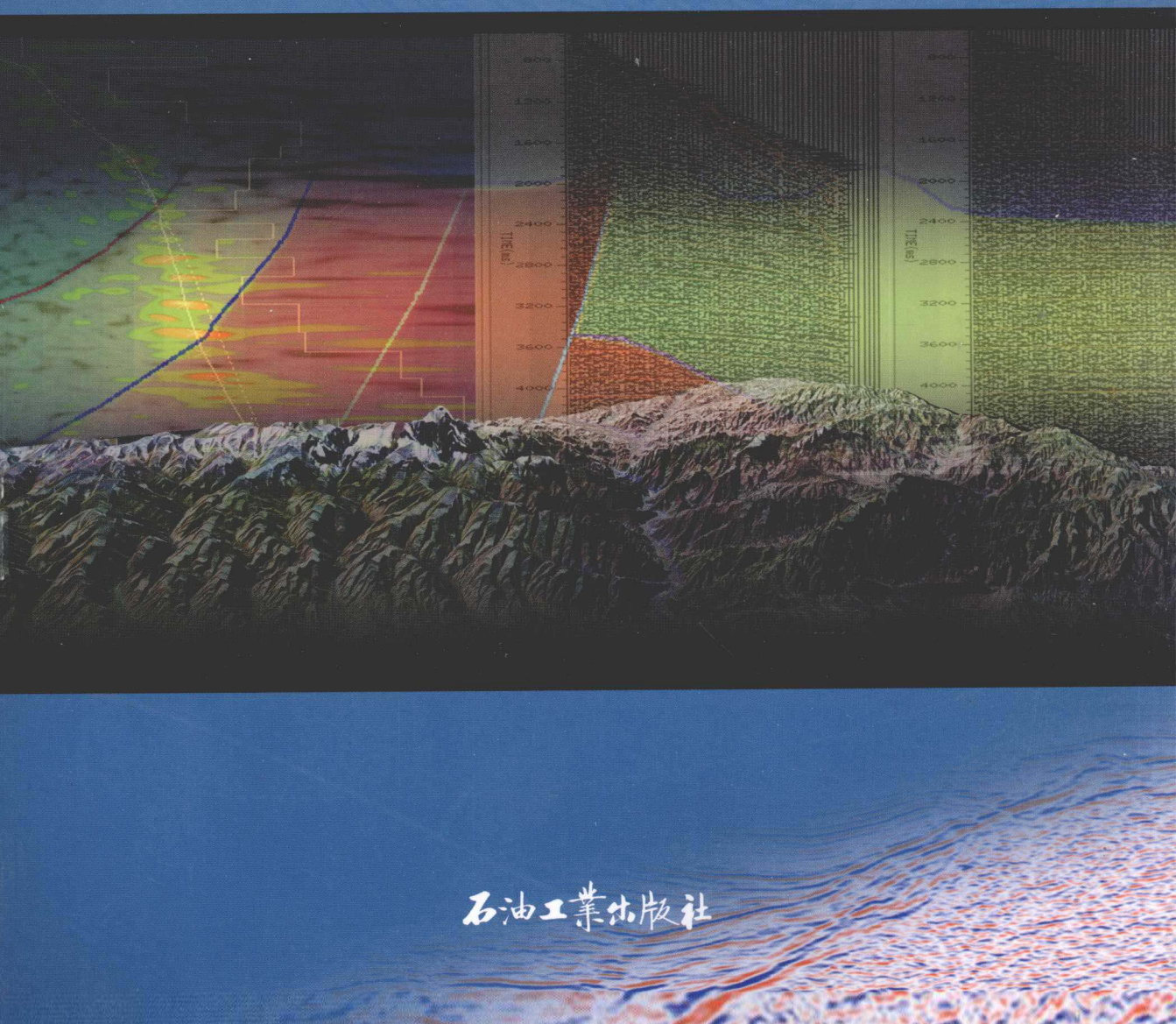


# 复杂地区 地震成像实用技术

韩永科 胡 英 徐 凌 崔兴福 编著  
张 才 胡 首 皓 王春明 王 棣



石油工业出版社

# 复杂地区地震成像实用技术

韩永科 胡 英 徐 凌 崔兴福  
张 才 首 皓 王春明 王 棣 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书共分 5 章,第 1 章重点介绍了复杂地区的概念、地震成像技术需求、难点和发展趋势。第 2 章重点介绍了地震成像理论的发展历程、基础理论、方法的变革与发展趋势等内容。第 3 章主要介绍了适合复杂地区的主流成像方法和关键技术,以及配套集成等方面的内容。第 4 章以我国复杂山地、起伏大沙漠、沟壑黄土塬、浅海滩涂区四类复杂地区的技术示范、技术应用和典型目标的成像效果为重点,首次全面介绍了中国石油勘探开发研究院物探技术研究所近五年来针对复杂地区的最新处理成果。同时简单介绍了国外落基山和安第斯山前的地震成像技术,起到技术类比的作用。第 5 章包含了复杂地区新技术、新方法的最新调研成果,对未来技术发展趋势和面临的挑战进行了客观论述。

本书可供地震资料处理与解释人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

复杂地区地震成像实用技术/韩永科等编著.

北京:石油工业出版社,2012.12

ISBN 978-7-5021-9285-3

I. ①复…

II. ①韩…

III. ①复杂地层-地震成像-实用技术

IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 218646 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:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523533 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:14.75

字数:393 千字

---

定价:128.00 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

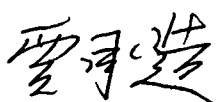
# 序

油气勘探面临的最大困难往往来自复杂地表，包括陡峭山地、起伏大沙漠、沟壑黄土塬、滨海滩涂、城镇工业区等。由于受制于复杂地表，这类地区的勘探程度和地质认识程度往往比较低，油气勘探潜力较大。比如塔里木盆地库车山前、准噶尔盆地西北缘及南缘等典型前陆冲断带尽管地表条件十分复杂，但构造圈闭发育，油气富集条件十分优越，是近年来油气勘探发现最多的一类地区，也是未来油气勘探的潜力地区。然而，由于前陆冲断带地形、地表和地下地质结构极其复杂，常规地震勘探技术面临严峻挑战，目标发现和圈闭落实存在很大困难，严重制约了油气发现进程和勘探业务的持续发展。近年来，针对复杂地区的地震采集、处理和解释一体化技术取得了明显突破，发现并储备了一批具有战略意义的勘探目标，为塔里木、准噶尔、鄂尔多斯、四川等盆地的勘探不断取得突破和中国石油“十一五”油气储量、产量的持续增长发挥了重要的支撑作用。

地震成像是透视地下地质结构，优选有利勘探目标，评价开发油气藏的核心技术，是从实践到认识再到实践的关键环节。随着油气需求的快速增长和勘探开发程度的不断加深，地震成像技术面对的领域和对象已经发生了重大变化，成像目标已从中浅层的大型、完整、结构相对简单的构造向中深层复杂断块、碳酸盐岩、火山岩、薄层小型砂体、基岩潜山等复杂目标转变，地震成像技术面临的地质对象越来越复杂，目标越来越隐蔽，油气生产对地震成像技术的要求也越来越高。总体看，地震成像技术面临复杂地区、复杂构造、复杂岩性等诸多挑战，而复杂地区首当其冲。

近年来，针对复杂地区、复杂构造的波场去噪、近地表结构精细反演，以逆时偏移（RTM）为代表的波动方程成像等关键技术发展迅速，应用成效显著。本书是中国石油勘探开发研究院在大量调研工作的基础上，结合近年来参与我国中西部复杂地区地震成像技术攻关研究所取得的成果、认识和经验，组织有关专家编写完成的一部内容全面细致、理论方法严谨、技术示范真实可靠的学术著作。其中多数内容是中国石油勘探开发研究院地震成像专家多年来紧跟国际前沿，自主研发的创新技术，也是其多年来的技术积淀。部分技术、成像理念国际领先，在行业内发挥了技术创新、技术指导和技術引领作用。

本书系统总结了复杂地区地震成像技术及其应用效果，是一本适合不同层面需求的技术参考书。相信该书不仅对提高技术人员的专业素质和管理人员驾驭技术应用的能力，乃至提高科研院所地球物理教学水平具有重要的参考价值，而且对地震勘探技术的创新发展、推广应用和高级技术人才培养具有重要的推动意义。

中国科学院院士 

2012年8月18日

# 前 言

地震勘探是一项系统工程，也是油气勘探开发的主导技术。地震成像是这项系统工程中的核心环节，也是其最终成果和效益的集中体现。地震成像技术近年来得到了快速发展，基于声学介质的波动方程成像技术已逐步成熟，CGG-Veritas、WesternGeco、TGS和东方地球物理勘探有限责任公司等大型技术服务公司推出的各向异性逆时偏移（RTM）技术已经开始了规模化生产应用，复杂构造、盐构造及盐下构造的成像效果十分明显。随着硬件技术的快速发展，成像技术已经朝着全波动方程反演技术的方向发展，预计未来五到十年，全波形反演（Full Wave Inversion）技术也将逐步成熟并得到推广应用，这标志着地震成像技术即将进入全波动方程反演的全新时代。速度建模技术作为波动方程成像的核心技术，将越来越体现出灵活、可控、交互解释与成像一体的优势，基于成像角道集的射线层析反演、井控模型校正、双域扫描各向异性参数更新和全波形反演等速度建模技术必将带来地震成像技术的革命。

在我国陆上复杂地区的特殊地震地质条件下，地震成像技术本身也是一项复杂的系统工程，在去噪、静校正、成像方法和速度建模等诸多环节面临挑战。在地表、地下双重复杂的条件下，仅仅依靠某项技术的进步无法真正解决复杂山地、复杂构造的低信噪比和准确成像问题。必须理论联系实际，系统研究，配套解决。譬如由中国石油勘探开发研究院提出的基于起伏地表波场保持的处理解释一体化叠前成像思路和方法，就是针对复杂地区地震成像问题提出、研发、配套的系统化解决方案，代表了当前最先进的地震成像理念和技术发展趋势。

本书系统论述了适合复杂地表，特别是复杂山地、复杂构造地震成像的理论、方法、关键技术及发展趋势；首次全面、细致地介绍了复杂地区地震资料前期处理、成像、解释一体化的完整流程、关键环节和配套技术；强调指出成像过程实际就是一个解释的过程，成像结果出来了，解释结果也有了；突出了单项技术的有效组合与适用条件；展示了典型地区、典型范例的地震处理过程和成像效果。既是一部集理论、技术、方法和示范于一体的教材，也是一本贴近实践、技术研发、技术咨询与应用的参考书。

本书共分为5章。第1章绪论由韩永科编写，重点交代了复杂地区的概念、技术需求、成像技术难点和发展趋势；第2章偏移成像与速度建模方法原理由崔兴福、张才编写，重点介绍了地震成像理论的发展历程、基础理论、方法的

变革与发展趋势等内容；第3章复杂地区地震成像技术由胡英、徐凌、首皓、王春明等编写，主要介绍了适合复杂地区的主流成像方法和关键技术，以及配套集成等方面的内容；第4章复杂地区地震成像技术应用由韩永科、徐凌、胡英、王棣、首皓等编写，以我国复杂山地、起伏大沙漠、沟壑黄土塬、浅海滩涂区四类复杂地区的技术示范、技术应用和典型目标的成像效果为重点，首次全面介绍了中国石油勘探开发研究院物探技术研究所近五年来针对复杂地区的最新处理成果。同时简单介绍了国外落基山和安第斯山前的地震成像技术，起到技术类比的作用；第5章复杂构造地震成像技术展望由韩永科、胡英编写，包含了复杂地区新技术、新方法的最新调研成果，对未来技术发展趋势和面临的挑战进行了客观论述。全书最后由韩永科负责统稿。

本书的编写得到了中国科学院贾承造院士和中国石油勘探开发研究院常务副院长周海民教授、副院长邹才能教授和刘雯林教授的指导和帮助；中国科学院地质与地球物理研究所刘洪研究员，中国石油勘探开发研究院物探技术研究所张研、姚逢昌、谢占安、张颖、陈立康、徐基祥等专家和西北分院王宇超、李菲等专家对书稿提出了具体修改建议；徐佑平、孙虎生、齐莉、梁宏、刘卫东、王春梅、杨晓安、宋雪娟、张素梅、孙荣、秦臻、郭宏伟、郭岩松、高银波、李萌、张征等参与了书稿相关资料的收集、图件编制和部分文字的编写工作。在本书正式出版之际，谨向他们表示衷心的感谢！由于编者水平所限，书中一定存在不妥之处，诚恳希望广大读者批评指正。

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 复杂地区的概念与地震成像技术需求 .....	1
1.2 复杂地区地震成像技术难点 .....	6
1.3 复杂地区地震成像技术发展趋势 .....	8
<b>2 偏移成像与速度建模方法原理</b> .....	11
2.1 偏移成像与速度建模概述 .....	11
2.2 偏移成像方法原理 .....	15
2.3 速度建模方法原理 .....	45
<b>3 复杂地区地震成像技术</b> .....	61
3.1 复杂地区近地表地震波散射效应 .....	61
3.2 复杂地区近地表地震处理技术 .....	69
3.3 复杂构造叠前深度偏移技术 .....	100
<b>4 复杂地区地震成像技术应用</b> .....	120
4.1 前陆冲断带地区地震成像技术应用 .....	120
4.2 塔中大沙漠地区地震成像技术应用 .....	185
4.3 沟壑黄土塬地区地震成像技术应用 .....	198
4.4 滩海地区连片处理关键技术应用 .....	206
<b>5 复杂地区地震成像技术展望</b> .....	217
5.1 速度反演技术 .....	217
5.2 偏移技术 .....	220
5.3 偏移前预处理技术 .....	221
<b>参考文献</b> .....	223

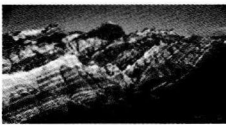

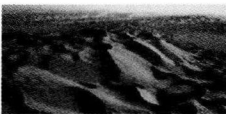


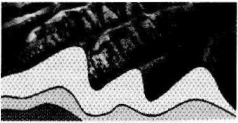




# 1 绪论

## 1.1 复杂地区的概念与地震成像技术需求

对于油气勘探工程（特别是地震成像技术）而言，相对简单的地区是指海上、平坦陆地（包括冲积平原、沙漠、戈壁等）和起伏不大的丘陵地带。复杂地区是指地形起伏剧烈，地表结构、岩性变化较大，地下断裂发育，结构破碎，地层变形严重，构造极为复杂的地区。这种双重复杂的地质条件给地震勘探工程设计、施工及后期成像、解释带来了相当大的困难，特别是给地震成像技术带来了极大的挑战。中国陆上油气勘探面临的复杂地区主要有前陆冲断带、起伏大沙漠、沟壑黄土塬和滨海滩涂区四种类型（表 1.1.1）。

表 1.1.1 复杂地区地表条件及成像难点分析

地区分类	地质地貌图	表层结构图	基本特点	成像难点	关键技术
前陆冲断带		 高速—高陡地层 高速砾石 戈壁沙漠 农田	山形陡峭； 地层倒转； 岩性剧变； 构造复杂	散射噪声发育； 波场极其复杂； 近地表精确速度反演困难	散射去噪； 表层精确反演与速度建模技术； 波动成像
起伏大沙漠			流动沙丘； 变化无常； 剧烈起伏； 低速带厚	散射噪声发育； 低速带厚，静校正难度大	散射去噪； 精细静校正技术； 速度分析
沟壑黄土塬			沟壑纵横； 地形起伏； 降速带厚	散射噪声发育； 地形复杂，低、降速带厚，静校正难度大	散射去噪； 静校正； 速度分析
滨海滩涂区		 鱼塘 泥沼 潮沟 砂体 滨海	泥沼、潮沟发育； 低降速带变化大	各类干扰大； 表层结构变化大，静校正、能量补偿、连片处理难度大	组合去噪； 静校正； 连片处理技术

### 1.1.1 前陆冲断带复杂山地

前陆冲断带位于前陆盆地的盆山结合部，沿造山带呈线形分布，是我国中西部含油气盆地最主要的勘探领域。由于其位于盆地周缘造山带一侧，一般都经过了多期构造运动，决定了其地震地质条件极其复杂多变，对于地震勘探而言，是最为复杂的一种类型（图 1.1.1）。

对于我国中西部前陆冲断带复杂山地高陡构造地震勘探技术来说，虽然不同盆地各有差异，但其共性特点非常突出：地表以复杂山地为主，地形起伏剧烈，岩性变化很大，地层陡立，新老地层相互叠置。从山区到盆地其表层结构由基岩、沉积岩出露区向陡峭山地、巨型砾石堆积区、巨厚疏松黄土、戈壁、沙漠、农田区过渡；地下以强烈变形的复杂高陡构造为主，深浅构造差异很大，结构非常复杂，各向异性很强。复杂山地地区主要分布在塔里木库车北缘山前带、塔西南山前带，准噶尔盆地南缘山前带、西北缘，四川盆地龙门山前、大巴山一米仓山前带，柴达木盆地西北缘山前带，酒泉盆地祁连山山前带，吐哈盆地博格达山前和火焰山山前带等，这些山前带在地质上统称为前陆冲断带，是油气勘探（尤其是地震成像）最困难的地区，也是油气勘探最有潜力的地区。

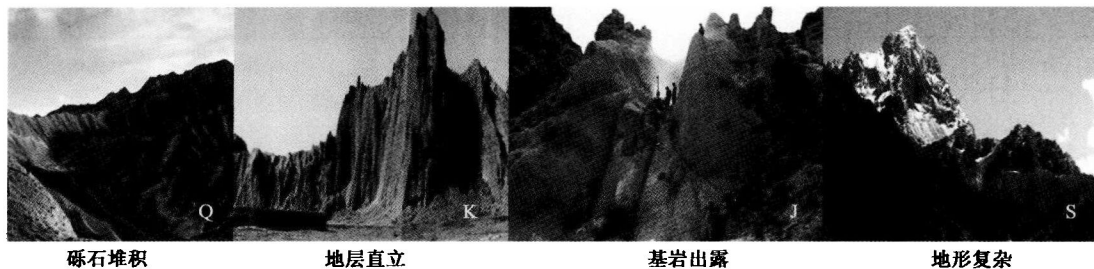


图 1.1.1 几种典型的前陆冲断带地表

复杂山地条件下，应用反射波地震原理采集得到的地震原始数据干扰信号能量强、有效反射信号能量弱、波场极为复杂，给后期地震成像带来极大的困难。主要问题集中在三个方面：一是由于地表速度横向剧烈变化带来的时差问题（图 1.1.1），解决不好直接影响最终资料的品质；二是由于地形剧烈起伏造成各类不规则散射噪声，常规处理还没有十分奏效的办法，严重影响了地震资料的信噪比；三是表层、地下结构复杂，难以准确刻画构造、速度模型，叠前深度偏移结构达不到解释要求（图 1.1.2）。多年来，地震资料处理工作者在这三个方面进行了不断的探索和实践，进行了新技术的开发、成熟技术的配套应用、处理流程的优化组合，使复杂地区地震资料品质得到明显改善，为正确认识地下构造奠定了资料基础。但是，目前复杂地区地震成像技术仍然面临各种难题，比如复杂山地的地震成像，国外技术服务公司涉及较少，仅在加拿大落基山前和南美洲的安第斯山前有少量应用。以前 Veritas 公司（现 CGGVeritas）为代表的服务公司在 20 世纪末期推出了从起伏地表开始叠前深度偏移的理念。这个思路是解决前陆冲断带逆冲构造成像问题最合理的思路，但是在实际应用中遇到了许多困难。主要集中在如何修正静校正和速度建模方法，使之与起伏地表成像算法相匹配。国内从 20 世纪 80 年代开始，在塔里木盆地和准噶尔盆地投入了大量地震工作量。但是相应的地震资料处理还是沿袭了以水平均匀介质假设为基础的叠后时间偏移技

术。直到2003年,中国石油天然气股份有限公司召开了第一次勘探技术研讨会,会议明确强化工程技术发展的主题,落实了针对前陆冲断带复杂构造地震成像技术攻关的任务。为此,中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司设立了“复杂山地山前高陡构造地震真地表叠前成像技术攻关”项目。经过几年攻关,取得了一定的成果。

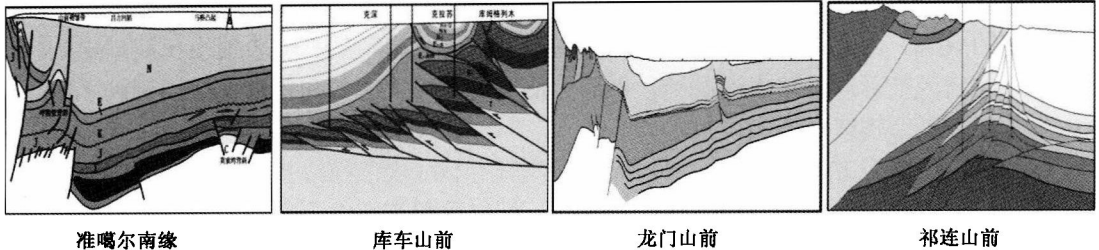


图 1.1.2 山前带地区具有十分复杂的构造模式

目前针对前陆冲断带叠前深度域成像的物探技术攻关主要集中在两个方面:(1)沿用多年的基于水平叠加和大平滑基准面成像处理技术;(2)近年来开展的波场和速度场保真处理技术结合地表出发的叠前成像技术。前者,技术已经成熟但理论上并不适合复杂山地的正确成像;后者,技术较新,仍处于探索和逐步成熟阶段,但代表今后叠前深度域成像的发展趋势。目前,复杂山地地震成像技术需求主要表现在以下四个方面:

(1) 波场保持叠前处理技术。在复杂山地探区,静校正问题不再作为一个孤立的问题而存在,必须考虑静校正量应用前后对地震波场的影响,也就是对叠前偏移成像的影响。在解决复杂山地静校正问题时要与叠前偏移技术进行一体化考虑,使静校正后的结果能够适应叠前偏移的要求,也就是说要保持地下的速度场特征,满足从起伏地表开始进行叠前深度偏移的需求。该项技术的特点是利用初至波进行静校正计算,研发高精度近地表速度模型反演软件建立近地表速度模型,在取得近地表速度模型的基础上,进行复杂构造的整体建模,最后做地表出发的叠前深度域成像。该技术的特点是摒弃常规的同相轴拉平和常规静校正技术,主要考虑地震反射波同相轴的参差和起伏所携带的地表和地质特征,如地表高程的起伏、近地表速度的变化、地下构造起伏、地下介质速度的横向变化等。常规处理中的静校正问题、低降速带问题、基准面校正问题等,统统归结到复杂构造整体速度建模和地表出发的深度域叠前成像来解决。

(2) 散射噪声衰减技术。由于地表起伏和岩性剧烈变化引起的散射噪声是复杂山地地震成像技术面临的核心问题之一,直接影响到地震资料的信噪比。在实际地震记录中,散射波是普遍存在的,不同尺度或不同结构的非均匀性会形成不同的地震散射波。一般说来,地形起伏、岩性变化和构造因素都能产生比较强的散射噪声,无论哪种因素形成的散射波,使用常规的建模方法和正演模拟计算方法都难以准确地得到其地震波场响应。为此,需要定量地研究散射波与产生它的地下介质之间的关系,改进常规建模方法和正演模拟计算方法。现在科学家们基于地震波传播规律,开始从理论上研究和认识地震波散射的实质,尝试用统计学方法描述非均匀介质模型,并研究采用非均匀介质中的弹性波波方程进行正演模拟计算由近地表非均匀性引起的散射噪声并加以分离,可能是一种有效途径。

(3) 高精度速度建模技术。由于前陆山区高速层出露地表,地震波的速度常在每秒几千

米的数量级，速度的误差表现在深度上十分可观。近地表速度不准确导致地震波在近地表出射时会有一个小角度的偏差，随着地震波传播路径的延伸，传播偏差逐渐增大，最后严重影响中深层目的层的成像效果，因此建立准确的近地表深度—速度模型已成为地下准确成像的迫切需要。由于地震反射波缺少近地表反射信息，采用基于反射波的常规速度分析技术不能满足近地表速度建模需要，而基于回折波和折射波的层析反演方法在近地表速度求取时能够取得理想的效果。因此，在叠前保真处理的基础上，进行高精度近地表速度反演，得到保持地表形态的较为准确的近地表速度场，再加上地下复杂构造建模和精细速度场刻画手段，形成地表和地下复杂构造整体建模技术。

(4) 高精度成像方法。地震波偏移成像是地震资料处理的核心技术之一，其主要作用是使反射波归位，绕射波收敛，提高横向分辨率，恢复反射波在地下空间位置的波形和振幅特性。因此，偏移成像结果不仅直接影响着地下构造边界及几何形态的确定，也影响着其他地质岩性参数的反演精度。地震成像方法经历了较长的发展过程，整体的发展趋势是从基于波动方程积分分解的 Kirchhoff 偏移和基于波动方程微分解的单程波成像向基于双程波动方程的逆时偏移发展。由声波方程偏移成像向弹性波波动方程偏移成像和黏弹性波动方程偏移成像发展。

叠前深度偏移在复杂地区的地震成像中起着非常重要的作用，标量波动方程是常规偏移算法的数学基础，但这些算法不能区分多次波、转换波、面波或干扰，进行偏移的输入数据中的任何地震能量都看做是反射波。目前常用的叠前深度偏移算法按照实现方法的不同可分为三类：一是基于标量波动方程积分分解的算法（Kirchhoff 偏移）；二是基于标量波动方程有限差分解的算法（有限差分偏移）；三是基于  $f-k$  变换来实现的偏移算法（Fourier 偏移）。对于每一种偏移算法，都希望它能够准确地处理陡倾角地层，有效地处理横向和垂向速度变化，高效率地完成工作。但是每种算法都有自己的特点，实际生产中需要根据地震资料特点、地质构造目标复杂性、时效性等综合考虑选择最合适的偏移方法。由于前陆冲断带地下构造相当复杂，单纯依靠基于射线理论的 Kirchhoff 叠前深度偏移方法难以得到精确的成像结果。应该积极发展更接近地下波场真实情况的双程波波动方程叠前深度偏移技术。

### 1.1.2 起伏大沙漠地区

起伏大沙漠主要指沙丘高度达到 30m 以上的大型沙漠区，沙漠厚度大，流动沙丘发育，地形变化多端，表层结构复杂，存在疏松黄土、流沙层、砾石层等结构，岩性纵横向变化相对剧烈。主要分布在塔里木、准噶尔盆地腹部，河西走廊北部银根—额济纳旗等盆地，是地震成像难度较大的地区之一（表 1.1.1）。

起伏大沙漠表层条件下，地震采集得到的地震原始数据面波散射干扰信号能量相对较强，静校正问题突出，给后期地震资料处理带来极大的困难。因此，对于起伏大沙漠地区的地震成像而言，技术需求主要表现在三个方面：

(1) 精细静校正技术。由于地表速度横向剧烈变化、低速带巨厚等因素所带来的时差问题，很难在后期资料处理中解决好；另外由于沙丘流动，野外静校正数据与实际采集数据不匹配，这就要求室内资料处理阶段必须开展大量试验、分析处理工作，精细解决静校正问

题,才能获得满意的结果。

(2) 不规则噪声衰减技术。由于表层岩性变化、沙丘起伏造成各类不规则散射噪声——沙丘大合唱,常规处理手段很难去掉这些不规则噪声,严重影响了地震资料的信噪比。因此,开展了散射噪声机理研究,也进行了新技术的开发、组合压噪、技术的配套应用等工作,但是对于诸如面波引起的散射噪声、侧面干扰等仍然没有好的解决办法,需要进一步研究,发展针对性技术。

(3) 能量补偿技术。巨厚沙丘速度较低,一般在 $280\sim 800\text{m/s}$ ,激发能量损失很大,并且在空间上极不均匀,目前主要采用地表一致性能量补偿等后续手段,还不能完全解决能量快速衰减的问题。因此,如何做好能量补偿,需要在这类地区进行地震成像方法研究、试验和完善。

### 1.1.3 沟壑黄土塬地区

沟壑黄土塬区是中国最典型的一种地质地貌,发育“崖(断崖)、沟(河沟)、谷(深切谷)”和“塬(山顶平地)、梁(连续山脊)、峁(独立山头)”等复杂地形,主要分布于鄂尔多斯盆地西南部,这种地形给地震工程设计、施工及后期处理带来相当大的困难(表1.1.1)。沟壑黄土塬区地震成像面临的主要问题是静校正和散射噪声衰减问题。

(1) 精细静校正技术。由于沟壑纵横,地表剧烈起伏,疏松黄土层巨厚等因素所带来的时差问题很难在后期资料处理中解决好;另外由于受雨水冲刷、切割等作用造成地形不断变化,不但给野外静校正量测量带来困难,也可能造成野外静校正数据与实际采集数据的不匹配问题,这就要求室内资料处理阶段必须开展大量试验、分析处理工作,精细解决静校正问题,才能获得满意的结果。

(2) 散射噪声衰减技术。由于地表剧烈起伏所引起的散射噪声是沟壑黄土塬地区地震成像技术面临的关键问题之一,单项去噪技术很难奏效,使用常规的建模方法和正演模拟计算方法也难以准确地得到散射波场的响应。因此,在这类地区如果想提高地震资料信噪比,就必须开展地震波传播规律研究,从理论上研究和认识地形引起的散射波场传播规律,尝试采用弹性波波动方程进行正演模拟计算由于起伏、突变近地表引起的散射噪声并加以分离,才能够达到预期目标。

### 1.1.4 滨海滩涂地区

滨海滩涂地区在业内一般简称滩海地区,特指渤海湾盆地沿海一带,这一地区工商业、渔业发达,人为干扰严重,地表遍布鱼池虾塘、工业区和码头,河流、泥沼、潮沟、疏松砂层等造成这一地区表层结构比较复杂。如果除去人为干扰,这类地区与西部复杂山地相比还是要简单一些,地震资料的信噪比较高(表1.1.1)。

近年来的三维精细地震勘探表明,以往人们不太重视的静校正问题明显存在,尤其是在河口、泥沼等地区,越来越多的资料证明该地区低降速带变化往往比预计的要复杂得多,因此在静校正方面还有很多工作需要研究。另外,由于这些地区大多都属于成熟探区,分年度、分区块、不同采集因素的地震资料比较丰富,如何在叠前、叠后大面积连片处理中获得精细勘探阶段所需要的“高、保、真”地震数据体也存在诸多难题。

## 1.2 复杂地区地震成像技术难点

近年来的地震成像技术应用与进展说明，叠前时间偏移和叠前深度偏移是解决复杂地区地震成像的有效手段。特别是近几年发展起来的逆时偏移（RTM）叠前深度域成像技术，在海上或简单地表很好地解决了盐构造、高陡构造的成像问题。但是，面对复杂地表、复杂构造，这些成像方法依然面临诸多挑战。

### 1.2.1 近地表结构复杂，准确的静校正量难以求取

静校正是复杂地表区常规地震资料处理的关键技术。通常包括地形静校正量，近地表速度变化静校正量，以及激发、接收延迟和测量误差所产生的随机性静校正量三个方面，常用的静校正方法有折射静校正、层析静校正和剩余静校正。常规资料处理中解决静校正问题的基本思路是：先求取近地表低速带速度，从地表起计算因近地表速度变化产生的静校正量，校正至地下稳定的高速层，再以此稳定的高值速度向上填充至地表以上的一个水平基准面，并将地震旅行时校正至该水平基准面上，从而克服地形变化的影响。在此基准面上再应用水平叠加理论为基础的地表一致性剩余静校正技术，以进一步消除短波长静校正量对成像效果的影响。然而，在复杂山地地震勘探中，近地表速度横向变化剧烈，缺乏稳定的折射层，一般难以满足折射静校正技术应用的前提条件；层析静校正方法虽不受稳定折射层的限制，但受算法精度的限制，处理应用中虽有些效果，仍难以满足前陆冲断带勘探的需求。此外，在复杂山地的地震资料处理中，低速带仅仅是一个相对的概念，由于近地表的速度变化很大，从几百米每秒到四五千米每秒，处理中很难选择适合的替代速度。比较适合表层低速区域的替代速度，对于表层高速区域却仍是相对低速。反之，若选择较高速度作为替代速度，需要获取较精确的上千米深度范围内的速度模型，这是目前常规处理技术所面临的最大的难题。

### 1.2.2 复杂地表引起的散射噪声频带宽、能量强，有效压制极为困难

散射噪声不仅仅是复杂山地特有的噪声，东部地区也有，区别在于东部地区的噪声分布主要集中在低频部分，大多在 10Hz 以下，一般不超过 20Hz。虽然有时能量很强，但影响的频段有限，压制起来比较容易，类似情况也包括前陆冲断带的山前部分。但在前陆勘探进山之后，噪声的情况就发生了很大的变化，散射噪声不再是集中于低频端的有限频宽，它变成一个广谱的噪声，频带宽度几乎覆盖有效信号的全部频段。由此带来两个难题，一是全频段散射噪声压制难，由于全频段散射噪声与有效信号在频带分布上几乎没有差别，因此以往行之有效的用频率域滤波压制散射噪声的方法难以奏效；二是高频线性噪声压制难，因为要压制的线性噪声的频率越高，其压制效果受静校正的影响越大，而静校正的效果同时是建立在高信噪比基础之上的。这些问题将最终导致前陆冲断带的地震资料信噪比偏低，影响叠前偏移速度分析的效果。

### 1.2.3 地表和地下结构双重复杂导致难以获得准确的速度模型

叠前深度偏移是目前精度最高的地震成像技术。决定叠前深度偏移成像效果的主要因素有两项：一是采用的偏移算法与实际地质情况的符合程度，二是用于偏移成像的速度模型的精度。因此，在实际资料处理中，建立比较准确的深度域层速度模型是做好叠前深度偏移的关键。虽然东部油气探区深层的构造形态也相当复杂，断裂同样十分发育，但两者之间存在明显差别，主要区别在于东部地区的复杂构造上部覆盖着大套较稳定的沉积层，建立准确的近地表模型相对容易些，而在西部复杂地区则是老地层直接出露地表，缺少大套稳定的沉积（均匀速度层），速度建模非常困难。由于叠前深度成像对速度的误差比时间偏移敏感，从而引出两个方面的问题：一是如果速度场不准确，那么叠前深度偏移的效果就会很差，速度不准导致的成像误差很容易抵消甚至超过偏移方法改进的效果；二是叠前深度偏移对速度的敏感性为准确的速度分析提供了比叠前时间偏移更好的工具。

到目前为止，速度模型的建立可以大体上分为两类：层状模型和非层状模型。层状模型适合于具有明显反射界面，地质构造相对简单的沉积岩地区。非层状模型又分为块状模型和网格模型，适合于盐丘、逆掩断层发育，构造运动强烈的地质构造建模。在这些地区，层状的沉积环境已经被剧烈的构造运动复杂化，层状模型难以准确地描述速度的分布规律。近十几年来，主要发展了两类叠前深度偏移速度建模技术：一是利用偏移前的道集数据拾取速度，进行旅行时反演，以求取相对准确的偏移速度场，通过剩余层析反演技术修正速度模型的偏差。由于存在焦散和多路径问题，在复杂地质条件下，难以达到较理想的成像效果；二是利用共反射点（CRP）道集进行深度聚焦分析和剩余曲率分析，通过判别共成像点道集（CIG）是否拉平，来判断速度模型的合理性。在西部地区由于信噪比低，同时存在很强的速度横向差异和速度各向异性，很难用共反射点道集拉平来判断速度模型的准确性。若速度模型不对，如何去更新它，这需要相当多的地质知识和地下沉积规律的充分认识，对资料处理人员而言，是十分困难的。但现有的速度建模方法都存在一定的假设条件（例如均匀介质、短排列等），对于前陆冲断带复杂速度场建模的适应性较差。总而言之，尽管叠前深度偏移在处理复杂介质时具有许多优点，但在实际应用过程中也存在一些缺点。除了高成本外，介质的复杂程度也会降低偏移速度分析的灵敏度，最终影响成像效果，这正是叠前深度偏移在我国难以大规模推广应用的一个重要原因。

### 1.2.4 大面积三维连片处理技术面临的难题

滨海滩涂区大面积三维连片处理就是根据成熟探区地质综合研究和整体认识的要求，把同一地区不同年份、相邻区块、不同采集因素的分片地震数据进行整体性处理，最终形成一个高质量的统一数据体。由于不同区块数据采集过程中存在观测系统、采集仪器、激发接收方式等因素的差异，导致在资料处理过程中面临输入数据非规则化、信号（波形）特征不稳定、能量补偿和静校正、数据存储等一系列问题，其中数据规则化和信号一致性处理是连片处理面临的重大技术难题。

## 1.3 复杂地区地震成像技术发展趋势

近年来,以 GPU 技术为代表的计算机硬件得到了快速发展,计算机的运算、存储能力得到极大的提高,使得具有海量运算要求的波动方程反演成为可能,最具代表性的就是逆时偏移和全波形反演技术快速发展和应用。新技术在海域地震成像中取得了明显效果,但在类似我国前陆盆地复杂地表区应用遇到了一定困难,主要原因是与之配套的前期处理和速度建模难度相比增大。根据近期攻关研究进展,基于波场保持的各向异性双程波动方程偏移技术(RTM)仍然给陆上复杂地区地震成像带来了希望和光明。因此,彻底摒弃以水平层状介质假设为前提的常规处理方法,发展适合起伏地表的双程波地震叠前深度偏移的波场保真处理技术势在必行;另外,加强近地表模型精确反演技术的研究,提高复杂构造速度建模精度,形成与逆时成像配套的建模技术十分关键。当然,复杂构造地震成像的最终解决方案必将是叠前全波形反演(Prestack full waveform inversion),即同时解决振幅和相位两个问题。

### 1.3.1 计算机软硬件能力

随着计算能力的提高,地球物理软件的功能和计算精度也有了长足的发展。CPU/GPU 异构高性能计算平台已经在叠前地震数据处理中发挥了巨大的作用。很多石油公司已经拥有了或多或少 GPU 节点的 CPU/GPU 计算机群。在这样的机群上,波动方程叠前时间偏移(中国科学院地质与地球物理研究所)、波动方程单程波叠前深度偏移(同济大学)、波动方程全三维偏移(同济大学)和三维逆时偏移(CGGVeritas 公司)表现出了很高的加速比。GeoStar 公司联合中国科学院地质与地球物理研究所、Tsunami 公司、中国石化石油物探技术研究院等分别利用 CUDA 开发工具在 GPU 计算环境下实现了 Kirchhoff 叠前时间偏移和波动方程地震叠前深度偏移、逆时偏移等技术。GSS 公司推出了支持 GPU 计算的地震像素法地质成像软件(SVI)。这些技术使得 GPU 计算技术在石油物探领域的应用向前推进了一大步,目前主流的地球物理软件开发商有 SLB—WesternGeco、CGGVeritas 和 Paradigm 三家公司。

地震成像对高性能计算的需求是计算能力得以快速发展的主要动力之一,同时高性能计算的发展也带动地球物理技术的进步,可以说地球物理技术与高性能计算的发展相辅相成。随着勘探对象的复杂化和勘探要求的日益精细化,以及地震资料的采集、处理、解释技术的发展,尤其是高密度、超万道地震采集技术的应用,海量地震数据与计算量的不断增加就使得地震勘探对高性能计算提出了更高的要求。

由于勘探目标的地质结构越来越复杂,尤其是我国复杂地表与地下构造的勘探,叠前偏移技术已经成为解决复杂构造成像的关键技术,但是叠前偏移技术导致计算量呈指数式增长,已经成为制约该项技术应用的瓶颈。单靠扩大 CPU 和并行集群的规模在低碳环保为主流的当今社会已经难以满足地震勘探的要求。据 IBM 公司统计数据,地震勘探中地震资料常规处理所需的计算量大约是每个数据 105 次浮点运算, Kirchhoff 叠前深度偏移所需的计算量大约是 106 次浮点运算,而基于波动方程的叠前深度偏移所需的计算量大约是每个数据 108 次浮点运算。叠前时间偏移不像叠前深度偏移那样对计算性能的依赖性那么强,目前已



经纳入了常规地震数据处理流程。而叠前深度偏移尤其是逆时偏移考虑到了波场的传播特性,需要进行正演与波场延拓,所需计算量极大,因而需要海量存储、高速计算与大内存支持。集群计算以其强大的并行处理能力、移植性强、可扩展性好等特点在叠前深度偏移方面备受关注,但是面对逆时偏移与全波形反演依然不能完全满足计算需求。

近年来,网格技术一直受到计算机界青睐,近期出现的云计算正日益受到业界关注。它是在分布计算、并行计算、网格计算等基础上发展起来的一种全新数据密集型超级计算模式,旨在通过网络把多个成本相对较低的计算实体整合成一个具有强大的计算能力的完美系统,并借助于诸多先进的商业模式把这种强大的计算能力分布到终端用户手中。Vaquero 等将云定义成一个包含大量可用虚拟资源的资源池。该技术具有超大规模的计算能力、虚拟化、高扩展性、高可靠性、服务多样性等特点。云计算应用了一系列最先进的计算及网络技术,包括虚拟化技术、分布式海量数据存储和分布式并行编程等。数据中心虚拟化是目前的研究热点,包括网络虚拟化、存储虚拟化、服务器虚拟化等,这些都是云计算的基础。

纵观高性能计算机的发展从早期的标量计算机、向量机、并行计算机。到如今的 PC 集群、超级计算机、GPU 计算、FPGAS 可重构计算技术。每一种产品的出现都使得相应时期的地震勘探技术得到快速发展。进入新世纪以来,随着新材料、新技术的不断进步,高性能计算产品更新换代的频率明显加快。由于计算机工业发展日新月异,所以关注高性能计算的发展动态及其在地震勘探中的应用前景具有十分重要的现实意义。

### 1.3.2 数据处理方法

数据预处理:在以提高道集质量为目的的预处理方面除了静校正、叠前去噪技术发展较快以外,近年来最重要的技术发展就是数据规则化技术,基于数据映射理论的 DMO 和反 DMO 的方法和基于傅里叶变换的叠前道内插的方法。值得重视的是,在复杂山地探区,静校正问题不再作为一个孤立的问题而存在,必须考虑静校正量应用前后对地震波场的影响,也就是对叠前偏移成像的影响。在解决复杂山地静校正问题时要与叠前偏移技术进行一体化考虑,使静校正后的结果能够适应叠前偏移的要求,也就是说要保持地下的速度场特征,满足从起伏地表开始进行叠前深度偏移的需求。核心思想是利用初至波进行静校正计算,研发高精度近地表速度模型反演软件建立近地表速度模型,在取得近地表速度模型的基础上,进行复杂构造的整体建模,最后做地表出发的叠前深度域成像。该技术的特点是摒弃常规的同相轴拉平和常规静校正技术,主要考虑地震反射波同相轴的参差和起伏所携带的地表和地质特征,如地表高程的起伏、近地表速度的变化、地下构造起伏、地下介质速度的横向变化等。常规处理中的静校正问题、低降速带问题、基准面校正问题等,统统归结到复杂构造整体速度建模和地表出发的深度域叠前成像来解决。

成像算法:随着计算机硬件能力快速提高,以逆时偏移成像(RTM)为代表的双程波动方程成像方法得以实现并得到快速发展和应用。根据最新调研结果,以全波场信息拟合介质模型为手段的全波形反演技术(FWI)已然进入完善应用阶段,其物理实现过程不是将观测的拾取旅行时与计算旅行时相拟合,而是通过不断修正介质模型,达到全波形合成地震图像与全波形记录数据相拟合的目的。利用了更多的波场信息,为构造及速度最为复杂的地区提供高分辨率、高精度模型。其反演的参数有:速度、密度、地震子波等。但是非线性反演