

21^{世纪}

高等学校电子信息类规划教材



电磁场与电磁波

(第三版)

王家礼 朱满座 路宏敏 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

21 世纪高等学校电子信息类规划教材

电磁场与电磁波

(第三版)

王家礼 朱满座 路宏敏 编著

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

全书共分八章,内容包括:矢量分析、静电场、恒定电流的电场和磁场、静态场的解、时变电磁场、平面电磁波、电磁波的辐射及导行电磁波。

本书内容精练,概念清晰,语言流畅,注重实践性与新颖性。为便于学习使用,书中安排有较多的例题。

本书可作为高等学校本科相关专业“电磁场与电磁波”课程的教材,也可作为有关科技人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波 / 王家礼, 朱满座, 路宏敏编著. — 3 版.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.8 (2009.9 重印)

21 世纪高等学校电子信息类规划教材

ISBN 978-7-5606-2280-4

I. 电… II. ①王… ②朱… ③路… 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 093931 号

策 划 云立实

责任编辑 杨宗周

出版发行 西安电子科技大学出版社 (西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2009 年 8 月第 3 版 2009 年 9 月第 15 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 19.75

字 数 463 千字

印 数 76 001~82 000 册

定 价 28.00 元

ISBN 978-7-5606-2280-4 / TN·0519

XDUP 2572003-15

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

第三版说明

本书作为西安电子科技大学电子类专业“电磁场与电磁波”课程的统一教材，是按照各学院的教学大纲编写的。编写中，吸收了部分讲课教师的意见和建议，同时融入了编者长期的教学经验和体会。

本书第二版出版以来，许多学校将其选作教材。根据教学需求和读者反馈意见，我们对本书第二版进行了修订，在各章增加了部分内容，充实了例题和习题。其中，第一、八章由王家礼修订，第二、三、四章由朱满座修订，第五、六、七章由路宏敏修订。最后由王家礼负责全书的统稿工作。

西安电子科技大学出版社的云立实、杨宗周编辑对第三版的出版付出了艰辛的劳动，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不当之处在所难免，衷心希望使用本书的老师和同学们批评指正。

编者

2009年5月

第二版前言

本书作为西安电子科技大学电子类专业“电磁场与电磁波”课程的统一教材，是按照西安电子科技大学教改方案确定的教学内容，参照各学院的教学大纲编写的。在编写中，吸收了部分讲课教师的意见和建议，同时融入了编者长期的教学经验和体会。

根据教学需求，我们对该书的第一版进行了部分修改，在第五、六、七章中增加了部分内容。其中第一、八章由王家礼修订，第二、三、四章由朱满座修订，第五、六、七章由路宏敏修订。最后由王家礼负责全书的统稿工作。

本书在编写过程中，西安电子科技大学出版社云立实、戚文艳编辑对此书的再版付出了艰辛的劳动，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中的错误和不当之处在所难免，衷心希望使用本书的老师 and 同学批评指正。

编者

2004年9月

第一版前言

现代电子技术如通讯、广播、电视、导航、雷达、遥感、测控、电子对抗、电子仪器和测量系统，都离不开电磁波的发射、控制、传播和接收；从家用电器、工业自动化到地质勘探，从电力、交通等工业、农业到医疗卫生等国民经济领域，几乎全都涉及到电磁场理论的应用。不仅如此，电磁学一直是，将来仍是新兴学科的孕育点，学习这一课程对培养学生严谨的科学学风、科学方法以及抽象思维能力、创新精神等，都起着十分重要的作用。因此，在我国和世界先进工业国家中，各高等学校都把它列入电子类专业必修的专业基础课。

本书作为西安电子科技大学各电子类专业“电磁场与电磁波”课程的统一教材，是按照西安电子科技大学 1999 年教改方案确定的教学内容，参照各学院的教学大纲编写的。在本书的编写过程中，还参照了全国普通高等学校工科电磁场理论课程教学指导小组 1993 年制定，并由原国家教委颁布的教学基本要求。在编写中，吸收了部分讲课教师的意见和建议，同时融入了编者长期的教学经验和体会。

全书共分八章。第一章首先复习矢量分析的基本知识，力求简明实用，为以后学习奠定教学基础。第二、三、四章讨论静态场，论述了静电场、恒定电流的电场和磁场的基本概念和计算方法及其应用。在第四章中专门讨论了静态场边值问题的基本解法，以便学会场问题的基本处理方法，为以后进一步学习奠定基础。第五、六、七章研究时变电磁场和电磁波的基本理论和有关应用，论述了麦克斯韦方程组及其边界条件，研究了无界媒质中均匀平面波的特性、均匀平面波在平面分界面的反射和折射以及全反射和全透射的条件、均匀平面波在多层介质中的反射和折射，讨论了电磁波的辐射特性及其应用。第八章研究了导行电磁波的特性，并介绍了波导、同轴线、谐振腔的特点及应用。书末附录给出了重要的矢量公式、常用数学公式以及物理量和单位，以便查用。

本书是西安电子科技大学国家电工电子教学基地的规划教材之一，由西安电子科技大学机电学院和电子工程学院的老师共同编写完成。其中第一、八章由王家礼编写，第二、三、四章由朱满座编写，第五、六、七章由路宏敏编写，最后由王家礼负责全书的统稿工作。本书在编写过程中，得到了许多同志的大力支持与帮助，赵永久、王新稳、任获荣提供了部分习题，韩军功、李海、李文成、黄磊、王磊为本书打印了部分手稿并绘制了部分图稿。

本书的编写大纲由褚庆昕教授审阅，并提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，孙肖子教授给予了大力支持和帮助，西安电子科技大学出版社云立实、孙雪妹编辑为本书的出版付出了艰辛的劳动，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中错误和不当之处在所难免，衷心希望使用本书的老师、同学和读者批评指正。

编者

2000年9月

欢迎选购西安电子科技大学出版社教材类图书

~~~~~“十一五”国家级规划教材~~~~~	数控机床故障分析与维修(高职)(第二版)	25.00	液压与气动技术(第二版)(朱梅)(高职)	23.00
计算机系统结构(第四版)(李学干)	25.00	~~~~~计算机提高普及类~~~~~		
计算机系统安全(第二版)(马建峰)	30.00	计算机应用基础(第三版)(丁爱萍)(高职)	22.00	
计算机网络(第三版)(蔡皖东)	27.00	计算机文化基础(高职)(游鑫)	27.00	
计算机应用基础教程(第四版)(陈建铎)		计算机文化基础上机实训及案例(高职)	15.00	
(for Windows XP/Office XP)	30.00	计算机科学与技术导论(吕辉)	22.00	
计算机应用基础(冉崇善)(高职)		计算机应用基础(高职)(赵钢)	29.00	
(Windows XP & Office 2003 版)	23.00	计算机应用基础——信息处理技术教程	31.00	
《计算机应用基础》实践技能训练		《计算机应用基础——信息处理技术教程》		
与案例分析(高职)(冉崇善)	18.00	习题集与上机指导(张郭军)	14.00	
微型计算机原理(第二版)(王忠民)	27.00	计算机组装与维修(中职)(董小莉)	23.00	
微型计算机原理及接口技术(第二版)(裘雪红)	36.00	微型计算机组装与维护实训教程(高职)(杨文诚)	22.00	
微型计算机组成与接口技术(第二版)(高职)	28.00	~~~~~计算机网络类~~~~~		
微机原理与接口技术(第二版)(龚尚福)	37.00	计算机网络技术基础教程(高职)(董武)	18.00	
单片机原理及应用(第二版)(李建忠)	32.00	计算机网络管理(雷震甲)	20.00	
单片机应用技术(第二版)(高职)(刘守义)	30.00	网络设备配置与管理(李飞)	23.00	
Java程序设计(第二版)(高职)(陈圣国)	26.00	网络安全与管理实验教程(谢晓燕)	35.00	
编译原理基础(第二版)(刘坚)	29.00	网络安全技术(高职)(廖兴)	19.00	
人工智能技术导论(第三版)(廉师友)	24.00	网络信息安全技术(周明全)	17.00	
多媒体软件设计技术(第三版)(陈启安)	23.00	动态网页设计实用教程(蒋理)	30.00	
信息系统分析与设计(第二版)(卫红春)	25.00	ASP动态网页制作基础教程(中职)(苏玉雄)	20.00	
信息系统分析与设计(第三版)(陈圣国)(高职)	20.00	局域网组建实例教程(高职)(尹建璋)	20.00	
传感器原理及工程应用(第三版)	28.00	Windows Server 2003组网技术(高职)(陈伟达)	30.00	
数字图像处理(第二版)(何东健)	30.00	组网技术(中职)(俞海英)	19.00	
电路基础(第三版)(王松林)	39.00	综合布线技术(高职)(王趾成)	18.00	
模拟电子电路及技术基础(第二版)(孙肖子)	35.00	计算机网络应用基础(武新华)	28.00	
模拟电子技术(第三版)(江晓安)	25.00	计算机网络基础及应用(高职)(向隅)	22.00	
数字电子技术(第三版)(江晓安)	23.00	~~~~~计算机技术类~~~~~		
数字电路与系统设计(第二版)(邓元庆)	35.00	计算机系统结构与组成(吕辉)	26.00	
数字信号处理(第三版)(高西全)	29.00	电子商务基础与实务(第二版)(高职)	16.00	
电磁场与电磁波(第二版)(郭辉萍)	28.00	数据结构—使用 C++语言(第二版)(朱战立)	23.00	
现代通信原理与技术(第二版)(张辉)	39.00	数据结构(高职)(周岳山)	15.00	
移动通信(第四版)(李建东)	30.00	数据结构教程——Java 语言描述(朱振元)	29.00	
移动通信(第二版)(章坚武)	24.00	离散数学(武波)	24.00	
物理光学与应用光学(第二版)(石顺祥)	42.00			



软件工程(第二版)(邓良松)	22.00	微机装配调试与维护教程(王忠民)	25.00
软件技术基础(高职)(鲍有文)	23.00	《微机装配调试与维护教程》实训指导	22.00
软件技术基础(周大为)	30.00	~~~~~数据库及计算机语言类~~~~~	
嵌入式软件开发(高职)(张京)	23.00	C程序设计 with 实例教程(曾令明)	21.00
~~~~~计算机辅助技术及图形处理类~~~~~		程序设计与C语言(第二版)(马鸣远)	32.00
电子工程制图(第二版)(高职)(童幸生)	40.00	C语言程序设计课程与考试辅导(王晓丹)	25.00
电子工程制图(含习题集)(高职)(郑芙蓉)	35.00	Visual Basic.NET程序设计(高职)(马宏锋)	24.00
机械制图与计算机绘图(含习题集)(高职)	40.00	Visual C#.NET程序设计基础(高职)(曾文权)	39.00
电子线路CAD实用教程(潘永雄)(第三版)	27.00	Visual FoxPro数据库程序设计教程(康贤)	24.00
AutoCAD实用教程(高职)(丁爱萍)	24.00	数据库基础与Visual FoxPro9.0程序设计	31.00
中文版AutoCAD 2008精编基础教程(高职)	22.00	Oracle数据库实用技术(高职)(费雅洁)	26.00
电子CAD(Protel 99 SE)实训指导书(高职)	12.00	Delphi程序设计实训教程(高职)(占跃华)	24.00
计算机辅助电路设计Protel 2004(高职)	24.00	SQL Server 2000应用基础与实训教程(高职)	22.00
EDA技术及应用(第二版)(谭会生)	27.00	Visual C++基础教程(郭文平)	29.00
数字电路EDA设计(高职)(顾斌)	19.00	面向对象程序设计与VC++实践(揣锦华)	22.00
多媒体软件开发(高职)(含盘)(牟奇春)	35.00	面向对象程序设计与C++语言(第二版)	18.00
多媒体技术基础与应用(曾广雄)(高职)	20.00	面向对象程序设计——JAVA(第二版)	32.00
三维动画案例教程(含光盘)(高职)	25.00	Java程序设计教程(曾令明)	23.00
图形图像处理案例教程(含光盘)(中职)	23.00	JavaWeb程序设计基础教程(高职)(李绪成)	25.00
平面设计(高职)(李卓玲)	32.00	Access数据库应用技术(高职)(王趾成)	21.00
~~~~~操作系统类~~~~~		ASP.NET程序设计与开发(高职)(眭碧霞)	23.00
计算机操作系统(第二版)(颜彬)(高职)	19.00	XML案例教程(高职)(眭碧霞)	24.00
计算机操作系统(修订版)(汤子瀛)	24.00	JSP程序设计实用案例教程(高职)(翁健红)	22.00
计算机操作系统(第三版)(汤小丹)	30.00	Web应用开发技术: JSP(含光盘)	33.00
计算机操作系统原理——Linux实例分析	25.00	~~~~~电子、电气工程及自动化类~~~~~	
Linux网络操作系统应用教程(高职)(王和平)	25.00	电路(高贇)	26.00
Linux操作系统实用教程(高职)(梁广民)	20.00	电路分析基础(第三版)(张永瑞)	28.00
~~~~~微机与控制类~~~~~		电路基础(高职)(孔凡东)	13.00
微机接口技术及其应用(李育贤)	19.00	电子技术基础(中职)(蔡宪承)	24.00
单片机原理与应用实例教程(高职)(李珍)	15.00	模拟电子技术(高职)(郑学峰)	23.00
单片机原理与应用技术(黄惟公)	22.00	模拟电子技术(高职)(张凌云)	17.00
单片机原理与程序设计实验教程(于殿泓)	18.00	数字电子技术(高职)(江力)	22.00
单片机实验与实训指导(高职)(王曙霞)	19.00	数字电子技术(高职)(肖志锋)	13.00
单片机原理及接口技术(第二版)(余锡存)	19.00	数字电子技术(高职)(蒋卓勤)	15.00
新编单片机原理与应用(第二版)(潘永雄)	24.00	数字电子技术及应用(高职)(张双琦)	21.00
MCS-51单片机原理及嵌入式系统应用	26.00	高频电子技术(高职)(钟苏)	21.00
微机外围设备的使用与维护(高职)(王伟)	19.00	现代电子装联工艺基础(余国兴)	20.00
		微电子制造工艺技术(高职)(肖国玲)	18.00

Multisim电子电路仿真教程(高职)	22.00	信息论与编码(邓家先)	18.00
电工基础(中职)(薛鉴章)	18.00	密码学基础(范九伦)	16.00
电工基础(高职)(郭宗智)	19.00	通信原理(高职)(丁龙刚)	14.00
电子技能实训及制作(中职)(徐伟刚)	15.00	通信原理(黄葆华)	25.00
电工技能训练(中职)(林家祥)	24.00	通信电路(第二版)(沈伟慈)	21.00
电工技能实训基础(高职)(张仁醒)	14.00	通信系统原理教程(王兴亮)	31.00
电子测量技术(秦云)	30.00	通信系统与测量(梁俊)	34.00
电子测量技术(李希文)	28.00	扩频通信技术及应用(韦惠民)	26.00
电子测量仪器(高职)(吴生有)	14.00	通信线路工程(高职)	30.00
模式识别原理与应用(李澍程)	25.00	通信工程制图与概预算(高职)(杨光)	23.00
信号与系统(第三版)(陈生潭)	44.00	程控数字交换技术(刘振霞)	24.00
信号与系统实验(MATLAB)(党宏社)	14.00	光纤通信技术与设备(高职)(杜庆波)	23.00
信号与系统分析(和卫星)	33.00	光纤通信技术(高职)(田国栋)	21.00
数字信号处理实验(MATLAB版)	26.00	现代通信网概论(高职)(强世锦)	23.00
DSP原理与应用实验(姜阳)	18.00	电信网络分析与设计(阳莉)	17.00
电气工程导论(贾文超)	18.00	~~~~~仪器仪表及自动化类~~~~~	
电力系统的MATLAB/SIMULINK仿真及应用	29.00	现代测控技术(吕辉)	20.00
传感器应用技术(高职)(王煜东)	27.00	现代测试技术(何广军)	22.00
传感器原理及应用(郭爱芳)	24.00	光学设计(刘钧)	22.00
测试技术与传感器(罗志增)	19.00	工程光学(韩军)	36.00
传感器与信号调理技术(李希文)	29.00	测试技术基础(李孟源)	15.00
传感器技术(杨帆)	27.00	测试系统技术(郭军)	14.00
传感器及实用检测技术(高职)(程军)	23.00	电气控制技术(史军刚)	18.00
电子系统集成设计导论(李玉山)	33.00	可编程序控制器应用技术(张发玉)	22.00
现代能源与发电技术(邢运民)	28.00	图像检测与处理技术(于殿泓)	18.00
神经网络(含光盘)(侯媛彬)	26.00	自动检测技术(何金田)	26.00
电磁场与电磁波(曹祥玉)	22.00	自动显示技术与仪表(何金田)	26.00
电磁波——传输·辐射·传播(王一平)	26.00	电气控制基础与可编程控制器应用教程	24.00
电磁兼容原理与技术(何宏)	22.00	DSP在现代测控技术中的应用(陈晓龙)	28.00
微波与卫星通信(李白萍)	15.00	智能仪器工程设计(尚振东)	25.00
微波技术及应用(张瑜)	20.00	面向对象的测控系统软件设计(孟建军)	33.00
嵌入式实时操作系统 μ C/OS-II教程(吴永忠)	28.00	计量技术基础(李孟源)	14.00
音响技术(高职)(梁长垠)	25.00	~~~~~自动控制、机械类~~~~~	
现代音响与调音技术(第二版)(王兴亮)	21.00	自动控制理论(吴晓燕)	34.00
~~~~~通信理论与技术类~~~~~		自动控制原理(李素玲)	30.00
专用集成电路设计基础教程(来新泉)	20.00	自动控制原理(第二版)(薛安克)	24.00
现代编码技术(曾凡鑫)	29.00	自动控制原理及其应用(高职)(温希东)	15.00
信息论、编码与密码学(田丽华)	36.00	控制工程基础(王建平)	23.00

现代控制理论基础(舒欣梅)	14.00	数控加工与编程(第二版)(高职)(詹华西)	23.00
过程控制系统及工程(杨为民)	25.00	数控加工工艺学(任同)	29.00
控制系统仿真(党宏社)	21.00	数控加工工艺(高职)(赵长旭)	24.00
模糊控制技术(席爱民)	24.00	数控加工工艺课程设计指导书(赵长旭)	12.00
工程电动力学(修订版)(王一平)(研究生)	32.00	数控加工编程与操作(高职)(刘虹)	15.00
工程力学(张光伟)	21.00	数控机床与编程(高职)(饶军)	24.00
工程力学(皮智谋)(高职)	12.00	数控机床电气控制(高职)(姚勇刚)	21.00
理论力学(张功学)	26.00	数控应用专业英语(高职)(黄海)	17.00
材料力学(张功学)	27.00	机床电器与PLC(高职)(李伟)	14.00
材料成型工艺基础(刘建华)	25.00	电机及拖动基础(高职)(孟宪芳)	17.00
工程材料及应用(汪传生)	31.00	电机与电气控制(高职)(冉文)	23.00
工程材料与应用(戈晓岚)	19.00	电机原理与维修(高职)(解建军)	20.00
工程实践训练(周桂莲)	16.00	供配电技术(高职)(杨洋)	25.00
工程实践训练基础(周桂莲)	18.00	金属切削与机床(高职)(聂建武)	22.00
工程制图(含习题集)(高职)(白福民)	33.00	模具制造技术(高职)(刘航)	24.00
工程制图(含习题集)(周明贵)	36.00	模具设计(高职)(曾霞文)	18.00
工程图学简明教程(含习题集)(尉朝闻)	28.00	冷冲压模具设计(高职)(刘庚武)	21.00
现代设计方法(李思益)	21.00	塑料成型模具设计(高职)(单小根)	37.00
液压与气压传动(刘军营)	34.00	液压传动技术(高职)(简引霞)	23.00
先进制造技术(高职)(孙燕华)	16.00	发动机构造与维修(高职)(王正键)	29.00
机械原理多媒体教学系统(资料)(书配盘)	120.00	机动车辆保险与理赔实务(高职)	23.00
机械工程科技英语(程安宁)	15.00	汽车典型电控系统结构与维修(李美娟)	31.00
机械设计基础(郑甲红)	27.00	汽车机械基础(高职)(娄万军)	29.00
机械设计基础(岳大鑫)	33.00	汽车底盘结构与维修(高职)(张红伟)	28.00
机械设计(王宁侠)	36.00	汽车车身电气设备系统及附属电气设备(高职)	23.00
机械设计基础(张京辉)(高职)	24.00	汽车单片机与车载网络技术(于万海)	20.00
机械基础(安美玲)(高职)	20.00	汽车故障诊断技术(高职)(王秀贞)	19.00
机械CAD/CAM(葛友华)	20.00	汽车营销技术(高职)(孙华宪)	15.00
机械CAD/CAM(欧长劲)	21.00	汽车使用性能与检测技术(高职)(郭彬)	22.00
机械CAD/CAM上机指导及练习教程(欧)	20.00	汽车电工电子技术(高职)(黄建华)	22.00
画法几何与机械制图(叶琳)	35.00	汽车电气设备与维修(高职)(李春明)	25.00
《画法几何与机械制图》习题集(邱龙辉)	22.00	汽车使用与技术管理(高职)(边伟)	25.00
机械制图(含习题集)(高职)(孙建东)	29.00	汽车空调(高职)(李祥峰)	16.00
机械设备制造技术(高职)(柳青松)	33.00	汽车概论(高职)(邓书涛)	20.00
机械制造基础(高职)(郑广花)	21.00	现代汽车典型电控系统结构原理与故障诊断	25.00

欢迎来函索取本社书目和教材介绍! 通信地址: 西安市太白南路2号 西安电子科技大学出版社发行部  
 邮政编码: 710071 邮购业务电话: (029)88201467 传真电话: (029)88213675。

# 目 录

<b>第一章 矢量分析</b> .....	1
1.1 场的概念 .....	1
1.2 标量场的方向导数和梯度 .....	3
1.3 矢量场的通量和散度 .....	7
1.4 矢量场的环量和旋度 .....	10
1.5 圆柱坐标系与球坐标系 .....	13
1.6 亥姆霍兹定理 .....	17
小结 .....	18
习题一 .....	19
<b>第二章 静电场</b> .....	22
2.1 库仑定律与电场强度 .....	22
2.2 高斯定理 .....	24
2.3 静电场的旋度与静电场的电位 .....	26
2.4 电偶极子 .....	29
2.5 电介质中的场方程 .....	30
2.6 静电场的边界条件 .....	35
2.7 导体系统的电容 .....	37
2.8 电场能量与能量密度 .....	41
2.9 电场力 .....	43
小结 .....	47
习题二 .....	49
<b>第三章 恒定电流的电场和磁场</b> .....	51
3.1 恒定电流的电场 .....	51
3.2 磁感应强度 .....	60
3.3 恒定磁场的基本方程 .....	63
3.4 矢量磁位 .....	66
3.5 磁偶极子 .....	68
3.6 磁介质中的场方程 .....	70
3.7 恒定磁场的边界条件 .....	74
3.8 标量磁位 .....	76
3.9 互感和自感 .....	77
3.10 磁场能量 .....	79
3.11 磁场力 .....	81

小结 .....	82
习题三 .....	84
<b>第四章 静态场的解 .....</b>	<b>87</b>
4.1 边值问题的分类 .....	87
4.2 唯一性定理 .....	88
4.3 镜像法 .....	89
4.4 分离变量法 .....	96
4.5 复变函数法 .....	105
4.6 格林函数法 .....	111
4.7 有限差分法 .....	118
小结 .....	123
习题四 .....	123
<b>第五章 时变电磁场 .....</b>	<b>126</b>
5.1 法拉第电磁感应定律 .....	126
5.2 位移电流 .....	129
5.3 麦克斯韦方程组 .....	133
5.4 时变电磁场的边界条件 .....	137
5.5 时变电磁场的能量与能流 .....	143
5.6 正弦电磁场 .....	146
5.7 波动方程 .....	153
5.8 时变电磁场中的位函数 .....	155
小结 .....	158
习题五 .....	160
<b>第六章 平面电磁波 .....</b>	<b>163</b>
6.1 无耗媒质中的平面电磁波 .....	163
6.2 导电媒质中的平面电磁波 .....	171
6.3 电磁波的极化 .....	178
6.4 色散、相速和群速 .....	183
6.5 均匀平面电磁波向平面分界面的垂直入射 .....	188
6.6 均匀平面电磁波向多层媒质分界面的垂直入射 .....	195
6.7 均匀平面电磁波向平面分界面的斜入射 .....	200
6.8 均匀平面电磁波的全透射和全反射 .....	207
小结 .....	211
习题六 .....	213
<b>第七章 电磁波的辐射 .....</b>	<b>217</b>
7.1 滞后位 .....	217
7.2 电基本振子的辐射场 .....	220
7.3 对偶原理与磁基本振子的辐射场 .....	225
7.4 天线的电参数 .....	229
7.5 对称线天线和天线阵的概念 .....	234

7.6 面天线的辐射场 .....	246
7.7 互易定理 .....	246
7.8 天线的有效面积 .....	247
7.9 传输方程 .....	249
小结 .....	250
习题七 .....	251
<b>第八章 导行电磁波 .....</b>	<b>253</b>
8.1 沿均匀导波装置传输电磁波的一般分析 .....	253
8.2 矩形波导 .....	262
8.3 圆柱形波导 .....	271
8.4 波导中的能量传输与损耗 .....	278
8.5 同轴线 .....	282
8.6 谐振腔 .....	286
小结 .....	295
习题八 .....	296
<b>附录一 重要的矢量公式 .....</b>	<b>298</b>
<b>附录二 常用数学公式 .....</b>	<b>300</b>
<b>附录三 量和单位 .....</b>	<b>304</b>

# 第一章 矢量分析

电场和磁场都是矢量场，因此在研究电磁场与电磁波之前，我们先介绍分析矢量场和标量场问题的数学工具——矢量分析。掌握矢量分析将为学习电磁场与电磁波内容奠定必要的数学基础。本章重点讨论如下内容：

- 标量场的方向导数和梯度
- 矢量场的通量和散度
- 矢量场的环量和旋度
- 亥姆霍兹定理

## 1.1 场的概念

### 1.1.1 矢性函数

数学上，实数域内任一数量  $a$  都可以称为标量，因为它只能代表该代数量的大小。在物理学中，任意一个代数量一旦被赋予物理单位，则成为一个具有物理意义的标量，即所谓的物理量，如电压  $u$ 、电流  $i$ 、面积  $S$ 、体积  $V$  等等。

在二维空间或三维空间内的任一点  $P$  是一个既存在大小(或称为模)又有方向特性的量，故称为实数矢量，实数矢量可用黑体  $\mathbf{A}$  表示，而白体  $A$  表示  $\mathbf{A}$  的大小(即  $\mathbf{A}$  的模)。若用几何图形表示，实数矢量是从原点出发的一条带有箭头的直线段，直线段的长度表示矢量  $\mathbf{A}$  的模，箭头的指向表示该矢量  $\mathbf{A}$  的方向。矢量一旦被赋予物理单位，便成为具有物理意义的矢量，如电场强度  $\mathbf{E}$ 、磁场强度  $\mathbf{H}$ 、速度  $\mathbf{v}$  等等。

若某一矢量的模和方向都保持不变，此矢量称为常矢，如某物体所受到的重力。而在实际问题中遇到的更多的是模和方向或两者之一会发生变化的矢量，这种矢量我们称为变矢，如沿着某一曲线物体运动的速度  $\mathbf{v}$  等。

设  $t$  是一数性变量， $\mathbf{A}(t)$  为变矢，对于某一区间  $G[a, b]$  内的每一个数值  $t$ ， $\mathbf{A}$  都有一个确定的矢量  $\mathbf{A}(t)$  与之对应，则称  $\mathbf{A}(t)$  为数性变量  $t$  的矢性函数。记为

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}(t)$$

而  $G[a, b]$  为  $\mathbf{A}(t)$  的定义域。矢性函数  $\mathbf{A}(t)$  在直角坐标系中的三个坐标分量都是变量  $t$  的函数，分别为  $A_x(t)$ 、 $A_y(t)$ 、 $A_z(t)$ ，则矢性函数  $\mathbf{A}(t)$  也可用其坐标表示为

$$\mathbf{A} = A_x(t)\mathbf{e}_x + A_y(t)\mathbf{e}_y + A_z(t)\mathbf{e}_z$$

其中,  $\mathbf{e}_x$ 、 $\mathbf{e}_y$ 、 $\mathbf{e}_z$  为  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的正向单位矢量。

在矢量代数中, 已经学习过矢性函数的极限和连续性, 矢性函数的导数和微分, 矢性函数的积分。由于篇幅所限我们不再讨论, 但是它们的运算法则我们必须掌握, 这样才能学好后面的内容。

### 1.1.2 标量场和矢量场

在许多科学问题中, 常常需要研究某种物理量在某一空间区域的分布情况和变化规律, 为此, 在数学上引入场的概念。

如果在某一空间区域内的每一点, 都对应着某个物理量的一个确定的值, 则称在此区域内确定了该物理量的一个场。换句话说, 在某一空间区域中, 物理量的无限集合表示一种场。如在教室中温度的分布确定了一个温度场, 在空间电位的分布确定了一个电位场。场的一个重要的属性是它占有空间, 而且在该空间域内, 除有限个点和表面外, 其物理量应该是处处连续的。若该物理量与时间无关, 则该场称为静态场; 若该物理量与时间有关, 则该场称为动态场或称为时变场。

在研究物理系统中温度、压力、密度等在一定空间的分布状态时, 数学上只需用一个代数变量来描述, 这些代数变量(即标量函数)所确定的场称为标量场, 如温度场  $T(x, y, z)$ 、电位场  $\varphi(x, y, z)$  等。然而在许多物理系统中, 其状态不仅需要确定其大小, 同时还需确定它们的方向, 这就需要用一个矢量来描述, 因此称为矢量场, 例如电场、磁场、流速场等等。

### 1.1.3 标量场的等值面和矢量场的矢量线

在研究场的特性时, 以场图表示场变量在空间逐点分布的情况具有很大的意义。对于标量场, 常用等值面的概念来描述。所谓等值面, 是指在标量场  $\varphi(x, y, z)$  中, 使其函数  $\varphi$  取相同数值的所有点组成的集合, 这些点组成一个曲面, 该曲面称为等值面。如温度场的等值面, 就是由温度相同的点所组成的一个曲面, 此曲面称为等温面。等值面在二维空间就变为等值线。如地图上的等高线, 就是由高度相同的点连成的一条曲线。

标量场  $\varphi(x, y, z)$  的等值面方程为

$$\varphi(x, y, z) = \text{const.}$$

对于矢量场  $\mathbf{A}(x, y, z)$ , 则用一些有向线来形象地表示矢量  $\mathbf{A}(x, y, z)$  在空间的分布, 这些有向线称为矢量线, 如图 1-1 所示。矢量线上任一点的切线方向表示该点矢量  $\mathbf{A}(x, y, z)$  的方向。在直角坐标系中, 其矢量线方程可写成

$$\frac{dx}{A_x} = \frac{dy}{A_y} = \frac{dz}{A_z} \quad (1-1)$$

按照一定的规则, 绘制出矢量线, 既可根据矢量线确定矢量场中各点矢量的方向, 又可根据矢量线的疏密程度, 判别出矢量场中各点矢量的大小和变化趋势。因此, 矢量线在分析矢量场特性时是十分有用的。

**例 1-1** 求数量场  $\varphi = (x+y)^2 - z$  通过点  $M(1, 0, 1)$  的等值面方程。

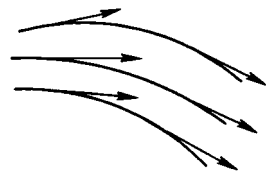


图 1-1 矢量场的矢量线



解：点  $M$  的坐标是  $x_0=1, y_0=0, z_0=1$ ，则该点的数量场的场值为

$$\varphi = (x_0 + y_0)^2 - z_0 = 0$$

其等值面方程为

$$(x+y)^2 - z = 0 \quad \text{或} \quad z = (x+y)^2$$

例 1-2 求矢量场  $\mathbf{A} = xy^2\mathbf{e}_x + x^2y\mathbf{e}_y + zy^2\mathbf{e}_z$  的矢量线方程。

解：矢量线应满足的微分方程为

$$\frac{dx}{xy^2} = \frac{dy}{x^2y} = \frac{dz}{y^2z}$$

从而有

$$\begin{cases} \frac{dx}{xy^2} = \frac{dy}{x^2y} \\ \frac{dx}{xy^2} = \frac{dz}{y^2z} \end{cases}$$

解之即得矢量方程

$$\begin{cases} x^2 - y^2 = C_2 \\ z = C_1 x \end{cases}$$

$C_1$  和  $C_2$  是积分常数。

## 1.2 标量场的方向导数和梯度

### 1.2.1 标量场的方向导数

在标量场中，标量  $\varphi = \varphi(M)$  的分布情况可以由等值面或等值线来描述，但这只能大致地了解标量  $\varphi$  在场中的整体分布情况。而要详细地研究标量场，还必须对它的局部状态进行深入分析，即要考察标量  $\varphi$  在场中各点处的邻域内沿每一方向的变化情况。为此，引入方向导数的概念。

设  $M_0$  是标量场  $\varphi = \varphi(M)$  中的一个已知点，从  $M_0$  出发沿某一方向引入一条射线  $l$ ，在  $l$  上  $M_0$  点的邻近取一点  $M$ ，其长度  $\overline{M_0M} = \rho$ ，如图 1-2 所示。若当  $M_0$  点趋于  $M$  点时（即长度  $\rho$  趋于零时），即

$$\frac{\Delta\varphi}{\rho} = \frac{\varphi(M) - \varphi(M_0)}{\rho}$$

的极限存在，则称此极限为函数  $\varphi(M)$  在点  $M_0$  处沿  $l$  方向

的方向导数，记为  $\left. \frac{\partial\varphi}{\partial l} \right|_{M_0}$ ，即

$$\left. \frac{\partial\varphi}{\partial l} \right|_{M_0} = \lim_{M_0 \rightarrow M} \frac{\varphi(M) - \varphi(M_0)}{\rho} \quad (1-2)$$

由此可见，方向导数  $\left. \frac{\partial\varphi}{\partial l} \right|_{M_0}$  是函数  $\varphi = \varphi(M)$  在点  $M_0$  处沿  $l$  方向对距离的变化率。当方

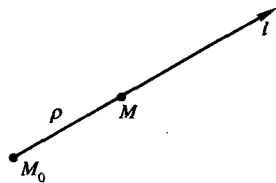


图 1-2 方向导数的定义