

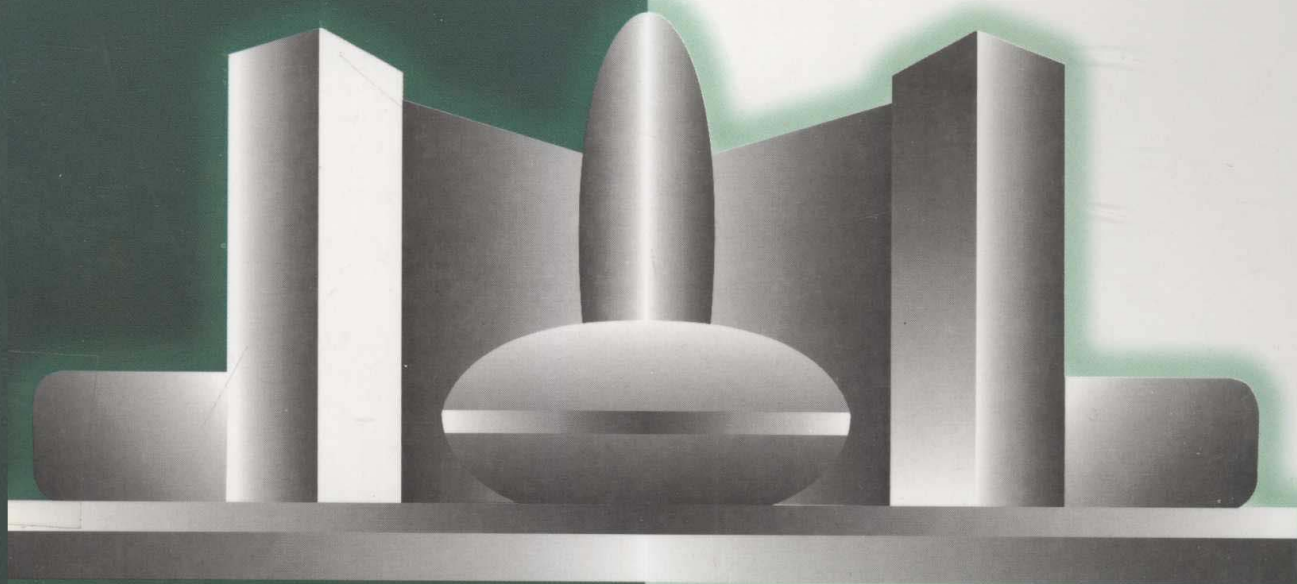
高等 专科学校
高等 职业技术学院
房屋建筑工程专业新编系列教材

理论力学

(第二版)

董卫华 主编

武汉理工大学出版社



高等专科学校
高等职业技术学院

房屋建筑工程专业新编系列教材

理论力学

(第二版)

董卫华 主编

武汉理工大学出版社

·武汉·

图书在版编目(CIP)数据

理论力学(第二版)/董卫华主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2002. 10
ISBN 7-5629-1847-3

I. 理… II. 董… III. 理论力学-高等学校-教材 IV. O31

出版者:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070)

印刷者:武汉理工大印刷厂

发行者:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16

印 张:15

字 数:374 千字

版 次:2002 年 11 月第 2 版 2005 年 1 月第 16 次印刷

书 号:ISBN 7-5629-1847-3/TU·194

印 数:104001—110000 册

定 价:15.00 元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

全国建筑高等专科学校

房屋建筑工程专业新编系列教材

编 审 委 员 会

顾 问:滕智明 李少甫 甘绍熺 罗福午
陈希天 卢 循

主 任:齐继禄 袁海庆

副主任(按姓氏笔划排列):

李生平 孙成林 张协奎 张建勋
武育秦 侯治国 胡兴国 廖代广

委 员(按姓氏笔划排列)

甘绍熺	乐荷卿	孙成林	齐继禄
卢 循	李少甫	李生平	张协奎
张建勋	张流芳	陈书申	陈希天
武育秦	陈晓平	周绥平	罗福午
胡兴国	侯治国	袁海庆	高琼英
舒秋华	董卫华	简洪钰	廖代广
滕智明	蔡德明	蔡雪峰	聂旭英
魏万德			

秘书长:蔡德明

出版说明

武汉理工大学出版社(原武汉工业大学出版社)组织编写的“全国建筑高等专科学校房屋建筑工程专业新编系列教材”在全国使用已经四年了。经过全体编审、出版人员的共同努力和广大用户的热情关怀,这套教材较好地实现了编委会预定的目标。四年中,全套教材平均每本发行量达到了8万册,其中最高的已达到12万册;使用的地域遍及祖国大陆,使用对象的类型包括高等专科、成人教育、电大、函大、自考和新的高等职业教育等。使用学校师生反馈的信息表明,编委会力求达到的“统一性、创新性、普适性和持久性”等特点,在教材的编写、编辑、出版和发行中得到了很好的体现,用各种标准来衡量,这都是一套成功的系列教材。

四年中,随着世纪的交替,我国的高等教育正在经历重大的变革。随着大学学科、专业的调整,高等学校的转制、重组,我国高等专科学校的队伍发生了很大的变化。特别是为适应社会主义市场经济和国民经济建设对人才的需求,在政府教育主管部门的政策引导下,高等职业技术教育得到了很大的发展。另外,与房屋建筑工程专业的教材内容密不可分的各种国家建筑规范正在修改,新规范2002年即将颁行。这些都对本套教材提出了修订的要求。为此,编委会经过认真研讨,决定全面修订、出版系列教材的第二版。

在全套教材第二版的修订过程中,编委会确定了如下原则:

1. 在第一版基础上,根据使用教师、学生反馈的意见,全面修订。
2. 教材内容上尽量体现最近四年里国内外建筑技术、工艺、材料的新发展、新成果。
3. 教材中凡涉及到国家建筑规范及其他部门规范、标准的,一律按最新规范、标准编写。
4. 除了保持第一版的统一性、创新性之外,特别注意教材的普适性。为适应高等专科教育改革的要求和针对高等职业教育的特点,修订中要更加强调教材的实践性。修订后的教材冠名为“高等专科学校、高等职业技术学院房屋建筑工程专业新编系列教材”。

第二版的出版正是体现了编委会提出的“持久性”原则。本套教材经过全面修订,必将焕发新的生机和活力。今后,随着我国建筑教育事业的进步和发展,我们的教材也将与时俱进,保持同步发展,及时修订,推出更新的版本。我们再次诚挚地希望广大读者对教材提出批评和建议。

武汉理工大学出版社
2001. 10

再版前言

本书原版是根据原国家教委颁发的《高等工程专科土建类理论力学课程教学基本要求》(1996年修订版)编写的,作为土建类高等工程专科理论力学课程的通用教材。

本书在2001年8月根据教育部对高职高专基础课程教学的统一要求进行删简修订和改编。编者在修订的过程中力求做到章节内容的安排、取舍和例题、习题的选择符合高职高专的教学特点;对理论系统的叙述突出重点,条理清楚,概念明确,文句通顺。对定理的推证尽量简捷直观,便于理解和接受。

书中带*号的章节和习题有部分内容略高于高职高专的课程教学基本要求,属补充和提高的内容范围,供教学中参考使用。

本书适用于土建类高职高专理论力学课程教学的教材,也可作为工程技术人员的参考书使用。

本书原版由董卫华主编,张成烈、马友君、张洪力参编,并由董卫华负责修订改编。由陈森教授主审。

限于编者的水平,书中难免存在缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

2002年8月

目 录

绪 论	(1)
-----	-----

第一篇 静力学

1 静力学基础理论	(3)
1.1 基本概念	(3)
1.2 静力学公理	(4)
1.3 约束和约束反力	(7)
1.4 受力分析和受力图	(10)
本章小结	(13)
思考题	(13)
习题	(14)
2 平面汇交力系	(17)
2.1 平面汇交力系的合成	(17)
2.2 平面汇交力系的平衡条件及其应用	(22)
本章小结	(25)
思考题	(26)
习题	(27)
3 平面力矩 平面力偶系	(30)
3.1 平面内力对点的矩	(30)
3.2 平面力偶	(31)
3.3 平面力偶系的合成和平衡	(33)
本章小结	(34)
思考题	(35)
习题	(36)
4 平面一般力系	(39)
4.1 概述	(39)
4.2 平面一般力系向一点简化	(39)
4.3 平面一般力系的合成结果	(41)
4.4 平面一般力系的平衡条件和平衡方程	(43)
4.5 物体与物体系统的平衡	(46)
4.6 静定和静不定的概念	(54)
本章小结	(55)
思考题	(56)
习题	(58)
5 摩擦	(64)
5.1 概述	(64)
5.2 滑动摩擦	(64)

5.3 考虑摩擦时物体的平衡问题	(68)
* 5.4 滚动摩擦阻	(70)
本章小结	(71)
思考题	(72)
习题	(73)
6 空间力系.....	(76)
6.1 空间汇交力系	(76)
6.2 空间力偶和力偶系	(81)
6.3 空间力矩理论	(83)
6.4 空间力系的简化和合成	(86)
6.5 空间力系的平衡条件 平衡方程及其应用	(88)
本章小结	(93)
思考题	(94)
习题	(94)
7 重心.....	(98)
7.1 概述	(98)
7.2 重心的概念	(98)
7.3 重心的性质及重心位置的计算	(99)
本章小结	(107)
思考题	(107)
习题	(108)

第二篇 运动学

8 点的运动	(111)
8.1 点的直线运动	(111)
8.2 用矢量法研究点的平面曲线运动	(113)
8.3 用直角坐标法研究点的平面曲线运动	(115)
8.4 用自然法研究点的平面曲线运动	(117)
本章小结	(123)
思考题	(123)
习题	(124)
9 刚体的基本运动	(125)
9.1 刚体的平动	(125)
9.2 刚体的定轴转动	(125)
9.3 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	(128)
本章小结	(131)
思考题	(131)
习题	(132)
10 点的合成运动.....	(133)
10.1 绝对运动、相对运动和牵连运动	(133)
10.2 点的速度合成定理	(134)

10.3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	(136)
本章小结	(138)
思考题	(138)
习题	(139)
* 11 刚体的平面运动	(141)
11.1 平面运动的概念	(141)
11.2 平面运动的分解	(141)
11.3 平面运动时平面图形上各点的速度	(143)
11.4 速度瞬心	(145)
本章小结	(148)
思考题	(149)
习题	(149)

第三篇 动力学

12 动力学基本定律和质点运动微分方程	(153)
12.1 动力学基本定律	(153)
12.2 质点运动微分方程	(154)
12.3 质点动力学的两类问题	(155)
本章小结	(160)
思考题	(161)
习题	(162)
13 动量定理	(164)
13.1 质点系的质量中心(质心)	(164)
13.2 质点和质点系的动量 力的冲量	(165)
13.3 动量定理	(166)
13.4 动量守恒定理和质心运动守恒定理	(169)
本章小结	(172)
思考题	(172)
习题	(173)
* 14 动量矩定理	(175)
14.1 动量矩的概念	(175)
14.2 转动惯量和平行轴定理	(176)
14.3 动量矩定理	(178)
14.4 刚体绕定轴转动的微分方程	(180)
本章小结	(182)
思考题	(183)
习题	(184)
15 动能定理	(187)
15.1 功的概念及其计算	(187)
15.2 动能的概念及其计算	(190)
15.3 动能定理及其应用	(191)

15.4 动力学普遍定理的综合应用	(194)
本章小结	(197)
思考题	(198)
习题	(199)
16 达朗伯原理.....	(202)
16.1 惯性力的概念	(202)
16.2 质点达朗伯原理和动静法	(203)
本章小结	(207)
思考题	(207)
习题	(208)
* 17 虚位移原理.....	(210)
17.1 虚位移、虚功和理想约束	(210)
17.2 虚位移原理	(211)
17.3 虚位移原理的简单应用	(215)
本章小结	(218)
思考题	(218)
习题	(219)
习题答案	(221)

绪 论

运动是物质的基本属性。自然界中的任何物质都以不同形式不停地运动。物理变化、化学变化、生物作用、人的思维都属于运动的范畴。机械运动是最简单、最基本也是最普遍的一种运动形式。

机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化。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行都是机械运动。

理论力学是研究物体机械运动普遍规律的学科。它属于经典力学(又称古典力学)的范畴,是以伽利略和牛顿所总结出的基本定律作为学科的理论基础。所谓经典或古典是相对于近代所发展起来的相对论力学和量子力学而言。相对论力学研究速度可与光速(3×10^8 m/s)相比的超高速运动。量子力学研究微观粒子的运动。在这两种情况下经典理论不再适用。但是日常生活和生产中所遇到的大量问题都属于宏观物体的常速运动,都是用经典力学的理论和方法去解决的。

理论力学的内容通常分为三个部分。第一部分静力学,研究在力的作用下物体的平衡规律。第二部分运动学,研究机械运动的时空特征,不涉及力的作用。第三部分动力学,研究物体的机械运动与作用力之间的关系。

理论力学以严密的逻辑方法研究机械运动这一最普遍的自然现象。其基本原理和基本方法在科学研究和工程技术领域都有广泛的应用。

学习理论力学将为学习房屋建筑工程专业的一系列后继课程如材料力学、结构力学、钢筋混凝土结构、土力学与地基基础等打下必要的基础。学习理论力学还有助于培养科学的思维方式和解决工程实际问题的能力。因此理论力学是一门重要的技术基础课。

第一篇 静 力 学

引 言

在绪论中我们已经提到理论力学是研究物体机械运动普遍规律的学科,而静力学是研究在力的作用下物体的平衡规律。

平衡是机械运动的一种特殊情形,是指物体相对于空间惯性参考系处于静止或匀速直线运动状态。我们通常把地球作为惯性参考系^①。地面上的静物,如桥梁、堤坝、房屋建筑以及沿直线轨道匀速行驶的火车等都是平衡的实例。

力则是指物体之间相互的机械作用。物体的运动状态(包括平衡)与它所受力的作用密切相关。

静力学主要研究三个问题:力的基本性质,力系的简化和力系的平衡。

它从基本公理出发,借助数学工具进行演绎和推理,得出力系简化和平衡的系统理论以及各种计算方法。

这些结论和方法是研究动力学、材料力学、结构力学以及其它力学学科和相关工程学科的重要基础和工具。

^① 地面点随地球自转运动的向心加速度仅为 0.008m/s^2 ,随地球公转的向心加速度仅为 0.0014m/s^2 ,都远小于重力加速度 9.8m/s^2 。因此,通常情况下可以将地球看作加速度为零的惯性参考系。

1 静力学基础理论

1.1 基本概念

1.1.1 力的概念

力是指物体之间相互的机械作用。力的实现分两种情况：一种是彼此相接触的两个物体，当有相互运动趋势时，在界面上所发生的相互作用，如压力、粘结力、摩擦力等。另一种是通过物理场实现的两物体之间的彼此作用，如重力、万有引力、电磁力等。

一般情况下，力的作用将使物体的运动状态发生改变，并使其几何形状和尺寸发生改变。前者称为力的外效应；后者称为力的内效应。实践和实验表明，力对物体的作用效应取决于力的作用点位置，力的方向和大小。三者合称为力的三要素。三要素中任何一个发生变化，力的效应就要发生变化。

因此力是定位矢量。

在图面上，力可以用带箭头的线段表示；线段的首端（或末端）表示力的作用点的位置，线段的长度按设定的比例表示力的大小。用线段的方位和箭头的指向表示力的方向（如图 1.1）。通常习惯用 F 、 P 等英文字母作为力的代号。本书在代号上方加一短矢号 $\rightarrow$ 表示矢量，以区别于一般的代数量。例如 $\vec{F}$ 表示力矢量，而 F 则只代表力的大小。

本书采用国际单位制，在国际单位制中，力的单位是牛顿(N)^①，千牛顿(kN)。地球上质量为 1 千克(公斤)的物体所受重力作用约为 9.8 牛顿。

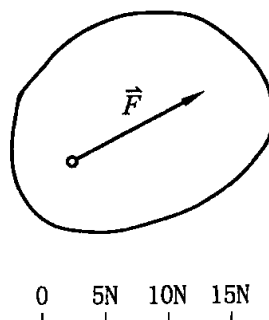


图 1.1

1.1.2 力系 平衡力系 等效力系 合力的概念

同时作用在物体或物体系统上的一群力称为力系。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，而不改变力对物体所产生的运动效应，则这两个力系互为等效力系。显然，等效关系可以递推。

$$A、B \text{ 等效且 } B、C \text{ 等效} \Rightarrow A、C \text{ 等效} \quad (1.1)$$

（“ $\Rightarrow$ ”号表示由左边的条件可以推出右边的结果。即符号左边的命题是右边命题的充分条件；右边命题是左边命题的必要条件。“ $\Leftrightarrow$ ”号表示互推关系，符号两边的命题互为充分

^① 英国科学家牛顿(Newton, 1642~1727)是经典力学的奠基者，为纪念他对物理学发展所做出的卓越贡献，物理学中把力的基本单位命名为牛顿。1 牛顿力相当于使 1 千克质量的物体获得 1m/s^2 的加速度所需要的力。

必要条件。)

如果一个力与一个力系等效,则称这个力为该力系的合力。

1.1.3 集中力和分布力

我们把集中作用在物体上某一点处的力称为**集中力**。但是实际上力总是连续作用在物体表面一定面积上,或者连续作用在物体内部一定的体积范围内。这样的力称为**分布力**。分布力的大小用力的集度表示。例如,重力是体积分布力,其大小用重力集度 γ 表示。单位为 N/m^3 或 kN/m^3 。再如水对容器壁的压力是面积分布力,其大小用面力集度表示。单位为 N/m^2 或 kN/m^2 。而分布在狭长条面积或体积上的力可以看成**线分布力**。线分布力的集度单位为 N/m 或 kN/m 。图 1.2 表示在梁 AB 上沿长度方向有均匀作用的向下的分布力,其大小为每米(m)2 千牛顿(kN)。

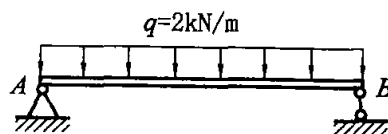


图 1.2

1.1.4 刚体和刚化原理

任何物体在力的作用下都要发生几何形状的改变(或称变形)。但是,在一般情况下变形往往很小。在研究物体的整体平衡和运动时可以不予考虑,这样并不影响所研究的结果。所以在理论力学中我们假设研究对象在力的作用下不发生变形,这样的物体称为**理想刚体**。刚体又称不变形体。本书中所研究的物体都视为刚体。

如果我们将力系作用下处于平衡状态的变形体用相同形状的刚体代替,那么,原有的平衡状态并不改变。这一原理称为**刚化原理**。可见刚体的平衡条件是相同形状变形体平衡的必要条件,即在同样力系作用下:

变形体平衡 $\Rightarrow$ 同形状的刚体平衡

必须注意,刚化原理的逆命题并不成立。即刚体的平衡条件不是变形体平衡的充分条件。例如在刚性杆的两端加一对大小相等的压力,可以使杆件平衡。但是同样一对力加在外形相同的柔绳(变形体)两端,柔绳是不能平衡的。

1.2 静力学公理

公理是科学家从前人长期观察和实验结果中总结出来的基本原理和法则,是不加严格的逻辑证明而采用的真理,它是构建学科系统理论的基础。本节所述静力学公理,是研究力系简化和平衡的基本依据。

公理 1 二力平衡公理

刚体只受两个力作用而保持平衡的充分必要条件是这两个力大小相等、方向相反,且作用线在同一条直线上。如图 1.3 所示。

刚体受二力平衡 $\Leftrightarrow$ 此二力等值、反向、共线 (1.2)

公理 2 加减平衡力系公理

在作用于一个刚体的任意力系中,增加(或减少)一个平衡力系,不会改变原力系对刚体的作用效应。

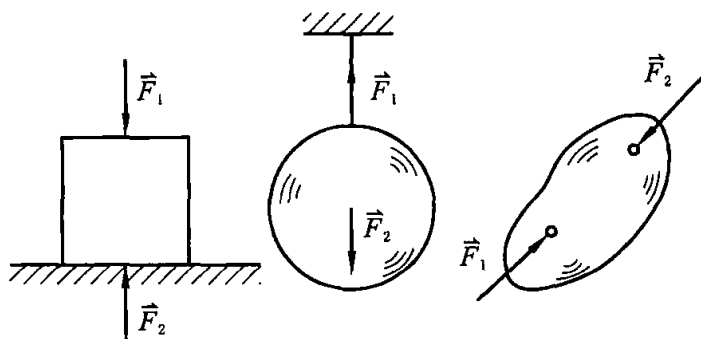


图 1.3

推理 1 力的可传性原理

在刚体内部,力可以沿其作用线移动到任意位置,而不改变力的作用效果。

证明:假设力 $\vec{F}$ 作用于刚体的 A 点, B 是力的作用线上刚体内部的任意一点(图 1.4 (a))。今在 B 处加上一对平衡力 $\vec{F}'$ 、 $\vec{F}''$ 。 $\vec{F}' = \vec{F}$, $\vec{F}'' = -\vec{F}$ 。 (“=”号表示矢量相等即方向、大小相同)(图 1.4(b))。由加减平衡力系公理可知, $\vec{F}$ 、 $\vec{F}'$ 、 $\vec{F}''$ 三力所构成的力系与原力系 $\vec{F}$ 等效。同理 $\vec{F}$ 、 $\vec{F}''$ 也构成平衡力系,将它们减去之后得到作用于 B 点的一个力 $\vec{F}'$ (图 1.4(c)), $\vec{F}'$ 与三力构成的力系等效。根据等效的递推性质,力 $\vec{F}$ 与力 $\vec{F}'$ 等效。于是力 $\vec{F}$ 沿作用线由 A 点移到了 B 点。

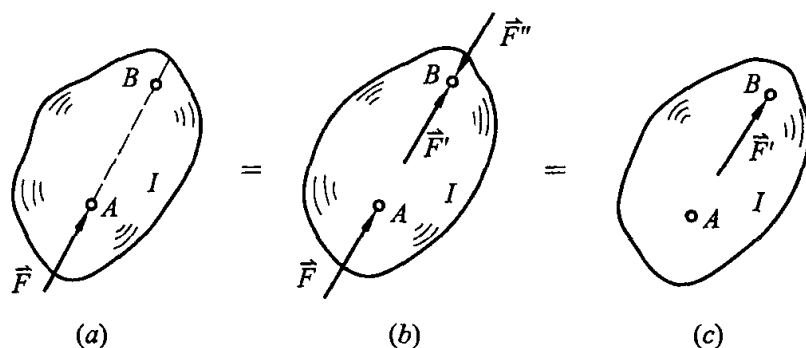


图 1.4

力的这种性质称为力的可传性。在刚体内部等值同向且作用线相同的力即为等效力。因此力的三要素成为:力的大小、方向和作用线。力由定位矢量变为滑移矢量。

必须注意的是力的可传性只能在刚体内部应用,不能沿作用线滑移到其它刚体上去。

例如图 1.5(a)所示作用于 A 物体上的力 $\vec{F}$ 不能沿作用线滑移到 B 物体上去。图 1.5(a)与图 1.5(b)所示两种情形显然并不等效。再如图 1.5(c)所示作用于三铰拱的左半拱上的力同样不能滑移到右半拱上。图 1.5(c)与图 1.5(d)所示两种情形力 $\vec{F}$ 所引起的拱脚支座处的反作用力完全不同。

另外,力的可传性不适用于变形体,因为力沿作用线移动会改变力对物体的内效应。例如,图 1.6(a)所示直杆 AB 的两端受到等值、反向、共线的两个力 $\vec{F}_1$ 、 $\vec{F}_2$ 作用处于平衡状态。如果将此二力各沿其作用线滑移到杆的另一端,显然直杆仍然平衡(图 1.6(b))。但是

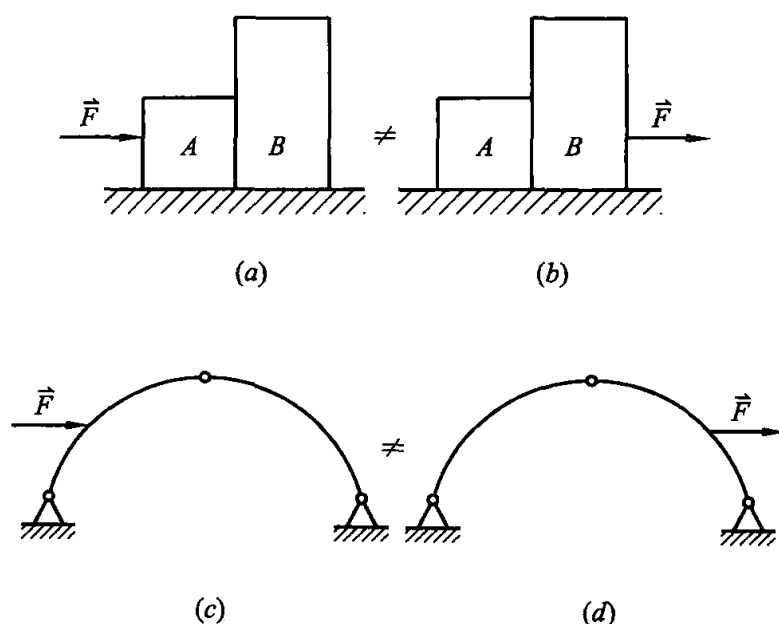


图 1.5

杆的变形改变了,原先 AB 杆受拉伸,将作用力沿力的作用线滑移后, AB 杆变为受压缩了。

公理 3 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点处的两个力的合力仍作用于该点。合力矢量的大小和方向,由以该两个力矢量为邻边所构成的平行四边形的对角线所确定。如图 1.7 所示。

图中 $\vec{R}$ 是 $\vec{F}_1$ 、 $\vec{F}_2$ 的合力。可以写成: $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{R}$ 。

两个共点力可以合成为一个合力。一个力同样也可以按平行四边形法则分解为两个分力,力在分解时必须指定分力的方向,因为同样一个力可以按不同的方向分解为两个力。特别需要注意的是,当一个分力的方向改变时,两个分力的大小都将发生变化(图 1.8)。因此,只确定一个分力的方向是无法将力分解的。

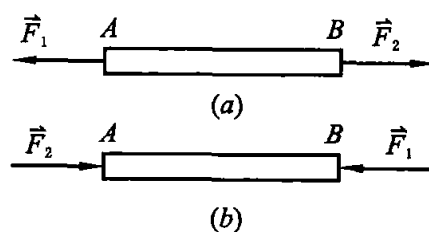


图 1.6

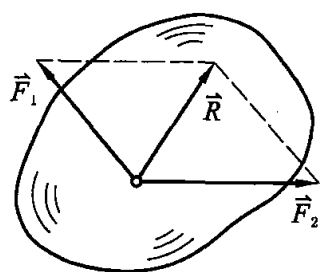


图 1.7

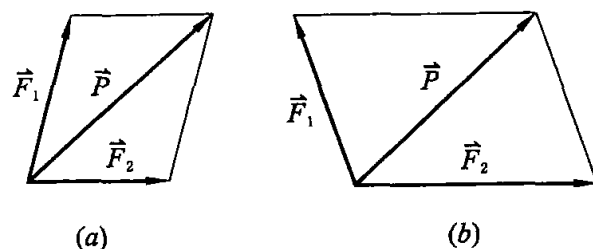


图 1.8

推论 2 三力平衡汇交定理

物体只受平面内三力作用而处于平衡状态时,若此三力不互相平行,则必汇交于一点。

证明:设三力为 $\vec{F}_1$ 、 $\vec{F}_2$ 、 $\vec{F}_3$,满足命题条件,它们不互相平行,所以必有二力相交。不妨令 $\vec{F}_1$ 、 $\vec{F}_2$ 滑移相交于 A 点。然后按平行四边形法则求得合力 $\vec{R}$ 。 $\vec{R}$ 作用于 A 点。由于力

的滑移和合成都是等效变换,不改变原有的平衡状态,所以, $\vec{R}$ 与 $\vec{F}_3$ 构成平衡力系。根据二力平衡公理 $\vec{R}$ 与 $\vec{F}_3$ 共线反向,故 $\vec{F}_3$ 必过A点,亦即三力 $\vec{F}_1$ 、 $\vec{F}_2$ 、 $\vec{F}_3$ 汇交于一点(图1.9)。

三力平衡汇交定理讨论的是平衡的必要条件,因此,适用于刚体,也适用于变形体或刚体系统。

公理4 作用力反作用力公理

当A物体对B物体施加作用力 $\vec{F}$ 时,B物体必然同时对A物体施加作用力 $\vec{F}'$ 。 $\vec{F}$ 和 $\vec{F}'$ 大小相等、方向相反且作用在同一条直线上。它们互为作用力、反作用力。

例如置于台面上的静物A对台面施加一个向下的作用力 $\vec{N}$ 。台面同时也对静物施加一个反向作用力 $\vec{N}'$ 。 $\vec{N}$ 与 $\vec{N}'$ 是一对作用力、反作用力(图1.10(a))。应该注意的是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。本例中,在分析A物体受力时,桌面对它的作用力 $\vec{N}'$ 与重力 $\vec{G}$ 构成平衡力系(图1.10(b))。

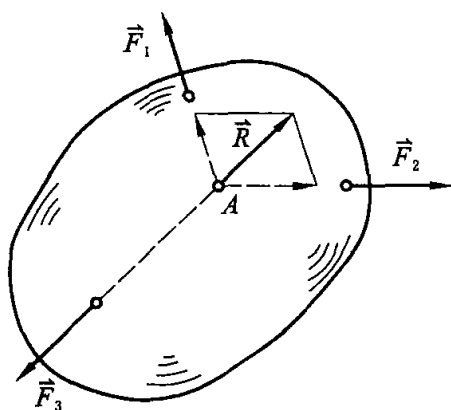


图 1.9

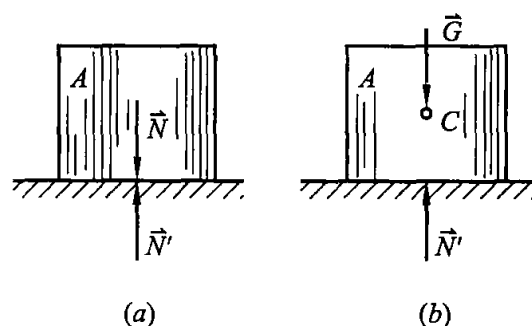


图 1.10

1.3 约束和约束反力

当物体与其它物体相互接触联系时,物体的运动会受到限制,它在空间某一方向的运动成为不可能。这样的物体称为非自由体。例如地面上的建筑物,被活页固定在窗框上的窗扇以及沿轨道行驶的火车都属于非自由体;而另一类物体,例如飞行中的飞机、炮弹等它们的运动没有受到限制,属于自由体。

力学中在研究非自由体的运动和受力时,把限定其运动的其它物体称为约束。当非自由体在力的作用下沿着被限定运动的方向有运动趋势时,约束将对该物体施加一个与运动趋势方向相反的作用力,以阻止运动的发生。这样的力称为约束反力,简称反力或约束力。

与约束反力对应,我们将主动作用在物体上,使物体产生运动趋势的力称为主动力。工程上又称为荷载。

约束反力的作用点和方向由约束本身的特点以及被约束物体的相对运动趋势所决定。约束反力的大小由施加于物体上的主动力大小以及物体的运动状态所决定,所以约束反力是被动力。

例如在分析水坝的受力时,水压力即是主动力或称荷载。基础可以看作约束,基础对水