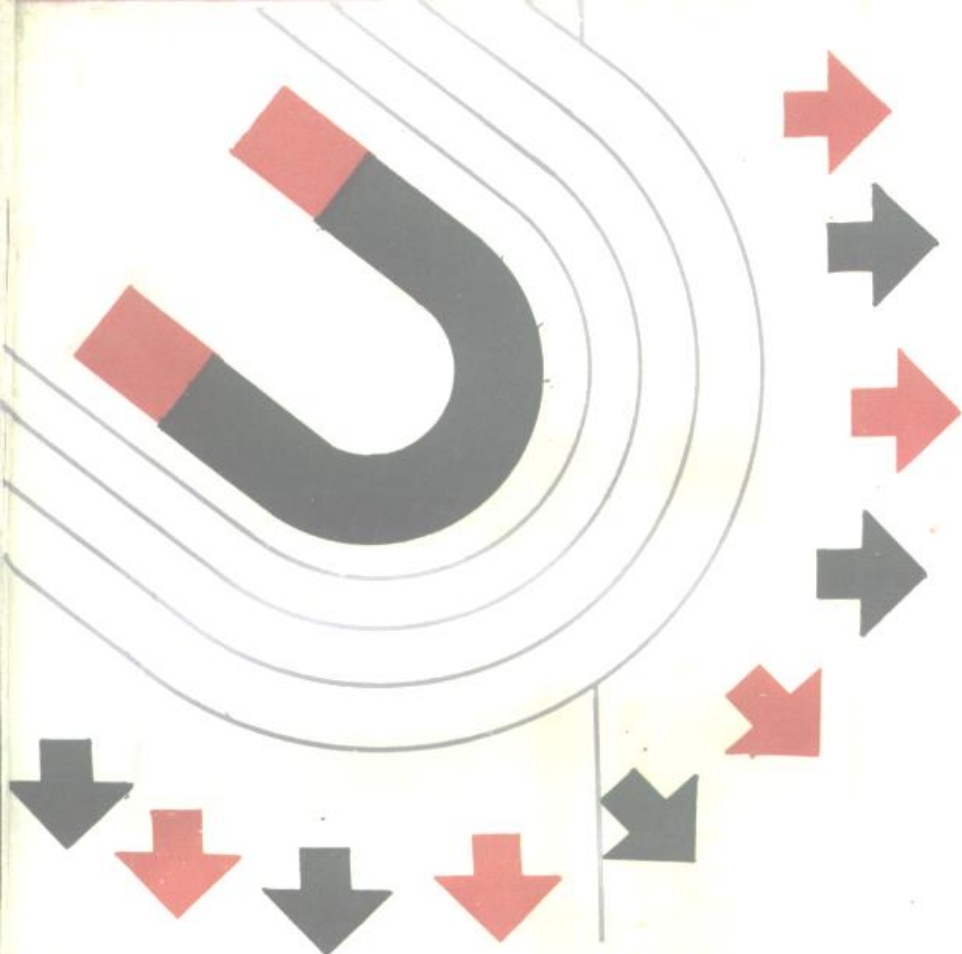




电磁散射理论

王志良 任 伟 著

四川科学技术出版社

电磁散射理论

王志良 任 伟 著

霍英东教育基金
国家自然科学基金 资助项目

四川科学技术出版社

1993年·成都

(川)新登字 004 号

书 名/电磁散射理论

著 者/王志良 任 伟

责任编辑·安小望

封面设计·韩健勇

版面设计·康永光

责任校对·刘生碧

出版、发行 四川科学技术出版社

成都盐道街 3 号 邮编 610012

经 销 四川省新华书店

印 刷 四川新华印刷厂

版 次 1994 年 1 月成都第一版

1994 年 1 月第一次印刷

规 格 787×1092 毫米 1/32

15.75 印张 330 千字

印 数 1—700 册

定 价 17.00 元

ISBN7-5364-2438-8/TN·77

内容简介

这是一本以波函数理论为基础处理电磁波传播和散射的某些论题的专著。本书取材于近期文献和作者的研究成果,反映了最近国内外的研究水平和动态。可供电磁理论、微波遥感、地球物理、光学、理论声学、应用数学、应用物理等专业的科技人员、研究生和高年级大学生阅读和参考,也可作为相应专业研究生的教材。



王志良,男,汉族,1965年3月生于浙江省绍兴县,1983年本科毕业于南京邮电学院无线电系,1988年在电子科技大学应用物理研究所获工学博士学位。目前在电子科技大学“宽带光纤传输与通信系统技术”国家重点实验室工作。研究兴趣包括:光纤传输理论与应用,光纤中的非线性效应,弹性与非弹性电磁波散射,光波与微波相互作用等。



任伟,男,汉族,1964年2月生于四川省仁寿县。1983年、1986年和1990年分别在电子科技大学应用数学系、电磁场工程系和应用物理研究所获学士、硕士和博士学位。目前在电子科技大学应用数学系工作。研究兴趣包括:声、电磁和弹性波在各向异性媒质、随机媒质和非线性媒质中的传播与散射,复合与非晶态材料的电子结构,微波遥感理论,时域与计算电磁学等。

序

由于通信和雷达工程的发展越来越需要人们了解各种媒质中目标对电磁波散射的特性,由于微波能穿透大气、天然植被、人工伪装和土壤表层一定深度,一门以微波遥感命名的新学科正在形成和发展之中,这门学科的基础就是电磁散射理论。我的两个学生(博士)从最近十几年浩瀚的文献中取其精华,连同自己的科学研究成果,写成这样一本有一定深度和特色的书,这是十分难能可贵的。

此书反映了电磁散射理论中一些论题的研究水平和动态,可以使读者较快地进入这一研究领域。它既可供电磁理论、微波遥感、地球物理、光学、理论声学、应用数学、应用物理等专业的科技人员、研究生和高年级学生阅读和参考,亦可作为相应专业研究生的教材。我相信,此书的问世将对我国电磁散射和微波遥感领域的研究起到促进作用。

中国科学院学部委员
电子科技大学一级教授

林为干

1992年4月

前 言

随机媒质的电磁散射一直是电磁理论上的热点课题之一。目前,国内外许多科学家和工程技术人员对随机媒质中波的传播和散射的研究兴趣日益增长,这有两个方面的原因。一方面,实际工作中越来越需要解决诸如光在大气中传播,海浪散射,电离闪烁,地球物理介质中的微波散射和遥感,波在复合材料、非晶态材料、星际空间中的传播和散射等这样一些问题。例如,据报道,由于海湾战争的刺激,今后十五年内全球高新技术产业投资的百分之四十左右将用于复合与非晶态材料的研究与开发。而自然科学的发展,特别是计算机技术的发展也为解决这些问题提供了可能性。另一方面,随机媒质中的波传播是对理论工作者最富挑战性的问题。多体问题一直是理论物理和工程实际中没有很好解决的难题,其物理内容极其丰富,物理过程极其复杂,涉及到广泛而艰深的数学知识和技巧。

为了使初学者不至因问题过于繁难望而却步,我们在选材上放弃了如时域散射和费曼图这样一些重要论题,在叙述上有时也不得不用简明、易懂的语言,而牺牲数学、物理上的严格性。作者认为,任何理论的建立总是从不成熟到成熟,由点滴而汇成整体,因而本书包括了一些正在发展中的题材。本书的论述注意留给读者许多思索、扩展、旁通的地方,涉及的范围也主要是随机离散散射体的电磁散射。本书风格偏于简练,参考文献只列出与本书直接相关的。

第一章比较系统地介绍了波函数的积分表达式,加法定理和数值计算,强调了求解有限多散射问题的公式列写。特色在于包括了作者创立的各向异性媒质和弹性各向异性媒质的波函数理论。

第二章汇集了作者在并矢格林函数和高斯束方面的工作。主要是在第一章的基础上建立各向异性媒质的并矢格林函数理论。

第三章以一种统一的观点论述了随机离散散射体的多散射理论,也包括作者的一些初步工作,供读者参考。

第四章论述弹性与非弹性散射问题。主要介绍作者在这方面所作的初步工作。

第五章论述导波散射方面的典型方法。也包括了作者的一些探索性工作。

本书一至三章由任伟撰写,四、五两章及附录由王志良撰写,由任伟负责统稿。本书部分内容曾在电子科技大学的研究生课程中讲授过。由于学识和时间的关系,错误之处在所难免,热忱地希望广大读者和专家们批评指正。

王志良 任 伟

1992年2月

目 录

第一章 矢量波函数及其变换	1
§ 1.1 正交曲线坐标系	1
§ 1.2 标量波函数	6
1.2.1 平面波函数	7
1.2.2 圆柱波函数	9
1.2.3 圆球波函数	13
1.2.4 椭圆柱波函数	15
1.2.5 长(扁)旋转椭球波函数	23
§ 1.3 标量波函数的平面波展开与变换迭加定理	32
1.3.1 圆柱和圆球波函数的积分表达与变换迭加定理	33
1.3.2 格林函数与长球函数的变换迭加定理	39
§ 1.4 矢量波动方程的直接解与矢量波函数	44
1.4.1 电磁场矢量的分解	44
1.4.2 自由空间电磁场的 L, M, N 展开	47
1.4.3 有界区域电磁场的 L, M, N 分解	51
1.4.4 自由空间的矢量波函数及其正交性	54
§ 1.5 矢量波函数的旋转、平移变换迭加定理	56
1.5.1 柱面矢量波函数的变换迭加定理	56
1.5.2 长旋转椭球矢量波函数与球矢量波函数的变换	56
1.5.3 长球矢量波函数的旋转加法定理	58
1.5.4 球与长球矢量波函数的平移加法定理	62
1.5.5 球与长球矢量波函数的旋转平移加法定理	66

§ 1.6	标准与非标准矢量波函数的转换关系及其应用	70
1.6.1	标准和非标准矢量波函数	70
1.6.2	标准与非标准圆柱矢量波函数的转换关系及其应用	71
1.6.3	标准与非标准圆球矢量波函数的转换关系及其应用	74
§ 1.7	长球矢量波函数与多个长球体的电磁散射	80
1.7.1	入射与散射场的长球矢量波函数展开	80
1.7.2	散射场系数的确定与散射截面	85
1.7.3	长球坐标系下麦克斯韦方程的分离变量解	88
§ 1.8	矢量波函数应用举例——求解多体散射的递推集成 τ 矩阵方法	97
1.8.1	求解单散射问题的 T 矩阵理论	97
1.8.2	求解多散射问题的递推集成 τ 矩阵方法	102
1.8.3	求解导体和均匀介质体散射的模拟集成 τ 矩阵方法	108
§ 1.9	劈形波函数的变换迭加定理及其在多边形导体柱散射上的应用	110
§ 1.10	各向异性介质的球矢量波函数	115
1.10.1	各向异性介质内的平面波传播	115
1.10.2	各向异性介质的球矢量波函数解	121
1.10.3	各向异性弹性介质的本征函数解	128
§ 1.11	单轴各向异性介质的球矢量波函数	131
§ 1.12	长(扁)旋转椭球谐合函数的变换迭加定理	137
§ 1.13	各向异性介质的圆柱本征函数解	144
1.13.1	各向异性均匀介质柱二维问题的本征函数	145
1.13.2	各向异性介质柱三维问题的本征函数	149
§ 1.14	双各向异性均匀介质的矢量本征函数	153
1.14.1	回转(Chiral)媒质的矢量波函数	154
1.14.2	双各向异性媒质的色散关系	156

1.14.3 双各向异性媒质的矢量波函数	159
参考文献	161
第二章 并矢格林函数与高斯束	167
§ 2.1 E 面扇形喇叭的并矢格林函数及其应用	168
§ 2.2 单轴各向异性媒质填充的矩形波导的并矢格林函数	173
2.2.1 静电、静磁场的解	173
2.2.2 并矢格林函数	174
§ 2.3 单轴各向异性媒质半空间的并矢格林函数	177
§ 2.4 弹性各向异性媒质的并矢格林函数	178
§ 2.5 无耗各向异性媒质电磁场的并矢格林函数	183
§ 2.6 求解电磁场并矢格林函数的直接方法	187
2.6.1 平面分层双各向异性媒质的并矢格林函数	188
2.6.2 圆柱分层双各向异性媒质的并矢格林函数	191
2.6.3 圆球分层双各向异性媒质的并矢格林函数	
§ 2.7 均匀各向异性媒质的并矢格林函数在非线性问题上的应用	192
§ 2.8 均匀各向异性媒质的 T 矩阵理论和积分方程法	197
§ 2.9 高斯束及其矢量波函数展开	198
2.9.1 复宗量拉盖尔高斯束与厄米特高斯束及其线性变换	199
2.9.2 普通拉盖尔高斯束与厄米特高斯束及其线性变换	201
2.9.3 实宗量拉盖尔和厄米特高斯束与复宗量拉盖尔和厄米特高斯束的线性变换	205
2.9.4 复(实)厄米特(拉盖尔)高斯束的矢量波函数展开	206
§ 2.10 电磁导弹后向散射的几何光学分析	209

参考文献	214
第三章 随机离散散射体的多散射理论	219
§3.1 引言	219
§3.2 混合物有效介电常数的自治理论	222
3.2.1 静电学近似自治理论	222
3.2.2 强扰动理论	224
3.2.3 相干位有效场自治理论	234
3.2.4 等效介电常数的 T 矩阵理论	237
§3.3 矢量辐射传输理论(VRT)及其修正	238
3.3.1 VRT 方程的形式结构	238
3.3.2 各向异性强起伏随机介质层的 VRT	243
3.3.3 致密媒质 VRT(DVRT)及其在全极化测量中的应用	246
3.3.4 二层各向异性随机媒质的修正辐射传输(MRT)方程	250
3.3.5 非球形粒子和各向异性球形粒子的消光率和相位矩阵	252
§3.4 含 N 成份致密分布介质球的随机媒质的有效传播常数	253
3.4.1 多散射方程与色散关系	253
3.4.2 能量守恒与二阶矩的梯形近似	260
3.4.3 含多种尺寸粒子的随机媒质的对分布函数	266
3.4.4 含中等尺寸粒子的随机媒质的有效传播常数	268
§3.5 强扰动理论、输运理论与多散射理论	278
3.5.1 对多散射理论的解释	279
3.5.2 三种理论的相似之处	283
3.5.3 现有理论存在的问题	284

§ 3.6	声、电磁和弹性波对随机颗粒媒质的多散射重整化理论	288
3.6.1	引言	288
3.6.2	均匀介质体电磁散射的单个积分方程	291
3.6.3	重整化的 T 矩阵	295
§ 3.7	位形平均重整化理论 (CART)	302
§ 3.8	多散射方程的修正及其 QCA 严格解	307
§ 3.9	蒙特卡罗模拟随机颗粒媒质	311
§ 3.10	有界随机媒质的波函数理论	312
§ 3.11	分子、原子簇和晶体的多散射 $X\alpha$ —自洽场方法——重叠球模型	313
3.11.1	格林函数的双中心球坐标展开式	313
3.11.2	原子簇重叠的多散射 $X\alpha$ —自洽场方程	317
3.11.3	能带理论中的重叠球模型	329
§ 3.12	晶态和非晶态材料电子结构的相干位多散射自洽场理论	330
参考文献		332
第四章	弹性与非弹性散射理论	338
§ 4.1	不规则颗粒的单散射: 积分方程法	340
4.1.1	散射场的积分方程	342
4.1.2	弹性散射场	345
4.1.3	非弹性散射场	349
4.1.4	数值结果和结论	353
§ 4.2	随机球粒媒质的弹性多散射	360
4.2.1	多散射场的基本积分方程	360
4.2.2	展开系数之间的关系	363
4.2.3	系数之间的耦合线性方程	365

4.2.4 数值结果和结论	368
§ 4.3 有源随机球粒媒质的非弹性多散射	369
4.3.1 非弹性单散射——并矢格林函数解	375
4.3.2 非弹性入射场——单散射迭加	377
4.3.3 非弹性多散射场	379
4.3.4 数值结果和结论	381
参考文献	387

第五章 导波散射理论 393

§ 5.1 金属波导:积分方程法	395
5.1.1 积分方程和并矢格林函数	395
5.1.2 矩量法解	397
§ 5.2 金属波导:正交模式展开法	400
5.2.1 互作用区场的正交模式展开	400
5.2.2 波导区域的场和散射矩阵	406
5.2.3 数值结果	409
§ 5.3 光纤内小偶极子的散射:傅里叶变换法	412
5.3.1 基本公式	412
5.3.2 实际场的表示	417
5.3.3 本地非均匀介质体的散射	420
§ 5.4 光纤内非均匀介质体的散射:积分方程法	427
5.4.1 基本公式	427
5.4.2 非均匀介质球	432
5.4.3 导模散射系数	439
5.4.4 数值结果及讨论	441
§ 5.5 光纤中有源分子的非弹性散射	448
5.5.1 非弹性散射场	448
5.5.2 非弹性散射系数	450

5.5.3 数值结果和结论	451
§ 5.6 光纤中非均匀介质体内有源分子的非弹性散射	456
5.6.1 基本公式	456
5.6.2 非均匀介质球	460
参考文献	461
附录 1 矢量球波函数坐标变换迭加定理	466
附录 2 球域 V 时第四章(116)、(117)式的解析表示	472
附录 3 $E_n(J)$ 、 $F_n(J)$ 、 $G_n(J)$ 和 $D_n(J)$ 的表达式	474
后记	477

自从 Hansen 1935 年提出矢量波函数以来,特别是 P. C. Waterman 建立声、电磁、弹性波散射的 T 矩阵理论以来,矢量波函数已成为处理波场与材料相互作用的一个有力工具。

本章强调波函数的数值计算和不同波函数的相互转换;重视矢量波函数的完备性和多体散射问题的公式列写 (Formulation) 及数值实施 (Implementation)。

本章详尽地讨论了各种波函数的平面波展开式,并在此基础上创立了各向异性媒质的矢量波函数理论。

本章可供声学、电磁学、弹性力学、流体力学各专业人员参考。

§ 1.1 正交曲线坐标系

关于坐标系的简洁讨论可见于 J. A. Stratton 的经典名著《电磁理论》^[1],比较详细的讨论可参考 Moon 和 Spencer 所著的《场论手册》^[2]。这里仅对正交曲线坐标系的有关知识作一简短的回顾。

在直角坐标系中,空间的每一点都对应一组坐标 $(x, y,$