

人工神经网络 在测井-地震资料 联合反演中的应用研究

● 刘争平 著



科学出版社

www.sciencep.com

人工神经网络在测井—地震资料 联合反演中的应用研究

刘争平 著

国家自然科学基金 联合资助项目
大庆油田有限责任公司

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了地球物理勘探中多源数据联合反演的意义和重要性及阅读本书所需的人工神经网络概念和基础知识,阐述了人工神经网络在测井与地震资料处理应用中的理论、方法和实例,介绍了两种基于神经网络算法的井-震数据联合反演方法:①以地震数据为输入,测井参数为输出的多井多参数非线性反演的人工神经网络算法理论基础,实现策略及多个应用实例;②与传统迭代反演策略一致,但以神经网络模拟正演算子的迭代反演理论和算法,以及应用实例。叙述了基于经典的线性系统响应理论,在井资料约束下估计地震子波和一般线性系统函数的神经网络算法原理、应用实例等。

本书可作为高等院校应用地球物理、石油天然气地质勘查高年级大学生、研究生的参考书或教材,也可供石油天然气勘探与开发、人工智能、信息处理和应用研究方面的科研和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

人工神经网络在测井-地震资料联合反演中的应用研究/刘争平著.

—北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-010597-4

I. 人… II. 刘… III. ①人工神经元网络-应用-测井-数据处理-研究 ②人工神经元网络-应用-地震数据-数据处理-研究 IV. ①P631.8 ②P315.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 052487 号

责任编辑:谢洪源 汪福斯 / 责任校对:包志虹

责任印制:刘秀平 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年4月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2003年4月第一次印刷 印张:7 3/4 插页:2

印数:1—1 500 字数:172 000

定价:22.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

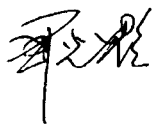
序

石油天然气是当代最重要的一次性自然资源。地球物理方法是石油天然气勘探和开发中不可替代的最重要的基本手段。鉴于石油天然气能源在国民经济建设中的重要战略地位和我国独特的陆相成因的薄互层油气藏研究的重要意义,以及在与欧美发达国家研究趋势基本同步条件下,国家自然科学基金委员会会同中国科学院、中国石油天然气总公司和大庆油田有限责任公司,不失时机地按照国家自然科学基金重大项目的评审、立项程序,设立并共同资助“陆相薄互层油储地球物理理论和方法研究”(简称“油储”)项目,以及后续的“九五”“油储”项目。跨部门、跨学科地组织起一支来自国内 20 多所知名大学和大型企业、科研机构,以地球物理学者为主,联合物理学、应用数学、地质学、计算机科学等多学科的专家、学者队伍,旨在对我国独特的陆相成因的薄互层油气藏的地球物理勘探和开发的理论方法、仪器设备和现场试验等方面开展基础研究,解决我国大庆、胜利等主力油田二次创业勘探和开发中面临的科学难题,以保持稳产高产,并形成具有我国特色的,具有自主知识产权的油气勘探和开发的地球物理技术系统,保障国家经济可持续发展和战略安全。

多源地球物理数据,主要是测井—地震数据的联合解释或反演是“油储”项目的资助研究内容之一,也是国内外公认的复杂油气藏勘探和开发中的最基本手段之一。本书将作者近 10 年来在“油储”项目和国内外其他相关项目资助下,独立研究的该方面应用基础成果系统化,书中深入探讨了现代人工智能信息处理技术在测井—地震数据的联合反演领域中系统应用的理论和方法,详细地介绍了应用这些理论和方法去解决传统的基于确定性算子的地球物理数据联合反演中面临的信息提取的高度非线性、多源信息耦合等困难的数据驱动的算法,并辅以丰富的理论模型和实际资料处理实例,验证这些理论的正确性和方法的有效性。

本书的出版对于丰富和完善勘探地球物理中的反演理论和方法,尤其是联合反演和非线性反演的理论和方法,有着积极的推进作用,也将促进勘探地球物理学与智能科学和信息科学间的相互渗透和交叉发展。

中国科学院院士



2002 年 8 月 20 日

前 言

石油天然气是近现代最重要的一次性的自然资源。地球物理方法是石油天然气勘探与开发中不可替代的重要基本手段。由于地下地质情况的复杂性,近年来,多源地球物理资料,主要是测井、地震数据的联合解释或反演已被公认为是复杂油气藏勘探和开发中的最基本手段之一。对其理论和方法的研究已成为近年来历届美国勘探地球物理学家协会(SEG)国际年会的主要学术专题之一。我国国家自然科学基金“八五”重大项目“油储”及其“九五”后继项目也都将其列为重要的相关研究内容,表明了这种多源地球物理资料联合反演理论和方法研究的重要理论意义和经济价值。另一方面,自20世纪末以来的人工智能信息处理技术(人工神经网络、演化算法等)尝试模拟人脑学习和自然演化的过程,自组织、自适应、自学习地去处理那些传统的方法难以解决的复杂信息提取问题。目前,这些智能信息处理技术在解决复杂非线性或缺乏确定性算子问题方面的有效性和优越性已在众多工程计算(包括地球物理)领域内得到了肯定。本书主要内容为应用现代的人工智能信息处理技术(人工神经网络)去解决多源地球物理资料信息提取面临的非线性和不同尺度多源信息耦合问题的理论和方法。一方面,这些理论和方法可有效地克服传统的确定性算子反演中面临的非线性和不同尺度多源资料匹配的困难,是地球物理学发展的重要趋势之一;另一方面,这些方法和理论本身也将促进人工智能信息处理技术的发展。

目前国内外已存在多种有关人工神经网络的应用专著或编著书,大多数以引论形式介绍人工神经网络的各种方法、原理,并以多领域的一些应用实例的介绍作为辅助理解和证明方法的实用性。这种横向的综合整理和编著学术思想是人类学习和传授已有知识的普遍形式之一。本书则选择了需要进行海量数据处理的多源地球物理数据反演这一特定的背景,系统地详细探讨和介绍了应用神经网络解决那些传统反演中面临的高度非线性、多源数据耦合的困难问题,和多源地球物理数据的联合反演的人工智能处理方法原理及算法实现,并辅以丰富的理论数据和处理实例,验证这些理论的正确性和方法的有效性。本书采用这种纵向的深入探讨神经网络在一特定领域系统应用的理论和方法的学术思想,其目的是双重的:其一是希望能将近年来作者独立研究的一些应用基础成果系统化,为应用地球物理反演提供新的方法理论;其二,希望通过这种较系统的具体研究的科学报告形式,展示科学研究获取知识的真

实过程,即由具体到普遍的过程。希望能对读者有所启迪。

本书共7章。第一章为绪论,综述了地球物理反演和测井-地震资料联合反演的背景、一般理论和面临的困难,以及人工神经网络的潜在应用背景;第二章介绍了人工神经网络的基本知识和原理;第三章概述了利用地球物理测井资料和地质资料反演储层参数和岩性识别的人工神经网络算法原理和实例;第四章介绍了在地震数据控制下的直接外推测井参数的测井-地震资料联合反演的人工神经网络算法的基本思路和实现策略,以合成模型及多个应用实例验证了其理论的可行性和应用的有效性;第五章则介绍了与传统基于模型的反演策略一致的,但以神经网络模拟正演算子的测井-地震资料迭代联合反演的算法的基本思路和应用;第六章基于线性时不变系统理论,讨论了人工神经网络系统的脉冲响应及其在井数据约束下估计地震子波方面的应用,后者同时也证实了本书设计的联合反演神经网络(外推和迭代反演)的I/O数据结构的正确性,表明该反演方法向下是与基于线性时不变褶积算子的反演方法兼容的;第七章首先介绍了在基于算子列一致收敛概念上提出的,并在本书反演算法中主要采用改进序列训练模式的神经网络学习方法,以有效克服学习中的过拟合效应和极大的提高学习速率。后半部分讨论和综述了在线学习的重要性和网络结构学习的主流方向。以上,除第一章、第二章和第七章的后半部分外,其余均为作者独立研究成果。

本书是在国家自然科学基金和大庆油田有限责任公司联合资助下完成的。作者在长期从事该方面的研究中以及在本书的写作过程中都得到中国科学院地球物理研究所研究员李幼铭先生的支持和鼓励,对此表示深切的感谢和敬意。衷心的感谢作者的博士导师,哈尔滨工业大学的刘家琦教授和副导师成都理工大学的贺振华教授对作者攻读博士学位期间在该方面探索的支持和鼓励。感谢美国勘探地球物理学家协会(SEG)前第一副主席,OKLAHOMA大学的J.P.Castanga教授及他领导的勘探与开发地球科学所对本书部分研究内容的支持和资助。感谢长庆石油局潘存焕高级工程师,与她的多次有关测井-地震联合反演的策略讨论,使作者受益匪浅。感谢成都理工大学物探系杜奉屏、肖崇礼副教授在测井资料处理和解释方面的指导和帮助。感谢成都理工大学计算机工程系孙淑霞教授、揭金良和黄地龙副教授在部分外推剖面彩色成图上的帮助。

谨以此书献给我的父母。

目 录

序

前言

第一章 绪论	(1)
1.1 地球物理勘探中的反演概述	(1)
1.1.1 地球物理勘探	(1)
1.1.2 反演理论的发展	(2)
1.1.3 地球物理测井反演	(6)
1.1.4 地震勘探反演	(7)
1.1.5 测井-地震资料联合反演	(8)
1.2 人工神经网络及其在勘探地球物理反演中的应用概述	(10)
1.2.1 人工神经网络	(10)
1.2.2 在地球物理勘探中的应用	(11)
1.3 本书的背景和主要成果	(12)
1.3.1 背景	(12)
1.3.2 主要成果	(13)
第二章 人工神经网络基础	(15)
2.1 生物神经网络	(15)
2.1.1 生物神经元	(15)
2.1.2 生物大脑的信息处理特点	(15)
2.2 人工神经网络	(16)
2.2.1 神经元数学模型	(16)
2.2.2 联接特征	(18)
2.2.3 工作规则和分类	(19)
2.3 误差反向传播神经网络(BP)	(21)
2.3.1 简要历史	(21)
2.3.2 计算原理	(21)
2.3.3 学习模式和逼近能力	(25)
第三章 BP神经网络在测井反演中的应用	(27)
3.1 引言	(27)
3.2 岩性识别	(27)
3.2.1 测井相-岩相分析	(27)
3.2.2 应用实例	(28)
3.3 储层参数反演	(33)

3.3.1 问题的提出	(33)
3.3.2 理论试验	(33)
3.3.3 应用实例	(34)
3.4 影响因素和结论	(37)
3.4.1 影响因素讨论	(37)
3.4.2 结论	(37)
第四章 地震数据控制下的测井参数外推	(38)
4.1 引言	(38)
4.2 基本思路和算法设计	(38)
4.2.1 基本思路	(38)
4.2.2 外推算法设计	(40)
4.3 合成模型研究	(42)
4.3.1 合成模型反演	(42)
4.3.2 敏感性和容错性试验	(44)
4.4 应用实例	(46)
4.4.1 陕甘宁中部气田上古河道砂体外推反演	(46)
4.4.2 大庆油田资料处理	(54)
4.5 结论与建议	(55)
第五章 井约束下的地震资料迭代反演	(57)
5.1 引言	(57)
5.2 BP 神经网络的迭代反演算法	(58)
5.3 井约束下的地震资料迭代反演方案	(59)
5.3.1 基本策略	(59)
5.3.2 正演网络训练	(59)
5.3.3 迭代反演	(60)
5.3.4 初始模型	(60)
5.4 理论模型试验和分析	(60)
5.4.1 正演模型学习	(61)
5.4.2 迭代反演	(63)
5.4.3 灵敏度和抗干扰分析	(64)
5.5 应用实例	(70)
5.5.1 数据概述和预处理	(70)
5.5.2 实际资料检验	(70)
5.6 结论与建议	(74)
第六章 BP 神经网络的脉冲响应和应用	(75)
6.1 引言	(75)
6.2 BP 神经网络的系统响应	(75)
6.2.1 地震反射系统	(75)

6.2.2 BP神经网络系统	(76)
6.3 子波提取和一般算子表示	(77)
6.3.1 子波提取	(77)
6.3.2 实例和时变子波	(80)
6.3.3 逆算子	(83)
6.4 不适定学习问题中的应用	(86)
6.4.1 不适定学习问题	(86)
6.4.2 适定问题的学习	(86)
6.4.3 不适定问题的学习	(88)
6.5 结论与建议	(92)
第七章 其他的有关算法优化和讨论	(93)
7.1 引言	(93)
7.2 改进的序列处理模式	(93)
7.2.1 问题的提出	(93)
7.2.2 改进的序列处理	(93)
7.2.3 几个噪声不适定学习问题的应用	(95)
7.2.4 学习时间比较	(96)
7.3 在线学习简论和尝试	(98)
7.3.1 问题的提出	(98)
7.3.2 改进序列处理的在线学习尝试	(99)
7.4 BP神经网络的结构学习	(102)
7.4.1 问题的提出	(102)
7.4.2 网络收缩技术	(102)
7.4.3 网络成长技术	(104)
7.4.4 讨论	(105)
7.5 结论与建议	(106)
总结论	(107)
参考文献	(108)
图版	

第一章 绪 论

1.1 地球物理勘探中的反演概述

1.1.1 地球物理勘探

地球物理勘探是人们为了认识和探索地球深部的结构和矿产资源而发展起来的一门物理学的应用学科。它通过观察或测量地下岩石的各种物理参数来推断和解释地下岩石的结构和岩性等特征,最终达到勘探地下矿产资源或解决其他地下探测的目的。尽管在 17 世纪,就曾有人想到利用罗盘来探测磁体,但直到上世纪初,人们通常是根据地表的可见标志来寻找地下的矿产资源。当时的矿产勘探具有极大的盲目性和偶然性。1912 年,巴黎矿业学院教授康拉德 Schlumberger^[1],以对地球科学的强烈兴趣和为了改进古老的勘探方法,在法国的诺曼底半岛上进行了第一次地球物理数据测量——人工电场测量,并得出了周密的论证:对人工电场的测量,即使不能直接探测地下矿体,也能为探矿工作提供十分有用的数据。自那以后,由于寻找矿产资源的迫切需要和科学技术的进步,众多的地球物理勘探方法,如重力测量、磁场测量、电学性质测量、放射性测量和弹性波测量等方法,很快地出现,并迅速发展,日臻完善。特别是在 20 世纪 60 年代后期,由于全世界寻找油气资源的强大经济动力,地球物理勘探方法和解释技术,尤其是地震勘探(岩石的弹性测量)和地球物理测井(井中地球物理参数测量),得到了巨大的发展。这两种地球物理勘探方法,已成为地质学家获取深部地层信息、预测油气的最有效和最主要的手段之一。它们甚至已成为随油气勘探而发展起来的现代地质学的某些分支,如地震地层学和层序地层学等学科的支撑基底。在应用于勘探油气的地球物理方法中,这两种方法所占投资总和在 95% 以上,这一事实也进一步显示了它们在能源勘探中的绝对优势地位^{[2][10]}。

地球物理测井,顾名思义,就是井孔内的地球物理测量。目前,井孔内的地球物理测量方法多达 10 余种,如测量井壁周围岩石的电性、放射性、弹性、重力、磁性等物理性质,几乎概括了地面地球物理方法可以测量的全部参数。地球物理测井以众多的测量参数,为地质学家提供沿井身连续的丰富的岩性、矿物成分、地层结构、孔隙和孔隙流体性质等信息。它已被广泛用于油气勘探与开发中,并发挥出越来越大的作用^{[14][18]}。

地震勘探方法是以岩石的弹性物理性质为基础的,作业基本方法是用人工震源激发在大地中传播的地震波,同时应用观测仪器,沿布置的测线,测量各观测点处,由于地震波在大地介质中传播而引起的振动响应;再通过处理和解释这些振动响应,来获得深部地层构造、岩性和其他地层参数的信息,达到勘探油气资源的目的。地震方法可获得深达数公里的地层信息剖面记录,这也是它在油气勘探中得到广泛应用的重要原因之一^[2]。

1.1.2 反演理论的发展

1.1.2.1 反演的一般提法

“反演”这一术语是与“正演”相对应的。正演的定义是,根据某些一般性原理和模型来预测具体的模型参数所激励的结果数据^[4]。而反演,就是处理相反的问题,即从观测到的数据及某些一般性原理和模型出发来估计模型参数。它们可用以下过程来描述:

正演:模型参数 $\rightarrow$ 模型 $\rightarrow$ 观测数据,

反演:观测数据 $\rightarrow$ 模型 $\rightarrow$ 模型参数估计值。

一般来说,由于正演模型是确定的,模型参数是完备的和无噪的,因此正演问题的解都是惟一的。而在反演问题中,实际观测数据总是含有噪声,并且在多数情况下,难于观测到全部的信息。因此,造成了反演问题通常具多解性。反问题的这种多解性可用图1-1来说明:

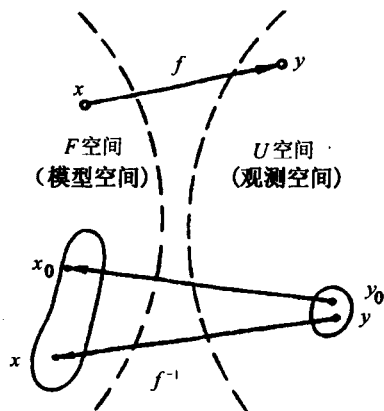


图 1-1 反演问题的不适定性^[9]

Fig. 1-1 The ill-posed property of inversion

来说明:从映射算子的观点来看,模型参数 x 是 F 空间的元素,观测数据 y 是 U 空间的元素(它们都可视为无穷维空间),算子 f 为正演模型,实现由模型空间 F 到观测数据空间 U 的映射是一一对应的,即这时 F 空间中的 x 点与 U 空间的 y 点是惟一对应的。若用 f^{-1} 表示由 U 空间到 F 空间的逆算子,由于在观测数据 y_0 中含有噪声,它在 U 空间实际上有一个变化范围(或邻域)。利用逆算子将这一邻域映射回 F 空间,则含有噪声的 y 所对应的模型参数 x 与不含噪声的 y_0 所对应的真实模型参数 x_0 可以有很大的差别。即反问题的解是不惟一的,或不稳定的,统称为反问题的不适定性。

一般来说,反问题的不适定性包括解的存在性,惟一性和稳定性。对于地球物理勘探反问题,实际遇到的是解的惟一性和稳定性这两个问题^[3]。

反演理论是由具有各种各样背景和目的的科学家和数学家发展起来的,有着强烈的应用背景。因此在不同学科或应用领域中,反演问题的称法也不同。如在统计学中被称为回归分析,在电气工程中,称为系统辨识或参数估计。各种地球物理勘探方法都是通过对观测到的地球物理场,如重力场、磁场、大地电磁场和弹性波场等的数据分析,或资料解释,来达到推测地球物理内部的结构和地层参数,实现勘探矿产的目的。因此,任何一种地球物理资料的解释最终都可归结为求解反演问题。

在地球物理勘探反演中,由于观测信息的有限和噪声干扰,以及数学建模等困难,直接建立由观测数据映射模型参数的逆算子是极其困难的。而正演模型(算子),则在某些假定条件下是相对容易建立的。因此通常的反演策略是,首先根据经验选择一组初始的模型参数(初始模型),将其代入正演模型中计算理论模型响应数据。将理论响应数据与实际观测数据比较,若差异很大,就修改模型参数,再次计算比较理论数据与实际数据的误差,如此反复,直到该误差小于容许的标准,这时的模型参数即为期望反演的模型参数。

这种反演策略由两部分构成,正演计算部分和反演部分。正演模型依据不同的地球

物理问题和参数而不同,而由计算目标函数和修改模型参数组成的反演部分,则具有许多理论上的共同性。因此,本书首先回顾了一般反演理论的发展,将正演模型的介绍放在测井和地震反演方法和联合反演概述中。

1.1.2.2 地球物理勘探领域中的几种主要的反演理论

由于观测数据的粗糙和计算技术的限制,早期的地球物理数据解释方法都是定性或半定量的,但这一阶段提出的基于理论计算曲线与观测曲线相拟合的选择法,如直流电测深及大地电磁测深解释中的扇形量板法等,已具有现代反演理论的萌芽,并且这种方法的基本原理至今仍在反演中应用^[8]。

自 20 世纪 50 年代末和 70 年代初以来,由于野外数据采集能力的极大改进和计算机技术的迅速发展,促使反演理论和计算方法有了重大进展。Backus 和 Gilbert (1967, 1968, 1970) 发表了一系列具有重要意义文章,这些文章实际上奠定了近代地球物理反演理论的基础,他们的反演理论在文献中常称为 Backus-Gilbert (或 B-G) 理论^{[8][19][20]}。在这以后, Wiggins (1972, 1976), Aki (1980), Drapier 和 Smith (1981), Oldenburg (1983), Tarantola (1982, 1984), Lines 和 Treitel (1984), Cooke 和 Schneider (1983) 等许多学者进一步发展和完善了地球物理勘探反演理论^[21~28]。

为与本书后面所发展的方法对比,作者在以下依次对在地球物理勘探中几种比较成熟的反演理论,主要是最优化、广义逆和最大似然法等进行简述。

1. 最优化方法

最优化方法可定义为确定某种数学定义问题的最好解^[5]。它的基本思想是构造一个评价解的目标函数 $F(x)$, 其特点是对应于 $F(x)$ 取极小的解 x 即为期望的解 (或解估计)^[6~7]。一般形式可写为:

$$\min_{x \in U} F(x), \quad (1-1)$$

式中 $F: U \subset R^n \rightarrow R^1$ 为实值函数。在最优化方法中,求解目标函数 $F(x)$ 的极小解的方法可分为直接计算目标函数值,计算目标函数的一阶和二阶导数三类。

统计学家 Drapier 和 Smith (1981) 首先讨论了线性和非线性问题的最优化算法中的最小二乘反演 (LSI)。地球物理学家 Lines 和 Treitel (1984) 通俗地介绍和总结了 Drapier 和 Smith 的最小二乘反演方法,并将该方法应用于法向入射地震记录反褶积和重力数据反演地下楔形体。该方法的基本策略是建立如下的平方和形式目标函数:

$$F(x) = \sum_i^n (y_i - y_i^0(x))^2, \quad (1-2)$$

式中 $\{y_i\}_n$ 为 n 个观测数据, $\{y_i^0(x)\}_n$ 为 n 个模型响应数据。 $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ 为 p 个模型的参数。显然,上式中 $F(x)$ 为观测值与模型响应的误差平方和,我们期望的最好解应该使 $F(x)$ 取最小值。将模型函数用一阶 Taylor 展开式表示:

$$y^0(x_0 + \Delta x) = y^0 + \sum_{j=1}^p \frac{\partial y^0(x)}{\partial x_j} \Big|_{x=x_0} \Delta x, \quad (1-3)$$

将其代入 (1-2) 式,并对 (1-2) 式求极小

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} = 0. \quad (1-4)$$

对于非线性问题,采用线性近似,略去 Δx 的二次及二次以上高阶项计算整理得到:

$$Z^T Z \Delta x = Z^T \Delta y, \quad (1-5)$$

式中 $\Delta x = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)^T$ 为参数修改量, $\Delta y = (y_1 - y_1^0, y_2 - y_2^0, \dots, y_n - y_n^0)^T$ 为误差矢量。 Z 是 $n \times p$ 阶偏导数矩阵,称为 Jacobi 矩阵,其元素为:

$$z_{ij} = \left. \frac{\partial y_i}{\partial x_j} \right|_{x=x_0} \circ \quad (1-6)$$

由(1-5)式可以求出模型参数修改量

$$\Delta x = (Z^T Z)^{-1} Z^T \Delta y, \quad (1-7)$$

对于实际地球物理问题,当已知正演模型和观测数据后,可选一初始模型参数 x_0 ,计算出 Jacobi 矩阵 Z 及右端误差项 Δy ,然后求解方程组(1-6)式和(1-7)式,得到 Δx ,取

$$x_1 = x_0 + \Delta x \quad (1-8)$$

作为第一次近似,然后以 x_1 作为新的初值,再据前述步骤求解,得到 $x_2, x_3, \dots$,直到设计的目标函数差值 $F(x_n) - F(x_{n-1})$ 达到事先设计的精度为止。这就是最小二乘或 Gauss-Newton 法的反演求解过程。

显然该方法要求(1-7)式中 $Z^T Z$ 矩阵是非奇异的。但由于地球物理反问题一般都是不适定的,导致 $Z^T Z$ 通常是奇异的。通过适当加大矩阵 $Z^T Z$ 的主对角元素,可有效改善奇异性。这时(1-5)式改写为

$$(Z^T Z + \beta^2 I) \Delta x = Z^T \Delta y, \quad (1-9)$$

式中 I 为单位方阵, β 称为阻尼因子。该方法称为阻尼最小二乘法或 Maquardt 方法。基于最小二乘法的最优化方法的其他方法可参考文献[5~7]等。

2. 广义逆法

广义逆法理论是线性代数的一个分支,它讨论一般矩阵求逆的问题^[4]。由前面讨论可知,对于地球物理反问题,通常作线性化后,可归结为以下的一般线性方程组求解:

$$Ax = y, \quad (1-10)$$

或写为

$$x = A^{-1}y, \quad (1-11)$$

即可通过矩阵求逆的方法来求解反问题的解。但在地球物理反问题中,在许多情况下,矩阵 A 通常是奇异的,一般也不是方阵,故常称 A^{-1} 为广义逆,记为 A^{-g} ,它的计算可采用奇异分解(SVD)等方法。由前讨论可知,对于最小二乘法,其广义逆

$$A^{-g} = (Z^T Z)^{-1} Z^T. \quad (1-12)$$

对于 Maquardt 方法,广义逆为

$$A^{-g} = (Z^T Z + \beta^2 I)^{-1} Z^T. \quad (1-13)$$

由于 Jacobi 矩阵 Z 是模型的偏导数矩阵,与模型参数 x 无关,可知广义逆 A^{-g} 与观测数据和模型参数都无关。因此,采用广义逆法求解,可使人们把注意力集中在研究映射矩阵广义逆 A^{-g} 上,而不是在模型参数 x 或观测数据 y 上。使求解过程更加标准化。也可进一步认识到 A^{-g} 代表的物理含义^[20]。

Cooke 和 Schneider(1983)首先将广义逆法理论应用到地球物理勘探反演中,采用广义线性反演方法成功地进行了地震剖面波阻抗反演。

3. 最大似然法

该方法是从参数分布的统计估计观点来求解反问题的,由 Rietch(1977)引入地球物理反问题中的^{[4][30]}。

由前可知,观测数据 y 和模型参数 x 的关系可表示为:

$$Ax = y,$$

一般认为地球物理观测数据 y 是符合多变量高斯分布的随机变量,数据不相关,而把 Ax 看作随机变量 y 的数学期望。对于随机变量 y_i ,其概率密度

$$P(y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-(y_i - \sum_{j=1}^p (a_{ij}x_j))^2 / (2\sigma^2)\right], \quad (1-14)$$

则 n 维随机矢量 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 的联合分布函数(或似然函数)为:

$$\begin{aligned} L = \prod_{i=1}^n P(y_i) &= \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\right)^n \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_j a_{ij}x_j)^2\right] \\ &= \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\right)^n \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} (y - Ax)^T (y - Ax)\right], \end{aligned} \quad (1-15)$$

两边取对数

$$\ln L = -n \ln \sigma - n \ln \sqrt{2\pi} - \frac{1}{2\sigma^2} (y - Ax)^T (y - Ax). \quad (1-16)$$

当观测数据的概率取最大值,即似然函数取最大值时,可认为得到的模型参数 x 的估计值是最佳的。不难看出,(1-15)式取极大值时,相当于

$$(y - Ax)^T (y - Ax)$$

取极小。所以模型参数的最大似然估计等价于最小二乘解的估计。再由前可知由最小二乘,广义逆和最大似然估计这三种不同观点出发得出的参数估计解是一致的。

4. 其他方法

以上的算法都是以线性近似来逼近地球物理反问题这一复杂的非线性问题。常采用贪婪的梯度下降算法,因此搜索到的解往往是局部极小解,为克服这一困难,20 世纪 80 年代末,又出现了一些全局寻优的反演算法,如模拟退火(或蒙特卡洛)算法,混沌算法和遗传算法等,见文献[38~41][151~153]。

1.1.2.3 反演的约束考虑

地球物理反问题的非惟一性,或不适定性是由于信息不足或噪声存在引起的。因此,加入必要的模型参数的先验信息作为补充,以限制或约束允许解类,可极大地改善反演的多解性或不适定性。一般来说,具体反演问题的约束条件或先验信息是不同的,但在地球物理反问题中,存在着几种一般的约束关系:

(1) 区间约束。根据地球物理知识给出模型参数——即反演解的取值区间,如研究区内的岩石密度和速度的取值范围等。

(2) 统计特性约束。要求模型参数的统计特性应满足某种分布,如高斯分布等。

(3) 函数关系约束。要求 $F(x) = b$ 等约束。

(4) 正则化约束。前苏联学者数学物理学家吉洪若夫(TNHOHOB)等人系统的研究了反演问题的不适定性,指出对于不适定问题寻找精确解是无意义的,而应只求在稳定意

义下最优的解。在不适应问题的允许解类上加以适当的限制,使不适应问题具有对信息不足或噪声存在的扰动数据稳定的解的约束,即为正则化约束。如在地球物理反演中, $\|x\|$ 或解的光滑 $\|x'\|$ 的限制^[3]。

约束条件在地球物理反演中起着非常重要的作用。反演问题的成败在很大程度上取决于是否存在足够的约束条件,线性规划就是专门研究在约束条件下的最优化问题的一反演理论分支。Oldenburg(1983)最先将线性规划方法应用于地球物理反演问题,得到令人满意的具有极小结构波阻抗反演结果,并在 1986 年获得了专利。

1.1.3 地球物理测井反演

在油、气藏的勘探与开发中,地质学家主要期望从地球物理测井资料中获得深部地层的沿井身连续的岩石性质,油气储层深度及其表征储集层特征的泥质含量 SH , 孔隙度 ϕ , 孔隙含水饱和度 S_w 和渗透率 κ 等参数。早期的资料解释方法主要有两类:

(1) 基于经验公式的直接计算方法。如用威利(Wyllie)时间平均公式由声波测井资料计算地层孔隙度 ϕ :

$$\phi = (\Delta t - \Delta t_{ma}) / (\Delta t - \Delta t_f) \quad (1-17)$$

式中, $\Delta t, \Delta t_{ma}, \Delta t_f$ 分别为声波测井, 岩石骨架和孔隙流体的声波时差值。

(2) 基于统计原理的交会图法, 如中子-声波交会图、 Z 值图等。

X_{ma}^k	V_n
• • • • •	• • • • •
X_{ma2}^k	V_2
X_{ma1}^k	V_1
X_f^k	ϕ

图 1-2 等效体积模型^[18]

Fig. 1-2 Equivalent volume model

V_i ——第 i 种矿物所占百分体积, X_{mai}^k ——第 i 种矿物的岩石骨架测井响应, ϕ ——岩石孔隙度, V_{sh} ——岩石泥质含量百分体积, X_f^k ——泥浆滤液测井响应, X_{sh}^k ——泥质测井响应。上标 k 为第 k 种

测井响应

近年来,随着数据采集,计算技术和反演理论的发展, Schlumberger 测井公司在 20 世纪 80 年代推出了以最优化反演理论为基础的 GLOBAL 地层评价程序。这一测井资料解释方法已逐步被大多数测井公司、软件公司和测井分析家接受,并相继推出各自的最优化地层评价软件。

在最优化测井反演中,地层的地质地球物理模型——正演模型基本上是建立在经典的体积模型概念上:即所谓“等效地层体积模型”,就是按储集层的组成,把地层体积分成对应的几部分,并把地球物理测井响应看成是这几部分贡献的加权总和^{[14][18]}。

图 1-2 就是对应上述概念多矿物含孔隙地层的单位等效体积模型。按体积模型概念,测井响应方程,即正演模型可写为:

$$X^k = X_f^k \phi + X_{sh}^k V_{sh} + \sum_{i=1}^n X_{mai}^k V_i, \quad (k=1, 2, \dots, p) \quad (1-18)$$

式中 k 代表第 k 种测井响应。如对密度测井, X 代表 ρ_b , 则响应方程为

$$\rho_b = \rho_f \phi + \rho_{sh} V_{sh} + \sum_{i=1}^n \rho_{mai} V_i, \quad (1-19)$$

对于 p 种测井测量,可以有 p 个这样的响应方程。建立实际测井响应与这些理论测井响

应之间的目标函数,就可用最优化方法反演模型参数($\phi, V_{sh}, V_1, V_2, \dots, V_n$)了。

最优化测井反演可以提供沿井身连续的地层孔隙度 ϕ , 泥质含量 sh , 含水饱和度 S_w 以及地层的矿物百分体积 V_i 。并且具有很高的纵向分辨率,一般勘探井中,至少可分辨出大于或等于 0.5m 厚的地层。这些信息对油气勘探具有极大的意义,这也解释了为什么在油气勘探中,每一口探井都必须要求进行地球物理测井的原因。

以上测井反演中也应注意到两点:

(1) 反演应用的响应方程——正演模型是线性的,是基于地层均质结构的。对于非均质地层,如裂缝型地层,这种刻划是不合理的。另一方面,对于某些储层参数,如渗透率,尤其是缝隙渗透率,是不能用体积模型或其他确定性算子来描述的。即这些参数缺乏正演算子,对于以上这些情况,目前的最优化反演往往难于获得理想的解,甚至是无能为力的。

(2) 地球物理测井及反演虽然可以提供沿井身连续的具有纵向高分辨(至少为 0.5m)的地层各种信息。但这些一般只是井壁附近几十厘米范围内的信息。由面或区域上的角度来看,仅是一个点的信息。从目前进入寻找地层圈闭型油气藏阶段的要求来看,是远远不能满足实际需要的。

1.1.4 地震勘探反演

采用地震法估算地层参数的历史可以追溯到有可能记录天然地震的准确波至时间和确定其震中时间及位置的年代。自那时以来,地震学家都一直在利用地震波研究地球的物理性质。但在 20 世纪 70 年代以前,勘探主要集中于寻找构造圈闭型油气藏,地震资料主要用于提取两种信息:零炮检距的双程反射旅行时和反射层的层速度。但在确定层速度的研究中已用到了现代反演的一些基本观点。70 年代以后,由于寻找隐蔽性或地层圈闭型油气藏的迫切需要,以及计算机技术迅速发展的推动,从地震资料中估算速度、密度、孔隙度等地层参数,即地震反演的研究和应用,开始迅速发展^{[15][16]}。

地震反演中,根据其采用的正演模型,又可分为褶积反演和波动方程反演两大类。在最基本的褶积模型中,反射地震记录 $S(t)$ 被认为是地层反射系数 $R(t)$ 和地震子波 $W(t)$ 的褶积:

$$S(t) = R(t) * W(t) + n(t), \quad (1-20)$$

式中 $n(t)$ 为随机噪声^[11]。褶积模型是在弹性水平地层和法线入射并忽略多次反射等假定下建立的(Perterson et al., 1953)。前述的 Lines 和 Treitel(1984)应用阻尼最小二乘法反演地层波阻抗, Cooke 和 Schneider(1983)引入的广义逆, Oldenburg 等(1983)的线性规划理论等反演方法在地震反演中的应用,都是基于褶积模型的。Neidell(1986)指出“褶积模型过去一直是地震资料处理和解释的基础。现在,尽管有限制因素,有警告……,然而对于实际上的处理和解释来说它仍然是基本的。虽然有了更为普遍的波动方程公式,它无疑仍将是我們许多思想活动的中心”^[15]。

基于波动方程正演模型的反演策略是由 Tarantola(1984)^[27]年引入到地震反演中的。地震波产生的压力场 $P(r, t)$ 可由波动方程惟一确定:

$$\left[\frac{1}{k(r)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \operatorname{div} \left(\frac{1}{\rho(r)} \operatorname{grad} \right) \right] P(r, t) = S(r, t), \quad (1-21)$$

式中 $k(r)$ 为体积模量, $\rho(r)$ 为体积密度, $S(r, t)$ 为震源函数。用 k, ρ, S 分别表示上式中对应的变量, 方程(1-21)可用简洁的算子关系表示为

$$P = f(k, \rho, S), \quad (1-22)$$

反演的模型矢量则为

$$m^T = (k, \rho, S)。 \quad (1-23)$$

由于波动方程可模拟由震源产生的整个波场, 从波动学的角度来解释地震记录, 更符合实际情况。加之近年来由于可得到在计算机上快速实现差分或有限元等数值方法求解波动方程的正演模拟手段, 基于波动方程的反演很快成为热门研究课题。我国学者刘家琦等人(1994)^[35]将一维波动方程反演技术应用到陆相薄互层沉积环境的地震剖面反演中, 获得了良好的波阻抗剖面反演结果。

还应指出的是, 在地震反演中, 由地震资料中有效的提取地层参数信息的能力还取决于正确的估计地震子波或震源函数。过去, 当地震勘探的主要目标是大的地层构造时, 几乎任何老的子波, 只要能使解释者对探区内地层或假想地层作波形特征对比, 从而制作构造等时图就可以满足。随着勘探目标转向地层圈闭, 地震子波的作用具有新的、惊人的重要性。无论是基于褶积或波动方程算子的反演, 都要求子波是事先知道的。然而, 由于地震子波与炮脉冲耦合, 传播效应, 检波器及耦合, 记录系统, 虚反射效应, 表层和处理滤波等众多因素有关, 子波或震源函数提取与反演精细地层参数具有同等的难度。实际上, 子波估算是和地震反演并行的重要研究方向。

地震反演的重要性在于, 它可提供勘探区内深部地层参数剖面, 可很好的追踪地层的横向演变特征, 这对于确定地层圈闭无疑是很基本的。但也存在下述问题, 使反演成为不适定的。

(1) 地震资料是带限的。由接收和大地非弹性传播效应影响, 地震资料一般都缺少低频和高频分量, 常见频带仅为 10~50Hz。低频的缺失, 主要导致反演多解性。高频的缺失, 则使其纵向分辨率很低, 通常最小分辨层都在 20~30m 以上。这使得反演结果对于精细的地层描述显得无能为力的。Oldenberg 等人(1984)^[25]曾应用加正则化条件: $\min(\sum |r_n|)$ 或 $\min(\sum |r_n^2|)$, 即假设地层具有最小结构或地震道为稀疏尖脉冲序列来克服地震资料带限性质带来的反演不稳定性, 但这样做实际上也降低了反演的纵向分辨率。

(2) 正演模型都是基于弹性介质的, 即无论是褶积还是波动方程算子都未考虑地层的吸收效应。并且一般是线性的, 或由于计算的复杂性, 在实际计算中, 采用线性或简单非线性逼近^[38, 39]。

1.1.5 测井 - 地震资料联合反演

多种地球物理资料的综合应用, 是克服地球物理资料解释或反演的多解性的基本路径, 是地球物理学家的共识之一^{[12][42~44]}。

早在 20 世纪 50 年代, 速度测井方法一诞生, 其资料就被用于改进地震记录及其处理技术, 使得到的层速度信息的质量远比从前能想像得到的高得多。但早期测井与地震资料的综合应用主要是利用测井声速, 通过褶积模型, 在已知子波条件下, 合成理论记录, 与井旁道记录对比, 以查明反射发生的位置(层组或岩性), 确定波形同相轴产生重大横向变