

工程力学(I)

静力学

侯密山 胡玉林 编

石油大学出版社



工程力学(I)

静力学

侯密山 胡玉林 编

石油大学出版社

内 容 简 介

本书是一本介绍工程力学基本内容的教材,分为工程力学(I)、(II)和(III)三册。

工程力学(I)主要介绍静力学的基本内容,包括力系的简化和平衡条件、刚体和刚体系统的受力分析与平衡条件应用等。工程力学(II)主要介绍材料力学的基本内容,包括拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲、应力状态与强度理论、组合变形、压杆稳定和交变应力等。工程力学(III)主要介绍运动学和动力学的基本内容,运动学包括点的基本运动和点的复合运动,刚体的平动、定轴转动和刚体的平面运动;动力学包括动力学基本概念与质点动力学、动力学普遍定理和动静法。

本教材是按照96学时的教学要求编写的,适用于理工科大中专院校石油工程、地质、油气储运、冶金、材料、热加工等专业以及成人教育的相关专业,也可供有关工程技术人员参考。

本教材的(I)、(II)、(III)册自成系统,除作为96学时左右的工程力学三册合用外,也可以灵活组合选用。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学(I)/侯密山,胡玉林编. —东营:石油大学出版社,2004.4

高校教材

ISBN 7-5636-1935-6

I. 工... II. 侯... III. 工程力学-高等学校-教材 IV. 0241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 026404 号

书 名: 工程力学(I)

作 者: 侯密山 胡玉林

出版者: 石油大学出版社(山东 东营, 邮编 257061)

网 址: <http://sunctr.hdpu.edu.cn>

电子信箱: upcpres@mail.hdpu.edu.cn

排 版 者: 石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 东营市新华印刷厂

发 行 者: 石油大学出版社(电话 0546—8395977)

开 本: 787×960 印张:8.375 字数:146千字

版 次: 2004年7月第1版第1次印刷

印 数: 1~2000册

定 价: 12.00元

前 言

Foreword

工程力学作为机械、土木、采矿、航空航海、石油工程等领域的基础学科,在设计、制造与生产、技术创新、增产措施等方面具有重要的作用,是理工科大院校相关专业的一门重要专业基础课程。多年来,石油大学的石油工程专业一直开设以理论力学和材料力学为主的《工程力学》课程。与此同时,随着培养计划的调整,诸如油气储运、热能工程等专业已将原来的理论力学和材料力学课程改为《工程力学》,以及安全工程、工业设计、建筑环境等新增专业也设置了《工程力学》课程。本教材就是为了适应这一需要,按照 96 学时的教学要求编写的。

随着科学技术的进步和高等教育的发展,作为基础学科,工程力学的体系和内容也必须相应调整,以使消除重复、加强工程概念、适当突出行业特点等,这是编写本教材的另一目的。

全书分工程力学(I)、(II)、(III)三册共二十五章。工程力学(I)从第一章至第五章主要介绍静力学的基本内容,包括简单力系、平面一般力系、摩擦和空间任意力系;工程力学(II)从第六章至第十六章主要介绍材料力学的基本内容,包括拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲、应力状态与强度理论、组合变形、压杆稳定和交变应力等。工程力学(III)从第十七章至第二十五章主要介绍运动学和动力学的基本内容,运动学包括点的基本运动和点的复合运动,刚体的平动、定轴转动和刚体的平面运动;动力学包括动力学基本概念与质点动力学、动力学普遍定理和动静法。每章后面备有小结和习题,以便复习与练习;加注了专业术语的英文对照;书后附有全部习题答案。

本教材(共三册)为以理论力学和材料力学为主的工程力学教材(96 学时),适用于理工科大院校石油工程、地质、油气储运、冶金、材料、热加工等专业以及成人教育的相关专业,也可供有关工程技术人员参考。另外,本教材的(I)、(II)两册可作为以静力学与材料力学为主的工程力学教材(80 学时);也可以单

独或灵活组合使用。

本书的静力学和动力学部分由侯密山教授编写,材料力学和运动学部分由胡玉林教授编写。全书由侯密山负责统稿和定稿。在本书的编写过程中,得到了石油大学工程力学系同仁的帮助和支持,并提出了宝贵的意见,王魁喜副教授、尹莉副教授分别对材料力学与静力学部分进行了审阅,在此表示感谢。

本书的编写参考了部分同类教材,有雷同之处请谅。

限于编者水平,疏漏与错误在所难免,殷切希望读者批评指正。

编 者

2004年3月17日

目 录

Contents

第一篇 静 力 学

第一章 静力学基本概念与物体的受力分析	2
§ 1-1 静力学的基本概念	2
§ 1-2 力的矢量运算	4
§ 1-3 静力学公理	7
§ 1-4 约束与约束反作用力	9
§ 1-5 物体的受力分析和受力图	15
小 结	18
习 题	19
第二章 汇交力系与力偶系	23
§ 2-1 汇交力系的合成	23
§ 2-2 汇交力系的平衡条件	26
§ 2-3 力偶系的合成与平衡	32
小 结	40
习 题	41
第三章 平面一般力系	47
§ 3-1 概述与工程实例	47
§ 3-2 平面一般力系向作用面内一点简化	48
§ 3-3 平面一般力系的平衡条件和平衡方程	56
§ 3-4 刚体系统的平衡	62
§ 3-5 平面静定桁架的内力计算	69

小 结	74
习 题	75
第四章 摩 擦	83
§ 4-1 摩擦现象	83
§ 4-2 滑动摩擦	84
§ 4-3 考虑摩擦时的平衡问题	89
§ 4-4 滚动摩阻的概念	94
小 结	97
习 题	98
第五章 空间一般力系	103
§ 5-1 概述与工程实例	103
§ 5-2 空间一般力系向一点简化	104
§ 5-3 空间一般力系的平衡条件和平衡方程	107
§ 5-4 平行力系的中心与重心	111
§ 5-5 用实验方法测定物体的重心位置	117
小 结	119
习 题	120
附录 习题答案	125

第一篇 静 力 学

引 言

物体在空间的位置随时间的改变,称为机械运动。静力学是研究物体机械运动的特殊情况——物体的平衡问题的科学。所谓物体的平衡,是指物体相对惯性参考系保持静止或做匀速直线运动。通常,把固结于地球上的参考系作为惯性参考系,所得结果可以满足大多数工程问题的精度要求。

若物体处于平衡状态,则作用于物体上的力系必须满足一定的条件,这些条件称为平衡条件。满足平衡条件的力系称为平衡力系。在力或力系作用下,物体不但有运动状态的改变(机械运动),同时也会发生形状和尺寸的变化(变形),但物体的变形对其机械运动的影响非常小,可以忽略不计。因此,在静力学中,将受力物体理想化为在任何情况下都不发生变形的物体——刚体。前述所谓的静力学实际是刚体静力学的简称。

静力学研究以下两个基本问题:

1. 力系的简化。力系的简化是建立力系平衡条件的基础。
2. 力系的平衡条件(或物体在力系作用下的平衡条件)。研究与建立各种力系的平衡条件,并应用这些条件去解决实际问题。

静力学是工程力学的基础,在工程技术领域有着广泛的应用。

第一章 静力学基本概念与物体的受力分析

本章介绍静力学的基本概念、静力学公理和物体的受力分析,它们是静力学理论的基础与静力计算的重要环节。

§ 1-1 静力学的基本概念

一、力的概念

力(force)是物体间的相互机械作用。力对物体的作用有两种效应,即运动效应(effect of motion)和变形效应(effect of deformation)。运动效应使物体的运动状态发生变化(包括平衡);变形效应使物体的尺寸和形状发生变化(包括破坏)。力对物体的作用效应取决于力的作用点、力的方向和力的大小,即力的三要素(three elements of a force),因此力是矢量,力的相加服从矢量加法原则。

如图 1-1 所示,力向量用斜黑体字母 F 表示,线段 AB 的长度(按一定比例)表示力的大小;用线段的方位和箭头表示力的方向;线段的起点或终点表示力的作用点。通过力的作用点沿力的方向的直线为力的作用线。在实际工程中,力总是作用在受力物体的一定区域上,若力的作用面积很小,作用位置可抽象为一点——作用点,这种力称为集中力或力,如图 1-1 中的点 A 和力 F 。在国际单位制中,力的单位为牛顿或千牛顿,分别表示为‘N’和‘kN’。

若考虑力的作用区域的大小,其单位面积或单位长度上的受力称为分布力,分布力的大小称为载荷集度,通常用 q 表示,如风力、水压力等。分布力的单位为‘ N/m^2 和 kN/m^2 ’或‘ N/m 和 kN/m ’。如图 1-2 所示三角形截面坝体,右侧承受 $q = \rho gy$ 的液体分布压力作用。

作用在物体上的一群力称为一个力系(system of forces)。只有一个力的力系是最简单的力系。力系按作用线在空间分布的不同形式,可分为:

- (1) 汇交力系 各力作用线汇交于一点;
- (2) 平行力系 各力作用线相互平行;
- (3) 一般力系 各力作用线既不相交于同一点,也不相互平行。

按照各力作用线是否位于同一平面内,上述三种力系又可再分为平面和空

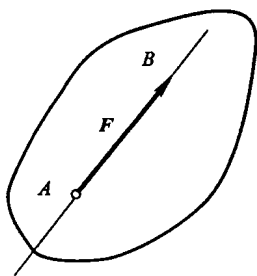


图 1-1 力的示意图

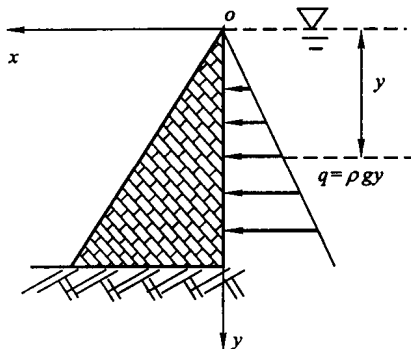


图 1-2 分布力实例

间两类,如平面汇交力系、平面一般力系;空间汇交力系、空间一般力系。

二、刚体的概念

刚体(rigid body)是在任何情况下保持其大小和形状不变的物体。实践表明,任何受力物体多少总要产生一些变形。但工程中的绝大多数受力零件或构件的变形都极其微小,这些微小的变形对物体的运动效应(也称为外效应)的影响甚微,可以略去不计,从而使问题的研究得到简化。静力学(statics)中所研究的物体只限于刚体,即研究力的外效应,所以又称为刚体静力学(statics of rigid body)。

刚体是一个抽象化的理想模型,实际并不存在。这种抽象化方法,在科学研究中是非常重要的,因为只有忽略一些次要的、非本质的因素,才能充分揭露事物的本质。将物体抽象为刚体,与所研究问题的性质有关。当所研究的问题以变形为主要因素时,就要将物体看成为变形体。

三、平衡的概念

平衡(equilibrium)是指物体相对于惯性参考系处于静止或做匀速直线运动状态。在工程实际中,一般可取固连于地球的参考系为惯性参考系。这样,工程中的一般平衡问题,是指物体相对地球处于静止或做匀速直线运动状态的问题。平衡是物体机械运动的特殊形式。

静力学着重研究以下两个基本问题:

(1) 作用于刚体上的力系的简化,即用一个简单的力系等效代替原力系对刚体的作用,此二者互为等效力系。若已知力系与单个力等效,则此单个力称为该力系的合力(resultant)。

(2) 刚体在力系作用下的平衡规律,即力系的平衡条件。使刚体处于平衡状态的力系,称为平衡力系。平衡力系应该满足的条件称为平衡条件。

§ 1-2 力的矢量运算

力是矢量,力的运算服从矢量运算原则。力的矢量运算是力系简化的基础。

一、力的合成与分解

作用于物体上同一点的两个力可合成为一个合力,此合力也作用于该点,合力的大小和方向由以原力矢为邻边所构成的平行四边形的对角线确定。其逆运算则为力的分解。此方法称为力合成的平行四边形法则或三角形法则。利用平行四边形法则(parallelogram law)或力的三角形法则(force triangle law)可以把两个共点力合成一个合力,也可以把一个力分解为作用在同一点的两个分力。特别是分解为互相垂直的共点分力,在后面的学习中尤为重要。

如图 1-3 所示,力 R 为力 F_1 、 F_2 的合力,作用于交点 A ;反之,力 F_1 、 F_2 为力 R 的分力。二者之间的关系由如下的矢量等式表示:

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

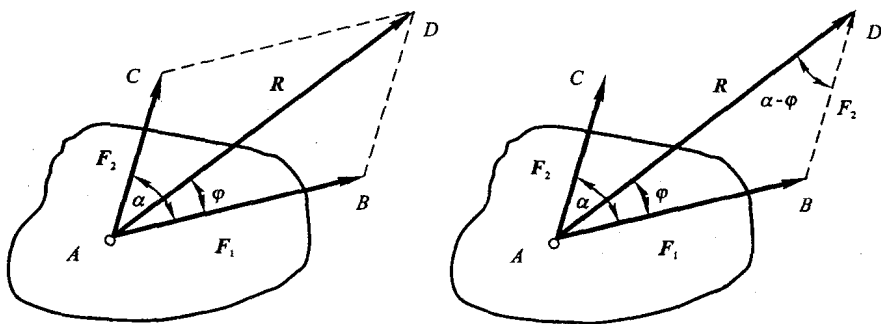


图 1-3 力的合成与分解

由式(1-1)知,两共点力的合力矢等于两力矢的矢量和。

若以 α 表示 F_1 和 F_2 之间的夹角, φ 表示 F_1 和 R 之间的夹角,则 R 的大小和方向可用三角公式求得。

由余弦定理有 R 的大小为(合力 R 的模)

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos(\pi - \alpha)} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha} \quad (1-2)$$

应用正弦定理,由三角形 ABD 有

$$\frac{F_1}{\sin(\alpha - \varphi)} = \frac{F_2}{\sin \varphi} = \frac{R}{\sin(\pi - \alpha)} \quad (1-3)$$

由此可确定 F_1 和 R 之间的夹角,即合力 R 的方向为

$$\sin \varphi = \frac{F_2}{R} \sin \alpha \quad (1-4)$$

力合成的平行四边形法则或三角形法则是矢量表达式(1-1)计算的几何方法。也可以用解析法计算。取直角坐标系 $Oxyz$,任一力矢 F_i 可表示为按直角坐标的分解式:

$$F_i = F_{ix}i + F_{iy}j + F_{iz}k \quad (1-5)$$

式中: i, j, k 是坐标单位矢量, F_{ix}, F_{iy}, F_{iz} 是力 F_i 在坐标轴 x, y, z 上的投影。

于是有:

$$R = R_x i + R_y j + R_z k \quad (1-6)$$

式中:

$$R_x = F_{1x} + F_{2x}, \quad R_y = F_{1y} + F_{2y}, \quad R_z = F_{1z} + F_{2z} \quad (1-7)$$

则合力 R 的大小为:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} \quad (1-8)$$

合力 R 的方向余弦为:

$$\cos(R, i) = \frac{R_x}{R}, \quad \cos(R, j) = \frac{R_y}{R}, \quad \cos(R, k) = \frac{R_z}{R} \quad (1-9)$$

二、力的矩

当我们用扳手拧螺母,用力开或关门,都利用了力对物体的转动效应。如图 1-4,力使螺母转动的效果不仅与力的大小 F 有关,而且也与力线到螺母的中心距离 d 有关。由此引出力的矩的概念。简称为力矩。

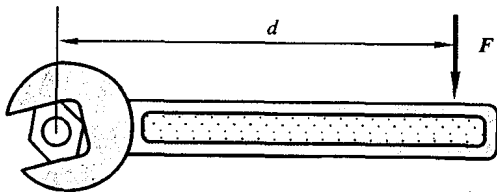


图 1-4 力使螺母转动的效果示意图

1. 力对点的矩

力 F 使物体绕一定点 O 转动的效应,可用力对该点的矩来度量,称为力 F 对 O 点的矩(moment of a force about a point),简称为力矩。 O 点称为力矩中心(centre of moment),简称矩心。

设力 F 作用于刚体的 A 点,从矩心 O 到 A 引矢量 $r = \vec{OA}$,称为 A 点到矩心 O 的矢径(position vector, radius vector),如图 1-5 所示,则力 F 对 O 点的矩矢为 $M_o(F)$,简记为 M_o :

$$M_o(F) = r \times F \quad (1-10)$$

即,力 F 对 O 点的矩矢等于力作用点对于矩心的矢径与力矢的矢积。

式(1-10)表明,力 F 对 O 点的矩是个矢量,矩矢 $M_o(F)$ 作用点在矩心,垂直于 r 与 F 所确定的平面,方向(或转向)由右手螺旋法则确定,大小为

$$M_o(F) = |M_o(F)| = Fd = 2\Delta OAB \text{ 面积} \quad (1-11)$$

力矩的单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$ (牛顿米)。

2. 力对轴的矩

力使刚体绕轴转动的效应,可用力对该轴的矩(moment of force about an axis)来度量。设作用于刚体上的力 F 沿 z 轴和 Oxy 面内的分量分别为 F_x 和 F_y ,如图 1-6 所示(其中 F_x 没有画出),则力 F 对 z 轴的矩 $M_z(F)$ 为

$$M_z(F) = \pm F_y d = \pm 2\Delta OAB \text{ 面积} \quad (1-12)$$

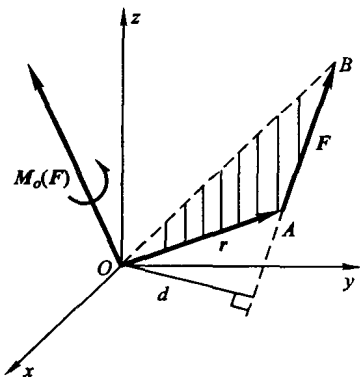


图 1-5 力对点之矩

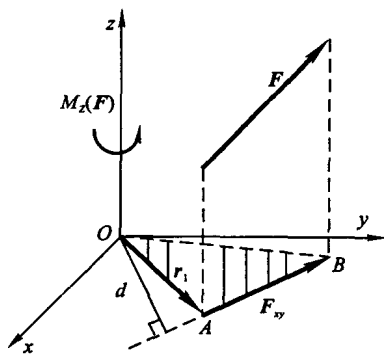


图 1-6 力对轴之矩

力对轴的矩为代数量,其正负号用以区别不同转向,正负号由右手螺旋法则确定,即弯曲的四指表示力 F 使物体绕 z 轴的转向,若拇指与 z 轴同向,则有

$M_z(F) > 0$; 反之, 若拇指与 z 轴反向, 则有 $M_z(F) < 0$ 。

3. 力对点的矩 $M_o(F)$ 与力对轴的矩 $M_z(F)$ 之间的关系

如图 1-5(或图 1-6)所示, 力 F 对 O 点的矩 $M_o(F)$ 与对 z 轴 (z 轴通过 O 点)的矩 $M_z(F)$ 之间有如下对应关系:

$$[M_o(F)]_z = M_z(F) \quad (1-13)$$

即, 力对点的矩在过点之轴上的投影等于力对该轴的矩。

在直角坐标系 $Oxyz$ 中, 设作用于 A 点的力 $F = F_x i + F_y j + F_z k$, 矢径 $\vec{OA} = r = xi + yj + zk$, 则有:

$$\begin{aligned} M_o(F) = r \times F &= \begin{vmatrix} i & j & k \\ x & y & z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} \\ &= (F_z y - F_y z) i + (F_x z - F_z x) j + (F_y x - F_x y) k \\ &= [M_o(F)]_z i + [M_o(F)]_y j + [M_o(F)]_x k \\ &= M_x(F) i + M_y(F) j + M_z(F) k \end{aligned} \quad (1-14)$$

利用式(1-14), 可用解析法计算力对点的矩或力对轴的矩。

上述运算法则不难推广到多个力的合成与力矩计算问题中。

§ 1-3 静力学公理

人们通过长期的观察与实践, 根据大量的客观事实, 对力的基本性质进行了概括总结, 得出了静力学公理。这些公理是静力学的基本规律, 它们构成了静力学的理论基础。静力学公理的正确性为大量的实践所证实。

公理 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与充分条件是: 此两力大小相等、指向相反且沿同一作用线。该公理阐明了作用于刚体上的一个简单力系的平衡条件, 是研究复杂力系平衡的基础。只受两个力作用处于平衡的物体称为二力体。二力体所受力的特点是: 两个力必沿作用点的连线, 如图 1-7 所示。

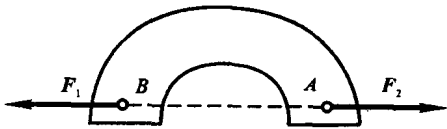


图 1-7 二力体

由公理 1, 可以推得平衡力系定理: 在

力系作用下,刚体保持平衡的充分必要条件是,该力系是一零力系。即,力系的主矢与对任一点的主矩均为零(主矢与主矩的概念将在后面章节中介绍)。

公理 2 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的任一力系中,加上或减去一个平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效应。即: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效果相同,因此可以等效替换。

公理二对研究力系的简化很重要。

推论 1 力的可传性原理

作用于刚体上的力,可以沿其作用线移至刚体上的任一点,而不改变它对刚体的作用。此即为作用于刚体上的力的可传性原理(transmissibility of force)。力的可传性指出,作用于刚体上的力的三要素是:力的大小、方向和作用线。

证明 设力 F 作用于刚体的 A 点,如图 1-8(a)。根据加减平衡力系公理,可在力 F 的作用线上任取一点 B ,并加上一平衡力系 F_1 、 F_2 ,使 $F = F_2 = -F_1$,如图 1-8(b)。由于力 F 、 F_1 也是一个平衡力系,故可减去;这样只剩下一个力 F_2 ,如图 1-8(c)。因图 1-8(a)、(b)、(c)三者等效,而力 F_2 就是原力 F ,但作用点已移到了 B 点。证毕。

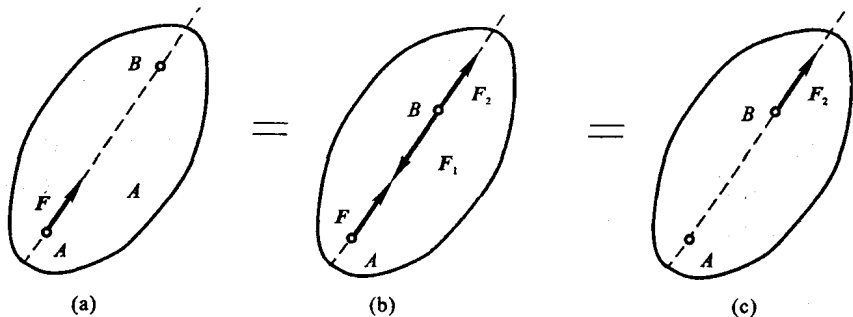


图 1-8 作用于刚体上的力的可传性

作用在刚体上的力可沿作用线移动,力矢为滑动矢量(sliding vector)。

注意:力的可传性原理对变形体并不适用,因力移动后对物体的变形效应不同。

推论 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上的三个力平衡,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三力必在同一平面内,且第三个力的作用线必通过此汇交点。

证明 如图 1-9, 在刚体上的 A 、 B 、 C 三点上, 分别作用平衡力 F_1 、 F_2 和 F_3 。根据力的可传性, 将力 F_1 、 F_2 移到汇交点 O , 并利用力的平行四边形法则得合力 R_{12} 。力 F_3 应与合力 R_{12} 平衡。二力平衡必共线, 所以力 F_3 的作用线通过汇交点 O , 且与 F_1 、 F_2 共面。证毕。

公理 3 作用与反作用定律 (law of action and reaction)

两物体之间的相互作用力, 总是大小相等、指向相反、沿同一直线分别作用在这两个物体上。

例 放在光滑平面上的物体, 受力如图 1-10。则 F 、 F' 为一对作用力和反作用力; 而 F 、 P 则为一对平衡力。

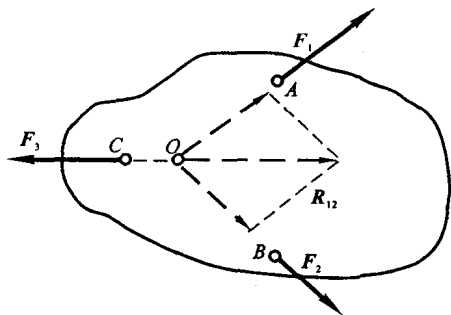


图 1-9 推论 2 证明图例

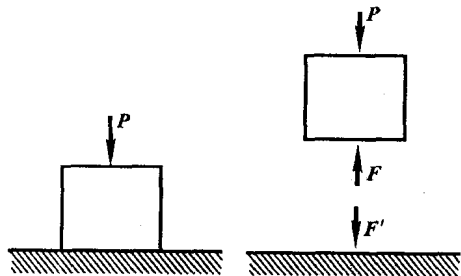


图 1-10 作用力和反作用力图例

注意: 公理 3 不限于刚体, 它对于变形体也是适用的, 且作用力和反作用力不是一对平衡力。但公理 1、2 只适用于刚体。

公理 4 (刚化原理)

当变形体在力系作用下处于平衡时, 若将它理想化为刚体, 其平衡状态保持不变。刚化原理 (principle of rigidization) 的前提条件是: 变形体处于平衡, 它提供了把变形体抽象成刚体模型的条件。在刚体静力学基础上, 考虑变形体特性, 可进一步研究变形体的平衡问题。刚化原理指出: 刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件。

§ 1-4 约束与约束反作用力

为了分析和解决实际力学问题, 除了对物体模型进行理想化外, 还要对物体的受力、物体间的接触性质和连接方式进行理想化。工程实际中的大多数物体,

其运动往往受到一定的限制或约束。例如,在路面上行驶的汽车、在钢轨上行驶的火车、安装在轴承中的电机转子等等。运动受到某种条件限制的物体称为非自由体(constrained body)。而像空中飞行的飞机、人造卫星等物体,它们在空间的运动没有受到任何其他物体施加的限制,则称为自由体(free body)。如图 1-11 所示。

对物体运动施加限制的物体,称为约束(constraint)。上述路面对汽车、轨道对机车、轴承对电机转子等都是约束。约束对被约束物体的作用力称为约束反力(reactions of constraint)或约束力(constraint force),简称反力。约束力的方向总是与物体被约束所限制的运动方向相反,作用在被约束物体上。约束力的大小常常是未知的,与被约束

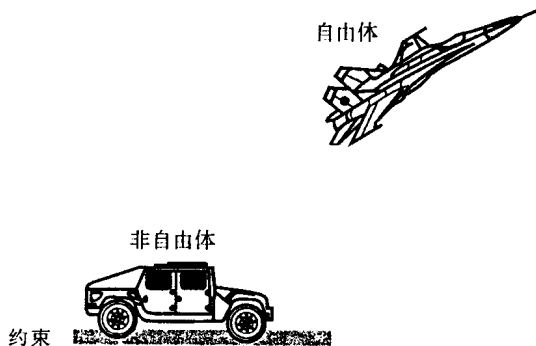


图 1-11 非自由体与自由体实例

物体的运动状态和受力,以及约束性质有关,需通过力学规律研究才能确定。

物体的受力可分为两类:主动力与约束力。除约束力以外的其他力,如重力、风力、水压力、电磁力等,都称为主动力(applied forces)或载荷(loads)。它们的特点是可以预先独立地确定。如图 1-12, G 、 F 为主动力,而 F_A 、 F_B 是约束反力,其大小未知。在一般情况下,约束反力是由主动力引起的。

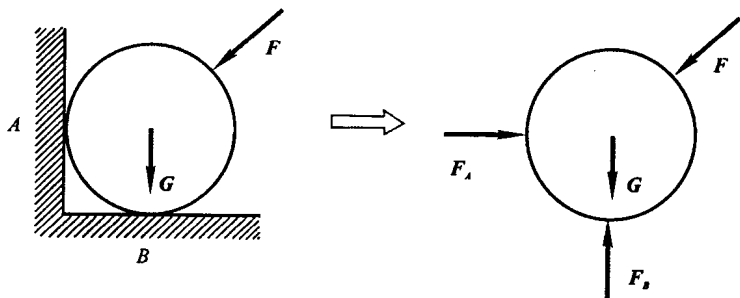


图 1-12 主动力与约束力

实际物体之间的接触或连接是非常复杂的(一般为非理想约束, non-ideal constraint)。在分析物体的受力时,必须对实际约束进行理想化抽象,以简化计