

新世纪高职高专课程与实训系列教材

# 机械设计基础

	李国斌	梁建和	主 编
陈伟珍	姜 俊	王爱君	副主编
	潘尚峰	殷立君	主 审

清华大学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是根据教育部制定的《高职高专教育机械设计基础课程教学基本要求》和新近颁布的国家有关标准编写而成的。

本书突出了高等职业教育的特点,将机械原理与机械零件的内容有机地结合在一起,并增加了实训教学内容。每章安排了较多的习题,并附答案,便于学生课后复习和教师根据授课需要安排教学,适应了目前教学改革的需要。各章内容是按照工作原理、结构特点和强度计算的顺序编写的。全书共分16章,包括机械设计基础概述、平面机构的运动简图及自由度、平面连杆机构、凸轮机构、间歇运动机构、联接、带传动、链传动、齿轮传动、蜗杆传动、轮系、滑动轴承、滚动轴承、轴,以及其他常用零部件和机械的平衡与调速。

本书可作为高等职业技术学院、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院机械、机电及近机类专业的教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础/李国斌,梁建和主编;陈伟珍,姜俊,王爱君副主编;潘尚峰,殷立君主审.—北京:清华大学出版社,2007.1

(新世纪高职高专课程与实训系列教材)

ISBN 978-7-302-14170-9

I.机… II.①李…②梁…③陈…④姜…⑤王…⑥潘…⑦殷… III.机械设计—高等学校:技术学校—教材 IV.TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第137817号

责任编辑:王景先 张文弘

封面设计:山鹰工作室

版式设计:北京东方人华科技有限公司

责任校对:周剑云

责任印制:

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印 刷 者:

装 订 者:

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:19 字 数:445千字

版 次:2007年1月第1版 印 次:2007年1月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:26.00元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:

# 第 1 章

## 机械设计基础概述

### 本章要点及学习指导:

本章学习的重点是“本课程研究的对象和内容、机械设计的基本要求和一般过程”。在本章的开始,介绍了机器、机构及机械等名词和概念,以及机器和机构的用途及区别,并通过实例说明各种机器的主要组成部分都是各种机构,从而明确了机械中的常用机构和通用零件的工作原理、结构特点,其中基本设计理论和计算方法是本课程研究的主要对象。在本章的学习中,要把注意力集中在了解本课程研究的对象及内容上。当然,由于目前还没有具体学习这些内容,故只能是有一个概括的了解。此外,对本课程的性质和特点也应有所了解,以便采取合适的学习方法把本课程学好。

### 案例导入:

用内燃机、颚式破碎机导入。提出机器的共同特征、机器与机构的区别、通用零件和专用零件的概念,介绍机械设计的基本要求及机械设计的一般过程。

机械是人类进行生产以减少体力劳动和提高生产率的主要工具,使用机械进行生产的水平是衡量一个国家的技术水平和现代化程度的重要标志。为了更好地运用、研究和设计机械,对于机械工程技术人员,学习和掌握一定的机械设计基础知识是非常重要的。

### 1.1 本课程研究的对象和内容

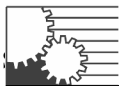
在日常生活和生产中,人们广泛地使用着名目繁多的机器。例如,缝纫机、洗衣机、汽车、电动机和起重机等。尽管这些机器的结构、性能和用途各不相同,但它们具有一些共同的特征。

如图 1.1 所示为单缸内燃机,它由气缸体 1、活塞 2、进气阀 3、排气阀 4、连杆 5、曲轴 6、凸轮 7、顶杆 8、齿轮 9 和齿轮 10 等组成。燃气推动活塞移动,通过连杆使曲轴作连续转动,从而将燃气的热能转换为曲轴转动的机械能。

如图 1.2 所示为颚式破碎机,它由电动机 1、带轮 2、V 型带 3、带轮 4、偏心轴 5、动颚板 6、肘板 7、定颚板及机架 8 等组成。电动机的转动经带传动带动偏心轴转动,从而使动颚板产生平面运动,与定颚板一起实现轧碎物料的功能。

由以上分析可知,各种机械虽然结构型式、功用和性能不同,但都具有以下的共同特征:

- 它们是由许多人为实体的组合。
- 各实体间具有确定的相对运动。
- 它们能代替或减轻人类的劳动,以完成有效的机械功,或进行能量转换。



凡同时具有以上三个特征的机械称为机器，仅具备前两个特征的则称为机构。由此可见，机器是由机构组成的，但从构成和运动的角度看，机器与机构并无区别。故在工程上，通常以“机械”一词作为机器和机构的总称。

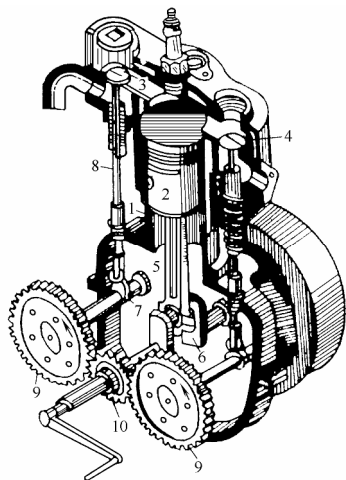


图 1.1 内燃机

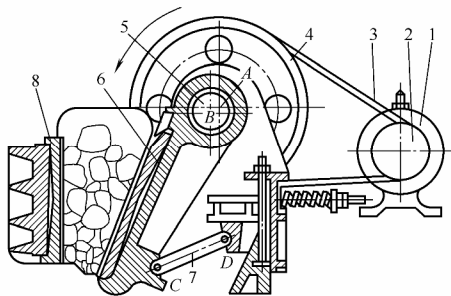


图 1.2 颚式破碎机

机构中的运动单元体称为构件。所以构件具有独立的运动特性，它是运动的单元，而零件是制造的单元。如图 1.3 所示的连杆，它是由连杆体 1、连杆盖 4、螺栓 2 及螺母 3 等几个零件组成。零件是组成机械的不可拆的基本单元，如螺钉、齿轮轴和弹簧等。

对于机械中的零件，按功能和结构特点又可分为通用零件和专用零件。各种机械中普遍使用的零件称为通用零件，如前所述零件。仅在某些专门行业中才用到的零件称为专门零件，如汽轮机的叶片、机床的床身和内燃机的活塞等。

机械设计基础课程主要研究机械中的常用机构和通用零件的工作原理、结构特点，基本设计理论和计算方法，同时扼要地介绍国家标准和有关规范，某些标准零件的选用原则和方法。

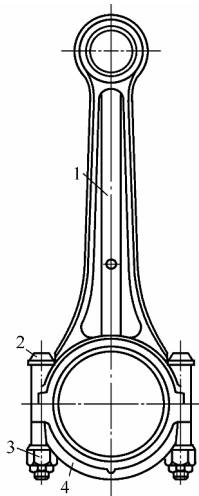


图 1.3 连杆



## 1.2 本课程的学习方法

机械设计基础如同机械制图、电工学一样,是高等学校工科有关专业的一门主要的技术基础课。通过本课程的学习,可以培养学生初步具备运用手册设计机械传动装置和简单机械的能力,为日后从事技术革新创造条件,为学习有关专业课程提供必要的理论基础。学习本课程时应注意以下几个特点:

(1) 本课程要综合运用高等数学、工程力学、金工实习、制图、互换性与技术测量等课程的基本知识去解决常用机构、通用零件的设计等问题。因此,先修课程的掌握程度直接影响到本课程的学习。

(2) 学生一接触本课程就会产生“没有系统性”、“逻辑性差”等错觉,这是由于学生习惯了基础课的系统性所造成的。本课程中,虽然不同研究对象所涉及的理论基础不同,且相互之间无多大关系,但最终的研究目的只有一个,即设计出能应用的机构、零件等。本课程的各部分内容都是按照工作原理、结构、强度计算和使用维护的顺序介绍的,有其自身的系统性,学习时应注意这一特点。

(3) 由于实践中的问题很复杂,很难用纯理论的方法来解决。因此,常常采用很多经验公式、参数以及简化计算等,这样往往会给学生造成“不讲道理”、“没有理论”等错觉,这点必须在学习过程中逐步适应。

(4) 计算步骤和计算结果常常不像基础课具有唯一性。

(5) 计算对解决设计问题虽然很重要,但并不是唯一所要求的能力。学生必须逐步培养把理论计算与结构设计、工艺等结合起来解决设计问题的能力。

## 1.3 机械设计的基本要求和一般过程

### 1.3.1 机械设计的基本要求

机械的类型很多,但其设计的基本要求大致相同。主要有以下几点:

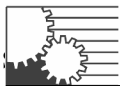
#### 1. 满足预定功能的要求

这是指能够按照预期的技术要求顺利地执行机械的全部职能,如机器工作部分的运动形式、速度、运动精度和平稳性、需要传递的功率,以及某些使用上的特殊要求(如高温、防潮等)。

#### 2. 满足经济性要求

机械的经济性是指在设计、制造上成本低,使用上效率高,能源和辅助材料消耗少,维护及管理费用低等。

在产品整个设计周期中,必须把产品设计、制造及使用三方面作为一个系统工程来考



虑, 用价值工程理论指导产品设计, 正确使用材料, 采用合理的结构尺寸和工艺, 以降低产品的成本。

### 3. 满足工艺要求

设计机器时应尽量减少零件的数量, 尽可能地采用标准件, 装配及维修简单等。

### 4. 满足劳动保护要求

操作方便为有利于减轻操作人员的劳动强度。能实现对操作人员的防护, 保证人身安全和身体健康。对于技术系统的周围环境和人不致造成污染和危害, 同时要保证机器对环境的适应性。

### 5. 满足其他特殊要求

必须考虑有些机械由于工作环境和要求不同, 而对设计提出某些特殊要求, 如药品、食品和纺织机械要求防止产品污染, 航空航天机械要求减轻重量等。

总之, 必须根据所要设计的机械的实际情况, 分清应满足的各项设计要求的主次程度, 切忌简单照搬或乱提要求。

## 1.3.2 机械设计的一般过程

机械设计方法很多, 既有传统的设计方法, 也有现代的设计方法。由于各种机械的用途、性能要求不同, 设计的具体条件不同, 所以设计的步骤和方法不完全一致, 但一般过程和内容是基本一致的。

### 1. 机械设计过程的几个阶段

机械设计的过程通常可分为以下几个阶段:

#### 1) 提出和制定产品设计任务书

设计任务书通常是人们根据市场需求提出, 通过可行性分析后确定的, 其中包括产品的预期功能、有关指标和限制条件等。

#### 2) 总体方案设计

在满足设计任务书的前提下, 由设计人员提出各种设计方案并进行分析比较, 从中选择最佳方案。

#### 3) 技术设计

在既定设计方案的基础上, 完成机械产品的总体设计、部件设计和零件设计等, 设计结果以工程图及计算书等技术文件的形式表达出来。

#### 4) 样机的试制和鉴定

根据技术设计提供的图样和技术文件进行样机试制并对样机进行试运行, 检测样机是否达到设计要求。把发现的问题反馈给设计人员, 经过修改完善, 最后通过鉴定。

#### 5) 产品的正式投产

根据鉴定结论, 使样机定型。然后, 再由生产条件和市场状况确定生产数量。



## 2. 机构零件设计的一般步骤

当机械的总体方案已经确定，运动学和动力学计算完成后，就要进行主要零部件的设计。机械零件设计的一般步骤如下：

- (1) 根据机器的具体运转情况和简化的计算方案确定零件的载荷。
- (2) 根据零件工作情况的分析，判定零件的失效形式，从而确定其计算准则。
- (3) 进行主要参数的选择，选定材料，根据计算准则求出零件的主要尺寸，考虑热处理及结构工艺性等。
- (4) 进行结构设计。
- (5) 绘制零件工作图，制订技术要求，编写计算说明书及有关技术文件。

对于不同的零件和工作条件，以上这些步骤可以有所不同。此外，在设计过程中，这些步骤又是相互交错、反复进行的。

## 3. 设计过程中的注意事项

产品设计过程是智力活动过程，它体现了设计人员的创新思维活动，设计过程是逐步逼近解决方案并逐步完善的过程。设计过程中还应注意几点：

- (1) 设计过程要有全局观点，不能只考虑设计对象本身的问题，而要把设计对象看作一个系统，处理人一机一环境之间的关系。
- (2) 善于运用创造性思维和方法，注意考虑多方案解，避免解答的局限性。
- (3) 设计的各阶段应有明确的目标，注意各阶段的评价和优选，以求出既满足功能要求又有最大实现可能的方案。
- (4) 要注意反馈及必要的工作循环。解决问题要由抽象到具体，由局部到全面，由不确定到确定。

# 1.3.3 机械零件的失效形式和设计准则

## 1. 零件的工作能力

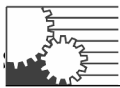
进行机器的零件设计时，一般都要根据零件的可能失效形式来进行，保证零件具有足够抵抗失效的工作能力。

零件的工作能力是指在不发生失效的条件下，零件所能达到的安全工作的限度。若用载荷来表示，习惯上称为承载能力。

## 2. 失效形式

机械零件的失效是指零件由于某些原因不能正常工作的现象。失效并不单纯意味着损坏，而且有更广泛的含义，零件常见的失效形式有：断裂或过大的塑性变形，过大的弹性变形，工作表面过度磨损或损坏，发生了强烈的振动，工作温度过高而产生过大的热应力，热变形或破坏正常的润滑油膜，靠摩擦力工作的零件打滑以及联接零件的松动等。如果零件发生失效，机械就可能无法正常工作。

同一种机械零件可能有几种不同的失效形式，对应于各种失效形式就各有其不同的工



作能力。例如，设计机床的主轴时，必须保证它具有足够的强度，而不发生断裂，且其弹性变形不能超过一定的数值，即还必须保证其刚度，对于有些作相对运动的零件，如机床的导轨，除了保证其强度和刚度外，还要求具有良好的耐磨性，否则会破坏机床应用的精度。

### 3. 设计准则

为了防止零件在预期工作寿命期内发生失效，设计零件时必须依据一定的设计准则，显然这些准则与失效形式紧密地联系在一起。这些准则主要有：强度准则、刚度准则、耐磨性准则、振动稳定性准则和可靠性准则。

## 1.3.4 机械零件的工艺性及标准化

### 1. 工艺性

机械零件的结构，主要由它在机械中的作用，它和其他相关零件的关系及制造工艺所决定。如果零件的结构在具体生产条件下，能用最少的工时和最低成本制造和装配出来，则这样的零件结构具有良好的工艺性，因此，对零件进行结构设计时，有关工艺性的基本要求是：

#### 1) 毛坯选择合理

机械制造中毛坯制备的方法有：直接利用型材、铸造、锻造、冲击和焊接等。毛坯的选择与具体的生产条件有关，一般取决于生产批量、材料性能和加工可能性等。

#### 2) 结构简单合理和便于机械加工

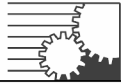
设计零件的结构形状时，应尽量采用简单的表面(如平面、圆柱面)及其配合，并使加工表面数目最少和加工面积最小。

#### 3) 制造精度及表面粗糙度选得合适

制造精度和表面粗糙度选得越高，加工费用就越高，因此，应在满足使用要求的原则下，恰当地选择制造精度和表面粗糙度。

### 2. 标准化

标准化是指以制订标准和贯彻标准为主要内容的全部活动过程。它包含两方面的内容：制订标准和贯彻标准；其原则是统一、简化、协调、择优。标准化有重大意义：有利于设计和制造，有利于产品的互换性，便于维修。标准件可以组织专门化生产，既有利于保证产品质量，又可降低成本。随着工业的发展，我国颁布了许多标准，其中有国家标准(GB)、部颁标准、专业标准和企业标准四级，在机械设计过程中，如无特殊需要，就必须采用这些标准。在国际上，为了促进世界各国在技术上的统一，成立了国际标准化组织(简称 ISO)和国际电工委员会(简称 IEC)，由这两个组织负责制定和颁发国际标准。我国于 1978 年恢复参加 ISO 组织后，陆续修订了自己的标准。修订的原则是，在立足我国生产实际的基础上向 ISO 靠拢，以利于加强我国在国际上的技术交流和产品互换。




## 习题与练习


- (1) 人们常说的机械含义是什么？机器与机构的区别是什么？指出下列设备中哪些是机构：铣床、发电机、机械式手表、洗衣机和汽车等。
- (2) 什么是通用零件？什么是专用零件？试各举三个实例。
- (3) 什么是机械零件的失效？机械零件可能的失效形式主要有哪些？

## 第 2 章

# 平面机构的运动简图及自由度

 本章要点及学习指导:

本章首先介绍组成机构最基本的环节——运动副及其类型；然后介绍工程中常用的机构运动简图的画法；最后重点讨论机构自由度的计算方法、机构具有确定运动的条件及其计算机构自由度时应注意的复合铰链、局部自由度和虚约束事项。通过本章的学习，要求学习者了解运动副及其分类，熟识各种平面运动副的一般表达方法；熟练看懂教材中各种平面机构的运动简图；能够正确判断和处理平面机构运动简图中的复合铰链、局部自由度和常见的虚约束，综合运用公式  $F=3n-2P_L-P_H$ ，进行平面机构自由度的计算，并能判断机构是否具有确定的运动。

 案例导入:

绘制和阅读平面机构运动简图是机械类工程技术人员的基本能力之一，是进行机械产品的设计、分析的基础。

冲床是机械产品中常见的一种机械装置。学习者可以通过冲床机构运动简图的测绘，学习机构自由度的计算方法、及其计算机构自由度时应注意的复合铰链、局部自由度和虚约束事项，以及机构运动简图测绘的基本步骤。

在进行机构运动简图的测绘时，须解决以下问题:

- (1) 机构运动简图测绘的步骤是什么？一个正确的平面机构运动简图应能说明哪些内容？原动件的位置对机构运动简图有何影响？为什么？
- (2) 平面机构自由度的计算，对测绘机构的运动简图有何帮助？自由度大于或小于原动件的数目时，会产生什么结果？
- (3) 计算机构自由度应注意哪些问题？

若组成机构的所有构件都在同一平面或相互平行的平面内运动，则称该机构为平面机构，否则称为空间机构。大多数机构为平面机构，故本章只讨论平面机构。

## 2.1 运动副及其分类

一个作平面运动的自由构件具有三个独立运动，如图 2.1 所示，在  $xoy$  坐标中构件可随其上任一点  $A$  沿  $x$ 、 $y$  轴移动和绕  $A$  点转动。这种相对于参考系构件所具有的独立运动称为构件的自由度，所以一个作平面运动的自由构件有三个自由度。

当构件组成机构时，每个构件都以一定的型式与其他构件相互联接，且相互联接的两构件间保留着一定的相对运动。这种使两构件直接接触而又彼此有一定的相对运动的联接称为运动副。如齿轮间的啮合、轴与轴承的联接和活塞与气缸的联接等都构成运动副。构



件组成运动副后，其独立运动受到约束，自由度便随之减少。

根据组成运动副两构件之间的接触特性，运动副可分为低副和高副。

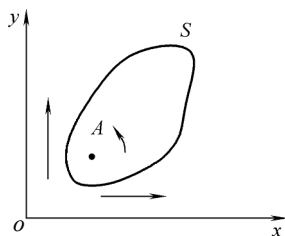


图 2.1 作平面运动的自由构件具有三个独立运动

### 2.1.1 低副

两构件通过面接触形成的运动副称为低副。根据它们之间的相对运动是转动还是移动，又可分为转动副和移动副。

#### 1. 转动副

若组成运动副的两构件之间只能绕某一轴线作相对转动，这种运动副称为转动副或铰链。如图 2.2 所示，它又可分为固定铰链和活动铰链。

#### 2. 移动副

若组成运动副的两构件只能沿某一轴线相对直线移动，这种运动副称为移动副。如图 2.3 所示。

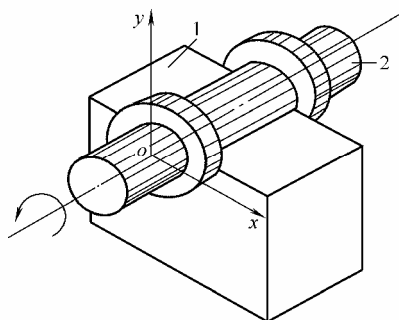


图 2.2 转动副

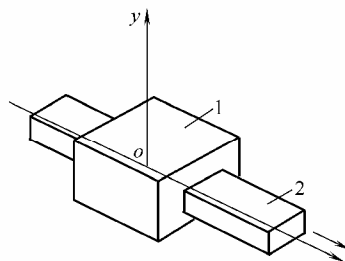


图 2.3 移动副

### 2.1.2 高副

两构件间通过点或线接触组成的运动副，称为高副。如图 2.4 所示，它们的相对运动是沿切线  $t-t$  和绕  $A$  点的转动。

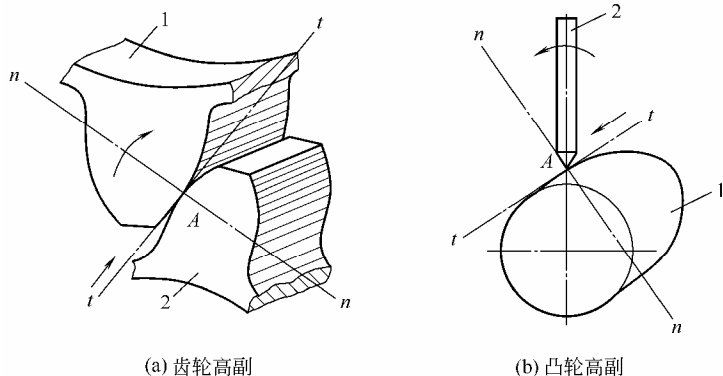


图 2.4 高副

此外，常见的运动副还有螺旋副、球面副。它们皆属空间运动副。

## 2.2 平面机构运动简图

实际机构一般由外形和结构都较复杂的构件组成，为便于分析和研究机构有必要撇开那些与运动无关的构件外形和运动副具体构造，仅用简单的线条和符号来表示构件和运动副，并按此比例定出各运动副的位置，这种说明机构各构件间相对运动关系的简化图形，称为机构运动简图。机构运动简图保持其实际机构的运动特征，它不仅简明地表达了实际机构的运动情况，且还可通过该图进行运动分析及动力分析。

### 2.2.1 运动副的符号

图 2.5(a), (b), (c) 是两个构件组成转动副的表示方法，用圆圈表示转动副，其圆心代表相对转动轴线。(a) 表示两个构件均为活动构件，(b)、(c) 表示一个构件为机架，应把代表机架的构件 1 画上斜线。图 2.6(a)、(b)、(c) 是两个构件组成移动副的方法，移动副的导路必须与相对移动方向一致，与上述相同，应把代表机架的构件画上斜线。

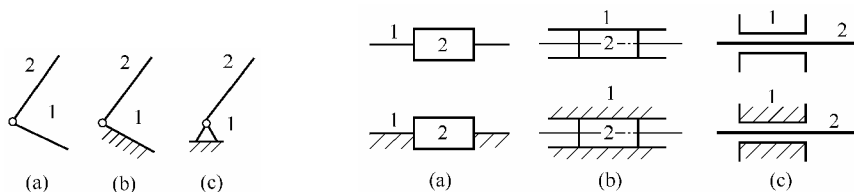


图 2.5 两个构件组成的转动副的符号

图 2.6 两个构件组成的移动副的符号

图 2.7 表示高副。画高副时，应将接触部分的外形画出。对于凸轮、滚子，习惯上画出其全部轮廓；对于齿轮，常用点画线画出其节圆。

图 2.8 为构件的表示方法。图 2.8(a) 表示参与构成两个转动副的构件。图 2.8(b)、图 2.8(c) 表示参与构成三个转动副的构件，为了说明三个转动副是在同一构件上，可在三角



形内画上剖面线如图 2.8(b)所示,或在三个角涂上焊缝标记,如图 2.8(c)所示,一个构件上有三个转动副,且转动副中心在一条直线上,则可用图 2.8(d)表示。如图 2.8(e)、2.8(f)所示表示参与构成一个转动副和一个移动副的构件。

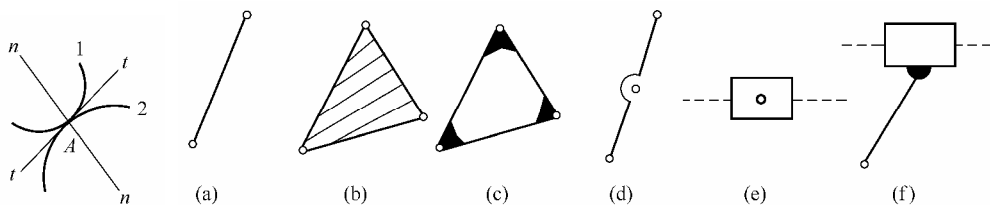


图 2.7 高副的表示方法

图 2.8 构件的表示方法

其他表示方法可参看有关标准。

## 2.2.2 机构中构件的分类

组成机构的构件,根据运动副性质可分为三类:

- (1) 固定构件(机架) 是用来支承活动构件的构件,如图 1.1 中的气缸体。
- (2) 原动件(主动件、输入构件) 机构中作用有驱动力或力矩的构件(或运动规律已知的构件);如图 1.1 所示中的活塞。
- (3) 从动件 机构中除了主动件以外,随着主动件的运动而运动的其余可动件皆称为从动件。其中输出预期运动的从动件称为输出构件,其他从动件则起传递运动的作用。如图 1.1 所示的曲轴是输出构件,连杆是用于传递运动的从动件。

任何一个机构中,必然有一个构件被相对地看作为固定构件。由此可知,机构是由机架、原动件及从动件系统所组成。

## 2.2.3 机构运动简图的绘制

机构运动简图一般可按以下步骤进行试绘:

- (1) 分析机构运动的传递情况,找出固定件(机架)、原动件和从动件。
- (2) 从原动件开始,按照运动的传递顺序,分析各构件间的运动副性质,从而确定有多少构件及运动副的类型和数目。
- (3) 选择视图平面。
- (4) 选取合适的比例尺  $\mu_l$ ,确定各运动副之间的相对位置,用简单的线条和规定的运动副符号画出机构运动简图。

$$\mu_l = \frac{\text{构件的实际长度(m)}}{\text{图中线段长度(mm)}}$$

下面分别以例 2-1、例 2-2 为例,说明其机构运动简图的绘制方法。

**例 2-1** 试绘制如图 1.1 所示内燃机的机构运动简图。

**解** 由图 1.1 可知,此内燃机的主体机构是由气缸 1、活塞 2、连杆 5 和曲轴 6 所组成的曲柄滑块机构。此外,还有齿轮机构、凸轮机构等。在燃气的压力作用下,活塞 2 首先



运动, 是主动件, 然后通过连杆 5 使曲轴 6 输出回转运动, 而为了控制进气和排气, 由固装于曲轴 6 上的小齿轮 10 带动大齿轮 9、10 使凸轮轴回转, 再由凸轮轴上的两个凸轮 7, 分别推动顶杆 8 以控制进气阀 3 和排气阀 4。构件 2 与构件 1 组成移动副, 构件 2 与构件 5 组成转动副, 构件 5 与构件 6 组成转动副, 构件 10 与构件 9 组成高副, 构件 7 与构件 8 组成高副, 构件 8、4 与构件 1 组成移动副。把该内燃机的构造情况及运动副的组成搞清楚以后, 再选定投影面和比例尺, 用规定的线条和符号来表示构件和运动副即不难绘出其机构运动简图, 如图 2.9 所示。

**例 2-2** 试绘制如图 1.2 所示颚式破碎机的机构运动简图。

**解** 颚式破碎机的主体机构由机架、偏心轴(又称曲轴)5、动颚板 6 和肘板 7 共四个构件组成。带轮 4 与偏心轴 5 固联成一体, 它是运动和动力输入构件, 即原动件, 其余构件都是从动件。当带轮 4 和偏心轴 5 绕轴线  $A$  转动时, 驱使输出构件动颚板 6 作平面运动, 从而将物料轧碎。在确定构件数目之后, 再根据各构件间的相对运动确定运动副的种类和数目。偏心轴 5 与机架绕轴线  $A$  相对转动, 故构件 5 与机架组成以  $A$  为中心的转动副; 动颚板 6 与偏心轴 5 绕轴线  $B$  相对转动, 故构件 5、6 组成以  $B$  为中心的转动副; 动颚板 6 与肘板 7 绕轴线  $C$  相对转动, 故构件 6、7 组成以  $C$  为中心的转动副; 肘板 7 与机架绕轴线  $D$  相对转动, 故构件 7 与机架组成以  $D$  为中心的转动副。选定适当比例尺, 根据图 1.2 尺寸定出  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  的相对位置, 用构件和运动副的规定符号绘出机构运动简图, 如图 2.10 所示。

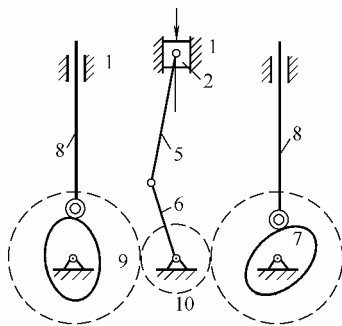


图 2.9 内燃机机构运动简图

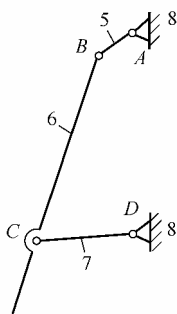


图 2.10 颚式破碎机的机构运动简图

## 2.3 平面机构的自由度

机构是一个构件系统, 为了传递运动和动力, 机构中各构件之间应具有确定的相对运动。然而, 机构中的构件仅仅拼凑起来是不一定能运动的; 即使能运动, 也不一定能具有确定的相对运动。为此, 构件应如何组合, 才能运动? 在什么条件下才具有确定的相对运动? 这对分析现有机构或创新机构是很重要的。

若要判定几个构件通过运动副相连起来的构件系统能否产生相对运动和是否有确切的运动, 就必须研究平面机构的自由度计算。



### 2.3.1 平面机构自由度计算公式及机构具有确定运动的条件

平面机构的自由度就是该机构中各构件相对于机架的所能有的独立运动的数目。

我们已经知道，对于一个作平面运动的构件，具有三个自由度。当它们通过运动副相互联接之后，它们的相对运动就受到约束，必然失去一些自由度。但又保留一些自由度。构件失去的自由度与它受到的约束条件数相等。例如，如图 2.2 所示的转动副，约束了两个移动自由度，只保留一个转动自由度；而移动副如图 2.3 所示也约束了两个自由度，保留一个自由度；高副如图 2.4 所示则只约束了沿接触公法线  $nn$  方向移动的自由度，保留两个自由度。故在平面机构中，每个低副引入两个约束，使构件失去两个自由度；每个高副引入一个约束，使构件失去一个自由度。

设平面机构共有  $k$  个构件，除去固定构件，则机构中的活动构件数为  $n=k-1$ ；若机构中共有  $P_L$  个低副和  $P_H$  个高副，则这些活动构件在未用运动副联接之前，其自由度总数为  $3n$ 。当用  $P_L$  个低副与  $P_H$  个高副联接成机构之后，全部运动副所引入的约束总数为  $2P_L+P_H$ 。因此可动构件的自由度总数减去运动副引入的约束总数，就是该机构中各个构件相对机架独立运动的数目，亦即为该机构的自由度，以  $F$  表示，则有

$$F=3n-2P_L-P_H \quad (2-1)$$

上式就是计算平面机构自由度的公式。

由前述可知，机构的自由度是机构中各构件相对机架所具有的独立运动的数目。而从动件是不能独立运动的，原动件才能独立运动，故原动件数必定等于机构的自由度。

**例 2-3** 计算如图 2.10 所示机构的自由度。

**解** 该机构有三个活动构件，即  $n=3$ ；有四个转动副，即  $P_L=4$ ；没有高副，即  $P_H=0$ 。由式(2-1)得机构的自由度为

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 3-2 \times 4-0=1$$

原动件的独立运动是由外界给定的。如果给出的原动件数不等于机构的自由度，则将产生如下影响：

如图 2.11(a)所示，由三个构件通过转动副联接而成的系统就没有运动的可能性。计算其自由度可得  $F=3 \times 2-2 \times 3-0=0$ ，如图 2.11(b)所示系统， $n=3$ ， $P_L=5$ ， $P_H=0$ 。计算其自由度可得， $F=3 \times 3-2 \times 5-0=-1$ ，由于  $F < 0$ ，已成为超静定的桁架。又如图 2.11(c)所示的五构件系统，若取构件 1 作主动件，当给定  $\varphi_1$  时，构件 2、3、4 的位置是不确定的。但如果给定构件 1、4 的位置参数  $\varphi_1$  和  $\varphi_4$ ，则构件 2、3 的位置也就确定。计算该系统的自由度可得  $F=3 \times 4-2 \times 5-0=2$ 。

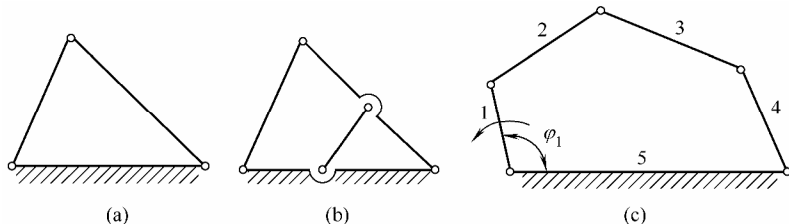


图 2.11 几种构件系统示例

综上所述，机构具有确定运动的条件是： $F > 0$ ，且  $F$  等于原动件数。

## 2.3.2 计算平面机构自由度应注意的事项

在应用式(2-1)计算平面机构自由度时，应注意以下几点。

### 1. 复合铰链

两个以上构件同时在一处用转动副相联接就构成复合铰链。如图 2.12(a)所示为三构件在  $A$  处构成的复合铰链。图(b)是它的俯视图，可以看出，此三个构件共组成两个转动副。当由  $k$  个构件组成复合铰链时，则应当组成  $(k-1)$  个转动副。在计算机构自由度时，应仔细观察是否有复合铰链存在，以免影响计算。

**例 2-4** 试计算如图 2.13 所示机构的自由度。

**解** 此机构  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为复合铰链，各具有两个转动副，所以  $P_L=10$ (全部为转动副)， $P_H=0$ ，可动构件数  $n=7$ 。

由式(2-1)得机构的自由度为

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 7-2 \times 10-0=1$$

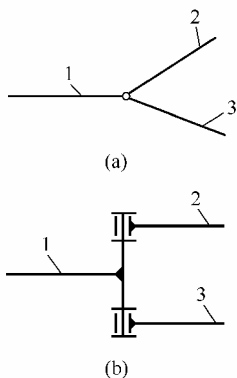


图 2.12 复合铰链

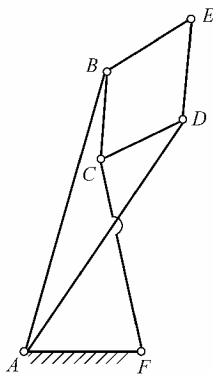


图 2.13 含有复合铰链的机构

### 2. 局部自由度

机构中一种与整个机构主运动无关的自由度，称为局部自由度，在计算机构自由度时，可预先排除。

**例 2-5** 试计算如图 2.14 所示机构的自由度。

**解** 如图 2.14 所示平面凸轮机构中，为减少高副元素的磨损，在从动件上安装一个滚子 3，变滑动摩擦为滚动摩擦。由于滚子绕其自身轴线的转动与否并不影响凸轮与从动件间的相对运动，因此滚子绕其身轴线的转动为机构的局部自由度，在计算机构的自由度时应预先将转动副  $C$  除去不计。或如图所示，设想将滚子 3 与从动件固连在一起作为一个构件来考虑，此时，该机构中  $n=2$ ， $P_L=2$ ， $P_H=1$ 。

故

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 2-2 \times 2-1=1$$



即此机构只有 1 个自由度，是符合实际情况的。

### 3. 虚约束

在机构中与其他约束重复而不起限制运动作用的约束，称为虚约束。在计算机构自由度时应当除去不计。例如，如图 2.15 所示的机构中  $L_{AB}=L_{CD}=L_{EF}$ ， $L_{BF}=L_{AE}$ ， $L_{FC}=L_{ED}$ ，在此机构中， $n=4$ ， $P_L=6$ ， $P_H=0$ ，故其自由度

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 4-2\times 6=0$$

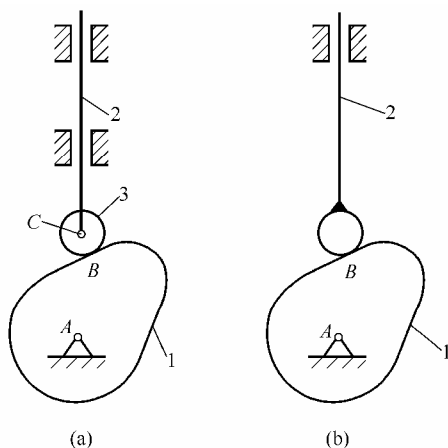


图 2.14 局部自由度

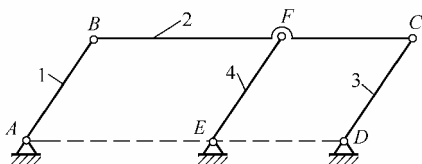


图 2.15 虚约束示意

这表明该机构不能运动，显然与实际情况不符。进一步分析可知，机构中的运动轨迹有重叠现象。因为如果去掉构件 4(转动副 C、D 也不再存在)。当原动件 1 转动时，构件 2 上的 C 点的轨迹自然是以 D 点为圆心，以  $L_{AB}$ (或  $L_{EF}$ ) 为半径的圆弧。因此构件 4 及转动副 C、D 是否存在，对整个机构的运动并无影响。也就是说，机构中加入构件 4 及转动副 C、D 后，虽然使机构增加了一个约束，但此约束并不起限制机构运动的作用，所以是虚约束。因此在计算机构自由度时应除去构件 4 和转动副 C、D，此时， $n=3$ ， $P_L=4$ ， $P_H=0$ ，则

$$F=3\times 3-2\times 4=1$$

此结果与实际情况相符。

对于虚约束，只要求理解和熟悉下列三种情况：

(1) 两构件间组成多个导路平行的移动副，只有一个起作用，另一个为虚约束。例如，如图 2.14(a) 所示凸轮机构的运动简图，其主动件、从动件与机座间组成两个移动副，但其中只有一个起作用。故可用如图 2.14(b) 所示的一个移动副来代替。

(2) 两个构件间组成多个轴线重合的转动副，只有一个起作用，其余为虚约束。例如，两个轴承支持一根轴只能看作一个移动副。

(3) 机构中对传递运动不起独立作用的对称部分。如图 2.16 所示行星轮系中，星轮 2' 对运动的作用与行星轮 2 一样，但 2' 将引入一个约束，也是虚约束，计算自由度时应拆去 2' 及其带入的转动副及两个高副。

应当注意，对于虚约束，从机构的运动观点看是多余的，但从增加构件的刚度，改善