

工程力学

陈薇薇 琚爱云 ◎主 编

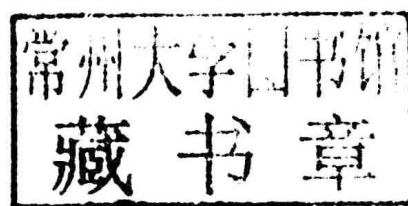
GONGCHENG LIXUE



中央广播电视大学出版社

工程力学

陈薇薇 琚爱云 主编



中央广播电视大学出版社

北 京

内容简介

全书共十章，主要内容有：静力学基础、平面力系的合成与平衡、轴向拉伸和压缩、剪切和挤压的实用计算、圆轴的扭转、截面的几何性质、梁的弯曲、强度理论、组合变形、压杆稳定等。

图书在版编目（CIP）数据

工程力学 / 陈薇薇，锯爱云主编. —北京：中央广播电视大学出版社，2014.1

ISBN 978-7-304-05304-8

I. ①工... II. ①陈... ②锯... III. ①工程力学

IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 224346 号

版权所有，翻印必究。

工程力学

陈薇薇 锯爱云 主编

出版·发行：中央广播电视大学出版社

电话：营销中心：010-58840200 总编室：010-68182524

网址：<http://www.crtvup.com.cn>

地址：北京市海淀区西四环中路 45 号

邮编：100039

经销：新华书店北京发行所

策划编辑：苏 醒

印刷：北京市平谷早立印刷厂

版本：2014 年 1 月第 1 版

开本：787×1092 1/16

责任编辑：吕 剑

印数：0001~3000

2014 年 1 月第 2 次印刷

印张：11.5 字数：186 千字

书号：ISBN 978-7-304-05304-8

定价：35.00 元

（如有缺页或倒装，本社负责退换）

前 言

本书以掌握概念、强化应用为原则，以提高综合素质和能力为目的，在编写过程中体现了以下特色：

(1) 注重理论与实践相结合，引用了大量工程实例，通过分析研究，增加读者对力学知识在工程实践中具体应用的感性认识，培养和提高他们解决工程实际问题的能力。

(2) 本书编入了较多的新知识、新技术、新工艺、新材料、新成果。在编写过程中，充分吸收了近几年“工程力学”改革的经验，删减了理论性较强的内容，加强了基础理论及有关实际工程应用的环节。全书强调“能分析”、“能计算”、“能联系工程实际”，力求在应用性方面有所突破和创新。

(3) 在结构顺序的编排和语言的陈述等方面经多方斟酌，力求概念把握准确，叙述深入浅出，详略得当。

全书共十章，主要内容有：静力学基础、平面力系的合成与平衡、轴向拉伸和压缩、剪切和挤压的实用计算、圆轴的扭转、截面的几何性质、梁的弯曲、强度理论、组合变形、压杆稳定等。

本书由陈薇薇（第1~5章）、琚爱云（第6~10章）任主编。

由于编者水平有限，书中难免存在一些疏漏和不妥之处，诚请读者多提宝贵意见和建议。

编 者

目 录

第1章 静力学基础	1
1.1 静力学基本概念	1
1.2 静力学公理	2
1.3 力矩	5
1.4 约束和约束反力	6
1.5 受力图	9
第2章 平面力系的合成与平衡	14
2.1 平面汇交力系的合成与平衡	14
2.2 平面力偶系的合成与平衡	16
2.3 平面任意力系的简化与平衡方程	19
2.4 平面任意力系的平衡条件及其应用	21
2.5 平面平行力系的平衡	23
2.6 物体系统的平衡	24
2.7 摩擦的概念	26
第3章 轴向拉伸和压缩	32
3.1 轴向拉伸和压缩时的内力	32
3.2 轴向拉伸和压缩时的应力	36
3.3 轴向拉伸或压缩时的变形及胡克定律	39
3.4 材料在拉伸和压缩时的力学性能	42
3.5 轴向拉(压)杆的强度条件及其应用	49
3.6 应力集中的概念	53
第4章 剪切和挤压的实用计算	58
4.1 剪切的概念	58
4.2 剪切和挤压的实用计算	59
第5章 圆轴的扭转	67
5.1 概述	67
5.2 外力偶矩的计算、扭矩和扭矩图	68
5.3 扭转强度计算	70
5.4 圆轴扭转时的刚度计算	76
5.5 矩形截面杆扭转时的应力	80

第6章 截面的几何性质	83
6.1 静矩和形心.....	83
6.2 惯性矩、极惯性矩和惯性积.....	85
6.3 平行移轴定理、组合图形的惯性矩与惯性积.....	88
6.4 转轴定理主惯性轴和主惯性矩.....	90
第7章 梁的弯曲	94
7.1 平面弯曲.....	94
7.2 梁的弯曲内力——剪力和弯矩.....	95
7.3 绘制剪力图和弯矩图.....	99
7.4 载荷集度、剪力和弯矩间的关系.....	104
7.5 纯弯曲时梁横截面上的正应力.....	108
7.6 梁弯曲时的应力及强度计算.....	113
7.7 提高梁弯曲强度的措施.....	117
第8章 强度理论	123
8.1 强度理论的概念.....	123
8.2 四种常用强度理论.....	124
第9章 组合变形	133
9.1 组合变形的概念.....	133
9.2 斜弯曲变形的应力和强度.....	134
9.3 拉伸（压缩）和弯曲组合变形的计算.....	137
9.4 偏心拉伸（压缩）杆件的强度计算及截面核心.....	138
第10章 压杆稳定	142
10.1 压杆稳定性的概念.....	142
10.2 两端铰支细长压杆的临界力.....	143
10.3 不同杆端约束细长压杆的临界力.....	146
10.4 欧拉公式的适用范围、经验公式.....	148
10.5 压杆稳定性计算.....	151
10.6 提高压杆稳定性的措施.....	159
附录 型钢规格表	164
参考文献	176

第1章 静力学基础

1.1 静力学基本概念

一、力的概念

力是物体之间相互的机械作用，这种作用将引起物体机械运动状态发生改变。力的概念产生于人类从事的生产劳动中，当人用手推车时，手指和车之间有了作用，这种作用使车产生了运动；当用气锤锻打工件时，气锤和工件间有了相互作用，工件的形状和尺寸发生了改变。可见力作用于物体将产生两种效果：一种是使物体的机械运动状态发生改变，称为力的运动效应或外效应；另一种是使物体发生变形，称为力的变形效应或内效应。

既然力是物体之间相互的机械作用，力就不能脱离物体而单独存在。在分析物体受力时，必须搞清哪个是施力体，哪个是受力体。

实践证明，力对物体的作用效应取决于以下3个要素：

(1) 力的大小。指物体间相互作用的强弱程度。国际单位制(SI)中，力的单位为牛顿(N)或千牛顿(kN)。

(2) 力的方向。通常包含力的方位和指向两个含义。例如重力的方向是“铅垂向下”，“铅垂”是指力的方位；“向下”是说力的指向。

(3) 力的作用点。力的作用点是指力在物体上作用的位置。

二、力系

作用在同一物体上的一群力称为力系。一个较复杂的力系，总可以用一个和它作用效果相等的简单力系来代替。在不改变作用效果的前提下，用一个简单力系代替复杂力系的过程称为力系的简化或力系的合成。对物体作用效果相同的力系，称为等效力系。如果一个力与一个力系等效，则此力称为该力系的合力，而力系中各个力都是其合力的分力。合力对物体的作用效果等效于所有分力的作用效果。使物体保持平衡的力系，称为平衡力系。要使物体处于平衡状态，就必须使作用于物体上的力系满足一定的条件，这些条件叫做力系的平衡条件。

三、刚体的概念

静力学的研究对象是刚体。所谓刚体是指在任何情况下都不发生变形的物体。显然,这只是一个理想化的力学模型。实际上任何物体受力后或多或少都要发生变形,但工程中许多物体变形都非常微小。这些微小的变形对研究物体的平衡问题不起主导作用,可以忽略不计,因而可以把实际物体看作刚体,这样可以使问题研究大为简化。这种处理问题的方法是科学研究中重要的抽象化方法。例如研究飞机的平衡或飞行规律时,可以把飞机看作刚体。但是研究飞机的振动问题时,机翼等的变形虽然微小,但是就不能把飞机看成刚体了,而把它看成是变形体,这是材料力学的研究内容。

静力学中研究的物体只限于刚体,因此静力学又称为刚体静力学。

1.2 静力学公理

静力分析中的几个基本公理是人们通过长期经验的积累与总结,又经实践反复检验,证明是符合客观实际的普遍规律。它们是静力学的理论基础。

【公理一】二力平衡公理

作用在同一刚体上的两个力,使刚体处于平衡状态的必要和充分条件是:这两个力大小相等,方向相反,并作用在同一直线上(简称等值、反向、共线),如图 1.1 所示。

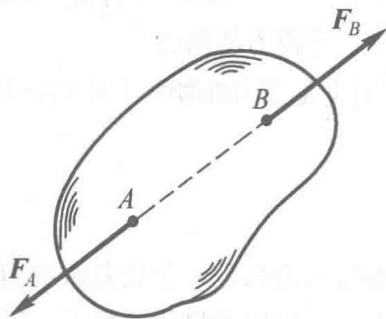


图 1.1

此公理揭示了作用于刚体上最简单的力系平衡时所必须满足的条件。它是推证各种力系平衡条件的基础。

必须指出,这里所说的是刚体的平衡。如果是变形体,上述平衡条件并非是充分条件。例如,软绳的两端受到两个等值、反向、共线的拉力作用时可以平衡,如改为受两个等值、反向、共线的压力作用就会发生蜷曲而不能平衡。

对于只受两个力作用而处于平衡的刚体,称为二力构件,如图 1.2 所示。根据二力平衡条件可知:二力构件不论其形状如何,所受两个力的作用线必沿二力作用点的连线。若

一根杆件只在两点受力作用而处于平衡, 则此两力作用线必与杆的轴线重合, 此杆称为二力杆件, 如图 1.3 所示。

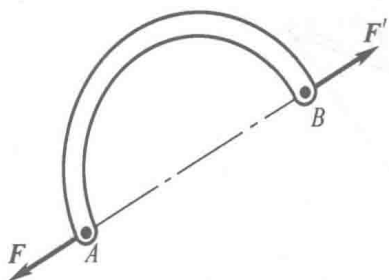


图 1.2

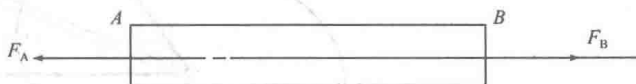


图 1.3

【公理二】加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系中, 加上或去掉任何一个平衡力系并不改变原力系对刚体的作用效果。这是因为一个平衡力系作用在物体上, 对物体的运动状态是没有影响的, 即新力系与原力系对物体的作用效果相同。

根据公理一和公理二, 可导出推论 I。

推论 I ——力的可传性

作用于刚体上的力可沿其作用线移至刚体内的任一点, 而不改变该力对刚体的作用效果。

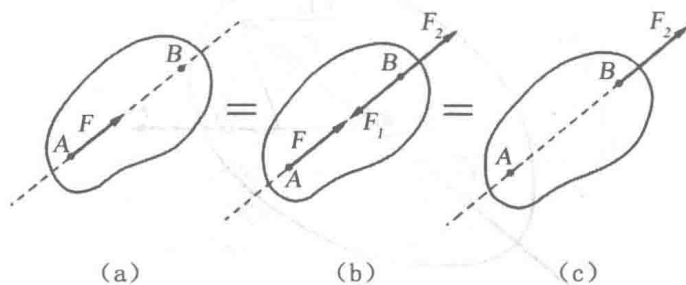


图 1.4

证明: 设力 F 作用于刚体上的 A 点, 如图 1.4 (a) 所示。在其作用线上任取一点 B , 并在 B 处加上一对平衡力 F_1 和 F_2 。使 F 、 F_1 、 F_2 共线, 且 $F_2 = F_1 = F$, 如图 1.4 (b) 所示。根据公理二, 将 F 、 F_1 所组成的平衡力系去掉, 刚体上只剩下 F_2 , 且 $F_2 = F$, 如图 1.4 (c) 所示, 由此力的可传性得到了证明。

必须指出, 力的可传性只适用于刚体而不适用于变形体。对于变形体, 加减任何平衡力系, 或将力沿其作用线移至物体上任一点, 都会改变其内效应。

【公理三】力的平行四边形公理

作用于物体上同一点的两个力的合力也作用于该点, 且合力的大小和方向可用以这两个力为邻边所作的平行四边形的对角线来确定。

该公理说明, 力矢量可按平行四边形法则进行合成与分解, 如图 1.5 所示。合力矢量 F_R 与分力矢量 F_1 、 F_2 间的关系符合矢量运算法则:

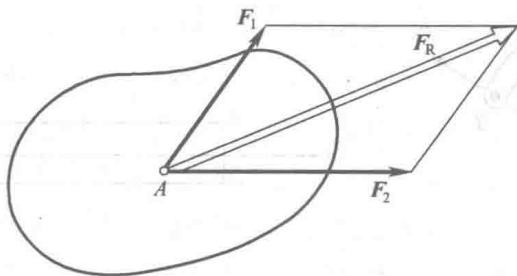


图 1.5

平行四边形法则可推广到作用在同一点的 n 个力 $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ 作用的情况:

$$F_R = F_1 + F_2 + \dots + F_n \quad (1-1)$$

根据上述公理可导出推论 II。

推论 II —— 三力平衡汇交定理

若刚体在三个互不平行的力作用下处于平衡状态, 则此三力必在同一平面内且汇交于一点。

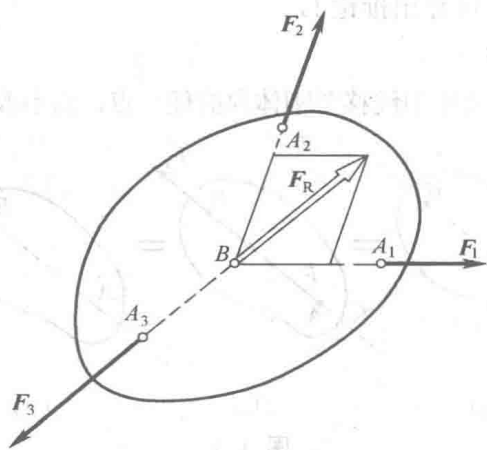


图 1.6

证明: 设刚体上 A_1, A_2, A_3 三点受共面且平衡的三个力 F_1, F_2, F_3 的作用, 如图 1.6 所示。根据力的可传性原理, 将 F_1, F_2 移至其作用线汇交点 B 处, 并根据公理三, 将其合成为 F_R , 则刚体上仅受力 F_3 和 F_R 的作用。根据公理一, F_3 和 F_R 必在同一直线上, 所以 F_3 必过 B 点, 于是得证 F_1, F_2, F_3 均通过 B 点。

【公理四】作用与反作用定律

两物体间的作用力和反作用力总是同时存在, 且大小相等、方向相反、作用线相同, 分别作用在两个相互作用的物体上。

该公理揭示了物体之间相互作用的定量关系，它是分析物体间作用力关系时必须遵循的原则。必须强调指出，力总是成对出现的，有作用力必有反作用力。但它们分别作用在两个物体上，因此不能把它们看成是一对平衡力。

1.3 力矩

一、力矩的定义

从生活和实践中知道，力除了能使物体移动外，还能使物体转动。例如用扳手拧螺母时，加力可使扳手和螺母绕螺母轴线转动。如杠杆、定滑轮等简易机械也是力使物体绕一点转动的实例。

力使物体产生转动效应与哪些因素有关呢？如图 1.7 用扳手拧紧螺母时，作用于扳手上的力 F 可使扳手与螺母一起绕螺母中心 O 转动。由经验可知，力 F 使扳手绕 O 点的转动效应，取决于力 F 的大小和 O 点到力作用线的垂直距离 d 。这种转动效应可用力对点的矩来度量。定义 Fd 为力 F 对点 O 之矩，简称力矩，用 $M_O(F)$ 表示。 O 点称为力矩中心，简称矩心； d 称为力臂，则力矩的计算公式为

$$M_O(F) = \pm Fd \quad (1-2)$$

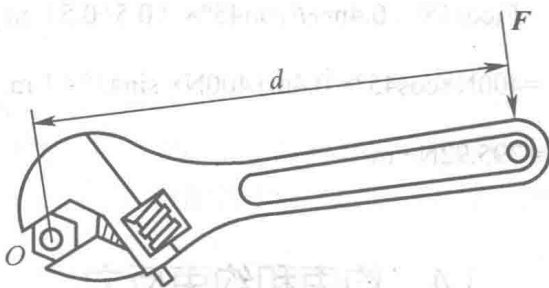


图 1.7

在平面上，力对点之矩是一个代数量，它的绝对值等于力的大小与力臂的乘积。力矩的正负号规定为：力使物体绕矩心逆时针方向转动时，力矩取正号；顺时针方向转动时，力矩取负号。力矩的单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 或 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

二、力矩的性质

由公式 1-2 可知力矩有如下性质：

- (1) 力 F 对 O 点之矩不仅取决于力 F 的大小，同时还与矩心的位置即力臂 d 有关。同一个力对不同的矩心，其力矩是不同的（包括数值和符号都可能不同）。
- (2) 当力的作用线通过矩心时，力矩等于零。

【例 1-1】如图 1.8 所示的结构受三个力作用，已知 $F_1=500\text{N}$ ， $F_2=200\text{N}$ ， $F_3=400\text{N}$ 。分别求三个力对 A 点的矩。

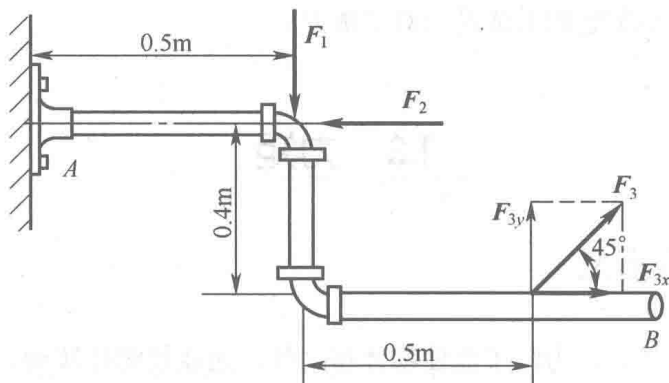


图 1.8

解：由力矩定义得：

$$M_A(F_1) = -F_1 \times 0.5 = -500 \times 0.5 = -250\text{N} \cdot \text{m}$$

F_2 作用线通过 A 点，所以

$$M_A(F_2) = 0$$

计算 $M_A(F_3)$ 时，可用合力矩定理。将 F_3 沿水平和竖直方向分解为 F_{3x} 、 F_{3y} ，得：

$$\begin{aligned} M_A(F_3) &= M_A(F_{3x}) + M_A(F_{3y}) \\ &= F_3 \cos 45^\circ \times 0.4\text{m} + F_3 \sin 45^\circ \times (0.5 + 0.5)\text{m} \\ &= 400\text{N} \times \cos 45^\circ \times 0.4\text{m} + 400\text{N} \times \sin 45^\circ \times 1\text{m} \\ &= 395.92\text{N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

1.4 约束和约束反力

一、约束和约束反力

凡是可以在空间任意运动的物体都称为自由体，例如在空中飞行的飞机、炮弹等。凡是受到周围物体的限制，不能在某些方向上运动的物体，称为非自由体。例如在轨道上行驶火车，受到钢轨的限制，只能沿轨道方向运动；电机转子受轴承的限制，只能绕轴线转动。工程实际中大多数物体都是非自由体。

对非自由体的某些方向的位移起到限制作用的周围物体称为约束。上述例子中，钢轨是火车的约束；轴承是电机转子的约束。由于约束阻碍限制了物体的自由运动，所以约束对物体的作用实际上就是力。这种力称为约束反力或简称反力。约束反力的方向总是和约束所能阻碍的运动方向相反，作用在约束与被约束物体相互接触之处。

除约束反力以外,作用在物体上的力一般还有重力、风力、气体压力、电磁力等。因为这些力能主动地使物体运动或使物体有运动趋势,故称其为主动动力。主动力一般都是已知的,而约束反力一般是未知的,需要通过静力学的力系平衡条件求得。所以,确定未知的约束反力是静力分析的重要任务之一。

二、几种常见的约束及其反力

1. 柔性约束

绳索、链条、皮带等构成的约束都属于柔性约束。这种约束的性质决定了它只能承受拉力,而不能承受压力和弯曲。所以,柔性体对物体的约束反力必定是沿着柔性体的中心线背离物体,即恒为拉力,如图 1.9 所示。

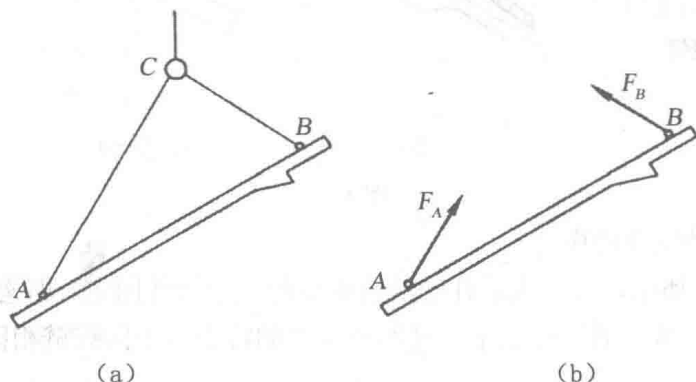


图 1.9

2. 光滑接触面约束

当物体在接触处的摩擦力很小或润滑条件较好时,可以认为是光滑接触面约束。这种约束不管接触面形状如何,它只能限制物体沿接触面的公法线指向接触面的运动,而不能限制物体沿接触表公切线或离开接触面的运动。所以光滑面的约束反力是通过接触点,沿公法线方向指向被约束物体,是一个压力,常用字母 F_N 表示,如图 1.10 所示。

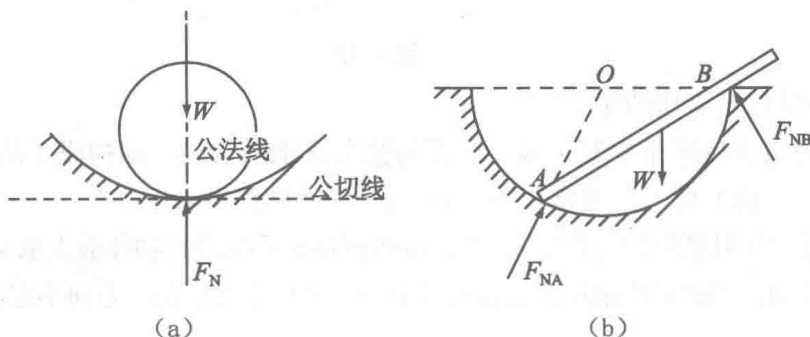


图 1.10

3. 光滑铰链约束

光滑铰链是由两个带有圆孔的构件用光滑圆柱销钉连接而成的。销钉只限制两构件在垂直于销钉轴线的平面内的相对移动,而不限制两构件绕销钉轴线的相对转动。工程中这

类约束有以下几种形式:

(1) 中间铰链约束

如图 1.11 (a)、(b) 所示, 圆柱销将两构件连接在一起, 即构成中间铰, 常采用如图 1.11 (c) 所示的简图表示。

中间铰所连接的两构件互为约束。两者本质上属于光滑面约束, 但由于接触点不确定, 所以中间铰链约束反力的特点是: 在垂直于销钉轴线的平面内, 作用线通过铰链中心, 方向不定, 通常用图 1.11 (d) 所示的单个力 F 和未知角或两个正交分力 F_x 和 F_y 表示。

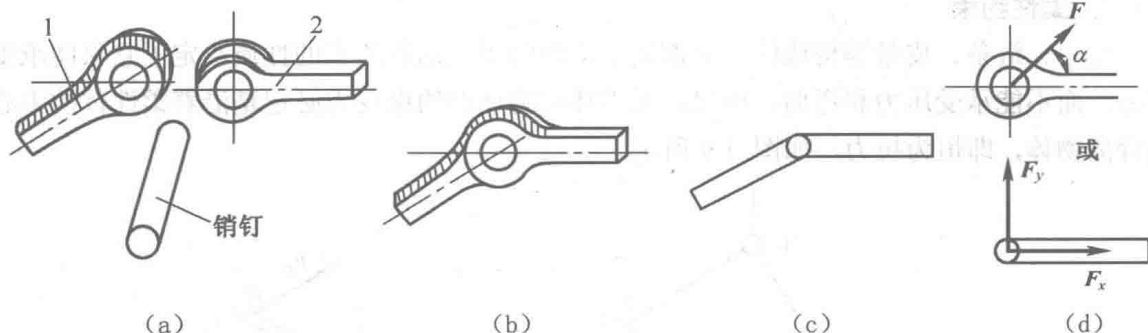


图 1.11

(2) 固定铰链支座约束

如图 1.12 (a) 所示, 若构成圆柱铰链约束中的一个构件固定, 即构成固定铰链支座约束, 用图 1.12 (b) 所示的简图表示。其约束反力的特点与中间铰链相同, 如图 1.12 (c) 所示。

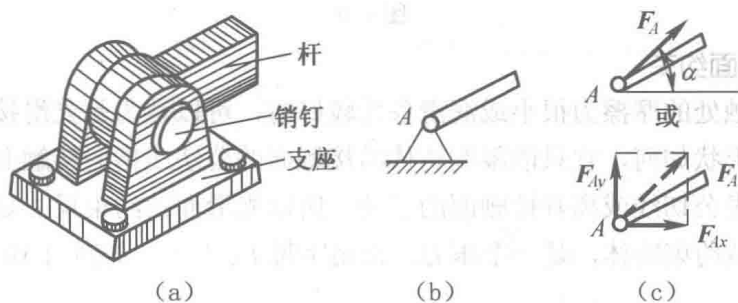


图 1.12

(3) 活动铰链支座约束

在固定铰链支座底部安装上滚子, 并与光滑支承面接触, 则构成了活动铰链约束, 如图 1.13 (a)、(b) 所示, 通常用图 1.13 (c) 所示的简图表示。

活动铰链支座只能限制构件沿支承面法向的移动, 不能阻止物体沿支承面切线方向的运动和绕销钉的转动, 因此其约束反力通过铰链中心, 垂直于支承面, 方向不定, 如图 1.13 (c) 所示。

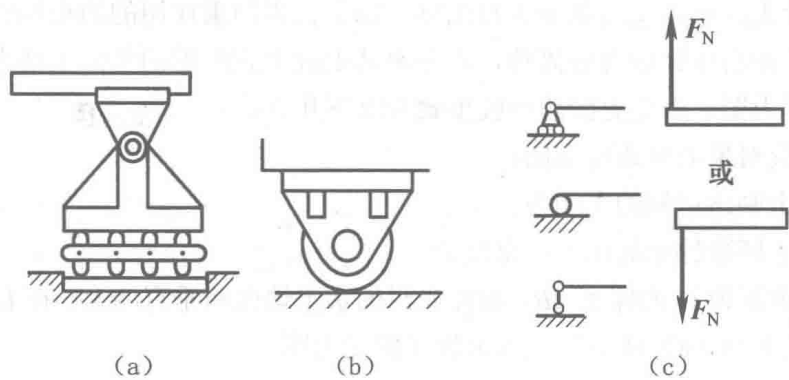


图 1.13

4. 固定端约束

如图 1.14 (a) 所示建筑物阳台上的挑梁、车床上的刀具、立于路旁的电线杆等，均不能沿任何方向移动和转动，构件所受到的这种约束称为固定端约束。

平面问题中一般用图 1.14 (b) 所示的简图表示。其约束反力在作用面内可用两个正交分力 F_x 、 F_y 和一个约束反力偶 M 表示，如图 1.14 (c) 所示。

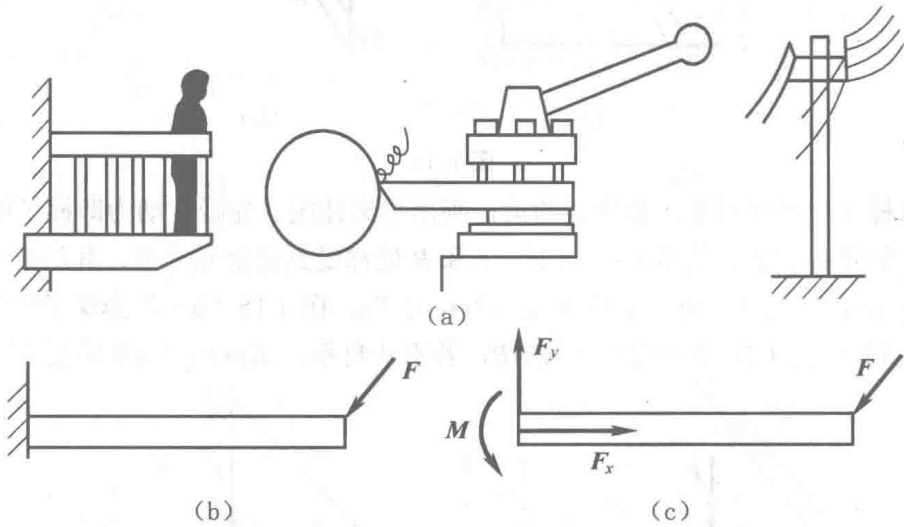


图 1.14

1.5 受力图

一、物体的受力分析与受力图

在求解静力学中物体的平衡问题时，必须首先分析物体的受力情况，即进行受力分析。根据问题的已知条件、约束类型和带求量，从相关结构中恰当地选某一物体（或某几个物体组成的系统）为研究对象。画研究对象时，只需显示出力的作用位置与约束类型，构件可以用简单线条组成的简图来表示。

在简图上除去约束，使对象成为自由体，添上代表约束作用的约束反力，称为解除约束。解除约束后的自由体成为分离体，在分离体上画上它所受的全部主动力与约束反力，就称该物体的受力图。画受力图的一般步骤为以下几点：

1. 画出研究对象的分离体简图；
2. 在简图上画出已知的主动力；
3. 在简图上解除约束处画上约束反力。

【例 1-2】重量为 G 的梯子 AB ，放在光滑的水平地面和垂直墙上。在 D 点用水平绳索与墙相连，如图 1.15 (a) 所示。试画出梯子的受力图。

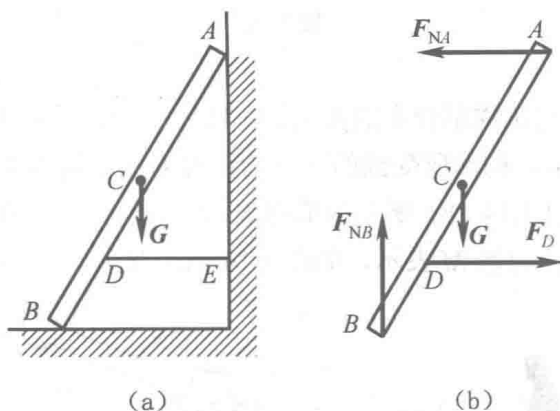


图 1.15

解：以梯子为研究对象，解除其约束，画出分离体图。先画主动力即梯子的重力 G ，作用于梯子的重心 C 点，方向竖直向下。 A 和 B 处都受到光滑面约束，其约束反力分别为 F_{NA} 和 F_{NB} 。 D 处受柔性约束，其约束反力为拉力 F_D 。图 1.15 (b) 即为梯子的受力图。

【例 1-3】如图 1.16 所示的水平梁 AB ，若不计自重，试画出梁 AB 的受力图。

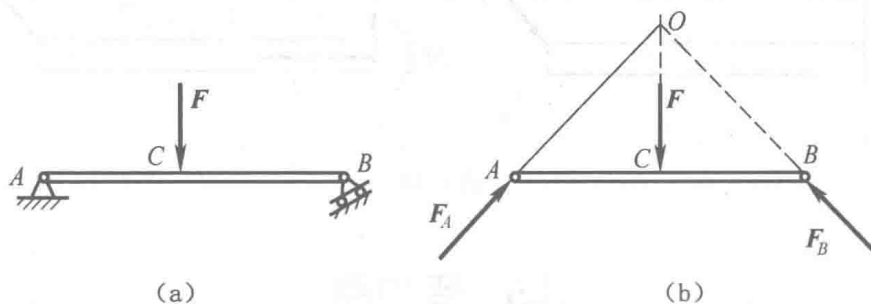


图 1.16

解：以梁 AB 为研究对象，解除约束，画出分离体。先画主动力 F 。 B 处受活动铰链约束，其约束反力 F_B 垂直于支承面。 A 处受固定铰链约束，根据三力平衡汇交定理， A 点反力的作用线必通过 F 和 F_B 的交点 O ，由此画出 A 处的约束反力 F_A 。 AB 梁的受力图如图 1.16 (b) 所示。

【例 1-4】如图 1.17 (a) 所示的结构由杆 AC 、 CD 和滑轮 B 铰接而成。物体重为 G ，用绳子挂在滑轮上。如杆、滑轮及绳子的自重不计，并忽略各处的摩擦，试分别画出滑轮 B ，杆 AC 、 CD 及整个系统的受力图。

解：(1) 以滑轮 B 为研究对象，画出分离体图。 B 处为光滑铰链约束，可用两个正交分力 F_{Bx} 、 F_{By} 表示；在 E 、 H 处有绳索的拉力 F_{TE} 、 F_{TH} ，如图 1.17 (b) 所示。

(2) 取杆 CD 为研究对象，画出分离体图。 CD 杆为二力杆，在 C 、 D 处画上拉力 F_{CD} 、 F_{DC} ，其受力图如图 1.17 (c) 所示。

(3) 取杆 AC 为研究对象，画出分离体图。 A 处为固定铰支座，用两个正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 表示；在 B 、 C 处受中间铰约束，在 B 处画上 F'_{Bx} 、 F'_{By} ，它们分别与 F_{Bx} 、 F_{By} 互为作用力与反作用力。在 C 处画上 F'_{CD} ，它与 F_{CD} 互为作用力与反作用力，其受力图如图 1.17 (d) 所示。

(4) 以整个系统为研究对象，画出分离体图。此时杆 AC 与杆 CD 在 C 处铰接，滑轮 B 与杆 AC 在 B 处铰接，这两处的约束反力互为作用力与反作用力，并成对出现，为系统的内力，不必画出。这样，系统所受的力有主动力 G ，约束反力 F_{DC} 、 F_{TE} 、 F_{Ax} 及 F_{Ay} ，其受力图如图 1.17 (e) 所示。

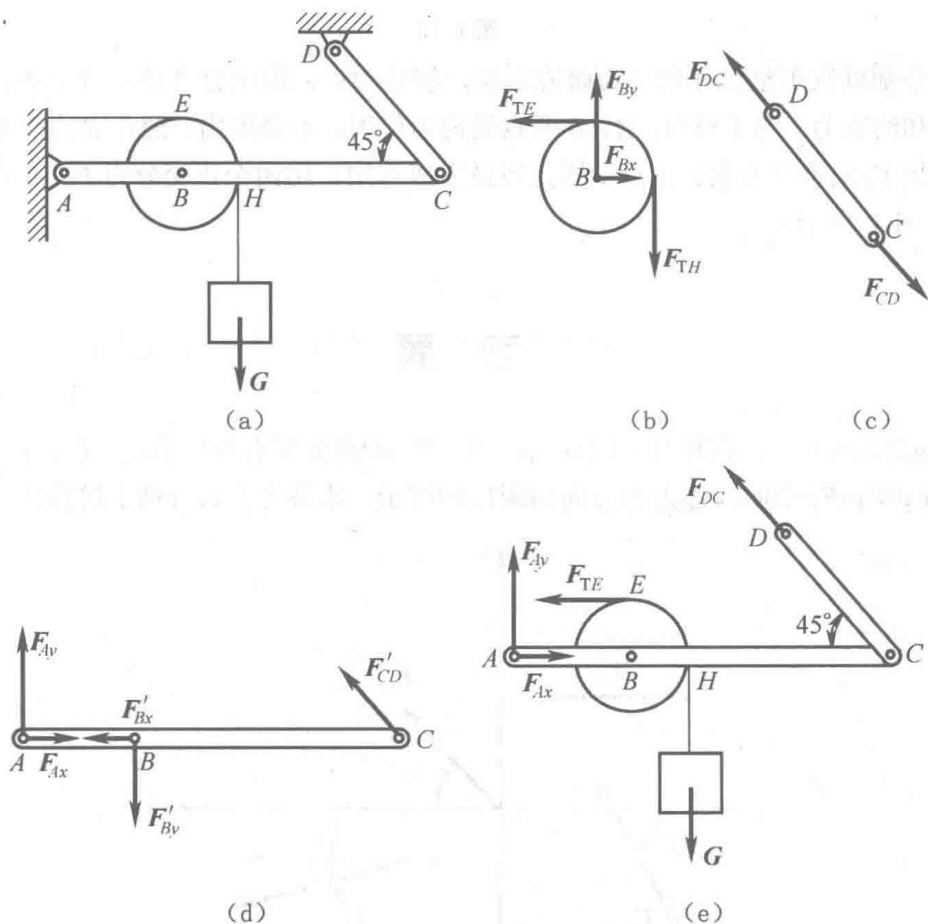


图 1.17

【例 1-5】如图 1.18 (a) 所示，卸货汽车的翻斗可绕铰链支座 A 转动，液压缸推杆视为二力杆。已知汽车本身重 G_1 ，翻斗重 G_2 。试画出整车和翻斗的受力图。