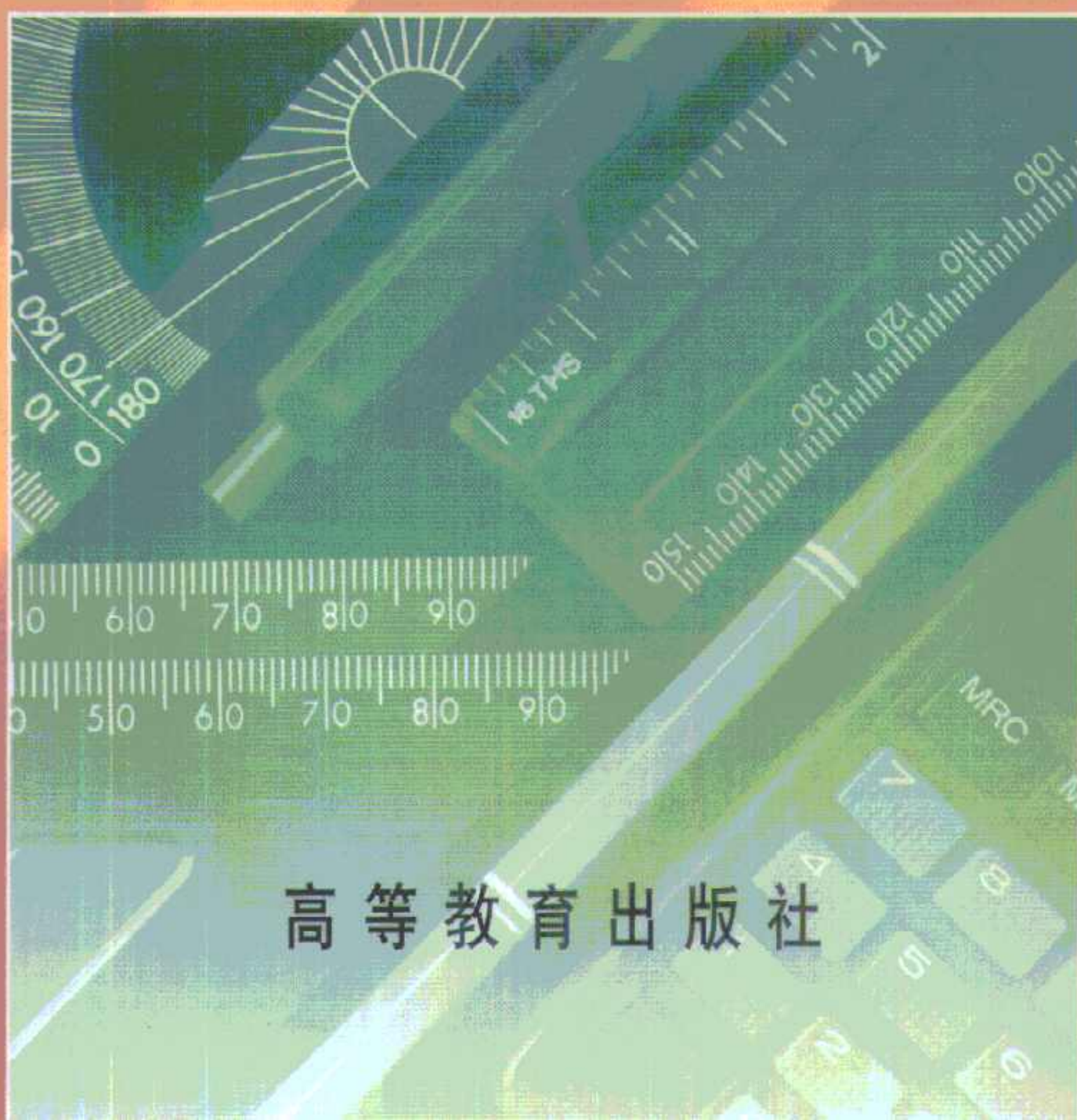




全国成人高等教育规划教材

工程力学

教育部高等教育司 组编



高等教育出版社

全国成人高等教育规划教材

工 程 力 学

教育部高等教育司 组编

胡性侃 张平之 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是教育部“全国成人高等教育主要课程教材建设规划”中的力学类教材之一,是根据教育部高等教育司1998年4月颁布的《全国成人高等教育工学主要课程教学基本要求》而编写的。

本书以成人高等教育的培养目标和培养规格为依据,充分考虑成人教育的特点,强化力学概念、淡化学科体系、突出工程应用,将原理论力学和材料力学课程的内容贯通、融合和相互渗透,组成力学课程的新体系,以便减少教学时数、提高教学效率。

全书共分三篇,第一篇静力分析;第二篇杆类构件设计分析;第三篇动力分析。为了便于自学,本书章首有学习指导,章末有小结,并配以适当的思考题,为读者指出了学习本章的重点和关键内容。

本书作为成人高等教育、电视大学、职工大学和自学考试等土建、机械类专业本科教材,也可供其它专业和有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/胡性侃,张平之主编;教育部高等教育司编. —北京:高等教育出版社,2000
全国成人高等教育规划教材
ISBN 7-04-007998-4

I. 工… II. ①胡…②张…③教… III. 工程力学—成人教育:高等教育—教材 IV. TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第56381号

工程力学
教育部高等教育司 组编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街55号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 2000年6月第1版

印 张 30.25

印 次 2000年6月第1次印刷

字 数 730 000

定 价 34.40元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

第一篇 静力分析

第一章 静力学的基本概念和物体的受力分析

学 习 指 导

本章的基本内容是力、刚体、力矩和力偶的概念，刚体静力分析中几个基本原理、约束和约束力，以及物体的受力分析和画受力图。

学习本章的要求：

1. 深刻领会力、刚体、平衡、力对点之矩和力偶的含意，它们是力学中最基本的概念。
 2. 深刻理解刚体静力分析中几个基本原理及其适用范围。它是力的基本性质的高度概括。
 3. 从力偶和力偶矩的物理概念出发，了解力偶的性质，理解力偶等效的条件。
 4. 熟练掌握常见约束的类型、性质以及相应的约束力的特征。
 5. 物体的受力分析是本章内容的重点。要能正确地分析物体的受力情况，画出单个物体和物体系统的受力图，这是解决工程力学问题的前提和关键。
-

§ 1.1 刚体和变形固体的概念

本篇静力分析的研究对象是刚体和变形固体。

刚体静力分析，又称为**刚体静力学**，它研究物体在力系作用下的平衡规律。

所谓力系，是指作用于物体上的一群力。

所谓平衡，在工程上，一般是指物体相对于地面保持静止或作匀速直线运动。如厂房、桥梁、机床的车身、在直线轨道上匀速行驶的火车等，都是处于平衡状态。平衡是物体机械运动的一种特殊形式。

本篇前三章属于刚体静力分析，主要研究以下三个问题：

1. 物体的受力分析

即选择某个物体或物体系统为分离体(或脱离体)，分析该分离体上受哪些力的作用，以及每个力的作用线、大小和方向。

2. 力系的等效替换和力系的简化

将作用在物体上的一个力系用另一个与它效应相等的力系来代替，这两个力系互为**等效力系**。如果把作用在物体上的一个复杂力系用一个最简单的与其效应相等的力系来代替，则称为力系的简化。

3. 力系的平衡条件

当物体平衡时，作用在物体上的各种力系所需满足的条件。

1.1.1 刚体的概念

所谓刚体是指在任何力的作用下，其大小和形状始终保持不变的物体。换言之，刚体内部任意两点之间的距离不因力的作用而改变。实际中的固态物体(固体)在受力的作用时，都会发生不同程度的变形。能否将实际物体抽象为刚体，主要取决于力学中所研究问题的性质。当我们研究力的运动效应和物体平衡规律时，物体的微小变形的影响可以忽略不计，因而可将物体抽象为理想化的力学模型——刚体。

1.1.2 变形固体的概念

实际上，所谓刚体，在自然界中并不存在。由实验得知，任何固体在外力作用下都会发生变形，即它的形状和尺寸大小总会有些改变，甚至当外力增加到一定大小时，它还会发生破坏。由于固体具有可变形性质，所以又称变形固体。严格地讲，自然界中的一切固体均属变形固体。

在本书第二篇各章中，研究杆类构件的强度、刚度和稳定性问题时，变形分析是必须考虑的一个主要内容。因此，不能再把物体抽象为刚体。而必须把它当作为变形固体。工程上，绝大多数固体的变形均被限制在弹性范围内，即在外力除去后又能立刻恢复其原有形状和尺寸，这时的变形称为“弹性变形”，相应的变形固体被理想化为“弹性体”，它是工程力学又一抽象化的力学模型。

刚体静力分析中的基本理论、概念和方法对于弹性体静力分析有一定的适用性，也有一定局限性。应当说明，刚体静力分析只是为研究变形固体平衡问题提供了必要的基础，对于变形固体的平衡问题，除了应用刚体静力学平衡方程以外，还必须考虑物体的变形和材料的力学性质才能求得解答。

§ 1.2 力的概念 刚体静力分析中的几个基本原理

1.2.1 力的概念

力是物体间相互的机械作用，这种作用的效果是使物体的机械运动状态发生改变，或使物体变形。

物体间机械作用的形式是多种多样的，大体上可以分为两类：一类是通过物质的一种形式——场而起作用的，如重力、万有引力、电磁力等；一类是由两个物体直接接触而发生的，如两物体间的压力、摩擦力等。这些力的物理本质各不相同。在力学中，我们不研究力的物理本质，而只研究力对物体的效应。力对物体作用有两种效应：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；一种是使物体的形状发生改变，称为力的变形效应或内效应。

实践证明，力对物体的效应取决于力的大小、方向和作用点三个因素，通常称为力的三个

要素。

本教材采用我国法定计量单位，力的单位是 N (牛)，或 kN (千牛)， $1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N}$ 。

在力学中有两类量：标量和矢量。如果在确定某种量时，只需考虑其大小，则称这类量为标量，如质量、长度、时间等。如果在确定某量时，不仅要考虑其大小，而且要考虑其方向，则称这类量为矢量（或向量）。力是一个有大小和方向的量，且又符合矢量运算法则，所以力是矢量。可用一带箭头的直线段将力的三要素表示出来，如图 1.1 所示：线段的长度 AB 按一定的比例尺表示力的大小；线段的方位以及箭头的指向表示力的方向；线段的始端 A 或末端 B 表示力的作用点。通过力的作用点并沿着力的方位的直线，称为力的作用线，如图 1.1 中的半直线 KL 。在本书中，矢量均用黑体字母表示。例如图 1.1 中，用 F 表示力矢量。

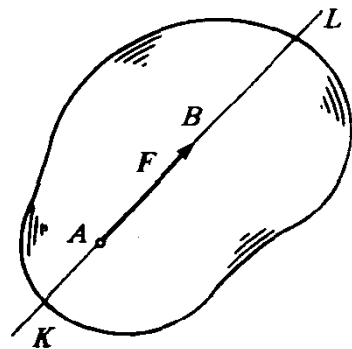


图 1.1

不难证明，作用在刚体上的力可沿其作用线滑移到刚体内的任一点，而不改变该力对刚体的运动效应。力的滑移等效的性质称为力的可传性。如图 1.2 所示，作用于刚体上 A 点的力 F ，可沿其作用线滑移到 B 点，而力 F 对刚体的效应不变。又如图 1.3a、b 所示，用手在车后面沿水平方向推车与沿同一作用线，以同样大小的力在车前面拉车，对车的运动效应是相同的。

由此可见，就力对刚体的运动效应来说，若已知了力的作用线，则力的作用点将不再是重要因素。因此，对于刚体，第一、力的三要素又可表示为：力的大小、方向和作用线；第二、力是滑动矢。

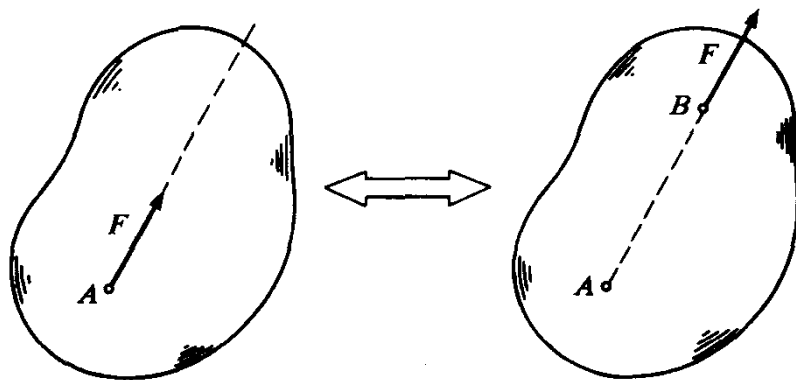


图 1.2

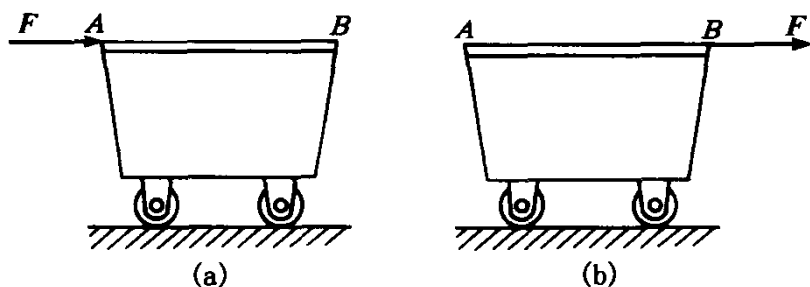


图 1.3

必须注意，力的可传性只适用于刚体。而不适用于变形固体。例如图 1.4a 所示的弹簧，在其两端点 A 、 B 分别作用大小相等、方向相反、作用线相同的两个力 F_1 、 F_2 ，弹簧会伸

长，即产生拉伸变形。如果应用力的可传性，将力 F_1 沿其作用线移至点 B ，力 F_2 移至点 A ，则弹簧将由拉伸变形变为压缩变形，如图 1.4b 所示。这二种变形效应是截然不同的。

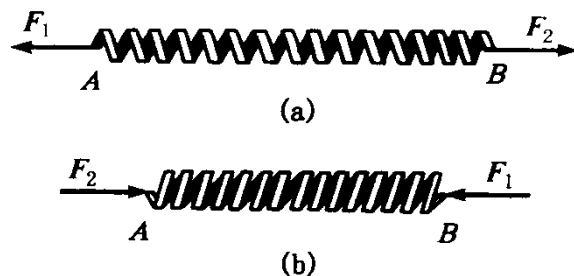


图 1.4

1.2.2 静力分析中的几个基本原理

静力分析中的几个基本原理是人类在长期的生产和生活实践中，经过反复的观察和实验总结出来的客观规律，它是对作用于物体上的力的基本性质的高度概括。

这些基本原理，只能在实践中得到验证，它不可能用更简单的原理去替代。静力分析中有关力系的简化和平衡条件的理论，都是以下面介绍的一些基本原理为依据得出的。

1. 二力平衡原理

作用在同一刚体上的两个力使刚体保持平衡的必要和充分条件是：这两个力大小相等，方向相反，并且作用在同一直线上。

这个原理只适用于刚体，是刚体平衡的必要和充分的条件。对于变形体来讲只是必要条件，而不是充分条件。例如，在一重量可以忽略不计的刚杆上，加上一对等值、反向、共线的拉力或是压力，刚杆均能保持平衡，如图 1.5 所示。如果将图中刚杆换成绳索，则在拉力作用下可以平衡，而在压力作用下就不能平衡。

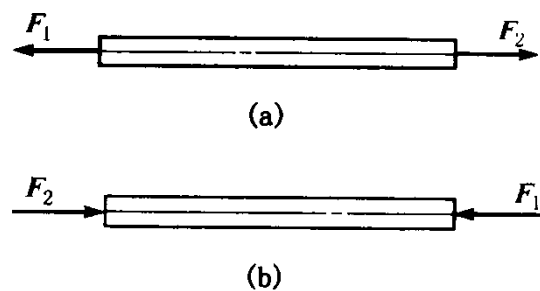


图 1.5

2. 加减平衡力系原理

在作用于刚体上的任何一个力系中，加上或减去任意一个平衡力系，并不改变原力系对刚体的效应。

本原理的正确性是显而易见的，因为平衡力系不会改变其平衡或运动状态。所以，在已知力系中加上一个平衡力系，或者从其中减去一个平衡力系，不会使刚体运动状态发生改变。加(减)后的新力系与原力系互为等效力系。

必须注意，加减平衡力系原理只适用于刚体。这个原理是研究力系简化的重要依据。

3. 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力，可以合成为仍作用于该点的一个合力，合力的大小和方向由以原来的两个力为邻边所构成平行四边形的对角线矢量来表示。

设在物体上点 A 作用两个力 F_1 和 F_2 ，其夹角为 α ，根据力的平行四边形法则，得到合力 $F_R = \vec{AC}$ ，如图 1.6a 所示，有

$$F_R = F_1 + F_2$$

即，作用于物体上同一点的两个力的合力，等于这两个力的矢量和。

求两个共点力的合力时，不必作出整个平行四边形。如图 1.6b 所示，在图外任一点 a 开始先画矢量 $\vec{ab} = F_1$ 再从点 b 画矢量 $\vec{bc} = F_2$ ，连接起点 a 与终点 c 得到矢量 $\vec{ac}$ ，矢量 $\vec{ac}$ 表示合力 F_R 的大小和方向，而合力 F_R 仍作用于 A 点。此三角形 abc 称为力三角形，这一求合力的方

法称为力三角形法则。如果改变分力相加的先后次序作力三角形，并不改变合力 F_R 的大小和方向。

还应指出，该法则是所有矢量表示的物理量相加的普遍法则。力的平行四边形法则对刚体和变形体都适用，也是研究力系简化的理论基础。

4. 作用与反作用定律

两个物体间相互作用的力，即作用力与反作用力，总是大小相等，方向相反，作用线重合，分别作用于这两个物体上。

这一定律概括了任何物体间相互作用的关系，不论物体是处于平衡状态还是处于运动状态，也不论物体是刚体还是变形体，定律都普遍适用。必须指出，力总是成对出现的，有作用力必有反作用力，这是分析物体之间相互作用力的一条重要规律。

由于作用力和反作用力分别作用在两个不同的物体上，这两个力并不能构成平衡力系，所以必须把作用与反作用定律和二力平衡原理严格区别开来。

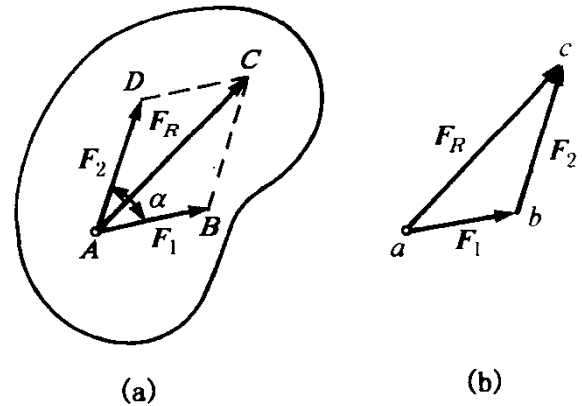


图 1.6

1.2.3 荷载分类

物体所受的力可分为两大类，即外力和内力。外力是指物体所受其它物体对它作用的力，内力是指物体各部分之间的相互作用力。

外力包括荷载和约束反力。一般地说，荷载属于主动力，约束力属于被动力。约束力是约束阻止物体因荷载作用产生的运动趋势所起的反作用，其性质、方向由约束的类型决定，在本章 § 1.3 将作详细介绍。

在工程实际中，构件受到的荷载是多种多样的。为便于分析，可分类如下：

1. 根据作用在构件上的范围，可分为集中荷载与分布荷载

(1) **集中荷载**又称**集中力**。若荷载作用在构件上的面积远小于构件的表面积，可把荷载看作是集中地作用在一“点”上，这种荷载称为集中荷载。例如火车车轮作用在钢轨上的压力，面积较小的柱体传递到面积较大的基础上的压力等，都可看作是集中荷载。

(2) **分布荷载**又称**分布力**。若荷载连续作用于整个物体的体积上时，称为**体荷载**。例如物体的重力；若荷载连续作用在物体表面的较大面积上，称为**面荷载**。例如屋面上的积雪，桥面上的人群，都可看作是均匀分布荷载；水坝迎水面、水池池壁所受的水压力和挡土墙背面上所受的土压力，都可看作是非均匀分布荷载(见图 1.7 所示)。若荷载分布于长条形状的体积或面积上，则可简化为沿其长度方向中心线分布的**线荷载**。例如可将等截面梁的自重简化为沿梁长均匀分布的线荷载，如图 1.8 所示。

物体上每单位体积、单位面积和单位长度上所承受的荷载分别称为**体荷载集度**、**面荷载集度**和**线荷载集度**，它们分别表示对应的分布荷载密集的程度。荷载集度乘以相应的体积、面积或长度后才是荷载。体荷载集度的单位是 N/m^3 (牛/米³)，面荷载集度的单位是 N/m^2 (牛/米²)，线荷载集度的单位是 N/m (牛/米)等。

2. 根据作用时间的久暂可分为恒荷载和活荷载

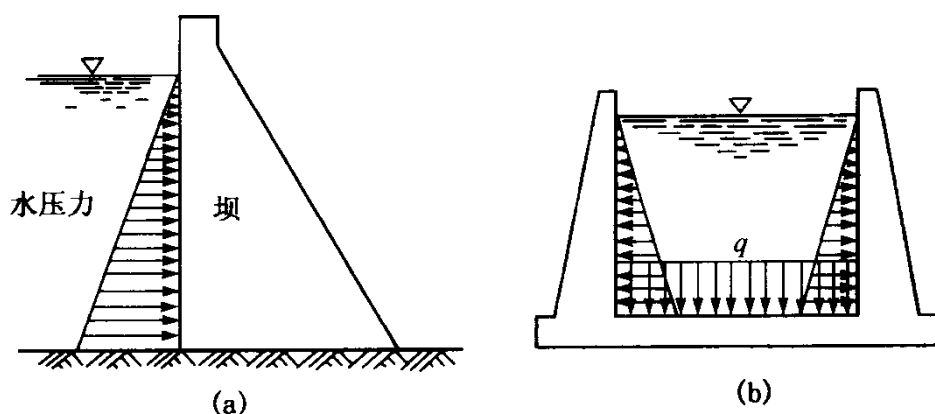


图 1.7

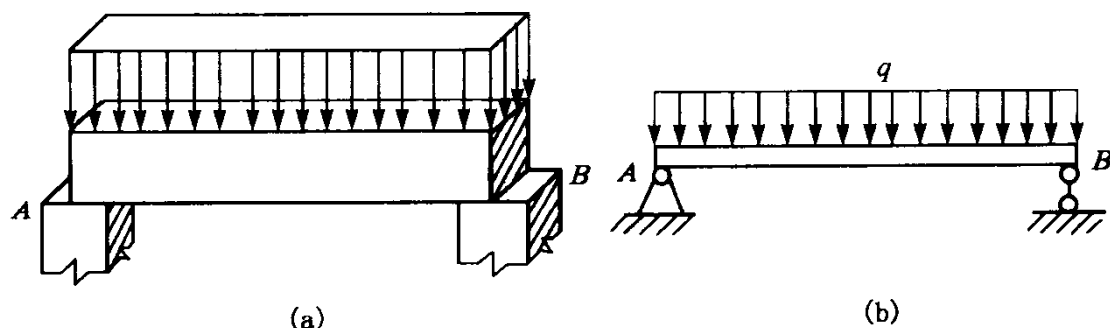


图 1.8

(1) **恒荷载**。长期作用在结构上的不变荷载称为恒荷载。所谓“不变”是指在结构建成以后荷载的大小和位置就都不会发生变化。例如构件的自重就是一种典型的恒荷载。

(2) **活荷载**。在施工期间和使用期间作用在建筑物和机械上的可变荷载，这种荷载称为活荷载。所谓“可变”是指这种荷载有时存在，有时不存在，其作用位置或范围可能是固定的(如风荷载、雪荷载)，也可能是变动的(如吊车梁上的吊车荷载、桥梁或路面上的汽车荷载、楼面上人群荷载等)。

3. 根据作用的性质可分为静荷载与动荷载

(1) **静荷载**。缓慢地加到结构上的荷载。荷载的大小、位置和方向不随时间而变化或变化极为缓慢。在此荷载作用下，构件和零件不会产生显著的加速度。例如结构的自重、土压力和水压力，都属于这一类。

(2) **动荷载**。指构件在运动时产生动力效应所引起的荷载称为动荷载。荷载的大小、位置和方向均随时间而迅速变化。在这种荷载作用下，结构会产生显著的加速度。例如火车车轮对桥梁的冲击力、锻造气锤对工件的撞击力、地震或其它因素引起的冲击波的压力等都是动荷载。

在本书中，前两篇所涉及的荷载均为静荷载。

§ 1.3 力对点的矩 力偶

1.3.1 力对点的矩

1. 力矩

作用于刚体上的力可以使刚体产生移动效应和转动效应。转动效应是用力矩来度量。

设有一力 F 作用于刚体上的某一平面内，在该平面内任取一点 O ，如图 1.9 所示。点 O 称为矩心，点 O 到力 F 的作用线的垂直距离 d 称为力臂，则在平面问题中力对点之矩的定义如下：

力对点的矩是一个代数量，它的绝对值等于力的大小与力臂的乘积，它正负号规定如下：力使物体绕矩心逆时针转动时为正。反之为负。

力对点 O 的矩，简称力矩，用记号 $M_O(F)$ 表示，其计算公式为

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

由图 1.9 可以看出，力 F 对 O 点的矩的大小也等于三角形 OAB 面积的 2 倍，所以(1-1)式又可写成：

$$M_O(F) = \pm 2\triangle OAB \text{ 面积} \quad (1-2)$$

在我国法定计量单位中，力矩的单位是 $\text{N}\cdot\text{m}$ (牛·米)，或 $\text{kN}\cdot\text{m}$ (千牛·米)。

由力矩定义可知：

- (1) 力 F 对点 O 的矩，不仅决定于力的大小，同时与矩心选择的位置有关，矩心位置不同，力矩随之而异。
- (2) 力的大小等于零或力的作用线通过矩心(即 $d=0$)，则力矩等于零。
- (3) 力 F 对刚体内任一点的矩，不因力 F 沿其作用线滑移而改变。

2. 力对点的矩用矢量表示

在平面问题中，各力的作用线和矩心都在同一平面内，如果把力与矩心所构成的平面称为力矩平面，则各力对点之矩都具有同一个力矩平面。因此，在平面问题中，力对点之矩被看作代数量。但是在空间问题中，各力与同一矩心分别组成不同的力矩平面，各力使物体绕矩心转动的效应，不仅取决于各力矩的大小，还取决于各力矩平面在空间的方位，以及力矩在力矩平面内的转向。由此可见，在空间问题中，力对点的矩必须用矢量来表示。

设在空间点 A 上作用一力 F ，以矢量 $\vec{AB}$ 表示，如图 1.10 所示。任取一点 O 为矩心， O 点到力 F 作用线的垂直距离为 d 。现过矩心 O 作矢量 $\vec{M}_O(F)$ 表示力对点的矩，称为力矩矢量。使其长度按一定的比例尺表示力矩的大小(即矢量 $\vec{M}_O(F)$ 的模)：

$$|\vec{M}_O(F)| = Fd = 2\triangle OAB \text{ 面积}$$

亦即等于三角形 OAB 面积的 2 倍；矢量 $\vec{M}_O(F)$ 的方位与力矩平面的法线方位相同；矢量 $\vec{M}_O(F)$ 的指向按右手法则确定，即以右手的四个手指表示力矩的转向，则大姆指的指向就是力矩矢量的指向。为了与力矢相区别，力矩矢量 $\vec{M}_O(F)$ 用带圆弧箭头的有向线段来表示。由此可见，力矩矢量是定位矢量，如图 1.10 所示。

力对点的矩可以用力的作用点对矩心的矢径与力的矢积来表示。如图 1.11 中， $\vec{r}$ 是力 F 的作用点 A 对于矩心 O 的矢径，根据矢积的定义，矢量 $\vec{r}$ 与 $\vec{F}$ 的矢积 $\vec{r} \times \vec{F}$ 是一个矢量。这个矢量的模也等于三角形 OAB 面积的 2 倍；方位与平面 OAB 的法线方位相同；指向同样符合右手法则，即以右手四指顺着 $\vec{r}$ 方向按小于 180° 角度转向力 F ，大姆指的指向就是矢量 $\vec{r} \times \vec{F}$ 的指向。因此，比较力矩矢量 $\vec{M}_O(F)$ 与矢积 $\vec{r} \times \vec{F}$ ，则有

$$\vec{M}_O(F) = \vec{r} \times \vec{F} \quad (1-3)$$

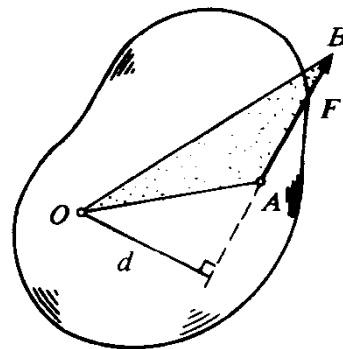


图 1.9

即一个力对于任一点的矩矢等于力的作用点对于矩心的矢径与该力的矢积。

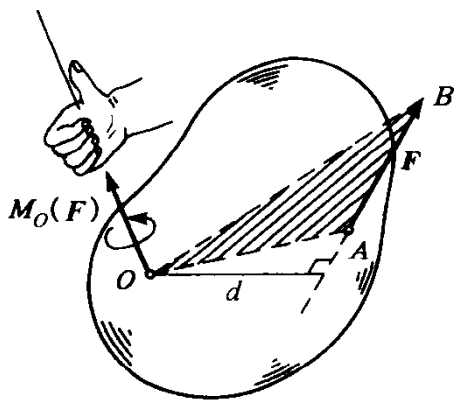


图 1.10

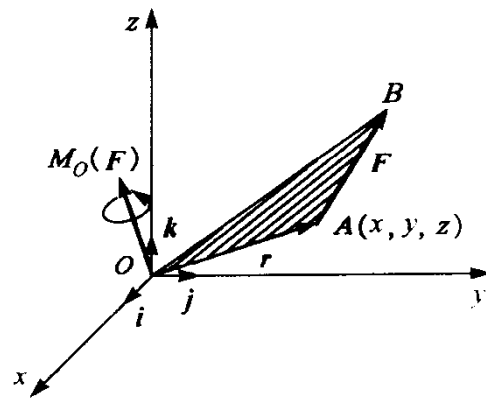


图 1.11

1.3.2 力偶

1. 力偶和力偶矩

力偶是力学中的重要基本概念。在实际中，驾驶员用双手操纵方向盘(图 1.12)，钳工用双手转动扳子和丝锥攻螺纹(图 1.13)等，都是在以上各物体上作用了一对等值反向的平行力，使物体的转动状态发生改变。这种由大小相等、方向相反、作用线平行但不共线的两个力所组成的力系称为力偶，通常记作 (F, F') 。力偶的两力之间的垂直距离 d 称为力偶臂，力偶所在的平面称为力偶作用面，如图 1.14 所示。

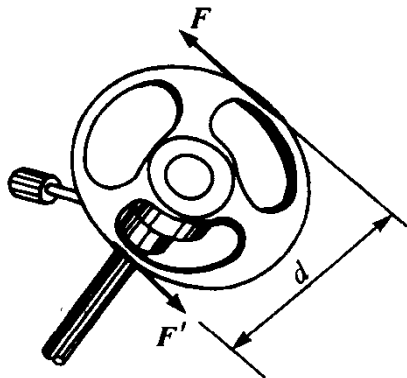


图 1.12

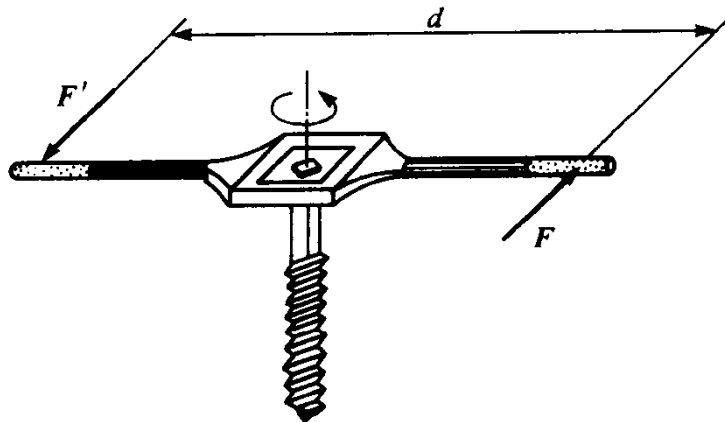


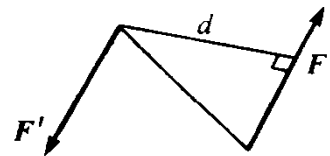
图 1.13

由于力偶中两个力不共线，所以力偶不是平衡力系，它对刚体的作用只能使刚体产生转动效应，而不能产生移动效应。力偶的转动效应用什么来度量呢？

设有力偶 $M(F, F')$ ，其力偶臂为 d ，如图 1.15 所示。为了度量力偶对物体的转动效应，可以用力偶的两个力对其作用面内某点的矩的代数和来度量。取点 O 为矩心，点 O 到力 F' 的垂直距离为 x ，力偶对点 O 的矩为 $M_O(F, F')$ ，则

$$M_O(F, F') = M_O(F) + M_O(F') + F(d + x) - F'x = Fd$$

图 1.14



矩心是任意选取的，由此可见，力偶对物体的转动效应决定于力的大小和力偶臂的长短，与矩心的位置无关。考虑到力偶在平面内的转向不同，其转动效应也不相同，所以将力偶中的一个

力的大小和力偶臂的乘积冠以适当的正负号称为力偶矩。通常用记号 $M(F, F')$ 表示，简记为 M ，即

$$M = \pm Fd \quad (1-4)$$

可见，力偶对刚体的转动效应由力偶矩来度量。在平面问题中，力偶矩是一个代数量，其绝对值等于力的大小与力偶臂的乘积，正负号的规定是，力偶使刚体逆时针方向转动，力偶矩为正，反之则为负。力偶矩的单位与力矩相同，也是 $\text{N}\cdot\text{m}$ (牛·米) 或 $\text{kN}\cdot\text{m}$ (千牛·米)。

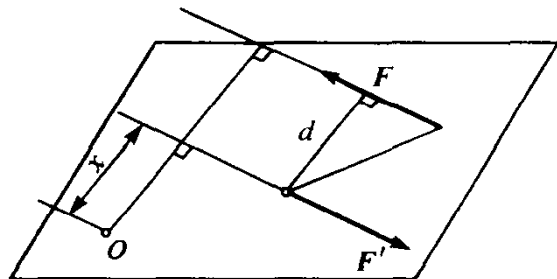


图 1.15

2. 力偶的性质

力偶具有如下基本性质：

性质一 力偶无合力。

力偶不能与一个力等效，也不能用一个力来平衡，力偶只能用力偶来平衡。

性质二 力偶对刚体的作用效应完全决定于力偶矩。

这一性质表明，力偶对其作用面内任一点的矩恒等于力偶矩，而与矩心的位置无关。

3. 力偶的等效条件

由力偶的性质二可知，在同平面内的两个力偶，如果力偶矩相等，则两力偶彼此等效。称为互等力偶或称等效力偶。由力偶的等效条件还可得出下列重要推论：

(1) 只要保持力偶矩不变，力偶可以在它的作用面内任意转移，而不改变对刚体的效应。因此，力偶对刚体的作用与力偶在其作用面内的位置无关。

(2) 只要保持力偶矩不变，可以同时改变力偶中力的大小和力偶臂的长短，而不改变力偶对刚体的作用。

由此可见，在平面问题中，力偶中力的大小、力偶臂的长短以及力偶在其作用面内的位置，都不是决定力偶对刚体作用的独立因素。只有力偶矩唯一地决定力偶对刚体的效应。

今后，在力学计算中，常常不用两个力来表示力偶，而是在力偶作用面内用一带箭头的弧线表示力偶，如图 1.16 所示，其中箭头表示力偶矩的转向， M 表示力偶矩的大小。

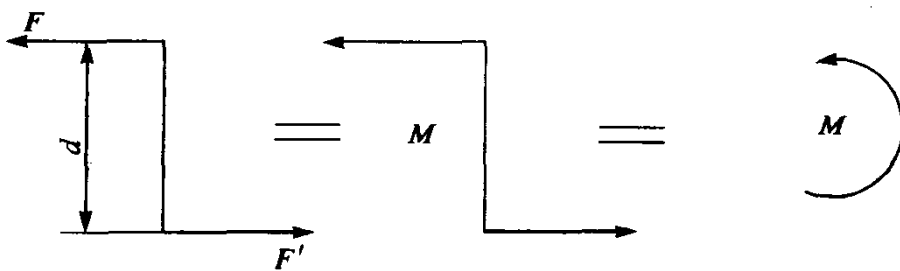


图 1.16

必须指出，上述力偶等效替换的性质，只适用于刚体，不能够无条件地应用到弹性体上去。例如图 1.17 所示矩形截面的悬臂梁。左端为固定端，在梁的 B 处或在 C 处，分别作用力偶矩相等的力偶，这相当于力偶在其通过梁轴线的纵向截面内，由梁的右端 B 处“转移”至梁的中间部位 C 处，前者引起整个悬臂梁发生弯曲变形(如图 1.17a)，而后者只引起力偶所在 C 处的左半段梁产生弯曲变形，而右半段保持不变形(图 1.17b)。

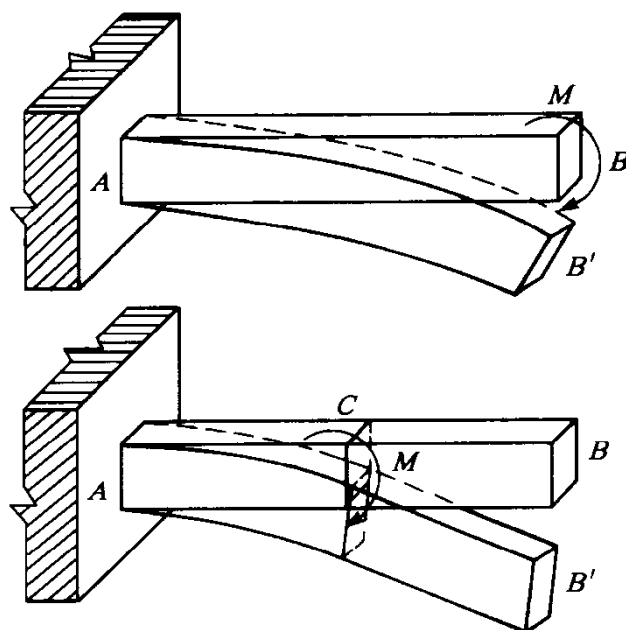


图 1.17 平面力偶转移后变形效应发生改变

§ 1.4 约束及约束力

凡位移不受任何限制可以在空间作任意运动的物体称为**自由体**，如空中飞行的飞机和导弹等。如果物体在空间的位移受到一定的限制，使其在某些方向的运动成为不可能，则这种物体称为**非自由体**。例如，吊车钢索上悬挂的重物，搁置在墙上的屋架，沿钢轨运行的机车，轴承中旋转的轴等，都是**非自由体**，因为它们都受到某些约束。所谓**约束**，是指对**非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束**。约束通常是通过与被约束体之间相互连接或直接接触而形成的。上述钢索是重物的约束，墙是屋架的约束，钢轨是机车的约束，轴承是轴的约束。这些约束分别阻碍了被约束物体沿着某些方向的运动。

约束作用于被约束物体上的力，称为**约束力**。正是约束力阻碍物体沿某些方向运动，因而约束力的方向总是与约束所能阻碍的物体运动的方向相反。

在静力分析中，主动力都是给定的，而约束力是未知的。因此，对约束力的分析，就成为物体受力分析的重点。工程实践中，物体间的连接方式是很复杂的，为了分析和解决实际力学问题，我们必须将物体间各种复杂的连接方式抽象化为几种典型的约束模型。

下面介绍工程中常见的几种典型的约束模型，并根据它们的构造特点和性质，指出相应的约束力的作用点和方向。

1.4.1 柔索约束

绳索、链条、胶带和钢丝绳等柔性体都属于这类约束。理想化的柔索柔软而不可伸长，只能承受拉力。可见，柔索只能阻碍被约束物体沿着柔索伸长的方向运动，故**柔索对物体的约束力**，作用在连接点，方位沿着柔索，指向背离物体。柔索的约束反力恒为拉力。例如图 1.18 所示，起重机用钢丝绳起吊大型机械主轴，主吊索及吊索 AC 和 BC 对吊钩的约束力分别为 F 、 F_1 和 F_2 ，都通过它们与吊钩的连接点，方位沿着各吊索的轴线，指向背离吊钩。

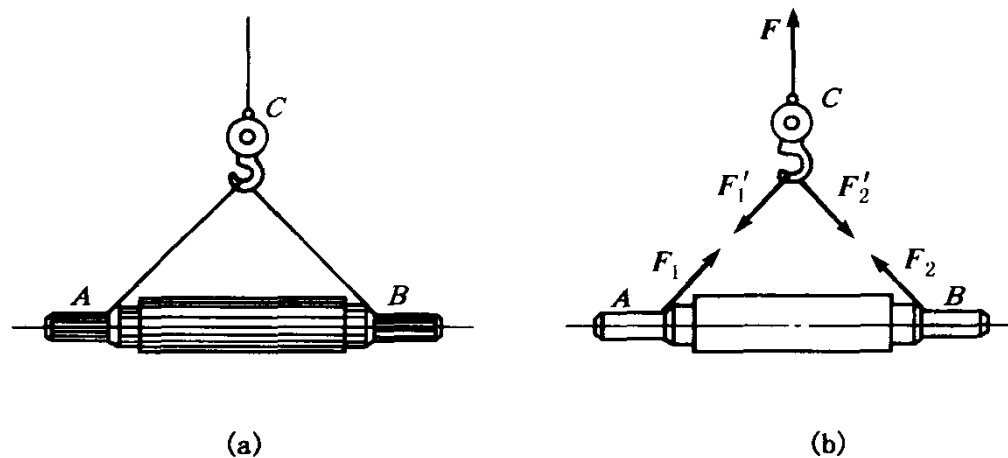


图 1.18

又如图 1.19 所示的胶带传动轮，其约束力(张力)沿胶带，均为拉力。其中 F_1 与 F_1' 、 F_2 与 F_2' ，分别是两个等值、反向、作用线沿着胶带轴线的拉力。应该注意，两边的胶带拉力 F_1 和 F_2 (或 F_1' 和 F_2') 的大小一般并不相等。

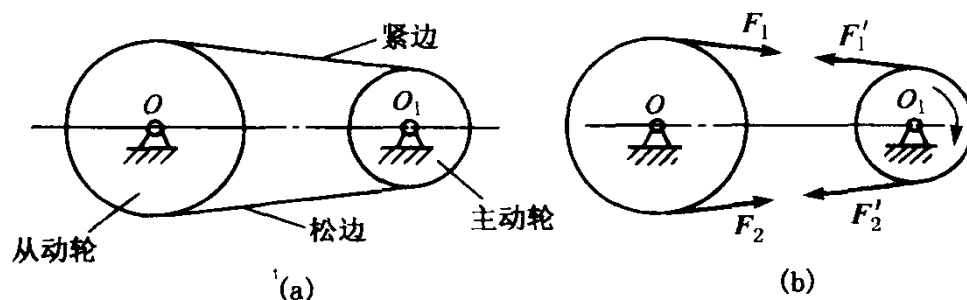


图 1.19

1.4.2 光滑接触面

当物体与支承面(固定的或活动的)之间的接触表面非常光滑，摩擦可以忽略不计时，就可以简化为这类约束。物体在光滑接触面上可以沿着表面自由地滑动，也可以朝脱离表面的任何方向运动，但不能沿着支承面在接触点处的公法线向着支承面内运动。所以，光滑接触面约束的约束力通过接触点，方向沿接触面的公法线并指向被约束物体。如图 1.20 所示的固定支承面给球 O 的约束力 F_{NA} 。图 1.21 所示的啮合齿轮的齿面给被约束齿轮的约束力 F_{NA} 。

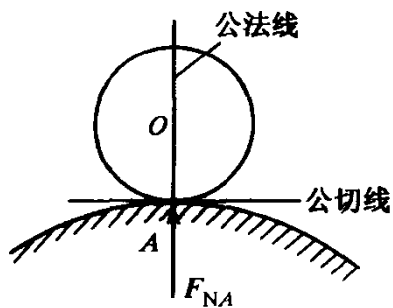


图 1.20

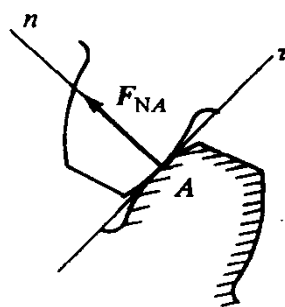


图 1.21

1.4.3 光滑圆柱铰链 固定铰链支座和轴承

1. 圆柱铰链

圆柱铰链是工程结构和机械中通常用来连接构件或零、部件的一种结构形式。理想的圆柱铰链(简称铰链)是在两个连接的构件上相同的光滑圆孔中穿入一个光滑圆柱销钉,如图 1.22a、b 所示。图 1.22c 所示为铰链连接的简化图形。

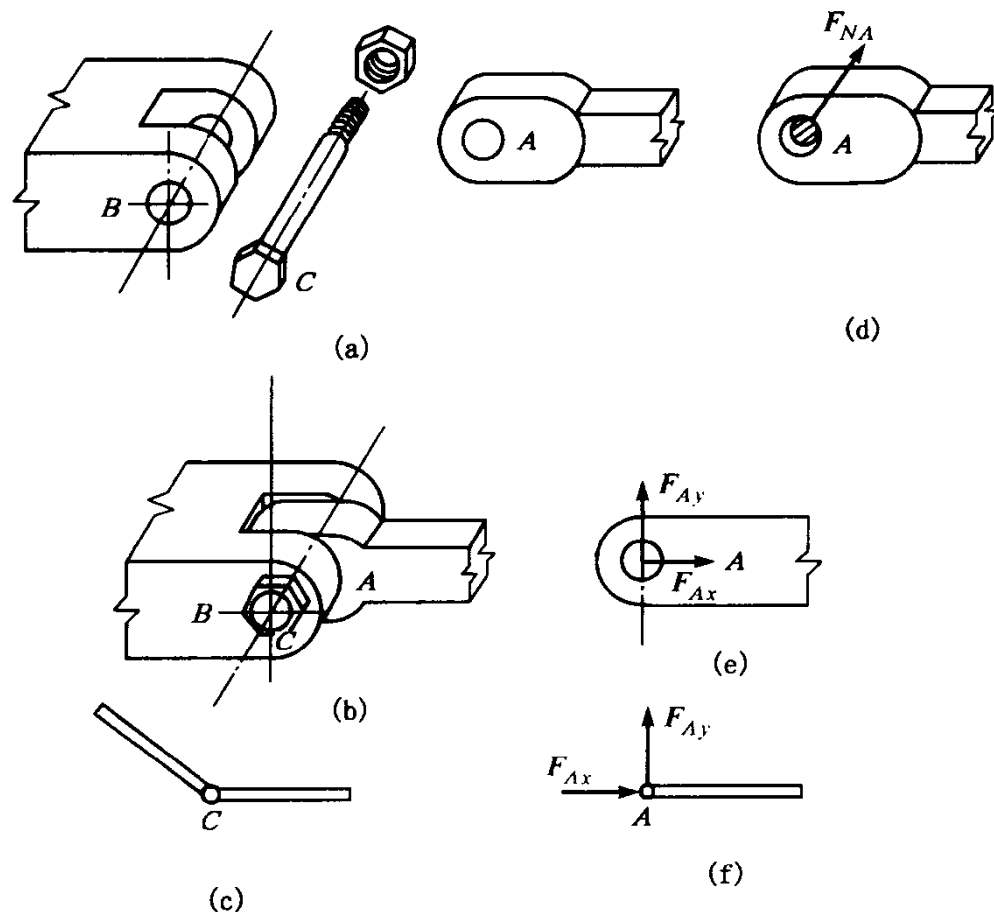


图 1.22

如果不计摩擦,销钉只能阻碍两构件在垂直于销钉轴线的平面内任意方向的相对移动,但不能阻碍两构件绕销钉轴作相对转动。若以两构件中的一个构件作为被约束物体,销钉为约束,则销钉作用在构件上的约束力,应通过销钉与构件圆孔内相接触的点(即母线上的一点)A,方位垂直于销钉轴线,且通过圆孔中心,如图 1.22d 中的 F_{NA} 。但因作用点 A 的位置随构件所受荷载而变化,所以,约束力 F_{NA} 的方向不能确定。由以上分析可知:在平面问题中,圆柱铰链的约束力作用在垂直于销钉轴线的平面内,通过圆孔中心,方向待定。在受力分析中,通常将铰链约束的约束力 F_{NA} ,分解为两个大小未知的正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 来表示,这两个分力通过销孔中心,指向预先假定,如图 1.22e、f 所示,假定的指向正确与否,由计算结果来判定。

2. 固定铰链支座

若用圆柱铰链连接两个构件,而其中一个构件固定于基础(或静止的机架)上,这就构成了工程中的固定铰链支座,也称为固定铰支座。例如图 1.23 所示弧形闸门,在 A 处的约束就是固定铰链支座,它是由圆柱销钉与固定构件组成。

固定铰支座的基本构造如 1.24a 所示,图 b、c 是该支座的简化图形。固定铰支座的性质

与光滑圆柱铰链的性质相同，其约束力的两个正交分量 F_{Ax} 、 F_{Ay} 的表示方法如图 1.24d 所示。

3. 向心轴承

向心轴承是机械中常见的一种约束，图 1.25a 所示为轴承装置，可画成如图 b 所示的简化图形。轴承是轴的支承部分，轴可在轴承内任意转动，也可以沿轴承孔的轴线移动，但是，轴承阻碍轴沿径向移动。它的约束性质与固定铰支座性质相同，不同的是这里的轴承是约束，轴则是被约束物体。当作用在轴上的主动力尚未确定时，轴承对轴的约束力的方向不能预先确定。但是，约束力一定在通过轴心且垂直于轴线的平面内，通常用两个大小未知的正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 来表示，指向可以预先假定，如图 1.25b 所示。

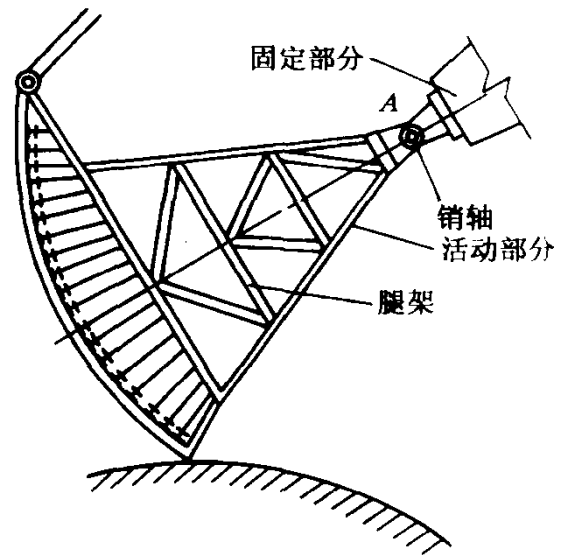


图 1.23

4. 辊轴支座

在桥梁、屋架和其它工程结构中，经常采用辊轴支座约束。它是在铰链支座的底座下安装一排辊轴，就构成辊

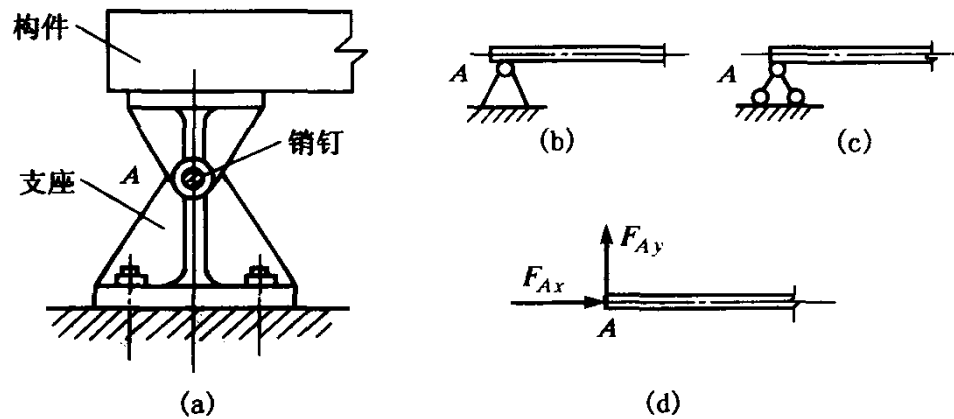


图 1.24

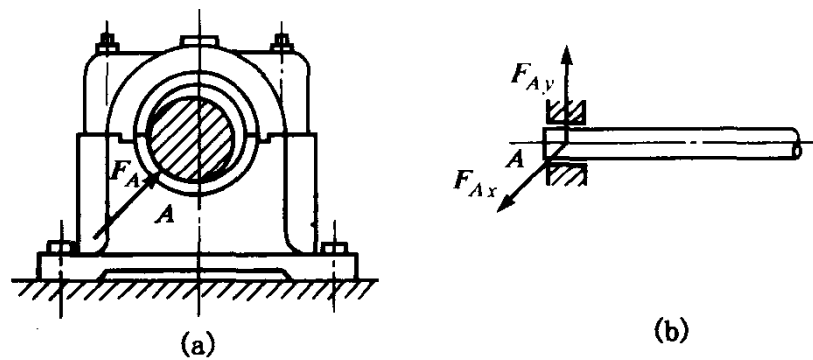


图 1.25

轴支座，又称为活动铰支座，如图 1.26a 所示。这种支座可以沿固定支承面作微小滚动，以便当温度变化而引起桥梁跨度伸长和缩短时，允许两端支座间的距离有微小的变化。显然，这种支座不能阻止物体沿支承面移动和绕销钉轴线的转动，只能阻止物体沿支承面法线方向移动。因此，辊轴支座的约束力垂直于支承面，通过销钉中心，指向可任意假定。图 1.26b、c、d 是辊轴支座的简化图形，其约束力 F_A 如图 1.26e 所示。

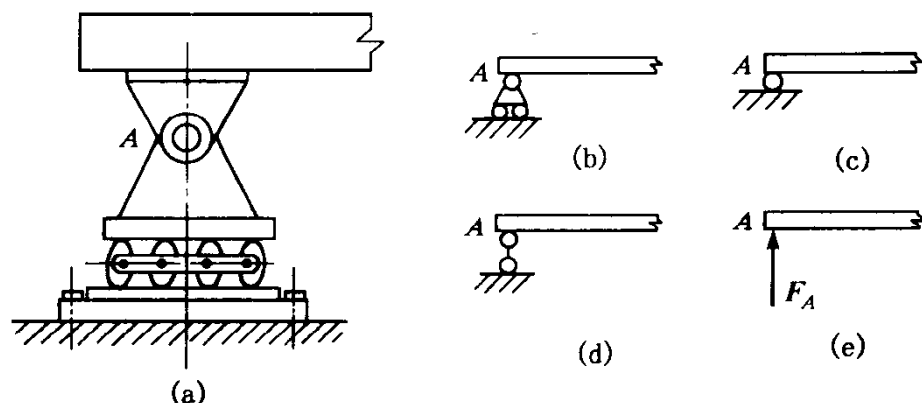


图 1.26

1.4.4 连杆约束

连杆是两端具有光滑铰链与其它物体相连，本身自重忽略不计，中间不受任何荷载作用的杆件。如图 1.27a 所示的轻型悬臂吊车中的拉杆 BC 是连杆。

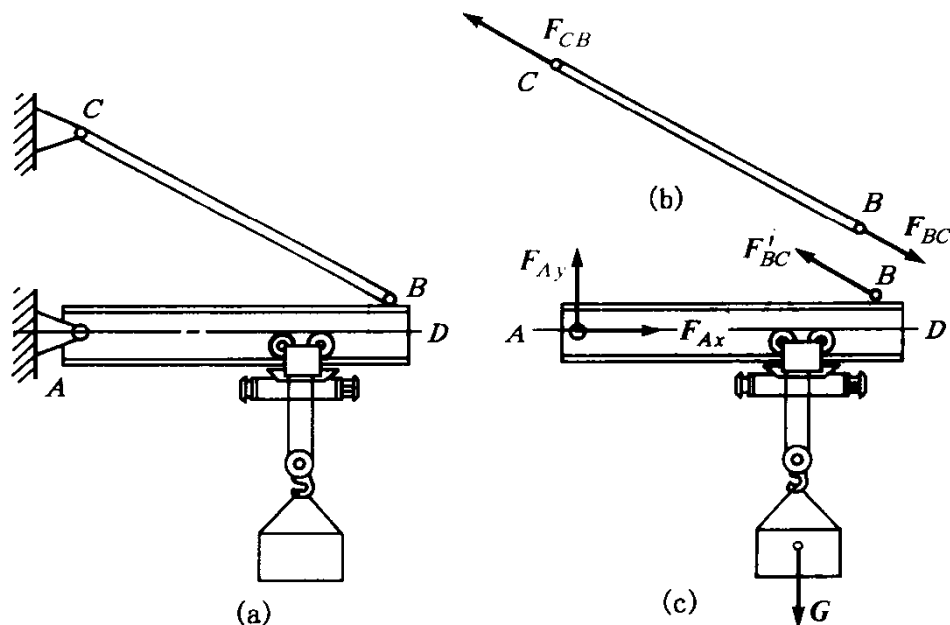


图 1.27

连杆只在两端受到通过铰链作用的力，根据二力平衡原理，这两个力必定是大小相等，指向相反，沿两端铰链中心的连线，如图 1.27b 所示。连杆又称为二力构件(或二力杆)，作为约束，它只能阻碍构件沿连杆两端铰链中心的连线方向运动，而允许构件绕杆端铰链轴线转动和沿铰链轴线作微小移动。可见，连杆对物体的约束力沿着两端铰链中心的连线，其指向预先假定。图 1.27c 中 F'_{BC} 是连杆 BC 作用于横梁 AD 的约束力，其方向与 F_{BC} 假定方向相反。 F_{BC} 与 F'_{BC} 互为作用力与反作用力，即 $F'_{BC} = -F_{BC}$ 。

在工程实际中，有些二力构件是曲杆或折杆，如图 1.28a 中的杆 AB 就是曲杆。作用在曲杆两端的力仍应沿着两端铰心的连线，如图 1.28b 所示。

上面介绍的是平面问题中几种常见的、理想化的典型约束类型。但是，在很多工程实际中连接部位是复杂的，这就要根据问题的性质将实际约束抽象为相应的典型约束。这种将实际问