

工程力学

GONGCHENG LIXUE

■ 齐汝璠 编

哈尔滨工程大学出版社

547

T B12-43

Q22

工 程 力 学

齐汝璠 编

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/齐汝藩编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2002. 5

ISBN 7-81073-287-0

I. 工... II. 齐... III. 工程力学-高等学校-教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 023725 号

内 容 简 介

本书是根据 36~45 学时“工程力学”教学大纲编写的。全书分为两编,第一编静力学;第二编材料力学。静力学包括静力学基本概念及物体受力分析、平面力系、空间力系;材料力学包括轴向拉伸和压缩、剪切、圆轴扭转、平面弯曲及压杆的稳定性等。

本书可用作只需静力学及材料力学基本知识的有关专业的教材。也可供有关专业工程技术人员学习参考。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001
新华书店经销
地矿部黑龙江测绘印制中心印刷厂印刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 13.25 字数 339 千字

2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

定价:18.00 元

前 言

本书是按照 36~45 学时的“工程力学”教学大纲编写的。可以用作只需静力学和材料力学基本知识的专业的教材。

本书在编写过程中注意做到突出重点和少而精,力求在较短的篇幅中,阐明静力学和材料力学的基本概念和基本理论。为了帮助读者对基本概念、基本理论和对基本方法的掌握,书中有相当数量的例题。每章后边都有本章小结和一定数量的习题,习题的难易程度有别,在学习本书时可以选做。书末附有习题答案。

本书均采用国际单位制。

本书在编写中参考了有关专家的论文和专著,在此一并表示感谢。限于编者水平,本书一定存在不少缺点和错误,殷切希望使用本书的教师及读者批评指正。

编 者

2002 年 2 月

目 录

第一编 静 力 学

引言	1
第一章 静力学基本概念及物体的受力分析	2
§ 1-1 静力学的基本概念	2
§ 1-2 力的基本性质	3
§ 1-3 约束及约束反力	6
§ 1-4 物体的受力分析及受力图	11
小结	14
习题	15
第二章 平面力系	17
§ 2-1 平面汇交力系合成及平衡的几何法	17
§ 2-2 平面汇交力系合成及平衡的解析法	20
§ 2-3 力对点的矩、合力矩定理	25
§ 2-4 力偶及平面力偶系	27
§ 2-5 力的平移定理、平面一般力系的简化	31
§ 2-6 平面一般力系的平衡方程及应用	34
§ 2-7 物体系的平衡、静定与超静定的概念	38
小结	41
习题	42
第三章 空间力系、重心	52
§ 3-1 力在空间坐标轴上的投影	52
§ 3-2 力对轴的矩、合力矩定理	54
§ 3-3 空间力系的平衡方程	56
§ 3-4 物体的重心和形心	60
小结	66
习题	67

第二编 材料力学

引言	70
第一章 轴向拉伸和压缩	73
§ 1-1 轴向拉伸和压缩的概念	73
§ 1-2 轴向拉(压)时杆横截面上的内力	73
§ 1-3 轴向拉(压)时杆横截面上的应力	76
§ 1-4 杆轴向拉伸和压缩时的变形	78

§ 1-5 材料在拉伸和压缩时的力学性能	80
§ 1-6 杆轴向拉压时的强度计算	84
§ 1-7 应力集中的概念	87
小结	88
习题	89
第二章 剪切	93
§ 2-1 剪切的概念和剪切的实用计算	93
§ 2-2 挤压的概念和挤压的实用计算	94
小结	98
习题	98
第三章 扭转	102
§ 3-1 扭转的概念	102
§ 3-2 扭转时的外力与内力	102
§ 3-3 薄壁圆筒的扭转	104
§ 3-4 圆轴扭转时的应力和变形	107
§ 3-5 圆轴扭转时的强度条件和刚度条件	111
小结	114
习题	115
第四章 平面弯曲	119
§ 4-1 平面弯曲的概念	119
§ 4-2 梁的简化	120
§ 4-3 平面弯曲时梁的内力	122
§ 4-4 剪力方程、弯矩方程、剪力图、弯矩图	125
§ 4-5 弯矩、剪力和载荷集度间的关系	127
§ 4-6 平面弯曲时梁横截面的正应力	131
§ 4-7 截面的惯性矩及抗弯截面模量	136
§ 4-8 弯曲正应力强度条件	140
§ 4-9 提高梁的弯曲强度的措施	145
§ 4-10 弯曲变形及梁的刚度条件	147
小结	157
习题	159
第五章 压杆的稳定性	168
§ 5-1 压杆稳定性的概念	168
§ 5-2 细长压杆的临界力	169
§ 5-3 欧拉公式的适用范围、经验公式	171
§ 5-4 压杆的稳定性计算	174
§ 5-5 提高压杆稳定性的措施	177
小结	179
习题	180
附录 I 型钢表	183
附录 II 习题答案	200
参考文献	206

第一编 静 力 学

引 言

在工程上,物体相对于地球处于静止或匀速直线运动的状态叫做平衡。例如一般的建筑结构、桥梁、沿直线轨道匀速行进的列车等,都处于平衡状态。平衡是物体机械运动的一种特殊形式。静力学就是研究受力物体平衡规律的科学。概括地说,主要包括以下三方面内容:

1. 研究物体的受力分析及物体受力图的画法。
2. 研究力系的简化,即如何将作用在物体上的力系用另一等效力系替代。
3. 研究在不同力系作用下的物体平衡时,作用在物体上的力所必须满足的条件——平衡条件,并应用这些条件求作用在物体上的未知力。

静力学是后面的材料力学的基础。在工程实际中,静力学也是结构分析及机械零部件设计时进行静力计算的基础。此外,在工程中静力学也有广泛地直接应用。例如,确定结构物的重心,计算起重设备的配重等。

第一章 静力学基本概念及物体的受力分析

§ 1 - 1 静力学的基本概念

一、力的概念

力是物体间的相互机械作用。这种作用的结果使物体的运动状态发生改变或者使物体发生变形。力使物体的运动状态发生变化叫力的外效应。一重物自高处自由落下,它的速度不断改变,这是重力作用的结果。行进中的汽车在刹车时,由于摩擦力作用,速度不断减小。月球在地球引力作用下绕地球运动,其速度方向不断改变。这些都是力的外效应的例子。力使物体变形叫力的内效应。这里的物体的变形包括形状改变和体积改变。例如在拉力作用下弹簧伸长。车间中吊车的横梁在吊起重物时微微变弯。这些例子都体现了力的内效应。

力对物体的作用效果取决于力的大小、方向和作用点,这三个因素称为力的三要素。三个要素中的任一要素发生变化,力对物体的作用效果就会改变。

力是矢量。这是因为力既有大小,又有方向。本书将用大写黑体字母表示力矢量。例如 H 、 R 、 T 等。

本书采用国际单位制。力的单位是牛顿(N)、千牛顿(kN)。

$$1 \text{ kN} = 1\,000 \text{ N}$$

通过力的作用点,沿力的方向上的直线叫力的作用线。因为力是矢量,所以可以用按比例有向线段表示一个力,有向线段的长度表示力的大小,它的指向表示力的方向,有向线段的始点或终点可表示力的作用点。

二、力系的概念

在工程上、往往有几个力同时作用在一个物体上。如果作用在物体上的力是一组力,则称为一个力系。如果各力系中各力的作用线位于同一平面,这样的力系叫平面力系。否则为空间力系。如果力系中各力作用线交于一点则称汇交力系。若各力作用线相互平行,叫平行力系。既不是汇交力系又不是平行力系叫一般力系。

若一物体在一力系作用下处于平衡状态,这个力系叫平衡力系。平衡力系所必须满足的条件叫平衡条件。

若一力系用另一力系代替时,对物体产生的效果相同,这两个力系互为等效力系。

三、刚体的概念

力的内效应是使受力物体发生变形。但是在工程实际中这种变形与物体本身的尺寸比较起来很小,因而物体变形以后并不改变原来力的作用效果,特别是对力的外效应没有大的影响,因此,在以讨论力的外效应为主的静力学中假定,在力的作用下,物体内各点的距离不变。并称这样的物体为刚体。实际上刚体是不存在的,只是在讨论受力物体静力特性时的假设。在后面的材料力学中,将主要讨论力的内效应。在那里就不能随意地把受力物体看作刚体了。

§ 1 - 2 力的基本性质

这节以公理或定理的形式给出力的最基本性质,这些公理或定理是对受力物体进行受力分析及建立物体平衡方程的基础。

一、二力平衡公理

作用在刚体上的两个力,使刚体处于平衡的充分必要条件是两力大小相等,方向相反,作用在同一直线上。如图 1 - 1 所示。若物体在 F_1 、 F_2 作用下平衡,必须满足

$$F_1 = -F_2 \quad \text{或} \quad F_1 + F_2 = 0$$

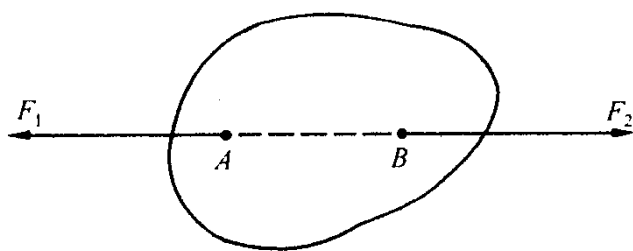


图 1 - 1

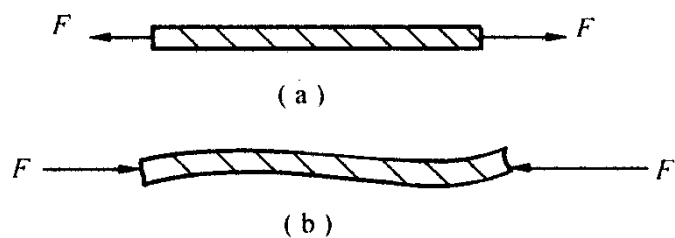


图 1 - 2

这个公理对于刚体是充分必要条件,而对变形体就不是平衡的充分条件,只能是必要条件。例如,一绳索两端受拉力时,只要二力等值、反向、共线则绳索就处于平衡状态(图 1 - 2(a)。而当两端受压力作用时,尽管二力满足等值反向共线的条件,绳索也不能平衡(图 1 - 2(b))。

在工程中,受二力作用处于平衡的物体叫二力构件。若构件是杆,则称二力杆。图 1 - 3 中的 AB 杆在不计自身重力时是二力杆。

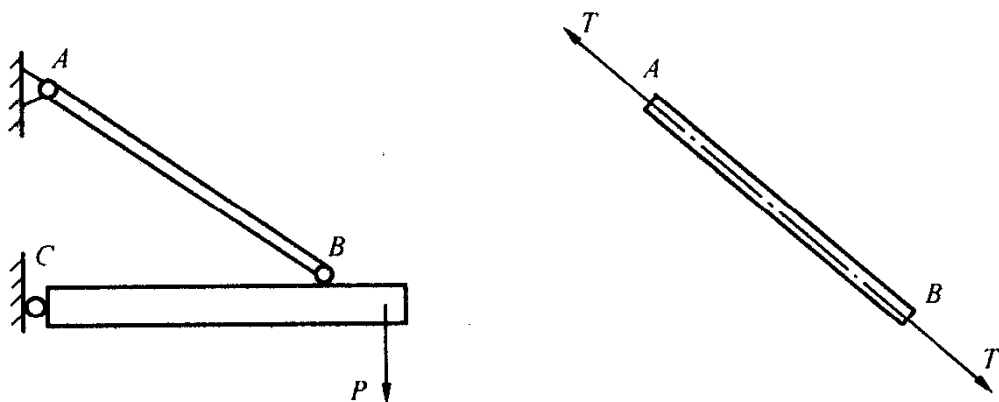


图 1 - 3

二、加减平衡力系公理

在作用于刚体上的已知力系上,加上或减去任意的平衡力系,将不会改变原力系对刚体的作用效果。这一公理也可表述为:若两个力系只相差一个或几个平衡力系,它们对刚体作用效果相同。

由加减平衡力系公理可导出下面的力的可传性定理：

作用于刚体上某点的力，可以沿力的作用线移到刚体内的任一点，而不改变这个力对刚体的作用效果。

证明：设一力 F 作用于刚体上 A 点(图 1-4(a))。由加减平衡力系公理，在 F 作用线上任一点 B 加一对平衡力 $F_1 = F_2 = F$ (图 1-4(b))，再根据这一公理去掉一平衡力系 F 及 F_1 ，则得作用于 B 点的力 $F_2 = F$ 。

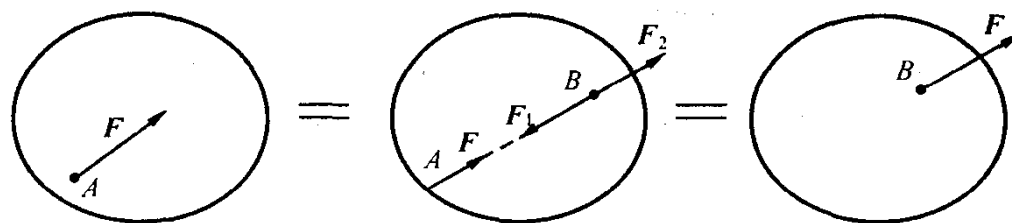


图 1-4

这一公理及推论只适用于刚体，对于变形体如果随便加减平衡力系或使力沿作用线移动都会改变物体的变形情况。图 1-5 所示一胶皮棒，在端面因拉力 P 作用而使棒伸长，若将 P 沿作用线移至 A 点，则棒不会伸长，棒的变形状况改变了。

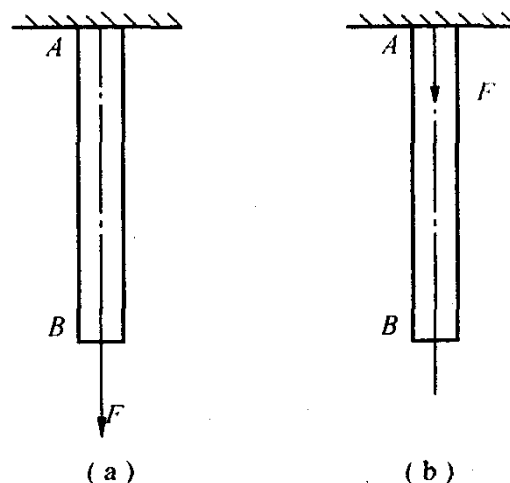


图 1-5

三、平行四边形公理

作用在物体上同一点的两个力可以合成一个合力。其作用点在两力的交点。合力的大小及方向由两力为邻边的平行四边形对角线决定。如图 1-6(a) 所示。

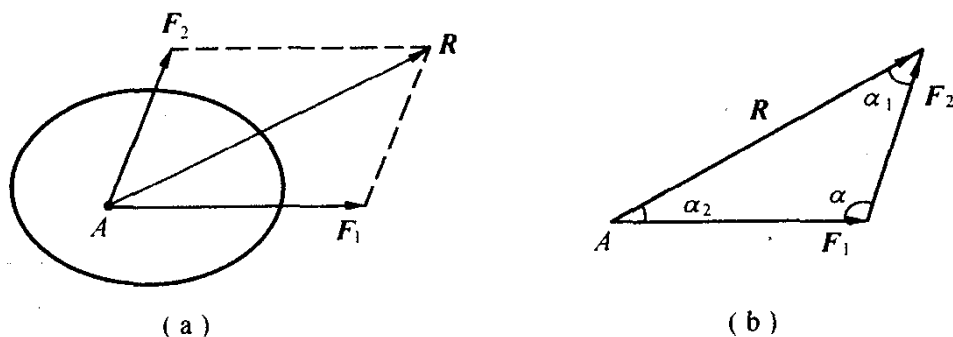


图 1-6

这个公理也叫平行四边形法则，它是矢量求和的法则，因而也可写成

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

这个公理对变形体也成立，但二力必须有共同的作用点。而对刚体，只要二力作用线有一交点就可应用。将平行四边形法则稍加改变可得三角形法则。如图 1-6(b) 所示，将 F_1 和

F_2 首尾相接,然后由第一力始点到第二力终点连一矢量就是合力矢量 R 。

合力可以通过几何作图求出,也可由三角学中的余弦定理、正弦定理求出。由图 1-6(b) 可求得

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos\alpha}$$

$$\frac{F_1}{\sin\alpha_1} = \frac{F_2}{\sin\alpha_2} = \frac{R}{\sin\alpha} \quad (1-2)$$

运用平行四边形法则也可以将一力分解为两个分力。由于以一条线段为对角线的平行四边形有无数个,因而一个力可以分解成任意组分力。通常将一个力分解为两个互垂的分力。例如可将一斜坡上的重物的重力 Q 沿斜坡切线方向及斜坡法线方向分解(图 1-7)。

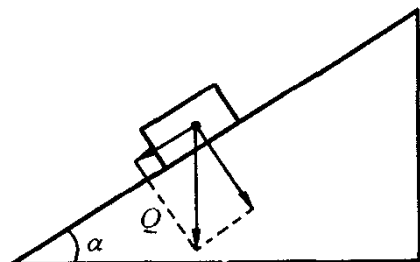


图 1-7

根据以上三个公理,可以得出下面的三力平衡汇交定理:

若刚体在三个力作用下平衡,并且其中两个力交于一点,则第三力的作用线必通过这点,而且三力位于同一平面。

证明:如图 1-8(a) 示,一刚体在三力 F_1 、 F_2 、 F_3 作用下平衡,且二力 F_1 及 F_2 的作用线交于 A 点。用力的可传性定理将力 F_1 、 F_2 沿其作用线移至 A 点,再由平行四边形公理求出它们的合力(图 1-8(b))。合力 R 与 F_1 、 F_2 等效。由于刚体平衡,由二力平衡公理, R 与 F_3 等值,反问,共线(图 1-8(c))。从而 F_3 必过 A 点,由于 R 与 F_1 及 F_2 共面,所以 F_3 也与 F_1 、 F_2 共面。

三力汇交定理常用来确定未知力的方向。

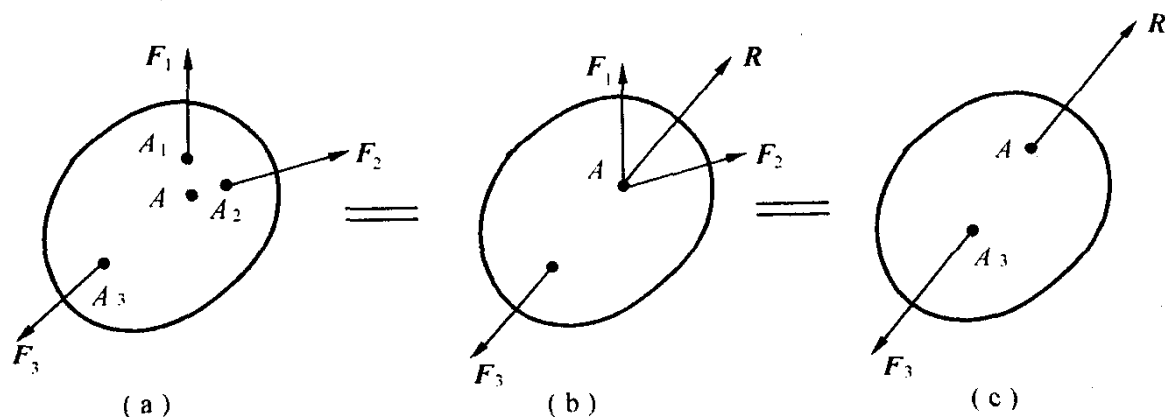


图 1-8

四、作用与反作用公理

两物体间的相互作用力,大小相等,方向相反,沿同一直线分别作用在两个物体上。

这个公理说明作用力和反作用力一定成对出现,相互依存,同时消失。并且这两个力分别作用在两个不同的物体上。在对物体作受力分析时,必须明确施力物体与受力物体。作用与反作用公理中的一对力和两力平衡公理中的两力根本不同,前者是分别作用于不同物体上,后者的两个力是作用于同一物体上。

§ 1 - 3 约束及约束反力

在机械设备及工程结构中的零部件,都必须根据设计要求与其它部件联系起来,这种联系限制了这些零部件沿某些方向的位移,这就构成了对零部件的约束。这些限制位移的物体叫约束。例如,吊车的绳索限制了所吊重物沿竖直方向的位移。铁轨也构成了对机车的位移的限制,使得机车只能沿轨道运动。

既然约束限制了物体的位移,说明约束可以改变物体的运动状态,因而约束可提供力的作用。约束对被约束物体的作用力叫约束力,也叫约束反力,简称反力。

约束反力的方向与所限制的物体的位移方向相反,约束力的作用点在约束与物体的接触点,约束力大小由平衡条件确定。

作用在物体上的力除了约束力外,还有其它力,例如还有重力,水压力及各种动力装置载荷引起的各种力。这些除了约束力以外的力叫主动力。一般主动力是预先知道的,而约束力是要通过平衡条件确定的。为了正确求出约束力,首先要能正确地知道约束提供的约束力的方向或作用线的方位。工程中约束有很多种,下面介绍几类基本约束。

1. 柔性约束

绳索、链条或皮带比较柔软,只能承受拉力,因而它只能限制被约束的物体沿绳索轴线离绳索而去的位移,例如,绳索吊起物体(图 1 - 9(a), (b))。它所产生的约束反力应沿着绳索中心线而背离物体。

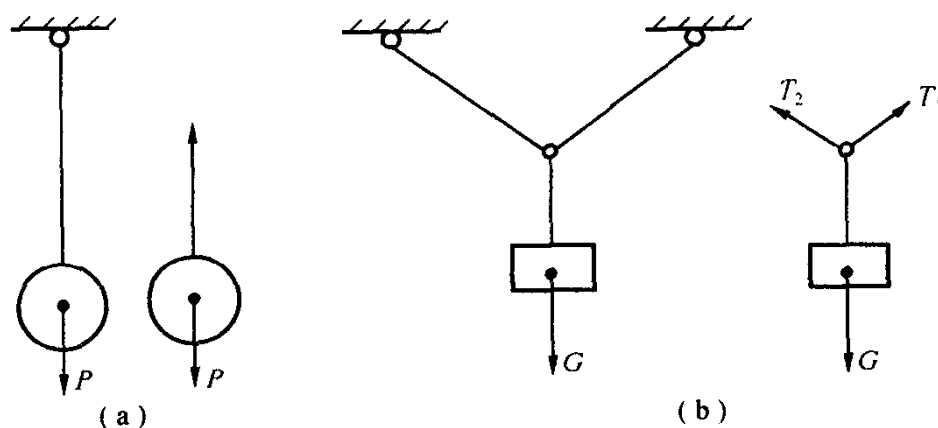


图 1 - 9

所以,柔性约束力沿柔性约束中心线,背离被约束物体,只能为拉力,不能为压力。

2. 光滑接触面约束

如果物体与约束的接触面之间的摩擦力与物体受到的其它力相比很小而忽略不计时,这种约束叫光滑接触面约束。光滑接触面约束不能限制物体沿接触面切向的位移,也不能限制物体沿接触面公法线方向离开约束的位移。因此光滑接触面的约束力过物体与约束的接触点,沿接触点公切面的法线方向,且为压力。图 1 - 10 给出了光滑接触面的约束反力。

如果一个具有光滑面的物体由一个支承物的尖端支承,则反力过接触点,且沿物体接触点的切平面的法线方向并指向物体。如图 1 - 11 所示。

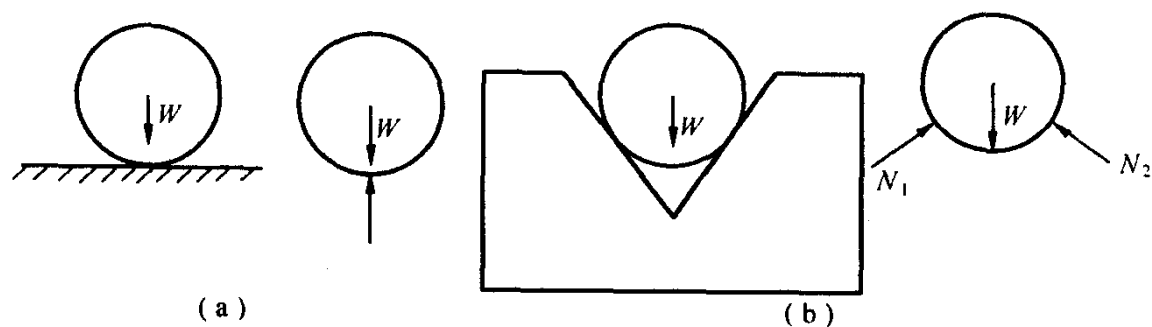


图 1-10

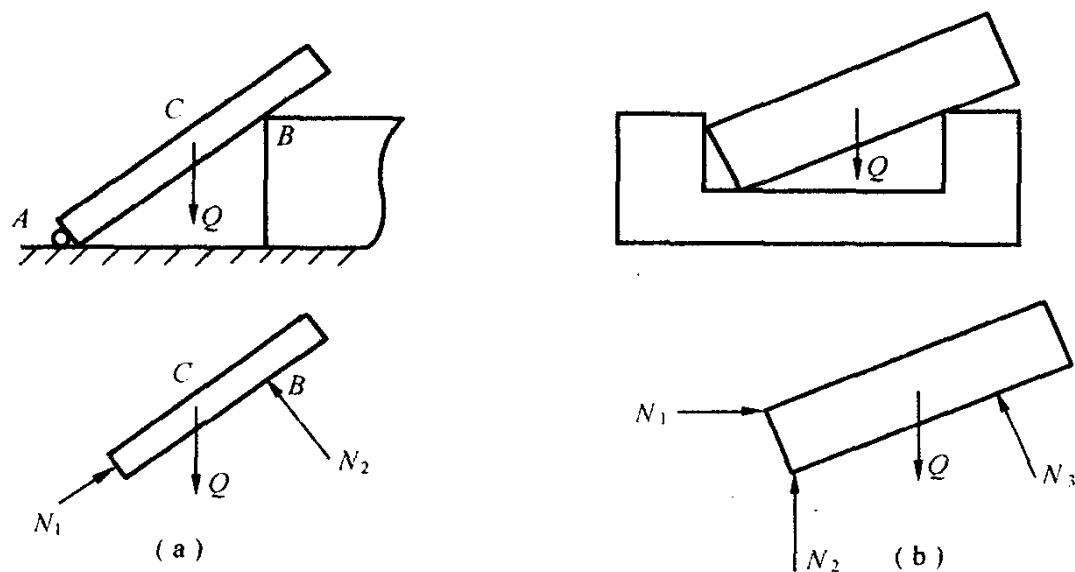


图 1-11

3. 光滑铰链

工程中常将两个零部件钻成同样大小的光滑圆孔,然后用一只圆柱销钉将它们连接在一起(图 1-12),两构件只能绕销钉轴线相对转动,这种约束叫光滑铰链约束。

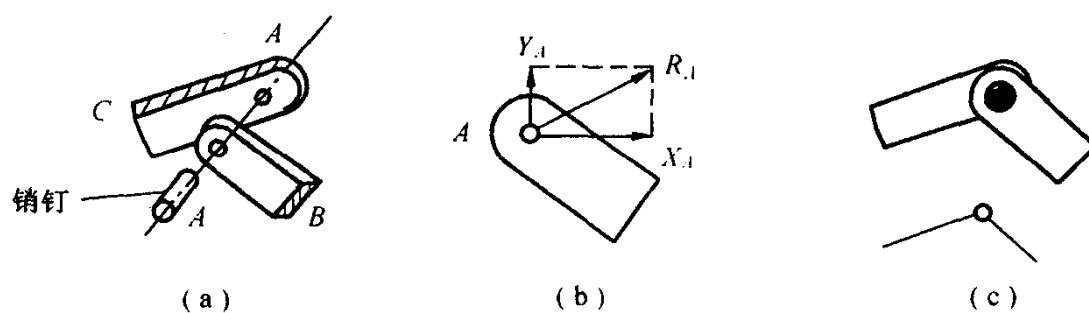


图 1-12

由于销钉与被连接的零件光滑接触,所以反力应过接触点,且沿接触点公切面法线方向,并过销钉中心。但由于不知道接触点的确切位置,也不知反力的确切方向。所以把反力画在孔的中心,并用两个互相垂直的分力 X 、 Y 表示(图 1-12(b))。工程上常将用铰链连接的两个杆件的约束叫中间铰,简单画成图(1-12(c))的形式。

4. 固定铰支座

固定铰支座约束是由支座和销钉组成(图 1-13(a))。与前面讲的中间铰约束类似,约

束力画在销钉中心,用两个互相垂直的分力 X 、 Y 表示(图 1-13(b))。工程上将固定铰支座画成图 1-13(c) 的形式。

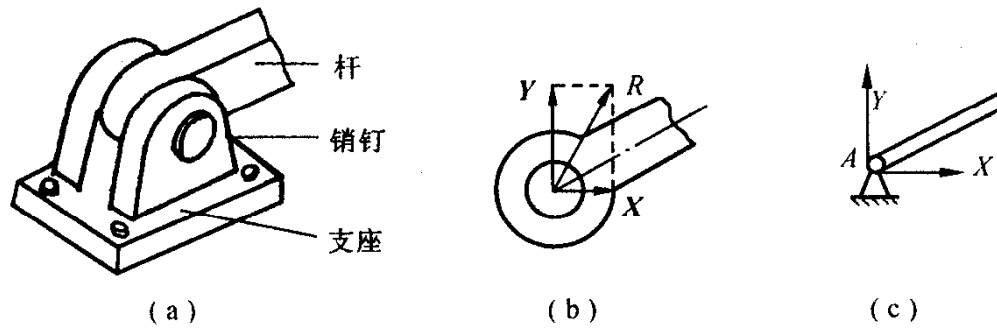


图 1-13

5. 滚动铰支座

如果在固定铰支座下安装两个导轮(图 1-14(a)),这个支座就不能限制杆件沿支承面的位移,只能限制杆件沿支承面法线方向的位移。因而这种支座只能产生沿支承面法向的反力,并且反力通过销钉中心(图 1-14(b))。这种支座叫滚动铰支座或滚轴支座。简单地画成图 1-14(c) 的型式。

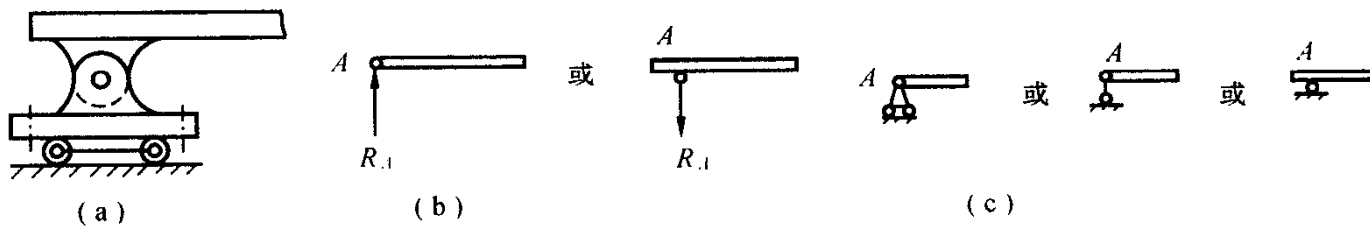


图 1-14

6. 轴承约束

工程中常见的轴承约束可分为滑动轴承及滚动轴承。

滑动轴承(图 1-15)不能限制轴的轴向位移,因而如同前面的铰链约束一样,反力在与轴线垂直的平面内,并分解为相互垂直的 x 、 z 两个分力。

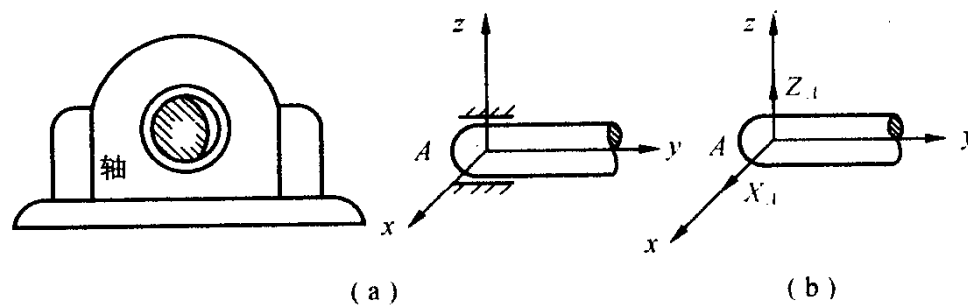


图 1-15

滚动轴承可分为向心轴承及止推轴承。图 1-16 为向心轴承,同样它不限制杆的轴向位移,反力在与轴线垂直的平面内并分解为互垂的 x 、 z 两个分力。

止推轴承(图 1-17)除了限制与轴线垂直的平面内的位移,同时也限制了杆沿轴线方向

的位移,因而可以产生沿 x 、 y 、 z 三个方向上的反力(图 1-17(b),(c))。

上面介绍的几种约束只是工程中常见的最简单的几种,其它还有球铰、固定端等约束。球铰由光滑球窝和一半径相同的球构成,球可在球窝内自由转动但不能移动(图 1-18(a))。因而可提供 x 、 y 、 z 三个方向的反力。固定端约束(图 1-18(b))使杆的一端既不能沿 x 、 y 、 z 三个方向移动,同时也限制了固定端截面绕 x 、 y 、 z 轴的转动。因而可引起 x 、 y 、 z 三个反力分量,也会产生对 x 、 y 、 z 轴的反力矩。关于固定端的约束以后还会详细讨论。

常见的典型的约束及约束反力列于表 1-1 中。

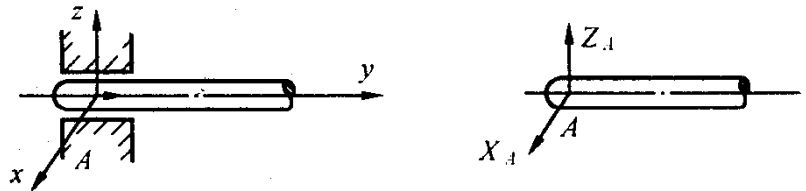


图 1-16

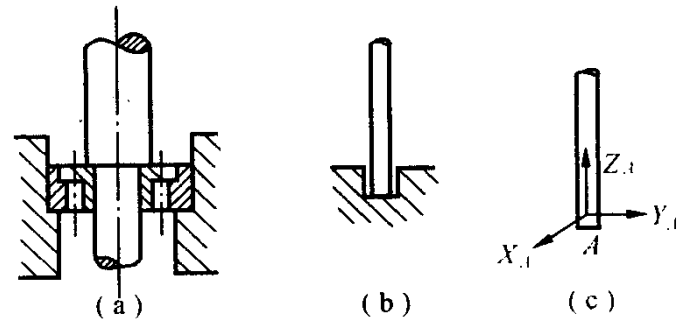


图 1-17

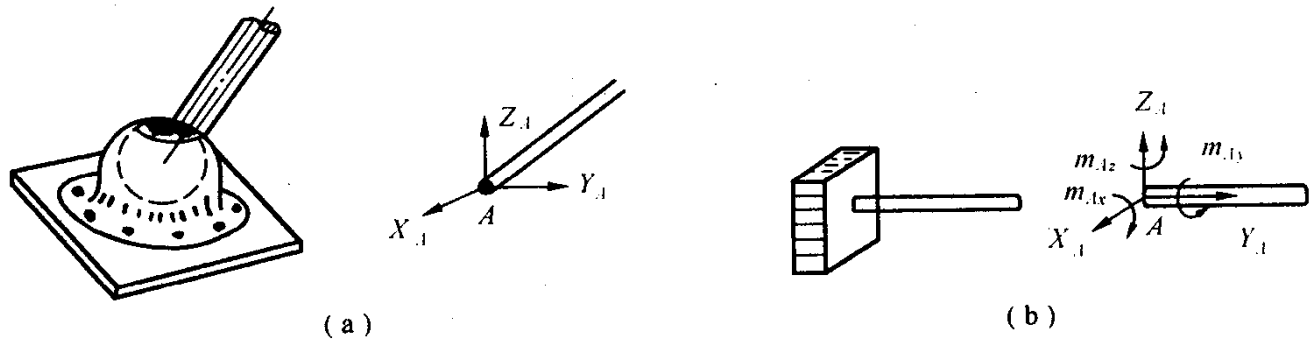


图 1-18

表 1-1 典型约束及其约束反力

约束类型	简 图	约束反力
柔性体约束		约束反力沿绳索方向,背离物体
光滑面约束		约束反力过接触点,沿接触面公法线方向,指向物体。

表 1-1(续 1)

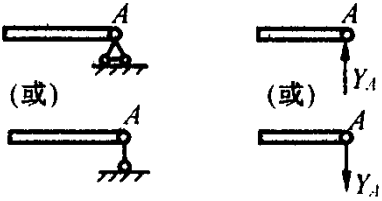
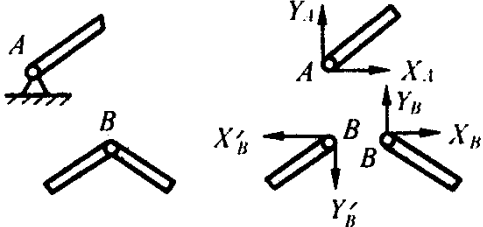
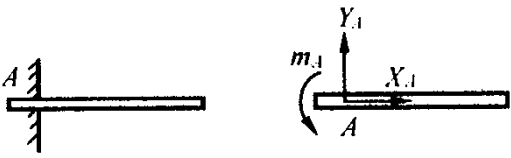
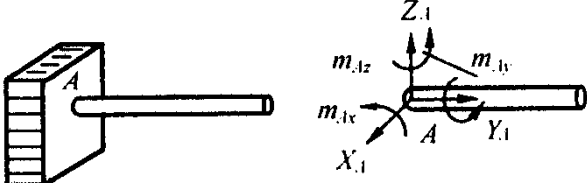
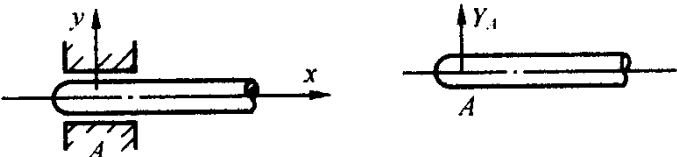
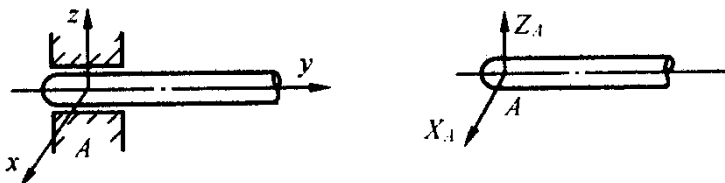
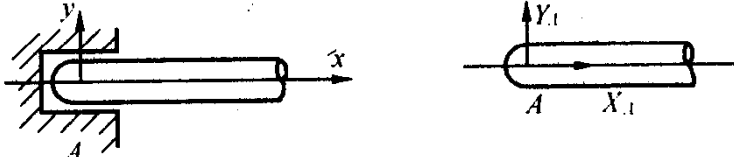
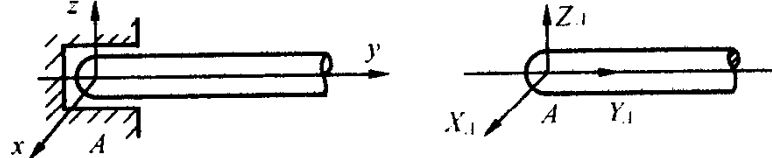
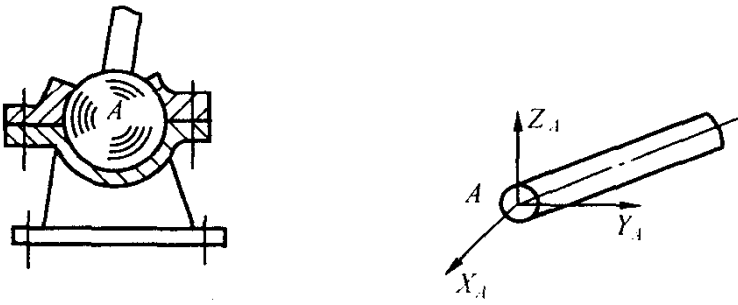
辊轴约束			约束反力通过销钉中心, 垂直于支承面, 方向待定。
铰链约束			约束反力用通过铰链中心的两个互相垂直的分力表示。
固定端约束	平面		约束反力用一个平面内的力偶和两个互相垂直的分力表示
	空间		约束反力用三个力偶 m_1、m_2、m_3 和三个互相垂直的分力表示
轴承约束	向心轴承	平面 	约束反力在垂直于轴线的径向平面内, 通常用 Y 表示。
		空间 	约束反力在垂直于轴线的径向平面内, 通常用互相垂直的分力 X、Z 表示
	向心推力轴承	平面 	约束反力通常用互相垂直的分力 X、Y 表示。
		空间 	约束反力通常用三个互相垂直分力 X、Y、Z 表示。

表 1-1(续 2)

球 铰		约束反力通常用三个互相垂直分力 X 、 Y 、 Z 表示。
-----	--	-------------------------------------

§ 1-4 物体的受力分析及受力图

如前所述,作用在物体上的力有主动力和约束力,一般主动力为已知力,而约束力是未知力,需要通过物体的平衡条件求出,为了应用物体的平衡条件,必须了解物体受那些力作用,这些力的作用点和方向,这个分析过程叫物体受力分析。

通常所研究的物体都与其它物体相联系,或者说受到其它物体的约束。为了分析物体的受力情况,必须把这个物体从与它联系的物体中分离出来。称分离出来的物体为隔离体或研究对象。分离的过程就是解除物体所受约束的过程,在解除约束的同时要 代之以相应的约束力,这样才与所研究的物体在未分离出来时的受力情况相同。在隔离体上画出它所受到的全部主动力和约束力所得到的受力分析的示意图叫物体的受力图。

画物体的受力图是对物体进行力学分析的第一步,十分重要,必须熟练掌握。

例 1-1 如图 1-19 所示,一碾子压平路面,受到一石块阻碍,分析碾子的受力情况并画受力图。

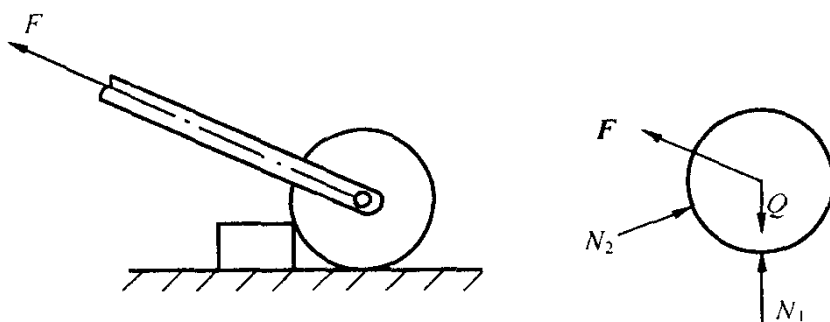


图 1-19

解 (1) 以碾子为研究对象。

(2) 将碾子受到的主动力画上。主动力有拉力 F 及重力 Q 。

(3) 画约束力。约束力有地面的反力及石块尖角的反力。假定均为光滑接触,则由光滑接触的反力特点,将反力 N_1 、 N_2 画出。

例 1-2 简易起重机的起重臂 AB , 下端 A 为固定铰支座, B 端由钢索 BC 固定。 B 端有滑轮, 不计滑轮摩擦力。已知所吊重物重 Q_1 , 杆 AB 重 Q_2 , 作用在 AB 中点。画出滑轮, 起重臂 AB 及系统的受力图(图 1-20(a))。

解 1. 滑轮的受力图。

(1) 取滑轮为研究对象。