

# 多维地震成像、偏移 和反演中的数学

● [美] N.布莱斯坦  
J.K.科恩  
J.W.斯托克韦尔, Jr. 著  
张文生 译  
何樵登 校



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 多维地震成像、偏移 和反演中的数学

[美] N. 布莱斯坦 J. K. 科恩 J. W. 斯托克韦尔, Jr. 著

张文生 译

何樵登 校

科学出版社

北京

图字:01-2004-1409号

## 内 容 简 介

本书系统阐述了基于射线理论的多维地震成像、偏移和反演的方法,内容由浅入深,既有严谨的数学公式推导,又有详尽的物理解释,包括一维模拟与反演/偏移、零偏移距均匀介质的2.5D和3D反演/偏移、高频傅里叶成像、一般源检组合方式非均匀介质的反演/偏移、数据变换的一般理论。在附录中,专门介绍了广义函数论、因果傅里叶变换、量纲分析、射线理论和Kirchhoff近似。

本书可作为应用数学系和地球物理系高年级学生或研究生学习射线成像反演理论的教科书或参考书,对从事波场成像理论与应用的地球物理工作者和其他有关科技工作者是一本很有价值的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

多维地震成像、偏移和反演中的数学/(美)布莱斯坦等著;张文生译. —北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-013303-x

I. 多… II. ①布…②张… III. 地震勘探-应用数学 IV. P631.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第041970号

责任编辑:谢洪源 王昌泰 / 责任校对:鲁素

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

N. Bleistein J. K. Cohen J. W. Stockwell, Jr. Mathematics of  
Multidimensional Seismic Imaging, Migration, and Inversion  
2001 Springer-Verlag New York, Inc.

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2004年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2004年9月第一次印刷 印张:22 1/4

印数:1—2 000 字数:499 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

# 前 言

在过去 25 年中,应用学科与工程学科中的数学内容日益增多,这是一种趋势,地球物理学的各个分支也不例外。

从 1921 年以来,当 J. Clarence Karcher [Karcher, 1993]第一次将反射地震方法用于石油勘探时,地球物理学家便找到了利用地震数据获取地下界面信息的较好的方法. 当石油和天然气工业仍主要用反射地震方法来探测碳氢化合物(石油和天然气)时,该方法已成功地应用于构造成像,成像的构造位于从近地表(指工程地球物理应用)到地壳深部和上地幔(指固体地球物理应用)的环境中. 这些应用尽管基于不同的物理学,但本质上相同. 这种方法,在用于材料科学和医学领域的同时,已用于探地雷达、声学 and 超声学成像的各个领域. 按照分类,它们都是“逆散射”成像的特例. 本书仅涉及逆散射在地震中的应用,然而所给出的数学结果也可用于其他领域。

地震测量中所采集的数据,如不作处理,仅是对地下界面变形的一个粗糙估计. 我们推导的方法,属于偏移方法,可用来校正未处理的数据,以产生地质构造的真实图像. 偏移已经从粗糙地解释模拟数据的作图法,演变成应用数学物理中的一项高级而复杂的工作。

对地震偏移中日益增多的数学描述的推动始于 20 世纪 70 年代早期的 Claerbout、Stolt、Schneider 及其他学者的先驱性工作,他们研究的结果大部分基于经典的几何光学原理,来自信号处理理论中的结果也是如此. 尽管地球物理学家在直觉上满意,但很多早期偏移公式的数学结构缺乏数学的严密性. 研究结果只是一些公式的堆积,虽然它们明显有联系,但作为一个整体,缺少牢固的数学基础,而且这些公式的直观推断性质难以将它们一般化,因而难以将它们推广到新的问题中去。

在本书中,我们汇集了波动现象中心(CWP)的研究结果. CWP 目前在科罗拉多矿业学院,但它建在丹佛大学. 这些结果代表了 CWP 从 1977 年到 1999 年期间师生的研究工作. 我们的目标是给出一种地震成像的统一方法,该方法在小扰动高频渐近体系之下,作为一个逆散射问题被公式化. 我们的方法有可能使读者以一种揭示内在假定的方式来认识经典的地震偏移结果,而这些早期结果的建立者并没有明确表述这些假定。

这种认识可使读者摆脱日趋复杂的观测系统和地质模型的困难. 按照该方法,地震偏移的很多经典结果将变成我们所给出的一般理论的特殊情况. 另外,读者将看到其他专题,如倾角时差校正(DMO)处理、波动方程基准面校正、偏移距延拓,本质上也符合我们的理论框架. 我们的目的是使读者对该无止境的专题产生一种增值,以便他或她基于这里给出的一般理论去获得新的结果。

该书始于其中一位作者(John Stockwell)在 1987 年的秋季学期、1988 年的春季学期和 1989 年的秋季学期所建立的一套讲稿. 这套讲稿是科罗拉多矿业学院数学和计算机科学系的波动现象中心的 Norm Bleistein 所讲授的关于“波动现象的数学方法”和“多维地震反演”的内容. 书的部分内容基于 Bleistein 的《波动现象的数学方法》一书,以及 Jack Cohen 和 Norm Bleistein 所写的题为“多维地震反演”的 CWP 报告(第 CWP-043 号). 讲

稿的后一部分是 Cohen 和 Bleistein 在 1986 年挪威特隆赫姆(Trondheim)的挪威技术学院所讲授的短期课程的一部分. 本书还参考了 CWP 的研究生论文资料以及该研究小组的教授和学生所完成的许多学术论文.

写本书的主要目标是建立一门课程的“硬拷贝”, 该课程以全学期和短期课程的形式, 已成功地对 18 学年跨度的几百名学生讲授过. 对学生各种不同背景的积累形成了该教材在教学中的方法. 因为本书预期的听众是数学和地球专业背景不断变化的人员, 所以我们给出一种基本内容与前沿性内容的混合, 更多的是基本内容而不是对问题的纯数学处理, 但比地球物理学家所见到的典型内容要更先进. 因此, 我们打算本书在关心理论的应用数学界与关心应用的地球技术界之间架起一座桥梁.

然而, 本书既不是一本关于偏微分方程的书, 也不是一本关于反演方法的数学理论书, 而是一本数学地球物理教科书. 我们在书名中用“数学”一词, 目的是使地球物理学家、工程师或面向计算实现的应用数学家都可以使用它. 因此, 牺牲了某些数学上的精确性以免失去叙述的条理性. 另一方面, 我们给出对参考文献的评论和引用, 以引导有兴趣的读者到更精确的问题起源中, 而且提供了附录, 以使读者熟悉广义函数论、因果傅里叶变换、射线理论及无量纲与量纲变量的专题——本书的主要部分使用了这些内容, 但又不作详细讨论.

第一章以一个启发性和半历史的概述开始, 强调地震偏移专题的体系结构, 如从反问题的数学角度中看到的一样. 这个体系被扩展到进行问题更复杂方面研究的一个计划. 我们也描述获取反演可用数据的基本地震实验, 以及从一个简单的地震实验产生地球内部图像的基本几何结构的概况. 该实验在一个对应的简单地球模型中进行.

在第二章中, 我们概述建立傅里叶型积分方程地震成像公式的基本方法, 该方程在简化的 1D 波传播背景中导出. 为此, 我们使用扰动理论(波恩近似)的经典方法和格林定理得到 1D 模拟和反演公式. 我们采用 1D 简化, 目的在于引进后面章节中所要用到的许多概念, 但我们不给出与一维波动问题的独有特征有关的任何结果.

第三章涉及零偏移距常数背景地震数据的高维傅里叶反演公式的推导, 实际上这是第二章中介绍的思想的 3D 应用. 对均匀介质, 推导了 3D 和 2.5D 反演公式, 其中一些经典偏移公式(如 Stolt 和 Schneider 的偏移公式)则是更一般理论的特例.(术语 2.5D 将在本章内解释). 我们通过将反演公式用于 Kirchhoff 近似数据来解析地检验这个一般理论, 其中所得的积分是高频或大波数假定下的渐近近似. 分析的主要工具是稳相法. 因为这些结果是基于渐近法来近似的, 所以我们介绍评价公式数值实现稳健性的方法.

在第二章和第三章中, 我们发现零偏移距偏移/反演公式是一个傅里叶型积分, 该积分产生的输出由峰值在反射面上的反射率函数(面奇异函数)构成. 它可产生有关反射系数的信息, 但给不出关于介质光滑波速变化的信息, 这与实际经验相符.

第四章将证明, 在大波数范围下计算时, 这些结果都以傅里叶型积分为基础. 特别地, 在大波数假定下, 数据正反傅里叶变换的级联得到输入数据的最奇异部分, 而且是主项. 反射地震数据最奇异的部分是反射面的反射率函数——精确等于反射系数乘以前面章节中的奇异函数. 第四章还将说明我们建立的反演公式的有效性, 它主要由兼有高频假定的傅里叶型积分的性质决定, 这使我们无须去担心很多特殊情况——如一个特定的波速剖面或一个特定类型的地震实验.

我们用这个灵活性来建立非均匀介质中具有一般源检组合方式的反演公式. 第五章和第六章分别涉及问题的 3D 和 2.5D 公式. 在第五章中, 我们也尽可能消除作为第二章和第三章出发点的小扰动假设.

第七章将前面章节中发展的概念和方法推广到更一般的问题, 也即从一种源检组合方式到另一种源检组合方式的地震数据再变换问题, 这将我们带回到现在(2000). 该一般课题包含倾角时差(DMO)的特定子课题, 但在变换到零偏移距(TZO)的标题下, 它包含充分的一般性, 它是其他数据变换技术包括数据基准面校正、偏移距延拓和数据正规化的一个潜在的出发点.

本书有这样的特征: 它省略的内容与它所包括的内容一样多. 我们将该书看成是入门的或本质上可能是“经典的”, 因此我们不包括关于弹性波传播、各向异性、多次波消除、反褶积技术、很多其他重要的地震数据处理课题以及当前研究的课题.

而且, 对地震偏移/反演主题, 有新的数学方法, 它表明我们给出的“一般”结果被嵌入到基于拟微分算子和广义拉冬变换的更一般理论之中. 研究的方向始于 1983 年 Schlumberger 公司的 Doug Miller、Mile Oristaglio、Gregory Beylkin 的先驱性工作, 现在 CWP 的 Maarten de Hoop 已推广该方向. 类似的是, 其中的推导也依赖于经典射线理论、几何光学和(少量的)散射几何理论. 当地球构造复杂到足以在来自点源的射线场中出现焦散时, 新方法利用 Maslov 的方法来逐步解决物理领域中某些射线族的困难. 所有这些(和更多)都是本书写作时正在进行研究的课题.

作者之一, Jack Cohen, 在本书正在写作中去世了. 然而, 他对本书的叙述、风格及内容的看法, 随着多年的友谊和合作传给了其他两位作者, 这些看法是他去世后本书修订和扩充的很大一部分内容.

假如本书有三个原始作者, 则它有很多“次生作者”, 他们包括经受过与本书同名之课程(该课程以前就有讲义, 但讲义又以逐渐发展的方式出现)辛苦的学生. 首先学生们在 1983 年与 Jack Cohen 承担了该课程, 当时该讲义尚处在原始形式; 某天给出的讲义几天后就可能被新的理解和新的研究结果所修订. 在提交该手稿之前, 最后两个班(一个是 Colorado 矿业学院的一个班, 另一个是巴西 Campinas 大学的一个班)的学生提供了很多建设性建议, 这些建议被直接加到更加扩充的一套讲义中, 而且从出版社的评审者中得到的建设性意见也被融合进去了. 最初的评审者, 最值得提到的是 Ken Lerner, 他以善于修正、敏锐的眼光和透彻的评语而著名. 虽然修改笔迹最后不出现在本书中, 但 Ken 亲手处理(和修订)了每一章. 由于 Ken 对整本书的坚毅不拔的劳动, 我们相信本书比已有的其他形式都要好.

我们幸运有足够的基金, 这些资金使得师生们在这里给出的思想可以加以发展. 基金的主要来源是科罗拉多矿业学院的地震反演方法合作计划. 自 1984 年以来, 我们还得到了石油工业及其服务公司的支持. 我们还感谢海军研究办数学和海洋声学计划的支持以及能源部的支持. 在 1999 年整个秋季学期(巴西是春季), Bleistein 将当时该书的草稿作为教材授课, 然后在巴西康皮拉斯(Campinas)大学, 在 FAPESP 即巴西圣保罗(Sao Paulo)州研究和教学基金机构的支持下, 作了紧张而近于最后的修订.

我们还得到了来自油气研究所及 SEG 基金的支持, 专门用于 CWP/SU 地震 Unix 软件包的开发. 地震 Unix 是一个免费的地震处理和软件环境, 由 CWP 的 Jack

Cohen建立,目前由 John Stockwell[Stockwell 1997,1999]管理.该软件包直至整个源代码,都可以从我们的网站 <http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes> 免费下载.

得到了所有这些帮助,如我们没有达到将问题阐述清楚的目的,则责任只归我们作者自己.假如读者有问题或意见,请给作者发电子邮件 [mmsimi@dix.mines.edu](mailto:mmsimi@dix.mines.edu)/.关于其他信息,请浏览我们的网站 <http://www.cwp.mines.edu/mmsimi>.

戈尔登  
科罗拉多

N. 布莱斯坦  
J. K. 科恩  
J. W. 斯托克韦尔, Jr.  
2000年2月

# 纪念 Jack K Cohen

1996年10月24日,随着 Jack K. Cohen 的去世,科罗拉多矿业学院失去了一位伟大的学者,他 56 岁. Jack 在库郎(Courant)数学科学研究所获得博士学位,然后在丹佛(Denver)大学工作了 16 年. 之后,在 1983 年,他成为科罗拉多矿业学院的一名教师. 他是创立 CSM 波动现象中心的成员. 在 CWP 期间,他给 CWP 的学生和同事留下了无限的仁爱和关怀他人的口碑,也给全世界的数学家和地球物理学家留下了这样的好名声.

在 20 世纪 70 年代后期,Jack 与别人联合发表了两篇描述地震反问题的重要文章. 该工作对地震成像中使用的某些算法奠定了一个数学基础,此后更多的应用数学家和理论物理学家从事该问题的研究. 在该文章发表后的 5 年内,SEG 国际年会就这些文章引发的问题主持了多次会议和专题讨论.

作为一个创新者,Jack 的工作并不只局限于他工作的理论方面. 当 Jack 看到急需一种人人都可免费得到地震数据处理流程软件时,他便从斯坦福勘探计划成员所写的少量代码出发,在 Shuki Ronen 的帮助下,建立了地震  $Un^* x$  或  $Su$  软件包. 在这很久之后,电子邮件、国际互联网或免费软件这样的词语才出现在公开字典中. 今天,CWP/SU 地震  $Un^* x$  软件包已免费发布在国际互联网上. 现在,该软件包已包括 380 个独立模块,它允许用户执行很多公共的地震数据操作,也为地震软件应用的新的开发提供了一个环境. 目前, $Su$  的安装已超过 900 个<sup>①</sup>. 该软件包在超过 37 个国家中,被石油勘探公司、政府研究机构以及教育机构所使用,很多使用者远远超出地震勘探界的范围.

Jack 用符号数学语言,特别是 Mathematica<sup>②</sup> 发展了一门专门技术. Frank Hagin 和 Jack 合著了一本教科书,有五种版本,它们将符号数学软件结合到本科生的微积分教学计划中. Jack 对此产生的兴趣,使他成为 Mathematica 期刊课堂评论栏目的编辑.

Jack 熟悉小波变换学科并向全球提供了用 Mathematica 语言写成的免费小波软件包. Jack 还对地震各向异性感兴趣,并对该复杂课题贡献了几篇重要论文. 他的工作对某些已有的各向异性反演方法奠定了一个坚实的数学基础,并促进了各向异性时差模拟和参数估计的新的研究.

Jack 兴趣广泛,范围涉及经典文学、印象派艺术、民间音乐、爵士音乐和巴西音乐. 他时刻准备尝试科学和非科学的新事物. 他 37 岁学骑自行车,在丹佛的早期时候,他是热衷的徒步旅行者和乡间滑雪者. 后来,从某种程度上说,他开始健美运动,并将这种运动一直保持到他去世.

Jack 是一个仁慈的人道主义者,有人类伟大的爱心. 在课堂上,他受到欢迎,并以即兴幽默而出名. 在 1982 年 SEG 会议的其中一次专题讨论会上,一位同事问他对反演被地球物理学界当作更认可的“偏移”的基本看法,Jack 马上滔滔不绝地说了一系

① 到 2000 年 8 月,已证实有 54 个国家中已有超过 2000 个的安装.

② Mathematica<sup>TM</sup> 是 Wolfram 研究公司的标志.



列当时反演的支持者,并说:“难道你看不到吗?反演是犹太人的偏移!”他仍活在他妻子 Diane 和女儿 Mara 的心中. 在对他的纪念中,科罗拉多矿业学院已设立了用作本科生奖学金的 Jack K. Cohen 纪念基金. 捐赠可送到科罗拉多矿业学院基金,931 号第 16 街, 戈尔登(Golden),CO. 80401.

Norman Bleistein  
John W. Stockwell, Jr

# 目 录

前言

纪念 Jack K Cohen

第一章 多维地震反演	1
§ 1.1 反问题和成像	1
§ 1.2 地震反问题的非线性	3
§ 1.3 高频	3
§ 1.4 偏移与反演	4
§ 1.5 源检组合方式	7
§ 1.6 数据的频带和孔径限制	10
§ 1.7 维数: 2D 与 2.5D 与 3D	12
§ 1.8 声学反演与弹性反演	12
§ 1.9 几何学偏移的数学观点	13
第二章 一维反问题	15
§ 2.1 一维空间中问题的形式	15
2.1.1 地球物理意义下的 1D 模型	15
2.1.2 作为数学测试基础的一维模型	16
§ 2.2 正演模拟的数学工具	17
2.2.1 控制方程和辐射条件	17
2.2.2 傅里叶变换约定	18
2.2.3 格林函数	19
2.2.4 格林定理	20
§ 2.3 正散射问题	22
2.3.1 1D 中的正散射问题	22
2.3.2 波恩近似和它的结果	25
2.3.3 逆散射积分方程	25
§ 2.4 常数背景零偏移距反演	26
2.4.1 常数背景、单层	27
2.4.2 多层、累积误差	36
2.4.3 数值例子	37
2.4.4 总结	37
§ 2.5 变背景介质的反演	39
2.5.1 现代数学问题	41
2.5.2 总结	43
2.5.3 变波速理论的完成	45

2.5.4 总结 .....	49
§ 2.6 小扰动假定的再评价 .....	50
§ 2.7 计算机实现 .....	50
采样 .....	51
§ 2.8 变密度 .....	52
<b>第三章 高维中的反演</b> .....	57
§ 3.1 无限介质中的散射问题 .....	58
§ 3.2 波恩近似 .....	61
3.2.1 波恩近似和高频 .....	64
3.2.2 常数背景零偏移距方程 .....	66
3.2.3 $\alpha$ 有一个自由度的实验 .....	67
§ 3.3 3D 零偏移距常数背景反演 .....	69
$k_z$ 选择的限制 .....	72
§ 3.4 再说高频 .....	73
3.4.1 来自一个倾斜平面的反射 .....	76
3.4.2 反射率函数 .....	77
3.4.3 反射率函数的另一种表示 .....	79
§ 3.5 二维半 .....	79
零偏移距二维半反演 .....	81
§ 3.6 Kirchhoff 反演 .....	82
3.6.1 稳相计算 .....	82
3.6.2 二维半 Kirchhoff 反演 .....	88
3.6.3 2D 模拟和反演 .....	90
§ 3.7 用 Kirchhoff 数据测试反演公式 .....	93
3.7.1 Kirchhoff 近似 .....	93
3.7.2 Kirchhoff 数据的渐近反演 .....	94
3.7.3 总结 .....	99
§ 3.8 由 Kirchhoff 近似导出的逆时波动方程偏移 .....	102
<b>第四章 大波数傅里叶成像</b> .....	105
§ 4.1 孔径的概念 .....	106
§ 4.2 孔径和测量参数之间的关系 .....	107
4.2.1 射线、傅里叶变换和孔径 .....	107
4.2.2 孔径和偏移倾角 .....	108
4.2.3 偏移倾角和孔径 .....	109
4.2.4 总结 .....	114
§ 4.3 有限孔径傅里叶反演的例子 .....	115
4.3.1 一个狄拉克 $\delta$ 函数的有限孔径反演(一个点散射体) .....	116
4.3.2 一个奇异函数的有限孔径反演(一个反射平面) .....	118
4.3.3 推广到其他类型的面奇异函数——渐近计算 .....	120

4.3.4	关于逆散射 .....	123
4.3.5	更光滑函数的有限孔径傅里叶反演 .....	123
4.3.6	阶梯型函数的有限孔径傅里叶反演 .....	124
4.3.7	一个斜坡型函数的有限孔径傅里叶反演 .....	126
4.3.8	一个无限次可微函数的有限孔径反演 .....	127
4.3.9	总结 .....	128
§ 4.4	有限孔径傅里叶恒等算子 .....	128
4.4.1	$D_y$ 中边界值的意义 .....	130
4.4.2	关于 $I_0$ 的稳相分析 .....	131
4.4.3	近表面条件 .....	136
4.4.4	提取 $f$ 在 $S_y$ 上的信息 .....	136
4.4.5	对边界面 $S_y$ 的一个标度后的奇异函数的处理 .....	137
4.4.6	法方向 .....	139
4.4.7	具有其他奇异性类型的被积函数 .....	139
4.4.8	总结 .....	140
4.4.9	现代数学问题 .....	141
<b>第五章</b>	<b>非均匀介质中的反演</b> .....	<b>142</b>
§ 5.1	波恩近似积分方程的渐近反演——一般结果 .....	142
5.1.1	观测系统 .....	142
5.1.2	3D 变背景逆散射问题的公式 .....	144
5.1.3	一个反射率函数的反演 .....	148
5.1.4	渐近证明的总结 .....	149
5.1.5	二维反演 .....	149
5.1.6	一般反演结果、稳相三元组和 $\cos\theta_0$ .....	152
5.1.7	另一种推导:在反射面处去掉小扰动限制 .....	155
5.1.8	讨论 .....	157
§ 5.2	Beylkin 行列式 $h$ 和 3D 反演的特殊情况 .....	158
5.2.1	Beylkin 行列式的一般特性 .....	158
5.2.2	共炮反演 .....	160
5.2.3	共偏移距反演 .....	162
5.2.4	零偏移距反演 .....	164
§ 5.3	Beylkin 行列式与共炮和共接收点排列中的射线雅可比行列式 .....	164
§ 5.4	单反射面 Kirchhoff 数据的渐近反演 .....	169
5.4.1	Kirchhoff 数据反演的稳相分析 .....	169
5.4.2	$\cos\theta_0$ 和 $c_+$ 的确定 .....	173
5.4.3	求稳相点 .....	174
5.4.4	矩阵符号差的确定 .....	176
5.4.5	商 $h/ \det[\Phi_{\epsilon_0}] ^{1/2}$ .....	176
§ 5.5	基于傅里叶成像原理的证明 .....	178

§ 5.6	变密度	181
5.6.1	变密度反射率反演公式	182
5.6.2	变密度反射率公式的含义	183
§ 5.7	结果与限制的讨论	183
	总结	185
<b>第六章</b>	<b>二维半反演</b>	<b>186</b>
§ 6.1	2.5D 射线理论和模拟	186
	二维半射线理论	186
§ 6.2	2.5D 反演和射线理论	191
6.2.1	2.5D Beylkin 行列式	192
6.2.2	一般的 2.5D 反射率反演公式	193
§ 6.3	Beylkin 行列式 $H$ 与 2.5D 反演的特殊情况	195
6.3.1	Beylkin 行列式的一般性质	196
6.3.2	共炮反演	197
6.3.3	一个数值例子——从共炮反演中提取反射率	197
6.3.4	常数背景传播速度	199
6.3.5	垂直地震剖面	199
6.3.6	井到井反演	201
6.3.7	反演什么	201
6.3.8	共偏移距反演	201
6.3.9	一个数值例子——从一个共偏移距反演中提取反射系数和 $\cos\theta_0$	202
6.3.10	一个数值例子——用共偏移距反演对一个向斜进行成像	203
6.3.11	常数背景反演	203
6.3.12	零偏移距反演	205
<b>第七章</b>	<b>数据变换的一般理论</b>	<b>206</b>
§ 7.1	数据变换介绍	206
7.1.1	Kirchhoff 数据变换(KDM)	208
7.1.2	振幅保持	208
7.1.3	KDM 平台公式的一个大致梗概	209
7.1.4	可能的 Kirchhoff 数据变换	209
§ 7.2	3D Kirchhoff 数据变换公式的推导	211
7.2.1	KDM 算子的空间结构	213
7.2.2	算子的频率结构和渐近初步	214
7.2.3	入射角的确定	216
§ 7.3	2.5D Kirchhoff 数据变换	217
	入射角的确定	218
§ 7.4	KDM 应用于 2.5D Kirchhoff 数据	218
7.4.1	2.5D KDM 的渐近分析	224
7.4.2	关于 $\gamma$ 的稳相分析	226

7.4.3 稳相分析的有效性	228
§ 7.5 接收点(或源点)的共炮下延拓	230
7.5.1 用于其他实现的时间域数据变换	232
7.5.2 关于 $t_i$ 的稳相	233
§ 7.6 2.5D 变换到零偏移距(TZO)	235
7.6.1 频率域中的 TZO	235
7.6.2 一个 Hale 型 TZO	240
7.6.3 Gardner/Forel 型 TZO	241
7.6.4 相位二阶导数的简化	242
§ 7.7 3D 数据变换	249
7.7.1 关于 $\gamma$ 的稳相	249
7.7.2 相位二阶导数的讨论	251
7.7.3 3D 常数背景 TZO	253
7.7.4 作为一个带限 $\delta$ 函数的 $\gamma_2$ 积分	254
7.7.5 常数背景中的空间/频率 TZO	256
7.7.6 一个 Hale 型 3D TZO	258
§ 7.8 总结和结论	258
<b>附录 A 广义函数论</b>	260
A.1 引言	260
A.2 通过狄拉克 $\delta$ 函数局部化	260
A.3 广义函数的傅里叶变换	265
A.4 快速递减函数	266
A.5 缓增广义函数	267
A.6 广义函数的支集	267
A.7 阶梯函数	269
A.7.1 Hilbert 变换	270
A.8 带限广义函数	271
<b>附录 B 因果函数的傅里叶变换</b>	274
B.1 引言	274
B.2 例子:1D 自由空间格林函数	277
<b>附录 C 量纲变量与无量纲变量</b>	280
C.1 波动方程	280
C.1.1 数学量纲分析	280
C.1.2 物理量纲分析	281
C.2 Helmholtz 方程	282
C.3 反演公式	284
<b>附录 D 病态的例子</b>	288
反演中的病态	288
<b>附录 E 射线理论和 Krichhoff 近似的基本介绍</b>	291

E. 1	程函方程和输运方程	291
E. 2	用特征线法求解程函方程	293
E. 2.1	程函方程的特征方程	295
E. 2.2	选择 $\lambda = \frac{1}{2}$ : $\sigma$ 作为运动参数	296
E. 2.3	选择 $\lambda = \frac{c^2}{2}$ : 走时 $\tau$ 作为运动参数	297
E. 2.4	选择 $\lambda = c(x)/2$ : 弧长 $s$ 作为运动参数	297
E. 3	射线振幅理论	298
E. 3.1	输运方程的 ODE 形式	300
E. 3.2	行列式的微分	300
E. 3.3	式(E. 3.12)的验证	302
E. 3.4	高阶输运方程	303
E. 4	确定射线方程的初始数据	303
E. 4.1	3D 格林函数的初始数据	303
E. 4.2	2D 格林函数的初始数据	306
E. 4.3	反射和透射射线的初始数据	307
E. 5	2.5D 射线理论	310
E. 5.1	2.5D 射线方程	310
E. 5.2	2.5D 振幅	311
E. 5.3	2.5D 输运方程	312
E. 6	变密度介质中的射线追踪	313
E. 6.1	变密度介质中的射线振幅理论	313
E. 6.2	变密度介质中的反射和透射射线	314
E. 7	动力学射线追踪	315
E. 7.1	一个简单例子, 在常数波速介质中的射线追踪	317
E. 7.2	以 $\sigma$ 表示的动力学射线追踪	318
E. 7.3	以 $\tau$ 表示的动力学射线追踪	318
E. 7.4	二维	319
E. 7.5	结论	319
E. 8	Kirchhoff 近似	319
E. 8.1	问题的公式化	320
E. 8.2	格林定理和波场表示	321
E. 8.3	Kirchhoff 近似	324
E. 8.4	2.5D	326
E. 8.5	总结	327
	参考文献	328
	人名索引	335
	译后记	337

# 图 形 目 录

图 1.1	合成记录由程序 CSHOT 产生. (a) 合成零偏移距地震剖面; (b) 地球模型 .....	5
图 1.2	一个共源(炮)地震剖面示意图 .....	8
图 1.3	一个共偏移距地震剖面示意图 .....	8
图 1.4	一个共中心点地震剖面示意图 .....	8
图 1.5	作图法偏移的一个例子 .....	13
图 2.1	一条测井曲线及相应反射率函数的草图表示. 反射率函数可表示成一个脉冲序列, 也可表示成一个地震记录. 反射率函数不同于地球物理学家的反射率序列, 在于没有表示多次反射, 脉冲的位置与反射面的位置相同. 右边地震记录是一个我们想要的理想地震偏移给出的形式 .....	16
图 2.2	对极点在 $\omega = \pm ck$ 处的简单情况, 积分路径 $\Gamma$ 的示意图 .....	18
图 2.3	对极点在 $k = \pm \omega/c$ 处的简单情况, 积分路径 $\Gamma$ 的示意图 .....	19
图 2.4	一个背景波速剖面 $c(x)$ 和一个真实波速剖面 $v(x)$ 的草图 .....	23
图 2.5	(a) 一个阶梯函数的全带宽表示; (b) 一个只缺零频率信息的阶梯函数 .....	29
图 2.6	一个阶梯函数的 0~50Hz 带宽表示(采样间隔 4ms) .....	30
图 2.7	(a) 一个阶梯函数的 4~50Hz 带宽表示(4ms 采样间隔); (b) 一个阶梯函数的 10~50Hz 带宽表示(4ms 采样间隔).....	31
图 2.8	一个阶梯函数的 10~50Hz 带宽表示(4ms 采样间隔), (导数)算子 $-i\omega$ 已作用于该阶梯函数, 所得的振幅由该滤波器下的面积标度 .....	32
图 2.9	(a) 一个阶梯函数序列的全带宽表示; (b) 上面一个阶梯函数序列的 10~50Hz 带宽表示(4ms 采样间隔), (导数)算子 $-i\omega$ 已用于该函数 .....	33
图 2.10	用于练习 2.11 中的数值例子的 1D 波速剖面.....	36
图 2.11	(a) 在图 2.10 中模型之上记录的一个合成地震道. 数据的带宽为一梯形, 梯形拐角频率分别为 10、20、50 和 60Hz. 尽管有 5 个多次反射, 仅容易识别 3 个反射; (b) 根据 2.4.2 节中的理论所进行的合成数据的反演. 第一反射面和第二反射面的精确反射系数分别为 $R_{1\text{精确}} = 1/2$ 和 $R_{2\text{精确}} = 1/7$ . 反演值与理论预测值之间的误差大约为 0.1%. 该误差由数值误差和拾取误差所引起 .....	38
图 3.1	方程(3.3.13)所包含的复 $k_3$ 平面的限制 .....	72
图 3.2	单个倾斜平面 .....	76
图 3.3	黑线描绘位于地下半圆柱体轴线上的一个震源-检波器排列, 阴影带仅是半圆柱体之上许多可能区域之中的两个, 它表示排列拾取的数据 .....	79
图 3.4	黑线描绘位于一个 2.5D 模型之上的一个震源-检波器排列, 所有的射线路径都局限于 $\xi_2 = 0$ 的平面内 .....	80



- 图 3.5 (a) 成像问题的一般几何图形; (b) 稳相点附近的  $x$  值的几何图形 ..... 95
- 图 3.6 一个反射面(从边缘看)的奇异函数  $\gamma(x)$ , 它表示为有限带宽  $\delta$  函数  $\delta_B(s)$ , 其中  $s$  是面的法线坐标 ..... 96
- 图 4.1 (a) 表示  $x_s$  处的单个源和  $x_g$  处的单个检波器之间的孔径的合成  $k$  向量. 孔径是  $\omega_{\min}[\hat{r}_s + \hat{r}_g]/c$  和  $\omega_{\max}[\hat{r}_s + \hat{r}_g]/c$  之间的线段; (b) 当源位置  $x_s$  固定, 检波器位置从  $x_s$  到  $x_g$  时, 孔径是两个半圆形圆弧之间的区域 ..... 110
- 图 4.2 位于一个共偏移距勘测的数据采集线之下的两个输出点之上的  $k$  域孔径. 在每一种情况中, 波数域局限在一个环形扇形中. 环形的内外半径分别由  $2|\omega_{\min}|\cos\theta/c$  和  $2|\omega_{\max}|\cos\theta/c$  计算. 这里  $2\theta$  是  $\hat{r}_s$  和  $\hat{r}_g$  之间的张角. 零偏移距孔径是  $\theta = 0$  的特殊情况, 孔径由程序 KAPERTURE 计算 ..... 110
- 图 4.3 位于一个共炮勘测的采集线之下的两个输出点处的  $k$  域孔径(由程序 KAPERTURE 计算) ..... 111
- 图 4.4 位于有重叠的共炮勘测数据采集线之下的三个输出点处的  $k$  域孔径. 源位于从标为第一  $x_s$  点到标为最后  $x_s$  点范围之内. 检波器位于从标为第一  $x_g$  到标为最后  $x_g$  的范围之内. 最大孔径在源检覆盖的重叠达到最大值的区域中. (孔径由 KAPERTURE 计算) ..... 111
- 图 4.5 位于共偏移距勘测之下的两个输出点处的  $k$  域孔径. 黑箭头是向量  $\hat{r}_s$  和  $\hat{r}_g$ , 分别表示各个源路径和接收点路径  $x_s^+$ 、 $x_s^-$ 、 $x_g^+$ 、 $x_g^-$  的单位向量. 虚箭头是合成向量  $[\hat{r}_s^+ + \hat{r}_g^+]$  和  $[\hat{r}_s^- + \hat{r}_g^-]$ , 它们指向合成的波数向量方向. 波数向量与偏移倾角有关. 带点的箭头表示合成向量  $[\hat{r}_s^+ + \hat{r}_g^-]$ , 它表示  $x_s^-$  处的源和  $x_g^+$  处的检波器之间的大偏移距. 因为该孔径的  $k$  向量大小由这些合成向量所标度, 我们看到源与检波器之间的较宽的间隔减少了孔径的有效波数 ..... 112
- 图 4.6 在一个单炮 VSP 剖面中 9 个输出位置处的  $k$  域孔径. 反射面从右向左倾斜且局限在一个相对窄的将要被成像的倾角范围内. 由于孔径的择优取向性, 从左向右倾的反射面不被成像. 另外, 点散射体在从左向右倾斜的线段中将模糊不清. 圆表示可能的最大  $k$  值. (孔径由 KAPERTURE 计算) ..... 113
- 图 4.7 在一个理想的 VSP“变井源距”剖面之中的 9 个输出位置处的  $k$  域孔径, 有多个源, 源离井的距离逐渐增加, 井中有多个检波器. 虽然达到了最大  $|k|$  值, 但角度孔径对来自单个源的结果没有较大的改善. (孔径由 KAPERTURE 计算) ..... 113
- 图 4.8 在一个理想的单个共炮跨井实验中的 9 个输出点处的  $k$  域孔径. (孔径由 KAPERTURE 计算) ..... 114
- 图 4.9 在一个理想的共炮跨井勘测中的 7 个输出点处的  $k$  域孔径, 在两个井中有多个源和多个检波器. (孔径由 KAPERTURE 计算) ..... 114
- 图 4.10 在方程(4.3.3)中的域  $D_k$  ..... 116
- 图 4.11 (a) 二维空间中的一个点散射体; (b) 在  $(k_1, k_2)$  一平面中的一个箱形区域, 它不含源点及  $k_1$  和  $k_2$  轴; (c) 应用该滤波器后的脉冲数据的图像;