

石油勘探开发中的数学问题

沈平平 刘明新 汤 磊 编著

科学出版社

2002

内 容 简 介

本书分为上、中、下三篇。上、中篇主要对石油勘探领域所涉及的数学理论和方法，特别是对地球物理勘探和盆地模拟的数学问题，作了比较系统和深入的阐述。主要包括：地震数据处理数学原理、地球物理的正反问题、地震层析成像和模拟退火等地球物理理论与方法以及盆地模拟的基本数学问题。下篇主要对石油开发领域所涉及的数学问题作了详细的介绍，包括油藏数值模拟及其相关的计算方法和试井、地质统计、分形几何、微观渗流、数据库等诸多方面。本书还从最基本的原理出发，对地震数据处理中的反褶积、相位、速度分析、静校正、偏移等方面所涉及的数学基础和关系（矩阵论、傅里叶变换、线性系统、复赛谱分析和滤波等）作了系统介绍和推导。

本书旨在使对石油勘探开发和数学都感兴趣的人得以比较全面、快速地了解 and 接触该领域的前沿问题及热点问题，可供地球物理、盆地模拟、数值模拟等石油勘探开发方面的专家、学者、教师和研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

石油勘探开发中的数学问题 / 沈平平, 刘明新, 汤磊编著. —北京: 科学出版社, 2002

ISBN 7-03-010056-5

I. 石… II. ①沈… ②刘… ③汤… III. 油气田-地质过程模型-建立模型 IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 005249 号

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2002 年 8 月第一次印刷 印张: 25 3/4

印数: 1—1 000 字数: 490 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

序

我一直从事渗流力学及油田开发研究，经常思考一些相关学科领域的问题，当然亦包括数学问题。作为一个老科技工作者，当著者交给我厚厚的一摞书稿，盛情邀请我为他们的专著——《石油勘探开发中的数学问题》作序的时候，我面对凝聚著者心血的厚重书稿，内心产生一种崇敬之情。作为共事多年的同事，我很高兴与著者共同分享收获的喜悦，当然，也更乐意与大家一起分享著者丰硕的成果。

本书重点介绍了石油勘探开发中最基本、最重要的数学问题，主要包括地震信号的数据处理、地球物理中的正问题、地球物理中的反问题、地震反演理论与方法、地震层析成像、模拟退火与人工神经网络、盆地模拟、油藏数值模拟、油藏工程、数据库、地质统计、分形几何等涉及的数学问题。本书的主要特点是展示了数学在石油勘探开发中的重要作用和著者在该领域的最新研究成果，也向读者提出了该领域尚未解决的难题和努力方向，所以，本书是一本数学与石油勘探开发实际应用相结合的教材。书中的结论或许并不重要，而贯穿其中的科学态度和研究方法正是值得我们好好学习的。

兴趣是最好的老师。著者对数学始终怀有极其浓厚的兴趣。尽管一直从事石油科研工作，但他们对数学研究却是情有独钟，乐此不疲。著者很善于把复杂的石油问题和数学问题有机地融合在一起，进行综合研究。数学是锻炼思维的体操，它能很好地锻炼人的思维，有效地提高理解、分析和解决问题的能力。30多年来，著者之所以在油气田开发技术领域，尤其是在油层物理、油水运动规律和提高石油采收率等方面做了大量开创性的研究工作，并取得了许多卓有成效的成果，我想，这在很大程度上得益于其深厚的数学功底和对事业的不懈追求。

科学研究，贵在勇于探索。出于对数学的兴趣和科研的需要，著者很注重将国内外数学成就应用到石油科研工作中。譬如，分形几何学是20世纪七八十年代出现的新兴学科。20世纪90年代，著者率先将分形几何学应用到多孔介质孔喉研究领域，提出了采用毛管压力曲线计算砂岩孔隙结构分形维数的方法，在多孔介质微观分布的认识方面取得了进步。近年来，还主持开展了逾渗网络模型的研究，用逾渗方法计算出了理论相对渗透率曲线。不断学习，勇于探索，正是著者从事科学研究的可贵之处。

记得恩格斯曾经说过，每一门学问只有最终能用数学表达时才可以被称

为科学。我认为，这句话是至理名言，它强调了定量研究的必要性和可能性。伽利略也曾说过，自然界是用数学语言写出来的。这句话同样是寓意深刻。浩浩苍穹，茫茫宇宙，自然界的一切皆离不开数学，各个领域都蕴含着数学，石油勘探开发也不例外：一方面，油气埋藏在几千米的地下岩层中，具有独特而又复杂的运动规律，要摸清这些规律，数学是必不可少的工具；另一方面，石油勘探开发技术正以令人意想不到的速度发展，而数学在技术发展中所处的地位显得愈来愈重要。面对愈来愈复杂的石油勘探开发难题及其相关的数学问题，石油界对数学研究及其应用的关注程度越来越强烈。我想，这也正是著者编著本书的重要目的之一吧。

著者有很扎实的应用数学基础与敏锐的洞察力，他们深知科研与生产紧密结合的重要意义，善于捕捉生产中遇到的疑点、难点问题，能够及时提出有价值的研究问题，并找到解决问题的可能途径。可以讲，他们的灵感来源于油田生产，他们的数学才华在现场实践中得到了充分的展示。

值此本书出版之际，聊表数言，是为序。



2001年12月12日

前 言

我自幼喜爱数学，上大学时选择了数学专业，大学毕业后直到现在，我一直在石油勘探开发领域从事科研工作。应当承认，石油勘探开发领域生产性比较强，与数学的关系似乎不是十分密切。然而，30多年来，我一直没有放弃对数学的追求，一则是出于自己对数学的偏好，二则是我发现在石油勘探开发中有很多数学问题值得研究。

2000年6月，数学界元老吴文俊先生邀请我参加香山科学会议，并要我在会上作一个关于“石油勘探开发中的数学问题”的发言。吴文俊先生给我的题目，正是我多年来一直在努力思索的问题。为此，我花了3个多月的时间，把我多年来在工作中遇到的数学问题进行了认真的梳理和分析，并特别邀请了我的两位年轻同事刘明新教授和汤磊教授，一起准备了发言稿。

在10月召开的香山会议上，我的发言引起了会议组织者和与会学者、专家的很大兴趣。由此，我萌发了一个想法，在这个讲稿的基础上，结合多年从事的科研工作，写成一本书，以了却我作为一名数学爱好者和一名在石油部门工作了37年的科研工作者的一个宿愿。此想法得到了刘明新教授和汤磊教授的共鸣，我们共同完成了此书的编写。

在石油勘探开发领域中经常遇到许多数学问题，比如，数学物理方程中的全部问题，包括抛物型方程、椭圆型方程、双曲型方程，以及此类方程的离散化方法、线性代数方程组的解、并行算法、网格化、统计计算等。本书尽可能在各个主要环节展示了数学在其中的重要作用。特别重点介绍了石油勘探开发领域中数学问题的最新进展，同时，还提出了该领域尚未解决的难题和主攻方向。我想，这些问题同样也是数学界和工程界共同关心的问题，所以，我写这本书，一个很重要的目的，就是藉以引起数学力学界和工程界的学者们更加关注石油勘探开发领域的问题。

随着计算机的日益普及和发展，石油勘探开发领域也对数学和数学计算提出了更多的问题和更高的要求。如何解决这些难题，是作者和读者将要继续思考的问题，尽管专业技术的分工十分繁多，然而读者透过本书将会发现各专业领域的数学问题有许多共性。对于长期从事石油勘探开发研究的专业人员，从一个新的视角来重新审视一下已经熟知的问题，或许能产生新的灵感和启发，这也是本书的另一个目的。

本书主要对石油勘探开发领域中与数学密切相关的诸多重要问题进行了

综述性的论述，重点介绍了石油勘探开发中遇到的地震信号的数据处理、地球物理中的正问题、地球物理中的反问题、地震反演理论与方法、地震层析成像、模拟退火、人工神经网络、盆地模拟、油藏数值模拟、油藏工程、数据库、地质统计、分形几何等涉及的数学问题。本书只对一些比较重要的概念进行了必要的表述，只阐明其关键所在和探究这些问题的最有效、最常用的方法以及国内外在这个领域的研究状况等，而对一些基本概念未作详细的阐述。对于那些即将或正在从事石油勘探开发与数学密切相关领域研究的人们，这些论述将有助于他们全面了解数学在石油勘探开发中的作用、研究方法以及尚待解决的问题。

笔者衷心希望本书能够给那些对石油勘探开发中的数学问题感兴趣的专家、学者以及在校研究生、高年级大学生提供一些必要的帮助和参考。如果读者在阅读了本书之后，对有关问题产生了兴趣或有了进一步开展研究的愿望，那么，笔者将感到十分欣慰。

本书在写作过程中得到了许多年轻同仁的热心帮助，承蒙渗流力学专家郭尚平院士为本书作序，科学出版社的陈玉琢编辑等在成书过程中付出了艰辛的劳动。在此，作者对他们致以衷心的感谢！

沈平平
2001年10月

目 录

上篇 勘探地球物理学中的数学问题

第一章 引言	1
§ 1.1 地球物理学研究	1
§ 1.2 地震方法简介	3
§ 1.3 地震成像及其数学问题	4
第二章 地震信号数据处理	6
§ 2.1 地震观测系统	6
§ 2.2 地震信号数据处理	12
§ 2.3 地震信号数学变换	29
§ 2.4 地震信号褶积	33
§ 2.5 地震信号相关	35
§ 2.6 地震信号相位	40
§ 2.7 反褶积与频率滤波	41
§ 2.8 地震偏移归位	53
§ 2.9 地震信号的小波变换	63
第三章 地球物理中的正问题	67
§ 3.1 勘探地球物理学的基本方程式	67
§ 3.2 波动问题的常用数字解法	74
§ 3.3 复杂介质中波的传播问题	77
第四章 地球物理中的反问题	83
§ 4.1 反演问题基本概念	83
§ 4.2 地球物理线性反演	84
§ 4.3 地球物理广义反演	85
§ 4.4 广义逆矩阵与分辨率	92
§ 4.5 奇异值分解与自然广义逆	101
§ 4.6 广义线性反演在地震处理解释中的应用	106
第五章 地震反演理论与方法	119
§ 5.1 地震反演方法综述	119
§ 5.2 递推地震反演方法	120
§ 5.3 基于模型地震反演方法	124
§ 5.4 随机地震反演方法	128

§ 5.5 广义共轭梯度法	135
§ 5.6 宽带约束地震反演法	139
第六章 地震层析成像	148
§ 6.1 层析成像的概念	148
§ 6.2 离散图像重建技术	150
§ 6.3 井间地震	160
第七章 现代数学方法	164
§ 7.1 模拟退火反演法	164
§ 7.2 人工神经网络方法	168
§ 7.3 地质统计学方法	172
参考文献	175

中篇 盆地模拟中的数学问题

第八章 盆地模拟方法	177
§ 8.1 盆地模拟的主要内容	177
§ 8.2 沉积埋藏史和构造发展史（地史）模拟	178
§ 8.3 古热流史和古地温史（热史）模拟	180
§ 8.4 有机质成熟史和生烃史模拟	182
§ 8.5 排烃史模拟	186
§ 8.6 运移、聚集史模拟	191
参考文献	196

下篇 油气田开发中的数学问题

第九章 油藏数值模拟基本方法中的数学问题	197
§ 9.1 油藏数值模拟简介	197
§ 9.2 黑油模型的基本方程	199
§ 9.3 数值模拟拟线性偏微分方程的新型离散化方法	203
§ 9.4 大型稀疏矩阵的快速解法	208
§ 9.5 非结构网格油藏数值模拟方法研究	216
§ 9.6 局部网格加密方法	221
§ 9.7 油藏数值模拟并行求解技术	227
第十章 专项油藏数值模拟中的数学问题	233
§ 10.1 数值模拟中自动历史拟合问题的解决方法	233
§ 10.2 组分模型快速求解技术与方法	236
§ 10.3 热采模型中的快速算法	253
§ 10.4 化学驱采油的数值模拟	255
§ 10.5 双重介质模型中的快速算法	261
第十一章 油藏工程中的若干数学问题	265

§ 11.1 试井分析中的数学问题	265
§ 11.2 孔隙网络结构的几何形态及参数计算	272
§ 11.3 微观孔隙空间中的流动与宏观渗流的关系	274
第十二章 数据库及其他方面的数学问题	279
§ 12.1 数据库在油田开发中的应用	279
§ 12.2 油藏描述在油田勘探开发中的应用	291
§ 12.3 分形几何技术在油藏开发中的应用	300
参考文献	314

附录 数学基础

附录 1 基本概念	322
§ A1.1 行列式	322
§ A1.2 矢量分析	323
§ A1.3 矩阵分析	326
§ A1.4 最小平方法	331
§ A1.5 有限差分	335
§ A1.6 微分方程的数值解	338
§ A1.7 部分分式法	341
附录 2 傅里叶 (Fourier) 级数与傅里叶变换	344
§ A2.1 傅里叶级数	344
§ A2.2 傅里叶积分	346
§ A2.3 傅里叶变换	346
§ A2.4 多维傅里叶级数和傅里叶变换	349
§ A2.5 傅里叶变换中的基本定理	349
§ A2.6 褶积定理	354
§ A2.7 互相关定理	356
§ A2.8 自相关	357
§ A2.9 多维褶积	357
§ A2.10 随机函数	358
§ A2.11 希尔伯特 (Hilbert) 变换	359
附录 3 拉普拉斯变换	363
§ A3.1 简介	363
§ A3.2 拉普拉斯变换定理	364
附录 4 线性系统	367
§ A4.1 简介	367
§ A4.2 串联与并联的线性系统	368
附录 5 数字系统与 z 变换	370
§ A5.1 采样定理	370

§ A5.2 采样函数的褶积与相关	371
§ A5.3 z 变换	372
§ A5.4 快速傅里叶变换 (FFT)	374
§ A5.5 将 z 变换用于数字系统	375
§ A5.6 相位因素	376
附录 6 复塞谱 (Cepstrum) 对数分析	383
附录 7 滤波	385
§ A7.1 简介	385
§ A7.2 滤波器的合成与分析	386
§ A7.3 频率滤波器	388
§ A7.4 巴特沃斯滤波器	390
§ A7.5 时窗	392
§ A7.6 最佳滤波器	394

上篇 勘探地球物理学中的数学问题

第一章 引言

§ 1.1 地球物理学研究

地球物理学可分为固体地球物理学和勘探地球物理学两大方面,其主要研究对象是地球内部,目的是探测地球内部的物理状态,如物理性质、受力状态或热流密度分布等.地球物理的研究内容和过程可用图 1.1 来表示(杨文采,1999).从该图可看出地球物理研究主要分为三个部分:

(1) **数据采集** 采集反映地球内部物理过程的数据.在勘探地球物理中数据获得系统不仅包括观测物理信号用的传感器和测量仪器,还包括激发物理信号的人工震源或场源,如可控震源、射线发生器等.数据采集是地球物理研究中最重要的一环之一,每当地球物理数据采集的精度或信息量提高一个等级,就推动数据分析技术前进一大步,从而导致对地球内部结构的认识的精细程度提高一大步.

(2) **数据处理与分析** 由于原始记录中包含着不同程度的干扰,也由于随着获得的数据量的不断增大而要求相应的数据管理和显示技术,原始记录的数据要先用计算机进行处理,以提高信噪比或提取与地质解释有关的某些特殊的信息.数据处理的结果一般还是描述物理现象的量,而不是描述地球内部物质物理状态变化的量;但反演处理的目的是将物理现象的数据转化为地球内部物质状态变化的数据,为下一步地质解释提供依据.

(3) **地质解释** 地质解释主要根据实验测定的岩石类型和物理性质之间的关系或者它们的统计规律来推测地球内部不同岩石的分布区域以及相变带和突变带,并由此导出有关地球构造、动力和演化的佐证,或者得出有关矿产生成、储存和聚集的结论.

本章主要以勘探地球物理学中的勘探地震学(或称“人工地震学”)为主,介绍其所涉及的数学问题及应用.

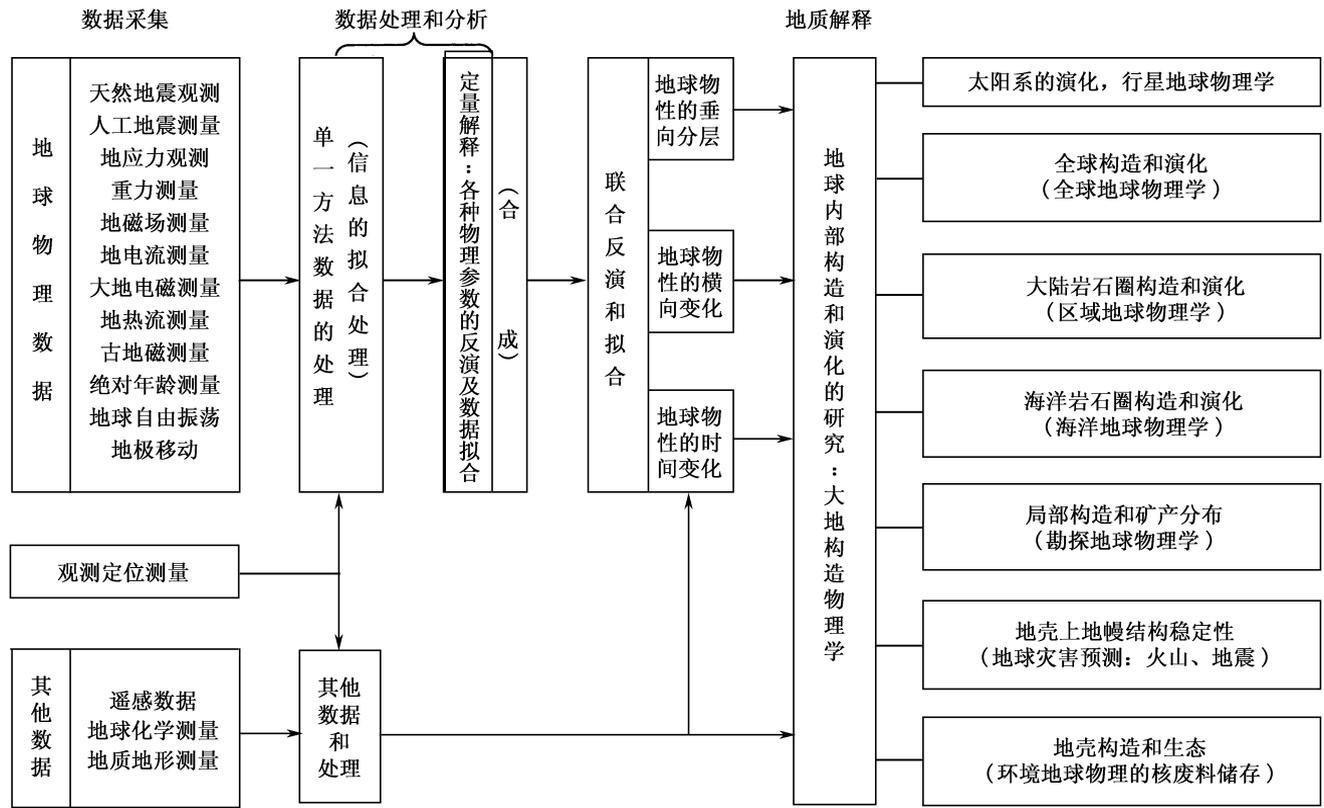


图 1.1 地球物理学研究的一般流程

§ 1.2 地震方法简介

在油气勘探中,地球物理勘探(简称物探)已成为一种很重要的方法,因为它不仅可以提供沉积覆盖地区有关地下地质、地层、岩性等方面的信息,而且工作效率高.如果采用钻井的方法来直接寻找油气田,则成本太高,且效率也很低.所以在近代的油气田勘探中,先物探后钻井的生产流程,即通过物探工作,提出钻探井位,然后才进行钻探工作.这种物探方法和钻井直接找油法相结合,使地质工作者更好更准确地找到油气田.

物探方法包括重力、磁力、电法、地震勘探等.前三种方法,主要是用来研究大地构造和区域构造,划分出沉积盆地中的次级构造单元,指出有利的含油气区.然后,在该区开展勘探工作,查明各类油气构造.在油气勘探工作中,特别是在详查阶段,地震勘探是起主导作用的.在我国,如大庆油田,首先是用地震方法发现了构造而找到的.接着胜利、大港、任丘等重要的大油田也都是这样.据统计,自大庆油田发现以来,95%的新油田都是用地震勘探提供构造位置而找到的.世界上,如墨西哥湾油田、中东油田等许多大中型油田的发现也都是如此.多年来,西方世界在物探方面的投资中有90%多用于地震勘探,可见,地震勘探方法在油气田勘探工作中所占的地位是相当重要的.

物探方法都是以研究岩石的某种物理性质为基础的,地震勘探所依据的是岩石的弹性.其基本的工作方法是在地表某测线上,在浅井中用炸药震源人工激发地震波,地震波向下传播,当遇到弹性不同的分界面时,就发生反射或折射.我们可以在测线的一些点上用专门的仪器记录地震波,得到地震记录.由于接收的地震波受到了地下地层介质的改造,就带有与地质构造、地层岩性等有关的各种信息,诸如时间、能量、速度、频率等.从地震记录中提取这些信息,就有可能推断解释地质构造的形态、含油气地层的分布等.图 1.2 表明了地震勘探野外工作及所得到的地震记录(钱绍珊,1993).

近年来,随着我国科学技术的发展及引进国外先进技术,地震勘探正在进一步向高信噪比、高分辨率、高保真度、高清晰度、高精度的方向发展,现在我们可以从接收的地震信号中提取构造信息,而且还可以提取与地层岩性、油气等有关的多种信息,使以往以找构造为主的构造地震向地层地震和岩性地震发展,进而可以对沉积盆地的发展演化、沉积环境、生储油条件等进行评价,有利于更准确地寻找构造和地层岩性油气藏.因此,石油地质理论及有关的地质资料与地震勘探理论及地震资料的结合,是当今勘探油气田最主要的工作方法和必然趋势.

地震勘探也广泛地用于煤田勘探中,因为煤层与围岩存在着较大的弹性

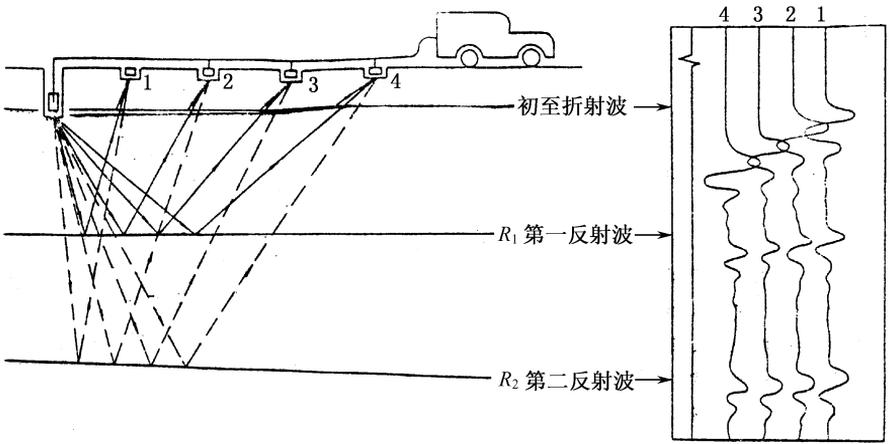


图 1.2 地震反射法示意图

差异,这就决定可用地震勘探方法寻找埋藏较浅的煤田.目前国内外对煤田地震勘探的研究和应用已得到了很快的发展.在寻找地热资源及水文工程、城市建设、地壳测深等工作中,地震勘探也得到了广泛的应用.

§ 1.3 地震成像及其数学问题

地震法的任务是测定地下几十米至几十公里深度范围内地下地层分布、构造形态、岩石物性以及所含的流体分布等,因此,可以说是要绘制出地球表层的图像.在过去很长一个历史阶段里,该任务的许多环节是以手工操作来完成的.20 世纪 70 年代以后,由于使用计算机才使用手工操作无法实现的计算工作都由计算机来完成,如用波动方程进行的波场延拓的计算可以在计算机上实现.因此,用计算机得到地下构造图像的过程就成为当代研究的主要方向,这个研究课题也常被称为地震成像研究.

现代地震成像研究的主要内容包括地震偏移成像、波动方程参数反演、井间地震层析和反射地震层析成像(马在田,1999),其中地震偏移成像理论比较成熟,实用效果也较好.其他三个方面正在进行广泛研究,但由于其复杂性,还须在理论、方法和实用问题上进行探索.

地震偏移成像是绘制地下地层结构形态的最有效的方法,它是以描述地震波传播过程的波动方程为理论基础的.任何波动传播的物理过程都是从震源向外传播的,而偏移成像过程要求实现地震波反向传播,而反向传播不是一个物理过程.要使用波动方程计算地震波的反传播问题在数学上是一个不适

定问题, 不适定问题理论上是无解的, 数值计算也是不收敛的. 为了解决此问题, 地震学家提出了各种变型的波动方程或改变求解的方法, 终于解决了这类问题, 从而使计算地震波的反向传播在计算机上得以实现, 并得到了精确的地下构造的图像. 围绕着地震信号处理和偏移成像, 我们将在第二章介绍有关数据处理概念及其数学模型, 特别是傅里叶变换理论.

波动方程参数反演是通过解波动方程的参数反问题来求解地下地层的物性参数, 如速度、阻抗、弹性系统和密度等, 其目的也在于测定地层的性质及其含油气性. 国际地球物理界在这方面的研究已进行 20 多年了, 发表了数以百计的论文和若干专著, 但由于地震数据的不完全和介质的复杂性, 以及数理问题的不适定性和非线性等多种因素, 一直未能达到可实用的程度, 目前研究工作仍在进行中. 为了解决地震参数反问题, 曾采用过类似于量子力学的反散射问题的解法, 但未取得明显进展. 为了能够得到稳定解, 提出了数据与模型正演结果的拟合法, 广义最小平方方法常用来解此类反问题, 并在实际中得到推广应用. 在第三、四和第五章, 我们将介绍地球物理的数学模型及其正、反问题理论及方法.

井间地震层析成像是研究两口或多口钻井之间的地层, 进而研究油层分布的技术. 它是根据医学 CT 成像原理, 用地震波的透射、衍射的观测数据求各种地震中相关的速度、密度和弹性参数, 从而判断各种地层的分布与性质, 从中分析出油气层、煤层、地质体等物性参数分布范围, 为开采各种矿产和工程研究提供可靠的依据. 井间地震层析成像在原理上虽然与医学 CT 成像是是一致的, 但面临的问题有很大的不同. 医学层析成像技术的巨大成功在很大程度上是由于三个因素: 一是 X 射线的传播路径是直线; 二是可以从各个方向上对人体(物体)进行观测扫描; 三是人体的器官及构成基本上是已知的. 而对于地震井间层析成像来说, 这些都无法实现. 尽管如此, 从理论上说, 地面反射加上井间观测的层析成像仍是最有价值的成像方法. 我们将在第六章介绍有关的数学方法和问题.

总之, 为了使处理后的地震资料能够真实地反映地下地质构造、地层分布、油气分布以及储量估算, 人们在不断地研究各种处理方法(第七章). 这些方法是根据勘探地震学的原理以及与矩阵论、数字分析、信号分析、数学物理、现代信息理论、人工智能等其他科学知识相结合研究出来的. 这些方法涉及面之广, 难度之大, 都难以想像. 例如, 地震参数的波动方程反问题就是数理方程中的不适定问题, 这类问题还远没有得到很好的解决. 同时这类问题也是非线性的, 而非线性问题的求解仍在探索中.

第二章 地震信号数据处理

本章我们将讨论地震信号处理方法及其数学原理. § 2.1 介绍地震数据采集的观测系统; § 2.2 介绍常规地震处理流程, 如反褶积、静动校正、水平叠加和偏移等主要处理方法; § 2.3 介绍地震信号处理的数学变换, 如傅里叶变换、Z 变换、拉东变换等的数学定义及其性质; § 2.4 介绍地震褶积的数学定义及其性质; § 2.5 介绍地震信号相关的数学定义及其性质; § 2.6 介绍地震信号相位及其性质; § 2.7 重点介绍反褶积与频率滤波; § 2.8 介绍偏移方法的数学定义和解法; 最后在 § 2.9 介绍小波理论现代数学方法在地震信号处理中的应用. 本章所涉及到的数学推导在附录 1~7 中.

§ 2.1 地震观测系统

2.1.1 地震观测系统

地震勘探中把震源点和布置检波器接收地段的相对位置关系叫做观测系统, 为了能较清楚地讲述系统, 先要介绍一些与观测系统有关的专业术语(钱绍瑚, 1993).

1. 术语

检波道数, 一般用 N 表示, 每次放炮的接收道数一般有 48 道、96 道或更多.

道间距, 一般用 ΔX 表示, 道距(指接收道之间的距离)多为 25~100m.

接收距, 一般用 L 表示, 它是检波器安置在地表的长度, 数值为 $L = (N-1)\Delta X$

放炮形式一般分为端点和中间放炮两种. 所谓中间放炮是指炮点位于地表所布检波器的中间. 所谓端点放炮是指炮点位于所布检波器的端点. 在这两种放炮形式中, 炮点既可以安置检波器, 如图 2.1(a)所示, 也可以不安置检波器, 如图 2.1(b)所示.

偏移距, 一般用 X_1 表示. 如果端点放炮时, 端点既是炮点又是检波点, 井中喷出物(井口干扰)及面波对炮点附近的几道检波器都会产生严重的干扰, 因此一般端点不安置检波器, 即紧挨震源的检波器离开震源一定距离, 这个距离称为偏移距, 偏移距的长度为道间距的整数倍.

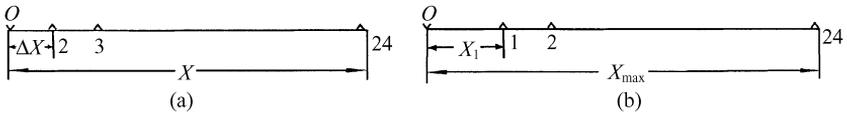


图 2.1 端点放炮排列

排列长度, 一般用 X 表示, 把一个炮点与 24 道、48 道或更多道检波器所组成的测线段叫排列。

最大炮检距, 一般用 X_{\max} 表示, 它是指炮点到最远检波器的距离。

在实际工作中常采用偏移距, 最大炮检距来表示炮点与接收点相对关系, 如图 2.1(b) 所画的端点放炮排列, 可表示为 $O - X_1 - X_{\max}$, 其中 O 为炮点, 设 $N = 24, \Delta X = 50\text{m}, X_1 = 4\Delta X = 200\text{m}$, 则上面的关系式可具体地写为 $0 - 200 - 1350$ 。

2. 反射波法观测系统的图示方法

观测系统可以用时距平面图和综合平面图两种方法来表示。

时距平面法是用时距曲线的方式来表示观测系统以及它与反射界面的相对关系。如图 2.2(a), 在 O_1 点激发, $O_1 O_2$ 地段接收反射波, 其时距曲线用 $t_{01} T'$ 表示, 对应的反射界为 $R_1 R_2$ 。在 O_2 点激发, 同在 $O_1 O_2$ 地段接收反射, 其时距曲线用 $t_{02} T$ 表示, 对应的反射界面为 $R_2 R_3$ 。通过放炮, 可得连续的反射界面段 $R_1 R_3$, 把炮点和排列向一个方向移动, 重复以上的工作, 就可以得到一个连续的长反射界面。

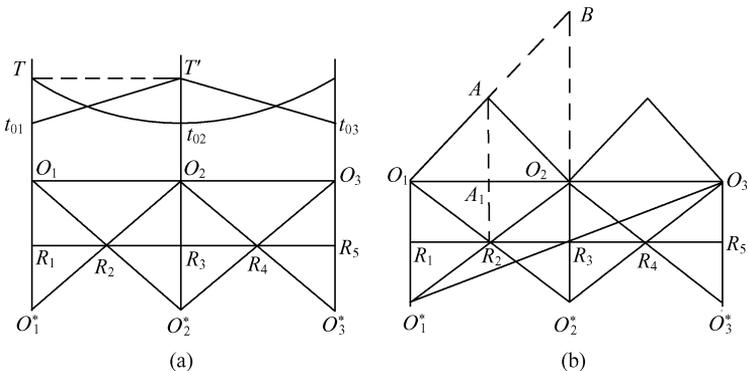


图 2.2 观测系统

从图 2.2 可见, 当波自 O_1 点传播到 O_2 与波自 O_2 点传播到 O_1 点所走

的路程相同,有相同的旅行时间,即 $T' = T$,称这个时间为互换时间。

综合平面图如图 2.2(b)所示,把炮点标在水平直线上,然后从炮点向两侧作与测线成 45° 角的斜线,组成坐标网.当在某点激发而在某一地段接收反射波时,则可将该接收段投影到通过爆炸点的 45° 斜线上,用此投影线段来表示接收地段.例如,在 O_1 点激发,在 $O_1 O_2$ 地段接收反射波,可用斜线段 $O_1 A$ 来表示炮点和接收段的关系, $O_1 A$ 在测线上的垂直投影 $O_1 A_1$ 就是所反映的反射界面的长度,同理在 O_2 点激发,在同一排列接收,可用 $O_2 A$ 来表示,相应的反射界面为 $R_2 R_3$,这样也可以得到连续的反射界面.这种观测系统称为简单连续观测系统。

另一种反射波法观测系统叫覆盖观测系统,如图 2.2(b)中,在 O_2 点激发,在 $O_1 O_2$ 地段接收反射波,对反射界面 $R_2 R_3$ 进行了一次观测,也叫单次覆盖.如果又在 O_1 点激发,在 $O_2 O_3$ 地段接收地震波,这种叫间隔一个排列接收,偏移距也为一个排列,斜线 AB 表示接收地段,这时对反射界面段 $R_2 R_3$ 又进行了一个观测,即重复观测了两次,叫二次覆盖。

在观测系统中,只有一个炮点而有多道检波器,即对多道接收点来说只有一个公共的炮点,在地震中又称为共炮点排列。

在实际生产中,使用的观测系统多用综合平面图来表示,它由水平线以上的许多等腰直角三角形组成.它的形式很简单,又很直观地表示了炮点和排列之间的关系,因此在地震工作中一直采用这种图示方法.有了观测系统便于人们统计各条测线的工作量(炮次、井数、炸药量数、布排列次数等),它也是野外生产中各个工种协同工作的共同依据。

2.1.2 多次覆盖法

随着数字地震仪和计算机的发展,20 世纪 60 年代在地震勘探中出现了共反射点多次叠加法,又叫多次覆盖法,它对反射界面上的各个反射点进行多次观测,然后进行动校正,再把校正后的波动信号叠加,这样得到的剖面叫多次覆盖时间剖面.这种方法可以有效地压制多次波等规则干扰和不规则干扰,提高地震资料的信噪比.下面我们要讨论如何获取这种剖面,它为什么能提高地震资料的信噪比等问题。

1. 平界面共反射点反射波的叠加效应

所谓叠加效应是指对地震波的时距曲线进行动校正,再将校正后的波形叠加,看其效果如何.要讨论水平界面共反射点反射波的叠加效应,须先讨论共反射点时距曲线,如图 2.3 所示,在 O_1, O_2, O_3 等点激发,可以在以 M 点为对称的相应的 S_1, S_2, S_3 等点接收来自水平界面 R 上 A 点的反射.称 A 点

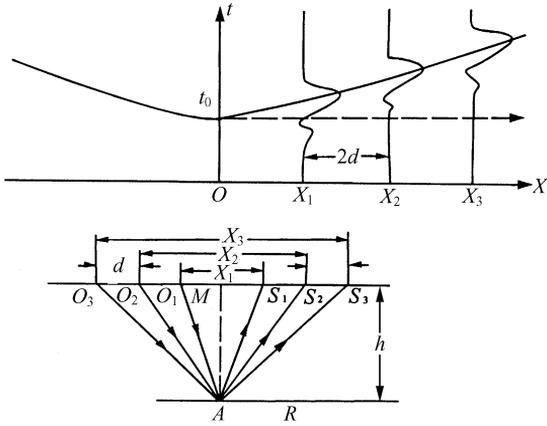


图 2.3 共反射点时距曲线

为共反射点或共深度点. M 点是 A 点在地面的投影点, 也是接收距的中心点, 称为共中心点公共地面点, S_1, S_2, S_3 等称共反射点的叠加道或叫做共反射点道集.

如果以炮检距为横坐标, 以反射波到达各叠加道的时间为纵坐标, 就可以得到来自 A 点的半支时距曲线, 将炮点和接收点互换, 得另一侧半支时距曲线. 整支时距曲线就叫做共反射点时距曲线, 其方程为

$$t = \frac{1}{V} \sqrt{X_i^2 + 4h^2}$$

式中 X_i 为共炮点道集中各道的炮检距, h 为 M 点处界面的法线深度.

对共反射点时距曲线进行动校正就是把叠加道的时间都校正到 M 点的回声时间, 或者说把呈双曲线的共反射点时距曲线拉平, 如图 2.4 所示. 假设各叠加道的波形相同, 将进行动校后的波形叠加, 必然是同相叠加, 振幅成倍增加, 如图 2.5 所示.

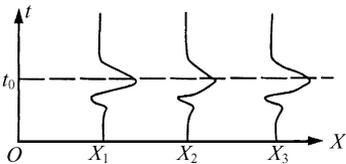


图 2.4 动校正

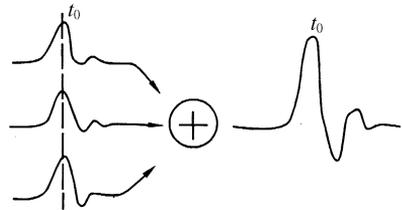


图 2.5 叠加

上面讨论的是水平界面共反射点波形叠加的情况, 地震勘探中称之为水

平叠加.上述描述为什么我们要在处理中进行叠加的道理.当界面水平时,叠加效果最为理想,但实际的反射界面往往是倾斜的,而且反射波除了一次波之外可能还存在多次波,它们的叠加效应又如何呢?

2. 倾斜平界面反射波的叠加效应

当界面倾斜时,波的叠加效应不同于水平界面反射波的情况,其区别之一是不存在共反射点,反射点是分散的,区别之二是会出现剩余时差.

(1) 反射点分散 如图 2.6 所示,炮点和接收点仍以共中心点对称布置,地下界面上反射点 A_1, A_2 等散布在倾斜界面的一定距离上,该地段称为共反射段,即对倾斜界面来说只存在共中心点,而不存在共反射点,有人把这种情况叫做共中心点叠加,以和共反射点叠加相区别.

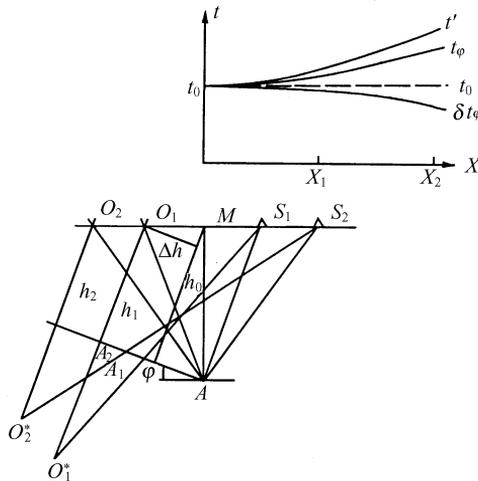


图 2.6 斜界面地震波的叠加

从图可见,反射点随着倾角、炮检距的增大和界面埋藏深度的减小,越来越分散,其中界面的倾角和埋深决定于地下地质条件,但炮检距的大小可以人为地控制,在地质构造比较复杂的条件下,一般总要使炮检距相对小一些,使反射点相对比较集中.

(2) 剩余时差.倾斜平界面的共中心点时距曲线经动校正后会出现剩余时差.

斜界面的共中心点时距方程与共炮点斜界面的方程形式是一样的,由图 2.6 可直接写出时距方程

$$t_{\varphi} = \frac{1}{V} \sqrt{X^2 + 4h_i^2 + 4h_i X \sin \varphi}$$

式中 h_i 为各炮点的界面法线深度,这是随炮点位置的移动而变化的,为了导出一个一般的共中心点时距方程,可以用共中心 M 处的界面法线深度 h_0 来表示 h_i ,为此先要找出二者之间的关系.从图 2.6 可知

$$h_i = h_0 - \Delta h = h_0 - \frac{X}{2} \sin \varphi$$

把它代入上式,经整理可得

$$t_\varphi = \frac{1}{V} \sqrt{4h_0^2 + X^2 \cos^2 \varphi} = \sqrt{t_0^2 + \frac{X^2}{\frac{V^2}{\cos^2 \varphi}}} = \sqrt{t_0^2 + \frac{X^2}{V_\varphi^2}}$$

式中 $V_\varphi = V / \cos \varphi$,称为倾斜界面反射波的等效速度,一般情况下 φ 总小于 90° ,所以等效速度总大于平均速度,当 $\varphi=0$ 时,等效速度就等于上覆介质的平均速度.

上式是以共中心点法向深度表示的斜界面的共中心点时距方程,它的形式和水平界面的共反射点时距方程完全相同,且都为双曲线,所不同的是前者的速度参数为平均速度,而后者为等效速度.

从图 2.6 可见,假设水平和倾斜界面的时距曲线有相同的 t_0 时间,因为平均速度小于等效速度,故水平界面的共反射点时距曲线要比斜界面的共中心点时距曲线要陡.对共中心点时距曲线进行动校正,如校正过量,出现负的剩余时差,剩余时差曲线(用 δt_φ 表示)是下弯的曲线.剩余时差的式子如同多次波的剩余时差的公式,可以写出

$$\begin{aligned} \delta t_\varphi &= (t_\varphi - \Delta T) - t_0 = t_0 + \frac{X^2}{2t_0 V_\varphi^2} - \frac{X^2}{2t_0 V^2} - t_0 \\ &= \frac{X^2}{2t_0} \left(\frac{1}{V_\varphi^2} - \frac{1}{V^2} \right) = \frac{X^2}{2t_0} \left(\frac{\cos^2 \varphi}{V^2} - \frac{1}{V^2} \right) \\ &= -\frac{X^2}{2t_0 V^2} \sin^2 \varphi = -\Delta t \sin^2 \varphi = q_\varphi X^2 \end{aligned}$$

式中

$$q_\varphi = -\frac{\sin^2 \varphi}{2t_0 V^2}$$

上式说明,剩余时差按抛物线的规律变化,它与炮检距的平方和地层倾角成正比.在一般情况下剩余时差是比较小的,因为 $\sin^2 \varphi$ 在 φ 不大时总是较小的.对于倾斜界面同一组的叠加道集,如果其最短的最长炮检距的剩余时差之差,不大于反射波半周期的话,根据叠加原理,叠加后一次反射波仍然会得到加强,但它已不是同相叠加.对于深层来说,由于剩余时差较小,倾角稍大些,同样可以取得较好的叠加效果.

由以上讨论,尽管多次覆盖在一定程度上可以提高信号的信噪比,但要获

得地层界面的准确位置,还需要消除多次波和地层倾角的影响.由此,人们提出了反褶积和偏移等方法来达到此目的(见 § 2.4 和 § 2.8).

§ 2.2 地震信号数据处理

2.2.1 概述

数字处理的任务是对采集的地震信息,进行各种方法的加工处理,进一步压制信息采集中未能消除的残留的面波、多次波和随机干扰等,提高信号的信噪比和改善分辨率.处理后可得到直观反映地质构造形态和地层岩性的地震时间剖面资料.

地震信号数字处理的目的是有以下三个方面:

(1) 使数据集尽量符合简化的数学模型.如,假定观测在平面上进行,就要通过静校正把观测点换算到基准面上.为消除炮点和检波器与地下介质耦合的不均匀性,要用道均衡等技术调整每个地震道的振幅等.

(2) 提高数据的信噪比,如各种数字滤波器.

(3) 提高信号的分辨率,包括时间分辨率和空间分辨率,如反褶积、地震偏移等.

野外数字记录磁带拿到室内用计算机处理时,都要经过输入、数据处理、输出显示三个部分.

输入部分是把磁带上记录的地震信息作各种加工处理,按其处理的时间先后顺序又分预处理、数字处理、修饰处理.

输出部分是将处理的结果,通过绘图仪、打印机等输出设备,以时间剖面等形式显示出来,作为处理的成果资料.

整个处理流程可用图 2.7 来表示.预处理是在数据处理之前所必须完成的准备工作.预处理的目的是把数据进行编辑,把野外数据的记录格式转化为计算机处理规定的形式.另外预处理要预先对资料进行一些简单的加工处理.

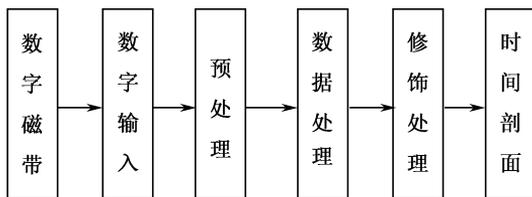


图 2.7 处理流程

1. 数据重排

数据重排也称为数据的编辑与解编.由于地震记录仪器对地震波是按时间分道采样的,这种采样数据的排列形式,可用一个矩阵 B 来表示,假设接收道为 24 道,这个 B 矩阵可写为

$$B = \begin{bmatrix} A_{t,1} & A_{t,2} & \cdots & A_{t,24} \\ A_{t+\Delta,1} & A_{t+\Delta,2} & \cdots & A_{t+\Delta,24} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{t+n\Delta,1} & A_{t+n\Delta,2} & \cdots & A_{t+n\Delta,24} \end{bmatrix}$$

式中 A 表示采样振幅离散值,下标 t 表示起始时间, Δ 表示采样间隔, n 表示为采样点个数,24 表示接收道数.所谓按时间分道采样就是按某一采样时间取其 1 至 24 道的子样,如矩阵中的第一行是指当时间为 t 时取其 1 至 24 道的子样.但在计算机内对地震数据进行运算时,却是逐道进行的,因此必须将按时间分道采样的时序数据排列形式转换成按道分时的道序排列形式,以供处理之用.数据重排就是完成这种转换的程序.实际上就是按上述要求将数据在内存单元中“搬家”,把 B 矩阵转变为下列形式的矩阵 C ,即把矩阵转置一下就行了.

$$C = \begin{bmatrix} A_{t,1} & A_{t+\Delta,1} & \cdots & A_{t+n\Delta,1} \\ A_{t,2} & A_{t+\Delta,2} & \cdots & A_{t+n\Delta,2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{t,24} & A_{t+\Delta,24} & \cdots & A_{t+n\Delta,24} \end{bmatrix}$$

C 矩阵的第一行就是对第一接收道离散取样.

2. 编辑

为了保证多次叠加的质量,必须在对地震数据进行处理之前,纠正信息采集时由于故障和失误对资料产生的影响,对于那些不合格的地震信息,宁可舍弃不用.如果说让它们参加,反而会影响到叠加效果,对这些不好的信息要剔除或冲零,即对记录要进行编辑加工.

编辑主要做两项工作,一对不正常炮要补缺,二对不正常道要补缺.不正常炮指废炮、哑炮和缺炮,废炮需将该炮所有道都充零.缺炮时要补上一张全零的记录.

不正常道包括反道、死道和工作不正常道.不正常道可能使记录道波形畸变或振幅过大过小,需将它们充零,也称为清野值.死道是由于埋置不好或检波器仪器的故障造成的,也应充零.反道可能是由于检波器正、负极性接反,使

记录出现反相,这时可将该道的采样改变符号,即乘上-1.

3. 抽道集

为了进行叠加和计算速度谱的方便,可按观测系统将各个共反射点的叠加道抽取在一起按炮间隔大小排列好,这个过程实际上也是一种数据的重排,叫做抽道集或称为共深度点道集.

图 2.8 是地震资料处理的常规流程(Sherif R E,1995),从该图中可将地

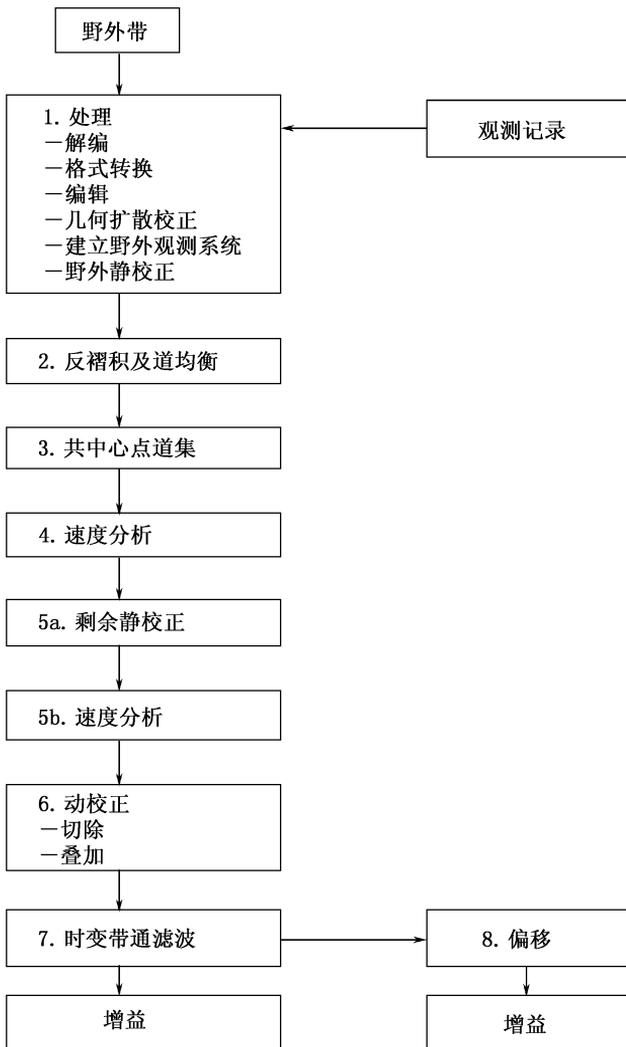


图 2.8 常规地震处理流程

震资料处理分为 3 个基本阶段.根据通常的应用顺序,它们是:(1)反褶积,(2)叠加,(3)偏移.

2.2.2 反褶积

反褶积的目的是要消除大地滤波器对地震信号的影响,提高地震记录的分辨能力;它还能消除多次波.

我们知道震源脉冲输入地下,受到大地吸收和反射系数的影响(也可以说是滤波),构成了我们所接收到的反射信号.我们先来分析一下这两个因素对震源脉冲到底有什么影响,然后再讨论反滤波问题.

1. 提高分辨率的反褶积

(1) 理想的地震记录

设震源为 $\delta(t)$ 脉冲,它在地层中传播只受到反射界面的影响,不考虑地层的吸收,这实际也是一种滤波过程,可表示为

$$\delta(t) \longrightarrow \boxed{\text{反射滤波器 } R(t)} \longrightarrow \hat{R}(t)$$

滤波器的滤波因子 $R(t)$,输出仍为强弱不等的尖脉冲.假设有如图 2.9 的地质模型,反射界面的反射系数依次为 R_1, R_2, \dots, R_N ,这时在地面某点接收的地震记录为

$$\hat{R}(t) = R_1 \delta_{t-1} + R_2 \delta_{t-2} + \dots + R_N \delta_{t-N} = \sum_{\tau=1}^N R_{\tau} \delta_{t-\tau}$$

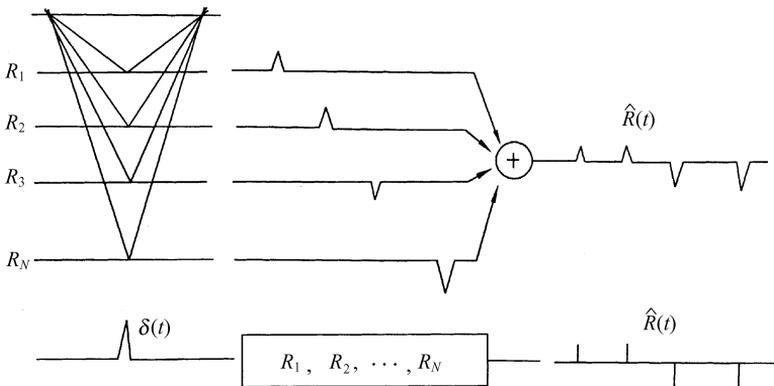


图 2.9 理想的地震记录

上式中每一项都为一个单位脉冲,脉冲的大小和极性反映了界面反射系数的大小和极性,不同脉冲之间的时差反映了地层的厚度,我们把这种记录称为理想的地震记录.在这种记录上每个脉冲都得分十分清楚,并与反射界面有其对应关系,我们又说它有很高的分辨能力,也就是说从记录上脉冲的个数就可知道地下有几个反射界面.在这种记录上每个脉冲都表示了不同反射界面的特性(反射系数的不同),所以我们又把所得的记录叫反射系数序列.

但实际的地震记录不可能是这样的,这只是一种理想化的条件.

(2) 实际的地震记录

1) 地震子波,大地对震源子波有吸收作用,它相当于一个低通滤波器,使尖脉冲变成了具有一定延续时间的波形,称此波为地震子波 $b(t)$,它可以看成是地层吸收滤波器的脉冲响应,如图 2.10 所示.

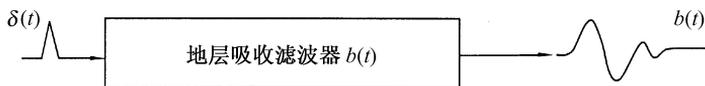


图 2.10 地震子波的形成

实际的地震子波一般情况下为 2 个周期左右,延续时间 60 毫秒~70 毫秒,子波在地层中传播,随着传播距离的增加,其振幅和波形是要发生变化的,但一般认为变化是很小的.

2) 实际的反射地震记录,地震子波有延续时间,它在传播中遇到某一反射界面,就会反射,在地面可接收到也有一定时间长度的反射波,而不再是尖脉冲,这样使来自相距较近的相邻反射界面的地震波到地面同一个接收点时将不能分开,相互叠加,形成复波,说明地震记录上的一个反射波,并不是由单一界面产生的单波,而是几十米间隔内许多反射波叠加的结果,如图 2.11 所示.称这种记录为实际的反射地震记录.从这种记录上无法分辨地下有几个反射界面,我们说它分辨能力是很差的.

图 2.12 表示了获取实际地震记录的滤波过程,可以写为

$$X(t) = \delta(t) * [R(t) * b(t)] = R(t) * b(t)$$

上式表明,地震记录 $X(t)$ 是地震子波 $b(t)$ 和反射系数 $R(t)$ 的褶积.这是著名的褶积模型,在地震方法中有重要应用.

(3) 反褶积

从实际所得的反射地震记录中去掉大地滤波器的作用,使它变为理想的地震记录,这种过程叫反褶积,其目的是压缩地震子波的时间长度,提高地震资料的分辨率;其关键是要设计一个反滤波器的滤波因子 $a(t)$.反褶积过程可用图 2.13 来表示.

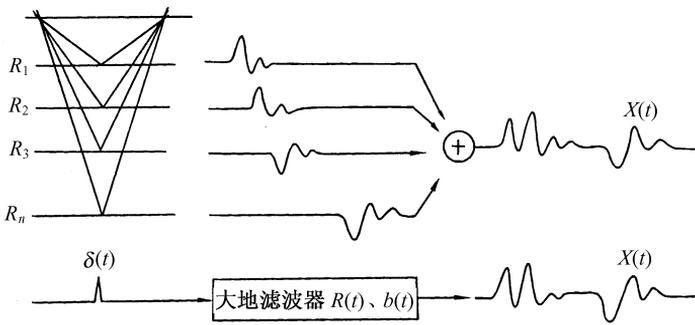


图 2.11 实际的地震记录

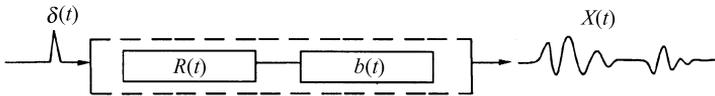


图 2.12 实际记录的滤波过程

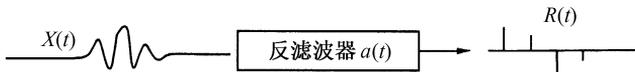


图 2.13 反褶积过程

反褶积的数学式为

$$X(t) * a(t) = R(t) * b(t) * a(t) = R(t)$$

上式中 $b(t) * a(t) = \delta(t)$ 。

反褶积的物理实质是由于实际的地震记录受了吸收的影响,使震源脉冲损失了高频成分加长了延续时间,如果我们能求取损失了高频部分的波动,对实际记录进行补偿,就会使信号的频带加宽,延续时间变小,使其接近尖脉冲,也就是说压缩了信号的长度,提高了分辨率.由于在记录中补偿了高频成分,有时会使原来在记录上被压制的高频干扰又显现出来,降低了信噪比,说明分辨率与信噪比是有一定矛盾的.处理人员需要通过计算和多次试验,做到既在一定程度上提高分辨率,又不显著降低信噪比.

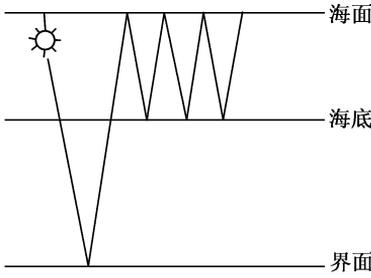
由于地震记录受存在干扰及提取子波技术条件的限制,实际上反褶积要真正做到使地震记录变成一个个尖脉冲还有一定的困难.

一般把压缩信号时间长度的反褶积,叫做脉冲反褶积.它是地震资料水平叠加处理中可供选用的程序,即需要提高地震资料的分辨率,可选用此处理手

段,有时甚至采用了叠前与叠后两次反褶积.当地震资料信噪比较低,这时应主要采用提高信噪比的处理手段,反褶积处理是次要的,甚至不用这种处理手段.

2. 提高信噪比的反褶积

反褶积还可以消除海上鸣震等多次波的干扰,以提高地震记录的信噪比.



由于海面和海底是两个强反射面,在这两个面之间会产生多次反射,在记录上出现类似正弦振动的干扰,这就是鸣震,它干扰了有效波,如图 2.14 所示.这时海水层的作用就相当于一个滤波器.如果用 $X(f)$ 表示反射信号的频谱,用 $F(f)$ 表示记录道的频谱,用 $N(f)$ 来表示海水层滤波器的频率特性,那么就有关系

图 2.14 海上鸣震的形成

$$F(f) = X(f) \cdot N(f)$$

当我们从包含干扰的地震记录道中拾取反射信号时,就必须设法消除海水层的滤波作用,即要设计一个滤波器 $A(f)$,使得有

$$X(f) = F(f) \cdot A(f)$$

把上式代入此式得

$$A(f) = \frac{1}{N(f)}$$

在时间域可表示为

$$X(t) = f(t) * a(t)$$

即在时间域,用反子波 $a(t)$ 和地震记录 $f(t)$ 做褶积,能直接得到只有一次反射,消除鸣震的地震信号.

一般把消除鸣震等多次波的反褶积,也叫做预测反褶积,它多在叠前使用,称为叠前预测反褶积,其目的是进一步压制地震资料中残留的鸣震等多次波干扰,提高资料的信噪比.对于海上地震资料来说,鸣震是相当严重的,预测反褶积已成为必须采用的常规处理手段.对于陆上资料来说,它是可供选用的一种处理手段,地震资料上有多次波干扰,则需要采用这种处理,反之地震记录无多次波干扰,则不需要采用这种处理手段.

2.2.3 叠加

常规的处理程序主要为水平叠加.水平叠加的处理流程如图 2.15 所示.水平叠加处理中最重要的是静校正、动校正和速度谱分析.下面我们介绍

其实现过程。

1. 静校正

用计算机来对地震资料作静校正处理时,主要做两项工作,一是计算各接收道的静校正量,二是实现静校正.计算静校正量目前主要有野外一次静校正和剩余静校正两种方法。

(1) 野外一次静校

野外一次静校正是根据对低速带厚度和速度测定的资料,计算各接收道的静校正量,它主要做二项工作:确定校正基准面、计算静校正量、计算机实现静校正。

1) 确定基准面

根据工区低速带厚度变化情况,选取一个静校正基准面,它一般选在地表与低速带底界面的中部,然后计算接收道的静校正量,并对记录道进行校正,使记录上反射时间校正到所选的基准面上.这种校正只与接收点位置有关,即每道只有一个校正量,它不随深、浅层反射波到达的时间改变,或者说这种表层影响对不同层次的反射波影响是相同的,此即静校正“静”的含义。

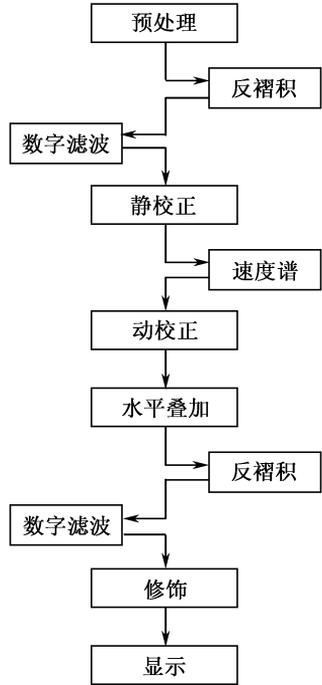


图 2.15 水平叠加处理流程

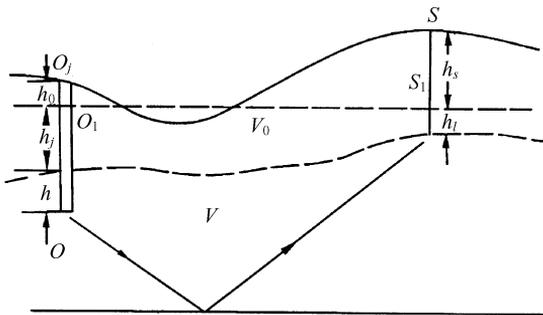


图 2.16 野外静校正量计算示意图

如图 2.16 所示,假设波从低速带底下的 O 点激发,在反射界面 R 上反射返回地表接收点 S 的时间为 t_s ,所谓静校正正是把地震波看做在基准面上 O_1

点激发,在基准面上 S_1 点接收,其传播时间假设为 t_s' ,那么两者的时间差值就是静校正量 $\Delta t_{\text{静}}$,在地震波实际的传播时间中减去静校正量,也就实现了静校正,即

$$t_s' = t_s - \Delta t_{\text{静}}$$

静校正量包括井深校正、地形校正和低速带校正。

2) 计算静校正量

井深校正:井深校正就是将炮点 O 的位置校正到地面 O_j 点,井深校正有两种方法:

① 井口 τ 值:它是井口检波器记录的直达波从井传播到地表的时间,可直接从井口记录道上读取, τ 值就为井深校正量。

② 从低速带资料及井深数据求取,即井深校正量 $\Delta \tau_j$ 为

$$\Delta \tau_j = - \left[\frac{1}{V_0} (h_0 + h_j) + \frac{1}{V} h \right]$$

式中 V_0 是低速带的波速, V 为低速带底下岩层的速度,也可称为基岩的速度, $h_0 + h_j$ 为炮井中低速带的厚度, h 是基岩中炸药的埋藏深度。因为井深校正总是向时间增大的方向校正,故此式前面取负号。

地形校正:地形校正就是将测线上的炮点和检波点校正到基准面上。对炮点的校正实际是在炮点井深校正的基础上进行的,因为实际野外工作中,炮点深度不一致,先把炮点校正到地表,再校正到基准面。炮点的地形校正量 $\Delta \tau_0$ 为

$$\Delta \tau_0 = \frac{1}{V_0} h_0$$

检波点的地形校正量 $\Delta \tau_s$ 为

$$\Delta \tau_s = \frac{1}{V_0} h_s$$

式中 h_s 为接收点到基准面的垂直距离。

故此道(第 j 炮第 i 道)总的地形校正量

$$\Delta \tau_{ji} = \Delta \tau_0 + \Delta \tau_s = \frac{1}{V_0} (h_0 + h_s)$$

地形校正量有正有负,当测点位置高于基准面取正,意味着在波实际传播时间中把这个时间校正掉;低于基准面时取负,意味着要把这个时间加上。

低速带校正:位于基准面以下的低速带,由于它的速度低于基岩速度,结果使地震波传播时间加长(延迟),为消除低速带的影响,故要从波到达的时间中减掉,为此进行的时差校正就是低速带校正,它需将基准面以下的表层速度用基岩速度代替。在炮点处的低速带校正量 $\Delta \tau_j'$ 为

$$\Delta \tau_j' = h_j \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V} \right)$$