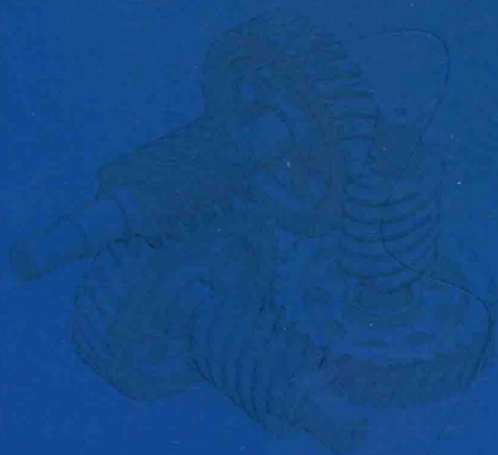


机械设计基础

● 主编 郭 平



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

机械设计基础

主 编 郭 平

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷

图书在版编目 (CIP) 数据

机械设计基础/郭平主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 2

ISBN 978 - 7 - 5682 - 3666 - 9

I. ①机… II. ①郭… III. ①机械设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 024258 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室)

68944990 (批销中心)

68911084 (读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 9

字 数 / 209 千字

版 次 / 2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 35.00 元

责任编辑 / 刘永兵

文案编辑 / 刘 佳

责任校对 / 王素新

责任印制 / 马振武

前 言

本教材以够用为度，注重基础知识与技术应用之间的关系，在解决知识与技能、理论与实践、通用能力与专业能力的关系上进行精心布置和安排，强调基础知识、基本技能在教学中的重要性。本教材适当控制难度，讲解深入浅出，简化理论推导过程，重点突出机械零件、机构的应用，并配有大量的图例，使学生易学易懂。

本书由郭平老师和陈海振老师编写，其中郭平老师编写了项目1~项目4，陈海振老师编写了项目5和项目6，全书由郭平老师统稿和定稿。

本书在编定过程中借鉴并参阅了一些国内的优秀教材及科学研究成果，在此向作者们表示衷心的感谢！

由于编者水平有限且时间仓促，在编写的过程中难免有很多不足之处，欢迎广大读者批评指正。

编 者

目 录

项目1 机构的认识与表达	1
任务 1.1 认识机器与机构	1
任务 1.2 表达机构	2
任务 1.3 判别机构是否有确定运动	7
思考与练习题	10
项目2 常用机构的分析与应用	13
任务 2.1 平面四杆机构的分析与应用	13
任务 2.2 认识凸轮机构	22
任务 2.3 认识其他机构	27
思考与练习题	34
项目3 机械传动的分析与应用	36
任务 3.1 齿轮传动的分析与应用	36
任务 3.2 挠性传动的分析	63
思考与练习题	83
项目4 机件连接的分析与应用	85
任务 4.1 螺纹连接的分析与应用	85
任务 4.2 键连接的分析与应用	94
任务 4.3 花键连接	97
任务 4.4 销连接的分析与应用	98
思考与练习题	99
项目5 轴系零件部件的分析与应用	100
任务 5.1 轴的分析与应用	100
任务 5.2 轴承的分析与应用	107
任务 5.3 轴间连接的分析与应用	120
思考与练习题	125
项目6 轮系的分析与应用	127
任务 6.1 认识轮系及其分类	127
任务 6.2 轮系传动比的计算	128
任务 6.3 轮系的功能	132
思考与练习题	134
参考文献	135

项目 1 机构的认识与表达

任务 1.1 认识机器与机构

1. 机器

在日常生活和生产实践中，我们见过很多种机器，如汽车、内燃机（见图 1-1）、拖拉机（见图 1-2）、缝纫机、各种机床等。

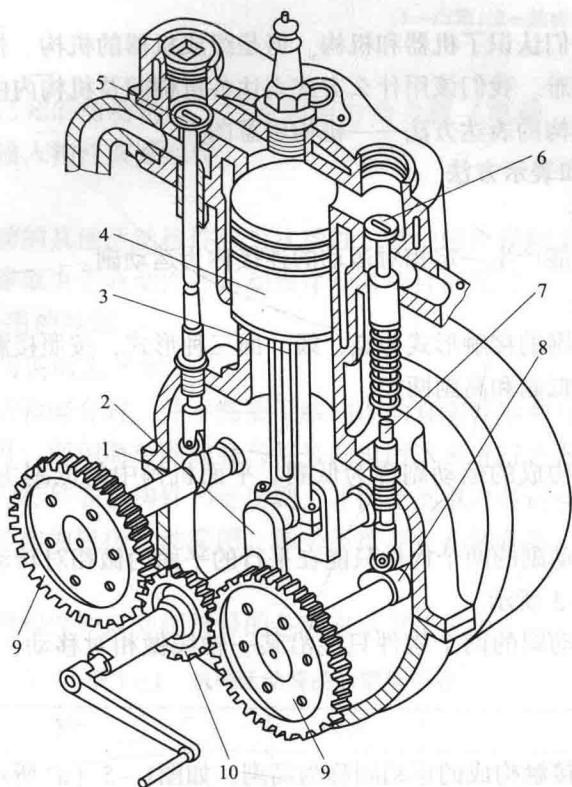


图 1-1 内燃机

1—气缸体；2—曲轴；3—连杆；4—活塞；5—进气阀；6—排气阀；7—推杆；8—凸轮；9，10—齿轮

机器的种类繁多，结构形式和用途也各不相同，但总的来说都具有三个共同的特征：

- ①人为的实物组合体；
- ②各运动单元具有确定的相对运动；
- ③能代替人类做有用功或进行能量转换。

2. 机构

机构是人为实物的组合,其各部分之间具有确定的相对运动。所以,机构具有机器的前两个特征。机构的种类很多,常用机构有平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构和间歇机构等。

工程上将机器和机构统称为机械。

3. 零件和构件

零件是机械中的制造单元。构件是机械中的运动单元,它可以是单一零件,也可以是多个零件刚性组合在一起的单元体。



图 1-2 拖拉机

任务 1.2 表达机构

在上一任务中,我们认识了机器和机构。但是组成机器的机构、构件往往形态各异,这给绘制及交流带来了困难。我们该用什么方式表达各机构间及机构内的运动关系和连接关系呢?下面我们来学习机构的表达方法——机构示意图。

1. 运动副的分类和表示方法

(1) 运动副的概念

两构件直接接触又能产生一定相对运动的连接称为运动副。

(2) 运动副的分类

两构件组成的运动副的接触形式为点、线、面三种形式,按照接触形式的不同,通常把平面机构的运动副分为低副和高副两类。

1) 低副

两构件通过面接触构成的运动副称为低副。平面机构中的低副主要有转动副和移动副两种。

①转动副。组成运动副的两个构件只能在平行的平面内做相对转动,这种运动副称为转动副(铰链),如图 1-3 所示。

②移动副。组成运动副的两个构件只能沿某一轴线做相对移动,这种运动副称为移动副,如图 1-4 所示。

2) 高副

两构件通过点或线接触构成的运动副称为高副。如图 1-5 (a) 所示,凸轮 1 与从动件 2 之间构成的运动副称为凸轮副;如图 1-5 (b) 所示,两齿轮轮齿啮合构成的运动副称为齿轮副。

2. 构件的分类

根据平面机构中各构件的运动情况,可将构件分为三类,即固定件、主动件和从动件。

(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,常以固定构件作为参考坐标系。

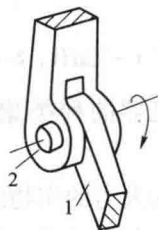


图 1-3 转动副

1—构件 1; 2—构件 2

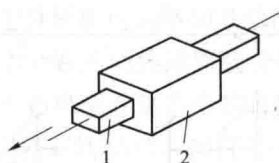


图 1-4 移动副

1—构件1；2—构件2

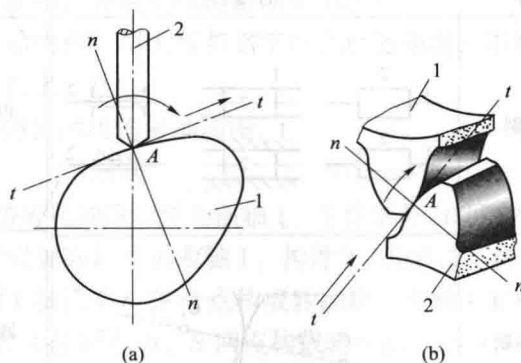


图 1-5 高副

(a) 凸轮副；(b) 齿轮副

1—凸轮；2—从动件

(2) 主动件

主动件是运动规律已知的活动构件。它的运动由动力源（电动、液动、气动等）或其他机构输入，故又称为输入构件或原动件。

(3) 从动件

随主动件运动而运动的其他活动构件称为从动件。其中输出预期运动规律的从动件称为输出构件。它的运动规律取决于原动件的运动规律和各构件的尺寸。

3. 平面机构运动简图的绘制

(1) 平面机构运动简图的表示方法

我们对机构进行分析和综合时，并不需要了解构件的真实外形和具体结构，只需简明地表达机构的传动原理即可，即用简单的线条与符号画出图形来进行方案讨论和运动、受力分析。这种用规定的线条与符号表示构件和运动副，并按比例定出各运动副的位置，表达各构件间相对运动关系的图形称为机构运动简图。如果不按规定比例画图，这样的简图称为机构示意图。

机构运动简图中常用构件和运动副符号的各种表示方法见表1-1。

表 1-1 机构运动简图的常用符号

名称	符号	名称	符号
固定构件		三副元素构件	
两副元素构件		转动副	

续表

名称	符号	名称	符号
移动副		齿轮齿条机构	
平面高副		圆锥齿轮机构	
凸轮机构		蜗杆蜗轮机构	
棘轮机构		带传动	类型符号标注在带的上方： V带用符号▽表示 圆带用符号○表示 平带用符号—表示
外啮合圆柱齿轮机构		链传动	类型符号标注在轮轴连心线上方： 滚子链用符号#表示 齿形链用符号W表示
内啮合圆柱齿轮机构			

(2) 绘制机构运动简图的步骤

- ①分析机构的结构及动作原理，找出固定件（机架）和原动件；
- ②从原动件开始沿着运动传递的路线，分析构件间的相对运动情况，确定运动副的类型；
- ③测出运动副的相对位置尺寸；
- ④选择合适的视图平面（通常选择与大多数构件的运动平面相平行的平面作为视图平面）；

⑤确定画图比例尺；

⑥用规定的符号与线条表示构件和运动副，并绘制机构运动简图。

注意：画图时，一般用阿拉伯数字表示构件，用大写英文字母表示运动副，用箭头符号表示原动件的运动方向，且机架构件上要打上斜线。

【例1-1】 绘出图1-6所示颚式破碎机的机构运动简图。

解：

①分析机构的结构及动作原理，找出破碎机的原动件为曲轴1、工作部分为动颚板5。

②沿着运动传递路线分析可知，此颚式破碎机是由曲轴1、构件2、构件3、构件4、动颚板5和机架6这六个构件组成的。曲轴1和机架6在O点构成转动副，曲轴1和构件2在A点也构成转动副，构件2与构件3、构件4分别在D、B两点构成转动副，构件3与机架6在E点构成转动副，构件4与动颚板5在C点构成转动副，动颚板与机架6在F点构成转动副。

③测出运动副的相对位置尺寸。

④选择合适的视图平面（图示平面）。

⑤选择合适的比例尺绘制运动简图，如图1-6（b）所示。

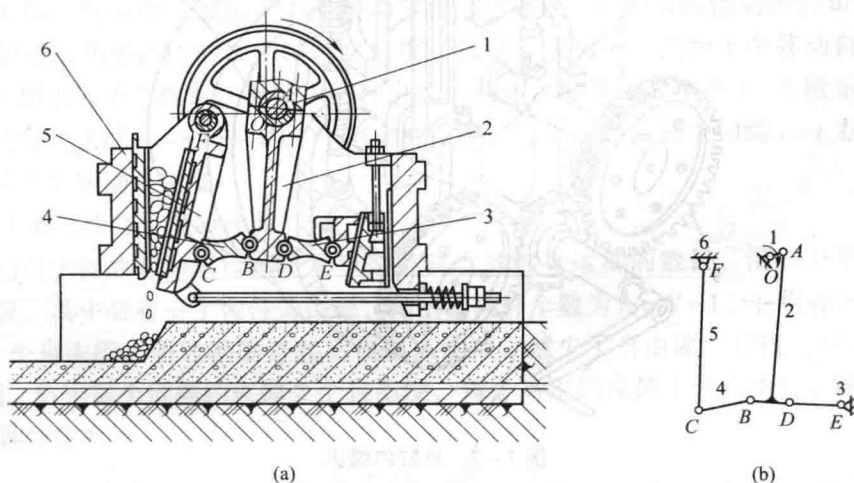


图1-6 颚式破碎机及机构运动简图

1—曲轴；2, 3, 4—构件；5—动颚板；6—机架

(a) 结构图；(b) 运动简图

【例1-2】 绘制单缸内燃机的机构运动简图。

解：

①根据单缸内燃机结构图，如图1-7所示，并结合动作原理找出内燃机的原动件为活塞4，固定件（机架）为气缸体1。

②沿着运动传递路线分析可知：此内燃机是由气缸体1、活塞4、连杆3、曲轴2、齿轮10、齿轮9（两个）、凸轮8（两个）、推杆7（两个）等构件组成。其中活塞4与机架1构成移动副，活塞4与连杆3构成转动副，连杆3与曲轴2构成转动副，小齿轮10与大齿轮9（两个）构成高副，凸轮与滚子（两处）构成高副，滚子与推杆7（两处）构成转动副，推

杆7与机架（两处）构成移动副，曲轴2与小齿轮10刚性组合在一起形成一个构件，并且与机架1一起构成一个转动副；大齿轮9与凸轮8（两处）同样是刚性组合在一起的一个构件，它们和机架1（两处）分别构成转动副。

③测出运动副的相对位置尺寸。

④选择合适的视图平面（图示平面）。

⑤选择合适的比例尺，绘制内燃机运动简图，如图1-8所示。

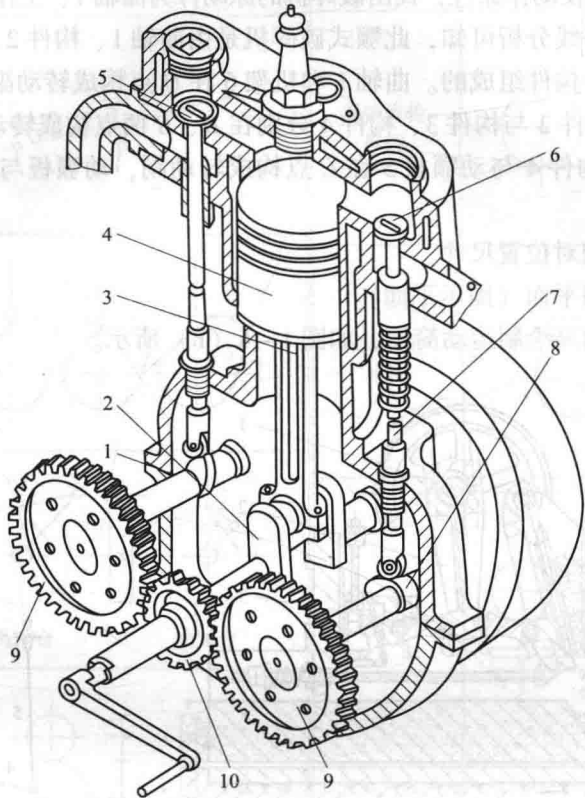


图1-7 单缸内燃机

1—气缸体；2—曲轴；3—连杆；4—活塞；5—进气阀；6—排气阀；7—推杆；8—凸轮；9, 10—齿轮

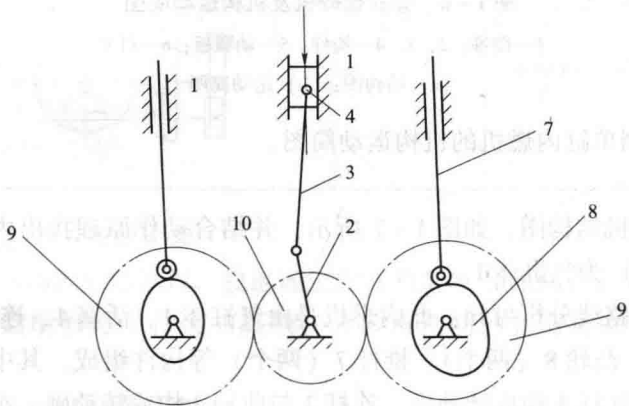


图1-8 内燃机运动简图

任务 1.3 判别机构是否有确定运动

1. 平面机构的自由度计算

(1) 构件的自由度

一个做平面运动的自由构件具有三个独立的运动。如图 1-9 所示,即构件 S 沿 x 轴、 y 轴方向移动及在 xOy 平面内绕 A 点的转动。

构件的这三个独立运动称为自由度,做平面运动的自由构件有三个自由度。

(2) 运动副对构件的约束

在平面机构中,构件通过运动副连接起来后,其独立运动受到了限制,自由度数减少。对独立运动所加的约束称为约束。不同类型的运动副引入的约束不同,所保留的自由度也不同。

每个低副引入 2 个约束,保留 1 个自由度。例如,任务 1.2 中图 1-3 所示的转动副约束了 2 个移动自由度,保留了 1 个转动自由度。图 1-4 所示的移动副约束了沿某一坐标轴方向的移动和平面内的 2 个转动自由度,保留了沿另一方向的 1 个移动自由度。

每个高副引入 1 个约束,保留 2 个自由度。例如,任务 1.2 中图 1-5 所示的高副约束了构件沿接触面法线 $n-n$ 方向的 1 个移动自由度,保留了沿接触面切线 $t-t$ 方向的移动和沿接触点的 2 个转动自由度。

(3) 平面机构自由度的计算

机构的自由度数即为机构相对于机架所具有的独立运动的数目。设一个平面机构由 N 个构件组成,其中必有一个构件为机架,则活动构件个数为 $n=N-1$ 。它们在未组成运动副前共有 $3n$ 个自由度。用运动副连接后便引入约束,减少了自由度。若机构有 P_L 个低副和 P_H 个高副,由于每个低副约束掉 2 个自由度,每个高副约束掉 1 个自由度,则平面机构的自由度计算公式为

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

【例 1-3】 计算任务 1.2 中图 1-6 (b) 所示颚式破碎机的机构自由度。

解:

该机构的活动构件数 $n=5$,低副数 $P_L=7$ (7 个转动副, 0 个移动副),高副数 $P_H=0$,故机构自由度为

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0 = 1$$

2. 计算平面机构自由度时应注意的问题

在应用式 (1-1) 计算平面机构自由度时,对下面几种情况必须加以注意:

(1) 复合铰链

两个以上的构件共用同一条轴线形成的转动副称为复合铰链。图 1-10 所示为三个构件形成的复合铰链,从图中可以看出,它实际为两个转动副,而不是一个转动副。以此类推, K 个构件形成的复合铰链应具有 $(K-1)$ 个转动副。

【例 1-4】 计算如图 1-11 所示机构的自由度。

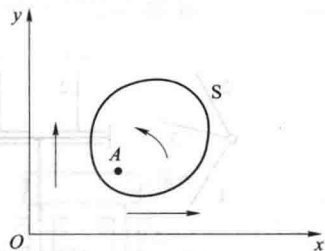


图 1-9 平面运动构件的自由度

解:

此机构中 B 、 C 、 D 、 E 四处都是由三个构件组成的复合铰链, 有两个转动副, 所以对于这个机构来说: $n=7$, $P_L=10$, $P_H=0$, 由式 (1-1) 得:

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

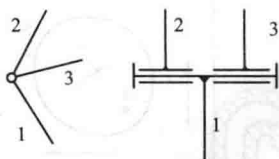


图 1-10 复合铰链

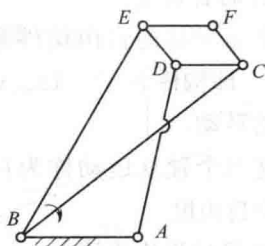


图 1-11 含有复合铰链的机构

(2) 局部自由度

在机构中, 某些构件的局部运动不影响其他构件的运动, 我们把不影响机构输入输出运动关系的自由度称为局部自由度。如图 1-12 (a) 所示的滚子从动件凸轮机构中, 为了减少从动件与凸轮的摩擦和磨损, 在从动件 3 与凸轮 1 间加了一个滚子 2, 此时机构的自由度为: $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 1 \times 1 = 2$, 但此时滚子绕自身轴线的运动并不影响其他构件的运动, 它只是一个局部自由度。如果我们将滚子和从动件焊接在一起, 如图 1-12 (b) 所示, 显然也不影响凸轮和从动件的运动情况, 但此时机构的自由度变为: $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1$, 所以在进行包含局部自由的机构的自由度计算时, 应将机构中的局部自由度除去不计。

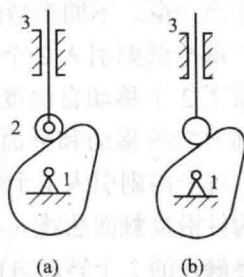


图 1-12 局部自由度

(3) 虚约束

在运动副引入的约束中, 有些约束对机构的运动是重复的。这些对机构的运动不起独立限制作用的重复约束称为虚约束。计算包含虚约束的机构自由度时, 应将虚约束除去不计。

机构中的虚约束有如下几种情况:

①如果两个相连接的构件在连接点上的运动轨迹重合, 则该运动副引入的约束为虚约束。如图 1-13 (b) 所示, 平行四边形机构中, 连杆 3 做平动, 如果 EF 平行并等于 AB 及 CD , 则杆 5 上 E 点轨迹与杆 3 上 E 点的轨迹重合。因此, EF 杆引入了虚约束, 计算时先将其简化成图 1-13 (a) 所示的图。如果不满足上述几何条件, 则 EF 杆引入的约束为有效约束, 如图 1-13 (c) 所示, 此时该机构的自由度数值为 0。

②机构运动时, 如果两构件上两点间的距离始终保持不变, 将此两点用构件和运动副连接, 则会引入虚约束, 如图 1-14 所示。

③如果两个构件组成多个移动方向平行的移动副 (如图 1-15 所示), 或两个构件组成多个轴线重合的转动副 (如图 1-16 所示), 则只需考虑其中一处的约束, 其余各处引入的约束均为虚约束。

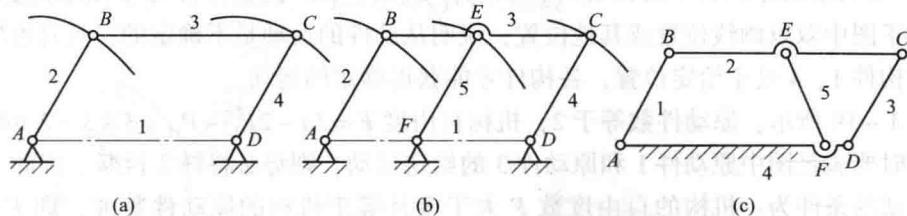


图 1-13 运动轨迹重合引入虚约束

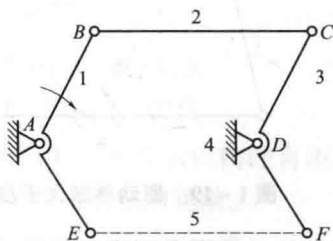


图 1-14 两点间的距离不变引入虚约束

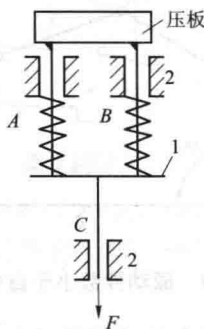


图 1-15 移动方向平行的虚约束

④机构中对运动不起作用的对称部分引入的约束为虚约束。如图 1-17 所示的差动齿轮系，只需要一个齿轮 2 便可传递运动。为了提高承载能力并使机构受力均匀，图中采用了 3 个完全相同的行星轮对称布置。这里每增加一个行星轮（包括两个高副和一个低副）便引入一个虚约束。

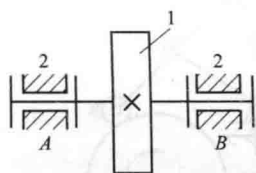


图 1-16 轴线重合的虚约束

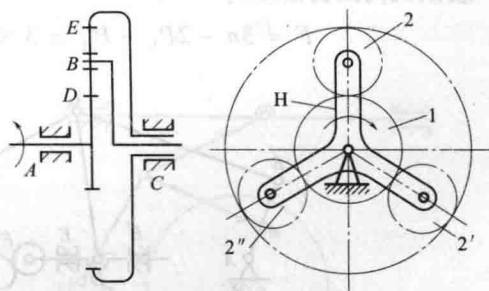


图 1-17 差动轮系

虚约束不影响机构的运动，但能增加机构的刚性，改善其受力状况，因而得到广泛采用。但是虚约束对机构的几何条件要求较高，因此对机构的加工和装配精度提出了较高的要求。

3. 机构具有确定相对运动的条件

机构的自由度是平面机构所具有的独立运动的数目。当机构的自由度大于零时，机构才有可能运动。同时，只有机构的原动件数与机构的自由度数相等，该机构才能有确定的运动。

如图 1-18 所示, 图中原动件数等于 1, 而机构的自由度 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 0 = 2$ 。当只给出原动件 1 的位置时, 从动件 2、3、4 的位置可以处于图示的实线位置, 也可以处于图中双点画线位置或其他位置, 说明从动件的运动是不确定的。只有给出两个原动件, 使构件 1、4 处于给定位置, 各构件才能获得确定的运动。

如图 1-19 所示, 原动件数等于 2, 机构自由度 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1$ 。若机构同时要满足图中原动件 1 和原动件 3 的给定运动, 则势必将杆 2 拉断。因此, 机构具有确定运动的条件为: 机构的自由度数 F 大于零且等于机构的原动件数 W , 即 $F = W$, 且 $W > 0$ 。

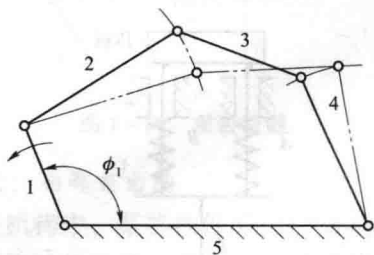


图 1-18 原动件数小于自由度数

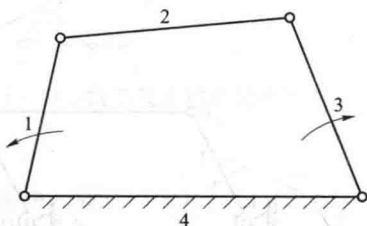


图 1-19 原动件数大于自由度数

在分析已有机构或设计新机构时, 需考虑所作机构运动简图是否满足机构具有确定运动的条件, 否则将导致机构组成原理的错误。

【例 1-5】计算图 1-20 所示的筛料机构的自由度。

解:

机构中滚子 F 处为局部自由度; 顶杆 DF 与机架组成两导路重合的移动副 E' 和 E , 故其中之一为虚约束; C 处为复合铰链。去除局部自由度和虚约束, 机构中 $n = 7$ 、 $P_L = 9$ 、 $P_H = 1$, 故该机构的自由度为

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

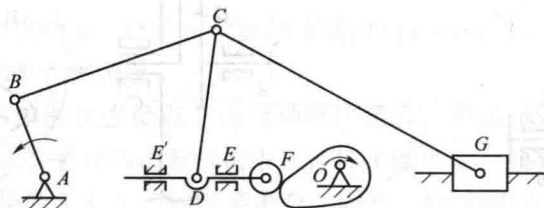


图 1-20 筛料机构

由于机构的原动件数等于机构的自由度数, 因此该机构具有确定的相对运动。

思考与练习题

1. 什么叫运动副? 平面运动的高副、低副是如何分类的?
2. 平面机构具有确定运动的条件是什么?
3. 绘制如图 1-21 所示机构的运动简图。

4. 图1-22所示为一个简易冲床的设计方案。试绘制该设计方案的机构运动示意图, 并分析方案是否合理。如不合理, 请简述如何进行修改。

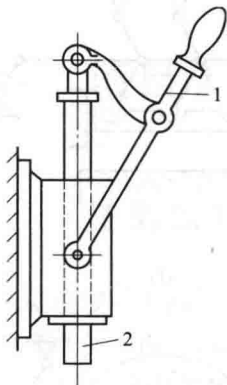


图1-21 第3题图

1—手柄; 2—活塞杆

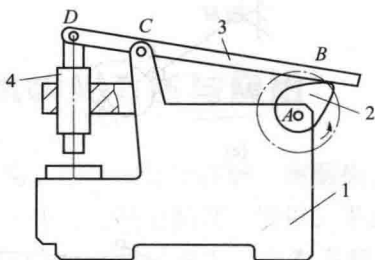
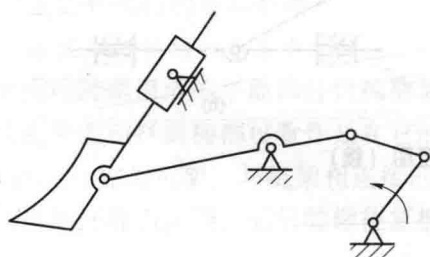
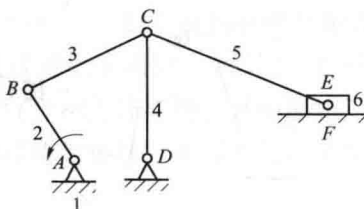


图1-22 第4题图

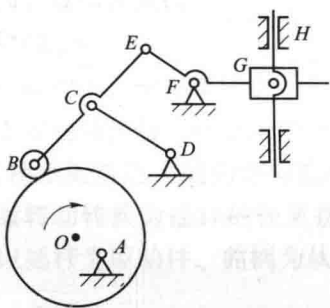
5. 计算如图1-23所示机构的自由度, 若有复合铰链、局部自由度、虚约束请指出, 并判断机构有无确定的相对运动。



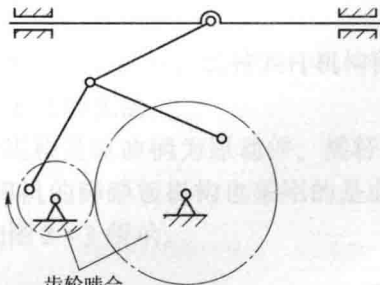
(a)



(b)



(c)



(d)

图1-23 第5题图

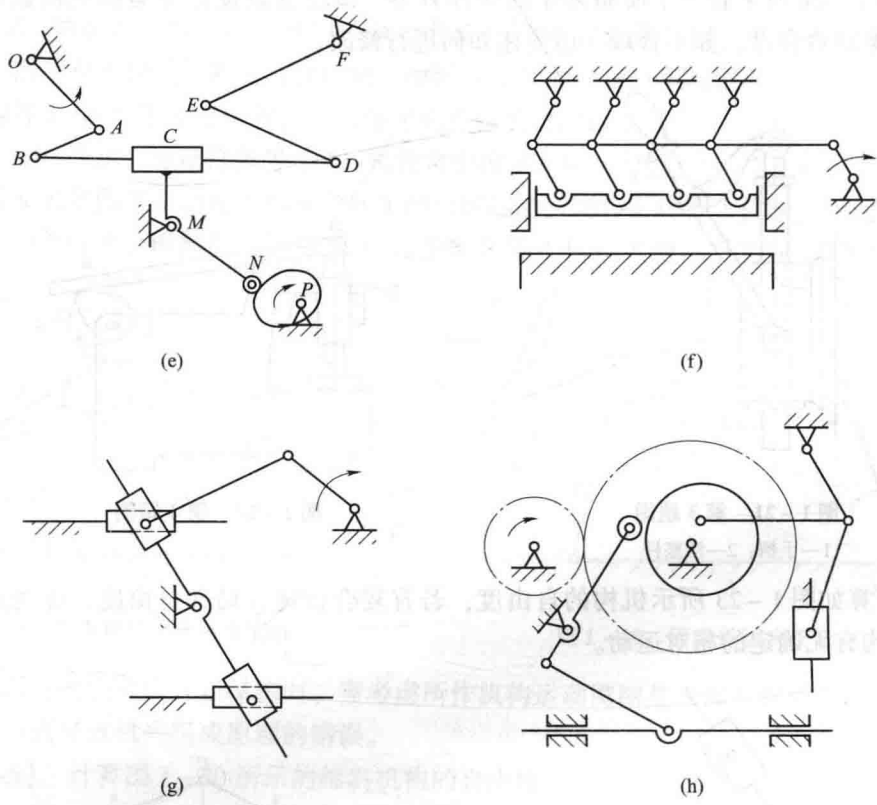


图 1-23 第 5 题图 (续)