

地震资料分析

——地震资料处理、反演和解释

上册

〔美〕渥·伊尔马滋 著
刘怀山 王克斌 童思友 等译
阎世信 芦文生 陈小宏 牛毓荃 校

石油工业出版社

地震资料分析

——地震资料处理、反演和解释

(上册)

[美] 渥·伊尔马滋 著

刘怀山 王克斌 童思友 等译

阎世信 芦文生 陈小宏 牛毓荃 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面系统地介绍了地震资料分析——地震资料处理、反演和解释技术，全书分上、下册出版。内容包括绪论、信号处理基础、反褶积、速度分析和静校正、偏移、倾斜时差校正和叠前偏移、噪声和多次波衰减、三维地震勘探、深度域偏移成像、深度域地质模拟、构造反演、储层地球物理，以及在各章提供的一些主要理论研究数学公式。

本书概念清晰、图文并茂、叙述细致。强调的是各种处理参数对结果的影响，提供了实际操作经验，理论与实际密切结合。在每章后都附有练习、参考文献和附录。

本书可供从事地球物理专业的科研人员，特别是地震资料处理和地震资料解释人员、地球物理学家、地质学家、大学本科生、研究生和博士生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地震资料分析——地震资料处理、反演和解释 / [美] 渥·伊尔马滋著；刘怀山等译.
北京：石油工业出版社，2006. 8

书名原文：Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of seismic Data
ISBN 7-5021-5266-0

I. 地…

II. ①伊… ②刘…

III. 地震数据 - 数据处理

IV. P315.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 124022 号

Copyright © 2001 by SEG

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transcribed in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording, without the prior written permission of the publisher.

本书经 SEG 授权翻译出版，中文版权归石油工业出版社所有，侵权必究。

著作权合同登记号图字 01-2005-5650

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.cn

发行部：(010) 64210392

经 销：全国新华书店

印 刷：北京晨旭印刷厂

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：95.5 插页：13

字数：2500 千字

定价：398.00 元 (上、下册)

(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

译校人员名单

主 审：阎世信

主 译：刘怀山

译 校：詹世凡 芦文生 牛毓荃 陈小宏 熊金良
王克斌 曹孟起 唐庆宝 杨绍国 童思友
张 进 韩晓丽 贺 懿 姜绍辉 刘 兵
崔树果 涂齐催 王兴芝 周青春 焦叙明
马光华 王坤明 袁汝松 冯永君

出版者的话

由渥·伊尔马滋教授编著的《地震资料分析——地震资料处理、反演和解释》(英文版)一书是近年来国外勘探地球物理界进行物探技术交流和培训时广泛使用的教材。全书不但阐述了传统的地震资料处理技术和方法,而且主要篇幅论述了近16年来发展起来的许多实用的地震资料处理新技术和新方法,诸如:深度域地质模型的建立、深度域地震成像、构造反演、储层地球物理、四维地震方法、四分量地震方法,以及各向异性等,几乎概括了当今地震资料处理的各个方面的内容。

本书语言通俗易懂,概念清晰,图文并茂。虽然正文公式并不很多,但几幅简单的图形和说明,就将深奥复杂的原理介绍得一清二楚。书内所用的公式分别集中在各章之后的附录之中,以备读者查阅。因此,勘探地球物理工作者可以参阅本书,研究感兴趣的实际问题;高等院校可以将本书设为教程,作为相关专业学生的必修或选修课。本书也可以指导地震资料处理分析员,研究并实施有关项目地震数据分析的实用方法,从中得到对算法和处理流程非常有益的提示和改进。

曾经有很多人希望能够将本书介绍到中国,中国海洋大学刘怀山教授等不失时机地经过两年多的努力,将《地震资料分析——地震资料处理、反演和解释》(英文版)上、下册译成了中文。中国石油学会物探专业委员会阎世信副主任等组织有关专家对中译本进行了全面审校。

本书中译本得以出版,要特别感谢作者伊尔马滋先生、SEG出版商,以及SEG北京分部的同仁,特别是程金箴先生的热情支持和帮助。在翻译和校对的过程中,我们每个人都不失时机地进行了重新学习和推敲,对地球物理基础和地震资料处理的许多理论概念都有了更深的理解,确实受益匪浅。由于经验不足,时间仓促,校译过程中难免存在不足之处,欢迎读者批评指正。

另外,原著中彩图变为黑白图后,译文仍采用直译,需该书英文原著或需要书中彩色图件的读者,可直接与SEG联系。

原著序言

本书的第一版《地震数据处理》，已于1987年由勘探地球物理协会（SEG）出版。在此之后，我紧接着就开始着手做第二版的工作，目的是不断的吸收地震工业发生的最新进展。第二版是过去十多年这种不断修订的最新成果。修订过程是基于我自己和他人全面的模型和实际资料研究及开发成果的试验。在修订过程中，我也从大量的实例研究中增添了一系列具有广泛意义而又能说明问题的实际资料例子，同时还阅读了大量的勘探地震学方面的书籍。

第二版包括了地震数据分析的较宽范围——地震资料的处理、反演和解释。系统地对过去15年地震数据分析最重要的新进展做一简短总结。三维地震方法处于油气田勘探开发的主导位置；三维地震数据处理的算法，包括三维倾角时差校正、三维折射和剩余静校正以及三维偏移已成为目前使用的地震数据处理系统中的主要部分。同时，基于预测滤波的噪声衰减技术已应用于地震资料常规处理中，基于拉东变换和波场外推的多次波衰减技术也已成功地应用于野外资料上。

简短地论述三维偏移之后，我们开始进行叠前地下成像的研究。目前，三维叠前时间偏移的有效处理流程，不仅应用于具有不同叠加速度倾斜地下界面的更准确成像，而且还用来得到共反射点道集。这些道集可用来进行叠前振幅反演，以获得振幅随偏移距变化的属性。三维叠前时间偏移为估计三维均方根速度场铺平了道路，三维均方根速度场可由Dix公式转换为三维层速度场。

在进行叠前成像研究的同时，我们也开始了深度域存在强烈的横向速度变化的地下成像研究。在过去的10年中，早期几十年的研究开发，使我们拥有了卓有成效的地质模拟反演方法和深度域成像方法。利用合适的反演方法，对于低幅度构造、复杂断块区和复杂推覆构造区，我们可以得出深度域地质模型的表现形式，它是通过层速度和反射界面的几何形态两组参数加以描述的。三维可视化的强大功能使我们能够建立深度域精确成像的深度地质模型，并建立有效的处理流程。而且，计算机能力的快速增长，使我们能够得到较大数据体的三维叠前深度偏移的地质图像。

为了获得三维叠前时间和深度偏移的成像数据，我们在地震解释中广泛应用三维可视化技术。我们不仅利用基于数据体的解释策略选择时间或者深度同相轴来描绘地下的构造模型，而且也利用地震波的振幅来推断地下沉积岩层的模型。

勘探地震学最前沿的内容包括三个方面，即四维地震方法、四分量地震方法和各向异性，它们都是用来对油气藏进行地震描述，最终实现监测油气藏变化的目的。通过以合理的时间间隔进行油气开发生产的野外三维地震资料的多次勘探采集，我们可以检测储层条件的变化，例如流体的饱和度和孔隙压力，这些变化可能与上次三维测量到下次三维测量的地震振幅变化有关。对储层的时移三维地震检测称为四维地震方法，第四维表示所检测储层的每次检测时间。四维地震方法的主要应用在热采（注蒸汽、火烧）过程中监测蒸汽前缘的空间延伸变化、在二次开采过程中监测注入水前缘位置的空间延伸变化、剩余油藏成像变化、测定流体封堵断层的属性以及探测油水界面的变化。

某些储层利用横波资料可以更好地进行识别和检测。例如，储层上部界面波阻抗变化可

能较小以至于检测不到，但是横波的波阻抗变化可能足够大，使我们能够检测到。通过记录海底的多分量数据，我们就能得到纵波和横波的成像。通常记录的四个数据分量为波场压力、纵向、横向和垂向的质点速度。因此，多分量地震数据记录和分析通常称为四分量地震方法。四分量地震方法主要应用于地下成像的羽状气藏、盐丘和玄武岩，描绘具有比纵波波阻抗变化大的横波波阻抗的储层界面、区分砂岩和页岩、探测从含油砂岩到含水砂岩的流体变化、探测垂直裂缝的方位、绘制烃类矿物的饱和度曲线和油水界面图件。

到目前为止，虽然我们己经认识到储层岩石的各向异性特征。但是勘探地震学基本上仍然是基于各向同性介质的假设。地震的各向异性通常与速度的方向变化有关。例如，对于一个垂向断裂的石灰岩储层，断裂方向的速度比与断面垂直方向的速度低，导致了方位角各向异性。速度的另一个方向变化包括水平地层和与该层平行的断裂，此类例子中，水平方向的速度比垂直方向的速度低，它导致了横向各向同性。

除了继续努力提高目前三维资料时间和深度域应用水平外，在解释各向异性时，地震数据分析的研究和开发集中反映在四维和四分量地震数据的时间和深度域分析方面。

本书的主要内容反映了地震数据分析中日益增加的复杂程度和勘探地震学所取得的进展。上册的研究主要基于三个基本步骤，即反褶积、叠加和偏移的二维常规处理。下册主要研究了二维常规处理以外的内容，即三维地震勘探、地质模拟的地震反演和深度域成像、四维地震方法、四分量地震方法和各向异性。每章都有附录，在附录内包括了该章中所涉及内容的数学公式。同样，地震数据分析在各章节中的实际应用也没有进行太多的理论论述。

如果本书作为大学教程，我建议上册作为大四第一学期的课程，下册作为大四第二学期的课程，或者研究生第一年的课程。当然，也可以将此书作为大四或者研究生基于附录中的关于勘探地震学应用理论内容的第一学期教科书。

如果你是地震分析员，利用本书作为参考书，可以研究相关项目的地震数据分析的实用方法，从中得到对算法和处理流程有用的提示。如果你是勘探地球物理学家，利用本书作为参考书，可以研究你所感兴趣的某些实际应用，它有助于确定与这些应用有关的假设。你也可以学习附录，使自己更深理解感兴趣课题的基本理论。

我对地震方法所怀有的热情始终贯穿于我的整个事业，这份热情来源于我的老师和终生朋友 Jon Claerbout。我非常有幸能够与最有才能的几位同事一起工作，是他们点燃了我对勘探地震学的热情，在此我对他们表示我最衷心的感谢！

首先，我深深地感谢我的技术编辑和终生朋友 Steve Doherty，是他小心谨慎、敏锐迅速地做了整个编辑工作，使得本书清晰和准确。Steve 还是第一版的编辑，不管是那时还是现在，他都与我风雨同舟。感谢 Steve 的努力和贡献。作为本书的部分技术编辑，我还得到了李志明的大力帮助，是他编辑了从 A 到 J 的附录，Joe Stefani 编辑了附录 L，John Toldi 编辑了第 11 章。我衷心地感谢他们认真仔细地编辑文字、调整方程及引入清晰推导。

其次，我要向我原稿的技术编辑 Judy Hastings 表达我最诚挚的感激之情，感谢她对原稿始终如一的精心编辑，使我能够保持工作进度。感谢 Judy 得体地处理了我的各种错误。同时，我感谢 SEG 出版经理 Ted Bakamjian 在出版发行过程中表现出的出色协调能力以及对我大力的支持。

在此，我要特别感谢 Cyril Gregory，Irfan Tanritanir，Ferudun Kilic，Orhan Yilmaz，周福根，Ma Xae Ling 和 Huseyin Ozdemir，是他们帮我做了许多实例研究和某些模型资料及实际资料的试验。尤其是 Cyril 在我 1996 年的 SEG 巡回演讲中，帮我建立了许多研究实

例，这些实例都包含在第 10 章中；在过去的 10 年中，Cyril 还参与了许多与这项工作有关的项目。Irfan, Ferudun 和周福根都给我做了大量的研究实例，这些研究也包含在第 10 章中。Orhan 做了第 11 章中四分量数据的处理。总之，能够有这么多优秀的同仁帮我分担这一重担，我感到无比的荣幸。

感谢 David Lumley 和 Chevron 为四维地震方法提供了许多实例；感谢 Moshe Reshef, 他合成了第 3 章和第 8 章中所用试验的数据体；同样，我感谢 Evgeny Landa, 他合成了第 9 章中所描述试验的数据体；我还要感谢 Ed Crase, Chris Taylor, Dave Nichols, Duane Dopkin, Gerald Kidd, Rob Bond, Cerys Biancardi, Davud Babayev 和 Lee Bell, 他们给我提供了许多实例，并帮我建立了许多实例。再倒退 10 年，我相信还有许多与这次修订有关但记不起名字的同事，在此，我对他们表达我最深的感谢。

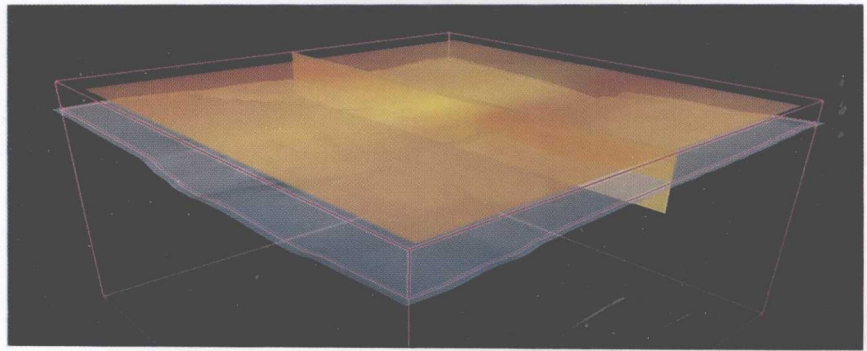
感谢 Chevron, Mobil, Britannia, Talisman, Husky Oil, BP - Amoco, Shell, AGIP, Total, BHP, Gulf Canada, ONGC, 中国石化胜利油田, Saudi Aramco, 以及其他许多公司（有的匿名）提供给我野外资料，使我能够完成我的试验。

感谢 Damir Skerl, Western Geophysical, Rutt Bridges, Landmark, Schlumberger, Geco - Prakla, Walt Lynn, PGS, 特别是 Eldad Weiss 和 Paradigm Geophysical, 他们对我的整个工作给予了最宝贵的支持和鼓励。

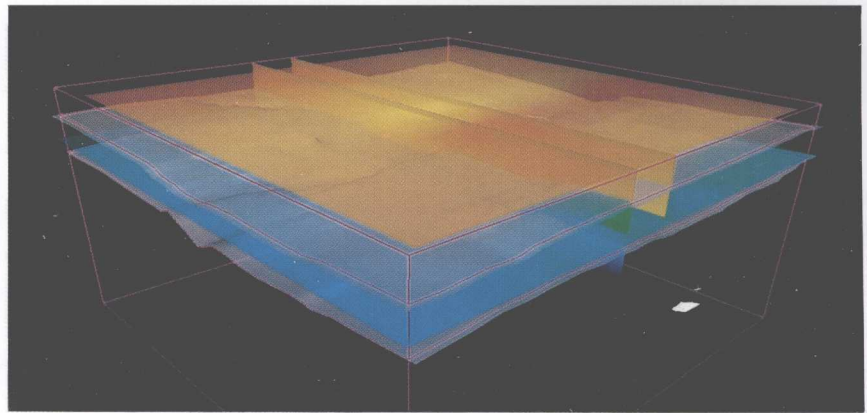
最后，我特别感激我的妻子 Hulya 和我的儿子 Esen。我由衷地感谢她们对我的爱和支持。毫无疑问，完成这项工作需要有人为家庭做出牺牲，而正是她们为我做出了巨大的牺牲。她们对我要求的很少，却给予了我她们所有的爱，我将终生珍视这份感情。

渥·伊尔马滋

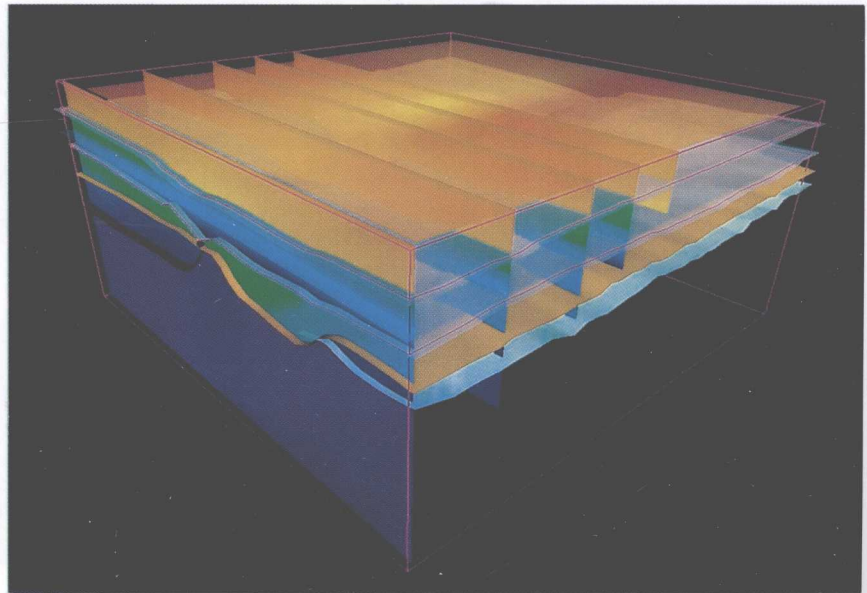
2000 年 5 月于伦敦



a



b



c

图 17 深度域地质模型的逐层估计

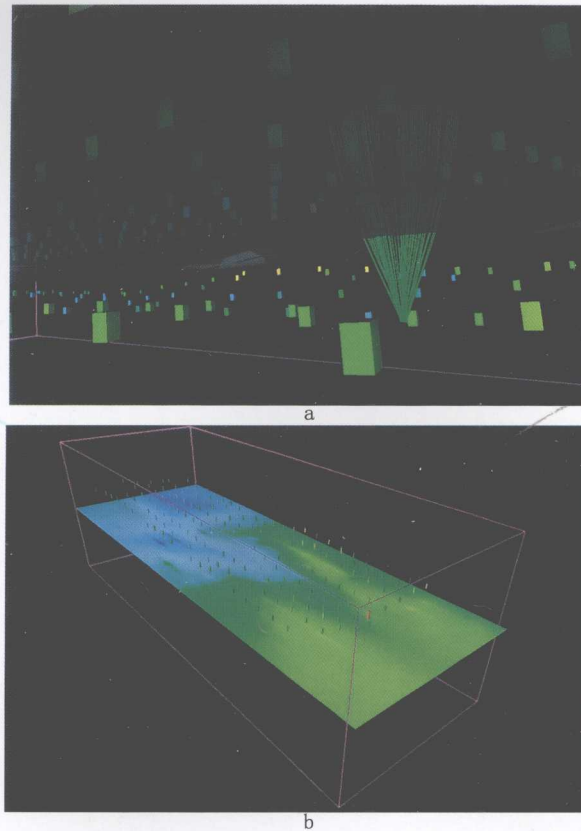


图 18 通过标有色标的速度控制点估算的层速度 (a) 和源于控制点的速度场 (b)

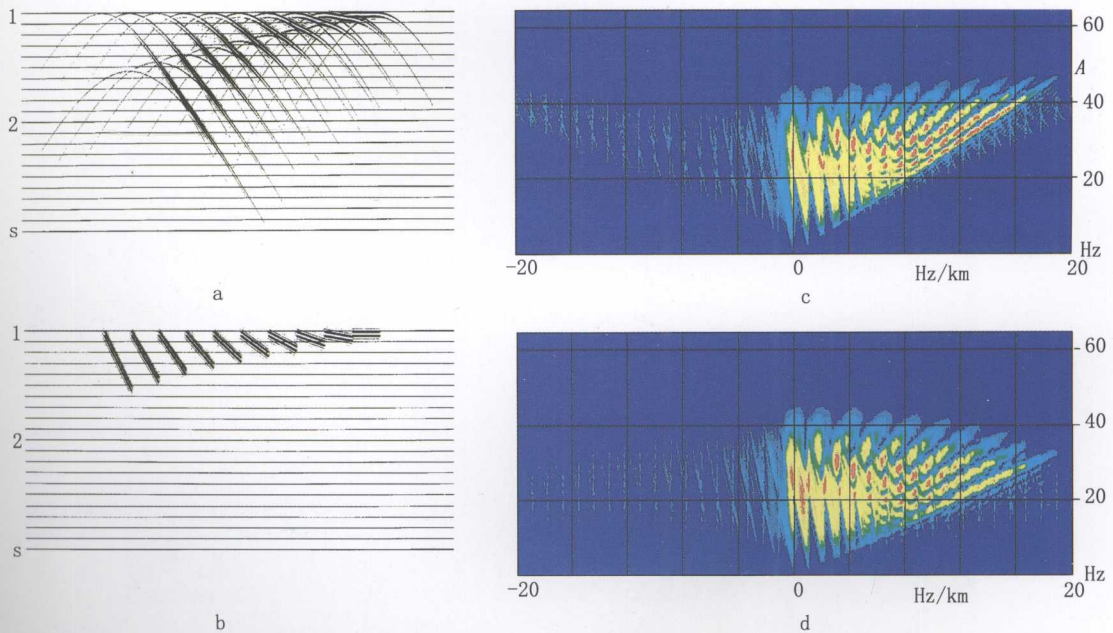


图 4.38 a 为包含一组倾斜反射界面的零偏移距剖面；b 为 a 中剖面的偏移；
c 为 a 中剖面的 $f-k$ 谱；d 为 b 中偏移剖面的 $f-k$ 谱

红色和蓝色分别代表高、低振幅，能量沿着与最陡倾角有关的放射线 A，偏移后是沿着放射线 B，介质速度恒定为 3500m/s

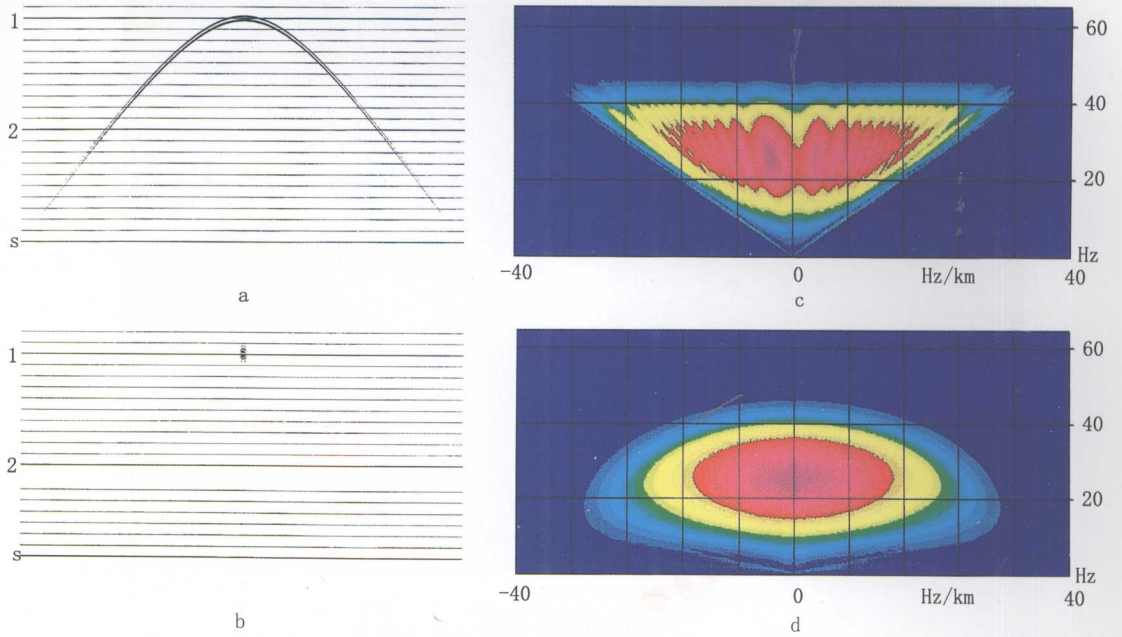


图 4.40 a 为包含一条绕射双曲线的零偏移距剖面；b 为 a 的偏移剖面；c 为 a 的 $f-k$ 谱；d 为 b 的 $f-k$ 谱
 红色和蓝色分别表示高振幅和低振幅，偏移后，c 图中三角区域内的能量映射到 d 图的半圆形区域上了，介质速度常数为 2500m/s

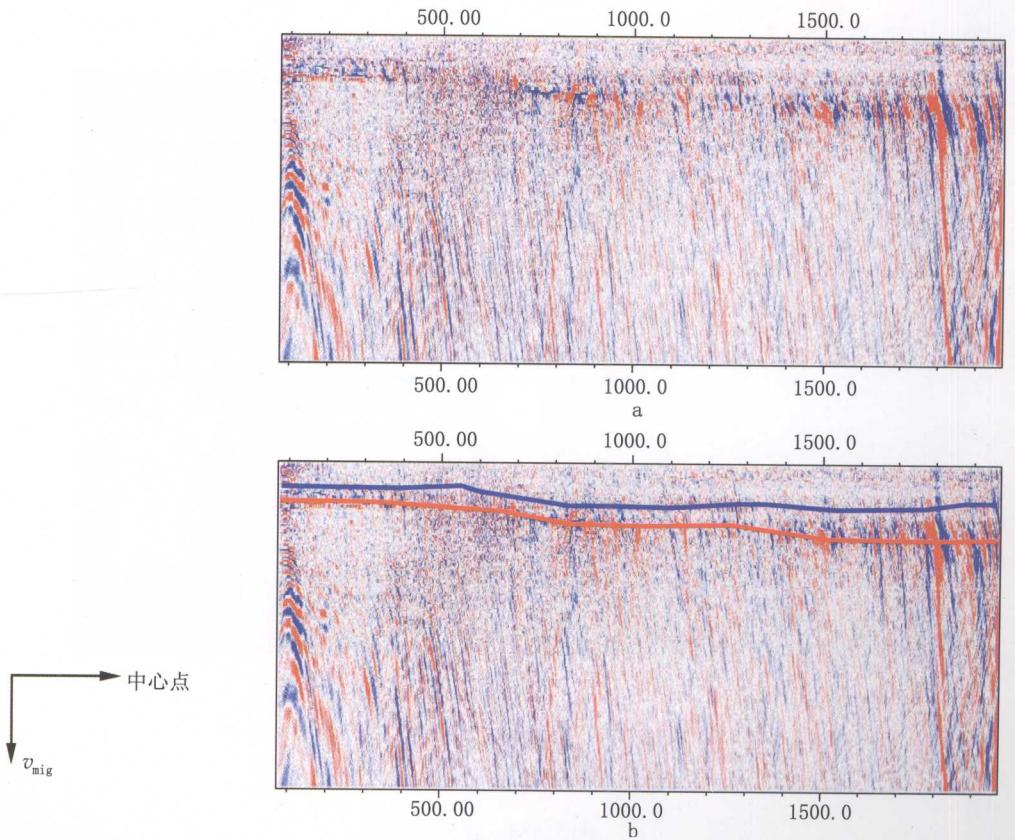


图 5.152 时间切片

a—图 5.151b 表示的偏移速度体的一个时间切片；b—a 的时间切片进行了速度拾取，红线和蓝线分别代表反射波和多次波

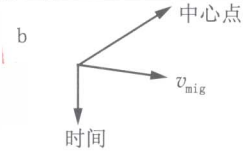
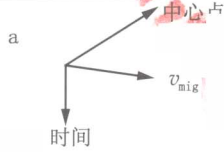
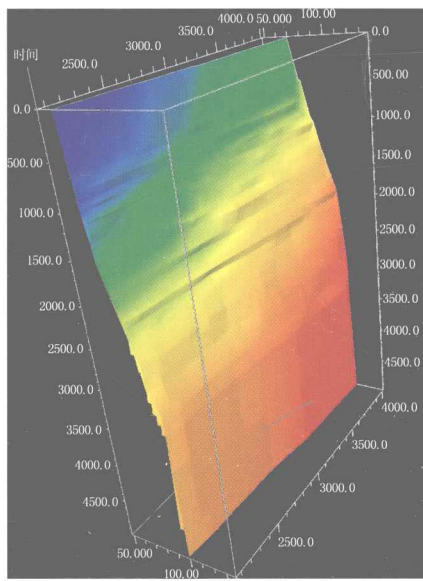
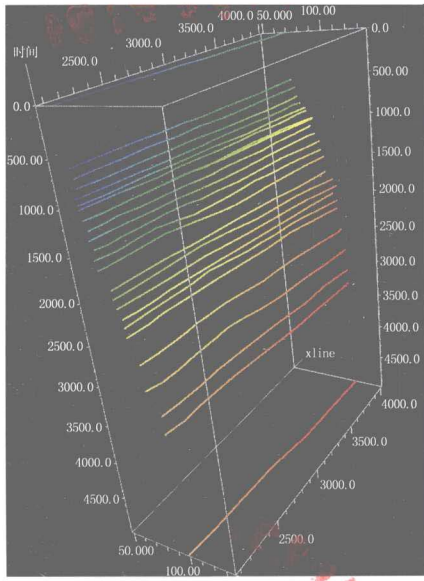


图 5.153 偏移速度场

a—如同图 5.152b 展示的那样，在图 5.151b 偏移速度体上拾取得速度串；b—由 a 速度串内插计算后彩色显示的速度场

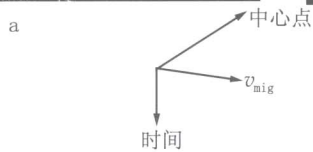
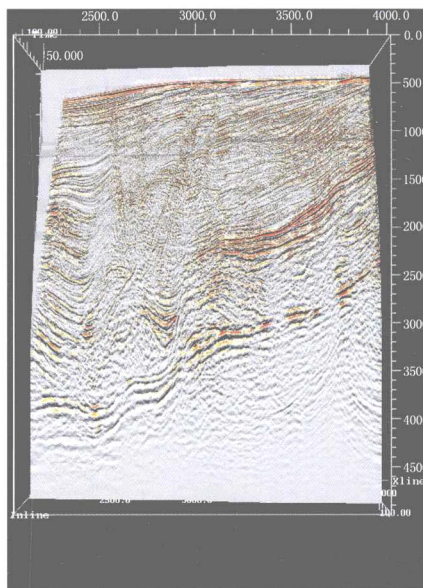
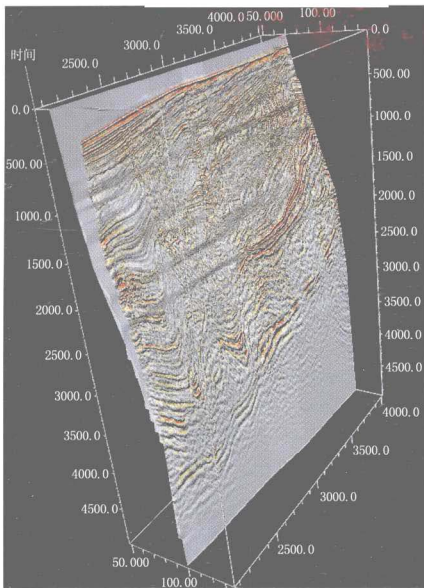


图 5.154 速度场

a—从图 5.151b 偏移速度体抽出的叠前时间偏移剖面，这个剖面与图 5.153b 速度场曲面一致；
b—以垂直于纸面的角度观察 a 剖面

目 录

上 册

绪论	(1)
1 信号处理基础	(19)
概述	(19)
1.1 一维傅里叶变换	(20)
1.2 二维傅里叶变换	(43)
1.3 全球范围单炮记录分析	(57)
1.4 增益应用	(72)
1.5 基本数据处理流程	(80)
习题	(114)
附录 A 傅里叶变换的数学基础	(118)
A.1 一维傅里叶变换	(118)
A.2 z 变换	(119)
A.3 二维傅里叶变换	(120)
参考文献	(120)
2 反褶积	(122)
概述	(122)
2.1 褶积模型	(126)
2.2 反滤波	(133)
2.3 最佳维纳滤波	(142)
2.4 预测反褶积的应用	(154)
2.5 野外资料实例	(173)
2.6 非平稳性问题	(183)
习题	(201)
附录 B 反褶积的数学基础	(202)
B.1 合成地震记录	(202)
B.2 地震反子波	(204)
B.3 反滤波	(205)
B.4 频率域反褶积	(206)
B.5 最佳维纳滤波器	(207)
B.6 脉冲反褶积	(209)

B.7	预测反褶积	(211)
B.8	地表一致性反褶积	(213)
B.9	反Q滤波	(216)
	参考文献	(219)
3	速度分析和静校正	(220)
	概述	(220)
3.1	正常时差	(225)
3.2	速度分析	(235)
3.3	剩余静校正	(262)
3.4	折射静校正	(288)
	习题	(334)
	附录 C 时差和静校正	(337)
C.1	时移双曲线	(337)
C.2	动校拉伸	(339)
C.3	倾斜反射界面旅行时方程	(340)
C.4	对剩余静校正量估算的旅行时分解法	(341)
C.5	由折射初至波估算深度	(343)
C.6	倾斜界面折射方程	(344)
C.7	加减法	(345)
C.8	折射初至波的广义线性反演	(346)
C.9	折射旅行时层析成像	(350)
C.10	L_1 模折射静校正	(353)
	参考文献	(357)
4	偏移	(359)
	概述	(359)
4.1	偏移原理	(371)
4.2	克希霍夫偏移的应用	(395)
4.3	有限差分偏移的应用	(405)
4.4	频率—空间域偏移的应用	(418)
4.5	频率—波数域偏移的应用	(440)
4.6	偏移中的其他实际问题	(452)
	习题	(478)
	附录 D 偏移的数学基础	(478)
D.1	波场外推与偏移	(478)
D.2	常相位近似	(485)
D.3	抛物线近似	(486)
D.4	频率—空间域隐式算法	(488)
D.5	稳定显式外推法	(490)

D.6	最佳深度步长	(492)
D.7	频率波数域偏移	(495)
D.8	剩余偏移	(496)
	参考文献	(497)
5	倾角时差校正和叠前偏移	(499)
	概述	(499)
5.1	倾角时差校正原理	(509)
5.2	倾角时差校正的应用	(531)
5.3	叠前时间偏移	(552)
5.4	偏移速度分析	(581)
	习题	(606)
	附录 E 倾角时差校正和叠前时间偏移	(606)
E.1	反射点离散	(606)
E.2	倾角时差校正方程	(608)
E.3	对数拉伸倾角的时差校正	(611)
E.4	倾角时差椭圆	(614)
E.5	非零偏移距旅行时方程	(615)
E.6	叠前频率波数域偏移	(617)
E.7	利用波场外推进行速度分析	(619)
	参考文献	(621)
6	噪声和多次波衰减	(624)
	概述	(624)
6.1	共中心点域多次波衰减	(645)
6.2	频率波数域滤波	(658)
6.3	倾斜叠加变换	(668)
6.4	拉东变换	(685)
6.5	线性不相干噪声衰减	(709)
	习题	(714)
	附录 F 噪声和多次波衰减的多道滤波技术	(715)
F.1	导波分析	(715)
F.2	$\tau-p$ 域波场外推	(717)
F.3	离散拉东变换的数学基础	(719)
F.4	自由表面多次波衰减	(725)
F.5	水底多次波衰减	(727)
F.6	空间预测滤波器	(729)
	参考文献	(732)

绪 论

地震勘探方法依据应用可以分为三类：

(1) 用于深度在 1km 以内的工程研究以及为煤炭和矿物勘探进行近地表地质描述的地震方法，称为工程地震学。

(2) 用于研究深度达 10km 的碳氢化合物的勘探和开发的地震方法，称为勘探地震学。

(3) 用于深度达 100km 的地壳结构研究的地震方法，称为天然地震学。

本书主要研究油气田勘探和开发中，勘探地震学反射波法的应用。

反射地震资料的传统处理结果是获得一张地下成像图，该图通常是由时间域显示的地震剖面来描绘的。图 1 是墨西哥湾地区长度约 40km 的地震剖面，它显示了地下 8km 的沙泥岩互层的沉积。从地下成像剖面上可清晰地看到在沉积层序中侵入的盐床，侵入盐床一般具有褶皱的顶部和相对光滑的底部，该盐层在剖面上具有明显的褶皱和断层存在。

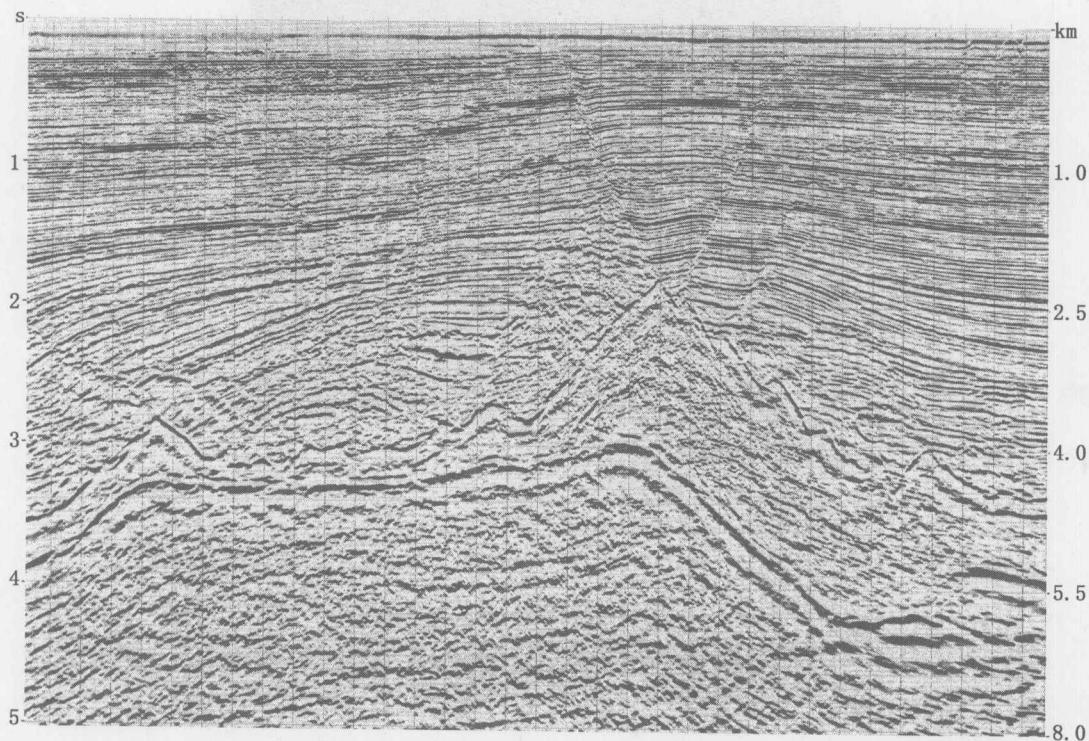
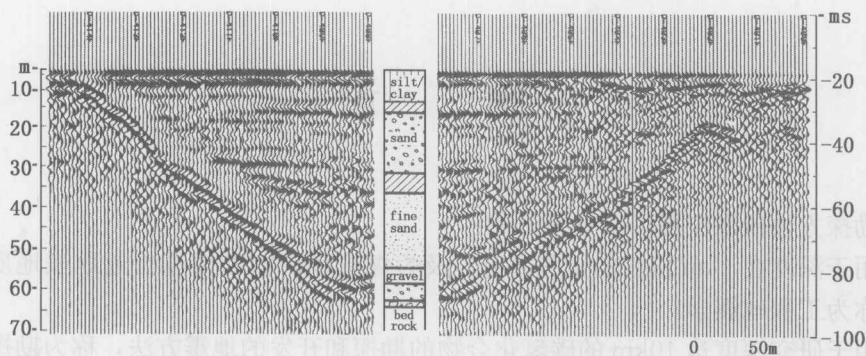
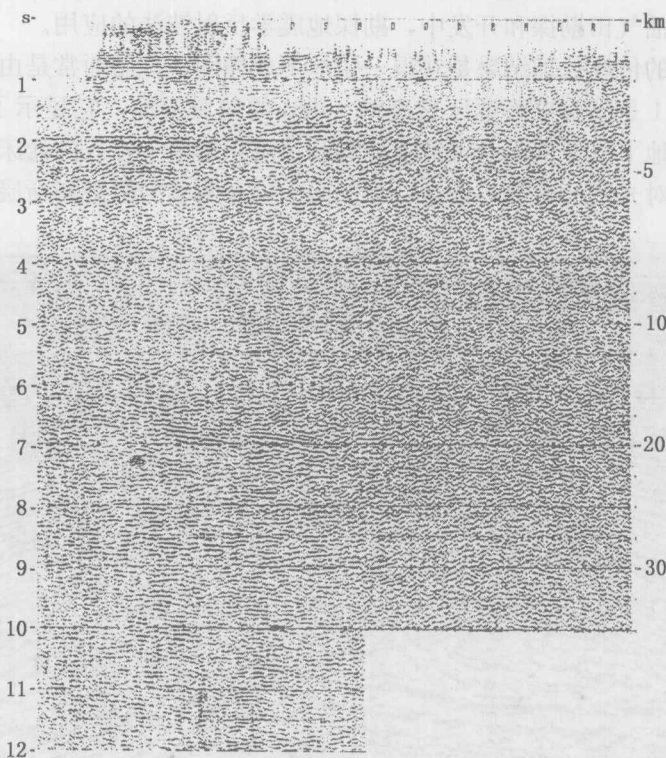


图 1 墨西哥湾碳氢化合物勘探的一张地震剖面（资料由 Schlumberger GecoPrakla 和 TGS 提供）

应用反射波地震法在煤炭和矿物勘探的工程研究中进行近地表地质描述，近些年来已被人们广泛接受。图 2a 为横穿一个侧翼陡峭的矿床峡谷的地震剖面，测线长度为 500m，钻井岩性柱状图显示了峡谷中沉积的粘土、沙和砾石序列。峡谷边缘岩床大约位于地下 15m，峡谷底部深约 65m，图中沉积岩床边界的强反射是由上部的低速沉积层和下部高速前寒武纪石英花岗岩地层的强烈差异而引起的。



a



b

图2 浅层和深层反射波地震剖面的对比

a—安大略湖的一张浅层反射波地震剖面 (Pullan 和 Hunter, 1990;

b—土耳其东南部的一张深层反射波地震剖面 (Yilmaz, 1976)

反射波地震法也可以应用于描述深达莫霍面的相变带,甚至更深的地壳结构。图2b是一条长度为15km的陆地地震剖面,根据区域控制资料,此剖面大约由4km的沉积物构成。6.5~7s的同相轴对应15~20km的深度范围,可以解释为岩石结晶基底,而8~10s的反射波组,对应25~35km的深度范围,代表地壳底部的一个过渡带,很可能就是莫霍面相变带。

共中心点(CMP)记录是应用最广泛的获取地震资料的技术之一,通过大量数据资料表明,在地震采集试验中应用多次覆盖测量,使CMP记录提高了信号质量。图3显示了同