

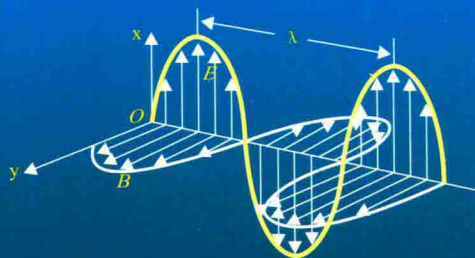
◆信息材料与应用技术丛书◆

APPLICATION RESEARCH OF MACHINE LEARNING METHODS
IN ELECTROMAGNETIC INVERSE SCATTERING PROBLEMS

机器学习方法

在电磁逆散射问题中的应用研究

张清河 / 著



科学出版社

信息材料与应用技术丛书

机器学习方法在电磁逆散射 问题中的应用研究

张清河 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地论述了机器学习方法的概念、原理、方法、流程和步骤及其在若干电磁逆散射领域中的应用。全书共 11 章, 内容包括绪论、机器学习方法、逆散射问题描述及模型建立、机器学习方法在自由空间逆散射中的应用、机器学习方法在埋地目标逆散射问题中的应用、机器学习方法在各向异性材料参数反演中的应用、机器学习方法在复合结构目标逆散射中的应用、机器学习方法在土壤湿度反演中的应用、机器学习方法在风驱粗糙海面逆散射中的应用、机器学习方法在雪地环境逆散射中的应用、结束语。全书内容主要为笔者近年来的研究成果, 并增加了国内外最新研究进展。书中理论部分介绍了两种机器学习方法——人工神经网络和支持向量机的原理与应用方法步骤, 以及电磁正演问题中的数值方法和近似方法。本书重点讨论了机器学习方法的应用实例, 涵盖了不同电磁环境、不同结构目标、不同介质类型的电磁逆散射问题, 可以方便不同领域的读者选择参考。

本书可供电子、通信、遥感、计算机、模式识别、信号处理、无损检测、地球物理、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。

图书在版编目(CIP)数据

机器学习方法在电磁逆散射问题中的应用研究/张清河著. —北京: 科学出版社, 2019.6

(信息材料与应用技术丛书)

ISBN 978-7-03-057529-6

I. ①机… II. ①张… III. ①机器学习-应用-电磁波散射-研究 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 110313 号

责任编辑: 张 展 黄 嘉/ 责任校对: 彭 映

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

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>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2019年6月第一次印刷 印张: 14 1/2

字数: 312 000

定价: 126.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

电磁逆散射(也常称为反演或重构)问题是根据已知的入射电磁场和测得的散射场,探究目标(object of interest, OI)的物理(或几何)特性,包括其位置、尺寸、形状、数量和电磁参数等。逆散射的研究对于应用科学有着重要的实际意义,它广泛应用于数学物理、地震学、目标识别、探地雷达(GPR)、医学成像、地球物理探测、无损检测、遥测遥感、地下资源及地层结构勘探等领域。近十多年来,随着计算机技术及数值算法的飞速发展,电磁逆散射研究方法不断进步,应用领域不断拓展,电磁逆散射研究已成为电磁领域中非常活跃且十分前沿的研究课题之一。然而,问题本身固有的非线性和病态性,使得逆散射研究总是显得异常困难。发展至今,尚未形成一套通用的解决方案,因此,如何找到并发展一种有效的逆散射方法逐渐成为研究的热点。

当前,就笔者所知,同类题材在国内图书市场几近空白:前期市场调研发现,在国内,相近选题的图书只有1987年西安电子科技大学葛德彪教授编著的《电磁逆散射原理》及2016年刘广东编著的《电磁逆散射理论及应用研究》两本书。前者着重于逆散射问题本身的物理描述及原理论述;后者专注于确定性优化方法中的各种梯度算法应用于色散介质的时、频域逆散射研究。近二十年来发展的相关理论、方法及技术散见于相关学术期刊、杂志。读者亟待相关领域的学术专著的出版,以便系统地学习参考。笔者近十几年来一直从事电磁散射与逆散射领域的教学、科研工作,特别是在基于机器学习的电磁逆散射研究方面,积累了一定的理论和实践基础,形成了一定的研究成果,故拟在笔者博士论文的基础上,结合近十年来个人的研究经历及科研成果,撰写这样一本学术著作,期望能抛砖引玉,方便相关领域同行的交流与学习,同时也希望能获得一定的社会效益和经济效益。

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;内容与时俱进,既有笔者近年来的研究成果,又吸收国内外最新进展;兼具“科学性”“创新性”“实用性”等学术特色,涵盖笔者对电磁逆散射问题多个方面新的探索,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。

全书共11章:第1章概述了电磁逆散射问题的研究背景、意义、分类、方法、研究进展和现状;第2章对两种机器学习方法的原理、方法及应用进行了介绍;第3章对逆散射问题及机器学习逆散射模型的建立进行了描述;第4章介绍了机

器学习方法在自由空间介质圆柱体目标逆散射中的应用；第 5 章研究了机器学习方法在半空间埋地目标逆散射问题中的应用；第 6 章介绍了机器学习方法在各向异性材料电磁参数反演问题中的应用研究；第 7 章讨论了机器学习方法在金属介质复合结构目标逆散射问题中的应用；第 8 章介绍了机器学习方法在微波遥感土壤含水量、雪层厚度等问题中的应用研究；第 9 章介绍了机器学习方法在风驱粗糙海面逆散射问题中的应用研究；第 10 章讨论了机器学习方法在雪地环境逆散射问题中的应用；第 11 章总结全书，并指出今后的研究设想。

本书的主体内容源于笔者及其合作者的共同研究成果，在此感谢朱国强教授、何思远教授、陈海涛研究员、张云华副教授，并对引用参考文献的作者一并致以谢意。

感谢国家自然科学基金面上项目(61179025、61771008)、湖北省自然科学基金项目(2009CDZ050)、湖北省教育厅重点项目(D20111201)及三峡大学重点学科建设与规划办公室对本书出版的资助。

由于笔者能力和水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请专家和读者批评指正。

张清河

2019 年 2 月于三峡大学

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 问题描述	1
1.1.2 应用背景	1
1.2 电磁场逆问题分类	2
1.3 逆散射中的数学问题	2
1.4 研究方法	3
1.5 研究进展和现状	7
1.6 本书的目的、内容和结构安排	10
参考文献	11
第2章 机器学习方法	17
2.1 机器学习方法概述	17
2.2 人工神经网络	18
2.2.1 神经元模型	19
2.2.2 神经网络的结构	21
2.2.3 神经网络的学习	22
2.2.4 BP 网络及其学习算法	22
2.2.5 基于 L-M 原理的 BP 神经网络研究	26
2.2.6 网络的拓扑结构	29
2.3 支持向量机	31
2.3.1 结构风险最小化原则	31
2.3.2 支持向量回归	32
2.3.3 核函数	36
2.3.4 支持向量机训练算法	37
参考文献	40
第3章 逆散射问题描述及模型建立	43
3.1 逆散射问题描述	43
3.2 BP 神经网络电磁逆散射模型	46
3.3 支持向量机电磁逆散射方法	48

3.3.1 支持向量机逆散射模型	48
3.3.2 支持向量机参数选择	49
3.3.3 支持向量回归电磁逆散射方法的流程	55
参考文献	55
第4章 机器学习方法在自由空间逆散射中的应用	57
4.1 复散射系数回归估计	57
4.2 电磁参数重构	60
参考文献	63
第5章 机器学习方法在埋地目标逆散射问题中的应用	65
5.1 埋地目标电磁逆散射模型	65
5.2 粗糙面散射理论基础	67
5.2.1 随机粗糙面的生成	69
5.2.2 入射锥形波	72
5.2.3 MoM 表面积分方程的推导	73
5.3 一维 PEC 随机粗糙面散射	75
5.3.1 电磁散射建模	75
5.3.2 数值结果及分析	76
5.4 一维介质随机粗糙面散射	78
5.4.1 MoM 电磁建模	78
5.4.2 数值结果及分析	80
5.5 介质随机粗糙面与埋地导体复合散射	82
5.5.1 MoM 电磁建模	82
5.5.2 数值结果及分析	84
5.6 埋地目标探测及参数反演	85
参考文献	92
第6章 机器学习方法在各向异性材料参数反演中的应用	95
6.1 时域有限差分法简介	95
6.1.1 FDTD 场域划分	96
6.1.2 Yee 元胞	97
6.1.3 吸收边界条件	98
6.1.4 数值色散及稳定性条件	98
6.2 各向异性介质 FDTD 方法	99
6.2.1 各向异性介质 FDTD 差分格式	99
6.2.2 各向异性 FDTD 算法验证	102
6.3 各向异性材料电磁参数反演	104
参考文献	106

第 7 章 机器学习方法在复合结构目标逆散射中的应用	108
7.1 复合结构目标正散射问题	108
7.1.1 复合结构目标矩量法方程的建立	109
7.1.2 矩量法方程的快速求解方法	111
7.1.3 正散射问题数值结果	112
7.2 逆散射数值算例	114
7.2.1 二维介质覆盖导体圆柱电磁逆散射	114
7.2.2 二维复合方柱电磁逆散射	120
参考文献	123
第 8 章 机器学习方法在土壤湿度反演中的应用	125
8.1 微波遥感土壤湿度研究概况	125
8.2 土壤的介电模型	129
8.2.1 Wang 的四成分模型	129
8.2.2 经验模型	131
8.2.3 Dobson 半经验模型	132
8.2.4 数值模拟	133
8.3 土壤粗糙面微波散射模型	134
8.3.1 微扰法	136
8.3.2 Kirchhoff 近似方法	142
8.3.3 积分方程方法	147
8.3.4 植被覆盖土壤散射模型	151
8.4 土壤粗糙面微波辐射模型	152
8.4.1 裸露土壤粗糙表面	152
8.4.2 植被覆盖土壤粗糙表面的 τ - ω 模型	155
8.5 敏感性分析	156
8.5.1 SPM 参数敏感性分析	156
8.5.2 IEM 相关参数敏感性分析	158
8.5.3 Q/H 模型土壤发射率参数敏感性分析	160
8.5.4 Q/H 模型土壤亮温参数敏感性分析	161
8.5.5 Q_p 模型土壤亮温参数敏感性分析	163
8.6 机器学习方法反演土壤湿度	164
8.6.1 主动微波土壤湿度反演	164
8.6.2 被动微波土壤湿度反演	170
8.6.3 主动、被动相结合微波土壤湿度反演	172
8.6.4 植被覆盖土壤湿度反演	175
参考文献	178

第9章 机器学习方法在风驱粗糙海面逆散射中的应用	181
9.1 海洋微波遥感研究进展	181
9.2 海谱及海水介电模型	183
9.2.1 海谱模型	183
9.2.2 海水介电模型	188
9.3 风驱海面散射双尺度模型	188
9.4 敏感性分析及反演方案设计	192
9.4.1 建模及反演步骤	192
9.4.2 雷达参数敏感性分析	193
9.4.3 反演方案设计	195
9.5 反演结果及分析	196
9.5.1 风速反演结果与分析	196
9.5.2 盐度反演结果与分析	198
参考文献	200
第10章 机器学习方法在雪地环境逆散射中的应用	202
10.1 分层随机粗糙面微扰法理论	203
10.2 雪地环境介质介电模型	209
10.2.1 土壤的相对介电常数	209
10.2.2 积雪的相对介电常数	210
10.3 雪地环境微波散射特性	211
10.4 雪地环境参数反演	215
10.4.1 步骤及流程	215
10.4.2 敏感性分析	216
10.4.3 反演方案设计	216
10.4.4 反演结果及分析	217
参考文献	220
第11章 结束语	222

第1章 绪论

本章 1.1 节简要介绍了电磁场逆问题的研究背景和意义,包括问题的物理描述、应用背景;1.2 节对电磁场中的逆问题特别是逆散射问题进行了分类;1.3 节阐述了逆散射研究中的数学问题,1.4 节概述了常用的研究方法并简要分析各种方法的优缺点,1.5 节综述了研究电磁场逆问题的缘起、发展和研究现状;1.6 节是本书的目的、内容及结构安排说明。

1.1 研究背景和意义

1.1.1 问题描述

电磁散射和逆散射分别是偏微分方程的正问题(定解问题)和逆问题。电磁散射问题(正问题)是指已知入射电磁波和散射体(包括背景空间)条件求解散射场分布;电磁逆散射(也常称为反演、重建或重构)问题是指一系列或多列入射电磁波照射被测物体(散射体)产生散射,通过测量散射体外部的散射场(一般设有多个接收点)或远场模式,探究目标的物理(或几何)特性,包括其位置、尺寸、形状、数量、介电常数及电导率分布等。它具有非接触、非破坏式探测和诊断物体的特点。电磁逆散射问题也称为电磁成像或微波成像问题。

1.1.2 应用背景

伴随计算电磁学、信息科学等领域的快速发展,电子技术、信息技术、计算机技术、测量技术的显著进步,以及遥测遥感、地球物理勘测、生物医学工程等领域的迫切需求,电磁逆散射问题越发受到广泛的关注。

逆散射的研究对于应用科学有着重要的实际意义,它广泛应用于数学物理、地震学、目标识别、探地雷达(ground penetrating radar, GPR)、生物医学成像、地球物理探测、无损检测、遥测遥感、地下资源及地层结构勘探等领域。电磁逆散射的应用最早可追溯到第二次世界大战期间雷达与声呐的成功应用,后来通过对电磁波的散射分析来探测地下矿藏,到了 20 世纪 70 年代,随着 X 射线、CT

技术在人体检测医学领域的应用,电磁成像在医学中的应用也引起了人们的关注。近十多年来,由于计算机技术的飞速发展,电磁逆散射研究方法不断进步,应用领域不断拓展,电磁逆散射问题已成为电磁领域中非常活跃且十分前沿的研究课题之一。

同时,电磁逆散射问题作为计算电磁学、数学及信息科学等多学科交叉的前沿科学问题,其理论发展成果及技术创新为地球科学、信息科学、材料科学、生物医学、军事科学等学科的发展提供了良好的参考价值,具有十分重要的现实意义。目前,电磁逆散射理论、方法及应用研究已经引起越来越多研究爱好者的兴趣。

1.2 电磁场逆问题分类

电磁场中的逆问题,总的来说可分为三类:

(1)电磁场中的逆源问题。通过源外部的辐射场确定源的结构及特性。

(2)电磁场中的逆散射问题。在给定入射场及背景环境电磁参数的情况下,通过测量相应的散射场来确定散射体几何特性和物理特性。该问题又可分为两类,一类是目标的定位,即确定目标的位置和外部边界;另一类是目标的参数辨识,即重构出目标的电磁参数,如介电常数、电导率等。

(3)电磁场中的优化问题。例如,天线的优化问题,即对于一个天线(或天线阵),通过设定的辐射场来优化、确定天线(或天线阵)的几何和电磁参数。

对于电磁逆散射,又可以从不同的角度把电磁逆散射分为不同的类型。比如,根据测量的散射场距离目标的距离,可分为近场和远场逆散射;根据电磁波工作频带的不同,可分为频域(单频或窄带)和时域(多频或宽带)逆散射;根据入射波的形态,可分为TM波、TE波或者混合波逆散射;根据反演目标的电磁特性,可分为导体、介质(各向同性或各向异性介质)及导体介质复合结构电磁逆散射;根据反演问题的物理维度,可分为一维、高维(二维、三维)电磁逆散射;根据散射场数据获取方式的不同,可分为频域电磁逆散射和时域电磁逆散射;根据目标所处的环境,可分为自由空间目标和埋地目标电磁逆散射;根据目标体的个数可分为单目标和多目标逆散射;根据入射波频率和入射角度的个数,可分为单入射波和多入射波电磁逆散射等。

1.3 逆散射中的数学问题

逆散射问题的求解比正问题要复杂得多,问题本身固有的非线性特征(散射体各部分间的相互作用造成的)和不适定性,使得逆散射研究显得十分困难。电磁逆

散射主要是指频率处于谐振区即电磁波波长和散射体尺寸可比拟的情况。在此情况下,电磁波的衍射和多散射效应明显,导致了逆散射问题呈现强烈的非线性特征和严重的不适定性,而非线性又加剧了不适定性的程度。

所谓不适定性是下列三项条件中有一个不满足:①解的存在性;②解的唯一性;③解的稳定性。从物理上看,由于实际问题中目标的客观存在,逆散射问题解的存在性总是成立的,所以不适定性(包括不唯一性和不稳定性)是电磁逆散射算法设计时要考虑的首要问题。

1.4 研究方法

电磁逆散射问题可分为两类:点状散射体和扩展散射体的逆散射问题。下面分别对这两类逆散射问题及研究方法做一简单介绍。

点状物体是指其几何尺寸远小于入射波长散射体,满足长波近似条件,这类问题可以看成是具有适定性的良态问题,但其内在的非线性依然较强。处理点状目标逆散射问题的几种代表性方法有:合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)技术、时间反转算子分解(decomposition of the time reversal operator, DORT)算法、多重信号分类(multiple signal classification, MUSIC)算法等。DORT算法通过测试天线阵列中每一对收发天线的脉冲响应,应用信号处理的方法得到电磁波信号的时间反演,通过对时间反演信号的特征值分析来获得被测区域内部的信息。MUSIC算法可看成是在Pisarenko方法基础上的一种改进算法,近二十年才被应用到逆散射领域,MUSIC算法是通过分析信号或其自相干矩阵的特征空间,从而达到对目标频谱信息的估计。需要指出的是,在利用MUSIC算法获取目标的位置后,通过一定的分析方法可进一步获得目标散射体的电磁参数。一般来说,DORT算法对测量环境的要求较高,而MUSIC算法要比DORT算法更容易得到良好的成像结果。

扩展散射体的逆散射研究一直是电磁领域的一个重大研究课题。在各种电磁逆散射算法中,无论是对几何参数(形状、大小、位置),还是对电磁参数(介电常数、电导率)成像的算法,都需要解决非线性和不适定性这两个根本困难。扩展散射体由于其物理尺寸大于或可比拟入射波波长,所以逆问题的非线性和病态性越强,反演难度越大。目前发展起来的逆散射方法可分为线性逆散射和非线性逆散射两类方法。线性逆散射方法是一种近似方法,但适用条件较为苛刻,一般只适用于弱散射体,即散射体的相对介电常数与背景介质比较接近。此时,可通过一阶玻恩(Born)近似或里托夫(Rytov)近似得到线性的逆散射模型,其典型应用则是著名的玻恩迭代算法(Born iterative method, BIM)、变形玻恩迭代法(distorted Born iterative method, DBIM)。通过将比较容易获得的入射场数据近似为总场数据,

可比较方便地得到场与解的线性关系。近似方法算法简单, 计算量小, 计算速度快, 可用于准实时电磁逆散射研究。需要指出的是, 在大多数线性近似方法中, 研究者大多采用了一阶 Born 近似或 Rytov 近似, 这也导致了虽然迭代收敛速度较快, 但反演精度和鲁棒性有所欠缺。同时, 它通常只对弱散射体有效, 对于对比度很大的目标, 其效果很差, 在实际应用中有一定的局限性。

第二类扩展散射体逆散射方法是通过逐次线性化过程来实现的非线性方法, 由于该类方法通常包含迭代过程, 且该迭代类问题通常可归结为一个非线性优化问题的求解, 故又称为最优化方法。近年来, 逆散射最优化方法得到了很大的发展, 该方法由于未包含任何线性近似而能实现较高精度的电磁成像, 且对反演目标的对比度要求不高。但由于计算量大, 其电磁逆散射的实时性较差, 提高收敛速度是此类方法解决的问题之一。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处理电磁逆散射问题。这里为方便读者参考, 给出一些在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, 本书对此简要归纳: 按照可行集的性质, 马昌凤(2010)将最优化问题分为线性规划、二次规划、动态规划、组合规划、最优控制等问题; 按照最优化问题是否附加约束条件, 刘广东(2016)将最优化问题分为两大类: 无约束优化法和约束优化法。本书依据 Pastorino(2010)的分类思路并结合多数研究者的习惯分类, 将最优化方法分为两大类: 确定性优化方法和随机性优化方法。

在确定性优化方法中, 对于约束优化问题, 主要有 Rosen 梯度投影法、(内点、外点、乘子、混合) 罚函数法、坐标轮换法、复合形法; 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, 其中后两类在电磁逆散射中应用较多。间接法主要包含最速下降法、共轭梯度(conjugate gradient, CG)法、牛顿法、拟牛顿法; 非线性 LS 法主要包含阻尼最小二乘(levenberg marquardt, L-M)法、高斯-牛顿(Gauss-Newton, G-N)法、修正 G-N 法。其中, CG 法主要包含 PRP(Polak-Ribiere-Polyak)、FR(Fletcher-Reeves)、DY(Dai-Yuan)、HS(Hestenes-Stiefel)、LS(Liu-Storey)等方法; 拟牛顿法主要有 DFP(Davidon-Fletcher-Powell)法、BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)法。以上是基于优化问题中所采用的数学方法的不同对确定性优化方法进行的分类, 从电磁场逆问题物理本身出发, 近年所发展起来的一些方法, 比如线性抽样方法(linear sampling method, LSM)、局部形状函数(local shape function, LSF)方法、对比源反演(contrast source inversion, CSI)方法、不精确牛顿算法(inexact-Newton method, INM)、子空间优化算法(subspace-based optimization method, SOM)等也可划分到确定性优化方法中。第二大类最优化方法——随机性优化方法主要包括模拟退火(simulated annealing, SA)法、蒙特卡罗(Monte Carlo)法、禁忌搜索(tabu search, TS)法、蚁群(ant colony optimization, ACO)算法、遗

传算法(genetic algorithms, GA)、进化算法(evolutionary algorithms, EA)、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法等。除了最优化方法,近年来机器学习方法也在逆散射领域中得到了应用,机器学习方法主要包括人工神经网络(artificial neural networks, ANN)方法和支持向量机(support vector machines, SVM)方法。上述三大逆散射方法应用于电磁逆散射问题,其收敛特性、收敛速度、精度及鲁棒性等性能对比如表 1.4.1 所示。

表 1.4.1 三大逆散射反演方法的性能对比

方法	收敛特性	收敛速度	精度	鲁棒性
确定性优化方法	局部	快	低	强
随机性优化方法	全局	慢	高	弱
机器学习方法	全局	快	高	强

电磁逆散射问题作为电磁场问题的一个方面,其求解的基础是电磁场正演问题,即电磁场散射问题。计算电磁场散射问题属于计算电磁学的研究范畴,近几十年来已经发展了多种成熟方法,并被多部专著详细论述。本书为了方便读者查阅,罗列了一些常用的方法。电磁场正演方法主要可分为三大类型:解析法(严格解)、近似法(近似解)、数值法(数值解)。三大类电磁场正演方法的性能对比如表 1.4.2 所示。

表 1.4.2 三大类电磁场正演方法的性能对比

方法	物理解释	适用范围	计算速度	精度
解析法	好	窄	快	高
近似法	中	中	中	中
数值法	中	广	慢	高

解析法仅适用于结构简单或空间结构对称、介质类型简单的散射体,如镜像法、分离变量法、傅里叶变换法、模式匹配法、Mie 级数法等。解析法虽然可以获得精确的显式解,但是对于很多实际的电磁问题显得无能为力。由于能够得到严格解的形体实在非常有限,人们不得不发展散射场的各种近似算法来解决更多散射场的计算问题。例如,几何光学(geometrical optics, GO)法、物理光学(physical optics, PO)法、射线追踪法、弹跳射线(shooting and bouncing ray, SBR)法、几何绕射理论(geometrical theory of diffraction, GTD)、物理绕射理论(physical theory of diffraction, PTD)等。因此有人认为,从 20 世纪 40 年代到 70 年代“计算复杂目标的历史就是一部发展近似理论的历史”。

近似法还包括一些半解析方法或模型,比如微扰法(small perturbation method, SPM)、基尔霍夫近似(Kirchhoff approximation, KA)法、积分方程方法(integral equation method, IEM)、双尺度方法(two scale method, TSM)等。这类方法特别适合处理粗糙面介质电磁散射问题,比如粗糙地表面、风驱粗糙海面等,本书在后面章节中将陆续向读者做一简单介绍。

对于大量的电磁场散射问题,散射目标结构和电磁环境复杂,那就必须选用数值法。数值法是对所求解的微分方程或积分方程实施离散,采用一组基函数表示电场、磁场或感应电流等未知量,然后将电磁场微分方程或积分方程转换为一组线性方程组,即可按照标准的数值程序求解这些线性方程组。数值法的优点在于容易处理结构复杂的散射体,而且通常可以获得较高精度。随着高性能计算机的飞速发展,数值法已经成为解决实际问题必不可少的重要工具。现今已发展多种数值法,各具特色,分别适用于求解不同的电磁散射问题。

数值法按照方程离散形式的不同,可进一步细分为微分方程(differential equation, DE)法、积分方程(integral equation, IE)法和混合法3个子类。一般来说,DE法的优点是适合求解无限域问题,生成的矩阵为稀疏矩阵,适于并行计算,方便处理非均匀、非线性、时变、色散等特殊介质。不足之处是生成矩阵阶数高、计算精度较低,特别是为了模拟目标全空间中的电磁特性,必须引入吸收边界条件(absorbing boundary condition, ABC)。基于DE法的电磁场数值方法包括有限元法(finite element method, FEM)、传输线法(transmission line method, TLM)、有限差分法(finite different method, FDM)。其中FDM包括频域有限差分(finite difference of frequency domain, FDFD)法、时域有限差分(finite difference of 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)法、时域有限体积(finite volume time domain, FVTD)法等。IE法的优点是生成矩阵的阶数低、计算精度高,且无须吸收边界;缺点是该方法需要求解稠密的矩阵方程,对于电大尺寸的散射体,将消耗大量的计算机内存和运行时间。IE法又可分为表面积分方程法(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、自适应积分方程法(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)、稀疏矩阵规范网格(sparse matrix canonical grid, SMCG)法、多层快速多极子算法(multilevel fast multipole algorithm, MLFMA)、最陡下降快速多极子方法(steepest descent FMM, SDFMM)、前后向迭代方法(forward backward method, FBM);TDIE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。

在处理复杂目标、电大尺寸、复杂环境电磁散射问题时,近年来也发展了一些近似法与数值法相结合的混合方法,这类混合方法既有效地降低了计算机内存需求和运行时间,计算结果又能保持较高的精度,如 PO+MoM、PTD+MoM、SBR+MoM、SBR+FEM、SBR+FDTD 等。

1.5 研究进展和现状

对电磁逆散射问题的关注与研究开始于第二次世界大战后期,尤其是当时雷达与声呐的成功应用,促使科学家更进一步地考虑除了简单地确定散射体的位置,能否确定更多的信息。由于逆散射研究有着重要的应用价值,长期以来受到广泛关注,尤其是近二十年来随着计算机、数值计算、测量等相关技术的飞速发展,有关电磁逆散射的研究在国内外都相当活跃。

目前发展起来的逆散射方法可分为线性逆散射和非线性逆散射两类,线性逆散射方法是一种近似方法,但适用条件较为苛刻,一般只适用于弱散射体,即散射体的相对介电常数与背景介质比较接近,此时可通过一阶 Born 近似或 Rytov 近似得到线性的逆散射模型,其典型应用则是著名的 Born 迭代算法,通过将比较容易获得的入射场数据近似为总场数据,可比较方便地得到场与解的线性关系。Chew 等(1992)利用 Born 近似,将总场近似为入射场,通过改进的牛顿法迭代求解二维逆散射问题,在高低频都得到了较好的效果。针对强散射体,Cui 等(2004)提出了高阶 Born 近似(high-order extend Born approximation)方法,取得了较好的成像效果,为后续强散射体逆问题研究奠定了基础。

随着计算机技术和数值算法的发展,加上线性近似方法在应用上的限制,人们开始注重直接处理非线性逆散射,即非线性积分方程的精确求解,该类方法往往通过最小二乘原理将原问题转化为一个优化问题,通过优化算法,寻找模型目标函数的最小值来实现逆散射问题的求解。非线性优化算法因为考虑了多次散射效应,且不包含任何线性近似,可以精确得到目标散射体的几何和物理参数。但由于逆问题本身固有的非线性和病态性,非线性优化算法在实际应用中受到了极大限制,这也导致国内学者对非线性逆散射方法研究相对较少。一般来说,根据优化方式的不同,非线性逆散射方法主要可分为三类:①结合正则化技术的确定性方法,如变形 Born 迭代法、梯度类迭代算法、线性抽样方法、局部形状函数方法、对比源反演方法、不精确牛顿算法、子空间优化算法等;②具有全局搜索能力的随机性方法,如遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、差分进化算法等;③基于机器学习的人工智能方法,如人工神经网络、支持向量机等。

在确定性方法中,为了加快 Born 迭代算法的收敛速度,一种改进型的 Born 迭代方法(distorted Born iteration method, DBIM)被用于解决二维逆散射问题,与

Born 迭代算法不同的是 DBIM 在每次迭代过程中更新格林函数和散射体内的场值,使得每次优化后的估计误差更小,收敛更快,但同时其计算散射场点源响应的计算代价也随之增大,且抗随机噪声能力较低。在处理非线性逆散射优化问题时,梯度类算法是较为常见的非线性优化算法,包括共轭梯度迭代算法、Newton-Kantorovitch 算法、Levenberg-Marquardt 迭代算法、Gauss-Newton 迭代算法、改进型的梯度算法等。线性抽样方法(linear sampling method, LSM)由 Colton 和 Kirsch 于 1996 年首次提出,并利用该方法研究了多边界条件下二维目标的逆散射成像问题,1997 年,Colton 等引入正则化策略以提高成像效果,随后,LSM 又被推广应用到三维电磁逆散射问题研究。国内四川大学黄卡玛、赵翔教授领导的课题组对该方法进行了深入的研究,特别是在计算效率和算法设计方面,提出了二维 LSM 应用于三维逆散射问题,相比传统的 LSM,其运行时间和入射/接收方向数量均节省 85%左右。与传统逆散射求解方法不同,LSM 是一种较为新颖的电磁逆散射求解方法,其优点是由数学模型建立的线性积分方程未经近似处理,成像效果较好,但该方法的成像精度对初始条件较为敏感,算法设计较为复杂,同时其计算效率也限制了该方法的应用。局部形状函数算法(local shape function, LSF)是一种典型的空域非线性迭代算法,在 LSF 方法中,通过将正演问题的计算转化为二进制形状函数的重建来实现逆散射问题的求解。该算法原理简单,适用于强散射体的成像,故多被用来对金属目标进行重建,但散射场振幅矩阵的求取成为该算法的一个难点。van den Berg 于 1997 年首次提出了基于非线性积分方程的对比源反演(contrast source inversion, CSI)算法,该算法通过重构对比源和对比度的迭代序列,创造性地将逆散射问题转化为求解目标函数极小值的优化问题。该算法在迭代过程中,通过对数据方程和状态方程的修正实现了对比源和对比度在每一次迭代中的更新,从而提高了算法的收敛速度,且该算法在迭代过程中无须进行正演计算,降低了对系统的内存需求,适用于均匀背景介质和层状背景介质。目前,CSI 算法已成为处理电磁逆散射问题最主要的算法之一。不精确牛顿算法(inexact-Newton method, INM)是近年来发展的一种典型的确定性算法,由两个嵌套的循环组成,外循环使非线性散射方程线性化,内循环则运用具有正则化效果的 Landweber 迭代求解被线性化了的方程,该算法适用于包含强散射体的电磁逆散射问题。Otto 和 Chew(1994)在对比源框架下,采用 INM 对介质目标进行了逆散射研究,结果表明在重构精度及噪声鲁棒性等方面有一定的改进,同时,基于对比源框架下数据方程(data equation)和状态方程(state equation)的融合,显著降低了该算法的内存需求。近年来,一种新的优化算法——子空间优化算法(subspace-based optimization method, SOM)被应用到逆散射问题研究。该算法实际上是在 CSI 算法的基础上,通过引入类似 MUSIC 算法的奇异值分解(singular value decomposition, SVD)方法,将感应电流分成两个部分:确定性感应电流部分和模糊性感应电流部分。确定性感应电流部分由频谱分析得到,模糊性感应电