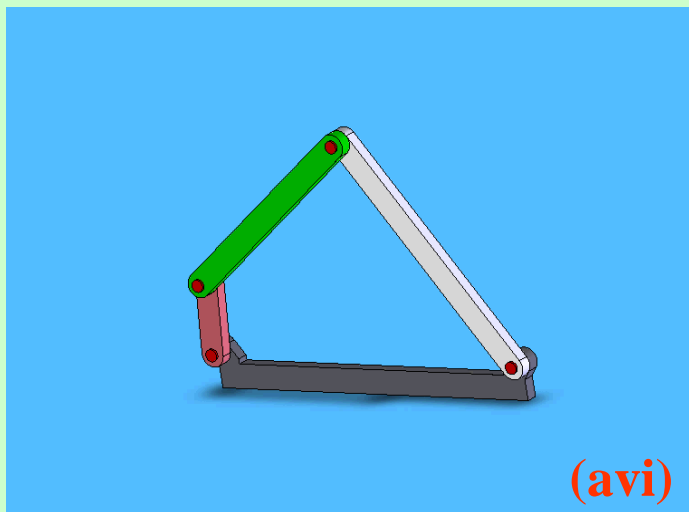


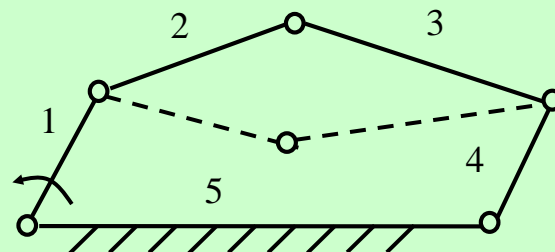
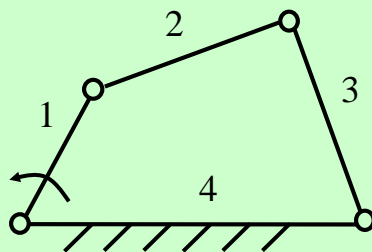
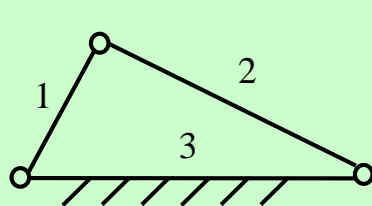
第一章 平面机构的结构分析

§ 1-1 概 述

平面机构：机构中所有构件均在一个或几个平面运动。



研究目的之一：机构运动的可能性及具有确定运动的条件

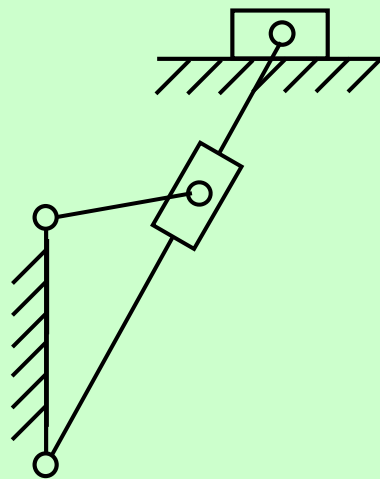
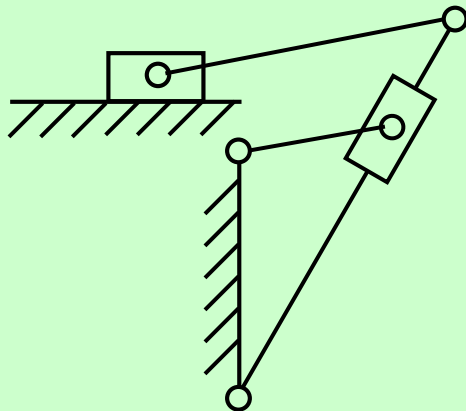
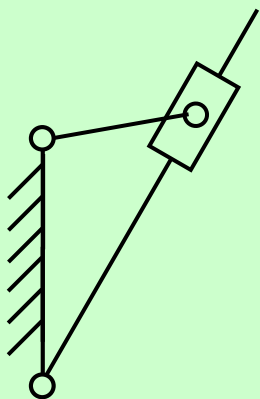


研究目的之二：绘制机构运动简图



2A 型數顯銑床 Digital Display Milling Machine

研究目的之三：研究机构的组成原理



§ 1-2 机构的组成

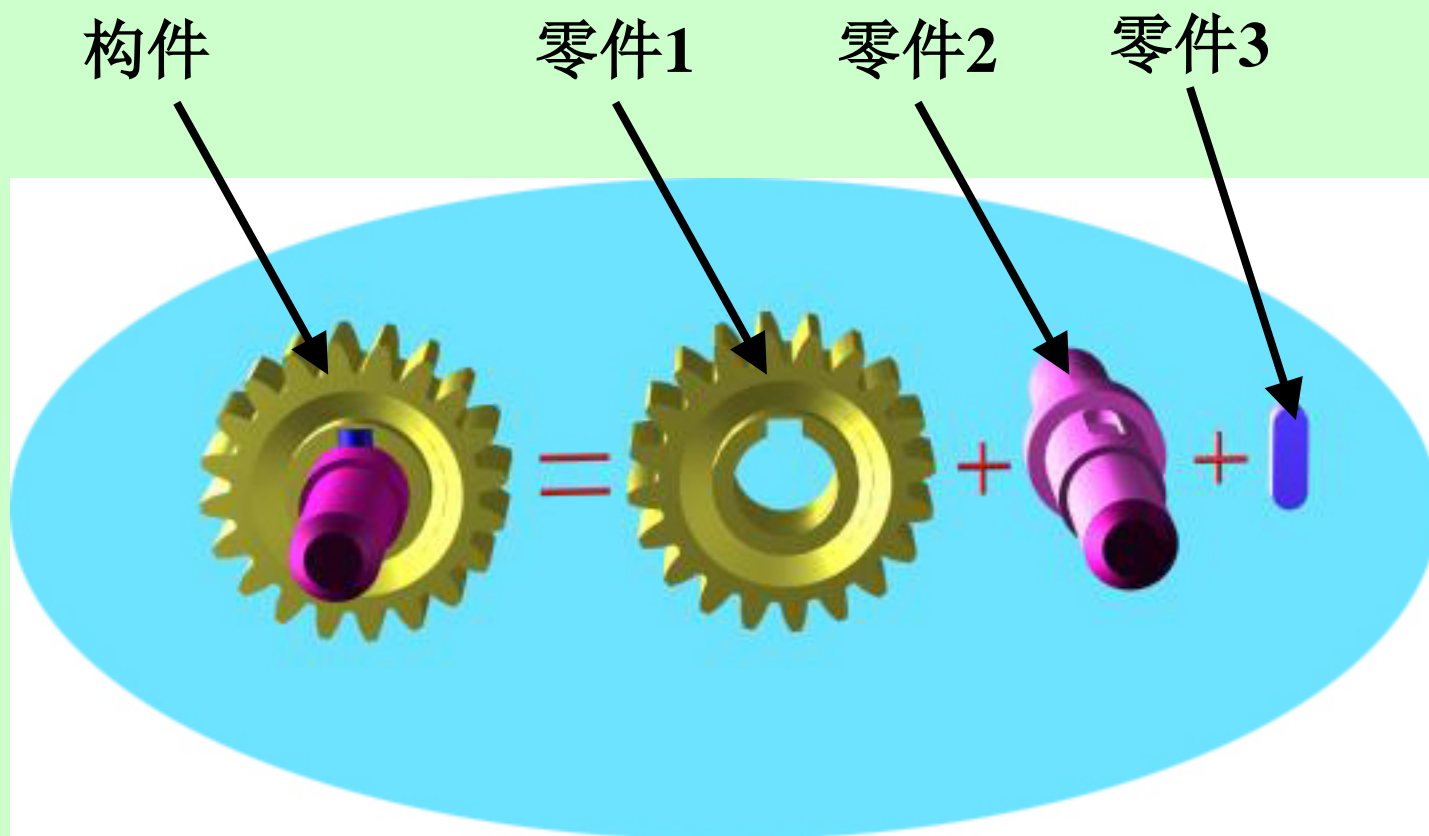
一、机构的组成要素

1. 构件(Component, Link)

定义： 机器中每个独立的运动单元体

特点： 一个构件，可以是一个零件，也可能是由若干个不同零件组装起来的刚性体。

从运动角度看： 任何机器都是由若干个构件组合而成



由三个零件组成的构件

内 燃 机 中 连 杆





曲 轴

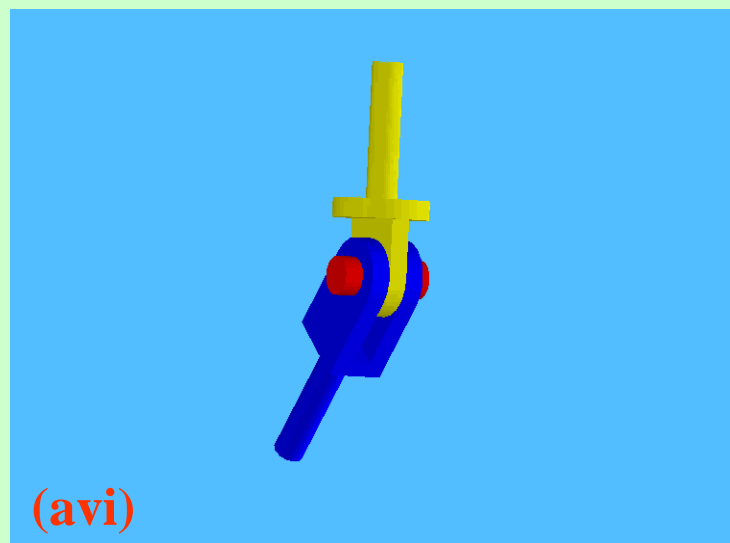
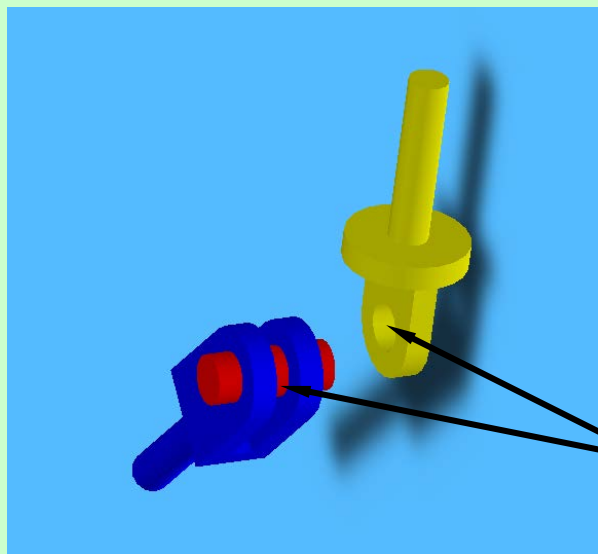
2. 运动副(Joint, Kinematic Pair)

定义：由两个构件组成的仍能产生某些相对运动的连接

特点：

- (1) 运动副是一种联接；
- (2) 运动副由两个构件组成；
- (3) 组成运动副的两个构件之

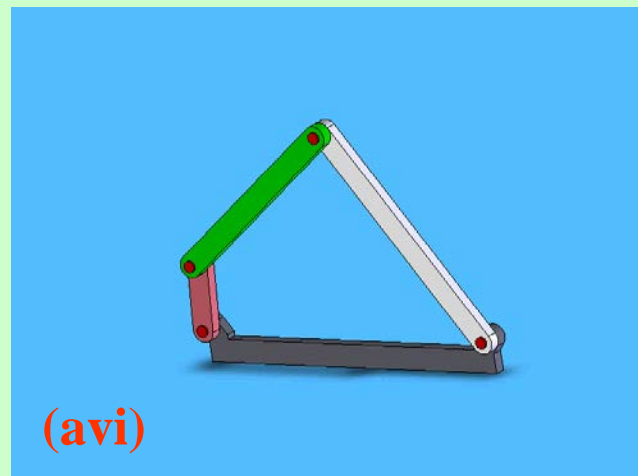
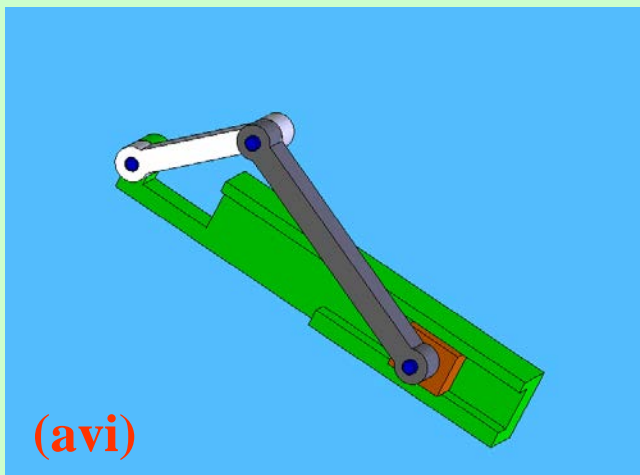
间有相对运动。



运动副元素：把两构件上能够参加接触而构成运动副的部分

运动副元素

机构是由运动副逐一联接各个构件组成的。

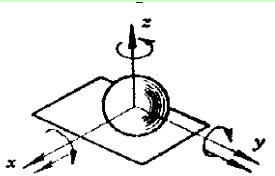

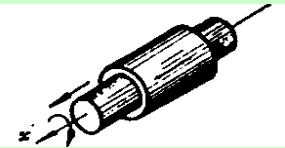

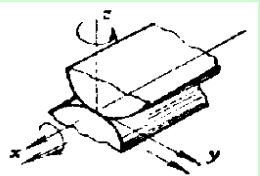
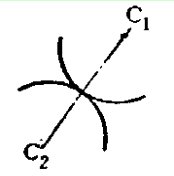
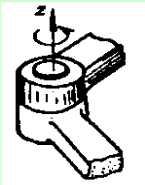
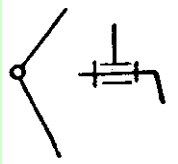
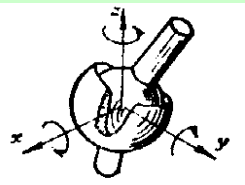
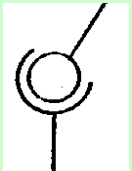
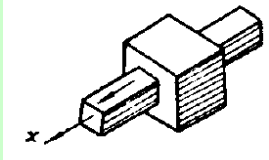
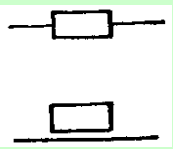
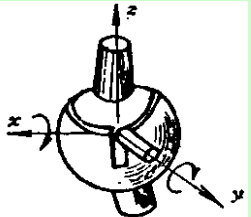
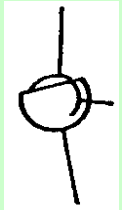

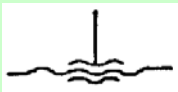


二、运动副的分类

机构的运动副的类型决定机构的运动形式。

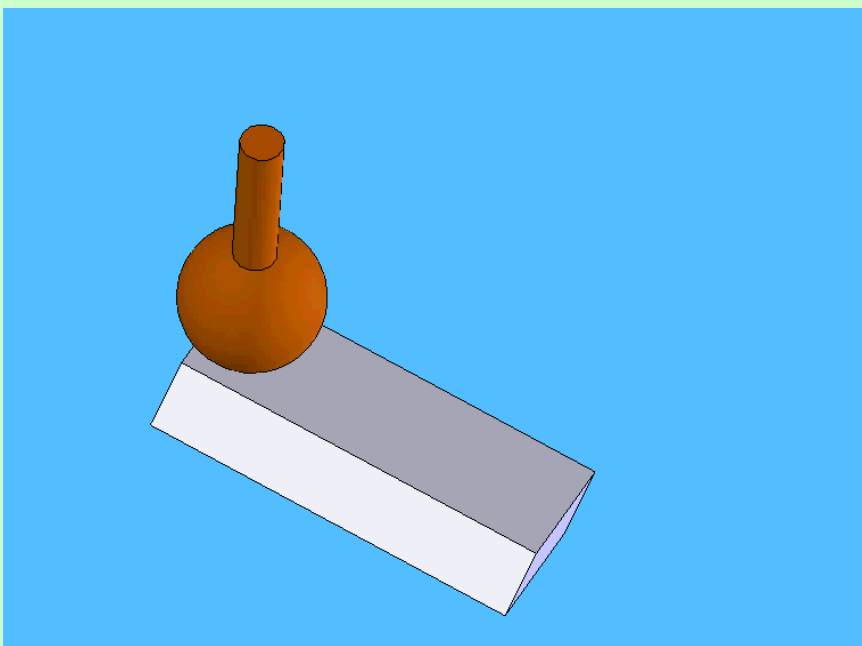
1. 根据运动副所引入的约束数分类

表2-1 常用运动副及其简图

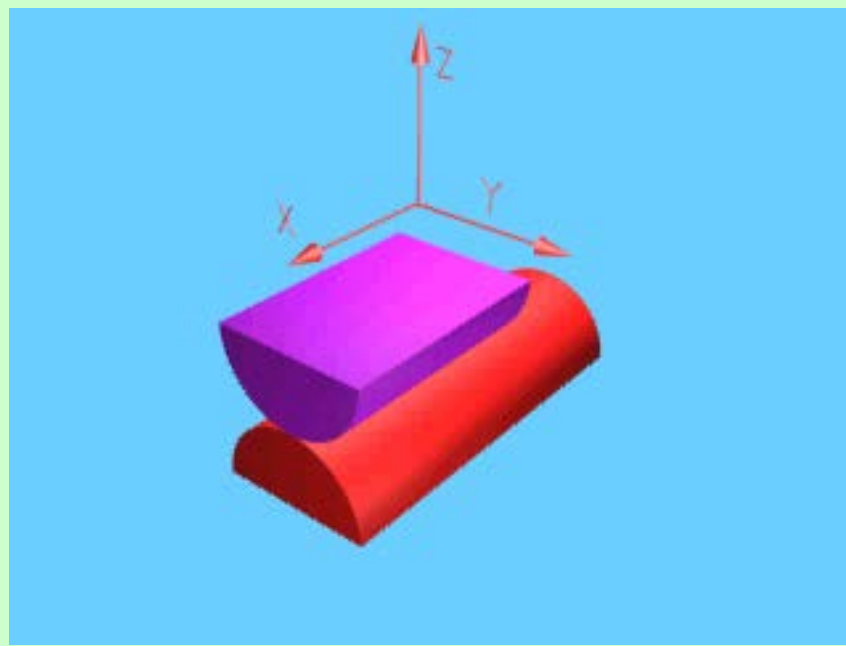
名称	图 形	简图符号	副级	自由度	名称	图 形	简图符号	副级	自由度
球面高副			I	5	圆柱套筒副			IV	2
柱面高副			II	4	转动副			V	1
球面低副			III	3	移动副			V	1
球销副			IV	2	螺旋副			V	1

2. 根据组成运动副的两个运动副元素的接触情况分类

★ 运动副元素以点或线接触的运动副称为高副。



球面高副(avi)

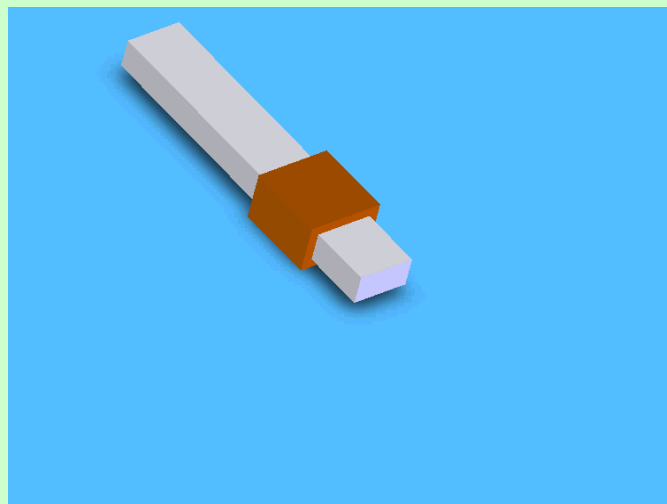


柱面高副(avi)

★ 运动副元素以面接触的运动副称为低副。

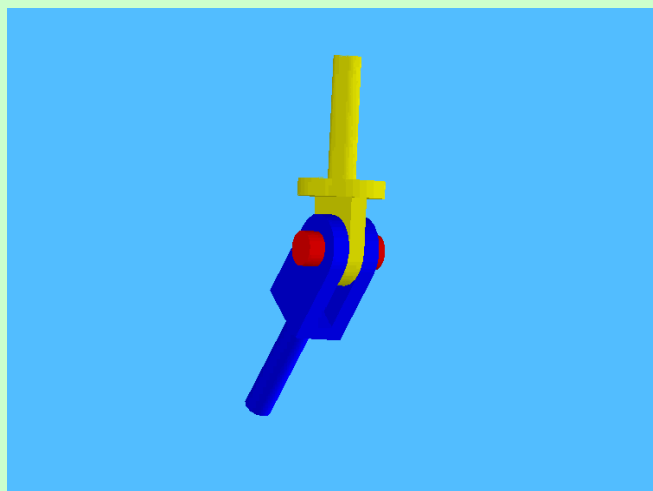


球面低副(avi)



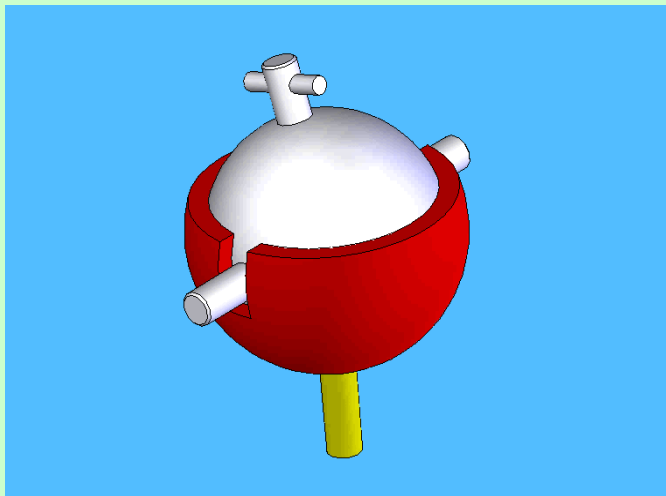
移动副(avi)

回转副
(avi)

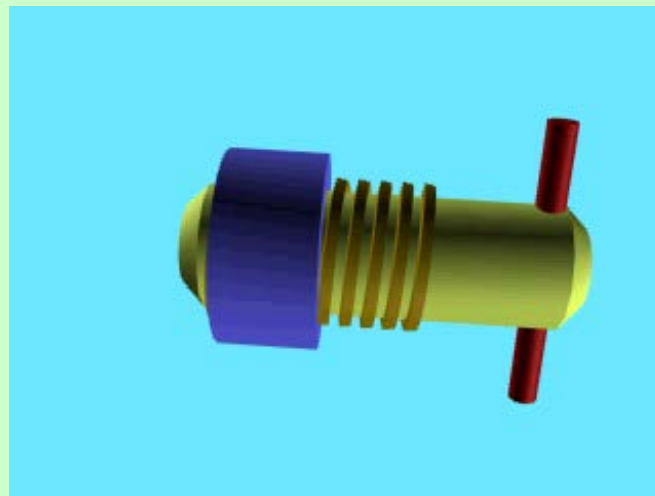


3. 根据组成运动副的两个构件的相对运动形式分类

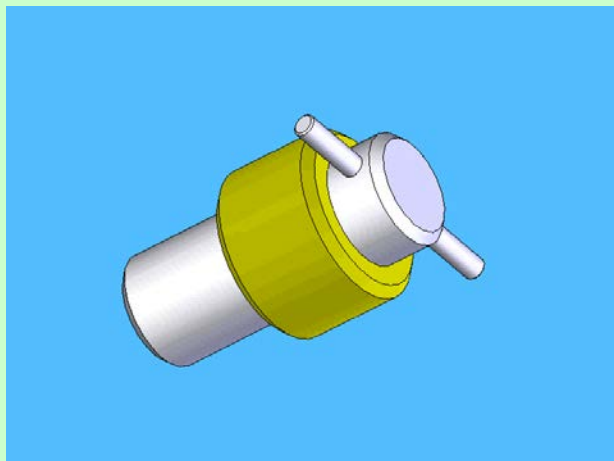
★ 空间运动副



球销副
(avi)



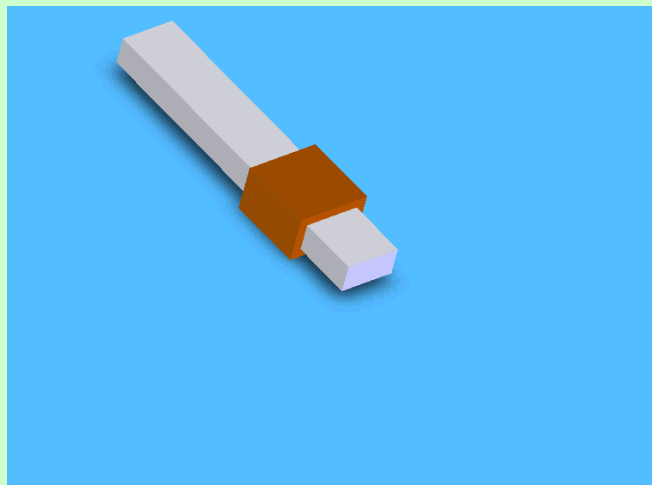
螺旋副
(avi)



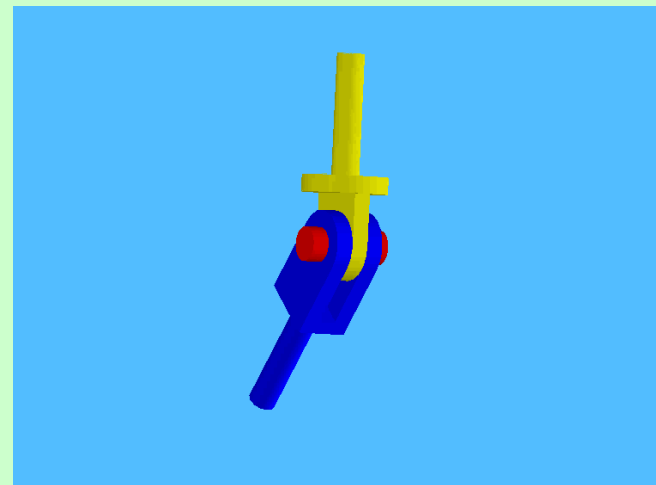
圆柱套筒副(avi)

4. 平面运动副

A. 低副

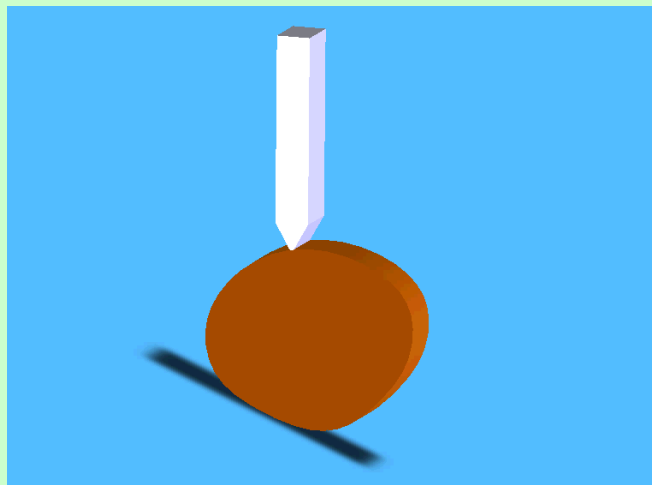


移动副(avi)

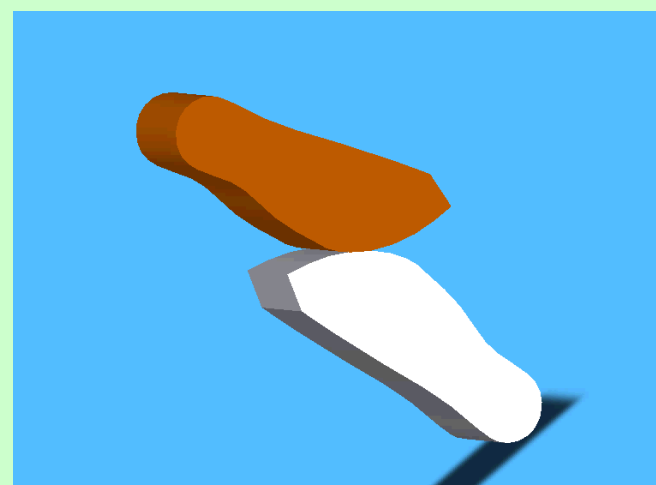


转动副(avi)

B. 高副

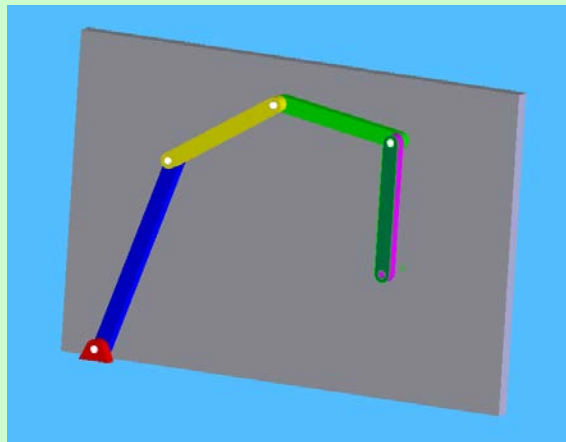


凸轮副(avi)

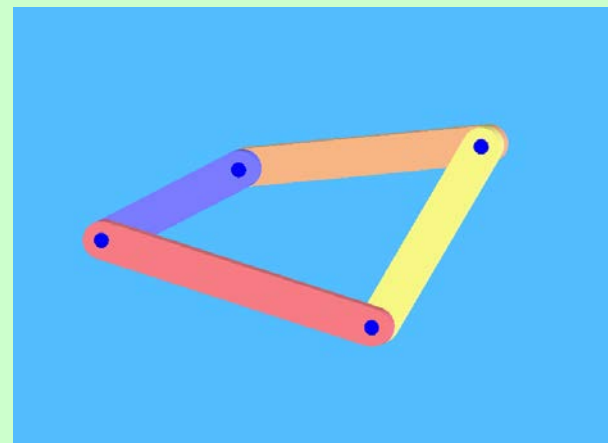


齿轮副(avi)

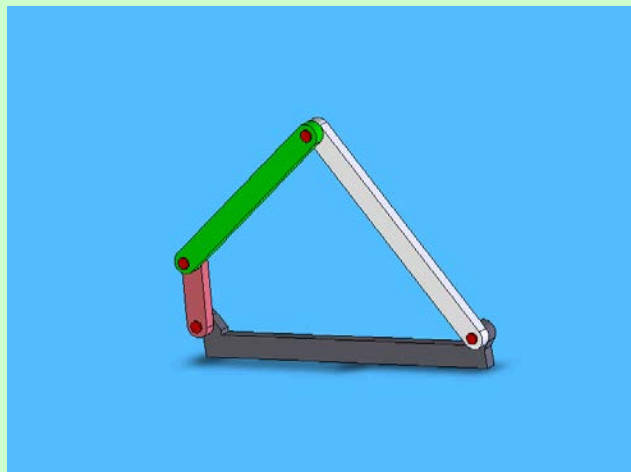
三、运动链(Kinematic Chain)与机构



开式运动链(avi)



闭式运动链(avi)



机构(avi)

运动链的类型:

{ 闭式运动链(闭式链)

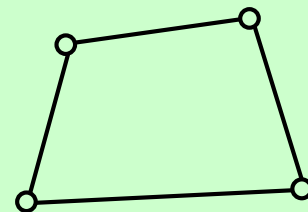
{ 开式运动链(开式链)

{ 简单运动链

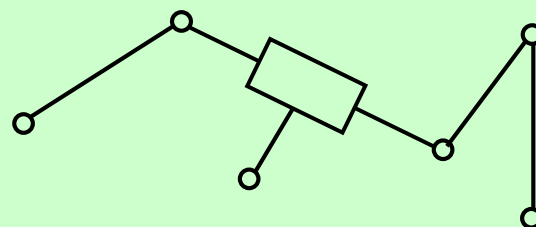
{ 复杂运动链

{ 平面运动链

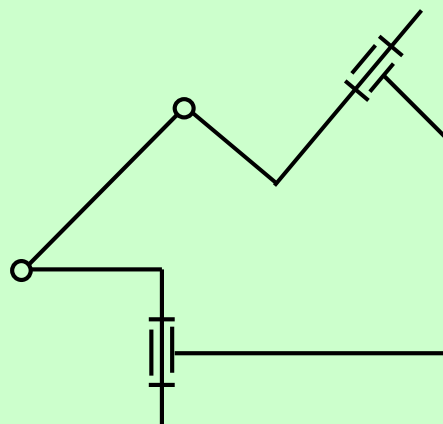
{ 空间运动链



闭式运动链 简单运动链



开式运动链 复杂运动链



空间运动链

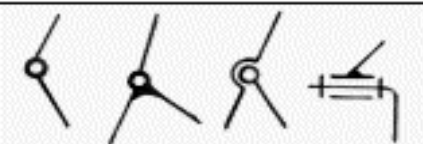
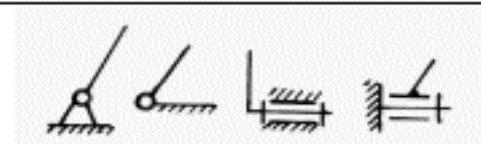
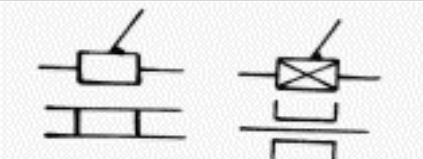
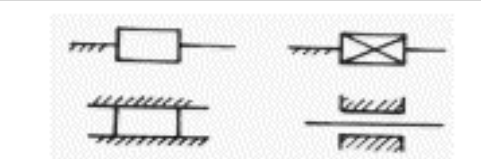
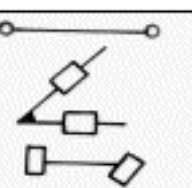
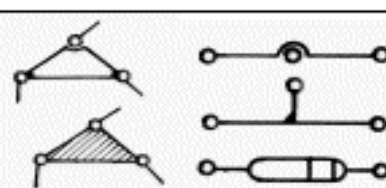
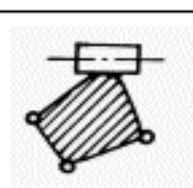
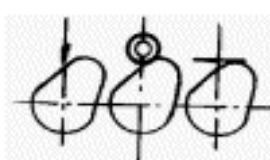
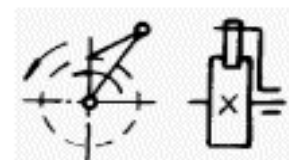
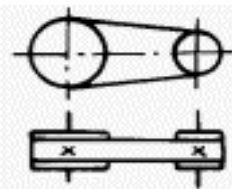
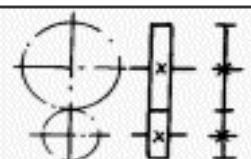
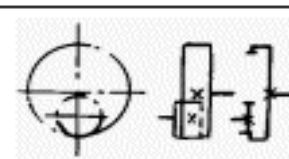
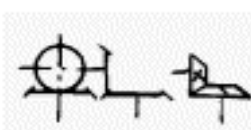
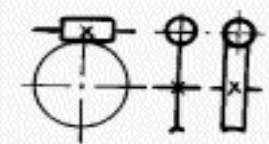
四、机构运动简图(Kinematical Diagrams)的绘制

1. 定义

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，而只用简单的线条和符号代表构件和运动副，并按比例定出各运动副位置，表示机构的组成和传动情况。这样绘制出能够准确表达机构运动特性的最简明图形就称为**机构运动简图**。

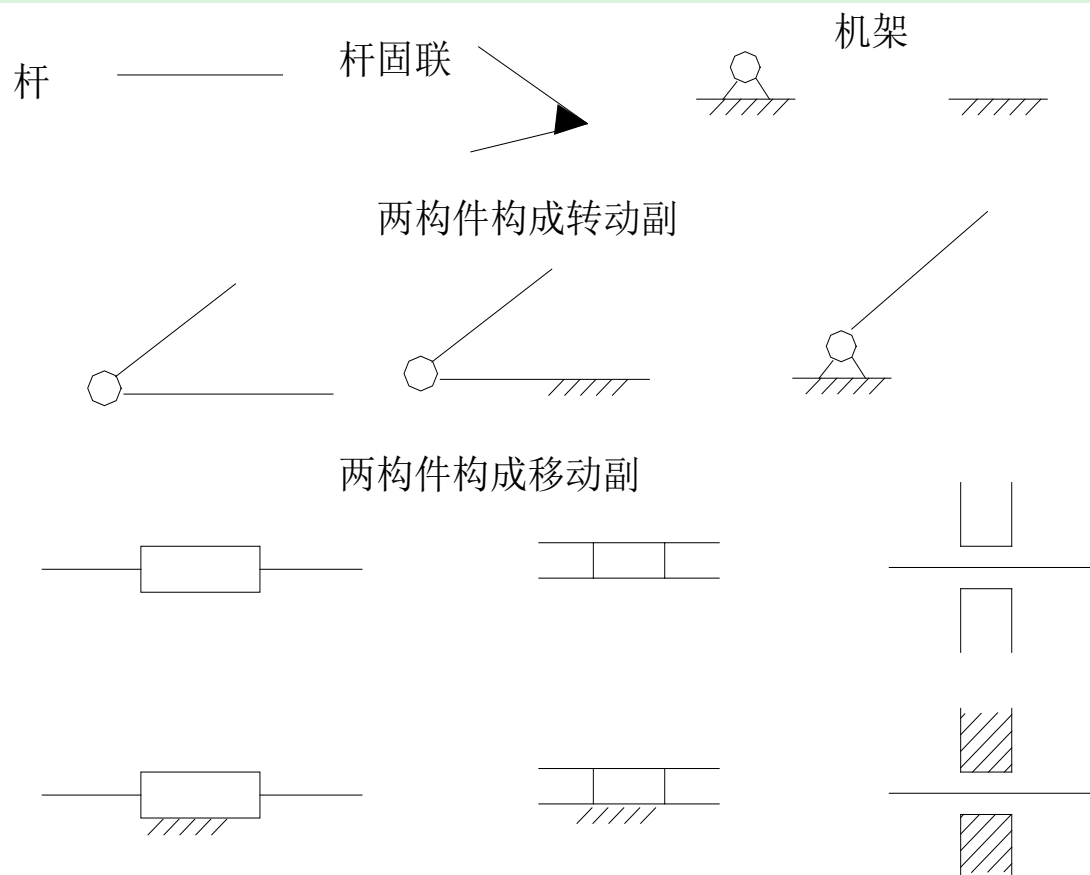
只是为了表明机构的运动状态或各构件的相互关系，可以不按比例来绘制运动简图，通常把这样的简图称为**机构示意图**。

常用机构构件、运动副代表符号

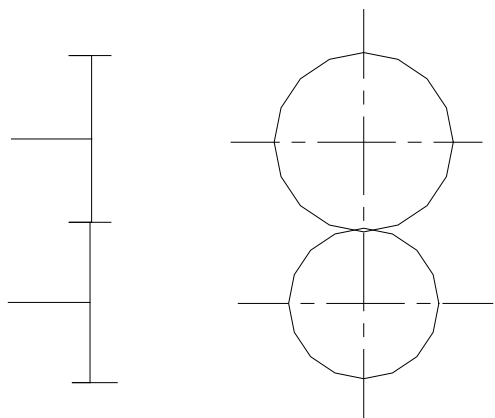
	两运动构件形成的运动副		两构件之一为机架时所形成的运动副	
转动副				
移动副				
构件	二副元素构件	三副元素构件		多副元素构件
				
凸轮及其它机构	凸轮机构	棘轮机构		带传动
				
齿轮机构	外齿轮	内齿轮	圆锥齿轮	蜗杆蜗轮
				

常用机构构件、运动副代表符号

GB4460-84

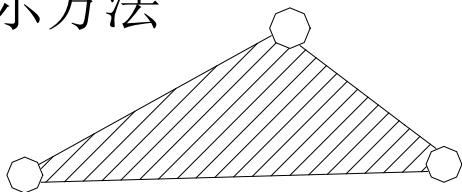


齿轮啮合

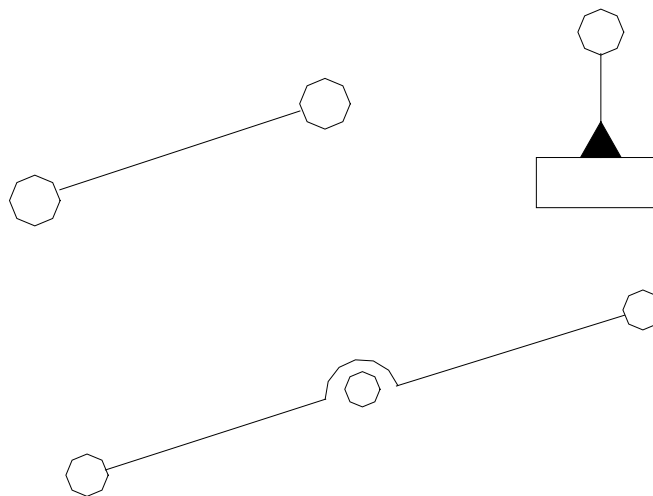
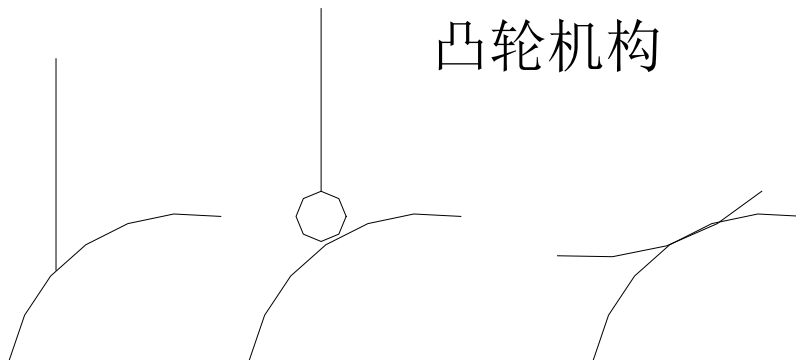


具有两个运动副元素的构件的表示方法

具有三个运动副元素的构件的表示方法



凸轮机构



绘制机构运动简图的步骤

1. 分析机构的运动路线

在绘制机构运动简图时，首先确定机构的原动件和执行件，两者之间为传动部份，由此确定出组成机构的所有构件；构件之间的是联接，即运动副，从而确定构件间运动副的类型。

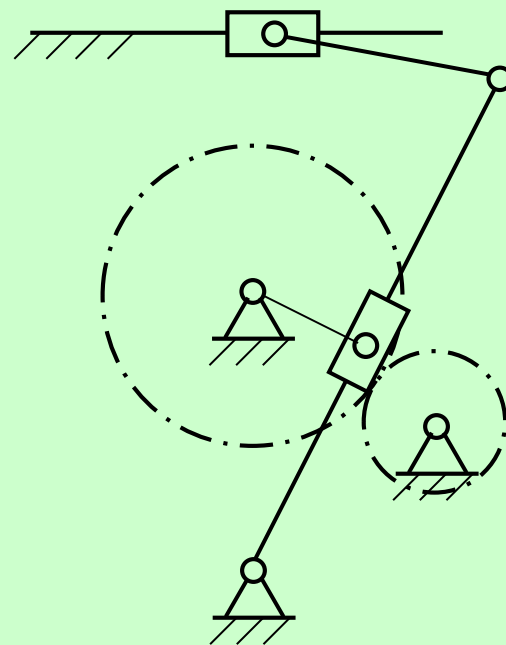
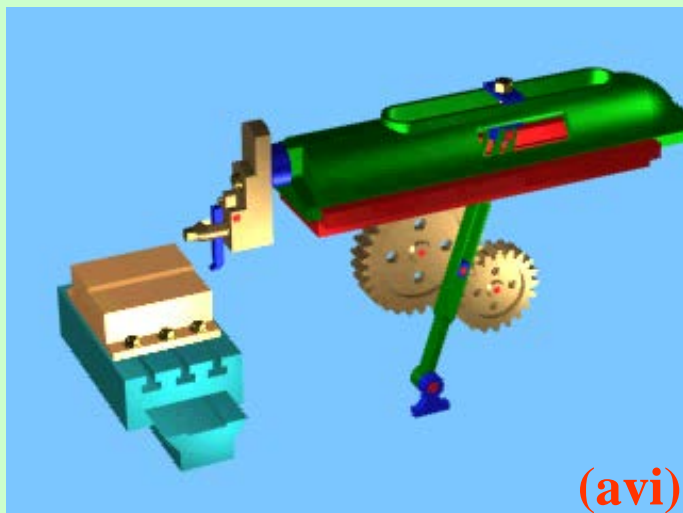
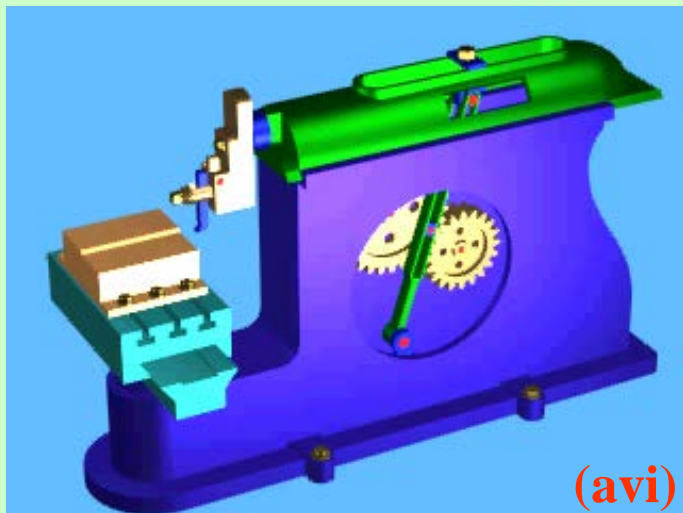
2. 选择合适的投影面

一般选择与多数构件的运动平面相平行的面为投影面，必要时也可以就机械的不同部分选择两个或两个以上的投影面，然后展开到同一平面上。

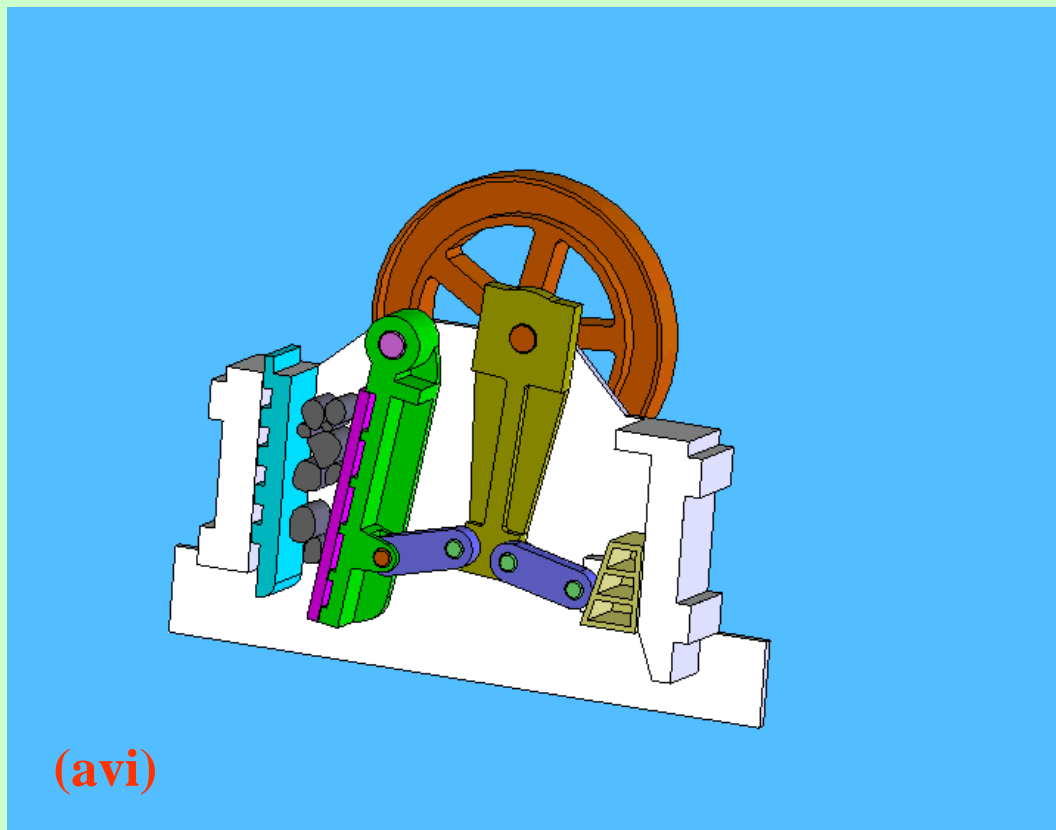
3. 保证运动副之间的相对位置——准确性

选择适当的比例尺，根据机构的运动尺寸定出各运动副之间的相对位置，然后用规定的符号画出各类运动副，并将同一构件上的运动副符号用简单线条连接起来——机构的运动简图。

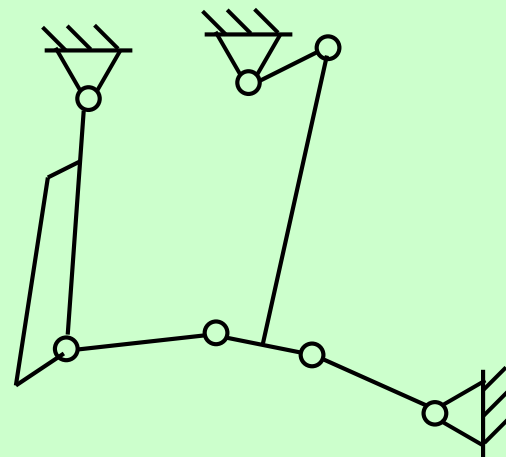
绘制牛头刨床机构的运动简图



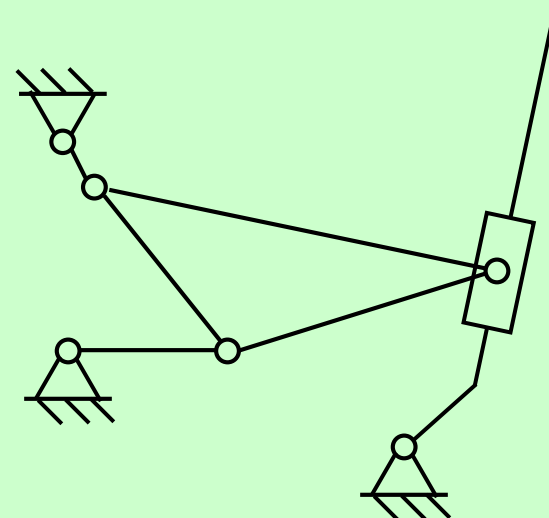
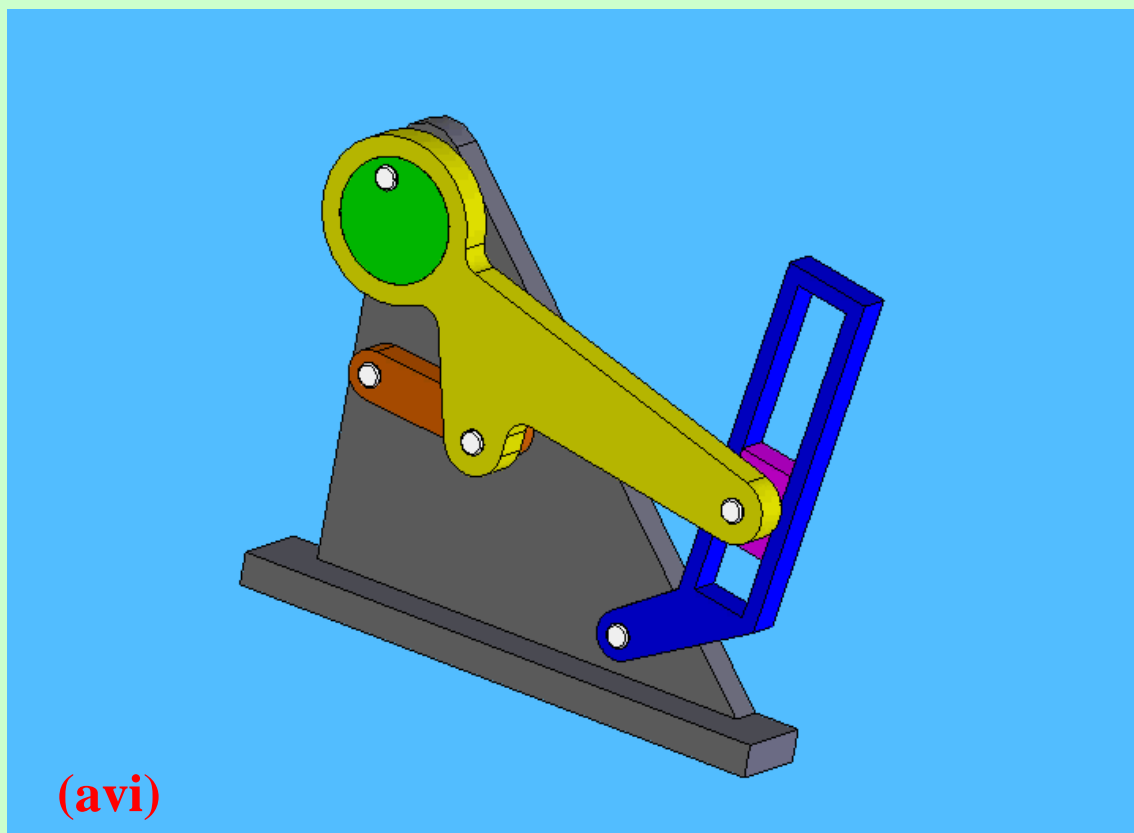
绘制破碎机机构的运动简图



选取比例尺 μ_1



试绘制该机构运动简图



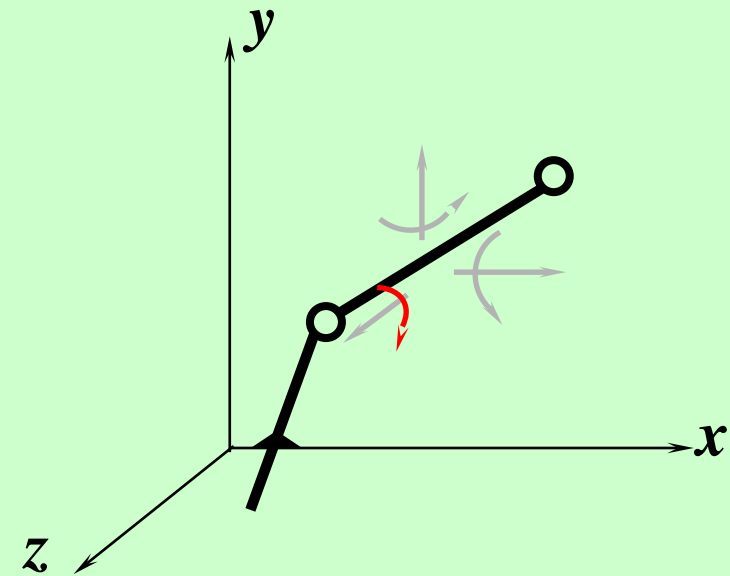
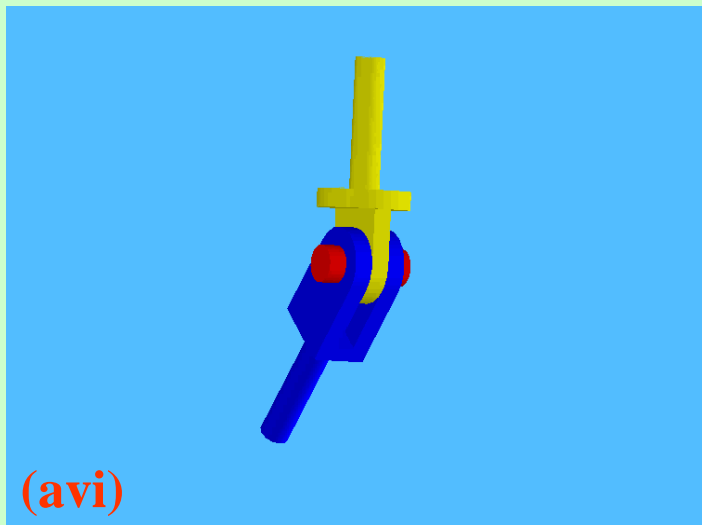
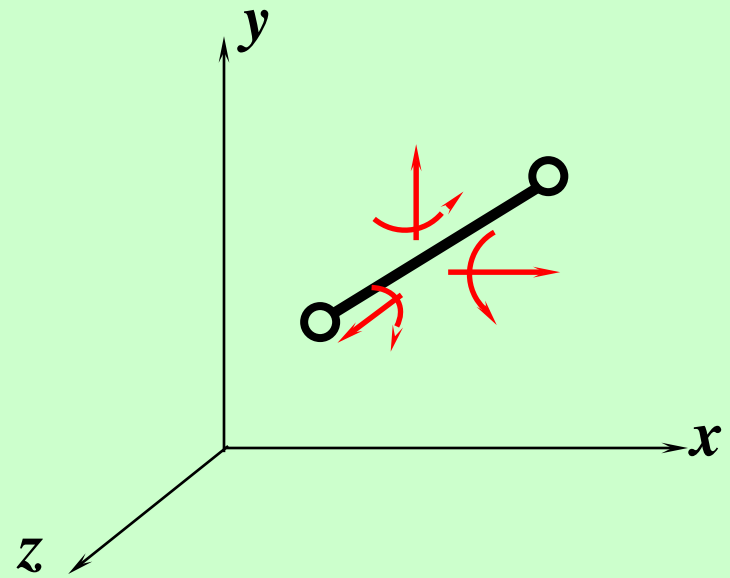
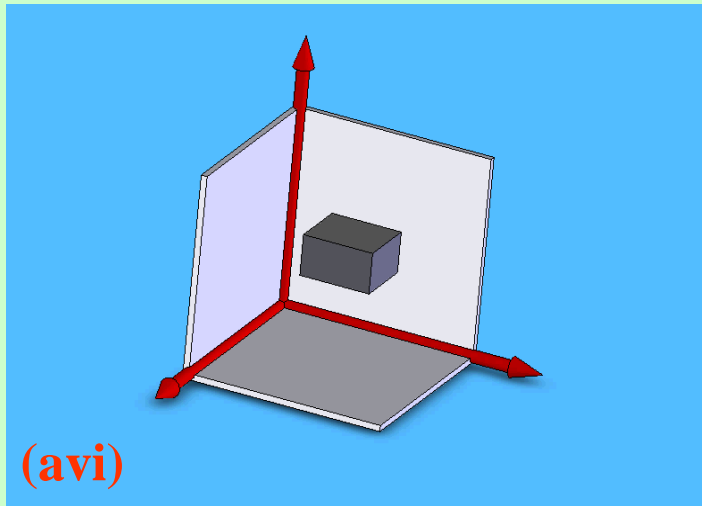
§ 1-3 机构自由度(Degrees of Freedom)的计算

一、平面机构自由度的计算公式

1. 构件的自由度与约束

构件独立运动的数目称为**自由度**

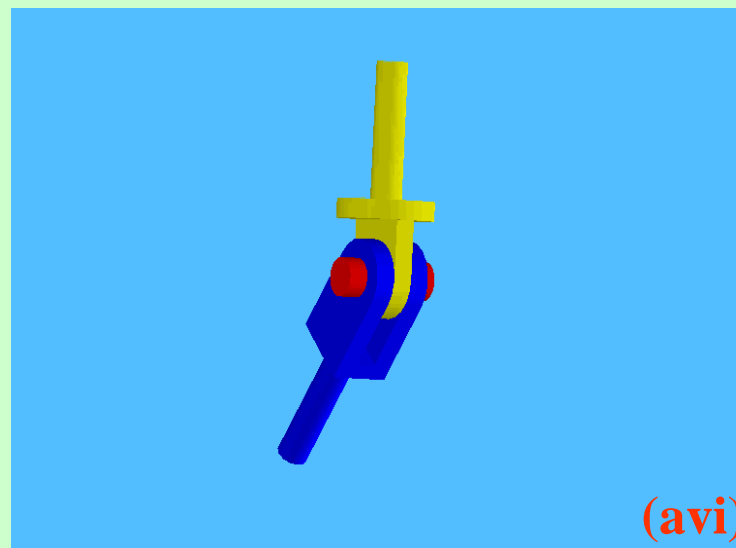
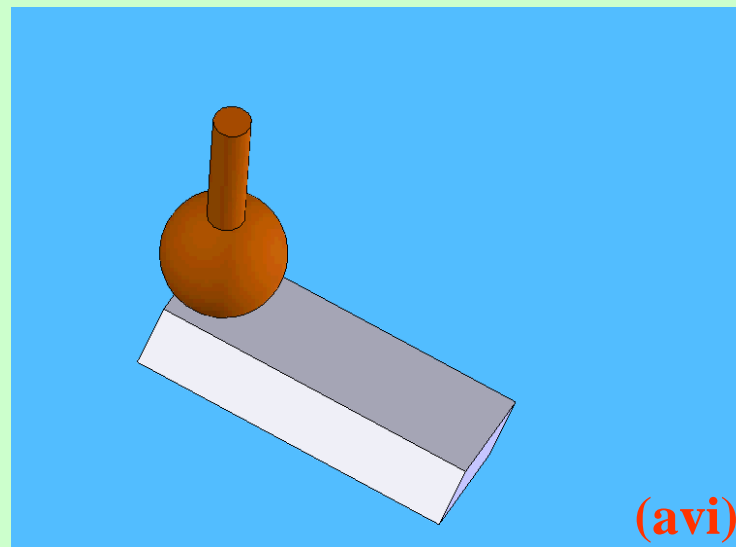
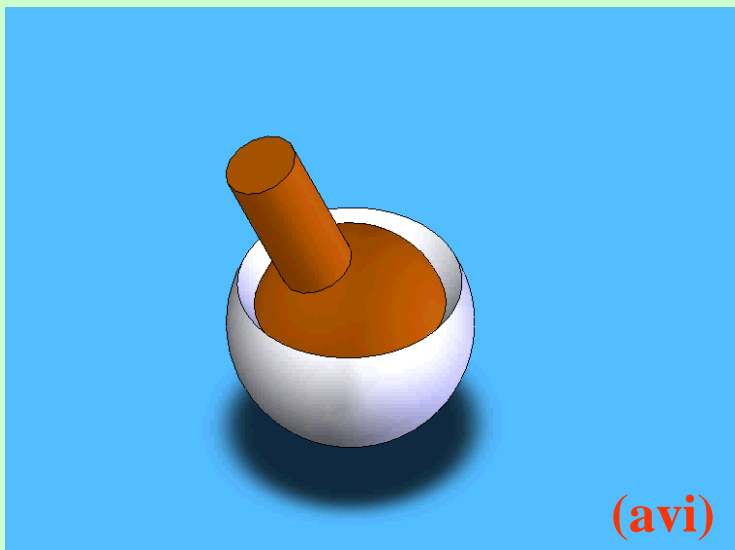
对构件运动的限制作用称为**约束**



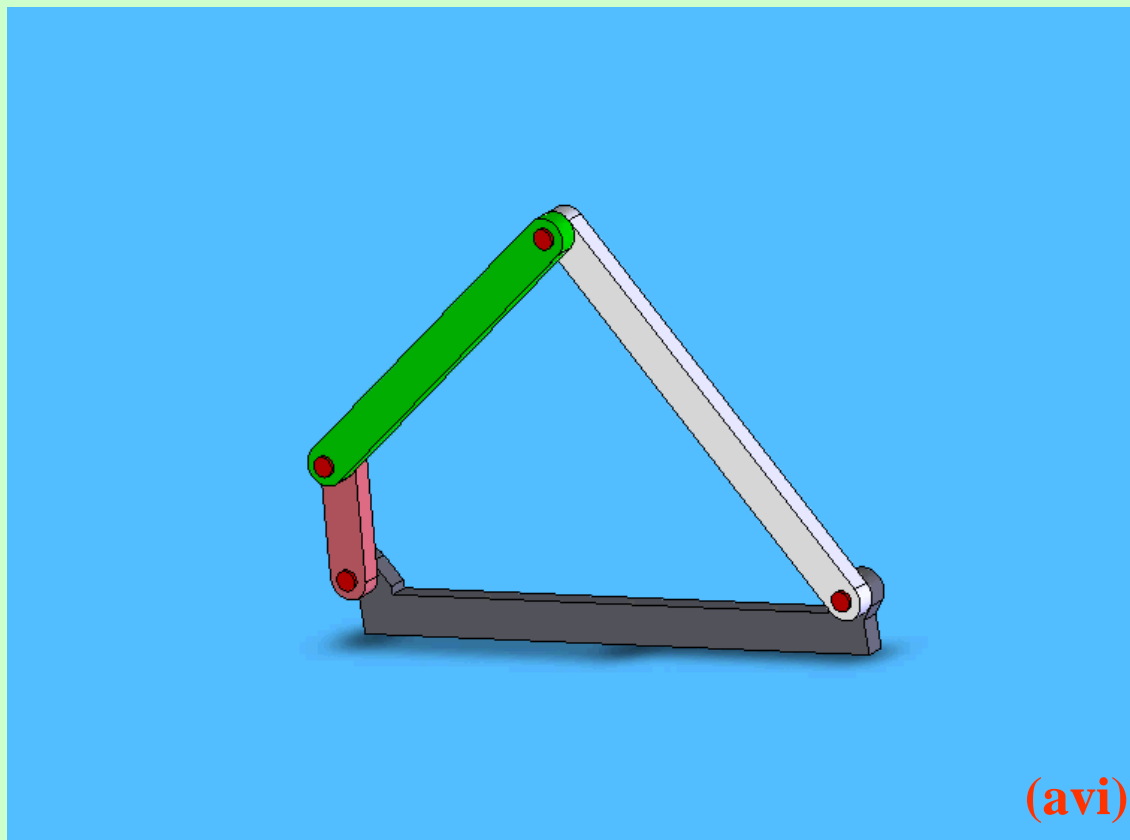
2. 机构自由度

机构独立运动的数目称为机构的**自由度**

什么是独立运动？



什么是机构的独立运动？



什么是机构的自由度？

★ 机构的自由度=机构的独立运动数目

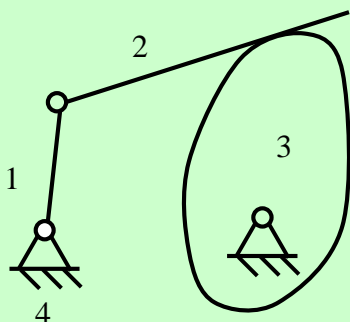
★ 平面机构独立运动的数目为：所有活动构件的自由度的和减去所有运动副引入约束数目的和。

★ 对于具有 n 个活动构件的平面机构，若各构件之间共构成了 P_L 个低副和 P_h 个高副，则它们共引入 $(2P_L+P_h)$ 个约束。机构的自由度 F 显然应为：

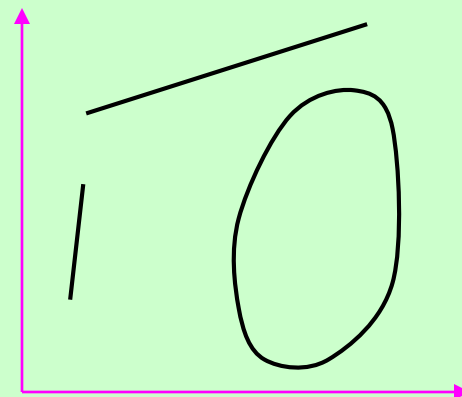
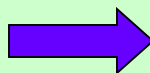
$$F=3n-(2P_L+P_h)=3n-2P_L-P_h$$

这是机构自由度的计算公式

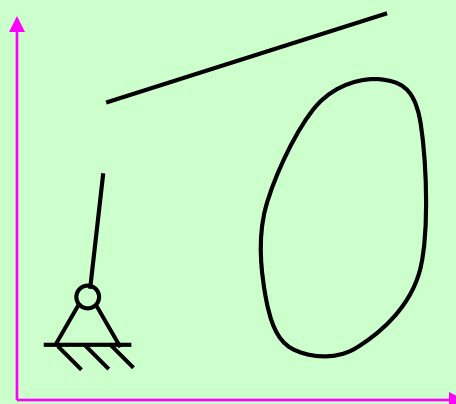
机构自由度计算式的验证



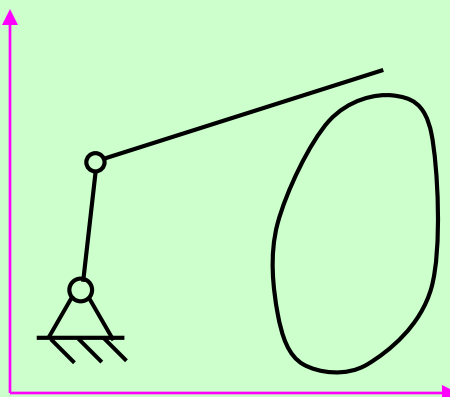
$$F=3n-(2P_l+P_h)=3*3-2*3-1=2$$



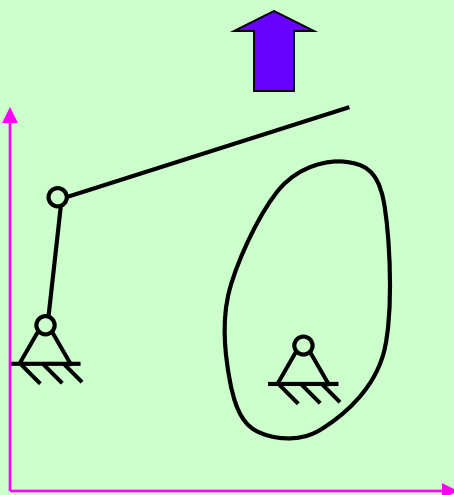
$$F=3n-(2P_l+P_h)=3*3-0-0=9$$



$$F=3*3-2*1-0=7$$



$$F=3*3-2*2-0=5$$



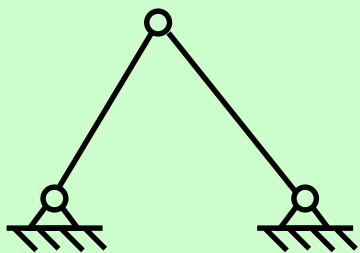
$$F=3*3-2*3-0=3$$



二、机构自由度的意义及机构具有确定运动的条件

机构具有确定运动的条件：**机构原动件数目（独立运动件数）等于机构的自由度数。**

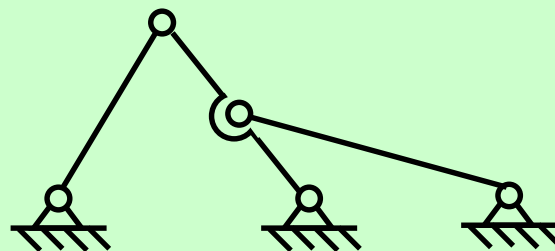
计算下列机构的自由度



$$n=2, P_1=3, P_h=0$$

$$F=3n-2P_1-P_h$$

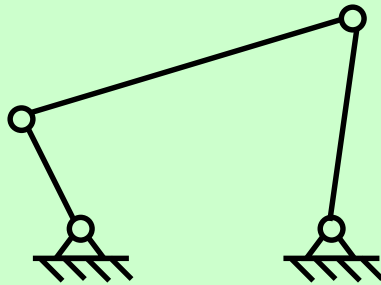
$$=3*2-2*3=0$$



$$n=3, P_1=5, P_h=0$$

$$F=3n-2P_1-P_h$$

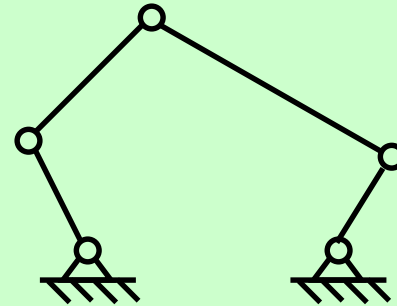
$$=3*3-2*5=-1$$



$$n=3, P_l=4, P_h=0$$

$$F=3n-2P_l-P_h$$

$$=3*3-2*4=1$$

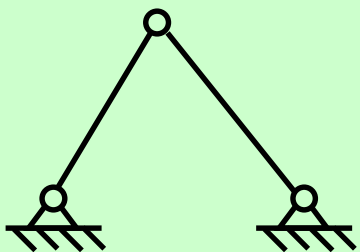


$$n=4, P_l=5, P_h=0$$

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

$$=3*4-2*5=2$$

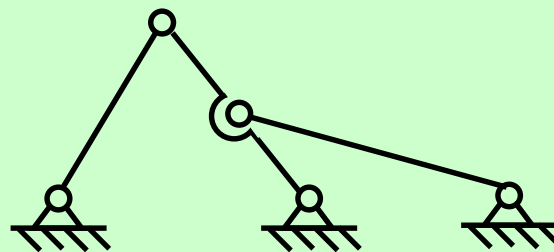
结论:



$$n=2, P_l=3, P_h=0$$

$$F=3n-2P_l-P_h$$

$$=3*2-2*3=0$$

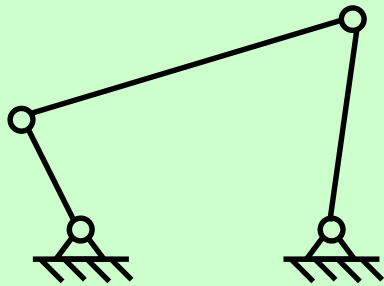


$$n=3, P_l=5, P_h=0$$

$$F=3n-2P_l-P_h$$

$$=3*3-2*5=-1$$

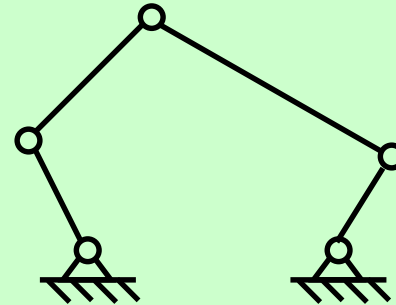
1) 若机构自由度 $F \leq 0$, 则机构不能动



$$n=3, P_1=4, P_h=0$$

$$F=3n-2P_1-P_h$$

$$=3*3-2*4=1$$



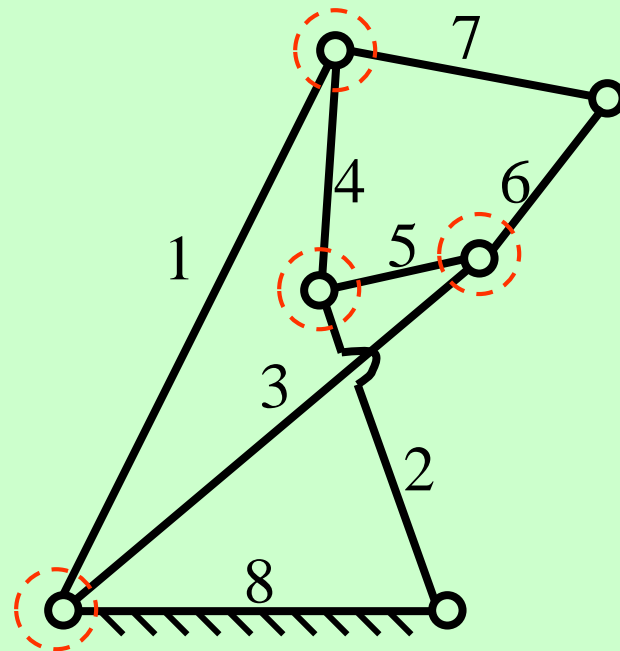
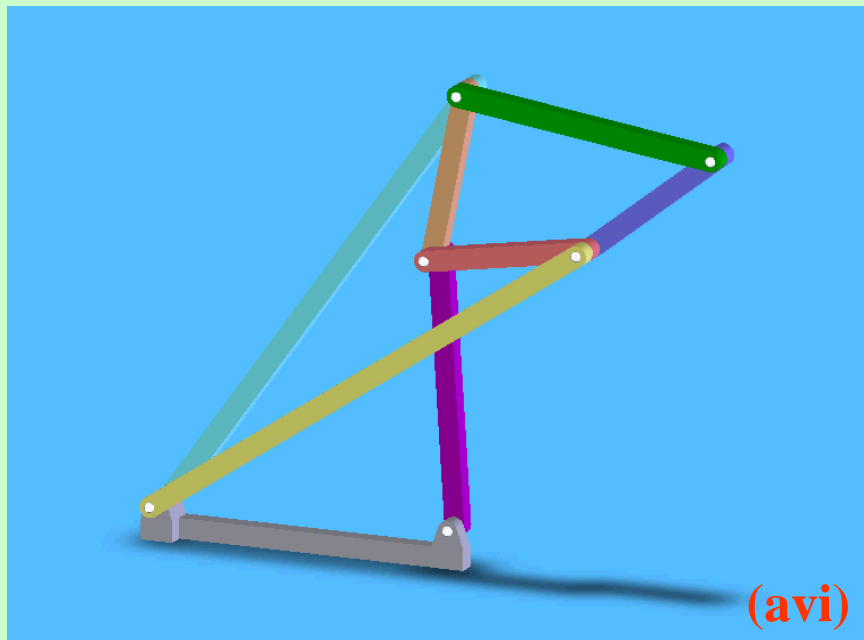
$$n=4, P_1=5, P_h=0$$

$$F=3n-2P_1-P_h$$

$$=3*4-2*5=2$$

- 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，因此，机构具有确定运动的条件是：机构的原动件数等于机构的自由度数；
- 3) 若 $F > 0$ ，而原动件数 $< F$ ，则构件间的运动是不确定的；
- 4) 若 $F > 0$ ，而原动件数 $> F$ ，则构件间不能运动或产生破坏。

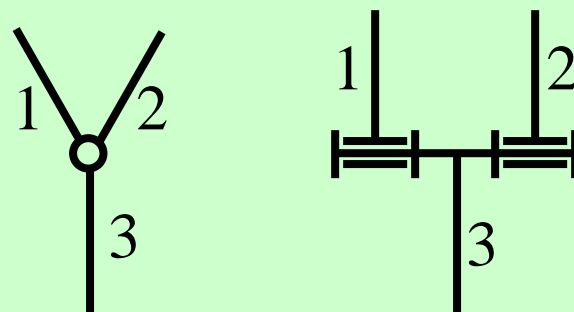
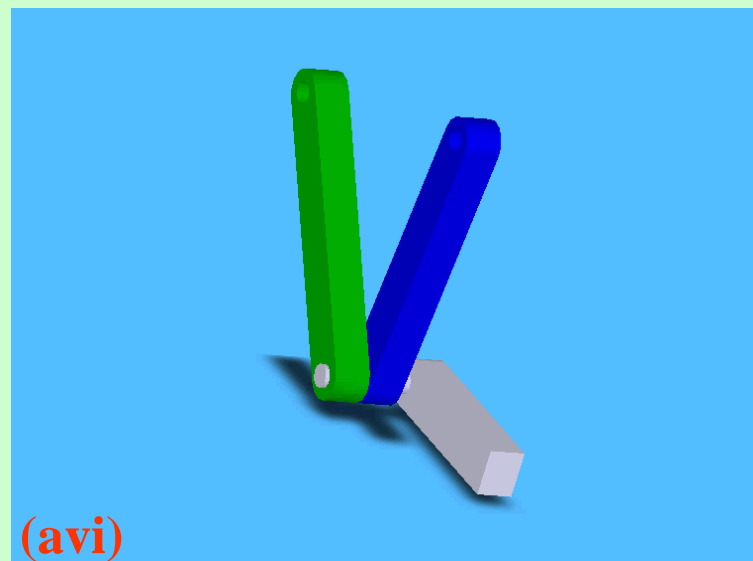
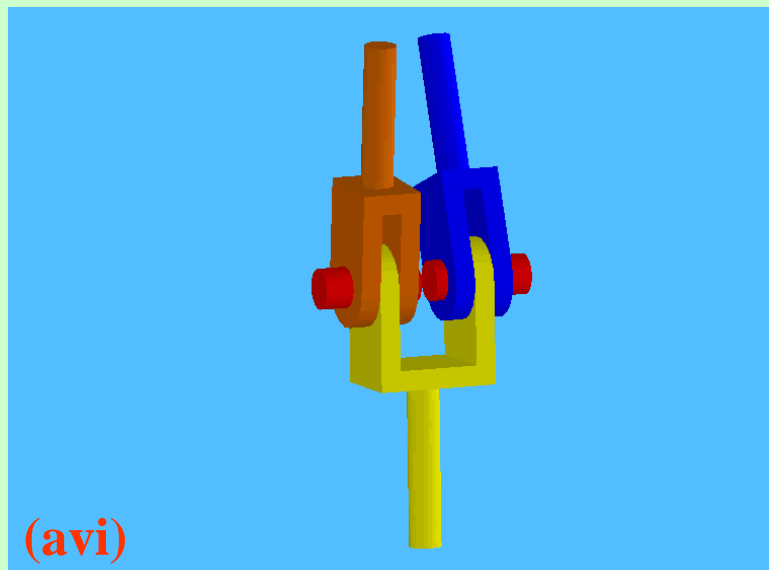
三、计算机构自由度时应注意的事项



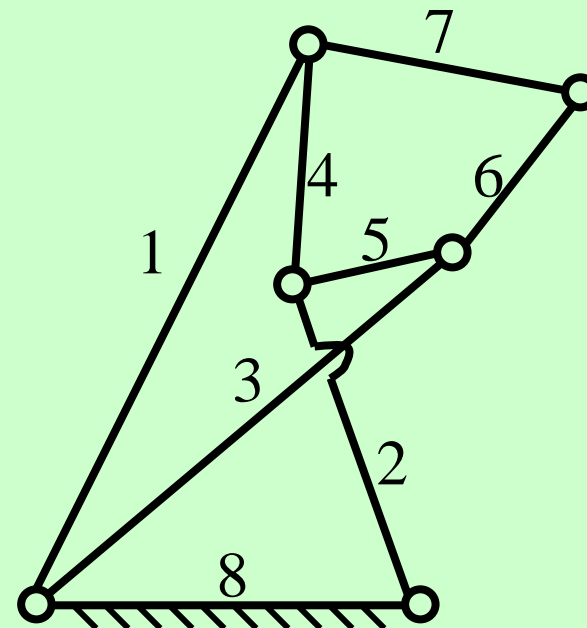
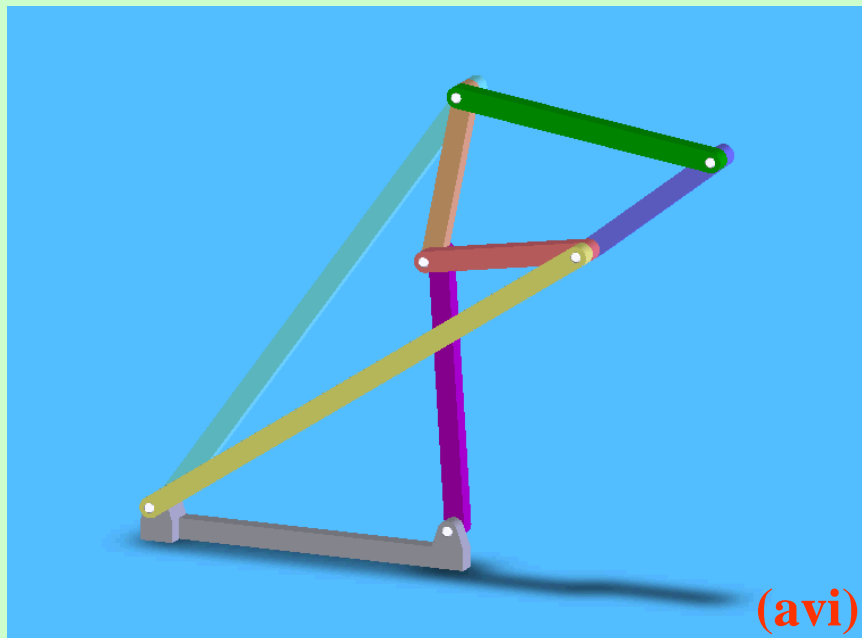
$$F = 3n - 2p_l - p_h = 3 \times 7 - 2 \times 6 - 0 = 9 \quad ???$$

1. 复合铰链(Multiple Joint)

由两个以上构件在同一处构成的重合转动副称为复合铰链。



由 m 个构件构成的复合铰链应当包含 $(m-1)$ 个转动副。

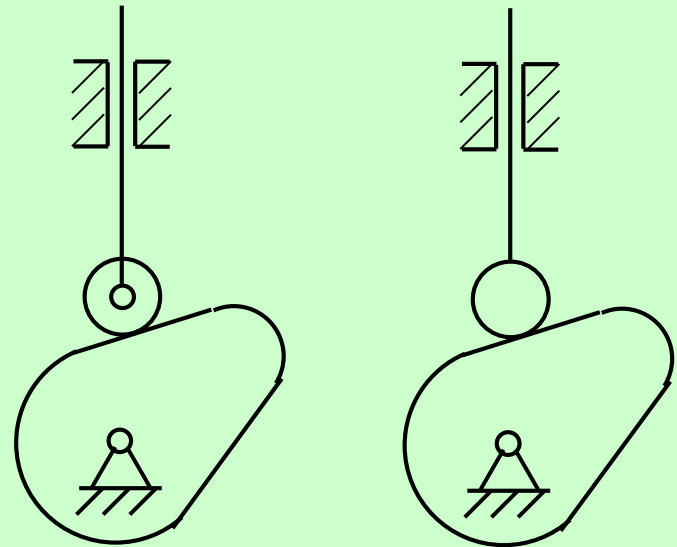
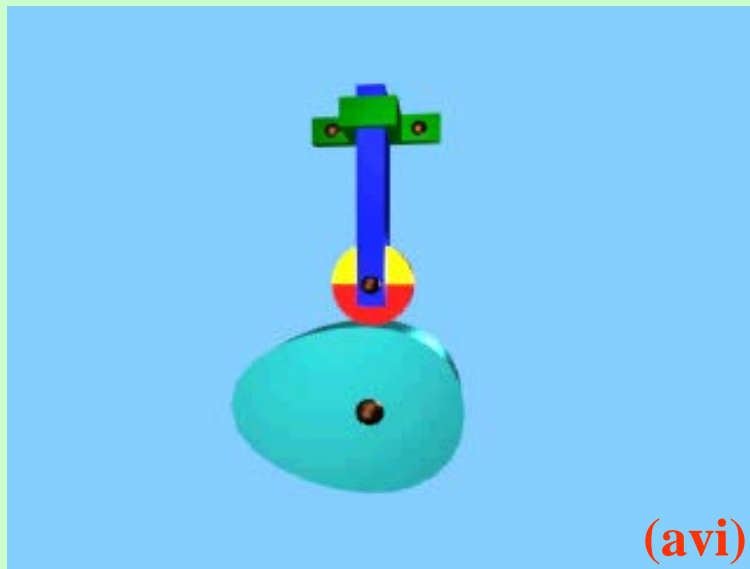


$$F = 3n - 2p_l - p_h = 3 \cdot 7 - 2 \cdot 10 - 0 = 1$$

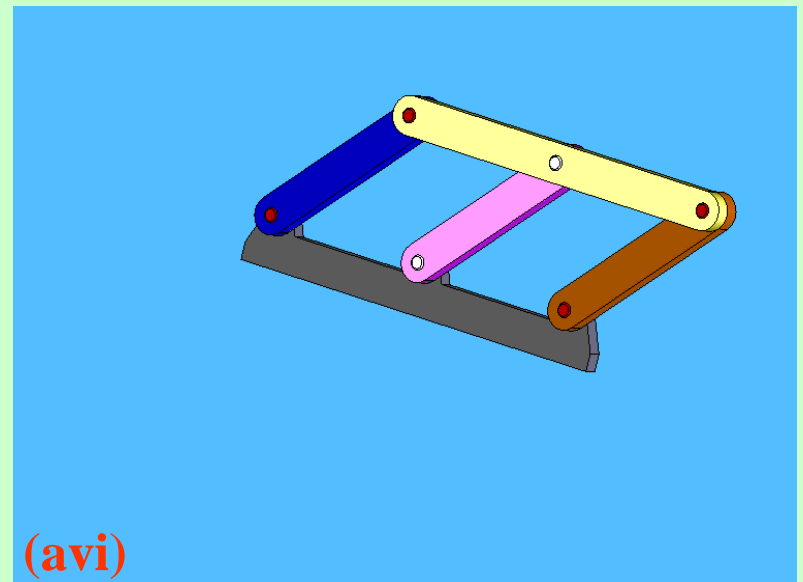
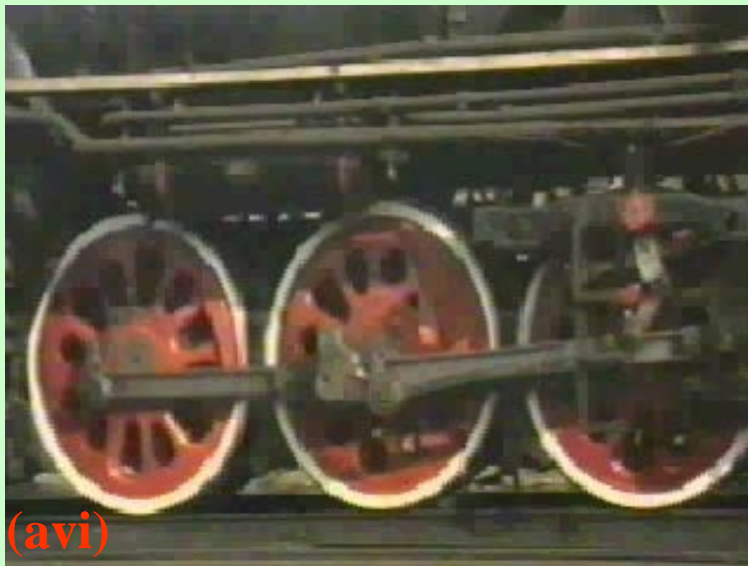
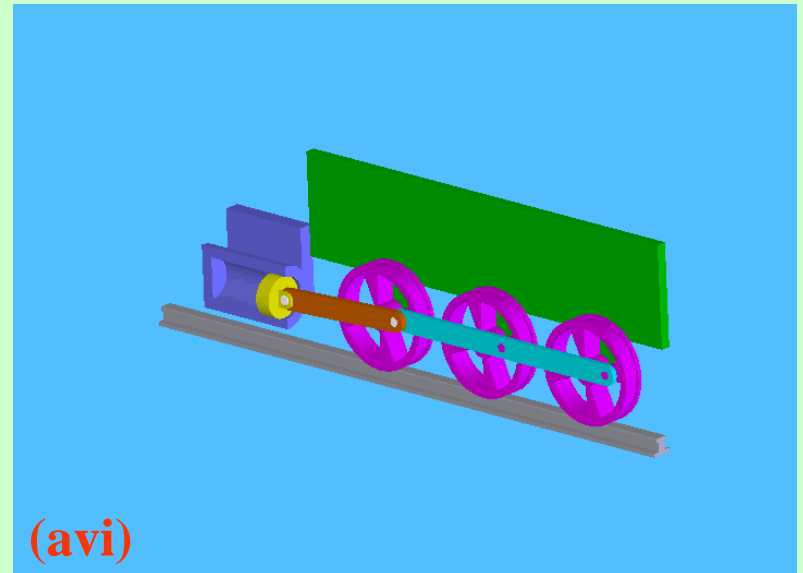
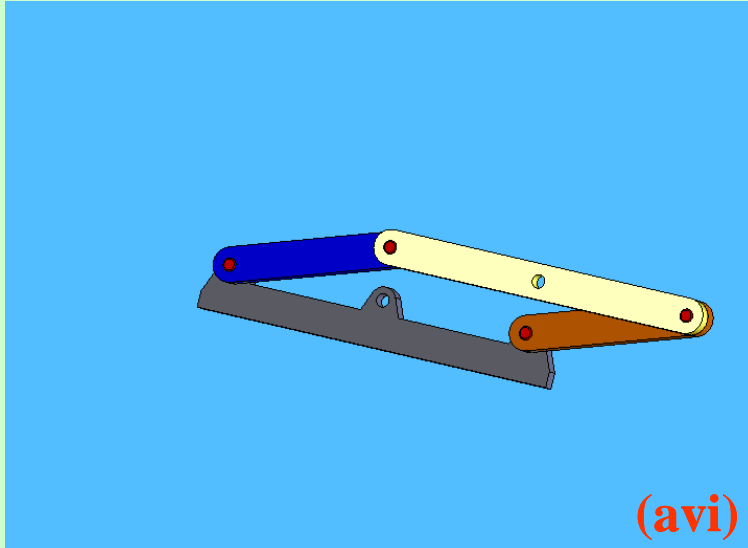
2. 局部自由度(Local Degree of Freedom)

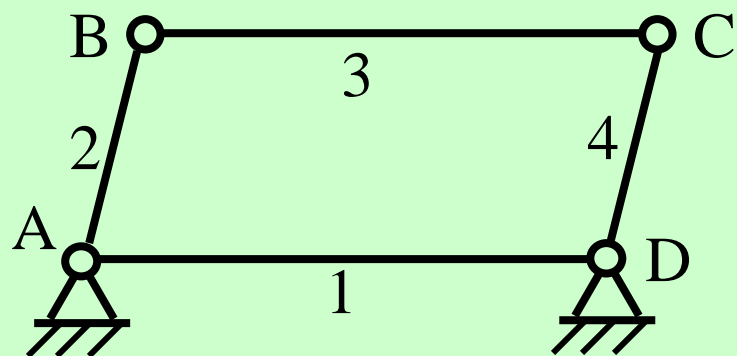
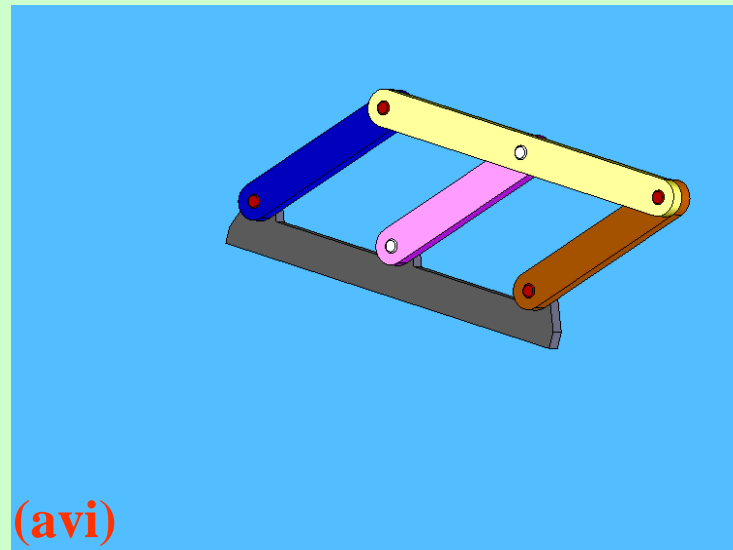
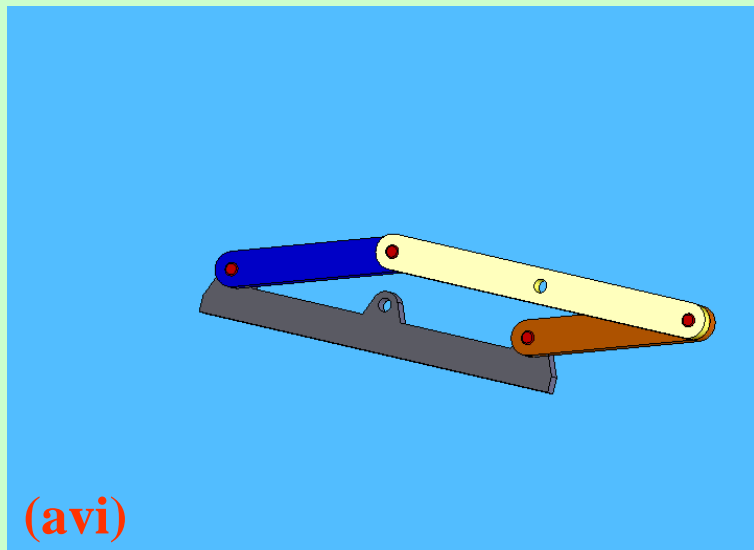
不影响机构整体运动的自由度，称为局部自由度。

处理方式：在计算机构自由度时，局部自由度应当舍弃不计。

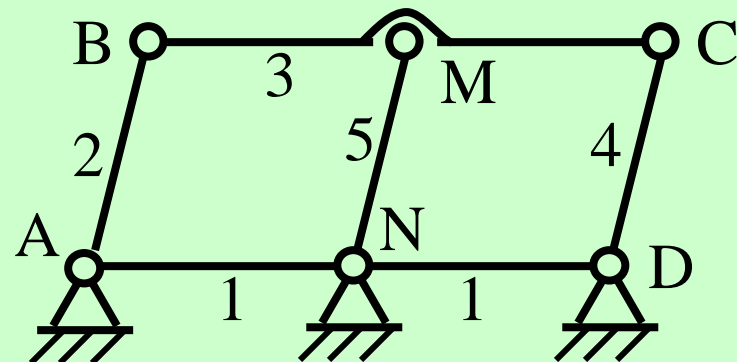


3. 虚约束(Void Constraint)



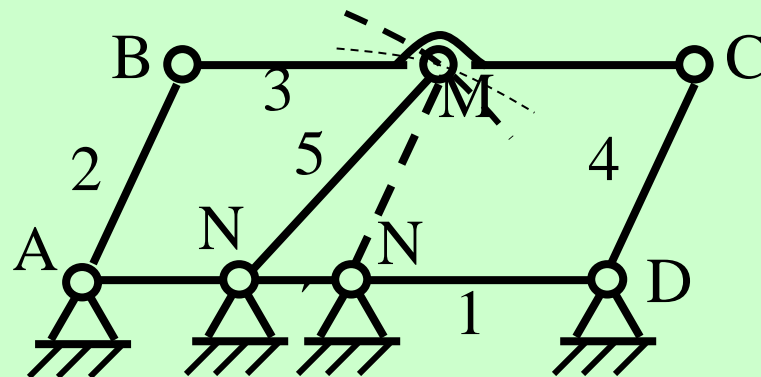


$$F = 3n - 2p_L - p_h = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 = 1$$



$$F = 3n - 2p_l - p_h = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 6 = 0 \quad ???$$

运动不确定



$$F=3n-2p_l-p_h=3*4-2*6=0$$

在机构中，有些约束所起的限制作用可能是重复的，这种不起独立限制作用的约束称为虚约束。

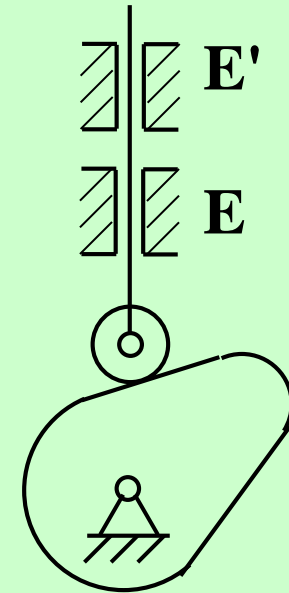
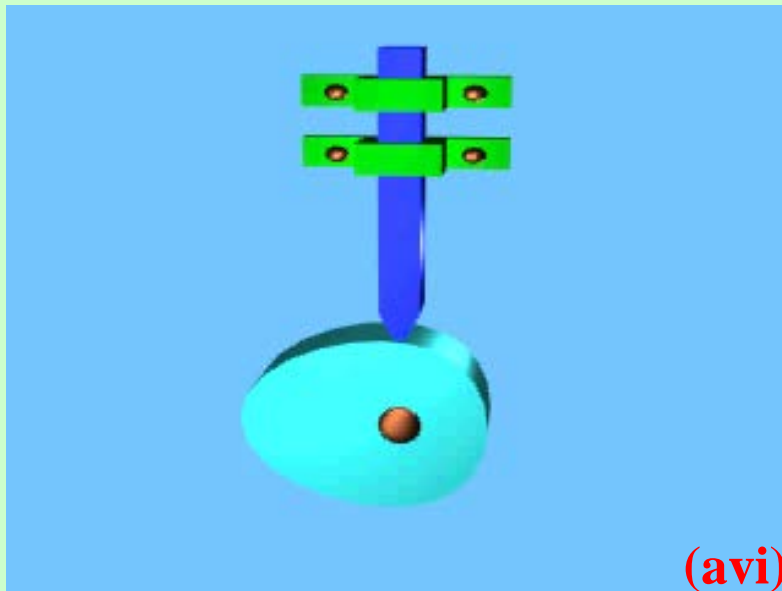
处理方式：应在计算结果中加上虚约束数，或先将产生虚约束的构件和运动副去掉，然后再进行计算。

虚约束对机构工作性能的影响

- 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，要求精度高的尺寸参数就越多，制造难度也就越大。
- 虚约束的多少也是机构性能的一个重要指标；
- 改善构件的受力情况；
- 保证机械顺利通过某些特殊位置等。

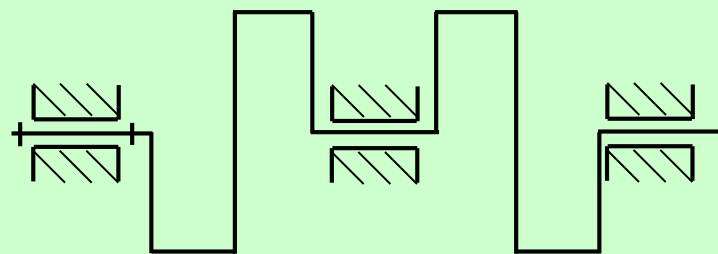
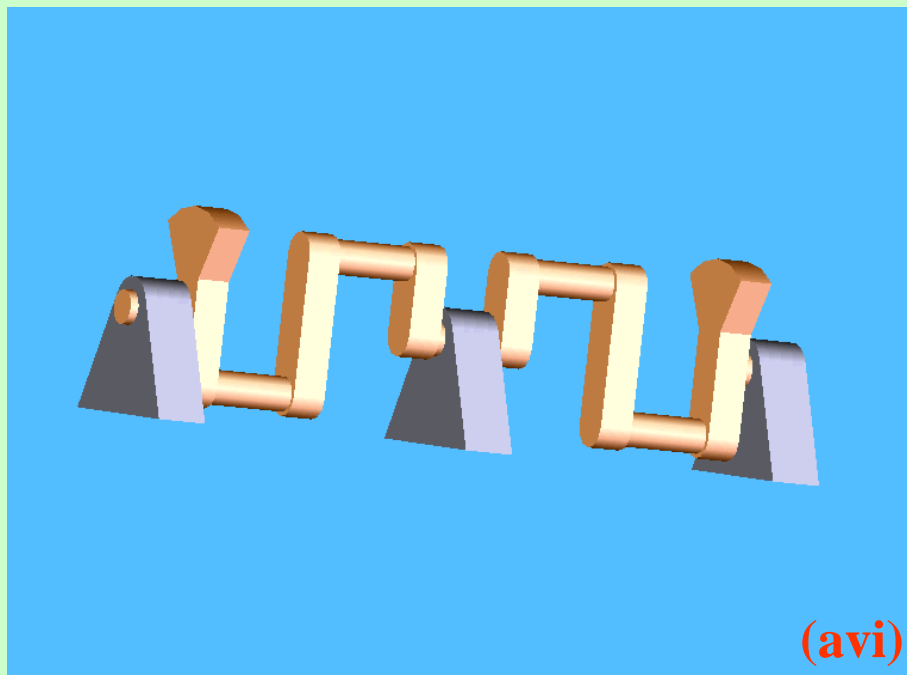
常见的虚约束有以下几种情况：

1) 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。



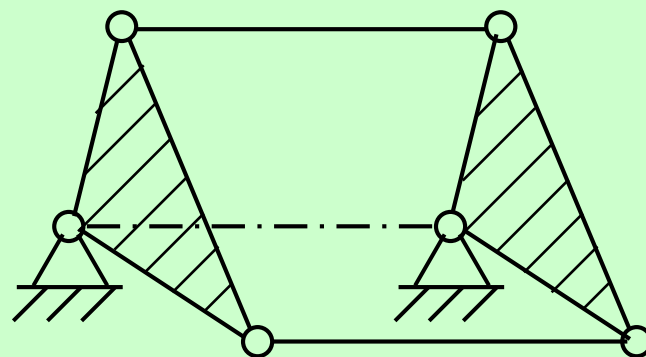
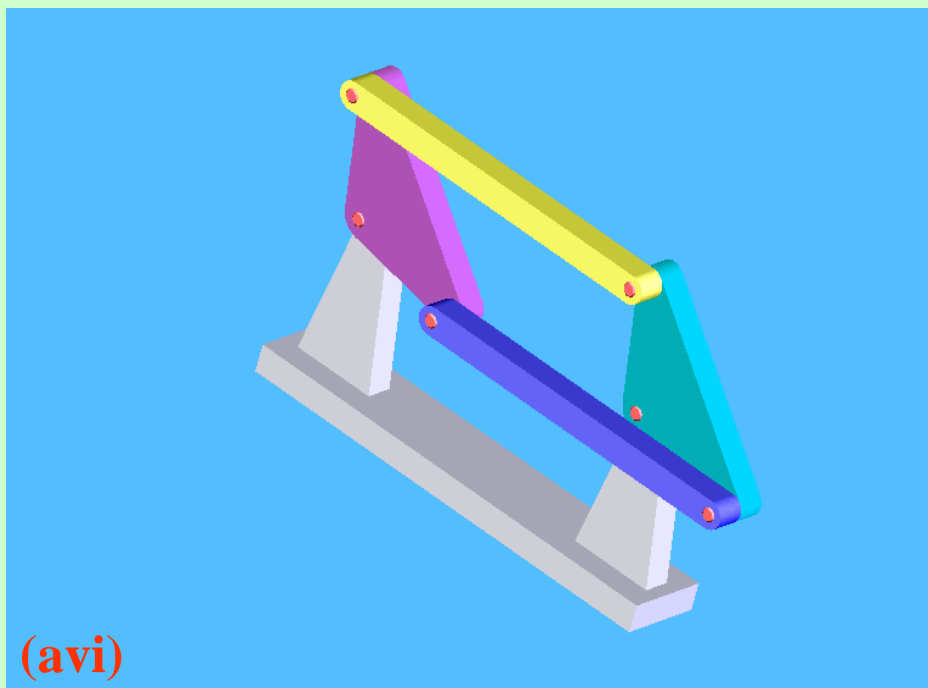
带虚约束的凸轮机构

2) 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。

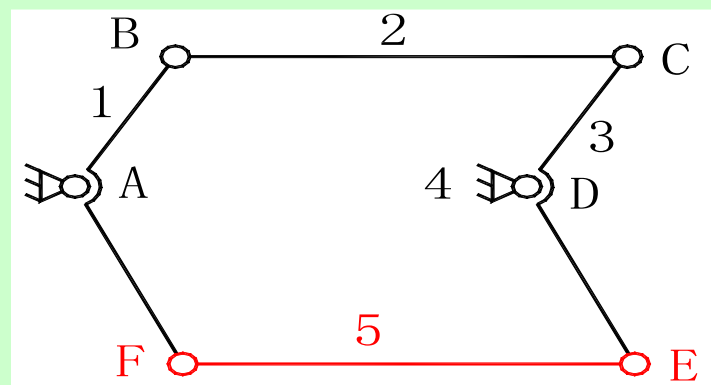


带虚约束的曲轴

3) 如果机构中两活动构件上某两点的距离始终保持不变，此时若用具有两个转动副的附加构件来连接这两个点，则将会引入一个虚约束。

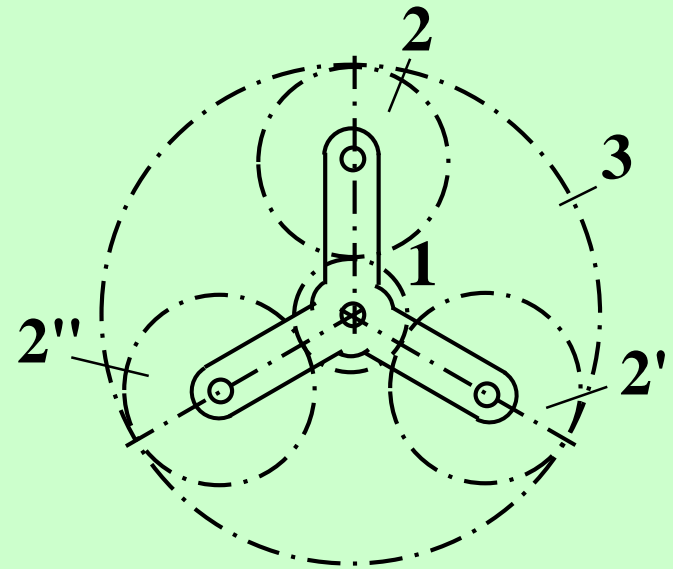
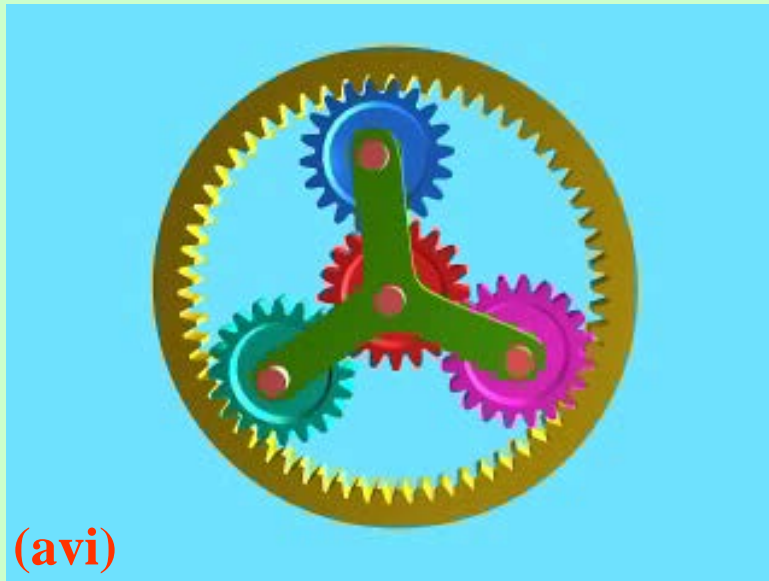


$$F = 3n - 2p - p = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0 \quad ???$$



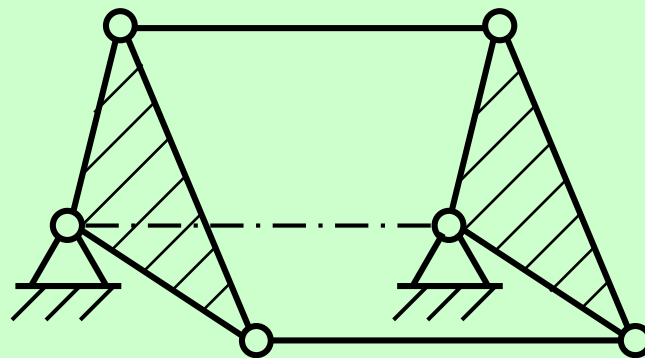
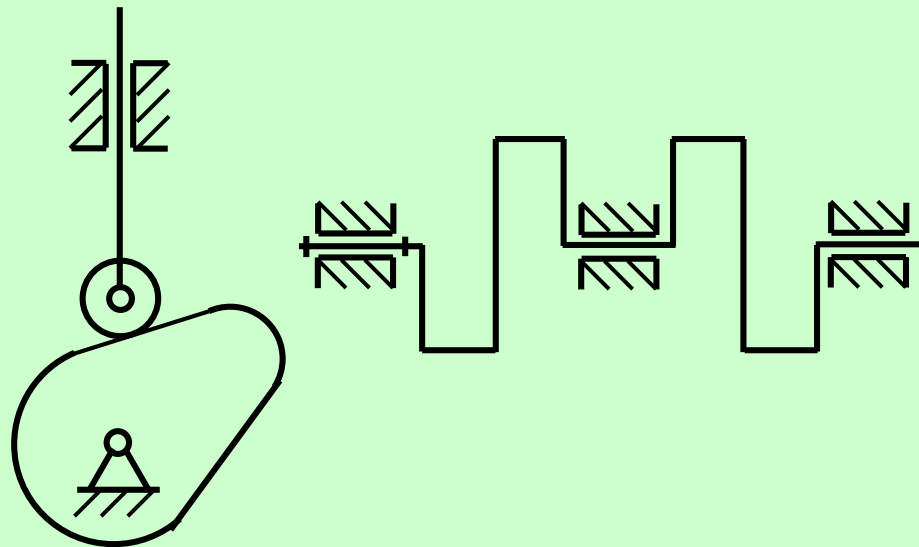
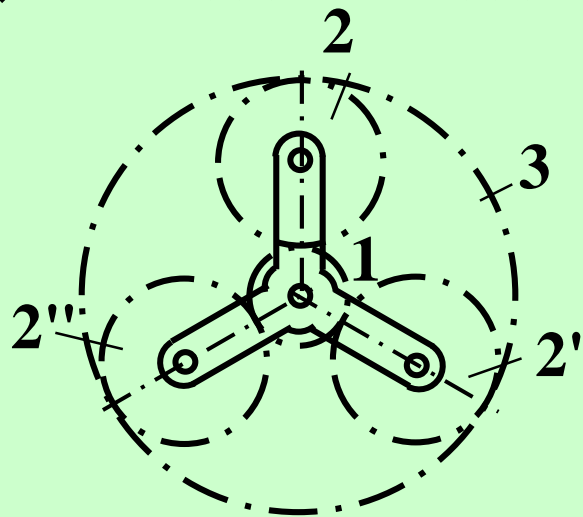
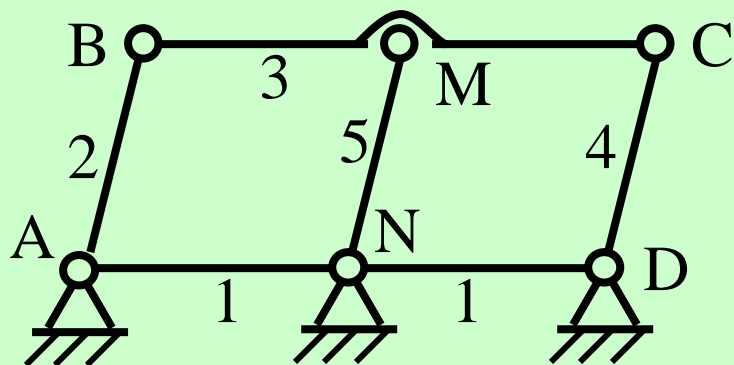
带虚约束的杆机构

4) 输入件与输出件间有多组完全相同的运动链也往往会引入虚约束。



带虚约束的行星轮系

虚约束的本质是什么？



从运动的角度看, 虚约束就是“重复的约束”或者是“多余的约束”。

机构中为什么要使用虚约束？

- a. 使受力状态更合理或增加构件的刚性
- b. 使机构平衡
- c. 考虑机构在特殊位置的运动

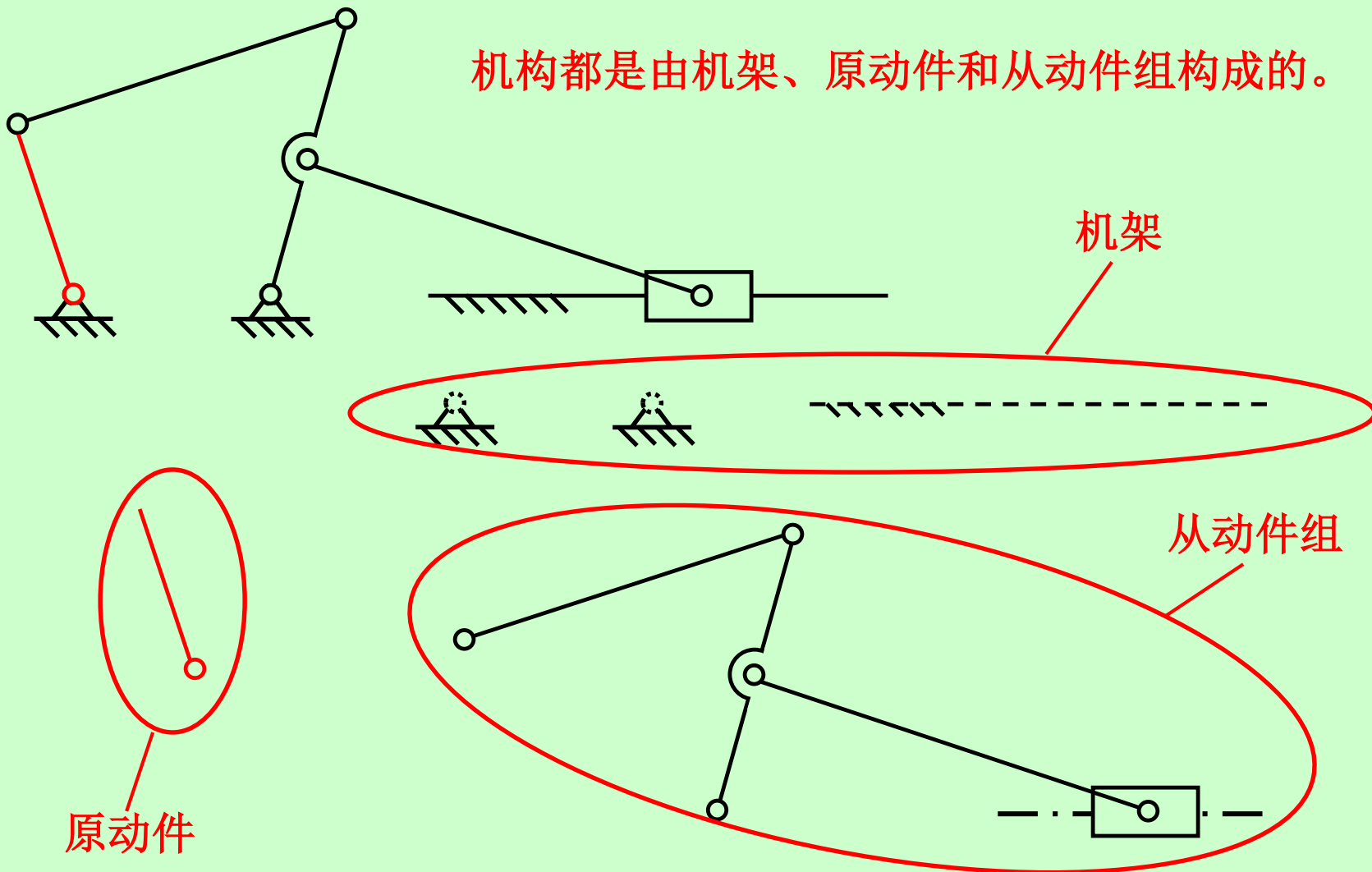
使用虚约束时要注意什么问题？

保证满足虚约束存在的几何条件，在机械设计中使用虚约束时，机械制造的精度要提高。

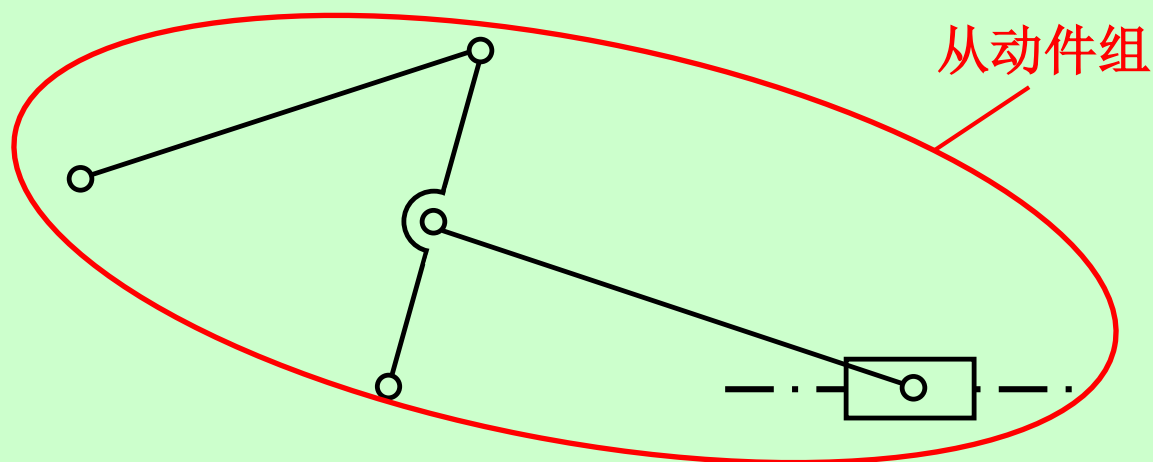
§ 1-4 平面机构的组成原理和结构分析与综合

一、平面机构的组成原理

机构都是由机架、原动件和从动件组构成的。



当把该机构的机架和原动件拆去后，则余下的从动件组为：

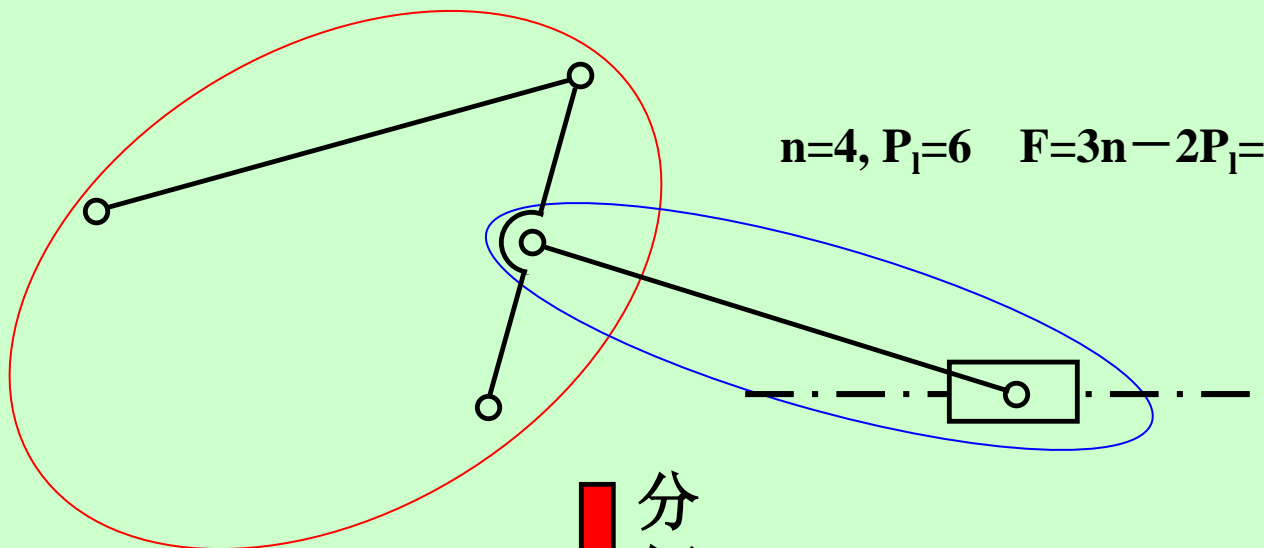


这个从动件组的自由度为零，即：

$$n = 4, P_1 = 6$$

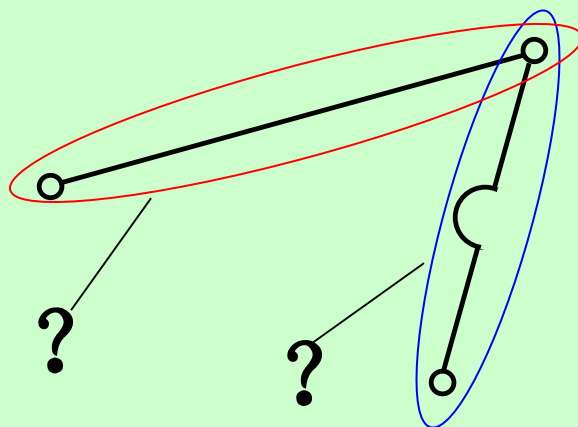
$$F = 3n - 2P_1 = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$$

这个从动件组还可以分解成若干个更简单的、自由度等于零的从动件组。

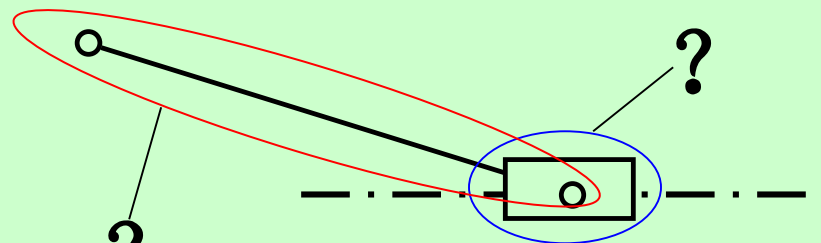


$$n=4, P_1=6 \quad F=3n-2P_1=3*4-2*6=0$$

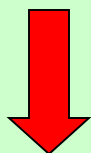
分解



$$n=2, P_1=3 \quad F=3n-2P_1=3*2-2*3=0$$



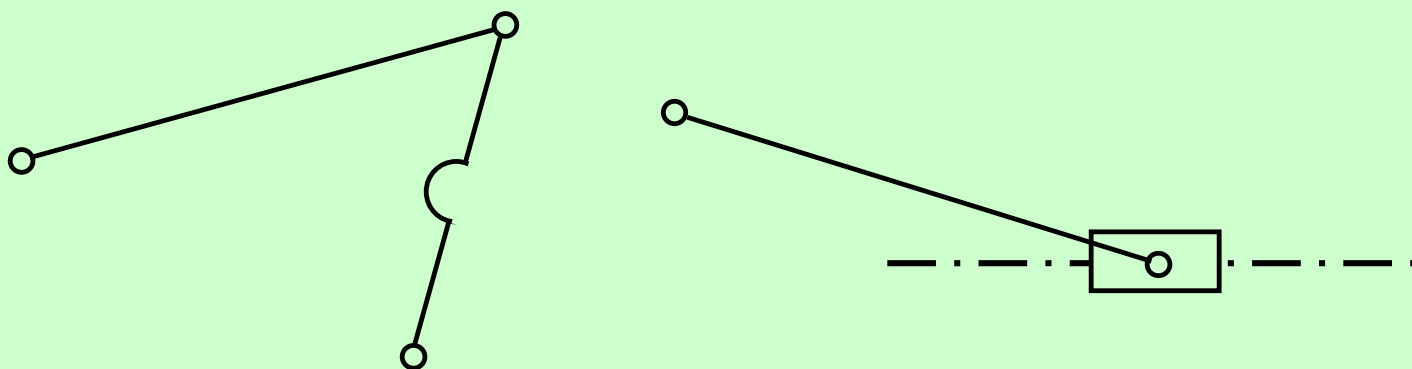
$$n=2, P_1=3 \quad F=3n-2P_1=3*2-2*3=0$$



还能进一步分解吗？



还能进一步分解吗？



这样的从动件组已经不能进一步分解成更简单、自由度为零的从动件组。

通常把这样的从动件组称为：**基本杆组**

基本杆组的概念非常重要，它是机构分析的重要的理论基础。

机构的组成原理：任何机构都可以看作是由若干个基本杆组依次连接于原动件和机架上所组成的。

二、基本杆组的类型

如果基本杆组的运动副全为低副，则基本杆组自由度的计算公式为：

$$F=3n-2P_l=0 \quad \longrightarrow \quad n=2P_l/3$$

由于活动构件数 n 和低副数 P_l 都必须是整数，所以 n 应是 2 的倍数， P_l 应是 3 的倍数。

也就是说，在一个基本杆组中，其构件数和低副数有以下关系：

$$n=2, P_l=3$$

$$n=4, P_l=6$$

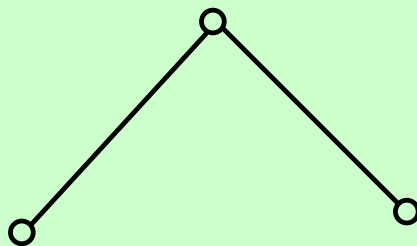
$$n=6, P_l=9$$

最简单的平面基本杆组是由两个构件三个低副组成的杆组，称之为Ⅱ级杆组。

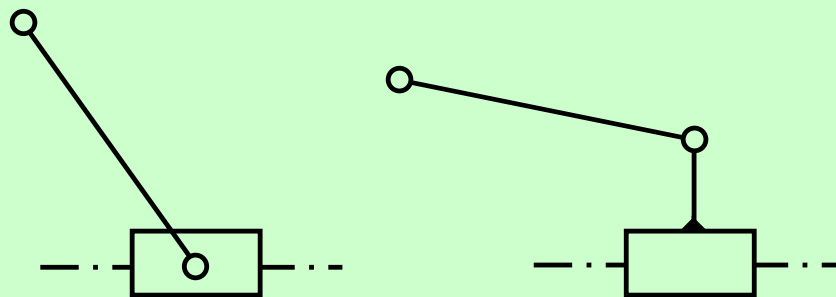
Ⅱ级杆组是机构中最常见的一类基本杆组。

Ⅱ级杆组有以下五种形式：

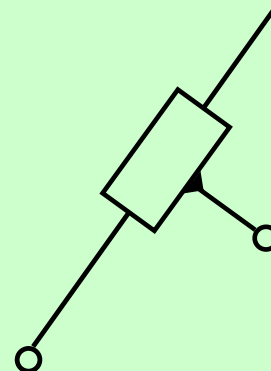
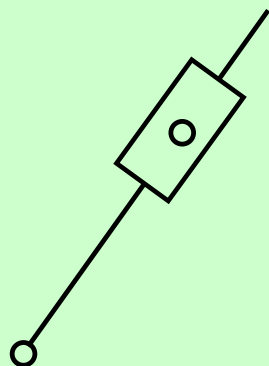
(1) RRR杆组



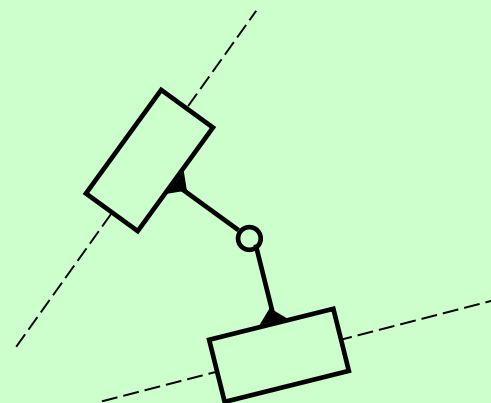
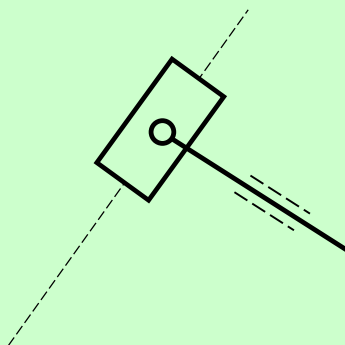
(2) RRP杆组



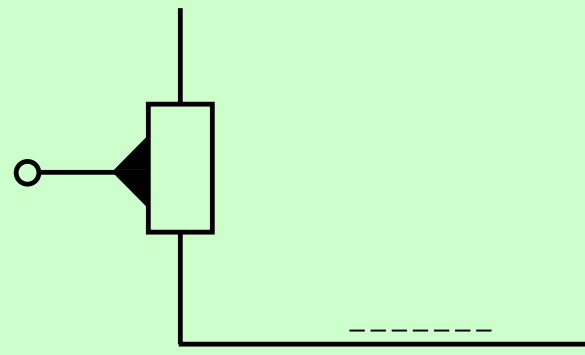
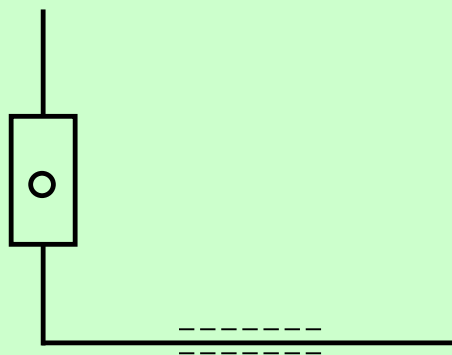
(3) RPR杆组



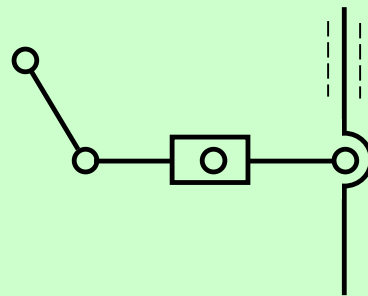
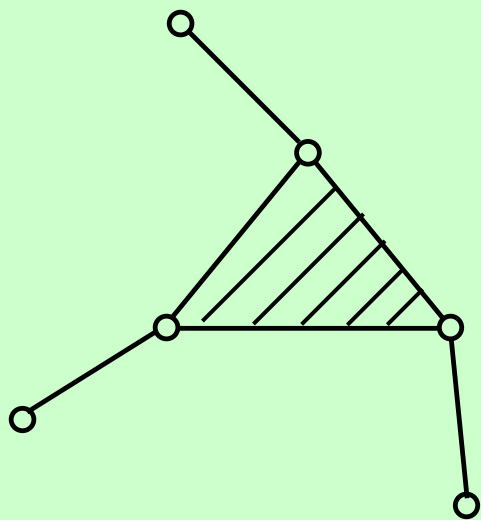
(4) PRP杆组



(5) RPP杆组

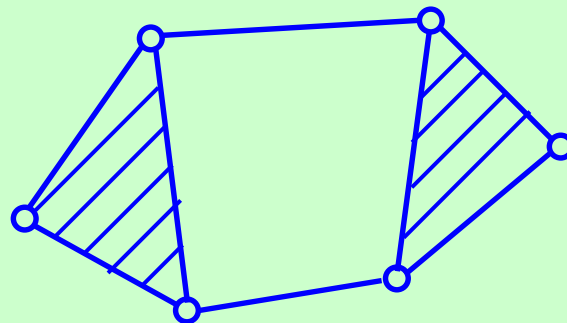


除Ⅱ级杆组外，还有Ⅲ、Ⅳ级等较高级的基本杆组。

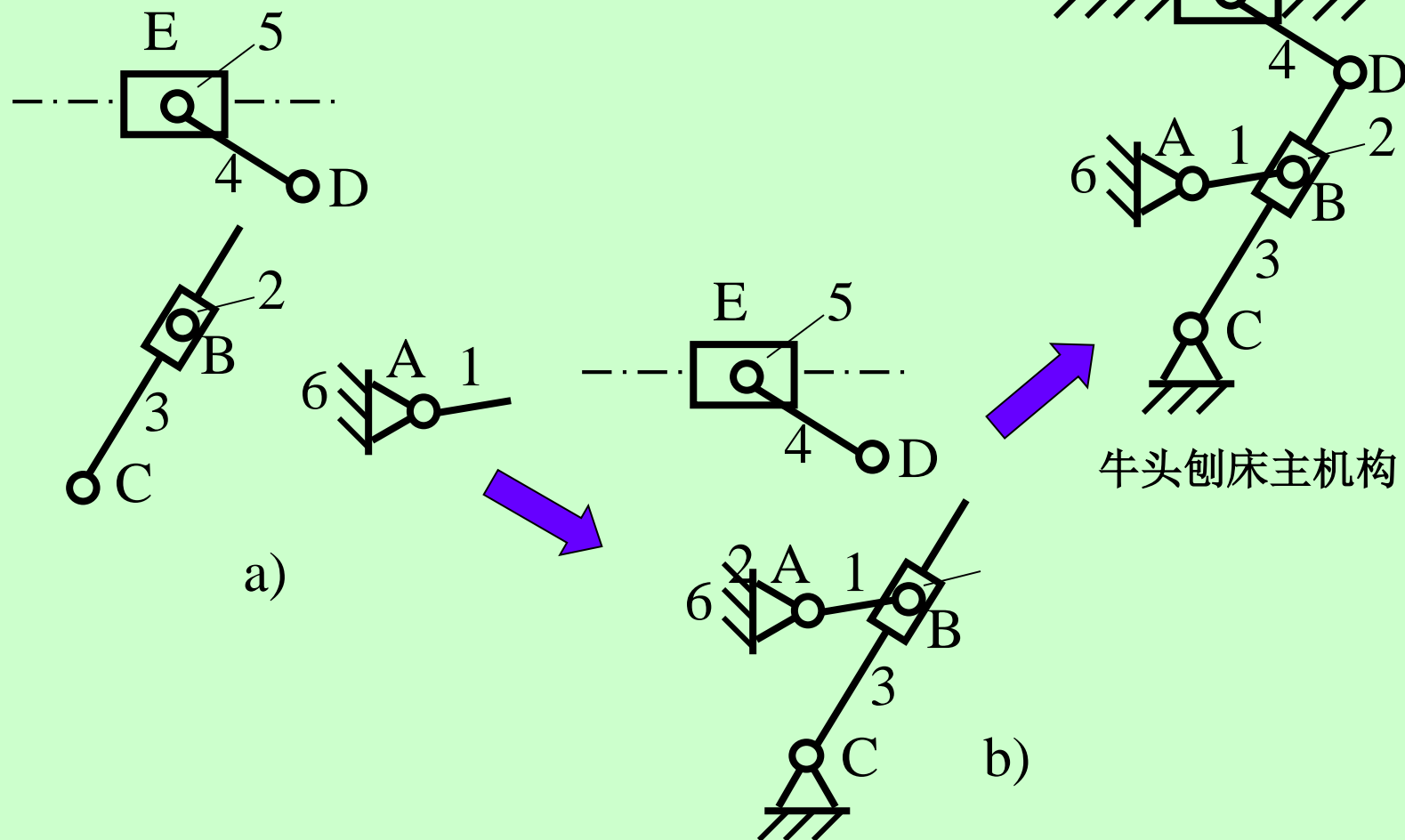


这是Ⅲ级杆组——由4个构件6个低副组成，具有一个3副构件，而每个内副所连接的分支是双副构件。

这是Ⅳ级杆组——由4个构件6个低副组成，有4个内副。



例：牛头刨床主机构的组成原理



三、平面机构的结构分析

目的：通过分析机构的组成来确定机构的级别。

机构的级别取决于该机构能够分解出的基本杆组的最高级别。

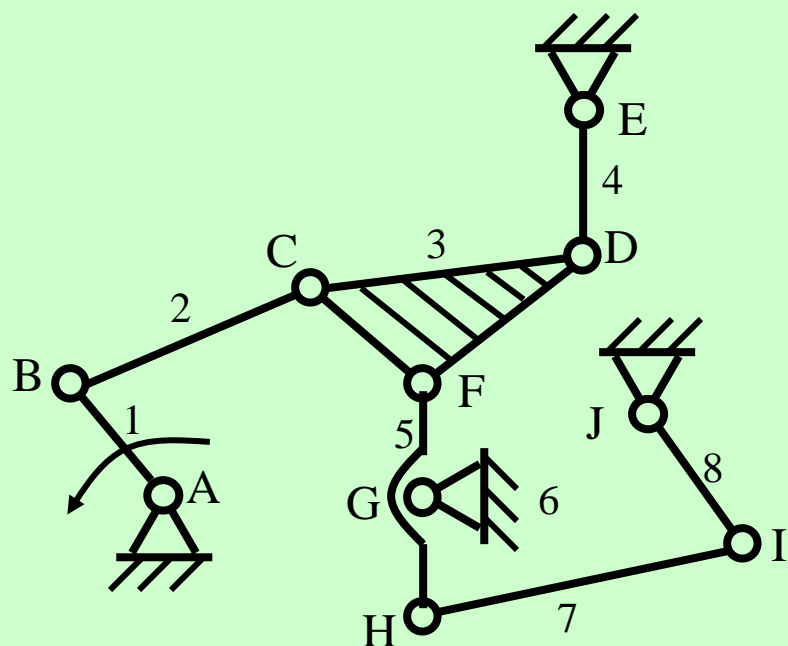
机构结构分析的步骤是：

- 1) 计算机构的自由度，确定原动件。
- 2) 从远离原动件的地方开始拆杆组。先试拆 II 级组，当不可能时再拆 III 级组。但应注意，每拆一个杆组后，剩下的部分仍组成机构，且自由度与原机构相同，直至全部杆组拆出只剩下 I 级机构。
- 3) 确定机构的级别。

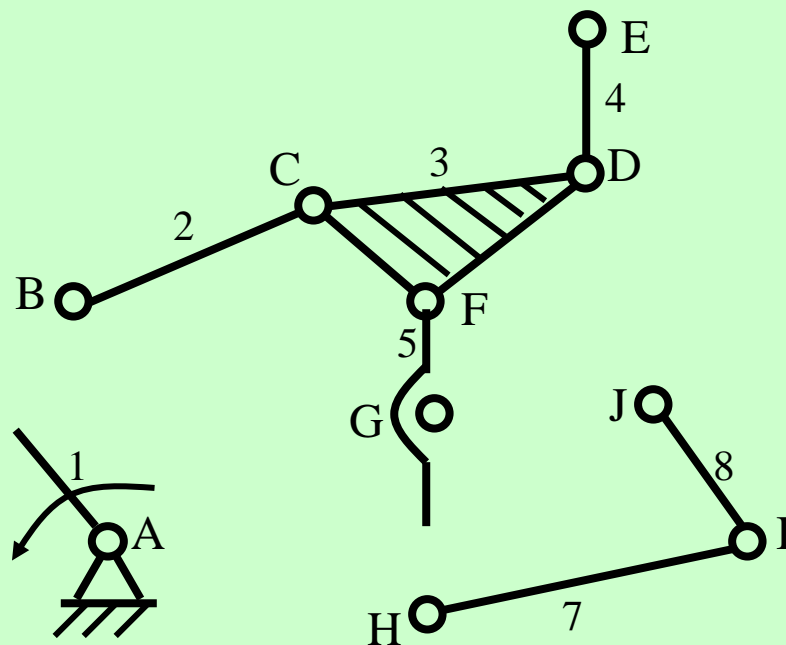
例：试确定图示机构的级别

解：1) 计算机构的自由度。 $F=3n-2p_l-p_h=3*7-2*10-0=1$ ；以构件1为原动件。

2) 进行结构分析



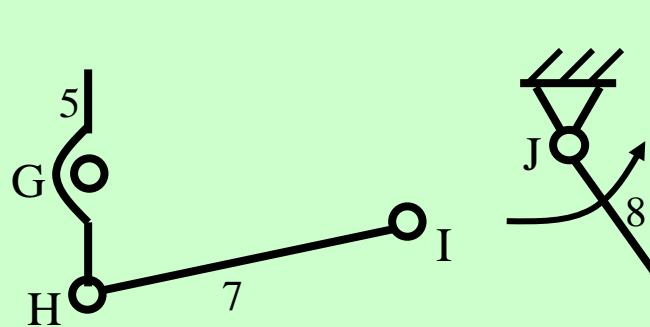
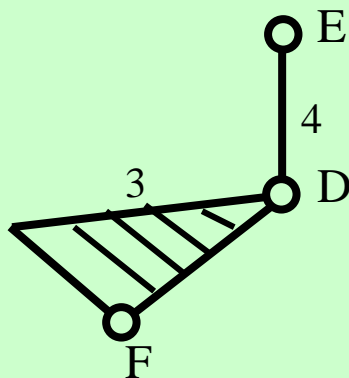
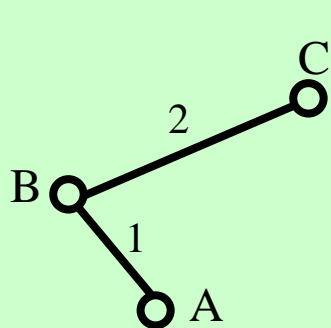
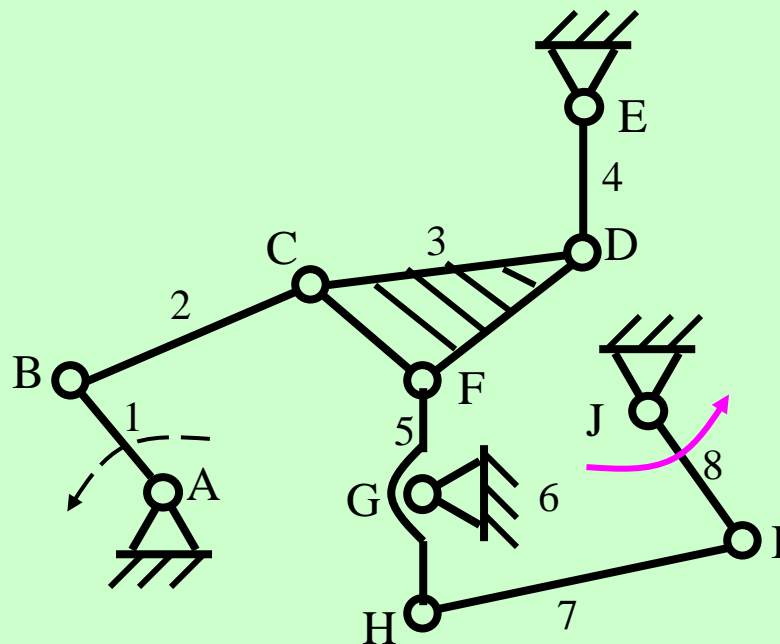
a)



b)

3) 确定机构的级别

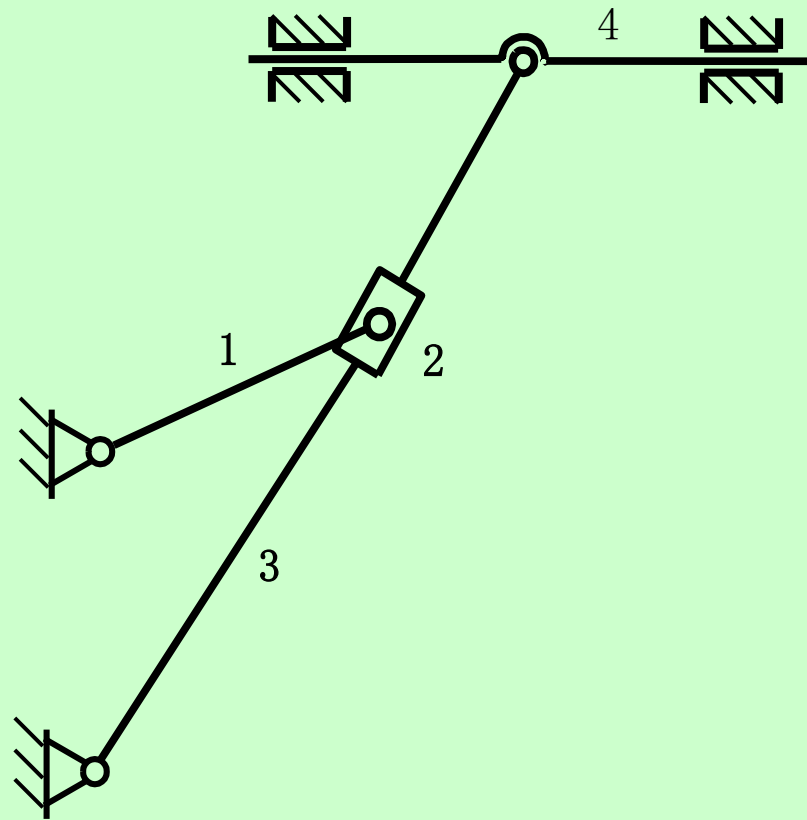
另：若将该机构的原动件由构件1改为构件8，则有



结构分析图

机构自由度计算举例

例 1 图示牛头刨床设计方案草图。设计思路为：动力由曲柄1输入，通过滑块2使摆动导杆3作往复摆动，并带动滑枕4作往复移动，以达到刨削加工目的。试问图示的构件组合是否能达到此目的？如果不能，该如何修改？



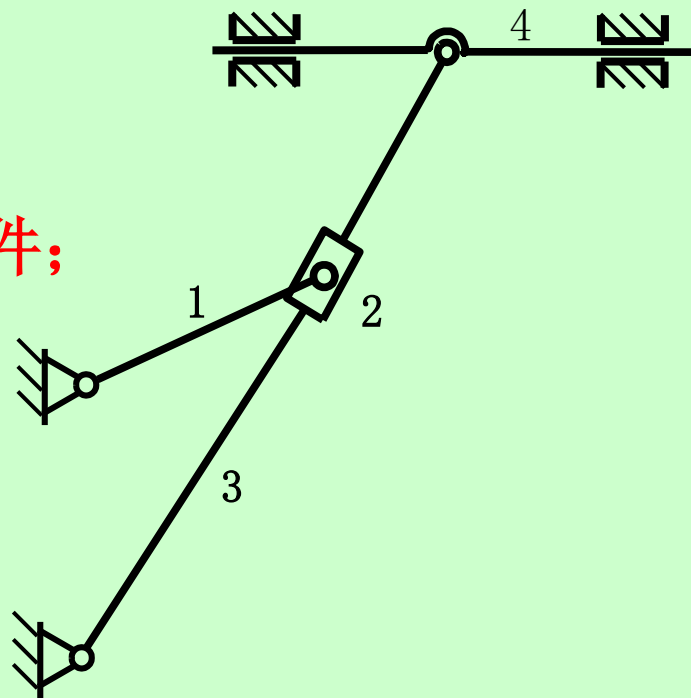
解：首先计算设计方案草图的自由度

$$F = 3n - 2P_l - P_h = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$$

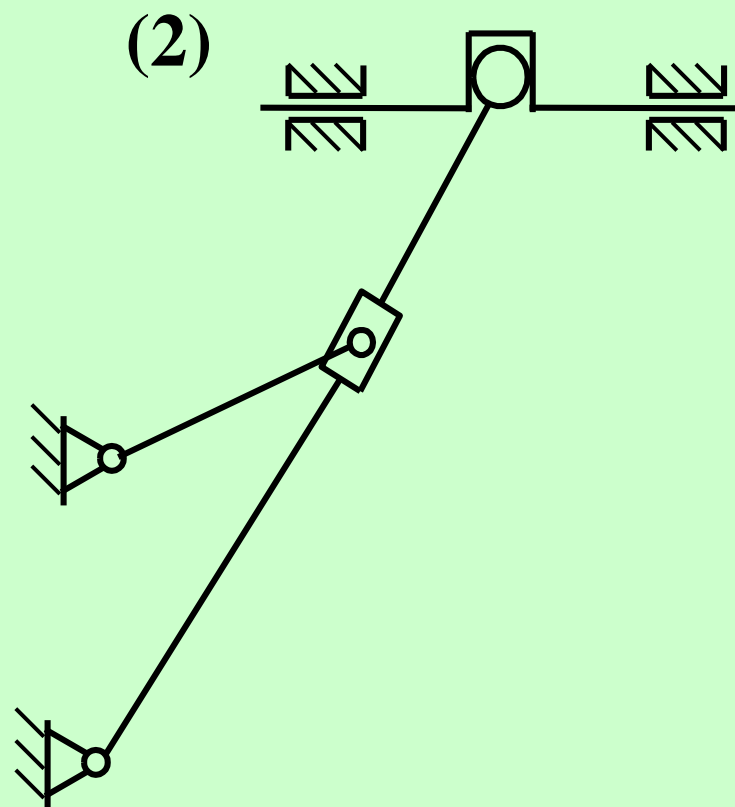
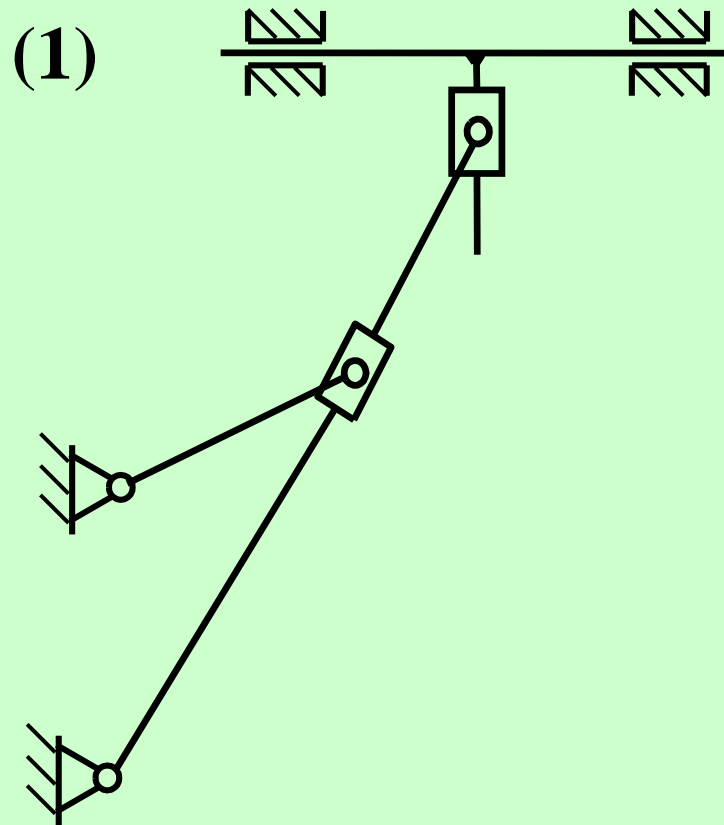
即表示如果按此方案设计机构，机构是不能运动的。必须修改，以达到设计目的。

改进措施：

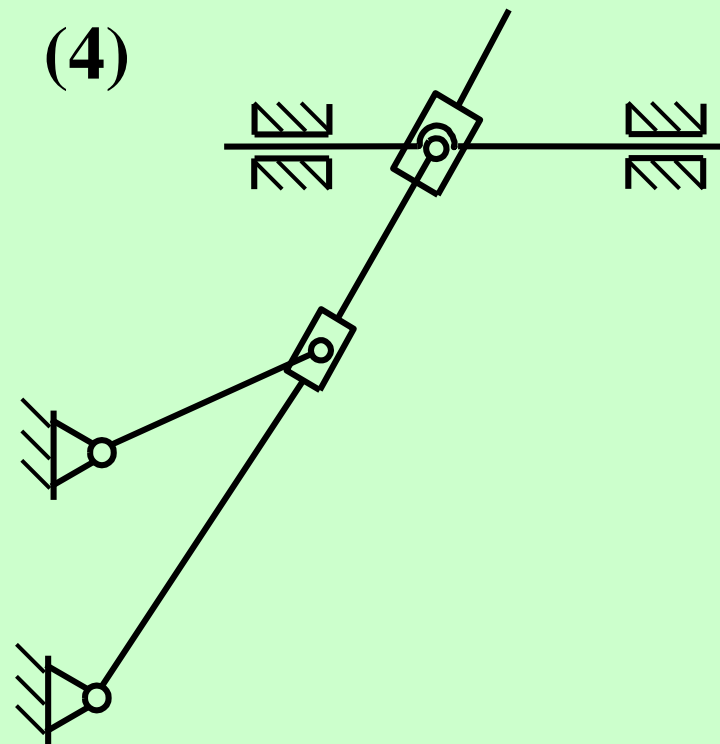
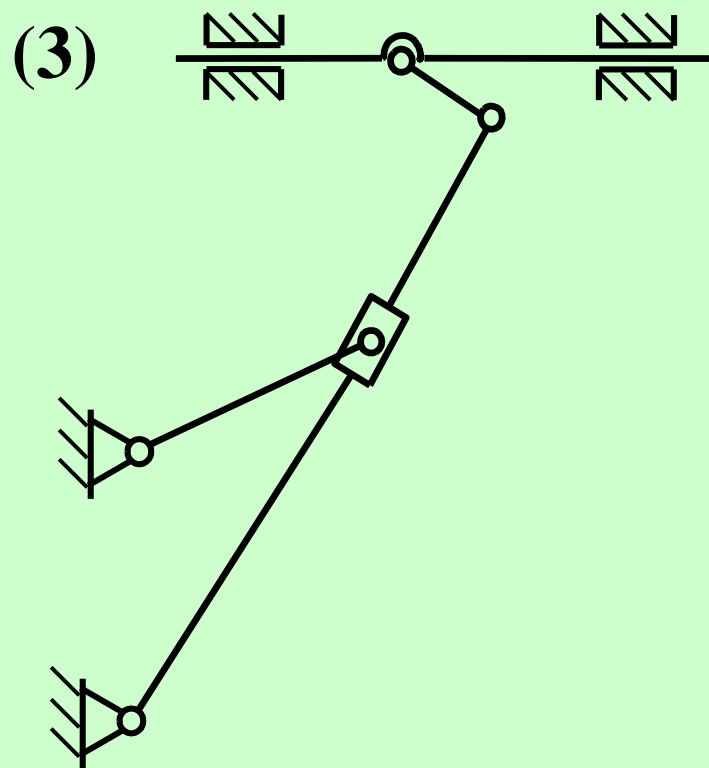
1. 增加一个低副和一个活动构件；
2. 用一个高副代替低副。



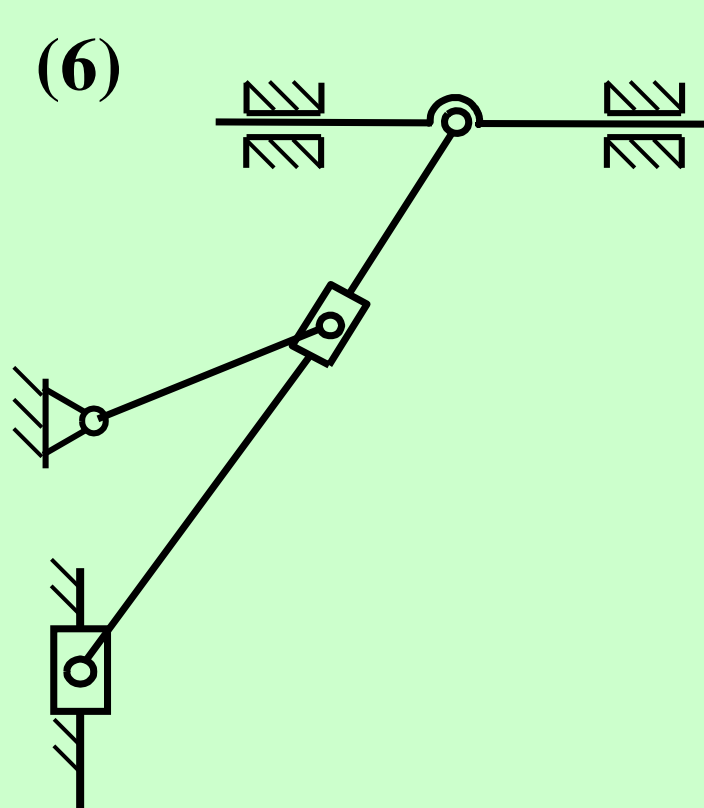
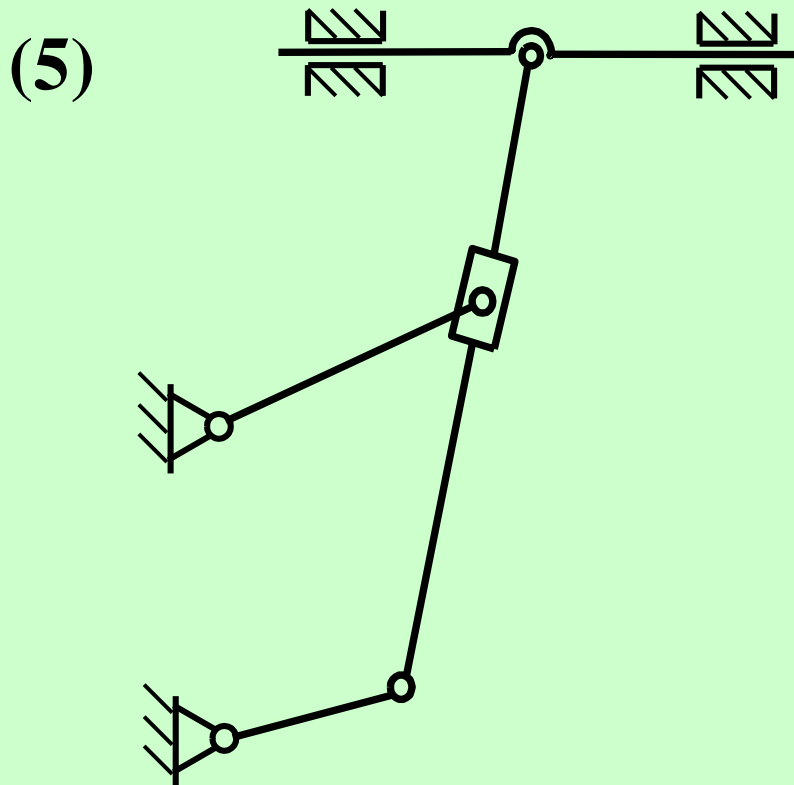
改进方案



改进方案

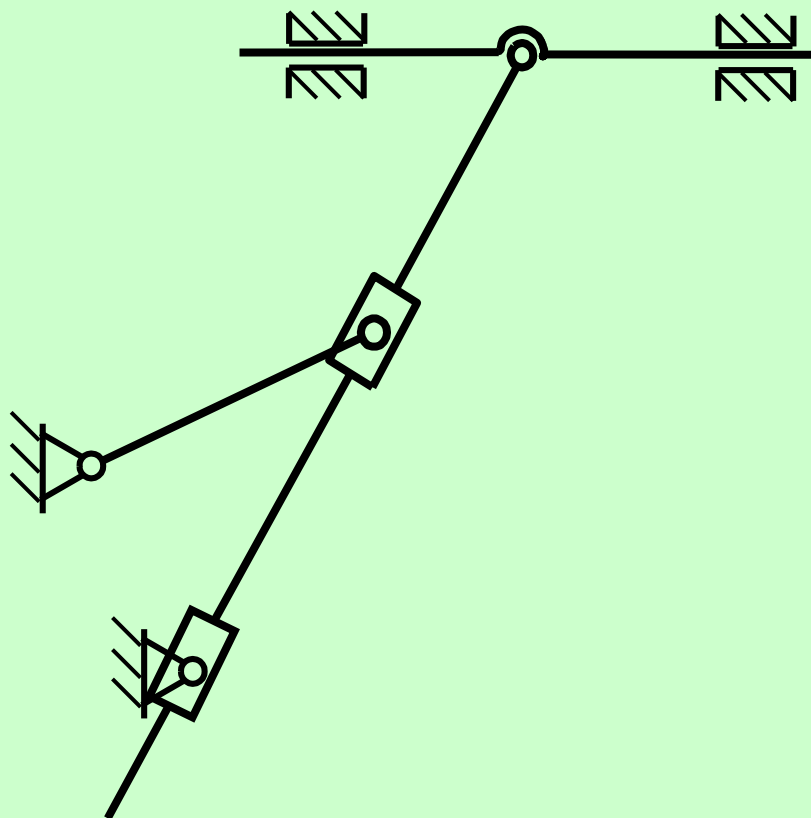


改进方案

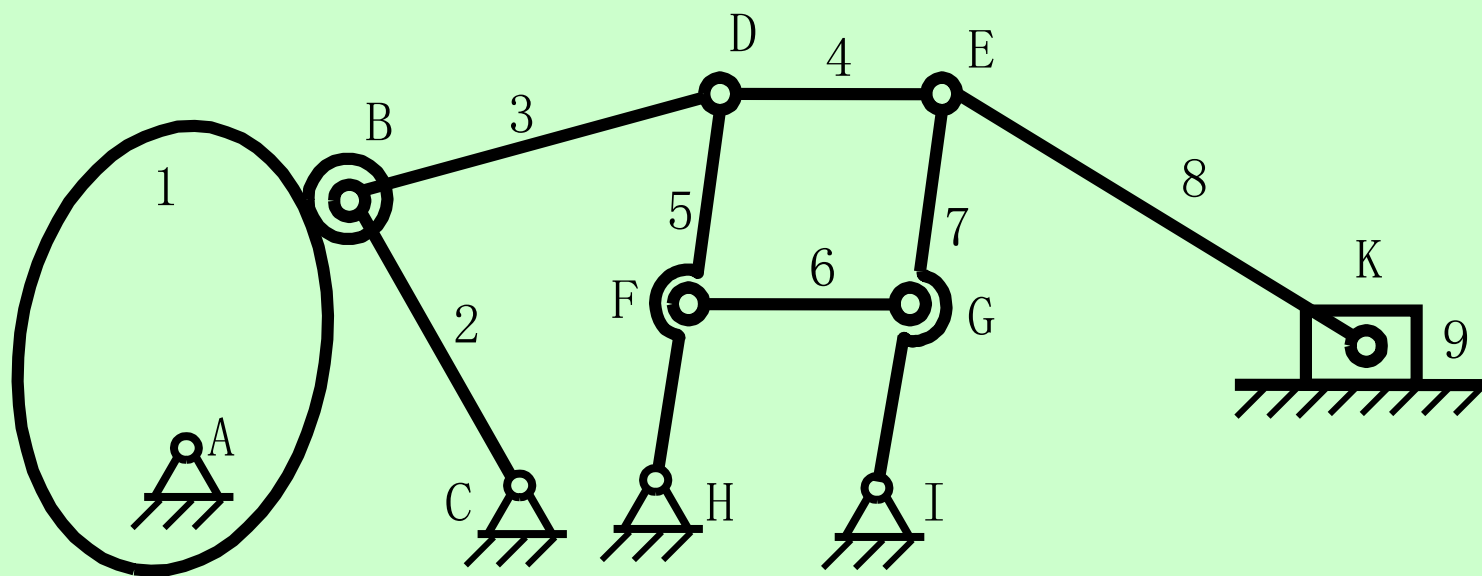


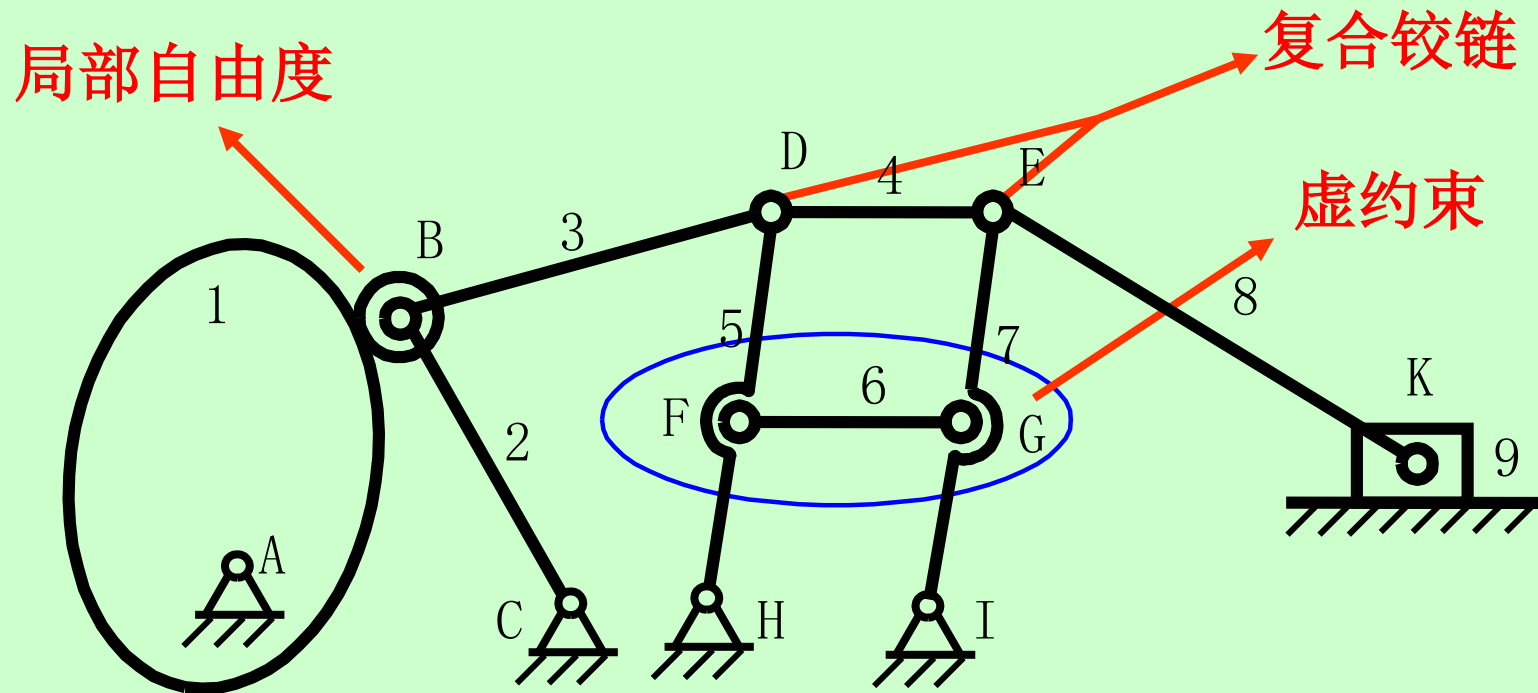
改进方案

(7)



例 2 如图所示，已知： $DE=FG=HI$ ，且相互平行；
 $DF=EG$ ，且相互平行； $DH=EI$ ，且相互平行。计算此机构
 的自由度（若存在局部自由度、复合铰链、虚约束请标出）。

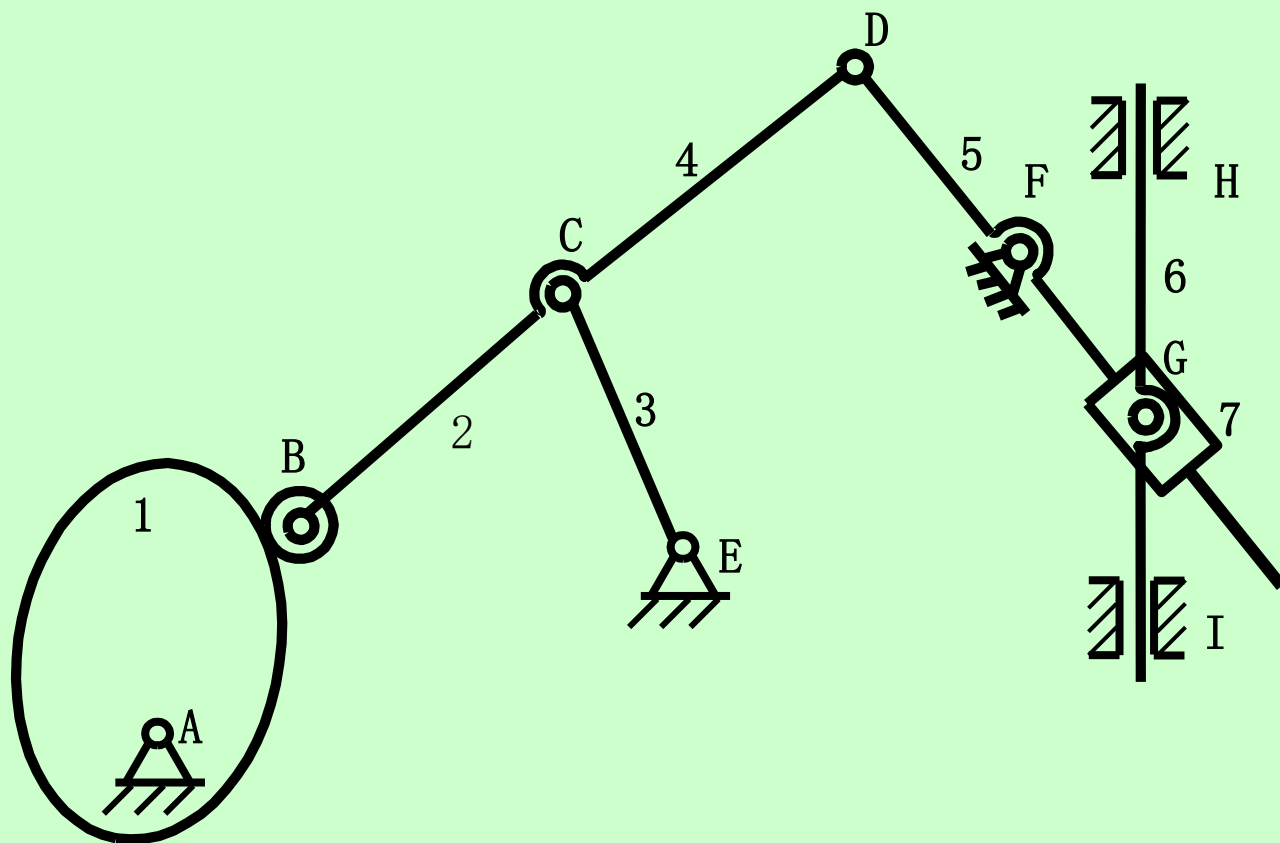


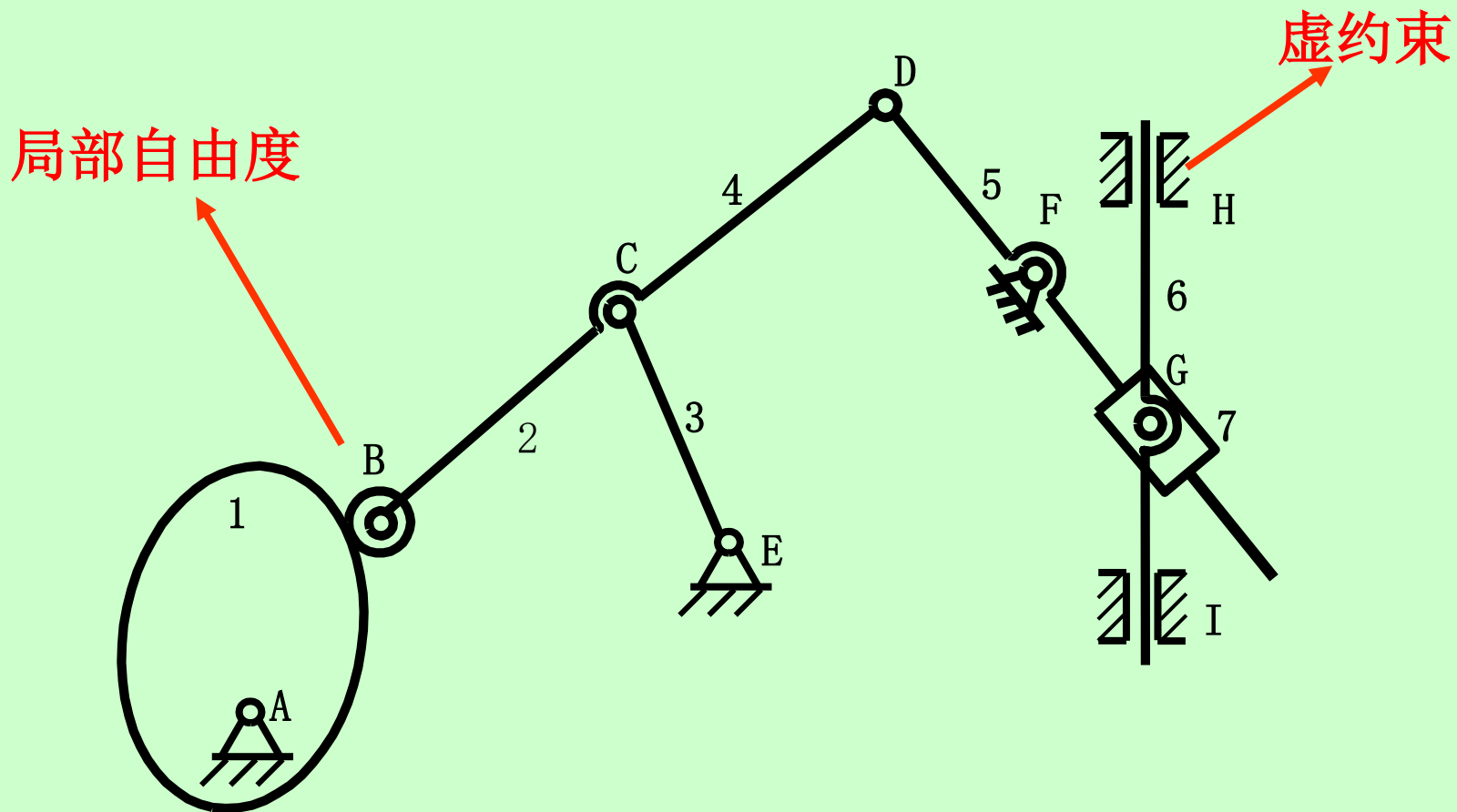


$$n=8; \quad P_l=11; \quad P_h=1$$

$$F=3n-2P_l-P_h=3 \times 8-2 \times 11-1=1$$

例 3 计算图所示机构的自由度 (若存在局部自由度、复合铰链、虚约束请标出)。

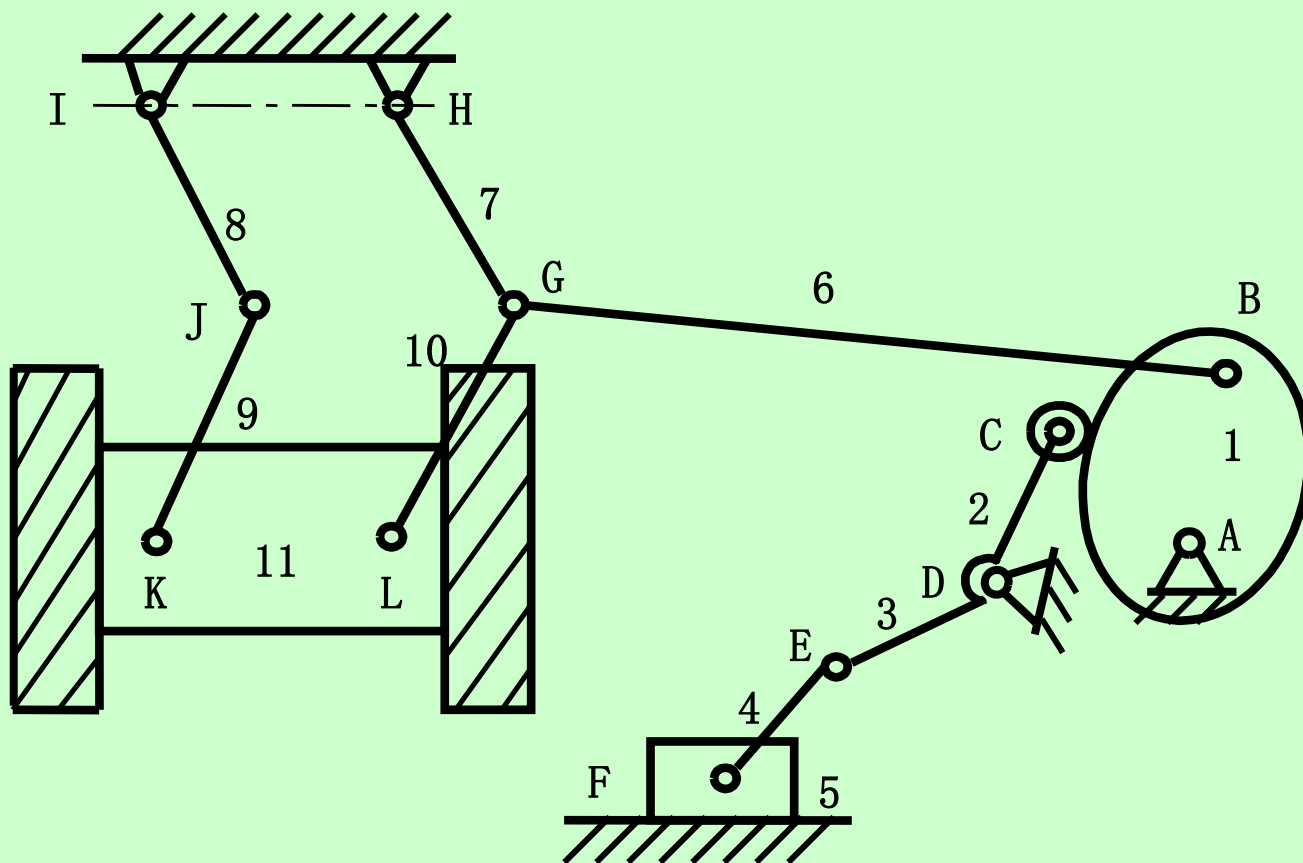


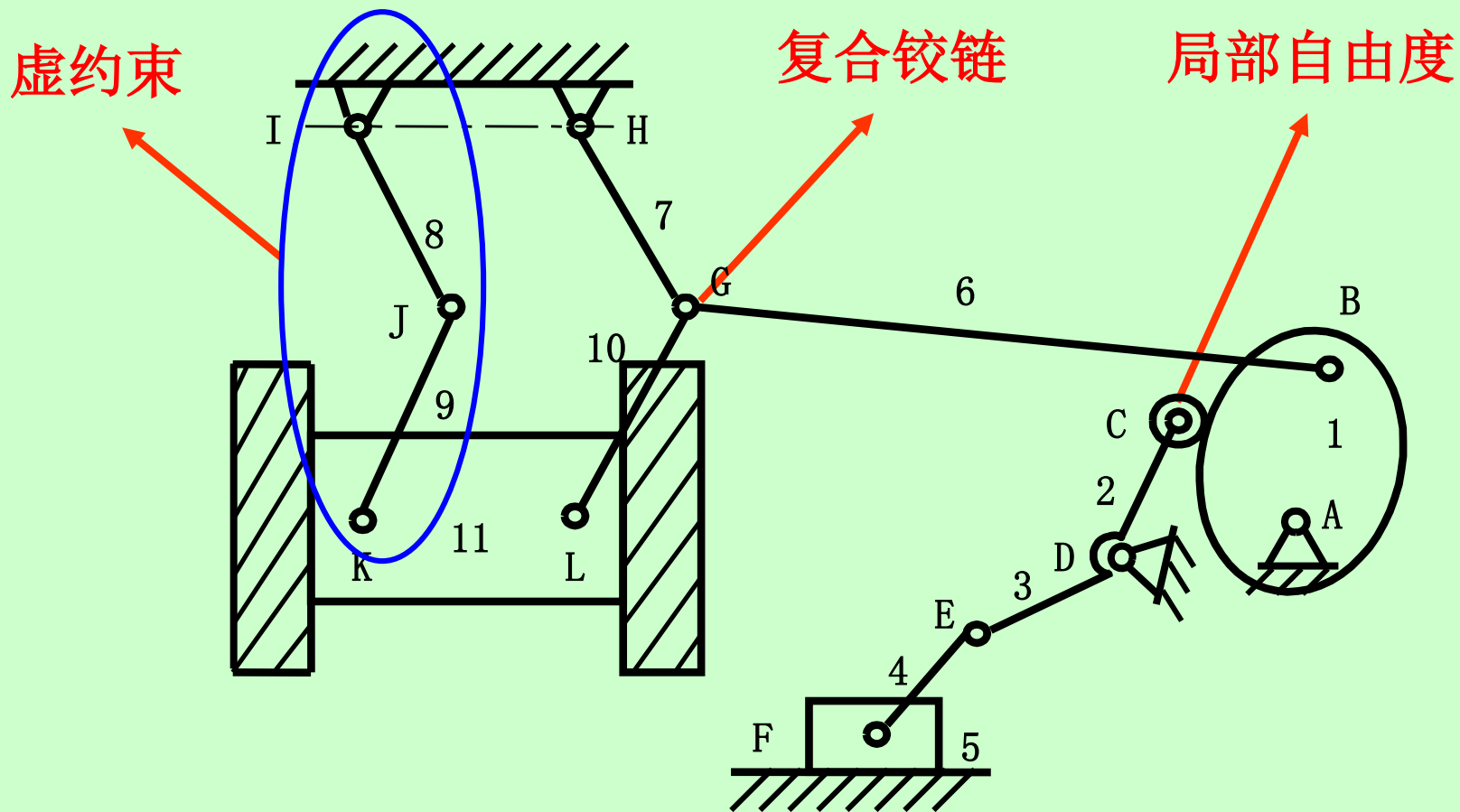


$$n=6; \quad P_l=8; \quad P_h=1$$

$$F = 3n - 2P_l - P_h = 3 \times 6 - 2 \times 8 - 1 = 1$$

例4 如图所示, 已知 $HG=IJ$, 且相互平行; $GL=JK$, 且相互平行。计算此机构的自由度 (若存在局部自由度、复合铰链、虚约束请标出)。





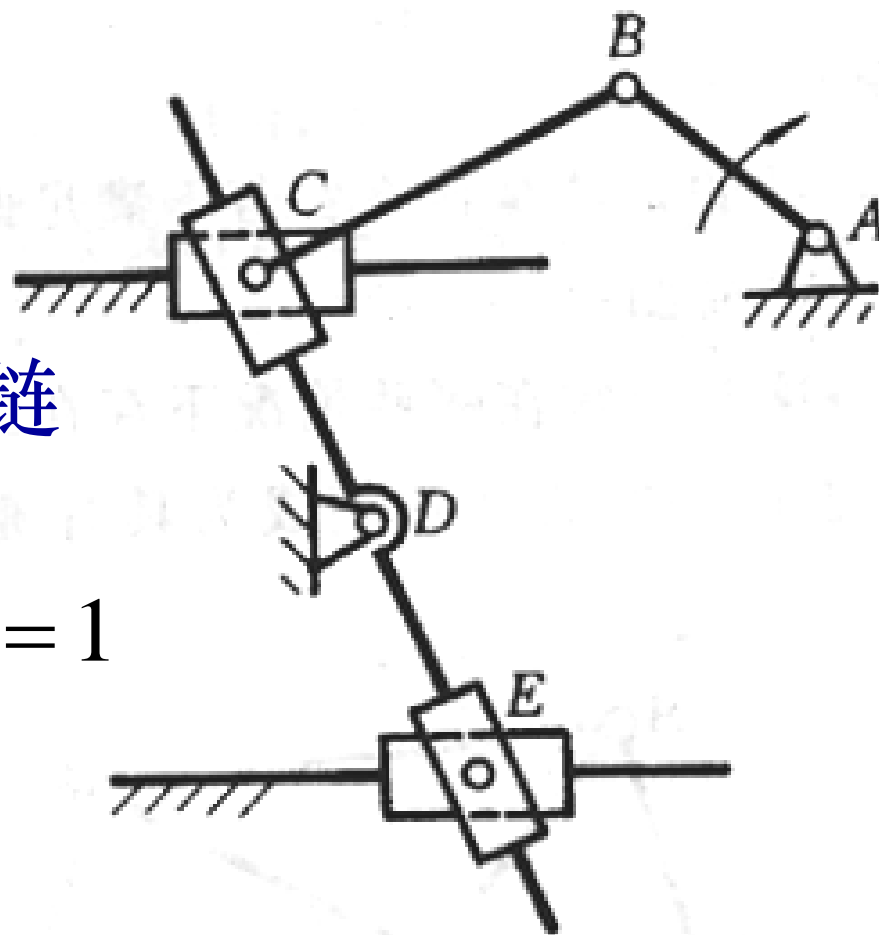
$$n=8; \quad P_l=11; \quad P_h=1$$

$$F=3n-2P_l-P_h=3\times 8-2\times 11-1=1$$

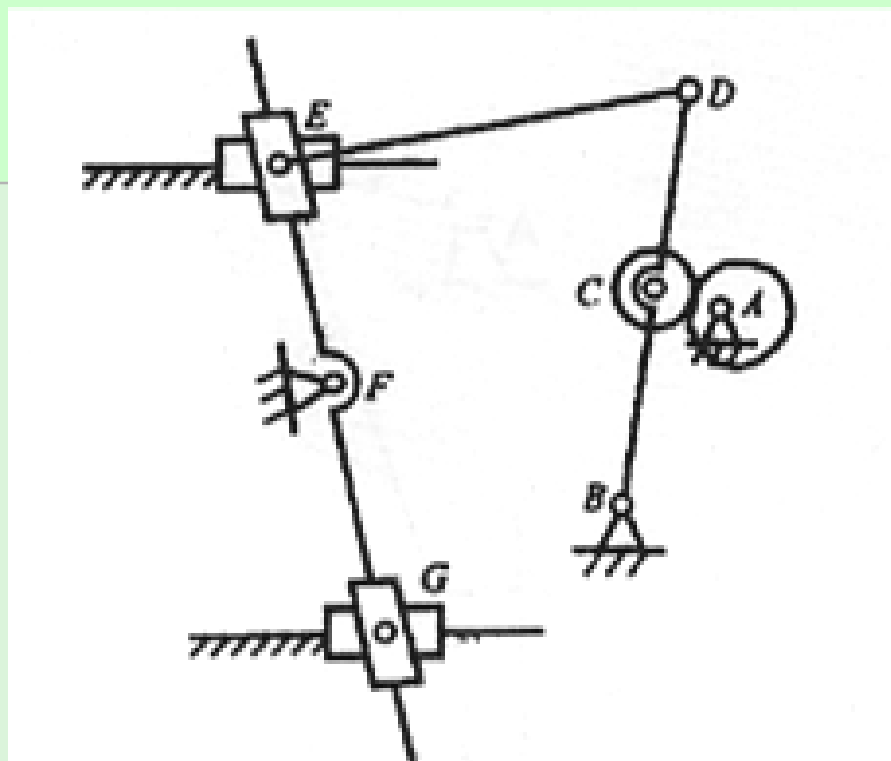
例1

解：c处——复合铰链

$$F = 3 \times 7 - 2 \times 10 = 1$$



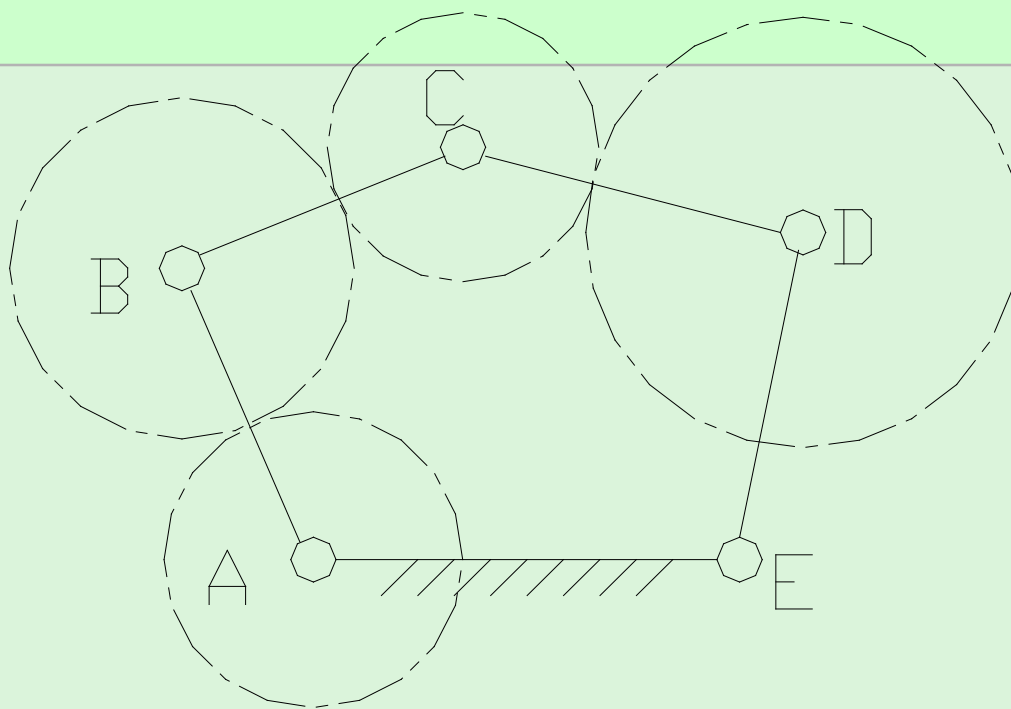
例2



解：C处—局部自由度，E处—复合铰链

$$F = 3 \times 8 - 2 \times 11 - 1 = 1$$

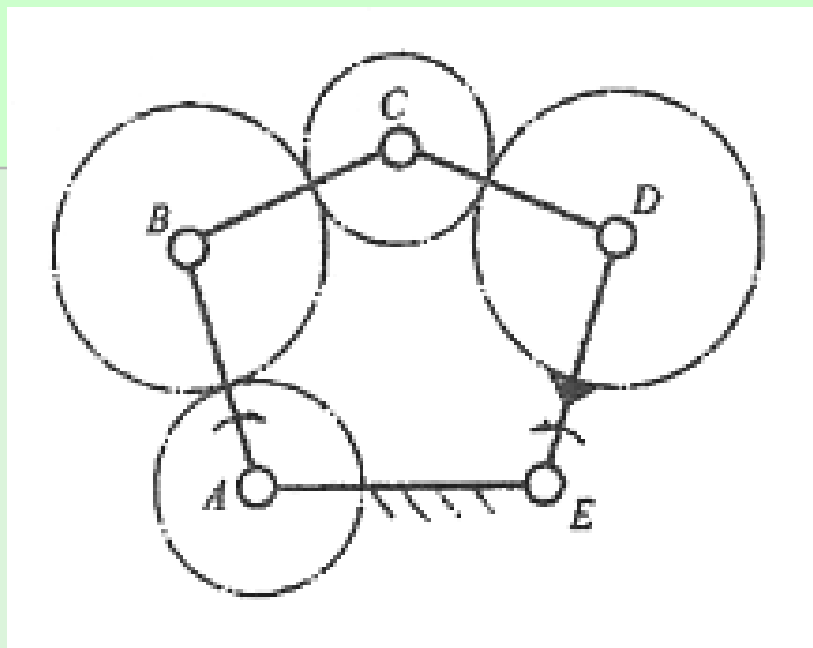
例3



解：A、B、C、D处—复合铰链

$$F = 3 \times 8 - 2 \times 9 - 3 = 3$$

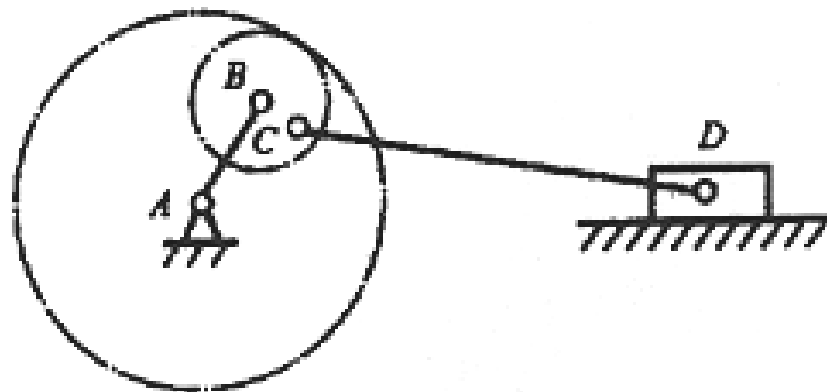
例4



解：A、B、C处—复合铰链

$$F = 3 \times 7 - 2 \times 8 - 3 = 2$$

例5



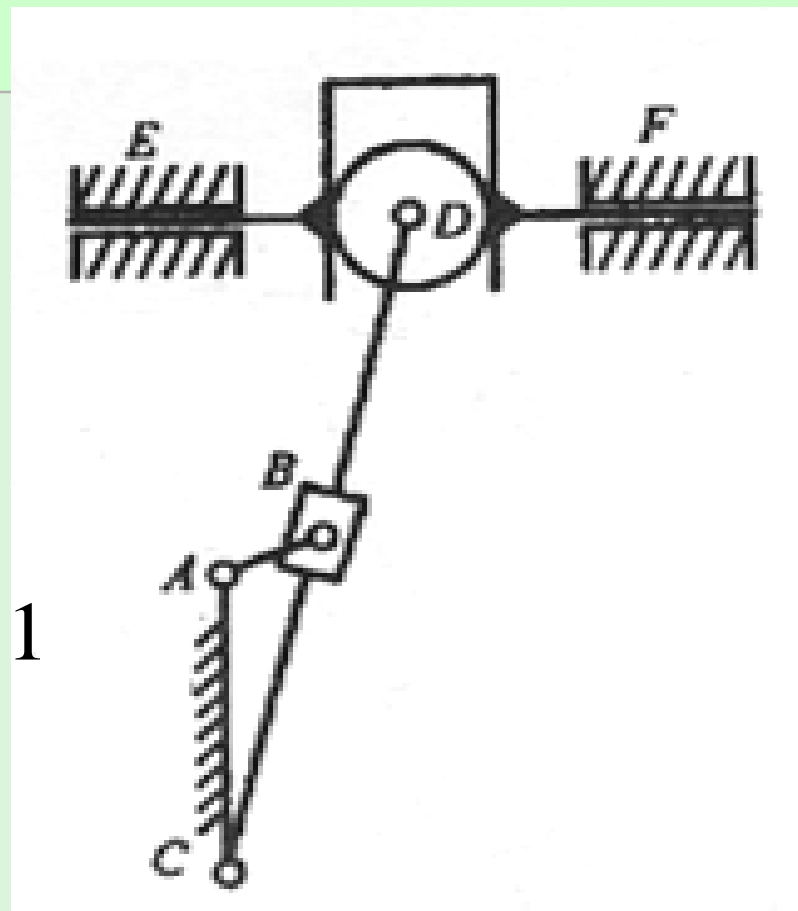
解：A——复合铰链

$$F = 3 \times 5 - 2 \times 6 - 1 = 2$$

例6

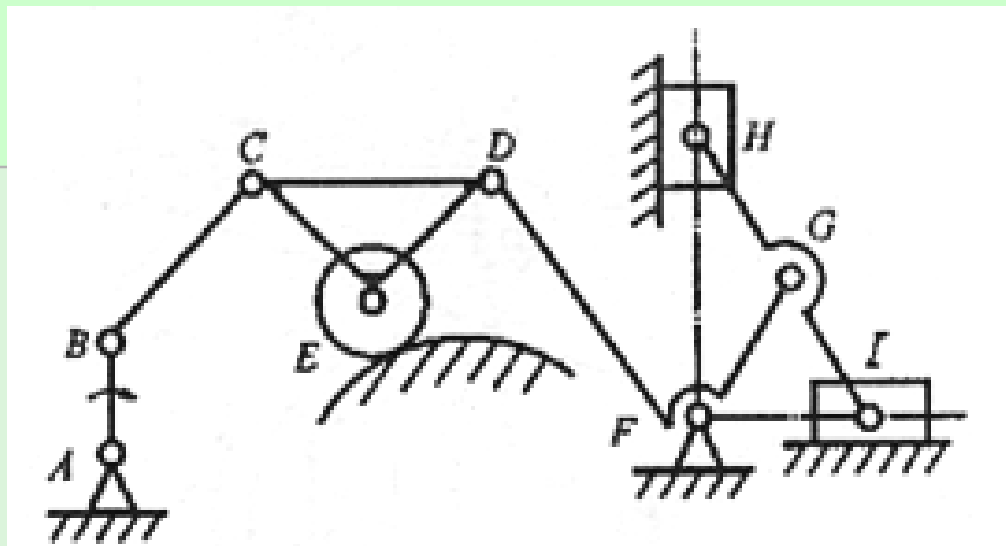
解：D—局部自由度

$$F = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 1 = 1$$



例7

$$\angle FHI = 90^\circ, L_{FG} = L_{HG} = L_{GI}$$



解：E——局部自由度

滑块H、I之一为虚约束

$$F = 3 \times 6 - 2 \times 8 - 1 = 1$$

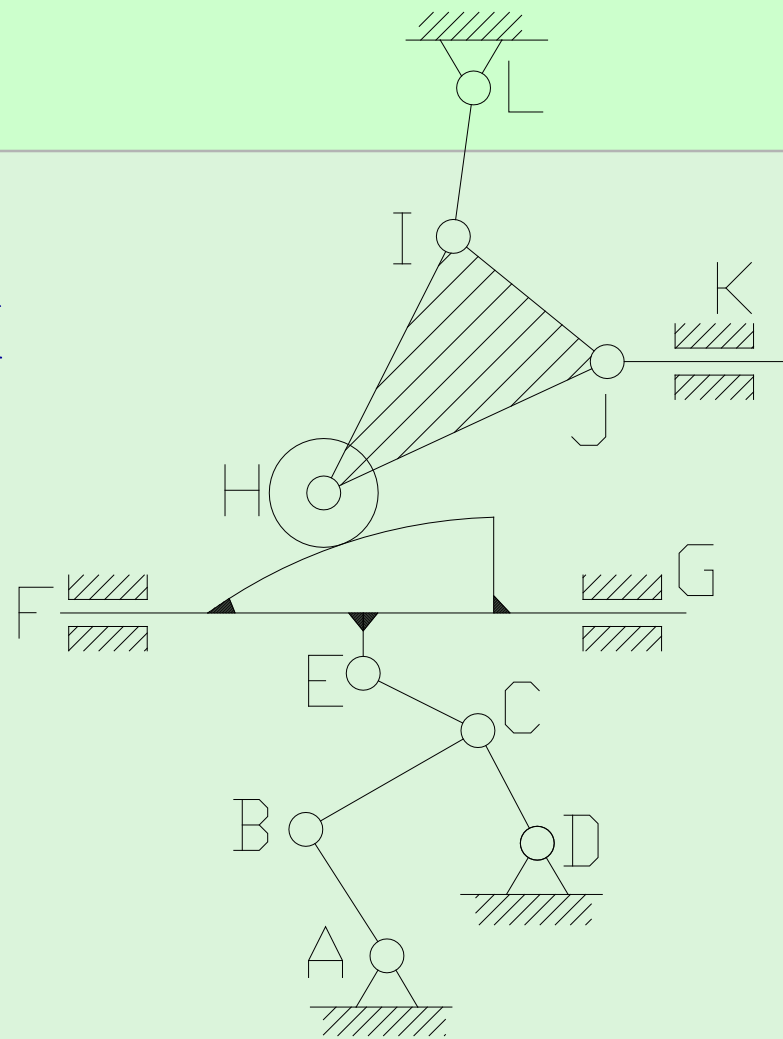
例8

解：H—局部自由度

F、G之一为虚约束

C—复合铰链

$$F = 3 \times 8 - 2 \times 11 - 1 = 1$$

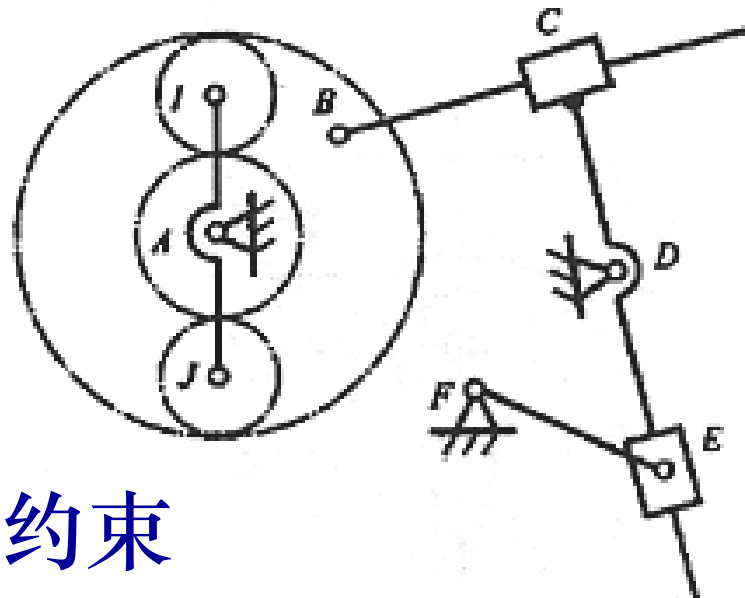


例9

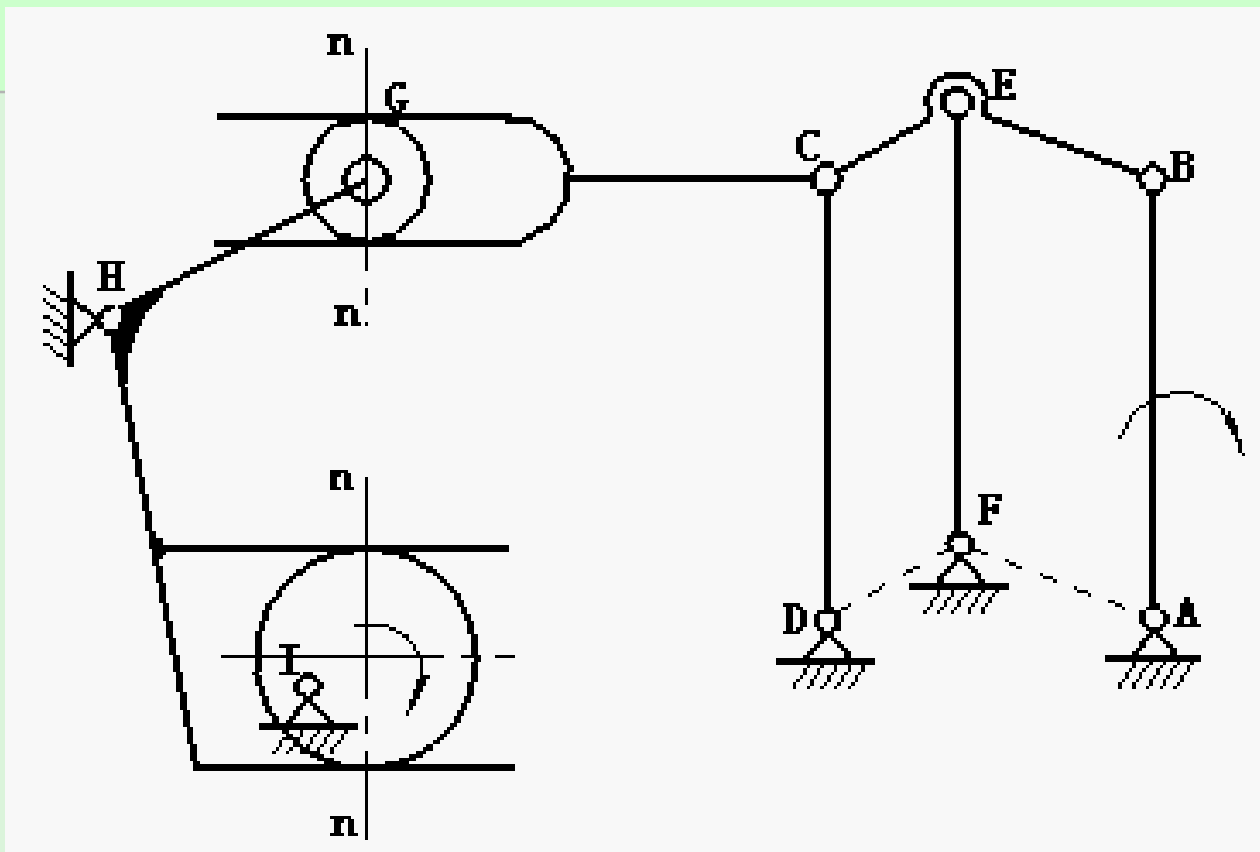
解： 齿轮I、 J之一为虚约束

A处—复合铰链

$$F = 3 \times 8 - 2 \times 10 - 2 = 2$$

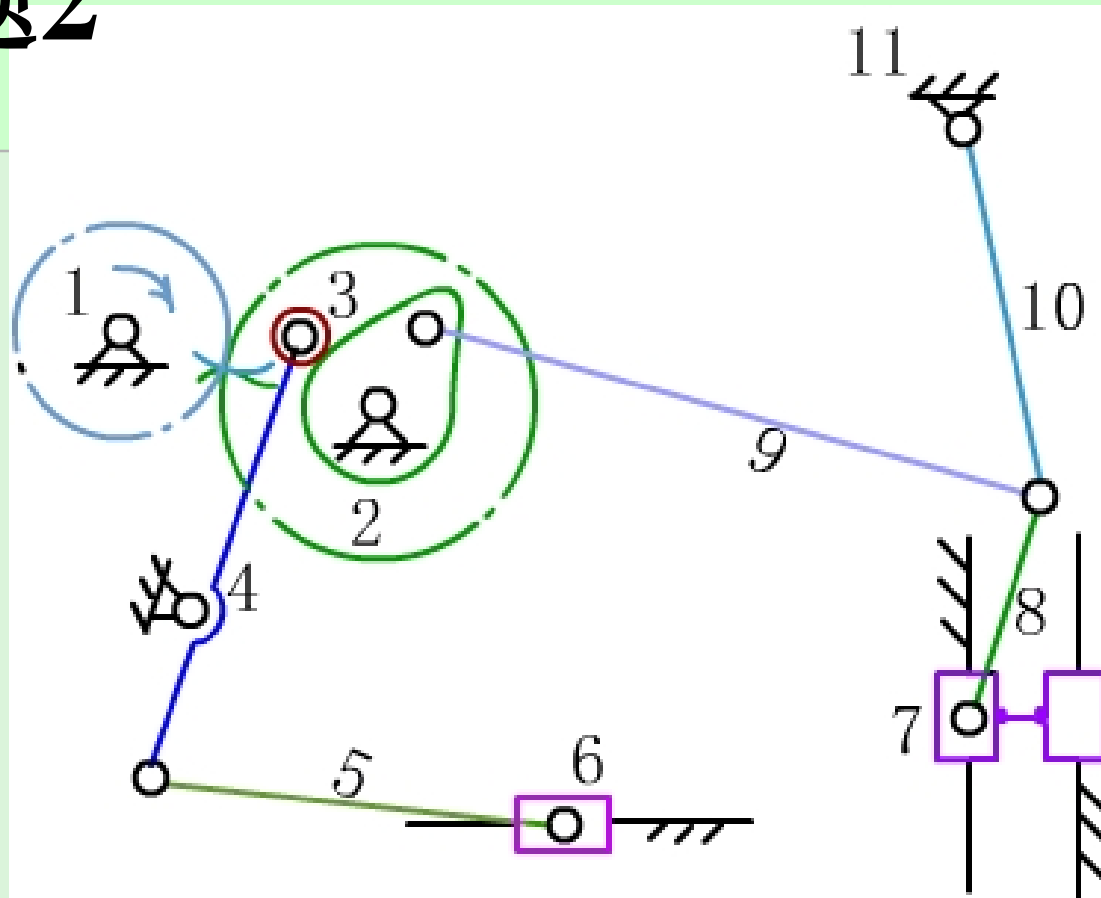


习题1



答案: $F=2$

习题2

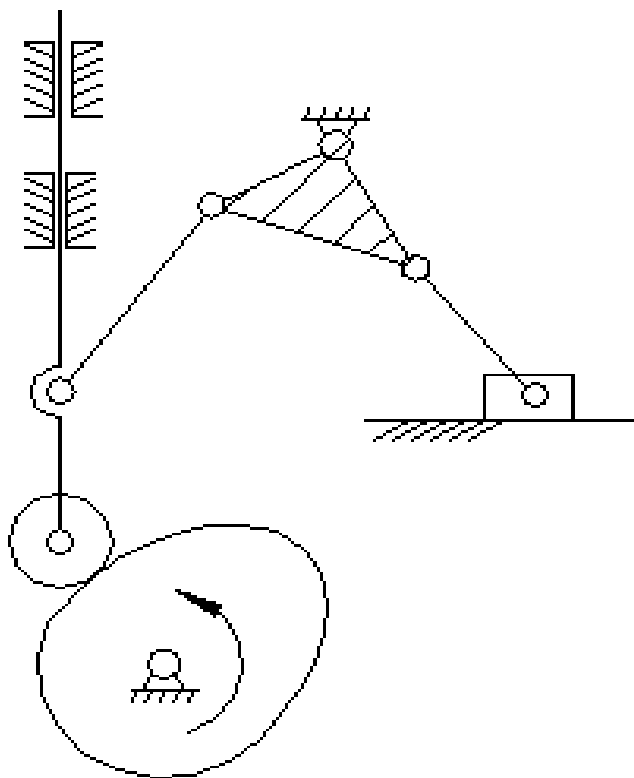


答案: $F=1$

The diagram shows a mechanism with the following components and connections:

- A horizontal bar at the top is supported by two fixed pivots (indicated by hatched areas).
- A slider block is connected to the left end of the horizontal bar by a vertical link. The block can move vertically along the bar.
- A link connects the slider block to a joint at the bottom left.
- A link connects the bottom left joint to a fixed pivot at the bottom left.
- A link connects the bottom left joint to a joint on a rotating link.
- The rotating link is pivoted at its center to a fixed pivot (indicated by a hatched area and a curved arrow showing rotation).
- A link connects the rotating link to a joint on a vertical link.
- The vertical link is pivoted at its bottom to a fixed pivot (indicated by a hatched area).
- A link connects the top of the vertical link to a joint on the horizontal bar.

习题4



答案: $F=1$

作业:

题1-5至1-12、题1-13、1-14

本章結束