

普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU SHIERWU GUIHUA JIAOCAI

# 机械技术应用基础

JIXIE JISHU YINGYONG JICHU

王雪艳 主编



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

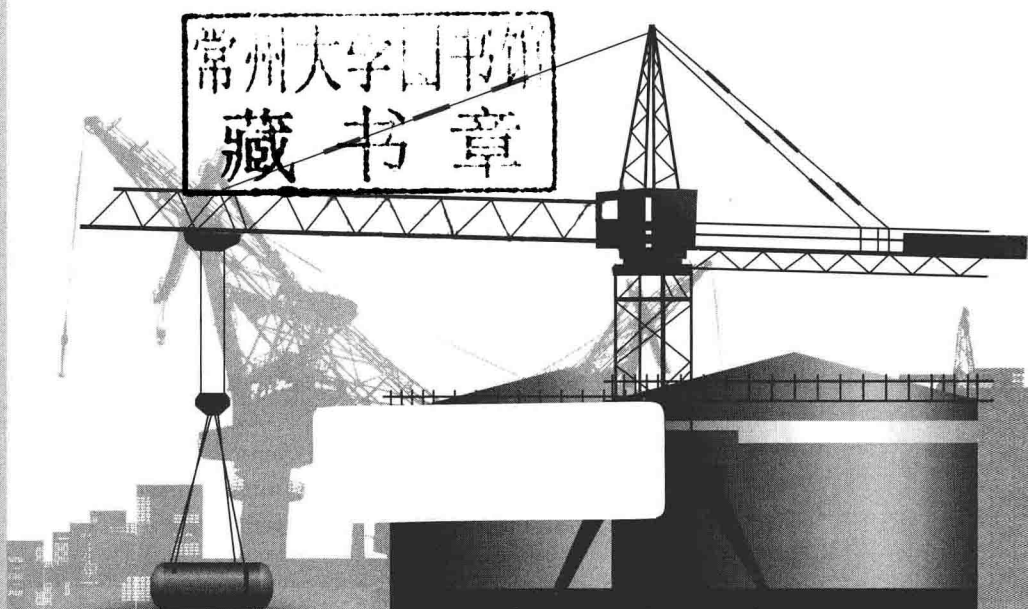
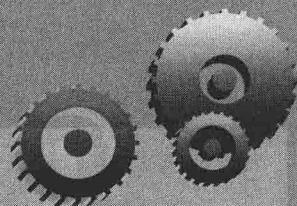
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIERWU GUIHUA JIAOCAI

# 机械技术应用基础

JIXIE JISHU YINGYONG JICHU

主 编 王雪艳

副主编 刘红霞 李金亮



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

机械技术应用基础/王雪艳主编. —北京: 北京  
航空航天大学出版社, 2013. 2  
ISBN 978-7-5124-1056-5

I. ①机… II. ①王… III. ①机械学—高等职业教育—  
教材 IV. ①TH11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 025692 号

版权所有, 侵权必究。

## 机械技术应用基础

王雪艳 主编

责任编辑: 宋丽霞

责任校对: 杨小红

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话: (010) 82317024 传真: (010) 82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话: (010) 82316936

北京市彩虹印刷有限责任公司印装 各地书店经销

\*

开本: 787 × 1 092 1/16 印张: 23.5 字数: 602 千字

2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5124-1056-5 定价: 46.80 元

---

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题, 请与本社发行部联系调换。联系电话: (010) 82317024

# 前 言

按照高职教育中,机械制造类专业职业岗位群多样化的特点,本书编者前期进行了课程综合化与项目化的教学改革,编写了《机械技术基础》。它涵盖了原机械类专业所涉及的多门专业基础课程的主要知识,并按机械传动装置设计这条主线对各课程的内容进行了重组,将其有机地串联起来,成为一门完整系统的综合课程。自2007年出版以来,受到了广大师生和读者的热情支持与鼓励。教材在解决高等职业教育中机械技术基础课程设置的综合性和课程内容的系统性方面取得了成效,在机械技术基础课程内容的深度把握和教材的编排方式上得到了认可,使其成为第二届山东省高等学校优秀教材。

随着高职教育教学改革的不断深入,课程改革也积累了些许经验。本书编者结合国家示范校课程改革实践成果,在总结高职教育教学经验的基础上,对上述《机械技术基础》一书进行了修订,编写成本书,使其更具有鲜明的高职教育特色:

首先,教材内容仍以机械传动装置设计为主线,在保证知识体系完整性的同时,体现基于工作过程的基本思想。以工学结合为切入点,以工作过程为导向,打破传统的学科型课程架构,采用任务驱动模式编写,让读者在解决任务的过程中学习知识、应用知识,不仅可以激发其求知欲和探索欲,又可培养其职业能力和创新思维。

其次,本教材结合科技发展现状和课程结构的合理性,并考虑到高职高专多层次教学的需要,对部分内容做了充实和更新,融入了工程材料、公差与配合等知识,使其更具有实用性、先进性、通用性和典型性,是适合高职院校机械类、近机类专业使用的“教、学、做”一体化教材。

本书既可以作为应用本科、高等职业学校、高等专科学校、成人高校机械与电气类专业的教材,也可供相近专业的学生参考和使用,还可作为一般工程技术人员的参考用书。

本书由王雪艳任主编,刘红霞、李金亮任副主编。由于时间仓促,编者水平有限,缺点和不足在所难免,恳请有关专家、教师和读者批评指正。

编 者  
2013. 1

◆ 绪 论 .....	1
◆ 项目一 构件的承载能力分析 .....	3
任务一 构件的静力分析 .....	4
任务导入 .....	4
任务资讯 .....	4
一、力的概念及其性质 .....	4
二、力矩和力偶 .....	6
三、约束与约束反力 .....	10
四、受力分析与受力图 .....	13
五、力系的平衡方程及其应用 .....	14
任务实施 .....	20
任务评价 .....	21
实作练习 .....	21
任务二 构件的变形与强度计算 .....	24
任务导入 .....	24
任务资讯 .....	24
一、轴向拉伸与压缩 .....	25
二、剪切与挤压 .....	29
三、扭转 .....	33
四、平面弯曲 .....	38
五、组合变形的强度计算 .....	51
六、交变应力作用下构件的疲劳强度 .....	54
任务实施 .....	57
任务评价 .....	59
实作练习 .....	60
◆ 项目二 机械工程材料分析 .....	62
任务三 减速器轴的材料选用及热处理 .....	63
任务导入 .....	63
任务资讯 .....	63
一、金属材料的性能 .....	63
二、常用机械工程材料 .....	68
三、钢的常用热处理及其作用 .....	92
四、机械工程材料的选用 .....	98
任务实施 .....	101
任务评价 .....	101
实作练习 .....	102
◆ 项目三 零件的精度分析 .....	105

任务四 轴类零件的精度设计 .....	106
任务导入 .....	106
任务资讯 .....	106
一、极限与配合 .....	107
二、形位公差简介 .....	127
三、表面粗糙度简介 .....	138
任务实施 .....	145
任务评价 .....	146
实作练习 .....	146
◆ 项目四 常用机构的工作情况分析与设计 .....	150
任务五 精压机中冲压机构与送料机构的设计 .....	151
任务导入 .....	151
任务资讯 .....	151
一、平面机构概述 .....	151
二、平面连杆机构 .....	156
三、凸轮机构 .....	165
四、间歇运动机构 .....	175
五、螺旋机构 .....	178
任务实施 .....	183
任务评价 .....	185
实作练习 .....	186
◆ 项目五 挠性传动设计 .....	189
任务六 带式输送机中 V 带传动的设计 .....	190
任务导入 .....	190
任务资讯 .....	190
一、带传动的类型、特点及应用 .....	190
二、V 带和 V 带轮 .....	191
三、带传动的工作情况分析 .....	194
四、V 带传动的设计计算 .....	196
五、V 带传动的张紧、安装与维护 .....	204
任务实施 .....	206
任务评价 .....	209
实作练习 .....	209
任务七 链式运输机滚子链传动的设计 .....	211
任务导入 .....	211
任务资讯 .....	211

一、链传动的类型、特点及应用	211	二、轴的结构设计	284
二、滚子链和链轮	212	三、轴的强度与刚度计算	292
三、滚子链传动的设计	214	四、轴的使用与维护	294
四、链传动的布置、张紧与润滑	218	任务实施	295
任务实施	221	任务评价	299
任务评价	222	实作练习	299
实作练习	222	<b>任务十一 轴承的选择与设计</b>	301
◆ <b>项目六 齿轮传动设计</b>	223	任务导入	301
<b>任务八 减速器中齿轮传动的设计</b>	224	任务资讯	301
任务导入	224	一、滚动轴承的结构、类型和代号	301
任务资讯	224	二、滚动轴承的合理选用	308
一、齿轮传动概述	224	三、滚动轴承的组合设计	316
二、直齿圆柱齿轮传动	228	四、滑动轴承简介	323
三、平行轴斜齿圆柱齿轮传动	243	任务实施	325
四、直齿锥齿轮传动	249	任务评价	326
五、齿轮传动的设计方法与步骤	252	实作练习	327
六、齿轮传动的使用与维护	256	◆ <b>项目八 常用联接的工作情况分析</b>	329
七、蜗杆传动	257	<b>任务十二 减速器轴与齿轮间的键联接的设计选用</b>	330
任务实施	266	任务导入	330
任务评价	269	任务资讯	330
实作练习	269	一、键联接	330
<b>任务九 轮系的分析</b>	272	二、花键联接	335
任务导入	272	三、销联接	336
任务资讯	272	四、螺纹联接	336
一、轮系的分类与功用	272	任务实施	346
二、定轴轮系传动比计算	273	任务评价	347
三、周转轮系传动比计算	275	实作练习	347
四、混合轮系传动比计算	277	<b>任务十三 带式输送机中联轴器的设计选用</b>	349
任务实施	277	任务导入	349
任务评价	278	任务资讯	349
实作练习	278	一、联轴器	349
◆ <b>项目七 支承零部件设计</b>	281	二、离合器	355
<b>任务十 减速器低速轴的设计</b>	282	任务实施	358
任务导入	282	任务评价	358
任务资讯	282	实作练习	358
一、轴的分类和材料	282	◆ <b>附录</b>	360

## 一、机械概述

为了满足生活和生产的需要,人类创造并发展了机械。当今世界,品种繁多的机械进入了社会的各个领域,承担着大量人力所不能或不便进行的工作,大大改善了劳动条件,提高了生产率,人们越来越离不开机械了。学习机械知识,掌握一定的机械设计、制造、运用、维护与修理方面的理论、方法和技能是十分必要的。

机械是机器和机构的总称。

### (一) 机器和机构

机器在人们感性认识中早已形成,如蒸汽机、内燃机、发电机、电梯、机器人及各种机床等。

图 0.1 所示为带式输送机示意图,它是由电动机 1、小带轮 2、大带轮 3、主动齿轮 4、从动齿轮 5、联轴器 6、滚筒 7、输送带 8、箱体 9 和支承轴等组成。以电动机为动力,通过带传动、齿轮传动使滚筒转动,从而实现输送带输送物料的功能。

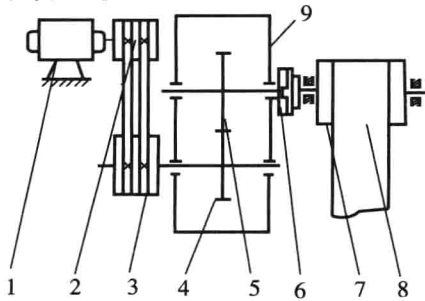


图 0.1 带式输送机简图

以上仅为机器实例之一。尽管机器品种繁多,形式多样,用途各异,但都具有如下特征:都是人为的各种实物的组合;组成机器的各种实物间具有确定的相对运动;可代替或减轻人的劳动,完成有用的机械功或转换机械能或传递信息。凡具备上述三个特征的实物组合体就称为机器。

机构是具有确定相对运动的各种实物的组合,即符合机器的前两个特征。如图 0.1 所示,齿轮 4、5 和箱体 9 等组成的齿轮传动机构;滚筒 7 与输送带 8 组成的工作机构。机构主要用来传递和变换运动,而机器主要用来传递和变换能量,从结构和运动学的角度分析,机器与机构之间并无区别。

### (二) 零件与构件

从制造的角度看,机器是由若干不同零件装配而成,零件是组成机器的基本要素,即机器的最小制造单元。各种机器经常用到的零件称为通用零件,如螺钉、螺母、轴、齿轮、弹簧等。另一类是专用零件,仅用于某些机器中,常可表征该机器的特点,如汽轮机中的叶片、牛头刨床的滑枕、起重机的吊钩、内燃机中的曲轴、连杆、活塞等。有时为了装配方便,先将一组协同工作的零件分别装配或制造成一个个相对独立的组合体,然后再装配成整机,这种组合体常称为部件(或组件)。例如,牛头刨床的刀架,车床的主轴箱、尾座、滚动轴承以及自行车的脚蹬子等。将机器看成是由零部件组成的,不仅有利于装配,也有利于机器的设计、运输、安装和维修等。

从运动的角度看,机器是由若干个运动的单元所组成,这种运动单元称为构件。构件可以是单一的零件,也可以是若干个零件的刚性组合体,如机器中的齿轮、轴和键就组合为一个构件。

### (三) 机器的组成

根据功能的不同,一部完整的机器由以下几部分组成:

(1) 原动机部分 如图 0.1 所示的电动机,是机器的动力来源。常用的原动机有电动机、内燃机及液压机等。

(2) 工作机部分 处于整个机械传动路线终端,是完成工作任务的部分,如图 0.1 中的滚筒 7 和输送带 8。

(3) 传动部分 介于原动机与工作机之间,起的作用是把原动机的运动和动力传递给工作机,如图 0.1 中的带传动和齿轮传动。但也有一些机器原动机直接驱动工作机。

较复杂的机器还包括控制部分,如离合器、制动器、变速器等,能够使机器的原动机部分、传动机和工作机部分按一定的顺序和规律运动,完成给定的工作循环。

### (四) 机械的类型

机械种类较多,根据用途不同,可分为以下几种:

(1) 动力机械 如电动机、内燃机、发电机、液压机等,主要用来实现机械能与其他形式能量间的转换。

(2) 加工机械 如轧钢机、包装机及各类机床,主要用来改变物料的结构形状、性质及状态。

(3) 运输机械 如汽车、飞机、轮船、输送机等,主要用来改变人或物料的空间位置。

(4) 信息机械 如复印机、传真机、摄像机等,主要用来获取或处理各种信息。

## 二、本课程的性质、内容和任务

本课程是高等院校机械类专业的一门综合性的技术基础课,主要介绍机械中的基本知识、基本方法。通过本课程的学习,培养学生的机械系统分析及简单机械传动装置设计的能力,为学习后续专业课程和技术改造奠定必要的基础。

### (一) 具体内容

(1) 工程力学 介绍构件的受力分析、平衡计算方法以及构件的变形分析和强度计算方法。

(2) 机械工程材料 介绍机械工程材料的组织结构、成分和性能,提高及挖掘材料潜能的热处理方法,以及如何合理地选择机械工程材料。

(3) 公差与配合 介绍机械零件精度、互换性、标准化及有关公差与配合的基本知识,学习国家标准的相关内容。

(4) 机械设计 主要讲述机械中常用机构和通用零部件的工作原理、运动特性、结构特点和设计方法等。同时,简要地介绍国家标准、标准零部件的选用原则以及机器设备的使用与维护。

### (二) 本课程的任务

(1) 能熟练地运用力学平衡条件求解简单力系的平衡问题,掌握零部件的受力分析和强度计算方法。

(2) 了解常用工程材料种类、牌号、性能、应用和热处理知识,合理选用常用金属材料,正确选定零件的热处理技术条件。

(3) 掌握有关公差标准基本内容和主要规定,对图样上的常见公差配合能正确理解,具有选用公差与配合的初步能力。

(4) 熟悉通用零部件和常用机械传动(含机构)的工作原理、特点、应用及其结构和标准,掌握通用零部件和常用机械传动(含机构)的选用和设计方法。

(5) 具有与本课程有关的解题、运算、绘图能力和应用标准、手册、图册等有关技术资料的能力,具备正确分析、使用及维护机械的能力,初步具有设计简单机械传动装置的能力。



# 1

## 项目一

# 构件的承载能力分析

### 【知识目标】

- ◆ 力的基本概念及公理
- ◆ 力矩和力偶
- ◆ 力在坐标轴上的投影
- ◆ 约束与约束反力的特点以及受力图的画法
- ◆ 各种力系的平衡方程及其应用
- ◆ 四种基本变形的受力特点、变形特点以及内力图的画法
- ◆ 四种基本变形的强度条件及其应用
- ◆ 组合变形的分析方法
- ◆ 交变应力作用下构件的疲劳强度

### 【能力目标】

- ◆ 会对构件进行受力分析并画出受力图
- ◆ 具有利用平衡方程求解力系平衡问题的能力
- ◆ 掌握拉伸与压缩、剪切与挤压、扭转、弯曲四种基本变形的强度计算方法
- ◆ 会进行构件弯扭组合变形的强度计算
- ◆ 熟悉工程中提高构件承载能力的方法和措施

工程中的机械设备都是由若干构件组成,如图 1.1 所示的单缸内燃机,包括活塞、连杆、曲轴、齿轮、凸轮、顶杆等多个构件。这些构件工作时均承受载荷作用,这就需要正确运用力学分析的方法,对构件承载能力进行分析,使之充分发挥材料的性能并且保证工作可靠。

## 任务一 构件的静力分析

## 任务导入

机器的运行是由于力的作用引起的,构件的受力情况直接影响机器的工作能力。因此,在设计或使用机器时需要构件进行受力分析。机器平稳工作时,许多构件的运动处于相对静止或匀速运动的状态,即平衡状态。通过完成以下任务,你将学会如何分析构件处于平衡状态时所受各力之间的关系,并能利用平衡方程求解未知力。

减速器输出轴如图 1.2 所示,以 A、B 两轴承支承。轴上直齿圆柱齿轮的分度圆直径  $d = 17.3 \text{ mm}$ ,压力角  $\alpha = 20^\circ$ ,在法兰盘上作用一力偶,其力偶矩  $M = 1\ 030 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。如输出轴自重和摩擦不计,求输出轴匀速转动时 A、B 两轴承的支反力及齿轮所受的啮合力  $F$ 。

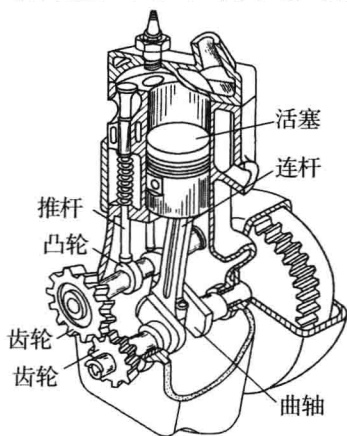


图 1.1 单缸内燃机

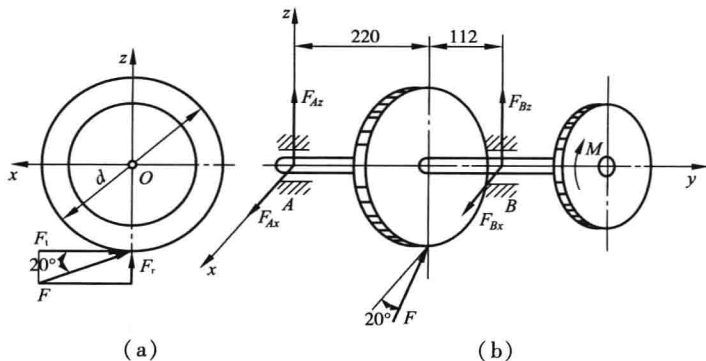


图 1.2 减速器输出轴受力分析

## 任务资讯

## 一、力的概念及其性质

## (一) 力的概念

力是物体之间相互的机械作用,这种作用使物体的机械运动状态发生改变,或使物体产生变形。力使物体的运动状态发生改变的效应称为外效应,而使物体发生变形的效应称为内效应。刚体只考虑外效应,变形固体还要研究内效应。在外力分析时构件视为刚体,在内力分析时,构件视为变形体。变形分为除去外力后能恢复的弹性变形和不能恢复有残余变形的塑性变形。变形体的变形是指小变形,它比构件本身尺寸要小得多,以至在分析构件所受外力(写静力平衡方程)时,通常不考虑变形的影响,而仍可以用变形前的尺寸。

**力的三要素:**①力的大小。在国际单位制中,力的单位是牛(N)或千牛(kN), $1\text{kN}=10^3\text{N}$ 。②力的方向。③力的作用位置,是指物体上承受力的部位。一般来说,是一部分面积或体积,此时的力称为分布力。结构的自重、风、雪等荷载都是分布力;而有些分布力分布的面积很小,可以近似看作一个点时,这样的力称为集中力。当以刚体为研究对象时,作用在结构上的分布力可用其合力(集中荷载  $F_q$ )代替,如图 1.3 所示。

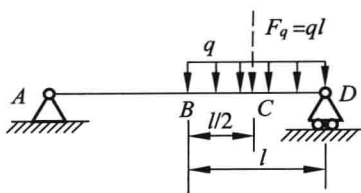


图 1.3 分布力

既然力是有大小和方向的量,所以力是矢量,可以用一带箭头的线段来表示,如图 1.4 所示。线段  $AB$  长度按一定的比例尺表示力  $F$  的大小,线段的方位和箭头的指向表示力的方向。线段的起点  $A$  或终点  $B$  表示力的作用点。线段  $AB$  的延长线(图中虚线)表示力的作用线。

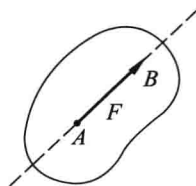


图 1.4 力的矢量表示

## (二) 力的基本公理

### 公理一 二力平衡公理

作用于同一刚体上的两个力平衡的充要条件:力的大小相等,方向相反,作用在同一直线上,如图 1.5 所示。

在两个力作用下处于平衡的构件称为二力构件,若物体是杆件,也称二力杆。二力杆上的力必须满足二力平衡条件,在物体的受力分析中,据此可以确定二力杆中未知力作用线的位置。

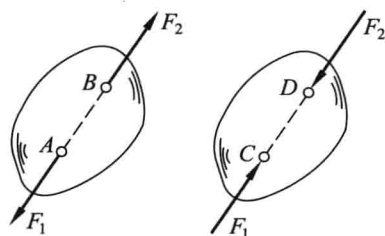


图 1.5 二力平衡

### 公理二 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系(作用于物体上的多个力)中,加上或减去平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效应。

### 推论 力的可传性原理

作用于刚体上的力可以沿其作用线移至刚体内任意一点,而不改变该力对刚体的效应。

**证明:**设力  $F$  作用于刚体上的点  $A$ ,如图 1.6 所示。在力  $F$  作用线上任选一点  $B$ ,在点  $B$  上加一对平衡力  $F_1$  和  $F_2$ ,使

$$F_1 = -F_2 = F$$

则  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F$  构成的力系与  $F$  等效。将平衡力系  $F$ 、 $F_2$  减去,则  $F_1$  与  $F$  等效。此时,相当于力  $F$  已由点  $A$  沿作用线移到了点  $B$ 。

由此可知,作用于刚体上的力是滑移矢量,因此作用于刚体上力的三要素为大小、方向和作用线。

### 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以合成为作用于该点的一个合力,它的大小和方向

由以这两个力的矢量为邻边所构成的平行四边形的对角线来表示。如图 1.7 所示,以  $F_R$  表示力  $F_1$  和力  $F_2$  的合力,则可以表示为  $F_R = F_1 + F_2$ ,即作用于物体上同一点两个力的合力等于这两个力的矢量和。

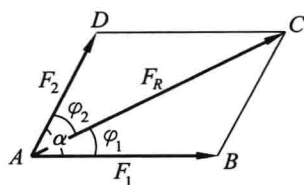


图 1.7 平行四边形法则

### 公理四 作用与反作用公理

两个物体间相互作用的力,总是同时存在,它们的大小相等,方向相反,并沿同一直线分别作用在这两个物体上。

应该注意,作用力与反作用力虽然等值、反向、共线,但它们不能平衡,因为二者分别作用在两个物体上,不可与二力平衡公理混淆起来。符号表示方法如图 1.8 所示,如车刀在工件上切削,车刀作用在工件上的切削力为  $F_p$ ,车刀受到工件的反作用力则为  $F_p'$ 。

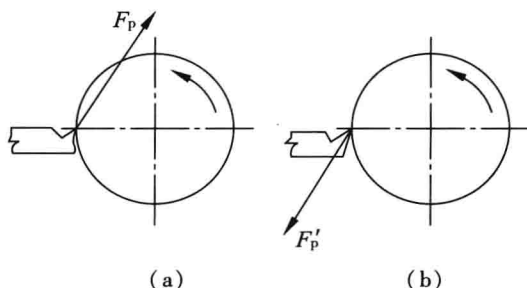


图 1.8 作用力与反作用力

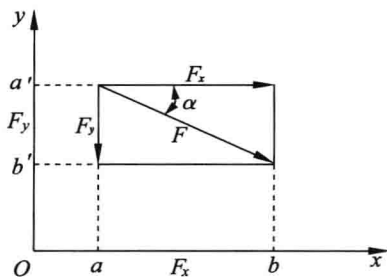


图 1.9 力在直角坐标轴上的投影

### (三) 力在平面直角坐标轴上的投影

力在直角坐标轴上的投影定义:过  $F$  两端分别向两坐标轴引垂线(图 1.9)得垂足  $a$ 、 $b$  及  $a'$  和  $b'$ 。线段  $ab$ 、 $a'b'$  分别为  $F$  在  $x$  轴和  $y$  轴上投影的大小,记为  $F_x$ 、 $F_y$ 。

投影的正负号规定:当力的指向与坐标轴正向一致时,力在该轴上的投影为正,反之为负。

如图 1.9 所示,若已知  $F$  的大小及其与  $x$  轴所夹的锐角  $\alpha$ ,则力  $F$  的投影为

$$\begin{cases} F_x = F \cos \alpha \\ F_y = -F \sin \alpha \end{cases} \quad (1-1)$$

若将  $F$  沿坐标轴方向分解,所得分力  $F_x$ 、 $F_y$  的值与  $F$  在同轴上的投影  $F_x$ 、 $F_y$  相等,但力的分力是矢量,力的投影是代数数量。

若已知  $F_x$ 、 $F_y$  的值,可反求  $F$  的大小及方向,即

$$\begin{cases} F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \tan \alpha = \left| \frac{F_y}{F_x} \right| \end{cases} \quad (1-2)$$

## 二、力矩和力偶

### (一) 力对点之矩

#### ◆ 1. 概念

力对点之矩是力使物体绕某点转动效应的度量。扳手旋转螺母,使螺母能绕点  $O$  转动,如图 1.10 所示。由经验可知,螺母能否转动,不仅取决于作用在扳手上的力  $F$  的大

小,而且还与点  $O$  到  $F$  的作用线的垂直距离  $d$  有关。因此,用  $F$  与  $d$  的乘积作为力  $F$  使螺母绕点  $O$  转动效应的度量。其中,距离  $d$  称为  $F$  对  $O$  点的力臂,点  $O$  称为矩心。由于转动有逆时针和顺时针两个转向,则力  $F$  对  $O$  点之矩的定义为:力的大小  $F$  与力臂  $d$  的乘积冠以适当的正负号,以符号  $M_O(F)$  表示,记为

$$M_O(F) = \pm Fd \quad (1-3)$$

通常规定:力使物体绕矩心逆时针方向转动时,力矩为正,反之为负。

在国际单位制中,力矩的单位是牛·米( $\text{N}\cdot\text{m}$ )或千牛·米( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )。

### ◆2. 性质

(1) 力对点之矩,不仅取决于力的大小,还与矩心的位置有关,力矩随矩心的位置变化而变化。

(2) 力对任一点之矩,不因该力的作用点沿其作用线移动而改变。

(3) 力的大小等于零或其作用线通过矩心时,力矩等于零。

### ◆3. 求解

两种方法:①用定义式(1-3)直接求解;②利用合力矩定理式(1-4),将力分解为两个易确定力臂的分力(通常是正交分解),分别计算各分力的力矩,然后相加得出原力对该点之矩。

合力矩定理:合力对其平面内任一点的矩等于所有各分力对同一点之矩的代数和,即

$$M_O(F_R) = M_O(F_1) + M_O(F_2) + \cdots + M_O(F_n) = \sum M_O(F) \quad (1-4)$$

下面以实例计算说明。

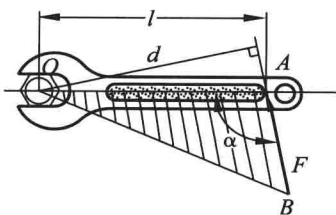


图 1.10 扳手旋转螺母

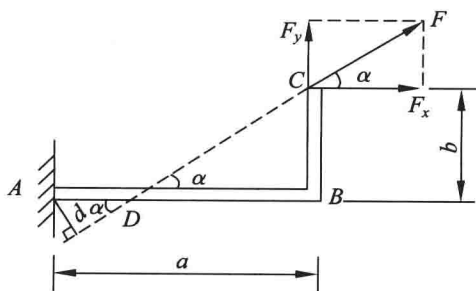


图 1.11 例 1.1 图

**例 1.1** 计算图 1.11 中力  $F$  对  $A$  点之矩。

**解 1:** 由力矩的定义计算力  $F$  对  $A$  点之矩。

先求力臂  $d$ 。由图中几何关系有

$$d = AD \sin \alpha = (AB - DB) \sin \alpha = (AB - BC \cot \alpha) \sin \alpha = (a - b \cot \alpha) \sin \alpha = a \sin \alpha - b \cos \alpha$$

所以

$$M_A(F) = Fd = F(a \sin \alpha - b \cos \alpha)$$

**解 2:** 根据合力矩定理计算力  $F$  对  $A$  点之矩。

将力  $F$  在  $C$  点分解为两个正交的分力  $F_x$  和  $F_y$ ,由合力矩定理可得

$$M_A(F) = M_A(F_x) + M_A(F_y) = -F_x b + F_y a = -F \cos \alpha \cdot b + F \sin \alpha \cdot a = F(a \sin \alpha - b \cos \alpha)$$

本例两种解法的计算结果是相同的,当力臂不易确定时,用后一种方法较为简便。

**例 1.2** 图 1.12 所示直齿圆柱齿轮的齿面受一压力角  $\alpha = 20^\circ$  的法向压力  $F_n = 1 \text{ kN}$  的作用,齿轮分度圆直径  $d = 60 \text{ mm}$ 。试计算力  $F_n$  对轴心  $O$  的力矩。

**解 1:** 按力对点之矩的定义,由图 1.12(a)有

$$M_O(F_n) = F_n h = F_n \frac{d}{2} \cos\alpha = 1\,000 \times \frac{60 \times 10^{-3}}{2} \times \cos 20^\circ = 28.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**解2:** 将  $F_n$  沿半径和垂直于半径的方向分解成正交的径向力  $F_r = F_n \sin\alpha$  与圆周力  $F_t = F_n \cos\alpha$  (图 1.12(b)), 按合力矩定理, 有

$$M_O(F_n) = M_O(F_t) + M_O(F_r) = F_t \frac{d}{2} + 0 = F_n \cos\alpha \cdot \frac{d}{2} + 0 = 28.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

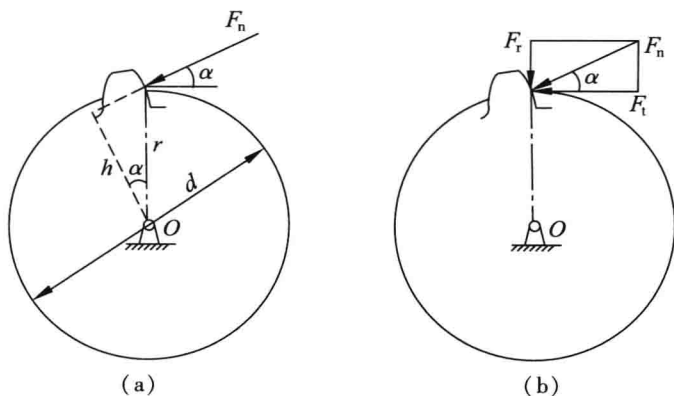


图 1.12 齿轮力矩的计算

## (二) 力偶

### ◆1. 概念

日常生活和工程实际中经常见到物体受到两个大小相等、方向相反, 但不在同一直线上的两个平行力作用的情况。例如, 驾驶员驾驶汽车时两手作用在方向盘上的力 (图 1.13(a)), 工人用丝锥攻螺纹时两手加在手柄上的力 (图 1.13(b)), 以及用两个手指拧动水龙头 (图 1.13(c)) 所加的力等。在力学中把这样一对等值、反向而不共线的平行力称为力偶, 力偶只能使物体产生转动效应。两个力作用线之间的垂直距离称为力偶臂, 两个力作用线所决定的平面称为力偶的作用面, 如图 1.14 所示。

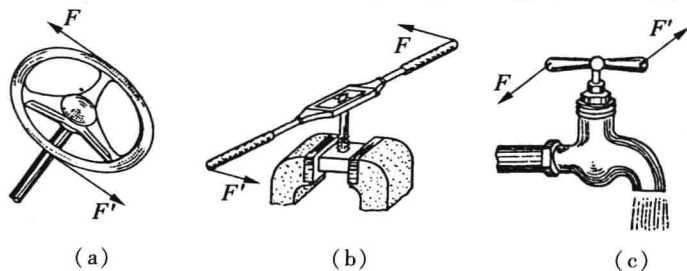


图 1.13 力偶应用实例

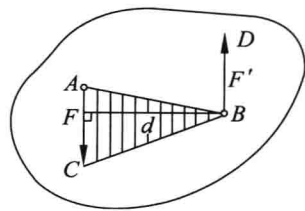


图 1.14 力偶的作用面

力偶对物体的转动效应可用力偶矩来度量。力偶中一个力的大小与力偶臂的乘积并冠以相应的正负号, 称为力偶矩, 用符号  $M$  表示, 即

$$M = \pm Fd \quad (1-5)$$

通常规定: 力偶使物体逆时针方向转动时, 力偶矩为正, 反之为负。

在国际单位制中, 力偶矩的单位是牛·米 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ ) 或千牛·米 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )。

### ◆2. 性质

(1) 力偶不能简化为一个力, 即力偶不能用一个力等效。因此, 力偶不能与一个力平

衡,力偶只能与力偶平衡。

(2) 力偶对其作用面内任一点的矩恒等于力偶矩,与矩心位置无关。如图 1.15 所示,不论点  $O$  选在何处,其结果都不会变。

由上述性质可得下面的推论:

**推论 1** 力偶可在其作用面内任意移动和转动,而不会改变它对物体的效应。

**推论 2** 只要保持力偶矩不变,可同时改变力偶中力的大小和力偶臂的长度,而不会改变它对物体的作用效应。故力偶通常在力偶作用面内简单表示为一带箭头的弧线,如图 1.16(b)所示。其中,箭头表示力偶的转向, $M$  表示力偶矩的大小。

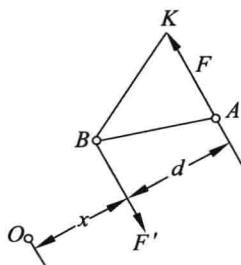


图 1.15 力偶的性质

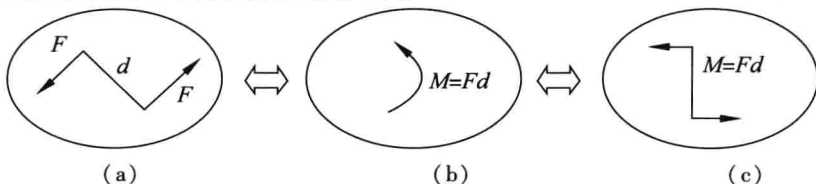


图 1.16 力偶的表示

### ◆3. 平面力偶系

当物体作用有两个或两个以上的力偶时即组成力偶系。平面力偶系可合成为一个合力偶,合力偶矩等于各个分力偶矩的代数和,即

$$M = M_1 + M_2 + \cdots + M_n = \sum M_i \quad (1-6)$$

由平面力偶系的合成结果进一步可知,当力偶系平衡时,其合力偶矩等于零。因此,平面力偶系平衡的必要和充分条件是各力偶的力偶矩代数和等于零,即

$$\sum M_i = 0 \quad (1-7)$$

### ◆4. 力的平移定理

作用于刚体上的力沿其作用线移至任意一点,不改变力对刚体的作用效应。但是力如果离开作用线,平移到刚体内任意一点,就会改变它对刚体的作用效应。

假设有一力  $F$  作用在刚体上点  $A$  处(图 1.17(a)),若要把它平移到刚体上的另一点  $B$  处,则根据加减平衡力系原理,在点  $B$  处加一对平衡力  $F'$  和  $F''$ ,使它们与力  $F$  平行,而且  $F' = F'' = F$ ,如图 1.17(b)所示。在三个力中,力  $F$  与  $F''$  组成一力偶。显然,它们对刚体的作用与原来的一个力  $F$  对刚体的作用等效。由此可以认为,作用于点  $A$  的力  $F$  可以平行移动到另一点  $B$ ,但同时还要附加一个力偶(图 1.17(c)),这个附加力偶的力偶矩为

$$M = M_B(F) = Fd$$

式中: $d$  为附加力偶的力偶臂,也就是平移点  $B$  到力  $F$  作用线的垂直距离。

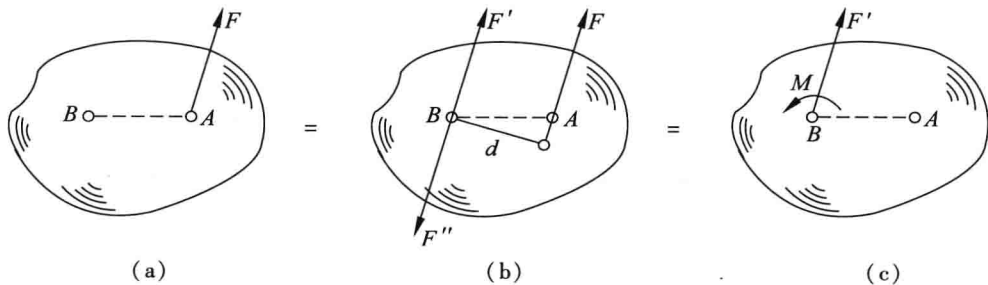


图 1.17 力的平移定理

推广到一般情形可以得到结论:作用于刚体上某点的力可以平移到刚体内任意一点,

但必须同时附加一个力偶,此附加力偶的力偶矩等于原力对新作用点的力矩,力偶转向决定于原力对新作用点的力矩的转动方向,这一结论称为力的平移定理。但须注意,力的平移定理只适用于刚体,而且只能在同一刚体上进行。

## 三、约束与约束反力

机械和工程结构中,每个零部件都是相互联系并相互制约的,它们之间存在着相互作用力。

限制其他物体某些位移的周围物体称为约束。例如,绳子对电灯、铁轨对火车、轴承对转子等都是约束。当物体在约束限制的运动方向上有运动趋势时,就会受到约束的阻碍,这种阻碍作用就是约束作用于物体的力,称为约束反力或约束力。物体所受的力,除约束力外,还有重力、水压力、风力等,它们是促使物体运动或使物体有运动趋势的力,称为主动力。

在一般情况下,主动力是已知的,而由主动力引起的约束力往往是未知的。下面介绍工程实际中常见的几种约束类型,并分析约束力的特征。

### (一) 柔性约束

绳索、链条、皮带等均属于柔性(柔索)约束。其约束反力作用于接触点,方向沿柔索的中心线背离物体,为拉力,如图 1.18 和图 1.19 所示。

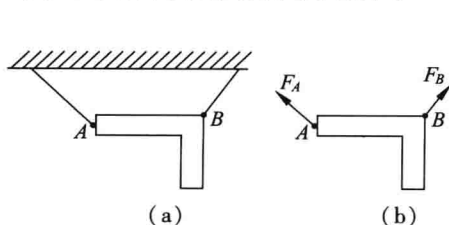


图 1.18 柔性约束实例一

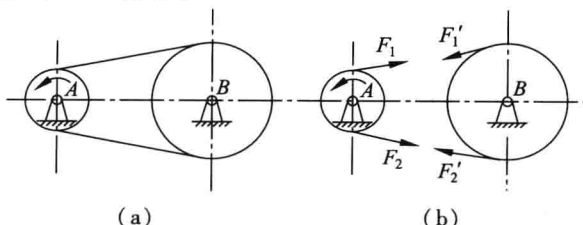


图 1.19 柔性约束实例二

### (二) 光滑面约束

当物体接触面上的摩擦力可以忽略时,即可看做光滑接触面,光滑接触面约束反力作用于接触点,沿接触面的公法线指向物体,为压力,如图 1.20 和图 1.21 所示。

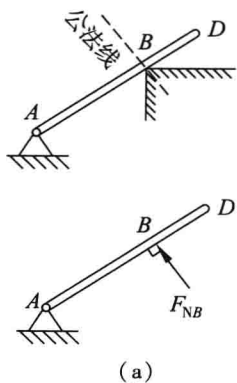


图 1.20 光滑面约束实例一

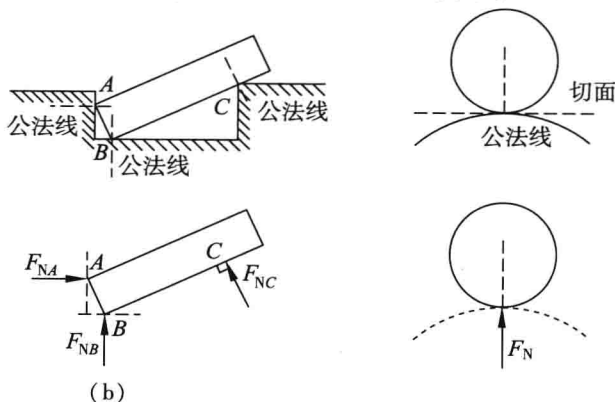


图 1.21 光滑面约束实例二

### (三) 光滑铰链约束

工程上常用销钉来联接构件或零件,且忽略销钉与构件间的摩擦,这种约束称为光滑铰链约束,如图 1.22(a)所示,此时受约束的两个构件都只能绕销钉轴线相对转动。如图 1.22(b)所示,由于销钉与构件的圆孔表面都是光滑的,两者之间总有缝隙,构件受主动



力后形成线接触点  $K$ , 根据光滑面约束反力特点, 销钉对构件的约束反力应沿接触点  $K$  的公法线通过构件圆孔中心 (铰链中心), 使被约束构件受压力。但由于销钉与销钉孔壁的接触点与被约束构件所受的主动力有关, 一般不能预先确定, 所以约束反力  $F_R$  的方向也不能确定。因此, 其约束反力作用在垂直于销钉轴线平面内, 通过销钉中心, 方向不定。为计算方便, 铰链约束的约束反力常用过铰链中心的两个大小未知的正交分力  $F_x$ 、 $F_y$  来表示, 两个分力的指向可以假设。

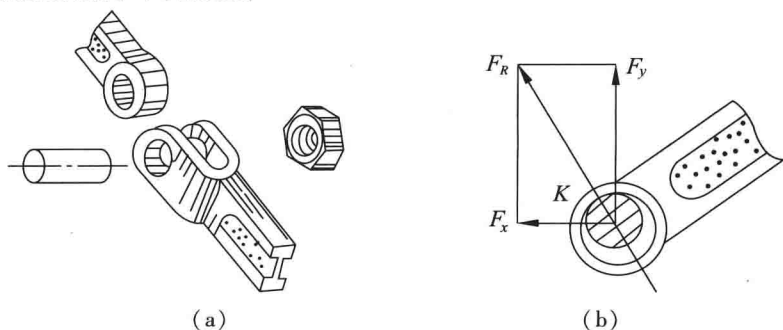


图 1.22 光滑铰链约束

根据被联接构件的形状、位置及作用, 光滑圆柱铰链又可分为中间铰链, 固定铰支座和活动铰支座以及球铰链支座等。

#### ◆1. 中间铰链

两构件用直径相同的圆柱形孔通过圆柱形销钉相联接 (图 1.23 (a)), 即构成中间铰链 (图 1.23 (b))。中间铰链所联接的两构件互为其中一个的约束, 其约束力用两个正交的分力  $F_x$  和  $F_y$  表示 (图 1.23 (c))。

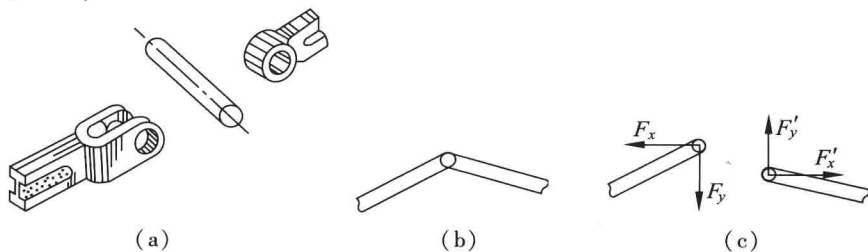


图 1.23 中间铰链

#### ◆2. 固定铰支座

将构件与地面或机座联接就构成了固定铰支座, 如图 1.24 (a) 所示。固定铰支座的约束与中间铰链约束完全相同。简化记号和约束反力如图 1.24 (b) 和图 1.24 (c) 所示。

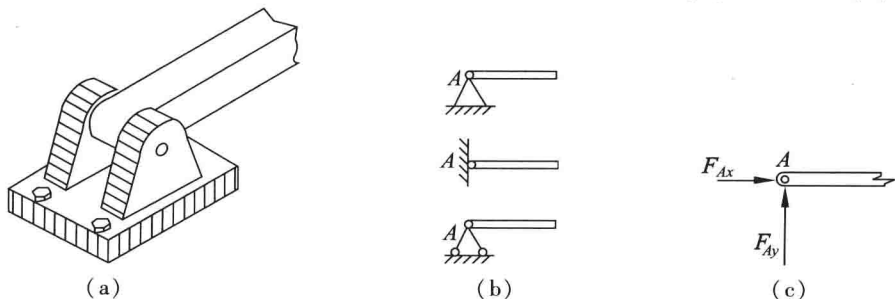


图 1.24 固定铰支座