

高等学校“十一五”规划教材 / 机械类

机械设计基础教程

主 编 蒋秀珍

副主编 关晓冬 马慧良

A First Course in the Design for Mechanism

哈尔滨工业大学出版社

教育部“十一五”国家级规划教材

机械设计基础教程

主 编 薛 琳

副主编 王 强 李 强

Efficient Learning with Design for Mechanisms



机械工业出版社

TH122/822

2008

高等学校“十一五”规划教材/机械类

机械设计基础教程

主 编 蒋秀珍
副主编 关晓冬 马慧良

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书融合了机械设计的基础知识,比较全面、系统地阐述了机械工程常用机构和零部件的工作原理、结构、理论计算和设计方法,以及工程材料和机械精度设计方面的基础知识。为了便于理解,书中各章均附有例题和习题。

本书内容包括机构的组成及平面连杆机构、凸轮与间歇运动机构、齿轮机构、机械工程常用材料及其工程性能、连接、轴与联轴器、零件的几何精度、轴承、导轨、螺旋传动、齿轮传动设计、带传动、弹簧等内容。

本书可作为大学专科机电类及本科近机类专业基础课教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础教程/蒋秀珍主编.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2008.2

ISBN 978-7-5603-2403-6

I.机… II.蒋… III.机械设计-教材 IV.TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 016905 号

策划编辑 杨 桦

责任编辑 费佳明

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 18.5 字数 439 千字

版 次 2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2403-6

印 数 1~4 000

定 价 28.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

为适应教学改革和专业调整的需要,将过去的四门机械类技术基础课融合为一门课,编写了《机械设计基础教程》这本书。

本书是根据培养高级应用型专门人才的要求,加强课程整合、优化的课程改革原则和多年的教学实践经验编写而成。本书将机械原理、机械零件、工程材料与热处理和零件的机械精度设计等四门课程的内容有机地整合在一起,打破了旧的课程界限和学科体系,减少了各课程之间的重复,缩减了教学时数。书中所涉及的国家标准全部为最新颁布的标准。

本书共有 15 章,其中哈尔滨工业大学蒋秀珍编写第 1 章,孙玉芹编写第 8 章,马惠萍编写第 9 章;黑龙江工程学院马慧良编写第 2~4 章,须莹编写第 5、15 章;哈尔滨工业大学华德应用技术学院关晓冬编写第 6、10、14 章,张晓明编写第 11、12 章,王峰编写第 13 章,孙立峰编写第 7 章。

本书由蒋秀珍教授任主编,关晓冬、马慧良任副主编。

殷切希望广大读者在使用中提出宝贵意见,对书中不妥之处予以指正。

编 者
2008 年 1 月

目 录

第 1 章 机构的组成及平面连杆机构	1
1.1 平面机构的运动简图和自由度	1
1.2 铰链四杆机构的基本形式和特性	9
1.3 铰链四杆机构的曲柄存在条件	14
1.4 铰链四杆机构的演化	15
1.5 平面连杆机构的设计	19
习题与思考题	22
第 2 章 凸轮与间歇运动机构	26
2.1 凸轮机构	26
2.2 凸轮轮廓设计	31
2.3 凸轮设计中的几个问题	37
2.4 间歇运动机构	40
习题与思考题	44
第 3 章 齿轮机构	47
3.1 概述	47
3.2 齿廓啮合的基本定律	48
3.3 渐开线齿形和渐开线齿轮传动的特点	49
3.4 齿轮各部分名称、符号及渐开线标准圆柱直齿轮的尺寸计算	51
3.5 渐开线齿轮正确连续啮合条件	54
3.6 齿轮加工原理和根切现象	56
3.7 变位齿轮	60
3.8 斜齿圆柱齿轮传动	63
3.9 直齿圆锥齿轮传动	66
3.10 蜗杆传动	67
习题与思考题	72
第 4 章 轮系	74
4.1 轮系的类型和应用	74
4.2 轮系的传动比计算	76
4.3 谐波齿轮传动	81
习题与思考题	82

第5章 工程材料	85
5.1 材料的力学性能	85
5.2 常用的黑色金属材料	89
5.3 常用有色金属	96
5.4 常用非金属	97
5.5 钢的热处理与金属零件的表面精饰	99
5.6 机械零件材料的选择及其热处理	103
习题与思考题	107
第6章 联接	108
6.1 螺纹联接	108
6.2 销钉联接	120
6.3 键联接	121
6.4 花键联接	124
习题与思考题	125
第7章 轴与联轴器	127
7.1 轴	127
7.2 联轴器	138
习题与思考题	141
第8章 零件的几何精度	143
8.1 基本概念	143
8.2 尺寸精度设计基础	143
8.3 形状和位置精度设计	155
8.4 表面粗糙度	173
8.5 典型零件精度设计简介	176
习题与思考题	179
第9章 轴承	180
9.1 滚动轴承	180
9.2 滑动轴承	193
习题与思考题	204
第10章 导轨	206
10.1 概述	206
10.2 滑动摩擦导轨	206
10.3 滚动摩擦导轨	208
10.4 液体静压导轨	210
习题与思考题	211

第 11 章 螺旋传动	212
11.1 概述	212
11.2 滑动螺旋传动	212
11.3 滚动螺旋传动	221
11.4 螺旋传动机构的常用材料	223
习题与思考题	224
第 12 章 齿轮传动设计	225
12.1 齿轮传动的失效形式和设计准则	225
12.2 齿轮材料及其热处理	227
12.3 直齿圆柱齿轮传动的作用力及其计算载荷	229
12.4 直齿圆柱齿轮传动的强度计算	231
12.5 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度计算	235
12.6 齿轮的结构	238
12.7 齿轮传动的润滑	240
习题与思考题	240
第 13 章 蜗杆传动	242
13.1 蜗杆传动的失效形式、材料和结构	242
13.2 普通圆柱蜗杆传动的强度计算	244
13.3 蜗杆传动的效率、润滑和热平衡计算	246
习题与思考题	251
第 14 章 带传动与链传动	253
14.1 带传动	253
14.2 同步带传动	265
14.3 链传动	266
习题与思考题	272
第 15 章 弹簧	273
15.1 弹簧的功用	273
15.2 螺旋弹簧	273
15.3 其他弹簧简介	281
习题与思考题	282
附录	283
参考文献	288

第1章 机构的组成及平面连杆机构

1.1 平面机构的运动简图和自由度

通常,一台完善的现代化的机器具有四个组成部分,即原动机、传动机构、执行机构和控制系统。原动机用于提供动力,如电动机等;传动机构将运动和动力传递给执行机构,如齿轮、丝杠等;执行机构用于实现机器的功能,如机床的刀架、机器人的手爪等;控制系统则用于处理机器各组成部分之间的工作协调,以及与外部其他机器或原动机之间的关系协调,例如,用各种传感器收集机器内外部的信息,输入计算机进行处理,并向机器各部分发出指令,使之协调地进行工作,达到提高工作质量和生产效率以及降低能耗的目的。正是由于机器具有上述组成部分,所以绝大部分机器都具有机械运动,以完成机械功、转换机械能或进行信息处理。

机器中的机械运动大多是通过各种机构来实现的。一台机器通常包含一个或若干个机构,因此机构是机器的重要组成部分,下面给出若干定义。

1.1.1 零件、构件和机构

1. 零件

零件是独立加工制造的实体,是构成机械结构的最小单元。螺钉、螺母、单个齿轮、轴等都是零件。

2. 构件

把若干个零件刚性地联接在一起,彼此不作任何相对运动,作为一个刚性整体进行工作,这种刚性组合体称为构件。

3. 机构

由若干构件组成,各构件之间具有确定的相对运动关系的组合体称为机构。机构是机械结构中需要实现某种确定运动的部分。

组成机构的目的是为了使机构按照预定的要求进行有规律的运动,而不是无规律运动。为此,需研究机构具有确定运动的条件。这个问题对设计新机械、拟定运动方案或认识和分析现有机械是非常重要的。

所有构件都在相互平行的平面内运动的机构称为平面机构。目前工程上常见的机构大多属于平面机构。本章只讨论平面机构。

1.1.2 运动副及其分类

机构是由许多构件组成的。机构的每个构件都以一定的方式与某些构件相互联接。这种联接不是固定联接,而是能产生一定相对运动的联接。这种使两构件直接接触并能

产生一定相对运动的联接称为运动副。例如轴与轴承的联接、活塞与气缸的联接、传动齿轮两个轮齿间的联接等都构成运动副。

显然,两构件构成的运动副所起的作用是限制构件间的相对运动,这种限制作用称为约束。

一个不受任何约束的构件在平面中运动有三个自由度。与另一构件组成运动副后,其运动就受到约束,自由度将减少。运动副对自由度产生的约束数目取决于运动副的类型。

两构件组成的运动副,不外乎通过点、线或面的接触来实现。按照接触特性,通常把运动副分为低副和高副两类。

1. 低副

两构件通过面接触组成的运动副称为低副。平面机构中的低副有回转副和移动副两种。若组成运动副的两构件只能在一个平面内相对转动,约束掉两个移动自由度,这种运动副称为回转副,或称铰链,如图 1.1 所示。若组成运动副的两个构件只能沿某一轴线相对移动,约束掉一个移动和一个转动自由度,这种运动副称为移动副,如图 1.2 所示。

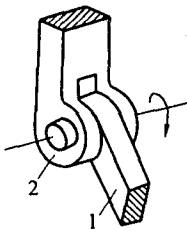


图 1.1 回转副

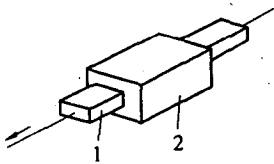


图 1.2 移动副

2. 高副

两构件通过点或线接触组成的运动副称为高副。图 1.3(a)中的车轮与钢轨,图 1.3(b)中的凸轮与从动件,图 1.3(c)中的轮齿 1 与轮齿 2 分别在接触处 A 组成高副。平面高副二构件间的相对运动由沿接触处切线 $t-t$ 方向的相对移动和在平面内的相对转动组成。

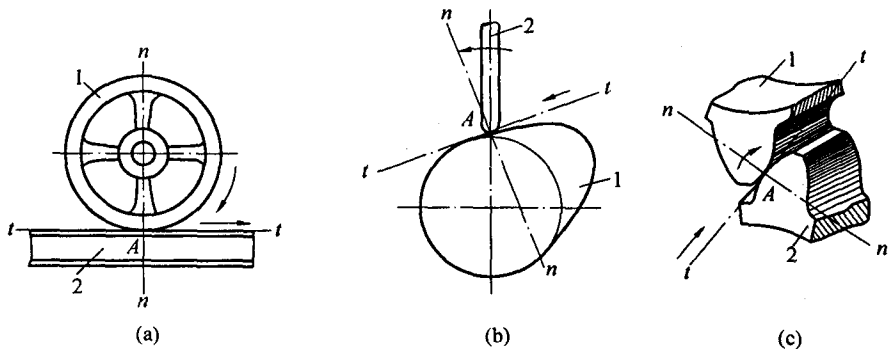


图 1.3 平面高副举例

除了上述平面运动副之外,机械中还经常见到如图 1.4(a)所示的球面副和图 1.4(b)所示螺旋副。这些运动副两构件间的相对运动是空间运动,故属于空间运动副。空间运动副已超出本章讨论的范围,故不赘述。

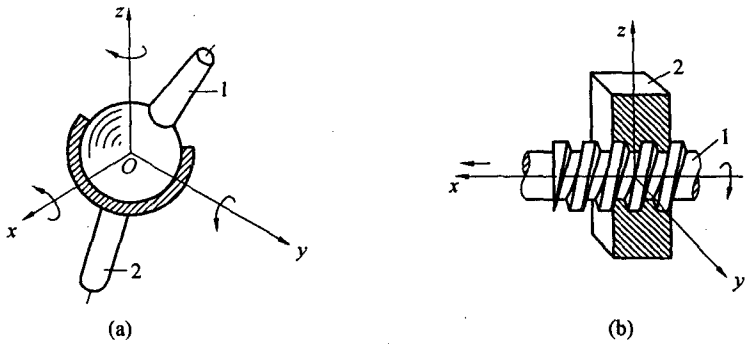


图 1.4 球面副和螺旋副

1.1.3 平面机构运动简图

实际构件的外形和结构往往很复杂,在研究机构运动时,为了使问题简化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,仅用简单线条和符号来表示构件和运动副,并按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。

机构运动简图中的平面运动副表示如图 1.5 所示。

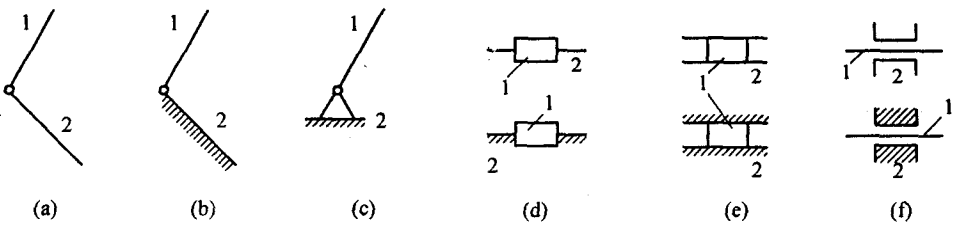


图 1.5 平面运动副的表示方法

图 1.5(a)~(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。若组成转动副的两构件都是活动件,则用图 1.5(a)表示;若其中有一个为机架,则在代表机架的构件上加阴影线,如图 1.5(b)、(c)所示。图 1.5(d)~(f)是两构件组成移动副的表示方法。移动副的导路必须与相对移动方向一致。同前所述,图中画阴影线的构件表示机架。

图 1.6 为构件的表示方法。图 1.6(a)表示参与组成两个转动副的构件。图 1.6(b)表示参与组成一个转动副和一个移动副的构件。在一般情况下,参与组成三个转动副的构件可用三角形表示。为了表明三角形是一个刚性整体,常在三角形内加剖面线或在三个角上涂以焊缝的标记,如图 1.6(c)所示;如果三个转动副中心在一条直线上,则可用图 1.6(d)表示。

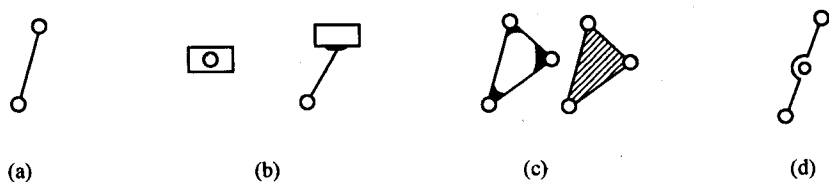


图 1.6 构件的表示方法

机构运动简图中常用机构的代表符号见表 1.1, 其他零部件的表示方法可参看 GB 4460—84 机构运动简图符号。

表 1.1 常用机构代表符号

名 称	符 号
圆柱齿轮	
锥齿轮	
齿轮齿条	
蜗轮与圆柱蜗杆	
凸轮与从动件	
槽轮传动	

机构中的构件可分为三类:

(1) 固定件(机架)。固定件是用来支承活动构件的构件。研究机构中活动构件的运动时,常以固定件上坐标系作为参考坐标系。

(2) 原动件。原动件是运动规律已知的活动构件。它的运动是由外界输入的,故又称输入构件。

(3)从动件。从动件是机构中随着原动件的运动而运动的其余活动构件。其中输出机构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。

任何一个机构中,必有一个构件被相对地看作固定件。在活动构件中必须有一个或几个原动件,其余的都是从动件。

下面举例说明机构运动简图的绘制方法。

例 1.1 绘制图 1.7 所示活塞泵机构的机构运动简图。

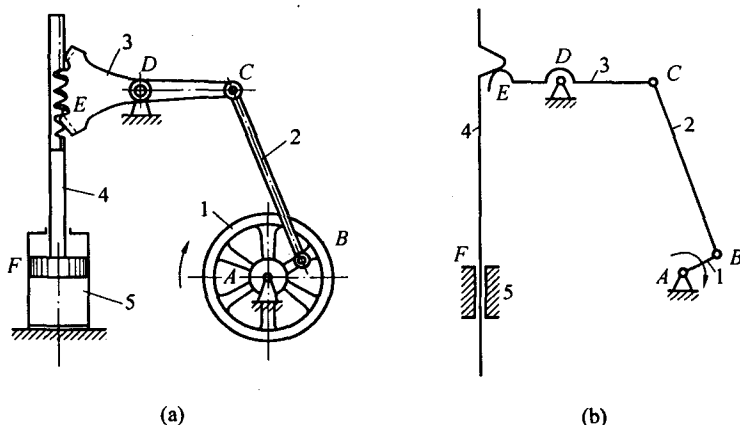


图 1.7 活塞泵及其机构运动简图

解 活塞泵由曲柄 1、连杆 2、齿扇 3、齿条活塞 4 和机架 5 共五个构件所组成。曲柄 1 是原动件,2、3、4 为从动件。当原动件 1 回转时,活塞在气缸中往复运动。

各构件之间的联接如下:构件 1 和 5,2 和 1,3 和 2,3 和 5 之间为相对转动,分别构成转动副 A、B、C、D。构件 3 的轮齿与构件 4 的轮齿构成平面高副 E。构件 4 与构件 5 之间为相对移动,构成移动副 F。

选取适当比例,按图 1.7(a)中的尺寸,用构件和运动副的规定符号,从主动件开始,按运动传递顺序,画出机构运动简图,如图 1.7(b)所示。

1.1.4 平面机构的自由度

任何一个机构工作时,在原动件的驱动下各个从动件都按一定规律运动,但并不是随意拼凑的构件组合都能具有确定运动而成为机构的。下面讨论机构自由度和机构具有确定运动的条件。

1. 平面机构自由度计算公式

一个作平面运动的自由构件具有三个自由度。因此平面机构的每个活动构件在未被运动副联接前都有三个自由度。当两个构件组成运动副之后,它们的相对运动就受到约束,自由度数随之减少。不同种类的运动副引入的约束不同,所以保留的自由度也不同。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。除去固定件,则机构中的活动构件数为 $n = K - 1$ 。在未被运动副联接之前,这些活动构件的自由度总数应为 $3n$ 。当用运动副将构件联接起来组

成机构之后,机构中各构件具有的自由度数就减少了。若机构中低副的数目为 P_L 个,高副数目为 P_H 个,则机构中全部运动副所引入的约束总数为 $2P_L + P_H$ 。因此活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的自由度(又称机构活动度),以 W 表示,即有

$$W = 3n - 2P_L - P_H \quad (1.1)$$

机构的自由度即机构所具有的独立运动的个数。由前述可知,从动件是不能独立运动的,只有原动件才能独立运动。通常每个原动件只具有一个独立运动(如电动机转子具有一个独立转动,内燃机活塞具有一个独立移动),因此,机构自由度必定与原动件的数目相等。

机构具有确定运动的条件是 $W > 0$,且 W 等于原动件个数。

例 1.2 计算图 1.7(b)中所示活塞泵机构的自由度。

解 在活塞泵机构中,有 4 个活动构件, $n = 4$; 有 5 个低副, $P_L = 5$, 有 1 个高副, $P_H = 1$ 。机构的自由度

$$W = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 1 = 1$$

该机构具有 1 个原动件(曲柄),故原动件数与机构自由度相等,机构具有确定的运动。

2. 计算平面机构自由度的注意事项

应用式(1.1)计算平面机构自由度时,对下述几种情况必须加以注意。

(1) 复合铰链

两个以上的构件同时在一处用回转副相联接就构成复合铰链。如图 1.8(a)所示是三个构件汇交成的复合铰链,图 1.8(b)是它的俯视图。由图 1.8(b)可以看出,这三个构件共组成两个回转副,依此类推, K 个构件组成的复合铰链应具有 $K - 1$ 个运动副。在计算机构自由度时应注意识别复合铰链,以免把运动副的个数算错。

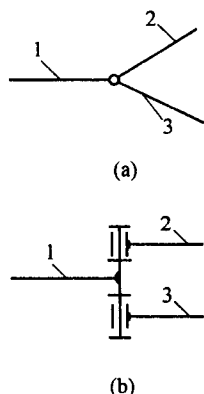


图 1.8 复合铰链

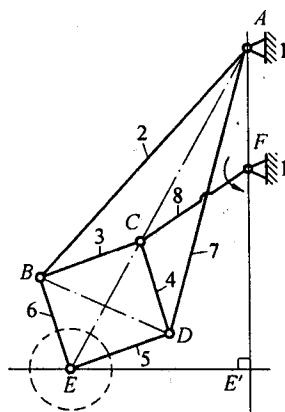


图 1.9 圆盘锯机构

例 1.3 计算图 1.9 所示圆盘锯主体机构的自由度。

解 机构中有 7 个活动构件, $n = 7$; A、B、C、D 四处都是三个构件汇交的复合铰链,各有两个回转副,故 $P_L = 10$ 。由式(1.1)可得

$$W = 3 \times 7 - 2 \times 10 = 1$$

W 与机构原动件个数相等。当原动件 8 转动时,圆盘中心 E 将确定地沿直线 EE' 移动。

(2)局部自由度

机构中常出现一种与输出构件运动无关的自由度,称为局部自由度或多余自由度,在计算机构自由度时应予排除。

例 1.4 计算图 1.10(a)所示滚子从动件凸轮机构的自由度。

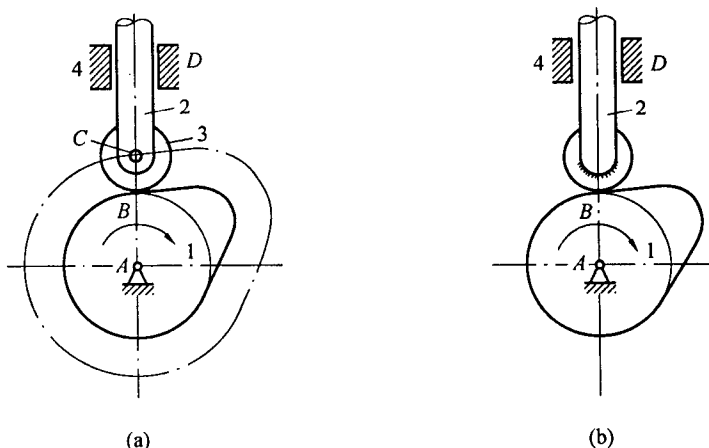


图 1.10 局部自由度

解 如图 1.10(a)所示,当原动件凸轮 1 转动时,通过滚子 3 驱使从动件 2 以一定运动规律在机架 4 中往复移动。因此,从动件 2 是输出构件。不难看出,在这个机构中,无论滚子 3 绕其轴线 C 是否转动或转动快慢,都丝毫不影响输出构件 2 的运动。因此滚子绕其中心的转动是一个局部自由度。为了在计算机构自由度时排除这个局部自由度,可设想将滚子与从动件焊成一体(回转副 C 也随之消失)变成图 1.10(b)所示形式。在图 1.10(b)中, $n = 2$, $P_L = 2$, $P_H = 1$ 由式(1.1)可得

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

局部自由度虽然不影响整个机构的运动,但滚子可使高副接触处的滑动摩擦变成滚动摩擦,减少磨损,所以实际机械中常有局部自由度出现。

(3)虚约束

在运动副引入的约束中,有些约束对机构自由度的影响是重复的。这些对机构运动不起限制作用的重复约束称为消极约束,或称虚约束,在计算机构自由度时应当除去不计。

虚约束是构件间几何尺寸满足某些特殊条件的产物。平面机构中的虚约束常出现在下列场合:

① 两个构件之间组成多个导路平行或重合的移动副时,只有一个移动副起作用,其余都是虚约束(图 1.11)。

② 两个构件之间组成多个轴线重合的回转副时,只有一个回转副起作用,其余都是虚约束(图 1.12)。

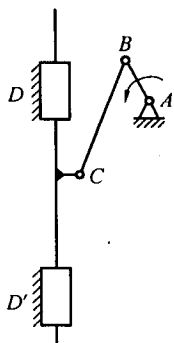


图 1.11 导路重合的虚约束

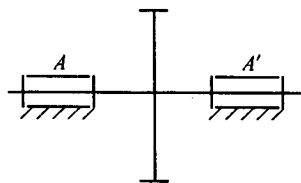


图 1.12 轴线重合的虚约束

③ 机构中对传递运动不起独立作用的对称部分。例如图 1.13 所示轮系, 中心轮 1 经过两个对称布置的小齿轮 2 和 2' 驱动内齿轮 3, 其中有一个小齿轮对传递运动不起独立作用。

④ 机构中有两构件相联接, 若它们联接点的轨迹在未组成运动副以前就是相互重合的, 则此联接形成的运动副就会带来虚约束。

图 1.14(a) 是一平行四边形机构, 若构件 2 为主动件且作转动时, 构件 4 也将以点 D 为圆心转动, 而构件 3 将作平移。它上面各点的轨迹均为圆心在 AD 线上、半径为 AB 长的圆周。该机构的自由度

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

若在机构上再加一个构件 5 (图 1.14(b)), 它与构件 2 和 4 平行而等长, 显然, 加上构件 5 后对整个机构并无任何影响, 但此时机构的自由度数却为 $W = 3n - (2P_L + P_H) = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$, 机构自由度数等于零意味着机构不能运动, 显然与实际情况不符。

这是因为加了一个构件 5, 增加了 3 个自由度, 但由于增加了两个转动副而引入 4 个约束, 减少机构 4 个自由度, 而这多出的一个约束对机构的运动并不起约束作用, 因此称其为虚约束。因为此时构件 3 和 5 上的点 E 在未形成运动副前均作圆周运动, 圆周半径均为 ER, 圆心为 R, 所以二者轨迹重合。在这种情况下, 应将虚约束去掉, 即将那些从机构运动的角度看来是多余的构件及其带入的运动副除去不计。

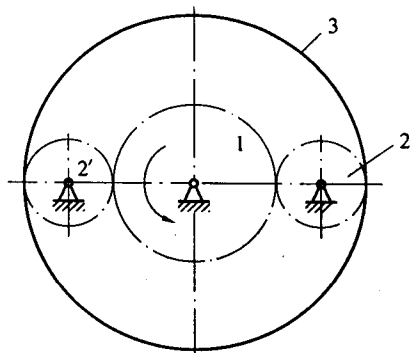


图 1.13 对称结构的虚约束

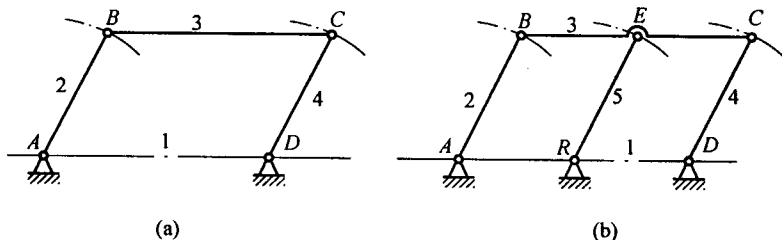


图 1.14 机构中的虚约束

还有一些类型的虚约束需要通过复杂的数学证明才能判别,我们就不一一列举了。虚约束对运动虽不起作用,但可以增加构件的刚性和使构件受力均衡,所以实际机械中虚约束随处可见。只有将机构运动简图中的虚约束排除,才能算出真实的机构自由度。

例 1.5 计算图 1.15 所示大筛机构的自由度。

解 机构中的滚子有一个局部自由度。顶杆与机架在 E 和 E' 组成两个导路平行的移动副,其中之一为虚约束。 C 处是复合铰链。现将滚子与顶杆焊成一体,去掉移动副 E' ,并在点 C 注明回转副的个数,如图 1.15(b) 所示。由图 1.15(b) 得 $n = 7$, $P_L = 9$ (7 个回转副和 2 个移动副), $P_H = 1$, 故由式(1.1)得

$$W = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 7 - 2 \times 9 - 1 = 2$$

此机构的自由度等于 2, 有两个原动件。

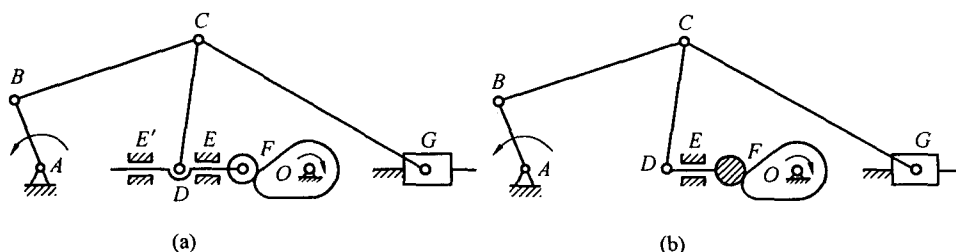


图 1.15 大筛机构

1.2 铰链四杆机构的基本形式和特性

平面连杆机构是由若干构件通过低副联接而成的平面机构,它们在各种机械中获得了广泛的应用,在日常生活所用的器具中也处处可见。最简单的平面连杆机构是由四个杆件组成的,它应用非常广泛,是组成多杆机构的基础。

全部用回转副组成的平面四杆机构称为铰链四杆机构,如图 1.16 所示。机构的固定件 4 称为机架;与机架用回转副相联接的杆 1 和杆 3,称为连架杆;不与机架直接联接的杆 2,称为连杆。连架杆 1 或杆 3 如能绕机架上的回转副中心 A 或 D 做整周转动,则称为曲柄;若仅能在小于 360° 的某一角度内摆动,则称为摇杆。

对于铰链四杆机构来说,机架和连杆总是存在的,因此可按照连架杆是曲柄还是摇杆,将铰链四杆机构分为三种基本形式:曲柄摇杆机构、双曲柄机构和双摇杆机构。

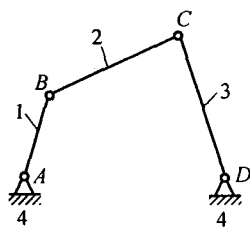


图 1.16 铰链四杆机构

1.2.1 铰链四杆机构的基本形式

1. 曲柄摇杆机构

在铰链四杆机构中,若两个连架杆,一为曲柄,另一个为摇杆,则此铰链四杆机构称为曲柄摇杆机构。通常曲柄 1 为原动件,并作匀速转动;而摇杆 3 为从动件,做变速往复摆动。