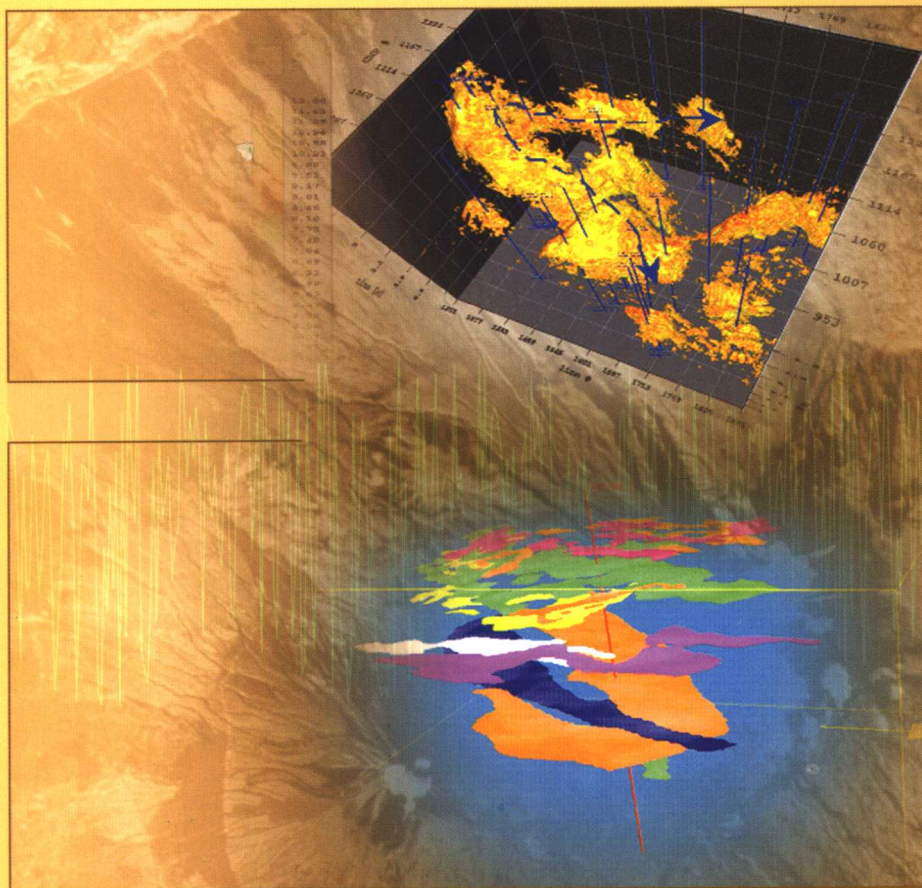
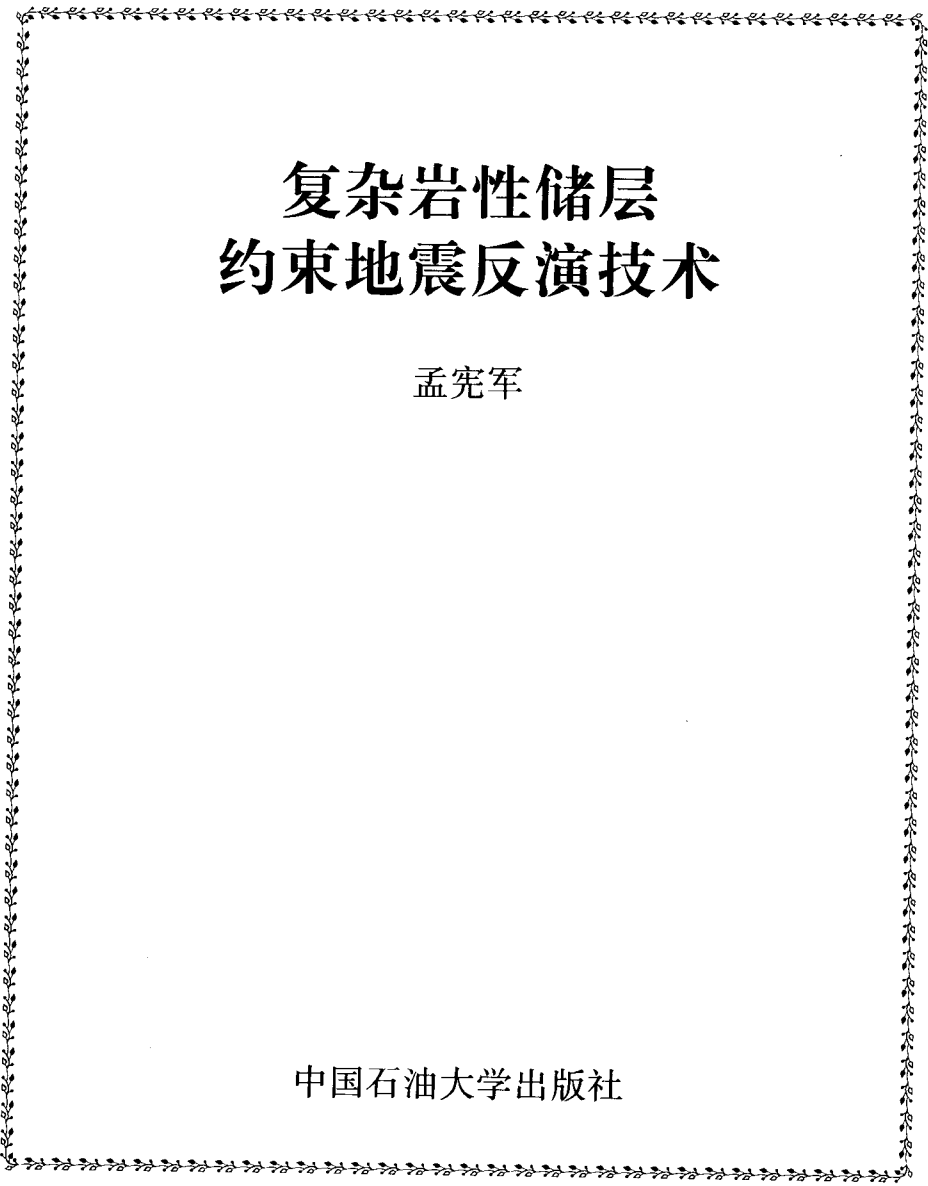


复杂岩性储层 约束地震反演技术

□ 孟宪军



中国石油大学出版社

A decorative rectangular border with a repeating floral pattern surrounds the central text.

复杂岩性储层 约束地震反演技术

孟宪军

中国石油大学出版社

内容简介

本书针对复杂岩性储层的预测和描述问题,通过应用叠后和叠前三维地震资料进行井资料和地质构造信息约束下的储层反演研究,提出了识别、描述复杂岩性储层的新方法和综合配套技术。本书系统总结、提升了作者承担完成的大量研究课题和实际勘探开发项目所取得的丰硕研究成果,在理论方法和有针对性实际应用方面具有很多独到之处,对岩性油气藏的勘探开发具有理论指导意义和实用价值。本书可供从事岩性油气藏勘探开发的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂岩性储层约束地震反演技术/孟宪军主编. —东营:中国石油大学出版社, 2005.5
ISBN 7-5636-2059-1

I. 复... II. 孟... III. 复杂地层:储集层-岩性
油气藏-地震勘探-研究 IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 044061 号

书 名: 复杂岩性储层约束地震反演技术

作 者: 孟宪军

责任编辑: 周洁韶

封面设计: 王凌波

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: upbook@mail.hdpu.edu.cn

印 刷 者: 东营市新华印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546-8391797)

开 本: 170×225 印张: 13.125 字数: 164 千字

版 次: 2006 年 1 月第 1 版 1 次印刷

印 数: 1-400 册

定 价: 28.00 元

作者简介:

孟宪军,男,1961年生,高级工程师。1982年毕业于华东石油学院石油物探专业,1994年获石油大学(华东)应用地球物理硕士学位,2004年获浙江大学构造地质学博士学位。现任胜利油田有限公司物探研究院总工程师,主要从事叠后地震反演、油藏综合地球物理和叠前地震成像研究工作,负责或参与多项国家、部级和局级研究课题,发表学术论文多篇。

前言

岩性油气藏已成为油气田的勘探开发重点。河道砂体、三角洲浊积砂体、砂砾岩体等储层的沉积厚度变化快、隐蔽性强,沉积规律和成藏规律受到复杂断裂系统的控制,是主要的复杂岩性储层类型,预测、描述难度较大。应用叠后和叠前地震资料进行井资料和地质构造信息约束下的三维地震波阻抗反演,是识别、描述复杂岩性储层的有效方法,也是石油勘探开发方面实用性很强的综合配套技术。作者十几年来一直从事这方面的方法技术与实际应用研究工作,承担并完成了大量研究课题和实际勘探开发项目。本书正是在系统总结、提升所取得的丰硕研究成果的基础上写成的。

不同的地震反演方法各有其特点和优缺点。稀疏脉冲叠后地震波阻抗约束反演方法寻求最佳的模型参数匹配和观测数据匹配关系,反演结果体现地震资料品质,适合有较好地震资料的不同勘探程度探区。随机模拟叠后地震波阻抗反演方法实现了多井之间的测井波阻抗数据的地质统计模拟与地震反演的有机结合,建立精细约束信息模型和变差拟合函数是其技术关键,反演结果分辨率高,适合于钻井资料较多的三维地震勘探开发区。协模拟岩性及孔隙度反演方法结合三维波阻抗数据体和井点岩性、孔隙度数据,进行地质统计协模拟反演,可减少单纯用波阻抗参数解释储层的多解性。

叠后地震反演技术是应用广泛的储层反演技术,但有其不足之处。叠后地震反演使用全角度叠加地震资料,信息是粗化的,损失了很多储层及油气信息,并只能反演出纵波波阻抗参数。叠前地震反演技术有其独到的特点和优点。叠前AVA地震反演技术能利用AVA地震道集小、中、大不同角度地震道上的丰富信息,在仅利用纵波震源地震资料的情况下,不仅得到纵波阻抗,特别得到了横波阻抗,以及纵横波速度比、泊松比等重要的弹性参数数据,使得能够利用多种参数对储层岩性、物性和流体性质进行交会分析解释。同时,用岩石地球物理方法计算横波测井速度,将其作为约束信息参与反

演能够提高反演精度。

影响波阻抗反演精度的因素很多,加强储层反演中若干关键技术环节的研究对反演精度的提高很重要。反演子波提取及空变与时变、地震剖面极性判定和精细地震地质标定、三维约束模型建立和三维可视化储层立体追踪解释等都是重要的储层反演关键技术环节。

针对多种复杂岩性储层的特点和反演难点,针对具体资料情况、储层描述类型和地质目标要求,应开展有针对性的反演技术对策和实际反演处理、解释应用研究。例如,针对河道砂的发育方向、宽度和厚度变化规律应选择与其适应的变差函数参数;针对三角洲浊积砂体应建立符合“S”形、非平行反射结构的三角洲约束模型;针对砂砾岩体应加强纵向和空间趋势约束;针对超覆层应仔细定义地层沉积接触关系。

本书的研究成果是我和许多同事共同完成的。慎国强、王玉梅、钮学民、孙振涛、李海涛和黄捍东、刘洪昌、姜秀娣等同志做了大量研究工作。

本书得到了我的博士生导师金翔龙院士的精心指导,浙江大学陈汉林教授进行了仔细审阅和指正,曲寿利、张善文、韩文功、王延光和李振春等领导和学者给予了热情关心。在此,表示衷心感谢。

作 者

2005年8月16日

目 录

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 国内外研究现状	3
第三节 存在问题和研究思路	11
第四节 研究成果特点	14
第二章 复杂岩性储层叠后约束地震反演	16
第一节 稀疏脉冲地震波阻抗约束反演	16
第二节 随机模拟地震波阻抗反演	22
第三节 协模拟岩性及孔隙度反演	29
第三章 叠前地震纵、横波阻抗(速度)约束反演	35
第一节 叠前 AVA 正演理论模型计算分析	35
第二节 AVO 道集与 AVA 道集转换分析	43
第三节 岩石地球物理与横波速度数值计算	46
第四节 叠前 AVA 广义非线性纵、横波速度反演	54
第五节 叠前地震纵、横波阻抗同步反演	68
第四章 波阻抗反演影响因素	73
第一节 基础资料品质影响因素	73
第二节 反演过程关键步骤影响因素	78
第三节 反演关键参数影响因素	84
第四节 其它影响因素	86
第五章 复杂岩性储层反演关键技术环节	88
第一节 反演子波高精度估算	88
第二节 多井横向地震、地质精细标定	92
第三节 三维复杂反演约束模型建立	101

第四节 反演参数选择及质量控制	115
第五节 反演体的三维储层立体解释	121
第六章 多种类型复杂岩性储层反演技术对策及应用	136
第一节 井间地震资料时间域波阻抗反演技术对策及应用	136
第二节 河流相砂体反演技术对策及应用	145
第三节 三角洲浊积体约束地震反演技术对策及应用	154
第四节 砂砾岩体约束地震反演技术对策及应用	161
第五节 碳酸岩裂缝储层反演技术对策及应用	168
第六节 火成岩下储层构造成图技术对策及应用	170
第七节 叠前地震纵、横波阻抗同步反演技术对策及应用	177
第七章 认识与结论	195
参考文献	198

第一章 绪 论

第一节 引 言

以东部油气田为代表的我国老油气田的勘探开发工作重点,已从构造油气藏转为隐蔽性油气藏。而岩性油气藏又在隐蔽性油气藏中占有很大的比重。特别在胜利油田济阳拗陷,经历了40年的深入勘探开发之后,近年来以岩性油气藏为主的隐蔽性油气藏的储量发现已占了总储量发现的一半以上,已成为勘探、开发研究工作的重中之重,而且所展现出来的潜力巨大。济阳拗陷地质构造和沉积情况极为复杂,一方面孕育了极为丰富的油气资源和油气藏类型,另一方面又给岩性油气藏的勘探开发带来了很多需要研究的技术难题。在岩性油气藏勘探开发中,如何进行复杂岩性储层的高精度预测和描述,成为其中最重要的研究问题。

在济阳拗陷,河道砂体、三角洲浊积砂体、砂砾岩体、碳酸岩裂缝储层、火成岩下储层等是主要的复杂岩性储层类型。之所以称它们为复杂岩性储层,除了其本身的地质特点外,一般来说其沉积规律和成藏规律要受到复杂断裂系统的控制,且多种沉积类型复合交织在一起。它们有的纵向上迭置关系复杂,且厚薄不一;有的横向空间里分布范围难测、厚度突变较大。复杂岩性储层是目前老油区勘探开发的主要对象,预测、描述难度较大。如何对它们进行精确描述,是胜利油田和其它东部探区勘探开发工作中亟须解决的主要地质问题。

长期以来,三维地震资料在研究复杂岩性储层方面一直发挥着重要作用,但仅仅使用地震资料精确地预测和描述它们困难很大。

· 复杂岩性储层约束地震反演技术 ·

三维地震资料是在地面进行连续观测得到的,因此,在横向上有密集的覆盖程度和较好的储层分辨能力,但由于大地滤波作用,实际得到的地震资料受到了带限地震子波叠合和噪音的影响,其垂向分辨能力受到了限制,且属于与地层分解面对应的界面反射型资料。钻井井孔处的测井资料在垂向上具有很高的、可靠的储层分辨能力,但在横向上井点分布稀疏且不均匀。将具有较高横向分辨能力的地震资料和具有较高垂向分辨能力的测井资料结合起来,在构造特征控制下进行联合研究应用,是解决储层高精度预测、描述的良好综合方法。那么,什么样的方法和技术最适合于完成这一任务?综合多种资料和技术所长的约束地震反演处理与解释应用技术,就是研究复杂岩性储层变化规律的十分有效的储层描述新技术。该项技术通过科学的数学算法和计算机软件,综合应用地震、测井、地质等资料,并将它们有机地结合为一体,把地震资料中包含的丰富岩性、物性、流体信息反演成岩层单元型波阻抗数据或地层层速度数据以及岩性和孔隙度等地层物性资料。使其能与钻井、测井资料直接对比分析,以岩层为目标进行地质、储层解释,充分发挥地震资料在横向上资料密集和测井资料纵向上分辨储层能力高的优势,在研究储层的空间特征和厚度变化规律方面具有独特的优势。

针对复杂岩性储层的预测、描述问题,本文主要研究了以包含丰富地下信息的地震反射资料为基础资料,以地质和测井资料作为约束,以揭示地下地层特别是地下储层的岩性、物性为目标的地震波阻抗、层速度反演技术和岩性反演技术。针对三维叠后地震资料、叠前地震道集资料和井间地震资料所包含的不同储层信息和资料特点,分别进行了有针对性的反演方法研究,形成了一项油田勘探、开发中非常有效的且具有良好发展前景的储层描述、油藏描述新技术。

针对普通地震反演方法分辨率低和多解性大的问题,以复杂岩性储层高精度反演为研究目标,深入研究了相应的反演方法、反演关

键技术环节,并形成了针对多种不同储层类型的反演技术系列。取得了丰富的研究成果和实际应用效果,分辨薄储层和厚储层的能力及可靠性都有了明显的提高。

第二节 国内外研究现状

一、概述

从广义上讲,地震资料处理中的大部分问题都属于反演范畴。本文所提及的地震反演问题特指从狭义上讲的地震参数反演——地震波阻抗反演或层速度反演。波阻抗反演是指利用地震资料反演地层波阻抗的地震特殊处理解释技术,它具有明确的地球物理意义,是储层预测、油藏特征描述的确定性方法,在实际应用中取得了显著的地质效果。正如李庆忠院士指出:“波阻抗反演是高分辨率地震资料处理的最终表达形式”。

地震反演研究的历史可追溯到几十年之前,但真正能解决实际储层描述问题的反演方法和技术研究还要归功于近十几年以来的成果。从波阻抗反演技术的发展历程看,它经历了从简单的地震直接反演到利用地震、测井、地质等多种信息的宽带约束反演。反演方法从线性发展到非线性及多种方法的联合应用,从单一的纵波阻抗反演发展到纵、横波阻抗的弹性反演。特别是最近几年来,国内外地质、地球物理同行加快了约束地震反演技术,特别是多井约束三维地震反演技术的研究、软件研制和推广应用工作。

常规叠后地震资料是地层波阻抗差异的函数,反映了岩层分界面的起伏变化,长期以来用于研究地层的几何形态,在构造油藏勘探中发挥了巨大作用。随着油气勘探的不断深入和勘探、开发难度的不断加大,必然要求地震技术从构造研究深入到储层评价,由勘探初期延伸到精细勘探和开发阶段。实际上地震资料中包含着丰富的岩

· 复杂岩性储层约束地震反演技术 ·

性、物性及流体信息,经过地震反演,可以把界面型的常规地震资料反演成能与测井资料直接对比的岩层型波阻抗资料,以及岩性和孔隙度等地层物性资料,研究储层特征的空间变化。反演结果表明分辨储层的能力也有了明显提高。

普通地震反演方法多解性较大。例如道积分,因为由地震资料直接反演得到,所以分辨率低,反映的只是相对的波阻抗,不能用于定量计算储层参数。再者,因没有约束,故结果比较粗略,多解性较大。

多井约束地震反演技术是目前使用广泛而且很有成效的储层预测和油藏描述新技术,钻井、测井资料的特点是纵向精细、横向稀疏,地震资料的特点是纵向上虽然比测井资料分辨率低,但横向密集,约束地震反演技术把两者的优势有机地结合起来,因而具有良好的发展前景。约束地震反演技术以包含丰富地下信息的地震反射资料为主要资料,以地质和测井资料作为约束,来揭示地下地层特别是地下储层的属性及其含流体特征。方法主要有:递归反演,基于模型的约束反演,稀疏脉冲反演,模拟退火反演,随机反演等。

从所使用的地震资料性质上讲,地震反演方法和技术可以分为叠前和叠后两大类。叠前地震反演方法使用叠前地震道集资料,叠后地震反演方法使用叠后地震偏移资料。

二、叠后地震反演方法研究现状

绝大部分反演方法都是以褶积模型为基础的。所谓 Robinson 褶积模型理论,粗略地讲就是,地震记录是由地震子波和反射系数序列褶积形成的。以褶积模型为基础的反演方法,一般来说是线性系统或线性化的非线性系统。地球物理线性反演理论,在 20 世纪 60 年代就有了较大的发展。

Backus 和 Gilbert 于 1967—1970 年期间,发表了一系列有关反演

的重要文献,这些文章实际上奠定了近代地球物理线性反演的理论基础,被称为 Backus—Gilbert 理论,或 B—G 理论^[1]。B—G 理论是以连续函数表达反演问题的。1972 年, Wiggins 用矩阵将 B—G 理论表达为离散形式。同年, Jackson 用广义逆理论详细讨论了线性反演问题在各种情况下的解答。20 世纪 70 年代,还有很多人根据 B—G 理论在地球物理反演方面做了许多工作。

Marquardt(1963)和 Levenberg(1944)研究了使计算出的模型响应和实际观测数据之间的误差平方和达到最小的阻尼最小二乘反演算法,是一种用于线性系统或线性化非线性系统(广义线性系统)的重要反演方法。Lines 和 Treitel 于 1984 年发表的文章^[2],详细讨论了最小二乘反演方法,并把该方法用于法向入射地震数据的反演。

Cooke 和 Schneider 在 1983 年发表了广义线性反演方法^[3],并提出了基于模型的反演方法。随后, Mcaulay 在著文中将广义线性反演方法用于叠前地震数据的反演。邹振恒、杨文采于 1987 年发表的文章中,通过对地层深度参数和波阻抗参数的同步反演以及对偏导数矩阵的归一化处理,对该方法进行了改进^[4]。模型法反演采用的是一种自适应的反褶积方法,首先根据速度谱和井资料建立一个速度模型,采取逐步修改地层波阻抗值及地层厚度值,相应修改子波,然后做一次正演,求其与实际地震道的误差。根据此误差再做调整,修改波阻抗模型,直到误差很小为止。这种反演在每一次修改波阻抗之后,都用褶积模型做正演,即以合成地震道与实际地震道比较来做检验。模型法反演中,井主要起标定、提取低频背景和质量控制作用,其反演的分辨率、信噪比和地质可靠性主要取决于地震资料。

Mendel 和 Hampson 在 1984 年发表的文章中^[5], Brian H. Russell 于 1988 年在其著作中^[6], Debeye 和 Van Riel 在随后的论文中,都提出了基于地震道的稀疏脉冲反演方法。稀疏脉冲反演基于最大似然反褶积、L1 模反褶积或最小熵反褶积,通过对每一道逐渐增加反射

系数的方法,估算一个符合高斯分布的稀疏反射系数序列,这个宽带的反射系数序列被不断修改,直到合成的地震道与实际地震道在允许的误差范围内相匹配,从而得到一个最优化的反射系数集合。

大多数地震反演问题是欠定的,即解是不惟一的、不稳定的^[7]。这主要是因为实际数据的有限观测、带限性和存在噪音所致,即存在“零空间”^{*}。在反演过程中,可通过对容许解类附加一些限制条件,增加资料或附加一些先验信息作为约束条件参与反演之中,使问题变得“条件适定”。这样得到的解限制了容许解类的范围,减少了“零空间”,使其更加符合地下真实情况。80年代中后期以来,人们对这一问题有了越来越清醒的认识,做了不少研究工作。美国 HGS 地球物理公司的 Ruben D. Martinez 等 1988 年发表文章,介绍了宽带约束反演、测井数据反演和岩性约束反演配套技术^[8]。法国石油研究院的 G. Grau 于 1990 年发表了介绍测井资料外推技术的文章。Laory R. Lines 等人于 1988 年发表文章介绍了地震、重力等资料联合反演方法^[9]。计算机技术的飞速发展,极大地推动了波阻抗反演方法的研究和技术的发展,人们试图通过反演将测井资料的测量尺度与地震资料的测量尺度有机地结合起来,得到既有纵向好分辨率又具有横向好连续性的反演结果,因此出现了测井约束反演。它首先从井出发,建立一个详细的全频带的地质模型,采用模型优选迭代算法,通过不断修改地质模型,使模型合成的地震数据与实测数据最佳吻合,最终的模型就是反演结果。由于避免了用地震数据做递推反演,其结果可以突破传统地震频带的限制,具有比直接反演更高的分辨率。

Mosgaard 等人于 1991 年发表了地震模型参数优化反演的模拟退火方法^[10]。90 年代中后期,出现了更多的以非线性反演理论为基础的多种反演算法,如模拟退火反演、概率法神经网络反演、遗传进

* 刘福田.地球物理学中的反演问题.中科院地球物理所讲义,1986

化算法反演等。这类反演的初始模型是根据低频模型的先验概率而产生一个随机层速度模型,与测井约束反演由测井内插高频模型有本质的区别。反演过程针对非线性、多参数、多极值的大型组合优化问题,采用模拟退火、神经网络等全局优化算法,寻找目标函数的最优解。Brian Russell, Dan Hampson 于 1991 年对几种叠后地震反演方法进行了比较^[11]。

Yarus 和 Chambers 等于 1994 年^[12],Shanor 等于 2001 年^[13]分别发表了地质统计反演的方法原理和应用实例。在这期间,地震特征反演、地质统计与随机模拟反演研究得到了较快的发展。地震特征反演在测井数据段和相应的地震数据段的特征间建立了关系,修改每个道位置的权值,使相应地震段的权值叠加,形成与地震数据的最佳匹配。地质统计和随机模拟方法是基于地质统计学原理的一种反演算法,它将地震反射资料、地质模型以及地质统计数据相结合,运用了模拟退火算法,统计模拟中运用协克里金、高斯等算法,把在井点位置得到的地震、地质及测井数据的统计关系,运用非线性、确定性与非确定性数学算法和一些空间约束条件进行模拟,然后在整个目标空间推而广之,以求达到最大限度的利用所有资料,并使反演结果与已知条件充分吻合的目的。

近几年,多种技术的交叉运用,又产生了一些新的反演思路^[14~19]。如分频波阻抗反演,即把地震资料分成几个一定带宽的频段数据进行反演,采用最快速下降法和高斯-牛顿法相结合的非线性的算法。

三、叠前地震反演方法研究现状

上述反演方法一般用于叠后地震资料的波阻抗等地震参数反演。长期以来,国内外一直主要应用叠后地震资料进行这方面研究,也取得了较好的实际应用效果。但由于地震资料处理中使用的叠后

地震处理技术,基于介质均匀或水平层状假设,不满足实际地层结构情况,保幅性和成像效果都差。加之全角度多次叠加,损失、模糊了很多构造和储层及油气信息,削弱了地震资料反映构造、储层变化特征的敏感性,导致叠后地震反演处理与地震属性处理和应用方面的技术成果存在很多解决地质问题的多解性。随着勘探开发的进一步深入,勘探难度的越来越大,使包含更多信息的叠前地震信息处理方法研究日趋活跃。

地震资料保幅和成像处理的好坏直接影响叠前地震反演方法的最终成果。随着计算机能力的提高和研究工作的深入,叠前处理方法正成为保幅处理和复杂构造成像的有效方法。叠前时间偏移(PSTM)等叠前时间域处理技术,在一定程度上可以解决复杂地区的地震保幅与聚焦和成像处理问题。成像效果大大优于叠后时间偏移。叠前处理技术与叠后处理技术相比,具有很多优点。在改善保幅性和成像效果的同时,还能够提供保真度好、聚焦好的道集,以进一步做好 AVO、AVA 等叠前反演研究。

叠后地震反演方便快捷,其波阻抗反演成果在一定程度上能够反映储层的内部变化规律。但由于使用全角度多次叠加后的叠后地震资料,在某种程度上削弱了反映储层特征的敏感性。且叠后地震反演只能提供种类很少的纵波波阻抗等参数,不能给出纵横波速度比、泊松比等反映物性、流体特征的参数,在研究储层物性、流体方面受到了限制。

叠前地震反演与叠后地震反演相比,具有良好的保真性和多信息性。叠前地震资料反演技术,克服了叠后反演的不足,不但适合薄储集层物性反演,还可进行含油气性反演。叠前地震反演保留了地震反射振幅随偏移距不同或入射角不同而变化的特征,并充分应用了叠前不同入射角的地震道集数据,部分角叠加和梯度、截距等地震处理数据体。通过叠前多种角叠加三维地震资料纵横波同步联合反

演技术研究,能结合纵波和转换横波地震资料和井资料等得到纵、横波波阻抗,纵、横波速度,纵、横波速度比,密度,泊松比和砂泥岩百分含量,孔隙度等多种参数体。提供了研究岩性、储层、流体变化规律的更多、更敏感有效的三维反演数据体成果。这些反演数据体成果是研究地层的“地震地层属性体”。叠前地震反演较叠后地震反演跃进一步,具有明显的优越性,能更可靠地揭示地下储层的展布情况和孔、渗物性及含油气性。

叠前地震反演的理论基础是地震波弹性动力学。前辈们在这方面进行了长期和卓有成效的潜心研究。涉及到叠前地震反演的方法和算法很多,也很复杂。目前,国内外正在深入开展叠前地震反演方法和技术的研究。

Zoeppritz 于 1919 年解出了著名的 Zoeppritz 方程组。当一个平面纵波倾斜入射到两种介质分界面上时,既能产生反射纵波和透射纵波,又能产生反射横波和透射横波,根据边界条件求解波动方程并引入反射系数和透射系数后,可以得出四个波的位移振幅应当满足的方程组,即 Zoeppritz 方程组。Keiiti Aki 和 Paul G. Richards 在 1980 年出版的著作中对其进行了详细描述^[20]。陆基孟在 1993 年出版的著作中也对其进行了很好的描述和说明^[21]。

Shuey 和 Aki、Richards 等许多著名学者在 20 世纪 80 年代对 Zoeppritz 方程组进行了很多形式的研究和简化^[22],使关系复杂的难以直接求解的 Zoeppritz 方程组,在一定条件下得以求解和分析应用。

进入 20 世纪 80 年代后,人们开始研究将反射系数随入射角变化应用于“亮点”型含气砂岩的识别,发现含气砂岩反射振幅随偏移距的增加而增加,含水砂岩反射振幅随偏移距增加而减少,这一现象极大地改善了烃类检测的能力。AVO 分析的基本理论根据是反射振幅系数随入射角的变化(AVA)与岩性参数组合有一定的规律性。Hilterman 研究的结论是,振幅随入射角的变化是法线入射项 NI 与