

21 世纪数学教育信息化精品教材

· 总主编 吴赣昌 ·

大学数学立体化教材

高等数学_{下册}

(理工类 · 第三版)

主编 广东工业大学应用数学学院

 中国人民大学出版社

21 世纪数学教育信息化精品教材

· 总主编 吴赣昌 ·

大学数学立体化教材

高等数学

下册

(理工类 · 第三版)

主编 广东工业大学应用数学学院

中国人民大学出版社

· 北京 ·

内容简介

本书根据高等院校理工类本科专业高等数学课程的教学大纲及考研大纲编写而成，并在第二版的基础上进行了修订和完善。本次修订对教材的深度和广度进行了适度的调整，并精选了大量有实际背景的例题和习题，以培养学生的数学素质、创新意识及运用数学工具解决实际问题的能力。内容包括多元微分学、多元积分学、无穷级数等知识。书中融入了数学历史、数学文化的教育。书后配有内容丰富、功能强大的《高等数学多媒体学习系统》（光盘），其内容覆盖了课堂教学、习题解答、数学实验、综合训练等模块。在教学过程中，把光盘与本书配合使用，形成了教与学的有机结合。

本书可作为高等院校理工类本科专业的数学教材。与书配套建设的《高等数学多媒体教学系统》（光盘）将随教材配送给教师。

前 言

大学数学是自然科学的基本语言，是应用模式探索现实世界物质运动机理的主要手段。对于非数学专业的大学生而言，大学数学的教育，其意义不仅仅是学习一种专业的工具而已。中外大量的教育实践事实充分显示了：优秀的数学教育，是一种人的理性的思维品格和思辨能力的培育，是聪明智慧的启迪，是潜在的能动性与创造力的开发，其价值是远非一般的专业技术教育所能相提并论的。

随着我国高等教育自 1999 年开始迅速扩大招生规模，至 2008 年的短短九年间，我国高等教育实现了从精英教育到大众化教育的过渡，走完了其它国家需要三五十甚至更长时间才能走完的路程。教育规模的迅速扩张，给我国的高等教育带来了一系列的变化、问题与挑战，如大众化教育阶段入学群体的多样化问题、学生规模扩张带来的大班和多班教学问题、由于院校合并导致的“一校多区”及由此产生的教学管理不科学以及师生间缺乏交流等问题，这些都是在过去精英教育阶段没有遇到的。

进入大众化教育阶段，大学数学的教育问题首当其冲受到影响。过去大学数学教育是面向少数精英的教育，由于学科的特点，数学教育呈现几十年、甚至上百年的—贯制，仍处于经典状态。当前大学数学课程的教学效果不尽如人意，概括起来主要表现在以下两方面：一是教材建设仍然停留在传统模式上，未能适应新的社会需求，传统的大学数学教材过分追求逻辑的严密性和理论体系的完整性，重理论而轻实践，剥离了概念、原理和范例的几何背景与现实意义，导致教学内容过于抽象，也不利于与其它课程及学生自身专业的衔接，进而造成了学生“学不会，用不了”的尴尬局面；二是在计算机技术迅猛发展的今天，信息化技术本应给数学教育提供空前广阔的天地，但遗憾的是，在数学教育领域，信息化技术的使用远没有在其它领域活跃。正如我国著名数学家张景中院士所指出的，计算机进入数学教育在国内还只是刚刚起步，究其原因主要有两方面：一是没有充分考虑把信息化技术和数学教学的学科特点结合起来；二是在强调教育技术的同时没有充分发挥教师的作用，这样就难以把信息化技术和数学教学完美地结合起来。

关于大学数学教育改革的出路问题，在此，我们引用教育部数学基础课程教学

指导分委员会前主任、清华大学数学系冯克勤教授专门撰文所指出的一句话：“数学教育的关键是彻底转变观念。”当前大学数学教学所面临的问题，实际上已经指出了大学数学教育改革的目標：一是深化教学内容和教材体系的改革；二是积极推进大学数学教育信息化建设。为此，自2000年初起，在本系列教材总主编吴赣昌教授的策划与组织下，我们成立了一个由专家学者、专任教师、专职软件与网络设计人员组成的研发团队，围绕上述改革目标坚持不懈地进行攻关，2002年推出了第一个“高等数学多媒体教学系统”，2005年由中国人民大学出版社出版了面向理工类与经管类专业使用的“大学数学立体化教材”（完整版与简明版各6种）及其配套的多媒体教学系统。上述教材于2007年修订并出版了第二版，同时推出的还有“高职高专数学立体化教材”（5种）和“大学文科数学立体化教材”（1种），并初步完成了与上述18种教材配套的多媒体教学系统、大学数学试题库系统和大学数学精品课程网站等信息化建设工作。

令我们感到欣慰的是，上述成果已被国内高等院校广泛采用并对当前大学数学的教育改革起到了积极的推动作用。三年来，我们得到了国内高校许多同行专家的鼓励和支持，其中部分同行专家不仅反馈了上述建设中存在的问题，而且主动给出了有针对性的建议，将这些建议和我们最新研究建设的成果及时融入上述教材建设及其配套信息化建设是此次修订、升级与扩版的动因。为更加突出教材的特色和内涵，我们特将此次经由中国人民大学出版社出版的上述系列教材统一冠名为“21世纪数学教育信息化精品教材”。本次修订与升级有两方面重点：一是对原有教材内容做了重大的修订，并根据教学需要扩展了专业适用类别与读者适用类别；二是与教材配套的各项信息化建设得到了重大提升。

在教材内容修订方面，我们努力做到紧密联系实际，服务专业课程，力图同步融入数学建模的思想和方法。在本次教材的升级改版中，我们特别精选了只涉及较为初等的数学知识、能体现数学建模精神、能吸引学生并且以后又可能接触到的应用范例和数学建模问题，如函数模型的建立及其应用，作为变化率的导数在几何学、物理学、经济学和医药学中的应用，对抛射体运动的数学建模及其应用，最优化方法及其在工程、经济、农业、医药领域中的应用，逻辑斯蒂模型及其在人口预测、新产品的推广模型与经济增长预测方面的应用，网络流模型及其应用，人口迁移模型及其应用，常用概率模型及其应用，等等，并为所有应用范例配备了相应的应用习题。这些实际应用范例既为学生理解数学的抽象概念提供了认识基础，也有助于加强与后续专业课程的联系，使学生学有所用。

此外，还对部分教学内容和章节引言做了改进，如数列极限的概念，先从其描述性定义来引入，然后从定量分析的角度进一步给出数列极限的严格定义，这样的安排既符合数学发展的本源，又利于学生更好地理解极限的概念。又如“线性

化”观点是用数学解决实际问题的一种重要的思想方法，改版后的教材中很好地引入并发展了这种观点，既利于学生更加直观地理解相应的数学概念，又利于培养学生的数学建模能力。此外，还改写或重新撰写了许多章节的引言，如数学建模——函数关系建立、函数连续性、数学建模——最优化、矩阵、线性方程组等章节的引言，这些引言对于学生理解即将学习的数学内容的实质能起到重要的作用。关于习题调整方面，除前面提到的补充了不少应用习题外，还在难度梯度上对习题进行了调整，尤其是增补了部分计算比较简单又利于加强概念理解的习题，并重新校订了全部习题及其答案。值得一提的还有，在《高等数学》与《微积分》中插入了历史上对数学（尤其是近代数学）有杰出贡献的八位伟大数学家的简介，从他们的身上既能管窥近代数学发展的基本过程，又能领略数学家坚韧不拔地追求真理的人格魅力和科学精神。

在与教材配套的信息化建设方面，针对我国高等教育快速进入大众化教育阶段后大学数学教育所面临的种种问题，我们将计算机信息技术与数学的教学内容、教师的课堂教学、学生的课后学习和数学的学科特点进行了有机的整合，形成了全新的大学数学教育理念，构筑了全新的大学数学教育模式，将大学数学教育的信息化建设延伸和拓展到教、学、考各个环节中，为大学数学的教与学双方建立了课堂教学信息化系统、课后学习辅导信息化平台、师生互动信息化平台以及试题库系统等，取得了以下重要的教学成果。

1. 在课堂教学信息化系统建设方面，我们利用 Flash 等多媒体开发工具软件开发建设了“大学数学多媒体教学系统”，该系列“教学系统”是大型的集成性、交互式和信息资源立体化的教学软件，内容模块上包括了多媒体教案、备课系统、习题解答、综合训练、实验教学与实验案例库等；系统功能上包括了长期开发积累的满足专业教学需求的多媒体教学动画演示功能、供教师在教学过程中进行手写板书的手写笔功能、供教师在教学过程中进行知识点交互和数学家介绍的系统导航功能、供教师备课和个性化的编辑修改功能、教学画面缩放功能、文件扩展链接功能等。此外，系统设计可使教师利用遥控鼠标在教室内进行移动教学。采用该系列“教学系统”进行课堂教学，既可以充分发挥信息化教学的优势，也能够很好地融入教师板书教学的个性化特色，若配合教师的教学演讲，可以充分展示现代教学方式的优势，突破此前以粉笔加黑板或 PPT 演示为主的传统教学模式。

2. 在课后学习辅导信息化平台和师生互动信息化平台的建设方面，开发建设了“大学数学精品课程网站”，该网站包含数学教育资讯、课程建设和师生互动三大模块，它们分别承载着搭建学生的课后学习辅导平台、课程建设平台与师生互动交流平台三项任务，而为完成这三项建设任务，我们的团队突出地解决了下面两点：

(1) 基于长期的研发积累, 开发建设了无需安装插件即可直接在 IE 浏览器上使用的基于 Web 的可视化数学公式编辑器, 它除实现了 Mathtype 等文档编辑器的全部功能外, 还支持最常用的上下标快捷键输入, 突破了长期制约数学教育领域开展网络教学和在线答疑与交流的技术瓶颈。

(2) 从专业建设的角度, 开发了满足数学教育需求的语音视频互动的在线答疑平台。该平台采用 P2P 技术开发, 对服务器硬件的依附性低, 在不增加各院校服务器建设的负担下, 能同时支持万人以上在线互动。尤为突出的是该平台同时支持文字编辑、数学公式编辑和语音视频交流互动, 能充分满足各院校进行网络在线答疑和在线交流的需要。

融入了上述基于 Web 的数学公式编辑器和在线交流平台成为该系列“课程网站”的独特亮点。同时由于有作者团队专业专职的服务, 该系列“课程网站”在内容建设的专业性、资讯更新的时效性、功能设计的实用性以及构建技术的先进性等方面居于国内同类精品课程网站建设的领先地位。

3. 在试题库系统建设方面, 本成果开发建设的“大学数学试题库系统”包含高等数学、线性代数、概率论与数理统计三大模块, 试题总量 25 000 余道, 可满足理工、经管、农林、医药等各类普通本科院校和高职高专院校试题组卷的要求。该系统具有试题类型丰富、组卷功能强大以及成卷快速等特点, 在试题的查询预览、成卷后试卷的人工调整以及试卷和试题的编辑修改方面, 提供了强大的二次开发功能。

4. 在教学资源共享与服务方面, 以作者为核心的“数苑团队”倾力建设了面向全国广大师生的数学教育门户网站——“数苑网”(www.math168.com), 该网站建设了动态信息、视频频道、名家论谈、莘莘学子、就业留学等教育资讯栏目, 数学建模、数学应用、数学考研、数学史话、数学欣赏、数学名著等数学资讯栏目, 数学实验、习题辅导、复习提高、题型分析、综合练习、考研真题等原创学习辅导栏目, 教材建设、教学文件、教辅建设、教学系统、题库系统、在线测试、作业系统、考试中心、交流平台、公式编辑等原创教学资源栏目。此外, 以实名制注册的面向全国同行的“教师空间”将为广大教师提供教学资源下载、教学研究交流、网上在线讨论以及博客论坛等服务, 而正在建设中的面向学生的在线学习系统、训练系统、测试系统以及答疑系统将为广大学生提供更进一步的服务。

由作者主持的“大学数学教育信息化研究与建设”教学成果于 2008 年 9 月 29 日在广东商学院举行了专题鉴定会, 由国内权威专家组成的鉴定专家组一致认为: 本成果自 2000 年 3 月起进行了连续九年多的研究、开发、建设与实践, 其研发历程恰恰与我国高等教育的规模扩张期同步, 其成果在历年的研究、建设与实践反复锤炼、不断提升, 包括“大学数学多媒体教学系统”、“大学数学试题库系统”、

“大学数学精品课程网站”的建设均居于国内领先地位,该成果针对大学数学公共基础课程的各项建设,具有广阔的应用前景,对相关课程的建设能起到很好的辐射作用。

致学生

在你进入高校即将学习的所有大学课程中,就巩固你的学习基础、提升你的学习能力、培养你的科学素质和创新能力而言,大学数学是最有用且最值得你努力的课程。事实上,像《微积分》、《线性代数》、《概率论与数理统计》这些大学数学基础课程,无论怎样评价其重要性都不为过,而学好这些大学数学基础课程,你将受益终生。

主动把握好从“学数学”到“做数学”的转变,这一点在大学数学的学习中尤为重要,不要以为你在课堂教学过程中听懂了就等于学到了,事实上,你需要在课后花更多的时间主动去做相关训练才能真正掌握所学知识。

在大学数学的学习过程中,概念和计算同等重要。只有反复、认真地阅读教材,你才能真正掌握大学数学的基本概念。每个章节的习题中都安排了简单的计算题,目的是帮助你检查对基本算法的理解,在做习题时,你应先尝试独立完成习题,尽量不看答案,便于发现哪些知识自己还没有真正理解。在今后的工作中,你当然可以使用计算机来完成这些计算,但你必须学会选择算法,理解计算结果的意义并且向他人解释清楚。

从某种意义上说,大学数学就是一门语言——科学的语言。你必须像对待外语一样,每天都学习它。为了真正理解教材中某一部分的内容,你往往需要完全掌握前面章节的内容和习题。跟上课程的进度可以节省很多时间并且避免很多麻烦。

为了帮助你学好大学数学课程,本系列教材均附有配套的“多媒体学习系统”,该学习系统是一套大型的集成性、交互式 and 教学资源多元化的学习软件,其中设计了多媒体教案、习题详解、综合训练、实验教学等功能模块。在多媒体教案模块中,我们按动态仿真教学方式设计了大量的教学动画,直击数学思想本质,便于你突破学习中的重点和难点,同时可以大大减少课堂教学中的笔记工作量;在习题详解模块中,我们以多媒体动画的形式给出了习题的求解过程和相关方法,便于你课后学习;在综合训练模块中,我们总结了每章的教学知识点,并在每章末通过精选的总习题进一步揭示解题的一般规律和技巧,便于你综合提高。在系统的教学与集成方面,我们利用多媒体开发软件的网页特性,为系统中的每个文件提供了丰富的知识点交互与导航,便于你高效率地学习。

为了帮助你进行数学实验,我们以交互和集成的方式,设计了“数学实验教学演示系统”,并提供了比教材包含更多实际案例的实验案例库。数学实验的学习应

从案例入手来理解数学的概念和算法本身，在大学数学的学习过程中，你完全没有必要将过多的精力花在全面细致地学习某种数学软件的程序语言中。此外，任何技术手段都有其局限性，它们永远都是辅助手段，绝不能替代人类聪明的思考、计算、推理和证明。

经常登录作者团队倾力为你建设的“数苑网”(www.math168.com)，你将会获得意想不到的收获。在那里，你能进一步拓展自己的学习空间，寻找到更多教材之外的学习资源，并与全国的良师益友建立联系。

致教师

我们开发的“21 世纪数学教育信息化精品教材”是名副其实的包含配套信息化建设的教材，如果您和您的学生正在使用或准备使用本系列教材，请登录作者团队建设的数学教育门户网站——“数苑网”(www.math168.com)下载与教材配套的教学资源，如教学软件和相关教学建设文件等。如果您所在的院校采用本系列教材达到一定量，请主动和我们联系，以获得与本系列教材配套的信息化建设，如安装“大学数学试题库系统”和“大学数学精品课程网站”等。

此外，还要提醒您的是，请尽早加入我们在“数苑网”上以实名制注册的面向全国同行提供的“教师空间”，该空间将为广大教师提供教学资源下载、教学研究交流、网上在线讨论以及博客论坛等服务。

结束语

正如美国《托马斯微积分》的作者 G. B. 托马斯 (G. B. Thomas) 教授精辟指出的，“一套教材不能构成一门课；教师和学生在一起才能构成一门课”，教材只是支持这门课程的信息资源。教材是死的，课程是活的。课程是教师和学生共同组成的一个相互作用的整体，只有真正做到以学生为中心，处处为学生着想，并充分发挥教师的核心指导作用，才能使之成为富有成效的课程。而本系列教材及其配套的信息化建设将为教学双方提供支持其课程的充分的信息资源，帮助教师在教学过程中发挥其才华，并利于学生富有成效地学习。

与传统的教材不同的是，有一支实力雄厚、专业专职的作者团队——数苑团队在为本系列教材的使用者提供长期的、日常的教学服务与技术支持。如果在使用本系列教材及其配套的信息化建设过程中遇到任何问题，你可以通过下面的邮箱随时与我们联系：math168@vip.188.com。

编者

2009 年 3 月 18 日

目 录

第8章 空间解析几何与向量代数

§8.1 向量及其线性运算	1
§8.2 空间直角坐标系 向量的坐标	6
§8.3 数量积 向量积 *混合积	13
§8.4 曲面及其方程	20
§8.5 空间曲线及其方程	24
§8.6 平面及其方程	29
§8.7 空间直线及其方程	35
§8.8 二次曲面	40
总习题八	48
数学家简介 [6]	49

第9章 多元函数微分学

§9.1 多元函数的基本概念	52
§9.2 偏导数	58
§9.3 全微分及其应用	63
§9.4 复合函数微分法	69
§9.5 隐函数微分法	75
§9.6 微分法在几何上的应用	82
§9.7 方向导数与梯度	89
§9.8 多元函数的极值	97
总习题九	108
数学家简介 [7]	110

第10章 重积分

§10.1 二重积分的概念与性质	112
§10.2 二重积分的计算 (一)	117
§10.3 二重积分的计算 (二)	127
§10.4 三重积分 (一)	136
§10.5 三重积分 (二)	143
总习题十	151

第11章 曲线积分与曲面积分

§11.1 第一类曲线积分	154
§11.2 第二类曲线积分	159
§11.3 格林公式及其应用	165

§11.4 第一类曲面积分	176
§11.5 第二类曲面积分	181
§11.6 高斯公式 通量与散度	187
§11.7 斯托克斯公式 环流量与旋度	194
§11.8 点函数积分的概念	201
总习题十一	204
数学家简介[8]	207
第12章 无穷级数	
§12.1 常数项级数的概念和性质	210
§12.2 正项级数的判别法	217
§12.3 一般常数项级数	226
§12.4 幂级数	235
§12.5 函数展开成幂级数	244
§12.6 幂级数的应用	253
§12.7 函数项级数的一致收敛性	258
§12.8 傅里叶级数	265
§12.9 一般周期函数的傅里叶级数	275
总习题十二	280
附录 I 大学数学实验指导	
项目三 空间图形的画法与多元函数微积分	283
实验1 空间图形的画法(基础实验)	283
实验2 多元函数微分学(基础实验)	288
实验3 多元函数积分学(基础实验)	293
实验4 最小二乘拟合(基础实验)	298
实验5 水箱的流量问题(综合实验)	302
实验6 线性规划问题(综合实验)	306
项目四 无穷级数	309
实验 无穷级数(基础实验)	309
附录 II 常用曲面	316
习题答案	
第8章 答案	320
第9章 答案	323
第10章 答案	328
第11章 答案	330
第12章 答案	332

第8章 空间解析几何与向量代数

空间解析几何的产生是数学史上一个划时代的成就. 17 世纪上半叶, 法国数学家笛卡尔和费马对此做出了开创性的工作. 我们知道, 代数学的优越性在于推理方法的程序化, 鉴于这种优越性, 人们产生了用代数方法研究几何问题的思想, 这就是**解析几何的基本思想**. 要用代数方法研究几何问题, 就必须弄清代数与几何的联系, 而代数和几何中最基本的概念分别是数和点. 于是, 首先要找到一种特定的数学结构来建立数与点的联系, 这种结构就是坐标系. 通过坐标系, 建立起数与点的一一对应关系, 就可以把数学研究的两个基本对象——数和形结合起来、统一起来, 使得人们既可以用代数方法来解决几何问题 (这是解析几何的基本内容), 也可以用几何方法来解决代数问题.

本章中我们先介绍向量的概念及向量的某些运算, 然后再介绍空间解析几何, 其主要内容包括平面和直线方程、一些常用的空间曲线和曲面的方程以及关于它们的某些基本问题. 这些方程的建立和问题的解决是以向量作为工具的. 正像平面解析几何的知识对于学习一元函数微积分是不可缺少的一样, 本章的内容对以后学习多元函数的微分学和积分学将起到重要作用.

§8.1 向量及其线性运算

一、向量的概念

人们在日常生活和生产实践中常遇到两类量: 一类如温度、距离、体积、质量等, 这种只有大小没有方向的量称为**数量 (标量)**; 另一类如力、位移、速度、电场强度等, 它们不仅有大小而且还有方向, 这种既有大小又有方向的量称为**向量 (矢量)**.

如何来表示向量呢? 在几何上, 可用空间中的一个带有方向的线段, 即有向线段来表示, 在选定长度单位后, 这个有向线段的长度表示向量的大小, 它的方向表示向量的方向. 如图 8-1-1 所示, 以 A 为起点、 B 为终点的向量记作 $\overrightarrow{AB}$. 为简便起见, 常用一个粗体字母来表示向量, 如 $\overrightarrow{AB}$ 可记作 $\mathbf{a}$ (也记作 $\vec{a}$).

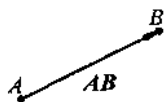


图 8-1-1

向量的大小称为向量的模, 记作 $|\overrightarrow{AB}|$ 或 $|\mathbf{a}|$. 模等于 1 的向量称为**单位向量**. 模

等于0的向量称为**零向量**, 记作 0 . 零向量的方向不确定, 或者说它的方向是任意的.

两个向量 a 与 b , 如果它们的方向相同且模相等, 则称这两个向量**相等**, 记作 $a=b$. 根据这个规定, 一个向量和它经过平行移动(方向不变, 起点和终点位置改变)所得的向量是相等的, 这种向量称为**自由向量**. 以后如无特别说明, 我们所讨论的向量都是自由向量. 由于自由向量只考虑其大小和方向, 因此, 我们可以把一个向量自由平移, 而使它的起点位置为任意点, 这样, 今后如有必要, 就可以把几个向量移到同一个起点.

记两向量 a 与 b 之间的夹角为 θ (见图8-1-2), 规定 $0 \leq \theta \leq \pi$. 特别地, 当 a 与 b 同向时, $\theta=0$; 当 a 与 b 反向时, $\theta=\pi$.

注: 向量的大小和方向是组成向量的不可分割的部分, 也是向量与数量的根本区别所在. 因此, 在讨论向量运算时, 必须把它的大小和方向统一起来考虑.

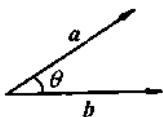


图 8-1-2

如果两个非零向量 a 与 b 的方向相同或相反, 就称这两个向量**平行**. 记作 $a \parallel b$. 由于零向量的方向是任意的, 因此可以认为**零向量平行于任何向量**.

当两个平行向量的起点放在同一点时, 它们的终点和公共起点应在同一条直线上. 因此, 两向量平行, 又称为两向量**共线**.

类似地, 还可引入向量共面的概念. 设有 k ($k \geq 3$) 个向量, 如果把它们起点放在同一点时, k 个终点和该公共起点在同一个平面上, 就称这 k 个向量**共面**.

二、向量的线性运算

1. 向量的加减法

定义1 设有两个向量 a 与 b , 任取一点 A , 作 $\overrightarrow{AB}=a$, 再以 B 为起点, 作 $\overrightarrow{BC}=b$, 连接 AC (见图8-1-3), 则向量 $\overrightarrow{AC}=c$ 称为向量 a 与 b 的**和**, 记作 $a+b$, 即

$$c = a + b$$

上述作出两向量之和的方法称为向量相加的**三角形法则**.

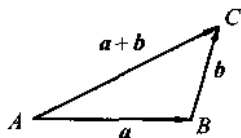


图 8-1-3

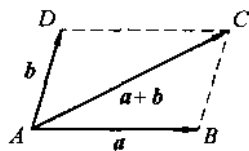


图 8-1-4

在力学上, 我们有作用在一质点上的两个力的合力的平行四边形法则, 类似地, 我们也可按如下方式定义两向量相加的**平行四边形法则**: 当向量 a 与 b 不平时, 作 $\overrightarrow{AB}=a$, $\overrightarrow{AD}=b$, 以 AB 、 AD 为边作平行四边形 $ABCD$, 连接对角线 AC (见图8-1-4), 显然, 向量 $\overrightarrow{AC}$ 等于向量 a 与 b 的和 $a+b$.

向量的加法满足下列运算规律:

- (1) 交换律 $\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{b} + \mathbf{a}$;
 (2) 结合律 $(\mathbf{a} + \mathbf{b}) + \mathbf{c} = \mathbf{a} + (\mathbf{b} + \mathbf{c})$.

对于(1), 根据向量相加的三角形法则, 由图8-1-4, 有

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AC} = \overrightarrow{AD} + \overrightarrow{DC} = \mathbf{b} + \mathbf{a},$$

所以向量的加法满足交换律. 对于(2), 如图8-1-5所示, 先作出 $\mathbf{a} + \mathbf{b}$, 再将其与 $\mathbf{c}$ 相加, 即得和 $(\mathbf{a} + \mathbf{b}) + \mathbf{c}$, 如将 $\mathbf{a}$ 与 $\mathbf{b} + \mathbf{c}$ 相加, 则得同一结果, 所以向量的加法满足结合律.

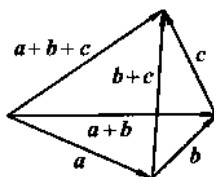


图 8-1-5

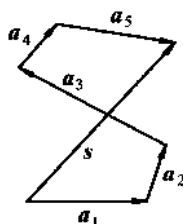


图 8-1-6

由于向量的加法满足交换律与结合律, 所以 n 个向量 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n$ ($n \geq 3$) 相加可写成 $\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \dots + \mathbf{a}_n$, 并可按三角形法则相加如下: 使前一向量的终点作为下一向量的起点, 相继作向量 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n$, 再以第一向量的起点为起点, 最后一向量的终点为终点作一向量, 这个向量即为所求的和. 如图8-1-6, 有

$$\mathbf{s} = \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_3 + \mathbf{a}_4 + \mathbf{a}_5.$$

设有向量 $\mathbf{a}$, 我们称与 $\mathbf{a}$ 的模相等而方向相反的向量为 $\mathbf{a}$ 的负向量, 记作 $-\mathbf{a}$. 由此, 我们规定两个向量 $\mathbf{b}$ 与 $\mathbf{a}$ 的差

$$\mathbf{b} - \mathbf{a} = \mathbf{b} + (-\mathbf{a}).$$

上式表明, 向量 $\mathbf{b}$ 与 $\mathbf{a}$ 的差就是向量 $\mathbf{b}$ 与 $-\mathbf{a}$ 的和 (见图8-1-7(a)). 特别地, 当 $\mathbf{b} = \mathbf{a}$ 时, 有 $\mathbf{a} - \mathbf{a} = \mathbf{a} + (-\mathbf{a}) = \mathbf{0}$.

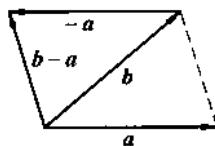


图 8-1-7(a)

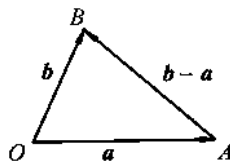


图 8-1-7(b)

显然, 对任意向量 $\overrightarrow{AB}$ 及点 O , 有

$$\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{AO} + \overrightarrow{OB} = \overrightarrow{OB} - \overrightarrow{OA},$$

因此, 若把向量 $\mathbf{a}$ 与 $\mathbf{b}$ 移到同一起点 O , 则从 $\mathbf{a}$ 的终点 A 向 $\mathbf{b}$ 的终点 B 所引向量 $\overrightarrow{AB}$ 便是向量 $\mathbf{b}$ 与 $\mathbf{a}$ 的差 $\mathbf{b} - \mathbf{a}$ (见图8-1-7(b)).

由三角形两边之和大于第三边的原理, 有

$$|\mathbf{a} + \mathbf{b}| \leq |\mathbf{a}| + |\mathbf{b}| \quad \text{及} \quad |\mathbf{a} - \mathbf{b}| \leq |\mathbf{a}| + |\mathbf{b}|,$$

其中等号当且仅当 $\mathbf{a} \parallel \mathbf{b}$ 时成立.

2. 向量与数的乘法

定义2 数 λ 与向量 $\mathbf{a}$ 的乘积是一个向量, 记为 $\lambda\mathbf{a}$, 它按下面的规定来确定: $\lambda\mathbf{a}$ 的模是 $\mathbf{a}$ 的模的 $|\lambda|$ 倍, 即

$$|\lambda\mathbf{a}| = |\lambda| \cdot |\mathbf{a}|.$$

当 $\lambda > 0$ 时, $\lambda\mathbf{a}$ 与 $\mathbf{a}$ 的方向相同; 当 $\lambda < 0$ 时, $\lambda\mathbf{a}$ 与 $\mathbf{a}$ 的方向相反; 当 $\lambda = 0$ 时, $\lambda\mathbf{a} = \mathbf{0}$.

由定义可知, $1\mathbf{a} = \mathbf{a}$, $(-1)\mathbf{a} = -\mathbf{a}$.

从几何上看, 当 $\lambda > 0$ 时, $\lambda\mathbf{a}$ 的大小是 $\mathbf{a}$ 的大小的 λ 倍, 方向不变; 当 $\lambda < 0$ 时, $\lambda\mathbf{a}$ 的大小是 $\mathbf{a}$ 的大小的 $|\lambda|$ 倍, 方向相反 (见图 8-1-8).

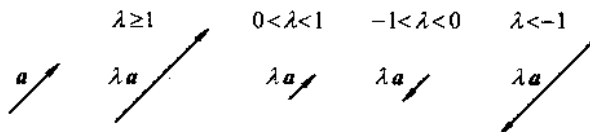


图 8-1-8

数与向量的乘积满足下列运算规律:

- (1) 结合律: $\lambda(\mu\mathbf{a}) = (\lambda\mu)\mathbf{a}$;
- (2) 分配律: $(\lambda + \mu)\mathbf{a} = \lambda\mathbf{a} + \mu\mathbf{a}$, $\lambda(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = \lambda\mathbf{a} + \lambda\mathbf{b}$.

读者可从图 8-1-9 中看出结合律、分配律的几何表示 (设 $\lambda > 0, \mu > 0$).

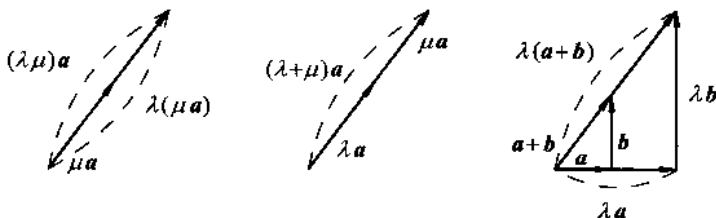


图 8-1-9

向量的相加以及数乘向量统称为向量的线性运算.

通常把与 $\mathbf{a}$ 同方向的单位向量称为 $\mathbf{a}$ 的单位向量, 记为 $\mathbf{a}^\circ$ (见图 8-1-10). 由数与向量乘积的定义, 有

$$\mathbf{a} = |\mathbf{a}| \cdot \mathbf{a}^\circ, \quad \mathbf{a}^\circ = \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|}.$$

注: 上式表明一个非零向量除以它的模的结果是一个与原向量同方向的单位向量, 这一过程又称为将向量单位化.

例1 化简 $\mathbf{a} - \mathbf{b} + 5\left(-\frac{1}{2}\mathbf{b} + \frac{\mathbf{b} - 3\mathbf{a}}{5}\right)$.

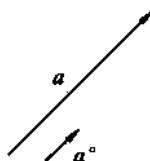


图 8-1-10

解 $a - b + 5\left(-\frac{1}{2}b + \frac{b-3a}{5}\right) = (1-3)a + \left(-1 - \frac{5}{2} + \frac{1}{5} \cdot 5\right)b = -2a - \frac{5}{2}b$. ■

例2 在平行四边形 $ABCD$ 中, 设 $\overrightarrow{AB} = a$, $\overrightarrow{AD} = b$, 试用 a 和 b 表示向量 $\overrightarrow{MA}$, $\overrightarrow{MB}$, $\overrightarrow{MC}$ 和 $\overrightarrow{MD}$, 这里 M 是平行四边形对角线的交点 (见图 8-1-11).

解 因为平行四边形的对角线相互平分, 所以

$$a + b = \overrightarrow{AC} = 2\overrightarrow{AM}, \text{ 即 } -(a + b) = 2\overrightarrow{MA}$$

故 $\overrightarrow{MA} = -\frac{1}{2}(a + b)$; $\overrightarrow{MC} = -\overrightarrow{MA} = \frac{1}{2}(a + b)$;

同理 $\overrightarrow{MD} = \frac{1}{2}\overrightarrow{BD} = \frac{1}{2}(-a + b)$; $\overrightarrow{MB} = -\overrightarrow{MD} = \frac{1}{2}(a - b)$.

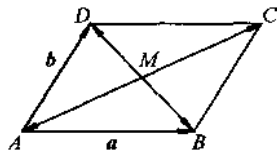


图 8-1-11

根据数与向量的乘积的定义, λa 与 a 平行, 因此, 我们常用数与向量的乘积来说明两个向量的平行关系.

设 a 为一非零向量, 则与 a 共线 (平行) 的向量 b 都可表示为 $b = \lambda a$, 其中 $\lambda = \pm \frac{|b|}{|a|}$, 当 b 与 a 同向时取正号; 反向时取负号. 此外, 在表示式 $b = \lambda a$ 中的数 λ 是唯一的. 如果不然, 存在数 μ 使得 $b = \mu a$, 则两式相减得

$$(\lambda - \mu)a = 0, \text{ 即 } |\lambda - \mu||a| = 0,$$

因为 $|a| \neq 0$, 故 $|\lambda - \mu| = 0$, 所以必有 $\lambda = \mu$. 由此我们得到:

定理1 设向量 $a \neq 0$, 那么向量 b 平行于 a 的充分必要条件是: 存在唯一的实数 λ , 使 $b = \lambda a$.

定理1是建立数轴的理论依据. 我们知道, 确定一条数轴, 需要给定一个点、一个方向及单位长度. 由于一个单位向量既确定了方向, 又确定了单位长度, 因此, 只需给定一个点及一个单位向量就能确定一条数轴.

设点 O 及单位向量 i 确定了数轴, 如图 8-1-12, 则对于轴上任意一点 P , 对应一个向量 $\overrightarrow{OP}$, 由于 $\overrightarrow{OP} \parallel i$, 故必存在唯一的实数 x , 使得

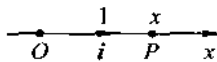


图 8-1-12

$$\overrightarrow{OP} = xi,$$

其中 x 称为数轴上有向线段 $\overrightarrow{OP}$ 的值, 这样, 向量 $\overrightarrow{OP}$ 就与实数 x 一一对应了. 从而

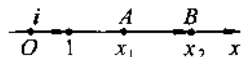
$$\text{点 } P \leftrightarrow \text{向量 } \overrightarrow{OP} = xi \leftrightarrow \text{实数 } x,$$

即数轴上的点 P 与实数 x 一一对应. 我们定义实数 x 为数轴上点 P 的坐标.

例3 在 x 轴上取定一点 O 作为坐标原点. 设 A, B 是 x 轴上坐标依次为 x_1, x_2 的两个点, i 是与 x 轴同方向的单位向量, 证明

$$\overrightarrow{AB} = (x_2 - x_1)i.$$

证明 因为 $OA = x_1$, 所以 $\vec{OA} = x_1 \vec{i}$, 同理 $\vec{OB} = x_2 \vec{i}$,



于是

$$\vec{AB} = \vec{OB} - \vec{OA} = x_2 \vec{i} - x_1 \vec{i} = (x_2 - x_1) \vec{i}.$$

图 8-1-13

习题 8-1

1. 填空:

(1) 要使 $|\vec{a} + \vec{b}| = |\vec{a} - \vec{b}|$ 成立, 向量 $\vec{a}, \vec{b}$ 应满足 _____;

(2) 要使 $|\vec{a} + \vec{b}| = |\vec{a}| + |\vec{b}|$ 成立, 向量 $\vec{a}, \vec{b}$ 应满足 _____.

2. 设 $\vec{u} = \vec{a} - \vec{b} + 2\vec{c}$, $\vec{v} = -\vec{a} + 3\vec{b} - \vec{c}$. 试用 $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ 表示向量 $2\vec{u} - 3\vec{v}$.

3. 已知菱形 $ABCD$ 的对角线 $\vec{AC} = \vec{a}$, $\vec{BD} = \vec{b}$, 试用向量 $\vec{a}, \vec{b}$ 表示 $\vec{AB}, \vec{BC}, \vec{CD}, \vec{DA}$.

4. 把 $\triangle ABC$ 的 BC 边五等分, 设分点依次为 D_1, D_2, D_3, D_4 , 再把各分点与点 A 连接, 试以 $\vec{AB} = \vec{c}$, $\vec{BC} = \vec{a}$ 表示向量 $\vec{D_1A}, \vec{D_2A}, \vec{D_3A}$ 和 $\vec{D_4A}$.

§8.2 空间直角坐标系 向量的坐标

本节将建立空间的点及向量与有序数组的对应关系, 引进研究向量的代数方法, 从而建立代数方法与几何直观的联系.

一、空间直角坐标系

在平面解析几何中, 我们建立了平面直角坐标系, 并通过平面直角坐标系, 把平面上的点与有序数组 (即点的坐标 (x, y)) 对应起来. 同样, 为了把空间的任一点与有序数组对应起来, 我们来建立空间直角坐标系.

过空间一定点 O , 作三个两两垂直的单位向量 $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$, 就确定了三条都以 O 为原点、两两垂直的数轴, 依次记为 x 轴 (横轴)、 y 轴 (纵轴)、 z 轴 (竖轴), 统称为 **坐标轴**. 它们构成一个空间直角坐标系 $Oxyz$ (见图 8-2-1).

空间直角坐标系有右手系和左手系两种. 我们通常采用右手系 (见图 8-2-2), 其坐标轴的正向按如下方式规定: 以右手握住 z 轴, 当右手的四个手指从 x 轴正向以 $\pi/2$ 角度转向 y 轴正向时, 大拇指的指向就是 z 轴的正向.

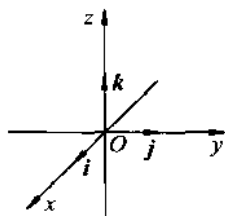


图 8-2-1

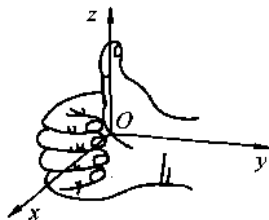


图 8-2-2