

高等学校教材

工程力学

GONGCHENG LIXUE

张喜斌 王相波 于大光 主编



清华大学出版社
<http://www.tup.com.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等学校教材

工程力学

张喜斌 王相波 于大光 主编

清华大学出版社
北京交通大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书内容包括刚体静力学、变形固体静力学及运动学和动力学,概括了理论力学和材料力学的基本内容。对于一些难点内容,比如动力学,考虑到后续课程的实际需要,只介绍动能定理和动静法,同时简化和省略了证明及推理,将重点放在了原理和方法的实际应用上。至于能量法和超静定问题,未作专门讲述,而是在附录中介绍了超静定的概念和几种简单超静定问题的解法。

本书内容理论严谨、逻辑清晰、由浅入深,主要用作机场建筑工程与管理专业本科教材、自学考试教材,也可作为土木建筑和水利类各专业的函授、培训及专科教材。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/张喜斌,王相波,于大光主编. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2009.3

(高等学校教材)

ISBN 978-7-81123-536-4

I. 工… II. ①张… ②王… ③于… III. 工程力学 IV. TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第034144号

责任编辑:郭东青

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京交大印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:22.5 字数:560千字

版 次:2009年4月第1版 2009年4月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-536-4/TB·14

印 数:1~4 000册 定价:36.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

本书主要用作机场建筑工程与管理专业本科教材、自学考试及土木建筑和水利类各专业的函授、培训及专科教材。

在编写过程中，力争使本教材理论严谨、逻辑清晰、由浅入深，适合自学。对于一些重点难点内容，作了如下处理。

1. 将本书的内容体系划分为三篇：刚体静力学、变形固体静力学、运动学和动力学。
2. 就理论力学和材料力学的内容而言，针对机场建筑工程与管理专业本科段自学考试的特点，适当增删了部分内容。
3. 简化和省略了一些定理和公式的证明与推理，将重点放在了原理和方法的实际应用上。
4. 考虑到杆件内力在概念上的统一，将刚体静力学中桁架的内力放在了变形固体静力学篇拉（压）杆的内力中去讲述。
5. 对于较难的动力学部分，考虑到后续课程的实际需要，只讲述了动能定理和动静法。
6. 至于能量法和超静定问题，未作专门讲述，而是在附录中介绍了超静定的概念和几种简单超静定问题的解法。

在编写过程中，参考和引用了许多兄弟院校的理论力学、材料力学、工程力学等教材，在此表示衷心的感谢。

本书由张喜斌、王相波、于大光担任主编。薛晓毅、张伟成、罗永强、张广军、刘春波、韩一磊等参加了本书的编写工作。

由于时间非常仓促，加之水平有限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

编者

2009年3月

目 录

绪论	1
第 1 篇 刚体静力学	
第 1 章 静力学公理和物体的受力分析	5
1.1 静力学公理	5
1.2 约束和约束力	6
1.3 物体的受力分析和受力图	10
习题	12
第 2 章 平面汇交力系与平面力偶系	15
2.1 平面汇交力系	15
2.2 平面力矩	19
2.3 平面力偶系	21
习题	25
第 3 章 平面任意力系	29
3.1 平面任意力系的简化	29
3.2 平面任意力系的平衡方程	33
3.3 刚体系统的平衡	36
习题	40
第 4 章 空间力系	46
4.1 空间汇交力系	46
4.2 力对点的矩和力对轴的矩	48
4.3 空间力偶系	50
4.4 空间任意力系的平衡	53
习题	57
第 5 章 摩擦	61
5.1 滑动摩擦	61
5.2 摩擦角和自锁现象	62
5.3 考虑摩擦时的平衡问题	64
习题	67

第 2 篇 变形固体静力学

第 6 章 拉 (压) 杆的强度和变形	73
6.1 轴向拉伸和压缩的概念	73
6.2 内力、截面法、轴力及轴力图	74
6.3 应力、拉 (压) 杆内的应力	78
6.4 拉 (压) 杆的变形、胡克定律	81
6.5 拉 (压) 杆内的应变能	84
6.6 材料在拉伸和压缩时的力学性能	85
6.7 强度条件、安全因数和许用应力	88
6.8 应力集中的概念	90
习题	91
第 7 章 轴的强度和刚度	96
7.1 扭转的概念	96
7.2 薄壁圆筒的扭转	97
7.3 传动轴的扭转外力偶矩、扭矩和扭矩图	98
7.4 等直圆杆扭转时的应力、强度条件	100
7.5 等直圆杆扭转时的变形、刚度条件	104
7.6 等直圆杆扭转时的应变能	106
习题	109
第 8 章 截面的几何性质	113
8.1 截面的静矩和形心位置	113
8.2 极惯性矩、惯性矩、惯性积	115
8.3 惯性矩和惯性积的平行移轴公式、组合截面的惯性矩和惯性积	118
8.4 主惯性轴和主惯性矩的概念	120
习题	120
第 9 章 梁的强度和刚度	123
9.1 对称弯曲的概念及梁的计算简图	123
9.2 剪力和弯矩、剪力图和弯矩图	124
9.3 平面刚架和曲杆的内力图	132
9.4 梁横截面上的正应力、梁的正应力强度条件	134
9.5 梁横截面上的切应力、梁的切应力强度条件	139
9.6 梁的位移	143
9.7 梁的刚度校核	150
9.8 梁内的弯曲应变能	153
9.9 梁的合理设计	154
习题	158

第 10 章 应力状态理论和强度理论	166
10.1 概述	166
10.2 平面应力状态的应力分析	168
10.3 空间应力状态的概念	178
10.4 应力与应变间的关系	179
10.5 空间应力状态下的应变能密度	182
10.6 强度理论及其相当应力	183
10.7 各种强度理论的应用	185
习题	186
第 11 章 组合变形杆件及连接件的强度	192
11.1 概述	192
11.2 两相互垂直平面内的弯曲	193
11.3 拉伸(压缩)与弯曲	196
11.4 扭转与弯曲	201
11.5 连接件的实用计算方法	203
习题	206
第 12 章 压杆的稳定性	211
12.1 压杆稳定性的概念	211
12.2 细长中心受压直杆临界力的欧拉公式	212
12.3 不同杆端约束下细长压杆临界力的欧拉公式	213
12.4 欧拉公式的应用范围、临界应力总图	214
12.5 实际压杆的稳定因数	216
12.6 压杆的稳定性计算、压杆的合理截面	220
习题	223

第 3 篇 运动学和动力学

第 13 章 点和刚体的简单运动	229
13.1 点的简单运动	229
13.2 刚体的平行移动	236
13.3 刚体的定轴转动	237
13.4 转动刚体内各点的速度和加速度	239
习题	241
第 14 章 点的合成运动	245
14.1 基本概念	245
14.2 点的速度合成定理	247
14.3 点的加速度合成定理	250
习题	257

第 15 章 刚体的平面运动	263
15.1 刚体平面运动概述	263
15.2 平面图形内各点速度分析	266
15.3 速度瞬心法	269
15.4 平面图形内各点的加速度分析	273
习题	275
第 16 章 动能定理	280
16.1 力的功	280
16.2 动能	282
16.3 动能定理	286
16.4 机械能守恒定律	291
16.5 自由落体冲击问题	293
习题	296
第 17 章 动静法	299
17.1 达朗伯原理	299
17.2 刚体惯性力系的简化	302
17.3 定轴转动刚体的轴承反力	307
习题	309
附录 A 简单载荷作用下梁的挠度和转角	312
附录 B 简单超静定问题	315
附录 C 型钢表	328
附录 D 习题答案	336
参考文献	351

绪 论

力学是最早产生并获得发展的科学之一。人类开始研究力学理论，大约可以追溯到2500年以前。

从历史上看，力学原是物理学的一个分支，而物理学的建立则是从力学开始的。后来，由于数学理论和工程技术的推进，以研究宏观机械运动为主的力学逐渐从物理学中独立出来。物理学中仍然保留的有关基础部分，被称为“经典力学”，以区别于物理学中的其他分支（如热力学、电动力学、量子力学等）。

力学既是基础科学，又是众多应用科学特别是工程技术的基础，是人类认识自然、改造自然的重要学科。20世纪前，经典力学的发展推动了影响整个人类文明进程的第一次工业革命。20世纪后，诸如导弹、飞机、海底隧道、高层建筑、远洋巨轮、海洋平台、精密机械、高速列车、人造卫星、机器人等，都是在现代力学理论的指导下实现的。甚至在表面看来似乎与力学关系不大的电子工业、生命科学、医学、农学等领域中，也离不开力学知识。哪里有力和运动，哪里就有力学问题需要去解决。

工程力学是研究物体机械运动一般规律和构件承载能力的科学。

力是指物体与物体之间的相互机械作用，这种作用的效应是使物体改变运动状态，或者发生变形。其中，使物体改变运动状态的效应称为力的**外效应**（又称做**运动效应**），使物体发生变形的效应称为力的**内效应**（又称做**变形效应**）。

机械运动是指物体在空间的位置随时间而变化。它是物质的运动形式中最简单的一种运动形式。同时，机械运动又是日常生活和工程实践中最常见的一种运动形式；**平衡**是机械运动的特殊情况。为了叙述简便，本书中通常都把机械运动简称为**运动**。

构件承载能力，顾名思义，是指构件承受载荷的能力。构件承载能力包括强度、刚度和稳定性三个方面。所谓**构件**，是指组成结构的单个部件或组成机械的单个零件。所谓**载荷**，是指人们或者自然环境施加在物体（构件）上的力，又称为**主动力**。

工程力学包含着非常广泛的内容，人们的理解不尽相同。本书所论“工程力学”包括三部分内容：**刚体静力学**；**变形固体静力学**；**运动学和动力学**。

刚体静力学研究物体的受力与平衡的一般规律，即作用在物体上的力及其相互关系。包括物体受力分析的基本方法，以及力系的简化和平衡的规律，重点是力系的平衡问题。

变形固体静力学研究构件在载荷的作用下产生变形和破坏的规律，也就是研究构件的承载能力，即构件的强度、刚度和稳定性问题。

运动学和动力学研究物体的运动规律，以及作用在物体上的力与运动之间的关系。

无论研究工程力学中的哪一类问题，都要涉及自然界和工程中各式各样的物体，而这些物体有时是很复杂的。因此，在研究上述三类不同的问题时，必须忽略某些次要因素，亦即

对这些物体进行必要的、合理的简化。通常将简化后的研究对象称为“(力学)模型”。对于三类不同的问题,模型也会有所差异,甚至差异很大。

实际物体在力的作用下都是可以变形的,称为**变形体(模型)**。但是,对于那些在运动中变形极小,或者虽有变形但不影响其整体运动的物体,可略去其变形,将其简化为**刚体(模型)**。在本书的刚体静力学篇中,通常将物体简化为刚体。但在本书的变形固体静力学篇中研究构件在载荷的作用下产生变形和破坏的规律时,即使物体的变形很小(满足**小变形条件**),也不能将其简化为刚体。刚体与变形体也不是绝对的,比如在变形固体静力学篇中,当涉及静力平衡问题时,绝大部分情况下依然可以沿用刚体模型。

在本书的运动学和动力学篇中,当所研究的**刚体**的运动范围远远超过其本身的几何尺度时,刚体的形状和大小对运动的影响很小,这时,可将其抽象为只有质量而无体积的**质点(模型)**。当所研究的物体不能简化为一个质点时,则需要将其简化为由若干个质点组成的系统。由两个或两个以上、相互之间有一定联系的质点组成的系统,称为**质点系(模型)**。刚体是一种特殊的质点系,称为**不变质点系(模型)**。

工程力学是机场建筑工程与管理专业本科段自学考试计划中一门重要的专业基础课。它与工程技术的联系极为广泛,是现代工程技术的重要理论之一,是一门具有逻辑性强、论证严谨、系统完整、注重理论应用又有一定工程背景等特点的学科。从知识结构形成来看,《工程力学》起着承上启下的桥梁作用。它以《高等数学》等课程为基础,又为《建筑材料》、《土质学与土力学》、《机场道面设计》等后续课程提供必要的基础知识。同时,本课程又是一门重要的素质培养课程,通过学习,不但要使考生获得工程力学必要的基本理论、基本分析方法及基本实验技能,而且还将培养考生分析和解决实际问题的能力。

通过对本课程的学习,要求考生了解本门课程的性质、地位和作用;掌握刚体静力学中刚体的平衡、受力分析及简化的基本概念、基本原理及基本方法;掌握变形固体静力学中杆件强度、刚度及稳定性的基本概念、基本原理及基本方法;掌握运动学和动力学中与物体的运动规律及作用在物体上的力与运动之间的关系相关的基本概念、原理和方法;学会对工程实际问题进行定性和定量分析,并具有初步的实验能力;知道本学科的进展和未来发展方向,为后续课程的学习及将来从事专业技术工作打下必要的力学基础。

为此,要求考生在自学过程中,必须认真阅读和思考指定教材的内容,并独立完成足够数量的习题。

刚体静力学研究物体的受力与平衡的一般规律，即作用在物体上的力及其相互关系。平衡是物体运动的特殊情形，是指物体相对于惯性参考系（地球坐标系）保持静止或作匀速直线运动。

刚体静力学主要研究以下三个方面的问题。

1. 物体的受力分析

分析物体受到哪些力的作用，以及每个力的作用位置和作用方向。

2. 力系的简化

将作用在物体上的一个力系，用另一个比较简单的力系来代替，并保持后者对物体的作用效应与前者相同。这一过程称为力系的简化。

3. 力系的平衡

研究物体在各种力系作用下相对于惯性参考系保持平衡的条件。在一般工程问题中，常把固连于地球上的参系视为惯性参考系。本书中如无特殊说明，都将视地球为惯性参考系。

刚体静力学的研究模型是刚体。

第 1 章

静力学公理和物体的受力分析

静力学公理和物体的受力分析是整个静力学的基础。本章将介绍静力学公理，工程中常见的约束和约束力，以及物体的受力分析和受力图。

1.1 静力学公理

公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结，又经过实践反复检验，被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

公理 1 力的平行四边形法则 作用在物体上同一点的两个力，可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向，由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定，如图 1-1 所示。或者说，合力矢等于这两个力矢的几何和，即

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

亦可另作一力三角形，求两汇交力合力的大小和方向（即合力矢），如图 1-1(b)，(c) 所示。

这个公理是复杂力系简化的基础。

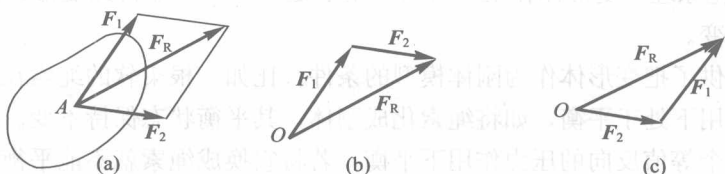


图 1-1

公理 2 二力平衡条件 作用在刚体上的两个力（如 F_1 与 F_2 ），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于刚体上最简单力系平衡时所必须满足的条件。

公理 3 加减平衡力系原理 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。

这个公理是研究力系等效替换的重要依据。

根据上述公理可以导出下列推理。

推理 1 力的可传性 作用于刚体上某点的力，可以沿着它的作用线移到刚体内任意一点，并不改变该力对刚体的作用，如图 1-2 所示。

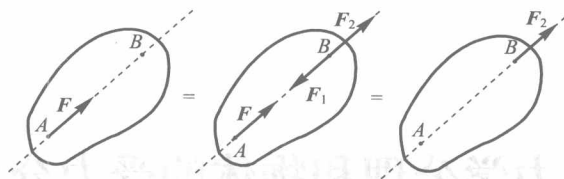


图 1-2

由此可见,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,它已为作用线所代替。因此,作用于刚体上的力的三要素是:力的大小、方向和作用线。

作用于刚体上的力可以沿着作用线移动,这种矢量称为滑动矢量。

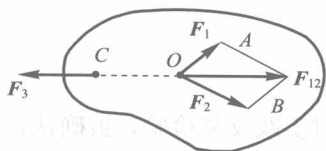


图 1-3

推理 2 三力平衡汇交定理 作用于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,如图 1-3 所示。

公理 4 作用和反作用定律 作用力和反作用力总是同时存在,两力的大小相等、方向相反,沿着同一直线,分别作用在两个相互作用的物体上。若用 F 表示作用力,用 F' 表示反作用力,即

$$F = -F'$$

这个公理概括了物体间相互作用的关系,表明作用力和反作用力总是成对出现的。由于作用力与反作用力分别作用在两个物体上,因此,不能视作平衡力系。

公理 5 刚化原理 变形体在某一力系作用下处于平衡,如将此变形体刚化为刚体,其平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体作为刚体模型的条件。比如一根柔软的绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索化成刚体,其平衡状态保持不变。反之就不一定成立。如刚体在两个等值反向的压力作用下平衡,若将它换成绳索就不能平衡了。

由此可见,刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件,而非充分条件。在刚体静力学的基础上,考虑变形体的特性,可进一步研究变形体的平衡问题。

静力学全部理论都可以由上述五个公理推证而得到,这既能保证理论体系的完整和严密性,又可以培养读者的逻辑思维能力。

1.2 约束和约束力

1. 约束和约束力的概念

工程结构中构件或机器的零部件都不是孤立存在的,而是通过一定的方式连接在一起。因而一个构件的位移一般都受到与之相连接物体的阻碍、限制,不能自由运动。各种连接方式在力学中便称之为约束,在机械设计中则称为运动副。例如,房屋、桥梁的位移受到地面的限制,梁的位移受到柱或墙的限制等。物体的位移受到限制,在一个或几个方向不可能运动,这样的物体称为非自由体。相反地,物体位移不受任何限制,可以在空间自由运动,这

样的物体称为**自由体**。例如，航行的飞机、发射的炮弹等。

当物体沿着约束所限制的方向运动或有运动趋势时，彼此连接在一起的物体之间将产生相互作用力，这种力称为**约束力**。约束力的作用点为连接物体的接触点，约束力的方向与阻碍物体运动的方向相反。

物体除受约束力作用外，还受像重力、引力及各种机械的动力和载荷等改变物体运动状态的力的作用，这类力称为**主动力**。主动力和约束力不同，它们的大小和方向一般是预先给定的，彼此是独立的。约束力的大小通常是未知的，取决于主动力的方向和大小，是一种**被动力**，需要根据平衡条件或动力学方程确定。

对物体进行受力分析的重要内容之一，是要正确地表示出约束力的作用线或力的指向，二者都与约束的性质有关。工程中实际约束的类型各种各样，接触的状况也千差万别，但是经过合理的简化，可以概括为以下几类典型约束模型。

2. 柔索约束

由绳索、链条、皮带、钢丝绳等所构成的约束统称为**柔索**。柔索的特点是柔软易变形，只能限制物体沿柔索伸长方向的位移，因而不能承受弯曲和压力，只能承受拉力。柔索的约束力作用在与物体的连接点上，作用线沿柔索拉直的方向，背向物体。通常用符号 F_T 表示。例如，图 1-4(a) 所示用链条 AO 和 BO 悬吊的重物，链条 AO 和 BO（它们都是重物的约束）给重物的拉力（即约束力）分别为 F_{TA} 、 F_{TB} ，如图 1-4(b) 所示。又如 图 1-5(a) 所示皮带轮传动系统，上下两段皮带分别作用在两轮上的拉力（约束力）为 F_{T1} 、 F_{T2} 和 F'_{T1} 、 F'_{T2} ，它们的方向沿着皮带（与轮相切）而背向皮带轮（见图 1-5(b)）。

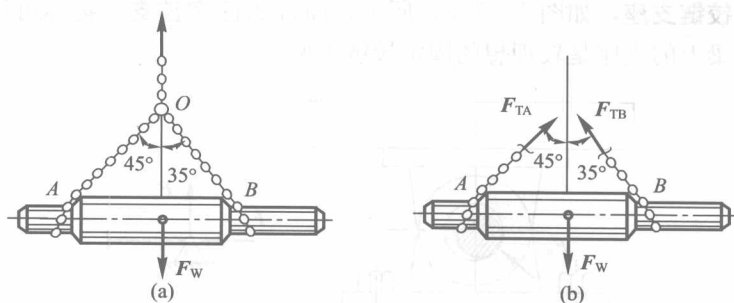


图 1-4

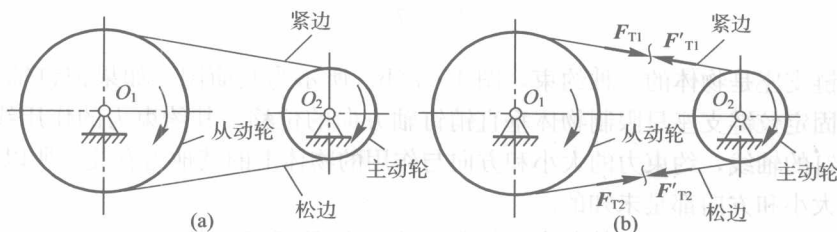


图 1-5

3. 光滑（接触）面约束

物体与约束的接触面如果是光滑的，即它们之间的摩擦力可以忽略时，约束不能阻止物体沿接触点切面任何方向的位移，而只能限制沿接触点处公法线指向约束方向的位移。所以

光滑面约束的约束力是通过接触点并沿该点公法线并指向物体。这种约束力用符号 F_N 表示。例如，图 1-6(a) 中，光滑固定曲面给圆柱的法向反力为 F_N ；在图 1-6(b) 中，AD 杆倚靠在固定挡块上，挡块给杆的约束力为 F_{NB} ；图 1-6(c) 中，板搁在固定槽内，板与槽在 A, B, C 三点接触，如果接触处光滑，约束力分别为 F_{NA} , F_{NB} 和 F_{NC} 。

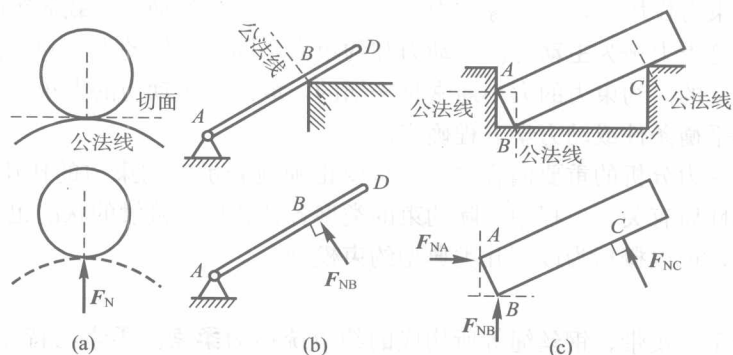


图 1-6

4. 光滑铰链约束

工程中光滑铰链约束的形式多种多样。下面所介绍的是工程中常见的几种。

1) 固定铰链支座

物体与固定在地基或机器上的支座有相同直径的孔，用一圆柱形销钉连接起来，这种连接方式称为固定铰链支座，如图 1-7(a) 所示，简称为固定铰支。物体可以绕销钉轴（铰链轴）转动。桥梁上的支座是较理想的固定铰链支座。

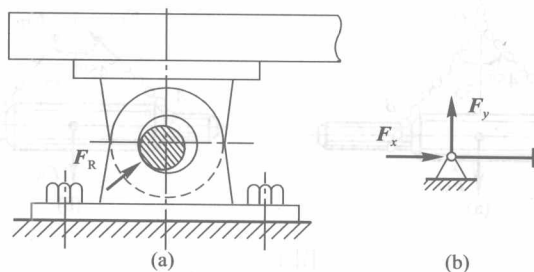


图 1-7

固定铰链支座是物体的一种约束，图 1-7(b) 所示为其简图。如果销钉轴与孔之间是光滑的，则固定铰链支座只限制物体垂直销钉轴方向的位移。其约束力的作用线必然通过，且垂直于销钉的轴线，约束力的大小和方向与作用的物体上的其他力有关，所以固定铰链支座约束力的大小和方向都是未知的。

为了便于计算，通常用它的两个互相垂直的分力 F_x 和 F_y 表示。只要求出这两个分力，总的约束力 F_R 的大小和方向即可完全确定。

2) 光滑铰链连接

将具有相同圆孔的两物体用销钉连接起来，如图 1-8(a) 所示，这也称为铰链连接，其简图如图 1-8(b) 所示。对于这种情形，约束力也可以用两个互相垂直的分力 F_x 和 F_y 表示如

图 1-8(c)所示。

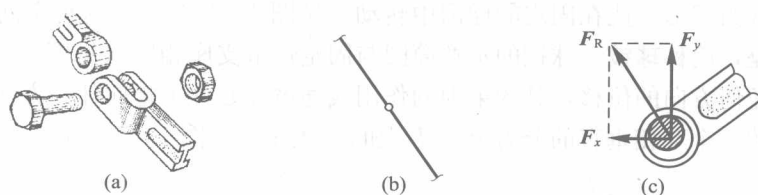


图 1-8

机器中常见各类轴承，如滑动轴承（见图 1-9(a)）或径向轴承等。这些轴承允许轴承转动，但限制与轴线垂直方向的位移，其简图如图 1-9(b) 所示。轴承约束力的特点与光滑圆柱铰链相同。因此，这类约束可归入铰链约束一类。

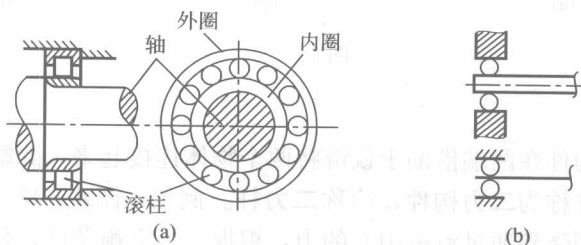


图 1-9

止推轴承也是机器中常见的一种约束，其结构简图如图 1-10(a) 所示。这种约束不仅限制转轴在垂直轴线方向（径向）的位移，而且也限制轴向的位移。其示意简图如图 1-10(b) 所示，其约束力需用三个分力 F_x 、 F_y 和 F_z 表示（见图 1-10(c)）。

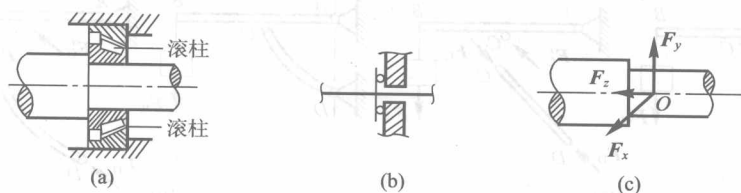


图 1-10

3) 滚动铰链支座

工程结构中为了减少因温度变化而引起的约束力，通常在固定铰链支座的底部安装一排滚轮，如图 1-11(a) 所示，可使支座沿固定支撑面自由滚动，这种结构称为滚动铰链支座，又称滚轴约束。当构件的长度由于温度变化而改变时，这种支撑允许构件的一端沿支撑面自由移动。滚动铰链支撑的示意图如图 1-11(b) 所示。这类约束只限制沿支撑面法线方向的位移，所以其约束力 F_R 的作用线沿支撑面法线（即为图中的 F_y ），通过铰链中心并指向物体。

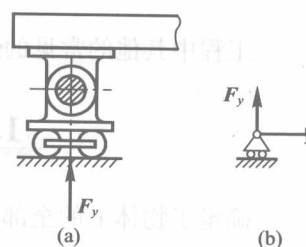


图 1-11