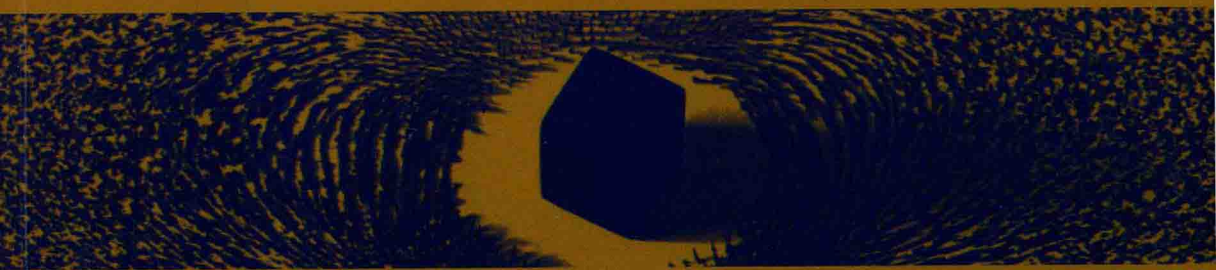




“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电磁场与电磁波

第3版



杨儒贵 编
刘运林 修订

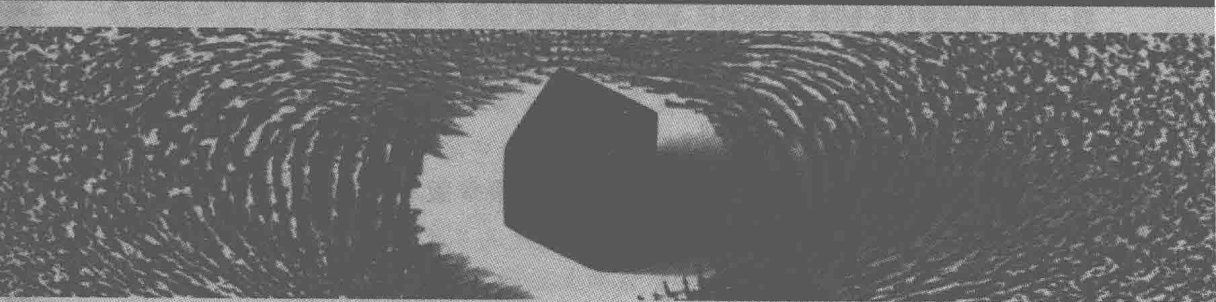
高等教育出版社

高等教育出版社

高等教育本科国家级规划教材

电磁场 与 电磁波

第3版



杨儒贵 编
刘运林 修订

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是为普通高等院校本科电子信息类专业基础课“电磁场与电磁波”编写的教材,主要介绍电磁场与电磁波的基本特性及规律,内容侧重于时变电磁场。本教材从严谨的矢量场数学理论体系出发,将其应用到静电场、恒定电流场、恒定磁场、时变电磁场,同时进行了理论性、系统性的讨论,这是本书与众不同的重要特色。本书被教育部列为普通高等教育“十二五”国家级规划教材。

第3版保留了第2版的体系与特色,对少量内容进行了删减与修改。全书共分十章:矢量分析;静电场;静电场的边值问题;恒定电流场;恒定磁场;电磁感应;时变电磁场;平面电磁波;导行电磁波和电磁辐射及原理等。附录中给出了电磁物理量的符号、单位及量纲;SI制的倍数单位;矢量恒等式;正交曲面坐标系; δ 函数;贝塞尔函数、勒让德函数和电磁波的波段划分及其主要应用等。

第3版增加了教材全部内容的微课录像。课程录像中有四十余个动画,讲解中注重课程整体思路、章节思路、具体细节的有机结合,有助于学生理解抽象的课程内容,形成理论性、系统性思维能力。

本书可供电子信息类专业本科生以及相关专业的研究生和科技人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波 / 杨儒贵编;刘运林修订.--3版

.--北京:高等教育出版社,2019.2

ISBN 978-7-04-051244-1

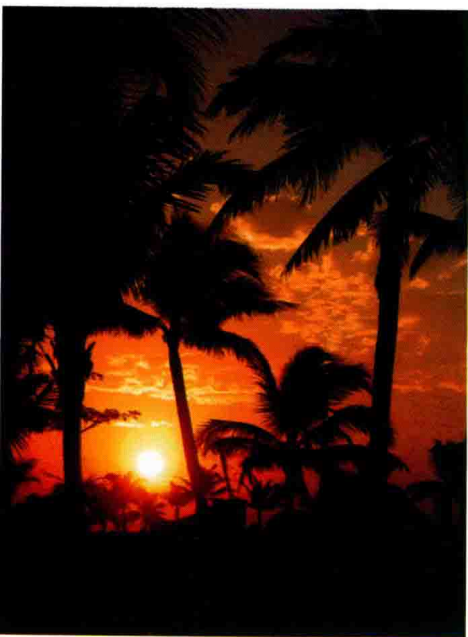
I. ①电… II. ①杨… ②刘… III. ①电磁场-高等学校-教材 ②电磁波-高等学校-教材 IV. ①O441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第011976号

策划编辑 张江漫 责任编辑 张江漫 封面设计 张志奇 版式设计 马敬茹
插图绘制 于博 责任校对 刘莉 责任印制 陈伟光

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	北京明月印务有限责任公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×960mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	25.25	版 次	2003年8月第1版
字 数	460千字		2019年2月第3版
插 页	1	印 次	2019年2月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	47.80元
咨询电话	400-810-0598		

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 51244-00



知识如大海
青春似朝阳
取之无穷尽
勤学不停歇

——作者杨儒贵摄于夏威夷（上图）和三亚（左下图）。

第3版前言

本书是杨儒贵教授编写的《电磁场与电磁波》(第2版)的修订版,第2版教材是“十一五”“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,是“高等教育出版社百门精品教材之一”。

本次修订保持了原教材的教学内容和体系,结合修订者长期使用该教材的教学体会对少量内容进行了修改和删减。对第三章的电位微分方程进行了一定的调整和补充;对第五章的恒定磁场的边界条件的证明进行了完善;对第八章关于“界限频率”的内容进行了删减;对第十章关于惠更斯原理进行了完善补充。

随着科技进步,教学方法与手段也进行了改革与发展。本次修订重要的内容是对教材全部内容建设了微课录像。录像采用录屏的方式,图像效果好,声音清楚,总体效果好。

全书修订完成后,承蒙电子科技大学唐璞教授仔细审阅了全稿,提出许多宝贵意见,修订者表示衷心的感谢。

高等教育出版社的编辑做了大量的策划与审编工作,修订者表示深切的谢意。

书中不妥之处,敬请广大读者提出宝贵意见,来函请发至 yunlinliu@swjtu.edu.cn。

刘运林

2018年9月于西南交通大学

第2版前言

本教材第1版2003年问世以来,受到广大读者的青睐和关怀。为了满足读者的需求,同时考虑到现代科技的发展,作者对原稿进行了修订。承蒙教育部和高等教育出版社的信任和支持,新版被教育部列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,作者深感荣幸。此外,本教材也是西南交通大学2006年度国家精品课程“电磁场与电磁波”的建设成果之一。

该版仍然保留第1版的主要特色与体系,但将部分章节进行了调整和合并,内容更加紧凑、充实和丰富,文笔更加流畅。同时增补了例题和习题,以及电磁场与电磁波的工程应用。作为专业基础课的教材,这些工程应用的内容将会更加体现“电磁场与电磁波”课程在电子信息技术中的重要地位。为了保持基本理论的完整性和连贯性,有关工程应用的内容分别放置在每章之后,课堂讲授时可以穿插到相应的章节。此外,每章附加小结,以便读者明确所述的重点内容。对于一些内容较深的部分章节仍然加注“*”号,以便教师根据自己的需求进行适当简化和取舍。对于书中计算题给出了答案,供读者参考。

本版仍采用SI国际单位制,对于正弦电磁场使用的时间因子仍为 $e^{j\omega t}$ 。各个物理量的名称、定义和符号采用最近颁布的国家标准。

全书完成后,承蒙西安交通大学汪文秉教授仔细审阅了全稿,提出很多宝贵意见,作者表示衷心的感谢。

高等教育出版社的编辑做了大量的策划和审编工作,作者表示深切的谢意。书中不妥之处,敬请广大读者提出宝贵意见。

作者于西南交通大学

2007年春

第1版前言

本书是为普通高等学校电子信息类专业基础课“电磁场与电磁波”编写的本科生教材,主要介绍电磁场与电磁波的基本特性及规律,内容侧重于时变电磁场。随着信息技术的飞速发展,要求从事电子信息技术的有关人员必须通晓和掌握电磁场与电磁波的基本特性、分析方法及其应用。因此,本课程是电子信息类专业本科学生必须具备的知识结构的重要组成部分之一。

我们知道,静止电荷周围存在一种效应,它表现为对带电体有力的作用,这种效应是由于电荷周围存在一种称为**电场**的物质产生的。在运动电荷或电流周围,除电场之外还存在另一种不同的场,它表现为对于磁铁和载流导体有力的作用,这种物质称为**磁场**。由此可见,电场和磁场都是以力的现象表现的。力是矢量,因此,电场和磁场都是矢量场。当电荷的电荷量及其位置均不随时间变化时,它产生的电场也不随时间变化,这种电场称为**静电场**。当运动电荷的电荷量及速度保持恒定时,它形成的电流也是恒定的,这种恒定电流产生的磁场也不随时间变化,这种磁场称为**恒定磁场**。如果电荷及电流均随时间改变,它们产生的电场及磁场也是随时变化的,而且人们发现时变的电场与时变的磁场可以相互转化,但是两者不可分割,它们构成统一的**时变电磁场**。时变电场与时变磁场之间的相互转化作用,在空间形成了电磁波,时变电磁场的能量就是以这种电磁波形式进行传播的。静电场与恒定磁场相互无关、彼此独立,可以分别进行研究。因此,本书先讨论静电场和恒定磁场,然后再介绍时变电磁场。

电磁场与电磁波虽然不能亲眼所见,但它是客观存在的一种物质,因为它具有物质的两种重要属性:能量和质量。众所周知,光是一种电磁波,太阳光的辐射压力和巨大能量充分说明了电磁场与电磁波具有质量及能量。但是,电磁场与电磁波的质量极其微小,因此,通常仅研究电磁场与电磁波的能量特性。

电磁场与电磁波既然是一种物质,它的存在和传播无需依赖于任何媒质。在没有物质存在的真空环境中,电磁场与电磁波的存在和传播会感到更加“自由”。因此对于电磁场与电磁波来说,真空环境通常被称为“自由空间”。当空间存在媒质时,在电磁场的作用下媒质中会发生极化与磁化现象,结果在媒质中又产生二次电场及磁场,从而改变了媒质中原来的场分布,这就是场与媒质的相互作用现象。为了研究方便起见,我们先介绍真空中的电磁场,然后再讨论媒质

中的电磁场。

已知静止电荷产生电场,运动电荷或电流除产生电场外,还产生磁场,可见电荷及电流是产生电磁场的源。应该指出,电荷及电流也是产生电磁场惟一的源。截至目前,人们尚未发现自然界中有磁荷及磁流存在。然而,有时引入磁荷及磁流的概念是十分有益的,但是,它们仅是假想的。研究场与源的关系是电磁理论的基本问题之一。我们将要介绍一系列数学方程描述场与源,以及场与媒质特性之间的关系。

现在,对于电磁现象的基本规律已经有了充分的认识,但是,人们认识这些规律经过了漫长的岁月和艰苦的历程。早在公元前600年希腊人就发现了摩擦后的琥珀能够吸引微小物体;公元前300年我国发现了磁石吸铁的现象;公元初我国制成的世界上第一个指南针是古代中国四大发明之一。后来,人们发现了地球磁场的存在。1785年法国科学家库仑(1736—1806)通过实验创建了著名的**库仑定律**,该定律描述了两个微小带电体之间的作用力与其电荷量及间距的关系。1820年丹麦人奥斯特(1777—1851)发现了电流产生的磁场。同年法国科学家安培(1775—1836)计算了两个电流之间的作用力。1831年英国科学家法拉第(1791—1867)发现电磁感应现象,创建了**电磁感应定律**,说明时变磁场可以产生时变电场。1873年英国科学家麦克斯韦(1831—1879)提出了位移电流的假设,认为时变电场可以产生时变磁场,并以严格的数学方程描述了电磁场应该遵循的统一规律,这就是著名的**麦克斯韦方程**。该方程说明了时变电场可以产生时变磁场,同时又表明时变磁场可以产生时变电场,因此麦克斯韦预言电磁波的存在,后来在1887年被德国物理学家赫兹(1857—1894)的实验所证实。在这个基础上,俄国的波波夫及意大利的马可尼于19世纪末先后发明了用电磁波作为媒体传输信息的技术,为逐步实现当今的无线通信、广播、雷达、遥控遥测、微波遥感、无线因特网、无线局域网、卫星定位以及光纤通信等信息技术奠定了基础。这些新技术的广泛应用又促进了电磁理论的发展。随着大容量的高性能及高速度计算机出现,不但解决了很多电磁理论的计算问题,同时也萌生了计算电磁场与波的新方法,从而形成计算电磁学的新学科,它是现代电磁学的重要分支。

电磁场是矢量场。为了研究电磁场特性,经常应用的基本数学工具是矢量运算及分析。因此,本书第一章综述了矢量分析的主要概念、定理、公式及其应用;第二章介绍静电场;第三章介绍静电场的边值问题;第四章介绍恒定电流场;第五章介绍恒定磁场;第六章介绍电磁感应;第七章介绍时变电磁场;第八章介绍平面电磁波;第九章介绍导行电磁波;第十章介绍电磁辐射及原理。第一章是数学基础,第二、三、四、五章为静态场,第七、八、九、十章为时变场,第六章通过

电磁感应定律建立了电场与磁场的联系,从而导出了时变电磁场。最后在附录中给出了电磁物理量的符号、单位与量纲,SI单位的倍数单位,矢量恒等式,正交曲面坐标系, δ 函数,柱贝塞尔函数,勒让德函数以及电磁波波段的划分及其主要应用等。

由上可知,本书介绍的时变电磁场内容极为丰富。此外,在阐明基本理论的同时,还列举了很多工程应用实例和自然界中的电磁现象。为了培养学生分析与解决问题的能力以及进一步理解所述的基本理论,书中给出了很多例题,并在每章之后附有一定数量的思考题和习题。为了读者阅读醒目起见,书中重要名词、定理、概念和结论等皆以黑体表示。为了便于教学,编纂了题解,制作了电子教案。题解编入教学指导书,电子教案录入光盘。为了读者查阅方便,书末备有重要名词索引。对于内容较多或较深的部分章节加注了“*”号,使用者可以根据具体情况进行适当简化和取舍。

本书采用国际单位制(SI)。在电磁学中,这种单位制的四个基本单位是:长度单位为 m(米),质量单位为 kg(千克),时间单位为 s(秒),电流单位为 A(安)。对于正弦电磁场使用的时间因子为 $e^{j\omega t}$ 。

关于“电磁场与电磁波”课程的本科生教材国内外版本很多。从内容安排和体系上来看,大致分为两种类型。一种可称为**归纳法**。它由库仑定律、毕奥-萨伐定律及法拉第电磁感应定律出发,逐一介绍静电场、恒定磁场和时变电磁场,其推理方向是由特殊到一般。这种传统体系起点较低,比较容易接受。但与物理学中电学部分重复太多,学生甚感厌烦。同时,从这些基本定律出发,逐一推演静态场的特性必然费时很多,导致时变场内容受到压缩。另一种可称为**演绎法**。它从麦克斯韦方程出发,先论述时变电磁场,然后把静态场归结为时变场的一种特殊情况加以演绎,最后再介绍静态场,其推理方向是由一般到特殊。这种体系虽然压缩了静态场,充实了时变场内容,但起点过高,学生不易接受。我国电磁理论学术前辈,教育部工科电磁场理论教材编审组成员、西安交通大学教授黄席椿先生于1985年提出,应从论述矢量场散度和旋度特性的亥姆霍兹定理出发,将电磁场的散度和旋度作为电磁场的首要问题,逐一论述电磁场。这种新颖体系既避免了归纳法与物理学重复,又没有演绎法起点过高的缺陷。而且对于电磁场的特性分析以及场与源之间的内在联系,给予十分严格的阐述。由于静态场的论述非常简洁严谨,节省的篇幅让给了时变场。遵循黄席椿教授的创新思路,作者在西安交通大学任教时与该校汪文秉教授、章锡元教授共同编写了《电磁场与波》讲义。经本人两次试用后,统编形成了正式教材。又经数次使用和修订,最后由西安交通大学出版社1989出版。

本书是根据1989年版本重新编写的,因此基本特色与前相同。但是鉴于当

前本科生专业面拓宽,各门课程学时减少的情况,将传输线、等效源原理及几何光学原理等删除,同时增加了电磁场与波在当前信息技术领域中新的应用。

在本书编写过程中,西南交通大学电磁所刘运林副教授及王敏锡副教授协助编制了题解和电子教案。同时,研究生官正涛、陈凯亚、张双文共同演算了书中全部习题。全书完稿后,西安交通大学汪文秉教授仔细审阅了全稿,并提出很多宝贵建议,进一步提高了本教材的素质。作者在此一并表示衷心的感谢。

承蒙高等教育出版社的编辑作了大量的审编工作,作者表示深切的谢意。

由于作者水平有限,书中定有不妥之处,敬请广大读者提出宝贵意见。

作者于西南交通大学

2002年5月1日

目 录

第一章 矢量分析	1
1-1 标量与矢量	1
1-2 矢量的代数运算	2
1-3 矢量的标积和矢积	3
1-4 标量场的方向导数与梯度	5
1-5 矢量场的通量、散度与散度定理	8
1-6 矢量场的环量、旋度与旋度定理	13
1-7 无散场与无旋场	17
1-8 格林定理	19
* 1-9 矢量场的惟一性定理	20
* 1-10 亥姆霍兹定理	22
* 1-11 正交曲面坐标系	25
本章小结	31
思考题	33
习题	34
第二章 静电场	37
2-1 电场强度	37
2-2 真空中的静电场	38
2-3 电位	47
2-4 介质的极化	49
2-5 介质中的静电场	53
2-6 静电场的边界条件	56
2-7 电容	61
2-8 电场能量	63
2-9 电场力	67
2-10 静电场的应用	71
本章小结	72
思考题	74

习题	75
第三章 静电场的边值问题	79
* 3-1 电位微分方程及其定解问题	79
* 3-2 电位微分方程解的惟一性	82
3-3 镜像法	84
3-4 直角坐标系中的分离变量法	91
* 3-5 圆柱坐标系中的分离变量法	95
* 3-6 球坐标系中的分离变量法	98
本章小结	103
思考题	103
习题	104
第四章 恒定电流场	108
4-1 电流	108
4-2 电动势	111
4-3 恒定电流场	113
4-4 恒定电流场的边界条件	115
4-5 导电介质的损耗	115
* 4-6 恒定电流场与静电场的比拟	118
4-7 恒定电流场的应用	121
本章小结	123
思考题	123
习题	124
第五章 恒定磁场	126
5-1 磁通密度	126
5-2 真空中的恒定磁场	128
5-3 磁位	133
5-4 介质的磁化	135
5-5 介质中的恒定磁场	138
5-6 恒定磁场的边界条件	141
本章小结	145
思考题	146
习题	147
第六章 电磁感应	150
6-1 电磁感应定律	150

6-2 电感	152
6-3 磁场的能量	157
6-4 磁场力	161
6-5 恒定磁场的应用	165
本章小结	168
思考题	169
习题	169
第七章 时变电磁场	172
7-1 位移电流	172
7-2 麦克斯韦方程	174
7-3 时变电磁场边界条件	176
7-4 标量位与矢量位	179
7-5 位函数方程求解	182
7-6 能量密度与能流密度矢量	185
7-7 时变电磁场惟一性定理	187
7-8 时谐电磁场	188
7-9 麦克斯韦方程的复矢量形式	189
7-10 位函数的复矢量形式	191
7-11 复能流密度矢量	192
7-12 时变电磁场的应用	196
本章小结	197
思考题	200
习题	201
第八章 平面电磁波	204
8-1 波动方程	204
8-2 理想介质中的平面波	205
8-3 导电介质中的平面波	211
8-4 平面波的极化特性	216
8-5 平面波对平面边界的正投射	220
8-6 平面波对多层边界的正投射	225
8-7 任意方向传播的平面波	229
8-8 平面波对理想介质边界的斜投射	232
8-9 无反射与全反射	235
* 8-10 平面波对导电介质表面的斜投射	240

8-11	平面波对理想导电表面的斜投射	242
*8-12	等离子体中的平面波	245
*8-13	铁氧体中的平面波	249
8-14	电磁波的应用	251
	本章小结	257
	思考题	261
	习题	261
第九章	导行电磁波	265
9-1	TEM波、TE波及TM波	266
9-2	矩形波导的传输特性	269
9-3	矩形波导中的 TE_{10} 波	276
*9-4	电磁波的群速	281
*9-5	圆波导的传输特性	284
9-6	波导传输功率和传输损耗	290
9-7	谐振腔	293
9-8	同轴线	298
9-9	导行波的应用	299
	本章小结	300
	思考题	302
	习题	303
第十章	电磁辐射及原理	305
10-1	电流元辐射	305
10-2	天线的方向性	310
10-3	对称天线辐射	313
10-4	天线阵辐射	316
10-5	电流环辐射	320
10-6	对偶原理	323
10-7	镜像原理	325
10-8	互易原理	329
*10-9	惠更斯原理	332
10-10	面天线辐射	335
10-11	电磁辐射的应用	341
	本章小结	346
	思考题	348

习题	348
附录	351
一、符号、单位及量纲	351
二、SI 单位的倍数单位	353
三、矢量恒等式	353
四、正交曲面坐标系	354
五、 δ 函数	356
六、贝塞尔函数	357
七、勒让德函数	360
八、电磁波的波段划分及其主要应用	362
计算题答案	364
索引	379
参考文献	386

第一章 矢量分析

在前言中已经指出,电磁场是矢量场,因此,矢量分析是研究电磁场特性的基本数学工具之一。本章将系统地介绍有关矢量分析的主要内容。我们先在直角坐标系中讨论矢量的定义、代数运算以及微分和积分运算,然后根据圆柱坐标系及球坐标系与直角坐标系的变量之间的关系,推导出圆柱坐标系及球坐标系中的矢量表示及其运算规则。本章还要介绍矢量分析中的几个重要定理,即散度定理、旋度定理、格林定理、惟一性定理及亥姆霍兹定理。最后给出正交曲面坐标系中矢量各种运算的一般表示式。

1-1 标量与矢量

仅具有大小特征的量称为标量。例如长度、面积、体积、温度、气压、密度、能量及电位等物理量都是标量。不仅具有大小而且具有方向特征的量称为矢量。例如:力、位移、速度、加速度、电场强度及磁场强度等物理量都是矢量。本书以黑斜体表示矢量。标量的空间分布构成标量场,矢量的空间分布构成矢量场。

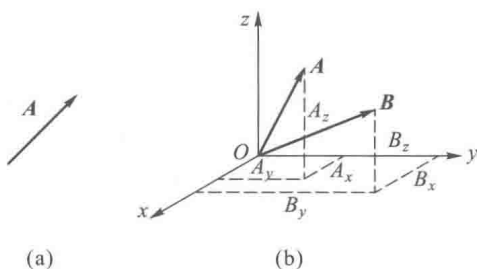


图 1-1-1 矢量的表示

矢量 A 的几何表示是一条有向线段,如图 1-1-1(a)所示,线段的长度表示矢量 A 的大小,其指向表示矢量 A 的方向。在直角坐标系中,若把代表矢量 A 和 B 的有向线段的始端放在坐标系的原点,如图 1-1-1(b)所示,不同的矢量,其终端坐标不同。矢量 A 的终端坐标为 (A_x, A_y, A_z) ; 矢量 B 的终端坐标为 $(B_x,$

B_y, B_z);通常, A_x, A_y, A_z 称为矢量 A 的三个相应的坐标分量; B_x, B_y, B_z 称为矢量 B 的三个相应的坐标分量,由此可见,在三维空间中,一个矢量可用其三个坐标分量来表示。反之,三个标量可用一个矢量来代替,这正是矢量运算比标量运算简洁的原因。当然,表示一个矢量的三个标量并不是任意的,它们必须是矢量的三个坐标分量。用三个坐标分量表示一个矢量称为三维空间矢量的代数表示。可以推知,在二维空间中,一个矢量仅需要两个坐标分量来表示,而在一维空间中,一个矢量仅需要一个坐标分量来表示。

通常,矢量场中矢量的大小及方向均随空间坐标而变化,若矢量的大小及方向均与空间坐标无关,这种矢量称为常矢量或简称为常矢。否则,称为变矢量或简称为变矢。

1-2 矢量的代数运算

当矢量 A 与矢量 B 的大小及方向均相同时,则认为 $A=B$ 。因此在同一坐标系中,只有当两个矢量的各个相应坐标分量均相同时,才可认为两个矢量相等。

矢量可以进行加法运算,且加法运算符合结合律和交换律,即

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

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

两个矢量相减可以归结为相加运算,例如

$$\mathbf{A}-\mathbf{B}=\mathbf{A}+(-\mathbf{B}) \quad (1-2-3)$$

式中 $(-\mathbf{B})$ 表示与矢量 B 大小相等方向相反的矢量。矢量运算的几何表示如图 1-2-1 所示。在同一个坐标系中,两个矢量的加减运算就是对应坐标分量的相加和相减。例如在直角坐标系中,若矢量 A 的坐标分量为 (A_x, A_y, A_z) , 矢量 B 的坐标分量为 (B_x, B_y, B_z) , 则 $A+B=C$ 的合成矢量的坐标分量为 $(A_x+B_x, A_y+B_y, A_z+B_z)$ 。

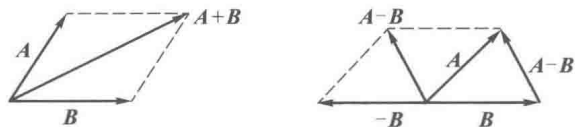


图 1-2-1 矢量加减

矢量与标量之间可以进行乘法运算,当矢量 A 与正标量 η 相乘时,其乘积仍然是一个矢量,但各个坐标分量乘以 η 倍,即乘积 (ηA) 的坐标分量为 $(\eta A_x, \eta A_y,$