



高等院校电子科学与技术专业系列教材

电磁场与电磁波

许福永 赵克玉 编著

 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

全书共有9章,内容包括矢量分析,静电场,稳恒电场与磁场,静态场边值问题的解法,时变电磁场,电磁波的传播,波导与谐振腔,电磁波的辐射,以及电磁波的应用。每章除有重点要求和本章小结外,还有解题方法及较多的例题与习题供读者复习巩固之用;书末又有部分习题答案与附录备查,适合于72学时的教学。

本书可作为电子信息科学类、电气信息类、仪器仪表类等专业的“电磁场与电磁波”或“电磁场理论”课程的本科生教材,也可作为相近专业的教学参考书,对于教师、研究生和科技工程人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波/许福永,赵克玉编著. —北京:科学出版社,2005

(高等院校电子科学与技术专业系列教材)

ISBN 7-03-015610-2

I. 电… II. ①许…②赵… III. ①电磁场-高等学校-教材②电磁波-高等学校-教材 IV. O441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第052976号

责任编辑:马长芳 资丽芳 姚庆爽 / 责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年9月第一次印刷 印张:29

印数:1—3 500 字数:554 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

《高等院校电子科学与技术专业系列教材》编委会

主 编	姚建铨	天津大学
副主编	金亚秋	复旦大学
	陈治明	西安理工大学
	吕志伟	哈尔滨工业大学
委 员	(按姓氏音序排列)	
	曹全喜	西安电子科技大学
	崔一平	东南大学
	傅兴华	贵州大学
	郭从良	中国科技大学
	郭树旭	吉林大学
	黄卡玛	四川大学
	金伟琪	北京理工大学
	刘纯亮	西安交通大学
	刘 旭	浙江大学
	罗淑云	清华大学
	马长芳	科学出版社
	毛军发	上海交通大学
	饶云江	重庆大学
	张怀武	电子科技大学
	张在宣	中国计量学院
	周乐柱	北京大学
	邹雪城	华中科技大学
秘 书	资丽芳	科学出版社

序 言

21 世纪,随着现代科学技术的飞速发展,人类历史即将进入一个崭新的时代——信息时代。其鲜明的时代特征是,支撑这个时代的诸如能源、交通、材料和信息等基础产业均将得到高度发展,并能充分满足社会发展和人民生活的多方面需求。作为信息科学的基础,微电子技术和光电子技术同属于教育部本科专业目录中的一级学科“电子科学与技术”。微电子技术伴随着计算机技术、数字技术、移动通信技术、多媒体技术和网络技术的出现得到了迅猛的发展,从初期的小规模集成电路(SSI)发展到今天的巨大规模集成电路(GSI),成为使人类社会进入信息化时代的先导技术。20 世纪 60 年代初出现的激光和激光技术以其强大的生命力推动着光电子技术及其相关产业的发展,光电子技术集中了固体物理、波导光学、材料科学、半导体科学技术和信息科学技术的研究成就,成为具有强烈应用背景的新兴交叉学科,至今光电子技术已经应用于工业、通信、信息处理、检测、医疗卫生、军事、文化教育、科学研究和社会发展等各个领域。可以预言,光电子技术将继续微电子技术之后再次推动人类科学技术的革命和进步。因此,本世纪将是微电子和光电子共同发挥越来越重要作用的时代,是电子科学与技术飞速发展的时代。

电子科学与技术对于国家经济发展、科技进步和国防建设都具有重要的战略意义。今天,面对电子科学技术的飞速发展,世界上发达国家像美国、德国、日本、英国、法国等都竞相将微电子技术和光电子技术引入国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术的研究也给予了高度重视。在全国电子科学技术的科研、教学、生产和使用单位的共同努力下,我国已经形成了门类齐全、水平先进、应用广泛的微电子和光电子技术的科学研究领域,并在产业化方面形成了一定规模,取得了可喜的进步,为我国科学技术、国民经济和国防建设做出了积极贡献,在国际上也争得了一席之地。但是我们应该清醒地看到,在电子科学与技术领域,我国与世界先进水平仍有不小的差距,尤其在微电子技术方面的差距更大。这既有历史、体制、技术、工艺和资金方面的原因,也有各个层次所需专业人才短缺的原因。

为了我国电子科学与技术事业的可持续发展和抢占该领域中高新技术的制高点,就必须统筹教育、科研、开发、人才、资金和市场等各种资源和要素,其中人才培养是极其重要的一环。根据教育部加强高等学校本科教育的有关精神,电子科学与技术教学指导委员会和科学出版社,经过广泛而深入的调研,组织出版了这套电子科学与技术本科专业系列教材。

本系列教材具有以下特色:

1. 多层次。考虑到多层面的需求(普通院校、重点院校或研究型大学、应用型大学),根据不同的层次,有针对性地编写不同的教材,同层次的教材也可能出版多种面向的教材。

2. 延续传统、更新内容,基础精深、专业宽新。教材编写在准确诠释基本概念、基本理论的同时,注重反映该领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

3. 拓宽专业基础,加强实践教学。适当拓宽专业基础知识的范围,以增强培养人才的适应性;注重实践环节的设置,以促进學生实际动手能力的培育。

4. 适应教学计划,考虑自学需要。教材的编写完全按照教学指导委员会最新的课程设置为课程要求的指示精神,同时给学生留有更大的选择空间,以利于学生的个性发展和创新能力的培养。

5. 立体化。教材的编写是立体的,包括主教材、学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等等。

本系列教材的编写集中了全国高校的优势资源,突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关学校教务处及学院的帮助,在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求,我们将对这套系列教材不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。

杨建铨

教育部“电子科学与技术”教学指导委员会主任
中国科学院院士,天津大学教授

前 言

在目前高等教育迅速发展的新形势下,提高教学质量,培养学生掌握系统的基本知识、基础理论和基本技能,具有学习能力、思维能力和创造能力,有着创业精神、科学精神和人文精神,适应经济和社会发展需要的基础厚、口径宽、素质高的复合型本科人才是学校教育教学的重要任务。教材是实现学校教育教学任务的基础,编写教材工作十分重要。“电磁场与电磁波”作为一门重要的专业基础理论课程,教学内容应体现经典性、先进性和科学性。因此,编写一本适合于现代教育和科技发展需要,以及在教学实践中易学好用的教材实非易事,编者为此而努力。

本书是编者继参编高等教育出版社 1989 年出版并获得原国家教委 1992 年全国普通高校优秀教材一等奖的《电磁场与微波技术》一书后,在多年教学第一线实践的基础上编写而成。全书共有 9 章,内容包括矢量分析,静电场,稳恒电场与磁场,静态场边值问题的解法,时变电磁场,电磁波的传播,波导与谐振腔,电磁波的辐射,以及电磁波的应用。每章除有重点要求和本章小结外,还有适量的解题方法及较多的典型例题与习题供读者复习巩固之用,适合于 72 学时的教学。

本书的主要特点是着重于基本概念、基本原理和基本分析计算方法的阐述,注意严密的数学分析与直观的物理图像相结合,对重点和难点进行深入细致的分析,使学生在电磁场及其边值问题的主要解法方面得到训练;要求学生掌握静态场的解法及电磁波的传播与辐射特性。针对学生做题难的现实,本书编写了解题思路和方法、典型例题、矢量分析和部分习题答案及附录等,尽量使其成为集基本原理、解题方法和习题集之大成,使学生能懂会用。书中公式推导和例题演算步骤较详细,便于学生自学。本书还着重增加了实际应用部分,并特别添加了反映科技新成果的内容。本书一律采用我国法定计量单位。选学内容打上“*”号,以适合于各类学校 and 不同类型读者教与学两方面的实际需要。每章前后分别有重点要求和本章小结及较多的习题。每章前所列重点要求明确指出各章的重点、地位及其相互关系。章末小结在于更好地掌握本章内容,便于复习,有助于理解和记忆。每章的习题便于学生的平时训练。书末又有部分习题答案和附录备查,可供各类人员查阅和使用。

本教材由许福永和赵克玉编写,赵克玉编写第七章,其余由许福永编写,并统校了全书。作者对高等教育出版社出版的《电磁场与微波技术》一书的主编陈孟尧教授以及其他参考书的作者表示感谢,同时亦对兰州大学信息科学与工程学院的曹斌照、梅中磊、彭宏、李月娥、马阿宁、吕英奇、程银琴等同志在录入文字、公式、习题及其解答等方面所做的工作表示感谢,对科学出版社高等教育分社的资丽芳编

辑在本书出版过程中给予的帮助表示感谢,作者还特别感谢兰州大学教务处给予教材建设基金的支持。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2005年3月

符 号 表

量的符号	量的名称	我国法定计量单位	
		单位符号	单位名称
L, l	长度	m	米
d	长度	m	米
	阻尼系数	$N \cdot s / (kg \cdot m)$	牛[顿]秒每千克米
R	距离矢量	m	米
r	空间位置矢径	m	米
S	面积	m^2	平方米
n	面的法向单位矢量	m^2	平方米
V	体积, 容积	m^3	立方米
m	质量	kg	千克(公斤) ^①
t	时间	s	秒
	温度	℃	摄氏度
θ	平面角	rad	弧度
Ω	立体角	sr	球面度
F	力	N	牛[顿] ^②
f	力密度	N/m^3	牛[顿]每立方米
T	力矩	$N \cdot m$	牛[顿]米
v	速度 ^③	m/s	米每秒
Q	电荷[量], 电量	C	库[仑]
	品质因数		
	无功功率	var	乏
e	电子电荷[量], 电子电量	C	库[仑]
ρ	电荷[体]密度	C/m^3	库[仑]每立方米
ρ_s	电荷面密度	C/m^2	库[仑]每平方米
ρ_l	电荷线密度	C/m	库[仑]每米
ϕ	静电势, 电位	V	伏[特]
	标[量]势	V	伏[特]
ϕ_m	磁标势	A	安[培]
U, u	电压	V	伏[特]

续表

量的符号	量的名称	我国法定计量单位	
		单位符号	单位名称
$\mathcal{E}$	电动势	V	伏[特]
I, i	电流	A	安[培]
J	电流密度, [体]电流面密度	A/m ²	安[培]每平方米
J_S	面电流[线]密度	A/m	安[培]每米
σ	电导率	S/m	西[门子]每米
E	电场强度	V/m	伏[特]每米
ϕ_e	E 通[量], 电场强度通量	V · m	伏[特]米
ϕ_D	电通[量], 电位移通量	C	库[仑]
ϕ_m	磁通[量]	Wb	韦[伯]
Ψ	磁链	Wb	韦[伯]
$\mathcal{F}$	磁动势, 磁通势	A	安[培]
R_m	磁阻	H ⁻¹	每亨[利]
D	电位移, 电通[量]密度	C/m ²	库[仑]每平方米
ϵ	介电常数(电容率)	F/m	法[拉]每米
χ_e	电极化率		
χ_m	磁化率		
p	电[偶极]矩	C · m	库[仑]米
P	电极化强度, 极化强度	C/m ²	库[仑]每平方米
	动量	kg · m/s	千克米每秒
W	能[量], 功	J	焦[耳]
w	能[量]密度	J/m ³	焦[耳]每立方米
B	磁感应强度, 磁通[量]密度	T	特[斯拉]
A	磁矢势, 矢[量]势, 磁矢位	Wb/m	韦[伯]每米
H	磁场强度	A/m	安[培]每米
μ	磁导率	H/m	亨[利]每米
m	磁[偶极]矩, [面]磁矩	A · m ²	安[培]平方米
M	磁化强度	A/m	安[培]每米
L	电感, 自感	H	亨[利]
M	互感	H	亨[利]
C	电容	F	法[拉]
R	电阻	Ω	欧[姆]
X	电抗	Ω	欧[姆]
Z	阻抗	Ω	欧[姆]
G	电导	S	西[门子]
	增益系数	dB	分贝
B	电纳	S	西[门子]

续表

量的符号	量的名称	我国法定计量单位	
		单位符号	单位名称
Y	导纳	S	西[门子]
f	频率	Hz	赫[兹]
ω	角频率,角速度	rad/s	弧度每秒
λ	波长	m	米
κ	波数	m^{-1}	每米
k	波矢量	m^{-1}	每米
α	衰减常数	dB/m	分贝每米
	平面角	rad	弧度
β	相移常数,相位常数	rad/m	弧度每米
	平面角	rad	弧度
γ	传播常数	m^{-1}	每米
S	坡印亭矢量,能流密度	W/m^2	瓦[特]每平方米
p	功率[体]密度	W/m^3	瓦[特]每立方米
p_0	功率面密度	W/m^2	瓦[特]每平方米
P	平均功率,[有功]功率	W	瓦[特]
η	效率		
δ	损耗角	rad	弧度
	趋肤深度	m	米
c	[真空中]光速	m/s	米每秒
n	折射率		
	法向变量		
	单位体积(或长度)内的个数		
N	总数		
Γ	反射系数		
T	传输系数,透射系数		
	周期	s	秒
	热力学温度	K	开[尔文]
D	方向性系数		
	长度	m	米
A	衰减[量]	dB	分贝
φ	相移[量],相位角	rad	弧度

注:① 圆括号内的名称与括号前的名称是同义词。

② 去掉方括号时是量或单位的全称,省略方括号里的字即成为其简称。

③ 矢量的模用同一字母但不加粗(黑)的斜体。

目 录

序言

前言

符号表

第一章 矢量分析	1
重点要求	1
1.1 矢量及其代数运算	1
1.1.1 标量场和矢量场及其不变性	1
1.1.2 矢量的加减、单位矢量和数乘	2
1.1.3 标量积与矢量积	3
1.1.4 矢量的混合积	4
1.2 标量场的梯度、矢量场的散度与旋度	5
1.2.1 矢量微分算子	5
1.2.2 标量场的梯度	5
1.2.3 矢量场的通量和散度	6
1.2.4 矢量场的环量和旋度	7
1.2.5 标量场的拉普拉斯	9
1.3 矢量积分定理	9
1.3.1 高斯散度定理	9
1.3.2 斯托克斯定理	9
1.3.3 格林定理(格林恒等式或格林公式)	10
1.3.4 亥姆霍兹定理	11
1.4 三种常用坐标系	12
1.4.1 坐标变量和基本单位矢量	12
1.4.2 坐标变量之间的关系	13
1.4.3 基本单位矢量之间的关系——单位圆法	14
1.5 广义正交曲线坐标系	16
1.5.1 广义正交曲线坐标系中的线元矢量和拉梅系数	16
1.5.2 广义正交曲线坐标系中梯度、散度和旋度及拉普拉斯的表达式	18
本章小结	19
习题一	21

第二章 静电场	23
重点要求	23
2.1 库仑定律和电场强度	23
2.1.1 库仑定律	23
2.1.2 电场强度	24
2.1.3 场的叠加原理和库仑场强法	25
2.1.4 电力线	28
2.2 高斯定理	29
2.2.1 E 通量	29
2.2.2 高斯定理	29
2.2.3 静电场的无旋性	32
2.2.4 真空中静电场的基本方程	33
2.3 静电势	33
2.3.1 静电势	33
2.3.2 计算电场的电势法	34
2.3.3 等势面	36
2.3.4 电势的微分方程	36
2.4 电偶极子	37
2.4.1 电偶极子的电场	37
2.4.2 均匀外电场对电偶极子的作用	38
2.5 电介质的极化和电位移矢量	39
2.5.1 电介质的极化和电极化强度	39
2.5.2 束缚电荷	40
2.5.3 电位移矢量和介质中的高斯定理	41
2.5.4 介质中静电场的基本方程	45
2.6 静电场中的导体和电容	46
2.6.1 静电场中的导体	46
2.6.2 孤立导体和双导体的电容	46
2.6.3 多导体系统的部分电容	48
2.7 静电场的边界条件	51
2.7.1 两种媒质间静电场的边界条件	51
2.7.2 两种介质间静电场的边界条件	53
2.7.3 介质与导体间静电场的边界条件	53
2.8 静电场的能量	57
2.8.1 带电体系统的电场能量	57

2.8.2 电场的能量密度	59
*2.9 电场力	62
本章小结	64
习题二	67
第三章 稳恒电场与磁场	73
重点要求	73
3.1 电流密度和电荷守恒定律	73
3.1.1 电流与电流密度	73
3.1.2 传导电流与运流电流	75
3.1.3 电动势	75
3.1.4 电荷守恒定律——电流连续性方程	76
3.2 稳恒电流的电场	77
3.2.1 导电媒质中稳恒电场的基本方程	77
3.2.2 稳恒电场的边界条件	78
3.2.3 焦耳定律	79
3.2.4 稳恒电场的静电比拟和电导	79
3.3 安培定律和磁感应强度	82
3.3.1 安培定律	82
3.3.2 磁感应强度与毕奥-萨伐尔定律	83
3.3.3 洛伦兹力	85
3.4 矢量势和安培环路定律	86
3.4.1 磁通连续性原理	86
3.4.2 矢量势及其微分方程	86
3.4.3 安培环路定律	91
3.4.4 真空中稳恒磁场的基本方程	92
3.5 磁偶极子	93
3.5.1 磁偶极子的磁场	93
3.5.2 稳恒磁场对磁偶极子的作用	95
3.6 物质的磁化和磁场强度	96
3.6.1 物质的磁化与磁化强度	96
3.6.2 磁化电流	97
3.6.3 磁场强度与磁介质中的安培环路定律	98
3.6.4 磁介质中稳恒磁场的基本方程	100
3.6.5 磁标势	101
3.7 磁场的边界条件	103

3.7.1 两种磁介质间磁场的边界条件	103
3.7.2 无面电流时两种磁介质间磁场的边界条件	104
3.7.3 磁介质与理想导体间磁场的边界条件	105
3.8 电感	108
3.8.1 互感	108
3.8.2 自感	109
3.9 磁场能量	113
3.9.1 电流回路系统的磁场能量	113
3.9.2 磁场的能量密度	114
*3.10 磁场力	115
本章小结	118
习题三	123
第四章 静态场边值问题的解法	130
重点要求	130
4.1 静态场边值问题的分类和唯一性定理	130
4.1.1 静态场边值问题的分类	130
4.1.2 静态场的边值条件	131
4.1.3 静态场边值问题的求解方法	131
4.1.4 唯一性定理	131
4.2 镜像法	133
4.2.1 镜像法原理	133
4.2.2 导体与介质间边界的镜像法	133
4.2.3 两种介质间平面边界的镜像法	139
4.3 直角坐标系内的分离变量法	144
4.4 圆柱坐标系内的分离变量法	151
4.4.1 二维平行平面场的边值问题	151
4.4.2 三维场的边值问题	154
*4.5 球坐标系内的分离变量法	157
4.5.1 球坐标系内的分离变量法	157
4.5.2 二维轴对称场的边值问题	158
4.5.3 三维场的边值问题	161
*4.6 格林函数法	162
4.6.1 δ 函数的定义及主要性质	162
4.6.2 格林函数	165
4.6.3 格林函数法	167

4.7 复变函数法	171
4.7.1 复变函数及其性质	171
4.7.2 复势函数法	174
4.7.3 常见的保角变换	176
4.7.4 许瓦兹-克利斯多非变换	184
本章小结	187
习题四	189
第五章 时变电磁场	195
重点要求	195
5.1 法拉第电磁感应定律	195
5.1.1 法拉第电磁感应定律	195
5.1.2 感应电动势的计算	196
5.1.3 感应电场	198
5.2 位移电流和全电流定律	200
5.2.1 位移电流和全电流的连续性	200
5.2.2 全电流定律	202
5.3 麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式	206
5.3.1 麦克斯韦方程组	206
5.3.2 正弦电磁场基本方程的复数形式	207
5.3.3 洛伦兹力公式	209
5.4 电磁场的边值关系	210
5.4.1 两种媒质间电磁场的边值关系	210
5.4.2 两种介质间电磁场的边值关系	211
5.4.3 介质与导体间电磁场的边值关系	212
5.5 电磁场的能量守恒定律与坡印亭矢量	213
5.5.1 电磁场的能量守恒定律——坡印亭定理	213
5.5.2 坡印亭矢量——能流密度矢量	215
5.5.3 正弦场的复数坡印亭矢量与复功率	216
5.6 电磁场的矢量势和标量势	221
5.6.1 电磁场的矢量势和标量势	221
5.6.2 洛伦兹条件与动态势的波动方程——达朗贝尔方程	222
5.7 推迟势和似稳电磁场	224
5.7.1 达朗贝尔方程的解——推迟势	224
5.7.2 似稳条件和似稳电磁场	227
5.7.3 电磁理论与电路理论之间的关系	229

本章小结	231
习题五	233
第六章 电磁波的传播	238
重点要求	238
6.1 均匀平面电磁波在理想介质中的传播	238
6.1.1 电磁波的波动方程及其解	238
6.1.2 复波动方程和均匀平面波的传播特性	240
6.1.3 均匀平面波的能量密度和能流密度	245
6.1.4 均匀平面波的极化	248
6.1.5 均匀平面波的性质	252
6.2 媒质的频散和电磁波的相速与群速	252
6.2.1 介质的频散及介质的复介电常数	252
6.2.2 导电媒质的频散及其等效复介电常数	254
6.2.3 电磁波的相速度和群速度	257
6.3 电磁波在有耗媒质中的传播	260
6.3.1 有耗媒质的复磁导率	260
6.3.2 有耗媒质中传播的均匀平面波	260
6.4 电磁波在介质分界面上的反射与折射	267
6.4.1 反射定律与折射定律	267
6.4.2 菲涅耳公式	269
6.4.3 全反射	274
6.4.4 正入射——垂直入射	277
6.5 电磁波在导体表面上的反射与折射	279
6.5.1 电磁波在导体表面上的反射和折射	279
6.5.2 驻波	281
6.5.3 趋肤效应和趋肤深度及表面电阻	283
本章小结	287
习题六	290
*第七章 波导与谐振腔	294
重点要求	294
7.1 纵向场法及波导的传输参量	294
7.1.1 纵向场法	294
7.1.2 波导的传输参量	296
7.2 矩形波导	298
7.2.1 矩形波导中传输的波型	298

7.2.2 矩形波导的截止特性	300
7.2.3 矩形波导中基波的传输特性	301
7.3 圆形波导	304
7.3.1 圆形波导中传播的波型	304
7.3.2 圆形波导中几种常用波型的特性	307
7.4 同轴线	310
7.4.1 同轴线中的 TEM 波	311
7.4.2 同轴线中的 TM 波与 TE 波	313
7.5 微带	314
7.5.1 微带中传播的波型	315
7.5.2 微带中 TEM 波的单一传输	316
7.5.3 微带的特性阻抗	316
7.5.4 损耗	319
7.5.5 耦合微带	319
7.5.6 微波集成电路简介	319
7.6 光纤	320
7.6.1 光纤的一般性质	320
7.6.2 光纤中的波型	322
7.6.3 光纤的数值孔径、色散与损耗	322
7.7 微波谐振腔	323
7.7.1 谐振腔的谐振波长与品质因数	324
7.7.2 矩形波导谐振腔	325
7.7.3 圆形波导谐振腔	328
本章小结	333
习题七	334
第八章 电磁波的辐射	336
重点要求	336
8.1 电磁波的辐射与天线的电参数	336
8.1.1 电磁波的辐射和天线的分类	336
8.1.2 天线的常用电参数	338
8.1.3 洛伦兹互易定理	343
8.2 电偶极子辐射	346
8.2.1 电偶极子辐射的电磁场	346
8.2.2 电偶极子的近区束缚场和远区辐射场	347
8.2.3 电偶极子辐射的电参数	349