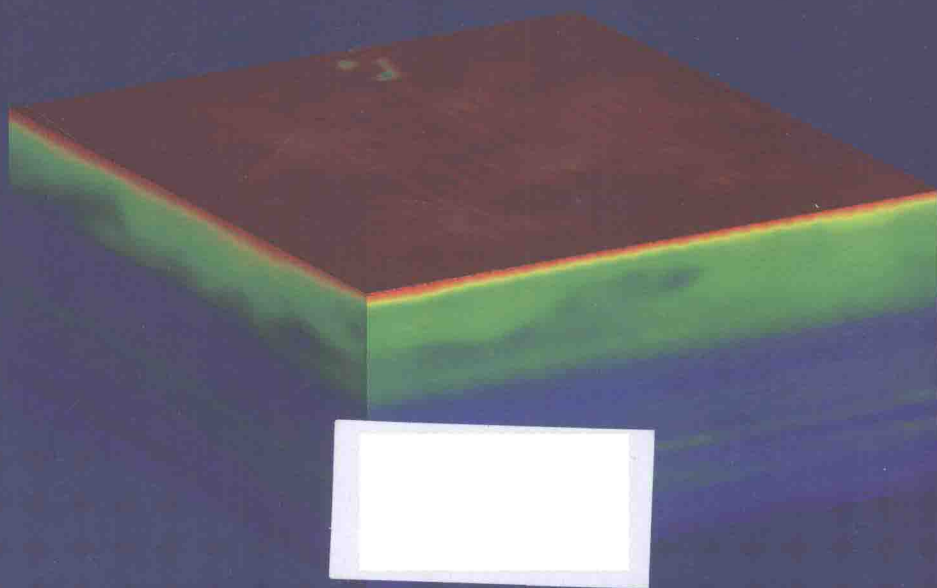


Full Waveform Inversion Method and Application

全波形反演

方法及应用

© 胡光辉 王立歆 方伍宝 等编著



石油工业出版社

全波形反演方法及应用

胡光辉 王立歆 方伍宝 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是一本关于全波形反演技术方法、原理和应用情况的专业图书。详细介绍了地震波传播的正演模拟方法、边界吸收条件,以及时间域、频率域波场值的精度对比;深入剖析了混合域全波形反演算法,详细阐述了基于二阶声波波动方程和一阶伪保守形式的伴随状态法的梯度求取方法,以及基于震源并行和区域分解并行的双并行策略和频率域多尺度反演算法;最后通过实例分别介绍了海上和陆地地震勘探资料的应用效果。

本书可供从事地球物理方法研究的科技人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

全波形反演方法及应用/胡光辉等编著.

北京:石油工业出版社,2014. 11

ISBN 978 - 7 - 5183 - 0415 - 8

- I. 全…
- II. 胡…
- III. 地震波传播 - 研究
- IV. P315. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 226045 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:<http://www.petropub.com>

编辑部:(010)64253533 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:14.25 插页:4

字数:380 千字

定价:68.00 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

目前,随着国内外勘探开发程度的不断深入,对高精度成像、精确的地震反演和储层描述等技术提出了更高的要求。全波形反演(full wave inversion, FWI)理论能够充分利用叠前地震资料中的运动学和动力学信息,具有揭示复杂地质背景下构造细节和岩性参数的能力。因此,该理论作为地球物理勘探领域一个新的研究热点,近年来得到了快速的发展。

地震全波形反演的研究领域触及地震波场模拟、目标泛函设置、梯度估计、并行策略等多方面的内容。随着计算机技术的发展和一些优化算法的提出,这一技术目前在海上勘探中已逐渐走向实用化,被证明为一种建立高精度速度模型的有效手段。

但是,受制于震源子波稳定性差、低频信息缺失、偏移距较小,以及信噪比低、预处理影响等各种复杂因素,全波形反演技术在陆地地震勘探资料的应用还存在很大挑战,目前还没有很成功的应用实例。

国内很多有潜力的油气富集区——如山前带,不但地表地质条件复杂,而且地下构造也复杂。面对复杂的勘探目标,如何提高反演精度,特别是近地表速度模型的建立精度,得到高精度的成像结果,进而获取定量的储层表征参数,是当前勘探的主要目标。

中国石化石油物探技术研究院一直高度重视新技术、新方法的追踪和研究。近年来,加大了对全波形反演技术的攻关研究,在陆上实际资料应用中取得了可喜的进展。这主要得益于本书主要作者胡光辉博士及其团队所付出的努力和贡献。

胡光辉于2012年毕业于法国约瑟夫傅里叶大学,获得地球物理专业博士学位。在读博士期间,作为主要成员,参与了国际知名地球物理小组 SEISCOPE 的3D全声波形反演的方法、算法研究及大型反演算法程序 GeoInv3D 的研发,掌握了目前国际上最先进的全波形反演理论。回国后,带领科研团队,开展了针对陆地资料的全波形反演应用技术研究,在陆地资料的全波形反演探索上迈出了可喜的一步。

本书既是对全波形理论方法的全面论述,也是一次将理论方法应用于陆地实际资料的探索和尝试。国内对全波形反演的研究起步较晚,技术水平较国外还有一定的差距。希望该书的出版,能够对国内全波形反演的研究与应用,起到一定的推动作用。

借此,也希望国内的地球物理工作者共同努力,集思广益,解决陆地资料全波形反演难题,不断推动中国油气勘探技术的发展!



2014. 10. 21

前 言

全波形反演理论和技术以其高精度、多参数建模的能力,吸引了越来越多的勘探地球物理学家的目光,已成为当前勘探地球物理领域的研究热点。它利用叠前地震波场中的运动学和动力学信息,具有揭示复杂地质背景下构造细节及岩性的潜在能力。但是,数学上它是一个高度病态的非线性问题,需要解决它的多解性及收敛性问题。从地球物理的角度,它涉及模型的参数化、目标泛函的建立、数据预处理、波场的数值模拟、子波的估计等研究内容。某种程度上,全波形反演理论和技术是勘探地球物理领域的一项终极技术。

尽管在 20 世纪 80 年代以 Tarantola 为代表的地球物理学家已经全面地阐述了全波形反演的理论,但其实用化至今还受到很大限制。可喜的是近年来在海上实际资料应用方面已取得不错的进展,以挪威北海油田为代表的经典案例相继出现,为全波形反演的实用化带来了曙光。但陆地地震勘探资料方面的应用受观测系统限制、子波空变、近地表复杂等因素影响,其实用化进程还受到很大制约。本书从陆地地震勘探资料实用化的角度出发,分正演、反演和实际地震勘探资料应用三个部分全面阐述了全波形反演的原理、算法和应用前景。

正演是反演的基础。正演的精度决定反演的精度。多尺度全波形反演的每一次迭代对每一个震源来讲都需要多次的正演过程。因此,正演的效率决定了反演算法是否可行。计算效率问题也是长期以来制约全波形反演实用化的主要瓶颈。随着计算机的发展和优化算法的提出,全波形反演实用化成为可能。本部分内容从实际应用的角度出发,详细讨论了正演问题的解法,对目前工业界广泛应用的有限差分进行了详细阐述。根据混合域反演算法需求,对时间域正演解的精度与频率域解的精度通过不同的模型进行了详细对比,以保证混合域算法的精度。

全波形反演是一个“病态的”强非线性问题,是一个典型的不适定问题,包括解的存在性、唯一性和稳定性问题。在全波形反演过程中,解的存在性是有物理保证的,主要问题是解的不唯一性和计算过程中的不稳定性。从全波形反演数据域拟合来看,其解的不唯一性本质上是由数据空间向模型空间映射的非线性引起的。更进一步地说,是由模型参数变化的复杂性和描述波场及参数场的正演算子决定的。解的不唯一性只能减弱不能消除。减弱反演解的不唯一性的关键是减弱数据空间向模型空间映射的非线性,以及增加反演解的先验信息。本书反演部分首先介绍了基于射线理论的初始模型建模方法。详细介绍了反问题的解法,针对全波形反演,介绍了伴随状态法,从程序设计和计算的角度推导了基于伪保守正演算子的共轭梯度法求取梯度,并通过有限差分对该方法求取的梯度予以验证;分析了牛顿、高斯牛顿迭代方法;对全波形反演精度,Hessian 矩阵照明补偿、先验信息引入等方面的技术进行了详细分析;阐述了为解决海量计算问题的并行策略;最后给出了全波形反演混合域的算法分析,并通过复杂地质模型进行验证。

实际资料应用一直是全波形反演的难点。第三部分首先通过一个海洋资料的应用实例分析了全波形反演的建模能力。其次,根据陆上地震勘探资料的特点及其应用瓶颈,详细介绍了

初始模型建模方法和针对性的预处理手段。传统资料缺少全波形反演要求的低频信息,因此,本书采用了综合建立初始模型的方法以完成初始模型与最低反演频率的耦合。全波形反演引入波场的动力学特征,而常规的预处理手段往往对波形信息造成污染,这就对地震勘探资料的处理提出了更高要求。但绝对的保真处理是难以做到的,本书实际资料应用过程中尽可能少地对资料进行预处理。对预处理流程做到相对保真处理,即在处理过程开发了不破坏相邻地震道振幅关系的方法和技术。最后通过中国石化某探区资料的全波形反演处理,详细分析了全波形反演的结果。

本书理论联系实际地将国际前沿的新方法、新技术应用于油气勘探的一线工作,并在解决问题的同时,形成了一套先进的技术方法,在实际生产中得到了良好的应用。

本书由胡光辉负责组织编写。前言由胡光辉执笔;绪论由王立歆执笔;第一部分由王杰、王立歆、胡光辉负责编写;第二部分由胡光辉、方伍宝、倪瑶、段心标负责编写;第三部分由胡光辉、王立歆、贾春梅负责编写;后记由方伍宝执笔。全书由王立歆、方伍宝负责修改、校对和统稿。

本书涉及的研究内容得到了中国石化石油物探技术研究院、法国科学院 SEISCOPE 组、同济大学波现象与反演成像研究组(WPI)等单位的专家学者的支持,笔者与他们进行了有益的讨论。本书的编写也得到了中国石化石油物探技术研究院的各级领导和专家的支持与帮助。特别感谢中国石化石油物探技术研究院杨勤勇副院长、王世星副总工程师对本书编写的支持。在本书正式出版之际,谨向他们表示衷心的感谢!

本书部分成果得益于胡光辉博士在法国科学院 SEISCOPE 的工作,特此感谢法国科学院 SEISCOPE 组的专家学者(Virieux Jean, Operto Stephane, Etieen Vincent, Brossier Romain, Ribodetti Alessandra, Dietrich Michel)对本专著的指导和有益讨论。

笔者感谢中国石化“面向目标层的全波形反演技术应用研究”和“复杂区近地表早至波全波形反演建模技术研究”项目组的支持。感谢项目组成员唐金良、孙晶梅、尹力、王振宇等同事的工作。感谢中国石化石油物探技术研究院地球物理成像所的同事在本专著成书过程中的帮助。感谢中国石化石油物探技术研究院及其地球物理成像所的领导对本专著工作的信任和支持。

特别感谢中国石化石油物探技术研究院曲寿利院长在本书编写过程中的指导和在百忙之中为本书写序。

由于笔者水平所限,书中一定存在诸多不妥之处,恳请广大读者批评指正。

目 录

绪论	(1)
----------	-----

第一部分 正 演

1 波场传播理论	(9)
1.1 各向同性介质中的一阶和二阶声波方程	(9)
1.2 伪保守形式的波动方程	(12)
2 声波方程的时间域有限差分法	(16)
2.1 声波方程的时间域离散	(17)
2.2 自由边界条件	(23)
2.3 最佳匹配层吸收边界条件	(23)
2.4 频散关系	(40)
2.5 数值稳定性	(46)
2.6 震源函数及震源设置	(56)
2.7 基于 MPI 的区域分解并行设计	(64)
3 声波方程的频率域有限差分法	(67)
3.1 二阶声波方程的频率域离散	(69)
3.2 频率域声波方程的解法	(76)
4 时间域、频率域单频波场精度对比	(81)
4.1 基于时间域正演的单频波场提取	(81)
4.2 单频波场精度对比	(84)

第二部分 反 演

5 基于射线理论的初始模型建立方法	(96)
5.1 射线理论	(98)
5.2 立体层析反演方法	(109)
6 全波形反演方法原理	(137)
6.1 地震反演理论	(137)
6.2 反演问题的求解	(140)
6.3 梯度导引类全波形反演计算	(142)
6.4 Hessian 矩阵	(152)
6.5 高效的并行策略	(154)

6.6	震源估计	(156)
6.7	频率选择策略	(158)
6.8	正则化	(159)
6.9	多尺度全波形反演	(160)
6.10	混合域全波形反演算法	(162)
7	EAGE/SEG 模型验证	(164)
7.1	模型简介	(164)
7.2	全波形反演参数设置	(164)
7.3	全波形反演的结果	(165)

第三部分 实际地震勘探资料应用

8	海上地震勘探资料应用	(175)
9	陆地地震勘探资料应用	(178)
9.1	工区地质情况简介	(178)
9.2	初始模型	(179)
9.3	地震资料预处理	(181)
9.4	地震反演策略及结果分析	(190)
	后记	(198)
	参考文献	(200)
附录 A	预备知识	(208)
A.1	若干约定	(208)
A.2	克罗内克(Kronecker)符号	(209)
A.3	置换符号	(210)
A.4	张量的定义和代数运算	(211)
A.5	张量分析	(212)
A.6	傅里叶变换	(214)
附录 B	立体层析 Fréchet 导数的计算	(215)
B.1	引言	(215)
B.2	立体层析的 Fréchet 导数公式推导	(215)
B.3	NIP 波层析的 Fréchet 导数的求取	(217)
附录 C	矩阵的奇异值分解	(219)
C.1	SVD 定义	(219)
C.2	SVD 性质	(219)

绪 论

(1) 地震反演思想。

地球物理勘探是一种通过数理手段提取地球物理数据中包含的地质信息,从而获知地下介质参数的分布状态及性质的数理方法。该方法主要包含三个要素:地下介质参数、地球物理数据,以及建立二者之间联系。对于不同的地球物理勘探方法,其获取的地球物理数据有所不同,对应的理论基础及方法技术也有相应的改变,因此能够获取的地下介质参数也不尽相同。重力勘探基于万有引力定律,利用观测到的重力异常获取地下介质的密度参数;电法勘探基于电磁场理论,利用观测到的电场、磁场等数据获取地下介质的电阻率、磁导率、介电常数等地磁学参数的性质;地震勘探基于地震波动力学理论,利用观测到的压力场、位移场等数据获取地下介质的密度、速度、衰减因子等弹性介质参数。地震勘探技术是地球物理勘探中发展最快的一项技术,它与其他地球物理勘探方法相比,具有精度高,探测深度大,分层详细等优点。地震勘探技术经过近一个世纪的发展,经历了从模拟阶段到数字时代阶段,从1D勘探发展到2D、3D、4D勘探,从单分量勘探到多分量勘探,从地面地震勘探到立体地震勘探,从构造勘探到岩性勘探,取得了一系列的突破和技术创新成果。当然,这些技术的发展也为油气勘探做出了突出贡献。近年来,石油工业的地震勘探技术逐步形成了高精度地震、3D地震连片处理、重磁电震联合反演、精细储层描述等综合勘探技术系列,在交互3D地震构造解释、断层分析、地震反演、属性分析、3D可视化、地质建模,以及地质统计等方面取得了重大的研究进展,极大地促进了复杂油气藏的勘探。

地震勘探方法经历了从地震偏移成像到反演成像的历程。在其发展的初期,地球物理学家们利用定性分析将地震信号中的反射信息点移动到它原本的反射位置,这也是偏移成像的由来。随着计算机技术的发展,一些依赖计算水平的方法得到了迅速发展。20世纪70年代初,Claerbout提出了基于波动理论的偏移成像方法,在有计算资源保证的前提下,这类方法对成像精度大幅改进,因此得到了工业界的广泛认可和大规模的应用。偏移成像技术经历了射线理论方法、叠后时间/深度单程波偏移方法、叠前时间/深度单程波偏移方法、逆时偏移成像的发展之后,偏移成像的理论方法研究已趋于成熟。然而,这些方法已经不能满足当前工业界对高精度成像的要求。进一步的偏移成像研究已经不是简单的基于射线或者波动方程的偏移成像理论,保幅的偏移方法和各种新的偏移速度分析方法等新技术的研究都需要地震反演理论的支持。更何况,从反演的层面来说,地震偏移成像可以归结到地震反演成像的理论框架之下。它将模型近似为速度场的扰动,正问题表述为基于波动方程或者射线理论的波场求解,反问题则归结为成像道集是否被拉平的判断准则。地球物理反演成像的理论有着更为完美的数理基础。早在20世纪中期,Backus和Gilbert就阐述了地球物理反问题中零空间、模型分辨率等概念,从而构建了古典地球物理反演的理论基础。到了20世纪80年代,Lailly(1983)和Tarantola(1984)通过正演记录与实际观测数据的拟合进行地下介质参数的反演,建立了时间域的地震波场反演理论的框架。但这一思想的实现,需要计算资源的有力支撑。受当时计算资源的限制,这一方法的应用受到了很大的制约,尤其是3D数据。但无论如何,这些研究都奠定了当今地球物理反演的理论基础。随着计算机硬件水平的提升和一些优化算法的提出,地震全波场反演成像正逐渐打开从理论到实用化的突破口。因此,我们坚信,基于反演思想的

新的地球物理理念将带来整个地震勘探领域理论的新一轮飞跃。

(2) 全波形反演理论及发展。

全波形反演一词最早由 Pan 等人在 1986 年提出,但该方法的核心思想是建立在 Tarantola 提出的广义最小二乘约束下的数据域拟合基础之上。全波形反演是 Bayes 估计理论在勘探地球物理中的一个应用范例。它可以描述为一个基于地震全波场模拟的数据拟合过程,且使用了地震记录中全波形信息(Tarantola, 1984),而不像其他传统的方法仅使用地震波形中的部分信息(如旅行时层析成像等技术)。全波形反演的实现是在正则化约束下通过更新迭代初始模型进而减小计算数据和观测数据之间的误差,逐步逼近真实模型的过程(胡光辉,贾春梅,夏洪瑞等,2013)。它利用叠前地震波场中的运动学和动力学信息,具有揭示复杂地质背景下构造细节及岩性的潜在能力。但是,数学上它是一个高度“病态的”非线性问题(Tarantola, 1984),需要解决它的多解性及收敛性问题。从地球物理的角度,它涉及模型的参数化、目标泛函的建立、数据预处理、波场的数值模拟、子波的估计等研究内容(卞爱飞,於文辉,周华伟,2010)。全波形反演理论是一套完美的体系,但它对数据、对初始模型、对地震波正演、对激发子波是有理论假设的,尽管某些数值模型验证全波形反演过程可以得到几乎和真实模型完全匹配的反演结果,但在介质复杂情况下,其实用化还受到诸多限制。FWI 反演结果很难收敛到正确的结果上,核心问题在于地震波波场(尤其是反射地震波场)与反演参数之间的关系是严重非线性的,目标泛函存在非常多的局部极值点,因此需要很好的初始模型来降低目标泛函的非线性性。然而,在复杂介质和低信噪比情形下,正确的初始模型的获取本身就是十分困难的事。其次,地震波正演模拟算子是简单的,不能模拟实测地震波场中的复杂的波现象。另外,地震子波特征的空变更加重了地震波波场与反演参数之间非线性关系,这是陆上地震勘探数据进行 FWI 测试更困难的基本原因。更深入地看,地震波在地下介质中的传播,不同的波现象与不同的介质变化成分是紧密关联的。譬如 Diving Wave 可以认为是一种地表观测的透射波,利用 Diving Wave 可以反演背景速度(初始速度模型)。但是,Diving Wave 要在深层介质中传播,一定是低频的。另一方面,还需要长偏移距才能观测到中深层的 Diving Wave。这是 FWI 需要低频长偏移距数据的基本原因。缺乏了低频长偏移距数据,背景速度就需要用其他的方式获取。但遗憾的是,通过其他方式获取满足 FWI 要求的初始速度并非易事。

FWI 通过目标泛函约束模拟数据与观测数据之间的匹配程度,从而更新地下参数。尽管它在理论上有着更高的成像精度,但到目前为止,FWI 还没有得到广泛的推广。在地球物理学领域,FWI 还没有取代走时层析等传统技术,在勘探地球物理学领域,FWI 也没有替代传统的地震勘探数据处理和解释流程。除了诸多的实际问题(子波空变、信噪比、低频信息、激发接收一致性等)外,高度的非线性问题是目前 FWI 遇到的最大瓶颈。这一非线性问题源自地震波传播的复杂性,波动方程虽然能准确模拟大部分波的传播,但并不能对地震记录上的所有波形进行准确描述。因此,这也决定了数据域驱动的全波形反演过程。从地震观测数据直接反演地下物性参数是一个十分复杂的过程。常规地震勘探方法往往是通过将问题分解予以解决。通常,通过 NMO 速度分析、偏移速度分析、走时层析成像方法首先解决宏观速度模型(背景速度场即低波数成分),继而利用地震成像解决构造(高波数成分),在相对保幅处理的基础上,通过 AVO 反演、波阻抗反演、地震波属性分析等途径反演介质物性参数。借鉴传统思想,FWI 也应该可以通过分步骤、分尺度的策略予以实现。Bunks 首先在 1995 年提出了时间域多尺度分频处理的理念,通过数据预处理,从低频逐步反演到高频,首先完成速度场的低波数成分反演,并以此作为初始模型完成高波数成分的重建。这一思想,有效地解决了 FWI 强非线性问题。Pratt 在 20

世纪 90 年代初期提出了频率域的全波形反演思想。如果使用全部频率进行反演,频率域实现 FWI 与时间域 FWI 具有等同的效果。然而,频率域 FWI 的优势在于仅使用几个离散的频率就能对模型实现高精度的重建,也就是说,几个离散的傅里叶级数代替地震记录的时间序列即可完成高精度的全波形反演过程。这在实际资料应用上是十分有意义的。它大量节省了存储空间。此外,频率域的正演,在解决多震源问题时,由于单频波场与震源的线性关系,使得频率域求解存在天然的优势,较时间域求解有着更高的效率。更何况,频率域反演相对时间域反演来说,更容易实现从低频到高频的多尺度反演策略,以及更容易加入吸收衰减因子等参数。因此,频率反演得到了迅猛的发展,并很快用于实际资料的应用。但遗憾的是,3D 频率域正演,对计算机内存要求极高,且更多的计算资源并不能有效提高其计算效率。因此,在 3D 情况下,频率域反演受到了限制。考虑到时间域正演和频率域反演的优势,Sirgue 于 2004 年提出了时间域正演频率反演的混合反演策略。时间域实现 3D 情况下的正演,不受计算机内存的限制,且适用于多节点的并行策略解决多震源问题。另外,可对资料进行灵活的预处理。频率域反演则灵活解决多尺度反演策略和资料的时间域存储空间问题。因此,这一混合算法得到了广泛认可,并很快用于解决 3D 海上实际资料的应用。

(3) 全波形反演的应用现状。

全波形反演的应用最早出现于 20 世纪 80 年代,Gauthier 等(1986)和 Mora(1987)等人实现了 2D 全波形反演实际资料的应用。这些应用证明了全波形反演是一种高精度的建模手段,它具有精细刻画地下构造及岩性的能力,但同时也指出了全波形反演对初始模型的严重依赖,这一“病态”性使得全波形反演在缺少低频信息情况下很难取得成功。受计算资源的限制,这一技术始终局限在 2D 情况下的应用。之后,地球物理学家们对这一应用进行了更加深入的研究,一些新的方法被应用到全波形反演中来,并出现了很多成功应用的案例(Ravaut C, Operto S, Impropa L 等, 2004; Gao F, Levander A, Pratt R 等, 2006; Operto S, Virieux J, Dessa J 等, 2006; Bleibinhaus F, Hole J, Ryberg T 等, 2007)。20 世纪 90 年代,3D 的全波形反演陆续出现(Pratt R, Sams M, 1996; Pratt R, Shin C, Hick G, 1998),当然计算水平的提高在这一应用的实现中扮演了重要角色。2010 年 Sirgue(Sirgue L, Barkved O, Dellinger J 等, 2010)率先在挪威北海油田(Valhall 地区)OBC 数据实现了 3D 全波形反演的实际资料应用。这一成果极大地鼓舞了全波形反演的研究热潮。Valhall 地区由于浅层气云的覆盖,一直是建模、成像的难点,甚至被称为勘探的“盲区”。全波形反演不仅对该气云形态进行了准确的描述,对其周边充气的断裂构造也达到了精细的刻画。因此,这也发展了地震勘探资料解释的另一分支,即直接对高精度速度体进行地质解释。浅层建模一直是建模的难点,从 Valhall 地区反演结果来看,全波形反演完全有能力实现浅层的高精度建模,其对该地区浅表层古河道的精细刻画,展现了常规建模手段无法达到的精度。之后,全波形反演海上 3D 实际资料应用陆续出现(Hu G, Etieen V, Castellanos C 等, 2012; Plessix R, Perkins C, 2010; Fichtner A, Trampert J, 2011)。遗憾的是,这一技术仍然停留在海上资料应用,陆上资料的应用还存在很大的挑战。2012 年,英国壳牌石油公司与中国石油东方地球物理勘探有限责任公司合作实现了 2D 陆上资料的全波形反演(Plessix R, Baeten G, Villem J, 2012)。虽然这一研究是基于低频大偏移距的特殊观测系统,在实际勘探中很难大规模应用,但这一结果也证明了全波形反演的可行性。从 1.5Hz 的初始频率开始反演,减少了全波形反演对初始模型的依赖。大偏移距的勘探,保证了记录中的全波场信息。因此,从一个均匀递增的背景速度场出发,也得出了很好的反演效果。低频数据对恢复长波长速度分量扮演了重要角色,也再一次证明低频数据的重要

性。在 2013 年 SEG 年会上,出现了很多不同区块的全波形反演实际资料应用实例。此外,在拉普拉斯域的全波形反演也得到了发展。Pyun 等人发展了拉普拉斯域的 3D 弹性波的全波形反演(Pyun S, Shin C, Lee H, 2008)。与直接解法不同,他们采取和频率域近似的迭代解法,使该方法更适用于大尺度 3D 全波形反演。针对海洋深水环境, Lee 等人提出了一种剥离直达波的拉普拉斯域全波形反演(Lee D, Ho Cha Y, Shin C, 2008)。剥离直达波的全波形反演方法与常规的对数正态的拉普拉斯域全波形反演相比,更适合海洋深水环境。此外,拉普拉斯混合频率域的全波形反演也在实际资料应用中得到了验证(Shin C, Ho Cha Y, 2009)。在缺少低频的情况下,利用拉普拉斯域全波形反演对频率不敏感的特性首先恢复长波长信息,继而以此作为初始模型利用频率域全波形反演恢复模型的短波长分量,实现模型的高精度重建。

国内对全波形反演的研究起步较晚,技术水平较国外研究还有一定的差距,目前国内还没有看到全波形反演成功应用的实例。针对国内陆上探区特点,中国石化开展了针对目标层的全波形反演研究,并取得了阶段性成果(Warner M, Nangoo T, Shah N 等, 2013),该结果展示了全波形反演对中浅层建模的积极作用,对成像剖面有较大改善,构造与测井信息更加吻合。

全波形反演近年来发展迅速,海上实际地震勘探资料的成功应用,对陆上地震勘探资料的应用存在很大挑战,尤其是无法提供满足全波形反演要求精度的初始速度模型及足够低频的观测数据。目前,实际资料应用中,无论海上还是陆上的全波形反演都使用层析反演的手段来获取初始速度模型。但结果表明,这一速度模型精度并不能满足全波形反演的要求。因此,Shin 提出的拉普拉斯域全波形反演手段为经典意义下的全波形反演提供初始速度模型备受关注。此外,特征波的波形反演手段,也为初始模型建模带来了新的曙光。虽然我们看到了陆上资料成功应用的实例,但这些大多需要特殊的观测系统和低频勘探作为保障,又或者与经典意义下的全波形反演不同,仅实现了特征波的全波形反演。能否实现陆上实际地震勘探资料的全波形反演,或者更进一步,能不能实现常规观测系统下陆上地震勘探资料的全波形反演,这将成为地球物理学家们又一个挑战的课题。



第一部分 正演

正演是反演的基础,正演方法的选择决定着反演的精度和效率。全波形反演梯度求取过程中,对于每一个震源点需要震源正传和检波点残差的反传两个正演过程,在步长求取过程中又需要至少另外两次正演。因此,正演是全波形反演过程中最主要的计算。正演问题的有效解决关系全波形反演的成败。

正演既可以在时间域实现,也可以在频率域实现。在 2D 情况下,频率域正演有不可替代的优越性,尤其在处理多震源问题上。

对于某一频率,波场 u 和震源 s 是线性关系,即

$$A(x, \omega)u(x, \omega) = s(x, \omega)$$

式中, $A(x, \omega)$ 为阻抗矩阵; $u(x, \omega)$ 为某一频率波场; $s(x, \omega)$ 为某一频率震源函数。

矩阵 A 是高度稀疏、非对称、非正定的,直接求逆非常困难。因此,常采用稀疏矩阵因式分解直接求解法。

利用直接求解法,我们得到

$$LU[u_1, u_2, \dots, u_n] = [s_1, s_2, \dots, s_n]$$

式中, LU 表示阻抗矩阵 A 的分解。

从上式可以看出, LU 矩阵完全独立于震源 s , 即一旦 LU 建立, 对不同的震源是一个线性求解过程, LU 阻抗矩阵分解结果可以对不同震源重复利用, 从而大大降低了计算任务。但每次正演只能计算一个频率。3D 情况下则完全不同, Operto 和 Virieux 提出在 3D 情况下 LU 的建立对于内存存储空间需求极高, 甚至难以实现。Operto 在其文章中指出在使用 SEG/EAGE 3D 推覆体模型进行波场模拟时, 使用空间步长为 50m 的网格, 正演频率为 10Hz 波场时, 需要 320Gb 内存存储单精度的 LU 分解结果。这是一般的计算机群所不能达到的。且频率域正演对观测系统也表现出了不适应性, 如果观测系统发生变化, 那么需要重新构建 LU 矩阵, 丧失其线性化求解的效率优势, 且在预处理上受限。为了避免这一问题, 我们在处理 3D 情况下的全波形反演将采取时间域正演方法, 即

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = B(x, t)u(x, t) + s(x, t)$$

式中, $u(x, t)$ 为波场值; $B(x, t)$ 为阻抗矩阵; $s(x, t)$ 为震源项。

时间域的正演方法能很好地满足全波形反演对正演的要求。即使我们需要频率域的波场解, 也可通过灵活运用离散傅里叶变换 (DFT) 得到。且在频率组反演的过程中体现出优势, 一次正演可以提取所需要的几个不同的频率, 而不像频率域那样逐一频率求解。更何况时间域正演, 可以对数据进行灵活的预处理工作, 对特征波选取 (直达波、折射波、反射波等) 处理等存在优势, 且时间域正演各炮点独立运算不受观测系统限制, 因此, 也能更好地适应现代机群多节点大规模并行的特性。这是频率域正演很难做到的。

当然, 无论是频率域正演还是时间域正演, 都有多种求解方式。目前, 对地震波全波场的数值模拟有多种方法, 主要包括有限差分法、有限元法、伪谱法和谱元法等。有限元法 (FEM) 很早就被应用于地震波传播的数值模拟, 但一直没有得到工业界的广泛推广, 其原因主要有: (1) 计算复杂, 且需要对大型质量矩阵求逆, 计算量大; (2) 低阶空间离散格式存在较强的数值频散; (3) 高阶空间格式离散容易产生伪波等。而传统的有限元法也因为精度不高, 在地震波传播模拟中应用不多。伪谱法 (PS) 流体动力学引入到地震波数值模拟中, 对三维各同向性介

质中的声波和弹性波进行了正确模拟。PS 采用 Fourier 变换对波动方程的空间导数项进行求解,而时间域可以采用 Chebyshev 展开,能形成快速展开的方法。PS 的优势在于精度高,且单个波长内所需的采样点数较少,占用内存也相对较小。其缺点在于难以适应介质横向变化剧烈情况。另外,在处理起伏地表模拟问题上,由于伪谱法是一种整体方法,它在实现过程中主要利用快速离散 Fourier 变换,所以自然地引入了周期性边界条件使得起伏地表条件下自由边界条件很难实现,且人工边界的反射也不易消除。谱元法(SEM)是一种用于流体动力学的有限元法和谱展开法相结合的高阶有限元法。SEM 把计算区域剖分成四边形(或六面体)单元,在每个单元上把解表示为拉格朗日插值函数的高维张量积,插值节点为 GLL 节点。采用 Galerkin 方法求解弹性波方程的变分格式,得到离散方程,并通过选择正交基函数作为有限单元上变分问题的权函数和试函数,使得最终有限元整体方程的质量矩阵对角化,从而避免了传统有限元中超大型质量矩阵的求逆过程,大大提高了计算效率。由于其谱性质,它满足低空间采样性,因此谱元法是一种高阶、高精度、低频散的数值方法。谱元法自然满足自由边界条件,因此也十分适用于起伏地表条件下弹性波的模拟。但 SEM 一般使用四边形和六面体网格,而目前生成适应复杂介质分布的四边形和六面体网格的技术还不是很成熟,难以适应地表起伏剧烈、地下构造十分复杂情况下地震波模拟的需要。另外,虽然目前谱元法也被成功地应用到三角形网格单元上,但相应的质量矩阵却不再是对角阵,这也增加了谱元法的计算代价。目前工业上最为常用的是有限差分方法(FD)。FD 采用差分格式来逼近波动方程的空间导数项。在地震波数值模拟中,FD 因其编程实现容易、计算效率高等优点在波场数值模拟中应用最为广泛。为了提高 FD 的精度,其差分格式从早期的低阶发展到高阶,网格的划分也从规则网格发展到目前广泛应用的交错网格、变网格和旋转交错网格等。(1)相比规则网格,交错网格在同一网格的不同节点上计算应力和速度分量,在不增加计算量和存储空间的前提下,大大提高了差分精度和计算效率。(2)变网格法由介质横向变化程度来决定离散网格的大小,在介质剧烈变化区域采用精细网格剖分,在介质缓变区域采用较大空间网格剖分。这种方法避免了传统的固定大小网格法在计算效率与计算精度上的矛盾,在介质变化剧烈或地层起伏明显的区域也需要较小的网格与较小的时间步长来满足数值计算的稳定性,而在介质缓变区域空间则采用较大的网格与时间采样步长。(3)当介质的波阻抗较大的时候,标准的交错网格会变得不稳定,而且在标准交错差分算法中必须定义弹性波的边界条件。旋转交错网格有限差分法是在标准交错网格基础上发展的,在继承交错网格优点的基础上,克服了交错网格在阻抗差较大的界面上不稳定的缺点,目前这种方法引起了国内学者的较大关注。

第一部分从差分格式、边界吸收条件等方面详细阐述有限差分的交错网格正演模拟算法。结合实际生产过程中,炮点、检波点并不能与差分网格完全重合的特点,详细阐述 Hicks 插值算法,并通过模型验证 Hicks 插值算法的高精度特性。由于反演部分梯度计算使用伴随状态,该方法要求伪保守形式的正演算子,在这一部分将做详细介绍。本书重点介绍频率域反演联合时间域正演的混合域算法,该部分通过模型验证详细对比了时间域波场通过离散傅里叶变换得到频率域的解与频率域直接求取的波场值解的精度,验证了这一算法的可行性。

1 波场传播理论

弹性动力学问题涉及的物体都是弹性的,物体在外力作用下发生形状改变即弹性变形,在一定限度内,引起形变的作用力消失后,物体的变形也消失。大部分弹性理论在地球物理应用中都假设弹性介质是各向同性的,地震波在弹性介质中传播的是弹性波,其传播的基本规律可以由弹性波动方程进行反映。地震波传播所依赖的介质变形可归结为弹性变形,其属于弹性动力学范畴。弹性动力学提供的三个基本方程:本构方程、运动微分方程、几何方程,它们是描述弹性介质内部质点位移、应力和应变之间相互联系的普遍规律,是弹性波动方程及声波理论的基础。本书的重点在于阐述全波形反演的基础理论和实际资料应用效果。全波形反演的目的是根据地表现测的波场数据来推测地下介质模型的参数,它以正演问题的求解为基础,在反演过程中每次迭代需要至少三次正演模拟,因而正演问题的求解对反演的成功实现起着至关重要的作用。正演问题的解通常采用数值模拟的方法得到,在假定地下介质结构模型和相应物理量已知的前提下,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各时刻观测到的数值地震记录,这是地震勘探和地震学的基础。本书正演部分主要给出波动方程有限差分的解法,其中包括各向同性介质声波方程的推导过程,有限差分的时间域、频率域数值模拟 PML 边界吸收条件,以及基于 MPI 的物理模型切割并行策略等方面知识。为了使读者更好地了解本书的正反演理论,本书给出的符号约定和必备的基础知识可参考附录 A。

1.1 各向同性介质中的一阶和二阶声波方程

目前在地震勘探中采用的波动方程有多种形式,本书反演理论基于声波波动方程。为此,本小节根据地震波在各向同性介质中传播所满足的弹性波动方程推导出各向同性介质的声波方程。

声波方程可以写为一阶速度—应力方程形式,也可以写为二阶声压方程形式,每种表示的形式在求解时具有其独特优缺点。在经过变形之后,一阶形式的声波方程系统和二阶形式的声波方程可以相互转换。地震波在地下介质中传播时弹性介质内发生形变和位移从而形成弹性波场,在微小体积元内,弹性波场的动态变化可以用牛顿第二定律表示,即弹性波满足的波动方程为

$$\rho(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x},t) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x},t) = \mathbf{f}(\mathbf{x},t), \mathbf{x} \in \Omega, t \in [0, T] \quad (1.1.1)$$

为便于分析,根据附录张量分析可把上式写成分量形式,即

$$\rho\ddot{u}_i - \sigma_{ji,j} = f_i, \quad i = j = \{x, y, z\} = \{1, 2, 3\} \quad (1.1.2)$$

式中, $\rho(\mathbf{x})$ 为地下介质密度的分布; $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ 为位移矢量; $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t)$ 为应力张量; $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ 为外力源。

在自由边界上牵引力为零,即满足的自由边界条件为

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \delta\Omega} = 0 \quad (1.1.3)$$