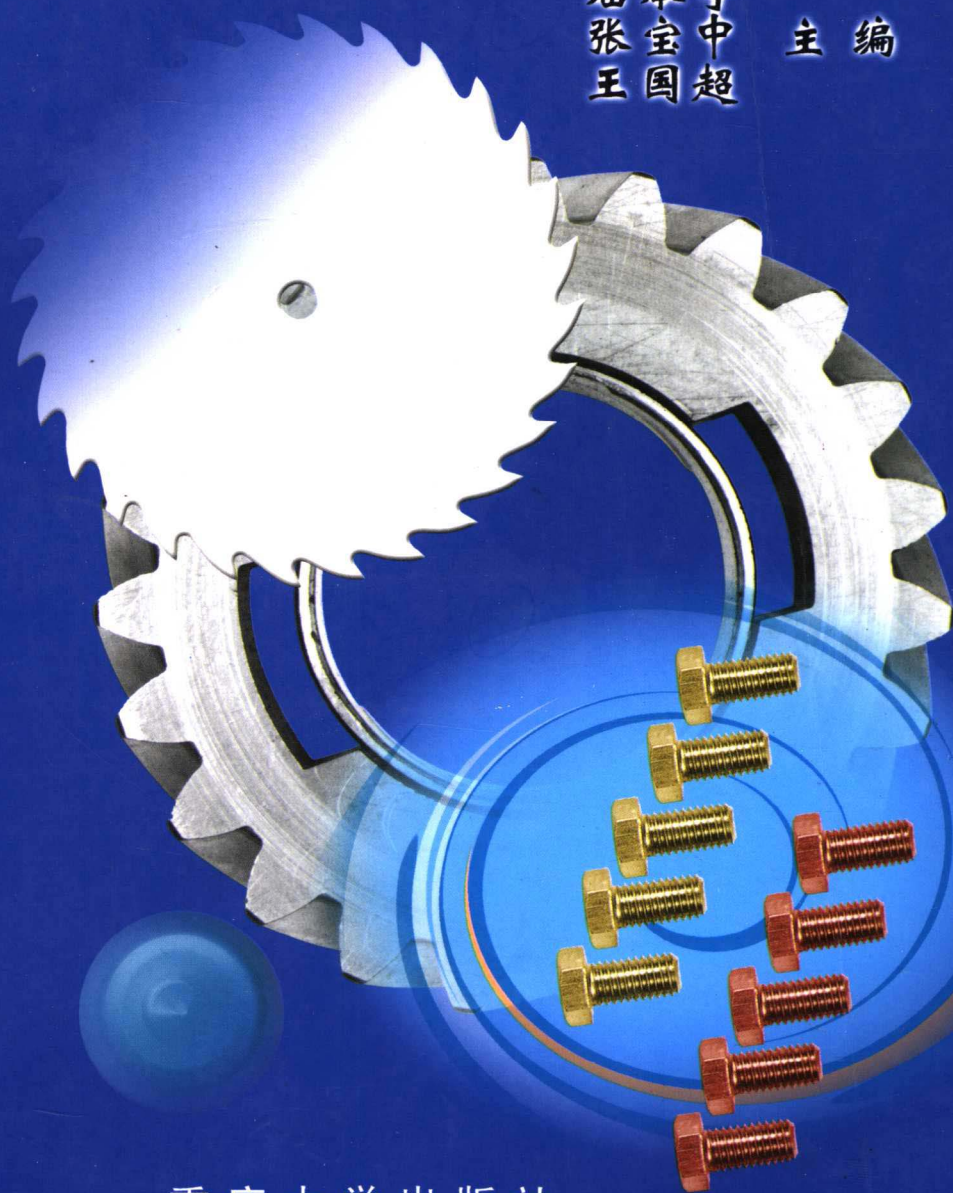


高等学校教材

理论力学

LILUN LIXUE

宁中超 主编
屈张王 本宝国



重庆大学出版社

理论力学

屈本宁 张宝中 王国超 主 编

重庆大学出版社

内容简介

本书是根据教育部高等工科本科理论力学课程基本要求及教育部工科力学课程教学指导委员会面向 21 世纪工科力学课程教学改革的要求编写而成。全书三篇共 15 章,分别阐述静力学、运动学和动力学的基础理论和方法。注重与工程实际相结合,通过大量例题深入浅出地阐述分析问题、解决问题的思路及方法。每章附有多种形式的思考题和习题,所有习题均有答案。

本书可作为工科机电类,近机类各专业本科、专科 70 ~ 80 学时理论力学课程的教材,也可供电大学生、自学者以及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/屈本宁,张宝中,王国超主编. —重庆:重庆大学出版社,2004.3

机械设计制造及自动化本科系列教材

ISBN 7-5624-2347-4

I. 理... II. ①屈... ②张... ③王... III. 理论力学—高等学校—教材 IV. 031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 000435 号

理 论 力 学

屈本宁 张宝中 王国超 主编

责任编辑:梁 涛 版式设计:梁 涛

责任校对:廖应碧 责任印制:张立全

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A 区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆大学建大印刷厂印刷

*

开本:787 × 1092 1/16 印张:22.5 字数:561 千

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2347-4/O · 204 定价:29.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

序

據各一、對高又時晴西影能明立并出等大天重，詞文《策日並時林
飛交伏、果知事近商陸的因全區等莫人，時聯華近半婚會賬豐又悉事半
師陳十年等由並其計保自其又至晴什其湖則取辦，餘發華近等婚的對各
與能了伏。林建照承因本共辦林建出，學聯聚由共，附大學婚的對與口各
就請不以了姐果林建出等大天重，量與因林建
為學婚的對與事近等婚的，用半早婚的與與有婚已全區有婚到式。

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济已见端倪。

日趋激烈。国力的竞争,归根结底是科技与人才的竞争。邓小平同志早已明确指出:科技是现代化的关键,而教育是基础。毫无疑问,高等教育是科技发展的基础,是高级专门人才培养的摇篮。我国高等教育在振兴中华、科教兴国的伟大事业中担负着极其艰巨的任务。

为了适应社会主义现代化建设的需要,在1993年党中央、国务院颁布《中国教育改革和发展纲要》以后,原国家教委全面启动和实施《高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划》,有组织、有计划地在全国推进教学改革工程。其主要内容是:改革教育体制、教育思想和教育观念;拓宽专业口径,调整专业目录,制定新的人才培养方案;改革课程体系、教学内容、教学方法和教学手段;实现课程结构和教学内容的整合与优化,编写、出版一批高水平、高质量的教材。

地处巴山蜀水的重庆大学,是驰名中外的我国重要高等学府。重庆大学出版社是一个重要的大学出版社,工作出色,一贯重视教材建设,从20世纪90年代初期开始实施“立足西部,面向全国”的战略决策,针对当时国内专科教材匮乏的情况,组织西部地区近20所院校编写、出版机械类、电类专科系列教材,以后又推出计算机、建筑、会计类专科系列教材,得到原国家教委的肯定与支持。在1998年教育部颁布《普通高等学校本

科专业目录》之后,重庆大学出版社立即组织西部地区高校的数十名教学专家反复领会教学改革精神,认真学习全国的教育改革成果,充分交流各校的教学改革经验,制定机械设计制造及其自动化专业的教学计划和各门课程的教学大纲,并组织编写、出版机械类本科系列教材。为了确保教材的质量,重庆大学出版社采取了以下措施:

- 发挥教育理论与教育思想的指导作用,将教学改革思想和教学改革成果融入教材的编写之中。

- 根据人才培养计划中对学生知识和能力的要求,对课程体系和教学内容进行整合,不过分强调每门课程的系统性、完整性,重在实现系列教材的整体优化。

- 明确各门课程在专业培养方案中的地位 and 作用,理顺相关课程之间的关系。

- 精选教学内容,控制教学学时数,重视对学生自主学习能力、分析解决工程实际问题能力和创新能力的培养。

- 增强 CAD、CAM 的内容,提高教材的先进性;尽可能运用 CAI 等现代化教学手段,提高传授知识的效率。

- 实行专家审稿制度,聘请学术水平高、事业心强、长期活跃在教学改革第一线的专家审稿,重点审查书稿的学术质量和是否具有特色。

这套教材的编写符合教学改革的精神,遵循教学规律和人才培养规律,具有明显的特色。与出版单科教材相比,有计划地将教材成套推出,实现了整体优化。这富有远见。

经过几年的艰苦努力,这套机械类本科教材已陆续问世了。它反映了西部高校多年来教学改革与教学研究的成果,它的出版必将为繁荣我国高等学校的教材建设做出积极的贡献,特别是在西部大开发的战略行动中,起着十分重要的作用。

高等学校的教学改革和教材建设是一项长期而艰巨的工作,任重道远,不可能一蹴而就。我希望这套教材能够得到读者的关注与帮助,并希望通过教学实践与读者不吝指教,逐版加以修订,使之更加完善,在高等教育改革的百花园中奇花怒放!我深深为之祝愿。

中国科学院院士 杨叔子

2000年4月28日

前言

本书根据教育部高等工科本科理论力学课程基本要求及教育部工科力学课程教学指导委员会面向 21 世纪工科力学课程教学改革的要求编写而成。全书内容涵盖了理论力学的全部基本内容。书中的物理量符号、名称和计量单位均采用国际单位制。

在编写中对与物理重复的部分以及课程自身重复部分进行了精简和重组,提高了起点。并以学习力学基本知识和能力培养为目标,吸取了现行教材之所长和编者多年的教学经验。在叙述方面,深入浅出,注重概念引入以及分析和解决问题的思路和方法。书中安排了较多的例题,精选各型思考题和习题,难度适中。习题均附有答案,既适合课堂教学又便于自学。

本书可作为工科机类,近机类各专业本、专科 70 ~ 80 学时理论力学课程的教材,也可供电大学生、自学者以及工程技术人员参考。

全书共分三篇 15 章,由屈本宁任主编,张宝中、王国超任副主编。屈本宁编写前言、绪论,第 11 章、第 12 章和第 15 章,张宝中任副主编并编写第 1 章、第 2 章、第 3 章;王国超任副主编并编写第 7 章、第 8 章和第 9 章;邓国红编写第 10 章、第 13 章和第 14 章;余玲编写第 4 章、第 5 章及第 6 章。全书最后由屈本宁统稿。

由于编者水平有限,书中的不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2002 年 10 月

目录

1	绪论	1
1	0.1 理论力学的研究对象和内容	1
2	0.2 理论力学的研究方法	2
2	0.3 理论力学的地位和学习目的	2
2	0.4 理论力学的学习方法	2
4	1 静力学的基本概念和物体的受力分析	4
4	1.1 静力学基本概念及静力学公理	4
7	1.2 力在坐标轴上的投影	7
10	1.3 力矩	10
13	1.4 力偶和力偶矩	13
15	1.5 约束与约束反力	15
19	1.6 物体的受力分析	19
23	本章小结	23
25	思考题	25
27	习题	27

2 力系的简化与合成	30
2.1 汇交力系的合成	30
2.2 力偶系的合成	32
2.3 任意力系向任意一点简化,主矢和主矩	33
2.4 力系简化结果讨论	35
2.5 平行力系的中心和重心	41
本章小结	46
思考题	46
习题	48
3 力系的平衡方程及其应用	50
3.1 空间任意力系的平衡条件和平衡方程	50
3.2 平面力系平衡方程的应用	54
3.3 物体系统的平衡	59
3.4 空间任意力系平衡方程的应用	67
3.5 考虑摩擦时的平衡问题	70
本章小结	76
思考题	78
习题	79
运 动 学	
4 点的运动及刚体的简单运动	85
4.1 确定点运动几种方法	85
4.2 刚体的平动与定轴转动	93
本章小结	98
思考题	99
习题	100
5 点的合成运动	106
5.1 点的合成运动的概念	106
5.2 点的速度合成	108
5.3 点的加速度合成定理	112
本章小结	121
思考题	122

习题	123
6 刚体的平面运动	128
6.1 概 述	128
6.2 刚体平面运动的分解	129
6.3 平面图形内各点的速度	131
6.4 平面图形内各点的加速度	137
6.5 运动学综合问题的求解	139
本章小结	143
思考题	144
习题	145

动 力 学

7 质点的运动微分方程	151
7.1 动力学基本定律	151
7.2 质点运动微分方程	152
7.3 质点动力学的两类基本问题	153
本章小结	159
思考题	159
习题	160
8 动量定理	166
8.1 质量中心、动量和冲量	166
8.2 质点系动量定理和质心运动定理	169
本章小结	175
思考题	176
习题	177
9 动量矩定理	182
9.1 质点及质点系的动量矩	182
9.2 质点系的动量矩定理	184
9.3 刚体对转轴的转动惯量	187
9.4 刚体绕定轴转动微分方程	193
9.5 刚体的平面运动微分方程	195

本章小结	199
思考题	200
习题	201
10 动能定理	208
10.1 力的功	208
10.2 动能的计算	212
10.3 动能定理	214
10.4 势力场、势能、机械能守恒定律	217
10.5 功率、功率方程与机械效率	220
10.6 动力学普遍定理的综合应用	221
本章小结	227
思考题	229
习题	230
11 碰撞	235
11.1 碰撞的基本概念及其动力学基本定理	235
11.2 恢复系数	237
11.3 两物体碰撞时的动能损失	239
11.4 碰撞冲量对定轴转动刚体的作用	242
本章小结	245
思考题	246
习题	247
12 达朗伯原理	250
12.1 惯性力及质点达朗伯原理	250
12.2 质点系的达朗伯原理	252
12.3 惯性力系的简化	254
12.4 达朗伯原理应用举例	256
12.5 定轴转动刚体的轴承动反力,动平衡概念	260
本章小结	263
思考题	264
习题	266

13 虚位移原理	270
13.1 约束的概念及分类	271
13.2 虚位移与理想约束的概念	273
13.3 虚位移原理	275
本章小结	279
思考题	280
习题	280
14 动力学普遍方程和拉格朗日方程	283
14.1 自由度和广义坐标的概念	283
14.2 用广义坐标表示的质点系的平衡条件	285
14.3 动力学普遍方程	287
14.4 拉格朗日方程	290
本章小结	295
思考题	296
习题	296
15 机械振动基础	299
15.1 单自由度系统的力学模型	299
15.2 单自由度系统的自由振动	300
15.3 单自由度系统有阻尼自由振动	305
15.4 单自由度系统无阻尼受迫振动	309
15.5 单自由度系统有阻尼受迫振动	313
15.6 转子的临界转速	315
15.7 减振与隔振的概念	316
本章小结	319
思考题	320
习题	321
习题答案	326
索引	341
参考文献	346

绪 论

0.1 理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。自然界中所有的物质都处在不断地运动之中。运动是物质存在的形式和固有属性。物质运动的形式是多种多样的,例如,物体在空间的位移、变形、发热、电磁现象以及人类思维、生命的兴衰等现象都是物质运动的形态。在各种各样的运动形态中,机械运动是最简单、最普遍的一种。所谓机械运动就是物体在空间的位置随时间而变化的运动形态。机器的运转、车辆的行驶、河水的流动、飞机火箭的运行、天体的运动等都属于机械运动。在物质高级和复杂的运动形式中,通常包含或伴随着机械运动。因此,研究机械运动不仅揭示自然界各种机械运动的规律,而且还是研究物质其他运动形式的基础。这就决定了理论力学在自然科学研究中所处的重要基础地位。

理论力学研究速度远小于光速的宏观物体的机械运动,属于古典力学的范畴。它的科学体系是以伽利略和牛顿所总结的关于机械运动的基本定律为基础,在 15 ~ 17 世纪逐步形成,之后又不断得到改善和发展的。在 20 世纪初,出现了相对论力学和量子力学,打破了传统的时空概念,建立了现代力学的科学体系。速度接近光速的物体和微观粒子的运动只有应用相对论力学和量子力学的观点才能给予完善的解释。在此,古典力学有其明显的局限性,但对于远小于光速的宏观低速物体的运动,相对论力学对古典力学的修正几乎为零。因此,对于一般工程中所遇到的力学问题,即使是如航天以及火箭等尖端科学技术中的大量力学问题,用古典力学的方法来解决,既方便又能保证足够的精确度。由此可见,古典力学至今仍具有重要的实用价值。

根据循序渐进的认识规律和解决工程实际问题的需要,本书分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学研究力的性质、力系的简化方法和力系的平衡理论;运动学从几何的角度研究物体的运动规律而不考虑产生运动的原因;动力学研究物体的运动变化与作用力之间的关系。

0.2 理论力学的研究方法

理论力学的研究方法与任何一门科学的研究方法一样,都必须遵循认识过程的客观规律,符合自然辩证法认识论。

理论力学的形成与发展是在人类对自然的长期观察、实验以及生产活动中获得的经验与材料进行分析、综合、归纳、总结的过程中逐步形成和发展的。

观察和实验是理论力学发展的基础。理论力学的基本概念和基本定律的建立正是以对自然的直接观察和生产生活中取得的经验为出发点并系统组织实验,从观察和实验的复杂现象中,抓住主要的因素和特征,去掉次要的、局部的和偶然的因素,深入现象的本质,找到事物的内在联系,从感觉经验上升到理性认识。总结出普遍规律性的东西,并经过数学演绎和逻辑推理而形成理论。

0.3 理论力学的地位和学习目的

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。许多工程专业后续课,如材料力学、结构力学、流体力学、弹性力学、机械动力学、机械原理、振动力学、塑性力学、断裂力学等课程都是以理论力学揭示的力学基本概念和基本规律为基础的。此外,理论力学的基本理论可以直接用于解决某些工程问题,也可与其他专门知识结合解决较复杂的工程问题。因此,理论力学对于工科专业来说是一门十分重要的必修课。

学习理论力学,一方面要学习到理论力学的基本概念、基本理论以及解决问题的基本方法,掌握理论力学的知识,为后续课程打下力学基础。第二方面要通过学习培养和锻炼对实际问题进行科学抽象建立力学模型并应用理论力学的方法加以解决的能力。第三方面,通过课程的学习,培养辩证唯物主义世界观,掌握唯物辩证法的方法论,提高分析和解决问题的能力。

0.4 理论力学的学习方法

1) 要注意:①正确理解有关力学概念的来源、含义和用途;②有关理论公式推导的根据和关键,公式的物理意义及应用条件和范围;③理论力学分析和解决问题的方法;④各章节的主要内容和要点;⑤各章节在内容和分析问题的方法上的区别和联系。

2) 对理论力学基本概念的理解和理论应用能力是通过大量习题的求解逐步加深和提高的。因此,在学习中必须要做一定量的习题。

3) 温故知新,及时复习和常做小结。

静力学

静力学主要研究物体在力系作用下的平衡条件。

在静力学中,我们要学习自然界中各种力的共同性质,研究力系的合成、简化及平衡的必要充分条件等。从应用的角度看,必须熟练掌握对物体的受力分析及应用平衡方程进行受力计算。

1

静力学的基本概念和物体的受力分析

本章将首先研究力、刚体、力在坐标轴上的投影、力对点之矩、力对轴之矩、力偶等基本概念及静力学公理,然后重点研究几何约束的本质、约束反力的特征及对物体进行受力分析的方法。

1.1 静力学基本概念及静力学公理

1.1.1 力的概念

力是力学中一个极为重要的基本概念。它产生于生产实践,并经过人们对感性认识加以概括和改造,提高到理性认识而形成的科学概念。

力是物体间的相互机械作用,其效应是使被作用物体的运动状态发生变化,同时使物体产生变形。

力使物体的运动状态发生变化的效应称为**外效应**,或称为运动效应;而使物体产生变形的效应称为**内效应**,或称为变形效应。在静力学中仅研究力的外效应。

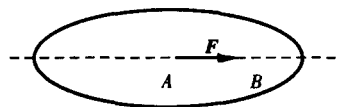


图 1.1

应注意到,力是一物体对另一物体间的相互作用,在对物体进行受力分析时,必须明确区分受力物体和施力物体。

实践表明,力对物体的作用效果,完全决定于力的大小、方向、作用点,简称力的三要素。由此可见,力是一个**定位矢量**。力矢量在印刷时常用黑体字母表示,如图 1.1 所示,而力的大小则用普通字母表示。在书写中,由于写不出黑体字,常在字母的上方加一个箭头,以示该字母表示一个矢量。

在作图时,力矢的始点(或终点)表示力的作用点,力矢的长度(按一定的比例画)表示力

的大小,力矢的方位表示力的指向。

本书采用国际单位制(SI制),力的单位是N(牛)或kN(千牛)。

两个以上的力的集合,称为力系。两个不同的力系,如果它们对同一物体的作用效应完全相同,则称这两个力系是等效的,或互称为等效力系。

若一个力系对物体作用后,并不改变物体原有的运动状态,则该力系称为平衡力系。平衡力系的外效应为零。

1.1.2 刚体的概念

刚体是指在力作用下不变形(即任意两点间的距离保持不变)的物体。显然,现实中并无刚体存在。这里所说的刚体,只是实际物体在一定条件下抽象的力学模型。

任何物体受力后或多或少都会发生变形。但有许多物体受力后变形十分微小,对静力学研究的问题,略去变形不会对研究的结果产生显著的影响,却能使问题的研究大大简化。在这种情况下,把实际的物体抽象为刚体,是合理的,也是必要的。如桥梁问题,在计算承载时可视为刚体,在计算振动或温度的影响时就要视为变形体。由此可见,一个物体能否简化为刚体,应看在所研究的问题中,物体的变形(即使是很微小)是否起主要作用,而不应把刚体的概念绝对化。

本书主要研究力的外效应,若无特殊说明,所研究的物体都抽象为刚体。

1.1.3 静力学公理

公理是人类从长期的实践和经验中总结出来的客观真理,它可以在实践中得到验证,无须证明而为大家所公认。下面介绍有关力的基本性质的几个公理。

(1) 二力平衡条件

刚体受两个力的作用而处于平衡,其必要和充分条件是:此二力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。

满足此条件且作用于同一物体上的两力,是一个最简单的平衡力系。二力平衡条件对于刚体是必要和充分条件,而对于非刚体,该条件只是平衡的必要条件而非充分条件,为什么?请读者自己证明。

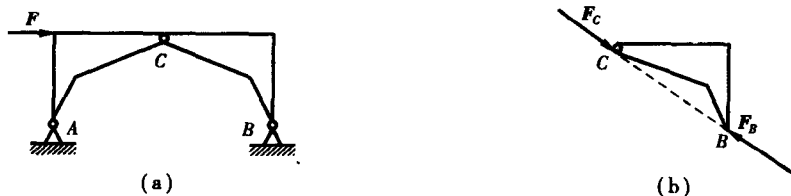


图 1.2

工程上,常遇到只有两点受力而处于平衡的构件,称为二力构件或二力杆。如图 1.2(b) 中所示(不计自重),不论构件的几何形状如何,只要符合二力平衡条件,就可按二力构件来处理。掌握了二力构件的这种受力特征,对物体进行受力分析是很有用的。

(2) 力的平行四边形法则和六面体法则

作用于物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力。合力的作用点仍在该点,其大小和方向由以这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线表示。若以 F_R 表示合力,以 F_1, F_2 表示分力,如图 1.3(a) 所示,则该公理可表示为

$$F_R = F_1 + F_2 \quad (1.1)$$

力的平行四边形法则可演变为力三角形(图 1.3(b)),因此,对于多于两个力的合成问题,可演变为力多边形,即从任选的点 a 开始,将各分力矢量依次首尾相连,从起始点 a 到该力多边形终点的矢量即为合力。

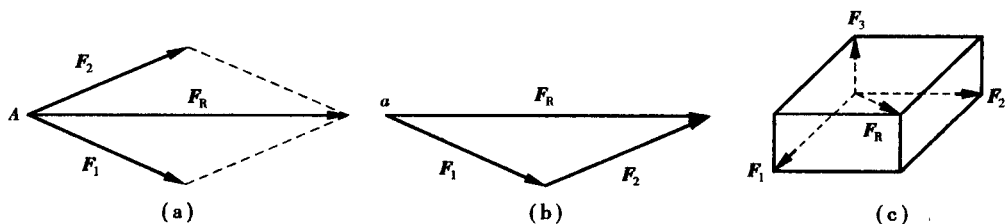


图 1.3

对于作用于一点的空间三个力,根据力的平行四边形法则,可得力的平行六面体法则。即作用于空间一点的三个力的合力,其作用点仍为原各力的共同作用点,合力的大小和方向由这三个力矢为棱边的平行六面体的对顶线矢量来表示,如图 1.3(c) 所示。

由以上公理可知,作用于一点的几个力对物体的作用效果可以用其合力 F_R 等效替代。反之,应用此公理,也可以将作用在一点的力分解为作用于同一点的若干个分力。对于具体的问题,通常将一个力分解为方向互相垂直的两个力,这种分解称为正交分解,所得的两分力称为正交分力。空间分解类同。若分解的两个已知方向不互相垂直,则称为斜分解。

(3) 加减平衡力系原理

在作用于刚体的任意力系中加上或减去任何平衡力系,不改变原力系对刚体的作用效应。

力的这一性质,对以后讨论力系的简化是很有用的。但是应当指出,这一性质对于变形体来说是不适用的。根据力的这一性质,可以证明下面两个推论。

推论 1 力的可传性原理

作用于刚体上的力,可沿其作用线任意移动而不会改变它对刚体的作用。

证明:设 F 作用于刚体上 A 点,如图 1.4(a) 所示,在其作用线上任意一点 B 加上一平衡力系 F_1, F_2 ,且令 $F_1 = F_2 = F$,由加减平衡力系公理可知,这个平衡力系的加入不影响原来的力 F 对刚体的作用,即力系 F, F_1, F_2 与力 F 等效,如图 1.4(b) 所示。

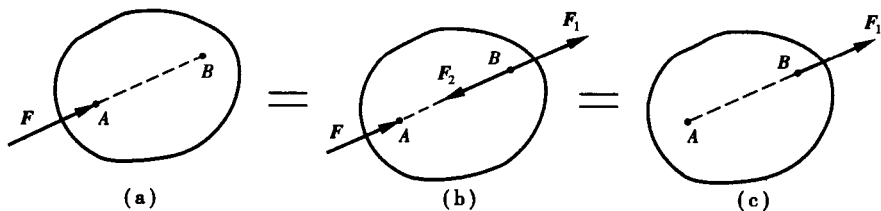


图 1.4