

GAOZHI GAOZHUAN

全国高职高专土木工程专业系列规划教材

LILUN LIXUE

©沈养中 李永年 主 编

理论力学

(第二版)



科学出版社
www.sciencep.com

中国科学院教材建设专家委员会
全国高职高专土木工程专业系列规划教材特另

全国高职高专土木工程专业系列规划教材

理 论 力 学

(第二版)

沈养中 李永年 主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是《全国高职高专土木工程专业系列规划教材》之一,是依据教育部制定的高职高专土木工程专业力学课程教学基本要求编写的。本书着力体现当前高职高专教学改革的特点,突出针对性、适用性和实用性,以及职业技能、素质的培养。编写时精选内容,简化公式推导,理论联系实际,注重工程应用;文字简洁,叙述深入浅出,通俗易懂,图文配合紧密。全书共分九章,内容包括:绪论、刚体静力分析基础、平面力系、空间力系、点的运动、刚体的运动、质点与刚体的运动微分方程、动能定理、达朗贝尔原理。每章末附有思考题、习题,并附习题答案。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校的土建类各专业力学课程的教材,也可作为专升本考试用书以及有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学 / 沈养中,李永年主编. —2版. —北京:科学出版社,2005
(全国高职高专土木工程专业系列规划教材)
ISBN 7-03-015524-6

I. 理… II. ①沈…②李… III. 理论力学—高等学校;技术学校—教材 N. 031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 047552 号

责任编辑:童安齐 彭明兰 / 责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方上林工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencecp.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年11月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2005年7月第 二 版 印张:11 1/4

2005年7月第五次印刷 字数:212 000

印数:13 501—16 500

定价:16.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

销售部电话:010-62136131 编辑部电话:010-62137026(VA04)

《全国高职高专土木工程专业系列规划教材》

编 委 会

主任委员 沈养中

副主任委员 (以姓氏笔画为序)

王志军 邓庆阳 司马玉洲 李继业
李维安 董平 童安齐

委 员 (以姓氏笔画为序)

王长永 王振武 马楠 石静
田云阁 史书阁 付玉辉 刘正保
刘念华 刘晓立 李洪岐 李树枫
肖翥 张力霆 张丽华 张献奇
陈守兰 周文国 孟胜国 郝延锦
郭玉起 袁雪峰

第二版前言

本书是在第一版的基础上,根据当前高职高专教育教学改革的新特点进行修订的。本次修订继续保持第一版教材的特色,进一步精选内容、突出工程应用,突出职业技能、素质的培养,更加注意内容的深入浅出、通俗易懂。参加本次修订工作的有徐州建筑职业技术学院沈养中(第三、四、七、八、九章),华北航天工业学院李永年(第一、二、五、六章)。全书由沈养中统稿。

在本书的修订过程中,许多同行提出了很好的意见和建议,在此表示感谢。

鉴于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请同行和广大读者批评指正。

编 者

2005年3月

第一版前言

本书是《新世纪高职高专土建类专业系列教材》之一,依据教育部制定的高职高专土建类专业力学课程教学基本要求编写。

本书为建筑力学之一,它与材料力学(建筑力学之二)、结构力学(建筑力学之三)、工程结构有限元计算(建筑力学之四)在内容上融合、贯通,有机地连成一体,构成高职高专土建类专业配套的力学课程教材。本教材着力体现当前高职高专教学改革的特点,突出针对性、适用性和实用性。编写时注意精选内容,简化公式推导,理论联系实际,注重工程应用,以及文字简洁、深入浅出、通俗易懂、图文配合紧密。

参加本书编写工作的有河北工程技术高等专科学校沈养中(第十一章)、张翠英(第十二章),华北航天工业学院李永年(第六、七、八章)、韩文仲(第一、二、三章)、刘卫、徐景满(第四章)、胡志勇(第五章),华北矿业高等专科学校李维安(第九、十章)。全书由沈养中、李永年统稿。全书由青岛化工学院张文教授担任主审。

在本书的编写过程中,许多同行提出了很好的意见和建议,在此表示感谢。

鉴于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请同行和广大读者批评指正。

编 者

2001年7月

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 绪论.....	1
1.1 理论力学的研究对象和任务	1
1.2 理论力学的研究方法	2
思考题.....	3

第一篇 静 力 学

第二章 刚体静力分析基础.....	4
2.1 刚体和力的概念	4
2.2 静力学公理	7
2.3 平面内力对点之矩	9
2.4 力偶的概念和性质.....	10
2.5 约束与约束反力.....	12
2.6 物体的受力分析与受力图.....	15
思考题	18
习题	20
第三章 平面力系	23
3.1 平面汇交力系的合成与平衡.....	24
3.2 平面力偶系的合成与平衡.....	29
3.3 力的平移定理.....	30
3.4 平面一般力系向一点简化.....	31
3.5 平面一般力系的平衡方程及其应用.....	35
3.6 物体系统的平衡问题.....	41
3.7 考虑摩擦时的平衡问题.....	45
思考题	51
习题	53
第四章 空间力系	60
4.1 力在空间直角坐标轴上的投影及其计算.....	60

4.2 力对轴之矩及其计算	61
4.3 空间力系的平衡条件及其应用	63
4.4 重心和形心	67
思考题	74
习题	74

第二篇 运 动 学

第五章 点的运动	78
5.1 描述点运动的矢量表示法	79
5.2 描述点运动的直角坐标表示法	80
5.3 描述点运动的弧坐标表示法	83
思考题	87
习题	87
第六章 刚体的运动	89
6.1 刚体的平行移动	89
6.2 刚体的定轴转动	90
6.3 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	92
6.4 点的合成运动	96
6.5 刚体平面运动的概念及简化	98
6.6 刚体平面运动分解为平动和转动	99
6.7 平面图形上各点的速度	101
思考题	108
习题	109

第三篇 动 力 学

第七章 质点与刚体的运动微分方程	114
7.1 质点运动微分方程	114
7.2 刚体定轴转动微分方程	120
7.3 转动惯量及其计算	122
7.4 刚体平面运动微分方程	126
思考题	127
习题	128
第八章 动能定理	132
8.1 功的概念及计算	132

8.2 动能的概念及计算	138
8.3 动能定理	140
思考题.....	145
习题.....	146
第九章 达朗贝尔原理	150
9.1 惯性力的概念	150
9.2 达朗贝尔原理及动静法	151
9.3 刚体惯性力系的简化	153
思考题.....	159
习题.....	159
部分习题答案	163
参考文献	168

第一章 绪 论

本章介绍理论力学的研究对象、基本任务及其研究方法。说明土木工程专业学生学习理论力学的必要性。

1.1 理论力学的研究对象和任务

1.1.1 理论力学的研究对象

运动是物质存在的形式,是物质的固有属性。自然界任何物质以不同的形式不停地运动,从物体位置的变化到物质形态的改变,以至人类的思维活动都是运动的表现形式。物体在空间的位置随时间的改变,称为**机械运动**,它是人们日常生活和工程实际中最常见的运动,例如,汽车的行驶、机器的运转、水和空气的流动、建筑物的震动、宇宙飞船以至日月星球的运动都是机械运动,其他任何复杂的运动都与机械运动有着密切的联系。

理论力学是研究物体机械运动一般规律的学科。它研究的内容属于经典力学的范畴。经典力学是伽利略和牛顿在总结人类大量实践经验的基础上,经理论研究逐渐发展和完善,以牛顿三个基本定律为基础建立起来的。

近代科学技术的发展逐渐发现经典力学存在一定的局限性:它的理论仅适用于速度远小于光速的宏观物体的机械运动。速度接近光速的物体的运动和微观粒子的运动要分别由近代发展起来的相对论力学和量子力学研究。所谓经典力学就是相对于相对论力学和量子力学而言的。既然理论力学属于经典力学的范畴,它也就只研究日常生活和工程实际中所遇到的宏观物体的常速运动。

由于工程技术所研究的对象一般都是宏观物体,且其速度都远小于光速,所以,以经典力学为依据解决其有关的力学问题是足够精确的。因此,经典力学今天仍有很大的实用意义,并且在不断地发展。

物体的任何运动都是相对的,理论力学所研究的机械运动,无特殊说明时一般都是指相对地球而言的。**物体的平衡是指物体相对于地球处于静止或做匀速直线运动的状态**,它是机械运动的特殊情况,因而,也是理论力学研究的一部分内容,尤其对于土建、水利等专业还是很重要的内容。

1.1.2 理论力学的任务

在工程实际和日常生活中,各种物体都处于运动或静止状态,它们又都无不受

各种力的作用。理论力学就是要研究如何描述物体的机械运动,满足什么条件物体处于平衡状态,以及物体机械运动的变化与物体所受的力之间的关系。概括起来理论力学的研究内容包括以下三部分:

第一部分:静力学——研究受力物体的平衡规律,具体研究物体受力的分析方法,力系如何简化和受力物体平衡应满足的条件等。

第二部分:运动学——研究机械运动的时空特征,即只从几何的角度来研究如何描述和分析物体的运动,而不涉及引起物体运动变化的原因。

第三部分:动力学——研究物体的机械运动与它所受作用力之间的关系。

这三部分的主要内容就是对物体进行静力分析、运动分析和动力分析,这也就是理论力学的基本任务。

1.2 理论力学的研究方法

理论力学与其他任何一门学科一样,它的研究方法也是遵循认识过程的客观规律的。概括地说,理论力学的研究方法是从观察、实践和科学实验出发,经过分析、综合和归纳总结出力学的最基本的概念和规律;在此基础上经过抽象建立力学模型,并从基本规律出发,用数学演绎和逻辑推理的方法,得出正确的具有物理意义和使用价值的定理和结论,这样就将从实践中得来的大量感性认识上升为理性认识,形成理论;然后再回到实践中去验证理论的正确性,并在更高的水平上指导实践,同时在实践中进一步补充、完善、发展理论。如此循环往复,不断向前发展。理论力学的这种研究方法从其理论体系的形成和发展过程可以清晰地看出。

远在古代,人们就依据劳动所积累的经验开始创造一些简单的工具和机械,如滑轮、斜面、杠杆、水车等。在我国古代伟大学者墨翟(约公元前468~前382年)所著的《墨经》中就有关于杠杆平衡原理的论述和力的概念的说明。古希腊自然科学家阿基米德(公元前287~前212年)在他的著作《论比重》中建立了液体中浮体平衡等理论。这些都是从实践中总结出来的最基本的力学规律。

17世纪伽利略和牛顿在总结前人实践经验的基础上,又做了大量的实验和研究,从而建立了以牛顿三定律为代表的理论力学的理论基础。

18世纪和19世纪数学有了很大的发展,它为力学理论的逐渐完善提供了必要的条件。人们从力学的基本理论出发,结合生产实践提出的问题,用数学演绎和逻辑推理的方法推进了力学向深度和广度的发展,例如,瑞士数学家伯努利(1667~1748年)提出了虚位移原理,法国科学家达朗贝尔(1717~1785年)提出了非自由质点动力学的普遍解法,即所谓的达朗贝尔原理,随后,法国数学力学家拉格朗日(1736~1813年)把虚位移原理与达朗贝尔原理结合起来,导出非自由质点系的运动微分方程,即著名的第二类拉格朗日方程等,逐渐形成了理论严谨、体系完整的理论力学学科。

在此过程中,将实际物体抽象得出的许多力学模型,例如,在研究物体机械运动时,忽略物体受力后的变形,得出刚体的模型;忽略摩擦对物体运动的影响,得出理想约束的模型;忽略物体的几何尺寸,得出质点的模型等,一方面使所研究的问题得以简化,另一方面也更深刻地反映了事物的本质。这种抓住事物本质抽象出力学模型的方法的运用在理论力学的研究中是十分普遍的,应用理论力学解决实际问题也离不开这种方法。

进入 20 世纪以后,随着科学技术和生产建设的发展,由于科学实验和工程实际的需要,力学模型越来越多样,力学领域不断扩大,与其他学科交叉又形成了许多力学的分支。尽管它们都有各自的理论体系,用于解决不同类型的问题,但理论力学的理论和方法仍是解决现代工程技术领域大量力学问题的基础,即使在一些尖端科学技术中仍然应用着其基本原理。

对于与力学关系十分密切的土木工程专业,研究的对象多种多样,要解决的问题往往也很复杂,例如要对各种建筑结构进行受力分析和平衡计算,这些都要直接应用理论力学建立力学模型的方法和理论力学力系平衡的基本理论去解决。理论力学又是土木工程专业的一系列后续课程,如材料力学、结构力学、钢筋混凝土结构、土力学与地基基础等的理论基础。理论力学无疑是该专业一门重要的技术基础课。

学习理论力学将使学生掌握理论力学的基本理论和分析、处理工程实际问题的基本方法,培养学生分析解决实际问题的能力,并使学生在学习中充分理解理论力学从实践出发,经科学抽象、综合、归纳,建立力学模型,并经数学演绎、逻辑推理而得出结论,再通过实践来验证的科学研究方法,逐渐养成实事求是、科学严谨的工作态度。这些都为学生将来从事专业技术工作打下良好的基础。

思 考 题

- 1.1 理论力学的研究对象是什么?
- 1.2 理论力学的基本任务有哪些?
- 1.3 简述理论力学的研究方法,说明土木工程专业学生为什么要学习理论力学。

第一篇 静 力 学

静力学研究物体机械运动的特殊情况——平衡的问题。所谓物体的平衡是指物体相对地球保持静止或匀速直线运动状态。

研究物体的平衡就是要研究物体在外力作用下平衡应满足的条件,以及如何应用这些条件解决工程实际问题。为此往往需将作用于物体上较复杂的力系简化。所以,静力学主要是解决如下两个基本问题:① 力系的简化;② 力系的平衡条件及其应用。

静力学的理论和方法,特别是对物体进行受力和画受力图的方法是学习理论力学及后续许多课程的基础,在工程技术中也有广泛的应用。

第二章 刚体静力分析基础

本章介绍刚体、力、平面内力对点之矩、力偶、力系等基本概念及静力学公理,并在介绍约束和约束反力概念的基础上,具体分析工程实际中常见的几种典型约束的特点及其约束反力的性质,着重阐述物体受力分析的方法和受力图的画法,为学习静力学打下必要的基础。

2.1 刚体和力的概念

2.1.1 刚体的概念

所谓刚体是指在力的作用下,其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体。这是一个理想化的力学模型。事实上,任何物体受力时,其内部各点间的相对距离都要发生改变,这种改变称为位移;各点位移累加的结果便导致物体的形状和尺寸的改变,这种改变称为变形。当物体的变形很小时,变形对物体运动和平衡的影响甚微,因此,在研究物体的运动和平衡时,这种微小变形可以忽略不计,而将物体抽象为刚体。但当研究的问题与物体的变形密切相关时,即使是极其微小的变形

也必须加以考虑,这时就不能再将物体视为刚体,而必须将其抽象为另一力学模型——**变形体**了。

例如,在研究飞机的平衡问题或飞行规律时,我们可以把飞机视为刚体;但在研究机翼的振颤问题时,尽管机翼的变形非常小,但也必须把它看作是可以变形的物体。又如,建筑工地上常见的塔式吊车[图 2.1(a)],为使其具有足够的承载能力,对其零部件及整体进行结构设计以确定其几何形状和尺寸时,就必须考虑其变形,不能把它们看作刚体。但是,为确保其在各种工作状态下都不发生倾覆,计算所需的配重时,整个塔式吊车又可以视为刚体[图 2.1(b)]。

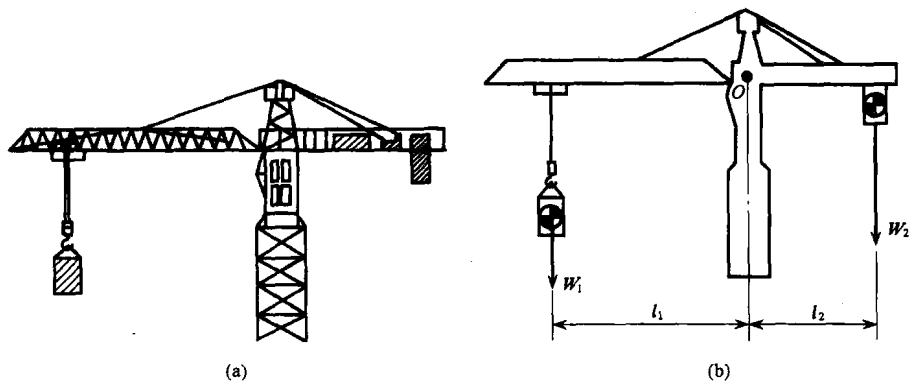


图 2.1

另外,当对某些工程结构进行设计计算时,若将其抽象为刚体,则有些问题可能无法解决,此时也必须考虑其变形,补充必要的条件后,才能使问题得以解决。

理论力学中,**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。

2.1.2 力的概念

1. 力的概念

力的概念是从人们劳动中产生的。人们在生活和劳动中,由对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,又逐渐认识到:物体运动状态的改变和物体的变形,都是由于其他物体对该物体施加力的结果。这样,由感性到理性逐步建立了力的概念。

力是物体间的相互机械作用。这种作用,一般有两种情况,一种是通过物体间的直接接触产生的,例如机车牵引车厢的拉力、物体之间的压力、摩擦力和粘结力等。另一种是通过“场”,如地球引力场对物体产生的重力,电场对电荷产生的引力或斥力等。

2. 力的效应

力对物体作用的效果称为力的效应。力的效应可分为两类:一类是使物体运动

状态发生变化,称为力的**运动效应**或**外效应**;另一类是使物体形状发生变化,称为力的**变形效应**或**内效应**。理论力学中把物体都视为刚体,因而只研究力的运动效应。

3. 力的三要素

大量实践证明,力对物体的效应取决于三个要素,即力的**大小**、力的**方向**、力的**作用点**,称之为力的三要素。

4. 集中力和分布力

作用于物体上某一点处的力称为集中力。对于集中力,我们可以用一个矢量来表示(图 2.2)。该矢量的长度 AB 按一定比例尺绘出表示力的大小;矢量的方向表示力的方向;矢量的始端(点 A)或终端(点 B)表示力的作用点;矢量 AB 所沿的直线(图 2.2 上的虚线)表示力的作用线。由于表示力的矢量不仅有大小和方向,还有确定的始端(或终端),所以常称其为**定位矢量**。规定用黑体字母 $\boldsymbol{F}$ 表示力的矢量,而用普通字母 F 表示力的大小。在国际单位制(SI)中,力的单位为牛顿(N)或千牛顿(kN)。

物体之间相互接触时,其接触处多数情况下并不是一个点,而是一个面。因此,无论是施力物体还是受力物体,其接触处所受的力都是作用在接触面上的,这种**分布在一定面积上的力称为分布力**。分布力的大小用力的**集度**表示,例如,水对容器壁的压力是作用在一定面积上的分布力,其大小用面积集度表示,单位为 N/m^2 或 kN/m^2 。分布在狭长面积上的力可看作线分布力,其集度单位为 N/m 或 kN/m 。图 2.3 表示在梁 AB 上沿长度方向作用着向下的均匀分布力,其集度为 $q=2\text{kN}/\text{m}$ 。

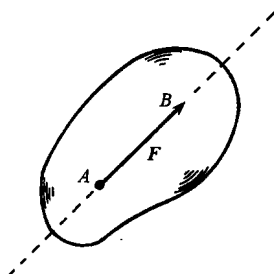


图 2.2

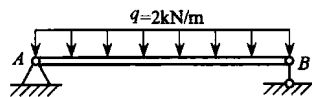


图 2.3

2.1.3 力系、平衡力系、等效力系、合力的概念

作用于一个物体上的若干个力称为力系。如果作用于物体上的力系使物体处于平衡状态,则称该力系为**平衡力系**。如果作用于物体上的力系可以用另一个力系代替,而不改变原力系对物体所产生的效应,则这两个力系互为**等效力系**。如果一个力与一个力系等效,则称这个力为该力系的**合力**,而该力系中的每一个力都称为**合力的分力**。

2.2 静力学公理

2.2.1 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力,使刚体处于平衡的必要和充分条件是这两个力的大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。例如,图

2.4 所示物体平衡的充要条件为

$$F_1 = -F_2 \quad (2.1)$$

受两个力作用处于平衡的构件称为二力构件。

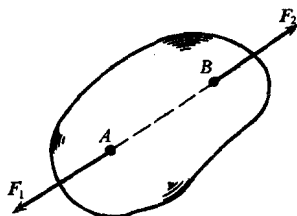


图 2.4

2.2.2 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的任意力系中,增加或减少任一平衡力系,并不改变原力系对刚体的效应。

根据上述公理可以导出如下结论:作用于刚体上的力可以沿其作用线移动到刚体内任意位置,而不改变力对刚体的效应。这一推论称为力的可传性原理。

证明:设力 F 作用于在刚体上的 A 点[图 2.5(a)]。根据加减平衡力系公理,可在力的作用线上任取一点 B ,并在 B 点加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F_2 = -F_1 = F$ [图 2.5(b)]。由于力 F 和 F_1 又组成一个平衡力系,故可以除去,于是只剩下了一个力 F_2 [图 2.5(c)]。这样就把原来作用于 A 点的力 F 沿其作用线移到了 B 点,而且没有改变对刚体的效应。

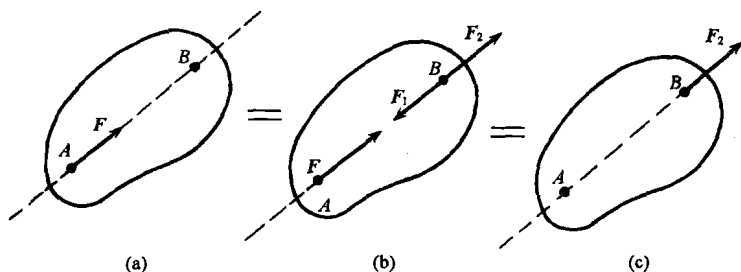


图 2.5

由上可知,对于刚体来说,作为力的三要素之一的力的作用点可以用力的作用线代替。于是,作用于刚体上的力的三要素就成为力的大小、方向和作用线。这样,表示作用于刚体上的力的矢量可以沿力的作用线移动,它不再是定位矢量,而称为滑移矢量。

2.2.3 力的平行四边形法则

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,合力的大小和方向由以这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线确定(图 2.6),其矢量表达式为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (2.2)$$

依据以上法则,可以推导出三力平衡汇交定理。即:设刚体在三个力作用下处于平衡状态,若其中两个力的作用线汇交于一点,则第三个力的作用线也通过该汇交点,且此三力的作用线在同一平面内。

证明:设刚体在作用于 A 、 B 、 C 三点的三个力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 、 $\mathbf{F}_3$ 作用下处于平衡状态(图 2.7),且力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 汇交于 O 点,根据力的可传性原理,可将力 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形法则,得合力 $\mathbf{F}_{12}$ 。则力 $\mathbf{F}_3$ 应与 $\mathbf{F}_{12}$ 平衡。由于两个力平衡必须共线,所以力 $\mathbf{F}_3$ 必通过力 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 的交点 O ,且与 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 共面。

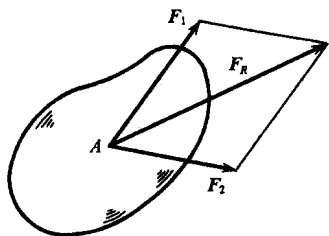


图 2.6

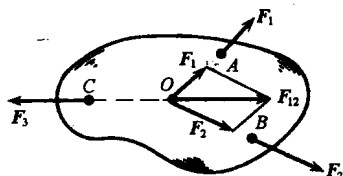


图 2.7

必须指出,三力平衡汇交定理给出的是不平行的三个力平衡的必要条件,而不是充分条件,即该定理的逆定理不一定成立。

2.2.4 作用和反作用定律

两物体之间的作用力和反作用力总是同时存在,而且两力的大小相等、方向相反、沿着同一直线,分别作用在两个物体上。

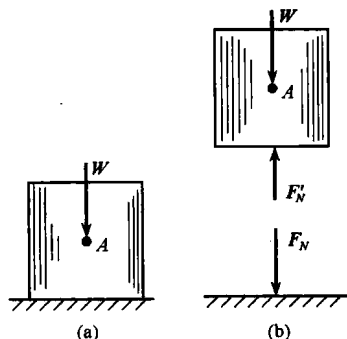


图 2.8

这个定律概括了物体间相互作用的关系,表明作用力和反作用力总是成对出现的。例如,物体 A 置于台面上[图 2.8(a)], A 对台面施加一个向下的作用力 $\mathbf{F}_N$,台面同时也对 A 施加一个反向作用力 $\mathbf{F}'_N$, $\mathbf{F}'_N$ 与 $\mathbf{F}_N$ 大小相等、方向相反,是一对作用力和反作用力[图 2.8(b)]。应该注意,作用力与反作用力分别作用在两个物体上,它们不构成平衡力系。