



普通高等教育“十一五”规划教材

精密机械学基础

蒋秀珍 马惠萍 主编



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”规划教材

精密机械学基础

蒋秀珍 马惠萍 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是为高等工科院校“测控技术与仪器专业”编写的“精密机械学”课程教材。

本书融合了工程力学与机械学的基础知识,全面而系统地阐述了静力学基础、材料力学基础、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、构件的受力分析与计算、构件受力变形及其应力分析、机械工程常用材料及其工程性能、联接、轴与联轴器、零件的几何精度、支承、导轨、螺旋传动、带传动、齿轮传动设计、弹性元件、微机械基础。

本书适用于仪器仪表、测控技术与仪器、光电工程、电子信息、电气工程专业师生作为教材,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

精密机械学基础 / 蒋秀珍,马惠萍主编. —北京:科学出版社,2009

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-03-021848-3

I. 精… II. ①蒋…②马… III. 机械设计-高等学校-教材
IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 062653 号

责任编辑:马长芳 潘继敏 / 责任校对:郑金红

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 1 月第一次印刷 印张: 25 1/4

印数: 1—4 000 字数: 495 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

本书是根据仪器科学与技术教学指导委员会 2007 年 7 月通过的高等学校仪器科学与技术学科本科专业教学规范的要求编写的。本书内容涵盖了仪器科学与技术学科本科专业教学规范在精密机械学方面提出的全部核心知识点。

本书是一门体系创新教材,将“机械原理”、“机械零件”、“静力学”、“材料力学”、“工程材料”、“互换性与测量技术基础”六门课融合为一门课。改革后的教材系统性、衔接性明显增强,学时大幅度减少,重复性、断层性得到有效抑制。

教学实践表明,以本书为主要教材,可以用较少的学时使学生较好地掌握工程力学与机械学的基础知识,在学完“工程图学”之后,本书可作为测控技术与仪器专业、电类专业唯一的一门机械类课程列入教学计划。本书的配套教材有《机械学基础综合训练图册》。使用本书时,可通过讲课、实验、大作业、上机、课程设计等教学与实践环节,培养学生对机械机构分析和设计的能力。具备这种能力的学生专业适应性强,能满足市场经济对人才的多重需求,从而扩大学生的就业面。

本书由哈尔滨工业大学蒋秀珍教授、马惠萍副教授主编。参编人员有蒋秀珍(第 1、3、6、7、10、12 章),马惠萍(第 2、4、5、8、13 章),刘丽华(第 11、14、15 章),孙玉芹(第 9 章),张晓光(第 16 章)。

本书配有电子课件,欢迎选用本书做教材的老师索取,索取信箱:

jiangxz@hit.edu.cn.

希望广大读者在使用中提出改进意见,以便进一步完善。

编 者

2008.8.5

目 录

前言

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型式和特性	8
1.3 铰链四杆机构的曲柄存在条件	13
1.4 铰链四杆机构的演化	14
1.5 平面连杆机构的设计	16
习题	22
第 2 章 凸轮与间歇运动机构	25
2.1 凸轮机构	25
2.2 凸轮轮廓设计	30
2.3 凸轮设计中的几个问题	36
2.4 间歇运动机构	39
习题	44
第 3 章 齿轮机构	47
3.1 概述	47
3.2 渐开线齿廓和渐开线齿轮传动的特点	49
3.3 齿轮各部分名称、符号及渐开线标准圆柱直齿轮的几何尺寸计算 ..	51
3.4 渐开线齿轮正确连续啮合条件	55
3.5 齿轮加工原理和根切现象	57
3.6 变位齿轮	61
3.7 斜齿圆柱齿轮传动	65
3.8 直齿圆锥齿轮传动	68
3.9 蜗杆传动	69
3.10 轮系	73
习题	80
第 3 章附录 变位系数线图	84
第 4 章 构件的受力分析与计算	85
4.1 静力学的基本概念和物体的受力分析	85
4.2 平面汇交力系的合成与平衡	93

4.3	力对点的矩、平面力偶系的合成与平衡	99
4.4	平面一般力系的简化和平衡	102
4.5	摩擦	109
4.6	空间力系	114
	习题	119
第5章	机械工程常用材料及其工程性能	126
5.1	概述	126
5.2	金属材料的机械性能	126
5.3	常用的工程材料	129
5.4	金属材料的热处理与表面精饰	136
	习题	139
第6章	构件受力变形及其应力分析	140
6.1	概述	140
6.2	直杆的轴向拉伸与压缩	142
6.3	剪切	147
6.4	圆轴扭转	150
6.5	梁的平面弯曲	156
6.6	复杂变形时的强度计算	163
	习题	168
第7章	联接	173
7.1	联接的分类	173
7.2	可拆联接	173
7.3	不可拆联接	186
7.4	机械零件与光学零件的联接	191
	习题	195
第8章	轴与联轴器	197
8.1	轴	197
8.2	联轴器	207
	习题	212
第9章	零件的几何精度	214
9.1	基本概念	214
9.2	尺寸精度设计基础	214
9.3	形状和位置精度设计	224
9.4	表面粗糙度	234

9.5 典型零件精度设计简介	237
习题	239
第 10 章 支承	241
10.1 概述	241
10.2 滑动摩擦支承	241
10.3 滚动摩擦支承	250
10.4 弹性摩擦支承	265
10.5 流体摩擦支承	270
习题	272
第 11 章 导轨	276
11.1 概述	276
11.2 滑动摩擦导轨	276
11.3 滚动摩擦导轨	281
11.4 弹性摩擦导轨	287
11.5 液体静压导轨	288
习题	289
第 12 章 螺旋传动	290
12.1 概述	290
12.2 滑动螺旋传动	290
12.3 滚动螺旋传动	299
习题	304
第 13 章 带传动	305
13.1 摩擦型传动带的类型和应用	305
13.2 摩擦型带传动的基本知识	305
13.3 同步带传动	309
13.4 绳传动	319
习题	320
第 14 章 齿轮传动设计	321
14.1 轮齿的破坏形式、设计准则和材料	321
14.2 直齿圆柱齿轮传动的作用力及其计算载荷	324
14.3 直齿圆柱齿轮传动的强度计算	325
14.4 齿轮传动链的设计	332
14.5 机械传动总论	340
习题	349

第 15 章 弹性元件	350
15.1 概述	350
15.2 弹性元件的材料	355
15.3 片弹簧	356
15.4 螺旋弹簧	360
15.5 膜片和膜盒	371
15.6 波纹管	379
15.7 热双金属弹簧	382
习题	385
第 16 章 微机械基础	387
16.1 概述	387
16.2 微机械的材料与加工技术	388
16.3 微机械的动力装置和传感器	389
16.4 MEMS 典型器件及系统	390
16.5 微机械系统研究中存在的基础问题	393
参考文献	394

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

任何机器和仪器一般均由许多部分组成,如机械结构部分、电路及控制部分、光学部分等。简单的机器和仪器不一定包含上述所有部分,但机械结构部分是必不可少的。在机械结构中,有一部分在工作中要实现某种确定的运动(如移动、转动或者更为复杂的运动),从而实现某些功能。例如,车床的主轴带动被加工零件转动,刀尖沿主轴轴线方向移动,从而完成车削加工。螺旋千分尺的测杆既转动又移动,从而实现对工件的测量。为了更好地了解机械结构的组成,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,彼此不做任何相对运动,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,而不是乱动。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、活塞与汽缸的联接、传动齿轮两个轮齿间的联接等都构成运动副。

显然,两构件间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。

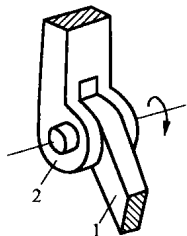


图 1-1 回转副
1、2-构件

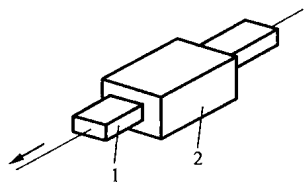


图 1-2 移动副
1、2-构件

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 1 与钢轨 2,图 1-3(b)中的凸轮 1 与从动件 2,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是由沿接触处切线 tt 方面的相对移动和在平面内的相对转动组成。

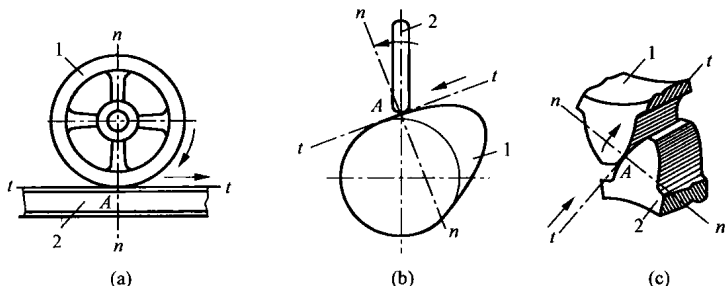


图 1-3 平面高副举例

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。

机构运动简图中的常用符号见表 1-1。

表 1-1 机构运动简图中的常用符号

名称	符号	名称	符号
活动构件		圆柱齿轮	
固定构件		锥齿轮	
回转副		齿轮传动	
移动副		齿轮齿条	
球面副		蜗轮与圆柱蜗杆	
螺旋副		向心轴承	
零件与轴联接		推力轴承	
凸轮与从动件		向心推力轴承	
槽轮传动			

机构中的构件可分为三类:

(1) 固定件(机架),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,常以固定件作为参考坐标系。

(2) 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,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 1-4 所示活塞泵机构的机构运动简图。

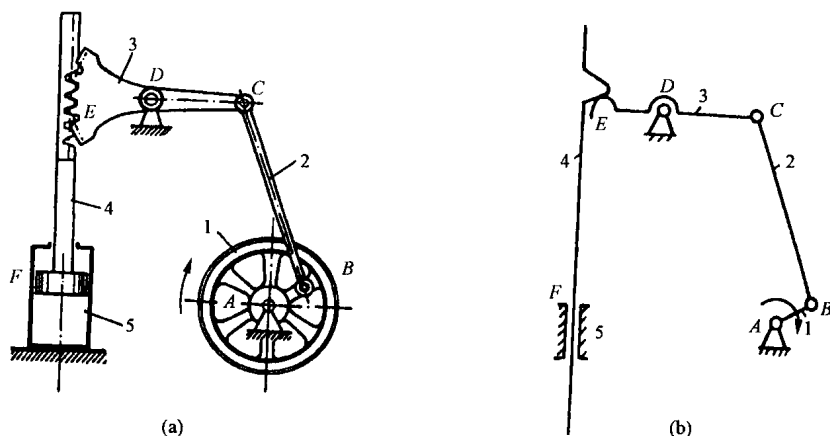


图 1-4 活塞泵及其机构运动简图

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,活塞在汽缸中往复运动。

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 1-4(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 1-4(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。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

一个做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用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 $n = K - 1$ 。

在未用运动副联接之前,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

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

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 1-4(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。图 1-5(a) 所示是三个构件汇交成的复合铰链,图 1-5(b) 是它的俯视图。由图 1-5(b) 可以看出,这三个

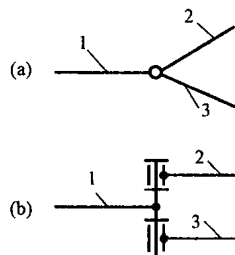


图 1-5 复合铰链
(1、2、3-构件)

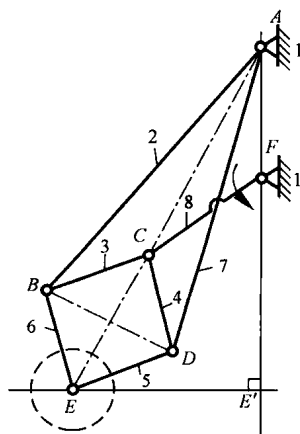


图 1-6 圆盘锯机构

构件共组成两个回转副,以此类推, 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。

例 1-3 计算图 1-6 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以排除。

例 1-4 计算图 1-7(a)所示滚子从动件凸轮机构的自由度。

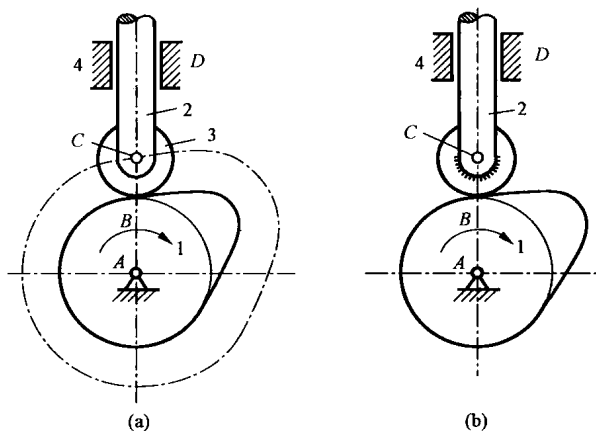


图 1-7 局部自由度

解 如图 1-7(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 1-7(b)所示形式。在图 1-7(b)中, $n=2$, $P_L=2$, $P_H=1$ 。由式(1-1)可得

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

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 1-8)。

(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 1-9)。

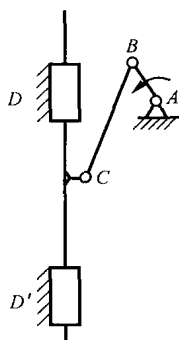


图 1-8 导路重合的虚约束

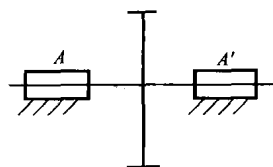


图 1-9 轴线重合的虚约束

(3) 机构中对传递运动不起独立作用的对称部分。例如,图 1-10 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 1-11(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 D 点为圆心转动,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。该机构的自由度为

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

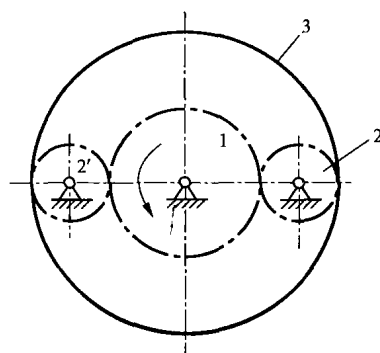


图 1-10 对称结构的虚约束

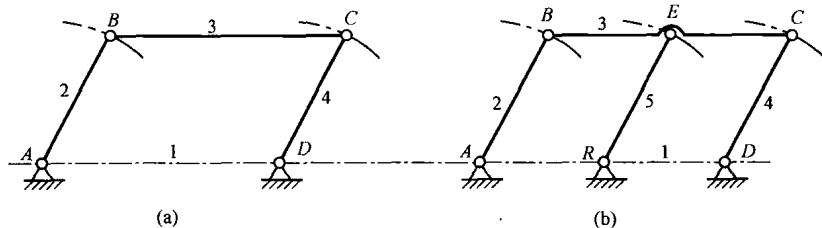


图 1-11 机构中的虚约束

若在机构上再加一个构件 5(图 1-11(b)),它与构件 2 和 4 平行而等长,显然,加构件 5 后对整个机构并无任何影响,但此时机构的自由度数为

$$W = 3n - (2P_L + P_H) = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$$

机构自由度数为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 E 点在未形成运动副前均做圆周运动,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。

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 1-12 所示大筛机构的自由度。

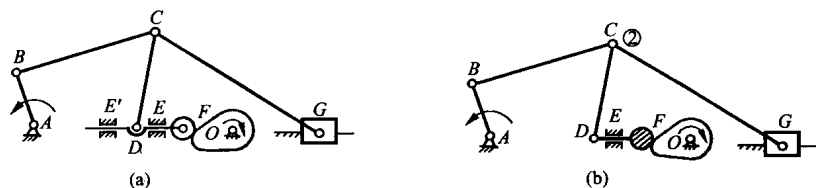


图 1-12 大筛机构

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 C 点注明回转副的个数,如图 1-12(b)所示。由图 1-12(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 2 个原动件。

1.2 铰链四杆机构的基本型式和特性

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,它们在各种机械和仪器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。

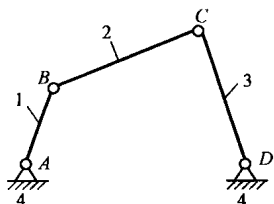


图 1-13 铰链四杆机构

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 1-13 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型式:曲柄摇杆机构、双曲柄机构和双摇杆机构。

1.2.1 曲柄摇杆机构

在铰链四杆机构中,若2个连架杆,一个为曲柄,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,并做匀速转动;而摇杆3为从动件,做变速往复摆动。

图1-14所示为调整雷达天线俯仰角的曲柄摇杆机构。曲柄1缓慢地匀速转动,通过连杆2,使摇杆3在一定角度范围内摆动,从而调整天线俯仰角的大小。

图1-15为缝纫机脚踏机构。左下角示出其机构运动简图。这里摇杆1(脚踏板)是原动件。当摇杆往复摆动时,通过连杆2使曲柄3做整周回转,再经过带传动使机头主轴回转。

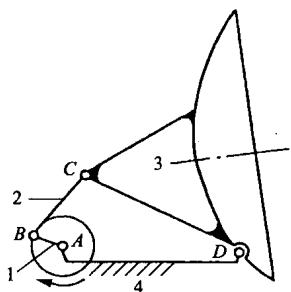


图 1-14 雷达调整机构

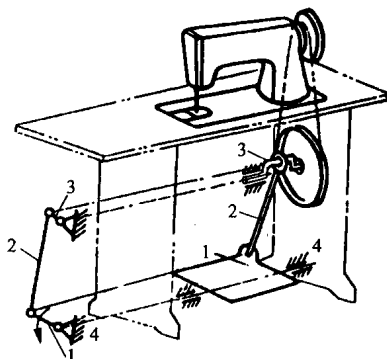


图 1-15 缝纫机脚踏机构

1.2.2 双曲柄机构

一般形式的双曲柄机构,两个曲柄虽然都可以做整周的转动,但若一个曲柄做匀速转动,则另一曲柄在一周之中的转动速度是有快有慢的。利用这种特性,双曲柄机构可用于要求变速的机构中。如图1-16所示,插床要求向下进刀切削时速度慢,向上退刀时速度快(图1-16(a)),双曲柄机构可实现这一要求。惯性筛也是利用这一特点,如图1-16(b)所示,使筛上的原料达到分选的目的。

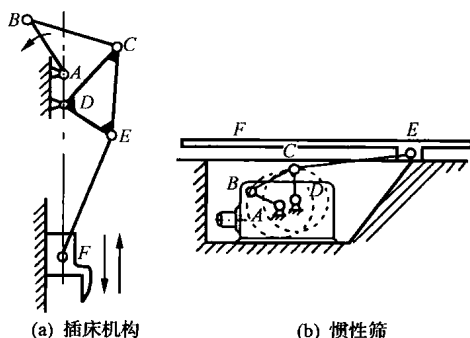


图 1-16 双曲柄机构

1.2.3 双摇杆机构

图1-17(a)是双摇杆机构在鹤式起重机中的应用。当摇杆AB摆动时,另一