

21 世纪高等教育规划教材

工程力学

莫宵依 主编

TP13



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高等教育规划教材

工 程 力 学

主编 莫宵依

参编 解 敏 马 凯 李智慧
黎明安 何钦象 师俊平



机 械 工 业 出 版 社

本书涵盖了静力学和材料力学的部分内容,内容精炼,例题充分、全面,习题由浅入深,包含大量工程实际问题。

本书共 14 章,包括静力学基础、汇交力系、力偶理论、平面一般力系、空间一般力系和重心、轴向拉伸与压缩、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形及简单超静定梁、应力状态和强度理论、组合变形时杆件的强度计算、压杆稳定、动载荷与交变应力。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 ajiang2001@sina.com 索取。

本书可作为高等学校工科本科非机、非土类各专业中少学时工程力学的教材,也可供高职高专与成人高校师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/莫宵依主编. 北京:机械工业出版社,2010.6
21 世纪高等教育规划教材
ISBN 978-7-111-30916-1

I. ①工… II. ①莫… III. ①工程力学—高等学校—教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 104836 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:姜 凤 责任编辑:姜 凤

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:路恩中 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2010 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·18.75 印张·361 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-30916-1

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在西安理工大学编写的《工程力学》讲义的基础上改编而成。《工程力学》讲义自 2000 年起在校内使用，至今已用了十年，学生和教师对该讲义评价较好，认为该讲义符合工程力学课程的教学要求，且适合学生使用。

本书从章节安排到教材内容，具有深入浅出、由普通到特殊的讲述特征，内容精炼、翔实，例题充分、全面，习题由浅入深，包含大量工程实际问题，题量丰富，可供选择的范围大，具有理论联系实际的特点。本书在保证课程内容体系完整、课程基本要求不降低的前提下，删繁就简，在很多章节中，尽量用较少、较简单的论述说明问题，这样可以达到既节约学时又不降低对内容掌握要求的目的。本书符合大多数工科院校开设工程力学课程的要求，适合于普通高等学校的工程力学教学。

参加本书编写的有马凯（第 1、3、4 章）、师俊平（第 5 章）、黎明安（第 6 章）、李智慧（第 6、7 章）、何钦象（第 8 章）、解敏（第 9、10 章）、莫宵依（第 2、11、12、13、14 章、附录），并由莫宵依担任主编。

西北工业大学的支希哲教授和苟文选教授对书稿进行了认真、细致的审阅，并提出了许多宝贵的意见。特此致谢。

西安理工大学的刘协会老师在本书的编写过程中，给予了极大的帮助和支持。在《工程力学》讲义使用期间，西安理工大学工程力学系的全体教师，对讲义中存在的问题及不足之处提出了许多中肯的意见，特别是王忠民老师对本书的修改提出了一些有益的建设性意见。在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2010 年 4 月

目 录

前言

引言	1
----------	---

第一篇 静 力 学

第 1 章 静力学基础	5
1.1 静力学的基本概念	5
1.2 静力学公理	6
1.3 约束和约束力	8
1.4 受力分析与受力图	10
习题	12
第 2 章 汇交力系	15
2.1 汇交力系合成的几何法	15
2.2 汇交力系合成的解析法	16
2.3 汇交力系的平衡条件	18
习题	24
第 3 章 力偶理论	28
3.1 力对点之矩 汇交力系的合力矩定理	28
3.2 力偶及其性质	30
3.3 力偶系的合成与平衡	33
习题	36
第 4 章 平面一般力系	39
4.1 力的平移定理	39
4.2 平面一般力系向作用面内一点简化	40
4.3 简化结果分析	43
4.4 平面一般力系的平衡条件及平衡方程	46
4.5 物体系统的平衡	50
4.6 考虑摩擦时的平衡问题	55
习题	61
第 5 章 空间一般力系和重心	68
5.1 力对轴之矩	68
5.2 力对轴之矩与力对点之矩的关系	69
5.3 空间一般力系向任意点简化及其结果的讨论	70

5.4 空间一般力系的平衡条件及其应用	73
5.5 平行力系的中心与重心	77
习题	82

第二篇 材料力学

第6章 轴向拉伸与压缩	89
6.1 轴向拉伸与压缩的概念	89
6.2 轴向拉伸与压缩杆件的内力	90
6.3 轴向拉压杆截面上的应力	93
6.4 轴向拉压时的变形 胡克定律	95
6.5 拉伸和压缩时材料的力学性能	100
6.6 轴向拉伸与压缩时的强度计算	106
6.7 拉(压)超静定问题	110
6.8 应力集中的概念	114
6.9 剪切与挤压的实用计算	115
习题	120
第7章 扭转	126
7.1 扭转的概念	126
7.2 外力偶矩的计算 扭矩和扭矩图	126
7.3 薄壁圆筒的扭转 切应力互等定理 剪切胡克定律	128
7.4 圆轴扭转时的应力和变形	131
7.5 圆轴扭转时的强度和刚度计算	135
7.6 非圆截面杆扭转简介	138
习题	139
第8章 弯曲内力	142
8.1 对称弯曲的概念 梁的计算简图	142
8.2 剪力和弯矩	144
8.3 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	147
8.4 弯矩、剪力与分布载荷集度之间的关系	150
习题	153
第9章 弯曲应力	156
9.1 梁横截面上的正应力	156
9.2 弯曲正应力的强度条件及其应用	160
9.3 弯曲切应力	163
9.4 弯曲切应力强度条件	167
9.5 提高梁弯曲强度的一些措施	169
习题	171
第10章 弯曲变形与简单超静定梁	177

10.1	梁的变形和位移	177
10.2	梁的挠曲线近似微分方程及其积分	178
10.3	叠加法求梁的转角和挠度	184
10.4	梁的刚度校核 提高梁刚度的一些措施	188
10.5	简单超静定梁的解法	191
	习题	194
第 11 章	应力状态和强度理论	198
11.1	应力状态的概念	198
11.2	平面应力状态的应力分析	199
11.3	三向应力状态的最大应力	205
11.4	广义胡克定律	206
11.5	强度理论的概念	208
11.6	常用的四个强度理论	208
	习题	213
第 12 章	组合变形时杆件的强度计算	216
12.1	组合变形概述	216
12.2	拉伸(压缩)与弯曲组合时杆件的强度计算	217
12.3	弯曲与扭转组合变形时杆件的强度计算	222
	习题	225
第 13 章	压杆稳定	228
13.1	压杆稳定性的概念	228
13.2	细长压杆的临界力	229
13.3	欧拉公式的应用范围 临界应力总图	231
13.4	压杆稳定性的校核	233
13.5	提高压杆稳定性的措施	236
	习题	237
第 14 章	动载荷与交变应力	240
14.1	概述	240
14.2	考虑惯性力时构件的应力计算	240
14.3	冲击应力计算	242
14.4	交变应力下材料与构件的疲劳极限	245
	习题	251
附录		254
附录 A	平面图形的几何性质	254
附录 B	型钢表	265
附录 C	部分习题答案	284
参考文献		294

引 言

一、工程力学的任务

如图 I-1 所示为支撑重物的三角托架。为设计这个结构，从力学计算的角度来说，包括两方面的内容。

首先，必须确定作用在各个构件（ AB 杆及 BC 杆）上力的大小和方向，概括地说就是对处于平衡状态的物体进行受力分析，这正是静力学所要研究的问题。其次，在确定了作用在构件上的外力以后，还必须为构件选用合适的材料、选用合理的截面形状和尺寸，以保证构件既能安全可靠地工作又满足经济要求（安全可靠地工作即要求构件有足够的强度、刚度、稳定性），这些则是材料力学所要讨论的问题。

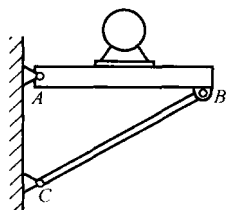


图 I-1

工程力学的任务就在于为各类工程结构的力学计算提供基本的理论和方法。

二、工程力学的研究方法

由观察和实验可知，在外力作用下，任何物体均会变形。在工程中通常把各构件的变形限制在很小的范围内，它与构件的原始尺寸相比是微小的。所以，在研究物体的受力分析、平衡问题时，把物体看成是不变形的刚性物体。但在研究构件的强度、刚度、稳定性问题时，变形成为不可忽略的因素，于是就将物体看成连续、均匀、各向同性的变形固体。

研究不同的问题，必须采用不同的力学模型，这是研究工程力学问题的重要方法。

第一篇

静力学

静力学研究物体在力系作用下的平衡问题。

本篇主要研究以下三个问题：

1. 物体的受力分析 研究一物体与周围其他物体之间的关系，将其从周围物体中分离出来，分析其上所受的力。这些力包括主动力（例如重力）和约束力。受力分析的关键在于约束力的分析。

2. 力系的简化 力系指作用在物体上的一群力。如果作用在物体上的力系可用另一力系代替而不改变其作用效果，称为力系的等效替换。用简单的力系等效替换一个复杂的力系，称为力系的简化。

3. 力系的平衡条件及其应用 物体处于平衡状态时，作用于其上的力系所必须满足的条件，称为力系的平衡条件。应用这些平衡条件，即可解决工程实际中的静力平衡问题。

第 1 章 静力学基础

1.1 静力学的基本概念

平衡 平衡是物体机械运动的特殊形式，是指物体相对地球处于静止或作匀速直线运动的状态。一般工程技术问题，是取固结于地球的坐标系作为参考系来进行研究，实践证明，所得到的结果具有足够的精确度。

刚体 任何物体受力总要产生一些变形。但是，工程实际中的机械零件和构件在正常情况下的变形，一般是很微小的。微小的变形对物体的机械运动影响极小，可以略去不计，即把物体看做是不变形的，从而使问题的研究得以简化。这种在受力情况下保持形状和大小不变的物体通常称为刚体。刚体是依据所研究问题的性质抽象出来的理想化的力学模型。当变形这一因素在所研究的问题中不可忽略时，就必须采用变形体作为力学模型。

力 人们在长期的生活和生产实践中，逐步形成了力的概念。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，并使物体产生变形。力使物体运动状态发生改变的效应，称为力的外效应。力使物体变形的效应，称为力的内效应。本书第一篇研究力的外效应，第二篇研究力的内效应。

力对物体的作用效应取决于三个要素，即力的大小、力的方向和力的作用点。因此，力是矢量，且是定位矢量，可用有向线段表示，如图 1-1 所示。通过力的作用点，沿力的方向引直线，该直线表示力在空间的方位，称为力的作用线。在作用线上截取有向线段 AB ，线段的长度按一定比例表示力的大小；线段的起点 A （或终点 B ）表示力的作用点。在本书中用

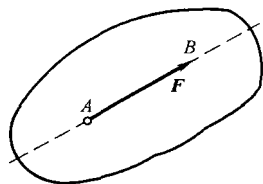


图 1-1

黑体字表示矢量，如 $\mathbf{F}$ ；矢量的大小（模）则用同形的普通字母表示，如 F 。本书采用国际单位制。在国际单位制中，力的单位是牛（N）或千牛（kN）。

通常，作用在物体上的力不止一个，而是许多个，即一个力系。若一力系作用于刚体并使其相对于地球处于静止或匀速直线运动状态，则认为刚体处于平衡状态，且该力系是平衡力系。如果作用在刚体上的一力系用另一力系来替换，并不改变刚体原来的运动状态，那么，此二力系是等效力系。当一力与一力系等效时，称此力为该力系的合力。

1.2 静力学公理

静力学公理是人们在长期的实践活动和实验观察中总结出来的最基本的力学规律。它无须证明而为人们所公认。力系简化和力系的平衡是以静力学公理为基础的。

公理一（二力平衡公理） 作用在刚体上的两个力，使刚体处于平衡的必要与充分条件是：两个力大小相等，方向相反，且作用在同一直线上。

二力平衡公理表明了作用于刚体上的最简单的力系平衡时所应满足的条件。它是推导力系平衡条件的基础。

工程中常有一些只受两个力作用而平衡的构件，称为二力构件。根据公理一，该两力的方向，必定沿两力作用点的连线（图 1-2）。

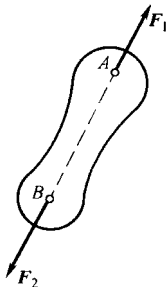


图 1-2

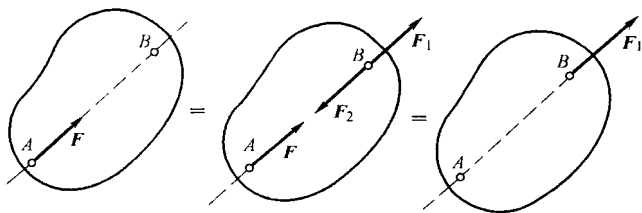


图 1-3

公理二（加减平衡力系公理） 在作用于刚体的力系上，加上或减去任意个平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用效应。

加减平衡力系公理是力系简化的重要依据。

推论 1（力的可传性原理） 作用于刚体的力可沿其作用线滑移至刚体内任一点，而不改变该力对于刚体的作用效应。

证明：参看图 1-3。设力 F 作用于刚体上点 A 。在刚体内力 F 作用线上任选一点 B ，在点 B 加一对平衡力 F_1 和 F_2 ，并使 $F_1 = -F_2 = F$ 。因为 (F_1, F_2) 是平衡力系，由公理二，力系 (F, F_1, F_2) 与力 F 等效。 F 与 F_2 二力等值、反向、共线，构成一平衡力系；减去该平衡力系，由公理二知，力 F_1 与力系 (F, F_1, F_2) 等效。从而有力 F 与力 F_1 等效。因为力 F_1 的大小、方向均与力 F 相同，且此二力等效，这相当于将力 F 沿其作用线从点 A 滑移至点 B ，而不改变原力对刚体的作用效应。

力的可传性原理指出，作用于刚体的力矢可沿其作用线任意滑动，因而对于刚体而言，力是滑动矢量。力的三要素成为力的大小、方向、作用线。

公理三（力的平行四边形公理） 作用在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，其大小和方向可由以这两个力为邻边所构成的平行四边形的共点对角线确定。

在图 1-4a 中，设力 F_1 和 F_2 作用于物体的点 A，以 F_R 表示其合力，则有

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

即合力矢 $\mathbf{F}_R$ 等于两个分力矢 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 的矢量和。

为求合力的大小和方向，在图 1-4b 中，作矢量 $\overrightarrow{ab}$ 表示力矢 $\mathbf{F}_1$ ，再从力矢 $\mathbf{F}_1$ 的终点 b 作矢量 $\overrightarrow{bc}$ 表示力矢 $\mathbf{F}_2$ ，则矢量 $\overrightarrow{ac}$ 即表示合力 $\mathbf{F}_R$ 的大小和方向。此种求合力矢的方法称为力三角形法则，其实质就是平行四边形公理。

力的平行四边形公理是力系简化的重要依据。

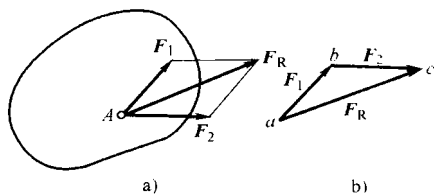


图 1-4

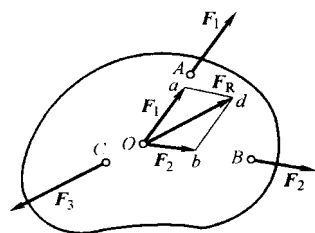


图 1-5

推论 2（三力平衡汇交原理） 当刚体受三力作用而平衡时，若其中任何两力的作用线相交于一点，则此三力必然共面，且第三个力的作用线通过汇交点。

证明：见图 1-5。设刚体的 A、B、C 三点分别作用有互不平行的力 F_1 、 F_2 、 F_3 ，力 F_1 、 F_2 的作用线相交于点 O；刚体在此三力作用下处于平衡状态。将力 F_1 、 F_2 滑移至点 O，并合成为一力 F_R 。于是力系 (F_1, F_2, F_3) 与力系 (F_R, F_3) 等效。因为力系 (F_1, F_2, F_3) 是平衡力系，故力系 (F_R, F_3) 必为平衡力系。根据公理一， F_R 与 F_3 在同一直线上，即力 F_3 的作用线也通过汇交点 O；由力的平行四边形公理，可知力 F_3 与力 F_1 、 F_2 共面。

公理四（作用与反作用定律） 两个物体间的相互作用力，总是大小相等，作用线相同，指向相反，且分别作用在这两个物体上。

在分析多个物体组成的物体系统的受力时，这个公理是从一物体受力过渡到另一物体受力的依据。

公理五（刚化公理） 如果变形体在某力系作用下平衡，若将此物体刚化为刚体，其平衡不受影响。

工程实际中的物体是变形体，变形体能否使用刚体的平衡条件？刚化原理回答了这个问题。只要变形体受力后处于平衡，则作用于其上的力系一定满足

刚体的平衡条件。需要注意的是,对于变形体而言,刚体的平衡条件只是必要的,而不是充分的。例如,一段绳子在两端受到等值、反向、共线两拉力而不是两压力的作用时才会处于平衡。

1.3 约束和约束力

位移不受任何限制的物体称为自由体,例如在空中飞行的飞机。在某些方向的位移受到限制的物体称为非自由体。在轨道上行驶的火车是非自由体,因为它受到轨道的限制,只能沿轨道运行。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束。约束对被约束物体的作用力,称为约束力。约束力作用在被约束物体与约束的接触处,其方向总是与约束所能限制的被约束物体的位移方向相反。

下面介绍几类常见的约束及其约束力的特点。

1. 柔性约束 工程实际中的柔软缆绳、皮带、钢丝绳、链条等类物体统称为柔索。由它们构成的约束称为柔性约束。柔索只能承受拉力,因而只能阻止物体沿柔索伸长方向的运动;于是,柔性约束的约束力作用

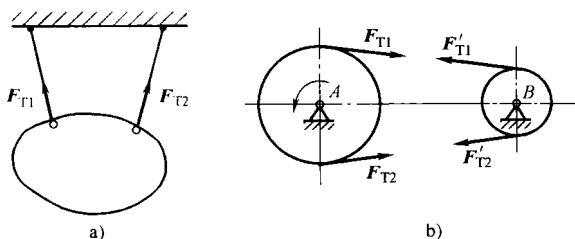


图 1-6

于柔索与被约束物体的连接点,其方向沿着柔索而背离被约束的物体(图1-6)。

2. 理想光滑接触构成的约束

当两物体接触面之间的摩擦力小到可以忽略不计时,就可把接触面(线)看做理想光滑的。光滑接触约束只能阻止物体沿接触处公法线指向约束方向的运动。于是,光滑接触的约束力通过接触点,沿着接触点处的公法线,指向被约束的物体,如图1-7。

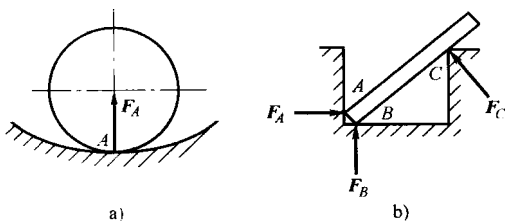


图 1-7

3. 光滑圆柱铰链约束 两个构件在连接处的相同圆孔中插入圆柱形销钉连接起来所形成的结构称为圆柱形铰链结构。在图1-8a中,曲柄OA和连杆AB的连接,连杆AB和滑块B的连接,都是圆柱形铰链连接。图1-8b说明了A处圆柱形铰链的构造。在铰链连接中,圆柱形销钉限制了构件的运动;如果忽略

摩擦, 销钉和圆孔成为光滑接触, 于是构成了光滑圆柱铰链约束。按照光滑接触约束的特点, 销钉作用于构件的约束力通过两者的接触点, 沿接触处公法线, 指向构件。显然, 约束力在垂直于构件销孔轴线的横截面内, 且通过销孔中心。图 1-8c 中, F_A 表示销钉作用于构件的约束力, A 为孔心, K 为构件与销钉的接触点。一般而言, 由于接触点的位置无法预先确定, 所以, 铰链约束力的方向不能预先确定。在受力分析中, 一般将铰链约束力用通过构件销孔中心的两个大小未知的正交分力来表示, 如图 1-8d 中所示的 F_{Ax} 、 F_{Ay} 。

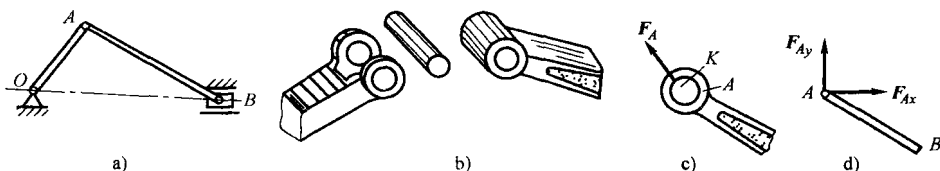


图 1-8

使用光滑圆柱销钉将构件或结构与固定支座连接, 则构成固定铰支座, 如图 1-9a 所示。图 1-9b、c 是固定铰支座的两种简化表示。固定铰支座约束的性质与铰链连接中的铰链约束一样。通常将固定铰支座的约束力表示为相互正交的两个分力, 如图 1-9d 所示。

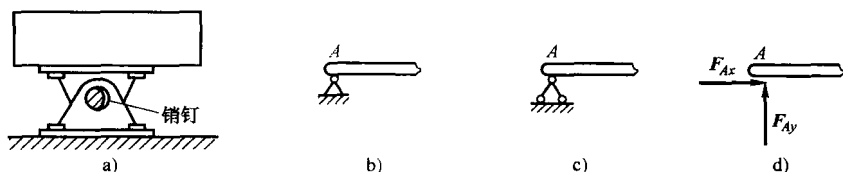


图 1-9

如果在铰链支座底部和支承面之间安装一排滚轮, 就构成辊轴支座, 也称为活动铰支座, 如图 1-10a 所示。辊轴支座的几种简化表示分别示于

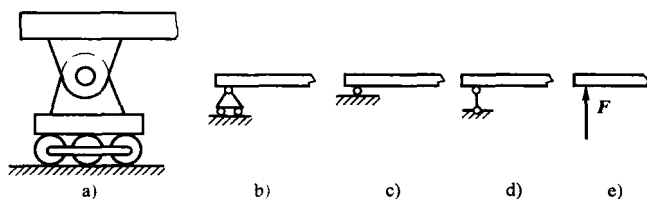


图 1-10

图 1-10b、c、d。如果接触面是光滑的, 则辊轴支座不限制物体沿支承面方向的运动, 只限制物体垂直于支承面方向的运动。因此, 辊轴支座的约束力通过销孔中心, 且垂直于支承面, 如图 1-10e 所示。

两端用光滑铰链与其他物体相连, 并且中间不受任何外力作用的刚杆称为链杆。它常被用来作为撑杆或拉杆而形成链杆约束, 如图 1-11a 中的 BC 撑杆。

显然, 链杆是二力杆; 所以, 链杆约束的约束力沿着两端铰链中心的连线, 是拉力或者是压力, 例如图 1-11b 中的 BC 杆的受力。在图 1-11c 中, 链杆 BC 对所连接物体 AB 的约束力的方向, 也必定沿连线 BC 。

4. 光滑球形铰链约束 光滑球形铰链约束是一种空间类型的约束, 其结构简图及简化表示分别见图 1-12a、b。一个物体的球形窝内放入另一物体的球形部分, 球窝和球的直径相差甚小, 忽略摩擦, 就构成了光滑球形铰链约束。根据光滑接触约束力的特点, 球窝作用于球的约束力通过球心。由于球与球窝的接触点未定, 故约束力的空间方位不定, 因而, 通常用通过球心的三个正交分力来表示, 如图 1-12c 所示。

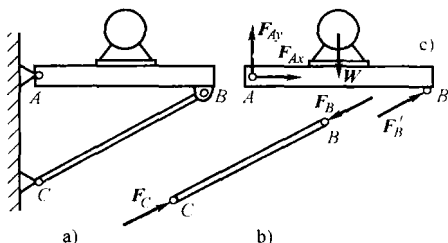


图 1-11

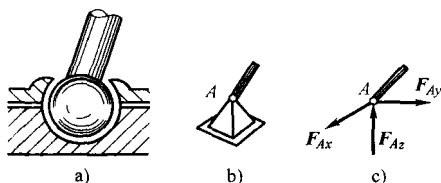


图 1-12

除上述几类约束之外, 还有其他类型的约束, 例如固定端约束等, 这将在后序的章节中予以介绍。

1.4 受力分析与受力图

在受力分析时, 需将受约束的物体 (研究对象) 从它周围的物体中分离出来, 此过程称为解除约束。在解除约束的同时, 应代之以相应的约束力。约束力是未知的。研究对象上除作用有约束力外, 通常还承受某些种类的载荷, 例如承受重力、油压力、风力等。这些载荷使物体产生运动或使物体产生运动趋势, 称其为主动力。主动力一般是已知的。所谓受力分析就是分析被研究物体上所受的全部主动力和约束力, 并把分析结果用受力图清晰地表示出来。根据问题的已知条件和要求的内容, 恰当地选择一个物体或几个物体组成的系统作为研究对象, 并将研究对象从周围物体中分离出来, 画出其外形简图, 这个过程称为取研究对象或取分离体。研究对象与周围物体的连接关系确定了约束类型, 也就确定了约束力的特征。画有研究对象及其所受的全部力 (包括主动力和约束力) 的简图, 称为受力图。

在静力平衡问题中, 将依据受力图和平衡条件, 利用作用于研究对象上的主动力确定作用于其上的未知约束力的大小和指向。