

高等学校教材

# 工程力学简明教程

► 吴亚平 程耀芳 康希良 编



化学工业出版社  
教材出版中心

高等学校教材

# 工程力学简明教程

吴亚平 程耀芳 康希良 编



化学工业出版社  
教材出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

工程力学简明教程/吴亚平, 程耀芳, 康希良编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 3

高等学校教材

ISBN 7-5025-6724-0

I. 工… II. ①吴…②程…③康… 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 (2005) 第 015840 号

---

高等学校教材

**工程力学简明教程**

吴亚平 程耀芳 康希良 编

责任编辑: 王文峡

文字编辑: 宋 薇

责任校对: 陶燕华

封面设计: 潘 峰

化学工业出版社 出版发行  
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 20 $\frac{1}{4}$  字数 500 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6724-0/G · 1732

定 价: 30.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

工程力学是一门重要的技术基础课。随着科学技术的发展，工程力学的研究与应用已深入到许多领域，由于多学科的互相交叉和渗透使得工程力学的应用范围显著扩大了，许多非土木、机械专业如运输、管理、包装、技术经济、工程造价、建筑学、环境工程、生物、测控、电器工程等专业的学生及技术人员也需要掌握一定的工程力学知识。对于上述专业，由于工程力学一般为非主修课程，学时往往很有限，因此需要一本既能使学生在较少的学时内掌握工程力学知识系统概貌，并具有一定应用水平的教科书。目前能满足上述要求的教材还较少。我们曾在1990年根据运输管理及包装专业的要求编写了一本《工程力学教程》，经过4年试用后，在1994年将其修订后正式出版，此教材出版后又在各有关专业连续使用了10年。在此期间，使用该教材的专业不断增多，而且各专业的力学学时及教学内容都发生了很大变化。由于当时编写此教材的主要对象是运输管理及包装专业的学生，所以在教材的内容安排上有一定的局限性。针对以上情况，我们根据专业要求，结合多年来为上述专业讲授工程力学课程的经验 and 体会，在原有教材的基础上对内容重新编写了这本《工程力学简明教程》，并删去了有关动力学的的内容，增加了结构力学内容。

本书的主要目的在于培养实用型人才，向他们提供工程力学学科的理性思维方法，并使之具有较好的实际应用能力。着眼点不在于繁杂的推导及论证，力争在有限的学时内，尽量增大教材的信息量、实用性及适用范围。本书根据这一原则选择与编排各章内容。

全书分为三篇，共18章。第一篇为静力学（第一章~第四章），主要介绍静力学的基本概念和基础知识，力系的合成及平衡的概念及求解方法。第二篇为杆件的强度、刚度及稳定性分析（第五章~第十一章），主要介绍材料力学的有关内容。第三篇为结构力学（第十二章~第十八章），主要介绍与结构静力学有关的内容。

为了节省学时，本教材根据实用的原则，在保证论述严谨，逻辑清晰的前提下尽量突出重点，删繁就简。在内容的编写上突出解题思路和方法以便于学生能真正学懂会用，如在第一篇中注重各力系之间的联系和融会贯通；在第二篇中将压杆的稳定性问题与杆件的轴向拉伸和压缩问题放在同一章中，并用折减系数法将其统一起来，从而避免了欧拉公式的推导；此外，将应力状态的概念分解在各相关章节中并对复杂应力状态的强度理论也只介绍其结果的应用。在第三篇中只介绍杆系结构的静力学问题，并考虑与第一篇，第二篇内容的衔接，删除了一般结构力学教材中与理论力学和材料力学中相重合的有关超静定、可变形固体等概念和内容。以上编排方法节省了许多学时，这也是本教材的一个特色。

综上所述，经过对内容的精选和编排，本书具有篇幅较小，信息容量较大，简便易学、实用的特点，全部学完该教材约需90~100学时，其中理论力学部分约占20学时，材料力学部分约占40学时，结构力学部分约占40学时。本教材可作为少学时工程力学相关专业的本、专科学生及教师教学用书，也适合于有关专业的函授生自学，也可供相关专业工程技术人员参考。

参加本书编写工作的有：吴亚平（第二篇），程耀芳（第一篇），康希良（第三篇），全书由吴亚平统稿。

本书在编写过程中，得到了兰州交通大学教务处领导、土木工程学院领导及工程力学系教师的大力支持和帮助，苏强、杨东涛、舒春生等同志在文稿整理、绘图方面做了大量工作，在此表示感谢。限于编者的水平，书中可能存在不少欠妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2005年1月于兰州交通大学

# 目 录

## 第一篇 静 力 学

<b>第一章 静力学的基本概念和物体的受力分析</b> .....	2
第一节 静力学的基本概念 .....	2
第二节 静力学公理 .....	3
第三节 约束与约束力 .....	5
第四节 物体的受力分析与受力图 .....	8
习题 .....	11
<b>第二章 平面汇交力系与平面力偶系</b> .....	13
第一节 平面汇交力系合成与平衡的几何法 .....	13
第二节 平面汇交力系合成与平衡的解析法 .....	14
第三节 平面力对点之矩的概念及计算 .....	17
第四节 平面力偶系的合成与平衡 .....	19
习题 .....	21
<b>第三章 平面任意力系</b> .....	24
第一节 力的平移定理 .....	24
第二节 平面任意力系向作用面内任意一点简化 .....	25
第三节 平面任意力系的平衡条件和平衡方程 .....	30
第四节 物体系的平衡 静不定问题的概念 .....	34
第五节 考虑摩擦时物体的平衡 .....	37
习题 .....	42
<b>第四章 空间任意力系</b> .....	47
第一节 空间汇交力系 .....	47
第二节 力对点之矩和力对轴之矩 .....	49
第三节 空间力偶系 .....	51
第四节 空间任意力系向一点简化 .....	51
第五节 空间任意力系的平衡方程及应用 .....	53
第六节 物体的重心 .....	56
习题 .....	59

## 第二篇 杆件的强度、刚度及稳定性分析

<b>第五章 截面的几何性质</b> .....	64
第一节 静矩和形心 .....	64
第二节 惯性矩和极惯性矩 .....	66
第三节 简单截面的惯性矩 .....	66
第四节 组合截面的惯性矩 .....	68
习题 .....	69
<b>第六章 轴向拉伸和压缩</b> .....	71
第一节 轴向拉伸和压缩的概念 .....	71
第二节 内力与截面法 .....	71
第三节 应力的概念及拉(压)杆横截面上的应力 .....	73
第四节 拉(压)杆的变形及虎克定律 .....	75
第五节 材料在拉伸和压缩时的力学性能 .....	78
第六节 拉(压)杆的强度计算 .....	82
第七节 拉伸和压缩的超静定问题 .....	86
第八节 压杆的稳定计算 .....	88
习题 .....	94
<b>第七章 剪切</b> .....	99
第一节 剪切的概念 .....	99
第二节 剪切和挤压强度的实用计算 .....	99
第三节 焊接实用计算 .....	103
第四节 切应变及剪切虎克定律, 切应力互等定理 .....	105
习题 .....	106
<b>第八章 梁的内力</b> .....	108
第一节 弯曲的概念 .....	108
第二节 用截面法求梁的内力 .....	108
第三节 内力方程及内力图 .....	111
第四节 弯矩、剪力及荷载集度间的微分关系 .....	115
习题 .....	119
<b>第九章 梁的应力</b> .....	121
第一节 弯曲应力的概念 .....	121
第二节 纯弯曲时梁的正应力 .....	121
第三节 梁弯曲时的正应力强度条件 .....	126
第四节 梁截面的合理形状 .....	129
第五节 梁的切应力及其强度计算 .....	131
习题 .....	135
<b>第十章 圆轴扭转</b> .....	138

第一节	扭转的概念	138
第二节	扭矩及扭矩图	138
第三节	圆轴扭转时的应力及变形	140
第四节	圆轴扭转时的强度及刚度条件	143
	习题	145
<b>第十一章</b>	<b>组合变形时的强度计算</b>	147
第一节	组合变形的概念	147
第二节	弯曲与拉伸或压缩的组合	147
第三节	弯曲与扭转的组合	151
	习题	153

## 第三篇 结构力学

<b>第十二章</b>	<b>体系的几何组成分析</b>	159
第一节	几何组成分析的目的	159
第二节	平面体系自由度的概念	159
第三节	几何不变体系的简单组成规则	161
第四节	几何组成分析的步骤及示例	163
第五节	静定结构和超静定结构	164
	习题	165
<b>第十三章</b>	<b>静定结构的内力计算</b>	167
第一节	多跨静定梁	167
第二节	静定刚架	170
第三节	三铰拱	175
第四节	静定平面桁架	182
第五节	组合结构的计算	188
	习题	189
<b>第十四章</b>	<b>静定结构的位移计算</b>	194
第一节	概述	194
第二节	变形体的虚功原理	195
第三节	荷载作用下的位移计算	196
第四节	图乘法	201
第五节	温度变化及支座移动时静定结构的位移计算	204
第六节	互等定理	207
	习题	209
<b>第十五章</b>	<b>力法</b>	211
第一节	超静定结构的概述、超静定次数的确定	211
第二节	力法的基本原理及典型方程	213
第三节	超静定结构的位移计算及最后内力图的校核	218



第四节	温度变化及支座移动对超静定结构的影响·····	220
第五节	超静定结构的简化计算·····	225
习题	·····	238
<b>第十六章</b>	<b>位移法</b> ·····	<b>241</b>
第一节	位移法的基本概念·····	241
第二节	单跨超静定梁的转角位移方程·····	242
第三节	位移法基本未知量及基本结构·····	246
第四节	位移法典型方程及计算步骤·····	247
第五节	对称性的利用·····	252
习题	·····	256
<b>第十七章</b>	<b>力矩分配法</b> ·····	<b>258</b>
第一节	力矩分配法的概念·····	258
第二节	多结点的力矩分配·····	262
习题	·····	267
<b>第十八章</b>	<b>影响线及其应用</b> ·····	<b>269</b>
第一节	影响线的概念·····	269
第二节	用静力法作单跨静定梁的影响线·····	269
第三节	多跨静定梁的影响线·····	274
第四节	铁路和公路的标准荷载制·····	275
第五节	影响线的应用·····	277
第六节	简支梁的绝对最大弯矩·····	286
习题	·····	288
<b>附录</b>	<b>型钢表</b> ·····	<b>291</b>
	<b>部分习题答案</b> ·····	<b>303</b>
	<b>主要参考文献</b> ·····	<b>312</b>

# 第一篇 静力学

静力学研究物体在力系作用下的平衡规律。平衡是指物体相对于地面保持静止或作匀速直线运动。如静止的建筑物、桥梁、匀速直线行驶的汽车等都处于平衡状态。在静力学中，将具体研究以下问题。

1. 物体的受力分析
2. 力系的简化与力系的合成
3. 力系的平衡条件及其应用

静力学在工程中应用非常广泛。机械和工程结构的设计都需要应用静力学理论进行受力和静力计算，然后对它们进行强度、刚度或稳定性的分析计算。

# 第一章 静力学的基本概念和物体的受力分析

本章将研究静力学的几个基本概念和公理，建立物体受力分析的基本方法。

## 第一节 静力学的基本概念

### 一、力的概念

力是物体间相互的机械作用，这种作用使物体的机械运动状态发生变化（见图 1-1）或使物体产生变形（见图 1-2）。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。实践表明，力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点。这三者称为力的三要素。力的大小表示物体间机械作用的强弱程度；在国际单位制中，力的单位是牛顿（N）或千牛顿（kN）。力的方向表示物体间的机械作用具有方向性；方向通常包括方位和指向两个涵义。例如，重力的方向是“铅垂向下”，“铅垂”是力的方位，“向下”是力的指向。力的作用点表示所受机械作用位置的抽象化，即实际上并不是一个点而是一块面积，当作用面积不大时可抽象为一个点。作用在这个点上的力称为集中力。而有些力（例如水压力、风压力等），当其作用面积不能忽略时，称为分布力。

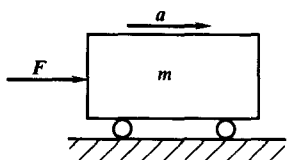


图 1-1



图 1-2

力的三要素表明，力是一个具有固定作用点的定位矢量，如图 1-3 所示。本书中用黑体字母  $\mathbf{F}$  表示力矢量，而用普通字母  $F$  表示力的大小。

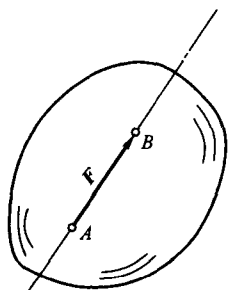


图 1-3

### 二、刚体的概念

刚体是指在力的作用下不变形的物体。在自然界和工程问题中，任何物体受力后都会发生变形。例如：车床主轴在切削过程中发生弯曲变形；车辆驶过一座桥时，桥梁发生弯曲变形，桥墩发生压缩变形。因此，“刚体”实际上是不存在的，它是一种抽象化的力学模型，至于在一个问题中能否将物体视为刚体，不仅取决于变形的大小，还取决于问题的要求。在研究平衡规律时，变形是次要因素，

可略去不计，而将物体抽象化为刚体。

### 三、力系的概念

作用在物体上的一群力，称为力系。若两力系对物体的作用效应相同，则称它们为等效力系，用一个简单力系等效替换一个复杂力系，称为力系的简化。特别地，如用一个力就可以等效地代替原力系，则称该力为原力系的合力，而原力系中的诸力称为该力的分力。使物体处于平衡状态的力系，称为平衡力系。

## 第二节 静力学公理

静力学公理是人们在长期生活和生产实践中的经验总结，无需证明而被公认，是研究力系简化和平衡的重要依据。

### 公理一 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力，可以合成为作用在该点的一个合力。合力的大小和方向，由这两个分力为邻边所构成的平行四边形的对角线确定 [见图 1-4 (a)]。或者说，合力矢等于这两个分力矢的几何和，即

$$F_R = F_1 + F_2$$

也可另作一力三角形，求两个汇交力合力的大小和方向 [见图 1-4 (b) 和 (c)]。

这个公理是复杂力系简化的基础，是力的合成法则，也是力的分解法则。

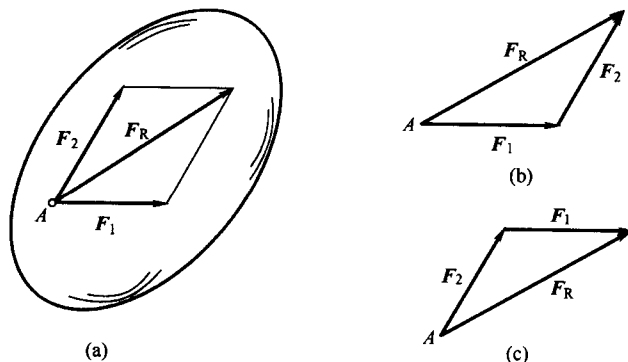


图 1-4

### 公理二 二力平衡公理

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

这个公理表明了作用在刚体上最简单力系平衡时所必须满足的条件。

只在两个力作用下平衡的刚体称为二力体或二力构件 [见图 1-5 (a)]，当构件为直杆时称为二力杆 [见图 1-5 (b)]。二力构件受的两个力必定沿两个力作用点的连线，且等值反向。在物体的受力分析中，据此可以确定二力构件中未知力作用线的位置。

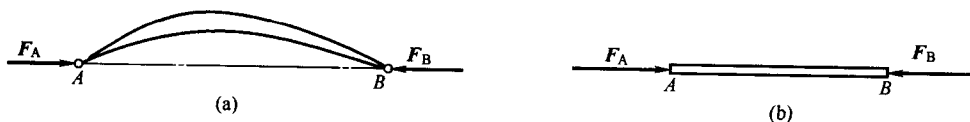


图 1-5

### 公理三 加减平衡力系公理

在已知力系上加上或减去任意的平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用。

这是非常明显的，因为平衡力系不能改变刚体的运动状态。也就是说，平衡力系对刚体作用的总效应等于零。

此公理是研究力系等效的重要依据。

#### 推论一 力的可传性原理

作用在刚体上的力，可以沿其作用线移到刚体内任意一点，并不改变该力对刚体的作用效应。

证明：设力  $F$  作用在刚体上的  $A$  点 [见图 1-6 (a)]，在力作用线上的任意一点  $B$  上加一平衡力系  $F_1$ 、 $F_2$ ，使  $F_1 = -F_2 = F$  [见图 1-6 (b)]。由加减平衡力系原理可知，这并不改变力  $F$  对刚体的效应。且  $F$ 、 $F_2$  也是一个平衡力系，可减去。于是只剩下力  $F_1$  与原力  $F$  等效 [见图 1-6 (c)]。这就证明了力  $F$  沿其作用线由  $A$  点移到任意一点  $B$ ，而不改变它对刚体的效应。

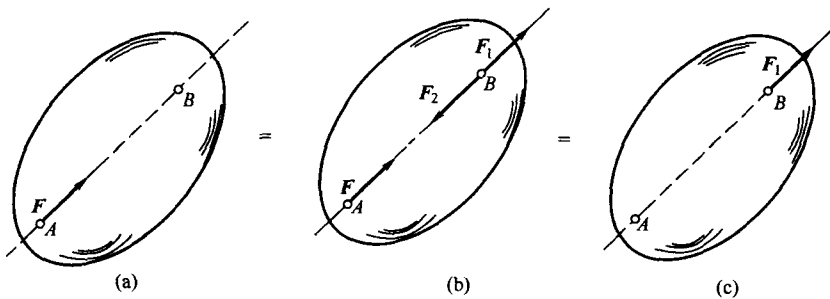


图 1-6

因此，对于刚体来说，力的作用点已不是决定力的作用效应的要素，它已被作用线代替，作用在刚体上的力可以沿其作用线移动的性质，称为力的可传性。这种矢量称为滑动矢量。

例如，在日常生活中用绳拉车，或者沿着同一直线以同样大小的力用手推车，对车将产生相同的运动效应（见图 1-7）。

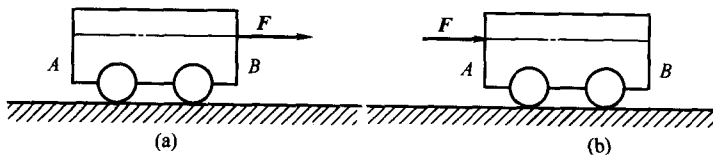


图 1-7

应当指出，在研究力对物体的变形效应时，力是不能沿作用线移动的，例如图 1-8 (a) 所示的可变形直杆。若沿杆的轴线在两端施加大小相等、方向相反的一对力  $F_1$  和  $F_2$  时，杆将产生拉伸变形。如果将力  $F_1$  沿其作用线移至  $B$  点，将力  $F_2$  沿其作用线移至  $A$  点 [见图 1-8 (b)]，杆将产生压缩变形。可见，力的可传性对变形体不成立。

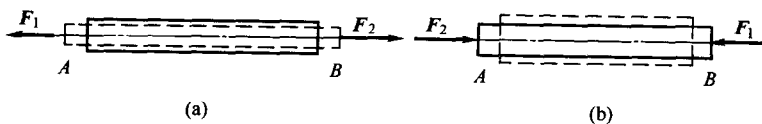


图 1-8

### 推论二 三力平衡汇交定理

作用在刚体上三个相互平衡的力，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通过汇交点。

证明：设在刚体上  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点处作用有三个相互平衡且不平行的力  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$ （见图 1-9）。将力  $F_1$  和  $F_2$  沿其作用线移至汇交点  $O$ ，由力的平行四边形法则求得合力  $F_{12}$ ，则力  $F_{12}$  应与  $F_3$  平衡。根据二力平衡公理可知， $F_3$  与  $F_{12}$  必共线。这就证明了三力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  必共面且汇交于一点。

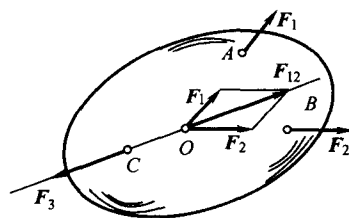


图 1-9

该定理常用来确定刚体在不平行的三个力作用下平衡时，其中某一未知力的作用线。

### 公理四 作用与反作用定律

两物体间相互作用的力总是大小相等、方向相反、沿着同一直线，并分别而且同时作用在这两个物体上。

这一性质表明，力总是成对出现的，有作用力，必定有反作用力，二者总是同时存在，同时消失。一般习惯上将作用力与反作用力用同一字母表示，其中一个加一撇以示区别。

应当注意，不要把这一性质与二力平衡条件相混淆。作用与反作用定律中的两个力分别作用在两个物体上，而二力平衡条件中的两个力作用在同一刚体上。

## 第三节 约束与约束力

在工程实际中，有些物体可以在空间自由运动，获得任何方向的位移，这些物体称为自由体。例如，在空中航行的飞机、飞行的炮弹等。另一些物体在空间的运动受到其他物体的限制，使其在某些方向不能发生位移，这些物体称为非自由体或被约束物体。如用绳索悬挂的重物、搁置在墙上的梁、支承在柱子上的屋架等。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束。例如，绳索是重物的约束、墙是梁的约束、柱子是屋架的约束。

显然，约束就是一种力的作用，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该约束所限制的非自由体的运动方向相反，它的作用点在约束与被约束物体的接触点。与约束力相对应，凡能主动引起物体运动或使物体有运动趋势的力，称为主动力。例如重力、风压力、水压力等。主动力在工程中也称为荷载。

在静力分析中，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。然而，不同类型的约束，其约束力也不相同，下面介绍几种在工程中常见的约束类型和确定约束力方向的方法。

### 一、光滑接触面约束

若两物体间的接触面是光滑的，则物体可以自由地沿接触面滑动或沿接触面在接触点的公法线方向脱离接触，但不能沿公法线方向压入接触面。因此，光滑接触面给物体的约束力，作用在接触点，方向沿接触面的公法线指向被约束物体。通常用  $F_N$  表示（见图 1-10）。

### 二、柔索约束

由绳索、链条或胶带等构成的约束称为柔索约束。由于柔索本身只能承受拉力，因此，

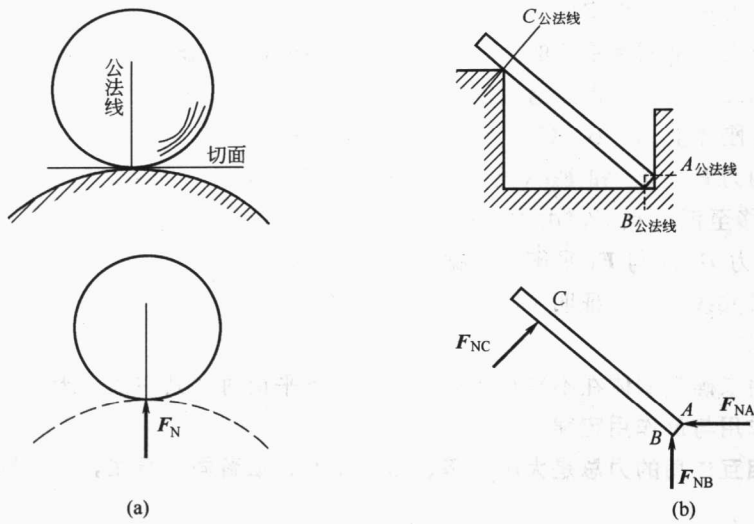


图 1-10

柔索对物体的约束力，作用在接触点，方向沿柔索背离被约束物体（为拉力）。通常用  $F_T$  表示（见图 1-11）。

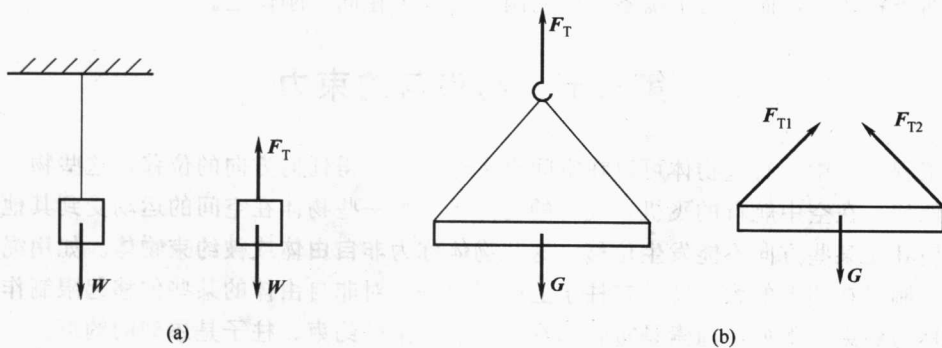
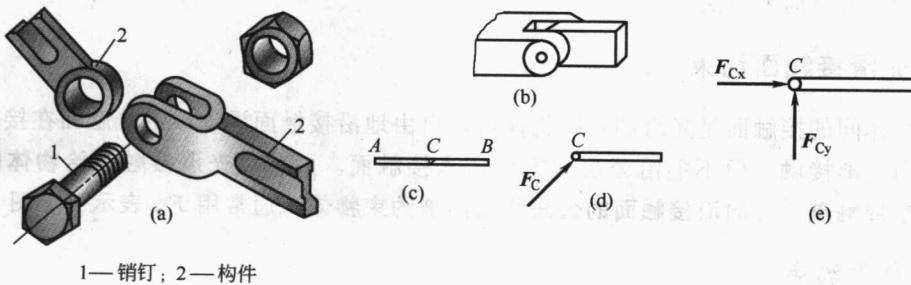


图 1-11

### 三、光滑圆柱铰链约束

用销钉连接两个钻有相同大小孔径的构件，且不计销钉与销钉孔壁间的摩擦，而构成的约束称为铰链约束 [见图 1-12 (a) 和 (b)]，图 1-12 (c) 所示为铰链连接的简化画法。由于铰链的圆柱销钉与构件的圆孔之间为光滑面接触，所以当一物体相对于另一个物体有运



1—销钉；2—构件

图 1-12

动趋势时，销钉与孔壁便在某点接触，销钉给构件的约束力沿着接触点的公法线方向。因此，铰链的约束力作用在垂直于销钉轴线的平面内并通过圆心，由于该约束接触点位置与构件所受的荷载有关，一般是未知的。故约束力的方位和指向不能确定 [见图 1-12 (d)]，常以通过铰链中心的两个正交分力  $F_x$ 、 $F_y$  表示 [见图 1-12 (e)]。

#### 四、支座

支座是把结构物或构件支承在墙、柱、机身等固定支承物上面的装置，它的作用是把结构物或构件固定于支承物上，同时把所受的荷载通过支座传给支承物。

##### 1. 固定铰支座

用铰链把结构物或构件与基础或其他固定的结构物连接而构成的约束称为**固定铰链支座**或**固定铰支座**。如图 1-13 (a)、(b) 所示。固定铰支座的简图及约束力的表示方法如图 1-13 (c)、(d) 所示。

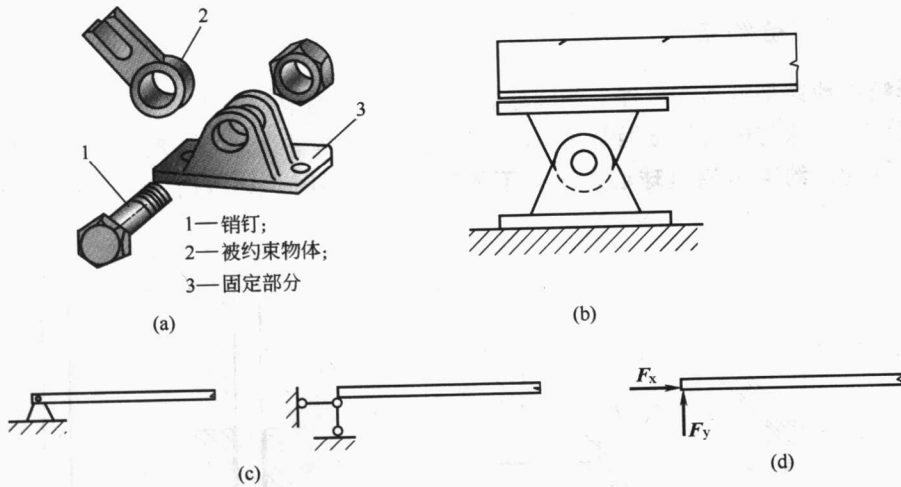


图 1-13

##### 2. 可动铰支座

为了保证构件变形时既能发生微小的转动又能发生微小的移动，可将结构物或构件的铰链支座用几个辊轴支承在光滑的支座面上 [见图 1-14 (a)]，就成为**辊轴支座**，又称为**可动铰支座**（或**活动铰支座**）。这种支座约束的特点是只能限制物体沿垂直于支承面的方向运动，而不能阻止物体沿光滑支承面的移动和绕销钉的转动。所以可动铰支座的约束力垂直于支承面，通过圆柱销钉中心（指向未知）。可动铰支座的简图及约束力的表示方法如图 1-14 (b)、(c) 所示。

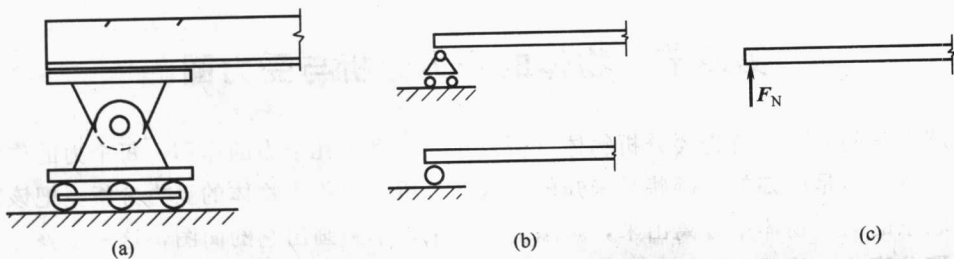


图 1-14



### 3. 轴承约束

轴承约束也是工程中常用的支承形式，图 1-15 (a) 所示为轴承装置，它的简图及约束力的特征和铰链的约束力完全相同 [见图 1-15 (b)]。

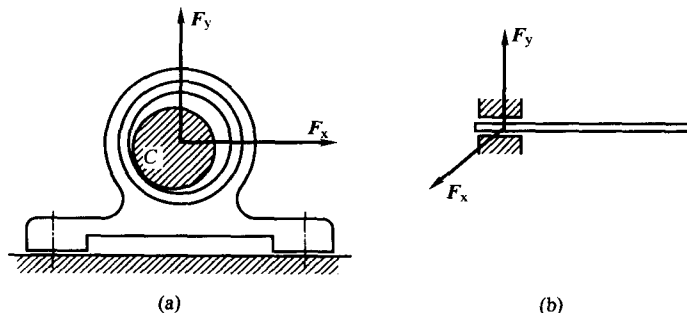


图 1-15

## 五、球形铰链约束

球形铰链约束是将连在构件上的圆球装在球窝里而构成的 [见图 1-16 (a)]。在一般情况下，可以认为球与球窝的接触是光滑的。该约束允许构件绕球心转动，限制构件的球心沿半径方向移动。约束力通过球心，方向不能确定，常用图 1-16 (b) 所示的三个正交分量表示。

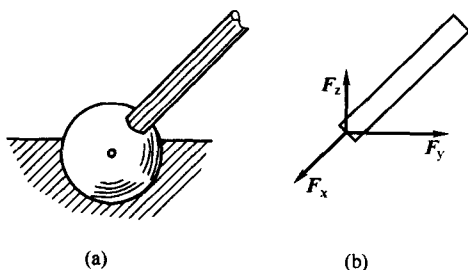


图 1-16

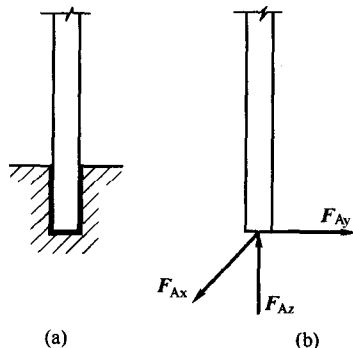


图 1-17

## 六、止推轴承

止推轴承 [见图 1-17 (a)] 除限制轴的径向位移外，还限制其轴向位移。约束力由图 1-17 (b) 所示的三个正交分量表示。

## 第四节 物体的受力分析与受力图

求解力学问题时，首先要分析物体（研究对象）受了几个力的作用，每个力的作用位置和方向，哪些力是已知的，哪些是未知的，这一分析过程称为物体的受力分析。把该物体从与它相联系的周围物体中分离出来，解除全部约束，单独画出它的简图，这一步骤称为解除约束、取分离体。然后画出该物体所受的主动力和周围物体对它的约束力，从而得到物体的