

目标与环境 电磁散射特性建模

——理论、方法与实现（基础篇）

主 编 聂在平 副主编 方大纲



国防工业出版社

National Defense Industry Press

目标与环境电磁散射特性建模 ——理论、方法与实现

(基础篇)

主 编 聂在平

副主编 方大纲



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

《目标与环境电磁散射特性建模——理论、方法与实现》系统介绍了目标与环境电磁散射理论及各类分析、计算方法,讨论了这些算法的原理、实施技术和适用范围,以及相关理论、技术的发展和展望;同时,也介绍了与上述内容密切相关的目标与环境的几何建模、电磁散射特性的测量以及模型的校模、验证方法。分为“基础篇”和“应用篇”上、下两册。“基础篇”重点介绍了目标与环境电磁特性建模的理论、方法和实现途径,共有 10 章内容,主要包括电磁理论及电磁散射基础、电磁散射的解析方法、电磁散射的积分方程方法、电磁散射的微分方程方法、高频渐近技术、电磁散射计算的混合方法、数值分析中的高效算法、随机介质电磁散射与辐射传输、电磁散射计算的并行算法、电磁散射测量和模型的校模验证等。本书由国内长期从事目标与环境特性研究的众多知名专家联合撰写而成,内容贴近工程实用需求,适合于高等学校相关专业高年级本科生及研究生、相关科研院所的工程技术人员作为学习、研究目标与环境电磁散射问题的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

目标与环境电磁散射特性建模——理论、方法与实现
(基础篇)/聂在平主编. —北京:国防工业出版社,2009.3
ISBN 978-7-118-04608-3

I. 目... II. 聂... III. 电磁波散射—建立模型
IV. 0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 071144 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 25 $\frac{3}{4}$ 字数 618 千字

2009 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

编辑委员会

主 任：陈军文

副 主 任：聂在平 樊寄松

委 员：（按姓氏笔画排序）

马 力	邓联平	印国泰	庄钊文	刘文清
李智勇	吴兴无	吴振森	张 琼	张忠治
陈晓盼	金连宝	赵 基	胡均川	宣益民
徐学文	徐根兴	董雁冰	靳云姬	蔡 琨

编 辑 部

主 编：聂在平

副 主 编：方大纲

编著人员：（按姓氏笔画排序）

王 超	王宝发	王晓峰	方大纲	白 璐
印国泰	刘 鹏	刘铁军	许小剑	杨正龙
吴振森	张 民	张剑峰	陆卫兵	昂海松
金东兴	金亚秋	周建江	郑奎松	胡 俊
俞文明	聂在平	殷红成	盛卫星	盛新庆
崔铁军	葛德彪	韩一平		

序

电磁场理论与计算在对多类科学与工程问题的理解与解释中起着极其重要的作用。1866年,英国科学家J.C.麦克斯韦(Maxwell)在解电磁场微分方程过程中就预测到电磁场辐射波的存在,其后20年,赫兹(Hertz)在他的实验室中证明了麦克斯韦的科学推理,在历史上首次产生并接收到了无线电电磁波。可见,在人类思维中,严格的数学推导有它可贵的特殊位置。同样,在无线电科学与技术的发展长河中,电磁场理论与计算对该领域一直起着重要的推动作用。

20世纪30年代,雷达问世。接着,微波遥感、目标隐身(低散射)、目标分类与识别等科学技术相继兴起,它们对目标与环境电磁散射特性研究提出了很高的要求,从而促进了电磁散射理论和计算的发展。半个世纪以来,求解电磁散射场和逆散射问题大致可分为三类方法。一是精确解析解。用解析式描述边界问题,它适用于具有符合坐标系并使波动方程可分离的一类几何结构目标的散射求解。二是数值计算。对麦克斯韦方程或与之等效的积分方程采用数值计算法求解,典型的是矩量法,随着计算技术提高,有限元法、时域有限差分法、快速多极子算法以及有限积分法等数值计算方法都相当有效。三是高频近似算法。由于多数受微波照射的雷达目标都处于光学区(目标尺度远大于照射波波长),因此可以基于场局限性原理来处理目标结构的有限性,高频近似算法在处理相关的边缘、表面行波、爬行波和多次绕射等问题时都很有效,算法虽然近似,但能满足工程要求,尤其多种方法相混合,其结果更为准确。这些方法包括几何光学法、几何绕射理论、一致性绕射理论、物理光学和物理绕射理论等。

再从电磁散射测量角度来看,现代雷达理论与技术的迅速发展,带动了电磁目标散射测量水平的提高,标志性的测量技术有低雷达散射截面(LRCS)和角闪烁(Glint)等,尤其在解决瞬时宽带空间目标散射、相位及其变化率(用于逆合成孔径成像)、瞬变电磁场、异向介质散射等新问题中,目前复散射测量准确度仍优于理论计算。可是测量只能在有限几何空间内进行,再加上目标与环境散射特征随空间、时间、电磁谱段、极化等参数变化的多样化与复杂性、任何最完备的感知系统也无法完整地进行测量数据建模。因此,理论计算与实验测量必须科学地结合起来,必须贯彻“理论建模、实验校模”的思想,完整地建立起目标与环境电磁散射研究的框架,使目标与环境电磁散射研究形成一支相对独立的分支科学,并定位于基础应用研究,它将有力地支撑现代雷达、微波/毫米波遥感、隐身和目标识别等先进技术进一步发展。

30多年来,我国在目标与环境电磁散射领域经几代科技工作者的辛勤努力,成绩显

著,研究水平基本与世界同步。结合我国国民经济和国防建设的需要,有针对性地解决了多类地面目标、海面目标及其环境、大气层内与空间多类目标电磁散射的理论计算和实验测量等问题,完成建模、建库和工程化设计,为我国的雷达学、航天航空技术与微波遥感技术发展做出了贡献。我国在该领域的研究工作经历了从薄弱的技术基础到形成一定的研究规模,从各单位分散研究状态到形成在总体牵引下的配套、协同研究,从各专业独立研究到形成理论建模与全尺寸、缩比与动态测量相结合的闭环研究,使模型的“校核、验证与确认”得到稳步发展,从学科化研究到形成应用需求牵引下的全过程综合开发研究,逐步走出了一条发展—创新—应用的新路子。《目标与环境电磁散射特性建模——理论、方法与实现》一书的诞生正是上述努力所取得的标志性成果之一,它是从事目标与环境电磁散射特性技术领域研究的专家们集体智慧的结晶,是他们长期工作成果的总结与展示,是这一领域的集大成者。

本书分为“基础篇”和“应用篇”上、下两册。其中“基础篇”重点介绍目标与环境电磁特性建模的理论、方法和途径。“应用篇”重点介绍目标与环境电磁散射特性建模的实现及相关算例。全书内容理论联系实际,既具有较高的学术水平,更具有广泛的应用价值。在此,我谨向全书编者和广大科技工作人员致敬,并衷心地祝贺本书出版,向在编辑出版过程中付出辛勤劳动的工作人员表示深深的感谢。相信本书的出版,对于从事相关专业领域的研究、教学和工程技术人员,一定会有很好的参考价值。

中国工程院院士
“目标与环境电磁散射辐射”重点实验室
学术委员会主任

黄培康

前 言

目标与环境电磁散射特性作为重要的雷达共性基础技术,既是当前的学科研究前沿,也是具有全局性、基础性和先行性的关键技术领域。

正因如此,目标与环境电磁特性的研究一直都备受关注。在国际上,目标与环境电磁散射特性的研究从一开始就在各种强烈的实际工程需求牵引下提出,并获得了持续不断的高强度的资助。反过来,其研究成果,包括理论预估方法、测量数据和用于目标特性分析的各种计算机代码等也获得了工业界的广泛应用。美国电磁代码联合体的工作就是一个典型的例证。当前,目标与环境电磁散射特性研究正朝着建模的精细化、计算的精确化、代码的通用化、多平台(陆、海、空、天)、多传感器和多波段的信息获取及综合利用方向发展。

在国内,目标与环境电磁散射特性的研究工作也日益受到重视并表现出长足的进步。我国从20世纪60年代开始这方面的研究工作,70年代开始系统地从事理论和实验方面来研究目标的电磁特性与光学特性,为我国制造技术的发展做出了贡献。80年代以来,随着我国装备制造业向自行设计研制发展,许多科研院所开展了各种目标电磁散射特性的理论建模和测量技术研究。

近年来,目标与环境电磁散射特性研究水平有了新的飞跃。测试与校验进一步规范化,数据采集与建模研究体系化,成果转化与应用研究一体化。形成了一些具有较高置信度的工程实用化模型,并在各类装备论证、设计、仿真、预估和定型中获得应用。

基于这样蓬勃发展的研究背景,国内长期从事目标与环境电磁散射特性研究的专家编写了这套专著,意在总结目标与环境电磁散射特性的理论研究成果与工程实践经验,与各界交流研究的心得,以满足目标与环境特性研究的需求,起到抛砖引玉、交流共享、互相促进的作用。

《目标与环境电磁散射特性建模——理论、方法与实现》主要介绍了目标与环境电磁散射理论及各类分析、计算方法,讨论了这些算法的原理、实施技术和适用范围,以及相关理论技术的发展历史和未来展望;同时,还介绍了目标与环境电磁散射测量技术。除了目标散射的电磁模型,还特别介绍了目标的几何建模方法。上述内容均贴近工程实用需求,适合于高等学校、科研院所的相关专业研究生和工程技术人员作为学习、研究的参考书籍。

本书分为“基础篇”和“应用篇”上、下两册。

上册“基础篇”重点介绍目标与环境电磁特性建模的理论、方法和实现途径,共分为10

章。绪论由聂在平、方大纲、刘铁军、许小剑撰写,第1章“电磁理论及电磁散射基础”由刘铁军、许小剑撰写,第2章“电磁散射的解析方法”由吴振森、白璐、韩一平撰写,第3章“电磁散射的积分方程方法”由崔铁军、陆卫兵、张剑峰撰写,第4章“电磁散射的微分方程方法”由葛德彪、盛新庆撰写,第5章“高频渐近技术”由王宝发撰写,第6章“电磁散射计算的混合方法”由盛新庆撰写,第7章“数值分析中的高效算法”由聂在平、胡俊、王晓峰撰写,第8章“随机介质电磁散射与辐射传输”由金亚秋撰写,第9章“电磁散射计算的并行算法”由葛德彪、聂在平、郑奎松撰写,第10章“电磁散射测量和模型的校模验证”由印国泰、殷红成撰写。

本书各章的撰写工作,本着分工合作的原则,由国内长期从事该领域研究的上述各位专家及其研究小组共同完成。由于各位作者知识结构、学识水平的客观限制,本书错、漏或不当之处在所难免,衷心希望各界专家、同仁不吝指教,直言批评,使本书渐趋完善。

编者

目 录

绪论	1
参考文献	4
第 1 章 电磁理论及电磁散射基础	6
1.1 麦克斯韦方程组	6
1.2 本构关系式	8
1.3 边界条件	11
1.3.1 一般边界条件	11
1.3.2 阻抗边界条件	12
1.4 坡印廷矢量	12
1.5 矢量位和标量位	14
1.6 几个重要定理	15
1.6.1 唯一性定理	15
1.6.2 镜像法	15
1.6.3 等效原理	16
1.6.4 感应定理	17
1.6.5 对偶定理	18
1.6.6 互易定理	19
1.7 雷达目标散射截面及其求解	20
1.7.1 雷达散射截面的定义	21
1.7.2 雷达散射的三个特征区域	22
1.7.3 雷达目标散射问题的典型解	23
参考文献	25
第 2 章 电磁散射的解析方法	26
2.1 分离变量法	26
2.1.1 交变电磁场与波动方程	26
2.1.2 规则坐标系下矢量波函数	27
2.2 多层介质球的电磁散射	35
2.2.1 均匀介质球电磁散射	35
2.2.2 内部场和散射场的矢量球谐函数展开	36
2.2.3 介质球电磁散射的角函数	36
2.2.4 均匀球的散射场特性	37
2.2.5 多层球的电磁散射	42
2.3 多层介质柱的电磁散射	45

2.3.1	均匀介质柱的电磁散射	45
2.3.2	无限长多层圆柱的电磁散射	48
2.4	椭球对平面波的电磁散射	51
2.4.1	平面波用椭球谐矢量波函数的展开	51
2.4.2	均匀椭球对平面波的电磁散射	52
2.4.3	均匀导体椭球对平面波的电磁散射	55
2.4.4	均匀椭球对平面波的电磁散射数值计算	55
2.5	有限波束的电磁散射	56
2.5.1	无限长多层圆柱对波束的电磁散射	56
2.5.2	多层球对高斯波束的电磁散射	59
2.5.3	多层圆柱和多层球对高斯波束的散射的数值计算	64
2.5.4	旋转椭球对高斯波束的散射	65
	参考文献	69
第3章	电磁散射的积分方程方法	71
3.1	格林函数	71
3.1.1	标量格林函数	72
3.1.2	矢量波动方程和并矢格林函数	73
3.1.3	半空间问题的格林函数	75
3.2	积分方程	77
3.2.1	导体目标的表面积分方程	77
3.2.2	细导线目标的线积分方程	78
3.2.3	介质目标的积分方程	79
3.3	矩量法	82
3.3.1	矩量法的基本原理	82
3.3.2	基函数和测试函数	83
3.3.3	脉冲基函数和三角形基函数	84
3.3.4	基于三角片元的RWG基函数	85
3.3.5	基于RWG基函数的理想导体目标的矩量法	86
3.3.6	基于RWG基函数的均匀介质目标的矩量法	87
3.3.7	非均匀介质目标的矩量法	88
3.3.8	矩阵方程的求解	88
3.4	极低频问题的矩量法	90
3.4.1	极低频情况下普通矩量法的局限性	90
3.4.2	环状基函数和树状基函数	91
3.4.3	电场积分方程的矩量法实现	92
3.4.4	磁场积分方程的矩量法实现	94
3.5	特殊结构的矩量法	96
3.5.1	线一面接头基函数及其矩量法实现	96
3.5.2	基于物理特性的新型基函数及其应用	98
3.6	矩量法中格林函数奇异性的处理	102

3.6.1	线结构的奇异性处理	102
3.6.2	面结构的奇异性处理	103
3.6.3	线—面连接结构的奇异性处理	104
3.7	开放结构积分方程的精确形式	105
3.7.1	开放细导线结构的精确电场积分方程	105
3.7.2	开放导体结构的精确电场积分方程	106
3.7.3	介质体的精确电场积分方程	107
	参考文献	108
第4章	电磁散射的微分方程方法	111
4.1	有限元法的基本步骤	111
4.2	二维电磁散射的标量有限元求解	112
4.2.1	问题的数学描述	112
4.2.2	二维吸收边界条件	113
4.2.3	二维电磁有限元的泛函	114
4.2.4	二维电磁有限元的标量基函数	115
4.2.5	二维电磁有限元泛函的离散	116
4.2.6	有限元矩阵边界条件的强加	118
4.2.7	算例	118
4.3	三维电磁散射的矢量有限元求解	119
4.3.1	问题的数学描述	119
4.3.2	三维吸收边界条件	119
4.3.3	三维电磁有限元的泛函	120
4.3.4	三维电磁有限元的矢量基函数	121
4.3.5	泛函变分表达式的离散	122
4.3.6	线性方程组的求解	124
4.3.7	有限元稀疏矩阵的存储	125
4.3.8	远区散射场的计算	126
4.3.9	算例	126
4.4	时域有限差分方法的基本格式	127
4.4.1	Yee 元胞	127
4.4.2	直角坐标中的 FDTD: 三维情形	128
4.4.3	直角坐标中的 FDTD: 二维情形	130
4.4.4	直角坐标中的 FDTD: 一维情形	132
4.4.5	空间间隔与时间间隔的选取	133
4.5	截断边界——Mur 吸收边界条件	133
4.5.1	Engquist-Majda 吸收边界——单向行波方程方法	133
4.5.2	一阶和二阶近似公式	134
4.5.3	Mur 吸收边界条件的 FDTD 形式	135
4.5.4	棱边和角顶点的特殊考虑	137
4.6	截断边界——完全匹配层	140

4.6.1	平面波入射到半空间单轴介质分界面情形	140
4.6.2	单轴各向异性分界表面的无反射条件:匹配矩阵	142
4.6.3	棱边和角顶区	144
4.6.4	三维 UPML 的时域公式	146
4.6.5	三维 UPML 的 FDTD 公式	148
4.7	近场—远场外推	151
4.7.1	等效原理	151
4.7.2	时谐场外推公式	152
4.7.3	封闭面积分计算的平均值方法	154
4.7.4	瞬态场外推公式	156
4.7.5	瞬态场外推的投盒子方法	157
	参考文献	160
第 5 章	高频渐近技术	162
5.1	高频渐近技术概述	162
5.2	几何光学	165
5.2.1	麦克斯韦方程的渐近解	165
5.2.2	高频的几何光学近似	165
5.2.3	均匀媒质中射线场的表示式	167
5.2.4	几何光学入射场、反射场和透射场	168
5.3	边界条件	174
5.3.1	广义阻抗边界条件	175
5.3.2	吸收边界条件	175
5.3.3	人造硬边界和软边界条件	176
5.4	物理光学	177
5.4.1	Stratton - Chu 积分方程及其简化形式	177
5.4.2	切平面近似	179
5.4.3	物理光学方法的几种具体型式	179
5.4.4	迭代物理光学(IPO)	180
5.5	绕射射线场分析方法	181
5.5.1	绕射场基本概念	181
5.5.2	理想纯导电直劈的绕射场	183
5.5.3	理想导电曲边缘的绕射场	186
5.5.4	尖顶和拐角绕射	189
5.5.5	不连续曲面的绕射矩阵	192
5.5.6	物理光学(PO)与物理绕射理论(PTD)	193
5.5.7	阻抗劈绕射	196
5.6	表面波绕射	199
5.6.1	光滑凸曲面散射问题的 GTD 解	200
5.6.2	光滑凸曲面上源的辐射问题的 GTD 解:阴影区的场	201
5.6.3	凸曲面散射问题的 UTD 解	203

5.6.4	凸曲面上源辐射问题的 UTD 解	206
5.6.5	涂层目标的表面波	209
5.7	焦散区场量求解法	210
5.7.1	等效电磁流法	210
5.7.2	增量长度绕射系数(ILDC)	212
5.8	时域高频技术	214
5.8.1	时域高频物理光学近似	214
5.8.2	时域一致性绕射	215
	参考文献	218
第 6 章	电磁散射计算的混合方法	222
6.1	混合法的基本原理	222
6.1.1	等效原理	222
6.1.2	模式理论	224
6.2	高频近似方法和全波数值方法的混合	224
6.2.1	高频近似法与有限元法的混合	224
6.2.2	高频近似法与矩量法的混合	227
6.3	全波数值方法之间的混合	229
6.3.1	有限元、边界元、多层快速多极子的混合——合元极技术	229
6.3.2	电场积分方程与磁场积分方程的混合	235
6.3.3	有限元法与模匹配法的混合	237
	参考文献	240
第 7 章	数值分析中的高效算法	241
7.1	快速多极子方法	241
7.1.1	快速多极子方法研究历程	241
7.1.2	快速多极子方法原理	243
7.1.3	快速多极子方法数值实现	244
7.1.4	快速多极子方法与矩量法的存储量、计算量对比	246
7.2	多层快速多极子方法	247
7.2.1	多层快速多极子方法研究历程与现状	247
7.2.2	多层快速多极子方法原理	248
7.2.3	多层快速多极子方法数值实现	249
7.2.4	数值误差	251
7.2.5	优化技术	251
7.2.6	计算性能与存储量考察	256
7.2.7	方法评价、预测及展望	258
7.3	基于多层快速多极子方法(MLFMA)的高效方法	259
7.3.1	加速矩阵矢量相乘计算的方法	259
7.3.2	降低迭代次数的高效方法	261
7.3.3	基于高阶基函数的多层快速多极子方法	263
7.4	基于快速傅里叶变换求解积分方程的其他高效方法	267

7.4.1	共轭梯度—快速傅里叶变换方法	267
7.4.2	自适应积分方程方法	267
	参考文献	271
第8章	随机介质电磁散射与辐射传输	275
8.1	矢量辐射传输(VRT)理论	275
8.1.1	VRT方程的成分	276
8.1.2	四个斯托克斯参数的VRT方程	277
8.2	晴空大气VRT和一层植被VRT方程	279
8.3	VRT解法	280
8.3.1	球形粒子VRT的迭代法	280
8.3.2	球形粒子VRT离散坐标和特征值方法	281
8.3.3	非均匀散射介质VRT的不变嵌入法	282
8.3.4	球形粒子主动VRT的傅里叶变换	282
8.3.5	非球形粒子VRT方程的Mueller矩阵解	282
8.3.6	非均匀分层植被极化脉冲回波Mueller矩阵解	283
8.3.7	蒙特卡罗数值模拟	286
8.3.8	复合建模的VRT与三维VRT	287
8.3.9	密集粒子的DVRT	287
8.3.10	广义玻恩近似下散射解	288
8.3.11	非均匀群聚粒子的CVRT	289
8.4	全极化散射与SAR对地观测成像	289
8.4.1	全极化散射的Mueller矩阵和相干矩阵	290
8.4.2	SAR多视图四个斯托克斯参数统计特性	292
8.5	环境杂波与目标回波的极化零值	294
8.6	随机粗糙面的散射	296
8.6.1	KA、SPA、COM近似	296
8.6.2	计算机数值模拟粗糙面散射	298
	参考文献	300
第9章	电磁散射计算的并行算法	304
9.1	并行计算的基本概念	304
9.1.1	并行计算的发展	304
9.1.2	相关基本概念	304
9.2	分布式并行计算平台	306
9.2.1	基于工作站网络的并行系统	306
9.2.2	基于个人计算机环境的并行系统	307
9.3	集群环境	307
9.3.1	集群技术	307
9.3.2	通信库	309
9.3.3	搭建集群环境	310
9.3.4	集群性能测试	311

9.4	分布式并行算法中的通信	311
9.4.1	TCP/IP 协议	312
9.4.2	Windows 线程和线程间的同步	314
9.5	并行矩量法	316
9.5.1	并行矩量法与串行矩量法流程对比	316
9.5.2	数据域分解技术	320
9.5.3	通信技术	324
9.6	并行多层快速多级子方法	329
9.6.1	数据预处理技术	329
9.6.2	Morton 键	329
9.6.3	数据域分解	331
9.6.4	邻接阻抗元素存储策略	331
9.6.5	多层快速多极子矩阵和矢量相乘特点	332
9.6.6	广播树和哑元树技术	332
9.6.7	计算节点间多级转移技术的轮询通信模式	333
9.6.8	RCS 的并行计算	333
9.6.9	串行/并行多层快速多极子流程对比	334
9.6.10	并行程序加速比的评估	334
9.7	并行多层快速多极子方法的应用	335
9.7.1	简单形体目标	335
9.7.2	复杂形体目标	336
9.7.3	超电大目标	336
9.8	FDTD 的并行计算——区域分割与数据传递	337
9.8.1	FDTD 迭代的局域性	337
9.8.2	FDTD 的子域划分	339
9.8.3	相邻子域之间的数据传递	339
9.8.4	特殊边界的处理	342
9.9	FDTD 的并行计算——程序实现	344
9.9.1	PVM 的基本操作命令及子程序	344
9.9.2	编程模式	348
9.9.3	并行 FDTD 流程图及程序	349
9.9.4	程序容错处理	353
9.10	网络并行 FDTD 计算实例	355
9.10.1	二维算例	355
9.10.2	三维算例	355
9.10.3	NASA 杏仁核基准模型	357
9.10.4	导弹模型	358
9.11	并行计算性能测试	361
9.11.1	并行计算所需内存估计	361
9.11.2	金属机翼的计算	362

9.11.3 加速比定义	362
9.11.4 加速比测试与讨论	363
参考文献	364
第 10 章 电磁散射测量和模型的校模验证	365
10.1 电磁散射实验室	365
10.1.1 微波暗室	366
10.1.2 理想导电目标的电磁缩比关系	366
10.1.3 微波暗室的评价指标	367
10.2 RCS 测量方法	367
10.2.1 相对标定法	368
10.2.2 绝对标定法	368
10.2.3 定标体	369
10.3 紧缩场技术	370
10.3.1 偏馈单反射面型紧缩场	370
10.3.2 边缘处理技术	371
10.3.3 紧缩场的主要参数	371
10.4 低散射背景控制技术	372
10.4.1 低散射目标支架	372
10.4.2 矢量场相减技术	372
10.4.3 软件距离门和硬件选通门技术	373
10.5 RCS 测量误差	374
10.5.1 RCS 测量的误差因素	374
10.5.2 背景回波与最小可测 RCS 电平	374
10.5.3 相干误差的统计分析	376
10.6 RCS 输出数据格式	380
10.6.1 RCS 数据的表示	381
10.6.2 RCS 数据的角度窗口平滑和处理	382
10.7 基准体的电磁散射曲线	389
10.8 模型的校验、评估方法	394
10.8.1 点对点比较法	394
10.8.2 平滑比较法	394
10.8.3 成像比较法	395
10.8.4 加权比较法	395
参考文献	396

绪 论

目标与环境电磁散射特性是非常重要的雷达共性基础研究领域。雷达散射截面是描述目标对电磁波散射强度的一个量化指标。对于给定的雷达系统和传播条件,不同情形下的目标与环境电磁散射特性将决定雷达的信号强度和噪声特性,因而决定了雷达的探测性能。另一方面,合理地控制目标与环境的电磁散射特性,则能达到对雷达更好的隐身与伪装效果。因此,目标与环境电磁散射特性研究对于雷达系统的设计、目标隐身和反隐身研究、基于雷达回波信号的目标识别研究、雷达合成孔径成像判读等应用都有极其重要的价值。

目标与环境电磁散射特性数据固然可以通过测量获取。但是,目标与环境电磁散射特性测量要求具备昂贵的测量设备、理想的测量环境,需要耗费大量的人力、物力和财力,还需要较长的测试周期,总之,需要付出极高的成本代价。相比之下,通过理论建模和数值模拟来获得目标与环境电磁散射特性数据,则显得更加容易、方便、价廉。随着计算电磁学的发展和计算机计算能力的迅速提高,目标与环境电磁散射特性的理论建模和数值模拟能力有了飞速提高。几十年前,经典电磁学还只能在几个正交坐标系中处理边界面正好和坐标面重合的简单目标的电磁散射求解;20世纪70年代之后,几何光学理论和基于典型结构散射场高频渐进解的一致性几何绕射理论^[1]大大促进了电大目标电磁散射的近似求解。但是,这些近似求解对诸如目标隐身和目标识别一类的应用,解的精度和可信度还是远远不够的。另一方面,数值方法的优点在于能够给出较为精确的解。但在其诞生初期,求解能力仍十分有限。数值方法分为基于微分方程的数值方法(如有限元法^[2]、有限差分方法^[3])和基于积分方程的数值方法(如矩量法等)。前者产生稀疏矩阵,但未知量分布在整个传播空间中(未知量数目较大),必须对传播空间剖分,易产生网格色散,还必须辅以截断边界。这些也都是解的误差主要来源。以矩量法^[4]为代表的积分方程数值方法只需在散射体二次电流分布区域中剖分(未知量数较易控制),自然满足无穷远条件,网格色散也较小,但产生满矩阵。矩量法出现于20世纪60年代末,尽管能给出精度很高的解,但当时还只能求解电尺寸很小的目标散射问题。90年代以后,随着多层快速多极子方法^[5]的提出,数值方法的求解能力有了极大的发展。长期以来被认为是数值方法求解极限的电尺寸已被轻而易举地突破。随着计算机数值计算能力的提高,现在用数值方法求解电尺寸在100个波长以上的电大目标散射问题已经很容易实现。21世纪开始,数值方法的研究已经在矩量法和多层快速多极子方法的框架下对积分方程新型算子、新的边界条件、新型基函数、新的离散方式和矩阵填充方式、更加高效的大型矩阵方程数值求解方法、改善方程性态、加速迭代求解的方法等方面展开了全面的研究。

当频率进一步提高,原有的确定性目标开始表现出愈加显著的随机特征,如随机粗糙表面等。事实上,诸如随机粗糙地表面、风驱海浪等粗糙海面、农作物和植被、雨雪等都属于随机介质。随机介质的电磁散射往往和环境电磁特性密切相关。以统计模型为基础的随机介质电磁散射又构成了电磁问题另一大类的分析方法^[6]。

如果说雷达散射截面由于强调目标本身固有特性的描述而定义在单频连续波的平面波照射条件下,那么,基于求解目标散射特性的计算电磁学方法已有足够的能力去模拟目标的宽带