



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

本书获得2015年北京邮电大学教学成果奖（教材类）
本书获得2016年北京邮电大学优秀教材立项

信息与通信工程

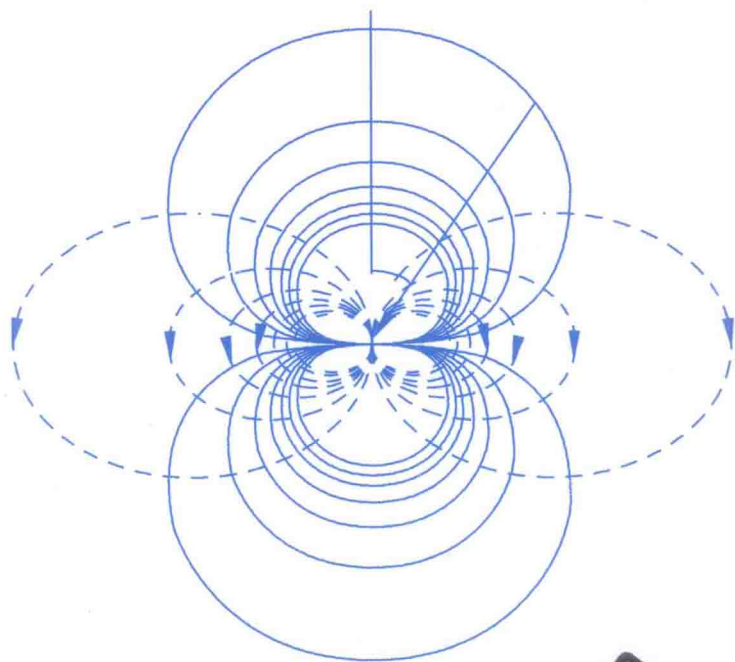
Field and Wave Electromagnetics, Second Edition

电磁场与电磁波

（第2版）

张洪欣 沈远茂 韩宇南 编著

Zhang Hongxin Shen Yuanmao Han Yunan



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Field and Wave Electromagnetics, Second Edition

电磁场与电磁波

(第2版)

张洪欣 沈远茂 韩宇南 编著

Zhang Hongxin Shen Yuanmao Han Yunan

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书以基本电磁现象和电磁规律为基础,系统分析和阐述电磁场与电磁波的基本概念、原理及其基本应用,注重展现电磁工程领域的最新科技成果。

全书共分9章,主要内容安排如下:

第1章介绍正交坐标系和矢量分析的基本方法、基本定理;第2章分析静电场、恒定电场的基本方程及其性质,讨论静电场的边界条件,介绍电位、电偶极子、静电场中的导体及电容、电场能量及电场力等;第3章分析恒定磁场的基本方程及其性质,讨论恒定磁场的边界条件,介绍矢量磁位、电感、磁场能量及磁场力等;第4章介绍静态场的边值问题,阐述镜像法、分离变量法、有限差分法等;第5章以麦克斯韦方程组为核心研究时变电磁场的性质,并分析边界条件、坡印亭矢量、交变场的位等;第6章介绍平面电磁波在无界媒质中的传播,包括平面波的性质、电磁波的极化、平面波在良介质及良导体中的传播特性等,介绍时域有限差分法;第7章研究电磁波在理想导体表面、理想介质分界面及导电媒质分界面的反射和折射,分析入射空间及透射空间场的性质,并介绍菲涅耳公式、人工电磁材料等;第8章介绍导行电磁波的种类、双导体传输线的性质,分析波导管中电磁场的分布规律、电磁波的传播特性,介绍导波传输系统、谐振腔的基本应用及基片集成波导的概念;第9章介绍电磁波的辐射,包括电偶极子、磁偶极子辐射、电磁场的对偶性、对称振子天线的辐射特性、天线基本参数及应用等。

本书可以作为电子信息工程、通信工程、电子科学技术等专业的教材,也可供从事电波传播、射频技术、微波技术、电磁兼容技术的科研和工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波/张洪欣,沈远茂,韩宇南编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2016

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-42948-7

I. ①电… II. ①张… ②沈… ③韩… III. ①电磁场—高等学校—教材 ②电磁波—高等学校—教材 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 030504 号

责任编辑:盛东亮 赵晓宁

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:19.5

字 数:475千字

版 次:2013年1月第1版

2016年8月第2版

印 次:2016年8月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.80元

产品编号:067835-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

一 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

第2版前言

PREFACE

本书第1版自2013年出版以来,以明晰的物理概念、简练的公式推导、形象的规律描述、先进的技术导向赢得了广大读者的欢迎。2014年和2015年作者又相继组织编写了《电磁场与微波技术测量及仿真》与《电磁场与电磁波教学、学习与考研指导》教学参考用书,与主教材《电磁场与电磁波》组成了完整的配套教材系列,在理论、实验实践和练习巩固等三方面紧密配合并支撑各个教学和学习环节。该套教材系列也由此获得了北京邮电大学教学成果奖(教材类)。

本次修订在采纳部分高校教师使用该教材后提出的意见和建议的基础上,改正了第1版的错误和不当之处,主要改进有以下几方面:

(1) 为便于直观分析,在第7章增补了电磁波斜入射到理想介质分界面时反射系数和透射系数与入射角的关系;

(2) 为深入理解电磁波的反射和折射,在第7章增补了平面波在多层媒质分界面垂直入射的情况作为选学内容;

(3) 在第9章增补了对方向性系数的分析;

(4) 为便于查阅梯度、散度和旋度的计算公式,增补了附录H;

(5) 对习题答案进行了修订。

本书在修订过程中得到了北京邮电大学吕英华教授的关心和指导,在此表示衷心感谢。同时,一并感谢北京邮电大学电子工程学院和清华大学出版社的支持。

对于本书中的缺点和不足之处,希望广大读者不吝批评指正。

编著者

2016年7月

于北京邮电大学

第1版前言

PREFACE

电磁场理论是电子、通信、微波及生物医学工程等众多学科领域的基础；同时，电磁场与电磁波又是工科院校电子科学与技术、信息与通信工程、电磁场与无线技术等本科电类专业的重要专业基础课程。随着计算机、通信及微电子等技术的迅速发展，电磁场与其他学科交叉发展、交相辉映，新的专业和技术不断涌现；并且，电路的集成化程度越来越高，电子设备的体积越来越小，电磁兼容、电磁干扰等电磁场问题也越来越突出，对电磁场理论和微波技术提出了更大的挑战。

电磁波是电磁场的一种运动形式，通过这门课程，应当使学生建立起“场”与“波”的概念，学会“场”与“路”的分析方法，学会用“场”的观点去观察、分析、计算一些基本、典型的问题。培养学生正确的逻辑思维方法，提高分析、解决问题的能力；从科学前沿的战略高度出发培养学生的创新思维能力和创造力，为处理实际电磁场问题打下坚实的理论基础。本书总教学时数为68学时左右（部分章节可根据需要节选），可以作为高等院校相关专业的本科生教材或者教学参考用书，也可以作为职业技术学院相关专业的教材和教学参考用书。

本书在编写过程中参照工科院校新修订培养计划的教学要求，认真贯彻执行教育部教高[2007]1号、2号文件精神，参照教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导分委会《高等学校电子信息科学与工程类本科指导性专业规范（试行）》及2011年高等学校本科专业目录的修订意见，密切结合工科院校电子科学与技术、通信工程、信息工程等专业的特点，研究和阐述电磁现象的基本原理、电磁场的基本规律及其在科学研究和工程中的应用。本书的编写思想是从学生认识和理解的角度出发，明确电磁场理论及发展的历史脉络；突出理论叙述、推导与趣味性的融合；强调数学方法与物理规律的有机结合，将数学工具“工程化”，既避免繁杂的数学推导，又阐明电磁场理论的基本概念和规律。本书在作者多年从事电磁场与电磁波教学经验的基础上，结合典型问题的应用，突出电磁场理论中的概念及物理意义，将抽象的问题具体化，将复杂的问题简单化，将零散的问题系统化，打上作者自己理解的“标签”。本书以“场与波”为主线，以“麦克斯韦方程”为纽带，对知识层次按照静电场、边界条件、时变场、电磁场与物质的相互作用、电磁场应用等进行划分；各章节内容按主线展开，环环相扣，在叙述上由浅入深、循序渐进；在内容组织结构上，强调前后内容的连贯性，保持理论体系的系统性和完整性。本书还注重介绍电磁场领域的最新科技成果及其应用，激发学生对电磁场的学习兴趣，起到抛砖引玉的作用，为进一步的学习和研究因势利导，打下牢固的理论基础。

本书还选编了部分例题和习题，并在书后附有参考答案，便于学生自学和复习。本书由张洪欣、沈远茂、韩宇南编写，其中韩宇南编写了第1章与第9章；沈远茂编写了第2章、第

6章与第7章;张洪欣编写了第3、4、5、8章以及绪论、附录等内容,并最终完成统稿。本书在编写过程中得到了北京邮电大学电子工程学院、北京化工大学信息科学与技术学院以及清华大学出版社的大力支持,在此一并表示诚挚的感谢。

由于编者学识有限,电磁场与电磁波技术发展迅速,书中难免存在一些疏漏和不足,恳请广大读者不吝斧正。

编 者

2012年8月于北京邮电大学

目录

CONTENTS

绪论	1
第 1 章 矢量分析	6
1.1 矢量代数	6
1.1.1 标量和矢量	6
1.1.2 矢量的加法和减法	6
1.1.3 矢量的乘法	7
1.2 三种常用的坐标系	8
1.2.1 正交坐标系	9
1.2.2 直角坐标系	10
1.2.3 圆柱坐标系	11
1.2.4 球坐标系	13
1.3 标量场的梯度	15
1.3.1 标量场的等值面	15
1.3.2 方向导数	15
1.3.3 梯度	16
1.4 矢量场的通量与散度	18
1.4.1 通量	19
1.4.2 散度	19
1.4.3 散度定理	21
1.5 矢量场的环量与旋度	22
1.5.1 环量	22
1.5.2 旋度	22
1.5.3 斯托克斯定理	24
1.6 无旋场与无散场	25
1.6.1 无旋场	25
1.6.2 无散场	26
1.7 拉普拉斯运算与格林定理	26
1.7.1 拉普拉斯运算	26
1.7.2 格林定理	27
1.8 亥姆霍兹定理	27
1.9 冲击函数及其性质	28
习题	29

第 2 章 静电场与恒定电场	33
2.1 库仑定律与电场强度	33
2.1.1 库仑定律	33
2.1.2 电场强度及其叠加原理	33
2.2 电场强度的通量和散度	35
2.2.1 电场强度的通量	35
2.2.2 电场强度的散度	36
2.3 电场强度的环量及旋度	37
2.3.1 电场强度的环量	37
2.3.2 电场强度的旋度	38
2.4 静电场的电位函数	38
2.4.1 电场强度与电位函数	38
2.4.2 电位函数的表达式	39
2.5 电偶极子	41
2.5.1 电偶极子的电位函数	41
2.5.2 电偶极子静电场的电场强度	41
2.5.3 电偶极子静电场的等位面 and 电场线	42
2.6 静电场中的导体和介质	43
2.6.1 静电场中的导体	43
2.6.2 静电场中的介质	44
2.6.3 介质中电位移矢量的通量和散度	46
2.6.4 电位移矢量与电场强度的关系	46
2.7 泊松方程与拉普拉斯方程	49
2.8 静电场的边界条件	50
2.8.1 电位移矢量的法向边界条件	50
2.8.2 电场强度的切向边界条件	52
2.8.3 电位函数的边界条件	53
2.9 导体系统的电容	53
2.9.1 双导体及孤立导体的电容	54
2.9.2 多导体的电容系数与部分电容	55
2.10 静电场的能量与静电力	56
2.10.1 静电场的能量	57
2.10.2 静电场的能量密度	57
2.10.3 静电力	59
2.11 恒定电场	60
2.11.1 电流与电流密度矢量	61
2.11.2 恒定电场的基本性质	62
2.11.3 恒定电场的边界条件	65
2.11.4 静电场比拟法与电导	66
2.11.5 损耗功率与焦耳定律	69
习题	70
第 3 章 恒定磁场	74
3.1 恒定磁场的基本定律	74

3.1.1	安培力定律	74
3.1.2	毕奥-萨伐尔定律	74
3.2	真空中的恒定磁场方程	76
3.2.1	恒定磁场的散度及磁通连续性原理	76
3.2.2	恒定磁场的旋度及安培环路定理	77
3.2.3	恒定磁场的位函数及其方程	78
3.3	磁偶极子与介质的磁化	81
3.3.1	磁偶极子及其矢量磁位	81
3.3.2	介质的磁化	82
3.3.3	介质中的恒定磁场方程	84
3.4	恒定磁场的边界条件	87
3.4.1	磁感应强度的法向边界条件	87
3.4.2	磁场强度的切向边界条件	88
3.4.3	恒定磁场位函数的边界条件	88
3.5	电感	90
3.5.1	自电感	90
3.5.2	互电感	91
3.5.3	电感的计算	91
3.6	恒定磁场的能量和磁场力	95
3.6.1	恒定磁场的能量及能量密度	95
3.6.2	恒定磁场的磁场力	97
	习题	98
第 4 章	静态场的边值问题及其解法	102
4.1	边值问题的类型及唯一性定理	102
4.1.1	边值问题的分类	102
4.1.2	静电场解的唯一性定理	103
4.2	分离变量法	106
4.2.1	直角坐标系中的分离变量法	106
4.2.2	圆柱坐标系中的分离变量法	113
4.2.3	球坐标系中的分离变量法	116
4.3	镜像法	118
4.3.1	平面镜像	119
4.3.2	球面镜像	123
4.4	有限差分法	128
4.4.1	有限差分法基本原理	128
4.4.2	有限差分法的基本实现方法	129
	习题	130
第 5 章	时变电磁场	134
5.1	麦克斯韦方程组	134
5.1.1	麦克斯韦第一方程	134
5.1.2	麦克斯韦第二方程	136
5.1.3	麦克斯韦第三方程	137
5.1.4	麦克斯韦第四方程	137

5.1.5	麦克斯韦方程组的形式	137
5.1.6	媒质的本构方程	138
5.2	时变电磁场的边界条件	141
5.2.1	法向场的边界条件	141
5.2.2	切向场的边界条件	141
5.3	时谐电磁场及麦克斯韦方程组的复数形式	146
5.3.1	时谐电磁场的复数形式	146
5.3.2	麦克斯韦方程组的复数形式	147
5.4	时变电磁场的能量及功率	147
5.4.1	坡印亭定理	147
5.4.2	复坡印亭矢量及平均坡印亭矢量	149
5.5	时变电磁场的唯一性定理	151
5.6	电磁场的位函数及波动方程	152
	习题	154
第 6 章	无界媒质中的均匀平面波	157
6.1	理想介质中的均匀平面波	157
6.1.1	亥姆霍兹方程与均匀平面波	157
6.1.2	理想介质中均匀平面波的特性	160
6.1.3	理想介质中均匀平面波的一般表达式	163
6.2	电磁波的极化	166
6.2.1	线极化	166
6.2.2	圆极化	167
6.2.3	椭圆极化	168
6.2.4	极化波的合成与分解	169
6.3	导电媒质中的均匀平面波	169
6.3.1	导电媒质中的波动方程与均匀平面波	170
6.3.2	导电媒质中均匀平面波的特性	171
6.3.3	良介质与良导体	176
6.3.4	趋肤效应	178
6.3.5	表面阻抗、交流电阻	179
6.3.6	损耗功率	181
6.4	时域有限差分法	182
6.4.1	麦克斯韦方程的差分格式	183
6.4.2	UPML 吸收边界条件	185
	习题	186
第 7 章	均匀平面波在不同媒质分界面的反射与折射	190
7.1	平面波垂直入射到理想导体表面	190
7.2	平面波垂直入射到理想介质间的分界面	192
7.3	平面波斜入射到理想导体表面	196
7.3.1	垂直极化波斜入射	197
7.3.2	平行极化波斜入射	198
7.4	平面波斜入射到理想介质间的分界面	200
7.4.1	平行极化波斜入射	200

7.4.2	垂直极化波斜入射	202
7.4.3	全折射、全反射与表面波	203
7.5	平面波在导电媒质分界面的反射与折射	205
7.6	平面波在多层媒质分界面的垂直入射	206
7.7	人工电磁材料	207
7.7.1	负折射效应	208
7.7.2	完美透镜效应	209
7.7.3	负相速度	210
7.7.4	逆多普勒频移	210
7.7.5	逆切伦科夫辐射	211
7.7.6	完美吸波材料	211
	习题	212
第 8 章	导行电磁波	214
8.1	导行电磁波传播模式及其传播特性	214
8.1.1	TEM 波	216
8.1.2	TM 波	216
8.1.3	TE 波	217
8.2	双导体传输线	217
8.2.1	平行双线传输系统	217
8.2.2	同轴传输线	225
8.2.3	微带线	228
8.3	矩形波导	230
8.3.1	矩形波导中的 TM 波	231
8.3.2	矩形波导中的 TE 波	233
8.3.3	简并模、主模及单模传输	237
8.3.4	矩形波导的传播特性参数及传输功率	238
8.4	圆波导	242
8.4.1	圆波导中的 TM 波	243
8.4.2	圆波导中的 TE 波	244
8.4.3	圆波导的传播特性	244
8.4.4	圆波导的几种主要波形	245
8.5	谐振腔	246
8.5.1	谐振腔的基本参数	247
8.5.2	矩形谐振腔	248
8.5.3	圆谐振腔	249
8.6	基片集成波导	249
	习题	250
第 9 章	电磁辐射	253
9.1	滞后位	253
9.2	电偶极子的辐射	255
9.2.1	电偶极子电磁场的激发与辐射	255
9.2.2	电偶极子的辐射场	257
9.3	磁偶极子的辐射	261

9.4	电与磁的对偶原理	262
9.5	对称振子天线	265
9.5.1	对称振子天线上的电流分布	265
9.5.2	对称振子天线的远区场	265
9.6	天线的基本参数	266
9.6.1	方向性函数、方向图与方向性系数	267
9.6.2	输入阻抗与驻波比	268
9.6.3	极化	268
9.6.4	效率	268
9.6.5	增益	268
9.6.6	波瓣宽度	269
9.6.7	前后比和副瓣电平	269
9.6.8	有效长度与频带宽度	269
	习题	270
附录 A	矢量基本运算公式	272
附录 B	洛伦兹规范	274
附录 C	无线电频段划分	275
附录 D	常用导体材料的参数	276
附录 E	常用介质材料的参数	277
附录 F	常用物理常数	278
附录 G	一维吸收边界条件 UPML 的实现	279
附录 H	梯度、散度和旋度的计算公式	280
附录 I	习题参考答案	282
	参考文献	295

绪 论

电磁场是内在彼此联系、相互依存的电场和磁场的总称。随时间变化的电场产生磁场,随时间变化的磁场产生电场,两者互为因果,形成一个统一的整体,即电磁场。电磁场是电磁作用的媒介,具有能量和动量,是物质存在的一种形式。电磁场可由变速运动的带电粒子引起,也可由强弱变化的电流引起,在自由空间中以光速向四周传播,形成电磁波。电磁波是电磁场的运动形式。电磁场的性质、特征及其运动变化规律可由麦克斯韦方程组来表述。

自 20 世纪以来,电磁理论及雷达、天线、微波器件、射频等技术发展迅猛,电磁场应用已经涉及了通信、遥感、导航、探测、成像、生物医学、天气预报等众多领域。民用多在手机终端、无线通信、射频识别(RFID)技术等领域;军用则涉及国家安全、军事装备的方方面面,例如雷达、导航、卫星等。通信是公民的基本权利,也是物物相联(物联网)的基本方式,有通信存在及需要的地方,无论海、陆、空、天,就有电磁场及电磁波技术出现。如今,随着电子技术、计算机及信息科学的发展,电磁理论及工程技术也正面临着更多的挑战,新型研究领域不断涌现,例如毫米波及亚毫米波技术、微波单片集成电路、智能天线、新型人工电磁材料、计算电磁学、电磁兼容、太赫兹技术、生物电磁学等。

1. 电磁场理论的建立与发展

据《黄帝内经》记载,中国人在公元前 2700 年就开始了对于宇宙的研究,并且认识到了地球磁场的存在。公元前 4 世纪,中国人发现了磁石吸铁现象,并在公元初制造出了世界上第一个指南针。1600 年,英国人吉尔伯特出版了名著《论磁》,介绍了对磁学的研究,成为历史上第一个对电磁现象进行系统研究的学者。

1733 年,法国人迪费发现所有物体都可摩擦起电,还认识到同性电荷互相排斥,异性电荷彼此吸引。1747 年美国的富兰克林定义了正电和负电,并总结出了电荷守恒定律。1780 年伽伐尼发现了动物电;1785 年法国物理学家库仑借助扭秤实验得出静电作用和磁极之间的平方反比关系,这一定律使电学和磁学进入了定量研究的阶段。

1800 年伏打发明电堆。在此基础上,1820 年丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应。同年,在电流磁效应的启发下,法国物理学家安培通过实验总结出了安培定律。也是在 1820 年,法国物理学家毕奥和萨伐尔通过实验总结出了毕奥-萨伐尔定律,并在数学家拉普拉斯的帮助下给出了数学表示公式。电学与磁学有了联系,从此开始了电磁学的新阶段。电流磁效应的发现,还使得电流的测量成为可能,1826 年欧姆据此确定了电路的基本规律——欧姆定律。1823 年斯特金发明了电磁铁,1831 年英国物理学家法拉第发现了电磁感应现象,证实了电现象与磁现象的统一性,并制造出了第一台发电机,开创了能源开发与利

用的新时代。1837年,摩尔斯发明有线电报,人类开始了电通信阶段;1861年贝尔发明了电话。人类在19世纪末实现了电能的远距离输送,电力的广泛应用直接推动了世界第二次工业革命。

从1855年到1873年,麦克斯韦在继承和发展库仑、高斯、欧姆、法拉第、安培、毕奥、萨伐尔等人思想和观点的基础上建立了电磁场理论体系。

1855年,麦克斯韦在第一篇重要论文《论法拉第的力线》中,引入了一种新的矢量函数来描述电磁场,由该函数的各种微分运算,推导出电流的力线与磁力之间的关系,通过矢量微分方程表示出电流和磁场之间的定量关系,以及电流间的作用力和电磁感应定律的定量公式。他将法拉第的力线由一种直观的概念上升为科学的理论,法拉第大为赞扬:“我惊讶地看到,这个主题居然处理得如此之好!”

1861年到1862年,麦克斯韦发表了第二篇重要论文《论物理力线》。在论文的第一部分,他设计了电磁作用的力学模型,讨论了磁体之间、能够产生磁感应的物质之间以及电流之间的作用力。在论文的第二部分,麦克斯韦设想了一个“分子涡旋和电粒子”模型,讨论了电磁感应现象。在论文的第三部分,麦克斯韦将他的涡旋假设用于静电现象,并引入了“位移电流”的概念,由此得到了两个惊人的结论:导体周围的电粒子可以做弹性位移;变化的电流能够以一定的形式进入导线周围空间。在论文的第四部分,麦克斯韦重新讨论了磁光效应。

1864年,麦克斯韦发表了第三篇重要论文《电磁场的动力学理论》。他明确地提出了电磁场的概念,认为电磁场可以存在于物质及真空之中,并对电磁场的能量做了定量计算,导出了电磁场能量密度公式和总能量方程。随后,麦克斯韦根据电磁学的实验定律和普遍原理建立了电磁场方程,包括电位移方程、电弹性方程、全电流方程、磁力方程、电流方程、电动力方程、电弹力方程、电阻方程、自由电荷方程、连续性方程等20个方程。1865年,他把电磁近距作用和电动力学规律结合在一起,用方程组概括了电磁规律,建立了电磁场理论,并预测了光的电磁性质,继牛顿力学之后,物理学实现了第二次理论大综合。

1873年,麦克斯韦出版了科学名著《电磁学通论》,系统、全面、完美地阐述了电磁场理论。他提出了“涡旋电场”和“位移电流”假说,预言了电磁波的存在,计算出了电磁波的传播速度,从理论上证明了光是一种电磁波。1888年,德国物理学家赫兹在实验室实现了电磁波的发送和接收,证明了电磁波具有反射、折射、干涉、衍射等性质,并验证了麦克斯韦理论。至此,物理学实现了电、磁、光的综合,即第三次理论大综合,为近代电力工业和无线电通信的发展奠定了理论基础。

电磁场理论是19世纪物理学中最伟大的成就,爱因斯坦在纪念麦克斯韦诞辰100周年时说,这是继牛顿力学之后物理学史上又一次划时代的伟大贡献。在历史上,赫兹对电磁场理论的贡献也举足轻重。他不仅证实了电磁波的存在,使得电磁场理论被普遍接受,还重新推导和论证了麦克斯韦理论中的静态电磁学基本方程组,整理了基本概念并消除了混乱。另外他还建立了运动物体的电磁学基本方程组,引申和拓展了麦克斯韦电磁场理论。1890年,赫兹给出了麦克斯韦方程组简化的对称形式,包括四个矢量方程,其基本形式一直沿用至今。

电磁场理论的建立标志着电磁学的发展进入了一个新阶段,为电工、电子和电能等技术的产生、应用及发展提供了强劲支撑,对人类生产实践和社会进步起到了巨大的推动作用