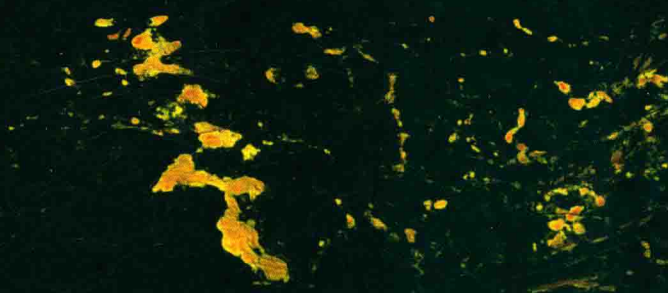


Technical Application of
Diffraction Wave Imaging

绕射波分离与成像 技术应用

栾锡武 李继光 著



科学出版社

Technical Application of Diffraction Wave Imaging

绕射波分离与成像技术应用

栾锡武 李继光 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从绕射波波场正演模拟入手,分析研究绕射波的形成机理与特征,并利用绕射波与反射波在不同域的形态差异,对绕射波与反射波的分离方法进行研究。最后应用高精度偏移方法对分离后的绕射波进行偏移成像,形成了较为系统的针对河道、缝洞、盐丘等小尺度地质目标体进行精确成像的处理技术。经大量的实际生产应用,获得了很好的效果。本书述及的技术成果对河道、缝洞、盐丘等隐蔽油气藏的勘探与开发具有实际的指导意义。

本书可供油气地震勘探开发研究工作人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

绕射波分离与成像技术应用/栾锡武,李继光著. —北京:科学出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-03-054685-2

I. ①绕… II. ①栾… ②李… III. ①地震波—地震层析成像—研究 IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 240226 号

责任编辑:周 杰 / 责任校对:马路遥
责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2019 年 1 月第二次印刷 印张: 21 3/4

字数: 500 000

定价: 228.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

1859年，美国人德雷克在宾夕法尼亚州钻成第一口具有现代工业意义的油井——德雷克井，标志着近代石油工业的开始。内燃机的发明开启了人类的石油利用时代。第一次世界大战和第二次世界大战在很大程度上推动了世界石油工业的发展。1941年12月到1945年8月，同盟国共消耗了70亿桶石油。所以，人们常说，第二次世界大战实际上是一场发动机和石油的战争。1945年，美国石油消耗首次超过煤炭。1967年，全球石油在一次能源消费中的比例超过煤炭，标志着人类的能源利用从煤炭时代正式进入石油时代。

随着以发动机为核心的世界工业的快速发展，世界对石油的消耗也呈快速增长的趋势。1860年，全球石油消耗为7万吨，到1900年为2043万吨，2000年为46亿吨。由于石油的不可再生性，世界油气的快速消耗使油气价格一路攀升，过去甚至有人预言世界石油在20世纪70年代即将枯竭。世界各国都把石油作为一项极为重要的战略资源进行争夺，一种说法被提出——石油是工业的命脉，谁掌握了石油，谁就控制了世界。旺盛的石油需求和资源争夺，20世纪全球几度出现能源危机，引发战争冲突。从海湾战争到最近美国对利比亚、叙利亚和伊拉克等中东国家的军事干涉，其背后都能看到石油的影子。

人类从蒸汽机时代到内燃机时代，经济社会发展和科学技术的位置关系发生了转折。科学技术的发展走在了社会经济发展的前面，开辟了经济发展的道路，在一定程度上决定了社会经济的发展方向。石油行业亦是如此。石油勘探技术的不断发展和创新，一次次化解了石油需求和供给之间的巨大矛盾，避免了石油末日的到来，支撑了整个人类社会的持续发展。以海洋石油勘探发展为例，1978年世界海洋钻井技术达到水深312米，获得的勘探储量是300多亿吨。1997年，当世界海洋钻井数据达到水深1600米时，获得的勘探储量达1650亿吨。到2005年，世界海洋钻井技术水深达到2500米到3000米，获得的勘探储量已突破2500

亿吨。陆域以我国为例，我国早期的油气勘探技术能力仅限于三角洲平原地区，发现了大庆油田和胜利油田。在此基础上，经过多年的攻关，我们的勘探技术在山地、黄土塬地区取得突破，发现了长庆油田。在黄土塬，我们又进一步发展了沙漠、戈壁的油气勘探技术，一举开拓了目前我国西部的油气勘探新局面。可以说，技术的创新，关键技术的突破，引领了我国油气新领域的开拓。

随着陆上含油气盆地逐步进入高成熟勘探阶段，隐蔽性油气藏越来越成为勘探开发工作的重点。统计资料显示，在全球范围内，构造油气藏、复合油气藏和隐蔽油气藏的储量比例分别为 35%、30% 和 35%。我国胜利油田的济阳拗陷油气探明储量的 70% 以上来自隐蔽油气藏。随着油气勘探程度的进一步提高，隐蔽油气藏勘探向河道砂体、三角洲浊积砂体、砂砾岩体、滩坝砂等复杂岩性储层，向碳酸盐的缝洞、盐丘等小尺度目标发展，并在中国的东部和西部等已经取得很好的勘探效果。

应该看到，随着地震勘探领域从构造圈闭向岩性圈闭的延伸，地震勘探面临新机遇的同时也面临巨大的技术挑战。河道、缝洞、盐丘等小尺度地质目标体，它们目标尺度小，反射能量弱，反射特征变化大，横向范围和厚度变化大，纵向叠置关系复杂、连通性差，边界预测困难，这些方面都是当前隐蔽油气藏勘探开发中要解决的主要地震地质问题。

绕射波成像是随着河道、缝洞等小尺度地质目标体的勘探需求提出的一项新技术，已逐步被生产实际所重视和证实。目前，国内外已有不少研究人员在这方面进行了很多有益的尝试，取得了一定的成果。中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院在这方面也做了重点部署，同志们在绕射波成像技术方面也进行了不少有益的探索，所形成的技术已成功用于塔河油田缝洞体的检测。无论是缝洞还是河道，未来隐蔽油气藏勘探将是技术攻关的主要方向。绕射波成像将是需要重点考虑的技术手段之一。针对隐蔽油气藏河道、缝洞等小目标地质体勘探成像的需要，结合当前地震处理技术，该书作者通过多年的研究与实践，对绕射勘探进行了系统的理论研究，总结出一套较为成熟的绕射波成像技术方法，并在生产实践中进行了应用，其中在胜利油

田济阳拗陷中的应用获得了钻井的支持，取得了良好的效果。栾锡武是我熟悉多年的一位优秀科技工作者，邀请我作序，我欣然答应。该书的出版并不是绕射波工作的结束，恰恰是刚刚开始。未来隐蔽油气藏工作将遇到很多技术难题，绕射波是其中之一。希望此书的出版能为绕射波的研究开个好头，带动更多的科技人员投入到绕射波勘探的研究中来，也希望在不远的将来绕射波技术能成为隐蔽油气藏勘探的关键技术。



中国科学院院士

2018年9月

前 言

2011年起作者在青岛筹建海洋地震数据处理解释中心,到2015年,这个中心完成了二维地震数据处理工作46 100km,三维地震数据处理工作600km²。就二维数据而言,其数据采集参数五花八门。有的拖缆长度达8000m,有的只有几百米;有的震源容量达6060in³①,有的只有几百平方英寸;有的主频40Hz,有的高达3000Hz。采集参数不一,处理目的也完全不同。完成上述处理任务着实提升了整个中心的技术水平。除完成生产任务以外,中心也是同国内外有关单位合作开展相关研究工作的一个平台。针对生产中遇到的技术难题,相继开展了鬼波压制、海洋宽线地震数据处理、浅水SRME、基于小波分频的地层Q值提取、水合物岩石物理模型、保幅角道集提取、逆时偏移、叠前地震反演、正演模拟方法等方面的研究。部分成果已经在学术期刊上发表(Nie et al., 2014; Yang et al., 2016, 2017; 王小杰等, 2015, 2016; 王小杰和栾锡武, 2017; 方刚等, 2016, 2017; 潘军等, 2015a, 2015b, 2016; 颜中辉等, 2017; 邢子浩, 2016; 蒋陶, 2018; 刘欣欣等, 2018)。此次绕射波相关内容的出版是继《面向储层预测的地震保幅处理技术》出版后,对近年来开展相关科研工作的又一个总结。

数据处理解释中心能在较短的时间内建设完成并开展相关的科研工作,离不开兄弟单位的大力支持。中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司研究院大港分院、斯伦贝谢西方奇科地球物理公司、CGG GeoSoftware 中国公司、中国石油化工股份有限公司勘探开发研究院、中国石化胜利油田有限公司物探研究院在软、硬件建设方面给予了大力支持。中国石油大学(华东)印兴耀教授、李振春教授、杜启振教授,国家深海基地管理中心刘保华教授,中国海洋大学王修田教授、姜校典教授、张建中教授、何兵寿教授,中国科学院地质地球物理研究所王赟教授,中国石油化工股份有限公司勘探开发研究院魏修成教授等在人才培养等方面给予了大力支持。中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院、中国石油化工股份有限公司勘探开发研究院、中国石油天然气股份有限公司杭州地质研究院等都在科研项目合作方面给予了大力支持。

绕射波的工作源自和中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院

① $1\text{in}^3 = 1.638\ 71 \times 10^{-5}\text{m}^3$ 。

长期的科研合作。近年来，随着胜利油田勘探进程的逐渐深入，构造简单、易于开采、相对大型的构造油气藏已基本勘探完毕。后续勘探开发的重点落在了低序级断层、岩性异常体和河道等复杂的小尺度非均质储层上。但由于上覆强能量的反射层屏蔽和反射波成像结果对小尺度油藏描述精度不高等影响，勘探开发进程受到一定制约。绕射波工作的开展是实际生产的驱动。

为了使读者对绕射波有系统的了解，本书增加了地震波的基本概念、绕射波的基本概念、绕射波波场特征三部分内容作为绕射波的基础。在此基础上介绍了绕射波的分离与成像。绕射波的应用来自胜利油田东部的济阳拗陷和西部准格尔盆地实际探区的例子。本书的出版得到了中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院有关领导、专家的支持、帮助与指导，得到了中国地质调查局青岛海洋地质研究所、中国石油大学（华东）各位同事、同学的大力支持与帮助，在此一并表示衷心感谢。

感谢青岛海洋科学与技术国家实验室项目（2017ASKJ01，QNL201708，QNL2016ORP0206，2016ASKJ13，2017ASKJ02）和行业基金项目（201511037）对本书出版的支持，感谢金之钧院士对本项工作的悉心指导并为本书作序。随着隐蔽油气藏勘探工作的深入，绕射波的工作应该能逐步铺开。因此，本书的工作只是个开始。由于作者水平和时间所限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2018年9月于青岛

| 目 录 |

第一章 绪言	1
第二章 地震波的基本概念	6
2.1 弹性理论	6
2.1.1 在拉紧的弦上传播的波	6
2.1.2 应力	8
2.1.3 应变	9
2.1.4 虎克定律	12
2.1.5 弹性常数	13
2.1.6 应变的能量	14
2.2 波动方程	15
2.2.1 标量波动方程	15
2.2.2 矢量波动方程	17
2.2.3 含场源的波动方程	17
2.2.4 克希霍夫定理	19
2.2.5 波动方程的平面波解	19
2.2.6 球面波的解	21
2.3 波的一般性质	22
2.3.1 简谐波	22
2.3.2 波的干涉	24
2.4 体波	24
2.4.1 纵波和横波	24
2.4.2 位移和速度势	27
2.4.3 流体介质中的波动方程	28
2.4.4 边界条件	29
2.4.5 球面波	30
2.5 波传播过程中的介质效应	32
2.5.1 能量密度和几何扩散	32
2.5.2 吸收	35

2.5.3 反射和折射: 斯内尔定律	36
第三章 绕射的基本概念	40
3.1 波的绕射	40
3.2 绕射的例子	40
3.3 研究历史	41
3.4 惠更斯原理	42
3.5 惠更斯—菲涅耳原理	44
3.6 叠加与干涉	46
3.7 克希霍夫衍射公式	49
3.8 夫琅和费衍射方程	51
3.9 夫琅禾费衍射的例子	52
3.9.1 狭缝衍射	52
3.9.2 小孔衍射	53
3.10 绕射波的表达	54
3.10.1 基本公式	54
3.10.2 部分水平面的绕射效应	55
3.10.3 绕射波在时间域的解	58
3.10.4 半无限平面的绕射效应	58
3.10.5 利用惠更斯原理构造绕射波的波前面	60
第四章 绕射波波场特征	62
4.1 绕射波的产生	62
4.2 绕射波的波场特征	63
4.2.1 单炮记录	63
4.2.2 共中心点道集	73
4.2.3 共偏移距道集	77
4.2.4 角度域共成像点道集	81
4.2.5 叠加剖面	87
4.3 绕射波波场正演模拟	93
4.3.1 正演模拟方法	93
4.3.2 绕射体地质体模型的地震响应特征	113
4.3.3 绕射体分辨能力模型检验	126
4.3.4 复杂地质模型正演模拟	133
4.4 地震波传播的动力学概念和广义绕射	137

第五章 绕射波分离	141
5.1 多域绕射波加强	141
5.1.1 实际资料绕射波地震特征分析	142
5.1.2 DMO 绕射波加强	148
5.1.3 CRS 绕射波加强	156
5.2 倾角域绕射波分离	170
5.2.1 倾角域共成像点道集	170
5.2.2 倾角域绕射波分离依据	181
5.2.3 倾角域绕射波分离方法及处理流程	184
5.2.4 倾角域绕射波分离测试	197
5.3 复杂地表倾角域绕射目标分离成像	210
5.3.1 复杂地表倾角域 CIG 道集生成	210
5.3.2 复杂地表倾角域绕射波分离及成像数值试验	213
5.4 弹性波倾角域绕射目标分离成像	218
5.4.1 弹性波倾角域 CIG 道集生成	218
5.4.2 弹性波倾角域绕射波分离及成像数值试验	223
5.5 平面波域绕射波分离	231
5.5.1 平面波域绕射波分离依据	232
5.5.2 合成平面波记录	234
5.5.3 平面波域绕射波分离原理	235
5.5.4 平面波域绕射波分离流程	237
5.5.5 平面波域绕射波分离试算	237
5.6 反稳相绕射波分离	255
5.6.1 稳相偏移	255
5.6.2 反稳相绕射波分离原理及实现	258
5.6.3 反稳相绕射波分离试算	262
第六章 绕射波成像	267
6.1 绕射波速度分析方法	267
6.1.1 倾斜界面地震绕射波时距曲线方程	267
6.1.2 倾角域绕射波速度分析方法	269
6.2 绕射波成像方法	277
6.2.1 等效偏移距 (EOM) 绕射波成像方法	277
6.2.2 基于 2D 反褶积成像条件的保幅叠前偏移	281
6.3 模型测试效果分析	284

6.3.1 三维断块模型	284
6.3.2 陈家庄凸起模型	289
第七章 绕射波成像应用	293
7.1 济阳拗陷陈家庄凸起	293
7.1.1 地质背景	293
7.1.2 绕射波成像的剖面特征	298
7.1.3 绕射波成像的平面特征	302
7.1.4 绕射波成像检验	306
7.1.5 应用效果	308
7.2 准噶尔盆地董2井	310
7.2.1 地质背景	310
7.2.2 地质目标	315
7.2.3 绕射波剖面特征	318
7.2.4 绕射波分离成像	320
7.2.5 绕射波平面效果	323
参考文献	326

第一章 | 绪 言

绕射是一个物理学的概念。但在物理学中,其对应的中文术语是“衍射”。两者对应的英文名词都是 diffraction。“绕射”和“衍射”没有实质的区别。按照中文的习惯,本书在描述物理学问题时,使用“衍射”一词,在描述勘探地震学问题时,更多地使用“绕射”一词。

物理学对衍射的研究比起勘探地震学对绕射的研究要早很多,理论体系也成熟得多。物理学对衍射的认识源于人们对光的各种观察和实验工作。光的衍射效应最早由弗朗西斯科·格里马第(Francesco Grimaldi)于1660年发现并加以描述。他也是 diffraction 一词的创始人。他提出,“光不仅会沿直线传播、折射和反射,还能够以第四种方式传播,即通过衍射的形式传播”。他的成果于1665年发表(Francesco Maria Grimaldi,1665^①)。

荷兰科学家惠更斯(1629—1695)在1678年向巴黎科学院报告了其波动光学理论,其中包括对光衍射的研究。惠更斯的光学研究发表于1690年,这是人类历史上第一个用数学对光学进行理论描述的著作(Huygens,1690^②)。英国科学家艾萨克·牛顿(1643—1727)对光的绕射现象进行了研究(1666~1704年)(Newton,1704^③),认为光是由粒子构成,衍射是因为光线发生了弯曲。由于牛顿在学界的权威,光的粒子说在很长一段时间占有主流位置,也压制了惠更斯关于光的波动学说。

1803年,托马斯·杨进行了著名的“双缝实验”(Young,1804^④)。在这个实验中,他把遮光挡板放置于光源和观测屏之间,并在遮光挡板上开了两条平行的狭缝。当光穿过狭缝并照射到挡板后面的观察屏上时,观察屏上出现了明暗相间的条纹。托马斯·杨把他的实验结果解释为光的衍射和干涉,并进一步推测光一定具有波动性质。在此基础上,法国科学家菲涅耳(1788—1827)对光的衍射进

① Francesco Maria Grimaldi. 1665. Physico mathesis de lumine,coloribus,et iride,aliisque annexis libri duo Bologna (“Bonomia”). Vittorio Bonati.

② Huygens C. 1690. Traité de la Lumière. Leiden; Pieter van der Aa.

③ Newton, Isaac. 1704. Opticks. London, Royal Society.

④ Thomas Young. 1804. The Bakerian Lecture; Experiments and calculations relative to physical optics. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 94:1-16.

行了扎实的实验和计算,其结果支持了托马斯·杨的实验和结论,也支持了惠更斯最早提出的光的波动说。菲涅耳的成果发表于1816和1819年(Fresnel,1816,1819^①)。

无论是牛顿还是惠更斯都没能对衍射现象做出很好的解释。按照光线直线传播来推断,障碍物后面阴影区的边缘应该是清晰的,而不应该出现条纹以及条纹间模糊的边界。牛顿将衍射称为“弯曲”。他假定光线在传播过程中遇到障碍物发生了弯曲,但他并没有对此给出定量解释。惠更斯对波前和波包络的假设,如果不加修订的话同样难以对衍射做出解释。

托马斯·杨在1801年对惠更斯原理做出了两点补充:第一,障碍物边缘附近的二次波会发散到阴影区中,但由于数量有限,因此阴影区中波动的振幅较弱;第二,在障碍物边缘发生的衍射是由反射和折射光线之间的干涉引起的。托马斯·杨最早在衍射研究中提到了绕射强度和波长的相关性。在1803年,托马斯·杨首次证明了障碍物后面阴影区的衍射条纹是由波的干涉引起。当障碍物一侧的光被遮挡时,阴影区的衍射条纹即消失。在菲涅耳之前,托马斯·杨是唯一一个站在光的波动立场上开展绕射研究的科学家。

菲涅耳在光学方面的研究成果,使人们彻底接受了光的波动学说,而不再相信牛顿的粒子说。

菲涅耳将惠更斯的次波原理和杨氏干涉原理进行了数学表达,并假设单色光由正弦波构成,菲涅耳成功给出了衍射的解释,包括首次对波的直线传播给出了基于波动的解释。

基于波动思想,他证明了相同频率但不同相位的正弦函数的加入类似于不同方向的力的加入。同样基于波动思想,他详尽解释了光的偏振现象。在惠更斯原理的基础上,他给出了描述次波基本特征(相位和振幅)的定量表达式,并在杨氏干涉的基础上增加了“次波相干叠加”的原理,从而发展成为惠更斯-菲涅耳原理。此时,物理学对于衍射的研究,无论是从现象观察,还是用理论对现象的描述,到了基本成熟的阶段。以后的工作则是在此基础上对于该理论的各种应用。绕射在其他领域,如地学领域的应用都是基于上述理论,特别是惠更斯-菲涅耳原理。

我国地学工作者较早的绕射波研究工作见于1964年滕吉文院士发表在地球物理学报上的工作(滕吉文,1964)。早期关于绕射波的研究主要限于绕射波产生的机制、绕射波在地震剖面上的表现特征,以及根据绕射波的特征进行断层位置的

^① Fresnel A J. 1816. Mémoire sur la Diffraction de la lumière, où l' on examine particulièrement le phénomène des franges colorées que présentent les ombres des corps éclairés par un point lumineux. Annales de la Chimie et de Physique,2(1): 239-281.

Fresnel A J. 1819. Mémoire sur la diffraction de la lumière. Annales de chimie et de physique,11:246-296.

确定(第六物探队 661 队解释方法组,1972;华北石油勘探指挥部地调一大队,1972;黄洪泽,1975,1977;钱荣钧,1976)。

因为“绕射尾巴”的问题,绕射波在地震剖面上还基本被认定为一种干扰。对绕射波的研究,更多地还是绕射干扰去除,即绕射波的收敛问题(徐中英,1981;翁史炀,1985)。用绕射波识别断层是在理解绕射波原理的基础上最早对绕射波的正面应用。20 世纪 90 年代,徐中英等(1992)将四川盆地中部中三叠统及下三叠统顶部广泛发育的丘状结构和绕射波联系起来,认为这些小幅度、低速度的盐丘形成了绕射。这是绕射波又一重要的正面应用。更有意义的是,这一工作首次把绕射波和油气藏联系起来。绕射波的另一个应用是对地震剖面上“串珠”形成机理的认识。胡中平等通过正演模拟认为,不均匀地质体和溶洞都可以形成绕射波。在地层内部,溶洞和地层波阻抗界面的相互作用可以形成多次绕射,对这些多次波进行叠前成像,即可在垂直方向形成多个强能量团即“串珠”。因此“串珠状”特征是多次绕射成像以后的地震现象(胡中平,2006;李凡异等,2009)。这样,绕射波再一次和重要的油气储集体联系起来。对“串珠”的研究迫切需要地震资料能够对“串珠”进行精确定位,即提高地震资料的横向分辨率。

地震偏移的主要目的是提高地质目标的横向分辨率。在以碳酸盐岩缝洞型储层为目标的储层描述中,地震横向分辨率尤为重要,它决定了对缝洞体尺度与几何形态刻画的精度。但偏移结果的横向分辨率本质上受菲涅耳带控制,同时也与地震频宽、目标埋深、空间采样率等相关。在地震频宽、目标埋深等关键参数确定的情况下,偏移对横向分辨率的提升受到很大限制。

一些学者通过对偏移后的地震剖面进行处理来改善地震分辨率。被广泛使用的地震反褶积技术,通过压缩地震子波来提高地震资料的分辨率,进而揭示出被带限地震记录掩盖的细节构造。Gersztenkorn 和 Marfurt(1999)从成像点的邻域提取相干信息;Hu 等(2001)提出去模糊滤波器;Liu 和 Marfurt(2007)通过提取瞬时谱属性来突出细节信息。事实上,由瑞雷准则可知,如果没有先验信息供参考,在地震剖面上只能识别尺度大于半个波长的地质目标,这是由远源波场的带限特征决定的。因此,受瑞雷准则的限制,上述技术对成像分辨率的改善效果有限。另外,应用上述处理技术得到的成像结果所展示的细节信息可信度低,而且没有相应的不确定性评价机制,使得后续的解释具有或多或少的任意性。

对地震剖面上“串珠”等小尺度地质体的识别需求,归纳起来,其实就是隐蔽油气藏勘探开发的需求。Levorsen(1964)于 1964 年首次提出隐蔽油气藏的概念。随着油气勘探程度的不断提高,隐蔽油气藏已成为很多盆地油气勘探的主要目标。和构造油气藏不同,隐蔽油气藏主要指发育在层序格架的特殊部位或有特殊成因的岩性油气藏、地层油气藏以及复合型水动力油气藏等,勘探目标主要以不整合

面、尖灭点、低序级层序、河道体系、缝洞、盐丘等为主要对象。在背斜构造油气藏等基础上建立起来的反射成像技术体系,已不能适应对隐蔽油气藏的描述。地震技术已从构造识别逐步转向流体识别。

流体识别的基础问题是含流体双相各向异性介质中地震波的传播理论。Gassmann(1951)提出了弹性波在多孔介质中的传播理论,并建立了著名的 Gassmann 方程。Biot(1956a,1956b)发展了 Gassmann 的流体饱和多孔介质理论,奠定了双相介质波动理论的基础。Dvorkin 等将 Biot 宏观流体机制和局部喷射流体机制有机结合起来,建立了 BISQ 模型(Dvorkin and Nur,1993;Dvorkin et al.,1994)。我国学者在双相各向异性介质地震波传播理论以及流体识别技术等方面的研究工作(如牟永光,1996;裴正林,2006;等等)基本都是在上述工作基础之上展开。

基于地震资料的流体识别技术始于 20 世纪年代中期。亮点技术作为第一个检测地下油气存在的技术进入了石油勘探领域,并流行一时。平点、 V_p/V_s 比值、P 波和 S 波反射系数比、P 波和 S 波波形的定性比、AVO、弹性阻抗、时频属性、地震波吸收衰减等直接碳氢指示因子成为勘探工作者发现许多新气田的重要参数(Backus and Chen,1975;Russell et al.,2003;Connolly,1999;Castagna et al.,2003;印兴耀等,2015),明显提高了油气田勘探的成功率,降低了勘探费用。

回到提高地震资料横向分辨率的初衷。其实,提高横向分辨率的主要目的就是准确识别地下的“串珠”、断层、裂缝、盐丘等小尺度构造。而这些构造的地震响应主要表现为绕射波。因此,地震资料中的绕射波可以被认为是地震高分辨率信息的携带者,对提高地震成像分辨率进而提高地震解释精度意义重大。从而,绕射波的分离与成像成为与同流体识别并行的两大隐蔽油气藏勘探支撑技术。

早在 20 世纪 50 年代,Krey(1952)和 Hagedoorn(1954)已经意识到绕射/散射波成像的重要性。但是,从 20 世纪 80 年代开始,人们才开始真正对绕射波分离成像感兴趣。根据绕射能量拾取方式的不同,可将绕射目标成像方法分为“直接法”和“间接法”两类。

“间接法”绕射目标成像方法通常是在原始道集(Landa et al.,1987;Linda and Keydar,1998;Kanasewich and Phadke,1988;Taner et al.,2006;Berkovitch et al.,2009)或者由原始道集经过 Randon 变换等方式得到的叠前道集(Nowak and Imhof,2004;Khaidukov et al.,2004;Moser and Howard,2008),用于波场分离的数据量大,且分离方法大多是反演方法,因此绕射波提取耗时较长、计算效率较低。但是该方法一般能得到压制反射波后主要含有绕射波的点源单炮记录。该绕射炮记录可以用于绕射速度分析以得到适用于绕射目标成像的偏移速度,从而提高绕射成像分辨率。与之不同,“直接法”绕射目标成像通常是通过将传统的地震处理、偏移

算子改进或者直接利用反射和绕射能量在成像矩阵中的差异直接进行叠加分离或者单独成像 (Kozlov, 2004; Moser and Howard, 2008; Koren and Ravve, 2010; Zhu and Wu, 2010; Landa et al., 2008; Klovov et al., 2010a, 2010b; Bai et al., 2011)。因此该类方法一般与常规处理效率相当, 较“间接法”来说计算效率较高。但是直接法得到的绕射波道集一般是叠加剖面或者直接成像结果 (比如绕射多聚焦叠加和 Kirchhoff 非稳相绕射成像方法) 通常很难用于速度分析。不过近几年发展起来的倾角域共成像点道集绕射目标成像方法中, 由于倾角域 CIG 道集中绕射波对偏移速度的敏感性, 也可用于偏移速度分析。