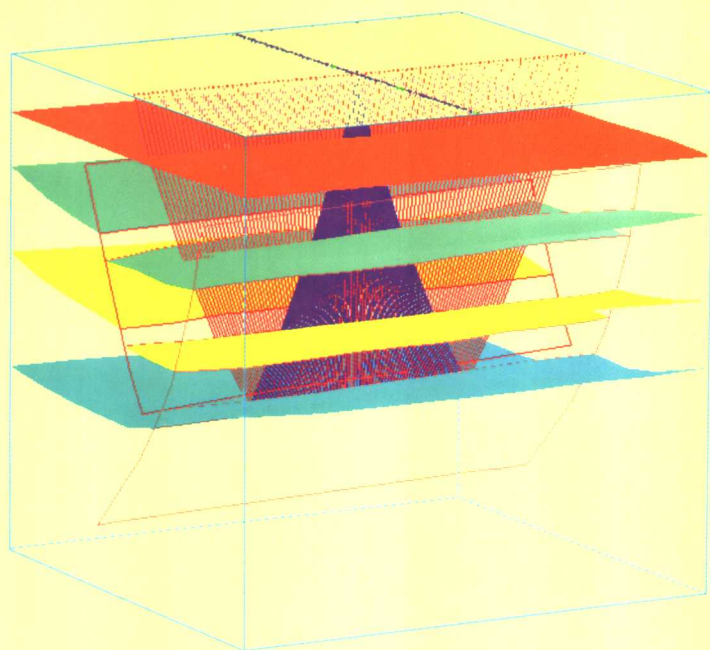


复杂构造模型正演模拟

蒋先艺 刘贤功 宋 葵 著



石油工业出版社

复杂构造模型正演模拟

蒋先艺 刘贤功 宋 葵 著



石油工业出版社

内 容 提 要

模型正演技术是地震反演的基础,是解决地震多解性的重要手段,也是勘探复杂目标的有效技术。本书是作者根据近年科研工作和生产实践的成果提炼总结而成的,内容主要涉及二维与三维复杂构造模型的描述和建立方法、二维与三维复杂构造模型、快速射线追踪法计算及模型正演技术在地震数据采集中的应用,其中包括多方面的创新成果。

本书题材新颖,内容系统、全面,图文并茂,适合从事地球物理科研与生产的工作者以及高等院校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂构造模型正演模拟/蒋先艺等著.

北京:石油工业出版社,2004.12

ISBN 7-5021-4890-6

I. 复…

II. 蒋…

III. 地质构造—数学模型

IV. P54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 127359 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:徐水县彩虹印刷厂排版印刷

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10

字数:254 千字 印数:1—1200 册

书号:ISBN 7-5021-4890-6/TE·3437

定价:40.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

地震正演模拟是地震数据采集、处理、解释三大环节的分析基础,是在假定地下模拟结构(几何形态和物性参数)的情况下,预测在给定的接收点上得到的地震响应,即地震记录。地震正演模拟的作用,一方面是为地震数据采集、处理、解释提供理论依据,评估方法的科学性、可行性和先进性;另一方面是用来检验各种解释成果的可信度,以及各种反演算法的正确性和反演成果的可靠性

从大的方面讲,地震正演模拟有物理模拟和数字模拟(数值模拟)两大类。物理模拟是通过物理实验过程来模拟地震波场传播过程的特征和现象以及在接收点上的波场记录,模拟过程直观,结果真实,且不受计算方法和假定条件等方面的限制,特别是在三维复杂介质模型地震模拟中,这方面的优势更加突出。但是,物理模拟的推广和应用也将受到模型材料、制作工艺、激发和接收设备、实验环境和条件等方面的限制。在计算机技术和计算方法飞速发展的今天,数字模拟技术的发展也十分迅速,对复杂模型的模拟结果的真实性有很大程度的提高,而且应用程度更加广泛和普遍。

地震正演模拟首先要有一个模型。物理模拟模型制作占有重要的位置,数值模拟也将一定的工作量放在数字建模上。因此,当我们在讨论地震数值模拟时,主要包括四部分内容:地震数字模型的建立、地震正演模拟、模拟结果分析评估和应用。在很多情况下,后面两部分内容互相渗透,很难独立分开。实际上,模拟方法适应性越强,其应用范围就越广。

当前,地震数字正演模拟方法很多,归纳起来可分为三类:直接法、积分法和射线追踪法。目前应用最多的是射线追踪法,又称渐近法,相对而言,它是一种高效的节省 CPU 的方法。

直接法在求解波动方程时,首先要将模型离散成有限个网格点,然后给出全波场的值,故又有网格法和全波方程法之称。当网格足够密时,模拟可达到足够的精度,并适用于介质参数空间变化复杂的模型。在波场计算方法上,目前使用较多的是有限差分法(FD)、虚谱法(PS)和有限元法(FE)。当精度要求不高时,有限差分法是以上几种方法中最简单、最有效的方法,其中时间 2 阶、空间 4 阶是很好的选择;虚谱法是非常耗费机时的,但采用交错网格算子的虚谱法,能够保障模拟结果的高精度和低噪声背景,并适用于泊松比变化大的模型;对于起伏地表和弯曲界面,有限元法是非常好的算法,随着谱插值技术的应用,该方法在计算精度和稳定性方面都不低于有限差分法和虚谱法,但对于泊松比变化大的界面,仍存在稳定性的问题。直接法在计算波场值时,首先要引入运动方程的数学公式,如压力公式、速度应力公式、变分方程等,然后按时间积分、偏导数计算、震源激发、边界条件或吸收边界条件等几个步骤来考虑。

积分法是建立在波动方程积分表达式的基础之上的,波场由点震源激发,其理论基础是惠更斯于 1690 年建立的惠更斯原理。波场一方面可以表示为一系列点震源分别激发所形成的波场的叠加;另一方面也可表示为仅由边界点源分别激发所形成的波场的叠加。惠更斯原理的这两种表达方式如今仍然在使用,它对应着体积分方程和边界积分(面积分)方程,它们各有自己的适用范围。对于一些特殊几何形态的地质体(如均匀介质中包含产生绕射的地质体)而言,积分法的计算效率和精度都很高。由于积分法的解析特性,对于建立在 Born 近似基础上的成像方法也很适用。积分法对于研究介质中小尺度的散射体(如裂隙、小的异常体等)是有效的,如果裂隙的尺度相对地震波长而言很小,那么每一个小裂隙相当于在所研究的问题中

增加了一个未知数,它们都是可模拟的。相对于直接法而言,积分法的计算效率要高得多。

射线追踪法是地震正演模拟和成像领域中应用最广泛的技术,它是建立在高频近似基础上的波动方程计算方法。由于没有考虑波场的全部特征,把波场视为同相轴、旅行时和振幅等参数所构成的一个整体,其中旅行时函数常被认为是程函方程的解,振幅函数是传输方程的解,目前有多种方法来求解这些方程,但使用最多的是波前结构法和有限差分法(FD),有限差分法以无振荡(ENO)的逆FD法最具代表性。在计算时只计算了方程最奇异部分的解,而不是全波场特征,且平滑了误差,因此是一种近似方法。由于近似法的高效性能,在利用Born理论处理非均匀速度模型的成像问题时,射线追踪法起着特别重要的作用;对于大面积的三维模拟,需要庞大的计算机资源,近似法有其重要的实际意义。当前,射线追踪法由于计算效率高,被广泛应用于模拟、旅行时层析成像等反演及偏移领域。

本书主要是作者在实际生产岗位上承担中国石油天然气集团公司科技攻关项目所做的生产科研工作的总结与升华。其内容属于射线追踪法范畴,包括二维和三维复杂构造模型的建立、二维和三维复杂构造模型的射线追踪计算、模拟结果的分析与评估,以及在二维和三维地震数据采集方法设计中的应用,内容全面,系统性强,是一本实用性很强的参考书。

作者用封闭概念描述二维复杂模型,用封闭块的概念描述三维复杂模型;在二维建模中应用点、段、面的概念,在三维建模中应用点、三角形、面、块的概念,有新意而且实用,有利于自动追踪、人机交互以及计算机可视化技术的推广和应用。

在实现射线追踪时,书中讨论了试射线追踪法、迭代射线追踪法以及试射迭代射线追踪法等三种实现方法,这些方法实用性很强,计算效率高,且适应复杂的构造速度模型,能满足当前生产实际的需求。

在正演射线追踪模拟的基础上,书中介绍了基于模型的地震数据采集参数的合理选择和观测系统的优化设计,这对提高地震数据采集质量具有非常重要的意义。传统的采集方法设计思想一般是基于共中心点(CMP)道集进行,书中介绍了用有效反射点和最佳接收范围来优化二维观测系统的方法;通过模型正演,用共反射点(CRP)来代替传统的共中心点(CMP)设计三维观测系统,均有利于提高采集方法设计的质量,是非常实用的思路。

全书以文字叙述为主,通俗易懂,附有一些图件可加深理解,讨论的问题全部基于生产实际,是一本很有实际价值的参考书。作者有丰富的实际工作经验和经历,并参与了软件的研制与开发,相应的软件产品经历了实际应用的检验和考核,其准确性得到了证实。因此,书中讨论的方法不仅实用性强,而且可操作程度高。阅读此书,必有较大收益。



2004年5月

前 言

随着我国国民经济的高速发展,对石油与天然气能源的需求量越来越大。石油供需缺口已经成为我国经济社会发展的重要制约因素。因此,加速发展我国能源工业,以寻找更多的石油后备资源,是保证我国国民经济可持续发展和国家安全的重大国策。然而,我国的石油后备资源主要分布在山地、黄土塬、沙漠、戈壁等地表条件及地下地质情况非常复杂的地区,这类地区的地表高差变化大,表层覆盖有巨厚的砾石层或低速砂层、黄土层,造成激发、接收困难,表层静校正问题严重。地下地质情况复杂表现为目的层埋藏深、断层发育、地层倾角变化大、速度变化剧烈,因而获得有效反射的难度较大,地震成像困难。

针对复杂地区的勘探特点,本书提出了基于复杂地质模型建模,通过正演射线追踪来分析反射点和射线分布范围,从而可合理地确定复杂地区的地震采集参数及优化观测系统设计,并有效地提高地震采集资料的品质,提升地震勘探方法找油找气的能力。这一研究课题是在中国石油天然气集团公司支持下开展的,它作为中国石油天然气集团公司“十五”重点科研攻关中的技术内容,是由东方地球物理公司所属的北京克浪石油技术公司承担完成的。

本书对该项研究成果进行了总结,包括三方面的核心内容。一是二维和三维复杂构造模型的描述和建立方法,并提出了封闭结构的建模思路,可实现对二维和三维复杂结构(如正断层、逆断层、尖灭、透镜体等)的模型描述,满足实际生产建模的需要;二是基于二维和三维复杂结构下的快速射线追踪方法研究,导出了适应复杂结构的“试射线追踪方法”、“迭代追踪方法”和“试射迭代追踪方法”,从而形成了高效的正演追踪技术;三是在模型正演的基础上,开展了基于模型正演结果确定地震采集参数及优化设计观测系统方面的研究工作,对实际生产具有指导作用。

根据研究目标的不同,正演模型涉及的类型也多种多样,如构造模型、速度模型、属性模型等。本书仅讨论构造模型,重点是通过描述地质界面的变化特征来研究地质构造对地震波传播的影响。在本书涉及的构造模型中,均假定地层介质的速度和密度是均匀的,但其对地层界面和断层面的变化均进行了深入细致的研究,并提出了一套行之有效的模型描述方法,从而实现二维和三维复杂构造模型的描述。在正演模型描述的基础上,研究了适应复杂结构的射线追踪方法,并形成了快速有效的模型正演技术,满足了高精度和高效率正演计算的要求。通过构造模型正演模拟,可以指导地震采集、处理和解释,本书着重讨论了正演模拟在地震采集方面的应用,这对复杂区地震勘探具有重要的参考作用。

本书对二维和三维复杂构造模型建立、模型正演射线追踪、基于模型正演的地震采集参数分析和观测系统优化设计三方面的内容进行了详细讨论,是作者近几年科研工作成果的结晶,为方便读者阅读,在内容上尽可能保持其系统性和完整性。本书共分六章,第一章(绪论)简要介绍了目前我国石油地震勘探面临的技术难点和技术现状以及本书研究的主要内容。第二章(二维复杂结构模型描述)介绍了二维复杂构造模型的建立方法。第三章(二维复杂结构下的射线追踪方法)介绍了二维复杂结构模型下的射线追踪正演方法。第四章(三维复杂模型的块状建立)介绍了三维复杂结构模型的建立方法。第五章(三维块状结构模型的射线追踪计算)介绍了三维复杂结构下的射线追踪正演方法。第六章(模型正演在地震采集中的应用)介绍了

基于模型正演的采集参数分析和观测系统设计。

在该项课题的研究过程中,中国科技大学的徐果明教授研究小组和北京航空航天大学杨钦教授研究小组给予了技术合作,为这项技术的发展创造了良好的条件。在本书的编写过程中,东方地球物理公司地球物理专家熊翥教授和成都理工大学贺振华教授提出了指导性的意见。参与该项目软件开发的有罗开云、王昌宏、林庆忠、文佳敏等软件工程师。此外,赵瑞平教授和郭钟灿高级工程师一直致力于推动和发展该项技术,并使之得以快速发展。在本书出版之际,对所有提供帮助和支持的专家、学者表示衷心的感谢!

作 者

2004年5月20日

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 层状结构地质模型	(2)
第二节 射线追踪技术现状	(2)
第三节 地震采集设计分析方法	(3)
第二章 二维复杂结构模型描述	(5)
第一节 二维层状结构模型	(5)
第二节 二维封闭结构模型	(9)
第三节 二维地层面和断层面的描述	(14)
第四节 二维封闭面追踪	(15)
第五节 二维复杂模型实例	(19)
第三章 二维复杂结构模型的射线追踪方法	(23)
第一节 二维介质试射线追踪方法	(24)
第二节 二维介质迭代射线追踪方法	(30)
第三节 二维封闭结构射线追踪方法	(34)
第四节 射线传播能量计算	(38)
第五节 二维复杂结构模型射线追踪示例	(40)
第四章 三维复杂模型的块状建立	(51)
第一节 三维层状结构模型	(51)
第二节 三维块状结构模型	(53)
第三节 三维地层面描述	(56)
第四节 三维断层面描述	(63)
第五节 三角形面自适应计算	(68)
第六节 三维封闭块提取	(69)
第七节 三维可视化建模技术	(71)
第八节 三维复杂模型示例	(74)
第五章 三维块状结构下的射线追踪计算	(80)
第一节 三维块状结构试射线追踪方法	(80)
第二节 三维块状结构迭代射线追踪方法	(93)
第三节 三维块状结构试射迭代射线追踪方法	(104)
第六章 模型正演在地震采集中的应用	(114)
第一节 采集基本参数	(114)
第二节 面元尺寸分析	(115)
第三节 接收范围统计分析	(118)
第四节 偏移孔径计算	(122)
第五节 正演波场模拟应用	(124)

第六节	共反射点面元分析方法.....	(128)
第七节	自激自收面元信息分析.....	(133)
第八节	成像面元信息分析.....	(137)
第九节	基于目标区观测系统分析.....	(138)
参考文献		(148)

第一章 绪 论

21 世纪我国国民经济将进入新的高速发展时期,对能源(特别是石油、天然气)的需求量将大幅度增加。相关资料表明,自 20 世纪 80 年代以来,我国石油产量每年约增长 300 万 t,年均增长率只有 2%,但石油消费量每年增加约 800 万 t,年均增长率达 4.83%。如,1999 年我国原油年产量为 16052 万 t,而当年消费量却达到 17225 万 t,因为供不应求,当年进口石油达到了 4200 万 t;2001 年我国原油年产量为 16893 万 t,当年进口石油达到了 6490 万 t;2002 年进口石油达到了 6941 万 t;2003 年进口石油达到了 7600 万 t。预计到 2010 年原油供、需的缺口将达到 15000 万 t,到 2020 年原油供、需的缺口将大于需求量的 50%。如果每年原油需求量的 50%以上要依赖进口,对于我国这样一个有 14 亿人口的发展中国家将是一个危险的信号。因此,寻找石油后备资源对国民经济发展至关重要,也关系到国家的安全。

我国石油资源接替的潜力很大,目前已探明的石油地质储量只占全国总资源量的 25% (即还有 75%尚待探明),石油剩余可采储量约为 24 亿 t,占世界第 10 位。我国石油可采资源探明率只有 42%,而世界平均可采资源探明率为 79%,多数地区为 70%~90%。我国石油可采资源探明率之所以低,是由于在我国不同地区的石油勘探程度不均一造成的。如在我国勘探程度相对较高的东部,松辽盆地的勘探程度只有 47%,渤海湾盆地为 37%,海洋大陆架只有 16%;西部的准噶尔盆地只有 20%,塔里木盆地最低,只有 4%。我国海域每 1000km² 面积上才有 1 口探井,西部的塔里木盆地每 1075km² 面积上才有 1 口探井,按国际标准,这些地区都属于勘探程度极低地区,因此资源潜力很大,近年来仍不断有亿吨级大油田陆续被发现。

从我国目前的石油勘探状况来看,63%的尚未探明石油资源量分布在我国中、西部地区,其中新疆就占 44.85%。剩余资源主要分布在山、黄土源、沙漠、戈壁和滩海等地表条件复杂地区,这些地区地形高差大、地表结构复杂,给野外数据采集带来了极大的困难。同时强烈的多期地壳活动导致这类地区的地下岩层遭受强烈挤压变形,地下构造情况和地震波场的成像机理都十分复杂,大深度、低幅度构造和岩性油气藏的识别对地震抗干扰能力和分辨率提出了较高的要求。

提高地球物理勘探技术和装备水平,发展相应的计算机软件系统,促进我国中、西部地区地球物理勘探能力的提高,从而逐步解决对中、西部战略资源接替区(如山、沙漠、戈壁、黄土源覆盖区)的高陡构造、低幅度构造、岩性油藏和东部老油田的复杂断块、非构造油气藏勘探中所遇到的技术难题,并配合中、西部各油田以寻找大型油气藏为目标,力争发现大油田,尽快增加石油储量,实现石油资源接替,以改变我国石油后备储量不足的局面,这些问题都需要地球物理工作者进行认真的思索。

面对上述复杂的勘探领域,通过建立正演模型和基于模型正演的快速射线追踪,根据其结果进行地震采集参数优化选择,以指导地震采集观测系统的优化设计,提高在复杂勘探区地震采集资料的质量,并增强物探方法找油找气的能力,对实现能源战略接替具有非常重要的作用和意义。

第一节 层状结构地质模型

地震勘探是利用地震反射波、折射波、绕射波等波场信息进行反演来重建地下地质结构,在地震勘探中也称为地震反演。由于地震反演存在解的不适定性问题,因此地震反演的结果具有多解性。解决多解性的措施大致有两种:一是对地下介质做一些近似假设,使其满足地震反演解的要求,从而得到近似的解;二是对已往勘探获得的地质、钻井等信息和先验知识进行有机的结合来建立正演地质模型,将正演地质模型作为约束条件进行迭代求解,并逐渐逼近真实的解。其中第二种方法解决地震反演多解性最有效也最可行,它通过正演模型来解决地球物理问题,并贯穿于地震数据的采集、处理和解释的整个过程中,因此,地震模型正演技术越来越受到地球物理工作者的关注和重视。

地下地层是经过漫长的沉积过程形成的具有一定岩石属性的介质,其后经过多次的构造运动,地层发生各种构造形变,而造成地下地层的结构复杂多样,常见的地层构造有正、逆断层、尖灭、侵入体等。地震模型正演技术的基础是要建立一个准确、合理的地质模型,不同的地球物理勘探阶段对地质模型的要求是不一样的,如地震数据采集模型要求能够较好地描述地层反射界面及断层界面特征,并通过射线追踪来了解勘探目的层的反射范围,并由此确定最佳的观测系统;叠前深度偏移模型则要求建立相对准确的速度模型,并通过迭代过程来获得最佳的成像;地震解释模型则要求能够准确地反映地层的岩石属性和地层结构特征,并通过地震波场的模拟来验证解释的合理性。

传统上,地质模型都沿用 Cervený 提出的模型结构(即所谓层状结构模型),它要求每一个分界面都必须从模型体的左边界贯穿到模型体的右边界,分界面按顺序由上到下依序排列,不得交叉。对于存在像逆断层、尖灭、侵入体等构造的复杂地层情况,可假想一个虚界面,并使其延伸到边界,从而人为地构成层状结构。如应在透镜体的两端各增加两个虚构的重合界面,并向左、右延伸到边界(其中一个为透镜体上界面的延伸,另一个是透镜体下界面的延伸),虚构界面上、下介质的速度相同。对于简单的地质体而言,上述这些做法无疑是很方便的。

我国以陆相沉积为主,地下的地质结构比较复杂,而采用层状结构模型无法准确地描述复杂的地质结构。另外,采用层状结构模型对正演计算也有一定的影响。如对射线追踪来说,由于层状结构模型假设了许多虚界面,并按顺序依次排列,这种关系不能真实地反映地层的结构关系,因此,在进行射线追踪时,每一步都需要与所有的界面进行判断,否则就有可能漏失有效射线,从而增加了相当大的计算量,这也是复杂模型射线追踪技术受到一定限制的重要原因。

第二节 射线追踪技术现状

在模型正演研究方面,射线理论和射线方法是地震波正演的一个重要途径。射线追踪方法在地震定位、地球物理层析成像、地震勘探资料的偏移处理等方面起着极其重要的作用。射线追踪的速度和精度是解决实际生产问题的关键。对于射线追踪方法,概括起来可以分为试射法、弯曲法和波前法三类。射线追踪方法的实质是给定震源激发点和接收点的两点射线追踪问题,已有很多学者,如 Julian(1977)、Chander(1975)、Pereyra 等(1980)、Keller 等(1983)、Um 等(1987)、Sambridge 等(1992)、Farra 等(1992)对两点间射线追踪问题进行过研究,并且针对两点射线追踪问题,已各自提出了许多解决方法,基本出发点都是以射线理论和扰动理论

为基础。

试射法又称打靶法,是基于斯奈尔定理的计算方法。试射法是最早提出和使用的射线追踪方法,在数学上属于初值定解问题。它通过更改射线的初始入射角,使射线出射点与接收点之间不断靠近,直到满足给定的精度要求为止,可实现两点间的射线追踪计算。试射法需要预先尝试许多初始试射,再通过迭代修改射线入射角获得准确射线路径。这样计算比较耗时,三维情况尤为突出。

弯曲法基于费马最小射线旅行时原理,在数学上属于两点边值问题,即固定起始点和终点,预先描述出射线旅行方程,根据射线旅行时方程满足最小走时条件,导出迭代修正公式,通过迭代使初始猜测的射线逐渐收敛到正确的射线路径。弯曲法在计算效率上比试射法要高,但有时会陷入局部收敛,得到非全局最优解。

波前法是根据惠更斯原理导出的一类方法。它首先将介质分割为许多网格节点,要求射线必须经过这些网格点,而震源点和接收点分别处于网格节点上,由震源点所处的网格节点出发经由各节点以最小走时到达接收点的网格节点组,射线依次经过这些节点,形成最小走时射线路径,虽然此方法在节点数目增加时,计算量也成比例地增加,但对于多个接收点的射线追踪与一个接收点的射线追踪的计算量基本相同,这是它的优点。

为了克服传统射线追踪方法的不足,围绕射线追踪的精度和计算速度,许多地球物理工作者在这方面进行了大量的研究工作。Vidale(1988)、Van Trier 等(1991)、Podivin 等(1991)从程函方程出发,用有限差分方法求解射线路径。该方法首先要将模型进行矩形网格化划分,从震源点开始,能量按矩形网格点逐点向外展开,用有限差分法求解程函方程而得到各个网格点上的旅行时。然后依据波传播理论,要求射线传播路径垂直波前面,并从接收点沿网格节点旅行时数据的最大梯度方向追踪到震源点,从而得到震源点到接收点的射线路径。但是,这种方法有时不能得到真正的全局最优射线路径。Qin 等(1992)、张霖斌等(1996)对该方法进行了不同程度的改进,但依然存在计算效率低的缺点。

Cassell(1982)曾采用网格剖分等方法,首先将地下介质划分为许多小方块,并假设每块中的速度为一常数,并按一定的初始条件,从震源点出发,逐个网格进行追踪,当遇到网格分界面时,利用斯奈尔定律确定射线在分界面上的方向,从而最终实现射线追踪计算。Langan 等(1985)在 Cassell(1982)的基础上,结合对程函方程积分等方法,可求得一组适用于速度呈线性变化的介质中的射线路径的位置和方向及走时对射线弧长的表达式,进而按照 Cassell(1982)的思路实现射线追踪计算。上述做法的主要区别在于:Cassell(1982)把网格内射线作为直线,而 Langan 等(1985)则以曲线形式表示网格内的射线。徐升等(1996)提出射线追踪的微变网格方法,杨长春等(1997)提出了适合于复杂地质模型的三维射线追踪方法。但是,上述方法基本上都采用与试射线法相结合来实现两点射线追踪。

在射线追踪领域中,虽然众多学者从不同的应用角度研究了多种射线追踪方法,并满足了部分应用需求,但是在解决既要适用于复杂地质模型又要高效率进行射线追踪这对矛盾时,仍然不能满足实际生产的需要,尤其在三维射线追踪方面更是如此。

第三节 地震采集设计分析方法

在地震数据采集方面,分为二维和三维地震数据采集两种主要方式。近年来地震采集装备及地震采集技术均得到了飞速的发展,可利用计算机软件进行采集参数和观测系统分析设

计、现场地震资料处理、地震资料品质实时监控与评价、炮点和检点 GPS 实时定位等。然而,目前地震勘探面临山地、黄土塬、沙漠、戈壁和滩海等地表条件及地下结构复杂的工区,因此对地震采集技术的要求也越来越高。

在地震采集参数分析方面,梁秀文、郑永乐等(1987)、钱荣钧(1993)、阎万朝(1993)等对地震采集参数的优选进行了研究。基本出发点是,根据勘探工区的表层结构和地下的目标层信息,选定典型的分析点,并分别建立表层地球物理模型和地下结构地球物理模型来分析和确定采集参数。表层物理模型包括表层的低速层、降速层的速度和厚度等参数,通过计算不同深度的激发能量及频率衰减变化情况、虚反射叠加响应特性、子波形态等,然后比较分析,以确定最佳的激发深度;地球物理模型包括主要目的层的深度、双程时、叠加速度、层速度、主频率、最高频率等参数,并兼顾浅层和深层资料,以确定地震采集面元尺寸、排列长度、接收点距等观测系统参数。另外,根据工区干扰波发育情况,通过接收组合图形的方向特性分析来确定压制干扰波的最佳接收组合图形。

在室内地震采集观测系统设计方面,Andreas Cordsen 等(1996)对陆上三维地震勘探观测系统的设计和施工进行了全面的介绍,并总结了目前最新的采集技术和观测系统设计方法,重点介绍了三维采集参数的确定方法及三维观测系统的类型及其优缺点。

综合起来,目前地震采集参数的分析主要以典型的物理点为依据,并将局部点分析结果用于整个勘探工区,它采用一种近似或折中方案;在观测系统设计方面,以共中心点(CMP)分析获得地下有效反射信息为基础,它是对实际反射点的近似描述。

第二章 二维复杂结构模型描述

在地震勘探中,正演模拟技术贯穿于地震数据采集、处理和资料解释的各个环节,是进行地震反演的基础,是认识和研究地下地质结构的最有效手段。在地震数据采集阶段,根据已知的勘探工区资料,建立目标模型,通过正演模拟,了解反射信息和波场分布特征,有针对性地进行观测系统设计,保证在最合理、最经济的观测方式下,获得最丰富的地下有效信息,为后续处理成像打下良好的基础;在地震数据处理阶段,通过建立正演模型和正演模拟可以了解有效波的波场特征及其变化规律,以便压制干扰信号和准确进行地下构造成像;在地震资料解释阶段,可根据解释结果进行正演模拟,通过对比来验证解释结果是否正确,还可通过模型正演了解地下波场的细微变化,提高解释的精度。总之,模型正演技术在地震勘探领域发挥着非常重要的作用,也一直是地球物理工作者关注和致力研究的重要课题之一。

正演模拟技术的基础是地球物理模型的建立。地球物理模型的建立可归结为对地球物理模型结构的数学描述。地球物理模型可分为速度模型和构造模型等多种类型。速度模型是指仅用速度参数变量来描述模型结构,速度随空间坐标而变化。速度模型主要用于叠前深度偏移、构造成图和地震数据的深时转换或时深转换等方面。构造模型是由地下结构和地层速度所表征的模型,它通过界面参数和地层速度参数进行模型描述。构造模型更注重对地下结构的描述,它适用于地下波场特征正演分析与研究。

本章从二维层状结构模型开始,提出了二维封闭结构建模思路,详细描述了二维封闭结构模型的数据结构,实现了二维复杂结构模型的建立。

第一节 二维层状结构模型

一、层状结构模型定义

地下地层是通过漫长的沉积过程形成的,普遍具有成层的特点,因此,通常用层状结构来描述地下地层形态。所谓层状结构是指按地层沉积的顺序,由下至上,地层由老到新,成层分布,每层内具有相同的地层属性(如速度、密度等)。图 2.1.1 所示是一个三层层状结构模型,其中 0 表示地面;1,2,3 依次表示第一、第二和第三地层界面。在该模型中,按地质年代论,1 表示新地层界面,2 表示次新地层界面,3 表示最老地层界面。

用层状结构表示地质模型具有概念清晰、描述简单的特点,同时也符合人们的传统习惯。层状结构的数学描述是:层状结构是由具有相同属性的地层组成,层与层之间具有明显的分界面,分界面可用一连续的单值函数表示。因此,对二维层状结构模型可描述为:由贯穿模型左、右边界的界面线组成,界面之间为具有相同属性的地层。界面可用一次、二次、三次或多次函数表示

$$z(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad (2.1.1)$$

式中, $z(x)$ 表示界面深度函数; x 为水平方向空间变量; a_i 是界面线拟合系数; n 为拟合次数。这里 n 的意义为: $n=0$,表示界面为水平界面; $n=1$,表示界面为线性拟合; $n=2$,表示界面为

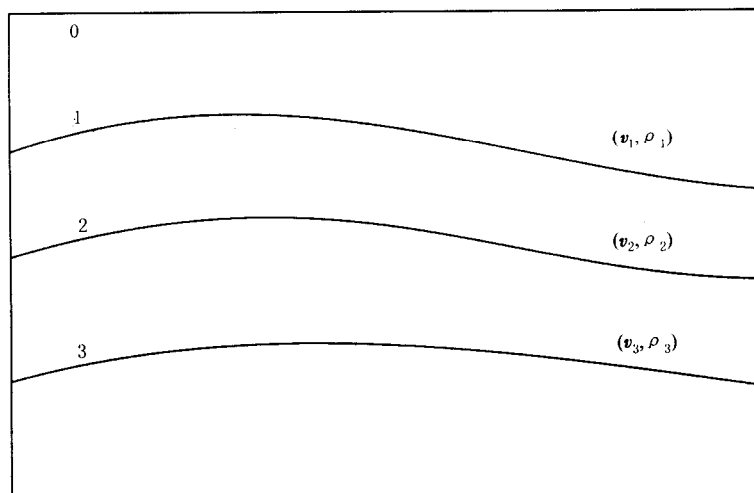


图 2.1.1 二维层状结构模型

二次拟合; $n=3$,表示界面为三次拟合;……

显然, n 越大表示界面拟合越光滑。一般地,三次拟合就可很好地描述界面的形态。每套地层的属性可用速度 v 和密度 ρ 来表示,图 2.1.1 中 (v_1, ρ_1) , (v_2, ρ_2) 和 (v_3, ρ_3) 分别表示第一、第二和第三地层的属性。

二、用层状结构描述复杂二维模型

地下地层通过沉积形成层状结构,其后经过多次构造运动,地层发生各种形变,各种类型的断层将地层进行分割,从而造成地下地层结构复杂多样,常见的地层结构有正断层、逆断层、尖灭、侵入体等。

层状结构模型描述的特点是,地层分界面是一个从左边界贯穿到右边界的连续界面,并且要求界面函数是以 x 为变量的单值函数,即界面不允许有回折现象发生。为了用层状结构描述复杂地质模型,一般是添加假想的界面,使原来不连续的分段界面在形式上变成从左边界贯穿到右边界的连续界面,这些假想的界面称为虚界面。所谓虚界面实际上就是不存在的界面,它在数学上的定义为:虚界面上、下两边介质的地层属性完全相同。

图 2.1.2a 是一含正断层构造的地质模型,其第二和第三层界面被断层构造分断,第二层界面分成①,②,③段,第三层界面分成④,⑤,⑥段;图 2.1.2b 是用层状结构模型描述的结果,第二层界面由界面①,②,③段和断面 a, d 段组成,排列顺序是①, a , ②, d , ③;第三层界面由界面④,⑤,⑥段和断面 c, f 段组成,排列顺序是④, c , ⑤, f , ⑥。由于图 2.1.2b 中地层界面①,②,③之间的地层属性相同,所以如图 2.1.2a 中断层 b, e 段被忽略。因此可见,用层状结构模型描述正断层构造还是比较方便的,也不需要做虚界面假设。

图 2.1.3a 是含透镜体的地质模型,透镜体左、右边界不与模型边界相接,因此描述透镜体要添加虚界面,并且将透镜体分成上、下两部分考虑,还要确保上、下两部分的边界都是单值函数;图 2.1.3b 是含透镜体的层状结构模型的描述结果,线段 AB 和 CD 分别为透镜体左、右两侧添加的两个虚界面,虚界面 AB 和 CD 上、下介质的属性完全相同,这样透镜体的层状结构模型可用 $AB①CD$ 和 $AB②CD$ 两个界面表示。

图 2.1.4a 是含逆断层的地质模型,同样第二和第三层界面被断层构造分断,第二层界面分成①,②,③段,第三层界面分成④,⑤,⑥段;图 2.1.4b 是根据介质属性简化的界面结构,只有这些界面才对正演地震波场真正起作用。因此,含有逆断层的第二和第三层界面实际上变

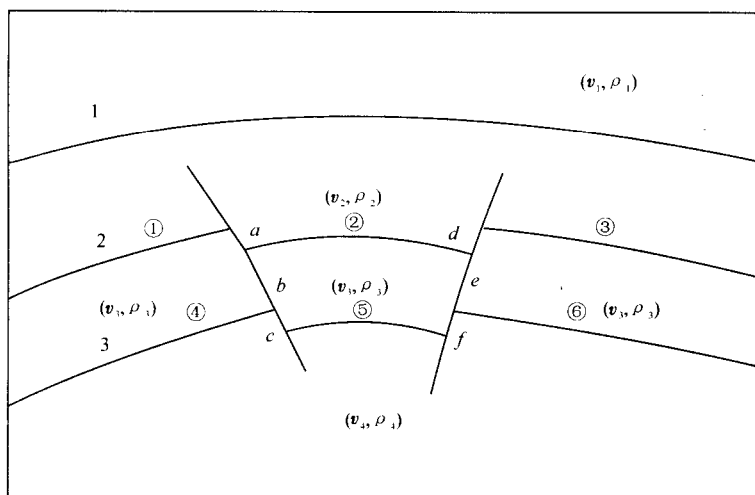


图 2.1.2a 正断层层状地质结构模型

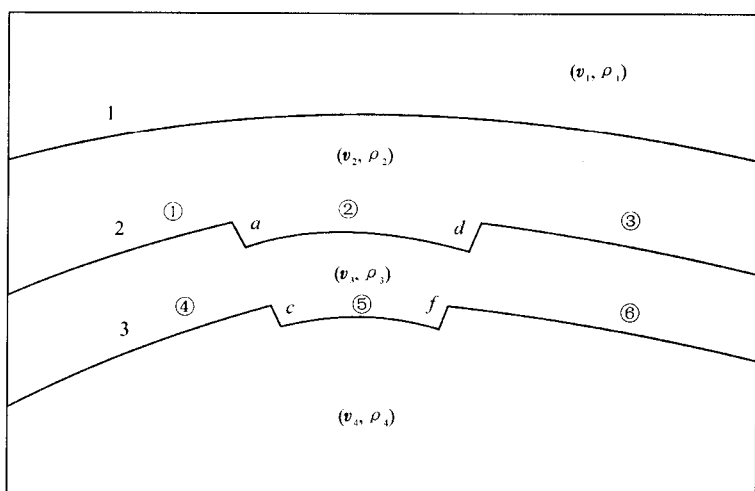


图 2.1.2b 正断层的层状结构模型表示

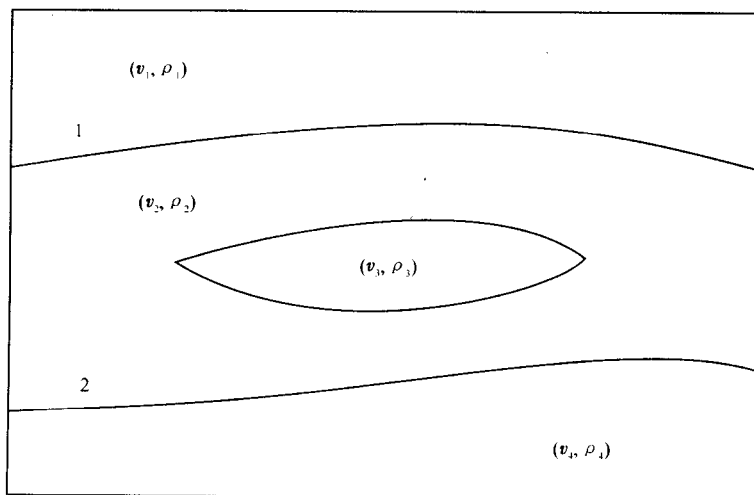


图 2.1.3a 透镜体的地质结构模型

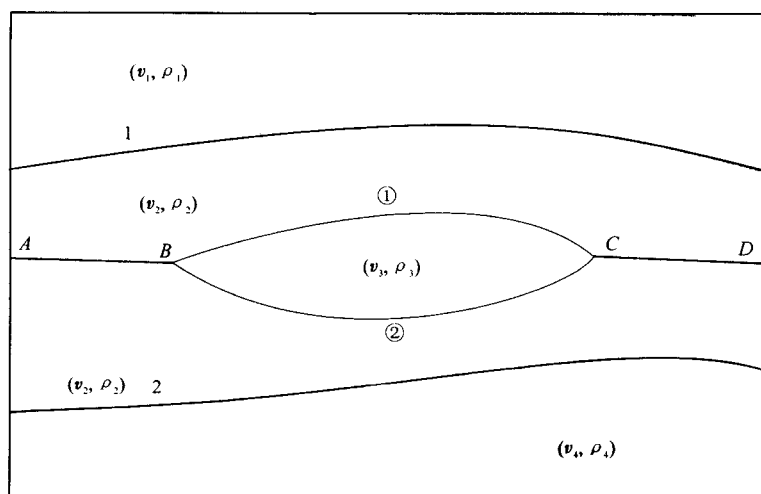


图 2.1.3b 透镜体的层状结构模型表示

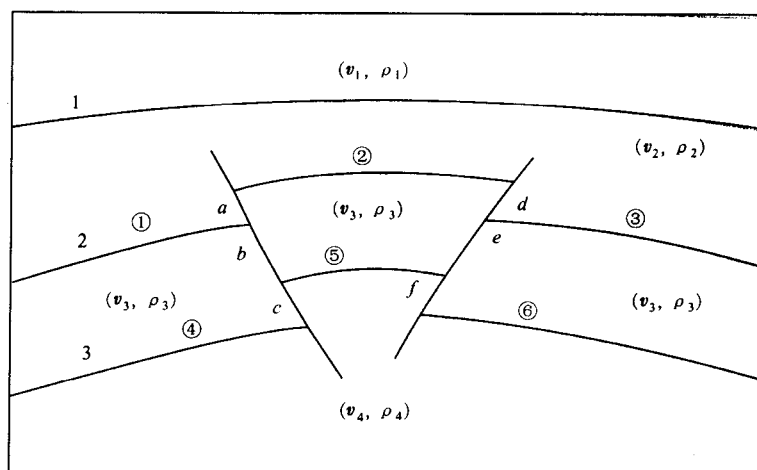


图 2.1.4a 逆断层地质结构模型

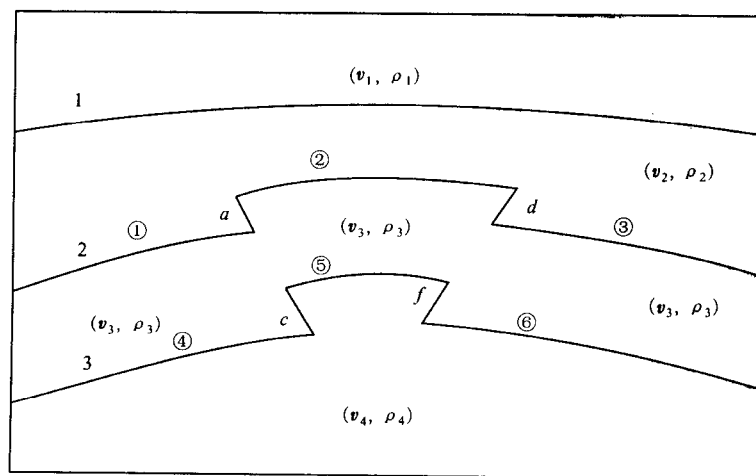


图 2.1.4b 逆断层结构模型的有效界面