

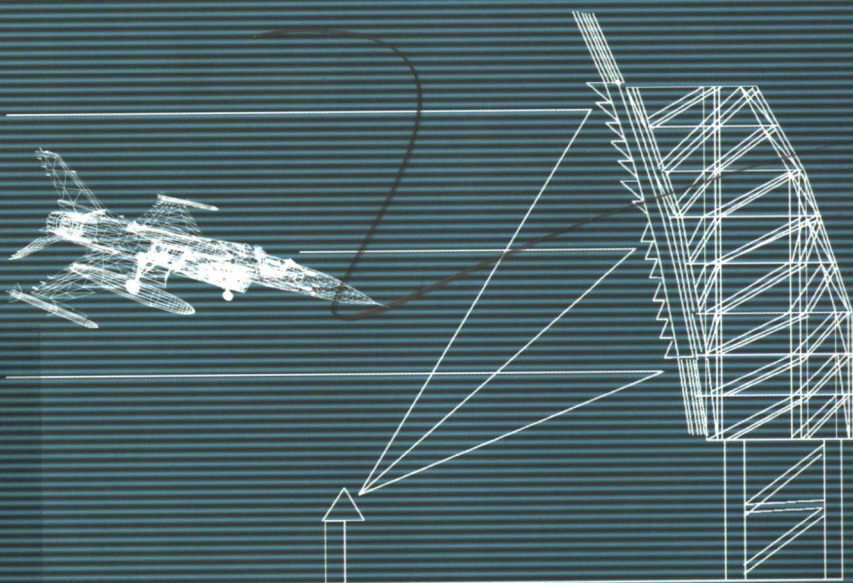
电子科学与技术



国防科工委「十五」规划专著

电磁散射的计算和测量

何国瑜 卢才成 洪家才 邓 晖 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

0441.4
97

2006



国防科工委“十五”规划专著·电子科学与技术

电磁散射的计算和测量

何国瑜 卢才成 洪家才 邓 晖 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书介绍电磁散射的基础理论和技术,包括电磁散射的计算和测量两部分。在计算部分,系统地讲述了当前应用比较广泛的几种计算电磁学方法,如矩量法、有限元法、时域有限差分法、快速多级子算法和有限积分技术。在测量部分,重点讲述测量的基本概念和技术,如近场与远场响应之间的关系、散射测量的仪表系统、紧缩场技术和室外静态场技术。

本书主要针对散射研究的历史、现状进行论述,同时也提出了一些作者自己的学术见解供讨论,可作为从事散射研究的科技人员、教师和研究生的教材或者参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁散射的计算和测量/何国瑜等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2006. 12
ISBN 7-81077-938-9

I. 电… II. 何… III. ①电磁波散射—电磁计算
②电磁波散射—电磁测量 IV. O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 119748 号

电磁散射的计算和测量

何国瑜 卢才成 洪家才 邓 晖 编著

责任编辑 刘晓明

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:850×1168 1/32

印张:15.75 字数:423千字

2006年12月第1版 2006年12月第1次印刷

印数:3 000册

ISBN 7-81077-938-9 定价:35.00元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编委：王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的



伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影晌。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编



著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育



是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

20世纪80年代,电磁散射及其在工程中的应用得到了快速发展。这种发展起源于雷达技术和航空、航天技术的迫切需求。电磁散射的基础研究包括散射计算和测量两部分。在电磁理论中,它属于一个比较年轻的研究领域。

散射场的计算方法大致可以分为三种:

第一种是散射场的严格解。它作为经典的边值问题,根据 Maxwell 方程和边界条件在直角坐标、柱坐标、球坐标和其他正交坐标系中通过分离变量法求解。经过许多优秀理论工作者的努力,在1940年以前就得到了球、圆柱、劈、理想导体半平面、圆盘、椭圆柱和椭球等简单形状的解答。

第二种方法是散射场的近似解。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(GO)法、物理光学(PO)法、几何绕射理论(GTD)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”。

第三种是数值解法。由电磁理论导出著名的 Stratton-Chu(斯特来顿-朱兰成)积分方程是散射理论中的重要方程。该方程将目标上的电流、电荷、磁流、磁荷与散射场之间的关系以积分方程的方式联系起来。矩量法(MoM)、快速多极子法等都是基于 Stratton-Chu 积分方程。由 Maxwell 方程的时域形式和有限差分技术形成的时域有限差分法(FDTD)也是一种重要的数值方法。近年来,基于积分形式 Maxwell 方程的有限积分技术(FIT)也得到了广泛应用。随着计算机技术的进步,数值计算在工程上的实用性已经越来越受到重视,相关的新理论和新方法正在快速发展之中。

本书对以上电磁散射计算的三种方法进行了系统的介绍。

近年来散射测量技术取得了长足进步。散射测量技术的发展主要有三个重要方面:

第一是测量理论与技术,包括天线和散射测量误差模型的建立、测量误差的评估和修正、测量结果的分析、根据近场测量结果预测远场结果以



及根据远场测量结果预测近场结果等。

第二是测试系统的设计和实现。最早采用简单连续波(CW)系统,只能进行单频、低分辨率测量。后来逐步发展了调频连续波(FMCW)测量系统、脉冲测量系统和脉间跳频系统。此外,时域、超宽带测量系统也在进行研究。现代散射测量系统可以实现高分辨率和低分辨率测量、振幅测量和相位测量,测量的精度和测量的效率都在不断提高。

第三是测量场地的研究。场地质量对散射和天线测量的影响很大,成为近年来研究的重点之一,而测量场地建设难度也很高。本书对紧缩场技术进行较全面的讨论,同时对全尺寸室外静态场的新技术进行介绍。

本书比较详细地介绍了有关电磁散射研究的基础理论和方法,目的是为从事散射应用的工程技术人员提供必要的知识。对散射应用方面的大量课题,读者可以参考其他书目。

北京航空航天大学电磁工程实验室多年来在电磁散射计算和测量方面开展了大量的研究工作。本书是实验室同事及历届研究生在电磁散射



领域开展研究工作的总结。本书由何国瑜教授主编,他撰写了第5章、第6章、第7章和第8章;第1章由邓晖博士撰写;第2章、第3章由卢才成博士撰写;第4章由洪家才博士撰写。博士生李志平、陈海波、彭刚、梁宜、万亮,硕士生王正鹏、曹贤德、彭炜等对本书的编写做了大量实际工作。作者感谢苗俊刚教授、王振荣教授、江贤祚教授、徐永斌教授、全绍辉副教授、武建华老师和许鼎老师的大力帮助。

限于作者水平,若书中有不足之处,希望读者提出意见和建议。

作者

2006年10月

目 录

第 1 章 电磁散射的基本理论

1.1	Maxwell 方程	1
1.2	边界条件	3
1.3	位函数和波方程	4
1.4	波方程的基本解	5
1.4.1	平面波	6
1.4.2	柱面波	7
1.4.3	球面波	10
1.5	Green 函数	11
1.6	Stratton - Chu 方程	12
1.6.1	矢量 Green 定理	13
1.6.2	Stratton - Chu 方程	13
1.7	互易定理和反应积分方程	16
1.8	散射及 RCS 定义	19
1.8.1	散射截面定义	19
1.8.2	散射系数定义	24
1.8.3	极化散射矩阵定义	25
1.8.4	散射的方向性函数	26
	参考文献	28

第 2 章 电磁散射的严格解

2.1	引 言	29
2.2	球体的散射	30
2.2.1	球面波的基本理论	30
2.2.2	理想导电球的散射	34
2.2.3	介质球的散射	40
2.2.4	有介质涂敷的导体球的散射	43



2.2.5	导体球的振荡	47
2.3	二维散射问题	53
2.3.1	柱坐标中的一般解	53
2.3.2	导体圆柱的散射	55
2.3.3	介质圆柱的散射	59
2.3.4	分层圆柱体的散射	61
2.3.5	线源激励	65
2.4	劈的散射	66
2.4.1	理想导电劈的绕射	66
2.4.2	阻抗劈的绕射	71
	参考文献	76

第3章 电磁散射的数值计算

3.1	引言	77
3.2	矩量法	77
3.2.1	矩量法的步骤	77
3.2.2	细导线的散射	84
3.2.3	二维散射问题	88
3.2.4	三维散射问题	104
3.3	有限元法	112
3.3.1	有限元的基本步骤	112
3.3.2	二维散射问题的有限元求解	116
3.3.3	三维散射问题的有限元求解	122
3.3.4	边界元法	128
3.4	时域有限差分法	128
3.4.1	时域有限差分法介绍	129
3.4.2	色散误差分析	137
3.4.3	吸收边界条件	138
3.4.4	远区场计算	153
3.4.5	小结	156
3.5	快速多极子算法	156
3.5.1	快速多极子算法的基本公式	158
3.5.2	快速多极子算法的物理意义	160



3.5.3	快速多极子算法的编程实现	160
3.5.4	快速多层多极子算法	163
3.5.5	计算实例	164
3.6	有限积分法	166
3.6.1	Maxwell 栅格方程	166
3.6.2	方程的物理与代数性质	176
3.6.3	算 例	180
	参考文献	188
第 4 章 电磁散射的高频近似计算		
4.1	引 言	192
4.2	几何光学法	196
4.2.1	Snell 定律	197
4.2.2	Fermat 原理	198
4.2.3	能量守恒原理	199
4.2.4	几何光学的场	201
4.3	几何绕射理论	204
4.3.1	边缘绕射线和 Keller 锥	205
4.3.2	表面绕射线	207
4.3.3	顶尖绕射线	207
4.3.4	边缘绕射系数和边缘绕射场	208
4.3.5	表面绕射系数和曲面绕射场	215
4.3.6	爬行波	220
4.3.7	行波散射	221
4.3.8	拐点的绕射场	222
4.3.9	散射中心	223
4.4	物理光学法	224
4.5	物理绕射理论	227
4.5.1	物理绕射场和物理绕射系数	227
4.5.2	等效电流法及其对几何绕射理论的修正	231
4.5.3	增量长度绕射系数及其对物理绕射理论的修正	233
4.6	小 结	234
	参考文献	237



第 5 章 电磁散射测量的基本概念

5.1 引言	243
5.2 远场条件	244
5.2.1 RCS 测量的简单原理	244
5.2.2 远场条件	245
5.3 柱面波谱和平面波角谱的概念	251
5.3.1 柱面波谱	251
5.3.2 平面波角谱	252
5.3.3 横向分量 $A_r(k)$ 和天线远场方向性图	256
5.3.4 全极化平面波谱	257
5.4 近场散射和远场散射之间的关系式	258
5.4.1 两天线间的耦合公式和天线测量的误差模型	258
5.4.2 近场散射和远场散射之间的关系式	272
5.4.3 天线和 RCS 测量误差模型的全极化表达式	285
5.5 背景杂波的影响	288
5.6 相似原理和缩比测量	289
参考文献	293

第 6 章 天线和 RCS 测试的仪表系统

6.1 概述	295
6.2 系统类型	296
6.2.1 FMCW 系统	296
6.2.2 幅相接收机系统	302
6.2.3 射频频脉冲系统	304
6.2.4 时域脉冲系统	308
6.3 系统指标	309
6.3.1 系统灵敏度	310
6.3.2 系统动态范围	313
6.3.3 不模糊区域和数字分辨率	314
6.3.4 测量精度	315
6.3.5 脉冲测量	319
6.3.6 频率扩展	320
6.3.7 速度和效率	327



6.4	接收机设计	330
6.5	单站二维成像	332
6.5.1	成像基本公式	333
6.5.2	一维横向分辨	335
6.5.3	距离-多普勒成像算法(R-D法)	338
6.5.4	卷积反投影法	339
6.6	双站二维成像	341
6.6.1	双站二维成像的几何关系	342
6.6.2	一维距离分辨	344
6.6.3	二维距离分辨	345
6.6.4	仿真结果	346
6.7	几何失真的修正	352
6.8	三维成像	354
6.8.1	单站平面扫描三维成像算法	356
6.8.2	单站平面扫描三维成像算法的仿真	359
	参考文献	360
第7章 紧缩场技术		
7.1	引言	362
7.2	口径天线的近场研究	364
7.2.1	修正 Green 函数和口径绕射的卷积算法	364
7.2.2	均匀分布圆形口径绕射计算	369
7.2.3	均匀分布矩形口径绕射计算	372
7.2.4	边缘处理技术	372
7.3	口径天线近场绕射的相似性	375
7.3.1	严格的相似性	377
7.3.2	渐近的相似性	377
7.4	紧缩场的类型	378
7.4.1	单反射面紧缩场	379
7.4.2	双柱面紧缩场	385
7.4.3	前馈卡塞格仑紧缩场	394
7.4.4	单柱面紧缩场	397
7.5	紧缩场应用中的几个问题	406