

海洋系列教材

YOUQI CHUCENG DIZHEN
ZONGHE YUCE JISHU YU YINGYONG

油气储层地震综合预测 技术与应用

刘豪 辛仁臣 主编



中国地质大学出版社有限责任公司

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

油气储层地震综合 预测技术及应用

YOUQI CHUCENG DIZHEN ZONGHE YUCE JISHU JI YINGYONG

刘 豪 辛仁臣 主编



中国地质大学出版社有限责任公司

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

油气储层地震综合预测技术及应用/刘豪,辛仁臣主编. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2013.10

ISBN 978-7-5625-3118-0

I. 油…

II. ①刘…②辛…

III. 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(2013)第 121041 号

油气储层地震综合预测技术及应用

刘豪 辛仁臣 主编

责任编辑:王凤林

选题策划:毕克成

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:333 千字 印张:13

版次:2013 年 10 月第 1 版

印次:2013 年 10 月第 1 次印刷

印刷:武汉教文印刷厂

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-3118-0

定价:32.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 地震储层预测的概念	(1)
一、储层的基本概念及主要参数	(1)
二、储层预测的主要地震参数及其地质意义	(1)
三、地震储层预测的任务	(2)
第二节 地震储层预测的主要技术	(4)
一、地震反演技术	(4)
二、地震属性分析技术	(4)
三、模式识别技术	(5)
四、烃类检测技术	(5)
五、三维可视化	(5)
六、时移地震(四维地震)	(6)
第三节 地震储层预测技术的发展历史	(6)
一、地震储层预测技术的诞生	(6)
二、地震储层预测的发展历史	(7)
第四节 地震储层预测对解释人员的要求	(12)
一、处理解释一体化的必要性	(12)
二、处理解释一体化对解释人员的要求	(15)
第二章 地震资料解释基础	(17)
第一节 地震波动力学的基本概念	(17)
一、波动方程	(17)
二、反射波的振幅	(19)
三、地震波的频谱	(22)
第二节 地震波的速度	(27)
一、地震波在岩层中传播的速度	(27)
二、速度资料的应用	(29)
第三节 地震的分辨能力及储层厚度解释方法	(30)
一、一道地震记录的形成	(30)

二、地震的分辨能力·····	(32)
三、地震子波与分辨能力的关系·····	(33)
四、薄层的定义·····	(36)
五、利用地震资料解释储层厚度的方法·····	(36)
第三章 地震地质综合解释 ·····	(39)
第一节 地震层序划分 ·····	(39)
一、地震不整合特征·····	(39)
二、地震反射界面的年代地层学意义和地震地层单元·····	(42)
第二节 地震构造解释 ·····	(48)
一、构造解释流程·····	(48)
二、资料准备·····	(49)
三、构造解释内容简介·····	(51)
第三节 地震相解释 ·····	(51)
一、地震资料的沉积解释概述·····	(51)
二、地震相分析·····	(53)
第四章 利用地层速度进行岩性解释 ·····	(60)
第一节 影响地震波速度的因素与分布规律 ·····	(60)
一、影响速度的一般因素·····	(60)
二、地震波速度与多孔介质流体性质的关系·····	(63)
三、几种与油气关系密切的岩层速度特征·····	(65)
四、速度分布规律·····	(66)
第二节 几种速度概念与叠加速度谱的解释 ·····	(67)
一、速度的概念·····	(67)
二、叠加速度谱的解释·····	(68)
第三节 层速度估算砂泥岩百分比和储层参数 ·····	(69)
一、利用层速度估算砂泥岩百分比·····	(69)
二、利用层速度估算储层参数·····	(72)
第四节 利用层速度预测地层压力 ·····	(74)
一、图版法·····	(75)
二、经验公式法·····	(75)
第五章 叠后波阻抗反演 ·····	(78)
第一节 地震反演的主要类型 ·····	(79)
一、道积分反演方法·····	(79)

二、递推反演方法·····	(80)
三、基于模型的反演方法·····	(83)
第二节 各种地震反演方法技术的特点·····	(84)
一、地震岩性模拟(SLIM)·····	(84)
二、递推反演·····	(85)
三、波恩反演·····	(87)
四、人工神经网络反演·····	(88)
五、遗传算法反演·····	(88)
六、混沌反演·····	(88)
七、波阻抗多尺度反演·····	(88)
八、多道反演·····	(89)
九、测井约束反演·····	(89)
十、地质统计学反演·····	(91)
第三节 叠后地震反演存在的问题及做好反演的技术关键·····	(92)
一、叠后地震反演存在的问题·····	(92)
二、做好叠后地震反演的技术关键·····	(94)
第六章 叠后地震属性的类型、意义及获取技术·····	(111)
第一节 地震特征参数的类型及意义·····	(111)
一、地震属性的应用·····	(111)
二、地震特征参数的物理意义·····	(112)
三、主要地震特征参数组合可能反映的储层信息·····	(118)
四、地震属性的优选·····	(119)
第二节 地震波形属性分析·····	(120)
一、对波形形状进行定量化·····	(121)
二、采用神经网络技术进行波形分类·····	(121)
第三节 相干体属性·····	(122)
一、相干体概念·····	(122)
二、相干体的常规计算方法·····	(122)
三、现代算法·····	(124)
四、相干体解释断层的过程与步骤·····	(128)
第四节 频谱分解·····	(130)
一、概述·····	(130)
二、楔形模型响应·····	(132)

三、调谐立方体	(133)
四、消除子波叠覆	(134)
五、目标层以外	(136)
第五节 亮点和 AVO 属性	(138)
一、亮点技术	(139)
二、AVO 技术	(141)
第七章 部分商业化储层预测软件介绍	(145)
第一节 EPT 公司:储层预测与解释软件系统 EPS TM reservoir	(145)
一、基本方法原理	(145)
二、软件应用中主要参数的意义及参数选择原则	(148)
三、软件应用条件及注意的问题	(150)
四、应用实例及效果	(151)
第二节 Strata 地震反演系统	(152)
一、Strata 提供的地震处理功能	(152)
二、测井曲线标定	(153)
三、子波提取	(153)
四、地震层位追踪	(153)
五、初始波阻抗模型建立	(153)
六、波阻抗反演	(153)
七、AVO 分析与反演	(154)
第三节 Jason 综合储层预测及描述软件(荷兰)	(154)
一、地质框架模型(EarthMod)	(154)
二、子波分析(Wavelets)	(154)
三、地震反演(InverTrace)	(154)
四、测井反演(InverMod)	(155)
五、地质统计反演(StatMod)	(155)
第四节 VoxelGeo 三维可视化和三维解释系统	(155)
一、VoxelGeo 基本方法原理	(155)
二、软件应用中主要参数的意义及参数选择原则	(158)
三、VoxelGeo 软件应用条件及注意的问题	(161)
四、软件应用实例及效果	(163)
第五节 Stratimagic 地震地层解释软件	(166)
一、概况	(166)

二、波形地震相分类	(167)
三、层段属性	(168)
四、Stratimagic 的使用及功能	(171)
第八章 实例分析	(174)
第一节 河流砂体储层预测实例分析	(174)
一、大王庄河道砂体岩性油藏勘探概况	(174)
二、关键技术的应用	(178)
三、储层滚动预测及油藏特征研究	(182)
第二节 三角洲砂体储层预测实例分析	(185)
一、研究区概况	(185)
二、储层预测方法	(186)
参考文献	(196)

第一章 概述

第一节 地震储层预测的概念

一、储层的基本概念及主要参数

凡是能够储存和渗滤流体的岩层,统称为储集层,简称储层。储层之所以能够储集流体,是由于具备了两个基本特性——孔隙性和渗透性。孔隙性的好坏直接决定岩层储存流体的数量,而渗透性的好坏则控制储层内所含流体的产能。严格地讲,地壳上各类岩石都具有大小不等的孔隙和渗透性能,绝对致密无缝的岩石是很少的。不论什么岩石,只要具备了一定的孔隙性和渗透性就可以作为油气储层。油气储层的含义只强调了具备储存油气和允许油气渗滤的能力,但并不意味着其中一定储存了油气。如果在储层中含有油气,则可将该储层称为含油气层。已经开采的含油气层称为生产层或产层。

目前已经发现的储层有碎屑岩储层、碳酸盐岩储层、火成岩储层、变质岩储层和泥质岩储层。显然,地壳上三大岩类都可以成为储层。然而,分布最广、最重要的储层是各类砂岩、砾岩、石灰岩、白云岩和礁灰岩储层。也就是说,绝大部分储层属于沉积岩。一般把沉积岩类储层作为常规储层,而把火成岩和变质岩及其他岩类储层作为非常规储层。本书中提到的储层是指常规储层。

表征储层的主要参数有储层的岩性、储层的物性和储层的含油气性三大类。储层的岩性包括储层的岩性成分、储层的厚度、储层的展布特征等;储层的物性包括储层的孔隙度和渗透率;储层的含油气性主要是指储层中流体的成分及含油气饱和度和。

二、储层预测的主要地震参数及其地质意义

地震波在传播过程中,当遇到弹性分界面(存在波阻抗差)时,将产生反射波、透射波和折射波,接收其中不同的波,就构成不同的地震勘探方法,目前应用最广的是反射波法勘探。反射波法是在离震源较近的若干测点上,记录地震波从震源到不同弹性分界面上反射后传播到各观测点的旅行时间及振幅、频率等信息,根据地震波的传播理论,经过合理的地震资料处理,得到反映地下地质特征的地震数据体,其中包含的丰富信息是进行储层预测的基础。地震数据中包含的信息可分为几何地震学信息和物理地震学信息。

(一)几何地震学信息

几何地震学信息包括地震反射界面的深度、形态;地层接触关系和地震反射构型等,几何地震学信息是一种宏观的信息,主要应用于构造形态描述、地震相分析、不整合面识别和较大

型的沉积体的识别。

(二)物理地震学信息

在油气藏岩性、物性和流体特征的精细描述上,主要是运用物理地震学信息,其内容丰富,包括:

1. 从地震资料中提取到的直接的岩石声学物理参数

(1)波阻抗(由地震波动力学反演而得)。

(2)密度(由反演的波阻抗分解而得)。

(3)速度(分为地震波旅行时反演的速度和波阻抗反演分解的速度两种)。

(4)反射系数(由地震波动力学反演而得)。

(5)吸收系数、品质因素(由频谱比或振幅比获取)。

2. 间接反映各种岩石声学物理参数特征的地震信息

(1)地震时间剖面上的振幅和反射强度(反映了垂直反射系数特征)。

(2)AVO剖面上与炮检距变化相对应的振幅变化(反映了倾斜反射系数或者说反映了界面上下的波阻抗和泊松比的特征)。

(3)纵、横波时间比和纵、横波速度比(反映了泊松比特征)。

(4)地层顶、底界面的振幅比和频谱比(反映了吸收系数特征)。

(5)频谱和积分能谱(反映了岩层厚度变化特征)。

(6)极性、瞬时相位(反映反射系数的正负)。

(三)岩石声学物理参数的地质意义

岩石声学物理参数主要有速度、密度、波阻抗、反射系数、吸收系数,而它们均与岩石的岩性、物性和所含流体的性质有关。上述的物理地震学信息直接或者间接地反映了岩石的声学物理参数特征。王之敬曾系统总结了岩石物理学特征与地震性质的联系。这里地震性质指的是岩石的弹性模量、密度、纵波速度、横波速度和衰减等。地震性质随岩石的弹性和微观连通性增加而增加。通常,岩石具有较低的可压缩性,流体具有较高的可压缩性。剪切性质对流体饱和度不敏感。温度、压力、开发历史和沉积历史都影响岩石性质的现状。

三、地震储层预测的任务

地震储层预测,是以地震勘探信息为主,综合测井、试井、地质、采油及分析化验等各种资料研究储集层的分布、岩性变化、厚度变化、物性特征、所含流体和油气藏等的一项综合性研究课题,其目的是提高勘探开发的整体效益。地震储层研究工作贯穿于油气勘探、开发的整个过程。

(一)油气勘探早期的区域性储层研究

一个盆地在勘探早期探井不多,处于已有发现井或尚未钻出发现井的时期,主要利用地震资料,结合露头地质资料,应用地震地层学及层序地层学的方法预测有利储层的区域展布。

(1)各类湖泊盆地的岩相古地理研究。这项研究的目的是预测各种沉积体系的配置及其空间展布,指出有利储集体的位置,如坡积或滑塌的砂砾岩,洪(冲)积扇、扇三角洲的砂砾岩,河流砂体,三角洲砂体,浊积砂体,滩、坝砂体和生物滩、鲕滩等。

(2)海相碳酸盐岩和碎屑岩岩相古地理研究。目的是解决海相地层的相带划分,预测有利

的碳酸盐岩和碎屑岩储集体。

(3) 岩浆岩和变质岩等特殊储层的研究。目的是预测岩浆岩和变质岩等特殊储层的分布范围和厚度。

(二) 油气勘探中后期(滚动勘探和开发初期)的储层研究

该项研究也就是储层或油藏描述,是在发现油气田后,从少数几口井出发研究储层的特征。

(1) 碎屑岩储层研究。主要对各种成因类型的砂岩、砂砾岩储层进行储层横向预测。

(2) 非碎屑岩储层的研究。中国东部中生代断陷湖泊盆地中存在一些淡水湖相碳酸盐岩,如渤海湾盆地中广泛分布的沙河街组一段、三段的“特殊岩性段”,即白云岩、泥灰岩、生物灰岩等均是良好的储层。某些油田的岩浆岩和变质岩也可形成良好的储油岩层。利用地震技术可以横向预测储层。

(3) 裂缝储层发育带的预测。辽河变质岩、四川和塔里木轮南碳酸盐岩裂缝发育带都是高产油气流储层,利用地震分形分维、神经网络、相干数据体、AVO 和多波勘探等技术可以预测裂缝发育带。

(4) 不整合面的研究。不整合面不仅是重要的油气运移通道,而且可以形成不整合油气藏,例如在鄂尔多斯及西部的一些盆地中,奥陶系顶部的侵蚀面和渤海湾盆地冀中和黄骅坳陷的震旦系顶部侵蚀面均含有丰富的油气。利用地震资料可以预测不整合面的分布范围及含油气性。

(5) 储层物性研究。利用地震信息预测储层的分布范围、厚度、孔隙度、渗透率、含油饱和度、孔隙中流体性质和异常压力特征等,但精度有待于进一步提高。

(6) 含油气面积及储量的预测。根据地震信息可以预测含油气面积,进而计算储量,效果较好。

(三) 油田开发阶段的储层研究(开发地震)

开发地震是 20 世纪 80 年代兴起的一门新学科,它是一项紧密结合已有地质、钻井、测井、试油、试采以及分析化验等多学科科研成果,以现代地震采集、处理、解释方法为主要手段,用于查明油气储层的构造形态、厚度变化、物性分布和油气范围等地质规律的应用性综合技术。该项研究又称为油藏地震学、油藏监测、四维地震。其技术特点是以钻井资料为依据,以地质原理作指导,充分发挥地震资料大面积密集采集的优势,研究储层的分布及其变化细节。其基础工作是“三高”(高分辨率、高信噪比和高保真度)地震目标处理,核心技术是地震反演,技术关键在于提取多种地球物理信息进行综合分析、综合多学科资料进行综合评价。即在油气田开发过程中,利用以地震为主的物探方法监测油藏动态,包括气顶变化、油水边界变化、注水效果及剩余油的分布等。四维地震技术的关键是如何把四维地震信息结合钻井资料反演解释给出精确的油气藏空间位置、油气运移的图像等。四维地震目前处于试验阶段,今后该项技术将有较大发展,如发展叠前四维地震,即六维地震(三维+时间+炮检距+方位角)研究。

第二节 地震储层预测的主要技术

一、地震反演技术

利用地震资料进行储层预测是指利用钻井资料作为控制和标定点,充分利用地震资料对储层进行预测。地震反演是储层地球物理的一项核心技术。地震反演是指利用地震资料,以已知地质规律、钻井和测井资料为约束,对地下岩层的空间结构和物理性质进行成像的过程。广义的地震反演包括了地震处理 and 解释的整个内容。经过地震反演,可以把界面型的地震资料转换成岩层型的测井资料,使其能够与钻井和测井资料直接进行对比,以岩层为单元进行地质解释,充分发挥地震在横向上资料密集的优势,研究储层的空间变化。波阻抗反演是指利用地震资料反演地层波阻抗(或速度)的特殊处理解释技术。与地震模式识别预测油气、神经网络预测地层参数、振幅拟合预测储层厚度等统计方法相比,波阻抗反演具有明确的物理意义,是储层岩性预测、油藏特征描述的确定性方法,是高分辨率地震资料处理的最终表达方式。地震反演通常分为叠前和叠后反演两大类;按测井资料在其中所起的作用大小又可以分为四类:地震直接反演、测井约束地震反演、测井地震联合反演和地震控制下的测井内插外推;从实现方法上可以分为三类:连续反演、递推反演和基于模型反演。

二、地震属性分析技术

地震属性指的是由叠前或叠后的地震数据,经过数学变换而导出的有关地震波的几何形态、运动学特征、动力学特征和统计学特征。这既是储层描述的需要,也是三维数据体解释的需要。具体做法是利用测井资料解释储层物性参数与井旁地震道地震属性直接的相关性,将地震属性转换成储层物性,并推算到井间或无井区。

通常把地震属性分为两大类:界面属性和体积属性。界面属性是在三维数据体内沿三维层面求取的、与分界面相关的地震属性,它提供了沿分界面或在两个分界面之间的变化信息,拾取的方法有:瞬时属性拾取、单道时窗属性拾取和多道时窗属性拾取。体积属性是指由三维地震数据体导出的完整的属性立方体,是地震数据的另一类图像,这种图像可以揭示使用其他剖面或图像难以识别的地震特征,如河道砂体、礁块和各类地层学单元的沉积特征等。

相干是多道数据间相似程度的一种度量(M. Bahorich 等,1996),是利用三维数据体中数据之间的相干性来显示数据的连续或中断,计算三维数据体中的某一道与相邻若干道的相关系数,然后对其进行统计分析,其结果为某道的输出道。相干数据体是通过分析在纵、横测线方向上的局部波形获得三维地震相干的估计而生成的。应用统计学原理,从不相干性、随机的同相轴中勾绘出相干的空间同相轴,如断面的反射等。被断层截断的地震道区域由于断层的存在,使逐道相干的数据突然中断,造成沿断层存在弱相干的轮廓,使断层、河道、三角洲沉积和特殊岩性体等能够被清楚地分辨出来。

条件属性的拾取方法与界面属性的拾取方法相同。地震属性与测井数据相比,只能是一种“软”数据,但地震测量密度大,测网空间分布均匀,可以作为储层空间变化的依据。联合使用地震数据和测井数据可以改善储层预测的精度和可靠性。

三、模式识别技术

要建立地震属性与储层岩石物性之间的一些定量关系,必须改变我们一贯从理论或理论近似化出发的研究方法,而是采用实验数据导出法,建立起它们之间的有效的统计关系。地质统计学是将空间随机变量的统计和估计技术应用于地质、地球物理问题的方法,包括根据相关性和概率原则对测量数据进行内插和外推的技术。在地震属性分析中使用地质统计学方法,就是利用计算机算法和直接推断的统计学原理对地震属性进行标定,并转换为储层物性参数。该方法要求使用测井资料作为控制点,对地震数据进行严格的标定。常用的方法包括多元统计分析、相关滤波技术、克里金预测技术和人工神经网络预测技术等。

四、烃类检测技术

1972年,西方国家根据反射地震资料成功地直接预测了浅海天然气田的存在,地震勘探开始直接用亮点标志找油。亮点是指在地震剖面上由于地下油、气藏的存在所引起的地震反射振幅相对增强的“点”,它主要利用振幅信息。由于某些特殊的地质体也可以产生亮点,使解释结论存在多解性。随着“亮点”技术的实践,人们开始认识到该技术存在的局限性,后来又进一步发展了 AVO 技术。

AVO(Amplitude Variation with Offset)是振幅随偏移距变化或振幅与偏移距关系的英语缩写。AVO 分析是一项利用振幅随偏移距的变化特征来分析岩性和进行油气藏监测的地震勘探新技术。在应用中必须结合工区的钻井和地震资料特点,建立 AVO 识别标志,进行综合解释。从某种意义上说,AVO 更适合于在气藏描述阶段使用。其基本原理为:在一定条件下,含气、油砂岩,其顶、底面反射振幅绝对值随炮检距(入射角)的增加而增加,而含水砂岩和干砂岩却没变。利用这一特点可以定量检测油气。

五、三维可视化

三维可视化是用于显示、描述和理解地下和地面诸多现象特征的一种新工具,是三维数据和模型的图像显示。通过图像之间的相互作用,彩色高分辨率,实时、光滑地移动旋转图像,使我们看到所需解释的某一部分。其优点是可以灵活方便地通讯,个人可以直接与数据对话。作为解释工具的可视化技术在地震解释中主要包括:

(1)地层可视化。地震层序可视化使解释和研究集中在感兴趣的单独或多个地层及构造区。可选择的技术包括地层可视化窗口功能和透明选项。

(2)构造可视化。立体显示增强了对三维数据的理解,有利于解决复杂断层区的断层模式、类型、断距和可能的断层圈闭。可利用由体到面的灵活转换,同时显示结合功能和多层可视化功能。

(3)振幅可视化。强振幅很容易从三维空间立即突显出来,预期的研究区块能被快速选择、提出,并进行可视化评估。利用这一功能,可以查明有利区块及其地层信息,解释复杂地层系统,结合不透明显示功能使重点区分解成几个独立的分析系统,或把几个独立的系统进行合并,对整个沉积体系进行可视化,以便进行综合研究。

现代三维可视化技术能够使地球物理学家、地质学家和油藏工程师、钻井工程师“钻入”到

相同的数据体中,用同样的数据进行工作。完整的解释、开发和钻井设计之间的相互沟通和综合,是三维可视化解释的发展方向。

六、时移地震(四维地震)

寻找油气最好的地方就是在现今已发现油气的地方。时移地震是指每间隔一定的时间进行一次三维观测,对不同时间观测的三维数据体进行互均化处理,使那些与油藏无关的反射波具有可重复性,保留与油藏有关的反射波之间的差异,通过与初始观测的数据体相减,来确定油藏随时间的变化情况,综合利用岩石物理学、地质学和油藏工程资料,对油藏及时进行动态监测,快速作出油藏评价,调整开发方案,对油气田进行有效的开发,提高采收率。由于这种方法是三维加上时间维,所以又称为四维地震。该方法主要用于:①寻找死油区,确定加密井、扩边井井位以及老井重新作业;②监测注入流体,如水、蒸汽、CO₂和天然气等流体的移动,监测压裂,预测渗透率各向异性,调整注水井和采油井等。

第三节 地震储层预测技术的发展历史

一、地震储层预测技术的诞生

地震储层预测技术的形成和发展是与数字地震技术紧密相伴的。反射波地震勘探技术出现于20世纪20年代。最初是使用机械式光点照相记录地震仪,1952年开始使用模拟磁带记录地震仪。记录道数由最初的4道发展到24道。1956年开始使用多次复覆盖技术,使地震数据质量得到显著提高,但这一阶段地震资料的品质还是相当低的,所获取的地震信息也十分有限,主要是利用反射同相轴特征进行主要标志层的对比,根据其到达时间和速度进行构造解释。尽管在60年代以后,已有人探索利用地震振幅信息进行含油气性的解释,以及根据反射波的调谐振幅计算薄层厚度和利用层速度进行岩性解释等,但由于资料品质差、精度低,还不能起到实用效果。例如,俄罗斯人早在1952年就试图在地震剖面上根据振幅异常确定油水边界,圈定油田范围,其思路与“亮点”技术完全相同。但是,由于当时使用的还是51型光点照相记录地震仪,振幅信息还不能真实地保持下来,因此误差很大,这一油气检测技术不可能达到工业应用水平。

数字地震技术是地震勘探发展历史上最重大的一次革命性科技进步,极大地得益于计算机技术的发展。1963年开始应用数字记录地震仪,1967年开始应用计算机进行数字处理。数字地震技术使数据采集和处理能力得到极大提高,使地震资料的精度和勘探能力显著提高,从而使地震勘探不再仅仅用于寻找构造,而是开始用来解释地层、预测储层和检测油气层。

1977年形成的“地震地层学”主要是利用地震资料进行层序地层划分、地震相和沉积体系分析,大大拓宽了地震资料解释的领域,被誉为石油科技界的一次革命性的突破。与此同时,地震储层预测技术(亦有人称之为“地震岩性学”或“储层地震学”)也诞生了,在油气勘探中正日益发挥出不可替代的重大作用。其与地震地层学的区别在于后者更偏重于区域性、宏观性的地层和沉积体系特征的研究,并主要利用常规地震剖面 and 几何地震学的信息进行研究,而地震储层预测技术则更侧重于对岩性、储层物性和含油气性的预测,主要利用物理地震学信息进

行研究。数字地震技术带来的“数字革命”,可以说是继地震技术拓荒时代后的最大进步。

二、地震储层预测的发展历史

地震储层预测技术的方法很多,细数下来可达几十种之多,但纵观各种地震储层预测技术,从研究思路上不外乎以下四大类:

- (1) 基于地球物理参数与储层特征间物理关系的预测技术。
- (2) 基于模式识别的多因素综合预测技术。
- (3) 基于空间形态分析的储层参数预测技术。
- (4) 基于多因素地质模型约束的储层参数反演预测技术。

围绕着每一种研究思路,都有许多的研究方法,其中有些方法已过时,新方法又在不断涌现,不管具体方法如何变化,却始终离不开这四种基本的研究思路,它们构成了地震储层预测方法的基本脉络。下面沿这四条主线来简要回顾一下地震储层预测技术的发展历史。

(一) 基于地球物理参数与储层特征间物理关系的储层预测

即首先通过某种方法反演出某一地球物理参数,再根据地球物理参数与储层特征间的物理关系(函数关系或统计关系),利用经验关系式或图版进行储层特征解释。最典型的是利用反演得到的速度参数,根据时间平均方程或 Biot - Gretrima 方程,进行孔隙度、含气饱和度的解释。类似的地球物理参数还有波阻抗、吸收系数、泊松比等。而反演这些参数的方法非常多,光波阻抗反演方法就有几十种。不管这些反演方法有多么大的区别,反演出的参数有多么大的不同,但在先反演出地球物理参数,再根据其地质特征间的物理关系进行储层特征解释上是完全相同的。

为了更好地揭示地球物理参数与地质因素之间的关系,早在 20 世纪 70 年代,人们就加强了实验室条件下岩石各种弹性参数与物性、含油气性的研究,Gardner(1974)指出:有很多因素能影响地震反射系数,而速度和密度取决于岩石骨架的矿物成分和粒状特性,取决于胶结物、孔隙度、流体成分和围压,并特别讨论了岩石微裂隙导致压力对速度的影响作用。Domenico(1977)研究了压应力和孔隙流体特性对非固结砂岩储层的弹性特征的影响,以及对纵波和横波波速的影响规律,这些工作为根据地球物理参数与地质因素的物理关系进行预测奠定了理论基础。

这一研究思路是最直接和最简单明了的。在早期主要为利用单一因素进行预测,代表性的方法有:

1. 层速度计算与岩性预测

这是从地震资料进行岩性预测的最早的尝试,是根据叠加速度谱资料中的叠加速度,通过 Dix 公式计算出研究目的层的层速度,进而进行岩性(主要是砂地比)的预测(Cook & Taner, 1969)。其基本的物理依据是不同的岩石类型往往具有不同的速度特征,因此当地层中只存在两种主要岩性(或可简化为两种主要岩性)时,则可根据统计出的速度—深度—岩性量板计算出地层中不同岩性所占的比例。这一技术即使在今天,对于勘探早期区域性岩性预测仍不失为一种简单有效的方法。但其纵向、横向的分辨率都比较低,是其主要的缺陷。

2. 亮点技术

亮点技术是利用地震振幅和极性进行油气检测的一种方法。在 20 世纪 70 年代,亮点技

术作为第一个直接检测地下油气存在的技术进入石油界(Craft, 1973)。亮点就是强反射振幅,主要用于检测气层。数字记录和保持振幅处理技术才使得亮点技术进入商业应用。最初,承包商并没有提供这类处理,而是由石油公司在秘密研究和应用这类处理技术,有人认为可能是由壳牌石油公司首先完成这项研究的。但是第一次报道保持振幅处理技术的是德国 PRAKLA-SEISMICS 公司在 1973 年美国《地球物理学》第 38 卷第 4 期刊登的一篇题为“真振幅处理”的广告。激励油气检测技术迅速发展的另一个重要因素是 20 世纪 70 年代初世界天然气勘探活动的加剧,需要一个行之有效的勘探方法。通过研究砂岩速度与油气饱和度的关系发现,砂岩含气将引起速度的明显变化,从而产生反射振幅异常。这样,在天然气勘探的需求下,有岩石物理学基础理论研究作依据,有数字地震记录和保持振幅处理技术供使用,就产生了著名的亮点技术,在墨西哥湾天然气勘探中获得了成功。之后,人们认识到亮点只可能在砂岩速度低于泥岩速度并且在含气条件下才存在,当地质条件不同,砂岩速度高于泥岩速度时,则会出现“暗点”。此外,与“亮点”或“暗点”相伴生的还有“平点”现象。现在亮点技术已取得了很大的发展,它只是一种迅速发现可疑气层的简便方法,而最终气层的确定则已主要通过 AVO 及多波多分量技术来完成。

3. 波阻抗反演及解释

在 20 世纪 70 年代主要是道积分和递推反演, Lindseth(1972)和 Laverne *et al.* (1977)提出了将子波处理后的零相位地震记录——近似的反射系数序列转换成波阻抗曲线的方法,其分辨率较基于速度谱分析的层速度要高得多,但与现代的反演结果有很大差别。对其的解释与根据层速度进行岩性预测时一样,也是基于不同的岩石类型往往具有不同的波阻抗特征这一物理依据。此外,在 20 世纪七八十年代,利用瞬时振幅、瞬时频率和瞬时相位参数以及吸收系数进行岩性、含气性预测的方法也都曾经广为流行。

单因素预测方法只能适用于地质条件比较简单、油气藏类型比较理想、原始地震剖面信噪比较高的情况。它具有方法简单、快速、方便、经济等方面的优点。但其应用条件难以满足,常出现如下弊端:一是只利用一个参数不能很好地分离含油气与不含油气的情况;二是利用单项信息预测油气效果差、精度低。在研究中,人们意识到单一的地球物理参数与储层特征之间尽管存在一定的物理关系,但这种关系往往并不是唯一的,存在多解性。例如,影响速度的参数既有岩性,也有孔隙度,还有流体成分等。仅仅根据一个地球物理参数难以同时对多种地质特征作出合理的解释。这就相当于根据一个方程只可能求出一个未知数,而要想对多种地质特征同时作出解释,就需要多个相互独立的地球物理参数。为此就产生了基于地球物理参数与储层特征间物理关系的多因素预测方法。

4. AVO 技术

AVO 技术所利用的不仅仅是叠加后共中心道的振幅,而是要考虑振幅随入射角的变化,这实质上是获得了新的变量,较之单独利用振幅信息多了一个新的信息,从而可用来区分岩性变化和含气性的变化。

5. 多波多分量技术

多波多分量技术更是多参数综合预测的典型代表,对于相同的岩性,当所含流体成分不同时,其纵波速度和横波速度的变化有明显差异,因此当同时反演出纵波速度和横波速度而用于解释时,就可以较有效地将岩性变化和含气层区分开来。横波和纵波的质点振动具有不同的方向,地震波场严格说来是一个矢量波场。因此,纵、横波联合勘探技术就被称作矢量地震技

术,有人认为矢量地震是继 20 世纪地震技术三次革命之后的第四次革命。2000 年,美国和欧洲两大地球物理学会联合召开专题讨论会,就矢量地震中的多分量技术在改善地震成像、裂缝检测、岩性和流体识别等 24 项应用进行了研讨,大多数专家预测五年以后将会有广泛应用。目前较为实用的矢量地震技术是常规纵波震源激发和三分量检波器接收(海上是四分量检波器)。

显然利用多因素进行预测的方法可显著地减少储层预测的多解性,是对单因素预测技术的重要发展。但是,AVO 技术和多波多分量技术更为复杂,采集和处理的难度更大,这影响了其应用的普遍程度。

(二)基于地球物理参数与储层特征间数学关系的储层预测

为了克服单因素解释中的多解性问题,除了前述的那些与地质特征具有明显物理关系的地震参数外,人们一直探讨提取更多的地震属性以进行储层预测。

在油气勘探中,地震属性的研究和使用始于 20 世纪 70 年代,最早主要是以振幅为基础的瞬时属性,用来直接指示油气。它随后经历了一个曲折的发展历程。70 年代早期,Anstey 发现了含气砂岩波阻抗的异常变化,使用了反射波振幅变化特征——亮点、暗点,对含气砂岩储集体进行预测。TurhanTaner 继承了 Anstey 的工作,并在此基础上提出了全新的地震属性计算方法——复数地震道分析,这一技术的应用得益于地震地层学的发展。事实上,这两者的的发展几乎是同步的。20 世纪 80 年代,地震属性的数量迅速增加。这些属性中的许多在数学上得到很好的定义并且在其他学科中有明确的意义(例如,第一主频或 K—L 信号复杂度),但是它们的地质意义是含糊不清的。尽管为了更好地理解地震属性,多元属性分析技术首次被使用,但地震属性的混乱不清还是最终导致了人们对它的不信任。20 世纪 80 年代晚期多维属性,如倾角和方位角的初步发展,导致了三维连续属性在 90 年代的广泛应用。究其原因,它的成功得益于清楚和明确的地质含义,也就是说它能反映具体的地质特征,这与过去经常设计的带有精确的数学定义、留给解释者去臆测地质含义的随意属性有着显著的差别。同时,地震属性技术的蓬勃发展同样得益于全三维解释技术的发展。随着石油工业的发展,工程的时效性越来越强,要求地震工作不断缩小解释周期,要在一个短时间内给出合理的地质解释。因此,发展一套快速、准确的地震数据分析技术来取代繁琐的手工解释是十分必要的,这就是基于三维可视化的全三维解释技术。全三维解释技术的基础就是三维地震数据属性检测与拾取,同时全三维解释技术的发展又反过来促进了三维地震体属性的广泛应用。相干数据体技术(一种特殊的属性体)的断层自动化解释和地质异常体检测的效果,使三维属性体技术引起了人们的普遍关注。目前三维地震属性体的提取方法已由单道提取方式发展为基于面元的多道提取方式。其处理成果在地震资料自动化解释和地质效果检测方面,如研究断层、识别古河道、冲积扇,突出岩性突变区,压制数据体内固有的噪声,都较常规的三维地震数据体有明显的优势。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,利用三维地震属性体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,为确定油气储量和油田开发服务。利用三维地震数据体根据面元方法提取的三维属性体来反演油藏参数,在今天正得到蓬勃发展。

三维连续性属性的开发,使得这些属性今天得到广泛应用。三维连续性属性的成功应归功于其明确的地质和地球物理含义,因此有着明确地质意义的新属性不断被推出,而那些仅仅带有精确数学定义的属性正在被扬弃;新的地震属性和属性分析方法的提出正在使地震相分