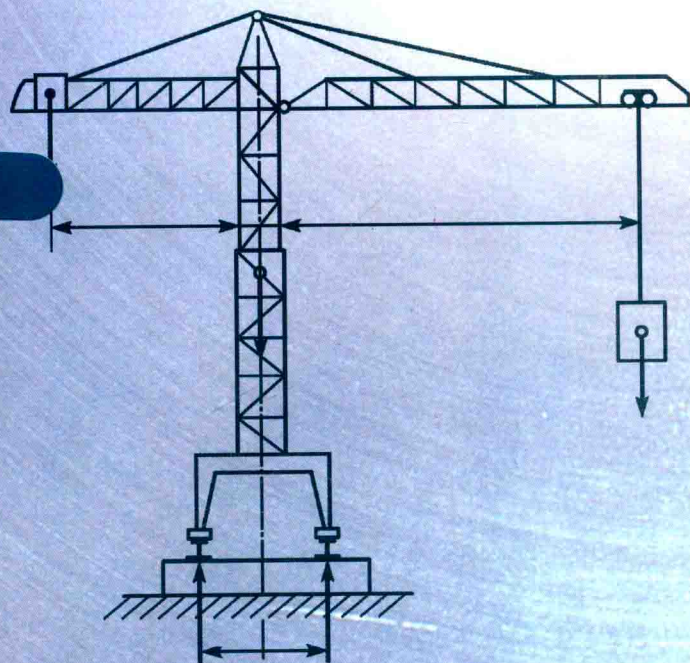


工程力学

Engineering Mechanics

(第2版)

主 编 王 彪
副主编 黄向明 杜皖宁



中国科学技术大学出版社

普通高等学校规划教材

工 程 力 学

(第 2 版)

主 编 王 彪

副主编 黄向明 杜皖宁

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本教材按照教育部制定的“工程力学”(静力学和材料力学)课程基本要求编写,在省精品课程建设经验和教学改革的基础上,对传统的章节进行了调整,着重突出了知识和能力,加强了知识间的整合以及工程意识和方法的训练,力求做到知识面适度,内容简明,适用性强。

全书共分静力学和材料力学两大部分,主要内容包括:静力学基础;平面力系;空间力系;材料力学基本概念;杆件的内力;杆件的应力;应力状态分析;强度设计;位移分析与刚度设计;压杆的稳定性;动载荷及附录等。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/王彪主编. —2 版. —合肥:中国科学技术大学出版社,2014. 11
ISBN 978-7-312-03594-4

I. 工… II. 王… III. 工程力学 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 188603 号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

印刷 合肥现代印务有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 710mm×960mm 1/16

印张 12.25

字数 240 千

版次 2008 年 8 月第 1 版 2014 年 11 月第 2 版

印次 2014 年 11 月第 3 次印刷

印数 10001—13000 册

定价 25.00 元

第 2 版 前 言

本书第 1 版被评选为安徽省高等学校“十一五”省级规划教材,于 2008 年正式出版,经过 6 年的教学实践,得到了广大师生的认可与好评,同时广大师生也对本书提出了许多宝贵的意见和建议。

这次改版,既保留了原教材的内容与风格,又对原书中一些错误进行了更正,并趁此改版机会,对一些术语进行了规范,对符号进行了统一,使之更加适应教学所需。

限于水平和条件,书中还会有不少缺点和错误,诚恳欢迎大家批评指正。

编 者

2014 年 6 月

前 言

本教材总结了省精品课程建设的经验,运用了教学改革成果,对传统的章节进行了调整,突出了知识和能力,加强了知识间的整合,融会贯通。本教材加强工程意识和方法的训练,力求做到知识面适度,内容简明,适用性强。

本教材按照国家教育部制定的“工程力学”(静力学和材料力学)课程基本要求编写,全书分静力学和材料力学两部分。全书在理论、概念的论述上准确、严谨,静力学和材料力学两部分内容相互渗透、相互协调,文字简明、精练,可适用于工科院校 50~80 学时工程力学的课程教材。

参加本教材编写的有:黄向明(第 1、2、3 章)、杜皖宁(第 4、7、10、11 章)、王彪(第 5、6、8、9 章)、高为浪(平面图形的几何性质、型钢表、第 1~3 章习题)、刘燕(第 4~7 章习题)、冯建友(型钢表、第 8~11 章习题)。由王彪担任主编,黄向明、杜皖宁担任副主编,冯建友还参与了版面和插图的修订工作。

本教材由安徽工业大学邱支振教授和谢能刚教授主审。

本教材在编写过程中,得到了中国科学技术大学出版社、安徽工业大学教务处及教学研究科和安徽工业大学力学教研室许多同志的支持和帮助,谨此致谢。

限于编者水平,本教材存在缺点和不当之处在所难免,恳请广大师生和读者批评指正,以便今后改进。

编 者

2008 年 3 月

目 录

第2版前言	(I)
前言	(III)
绪论	(1)
第1章 静力学基础	(3)
1.1 静力学基本概念	(3)
1.2 静力学公理	(4)
1.3 约束和约束反力	(7)
1.4 物体的受力分析和受力图	(13)
第2章 平面力系	(16)
2.1 平面基本力系	(16)
2.1.1 平面汇交力系的合成与平衡	(16)
2.1.2 平面力偶系的合成和平衡	(21)
2.2 平面任意力系	(24)
2.2.1 平面任意力系的简化	(24)
2.2.2 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	(27)
2.2.3 静定与超静定的概念·物系的平衡	(30)
2.2.4 平面静定桁架的内力分析	(34)
2.3 考虑摩擦时的平衡问题	(37)
第3章 空间力系	(46)
3.1 空间汇交力系	(46)
3.2 力对点的矩和力对轴的矩	(48)
3.3 空间力偶	(51)
3.4 空间任意力系向一点的简化——主矢和主矩	(53)
3.5 空间任意力系的平衡方程	(54)
3.6 重心	(56)
第4章 材料力学基本概念	(58)
4.1 材料力学的任务	(58)
4.2 变形固体的基本假设	(59)
4.3 作用在构件上的载荷	(60)

4.4 杆件变形的基本形式	(61)
第5章 杆件的内力	(63)
5.1 内力的概念·截面法	(63)
5.2 轴向拉压时的内力	(65)
5.3 扭转时的内力	(66)
5.4 弯曲时的内力	(67)
5.4.1 剪力方程和弯矩方程	(67)
5.4.2 剪力图和弯矩图	(69)
5.4.3 剪力、弯矩与载荷集度间的关系	(70)
第6章 杆件的应力	(75)
6.1 应力的概念	(75)
6.2 应变的概念·胡克定律	(76)
6.3 轴向拉压时的正应力	(77)
6.4 圆轴扭转时的切应力	(78)
6.5 对称弯曲时的应力	(80)
6.5.1 纯弯曲时的正应力	(80)
6.5.2 横力弯曲时的正应力	(82)
6.5.3 弯曲切应力	(82)
第7章 应力状态分析	(84)
7.1 应力状态概述	(84)
7.2 平面应力状态分析	(86)
7.2.1 解析法	(86)
7.2.2 图解法	(92)
7.3 空间应力状态	(95)
7.4 广义胡克定律	(96)
第8章 强度设计	(100)
8.1 金属材料轴向拉压时的力学性能	(100)
8.2 强度失效形式·常用强度理论	(102)
8.3 杆件基本变形时的强度设计	(103)
8.3.1 轴向拉压时的强度设计	(103)
8.3.2 圆轴扭转时的强度设计	(105)
8.3.3 梁的强度设计	(106)
8.4 杆件组合变形时的强度设计	(107)
8.4.1 组合变形与叠加原理	(107)

8.4.2 拉(压)弯组合	(108)
8.4.3 扭弯组合	(109)
8.4.4 斜弯曲	(111)
8.5 连接件的实用计算	(112)
8.5.1 剪切实用计算	(112)
8.5.2 挤压实用计算	(112)
8.6 提高杆件强度的措施	(114)
第9章 位移分析与刚度设计	(116)
9.1 杆件的拉压变形	(116)
9.2 圆轴的扭转变形	(118)
9.3 梁的弯曲变形	(120)
9.4 简单超静定问题	(123)
9.4.1 拉压超静定	(124)
9.4.2 弯曲超静定	(125)
第10章 压杆的稳定性	(130)
10.1 稳定性概念	(130)
10.2 细长杆的临界载荷——欧拉公式	(132)
10.3 经验公式与临界应力总图	(136)
10.4 压杆的稳定性设计	(142)
第11章 动载荷	(145)
11.1 概述	(145)
11.2 杆件受冲击时的应力计算	(145)
11.3 交变应力与疲劳破坏	(152)
附录 I 平面图形的几何性质	(157)
I.1 静矩和形心	(157)
I.2 惯性矩和惯性半径	(161)
I.3 惯性积	(164)
I.4 平行移轴公式	(165)
I.5 转轴公式·主惯性轴	(169)
附录 II 型钢规格表	(172)
II.1 热轧等边角钢(GB9787—1988)	(172)
II.2 热轧工字钢(GB706—1988)	(179)
II.3 热轧槽钢(GB707—1988)	(182)

绪 论

工程力学由静力学和材料力学两部分内容组成,主要研究物体的受力分析、平衡条件及杆件的强度、刚度和稳定性。

学习本课程的目的,一是掌握力学的基本知识,为学习有关的后续课程打好必要的基础;二是培养学生运用力学的基本概念和基本理论,分析解决工程实际问题;三是学习力学的基本方法,培养学生逻辑思维能力、计算表达能力等综合素质。

力学是研究宏观物体机械运动规律的科学,它揭示了物体的相互作用以及和运动之间的关系。以牛顿力学为主体的力学类课程,系统地介绍了阿基米德、伽利略、牛顿等科学巨匠的研究方法、基本观念和思维方式。牛顿力学不仅成为近代自然科学与古代科学的分水岭,其影响远超过它本身的应用范围,而且转化为社会人的思维方式,被哲学家提升为世界观和方法论。

力学本是物理学的一个分支,而物理学科的发展则是从力学开始的。牛顿力学相信一切事物都源于少数事实,而它们又遵循少数最基本的规律即基本定律;利用逻辑推理和数学演绎建立力学理论;在理论的指导下,同学们通过自己亲身的努力去摸索事物的本质。这就是所谓的“力学的思考方法”——“从运动的现象去研究自然界中的力,然后从这些力去说明其他现象”(《自然哲学之数学原理》)。与古代科学相比,近代科学有两大特征:用实验可以验证,用数学可以精确表达。牛顿力学是世界上第一门具备这两大特征的学科,为其他学科树立了典范。直至今日,物理学仍然大体沿着牛顿所开创的研究途径去寻找支配物质运动现象的统一的力,或者统一的相互作用,然后从这些相互作用去说明自然现象。耐人寻味的是,几乎所有的基本物理理论都称之为某种力学,如牛顿力学、热力学、电动力学、色动力学、量子力学等等,这恰恰反映了力学的观念、方法和理论对整个物理学的基本和重大的影响。因此,掌握“力学的思考方法”的能力,不仅对于学习力学,而且对于学习其他科学领域知识都应该是大有好处的。

力学在工程技术的推动下按自身的规律进一步发展,逐渐从物理学中独立出来。力学的发展,推动了科学技术和人类社会的进步。力学的发展,无时不与工业的发展密切相关。从蒸汽机、内燃机的发明,到火车、船舶、汽车、飞机的生产,以及到今天的核反应堆、航天飞机、宇宙空间站的制造和建立,都是在应用了力学理论后而得以实现的。可以说,力学是众多学科和工程技术的基础。正是由于力学应用的广泛性,所以力学在解决一系列工程技术问题的时候,又向其他学科渗透,从

而也大大丰富了力学科学本身。力学在发展以及在成为一门独立学科的过程中,又分流出许多分支学科,如理论力学、材料力学、结构力学、弹性力学、塑性力学、断裂力学、空气动力学、高速空气动力学、生物力学,等等。力学发展到近代,所显示出的一个重要特征,就是与其他学科的相互交叉。这种学科的相互交叉又为科学技术、工业和社会的发展产生了巨大的作用。其中最为突出的就是力学与工程的交叉。大型工程的建设推动了工程力学知识的积累和发展,而工程力学理论又指导着工程实践,因此,工程力学是具有强大的生命活力、与时俱进的学科。

工程力学的内容、理论和研究方法,不仅能为学生进一步学习专业课奠定基础,而且在他们的整个知识结构与能力结构的构筑过程中,起到相当大的作用。从大学生整体知识链来看,力学处于关键部位;从学习基础知识向学习专业知识过渡方面看,力学起着承前启后的桥梁作用;从认识世界的方式看,力学在从抽象思维方式向解决工程实际问题的方式转变过程中起中介作用。由此看来,工程力学不仅对学习专业知识是重要的,而且对开发学生智力,培养学生敏锐的观察能力、丰富的想象能力、科学的思维能力和创新能力以及解决生产实际问题的能力与水平都将产生重大影响。

学习工程力学应注意以下几点:

(1)会听课:要用心去听课,听老师是如何引出概念、如何阐明理论、如何分析问题和解决问题的。这样才能很快抓住知识的要领。

(2)会发问:即要学会提出问题。对新概念、新理论要多问几个“为什么”,弄清新旧知识之间的联系与区别。因为只有深入思考,才能提出问题,而提出问题又能促进更深刻的思考,这样才能领会所学知识。

(3)会总结:学完一章或一篇后,要将主要内容进行提纲挈领的归纳和总结,将课本上的知识变成自己的知识。

(4)会应用:工程力学的知识源于实际,因此也必须用于实际。学习这门课程必须联系实际,要做一定数量的习题。可以说,不联系实际、不做习题是学不好工程力学的。

(5)会创新:学是为了用,而用就是要创新。工程力学产生与发展的历程,就是不断创新的历程。照葫芦画瓢、墨守陈规是学不好工程力学的。只有学会创新,才能把知识变成分析问题与解决问题的能力。

“力学是一门美丽而有用的科学”(伽利略),“工程力学走过了从工程设计的辅助手段到中心主要手段,不是唱配角而是唱主角了”(钱学森)。

第1章 静力学基础

1.1 静力学基本概念

静力学是理论力学的重要组成部分。理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化,包括变形和流动。平衡是机械运动的特殊情况。

理论力学的内容属于古典力学范围。理论力学主要包括三个部分:静力学、运动学和动力学。

古典力学的基本定律是由伽利略和牛顿总结出来的,他们把来自生活和实验的经验系统地表达成了数学的简明形式。实践证明:古典力学理论的定律有着极其广泛的适用性,这些定律就是理论力学的科学根据。

1. 静力学的研究对象

静力学是研究物体在力系作用下处于平衡的规律。

力,物体间相互的机械作用。

力系,作用在物体上的一群力。

平衡,物体机械运动的特殊情况,是指物体相对于某个惯性参照系保持静止或做匀速直线运动。

静力学的力学模型是**刚体**,所以静力学又称为**刚体静力学**。

刚体是指在力的作用下不变形的物体,即刚体内部任意两点间的距离保持不变。

在静力学中,主要研究以下三个问题:

(1) 物体的受力分析

分析所研究物体的受力情况,主要包括受多少个力作用,每个力的大小、作用位置 and 方向。

(2) 力系的等效简化

将作用在物体上的一个力系用另一个与它等效的力系来替代,这两个力系互为**等效力系**。

力系的简化——用最简单的力系等效代替原来较复杂的力系。通过力系的简化,我们可以清楚地、直接地知道力系作用总效应。如果某力系与一个力等效,则

此力称为该力系的合力,而该力系的各力成为此力的分力。

(3) 建立各种力系作用下的平衡条件

研究作用在物体上的各种力系所需满足的平衡条件。

在特殊情况下,若力系满足某些特定的条件,刚体将处于平衡状态,这种特定的条件称为平衡条件。

2. 力的概念

推拉物体时,可以直接意识到“力”的模糊概念。被推拉物体发生运动以及物体滑行时由于摩擦而逐渐变慢,最后停止下来,都反映了力的作用。

力的定义如下:力是物体间的相互机械作用,这种作用使物体的运动状态和形状发生变化。

外效应——使物体的运动状态发生变化的效应。

内效应——使物体形状发生变化的效应。

对刚体来说,只有外效应。

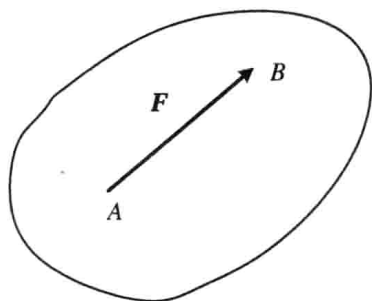


图 1-1

力是矢量,一般地,用字母加上箭头表示矢量(如 $\vec{F}$),或用黑体字母表示(见图 1-1 中 $\mathbf{F}$,本书用黑体字母 $\mathbf{F}$ 表示力矢量),而用普通字母 F 表示矢量的大小; $F=|\mathbf{F}|$,力对物体作用有三要素:大小、方向、作用点。只要其中任意一要素改变,该力对物体作用的效应就可能改变。设力为 $\mathbf{F}$,图中力 $\mathbf{F}$ 是用有向线段 AB 来表示三要素的,线段长度 AB 按一定比例尺表示力的大小,线段的方位加上箭头表示力的方向(方向=方位+指向),力的作用点可选

线段的起点 A 和终点 B 来表示(由作图的方便决定)。线段 AB 所沿的直线为力的作用线。

力的单位:在国际单位制(SI)中,以“N”作为力的基本单位符号,称作‘牛顿’。有时也用“kN”作为力的基本单位符号,称作‘千牛顿’, $1\text{kN}=10^3\text{N}$ 。

1.2 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,经过实践反复检验,被认为是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

公理 1 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:此两力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。

该公理仅适用于刚体。对于变形体,公理1给出的平衡条件仅是必要的,即平衡时,这两个力一定等值、反向、共线;但不充分,即变形体在等值、反向、共线的一对力作用下不一定平衡。

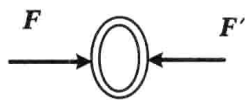


图 1-2

例如,假设橡胶圈上作用有一个等值、反向、共线的力(见图1-2),则橡胶圈是否平衡取决于:

- ① 它是否处于变形过程中;
- ② 它是否破坏。

刚体上二点各受一个集中力作用而平衡的刚体称为**二力体**,该刚体为一构件时称为**二力构件**;该刚体为一杆件时称为**二力杆**(注意,二力杆不一定为直杆,如图1-3(a)、(b)所示)。

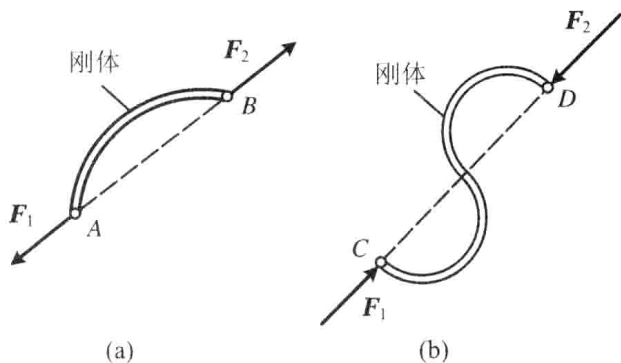


图 1-3

公理2 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。

公理3 力的平行四边形法则

作用于物体上同一点的两个力可以合成为一个合力,合力也作用于该点,合力的大小和方向由原两力的力矢量为邻边组成的平行四边形的对角线矢量来表示;或者说,合力矢等于这两个分力矢的几何和(见图1-4(a))。即

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

也可另作一力三角形,求两汇交力合力的大小和方向(即合力矢),注意,合力的大小和方向和各个分力相加的次序是无关的,见图1-4(b)、(c)。

公理4 作用和反作用定律

任何物体间相互作用的一对力总是等值、反向、共线,分别作用于相互作用的两个物体上。

注意:公理4和公理1都有一对等值、反向、共线的力,但它们是根本不同的,公理4中的一对力(作用力和反作用力)是作用在不同的物体上(不一定是刚体),

而公理 1 的一对力是作用在同一刚体上。

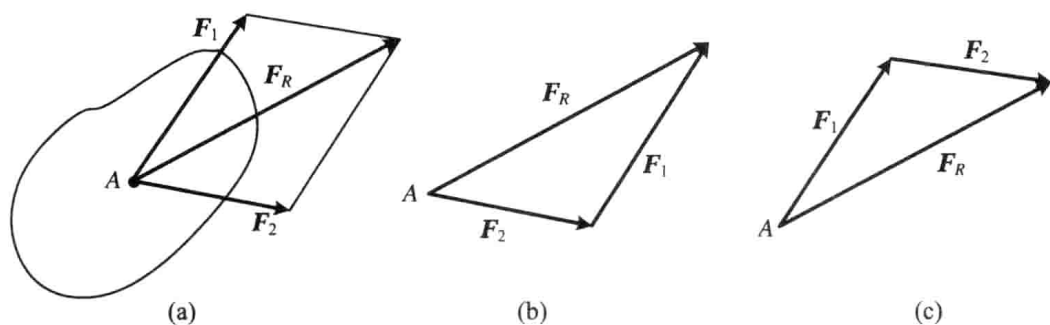


图 1-4

公理 5 刚化原理

当变形体在已知力系作用下处于平衡时,如果把变形后的变形体换成刚体(刚化),则平衡状态保持不变。

注意:这个公理提供了把变形体看做为刚体模型的条件。变形体的平衡条件中包括了刚体的平衡条件。因此可以把任何已处于平衡状态的变形体看成刚体,而对它应用刚体静力学的全部理论,这就是该公理的意义所在。

推论 1 力的可传性

作用在刚体上某点的力,可以沿着其作用线移到刚体内任意一点,而不改变该力对刚体的作用效果。(见图 1-5 其中 $F=F_1=F_2$)

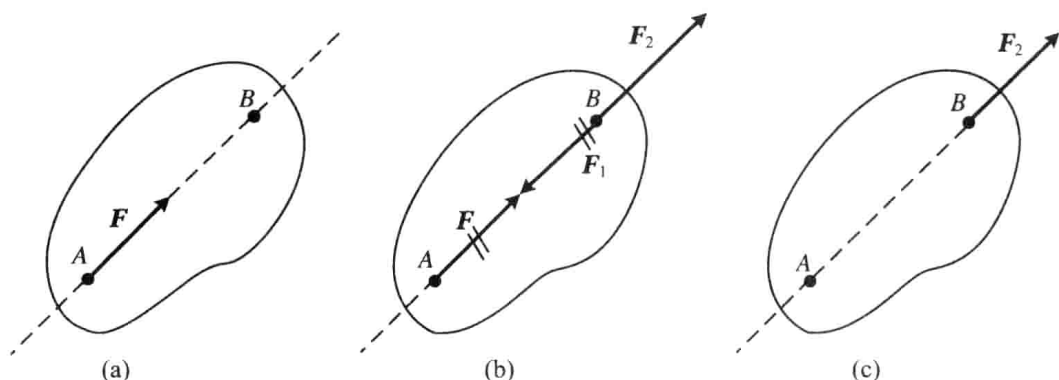


图 1-5

比如,水平推车与拉车效果是相同的。所以作用于刚体上的力的三要素是:大小、方向、作用线。可见,作用于刚体上的力为滑动矢量。

推论 2 三力平衡汇交定理

当刚体受到同平面内作用线不平行的三个力作用而平衡时,这三个力的作用线必定汇交于一点。

如图 1-6 所示物体受三力作用而平衡, 设 F_1 、 F_2 两力的作用线汇交于点 O , F_{12} 为 F_1 和 F_2 的合力, 由平衡条件和公理一, F_{12} 和 F_3 必定共线, 即 F_3 过 O 点(三力汇交)。

注意:

(1) 定理仅充分性成立, 平衡时, 不平行的三力必汇交。但必要性不成立, 即不平行三力汇交时, 不一定平衡。

(2) 三力汇交定理可用于确定一个未知力的方位。

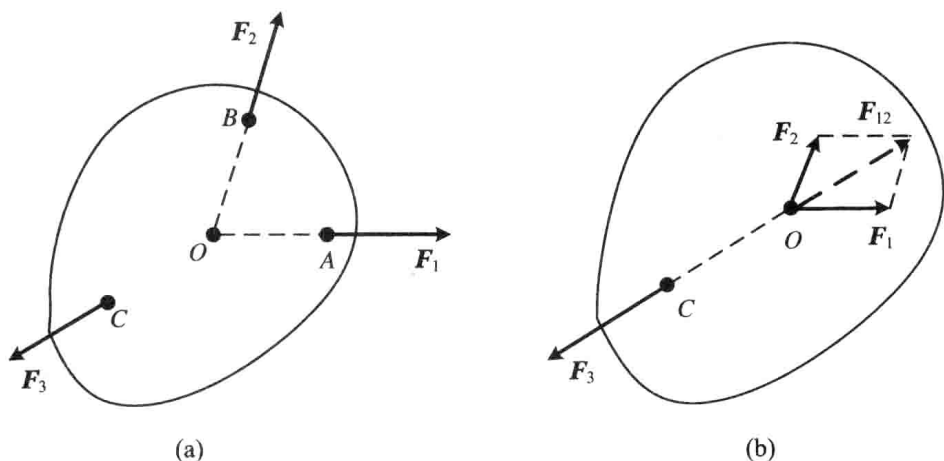


图 1-6

1.3 约束和约束反力

在空间可以自由运动而获得任意方向位移的物体称为**自由体**, 例如在天空中的飞机, 宇宙飞船等。位移受到周围其它物体限制, 不能沿着某些方向运动的物体称为**非自由体**或**受约束体**。

对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为**约束**。因为约束限制了物体的运动, 约束对物体就有作用力, 这种作用力称为**约束反作用力**(简称**约束反力**或**反力**)。能够使物体运动或有运动趋势的力称为**主动力**, 一般情况下, 约束反力是因主动力的作用而引起的, 所以约束反力也称为**被动力**, 它随主动力变化而变化, 一般当主动力不存在或者为零时, 相应的约束反力也不存在或者为零, 但反之不然。

在静力学中的主动力往往是给定的, 而约束反力是未知的, 因此对于约束反力的分析就成了受力分析的重点。因为约束反力是限制物体运动的, 所以约束反力的作用点应在约束和被约束物体相互接触之处, 它的方向应与约束所能限制的运

动方向相反,其大小总是未知的。物体之间相互接触,力总是分布在一定的接触面上,这时约束反力是一个分布力系,理论力学知识仅仅可以计算出这分布力系的总效应。如果接触面积很小,则可近似地看成点接触,此时反力为集中力。

通常,约束有两种分类方法,一是按约束构件分类,二是按约束自由度数分类。

1. 按约束构件分类

(1) 柔性体约束

由绳索、链条、皮带、钢丝绳等所构成的约束统称为**柔性体约束**,简称**柔索**。

约束的特点:只能承受拉力,不能承受压力和抗拒弯曲,只能限制物体沿柔性体伸长的方向运动。

约束反力的特点:只能是拉力,作用在连接点或假想截割处,方向沿着柔性体轴线而背离物体,常用 F_T 表示。(如图 1-7(a)、(b))

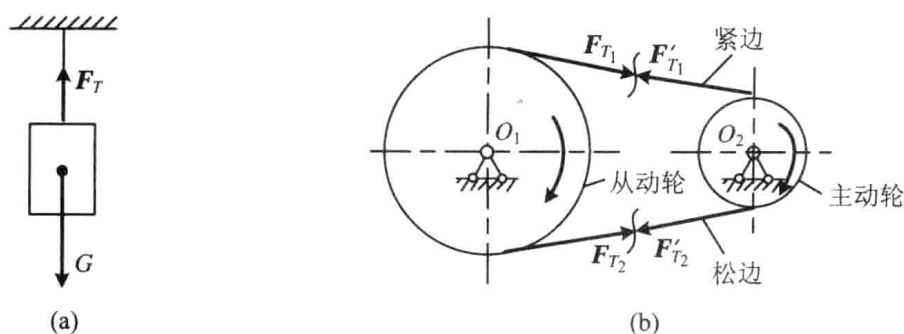


图 1-7

(2) 光滑接触面约束

物体与约束的接触面是光滑的,即它们间的摩擦可以忽略。

约束的特点:无论支承接触面形状如何,约束只能承受压力,不能承受拉力。只能限制物体沿接触面公法线方向的运动,故约束力沿着两接触面公法线方向。

反力的特点:只能是正压力,作用于接触点处,方向沿着接触表面在接触点处的公法线而指向物体,常用 F_N 表示,称为法向反力。(如图 1-8(a)、(b)、(c)所示, n 为公法线方向, τ 为切线方向)

(3) 光滑圆柱铰链约束

圆柱形铰链简称**圆柱铰**,这类约束由**圆柱形销钉**插入二构件的圆柱孔而构成。

约束特点:只能限制物体沿圆柱形销钉任意径向的相对移动,不能限制物体绕圆柱形销钉轴线的转动和平行于圆柱形销钉轴线的移动(平面问题中不考虑这种移动),由于圆柱形销钉和圆柱孔是光滑曲面接触(如图 1-9(a)),故某一构件所受到的约束反力应沿接触点处的公法线并指向物体。由于接触点的位置是由主动力决定的,因此,反力的方向总是不定的。

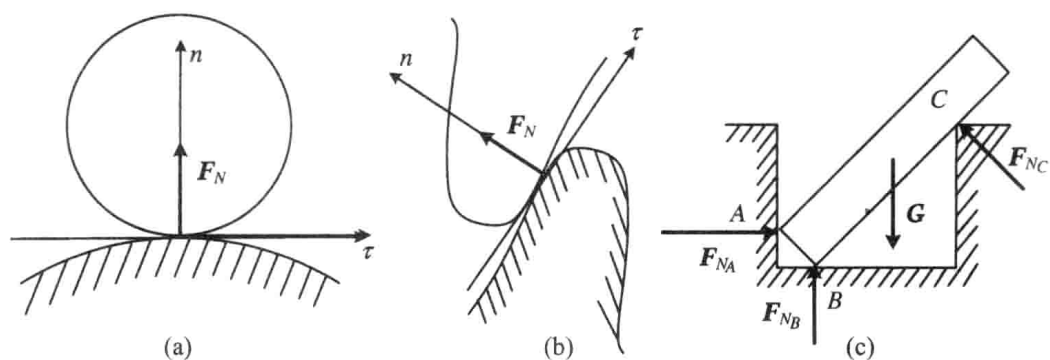


图 1-8

反力的特点:光滑圆柱铰链的反力只能为压力,作用在垂直于圆柱形销钉轴线的平面内,且通过圆柱形销钉中心,方向不定,通常用通过轴心的两个大小未知的正交分力 F_x 、 F_y 来表示(如图 1-9(b))。

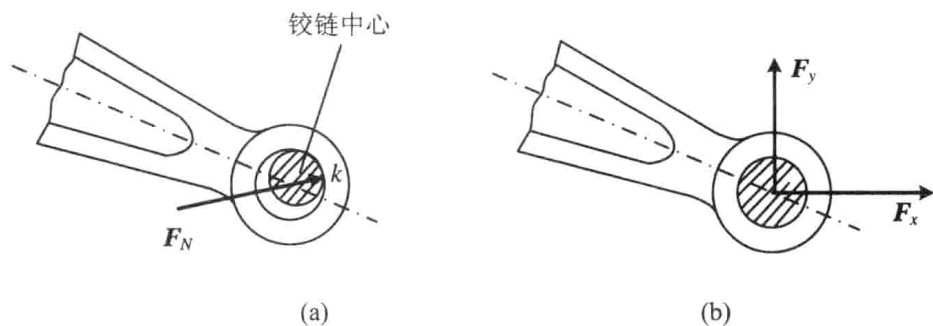


图 1-9

下面介绍几种不同的光滑圆柱铰链约束。

① 固定铰链支座:某一个构件圆孔端固定不动而形成的支座(如图 1-10(a)、(b))。

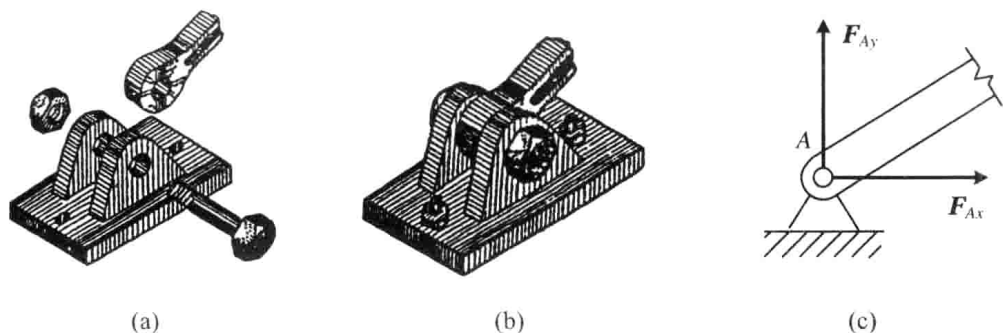


图 1-10