



非均匀介质中的 场与波

● [美] Weng Cho Chew 著 ● 聂在平 柳清伙 译

● 电子工业出版社

52.67
642

非均匀介质中的场与波

[美] ^温Weng Cho Chew 著

聂在平 柳清伙 译



电子工业出版社

9310306

(京)新登字 055 号

内 容 简 介

本书是全面、深入地论述非均匀介质中波的传播、辐射和散射问题的第一本学术专著。它详细介绍了各种解析方法、数值方法和半解析-半数值混合方法及其在一维和多维非均匀介质场分析中的应用,较集中地反映了当代电磁理论的主要发展,可供从事电磁场工程、地球物理探测、光学、目标识别、成像技术和生物工程等相关领域内的专家、工程师和其他研究人员参考。该书又是一本理想的教科书,可供高等学校本科生、研究生和教师学习、研究用。

2014/07

Waves and Fields in Inhomogeneous Media

Weng Cho Chew

Van Nostrand Reinhold, New York, U. S. A

非均匀介质中的场与波

[美] Weng Cho Chew 著

聂在平 柳清伙译

责任编辑:竞力

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经营

中国地质科学院 562 印刷厂印刷

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:33 字数:845 千字

1992 年 2 月第一版 1992 年 2 月第一次印刷

印数:1500 册 定价:28.00 元

ISBN7-5053-1951-5/TN·578

译者序

《非均匀介质中的场与波》一书于1990年6月在美国首次出版,作者为美国伊利诺依大学电机系教授 W. C. Chew(周永祖)。

该书是全面、深入论述非均匀介质中波的传播、辐射和散射问题的第一本学术专著。它系统介绍了各种解析方法、数值方法和半解析半数值混合方法在一维和多维非均匀介质场与波分析中的应用,解决了很多过去一直被认为是过于复杂、难于求解的问题。该书还对很多前沿课题进行了深入的研究,较集中地反映了当代电磁学的一些最新进展。该书强调数学方法,特别是各种数值方法的实际应用,并为各种具体问题选择最适宜的分析方法。书中的公式表达也特别适合于计算机应用。

作为第一本全面论述非均匀介质的著作,该书将是电磁工程、地球物理探测、光学、生物工程、非破坏性探测、成像技术、目标识别等领域里的专家、工程师、教师和其他研究人员的一本极有价值的参考书。同时,该书又是电磁学专业研究生的一本理想的教材。它的论述系统深入,推导详尽严谨,每章还配有大量习题和参考书目,便于进一步研究和学习。

该书作者 Weng Cho Chew(周永祖)教授,先后在美国麻省理工学院(MIT)获电气工程专业硕士、博士学位,并执教于 MIT。后任斯仑贝谢——道尔研究所电磁物理部门负责人。他现在任教于美国伊利诺依大学电机及计算机工程系,并在该系电磁实验室从事研究工作。他是“美国总统青年科学家奖金”获得者,在学术研究中成果突出,著述甚丰。

本书第四、七、八、九章由柳清伙翻译,其它各章由聂在平翻译。全书校对工作由聂在平担任。由于译者学识有限,加之翻译、打印、校对人力不足,时间仓促,错漏之处在所难免,尚希广大读者不吝指正。

本书的两位译者在学术研究中均曾得到 W. C. Chew 教授的精心指导与帮助,借此机会,谨表达对 W. C. Chew 教授衷心的感谢。

译者 一九九二年二月

中译本序

我非常高兴地获悉聂在平教授和柳清伙博士正在将我的“非均匀介质中的场与波”一书译成中文。作为一个海外中国人,我一直着迷于中国以及它的悠久历史,关注着中国的兴衰和它在世界上所起的作用。中国人以其智慧和创造力著称于世,但也因其文化上的停滞和内忧外患而有一部动荡的近代史。

我希望“非均匀介质中的场与波”的这一很好的中译本将引起中国科学和工程界有关人士的兴趣。我也希望这一领域的中国同行能因此有更多的贡献。使我感到高兴的是,在本书中介绍了廖振鹏,黄孔亮,杨柏坡和袁一凡在吸收边界条件方面的贡献。非均匀介质中的场与波这一领域仍需要基础理论的继续发展,同时,这一领域也正在孕育着巨大的技术冲击波。目前正在积极研究的一个方面是求解散射问题的快速算法。这主要是由于计算机在求解科学与工程问题中的作用越来越重要的缘故。快速算法可以使计算机辅助工程更为方便,也增强了对复杂系统物理意义的理解。当今感兴趣的另一课题是场的逆散射及其在成象技术中的应用。这是由于人们要求了解物体内部那些超出可见光谱所能提供的信息。

在人类历史上,中国人一直在为人类贡献着重要的、基本的知识财富。西方文明的兴起,造成了新的知识爆炸,以至使全世界发展中国家感到难以跟随。因此,我最大的希望就是这本译著能告知中国科学家该领域的最新进展并有助于促进中国在未来的科学与技术努力中有更高水平的参与。

W. C. Chew(周永祖)
一九九二年一月于
美国 阿尔班那一香槟

前 言

这本书是从在伊利诺依大学(香槟)教授的研究生课程基础上发展而成的。而这门课程则是为满足在场与波这一领域从事研究工作的学生的学习需要而设计。随着工程技术的深入发展,求解更为复杂问题的要求日益迫切。值得庆幸的是,在近二十年里,计算机技术的发展提供了求解这类问题的新方法。本书试图阐明适用于非均匀介质中场与波问题求解的途径和方法,这样,同学们即可应用它们来解决实际问题。读者也可以利用计算机来实践本书所述的很多方法。

但是,本书并不是一本关于数值方法的专著。为此,读者尽可参阅关于数值方法的很多优秀著作。而本书所强调的是用于求解非均匀介质场与波问题的很多数学方法的基础。因此,读者将学到怎样应用这些方法将很多复杂的问题抽象成数学公式。在场与波的很多问题中直接应用数值方法可能导致大量的计算和消耗很长的计算机时间,甚至可能占尽当今超级计算机的资源。但是,适于把数值方法和解析方法结合起来的思路常常可使计算程序具有更高的效率。这些方法中数值分析的细节,即数值积分,矩阵分析,或有限元分析等已超出了本书的范围,但均可在很多相关的书籍中找到。同时,本书不讨论随机非均匀介质,因为这一课题又可形成另一同等规模的著作。

在计算机尚未应用之前,解析方法非常流行。它们经常是“铅笔加纸张”那个物理或工程时代唯一的分析方法。例如,很多经典的论题,如平面分层介质中的波,瞬态分析中的卡尼亚—德·霍普方法,逆散射中的杰尔范德—列维坦—马尔琴柯方法都是为求解一维非均匀问题而精心设计的。这些方法通常具有有限的应用范围,但若本书中略去这些论题的讨论将使其很不完整。本书将它们包括过去,既是表达对发展这些论题的前辈们的尊重,也给读者提供一个历史的回顾。

尽管本书中电磁场的例子占优势,但其中很多方法可很容易地应用于其它波动现象,如声波,克罗丁格尔波或弹性波。为了向读者传达一种方法的基本概念,有些是按标量波形式作出说明。将其推广到矢量电磁波情形则可能很不彻底。

本书假定读者具备电磁理论的基础知识,第一章简要地回顾了所要求的背景知识。平面分层介质由于简单仍是研究得最多的非均匀介质问题。很多结果无需大量的计算机运算即可获得。而且,用谱域积分表示的闭合形式的解(索末菲尔德积分)可作渐近近似,提供了问题更多的物理内涵。因此,这一论题伴随其很长的历史,都局限在解析方法的范畴中。于是,第二章将集中讨论平面分层介质中的波。本章较长的篇幅反映了多年来平面分层介质研究中大量有价值的材料。虽然这一论题在其它很多书籍中也有论述,有时甚至是专题论述,本书中只包括了一些最重要的问题。而且,一些数值方法,如传播矩阵法和索末菲尔德积分的数值计算也将讨论到。

第三章讨论柱面和球面分层介质中的波。这类波动问题在光学,地球物理探测,以及地面和电离层中无线电波传播方面都有广泛的应用。在飞行器多层涂敷以减小其雷达截

面积方面亦有应用。让人惊奇的是这一课题并未得到象平面分层介质中的波那样广泛的研究和发展。

瞬态测量是雷达,生物声学或声纳测量中常见的。第四章研究瞬态波在非均匀介质中的传播。首先提出卡尼亚—德·霍普方法,它对分层无色散介质上方线源的响应给出闭合形式解。然后,对于一般非均匀介质,和吸收边界条件相衔接,讨论了著名的时域有限差分法以获得瞬态解。

第五章给出了适用于标量波方程和电磁波方程的变分方法。这些方法往往是场与波问题中很多现代数值方法,诸如有限元法和矩量法的基础。而且,很多这一类的数值方法均可用于菜单式选择来获得一个问题的解。但是,同学们仍有必要了解这些数值方法的基础。因此,本章开始便介绍线性矢量空间的基本概念。然后给出自伴和非自伴问题的变分表达式。最后,利用瑞利—里兹方法由变分公式一步步导出矩阵方程。这一推导是有限元法的基础;跟随这一推导过程,读者将会理解有限元法的基础。但是有限元法的详细过程,以及发展的很多注记方法则不在本书的范围内。

第六章叙述了模式匹配方法。这种方法对于介质板波导和很多地球物理问题中所包含的界面不连续处散射问题研究是特别有用的。为便于读者理解这一方法,首先介绍了介质板导波模和辐射模的概念,然后讨论了单一不连续界面的典型散射解。这一典型解又被用来在一组合问题中借助于递推算法求解多个不连续界面的散射解。这里用矢量标注来写出解的闭合形式。

并矢格林函数已成为电磁理论中感兴趣的论题。在这一论题中,很多标量波概念不能简单地扩展到矢量波情形。尽管很多问题不用并矢格林函数也能解,但表达数学关系时的简洁符号使得很多问题的公式更为简单和紧凑。而且,应用并矢格林函数可很容易地将很多问题概念化。因此,在第七章中从均匀介质中并矢格林函数的空间域和谱域表达式开始,讨论了分层非均匀介质中的并矢格林函数。然后讨论了并矢格林函数的奇导性,这是近年来热烈争论的一个论题。此后,引入了矢量波函数以导出不同坐标系中的并矢格林函数。最后,将并矢格林函数推广到平面、圆柱面和球面分层介质的情形。

第八章给出了积分方程法。当非均匀介质为分区均匀或当非均匀区域为有限空间时这些方法是特别有用的。本章描述了表面积分方程以及应用矩量法和扩展边界条件法求解的过程。应用扩展边界条件方法,适用于单体散射的 \bar{T} 矩阵和 \bar{S} 矩阵被导出。然后说明了单体散射解怎样用于求解多散射体或多层散射体的散射。而且,紧接着叙述了单矩法,这是一个混合方法,它将有限元法和表面积分方程法的应用结合起来。最后,还讨论了体积分方程及其求解途径。同时本章还研究了近似解方法,如波昂近似或里托夫近似解有效性的判据。

很多研究非均匀介质中波动问题的人都必定对逆散射问题感兴趣,逆散射理论在生物传感、地球物理遥感、非破坏性探测和目标识别等方面都有广泛的应用。第九章给出了几种逆散射问题的解法。首先讨论线性逆散射问题,它在医学成象方面有巨大的影响。这里特别回顾了后投影成象和绕射成象。但是,散射实验中的散射场与产生该散射的散射体之间更经常地是一种非线性的关系。因此,提出了求解这些非线性逆散射问题的不同方法。在过去,进展最大的是在一维逆散射问题的研究领域中。所以本章讨论了求解此类一维逆散射问题的特征法,杰尔范德—列维坦方法和马尔琴科方法。但对于高维问题,就不

得不依靠准牛顿方法求解非线性逆散射问题。另外,还给出了修正波昂迭代法以及波昂迭代法在寻找此类问题解时的应用。在多维散射问题中迫切需要发展新思路、取得新进展,使很多方法都能从中获益。

本书中的很多论题都取自己发表的文献中。有些内容则是撰写本书时所发展的。在某些情形中,公式与发表的文献中的稍有变动,但并未失其精确,以便保持表述上和风格上的一致性。

这种篇幅的一本书不可能包容已论述过的与非均匀介质中场与波有关的一切论题,但它可将更多的论题变得与读者更为接近。同时,欢迎读者利用参考文献对所列的任一论题作进一步的研究。

致谢

我感谢在此领域作出贡献的所有同事们。我还感谢那些我有幸向其学习场与波理论的众多的人。我特别感谢 Jin Au Kong 教授,以及 Leung Tsang 教授,当我在 MIT 时,他们教授给我电磁场理论方面大量的知识。在斯仑贝谢一道尔研究中心,我有机会向阿德瑞安·德·霍普(Adrianus de Hoop)学习卡尼亚—德·霍普方法的第一手材料。而库尔特·兰多(Curt Randall)则提醒我注意很多有关有限差分方法的资料,我还非常感谢迈克·爱克斯特拉姆(Mike Ekstrom),鲍布·克莱因贝格(Bob Kleinberg),以及帕彼特拉·孙(Pabitra Sen),他们对我的科学观有很大影响。爱伦·霍华德(Allen Howard),安德瑞安·德·霍普、约翰·拉威尔(John Lovell)以及吉姆·维特(Jim Wait)对本书初稿的宝贵意见都是值得感谢的。在伊利诺依大学,我非常感谢与我所有同事们卓有成效的交流。

国家科学基金通过总统青年科学家计划,军事研究局(Army Research Office)通过伊利诺依大学高级建设技术中心(Advanced Construction Technology Center)以及海军研究局(Office of Naval Research)对我研究工作的资助都是非常令人感谢的。我还要感谢工业界很多组织,特别是斯仑贝谢,通用电气,诺思罗普和 TRW 的支持。

最后,我要感谢李彤(Li Tong),是她刻苦和熟练地工作,打印出本书的书稿。我还要感谢我的很多学生(吉姆·弗里德里克,列维特·盖瑞尔,玛塔·玛格哈达姆,柳清伙,穆哈默德·纳赛尔,格瑞格·奥托,罗布·瓦格纳,以及王亦民)帮助校阅书稿,特别是吉姆·弗里德里克和柳清伙,他们校阅了每一章。我还要深深地感谢我的妻子和两个孩子,当我撰写本书时,他们表现出如此的耐心和爱。

目 录

第一章 预备知识	(1)
1.1 麦克斯韦方程	(1)
1.1.1 麦克斯韦方程的微分表达式	(1)
1.1.2 麦克斯韦方程的积分表达式	(2)
1.1.3 麦克斯韦方程的时谐形式	(3)
1.1.4 组合关系	(4)
1.1.5 玻印亭定理和无耗情形	(5)
1.1.6 两重性原理	(6)
1.2 标量波方程	(7)
1.2.1 声波方程	(7)
1.2.2 电磁学中的标量波方程	(9)
1.2.3 直角坐标系统中的解	(10)
1.2.4 圆柱坐标系统中的解	(11)
1.2.5 球坐标系统中的解	(12)
1.3 矢量波方程	(14)
1.3.1 边界条件	(14)
1.3.2 互易关系	(16)
1.3.3 非均匀各向异性介质中的平面波	(18)
1.3.4 格林函数	(20)
1.4 惠更斯原理	(23)
1.4.1 标量波	(24)
1.4.2 电磁波	(25)
1.5 唯一性定理	(27)
1.5.1 标量波方程	(27)
1.5.2 矢量波方程	(28)
练习题	(30)
参考文献	(33)
深入阅读材料	(34)
第二章 平面分层介质	(37)
2.1 一维平面不均匀性	(37)
2.1.1 标量波方程的推导	(37)

2.1.2	半空间的反射	(39)
2.1.3	多层介质中的反射和透射	(40)
2.1.4	反射系数的瑞卡蒂方程	(44)
2.1.5	特殊非均匀剖面	(46)
2.2	源的谱域表达	(48)
2.2.1	线源	(48)
2.2.2	点源	(52)
2.2.3	里曼面和支点割线	(55)
2.3	分层介质上方的源	(58)
2.3.1	竖直电偶极子(VED)	(59)
2.3.2	水平电偶极子(HED)	(60)
2.3.3	竖直磁偶极子(VMD)	(61)
2.3.4	水平磁偶极子(HMD)	(61)
2.3.5	横向场分量	(61)
2.4	分层介质中的源	(63)
2.5	积分的渐近展开	(65)
2.5.1	驻相法	(65)
2.5.2	最陡下降法	(67)
2.5.3	一致渐近展开	(71)
2.6	分层介质上方的偶极子—渐近展开	(76)
2.6.1	半空间上方的偶极子(VMD)	(76)
2.6.2	半空间上方的偶极子(VEE)	(79)
2.6.3	介质板上方的偶极子(VEE)	(82)
2.6.4	一致渐近展开实例—半空间的透射波	(86)
2.7	索末菲尔德积分的奇点	(90)
2.7.1	无支点情形	(90)
2.7.2	奇点的位置	(92)
2.7.3	索末菲尔德积分的数值计算	(96)
2.8	WKB方法	(98)
2.8.1	WKB解的推导	(99)
2.8.2	渐近匹配	(101)
2.9	传播矩阵	(105)
2.9.1	状态方程的推导	(105)
2.9.2	状态方程的解	(106)
2.9.3	从三层介质的反射	(107)
2.9.4	非均匀介质板的反射	(108)
2.10	各向异性分层介质中的波	(109)
2.10.1	状态方程的推导	(109)
2.10.2	状态方程的解	(111)

2.10.3 从各向异性半空间交界面的反射	(112)
2.10.4 介质平板的反射	(114)
2.10.5 几何光学级数	(114)
练习题	(116)
参考文献	(125)
深入阅读材料	(129)
第三章 柱面和球面分层介质	(135)
3.1 圆柱面分层介质—单界面情形	(135)
3.1.1 圆柱坐标系统中的矢量波方程	(135)
3.1.2 外向波的反射和透射	(136)
3.1.3 驻波的反射和透射	(138)
3.2 圆柱面分层介质—多界面情形	(140)
3.2.1 外向波情形	(140)
3.2.2 驻波情形	(142)
3.3 圆柱分层介质中的源	(144)
3.3.1 离散角波数表达	(145)
3.3.2 连续角谱波数表达	(148)
3.4 传播矩阵—圆柱分层介质情形	(150)
3.4.1 各向同性分层介质	(150)
3.4.2 各向异性分层介质	(152)
3.5 球面分层介质—单界面情形	(155)
3.5.1 球坐标系统中的矢量波方程	(155)
3.5.2 外向波的反射和透射	(157)
3.5.3 驻波的反射和透射	(159)
3.6 球面分层介质—多界面情形	(161)
3.6.1 外向波情形	(161)
3.6.2 驻波情形	(162)
3.7 球面分层介质中的源	(162)
3.8 传播矩阵—球面分层介质	(166)
练习题	(168)
参考文献	(172)
深入阅读材料	(174)
第四章 瞬变过程	(178)
4.1 瞬态响应的因果律	(178)
4.1.1 克莱默—克洛尼关系	(178)
4.1.2 因果律与积分的围线	(180)

4.2	卡尼亚—德·霍普(Cagniard—de Hoop)方法	(181)
4.2.1	自由空间的线源——二维格林函数	(182)
4.2.2	自由空间的点源——三维格林函数	(185)
4.2.3	半空间上方的线源——瞬态响应	(186)
4.2.4	半空间上方的偶极子——瞬态响应	(189)
4.3	多层介质	(191)
4.4	直接反演	(192)
4.5	傅里叶积分的数值计算	(194)
4.5.1	有耗介质中的直达波——二维情况	(195)
4.5.2	有耗介质中的直达波——三维情况	(196)
4.6	有限差分法	(198)
4.6.1	有限差分近似	(198)
4.6.2	稳定性分析	(201)
4.6.3	网格色散误差	(203)
4.6.3	叶(Yee)氏算法	(205)
4.7	吸收边界条件	(206)
4.7.1	英奎斯特—马吉达(Engquist—Majda)吸收边界条件	(206)
4.7.2	林德曼(Lindman)吸收边界条件	(209)
4.7.3	贝利斯—图尔克(Bayliss—Turkel)吸收边界条件	(210)
4.7.4	廖氏吸收边界条件	(211)
	练习题	(215)
	参考文献	(220)
	深入阅读材料	(223)
第五章 变分方法		(228)
5.1	线性矢量空间回顾	(228)
5.1.1	内积空间	(228)
5.1.2	线性算子	(230)
5.1.3	基函数	(231)
5.1.4	帕萨维尔(Parseval)定理	(233)
5.1.5	复状态矢量的帕萨维尔定理	(234)
5.1.6	算子方程解的回顾	(235)
5.1.7	本征值问题	(238)
5.2	自伴问题的变分表达式	(239)
5.2.1	一般概念	(239)
5.2.2	瑞利—里兹方法—自伴问题	(241)
5.2.3	对标量波方程的应用	(243)
5.2.4	对矢量波方程的应用	(245)

5.3 非自伴问题的变分表达式	(247)
5.3.1 一般概念	(247)
5.3.2 瑞利—里兹方法—非自伴问题	(248)
5.3.3 对标量波方程的应用	(249)
5.3.4 对矢量波方程的应用	(250)
5.4 本征值问题的变分表达式	(252)
5.4.1 一般概念	(252)
5.4.2 对标量波方程的应用	(253)
5.4.3 对电磁问题的应用	(254)
5.5 基本边界条件和自然边界条件	(258)
5.5.1 标量波方程情形	(258)
5.5.2 电磁波情形	(261)
练习题	(264)
参考文献	(269)
深入阅读材料	(271)
第六章 模式匹配方法	(275)
6.1 平面分层介质中的本征模	(275)
6.1.1 分层介质中模式的正交性	(275)
6.1.2 分层介质的导波模和辐射模	(277)
6.2 场的本征函数展开	(281)
6.2.1 线源激励的模式	(281)
6.2.2 矢量表示法的应用	(282)
6.3 在接合部不连续处的反射和透射	(285)
6.3.1 反射算子和传输算子的推导	(285)
6.3.2 连续的极限情形	(287)
6.4 确定本征模的数值方法	(290)
6.5 柱面分层介质情形	(293)
6.5.1 圆柱分层介质中的本征模	(294)
6.5.2 圆柱结构的微分方程	(295)
6.5.3 本征模的数值解	(296)
6.5.4 场的本征函数展开	(298)
6.5.5 接合部不连续处的反射	(299)
6.6 多区域问题	(301)
6.6.1 三区域问题	(301)
6.6.2 N个区域的问题	(303)
练习题	(306)
参考文献	(309)
深入阅读材料	(311)

第七章 并矢格林函数	(314)
7.1 均匀介质中的并矢格林函数	(314)
7.1.1 空间表示	(314)
7.1.2 并矢格林函数的奇点	(316)
7.1.3 谱域表示	(319)
7.1.4 谱域表示与空间表示的等效性	(322)
7.2 矢量波函数	(324)
7.2.1 矢量波函数的推导	(324)
7.2.2 矢量波函数的正交关系	(325)
7.2.3 无界介质的矢量波函数	(329)
7.3 矢量波函数表示的并矢格林函数	(333)
7.3.1 积分表示	(333)
7.3.2 奇异项的分离	(335)
7.4 分层介质的并矢格林函数	(344)
7.4.1 一般的各向同性非均匀介质	(344)
7.4.2 平面分层介质	(345)
7.4.3 柱面分层介质	(347)
7.4.4 球面分层介质	(349)
7.4.5 互易条件	(351)
练习题	(354)
参考文献	(357)
深入阅读材料	(359)
第八章 积分方程	(361)
8.1 表面积分方程	(361)
8.1.1 标量波动方程	(362)
8.1.2 矢量波动方程	(364)
8.1.3 各向异性的非均匀介质情况	(367)
8.1.4 二维电磁场问题	(369)
8.2 用矩量法求解积分方程	(373)
8.2.1 标量波例子	(373)
8.2.2 电磁场例子	(376)
8.2.3 具有内共振的问题	(380)
8.3 扩展边界条件法	(381)
8.3.1 标量场情况	(382)
8.3.2 矢量电磁波情况	(384)
8.4 传输矩阵和散射矩阵	(386)
8.5 瑞利假说法	(388)

8.6 多体散射	(391)
8.6.1 二体问题	(391)
8.6.2 N 个散射体问题—递推算法	(392)
8.7 多层散射体的散射	(395)
8.7.1 一个界面的问题	(396)
8.7.2 多界面问题	(397)
8.8 用有限元法求解表面积分方程	(401)
8.9 体积分方程	(405)
8.9.1 标量波情况	(405)
8.9.2 电磁波情况	(407)
8.9.3 积分方程的矩阵表示	(408)
8.10 散射问题的近似解	(409)
8.10.1 玻昂(Born)近似	(410)
8.10.2 里托夫(Rytov)近似	(412)
练习题	(414)
参考文献	(422)
深入阅读材料	(426)
第九章 逆散射问题	(431)
9.1 线性反演问题	(431)
9.1.1 背面投影层析摄影术	(433)
9.1.2 瑞当变换	(435)
9.1.3 衍射层析摄影术	(437)
9.1.4 有限源的效应	(440)
9.1.5 解的非唯一性	(442)
9.2 一维反演问题	(443)
9.2.1 特征曲线方法	(443)
9.2.2 波动方程变换成薛定谔方程	(448)
9.2.3 杰尔范德—列维坦积分方程	(449)
9.2.4 马尔琴柯积分方程	(455)
9.2.5 杰尔范德—列维坦—马尔琴柯积分方程	(457)
9.3 高维的反演问题	(461)
9.3.1 变形波昂迭代法	(462)
9.3.2 波昂迭代法	(465)
9.3.3 散射方程的算符形式	(466)
练习题	(469)
参考文献	(473)
深入阅读材料	(476)

附录 A 一些常用的数学公式	(481)
A·1 常用的矢量恒等式	(481)
A·2 直角、圆柱和球坐标系统中和一般正交曲线 坐标系统中的梯度、散度、旋度和拉普拉斯算子	(481)
A·3 常用的积分恒等式	(484)
A·4 积分变换	(485)
附录 B 张量回顾	(488)
附录 C 广义函数	(495)
附录 D 加法定理	(503)
参考文献	(509)
深入阅读材料	(510)

第一章 预备知识

尽管本书所讨论的很多数学方法也适用于其它各种类型的波动问题,但我们将只就电磁场与电磁波来说明这些数学方法。因此,在本章中我们将给出阅读本书所必须的电磁理论基础。对于通晓电磁理论的读者,这一章可以跳过。

某些时候电磁场可以用标量波方程来描述,尽管在大多数情况下它只能用矢量波方程来表达。在很多例子中,本书所叙述的数学方法用标量波方程可以阐述得更清楚一些。由于声波总是用标量波方程描述的,故在第 1.2 节(“标量波方程”一节)也给出了声波方程的推导。

1.1 麦克斯韦方程

麦克斯韦方程是麦克斯韦(James Clerk Maxwell)在 1873 年建立的。在此之前,由于法拉第,安培,高斯和泊松等人的工作,这些方程已经以不太完整的形式出现了。麦克斯韦的贡献在于对这些方程加上了位移电流项。证明电磁场能够以波的形式存在是非常重要的。麦克斯韦方程的波动性质在 1888 年由赫兹(Heinrich Hertz)以实验的方式证明。尽管地球表面是弯曲的,马可尼(Guglielmo Marconi)于 1901 年借助于电离层对无线电波的反射实现了跨越大西洋的无线电波传递。在那以后,麦克斯韦方程的重要性已在光学、微波、天线、通讯、雷达和其它敏感的应用领域中得到证实。

1.1.1 麦克斯韦方程的微分表达式

用矢量标记和米千克秒单位制,麦克斯韦方程的微分表达式为

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t), \quad (1.1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t), \quad (1.1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0, \quad (1.1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}, t), \quad (1.1.4)$$

其中 \mathbf{E} 为电场(伏特/米), \mathbf{H} 为磁场(安培/米), \mathbf{D} 为电通密度(库仑/米²), \mathbf{B} 为磁通密度(韦伯/米²), $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$ 为电流密度(安培/米²), 而 $\rho(\mathbf{r}, t)$ 为电荷密度(库仑/米³)。

对于时变电磁场,上述麦克斯韦方程组的式(3)和式(4)可由式(1)和式(2)导出。例如,对式(1)两边取散度即得式(3),对式(2)两边散度并利用连续性方程