

中等职业学校教学用书

机械工程力学 学习指导与练习

(工程技术类)

主编 杜建根



高等教育出版社

中等职业学校教学用书

机械工程力学 学习指导与练习

(工程技术类)

主编 杜建根

高等教育出版社

内容提要

本书为杜建根编写的中等职业教育教材《机械工程力学》(工程技术类)的配套教学用书,全书除绪论外分三篇,共八章:第一篇为静力分析,包括静力分析基础、平衡方程及其应用、杆件的内力计算三章;第二篇为构件的承载能力分析,包括轴向拉压时材料的力学性质、杆件的强度计算、杆件的变形和刚度条件、压杆稳定四章;第三篇为运动分析初步,包括刚体的运动分析一章。每一章设有内容提要、基本要求、典型例题分析、思考题与习题。通过本书的学习,学生可巩固力学基本概念、基本原理,掌握力学问题的分析方法,提高分析和解决实际问题的能力。

本书可作为中等职业教育机械类、近机类各专业工程力学课程的教学配套用书,同时可供高等职业教育或工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程力学学习指导与练习(工程技术类)/杜建根主编. —北京:
高等教育出版社,2005.6 (2007 重印)
ISBN 978-7-04-016738-2

I. 机... II. 杜... III. 机械工程学: 工程力学 -
专业学校 - 教学参考资料 IV. TH113

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 048360 号

策划编辑 王瑞丽 责任编辑 胡纯 封面设计 于涛 责任绘图 朱静
版式设计 张岚 责任校对 杨凤玲 责任印制 尤静

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总机 010-58581000
经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京市南方印刷厂

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开本 787×1092 1/16
印张 10.75
字数 250 000

版次 2005年6月第1版
印次 2007年5月第4次印刷
定价 13.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 16738-00

前 言

本书是根据国家教育部中等职业教育工程力学课程教学大纲的要求,围绕中等职业教育的培养目标,并考虑到学生继续学习和深造的需要编写的,可作为中等职业教育国家规划教材杜建根编《机械工程力学》(工程技术类)的配套教学用书,也可作为高等职业教育的教学参考书。

全书除绪论外分三篇,共八章:第一篇为静力分析,包括静力分析基础、平衡方程及其应用、杆件的内力计算三章;第二篇为构件的承载能力分析,包括轴向拉压时材料的力学性质、杆件的强度计算、杆件的变形和刚度条件、压杆稳定四章;第三篇为运动分析初步,包括刚体的运动分析一章。每一章设有内容提要、基本要求、典型例题分析、思考题与习题。

本书在编写过程中,汲取了各院校近年来力学课程改革的成功经验,紧密结合工程实际,注重基本概念、基本原理和基本方法的阐述,而不追求课程的理论性和系统性。书中的例题绝大多数为精选的典型题目,旨在使读者巩固力学基本概念、基本原理,掌握力学问题的分析方法和解题技巧。每章后附有思考题和习题,以使读者得到较为全面的训练,提高分析和解决实际问题的能力,并为学习后续课程打下基础。

本书由河南工业职业技术学院杜建根主编,朱成俊、徐荣政也参加了部分编写工作,河南工业职业技术学院姜立增主审。

限于作者水平有限,且编写时间仓促,书中错误和缺点在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2005年1月

目 录

绪 论	1
-----------	---

第一篇 静 力 分 析

第一章 静力分析基础	5
第二章 平衡方程及其应用	23
第三章 杆件的内力计算	54

第二篇 构件的承载能力分析

第四章 轴向拉压时材料的力学性质	77
第五章 杆件的强度计算	88
第六章 杆件的变形和刚度条件	121
第七章 压杆稳定	136

第三篇 运动分析初步

第八章 刚体的运动分析	149
参考答案	159
参考文献	164

绪 论

一、机械工程力学的任务和性质

机械工程力学是研究物体机械运动一般规律与构件承载能力的科学。机械运动是物体在空间的位置随时间的变化,而平衡是机械运动的一种特殊情况。构件承载能力是指构件在确定的外力作用下安全正常工作的能力。

组成机械或结构的基本零、部件称为构件。

构件在确定的外力作用下丧失正常功能称为失效或破坏。工程构件的失效形式主要有强度失效、刚度失效和稳定失效等。

强度失效是指构件在外力作用下发生塑性变形或断裂。

刚度失效是指构件在外力作用下产生过量的弹性变形。

稳定失效是指构件在某种外力作用下突然丧失原有的平衡形式。

机械工程力学的主要任务是研究构件的受力、平衡、变形和失效规律,为保证构件安全、可靠地工作提供必要的基础理论、设计准则和计算方法。

机械工程力学是工科院校各专业一门重要的技术基础课。

二、机械工程力学的研究对象、模型及构件变形的基本形式

机械工程力学主要研究杆类构件,简称为杆件。杆件的几何特征是长度方向的尺寸远大于横向尺寸,如梁、轴、柱等均属于杆件。杆件的几何形状可用其轴线(截面形心的连线)和横截而表示。轴线为曲线的杆件称为曲杆,轴线为直线的杆件称为直杆,各横截面相同的杆件称为等截面杆。本课程主要研究等截面的直杆,简称为等直杆。

机械工程力学中最基本的力学模型有刚体和变形固体。

刚体是指在力的作用下,大小和形状不变的物体。

变形面体是指在外力作用下将产生变形的固体。工程力学从宏观的角度研究物体内部的受力和变形规律时,对变形固体作如下假设:

(1) 均匀连续性假设。

(2) 各向同性假设。

变形固体在外力作用下将产生两种不同性质的变形:一种是外力消除时变形也随着消失,称为弹性变形;另一种是外力消除后变形不能全部消失而留有残余,残余部分的变形称为塑性变形(或残余变形)。机械工程力学在研究构件的承载能力时,只限于讨论材料在弹性范围内的小变形问题。所谓小变形,是指构件的变形量远小于其原始尺寸。

构件在不同外力作用下,将发生不同形式的变形。构件变形的基本形式有四种:轴向拉伸和压缩、剪切、扭转、弯曲。

三、机械工程力学的主要内容

机械工程力学的主要内容包括以下三部分：

1. 静力分析

主要研究刚体受力分析的方法和力系的平衡条件及其应用。

2. 构件的承载能力分析

主要研究构件的强度、刚度和稳定性。

3. 运动分析初步

主要研究平移和定轴转动刚体的运动规律。

强度是指杆件抵抗破坏的能力。刚度是指杆件抵抗弹性变形的能力。稳定性是指杆件保持原有平衡形式的能力。

第一篇 静 力 分 析

静力分析主要研究物体在力系作用下的平衡规律,包括物体的受力分析、力系的简化与平衡条件。

力系是指作用于物体上的一组力。对物体作用效果相同的力系,称为等效力系。在不改变力系对物体作用效果的前提下,用一个简单的力系来代替复杂的力系,这一过程称为力系的简化。若一个力与一个力系等效,该力称为力系的合力,而力系中的各力称为合力的分力。

在一般工程问题中,平衡是指物体相对于地球静止或匀速直线运动的状态。作用于平衡物体上的力系,称为平衡力系;平衡力系所应满足的条件,称为力系的平衡条件。

静力分析的研究对象为刚体或刚体系统。刚体是指在力的作用下不发生变形的物体。

第一章 静力分析基础

本章主要研究力、力偶的概念及其性质,力的投影和力矩的计算以及物体受力分析的方法。力和力偶是组成力系的两个基本要素,力的投影和力矩分别表征了力对物体的移动效应和转动效应。受力分析是对物体进行力学计算的前提,也是机械工程力学的基础。

内 容 提 要

一、力的概念及其性质

1. 力的概念

力是物体间相互的机械作用。这种作用使物体运动状态发生变化或使物体产生变形,前者称为力的运动效应或外效应,后者称为力的变形效应或内效应。

力对物体的作用效果决定于力的三要素:大小、方向和作用点。

力是具有大小和方向的量,所以力是矢量。

力的三要素可以用有向线段表示,称为力的图示。过力的作用点,沿力矢量方向画出的直线,称为力的作用线。

在国际单位制中,力的单位为 N(牛)或 kN(千牛), $1\text{ kN} = 10^3\text{ N}$ 。

2. 力的性质

1) 力的可传性

指作用于刚体上的力可沿其作用线移动到该刚体内任一点,而不改变力对刚体的作用效应。根据力的可传性,作用于刚体上力的三要素为力的大小、方向和作用线。

2) 二力平衡条件

指作用于同一刚体的两个力使刚体处于平衡的充分和必要条件是这两个力大小相等,方向相反,且作用在同一条直线上。在两个力作用下处于平衡的构件,称为二力构件。二力构件所受的两个力沿两力作用点的连线。

3) 作用与反作用定律

指两个物体间的作用力与反作用力总是大小相等,方向相反,沿着同一直线,并分别作用在这两个物体上。

4) 力的平行四边形法则

指作用于物体上同一点的两个力可以合成为作用于该点的一个合力,合力的大小和方向由这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线来决定(图 1-1)。如用 F_R 表示力 F_1 与 F_2 的合力,则合力的矢量等于各分力的矢量和,即

$$F_R = F_1 + F_2$$

在工程实际中,常把一个力 F 沿直角坐标轴方向分解,从而得到两个相互垂直的分力 F_x 和

F_y , 称为力的正交分解(图 1-2), 分力的大小为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= F \sin \alpha \end{aligned} \right\}$$

式中, α 为力 F 与 x 轴所夹的锐角。

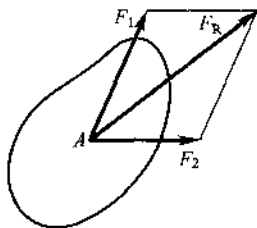


图 1-1

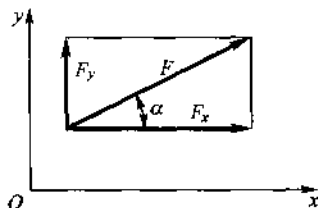


图 1-2

3. 集中力与分布力

作用于一点的力称为集中力。作用在一定范围(面积、体积或长度内)的力称为分布力。分布在一定长度上的力称为线分布力(又称为线分布载荷)。线分布载荷的大小用载荷集度 q 表示, 某点的载荷集度是指该点单位长度上受力的大小, 它表示该点所受载荷的强弱程度, 其单位为 N/m 或 kN/m 。当 $q = \text{常数}$ 时, 称为均布载荷; 当 $q \neq \text{常数}$ 时, 称为非均布载荷。如图 1-3 所示梁的 CB 段上作用有载荷集度为 q 的均布载荷, 其合力的大小等于载荷集度 q 与其分布长度 l 的乘积, 即 $F_q = ql$, 合力的作用线过分布长度的中点, 方向与均布载荷的方向相同。

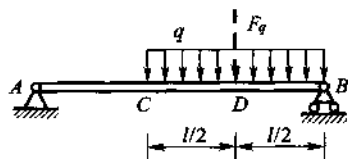


图 1-3

4. 力系的分类

通常将力系按其各力作用线的分布情况进行分类: 各力的作用线都在同一平面内的力系, 称为平面力系; 各力作用线不在同一平面内的力系, 称为空间力系。在这两类力系中, 各力的作用线相交于一点的力系, 称为汇交力系; 各力的作用线互相平行的力系, 称为平行力系; 各力的作用线不全交于一点, 也不全平行的力系, 称为一般力系或任意力系。

二、力的投影与合力投影定理

1. 力在平面直角坐标轴上的投影

如图 1-4 所示, 在力 F 所在的平面内取直角坐标系 Oxy , 从力 F 的起点 A 和终点 B 分别向 x 轴和 y 轴作垂线, 线段 ab 和 cd 的长度冠以适当的正、负号, 分别称为力 F 在 x 轴和 y 轴上的投影, 用 F_x 和 F_y 表示。并且规定: 从力起点的投影到力终点的投影的指向与坐标轴的正向一致时, 力的投影取正值; 反之, 取负值。力的投影 F_x 和 F_y 的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \pm F \cos \alpha \\ F_y &= \pm F \sin \alpha \end{aligned} \right\}$$

式中, α 为力 F 与 x 轴所夹的锐角。

由力的投影的定义可知:

(1) 当力与坐标轴垂直时, 力在该轴上的投影等于零;

(2) 当力与坐标轴平行时,力在该轴上投影的绝对值等于力的大小;

(3) 当力平移或坐标轴平移(正方向不变)时,力在坐标轴上的投影不变。

在图 1-4 中还画出了力 F 沿直角坐标轴方向的分力 F_x 和 F_y 。在直角坐标系中,分力 F_x 、 F_y 的大小分别等于力 F 在同一轴上投影 F_x 、 F_y 的绝对值。但应注意,力在坐标轴上的投影是代数量,而分力是矢量。当坐标轴 Ox 和 Oy 不垂直时,分力 F_x 、 F_y 的大小,不等于力 F 在同一轴上投影 F_x 、 F_y 的绝对值(图 1-5)。

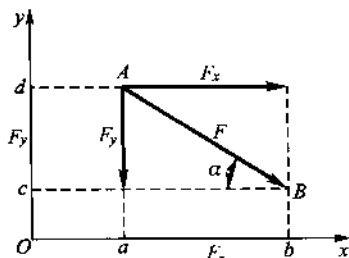


图 1-4

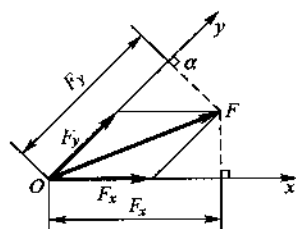


图 1-5

若已知力 F 的投影 F_x 、 F_y ,则可求出力 F 的大小和方向

$$\left. \begin{aligned} F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \tan \alpha &= \left| \frac{F_y}{F_x} \right| \end{aligned} \right\}$$

式中, α 为力 F 与 x 轴所夹的锐角。

2. 合力投影定理

合力投影定理指合力在坐标轴上的投影,等于各分力在同一轴上投影的代数和,即

$$\left. \begin{aligned} F_{Rx} &= F_{1x} + F_{2x} + \cdots + F_{nx} = \sum F_x \\ F_{Ry} &= F_{1y} + F_{2y} + \cdots + F_{ny} = \sum F_y \end{aligned} \right\}$$

合力投影定理适用于有合力的任何力系。

根据合力投影定理,可求出平面汇交力系合力 F_R 的大小和方向:

$$\left. \begin{aligned} F_R &= \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2} = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} \\ \tan \alpha &= \left| \frac{F_{Ry}}{F_{Rx}} \right| = \left| \frac{\sum F_y}{\sum F_x} \right| \end{aligned} \right\}$$

式中, α 为合力 F_R 与 x 轴所夹的锐角,合力的作用线通过力系的汇交点 O ,具体指向可由 F_{Rx} 和 F_{Ry} 的正负确定。

三、力矩与合力矩定理

1. 力对点之矩

力对点之矩是力使物体绕某点转动效应的度量。如图 1-6(a)所示, O 点称矩心,矩心 O 到力作用线的垂直距离 d 称为力臂。力的大小与力臂的乘积 Fd 再冠以适当的正负号,称为力 F 对 O 点的矩,简称为力矩,用 $M_O(F)$ 表示。一般规定力使物体绕矩心逆时针方向转动时,力矩为正,如图 1-6(b)所示;反之,力矩为负,如图 1-6(c)所示。所以力对点之矩是代数量,即

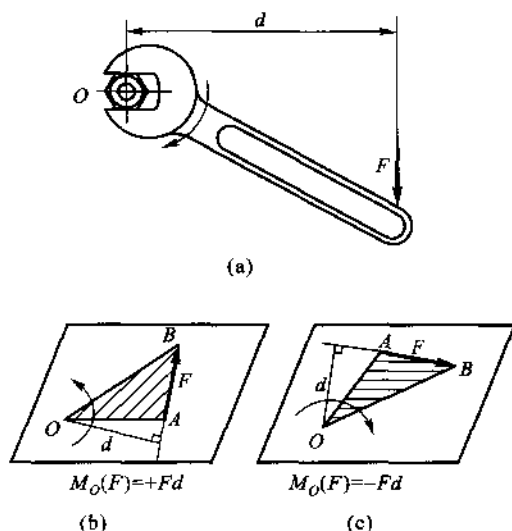


图 1-6

$$M_O(\mathbf{F}) = \pm Fd$$

力矩的单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 或 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

由力矩的定义可知：

- (1) 当力的大小等于零或力的作用线通过矩心(力臂 $d=0$)时,力对点之矩等于零;
- (2) 当力沿其作用线移动时,力对点之矩不变。

2. 合力矩定理

合力矩定理指合力对平面内任一点之矩,等于各分力对该点之矩的代数和。合力矩定理说明了合力与分力对同一点之矩的关系,它适用于有合力的任何力系。对于由 n 个力组成的力系,合力矩定理的表达式为

$$M_O(\mathbf{F}_R) = \sum_{i=1}^n M_O(\mathbf{F}_i)$$

四、力偶及其性质

1. 力偶与力偶矩

大小相等,方向相反,作用线平行但不共线的两个力,称为力偶。如图 1-7 所示,由力 $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{F}'$ 组成的力偶,表示为 $(\mathbf{F}, \mathbf{F}')$ 。力偶中两力作用线所确定的平面称为力偶的作用面,两力作用线之间的垂直距离 d ,称为力偶臂。



图 1-7

力偶对刚体的作用将使刚体产生转动效应。力偶对刚体的转动效应,用力偶矩来度量。力偶中一个力的大小与力偶臂的乘积并冠以适当的正、负号,称为力偶矩,记为 M 或 $M(\mathbf{F}, \mathbf{F}')$,即

$$M = \pm Fd = \pm F'd$$

式中,一般规定使物体作逆时针方向转动的力偶矩为正,反之为负。在平面情况下,力偶矩为代数量,其单位与力矩相同,为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 或 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

2. 力偶的性质

(1) 力偶在任一轴上的投影等于零。力偶无合力,力偶不能与一个力等效,也不能与一个力平衡,力偶只能与力偶平衡。力偶对物体不会产生移动效应,只产生转动效应。面力对物体既可以产生转动效应,也可以产生移动效应。因此,力偶是一种最基本的力系,力和力偶是组成力系的两个基本要素。

(2) 力偶对其作用面内任一点之矩恒等于力偶矩,而与矩心的位置无关。

(3) 作用在同一平面内的两个力偶,如果它们力偶矩的大小相等,转向相同,则这两个力偶等效。根据力偶的等效性,可以得到如下两个推论:

推论 1 力偶可以在其作用平面内任意移动或转动,而不改变力偶对刚体的作用效应。

推论 2 只要保持力偶矩的大小和力偶的转向不变,可以同时改变力偶中力的大小和力偶臂的大小,而不改变力偶对刚体的作用效应。

力偶对刚体的转动效应完全取决于力偶矩的大小和力偶的转向两个要素。因此,力偶可用带箭头的弧线或折线表示(图 1-8)。其中,箭头表示力偶的转向,弧线或折线所在平面表示力偶的作用面, M 表示偶矩的大小。

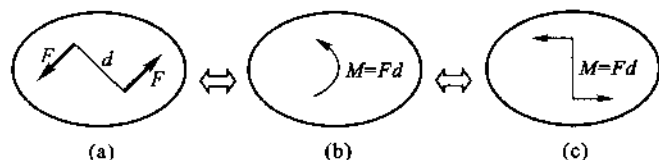


图 1-8

3. 平面力偶系的合成

作用在物体上同一平面内的一组力偶 $M_1, M_2, \dots, M_n$ 称为平面力偶系。平面力偶系的合成结果是一个合力偶,合力偶矩等于各分力偶矩的代数和,即

$$M = M_1 + M_2 + \dots + M_n = \sum M_i$$

五、力的平移定理

力的平移定理指作用于刚体上的力可以平移到该刚体上任一点,但必须同时附加一个力偶,附加力偶的力偶矩等于原力对该点之矩。

力的平移定理是力系简化的重要依据,它揭示了力对刚体的两种运动效应,如将作用在静止自由刚体某点的力,向刚体的质心平移,所得的力将使刚体移动,所得的附加力偶则使刚体绕质心转动。

六、约束与约束力

1. 自由体和非自由体

在空间的位移不受任何限制的物体称为自由体。位移受到限制的物体称为非自由体(受约束物体)。

2. 约束与约束力

对非自由体的位移起限制作用的周围物体称为该非自由体的约束。

约束作用于被约束物体上的力称为约束力。约束力的方向总是与约束限制非自由体的运动方向相反,它的作用点就在约束与被约束物体的接触点。

作用于非自由体的约束力以外的力称为主动力,主动力在工程上又称为载荷。静力分析在研究物体的平衡问题时,主动力一般是已知的,而约束力往往是未知的,它们需要根据平衡条件来确定。

3. 工程中常见的约束及其约束力

1) 柔体约束

柔软且不可伸长的绳子、传动带、链条、钢丝等构成的约束称为柔体约束或柔索约束。柔体约束的约束力作用在接触点,沿柔索的中心线且背离物体(为拉力),如图 1-9(a)、(b)、(c)所示。

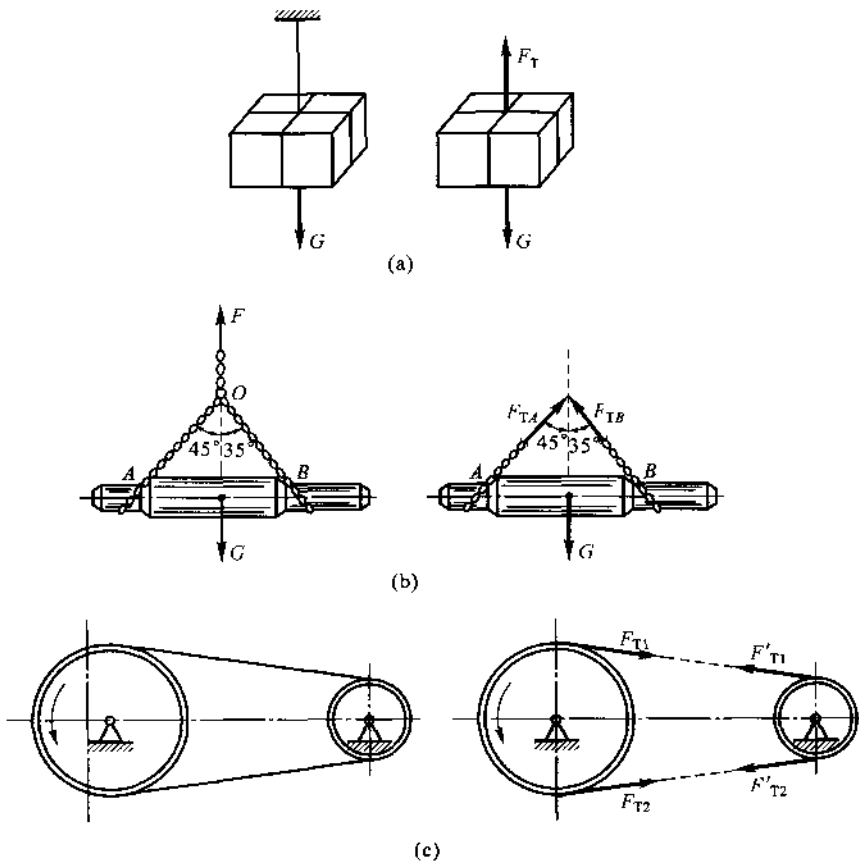


图 1-9

2) 光滑面约束

当物体与约束接触面之间的摩擦小到可以忽略不计时,则认为接触面是光滑的,这种光滑的平面或曲面构成的约束,称为光滑面约束。光滑面约束只能限制物体沿接触点公法线且向着约

束内部的运动,不能限制物体沿接触点公切线方向的运动。所以,光滑面的约束力作用在接触点处,沿接触面的公法线并指向被约束的物体,称为法向约束力或正压力,如图 1-10(a)、(b)、(c)所示。

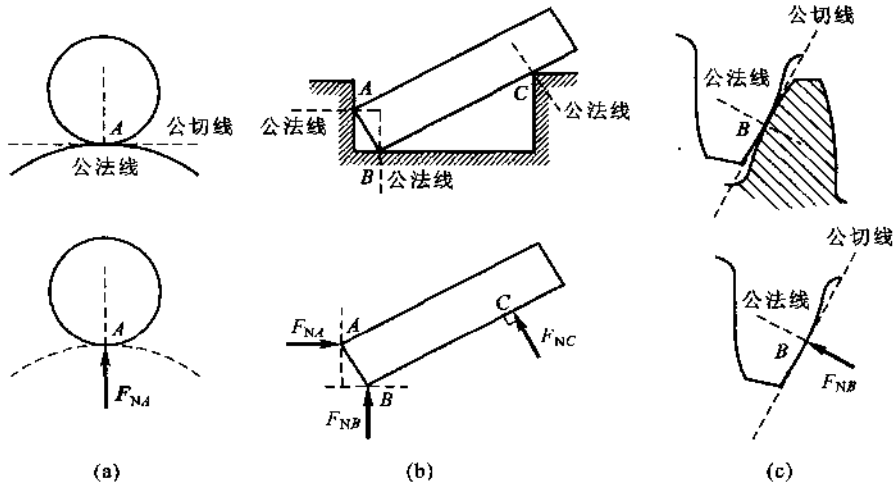


图 1-10

3) 光滑圆柱铰链

如图 1-11(a)、(b)所示,在两个或两个以上物体上做出相同直径的孔并用一个圆柱形销钉连接起来,即构成圆柱铰链(又称为中间铰链),简称为柱铰,其简图如图 1-11(c)所示。

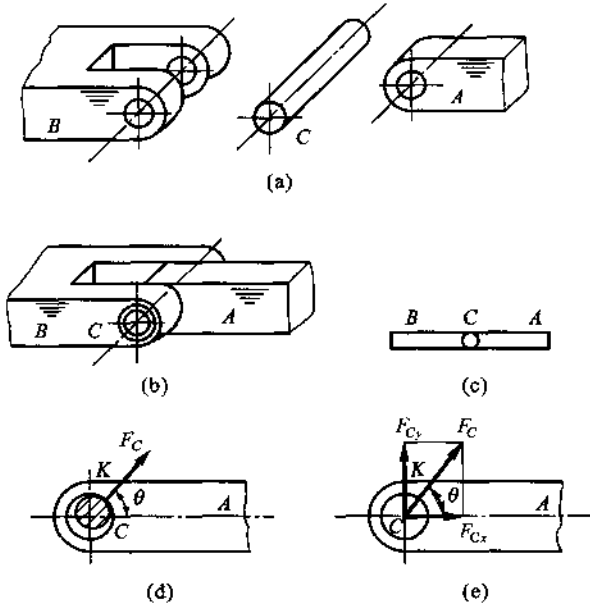


图 1-11

铰链连接的构件可以绕销钉的轴线相对转动,但在垂直于销钉轴线的平面内不能沿任何方向相对移动。光滑圆柱铰链给每个构件的约束力在垂直于销钉轴线的平面内,通过铰链的中心,方向未知,如图 1-11(d) 所示。其常用过铰链中心的两个正交分力表示,如图 1-11(e) 所示。

4) 固定铰链支座

将结构或构件用铰链与基础或其他固定的结构物相连接,这样构成的约束成为固定铰链支座,简称固定铰支座。图 1-12(a)、(b) 所示为固定铰支座的构造示意图,其简图如图 1-12(c)、(d)、(e) 所示。固定铰支座限制物体垂直于销钉轴线任何方向的线位移,但物体可以绕销钉的轴线转动。因此,与圆柱铰链的约束力相同,固定铰支座的约束力过铰链的中心,方向未知,常用过铰链中心的两个正交分力表示,如图 1-12(f) 所示。

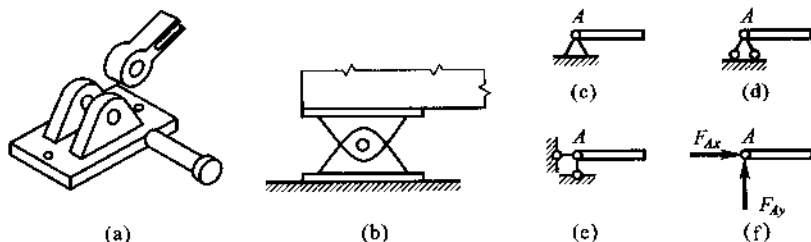


图 1-12

机械中常见的径向轴承也属于光滑圆柱铰链约束,它允许轴绕轴线转动,但限制轴在垂直于轴线的平面内任何方向的位移,如图 1-13(a)、(b) 所示。因此径向轴承作用于轴颈的约束力在垂直于轴线的平面内,方向未知,常用过轴心的两个正交分力表示,如图 1-13(c) 所示。

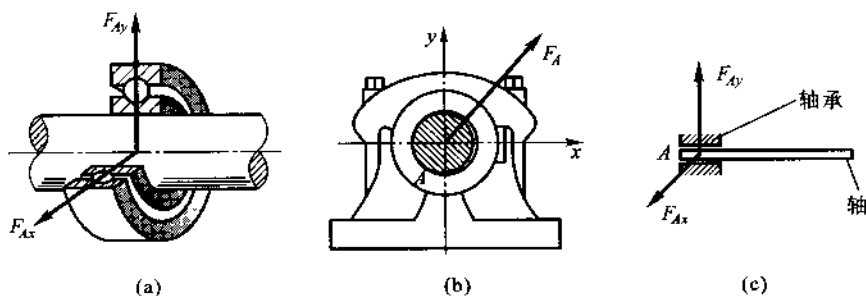


图 1-13

5) 空间光滑球铰链

球铰链简称球铰,物体的一端做成球形,固定的支座做成一球窝,将物体的球形端置于支座的球窝内,则构成球铰支座,如图 1-14(a) 所示。被连接的物体可以绕球心转动,但不能沿任何方向移动,因此球铰的约束力过球心,方向未知,常用过球心的三个正交分力表示,如图 1-14(b) 所示。

止推轴承也是机械中常见的约束,其结构如图 1-15(a)、(b) 所示。与径向轴承不同的是止推轴承还能限制轴沿轴线方向的位移,因此其约束力比径向轴承增加了轴向分力,如图 1-15(c) 所示。

6) 辊轴支座(可动铰链支座)