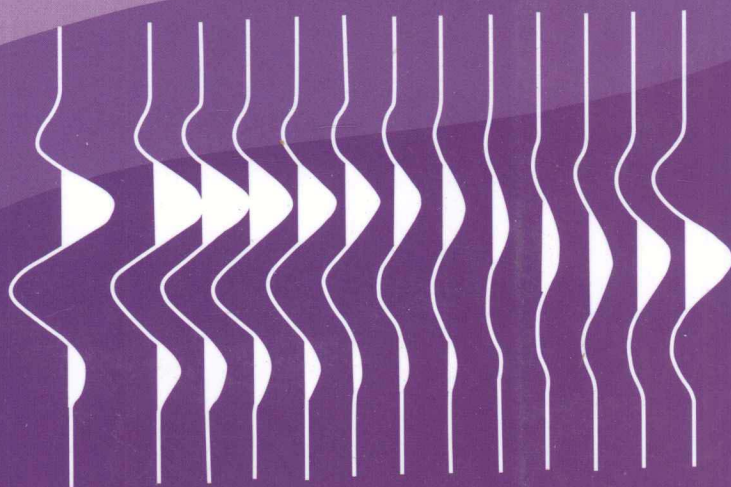


油气田开发地震技术

刘雯林 著



3. 130.8

石油工业出版社



油气田开发地震技术

刘雯林 著

石油工业出版社

内 容 提 要

作者从我国具体地质条件出发,以翔实的资料,用大量简明的附图形式,通过几十年科研成果的积累,凭借地球物理学家深厚的理论功底,深入浅出地在阐述了油气田开发地震技术的意义、发展、任务和地震反演方法的基础上,归纳总结出了陆相沉积模式,进而介绍了油藏形态描述,储层含油气范围预测和厚度、孔隙度、渗透率、饱和度的估算,压力预测、油藏监测的具体方法。

本中是石油勘探、开发工程技术人员及有关院校师生值得一读的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油气田开发地震技术/刘雯林著.
北京:石油工业出版社,1996.3
ISBN 7-5021-1612-5

- I. 油…
- II. 刘…
- III. ①油田开发-地震勘探-技术
②气田开发-地质勘探-技术
- IV. P618.130.8

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第19217号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里2区1号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开 11.5印张 280千字 印2001-4000

1996年3月北京第1版 2004年8月北京第2次印刷

ISBN 7-5021-1612-5/TE·1375

定价: 16.00 元

序

地震勘探，乃至整个地球物理勘探，顾名思义，是一项勘探技术。在寻找石油和天然气的资源的油气勘探阶段，地震勘探已成为一项必不可少的勘探技术。到了油气田开发阶段，往往由于已经钻了很多井，就完全使用钻井资料研究储层特征，进行小层对比，建立油藏地质模型，开展油藏数值模拟，制定开发方案，进行开采了。当油气田的地质情况比较复杂时，人们就又想起了面积上密集的地震资料或许能帮助搞清井间的地质情况。60年代在开发东辛油田时就曾碰到了这种情况。东辛油田是一个典型的复杂断块油田，在150km²范围内，有断层198条，断块174个。断层控制着油藏的分布。要经济地开发油田，就必须查明断层的展布。油田开发对地震技术提出了新的要求，油田的地球物理学家们利用300m边长的一套小三角形测网，用手工进行三维立体归位解释，研究了复杂断块构造。这实际上是我国最早用于油田开发的“三维地震”了。与此同时，还用波动理论研究了小断块的反射特征，有效地指导了当时的小断层、小断块的地震解释。这恐怕要算是我国最早的开发地震了。上述波动理论研究到1973年进一步发展成为二维偏移和三维两步法偏移技术，并于1974年在东辛油田邻近的广利油田开始三维地震野外施工，使得该油田在后来得到成功的开发。

实际上，油田开发不只是要求地震解决构造问题，还希望帮助解决储层或油藏问题，最简单的问题就是圈定砂岩储层的分布。为了能研究储层的分布，我们于1978年开始研究了地震反演技术，利用合成声波测井有效地圈定了纯化镇—梁家楼油田的浊流河道—深水扇砂岩储层的分布。

近些年来，人们越来越认识到，要经济有效地开发油气田，仅靠传统的油田开发资料，诸如由钻井取得的测井、岩心和生产历史资料，已经显得不够了。无论是开发新的油气田，还是在老油田钻加密井、扩边井和试井，乃至提高油气采收率，使用地震资料均能够较完整地刻画油藏的特征，改善油藏管理。为了适应油气田开发和开采的需要，地震技术已从勘探领域延伸到开发领域，正在逐渐形成一门新的学科——开发地震。

如今，随着开发地震技术的进步，用少量钻井作为控制和标定，充分利用面积上密集的地震资料，已能对油气藏做出圈绘和描述。在东部，我们已成功地应用于复杂断块油田的滚动勘探开发，曾使一个滚动区块两年多来钻的49口开发井无一落空。在西部，曾从一口油藏发现井开始，为油田开发概念设计和方案设计提供了非均质砂岩油藏描述成果。在南方，钻井曾按油藏预测设计的钻井方位进入裂缝性油藏，也曾使老井重新作业获得高产。开发地震正在深入的研究和发展中。

开发地震使用的基本观测方式应当是三维地震。三维世界本来就应该用三维方式来观测。对于油气田开发来说，三维地震有其独特的地质效果。一是横向分辨率最高；二是查明复杂，断块构造圈闭的能力最强；三是能使小断层平面连接方案有唯一解；四是能圈定小幅度微型圈闭；五是容易解决非均质储层的连通性和分布问题；六是用三维数据体和多口井资料联合做储层反演效果最好，效率最高。当然，在没有三维资料的情况下，开发地震也无妨使用二维资料来进行研究。

在油气田开发中，钻井资料虽然精确，但稀疏。地震资料虽然粗略，但密集。地震的独

特优势就在于，可以利用它的巨大面积覆盖资料，在横向上对油藏做出追踪和预测，改善油藏特征的空间描述。要实现地震与钻井资料的综合，关键是要把常规的界面型反射剖面处理成岩层型测井剖面，以便实现地震资料与钻井资料的直接连接对比，从钻井出发，对油藏进行井间非线性内插和外推，预测远离钻井位置的油藏特征。这种地震反演处理技术应作为开发地震的一项基本处理技术。

要把地震反演的地球物理参数转换成油藏物性参数，就需要很好地研究地球物理参数与油藏物性参数之间的关系，岩石物理学研究是开发地震的一项基础研究。

开发地震还可以在强化开采中，诸如稠油蒸汽驱、火烧油层、二氧化碳驱、水驱及压裂等，进行油藏监测。地震监测的理论依据是强化开采将引起油藏层速度降低，只要这种速度降低足够明显，足以能使我们用现代地震技术观测到。

对于进入高含水期的老油田，如何增储稳产，寻找剩余油分布区是一条出路，特别是对于那些非均质油田。利用开发地震技术，通过分析油田开发前和现在地震信息的变化，将会有助于圈定剩余油分布区。

开发地震的基本限制，一是地震资料的粗略，二是只提供一个合成声波测井信息，它是油藏特征的综合反映，具有多解性。弥补地震资料的不足，发挥地震资料的优势，一是要充分利用地震波的动力学特征，包括振幅和波形，二是地震资料要与钻井、测井、油田地质和油藏工程协同进行综合研究，综合比单项新技术更重要。

利用地震资料直接测量油藏厚度的能力是有限的，只能分辨 $1/4$ 波长的厚度。如果使用检测度概念，有可能分辨到 $1/30$ 波长厚度。检测度定义为在噪声背景上能够给出可见反射的岩层的最小厚度。无论是高分辨率采集，还是处理，噪声是限制分辨率的大敌。提高信噪比是提高分辨率的关键所在。

利用 AVO 技术对叠前反射振幅进行反演，可以增加一个横波信息以及一个密度信息，或者利用多波多分量采集增加横波信息，有助于减少油藏描述的多解性。

综合可以提高分辨率，综合可以减少多解性，综合可以弥补单项技术的不足。综合测井与地震资料的测井约束反演能够把分辨率提高到米级。综合地震波形特征参数和钻井试油资料的模式识别及神经网络等技术比单纯的地震油气检测技术要更有效。综合钻井岩心试验和地震信息的地质统计方法将会改善油藏特征参数的空间描述。

开发地震对提高石油工业经济效益来说，无疑是一项很有用的技术。我所从事的研究工作大都与此有关。我在历年开发地震培训班及专题讲座手稿的基础上写成了这本书。我深切地知道这本书绝不是开发地震技术发展领域的完整著述。我力求写的通俗实用，多用图来增强视觉上形像的理解。出于经济上的考虑，所有彩图全都用黑白印制。我希望这本书能对开发地震的实际应用和需要了解开发地震技术的人们有所帮助。

如果没有中国石油天然气总公司开发生产局，石油勘探开发科学研究院与各油田众多的领导和专家的支持和协助，许多研究工作就难以开展。在过去几年里，石油勘探开发科学研究院地球物理所的专家们在开发地震研究领域做出了许多出色的研究成果。钱绍新教授在开发地震方面的杰出学术思想给了我许多启发，对我的研究工作给予了巨大帮助。我衷心感谢对这一研究领域做出众多贡献，对我帮助很大的所有人。我向我过去十年中的研究生们表达深切的谢意。

作者

1995年9月27日

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 开发地震的意义	(1)
第二节 开发地震的发展	(1)
第三节 开发地震的任务	(2)
第二章 地震反演	(4)
第一节 基本原理	(4)
第二节 直接反演	(6)
第三节 模型反演	(32)
第四节 AVO反演	(36)
第三章 沉积模式	(45)
第一节 建立沉积模式的意义	(45)
第二节 陆相碎屑岩沉积模式	(47)
第三节 碳酸盐岩沉积模式	(61)
第四章 油藏形态描述	(67)
第一节 对层	(67)
第二节 三维地震做图	(68)
第三节 变速做图	(70)
第四节 偏移处理	(72)
第五章 确定储层分布	(76)
第一节 横向分辨率	(76)
第二节 储层的连续性	(78)
第六章 储层含油气范围预测	(82)
第一节 岩石物理基础	(82)
第二节 砂岩储层油气检测	(85)
第三节 石灰岩储层油气检测	(101)
第四节 模式识别技术	(102)
第七章 厚度估算	(108)
第一节 厚度分辨率	(108)
第二节 计算薄层厚度的方法	(110)
第三节 利用反演资料确定厚度	(113)
第八章 孔隙度估算	(116)
第一节 确定性孔隙度估算方法	(116)
第二节 统计性孔隙度估算方法	(118)
第三节 储层裂缝预测方法	(123)
第九章 渗透率和饱和度估算	(135)

第一节	渗透率估算	(135)
第二节	饱和度估算	(136)
第三节	估算储层参数的地质统计方法	(139)
第十章	压力预测	(145)
第一节	地层压力平衡方程	(145)
第二节	计算压力的公式	(146)
第三节	计算压力的图版法	(151)
第四节	纵波和横波速度的综合应用	(151)
第十一章	油藏监测	(153)
第一节	岩石物理依据	(153)
第二节	地震监测技术	(157)
第三节	监测实例	(162)
第十二章	展望	(170)
参考文献		(172)

第一章 绪 论

第一节 开发地震的意义

开发地震是在勘探地球物理学的基础上,充分利用针对油气藏的观测方法和信息处理技术,紧密结合钻井、测井、地质和油藏工程等多学科资料,对油气藏特征进行横向预测,在油气田开发和开采过程中对油气藏做出完整描述和动态监测的一门新兴学科。

反射波法地震勘探自1927年首次成功应用以来,在油气勘探阶段一直是一个重要的勘探手段。地震与钻井、测井及地质等多学科的综合勘探,效果是很好的。而在油气田开发阶段,则完全是依靠钻井资料,用井间内插或由井外推的方法来研究油气层的空间分布和变化。这对于大多数非均质油气田和复杂断块油气田来说,都是极不适应的,代价是昂贵的。如果用钻井资料做为控制和标定,使用大量的地震资料来研究钻井以外或井间的油气层变化,可更经济有效地开发油气田。

在老油田,例如中国东部众多的被断层切割的断块油田,以及南方的石灰岩裂缝油气田,利用开发地震技术,包括三维地震、地震反演油气藏模式识别、构造形态、油气藏厚度和孔隙度做图,可以更精确地刻划油气藏的特征,通过滚动勘探开发,不断增加储量和产量。

在新区,当油气田发现后少井时,就可以利用开发地震技术精确地确定油气藏位置,勾绘油气藏特征,为油藏数值模拟和开发方案编制提供三维油藏地质模型,减少干井和低产井,降低开发成本,提高开发效益。新区新油田往往比过去找到的那些油田更小更复杂,这就更需要依靠先进的开发地震技术。

另外,在油田开采过程中,还可能利用开发地震技术对油田进行有效地监测和管理。

第二节 开发地震的发展

世界上的许多石油公司越来越认识到,综合利用地球物理新技术进行油气田开发和开采在经济上是最合算的。1982年8月,美国地球物理杂志“GEOPHYSICS”首次报导了法国CGG公司用于增加石油产量的开发地球物理技术的一篇广告(Development Geophysics)。该公司当时主要采用振幅平面作图和合成声波测井技术,用来解决油田开发的三个问题:气—油—水界面构造作图,岩性和孔隙度横向变化,火烧和注热蒸汽过程的监测。1984年,美国勘探地球物理学家协会SEG成立了开发和开采委员会,负责加强地球物理学家、开发地质学家和油藏工程师们之间的联系。自1987年以来,每年至少都要举行两次联合专题讨论会。1987年,伦敦地球物理出版公司出版了J. E. White和R. L. Sengbush合著的开发地震学“Production Seismology”,介绍了多学科综合,岩石物理学,储层圈定,油田开发,提高

采收率,以及三维、VSP、亮点、模型、纵横波联合勘探和 AVO 等地震技术的应用。1988 年,美国石油地质学家协会(AAPG)召开地质学家、石油工程师和地球物理学家联席会议,专题讨论油藏开发问题。随后,美国勘探地球物理学家协会(SEG)和欧州勘探地球物理学家协会(EAEG)联合召开油藏地球物理专题讨论会,探讨这个学科的技术发展状况。此后,开发地震的应用研究和试验工作迅速兴起,开发地震已成为热门课题。1992 年,著名地球物理学家 R. E. Sheriff 编辑出版了油藏地球物理论文集“RESERVOIR GEOPHYSICS”,共收入论文 36 篇,涉及到油藏管理、岩石物理和地球物理基础、地球物理技术、油藏圈定、油藏描述、油藏监测、非地震技术、未来的地震技术以及油藏开发经济评价诸多方面,基本反映了开发地震的最新进展^[1]。

在中国,60 年代末曾出现过“开发地震”术语。当时的所谓开发地震,只不过是用地震细测及手工三维地震查明复杂断裂构造油田的小断层、小断块,为油田开发提供一张准确的构造图。在作图过程中,已开始注意到应用油气水关系及油层压力测试资料帮助地震划分小断块。在 80 年代,我国的地震技术取得了长足进步,为开发地震准备了技术基础。地震在油田开发中的作用一直在增长。进入 90 年代,开发地震项目逐渐增多。在东部,开发地震已成功应用于复杂断块油田的滚动勘探开发,曾使一个断块的 49 口开发井无一落空。在西部,开发地震与开发地质和油藏工程协同研究,曾利用一口油藏发现井进行了开发概念设计。开发地震提供的油藏定量参数已用于油藏数值模拟,优选开发方案。在南方,钻井曾按开发地震设计的钻井轨迹进入裂缝油藏。开发地震技术正在研究和发展中。

第三节 开发地震的任务

从油藏工程角度来看,油藏的完整描述需要在很宽的尺度上进行。钻井岩心分析可以精细到岩石粒度和孔隙结构,测井资料垂向分辨率能达到厘米级。地震资料的分辨率虽然很粗,纵向分辨率 10~100m,横向分辨率 30~150m,有时甚至还是模糊的,但却能利用它有巨大面积覆盖信息的优势改善油藏特征的空间描述,估算远离钻井控制的油藏特征。地震资料与油田地质和油藏工程资料相结合,就能建立完整的油藏地质模型,既保持了钻井资料的精细可靠,又约束和优化了井间或井外边的油藏特征变化。因此,开发地震作为一个协同学科,它所能提供的巨大的面积测量资料,它相对于钻井费用的低成本,正使它逐步成为提高油气田开发经济效益不少缺少的技术方法。

开发地震的任务有三个:

(1) 油藏圈定。

利用高精度的地震资料,结合钻井资料,乃至油藏工程资料,精确地确定油藏的圈闭形态,断层展布,圈定储层的分布,如果有可能,还可对含油气范围做出预测。

(2) 油藏描述。

综合利用地震、测井、油田地质和油藏工程资料描述油藏的特征,估算油藏参数,包括岩性变化、连通性、厚度和孔隙度,在可能的情况下,还可以进一步对渗透率、饱和度及孔隙流体压力做出估算。

(3) 油藏监测。

在采用增产措施提高原油采收率的过程中,通过不同时间进行地震观测,利用地震信息的变化可以监测增产措施的实施效果,包括稠油热采,CO₂ 气驱,注水,火烧和压裂等,以

便修改油藏地质模型，调整开采方案，降低作业成本。

开发地震在油气田开发的不同阶段都能发挥重要作用^[2]。

(1) 开发前阶段。

在第一口油藏发现井之后，就可以从发现井的各项资料出发，通过地震油藏圈定，精确地确定储量。随着评价井和探边井资料的增加，油藏圈定逐步趋于精细和完美。

这一阶段的任务是：确定构造特征，圈闭形态和面积；圈定油藏范围，厚度分布，油气聚集的横向和纵向范围；估算含水层的分布范围和体积，确定驱动机理。

高分辨率地震，特别是三维地震，可用来精确地确定圈闭，产层的连通性，水体的大小，在有利的条件下，还可以预测含油气范围。通过利用地震资料预测钻井风险，如断层、油气分布范围及超压带，可以降低钻井成本。

(2) 开发初期阶段。

工作目标是设计开发井网使采收率最高。

这一阶段的任务是：描述油藏的内部特征以及水体分布，而不是仅仅圈定油藏的外形轮廓。必须估算岩相横向变化和孔隙度变化，以确定流体是否有隔阻层存在，确定是否所有油藏都是连通的。流体接触面必须精细作图。还应确定地震压力及其对流体饱和度的控制，进行油藏的裂缝分析。最后建立完整的油藏地质模型，通过利用这个模型进行油藏流动数值模拟设计开发井网，编制开发方案。

在这个阶段的油藏描述中，地震资料扮演着一个非常活跃的角色。地震地层学可用于提供沉积模式及岩相横向变化的模式。地震反演能够预测岩性变化，连通性，估算孔隙度等参数。模式识别等分析方法还可用来预测油气藏分布，裂缝发育带等油藏特征。地震油藏描述应当作为油田开发综合油藏描述中一种重要的空间描述资料，输入到油藏数值模拟模型中。

(3) 生产阶段。

工作目标是有效的油藏管理来降低生产成本，确保最大限度地提高采收率。

这一阶段的任务是：利用实际与预测油藏特征之间的差别修改油藏地质模型，修正衰竭策略；通过钻加密井进一步增加储量；进行二次采油，提高采收率；确定渗透率隔阻层，估计油藏连通性和驱动效率。

地震资料与精确的岩心、钻井和油藏工程资料紧密结合，开始用于油藏监测。利用地震资料检测井间距离尺度内存在的非均质性，能够帮助我们圈定剩余油分布区，使采油工程师能够更有效地设计加密井方案。

(4) 提高采收率阶段。

工作目标是保证投资回收的情况下实施强化采油，提高采收率。

这一阶段的任务是：进行细致的油藏描述，防止因油藏非均质性和各向异性造成 EOR 失败；在注热蒸汽，火烧油层或注 CO₂ 气的过程中，监测前缘的推进情况，以便有效地控制和调整 EOR 过程，降低作业成本。

高精度的地震资料能够检测 EOR 过程引起的油藏岩石物理性质的改变，用来进行油藏监测。

开发地震作为油藏评价众多协同方法之一，在油藏管理的整个过程中是交互进行研究的。最初的解释成果被用于最初的开发方案。随着钻井、测井、岩心、中途测试、压力测试、试采试注等更多信息的增加，应逐步修正和加深最初的解释，使油藏地质模型逐步趋于精细和完美。

第二章 地震反演

第一节 基本原理

油气田开发的所有工作都是针对储层进行的。而地震勘探长期以来只是利用岩层的声学特征确定岩性分界面。这就使地震与油田地质的结合发生困难。为了使地震资料能与钻井资料直接连接对比,就要把常规的界面型反射剖面转换成岩层型测井剖面,把地震资料变成可与钻井直接对比的形式。实现这种转换的计算机处理技术就是地震反演技术。通常把地震反演的结果叫做合成声波测井。也有人叫做波阻抗。还有人根据英文词 pseudo 把反演结果叫做拟、虚、似或伪速度测井或波阻抗。不同公司也有不同的商标名称,如 Seislog, Veloglog, Delog, PIVT, Strata, BCI, ROVIM, SLIM 和 PARM 等。图 2—1 是一个楔形砂岩体的例子。在常规地震剖面上很难看出砂岩体的直观形态,还误以为这是一个角度不整合地层削蚀现象。而在合成声波测井剖面上,一目了然地就看到这是一个高速度的楔形砂岩体。

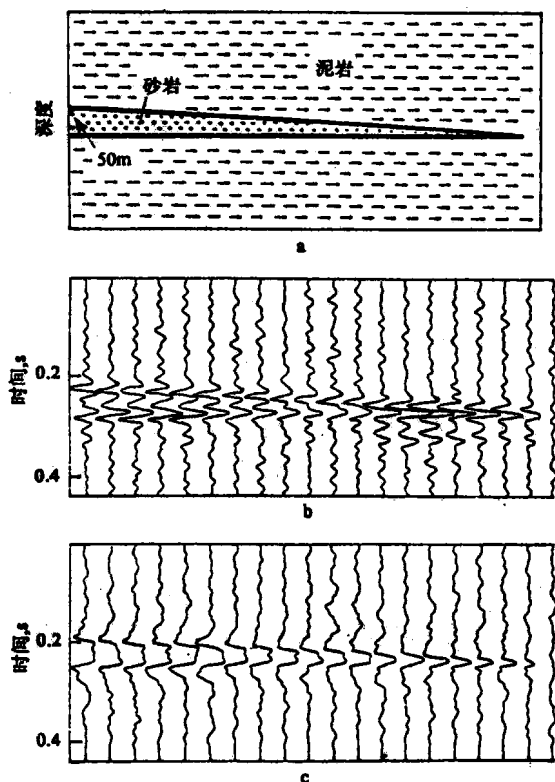


图 2—1 合成声波测井把界面型地震剖面变成了岩层型剖面

a—楔状砂岩体; b—地震剖面; c—合成声波测井剖面

地震反演技术的基本原理可用图 2—2 来说明。不同的岩层具有不同的速度和密度值,速度和密度的乘积叫做波阻抗。只要不同岩层之间波阻抗有差异,就能产生反射波。假定地震剖面上的地震道是法线入射道,即地震入射线与岩层分界面垂直,则法线入射反射系数由下式计算:

$$R_i = \frac{\rho_{i+1}v_{i+1} - \rho_i v_i}{\rho_{i+1}v_{i+1} + \rho_i v_i} \quad (2-1)$$

式中 R_i ——第 i 层底界面的反射系数;

ρ_i ——第 i 层的密度, g/cm^3 ;

v_i ——第 i 层的速度, m/s ;

ρ_{i+1} ——第 $i+1$ 层的密度, g/cm^3 ;

v_{i+1} ——第 $i+1$ 层的速度, m/s 。

地震波从激发、传播到接收, 相当于经历了一个滤波系统。一个很尖锐的脉冲通过这个滤波系统后, 就变成了一个延续有一定长度的脉冲波形, 我们通常叫它做子波。这个过程就相当于在每个反射系数位置上用一个小波把反射系数“棒”替换掉, 子波的极性和振幅强弱取决于反射系数的正负和大小。由于岩层通常很薄, 顶底反射系数间隔远小于子波长度, 不同界面的反射子波互相重叠, 叠加在一起, 形成一道地震记录。这实际上是一个数学上的褶积过程, 制作合成地震记录就使用这种方法。最后, 由于地震波的球面发散、吸收衰减和透射损失, 使得野外记录在磁带上的实际记录浅层振幅强, 深层振幅弱, 相差一百万倍, 无法用来解释。只是在经过振幅衰减补偿后, 才得到深浅层振幅相差不大的地震道, 即我们在地震剖面图上所看到的结果。以上就是地震记录的形成过程。按照这个过程制作合成地震记录或合成地震剖面 (地震模型), 叫做正演。

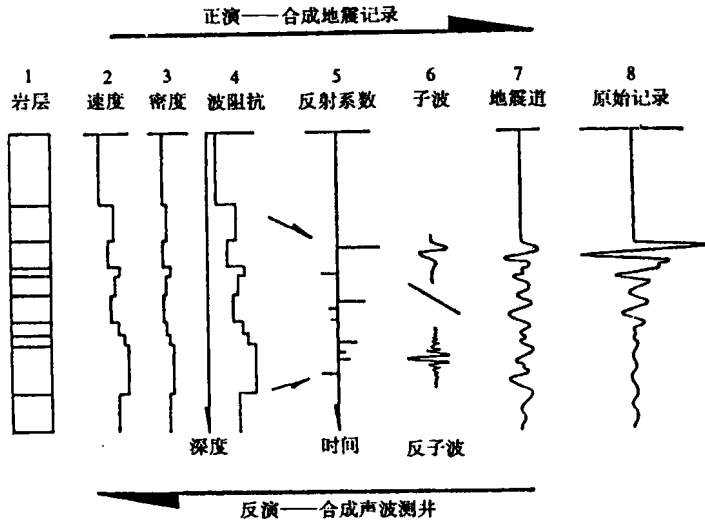


图 2—2 地震记录的形成和反演原理

反演就是估算一个子波的逆——反子波, 用反子波与地震道进行褶积运算, 通常称为反褶积, 从而得到反射系数。然后, 把反射系数代入由公式 (2—1) 导出的递推公式

$$\rho_{i+1} v_{i+1} = \rho_i v_i \frac{1 + R_i}{1 - R_i} \quad (2-2)$$

便可逐层递推计算出每一层的波阻抗, 这就实现了界面型反射剖面向岩层型剖面的转换。如果你习惯使用类似于测井的速度和密度剖面, 就可利用著名的 Gardner 公式

$$\rho = 0.31 v^{0.25} \quad (2-3)$$

从波阻抗中分离出速度和密度

$$v = 2.55(\rho v)^{0.8} \quad (2-4)$$

$$\rho = 0.39(\rho v)^{0.2} \quad (2-5)$$

甘利灯先生曾利用我国东部地区几乎所有司仑贝谢公司测井资料来统计速度和密度的关系，结果与 Gardner 公式完全一致，证明 Gardner 公式具有普遍的实用价值。以上就是反演的基本原理。

实际上，图 2—2 概括了目前流行的两大类反演方法，除上述直接定义的合成声波测井反演方法外，利用正演方法也能实现反演。基于正演的反演方法就是反复修正岩层的结构、速度和密度，不断做合成地震记录，与实际地震记录进行对比，直到二者相似为止，这时的岩层速度及密度曲线就是反演结果。直接反演和基于正演模型的迭代反演都是利用叠加后的地震资料进行的叠后反演。还有一种叠前利用反射振幅随炮检距变化的所谓 AVO 反演，也将下面介绍。

第二节 直接反演

直接反演有两种基本做法：递推反演和道积分反演。

一、递推反演

递推反演使用的基本公式是上一节给出的 (2—2) 式。由于密度的影响在多数情况下看来是相当的小，例如，在大多数沉积凹陷中，仅仅利用声波测井制作合成地震记录结果表明是十分成功的^[3]，可以假设密度变化不大，近似为常数。则公式 (2—2) 简化为

$$v_{i+1} = v_i \frac{1 + R_i}{1 - R_i} \quad (2-6)$$

把经过反褶积处理后的地震道看做近似的反射系数序列，代入公式 (2—6)，就可以递推计算每一个采样点的层速度 v_i 或时差 Δt_i 。

由于地震道是一个具有有限频率带宽的信号，由 (2—6) 递推反演得到的 v_i 只是一个相对速度值，缺少 10Hz 以下的低频速度成分。低频速度可以用速度谱或声波测井资料计算。把低频速度加到由公式 (2—6) 递推直接得到的相对速度上去，就得到用绝对速度或时差值表示的合成声波测井。

下面就合成声波测井数据处理的几个具体技术问题做一简要讨论。

1. 信噪比

反演与许多其它地震新技术相比，更需要有高信噪比。利用地震资料研究储层的横向变化，没有好反射就什么也做不成。在合成声波测井剖面上噪声引起的速度横向变化会误以为储层连通性变差。

图 2—3 是一个复杂断块油田上的地震剖面，2.0s 下面的深层是油田滚动勘探开发的主要目标。在以往常规处理剖面上，目标层段是一片噪声，几乎看不到什么反射。十几年来就是按照这种资料提供的解释成果指导钻井，钻井见油成功率仅有 41%。这个地区地表条件复杂，地下多次波干扰严重，深层砂泥岩互层反射系数小。针对这种复杂的地表和地下地震

地质条件，我们采用了压制多次波、增强信号的提高信噪比目标处理技术，使深层目标层反射得到显著改善。这说明不管新油田还是老油田，改善地震反射品质的潜力还是很大的。

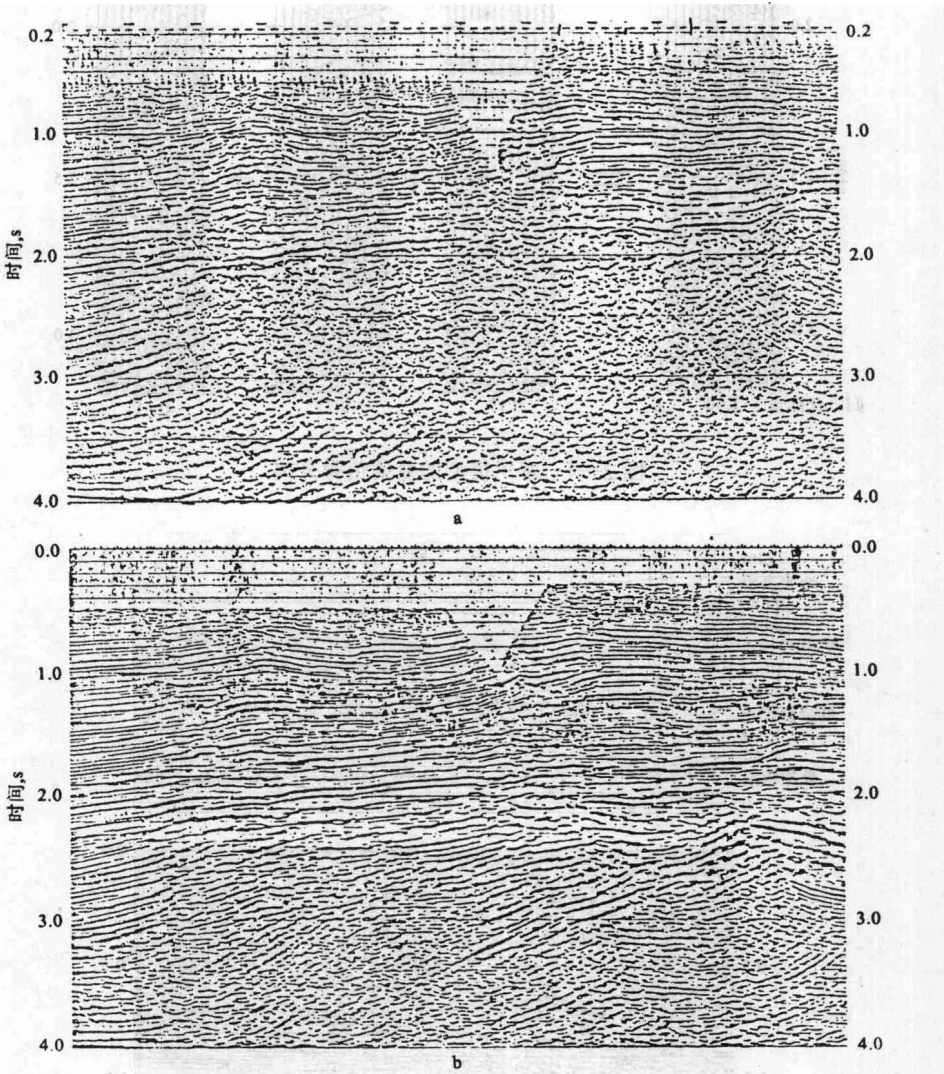


图 2—3 目标处理改善了地震剖面的信噪比
a—常规处理；b—目标处理

提高信噪比的方法很多，绝大部分是把地震记录分成相干和随机两类，相干就是信号，随机就是噪声。这些方法包括：利用信号与噪声的概率分布函数的不同，在叠加前对信号和噪声进行分离，基于信号的波动理论在偏移前的叠加剖面上用多项式拟合法分离信号和噪声， $K-L$ 变换滤波， $\tau-p$ 域滤波和 $f-x$ 域滤波等。这些方法在提高信噪比方面起了很大作用。但有时表现出相干性的同相轴并不一定是信号。我们曾在一个低信噪比地区使用 $f-x$ 域滤波，反射是增强了，但不能闭合做图。说明增强的并不是真反射。我认为比较好的办法是采用基于模型的信噪分离，国外叫做反速度叠加^[4]。它把地震记录看成是由一次波、多次波和随机噪声三部分组成，在叠加前通过模型拟合方法把一个道集记录分离成信号、多次波和随机噪声三部分（图 2—4），然后只把信号叠加成剖面。

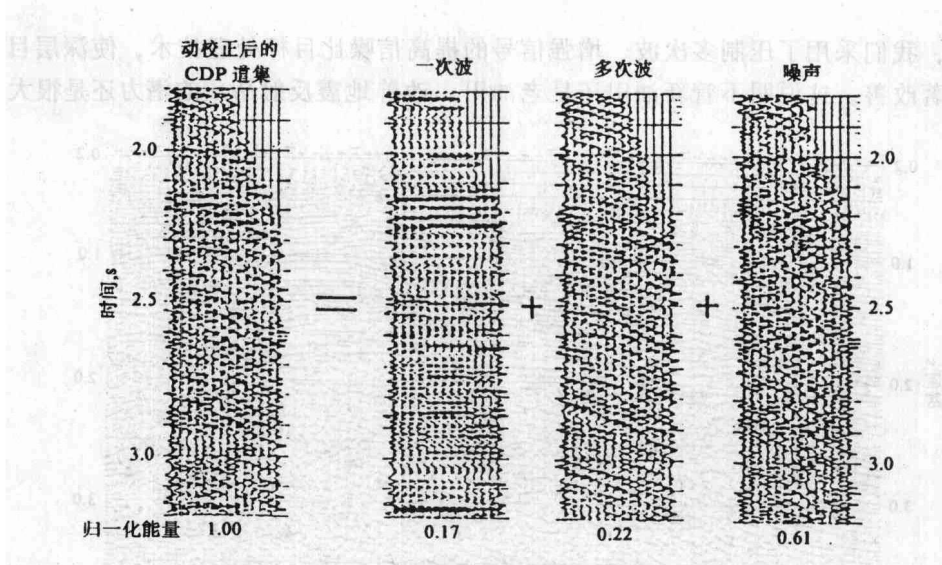


图 2—4 基于模型的叠前信噪分离

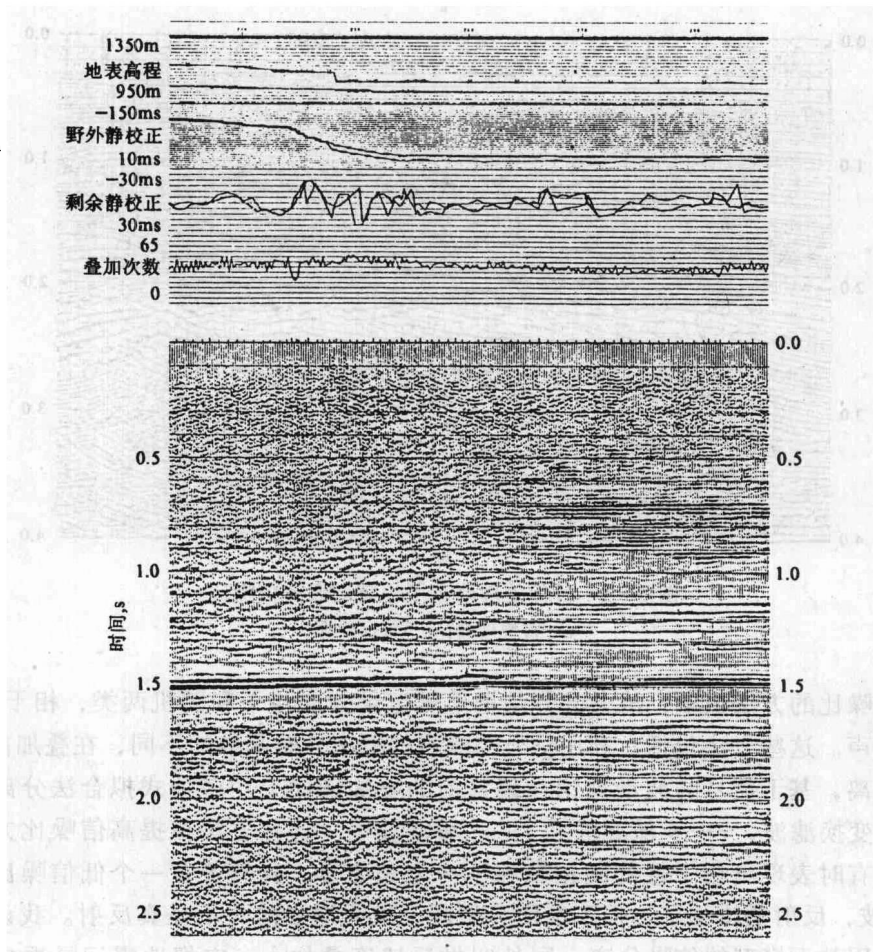


图 2—5 地表对叠加剖面信噪比的影响

提高信噪比的另一个问题是做好静校正，静校正潜力很大。图 2—5 给出的一段剖面，右边地形低，低速带薄，野外静校正量小，深浅层反射都很好。一进入左边地势高，低速带厚，野外静校正量大的地区，除碎屑岩与石灰岩界面产生的强反射仍存在外，几乎没有反射了，全是噪声。尽管野外用了高分辨率采集，频率很高（图 2—6），但都是噪声，无法用于反演。只有精细地进行静校正处理，才能得好一张剖面。有时需要做 4 次以上的静校正才能使剖面信噪比得到明显改善，包括基准面静校正，地表一致性静校正，剩余静校正和分频静校正等。

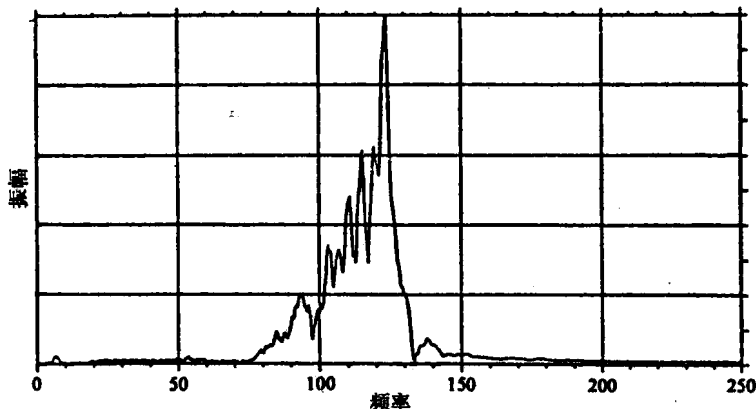


图 2—6 低信噪比区高分辨率采集叠加道的频谱

分频静校正是采用若干个互相连接的不同窄频带对地震道滤波，对每个频带分别做剩余静校正，然后重新组合 CDP 道集进行叠加。这样，在所有频率上都能在叠加前把反射时间对齐，消除了叠加噪声，展宽了有效频带，与提高信噪比的同时，还提高了分辨率。我们用一组相关函数的频谱分析来说明分频静校正的这种优点[●]。图 2—7a 是常规静校正处理叠加剖面上邻近道互相关的频谱，具有高信噪比的有效带宽很窄，相位谱在 70Hz 以上已不稳定，只在有效带宽内才接近零相位。高频部分基本上是噪声。两个道互相关在频率域是振幅谱相乘，相位谱相减。由于在邻近道互相关中信号是相关的，所以相位谱相减应近似为零相位角。由于在邻近道互相关中噪声是不相关的，所以相位谱相减就不会是零。利用互相关谱的这个特点可以帮助我们判断所采用的处理方法的有效性。图 2—7b 是分频静校正处理叠加剖面上邻近道互相关的频谱，有效频带明显地被展宽了，已接近图 2—7c 带限声波测井的自相关谱了。分频静校正处理的相位谱在 90Hz 以上就不稳定了，说明高频部份主要是噪声了，振幅谱上 100Hz 处的高幅值已是高频噪声了。

除提高信噪比处理和静校正处理外，DMO 叠加和偏移等地震成像处理手段也是提高信噪比的基本手段。在共炮集和共检波点道集上分别用二维滤波压制低视速度规则干扰的所谓双向二维滤波，也是一种提高信噪比的有效方法。

2. 分辨率

分辨率是地震反演的一个关键问题。由于长期以来，地震资料主要用于查明构造形态，

● Titchkosky, K. Frequency dependent statics for improved stratigraphic detail. CPS/SEG 油气田开发开采地震方法讨论会，大庆油田，1988。

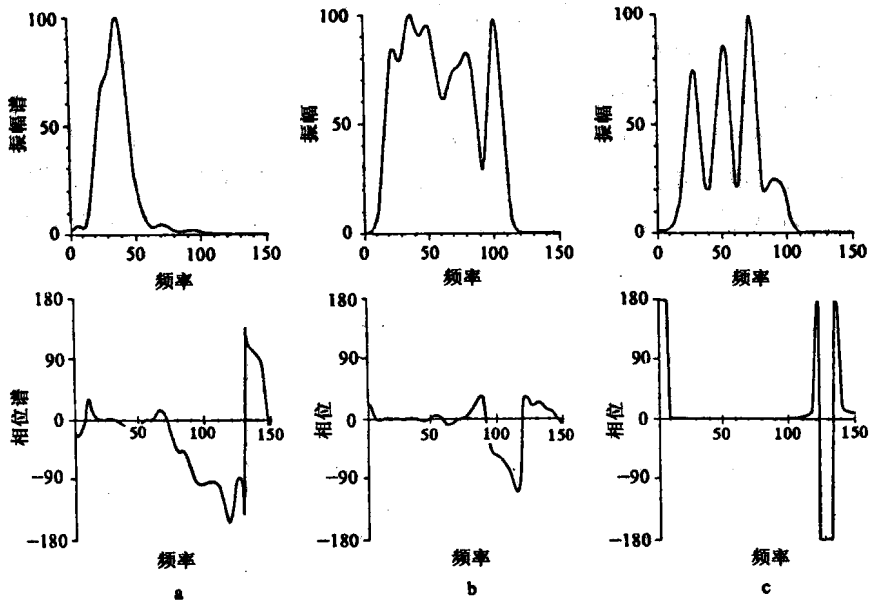


图 2—7 分频静校正处理使有效频带展宽
a—常规叠加；b—分频静校正叠加；c—带限声波测井

解释人员往往习惯于使用反射层连续性好的资料。现在的问题是，还要指出储层在哪儿，要对油藏进行描述。特别是在油气田开发中，要求能用地震反演划分出小层来。因此，如何提高地震分辨率，就成为开发地震技术中的一个关键问题了。

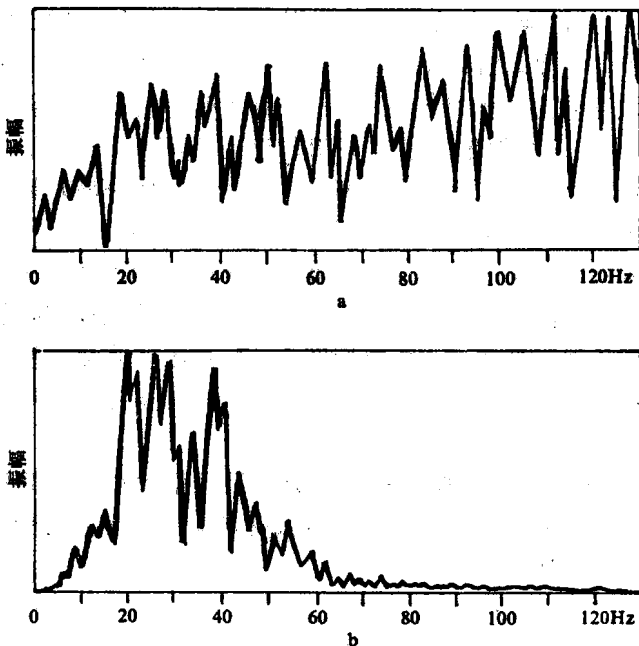


图 2—8 地震频带与地层频带的差别
a—地层反射系数频谱；b—地震反射频谱

地震分辨率之所以低，是由于它是一个窄频带信号。图 2—8 给出了地震频带与地层频带的差别。地层频带是用测井反射系数计算的，频带很宽，频谱上的大峰值反映了具有周期性的优势地层分量。由于薄互层在整个地层中总是占多数，致使高频成分很丰富。相比之下，地震频带却非常窄，既无 10Hz 以下的低频信息，又缺 60~70Hz 以上的高频信息，频带被限制在有限的频带宽度内。这个带宽就是地震勘探系统的滤波特性，它是一个光滑的近似钟形的振幅曲线。其上的不规则锯齿谱分量是被地层反射系统调制的结果。因此，在时间深度域地震只能分辨较厚的地层，而不能分辨薄层。只要能有限的地震频带展宽成类似地层频