



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

普通高等教育“十一五”教材建设基金资助

信息与通信工程

Electromagnetic Fields and Waves

电磁场与电磁波

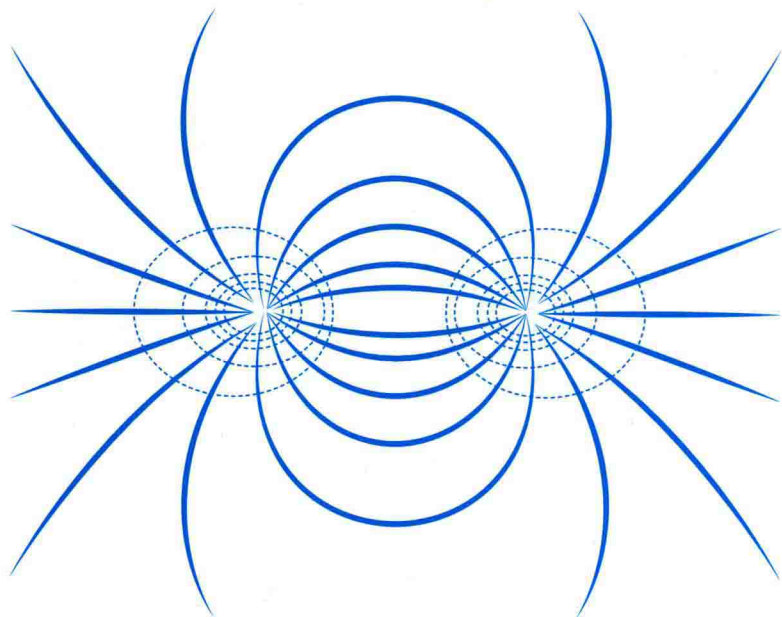
梅中磊 曹斌照 李月娥 马阿宁 编著

Mei Zhonglei

Cao Binzhao

Li Yue'e

Ma Aning



清华大学出版社



学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
电子信息类专业系列教材

Electromagnetic Fields and Waves

电磁场与电磁波

梅中磊 曹斌照 李月娥 马阿宁 编著

Mei Zhonglei

Cao Binzhao

Li Yue'e

Ma Aning

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是为高等院校电子信息与电气工程类专业主干基础课程“电磁场与电磁波”编写的本科生教材,主要介绍电磁场与电磁波的基本特性及规律。本书从矢量分析与场论入手,着重讨论电磁场基本理论的内容。全书共分7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、电磁波的辐射等。书末有附录(常用坐标系下涉及的场论公式、重要的矢量恒等式、希腊字母表、常用保角变换对照表等)、各章习题参考答案等。

本教材的指导思想是在一定程度上降低教材难度,强化物理概念的理解,淡化数学计算的繁杂;撰写力求语言简单、朴实,通俗易懂;比喻、举例恰如其分;精选最具代表性的例题和作业题,且有些例题紧密结合科技前沿内容,力求达到举一反三的效果;部分内容配有 MATLAB 程序代码,方便学习中动手操作。此外,教材中辅以与教学内容密切相关的最新科研进展,方便感兴趣的读者浏览。

本书适合电子信息类、电气类专业的本科生使用,尤其适合开展研究型教学的基础理论班、创新人才培养基地等使用,对于大学生科研有积极的促进作用。本书也可以作为相关专业研究生的参考教材。

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/梅中磊等编著. —北京:清华大学出版社,2018
(高等学校电子信息类专业系列教材)
ISBN 978-7-302-49912-1

I. ①电… II. ①梅… 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(2018)第 055452 号

责任编辑:盛东亮 赵晓宁

封面设计:李召霞

责任校对:梁毅

责任印制:宋林

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:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:23

字 数:554千字

版 次:2018年10月第1版

印 次:2018年10月第1次印刷

定 价:59.00元

产品编号:071420-01

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	国防科技大学	(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
隆克平 北京科技大学
秦石乔 国防科技大学
刘向东 浙江大学

委员 王志华 清华大学
韩焱 中北大学
殷福亮 大连理工大学
张朝柱 哈尔滨工程大学
洪伟 东南大学
杨明武 合肥工业大学
王忠勇 郑州大学
曾云 湖南大学
陈前斌 重庆邮电大学
谢泉 贵州大学
吴瑛 解放军信息工程大学
金伟其 北京理工大学
胡秀珍 内蒙古工业大学
贾宏志 上海理工大学
李振华 南京理工大学
李晖 福建师范大学
何平安 武汉大学
郭永彩 重庆大学
刘缠牢 西安工业大学
赵尚弘 空军工程大学
蒋晓瑜 陆军装甲兵学院
仲顺安 北京理工大学
黄翊东 清华大学
李勇朝 西安电子科技大学
章毓晋 清华大学
刘铁根 天津大学
王艳芬 中国矿业大学
苑立波 哈尔滨工程大学

王志军 北京大学
葛宝臻 天津大学
何伟明 哈尔滨工业大学

宋梅 北京邮电大学
张雪英 太原理工大学
赵晓晖 吉林大学
刘兴钊 上海交通大学
陈鹤鸣 南京邮电大学
袁东风 山东大学
程文青 华中科技大学
李思敏 桂林电子科技大学
张怀武 电子科技大学
卞树檀 火箭军工程大学
刘纯亮 西安交通大学
毕卫红 燕山大学
付跃刚 长春理工大学
顾济华 苏州大学
韩正甫 中国科学技术大学
何兴道 南昌航空大学
张新亮 华中科技大学
曹益平 四川大学
李儒新 中国科学院上海光学精密机械研究所
董友梅 京东方科技集团股份有限公司
蔡毅 中国兵器科学研究所
冯其波 北京交通大学
张有光 北京航空航天大学
江毅 北京理工大学
张伟刚 南开大学
宋峰 南开大学
靳伟 香港理工大学

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。

教育部于 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。其目的是为了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

前言

PREFACE

“电磁场与电磁波”(或“电磁场理论”)是高等学校电气类、电子信息类专业本科生必修的一门专业基础课,课程涵盖的内容是电气类、电子信息类专业应具备知识结构的重要组成部分,是“微波技术”“光纤通信”“天线”“射频电路”“无线通信”等后续课程的基石。对于培养现代通信领域、电子信息技术领域的高素质人才,具有重要的作用。近代科学的发展表明,电磁场与电磁波基础理论是一些交叉学科的生长点和新兴边缘学科发展的基础。

本书的作者们大都毕业于兰州大学信息科学与工程学院,均获得无线电物理专业的硕士、博士学位,长期从事电磁场与微波技术领域研究,并在兰州大学讲授“电磁场理论”课程。作为曾经的学生和现在的老师,我们深深体会到:“电磁场理论”涉及大量的矢量分析和场论方面的知识;覆盖内容较广,且要求有一定的深度;相对于应用型课程,课程理论分析较多,内容抽象,难度较大;部分教学内容与生产实践脱节,与日常生活脱节,不接地气。长期以来,国内外高校尤其是国内高校,对于课程内容的传授,基本上采用“黑板加粉笔”的讲授模式,或者是“PPT 放映讲授”模式,再加上课程本身具有理论难度,所以学生的学习积极性不太高,教学效果也不理想,对后续课程也有不良影响。同时,与其他课程相比,“电磁场理论”课程实验是一个难点,设备投资大、占地面积大、使用效率低,这个问题在国内外都没有得到很好的解决。

尽管存在上述问题,但对于“电磁场理论”课程及其课程群来讲,也具有自身的优势:课程中所讲授的知识、理论或方法,在科研工作中具有一定的普适性,更容易与科研结合,并取得成绩。因此,该课程也是对本科生尤其是优秀本科生进行科研训练的一门理想课程。

从 2008 年开始,课题组以兰州大学信息科学与工程学院的“电磁场理论”课程为基地,尝试在课程教学中采用研究型教学方法,并循序渐进,逐步将改革内容延伸至“数学物理方法”“微波技术”及相关课程实验中去。主要内容包括:①多媒体教学手段、先进教学方法与科研工具的渗透性结合;②科技前沿与课程内容的互补性结合;③考核方式的改革与科技小论文写作的灵活结合;④创新性实践环节的引入及其与理论教学的无缝结合。在此过程中,课题组既给同学们传授了相关知识,又提升了他们的实践动手能力,还培养了本科学生的科研创新素养。同时,不断总结教学经验和成果,多次指导本科学生发表教学科研论文,并多次获得国家级、省级奖励。

2014—2015 年,课题组受兰州大学资助,开展了“基础课程‘电磁场理论’教学中创新性实践环节的设计及应用研究”的课题研究,结合十多年来的课程教学经验,深入讨论、研究并加以践行,尝试将创新性实践环节引入课程教学环节中,包括:课堂内多媒体演示实验、手动演示实验的规划与实施;电磁仿真实验的设计与普遍应用等。目的是在保证学生扎实掌握基础理论的同时,大幅度提高动手实践能力,为后续课程群的学习及今后走上工作岗位奠

定坚实的工程实践基础。

经过多年的教学实践,我们深感到有必要把自己在教学方面的体会和经验融入教材内容,并展现给广大同仁,希望能够给其他高校相关课程的教学提供一些启发。兰州大学信息学院“电磁场理论”课程的讲授,多年来一直采用由高等教育出版社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》(陈孟尧、许福永、赵克玉等编著)作为教材。2005年,许福永教授对该教材进行了改编,由科学出版社出版,书名为《电磁场与电磁波》,并一直作为本科生教材沿用至今。截至目前,两本教材都不再印刷。本教材在原《电磁场与电磁波》的基础上,结合课题组十几年的教学实践,在保持基本框架不变的同时,对全书做了较大幅度的具有明显特色的增减,并最终由清华大学出版社出版。

本教材具有以下特色:

(1) 延续传统,更新内容。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,教材中辅以最新科研进展,密切联系教学内容,提高学生的学习兴趣,真正使教材能够达到培养人才的目的。同时,列举生活中的实例,使教材真正“接地气”,贴近实际问题。

(2) 精选最具代表性的例题和作业题,力求达到举一反三的效果。有些例题紧密结合科技前沿内容,如电磁隐形衣、无线输电、人工电磁表面的分析等。

(3) 拓宽专业基础,融合实践教学,培养科研素养。适当拓宽专业基础知识的范围,以增强培养人才的适应性;教材中融合了实践环节的设置,部分内容配有MATLAB程序代码,方便学习中动手操作。比如:利用MATLAB绘制特殊函数曲线、方程求根、数值积分的实现、天线方向图函数的绘制,利用符号运算求解方程组的解等,以促进学生实际动手能力的培养;结合科研方法和科研工具,给本科生科研和就业打下基础。

(4) 语言简单、朴实,通俗易懂;比喻、举例恰如其分;强调对物理概念的理解,弱化数学推证。比如:通过举“切土豆丁”的例子,阐述高斯定理;举“试管刷”“蒲公英”的例子,描述电力线形状;举“渔网”的例子,讲授斯托克斯定理。同时,编写顺口溜(“现觅领队”“山区植被”),加深同学们对柱坐标系下拉普拉斯方程分离变量的理解。

(5) 结合电磁场教学中的重点、难点和容易出错的地方等,书中增加了类似“难点点拨”“重点提醒”“答疑解惑”和“延伸思考”等环节,对相关问题进行介绍和强调,适时帮助读者解决阅读和学习中的困惑。

更难能可贵的是,教材中“科技前沿”等内容的增添,紧密结合教学内容,做到水乳交融,绝非画蛇添足、哗众取宠。比如各种隐形衣的原理介绍,本书紧密结合柱坐标和球坐标系下的分离变量法展开,所举例题是《科学》《物理评论快报》等著名刊物的发表内容,不超纲、提兴趣且生动活泼;关于电磁超表面的介绍,密切联系平面天线阵的辐射理论,用本科生的知识阐述科学家的工作;再如,讲解互感和法拉第电磁感应定律时,本书适时补充无线输电的基本原理,从而让同学们有学以致用感受。

相信通过仔细阅读、科学安排并合理使用本书,广大读者一定受益匪浅。

本书由“电磁场理论”课题组的梅中磊、曹斌照、李月娥和马阿宁编写。其中曹斌照副教授在2013年调离兰州大学,目前在太原理工大学任教。全书共7章,适合于72学时的教学,经过适当删减,也可用于54学时的教学。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、电磁波的传播和电磁波的辐射等。书中加“*”的内容

可以根据实际情况选讲。梅中磊负责第 2 章和第 4 章的编写,书中 MATLAB 代码的编写、科技前沿等内容的规划和全书的统校工作;曹斌照编写了第 3 章和第 6 章;李月娥编写了第 1 章和第 5 章;马阿宁编写了第 7 章和附录部分。书中每章除有本章导读和本章小结外,还有较多的典型例题和习题以供读者巩固复习之用。书末有部分习题答案和内容较多的附录备查,以适用于不同院校和不同类型的读者,满足教与学两方面的要求。在教材编写过程中,兰州大学博士生导师许福永教授给予了极大的帮助和鼓励,并提出了很多宝贵建议,进一步提升了本教材的质量;兰州大学信息学院硕士研究生赵灿星、杨宁、陈镇生、胡艺文、王一丁、马雪曼、穆希皎等对书中的部分绘图和公式录入有很大帮助;兰州大学教务处对教材的编写给予了资金支持(兰州大学教材建设基金资助)。在此对他们表示衷心的感谢!

由于受水平、时间、篇幅所限,书中难免存在一些疏漏或欠妥之处,恳请广大读者批评指正。我们将对本教材不断更新,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信息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。

编 者

2018 年 1 月

常用物理量符号及单位对照表

符号	符号名称	单位	单位名称
R	距离矢量	m	米
r	空间位置矢径	m	米
n	面的单位法向矢量		
T	力矩	N·m	牛[顿]米
S	面积	m ²	平方米
V	体积	m ³	立方米
F	力	N	牛[顿]
v	速度	m/s	米每秒
Q	电荷[量], 电量	C	库[仑]
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]
\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
ψ_e	E 通[量], 电场强度通量	V·m	伏[特]米
ψ_D	电通[量], 电位移通量	C	库[仑]
ψ_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

续表

符号	符号名称	单位	单位名称
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	$A \cdot m^2$	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]
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
k	波数	m^{-1}	每米
k	波矢量	m^{-1}	每米
α	衰减常数	Np/m	奈培每米
β	相移常数,相位常数	rad/m	弧度每米
γ	传播常数	m^{-1}	每米
S	坡印廷矢量,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		
w	能量密度	J/m^3	焦[耳]每立方米
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		
Γ	反射系数		
T	传输系数,透射系数		
D	方向性系数		
A	衰减[量]	dB	分贝
φ	相移[量],相位角	rad	弧度

目录

CONTENTS

第 1 章 矢量分析	1
1.1 矢量的代数运算	1
1.1.1 标量场和矢量场	1
1.1.2 标量积与矢量积	3
1.1.3 矢量的混合积	3
1.2 标量场的梯度、矢量场的散度与旋度	4
1.2.1 标量场的梯度	4
1.2.2 矢量场的散度	6
1.2.3 矢量场的旋度	7
1.2.4 标量场的拉普拉斯运算	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	10
1.3.3 格林定理	11
1.4 三种常用坐标系	11
1.4.1 坐标变量和基本单位矢量	11
1.4.2 坐标变量之间的关系	12
1.4.3 基本单位矢量之间的关系——单位圆法	13
1.4.4 三种常用坐标系中的线元、面元和体元	15
1.4.5 三种常用坐标系中的梯度、散度、旋度及拉普拉斯运算表达式	16
* 1.5 MATLAB 绘制矢量场和标量场	18
本章小结	20
习题	22
第 2 章 静电场	24
2.1 库仑定律和电场强度	24
2.1.1 库仑定律	24
2.1.2 电场强度	25
2.1.3 场的叠加原理和库仑场强法	25
2.1.4 点电荷密度的数学表示	28
2.1.5 电力线	29
* 2.1.6 用 MATLAB 绘制电力线	31
2.2 真空中静电场的性质	33
2.2.1 E 通量	33

2.2.2	高斯定理	33
2.2.3	静电场的无旋性	36
2.2.4	真空中静电场的基本方程	37
2.3	静电势	37
2.3.1	静电势的基本概念	37
2.3.2	计算电场的电势法	38
2.3.3	等势面	40
2.3.4	电势的微分方程	41
2.4	电偶极子	42
2.4.1	电偶极子的电场	42
2.4.2	均匀外电场对电偶极子的作用	43
2.5	电介质的极化和电位移矢量	43
2.5.1	电介质的极化和电极化强度	44
2.5.2	束缚电荷	45
2.5.3	电位移矢量和介质中的高斯定理	45
2.5.4	介质中静电场的基本方程	48
*2.5.5	极化相消的隐形机理	49
2.6	静电场的边界条件	50
2.6.1	两种媒质间静电场的边界条件	50
2.6.2	两种介质间静电场的边界条件	51
2.6.3	介质与导体间静电场的边界条件	52
2.7	电容	53
2.7.1	静电场中的导体	53
2.7.2	孤立导体和双导体的电容	54
2.7.3	电容器的并联和串联与等效材料	56
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	科技前沿: 静电隐形衣	61
	本章小结	62
	习题	64
第3章	稳恒电场与磁场	69
3.1	电流密度和电荷守恒定律	69
3.1.1	电流与电流密度	69
3.1.2	电流元	70
3.1.3	传导电流与运流电流	71
3.1.4	电动势	71
3.1.5	电荷守恒定律——电流连续性方程	72
3.2	稳恒电流的电场	73
3.2.1	导电媒质中稳恒电场的基本方程	73
3.2.2	稳恒电场的边界条件	74
3.2.3	焦耳定律	75
3.2.4	稳恒电场的静电比拟和电导	75

* 3.3	科技前沿: 直流电型隐身衣	78
3.4	安培定律和磁感应强度	80
3.4.1	安培定律	80
3.4.2	磁感应强度: 毕奥-萨伐尔定律	80
* 3.4.3	磁单极子	83
3.4.4	洛伦兹力	83
3.5	矢量势、稳恒磁场的基本性质	84
3.5.1	磁通连续性原理	84
3.5.2	矢量势及其微分方程	85
3.5.3	安培环路定律	89
3.5.4	真空中稳恒磁场的基本方程	90
3.6	磁偶极子及磁场对其的作用	91
3.6.1	磁偶极子的磁场	91
3.6.2	稳恒磁场对磁偶极子的作用	93
3.7	物质的磁化和磁场强度	93
3.7.1	物质的磁化与磁化强度	93
3.7.2	磁化电流	95
3.7.3	磁场强度与磁介质中的安培环路定律	97
3.7.4	磁介质中稳恒磁场的基本方程	98
3.7.5	磁标势	99
3.7.6	磁路	100
3.8	磁场的边界条件	101
3.8.1	两种磁介质间磁场的边界条件	102
3.8.2	无自由面电流时两种磁介质间磁场的边界条件	103
3.8.3	磁介质与理想导体间磁场的边界条件	103
3.9	电感	105
3.9.1	互感	105
3.9.2	自感	107
* 3.9.3	互感计算和无线输电	109
3.10	磁场能量	111
3.10.1	电流回路系统的磁场能量	111
3.10.2	磁场的能量密度	112
* 3.11	科技前沿: 静磁隐身衣	113
	本章小结	114
	习题	116
第 4 章	静态场边值问题的解法	121
4.1	静态场边值问题的分类和唯一性定理	121
4.1.1	静态场边值问题的分类	121
4.1.2	静态场的边值条件	122
4.1.3	静态场边值问题的求解方法	122
4.1.4	唯一性定理	122
4.1.5	基于唯一性定理求解边值问题	123
* 4.1.6	科技前沿: 有源隐形的理论基础	126

4.2 镜像法	126
4.2.1 镜像法的原理	126
4.2.2 导体与介质平面边界的镜像法	127
4.2.3 导体与介质圆柱面边界的镜像法	128
4.2.4 导体与介质球面边界的镜像法	131
4.2.5 两种介质间平面边界的镜像法	133
4.3 直角坐标系下的分离变量法	134
4.3.1 分离变量法简介	134
4.3.2 直角坐标系内的分离变量法	135
4.3.3 边界条件的叠加	139
4.4 圆柱坐标系内的分离变量法	142
4.4.1 通解的三种形式	142
*4.4.2 特殊函数不特殊: 用 MATLAB 绘制贝塞尔函数等曲线	146
*4.4.3 科技前沿: 柱状隐形装置的分离变量法分析	150
*4.5 球坐标系内的分离变量法	152
4.5.1 球坐标系内的分离变量法	152
4.5.2 轴对称情况下势函数的通解表达式	154
4.5.3 特殊函数不特殊——用 MATLAB 绘制勒让德多项式曲线	155
4.5.4 科技前沿: 球状静场隐形装置的分离变量法分析	157
4.6 保角变换法	159
4.6.1 复变函数及其性质	159
4.6.2 保角变换法求解平面场问题的原理	162
4.6.3 常见的保角变换	164
4.6.4 许瓦兹-克利斯多非变换	170
*4.6.5 神通广大的保角变换	172
本章小结	175
习题	177
第 5 章 时变电磁场	182
5.1 法拉第电磁感应定律	182
5.1.1 法拉第电磁感应定律	182
5.1.2 感应电动势的计算	183
5.1.3 动生电动势的另一种推证方法	185
*5.1.4 再议无线输电	187
5.2 位移电流和全电流定律	187
5.3 麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式	191
5.3.1 麦克斯韦方程组	191
5.3.2 正弦电磁场基本方程的复数形式	192
5.3.3 洛伦兹力	195
5.4 电磁场的边值关系	195
5.4.1 两种媒质间电磁场的边值关系	195
5.4.2 两种理想介质间电磁场的边值关系	197
5.4.3 介质与理想导体间电磁场的边值关系	197
5.5 电磁场的能量守恒定律与坡印廷矢量	198

5.5.1	电磁场的能量守恒定律——坡印廷定理	198
5.5.2	坡印廷矢量——能流密度矢量	199
5.5.3	正弦场的复数坡印廷矢量与复功率	200
5.6	电磁场的矢量势和标量势	204
5.6.1	电磁场的矢量势和标量势	204
5.6.2	洛伦兹条件与动态势的波动方程——达朗贝尔方程	205
5.7	推迟势和似稳电磁场	207
5.7.1	达朗贝尔方程的解——推迟势	207
5.7.2	似稳条件和似稳电磁场	209
5.7.3	电磁理论与电路理论之间的关系	210
*5.8	科技前沿: 麦克斯韦方程组的空间协变性——电磁隐身衣的基本原理	212
*5.9	时变电磁场在生活中的应用	213
5.9.1	电磁炮	213
5.9.2	电磁秋千	214
5.9.3	磁悬浮	215
5.9.4	电磁阻尼	215
	本章小结	215
	习题	217
第 6 章	电磁波的传播	220
6.1	理想介质中的均匀平面电磁波	220
6.1.1	电磁波的波动方程及其解——均匀平面电磁波	220
6.1.2	复波动方程和均匀平面波的传播特性	222
6.1.3	均匀平面波的能量密度和能流密度	226
6.1.4	均匀平面电磁波的极化	229
6.1.5	均匀平面电磁波的性质	232
*6.1.6	双负电磁参数媒质中的均匀平面电磁波	233
6.2	媒质的频散和电磁波的相速与群速	233
6.2.1	媒质的频散及其复介电常数	233
6.2.2	磁介质的复磁导率	235
6.2.3	导电媒质的频散及其等效复介电常数	236
6.2.4	电磁波的相速度和群速度	237
6.3	电磁波在有耗媒质中的传播	240
6.3.1	有耗介质中传播的均匀平面波	240
6.3.2	导电媒质中传播的均匀平面波	241
6.4	电磁波在介质分界面上的反射与折射	245
6.4.1	反射定律与折射定律	245
6.4.2	菲涅耳公式	247
6.4.3	全反射	252
6.4.4	正入射	254
*6.4.5	负折射和零折射	255
6.5	电磁波在导体表面上的反射与折射	256
6.5.1	电磁波在导体表面上的反射和折射	256
6.5.2	驻波	259

* 6.5.3 金属界面的表面波——SPP	261
6.5.4 趋肤效应和邻近效应	263
6.5.5 趋肤深度及表面电阻	264
6.5.6 涡流及其应用	266
6.5.7 电磁屏蔽	266
6.6 波导和谐振腔	267
6.6.1 高频电磁能量的传输	267
6.6.2 矩形波导中的电磁波	268
6.6.3 谐振腔	271
* 6.7 科技前沿：左手材料的前世今生	274
6.7.1 左手材料的基本特性	274
6.7.2 左手材料的实现	276
6.7.3 左手材料的应用领域	276
本章小结	277
习题	279
第 7 章 电磁波的辐射	282
7.1 天线的分类和常用电参数	282
7.1.1 天线的分类	282
7.1.2 天线的常用电参数	283
7.1.3 天线辐射场的求解方法	287
7.2 电偶极子辐射和磁偶极子辐射	287
7.2.1 电偶极子辐射	287
7.2.2 电磁场的对偶原理——二重性原理	291
7.2.3 磁偶极子辐射	293
* 7.2.4 使用 MATLAB 绘制天线方向图	294
7.3 振子天线	295
7.3.1 对称半波振子天线	295
7.3.2 任意长度的振子天线	298
* 7.3.3 MATLAB 在天线场计算中的应用	300
7.4 天线阵	302
7.4.1 二元阵	302
7.4.2 均匀直线式天线阵	303
7.4.3 均匀平面天线阵	308
7.4.4 立体天线阵	310
* 7.5 电磁超表面的相控阵解释	311
* 7.6 超材料天线介绍	312
本章小结	314
习题	315
部分习题参考答案	319
附录 A 三种常用坐标系中一些量的表达式	335
附录 B 矢量恒等式	336
B.1 矢量代数恒等式	336