



普通高等学校机械基础课程规划教材

理论力学

● 主 编 胡文绩
● 副主编 华 蕊 杨 强 陈晓峰
张维祥 邱清水



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

普通高等学校机械基础课程规划教材

理 论 力 学

主 编	胡文绩		
副主编	华 蕊	杨 强	陈晓峰
	张维祥	邱清水	
参 编	彭俊文	唐学彬	高红霞
	曾全英	姜忠宇	

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书是按照教育部力学基础课程教学指导分委员会最新制定的“理论力学课程教学基本要求(试行)”(B类)编写的。全书共三篇,分别为静力学篇、运动学篇和动力学篇。本书内容又可分为基础部分和专题部分。基础部分包括静力学部分的静力学公理与物体的受力分析、平面汇交力系与平面力偶系、平面任意力系、考虑摩擦的平衡问题、空间力系等,运动学部分的点的运动学、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动等,以及动力学部分的质点动力学的基本方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理等;专题部分有动力学部分的虚位移原理、碰撞问题和振动理论基础。全书配有大量的思考题和习题。

本书可作为普通高等学校工科机械类专业理论力学课程的教材,也可作为高职高专、成人高校机械专业的学习教材,还可作为相关技术人员的参考用书。本书适用课时数为48~64学时。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/胡文绩 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2010.9
ISBN 978-7-5609-6430-0

I. 理… II. 胡… III. 理论力学 IV. O31

理论力学

胡文绩 主编

责任编辑:姚同梅

封面设计:刘 卉

责任校对:李 琴

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:22.5

字 数:477千字

版 次:2010年9月第1版第1次印刷

定 价:37.50元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

为了适应新形势下“教育面向大众化,人才培养应用型”的我国高等教育发展需要,我们在总结多年来教学实践的基础上,为探索普通工科院校的教学改革与实践,编写了这本适合普通工科院校的理论力学教材。

目前,适合普通工科院校的中、少学时的理论力学教材,其可供选择的余地不大。由此,我们编写了这本教材。本教材在满足教育部力学基础课程教学指导分委员会制定的“理论力学课程教学基本要求(试行)”(B类)的基础上,具备以下特点:

- (1) 注重基本理论、基本概念和基本方法;
- (2) 重视工程实例的介绍;
- (3) 注重力学模型的建立;
- (4) 内容易于理解、难度适当。

本书例题较多,由浅入深,方便读者参考。在每章后有小结、思考题和习题,在书末附有习题参考答案。带有“*”部分的内容和习题可按各专业需求自行选取。

本书适合于普通工科院校机械、土建、交通、水利水电、材料等本科专业,也可供专科相关专业选用,或作为自学、函授教材。

参加本书编写的有:西华大学胡文绩(第1、2、16章),佛山科学技术学院华蕊(第9、12章),太原理工大学杨强(第13、17章),宁夏大学机械工程学院陈晓峰(第5、14章),河南工业大学张维祥(第6、8章),西华大学邱清水(第3、15章),西华大学彭俊文(第10、11章),西华大学唐学彬(第4、7章),西华大学高红霞(第11章图形处理,习题答案整理),西华大学曾全英(第3章图形处理,部分稿件校核),安徽工程大学姜忠宇(第10章图形处理,部分稿件校核)。全书由胡文绩统稿并任主编,华蕊、杨强、陈晓峰、张维祥及邱清水任副主编。

由于我们的水平有限,缺点和错误在所难免,恳请读者批评和指正。

编 者

2010年6月

目 录

绪论	(1)
----	-----

第一篇 静 力 学

第 1 章 静力学公理与物体的受力分析	(5)
1.1 静力学公理	(5)
1.2 约束及其约束力	(7)
1.3 物体的受力分析与受力图	(11)
小结	(14)
思考题	(15)
习题	(16)
第 2 章 平面汇交力系与平面力偶系	(18)
2.1 平面汇交力系	(18)
2.2 平面力对点之矩的概念与计算	(23)
2.3 平面力偶理论	(25)
小结	(28)
思考题	(29)
习题	(30)
第 3 章 平面任意力系	(34)
3.1 平面任意力系的简化 主矢与主矩	(34)
3.2 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	(40)
3.3 物体系统的平衡 静定与静不定问题	(45)
* 3.4 平面桁架	(50)
小结	(53)
思考题	(54)
习题	(55)
第 4 章 考虑摩擦的平衡问题	(62)
4.1 滑动摩擦	(62)
4.2 考虑滑动摩擦的平衡问题	(64)
4.3 滚动摩擦	(68)
小结	(72)
思考题	(72)
习题	(73)

第 5 章 空间力系	(76)
5.1 空间汇交力系	(76)
5.2 力对点之矩和力对轴之矩	(79)
5.3 空间力偶系	(82)
5.4 空间任意力系向一点简化 主矢和主矩	(84)
5.5 空间任意力系的平衡	(87)
5.6 重心	(90)
小结	(95)
思考题	(96)
习题	(97)

第二篇 运 动 学

第 6 章 点的运动学	(105)
6.1 矢量法	(105)
6.2 直角坐标法	(106)
6.3 自然法	(109)
小结	(114)
思考题	(115)
习题	(116)
第 7 章 刚体的基本运动	(118)
7.1 刚体的平行移动	(118)
7.2 刚体的定轴转动	(119)
7.3 轮系的传动比	(124)
* 7.4 以矢量表示角速度和角加速度 以矢积表示点的速度和 加速度	(126)
小结	(128)
思考题	(129)
习题	(129)
第 8 章 点的合成运动	(132)
8.1 合成运动的概念	(132)
8.2 点的速度合成定理	(134)
8.3 牵连运动为平移的加速度合成定理	(137)
* 8.4 牵连运动为转动的加速度合成定理	(140)
小结	(146)
思考题	(147)
习题	(148)
第 9 章 刚体的平面运动	(152)
9.1 刚体平面运动的分析	(152)

9.2 刚体平面运动的速度分析	(154)
* 9.3 刚体平面运动的加速度分析	(162)
9.4 运动学综合应用举例	(164)
小结	(170)
思考题	(170)
习题	(172)

第三篇 动 力 学

第 10 章 质点动力学的基本方程	(179)
10.1 动力学基本定律	(179)
10.2 质点的运动微分方程	(180)
* 10.3 质点的相对运动微分方程	(186)
小结	(189)
思考题	(190)
习题	(191)
第 11 章 动量定理	(194)
11.1 动量与冲量	(194)
11.2 动量定理	(197)
11.3 质心运动定理	(201)
小结	(206)
思考题	(207)
习题	(207)
第 12 章 动量矩定理	(211)
12.1 质点和刚体的动量矩	(211)
12.2 动量矩定理	(215)
12.3 刚体绕定轴转动的微分方程	(218)
12.4 质点系相对于质心的动量矩定理	(220)
* 12.5 刚体的平面运动微分方程	(222)
小结	(227)
思考题	(227)
习题	(229)
第 13 章 动能定理	(234)
13.1 力的功	(234)
13.2 质点与质点系的动能	(239)
13.3 动能定理	(241)
13.4 功率 功率方程 机械效率	(247)
13.5 势力场 势能 机械能守恒定律	(250)
13.6 动力学普遍定理的综合应用举例	(254)

小结	(260)
思考题	(262)
习题	(263)
第 14 章 达朗贝尔原理	(269)
14.1 惯性力的概念 质点的达朗贝尔原理	(269)
14.2 质点系的达朗贝尔原理	(271)
14.3 刚体惯性力系的简化	(273)
* 14.4 绕定轴转动刚体的轴承动约束力	(278)
小结	(282)
思考题	(283)
习题	(283)
第 15 章 虚位移原理	(288)
15.1 质点系的自由度 约束及约束的分类	(288)
15.2 虚位移与虚功	(291)
15.3 虚位移原理	(293)
小结	(299)
思考题	(300)
习题	(300)
* 第 16 章 碰撞问题	(305)
16.1 碰撞现象的基本特征、分类及其简化	(305)
16.2 用于碰撞过程的基本定理	(306)
16.3 两平移物体的对心正碰撞 恢复因数	(307)
16.4 碰撞对于定轴转动刚体的作用 撞击中心	(310)
小结	(311)
思考题	(312)
习题	(312)
* 第 17 章 振动理论基础	(316)
17.1 振动的概念	(316)
17.2 自由振动	(316)
17.3 衰减振动	(322)
17.4 强迫振动	(325)
17.5 隔振理论简介	(329)
小结	(332)
思考题	(334)
习题	(334)
附录 A	(337)
习题参考答案	(338)
参考文献	(351)

绪 论

1. 理论力学的研究对象

理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门科学。

所谓机械运动,是指物体在空间的位置随时间变化的过程。机械运动是自然界和工程技术中最为常见的一种运动。物体的平衡是机械运动的特殊情况,理论力学也研究物体的平衡问题。

理论力学研究的内容是速度远小于光速(3×10^8 m/s)的宏观物体的机械运动,它以伽利略和牛顿所建立的基本定律为基础,属于古典力学的范畴。由于近代物理学的重大发展,人们发现,许多力学现象不能用古典力学加以解释。对于速度接近于光速的物体以及微观粒子的运动,则需要用相对论和量子力学的观点才能合理解释。这说明了古典力学的局限性。但是,对于速度远小于光速的宏观物体的运动,古典力学具有足够的精确性。同时,在古典力学基础上诞生的各种近代力学也正在迅速发展。因此,无论是在现代科学技术的研究,还是大量的工程实际问题和日常生活中,理论力学都具有非常重要的作用。

2. 理论力学的任务及其内容

理论力学是一门理论性较强的课程。学习本课程的任务是:一方面,学会运用力学基本知识直接解决工程实际问题;另一方面,为学习一系列的后续课程打下重要的理论基础,如材料力学、结构力学、弹塑性力学、流体力学、机械原理、机械零件、飞行力学、振动理论、断裂力学及许多专业课程等,都要以理论力学为基础。

本课程的内容包括以下三部分。

静力学——研究物体的平衡规律,同时也研究力的一般性质及其合成法则。

运动学——研究物体运动的几何性质,而不考虑物体运动的原因。

动力学——研究受力物体的运动变化与作用力之间的关系。

3. 理论力学的研究方法

理论力学的研究方法是从实践出发,经过抽象化、综合、归纳,建立公理,再应用数学演绎和逻辑推理而得到定理和结论,形成理论体系,然后再通过实践来证实理论的正确性。

观察和实践是理论力学发展的基础,抽象化和数学演绎是形成理论力学概念和理论体系的主要方法。由于我们观察到的物体是复杂多样的,不易从中抓住事物的本质,因此必须在各种现象中抓住起决定性作用的主要因素,撇开次要的、局部的、偶然性的因素,这样才能深入事物的本质,明确事物间的内在联系。这就是力学中普遍采取的抽象化方法。抽象化的力学模型也称为力学的理想模型。例如:忽略物体在

受力下的变形,得到刚体的模型;忽略摩擦对物体运动的影响,得到理想约束的模型;忽略物体的几何尺寸,得到质点的模型。采用这种抽象化、理想化的方法,一方面可简化所研究的问题,另一方面能更深刻地反映出事物的本质。当然,任何抽象化的模型都是相对的,当条件改变后,原来的模型就不一定适用了,必须再考虑影响问题的新的因素,建立新的模型。例如,在建立刚体平衡规律之后,考虑物体变形的特征就得到弹、塑性物体的模型。

通过抽象化,将观察、实践得来的经验加以分析、综合和归纳,建立最基本的公理和定律,作为本课程的理论基础;再根据这些公理,考虑到各种不同的条件,通过数学演绎和逻辑推理的方法,得到一系列的定理和结论,建立起系统的理论。

数学方法在理论力学的发展中起了重要的作用。随着计算机技术的发展和普及,现代计算机不仅能完成力学问题中大量的繁杂的数值计算,而且在逻辑推理、公式推导等方面也是极有效的工具。

从实践中得到理论,再将理论运用于实践,以此来解释世界、改造世界,并使理论不断得到验证和发展,理论力学便不断趋于完善。

第一篇 静 力 学

静力学是研究物体在力系作用下的平衡规律的科学。

所谓物体的平衡,是指物体相对于周围物体保持其静止或做匀速直线平移的状态。由于一切物体都在运动,所谓平衡也只是相对的和暂时的。在一般工程技术问题中,就是指物体相对地球的平衡,特别是指相对于地球的静止。

在静力学中,所有物体都被视为刚体。所谓刚体,是指在任何情况下都不变形的物体。这一特征表现为刚体内任意两点的距离永远保持不变。刚体只是一个为了研究方便而把实际物体抽象化后得到的理想化的力学模型。在静力学中研究的对象主要是刚体,因此有时静力学又称为刚体静力学。

所谓质点,是指具有一定质量而其形状和大小可以忽略不计的物体。所谓质点系,是指由多个质点组成的系统。质点和质点系也都是理想模型。把物体视为刚体、质点或质点系,需要视研究的问题而定。在力学中被视为质点的物体的大小是相对的。刚体是由无限个质点组成的不变质点系,但当刚体的尺寸对问题的研究不起主要作用时,也可将其抽象化为质点。由若干个刚体组成的系统也是质点系,即物体系统,简称物系。

所谓力系,是指作用于物体上的一群力。力系可分为平面力系和空间力系,各包括汇交力系、力偶系、平行力系和任意力系。

若力系的作用结果使物体保持平衡或运动状态不变,则这种力系称为平衡力系。

所谓力系的平衡条件,是指要使物体保持平衡,作用于物体上的力系应满足的条件。

力是物体间相互的机械作用,其作用效应是使物体的机械运动状态发生改变。力对物体作用的效应一般可分为两个方面:一是改变物体的运动状态,二是改变物体的形状。前者称为力的外效应或运动效应,后者称为力的内效应或变形效应。理论力学的研究对象主要是刚体,故只研究力的外效应,即运动效应。

实践表明,力对物体的作用效应取决于三方面的因素,即力的大小、方向和作用点,通常称为力的三要素。由此可见,力是矢量。通常用倾斜的黑体字母 F 表示力,而用普通字母 F 表示力的大小(又称模)。力的单位在国际单位制(SI)中是牛顿(N)或千牛顿(kN), $1\,000\text{ N}=1\text{ kN}$ 。

在静力学中,我们将研究以下内容:

- (1) 物体的受力分析;
- (2) 力系的简化;
- (3) 力系的平衡条件及其应用。

第 1 章 静力学公理与物体的受力分析

本章包括静力学公理及物体的受力分析等基本内容,是研究静力学的基础。首先介绍作为静力学基础的几个公理,然后阐述工程中常见的约束和约束力,最后论述物体的受力分析方法并介绍如何作受力图。

1.1 静力学公理

公理 1 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力,使刚体保持平衡的必要和充分条件是:这两个力大小相等、方向相反且作用于同一直线上。如图 1-1 所示,有

$$\mathbf{F}_A = -\mathbf{F}_B$$

公理 1 揭示了作用于物体上最简单的力系平衡时所必须满足的条件。对于刚体,这个条件是必要而充分的;若是变形体,则仅为必要条件。

由公理 1 可知,平衡力系中的任何力的作用线均与力系中其他力的合力的作用线在同一直线上。

工程上常遇到只受两个力作用而平衡的构件,称为二力构件或二力杆,如图 1-2 所示。

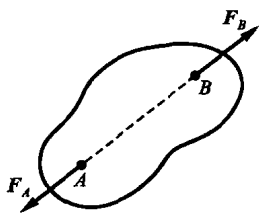


图 1-1

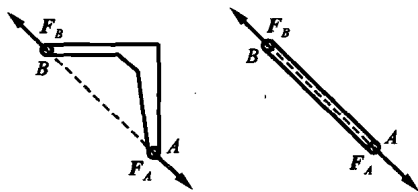


图 1-2

公理 2 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系上添加或取去任意平衡力系,不改变原力系对刚体的效应。这个公理是研究力系等效替换的重要依据。

推论 力的可传性原理

作用于刚体上某点的力,可沿其作用线移至刚体内任意一点,而不改变该力对刚体的作用。

证明 设力 F 作用于刚体上的 A 点,如图 1-3(a)所示。沿其作用线任选一点 B ,欲使力 F 从 A 点移至 B 点,根据加减平衡力系公理,可在 B 点添加上一对平衡力

F_1 和 F_2 , 使 $F_2 = -F_1 = F$, 如图 1-3(b) 所示。由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系, 故可除去。这样, 只剩下一个力 F_2 作用于 B 点, 如图 1-3(c) 所示, 显然它与原来作用于 A 点的力等效, 即相当于原来的力 F 从刚体上的 A 点沿着它的作用线移至 B 点。

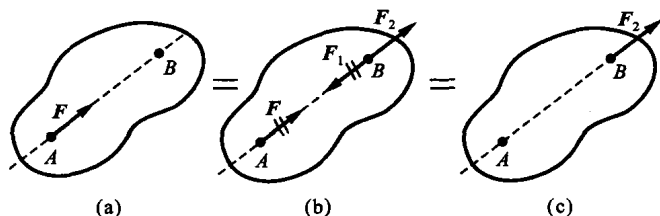


图 1-3

力的这种性质称为力的可传性。由此可见, 对刚体而言, 力是滑动矢量。应该注意, 力不能从一个刚体沿其作用线移至另一个刚体上。

公理 3 力的平行四边形法则

作用于物体上某点的两个力的合力, 也作用于同一点上, 其大小和方向可由这两个力所组成的平行四边形的对角线来表示。

设有力 F_1 和 F_2 作用于刚体上的 A 点, 如图 1-4(a) 所示, 则其合力用矢量式表示为

$$F_R = F_1 + F_2$$

即合力等于两个分力的矢量和(或几何和)。此式反映了力的方向性特征。应注意两点: 一是要区别矢量相加与数量相加的不同; 二是合力必须用平行四边形法则确定。

合力也可用作力三角形的方法确定, 如图 1-4(b)、(c) 所示。力三角形的两个边分别为力矢 F_1 和 F_2 , 第三边即代表合力 F_R , 而合力的作用点仍在 A 点。

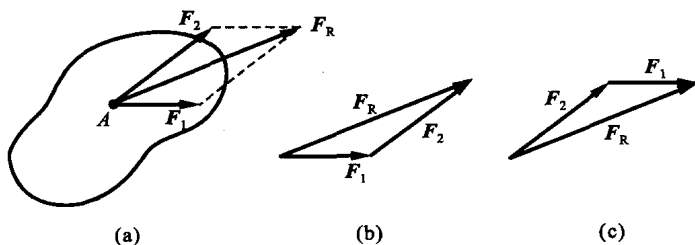


图 1-4

公理 3 是复杂力系简化的重要基础。

推论 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, 则此三个力必在同一平面内, 且第三个力的作用线通过汇交点。

证明 如图 1-5 所示, 在刚体上 A 、 B 、 C 三点分别作用有互相平衡的力 F_A 、 F_B 、 F_C 。按刚体上力的可传性, 将 F_A 和 F_B 移至汇交点 O 处, 由力的平行四边形法则求

得其合力 F_R , 则力 F_C 必与 F_R 平衡。再由二力平衡条件可知, 力 F_C 的作用线必与合力 F_R 的作用线重合。因此, 力 F_C 的作用线亦在力 F_A 和 F_B 所组成的平行四边形平面里。于是定理得证。

有时, 用此定理来确定第三个力作用线的方位较为方便。

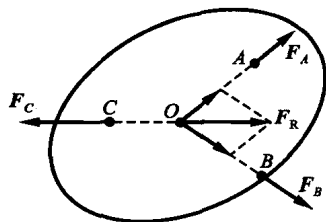


图 1-5

公理 4 作用和反作用定律

两物体间相互作用的力总是同时存在, 且其大小相等、方向相反, 沿着同一直线, 分别作用在两个物体上。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。已知作用力就可知反作用力。

公理 4 是分析物体和物体系统时必须遵循的原则。需要强调的是, 作用力和反作用力不是一对平衡力。

公理 5 刚化原理

变形体在某一力系作用下平衡, 若将它刚化成刚体, 其平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体看做刚体模型的必要条件。也就是说, 对处于平衡状态的变形体, 总可以把它视为刚体来研究, 而处于平衡状态的刚体, 变成变形体后不一定能平衡。当研究对象里有变形体(如柔性体)时, 常常用到公理 5。

1.2 约束及其约束力

当物体的位移在空间不受任何限制时, 该物体称为自由体。而有些物体的位移在空间受到一定限制, 则称为非自由体, 如沿铁轨行驶的火车、吊起的货物、机床上做直线运动的车刀等。对非自由体的位移起限制作用的周围物体称为约束(或约束体), 如铁轨对于火车、吊车对于货物、机床对于车刀等都是约束。

约束会阻碍物体的运动, 改变物体的运动状态, 因此约束必然承受物体的作用力, 同时给予物体以反作用力, 这种阻碍物体运动的反作用力称为约束力。约束力的方向必与该约束所能够阻碍的位移方向相反。应用这个准则, 可以确定约束力的方位或作用线的位置。约束力属于被动力, 而一些促使物体运动或产生运动趋势的力称为主动力, 如物体上受到的各种载荷(如重力、风力、切削力、顶板压力等)。在静力学中, 主动力一般已知, 主动力和约束力组成平衡力系, 可利用平衡条件求约束力。

下面介绍几种工程上常用的简单约束类型和确定约束力方向的方法。

1. 柔性体约束

对于绳束、胶带、链条等物体, 忽略其刚性, 不计重量, 视为绝对柔软, 便可将其归类为柔性体约束。柔性体约束的特点是只能承受拉力, 不能抗弯和承受压力, 故它给物体的约束力是拉力, 作用在接触点, 方向沿着柔软体轴线背离物体, 如图 1-6 所示。拉力通常用 F 或 F_T 表示。

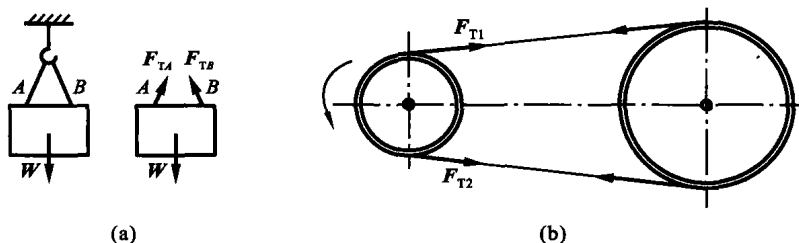


图 1-6

2. 光滑接触面约束

当物体间表面的摩擦对问题的研究不起主要作用时,可认为接触面为理想光滑表面,约束为光滑接触面约束。当忽略摩擦时,机床中的导轨对工作台、相互啮合的一个齿轮对另一个齿轮等的约束,都可视为光滑接触面约束。

这类约束的特点是只能承受压力,即限制物体沿接触面公法线并向约束体内部的位移,故它给物体的约束力是压力,作用在接触点,方向沿着公法线指向物体。压力一般用 F 或 F_N 表示,如图 1-7 所示。

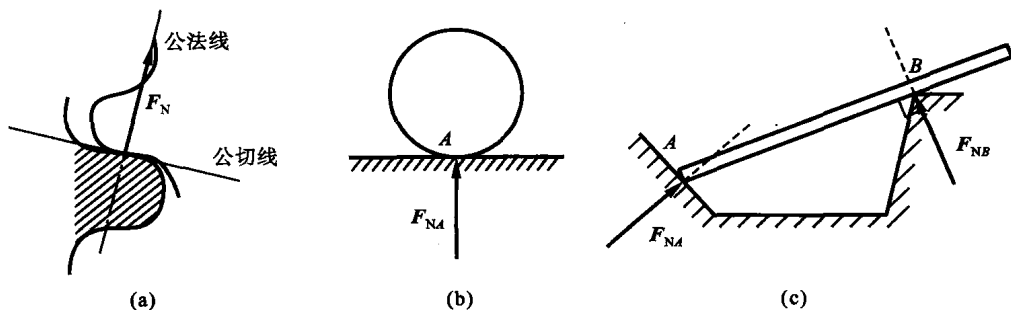


图 1-7

3. 光滑铰链约束

光滑铰链约束有多种形式,这里主要介绍光滑圆柱铰链、固定铰链支座、滚动支座。

1) 光滑圆柱铰链

如图 1-8(a)所示曲柄连杆机构, C 处为光滑圆柱铰链。光滑圆柱铰链简称圆柱铰,是连接两个构件的圆柱形零件,通常称为销钉。这类约束由一个圆柱形销钉插入两个物体的圆孔中构成。其特点是可使具有同样孔径的两个构件 A 、 B 绕销钉轴线相对转动,也可以一起移动,但不可相互脱离,如图 1-8(b)、(c)所示。考虑铰孔内光滑,并忽略空隙时,构件受到的光滑圆柱铰链的约束力为压力,作用在垂直于圆柱销的平面内,过圆柱销中心,指向不定,如图 1-8(d)所示。为了方便计算,常将约束力按正交方式分解,如图 1-8(e)所示。

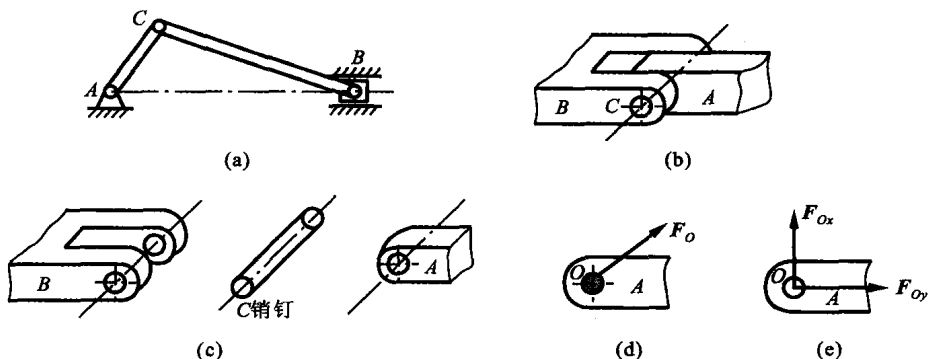


图 1-8

2) 固定铰链支座

如果光滑圆柱铰链与底座连接,固定在地面或支架上,则称为固定铰链支座,简称铰支座,如图 1-9(a)、(b)所示,图 1-9(c)是其简图。其特点是物体只能绕铰链轴线转动,不能在垂直于铰链轴线的平面内任意移动,故约束力在垂直于铰链轴线的平面内,其作用线过销钉中心,方向不定。一般情况下,可假设为正交的两个力 F_{Ax} 、 F_{Ay} ,如图 1-9(d)所示。

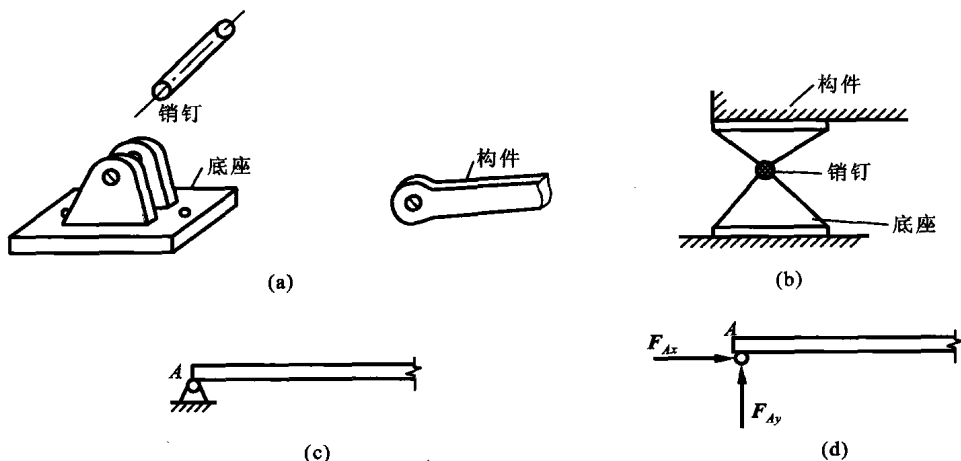


图 1-9

3) 滚动支座

在桥梁、物架等结构中经常采用滚动支座约束。这种支座是在支座与光滑支承面之间装了几个辊轴(滚柱)而形成的,故又称辊轴支座,如图 1-10(a)所示,其简图如图 1-10(b)所示。滚动支座与固定铰链支座相比,不同之处在于其可以让构件沿支承面有微小移动,以防构件由于温度变化而产生结构跨度的自由伸长与缩短。所以,辊轴支座的约束力应垂直于支承面,通过销钉中心,指向不定(一般为双面约束)。通常