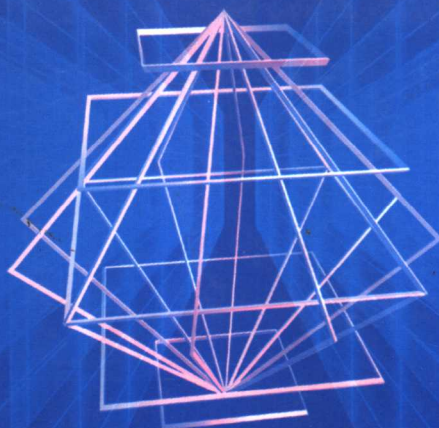


高等学校教材

理论力学

L I L U N L I X U E

江晓仑 主编
张克跃 金建明 副主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校教材

理 论 力 学

江晓仑 主编

张克跃 金建明 副主编

中 国 铁 道 出 版 社

2004年·北京

内 容 简 介

本书主要讲述静力学、运动学和动力学三部分,内容包括:静力学公理与物体的受力分析,力系的合成,力系的平衡,平衡方程的应用,点的运动学,刚体的平动、定轴转动和平面运动,点的合成运动,质点动力学基本方程、动量定理,动量矩定理,动能定理,动静法,虚位移原理,线性振动理论基础。参考学时数为 65~80。

本书可作为工科普通本科、专科、高职以及成人教育的教材。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/江晓仑主编. —北京:中国铁道出版社,2004.7

ISBN 7-113-05865-5

I. 理… II. 江… III. 理论力学-高等学校-教材 IV. 031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 028058 号

书 名:理论力学

作 者:江晓仑 主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:程东海

封面设计:蔡 涛

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×960 1/16 印张:22 字数:446 千

版 本:2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

书 号:ISBN 7-113-05865-5/O · 137

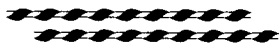
定 价:30.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话(010)51873135 发行部电话(010)51873171

前 言



本书是在编者所编讲义的基础上,经过多年使用、修改、完善而成的。参考学时数 65~80。

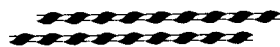
本书在编写过程中,注意到按“好教、好学”的原则,对课程内容进行了适当的精选、重组、突出了应用性强的理论内容。为了培养学生的能力,启发学生的创新意识,我们在部分例题中采用了“一题多解”的方法,部分例题由过去的单一型,演变、改造成“题型系列”,通过改变约束条件等,创造出一群(一组)题,构成题型系列。让学生去研究与思考这一系列题型在理论方法上有什么区别与联系,从中找出规律性的东西来,引导学生学会并掌握基本的知识,做到举一反三。通过题型变化,启发学生“变”、“改”、“创”的意识,不要把所学知识看成“一成不变”的,引导学生把知识学活、用活。

本书由西南交通大学江晓仑主编,张克跃、金建明任副主编。编者的分工为:金建明编写第一章至第四章,张克跃编写第五章至第七章,江晓仑编写第八章至第十二章,陈庚生编写第十三章,林德荣、王桥川编写本书的习题及解答,并参与原讲义的勘误、修订工作。其中林德荣负责第一章至第六章,王桥川负责第七章至第十三章。

限于编者的水平,书中肯定有不少缺点和错误,诚恳希望读者批评、指正。

编 者

2004 年 5 月



目 录

绪 论	1
-----	---

静 力 学

第一章 静力学公理与物体的受力分析	3
§ 1—1 刚体和力的概念	3
§ 1—2 静力学公理	4
§ 1—3 约束与约束反力	7
§ 1—4 物体的受力分析 受力图	10
小 结	14
思考题	15
习 题	15
第二章 力系的合成	19
§ 2—1 平面汇交力系的合成	19
§ 2—2 力矩 平面力偶系的合成	22
§ 2—3 平面任意力系向一点简化	25
§ 2—4 空间汇交力系的合成	31
§ 2—5 空间力对点之矩与力对轴之矩 * 空间力偶系的合成	34
* § 2—6 空间任意力系向一点简化 主矢和主矩	37
§ 2—7 重 心	38
小 结	45
思考题	47
习 题	48
第三章 力系的平衡	52
§ 3—1 平面汇交力系的平衡	52
§ 3—2 平面力偶系的平衡	55
§ 3—3 平面任意力系的平衡方程	57
§ 3—4 空间力系的平衡方程	63
小 结	71
思考题	72

习 题	72
第四章 平衡方程的应用	78
§ 4—1 静定与静不定问题的概念	78
§ 4—2 物体系的平衡	78
§ 4—3 桁 架	88
§ 4—4 考虑摩擦时物体的平衡问题	91
小 结	100
思考题	100
习 题	102

运 动 学

第五章 点的运动学	112
§ 5—1 决定点运动的矢量法与直角坐标法	112
§ 5—2 决定点运动的自然法	119
小 结	129
思考题	131
习 题	132
第六章 刚体的平动、定轴转动和平面运动	135
§ 6—1 刚体的平动归结为点的运动	135
§ 6—2 刚体定轴转动方程 角速度与角加速度	137
§ 6—3 定轴转动刚体内各点的速度与加速度	139
§ 6—4 刚体平面运动分解为平动和转动	144
§ 6—5 平面图形内各点的速度 速度投影定理 速度瞬心	147
§ 6—6 用基点法求平面图形内任一点的加速度	155
小 结	159
思考题	160
习 题	161
第七章 点的合成运动	168
§ 7—1 相对运动、绝对运动和牵连运动	168
§ 7—2 点的速度合成定理	170
§ 7—3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	175
* § 7—4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	178
小 结	182
思考题	183
习 题	183

动 力 学

第八章 质点动力学基本方程 动量定理	189
§ 8—1 质点动力学基本方程及其投影式	189
§ 8—2 质点动量定理	197
§ 8—3 质点系动量定理	199
§ 8—4 质心运动定理	205
小 结	212
思考题	214
习 题	216
第九章 动量矩定理	221
§ 9—1 质点动量矩定理	221
§ 9—2 质点系动量矩 转动惯量	223
§ 9—3 质点系动量矩定理	229
§ 9—4 刚体绕定轴转动微分方程	232
小 结	235
思考题	236
习 题	238
第十章 动能定理	241
§ 10—1 力的功	241
§ 10—2 质点的动能定理	243
§ 10—3 质点系和刚体的动能	246
§ 10—4 质点系动能定理	248
§ 10—5 功率 功率方程 机械效率	254
§ 10—6 势力场 势能 机械能守恒定律	256
§ 10—7 动力学普遍定理的综合应用	258
小 结	260
思考题	262
习 题	263
第十一章 动静法(达朗伯原理)	267
§ 11—1 惯性力的概念	267
§ 11—2 动静法	268
§ 11—3 刚体惯性力系简化	271
§ 11—4 静平衡与动平衡概念	276
§ 11—5 动力学问题多种解法举例	278

小 结	287
思考题	288
习 题	288
第十二章 虚位移原理	292
§ 12—1 质点系的自由度 约束与广义坐标	292
§ 12—2 虚位移 理想约束	294
§ 12—3 虚位移原理	296
小 结	302
思考题	302
习 题	303
第十三章 线性振动理论基础	306
§ 13—1 引 言	306
§ 13—2 单自由度线性系统的自由振动	306
§ 13—3 计算固有频率的能量法	311
§ 13—4 阻尼对自由振动的影响	313
§ 13—5 单自由度系统的受迫振动	318
§ 13—6 减振与隔振的概念	325
小 结	328
思考题	330
习 题	331
习题答案	335
参考文献	344

绪 论

一、学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性较强的技术基础课,是科技人员从事专业工作、进行科学研究、从事工程建设等所必需的基础知识。所以,学习理论力学的目的之一就是为解决上述问题打下必要的基础。

此外,有些工程问题可以直接应用理论力学的基本理论、基本方法加以解决。所以,学习理论力学的目的之二,就是为解决某些工程问题提供必要的基本理论与方法。

理论力学研究力学中最普遍、最基本的规律,它为一系列后继课程如材料力学、结构力学、机械原理等提供重要的理论基础。这是学习理论力学的目的之三。

随着现代科学技术日新月异的发展,力学理论已渗入到许多科学领域,例如用固体力学的理论来研究人体骨骼的强度,用流体力学的理论来研究人体血液流动规律以及植物中营养的输送规律等,形成了生物力学,等等。力学和其他学科结合而形成了许多边缘学科。这些新兴的边缘学科的建立和发展都必须以理论力学知识为重要基础。所以,学习理论力学的目的之四,就是为进一步学习与研究新兴学科提供必要的基础。

二、理论力学研究的对象、内容和研究方法

理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门学科。

运动是物质存在的方式,自然界中所有物质都处在永恒的运动之中。正如恩格斯所指出的:“运动,就最一般的意义来说,就它被理解为存在的方式、被理解为物质的固有属性来说,它包括宇宙发生的一切变化和过程,从单纯的位置移动起直到思维。”而机械运动,即物体在空间所作的位置变动,是物质运动形式中最简单的一种。平衡是机械运动的特殊情况。

理论力学研究的内容是远小于光速的宏观物体的机械运动,它属于以牛顿基本定律为基础的古典力学。古典力学至今仍有着广泛的应用。

根据循序渐进的认识规律,将本课程的内容分为3个部分,即

静力学,研究物体的受力分析、力系的合成与平衡条件。

运动学,只从几何角度来研究物体的运动规律,而不涉及引起物体运动的原因。

动力学,研究物体运动变化、力、质量之间的关系。

同其他学科一样,理论力学也是遵循实践——理论——再实践这一辩证唯物主义的认识论而逐渐完善的。

静力学

引言

静力学是研究物体机械运动的特殊情况,即研究物体的平衡规律的科学。所谓平衡是指物体相对于惯性参考系(例如地面)保持静止或作匀速直线运动。

在静力学中,除了阐明一些基本概念之外,主要研究以下3个问题:

1. 物体的受力分析

分析某个物体的受力状况:有哪些力作用,每个力的方向和作用线位置如何。

2. 力系的简化

通过力的分解、合成,可以将作用于物体上复杂的力系(即一组力)用一个简单的力系等效代换,这种做法称为力系的简化。实际上,研究力系的简化不仅是为了研究静力学有关问题的需要,也是为研究动力学有关问题打下基础。

3. 建立在各种力系作用下物体的平衡方程及其在工程中的应用

满足平衡条件的力系称为平衡力系。应用力系的平衡方程可以求解未知力,在某些情况下也可求物体的平衡位置。

在工程中有大量的力学问题,如土建施工中,起重机起吊重物时,重载和空载满足平衡条件所需平衡重的大小,即不翻倒的条件。桥梁、房屋等建筑物,在设计和施工中都有大量静力学问题,包括受力分析、构件受力大小以确定各杆件截面尺寸,梁、柱大小等。在机械工程的设计中,也需对机械的零、部件进行力学分析、强度计算。特别是对一些运行速度低,速度变化小的机械零件往往可作为静力学问题来处理。同时,受力分析、力系的简化等静力学的理论还是动力学的基础;在动力学中,有用静力学的方法解决动力学问题的理论。因此,静力学成为了一门独立的学科。

当对实际工程对象进行力学分析时,为便于研究,首先要把它理想化,抓住所研究问题的主要方面,忽略次要方面,合理地抽象化为力学模型,继而进行数学描述,得到数学模型。这个过程在数学上称为“建模”。有了力学模型、数学模型,然后才进行计算。

第一章 静力学公理与物体的受力分析

本章讨论刚体和力的概念、静力学公理、约束与约束反力及受力图。这些内容是静力学中最基本的知识。

§ 1—1 刚体和力的概念

1. 刚体的概念

刚体，指的是在力的作用下其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体。也就是说，刚体是在力的作用下永不变形的物体。刚体的概念是用科学抽象化的方法建立的一个理想化的力学模型。实际上，任何物体在力的作用下都会或多或少地发生变形。只不过在我们所研究的问题中，当变形是次要因素从而可以忽略不计时才可以将物体理想化为刚体。对于同一个物体，当在不同的学科领域研究不同的问题时，将采用不同的力学模型。例如一座桥梁，当对它进行受力分析时，采用刚体这个力学模型；但当确定桥梁的截面尺寸或研究桥梁的振动问题时，就不能再采用刚体这个力学模型而必须采用理想的变形体模型。

在理论力学的静力学中，由于采用的是刚体模型，故又称为刚体静力学。

2. 力的概念

力是物体间相互的机械作用，这种作用有两种效应，其一，使物体的机械运动状态发生改变，其二，使物体的形状发生改变。前者称为运动效应或称外效应，后者称为变形效应或称内效应。

应当指出，通常我们所说的力，都是有它具体的物理本质的，诸如重力、万有引力、电磁力等，都是通过“场”起作用的力，故其物理本质是“场力”；又如物体间的压力、摩擦力等，都是由于物体间相互接触而产生的，故其物理本质是接触力。在理论力学中，我们抛开了力的物理本质而专门研究力的统一的、普遍的规律性。

实践证明，作用在物体上力的大小、方向、作用点不同，物体的运动状态就不同。因此，力对物体的作用效应，取决于力的大小、方向、作用点这 3 个要素，一般称其为力的三要素。可见，力具有矢量应具有的条件，所以，力是矢量。这里，如图 1—1 所示，用一个带箭头的直线段表示力，线段的长度 AB 按一定比例表示力的大小；线段的方位及箭

头的指向表示力的方向,线段的始端(A点)表示力的作用点。该线段所在的位置 KL 为力的作用线位置。通常用黑体字母 $\mathbf{F}$ 表示力矢量,用普通字母 F 表示力的大小。

如果作用在刚体上的力不止一个而是一组,我们就称这一组力为力系。如果作用在刚体上的一个力系可以用另一个力系来代替而不改变刚体的运动状态,则这两个力系互为等效力系;如果一个力和一个力系等效,则这个力称为该力系的合力。

在国际单位制(SI)中,力的单位为 N(牛)或 kN(千牛)。

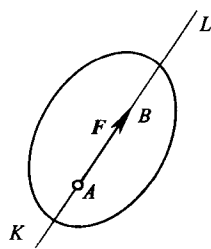


图 1-1

§ 1—2 静力学公理

人们经过长期的生活和生产实践,总结出了关于力的基本规律。这些规律又经过实践的反复检验,证明是符合客观实际的最普遍、最一般的规律,并将其称之为公理。这些公理简单明了,为人们所公认。这些被认为是公理的普遍规律为静力学提供了理论基础,故称为静力学公理。

公理一 二力平衡公理

作用在同一刚体上的两个力使刚体处于平衡的必要和充分条件是:这两个力大小相等、方向相反、沿同一直线。如图 1—2 所示,有

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2$$

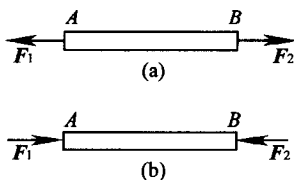


图 1-2

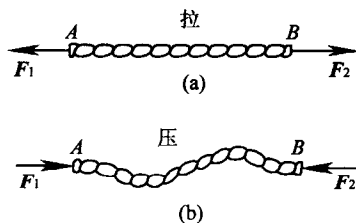


图 1-3

公理一给出了作用于刚体上最简单力系平衡时所必须满足的条件。对于刚体来说(图 1—2),这个条件是必要的也是充分的,但对于变形体来说,这个条件只是必要的而不充分。例如,图 1—3 所示的软绳,当受到两个等值、反向、共线的压力时就不能平衡。

公理二 加减平衡力系原理

在作用于刚体的力系中,加上或去掉任意的平衡力系,不改变原力系对该刚体的作用效果。

这是明显的,因为平衡力系对于刚体的平衡或运动状态没有影响。这个公理可以用来简化一个已知的力系,并且还可以得出一个重要的推论,即力的可传性。

推论 力的可传性

作用于刚体的力可以沿力的作用线移动到该刚体上的任意点,而力对刚体的外效应不变。

证 在刚体上 A 点作用有力 F , 其作用线沿 AB , 如图 1—4(a) 所示。若欲将力 F 从 A 点沿作用线移到 B 点, 则只需在 B 点加上力 F' 、 F'' , 且有 $F' = -F'' = F$, 如图 1—4(b) 所示。

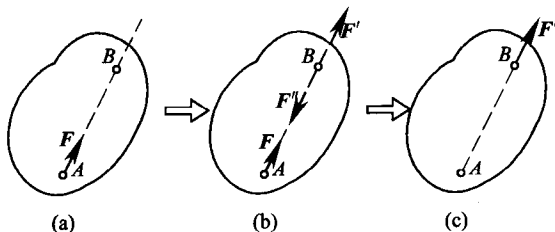


图 1—4

由公理一, F' 与 F 为平衡力系, 再根据公理二, 去掉平衡力系 F 与 F'' 后外效应不变, 余下作用于 B 点的 F' 。于是, 力 F 就从 A 点移到了 B 点, 如图 1—4(c) 所示。

由此, 作用于刚体上力的三要素, 将成为力的大小、方向和作用线。于是作用于刚体上的力矢量将是一个滑动矢量。

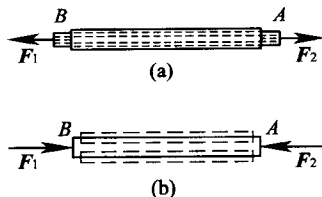


图 1—5

力的可传性只能适用于刚体, 因为公理一、公理二都只适用于刚体。在实践中可以看到, 在变形体上的一对等值、反向、共线的拉力, 使其伸长。如果将两力分别移到另一端, 此时变为一对等值、反向、共线的压力, 使其压缩, 如图 1—5 所示。可见, 两者的变形效应完全不同。

公理三 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。合力的作用点仍在该点, 合力的大小和方向可由这两个力为边所作的平行四边形的对角线来确定, 如图 1—6(a) 所示。

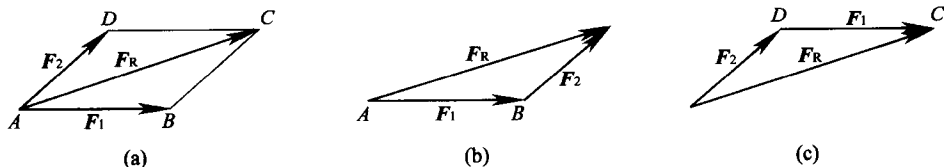


图 1—6

这种求两个共点力合力的方法, 称为矢量加法。其矢量表达式为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

在用矢量加法求合力时,可以只用平行四边形的一半[图 1—6(b)、(c)],这种求合力的作图规则,称为力的三角形法则。需注意,应用力三角形法则作图时,3 个力只表明力的大小和方向,不表示其作用点或作用线位置。

力的平行四边形法则表明了最简单力系的简化法则,它为复杂力系的简化提供了必要的理论基础。

推论 三力平衡汇交定理

若一个刚体在 3 个力作用下处于平衡,其中两力作用线相交,则三力作用线必汇交于一点且在同一平面内。

证 设 3 个力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 和 $\mathbf{F}_3$ 作用于刚体且刚体处于平衡,其中 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 的作用线交于 O 点,如图 1—7 所示。按力的可传性,将 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 沿它们的作用线移至 O 点,并由平行四边形法则得到 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 的合力 $\mathbf{F}_{12}$ 。根据二力平衡公理, $\mathbf{F}_3$ 、 $\mathbf{F}_{12}$ 必定等值、反向、共线,则 $\mathbf{F}_3$ 的作用线必过 O 点,且位于平行四边形所在的平面内。证毕。

用此定理可以确定某未知力的作用线位置。

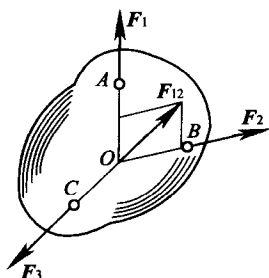


图 1—7

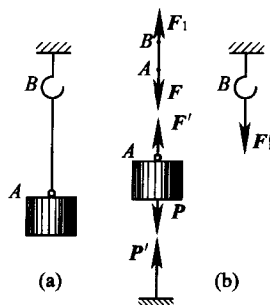


图 1—8

公理四 作用与反作用定律

两个物体间相互作用的力总是同时存在,大小相等、方向相反、沿同一直线、分别作用于两个物体上。

该定律为研究多个物体的相互作用打下了基础,它不仅适用于静力学、还适用于动力学、材料力学等。注意它和公理一有本质区别,不能混淆。例如,绳 AB 悬挂一重物[图 1—8(a)],若将绳切开,用力 $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{F}'$ 分别表示作用于两个物体的力[图 1—8(b)],则这两个力是等值、反向、共线的,但分别作用于两个物体上。其中一个力称为作用力,另一个就称为反作用力。而 $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{F}_1$ 是作用于绳的一对平衡力,重物的重力 $\mathbf{P}$ 与拉力 $\mathbf{F}'$ 也是一对平衡力。 $\mathbf{P}$ 的反作用力是重物对地球的引力 $\mathbf{P}'$ 。

公理五 刚化原理

变形体在已知力系的作用下处于平衡,若将变形体假设为刚体(刚化),则平衡状态

保持不变。

公理五提示了把变形体看作刚体模型的必要条件,从而建立了刚体静力学与变形体静力学之间的联系,使得处于平衡状态的变形体总可以把它视为刚体,并应用刚体静力学的理论与方法加以研究。只是刚体的平衡条件对于变形体来说,仅仅是必要条件而非充分条件。例如,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,若将绳索硬化为刚体,其平衡状态保持不变。但对于刚体能平衡的一对等值、反向、共线的压力,对变形体(例如绳索)就未必能平衡。

§ 1—3 约束与约束反力

在空间的位移不受限制的物体称为自由体,如飞行中的飞机、炮弹和火箭等,均能在空间作任意的位移。而位移受到限制的物体称为非自由体,如在钢轨上运行的机车、桥梁、门、窗等,其位移都受到一定的限制。对非自由体的运动起到限制作用的其他物体,就称作非自由体的约束。如机车轮下的钢轨、桥梁的墩台、门窗的合页等,都是约束。

约束对被约束物体位移的限制,是通过约束与被约束物体之间相互的机械作用来实现的,这种机械作用的结果改变了被约束物体的运动状态,而能改变物体运动状态的是力,所以,约束对被约束物体的作用就是力的作用,这种力称为约束反力,简称反力。约束反力的大小是未知的,约束反力的方向应与该约束所能限制的位移方向相反。

除了约束反力以外,还有诸如重力、风压力、水压力、弹性力等,这些统称为主动力。主动力通常是已知。静力学的任务之一就是建立主动力与约束反力之间的定量关系。因此,对约束反力的表述就显得十分重要。

下面介绍几种工程中常见的约束类型以及约束反力方向的确定方法。

1. 柔索约束

属于这类约束的有柔软绳索、皮带和链条。绳索只能承受拉力[图 1—9(b)],所以,绳索对物体的约束反力也只能是拉力。作用在接触点,方向沿着绳索背离物体,如图 1—9(c)所示。

链条[图 1—10(a)]和皮带[图 1—11(a)]也只能承受拉力,所以,它对轮子的约束反力为沿轮缘切线方向的拉力,如图 1—10(b)、图 1—11(b)所示。

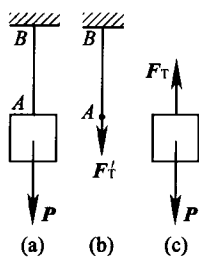


图 1—9

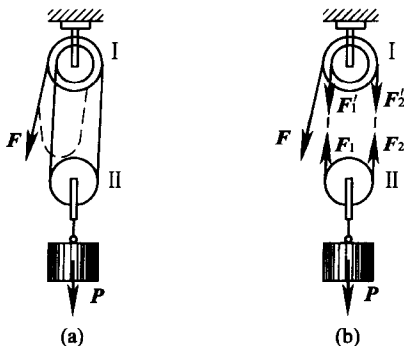


图 1—10

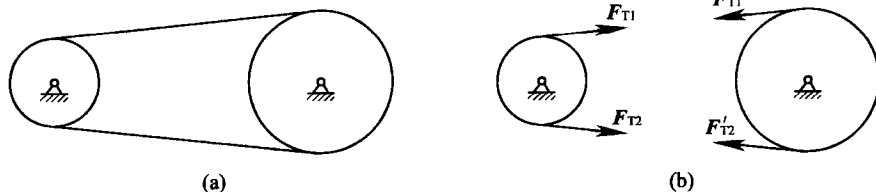


图 1-11

2. 光滑接触面约束

两物体的接触表面如果是光滑的,则称这样的约束为光滑接触面约束,如图 1-12 (a)、(c)、(e)所示。

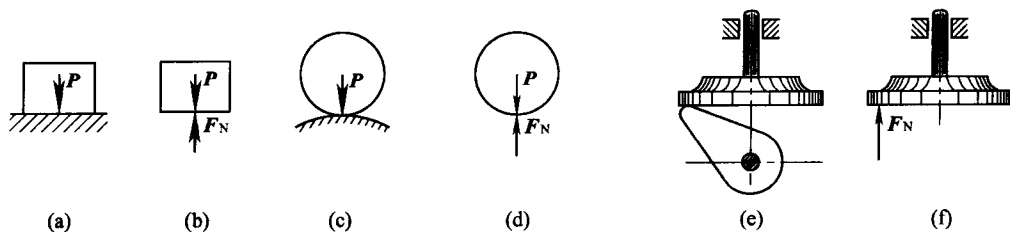


图 1-12

光滑接触面约束不能限制物体沿接触面的切线方向运动,而只能限制沿接触面的公法线方向运动,因此,光滑接触面的约束反力沿公法线,且指向物体,作用在接触点上,如图 1-12(b)、(d)、(f)所示。

3. 光滑圆柱形铰链约束

铰链是工程上常见的一种约束。它是将两个有圆孔的构件,用圆柱形销子(或称为销钉)穿过圆孔而将其连接在一起的一种构造,如图 1-13(a)、(b)所示。

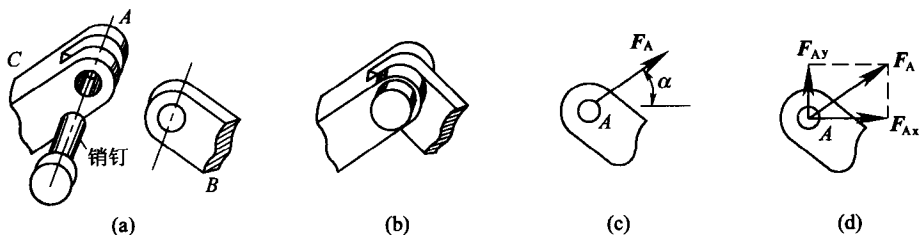


图 1-13

这种约束不限制两个构件分别绕销子轴线转动,只限制两个构件分别沿销子径向

向外的位移。由于构造上要求销子直径应略小于孔径,所以,销子与构件之间只能有一个接触点(例如 A 点)。又由于忽略摩擦,故销子与构件之间的接触属光滑圆柱面接触。于是,销子作用于构件的约束反力 F_A 应沿接触点 A 处的公法线方向,指向构件,并通过销子中心,如图 1—13(c)所示。但在实际工程问题中,销子与构件的接触点是不容易找到的,它随构件所受的主动动力不同而变化。不过,无论接触点位置怎样变化,它的公法线方向必垂直于销子轴线并通过销子中心。于是,对于这样一个方向不能预先确定的约束反力,总可以用通过销子中心的、大小未知的两个正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 来表示,如图 1—13(d)所示。

4. 固定铰支座与活动铰支座

在上述的圆柱形铰链约束中,若其中一个构件固定而作为基座,就构成固定铰支座,如图 1—14(a)、(b)、(c)所示。其简图如图 1—14(d)、(e)所示。其约束反力的表示方法如图 1—14(f)所示。

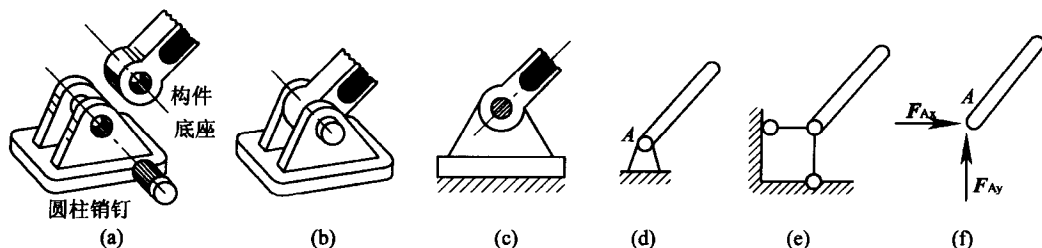


图 1—14

若将固定铰支座用几个辊轴支承在光滑固定面上,就构成了活动铰支座或辊轴支座,如图 1—15(a)所示。其简图如图 1—15(b)所示。活动铰支座可以沿支承面移动。其约束反力的表示法与光滑约束面相同,即垂直于支承面,通过铰链中心,如图 1—15(c)所示。

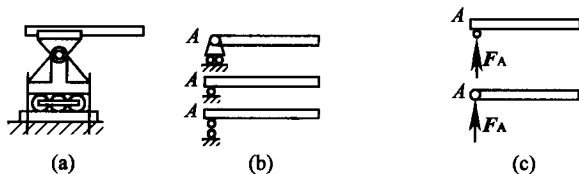


图 1—15

5. 径向轴承与止推轴承

在各种机械设备中,轴承有着广泛的应用。图 1—16(a)为一径向轴承装置。图