



应用型本科规划教材

ELECTROMAGNETIC FIELD
AND MICROWAVE

电磁场与微波

◆ 主 编 毕 岗

副主编 陈文鑫 杨俊秀 阮谢永



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大學出版社

0441.4
89

应用型本科规划教材

电 磁 场 与 微 波

主 编 毕 岗

副主编 陈文鑫 杨俊秀 阮谢永

浙江大學出版社

内 容 简 介

本书从矢量分析与场论入手,着重讨论了静态电磁场基本理论、时变电磁场基本理论、微波技术工程基础及电磁波的应用。全书共分9章,具体包括矢量分析与场论、静态电场与恒定电场、恒定电流的磁场、时变电磁场与电磁波、均匀传输线理论、波导与谐振腔、微波网络基础、天线辐射与接收基本原理、电磁波的应用等。为了加强基础性教学,书中每节以电磁场和微波的基本概念和基本原理的阐述为主线,配以大量的例题,并对大篇幅的数学推导进行了删选。书中每节配备有思考题,每章附有习题和参考答案。

本书面向应用型本科教学。根据通信、信息以及电子等专业发展的要求,力求知识的基础性和体系的完整性,并注重理论和实际结合。

本书可供高等学校电子信息类各专业本科生用作教材,也可作为电子工程、通信工程以及相关专业的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与微波 / 毕岗主编. —杭州:浙江大学出版社,
2006.8

应用型本科规划教材

ISBN 7-308-04806-3

I. 电... II. 毕... III. ①电磁场—高等学校—教材 ②微波技术—高等学校—教材 IV. ①0441.4②
TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 070638 号

电磁场与微波

毕 岗 主 编

丛书策划 樊晓燕

责任编辑 樊晓燕

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路148号 邮政编码310028)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 19

字 数 462 千

版 次 2006年8月第1版 2006年8月第1次印刷

印 数 0001—3000

书 号 ISBN 7-308-04806-3/O·346

定 价 29.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88072522

总 序

近年来我国高等教育事业得到了空前的发展,高等院校的招生规模有了很大的扩展,在全国范围内发展了一大批以独立学院为代表的应用型本科院校,这对我国高等教育的持续、健康发展具有重大的意义。

应用型本科院校以着重培养应用型人才为目标,目前,应用型本科院校开设的大多是一些针对性较强、应用特色明确的本科专业,但与此不相适应的是,当前,对于应用型本科院校来说作为知识传承载体的教材建设远远滞后于应用型人才培养的步伐。应用型本科院校所采用的教材大多是直接选用普通高校的那些适用研究型人才培养的教材。这些教材往往过分强调系统性和完整性,偏重基础理论知识,而对应用知识的传授却不足,难以充分体现应用类本科人才的培养特点,无法直接有效地满足应用型本科院校的实际教学需要。对于正在迅速发展的应用型本科院校来说,抓住教材建设这一重要环节,是实现其长期稳步发展的基本保证,也是体现其办学特色的基本措施。

浙江大学出版社认识到,高校教育层次化与多样化的发展趋势对出版社提出了更高的要求,即无论在选题策划,还是在出版模式上都要进一步细化,以满足不同层次的高校的教学需求。应用型本科院校是介于普通本科与高职之间的一个新兴办学群体,它有别于普通的本科教育,但又不能偏离本科生教学的基本要求,因此,教材编写必须围绕本科生所要掌握的基本知识与概念展开。但是,培养应用型与技术型人才又是应用型本科院校的教学宗旨,这就要求教材改革必须淡化学术研究成分,在章节的编排上先易后难,既要低起点,又要有坡度、上水平,更要进一步强化应用能力的培养。

为了满足当今社会对信息与电子技术类专业应用型人才的需要,许多应用型本科院校都设置了相关的专业。而这些专业的特点是课程内容较深、难点较多,学生不易掌握,同时,行业发展迅速,新的技术和应用层出不穷。针对这一情况,浙江大学出版社组织了十几所应用型本科院校信息与电子技术类专业的教师共同开展了“应用型本科信电专业教材建设”项目的研究,共同研究目前教材的不适应之处,并探讨如何编写能真正做到“因材施教”、适合应用型本科层次

信电类专业人才培养的系列教材。在此基础上,组建了编委会,确定共同编写“应用型本科院校信电专业基础平台课规划教材系列”。

本专业基础平台课规划教材具有以下特色:

在编写的指导思想上,以“应用类本科”学生为主要授课对象,以培养应用型人才为基本目的,以“实用、适用、够用”为基本原则。“实用”是对本课程涉及的基本原理、基本性质、基本方法要讲全、讲透,概念准确清晰。“适用”是适用于授课对象,即应用型本科层次的学生。“够用”就是以就业为导向,以应用型人才为培养目的,达到理论够用,不追求理论深度和内容的广度。突出实用性、基础性、先进性,强调基本知识,结合实际应用,理论与实践相结合。

在教材的编写上重在基本概念、基本方法的表述。编写内容在保证教材结构体系完整的前提下,注重基本概念,追求过程简明、清晰和准确,重在原理,压缩繁琐的理论推导。做到重点突出、叙述简洁、易教易学。还注意掌握教材的体系和篇幅能符合各学院的计划要求。

在作者的遴选上强调作者应具有应用型本科教学的丰富经验,有较高的学术水平并具有教材编写经验。为了既实现“因材施教”的目的,又保证教材的编写质量,我们组织了两支队伍,一支是了解应用型本科层次的教学特点、就业方向的一线教师队伍,由他们通过研讨决定教材的整体框架、内容选取与案例设计,并完成编写;另一支是由本专业的资深教授组成的专家队伍,负责教材的审稿和把关,以确保教材质量。

相信这套精心策划、认真组织、精心编写和出版的系列教材会得到广大院校的认可,对于应用型本科院校信息与电子技术类专业的教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会主任

顾伟康

2006年7月

前 言

电磁场与微波是电子信息类专业的一门技术基础课,对电磁场的研究和认识也是工程技术和科学研究的重要内容。本书以培养应用型、创新性、复合型人才为目标,面向基础性应用型本科教学。

在宇宙中,电磁场可以说无所不在、无时不在,与人类的生活息息相关,电磁场的发展历史可以追溯到 1875 年库仑创建库仑定理;19 世纪是电磁场发展的重要时期,那个时期最有代表性的成就是 1864 年麦克斯韦提出了体现宏观电磁理论的麦克斯韦方程组;随着人们对电磁场与微波的认识不断加深,电磁场的应用领域也不断拓展,21 世纪的今天,电磁场在电报、广播、电视、卫星通信、移动通信、雷达、导航、无线网络,电子对抗、遥感、电磁兼容以及电气控制得到了广泛的应用。

随着高等教育改革的不断深入以及培养模式的转变,要求学生掌握知识体系的基础性、应用性和系统性,因此本书编写过程中力求做到以下几点:①在定位上,本书面向基础性应用型本科教学,有针对性的进行由浅入深的知识传输,在此基础上培养读者对电磁场和微波的学习的兴趣,为深入学习和工程技术研究打基础。②在内容上,重点阐述基本概念、基本原理和分析方法,并把抽象的理论形象化,在教材的编排上增加图片量,以图片、举例的形式说明理论结果的物理意义,由此掌握原理性的知识。③编写方法上,改变以往的教材过多内容抽象的知识传输。尽量避开大篇幅的、繁杂的公式推导。增加例题、思考题和习题,尽力做到在教的过程中运用启发,学的过程有自得、自悟。④尽力使知识体系完整性,连贯统一,并注重理论和实际的结合。

本书的内容包括矢量分析和场论、静态电磁场基本理论、时变电磁场基本理论、微波技术工程基础及电磁波的应用实例,全书共分 9 章。第 1 章矢量分析与场论,内容包括三种常用的正交坐标系、矢量代数,标量场梯度、矢量场的散度和旋度、格林(Green)定理和亥姆霍兹(Helmholtz)定理。第 2 和 3 章静态电磁场理论,内容包括静态电场、恒定电场、恒定电流磁场。第 4 章时变电磁场与电磁波,内容包括麦克斯韦方程、时谐变电磁场、平面电磁波、电磁波的极化、色散与

群速。第5~8章微波技术基础,第5章均匀传输线理论包括传输线方程以及传输线的等效、史密斯圆图、有耗传输线、双导线与同轴线、微带传输线、传输线的匹配等;第6章波导与谐振腔,包括导行波系统中的场分析和特性参量、矩形波导、圆波导、波导的激励与耦合、谐振腔等;第7章微波网络基础,等效传输线理论、微波网络传输特性及参量分析、散射矩阵与传输矩阵、多端口网络的散射矩阵等;第8章天线辐射与接收,包括介绍了天线的功能、类型以及天线的电参数、电磁辐射基本理论等。最后一章介绍了电磁波的应用,包括电磁波谱、微波在无线通信技术中的应用、微波通信技术、雷达利用。上述内容既有联系又相互独立,使用时可以根据不同的学习要求进行取舍。

本书由毕岗担任主编,陈文鑫、杨俊秀、阮谢永担任副主编。第1~2章由毕岗编写、第3章由张翠编写、第4,5章由陈文鑫编写、第6~9章由毕岗编写,杨俊秀和金晖和阮谢永参与部分章节编写。全书由浙江大学陈抗生教授审阅,在此表示诚挚的谢意,同时也感谢浙江大学出版社的大力支持。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

作 者

2006年4月

目 录

第 1 章 矢量分析与场论	1
1.1 标量、矢量和场	1
1.1.1 标量的概念	1
1.1.2 矢量的概念	1
1.1.3 场的概念	2
1.2 矢量的基本运算	2
1.2.1 矢量的数乘	2
1.2.2 矢量的加法和减法	2
1.2.3 标量积(点积)	3
1.2.4 矢量积(叉积)	3
1.3 三种常用的正交坐标系	4
1.3.1 直角坐标系	4
1.3.2 圆柱坐标系	5
1.3.3 球坐标系	6
1.3.4 三种正交坐标系中的矢量基本运算	8
1.3.5 三种坐标系之间的关系	9
1.4 标量场的梯度	11
1.4.1 标量场的等值面	11
1.4.2 方向导数	12
1.4.3 梯度	13
1.5 矢量场的散度	15
1.5.1 矢量的通量	15
1.5.2 散度	17
1.6 矢量函数的旋度	18
1.6.1 矢量的环量	18
1.6.2 旋度	19
1.7 格林(Green)定理和亥姆霍兹(Helmholtz)定理	24
1.7.1 格林定理	24
1.7.2 亥姆霍兹定理	24

本章小节	25
习 题	26
第 2 章 静态电场与恒定电场	29
2.1 电场强度	29
2.1.1 库仑定律	29
2.1.2 电场强度和分布电荷之间关系	30
2.2 真空中的静电场基本方程	32
2.2.1 静电场的通量	33
2.2.2 静电场的环量	34
2.2.3 真空中的静电场方程	35
2.3 电位	37
2.3.1 电位的概念	37
2.3.2 电场强度与电位的关系	37
2.3.3 电荷与电位的关系	38
2.4 静电场中的导体与介质	40
2.4.1 静电场中的导体	40
2.4.2 静电场中的电介质	41
2.5 介质中的静态电场基本方程	43
2.5.1 介质中的高斯定理	43
2.5.2 静电场的基本方程	44
2.5.3 电荷在导电媒质中的积累	45
2.6 恒定电流和恒定电场	47
2.6.1 电流及其空间分布	47
2.6.2 欧姆定律和焦耳定量	49
2.6.3 电流连续性方程	50
2.7 边界条件, 惟一性定理与镜像法	51
2.7.1 静电场边界条件	51
2.7.2 惟一性定理	54
2.7.3 镜像法	55
2.8 导体系统的电容与静电场的能量	56
2.8.1 电容	56
2.8.2 静电场的能量	57
2.9 恒定电场与静电场的比较	58
本章小结	59
习 题	61
第 3 章 恒定电流的磁场	64
3.1 感应强度与矢量磁位	64

3.1.1 毕奥—萨伐尔定律与安培力定律	64
3.1.2 洛仑兹力	66
3.2 真空中的静磁场基本方程	67
3.2.1 磁感应强度的散度与磁通连续性原理	67
3.2.2 磁场强度和导磁媒质中的安培环路定律	68
3.2.3 真空中的静磁场基本方程	68
3.3 磁位	69
3.3.1 矢量磁位	69
3.3.2 标量磁位	71
3.4 媒质的磁化和磁场强度	72
3.4.1 媒质的磁化	72
3.4.2 媒质中的恒定磁场基本方程	76
3.5 恒定磁场的边界条件	77
3.5.1 法向分量的关系	77
3.5.2 切向分量的关系	78
3.6 自感、互感以及静磁能量	79
3.6.1 电感、自感和互感	79
3.6.2 互感的计算	80
3.6.3 磁场的能量	81
本章小结	85
习 题	86
第4章 时变电磁场与电磁波	88
4.1 麦克斯韦方程组	88
4.1.1 法拉第电磁感应定律	88
4.1.2 位移电流和全电流定律	91
4.1.3 麦克斯韦方程组	94
4.2 时变电磁场的边界条件	96
4.2.1 不同媒质分解面的边界条件	96
4.2.2 理想介质分界面之间的边界条件	97
4.2.3 理想介质与理想导体分界面的边界条件	97
4.3 坡印廷定理和坡印廷矢量	98
4.3.1 坡印廷定理	98
4.3.2 坡印廷矢量	99
4.4 时谐变电磁场	101
4.4.1 时谐变电磁场的形成过程	101
4.4.2 时谐变电磁场的复矢量表示方式	102
4.4.3 复数形式的麦克斯韦方程组	103
4.4.4 复数形式的坡印廷矢量	104

4.5 平面电磁波	106
4.5.1 波动方程	106
4.5.2 理想媒质中的均匀平面电磁波	107
4.5.3 向任意方向传播的均匀平面电磁波	111
4.5.4 均匀无限大导电媒质中的均匀平面电磁波	114
4.5.5 趋肤效应	116
4.6 电磁波的极化、色散与群速	119
4.6.1 电磁波的极化	119
4.6.2 相速、群速与色散的关系	122
4.7 平面边界上均匀平面波的入射	124
4.7.1 平面电磁波向理想介质的垂直入射	124
4.7.2 平面边界上均匀平面波的斜入射	128
本章小结	133
习 题	135
第5章 均匀传输线理论	139
5.1 均匀传输线理论概述	139
5.1.1 导波形式及传输线的分类	139
5.1.2 双导线型传输线基本要求以及分布参数	140
5.1.3 传输线分析方法	141
5.2 传输线方程及其解	142
5.2.1 均匀双导体传输线的分布参数及其等效电路	142
5.2.2 电报方程及其解	142
5.2.3 无耗传输线的基本特性	145
5.3 均匀无耗传输线的等效	149
5.3.1 行波工作状态	149
5.3.2 纯驻波工作状态	149
5.3.3 行驻波工作状态	153
5.4 圆图及其应用	154
5.4.1 等反射系数圆	155
5.4.2 阻抗圆图	155
5.4.3 导纳圆图	158
5.4.4 圆图应用举例	159
5.5 有耗传输线	161
5.5.1 有耗传输线的特性参数	161
5.5.2 有耗传输线上的电压、电流和阻抗的分布	163
5.5.3 有耗线上传输效率的计算	163
5.6 双导线与同轴线	164
5.6.1 平行双导线	164

5.6.2 同轴线	165
5.6.3 同轴线中不连续性的等效电路	166
5.7 微带传输线	167
5.7.1 微带线中的主模	167
5.7.2 微带线的特性阻抗、相速与波长	168
5.7.3 微带线的色散特性	170
5.8 传输线的匹配	170
5.8.1 三种匹配状态及其匹配方法	170
5.8.2 阻抗匹配网络	171
本章小结	174
习 题	176
第 6 章 波导与谐振腔	179
6.1 导行波系统中的场分析和特性参量	179
6.1.1 导行波系统中的场分析	179
6.1.2 规则波导的传输特性参量	181
6.2 矩形波导	182
6.2.1 矩形波导中的场	182
6.2.2 矩形波导的传输特性	185
6.2.3 矩形波导尺寸的选择	190
6.2.4 脊形波导	191
6.3 圆波导	193
6.3.1 圆波导中的场	193
6.3.2 圆波导的传输特性	194
6.4 波导的激励与耦合	196
6.4.1 电激励	196
6.4.2 磁激励	196
6.4.3 电流激励	196
6.5 谐振腔	197
6.5.1 谐振回路的基本性质	197
6.5.2 微波谐振器的基本参数	199
6.5.3 矩形金属谐振腔	201
6.5.4 微带线谐振器	203
6.6 几种常用的微波元件	204
6.6.1 电抗元件	204
6.6.2 连接匹配元件	206
6.6.3 分支元件	207
6.6.4 定向耦合器	210
6.6.5 环行器	212

本章小结·····	214
习 题·····	216
第 7 章 微波网络基础 ·····	218
7.1 微波网络概述 ·····	218
7.2 等效传输线理论 ·····	220
7.2.1 等效电压和等效电流 ·····	220
7.2.2 归一化参量 ·····	221
7.3 微波网络传输特性及参量分析 ·····	224
7.3.1 单口网络的传输特性 ·····	224
7.3.2 双端口网络的传输特性 ·····	225
7.4 散射矩阵与传输矩阵 ·····	230
7.4.1 散射矩阵 ·····	231
7.4.2 传输矩阵 ·····	232
7.4.3 散射矩阵与其他参量之间的关系 ·····	233
7.4.4 S 参数测量 ·····	235
7.5 微带线的不均匀性以及微带线基本元件 ·····	237
7.5.1 短路和开路微带线的等效电路 ·····	237
7.5.2 串联电感和并联电容的实现 ·····	238
7.5.3 微带线中的不连续性 ·····	239
7.6 多端口网络的散射矩阵 ·····	240
本章小结·····	241
习 题·····	243
第 8 章 天线辐射与接收 ·····	245
8.1 天线概述 ·····	245
8.1.1 天线的定义 ·····	245
8.1.2 天线的功能 ·····	245
8.1.3 天线的分类 ·····	246
8.1.4 天线的研究方法 ·····	246
8.2 电磁辐射的基础理论 ·····	247
8.2.1 电标位 φ 与磁矢位 A 的引入 ·····	247
8.2.2 位函数的方程 ·····	247
8.2.3 位函数的解 ·····	248
8.3 基本振子的辐射 ·····	250
8.3.1 电基本振子 ·····	250
8.3.2 磁基本振子 ·····	252
8.4 天线的电参数 ·····	253
8.4.1 天线效率 ·····	253

8.4.2 天线方向性参数	253
8.4.3 极化特性	257
8.4.4 频带宽度	257
8.4.5 输入阻抗	257
8.4.6 有效长度	257
8.5 天线的接收理论	259
8.5.1 互易性原理	259
8.5.2 天线接收的物理过程及其等效电路	260
8.5.3 有效接收面积	261
8.5.4 弗里斯(Friis)传输公式	261
8.5.5 等效噪声温度	262
8.5.6 接收天线的方向性	262
本章小结	263
习 题	264
第9章 电磁波的应用	265
9.1 电磁波分类及其微波特点	265
9.1.1 电磁波谱	265
9.1.2 微波的分类	266
9.1.3 微波的传输特性	267
9.2 微波无线通信技术中应用	267
9.2.1 射频前端发射机和接收机基本结构	268
9.2.2 滤波器	269
9.2.3 微波放大器	271
9.2.4 混频器	273
9.3 微波通信技术	274
9.3.1 地面微波接力通信	275
9.3.2 卫星通信	276
9.3.3 微波通信的无线信道特性和影响因子	278
9.4 雷达系统	280
9.4.1 雷达的组成	280
9.4.2 雷达的分类	282
9.4.3 雷达的应用	282
本章小结	283
习 题	283
附件 史密斯(Smith)阻抗圆图	284
参考文献	285

第 1 章 矢量分析与场论

在学习和研究电磁现象时,会涉及一些主要的物理量,如电场强度 E 、电位移 D 、磁场强度 H 、磁感应强度 B ,这些物理量都是矢量。这些具有一定的时间和空间分布的物理量,构成了电磁矢量场。因此,矢量的表示、矢量的基本运算、矢量场的分析知识是电磁场理论学习的必备基础知识。

1.1 标量、矢量和场

1.1.1 标量的概念

标量是只有数值没有方向的物理量,如长度(L)、质量(M)、时间(t)、温度(T)、角度(α, β, γ)、频率(ω)、能量(G)等。标量可以是时间和空间坐标的函数。物理中的标量还需带有相应的量纲。

1.1.2 矢量的概念

1. 矢量的定义

矢量是既有大小又有方向的量,如位移(A), 电场强度(E)、电位移(D)、磁场强度(H)、磁感应强度(B)等。表示为

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

其中, A 表示矢量大小,称为矢量的模($|\mathbf{A}|$)或长度; $\hat{A}$ 表示矢量的方向,是大小为 1 的无量纲的单位矢量。

2. 矢量相等

对矢量 $\mathbf{A}$ 与 $\mathbf{B}$,若两者大小相等,即 $|\mathbf{A}| = |\mathbf{B}|$,且方向相同,则称 $\mathbf{A}$ 与 $\mathbf{B}$ 相等,记为 $\mathbf{A} = \mathbf{B}$ 。

3. 矢量的负值

若矢量模的值与 $\mathbf{A}$ 相同,但方向相反,则称其为矢量 $\mathbf{A}$ 的负值,记为 $-\mathbf{A}$ 。

4. 单位矢量

若矢量 $\mathbf{A}$ 的长度为 1,则称其为单位矢量,用 $\hat{A}$ 表示。一般 $\hat{A} = \mathbf{A}/|\mathbf{A}|$ 。

5. 零矢量

若矢量 $\mathbf{A}$ 的大小为零,则称其为零矢量。

1.1.3 场的概念

1. 场的定义

广义而言,场是指某种物理量在空间的分布,这种分布还可能随时间变化,即为时空坐标的函数。根据场所表示的物理量是否具有方向性可分为标量场(如地球表面的温度分布)和矢量场(如江河中水的流速分布,星球周围的引力分布等);根据场所表示的物理量随时间变化的情况,可分为静态场和时变场。若场中各点对应的物理量不随时间变化,则该场称为静态场,否则被称为时变场。有时变化缓慢的时变场可称为准静态场或称似稳场。如在电学中,电场有静电场和时变电场之分,而变化缓慢的电场被称为准静电场。

2. 标量场

如果所研究的量是标量,则物理量的空间分布对应于标量场,即每一时刻、每一位置都对应一个标量值,如温度场、密度场、电位场等。若自变量是坐标 (x, y, z) 和时间 t ,则静态标量场记为 $u = u(x, y, z)$,时变标量场记为 $u = u(x, y, z, t)$ 。

3. 矢量场

如果所研究的量是矢量,则物理量的空间分布对应于矢量场,即每一个时刻、每一个位置都对应一个矢量值,如电场强度、磁场强度、风速,引力场。若自变量是坐标 (x, y, z) 和时间 t ,则静态矢量场记为 $A = A(x, y, z)$;时变矢量场记为 $A = A(x, y, z, t)$ 。

思考题

- (1) 标量场和矢量场有什么区别?
- (2) 矢量场和矢量之间有什么关系?
- (3) 零矢量表示什么物理意义?

1.2 矢量的基本运算

1.2.1 矢量的数乘

1. 定义

数 ξ 乘以矢量 A 称为矢量的数乘,其大小为 ξ 的绝对值与 $|A|$ 之积;当 $\xi > 0$ 时,其方向为 A 的方向,当 $\xi < 0$ 时,其方向为 A 的反方向。

2. 矢量数乘的运算规则

- (1) 交换率:若 ξ 和 ζ 为两个常数,则 $\zeta(\xi A) = \xi(\zeta A)$ 。
- (2) 分配率:若 ξ 和 ζ 为两个常数,则 $(\zeta + \xi)A = \xi A + \zeta A$ 。

若 ξ 为常数,对于矢量 A 和 B 来说, $\xi(A + B) = \xi A + \xi B$ 。

1.2.2 矢量的加法和减法

1. 矢量的加法

矢量的加法定义为 $A + B = C$ 。它满足平行四边形法则,即矢量的加法等于以 A 与 B 为邻边所作的平行四边形(夹于 A 与 B 之间的)对角线,如图1-2-1(a)所示。

2. 矢量的减法

矢量的减法定义为 $A - B = D$ 。矢量 D 为 B 的终端指向 A 的终端,如图 1-2-1(b) 所示。

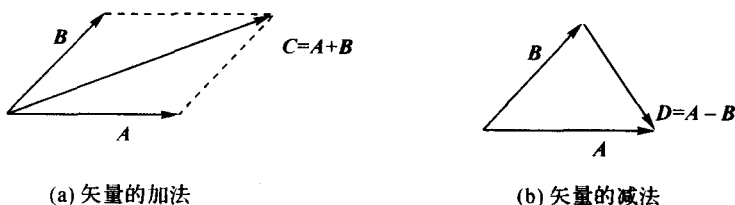


图 1-2-1 矢量的加法与减法

3. 矢量加减的运算规则

$$(1) \text{ 交换律: } A \pm B = B \pm A \quad (1-2-1)$$

$$(2) \text{ 结合律: } A \pm (B \pm D) = (A \pm B) \pm D \quad (1-2-2)$$

1.2.3 标量积(点积)

1. 定义

两个矢量的点积是两个矢量的大小与它们之间夹角 θ 的余弦之积,表示为

$$A \cdot B = |A| \cdot |B| \cos \theta \quad (1-2-3)$$

这里 θ 是 A 和 B 的夹角。两个矢量的点积为一个标量,标量积的物理意义是矢量 A 的模乘以矢量 B 在矢量 A 上的投影。如图 1-2-2(a) 所示。

2. 矢量点积的运算规则

$$(1) \text{ 交换律: } A \cdot B = B \cdot A \quad (1-2-4)$$

$$(2) \text{ 分配率: } A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C \quad (1-2-5)$$

(3) 如果两个非零矢量的点积 $A \cdot B = 0$,则它们的夹角为 90° ,可见两个矢量相互垂直。

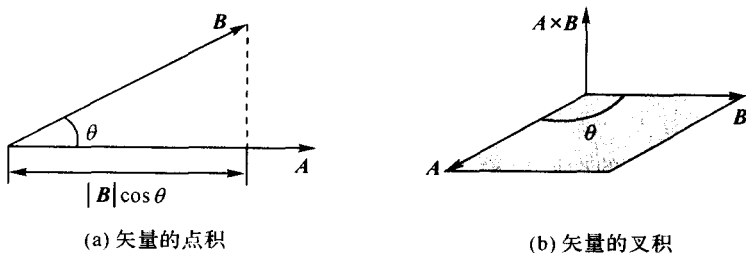


图 1-2-2 矢量的点积和叉积

1.2.4 矢量积(叉积)

1. 定义

两个矢量的叉积是一个矢量,其大小为两个矢量的大小与它们之间的夹角 θ 的正弦之积,它们的方向垂直于包含两个矢量的平面。表示为

$$A \times B = C \quad (1-2-6)$$

矢量积的数值为 $|A \times B| = AB \sin \theta$; 矢量积的方向满足右手定则,如图 1-2-2(b) 所示。

2. 矢量叉积的运算规则

$$(1) A \times B = -B \times A \quad (1-2-7)$$