

基于各向异性介质的 深度域地震成像技术

刘定进 李博 郭恺 等编著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

基于各向异性介质的 深度域地震成像技术

刘定进 李博 郭恺 等编著

中國石化出版社

内 容 提 要

本书基于各向异性波动理论,系统全面地论述了各向异性介质射线追踪、参数建模和偏移成像的原理、方法及实现过程。全书共8章,包括绪论、各向异性介质弹性波基本理论、经典各向异性介质叠前深度偏移方法、各向异性介质射线追踪技术、各向异性介质深度域速度建模技术、各向异性介质高斯束叠前深度偏移技术、各向异性介质逆时叠前深度偏移技术、结束语。

本书具有一定的理论价值和实用价值,适合从事地球物理研究的科研人员或从事地球物理工作的处理、解释人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

基于各向异性介质的深度域地震成像技术 / 刘定进, 李博, 郭恺编著. —北京: 中国石化出版社, 2019. 2
ISBN 978-7-5114-5208-5

I. ①基… II. ①刘… ②李… ③郭… III. ①地震层析成像—研究 IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 022817 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市朝阳区吉市口路9号
邮编: 100020 电话: (010) 59964577
发行部电话: (010) 59964526
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail: press@sinopec.com
北京柏力行彩有限公司印刷
全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 21.25 印张 457 千字
2019 年 4 月第 1 版 2019 年 4 月第 1 次印刷
定价: 148.00 元

编 委 会

主 编：刘定进

副主编：李 博 郭 恺

编 委：蔡杰雄 张 兵 徐兆涛 蒋 波 王鹏燕

刘小民 段心标 白英哲 郑 浩 许 璐

倪 瑶 张慧宇

前 言

一系列研究成果表明，地球介质具有广泛的波动各向异性效应。如陆相石油储层很多是由泥岩和砂岩薄互层构成的，两种薄互层厚度远小于地震波波长，导致地震波在其中传播时显现出各向异性特性；四川盆地普遍存在的页岩薄互层表现出垂向各向异性属性，其中裂缝定向发育造成速度随方位发生变化，表现为正交各向异性特征。随着波动理论研究的深入和野外勘探的精细化，各向异性受到越来越多的关注，研究地震波在各向异性介质中的传播规律与成像是地震学和勘探地震学研究领域的前沿课题。

传统地震学和地震勘探主要以地球介质具有完全弹性和各向同性的物理假设为基础，由于早期的地震勘探方位较窄、偏移成像方法简单，硬件设施又相对落后，地震数据体现不出各向异性特性，采用各向同性处理能够取得较好的效果。近年来，为了获得高品质的地震数据，宽方位采集技术得到了越来越广泛的应用，使地下介质的各向异性问题日益突出，采用各向同性的地震数据处理方法会导致地震成像质量降低和地震成像深度误差，迫切需要各向异性偏移成像方法提供支撑；另外，一些高精度地震成像新技术（如 RTM 成像技术）克服了偏移孔径和偏移倾角的限制，引入了更多的大偏移距数据，必须要考虑各向异性因素的影响；同时，计算机的发展使各向异性复杂处理成为可能。因此，为了更精确地刻画地下地质构造，开展地震各向异性偏移成像方法研究是高精度地震成像技术的必然发展趋势。

波兰科学家 Rudzki 于 19 世纪末至 20 世纪初首次提出各向异性的课题。20 世纪 50 年代，Gassmann 等进行了各向异性介质对地震波传播影响方面的研究。20 世纪 70 年代，Levin 等给出了椭圆各向异性介质中反射波、折射波和多次波的特性描述，从而为各向异性介质地震处理方法研究奠定了扎实的理论基础。20 世纪 90 年代，Tsvankin 等进行了各向异性介质反射波时距曲线方程的推导，在各向异性介质地震资料处理及成像技术的发展历程中树立了一个里程碑。21 世纪初，伴随着地震成像方法的发展，各向异性介质地震成像方法飞速发展，基于各向异性介质的 Kirchhoff 偏移、单程波动方程偏移、高斯束偏移、RTM 偏移等得到发展并逐渐实现实用化。

目前在工业界应用最多的各向异性叠前深度偏移方法主要有基于射线理论的 Kirchhoff 积分法偏移和基于波动理论的波动方程偏移两类。近年来，在这两类理论上分别发展

了精度更高的高斯射线束偏移（高斯束）和逆时偏移技术（RTM）。高斯束偏移将波动方程和射线理论紧密结合，通过运动学射线追踪和动力学射线追踪获取射线轨迹和中心射线附近的高频能量分布，既保持了传统射线方法的高效性和灵活性，又考虑了波场的动力学特征，能够比较好地处理多波至、焦散（射线交叉）等复杂波现象，是较好的兼顾成像精度和计算效率的方法。RTM同时采用全声波方程延拓震源和检波点波场，克服了偏移倾角和偏移孔径的限制，可以有效地处理纵横向存在剧烈变化的地球介质物性特征，该技术具有相位准确、成像精度高、对介质速度横向变化和高陡倾角适应性强、甚至可以利用回转波、多次波等成像等优点。RTM是目前理论最先进、成像精度最高的地震偏移成像方法。现阶段，高斯束偏移和逆时偏移方法发展迅速，已经成为地震勘探的主流成像技术，同时，这两项方法的核心算法可以准确地拓展到各向异性介质，为各向异性处理提供先进的偏移成像方法。

本书共分为8章：第1章对地震各向异性的基本概念、影响范围和处理方法的发展历程进行了较为系统的阐述；第2章主要介绍各向异性介质弹性波传播原理及特征；第3章对一些经典的各向异性介质叠前深度偏移成像方法进行了回顾；第4章主要介绍多种各向异性介质射线追踪方法；第5章主要介绍各向异性介质深度域速度建模相关技术；第6章主要介绍各向异性介质高斯束叠前深度偏移成像技术；第7章主要介绍各向异性介质逆时叠前深度偏移（RTM）成像技术；第8章是笔者对各向异性介质处理方法的认识，以及对各向异性领域发展趋势的展望。

本书前言由刘定进、李博、郭恺执笔；第1章由郭恺、蔡杰雄、徐兆涛执笔；第2章由刘定进、李博、张慧宇执笔；第3章由郑浩、白英哲、段心标执笔；第4章由王鹏燕、蒋波、刘小民执笔；第5章由郭恺、张兵、刘小民执笔；第6章由蔡杰雄、倪瑶、蒋波执笔；第7章由刘定进、李博、段心标、许璐执笔；第8章由刘定进、李博、郭恺执笔。全书由刘定进、李博、郭恺负责修改与统稿。

本书内容涉及的研究项目得到了中国石化科技部、油田勘探开发事业部、石油工程技术服务有限公司、石油物探技术研究院、南方分公司、西北油田分公司、东北油气分公司、华北分公司、胜利油田分公司、江苏油田分公司的支持。在本书的编写过程中，特别得到了石油物探技术研究院领导的指导和关心及同事的大力支持，同时也得到了同济大学海洋与地球科学学院王华忠教授及学生的支持和帮助。笔者在此一并表示衷心的感谢。

由于笔者水平有限，书中难免会有疏漏之处，敬请读者批评指正。

目 录

1 绪论	1
1.1 地震各向异性的成因	1
1.2 地震各向异性的影响	3
1.3 国内外研究现状及发展历程	6
2 各向异性介质弹性波基本理论	17
2.1 各向异性介质弹性波方程	17
2.2 各向异性介质的对称性	22
2.3 各向异性介质弹性矩阵坐标变换	28
2.4 各向异性介质弹性波传播特征	34
2.5 本章小结	68
3 经典各向异性介质叠前深度偏移方法	69
3.1 各向异性射线类 (Kirchhoff) 叠前深度偏移	69
3.2 各向异性单程波波动方程叠前深度偏移	75
3.3 本章小结	108
4 各向异性介质射线追踪技术	109
4.1 TI 介质射线追踪技术	109
4.2 ORT 介质射线追踪技术	138
4.3 本章小结	142

5 各向异性介质深度域速度建模技术	143
5.1 TTI 介质速度初始建模技术	144
5.2 TTI 介质速度精细建模技术	167
5.3 本章小结	208
6 各向异性介质高斯束叠前深度偏移技术	210
6.1 各向同性介质高斯束方法基本原理	212
6.2 TTI 介质动力学射线追踪方程近似	224
6.3 TTI 介质高斯束偏移技术	227
6.4 TTI 介质高斯束偏移成像道集提取技术	228
6.5 优选束偏移技术	231
6.6 应用实例	232
6.7 本章小结	243
7 各向异性介质逆时叠前深度偏移技术	245
7.1 各向异性介质 RTM 偏移算子构建	246
7.2 基于 GPU 平台的各向异性 RTM 成像技术	267
7.3 组合噪音压制技术 (针对偏移噪音)	275
7.4 各向异性介质 RTM 共成像点道集提取技术	302
7.5 实际资料试处理	307
7.6 本章小结	321
8 结束语	322
8.1 各向异性处理技术的应用前提	322
8.2 各向异性处理技术的发展趋势	323
参考文献	325

1 绪 论

地球介质普遍存在地震各向异性效应，研究地震波在各向异性介质中的传播规律与成像是地震学和勘探地震学研究领域的前沿课题。传统地震学和地震勘探主要是以地球介质具有完全弹性和各向同性的物理假设为基础，而采用各向同性的地震数据处理方法处理各向异性介质的地震资料，会导致地震成像质量降低和地震成像深度误差。之所以采用各向同性假设，一方面是因为各向同性介质模型是地球介质模型的一个很好的近似，在某种程度上可以解决一些实际问题；另一方面由于观测技术的限制和观测精度不高，难以通过观测资料提炼出明显的波动各向异性，因而地震各向异性没有得到足够的重视；再者，以前的处理解释技术还不足以对复杂的各向异性资料进行研究。近年来，为了获得高品质的地震数据，宽方位采集技术得到了越来越广泛的应用，使地下介质的各向异性问题日益突出，迫切需要各向异性偏移成像方法提供支撑；另外，一些高精度地震成像新技术（如RTM成像技术）克服了偏移孔径和偏移倾角的限制，引入了更多的大偏移距数据，必须要考虑各向异性因素的影响；同时，计算机的发展使各向异性复杂处理成为可能。因此，为了更精确地刻画地下地质构造，开展地震各向异性偏移成像方法研究是高精度地震成像技术的必然发展趋势。

1.1 地震各向异性的成因

引起地震各向异性的因素很多，成因很复杂。许多地球物理学家和地震学家通过对地震波在地球介质中的传播现象进行观测，对地震波在各向异性介质中的传播规律和形成机理做了大量的研究工作，认识到地球介质存在各向异性，发现地壳上大多数沉积的岩石展现出地震各向异性特征（Crampin, 1984、1989）。综合起来，地下岩石的地震各向异性成因主要来源于三个方面：固有各向异性、裂隙诱导各向异性和长波长各向异性。

1.1.1 固有各向异性

固有各向异性是由岩石的固有结构和特性产生的（张美根，2001）。从20世纪50年代开始，地球物理工作者通过对地球岩石进行的一系列观测和实验室研究，发现了固有各

向异性的证据，证实了地震各向异性是客观存在的。天然地震学家从海上和陆上的观测资料中发现深部地壳岩石和上地幔存在各向异性 (Jolly, 1956; Hess, 1964)。Nur (1969) 在实验室研究中发现，对岩石施加压力会产生各向异性。Bachman (1979) 从深海钻井岩芯中发现了横向各向同性。Jones 和 Wang (1981) 也从岩芯中发现了强的横向各向同性。

固有各向异性形成的物理机制包括以下几点。

(1) 晶体各向异性。组成岩石的矿物组分因具有结晶作用，使得结晶固体的晶体在有择优取向排列时形成晶体各向异性，在上地幔，由橄榄石晶体的优选定向排列引起上地幔各向异性。在高温条件下，地下岩石在地下应力场作用下，通过液态熔体的分异作用、重结晶和塑性变形，晶体也会发生择优取向而引起各向异性。

(2) 直接的应力作用导致各向异性。地壳中的岩石在足够大的应力作用下，原来各向同性的固体会变成各向异性，定向应力以某种方式修改了晶体结构的细节，从而产生了与应力有关各向异性，一般认为这种各向异性显得非常微弱，不如矿物组分的定向排列产生的各向异性那样常见。

(3) 岩性各向异性。在沉积过程中受到重力或水流的作用，沉积岩石中的矿物颗粒会被压扁、拉长而定向排列，引起岩性各向异性。如现场横向各向同性的黏土岩和页岩可能是由于矿物颗粒的取向排列而展现出岩性各向异性。

固有各向异性是引起地下介质各向异性的最主要因素，主要表现为同一时期沉积地层由于晶体内部定向排列导致地震波速度具有方向性，即不同方向的地震波速度不一致。通常情况下，地球物理学者普遍认为晶体沉积条件与地层产状相同，即晶体的各向异性对称轴方向与地层法线方向相同，因此，地震波在各向异性介质中传播时依然遵循斯奈尔定律，不受各向异性效应的影响。当地层水平或近似水平时，介质表现为 VTI 各向异性特性；当地层产状垂直或接近垂直时，介质表现为 HTI 各向异性特性；当地层产状介于水平和垂直之间时，介质表现为 TTI 各向异性特性。

1.1.2 裂隙诱导各向异性

由于受到应力场的作用，岩石中形成择优取向排列的裂缝、裂隙和孔隙，这些裂缝、裂隙或孔隙可能充满气体或流体等充填物，地震波在裂隙岩石中的传播相当于在均匀弹性各向异性固体中的传播，可称此裂隙岩石具有等效各向异性。Crampin (1987) 把这种具有气体或流体等充填物的择优取向裂隙称为广泛扩容各向异性 (EDA, extensive dilatancy anisotropy)。

由于地壳岩石易受到构造应力场的作用而产生定向排列的裂隙或裂缝，现在普遍认为地壳大多数岩石中存在定向排列的流体充填的裂隙，可广泛引起横波分裂，通过理论与实验室研究证实，EDA 介质可引起横波分裂现象 (Crampin, 1978、1984; Hudson, 1981、1982)。对于 EDA 介质，Hudson 给出了等效各向异性的弹性常数 C_{ij} 的两种近似形式：一种是对各向同性弹性常数的一阶扰动；另一种是对各向异性弹性常数的二阶扰动，认为等

效各向异性的弹性常数 C_{ij} 是由不含裂隙时各向同性固体的弹性常数 C_0 加上裂隙对裂隙的一阶相互作用 C_1 和裂隙对裂隙的二阶相互作用 C_2 等部分组成。

裂隙诱导各向异性是引起地下介质各向异性的另一重要因素，普遍性仅次于固有各向异性，并且通常跟固有各向异性同时出现，如裂缝性页岩气构造。裂隙诱导各向异性是由于裂缝的填充介质与周围岩石岩性差异导致的地震波传播速度发生变化，具体表现为：沿裂缝方向地震波传播快，垂直于裂缝方向地震波传播慢。由于裂缝在空间中具有方位性，即裂缝一般是沿着一个方向发育的，因此，裂隙诱导各向异性介质的地震波传播也具有方位性，表现为沿着某一方位传播速度快，其他方位传播速度慢。可以说裂隙诱导各向异性只能在三维情况下体现出来，而固有各向异性既可以体现在三维情况中，也可以体现在二维情况中。

1.1.3 长波长各向异性

沉积地层中周期性的薄互层，只要单层的厚度小于地震波长，当地震波通过时便会表现出长波长各向异性。Postma 等（1955）研究表明，小于地震波长的旋回性薄互层（PTL, period thin-layer）等效于横向各向同性介质，解释了当时地震资料时深转换的误差问题。在这一理论的指导下，激起了勘探地震学家对各向异性研究的兴趣，后来有许多学者在这方面作了大量的研究工作，丰富和发展了 Postma 理论，为勘探地震学各向异性奠定了应用研究的理论基础（Jolly, 1956; Krey, Helbig, 1956; Backus, 1962; Berryman, 1979）。在这一时期，一系列的观测和研究都表明了真实地球介质的波动各向异性是客观存在的。因为形成油气藏的储集层通常是沉积岩（即分层的），Postma 理论对今天勘探地球物理工作者开展地震各向异性研究，寻找隐蔽油气藏具有重要的理论指导意义。

长波长各向异性的本质是由于地层岩性变化导致地震波速度出现各向异性。Ian F Jones 教授于 2017 年的 SEG 会议上表示，长波长各向异性严格来说不属于地震各向异性范畴，虽然长波长各向异性介质等效于横向各向同性介质，也具有明显的各向异性特性，但是形成机理却完全不同。因此，长波长各向异性与前两种各向异性性质不同，不应列入地球物理界常说的地震各向异性范畴。

1.2 地震各向异性的影响

地下介质经过长期的地质运动变得非常复杂，很难用一种模型完整地描述和表示。各向同性介质是最早用来描述地球介质的模型，显然，地球介质不是完全各向同性的，只是各向异性程度不同。早期采用各向同性介质假设符合当时的技术现状和勘探需求，但是，随着采集技术和处理技术的飞速发展，各向异性对地震勘探的各个环节都产生了巨大的影响。本节重点讨论各向异性对速度建模和地震成像的影响，以及简单的解决方案，并在后续章节详细论述。

1.2.1 各向异性对速度建模的影响

速度模型在地震处理中的重要性不言而喻。均匀各向同性介质中地震波的传播相对简单，各个方向的地震波速度都相同。但是在各向异性介质中，地震波沿各个方向出射时速度不同，为了准确描述各向异性介质的地震波速度，引入了各向异性参数，参数的增加导致建模难度也随之增加。各向异性对速度建模的影响主要有以下几方面。

1.2.1.1 地震波速度的方向性

本节所讨论的速度均为声波速度，在各向异性介质中为伪声波速度。各向同性地震处理一般只需要介质的地震波速度，这个速度是三维的，即在空间上每一点的速度值唯一。对于各向异性而言，虽然也只需要速度，但是这个速度不是三维的，如 TI 介质的速度是五维的（空间三维加两个角度），T-ORT 介质的速度是六维的（空间三维加三个角度）。

各向异性介质的地震波速度需要更多的参数加以描述，如 VTI（具有垂直对称轴的横向各向同性）介质有 3 个参数（3 个 Thomsen 参数），HTI（具有水平对称轴的横向各向同性）介质有 4 个参数（3 个 Thomsen 参数和裂缝方位角），TTI（具有倾斜对称轴的横向各向同性）介质有 5 个参数（3 个 Thomsen 参数以及对称轴倾角和方位角），ORT（正交各向异性）介质有 6 个参数（6 个 Thomsen 参数），T-ORT（倾斜正交各向异性）介质有 9 个参数（6 个 Thomsen 参数、地层倾角和方位角、裂缝方位角）等。

均匀各向同性介质某一点的速度沿各个方向都相同，波前面（或射线等时面）是标准的圆球。而均匀各向异性介质某一点的速度沿各个方向不同，波前面不再是标准的圆球，TTI 各向异性的波前面是椭球，椭球的方向与地层倾角和方位角有关，ORT 各向异性的波前是不规则形状，但是在垂向切片仍为椭圆。

综上所述，各向异性对地震波速度的影响非常大，相比于各向同性发生了巨大变化，并且随着各向异性程度的增加，准确描述地震波的速度也越来越困难，给建模和成像造成了很大的影响。

1.2.1.2 射线追踪的效率

射线追踪是层析反演中非常关键的步骤，射线追踪的速度直接决定了层析迭代反演的效率。各向异性介质的多参数性增大了射线追踪方程的复杂程度，增加了射线追踪方程的求解时间，降低了射线追踪的效率，延长了层析迭代反演时间，影响了勘探开发的周期。因此，各向异性介质的处理要比各向同性更为复杂、耗时，本书第四章将介绍几种提高各向异性射线追踪效率的方法。

1.2.1.3 速度建模的精度

各向同性介质多参数同时层析反演非常不稳定，因此工业界通常的解决方法是逐个反演，很好地解决了同时反演的不稳定问题。但是，各向异性参数相互耦合、相互影响、相互制约，共同作用于地震波速度，都对射线旅行时有贡献，单独反演没有考虑其他参数的

影响,势必会影响速度建模的精度。

同时反演相比于逐一顺序反演,具有更强的理论先进性。只用旅行时残差建立的反演方程是欠定的,必然会造成多解性,降低反演精度。针对这个问题,采用增加约束条件和制定针对性策略增加反演精度,这部分内容会在第五章详细介绍。

1.2.1.4 层析反演的稳定性

TTI 各向异性介质的参数主要包括 V_{P0} 、 ϵ 和 δ , 这三个参数数量级相差极大,同时反演会极不稳定,就像绑腿齐步走的游戏,一群大人中间夹几个孩子,大家同时走必然会摔倒,就算不摔倒也不和谐。因此,同时反演各向异性多参数将会非常不稳定,ORT 各向异性介质的不稳定性更严重,一般的解决方法是归一化方法和等效参数方法,这部分内容会在第五章详细介绍。

1.2.2 各向异性对地震成像的影响

如果各向异性介质从一开始就按照各向同性处理,只要解决了一些关键问题,如起伏地表、静校正、噪音、多次波、速度模型等,最终通常都能得到一个质量较高的成像剖面。但是,该结果的精度往往较低,主要体现为井震矛盾,包括井震深度误差、横向误差、产状误差等。各向异性对地震成像的影响主要有以下几方面。

1.2.2.1 成像质量

各向同性(或各向异性非常弱)介质,只靠速度就能把成像道集完全拉平,即只要速度准确,成像道集的近、远偏移距能够同时被拉平,从而达到最佳的成像效果。对于各向异性介质,无论如何调整速度,都无法把成像道集的近、远偏移距同时拉平,这个时候,如果速度准确的话,成像道集的近偏移距是平的(近偏移距旅行时主要由速度决定),而远偏移距上翘(远偏移距旅行时由速度和各向异性参数共同决定),此时如果将成像道集叠加成像,必然会降低分辨率和信噪比,如果强行切除大偏移距数据,则会造成有效信息的损失。只有引入各向异性参数,才能将远偏移距道集拉平,有效提高成像质量。

1.2.2.2 成像精度

笔者认为成像精度和成像质量的具体含义略有不同,成像质量是剖面的信噪比、分辨率、聚焦程度、波组特征等,而成像精度包括成像深度、水平位置、地层走向等的准确程度。针对各向异性介质的成像道集无法拉平的情况,通常的处理方法是不断调整速度,使叠加效果达到最佳,这时成像道集不是水平的,而是呈现微小的抛物线状。虽然此时成像质量较高,但是存在较大的成像深度误差(速度不准导致),引入各向异性参数后,校平了成像道集,改变了速度值,从而调整了成像深度,缩小了井震误差。

1.2.2.3 成像效率

众所周知,偏移成像(特别是逆时偏移成像)是非常耗时的工作,引入各向异性参数后,输入参数增加了数倍,相应内存同样增加数倍,对机器的内存要求提高,I/O 耗时将

会增加。另外，参数增加导致波场延拓方程更加复杂，解方程的过程也会变复杂，耗时至少增加一倍。特别是 RTM 成像技术，本身各向同性 RTM 就非常耗时，发展到各向异性后，RTM 处理严重影响工程进度，我们将在第七章讨论如何提高 TTI-RTM 的效率。

综上所述，各向异性给地震处理带来的影响不可忽视，如果不考虑各向异性因素，地震成像的质量和精度将受到限制，无法满足地震勘探日益精细的需求，本书将从各向异性速度建模和地震成像两部分讨论如何把各向异性处理做好。

1.3 国内外研究现状及发展历程

各向异性介质地震波传播理论早在 19 世纪就已奠定，至 20 世纪中期，多数工作都处于理论研究阶段。随着石油勘探形式的发展，地震波偏移成像及配套技术也不断往前推进。近二十年来，随着采集（三维宽方位采集、三维全方位采集、三维 VSP 采集、多分量采集）技术的进步、处理技术的发展、计算机能力的提高，地震资料各向异性偏移及其参数估计得到了飞速的发展。如今，各向异性介质中的地震成像及各向异性参数估计已经从勘探地震学的前沿课题转为实际资料处理的有效工具。

Helbig 和 Thomsen (2005) 详细回顾了早期诸多学者为各向异性介质中地震波传播理论做出的重要研究工作（在此仅回顾部分本文认为重要的工作）。Crampin (1978、1984) 通过理论与实验室研究证实，EDA 介质可引起横波分裂现象。Crampin (1981、1985)，Willis 等 (1986)，Martin 和 Davis (1987) 也证明各向异性介质中 S 波和 PS 波在两个正交的极化方向会分裂成快横波和慢横波。基于 Alford (1986) 提出的横波处理表征参数及其修正形式，可以方便地处理垂直对称轴的裂隙介质中的方位各向异性。20 世纪 90 年代高质量的多分量海上资料的采集和处理证明，在不考虑速度各向异性前提下，PP 波、PS 波成像结果与实际构造存在明显的深度差。然而，由于采集及其他原因，即便是各项同性介质中 S 波的处理也尚未成为主流。相对 S 波，P 波成像早，地震勘探中应用更为广泛，但各向异性对其结果的影响要小得多，尤其是对窄方位、中短排列观测的 P 波数据几乎可以忽略各向异性的影响。P 波成像中忽略各向异性的另一个重要原因是 P 波的反射时间与空变的各向异性参数之间没有建立良好的显示表达式。

英国以 Crampin S A 为代表，自 20 世纪 70 年代开始专注于各向异性研究，他从地球深部资料中发现 S 波分裂，并提出了广泛扩容各向异性模型，简称 EDA 模型，形成了一套对横波分裂的检测技术。Crampin 在 EDA 模型的基础上，发展了一种预应力饱和流体岩石非线性各向异性孔隙弹性理论 (APE)。俄罗斯以 Cheskonov N I 为代表，着重于波动理论研究，研究薄互层组引起的视各向异性应力诱导和非均匀性介质中各向异性与建立热动力模型。Marrtynov 等利用虚谱算法，对定向排列的 EDA 介质中点力源激发的地震波传播进行了三维数字模拟，讨论了裂隙密度与排列方向对纵波和横波偏振特征的影响。此外，还研究了应力与微结构引起的各向异性。美国在波动射线正演模拟、数字仿真、VSP 资料

中分裂现象检测和反演成像等方面做了大量工作，特别是在太平洋地区和洛杉矶盆地的各向异性研究。美国科罗拉多矿业学院以 Tsvankin 为首的研究小组在非均匀 TI 介质 P 波数据三维走时反演、各向异性介质中转换波速度分析及 P 波、PS 波数据联合反演、倾斜 TI 介质的深度偏移和方位各向异性介质中的 AVOA 等方面也做了大量的研究工作，发表了多篇论文。夏威夷地区地震波速度的各向异性（各向异性因子达 8%）研究具有重要意义。Blackroom 等对地幔各向异性的模拟与地震波的传播进行了探讨；此外，还研究了各向异性在波振幅中的显示。美国目前主要是利用 S 波分裂来估计油气田盆地中裂隙和孔隙储集体的物理参数，这对裂隙孔隙储集体的勘探以及油气开发具有重要的指导意义。

在我国，中国科学院、国家地震局、中国石油大学、清华大学、吉林大学等许多研究所和高校均对各向异性问题进行了深入的研究。1998 年 6 月，在中科院地球物理所的积极倡导下，在北京十三陵召开了由国家基金委主办、中国石油天然气总公司物探局承办、中科院地球物理所协办的中国首届地震各向异性学术讨论会，这次会议从各向异性的理论、方法、实验、应用以及存在的问题和应用前景等方面进行了广泛、深入的讨论，这是我国各向异性研究的一次全面、深入的总结，取得了许多重要成果，标志着我国各向异性研究的新开端。

近年来，面向 TI 介质的各向异性叠前深度偏移技术已经在墨西哥湾、北海、非洲以及北美山地油气勘探中得到了初步应用，并已被证实对改善成像剖面主要层位的深度与产状同井资料的一致性很有帮助（Vestrum, 2003; Bear, 2005; Elbig 和 Thomsen, 2005）。基于地震波方位各向异性的裂隙检测技术，在碳酸盐储层、致密碎屑岩储层的油气勘探、开发领域也得到了应用（Li, 1999; Grechka 和 Tsvankin, 2006）。叠前深度偏移是强横向非均匀介质复杂构造成像与速度模型建立依赖的关键技术。其算法的实现要么基于射线理论，如 Kirchhoff 偏移和高斯束偏移，要么基于波动理论，如单程波方程深度延拓偏移和双程波方程逆时延拓偏移。近十余年来，各向异性介质深度偏移方法也得到了极大的发展，先后出现了 TI 介质 Kirchhoff 偏移（Kumar 等, 2004）、高斯束偏移（Zhu 等, 2007）、单程波方程偏移（Han 和 Wu, 2003; Shan, 2006; 吴国忱, 2005）与逆时偏移（Zhou 等, 2006; Zhang 等, 2009; 康玮、程玖兵, 2011）等深度域成像方法。一些学者研究发现，在复杂介质条件下，即使偏移速度是合理的，传统的偏移距域和炮域共成像点道集都可能存在假象干扰（Xu 等, 2001）。为此，诸多学者一直致力于研究射线理论或波动理论基础上的角度域成像方法。

1.3.1 各向异性地震波正演模拟

地震波正演模拟是模拟地震波在地球介质中的传播过程，并研究地震波的传播特性与地球介质参数的关系，通过正演模拟达到对实际观测地震记录的最优逼近（孙成禹, 2004）。地震波在地球介质中的传播，是一个非常复杂的物理过程，地震波波动方程只有在简单介质条件下才有精确的解析解。随着研究介质模型趋于复杂化，很难寻找到波动方

程的解析解,地震波正演模拟通常采用地震波数值模拟方法。开展地震波的正演模拟研究,对人们正确认识地震波的传播规律,验证所求地球模型的正确性,进行实际地震资料的地质解释与储层预测以及地球资源开发等,均具有重要的理论和实际意义。

地震波数值模拟是在地震波传播理论的基础上,通过数值计算来模拟地震波在地球介质中的传播(董良国,2003)。在地震学向真实地球介质地震波理论发展的过程中,地震波数值模拟起到了非常重要的作用,在理论研究和实际应用上都得到了广泛的应用。伴随着计算机技术的飞速发展,进一步推动了地震波场数值模拟技术的发展。目前,各向异性介质中地震波正演模拟的数值方法主要有:射线追踪法、有限差分法、反射率法、伪谱法、波动射线法和有限元法等,这些数值正演模拟方法各有优缺点。

1.3.1.1 各向异性介质射线追踪

射线追踪方法是进行几何地震学研究的基础,射线追踪主要是通过求解程函方程计算地震波旅行时,通过求解输运方程计算地震波振幅(Cerveny,1984)。在各向异性介质中,Byun(1984)、Tanimoto(1987)、Shearer和Chapman(1989)等研究了地震波正演模拟的射线追踪技术。各向异性介质中体波计算的射线追踪是基于Cerveny(1972)的射线理论,是以波动方程的高频近似为前提,适用于物性参数缓变介质模型的地震波场模拟。该方法的主要优点是计算成本低、效率高,还具有很强的适应性,能处理较复杂形状的地质体和不同的各向异性对称类型(Gajewski和Psencik,1978)。射线追踪方法的缺点是:由于是高频近似,计算精度低;不能很好地描述地震波的临界反射、转换波和层间的多次波;不适合物性参数变化较大介质模型的地震波场模拟;由于在各向异性中体波间的相互耦合,用射线追踪方法描述起来存在一些困难(Chapman和Shearer,1988)。

射线追踪不仅用于地震波正演模拟,还用于偏移成像和射线理论速度建模中。目前各向异性介质射线追踪方法主要有打靶法、波前构建法、插值法、最短路径法和程函方程法(赵爱华,2006)。打靶法基于渐进射线理论(Cerveny V,2001),能够适用于一般各向异性介质,但对于TTI这种复杂介质则会出现阴影区问题。波前构建法是根据当前的波前,利用射线理论估计新的波前,白海军等(2012)虽然利用群速度和相速度表达的射线追踪方程避免了复杂的特征值求解问题,但是实现方案较为复杂。插值法基于费马原理(邓怀群,2000;马德堂,2006、2011),分为向前确定走时和向后确定射线路径两个过程,在各向异性介质中往往得不到精确的出射点位置。最短路径法基于惠更斯原理和费马原理(Moser,1991;Zhou B,2005;Bai C,2007),能同时求取震源到模型所有节点的走时和相应的射线路径,但只适用于各向异性介质初至波射线追踪。Vidale(1988)基于扩张波前的思想建立了经典的程函方程射线追踪系统,之后,Alkhalifah(2000)提出了各向异性程函方程式,并在此基础上建立了各向异性射线追踪系统,该方法稳定性强、精度高,是VTI介质射线追踪最主要的方法,这种方法在VTI介质中运算效率较高,能够达到生产需求,但是TTI介质程函方程式复杂了许多,严重降低了程函方程式射线追踪速度,到ORT介质,程函方程式进一步复杂化,程函方程式各向异性射线追踪将无法

需求。郭恺等(2017)提出了基于相速度的各向异性介质射线追踪方法,简化了各向异性介质射线追踪方程,大大提高了运算效率,笔者将在本书第六章详细介绍该方法。

1.3.1.2 各向异性波动方程数值模拟

地震波传播理论总体上可分为积分型波动传播理论和微分型波动传播理论(牛滨华,2002)。积分型波动传播理论是基于惠更斯(Huygens)、菲涅尔(Fresnel)、克希霍夫(Kirchhoff)积分等原理建立起的理论体系,微分型波动传播理论是基于连续介质微分体积分元弹性动力学原理建立起的理论体系。地震波数值模拟方法是和地震波传播理论紧密结合在一起的。在波动地震学理论中,使用积分方程和微分方程描述地震波传播,地震波数值模拟也相应地分为积分方程数值模拟方法和微分方程数值模拟方法。

1. 积分方程数值模拟方法

在积分型地震波传播理论的发展过程中,Aki(定量地震学,1980)、Bleistein(Mathematics of Multidimensional Seismic Inversion,1987)、Wu R S(地震波的散射与衰减,1993)等地震学家做出了重要贡献,丰富和发展了积分型地震波理论,为利用积分法研究地震波正演模拟问题奠定了理论基础。积分方程数值模拟方法又可分为体积分方法和边界积分方法。由于该方法具有半解析解特征,它在地震波正反演和地震波成像方面有明显的优势。积分方程法的核心是求取或计算Green函数,主要是用来解决均匀背景介质上的非均匀地质体产生的波场计算问题,要给出特定的边界条件,因此该方法的应用范围受到了限制。

2. 微分方程的数值模拟方法

微分方程数值模拟方法是微分型波动地震学中广泛使用的地震波正演模拟方法。微分方程法是对介质模型网格化,通过数值求解描述地震波传播的微分方程来模拟地震波场传播。微分方程数值模拟方法可分为单程波和全程波模拟:单程波模拟计算速度快、效率高,但经过了一定的物理性近似,在应用时受到不同程度的限制,一些地震波的传播现象无法模拟;全程波模拟是基于弹性波全波方程,计算效率相对较低,但它是能较完整地描述弹性波的主要方法。微分方程数值模拟方法适应性强,对介质模型没有限制,在地震波正演模拟中普遍使用,主要缺点是计算量大,对计算机内存要求较高。利用微分方程法进行地震波正演模拟,使用比较多的是有限差分方法(FD)、有限元方法(FE)、傅里叶变换法(PS)。这些方法各有优缺点:有限差分方法适应性强、计算快速,但必须以规则网格剖分介质,存在数值频散,且需要采用吸收边界条件;有限元方法适合处理任意形状的介质分界面及起伏的自由界面,但使用不方便,效率低,对计算机性能要求高;傅里叶变换法(或称伪谱法、虚谱法)是利用傅里叶变换计算波场的空间导数,照顾了空间导数的整体性质,模拟精度高,数值频散较小,但不适合复杂介质模型的地震波模拟,边界处理相对比较困难。

在地震波场正演模拟方法中,微分方程数值模拟方法是主流方法,国内外许多学者致力于将微分方程法应用到各向异性介质地震波场的数值模拟中。在国外方面:Mora(1989)、Tsingas等(1990)、Igel等(1995)研究了利用有限差分方法进行各向异性介质