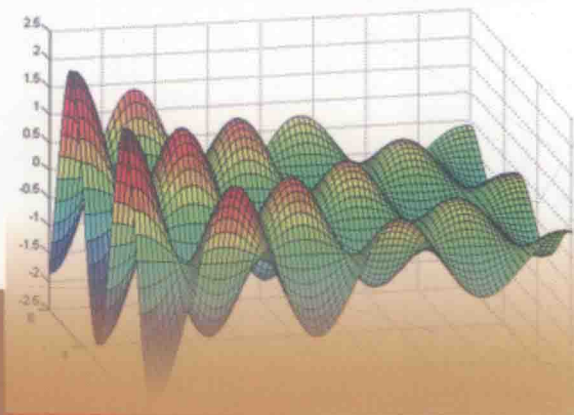
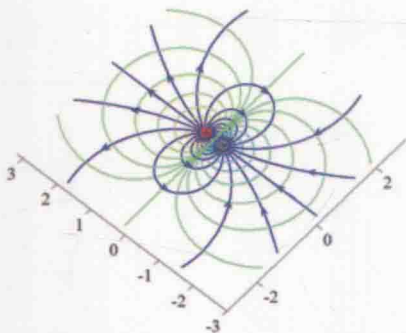




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



国家电工电子教学基地系列教材



电磁场与电磁波

(M⁺ Book)

◎ 邵小桃 李一玫 王国栋 编著



清华大学出版社
<http://www.tup.com.cn>



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

国家电工电子教学基地系列教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电磁场与电磁波

(M⁺ Book)

邵小桃 李一玫 王国栋 编著



清华大学出版社

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是在普通高等教育“十一五”国家级规划教材《电磁场与电磁波基础教程》的基础上修订而成的。全书共分7章,包括矢量分析、静电场、恒定电场、恒定磁场、时变电磁场、平面电磁波、导行电磁波。内容讲述深入浅出,对电磁场与电磁波理论既有严格的数学推导,又注重其物理意义的阐述与分析。每章除小结、思考与练习、习题之外,还包括电磁场与电磁波的主要应用、MATLAB 应用分析、部分插图的动态链接、研究型拓展题目。附录给出了定理与矢量恒等式、三个坐标系下的微分运算、坐标系变换、基本物理常数和 SI 词头,书末还附有习题答案。

本书可作为通信、电子、自动化专业本科生“电磁场与电磁波”课程教材,也可作为相关教师、学生及专业人员的重要参考书。

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 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波: M* Book/邵小桃,李一玫,王国栋编著. —北京:北京交通大学出版社:清华大学出版社, 2018. 3

(国家电工电子教学基地系列教材)

ISBN 978-7-5121-3312-9

I. ①电… II. ①邵…②李…③王… 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 (2017) 第 192690 号

电磁场与电磁波

DIANCICHANG YU DIANCIBO

责任编辑:谭文芳

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京时代华都印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185 mm × 230 mm 印张:19.25 字数:428 千字 彩插:1

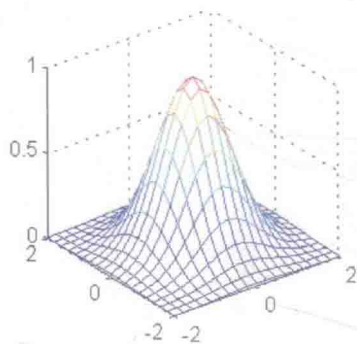
版 次:2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-3312-9/O · 169

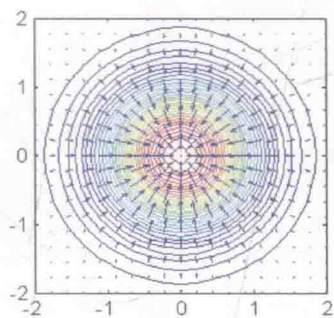
印 数:1 ~ 1 000 册 定价:58.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

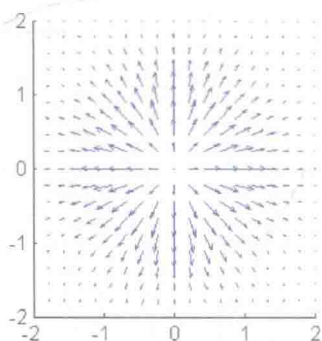
投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。



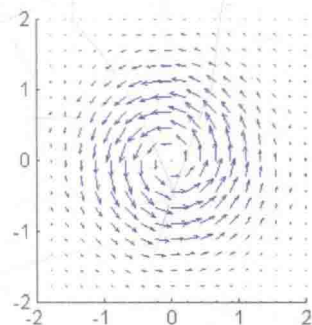
标量场分布



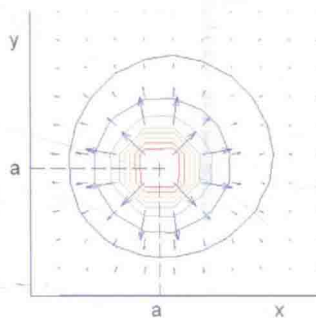
标量场的梯度



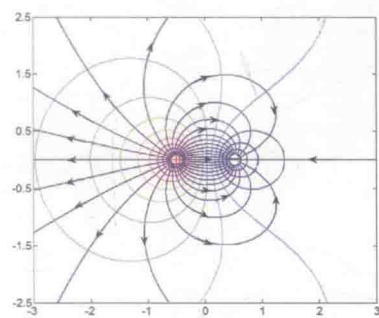
有散场



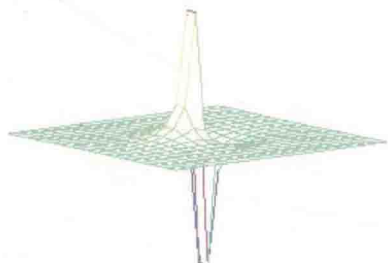
有旋场



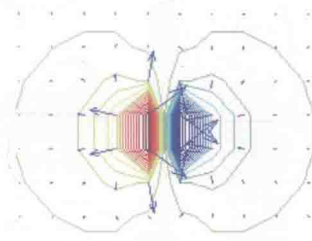
接地导体 90° 角域内正电荷电场和电位分布



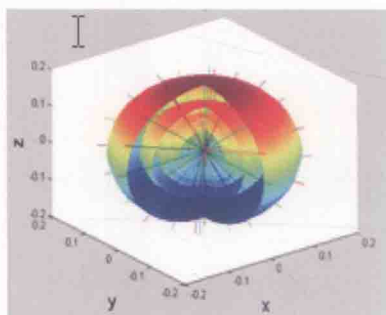
不等量异号长直导线的电场和电位分布



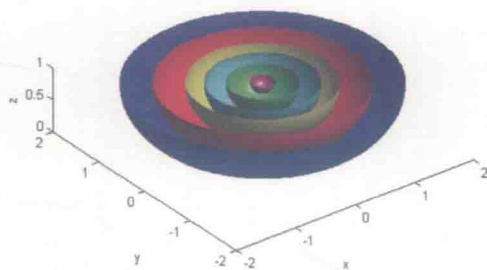
电偶极子电位分布



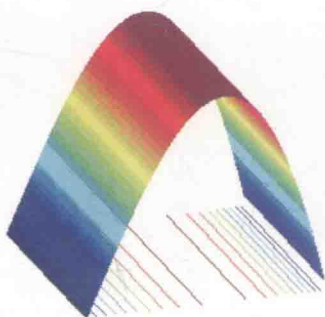
电偶极子电场和电位分布



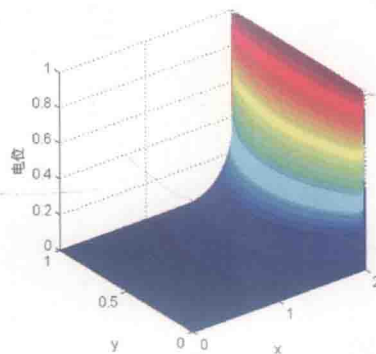
点电荷电场和电位分布



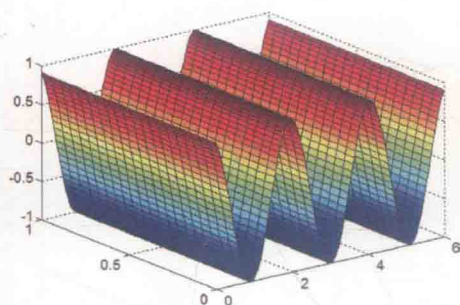
两接地导体平板间点电荷的等位面剖面



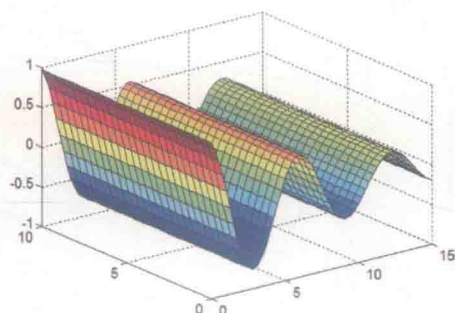
电位分布



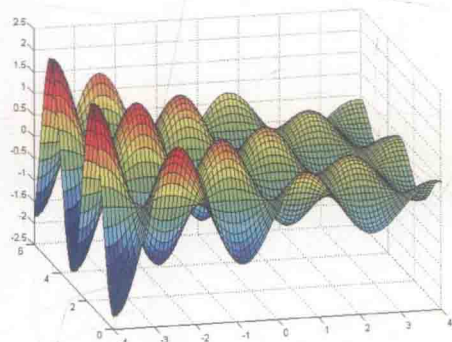
电位分布



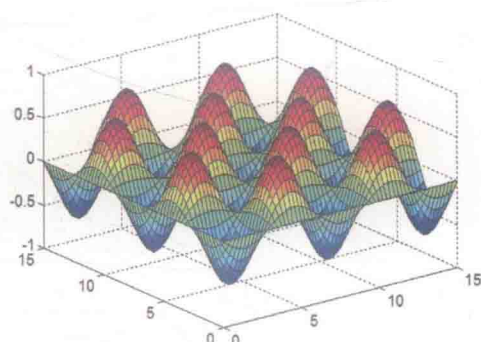
均匀平面波



衰减行波



衰减驻波



等幅驻波

前言

文化与科技的融合,使得教材与新媒体的有效融合成为可能。在数字出版概念提出几年后,我们基于读者阅读和深入学习的需要,开发了这本融传统出版与新媒体于一体的数字化教材。我们相信这将大大提升教学效果,使大学教学更加精彩。

随着信息技术的飞速发展,电磁场与电磁波理论在通信、广播、电视、导航、遥感遥测、工业自动化、家用电器、地质勘探、电力系统、医用电子设备等方面有着越来越多的应用,电磁理论也是新兴学科的增长点和交叉点。电磁场与电磁波是电子信息类本科生的专业基础课,属于理论与实践紧密结合的课程。学习电磁场与电磁波课程,可以使学生掌握电磁场和电磁波的理论体系,掌握静态场和时变场的分析和计算,对电磁场的分布和电磁波的传播特性有正确的理解和认识,对于提高学生自主学习与探究的能力,培养学生科学的方法、严谨的学风、创新的精神都具有重要的作用。

本书是在普通高等教育“十一五”国家级规划教材《电磁场与电磁波基础教程》的基础上修订而成,是“国家电工电子教学基地系列教材”之一。本书的编写者参考目前国内普遍使用及国外优秀的经典电磁场与电磁波教材,并将多年一线教学实践的经验和对本课程的理解融入书的编写中,使其通俗易懂、重点突出,合理地渗透新概念、新方法、新手段,注重经典与现代的有机结合,并且引入动态链接。书中有动态链接的图,其图题前有作为标记。当学生或读者在下载手机 App 后,扫一扫相关的图,就能够得到立体可视、生动有趣的动态链接。本书在内容结构和编写安排上具有以下几个主要特色。

1. 在建设思想上,体现书是知识的载体;体现经典与现代、理论与技术、解析与仿真的有机结合。

2. 在知识结构上,理论叙述深入浅出,不罗列艰深的公式及数学推导,推导力求简洁,重点强调结论的物理意义及其应用。

3. 在素材选择上,将最新的科技成果转化为教材内容,体现基础性和先进性。

4. 精心设计典型综合例题和习题来加深对电磁场理论的理解,增加思考与练习引导学生自主学习和探究,从而对典型的电磁场问题有较清晰地认识。

5. 书中插图、MATLAB 仿真分析图形完整精美,有的示意电磁场基本原理,有的与电磁场的基本物理现象有关,还有一部分展示了电磁波理论的应用。

6. 仅需要手机互动,图像作为入口,能呈现三维视频及动画,不用实时联网,APP 可离线使用,想象空间广阔,可更好为读者服务。

7. 书中电磁场与电磁波应用方面的内容系统全面,研究型扩展题目精心挑选,独具特色。全书共 7 章。第 1 章矢量分析,主要介绍了矢量的各种运算及运算法则、场的分类与表

示、三种常见正交坐标系与微分元;重点讲解了场的梯度、散度和旋度的物理意义及计算公式,亥姆霍兹定理的内容及意义;最后利用 MATLAB 分析了梯度、散度和旋度的特性。

第2章、第3章和第4章属于静态场部分,包括静电场、恒定电场和恒定磁场。从分析产生各自场的散度源和旋度源出发,建立了场所满足的基本方程,讨论了介质的极化和磁化特性,研究了介质中场的基本方程和边界条件。在源和场的互求的基础上,分析计算了部分电容、电阻和电感。基于唯一性定理,分析和阐述了分离变量法和镜像法。

第5章、第6章和第7章属于时变场部分,包括时变电磁场、平面电磁波和导行电磁波。分析介绍了时变电磁场的基本定律、麦克斯韦方程组、时变场的边界条件、坡印廷定理,均匀平面波在空间、导电媒质和各种导波系统中的传播特性。

书中附录列出了定理与矢量恒等式、三个坐标系下的微分运算、坐标系变换、基本物理常数及 SI 词头,书末附有习题答案。

本书可作为通信、电子、自动化专业本科生“电磁场与电磁波”课程教材,也可作为相关教师、学生及专业人员的重要参考书。

本书由邵小桃主编。其中,第1章、第4章、第7章、MATLAB 应用及书后附录由邵小桃编写;第2章、第3章、第5章、第6章及习题答案由李一玫编写;各章应用及 MATLAB 应用分析由王国栋编写;部分研究型拓展题目由郭勇和张波编写。各章插图的动态链接视频及动画主要由卫延制作完成,第6章的动态链接由李一玫完成仿真,崔勇和郭勇也参与了部分视频的制作。全书由邵小桃审阅。

本书得到国家级教改项目“通信工程专业综合改革试点建设项目”的资助,也得到北京交通大学出版社及责任编辑的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免会出现不妥和疏漏,敬请各位读者和专家指正。

编者

2018年1月

电子资源使用方法和注意事项

扫描扉页中的二维码,安装加阅 APP,注册成功后,扫描书中图标题前带有“”图标图片,除图 7-2-3 扫描图(c)外,其他带子图的图只需扫描图(a),即可观看与之对应的彩图或动画。为消除手机网络信号故障的不利影响,阅读前请在 APP 主界面上分章节将各图对应的彩图或动画预先下载下来。

目 录

第1章 矢量分析	1
1.1 矢量和矢量运算	1
1.1.1 标量与矢量	1
1.1.2 矢量运算	1
1.2 标量场和矢量场	3
1.2.1 场的分类	3
1.2.2 场的表示	4
1.3 正交坐标系与微分元	5
1.3.1 直角坐标系	5
1.3.2 圆柱坐标系	7
1.3.3 球坐标系	9
1.4 标量场的方向导数和梯度	11
1.4.1 方向导数	11
1.4.2 标量场的梯度	12
1.5 矢量场的通量和散度	15
1.5.1 通量和通量源	15
1.5.2 矢量场的散度	18
1.5.3 散度定理	20
1.6 矢量场的环量和旋度	21
1.6.1 环量和涡旋源	21
1.6.2 矢量场的旋度	22
1.6.3 斯托克斯定理	25
1.7 亥姆霍兹定理	26
1.7.1 无散场与无旋场	26
1.7.2 亥姆霍兹定理	27
1.8 MATLAB 应用分析	27
小结	29
思考与练习	31
习题	32
研究型拓展题目	34

第2章 静电场	35
2.1 库仑定律和电场强度	35
2.1.1 库仑定律	35
2.1.2 电场强度	36
2.2 真空中的静电场方程	38
2.2.1 静电场的通量和散度	38
2.2.2 静电场的环量和旋度	40
2.2.3 真空中静电场的基本方程	40
2.3 电位	42
2.3.1 电位的定义	42
2.3.2 电位的计算	42
2.3.3 电偶极子	43
2.4 介质中的静电场方程	45
2.4.1 介质的极化	45
2.4.2 介质中的高斯定律	47
2.5 静电场的边界条件	49
2.5.1 两种介质分界面上的边界条件	49
2.5.2 介质与导体分界面上的边界条件	50
2.6 泊松方程 拉普拉斯方程	52
2.7 静态场的边值问题和基本定理	53
2.7.1 格林定理	53
2.7.2 唯一性定理	54
2.7.3 静态场的边值问题	55
2.8 分离变量法	55
2.8.1 直角坐标分离变量法	56
2.8.2 圆柱坐标分离变量法	61
2.8.3 球坐标系的分离变量法	64
2.9 镜像法	68
2.9.1 平面镜像法	68
2.9.2 球面镜像法	71
2.9.3 圆柱面镜像法	72
2.10 多导体系统——部分电容	74
2.10.1 电容的概念	74
2.10.2 多导体系统间的部分电容	76
2.11 静电场能量 静电力	78

2.11.1 静电场能量	78
2.11.2 静电力	80
2.12 静电场的应用	81
2.13 MATLAB 应用分析	83
小结	87
思考与练习	89
习题	89
研究型拓展题目	96
第3章 恒定电场	97
3.1 电流密度	97
3.1.1 电流强度和电流密度	97
3.1.2 电流密度和电荷密度	98
3.1.3 欧姆定律	98
3.1.4 焦耳定律	99
3.2 恒定电场的基本方程和电动势	100
3.2.1 电流连续性方程	100
3.2.2 恒定电场的基本方程	100
3.2.3 电动势	102
3.3 恒定电场的边界条件	103
3.4 恒定电场与静电场的比拟	105
3.5 恒定电场的应用	107
3.6 MATLAB 应用分析	108
小结	109
思考与练习	110
习题	110
研究型拓展题目	112
第4章 恒定磁场	113
4.1 安培力定律与磁感应强度	113
4.1.1 安培力定律	113
4.1.2 磁感应强度——毕奥 - 萨伐尔定律	113
4.1.3 洛伦兹力	115
4.2 真空中恒定磁场的基本方程	116
4.2.1 磁通连续性方程	116
4.2.2 安培环路定律	117
4.3 矢量磁位和磁偶极子	121

4.3.1 矢量磁位	121
4.3.2 磁偶极子	124
4.4 磁介质中的恒定磁场方程	125
4.4.1 介质的磁化	125
4.4.2 磁介质中的安培环路定律	127
4.5 恒定磁场的边界条件	129
4.5.1 两种磁介质分界面上的边界条件	129
4.5.2 理想导磁体表面的边界条件	130
4.5.3 矢量磁位表示的边界条件	131
4.6 标量磁位	132
4.6.1 标量磁位及其方程	132
4.6.2 标量磁位的多值性	133
4.6.3 介质磁化的磁荷模型及其标量磁位	133
4.7 电感	134
4.7.1 自感系数和互感系数	134
4.7.2 自感和互感的计算	135
4.8 磁场能量 磁场力	138
4.8.1 磁场能量	138
4.8.2 磁场力	141
4.9 恒定磁场的应用	143
4.10 MATLAB 应用分析	145
小结	146
思考与练习	148
习题	149
研究型拓展题目	153
第5章 时变电磁场	154
5.1 法拉第电磁感应定律	154
5.2 位移电流	156
5.3 麦克斯韦方程组	159
5.3.1 麦克斯韦方程组的形式	160
5.3.2 本构关系	160
5.3.3 无源区的麦克斯韦方程组	161
5.3.4 无源区的波动方程	161
5.4 时变电磁场的边界条件	162
5.4.1 两种媒质分界面上的边界条件	162

5.4.2 理想导体表面的边界条件	162
5.5 正弦电磁场的复数表示法	164
5.5.1 正弦场量的复数表示	165
5.5.2 麦克斯韦方程组的复数形式	166
5.5.3 波动方程的复数形式	166
5.5.4 复电容率 复磁导率	167
5.6 坡印廷定理和坡印廷矢量	170
5.6.1 时变电磁场的能量与功率	170
5.6.2 时域坡印廷定理	170
5.6.3 频域坡印廷定理	174
5.6.4 时变电磁场的唯一性定理	176
5.7 时变电磁场的动态位	176
5.7.1 动态位方程	176
5.7.2 动态位方程的解	178
5.8 时变电磁场的应用	181
5.9 MATLAB 应用分析	182
小结	182
思考与练习	185
习题	185
研究型拓展题目	188
第6章 平面电磁波	189
6.1 理想介质中的均匀平面波	189
6.1.1 均匀平面波的方程和解式	189
6.1.2 均匀平面波的传播特性	191
6.2 电磁波的极化	195
6.2.1 直线极化	195
6.2.2 圆极化	196
6.2.3 椭圆极化	197
6.3 导电媒质中的均匀平面波	200
6.3.1 导电媒质中的波动方程及其解式	201
6.3.2 导电媒质中均匀平面波的传播特性	201
6.4 均匀平面波的垂直入射	206
6.4.1 导电媒质分界面的垂直入射	206
6.4.2 理想导体表面的垂直入射	208
6.4.3 理想介质分界面的垂直入射	210

6.4.4 良导体表面的垂直入射	213
6.5 均匀平面波对多层介质的垂直入射	216
6.6 均匀平面波的斜入射	220
6.6.1 理想介质分界面的斜入射	220
6.6.2 波的全反射和全折射	223
6.6.3 理想导体表面的斜入射	229
6.7 群速	231
6.8 电磁波的应用	233
6.9 MATLAB 应用分析	235
小结	236
思考与练习	239
习题	239
研究型拓展题目	244
第7章 导行电磁波	245
7.1 导行波的基本特性	245
7.1.1 TEM 波的传输特性	247
7.1.2 TE 波和 TM 波的传输特性	247
7.2 矩形金属波导	248
7.2.1 矩形波导中的 TM 模	248
7.2.2 矩形波导中的 TE 模	249
7.2.3 矩形波导的截止频率和传输特性	250
7.2.4 矩形波导中的 TE_{10} 模	254
7.3 圆波导	257
7.3.1 圆波导中的场分布	257
7.3.2 圆波导中波的传播特性	259
7.3.3 圆波导中的三个常用模式	261
7.4 同轴传输线	263
7.4.1 同轴线传输主模——TEM 模	263
7.4.2 同轴线中的高次模	264
7.5 谐振腔	265
7.5.1 谐振腔的基本概念及主要参数	265
7.5.2 矩形谐振腔	267
7.6 导行电磁波的应用	271
小结	271
思考与练习	273

习题.....	274
研究型拓展题目.....	275
附录 A 定理与矢量恒等式.....	276
附录 B 三个坐标系下的微分运算.....	277
附录 C 坐标系变换.....	278
附录 D 基本物理常量.....	279
附录 E SI 词头.....	280
习题答案.....	281
参考文献.....	291

第1章 矢量分析

电磁场与电磁波理论涉及电场和磁场的研究,电场和磁场都是矢量,它们的特性由麦克斯韦方程组决定。研究和讨论麦克斯韦方程组及其相关应用,都需要首先学习与矢量运算有关的基本规则。鉴于此,本章将研究矢量分析。首先学习与坐标系无关的矢量运算的基本规则、标量场和矢量场的概念;然后介绍三种常见的正交坐标系即直角坐标系、圆柱坐标系和圆球坐标及其微分元。在此基础上,分析和介绍了标量场的梯度、矢量场的散度和旋度、亥姆霍兹定理。在本章的最后部分,利用 MATLAB 对梯度、散度、旋度的特性进行了分析和讨论。

1.1 矢量和矢量运算

1.1.1 标量与矢量

仅具有大小的量称为标量,如质量、温度和电荷都是标量。既有大小又有方向的量称为矢量,如速度、加速度和力都是矢量。而其他的量如电压和电流都是标量,电场和磁场都是矢量。矢量用黑斜体表示,如 $\mathbf{A}$ 。标量用白斜体字符来表示,如 A 。

矢量 $\mathbf{A}$ 的几何表示是一条有向线段,线段的长度表示矢量 $\mathbf{A}$ 的大小,指向表示矢量 $\mathbf{A}$ 的方向,矢量 $\mathbf{A}$ 的大小或模用 $|\mathbf{A}|$ 或 A 表示。那么,矢量 $\mathbf{A} = A\mathbf{a}_A = |\mathbf{A}| \mathbf{a}_A$,其中 $\mathbf{a}_A$ 称为矢量 $\mathbf{A}$ 的单位矢量,即 $\mathbf{a}_A$ 的大小是 1,方向与 $\mathbf{A}$ 相同。

1.1.2 矢量运算

矢量运算包括矢量的加减法、矢量的数乘、点乘和叉乘。

1. 矢量加减法

两矢量 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 相加,可采用平行四边形法则或三角形法则,如图 1-1-1 所示。两矢量 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 的始端重合,以 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 为邻边做平行四边形,其对角线即为和矢量 $\mathbf{A} + \mathbf{B}$;或把 $\mathbf{B}$ 矢量的起点放在 $\mathbf{A}$ 矢量的末端,从 $\mathbf{A}$ 矢量的起点到 $\mathbf{B}$ 矢量的末端的连线即为和矢量。矢量的减法是矢量加法的特殊情况,因有 $\mathbf{A} - \mathbf{B} = \mathbf{A} + (-\mathbf{B})$,其中 $-\mathbf{B}$ 是与 $\mathbf{B}$ 大小相等方向相反的矢量,同样可以利用平行四边形法则或三角形法则做加法运算,即可得到差矢量 $\mathbf{A} - \mathbf{B}$,如图 1-1-2 所示。

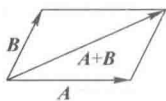


图 1-1-1 矢量加法

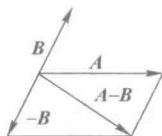
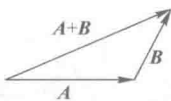
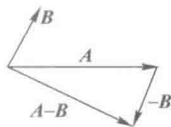


图 1-1-2 矢量减法



矢量加法服从加法的交换律和结合律,即:

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

$$\mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}) = (\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{C} \quad (1-1-2)$$

2. 矢量的数乘

一个矢量 $\mathbf{A}$ 和一个标量 k 相乘,结果是一个矢量,即:

$$\mathbf{B} = k\mathbf{A} \quad (1-1-3)$$

而 $\mathbf{B}$ 的模值是 $\mathbf{A}$ 的 k 倍, $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{A}$ 方向是否相同取决于 k 的正负。

3. 两矢量的标量积

两矢量的标量积也称点积或点乘。两个矢量 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 的标积是一个标量,它的值等于 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 的幅值与 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 之间夹角余弦的乘积,记作 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ 。即:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = AB \cos \theta \quad (1-1-4)$$

其中, θ 为矢量 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 之间较小的夹角,如图 1-1-3 所示。

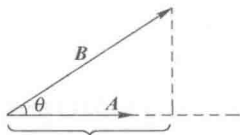


图 1-1-3 矢量的标积

在直角坐标系中,三个坐标的单位矢量分别为 $\mathbf{a}_x$ 、 $\mathbf{a}_y$ 、 $\mathbf{a}_z$,若矢量 $\mathbf{r}$ 与 x 、 y 、 z 坐标轴的夹角分别为 α 、 β 、 γ ,则 $\mathbf{r}$ 在直角坐标系中即可表示为:

$$\mathbf{r} = \mathbf{a}_x r \cos \alpha + \mathbf{a}_y r \cos \beta + \mathbf{a}_z r \cos \gamma \quad (1-1-5)$$

$\mathbf{r}$ 的单位矢量为:

$$\mathbf{a}_r = \frac{\mathbf{r}}{r} = \mathbf{a}_x \cos \alpha + \mathbf{a}_y \cos \beta + \mathbf{a}_z \cos \gamma \quad (1-1-6)$$

其中, $\cos \alpha$ 、 $\cos \beta$ 和 $\cos \gamma$ 称为矢量 $\mathbf{r}$ 的方向余弦。

利用式 (1-1-4) 也可求出两个非零矢量之间的夹角:

$$\theta = \arccos \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{AB} \quad (1-1-7)$$

当 $\theta = 90^\circ$ 时, $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = 0$, 因此,两矢量的标量积是否为零可作为两矢量垂直的判据。即:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = 0 \Leftrightarrow \mathbf{A} \perp \mathbf{B} \quad (1-1-8)$$

当 $\mathbf{B} = \mathbf{A}$ 时, $\theta = 0^\circ$, 可求出矢量 $\mathbf{A}$ 的模:

$$A = |\mathbf{A}| = \sqrt{\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}} \quad (1-1-9)$$

标量积的运算服从交换律和分配律,即:

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