

三维复杂介质 地震数值模拟

牟永光 裴正林 著



**SEISMIC NUMERICAL
MODELING
FOR 3-D COMPLEX
MEDIA**



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

三维复杂介质地震数值模拟

牟永光 裴正林 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书基于地震波传播理论,比较系统全面地论述了复杂地表、复杂构造和复杂介质三维地震波传播方程数值模拟理论、方法和算法。全书共十二章。内容包括地震数值模拟理论基础、方法;地震波场的空间导数和时间导数的数值逼近;三维各向同性介质声波方程数值模拟;三维各向同性介质弹性波方程数值模拟;三维各向同性介质粘弹性波方程数值模拟;三维各向异性介质弹性波方程数值模拟;三维双相各向异性介质弹性波方程数值模拟;复杂地区弹性波传播数值模拟;三维弹性波方程边界元法数值模拟;地震波方程小波方法数值模拟;地震波数值模拟中的稳定性分析和边界条件;地震波数值模拟在地震勘探开发中的应用。本书具有较高的理论价值和实用价值。

本书可以作为从事地球物理研究的技术人员和高等院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

三维复杂介质地震数值模拟 / 牟永光, 裴正林著.

北京: 石油工业出版社, 2005.1

ISBN 7-5021-4737-3

I. 三…

II. ①牟…②裴…

III. 地震—数值模拟

IV. P315.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 086313 号

三维复杂介质地震数值模拟

牟永光 裴正林著

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.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂印刷

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 14

字数: 352 千字 印数: 1—1500 册

定价: 50.00 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

前 言

随着我国石油天然气勘探、开发工作的不断发展,我们面临的勘探对象和开发条件越来越复杂,面临着复杂构造油气藏、岩性油气藏和裂缝油气藏的勘探和寻找开采“剩余油”的艰巨而复杂的任务。为了解决这些复杂油气藏的勘探、开发问题,必须将复杂介质地震波传播理论与地震物理模拟实验研究紧密结合起来,必须将复杂介质地震数值模拟研究与地震物理模拟研究紧密结合起来。地震数值模拟就是在假定地下介质结构模型和相应物理参数已知的情况下,模拟研究地震波在地下各种介质中的传播规律,并计算在地面或地下各观测点所应观测到的数值地震记录的一种地震模拟方法。地震数值模拟是地震反演和偏移成像的基础。地震数值模拟可以应用于地震勘探与开发的各个环节。通过三维复杂介质地震数值模拟可以研究三维复杂介质地震勘探方法、三维地震观测系统的优化设计、三维地震数据处理方法,三维地震资料解释方法,以及复杂油气藏开发地震方法。

我们从 20 世纪 80 年代初开展了中国石油工业部重点科研项目“弹性波问题有限元法数值解法”的研究工作。进入 21 世纪后,又开展了中国石油化工股份有限公司重点科研项目“复杂介质中地震波传播规律的地震模拟研究”工作。

当前国内外尚无一本系统反映三维复杂介质地震数值模拟最新成果的专著。本书是在上述研究的基础上,取得进一步的研究新成果后,结合地震波传播理论,系统整理撰写而成的。参与本书各章节撰写的人员有牟永光教授(第一章、第三章、第七章、第九章和第十二章)、裴正林博士后(第二章、第四章、第五章、第六章、第七章中的部分内容、第八章、第十章和第十一章)、符力耘博士(第九章中的部分内容)和刘洋博士(第七章中的部分内容)。

在研究过程中,中国石油天然气集团公司和中国石油化工股份有限公司各级领导给予了支持和关心,在此特致深切的谢意。

在研究工作中,中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院南京物探研究所、江汉油田等单位参与了合作;中国科学院地质与地球物理研究所提供了二维陆相断陷模型、二维 Marmousi 模型数据和三维盐丘模型数据;康英负责本书稿的录入,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,恳请大家批评指正。

作者

2004 年 5 月 18 日于北京

目 录

第一章 绪论	1
第一节 地震数值模拟及其理论基础	1
第二节 地震数值模拟方法及其特点	2
第三节 地震数值模拟的发展	4
第四节 地震数值模拟三维建模	6
第五节 地震数值模拟的计算机硬件平台	11
第六节 地震数值模拟的应用	12
第二章 地震波场的空间导数和时间导数的数值逼近	14
第一节 地震波场的空间导数高精度近似	14
第二节 地震波场的时间导数高精度近似	25
第三章 三维各向同性介质声波方程数值模拟	33
第一节 均匀介质三维声波方程规则网格高阶有限差分数值解	33
第二节 非均匀介质三维声波方程交错网格高阶有限差分数值解	34
第三节 均匀介质三维声波方程虚谱法数值解	36
第四节 数值模拟算例	37
第四章 三维各向同性介质弹性波方程数值模拟	45
第一节 非均匀各向同性介质三维弹性波方程	45
第二节 三维弹性波方程交错网格高阶有限差分数值解	47
第三节 数值模拟算例	48
第四节 弹性波波场分离	59
第五章 三维各向同性介质粘弹性波方程数值模拟	62
第一节 非均匀介质三维粘滞声波方程	62
第二节 三维粘滞声波方程交错网格高阶有限差分数值解	63
第三节 非均匀介质三维粘弹性波方程	65
第四节 三维粘弹性波方程交错网格高阶有限差分数值解	66
第五节 数值模拟算例	67
第六章 三维各向异性介质弹性波方程数值模拟	72
第一节 各向异性介质的分类和储层地球物理模型的建立	72
第二节 三维各向异性介质弹性波方程	75
第三节 三维各向异性介质的 Christoffel 方程	76
第四节 应力、应变和弹性常数张量矩阵的坐标变换	78
第五节 三维各向异性介质一阶应力—速度弹性波方程	80
第六节 三维各向异性介质弹性波方程交错网格高阶有限差分数值解	81
第七节 数值模拟算例	82
第七章 三维双相各向异性介质弹性波方程数值模拟	103

第一节	三维双相各向异性介质弹性波方程的交错网格高阶有限差分数值解	103
第二节	双相各向异性介质弹性波方程有限元法数值解	108
第三节	双相各向异性介质弹性波方程虚谱法数值解	113
第四节	数值模拟算例	114
第八章	复杂地区弹性波传播数值模拟	125
第一节	任意起伏地表弹性波场数值模拟	125
第二节	缝洞介质弹性波场模拟	136
第三节	随机介质弹性波场模拟	146
第九章	三维弹性波方程边界元法数值模拟	150
第一节	三维弹性波方程边界元法数值解	150
第二节	数值模拟算例	154
第十章	地震波方程小波方法数值模拟	157
第一节	地震波方程的小波自适应数值模拟	157
第二节	弹性波方程的小波一半群方法数值模拟	162
第十一章	地震波数值模拟中的稳定性分析和边界条件	171
第一节	三维地震波方程交错网格高阶有限差分法稳定性分析	171
第二节	三维应力—速度弹性波方程 PML 吸收边界条件	180
第十二章	地震数值模拟在地震勘探开发中的应用	188
第一节	火成岩地区地震波传播规律及地震观测系统设计研究	188
第二节	山地无组合检波采集方法的三维地震数值模拟研究	205
参考文献		210

第一章 绪 论

本章将叙述地震数值模拟及其理论基础、地震数值模拟方法及其特点、地震数值模拟的发展、地震数值模拟三维建模、地震数值模拟的计算机硬件平台及地震数值模拟的应用。

第一节 地震数值模拟及其理论基础

一、地震数值模拟

地震数值模拟 (Seismic Numerical Simulation 或 Seismic Numerical Modeling) 是地震勘探和地震学的重要基础。所谓地震数值模拟就是在假定地下介质结构模型和相应物理参数已知的情况下, 模拟研究地震波在地下各种介质中的传播规律, 并计算在地面或地下各观测点所应观测到的数值地震记录的一种地震模拟方法。这种地震数值模拟方法已在地震勘探和天然地震领域中得到广泛的应用。它不但在石油、天然气、煤、金属和非金属等矿产资源及工程和环境地球物理中得到普遍的应用, 而且在地震灾害预测、地震区带划分以及地壳构造和地球内部结构研究中, 也得到相当广泛的应用。地震数值模拟在地震勘探和地震学各工作阶段中都有重要的作用。在地震数据采集设计中, 地震数值模拟可用于野外地震观测系统的设计和评估, 并进行地震观测系统的优化。在地震数据处理中, 地震数值模拟可以检验各种反演方法的正确性。在地震数据处理结果的解释中, 地震数值模拟又可以对地震解释结果的正确性进行检验。

地震数值模拟与地震物理模拟同属于地震正演模拟, 即在已知地下介质结构和物理参数模型情况下, 预测在地面或井中各观测点所应观测到的地震记录。而地震勘探的目的则是根据地面或井中各观测点所观测的地震记录来刻画地下介质结构模型, 并描述其状态或岩性。这是一个反演过程, 但是, 这个反演过程是建立在地震正演模型的基础上的。因此地震数值模拟不仅可以进行地震正演模拟研究, 同时也是地震反演的基础。

地震数值模拟的发展非常迅速, 现在已经研制出了各种各样的地震数值模拟方法, 并均在地震勘探和地震学中得到广泛而有效的应用, 这些地震数值模拟方法可以归纳为地震波方程数值解法、积分方程法和射线追踪法三大类。

二、地震数值模拟的理论基础

地震数值模拟是在已知地下介质结构的情况下, 研究地震波在地下各种介质中传播规律的一种地震模拟方法, 其理论基础就是表征地震波在地下各种介质中传播的地震波传播理论。

上述三类地震数值模拟方法相应的地震波传播理论的数学物理表达方式也不尽相同。地震波方程数值解法是建立在以弹性或粘弹性理论和牛顿力学为基础的双曲型偏微分方程——地震波传播方程的理论基础上的。由于地下介质性质不同, 其相应的地震波传播方程也不同。如声学介质中的声波波动方程; 弹性介质中的弹性波波动方程; 粘弹性介质中的粘弹性波波动方程; 孔隙弹性介质 (双相或多相介质) 中的双相 (或多相) 介质弹性波方程; 各向异性介质中的各向异性弹性波波动方程等。积分方程法是建立在以惠更斯原理为基础的波叠加原理基础上的, 其数学表达形式为波动方程的格林函数域积分方程式和边界积分方程

式。射线追踪法是建立在以射线理论为基础的波动方程高频近似理论基础上的，其数学表达式为程函方程和传输方程。

由于地震波传播方程在三维复杂介质中地震波传播的广泛适应性及地震波方程数值解法在地震波数值模拟中应用的广泛性和有效性，下面，我们将着重研究地震波方程数值解法，同时，对积分方程和射线追踪法也进行适当的讨论。

第二节 地震数值模拟方法及其特点

一、地震数值模拟方法

地震数值模拟是以地震波传播理论为基础的。描述地震波在各种介质中传播的波动方程属于双曲型变系数偏微分方程。地震波波动方程的定解问题（或正演方程）包括：微分算子、微分算子的系数（可变或常系数）、震源项、边界条件、初始条件等。

地震波正演过程是由“因”推“果”的确定过程，求解微分方程可以算出系统中表示状态的参量随时间的演化。地震波的正演过程数学上可描写为

$$d=A(m) \tag{1-1}$$

式中， d 表示合成地震数据向量； A 为正演算子； m 为模型向量。 d 的精度受 m 的离散化精度和正演算子 A 计算精度的影响。

地震波传播方程正演问题的研究内容包括：

- (1) 地震数值模拟原理；
- (2) 地震数值模拟算法；
- (3) 计算程序的质量。它受三个主要因素影响，即计算精度，计算效率和计算的稳定性。

另外，现代计算机的飞速发展极大地促进了地震数值模拟研究的进展。

现代地震数值模拟是利用先进的计算机技术将野外一定规模的复杂地质构造、地质体和复杂岩性通过可视化建模技术建立二维、三维地质—地球物理模型，并用先进的数值模拟方法对野外地震勘探方法进行模拟（如图 1-1 所示）。

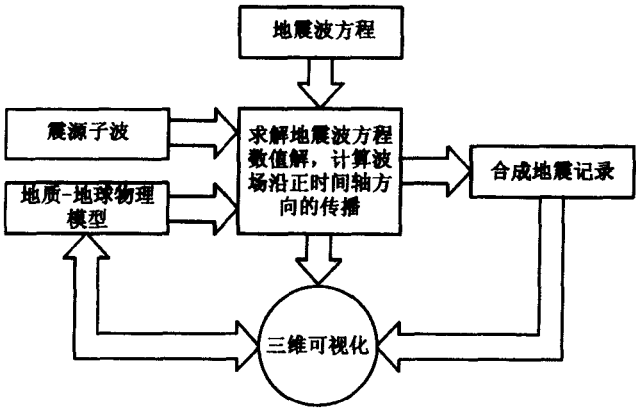


图 1-1 地震数值模拟方法示意图

二、地质—地球物理模型离散化

不同的研究目的, 构成地质—地球物理模型的地球物理量也不同。对于均匀各向同性介质声波方程, 地质—地球物理模型 m 可表示为 $m = m(\rho, v_p)$, 而对均匀各向同性介质弹性波方程而言, 其地质—地球物理模型则表示为

$$m = m(\rho, v_p, v_s) \quad (1-2)$$

即模型 m 离散化为包含有限个模型物理参数的向量 m 。

地质—地球物理模型的离散化是通过对模型的空间剖分来实现的。目前地质—地球物理模型的空间剖分方法可分为两种, 即正交网格剖分和非正交网格剖分。正交网格在平面上是矩形网格, 而非正交网格剖分在平面上是三角形网格和不规则四边形网格。对于地下介质进行非正交网格剖分可以充分考虑到地下介质分布的几何形状, 并且不受边界几何形状的限制。从这一点来说, 基于非正交网格的数值模拟方法要优于基于正交网格的数值模拟方法。

为了准确地刻画地下介质物理性质空间变化, 模型网格剖分必须要求足够精细, 只有这样才能以较小的误差逼近地下介质的实际物性分布。模型网格剖分得越细, 则空间网格点的数目越多, 这必然会占用大量的内存, 加大计算的工作量, 降低计算的效率, 增加计算的成本。因此, 模型离散化时既要考虑数值模拟的分辨率 (或网格大小), 又要考虑计算成本。

三、地震波方程的离散化

模型空间的网格化必然带来波场分量的网格化。由于这种网格化把一个连续的地震波动问题转化成一个离散的地震波动问题, 因此必然涉及到波场逼近问题, 并在空间网格化以后, 尽可能以较小的逼近误差表示离散波场的空间微分。有限差分法通过有限差分算子将波动方程离散化, 以差分代替微分, 将微分方程问题化为代数问题, 然后求解相关的线性代数方程组以获得微分方程问题的数值解。图 1-2 表示地震数值模拟各种概念之间的关系。差分法是点近似, 只考虑有限个离散点上的函数值, 而不考虑点的领域函数值如何变化。差分算子是一个空间局部的算子, 在空间域具有较高的分辨率, 可以很好地适应剧烈变化的地下介质情况。但是在频率域中, 有限差分算子的分辨率却很低。算法的稳定性和收敛性受空间采样率和时间采样率的影响, 但算法的速度较快。

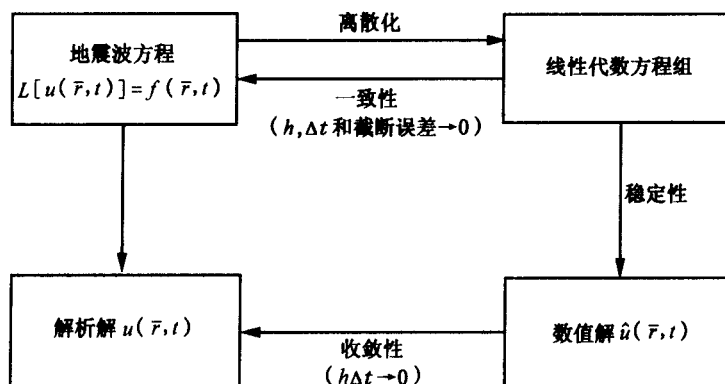


图 1-2 地震数值模拟各种概念之间的关系

基于变分原理和剖分插值的有限元法考虑的是分段近似,比较适合几何和物理条件比较复杂的问题。但算法复杂,计算速度慢,一般对网格要求三角剖分,基函数是分段线性函数,不具有正交性。算子也是空间局部的,空间分辨率高,但在频率域中分辨率低。

另外一种逼近空间微分的方法是虚谱法,它是基于空间域中的求导,相当于频率域中的乘积运算,利用傅里叶变换将波场函数表示为傅里叶级数的展开形式,将波动方程在时间一波数域或频率域中求解。虚谱法对微分算子的逼近程度可以达到 Nyquist 频率或波数,并且收敛速度快。但由于傅里叶变换是基于整个时间域或空间域的,改变空间中的某一点的值,就会改变频率域中的所有值,因此每一点的微分结果都要受到计算域中其它点的影响并且存在众所周知的 Gibbs 效应。实际上,求导运算应该是一种局部运算。对于空间物性剧烈变化的情形,这显然是不合适的。与有限差分法和有限元法相比较,虚谱法在频率域分辨率高,在时间域分辨率低。

如果地震波场具有规则的特征,那么上面这三种数值算法都是适合的。事实上,地面上接收到的地震波场不仅包含了反射的位置信息,而且还包含了介质性质的奇异性信息。由于地下介质的分布是很不均匀的,这种不均匀性发生在很大的尺度范围内。从毫米级尺寸的岩石颗粒和孔隙到百千米级的盆地构造,包括岩性、孔隙度、渗透率、孔隙流体性质以及孔隙压力、温度等地球物理性质的变化。介质表现出的这种多尺度性质通过地震波动方程可以映射到地面接收的地震波场中,其中介质的物理性质变化通过波动方程的系数体现出来。

对于目前的大多数自适应有限差分法或者有限元法来说,很难针对解的局部特征发展一种有效的鲁棒适应性过程,也就是根据解的局部性质来动态调整计算的网格点。

第三节 地震数值模拟的发展

地震数值模拟是模拟地震波在介质中传播的一种数值模拟技术。随着地震波理论在天然地震和地震勘探中的应用,地震模拟技术便应运而生,并随着地震波理论和计算机技术的发展,地震数值模拟技术自 20 世纪 60 年代以来也得到了飞速发展,形成了目前具有有限差分法、有限元法、虚谱法和积分方程等各种数值模拟方法的现代地震数值模拟技术。

有限差分法是偏微分方程的主要数值解法之一。在各种地震数值模拟方法中,最早出现的数值模拟方法是有限差分法。Alterman 和 Karal (1968) 首先将有限差分法应用于层状介质弹性波传播的数值模拟中。此后,Boore (1972) 又将有限差分法用于非均匀介质地震波传播的模拟。Alford 等 (1974) 研究了声波方程有限差分法模拟的精确性。Kelly 等 (1976) 研究了用有限差分法制作人工合成地震记录的方法。Virieux (1986) 提出了应用速度—应力一阶方程交错网格有限差分法模拟 P—SV 波在非均匀介质中的传播。交错网格方法提高了地震模拟的精度和稳定性,并消除了部分假象。Dablain (1986) 提出了应用高阶有限差分算子进行标量波模拟的方法,此后,Bayliss 等 (1986)、Levander (1988) 采用四阶空间有限差分算子计算弹性波的地震记录。Graves (1996) 给出了三维速度—应力方程交错网格有限差分法弹性波传播的模拟方法。三维速度—应力方程交错网格有限差分弹性波数值模拟方法使得地震数值模拟对地震波在弹性介质中传播模拟能力有了明显提高。为了进一步模拟地震波在非完全弹性的实际地层中的传播,Carcione 等 (1988) 提出了粘滞声波在地层中传播的模拟方法。Tal-Ezer 等 (1990) 进行了线性粘弹性介质中地震波传播的方法研究。

Robertsson 等 (1994) 给出了粘弹性波有限差分模拟方法。而为了模拟地震波在实际地层中的各向异性性质, Mora (1989) 研究了三维各向异性介质中地震波的模拟方法。Igel 等 (1995) 给出了各向异性介质中地震波传播的有限差分模拟方法。此后, 为了模拟地震波在双相或多相孔隙弹性介质中的传播, Dai 等 (1995) 给出了非均匀孔隙介质中速度—应力方程有限差分地震模拟方法。Carcione 和 Quiroga-Goode (1996) 研究了孔隙弹性介质中 Biot 纵波的数值模拟问题。OZdenvar 和 McMechan (1997) 给出了孔隙弹性介质中地震波的交错网格有限差分模拟方法。Carcione 和 Helle (1999) 提出了孔隙粘弹性介质中地震波传播的交错网格有限差分模拟方法。

上述的粘弹性、各向异性和孔隙弹性介质中地震波传播的模拟方法进一步增强了地震数值模拟在实际复杂岩性介质中的地震波传播模拟的能力。但是一般的有限差分地震模拟方法基于笛卡尔坐标系中的规则网格, 在模拟复杂地质构造和复杂地质体的复杂界面时, 必然会出现阶梯状的边界, 在这种边界上必然引起人为的虚假绕射波, 为了减弱这种虚假绕射波, 则必须采用精细网格, 而这将导致数值模拟计算储存量的增加和计算量的增大。为此, 则必须发展基于可变网格和不规则网格的地震数值模拟方法。

Jastram 和 Tessmer (1994) 提出了垂直间距可变网格的弹性波模拟方法。Falk 等 (1996) 应用可变网格有限差分法模拟井筒波的传播。Opsal 和 Zahradnik (1999) 提出了非均匀介质中弹性波的矩形不规则网格有限差分法模拟方法。Pitarka (1999) 给出了三维各向同性介质中弹性波的矩形非规则交错网格有限差分模拟方法。Nordstrom 和 Carpenter (2001) 提出了曲线坐标下变形网格高阶有限差分法地震数值模拟方法。

随着山地、沙漠等复杂地表地震勘探的发展, 起伏地表地震数值模拟技术受到了地球物理勘探学家的广泛关注和重视。Hestholm 和 Ruud (1994) 对起伏地表下弹性波传播有限差分法数值模拟进行了研究。Tessmer 和 Kosloff (1994) 利用 Chebychev 谱法对起伏地表下弹性波传播进行了模拟。Robertsson (1996) 给出了含起伏地表弹性和粘弹性介质中地震波传播的有限差分模拟方法。

有限元法也是偏微分方程的数值解法之一。Lysmer 和 Drake (1972) 最早将有限元法应用于地震数值模拟。Marfurt (1984) 研究对比了模拟弹性波传播的有限差分法和有限元法的精度。Seron 等 (1990, 1996) 给出了弹性波传播有限元模拟方法。Padovani 等 (1994) 研究了地震波模拟的低阶和高阶有限元法。Sarma 等 (1998) 给出了弹性波传播有限元模拟中的无反射边界条件。

虚谱法是偏微分方程的另一种数值解法。Gazdag (1981) 提出了声波传播的虚谱法地震模拟方法。Kosloff 等 (1982) 给出了虚谱法地震波模拟方法。Fornberg (1987) 对弹性波传播模拟的虚谱法和有限差分法进行了对比研究。Reshef 等 (1988) 给出了三维声波模拟的虚谱法。

积分方程法是建立在波动方程的积分表达式的基础上的, 其理论基础是惠更斯原理。积分方程法也是有限元法之后发展起来的一种地震数值模拟方法。Pao 和 Varatharajulu (1976) 提出了弹性波散射的积分表达式。Bennett 和 Mieras (1981) 给出了流体目标声波散射的时间域积分方程解。Bouchon (1987) 给出了裂隙或孔洞弹性波绕射的离散波数法模拟方法。Bouchon 等 (1989) 研究了具有不规则界面的多层介质中波传播的边界积分方程—离散波数法。Bakamjian (1992) 给出了三维地震波传播模拟的边界积分方程法。符力耘和

牟永光(1994)提出了弹性波正演模拟的边界元法。符力耘等(1997)提出了非线性 Fredholm 积分方程的正演问题。符力耘(2003)给出了含起伏地表的广义 Lipmann-Schwinger 积分方程的数值模拟方法。

射线追踪法是建立在波动方程的高频近似基础上的一种地震数值模拟方法(Cerveny 等, 1977)。这种方法实际只计算了最奇异部分的解, 即旅行时和振幅函数的特征曲线, 它们分别是程函方程和传输方程的解。这种方法计算效率高。但是, 一些复杂的本构方程由于积分方程法和射线追踪法不满足假设条件而限制了这些方法的应用。

上述这些地震数值模拟方法各有优缺点。对于三维复杂构造、复杂地质体和复杂岩性地震模拟而言, 交错网格高阶有限差分法其综合性能(占内存大小、模拟精度、计算效率和并行算法实现)最好, 是实用性最好的方法。

第四节 地震数值模拟三维建模

实际含油气构造及地质体一般是很复杂的。为了实现对复杂油气藏储集体的地震数值模, 就必须解决三维地质—地球物理建模问题。三维地质—地球物理建模技术是三维地震数值模拟的重要组成部分。美国 SEG/EAEG 和法国 IFP (Institut Francais du Petrole) 等地球物理组织, 在 20 世纪 90 年代, 先后推出了二维 Marmousi、三维盐丘和三维逆掩推覆体等模型(见图 1-3、图 1-4 和图 1-5), 业已成为勘探地球物理界的标准模型。

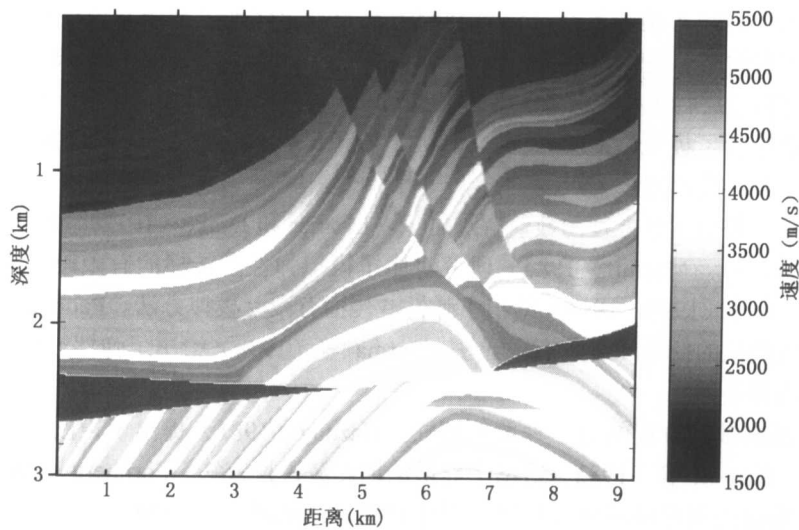


图 1-3 二维 Marmousi 模型

这些模型主要是针对基于声波方程的纵波地震勘探方法而建立的。为了研究多波多分量地震勘探方法, SEG/EAEG 于 20 世纪 90 年代末对原有的二维声介质 Marmousi 模型进行了修改, 给出了二维弹性介质 Marmousi 模型(图 1-6)。上述模型主要反映的是海相沉积特点。我国“陆相油储地球物理”学术委员会于 20 世纪 90 年代末提出了反映我国陆相沉积特点的二维陆相断陷模型(图 1-7)。

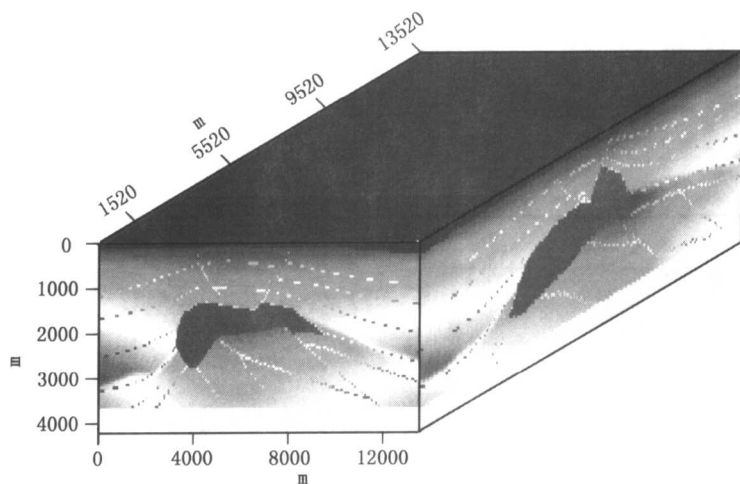


图 1-4 三维盐丘模型

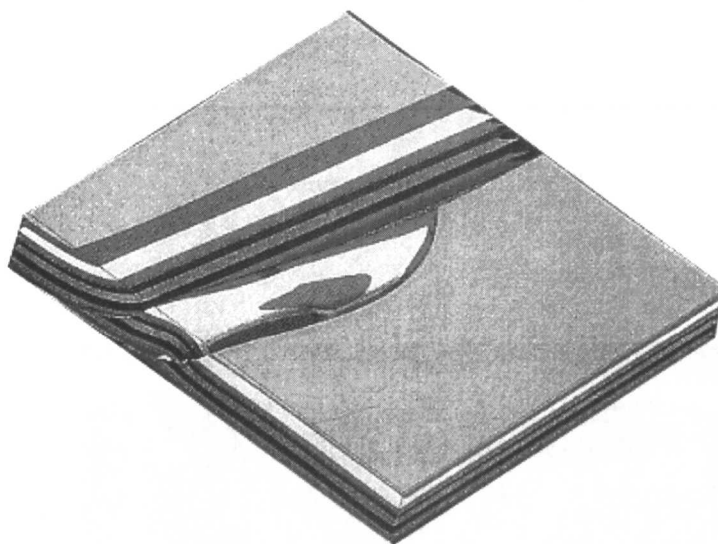


图 1-5 三维逆掩推覆体 (Overthrust) 模型

一、地质—地球物理模型的建立

在进行地震数值模拟时，必须首先建立地质—地球物理模型。为了准确地建立地震数值模拟所需要的地质—地球物理模型，则需要根据工作地区的地质、钻井、地震、测井和岩石物理资料，进行综合分析，确定地质—地球物理模型。整个地质—地球物理模型建立过程如图 1-8 所示。

二、地震—地球物理三维建模的关键技术

地质—地球物理三维建模的关键技术主要包括：(1) 对三维复杂地质体的有效描述；(2) 三维空间内的交互编辑；(3) 高效的三维空间插值技术；(4) 地质统计学方法和拓扑学应用。

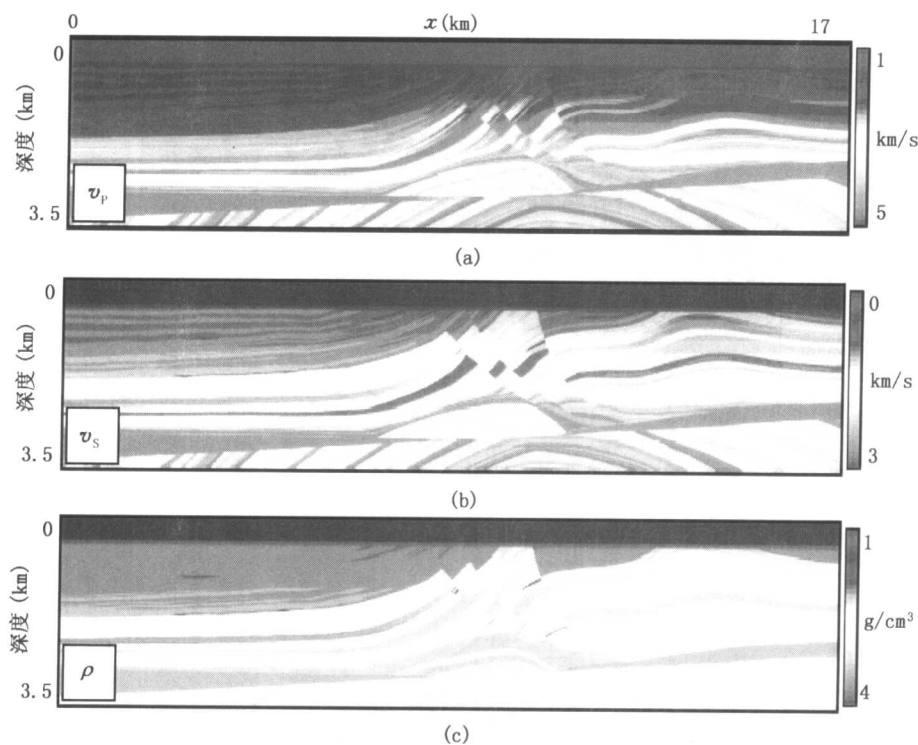


图 1-6 二维弹性介质 Marmousi 模型

(a) 纵波速度剖面；(b) 横波速度剖面；(c) 密度剖面

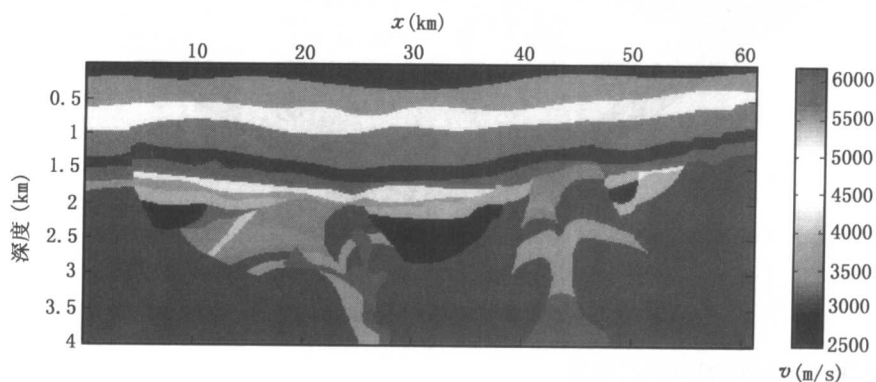


图 1-7 二维陆相断陷模型

三维地质体，其形态是任意复杂的。三维建模既要描述其几何形态，也要描述其所包含的属性特征。但是无论多么复杂的地质体，归纳起来都可用点、线、面、体等四类数据来描述。基于这种观点，GOCAD 中描述地质目标的数据定义有：

- (1) 点集：描述离散数据；
- (2) 线集：描述断层线、河道等线状数据；

- (3) 面集：描述层面、断面等面状数据；
- (4) 体集：地层网格、盐丘封闭体等数据体。

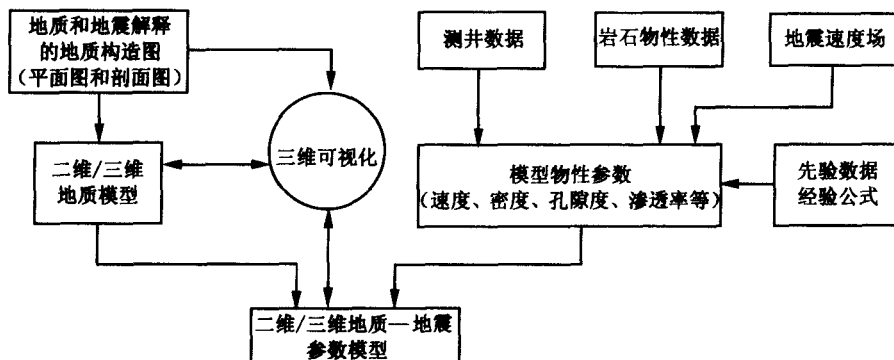


图 1-8 地质—地球物理模型建立

三维建模的过程是信息逐步丰富的过程，也就是需要根据少量信息，推断到整个三维空间，因此必须使用先进的插值方法和技术。GOCAD 的创始人 Mallet 教授，研制了一套“离散平滑插值 (DSI)”的专利技术，该技术已被工业界广泛承认。各大石油公司和地球物理软件、服务公司已将该技术运用于复杂构造建模（如逆掩断层、盐丘等）和速度建模过程中。

该技术的核心思想是：

- (1) 保证单元之间的属性彼此相似，平滑过度；
- (2) 尽可能少地改变控制点信息；
- (3) 在空间插值过程中采用模糊控制。

三、复杂地质体三维建模系统

基于 GOCAD 的建模思想，石油大学 CNPC 物探重点实验室自行开发了三维建模系统。

1. 复杂地质体的描述

根据目前复杂地质体三维建模基本思路：三维模型→地质体块→边界→面→线→点。本系统采用三维模型→二维模型→地质体平面区域→边界→线→点的建模方案，即将三维问题分解为二维问题。换言之，通过三维模型的垂直切片划分为若干个二维模型来完成三维建模。

2. 二维向三维过渡的关键——空间插值算法

我们用二元三点插值算法作为三维插值的基本算法。在二维插值中则选择了光滑不等距阿克玛插值方法。

3. 可视化编辑

首先，主要通过二维系统交互式地进行模型的创建、修改、删除等编辑处理。最后采用三维可视化技术进行交互式编辑处理并进行模型的三维显示、旋转等显示方法进行检验。

4. 三维速度建模系统

三维速度建模系统基本功能和流程见图 1-9。该系统可以在 Windows98/2000 或 NT 环境下运行。二维建模系统界面见图 1-10，三维显示系统界面见图 1-11。

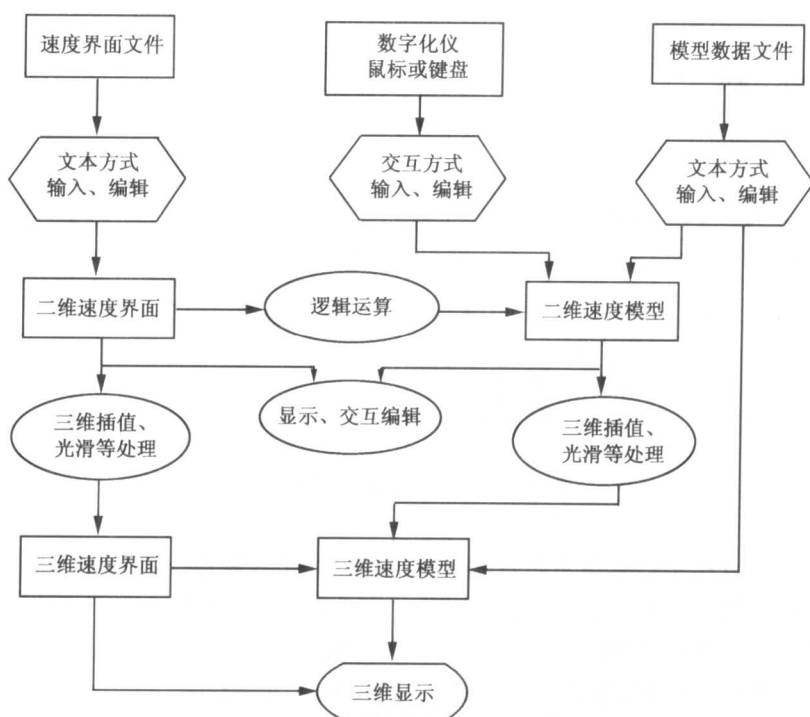


图 1-9 三维速度建模系统基本功能和流程图

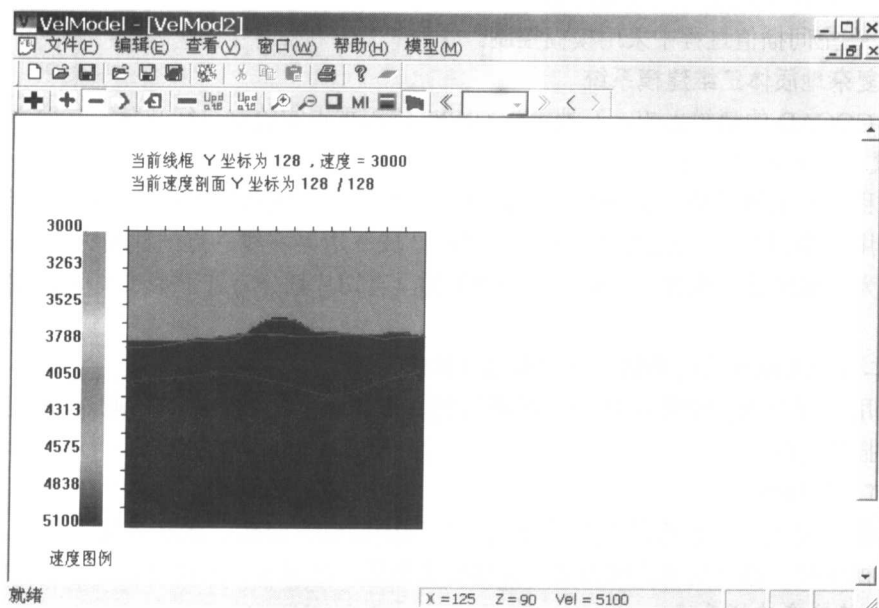


图 1-10 二维建模系统界面

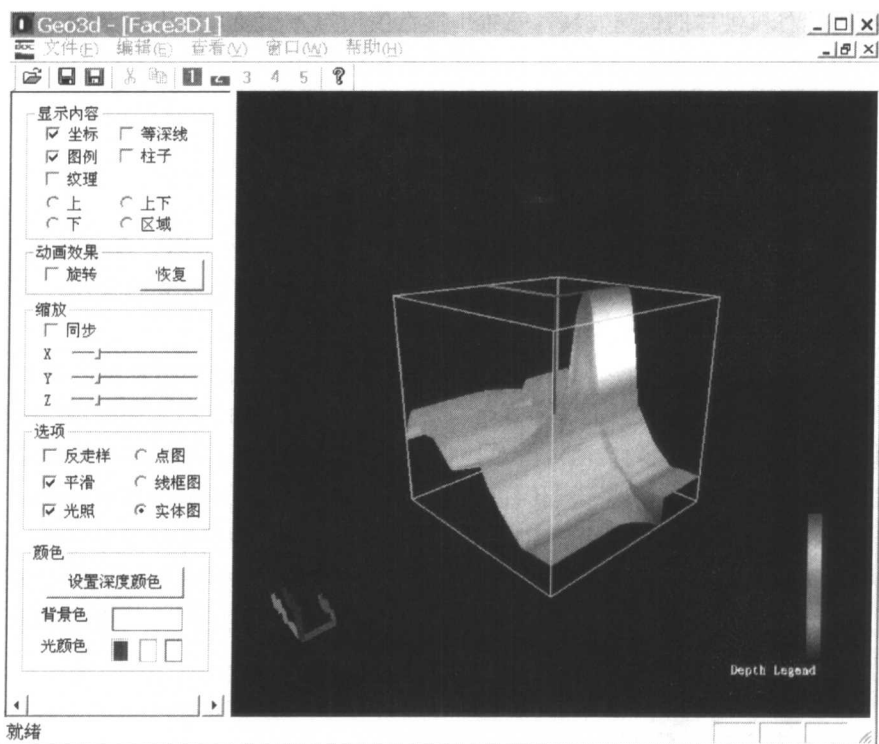


图 1-11 三维显示系统界面

对于较复杂的三维速度模型，本系统建模精度还不能完全满足要求。在这种情况下，还需要借助 GOCAD 来完成。

第五节 地震数值模拟的计算机硬件平台

地震数值模拟是通过计算机来实现的。因此，地震数值模拟是介于地震波传播理论和计算机科学之间的一门交叉学科。它的发展直接受到计算机科学水平的影响。另外，现代数值分析的方法和技术对于地震波数值模拟算法的研究起主要作用。地震波数值模拟算法性能的评价主要考虑三个因素：精度、稳定性和计算效率。

高性能计算机（HPC）和大型并行计算机（MPP）已经成为衡量一个国家综合国力和科学技术进步的重要标志。并行是实现计算能力突破的根本手段，现在的超级计算机和高性能计算机必定是并行机（如 IBM SP2，我国的曙光 2000 系列）。然而，随着计算机技术的发展，具有高性能计算能力不再是昂贵的巨型机的专项。Beowulf 微机集群（PC-Cluster）技术是近年来涌现出来的利用廉价个人微机，针对一些特定应用来产生与巨型计算具有相同能力的技术。

地震数值模拟，尤其是大规模三维模型的数值模拟是一个非常费机时的过程，但它在地震勘探、天然地震中确实又是一个不可或缺、非常有效的手段，因此，需要高性能计算机硬件平台的支持。随着个人计算机硬件性能的提高（特别是 64 位 CPU 的面市），PC-Cluster 将成为三维地震数值模拟的一个可供选择的高效而经济的硬件平台。