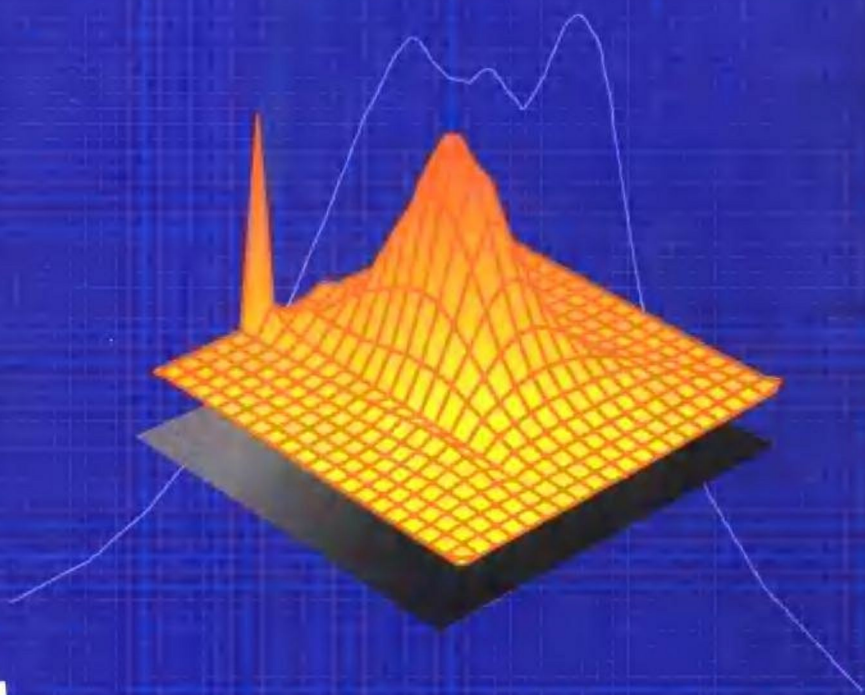


科学与工程计算丛书

地震波参数反演与应用技术

DIZHENBOCANSHUFANYANYUYINGYONGJISHU

范祯祥 郑仙种 编著



SECS

河南科学技术出版社

~~科学与工程计算丛书~~

地震波参数反演与应用技术

范祯祥 郑仙种 编著

河南科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震波参数反演与应用技术/范祯祥, 郑仙种编著. — 郑州:
河南科学技术出版社, 1998.12
(科学与工程计算丛书)
ISBN 7-5349-1982-7

I. 地… II. ①范… ②郑… III. 地震测井-地震波-参
数-逆变换 IV. P315.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 34596 号

责任编辑 冯 英
责任校对 徐小刚

河南科学技术出版社出版发行
郑州市农业路 73 号
邮政编码:450002 电话:(0371)5721186
河南第一新华印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:10.875 字数:246 千字
1998 年 12 月第 1 版 1998 年 12 月第 1 次印刷
印数:1—1 000

ISBN 7-5349-1982-7/T·409 定价:10.80 元

《科学与工程计算丛书》第二届编辑委员会

名誉主编：石钟慈

名誉编委：(按姓氏笔画为序)

于 敏	王 仁	石钟慈	庄逢甘	曲钦岳	朱家骅(美)
李德元	何祚庥	陈能宽	谷超豪	况蕙孙	林 群
郑哲敏	周毓麟	胡思得	秦元勋	黄祖洽	符鸿源
曾庆存	程开甲	裴鹿成			

编 委：(按姓氏笔画为序)

于万瑞	王兴华	王肖钧	王能超	文舸一	石济民
石中岳	田德余	冯士桢	孙文心	傅德薰	任 兵
纪立人	纪楚群	刘 林	刘儒勋	朱允伦	李开泰
李荫藩	邬华谟	吴辉碇	杜书华	杨清建	宋国乡
邱希春	陈光南	陈雨生	陈传森	陈健华	何延才
汪翼云	范宝春	范新亚(美)		季达人	宓国柱
张春霖	张锁春	姜宗福	顾昌鑫	袁健民	袁耀初
徐国华	常铁强	蒋伯诚	鲍家駁(美)		颜 宏

常务编委：(按姓氏笔画为序)

孙文心	刘儒勋	杜书华	陈雨生	何延才	张锁春
蒋伯诚					

本书执行主编：张锁春

编辑部成员：蒋伯诚 姜宗福 杜慧娴 卢芳云 唐 犇

代 序

为促进我国科学与工程计算事业的发展,1988年7月,中国核学会计算物理学会在青岛举办了全国计算物理学术研讨会.会议期间,经有关专家商议,决定出版一套《科学与工程计算丛书》,得到了许多著名科学家们的热情关心和支持.经过两年多的筹备,正式开始了这套丛书的编辑出版工作.

计算机是一种延伸、强化人的思维的工作.当世界上第一台计算机 ENIAC 诞生时,冯·诺伊曼就预言这一新工具所拥有的巨大潜力和对人类社会的深远影响.在过去的40多年里,计算机迅猛发展,其应用范围从国防尖端部门扩大到科学技术和国民经济建设的各个领域,计算机已经给人类社会带来了一场深刻的技术革命,计算机的发展和计算方法的进步极大地提高了人们的计算能力,从而引起了科学方法论上的巨大变革,使计算成为科学研究的第三手段,对研究的定量化起到了特殊重要的作用.“实验、理论、计算”三位一体是现代科学研究的基本模式,三者既相对独立,又互相补充,互相依赖.人们在计算机上可充分利用数值计算来模拟现实世界的各种过程,部分替代实验或作为实验的补充,检验理论模型的正确性,尤其是还能呈现现实生活中无法重复或无法进行实验的现象,或模拟耗资巨大的实验工程,探索新的奥秘.由于有了计算这一强有力的手段,大大增强了人们科学研究的能力,促进了不同学科之间的交叉渗透,缩短了基础研究到应用开发的过程,加速了把科学技术转化为生产力的进程.

在计算机的发展和数值计算的广泛应用的推动下,科学与工程

程计算(简称科学计算)作为一门工具性、方法性和边缘交叉性的新学科,已经开始了自己的发展.它既包含了在各种科学与工程领域中逐步发展起来的计算性学科分支,如计算数学、计算物理、计算力学、计算化学以及计算地震学等计算工程学,又包括经济科学、医学、生物学和系统科学等发展中所需要的计算理论.计算方法则是它们联系的纽带和共性的基础.科学计算就其本质而言,是要解决现代科学与工程中提出的大规模、非线性、非均匀和几何形状非规则的复杂问题,是数学理论和计算艺术的高度结合,是复杂系统的数值计算或模拟.计算机的性能与算法水平的乘积是衡量计算能力高低的指标.

我国在科学与工程计算领域已有了一支较高水平的、能打硬仗的队伍.这支队伍在我国计算机水平相对落后的条件下,以其智力优势和拼搏精神为我国的国防建设和经济建设做出了重大贡献,积累了丰富的实践经验,急需加以总结、提高、推广和交流.编写《科学与工程计算丛书》,正是为了适应这种形势和需要,它的出版将会填补我国这方面的空缺.

这套丛书是采用“众人拾柴火焰高”的集资方式创办的,由于丛书的涉及面极广,故不设主编,由常务编委轮流担任执行主编.丛书作者都是奋战在教学和科研第一线的专家学者,他们为发展我国的科技事业不辞劳苦,呕心沥血,无私奉献.谨向他们表示崇高的敬意.

可以期望,《科学与工程计算丛书》的出版发行,必将有力地推动我国科学计算事业的发展.

《科学与工程计算丛书》编委会

1990年8月

绪 言

本书是作者 1994 年 12 月出版的《地震波数值模拟与偏移成像》一书的续篇，也是“储层物性参数地震、测井联合反演技术”项目的方法与技术的总结。该项目是石油天然气总公司“八五”科研项目之一，是由总公司[93]科字 172 号文确定的研究课题，于 1995 年 12 月完成。本书是在对该项目多年研究过程中所积累的地震波参数反演方法与技术成果进行总结的基础上，选择其中有成效的方法加以提炼，并将其中的一部分上升为理论，由郑仙种用数学方法重新推导、整理编写而成的。

本项目由范祯祥主持研究。参加项目研究的人员中对理论与方法做出贡献的主要有：范祯祥、严昌言、郑仙种、田振平、范书蕊、高少武、王华忠、郭矛、李建江、柯本喜等。参加本项目协作研究的人员主要有：哈尔滨工业大学的刘家琦教授、冯英俊教授、吴从昕教授，翟军、孙豪志、单式灶、盛建明、郑江奎、李思彪等 26 位博士、硕士研究生，以及中国科学院计算数学与科学工程计算研究所张关泉教授及博士生张宇等。他们对本书的贡献均列在各章参考文献中。

地震波参数反演是地震勘探的根本问题。石油勘探、开发、开采技术的发展要求地震技术能识别储层物性参数。这就对地震技术提出了艰巨的技术革命任务，综合利用地震测井资料的互补特性，采用地震、测井联合反演技术无疑是实现这一任务的有效方法。本项目的研究成果将为油田勘探、开发、开采提供科学依

据.

地震波参数反演方法,要求地震波数据具有振幅真值,波传播过程的地震信号要完整,波谱要足够宽,已知信息的提供要充分,且要求没有有色噪声.显然,现行地震采集系统是无法满足这些要求的.而且测井方法的物理机制与井间地震波记录的机制是不同的,严格地讲,测井信息与地震波信息是不能直接对比的.但是,测井信息是唯一的已知的钻探信息,为将测井与地震信息进行联合应用,必须在充分掌握有关先验地质知识的前提下,根据经验在对比测井层位与地震波反射层位的基础上进行.因此,能否取得可靠的先验知识作为已知的附加信息参加反演过程,是决定非线性参数反演成败的关键.

储集层物性参数反演技术分三大步来实现.首先要搞清楚地层几何形态的细微变化,这主要由线性反演技术实现.第二步是求取地震波在地层中的传播参数,主要由非线性参数反演技术实现.这两步在数学上是高维双曲型偏微分方程系数反问题.第三步是求储集层的物性参数,主要由神经网络分析来实现.其中小波分析、分形分析、模糊识别技术贯穿三大步全过程,最终实现地震、测井数据的物性参数联合反演技术.

本书分为六章,第一章为地震波参数反演的预备知识,第二章至第五章为理论与方法,第六章为有关地震、测井联合反演的应用技术.

本书经中国科学院院士、上海同济大学马在田教授,中国科学院计算数学与科学工程计算研究所博士生导师张关泉教授审阅指正,并经《科学与工程计算丛书》常务编委张锁春教授最后审阅斧正.谨在此致以敬意.

我们敬爱的导师翁文波院士生前对本书的编著曾多次给予指

导与督促。他诲人不倦的教导，刻苦严谨的学风，令人仰止的高贵品德，使人永世难忘。谨以此书纪念我们心目中永垂不朽的楷模——翁文波老师。

本书得到国家自然科学基金委员会、中国科学院、中国石油天然气总公司、大庆石油管理局的联合资助，在此表示衷心的感谢！

作 者

1996年10月1日

目 录

第一章 参数反演的若干预备知识	(1)
1.1 反问题及其求解的基本方法	(1)
1.2 泛函分析提要	(3)
1.3 狄拉克 δ 函数	(7)
1.4 格林函数	(9)
1.5 格林函数的 Born 近似	(11)
1.6 WKBJ 近似法	(13)
1.7 Marchenko 积分方程的数值解	(15)
1.8 最优化算法	(22)
1.9 三次样条(Spline)内插值公式	(31)
参考文献	(36)
第二章 介质参数反演的特征数值解	(37)
2.1 特征线概念及波动方程系数反演	(37)
2.2 介质阻抗反演的差分格式	(39)
2.3 等时层均匀弹性介质阻抗的反演	(45)
2.4 非等时层均匀弹性介质阻抗的反演	(54)
2.5 粘弹性均匀介质阻抗的反演	(59)
参考文献	(68)
第三章 介质参数反演的反散射方法	(69)
3.1 基本方程	(69)

3.2	等时分层层状模型的正反演	(73)
3.3	非等时分层层状模型的正反演	(76)
3.4	连续层状模型(基于 Schrödinger 方程)的正反演	(81)
3.5	连续层状模型(基于 Riccati 方程)的正反演	(88)
3.6	分层均匀介质速度和密度的反演	(91)
	参考文献	(104)
第四章	介质参数及界面位置参数若干反演算法	(105)
4.1	界面位置参数反演——梯度法	(105)
4.2	界面位置参数反演——模拟退火法	(110)
4.3	波阻抗反演——最优拟合法	(115)
4.4	波阻抗反演——脉冲变分法	(120)
4.5	波阻抗反演——变目标优化法	(129)
4.6	井间波阻抗反演——交替插值法	(135)
4.7	井间波阻抗反演——逐段折叠法	(139)
4.8	震源参数反演——曲面拟合法	(145)
	参考文献	(151)
第五章	基于二维波动方程的若干反演算法	(154)
5.1	层状介质参数反演算法	(154)
5.2	速度反演优化算法	(160)
5.3	速度和密度的同时反演	(167)
5.4	纵、横波速度的反演	(174)
5.5	波阻抗界面的线性化反演	(179)
5.6	变背景速度的 2.5 维 Born 反散射反演	(186)
	参考文献	(198)
第六章	几种实用的辨识方法与应用技术	(200)
6.1	小波分析在地震波参数反演中的应用	(200)

6.2	CUSI 神经元模型在储层参数预测中的应用	(219)
6.3	BP 神经网络的应用	(232)
6.4	分形插值与分维计算	(243)
6.5	反射层位识别中的模糊聚类法	(251)
6.6	波阻抗参数反演遗传算法	(271)
6.7	震源子波的确定问题	(285)
6.8	地层物性参数的地震、测井数据联合反演技术	(294)
	参考文献	(327)

第一章 参数反演的若干预备知识

1.1 反问题及其求解的基本方法

“反问题”这一术语，在不同的文献中有其不同的含义，其定义在不同的领域中各有侧重，例如 Lavrentiev 给出微分方程反问题的定义是“微分方程反问题是指从微分方程的解的某些泛函去确定微分方程的系数或右端项”。Marchuk 把反问题分为两类，第一类是确定过程的过去状态，例如，已知物体当前的温度去确定初始的温度分布；第二类是借助解的某些泛函，去识别具有已知结构的算子的系数，例如在 Sturm—Liouville 方程中根据谱函数的性质去确定二阶微分方程的系数。Simonian 用工程的术语将反问题分为四类，即综合、控制、识别与连接输入、系统参数识别。刘家琦把微分方程反问题分为：待定微分方程的未知系数反演——算子识别；待定初始条件的反问题——逆时间过程反问题；待定边界条件的反问题——边界控制反问题；待定边界形态的反问题——几何反问题；待定右端项的反问题——寻源反问题。

地震勘探反问题主要有反褶积与子波的提取，伪速度、伪密度、伪速度测井，地震偏移、地震层析成像、AVO、基于波动方程的介质参数反演等。若按地震过程基本假设，地震勘探反演方法大致可分为两类：一类是按地震记录等于反射系数和子波褶积为前提派生出来的反演方法，这类方法有广义逆反演，最大似然逆

反演, 最小平方反演, BG 反演法, 广义线性反演和线性规划反演等; 第二类是建立在波动理论基础上的反演方法, 这类方法有 Gelfand—Levitan 散射反演, 特征线法, 分布参数反演方法, 地震体波 CT 反演, 广义脉冲谱法, Born—WKBJ 反演方法等等。

目前求解一维反问题的基本方法主要有以下几种:

直接离散求逆法, 该方法是根据层状介质的响应逐层求反射系数, 再由反射系数计算出各层的阻抗值。

连续迭代法, 该方法的基本思想和所求参数与前一种方法是一致的, 所不同的只是在推导过程中使用的是连续函数, 而不是离散数列。其优点是可得到较高的计算精度, 但计算工作量较大。

特征线法, 该方法是将波场分解为上行波与下行波, 并沿波动方程的特征线将其离散, 通过引入上、下行波的关系可求得反射系数, 再由波阻抗与反射系数的关系计算出各层的波阻抗值。特征线法的优点在于可不必假定入射波为脉冲, 可以是任意子波, 而且计算效率高。

脉冲谱方法, 是在牛顿迭代法的基础上发展起来的一种解反问题的迭代求解方法, 它是将波动方程作 Fourier 或 Laplace 变换, 在频率域得到关于介质参数的变化量, 用以修正介质参数, 进行迭代求解直至满足反问题附加的补充条件。其优点是对介质无须做任何假定, 故适用性较高。

最优控制法, 该方法是通过最优控制理论(在时域或频域上)求取地层的波阻抗分布, 与实际地震记录拟合最好的合成理论记录所用的阻抗分布即为所求的结果。其优点是能够得到稳定的结果, 但计算效率低。

另外还有应用反问题中的补充条件对所求介质参数梯度的求

法,选取正则参数与确定正则泛函,将非线性的反问题化为一系列线性问题来迭代求解的所谓梯度正则化方法,以及为解决全局最优而提出的 Monte—Carlo 搜索法等。

求解二维和三维地震反问题的基本方法主要有摄动法、反散射法和最优控制法等。

摄动法是在微扰动下将非线性问题化为微扰的线性问题来处理的一种方法。这种方法用于叠后地震记录求解反问题时,是假定介质参数在一个固定常数(称之为背景参数)的基础上有微小的变化,地震反射波是由这些微小变化引起的,在假定背景参数为已知时,可以估算出介质参数的变化量。若用于叠前地震记录,此时是利用叠前两种炮检距的地震数据,求出介质的密度和体积模量的变化量。在将非线性算子线性化时,主要用 Born 近似和 Rytov 近似,而基本解常采用 WKBJ 法来近似,即所谓的 Born—WKBJ 线性化反演方法。

反散射方法是把量子力学反散射的原理用于求取介质速度或速度摄动量的方法,通过把波动方程化为 Schrödinger 方程的形式,从而把量子反散射的方法用于地震勘探反问题。

最优控制方法,亦可称之为非线性反演方法,其基本思想是根据最小二乘准则,从目标泛函中导出模型参数的梯度公式,再利用梯度法或共轭梯度法来实现非线性迭代反演。

有关解反问题及其解的定义等可参见参考文献[3]。

1.2 泛函分析提要

1.2.1 距离空间

设 X 是由某些元素组成的一个集合。如果对于其中的任意两

个元素 x 和 y , 定义了一个非负实数 $\rho(x, y)$, 它满足距离三公理:

(1) 恒等公理: $\rho(x, y) = 0$, 当且仅当 $x = y$;

(2) 对称公理: $\rho(x, y) = \rho(y, x)$;

(3) 三角公理: $\rho(x, y) + \rho(y, z) \geq \rho(x, z)$,

则称 X 为距离空间. X 中的元素, 也称为“点”.

设距离空间 X 的点列为 $\{x_n\}$, 若当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\rho(x_n, x) \rightarrow 0$, 则称 x 为点列 x_n 的极限. X 中的点列最多只能收敛于一个点 x . 类似于欧氏空间情形, 可将点集论中的开集、闭集、聚点及稠密等一系列概念搬到距离空间中来.

如果距离空间中的所有点依 Cauchy 收敛准则都收敛于本空间的点, 则称此距离空间为完备的.

对于距离空间 X 中的集合 M , 如果 M 中任一无穷子集都含有一个子序列, 则称 M 为列紧的. 若 M 中所有收敛序列的极限都属于 M , 则称 M 是自列紧的. 若空间 X 是自列紧的, 则叫做列紧空间.

1.2.2 线性赋范空间

设 E 是某元素的集合, K 是复(或实)数域, 如果下列条件成立, 便称 E 为一复(或实)线性空间:

(1) 定义了 E 中元素之间的加法运算, 构成加法群(满足交换律、结合律及存在零元素与逆元素);

(2) 定义了 E 中元素与 K 中元素的乘法, 且满足分配律、结合律及 E 中任一元素与数 1 相乘仍为该元素.

设 E 是复(或实)线性空间, 若对于 E 中每个元素 x 定义了一个非负实数 $\|x\|$, 且满足(范数公理):

(1) 非负公理: $\|x\| \geq 0$, 当且仅当 $x=0$ 时, $\|x\| = 0$;

(2) 三角公理: $\|x+y\| \leq \|x\| + \|y\|$;

(3) 线性公理: $\|\alpha x\| = |\alpha| \|x\|$,

则称 E 为复(或实)线性赋范空间, $\|x\|$ 为元素 x 的范数.

对于这种线性赋范空间 E , 定义其中元素 x 与 y 的距离为 $\rho(x, y) = \|x - y\|$, 易知它满足距离三公理, 因而 E 是一距离空间.

完备的线性赋范空间称为 Banach(巴拿赫)空间.

1.2.3 内积空间

设 E 为实线性空间, 如果对 E 中任意两个元素 x 与 y 定义了一个实数 (x, y) 且满足性质:

(1) $(\alpha x, y) = \alpha(x, y)$;

(2) $(x+y, z) = (x, z) + (y, z)$;

(3) $(x, y) = (y, x)$;

(4) $(x, x) \geq 0$, 当且仅当 $x=0$ 时, $(x, x) = 0$,

则称 E 为实内积空间, 而称 (x, y) 为 x, y 的内积.

对内积空间中的任意元素 x , 定义范数 $\|x\| = \sqrt{(x, x)}$, 易知它满足范数公理. 内积空间常用 U 表示.

内积空间 U 与线性赋范空间 E 和距离空间 X 有如下关系:

$$U \subset E \subset X.$$

完备的可分的内积空间称为 Hilbert(希尔伯特)空间.

1.2.4 内积空间 L^2 与赋范空间 H^n

空间 $L^2(D)$ 即由定义在 D 上的平方可积函数构成.