

电磁逆散射理论 及应用研究

DIANCI NISANSHE LILUN
JI YINGYONG YANJIU

刘广东 著



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
安徽大学出版社

电磁逆散射理论及应用研究

刘广东 著



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
安徽大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电磁逆散射理论及应用研究/刘广东著. —合肥:安徽大学出版社,
2016.4

ISBN 978-7-5664-1104-4

I. ①电… II. ①刘… III. ①电磁波散射—逆问题—研究 IV. ①
O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 070581 号

电磁逆散射理论及应用研究

刘广东 著

出版发行:北京师范大学出版集团
安徽大学出版社
(安徽省合肥市肥西路3号 邮编 230039)
www.bnupg.com.cn
www.ahupress.com.cn

印 刷:安徽省人民印刷有限公司
经 销:全国新华书店
开 本:170mm×240mm
印 张:15.75
字 数:290千字
版 次:2016年4月第1版
印 次:2016年4月第1次印刷
定 价:39.00元

ISBN 978-7-5664-1104-4

策划编辑:李梅 张明举
责任编辑:张明举 王智
责任校对:程中业

装帧设计:戴丽 李军
美术编辑:李军
责任印制:李军

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话:0551-65106311

外埠邮购电话:0551-65107716

本书如有印装质量问题,请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话:0551-65106311

作者简介

刘广东,男,汉族,中共党员,1972年1月出生于江苏灌云,阜阳师范学院物理与电子工程学院电子学科副教授。



1996年毕业于盐城师范专科学校物理教育专业;2005年毕业于广西师范大学理论物理专业,获理学硕士学位,研究方向为原子核物理;2011年毕业于南京邮电大学电磁场与微波技术专业,获工学博士学位,研究方向为微波医学成像。

教学方面主讲过电磁场与电磁波、工程电磁场等本科生课程近10门,主持或参与教研项目多项,发表教研论文4篇。

科研方面主持或参与国家自然科学基金、安徽省自然科学基金等课题10余项,发表期刊论文20余篇,研究领域主要包括电磁散射、逆散射及其应用。

内容简介

本书较系统、全面地论述了电磁逆散射的主要概念、原理、方法及其应用。全书共分9章,内容包括进展综述、理论基础、问题描述、电磁散射数值方法、频域逆散射方法、时域逆散射方法、正则化方法、应用算例、结束语。全书取材较为广泛,内容主要为笔者近年来的研究成果,并兼顾吸收国内外的最新研究进展,注重理论与应用相结合。书中讨论的理论与应用实例,涵盖了不同工作频带、不同媒质类型、不同物理维度以及不同强度的电磁逆散射问题,可以方便不同领域的读者选择参考。

本书适用于电子、通信、遥感、计算机、自动化、应用物理、信号处理、无损检测、地球物理、模式识别、生物医学工程等领域的教师、高年级本科生、研究生、科研或工程技术人员学习参考。

前 言

研究电磁逆散射问题始于 20 世纪 50 年代,伴随着计算电磁学、数学、信息科学等领域的快速发展,电子技术、计算机技术、测量技术等领域的显著进步,以及遥感监测、地球物理勘探、生物医学工程等领域的迫切需求,电磁逆散射问题正受到越发广泛的关注。因此,电磁逆散射问题已成为近年来信息科学与技术领域的一个热点问题。

电磁逆散射问题是多学科交叉的综合问题,属于一类富有挑战的难点问题,非线性和病态性是两个主要困难点。当前同类选题在国内图书几近空白,相关理论、方法及其应用技术也仅散见于相关学术期刊、会议论文中,因此亟待编写相关领域的学术专著,方便系统地学习参考。所幸笔者近十年来一直从事相关领域的教学、科研工作,奠定了一定的理论、实践基础,拟在博士论文的基础上,结合近年来的科研成果和国内外最新进展,撰写了这部学术专著。

全书理论联系实际:既有完善的理论体系,又有丰富的应用实例,彰显“应用型”特色;内容与与时俱进:既有笔者近年来的研究成果,又吸收国内外其他最新进展;兼具“科学性”、“创新性”、“实用性”等学术特色:涵盖作者对电磁逆散射问题多个方面的新探索(或改进),既体现一定的科学价值,又体现一定的社会价值和经济价值;逻辑体系严密:一个核心(体现学术专著的学术特性,遵循学术论文的一般行文规范);三条主线(工作频带、媒质类型、物理维度);多种选择(兼顾不同研究方向、不同学历层次读者的个性需求)。

本书共分 9 章:第 1 章概述了电磁逆散射问题的研究背景、意义、内容、方法、进展综述;第 2 章补充了必备的数学和电磁理论基础;第 3 章给出了电磁散射、逆散射问题的算子、频域和时域描述;第 4 章分别

针对常规媒质和电色散媒质,研究了频域、时域电磁散射方法;第5章讨论了3类频域电磁逆散射方法;第6章分析了4类时域电磁逆散射方法;第7章探讨了2类正则化方法;第8章分别研究了电磁逆散射方法在乳腺癌筛查、地下勘探领域中的应用;第9章总结全书,并给出今后研究设想。

书稿的主体内容源于笔者及其论文合作者的共同研究成果,在此感谢张业荣教授、张开银博士、赵发勇博士、范士民实验师,并对引用参考文献的作者也一并致谢。

限于作者能力和水平,书中不妥、甚至错误之处在所难免,敬请读者批评指正,我们将不胜感激。

感谢国家自然科学基金项目(61071022,51271059)、教育部高等学校特色专业建设点(物理学)项目(TS10314)、安徽省教育厅质量工程(物理与电子开放实训基地)项目(20100634)、安徽省教育厅质量工程(应用物理学专业综合改革试点)项目(2014zy047)、安徽省教育厅质量工程(电气工程及其自动化专业改造与新专业建设)项目(2013zytz041)、安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2014A193)、安徽省科技计划项目(12010302080,1501031114)、阜阳师范学院自然科学研究项目(2014FSKJ14)、阜阳师范学院教学研究项目(2015JYXM35)、阜阳师范学院应用物理学教学团队(2014JXTD02)对本书出版的资助。

刘广东

2015年12月于阜阳师范学院

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 研究内容	2
1.3 研究方法	2
1.4 进展综述	9
1.5 本书的目的、内容和结构安排	14
第 2 章 理论基础	16
2.1 数学基础	16
2.2 电磁理论基础	36
2.3 时域有限差分法简介	43
2.4 矩量法简介	47
第 3 章 问题描述	49
3.1 基本假设	49
3.2 算子描述	52
3.3 频域描述	54
3.4 时域描述	57
第 4 章 电磁散射数值方法	66
4.1 方法类别	66
4.2 频域方法	67
4.3 时域方法	76
第 5 章 频域电磁逆散射方法	94
5.1 线性近似法	94
5.2 线性化迭代法	97

5.3 最优化方法	104
第6章 时域电磁逆散射方法	117
6.1 时域玻恩迭代法	118
6.2 时域高斯-牛顿反演算法	121
6.3 时域正反向时间步进法	127
6.4 时域共轭梯度法	138
第7章 正则化方法	144
7.1 加性正则化	146
7.2 乘性正则化	171
第8章 应用算例	186
8.1 微波乳腺筛查	186
8.2 地下勘探	217
第9章 结束语	221
参考文献	227

第1章

绪论

研究电磁逆散射问题始于20世纪50年代,几十年来取得了长足进展,产生了良好的社会效益和经济效益。本章首先简介了电磁逆散射问题的研究背景和意义;其次分析了其研究内容,概述常用的研究方法,简要分析各自优缺点;进而综述研究电磁逆散射问题的缘起、现状和发展;最后说明本书的目的、内容以及结构安排。

1.1 研究背景和意义

伴随计算电磁学、数学、信息科学等领域的快速发展,电子技术、计算机技术、测量技术等领域的显著进步,以及遥感监测、地球物理勘探、生物医学工程等领域的迫切需求,电磁逆散射问题受到越发广泛的关注。

(入射)电磁波在传播过程中,如果遇到不均匀媒质(散射体),将发生(广义)电磁散射现象。可见,电磁散射是电磁波和媒质相互作用产生的物理现象。因此,散射电磁波携带了散射体的电磁参数、位置、形状、尺寸等多方面信息。电磁散射问题就是已知入射波和媒质的电磁特性,求解(计算、仿真、测量等)散射电磁波的问题。

电磁(正)散射问题的逆问题(或反问题)即为电磁逆散射问题,还常被称为电磁成像(反演、重建、重构等)问题:即根据已知的入射波和测得的散射波,探究散射体的目标信息。可见,电磁逆散射方法无需直接接触及检测目标即可获得目标的内部信息,属于无损检测方法。电磁逆散射问题为多学科交叉的前沿课题,其理论成果对学科发展具有重要意义,对军事科学、地球科学、材料科学、生物医学等学科具有较高的参考价值;电磁逆散射理论、方法具有较高的应用价值,已经(或有望)

广泛应用到遥感遥测、无损探伤、矿藏检测、环境监测、地球物理探测和生物医学成像等众多领域。因此,近年来,电磁逆散射问题已成为信息科学与技术领域的一个热门课题。电磁逆散射技术作为一类关键技术,不仅是国防尖端技术,如现代信息化战场的雷达技术,而且是重要的民用技术,如非成像遥感雷达技术等,电磁逆散射理论和应用研究已经引起越来越多读者的兴趣。

1.2 研究内容

电磁逆散射问题属于一类富有挑战的不适定问题,解的非线性(Nonlinearity)、病态特性(Ill-posedness)是求解此类问题面临的2个首要困难。因此,一般不能直接照搬(或套用)现有求解逆散射问题的方法。解的非线性主要源于入射电磁波的多重散射;而解的病态特性起因于测量数据不足、测量存在误差、测量频带受限等因素。

研究电磁逆散射问题,主要研究如何有效克服解的非线性和病态性困难。当然,处理问题还包括问题的物理维度、媒质类型、工作频带等方面内容。

1.3 研究方法

电磁逆散射问题本身具有多学科交叉的特点,因此研究方法也具有跨学科的特点,常常采用电磁学、声学、量子力学、数学、信息科学等多学科相互借鉴、共同发展的研究方法。根据问题维度、媒质类型、工作频带、研究内容等方面的不同,采用的研究方法也存在差异。

首先,按照物理维度不同,电磁逆散射问题可分为一维(One-Dimensional, 1-D)、二维(Two-Dimensional, 2-D)、三维(Three-Dimensional, 3-D)问题,分别处理分层媒质重建、断层(层析)成像、一般反演问题。不同维度问题,采用的研究方法也不尽相同。电磁逆散射理论研究早期或新理论探索初期,一般从较为简单的1-D问题开始,获得的1-D研究成果通过改进(或直接推广)到多维情形。当然,研究也可从一般的3-D问题开始,获得的研究成果通过演绎应用到低维情形。另外,还有相当一部分研究针对特定的2-D问题。不同维度研究方法的性能对比如表1-1所示。

表 1-1 不同维度研究方法的性能对比

问题维度	适用范围	复杂度	存储量	速度
1-D	窄	低	小	快
2-D	中	中	中	中
3-D	广	高	大	慢

其次,散射电磁波与媒质的电磁特性密切相关。由于媒质类型的多样性和复杂性,难以发展出一套普遍适用的电磁逆散射方法。按照不同的标准,媒质可分为多种类型。例如,按照电磁特性,媒质可分为导电媒质、电介质、磁介质 3 类;按照电磁参数是否均匀,媒质可分为均匀媒质、非均匀媒质;按照电磁参数是否有确定值,媒质可分为确定媒质、随机媒质;按照电磁参数是否随时间变化,媒质可分为时变媒质、时不变媒质;按照本构关系,媒质可分为线性媒质、非线性媒质;按照电磁参数的方向特性,媒质可分为各向同性(方向无关)媒质、各向异性(方向相关)媒质;按照电磁参数的频率相关(色散)特性,媒质可分为色散媒质、非色散(常规)媒质。当然,具体的媒质类型还可能进一步细分为不同类型。例如,色散媒质可概括为 2 大类型:第一大类包含德拜(Debye)媒质(土壤等)、德鲁(Drude)媒质(等离子体等)、洛伦兹(Lorentz)媒质(光学材料等),其共同特点为复值介电常数仅含 $j\omega$ (j 、 ω 分别表示虚数单位、角频率)的整数次幂项;第二大类包含 Cole-Cole (C-C) 媒质(生物组织等)、Davidson-Cole (D-C) 媒质(甘油等)、Havriliak-Negami (H-N) 媒质(聚合物等),其共同特点为复值介电常数包含 $j\omega$ 的分数次幂项。因此,往往针对某类特定媒质开展研究。

另外,散射电磁波还与入射电磁波的工作频率(或波长)紧密关联:同一媒质在不同频率入射波辐照下,可能产生不同的响应;不同应用场合,一般需要提取目标不同的特征参数。按照工作频带的不同,研究电磁逆散射问题可分为窄带(单频或频域)方法和宽带(多频或时域)方法。相比之下,频域方法对低分辨率场合经济适用,而对高分辨率场合(例如筛查早期乳腺小尺寸肿瘤),时域方法则凸显优势。2 种方法的性能对比如表 1-2 所示。

表 1-2 频域、时域方法的性能对比

方法类别	工作频带	分辨率	复杂度	成本
频域法	窄	低	低	低
时域法	宽	高	高	高

再者,从研究内容来说,首要工作是设法克服电磁逆散射问题的非线性、病态性 2 个主要困难。为了克服非线性困难,对于弱散射情形,采用线性近似方法(忽略多重散射),如光学衍射法、玻恩(Born)近似法、利托夫(Rytov)近似法;对于强散射情形,一般采用最优化方法,如共轭梯度(Conjugate Gradient,CG)法、信赖域(Trust Region,TR)法、粒子群优化(Particle Swarm Optimization,PSO)法;而对于中等强度散射问题或者未知散射强度的一般情形,可采用线性化结合迭代法,如玻恩迭代法(Born Iterative Method,BIM)、变形玻恩迭代法(Distorted BIM,DBIM)。当然,还有其他一些反演方法,如泛函方法。3 大类电磁逆散射方法的性能对比如表 1-3 所示。

表 1-3 3 大类电磁逆散射方法的性能对比

方法类别	适用散射强度	收敛速度	精度
线性近似法	弱	快	低
线性化迭代法	中	中	中
最优化方法	强	慢	高

在上述 3 大类电磁逆散射方法中,最优化方法具有反演精度高、适用于大尺寸目标等优势,并适用于处理工程中频繁出现的高对比度(强散射)问题而最具发展前途和应用前景。提高收敛速度是此类方法亟待解决的问题之一。几十年来,在数学领域,已经提出了多种最优化方法处理逆问题,其中不少方法已被直接应用(或改进)处理电磁逆散射问题。这里为方便读者参考,给出一些在电磁逆散射领域常用的方法。由于最优化方法多达数十种,不同文献的分类标准也不尽相同,本书对此做简要归纳:文献[13]按照可行集的性质,将最优化问题大致分为线性规划、二次规划、动态规划、组合规划、最优控制等问题;文献[15、17]按照最优化问题是否附加约束条件,将最优化方法分为 2 个大类:无约束优化法(如单纯形搜索法、最速下降法等)、约束优化法(如罚函数法、复合形法等);本书主要依据文献[14]的分类思路,将最优化方法分为 3 个大类:确定性优化法、随机优化法、混合优化法。在确定性优化法中,对于约束优化问题,主要有 Rosen 梯度投影法、(内点、外点、混合、乘子)罚函数法、坐标轮换法、复合形法;而对于

无约束优化问题,可细分为直接法、间接法(需计算目标函数导数)、非线性最小二乘(Least Squares, LS)法 3 个小类。直接法主要包括 Hooke-Jeeves 法(模式搜索法)、Rosenbrock 法(转轴法)、单纯形搜索法、Powell 法;间接法主要包含最速下降法、CG 法、牛顿法、修正牛顿法、TR 法和拟牛顿法;非线性 LS 法主要包含 G-N(Gauss-Newton)法、修正 G-N 法、L-M(Levenberg-Marquarat)法。其中,拟牛顿法主要有 DFP(Davidon-Fletcher-Powell)法、BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)法;CG 法主要包含 PRP(Polak-Ribière-Polyak)、FR(Fletcher-Reeves)、DY(Dai-Yuan)、HS(Hesteness-Stiefel)、LS(Liu-Storey)等方法。另外,应用确定性优化方法求解迭代步长时,一般要求解一维搜索子问题,常用的方法有线性搜索、非线性搜索 2 类:一维线性搜索方法主要有黄金分割法、斐波那契法、(基本、全局)牛顿法;一维的非线性搜索方法主要有抛物线法(二次插值法)、三次插值法、可接受的搜索法(Goldstein 法、Wolfe-Powell 法)。对于第二大类随机优化法,主要包含模拟退火(Simulated Annealing, SA)法、神经网络(Neural Networks, NN)法、蒙特卡罗(Monte Carlo)法、禁忌搜索(Tabu Search, TS)法、蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)法、进化算法(Evolutionary Algorithms, EA)、PSO 法、遗传算法(Genetic Algorithms, GA)等。其中,一种方法常常又细分为多种,例如,粒子群优化法可细分为基本 PSO、带压缩因子 PSO、权重改进 PSO、变学习因子 PSO、二阶 PSO、混沌 PSO、混合 PSO 等种类;遗传算法可细分为基本 GA、顺序选择 GA、适值函数标定 GA、大变异 GA、自适应 GA、双切点交叉 GA、多变异位自适应 GA 等种类。对于第三大类混合优化法,主要思想是将前 2 大类方法巧妙联合起来,结合它们的各自优点,例如 CG 法结合 PSO 法的混合优化法。3 大类最优化方法的性能对比如表 1-4 所示。

表 1-4 3 大类最优化方法的性能对比

方法类别	收敛特性	收敛速度	精度
确定性优化法	局域	快	低
随机优化法	全局	慢	高
混合优化法	全局	中	中

从方法论角度来看,迭代法是电磁反演的主流方法。然而,在迭代重建的每一步,都需要求解(正)散射子问题。计算电磁散射问题隶属计算电磁学(Computational Electromagnetics, CEM)领域,近几十年

来已经发展了多种方法,并被多部专著详细论述。本书为方便读者查阅,这里简介一些常用的方法。常用的分类依据有计算精度、工作频率、方程形式等,按照计算精度分类,正演方法主要分为3大类型:解析(精确)法、数值(近似)法、(解析、数值结合的)混合解法。3大类电磁正演方法的性能对比如表1-5所示。

表 1-5 3 大类电磁正演方法的性能对比

方法类别	物理解释	适用范围	限制条件	精度
解析法	好	窄	多	高
数值法	差	广	少	低
混合法	中	中	中	中

在这3大类电磁正演方法中,混合法仅出现在少量文献中,如数值模式匹配法(Numerical Mode-matching Method, NMM)。解析法仅适用于空间结构对称、媒质类型简单的少量问题和理论研究场合,如镜像法、分离变量法、映射法(Method of Mapping)、傅里叶变换法、模式匹配法、米(Mie)级数法等。而对于大量的真实正演问题,主要采用数值法,也正因为如此,数十年来,计算电磁学的研究取得了丰硕成果,已经发展出多种正演数值方法。若按照工作频率的差异,可将数值方法进一步细分为3个小类:高频法、低频法、混合法,分别适用于电大尺寸、电小尺寸、中等电尺寸正散射问题。

高频法主要有几何光学(Geometrical Optics, GO)法、物理光学(Physical Optics, PO)法、射线追踪法、射线管法、弹跳射线(Shooting and Bouncing Ray, SBR)法、几何绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)、一致性几何绕射理论(Uniform Theory of Diffraction, UTD)、物理绕射理论(Physical Theory of Diffraction, PTD)等。

按照方程形式的不同,低频法还可进一步细分为微分方程(Differential Equation, DE)法、积分方程(Integral Equation, IE)法、混合法3个子类。相比之下,DE法的优点是适合求解无限域问题,生成矩阵为稀疏矩阵,方便处理非均匀、非线性、时变、色散等特殊媒质。不足是计算精度低、生成矩阵的阶数高,且需要满足吸收边界条件(Absorbing Boundary Condition, ABC),常用的吸收边界有2类:Mur吸收边界、完全匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)。其中PML可细分为Berenger完全匹配层(Berenger PML, BPML)、单轴各向异性完全匹配层(Uniaxial PML, UPML)、广义完全匹配层(Generalized PML,

GPML)、伸缩坐标完全匹配层(Stretched Coordinate PML, SC-PML)、卷积完全匹配层(Convolutional PML, CPML)吸收边界。DE法主要包含有限元法(Finite Element Method, FEM)、时域有限元法(Time-Domain Finite Element Method, TD-FEM)、传输线法(Transmission Line Method, TLM)、有限差分法(Finite Difference Method, FDM)。其中, FDM 包括频域有限差分(Finite Difference Frequency Domain, FDFD)法、时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法、时域伪谱(Pseudospectral Time Domain, PSTD)法、时域多分辨(Multi-Resolution Time Domain, MRTD)法、时域平面波(Plane Wave Time Domain, PWTD)算法、时域有限体积(Finite Volume Time Domain, FVTD)法等子类。IE法的优点是生成矩阵的阶数低、计算精度高,且无需吸收边界。IE法主要包含离散偶极子近似(Discrete Dipole Approximation, DDA)法、表面积分方程法(Surface Integral Equation Method, SIEM)、体积分方程法(Volume Integral Equation Method, VIEM)、时域积分方程(Time Domain Integral Equation, TDIE)法、自适应积分法(Adaptive Integral Method, AIM)。其中, SIEM 包含矩量法(Method of Moments, MoM)、边界元法(Boundary Element Method, BEM), VIEM 包含快速多极子方法(Fast Multipole Method, FMM)、广义多极子技术(Generalized Multipole Technique, GMT)、多层快速多极子算法(Multilevel Fast Multipole Algorithm, MLFMA), TDIE 法包含时域电场积分方程(Time-Domain Electric Field Integral Equation, TD-EFIE)法、时域磁场积分方程(Time-Domain Magnetic Field Integral Equation, TD-MFIE)法、时域混合场积分方程(Time-Domain Combined Field Integral Equation, TD-CFIE)法。

在高频、低频混合方法中,也有不少方案,如 SBR+MoM、SBR+FEM、SBR+FDTD、PTD+MoM 等。在电磁计算领域,就相关论文和计算软件来说,最常用方法有 FEM、MoM、FDTD 法、FMM 等。另外,也有其他一些分类方法,如文献[5]将电磁正演方法分为严格解法、数值法和高频近似法 3 大类。

电磁逆散射问题的另一主要困难是逆问题的病态特性。为了克服该困难,迄今已经提出了好几类正则化方法。按照病态问题是否连续,可分为 2 个大类:连续正则化方法、离散正则化方法。特别说明除外,本书后文讨论的正则化方法一般指后者。按照是否需要(人工参与)选

择正则化参数,分为2个小类:普通正则化方法、自适应(无需人工参与)正则化方法。其中,普通正则化方法主要有著名的也最常用的吉洪诺夫(Tikhonov)正则化,基于奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)法的广义奇异值分解(Generalized SVD, GSVD)、截断奇异值分解(Truncated SVD, TSVD)、改进的截断奇异值分解(Modified TSVD, MTSVD)、截断总体最小二乘(Truncated Total Least Squares, TTLS)以及最大熵正则化。基于SVD的正则化方法一般计算量较大,主要适用于正则化中、小规模逆问题,并且还要额外计算正则化参数,常用的方法主要有L-曲线法、广义交叉验证方法(Generalized Cross Validation, GCV)、基于Morozov偏差原理的方法。恰当的正则化参数往往要结合先验信息,并通过多次仿真确定,是一个相对复杂的过程。如果参数选择不当,可能导致迭代反演算法不收敛,计算结果严重偏离真实值。因此,近年来无需人工调参的自适应正则化引起读者广泛的兴趣。此类正则化方法主要有:共轭梯度最小二乘(Conjugate Gradient Least Squares, CGLS)、最小二乘QR分解(Least Squares QR Factorization, LSQR)、Landweber迭代法等迭代正则化方法。当然,也有一些其他分类方法,例如,文献[16]将正则化方法分为LS、加权最小二乘(Weighted LS, WLS)、差分最大光滑化、拉普拉斯、最小熵、总体变分(Total Variation, TV)、改进的总体变分(Modified TV, MTV)、最小支撑、最小梯度支撑(Minimum Gradient Support, MGS)、最小一阶熵、指数型等正则化子。文献[24]将正则化方法分为2种策略。第一种策略是直接目标泛函中引入正则化项,可细分为2类方法:罚函数法、射影法。其中,罚函数法如Tikhonov正则化,射影法如krylov子空间法(如CGLS、LSQR、TSVD)。第二种策略是迭代过程中的每次迭代都进行正则化,可细分为3类方法:加性正则化(Additive Regularization, AR)、乘性正则化(Multiplicative Regularization, MR)以及加乘正则化(Additive-Multiplicative Regularization, AMR)方法。

总结起来,电磁逆散射问题的研究方法主要包括电磁散射方法、电磁逆散射方法、正则化方法。尽管已经提出了许多方法,然而,由于实际问题的复杂性、媒质类型的多样性等因素,迄今尚无一套万能的通用方法。特别是色散媒质、随机媒质、非线性媒质、左手媒质等复杂媒质,相关研究,近年来才刚刚起步。本书重点探讨作者近年来在色散媒质问题的相关工作。

1.4 进展综述

研究电磁逆散射问题起步于上世纪 50 年代,相对深入的研究工作始于上世纪 70 年代,而真正有实用价值的研究也就三、四十年历史。尽管在电磁理论中,电磁逆散射是个相对年轻的研究领域,但近几十年来,在电磁散射、电磁逆散射、正则化等领域,人们还是取得了较为丰硕的研究成果。

1.4.1 电磁正演数值方法

计算电磁学是电磁理论中最为活跃的领域,迄今已经发展了数十种方法,其中 FEM、MoM、FDTD 法和 FMM 是最为常用的几种。

FEM 始于上世纪 40 年代,50 年代主要用于飞机的散射计算和设计,迄今已广泛应用在工程、数学、计算电磁等领域,特别适用于处理偏微分方程的边值问题。FEM 的基本原理是变分原理:首先,将待求解的边值问题转化为变分问题;其次,通过对场域进行剖分、插值,将变分问题离散化为普通多元函数的极值问题;然后,获得多元的代数方程组;最后,求解代数方程组,即可得到所求边值问题的数值解。FEM 的基本步骤主要有:①选取基函数;②剖分单元;③计算矩阵元;④求解矩阵方程。FEM 的主要不足是设计截断边界复杂,而主要优点有:适合处理复杂结构、复杂边界问题;方便处理有多种特殊媒质问题;通用性好。优点多于不足,因此,FEM 广泛应用在 Ansoft HFSS、ANSYS Emax、COMSOL 等商业仿真软件中。

MoM 始于上世纪 60 年代,最初由哈林登引入计算电磁学领域,经过几十年的发展,已广泛应用在电磁辐射、散射及电磁兼容等领域。尤其适用于处理电大尺寸的电磁场问题。MoM 的基本思路为:将原问题归结为算子方程;离散化算子方程为代数方程;采样、校验转化代数方程为矩阵方程;矩阵方程求逆。MoM 的基本步骤主要有:①选取基函数、展开未知函数;②校验(或匹配)积分方程;③求解线性代数方程组。MoM 的主要优点有:数值精度高;算法稳定性好;不需要吸收边界,避免数值色散。因此,MoM 多应用在 Agilent ADS、Sonnet、IE3D、Microwave Office、FEKO 等商业仿真软件中。然而,MoM 的主要不足是通用性(可移植性)较差、处理高维问题速度较慢,需要发展快