



第二章 机构的结构分析

徐鹏

哈尔滨工业大学(深圳)



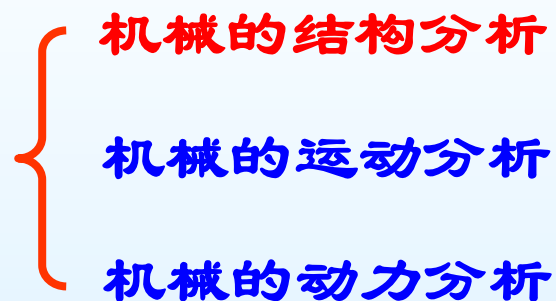
本章重点内容：

- 1、机构简图的绘制
- 2、自由度的计算
- 3、机构的组成原理

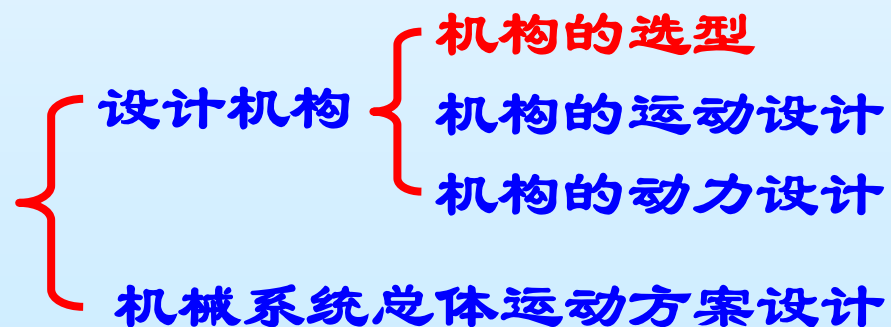


本章内容的作用：

一、分析已有的机械



二、设计新的机械





§ 2-1 结构分析的基本内容

1. 研究机构的组成要素及机构运动简图的绘制
2. 研究机构的自由度计算及机构具有确定运动的条件
3. 研究机构的组成原理

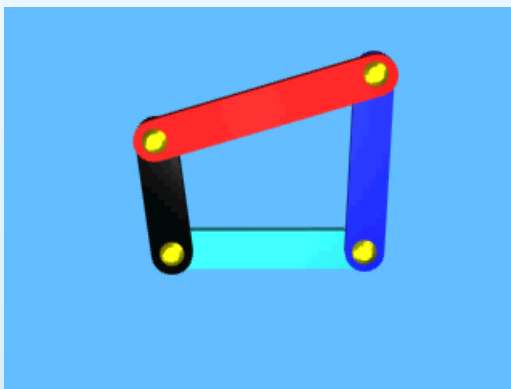


§ 2-2 机构的组成及其运动简图的绘制

一、机构的组成要素

1. 构件

作为一个整体参与机构运动的刚性单元体称为构件。

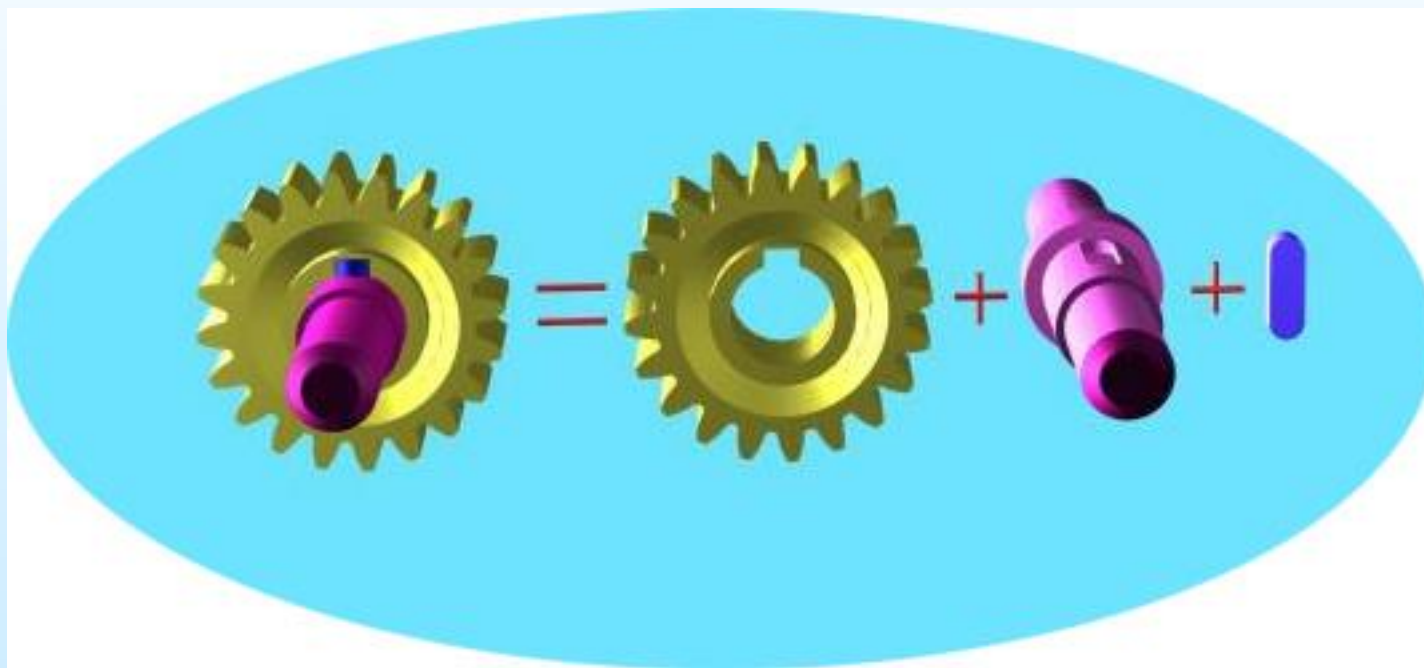


连杆机构



一个构件，可以是不能拆开的单一整体，也可能是由若干个不同零件组装起来的刚性体。

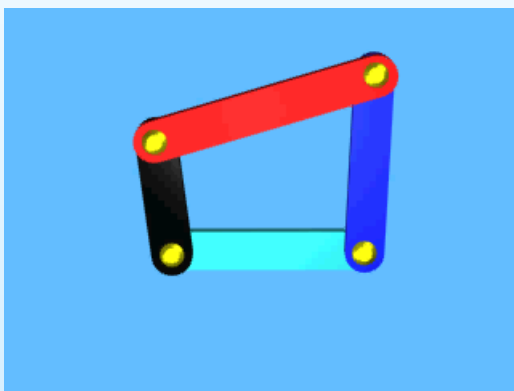
例如：





2. 运动副

由两个构件直接接触而产生一定相对运动的连接称为**运动副**。
两构件上参与接触构成运动副的部分称为**运动副元素**。



连杆机构



人体上臂

运动副是机械原理中最重要的概念之一。

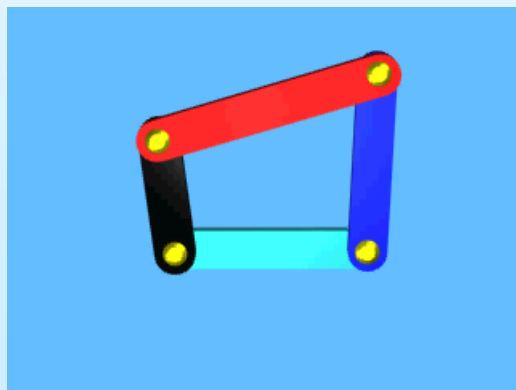


对运动副的理解要把握以下三点：

- (1) 运动副是一种连接；
- (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。

以上是机构的两大组成要素。

可以说：**机构是由运动副逐一连接各个构件组成的。**



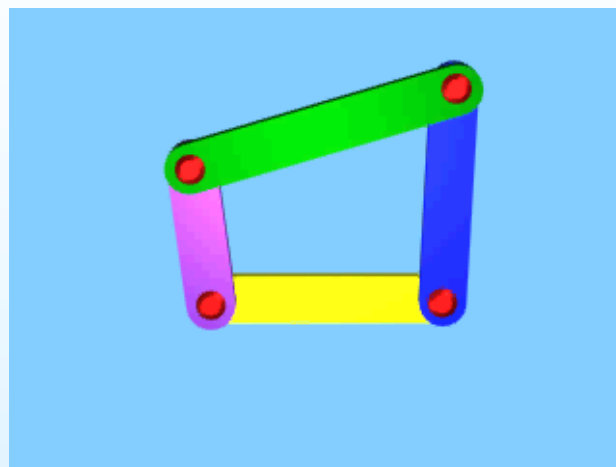
连杆机构



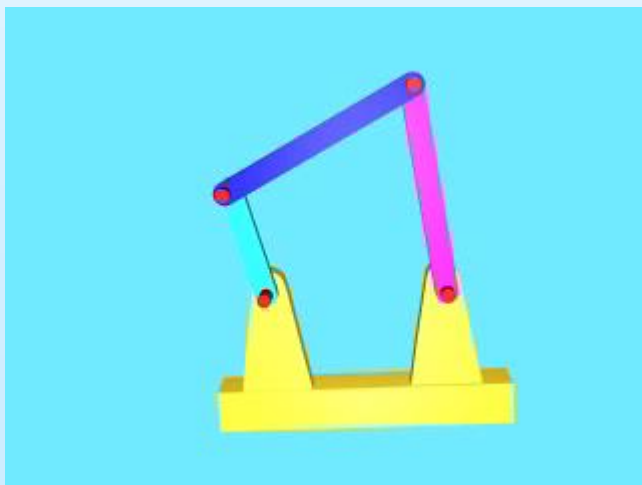
3、运动链与机构



开式运动链
(00)



闭式运动链
(00)



机构
(00)



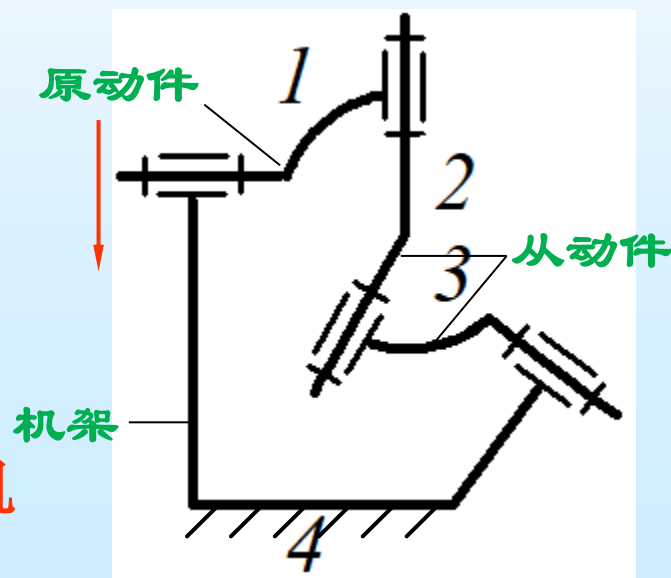
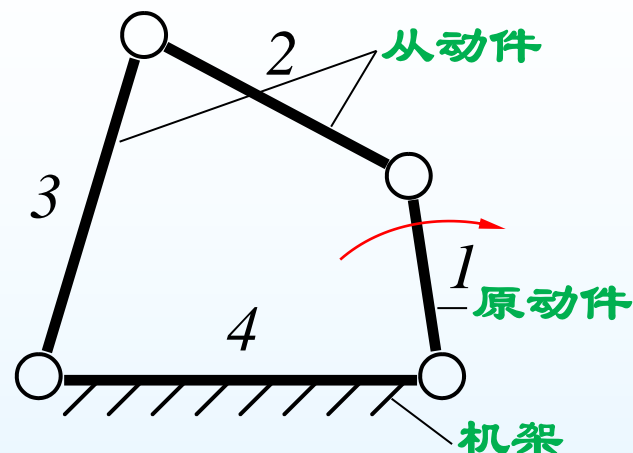
■ **机构**——具有固定构件的运动链称为**机构**。

机架 一机构中的固定构件。一般机架相对地面固定不动，但当机构安装在运动的机械上时则是运动的。

原动件 一 按给定已知运动规律独立运动的构件；常以转向箭头表示。

从动件 一 机构中其余活动构件。其运动规律决定于原动件的运动规律和机构的结构及构件的尺寸。

机构常分为**平面机构**（曲柄滑块机构00）和**空间机构**两类，其中平面机构应用最为广泛。

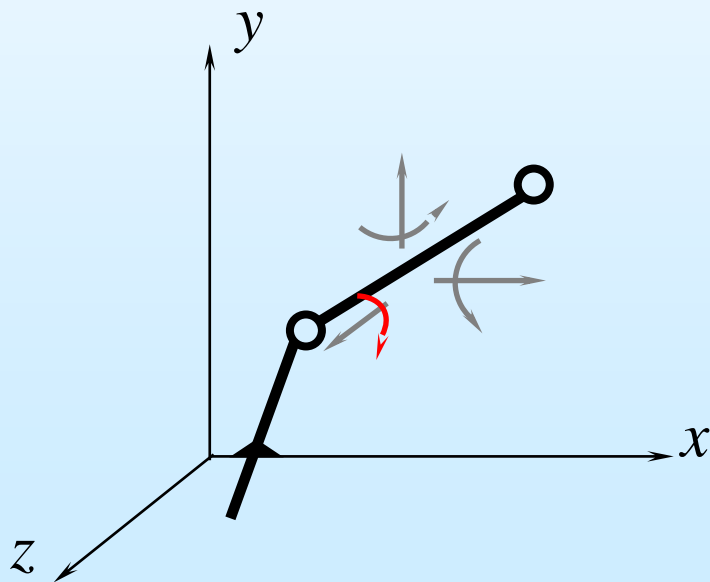
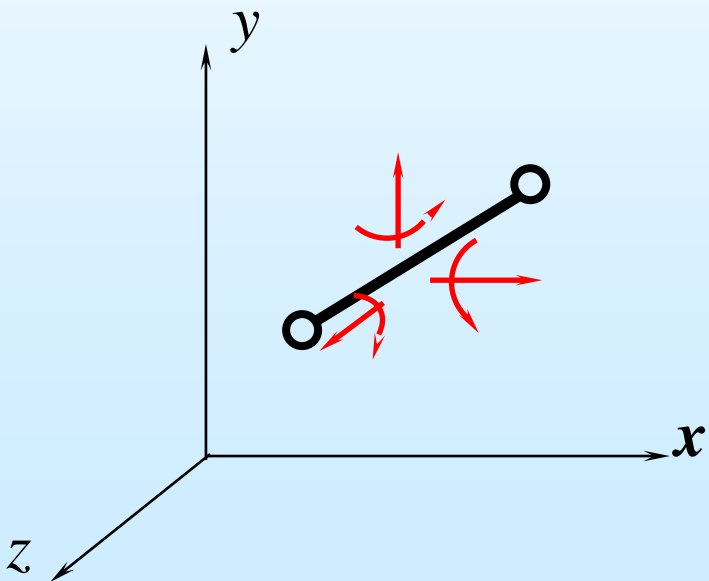


空间铰链四杆机构



二、运动副的分类

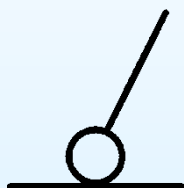
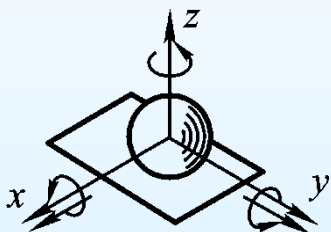
组成机构的运动副的类型决定机构的运动形式
(?)。运动副有多种类型，对运动副进行正确的分类，
在机构设计和综合中是非常重要的。





1. 根据运动副所引入的约束数分类

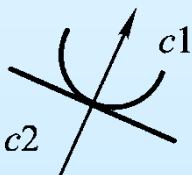
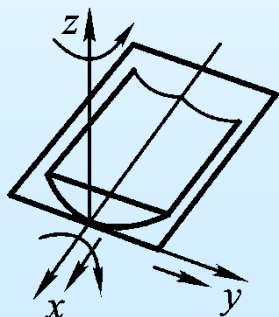
把引入1个约束的运动副称为I级副，引入2个约束的运动副称为II级副，依此类推，最末为V级副。



引入1个约束
I 级副

保留5个独立运动
5个自由度

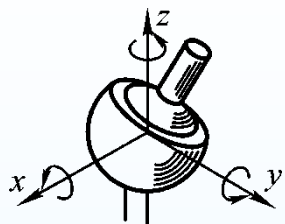
点高副 (21)



引入2个约束
II 级副

保留4个独立运动
4个自由度

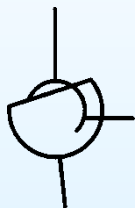
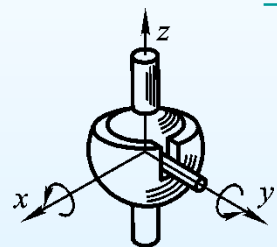
II级副 (21)



引入3个约束
Ⅲ级副

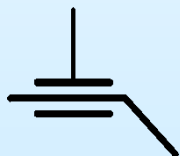
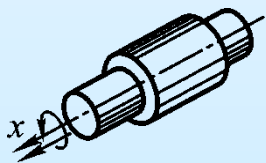
保留3个独立运动
3个自由度

球面副 (21)



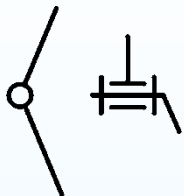
引入4个约束
Ⅳ级副

保留2个独立运动
2个自由度



引入4个约束
Ⅳ级副

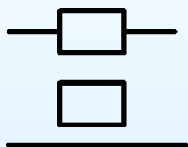
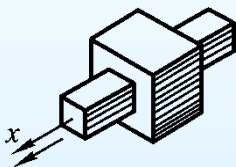
保留2个独立运动
2个自由度



转动副 (21)

引入5个约束
V 级副

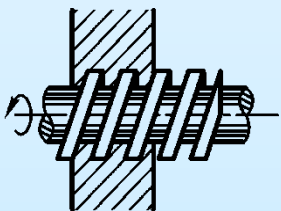
保留1个独立运动
1个自由度



移动副 (21)

引入5个约束
V 级副

保留1个独立运动
1个自由度



螺旋副 (21)

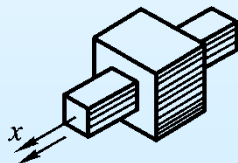
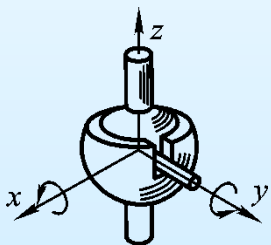
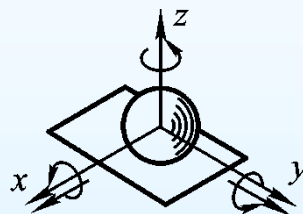
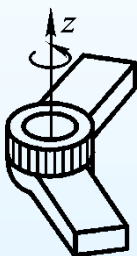
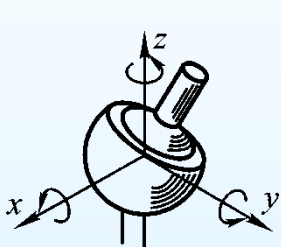
引入5个约束
V 级副

保留1个独立运动
1个自由度

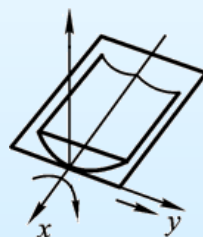


2. 根据构成运动副的两构件的接触情况分类

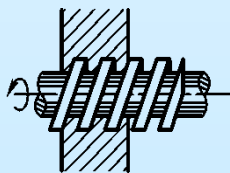
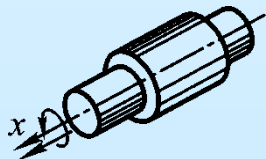
理论上凡是以面接触的运动副称为低副，而以点或线相接触的运动副称为高副。

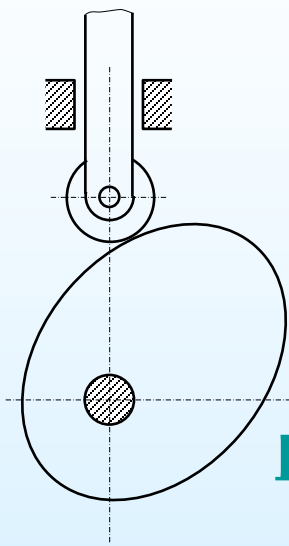


低
副

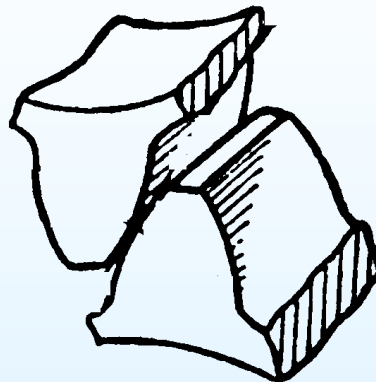


高
副





凸轮高副



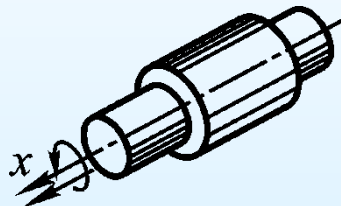
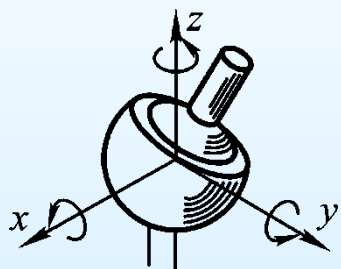
齿轮高副

特点：点或线接触、沿接触点切线方向相对移动或绕接触点的转动→ 高副

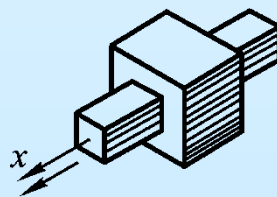
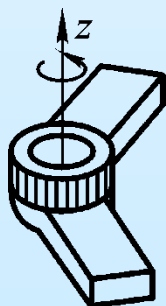


3. 根据构成运动副的两构件间相对运动形式分类

如果两运动副元素间只能相互作平面平行运动，则称之为平面运动副，否则称之为空间运动副。



空间运动副



平面运动副



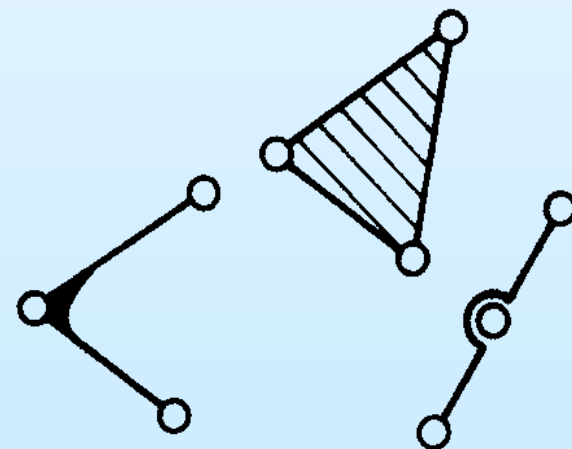
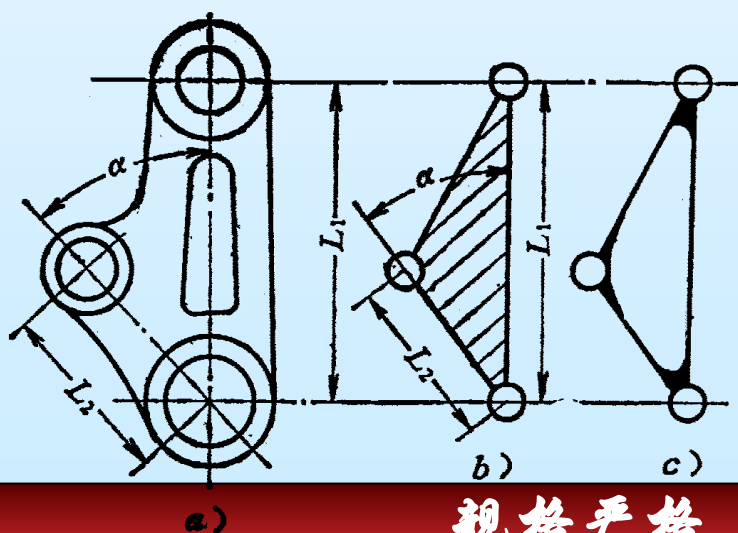
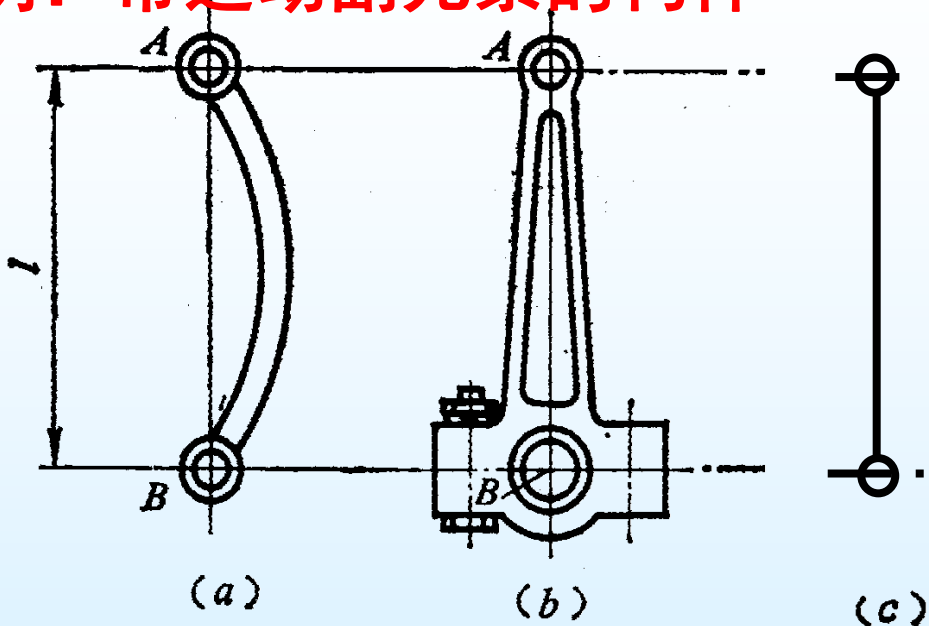
四、机构运动简图的绘制

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，也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。



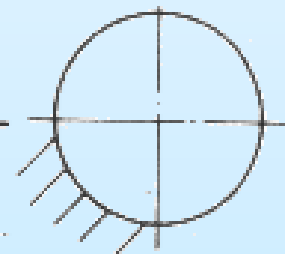
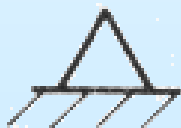
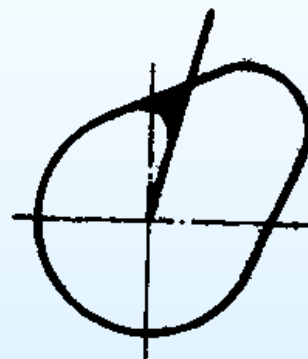
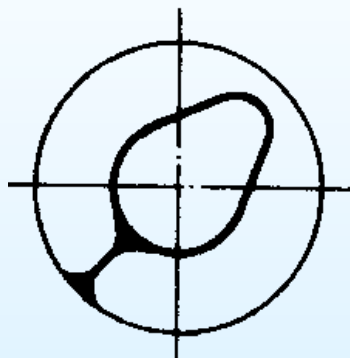
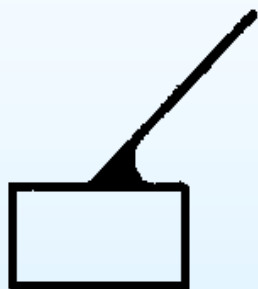
实例：带运动副元素的构件





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**。





常用机构构件、运动副代表符号(摘自GB4460-2013)

	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	
凸轮及其他机构	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



绘制机构运动简图的步骤

1. 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，然后确定构件间运动副的类型。
2. 为将机构运动简图表示清楚，恰当地选择投影面。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。总之，绘制机构运动简图要以**正确、简单、清晰**为原则。



3. 选择适当的比例尺（ m/mm ，实际/图纸），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，这样便可绘制出机构的运动简图。

4. 标明机架、原动件和作图比例尺；

5. 验算自由度。



【例】 绘制颚式破碎机的运动简图（22）

1 曲柄

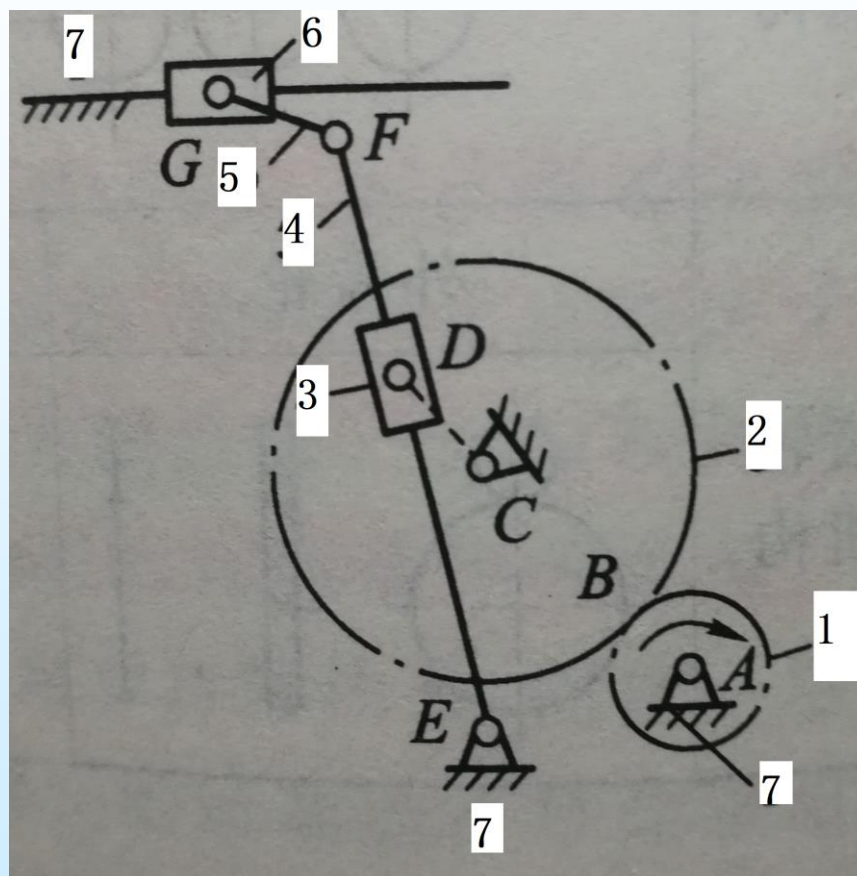
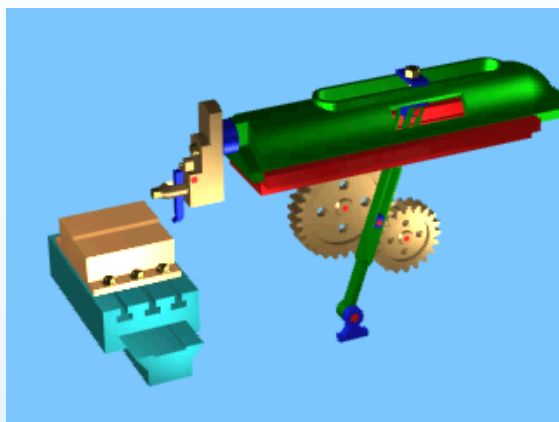
2, 3, 4 为构件

5 为动颚板

6 为机架



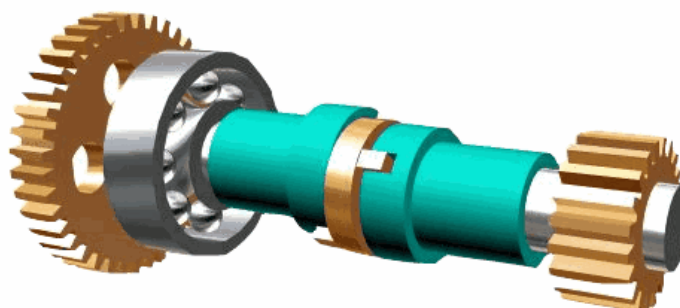
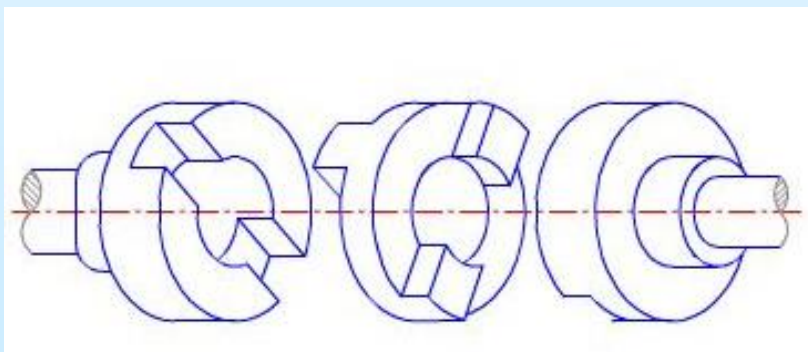
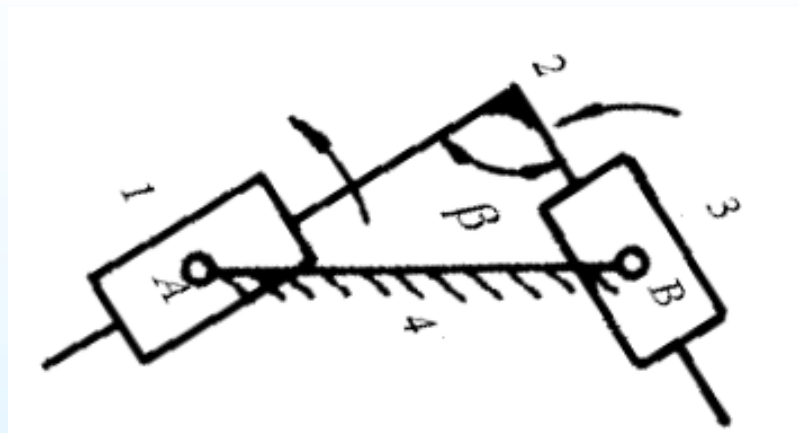
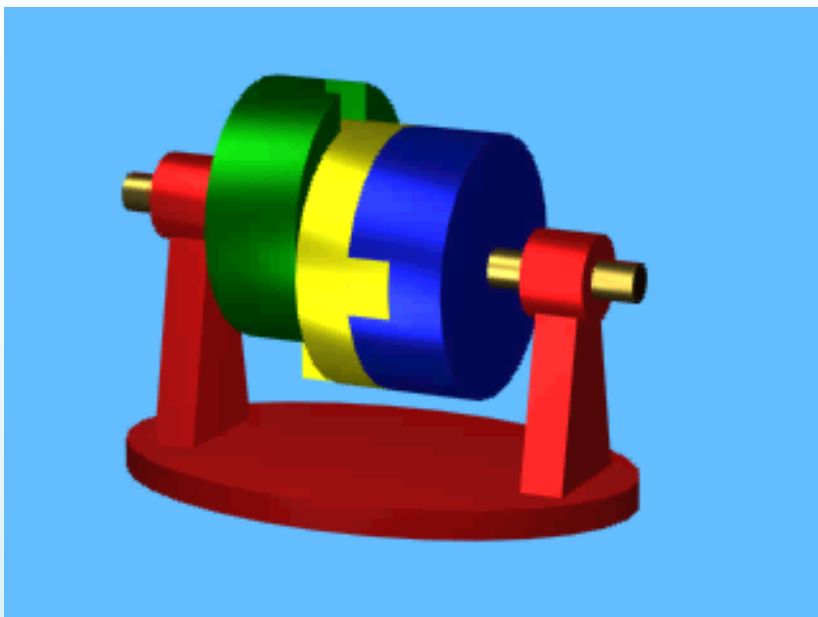
【例】 绘制牛头刨床机构的机构简图



牛头刨床 (22)



【例】 绘制十字滑块联轴节的机构简图



运转 暂停



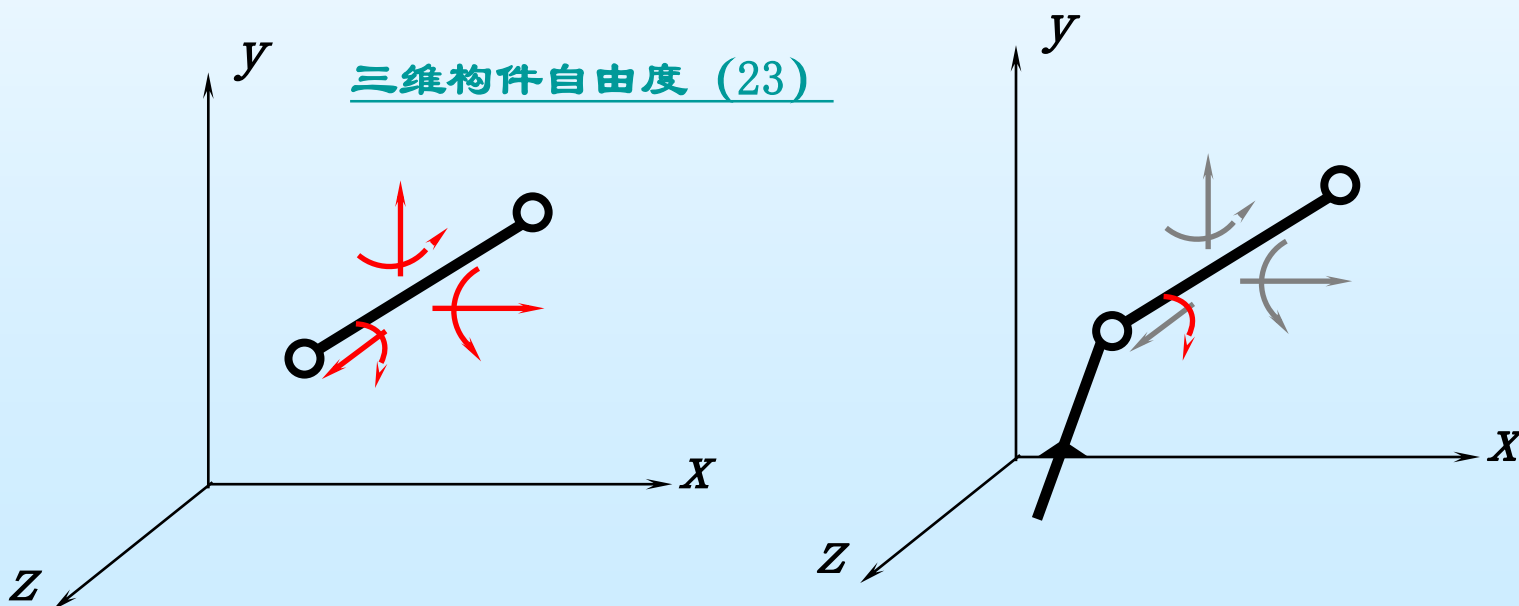
§ 2-3 机构自由度的计算

一、平面机构自由度的计算公式

(1) 构件的自由度与约束

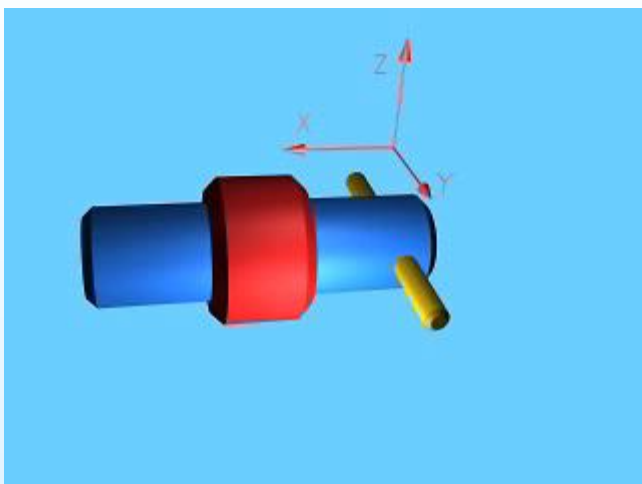
构件独立运动的数目称为自由度

对构件运动的限制作用称为约束

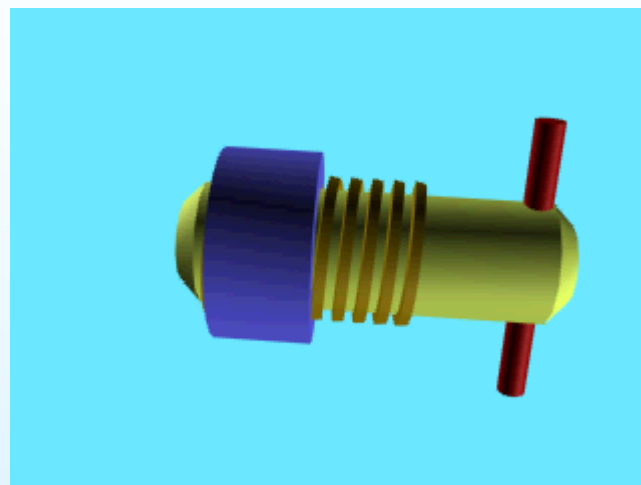




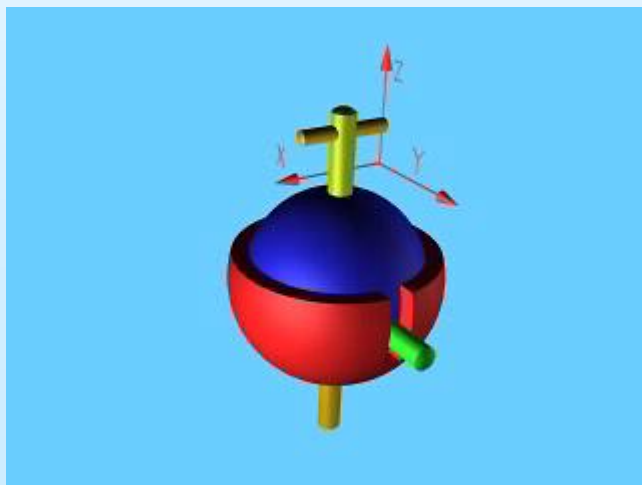
什么是构件独立运动?



圆柱套筒副



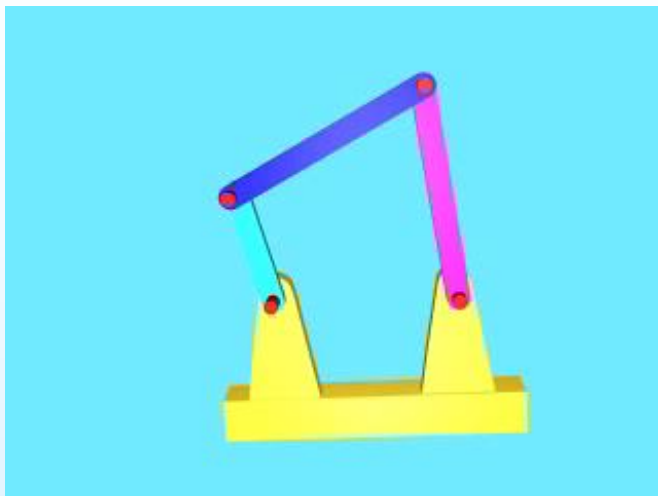
螺旋副



球销副



(2) 机构自由度



平面四杆机构 (23)

机构独立运动的数目称为机构的自由度。

机构的自由度 = 机构的独立运动数

什么是机构的独立运动？



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 P_L 个低副和 P_H 个高副，则它们共引入了 $(2P_L + P_H)$ 个约束。机构的自由度 F 显然应为：

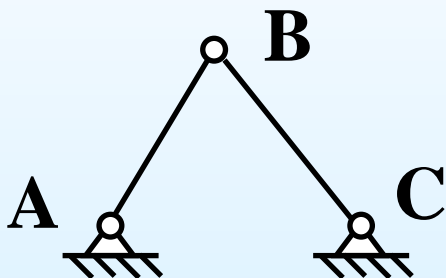
$$F = 3n - (2P_L + P_H) = 3n - 2P_L - P_H$$

这是平面机构自由度的计算公式



二、机构自由度的意义及机构具有确定运动的条件

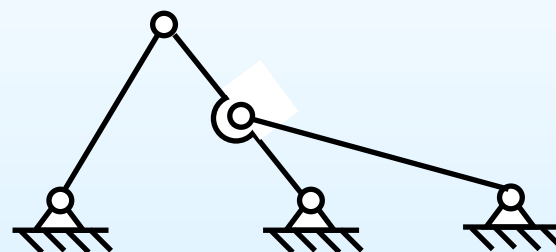
计算下列机构的自由度



$$n = 2, \quad P_L = 3, \quad P_H = 0$$

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

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



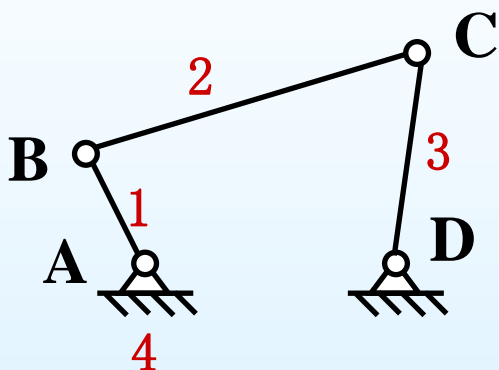
$$n = 3, \quad P_L = 5, \quad P_H = 0$$

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

$$= 3 \times 3 - 2 \times 5 - 0 = -1$$

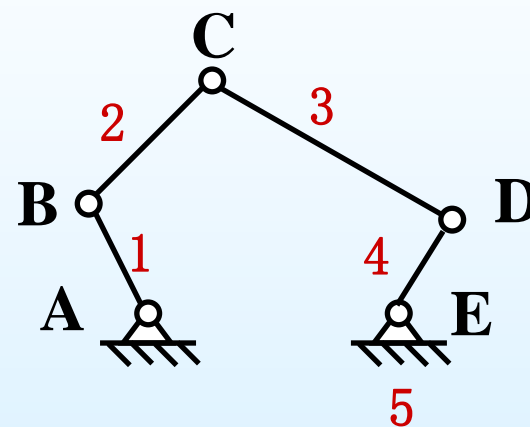


机构自由度意义的讨论：



$$n = 3, \quad P_L = 4, \quad P_H = 0$$

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



$$n = 4, \quad P_L = 5, \quad P_H = 0$$

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

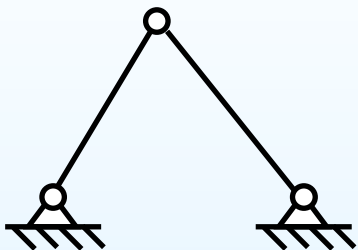


机构自由度的意义

- 所谓机构的自由度，实质上就是机构具有确定运动（位置）时所必须给定的独立运动参数的数目。



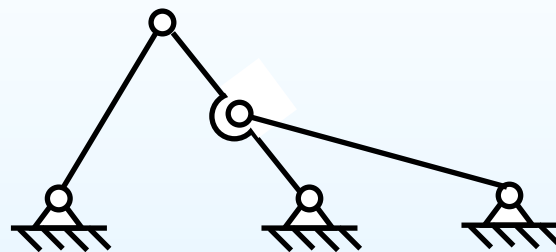
确定运动条件的讨论：



$$n = 2, \quad P_L = 3, \quad P_H = 0$$

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

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

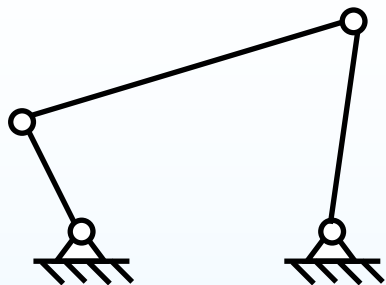


$$n = 3, \quad P_L = 5, \quad P_H = 0$$

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

$$= 3 \times 3 - 2 \times 5 - 0 = -1$$

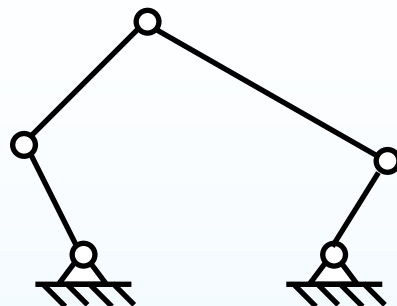
1) 若机构自由度 $F \leq 0$ ，则机构不能动；



$$n = 3, \quad P_L = 4, \quad P_H = 0$$

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

$$= 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1$$



1个原动件 (23)

2个原动件 (23)

$$n = 4, \quad P_L = 5, \quad P_H = 0$$

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

$$= 3 \times 4 - 2 \times 5 - 0 = 2$$

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。



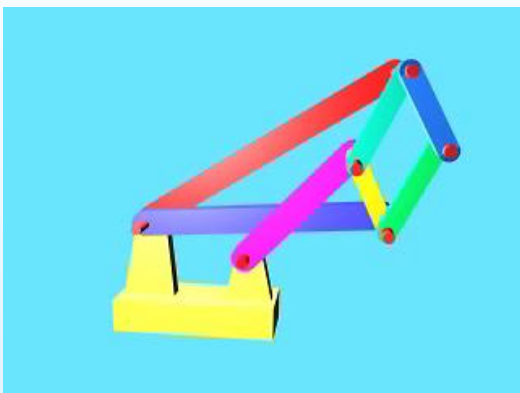
机构具有确定运动的条件：

- 机构的自由度应大于零。且机构的原动件（主动件）数应等于机构的自由度数。

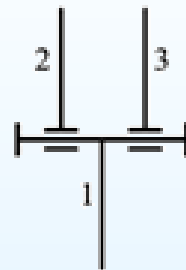
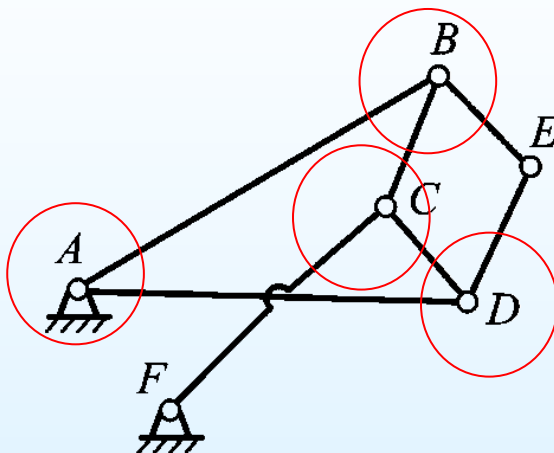
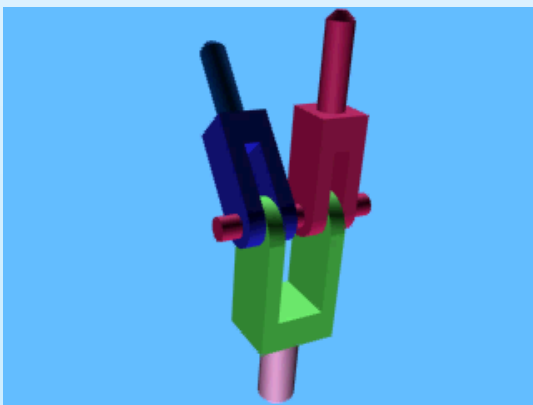


三、计算机构自由度时应注意的事项

1. 复合铰链



八杆机构 (23)



$$n = 7$$

$$P_L = 10$$

$$P_H = 0$$

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

复合铰链动画1

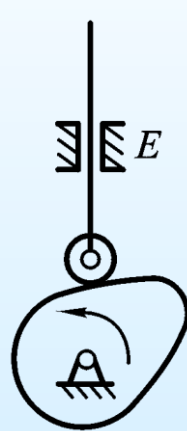
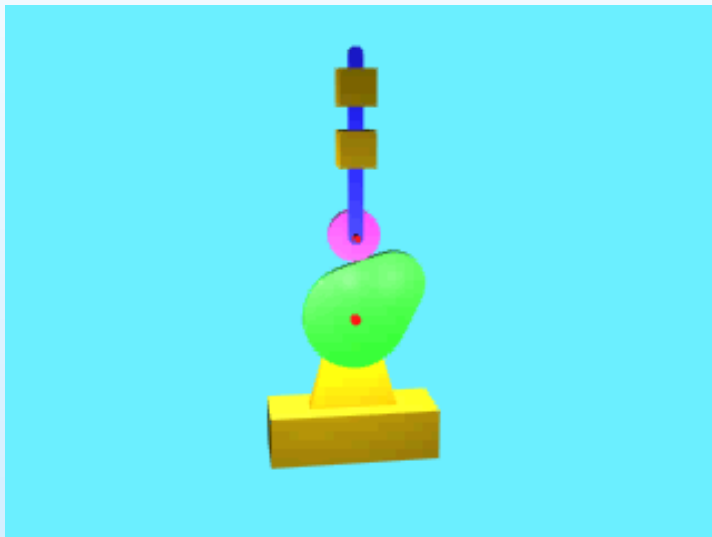
复合铰链动画2



2. 局部自由度

不影响机构整体运动的自由度，称为局部自由度。

在计算机构自由度时，局部自由度应当舍弃不计。



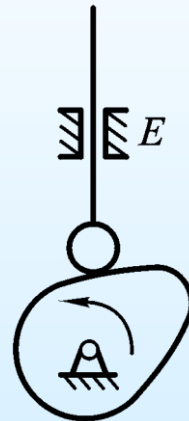
$$n = 3$$

$$P_L = 3$$

$$P_H = 1$$

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

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



$$n = 2$$

$$P_L = 2$$

$$P_H = 1$$

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

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



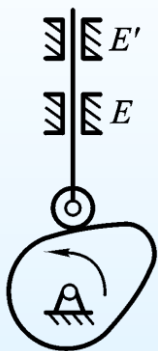
3. 虚约束

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。

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。



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。



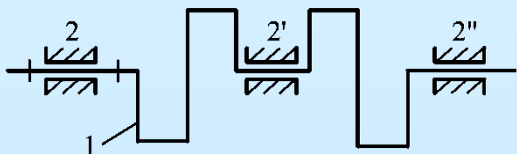
$$n = 2$$

$$P_L = 3(2)$$

$$P_H = 1$$

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

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。

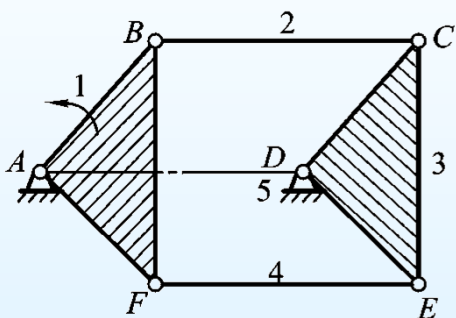
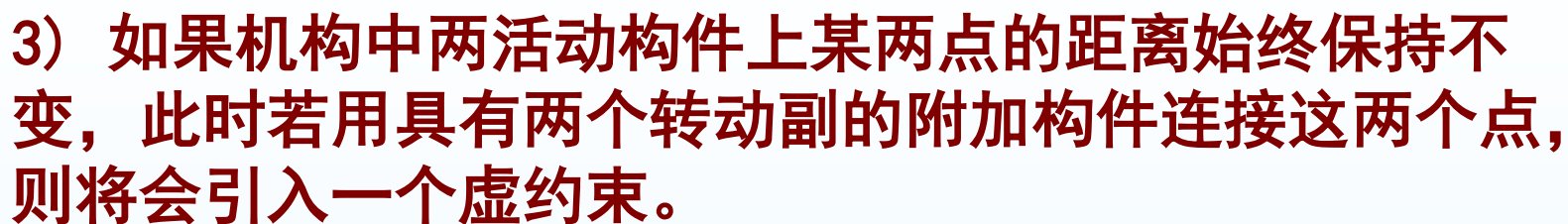


$$n = 1$$

$$P_L = 3(1)$$

$$P_H = 0$$

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



$$\triangle ABF \cong \triangle CDE$$

$$n = 4(3)$$

$$P_L = 6(4)$$

$$P_H = 0$$

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



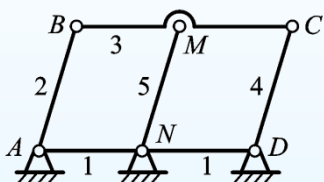
4) 机构中，如果用转动副连接的是两构件上运动轨迹相重合的点，则该连接将引入1个虚约束。

$$AB = CD = MN$$

$$AD = BC$$

AND 共线

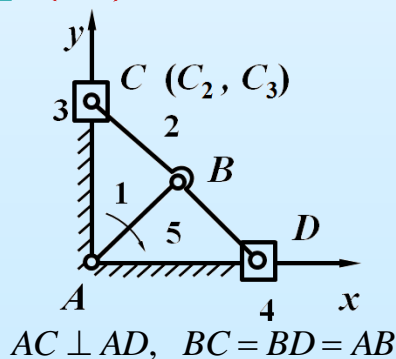
BMC 共线



平行四边形虚约束 (23)

火车车轮虚约束 (23)

摇筛机构 (23)



椭圆仪 (23)

$$n = 4(3)$$

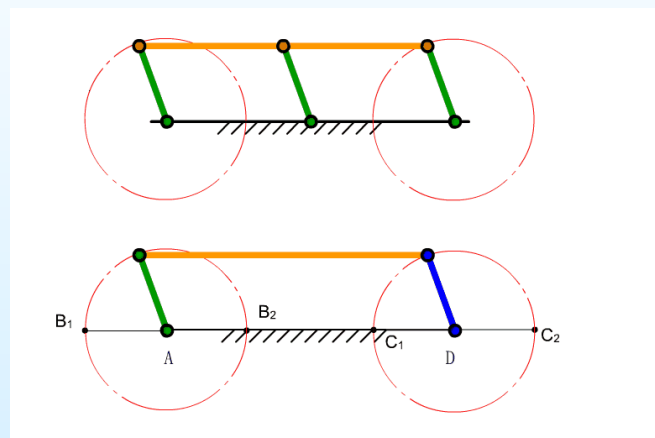
$$P_L = 6(4)$$

$$P_H = 0$$

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

$$= 3 \times 4 - 2 \times 6 - 0 = 0$$

平行四杆机构没有虚约束的后果？



$$n = 4(3)$$

$$P_L = 6(4)$$

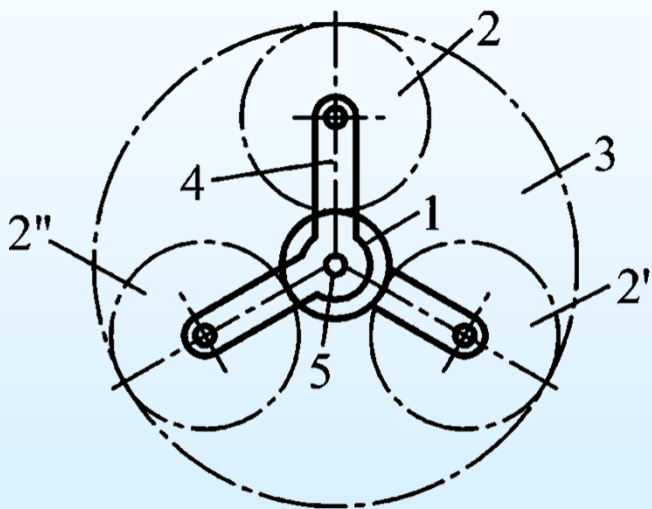
$$P_H = 0$$

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

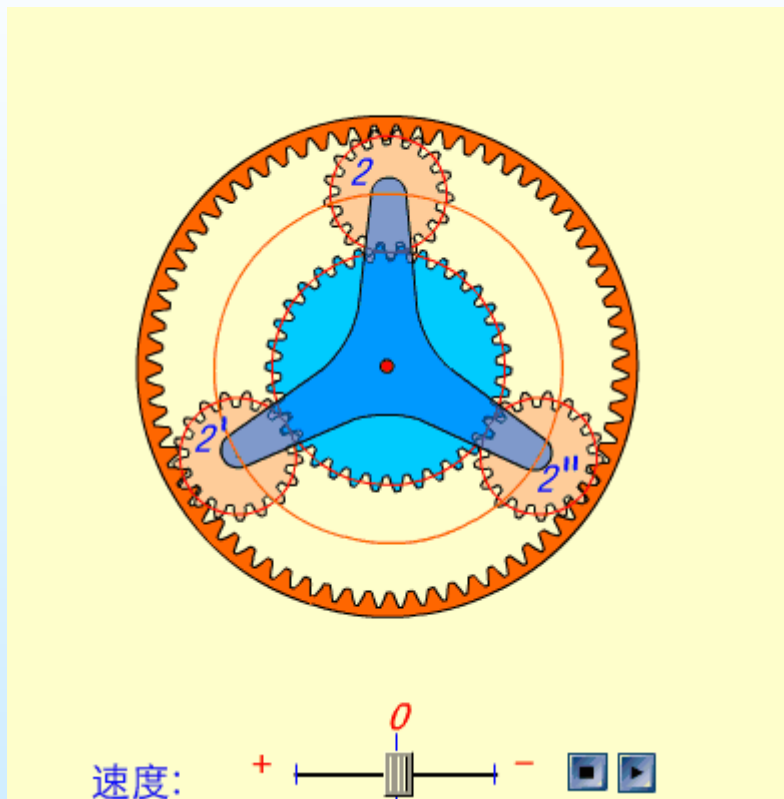
$$= 3 \times 4 - 2 \times 6 - 0 = 0$$



5) 机构中**对运动起重复限制作用**的对称部分也往往会引入虚约束。

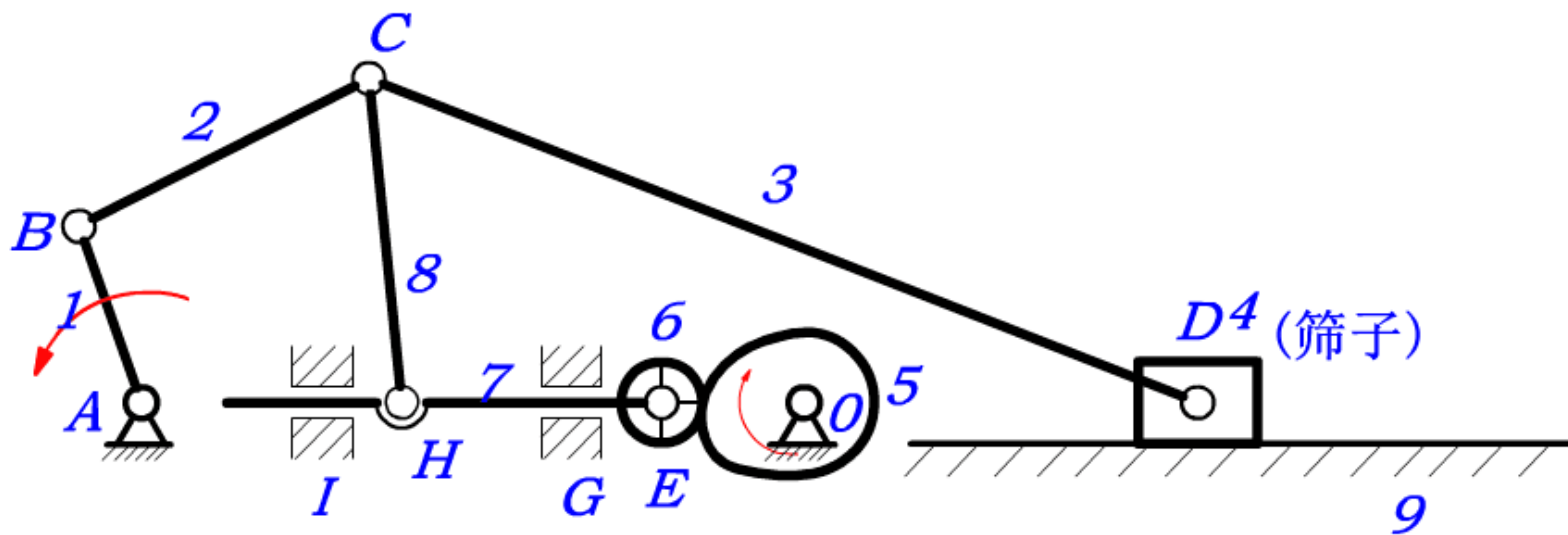


行星轮系 (23)





【例题】



大筛机构



虚约束的本质是什么？

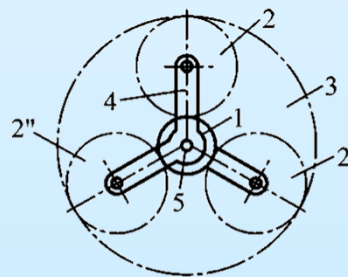
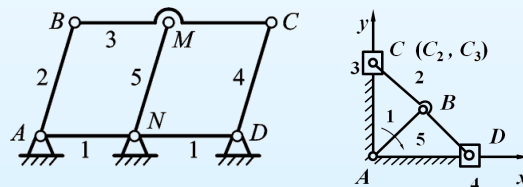
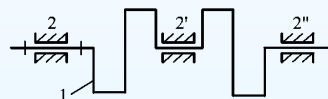
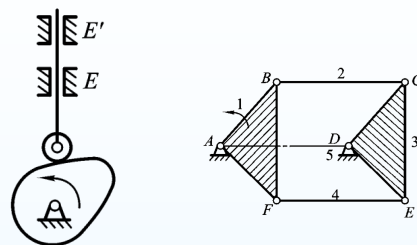
从运动的角度看，虚约束就是“**重复的约束**”或者是“**多余的约束**”。

机构中为什么要使用虚约束？

- a. 使受力状态更合理；
- 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。





四、空间机构自由度简述

空间机构自由度计算公式

$$F = 6n - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1$$

n —— 活动构件数目

$P_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ —— i 级运动副的数目

i —— i 级运动副的约束数目

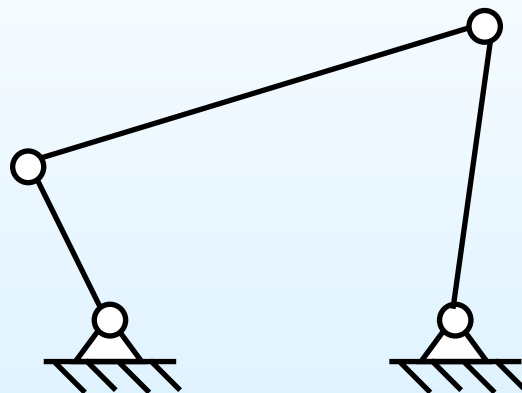
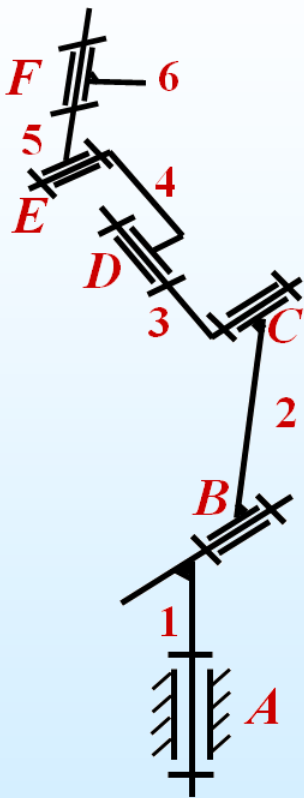
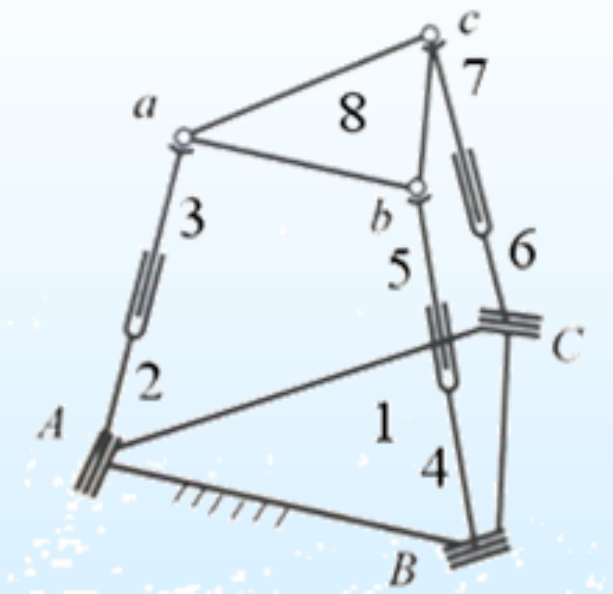
$$F = 6n - \sum_{i=1}^5 iP_i$$

平面机构自由度计算公式

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



用空间机构自由度计算公式计 算下列机构自由度



自学

考虑能否用空间机构自由度公式计算平面
机构？

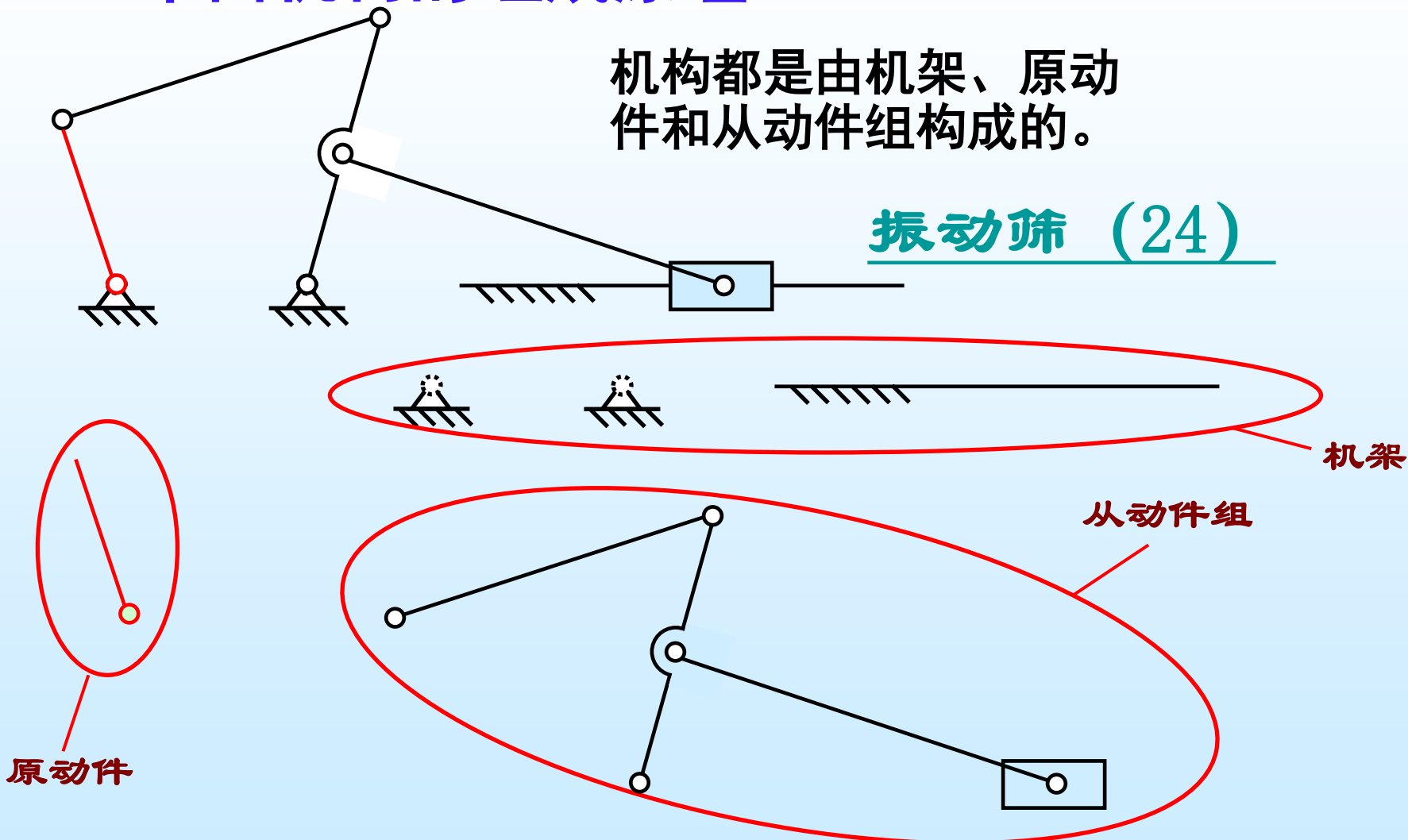


§ 2-4 平面机构的组成原理和结构分析

一、平面机构的组成原理

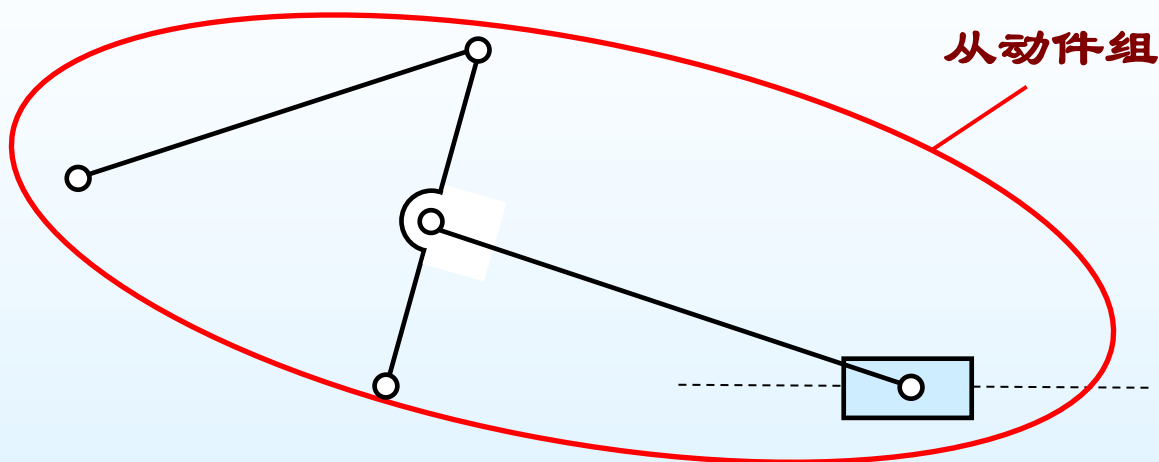
机构都是由机架、原动件和从动件组构成的。

振动筛 (24)





当把该机构的机架和原动件拆去后，则余下的从动件组为：

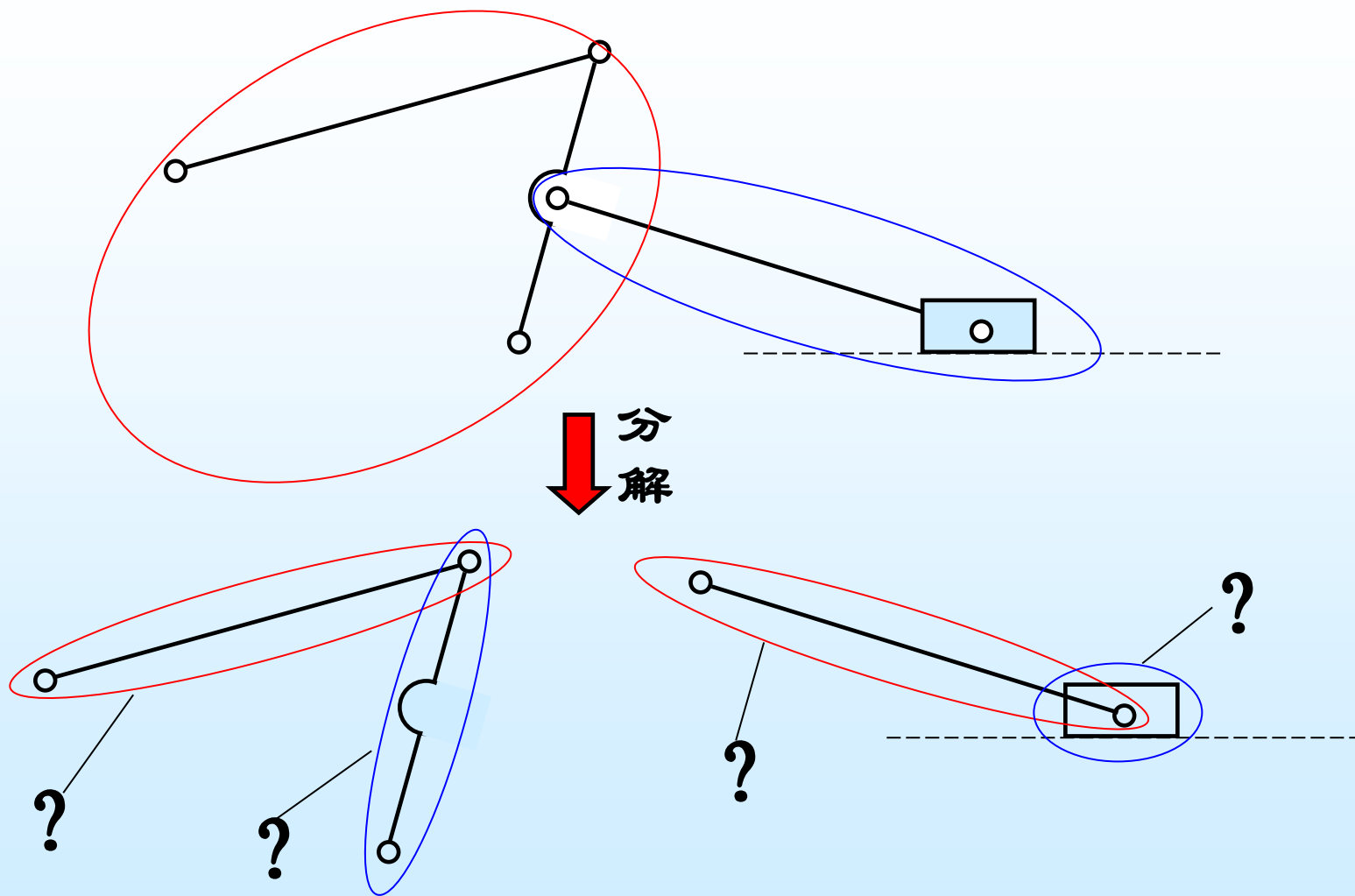


这个从动件组的自由度为零，即：

$$n = 4, P_L = 6$$

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

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。

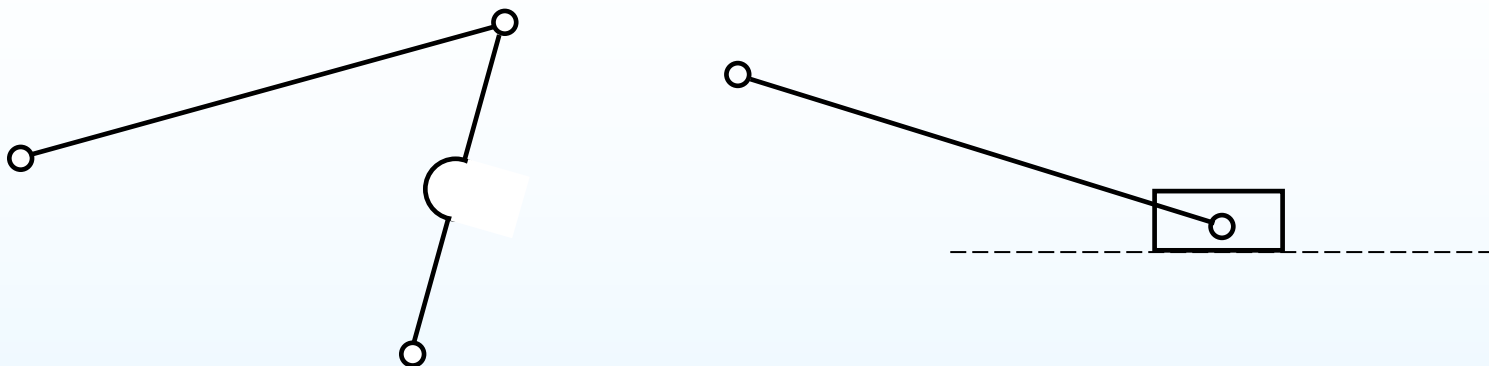


还能进一步分解吗？

还能进一步分解吗？

规格严格

功夫到家



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：
阿苏尔（ASSUR）或者基本杆组

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：

$$F = 3n - 2P_L = 0 \quad \longrightarrow \quad n = \frac{2}{3} P_L$$

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。

这也就是说，在一个基本杆组中，其构件数和低副数有以下关系：

$$n=2, P_L=3$$

$$n=4, P_L=6$$

$$n=6, P_L=9$$

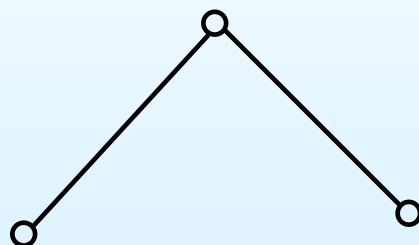


最简单的平面基本杆组是由两个构件三个低副组成的杆组，称之为 II 级杆组。

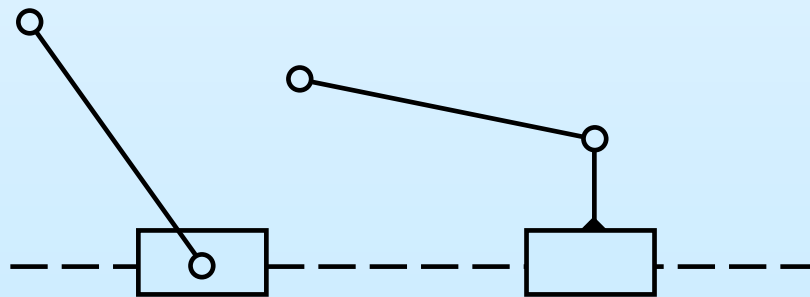
II 级杆组是机构中最常见的一类基本杆组。

II 级杆组有以下五种形式：

(1) RRR 杆组

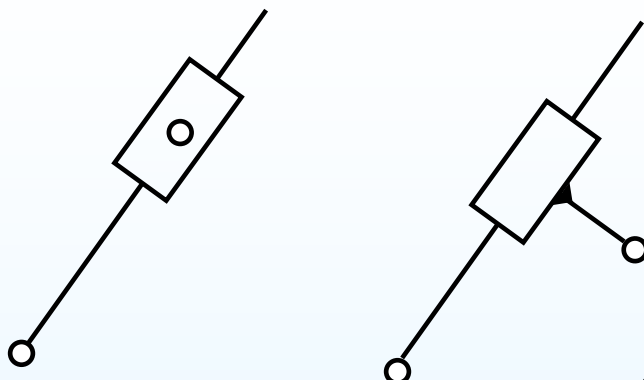


(2) RRP 杆组

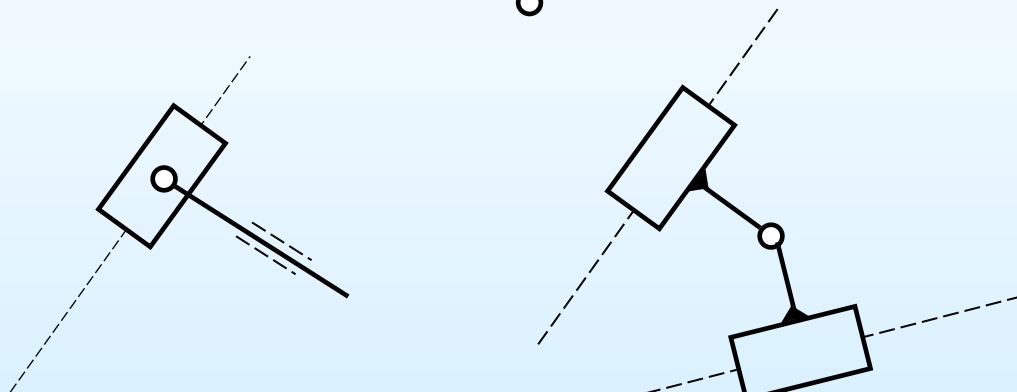




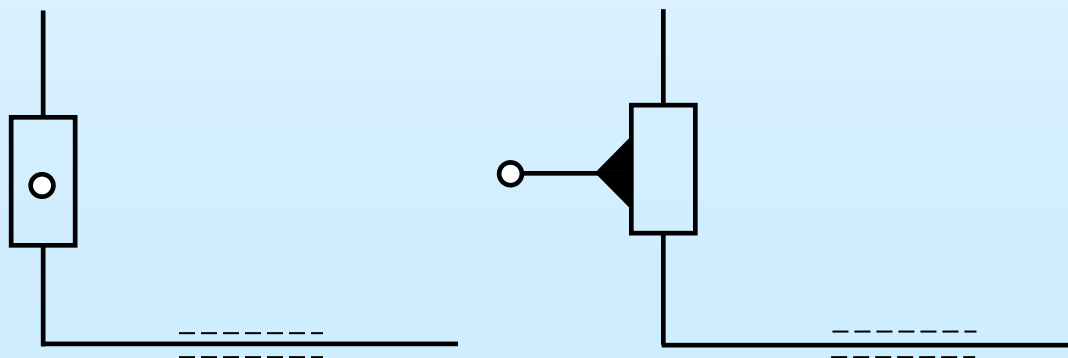
(3) RPR杆组

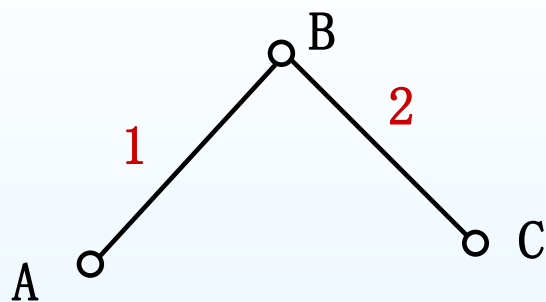


(4) PRP杆组

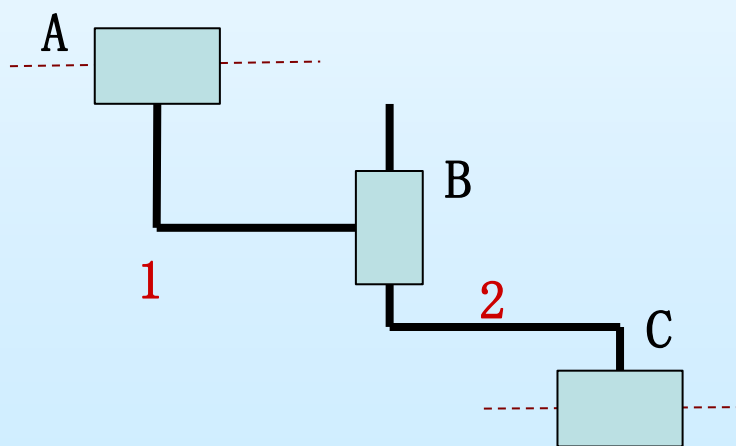


(5) RPP杆组

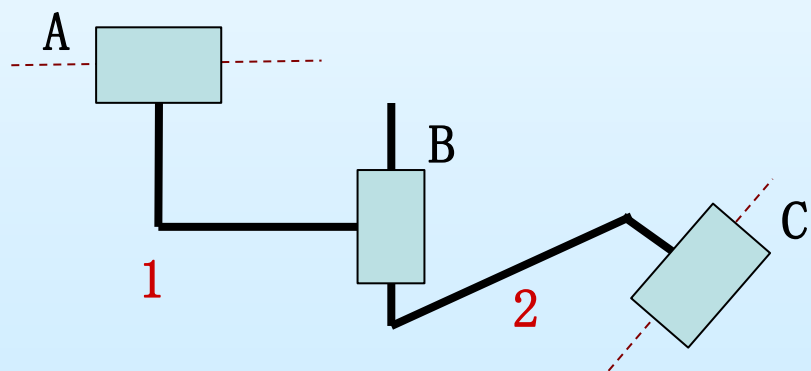




RRR杆组

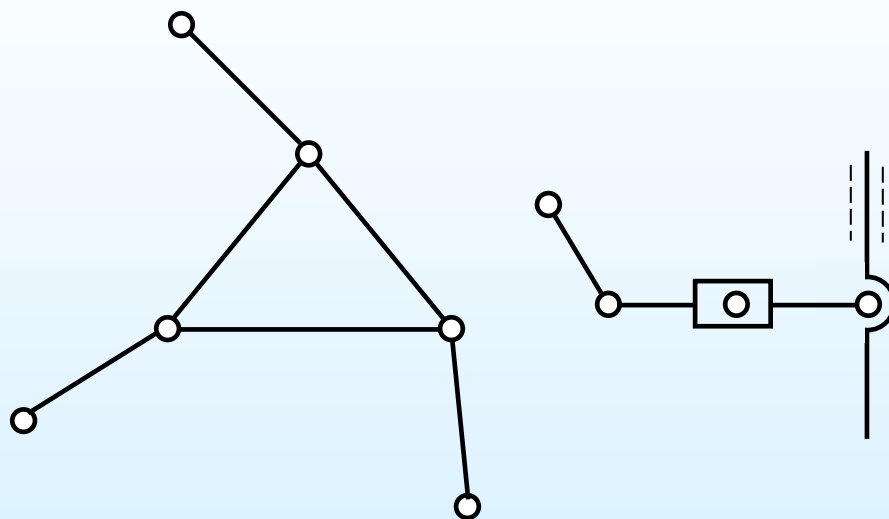
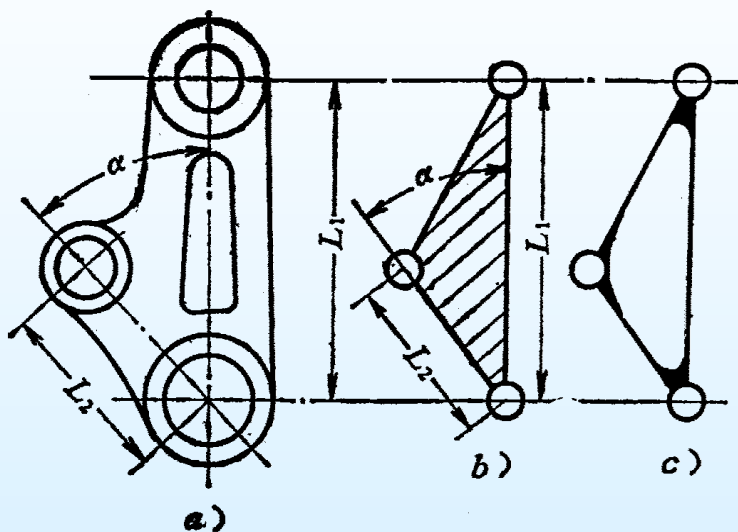


PPP杆组?

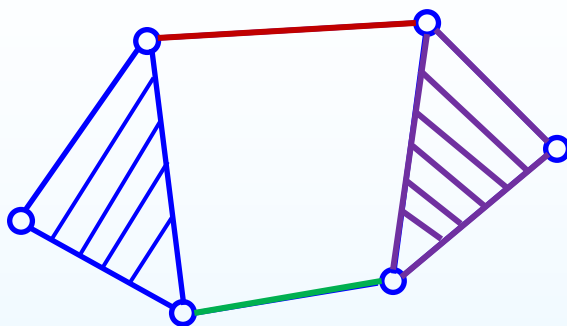




除 II 级杆组外，还有 III、IV 级等较高级的基本杆组。



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。

任何平面机构可以由机架、原动件和若干基本杆组组成，
对于相同的杆组

- 运动学
- 动力学



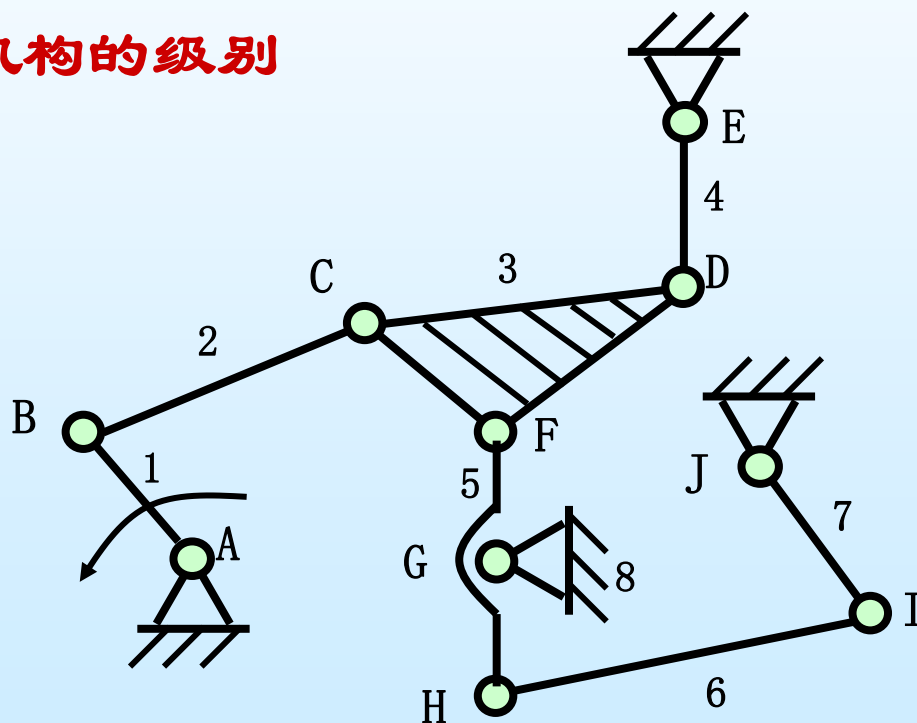
2) 分析的方法

- a) 先计算机构的自由度，并确定原动件；
- b) 从远离原动件的构件先试拆Ⅱ级组，若不成；再拆Ⅲ级组，直至只剩下原动件和机架为止；
- c) 最后确定机构的级别。



【例】 试确定图示机构的级别

- 1) 计算机构的自由度
- 2) 结构分析
- 3) 确定机构的级别

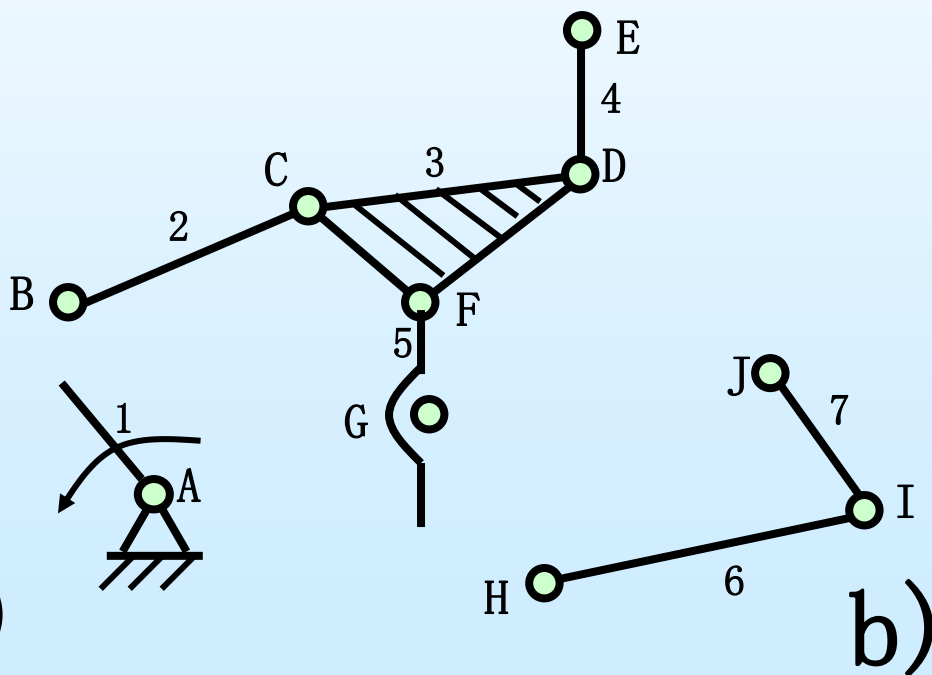
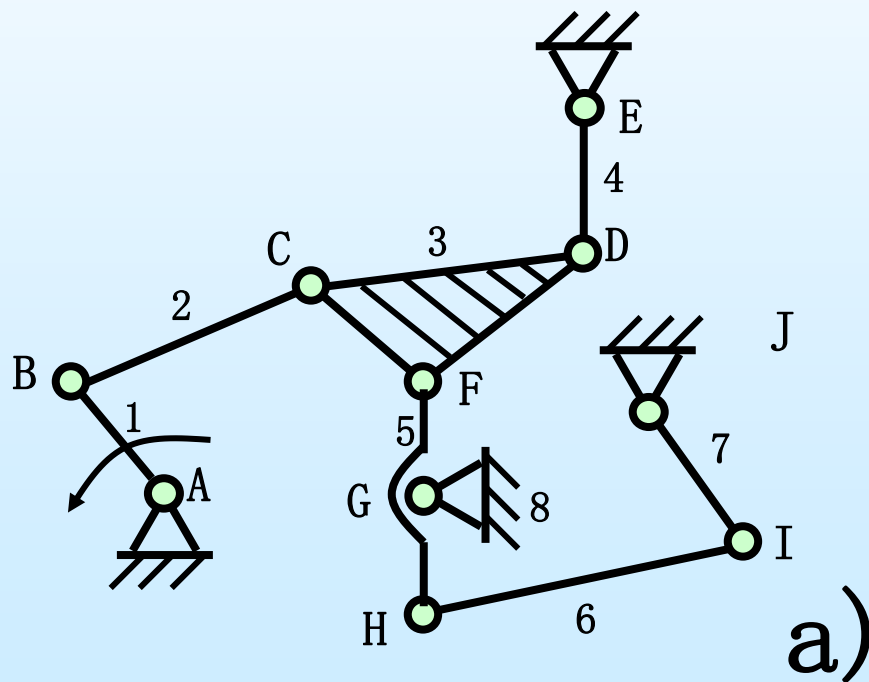


a)



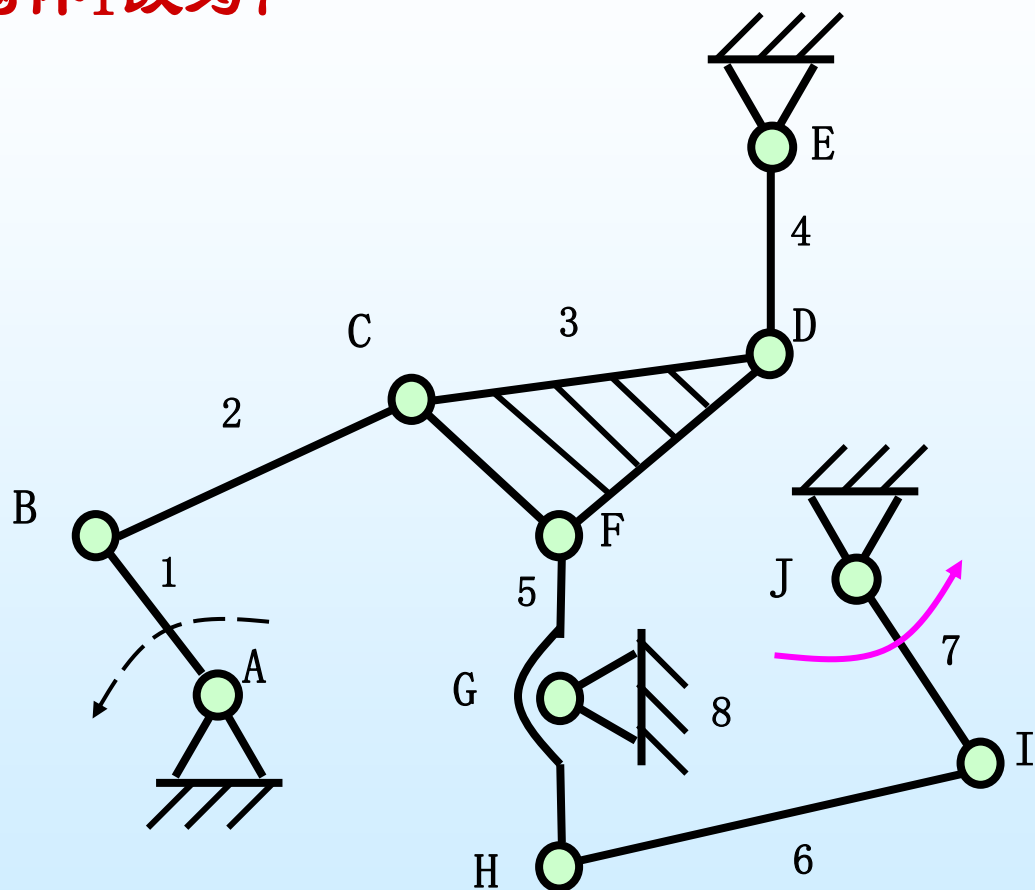
【例】 试确定图示机构的级别

- 1) 计算机构的自由度
- 2) 结构分析
- 3) 确定机构的级别





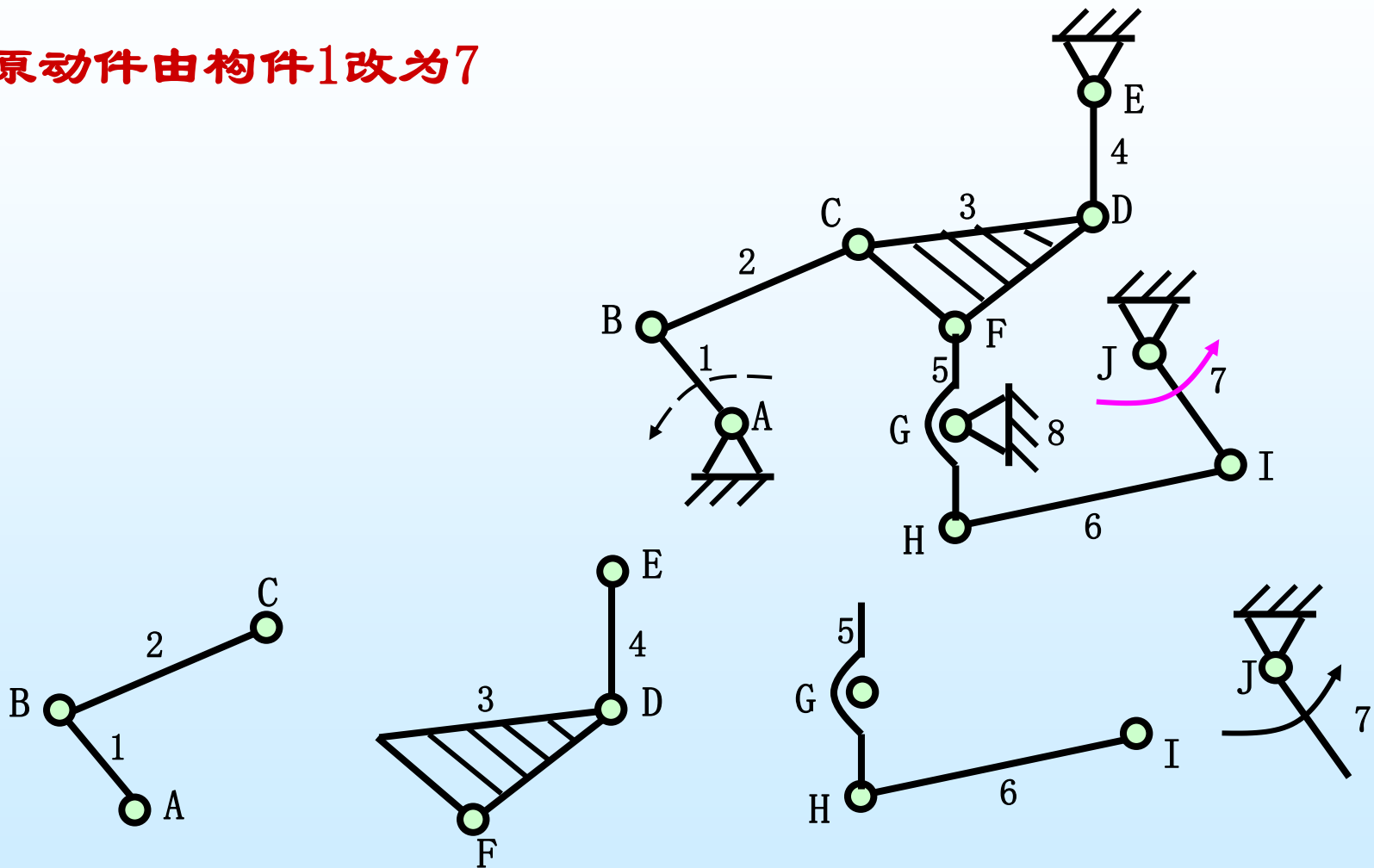
原动件由构件1改为7



规格严格 功夫到家



原动件由构件1改为7





四、平面机构的高副低代

机构的组成原理只适合于低副平面机构。对于含有高副的平面机构，首先应虚拟地把高副转化为低副，然后再进行结构分析。

1) 高副低代的原则

高副低代前后机构的结构特性和运动特性不变。

(1) 代替前后机构自由度不变-结构特性不变

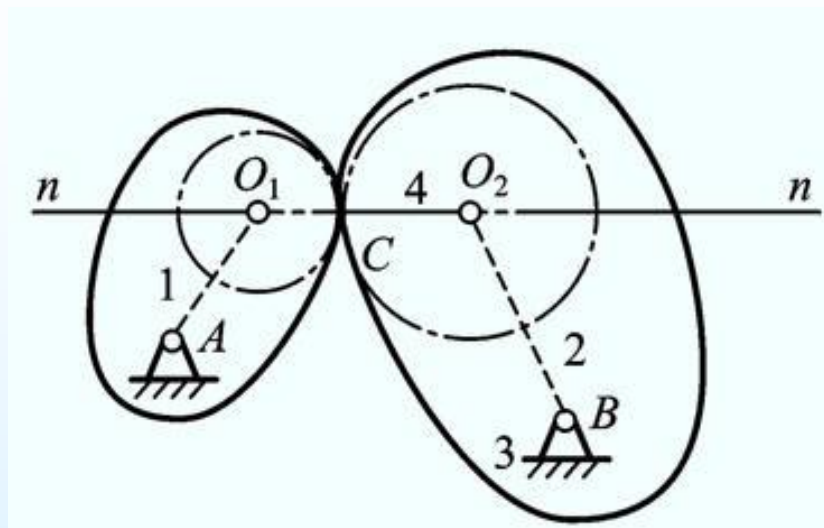
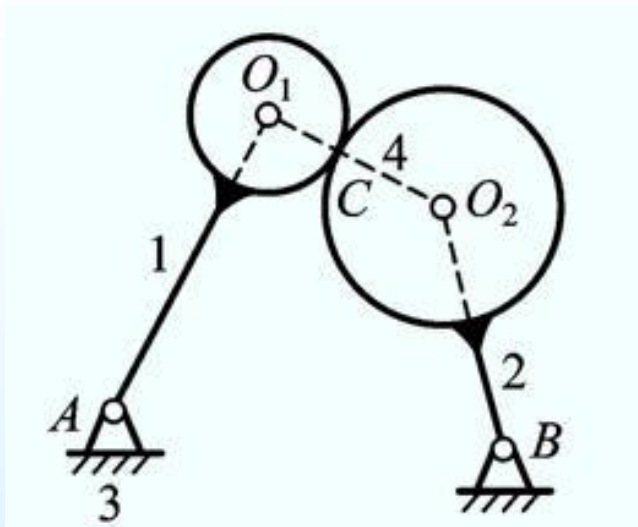
(2) 代替前后机构的瞬时运动不变（位移、速度、加速度）

— 运动特性不变

2) 高副底代的方法

(1) 圆弧高副机构

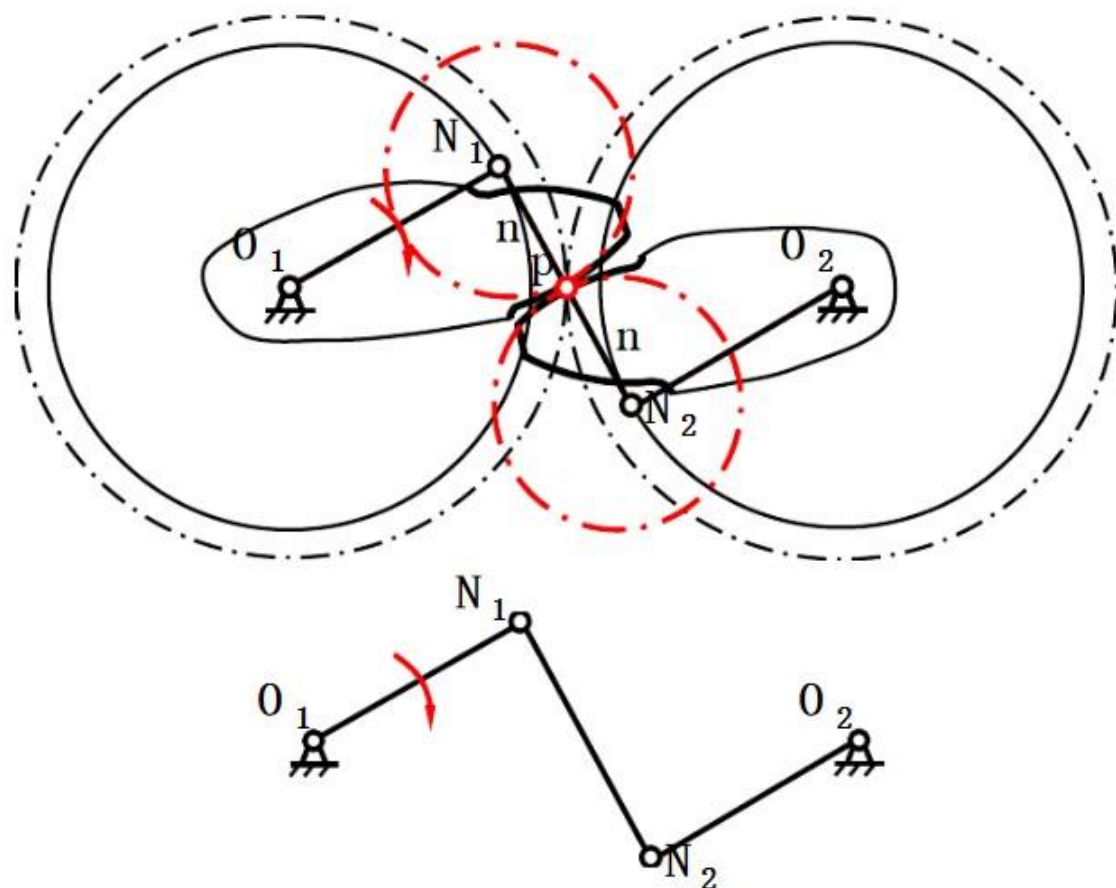
(2) 非圆弧高副机构

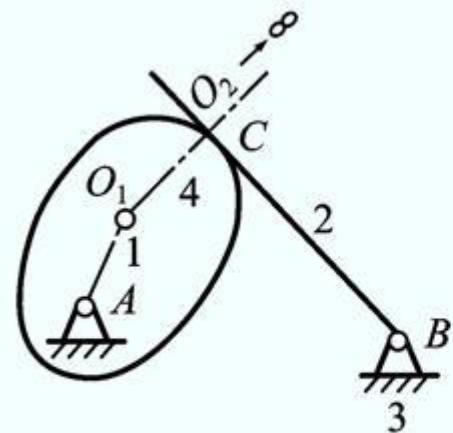


关键：找出构成高副两轮廓线在接触点处的曲率中心，再用一个构件和位于两曲率中心的两个转动副代替该高副。

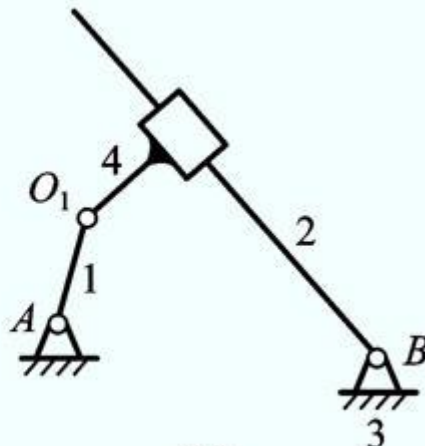


单齿接触齿轮的高副底代示意图



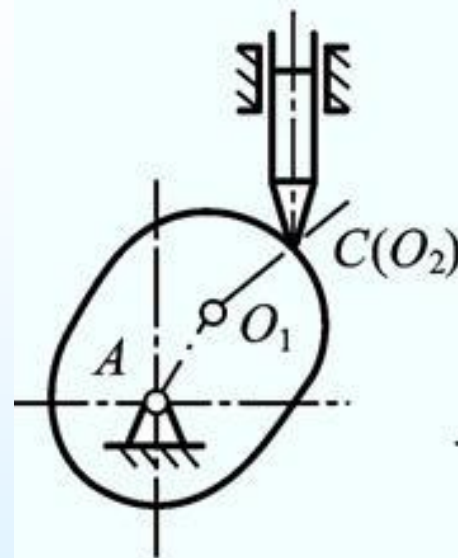


(a)

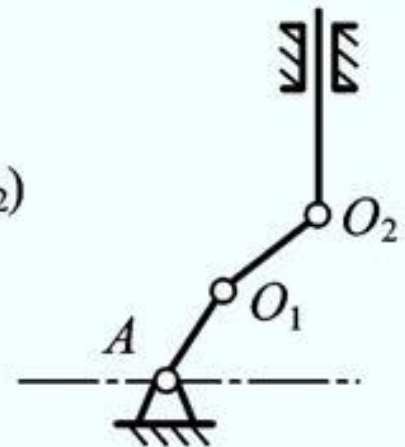


(b)

直线的曲率半径无穷远处，
演化为移动副



(a)



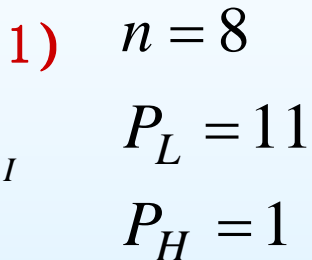
(b)

点接触，曲率半径等于零



2) 结构分析

3) 确定机构的级别



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

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

?



谢谢!



规格严格 功夫到家