



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电磁场与 电磁波

苏东林 陈爱新 谢树果 等编著



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电磁场与电磁波

苏东林 陈爱新 谢树果 编著
全绍辉 赵京城 齐万泉

高等教育出版社

内容提要

本书被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,系统讲述了电磁场基本定律、静态场、电磁能、低频电磁场、平面波、电磁波的反射和折射、电磁辐射等电磁场与电磁波的基础理论。书中侧重介绍电磁场与电磁波常用的基本概念和基本方法,同时具有较强的工程实用性。

本书是电子信息类专业本科大学生的教科书,也可供有关专业的研究生、教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波/苏东林,陈爱新等编著. —北京:
高等教育出版社, 2009. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 023949 - 2

I. 电… II. ①苏…②陈… III. ①电磁场—高等学
校—教材②电磁波—高等学校—教材 IV. 0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 195916 号

策划编辑 韩 颖 责任编辑 曲文利 封面设计 赵 阳 责任绘图 尹文军
版式设计 王艳红 责任校对 金 辉 责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 34.5
字 数 850 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009 年 1 月第 1 版
印 次 2009 年 1 月第 1 次印刷
定 价 39.20 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 23949 - 00

审 者 序

电磁场理论是电子信息类专业的主要基础课程之一，是后续专业课程的基石和许多新兴学科的发展基础和生长点。北京航空航天大学电磁场与微波技术学科是国家重点学科，为我国电磁场与微波技术领域培养了众多优秀人才。作为该领域的专业基础课，北京航空航天大学电磁场理论课程经过多年的建设和发展，建立了结构合理、教学和科研相结合，学术水平高的师资队伍，构建了理论教学、实验教学相结合的电磁场理论课程体系，在培养学生专业理论基础和工科综合素质方面取得显著成效。经过半世纪的建设，目前已完成第4任课程成员的顺利交替，教学体系发生了重大变化，教材内容和教学方式也日益完善。

苏东林教授主持了3次该课程内容、教学方法的改革，按照以学生为学习的主体、教师为学生学习的引导者的理念，设计了新的课程体系和配套的综合训练与实验环节，充分应用信息技术手段，逐步实现了具有“给予问题、构建理念、深化思考、意在探索”特征的研究型教学，取得了显著成效。

课程建立了以认识型实践、教学型实践、综合型实践及开放型实践为主线的综合训练实验实践体系，在教学全过程中贯彻“实践、认识、再实践、再认识”螺旋式上升认识事物的方法，培养学生从“场”的角度观察问题、分析问题、解决问题和再发现问题的基本素质。

课程团队注重研究与借鉴国际一流研究型大学对该课程的教学改革，继承北京航空航天大学优良传统，注重启发引导学生，充分应用信息技术手段。电磁场理论课素以难学难教著称，为激发学生学习兴趣和达到优质的教学效果，北京航空航天大学电磁场理论课程团队在教学过程中，在注重电磁场理论知识凝练和传授的同时，积极将现代电子信息技术的发展需求和国内外电磁场教学的先进理念及成功经验引入到教学中，为电磁场理论这一传统课程注入不断发展的活力。

北京航空航天大学电磁场理论教学借鉴了20世纪70、80年代美国麻省理工学院的教学体系，曾经使用的教材就是麻省理工学院教授L. M. 玛奇德编著的《电磁场、电磁能和电磁波》一书。与同类课程大多数先讲授静态场，再讲授时变场，进而归纳总结得到麦克斯韦方程组相比，本课程首先给出了整体麦克斯韦方程组及其物理意义，再按照各种特定条件讲授静态场和时变场，让学生在学习之初就站在整体的高度上，学会利用“场”的观念分析问题。

本书从一开始就提出积分形式的麦克斯韦方程组（它是大学物理中电磁学的主要结论），然后着重研究麦氏方程组的数学物理特性，研究它在不同条件下的解答，以及这些解答的物理特性，使大学物理和本课程之间有了明确的分工。前者以大量实验结果为基础，导出宏观电磁现象应该服从的普遍规律，即麦克斯韦方程组。后者的任务是研究麦克斯韦方程组的解法及解的特性，并和大学物理形成顺利衔接。

通过本课程的学习，应使学生开阔视野，学会从“场”的角度观察问题、分析问题、解决问题。在学习内容上，学生应掌握静态和时变电磁场的基本性质、典型分析方法；正确理解电磁场的基本概念，并能运用这些概念，从电磁场的角度分析和处理一些典型的电磁场边值问题；掌握宏观电磁场的基本规律，对电磁场及电磁波的整体理论体系有一个比较完整的理解。我为这本有明显特色的优秀教材出版而深感欣慰，并衷心期望使用本教材的教师和学生共同努力，为培养航空航天高科技人才做出贡献。

赵家升

2008 年 11 月于电子科技大学

编 者 序

电磁场理论是电子信息类专业本科生的重要专业基础课程，是当今许多新兴学科的发展基础和生长点。北京航空航天大学自 1952 年建立航空电子专业以来，经过以宋丽川、何国瑜、徐永斌、苏东林等为电磁场理论课程教学组组长的全体教师半个世纪的辛勤努力，现已建设为北京市精品课程。

现代教育倡导“以学生为主体、教师为引导者”的理念，电磁场理论授课教师如何实践“变知识的传输者为学习的指导者”是北京航空航天大学电磁场理论精品课程建设团队的努力方向，我们努力尝试设计新的课程体系和配套的综合训练与实验环节，通过“以 MIT 演示实验为主的认识型实践”、“以与课程教学配套的实验课件为主的教学型实践”、“以在教学实验实践中心实验为主的综合型实践”及“以课程设计为主的开放型实践”的实验实践体系，旨在培养学生观察现象、发现问题、分析问题和解决问题的基本科研素质。

本教材是在徐永斌教授主编的《工程电磁场基础》一书基础上，根据我近二十年讲授电磁场理论课程的教学体会，并融入电子信息技术的最新发展编写而成。

在新版教材即将完成之际，借此序向在我近二十年电磁场理论课程从教历程中给予我巨大指导和教诲的北京航空航天大学何国瑜教授、徐永斌教授，清华大学杨弃疾教授，北京邮电大学已故的杨渊教授，航天科工集团陈敬熊院士等表示由衷的感谢；向多年与我一起建设电磁场理论课程的教学团队成员表示感谢；向曾经参与该课程建设的杨争光同志表示感谢；向积极参加电磁场理论课程教学课件建设的学生们表示感谢。



2008 年 11 月于北京

前言

本书是为电子信息类专业本科大学生编写的电磁场理论课程的教科书。

电磁场理论课程是一门专业基础课。由于该课程的理论性强，数学推导繁复，公式、定理众多，方法不易掌握，因而是公认的“难教、难学、难考”的一门课程。

我们在教学和科研工作中感到，学习电磁场理论关键在于对基本概念的理解和掌握。所以在书中，我们以较多的篇幅来阐述一些重要的电磁场概念的物理意义。在内容安排上，本书第一章的矢量分析，是研究电磁场的重要数学工具。第二章和第三章介绍全部的电磁场基本定律，以便使读者建立对完整的电磁场理论体系的认识。第四、五、六三章主要介绍静态场。在第六章中，我们将例题按照静电场边界条件的类型进行分类，以便于对边界条件这一难点的掌握。在各章中，我们尽量多举一些例题，帮助读者掌握解题的思路和方法。这对于读者理解和掌握概念问题也是有好处的。第七章讨论物质中的场定律，第八章介绍了电磁场的功能关系。这些内容都是电磁场理论框架中的重要部分。第九章的低频电磁场，主要讨论的是电路理论与电磁场理论的关系。第十章均匀平面波，主要讨论平面波的传播特性。第十一章介绍的是电磁波的反射与折射问题。第十二章讨论电磁辐射问题。这些问题都是电磁场与电磁波中的重要问题。

另外我们还认为，作为一本工科教科书，本书应该具有一定的工程实用性，因而在内容上安排了静电场示意场图的画法、平面波极化旋转方向的工程判断法等内容。对在科研工作中涉及的一些问题，例如透波和吸波问题、有耗媒质中的波、电磁对偶原理等，也进行了一定的介绍。我们还将电磁场的基本定理加以归纳，作为第十三章，以便读者在需要时查阅。其中有些内容超出了电子信息工程本科生电磁场理论教学大纲的要求，在目录中以“*”号标出。在教学过程中，这部分内容可以选讲，也可以略去。将这部分内容略去，不会影响其余内容的连贯性。

本书是在北京航空航天大学出版社出版的《工程电磁场基础》(徐永斌、何国瑜、卢才成、苏东林)的基础上编著完成的，苏东林统筹整个编写工作，其中引言、第一、二、三、四章由陈爱新执笔，第五、六章由赵京城执笔，第七、八、九章由谢树果执笔，第十、十一章由全绍辉执笔，第十二、十三章、附录由齐万泉执笔。本书的出版得到了高等教育出版社的大力支持，编者在此表示衷心的感谢。

我们希望本书对于电子信息类专业的教师和工程技术人员也能有一定的参考价值。由于水平所限，本书不足之处在所难免，欢迎各方面的批评指正。

编著者
于北京航空航天大学

符 号 表

x, y, z	直角坐标系坐标变量	χ_r	媒质极化率
i_x, i_y, i_z	直角坐标系坐标单位矢量	$\overline{\varepsilon}$	张量介电常数
r_c, φ, z	柱坐标系坐标变量	μ_0	自由空间磁导率
i_{r_c}, i_φ, i_z	柱坐标系坐标单位矢量	μ	媒质磁导率
r_s, θ, φ	球坐标系坐标变量	μ_r	相对磁导率
$i_{r_s}, i_\theta, i_\varphi$	球坐标系坐标单位矢量	χ_m	媒质磁化率
r	空间某点的矢径	$\overline{\mu}$	张量磁导率
r_p	空间 P 点的矢径	σ	媒质电导率
r_{qp}	Q 点到 P 点的位移	$\overline{\sigma}$	张量电导率
ds	矢量线元	P	极化强度
da	矢量面元	ρ_p	束缚电荷体密度
dV	体元	η_p	束缚电荷面密度
ρ	体电荷密度	J_p	极化电流
η	面电荷密度	M	磁化强度
λ	线电荷密度	J_a	磁化电流(安培电流)体密度
q	点电荷	K_a	磁化电流(安培电流)面密度
J	体电流密度	ρ_f	自由电荷体密度
K	面电流密度	η_f	自由电荷面密度
I	电流强度	J_f	自由电流密度
E	电场强度	ρ_m	体磁荷密度
H	磁场强度	η_m	面磁荷密度
D	电通密度矢量	J_m	磁流密度
B	磁通密度矢量	W_E	电场能
i_n	法线方向	w_E	电场能密度
i_t	切线方向	W_H	磁场能
Φ	标量位	w_H	磁场能密度
A	矢量磁位	W_e	电能
Φ_m	标量磁位	w_e	电能密度
p	矢量电偶极矩	W_m	磁能
ε_0	自由空间介电常数	w_m	磁能密度
ε	媒质介电常数	S	坡印廷矢量
ε_r	相对介电常数	c	自由空间光速

v	介质中光速	$\dot{\rho}$	复数电荷密度
v_p	相速	$\tilde{\mathbf{S}}$	复数坡印廷矢量
v_g	群速	θ_i	入射角
η_0	自由空间波阻抗	θ_r	反射角
η	媒质中波阻抗	θ_t	折射角
λ_0	自由空间波长	n	折射率
λ	媒质中波长	Γ	反射系数
f	频率	$\Gamma_{\perp}$	垂直极化波反射系数
ω	角频率	$\Gamma_{//}$	平行极化波反射系数
$\dot{\epsilon}$	复介电常数	T	透射系数
$\dot{\eta}$	复波阻抗	$T_{\perp}$	垂直极化波透射系数
$\dot{k}$	复传播常数	$T_{//}$	平行极化波透射系数
$\tilde{\mathbf{k}}$	复传播矢量	θ_c	临界角
α	衰减常数	θ_p	布儒斯特角
β	相位常数	$\theta_{p\perp}$	垂直极化波布儒斯特角
$\boldsymbol{\beta}$	实传播矢量	$\theta_{p//}$	平行极化波布儒斯特角
β_0	自由空间相位常数	$\dot{\Phi}$	复数标量位
$\tilde{\mathbf{E}}$	复数电场强度矢量	$\tilde{\mathbf{A}}$	复数矢量位
$\tilde{\mathbf{H}}$	复数磁场强度矢量	P	辐射功率
$\tilde{\mathbf{D}}$	复数电通密度矢量	R_r	辐射电阻
$\tilde{\mathbf{B}}$	复数磁通密度矢量	$F(\theta, \varphi)$	方向性函数
$\tilde{\mathbf{J}}$	复数电流密度矢量		

目 录

引言	1	2.2 自由空间中的电磁场定律	36
第一章 矢量分析	4	2.2.1 场定律中符号的意义	37
1.1 标量场的梯度	4	2.2.2 各电磁场定律的数学物理意义	38
1.1.1 标量场的等值面	4	2.2.3 电磁场定律整体的物理意义	42
1.1.2 标量场的梯度	5	2.3 积分形式电磁场定律的应用	43
1.1.3 梯度的性质	7	本章小结	49
1.1.4 标量场梯度的物理意义	8	习题	50
1.1.5 例题	9	第三章 自由空间中的微分形式电	
1.2 矢量场的散度和高斯定理	10	磁场定律和边界条件	53
1.2.1 矢量场的场图	10	3.1 微分形式电磁场定律	53
1.2.2 矢量场的散度	11	3.1.1 微分形式电磁场定律的导出	53
1.2.3 矢量场散度的性质	13	3.1.2 微分形式电磁场定律的数学	
1.2.4 矢量场散度的物理意义	14	物理意义	54
1.2.5 高斯定理	15	3.1.3 微分形式电磁场定律整体的	
1.2.6 拉普拉斯运算符	17	意义	55
1.2.7 例题	17	3.1.4 例题	55
1.3 矢量场的旋度和斯托克斯定理	18	3.2 边界条件	56
1.3.1 保守场和非保守场	18	3.2.1 电磁场中的不连续界面	56
1.3.2 矢量场的旋度	20	3.2.2 边界条件	57
1.3.3 矢量场的旋度的性质	22	3.2.3 边界条件的物理意义	61
1.3.4 矢量场旋度的物理意义	23	3.3 微分形式电磁场定律和边界	
1.3.5 斯托克斯定理	23	条件的应用	64
1.3.6 例题	25	3.3.1 已知场分布求源分布	64
本章小结	26	3.3.2 已知源分布求场分布	66
习题	27	本章小结	70
第二章 自由空间中的电磁		习题	70
场定律	31	第四章 静电场的标量位	73
2.1 基本定义	31	4.1 静电场的标量位	74
2.1.1 电荷密度	31	4.1.1 静电场标量位的引入	74
2.1.2 电流密度	33	4.1.2 标量位(电位)的物理意义	76
2.1.3 基本场量	36	4.1.3 电偶极子的电场和电位	77
		4.1.4 标量位的微分方程和边界条件	80

4.1.5 泊松方程的解	84	6.2.2 带有自然边界条件的静电系统 ...	174
4.2 标量位的性质	85	6.2.3 带有电位导数边界条件的 静电系统	178
4.2.1 极值定理	85	6.2.4 带有趋势性边界条件的静电 系统	191
4.2.2 平均值定理	86	*6.3 柱坐标系中三维拉普拉斯方程的 分离变量解	198
4.2.3 唯一性定理	89	6.4 磁标位的方程和方程解族	207
4.3 唯一性定理的应用	92	6.4.1 磁标位的方程和方程解族	207
4.3.1 静电镜像法	92	6.4.2 边界条件	208
*4.3.2 电轴法	97	6.4.3 例题	208
*4.4 复变函数在静电场问题中的应用	100	6.5 位函数在远区的多极子展开式	211
4.4.1 复电位(复位函数)	100	6.5.1 静电标量位 $\Phi(r)$ 的多极 子展开式	211
4.4.2 保角变换(保角映射)	103	6.5.2 磁矢位 $A(r)$ 的远区多极 子展开式	215
4.4.3 许瓦兹-克里斯托弗尔变换	109	本章小结	217
4.5 静电场示意图的画法	116	习题	220
4.5.1 静电场示意图的作用	116	第七章 有物质存在时的宏观 场定律	226
4.5.2 绘制静电场示意图的基本 法则	116	7.1 物质极化的宏观模型	227
4.5.3 静电场示意图实例	124	7.1.1 极化的概念	227
本章小结	130	7.1.2 极化强度 $\mathbf{P}$	229
本章附录 式(4-99)的证明	131	7.1.3 极化电荷与电场高斯定律	230
习题	132	7.1.4 极化电流与修正的安培定律	232
第五章 静磁场的位函数	137	7.2 极化问题举例	233
5.1 静磁场的矢量位	137	7.2.1 永久极化物体	234
5.1.1 毕奥-沙伐定律	137	7.2.2 非永久极化物体	237
5.1.2 磁场的矢量位	138	7.3 物质磁化的安培电流模型	244
5.1.3 例题	141	7.3.1 物质磁化的机理	244
5.2 静磁场的标量位	143	7.3.2 磁化强度 $\mathbf{M}$	246
5.2.1 磁标位	144	7.3.3 磁化电流密度	247
本章小结	146	7.3.4 安培电流模型下的场定律	249
习题	146	7.3.5 永久磁化圆柱体的磁场	249
第六章 分离变量法及位函数的远 区多极子展开式	148	7.4 物质磁化的磁荷模型	251
6.1 静电位拉普拉斯方程的变量可 分离解	149	7.4.1 物质磁化的机理	251
6.1.1 在直角坐标系中	149	7.4.2 磁荷模型下的磁化强度	252
6.1.2 在柱坐标系中	151	7.4.3 物质中的磁场高斯定律	252
6.1.3 在球坐标系中	156		
6.2 静电场问题求解实例	161		
6.2.1 边界电位值已知的静电系统	161		

7.4.4 物质中的法拉第电磁感应定律	253	9.3.3 多匝线圈	339
7.4.5 永久磁化圆柱体的磁场	254	9.4 电路理论与电磁场理论的关系	341
7.4.6 有均匀磁介质的磁场系统	256	本章小结	345
7.5 物质中的场量组成关系和场定律	261	习题	346
7.5.1 物质中的场量组成关系	261	第十章 平面电磁波	349
7.5.2 物质中的电磁场定律	265	10.1 自由空间中的均匀平面波的时域解	349
本章小结	269	10.1.1 均匀平面波的电场和磁场时域解	349
习题	271	10.1.2 均匀平面波的传播特性	354
第八章 电磁场的能量和功率	274	10.2 正弦时变场	356
8.1 静电场和静磁场的能量	274	10.2.1 复矢量	356
8.1.1 静电场的能量	274	10.2.2 复数形式的场定律	357
8.1.2 静电场能计算举例	279	10.2.3 复矢量乘积的物理意义	358
8.1.3 静磁场的能量	280	10.3 正弦均匀平面波	359
8.1.4 静磁场能计算举例	284	10.3.1 均匀平面波的频域解	359
8.2 坡印廷定理	284	10.3.2 复数形式的坡印廷定理	363
8.2.1 电磁场供给运动电磁荷的功率	285	10.3.3 复数坡印廷定理与微波网络的关系	366
8.2.2 坡印廷定理	286	10.4 平面波在有耗媒质中的传播	368
8.2.3 坡印廷定理的单位分析	287	10.4.1 导电媒质中的均匀平面波解	368
8.2.4 坡印廷定理的物理解释	289	10.4.2 半导电媒质中均匀平面波的传播	370
8.2.5 对 S 和 w 的补充规定	292	10.4.3 良导体的趋肤效应	370
8.2.6 坡印廷定理在物质中的应用	293	10.4.4 相速、群速和色散	372
8.3 静态功率流与损耗	295	10.5 电磁波的极化状态	375
8.4 物质中的极化能和磁化能	301	10.5.1 电场极化状态的概念	375
8.4.1 极化能和电能	301	10.5.2 极化方向的工程判断法	379
8.4.2 磁化能和磁能	305	10.5.3 波的分解与合成	383
8.4.3 磁能计算举例	307	10.6 沿任意方向传播的均匀平面波	385
8.4.4 物质宏观模型与坡印廷定理的关系	308	10.6.1 波的数学表达式	386
本章小结	309	10.6.2 波的特性	387
习题	311	*10.7 无耗媒质中的非均匀平面波	391
第九章 时变场的低频特性	314	*10.8 频率极高时媒质中的波	394
9.1 平行板系统中的时变电磁场	315	10.8.1 电介质中的波	394
9.1.1 时变电磁场的严格解	315	10.8.2 金属中的波	397
9.1.2 平行板系统的低频响应	319	10.8.3 电离层和等离子体中的波	398
9.2 时变场的幂级数解法	322	本章小结	400
9.3 低频系统中的场	326		
9.3.1 平行板系统	326		
9.3.2 单匝电感器	335		

习题	402	习题	480
第十一章 平面波的反射与折射	406	*第十三章 电磁场的基本定理	482
11.1 在自由空间与理想导体分界面处的反射现象	408	13.1 格林定理	482
11.1.1 正入射	409	13.1.1 标量格林定理	482
11.1.2 斜入射	411	13.1.2 广义格林定理	483
11.2 在两种理想介质分界面处的反射和折射现象	416	13.1.3 矢量格林定理	485
11.2.1 垂直极化	416	13.2 亥姆霍兹定理	486
11.2.2 平行极化	422	13.3 静态场的几个定理	486
* 11.3 导电媒质表面的反射和折射	425	13.3.1 标量位 Φ 的唯一性定理	487
11.3.1 导电媒质中的实数折射角	426	13.3.2 平均值定理	487
11.3.2 良导体中的透射功率	429	13.3.3 无极大值定理	487
11.3.3 导电表面的反射	431	13.3.4 汤姆逊(Thomson)定理	487
11.4 透波和吸波现象	434	13.3.5 恩绍(Earnshaw)定理	487
11.4.1 透波现象	434	13.3.6 矢量位 A 的唯一性定理	487
* 11.4.2 吸波现象	441	13.4 时变场的唯一性定理	488
本章小结	445	13.5 坡印廷定理	489
习题	447	13.6 电磁力的定理——麦克斯韦定理	490
第十二章 电磁波的辐射	450	13.7 相似原理	492
12.1 时变场的位函数	450	13.8 二重性原理和电磁对偶原理	494
12.1.1 标量位和矢量位	450	13.9 等效原理	497
12.1.2 赫兹电矢量 II_z	453	13.10 感应定理	498
12.1.3 时变场位函数方程的解	455	13.11 互易定理	500
12.2 时变电偶极子的辐射	457	13.12 天线远场定理	503
12.2.1 时变电偶极子的电磁场量	458	13.13 基尔霍夫-惠更斯(Kirchhoff-Huygens)原理	505
12.2.2 时变电偶极子场的分析	459	13.14 费马原理	506
12.3 时变磁偶极子的辐射	463	附录 A 电磁学常用量纲分析	507
12.3.1 通过复数矢量位 $\tilde{A}(r)$ 求电磁场	463	附录 B 矢量运算及常用的矢量公式	510
12.3.2 使用电磁对偶原理求电磁场	465	附录 C 坐标系的有关概念	516
* 12.4 缝隙元的辐射	466	附录 D 立体角的有关概念	523
* 12.5 半波天线	469	附录 E 级数展开的有关概念	526
12.6 天线阵	472	附录 F 基尔霍夫积分求解时变场位函数方程的解	530
* 12.7 天线电磁场的精确计算	474	参考文献	534
* 12.8 天线的输入功率和输入阻抗	477		
本章小结	479		

引 言

电磁场理论是研究电磁场运动规律的科学，它具有较完整的理论结构和较高的实用价值。它不仅是微波、天线、电波传播等工程技术的理论基础，而且在科学技术的各个领域中也得到日益广泛的应用。

电磁场理论与电路理论、系统理论被认为是现代电子工程技术的基本理论，是电子工程技术人员必备的基础知识。

一、电磁学发展简史

人类探索电磁运动规律的道路是曲折而漫长的。人类很早就注意到自然界的雷电现象。大约三千多年前，人类就有了有关天然磁石、摩擦起电的知识。其后，我们的祖先还造出了指南针，对世界科学的发展做出了不朽的贡献。

但是，对电磁现象进行系统的研究上升为理论并加以运用，则是18世纪中叶以来，特别是19世纪中叶后的事情。这当然是由社会生产水平和科学发展水平导致的。

在17世纪中叶，德国马德堡市冯·魁克(Von Guencke)制成了摩擦起电机，从而使人们可以人为地得到较大数量的电荷，为进行电学的初步实验打下了基础。1745年，荷兰莱顿大学教授马森布罗克制成了莱顿瓶，可以将得到的电荷储存起来，供电学实验用。1752年，很多国家的科学家进行了雷电实验，其中著名的有美国科学家富兰克林(Flanklin, 1706—1790)和俄国科学家罗蒙诺索夫(Ломоносов, 1711—1765)。这些科学家的实验结果证明了自然界的雷电与摩擦起电得到的电在电的性质上是完全一样的。但在进行这项实验时，却有几位科学家，如俄国的利赫曼，被雷电击中身亡，为电磁学的发展献出了自己的生命。为了免遭雷电的危害，富兰克林在1753年发明了避雷针，从而将电学的研究成果首次用于工程实际中。1771—1773年，英国科学家卡文迪许(Cavendish, 1731—1810)进行了著名的静电实验，证明了在静电情况下，导体上的电荷只能分布在导体的表面。在总结实验的基础上，法国科学家库仑(Coulomb, 1736—1806)在1785年提出了第一个电学定律——库仑定律，开始走上将电学研究理论化的道路。1799年，意大利科学家伏打(Volta, 1745—1827)制成了伏打电池，这是人类制造的第一个化学电源，它使电学和磁学实验得以进行。1819年，丹麦教授奥斯特(Oersted, 1777—1851)在准备示教实验时发现电流对磁针的作用，这表明电流与磁现象之间有联系。1822年，法国科学家安培(Ampère, 1775—1836)提出了安培定律。将电流和磁场的相互作用关系上升为理论，1820—1825年，德国科学家欧姆(Ohm, 1787—1854)，得出第一个电路定律——欧姆定律。1831年，英国科学家法拉第(Faraday, 1791—1867)在经过十年研究之后发现变化的磁场可以产生电场，得到了法拉第电磁感应定律。为解释电磁感应定律，他在1837年提出力线的概念。从而首先使得对电磁现象的描述脱离开超距作用的见解，建立了“场”概念的雏形。1840年，英国科学家焦耳(Joule, 1818—1889)提出焦耳定律，揭示出电磁现象的能量属性。在同时期有人研制出使用永久磁铁的发电机，这是第一个机械电源，实现了由机械能向电能的转变。1844

年，美国的莫尔斯(Morse,1791—1872)发明了有线电报，将电磁学的成果用于通信方面。1848年，德国科学家基尔霍夫(Kirchhoff,1824—1887)提出了基尔霍夫电路定律，使电路理论结构趋于完善。1862—1865年，英国科学家麦克斯韦(Maxwell,1831—1879)提出了“场”的概念，总结出完整的电磁场方程组——麦克斯韦方程组，完成了电磁场的理论结构，为电磁场理论的发展做出了巨大的贡献。随后，在1866年，德国的西门子(Siemens,1816—1892)发明了使用电磁铁的发电机，为电力工业发展开辟了道路。1876年，美国的贝尔(Bell,1847—1922)发明了电话，实现电声通信。1879年，美国发明家爱迪生(Edison,1847—1931)发明了电灯，使电开始进入人们的日常生活。在麦克斯韦逝世9年后的1888年，德国科学家赫兹(Hertz,1857—1894)成功地做出了电磁波实验，对麦克斯韦方程组的正确性提供了实验依据。至此，电磁场的理论体系才告基本完成。

在其后至今的一个多世纪内，电磁场理论得到广泛的应用，出现了数不胜数的发明创造。今天，由电磁学发展起来的现代电子技术已成为包含电力工程、通信工程、电声电像、定位技术、导航技术、遥控遥测、遥感技术、计算机技术等多学科的科学技术领域。此外，电磁学与其他学科相结合还产生了一系列新学科，如射电天文学、无线电气象学、量子电动力学、无线电波谱学等。

现在，电子技术已广泛应用于经济、政治、军事、科技、文体卫生等各个领域，深入到人类的日常生活当中。现代人们已很难设想在世界上离开电子技术，离开电磁学的成果，社会将处在一种什么状态下。

二、电磁场理论课程的特点

电磁场理论发展到今天，已成为一门较成熟的经典理论。它的理论体系较完整、较简练，但内涵丰富，概念性强，内容较抽象，使用数学工具较多，应用灵活。初学时，往往因其理论体系简练而满足于浅知；但深入学习时，又因其内容丰富、难以掌握而畏难。因此，往往有越学越没底的感觉。

但是，从另一个角度来看，这样一门经典理论，有着较完整、严密的理论体系，只要肯下功夫认真学习，领会到这个理论体系的丰富内容，就会产生极大的学习兴趣。由于本课程将数学形式和物理概念紧密地联系在一起，对于培养抽象思维和形象思维能力是有益的。因此，对于培养学习能力，开阔思路和活跃思维，进而对于其他课程的学习和以后的工作都是大有裨益的。

根据课程特点，在学习时，从一开始就应抓住对概念的理解，以建立正确的概念图像。应该认识到，对于本课程的学习来说，比记忆公式和定理更为重要的是掌握概念；对于后续课程的学习和今后工作来说，更主要的也是掌握正确的概念。还应该认识到，只有正确掌握公式和定理所包含的物理概念，才有益于记忆它们，也才能打好正确、灵活运用它们的基础。

另外，对于本课程的学习来说，还有一个很重要的方面就是必须完成相当数量的习题。由于做习题对于掌握概念是一个十分重要的途径，因此，完成习题不能只是“做出来”，还必须明白在解题时都运用了哪些概念，为什么要用这些概念以及如何运用这些概念。此外，由于本课程运用概念的方法很灵活，如果不做相当数量的习题，是难以掌握解题方法的。因此，轻视习题的作用，势必会给学习带来很大的困难。

在学习中要注意总结和归纳，以利于前后贯穿，加深对概念的理解。

在一般学习中常用的预习、复习、讨论等方法，在本课程学习中，也是行之有效的。

总之，只要认真、有信心，本课程是可以学好的。

本书采用国际单位制(SI)，其长度单位为米(m, meter)，质量单位为千克(kg, kilogram)，时间单位为秒(s, second)，电流单位为安培(A, Ampere)。

第一章 矢量分析

矢量分析又称为数学场论，是研究各种类型场运动规律的数学工具。它的数学公式是与场的物理概念密切相关的。因此，对本章内容的掌握将直接影响后续各章的学习。在学习时应注意它包含的物理概念，而不要把它单纯地作为数学来学。本章所需的预备知识见附录 A、B。

1.1 标量场的梯度

在标量场中，场量是标量，它可以是空间位置与时间的函数。通常用一般的函数符号表示标量场，如提到标量场 f ，即可表示为

$$f = f(u_1, u_2, u_3, t) \quad (1-1)$$

式中， (u_1, u_2, u_3) 为空间点的坐标； t 为时间变量。为书写简便，亦常写为

$$f = f(\mathbf{r}, t) \quad (1-2)$$

式中， $\mathbf{r}$ 为空间点的矢径。

对于与时间无关的标量场，则可写为

$$f = f(u_1, u_2, u_3) = f(\mathbf{r}) \quad (1-3)$$

1.1.1 标量场的等值面

标量场 $f(\mathbf{r}, t)$ 在 t_0 时刻的等值面，是在 t_0 时刻标量场值等于同一数值的空间各点所构成的空间曲面。因此，标量场等值面的方程即为

$$f(\mathbf{r}, t_0) = \text{常数} \quad (1-4)$$

对于与时间无关的标量场（静态标量场），其等值面方程为

$$f(\mathbf{r}) = \text{常数} \quad (1-5)$$

在式(1-4)及式(1-5)中，给定不同的常数值，将由它们给出空间中不同的等值面方程，这样即可得到标量场的等值面族。因此，一个标量场的等值面族就给出了该标量场场量的空间分布状态。

例如，标量场 $f(\mathbf{r}) = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2 - z^2}$ 的等值面方程即为

$$f(\mathbf{r}) = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2 - z^2} = C \quad (\text{常数}) \quad (1-6)$$

这是一族以原点为球心的球面，即

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 - C^2 \quad (1-7)$$

而半径最大的球面是 $f(\mathbf{r}) = 0$ 的等值面，即