

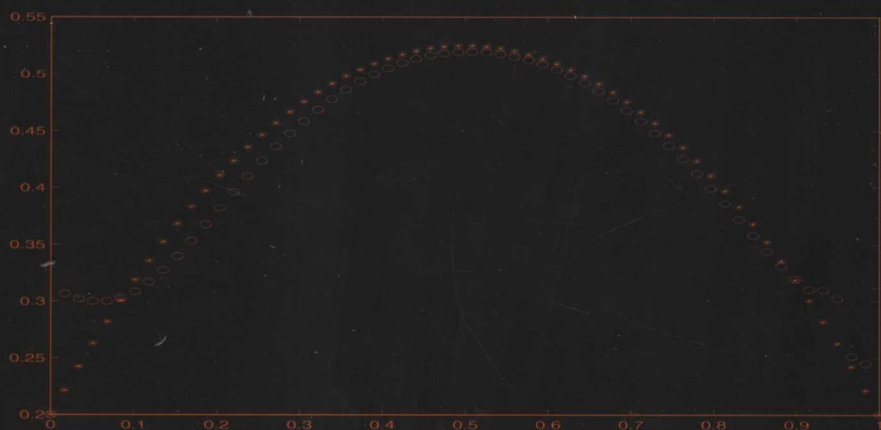


当代科学前沿论丛

NEW FRONTIERS OF SCIENCES

反演问题的计算方法及其应用

Computational Methods for Inverse Problems and Their Applications



王彦飞 著



高等教育出版社 HIGHER EDUCATION PRESS

当代科学前沿论丛

反演问题的计算方法及其应用

王彦飞 著

高等教育出版社

内容简介

本书详细介绍了求解数学物理反问题的数值计算方法以及在相关的各个学科的应用。这些方法包括正则化方法、最优化计算方法、统计的方法、支撑向量机以及其他的数值代数方法等等。本书既研究线性反问题,又研究非线性反问题,并介绍了工程、物理、医学、金融、遥感、模式识别、生命科学、大气科学与经济应用背景的反问题。在附录中还给出了示范性的MATLAB语言源程序。全书共分六个部分。第一部分介绍基本概念和事例;第二和第三部分分别研究线性反问题的计算方法和典型应用;第四和第五部分分别研究非线性反问题的计算方法和典型应用;第六部分简要介绍了反问题的研究方法和应用的最新进展。

本书适合于数学物理专业的科研人员、大学教师使用,也可以作为相关专业研究生和高年级大学生的教材,亦可供从事科学和工程领域中反问题(比如说信号/图像处理、定量遥感、地质与地球物理、高能物理、生物医学、应用光学、金融科学、大气科学、生命科学等)数值计算方法研究的科研人员、高等院校的教师、研究生和高年级的大学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

反问题的计算方法及其应用 / 王彦飞著. —北京:
高等教育出版社, 2007.1

ISBN 7-04-018945-3

I.反... II.王... III.数学物理方法 - 研究
IV.O411.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 139595 号

策划编辑 张小萍 责任编辑 郭伟 封面设计 刘晓翔 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 涿州市星河印刷有限公司

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 25
字 数 580 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2007 年 1 月第 1 版
印 次 2007 年 1 月第 1 次印刷
定 价 59.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 18945-00

《当代科学前沿论丛》专家委员会

(按姓氏笔画为序)

(国内部分)

王 夔	冯 端	师昌绪	曲钦岳	朱清时
孙 枢	李三立	李大潜	李国杰	杨芙清
吴建屏	邹承鲁	张尧庭	陈 竺	陈佳洱
陈希孺	陈宜瑜	周秀骥	姜伯驹	袁亚湘
钱 易	徐光宪	徐端夫	徐冠华	翟中和
戴立信	戴汝为			

(海外部分)

王中林	文小刚	邓兴旺	田 刚	丛京生
刘 钧	汤 超	许 田	危 岩	严晓海
李 凯	李 明	邱子强	余振苏	范剑青
周午纵	郑元芳	宫 鹏	俞陆平	袁钧璁
徐希平	鄂维南	程正迪		

序 言

最近几十年, 数学物理反演问题的学科发展十分迅速. 该学科的发展, 在很大程度上受其他学科与众多工程技术领域的应用中所产生的迫切需求所驱动. 数学物理反演问题涉及的不单纯是数学和物理中的反问题. 由于科学技术的发展和研究范围的扩大, 地学、图像图形学、遥感、石油勘探、医学、金融、经济乃至生命科学都提出了由“结果”(观测) 探求“原因”(待反演参数) 的反演问题. 因而, 反演问题具有涉及面广, 内容丰富, 跨行业, 跨学科等特点. 从反演问题的研究方法上看, 它更多地用到了计算数学、应用数学和统计学的知识, 可以说数学理论和方法是反演问题研究的基础. 在科学发展史上, 反演问题代表了最活跃和令人振奋的交叉学科之一.

王彦飞博士是我国非常优秀的青年科研工作者, 他是我国成功应用最优化计算方法和正则化方法研究数学物理反演问题的工作者之一. 《反演问题的计算方法及其应用》一书, 是王彦飞博士撰写的一部系统性专著. 作者系统地阐述了线性反演问题和非线性反演问题的理论与方法, 并给出了实际的应用实例. 我非常欣喜地看到有关反演问题的这么多理论性和方法性的成果. 王彦飞博士把最优化研究领域的很多优秀的方法用来求解线性和非线性反演问题, 取得了良好的结果. 他提出了求解数字图像恢复问题的信赖域算法和信号处理超分辨率问题的奇异值分解算法, 并证明了它们的正则性; 他研究了正则化方法及其各种扩展; 他把图像纹理特征提取看成是反演问题, 并最先把正则化方法应用于纹理特征提取这一学科研究上, 这是极有创见的; 特别是, 他证明了求解非线性反演问题的信赖域算法也是一种正则化方法, 因而为科技工作者们放心地应用这一方法于反演问题提供了理论支持. 在本书中, 王彦飞博士还系统地介绍了一些具有实际应用背景的反演问题的计算方法并介绍了新近发展起来的支撑向量机方法 (SVM)、Monte Carlo 型方法 (模拟退火方法和遗传算法)、Bayes 网络方法和数据同化方法等内容. 这些都对反演问题理论和方法的研究是一种充实.

我是学电子工程出身, 现在又研究遥感. 我深深地体会到数理不分家这个道理. 当今的遥感越来越走向量化研究. 而定量遥感的本质是反演. 在遥感量化过程的研究当中, 一个重要的研究课题就是如何能够根据已知的物理模型 (有时还是经验或半经验的) 和残缺的信息来推算我们所关心的参数. 为了成功反演, 设计合适的反演算法是关键步骤之一. 王彦飞博士在本书中对反演问题的求解方法作了详细的论述, 其中, 许多方法和思想都可以应用到遥感反演问题中去. 总的来说, 王彦飞博士的这部著作对于数学物理反问题研究领域, 对于遥感科学量化基础理论

的研究和发展、对于遥感及其他相关学科的应用和发展,都具有极高的参考价值,对广大读者也必将是一笔宝贵的财富。

最后,在本书即将付梓之际,谨向王彦飞博士表示衷心的祝贺!愿他在知识的海洋里乘风破浪,继续为我们国家的数学物理反演问题研究和遥感定量化反演研究做出更大的成绩。

中国科学院院士
北京师范大学遥感与 GIS 研究中心主任
中国科学院遥感所所长
波士顿大学研究教授
李小文
2005 年 2 月 23 日

前言

自 20 世纪 60 年代以来,在地球物理、大气科学、生命科学、金融科学、遥感技术、高能物理、工业控制、模式识别以及经济决策等众多的科学技术领域中,都提出了“由效果、表现(输出)反求原因、原像(输入)”的反问题,统称为“数学物理反问题”。由于该类问题有着广泛的应用背景,近 30 年来在国际上日益引起众多科学家的兴趣和重视。反问题的典型特性是其不适定性,即: (1) 给定的数据可能不属于数学模型建立的问题的值域,故问题的解可能不存在; (2) 即使问题的解存在也可能不唯一; (3) 问题的解不连续依赖于观测数据的变化,因而带来数值模拟的不稳定性。本书旨在从理论上和方法及算法上解决上述问题。我们将分别介绍线性反问题和非线性反问题的数值方法及其应用。我们将介绍经典的 Tikhonov 正则化方法,以及求解离散不适定问题的迭代正则化方法、梯度型方法、奇异值分解 (SVD) 方法、支撑向量机 (SVM) 方法,特别是我们将要介绍新发展起来的信赖域 (Trust Region) 方法、Monte Carlo 型方法 (模拟退火和遗传算法) 等等。我们还将应用这些方法给出求解对称核问题、数字图像信息处理、图像纹理特征分析、PDE 参数识别问题、热中子时间解谱问题以及地质地貌勘探等内容的新型算法。

数学物理反演问题来源于社会发展和科学技术的驱动。在 1902 年由 Cauchy 教授最初提出反演问题的时候,人们对此不屑一顾,比如说 Hadamard 教授认为这种问题是人造的,它不能描述真实的物理系统。但后来随着科技的发展,人们发现越来越多的问题都涉及求解反演问题,比如说医学成像中的 CT 机的发明和应用,地质勘探中地貌的探测,遥感科学中地表参数的反演、光学信号处理中信号的重构等等。自 20 世纪 60 年代 Tikhonov 院士提出求解不适定问题的正则化理论和方法以来,在相当长的一段时间内人们的目光集中在该类方法及其各种推广之上,比如说正则化方法的迭代执行、广义逆方法等等。我们国家在反问题方面的研究起步稍晚,20 世纪 80 年代初在已故的中国科学院院士、学部委员冯康教授的倡导下和大量实际问题的驱动下,这方面的研究也陆续展开了,并涌现出了一大批优秀的科研工作者和发表了一系列优秀的科研成果。值得指出的是,近年来由于计算数学学科的最优化方法的发展,人们越来越多地关注把此类方法与正则化方法结合并应用到反演问题的求解上。比如说人们提出了正则化的 Broyden 方法,正则化的 Gauss-Newton 方法,正则化的 CG 方法、内点方法、截断共轭梯度方法、信赖域方法等等。这些方法应用于实际问题,取得了良好的结果。比如说地质勘探,应用这些方法可以较准确地确定不为人知的地貌;再如图像恢复问题,应用这些方法可以在很大程度上抑制噪音和误差的传播,

从而达到稳定的恢复效果;再如金融科学中的市场波动率问题,应用这些方法可以较科学地估算出一定时间段内的股票市场波动率,从而可以为投资者提供较准确的决策支持;再比如遥感地表参数反演和大气参数反演问题,利用正则化方法和最优化方法,人们可以较精确地获得地表反射率和预测在一定时间和空间范围内大气(如气溶胶)的变化状况,从而为国家决策部门(如气象局、海洋局、环保局等)提供决策依据。

本书综合了国内外反演问题研究的前沿动态,既有理论性的又有应用性的。书中的部分章节出自作者近年来的科研成果,特别是作者的博士研究论文以及作者在中佛罗里达大学工作期间的科研成果。全书共分 16 章和 1 个附录。写作本书的总的思路是按“基础知识 → 线性反问题的计算方法及其应用 → 非线性反问题的计算方法及其应用 → 最新进展”的路子展开的。各个部分可以说是自成体系,读者可以选择感兴趣的部分内容阅读。本书第一章是绪论,通过列举基本事例引入反问题的概念,其不适定性以及求解该类问题的传统的变分正则化方法。在第四章~第十章,针对线性反问题的应用举例分别有所展开。在第十一章~第十五章,针对非线性反问题的应用举例亦分别有所展开。

第二章是数学基础,这一章介绍了阅读本书所需要的一些最优化、正则化及算子理论等的一些相关知识。在第三章我们用一章的内容概要地介绍了线性反问题的数值解法。我们从求解最简单的线性代数问题谈起,介绍了求解该类型问题的直接解法和迭代解法、预条件处理和正则参数选择方法。有些内容是当前的最新研究成果,比如说 TV-正则化方法, BB 方法, Lanczos 方法和信赖域- CG 算法。第四章研究特殊类型的线性反问题的数值解法,其中的算子为半正定对称核算子(它映射了实际应用科学中的对称模型),该类型问题的求解方法是一类特殊的 Tikhonov 正则化方法,也称为 Lavrentiev 正则化方法。第五章讨论了求解矩问题这类特殊问题的数值方法,重点介绍了软化法(Mollification)及其拓展,该方法在地球物理反演领域有着重要的应用。第六章给出了有关数字图像信息处理的一些基本概念和处理方法。数字图像信息处理是一个很大的研究课题,在国防、工业、医学、生命等应用科技领域有着重要的作用。当前很多应用数学领域作反问题研究的科学工作者都转向了该方向的研究。在这一章中,我们还特别提出了基于计算全息(CGH)的数字图像处理技术。第七章研究的是数字图像处理中一类特殊的问题,即数字图像恢复问题(Image Restoration)。我们通过引入 Kronecker 张量积, Fourier 变换等工具来辅之以图像恢复的快速实现。我们重点介绍 CG 法和 Lanczos 方法及相关的处理技巧。第八章描述了数字图像处理中的纹理分析问题。单纯的光谱分类器只考虑图像的光谱特征,但在实际的景观中,由于地物是具有一定空间结构特征的,因此在分类中,利用其空间特征纹理的差异可以比较容易地区分不同的类型。我们把纹理特征的提取看作是不适定的线性反演问题,利用正则化的手段进行纹理特征的提取。基于纹理特征的纹理分类原理主要是利用一定的窗口测量像元与其周边像元之间的关系。该类型问题对于当物体在纹理上而不是在平均亮度上与周围背景和其他物体有区别时,则物体的分类就必须以纹理分类为基础。第九章介绍的是数字信号处理的部分内容。我们既回顾了经典的 PSF 方法、G-P 算法和 Cadzow 外推算法又介绍了最新研究和发展起来的正则化方法、频域与空域中的 SVD 算法。第十章探讨统计分类中的 SVM 方法。该方法发展的基础之一是 Tikhonov 正则化方法,是由 Vapnik 在研究样本学习训练器中提出的,它是模式识别中一类重要的分类方法。

第十一章我们转向非线性反问题的研究,这一章的方法本质上都是传统的 Newton 法的扩展。

我们首先回顾了经典的 Tikhonov 正则化方法以及发展了的 Landweber 迭代法. 然后重点介绍新近发展起来的 Gauss-Newton 型方法、Levenberg-Marquardt 方法和信赖域方法, 给出了最新的研究结果. 特别是我们证明了标准的信赖域方法也是一种正则化方法, 从而为从事反问题领域研究的工作者放心地使用该方法提供了理论依据. 第十二章研究求解非线性反问题的梯度型方法, 其中重点介绍了 CG 法. 我们同样证明了非精确求解信赖域子问题的信赖域-CG 算法也是一种正则化方法. 第十三章~第十五章, 我们分别就地质地貌勘探问题、热中子时间解谱问题和 PDE 参数识别问题, 利用求解非线性反问题的技巧, 给出了求解方法和数值结果.

第十六章探讨了反问题的最新进展. 主要描述了相关领域的特殊反演方法, 如用于图像处理的小波方法和完全非线性反演的 Monte Carlo 型方法 (模拟退火法和遗传算法) 以及遥感科学、大气物理、医学、计量经济、生命和金融科学中的反问题. 这些学科中的反问题是相关领域的研究热点, 有的是刚刚起步, 希望有志于该领域研究的同行们引起注意.

本书是一本学术专著, 介绍了当今国际上反问题理论与应用领域前沿的研究成果, 引用了大量的较新的参考文献, 以提供希望进一步研究的同行们参考.

本书的出版得到了国家自然科学基金委员会“青年科学基金 10501051”、国家重点基础研究发展规划的 973 项目 G20000779 “地球表面时空多变要素的定量遥感理论及其应用”、中国科学院遥感应用研究所/北京师范大学遥感科学国家重点实验室和中国科学院地质与地球物理研究所油气资源研究室的支持, 书中的部分章节是在这些项目的资助下完成的, 在此深表感谢!

我想借此机会向我的博士论文指导教师、中国科学院数学与系统科学研究院研究员袁亚湘先生表示衷心的感谢. 我的成长和科学研究的进步都是与他的谆谆教诲分不开的. 他对待工作的兢兢业业、对待学术的严谨、求新、求真将是我一生的楷模. 我非常感谢中国科学院遥感应用研究所所长李小文院士对我工作开展的支持和帮助. 我十分感谢中国科学院遥感应用研究所的关燕宁研究员、郭杉研究员对我生活和工作的一贯支持和帮助. 特别感谢遥感科学国家重点实验室主任宫鹏研究员对我科研工作的支持、鼓励与帮助. 同时感谢航天遥感论证中心的顾行发研究员、遥感科学国家重点实验室的柳钦火研究员和中国科学院遥感应用研究所马建文研究员的支持与帮助. 我诚挚地感谢河北工业大学理学院的肖庭延教授和于慎根教授多年来一直的关心与帮助. 我由衷地感谢中佛罗里达大学的 M. Z. Nashed 教授和孙颀或等其他教授在作者于中佛罗里达大学工作期间提供的合作与帮助; 感谢在雍炯敏教授主持的金融数学讨论班上的有趣讨论和收获. 我还要感谢中国科学院应用数学研究所的韩继业研究员、中国农业大学的邓乃扬教授、复旦大学的程晋教授对本书写作的指导与帮助. 感谢中国科学院计算数学与科学工程计算研究所的张关泉研究员与作者的有关反问题理论和最优化理论的讨论. 感谢北京交通大学的修乃华教授对作者的一贯支持与帮助. 感谢北京师范大学的王锦地教授、杨华教授、张立新教授、戴永久教授、闫广建教授、柏延臣教授, 中国科学院高能物理研究所的胡天斗教授, 北京大学的陶澍教授、李本纲教授, 中国科学院地质与地球物理所的杨长春研究员和中国科学院遥感应用研究所张颖博士的有趣讨论. 感谢所有曾经给过我帮助和指导的老师, 感谢我的学生和朋友们, 与他们在一起有着热烈的学术讨论, 也留下了许多美好的回忆. 我也愿意借此机会向高等教育出版社的编辑同志们, 特别是张小萍编审和郭伟博士给予的支持和帮助表示深深的谢意. 最后, 我深深地感谢我的家人和我的爱人马青华女士多年来给予我的无私的支持与帮助, 本书初稿的校稿工作大部分是由她完

成的。由于作者学识所限，书中疏漏、片面之处一定不少，又因为反问题涉及面很宽，因此取舍不当甚至谬误之处恐亦难免。热诚欢迎读者批评指正。

王彦飞

2005 年 1 月于北京

目 录

第一部分 反问题概述和基本知识	1
第一章 绪 论	3
1.1 反问题的基本概念及事例	3
1.2 反问题的不适定性	13
1.3 变分正则化方法	14
1.4 反演问题研究现状和进展	15
第二章 数学基础	17
2.1 最优化理论与方法	17
2.2 有关算子理论的主要结果	20
2.3 紧算子、奇异系统与奇异值分解	23
2.4 最小二乘与正则化	26
2.5 采样定理	28
第二部分 线性反问题的理论和方法	31
第三章 线性反问题的数值方法	33
3.1 求解非齐次线性系统的基本方法	33
3.1.1 直接法	33
3.1.2 迭代法	34
3.2 病态系统与离散正则化	37
3.3 适应性正则化方法	38
3.3.1 引言	38
3.3.2 适应性正则化的收敛性	39

3.3.3	α -滤波算子	40
3.3.4	先验原则下适应性正则化方法的收敛速度	41
3.3.5	后验原则下适应性正则化方法的收敛速度	43
3.4	迭代正则化方法	45
3.4.1	迭代 Tikhonov 正则化方法	45
3.4.2	基于全变差 (TV) 的非光滑正则化方法	47
3.4.3	最速下降法与 BB 法	49
3.4.4	Landweber-Fridman 迭代法	51
3.4.5	ν -方法	59
3.4.6	极小化余量法与 GMRES 方法	60
3.5	截断共轭梯度方法	62
3.5.1	算法的提出	62
3.5.2	算法的收敛性	66
3.5.3	算法的正则性	71
3.6	Lanczos 方法	73
3.7	预条件迭代方法	75
3.8	正则参数选择方法	76
第四章	Lavrentiev 正则化方法	85
4.1	引言	85
4.2	Lavrentiev 正则化方法	87
4.3	迭代 Lavrentiev 正则化方法	87
4.3.1	算法的提出	87
4.3.2	收敛性分析	88
4.3.3	正则性分析	90
4.4	对数字图像复原的应用	93
4.5	进一步说明	95
第五章	矩问题的数值解法	97
5.1	引言	97
5.2	正则化方法	97
5.3	软化法	100
5.3.1	Banach 空间中的算法描述	100
5.3.2	几个例子	103
5.3.3	Backus-Gilbert 方法	104

第三部分 线性反演方法在相关领域的应用	109
第六章 数字图像信息处理	111
6.1 一般概述	111
6.1.1 图像的光学处理	111
6.1.2 图像的计算机处理	112
6.2 数字图像处理	113
6.2.1 连续图像与数字图像	113
6.2.2 直方图处理	115
6.2.3 数字图像的增强处理	116
6.2.4 图像的噪音与去噪	119
6.2.5 彩色图像复原	120
6.2.6 数字图像的分类	120
6.2.7 数字图像的变换处理	125
6.2.8 主成分分析 (PCA)	131
6.2.9 独立成分分析 (ICA)	134
6.2.10 基于计算全息 (CGH) 的图像再现技术	136
6.2.11 数字图像处理系统	139
第七章 数字图像恢复问题	141
7.1 问题的模型	141
7.2 Kronecker 积	144
7.3 Fourier 变换	146
7.4 特殊矩阵	148
7.5 噪音	152
7.6 数值方法	153
7.6.1 直接法	153
7.6.2 正则化方法	155
7.6.3 带信赖域技巧的共轭梯度 (CG) 法	156
7.6.4 带信赖域技巧的 Lanczos 方法	160
7.6.5 预条件处理	162
7.6.6 其他分解方法	164
7.7 一些数值结果	165
第八章 纹理特征分析问题	173
8.1 纹理的定义	173
8.2 描述图像纹理的 SAR 模型	173
8.3 最小二乘法 (LSE)	174
8.4 正则化方法	175

8.4.1 标准正则化 (SR)	175
8.4.2 惩罚的最小二乘法 (PLSE)	176
8.4.3 全变差 (TV) 惩罚的最小二乘法	177
8.5 数字图像纹理的分割	178
8.6 一些数值结果	179
8.7 遥感图像的纹理特征	184
8.8 进一步说明	186
第九章 带限信号的重构和外推问题	188
9.1 基本概念	188
9.2 经典方法回顾	189
9.2.1 解析延拓法	189
9.2.2 PSF 方法	190
9.2.3 Gerchberg-Papoulis 算法	191
9.2.4 一步外推法	192
9.3 正则化方法	192
9.4 复数域空间的截断 SVD 算法	193
9.5 时域空间的截断 SVD 算法	195
第十章 支撑向量机 (SVM)	206
10.1 预备知识	206
10.1.1 模式识别	207
10.1.2 回归估计	208
10.1.3 密度估计	208
10.1.4 学习问题的泛函表示与 ERM 原则	209
10.1.5 SRM 原则	210
10.2 VC 维和 VC 界	211
10.3 SVM 的基本概念及其计算方法	213
10.3.1 训练数据线性可分情形的 SV 机	213
10.3.2 训练数据线性不可分情形的 SV 机	215
10.3.3 Mercer 定理	216
10.3.4 基于特征空间构造的 SV 机	219
10.4 随机不适定问题 —— 正则化方法	220
第四部分 非线性反问题的理论和方法	223
第十一章 非线性反问题的 Newton 型数值方法	225
11.1 问题的模型及基本概念	225
11.2 Tikhonov 正则化方法	227

11.3	正则化的 Gauss-Newton 型方法	228
11.4	Levenberg-Marquardt 方法	234
11.5	信赖域方法	236
11.5.1	基本假设	236
11.5.2	信赖域方法	237
11.5.3	信赖域算法的收敛性	241
11.5.4	信赖域算法的正则性	246
11.5.5	信赖域算法的有限维逼近	248
第十二章	非线性反问题的梯度型数值方法	251
12.1	Landweber-Fridman 迭代法	251
12.2	最速下降法	252
12.3	Newton-CG 法	254
12.4	截断共轭梯度法	255
12.4.1	基本假设	255
12.4.2	带信赖域技巧的截断共轭梯度法	257
12.4.3	截断共轭梯度法的一些简单性质	260
12.4.4	收敛性分析	263
12.4.5	正则性分析	266
12.5	梯度算子方法	268
第五部分	非线性反演方法在相关领域的应用	271
第十三章	重力测定问题	273
13.1	问题的模型与不适定性	273
13.2	假设检验	275
13.3	有限维逼近与数值结果	277
13.3.1	有限维逼近	277
13.3.2	数值方法	278
13.3.3	计算结果	278
第十四章	热中子时间解谱问题	280
14.1	问题的模型	280
14.2	热中子时间谱的解析方法	283
14.2.1	最小二乘解析法	283
14.2.2	模型的简化与约束优化	283
14.2.3	进一步说明	288

第十五章 PDE 参数识别问题	289
15.1 问题的模型	289
15.2 有限维逼近——信赖域算法	290
15.3 伴随算法	294
15.4 正则参数选取的 Newton 法	295
15.5 一个数值例子	296
 第六部分 反演问题的最新进展	 301
第十六章 反演问题研究方法和应用	303
16.1 反演方法	303
16.1.1 数字图像处理的小波方法	303
16.1.2 Monte Carlo 型方法——模拟退火方法和遗传算法	305
16.1.3 Bayes 网络方法	317
16.1.4 数据 (资料) 同化 (Data Assimilation) 方法	321
16.2 其他学科中的反演问题	325
16.2.1 遥感科学中的反演问题	325
16.2.2 大气气溶胶反演问题	330
16.2.3 医学图像处理	332
16.2.4 计量经济领域中的参数识别问题	334
16.2.5 金融科学中的反演问题	336
16.2.6 生命科学中的反演问题	337
16.2.7 高能物理中的光能谱反演问题	338
 附录 MATLAB 应用举例	 340
A.1 MATLAB 指令说明	340
A.2 部分源程序	346
 参考文献	 352
 索 引	 367

Contents

Part I Inverse Problems and Fundamentals	1
1 Introduction	3
1.1 Basic Concepts of Inverse Problems and Examples	3
1.2 Ill-posedness of the Inverse Problems.....	13
1.3 Variational Regularization Methods.....	14
1.4 The Status of the Development of Inverse Problems	15
2 Fundamentals	17
2.1 Theory and Methods for Optimization	17
2.2 Basic Results of the Operator Theory	20
2.3 Compact Operator, Singular Value System and Singular Value Decomposition.....	23
2.4 Least Squares Error (LSE) Method and Regularization.....	26
2.5 Sampling Theorem.....	28
Part II Theory and Methods of Linear Inverse Problems	31
3 Numerical Methods for Linear Inverse Problems	33
3.1 Numerical Methods for Solving Nonhomogenous Linear System	33
3.1.1 Direct Methods.....	33
3.1.2 Iterative Methods	34
3.2 Ill-Conditioned System and Discrete Regularization	37
3.3 Adaptive Regularization Method.....	38
3.3.1 Introduction.....	38
3.3.2 Convergence Properties.....	39
3.3.3 α -Filtering Operator	40
3.3.4 Convergence Rate Under a priori Knowledge.....	41
3.3.5 Convergence Rate Under a posteriori Knowledge.....	43