

地震波传播数值模拟

裴正林, 牟永光

(石油大学 CNPC 物探重点实验室, 北京 100083)

摘要 本文概述了地震数值模拟及其理论基础, 阐述了地震数值模拟方法及特点. 综述了地震数值模拟方法、三维建模和计算机硬件平台等方面的现状和进展. 最后, 给出了地震波数值模拟在地震勘探方法研究、地震观测系统优化设计、地震数据处理、地震资料解释、开发地震等方面的应用.

关键词 地震数值模拟, 研究进展, 应用领域, 三维建模, 集群计算

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2004)04-0933-09

Numerical simulation of seismic wave propagation

PEI Zheng-lin, MU Yong-guang

(University of Petroleum, Key Lab of Geophysical Exploration, CNPC, Beijing 100083, China)

Abstract This paper summarizes the seismic numerical modeling and its theoretic foundation, presents the basic method and characteristics of the seismic numerical modeling. It also summarizes status in quo and evolution on methods, three dimension model building and computer hardware of the seismic numerical modeling. Finally it describes the applications of the seismic numerical modeling in oil exploration and development fields such as seismic exploration method, seismic survey system design, seismic data processing, seismic data interpretation, development seismic and so on.

Keywords seismic numerical modeling, progress of method, application fields, three dimension model building, PC cluster

1 地震数值模拟及其理论基础

1.1 地震数值模拟

地震数值模拟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.

收稿日期 2004-07-10; **修回日期** 2004-08-20.

基金项目 基金项目 CNPC 重点实验室基金项目(GPR0408)资助.

作者简介 裴正林, 男, 1962 年生, 博士, 副研究员. 2000 年于中国地质大学(北京)获博士学位, 2003 年于石油大学(北京)博士后出站, 主要从事井间地震层析成像、地震波传播理论及其数值模拟方法、小波变换应用研究. (Email: zhenglinpei@hotmail.com)

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^[1].

1.2 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黏弹性理论和 Newton 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;黏弹性介质中的黏弹性波波动方程;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 Huygens 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 Green 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,其数学表达形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.

2 地震数值模拟方法及其特点

2.1 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

$$d = A(m).$$

其中, d —合成地震数据向量; A —正演算子; m —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:

(1)地震波数值模拟原理

(2)地震波数值模拟算法

(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.

现代地震波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 所示).

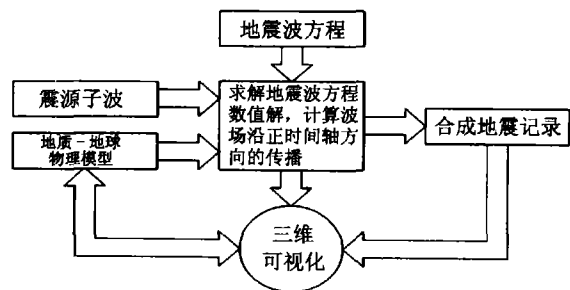


图 1 地震数值模拟方法示意图

Fig. 1 Sketch map of seismic numerical modeling

2.2 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

$$m = m(\rho, v_p, v_s).$$

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

格剖分的越细,则空间网格点的数目越多,这必然会占用大量的内存量,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。

2.3 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为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 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。

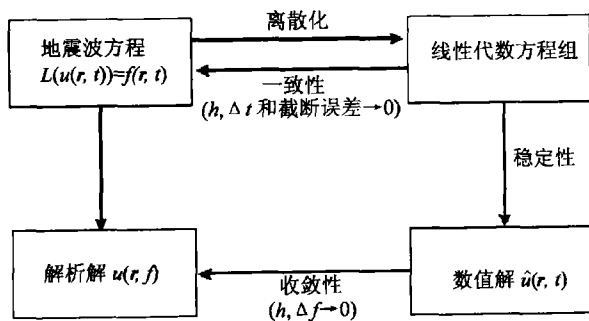


图 2 地震数值模拟各种概念之间的关系

Fig. 2 Relation among the difference concepts of seismic numerical modeling

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 Fourier 变换将波场函数表示为 Fourier 级数的展开形式,将波动方程在时间一波数域或频率中

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 Fourier 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。

3 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^[2]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,Alford 等^[3]研究了声波方程有限差分法模拟的精确性。Kelly 等^[4]研究了用有限差分法制作人工合成地震记录的方法。Virieux^[5]提出了应力一速度一阶方程交错网格有限差分法。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^[6]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^[7]、Levander^[8]采用四阶空间有限差分算子计算弹性波的地震记录. 裴正林等^[9,10]研究了非均匀介质中地震波传播的交错网格高阶有限差分法. Graves^[11]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^[12]提出了黏滞声波在地层中传播的模拟方法. Tal-Ezer 等^[13]进行了线性黏弹性介质中地震波传播的方法研究. Robertsson 等^[14]给出了黏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, Igel 等^[15]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^[16]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^[17]研究了孔隙弹性介质中 Biot 纵波的数值模拟问题. OZdenvar 和 McMechan^[18]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^[19]提出了孔隙黏弹性介质中地震波传播的交错网格有限差分模拟方法. 何樵登等^[20]研究了横向各向同性介质中地震波数值模拟方法. 董良国等^[21]给出了一阶弹性波方程交错网格高阶差分解法. 裴正林等^[22]给出了三维任意各向异性介质中弹性波传播的交错网格高阶有限差分模拟方法.

上述的黏弹性、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^[23]提出了垂直间距可变网格的弹性波模拟方法. 张剑锋^[24]、Oprsal 和 Zahradnik^[25]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^[26]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^[27]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. 裴正林等^[10]提出了地震波传播小波多尺度自适应网格数值解法.

随着山地、沙漠等地表复杂区地震勘探的发展, 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^[28]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^[29]利用 Chebychev 谱法对起伏地表下弹性波传播进行了模拟. Robertsson^[30]给出了含起伏地表弹性和黏弹性介质中地震波传播的有限差分模拟方法. 裴正林等^[31]对任意起伏地表下 2D 弹性波传播交错网格高阶有限差分法数值模拟进行了研究.

有限元法也是偏微分方程的数值解法之一. Marfurt^[32]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^[33]给出了弹性波传播有限元模拟方法. Padovani 等^[34]研究了地震波模拟的低阶和高阶有限元法. Sarma 等^[35]给出了弹性波传播有限元模拟中的无反射边界条件. 王尚旭^[36]利用有限元法研究了双向各向同性介质中弹性波传播规律. 周辉等^[37]给出了各向异性介质中波动方程的有限元数值解法. 杨顶辉^[38]对孔隙各向异性介质中基于 BISQ 模型的弹性波传播进行了有限元方法模拟.

虚谱法是偏微分方程的另一种数值解法. Gazdag^[39]提出了声波传播的虚谱法地震模拟方法. Kosloff 等^[40]给出了虚谱法地震波模拟方法. Fornberg^[41]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^[42]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 Huygens 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^[43]提出了弹性波散射的积分表达式. Bouchon^[44]给出了裂隙或孔洞弹性波绕射的离散波数法模拟方法. 符力耘等^[45]提出了弹性波正演模拟的边界元法.

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. 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。

4 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。为了实现复杂油气藏储集体的地震数值模拟,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,业已成为勘探地球物理界的标准模型。

这些模型主要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。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^[46]。

4.1 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 3 所示。

4.2 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。

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:

- * 点集:描述离散数据;
- * 线集:描述断层线、河道等线状数据;
- * 面集:描述层面、断面等面状数据;
- * 体集:地层网格、盐丘封闭体等数据体。

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。

4.3 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。该系统可

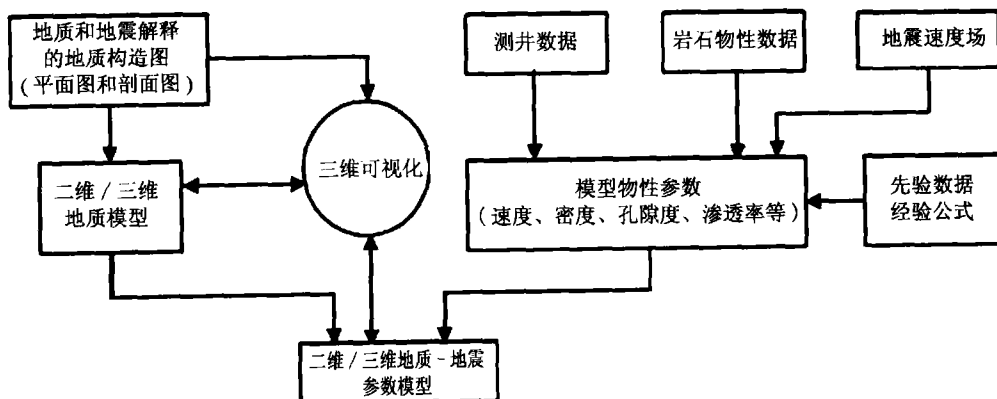


图 3 地质—地球物理模型建立

Fig. 3 Process of building geological and geophysical model

以在 Windows98/2000 或 NT 环境下运行. 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.

5 地震数值模拟的计算机硬件平台

地震波数值模拟是通过计算机来实现的. 因此, 地震波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.

地震波数值模拟, 尤其是大规模三维模型的数值模拟是一个非常费时过程, 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.

过去由于计算速度存在的瓶颈, 三维地震波数值模拟方法一直未能得到实际生产应用. 但近年来随着计算机硬件的快速发展, 三维地震波数值模拟方法及其应用在国际上又形成了研究的热点. 由此, 可以预见, 今后几年内三维地震波数值模拟方法即将得到广泛的实际生产应用, 也必将为三维地震勘探带来新的生机和活力.

6 地震数值模拟的应用

现代地震数值模拟在地震勘探和天然地震领域都有着广泛的应用. 在地震勘探领域中, 主要应用于石油天然气和煤等矿产资源的勘探及工程地震勘探. 在天然地震中, 主要用来进行地震灾害预报及地壳深部构造和地球内部结构研究.

在石油和天然气勘探方面, 随着我国石油天然气勘探工作的不断发展, 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等复杂油气藏的勘探及寻找和开发“剩余油”的艰巨而复杂的任务. 为了解决这些复杂油气藏勘探开发问题, 必须将复杂介质地震波传播理论与地震物理模拟试验研究结合起来, 必须将复杂介质地震波数值模拟研究与地震物理模拟研究紧密结合起来. 通过三维复杂介质地震模拟, 包括地震数值模拟和地震物理模拟对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和三维地震资料解释方法及复杂油气藏开发地震方法进行研究.

目前, 三维复杂介质地震数值模拟的应用主要有以下五个方面.

6.1 三维复杂介质地震勘探方法研究中的应用

通过三维复杂介质——黏弹性介质、孔隙弹性 (双相) 介质或各向异性介质中地震波传播的地震波数值模拟研究, 可以发现三维复杂介质中形成的一些特殊波及一些波传播的特殊规律, 因而为三维复杂介质地震勘探方法提供依据. 具体应用包括以下 6 个方面.

- (1) 三维地震勘探方法研究;
- (2) 多波地震勘探包括转换波法勘探方法研究;
- (3) 横波勘探包括横波分裂及横波再分裂应用研究;
- (4) 砂岩油气储层研究;
- (5) 碳酸盐岩裂缝储层研究;
- (6) 消除高速层屏蔽 (包括陆地和海上玄武岩层、膏岩层和冻土层) 影响研究.

6.2 三维地震观测系统优化设计中的应用

野外地震数据采集是整个地震勘探的基础, 其中激发、接收和观测系统是构成野外采集系统的三个不可缺少的组成部分. 激发和接收通过观测系统将它们与地下构造、地质目标联系起来. 观测系统设计的优劣直接关系到勘探任务的成败. 成功的观测系统设计就要通过野外采集经济、有效地获得勘探目标的地震信息, 经过后续的数据处理和资料解释, 完成勘探任务. 由于三维复杂地区勘探工作量大、技术难度大、投资高, 因而三维复杂地区的地震观测系统设计就需要通过三维复杂介质地震数值模拟和地震物理模拟进行优化设计, 以期达到最佳野外采集效果. 具体应用如下:

- (1) 复杂断块构造三维地震观测系统优化设计;

- (2)复杂逆掩断裂带三维地震观测系统优化设计;
- (3)复杂潜山构造三维地震观测系统优化设计;
- (4)复杂盐丘构造三维地震观测系统优化设计;
- (5)起伏地表检波器组合接收优化设计.

6.3 三维地震数据处理中的应用

地震数值模拟在三维地震数据处理中的应用为各种处理方法包括静校正、动校正、速度分析、叠加、偏移和反演方法提供各种典型三维复杂地质构造和地质体的标准数据体,用以检验各种地震数据处理方法的正确性.具体应用如下:

- (1) 三维复杂介质标准数据体的建立;
- (2) 对三维复杂介质地震数据处理方法进行检验,包括①地面地震勘探方法;②VSP方法;③井间地震层析成像方法;④各向异性介质偏移成像方法;⑤复杂盐丘及盐下偏移成像方法;⑥消除多次波方法.

6.4 三维地震资料解释中的应用

地震数值模拟在三维复杂介质地震资料解释中的应用主要为检验三维复杂介质地震资料解释的正确性.首先按地震资料解释的结果获得的地质—地球物理模型进行地震数值模拟,如果所得到的数值模拟结果与实际地震资料相一致,则可以认为地震资料解释是正确的(或者是多解性中的一个解).而如果所得到的地震数值模拟结果与实际地震资料不一致,则需要修正地质—地球物理模型重新进行地震数值模拟,如此反复迭代,直到最后所得到的地震数值模拟结果与实际地震资料相一致(或其误差在某一允许范围内),则其最终地质—地球物理模型即可以认为是正确的地震解释结果.由于地震解释存在多解性问题,为了避免多解性必须将地震资料解释与钻井和测井资料结合起来,才能获得正确的单一地震资料解释结果.具体应用如下:

- (1) 对三维复杂介质地震资料解释结果进行检验;
- (2) 对三维复杂介质地震资料解释结果进行迭代修改,直到获得正确的地震解释结果;
- (3) 三维复杂构造解释,包括①隐蔽断块圈闭解释;②逆掩断裂带解释;③盐丘和盐内幕解释.
- (4) AVO、AVA 属性解释,包括①岩性解释;②孔隙流体性质解释.
- (5) 地震层序解释;
- (6) 储层预测,包括①砂岩储层预测;②砂泥岩薄互层储层预测;③碳酸盐岩裂缝储层预测

6.5 开发地震中的应用

地震数值模拟在开发地震中也有广泛的应用,主要包括时移地震油气藏动态监测和油藏管理.具体应用如下:

- (1) 油藏精细描述;
- (2) 应用地震属性进行油藏动态监测;
- (3) 应用时移地震进行油藏动态监测;
- (4) 应用三维地震正演模拟进行堵水和其它油藏管理.

参 考 文 献 (References):.

- [1] Carcione J M, Herman G, ten Kroode F P E. Seismic Modeling[J]. *Geophysics*, 2002, 67(4): 1304~1325.
- [2] Alterman Z, Karal Jr F C. Propagation of elastic waves in layered media by finite-difference methods[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1968, 58: 367~398.
- [3] Alford R M, Kelly K R, Boore D M. Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation[J]. *Geophysics*, 1974, 39(4): 838~842.
- [4] Kelly K R, Ward R W, Treitel S, *et al.* Synthetic seismograms, a finite difference approach[J]. *Geophysics*, 1976, 41(1): 2~27.
- [5] Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method [J]. *Geophysics*, 1986, 51(4): 889~901.
- [6] Dablain M A. The application of high-order differencing to scalar wave equation[J]. *Geophysics*, 1986, 51(1): 54~66.
- [7] Bayliss A, Jordan K E, LeMesurier B J, Turkel E. A fourth-order accurate finite-difference scheme for the computation of elastic waves[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1986, 76: 1115~1132.
- [8] Levander A R. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms[J]. *Geophysics*, 1988, 53(11): 1425~1436.
- [9] 裴正林. 地震物理模型数据处理研究[博士后研究报告]. 北京, 石油大学, 2002.
Pei Zhenglin. Study on data processing of seismic physical simulation[Postdoctoral Research Report]. Beijing: Petroleum University, 2002.
- [10] 裴正林, 牟永光. 非均匀介质地震波传播交错网格高阶有限差分法模拟[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(6): 17~21.
Pei Zhenglin, Mu Yongguang. A staggered-grid high-order difference method for modeling seismic wave propagation in inhomogeneous[J]. *Journal of the University of Petroleum China*, 2003, 27(6): 17~21.
- [11] Graves R W. Simulating seismic wave propagation in 3-D elastic media using staggered-grid finite difference[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1996, 86: 1091~1106.
- [12] Carcione J M, Kosloff D, Kosloff R. Viscoacoustic wave propagation simulation in the earth[J]. *Geophysics*, 1988, 53(4): 769~777.
- [13] Tal-Ezer H, Carcione J M, Kosloff D. An accurate and effi-

- cient scheme for wave propagation in linear viscoelastic media[J]. *Geophysics*, 1990, 55 (8): 1366~1379.
- [14] Robertsson J O, Blanch J O, Symes W W. Viscoelastic finite-difference modeling[J]. *Geophysics*, 1994, 59 (9): 1444~1456.
- [15] Igel H, Mora P, Riollot B. Anisotropic wave propagation through finite-difference grids[J]. *Geophysics*, 1995, 60 (4): 1203~1216.
- [16] Dai N, Vafidis A, Kanasevich E R. Wave propagation in heterogeneous, porous media: A velocity-stress, finite-difference method[J]. *Geophysics*, 1995, 60 (2): 327~340.
- [17] Carcione J M, Quiroga-Goode G. Some aspects of the physics and numerical modeling of Biot compressional waves[J]. *J Comput Acous*, 1996, 3: 261~280.
- [18] Ozdenvar T, McMechan G. Algorithms for staggered-grid computations for poroelastic, elastic, acoustic, and scalar wave equation[J]. *Geophys Prosp*, 1997, 45: 403~420.
- [19] Carcione J M, Helle H B. Numerical solution of the poroviscoelastic wave equation on a staggered mesh[J]. *J Comput Phys*, 1999, 154: 520~527.
- [20] 何樵登, 张中杰, 编著. 横向各向同性介质中地震波及其数值模拟[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1996.
He Qiaodeng, Zhang Zhongjie, ed. Seismic wave and its numerical simulation in TI media(in Chinese)[M]. Changchun: Jilin University Publishing House, 1996.
- [21] 董良国, 马在田, 曹景忠, 等. 一阶弹性波方程交错网格高阶差分法[J]. *地球物理学报*, 2000, 43 (3): 411~419.
Dong Lianguo, Ma Zaitian, Cao Jingzhong, *et al.* A staggered-grid high-order difference method of one-order elastic wave equation[J]. *Chinese J Geophys(in Chinese)*, 2000, 43 (3): 411~419.
- [22] 裴正林. 三维各向异性介质中弹性波方程交错网格高阶有限差分法模拟[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 28 (5)(in press).
Pei Zhenglin. A staggered-grid high-order difference method for modeling seismic wave propagation in 3-D anisotropic media[J]. *Journal of the University of Petroleum China*, 2004, 28 (5)(in press).
- [23] Jastram C, Tessmer E. Elastic modeling on a grid with vertically varying spacing[J]. *Geophys Prosp*, 1994, 42: 357~370.
- [24] 张剑锋. 弹性波数值模拟的非规则网格差分法[J]. *地球物理学报(增刊)*, 1998, 41: 357~366.
Zhang Jianfeng. Non-orthogonal grid finite-difference method for numerical simulation of elastic wave propagation[J]. *Chinese J Geophys(in Chinese)*, 1998, 41(Suppl): 411~419.
- [25] Oprsals I, Zahradnik J. Elastic finite-difference method for irregular grids[J]. *Geophysics*, 1999, 64 (1): 240~250.
- [26] Pitarka A. 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1999, 89 (1): 54~68.
- [27] Nordstrom J, Carpenter M H. High-order finite difference methods, multidimensional linear problems and curvilinear coordinates[J]. *J Comput Phys*, 2001, 173: 149~174.
- [28] Hestholm S O, Ruud B O. 2D finite-difference elastic wave modeling including surface topography[J]. *Geophysical Prospecting*, 1994, 42: 371~390.
- [29] Tessmer E, Kosloff D. 3-D elastic modeling with surface tomography by Chebychev spectral method[J]. *Geophysics*, 1994, 59 (3): 464~473.
- [30] Robertsson J O. A numerical free-surface condition for elastic/viscoelastic finite-difference modeling in the presence of topography. *Geophysics*, 1996, 61 (11): 1921~1934.
- [31] 裴正林. 任意起伏地表弹性波方程交错网格高阶有限差分法数值模拟[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39 (6)(in press).
Pei Zhenglin. Numerical modeling of the staggered-grid high-order difference method for the elastic wave equation including arbitrary rugged topography[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2004, 39 (6)(in press).
- [32] Marfurt K J. Accuracy of finite-difference and finite-element modeling of the scalar and elastic wave equations[J]. *Geophysics*, 1984, 49 (3): 533~549.
- [33] Seron F J, Badal J, Sabadell F J. A numerical laboratory for simulation and visualization of seismic wavefields[J]. *Geophys Prosp*, 1996, 44: 603~642.
- [34] Padovani E, Priolo E, Seriani G. Low- and high-order finite element method: experience in seismic modeling[J]. *J Comp Acoust*, 1994, 2: 371~422.
- [35] Sarma G S, Mallick K, Gadhinglajkar V R. Nonreflecting boundary condition in finite-element formulation for an elastic wave equation[J]. *Geophysics*, 1998, 63 (4): 1006~1016.
- [36] 王尚旭. 双相介质中弹性波问题有限元数值解和 AVO 问题[博士学位论文]. 石油大学, 北京, 1990.
Wang Shangxu. Numerical solution of the finite element method for the elastic wave problem and AVO problem in dual-phase media[Ph. D thesis]. Beijing: Petroleum University, 1990.
- [37] 周辉, 徐世浙, 刘斌, 等. 各向异性介质中波动方程有限元模拟及其稳定性[J]. *地球物理学报*, 1997, 40 (6): 833~841.
Zhou Hui, Xu Shizhe, Liu Bin, *et al.* Finite element simulation for wave equation in anisotropic media[J]. *Chinese J Geophys(in Chinese)*, 1997, 40 (6): 833~841.
- [38] 杨顶辉. 孔隙各向异性介质中基于 BISQ 模型的弹性波传播理论及有限元方法[博士后研究报告]. 北京, 石油大学, 1998.
Yang Dinghui. Theory of propagation of elastic wave based on the BISQ model and finite element method in porous anisotropic media[Postdoctoral Research Report]. Beijing: Petroleum University, 1998.
- [39] Gazdag J. Modeling of the acoustic wave equation with transform methods[J]. *Geophysics*, 1981, 46 (6): 854~859.
- [40] Kosloff D D, Baysal E. Forward modeling by a Fourier method[J]. *Geophysics*, 1982, 47 (10): 1402~1412.
- [41] Fornberg B. The pseudospectral method: Comparisons with

- finite differences for the elastic wave equation[J]. *Geophysics*, 1987, 52(4):483~501.
- [42] Reshef M, Kosloff D, Edwards M, *et al.* Three-dimensional elastic modeling by the Fourier method[J]. *Geophysics*, 1988, 53(3): 611~624.
- [43] Pao Y H, Varatharajulu V. Huygens' principle radiation conditions and integral formulas for the scattering of elastic waves[J]. *J Acoust Soc Am*, 1976, 59:1361~1371.
- [44] Bouchon M. Diffraction of elastic waves by cracks or cavities using the discrete wavenumber method[J]. *J Acoust Soc Am*, 1987, 81:1671~1676.
- [45] 符力耘, 牟永光. 弹性波边界元法正演模拟[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(4):521~529.
- Fu Liyun, Mu Yongguang. Forward Simulation of the boundary element method for the elastic wave[J]. *Chinese J Geophys(in Chinese)*. 1994, 37(4):521~529.
- [46] “油储地球物理”项目办公室. 中国反射地震“陆相断陷模型”简介[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(5):725~728.
- Project Office of Research Geophysics. Reflective seismic simulation on the China terrestrial facies fault depression model[J]. *Chinese J Geophys (in Chinese)*. 2000, 43 (5): 725~728.

欢迎订阅

季 刊

《地球物理学进展》

2005 年每期定价 35 元

ISSN 1004-2903
CN 11-2982-P

全年 140 元

《地球物理学进展》1986 年创刊,由中国地球物理学会和中国科学院地质与地球物理研究所共同主办,是地球物理及相关学科的综合性和学术性期刊。国内外公开发刊。《地球物理学进展》是中国科技核心期刊,为《中文核心期刊要目总览》2004 版、《中国科技论文与引文数据库(CSTPC)》、《中国科学引文数据库核心库》等收录。本刊主要报道地球物理学及相关学科领域的最新研究成果和学科发展动态,探讨我国地球物理学学科的发展战略和发展趋势,主要刊载国内外未公开发表的有创新性或意义重大的研究论文和综述文章。为国民经济建设和学科发展服务。本刊面向国内外各种行业特别是能源、矿产、地质、工程、交通、军事从事地球物理及相关领域工作的科研、生产、管理等方面人士和高等院校广大师生。

订购办法主要有两种:

(1) 向天津全国非邮发报刊联合征订服务部订阅

地 址: 天津市大寺泉集北里别墅 17 号; 邮 编: 300385
电 话: 022-23973378, 23962479; 传 真: 022-23973378
E-mail: <http://www.LHZD.com>; E-mail: LHZD@public.tpt.tj.cn
户 名: 天津市河西区联合征订服务部
开 户 行: 工商银行天津市尖山分理处
银行帐号: 0302060509104619603

(2) 直接向本刊编辑部订阅(邮局汇款和单位电汇两种方式)

邮局汇款地址: 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部
电 话: 010-62007700; 010-62007909; 010-62007696
联 系 人: 刘少华, 肖台琴, 徐雅玲, 汪海英
E-mail: shliu@mail.igcas.ac.cn; xtq@mail.igcas.ac.cn; xyl@mail.igcas.ac.cn;
wanghy@mail.igcas.ac.cn; prog@mail.igcas.ac.cn;