

电磁理论的新进展

Advances in Electromagnetic Theory

文舸一 著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

电磁理论的新进展/文舸一著. - 北京:国防工业出版社, 1999.6

ISBN 7-118-02029-X

I. 电… II. 文 III. 电磁理论-进展 IV. 0441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 33013 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)

河北三河市腾飞胶印厂

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 276 千字

1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:21.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

174651/11

IV

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

首先简短地回顾一下电磁场理论的发展历史。在 19 世纪之前,电学和磁学是分别研究的;19 世纪之后人们才发现电和磁之间的内在联系。1820 年丹麦物理学家 H.C.Oersted(1777—1851)发表了“关于磁针上电流碰撞的实验”的论文,第一次揭示了电流可以产生磁场。同年法国物理学家 A.M.Ampere(1775—1836)对这一物理现象做了进一步研究,并讨论了两平行导线有电流通过时的相互作用问题,提出了著名的 Ampere 定律。1831 年英国物理学家 M.Faraday(1791—1867)首次报道了电磁感应现象,即通过移动磁体可在导线上感应出电流。Oersted, Ampere 和 Faraday 的工作为电磁学的建立提供了物理概念基础。电磁学真正上升为一门理论则应归功于伟大的苏格兰物理学家 J.C.Maxwell(1831—1879)。Maxwell 于 1855 年发表了“论 Faraday 的力线”的论文,建立了电磁之间的数学关系,指出了电与磁不能孤立地存在。1862 年,他又发表了“论物理学的力线”一文,创造性地提出了“位移电流”的假设。1864 年 Maxwell 又写出了“电磁场的动力理论”,完整地给出了电磁场所满足的方程组,即我们现在所熟知的 Maxwell 方程,并预言了电磁波的存在。1887 年德国物理学家 H.R.Hertz(1857—1894)用实验证明了电磁波的存在。后经意大利工程师 M.G.Marconi(1874—1937)进一步的实验研究,电磁波逐渐发展成一种应用范围最广的信息载体,是当今无线电通信的基础。

Maxwell 方程是电磁场理论这座宏伟大厦的根基,是我们研究一切宏观电磁现象的出发点。Maxwell 方程建立之后,余下的问题即归结为 Maxwell 方程在各种条件下的求解问题。在计算机

出现以前,人们能够求解的电磁场问题是很少的,这段时间内各种解析求解方法成为电磁理论发展的主流。随着计算机水平和计算方法的日益发展和提高,过去一些不能用解析方法求解的问题可以用数值方法来求解,故数值计算在电磁学中的地位越来越重要。

电磁理论经 100 余年的发展已根深叶茂。本世纪下半叶所发生的信息革命和材料革命又给人们提出了许多新的电磁学问题,使这一古老的学科仍然生机勃勃,充满活力,新的内容层出不穷,可以发展的方向不可胜数。在这一新的形势下,国内过去出版的一些电磁场方面教材和专著在内容上显得有些陈旧。因此很有必要出版一批能够反映电磁理论最新进展的专著,作为对传统教材和专著的补充。本书就是这方面的一个尝试。

本书内容主要取材于国内外的数学、物理和技术文献。作者力争在内容的深度和广度上有所突破,着重介绍新概念、新观点和新方法,同时注意内容的系统化和各章节的内在联系以及内容的基础性和重要性。国内出版的教材和专著中涉及过的内容原则上不再纳入本书,但对过去讨论深度不够的某些重要内容则重新做了系统的处理或补充。本书虽取名为电磁理论的新进展,但并不是包罗万象。

全书共分 14 章,涉及微波、天线与电波传播等内容。第 1 章以泛函分析中的谱分析为主线,介绍谱论在偏微分方程中的应用,为后续章节研究各种完备性问题打下基础。泛函分析目前已成为物理学和大多数工程技术学科的通用语言,尤其成为从事电磁场理论及其工程计算方法研究的科技人员所必须掌握的工具。第 2 章介绍波导的模式理论。波导模式理论是整个微波工程的基础,已在大多数教材和专著中做过讨论,但显得深度不够。尤其对波导模式的完备性理论往往蜻蜓点水,一带而过,使广大读者知其然而不知其所以然,达不到熟练灵活掌握波导中模式展开理论和技巧的目的。本章以矢量 Helmholtz 方程的变分原理为基础,系统地建立了波导中模式的完备性理论,并对典型波导的模式求解作了深入讨论。本章还介绍了一般非均匀填充波导的变分原理和不

连续性问题变分解法等内容。最后对波导中的瞬态场理论做了深入细致的讨论。这里的关键问题是如何从时域将波导中的场分裂成沿波导两个相反方向传输的波。我们还讨论了时域激励问题的求解。第3章研究光纤传输的数学基础以及各向异性非均匀介质波导的变分解法。本章讨论不针对具体的光纤形式,而是给出任意形状、任意指数剖面分布光纤的严格数学描述。所采用的方法仍然是变分原理。金属谐振腔在很多文献中都作过讨论,但对其振荡模式的完备性问题很少给出过完整的论述。第4章的中心问题是介绍金属谐振腔模式的完备性理论,内容涉及均匀与非均匀填充金属谐振腔两种情况。由于所采用的研究方法 with 波导问题完全相同,故叙述时以类比为主。本章还讨论了谐振腔与波导的耦合问题。第5章介绍金属天线和介质天线的积分方程理论,对积分方程的建立作了较严格的数学处理并讨论积分方程解的唯一性和积分算子的紧性等问题。鉴于超宽带技术的重要性,最后还介绍了时域天线的一些基本概念以及激励波形的选择问题,这些概念与普通天线的基本概念有很大不同。第6章讨论了天线与散射问题的特征模理论。基于该理论,天线与散射问题的求解可化成一系列特征值问题的求解。特征模是一种远场模式,而特征模的完备性是特征模理论的基础,故本章最后对远场模式的完备性理论作了系统的介绍。第7章研究电磁源的分解。对给定的辐射源来讲,它在空间某方向上所产生的场通常是该方向上 TE 波和 TM 波的叠加。本章便是来研究如何将辐射源分解成两部分,使其中一部分在该方向辐射 TE 波,而另一部分在该方向辐射 TM 波。通过本章的介绍可以加深我们对辐射源的认识。第8章研究时域并矢 Green 函数理论。众所周知,并矢 Green 函数在求解矢量方程时带来很大方便。一般文献常采用启发式的方法来推导和研究 Green 函数。这样做虽然直观简单,但有时会导致错误结论。事实上 Green 函数理论必须建立在分布论(即广义函数论)的基础上。本章先对分布论的一些基本概念作了必要的介绍,然后利用 Green 函数理论讨论了波动方程和 Maxwell 方程的严格解法。在

矢量场问题中,旋度算子起着十分重要的作用。通过引进旋度算子的特征函数,可将任意矢量场按这些特征函数进行展开,从而达到简化问题的目的。第9章利用旋度算子的特征函数理论对Helmholtz定理进行改进并讨论了该理论在时域逆源问题中的应用。第10章研究Maxwell方程的波的分裂理论。近年来波的分裂理论在电磁场正、逆问题中获得广泛应用。本章利用第8章介绍的时域Green函数理论讨论了各种媒质中时域电磁波的分裂条件,进而将Maxwell方程的解分裂成两个沿相反方向传播的互不耦合的波的叠加,从而使问题的求解得以简化。电磁波作为信息传输的手段早已广为人知,而其作为能量的传输手段则是在近几十年科技全面迅速发展之后才为发达国家政府部门所重视。电磁波功率传输的理论基础早在50年代就已成熟,60年代是电磁波功率传输的实践阶段,这期间有很多实验工作取得进展。第11章系统地介绍电磁波功率传输的基本理论,弥补国内在这方面资料的明显不足。在电磁辐射与散射问题中经常用到球矢量波函数。过去人们往往不加证明地使用球矢量波函数的完备性来解决一些典型的实际问题并获得了成功。然而球矢量波函数完备性的严格证明则是80年代中期以后的事情。在第12章中我们利用单层势论分别讨论了球矢量波函数在内问题、外问题和双连通区域问题中的完备性问题,从而为球矢量波函数的进一步应用提供理论依据。第13章讨论低频和高频渐近技术。电磁问题的低频解法早在上个世纪末就被Rayleigh研究过,后经Stevenson和Kleimann等人的改进而日趋完善。本章介绍了三维电磁问题的低频迭代解法,同时还以二维金属目标散射为例介绍了较有特色的Neumann级数迭代解法。低频技术虽然不及一些其它电磁场问题解法适用范围广,但仍有潜在的应用价值,例如在超大规模集成电路中可望获得应用。本章最后还介绍了边界积分方程的高频渐近解法。第14章介绍辛几何及其在电磁理论中的应用。微分几何方法在物理学中被广泛采用,以致出现了物理学几何化的趋势。Hamilton理论在经典力学中占有十分重要的位置。Hamilton描述的理论

基础是辛几何。本章介绍辛几何的一些基本知识以及有限维与无限维 Hamilton 系统理论。近年来 Hamilton 系统的数值求解方法进展很快,其中以辛算法最具代表性和广泛性。本章介绍了建立辛算法的生成函数法和 Pade 逼近法并在此基础上给出了电磁场方程的辛格式。本书采用国际单位制,时谐场采用 $e^{j\omega t}$ 的时间关系。

本书的读者对象是应用数学和应用物理专业的硕士、博士生和从事电磁科学研究的科研人员。阅读本书时要求读者具备坚实的数理基础,尤其要熟练掌握泛函分析、偏微分方程和电磁场理论。

本书的部分内容曾作为硕士生和博士生的教材讲授过,反映尚可。由于作者水平有限,书中错误在所难免,敬请国内外同行批评指正。

作者 谨识

1997 年 8 月于成都

目 录

第 1 章 泛函分析基础	1
1.1 Hilbert 空间的基本性质	1
1.1.1 线性空间的定义	1
1.1.2 内积空间	2
1.1.3 Hilbert 空间	3
1.2 线性算子	8
1.3 有界线性算子	11
1.4 偏微分方程的特征值问题	18
1.5 Fredholm 择一性质	27
第 2 章 波导模式理论	34
2.1 波导中场的模式展开理论	34
2.1.1 波导的变分表达式	34
2.1.2 $k_n^2 \rightarrow \infty$ 的证明	38
2.1.3 特征函数的完备性	40
2.1.4 模式的分类	43
2.2 波导的一般理论	51
2.3 非均匀填充波导	58
2.4 模式函数的经典求解方法	61
2.4.1 一维特征值问题	61
2.4.2 均匀填充矩形波导	63
2.4.3 均匀填充环形波导	73
2.5 波导中的瞬态电磁波	83
2.5.1 基本方程与场的分解, 边界条件	83
2.5.2 本征方程	85
2.5.3 波的分裂	88

2.5.4	Green 函数	90
2.5.5	功率流	93
2.5.6	展开函数	94
2.5.7	波导中的激励问题	97
2.6	波导不连续性问题	98
第 3 章	光纤传输的理论与各向异性非均匀介质波导 的变分解	104
3.1	光纤传输的理论基础	104
3.1.1	模型与记号	104
3.1.2	变分描述的选择	107
3.1.3	色散关系的推导	110
3.2	各向异性非均匀介质波导的变分解法	115
3.2.1	微分方程的推导	115
3.2.2	转置问题	117
3.2.3	变分原理	120
3.2.4	自然边界条件	121
第 4 章	金属谐振腔的模式理论	126
4.1	均匀填充金属谐振腔的模式理论	126
4.2	非均匀填充的金属谐振腔	137
第 5 章	天线理论与积分方程	139
5.1	金属天线的积分方程	139
5.1.1	电场积分方程	139
5.1.2	电场积分方程解的不唯一性	146
5.1.3	磁场积分方程	148
5.1.4	磁场积分方程的紧性	150
5.2	介质天线的积分方程	152
5.3	超宽带技术与天线	156
5.3.1	超宽带雷达分析与建模	157
5.3.2	时域天线参数	160
5.3.3	时域天线的波形选择	162
第 6 章	天线与散射问题的特征模理论	168
6.1	导电体的特征模理论	168

6.1.1 特征场与特征模式	170
6.1.2 模式解	172
6.1.3 线性测量	173
6.1.4 在辐射与散射问题中的应用	174
6.1.5 散射矩阵和微扰矩阵	176
6.2 一般媒质体的特征模理论	177
6.2.1 基本的算子方程	177
6.2.2 特征方程、模式解与线性测量	179
6.3 远场模式的完备性	182
6.4 特征模理论与电小天线设计	189
第7章 电磁源的分解	192
7.1 基本方程与等效源	192
7.2 TE/TM 分解	195
7.2.1 用线源分解	196
7.2.2 用平面源分解	197
7.2.3 用点源分解	199
第8章 时域并矢 Green 函数	201
8.1 分布论简介	201
8.2 标量波动方程	207
8.3 Maxwell 方程与并矢 Green 函数	211
第9章 旋度算子的特征函数及其应用	218
9.1 矢量 Q_λ 的引进	218
9.2 旋度算子的特征函数, 展开定理 和不变 Helmholtz 定理	220
9.3 Maxwell 方程的初值问题	223
9.4 电磁逆源问题	228
第10章 时域 Maxwell 方程的波分裂	230
10.1 Maxwell 方程的混合问题	230
10.2 嵌入几何	234
10.3 各向同性媒质中的上行和下行波条件	235
10.4 波在媒质 $\epsilon = \epsilon(x_1, x_2, \alpha)$, $\mu = \mu(x_1, x_2, \alpha)$	

中的分裂	242
10.5 波在媒质 $\epsilon = \epsilon(x_1, x_2, x_3)$, $\mu = \mu(x_1, x_2, x_3)$ 中的分裂以及反射算子的嵌入方程	245
10.6 波在色散媒质中的分裂	247
第 11 章 电磁波功率传输的理论基础	249
11.1 互易定理	249
11.2 功率互易定理	251
11.3 一般的传输公式	253
11.4 接收系统在非匹配情况下的修正	255
11.5 两平面口径天线传输效率的 Rayleigh 商式	257
11.6 两圆口径天线的最大传输问题	262
第 12 章 球矢量波函数的完备性	267
12.1 单层势论的若干结果	267
12.2 内问题	268
12.3 外问题	273
12.4 双连通区域的情形	274
第 13 章 电磁散射问题的低频与高频解法	277
13.1 电磁场表示定理	277
13.2 有耗三维介质目标的低频解法	281
13.3 算子方程的 Neumann 级数解及其应用	288
13.3.1 算子方程的 Neumann 级数解	288
13.3.2 二维金属柱体散射积分方程的正规范化及其 Neumann 级数解	289
13.4 边界积分方程的高频渐近解	292
13.4.1 散射问题的积分方程及其变种	292
13.4.2 高频极限下的积分方程	294
13.4.3 高频极限下积分方程的渐近解	296
第 14 章 辛几何与电磁场理论	300
14.1 数学预备知识	301
14.1.1 辛流形与 Hamilton 系统	301
14.1.2 有限维与无限维 Hamilton 系统	304

14.1.3 辛变换与梯度变换	307
14.2 生成泛函与辛差分格式	308
14.2.1 生成泛函	308
14.2.2 辛差分格式的构造	314
14.3 Pade 逼近与辛差分格式	315
14.4 电磁场方程的辛格式	317
14.4.1 波动方程	317
14.4.2 Maxwell 方程	318
参考文献	320

Contents

Chapter 1 An Introduction to Functional Analysis	1
1.1 Hilbert Space	1
1.1.1 Linear Space	1
1.1.2 Inner Product Space	2
1.1.3 Hilbert Space	3
1.2 Linear Operators	8
1.3 Bounded Linear Operators	11
1.4 Eigenvalue Problems for Partial Differential Equations	18
1.5 Fredholm Alternatives	27
Chapter 2 Mode Theory of Waveguides	34
2.1 The Mode Expansion Theory in Waveguides	34
2.1.1 The Variational Expression for Waveguides	34
2.1.2 Proof of $k_n^2 \rightarrow \infty$	38
2.1.3 The Completeness of Eigenfunctions	40
2.1.4 The Classification of Modes	43
2.2 The General Theory of Waveguides	51
2.3 Inhomogeneously Filled Waveguides	58
2.4 Classical Methods for Mode Functions	61
2.4.1 One Dimensional Eigenvalue Problems	61
2.4.2 Rectangular Waveguide	63
2.4.3 Secular Waveguide	73
2.5 Transient Waves in Waveguides	83
2.5.1 Fundamental Equations, Decomposition of the Fields and the Boundary Conditions	83

2.5.2 Eigenvalue Equations	85
2.5.3 Wave Splitting	88
2.5.4 Green's Functions	90
2.5.5 Power Flow	93
2.5.6 Expansion Functions	94
2.5.7 Excitation of Waveguides	97
2.6 Discontinuities in Waveguides	98
Chapter 3 Optical Fiber Transmission Theory and	
Variational Solutions of Anisotropic	
Inhomogeneous Dielectric Waveguides	
.....	104
3.1 Theory of Optical Fiber Transmission	104
3.1.1 Models and Notations	104
3.1.2 Choices of Variational Descriptions	107
3.1.3 Derivation of Dispersion Relations	110
3.2 Variational Solutions of Anisotropic Inhomogeneous	
Dielectric Waveguides	115
3.2.1 Derivation of Differential Equations	115
3.2.2 Transpose Problem	117
3.2.3 Variational Principles	120
3.2.4 Natural Boundary Conditions	121
Chapter 4 Mode Theory of Cavity Resonators	126
4.1 Mode Theory for Homogeneously Filled	
Cavity Resonators	126
4.2 Inhomogeneously Filled Cavity Resonators	137
Chapter 5 Antennal Theory and Integral Equations	139
5.1 Integral Equations for Metallic Antennas	139
5.1.1 Electric Field Integral Equations	139
5.1.2 Non-uniqueness of Electric Field Integral Equations	146
5.1.3 Magnetic Field Integral Equations	148
5.1.4 Compactness of Magnetic Field Integral Equations	150
5.2 Integral Equations for Dielectric Antennas	152