

第二篇 常用机构设计

第2章 平面机构的结构分析

§ 2-1 平面机构的组成

一、运动副及其分类

1. 构件的自由度

一个自由构件可能出现的独立运动称为自由度。

一个作平面运动的自由构件有三个独立运动。如图 2-1 所示，在 xOy 坐标系中，构件 S 可随其上任一点 A 沿 x 轴、 y 轴方向移动和绕点 A 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，一个作平面运动的自由构件有三个自由度。

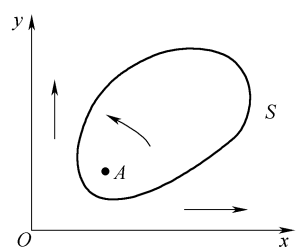


图 2-1 刚体自由度示意图

2. 运动副

机构由构件组成，机构中每个构件都是以一定的方式与其他构件相互连接，这种连接不是固定连接，而是能产生相对运动的连接，这种使两构件直接接触并能产生一定相对运动的可动连接称为运动副。例如，图 0-2 所示内燃机中活塞与汽缸、两个齿轮之间都构成运动副。

当两个构件以某种方式组成运动副后，它们的相对运动就受到约束，自由度随之减少。每加上一个约束，构件便失去一个自由度，自由度减少的数目等于引入的约束数目。两构件间约束数的多少以及约束的形式，完全取决于运动副的类型。

运动副的类型很多，按构件间相互接触方式不同可分为低副和高副两类。

(1) 低副。

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

转动副：组成运动副的两构件若只能在一个平面内作相对转动或摆动，则该运动副称为转动副或铰链。如图 2-2 所示，若两构件中有一个是固定的，称为固定铰链（见图 2-2a）；若两个构件都是活动的，称为活动铰链（见图 2-2b）。

显然，图 2-2 中的两构件只能作相对转动，不能沿轴向或径向作相对移动。因此，两构件组成转动副后，引入 2 个约束，保留了 1 个自由度。

移动副：组成运动副的两构件只能沿某一轴线相对移动，则该运动副称为移动副。如图 2-3 所示。构件只能沿轴向作相对移动，其余的运动受到了约束（一个移动和一个转动），即引入 2 个约束，保留了 1 个自由度。

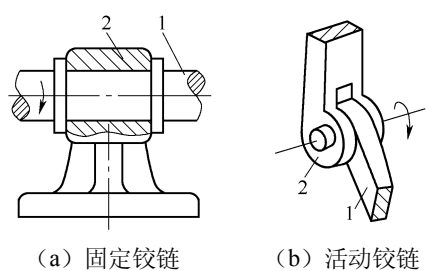


图 2-2 转动副

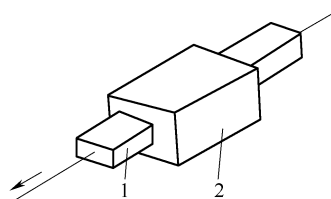


图 2-3 移动副

(2) 高副。

两构件通过点或线接触组成的运动副称为高副。图 2-4a 中火车车轮与钢轨、图 2-4b 中的凸轮与从动件、图 2-4c 中轮齿 1 和轮齿 2 均在接触处 A 组成高副。组成平面高副的两构件间的相对运动是沿接触处的切线 $t-t$ 方向的相对移动和在平面内绕接触点 A 的相对转动, 构件间沿公法线 $n-n$ 方向的移动受到约束。显然, 高副引入 1 个约束, 保留了 2 个自由度。

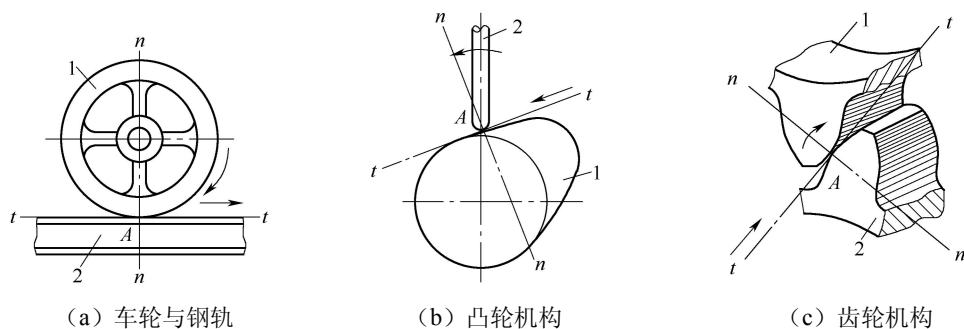


图 2-4 平面高副

因此, 在平面机构中, 平面低副具有 2 个约束, 1 个自由度; 平面高副具有 1 个约束, 2 个自由度。

此外, 在机械中还常采用图 2-5a 所示的球面副和图 2-5b 所示的螺旋副。由于这些运动副的两构件间的相对运动为空间运动, 所组成的运动副属于空间运动副, 故不属于本章的讨论范围。

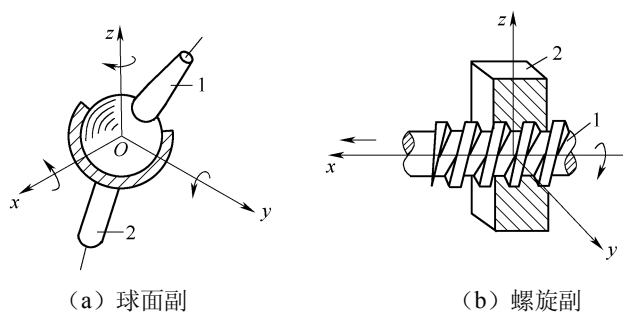


图 2-5 球面副与螺旋副

3. 运动链

由两个以上的构件通过运动副连接构成的系统称为运动链。如果运动链的各构件构成首

末封闭的系统,如图 2-6a 所示,称为闭式链;如果运动链的各构件没有构成首末封闭的系统,如图 2-6b 所示,称为开式链。在各种机构中,一般多采用闭式链,开式链多用于机械手或机器人的传动中。

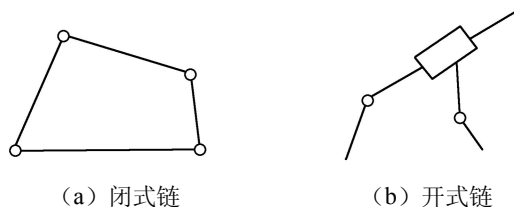


图 2-6 运动链

二、平面机构的组成

如果将运动链中的一个构件加以固定作为参考系,则这种运动链便成为机构。

机架: 机构中作为参考系的构件称为机架,是用来支承活动构件的构件。机架相对地面可以是固定的,也可以是运动的(如汽车、轮船、飞机等中的机架)。如图 0-2 中的汽缸体是机架,用来支承活塞、连杆、曲轴、凸轮轴等活动构件。

主动件: 按给定运动规律运动的活动构件称为主动件或原动件。如图 0-2 中的活塞 2,它的运动规律已知,是由外界输入的。

从动件: 随着主动件的运动而运动的活动构件称为从动件。如图 0-2 中的连杆、曲轴、齿轮、凸轮、顶杆等都是从动件。从动件的运动规律取决于原动件的运动规律和机构的结构。

由此可见,任何机构都是由若干个构件通过运动副连接而成,且必定有一个固定构件作为机架,并有一个(或几个)原动件,从而使其余个构件之间都能产生完全确定的相对运动。

§ 2-2 平面机构的运动简图

一、平面机构运动简图的定义

实际机构往往是由外形和结构都比较复杂的构件通过运动副连接而构成的。构件的运动取决于运动副的类型和机构的运动尺寸(确定各运动副相对位置的尺寸),而与构件外形、断面尺寸、组成构件的零件数目、运动副的具体结构等无关。因此,为了便于研究机构的运动,可以撇开构件、运动副的外形和具体构造,只用简单的线条和符号代表构件和运动副,并按一定的比例确定出各运动副位置,表示机构的组成和传动情况,这样绘制出的能够准确表达机构运动特性的简明图形称为机构运动简图。机构运动简图与原机构具有完全相同的运动特性,可以根据它对机构进运动分析。

有时,只是为了表明机构的组成情况、运动状态或各构件的相互关系,也可以不按比例来绘制运动简图,这种简图称为机构示意图。

二、机构运动简图中的常用符号

表 2-1 中列出了绘制运动简图时一些常用构件和运动副以及常用机构的代表符号。

表 2-1 机构运动简图中的常用符号

名称	符号	名称	符号
构件	固定件	高副	凸轮副
	同一构件		齿轮副
	两副构件		
	三副构件		
低副	转动副		
	移动副		
电动机		棘轮机构	
带传动		链传动	

三、机构运动简图的绘制

机构运动简图的绘制步骤:

- (1) 分析机构的组成, 确定机构的原动件和执行件, 从原动件开始, 沿运动传递顺序确定构件数目;
- (2) 分析机构的运动情况, 确定机构中各构件的运动尺寸及运动副类型和数目;
- (3) 恰当地选择投影面, 以能够简明地把机械结构及运动情况表示清楚为原则;
- (4) 选择合适的比例尺 μ_l , $\mu_l = \text{实际尺寸 (m)} / \text{图示尺寸 (mm)}$, 用简单的线条和各种运动副代号绘制机构运动简图;
- (5) 用箭头表示原动件的运动方向。

例题 2-1 绘制图 2-7a 所示油泵机构的运动简图。

解：先找出油泵的原动件为圆盘 1，执行件是构件 3。当回转副 B 在 AC 中心线的左边时，从机架 4 的右孔道吸油；当 B 在 AC 中心线的右边时，经机架 4 的左孔道排油。

按照运动传递路线可以看出，此机构由圆盘 1、构件 2、构件 3 和机架 4 四个构件组成。其中圆盘 1 与机架 4 在 A 点构成转动副、与构件 2 在 B 点构成转动副，而构件 3 与机架 4 在 C 点构成转动副，构件 2 与构件 3 构成移动副，移动导路沿 BC 方向。

机构组成情况、运动情况清楚后，再选定投影面和比例尺，定出各转动副的位置，测量出各转动副中心之间的尺寸，即可绘出其机构的运动简图，如图 2-7b 所示。

例题 2-2 绘制图 0-2 所示单缸内燃机的机构运动简图。

解：活塞 2 是原动件，在燃气的压力作用下，活塞 2 首先运动，通过连杆 3 使曲轴 4 输出回转运动。为了控制进、排气，利用固定在曲轴上的小齿轮 4' 带动固定在大齿轮 5 转动，再由凸轮轴上的凸轮 5' 推动顶杆 6 来控制进气阀和排气阀。

按照运动传递路线可以看出，此内燃机是由汽缸体 1（机架）、活塞 2、连杆 3、曲轴 4（齿轮 4'）、齿轮 5（凸轮轴 5'）、顶杆 6 六个构件组成。其中机架 1 与活塞 2、与顶杆 6 组成移动副；连杆 3 与活塞 2 在 C 点构成转动副、与曲轴 4 在 B 点构成转动副，机架 1 与曲轴 4 在 A 点构成转动副、与大齿轮 5 在 D 点构成转动副；小齿轮 4' 与大齿轮 5、凸轮 5' 与顶杆 6 构成高副。

选择好投影面，选定比例尺，按规定的符号和线条绘出运动简图，如图 2-8 所示。

例题 2-3 绘制图 0-3 所示牛头刨床机构运动简图。

解：牛头刨床由床身 1（机架）、齿轮 2、齿轮 3、滑块 4、导杆 5、连杆 6、滑枕 7 七个构件组成。当齿轮 2（原动件）转动时，将运动传递给齿轮 3，再经过滑块 4 带动导杆 5 绕 E 点摆动，并通过连杆 6 带动滑枕 7，使刨刀随同滑枕 7 一起作往复直线运动，实现刨削运动。

床身 1 与齿轮 2、与齿轮 3、与导杆 5 分别在 A 、 C 、 E 点构成转动副，滑块 4 与齿轮 3、导杆 5 与连杆 6、连杆 6 与滑枕 7 分别在 D 、 F 、 G 点构成转动副；滑块 4 与导杆 5、滑枕 7 与床身 1 组成移动副；齿轮 2 与齿轮 3 构成高副。

选定比例尺，选择投影面，按规定的符号和线条绘出运动简图，如图 2-9 所示。

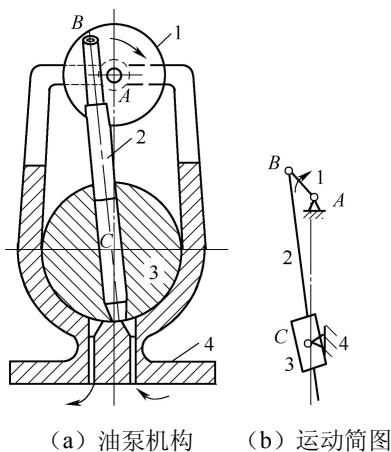


图 2-7 油泵机构

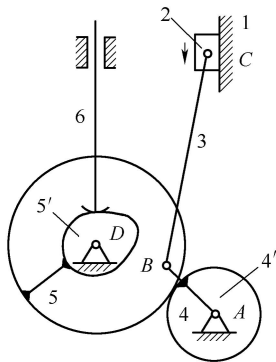


图 2-8 内燃机机构运动简图

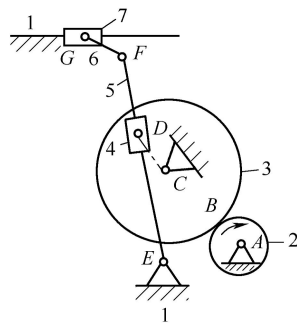


图 2-9 牛头刨床机构运动简图

§ 2-3 平面机构的自由度

一、平面机构的自由度计算公式

一个作平面运动的自由构件有三个自由度。设平面机构共有 K 个构件，其中必有一个构件为机架，机架的自由度为零，则活动件个数为 $n = K - 1$ ，这些活动构件在未组成运动副之前总共有 $3n$ 个自由度，组成运动副后，自由度将减少，减少的数目应等于运动副引入的约束数目。每个低副引入 2 个约束，每个高副引入 1 个约束。若平面机构中包含 P_L 个低副和 P_H 个高副，则引入的约束数为 $2P_L + P_H$ 。则机构的自由度 F 为

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

例题 2-4 试计算图 2-8 所示内燃机机构的自由度。

解：从机构运动简图中可以看出该机构有 5 个活动构件（即 $n=5$ ），包含 4 个转动副、2 个移动副和 2 个高副（即 $P_L=6$, $P_H=2$ ）。根据式 (2-1)，机构的自由度为

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 5 - 2 \times 6 - 2 = 1$$

二、机构具有确定运动的条件

机构是用来传递运动和动力的构件系统，机构要实现这种功能就必须满足一定的条件。我们先看几个例子，判断一下它们是否能传递运动和动力。

如图 2-10 所示铰链四杆机构， $n=3$, $P_L=4$, $P_H=0$ 。其自由度为

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

如取构件 1 作为原动件，当构件 1 以参变量 φ_1 相对机架运动时，对于每一个确定的 φ_1 值，从动件 2、3 便有一个与之确定的对应位置，由此说明这个自由度为 1 的机构，在具有一个原动件时，构件间的相对运动是确定的，能传递运动和动力。若同时给定两个构件作为原动件（如构件 1 和构件 3），机构就可能出现卡死或损坏。

如图 2-11 所示铰链五杆机构， $n=4$, $P_L=5$, $P_H=0$ 。该机构自由度为

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

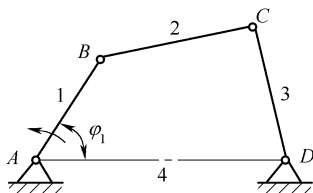


图 2-10 铰链四杆机构

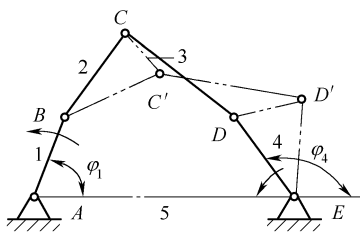


图 2-11 铰链五杆机构

若只取构件 1 为原动件，对于每一个给定的 φ_1 值，从动件 2、3、4 的位置不确定，如当原动件 1 处于图示 AB 位置时，构件 2、3、4 可以处在 BC 、 CD 、 DE 位置，也可以处于 BC' 、 $C'D'$ 及 $D'E$ 或者其他位置，即机构的运动不确定；若取构件 1 和 4 为原动件，对于每一组给定 φ_1 和 φ_4 值，从动件 2、3 便有一确定的位置，该机构的运动就能完全确定。由此可知，该机构具有两个自由度，在两个原动件的作用下，机构具有确定的运动。

图 2-12a 所示系统, $n=2$, $P_L=3$, $P_H=0$ 可得 $F=3n-2P_L-P_H=3\times 2-2\times 3=0$, 各构件之间不能产生相对运动, 是刚性桁架。

图 2-12b 所示系统, $n=3$, $P_L=5$, $P_H=0$, $F=3n-2P_L-P_H=3\times 3-2\times 5=-1$, 该系统由于受到的约束过多, 已成为超静定桁架, 各构件之间不能产生相对运动, 故此系统不能传递运动和力。

机构的自由度就是机构具有确定位置时所必须给定的独立运动参数的数目。机构的自由度 F 、机构原动件的数目与机构的运动有着密切的关系:

(1) 若机构自由度 $F \leq 0$, 则机构不能动。

(2) 若 $F > 0$ 且与原动件数相等, 则机构各构件间的相对运动是确定的, 这就是机构具有确定运动的条件。

(3) 若 $F > 0$, 而原动件数小于 F , 则构件间的运动是不确定的。

(4) 若 $F > 0$, 而原动件数大于 F , 则构件间不能运动或产生破坏。

例题 2-5 试计算图 2-9 所示牛头刨床传动机构的自由度。

解: 从图中看出, 该机构共有 6 个活动构件 (即 $n=6$), 包含 6 个转动副, 2 个移动副和 1 个高副 (即 $P_L=8$, $P_H=1$)。则该机构的自由度为

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 6-2\times 8-1=1$$

即此机构只有 1 个自由度。齿轮 2 为原动件, 由于此机构的自由度大于零且与原动件数相同, 故机构具有确定的运动。

三、计算平面机构自由度时要注意的问题

计算机构的自由度时, 还有一些注意事项, 否则得不到正确的结果。

1. 复合铰链

两个以上的构件在同一处用转动副相连, 便构成复合铰链。

如图 2-13 所示为三个构件组成的复合铰链, 它实际为两个转动副。同理, 由 m 个构件组成的复合铰链, 共存在 $(m-1)$ 个转动副。

例题 2-6 试计算图 2-14 所示直线锯机构的自由度。

解: 机构共有 5 个活动构件 (即 $n=5$); 在 C 处是 3 个构件组成的复合铰链, 有两个转动副, 整个机构共有 6 个转动副, 1 个移动副, 由公式可得机构的自由度为

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

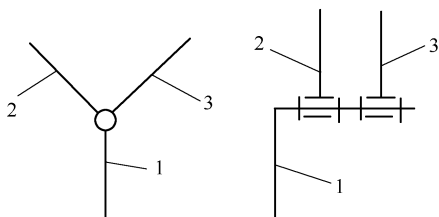


图 2-13 复合铰链

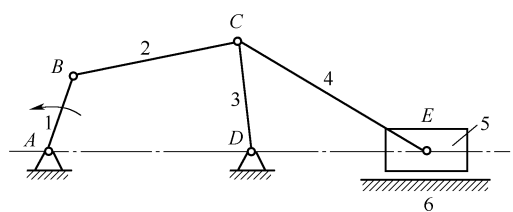


图 2-14 直线锯机构

2. 局部自由度

机构中某些构件所产生的局部运动，并不影响其他构件或整个机构的运动规律，称为机构的局部自由度。在计算机构自由度时局部自由度应舍弃不计。

例题 2-7 试计算图 2-15a 所示滚子从动件盘形凸轮机构的自由度。

解：图 2-15a 中凸轮 2 为原动件，当凸轮转动时，通过滚子 4 驱使从动件 3 以一定的运动规律在机架 1 中往复移动。不难看出，滚子 4 绕其本身轴线的自由转动丝毫不影响其他构件的运动。因此滚子的转动是一个局部自由度。

在计算机构自由度时，可设想将滚子与从动件焊成一体，排除局部自由度，如图 2-15b 所示，并不改变机构的运动特性。这时机构具有 2 个活动构件，1 个转动副，1 个移动副和 1 个高副。机构自由度为

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

实际机械中常常采用局部自由度，其目的是将高副接触处的滑动摩擦变成滚动摩擦，以达到减少摩擦和磨损的目的。

3. 虚约束

在机构中有时存在着对运动起不到限制作用的重复约束。这些重复的约束称为虚约束，在计算机构自由度时应除去不计。

如图 2-16a 所示的机车车轮联动机构，若按式 (2-1) 计算，其自由度 $F = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$ ，这个结果与实际情况不符。实际上，机车运行中，车轮在飞快旋转。究其原因，此机构存在着对运动不起约束作用的虚约束，即构件 4 和转动副 G 、 H 构成的虚约束，构件 4 引入三个自由度，两个转动副 G 、 H 共引入四个约束，多引入了一个约束，这个约束对机构的运动起重复限制作用（图 2-16b）。现把它们除去（图 2-16c），则该机构的自由度为： $F = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$ 。这样，与实际相符。由此可见，如何判断机构是否存在虚约束是十分重要的。

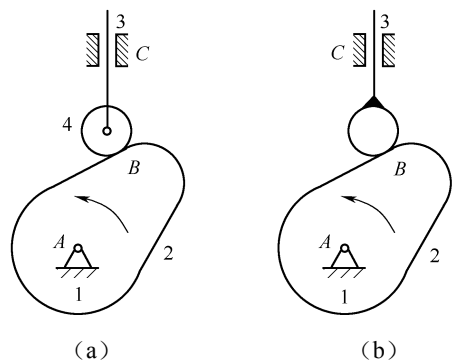
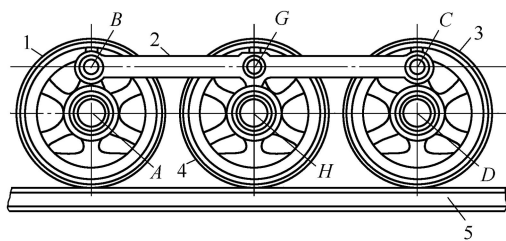
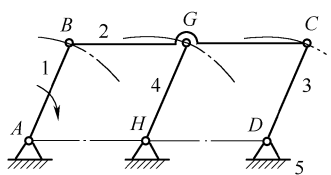


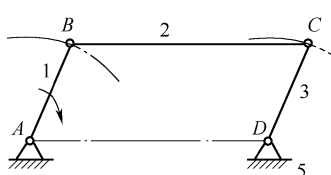
图 2-15 局部自由度



(a)



(b)



(c)

图 2-16 机车车轮联动机构

下面介绍几种在平面机构中常出现的虚约束。

(1) 移动副导路重合或平行。

当两构件组成多个移动副，且其导路互相平行或重合时，则只有一个移动副起约束作用，其余都是虚约束。如图 2-17a 中的 E 和 E' 、图 2-17b 中的 D 和 D' 两处移动副导路重合；图 2-17c 中的两处移动副 A 或 A' 导路平行，计算自由度时，均仅计一个移动副。

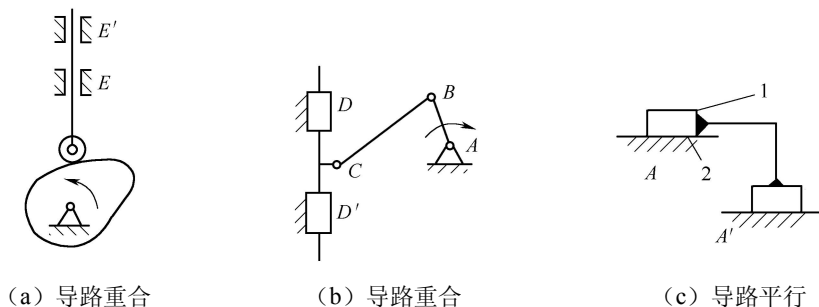


图 2-17 移动副导路重合或平行

(2) 转动副轴线重合。

当两构件组成多个转动副，且轴线重合时，则只有一个转动副起作用，其余转动副都是虚约束。如图 2-18a 中的 A 和 A' 构成两处转动副；图 2-18b 中的四缸发动机的曲轴和轴承在 2、2' 和 2'' 构成三处转动副，计算自由度时，均仅计一个转动副，余者为虚约束。

(3) 轨迹重合（两构件连接前后，连接点的轨迹重合）。

如果机构中两活动构件上某两点之间的距离在机构运动过程中始终保持不变，此时若用具有两转动副的附加构件来连接这两个点，则会引入一个虚约束。如图 2-19 所示，当机构运动时，构件 1 和 3 上 E 、 F 两点间的距离始终不变，若将 E 、 F 两点以构件 4 相连，则多引入一个虚约束，在计算自由度时，该机构可看作拆掉构件 4 连同 E 、 F 转动副，再计算自由度。

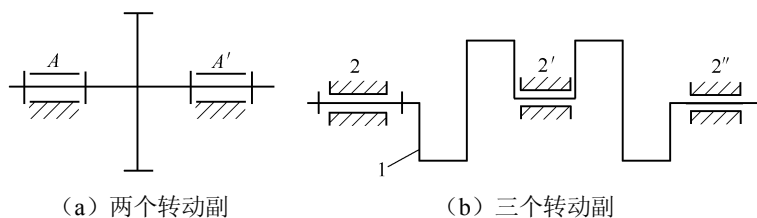


图 2-18 转动副轴线重合

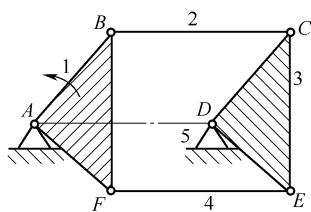


图 2-19 轨迹重合

(4) 机构存在对运动不起作用的对称部分。

在机构中，某些不影响机构运动传递的重复部分所带入的约束为虚约束。

如图 2-20a 所示的行星轮系，为了受力均衡，采用三个行星轮 2、2' 和 2'' 对称布置的结构，而事实上只要一个行星轮 2 就可以满足运动要求，其余两个行星轮 2' 和 2'' 则引入两个虚约束。计算自由度时应予以排除，认为该机构有三个活动构件、三个转动副、两个高副，此机构的自由度 $F=1$ ，如图 2-20b 所示。

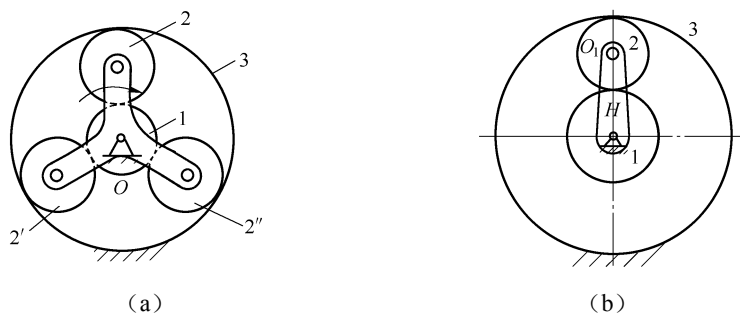


图 2-20 行星轮系

注意：从机构运动观点分析，机构的虚约束是多余的，但从增加机构的刚度、改善构件的受力情况、避免机构运动不确定等方面来说却是有益的。当机构具有虚约束时，通常都必须满足一定的几何条件（如图 2-21a 中 EF 与 AB 、 CD 平行且相等），否则，虚约束就会成为真实有效的约束而使机构卡住不能运动（图 2-21b 中 EF 是真实约束）。所以，从保证机构运动和便于加工、装配等方面而言，应尽量减少机构的虚约束。

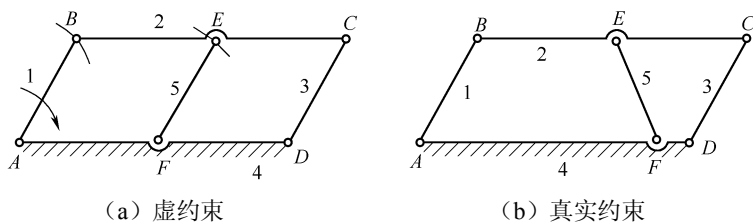


图 2-21 虚约束的几何条件

例题 2-8 试计算图 2-22 所示配气机构的自由度。

解：滚子 F 处有一个局部自由度，气门与机架在 G 或 H 处有一个虚约束。该机构包含 6 个活动构件（ $n=6$ ），8 个转动副、2 个移动副、一个高副（ $P_L=8$ ， $P_H=1$ ）。则自由度为

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 6 - 2 \times 8 - 1 = 1$$

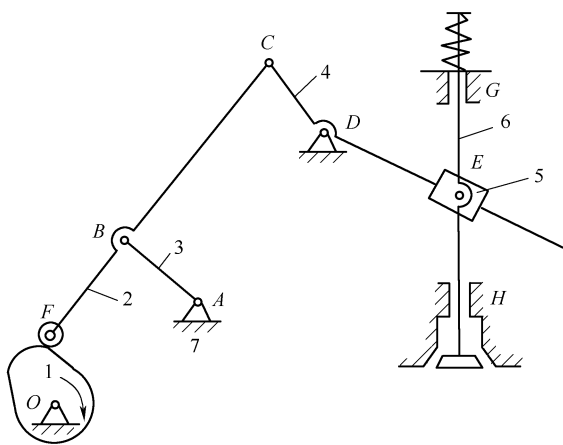
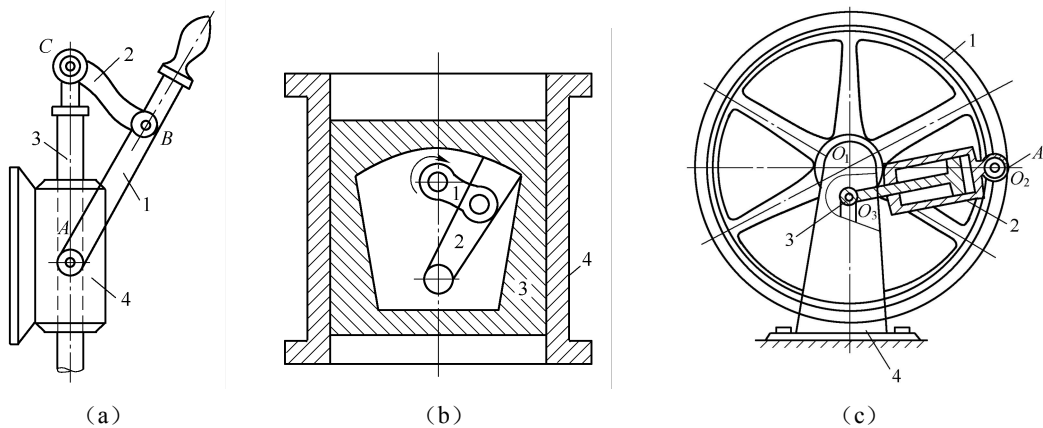


图 2-22 配气机构

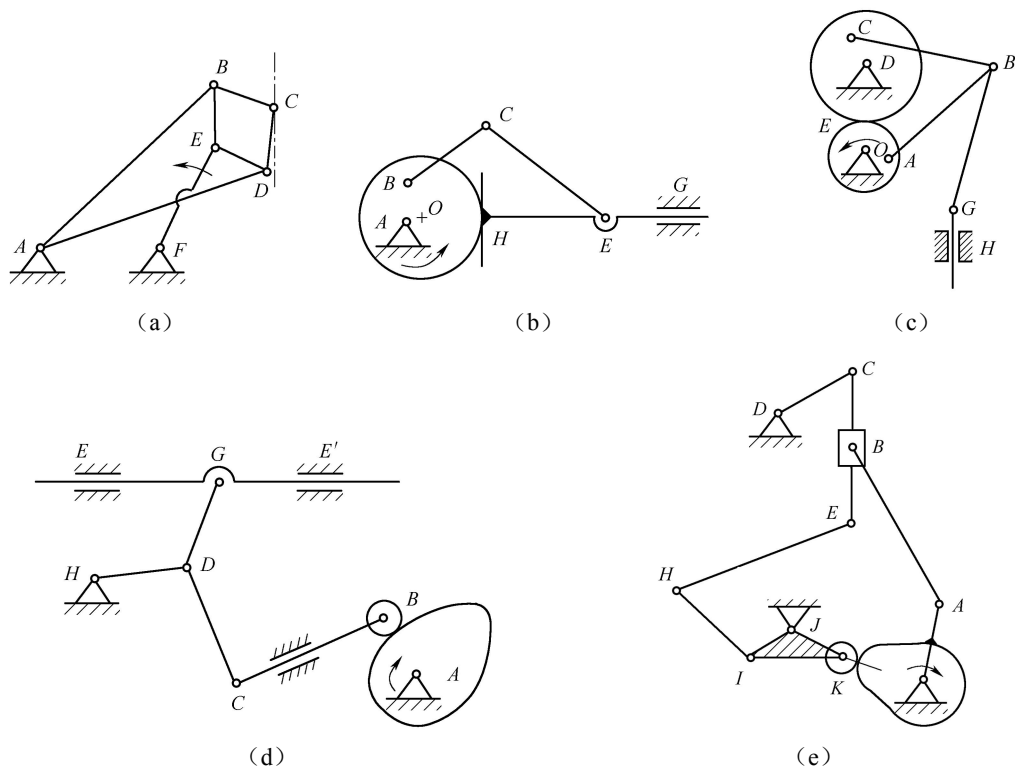
习 题

- 2-1 什么是运动副？高副和低副有何区别？
 2-2 什么是机构运动简图？机构运动简图和机构示意图有何区别？
 2-3 平面机构具有确定运动的条件。
 2-4 绘出如图所示机构的机构运动简图。



题 2-4 图

- 2-5 计算如图所示机构的自由度，如有复合铰链、虚约束、局部自由度，请明确指出。



题 2-5 图