

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

# 微波技术与天线

■ 龚书喜 刘 英 傅 光 杨 林 李延平 编著

■ 傅德民 主 审



 高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会

# 微波技术与天线

WEIBO JISHU YU TIANXIAN

■ 龚书喜 刘 英 傅 光 杨 林 李延平 编著

■ 傅德民 主 审



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书内容覆盖了微波与天线相关的基本概念和技术,主要包括:电磁理论、传输线理论、传输线和波导、微波网络理论、微波元器件、天线理论、天线散射理论、线天线和面天线。此外,书中还介绍了一些新的研究理论和应用示例。在数学推导方面“繁简平衡”,在内容方面“深入浅出”,结构紧凑、内容简练。

本书可供大专院校通信工程、电子信息工程等相关专业的大学生和研究生使用,也可供从事微波与天线技术研究与设计工作的技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

微波技术与天线 / 龚书喜等编著. --北京:高等教育出版社, 2014. 1  
ISBN 978-7-04-038963-0

I. ①微… II. ①龚… III. ①微波技术-高等学校-教材②微波天线-高等学校-教材 IV. ① TN015  
② TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 289067 号

策划编辑 吴陈滨      责任编辑 吴陈滨      封面设计 赵 阳      版式设计 王艳红  
插图绘制 尹 莉      责任校对 刘 莉      责任印制 毛斯璐

---

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码	100120		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印 刷	国防工业出版社印刷厂	网上订购	<a href="http://www.landracom.com">http://www.landracom.com</a>
开 本	787mm × 1092mm 1/16		<a href="http://www.landracom.com.cn">http://www.landracom.com.cn</a>
印 张	16.75	版 次	2014 年 1 月第 1 版
字 数	400 千字	印 次	2014 年 1 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	26.50 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  
物 料 号 38963-00

# 序 一

由教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐,西安电子科技大学与高等教育出版社联合策划的这套电子信息类专业基础课程系列教材即将陆续出版发行,我很高兴,这是我国高校电子信息类教材建设工作的一个新举措!

本系列教材的编写基于西安电子科技大学的电子信息办学特色和长期的教学经验积累。学校从1931年诞生于江西瑞金的中央军委无线电学校,到1949年张家口的军委工校和20世纪60年代的“西军电”,80年代的西北电讯工程学院,到现在的西安电子科技大学,一直致力于为国家 and 军队培养电子信息方面的高级专业人才,是国内最早建立信息论、信息系统工程、雷达、微波天线、电子机械、电子对抗等专业的高校之一,形成了鲜明的电子与信息学科特色与优势。本系列教材由学校众多知名教授担任主编,他们长期从事电子信息专业基础课教学和研究,努力继承和发扬学校在电子信息类专业基础课教学方面的经验和特色,并结合最新的科技进展组织和编写了系列教材。

大家知道,培养高素质的电子信息专门人才的前提,是要加强基础课程建设,尤其是数理基础和专业技术基础,要打造一个高水平的专业基础课程平台;本系列教材正是瞄准这一目标,从电路分析、信号与系统、模电(低频,高频)、数电、电磁场等专业基础课,到通信原理、雷达原理、软件技术基础、微波技术与天线等技术基础课,构成了一个知识面宽阔的电子信息类专业基础课教材体系。

本系列教材在编写时强调了如下几点,也可看做是本系列教材的特色:

(1) 本系列教材自成体系,以西安电子科技大学的优势学科和特色专业为依托,覆盖了学校电子信息类专业的主干专业基础课程,知识结构系统完整,内容精练,具有先进性、系统性、完整性等特点;

(2) 本系列教材由学校知名教授、专家(包括国家级教学名师、教育部相关教指委委员、学科带头人等)担任主编,他们具有较丰富的教学和科研经验,保证了该系列教材的编写质量;

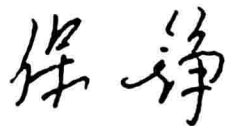
(3) 本系列教材具有很好的基础,大部分教材都是在原有教材的基础上进行修订,在此基础上增加先进的内容和新的方法,而部分原有教材是国家“九五”、“十五”、“十一五”国家级规划教材和普通高等教育精品教材,获得过省部级优秀教材奖;

(4) 本系列教材对应的本科生课程大部分是国家级精品课程或省级精品课程,课程建设和教材建设十分注重基础理论知识与实际工程应用之间的紧密结合,注重对学生的分析问题和解决问题能力的培养。

电子信息领域是一个发展异常迅速的领域,新的需求不断产生,新技术不断涌现,电子信息产品迅速更新并广泛应用于社会的各个方面,从而对IT人才培养提出了更高的要求,反映在课

程建设和教材建设上,就是要有前瞻性,并不断强化基础、不断适应新技术和新要求,就是要通过教学改革与创新,不断提高教学质量,进而促进人才培养质量的全面提升。

希望本系列教材能在这方面产生一些积极的促进作用,并在实践中不断改进和提高,为国家培养出更多优秀的电子信息高级专业人才做出贡献!



2012年5月于西安

## 序 二

自 1999 年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型和种类较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类与电气信息类专业平台课程教材规划”。

这套规划教材的制订和编写遵循了以下几点原则:

1. 尊重历史,将高等教育出版社经过半个多世纪的积淀所形成的名家名作、精品教材纳入规划。这些教材经过数十年的教学实践检验,具有很好的教学适用性。此次规划将依据新的《电子电气基础课程教学基本要求》以及电气信息学科领域的最新发展,对教材内容进行修订。

2. 突出分类指导,突出不同类型院校工程教育的特点。大众化教育阶段,不同类型院校的人才培养目标定位不同,应当根据不同类型院校学生的特点组织编写与之相适应的教材。鼓励有编写基础的一般院校和应用型本科院校经过 2~3 年的试用,形成适用于本层次教学的教材。

3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程教育人才的要求。

4. 数字化的多媒体资源与纸质教材内容相结合。在教育部“加快教育信息化进程”的倡导下,提倡利用多样化、立体化的信息技术手段(如动画、视频等),将课程教学内容展现给学习者,以加深他们对知识的理解,达到更好的教学效果。

教材建设是一项长期、艰巨的工程。我们将本着成熟一批出版一批的指导思想,把这项工作扎实持续地推进下去,为电子信息科学类与电气信息类专业基础课程建设一批基础扎实、教学适用性强、体现时代气息的规划教材,为提高高等教育教学质量,深化高等教育教学改革做出应有的贡献。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员



2010 年 12 月

# 前 言

本书为教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材。

本书由西安电子科技大学工作在第一线的多位教授编写,他们在各个研究方向上积累了比较丰富的工作经验并具有较高的学术造诣。本书内容除了基本的概念与理论外,还综合了作者在微波技术与天线领域的一些创新性研究成果。

本书把“深入基础上的浅出”作为重要编写原则。在“删繁就简”方面,注重数学推导的“繁简平衡”,“宜繁则繁,宜简则简”。例如,在天线接收理论部分,通过详尽严密的数学推导(“繁”),得到了简洁的接收幅度公式和清晰的天线收发互易概念(“简”)。本书的特色使其内容更易为不同类型的读者所接受。

本书内容新颖,理论与工程应用相结合,对于电磁场与微波技术等学科领域的科研人员、高校师生等,都有较好的参考价值。

本书内容包括微波与天线的相关概念与技术。全书共分9章:第1章电磁理论,介绍电磁场最基本的概念与理论;第2章传输线理论,介绍传输线的基本概念与理论;第3章传输线和波导,介绍各种传输线和波导的基础理论;第4章微波网络,介绍微波网络的基本原理及各种矩阵形式;第5章微波元器件,介绍各种端口的微波元件以及器件;第6章天线基础理论,介绍天线的基本概念与相关理论;第7章天线散射理论,介绍电磁散射相关基本概念及雷达截面控制技术;第8章线天线,介绍各种线状结构天线的概念与特性;第9章面天线,介绍各种面天线的概念与特性。

本书由傅德民教授担任主审。第1章、第6章和第7章由龚书喜教授撰写,第2章和第3章由刘英教授撰写,第4章由李延平副教授撰写,第5章由杨林教授撰写,第8章和第9章由傅光教授撰写。洪涛博士参与了第1章和第6章的撰写工作,雷娟副教授参与了第8章和第9章的撰写工作。姜文博士、王夫蔚博士、魏明硕士、罗洁硕士、牟春晖硕士、段沛硕士和吕洁硕士也参与了教材的修改与完善工作,在此一并致谢。

本书编辑、出版工作繁重,高等教育出版社的有关人员付出了大量的心血,特此一并致谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏,恳请读者不吝指出,以不断完善本书。作者邮箱为:shxgong@xidian.edu.cn。

作者

2013年6月

于西安电子科技大学

# 主要符号表

$E$	电场
$H$	磁场
$D$	电通量密度(电位移)
$B$	磁通量密度(磁感应强度)
$E_t$	横向电场
$H_t$	横向磁场
$J$	电流密度
$J_m$	磁流密度
$\rho$	电荷密度
$\rho_m$	磁荷密度
$R$	传输线单位长度导体的串联电阻,简称为分布参数电阻
$L$	传输线单位长度导体的串联电感,简称为分布参数电感
$C$	传输线单位长度导体之间的并联电容,简称为分布参数电容
$G$	传输线单位长度导体之间的漏电导,简称为分布参数电导
$\varepsilon_r$	相对介电常数
$\sigma$	媒质电导率
$c$	光速
$\beta$	相移常数
$\alpha$	衰减常数
$\gamma$	传播常数
$\eta$	空间波阻抗
$D$	方向性系数(量纲为1)
$P$	功率
$U$	天线(远场)固有极化
$I(\mathbf{k})$	总辐射强度
$\mathbf{A}(\mathbf{r})$	磁矢位
$\mathbf{F}(\mathbf{r})$	电矢位
$G$	增益
$G(\mathbf{r}/\mathbf{r}')$	三维标量格林函数
$\Phi(r, \varphi)$	位函数
$\Gamma$	反射系数
$V(z)$	传输线上 $z$ 处的电压



$I(z)$	传输线上 $z$ 处的电流
$Z_i(z)$	输入阻抗
$f$	电磁波频率
$T$	振荡周期
$\lambda_0$	真空中电磁波的波长
$L_A$	工作衰减
$L_1$	插入衰减
$V, I, P$	电压、电流、传输功率
$\bar{V}, \bar{I}$	归一化电压、归一化电流
$\mathbf{e}(u, v), \mathbf{h}(u, v)$	二维矢量函数, 称为电磁场模式矢量函数
$[Z]$	阻抗矩阵
$[Y]$	导纳矩阵
$[S]$	散射矩阵
$[A]$	转移矩阵
$\bar{Z}$	归一化阻抗参数
$\bar{Y}$	归一化导纳参数
$\bar{A}$	归一化转移参数
$S$	散射参数
$\Gamma_{in}$	输入端反射系数
$\Gamma_L$	负载反射系数
$[E]$	单位矩阵
$Q_0$	品质因数
$g_n(\mathbf{k}, \mathbf{u})$	$(\mathbf{k}, \mathbf{u})$ 态天线的部分增益
$\sigma(\mathbf{k}, \mathbf{u})$	$(\mathbf{k}, \mathbf{u})$ 态天线的接收截面(有效面积)
$p$	极化效率
$BCS$	双站雷达截面
$RCS$	单站雷达截面
$SCS$	散射截面
$A_e$	天线口面的有效面积
$A$	抛物面天线的口面面积
$g$	增益因子
$P(\theta, \phi)$	归一化功率方向性函数
$F(\theta, \phi)$	归一化方向性函数
$P_r$	辐射功率
$Z_{rm}$	归算于波腹电流的辐射阻抗

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

# 目 录

第 1 章 电磁理论 .....	1	2.5.2 阻抗匹配方法 .....	39
§ 1.1 麦克斯韦方程组 .....	1	习题 2 .....	43
1.1.1 麦克斯韦方程组概述 .....	1	第 3 章 传输线和波导 .....	44
1.1.2 麦克斯韦方程组的对称性 .....	3	§ 3.1 同轴线 .....	44
1.1.3 电磁场的约束条件 .....	3	3.1.1 同轴线的 TEM 导波场 .....	45
§ 1.2 电磁源的辐射场 .....	8	3.1.2 传输特性 .....	46
1.2.1 电流源的辐射场 .....	9	3.1.3 同轴线的高次模 .....	48
1.2.2 电磁流的辐射场 .....	10	3.1.4 同轴线尺寸选择 .....	48
1.2.3 电磁辐射远场 .....	10	§ 3.2 带状传输线 .....	48
§ 1.3 平面波及极化 .....	12	3.2.1 传输模式 .....	48
1.3.1 平面波表示 .....	12	3.2.2 传输参数 .....	49
1.3.2 平面波的极化 .....	12	3.2.3 衰减常数 .....	50
§ 1.4 坡印廷定理 .....	15	§ 3.3 微带线 .....	51
§ 1.5 洛伦兹关系 .....	15	3.3.1 传输模式 .....	51
§ 1.6 惠更斯原理 .....	17	3.3.2 微带线的准 TEM 模特性 .....	51
§ 1.7 感应定理 .....	18	3.3.3 微带线的衰减 .....	52
习题 1 .....	19	§ 3.4 矩形波导 .....	53
第 2 章 传输线理论 .....	20	3.4.1 矩形波导的通解 .....	54
§ 2.1 传输线的基本概念 .....	20	3.4.2 矩形波导中的力线图 .....	56
2.1.1 长线和短线的概念 .....	20	3.4.3 矩形波导中导波的相速和群速 .....	57
2.1.2 分布参数的概念 .....	20	3.4.4 $TE_{10}$ 模矩形波导的传输功率 .....	58
§ 2.2 传输线方程及其解 .....	21	3.4.5 $TE_{10}$ 模矩形波导的损耗 .....	58
§ 2.3 无耗均匀传输线的工作状态 .....	25	3.4.6 矩形波导的导体壁电流 .....	58
2.3.1 特性阻抗 .....	25	§ 3.5 圆波导 .....	60
2.3.2 相速和相波长 .....	25	3.5.1 圆波导的通解 .....	60
2.3.3 电压反射系数 .....	26	3.5.2 圆波导的色散方程 .....	64
2.3.4 电压驻波比 .....	27	§ 3.6 其他类型传输线 .....	65
2.3.5 输入阻抗与输入导纳 .....	27	3.6.1 平行传输线 .....	65
2.3.6 传输线工作状态 .....	28	3.6.2 共面传输线 .....	66
§ 2.4 史密斯圆图 .....	33	3.6.3 悬置微带线和倒置微带线 .....	66
§ 2.5 传输线的阻抗匹配 .....	38	3.6.4 鳍线 .....	67
2.5.1 匹配类型 .....	38	习题 3 .....	68

<b>第 4 章 微波网络</b> .....	69	5.2.2 双端口网络工作特性参量 .....	114
§ 4.1 微波网络的基本原理 .....	69	5.2.3 衰减器和移相器 .....	115
4.1.1 引言 .....	69	§ 5.3 三端口元件 .....	116
4.1.2 广义传输线理论简介 .....	70	5.3.1 无耗互易三端口网络的特性 .....	116
4.1.3 波导等效为双线 .....	70	5.3.2 波导 T 形接头 .....	117
4.1.4 微波元件、不均匀区等效为 网络 .....	73	§ 5.4 四端口元件 .....	118
4.1.5 微波网络的分类 .....	73	5.4.1 无耗互易四端口网络的特性 .....	118
§ 4.2 线性双端口微波网络的 $Z$ 、 $Y$ 、 $A$ 参数 .....	73	5.4.2 波导双 T 和魔 T .....	118
4.2.1 阻抗参数和导纳参数 .....	74	5.4.3 定向耦合器 .....	119
4.2.2 转移参数 .....	76	§ 5.5 微波谐振器 .....	122
§ 4.3 线性双端口微波网络的散射参数 .....	83	5.5.1 微波谐振器的基本特性参数 .....	122
4.3.1 散射参数 $S$ 的定义 .....	83	5.5.2 微波传输线谐振器的等效电路 .....	125
4.3.2 散射参数 $S$ 的意义 .....	84	5.5.3 微波传输线串联谐振器 .....	127
4.3.3 散射参数与归一化转移参数 $\bar{A}$ 的 关系 .....	85	5.5.4 微波传输线并联谐振器 .....	129
4.3.4 输入端反射系数 $\Gamma_{in}$ 和负载反射 系数 $\Gamma_L$ 的关系 .....	85	5.5.5 矩形波导谐振腔 .....	130
4.3.5 网络性质对应的 $S$ 参数特性 .....	86	§ 5.6 微波滤波器 .....	131
§ 4.4 散射参数的确定与应用 .....	89	5.6.1 微波滤波器的分类和主要技术 指标 .....	131
4.4.1 $S$ 参数的计算 .....	89	5.6.2 微波滤波器的设计方法 .....	132
4.4.2 $S$ 参数的测量 .....	90	5.6.3 低通原型滤波器的概念 .....	132
4.4.3 $S$ 参数的应用 .....	94	5.6.4 频率变换 .....	134
§ 4.5 多端口网络 .....	98	5.6.5 微波滤波器的设计 .....	135
4.5.1 多端口网络的阻抗矩阵、导纳 矩阵以及散射矩阵 .....	98	§ 5.7 微波混频器 .....	138
4.5.2 $2n$ 端口网络的 $[A]$ 矩阵 .....	100	5.7.1 金属-半导体结二极管 .....	138
§ 4.6 散射参数的信号流图 .....	101	5.7.2 混频原理 .....	140
4.6.1 网络信号流图的建立法则 .....	101	5.7.3 混频器的特性参数 .....	143
4.6.2 信号流图的拓扑变换 .....	105	5.7.4 微波混频器的基本电路及结构 .....	143
习题 4 .....	108	§ 5.8 微波振荡器 .....	146
<b>第 5 章 微波元器件</b> .....	111	5.8.1 微波振荡器的分类 .....	146
§ 5.1 单端口元件 .....	112	5.8.2 振荡器的主要技术指标 .....	147
5.1.1 匹配负载 .....	112	5.8.3 微波晶体管振荡器 .....	148
5.1.2 短路活塞 .....	112	5.8.4 雪崩二极管振荡器 .....	151
§ 5.2 双端口元件 .....	113	习题 5 .....	153
5.2.1 无耗互易双端口网络的特性 .....	113	<b>第 6 章 天线基础理论</b> .....	155
		§ 6.1 天线辐射场 .....	155
		6.1.1 天线近场和远场 .....	155
		6.1.2 天线远场表示 .....	156
		6.1.3 天线远场计算 .....	158

§ 6.2 天线参考极化和交叉极化 .....	158	<b>第 8 章 线天线</b> .....	185
§ 6.3 天线增益 .....	160	§ 8.1 振子天线 .....	185
6.3.1 入射功率、输入功率和辐射 功率 .....	160	8.1.1 自由空间中的对称振子 .....	185
6.3.2 $(\mathbf{k}, \mathbf{U})$ 态天线的三个增益 .....	161	8.1.2 V 形对称振子 .....	196
6.3.3 $(\mathbf{k}, \mathbf{u})$ 态天线的三个部分增益 .....	161	8.1.3 折合振子 .....	197
6.3.4 峰值增益 .....	162	8.1.4 振子天线的馈电 .....	198
6.3.5 增益相关的若干术语 .....	162	§ 8.2 宽带振子天线 .....	201
§ 6.4 天线的单端口表示 .....	163	8.2.1 笼形天线 .....	201
§ 6.5 发射天线的三种激励源 .....	163	8.2.2 平面臂天线 .....	201
§ 6.6 接收天线的三种度量表 .....	165	§ 8.3 水平全向天线 .....	202
§ 6.7 天线的收发互易性 .....	167	§ 8.4 环天线 .....	205
6.7.1 涉及任意入射场的互易性 .....	167	8.4.1 小环天线 .....	205
6.7.2 涉及平面波入射场的互易性 .....	168	8.4.2 电流为驻波分布的大环 .....	206
6.7.3 天线接收截面 .....	169	§ 8.5 八木天线 .....	208
§ 6.8 雷达方程与付里斯传输公式 .....	170	8.5.1 天线结构 .....	208
6.8.1 双站/雷达/散射截面概念 .....	170	8.5.2 天线分析 .....	209
6.8.2 雷达方程 .....	172	8.5.3 天线设计 .....	210
6.8.3 付里斯传输公式 .....	172	§ 8.6 螺旋天线 .....	213
习题 6 .....	173	8.6.1 螺旋天线的基本构成 .....	213
<b>第 7 章 天线散射理论</b> .....	175	8.6.2 法向模螺旋天线 .....	215
§ 7.1 电磁散射概念 .....	175	8.6.3 轴向模螺旋天线 .....	216
§ 7.2 物理光学近似 .....	175	§ 8.7 对数周期天线 .....	219
§ 7.3 电磁场的球面波表示 .....	177	习题 8 .....	221
7.3.1 电磁场理论解——矢量球面波 表示 .....	177	<b>第 9 章 面天线</b> .....	224
7.3.2 辐射散射电磁场矢量球面波 表示 $(R > R')$ .....	178	§ 9.1 面元的辐射场 .....	224
7.3.3 入射电磁场矢量球面波表示 $(R < R')$ .....	178	§ 9.2 口面辐射场 .....	229
§ 7.4 天线散射基础理论 .....	179	9.2.1 口面均匀分布的矩形口面 .....	230
7.4.1 一般普遍理论 .....	179	9.2.2 口面场振幅沿 $x$ 轴余弦分布的 矩形口面 .....	232
7.4.2 天线模式散射场 .....	180	9.2.3 口面场均匀分布的圆形口面 .....	233
7.4.3 天线散射场经典公式 .....	180	9.2.4 面天线的电参数 .....	234
§ 7.5 天线雷达隐身概念 .....	182	§ 9.3 喇叭天线 .....	235
7.5.1 有源目标特征控制 .....	182	9.3.1 喇叭天线的结构及种类 .....	236
7.5.2 无源目标特征控制 .....	183	9.3.2 喇叭天线口面场 .....	236
习题 7 .....	184	9.3.3 喇叭天线的方向性系数和口面 利用率 .....	239
		9.3.4 喇叭天线的设计 .....	241
		§ 9.4 反射面天线 .....	242

---

9.4.1 反射面的几何特性 .....	243	§ 9.5 卡塞格伦天线 .....	249
9.4.2 口面场分布 .....	244	9.5.1 卡塞格伦天线的工作原理 .....	249
9.4.3 反射面天线的方向性系数和 增益 .....	247	9.5.2 卡塞格伦天线的增益 .....	252
9.4.4 馈源 .....	247	习题 9 .....	253
		参考文献 .....	254

# 电磁理论

## § 1.1 麦克斯韦方程组

宏观电磁现象由麦克斯韦(Maxwell)方程组支配。麦克斯韦方程组是电磁理论的基石。从本质上讲,电磁理论就是关于麦克斯韦方程组的理论。本章首先公设麦克斯韦方程组,然后着手演绎电磁场的结构与性质。

### 1.1.1 麦克斯韦方程组概述

#### 1. 时变场麦克斯韦方程组

场是空间变量(位置矢量  $\mathbf{r}$ )和时间变量(时间  $t$ )的函数。随时间变化的场称为时变场。

时变场麦克斯韦方程组的微分形式为

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{J}_m \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= \rho_m\end{aligned}\tag{1.1.1}$$

式中:

$\mathbf{E}$  为电场强度(单位为  $\text{V/m}$ );

$\mathbf{H}$  为磁场强度(单位为  $\text{A/m}$ );

$\mathbf{D}$  为电通量密度(电位移)(单位为  $\text{C/m}^2$ );

$\mathbf{B}$  为磁通量密度(磁感应强度)(单位为  $\text{T}$ ,  $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$ );

$\mathbf{J}$  为电流密度(单位为  $\text{A/m}^2$ );

$\mathbf{J}_m$  为磁流密度(单位为  $\text{V/m}^2$ );

$\rho$  为电荷密度(单位为  $\text{C/m}^3$ );

$\rho_m$  为磁荷密度(单位为  $\text{Wb/m}^3$ )。

由麦克斯韦方程组可以导出连续性方程

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{J} &= -\frac{\partial \rho}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{J}_m &= -\frac{\partial \rho_m}{\partial t}\end{aligned}\quad (1.1.2)$$

## 2. 时谐场麦克斯韦方程组

场是空间变量  $\mathbf{r}$  和时间变量  $t$  的函数  $\mathbf{F}(\mathbf{r}, t)$ 。时谐场情况下, 时间变化是已知的, 有

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \{ \mathbf{F}(\mathbf{r}) e^{j\omega t} \} \quad (1.1.3)$$

式中,  $\omega = 2\pi f$  为角频率(单位为 rad/s),  $f$  为频率(单位为 Hz),  $\mathbf{F}(\mathbf{r})$  为复相量(矢量)。

除非特别声明, 以下我们仅研究时谐场(复相量)。

时谐场(复相量)麦克斯韦方程组的微分形式为

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega \mathbf{B} - \mathbf{J}_m \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= \rho_m\end{aligned}\quad (1.1.4)$$

线性各向同性媒质中本构关系为

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J}_c &= \sigma \mathbf{E}\end{aligned}\quad (1.1.5)$$

式中,  $\varepsilon$  为媒质的介电常数,  $\mu$  为媒质的磁导率,  $\sigma$  为媒质的电导率,  $\mathbf{J}_c$  为传导电流密度,  $\mathbf{J} = \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_e$ ,  $\mathbf{J}_e$  为源电流密度。

此种媒质中, 麦克斯韦第一方程[推广的安培(Ampere)定律]  $\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}$  可写成

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \varepsilon \mathbf{E} + \mathbf{J} = j\omega \tilde{\varepsilon} \mathbf{E} + \mathbf{J}_e \quad (1.1.6)$$

式中,  $\tilde{\varepsilon} = j\omega(\varepsilon - j\sigma/\omega)$ 。因此, 计入媒质电导率  $\sigma$  (传导电流密度  $\mathbf{J}_c$ ) 后, 麦克斯韦第一方程  $\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \varepsilon \mathbf{E} + \mathbf{J}$  的数学形式未变, 只是  $\varepsilon$  变为  $\tilde{\varepsilon}$ ,  $\mathbf{J}$  变为  $\mathbf{J}_e$ 。

自由空间情况下, 媒质参数为

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_0 \cong \frac{1}{36\pi \times 10^9} \text{ (F/m)} \\ \mu &= \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \\ \sigma &\cong 0 \text{ (S/m)}\end{aligned}\quad (1.1.7)$$

由麦克斯韦方程组可以导出时谐场(复相量)连续性方程

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{J} &= -j\omega \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{J}_m &= -j\omega \rho_m\end{aligned}\quad (1.1.8)$$

**【注】** 虽然自由磁荷(磁单极子)的存在性目前仍是现代物理学的重大研究课题之一, 但我们还是毫不犹豫地使用含有磁荷与磁流的麦克斯韦方程组。之所以如此, 主要原因是: (1) 等效电磁源含有磁荷与磁流; (2) 含有磁荷与磁流的麦克斯韦方程组具有对称性。



### 1.1.2 麦克斯韦方程组的对称性

定义对称性变换为

$$\begin{aligned} E &\Rightarrow H & H &\Rightarrow -E \\ D &\Rightarrow B & B &\Rightarrow -D \\ J &\Rightarrow J_m & J_m &\Rightarrow -J & \mu \Leftrightarrow \varepsilon \\ \rho &\Rightarrow \rho_m & \rho_m &\Rightarrow -\rho \end{aligned} \quad (1.1.9)$$

可以证明:麦克斯韦方程组在对称性变换之下保持不变,即麦克斯韦方程组具有对称性。

麦克斯韦方程组的解亦满足对称性变换关系。

**【例 1.1.1】** 以时谐场麦克斯韦方程组为例,证明麦克斯韦方程组的对称性。

(1) 麦克斯韦第一方程  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}\omega\mathbf{D} + \mathbf{J}$  在对称性变换之下变为麦克斯韦第二方程  $\nabla \times \mathbf{E} = -\mathbf{j}\omega\mathbf{B} - \mathbf{J}_m$ ;

(2) 麦克斯韦第二方程[法拉第(Faraday)定律]  $\nabla \times \mathbf{E} = -\mathbf{j}\omega\mathbf{B} - \mathbf{J}_m$  在对称性变换之下变为麦克斯韦第一方程  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}\omega\mathbf{D} + \mathbf{J}$ ;

(3) 麦克斯韦第三方程[高斯(Gauss)定律]  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$  在对称性变换之下变为麦克斯韦第四方程  $\nabla \cdot \mathbf{B} = \rho_m$ ;

(4) 麦克斯韦第四方程(磁高斯定律)  $\nabla \cdot \mathbf{B} = \rho_m$  在对称性变换之下变为麦克斯韦第三方程  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ 。

综上所述,虽然在对称性变换之下麦克斯韦方程组中四个方程两两互变,但麦克斯韦方程组作为整体保持不变。

### 1.1.3 电磁场的约束条件

#### 1. 电磁场的边界条件

电磁场的边界条件为麦克斯韦微分方程组的特殊形式。

电磁学界一种著名的观点认为:电磁场的边界条件是一种公设,其正确性只能由实验来证实;电磁场的边界条件不能由麦克斯韦微分方程组推演出来。

在一种新的公设(麦克斯韦微分方程组在广义函数论意义下保持成立)下,通过广义函数论我们由麦克斯韦微分方程组可逻辑地导出广义的电磁场边界条件,常规的电磁场边界条件为其特例。

**【公设】** 麦克斯韦微分方程组在广义函数论意义下保持成立。

下面我们着手推演电磁场的边界条件。

麦克斯韦第一方程为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}\omega\mathbf{D} + \mathbf{J} \quad (1.1.10)$$

式中各量的分区(区域 1 和区域 2)表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \mathbf{H}_2 U^> + \mathbf{H}_1 U^< + \mathbf{H}_s \delta + \mathbf{H}_{ds} \delta' \\ \mathbf{D} &= \mathbf{D}_2 U^> + \mathbf{D}_1 U^< + \mathbf{D}_s \delta + \mathbf{D}_{ds} \delta' \\ \mathbf{J} &= \mathbf{J}_2 U^> + \mathbf{J}_1 U^< + \mathbf{J}_s \delta + \mathbf{J}_{ds} \delta' \end{aligned} \quad (1.1.11)$$