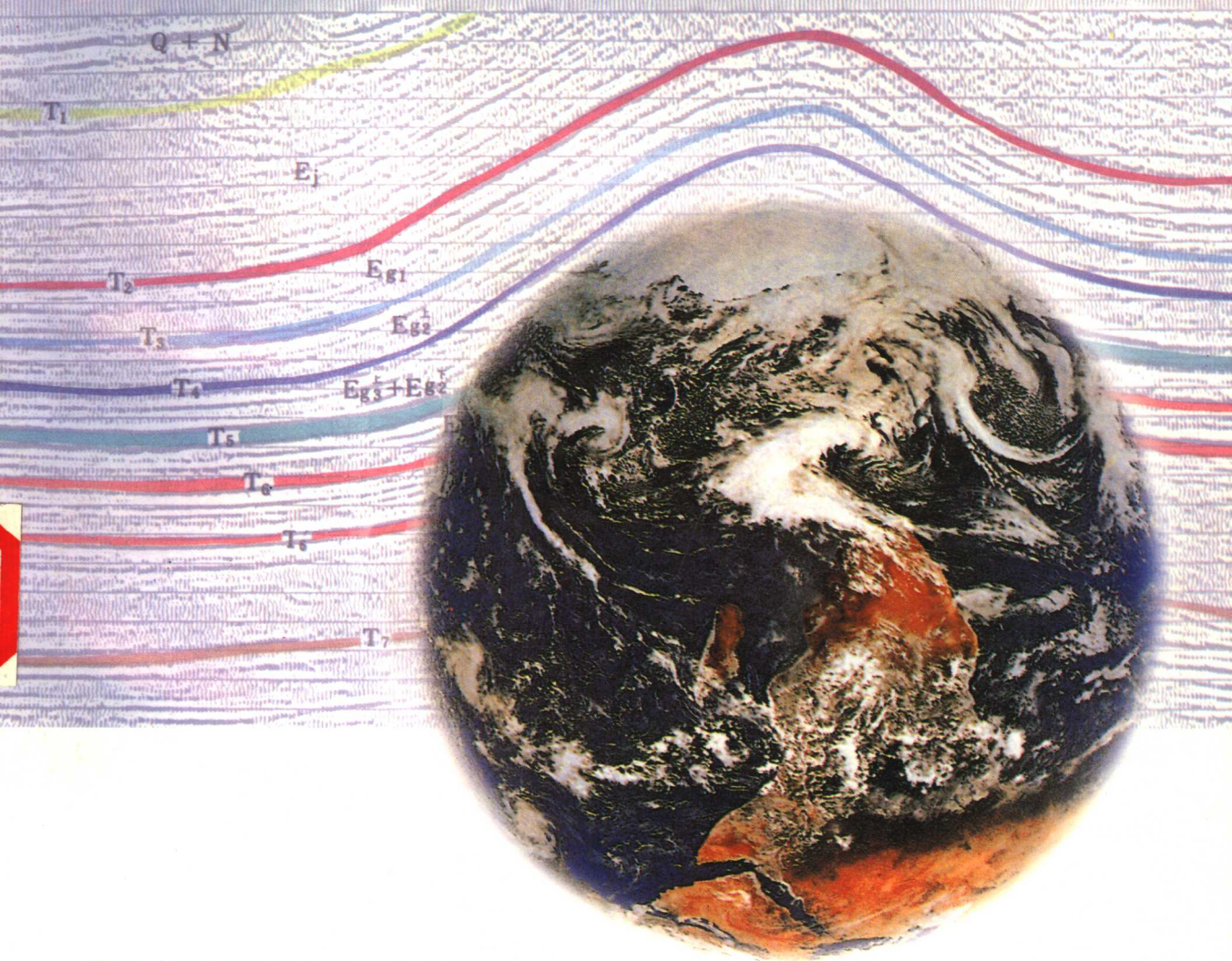


计算地球 物理学概论

马在田 等编著



同济大学出版社

计算地球物理学概论

马在田 曹景忠 王家林 徐仲达
侯安宁 刘瑞林 王华忠 编 著

同济大学出版社

内 容 提 要

计算地球物理学是地球物理、数学和计算机科学三者结合而产生的一门边缘学科。本书根据作者在近 10 年间的科研和教学工作所取得的成果和资料编写而成,内容新颖。书中所涉及的目录有地震波场的上演模拟和三维结构成像;位场和电场的三维地质地质体的正反演原理与计算;地震波的散射与衰减计算;横波分裂与裂隙检测;人工神经网络和非线性方法在地球物理学中的应用等。

本书可供从事地球物理实际工作和教学、科研工作的科技人员,也可作为相关专业博士生和硕士生的参考用书。

责任编辑 卞玉清

封面设计 陈益平

计算地球物理学概论

马在田等 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:27.25 字数:690 千字

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

印数:1—500 定价:50.00 元

ISBN 7-5608-1869-2/P·14

前 言

地球物理学是用物理的手段和方法,在地面、海洋或井孔中观测来自地球内部的各种信息,如重磁场、电磁场、地震波场、放射射线和热流场等。通过这些信息来研究地球内部几何的和物性的结构。而计算地球物理学就是将上述问题用计算科学方法予以解决,这就是计算地球物理学的任务。计算地球物理学是以计算机硬件和软件提供的工作环境,用数学和信息科学等方法,解决地球物理学中大量无法由解析方法解决的各种理论问题和实用问题。计算地球物理学是地球物理学的一个新的分支学科,它形成于六七十年代,今天仍在继续发展之中。

计算地球物理学的内容很多,要解决的问题范围也很广泛,它所涉及的问题,小的可以是地球上的一个局部点,大到整个地球。从研究目标的尺度来说,可以从地层厚度为几分米到数千千米。因此,不可能把计算地球物理中的所有问题都写入本书,只能将当前计算地球物理学中与科研和实用有关的主要内容加以阐述。即使这样也不可能写得很全面和很详细,只能是其中的基本原理和方法要点。故将本书称之为计算地球物理学概论。

本书的内容由编写组集体写成。第1章、第5章和第6章由马在田编写。第2章和第7章由曹景忠编写。第3章由王家林编写。第4章由徐仲达编写。第8章由侯安宁编写。第9章由刘瑞林编写。第10章由王华忠编写。本书设计与总审由马在田完成。作者谨以本书纪念同济大学建校九十周年。

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 计算地球物理学的兴起与发展	(1)
1.2 计算地球物理学的研究内容	(2)
1.3 计算地球物理学的特点	(6)
1.4 本书的内容	(8)
第2章 复杂介质地震波场的数学模拟	(10)
2.1 概述	(10)
2.2 有限差分法正演数值模拟	(11)
2.3 富氏变换正演模拟	(34)
2.4 有限元法地震波场数值模拟	(40)
2.5 边界条件的讨论	(49)
2.6 射线追踪正演模拟	(58)
2.7 3维数值模拟	(63)
第3章 位场与电磁场的正反演	(72)
3.1 重磁正演问题	(72)
3.2 重磁异常的反演	(86)
3.3 电磁场的正反演	(101)
第4章 地震波的散射与吸收	(130)
4.1 地震波散射	(130)
4.2 地震波吸收	(146)
4.3 反射波振幅与人射角的关系在寻找油气中的应用	(156)
第5章 地球物理场反向外推与界面成像	(180)
5.1 前言	(180)
5.2 三维叠后时间偏移和深度偏移	(181)
5.3 叠前时间偏移和深度偏移	(201)
5.4 多分量地震资料的偏移处理	(220)
5.5 电磁场电阻率偏移成像	(245)
第6章 波动方程反问题	(254)
6.1 地震反问题概述	(254)
6.2 一维声波方程被阻抗反演	(256)
6.3 层状介质弹性参数反演	(264)
6.4 高维逆散射反演	(274)
6.5 数据拟合法非线性参数反演	(284)
第7章 地球物理层析成像	(294)

7.1 概述	(294)
7.2 射线理论层析成像	(294)
7.3 地球物理衍射层析	(297)
7.4 2.5 维井间衍射层析	(301)
7.5 非线性波形层析	(308)
第8章 横波分裂与裂缝检测	(317)
8.1 各向异性概述	(317)
8.2 横波分裂的理论模型与实验证实	(326)
8.3 垂直地震剖面检测裂缝	(335)
8.4 地面反射地震检测裂缝	(345)
8.5 地震横波检测裂缝的实际效果	(356)
第9章 人工神经网络的应用	(368)
9.1 引言	(368)
9.2 生物神经系统的功能及特点	(368)
9.3 几种人工神经网络模型	(370)
9.4 人工神经网络在测井资料岩性识别和沉积相识别中的应用	(380)
9.5 人工神经网络在地震资料油气预测中的应用	(383)
9.6 延迟神经网络模型测井资料水淹层参数计算方法	(397)
9.7 时间延迟神经网络地震井间波阻抗估算	(401)
第10章 非线性全局寻优算法及应用	(405)
10.1 前言	(405)
10.2 非线性寻优算法与地球物理数据反演	(405)
10.3 模拟退火算法的理论与实现	(407)
10.4 遗传算法的理论与实现	(413)
10.5 全局寻优算法在地震反演中的应用	(420)

第 1 章 绪论

计算地球物理学(Computational Geophysics)是地球物理、数学和计算机科学三者相结合而产生的一门边缘学科。它是以计算机硬件和软件所提供的工作环境,用应用数学和计算数学以及信息科学的方法解决地球物理学中的大量的无法由解析解方式解决的各种理论问题和实际问题的一门应用学科。计算地球物理学是地球物理学的一个分支学科,这个分支学科已经成为现代地球物理学理论与应用的各个方面必不可少的科学手段和有力支柱。研究和讨论当代的各种地球物理问题离开计算成果已经是不可想像的了。它虽然应用广泛,并已渗透到地球物理学的各个分支学科而且日常从事计算地球物理工作者已占地球物理学界的多数。但是,它永远不会成为地球物理学的全部内容。地球物理学的理论研究和实测与实验工作仍然具有基础性质。因此,将计算地球物理看成是地球物理全部,因而放弃理论研究与实测和实验研究是不可取的。实际上这三个方面是密切相关又各有其相对独立性。只有三者的密切结合才能使地球物理学走向现代科学的先进行列。

1.1 计算地球物理学的兴起与发展

地球物理学实质上是一门以观测数据对地球内部各种尺度的地质体和矿体进行研究的一门科学,因此,从它形成独立学科的时候起,就离不开计算问题。例如,从地震台站的地震波的走时求震源的位置,根据地球物理场的地面观测数据求得地球内部物质结构都需要进行各种计算工作。这类问题属于地球物理反问题。地球物理反问题的计算都是建立在正问题的基础之上的。因此,尽管我们计算的目的是解反问题,但反问题的解是否正确,常常需要通过计算正问题来回答。此外,在进行理论问题研究时,特别是提出新的理论或方法时一定要通过正演模拟的计算和通过模拟数据的验算证明新的理论与方法是正确时才能用于实测地球物理资料的处理,否则会造成很大的经济与时间上的损失。因此,地球物理的计算方法与技术是随着它的正、反演问题研究的深入与扩展而发展起来的。

在电子计算机问世以前,地球物理的计算是粗略的。许多想要计算的问题由于计算工作量的巨大,用人力或台式机械计算器是无法完成的。因此,在 50 年代以前虽然已经广泛地进行地球物理计算,但它并未形成一门学科分支。只有在将电子计算机引进到地球物理工作中来,特别是各种地球物理资料的数值化采样之后,计算效率大大提高,才使地球物理的计算工作向更深入更精确的方向发展。许多以前无法计算的问题得以解决。这样才逐渐形成了计算地球物理学的分支学科。形成的开始时期大约在 60 年代初期。当然,50 年代已经开始有一些人为了建立和形成计算地球物理进行了研究。Backus, G. 和 Gilbert, F. (1967, 1968, 1970, 1976)在地球物理反演计算方面有过显著的贡献。Robinson, A. 和 Tritel, B. (1967)在应用地球物理领域,特别是在反射地震学的数值处理方面有开拓性的贡献。在中国,计算地球物理的开展是随大型电子计算机的应用开始的,以北京大学数学系闵嗣鹤教授为首的一批数学、地球物理专家为我国的计算地球物理的开展有着不可磨灭的贡献。这

些专家编写了我国地球物理界第一部系统著作——地震勘探数字技术(1973, 1976, 1978, 1980), 这对我国的计算地球物理的发展有一定的指导作用。从 80 年代以来, 我国的专家学者出版了一批属于计算地球物理学方面的书。从中可以看到 80 年代以来计算地球物理学发展的速度与广度。虽然, 在地球物理学的各个分支学科或专门技术领域有着不同的计算内容, 但其中有许多是共同的, 可以互相借鉴的。随着地球物理学对地学与矿产资源、环境与灾害的各个方面的应用, 计算地球物理学一定会向更高层次发展, 在各个科学领域的计算科学中会占有更重要的位置。

1.2 计算地球物理学的研究内容

地球物理学的问题分为两类, 一类称之为正问题, 另一类称为反问题。简单地说, 正问题是根据给定的地球模型求解地球物理场的理论值, 反问题是根据实际观测的(有时也用理论的)地球物理场的观测值解释(定量或者定性)出地球内部的结构, 包括地质体形态和岩层的物理性质。计算地球物理学研究方法实质上就是用数值计算的方法来解决地球物理学中的正问题和反问题。其中反问题的内容占主要地位, 正问题是为解反问题服务的。

1. 正问题的计算

正问题一般是先给出地球模型, 即全球或局部的地质结构, 在假定的自然源或人工源的作用下用相应的地球物理场方程求解地面或地下某处的地球物理场的响应函数, 可用下面的表达式表示:

$$d = f(m), \text{在线性条件下表示为 } d = Am$$

式中 d 表示数据向量;

m 表示地球模型的参数向量;

A 为线性算子或矩阵。

这样求出的理论场如重力场、磁场、电场或电磁场、地震波场、热流场和其它物理场等可用来研究地球模型与这些场之间的物理过程和映射关系, 以便正确地对地球内部结构与地球物理场的关系做出解释。正问题的实质是用人为的条件在实验室内模拟自然界的各种地球物理现象, 并给出相应的观测值或计算值。因此, 求解地球物理的正问题也常称它为地球物理模拟。地球物理模拟有两种方式。一种是用物理的手段进行, 称为物理模拟。这种模拟是按照相似原理将设计的地球模型用各种材料做成物理模型。然后在模型表面或内部施加相应的物理源, 如震源, 电源, 热源等, 并用相应的换能器将接收的物理场响应转换为电信号, 记录在信号接收-控制系统中。在接收系统中进行模-数转换与采样。这种模拟方式由于投资大, 材料选用困难和物理模型制做要求精度高、周期长和费用大等原因, 因此不能大量使用, 只能做理论或特殊实例的研究。因此人们常常选择效率高、费用低的另一种模拟方式。这就是数学模拟方法。用数学方法对地球物理场的响应函数进行计算也有两种方式。一种是用解析方法, 用建立起来的地球模型给出的条件解相应的场方程。求出场方程的解析解公式。再根据这个公式求出地面或地球内部各点的场函数值。如果能够对各种地球模型给出相应的地球物理场方程, 并对此种场方程求得解析解, 那是解地球物理正问题最简捷方便的方法。但是, 能够对各种地球模型列出与之对应的地球物理场方程并求出它们

的解析解的是极少数,一般是非常简单的情况。对于解复杂的地球模型或地质结构模型的正问题,只能采用计算地球物理学的数值模拟方法。数值模拟已经成为解地球物理正问题的主要工具和手段。数值模拟就是将描述各种地球物理场的方程或表达式及初、边值条件通过数值方法求出它们的数值解。在进行计算地球物理的数值模拟中,有许多计算方法,常用的方法如,有限差分法,有限元法(边界元法),快速离散傅立叶变换法,拟谱法,数值积分法,元胞自动机法和在地质学广泛应用的射线追踪法等。这些方法都各有自身的优点与不足。在千变万化的多样的计算地球物理问题中,它们都可能被应用于解决实际计算问题。当然,所有的数值算法都是有误差的。解计算地球物理正问题的过程如下。第一步,根据要研究的对象和问题建立地球模型或地质结构模型。第二步,根据要使用的物理手段和地球模型建立相应的数学模型。第三步,选择进行计算的方法,并根据计算方法编制的计算机实现程序进行计算。计算的结果是否正确可通过理论分析或几种计算方法相互验证来判断。在以上三个步骤中它们是互相关联的。建立的地球模型能够反映主要地质构造和岩石、矿物特征即可。不能把模型搞得太复杂。否则,将无法建立相应的数学模型,或者计算出来的地球物理场过于复杂化,难以辨认地质特征与物理场特征之间的联系。计算方法的选择对于求解地球物理正问题是重要的。有的计算方法只适用于简单的地质-数学模型,但它的计算效率高,机时少,周期短,费用低。有的数值方法能够适用于复杂地质-数学模型,也适用于简单的模型。但是,它的计算效率低,周期长,费用高。如果把它用于简单的地质-数学模型的计算,显然是不合适的。因此,要综合考虑各种因素采用计算方法,特别要有针对性地灵活运用计算方法。

3. 反问题求解

到目前为止,有关地球内部,特别是深部的知识,主要还是来自地球物理的观测资料的解释取得的。因此,地球物理学的基本问题就是用地面或地表附近的各种观测资料定性和定量地对地下的地质结构和矿产资源做出判断,这就是解地球物理反问题。用公式表示为

$$m = g(d); \text{在线性情况下表示为 } m = A^{-1}d$$

式中 m 表示地球介质模型的参数向量;

d 为数据向量;

A^{-1} 为 A 的反算子或逆矩阵。

地球物理反问题有广义和狭义两种提法。广义地球物理反演是指根据地面观测数据不管用什么样的方法和计算手段,能对地下的地质情况做出定量或半定量的估算都可称为解反问题或反演问题。例如合成声波测井曲线的计算,神经网络的地层横向预测,油气储层的多参数分析,矿体埋深与大小的估算和求波动方程系数以及地球物理层析成像等均属于广义反演范畴。狭义地球物理反问题是指与各种地球物理场方程,即各种偏微分方程有关的地球物理反问题的求解方法和计算问题。狭义的地球物理反问题与数学物理反问题或数理方程反问题是密切相关的。

狭义地球物理反问题又可分为两类(Marchuck, 1985)。第一类是根据现在的物理状态去确定物理过程的过去状态。例如,已知物体的当前温度去确定初始的温度分布;根据空间中波场的当前分布计算以前某时刻波场的空间分布等。前者用于地热场的研究,后者用于地震偏移成像、电磁波成像和地震层析成像的研究。第二类是从微分方程的解的某种泛函

来求方程的系数或右端项。第一类反问题求解相对容易,虽然场函数与介质参数二者之间存在不确定性,但计算总是稳定的。因此,在实用中取得了良好的效果。无论是地震偏移问题,还是求地热场的原始分布问题,都是通过解微分方程计算波场或热流场的传播逆过程。虽然这个过程也是物理不可实现的,但是它的物理意义是非常确定的,而且这个过程是唯一的。因此,反演的结果在参数未确知或计算方法非最佳的情况下只存在误差,不存在非解的问题。这一点与下面要讨论的第二类数理方程反问题是很不相同的。第一类数理方程反问题在正确建立数学模型或数理方程问题的前提下,问题是适定的和线性的。因此各种求解的计算方法都是稳健的。对解此类反问题的计算方法的评价标准主要是对复杂介质的适应能力和计算效率的综合指标。这一类反问题如果把时间的指向反个方向,确实可以把这类问题看成是特殊的地球物理方程正问题。这就是它的数学计算上的性状为什么与正问题更相似的原因。

第二类数理方程反问题一般是不适定的和非线性的。不适定性表示这类反问题的解不唯一。非线性说明求解上的困难。这类反问题经过半个世纪的求索,至今仍然不是那么好解决的,特别是高维波动方程反问题的研究,无论从理论上,还是从实用上来看,基本没有有一个令人满意的求解计算方法。虽然在各个学科领域发表了大量的论文和著作,但一触及实际问题都显得无能为力。特别是计算地球物理反问题由于数据不足,使本来的不适定问题的求解更加困难。近年来在一维地球物理反问题中特别是波动方程反问题的理论与实用相结合的研究方面比高维反问题的研究有较多的进展(张关泉, 1991, 1995, 刘家琦等, 1995, 宋海斌等, 1995, 1996),

一维波动方程反问题的方法,基本可分为两类,一类是反散射方法,另一类是特征方法。反散射方法最初产生于量子力学领域,归结为 Schrodinger 方程势函数的重建问题,也常称为 Sturm-Liouville 方程的反谱问题。一维波动方程可化为 Schrodinger 方程的等价形式。反散射问题也可在时域进行 (Gel' fand et al., 1951; Marchenko, 1955; Gopinath et al., 1971; 栾文贵, 1989)。反散射方法通过求解一个线性第二类 Fredholm 积分方程(频域的 $G-L$ 积分方程,时域的 Gopinath-Sondhi 积分方程)使反问题得到解决。Ware 和 Aki (1969) 用 Marchenko 积分方程法研究了层状声学介质的阻抗反问题。后来被 Berryman 和 Greene (1980) 证明它与 Goupillaud 的直接从水平层状离散模型建立的反演方法是等价的。

解一维反问题的特征方法是个时域反演方法,该方法通过奇性分析建立待求参数与波动方程解的直接关系式,沿特征线积分求解将反问题化为求解非线性的第 II 类 Volterra 积分方程组的问题 (Romonov, 1987) 或非线性偏微分方程的初值问题 (张关泉, 1988), 与之相对应的数值计算方法有 Bube 的特征线积分-差分法 (Bube 等, 1983) 和直接离散计算积分方程组的方法。

此外,还有一维波动方程反问题线性化求阻抗的近似解的方法。在这方面有不少的实用计算求解方法,如刘家琦等人的逐段折叠反演方法用于一维地震数据的阻抗系数的重建。

在高维数理方程反问题方面,基本上可分为两大类。第一类是直接解积分方程的 Born 近似线性反演方法 (Bleistein 等, 1987)。这种方法是将介质参数(速度、密度、介电常数或弹性系数 λ 和 μ 等)分解为两部份,一部份数值较大的称为背景 a , 另一部分较小的 δa 称为摄动量。假定背景值是已知的,则反演求解的是摄动量 δa 。地震波或电磁波的散射场是由这个摄动量 δa 产生的。这样就可以将非线性反问题变为一个线性的积分方程求解问题。利

用现有的数学工具,可以将求 δa 摄动量表示为一个多重积分公式。这种方法尽管数学表达式很优美,在数值计算上也能够稳定求解。但实际效果并不好,表达不了 δa 的定量值。特别是在多层和复杂几何形态情况下,要求背景值随深度而变。作为深度参数的背景值一般无法正确给出。如果给出的背景值和摄动量不能满足 $\delta a \ll a$ 的条件,线性化就无法实现,计算的结果将不知为何物。因此,这种方法目前正用来从事保幅偏移的研究。

第二类高维反问题的求解方法是,通过使观测的地球物理数据与根据地球模型计算的理论数据的最佳拟合,对模型参数进行估计。给出先验的地球模型,用恰当的地球物理场方程对它进行正问题计算,求得相应的数据,然后对它们进行最佳拟合。最佳拟合的方法一般使二者误差的平方和为最小,或绝对值之和为最小来实现。一般可表示为 L_p 模最优优化问题(以线性问题为例),即

$$S(m) = \min \sum_i \left| \sum_j G_{ij} m_j - d_i \right|^p$$

式中 $p \geq 1$ 。

在用到数据、模型参数的概率分布函数时,要考虑概率密度的作用(Tarantola, 1987)。用最佳拟合方法求解反问题时,虽然方法是稳健的,即计算上保证是稳定的。但是它仍然无法解决多解性问题。因为最优化中的目标函数 $S(m)$ 不能保证它是一个凸函数。它可能有很多局部极值。如果给定的初始模型参数组合不处于真解附近,则反演结果就会落入局部极值,从而反演的结果是不正确的。这种不正确可能离正确解相去甚远。导致反演失败。为了在求解过程中避开局部极值,可选用模拟退火法和生物遗传算法等计算技术。但仍不能保证不落入局部极值。因此,先验的模型参数的信息是非常有价值的。如果我们能够给定解的先验信息被约束在一定的范围内,则反问题的解就有望是正确的。在约束条件方面,如物性参数是非负的,它们的取值也是有一定范围的,它们之间有时有一定的函数关系,在特定地区从钻井、测井或其它渠道已知其中的参数值等。

3. 信号处理、信息提取与可视化研究

正、反演问题是计算地球物理学的主要研究内容,但是为了更好地解出正、反演问题,特别是在用实测数据进行反问题求解之前,要对实际的地球物理数据进行旨在加强有用信息的信号处理。因为,在实际观测数据中总是存在各种各样的噪声和干扰。如果用有严重干扰的地球物理数据进行反问题研究,其所求结果是不可想像的。因此,对实测地球物理数据首先要进行处理。地球物理数据也可以看做是信号,特别是地震数据和电磁场的观测数据。在信号处理和信息提取过程中对计算地球物理学最重要的处理内容就是提高信噪比和提高分辨率的工作。而信噪比又是分辨率的基础。提高地球物理数据的分辨率又是一个系统工程(李庆忠, 1993)。因此,计算地球物理学在这方面的研究内容也是相当广泛的。

关于提高信噪比的问题,一向被地球物理学家所重视,为了提高信噪比,在观测和处理方面曾经投入过大量的工作。如在反射地震学中实行多次覆盖观测技术。在处理中实行共中心点道集叠加,或共反射点道集叠加,或共转换点道集叠加等。其目的是将不同次接收的同一点处的反射波同相叠加,叠加后信噪比可提高 $\sqrt{n}$ 倍。有时要进行共深度面元叠加(Common Depth Area Stack 简称 CDA)使覆盖次数由几十次达到几百次。当然,要做到同相叠加也非易事。有时地表等复杂条件会破坏同相性,因此要进行地表校正等。提高信噪比的另一项工作就是去噪处理。噪声又分为随机性噪声和相干性噪声。消除这些噪声已有不少

方法。但有时仍然不能解决低信噪比记录中的两种去噪问题。

提高分辨率的问题也是一个持久性的研究课题。因为对地球内部结构的研究详细程度越来越高,因此对分辨率的要求也就越来越高。各种反滤波是提高分辨率的手段,但并非那么有效。另外对于地层的高频吸收作用的补偿是一个尚未解决的问题。

此外,计算地球物理的结果总是以各种图件表示的,如剖面图,平面图,透视图和各种曲线图等。随着多媒体的应用,地球物理成果的可视化将是计算地球物理学研究的一个重要方面。

1.3 计算地球物理学的特点

计算地球物理学就是用计算的方法解决地球物理中的科学问题和实用问题。它与数学,特别是计算数学有着密切关系。但是,计算地球物理学的问题常常不是用已有的计算方法就能解决问题的,而是要从问题自身的特点出发,采用一定的数学手段才能完成计算工作,达到我们研究的目标。

(1) 不适定问题在计算地球物理学中经常遇到,且是不可避免的,特别是在解反问题方面。早年,人们普遍认同 Hadamard 的观点,即不适定问题没有物理意义。而地球物理学要解决的问题,很多是不适定的但它们是有物理意义的。因此,后来数学家对不适定问题重新作了定义,认为不适定问题是有意义的适定外延。为适定外延数学家引进了某种先验假定。例如,原苏联科学院院长吉洪诺夫(1963)假定不适定问题的解具有某种“正则”性质,可以通过将不适定问题正则化变为适定的问题求解。Franklin(1970)则假定模型空间满足某种先验统计规律。事实上,如果将 Hadamard 有关数理方程解的适定性的定义做适当修改是合适的:能够描述自然界中物理可实现过程的问题是适定的,而求解自然界中物理不可实现,但有物理意义的问题是条件适定的,无任何物理意义的问题是不适定的。例如,在地球物理中解波动方程的初值问题求地震波的传播问题是适定的。因为这时求出的解是描述了一个物理可实现的过程,即地震波从震源出发向外传播的物理过程。在偏移问题中要求从当前的波场推出以前各时刻上的波场值,即要解地震波的反向传播的问题。这是一个物理不可实现的问题。但是,它是有物理意义的。因此它是条件适定的。这时,如果我们把问题提法和初、边值条件做出合理的改变,即可以使问题变为适定的。将时间的方向改变符号,即给出逆时间求解波动方程即可实现逆时波场外推。另外,如果将波动方程分解为上行波方程和下行波方程,我们用上行波方程进行深度方向的反向波场外推,问题变为适定的。如果对波动方程本身不做任何的条件改变,既不进行逆时外推,也不用上行波进行深度方向的反向外推,则问题是不适定的。因为这时方程全部或部分内容无物理意义。

总之,在计算地球物理学中用于进行计算的方程一定要使它满足能够描述真实的物理过程,至少应当具有明确的物理意义,方程中不能包含无任何物理意义的成分,同时还要根据问题把相应的计算条件合理的给出,则计算是可以实现的,否则计算不稳定或结果不正确。

(2) 要求计算地球物理的求解精度要有适度性,否则会适得其反。这对解正问题和反问题都是应当予以慎重考虑的。关于适度性的问题不是指对算法本身或计算过程以及收敛性和稳定性而言的,这些方面都应当按照计算数学的要求严格认真地做好。由于地球物理

的观测数据是间接的物理场响应的综合结果,不是与地下的地层空间点一一对应的,因此不能简单地要求达到想要达到的理想精度。例如,对分辨率的要求要有一个正确的理解,不可无限制的提高。因为地球物理场总是有干扰背景的。如果在地震记录上用各种反滤波和谱白化手段无约束地提高高频成分,则会出现假的高分辨率,也就是所谓的地质假象。因此,研究一个地区的观测数据的极限分辨率是非常必要的。虽然理论上已有不少关于分辨率定义的公式,但是地震记录的实际分辨率远非理论定义的分辨率能包括完全的。不论是 Widess 的分辨率厚度为 $1/8$ 视波长,还是 Knapp 的 $1/4$ 的视波长都无法解决客观实际的多个厚度不等又无韵律的薄互层的分辨率问题。对分辨率的要求应当根据地层组成状况,实际接收到的频率成分做系统的研究才能决定。那种认为地震波分辨率可以无限提高,甚至提高到一个采样间隔的水平是骗人的。关于地震垂向分辨率的问题,我们非常赞赏李庆忠院士的观点(1993):不同的频率成分有不同的用处,缺了哪一部分都不成;分辨率与频带宽度成正比是对的,但并不能说频带的宽度越大越好,还要注意不要丢掉有地质意义的低频成份;那种丢掉低频成份,表面上看来主频较高的分辨率是假分辨率。

除了分辨率问题外,其它方面还有很多处理需要适度的问题,几乎在每个处理方法中都有相类似的问题。如去噪过度会损害有效波,反之则去不掉噪声。组合、混波和相干处理过强会造成地层的假连续性,反之连续性及信噪比很差。在偏移、反演阻抗剖面上都有类似的问题。因此,计算地球物理学中的适度性就成为一种非常关键的技巧,甚至可以说是一种知识和技能水平的衡量标准。它作为对最终地震成果优劣评价的标准是一个专门的学问,不可等闲视之。

(3) 在计算地球物理学中结合实用的创新性是它的发展的基础。计算地球物理学中的数学模型、计算方法、算法技巧虽然很多是应用了数理方程和计算数学中的已有知识。但它们都不是直接的应用,而是与地球物理中的问题密切结合,以明确的地球物理问题为出发点和归宿点。因此,它们并不总是与计算数学的研究热点相一致的。从地球物理问题提出的方程、公式和求解方法与计算方法都是比较独特的,不但与现成的数学方法不完全一致,而且有时很难对它们的适定性、收敛性和稳定性做出预先的研究。常常是先应用,从应用的效果来判断模型、方法和计算过程的可行性。看起来这有些盲目和不够科学。但是,所有的科学都要通过实践或实验来验证的,只是时间有长有短而已。不断地创新,结合实用的发展是计算地球物理所应当具有的一个特征。否则,难以把大量的尚未解决的问题加以解决。

譬如,地球物理学中的反问题的命题方式,由于不适定性就被人们认为是无物理意义的。但是,地球物理学家坚持自己的立场,最终一些著名的数学家还是作了对 Hadamard 定义的修改(吉洪诺夫,1963)。又如波场和电磁场的反向外推问题,从一般数学角度分析是一个不适定问题,但是在计算地球物理中得到广泛的应用。它不但能够进行稳定的数值计算,而且得到了良好的计算结果。在计算中使用了各种计算方法,如有限差分法,有限元法,快速傅氏变换法和拟谱法等多种计算方法。得到的结果是一致的。这就用事实证明了该数学模型,由于有明确的物理意义,它的收敛性和稳定性是有保证的。还有,由于计算地球物理学家对地震子波和分段函数谱估计的继续研究,最后形成小波分析理论,通过数学界向其它学科领域推广。这些都是比较典型的创新性。

此外,在实际资料的处理和工业应用中,计算地球物理学也是处于研究状态中,它与工业成品生产过程完全不是一回事。不了解地区特点和处理的目标,不了解每个模块的原理

和功能,没有充分的经验,不进行持续的开发研究是得不出好的地质效果的。

总之,在计算地球物理学的理论研究和实际应用中离不开不断地研究和创新。因为面临的任务越来越复杂,越来越深入。计算地球物理学如果不能赶上新一轮的科技革命的步伐,就有可能走向没落被历史所抛弃。

1.4 本书的内容

计算地球物理学的内容很多,要解决的问题范围也很广泛。它所涉及的问题,小的可以是地球上的一个局部点,大到整个地球。从研究目标的尺度来说,可以从地层厚度为几个分米到数千千米。因此,在计算中对同样的问题可能有各种精度的不同方法。尽管如此,在固体地球物理领域,计算问题还是有很多共同之处的。因此,本书可以作为从事固体地球物理工作和地声学研究的计算技术的参考书。本书是根据中等尺度的地质目标做为研究的基础写成的。但完全可以用于大尺度和小尺度地质体研究的。

本书是根据作者在过去十余年的科研和教学的工作中的体会为主来编写的,但考虑到这本书是用来作为研究生的参考读物,要求有一定的系统性和完整性。因此,在编写本书的过程中,不可避免的参照和采用了部份他人的学术成果。在此特向这些作者表示感谢。

本书共有 10 章,除第 1 章为绪论外,以后的 9 章都是针对专题进行论述。第 2 章为地球物理正演模拟的数学方法的综述。其中主要介绍在地球物理领域中,特别是在实用地震学中的模拟声波和弹性波传播及反射波波场。在计算方法方面讲到了有限差分法,有限元法,虚谱法和射线法等。第 3 章为位场和电场的正演和反演的原理和方法。在位场正、反演方法讨论中,重点是三维地质体的数值积分方法和多界面的正、反演计算的原理与效果。在电场正、反演计算原理和方法的阐述中,重点是讨论电磁场的一维和二维的正、反演方法。第 4 章是地震波的散射与吸收。在这一章中,首先讨论了单个界面和多层介质的波的散射和衰减问题。对这些问题进行了以实用为背景的理论分析和计算。在此基础上着重讨论了反射波振幅与入射角的关系在寻找油气中的应用问题。在这方面详细地阐述了薄互层中的储层的振幅与入射角的关系。在这里对 AVO(振幅与炮检距关系)技术的应用做了系统的讨论,特别是对 AVO 分析前的处理要求与处理方法进行了分析,以保障振幅的保真度。第 5 章是地球物理场的向地下延拓和成像问题的研究。在这一章里主要针对三维地震深度偏移成像和多波多分量地震记录的波场分离和转换波成像问题展开讨论。这些内容,除了有相当的新颖性外,并且很实用。在我国不少地区实用过,取得了良好的效果。在这一章中还介绍了电磁波场的电阻率偏移成像问题。文中叙述了电磁(EM)场偏移的物理意义,数学基础和地电分界面成像及电阻率成像。其中的方法原理与地震偏移成像有许多相似之处,成功地借鉴了地震偏移成像的计算方法和技术。第 6 章是谈波动方程参数反演方法问题。使用波动方程对波阻抗、速度、密度、弹性系数进行反演的方法甚多,但很实用的方法并不多。因此,在这方面本章不是全面地介绍各种反演方法,而是从中选取有相当实用价值和有代表性的内容进行详细阐述与讨论。我们分四个方面进行论述,即一维波阻抗反演中的特征线法和拟合-线性化法;弹性波多参数反演,利用二分量多炮检距记录可同时反演纵波速度、横波速度和密度等;多维反散射方法是采用 Bom 近似导出积分方程求出解析式;最后一部分是非线性拟合反演的介绍。第 7 章是有关层析成像的论述。这方面的论文不少,但由于地

球物理数据不完备,使求解的可靠性和分辨率都难以达到使用的目的。为了本书的完整性,还是对这部分内容做了概要的叙述。第8章是横波分裂与裂隙检测。在这一节中首先介绍了地震各向异性和横波分裂的理论与实验结果。在此基础上介绍用垂直地震剖面的三分量观测记录和地面地震资料进行裂缝检测的方法和实例。这一章的内容是有一定的新颖性的。第9章讨论人工神经网络的方法原理及其在油气预测中的应用。作者在此方向上做了不少实用性研究,取得了较好的成果。第10章是对地球物理中使用的一些非线性方法进行了理论结合实际的综合系统的阐述。这也是近年来进行实用性探索的一个总结。

从以上概略介绍的内容,大家可以看出,尽管本书的字数已达40多万,但仍然包括不了计算地球物理的全部内容。还有很多的内容并未涉及。希望有更多的同行进一步写出计算地球物理的其它内容。使计算地球物理这门新学科分支得到进一步的发展,以推动整个地球物理各学科的全面发展。本书只能起到抛砖引玉的作用。对书中引用的国内外专家、学者的研究成果,表示衷心的感谢。同时也感谢国家自然科学基金会,多年来对本书作者所进行的科学研究的一贯支持。因此,本书也可看做是国家自然科学基金会资助的科研成果的内容之一。

第1章 参考文献

1. 石油部地球物理勘探局计算中心,北京大学数力系等地震勘探系数字技术第一册(1973)第二册(1974)第三册(1977)科学出版社
2. Robinson, E. A., 1967 Multichannel time Series analysis with digital computer programs: San Francisco, Holden-Day. Inc. 298P.
3. Backus, G. and Gilbert, F., Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems, Geop. Journal of the Royal Astronomical society, 13, 247—276P.
4. Backus, G. and Gilbert, F., The resolving power of gross Earth data. Geop. Journal of the Royal Astronomical Society, 16:169—205P.
5. Backus, G. and Gilbert, F. Uniqueness in the inversion of inaccurate gross Earth data, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A266:123—192P.
6. Ware, J.A., and Aki, K., Continuous and discrete inverse scattering problems in a stratified elastic medium, Journal of the Acoustical Society of America 45:911—921P.
7. Marchenko, V. A., 1955, Sturm-Liouville operators and their applications (in Russian) Naukova Dumka, Kiev
8. Tikhonov, A. N., 1963, Resolution of ill-posed problems and the regularization method (in Russian) Dokl. Akad. Nauk SSSR, 151:504P.
9. Bleistein, N., Cohen, J.K., and Hagiu, F.G., 1987 Two-and-one-half dimensional Born inversion with an arbitrary reference. Geophysocs, Vol. 52 26—36
10. Bube, K.P., and Burridge, R., The one-dimension inverse problem of reflection seismology, SIAM Review, 25, 497—559, 1983
11. Romonov, V.G., Inverse problems of mathematical physics, VNU Science Press. Utrecht, 1987

第2章 复杂介质地震波场的数学模拟

2.1 概述

应用地球物理学中的一项重要任务就是寻找地下油气藏,油气藏一般都是存在于沉积盆地中有孔隙的构造之中,另外也有薄互层的岩性油气藏。我们的任务就是把油气藏的范围和位置准确地确定下来。实际上这是一项综合性的工作。一般情况下是首先对这一地区采集的地震资料进行各种处理,然后依据处理的结果以及这一地区的地质资料、测井资料(如果有的话)作出构造及岩性方面的解释。常常由于构造复杂,岩性及速度变化太大,给各种处理方法特别是成像处理带来很大的困难,以致难于作出确定的解释。这时,人们会在这些资料的基础上再加上经验对这一地区的构造及岩性先作出各种猜测,即形成一种模型,然后再依据地震波在介质中传播的理论,仿照各种数据采集方式,计算出数字模拟剖面(也叫做人工合成剖面),再与实际资料对比。尽管人工合成记录与实际记录不会完全一样,但是通过对比其相似性及差异性,地球物理解释人员可以获得许多对该地区构造、岩性、速度的再认识,然后修改模型,再模拟、再对比,直至获得满意的地质解释。这就是数字正演模拟的一个重要的应用。

另外,地震数据处理中要经常研究一些新的处理方法来不断改善速度分析及成像等问题,这种方法有许多而且不断地出现,如何对它们进行检验、评价和对比就成为一个重要的问题了。这时往往正演数字模拟成为解决这个问题的标准数据。之所以不用实际数据,是因为它还存在静校和速度未知等不确定因素,而数字正演数据就排除了这些不确定的因素,用各种处理方法处理的结果就决定了方法的优劣。这种思想愈来愈引起大家的注意。EAEG(欧洲地球物理学会)在1990年就曾专门开过这样的讨论会(用Marmousi模型),以后又与SEG(美国勘探地球物理学家协会)共同推出一些复杂地质模型的三维数字模拟,并向世界范围的地球物理工作者提供这些数据,以检验自己方法的效果。

数字正演模拟有时在设计某区域的采集方案时可以用来检验其采集方法及参数,以使在实际施工中取得更好的效果。

数字正演模拟还有一个重的作用就是形象地教学和科普学的作用。在讲解波的传播过程时,或向大众介绍地震勘探原理时,用数学公式来描述波的传播往往会使人感到抽象和枯燥,而用数学公式计算的数字正演模拟可以把地下构造在每个时刻振动的情形都记录下来,也是把地震波在构造中的传播过程全部记录下来,用这各个时刻的振动制作成动画或电影,这样就可使人们直观、形象地了解到地震波在地球内部传播的情形,这在实际试验中无论如何是无法了解的。这个动画的作用也不限于教育和科普,有时研究人员在碰到一些难于解释的同相轴时,通过地震波传播过程的描述,可以追踪其来源,所以这也是认识波的复杂关系的一个有效的方法。

正演模拟的方法有物理模拟及数值模拟,物理模拟是在实验室用一些特殊材料做成缩小了的地质模型来测量波的传播。应用地球物理中常见的一种方法是模拟地质体的波阻抗

界面,并且在水面测量波的传播,这非常接近实际采集数据的方法。由于地质模型由几公里缩小为厘米级,所以声波的频率也由几十赫提高到几十万赫,密度及速度也要按比例相应地改变。

数值模拟又分为波动方程的解析解及数值解(包括近似解)。对于一些简单的地质模型,例如均匀水平层状介质等,我们可以得到其精确解,对于复杂的地质模型解析解很难获得,这只有靠被动方程的数值解才能说明构造对波的传播的影响。在应用中即使简单模型也常常求其数值解,解析解只是作为对数值解的一种检验。数值方法一般采用有限差分法、有限元法或虚谱法等来求复杂介质条件下的波动方程数值解。

射线追踪也是常采用的一种正演模拟方法,射线追踪的理论基础是几何光学,它对地质模型的几何尺寸的要求是大大超过子波的波长。另外还有高斯射线束等方法。

下面对数值解法及射线追踪法给予较详细的讨论。

2.2 有限差分法正演数值模拟

对不同的边界条件和震源用有限差分法解声波方程或弹性波方程,我们可以得到各种地质模型的人工合成记录。

2.2.1 声波方程的人工合成记录

1. 声波方程

非均匀介质的声波方程可由对连续介质力学方程

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho c^2 \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.2.1)$$

的两端对时间 t 求导,并利用欧拉方程

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla P = 0 \quad (2.2.2)$$

而推得

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \rho c^2 \nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho} \nabla P \right] = 0 \quad (2.2.3)$$

其中 P 是声压, $\mathbf{V}$ 是质点运动速度向量, ρ 是密度, c 是波在介质中的传播速度, ρ 和 c 是在空间中变化的。如果引入震源, (2.2.3) 式可写为

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \rho c^2 \nabla \cdot \left[\frac{1}{\rho} \nabla P \right] = \delta(t) \delta(\mathbf{r}) \quad (2.2.4)$$

其中 $\delta(\cdot)$ 是 Dirac 函数, $\mathbf{r}$ 是位置向量。但在实际问题中,我们总是用一个有限宽频节的时间函数来代替 $\delta(t)$,这样才能真实地反映地震源传播的情形。

下面以二维为例进行较详细的讨论。对于三维的情形,可以依此推广,而没有本质上的困难。

2. 有限差分近似

下面讨论如何用有限差分法解方程(2.2.3)或(2.2.4)。

时间导数用二阶差商来近似时,可表示为