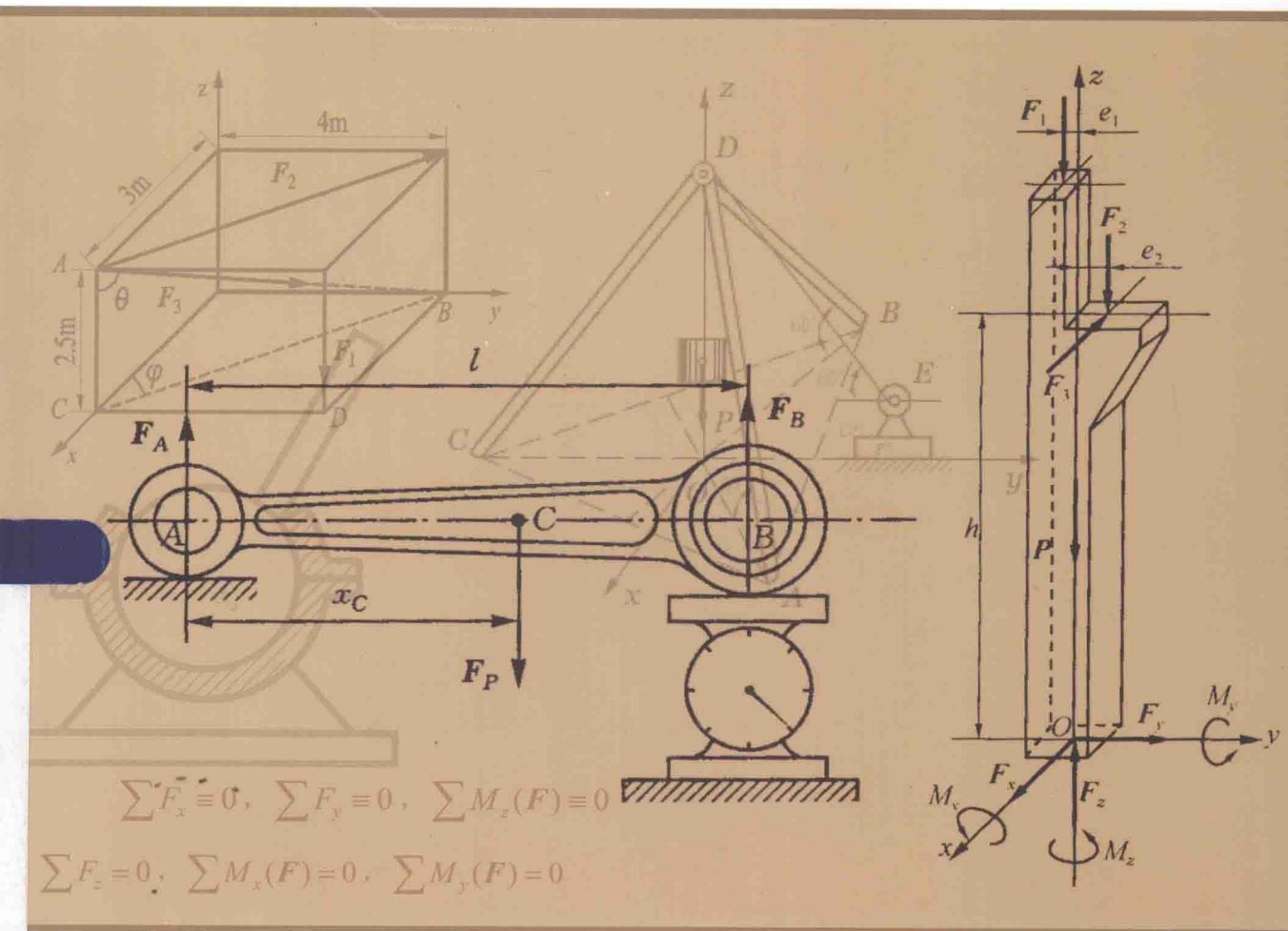




普通高等教育“十二五”应用型本科规划教材

工程力学

主编 刘桂霞 任述光





普通高等教育“十二五”应用型本科规划教材

工程力学

主编 刘桂霞 任述光

参编 姚力 李东斌 马冬梅 崔红娜 张岚 魏刚

中国人民大学出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/刘桂霞,任述光主编. —北京:中国人民大学出版社, 2015. 6
普通高等教育“十二五”应用型本科规划教材
ISBN 978-7-300-21489-4

I. ①工… II. ①刘… ②任… III. ①工程力学—高等学校—教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 132904 号

普通高等教育“十二五”应用型本科规划教材

工程力学

主 编 刘桂霞 任述光

参 编 姚力 李东斌 马冬梅 崔红娜 张岚 魏刚

Gongcheng Lixue

出版发行 中国人民大学出版社

社 址 北京中关村大街 31 号

邮政编码 100080

电 话 010-62511242 (总编室)

010-62511770 (质管部)

010-82501766 (邮购部)

010-62514148 (门市部)

010-62515195 (发行公司)

010-62515275 (盗版举报)

网 址 <http://www.crup.com.cn>

<http://www.ttrnet.com> (人大教研网)

经 销 新华书店

印 刷 北京昌联印刷有限公司

规 格 185mm×260mm 16 开本

版 次 2015 年 8 月第 1 版

印 张 19.75

印 次 2015 年 8 月第 1 次印刷

字 数 460 000

定 价 39.80 元

版权所有 侵权必究

印装差错 负责调换

内容简介

本书为普通高等教育“十二五”应用型本科规划教材。教材根据教育部高等学校力学教学指导委员会新修订的课程教学基本要求，并参照普通高等工科院校工程力学课程教学现状编写而成。

全书共 14 章，内容包括绪论，静力学的基本概念和物体的受力分析，平面力系，空间力系，摩擦，材料力学的基本概念，轴向拉伸和压缩，剪切与扭转，弯曲内力，截面的几何性质，弯曲应力，弯曲变形，应力状态和强度理论，组合变形，压杆稳定。章后均附有习题。

本教材适用于普通高等工科院校少学时（80 学时及以下）工程力学的本科教学，也可供部分高职高专及成人教育作为教材及参考书。

前言



本书为普通高等教育“十二五”应用型本科规划教材。教材根据教育部高等学校力学教学指导委员会新修订的课程教学基本要求，并结合普通高等工科院校少学时工程力学课程的教学实践编写而成。本书对原有的工程力学内容进行了精简和整合，其中理论力学的内容仅保留了静力学部分，对原本因学时不足不做课堂讲授的运动学与动力学部分不再选入教材；而材料力学的内容则相对保持了其完整性。本教材适用于材料工程、给排水、建筑环境与设备、环境工程、热能与动力工程、建筑电器与智能化、工程管理、工程造价、风能与动力工程等少学时各专业的教学要求，也可供部分高职高专专业作为教材使用。

全书共有 14 章，其中绪论及第 1、2、3、4 章由任述光编写，第 5、6 章由李东斌编写，第 7、9 章由崔红娜编写，第 8 章由姚力编写，第 10 章由张岚编写，第 11 章由魏刚编写，第 12、13 章由马冬梅编写，第 14 章由刘桂霞编写。全书由刘桂霞统稿。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2015 年 5 月

教师信息反馈表

为了更好地为您服务，提高教学质量，中国人民大学出版社愿意为您提供全面的教学支持，期望与您建立更广泛的合作关系。请您填好下表后以电子邮件或信件的形式反馈给我们。

您使用过或正在使用的我社教材名称		版次	
您希望获得哪些相关资料			
您对本书的建议（可附页）			
您的姓名			
您所在的学校、院系			
您所讲授的课程名称			
学生人数			
您的联系地址			
邮政编码		联系电话	
电子邮件（必填）			
您是否为人大社教研网会员	☐ 是，会员卡号：_____ ☐ 不是，现在申请		
您在相关专业是否有主编或参编教材意向	☐ 是 ☐ 否 ☐ 不一定		
您所希望参编或主编的教材的基本情况（包括内容、框架结构、特色等，可附页）			

我们的联系方式：北京市西城区马连道南街 12 号
中国人民大学出版社应用技术分社
邮政编码：100055
电话：010-63311862
网址：<http://www.crup.com.cn>
E-mail：rendayingyong@163.com



目录



绪论	1
第 1 章 静力学的基本概念和物体的受力分析	
1.1 静力学公理	3
1.2 约束和约束反力	8
1.3 物体的受力分析和受力图	14
习题	19
第 2 章 平面力系	
2.1 平面汇交力系	22
2.2 平面力对点之矩 平面力偶	27
2.3 平面任意力系的简化	35
2.4 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	38
2.5 物体系统的平衡 静定和超静定问题	42
习题	48
第 3 章 空间力系	
3.1 空间汇交力系	55
3.2 力对点之矩与力对轴之矩	60
3.3 空间力偶	64
3.4 空间任意力系向一点的简化 主矢和主矩	66
3.5 空间任意力系的平衡方程	68
3.6 重心	72
习题	78

第4章 摩擦

4.1 滑动摩擦	82
4.2 摩擦角和自锁现象	85
4.3 考虑摩擦时的平衡问题	88
习题	93

第5章 材料力学的基本概念

5.1 材料力学的任务	96
5.2 材料力学的基本假设	97
5.3 内力的概念和截面法	98
5.4 应力的概念	99
5.5 位移和应变的概念	100
5.6 杆件变形的基本形式	102

第6章 轴向拉伸和压缩

6.1 轴向拉伸、压缩的概念和实例	103
6.2 轴力和轴力图	104
6.3 横截面上的应力	106
6.4 斜截面上的应力	108
6.5 拉、压杆的变形	109
6.6 材料在拉伸、压缩时的力学性质	112
6.7 安全因数、许用应力和强度条件	118
习题	122

第7章 剪切与扭转

7.1 剪切与挤压的实用计算	124
7.2 扭转、扭矩和扭矩图	128
7.3 等直圆杆扭转时的应力和变形 强度条件与刚度条件	131
习题	141

第8章 弯曲内力

8.1 概述	144
8.2 剪力和弯矩	147
8.3 剪力方程与弯矩方程 剪力图与弯矩图	152
8.4 荷载集度、剪力和弯矩间的关系	156
8.5 叠加法作弯矩图	162

习题	165
第 9 章 截面的几何性质	
9.1 截面的静矩和形心	168
9.2 截面的惯性矩和惯性积	171
9.3 平行移轴公式 惯性主轴和主惯性矩	172
习题	175
第 10 章 弯曲应力	
10.1 弯曲正应力	177
10.2 弯曲切应力	183
10.3 弯曲强度计算	190
10.4 提高弯曲强度的措施	197
习题	203
第 11 章 弯曲变形	
11.1 梁弯曲变形的基本概念	209
11.2 梁的挠曲线近似微分方程	212
11.3 积分法计算梁的变形	213
11.4 叠加法计算梁的变形	221
11.5 梁的刚度条件及其应用	234
11.6 简单静不定梁	236
习题	240
第 12 章 应力状态和强度理论	
12.1 概述	244
12.2 平面应力状态的应力分析 主应力	245
12.3 空间应力状态的概念	248
12.4 广义胡克定律	251
12.5 强度理论	253
习题	257
第 13 章 组合变形	
13.1 概述	259
13.2 斜弯曲	260
13.3 拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	263

13.4 弯曲与扭转的组合变形	266
习题	270
 第 14 章 压杆稳定	
14.1 压杆稳定的概念和实例	272
14.2 两端铰支的细长压杆的临界力	273
14.3 不同支承情况下细长压杆的临界力的欧拉公式	274
14.4 临界应力和欧拉公式的适用范围	276
14.5 压杆的稳定计算	279
14.6 提高压杆稳定性的措施	281
习题	283
 附录 I 型钢规格表	
286	
 附录 II 简单荷载作用下梁的转角和挠度	
302	
 参考文献	
304	

绪论

工程力学的内容包括理论力学的静力学部分和部分材料力学。理论力学既是许多工科专业学生必修的一门重要的专业基础课，又是一些后续课程的基础。理论力学虽然讲授经典理论，但其概念、理论及方法不仅是许多后继专业课程的基础，甚至在解决现代科技问题中也能直接发挥作用。

理论力学研究力与机械运动的基本规律。机械运动就是物体相对位形的改变（即空间位置和形状随时间而改变），包括变形和流动。理论力学是以伽利略（Galileo A. D., 1564~1642年）和牛顿（Newton A. D., 1642~1727年）所总结的关于机械运动的基本定律为基础发展起来的，属于古典力学的范畴，也称为牛顿力学或经典力学。实际上它的研究对象要求是宏观、低速运动的物体才足够准确。这里，宏观是相对基本粒子而言的，低速是相对光速（300000 km/s）而言的。虽然经典力学受到这样的局限，但我们工程实际中的许多技术问题都是满足这些条件的，因此，经典力学在现代工程技术中有着广泛的应用。

理论力学包含静力学、运动学和动力学三部分内容。静力学是关于物体平衡规律的科学，其任务是研究物体在各种力学作用下的平衡条件及其应用。静力学中的平衡是物体机械运动的一种特殊情况，在一般工程问题中，平衡是指物体相对于地球保持静止，而更完整的定义是指物体处于惯性运动状态。设以地球为惯性参考系，平衡最简单的例子有点的匀速直线运动和刚体的匀速直线平动，在这些情况下，作用于物体的力系所服从的规律与作用在静止物体上所服从的规律相同。

静力学着重研究力系的简化和力系的平衡。由于平衡是运动的特殊情况，因此研究力系的简化可以导出力系的平衡条件。力系的简化理论也是研究动力学的基础，通过力系的简化，可以知道力系对物体的总的作用效果和物体运动状态的改变量，这些问题将在动力学中研究。

当物体处于平衡状态时，作用在物体上的力系必须满足一定的条件；反之，只有满足一定条件的力系才能使物体平衡。求得各种力系的平衡条件，阐明物体受力和求解物体平衡问题的方法，是静力学的基本任务。

静力学在工程中有着广泛的应用。例如在各种工程结构构件或机械零部件的设计计算中，常需先进行静力分析。静力分析所得结果是构件强度和刚度计算的依据。静力学是进一步学习动力学、材料力学、结构力学、机械零件、弹性力学等后续课程的基础。

从自然科学发展史的角度来看，由于力学是发展最早的学科之一，这就难免有它的局

限性。因此，从某种意义上来说它确是一门古老而成熟的理论。尽管理论力学是一门古老而成熟的理论，但是这并不意味着它是陈旧而无用的理论。不管是在今天还是在将来，它都仍是许多前沿学科不可缺少的基础。其实，前沿总是相对基础而言的，没有基础哪来的前沿？近几十年来，以航天、原子能、计算机为标志的新技术和物理化学的新成就，促使力学有很大的发展。理论的发展往往是沿着分久必合、合久必分的规律向前发展的。随着科学和现代工程技术的飞速发展，力学作为一门基础学科，正在突破它原来的范畴，与其他学科交叉结合形成了许多新的分支学科。多学科交叉是当今科学发展的大趋势，生物力学、爆炸力学、物理力学等边缘学科的兴起，需要我们有坚实的理论力学基础。

力学老前辈钱学森先生曾经说过：“工程力学走过了从工程设计的辅助手段到中心主要手段的过程，不是唱配角而是唱主角了。”

我们相信随着科学的发展，工程力学这门古老而成熟的学科在人类改造客观世界的伟大实践中必将取得更加辉煌的成就。

第 1 章

静力学的基本概念和物体的受力分析

1.1 静力学公理

一、刚体和力的概念

静力学研究的是物体机械运动的特殊形式，即物体的平衡。平衡是指物体相对于惯性参考系保持静止或作匀速直线运动的状态，平衡是机械运动的一种特殊形式。

在研究物体的机械运动时，如果物体大小和形状对于所研究的问题的影响可以不计，则可以把物体抽象为具有一定质量的点，称为质点。如图 1—1 (a) 所示，当物体平衡时，若求绳索的拉力，物体可视为质点；若求图 1—1 (b) 中绳子的拉力，当两绳关于物体不对称时，则必须考虑物体的尺寸，物体不能视为质点。具有一定联系的若干个质点的集合称为质点系。质点系既可能由有限个离散质点组成，也可能是由无穷多个连续分布的质点组成的无穷质点系，如一般物体或物体组成的系统、运动的机构等。

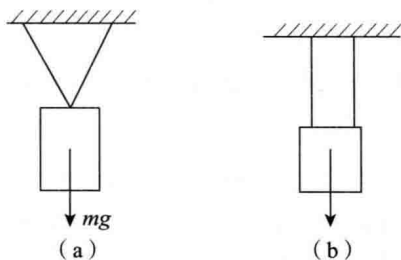


图 1—1

实际的物体在力的作用下，都会产生不同程度的变形，因此一般的物体我们称为可变形体或弹性体。但如果变形微小，对所研究物体的机械运动影响很小，为研究问题简单起见，我们可以忽略这些微小的变形，认为其没有发生变形。我们称这种受力作用后大小和形状保持不变的物体为刚体，其特征是物体内任意两点的距离始终保持不变。刚体是一个理想化的力学模型，是一种特殊的质点系，称为不变质点系。但是不应该把刚体的概念绝对化，例如，在研究飞机的平衡问题或飞行规律时，我们可以把飞机看作刚体；可是在研究飞机的颤振问题时，机翼等的变形虽然非常微小，但其变形对问题的研究是不能忽略的，必须把飞机看作可变形物体。

还有，在计算某些工程结构时，如果不考虑它们的变形而仍使用刚体的概念，则问题将成为不可解的。静力学研究的物体只限于刚体，故又称为刚体静力学，它是研究变形体力学的基础。

实际上，我们在对工程实际中的物体进行力学分析的时候，通常都要忽略一些与所研究的问题关系不大的次要因素，把握其主要因素，抽象出合理的力学模型，在满足工程精度要求的前提下尽量简化计算。

力的概念是从劳动中产生的。人们在生活和生产中，由于肌肉紧张收缩的感觉，逐渐产生了对力的感性认识。随着生产的发展，人们又逐渐认识到：物体机械运动状态的改变（包括变形），都是由于其他物体对该物体作用的结果。这样，逐步由感性到理性，形成了力的概念。

力是物体间的相互机械作用，这种作用可使物体的运动状态发生改变，或使物体发生变形。力改变物体运动状态的效应称外效应，也称运动效应，使物体变形的效应称内效应，也称变形效应。

力对物体的作用效应决定于三个要素：力的大小、方向和作用点。在国际单位制（SI）中，力的单位是牛顿（N）或千牛顿（kN）。力的方向包括方位和指向，比如说重力方向铅垂向下，“铅垂”是力的方位，“向下”是指向。力的作用点是指物体受力作用的点。对于相互接触的可变形物体，力实际上是作用在一小块面积上的，当作用面积很小时可近似看作一个点，而作用在这个点上的力称为集中力。对于点接触的刚体，其接触点就是力的作用点。

力既然是一个有大小和方向的量，所以是矢量。可以用带箭头的线段来表示力，如图 1—2 所示。其中线段的长度按一定的比例表示力的大小，线段的方位（例如与水平线所成的角度 θ ）和箭头的指向表示力的方向，线段的起点或终点表示力的作用点。过力的作用点沿力的矢量方位画出的直线（图 1—2 中 KL），称为力的作用线。

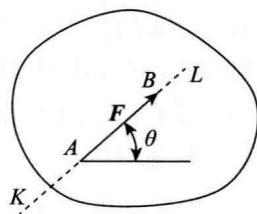


图 1—2

作用在物体上的一组力称为力系。力系按作用线分布情况的不同可分为下列几种：

当所有力的作用线在同一平面内时，称为平面力系，否则称为空间力系。

当所有力的作用线汇交于同一点时，称为汇交力系；而所有力的作用线都相互平行时，称为平行力系，否则称为任意力系。

若两个力系对同一刚体的效应完全相同，则称这两个力系为等效力系，等效的两个力系可以相互代替，称为力系的等效替换。用一个简单的力系等效替换一个复杂的力系称为力系的简化。如果一个力同一个力系等效，则称这个力为力系的合力，力系中的各力称为这个力的分力。能够使刚体保持平衡的力系称为平衡力系。但不能说不能使刚体保持平衡的力系就一定是非平衡力系，因为刚体的平衡除与其受力有关外，还与其初始状态有关。

二、静力学基本公理

静力学公理是人们在长期的生活和生产实践中总结出来的力的基本性质，它们又经过实践的反复检验，被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。这些性质无须证明而为人们所公认，并可作为证明中的论据，是静力学的理论基础。

公理 1 二力平衡公理

作用在刚体上的两个力，使刚体保持平衡的必要和充分条件是这两个力的大小相等、方向相反，并作用于同一条直线上，称为二力平衡公理。

如图 1—3 (a) 和图 1—3 (b) 所示，即平衡的两个力 F_A 、 F_B 满足 $F_A = -F_B$ 且两力作用线共线。注意，这里的充分性是指对保持刚体平衡而言是充分的，也就是初始平衡的刚体，只受等值、反向、共线的两个力作用，一定可以维持刚体的平衡。对本教材中静力学平衡的充分性都要这样理解。

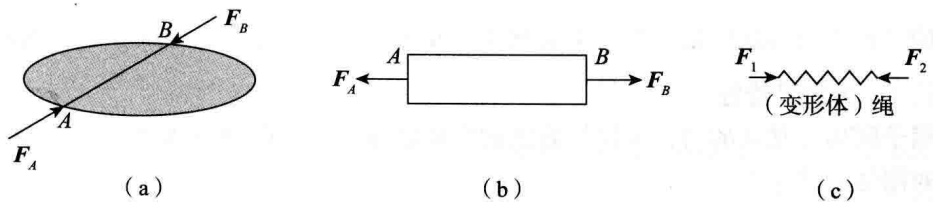


图 1—3

这个公理表明了作用于刚体上的最简单的力系平衡时所必须满足的条件。对于变形体来说，这个条件是必要的，但不是充分的。如图 1—3 (c) 所示，软绳受两个等值、反向、共线的拉力作用可以平衡，但若将拉力改变为压力就不能平衡了。

工程上常遇到只在两点受力作用处于平衡的构件，称为二力构件或二力杆。二力构件的受力特点是两力必沿作用点的连线，且等值、反向，如图 1—4 中的 BC 杆。

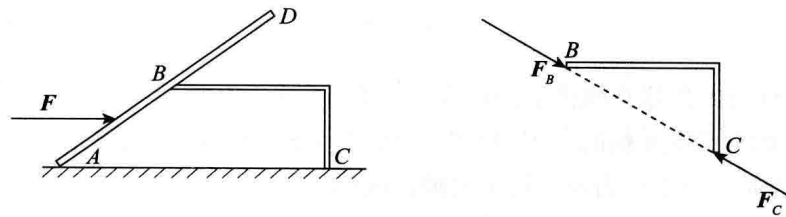


图 1—4

公理 2 加减平衡力系原理

在已知力系上加上或减去任意的平衡力系，并不改变原力系对刚体的效应。也就是说，如果两个力系只相差一个或几个平衡力系，则它们对刚体的作用是相同的，因此可以等效替换。这个公理是研究力系简化及等效替换的重要依据。

公理 3 力的平行四边形法则

作用在物体同一点上的两个力，可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向由这两个力矢量为邻边构成的平行四边形的对角线矢量确定，如图 1—5 所示， F_R 为 F_1 和 F_2 的合力。按平行四边形法则将两个力矢量合成，称为这两个力矢量的矢量和或几何和，表示为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-1)$$

合力大小为

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\varphi}$$

以合力 F_R 作用线与 F_2 作用线的夹角 α 表示合力的方向，则

$$\tan\alpha = \frac{F_1 \sin\varphi}{F_2 + F_1 \cos\varphi}$$

力的平行四边形法则是复杂力系简化的主要依据。据上述公理可以导出下列推论：

推论 1 力的可传性

作用于刚体上某点的力，可以沿着它的作用线将作用点移到刚体上另外一点，并不改变该力对刚体的作用。

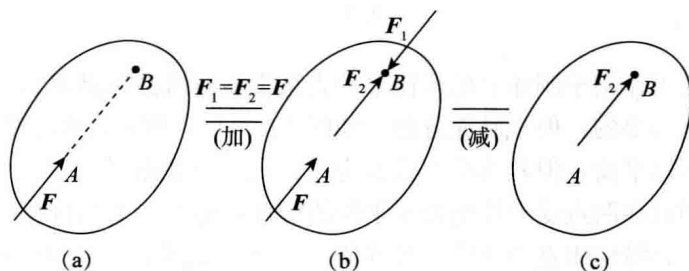


图 1—6

证明：设有力 F 作用在刚体上的点 A ，如图 1—6 (a) 所示。可在力的作用线上任取一点 B ，加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ，使 $F = F_2 = -F_1$ ，如图 1—6 (b) 所示。由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系，故可去掉；这样只剩下一个力 F_2 ，如图 1—6 (c) 所示。根据加减平衡力系原理，原来的这个力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 以及力 F_2 均等效，即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

由此可见，对于刚体来说，力的作用点已不是决定力的作用效应的要素，它已为作用

线所代替。因此，作用于刚体上的力的三要素是：力的大小、方向和作用线。

作用于刚体上的力可以沿着作用线移动，这种起点可以沿矢量线移动的矢量称为滑动矢量，力矢量是滑动矢量。

推论 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上三个相互平衡的力，若其中两个力的作用线汇交于一点，则第三个力的作用线必通过汇交点，且此三力的作用线在同一平面内。

证明：如图 1—7 所示，在刚体的 A_1 、 A_2 、 A_3 三点上，分别作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 。根据力的可传性，将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 A ，然后根据力的平行四边形法则，得 F_1 和 F_2 的合力 F_{R1} ，则力 F_3 应与 F_{R1} 平衡。由于两个力平衡必须共线，所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面，且通过力 F_1 与 F_2 的交点 A 。于是定理得证。

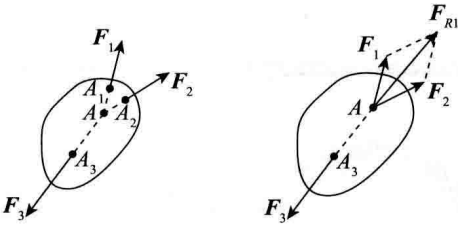


图 1—7

公理 4 作用力和反作用力定律

作用力和反作用力总是同时存在的，两力的大小相等、方向相反，沿着同一直线，分别作用在两个相互作用的物体上。

应该注意，尽管作用力和反作用力大小相等，方向相反，沿同一直线，但它们不是平衡力系，因为作用力与反作用力是作用在两个不同的物体上的力。

公理 4 概括了自然界中物体间相互作用的关系，表明作用力与反作用力总是成对出现的，同时存在同时消失，有作用力就有反作用力。根据这个公理，已知作用力则可知反作用力，它是分析物体受力时必须遵循的原则，为研究由一个物体过渡到多个物体组成的物体系统提供了基础。下面举一个实例来说明。

如图 1—4 所示构件的受力图，画出了构件 BC 的受力图后，再画 AB 杆受力图时， B 处的反作用力 F'_B 必须与 F_B 等值、反向、共线（图 1—8）。今后，作用力和反作用力用同一字母表示，但其中之一在字母的上方加一撇。

公理 5 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡，如将此变形体刚化为刚体，其平衡状态保持不变。

如图 1—9 所示，绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡，如将绳索刚化成刚体，其平衡状态保持不变。反之就不一定成立，如刚性杆在两个等值、反向、共线的压力作用下能平衡，如果将刚性杆换为绳索，则绳索就不能平衡。