

平面机构的结构分析

机构由构件组成,主要功能是传递运动和转换运动形式,各构件之间通常具有确定的相对运动,但构件的任意拼凑组合不一定具有确定的相对运动。图2.1所示为用销连接起来的三杆构件,构件间无相对运动。图2.2所示为五杆构件,当只给定构件 AB 的运动规律时,其余构件的运动并不确定(C 和 C' 、 D 和 D' 不重合)。图2.3所示为四杆构件,当构件 AB 为主动件时,其余构件具有确定的相对运动。

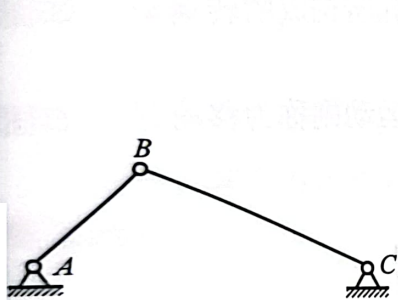


图 2.1 三杆构件

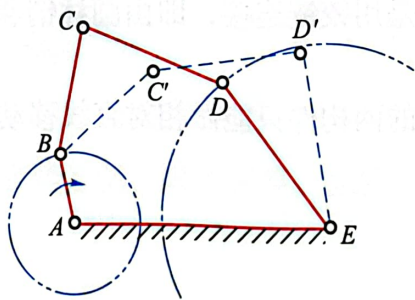


图 2.2 五杆构件

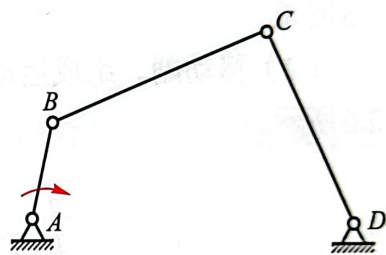


图 2.3 四杆构件

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。

实际机构一般由外形和结构都较复杂的构件组成,为了便于分析和研究机构的运动,仅根据构件的连接特征和与运动有关的尺寸,用规定的符号,将实际机构绘制成机构运动简图。

本章主要讨论平面机构具有确定相对运动的条件和平面机构运动简图的绘制方法。

2.1 平面机构的组成及运动副

2.1.1 构件的自由度

构件是机构中具有相对运动的实物组合,是组成机构的主要元素。在空间直角坐标系内,一个自由状态的构件(刚体)具有六个独立运动的参数,即沿着三个坐标轴的移动和绕三个坐标轴的转动。对于一个做平面运动的构件,如图2.4所示,只有三个独立运动的参数,即构件 AB 绕垂直于 xOy 平面的 z 轴的转动,沿 x 轴或 y 轴方向移动,可以用三个独立参数 x_A 、 y_A 、 φ 来描述。构件相对于参考系所具有的独立运动的数

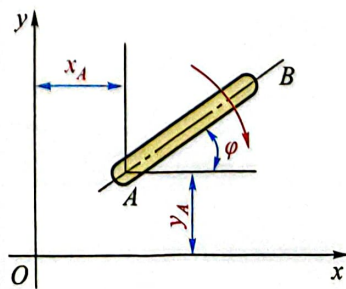


图 2.4 构件的自由度



目,称为构件的自由度。

2.1.2 运动副与约束

平面机构中每个构件都不是自由构件,而是以一定的方式与其他构件组成可动连接,这种使两构件直接接触并能产生一定相对运动的连接称为运动副,因此运动副也是组成机构的主要元素。两构件组成运动副后,限制了两构件间的相对运动,即减少了自由度。运动副限制构件独立运动的作用称为约束。

2.1.3 运动副及其分类

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。

1. 低副

两构件以面接触组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,运动副又可分为转动副和移动副。

(1) 转动副。组成运动副的两构件之间只能绕某一轴线做相对转动的运动副称为转动副。通常转动副的具体形式是用铰链连接,即由圆柱销和销孔所构成的转动副,如图2.5所示。

(2) 移动副。组成运动副的两构件只能做相对直线移动的运动副称为移动副,如图2.6所示。

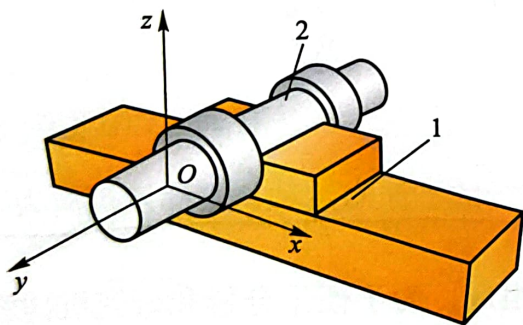


图2.5 转动副

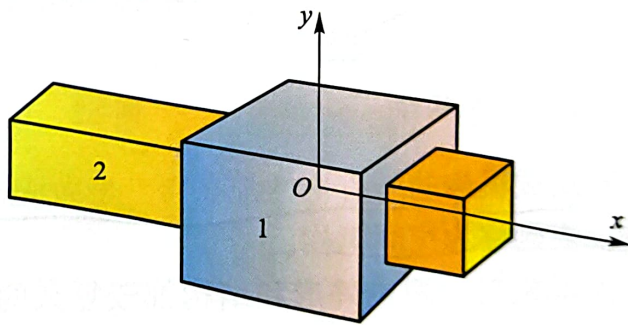


图2.6 移动副

图2.7所示为装载机铲斗上的实际低副。由上述可知,平面机构中的低副引入两个约束,仅保留一个自由度。



图2.7 装载机铲斗上的实际低副



2. 高副

两构件以点或线接触组成的运动副称为高副。如图2.8所示, 构件1与构件2组成的高副中, 构件1沿公法线 nn 方向的移动受到约束, 而构件1相对于构件2则可沿接触点(线) A 的切线 tt 方向移动, 同时还可绕 A 点转动。由此可见, 高副引入一个约束, 保留了两个自由度。

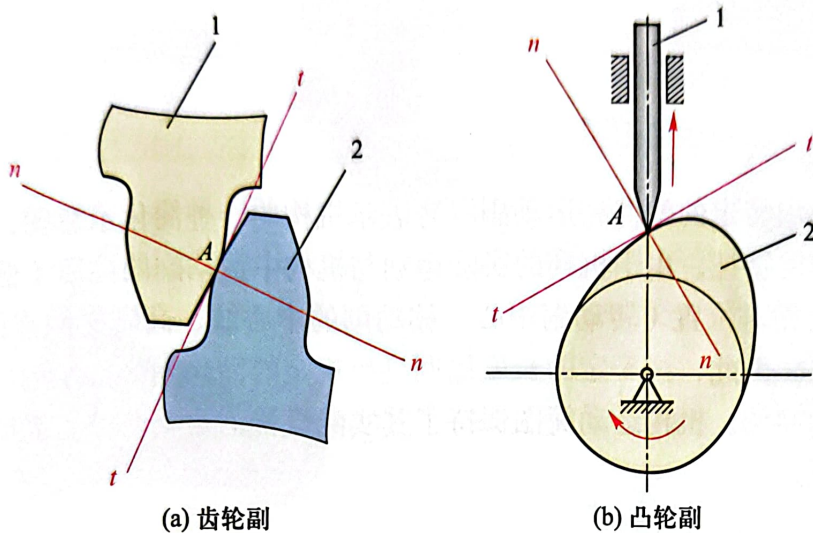


图2.8 高副

此外, 常用的运动副还有球面副、螺旋副等, 如图2.9、图2.10所示, 它们都属于空间运动副。

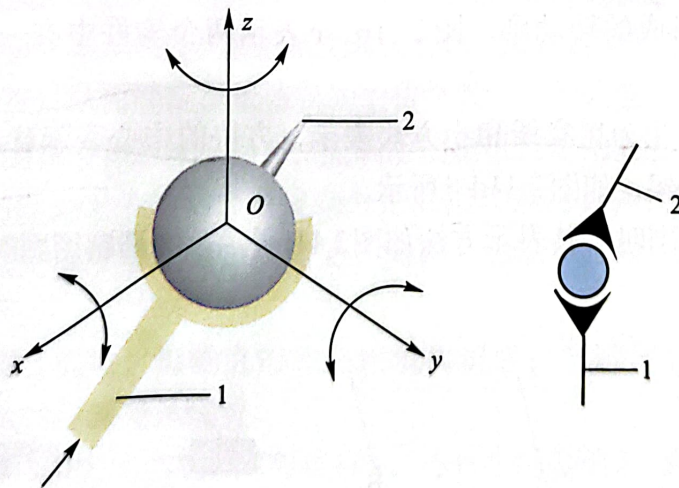


图2.9 球面副

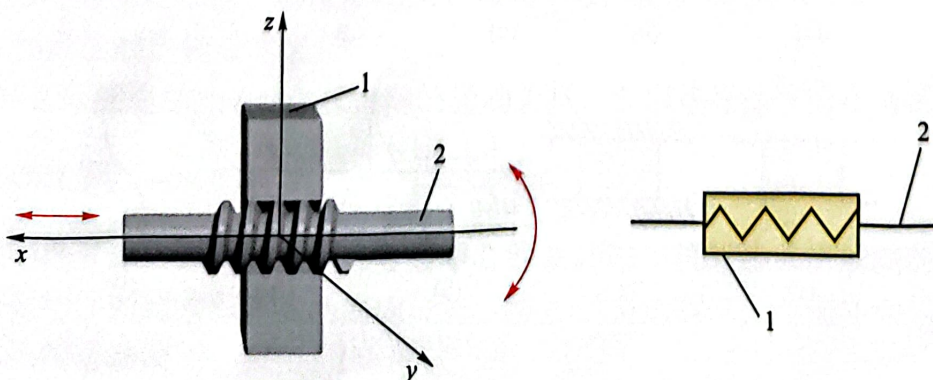


图2.10 螺旋副

动画

高副



AR

螺旋副





构件的自由度给我们一个重要启示：在生活和工作中需要正确处理自律与自由的关系。一个独立的构件是自由的，不受其他构件的约束，一旦它与其他构件形成运动副，它就会失去部分自由度，而完成某种预定的运动。一个独立的个人是自由的，一旦参加一个团队，就要受到团队纪律的约束。因此自由是相对的，世界上没有绝对的自由，在团队中个人要学会自律。

2.2 平面机构运动简图

2.2.1 平面机构简图和运动简图

机构简图是用特定的构件和运动副符号表示机构的一种简化示意图，仅表示机构运动传递情况和结构特征。由于机构的实际运动与机构中运动副的性质（低副或高副等）、运动副的数目及相对位置（转动副中心、移动副的中心线、高副接触点的位置等）、构件的数目等有关。因此，按一定的长度比例尺用规定的简化画法表示构件和运动副的图形称为机构运动简图。机构运动简图保持了其实际机构的运动特征，简明地表达了实际机构的运动情况。

2.2.2 平面机构运动简图的绘制

1. 运动副表示方法

机构运动简图中运动副表示方法如图2.11所示。转动副的符号简化为一个小圆圈表示，圆心代表相对转动的中心，等间距短斜线表示固定构件，也就是机架，图2.11a表示由两个可动构件组成的转动副，图2.11b、c表示两个构件中有一个构件是固定的转动副。

移动副的符号简化为粗实线和小方块表示，方块的中心表示移动导路中心，同样，等间距短斜线表示机架，如图2.11d~i所示。

两个构件组成高副时，其表示方法如图2.11j所示，画高副简图时应画出两构件接触处的曲线轮廓。

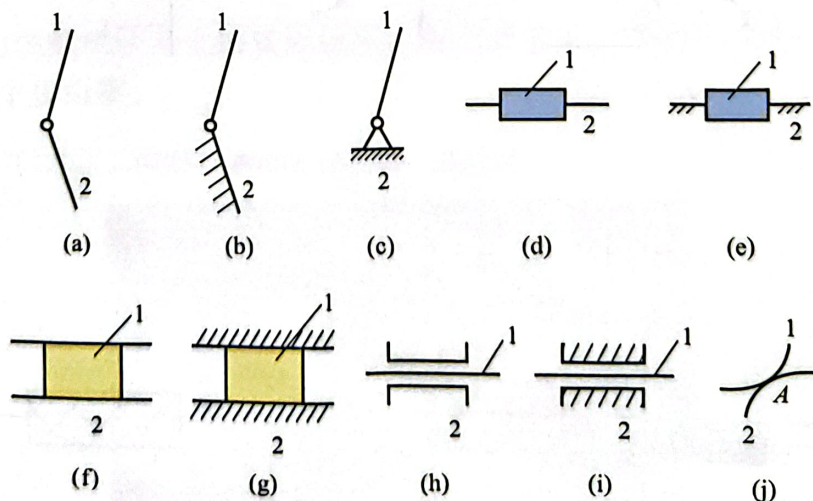


图2.11 运动副表示方法

构件表示方法

机构运动简图中构件表示方法如图2.12所示。图2.12a、b表示能组成两个运动副的一个构件，图2.12a所示构件可组成两个转动副，图2.12b所示构件组成一个转动副和一个移动副；图2.12c、d表示能组成三个转动副的一个构件。

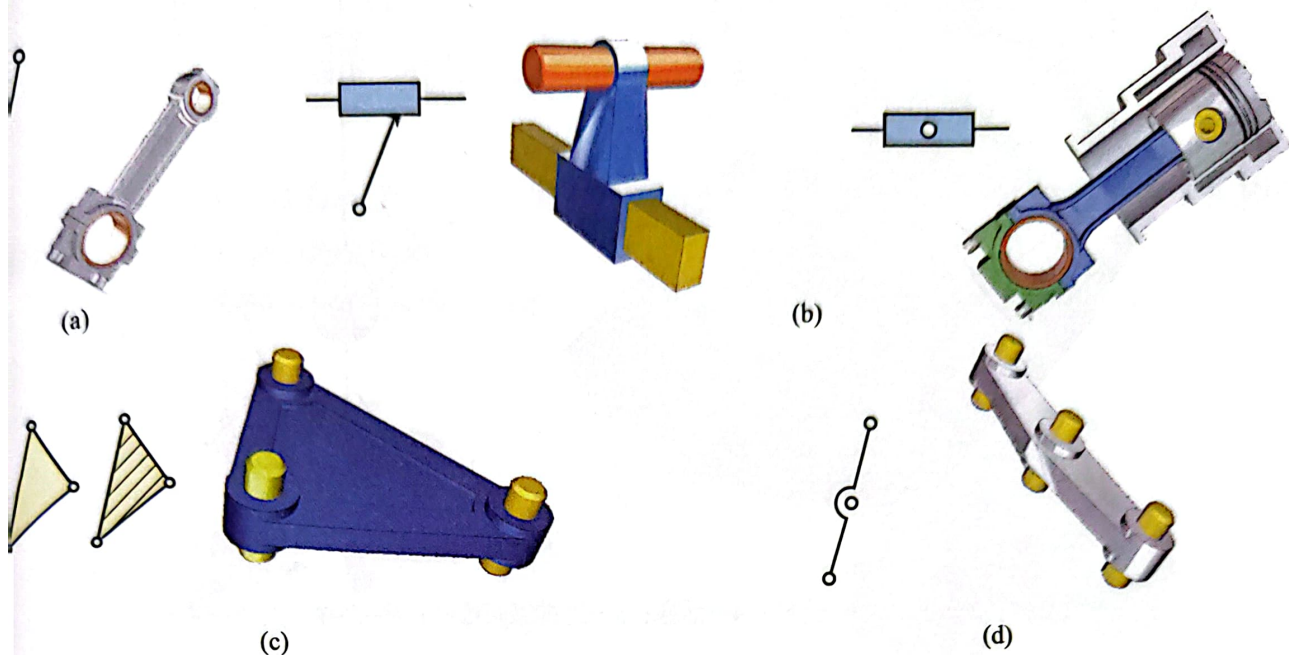


图2.12 构件表示方法

平面机构运动简图绘制

在绘制平面机构运动简图时，首先必须分析该机构的实际构造和运动情况，分清机构中主动件（运动输入构件）及从动件；然后从主动件开始，沿着运动传递路线，仔细分析各构件之间的相对运动情况；从而确定组成该机构的构件数、运动副数及性质。在此基础上按一定的比例尺及特定的构件和运动副符号，正确绘制出机构运动简图。

绘制时应撇开与运动无关的构件及复杂外形和运动副的具体构造，同时应注意选择合适的视图平面，避免构件相互重叠或交叉。例如：绘制单缸内燃机（图2.13）的机构运动简图，步骤如下：

（1）内燃机由连杆机构、齿轮机构和凸轮机构组成。气缸体1作为机架是固定件，活塞是主动件，其余构件都是从动件。

（2）各构件间的连接方式：活塞4与连杆3、连杆3与曲轴2、曲轴2与气缸体1、凸轮6与气缸体1之间均为相对转动，构成转动副。活塞4与气缸体1、进排气阀推杆5与气缸体1之间均为相对移动，构成移动副。齿轮7与齿轮8、凸轮6与进排气阀推杆5顶端之间为线 and 点接触，构成高副。

（3）图2.13a能清楚地表达各构件间的运动关系，所以选择此平面作为视图平面。

（4）选择比例尺： $\mu_l = \frac{\text{实际构件长度 (m)}}{\text{图示构件长度 (mm)}}$

先从主动件开始，画出移动副的导路中心线及曲轴与机架构成转动副的位置作为基准，然后根据构件的尺寸和各运动副的位置，按选定的比例尺，用构件和运动副的规定符号，绘出机构运动简图，如图2.13b所示。

动画

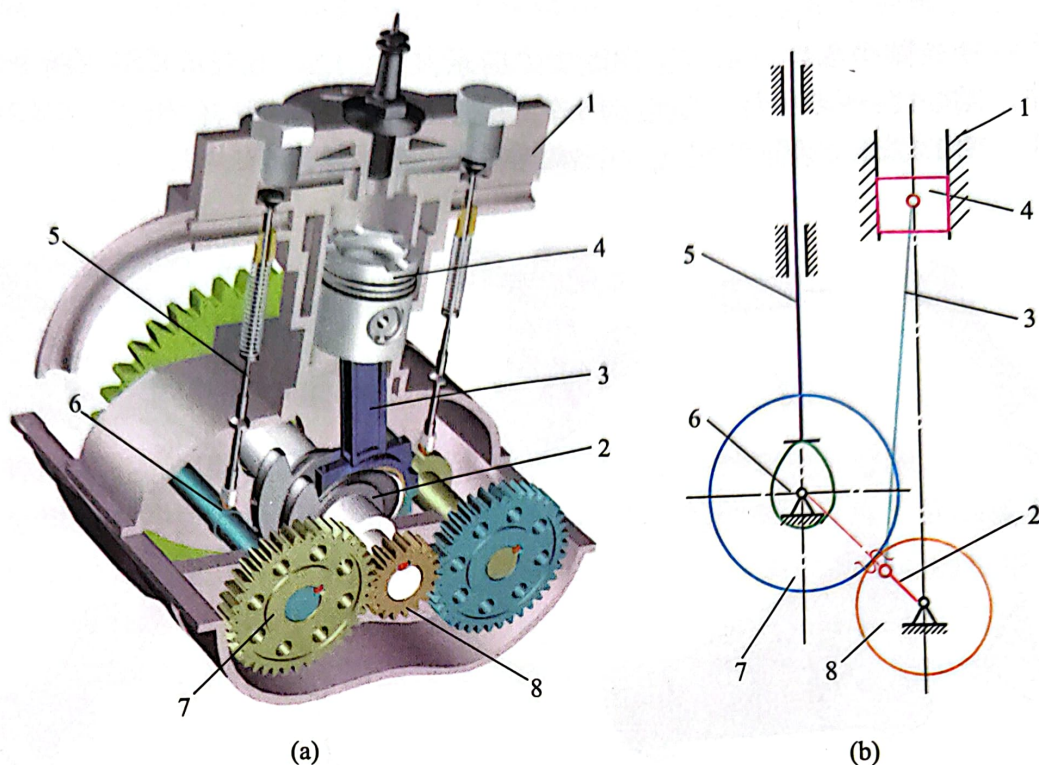
构件表示方法





动画

单缸内燃机



1—气缸体；2—曲轴；3—连杆；4—活塞；5—进排气阀推杆；6—凸轮；7、8—齿轮

图2.13 单缸内燃机

2.3 平面机构的运动

2.3.1 平面机构的自由度

机构具有**确定运动**时所必须给定的独立运动参数的数目（亦即为了使机构的位置得以确定，必须给定的独立的广义坐标的数目），称为**机构自由度**，其数目常以 F 表示。

如图2.1所示的三杆构件，其没有运动的可能性。如图2.2所示的五杆构件，若只有一个主动件时，其他活动构件的运动是不确定的；但若给定两个主动件，则其余构件位置确定。如图2.3所示的四杆构件，若给定一个主动件，则其余构件位置确定。由此可见，构件组合后的运动或位置是否确定，与主动件的数目及机构自由度有关。

由前述可知：在平面机构中每个平面低副（转动副、移动副等）引入两个约束，使构件失去两个自由度；而每个平面高副（齿轮副、凸轮副等）引入一个约束，使构件失去一个自由度。

如果一个平面机构中包含有 n 个活动构件（机架为参考坐标系，相对固定而不计），连接之前，这些活动构件的自由度总数应为 $3n$ ，连接后若机构中有 P_L 个低副和 P_H 个高副，则所有运动副引入的约束数为 $2P_L + P_H$ 。因此，机构自由度 F 应为：

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (2.1)$$

2.3.2 平面机构具有确定运动的条件

由以上公式可知，机构的自由度必须大于零，该机构除机架之外的其他构件才能够



运动。构件组合成为机构的充分和必要条件为：构件组合体的自由度必须大于零，且主动件的数目必须等于自由度数。

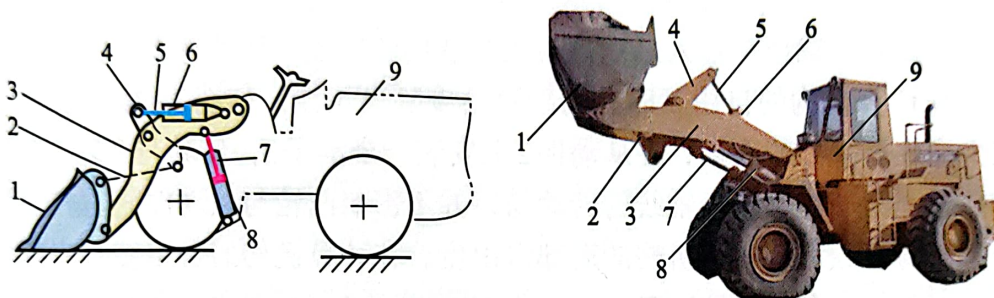
例2.1 计算图2.13所示单缸内燃机的自由度，并判断该机构的运动是否确定。

解 由前面的分析可知，单缸内燃机机构有5个活动构件，6个低副（其中有2个移动副、4个转动副），2个高副。即 $n=5$ ， $P_L=6$ ， $P_H=2$ 。所以，该机构的自由度为：

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

由于机构是以具有一个独立运动的构件活塞4作主动件，主动件的数目等于机构自由度数，故机构具有确定的运动。

例2.2 计算图2.14所示推土机的自由度，并判断该机构的运动是否确定。



1—铲斗；2—铲斗拉杆；3—大臂；4—活塞拉杆；5、7—活塞杆；6、8—液压缸；9—车体（机架）

图2.14 推土机

解 推土机机构有8个活动构件，分别是铲斗1、铲斗拉杆2、大臂3、活塞拉杆4、活塞杆5、液压缸6、活塞杆7、液压缸8；11个低副（其中有2个移动副，分别是活塞杆5与液压缸6之间、活塞杆7与液压缸8之间；有9个转动副，分别是构件1、2之间，2、3之间，1、3之间，2、4之间，3、4之间，4、5之间，6、9之间，8、9之间，3、9之间）。即 $n=8$ ， $P_L=11$ 。所以，该机构的自由度为：

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 8-2 \times 11-0=2$$

此机构有两个主动件（活塞杆5和7），主动件数等于机构自由度数，故机构的运动确定。

2.3.3 计算平面机构自由度时应注意的问题

应用式(2.1)计算平面机构的自由度时，应注意以下几点。

1. 复合铰链

两个以上的构件在一处组成的转动副，称为复合铰链。如图2.15a所示，构件1与构件2、3组成两个转动副。图2.15b为复合铰链的机构简图。3个构件组成的复合铰链包含2个转动副，如果由 k 个构件在同一处构成复合铰链，就构成 $k-1$ 个共线转动副。

例2.3 图2.16所示为惯性筛的机构简图，试计算该机构的自由度。

解 该机构中， $n=5$ ， $P_L=7$ （C处为复合铰链）， $P_H=0$ ，所以该机构的自由度为：

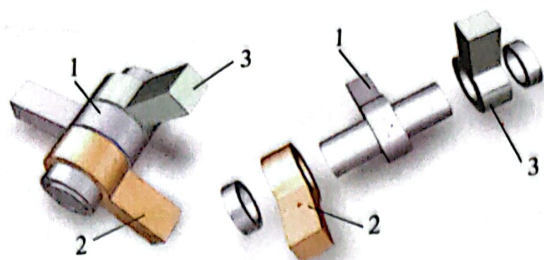
动画

推土机

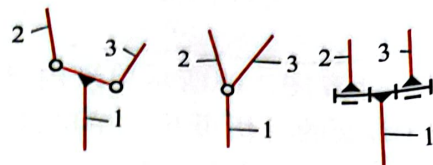


AR

复合铰链



(a) 结构示意图



(b) 机构简图

图2.15 复合铰链

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

2. 局部自由度

机构中不影响其输出与输入运动关系的个别构件的独立运动自由度，称为机构的局部自由度。在计算机构的自由度时，局部自由度除去不计。如图2.17a所示的凸轮机构中，为减少高副接触处的磨损，在从动件2上安装一个滚子3，使其与凸轮1的轮廓线滚动接触。显然，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，因此滚子绕其自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和构件3除去不计。如图2.17b所示，设想将滚子3与从动件2固连在一起，作为一个构件来考虑，此时该机构中， $n=2$ ， $P_L=2$ ， $P_H=1$ ，其机构自由度为：

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

此凸轮机构只有一个自由度，是符合实际情况的。

动画

惯性筛机构



动画

局部自由度

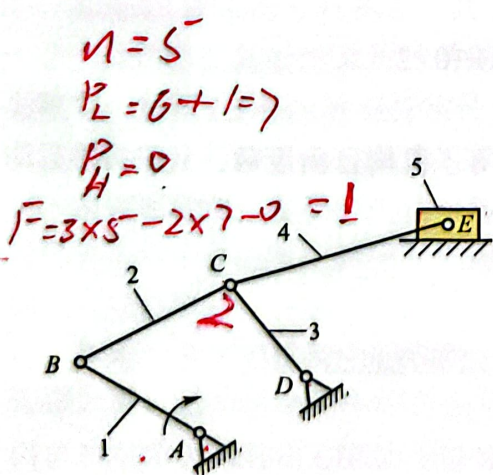
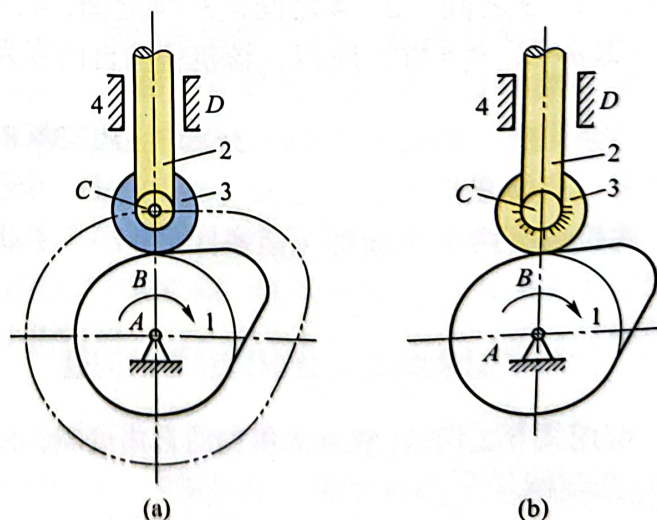


图2.16 惯性筛的机构简图



1—凸轮；2—从动件；3—滚子

图2.17 局部自由度

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2.4 图2.18所示为机车车轮联动机构简图, 其中, $l_{AB}=l_{CD}=l_{EF}$, $l_{BC}=l_{AD}$, $l_{CE}=l_{DF}$ 。试计算该机构的自由度。

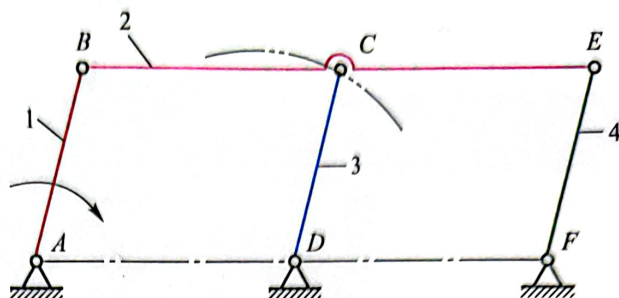
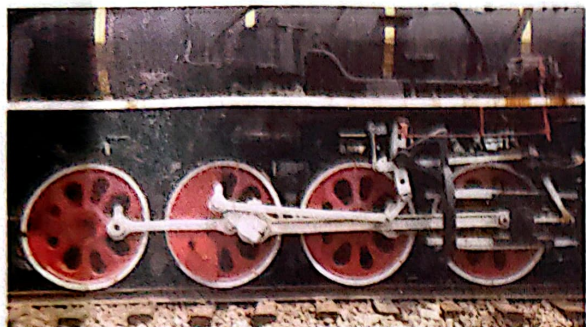


图2.18 机车车轮联动机构简图

解 在此机构中 $n=4$, $P_L=6$, $P_H=0$, 所以其机构自由度为:

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

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。如果去掉构件4 (转动副 E 、 F 也不再存在), 当主动件1转动时, 构件2上 E 点的轨迹是不变的。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, 是**多余约束或重复约束, 即虚约束**。因此, 在计算机构自由度时应除去构件4和转动副 E 、 F 。此时机构中 $n=3$, $P_L=4$, $P_H=0$, 则机构自由度为:

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

此结果与实际情况相符。

由此可知, 当机构中存在虚约束时, 其消除办法是将含有虚约束的构件及其组成的运动副去掉。

平面机构的虚约束常出现于下列情况中:

(1) 被连接件上点的轨迹与机构上连接点的轨迹重合时, 这种连接将出现虚约束, 如图2.18所示。

(2) 两个构件组成多个移动副且其导路互相平行时, 只有一个移动副起约束作用, 其余都是虚约束, 如图2.19所示 (1为运动构件、2为机架)。

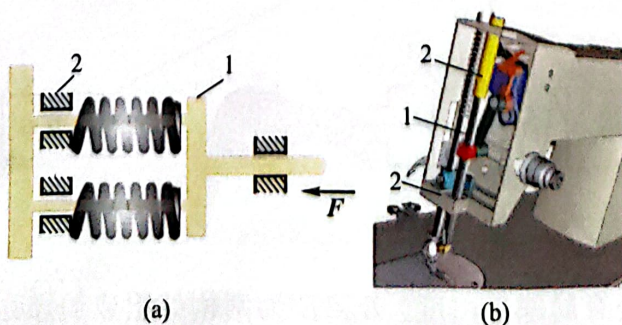


图2.19 导路平行 (重合) 虚约束 (缝纫机机针)

(3) 两个构件组成多个转动副，其轴线重合时，只有一个转动副起约束作用，其余部分是虚约束。例如：一根轴上安装多个轴承，如图2.20所示(1为运动构件、2为机架)，

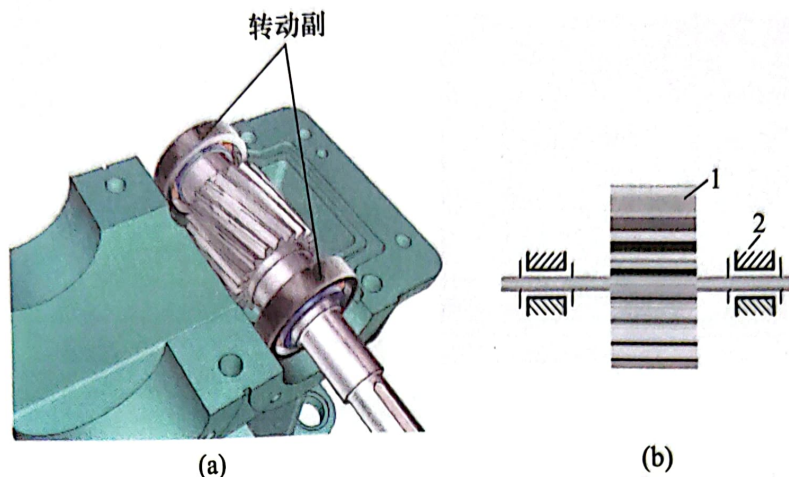


图2.20 转动轴线重合虚约束

(4) 机构中对运动不起限制作用的对称部分，如图2.21所示的齿轮系，中心轮1通过三个齿轮2、2'和2''驱动内齿轮3，齿轮2、齿轮2'、齿轮2''中有两个齿轮对传递运动不起独立作用，引入了虚约束。虚约束对机构运动虽然不起作用，但可以增加构件的刚性，改善受力情况，因而机构中经常出现虚约束。

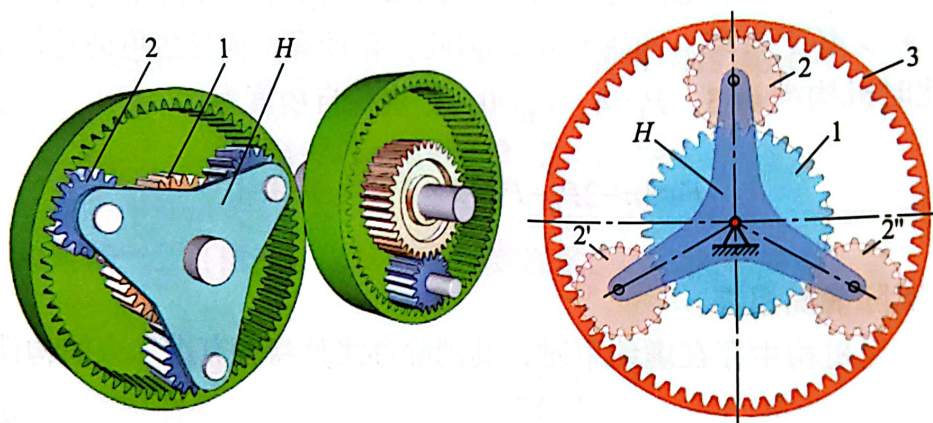


图2.21 结构对称虚约束

例2.5 计算图2.22所示大筛机构的自由度。

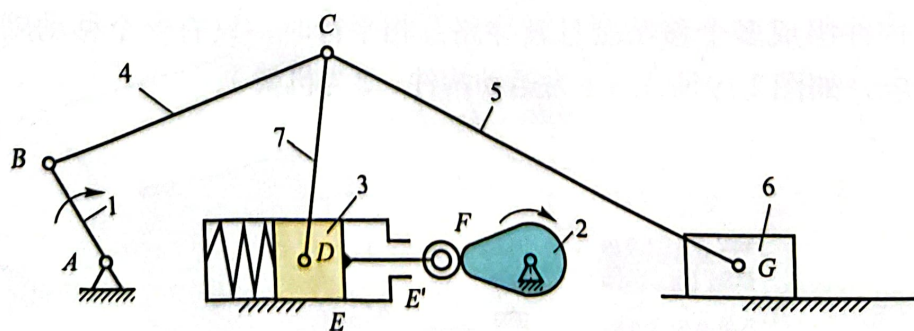


图2.22 大筛机构简图

解 图中滚子 F 处有局部自由度。 E 和 E' 为两构件组成的导路平行移动副，其中一个为虚约束。 C 处为复合铰链。消除局部自由度，去掉虚约束后，机构中 $n=7$ ， $P_L=$
 $P_H=1$ ，则机构自由度为：

AR

结构对称虚
约束



动画

结构对称虚
约束



动画

大筛机构



思考与练习题

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

此机构具有两个自由度，应当有两个主动件（构件1和2）。