



普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材  
精品课程系列规划教材

# 电磁场与电磁波 理论基础

曹建章 张正阶 李景镇 编著



4-43



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材  
精品课程系列规划教材

# 电磁场与电磁波理论基础

曹建章 张正阶 李景镇 编著



科学出版社

北京

0441.4-43  
C129

## 内 容 简 介

本书是作者多年来从事电磁场与电磁波课程教学成果的总结。全书共分11章:第1章是电磁场与电磁波的数学基础——矢量分析和场论;第2~4章为静态场,包括静电场、恒定电流与恒定电场、恒定电流的磁场;后7章为时变场,包括时变电磁场、无界空间平面电磁波的传播、平面电磁波的反射与透射、电磁波在各向异性介质中的传播、传输线、电磁波在波导中的传播和电磁波的辐射与接收。鉴于光电新技术的迅速发展,本书在取材的深度和广度上充分考虑到现代前沿科学领域的知识内容。

本书内容翔实,重点突出,概念清晰,数学推导严谨,层次分明,在内容上作适当取舍可作为不同层次、不同电类专业和光电类专业的本科生教材,同时也可作为研究生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波理论基础/曹建章,张正阶,李景镇编著. —北京:科学出版社,2009

(普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材·精品课程系列规划教材)

ISBN 978-7-03-026137-3

I. 电… II. ①曹…②张…③李… 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(2009)第218399号

责任编辑:贾瑞娜 / 责任校对:陈玉凤  
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

电子工业出版社印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2010年1月第一次印刷 印张:21 1/4

印数:1—3 500 字数:504 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》

## 编 委 会

顾 问:姚建铨 中国科学院院士 天津大学  
蔡惟铮 国家级教学名师 哈尔滨工业大学

主 任:吕志伟 教授 哈尔滨工业大学

副主任:金亚秋 教授 复旦大学  
郝 跃 教授 西安电子科技大学  
严晓浪 教授 浙江大学  
胡华强 编审 科学出版社

委 员:(按姓氏笔画排序)

王卫东	教授	中国科学技术大学	张 兴	教授	北京大学
王志华	教授	清华大学	张怀武	教授	电子科技大学
毛军发	教授	上海交通大学	张贵忠	教授	天津大学
文玉梅	教授	重庆大学	张雪英	教授	太原理工大学
匡 敏	副编审	科学出版社	陈弟虎	教授	中山大学
仲顺安	教授	北京理工大学	陈徐宗	教授	北京大学
任晓敏	教授	北京邮电大学	陈鹤鸣	教授	南京邮电大学
刘纯亮	教授	西安交通大学	欧阳征标	教授	深圳大学
杨冬晓	教授	浙江大学	都思丹	教授	南京大学
杨瑞霞	教授	河北工业大学	高 勇	教授	西安理工大学
时龙兴	教授	东南大学	郭树旭	教授	吉林大学
何伟明	教授	哈尔滨工业大学	黄卡玛	教授	四川大学
余 江	教授	云南大学	崔一平	教授	东南大学
邸 旭	教授	长春理工大学	逯贵祯	教授	中国传媒大学
邹雪城	教授	华中科技大学	曾 云	教授	湖南大学
应质峰	教授	复旦大学	谢 泉	教授	贵州大学
宋 梅	教授	北京邮电大学	蔡 敏	教授	华南理工大学



材料、能源和信息是 21 世纪的三大支柱产业,电子科学与技术是电子工程和电子信息技术发展的基础学科。目前,许多发达国家,如美国、德国、日本、英国、法国等,都竞相将电子科学与技术相关领域纳入了国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术等方向的研究也给予了高度重视,在多项国家级战略性科技计划中,如“863 计划”、“973 计划”、国家科技攻关计划、国家重大科技专项等,都有大量立项。在近几年发布的国务院《2006—2020 年国家信息化发展战略》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,对我国的集成电路(特别是中央处理器芯片)、新一代信息功能材料及器件、高清晰度大屏幕平板显示、激光技术等关键领域都提出了明确目标。

电子科学与技术主要研究制造电子、光电子的各种材料及元器件,以及集成电路、集成电子系统和光电子系统,并研究开发相应的设计和制造技术。它涵盖的学科范围很广,是多学科交叉的综合性学科。现在,教育部本科专业目录中,电子科学与技术专业涵盖了微电子技术、光电子技术、物理电子技术、电子材料与元器件及电磁场与微波等专业方向。随着学科的交叉发展和产业的整合,各专业方向已彼此渗透交融。如何拓宽专业方向?如何体现专业特色?是当前我国高校电子科学与技术专业在办学方面所迫切需要探讨的问题。教育部电子科学与技术专业教学指导分委员会起草的《普通高等学校电子科学与技术本科指导性专业规范》,对本专业的核心知识领域和知识单元的覆盖范围作了规定,旨在引导高等学校电子科学与技术专业在办学方向与人才培养方面探索新的模式,不断提高教学质量,增强高校教学的创新能力,更好地培养知识、能力、素质全面协调发展的,适合我国电子科学与技术各领域不同层次发展需求的有用人才。

教育部为了推进“质量工程”,自 2007 年 10 月开始,先后三批遴选了国家级特色专业建设点。目前,有三十余个院系被批准为电子科学与技术国家级特色专业建设点。在教材建设方面,2008 年 10 月,教育部高教司在《关于加强“质量工程”本科特色专业建设的指导性意见》中指示:“教材建设要反映教学内容改革的成果,积极推进教材、教学参考资料和教学课件三位一体的立体化教材建设,选用高质量教材,编写新教材。”为了适应新形势下对电子科学与技术领域人才培养的需求,本届电子科学与技术教学指导分委员会经过广泛深入调研,依托电子科学与技术专业国家级、省级特色专业建设点,与科学出版社共同组织出版本套《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》,旨在贯彻专业规范和教学基本要求,总结和推广各特色专业建设点的教学经验和教学成果,以提高我国电子科学与技术专业本科教学的整体水平。

本套丛书在组织编写中,重点考虑了以下几方面的特色:

1. 体现专业特色,贯彻专业规范和教学基本要求。依托“国家级、省级特色专业建设点”,汇总优秀教学成果,将特色专业建设的内容、国内外科研教学的成果、电子科学与技术方向的专业规范与教学基本要求结合起来,教材内容安排围绕专业规范,体现核心知识单元与知

识点。

2. 按照分类指导原则,满足多层面的需求。针对同一类课程,根据不同的教学层次(普通高校、重点院校或研究型大学、应用型大学)和学时要求(多学时、少学时),涵盖不同范围的拓展知识单元,编写适合不同层次需求的教材。注重与先修课程、后续课程的有机衔接,每本教材在重视系统性和完整性的基础上,尽量减少内容重复。

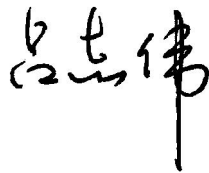
3. 传承精品,吐故纳新。本套丛书吸纳了科学出版社2004年出版的《高等院校电子科学与技术专业系列教材》中受到高校师生欢迎的精品教材。在保证前一版教材准确诠释基本概念、基本理论的基础上,新版教材更新内容;注重反映本学科领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

4. 拓宽专业基础,面向工程应用,加强实践环节。适当拓宽专业基础知识的范围,以增强学生的适应性;面向工程应用,突出工科特色,反映新技术、新工艺;注重实践环节的设置,以促进学生的实际动手能力和创新能力的培养。

5. 注重立体化建设。本套丛书除了主教材外,还将逐步配套学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等,为任课教师提供丰富的配套教学资源,方便教师教学,同时帮助学生复习与自学,使教材更加易教易学。

本套丛书的编写汇聚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高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,我们将对本套丛书不断更新,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!



教育部高等学校电子科学与技术专业  
教学指导分委员会主任  
哈尔滨工业大学教授

**《电磁场与电磁波理论基础》  
立体化教材编委会**

**主 编** 曹建章

**副主编** 张正阶 李景镇

**编 委** 程俭中 李雄辉

## 序

自从 19 世纪中叶麦克斯韦建立了经典电磁场理论以来,电磁技术的应用带来了以电气化、有线和无线通信为标志的技术革命,对人类的活动产生了深远的影响。在信息化时代的 21 世纪,为了支撑能源、交通、材料和信息等基础产业的高度发展,我国已把电子科学与技术领域纳入了国家发展计划,涵盖的学科包括:微电子技术、光电子技术、物理电子技术、电子材料与元器件和电磁场与微波技术等专业。而“电磁场与电磁波”课程是贯穿于电子科学与技术学科领域及波动光学的极为重要的基础课,不仅具有理论性,且具有实用性;不仅是各学科的重要基础,也是各学科专业之间的纽带和桥梁。因此,在“电磁场与电磁波”本科教学中,为了提高教学质量和学习效率,培养国家和市场需要的高层次技术人才,有必要进行适应不同专业和不同层次的“电磁场与电磁波”教材建设,着重解决的问题是切实加强基础和教学内容的现代化。当代科技发展日新月异,应该根据前沿进展对“电磁场与电磁波”的教学提出新要求、充实新内容。

本书是深圳大学和成都理工大学电子信息工程国家级特色专业及精品课程建设成果之一,是教育部推进“质量工程”的结果。本书体现了电子科学与技术专业发展的要求,教学内容改革在继承传统电磁场理论教材的基础上,从理论和实用角度出发,也注重反映出本学科领域的最新成果和发展方向。对于电子科学与技术学科领域不同层次和不同专业,本书除覆盖本专业的核心知识领域和知识单元外,同时体现了反映 21 世纪电子科学与技术学科领域所需的新内容。例如,本书把多层介质薄膜的反射和透射(即光学薄膜设计的矩阵方法)、圆柱形介质波导(即阶跃型光纤)、电磁波在单轴各向异性介质中的传播及激光雷达的内容和概念引入本科教材,这种做法对于后续课程的学习是十分有益的。

本书注重数学方法与电磁场问题的结合,理论推导严密,内容翔实,概念清楚,层次分明,插图丰富。不仅可以引导读者将抽象的数学理论应用于实际电磁场问题的具体方法的学习,而且有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。期望本书的出版对“电磁场与电磁波”本科教学起到积极的作用,并能引发和促进学生学习电磁场理论的浓厚兴趣。

中国科学院院士



2009 年 12 月 23 日

## 前 言

电磁场理论是揭示和研究各种电磁现象内在规律的基本理论,广泛应用于现代信息化社会的各个方面,如移动通信、广播、电视、雷达、遥感遥测、电子器件、电机、电器控制、高压工程、全息、光纤通信和卫星通信等,这些应用极大地丰富和改善了人们的生活方式和质量,并将继续影响整个人类的活动。

电磁场与电磁波理论是电子信息工程和电气工程类专业最重要的基础课之一。它不仅是许多专业课程的重要基础,而且也是许多新兴边缘学科的发展基础和生长点。例如,随着光电技术的发展和市场对光电技术专业人才的需求,近十年来,在国内许多高等院校相继成立光电类专业,如电子科学与技术专业、光信息科学与技术专业、光电信息工程专业、光电子技术科学专业等,且招生量逐年扩大。但是,目前的电磁场理论的教学仍然采用电子工程或电气工程电磁场理论的教材,在不少方面不能适应光电专业的新增需要,如对于光电专业需要掌握的平面电磁波在分层介质中的反射和透射、电磁波在各向异性介质中的传播和圆柱形介质波导等的电磁场理论内容,国内外教材几乎都未涉及,这对于后续课程的学习,如“光学薄膜技术”、“导波光学”、“光纤通信技术”和“光子晶体”等都带来了困难,增加了教学的难度。所以需要增加反映 21 世纪光电专业所需的新内容,这就是编写这本电磁场理论的初衷。

本书共分为 11 章,第 1 章是矢量分析和场论。第 2~4 章为静态场,包括静电场、恒定电流与恒定电场、恒定电流的磁场。后 7 章为时变场,内容包括时变电磁场、无界空间平面电磁波的传播、平面电磁波的反射与透射、电磁波在各向异性介质中的传播、传输线、电磁波在波导中的传播和电磁波的辐射与接收。矢量分析是学习电磁场理论最基本的数学工具,本教材吸收了国内外教材的优点,较细致地讨论了在直角坐标、圆柱坐标和球坐标系下矢量的各种表示和变换,并总结性地给出了电磁场的分类和有关定理。在静电场和静磁场的有关章节中,对于学生比较难理解的介质极化和磁化的概念作了较为深入的讨论,以帮助学生克服基本概念理解方面的困难。从内容上讲,静态场部分的基本内容虽与大多数教材基本相同,但在表述上采用了更为严格的数学语言,这可让学生更为平稳地从大学物理电磁学的学习过渡到电磁场与电磁波理论的学习,这是本书的特点之一。在静电场边值问题一节,对镜像法作了详细的讨论,有助于学生理解镜像法的实质和求解方法;对分离变量法,除介绍了直角坐标系下的分离变量法外,考虑到后续课程的需要,还详细地介绍了圆柱坐标系和球坐标系下的分离变量方法。作者认为这对于学生熟悉和掌握贝塞尔函数与勒让德函数这两类特殊函数是有好处的。

时变场部分,为了学生阅读方便,对于时谐场复振幅的表示沿用国外教材的做法,在表示场量符号的上方加“ $\sim$ ”以示区别。对于大多数国内外教材,平面波的引入通常是求解特殊方向的一维亥姆霍兹方程,而任意方向的平面波可推而广之。本教材是直接求解无界空间理想介质中的三维亥姆霍兹方程,这不仅使理论体系更为严谨,同时对学生掌握分离变量法也有好处。在平面电磁波的反射和透射一章,加入了平面电磁波在分层介质中的反射和透射一节,其内容就是光学薄膜设计的矩阵方法,在电磁场理论中讲述这种方法简单而方便,对后续“光学

薄膜与技术”课程学习减小了教学难度,同时也提高了学习效率。电磁波在各向异性介质中传播一章的内容,仅讨论了单轴晶体的各向异性,主要是考虑到“光学”课程和后续课程学习的需要,便于学生深入了解介质各向异性的电磁特性。传输线一章主要是考虑到电类专业和微电子专业的需要,采用电路分析方法对均匀无耗传输线的传输特性进行了较为深入的讨论。电磁波在波导中传播一章的内容涉及矩形波导、圆波导和介质光纤。虽然金属波导的应用目前相对比较少,但为了便于理解介质光纤的内容,金属矩形波导和圆波导也作了较详细的讨论。电磁波的辐射和接收一章,从位函数波动方程的解出发,讨论了电基本振子和磁基本振子的辐射场、对称振子天线和天线阵的概念。另外,考虑到激光雷达具有很广泛的应用,因此,本章最后介绍了微波雷达和激光雷达的概念。

数学是科学的语言,必须与实际科学问题相联系,而电磁场理论的表述就是数学语言的很好应用。电磁场理论的学习对于初学者来说具有难度,其难点在于对数学语言的理解和掌握的熟练程度以及培养用数学语言描述实际问题的能力。因此,学习电磁场理论本身就是锻炼学生应用数学语言解决实际问题的能力。作者认为,仅仅基于减轻学生的学习“负担”,而对电磁场理论教材的内容大量“精简”的做法是不可取的。为此,本教材就电磁场理论涉及的问题在数学上做到尽量完整,数学公式推导中尽量“细致”,并在必要的地方以图示作为辅助手段,以帮助学生深刻理解相关概念;使学生在学学习电磁场理论内容时,对相关的数学推导和描述感到言之有物,做到心中有数,而不是抽象难懂,这是本教材一大特点。

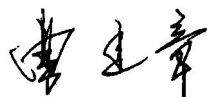
本书具有一定深度,在内容上作适当取舍可作为不同层次、不同电类专业和光电类专业的本科生教材,也可作为研究生的教学参考书。

本书是深圳大学电子信息工程国家级特色专业建设成果之一,也是成都理工大学省级精品课程的部分成果。成都理工大学张正阶教授等参与了本书编写并承担本书的审稿、校订,以及配套电子课件和习题解答的编纂工作。

作者在编写本书的过程中,得到了深圳大学电子科学与技术学院领导徐平教授、高致慧教授、欧阳征标教授、余建华教授和成都理工大学物理系的领导及同行的大力支持与帮助,在此表示诚挚的谢意。另外,作者也对所列参考文献的作者表示感谢。深圳大学光电技术学院的彭文达教授审阅了全书的内容,并提出宝贵的意见,在此表示衷心感谢。还要感谢我的导师西北工业大学的陈国瑞教授提供了清晰的史密斯圆图,并提出有益的建议。另外,电子科学与技术学院2007届本科生在使用本书初稿的过程中,也提出某些修改意见;本书编写过程中,何红老师和王梅珠同学多次帮忙打印书稿,在此一并表示感谢。最后要特别感谢刘盛纲院士在百忙中为本书作序,并提出改进的建议。

本书的出版得到深圳大学教材建设基金,深圳大学电子科学与技术学院学科建设基金和深圳市微纳光子信息技术重点实验室资助。

虽然作者在编写本书的过程中,力求做到无误,但限于作者的水平,书中错误在所难免,敬请读者及同行给予批评指正。



2009年9月30日于深圳大学

E-mail: caojianzhang@sina.com



# 目 录

## 丛书序

## 序

## 前言

## 第 1 章 矢量分析和场论基础 1

1.1 标量和矢量	1
1.2 矢量的运算	1
1.2.1 直角坐标系中矢量的表示	1
1.2.2 矢量的运算	2
1.3 标量场和矢量场	4
1.4 特殊正交曲线坐标系	5
1.4.1 直角坐标系	5
1.4.2 圆柱坐标系	6
1.4.3 球坐标系	8
1.5 场论	11
1.5.1 数量场的等值面和矢量场的矢量线	11
1.5.2 标量场的梯度和方向导数	12
1.5.3 矢量场的通量和散度	14
1.5.4 矢量场的环量和旋度	17
1.5.5 符号说明	23
1.6 拉普拉斯算子	24
1.7 电磁场的分类和亥姆霍兹定理	25
习题一	27

## 第 2 章 静电场 30

2.1 库仑定律和电场强度	30
2.1.1 库仑定律	30
2.1.2 电场强度	30
2.2 电位	34
2.2.1 电位的定义	34
2.2.2 点电荷的电位	34
2.2.3 连续分布电荷的电位	35
2.2.4 电场与电位的关系	35
2.3 电偶极子的电场	36

## 2.4 物质的电特性 37

2.4.1 介质的极化及极化强度	37
2.4.2 极化电荷产生的电位	39
2.5 静电场的基本方程	40
2.5.1 静电场的通量和散度	40
2.5.2 静电场的环量和旋度	45
2.5.3 静电场的基本方程	46
2.6 泊松方程与拉普拉斯方程	47
2.7 分界面的边界条件	47
2.7.1 $\mathbf{D}$ 的法向分量	48
2.7.2 $\mathbf{E}$ 的切向分量	49
2.7.3 静电场边界条件小结	49
2.8 导体系统的电容	52
2.8.1 两导体电容	52
2.8.2 部分电容	54
2.9 电场能量	56
2.9.1 电场能量	56
2.9.2 能量密度	56
2.10 静电场边值问题	58
2.10.1 边值问题的分类	58
2.10.2 唯一性定理	59
2.10.3 镜像法	60
2.10.4 分离变量法	69
习题二	85

## 第 3 章 恒定电流与恒定电场 89

3.1 电流与电流密度	89
3.1.1 电流强度的概念	89
3.1.2 电流密度	89
3.2 欧姆定律和焦耳定律	91
3.2.1 材料的电导率	91
3.2.2 欧姆定律	92
3.2.3 电动势	92
3.2.4 电阻	93

3.2.5 焦耳定律 .....	94	的环量和旋度 .....	128
3.3 恒定电场的基本方程 .....	96	5.1.2 全电流定律——时变磁场的环量 和旋度 .....	131
3.3.1 电流连续性方程 .....	96	5.1.3 时变电磁场的通量和散度 .....	132
3.3.2 恒定电场的基本方程 .....	97	5.2 时变电磁场的基本方程——麦克 斯韦方程组和物质方程 .....	133
3.4 恒定电场的边界条件 .....	97	5.3 介质分界面上的边界条件 .....	134
习题三 .....	100	5.3.1 介质分界面上的边界条件 .....	134
<b>第4章 恒定电流的磁场</b> .....	<b>102</b>	5.3.2 理想介质分界面上的边界条件 .....	134
4.1 恒定磁场的实验定律 .....	102	5.3.3 理想导体分界面上的边界条件 .....	135
4.1.1 安培定律 .....	102	5.4 坡印亭定理和坡印亭矢量 .....	136
4.1.2 毕奥-萨伐尔定律 .....	103	5.4.1 坡印亭定理 .....	136
4.2 恒定磁场的散度和通量 .....	104	5.4.2 坡印亭矢量 .....	137
4.2.1 磁通密度矢量的散度 .....	104	5.5 波动方程 .....	138
4.2.2 恒定磁场通量 .....	105	5.5.1 无源导电介质中的齐次波动方程 .....	139
4.3 恒定磁场的环量和旋度 .....	105	5.5.2 无源理想介质中的齐次波动方程 .....	139
4.3.1 环量 .....	105	5.5.3 有源理想介质中的非齐次波动方 程 .....	139
4.3.2 旋度 .....	106	5.5.4 位函数波动方程 .....	140
4.4 矢量磁位 .....	107	5.6 时谐电磁场 .....	141
4.4.1 矢量磁位 .....	107	5.6.1 时谐量的复数表示 .....	141
4.4.2 矢量泊松方程 .....	108	5.6.2 麦克斯韦方程组的复数形式 .....	142
4.5 磁偶极子 .....	109	5.6.3 复数形式的物质方程与边界条件 .....	142
4.6 物质的磁特性 .....	110	5.6.4 复坡印亭矢量和平均坡印亭矢量 .....	143
4.6.1 介质的磁化和磁化强度 .....	111	5.6.5 复介电常数和复磁导率 .....	143
4.6.2 介质磁化产生的矢量磁位 .....	113	5.6.6 复矢量波动方程——矢量亥姆霍 兹方程 .....	144
4.6.3 磁介质中的安培环路定律 .....	114	5.7 电磁波谱 .....	146
4.7 恒定磁场的基本方程 .....	116	5.7.1 波数、频率和波长 .....	146
4.8 恒定磁场的边界条件 .....	117	5.7.2 电磁波谱 .....	146
4.8.1 法向分量的边界条件 .....	117	习题五 .....	148
4.8.2 切向分量的边界条件 .....	117	<b>第6章 无界空间平面电磁波的传播</b> .....	<b>150</b>
4.9 电感 .....	120	6.1 理想介质中的平面电磁波 .....	150
4.9.1 自感 .....	120		
4.9.2 互感 .....	121		
4.10 磁场能量 .....	123		
习题四 .....	124		
<b>第5章 时变电磁场</b> .....	<b>128</b>		
5.1 时变电磁场的环量和旋度及通量 和散度 .....	128		
5.1.1 法拉第电磁感应定律——时变电场			

6.1.1 亥姆霍兹方程的平面波解 .....	150
6.1.2 理想介质中均匀平面电磁波的基本特性 .....	152
6.1.3 平面电磁波的能量和能流密度 .....	155
6.2 有耗介质和良导体中的平面电磁波 .....	156
6.2.1 有耗介质中的平面电磁波 .....	156
6.2.2 良导体中的平面波 .....	161
6.3 波的极化 .....	163
6.3.1 线极化波 .....	165
6.3.2 圆极化波 .....	165
6.3.3 椭圆极化波 .....	167
习题六 .....	169
<b>第 7 章 平面电磁波的反射与透射</b> .....	<b>171</b>
7.1 平面电磁波对分界平面的垂直入射 .....	171
7.1.1 理想介质与理想导体分界平面的垂直入射 .....	172
7.1.2 理想介质与理想介质分界平面的垂直入射 .....	173
7.2 平面电磁波对理想介质分界平面的斜入射 .....	177
7.2.1 垂直极化波 .....	178
7.2.2 平行极化波 .....	179
7.3 反射系数、透射系数随入射角的变化特性 .....	181
7.3.1 全反射与倏逝波 .....	181
7.3.2 全透射 .....	182
7.3.3 反射系数和透射系数随入射角变化的实例分析 .....	183
7.4 反射率和透射率 .....	184
7.5 平面电磁波在分层介质中的反射和透射 .....	187
7.5.1 用法向阻抗、有效导纳表达反射和透射系数 .....	187
7.5.2 单层介质薄膜的反射和透射 .....	189
7.5.3 多层介质薄膜的反射和透射 .....	192
习题七 .....	196

<b>第 8 章 电磁波在各向异性介质中的传播</b> .....	<b>198</b>
8.1 晶体的介电张量和折射率椭球 .....	198
8.1.1 晶体的介电张量 .....	198
8.1.2 折射率椭球 .....	201
8.1.3 折射率 $n_e$ 随方向的变化 .....	204
8.2 光波在晶体中的传播 .....	205
8.2.1 各向异性介质中的单色平面波 .....	205
8.2.2 相速度和光线速度 .....	206
8.2.3 菲涅耳法线方程 .....	207
8.2.4 单轴晶体中光波的传播特性 .....	208
8.2.5 单轴晶体中的折射率曲面和光波面 .....	212
8.3 光波在晶体表面的反射和透射 .....	216
8.3.1 光波在晶体表面上的反射和透射定律 .....	216
8.3.2 菲涅耳作图法 .....	217
8.3.3 惠更斯作图法 .....	218
习题八 .....	220
<b>第 9 章 传输线</b> .....	<b>221</b>
9.1 传输线方程及其解 .....	221
9.1.1 传输线方程 .....	221
9.1.2 传输线方程的解 .....	223
9.2 无损传输线上的行驻波、反射系数与输入阻抗 .....	225
9.2.1 行驻波 .....	225
9.2.2 反射系数 .....	227
9.2.3 输入阻抗 .....	227
9.2.4 始端输入阻抗 .....	228
9.2.5 均匀传输线的参数分布 .....	229
9.3 传输线的工作状态分析 .....	231
9.3.1 短路线 .....	231
9.3.2 开路线 .....	233
9.3.3 匹配传输线 .....	234
9.3.4 阻抗负载传输线 .....	234
9.4 无损传输线的功率 .....	235
9.5 史密斯圆图 .....	236
9.5.1 史密斯圆图的参数方程 .....	237

9.5.2 史密斯圆图的构成 .....	238	10.3.4 弱导光纤的单模传输条件 .....	279
9.5.3 阻抗圆图的应用 .....	240	10.3.5 弱导光纤的主模 .....	280
习题九 .....	242	习题十 .....	282
<b>第 10 章 电磁波在波导中的传播</b> .....	<b>244</b>	<b>第 11 章 电磁波的辐射与接收</b> .....	<b>283</b>
10.1 矩形金属波导中的电磁波 .....	244	11.1 位函数波动方程的解——滞后位 .....	284
10.1.1 矩形波导横截面内场分量之间的关系 .....	244	11.2 基本振子的辐射 .....	287
10.1.2 矩形波导横截面内纵向场分量的解 .....	245	11.2.1 电基本振子 .....	287
10.1.3 矩形波导中电磁波传播的模式 .....	248	11.2.2 磁基本振子 .....	289
10.1.4 TE 波和 TM 波 .....	249	11.3 天线的辐射特性 .....	291
10.1.5 矩形波导的传输特性 .....	250	11.4 对称振子天线与天线阵的概念 .....	296
10.1.6 矩形波导中的 $TE_{10}$ 模 .....	253	11.4.1 对称振子天线 .....	296
10.1.7 矩形波导的传输功率及尺寸选择 .....	257	11.4.2 天线阵的概念 .....	298
10.2 圆柱形金属波导中的电磁波 .....	259	11.4.3 均匀直线式天线阵 .....	300
10.2.1 圆波导横截面内场分量之间的关系 .....	259	11.5 接收天线的有效面积 .....	303
10.2.2 圆波导横截面内纵向场分量的解 .....	260	11.6 雷达的概念 .....	304
10.2.3 圆波导中电磁场传播的模式 .....	264	11.6.1 微波雷达 .....	305
10.2.4 圆波导的传输特性 .....	265	11.6.2 激光雷达 .....	306
10.2.5 圆波导的三个主要传输模式 .....	267	习题十一 .....	309
10.3 圆柱形介质波导——阶跃型光纤 .....	269	<b>附录</b> .....	<b>311</b>
10.3.1 光纤横截面内纵向场分量的解 .....	270	附录 A 符号、物理量及单位 .....	311
10.3.2 光纤中电磁场传播的模式分类及本征值方程 .....	272	附录 B 常用材料的电磁常数 .....	312
10.3.3 弱导光纤的截止特性 .....	276	附录 C 基本物理常数和基本国际单位 .....	314
		附录 D 常用矢量恒等式 .....	315
		附录 E 贝塞尔函数和勒让德函数 .....	317
		参考文献 .....	322

# 第 1 章

## 矢量分析和场论基础

矢量分析和场论是学习电磁场理论必备的数学工具,在高等数学课程中已有简单介绍。鉴于在电磁场理论学习中普遍采用矢量,本章简要介绍矢量分析和场论的基本概念和定理,便于后续章节中应用。

### 1.1 标量和矢量

所谓标量是指用单一数就可以完整描述的物理量,如质量、时间、温度和功等。而矢量是指既有大小又有方向的物理量,如力、电场和磁场等。标量通常用字母或数字表示,如  $A$ 、 $a$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $10\text{g}$ ;而矢量既有大小又有方向,表示也多种多样,可用黑正体字母表示,如  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{R}$ ;也可用黑斜体字母表示,如  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{R}$ ;也可用字母加箭头表示,如  $\vec{a}$ 、 $\vec{A}$ ;还可以用字母或数字加单位矢量表示,如  $A\mathbf{e}_A$ 、 $5\mathbf{e}_A$ ,其中  $\mathbf{e}_A$  为单位矢量。单位矢量仅表示矢量的方向,其大小为 1。在本教材中用黑正体字母表示矢量,如矢量  $\mathbf{A}$  可以写成

$$\mathbf{A} = A\mathbf{e}_A \quad (1-1)$$

式中  $A$  是  $\mathbf{A}$  的大小,  $\mathbf{e}_A$  代表  $\mathbf{A}$  的方向,大小为 1,则有

$$\mathbf{e}_A = \frac{\mathbf{A}}{A} \quad (1-2)$$

为了直观起见,通常矢量还可以用带箭头的线段图示,如图 1-1 所示。

标量可以直接比较大小。两个或多个矢量比较,除大小外,还涉及方向。假如两个矢量具有相同的量纲或单位,说两个矢量相等,表明两个矢量大小相同并具有相同的方向。

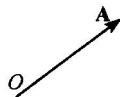


图 1-1 矢量表示

### 1.2 矢量的运算

#### 1.2.1 直角坐标系中矢量的表示

如图 1-1 所示的矢量表示,对于矢量的运算很不方便。为了定量描述矢量的大小和方向,

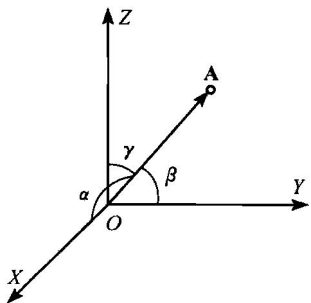


图 1-2 直角坐标系中矢量的描述

以便于矢量的运算,通常把矢量置于三维直角坐标系中,如图 1-2 所示。直角坐标系中三个互相垂直的有向线段分别称为  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴,沿坐标轴的单位矢量分别记为  $\mathbf{e}_x$ 、 $\mathbf{e}_y$  和  $\mathbf{e}_z$ 。设矢量  $\mathbf{A}$  沿三个坐标轴的投影分别为  $A_x$ 、 $A_y$  和  $A_z$ ,称之为矢量  $\mathbf{A}$  沿坐标轴的分量,那么,矢量  $\mathbf{A}$  的大小(或称之为模)就可写为

$$|\mathbf{A}| = A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (1-3)$$

设矢量  $\mathbf{A}$  与三个坐标轴的夹角分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ ,则矢量的方

向可以由三个方向余弦确定,即

$$\cos\alpha = A_x/A, \quad \cos\beta = A_y/A, \quad \cos\gamma = A_z/A \quad (1-4)$$

把式(1-4)代入式(1-3),可知方向余弦满足条件

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1 \quad (1-5)$$

由此可以看出,任何矢量都可以用矢量在坐标轴的分量和沿坐标轴的单位矢量表示,可写为

$$\mathbf{A} = A_x\mathbf{e}_x + A_y\mathbf{e}_y + A_z\mathbf{e}_z \quad (1-6)$$

### 1.2.2 矢量的运算

标量运算性质包括加、减、乘和除,并满足结合律、分配律和交换律。而矢量的运算要复杂得多,也没有除法运算。

#### 1. 矢量加法

如果矢量  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{C}$  具有相同的单位或量纲,则三个矢量的和为唯一确定的矢量,设为  $\mathbf{D}$ , 则有

$$\mathbf{D} = D_x\mathbf{e}_x + D_y\mathbf{e}_y + D_z\mathbf{e}_z = \mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} \quad (1-7)$$

式中

$$\begin{cases} D_x = A_x + B_x + C_x \\ D_y = A_y + B_y + C_y \\ D_z = A_z + B_z + C_z \end{cases} \quad (1-8)$$

根据式(1-7)可以看出,矢量满足结合律和交换律,即

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{C} = \mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}) \quad (1-9)$$

$$\mathbf{A} + \mathbf{C} + \mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{C} + \mathbf{A} \quad (1-10)$$

#### 2. 矢量的标积

矢量的标积也称点积或数量积,其定义为

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = |\mathbf{A}| |\mathbf{B}| \cos\theta \quad (1-11)$$

式中  $|\mathbf{A}|$  和  $|\mathbf{B}|$  分别为矢量  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  的大小,  $\theta$  为两矢量间的夹角,如图 1-3 所示。显然,矢量的标积是一个数量,并满足交换律、分配律和数乘,即

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \quad (1-12)$$

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} \quad (1-13)$$

$$k(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) = (k\mathbf{A}) \cdot \mathbf{B} = \mathbf{A} \cdot (k\mathbf{B}) \quad (1-14)$$

上式中的  $k$  为一常数。矢量的标积也可以写成分量形式

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = (A_x\mathbf{e}_x + A_y\mathbf{e}_y + A_z\mathbf{e}_z) \cdot (B_x\mathbf{e}_x + B_y\mathbf{e}_y + B_z\mathbf{e}_z)$$

由于  $\mathbf{e}_x$ 、 $\mathbf{e}_y$  和  $\mathbf{e}_z$  相互垂直,即  $\mathbf{e}_x \cdot \mathbf{e}_y = 0$ ,  $\mathbf{e}_y \cdot \mathbf{e}_z = 0$ ,  $\mathbf{e}_x \cdot \mathbf{e}_z = 0$ , 则有

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = A_xB_x + A_yB_y + A_zB_z \quad (1-15)$$

由式(1-6)和式(1-15),可以得到如下关系

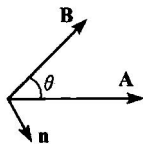


图 1-3 矢量的标积和矢积



$$A_x = \mathbf{A} \cdot \mathbf{e}_x, \quad A_y = \mathbf{A} \cdot \mathbf{e}_y, \quad A_z = \mathbf{A} \cdot \mathbf{e}_z \quad (1-16)$$

### 3. 矢量的矢积

矢量的矢积也称叉积,其定义为

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = |\mathbf{A}| |\mathbf{B}| \sin\theta \mathbf{n} \quad (1-17)$$

式中  $\mathbf{n}$  是一垂直于由矢量  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  构成的平面的单位矢量,并遵循右手螺旋法则,见图 1-3。由定义可见,两个矢量的矢积是一矢量,其方向为  $\mathbf{n}$ 。另外,矢量的矢积不满足交换律。由图 1-3 可以看出,矢量交换满足如下关系

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = -\mathbf{B} \times \mathbf{A} \quad (1-18)$$

矢积满足分配律和数乘,即

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{A} \times \mathbf{B} + \mathbf{A} \times \mathbf{C} \quad (1-19)$$

$$(k\mathbf{A}) \times \mathbf{B} = k(\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{A} \times (k\mathbf{B}) \quad (1-20)$$

式中  $k$  为一常数。矢量的矢积写成分量形式为

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = (A_x \mathbf{e}_x + A_y \mathbf{e}_y + A_z \mathbf{e}_z) \times (B_x \mathbf{e}_x + B_y \mathbf{e}_y + B_z \mathbf{e}_z) \quad (1-21)$$

由于  $\mathbf{e}_x \times \mathbf{e}_y = \mathbf{e}_z, \mathbf{e}_y \times \mathbf{e}_z = \mathbf{e}_x, \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_x = \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_x \times \mathbf{e}_x = \mathbf{e}_y \times \mathbf{e}_y = \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_z = 0$ , 可得到

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = (A_y B_z - A_z B_y) \mathbf{e}_x + (A_z B_x - A_x B_z) \mathbf{e}_y + (A_x B_y - A_y B_x) \mathbf{e}_z \quad (1-22)$$

上式也可以简写为行列式的形式

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \quad (1-23)$$

下面是两个矢量恒等式,采用直角坐标分量形式可直接得到验证。

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\mathbf{C} \times \mathbf{A}) \quad (1-24)$$

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C} \quad (1-25)$$

**例 1.1** 计算由矢量  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{C}$  构成的平行六面体的体积, 矢量  $\mathbf{A} = 2\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y - 2\mathbf{e}_z$ ,  $\mathbf{B} = -\mathbf{e}_x + 3\mathbf{e}_y + 5\mathbf{e}_z$ ,  $\mathbf{C} = 5\mathbf{e}_x - 2\mathbf{e}_y - 2\mathbf{e}_z$ 。

**解** 借助于式(1-23), 平行六面体的体积可表示为三重积的行列式形式

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \begin{vmatrix} A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \\ C_x & C_y & C_z \end{vmatrix}$$

数值代入, 得所求体积  $V$  为

$$V = \mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \begin{vmatrix} 2 & 1 & -2 \\ -1 & 3 & 5 \\ 5 & -2 & -2 \end{vmatrix} = 57$$

**例 1.2** 给定三个矢量  $\mathbf{A} = \mathbf{e}_x + 2\mathbf{e}_y - 3\mathbf{e}_z$ ,  $\mathbf{B} = -4\mathbf{e}_y + \mathbf{e}_z$ ,  $\mathbf{C} = 5\mathbf{e}_x - 2\mathbf{e}_y$ , 试求  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$  和  $\mathbf{A} \times \mathbf{C}$ 。

**解**

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = (\mathbf{e}_x + 2\mathbf{e}_y - 3\mathbf{e}_z) \cdot (-4\mathbf{e}_y + \mathbf{e}_z) = -11$$