

地球物理 反演的理论 与方法

杨文采 著



地质出版社

地球物理反演的理论与方法

杨文采著

地质出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

本书按循序渐近原则,全面介绍地球物理反演的理论体系和方法技术。上篇分5章介绍地球物理反演的基础知识、主干反演理论与方法,以及地震层析成像方法技术。下篇分4章讨论深层次的地球物理数据处理问题和研究前沿问题,从理论上进行系统概括和总结。本书可作为地球物理专业硕士和博士研究生的教材,以及从事地球物理数据处理解释人员进修的参考书。对于关心反演的数学家与信息科学家,也可从本书迅速了解到现代数学和信息处理方法在地球物理中应用的全貌。

图书在版编目(CIP)数据

地球物理反演的理论与方法/杨文采著.-北京:地质出版社,1997.10
ISBN 7-116-02427-1

I. 地… I. 杨… III. 地球物理学-重力反演问题 IV. P312

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第17950号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路29号)

责任编辑:陈军中 曹玉

责任校对:关风云 黄苏晔

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:17.5 字数:412000

1997年12月北京第一版·1997年12月北京第一次印刷

印数:1—1250册 定价:28.00元

ISBN 7-116-02427-1

P·1809

前 言

这是一个在 21 世纪将成为老朽的地球物理工作者，呈献给 21 世纪地球物理精壮后继者的书。希望在公元之后的四位数字同时更换的前后，他们能顺着本书导引的路线，迅速占领地球物理反演的前沿阵地。

10 年前在北大讲课后，写了《地球物理反演与地震层析成象》一书，不久即脱销。不少人劝我出第二版，但因这个领域发展很快，我不想按原样再版。今年初应邀又给地大和北大研究生合班讲课，用英文给博士生写了一份讲义。这次将前书压缩为五章，作为给硕士生讲课用的上篇；又请《地球物理学报》郭爱缨女士将今年讲义译成中文，作为给博士生讲课用的下篇，一并付梓。

本书也浓缩了我 10 余年的研究成果，希望对科研工作者有所裨益。

如果说本书有什么特点的话，也许是一种“搭桥”作用：使数学家和理论家看了能迅速了解地球物理反演与现代数学的依存现状，使地球物理工作者能用现代数学工具解决地质和工程问题。在讨论反演方法时，我偏爱与正交化有关的数值方法；在地震反演时，也兼顾其它。此外，本书的系统不同于西方有关专著，我的组织系统也许更适合中国人的文化背景和思维方式。

本书的出版首先要感谢中国地球物理学会的诸多学长和同仁对我多年的指导、支持和关心，以及中国自然科学基金委对我的研究工作的多年资助；也要感谢我工作过的单位（地矿部北京计算中心、物化探研究所和地质研究所）的支持。同时，我要感谢与我一起工作过的研究生和同事，包括已在美国转攻其它科学的杜剑渊等，没有他们的努力工作，我不可能在近年完成诸多科研任务。

“浮天沧海远，攀沿必维艰。辉煌仅一瞬，世上本无仙。”我估计本书的参考价值不超过 10 年。

杨文采

1996 年 12 月 1 日

目 录

上篇 地球物理反演基础

第一章 概述	(2)
一、地球物理反演的研究对象	(2)
二、地球物理反演的发展简史	(4)
三、地球物理反演的研究内容和方法	(7)
四、地球物理反演的计算机实现	(12)
第二章 算法基础	(15)
一、矩阵的范数	(15)
二、线性方程组和扰动分析	(18)
三、QR 分解和线性最小二乘问题	(24)
四、奇异值分解 (SVD)	(32)
五、奇异值分解 Fortran 子程序	(39)
第三章 广义反演方法	(45)
一、参数化、线性化和归一化	(45)
二、广义最小二乘法	(51)
三、广义线性反演	(55)
四、利用自然逆的广义反演方法	(62)
五、线性规划和联合线性反演	(67)
六、广义线性反演在位场处理解释中的应用	(74)
七、广义线性反演在地震处理解释中的应用	(79)
第四章 Backus-Gilbert 反演理论	(83)
一、连续地球物理模型的反问题	(83)
二、线性反问题解的非唯一性	(87)
三、非线性反问题的线性化	(91)
四、脉冲度准则	(96)
五、BG 展布准则	(100)
六、BG 折衷准则	(106)
第五章 地震层析成像	(112)
一、地震层析成像的数据采集	(112)
二、射线追踪方法	(117)
三、Radon 变换和连续图像重建	(125)
四、离散图像重建技术	(130)
五、广义 Radon 变换问题	(138)

六、衍射层析成像·····	(145)
七、逆散射地震层析成像·····	(153)
参考文献 (上篇) ·····	(166)

下篇 地球物理反演精义

第六章 应用地球物理中的正问题 ·····	(172)
一、应用地球物理学的基本方程式·····	(172)
二、用于波传播问题的有限差分法·····	(177)
三、有限元法简析·····	(179)
四、几种深入的波动问题·····	(183)
第七章 地球物理数据处理 ·····	(190)
一、数据与数据模型·····	(190)
二、最小二乘法数据处理·····	(194)
三、二维数字滤波·····	(199)
四、地球物理场的向下延拓·····	(204)
五、小波变换与多尺度分析·····	(209)
第八章 地球物理中的偏微分方程反演 ·····	(215)
一、广义解与正则化·····	(215)
二、最大熵法·····	(222)
三、地球物理线性反演·····	(226)
四、非线性迭代地震反演·····	(230)
五、电导率成像反演·····	(237)
第九章 非线性反演方法 ·····	(242)
一、迭代、分形和混沌·····	(242)
二、地震道非线性混沌反演·····	(246)
三、仿真淬火反演·····	(252)
四、遗传算法·····	(256)
五、人工神经网络的应用·····	(261)
结束语 ·····	(268)
参考文献 (下篇) ·····	(269)

Theory and Methods of Geophysical Inversion

By Dr. Yang. Wencai (Ph. D.)

Contents

Part One: Fundamentals of Geophysical Inversion

Chapter I . Introduction to Geophysical Inversion	(2)
1. 1 The objects of geophysical inversion	(2)
1. 2 Development of geophysical inversion	(4)
1. 3 Contents and methodology	(7)
1. 4 Computer implementation of geophysical inversion	(12)
Chapter I . Matrix Computation	(15)
2. 1 The norm of matrices	(15)
2. 2 Linear equations and perturbation analysis	(18)
2. 3 The QR decomposition	(24)
2. 4 The singular value decomposition	(32)
2. 5 Fortran procedure for SVD	(39)
Chapter III . Generalized Inversion Methods	(45)
3. 1 Parameterization, linearization and normalization	(45)
3. 2 Generalized least squares methods	(51)
3. 3 Generalized linear inversion	(55)
3. 4 Generalized inverse by using singular value decomposition	(62)
3. 5 Linear programming and joint inversion	(67)
3. 6 Application to potential data inversion	(74)
3. 7 Application to seismic data inversion	(79)
Chapter IV . Backus-Gilbert Inversions	(83)
4. 1 Inverse problems of continuous Earth parameters	(83)
4. 2 Non-uniqueness of inverse problems	(87)
4. 3 Linearization of nonlinear inverse problems	(91)
4. 4 The deltaness criterion	(96)
4. 5 The BG spread criterion	(100)
4. 6 The trade-off between resolution and variance	(106)
Chapter V . Seismic Tomography	(112)

5. 1 Data acquisition of seismic tomography	(112)
5. 2 The rays tracing	(117)
5. 3 The Radon transform and image reconstruction	(125)
5. 4 Discrete image reconstruction techniques	(130)
5. 5 The generalized Radon transform problems	(138)
5. 6 Diffraction seismic tomography	(145)
5. 7 Inverse scattering tomography	(153)
References for Part I	(166)

Part I : Advanced Geophysical Inversion

Chapter VI. Forward Problems in Applied Geophysics	(172)
6. 1 The common equation in geophysical inversion	(172)
6. 2 The finite difference method for wave propagation problems	(177)
6. 3 Introduction to the finite element method	(179)
6. 4 Special wave propagation problems	(183)
Chapter VII. Geophysical Data Processing	(190)
7. 1 Geophysical data and data models	(190)
7. 2 The least squares methods in data processing	(194)
7. 3 Two-dimensional digital filters	(199)
7. 4 Downward continuation of geophysical fields	(204)
7. 5 The wavelet transform and multiscale analysis	(209)
Chapter VIII. Inversion of Partial Differential Equations in Geophysics	(215)
8. 1 Generalized solutions and regularization	(215)
8. 2 The maximum entropy method	(222)
8. 3 Linear geophysical inversion	(226)
8. 4 Nonlinear iterative seismic inversion	(230)
8. 5 Imaging the electrical conductivity	(237)
Chapter IX. Nonlinear Geophysical Inversion	(242)
9. 1 Iteration, Fractals and Chaos	(242)
9. 2 Nonlinear chaotic inversion of seismic traces	(246)
9. 3 The simulated annealing	(252)
9. 4 The genetic algorithm	(256)
9. 5 Application of the neural networks	(261)
Afterword	(268)
References for Part I	(269)

上篇 地球物理反演基础

Part I Foundational Geophysical Inversion

地球物理学家面对人类赖以生存和发展的地球，她内部的奥秘无穷无尽。自 50 年代以来，地球物理观测仪器及其自动记录水平每隔 10~15 年提高一个级次，采集的信息量和计算机处理能力也相应提高一个级次。如果地球反演的水平也相应地提高一个层次，那么人类对地球内部组成与结构及其细节的认识，每隔 30~50 年，将有一次大的飞跃。

第一章 概 述

一、地球物理反演的研究对象

地球物理反演是在地球物理学中利用地球表面观测到的物理现象推测地球内部介质物理状态的空间变化及物性结构的一个分支。虽然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,但这两方面在理论上都有一个共同的核心问题:如何根据地面上的观测信号推测地球内部与信号有关部位的物理状态,如物理性质、受力状态或热流密度分布等,这些问题就构成了地球物理反演的独特研究对象。具体来说,地球物理反演研究的是各种地球物理方法中反演问题共同的数学物理性质和解估计的构成和评价方法,它是从各个地球物理分支中抽象出来的新的边缘学科。

以地球内部为主要研究对象的地球物理研究过程一般可以用如图 1.1 的流程表示。反映地球内部物理过程的数据由数据获得系统收集,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,还可能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。数据获得是地球物理研究中最重要的一环之一,每当记录的地球物理数据的精度或信息量提高一个级次,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步。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,以提高信噪比及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的量,而反演计算的目的是将物理现象的数据转化为地球内部物质物理状态变化的数据,为下一步地质解释提供依据。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这方面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。由此不难看出,地球物理反演乃是地球物理研究过程中的关键环节,反演的准确度和分辨率实际上常常成为衡量地球物理研究成果的价值的关键指标。

地球物理反演又可分为单一地球物理现象的反演和多种地球物理现象的联合反演两大步骤。由于我们要推测的地球模型只有一个,它必须和地表观测到的所有物理现象保持一致,因此联合反演是地球物理数据分析的最理想工具。遗憾的是,由于各种技术上的困难和限制,适用于各种地球物理数据综合反演的模式和技术还不成熟,人们在大多数场合下还只能定性地对比单一地球物理数据反演结果的一致性。因此,这里讨论的反演方法主要是单一地球物理数据的反演方法,仅在第三章讨论广义反演时介绍联合线性反演的几种方法。

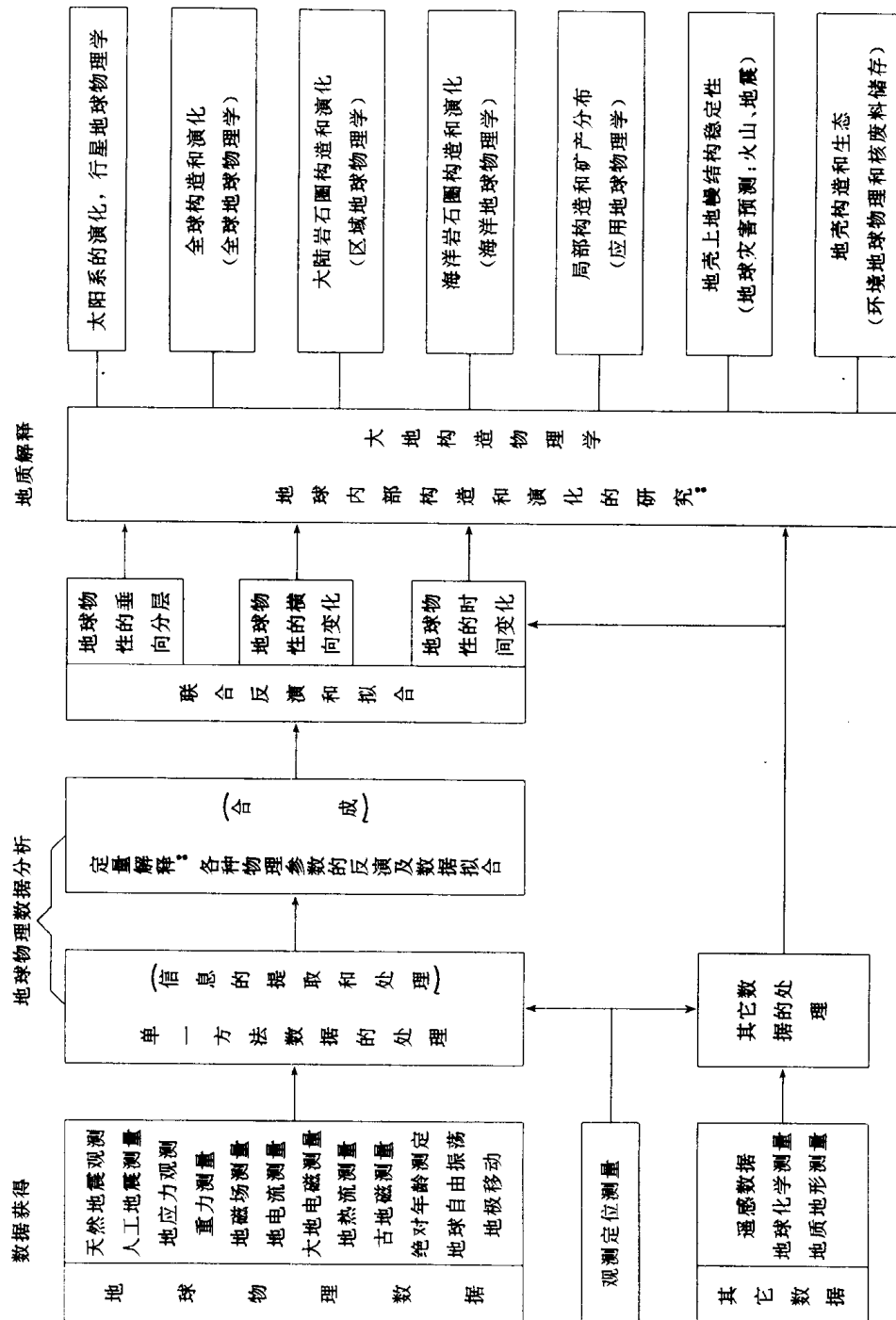


图 1.1 地球物理学研究的一般流程

二、地球物理反演的发展简史

如果把天然地震的震源参数的推测也归入地球物理反演的范围,那么我国东汉的科学家张衡应是从事地球物理反演的先驱。牛顿根据万有引力定律推测地球密度,开尔文(Lord Kelvin)研究地球的弹性和热传导,都是早期地球物理反演研究的范例。

地球物理学中反演问题的研究,在早期主要来自科学家对地球内部构造的好奇心,并受到物理学和地质学发展的推动。1880年美国学者 J. A. Ewing 等人发明了近代地震仪,此后地震记录的分析便提到日程上来。到了本世纪初,地震、地磁和重力的数据都有了一定程度的积累^①,地球物理数据的分析问题逐渐受到了重视,而定量的分析地球物理数据便导致了对地球物理反演问题的研究。有人认为^[15]首先用于地球物理研究并取得反演问题数学解的是 Herglotz 于 1907 年提出的地震走时数据的反演。1909 年 A. Mohorovičić 发现莫霍面,1912 年 Beno Gutenberg 发现古登堡面,以及 1935 年 Inge Lehmann 发现地球外核和内核的分界面。这些地学发展史上的辉煌事件,都对地球物理反演学术思想的形成和发展起过巨大的推动作用,至今还值得我们借鉴。

到了 50 年代,人们对地球内部的分层结构和各层的物理状态已经有了大致的了解,编制了地震波速、密度和磁化率随球状地球径向变化的分层模型,所用的反演方法主要是试错法和拟合法。此后,球状地球的分层模型在地震和地电、地磁数据的解释上再度建立功勋,确定了上地幔低速和高电导层的存在和深度,导致了岩石圈和软流圈概念的建立。

虽然应用物理学的方法来勘探矿产的思想萌芽于 19 世纪,但是勘探地球物理方法的研究和试验却是在第一次世界大战前后伴随着现代大工业的发展而兴起的。1926 年在美国奥克拉荷马洲的沉积盆地上根据反射地震记录的解释布置的钻孔第一次打到了工业油流,证实了物探在找矿勘探中巨大的经济效益,促进了应用地球物理学的迅速发展。第二次世界大战以后,电子管地震仪,高精度石英丝重力仪和航空磁力仪的发明使勘探地球物理中的数据收集系统发生了质的变化,数据分析技术也随之走向复杂,因此有关勘探方法的地球物理学科逐渐从固体地球物理学中分离出来,自成体系。然而在 50 年代以前,由于计算工具的限制,对反演问题的研究远不如正演问题的研究那么受到重视。这时用于解释推断的工具主要为用于地震走时曲线或位场曲线的特征法(曲面斜率、特征点等),与正演结果对比的选择法和量板法(即简化计算过程用的试错法,如电测深曲线量板),以及用观测信号能量来推测场源参数的积分法等。

1947 年第一台电子数字计算机的诞生标志着科学技术的一场革命,对地球物理数据分析产生了巨大的推动作用。50 年代地球物理中的正演问题已广泛地使用了电子计算机,而与正演计算关系紧密的试错法和拟合法也随之转用计算机来实现。到了 60 年代,人们开始利用计算机高速运算的特性试验用计算机代替解释者自动修改地球模型的参数,实现所谓的计算机自动解释(称为自动拟合法或最优化选择法)。然而,在 1967 年 Backus 和 Gilbert 发表他们三篇经典性的论文以前,适用于各种地球物理方法的反演理论还没有形成,反演研

① 近代重力测量开始于 1735 年 Pierre Bouguer 率领的安第斯考察队。古代地磁测量在中国公元 720 年已有记录, J. Michell 于 1750 年开始用磁秤测出磁场强度,1832 年高斯提出了地磁场强度向量的测量方法。

究还只是作为正演研究的自然延伸分散在单一的地球物理分支之中。

总结 1970 年以前地球物理反演的研究过程,其主要特点可概括如下:

(1)地球模型在数学上多用被二次曲面分隔的均匀各向同性介质模型。

(2)由于对上述模型正问题的解析解(古典解)一般可以找到,反问题不需要直接与偏微分方程打交道,反演计算只用微积分或古典积分方程等数学工具。

(3)地球物理数据被认为是无限的、完整的、精确的或者只含可忽略的误差,在大多数情况下把它与根据假定模型正演计算取得的人工合成数据等同起来。

(4)虽然意识到反问题解的非唯一性,但没有对解非唯一的程度和后果作深入研究,评价反演结果的主要准则是用推测的地球模型求得的合成数据与实测数据的拟合好坏。

(5)所用到计算技术只涉及到初等数值分析,如数值微积分,最小二乘法解超定方程组等。在 60 年代后期开始用到快速 Fourier 变换和高速褶积。

60 年代是地质科学和计算机科学发生革命性飞跃的时期。电子计算机从第一代跃变为第三代,计算技术也获得了迅速发展,各种适用于高速计算机的新算法不断涌现。60 年代初开始的国际“上地幔研究”计划,要求研究地壳和上地幔的不均匀性,这就使基于二次曲面分割的地球模型不能满足新的要求。与此同时,地球物理勘探的仪器逐渐走向数字化,数据获得的总量和精度提高了一个级次。随着对复杂构造和地层岩性圈闭等精细地层结构圈定的需要,对反演计算结果的分辨率的要求也大大提高。因此,反演理论和方法的研究开始受到极大重视。在 1967~1970 年期间,美国地球物理学家 Backus 和应用数学家 Gilbert 连续发表了三篇关于地球物理反演的文章^[17-19],为建立统一的地球物理反演理论和方法奠定了基础。他们的主要贡献有:

(1)地球模型是客观地球在人们头脑中的反映,可以有无穷多个。在数学上地球模型可以用有限个有序的函数集合表示,与希尔伯特空间的元对应,这种希尔伯特空间称为模型空间。

(2)地球物理数据是有限个不精确的实数组成的集合,如果认为它们可以通过地球模型计算出来,则与模型空间相对应,也可以用希尔伯特空间的元表示地球物理数据集。

(3)这样定义的地球物理模型和数据的联系常常可以用有限个泛函方程式表示,反问题可以归纳为泛函方程组的求解。然而,由于零空间的存在和数据的有限性,反问题的解具有高度的非唯一性,即古典解一般不存在。

(4)对于精确的地球物理数据,地球物理反问题的古典解虽然可能不唯一,但是解的某种平均是唯一的,可以利用微扰法等数学工具构成某种迭代格式逐次逼近而求出满足规定准则的广义解。这样获得的解估计的分辨本领和精度不可能同时达到最高。

(5)在反问题研究中,重要的不是构造出一种广义的解估计,而是要对各种可能的解估计进行评价,这是由于反问题解的非唯一性所决定的。评价解估计的准则应该是在分辨本领和精度之间取合理的折衷,而不是实测和计算数据之间的拟合差最小。

Backus 和 Gilbert 的反演理论讨论的是模型为连续的情况,因此总是导致欠定的方程组,不便于在计算机上作快速计算。与 BG 理论对应的离散模型的情况下的反演在 1972 年由美国的 Wiggins 和英国的 Jackson 等人先后提出^[20,21],这就是广义反演方法。经过 Parker 等人的介绍和推广^[22],BG 反演理论和方法在 70 年代后期逐渐普及,并在北美许多大学的地球物理专业开设了地球物理反演方面的研究生课程,标志着它已经成为地球物理学中相

对独立的一个分支。

BG 反演理论的一个不足之处,是未能直接从运动方程和本构方程本身出发来提出反演问题。自 60 年代中期以来,偏微分方程的理论有了很大的发展,出现了拟微分算子和 Fourier 积分算子的理论。在另一方面,变系数波动方程中系数项或源项的反问题在物理学、医学、天文学和地学等不同领域及工程技术中不约而同地被提了出来,这些问题大都与不可直接观测的物体的成像问题有关。70 年代初期英国学者 G. Honsfield 研制出第一台医用 CT 机以及他和美国物理学家 A. M. Cormack 共同获得了 1979 年度生理学和医学的诺贝尔奖金,大大推动了有关不可见物体层析成像的研究热潮,激发了地球科学家们对变系数偏微分方程反问题及层析成像技术的巨大兴趣。由于 70 年代开展的国际“地球动力学计划”未能解决板块运动的驱动力等问题,地球科学家们认为 80 年代应该进一步研究地球内部的精细结构,以便为揭示地球内部物质运动的动力和地球演化提供可靠的佐证。因此,在 80 年代开展的国际地球岩石圈研究计划中,地学层析成像反演技术受到了特别关注,而且取得了令人鼓舞的成果。例如,美国哈佛大学和加州理工学院应用地震层析成像技术取得了揭示地球内部精细结构的层析图^[23],为板块运动的热对流学说提供了证据。由地震学得到的传统的地球模型仅给出了波速在不同深度上的平均值,只反映地球波速径向的平均变化;而层析图还同时揭示了波速的横向变化,并可由波速的横向变化了解地幔密度和温度的横向变化,即低速异常与低密度、高温的地幔物质对应。由层析图上地幔波速环状分布模式可推测地幔内热流的位置,从而间接地显示出地幔的对流图形。由于地震层析成像初步成果引人注目,1984 年美国 40 多个学术机构建立了地震学合作研究机构 IRIS(Incorporated Research Institutions for Seismology),并取得了美国政府的大量资助。1984 年在美国亚特兰大召开的 54 届 SEG 年会上,也首次开辟了层析成像技术在油气勘探开发方面应用的专题讨论。总的来说,偏微分方程反演和地震层析成像的研究已把地球物理反演这门学科推向一个新的阶段。虽然这个领域中取得的研究成果还是初步的,理论还不系统,方法也不成熟,但是已为今后地球物理反演的发展勾划出一个重要的方向。有人认为地震层析成像的研究将导致地球科学的第二次革命,虽然还有不少人对此持慎重态度,但至少说明地球物理反演成像在今后的一段时期内将继续处于地学发展的前沿方向上。

与固体地球物理学中层析成像研究几乎同步,应用地球物理领域在 80 年代初期也开始了偏微分方程反演与层析成像的研究。例如,海湾石油公司与美国加州大学合作从 80 年代开始秘密地进行利用反射数据重建地下速度结构的研究,并在 1984 年勘探地球物理(SEG)年会上首次公布了地震层析成像的研究成果,引起了轰动。地震波波速的提取不仅对于准确圈定地下构造的传统地震勘探是非常重要的,而且波速的变化可以指示非背斜型的地层岩性圈闭,而这些类型的圈闭已成为现今油气勘探的主要目标。地震层析成像技术的发展不仅适应了油气勘探的要求,而且渗透到以提高采收率为目标的油藏工程的全过程。在油田开发方面,开采方案的设计、油田开采的监测和强化采油是提高产量和降低成本的关键环节。这些环节都要求准确地了解地下岩层的孔隙率、饱和度、渗透率和温度,而地震波速和品质因子与地层的这些物理参数有密切的关系。以强化采油为例,对稠油的水采和火采要求准确控制地层中注水面或火焰前沿的位置,这是油藏工程中一个极其困难的问题。由于地层注水或燃烧后其波速变化可达 20%至 70%,因此地震波速的层析成像在强化采油时可以起到有效的监测作用。目前,为油藏工程服务而不是以找油为目标的地震方法已从地震勘探中分离出

来,形成一个新的地震学分支——开发地震学(Production Seismology),而地震层析成像就是开发地震学中的主要方法之一。在采油过程中应用的跨孔电磁层析成像技术近年来也有很大发展。可以预计能源和工业上的需求将促进地球物理反演的新分支——层析成像逐渐走向完善和实用。

80年代以来偏微分方程反问题研究进一步深化了反演的内涵。反演的实践证明,由于正问题拟微分算子具有不同程度的奇异性,反问题求解过程同时制造人为的假象。因此地球物理反演研究面对着相互矛盾的两个方面:一方面要从数据中提取尽可能多的信息,如最大限度地提高反演地球模型的分辨率;另一方面要尽可能压制难以避免的人造假象。因此,反演的含义应该为研究从数据中提取尽可能多信息的同时控制人造假象的理论与方法。原苏联数学家吉洪诺夫很早就意识到这个问题,曾建立了一套正则化理论用于反问题研究。在BG理论中最佳折衷的思想也是正则化理论对地球物理反演的发展。但是,这些方法都属于调和反演面临矛盾的方法,还没有深入去解决这一矛盾。

进入90年代,非线性理论在自然科学的各个领域都成为研究前沿;标志着自然科学一场新的革命的来临。大多数自然现象都是非线性的,地球物理反问题也是这样。实际计算表明,非线性反演要比线性反演复杂得多,而决不像 Backus 和 Gilbert 当初想象的那样,只要用线性化加迭代就能解决。实际上,非线性迭代本身就在不断地制造人造假象,把有用信息转化为熵。虽然非线性反演理论框架的建立仍要相当长的时间,但目前已有几个研究方向上取得了初步的成果,本书将有专门章节进行讨论。

我国关于地球物理反演理论和成像技术的研究起步较晚,但是BG反演方法在70年代就开始介绍到中国,并用于解决我国某些地球物理数据分析问题。我国著名的老科学家傅承义、冯康等都十分重视反演问题的研究^①。80年代初,我国的大学已经开始设立了地球物理反演的研究生课程,而且多次召开了关于数学物理反演的学术会议,一个关于地球物理反演成像的新的热潮已经兴起。近年来,我国的地球物理学家和数学家们已为地球物理反演方法的发展作出了应有的贡献。

三、地球物理反演的研究内容和方法

地球物理反演的出发点是描述地球内发生的物理现象满足的数学物理方程。数学家称为偏微分方程,物理学称之为运动方程或场方程。在物理学家眼中,运动方程是一个物理体系中物理过程的数学描述,这里“过程”指物质状态的变化。实际上,对运动方程的研究和证实是物理学方法论的核心。典型的物理学研究方法是,对某个系统在某个时刻的状态列出运动方程,通过求解运动方程计算系统中表示状态的变量是怎样随时间变化的,然后得到这一物理过程的某些预测数据;如果这些数据与实验取得的数据相符,则证实了他们的假说和运动方程,产生了新理论;如果预测数据和实验数据不符,则反过来修改运动方程和假说,然后进行下一个循环。典型的物理学研究方法见图1.2。

对于地球物理学家来说,他们习惯用的研究方法和物理学的方法只有一点不同,即他们全盘接受在物理学中已经证实的运动方程(包括稳定场方程,下同),而只修改介质函数和边

① 见1982~1985年期间中国数学会及地球物理学术讨论会的报告。

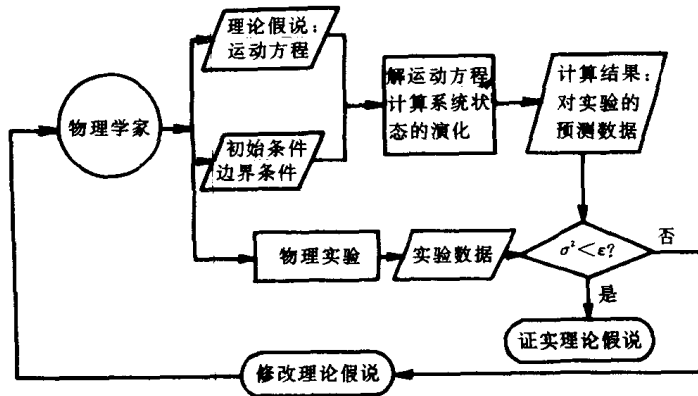


图 1.2 典型的物理学研究方法示意图

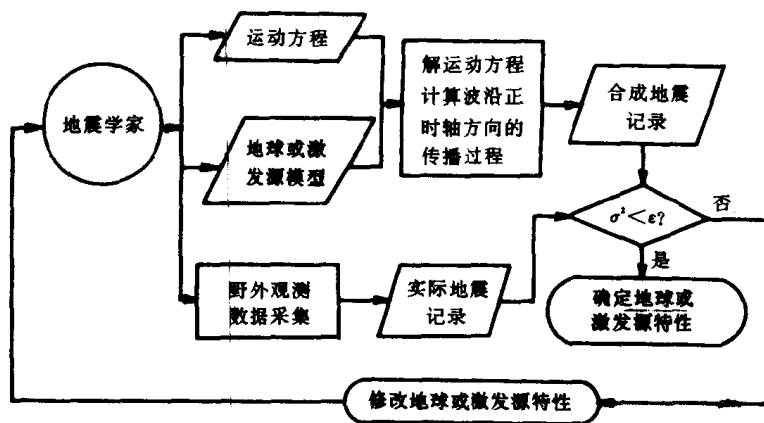


图 1.3 典型的地震学研究方法示意图

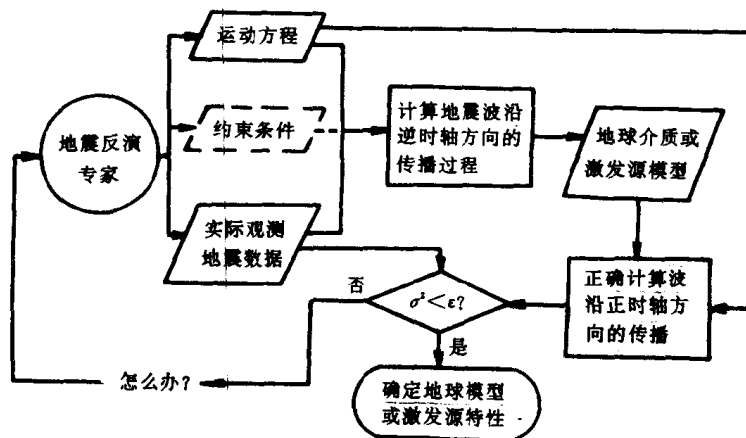


图 1.4 反演过程的示意图

界条件(地球模型)或初始条件(激发源特性)。以地震学为例,示如图 1.3 的典型研究方法可称为反演计算的试错法。对比图 1.2 和图 1.3 可清楚地看到研究方法的相似性。

在地球物理反演研究中,采用的方法和上述流程不一样。以地震反演为例,这时反演专家已知的运动方程和实际地震数据,这两者都不是可以随便修改的。利用波动方程来研究的不再是波向前的传播(过程的进化),而是波沿时间轴的后退(逆时轴传播),所期望的是通过波后退过程中地下质点振动状态的变化给出关于介质性质或激发源特性的消息(图 1.4)。为了证明反演的结果是否正确,可用图 1.3 所示的正演计算来合成地震图,并把它与实际地震数据比较。如果两者相符说明反演结果可靠,但是如果两者差别很大怎么办?难道允许反演专家去修改运动方程或实际数据(它们是反演系统的输入)吗?

对于这样的反演系统,至少有两个问题使物理学家产生怀疑。第一,反演涉及到的波的逆时传播是物理不可实现的。第二,系统的不封闭不能保证研究的深入,而且可能导致混乱(如错误地怀疑观测数据而布置更多实验)。这些问题的存在决定了地球物理反演研究内容和方法的特殊性。

要利用台站上接收的地震波传播的某种后果来研究发生在以前时刻的波的传播特性或激发过程,必须假定地震波沿时轴的正向和反向的传播是对称的。这一隐含的假定对数学家也许是无所谓的,但是物理学家们却心怀疑虑,因为时间具有方向性。根据热力学第二定律,如果在一个封闭的房间内放一小瓶香水,若干小时后房间内会充满宏观上均匀分布的香水分子,这是一个产生熵的不可逆过程,因为均匀分布香水分子的房间绝不会发生香水逐渐汇聚回小瓶子中去的“逆扩散”过程。物理学关于热力学的时间方向不可逆和自然过程产生熵的知识,导致沿时间轴正演和反演的不对称结论。与扩散过程一样,波动过程沿时间轴也是不对称的,在炮点的爆破产生了地面振动,如果人工发生相同的振动却不能导致振动能量集中回到炮点而激发爆破。从物理学和信息论分析,从源出发的地震波传播过程是消灭宏观信息而产生熵的过程,在传播过程中宏观信息不断地转化为微观信息,而微观信息又不断地被微扰所消耗(从而不断再生出熵增加的条件),因此利用波传播的“结果”不可能完全恢复波的“源”,所谓的“逆时传播”是物理不可实现的。

当然,也有的物理学家认为,时间的方向性来自于孤立的封闭系统的假定实际上并不存在。他们认为,如果把封闭的物理体系扩大到整个宇宙,在测不准原理的规定限度内对宇宙给出完全微观的描述,则时间的两个方向就不会有质的差别,描述对于时间的正演和反演就将对称的。这个观点看来有一定道理,但是对于无界的宇宙进行完全微观的描述是不现实的。

数学家们可以争辩说,逆时物理过程即使是物理不可实现的,但也可以用计算机进行“仿真”。以香水扩散过程为例,如果可以把小瓶子内每个分子扩散的轨迹用摄像机拍成电影,然后把电影片子倒过来放,就可以看到宏观上均匀分布的香水分子是怎样“逆扩散”回到小瓶子里去。类似地我们可以把地震波传播的计算机模拟(如波动方程地震合成)的计算步骤一步一步地颠倒过来,那么只要计算机的精度高到舍入误差可以忽略的程度,也可以把地面振动的传播能量逆向追回到源点,实现地震波逆时传播的“仿真”。这表明物理上不可能实现的自然过程具有数学上的可模拟性。然而,对于这一类物理不可实现的过程的模拟在数学上常常归结为所谓的不适定问题,即初始条件或边界条件有微小的误差会导致解答发散的一类数学问题,它的古典解即使存在,也难以准确地计算出来。这就使地球物理反演方法通