

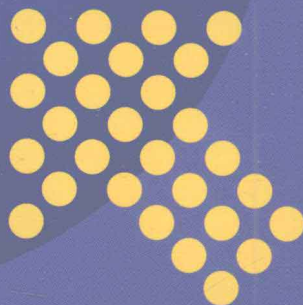
21世纪高等学校规划教材



JIXIE YINGYONG JICHU

机械应用基础

贾玉梅 主 编
闫莉敏 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

21世纪高等学校规划教材



JIXIE YINGYONG JICHU

机械应用基础

主 编 贾玉梅
副主编 闫莉敏
编 写 杨殿文 刘 冰 石向东 陶然峰
主 审 侯德华

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。本书根据高等职业教育特点,把基础课程进行有机整合,是一本综合性教材。内容突出实践性,淡化理论推导。全书共分 12 章,主要内容包括:构件的受力及其力的平衡规律、平面机构的组成及结构、常用机构、构件的基本变形与强度计算、连接、带传动与链传动、齿轮传动、轮系传动、轴、轴承、联轴器和离合器、减速器。每章后有小结、思考题及习题。

本书可作为高职教育机电类或近机类专业的通用教材,还可作为职业学校(含中职、职高、成人职业教育)非机类或近机类专业教材或岗位培训教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械应用基础/贾玉梅主编. —北京:中国电力出版社,2010
21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-9759-7

I. ①机… II. ①贾… III. ①机械学-高等学校-教材
IV. ①TH11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 214518 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 347 千字

定价 24.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书是为适应高等职业院校 21 世纪应用性人才培养要求而编写的,内容适应教学的需要,满足各种机电类和近机类专业对机械知识的需求,教学学时在 80~90 学时之间。

在本书编写过程中,充分吸取了各院校高职课程改革的经验,力争体现高职教育特点,把理论力学、材料力学、机械原理、机械零件等内容进行有机的整合,成为机械基础知识模块。主要有以下特点:

(1) 着重对非机类专业所需机械工程基础知识进行介绍,内容全面,综合性强,满足了机类专业对机械知识的需求。

(2) 本着“适度、够用”的原则,对各部分内容进行了适当筛选,对理论性较深的推导过程予以省略,尽可能适应实用的需要。

(3) 教材文字简明、内容精炼、知识面宽,采用简明易懂的插图,如立体图、结构简图等,以便于学生对教材内容的理解。

(4) 注重各部分知识的联系,前后内容互相呼应,保证了知识的连续性、系统性。

(5) 书中物理量单位及图形符号均采用最新国家标准。

本书由包头职业技术学院贾玉梅担任主编,闫莉敏担任副主编。本书绪论、第 1、2 章由贾玉梅编写,第 3、8 章由杨殿文编写,第 4 章由陶然峰编写,第 5、10、12 章由包头铁道职业技术学院刘冰编写,第 6、9、11 章由闫莉敏编写,第 7 章由石向东编写。

本书由包头职业技术学院侯德华副教授主审,主审老师提出宝贵意见和建议,在此表示感谢。

由于编者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2009 年 9 月

目 录

前言	
绪论	1
第 1 章 构件的受力及其力的平衡规律	4
1.1 力的概念与静力学基本公理	4
1.2 约束与约束反力	6
1.3 物体的受力分析	8
1.4 平面汇交力系	10
1.5 力矩与力偶	12
1.6 平面一般力系	15
1.7 摩擦	18
1.8 空间力系	21
小结	25
思考题	26
习题	28
第 2 章 平面机构的组成及结构	33
2.1 平面机构和运动简图	33
2.2 机构具有确定运动的条件	35
小结	39
思考题	39
习题	40
第 3 章 常用机构	42
3.1 平面连杆机构	42
3.2 凸轮机构	50
3.3 间歇机构	56
小结	60
思考题	60
第 4 章 构件的基本变形与强度计算	62
4.1 轴向拉伸与压缩	62
4.2 剪切与挤压	70
4.3 圆轴扭转	72
4.4 直梁的平面弯曲	76
4.5 组合变形的强度计算	86
小结	89
思考题	90

习题	92
第 5 章 连接	97
5.1 键连接和销连接	97
5.2 螺纹连接	102
小结	109
思考题	109
习题	109
第 6 章 带传动与链传动	110
6.1 带传动	110
6.2 链传动	123
小结	127
思考题	127
习题	127
第 7 章 齿轮传动	128
7.1 齿轮传动的特点和类型	128
7.2 渐开线直齿圆柱齿轮	129
7.3 渐开线齿廓的啮合特性	133
7.4 渐开线直齿圆柱齿轮的加工方法与根切现象	136
7.5 轮齿的失效形式与材料选择	139
7.6 直齿圆柱齿轮传动的强度计算	142
7.7 斜齿圆柱齿轮传动	150
7.8 齿轮的结构设计	153
7.9 其他齿轮传动的特点和应用	155
7.10 传动装置的润滑	157
小结	158
思考题	159
习题	160
第 8 章 轮系传动	163
8.1 轮系的类型	163
8.2 定轴轮系的传动比计算	164
8.3 周转轮系的传动比计算	165
8.4 混合轮系	167
8.5 轮系的应用	167
小结	169
思考题	170
习题	170
第 9 章 轴	173
9.1 轴的类型与材料	173
9.2 轴的结构设计	175

9.3 轴的失效形式和设计轴的基本要求	179
9.4 轴的强度计算	180
小结	185
思考题	185
习题	186
第 10 章 轴承	187
10.1 滑动轴承概述	187
10.2 滚动轴承	193
小结	209
思考题	209
习题	209
第 11 章 联轴器和离合器	211
11.1 联轴器	211
11.2 离合器	215
小结	217
思考题	217
第 12 章 减速器	218
12.1 减速器的类型和特点	218
12.2 减速器的结构	219
小结	221
参考文献	222

绪 论

一、引言

机械存在于人类活动的各个领域,它是人类进行生产劳动的主要工具,也是创造人类文明的重要组成部分,它的发展程度标志着国家的整体科技水平,也是当今科技高速发展的基础。

早在古代,人类就应用杠杆、滚子和绞盘等简单机械从事建筑和运输的劳动。到 18 世纪中叶,蒸汽机的发明促进了产业革命,出现了原动机、工作机组成的近代机器。从此,机器有了迅猛的发展。

随着科学技术的进步,机械制造的面貌在不断发生变化,新工艺和新材料的出现对机电产品的发展起着巨大的推动作用。随着电子、计算机、原子能、通信等技术的飞速发展,大量的新机器也从传统的纯机械系统发展成为光机电一体化化的机械设备。先进的机械设计、机械制造方法给机械行业的发展创造了新机。为了更好地运用、研究和设计机械,对于机械工程技术人员而言,学习和掌握一定的机械设计基础知识是非常重要的。

二、本课程的性质、任务和内容

(1) 本课程的性质、任务。本课程是机械类专业的一门技术基础课。以一般机械中的常用机构和通用零件为研究对象,分析它们的工作原理、受力分析、运动分析、结构形式,以及设计和计算方法。同时扼要地介绍国家标准和有关规范,以及某些标准零件的选用原则和方法。

通过学习本课程要求学生达到:掌握有关力学的基本知识,分析构件的受力、基本变形、强度和刚度计算方法;了解常用构件的工作原理、运动特性、结构特点;具备分析和判别常用机械和机械传动的能力;掌握通用零件的设计原理和方法,以及运用机械设计手册、图册、标准、规范等有关技术资料设计简单机械的能力。为学习专业课和今后工作提供必要的基本知识和能力。

(2) 本课程的内容。机械设计基础是一门综合化性质的课程,按照内容本身的内在联系分成下面几个模块:

工程力学基础:主要介绍构件的受力分析和平衡规律,分析构件在外力作用下的变形和破坏规律,以及强度和刚度的计算方法。

常用机构:主要讲授机械中常用机构的工作原理、运动特性和结构特点。

通用零件:主要讲述通用零件的失效分析、强度计算和常用标准零件的选用原则等问题。

三、机械的有关术语

(1) 机器。机器的种类很多,如缝纫机、洗衣机、汽车、电动机和起重机等,尽管这些机器的结构、性能和用途各不相同,但它们具有以下共同的特征。

1) 它们由许多构件组合而成。

2) 各个构件之间具有确定的相对运动。

3) 它们能代替或减轻人类的劳动, 完成有效的机械功, 或进行能量转换。

如图 0-1 所示的牛头刨床, 它是由床身 (机架)、传动齿轮、导杆、滑块、连杆、刨头, 以及其他辅助部分所组成的机器。当电动机驱动齿轮 2 转动时, 它带动齿轮 3 (又是曲柄) 回转, 通过滑块 5 推动导杆 4 左右摆动, 再经过连杆 6 带动刨头 7 做往复直线运动, 刨刀装在刨头上直线切削, 把电能转换为机械能。

(2) 机构。机构是具有相对运动构件的一种实体组合。它具有机器的前两个特征。

机构的主要功用在于传递或转变运动形式, 而机器的主要功用则是为了利用机械能做功或进行能量转换。牛头刨床由两个主要机构组成: 齿轮 2、3 和机架 1 组成的齿轮机构; 曲柄、滑块、导杆、连杆、刨头和机架组成的连杆机构。由此可见, 机器是由机构组成的, 但从构成和运动的观点看, 机器和机构并无区别。所以在工程上, 通常以“机械”一词作为机器和机构的总称。

(3) 构件。构件是指相互之间能做相对运动的物体, 是机构中的运动单元。如图 0-1 所示的汽缸、活塞、连杆和曲轴等都是构件, 它可以是单一的零件, 也可以是由若干个零件组成的刚性结构。例如, 内燃机中的曲轴这个构件, 是一个单一的零件; 而连杆如图 0-2 所示, 是由连杆体、螺栓、螺母、连杆盖、轴瓦等组成。

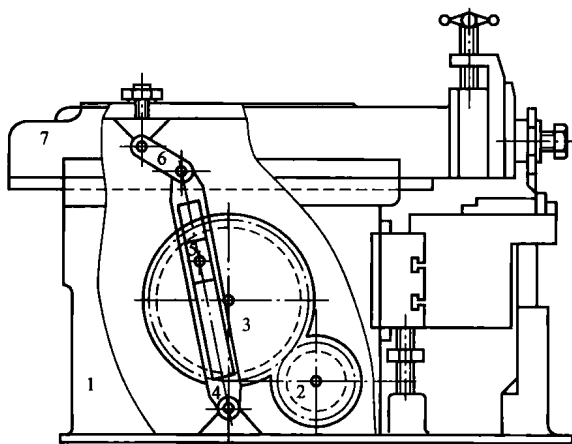


图 0-1 牛头刨床

1—机架; 2、3—传动齿轮; 4—导杆; 5—滑块; 6—连杆; 7—刨头

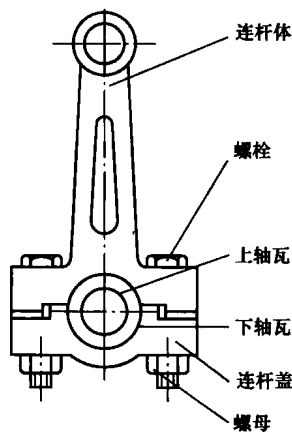


图 0-2 连杆

(4) 零件。零件是指组成机器的最小制造单元, 按照功能和结构特点分为通用零件和专用零件。各种机器中都可以用到的零件称为通用零件, 如螺栓、轴、齿轮、弹簧等。在特定类型机器使用的零件称为专用零件, 如内燃机中的活塞、洗衣机中的波轮、风扇中的叶轮等。

(5) 机器的组成。机器的种类繁多, 构造和功能各异。根据其功能的不同, 机器主要由以下四个部分组成:

1) 动力部分。它是机器的动力源。现代机械的动力源多为电动机和热力机 (内燃机、汽轮机、燃气轮机), 其中电动机的使用最为广泛。

2) 工作部分。它是机器特定功能的执行部分, 如汽车车轮、机床刀架、轮船的螺旋桨等。

3) 传动部分。介于原动机与工作机之间，作用是把原动机的运动或动力传递给工作机，如汽车的变速箱、主减速器、机床的主轴箱等。

4) 控制部分。它是通过人工操作或自动控制来改变动力机或传动系统的工作状态和参数，使执行机构保持或改变其运动或动力装置，如数控机床控制按钮、变速器操纵杆、离合器踏板等。

第 1 章 构件的受力及其力的平衡规律

1.1 力的概念与静力学基本公理

1.1.1 力的概念

一、力的定义

力是物体间的相互机械作用。力的作用效应使物体运动状态发生变化或引起物体变形。例如，推车、抛物，由于力的作用，车、物的运动状态发生了变化；锻锤冲击锻件使锻件改变了形状等。力使物体的运动状态发生了变化的效应称为力的外效应；力使物体发生了变形的效应称为力的内效应。

二、力的三要素

力对物体的作用效果，取决于三要素：力的大小、力的方向、力的作用点。三个要素中任何一个要素的改变，都会使力的作用效果改变。

力是一个具有大小和方向的量，所以力是矢量。这个矢量用一个带箭头的有向线段表示，线段的长度按一定的比例尺，表示力的大小；线段箭头的指向表示力的方向；线段的始点 A 或终点 B 表示力的作用点。本书中用黑体字 F 表示矢量，如图 1-1 所示。

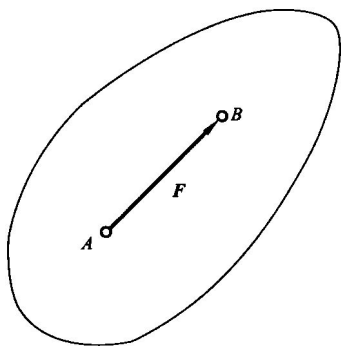


图 1-1 力的几何表示

力的单位在国际单位制中用 N (牛) 或 kN (千牛) 表示。

三、力系与力系简化

作用在同一个物体上的一组力称为力系。用简单力系代替复杂力系称为力系简化。

1.1.2 平衡和刚体的概念

一、平衡

平衡指物体相对于地球处于静止或匀速直线运动的状态。平衡是相对的，又是有条件的。力系使物体处于平衡状态，该力系称为平衡力系。力系平衡所满足的条件称为力系的平衡条件。

二、刚体的概念

在外力作用下形状和大小保持不变的物体称为刚体。实际上，任何物体在受到外力作用下都会产生变形，但微小变形对研究结果不产生显著影响，可以略去不计，静力学中研究的物体均视为刚体。

1.1.3 静力学的基本公理

一、公理一 二力平衡公理

刚体在两个力作用下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，且作用在同一直线上。如图 1-2 所示的拉杆（或压杆）同时受到等值、反向、共线的两个力 F 和 F' 作用，显然，该刚体是平衡的。

必须指出，本原理只适用于刚体。对于变形体，这个条件是不充分的。例如，一根绳索

的两端受到等值、反向、共线的两拉力作用能平衡，若是压力则不能平衡。

在结构中凡只受二力作用，而处于平衡状态的构件，称为二力构件，如图 1-2 (a) 所示的托架中，杆 A、B 不计自重，A、B 两点所受力 F_A 、 F_B 必定在二力作用点的连线 AB 上，如图 1-2 (b) 所示。

二、公理二 加减平衡力系公理

在已知刚体上加上或减去一个平衡力系，不会改变原力系对刚体的作用效应。

推论 1 力的可传性原理

作用于刚体上的力可沿其作用线在体内移动，而不会改变该力对刚体的作用效应。如图 1-3 所示，在 A 点的作用力 F 和在 B 点的作用力 F 对小车的效果相同。

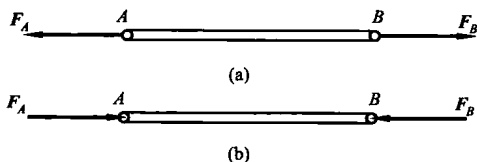


图 1-2 二力平衡

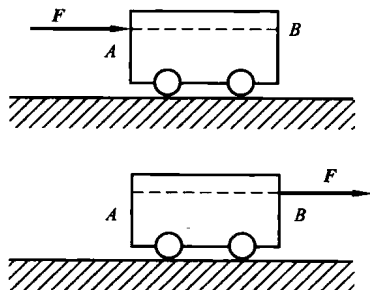


图 1-3 力的可传性

三、公理三 力的平行四边形法则

作用于物体上同一点的两个力，可合成为一作用于该点的合力，其大小和方向是这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线，如图 1-4 (a) 所示， F_R 是 F_1 、 F_2 的合力，则有

$$F_R = F_1 + F_2$$

即合力等于两分力的矢量和。

为了简便，在利用作图法求合力时，只需画出力平行四边形的一半即可，称为力的三角形法则，如图 1-4 (b)、(c) 所示。

推论 2 三力平衡定理

刚体在共面而又互不平行的三个力作用下若平衡，则此三个力的作用线必汇交于一点，如图 1-5 所示。

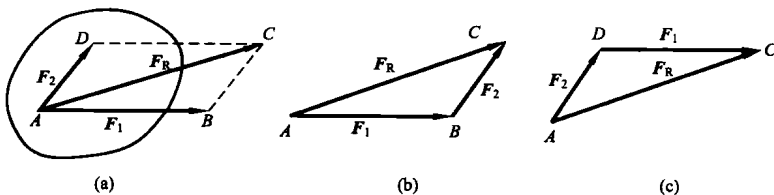


图 1-4 力的平行四边形法则

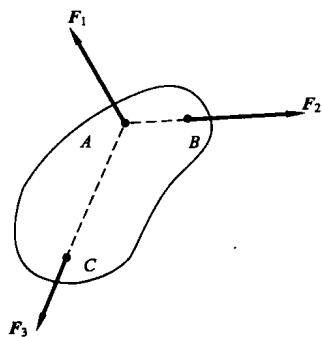


图 1-5 三力平衡

四、公理四 作用与反作用公理

两物体间的作用力与反作用力，总是等值、反相、共线，而且分别作用在两个相互作用的物体上，如图 1-6 所示。

公理四指出力是成对出现的，有作用力就有反作用力。如图 1-7 (a) 所示，一重物用钢丝绳悬挂在鼓轮上， G 为重物的重力， F_T 为钢丝绳对重物的拉力，如图 1-7 (b) 所示， F_T 与 F'_T 是作用力与反作用力的关系，而 G 和 F_T 就不是。

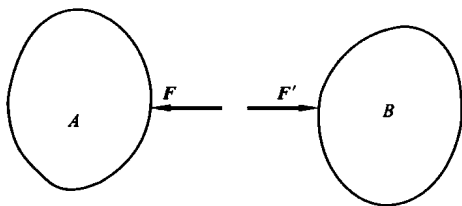


图 1-6 作用力与反作用力

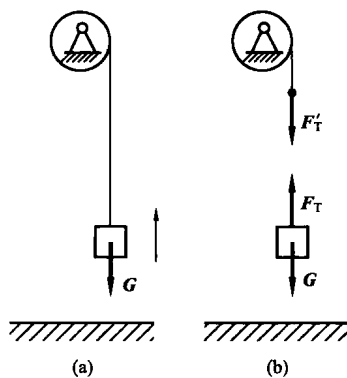


图 1-7 作用力与反作用力实例

1.2 约束与约束反力

1.2.1 约束与约束反力

工程结构中的构件既相互连接又彼此制约，一个构件的运动受到周围物体限制时，这种限制就称为约束。例如，火车受铁轨的限制，又能沿轨道运行；房梁受立柱的限制，使它在空间得到稳定的平衡。

构件受的力可以分为主动力和约束反力，能够使构件产生运动，或运动趋势的力，称为主动力。例如，重力、拉力等，主动力通常都是已知的。约束对构件的运动起到限制作用的力，称为约束反力。约束反力的方向总是和该约束所能阻碍的运动方向相反。约束反力是未知力，它的确定与约束类型及主动力有关。

1.2.2 工程上常见约束类型

一、柔性约束

由柔绳、链条、皮带等柔性物形成的约束称为柔性约束。柔性体本身只能承受拉力，不能承受压力。因此柔性约束反力作用点在连接点，方向沿柔索而背离受力物体，用符号 F_T 表示。

图 1-8 所示的钢索吊起重物及图 1-9 所示的带传动，重物和皮带轮受到钢索和皮带的拉力均属于此类约束反力。

二、光滑面约束

两直接接触物体，若忽略摩擦，把物体的接触面看成是完全光滑的刚性接触面，则简称为光滑面约束。光滑面约束反力的作用力通过接触点，方向沿接触面法线而指向受力体，用符号 F_N 表示，如图 1-10 所示。重物与平面接触，约束反力沿接触面公法线指向物体。

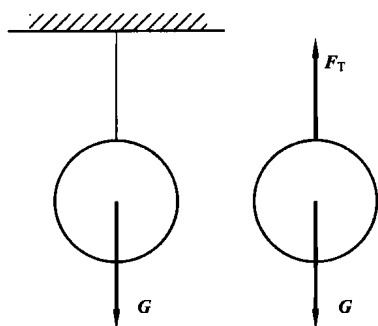


图 1-8 柔性约束

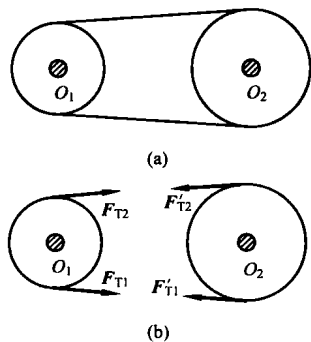


图 1-9 带传动的受力

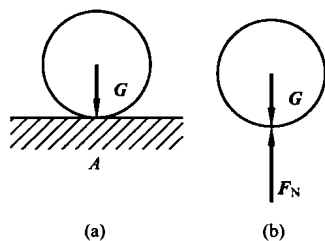
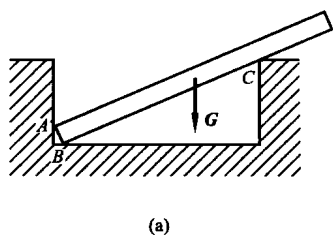


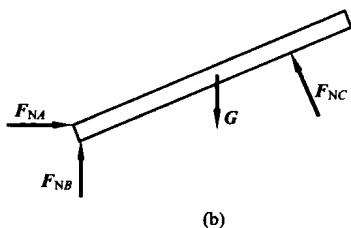
图 1-10 光滑面约束

图 1-11 (a) 中, 直杆与方槽 A、B、C 三点处接触, 三处的约束反力均沿两者接触点的公法线方向, 指向物体, 受力如图 1-11 (b) 所示。

齿轮传动时, 相啮合的两齿廓曲面相接触, 如图 1-12 所示。两齿廓的相互作用力一定通过接触点并沿公法线方向分别指向另一个齿轮。



(a)



(b)

图 1-11 光滑面约束

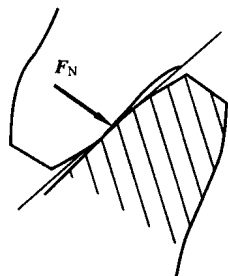
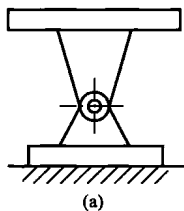


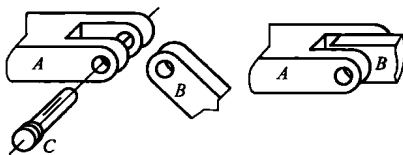
图 1-12 齿廓曲面受力

三、光滑铰链约束

(1) 固定铰链和中间铰链。两物体采用圆柱销所形成的连接为铰链连接, 这种约束是采用圆柱销 C 插入构件 A 和 B 的孔内而构成, 其接触面是光滑的, 如图 1-13 所示。若相连的构件有一个固定在地面或机架上, 则这种约束称为固定铰链, 如图 1-13 (a) 所示; 若均无固定, 则称为中间铰链, 如图 1-13 (b) 所示。



(a)



(b)



(c)

图 1-13 固定铰链和中间铰链

(a) 固定铰链; (b) 中间铰链; (c) 约束反力的表示

这类约束的约束反力沿圆柱面接触点的公法线通过圆销中心, 方向不确定。通常用两个正交分力 F_{Nx} 、 F_{Ny} 来表示, 如图 1-13 (c) 所示。

必须强调, 当中间铰链或固定铰链约束的是二力构件时, 则其约束反力满足二力平衡条

件,沿两约束反力作用点的连线,方向是确定的。

(2) 活动铰支座。支座下面装上滚子,使它能在支承面上沿切线方向任意移动,称为活动铰支座,如图 1-14 所示,约束反力通过铰链中心,并垂直支承面,其方向随载荷的情况而定。

图 1-15 所示为 ACB 梁支承情况, A 为固定铰链, B 为活动铰链,约束反力画法如图 1-15 (b) 所示。

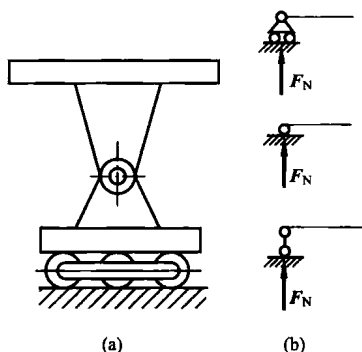


图 1-14 活动铰支座

(a) 活动铰链; (b) 约束反力的表示

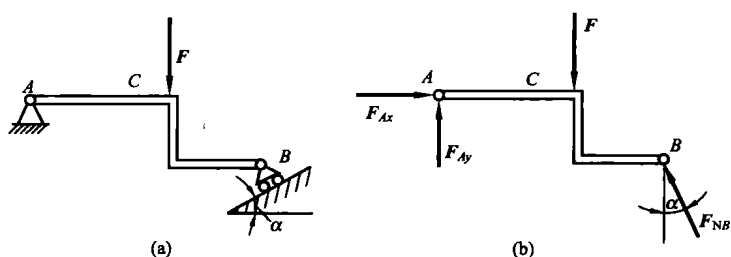


图 1-15 铰链约束实例

四、固定端约束

工程中还有一种常见的基本约束类型,如图 1-16 所示的建筑物上的阳台、车刀固定于刀架部分、电线杆埋入地下部分等,这些约束称为固定端约束。这种约束的特点是构件一端被固定,既不允许构件随意移动,也不允许构件绕其固定端转动。因此,固定端的约束就有两个约束反力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 和一个约束力偶矩 M_A ,如图 1-16 (d) 所示。

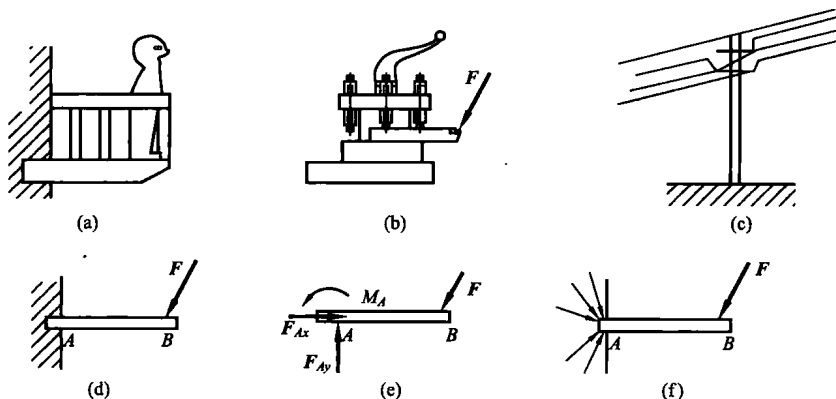


图 1-16 固定端约束

(a)、(b)、(c) 固定端约束; (d)、(e)、(f) 约束反力的表示

1.3 物体的受力分析

一、受力图的概念

为了清楚地表示构件的受力情况,需把所研究的构件从周围的物体中分离出来,解除约

束后的自由物体称为分离体。在分离体上画出全部作用力（包括主动力和约束反力）的简图，称为受力图。

二、画受力图的步骤

- (1) 确定研究对象，解除约束，取分离体。
- (2) 画所有的主动力。
- (3) 画出全部约束反力。

例 1-1 重为 G 的小球放在光滑斜面上，用与斜面平行的绳子系在墙壁上，如图 1-17 (a) 所示，画小球的受力图。

解 (1) 以球体为研究对象，解除约束，取分离体。

(2) 画出主动力 G 。

(3) 画出全部的约束反力。球体 B 处受到柔体约束，约束反力沿柔体中线背离球体，用 F_T 表示；在 C 处受光滑斜面约束，约束反力沿接触面 C 点的公法线指向球体，用 F_N 表示，如图 1-17 (b) 所示。

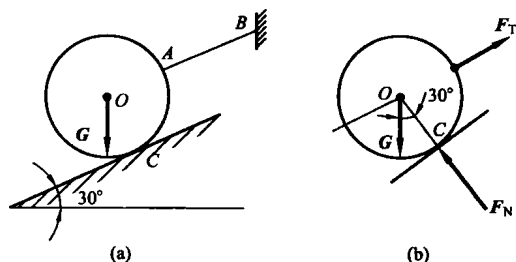


图 1-17 小球的受力
(a) 小球结构图；(b) 受力图

例 1-2 如图 1-18 所示的 AB 梁， A 端为固定铰链支座， B 端为活动铰链支座，梁中 C 点受主动力作用，梁重不计，试画出梁的受力图。

解 (1) 以 AB 梁为研究对象，取分离体。

(2) 画主动力。

(3) 画约束反力。活动铰链的约束反力 F_B 沿铅垂向上且通过铰链中心，固定铰链的约束反力的方向不定，可用两正交分力 F_{Ax} 和 F_{Ay} 表示，如图 1-18 (b) 所示。

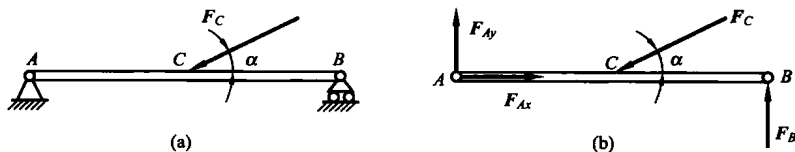


图 1-18 梁的受力

例 1-3 如图 1-19 所示的三铰拱结构，左、右两部分铰接而成，左部分点 B 受主动力 F 作用，杆重不计。试画 AB 、 BC 两杆的受力图。

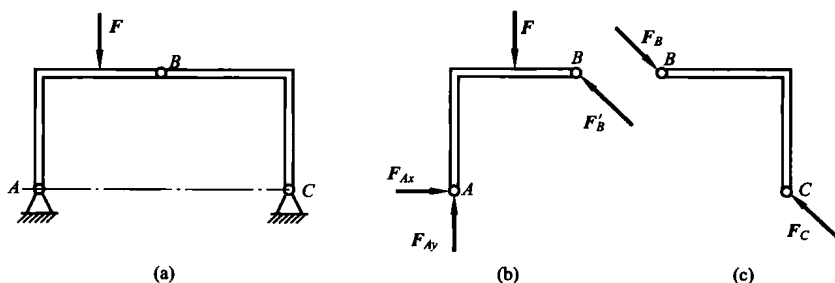


图 1-19 三铰拱受力图

解 (1) 先分析此杆受力, 由于 BC 杆为二力构件, F_B 、 F_C 必通过 B 、 C 两点连线, 如图 1-18 (c) 所示。

(2) 再以 AB 为研究对象, 画主动力。

(3) 画约束反力。中间铰链的约束反力 F'_B 与 F_B 构成作用力与反作用力的关系, 固定铰链的约束反力的方向不定, 可用两正交分力 F_{Ax} 和 F_{Ay} 表示, 如图 1-19 (b) 所示。

1.4 平面汇交力系

凡各力的作用线均在同一平面内的力系称为平面力系。若各力的作用线全部汇交于一点, 则称为平面汇交力系。

1.4.1 平面汇交力系的合成

一、力在坐标轴上的投影

力在坐标轴上的投影是代数量, 其大小为力矢的始端和末端向坐标轴引垂线, 如图 1-20 所示, 得垂足 a 、 b 的连线, 即 $F_x = ab$, 正负规定为: 从 a 到 b 的指向与坐标轴的正向相同为正, 相反为负。

若已知 F 的大小及 F 与 x 轴的夹角 α , 则力在 x 、 y 轴的投影可由式 (1-1) 计算, 即

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= F \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

注意: (1) 当力与轴平行时, 力在轴上的投影绝对值等于力的大小。

(2) 当力与轴垂直时, 力在轴上的投影为零。

当力 F 沿坐标轴分解为两分力 F_x 、 F_y 时, 这两个分力的大小分别等于力 F 在两轴上的投影的绝对值, 但当两轴不相互垂直时, 分力 F_x 、 F_y 与投影 F_x 、 F_y 值不等。

必须指出, 分力是矢量, 而投影是代数量。

二、合力投影定理

图 1-21 所示为平面汇交力系的各力矢 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 组成的力多边形, F_R 为合力。将力多边形中各力矢投影到 x 轴上, 则

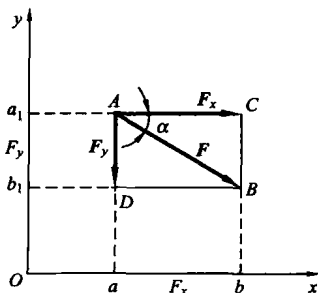


图 1-20 力在坐标上的投影

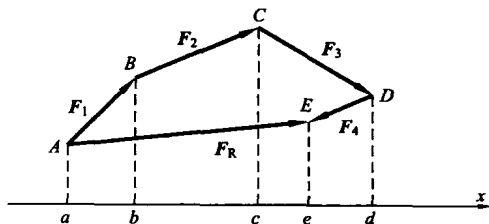


图 1-21 合力投影

$$ae = ab + bc + cd - de$$

按投影定义, 上式左端为合力 F_R 的投影, 右端为四个分力的投影的代数和, 即

$$F_{Rx} = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x} = \sum F_x$$