

第1章 平面机构的运动简图及自由度

内 容

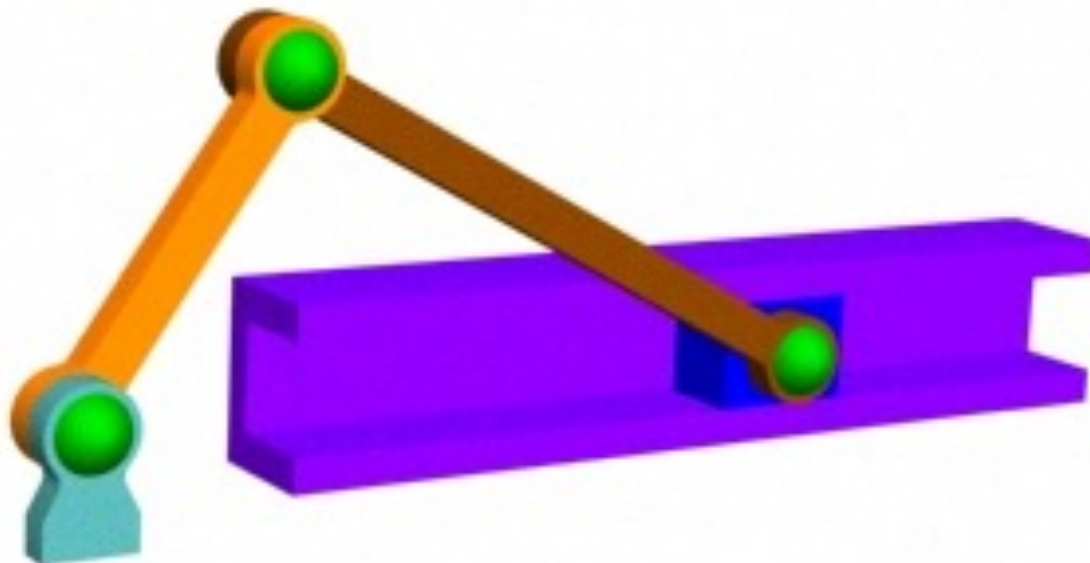
- 运动副及其分类
- 平面机构的运动简图
- 平面机构的自由度

重 点

- 运动副和运动链的概念
- 机构运动简图的绘制
- 机构自由度的计算。

(1) 为什么各活动部分既能相互连接又能保持有相对运动？

(2) 具有确定运动的机构是怎样组成的？



§1 运动副及其分类

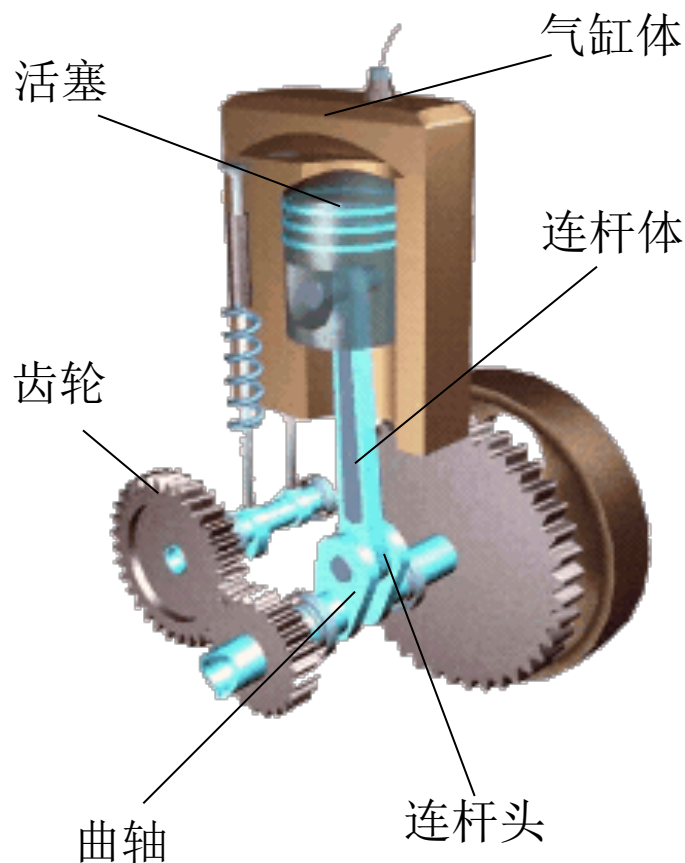
1. 构件

构件 —— 机构中独立运动单元

零件 —— 机构中独立制造单元

**构件往往是由若干零件刚性
地联接在一起的独立运动的整
体。**

从运动来看，任何机器都是由若干个构件组合而成的。构件是组成机构的要素之一。



内燃机

2. 运动副

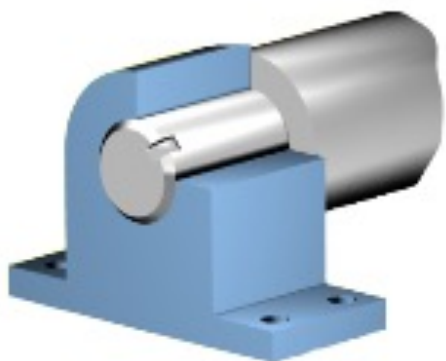
运动副 ——两个构件直接接触且具有确定相对运动的联接。

a)两个构件、 b) 直接接触、 c) 有相对运动

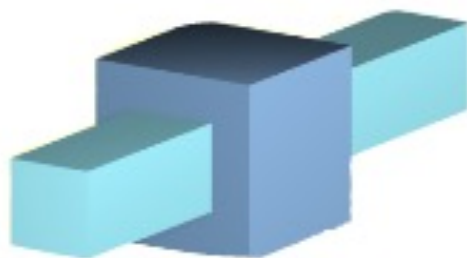
三个条件，缺一不可

运动副元素 ——两构件相互接触的几何形状（点、线、面）。

例 轴与轴承、 滑块与导轨、 两轮齿啮合。



圆柱面与圆孔面



棱柱面与棱孔面



两轮轮齿曲面

空间两构件构成的运动副，其自由度 f 和约束数 s 满足

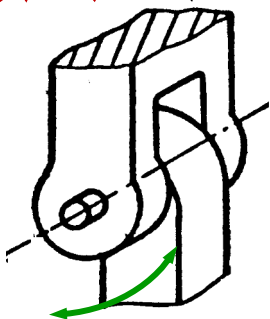
$$f + s = 6$$

运动副的分类:

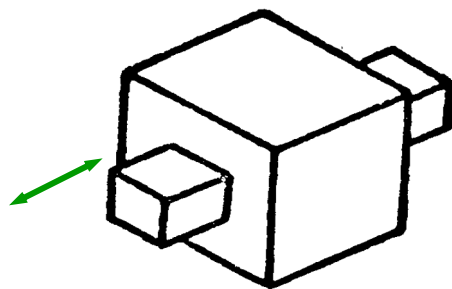
①低副一面接触，应力低

┌ 转动副（回转副）——相对运动为转动

└ 移动副——相对运动为移动

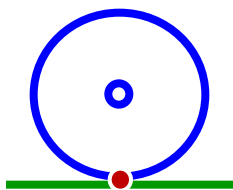


转动副

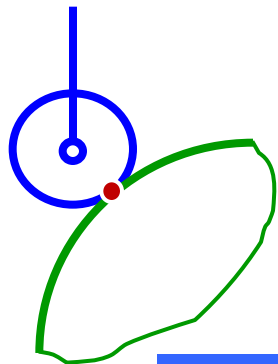


移动副

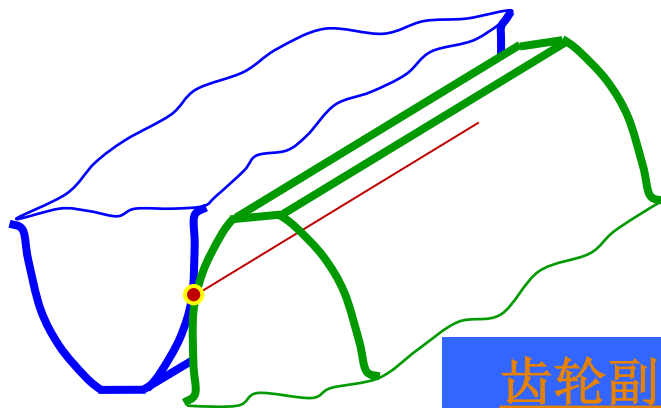
②高副一点、线接触，应力高。例如：滚动副、凸轮副、齿轮副等。



滚动副



凸轮副



齿轮副

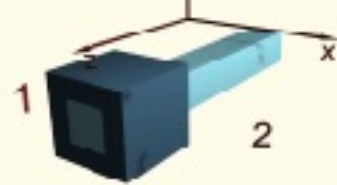
常用运动副的类型



转动副 (轴承)



转动副 (铰链)



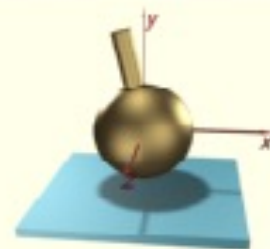
移动副



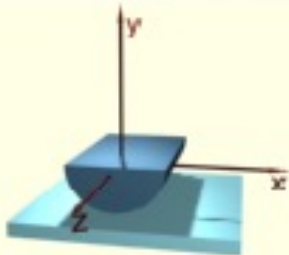
平面齿轮高副



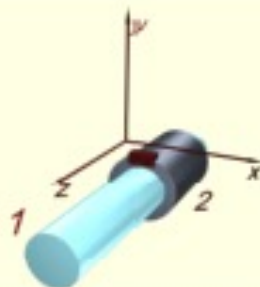
平面凸轮高副



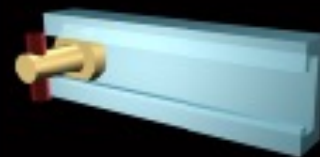
点接触高副



线接触高副



圆柱副



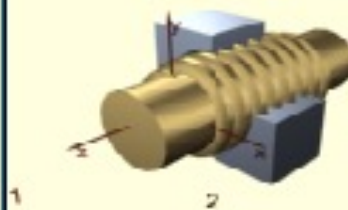
滚转副



球面副

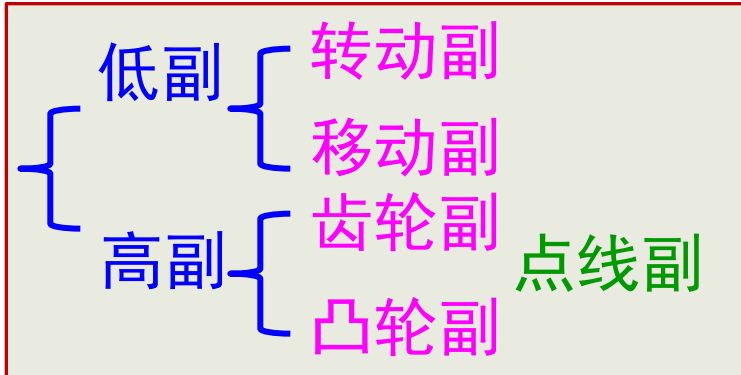


球销副



螺旋副

平面运动副—平面运动
空间运动副—空间运动



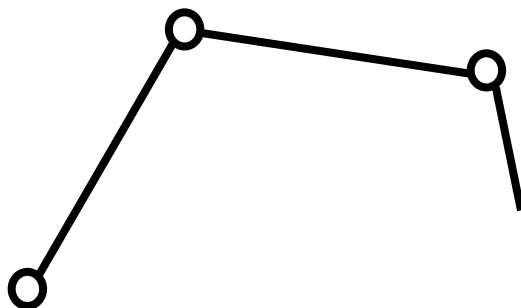
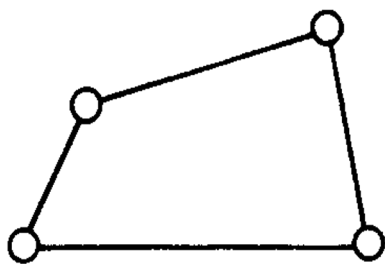
例如：球铰链、拉杆天线、螺旋、生物关节。

平面机构 ——全部由平面运动副组成的机构。

空间机构 ——至少含有一个空间运动副的机构。

3. 运动链

运动链 ——两个以上构件通过运动副联接而成的系统。



闭式运动链（闭式链） ——如果组成运动链的各构件构成首末封闭系统。曲柄摇杆机构

开式运动链（开式链） ——如果组成运动链的各构件未构成首末封闭系统。机器人手

- 机构是由若干构件经运动副联接而成的。在什么条件下就能称为机构呢？即各部分运动确定。分别用四杆机构和五杆机构模型演示得出如下结论：

4. 机构

在运动链中，如果以某一个构件作为参考坐标系，当其中另一个（或少数几个）构件相对于该坐标系按给定的运动规律运动时，其余所有的构件都能得到确定的运动，那么，该运动链便成为机构。

机构 ——具有确定运动的运动链称为机构。

机构中构件的分类：

机架—作为参考系的构件，如机床床身、车辆底盘、飞机机身。

原（主）动件—按给定运动规律运动的构件。

从动件—其余可动构件。

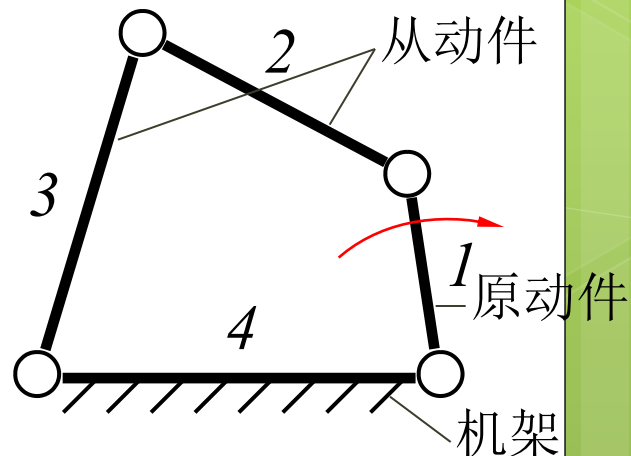
机构的组成：

机构 = 机架 + 原动件 + 从动件

1个

1个或几个

若干



平面铰链四杆机构

§2 平面机构运动简图

机构运动简图 — 仅用简单的线条和规定的符号，代表构件和运动副，并按一定比例表示各运动副的相对位置。这种准确表达机构运动特性的简单图形称为机构运动简图。

➤ 与运动有关的因素：

构件数目；

运动副数目及类型；

运动副之间的相对位置

➤ 表达方式：

用简单线条表示构件；

规定符号代表运动副；

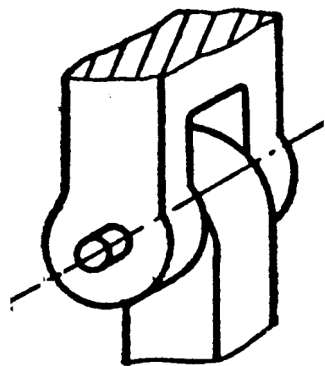
按比例定出运动副的相对位置

➤ 用途：

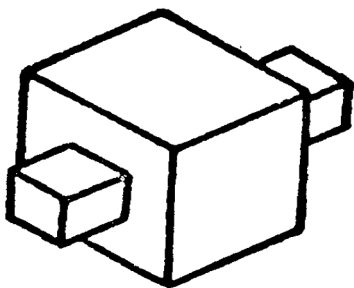
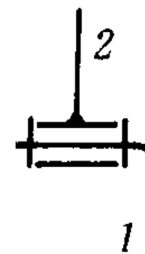
1. 表示机构的结构和运动情况。
2. 作为运动分析和动力分析的依据。

机构运动示意图 — 有时仅为表明机构组成情况和机构类型，可不严格按比例绘制机构运动简图

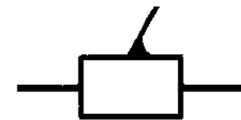
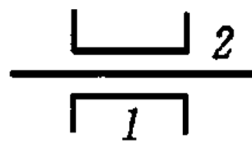
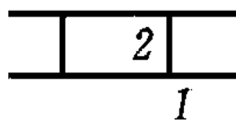
一、运动副符号

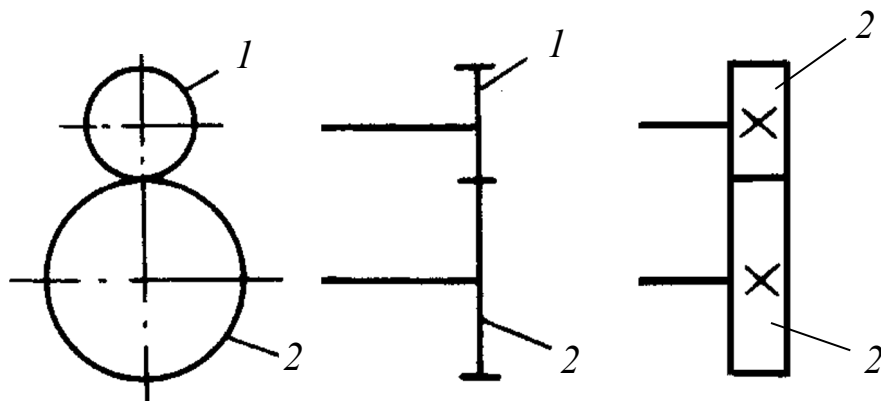
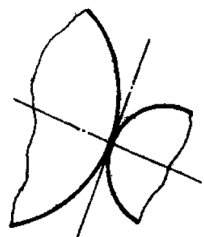
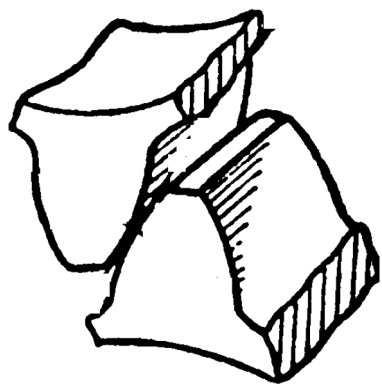


转动副

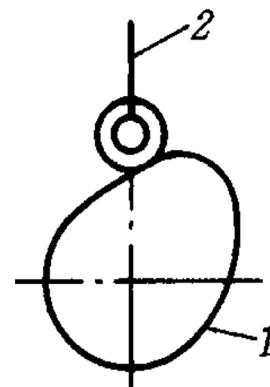
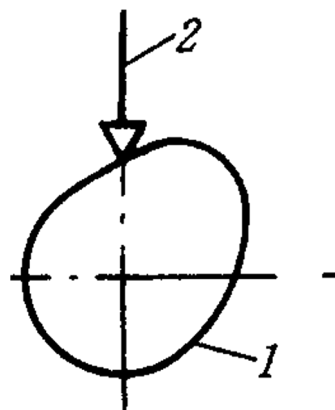
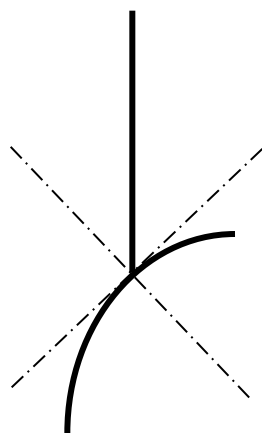
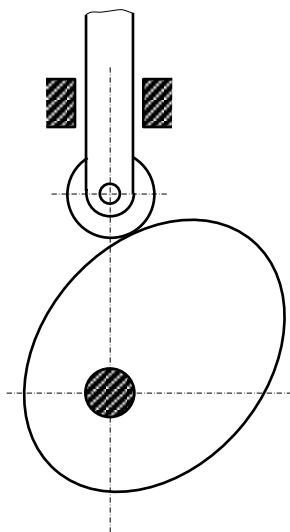


移动副





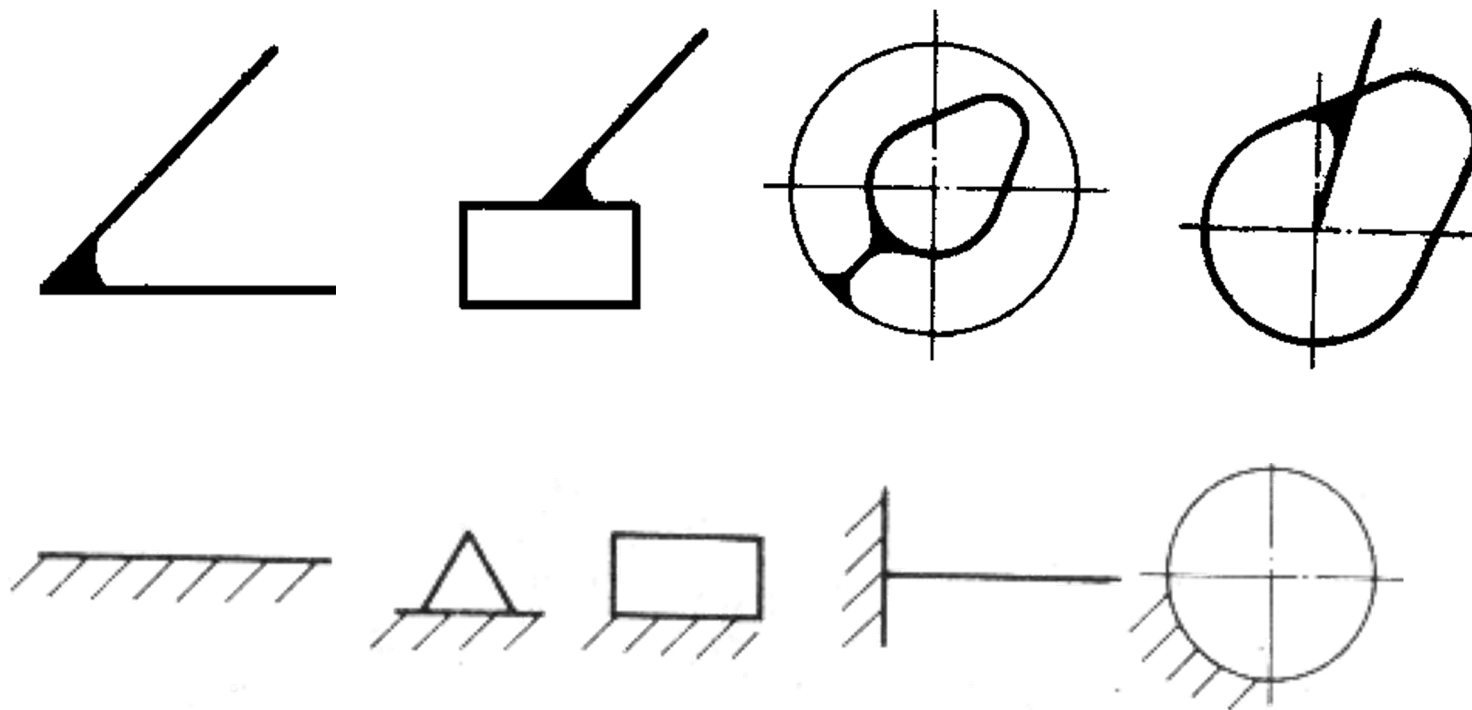
齿轮副



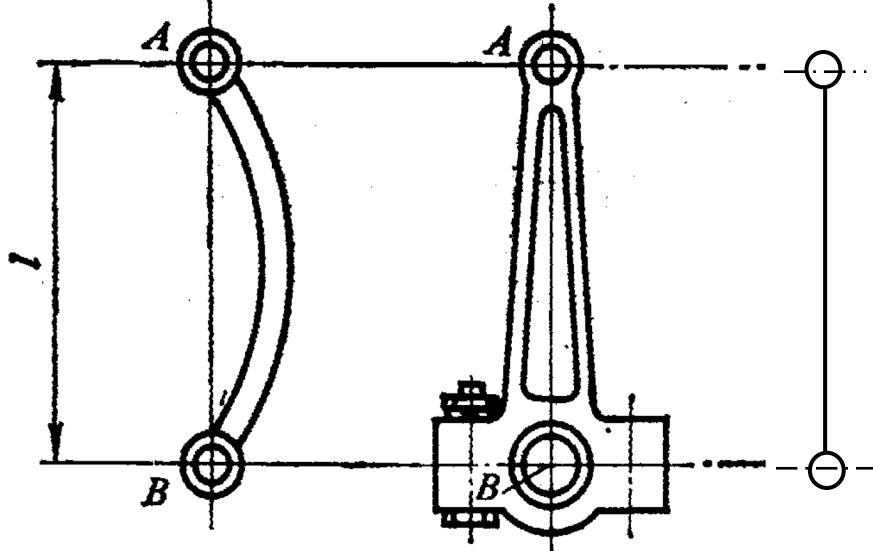
凸轮副

二、构件

不管构件形状如何，简单线条表示，带短剖面线表示机架。



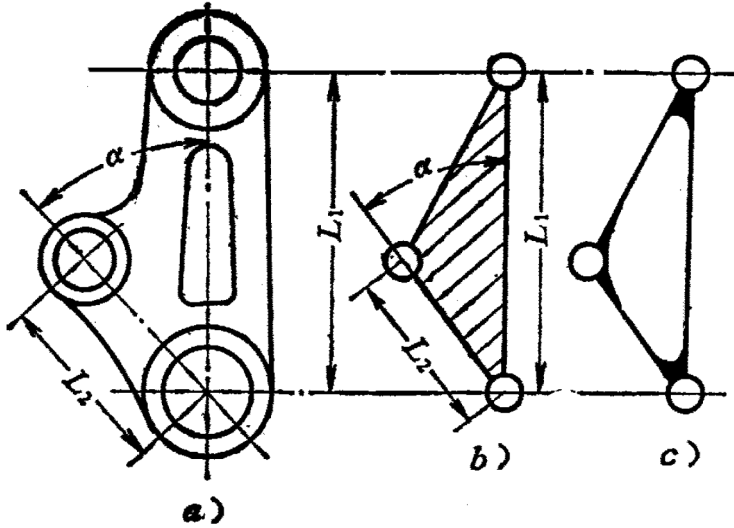
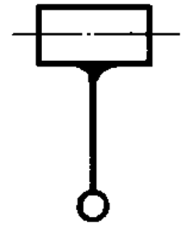
带运动副元素的构件



(a)

(b)

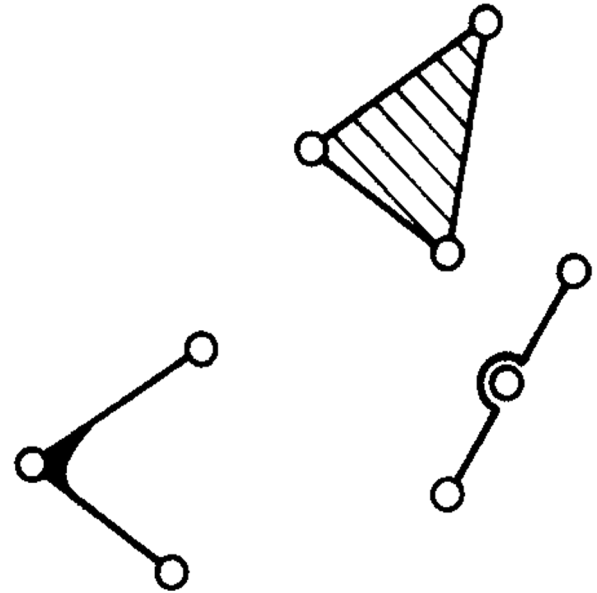
(c)



(a)

(b)

(c)



机构运动简图常用符号 (摘自GB4460-85)

名称	符 号	名 称	符 号
固定构件		外啮合圆柱 齿轮机构	
两副元素 构件		内啮合圆柱 齿轮机构	
三副元素 构件		齿轮齿条 机构	
转动副		圆锥齿轮 机构	
移动副		蜗杆蜗轮 机构	
平面高副		带传动	
凸轮机构		链传动	
棘轮机构			

类型符号,标注
在带的上方
V带 圆带 平带
▽ ○ —

类型符号,标
注在轮轴连
心线上方
滚子链 #
齿形链 W

三、机构运动简图的绘制

方法与步骤：

1. 确定构件数目及原动件、输出构件；
2. 根据各构件间的相对运动确定运动副的种类和数目；
3. 选定比例尺，按规定符号绘制运动简图；
4. 标明机架、原动件和作图比例尺；
5. 验算自由度。

绘制路线： 原动件 \Rightarrow 中间传动件 \Rightarrow 输出构件

观察重点： 各构件间构成的运动副类型

良好习惯： 各种运动副和构件用规定符号表达

误区： 构件外形

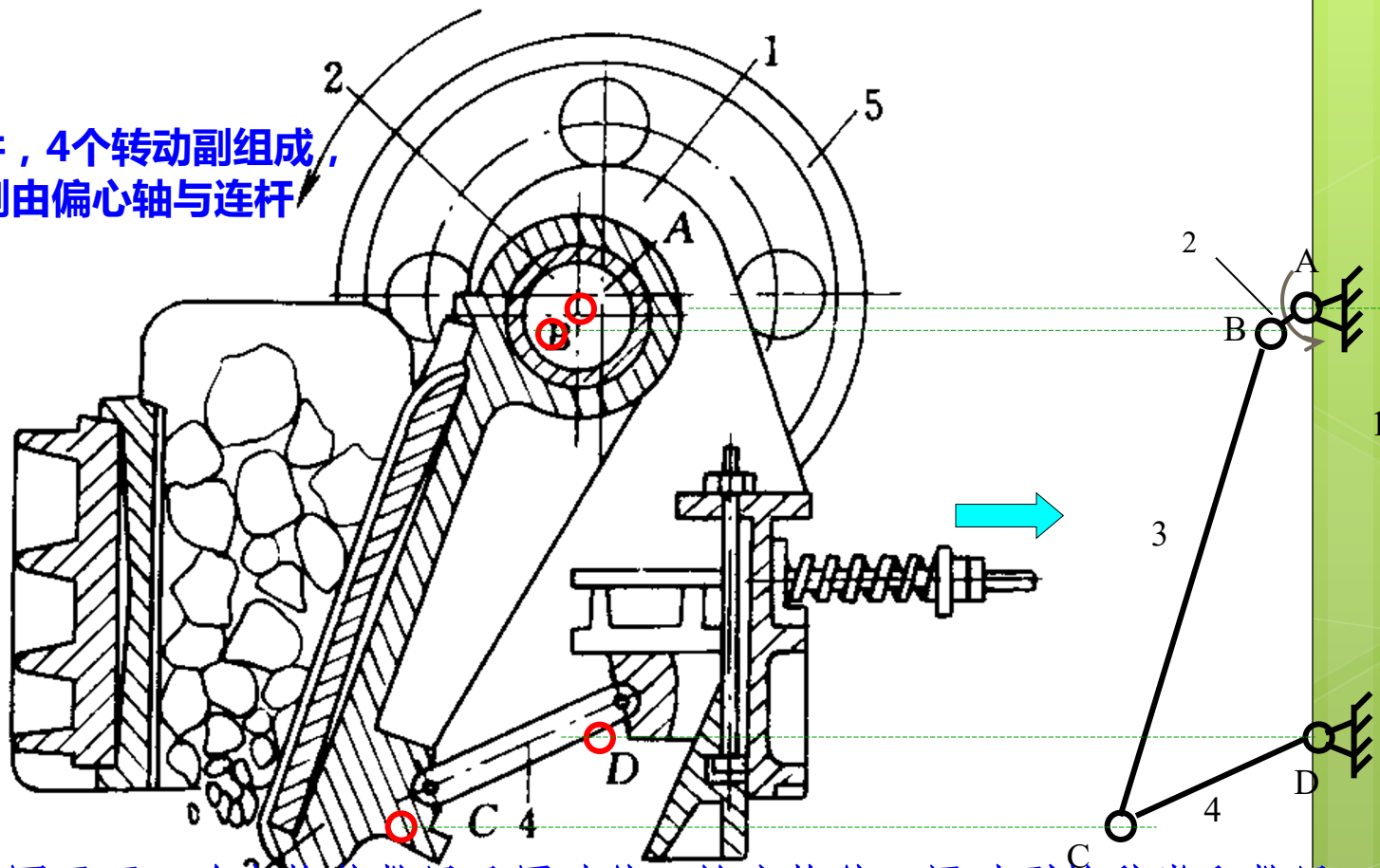
注意： 要合理选择原动件的位置

顺口溜： 先两头，后中间，从头至尾走一遍，
数数构件是多少，再看它们怎相联。

例1 颞式破碎机

分析：

此机构由5个构件，4个转动副组成，其中A处的转动副由偏心轴与连杆组成。



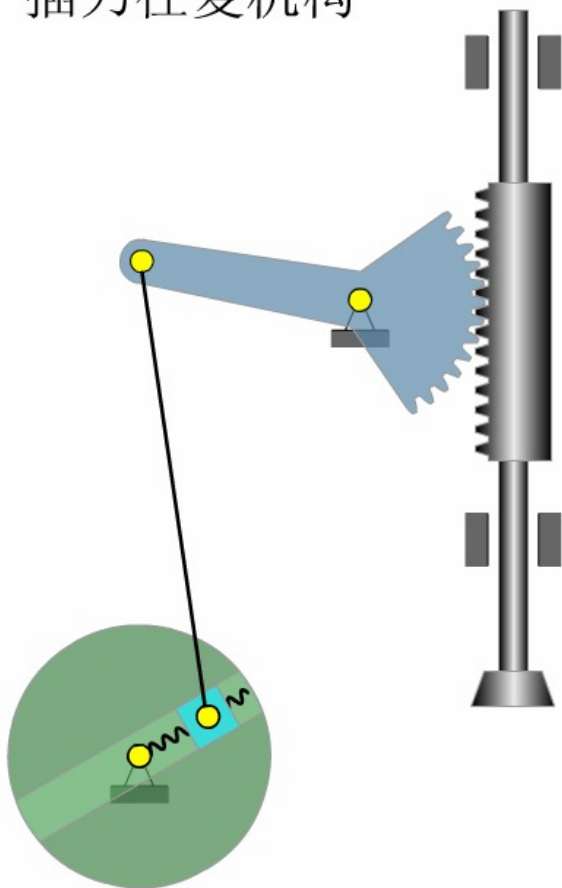
作图：

- (1) 选择视图平面。确定构件数目及原动件、输出构件，运动副的种类和数目。
- (2) 选取比例尺。根据机构的运动尺寸定出。
- (3) 确定各运动副之间的相对位置。
- (4) 画出各运动副符号和各构件符号。
- (5) 表示出原动件，并完成标注。

注意： 构件用数字表示；运动副用大写字母表示；标明原动件

例2 齿轮插刀机构运动简图

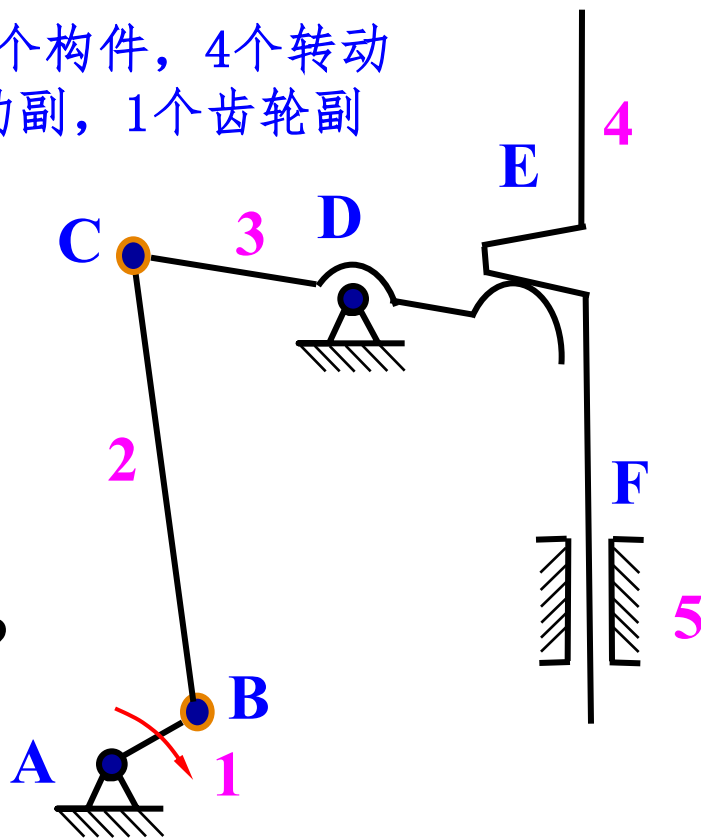
插刀往复机构



分析：

此机构由5个构件，4个转动副，1个移动副，1个齿轮副组成。

运动副？

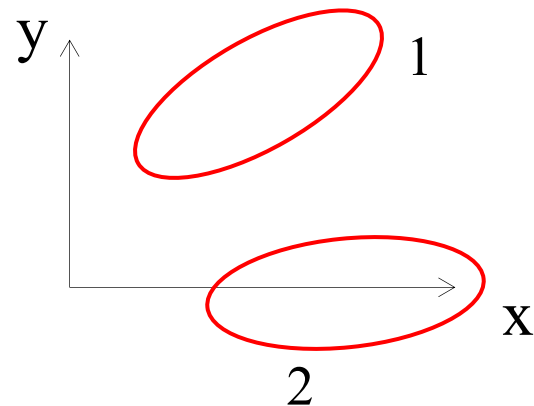
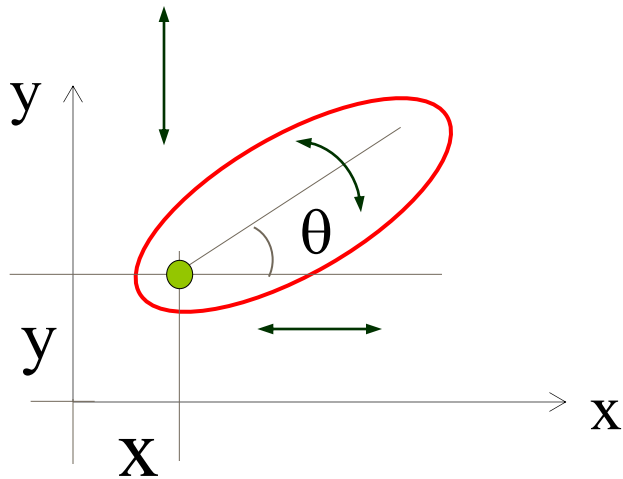


§3 平面机构的自由度

一、构件的自由度

自由度—构件所具独立运动的个数（确定构件位置所需独立坐标数）。

一个完全自由的平面运动构件**具有三个自由度**。

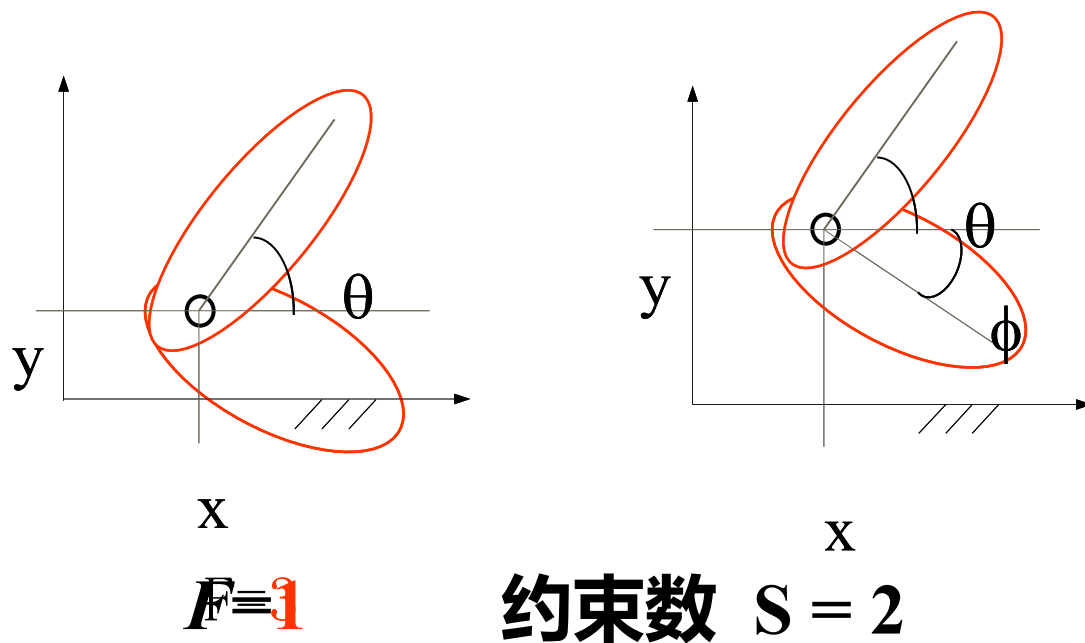


二、平面运动副的约束条件

约束 — 限制
约束条件 — 约束数

运动副的形成引入了约束，使构件失去运动自由度。

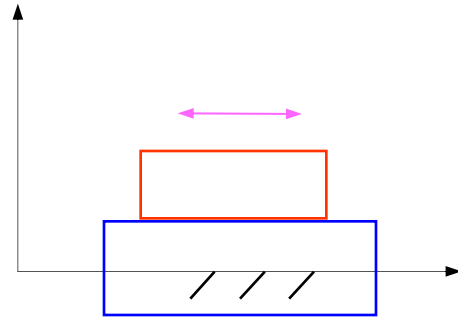
1. 转动副



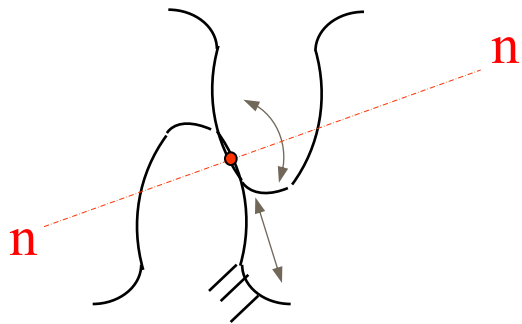
不论形成运动副的两个构件是否其中有一个相对固定，运动副引入的约束数 S 均相同。

2. 移动副

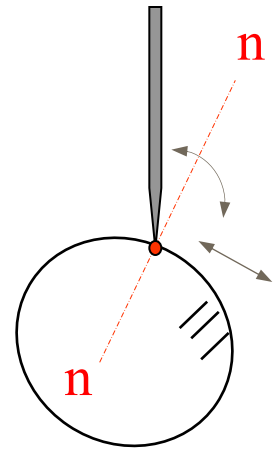
约束数 $S = 2$



3. 齿轮副



4. 凸轮副



约束数 $S = 1$

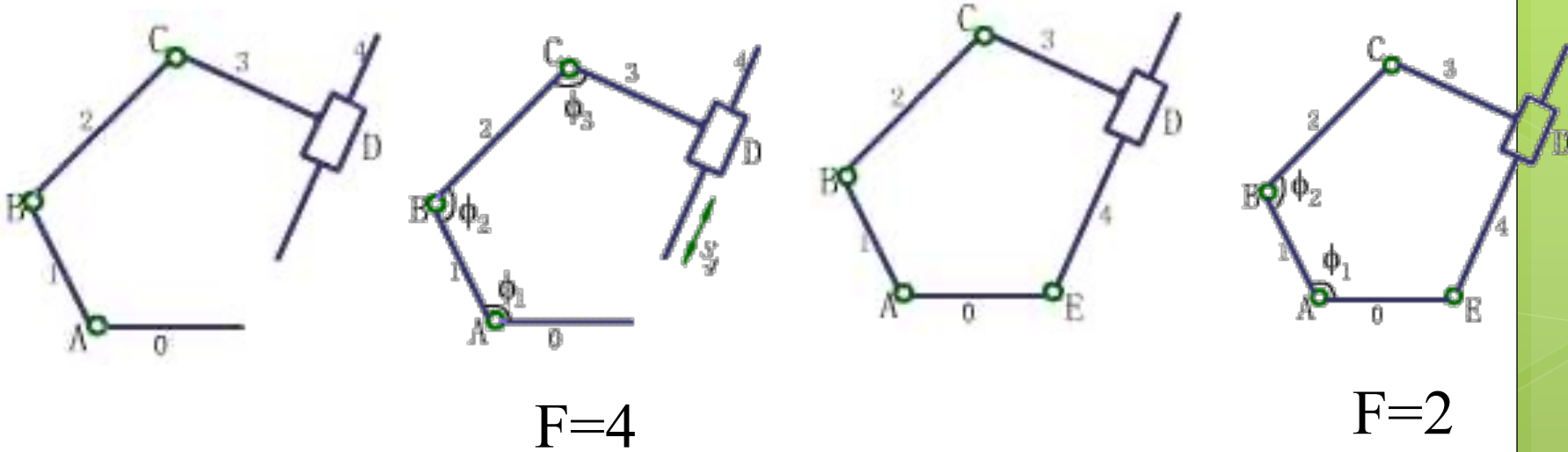


平面低副约束数 $S = 2$

平面高副约束数 $S = 1$

三、平面机构的自由度

机构的自由度—— 机构中各构件相对于机架的所能有的独立运动的数目称为机构的自由度。



机构自由度 $F =$ 所有活动构件的自由度数 - 所有运动副的约束数

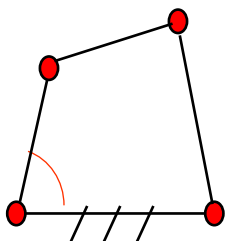
1. 机构自由度的计算公式

机构的自由度 $F=3\times$ 活动构件数 $-2\times$ 低副数 $-1\times$ 高副数

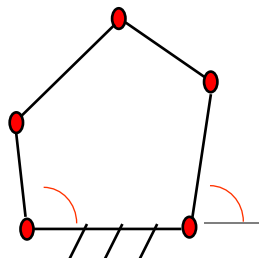
计算公式

$$F = 3n - 2P_L - P_H$$

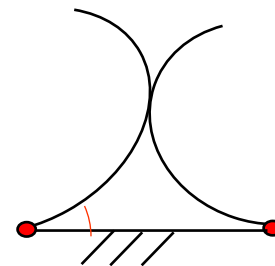
例



$$\begin{aligned} F &= 3n - 2P_L - P_H \\ &= 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 \\ &= 1 \end{aligned}$$

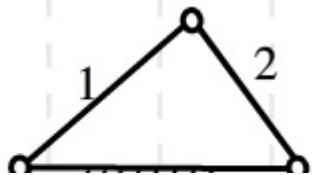


$$\begin{aligned} F &= 3n - 2P_L - P_H \\ &= 3 \times 4 - 2 \times 5 - 0 \\ &= 2 \end{aligned}$$



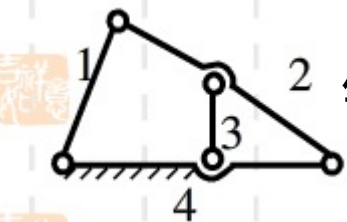
$$\begin{aligned} F &= 3n - 2P_L - P_H \\ &= 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 \\ &= 1 \end{aligned}$$

练习：计算自由度？



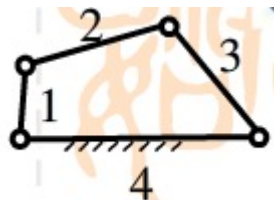
三个构件通过三个转动副相连，相当于一个构件。

铰链三杆桁架： $F=3n-2P_L-P_H=3\times 2-2\times 3-0=0$

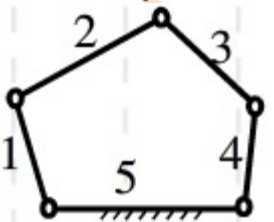


铰链四杆桁架： $F=3n-2P_L-P_H=3\times 3-2\times 5-0=-1$

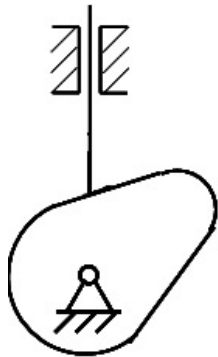
★若系统自由度 $F\leq 0$ ，系统不能运动



铰链四杆机构： $F=3n-2P_L-P_H=3\times 3-2\times 4-0=1$



铰链五杆机构： $F=3n-2P_L-P_H=3\times 4-2\times 5-0=2$



凸轮机构： $F=3n-2P_L-P_H=3\times 2-2\times 2-1=1$

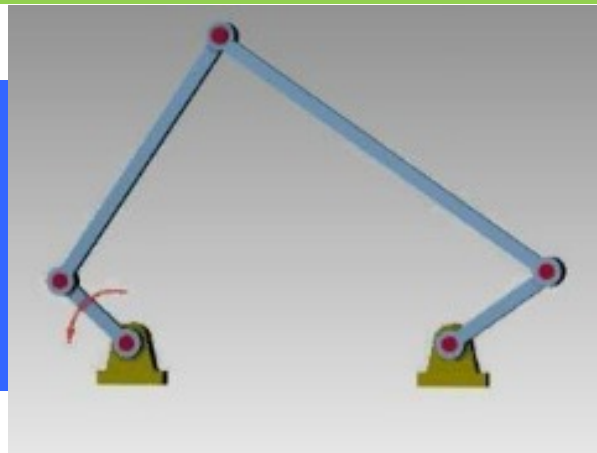
机构具有确定运动的条件？

四杆机构



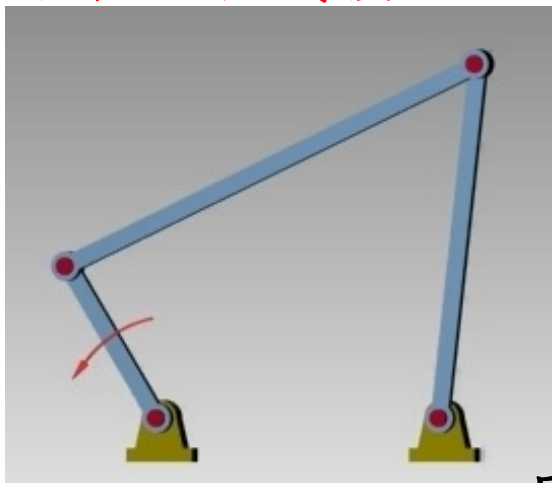
原动件数 $> F$
不能运动或损坏!

五杆机构



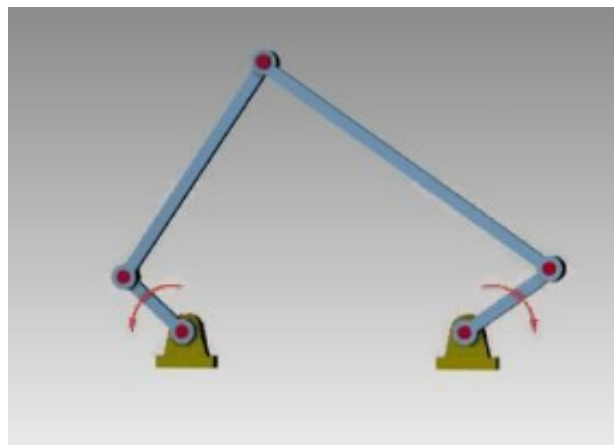
原动件数 $< F$
运动不确定

四杆机构

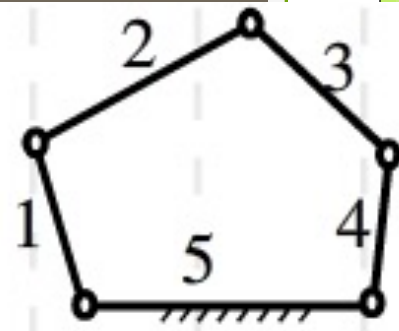
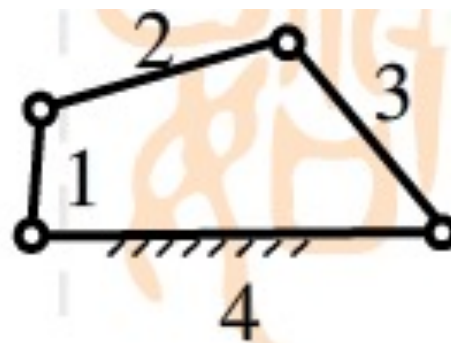
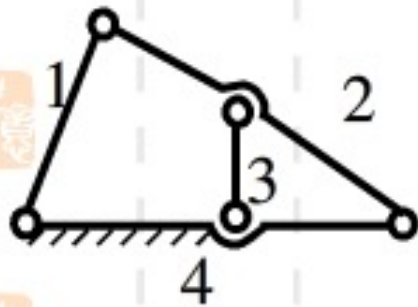
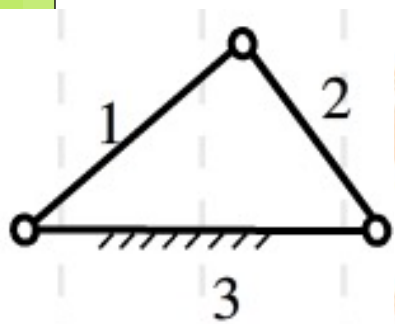


原动件数 $= F$

五杆机构



各构件都有确定的运动



(1)若系统自由度 $F \leq 0$, 则系统不能动。

(2)若系统自由度 $F > 0$, 而原动件数 $> F$, 则构件间不能运动或产生破坏。

(3)若系统自由度 $F > 0$, 而原动件数 $< F$, 则构件间的运动是不确定的。

(4)若系统自由度 $F > 0$, 而原动件数 $= F$, 则构件间的运动是确定的。

2.机构(运动链)具有确定相对运动的条件

有一个机架

自由度大于零 ($F > 0$)

原动件数 = 自由度数

(通常, 原动件为含低副构件且与机架相连, 只有一个自由度)

3. 注意事项

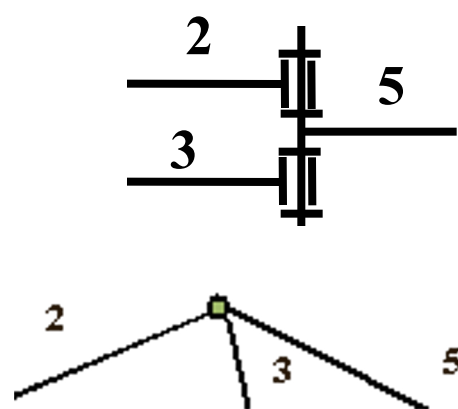
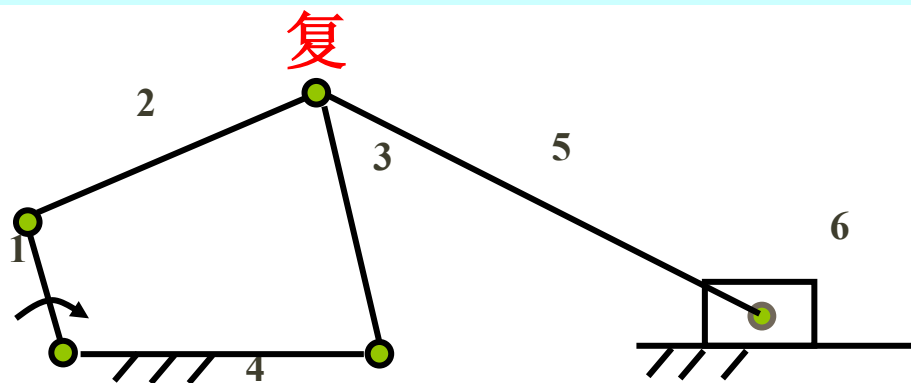
(1) 要正确计算运动副数目

复合铰链

— 计算在内

m个构件 ($m \geq 3$) 在同一处构成共轴线的转动副

m-1个低副



四杆—滑块机构

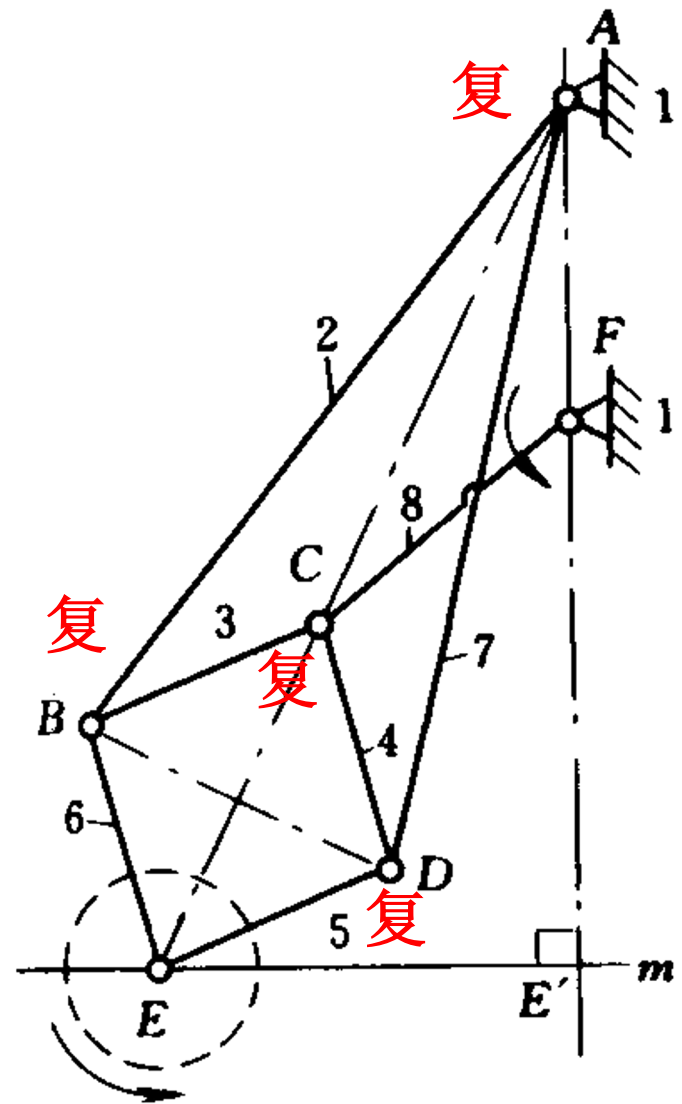
$$\begin{aligned}
 F &= 3n - 2P_L - P_H \\
 &= 3 \times 5 - 2 \times 6 - 0 \\
 &= 3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F &= 3n - 2P_L - P_H \\
 &= 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0 \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

例3 圆盘锯机构

$$\begin{aligned} F &= 3n - 2P_L - P_H \\ &= 3 \times 7 - 2 \times 6 - 0 \\ &= 9 \quad ? \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= 3n - 2P_L - P_H \\ &= 3 \times 7 - 2 \times 10 - 0 \\ &= 1 \end{aligned}$$



(2)

局部自由度

— 排除

机构中某些构件所具有的局部运动，并不影响机构运动的自由度。

局部自由度处理方法：

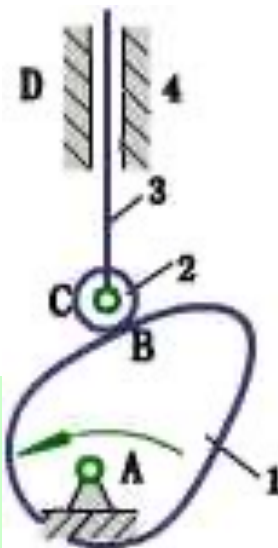
1) 修正机构自由度计算公式：

$$F = 3n - 2P_L - P_H - F'$$

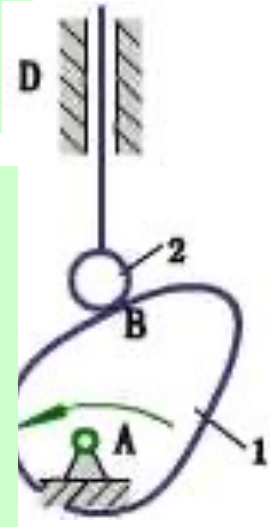
式中 F' 为局部自由度数目

2) 将滚子2与从动件3视为一体，即为一个构件。

$$F = 3n - 2P_L - P_H$$



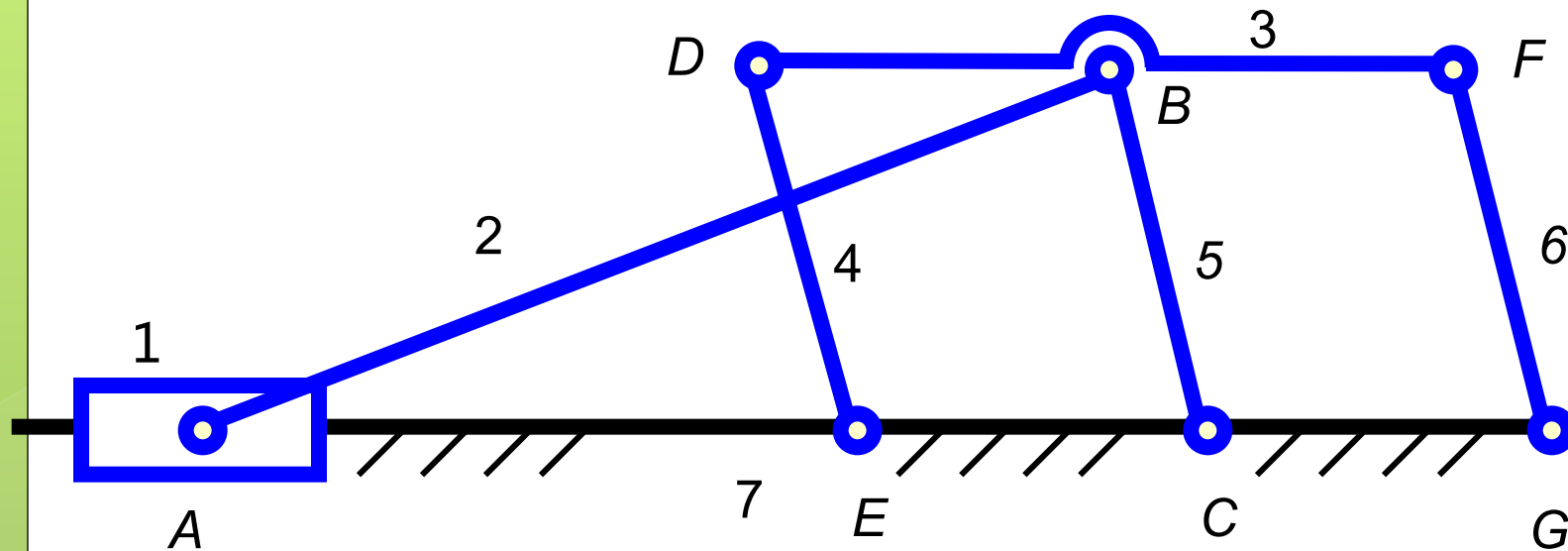
$$\begin{aligned}
 F &= 3n - 2P_L - P_H \\
 &= 3 \times 3 - 2 \times 3 - 1 \\
 &= 2 \quad \times
 \end{aligned}$$



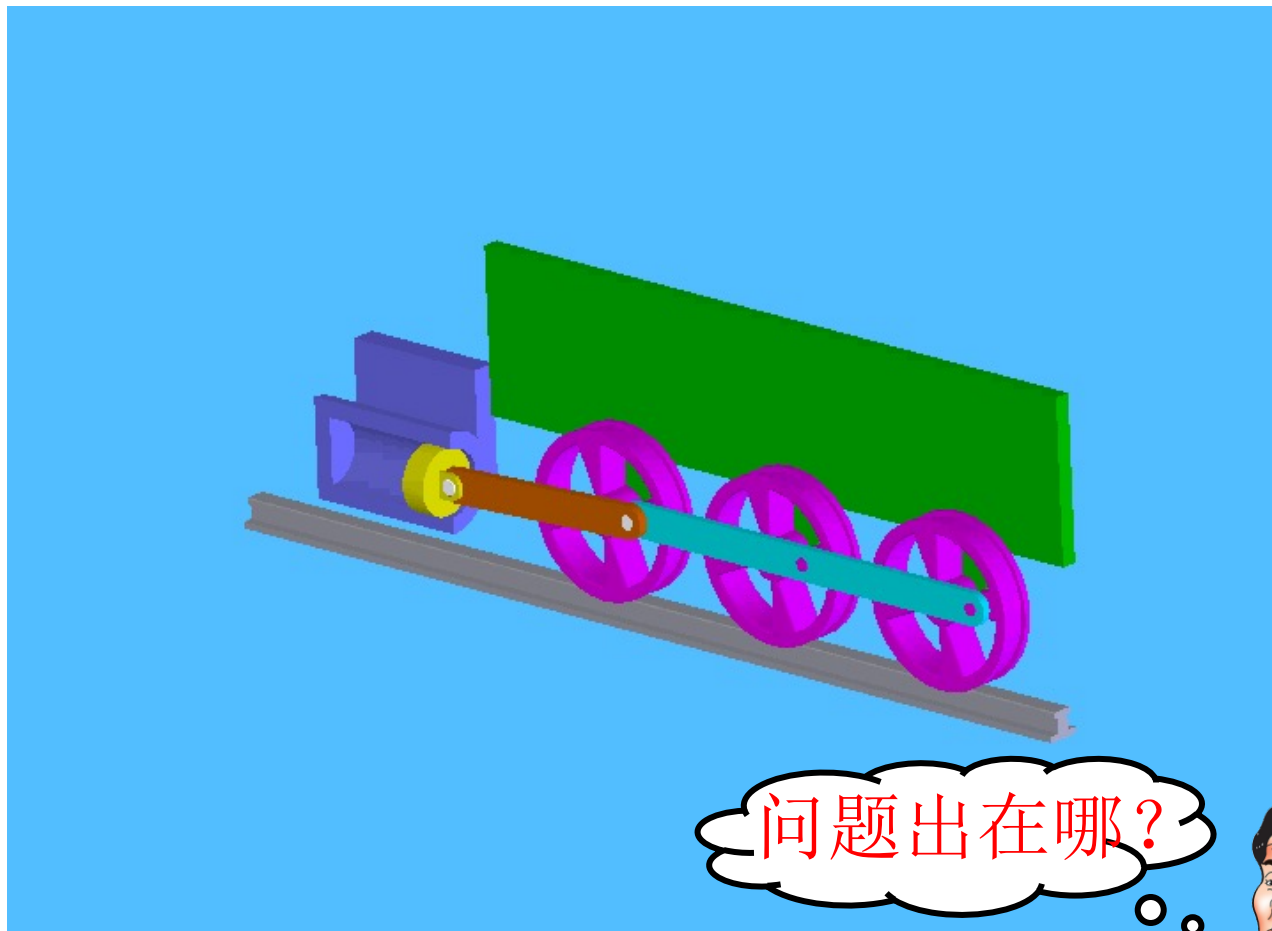
$$\begin{aligned}
 F &= 3n - 2P_L - P_H - F' \\
 &= 3 \times 3 - 2 \times 3 - 1 - 1 \\
 &= 1 \quad \checkmark
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F &= 3n - 2P_L - P_H \\
 &= 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 \\
 &= 1 \quad \checkmark
 \end{aligned}$$

思考： 计算火车轮机构的自由度



提出问题



问题出在哪?

火车轮机构

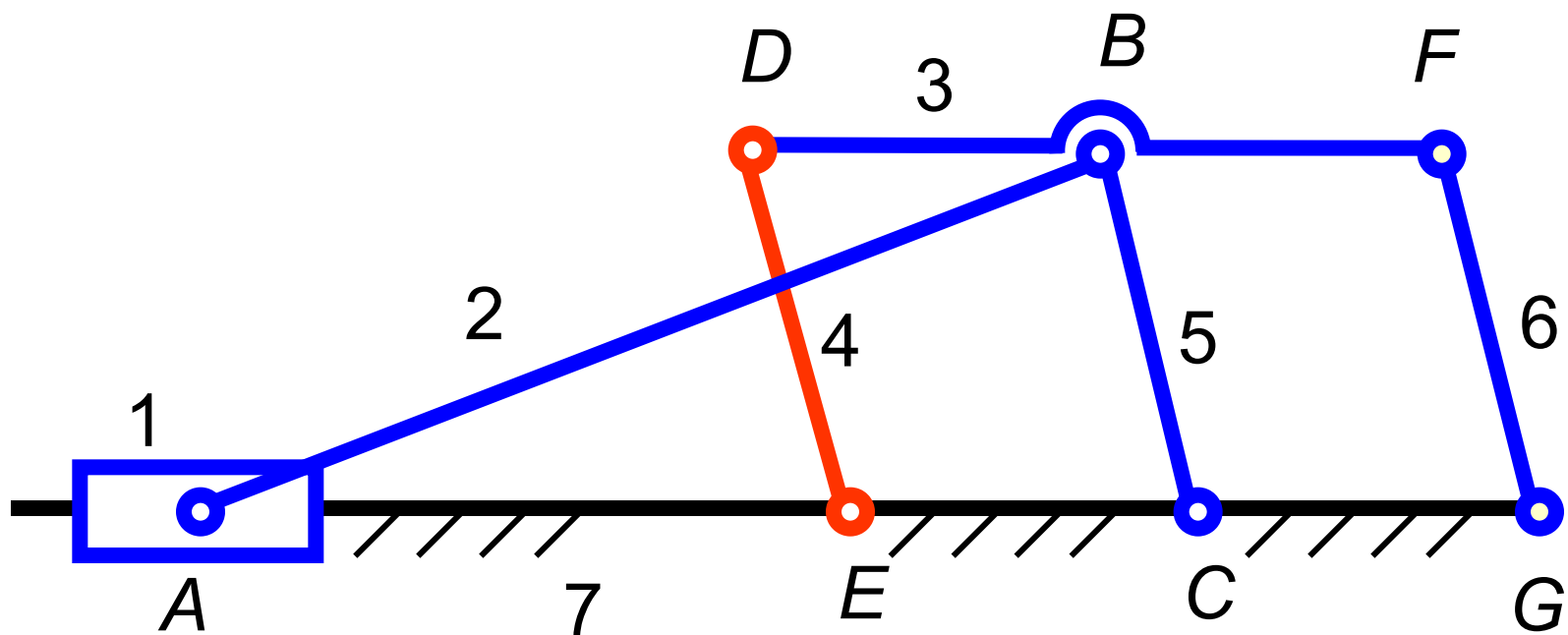


(3)

虚约束

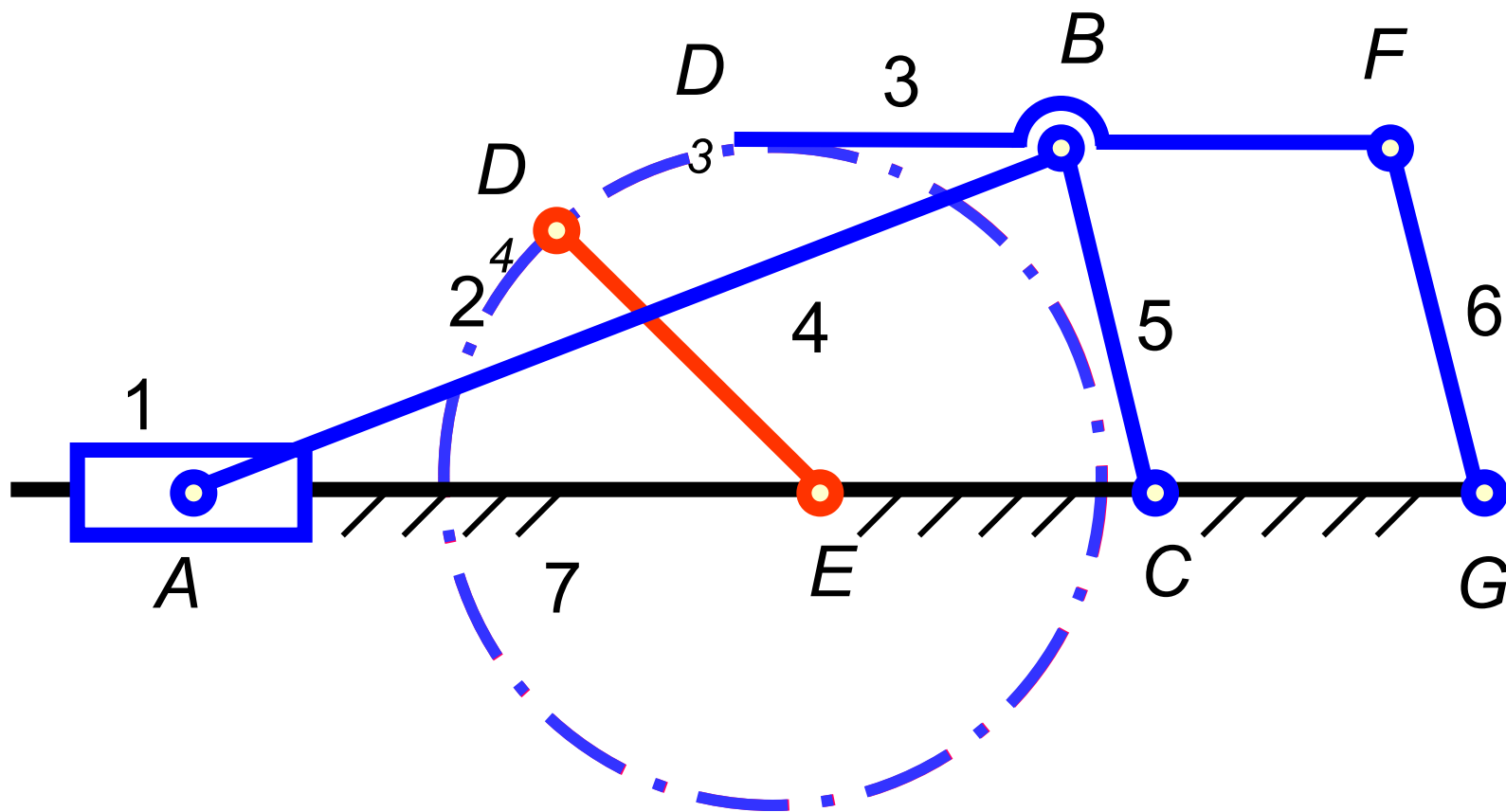
——排除

分析:



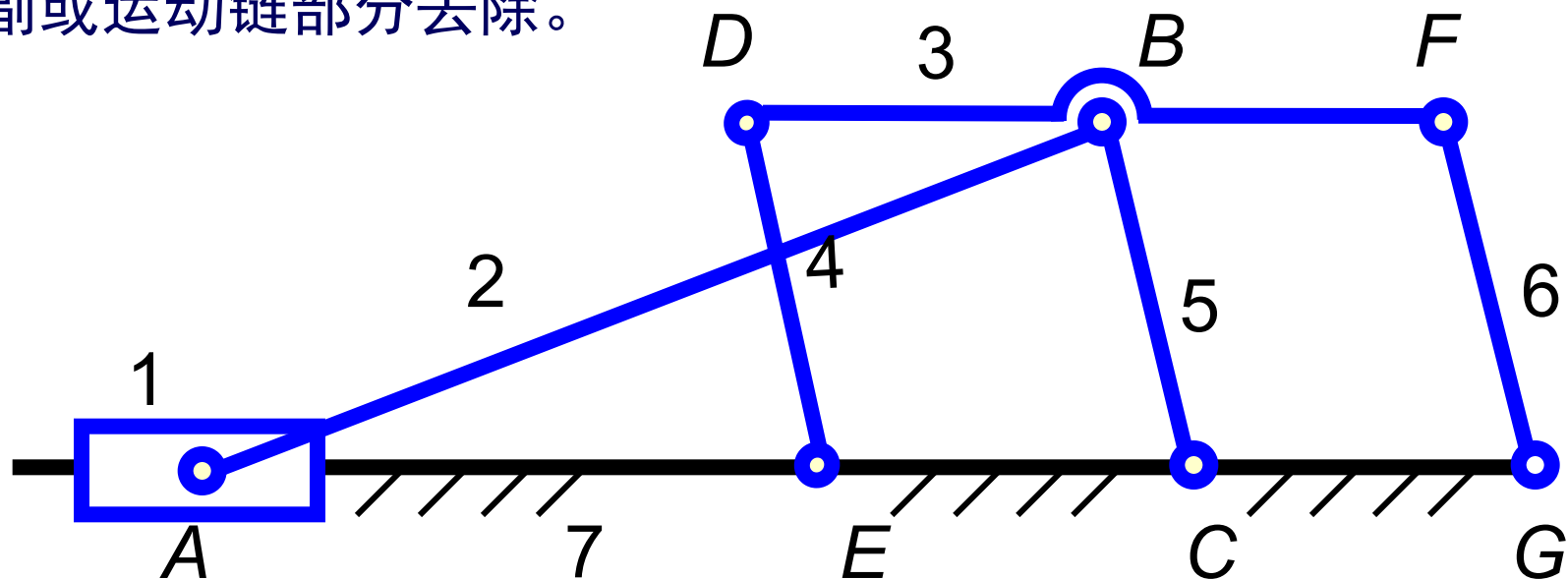
虚约束的定义：

机构中不起独立限制作用的重复约束。



虚约束的处理:

计算具有虚约束机构的自由度时，将机构中引入虚约束的运动副或运动链部分去除。



【解】

$$n = 5 \quad P_L = 7 \quad P_H = 0$$

$$F = 3n - 2P_L - P_H$$

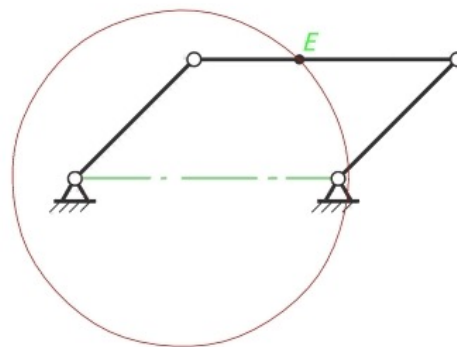
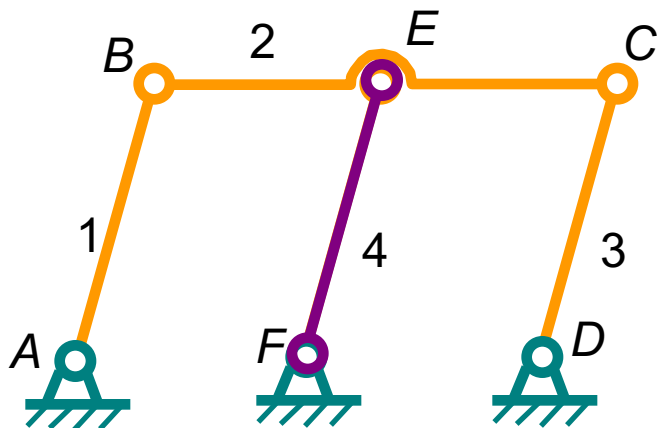
$$= 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0$$

$$= 1$$

去5、6构件等效?



(1) 联接构件与被联接构件上联接点的轨迹重合



平行四边形机构

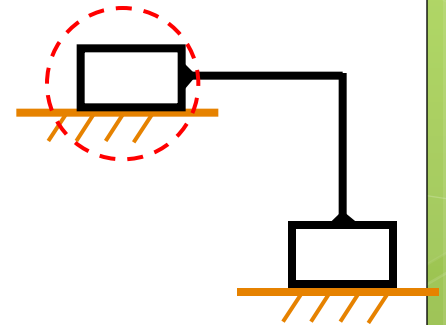
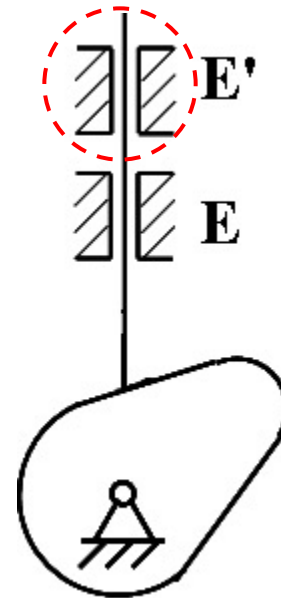
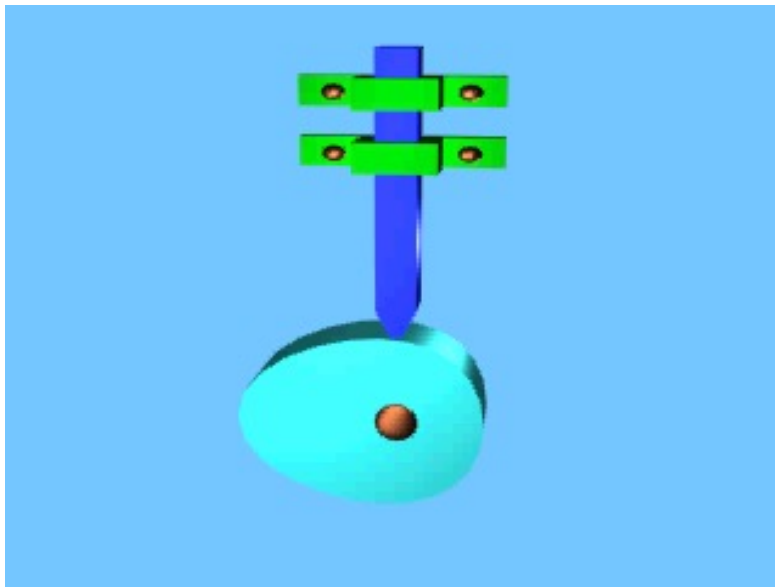
注意： 存在虚约束的几何条件是 $AB \parallel CD \parallel EF$

附加的构件4和其两端的转动副E、F 提供的自由度

$$F = 3 \times 1 - 2 \times 2 = -1 \quad \text{即引入了一个虚约束}$$

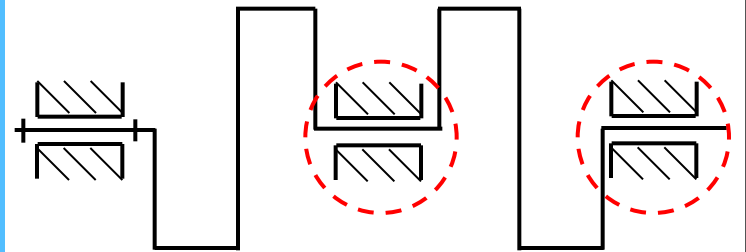
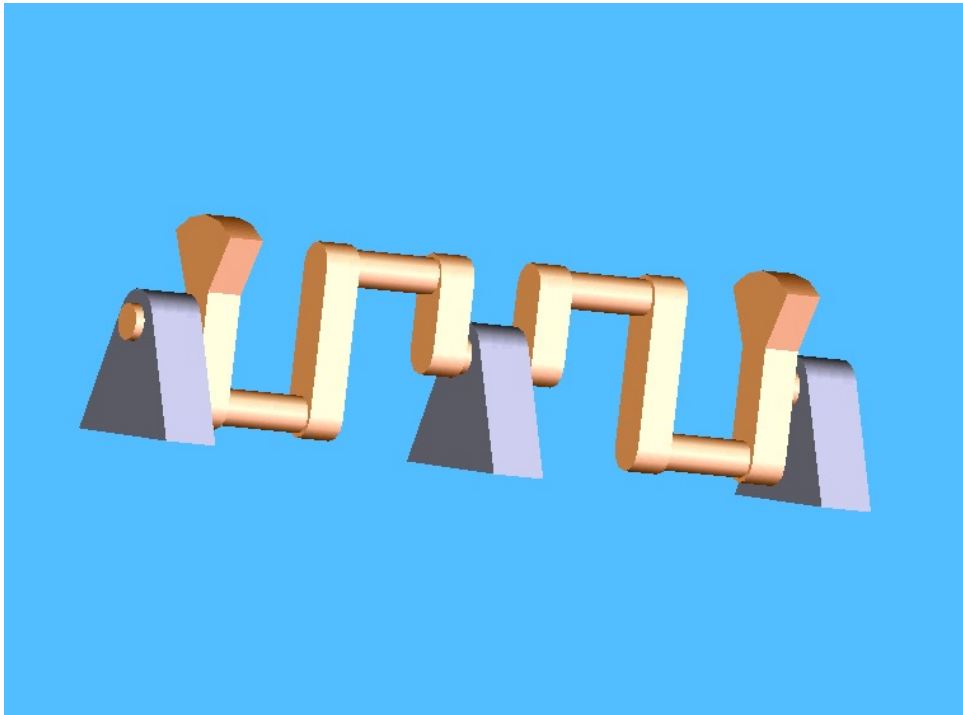
$$\text{去掉虚约束} \quad F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$$

(2) 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。



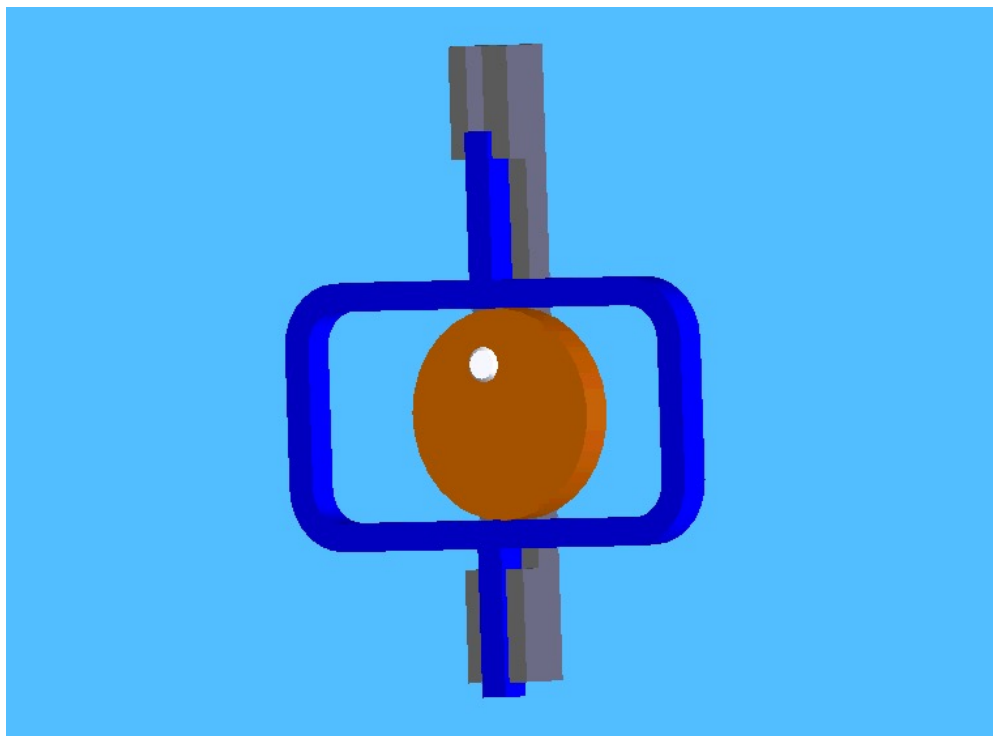
带虚约束的凸轮机构

(3) 当两构件构成多个转动副，且轴线互相重合时，则只有一个转动副起作用，其余转动副都是虚约束。

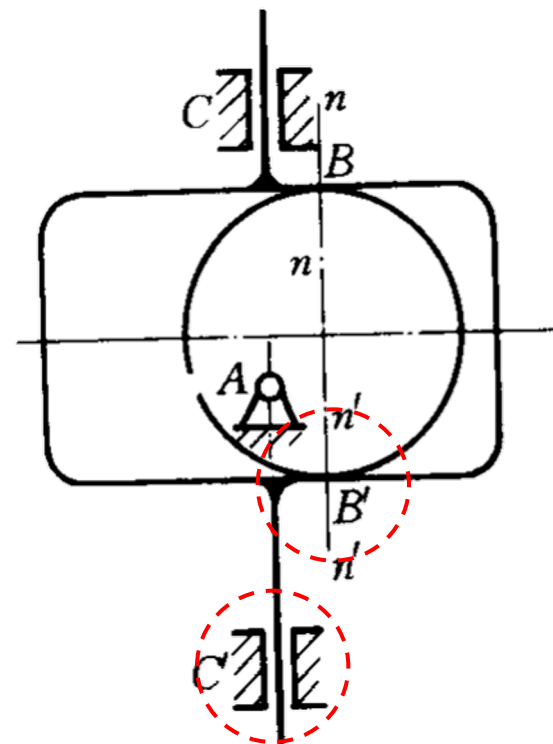


带虚约束的曲轴

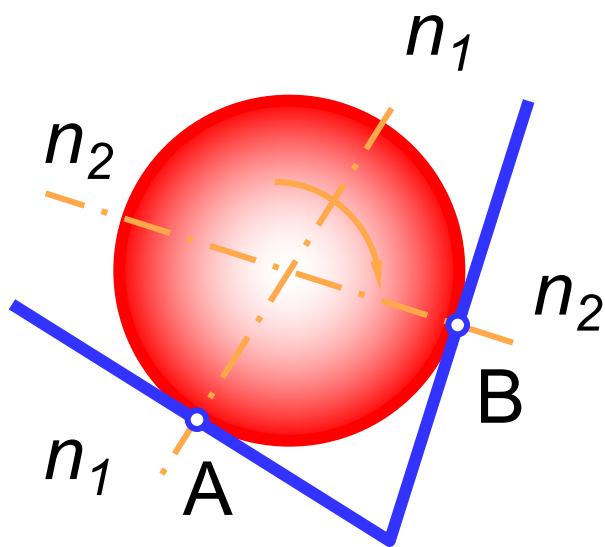
(4) 法线始终重合的高副



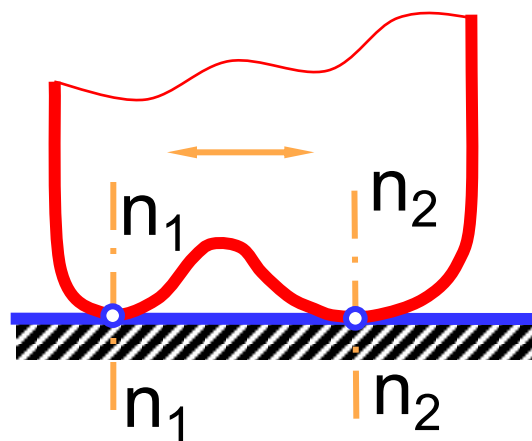
等宽凸轮



注意：法线不重合时，构成复合高副，
变成实际约束！

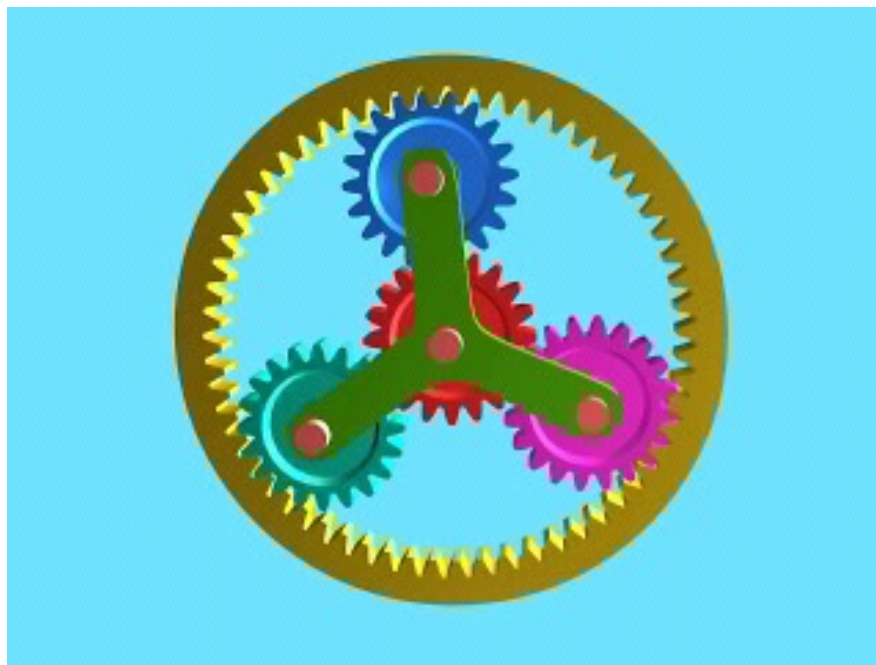


相当转动副

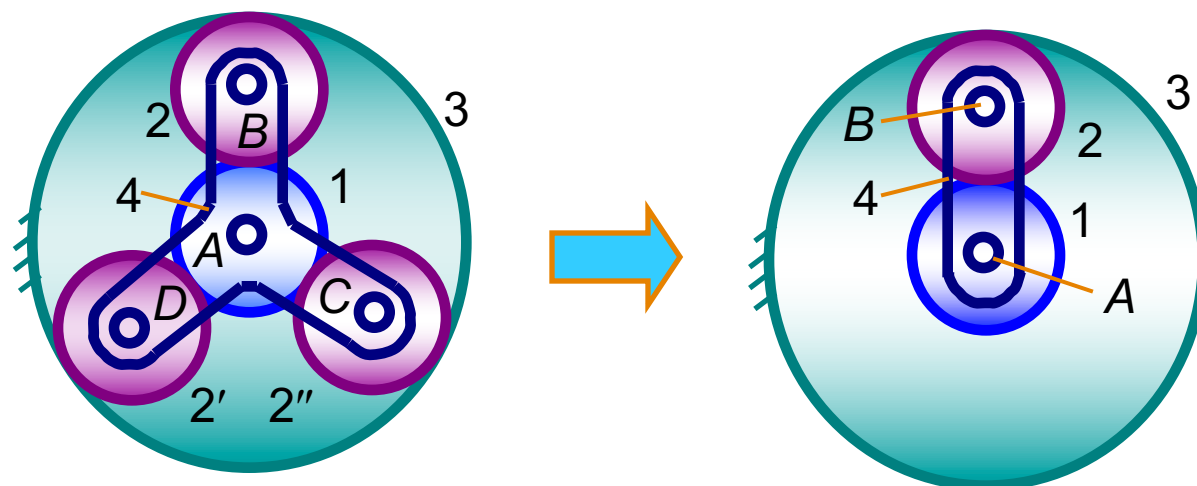


相当于移动副

(5) 机构中对传递运动不起独立作用的对称部分



带虚约束的行星轮系



行星轮2'和2''以及转动副D、C和4个平面高副提供的自由度

$$F = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 \times 4 = -2$$

即引入了两个虚约束。

未去掉虚约束时 $F = 3n - 2p_L - p_H = 3 \times 5 - 2 \times 5 - 1 \times 6 = -1$

去掉虚约束 $F = 3n - 2p_L - p_H = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 1 \times 2 = 1$

虚约束的应用

作用：

- (1) 改善构件的受力情况或平衡惯性力，如多个行星轮。
- (2) 增加结构刚度，如轴与轴承。
- (3) 提高运动可靠性和工作的稳定性，如火车轮。

影响：

有虚约束的机构，其相关尺寸的制造精度要求高，增大了制造成本。机构中的虚约束数越多，制造难度也就越大。

小结：机构自由度的计算步骤

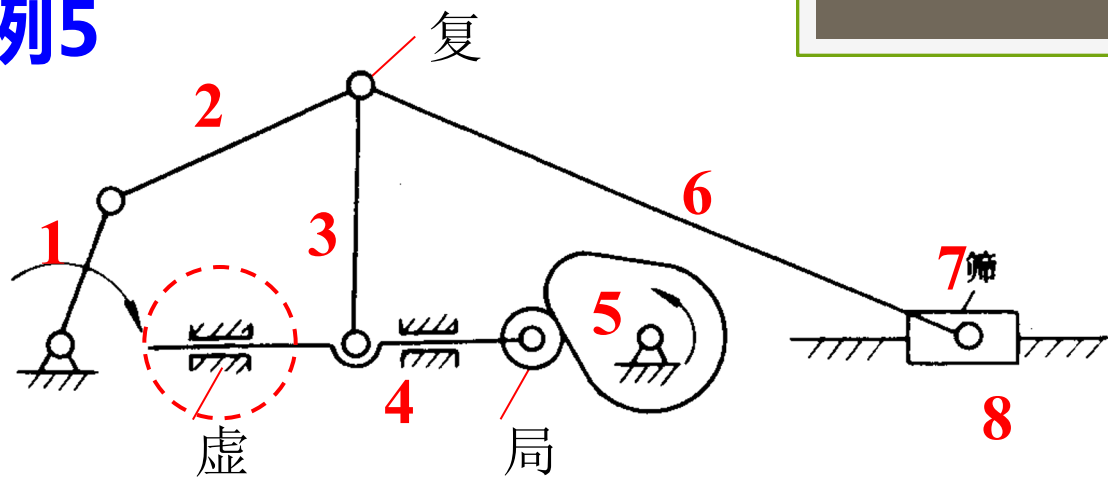
1. 识别复合铰链，准确计算运动副数目。
2. 识别局部自由度并去除。
3. 识别虚约束并去除。
4. 准确计算活动构件数，代入公式计算。

平面机构自由度计算公式：

$$F = 3n - 2P_L - P_H$$

n — 活动构件数； P_L — 低副数； P_H — 高副数；

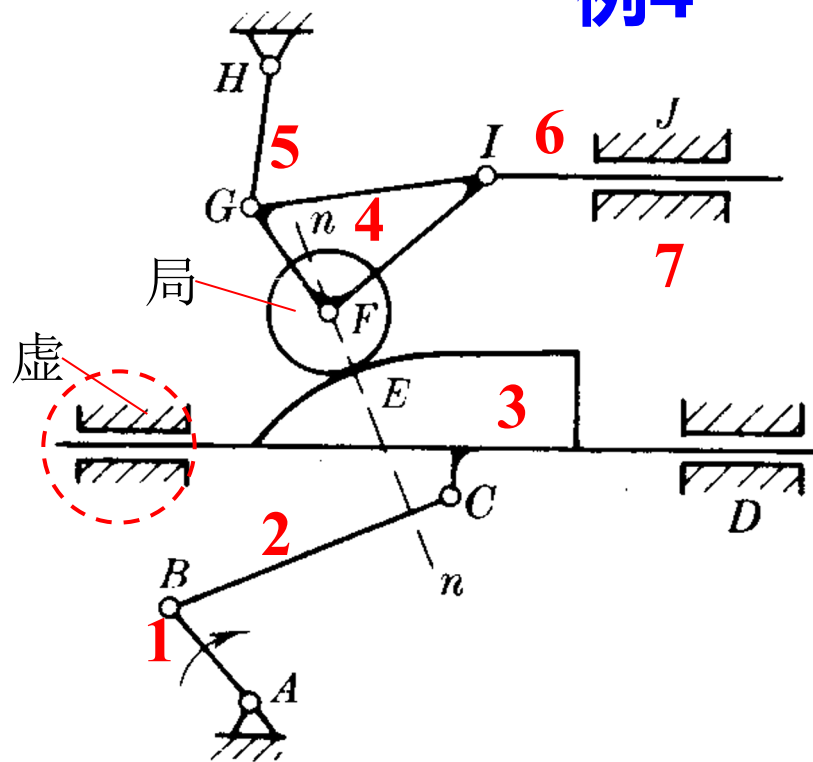
例5



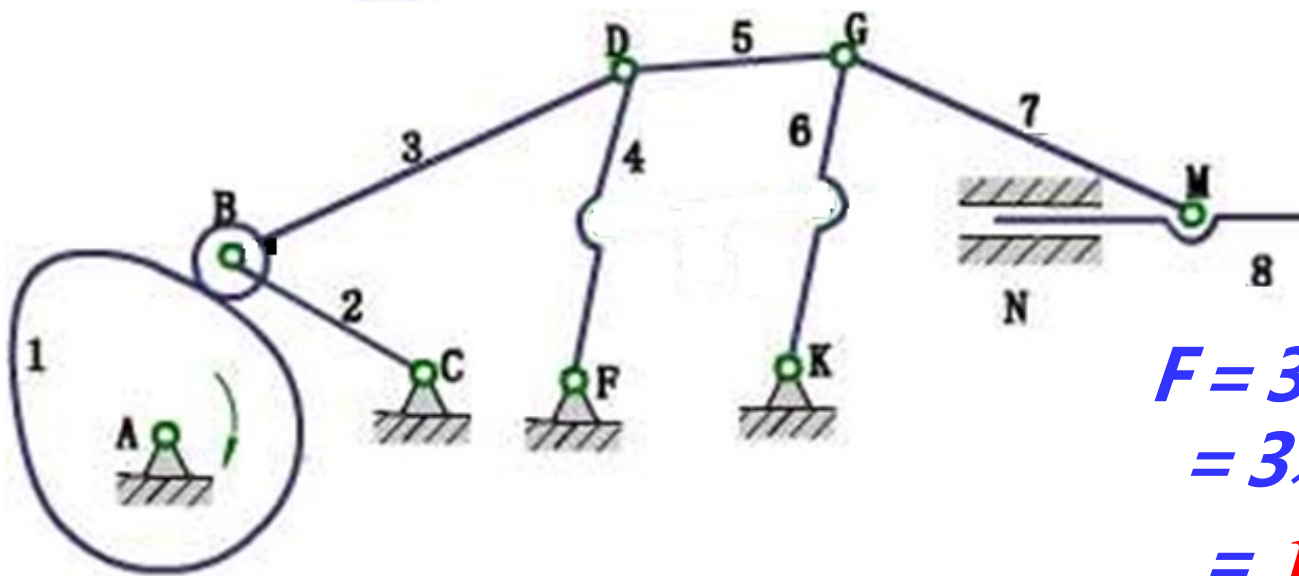
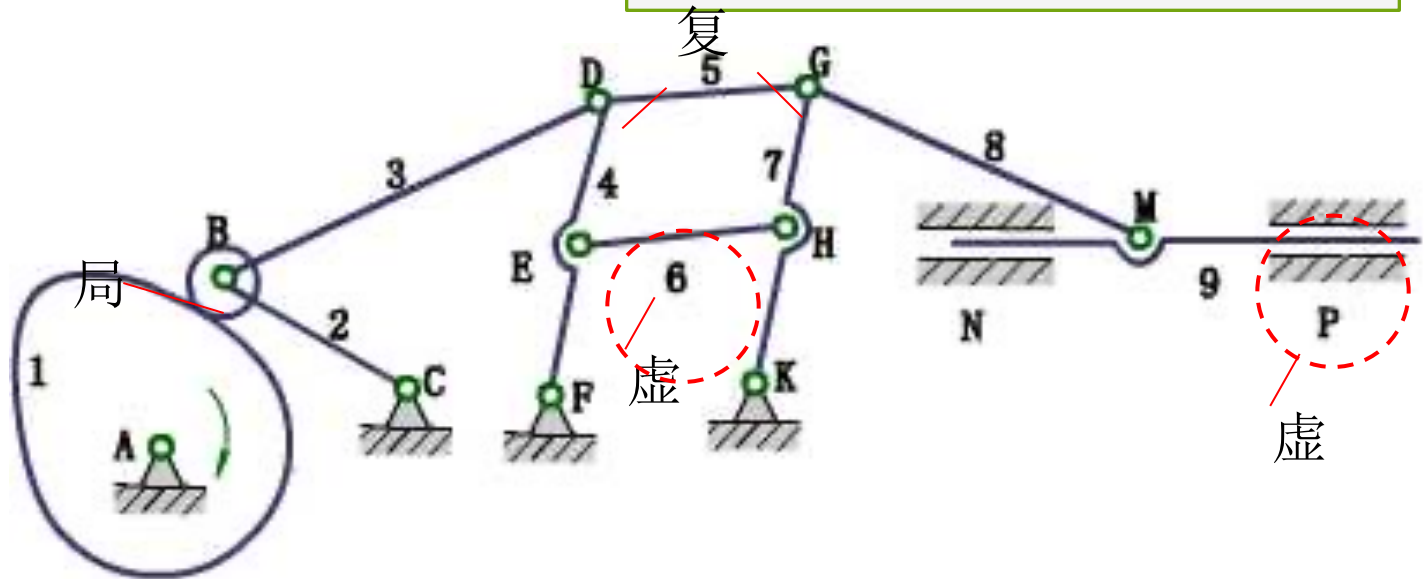
$$\begin{aligned}
 F &= 3n - 2P_L - P_H \\
 &= 3 \times 7 - 2 \times 9 - 1 \\
 &= 2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F &= 3n - 2P_L - P_H \\
 &= 3 \times 6 - 2 \times 8 - 1 \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

例4



例6



$$\begin{aligned}
 F &= 3n - 2P_L - P_H \\
 &= 3 \times 8 - 2 \times 11 - 1 \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

本章小结

一、构件 + 运动副 \Rightarrow 运动链 \Rightarrow 机构

机架
原动件
从动件

二、运动链成为机构的条件：

$F > 0$, 原动件数目等于自由度数目

 平面运动链自由度计算方法和注意事项

三、机构运动简图的绘制