

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。通过对本章内容的学习，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；能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，是进行机械产品设计和分析的基础。

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、在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，必须解决以下几个问题。

(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

一个做平面运动的自由构件具有 3 个独立运动，如图 2.1 所示，在 xOy 坐标系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，所以一个做平面运动的自由构件有 3 个自由度。

当构件组成机构时，每个构件都以一定的形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。

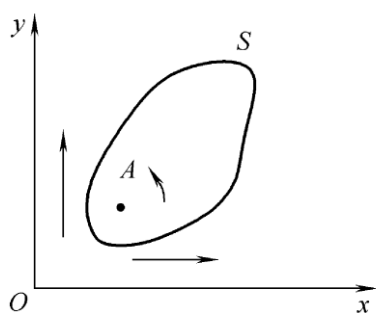


图 2.1 做平面运动的自由构件具有 3 个独立运动

2.1.1 低副

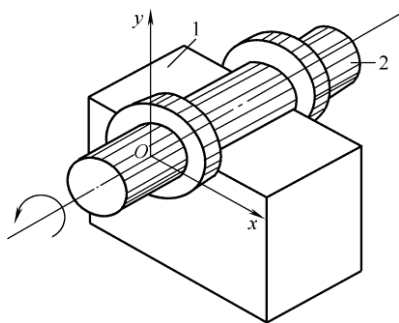
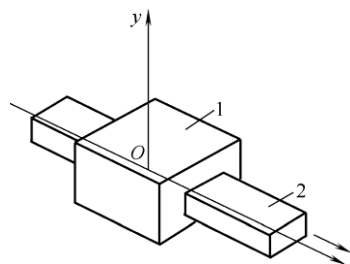
两构件通过面接触形成的运动副称为低副。根据它们之间的相对运动是转动还是移动，又可分为转动副和移动副。

1. 转动副

若组成运动副的两构件之间只能绕某一轴线做相对转动，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做相对直线移动，这种运动副称为移动副，如图 2.3 所示。

图 2.2 转动副
1, 2—构件图 2.3 移动副
1, 2—构件

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。

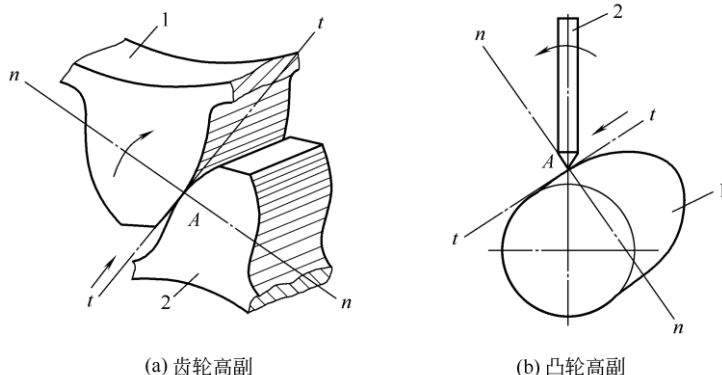


图 2.4 高副

1, 2—构件

此外, 常见的运动副还有螺旋副、球面副。它们皆属于空间运动副。

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, 而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)所示为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。图 2.5(a)表示两个构件均为活动构件, 图 2.5(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)所示为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。

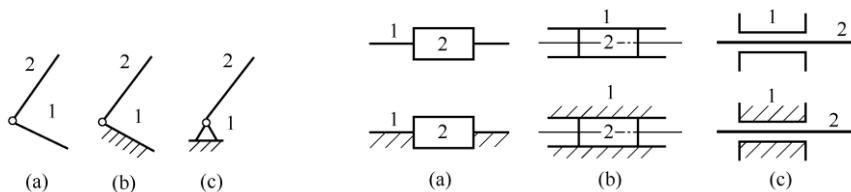


图 2.5 两个构件组成的转动副的符号

1, 2—构件

图 2.6 两个构件组成的移动副的符号

1, 2—构件

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, 常用点划线画出其节圆。

图 2.8 所示为构件的表示方法。图 2.8(a)表示参与构成两个转动副的构件。图 2.8(b)、(c)表示参与构成 3 个转动副的构件,为了说明 3 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 3 个角涂上焊缝标记,如图 2.8(c)所示,一个构件上有 3 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。图 2.8(e)、(f)所示为参与构成一个转动副和一个移动副的构件。

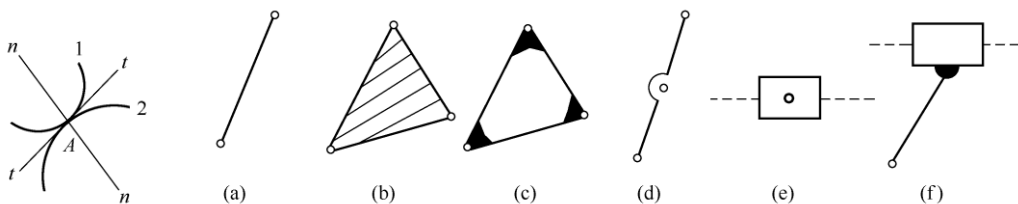


图 2.7 高副的表示方法

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 3 类。

- (1) 固定构件(机架)。这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 所示内燃机中的活塞。
- (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。图 1.1 所示内燃机中的曲轴是输出构件,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 μ_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 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,便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 4 个构件组成。带轮 4 与偏心轴 5 固连成一体,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 做平面运动,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 做相对转动,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 做相对转动,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 做相对转动,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 做相对转动,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 的尺寸定出 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。

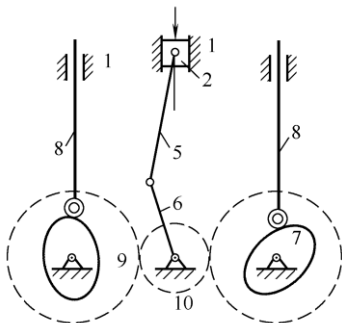


图 2.9 内燃机的机构运动简图

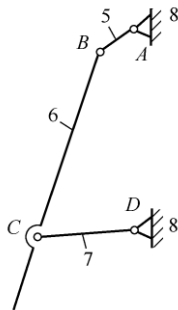


图 2.10 颚式破碎机的机构运动简图

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。

众所周知, 对于一个做平面运动的构件, 具有 3 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(见图 2.3)也约束了两个自由度, 保留一个自由度; 高副(见图 2.4)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

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

式(2-1)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 计算图 2.10 所示机构的自由度。

解 该机构有 3 个活动构件, 即 $n=3$; 有 4 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, 则将产生以下影响。

如图 2.11(a)所示, 由 3 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 φ_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 φ_1 和 φ_4 , 则构件 2、3 的位置也就确定。计算该系统的自由度可得 $F=3\times 4-2\times 5-0=2$ 。

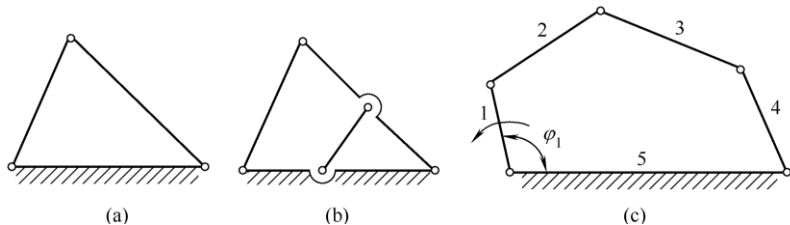


图 2.11 几种构件系统示例



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。图 2.12(a)所示为三构件在 A 处构成的复合铰链。图 2.12(b)是它的俯视图, 可以看出, 此 3 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

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

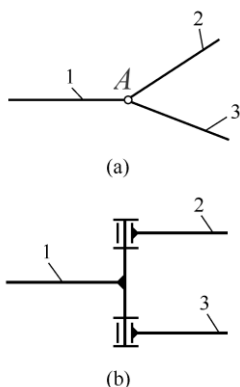


图 2.12 复合铰链
1~3—构件

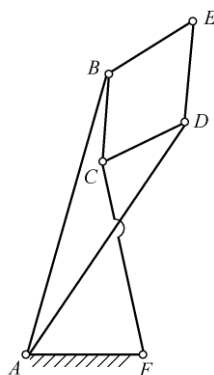


图 2.13 含有复合铰链的机构

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 在如图 2.14 所示的平面凸轮机构中, 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。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 $n=2$, $P_L=2$, $P_H=1$, 故有

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

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,在如图 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, $n=4$, $P_L=6$, $P_H=0$, 故其自由度为

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

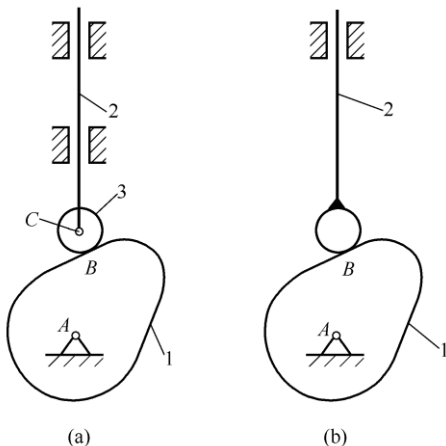


图 2.14 局部自由度

1—工件; 2—轴; 3—滚子

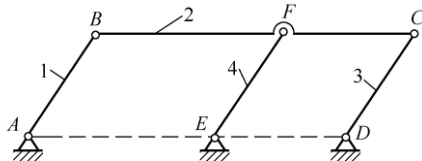


图 2.15 虚约束示意

1~4—构件

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 E 、 F 也不再存在)。当原动件 1 转动时,构件 2 上的 F 点的轨迹自然是以 E 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 E 、 F 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 E 、 F 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 E 、 F ,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 3 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。在如图 2.16 所示的行星轮系中,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,改善机构受力状况等方面看,却是必需的。虚约束发生的情况较复杂,要注意分析判断,以免



计算错误。

例 2.6 计算如图 2.17 所示凸轮连杆机构的自由度。

解 机构中滚子处有一个局部自由度, 除去滚子与构件 6 之间的转动副。从 AB 开始给每个构件编号, 共有 8 个可动构件; 构件 5 与机架由导路平行的两个移动副 F 、 F' 相连, 其中一个移动副为虚约束, 应除去一个移动副。构件 2、3 及 4 之间的转动副 D 是复合铰链。合计有 11 个低副, 1 个高副。由式(2-1)有

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 8-2\times 11-1=1$$

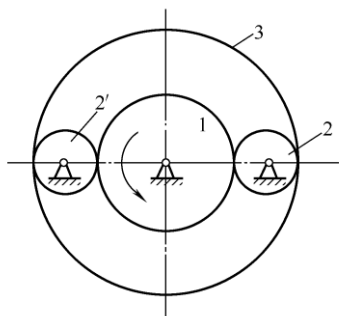


图 2.16 对称结构的虚约束

1~3, 2'—构件

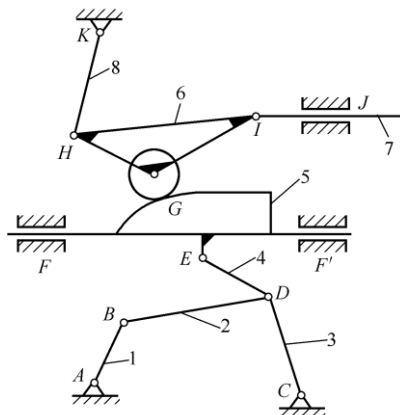


图 2.17 凸轮连杆机构

1~8—构件



实训 1 机构运动简图的测绘

1. 实训目的

- (1) 掌握平面机构运动简图测绘及其运动尺寸正确标注的基本方法。
- (2) 掌握平面机构自由度的计算和机构运动是否确定的判别方法。
- (3) 巩固和扩展对机构的运动及其工作原理的分析能力。

2. 实训设备和工具

- (1) 若干机构实物或机构模型(如简易冲床)。
- (2) 钢板尺、卷尺, 精密测绘时还应配备游标卡尺及内外卡钳。
- (3) 直尺、铅笔、橡皮(自备)和稿纸(自备)。

3. 实训原理

机构的运动取决于机构中的构件数目和运动副的数目、种类及相对位置等, 与构件的形状和运动副的具体结构无关。用简单的线条或图形轮廓表示构件, 以规定的符号代表运

动副,按一定比例尺寸关系确定运动副的相对位置,绘制出能忠实反映机构在某一位置时各构件间相对运动关系的简图,即机构运动简图。

4. 实训步骤和方法

(1) 缓慢运动被测机构或模型,从原动件开始仔细观察机构中各构件的运动,分出运动单元,确定机构的构件数目,进而确定原动件、执行构件、机架及各从动件。

(2) 根据直接接触的两构件的联接方式和相对运动情况,确定各运动副的种类、数目和相对位置(注:本书中构件的“联接”方式不用改为“连接”方式,以便与实际应用一致)。

(3) 按类别在某相应的位置上用规定符号画出运动副,并逐个标注运动副代号 A、B、C、…。

(4) 将位于同一构件的运动副用简单的线条连接,机架打上斜线表示,高副构件画出构件高副联接处的外廓形状,然后逐个标注上构件的序号 1、2、3、…。

(5) 测量出运动副之间的距离和移动副导路的位置尺寸或高度,并将测出的尺寸标注在图上。

(6) 选取适当的比例尺、视图平面和原动件位置,将示意图绘制成机构运动简图。原动件要画上表示运动方向的箭头。长度比例尺按下式 $\mu_l = \frac{\text{构件的实际长度(m)}}{\text{图中线段长度(mm)}}$ 计算。

5. 注意事项

- (1) 测绘出若干个机构的运动简图,计算机构自由度,判断机构运动是否确定。
- (2) 在机构运动简图中,应正确标注出有关运动构件尺寸的符号,如杆长 l 、偏心距 e 等。
- (3) 注意一个构件在中部与其他构件用转动副联接的表示方法。
- (4) 机架的相关尺寸不应遗漏。
- (5) 两个运动副不在同一运动平面时,应注意其相对位置尺寸的测量方法。

6. 思考题

- (1) 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将会产生什么结果?
- (3) 计算机构自由度应注意哪些问题?本实训中有无遇到此类问题?若有,你是如何处理的?

习题与练习

1. 填空题

- (1) 机构要能够动,自由度必须_____。
- (2) 机构中的相对静止件称为_____,机构中按给定运动规律运动的构件称为_____。
- (3) 两构件通过_____或_____接触组成的运动副称为高副;通过_____接触组

成的运动副称为低副。

- (4) 在平面机构中若有一个高副就引入_____个约束,若有一个低副就引入_____个约束。
 (5) 机构的自由度为 2, 则机构需_____原动件。

2. 选择题

- (1) 组成平面高副两构件的接触必须为()。
 A. 点接触 B. 线接触 C. 点或线接触 D. 面接触
 (2) 计算机构自由度时, 若计入虚约束, 则计算所得结果与机构的实际自由度数目相比()。
 A. 增多了 B. 减少了
 C. 相等 D. 可能增多也可能减少
 (3) 由 m 个构件所组成的复合铰链包含的转动副个数为()。
 A. $m-1$ B. $m+1$ C. m D. 1

3. 判断题

- (1) 两个以上的构件在一处用低副相联接就构成复合铰链。 ()
 (2) 机构是由两个以上构件组成的。 ()
 (3) 转动副限制了构件的转动自由度。 ()
 (4) 固定构件(机架)是机构不可缺少的组成部分。 ()
 (5) 4 个构件在一处铰接, 则构成 4 个转动副。 ()
 (6) 机构的运动不确定, 就是指机构不能具有相对运动。 ()
 (7) 虚约束对机构的运动不起作用。 ()
 (8) 使两个构件直接接触并能产生相对运动的联接称为运动副。 ()

4. 简答题

- (1) 计算机构自由度时应注意哪些事项?
 (2) 机构具有确定运动的条件是什么?

5. 分析计算题

- (1) 绘制如图 2.18(a)、(b)所示机构的运动简图, 并计算其自由度。

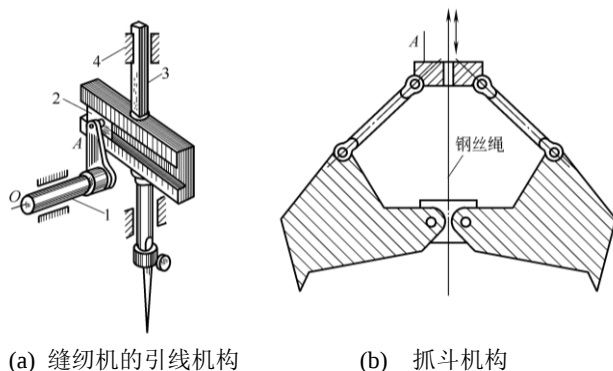


图 2.18 缝纫机的引线机构和抓斗机构

1~4—构件

(2) 计算如图 2.19(a)~(h)所示机构的自由度, 并判定它们是否具有确定的相对运动 (图中画有箭头的构件为原动件)。若有复合铰链、局部自由度和虚约束要明确指出。

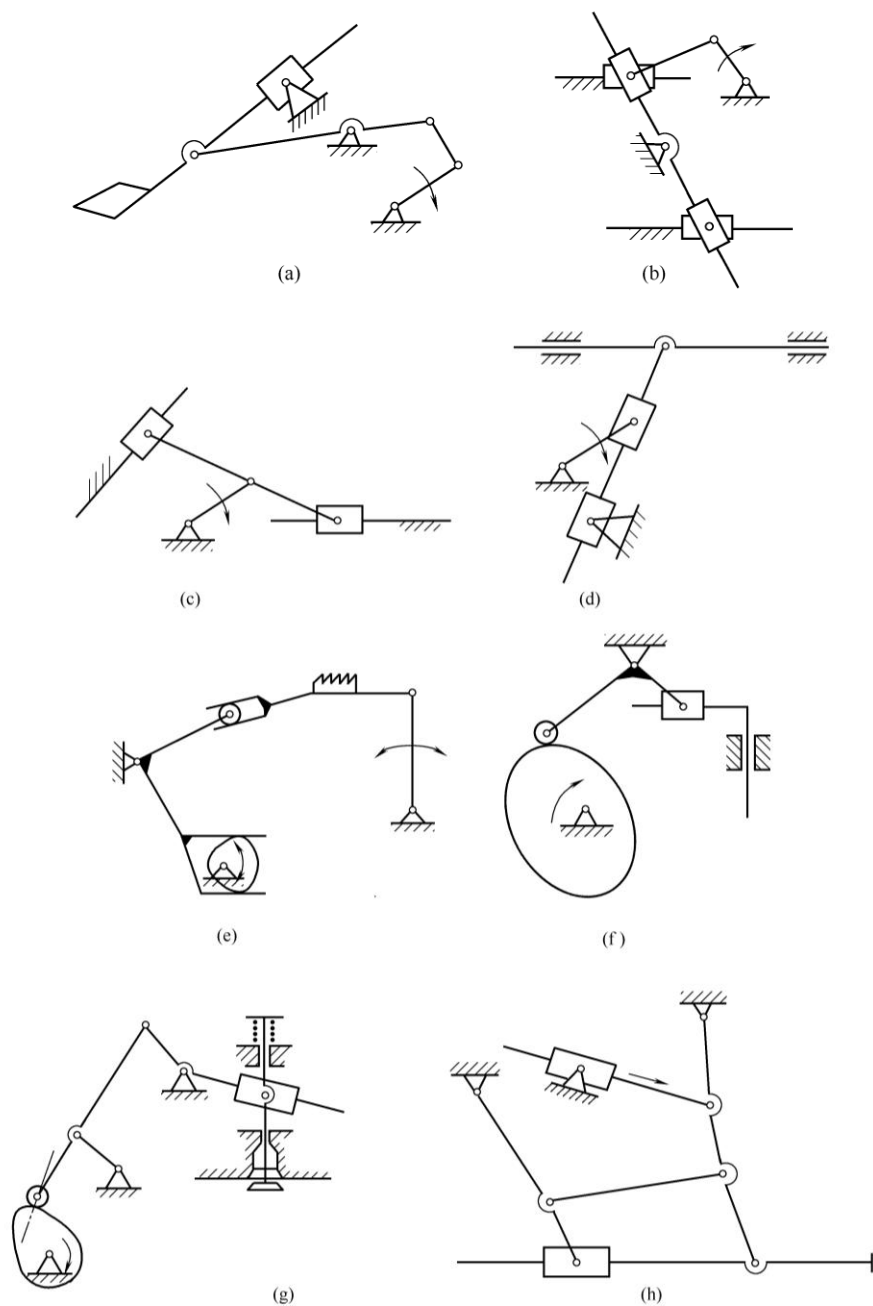


图 2.19 几种机构的示意图