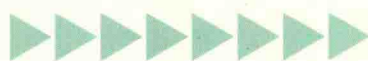


国家自然科

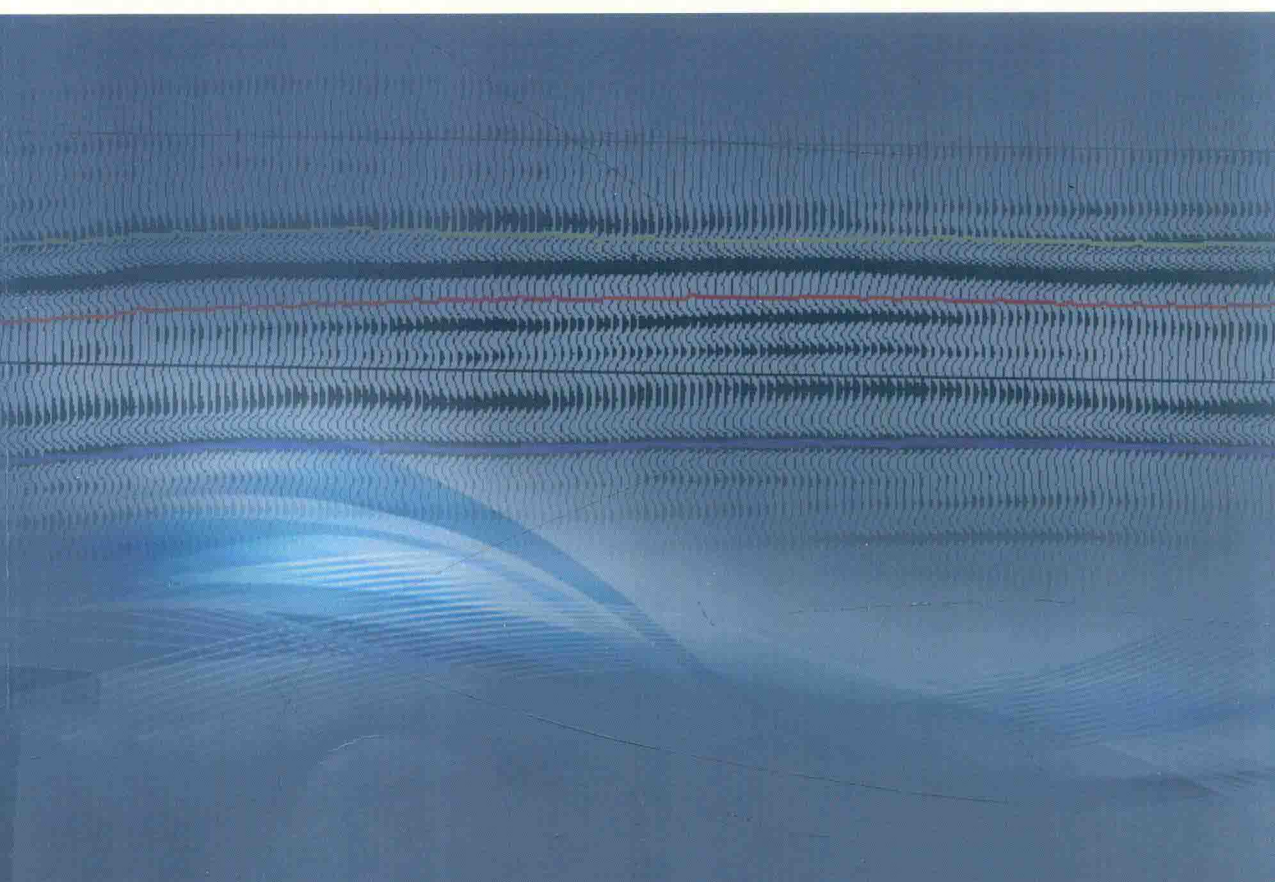
374126)资助

井间地震



高分辨率数值模拟方法 及波场特征研究

李桂花 林年添 杨思通 朱光明 王守进 谭凯 / 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

(40904009,41374126)资助

井间地震高分辨率数值模拟 方法及波场特征研究

李桂花 林年添 杨思通 著
朱光明 王守进 谭 凯

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了几种数值模拟方法,包括射线追踪法、时间—空间域交错网格高阶有线差分方法以及频率—空间域 25 点有限差分法等,并在此基础上通过对声波、弹性各向同性、弹性各向异性及黏弹性各向同性及黏弹性各向异性介质模型井间地震波场进行了模拟,对井间地震勘探中地震波传播规律及井间地震波场特征进行了分析研究。

本书可供地球探测与信息技术、地球物理学、勘查技术与工程等相关专业的技术人员以及大专院校相关专业的师生作为参考教学用书或科研参考书。

图书在版编目(CIP)数据

井间地震高分辨率数值模拟方法及波场特征研究 /
李桂花等著. — 徐州:中国矿业大学出版社,2017.5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3540 - 4

I. ①井… II. ①李… III. ①井间地震—高分辨率—
数值模拟—研究②井间地震—地震波场—研究 IV.
①P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 114068 号

书 名 井间地震高分辨率数值模拟方法及波场特征研究
著 者 李桂花 林年添 杨思通 朱光明 王守进 谭 凯
责任编辑 杨 洋
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 8.75 插页 10 字数 230 千字
版次/印次 2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书由国家自然科学基金委员会资助出版,基金项目编号为 40904009 和 41374126。

井间地震目前已经成为油藏综合地球物理的重要组成部分,井间地震由于其独特的观测系统,其地震波场十分丰富且非常复杂,所以利用数值模拟方法模拟生成井间地震的地震波场,是识别井间地震野外观测到的复杂波场,分析各种波的传播特征,为井间地震资料采集设计、处理、解释以及应用提供重要的保证,是发展井间地震技术的基础,具有重要的意义。

全书共分为 5 章,详细地论述了弹性各向同性、各向异性、黏弹介质情况下井间地震波场的数值模拟方法,包括基于射线理论的突变点加插值的射线追踪井间地震波场数值模拟方法,基于波动方程的弹性各向异性介质和黏弹性介质交错网格高阶有限差分数值模拟方法,弹性和黏弹性介质频率空间域 25 点有限差分井间地震波场数值模拟方法。第 1 章绪论,主要讲述开展井间地震高分辨率数值模拟方法及波场特征研究的目的、意义。第 2 章井间地震波场数值模拟的射线法,用改进的突变点加插值射线追踪方法,模拟井间地震观测的主要类型的波。以此为基础研究井间地震波场的特征,并结合简单模型的解析解,系统地总结了井间地震共炮点、共接收点、共偏移距、共中心深度点 4 种不同道集中主要类型波的时深关系。并在研究单层模型、多层模型、断层模型的井间地震波场的基础上,根据某地区的测井曲线建立地质模型,对比分析、识别、解释了野外实际观测的井间地震的波场。第 3 章井间地震波场数值模拟的时间—空间域交错网格高阶有限差分法,详细给出了 VTI 介质时间—空间域交错网格弹性波方程有限差分和时间—空间域交错网格黏弹性波动方程方程有限差分方法的差分系数和差分格式的公式推导,分析了 VTI 介质弹性波的波动特征,并通过建模以及对实际井间地震记录的正演模拟,对井间地震的波场特征作了详细分析。第 4 章井间地震波场模拟的频率—空间域 25 点优化差分方法,本章详

细介绍了准 P 波波动方程频率空间域有限差分数值模拟和加黏滞衰减系数的准 P 波波动方程频率空间域数值模拟解法,并根据特征分析方法与 Christoffel 方程推导准 P 波波动方程有限差分解法的吸收边界条件。第 5 章结束语。

本书是由李桂花主笔撰写,林年添和王守进撰写了第 3 章第 1 节,杨思通撰写了第 3 章第 5 节。朱光明教授对本书做了大量的指导和修改。在本书的成稿及数值模拟程序编写过程中得到了张文波高级工程师、吴国忱教授、冯建国博士的帮助,山东科技大学的研究生谭凯、马欣,王景琦等也帮忙作了图件及文字上的修改,笔者一并对他们表示深深的谢意。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏与不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 10 月

目 录	
1 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 研究内容	2
1.3 国内外研究现状与分析	2
1.4 研究方法和技术路线	4
1.5 研究目标	5
1.6 本书内容的特色与创新之处	6
2 井间地震波场数值模拟的射线法	8
2.1 射线法的基本理论	8
2.2 射线法模拟井间地震的波场	8
2.2.1 单层水平界面模型井间地震观测波场的模拟	8
2.2.2 多层水平介质模型井间地震观测波场的模拟	14
2.2.3 断层模型井间地震观测波场的模拟	16
2.2.4 野外实际介质井间地震观测波场的模拟	19
2.3 本章小结	22
3 井间地震波场模拟的时间—空间域交错网格高阶有限差分法	23
3.1 三维各向同性非均匀介质弹性波有限差分法数值模拟	23
3.1.1 三维弹性波应力—速度方程的推导	23
3.1.2 一阶应力—速度方程的离散差分格式	25
3.1.3 分格式的稳定性分析	29
3.1.4 人工边界吸收条件	32
3.1.5 自由界面边界条件	35
3.1.6 模拟震源	38
3.1.7 数值模拟算例	41
3.2 VTI 介质时间—空间域交错网格弹性波方程有限差分方法	44
3.2.1 一阶速度—应力 VTI 介质弹性波方程	44
3.2.2 一阶速度—应力 VTI 介质弹性波方程的差分格式	46
3.2.3 吸收边界条件	52
3.2.4 震源函数	62
3.2.5 VTI 介质弹性波的波动特征	63
3.2.6 基于测井和井间地震数据的异性建模方法	66

3.3	基于测井和井间地震数据的各向异性建模方法	66
3.4	井间地震的波场特征分析	67
3.4.1	理论模型分析井间地震的波场特征	67
3.4.2	大庆油田葡 33 井区实际井间地震记录的正演模拟	77
3.4.3	大庆油田杏 69 井区井间地震记录的正演模拟	80
3.5	时间—空间域交错网格黏弹性波动方程有限差分方法	86
3.5.1	黏弹性波动方程的高阶差分近似	86
3.5.2	黏弹性波动方程的高阶差分数值模拟	91
3.5.3	黏弹介质直达波衰减特征分析	96
3.6	本章小结	99
4	井间地震波场模拟的频率—空间域 25 点优化差分方法	101
4.1	弹性 VTI 介质频率空间域准 P 波波动差分方程	101
4.2	黏弹性 VTI 介质频率空间域准 P 波波动差分方程	110
4.3	VTI 介质准 P 波优化加权系数的确定	113
4.4	震源	116
4.5	边界条件	116
4.5.1	特征值分析法吸收边界条件基本原理	117
4.5.2	完全匹配层衰减边界条件	123
4.5.3	边界条件的吸收衰减效果	124
4.6	大型稀疏矩阵的压缩存储	127
4.7	井间地震的波场特征分析	127
4.8	本章小结	132
5	结论	134
5.1	井间地震数值模拟方法的研究成果	134
5.2	井间地震波场特征的研究成果	135
5.3	井间地震波场数值模拟软件的研究成果	135
	参考文献	137

1 绪 论

1.1 研究目的和意义

井间地震是将震源、检波器分别放置在相邻的两口井中,在目的层内部或目的层附近,一口井激发地震波,另一口井观测接收地震波,通过对所记录的地震波的走时、振幅和频率等信息的处理,结合测井、地质和地面地震等资料的综合分析,得到地下两井之间储层和地质体的精细构造形态和有关物性的空间分布的图像的一种新技术^[1]。井间地震与地面地震相比,其主要优点是:因为井间地震激发和接收都在地下,可以避开地表表层低速带对高频成分的吸收衰减,井间地震波传播的距离比地面地震波传播的距离短,使井间地震观测到的地震波的分辨率比地面地震分辨率高 1~2 个数量级,从而可以对比追踪小层,对井间小断层和小构造进行精细成像,并能较精细地提取属性^[2]。除此之外,井间地震可以方便地观测到多种类型的波^[3],几乎包含了地震技术的所有地震波类型,如直达波、管波、上行反射波、下行反射波、导波、转换波、绕射波和折射波,波场非常复杂。井间地震的复杂波场一方面能为我们提供丰富的信息,另一方面也给波场的识别和分离带来了困难;识别井间地震观测到的复杂波场,分析井间地震资料上各种主要波场的传播特征是井间地震资料采集设计、处理、解释以及井间地震资料利用的前提。

如何研究井间地震波场的传播规律呢?一般来说,研究地震波场有四种途径,即理论研究、物理模拟试验研究、数值模拟研究和野外实际观测研究。实际观测数据是研究的基础,理论方法是研究的本质,然而只有极少数的简单波场模型才可能求得解析解,绝大部分模型都没有解或求不出解^[4]。地震波数值模拟方法虽然得到的是解析解的一种近似,但对于大多数复杂的介质模型都可能求解,因此各种数值模拟方法的研究在地震波传播规律的研究中占非常重要的地位,并被普遍应用^[5]。多年来,地震波数值模拟方法已有很多学者进行了研究,研究的方法也有很多种,但是由于井间地震的波场具有与地面地震不同的特点,数值模拟方法也有不同的重点。例如,井间地震波场分辨率高,要求精细地模拟^[6];波场复杂,要求多波多分量观测和模拟,波场的各向异性明显,要考虑波场的各向异性^[7];为了更真实地模拟出符合实际资料的地震合成记录,还要求考虑非弹性衰减,考虑多孔介质情况下的波场等。因此,本项目重点是精细地研究各向异性、非弹性介质情况下井间地震波场的数值模拟方法。当然,各向异性、非弹性、孔隙流体这些实际介质中波的传播问题也是当前包括地面地震在内的地震波传播问题研究的热点。我们的研究对于更广泛的地震波问题同样也是适用的。所以,研究井间地震波的传播规律和波场变化特征,是发展井间地震技术的基础,具有重要的理论意义和实用价值。并且可以在深度域比较直接地查明各种波的生成、演化和发展的历史,以及它们之间的相互关系,从而方便地实现多波多分量调查,实现井下、地面的地质和地球物理的综合解释。

1.2 研究内容

本书研究的内容包括两方面:一是井间地震波场数值模拟方法的研究;二是井间地震波传播规律及波场特征的研究。

地震波场数值模拟的方法有很多种,本书主要研究适用于井间地震波场分析的一些主要的数值模拟方法,包括基于射线理论的突变点加插值带衰减的射线追踪井间地震波场数值模拟方法,基于波动方程的各向异性弹性介质和黏弹性介质交错网格高阶有限差分井间地震波场数值模拟方法和弹性和黏弹性介质频率空间域有限差分井间地震波场数值模拟方法。研究它们的原理、特点、实现方法、适用条件和模拟的结果。另外,要对模拟结果进行分析,即根据对数值模拟方法生成的波场的分析对实际井间地震波场特征进行研究,研究井间地震波场的空间分布和随时间变化的规律,包括波的运动学变化规律和动力学变化规律。

1.3 国内外研究现状及分析

国外井间地震的应用首先见于 Fesseden(1917)注册的专利,当时井间地震观测的目的是用于确定金属矿体在地下位置与分布范围。20 世纪 60 年代初期,美国为了检测盐丘的弹性,寻找和确定适合于原子弹爆炸的地点,进行了井间地震试验^[8]。70 年代,井间地震技术开始进入石油勘探领域,当时记录下的有效信息主要是初至波旅行时^[9]。在 80 年代,井间地震的实验研究形成了一个高潮,很多大学和石油公司竞相开展井间地震的试验和研究,但短期内井间地震未能收到成效,因此得出结论认为井间地震得不偿失,导致一些石油公司退出和停止井间地震的试验研究,形成研究的低潮。但是,井间地震在理论和方法方面潜在的优势以及井间地震可以得到极高分辨率数据的诱人前景,使人们不愿放弃这种新技术的研究。所以 80 年代后期至 90 年代,井间地震研究并没有停止,关键装备和方法技术仍然在发展^[10,11]。

同时,国内外学者对于井间地震波场的数值模拟方法已经做过不同层次和不同侧面的研究:E. Asakawa(1993)提出一种称为旅行时线性插值的初至波射线追踪方法,用于井间数据的层析成像(CT)^[3]。James W. Rector 等(1994)对于简单地层模型,用 Sierra Geophysics 的模拟软件 VESPA 计算了井间地震的合成记录,分析了井间地震共炮点道集,共检波点道集,共炮检距道集中的直达波、反射波和多次反射波的时距关系,但文中没有涉及横波和转换波的模拟^[4]。Mark van Schaack 等(1995)用三维波动方程对一维水平层状介质中传播的井间地震弹性波场的径向单分量记录作数值模拟^[5]。在一维水平层状介质中,三维偏微分方程简化为频率波数域的常微分方程,使计算变得简单容易。依据测井曲线建模正演模拟的结果识别出实际井间地震记录上多种类型的波。在这个简单模型中,只模拟了各向同性介质和单分量记录,没有考虑各向异性,没有模拟三分量记录的波场。杜光升(2000)用二维声波方程四阶有限差分格式和二阶的自动校正吸收边界条件,对井间地震波场进行了数值模拟^[6];孔庆丰(2006)利用声波方程建立井间波场数值模拟的计算公式,选取一对实际井的声波测井资料建立速度模型,进行井间数值模拟,研究上行、下行反射和直达波的时距特征^[7];何悝华(2003,2005)用射线模型和波动方程有限差分法生成的合成记录,

分析了井间地震中的横波信息,以及井间地震中反射波特别是广角反射的振幅特征^[8-9]。杜世通(2004)给出了用于井间地震数据模拟和偏移的有限单元波动方程数值解模型,提出了适用于该算法的吸收边界条件,得到了可靠的数值解^[10]。上述论文对于认识井间地震观测的波场有很大的意义,但论文大都重点研究声学介质和各向同性弹性介质中单分量观测的纵波,没有研究三分量观测的弹性波,也没有涉及各向异性介质中波的传播特征。

对于各向异性介质中波场传播规律的研究,一些学者已做出了重要的贡献。在国外,P. Mora(1989)、C. Tsings (1990)、H. Igel(1995) 等研究了有限差分方法各向异性介质地震波正演模拟^[11-13],D. Kosloff(1989)、S. P. Carcione 等(1992)研究了伪谱法各向异性介质地震波场正演^[14-15]。在国内,自 1985 年以来,何樵登及张中杰等,采用有限差分法、有限元法、傅立叶变换法等对各向异性波动的正演问题进行了研究^[16];牛滨华(1994,1995,1998)利用有限元方法研究了 EDA 介质中的地震波场、横波分裂现象和 P 波各向异性^[17-19],侯安宁等(1995)研究了正交对称和六方对称各向异性介质中弹性波动方程交错网格高阶差分在时间和空间上的差分精度,并导出了其稳定性条件^[20];张美根(2000)利用有限元方法对各向异性地震波正反演问题进行了研究^[21];董良国等(2000)详细讨论了一阶弹性波方程交错网格高阶差分的解法,并给出了两个弹性介质模型的算例,同时从理论上分析了三维横向各向同性介质中一阶弹性波方程交错网格高阶差分解法的稳定性^[22]。张文波(2005)利用交错网格高阶差分方程正演模拟了井间地震实际资料的双分量记录,解释了实际井间地震记录上观测到的快纵波和慢纵波,估计了沿垂直方向和水平方向速度的各向异性^[23]。上述论文表明,各向异性介质交错网格高阶有限差分方法提高了波场模拟的精度,对于波动方程有限差分模拟方法以及井间波场特征的研究无疑是很大的进展,但他们还没有讨论各向异性介质中三分量波场的模拟,没有对各向异性介质井间地震观测的三分量波场进行分析。

除时间空间域正演模拟各向异性介质中的波场外,一些学者还试验了频率空间域正演模拟地震波场的方法。频率—空间域有限元解法最初由 J. Lysmer 和 L. A. Drake(1972)提出^[24],之后该方法被 K. J. Marfurt(1984)发展^[25]。R. G. Pratt 和 M. H. Worthington 将频率域有限差分模拟应用于井间层析反演和地震成像^[26-27]。C. Shin(1996,1998)将频率域 9 点和 25 点有限差分应用到 2D 标量波的正演模拟中^[28-29]。吴国忱(2005,2006)将频率空间域有限差分模拟用于 VTI 介质^[30-31]。为了提高差分精度,空间差分采用 25 点优化差分算子,不但能提高空间导数的计算精度,而且能有效地抑制数值频散,使每个波长所要求的最少网格点数目由以前每个波长大约 15 个网格点减少到每个波长大约 5 个网格点。频率空间域有许多优点:特别是对黏弹性介质而言,频率—空间域正演模拟比时间—空间域更容易实现,而且在频率—空间域正演模拟时,其衰减系数可以是频率的函数,实现起来方便;另外,由于各个频率片之间是独立计算的,因此频率—空间域正演模拟特别适合于并行计算。

对于黏弹性介质和实际介质中的波,J. M. Carcione(1988,1992,1995)做了大量的研究,还有很多作者对黏弹性各向异性介质中地震观测的波场进行了数值模拟^[32-34],例如,I. Stekl 和 R. G. Pratt(1998)在频率域有限差分方法中利用旋转算子精确地模拟黏弹介质中井间地震波的传播^[44],因为方程转到频率域成为赫姆霍茨型的方程,使得与频率有关的衰减容易用复值弹性参数表示,从而使方程简化。黏弹介质模拟的结果与声学介质模型模拟的结果对比表明,用黏弹介质模型对井间地震记录波场的模拟,不仅模拟出 5 m 和 10 m 的高速层以及小的陡倾斜的断层,还能模拟出初至后面的强振幅同相轴,解释这些同相轴可能

是 P 波能量转换到 S 波形成的,声学介质模拟不出初至后面的强振幅同相轴。宋常瑜(2006)重点研究了各向同性介质中的均匀模型、含洞均匀背景模型和含洞层状模型井间地震波的黏滞衰减和散射衰减^[36]。结果表明,介质的黏弹性使得振幅明显衰减、波形和相位畸变,主频向低频偏移,有效频带变窄。洞的散射波同相轴为双曲型,同相轴的曲率大于直达波的曲率,洞的散射引起直达波振幅明显衰减。这些为井间地震波场在各向异性、黏弹、孔隙介质中传播特征的研究打下了基础。

井间地震波场分辨率高,比地面地震波场高 1~2 个数量级,因此要求用高分辨率和高精度的数值模拟方法来模拟井间地震的波场^[37];井间地震波场复杂,既有纵波又有横波和转换波,既有透射波又有反射波和首波,既有上行反射波,又有下行反射波,既有一次反射波,又有多次反射波,因此要求模拟三分量检波器观测的弹性波波场,模拟井间地震记录中出现的多种类型的波;井间地震中射线方向的变化范围很大,在沉积旋回型的薄互层地层中或有垂直裂缝的裂缝型地层中,井间地震的波场呈现出明显的各向异性,因此要求模拟各向异性介质中观测的地震波的传播规律;井间地震中,因为观测波场的精度高、分辨率高,以及我们希望井间地震观测的波场能用于提取属性参数,因而不能再简单地将井间的地层介质看成完全弹性的固体介质,而应把井间地层看成实际的非完全弹性介质(黏弹介质)和实际的多孔孔隙介质。

从上面的叙述可以看出,井间地震波场数值模拟需要进一步解决的几个方面:发展黏弹介质多炮多道快速井间地震数值模拟方法;高精度高分辨率地模拟复杂介质中井间地震观测的波场;模拟各向异性、黏弹、孔隙等实际介质中井间地震观测的波场;修改方程、改进算法、研究新工艺,减少数值模拟对计算机资源(内存等)的要求和提高数值模拟的效率。

1.4 研究方法和技术路线

本书研究工作的技术路线是:首先研究井间地震波场正演数值模拟方法,接着再根据模拟出的井间地震的波场,分析井间地震观测到的各种类型的波以及这些波的传播规律。

① 黏弹介质基于射线理论的突变点加插值射线追踪的井间地震波场数值模拟方法。

改进突变点加插值的射线追踪方法,使该方法适用于黏弹介质,模拟井间地震观测的主要类型的波,用这种模拟方法快速地模拟多炮激发、每炮多道接收的井间地震波场,模拟井间全空间传播的上行、下行、直达、反射、转换的 P、S、PS、SP 波,追踪各类波的射线路径,计算射线振幅和传播方向,并且按需要有控制地单个分析某个界面、某种类型波的射线路径,清楚可靠地分析这些波的生成过程和传播衰减规律。

在模拟井间地震观测的主要类型的波的基础上,研究井间地震波场的特征,结合简单模型的解析解,利用合成的记录选排为井间共炮点道集、共接收点道集、共偏移距道集和共中心深度点道集,系统地总结井间地震共炮点、共接收点、共偏移距、共中心深度点 4 种不同道集中主要类型波的时深关系,系统地分析不同道集内几种主要类型的地震波的传播特征。

在研究简单模型和复杂模型等井间地震波场的基础上,对野外观测的实际井间地震记录进行模拟,从复杂的井间地震记录中识别出井间地震实际观测到的不同类型的波场,为随后的井间地震资料处理和应用提供了依据,并对井间地震目前尚有不同看法的一些问题提出自己的观点。

② 基于波动方程的各向异性弹性介质和黏弹性介质交错网格高阶有限差分井间地震波场数值模拟方法。

在砂泥岩互层地区做井间地震观测,常遇到明显的地震波场的各向异性,这时必须用各向异性介质的模型来处理 and 解释井间地震观测的波场。井间地震是研究各向异性的一个很有利的手段,而井间地震的直达快横波和直达慢横波是研究 VTI 介质各向异性一个非常有用的信息。

研究交错网格高阶有限差分井间地震三分量数值模拟方法。在前人二维双分量(X 和 Z 分量)数值模拟工作基础上,推导 Y 分量的交错网格高阶差分方程、边界条件和数值解法,从而将原来的 2D 波场数值模拟发展为 2.5 维波动方程数值模拟,真正实现各向异性介质中三分量观测的井间地震波场的数值模拟,可与实际采集的三分量记录作对比。只有在包括 Y 分量的二维三分量波场上才能更清楚地识别快纵波、慢纵波、快横波和慢横波,分析各类波的走时、传播速度和偏振特性,完善了井间地震波场的交错网格高阶有限差分数值模拟方法。

③ 基于波动理论的弹性和黏弹性介质频率空间域准 P 波有限差分井间地震波场数值模拟方法。

井间地震记录中横波的能量很强,严重干扰甚至掩盖了纵波的信息,为了更好地认识井间地震纵波波场,需要作仅存在 qP 波的各向异性介质的波场的模拟。频率域正演模拟方法被证明相对于时间域算法更易于求解,这是因为对于弹性或黏弹性波动方程来说,时间域处理需要进行卷积处理,这样会大大加大计算的复杂度,而频率域是乘因子,相对简单,更为重要的是,时间域算法的误差会逐渐累积,导致计算精度降低。在前人研究的频率空间域各向异性准 P 波波场数值模拟方法的基础上,详细推导频率空间域准 P 波波动方程及其频率空间域有限差分数值模拟中的算法公式,给出黏弹各向异性介质中的频率空间域准 P 波波动方程及其频率空间域有限差分数值模拟中的算法公式,研发弹性、黏弹性 VTI 介质中准 P 波的频率空间域数值模拟软件,将其应用于井间地震正演模拟,从而能更接近井间实际地模拟各向同性、各向异性准 P 波的波场。该方法中解决大型稀疏带状矩阵的解法以解决存储空间不够和计算时间过长的问题是该方法的关键问题。利用分块存储非零的带状矩阵,来压缩存储解决存储空间不足的问题。

1.5 研究目标

① 将突变点加插值射线追踪方法引入井间地震波场的数值模拟,使其能模拟弹性不均匀介质中井间地震观测的直达纵波、直达横波、上行反射纵波、上行反射横波、下行反射纵波、下行反射横波、P—S 转换波、S—P 转换波,还能模拟井间地震观测到的主要干扰波——井筒波;使其能多炮(几百炮)多道(几万道)连续追踪多炮激发每炮多道接收的波场;追踪各类波的射线路径,计算波沿射线的旅行时,计算射线振幅和射线出射角;同时发展配套的射线追踪软件,包括建模和绘图。

② 完善井间地震数值模拟的交错网格高阶有限差分数值模拟方法,其中理论方法的研究包括各向异性介质中传播的波动方程、交错网格高阶有限差分格式、吸收边界条件、震源函数等。软件研制包括井间地震交错网格高阶有限差分正演模拟软件和配套的各向异性介

质建模及波前快照和波场记录显示软件。

③ 将频率空间域有限差分正演模拟算法引入井间地震正演模拟。在实现中改进大型稀疏带状矩阵的解法,减少要求的存储空间,使其能在高档微机上实现。将衰减加入到各向异性黏弹介质频率空间域有限差分波动方程中,实现各向异性黏弹介质频率空间域有限差分井间地震波场的数值模拟。

④ 在射线追踪模拟多炮多道井间地震波场的基础上,在选排的共炮点道集、共接收点道集、共偏移距道集和共深度中心点道集中,系统地分析和总结 4 种道集中几种主要类型的波的时距关系,几种主要类型波的运动学特征。分析直达波记录和反射波记录,比较水平分量记录和垂直分量的记录,对层析成像和反射成像的效果,以及对诸如 45 度“牛角尖”等问题提出评价意见。

⑤ 分析交错网格高阶有限差分数值模拟方法在水平层状介质构成的横向各向同性介质中模拟的三分量记录,总结 VTI 介质井间地震记录上观测到的快纵波、慢纵波、快横波和慢横波的传播规律。分析各向异性系数与波场传播特征之间的关系。除水平层状介质外,还要对几种典型的地层结构作数值模拟,分析井间地震波场的运动学和动力学特征。

⑥ 利用频率空间域模拟方法模拟井间地震观测的几个模型,包括倾斜地层、弯曲界面地层、断层等,比较加衰减和不加衰减的模拟结果,分析加衰减和不加衰减地震波场各自的特点。

1.6 本书内容的特色与创新之处

(1) 本书内容的特色

针对井间地震高分辨率的特点,研究高精度高分辨率的各项异性介质的井间地震数值模拟方法,这些方法不仅适用井间地震的数值模拟而且也适用于一般的地面地震的数值模拟,是研究地震波传播理论的有效途径,通过模拟井间地震的记录与实际井间地震采集获得的地震三分量记录对比可以分析和识别井间地震复杂波场中的各种波,为波场分离和成像打好基础。

(2) 本书内容的创新之处

本项目主要有以下创新点:

① 将突变点加插值的射线追踪方法修改为适用于黏弹介质,使之更接近实际介质,模拟的井间地震记录更接近实际的井间地震记录,这样在多域分析井间地震的波场就更精确。

② 在交错网格高阶有限差分数值模拟方法中,推到了弹性和黏弹性介质的波动方程及差分格式和吸收衰减边界条件,研发相应的正演模拟软件,实现了弹性介质和黏弹性介质交错网格高阶有限差分二维三分量波场的数值模拟。

③ 研究各向同性介质和黏弹各向异性介质井间地震波场数值模拟的建模方法,充分利用测井资料和井间地震数据,由测井资料或 VSP 数据可以获得垂向速度 $v_p(0)$,从井间地震共炮点道集上快纵波、快横波和慢横波从震源点处到达同深度检波点的旅行时可以获得横向速度 $v_p(\pi/2)$, $v_s(0)$, $v_s(\pi/2)$,从而可以求出各向异性弹性系数 C_{11} , C_{13} , C_{33} , C_{44} , C_{66} ,用该建模方法建立的地质模型进行数值模拟,可以获得与实际记录波场在运动学和动力学特征方面都相当一致的三分量模拟合成记录。

④ 推导了黏弹各向异性介质中的频率空间域准 P 波波动方程及其频率空间域有限差分数值模拟中的算法公式,研发弹性、黏弹性 VTI 介质中准 P 波的频率空间域数值模拟软件,将其应用于井间地震波场正演模拟,从而能更接近井间实际地模拟各向同性、各向异性准 P 波的波场。

⑤ 在频率空间域有限差分数值模拟方法中,将大型稀疏矩阵的解法引入到每个频率片的波场求解中,并对大型稀疏矩阵的求解进一步作了改进,使解方程必需的内存数由原来的 $N_x^2 \cdot N_z^2$ 减少到 $(6N_z + 7)N_x$,其中 N_x 是 X 方向的网格点数, N_z 是 Z 方向的网格点数。这就使频率空间域有限差分数值模拟方法能够在高档微机上实现。另外,在节省内存空间的同时,运算时间也缩短了大致相同的倍数。

⑥ 利用不同的数值模拟方法,获得不同的模拟结果,并与实际井间地震记录结合,系统地分析不同道集、不同介质条件下井间地震波场的各种波的类型、各种波在介质中的传播特点及其在井间地震记录上的波场特征。

2 井间地震波场数值模拟的射线法

地震波场数值模拟方法有两大类^[30]：一类是以不均匀介质波动方程取高频近似为基础的射线方法；另一类是波动方程数值解方法。本章主要研究的是井间地震模拟的射线追踪方法。

2.1 射线法的基本理论

在本项目中研究了采用突变点加插值的射线追踪方法，对井间地震观测的波场作正演模拟。这种方法克服了射线追踪计算量大、耗时太长的缺点。其特点是：不用单条射线一次一次地试射打靶反复调整，而用多条射线成组地同时发射，多条射线成组地同时调整，调整的方法是对突变点（追踪不到射线的点）之间能够追踪的多条射线进行成组非线性插值，使多条射线在容许的误差范围内同时到达目标。这种射线追踪方法适用于界面任意起伏和容许有断层的复杂介质模型，也适用于既考虑纵波也考虑横波的弹性介质模型。震源可以在任意深度，因此可以追踪震源上方地层的下行反射，也可以追踪震源下方的上行反射。由射线码控制要追踪的射线类型，如直达 P 波、直达 S 波、反射 P 波、反射 S 波、PS 转换波、SP 转换波以及井筒波。在射线追踪过程中，除追踪震源点到接收点的射线路径外，还能同时考虑球面扩散，反射和透射损失，射线到达接收点的方向，计算射线振幅和相位。在计算走时和射线振幅后，通过选择子波的类型和频率可以按褶积模型生成不同的合成地震记录^[31-32,42]。

2.2 射线法模拟井间地震的波场

井间地震观测到的波场十分丰富，这是井间地震的优点，也是井间地震的难点。识别井间地震记录复杂波场中各种类型的波以及这些类型波的传播特点，是井间地震资料分析和处理的基础，也是井间地震资料解释和应用的依据^[32]。利用射线法可以单独生成直达 P 波、直达 S 波、反射 P 波、反射 S 波、PS 转换波、SP 转换波以及井筒波，可以清晰地分析出各种波在不同情况下的特征。

2.2.1 单层水平界面模型井间地震观测波场的模拟

2.2.1.1 共炮点道集中单层水平界面模型的波场

图 2-1 为一个单层水平界面模型，界面深度 $r=100\text{ m}$ ，界面上下两层的纵波速度、横波速度和密度分别为 $V_{p1}=4\,573\text{ m/s}$ ， $V_{s1}=2\,641\text{ m/s}$ ， $\rho_1=2.54\text{ g/cm}^3$ ， $V_{p2}=6\,100\text{ m/s}$ ， $V_{s2}=3\,522\text{ m/s}$ ， $\rho_2=2.74\text{ g/cm}^3$ 。井间地震的观测系统为：第一个震源点的深度

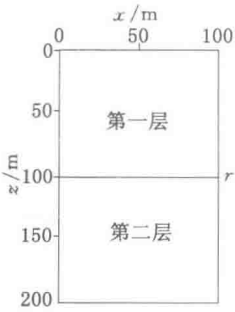


图 2-1 单层介质模型

$s_1=0$ m, 震源点深度间隔 $d_s=1$ m, 总震源点数 $n_s=200$ 个点, 第一个接收点深度 $g_1=0$ m, 接收点间隔 $d_g=1$ m, 总接收点数 $n_g=200$ 个点。用突变点加插值射线追踪方法, 作多炮多道射线追踪, 制作多炮多道的井间地震合成记录。图 2-2 和图 2-3 分别为炮点在单层界面上方($s=50$ m, $r=100$ m)和下方($s=150$ m, $r=100$ m)的 P 波(a)和 S 波(b)的直达波、反射波、转换波的射线路径(左)、水平分量合成记录(中)和垂直分量合成记录(右)。

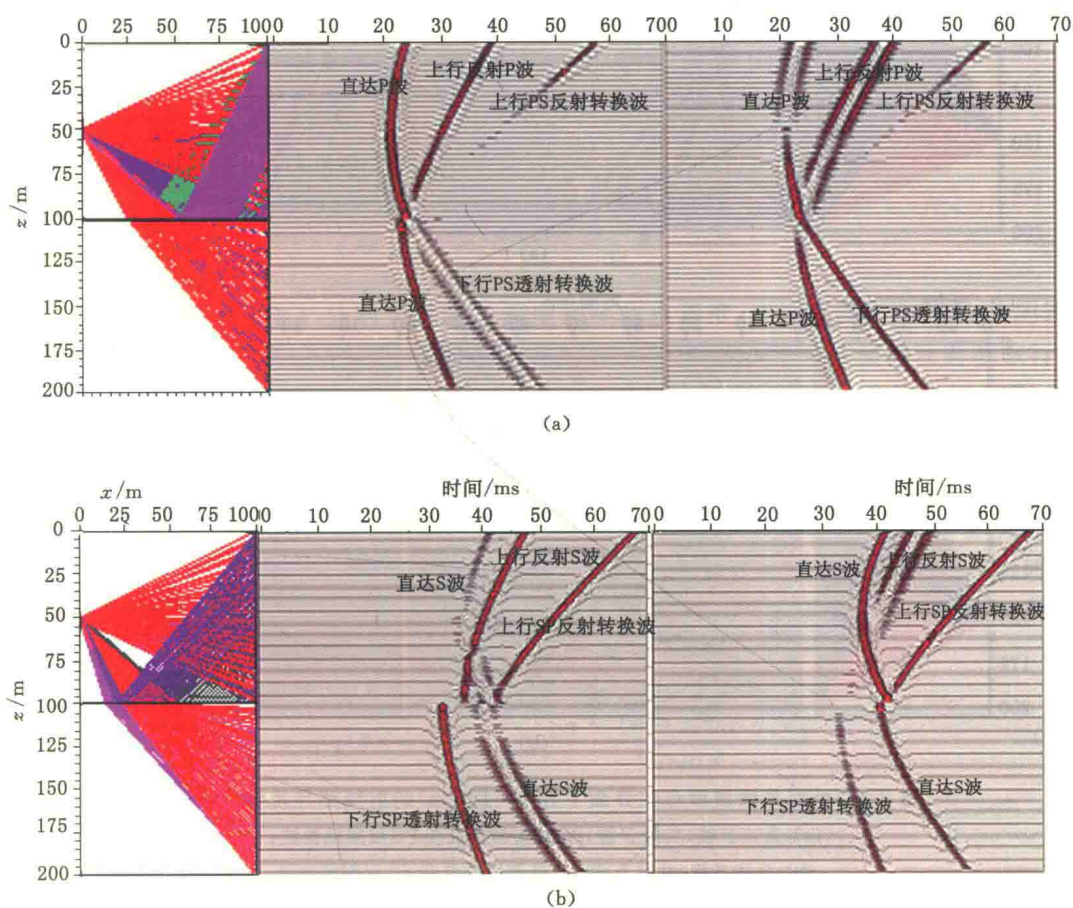


图 2-2 单层界面震源点在界面上方($s=50$ m)时的射线路径及合成记录

(a) 直达 P 波, 反射 P 波, PS 透射转换波和 PS 反射转换波;

(b) 直达 S 波, 反射 S 波, SP 透射转换波和 SP 反射转换波

(左为射线路径, 中为合成记录水平分量, 右为合成记录垂直分量)

从图 2-2 和图 2-3 可以结合旅行时计算公式分析井间地震共炮点道集中观测到的几种类型的波的传播特点:

(1) 直达纵波和直达横波

当震源点 s 与接收点 g 同在第一层时(图 2-4), 直达波的旅行时为^[52]:

$$t = \frac{\sqrt{(g-s)^2 + d^2}}{V} \quad (2-2)$$

式中, s 为震源点深度; g 为接收点深度; d 为震源井和接收井井距。

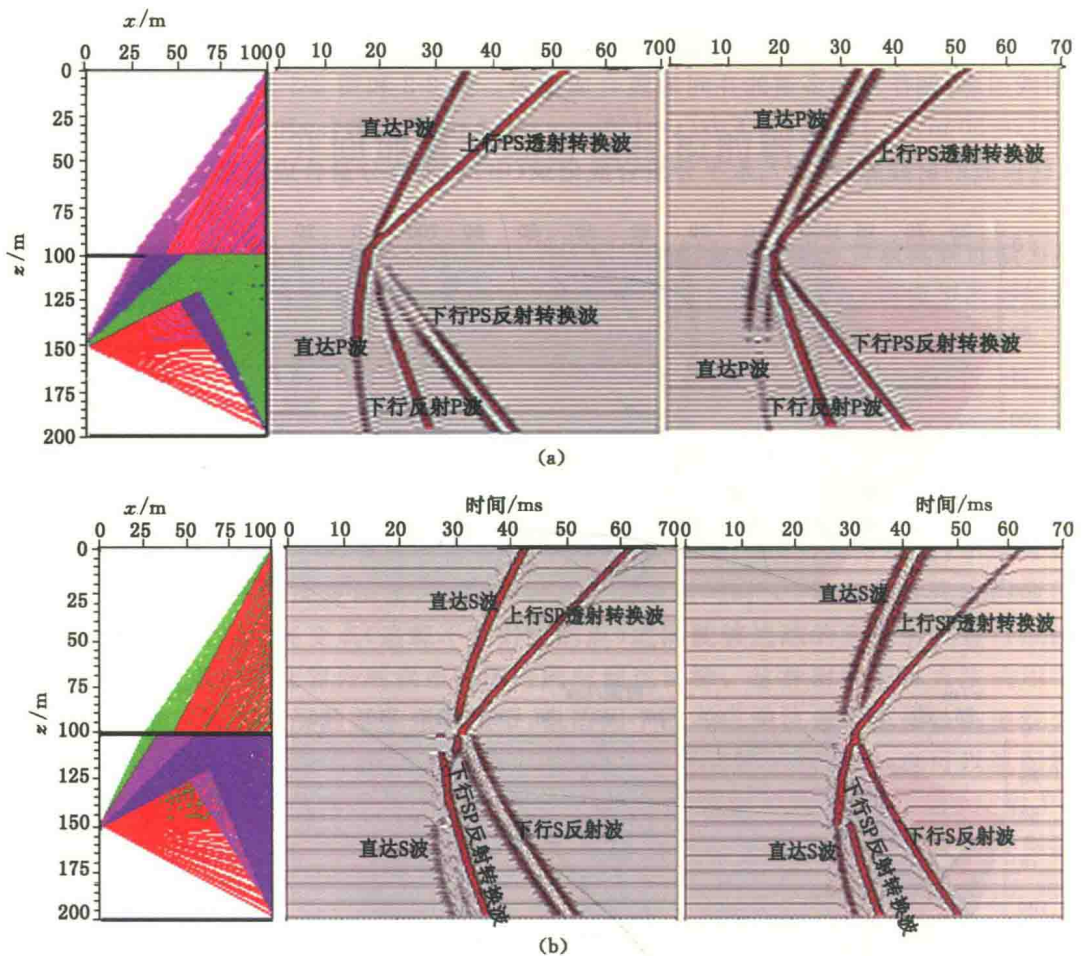


图 2-3 单层界面震源点在界面下方($s=150$ m)的射线路径及合成记录

(a) 直达 P 波, 反射 P 波, PS 透射转换波和 PS 反射转换波;

(b) 直达 S 波, 反射 S 波, SP 透射转换波和 SP 反射转换波

(左为射线路径, 中为合成记录水平分量, 右为合成记录垂直分量)

当震源点在第一层内且接收点也在第一层内时, V 对于纵波为 V_{p1} , 对于横波为 V_{s1} , 这时直达波时深曲线 $t=t(g)$ 为双曲线, 其顶点深度大致与震源点深度一致, 双曲线的开口随波速 V 的值增大(或减小)而增大(或减小)。例如纵波波速大于横波波速, 所以纵波同相轴的时深双曲线开口程度大于横波同相轴的开口程度。直达 P 波的垂直分量和直达 S 波的水平分量在震源上下两边极性都是翻转的。

当震源点在第一层内而接收点在第二层内时(图 2-4), 射线透过分界面, 成为透射的直达波或透射的转换波, 其时深关系式要用参数方程来表示^[53]:

$$\begin{cases} t = t(\theta) = \frac{r-s}{V_1 \cos \theta} + \frac{[d - (r-s)\tan \theta]V_1}{V_2^2 \sin \theta} \\ g = g(\theta) = r + \frac{d - (r-s)\tan \theta}{V_2 \sin \theta} \sqrt{V_1^2 - V_2^2 \sin^2 \theta} \end{cases} \quad (2-3a)$$

$$\begin{cases} t = t(\theta) = \frac{r-s}{V_1 \cos \theta} + \frac{[d - (r-s)\tan \theta]V_1}{V_2^2 \sin \theta} \\ g = g(\theta) = r + \frac{d - (r-s)\tan \theta}{V_2 \sin \theta} \sqrt{V_1^2 - V_2^2 \sin^2 \theta} \end{cases} \quad (2-3b)$$