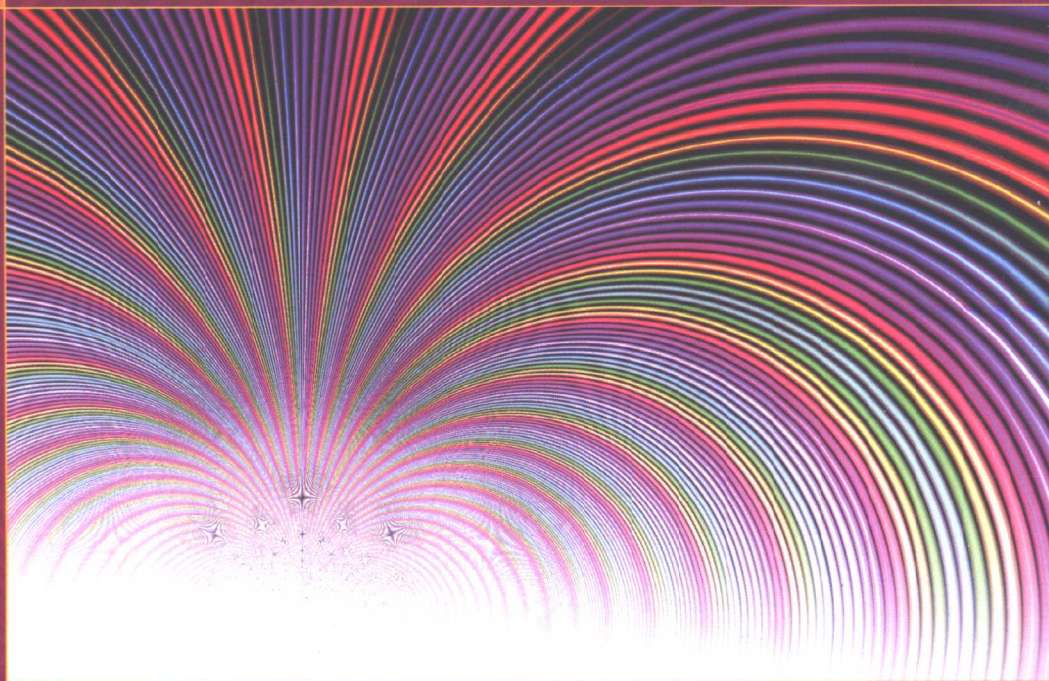




普通高等教育“十五”国家级规划教材



电磁场与电磁波

陈抗生



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十五”国家级规划教材

电磁场与电磁波

陈抗生



高等教育出版社

内 容 提 要

《电磁场与电磁波》是普通高等教育“十五”国家级规划教材。本书对电磁场与电磁波的分析研究按先交变场后静态场并以交变场为主的体系进行。对交变场的讨论微波与光波并重，并从传输线理论入门。传输线模型作为分析电磁波传播的一种有效方法贯穿全书。全书共13章。第1章作为研究电磁场与电磁波必要的数学物理准备；第2章传输线理论；第3章到第5章是电磁场与电磁波理论的基础部分，包括麦克斯韦方程、平面波以及介质交界面对波的反射、折射；第6、7、8章分别为波导、谐振器、天线；第9章为波动专题；第10、11两章为静电场与恒定磁场；最后两章为波导系统的等效网络分析及网络参数的数值模拟。

本书可作为电子信息类专业本科生“电磁场与电磁波”课程教材，同时可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波/陈抗生. —北京：高等教育出版社，2003. 12

ISBN 7-04-013020-3

I. 电... II. 陈... III. ①电磁场—高等学校—教材②电磁波—高等学校—教材 IV. 0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 080672 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京二二〇七工厂

开 本 787×960 1/16
印 张 41
字 数 770 000

版 次 2003 年 12 月第 1 版
印 次 2003 年 12 月第 1 次印刷
定 价 46.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

序

科学技术的飞速发展，市场对人才新的需求，促成了新一轮教学改革高潮的兴起，课程改革是一个重要方面。

近半个世纪，电子信息科学与技术的发展充满生机，新的研究领域一个接着一个。从20世纪50~60年代的真空电子学、60~70年代的固体电子学，到70~80年代计算机，90年代后互联网，进入21世纪又关注硅以后的技术，但电磁场与电磁波作为电子信息科学与技术基础课的地位没有变，只是随着新领域的不断涌现教学的侧重点有所变化。根据当前以及今后一段时期内电子信息科学与技术发展中涉及的电磁问题，编写适合本科生教学的电磁场与电磁波教材是放在电磁工作者面前的一项重要任务。陈抗生同志基于多年从事电磁场与电磁波教学与科研的经验，撰写了电磁场与电磁波教材，在这方面进行了有益而成功的尝试，值得庆贺。

选择先交变场后静态场并以交变场为主的教材体系，很有见地。人们对事物的认识有两个途径，一是从特殊到一般，二是从一般到特殊。对于十分成熟的电磁科学，从一般到特殊，直接从麦克斯韦方程讲授电磁运动规律，使读者从较高的起点认识电磁问题，这是可行的，也利于缩短教学时数。从传输线理论步入麦克斯韦方程组，对于已有一定电路基础的读者，这个途径很好。

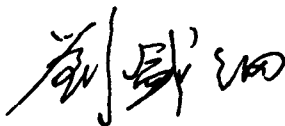
电磁理论的研究，当所研究对象的尺度比波长小得多时，可以采用路的方法，而与波长可比拟甚至比波长大得多时，就要用场的方法。路是场的特例。传输线理论兼有路和场两者的特点。传输线理论，尤其是圆图在微波技术发展史上具有里程碑式的意义。作者对场与波问题的阐述，将传输线模型作为分析场与波的一种有效方法贯穿全书，运用自如，这在现有电磁场与电磁波教材中不多见。

微波与光波都是电磁波，人们对光波的研究比微波早得多，但微波一开始就与应用结合，其发展速度比光波快得多，且更成熟。20世纪70年代后由于光纤通信与光存储技术的进步，光波的发展进入一个新的阶段。21世纪光波与微波将发展得同样强大。由于历史发展的原因，以往微波与光学分属两个学科，将两者紧密结合的电磁场与电磁波教材还不多。陈抗生同志撰写的教材，微波与光波并重，反映了新世纪微波与光波技术的发展，力求将两者在统一的框架下进行分析处理，也较成功。

将电磁场与电磁波基本原理、概念的讲解与应用结合，且举例力求与读者

日常经历、今后可能从事的工作领域结合，这是提高读者学习积极性的好方法。

电磁场与电磁波涉及数学较多，教师感到难教，学生感到难学，怎么解决这个问题，教材是关键。陈抗生同志撰写的电磁场与电磁波教材颇有特色，我为此书的完稿与出版深感庆幸。我衷心希望有电磁教学与科研经历的专家、学者都来关心这个问题，期望国内有更多的各种风格与特色的优秀电磁场与电磁波教材问世。



-2-

2003年3月于中国电子科技大学

前 言

世间运动最快的物质是电磁波，当今社会绝大部分信息都是通过电磁波这个载体传播的。正因如此，在电子信息类专业本科生知识结构中，电磁运动规律及其应用占有十分重要的地位。

随着信息科学技术的进步，尤其是以互联网技术为代表的网络与通信技术的飞速发展，电子信息类专业对电磁场与电磁波类课程提出了新的要求。本书作者所在的浙江大学信息与电子工程系从1999年起对原电磁场与电磁波类三门课程——“电磁场理论(含天线)”(周学时3.5)、“微波与光导波技术”(周学时3)、“电磁波实验”(周学时1)进行综合改革，要求在总学时不增加的前提下，根据电磁科学技术的最新进展提高课程起点，适当提高课程的深度，拓展课程的广度；增开与应用结合的新课，同时提高实验水平。为此，我们将原“电磁场理论(含天线)”以及“微波与光导波技术”两门课有机地组合成一门课“电磁场与电磁波”(周学时4)，并开设“射频与微波电路及其设计”(周学时2.5)新课，“电磁波实验”课周学时数不变，但测量技术提高到基于网络参数的测量，并增加微带电路的实验。对“电磁场与电磁波”课程的要求是：授课时数要压缩，基础要加强，深度要提高，内容涵盖要宽，要反映现代电磁理论与应用的最新进展，在保持电磁理论系统性、严密性的同时，强调与应用结合。本书正是在这一课程改革背景下的产物。

根据上述课程改革的要求，精选教学内容是关键之一。从信息科学技术的发展以及市场对电子信息工程技术人才的要求出发，本书微波与光波并重，主要针对通信、网络、雷达、导航、遥感、集成电路与集成光路、加热与能量传输、控制和记录以及生物电磁学等领域涉及的电磁问题精选教学内容。教材体系也作了大胆改革，对电磁理论的讲解直接从麦克斯韦方程组开始，先交变场后静态场，并以交变场为主。静态场作为交变场的特例，以角频率 $\omega = 0$ 给出。对于交变场的讲授，微波与光波并重，并力求将两者在统一的框架下进行分析处理。对于先交变场后静态场的教材体系，有些人有疑虑。作者从1999年起已连续在4届本科生中按新体系讲授“电磁场与电磁波”，其中静态场的规律作为交变场的特例，主要安排学生自学。实践的结果是学生不仅能接受，而且收到较好的效果。

按什么思路组织教材，这是本书编写又一关键问题。为使已熟悉电路的读者很自然地过渡到从场与波的角度看电磁问题，本书从第1章给出必要的物

理、数学准备后,第2章就进入传输线基本理论。本书对传输线理论给予较多关注,一是因为传输线理论在解决电磁工程问题中得到广泛应用;二是根据传输线理论建立起来的关于波的传播、反射和阻抗匹配等概念对其后理解电磁波的传播,波遇到不均匀处的反射、折射,及其在多层介质中以至各类波导中的传播都十分有益。本书不仅从麦克斯韦方程出发导出将场问题化为路问题——波传播的传输线模型,而且在此基础上将电磁波传播的问题尽可能地统一到传输线模型框架下进行分析,使本书内容有机地组织起来。导波结构的传输线模型是本书分析电磁问题的特色,其优点是便于将复杂的场问题简化为工程技术人员熟悉的路的问题。

与应用结合是本书编写中考虑的又一重要问题。针对通信与网络等主要应用精选教学内容是其一;举例与读者日常经历结合,与其感兴趣的或今后可能从事的工作领域相关联是其二。因此,与电磁场、电磁波相关的各类信号处理器件与系统(如微波通信系统与雷达等)以及诸如静电复印机、静电喷涂、离子推进器、磁记录和硅微机械等都结合相关原理作为应用例子给出。

本书共分13章,第1章为引言——波与矢量分析,这是学习与研究电磁场与电磁波必要的物理、数学准备,旨在使不同基础的读者能在同一起点上进入麦克斯韦方程,研究电磁问题。因此第1章讲授时数将随学生基础而异。第2章传输线基本理论与圆图,这一章的重要性不仅在于其应用的广泛性,也因为其后本书对导波问题的分析尽可能地简化到传输线问题,而圆图作为分析计算传输线的工具在微波发展史上具有里程碑式的意义。第3章麦克斯韦方程,这是支配电磁运动的基本方程,是全书分析电磁场与电磁波的出发点。第4章均匀平面波,这是无界均匀媒质中电磁运动的最基本形式,并可用传输线等效。第5章研究介质交界面对平面的反射和透射,这是研究不均匀介质中电磁波传播的基本问题,并用传输线模型分析多层介质中稳态与瞬态两种情况下波的传播。第6章波导,研究导引电磁波,重点研究柱形金属波导、平板介质波导、光纤中电磁波的传输。第7章谐振器,它是储存电磁能的元件。传输线模型、横向谐振是研究波导、谐振器的有效方法。第8章天线,研究电磁波的辐射与接收。第9章波动专题,重点是各向异性介质中波的传播。第10、11两章讨论静电场、恒定电场与恒定磁场,是作为交变场 $\omega=0$ 的特例引入的。第12章波导器件及其等效网络分析,将各类波导元件当作一个黑盒子,从外部特性描述各类波导元件。第13章讨论电磁问题的数值模拟,这一章作为数值求解电磁问题的导引。

根据作者在浙江大学的教学实践,本书作为教材可以满足不同类型的教学要求。如果18周为一个学期(包括复习考试),周学时为3,可选第1到第7章或第1到第5章与第8、9章。如果周学时为4,可选第1到第9章。如果周学

时为5~6,全书基本上都可安排在课内讲授。以上3种类型的教学安排,第10、11两章均作为交变场的特例简略提及,主要安排自学。如果有电磁场与电磁波类后继课,第12章可与后继课结合。作者所在浙江大学信息电子工程系,将第12章与后续课“射频与微波电路及其设计”结合。第13章亦可作为专题研究参考资料供学生自学。本书也可作为非电磁场与微波技术专业研究生的教材,周学时为3。

配合本书的电子版阅读材料可从本课程网站(<http://EITS.zju.edu.cn/EM01>)下载。电子版阅读材料分章列出,内容丰富多彩,且随时更新。从电磁波发展历史的趣事,到电磁场与电磁波的最新研究进展都有涉及,有帮理解难点的多媒体教学软件以及电磁场数值模拟及射频微波电路设计的应用软件,更多的则是指导读者做电磁场与电磁波专题研究的参考材料。

中国科学院院士刘盛纲教授在百忙中为本书作序,这是对本书出版的莫大支持。上海大学李英教授审阅了全书,并提出许多宝贵意见。作者在此特向刘盛纲院士、李英教授表示衷心的感谢。

美国麻省理工学院孔金瓯教授等撰写的“Applied Electromagnetism”一书对本书先交变场后静态场教材体系的确定影响很大。美国纽约理工大学彭松村教授(近年在台湾新竹交大)的研究成果在本书中引用,作者特向他们致谢。本书撰写过程中得到浙江大学周文教授、李志能教授、黄达诠教授和倪光正教授等的关心与支持,章献民教授、冉立新副教授、郑史烈博士、谢银芳高级工程师、盛法生副教授、李文杨副教授和朱一心讲师在本书撰写与使用本书初稿过程中提出许多宝贵意见,郑国武、陈红胜等多名研究生的成果在本书中得到应用,使用本书初稿的同学指出初稿中许多不足,作者也在此一并致谢。

感谢浙江大学教务部、浙江大学信息电子工程系为本书撰写提供各种便利与支持。

全书由王锴波小姐打印,在此表示谢意。

陈抗生

2003年1月

符 号 表

A	A 矩阵	$d\mathbf{l}$	线元矢量
A	安培	$\mathbf{m}$	磁矩
A	矢量位	m	米
A_e	天线有效面积	N	牛顿
B	磁通量密度(磁感应强度)	N	奈贝
B	电纳	$\mathbf{n}_0$	法线方向单位矢量
b	归一化电纳	p	功率
C	库仑	$\mathbf{p}$	电矩
c	真空中光速(3×10^8 m/s)	Q, q	电荷
D	电通量密度(电位移)	Q	品质因数
dB	分贝	R	电阻
E	电场强度	r	归一化电阻
e	自然对数的底	S	坡印廷矢量
e	电子电荷	S	面积
F	法拉	dS	面元矢量
F	力	dS	面元
f	频率	T	温度
G	电导	T	透射系数
G	天线增益	T	时间周期
g	加速度	V	电压
G_D	天线方向性	v	速度
Hz	赫兹	V	体积
I	电流	dV	体积元
J	电流密度	Wb	韦伯
j	$\sqrt{-1}$	W	能量
k	波矢	w	能量密度
k	传播常数, 波数	X	电抗
L	电感	x	归一化电抗
l	长度, 曲线	Y	导纳
dl	线元	y	归一化导纳

Z	阻抗	κ	等效传输线传播常数
z	归一化阻抗	λ	波长
Z	Z 矩阵	λ	本征值
Y	Y 矩阵	λ_c	临界波长(截止波长)
S	S 矩阵	λ_g	导波波长
T	T 矩阵	μ	磁导率
∇	梯度算符	π	圆周率
α	波导纵向传播常数的虚部	ρ	电荷密度
β	波导纵向传播常数的实部	ρ	驻波系数
β	耦合度	(ρ, φ, z)	圆柱坐标系
γ	旋磁比	(r, θ, φ)	球坐标系
δ	δ 函数	σ	电导率
δ	穿透深度	σ	雷达截面
δ	介质损耗角	Φ	标量位
ϵ	介电常数(电容率)	Φ	电位
η	波阻抗	χ	极化率或磁化率
η	效率	ω	角频率
η_0	自由空间波阻抗(377 Ω)	ψ	标量函数
θ	角度	Γ	反射系数
θ_b	布儒斯特角	Ω	立体角
θ_B	波束宽度	Ω	欧姆
θ_c	临界角		

策划编辑	刘激扬
责任编辑	吴陈滨
封面设计	王凌波
责任绘图	朱 静
版式设计	胡志萍
责任校对	王效珍
责任印制	宋克学

目 录

第 1 章 引言——波与矢量分析	1
1.1 概述	1
1.2 电磁场与电磁波的基本概念	2
1.2.1 电场强度 E 与电通量密度 D	2
1.2.2 磁通量密度 B 与磁场强度 H	6
1.2.3 静电场、恒定磁场与时变场	9
1.2.4 介质的电磁特性	10
1.2.5 电磁波	10
1.3 波动特征	11
1.4 时谐标量波的复数表示	15
1.4.1 用复数“表示”时谐标量波	15
1.4.2 两时谐标量波乘积的时间平均值	18
1.5 电磁波谱	19
1.5.1 电磁波谱图	19
1.5.2 电磁波大气传输窗口	20
1.5.3 不同波段电磁波的传播特性及其应用	21
1.6 矢量分析与场论	22
1.6.1 标量、矢量与场	22
1.6.2 标量场的等值面与梯度	26
1.6.3 矢量场的通量与散度	28
1.6.4 矢量场的环量与旋度	31
1.6.5 矢量运算的几个恒等关系	35
1.6.6 矢量场的分类与亥姆霍兹定理	37
1.6.7 格林定理	38
1.7 正交坐标系	40
1.7.1 圆柱坐标系	40
1.7.2 球坐标系	42
1.7.3 坐标变换	44
1.7.4 坐标单位矢量对空间坐标的偏导数	46

MAG 53/09

1.7.5 梯度、散度和旋度在柱坐标与球坐标系下表达式	48
1.8 电荷与电流分布的模型	49
本章要点	51
习题	53
第2章 传输线基本理论与圆图	55
2.1 传输线的等效电路模型与传输线方程及其解	55
2.1.1 传输线的等效电路模型	55
2.1.2 传输线方程及其解	58
2.1.3 传输线的特征参数	62
2.2 描述传输线状态的特征量沿传输线的变换	64
2.2.1 描述传输线状态的特征量沿传输线变换的关系式	65
2.2.2 描述传输线状态的特征量沿传输线变换关系的图示	68
2.3 传输功率与传输效率	77
2.3.1 传输功率	77
2.3.2 传输效率	79
2.4 传输线圆图	80
2.4.1 反射系数圆与阻抗圆图	81
2.4.2 导纳圆图	84
2.5 圆图应用举例	86
2.6 阻抗匹配及阻抗匹配器	92
2.6.1 $\lambda/4$ 变换器	93
2.6.2 并联支路可变电纳匹配器	94
2.7 耦合传输线	100
2.7.1 奇、偶模分析	100
2.7.2 耦合微带线满足的方程及其解	102
2.7.3 微带双分支定向耦合器	105
2.8 传输线的瞬态响应	107
2.8.1 时域分析	107
2.8.2 频域分析	111
本章要点	111
习题	112
第3章 麦克斯韦方程	116
3.1 积分与微分形式的麦克斯韦方程	116
3.1.1 从库仑定理到高斯定理	116

3.1.2 磁通连续性原理	118
3.1.3 法拉第电磁感应定理	119
3.1.4 安培全电流定理	120
3.1.5 积分与微分形式的麦克斯韦方程组	122
3.2 复矢量与时谐场的麦克斯韦方程组	124
3.2.1 时谐矢量的复矢量表示与时谐场的麦克斯韦方程组	124
3.2.2 两时谐矢量叉积时间平均值的计算	127
3.3 电流连续性原理	127
3.4 物质的本构关系	128
3.5 洛伦兹力	132
3.5.1 洛伦兹力方程	132
3.5.2 等离子体	133
3.6 坡印廷定理	134
3.7 电磁场的几个基本原理和定理	139
3.7.1 叠加定理	139
3.7.2 时变电磁场的唯一性定理	139
3.7.3 镜像原理	140
3.7.4 等效原理	140
3.7.5 对偶定理	141
3.7.6 互易定理	142
本章要点	145
习题	147
第4章 均匀平面波	149
4.1 波方程	149
4.2 平面电磁波	150
4.3 极化	155
4.4 有耗介质中的平面波	159
4.5 色散与群速	164
4.6 平面波传播的传输线模型	167
4.6.1 TEM 模传播的传输线模型	167
4.6.2 TE 模传播的传输线模型	168
4.6.3 TM 模传播的传输线模型	169
4.6.4 电磁波传播传输线模型的一般证明	171
本章要点	177

习题	178
第 5 章 波的反射与折射及多层介质中波的传播	181
5.1 边界条件	182
5.2 介质交界面的反射与折射	185
5.2.1 介质交界面对 TE 波(或垂直极化波)的反射与折射	186
5.2.2 介质交界面对 TM 波的反射与折射	192
5.3 临界角与布儒斯特角	197
5.3.1 临界角	197
5.3.2 布儒斯特(Brewster)角	200
5.4 吸收介质边界上的反射和折射	201
5.5 介质-导体交界面的反射	203
5.5.1 平面波从完纯导体表面的反射	204
5.5.2 电离层的反射	208
5.6 多层平板介质中波的传播	210
5.6.1 单层介质系统的波动分析与射线分析	210
5.6.2 多层平板介质系统中波的传播	213
5.7 多层平板介质系统瞬态响应的传输线模型分析	221
本章要点	227
习题	228
第 6 章 波导	232
6.1 概述	232
6.1.1 波导的基本特征	232
6.1.2 波导的特征参数	234
6.2 矩形波导	234
6.2.1 矩形波导的传输线模型	235
6.2.2 模式函数与场分布	235
6.2.3 色散特性	241
6.2.4 特征阻抗与等效阻抗	245
6.2.5 矩形波导管壁的电流	247
6.2.6 矩形波导的损耗	248
6.2.7 矩形波导的激励与耦合	251
6.2.8 矩形波导元件	254
6.3 圆波导	258
6.3.1 用纵向场量表示横向场量	259

6.3.2 场分布与截止特性	260
6.4 平板介质波导	268
6.4.1 平板介质波导的横向谐振原理	269
6.4.2 单层平板介质光波导	271
6.4.3 条形介质光波导的近似分析——EDC 法	278
6.5 光纤的射线分析	282
6.6 光纤的波动分析	286
6.6.1 分析模型、场分量表达式与特征方程	287
6.6.2 线偏振模及其截止特性与场分布	291
6.6.3 归一化参量与色散	298
6.6.4 无源光器件	303
本章要点	307
习题	308
第 7 章 谐振器	311
7.1 结构特点及其等效电路	311
7.1.1 集总式谐振器与分布式谐振器	311
7.1.2 分布式谐振器的等效电路	312
7.1.3 谐振器结构类型	314
7.2 谐振器的特征参数	315
7.2.1 谐振频率	316
7.2.2 品质因数	316
7.3 空腔谐振器	318
7.3.1 传输线型空腔谐振器的色散关系	319
7.3.2 矩形空腔谐振器的场分布	320
7.3.3 微扰近似下品质因数的计算	322
7.3.4 波长计	324
7.4 微带谐振器	326
7.5 介质谐振器	328
7.6 开放式谐振器	331
7.7 谐振器与传输线的耦合	334
7.7.1 耦合的方式	334
7.7.2 传输线与谐振器耦合的等效电路	335
7.7.3 谐振器特征参数的测量	337
本章要点	341

习题	342
第 8 章 天线	345
8.1 概述	345
8.2 标量和矢量位函数及其解	350
8.3 电基本振子的辐射	353
8.3.1 电基本振子	353
8.3.2 电基本振子辐射的电磁场	355
8.3.3 电基本振子的特性	356
8.4 磁基本振子的辐射、电振子与磁振子的对偶性	361
8.5 线天线	364
8.5.1 短振子天线	365
8.5.2 中心激励半波振子天线	366
8.5.3 中心激励振子天线	368
8.5.4 单极天线	369
8.6 列阵天线	370
8.7 口径天线	377
8.8 微带天线	382
8.9 传输方程与雷达方程	385
8.9.1 传输方程	385
8.9.2 雷达方程	387
本章要点	388
习题	389
第 9 章 波动专题	392
9.1 瑞利散射	392
9.2 傅里叶光学和全息	396
9.3 高斯光束	401
9.4 多普勒效应	405
9.5 电各向异性介质中平面波	409
9.5.1 各向异性介质中 ϵ 、 μ 的并矢表示	409
9.5.2 电各向异性介质中的波方程及其平面波解	410
9.5.3 寻常波与非寻常波	412
9.6 磁化铁氧体中的平面波及铁氧体器件	418
9.6.1 磁化铁氧体磁导率的张量表示	418
9.6.2 波方程及其平面波解	421