad (6-10a)$$

$$(\rho\alpha)_2 = \frac{1 + C_{\rho 0}}{1 - C_{\rho 0}} (\rho\alpha)_1$$

$$(\rho\beta)_2 = \frac{1 + C_{\rho 0}}{1 - C_{\rho 0}} (\rho\beta)_1$$

或

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha}$$

$$\rho = \exp(2 \int C_{\rho})$$

$$\alpha = \exp(2 \int C_{\alpha})$$

$$\beta = \exp(2 \int C_{\beta})$$

$$\rho\alpha = \exp(2 \int C_{\rho 0})$$

$$\rho\beta = \exp(2 \int C_{\rho 0})$$

$$\sigma = 1 - \frac{1}{\int C_{\rho}}$$

$$(6-10b)$$

采用合成声波测井或积分法或基于模型的测井约束反演,可以得到相应的弹性参数。叠后流行的各种 AVO 反演算法可应用于后 AVO 反演(Post AVO Inversion),实现更为全面的地震参数反演。由(6-6)式,忽略高次项可以得到近似的实用公式:

$$R_{PP} = A_0^R + A_2^R \sin^2 \theta + A_4^R \sin^4 \theta$$

$$R_{PS} = A_1^R \sin \theta + A_3^R \sin^3 \theta \quad (6-11)$$

$$T_{PP} = A_0^T + A_2^T \sin^2 \theta + A_4^T \sin^4 \theta$$