



第02章

平面连杆机构

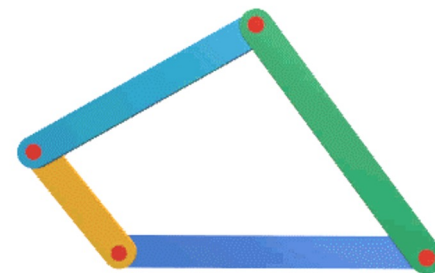
(中)

宋超阳

南方科技大学

本章要点概述

- 平面四杆机构的基本形式、演变及其应用
- 平面四杆机构设计中的共性问题
- 平面四杆机构的设计
- 平面连杆机构的解析综合



平面四杆机构设计中的 共性问题

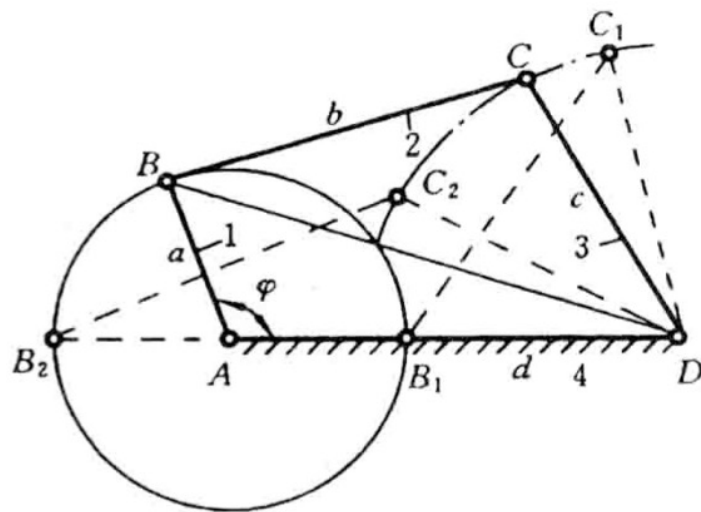
平面四杆机构存在曲柄的条件

在工程实际中，用于驱动机构运动的原动机通常是作整周转动的

要求机构的主动件也能作整周转动

即希望主动件是曲柄

- 设平面四杆机构各杆 1、2、3 和 4 的长度分别为 a 、 b 、 c 和 d ，杆 4 为机架，杆 1 和杆 3 为连架杆
- 当 $a < d$ 时，只要杆 1 能通过于机架两次共线的位置，则杆 1 必为曲柄
 - ΔB_2C_2D : $a + d \leq b + c$
 - ΔB_1C_1D : $b \leq (d - a) + c$ 或 $c \leq (d - a) + b$
 - $a \leq b$ 、 $a \leq c$ 、 $a \leq d \Rightarrow$ 即杆 AB 为最短杆
- 当 $d < a$ 时，同样分析可得
 - $d \leq a$ 、 $d \leq b$ 、 $d \leq c \Rightarrow$ 即杆 AD 为最短杆

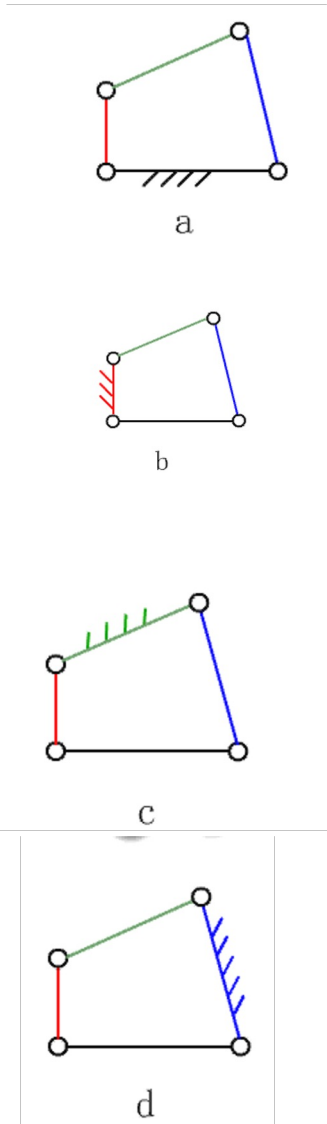
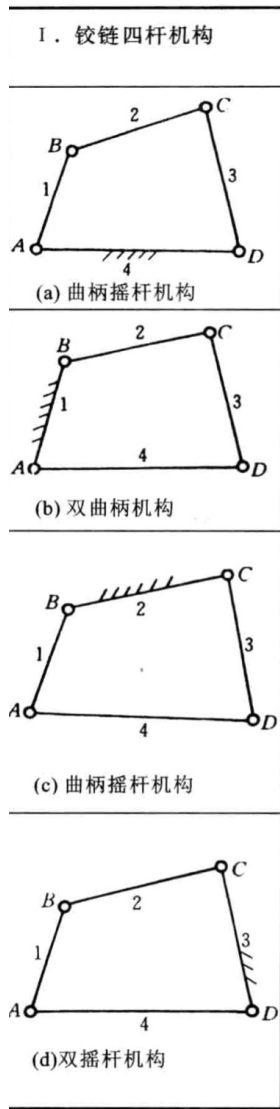


平面四杆机构存在曲柄的条件是：

- (1) 连架杆与机架中必有一杆为平面四杆机构中的**最短杆**
- (2) 最短杆与最长杆的杆长之和应小于或等于其余两杆的**杆长之和**

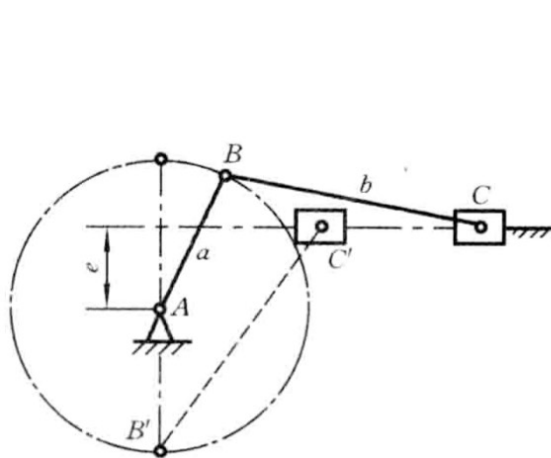
平面四杆机构存在曲柄的条件

- 在平面四杆机构中，如果最短杆与最长杆的长度之和小于或等于其他两杆长度之和，**且**：
 - ① 曲柄摇杆机构：以最短杆的相邻构件为机架，则最短杆为曲柄，另一连架杆为摇杆
 - ② 双曲柄机构：以最短杆为机架，则两连架杆均为曲柄
 - ③ 双摇杆机构：以最短杆的对边构件为机架，则无曲柄存在

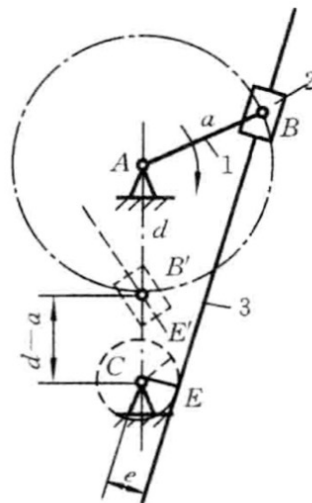


平面四杆机构存在曲柄的条件

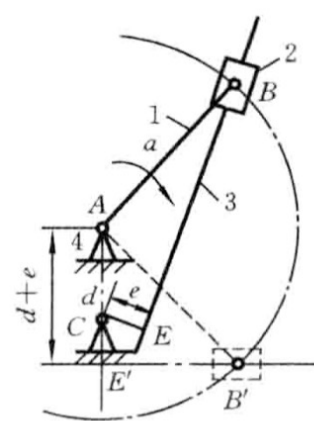
- 在平面四杆机构中，如果最短杆与最长杆的长度之和大于其他两杆长度之和，则不论选定哪一个构件为机架，均无曲柄存在，即该机构只能是双摇杆机构
 - 应当指出的是，在运用上述结论判断平面四杆机构的类型时，还应注意四个构件组成封闭多边形的条件，即**最长杆的杆长应小于其他三杆长度之和**
- 对于图 (a) 中所示的滑块机构，可得到杆AB成为曲柄的条件是：
 - ① a 为最短杆；② $a + e \leq b$
- 对于图 (b) 所示的导杆机构，可得到杆AB成为曲柄的条件是：
 - ① a 为最短杆；② $a + e \leq d$ ，这种机构称为曲柄摆动导杆机构
- 对于图 (c) 所示的曲柄转动导杆机构， d 为最短杆，且满足 $d + e \leq a$



(a)



(b)



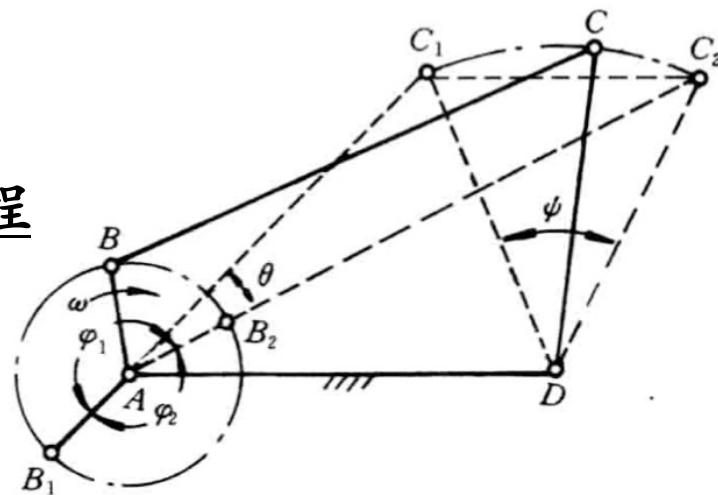
(c)

平面四杆机构输出件的急回特性

- 当曲柄等速转动时，摇杆来回摆动的平均速度不同，一快一慢
 - 极位夹角 θ
 - $\varphi_1 = 180^\circ + \theta > \varphi_2 = 180^\circ - \theta \Rightarrow \varphi = \omega t \Rightarrow t_1 > t_2 \Rightarrow v_1 > v_2$
 - 有些机器（如刨床），要求从动件工作行程的速度低一些（以便提高加工质量），而为了提高机械的生产效率，要求返回行程的速度高一些

• 摇杆的急回特性

- 使机构的慢速运动的行程为工作行程
- 而快速运动的行程为空回行程



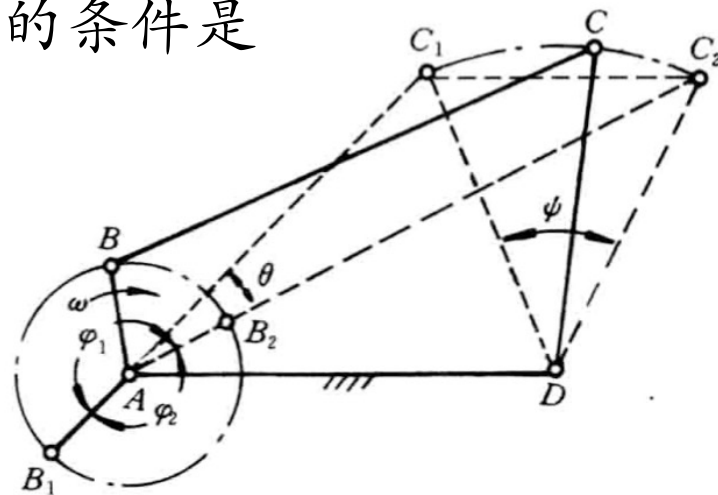
平面四杆机构输出件的急回特性

- 引入机构输出件的行程速度变化系数 k ，表明急回运动的特征
 - k 的值为空回行程和工作行程的平均速度 v_2 与 v_1 的比值

$$\varphi_1 = 180^\circ + \theta > \varphi_2 = 180^\circ - \theta \Rightarrow \varphi = \omega t \Rightarrow t_1 > t_2 \Rightarrow v_1 > v_2$$

$$k = \frac{v_2}{v_1} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{180^\circ + \theta}{180^\circ - \theta}$$

- 综上所述，平面四杆机构具有急回特性的条件是
 - (1) 原动件作等角速度整周转动
 - (2) 输出件作具有正、反行程的往复运动
 - (3) 极位夹角 $> 0^\circ$



平面四杆机构的传动角和死点

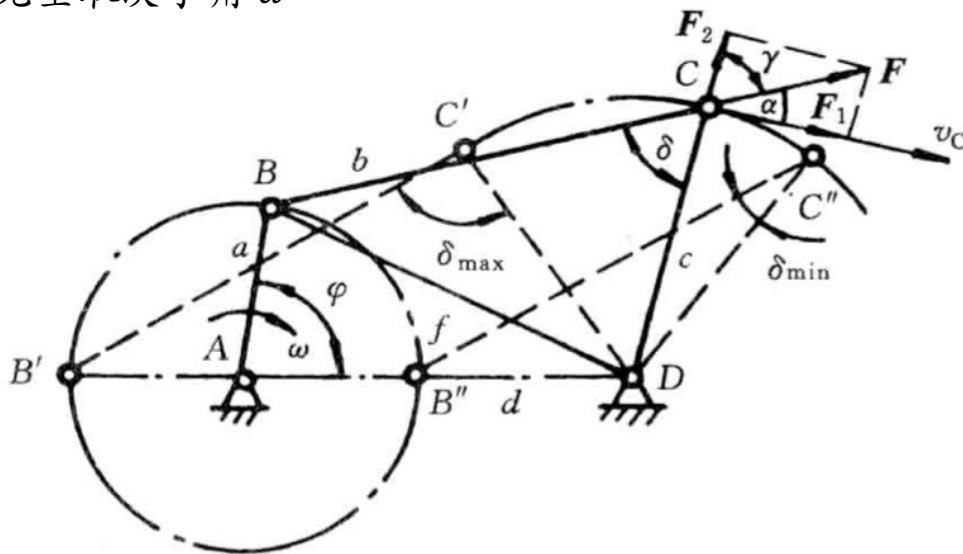
- 在不计摩擦力、惯性力和重力的条件下，机构中驱使输出构件运动的力的方向线与输出构件上受力点的速度方向间所夹的锐角（余角 γ 为传动角： $\gamma = 90^\circ - \alpha$ ）
 - 主动构件AB上的驱动力通过连杆BC传给输出构件CD的力 F 是沿BC方向
 - 设力 F 与速度 v_c 方向之间所夹的锐角为 α
 - $F_1 = F \cos \alpha$ ：对从动件产生有效转动力矩
 - $F_2 = F \sin \alpha$ ：只增加摩擦力矩，无助于输出构件的转动
- 为使机构传力效果良好，显然应使 F_1 的值愈大愈好
 - 理想情况是 $\alpha = 0^\circ$ ，最坏的情况是 $\alpha = 90^\circ$
 - 在力 F 一定的条件下， F_1 、 F_2 的大小完全取决于角 α

为了提高机械的传动效率，对于一些承受短暂高峰载荷的机构，应使其在具有最小传动角的位置时，刚好处于工作阻力较小（或等于零）的空回行程中

为了保证机构的传力效果，应限制机构的压力角的最大值 α_{max} 或传动角的最小值 γ_{min} 在某一范围内

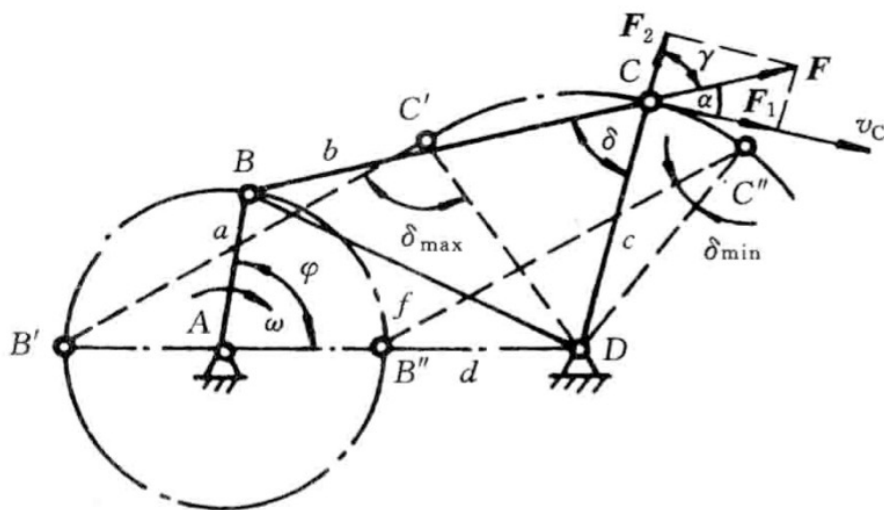
$$\gamma_{min} \geq [\gamma] \text{ 或 } \alpha_{max} \leq [\alpha]$$

- 一般机械： $[\gamma] = 30^\circ \sim 60^\circ$
- 高速和大功率机械： $[\gamma]$ 应取较大值

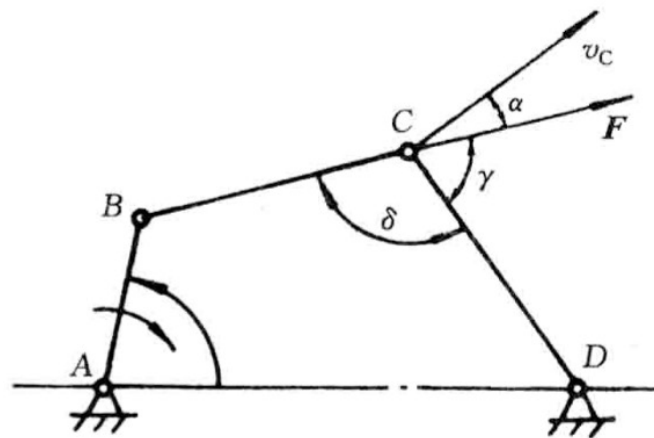


最小传动角的确定

- 对已设计好的平面四杆机构，应校核其压力角或传动角，以确定该机构的传力特性。为此，必须找到机构在一个运动循环中出现最小传动角（或最大压力角）的位置及大小
- 若 δ 为锐角，则 $\gamma = \delta$ ；若 δ 为钝角，则 $\gamma = 180^\circ - \delta$
 - 故当 δ 在最小值或最大值的位置时，有可能出现传动角的最小值



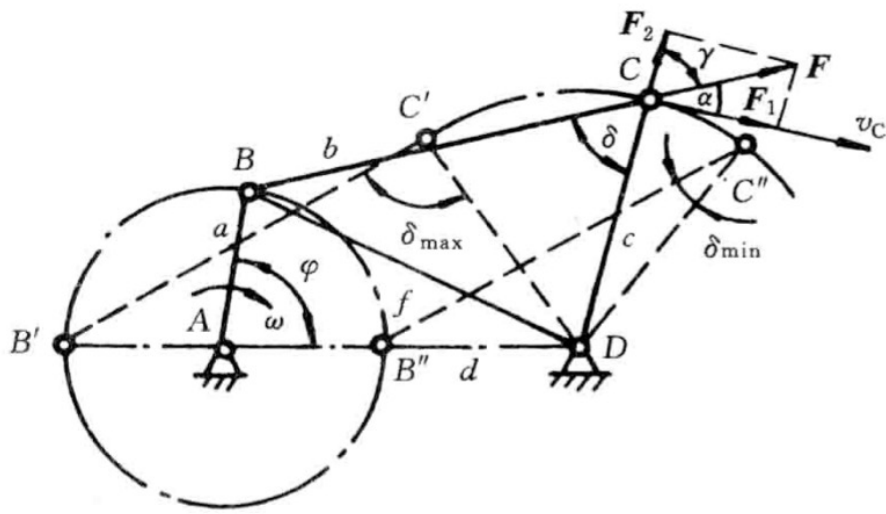
(a)



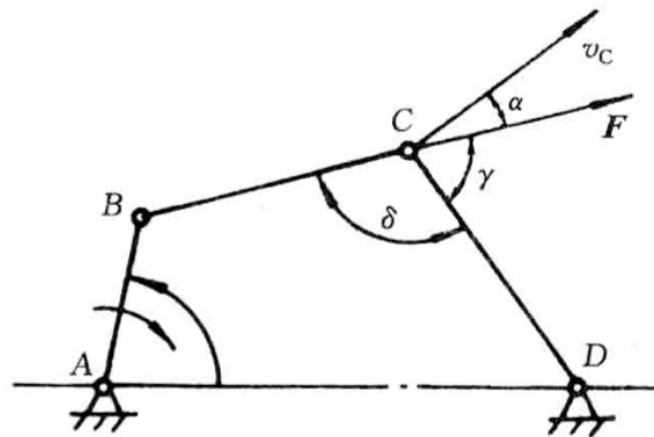
(b)

最小传动角的确定

- $f^2 = a^2 + d^2 - 2ad \cos \varphi$, $f^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \delta$
- $\delta = \arccos \frac{b^2+c^2-a^2-d^2+2ad \cos \varphi}{2bc}$
 - (1) 当 $\varphi = 0^\circ$, 即AB与机架AD重叠共线时, 得 $\delta_{min} = \arccos \frac{b^2+c^2-(d-a)^2}{2bc}$
 - (2) 当 $\varphi = 180^\circ$, 即AB与机架AD拉直共线时, 得 $\delta_{max} = \arccos \frac{b^2+c^2-(d+a)^2}{2bc}$
- 所以: $\gamma_{min} = \min\{\delta_{min}, 180^\circ - \delta_{max}\}$



(a)



(b)

最小传动角的确定

• 对于偏置曲柄滑块机构

• 当曲柄为主动件、滑块为从动件时, $\cos \gamma = \frac{a \sin \varphi + e}{b}$

• 当 $\varphi = 90^\circ$ 时, 有 $\gamma_{min} = \arccos \frac{a+e}{b}$

• 曲柄滑块机构可视为由曲柄摇杆机构演化而成

• 所以, 曲柄与机架的共线位置应为曲柄垂直于滑块导路线的位置

• 故 γ_{min} 必然出现在 $\varphi = 90^\circ$ 时的位置

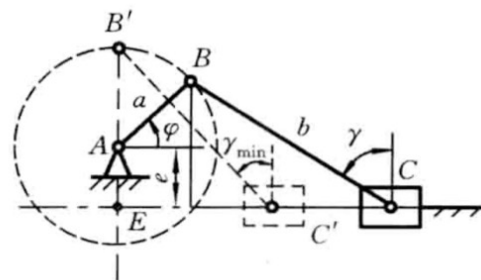
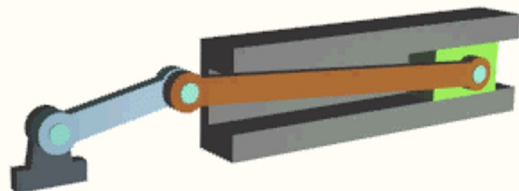
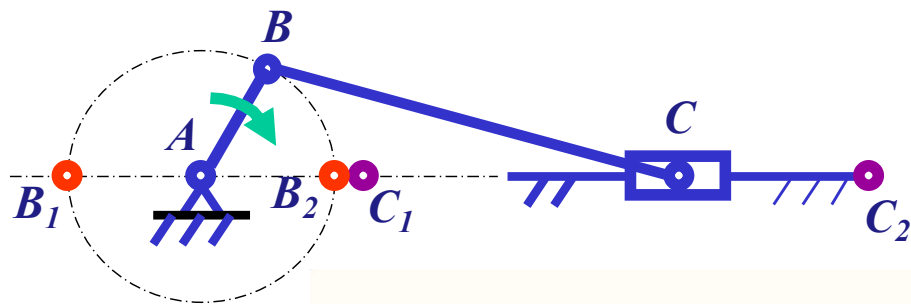
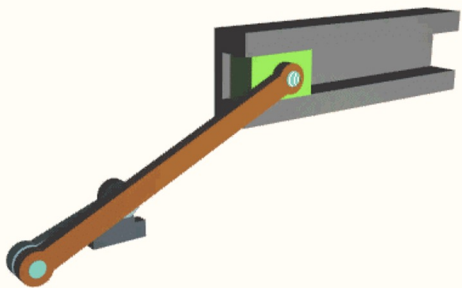
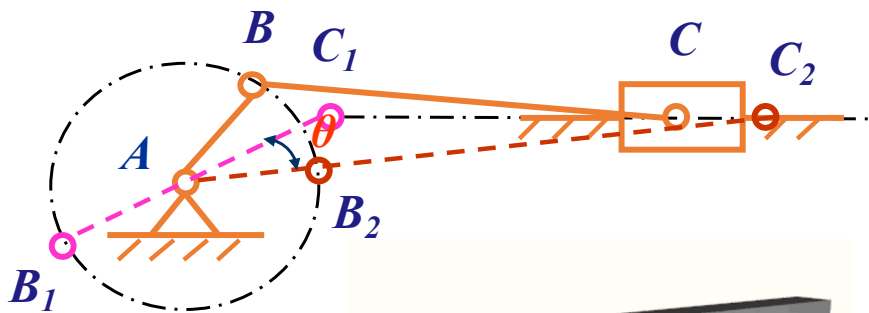


图 2-20 偏置曲柄滑块机构的传动角



最小传动角的确定

- 为使机构具有最小传动角的瞬时位置能处于机构的非工作行程中
 - 注意滑块的偏置方位、工作行程方向与曲柄转向的正确配合
 - 例如，当滑块偏于曲柄回转中心的下方，且滑块向右运动为工作行程，则曲柄的转向应该是逆时针的
 - 反之，若滑块向左运动为工作行程，则曲柄的转向应该是顺时针的，这样也可以同时保证输出件滑块具有良好的传力性能
 - 在设计偏置曲柄滑块机构时，可采用下述方法判别偏置方位是否合理：

过曲柄回转中心A
作滑块上铰链中心
C的移动方位线的
垂线

将其垂足E视为曲
柄上的一点

则当E与滑块的工作行程方向一致时，说明主动件曲柄的转向以及滑块的偏置方位选择是正确的；否则，应重新设计

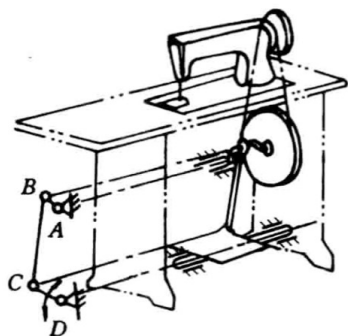
可利用
$$\gamma_{min} = \arccos \frac{a+e}{b}$$
判别偏置方位合理性

机构的“死点”位置

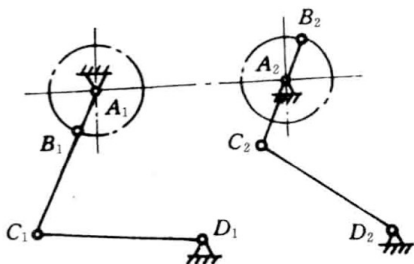
- 无论给机构主动件上的驱动力或驱动力矩有多大，均不能使机构运动，这个位置称为“死点”位置

不利的“死点”例子

- 缝纫机主动件是摇杆（踏板）CD，输出件是曲柄AB
- 当曲柄与连杆共线时， $\gamma=0^\circ$ ，主动件摇杆给输出件曲柄的力将沿着曲柄的方向
- 不能产生使曲柄转动的有效力矩，当然也就无法驱使机构运动



(a) 缝纫机



(b) “死点”位置

有利的“死点”例子

- 在工程实践中，不少场合要利用“死点”位置来满足一定的工作要求
- 如图所示的钻床上夹紧工件的快速夹具，就是利用“死点”位置夹紧工件的一个例子
- 如图所示的飞机起落架机构也是利用“死点”位置进行工作的一个例子

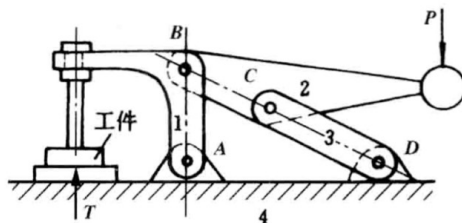


图 2-23 利用“死点”位置夹紧工件

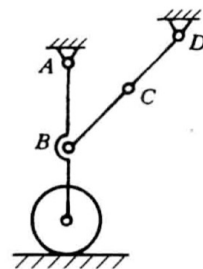


图 2-24 飞机起落架机构

平面四杆机构的设计

主要是根据给定的运动条件确定机构运动简图的尺寸参数

平面四杆机构设计的基本问题

- 实现刚体给定位置的设计
 - 要求所设计的机构能引导一个刚体顺序通过一系列给定位置
 - 该刚体一般是机构的连杆

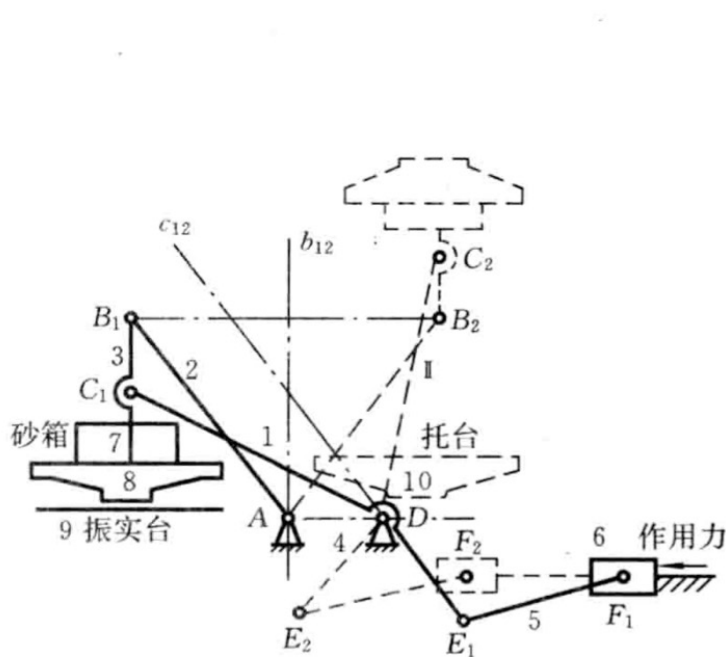


图 2-28 翻转机构

1—摇杆;2—摇杆;3—连杆;4—机架;5—连杆;
6—滑块;7—砂箱;8—翻台;9—振实台;10—托台

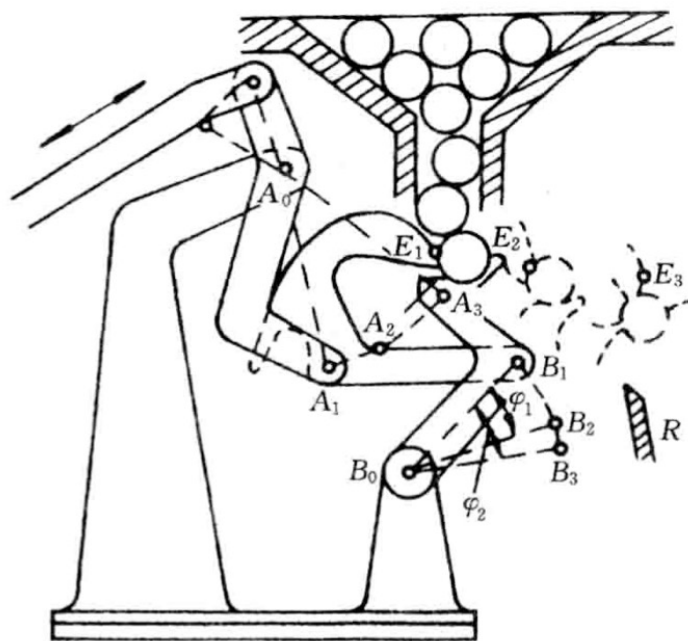
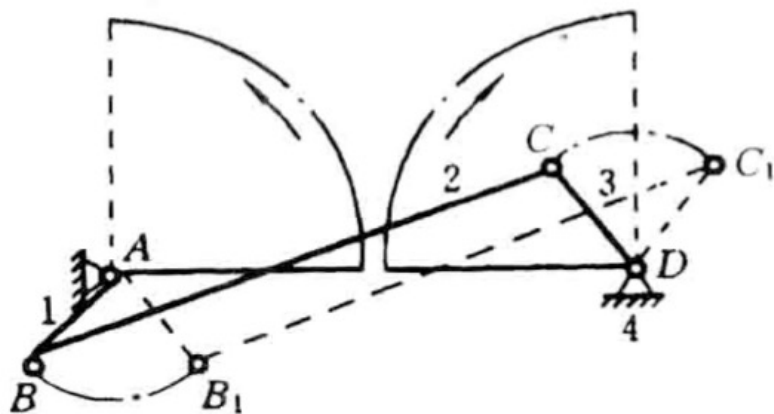


图 2-29 自动送料机构

平面四杆机构设计的基本问题

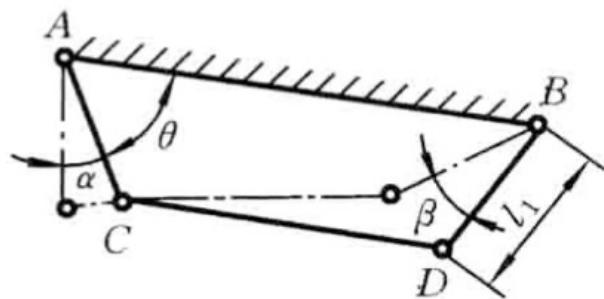
• 实现预定运动规律的设计

- 要求所设计机构的两主、从动连架杆之间的运动关系能满足某种给定的函数关系
- 如实现两连架杆的对应角位移、实现输出构件的急回要求等



(a) 车门开闭机构

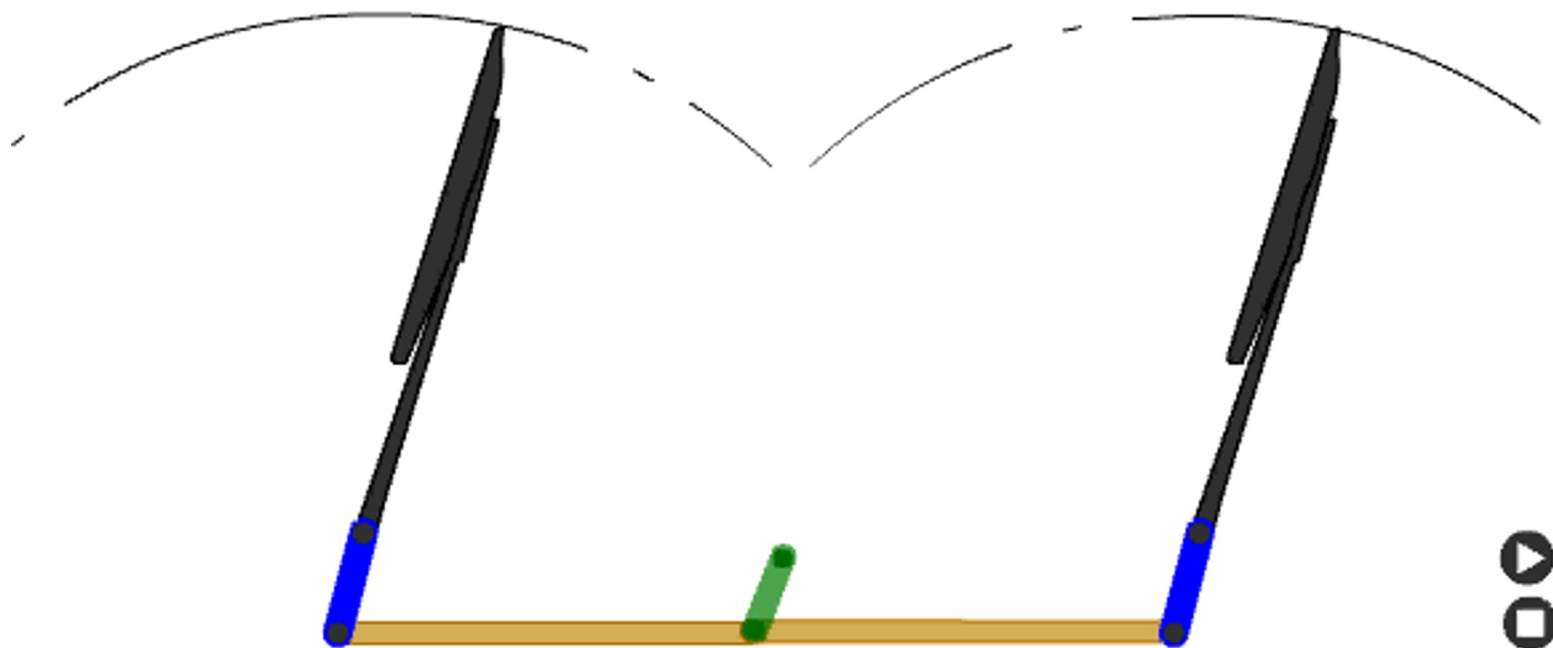
要求两连架杆的转角满足大小相等而转向相反的运动关系，以实现车门的开启和关闭



(b) 汽车前轮转向机构

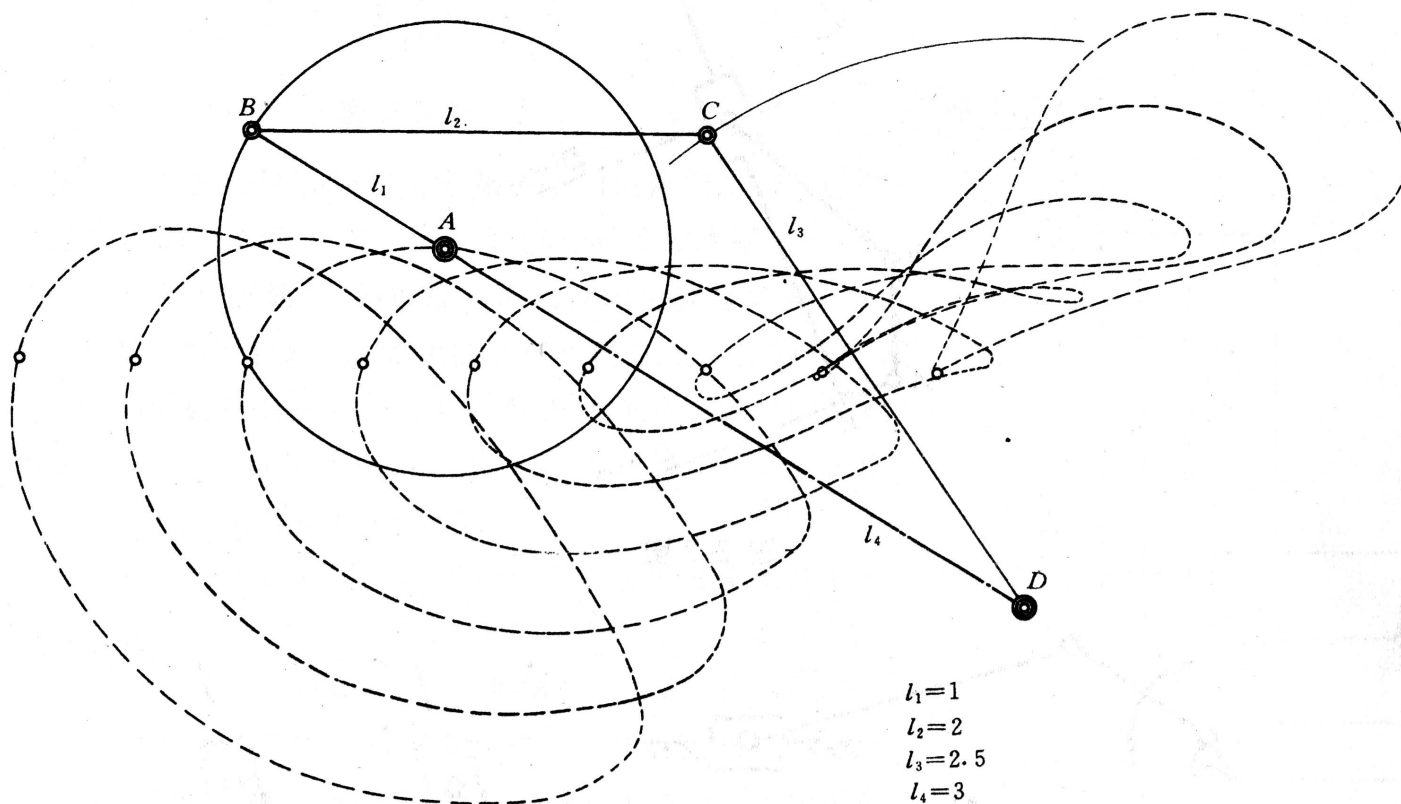
要求两连架杆的转角满足某种函数关系，以保证汽车转弯时各轮均处于纯滚动状态，实现顺利转向

平面四杆机构设计的基本问题



平面四杆机构设计的基本问题

- 实现**预定运动轨迹**的设计
 - 要求所设计机构的连杆上某一点的轨迹，能与给定的曲线相一致，或者能依次通过给定曲线上的若干个有序的点



平面四杆机构设计的基本问题

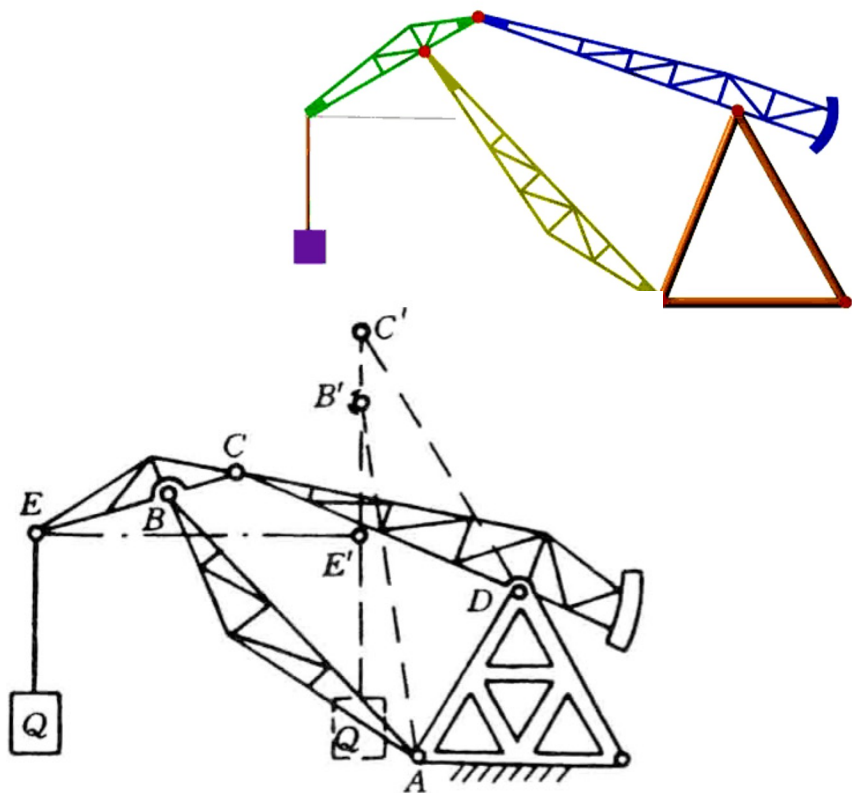


图 2-31 鹤式起重机机构

当构件AB为原动件时，能使连杆BC上悬挂重物的点E在近似水平的直线上移动

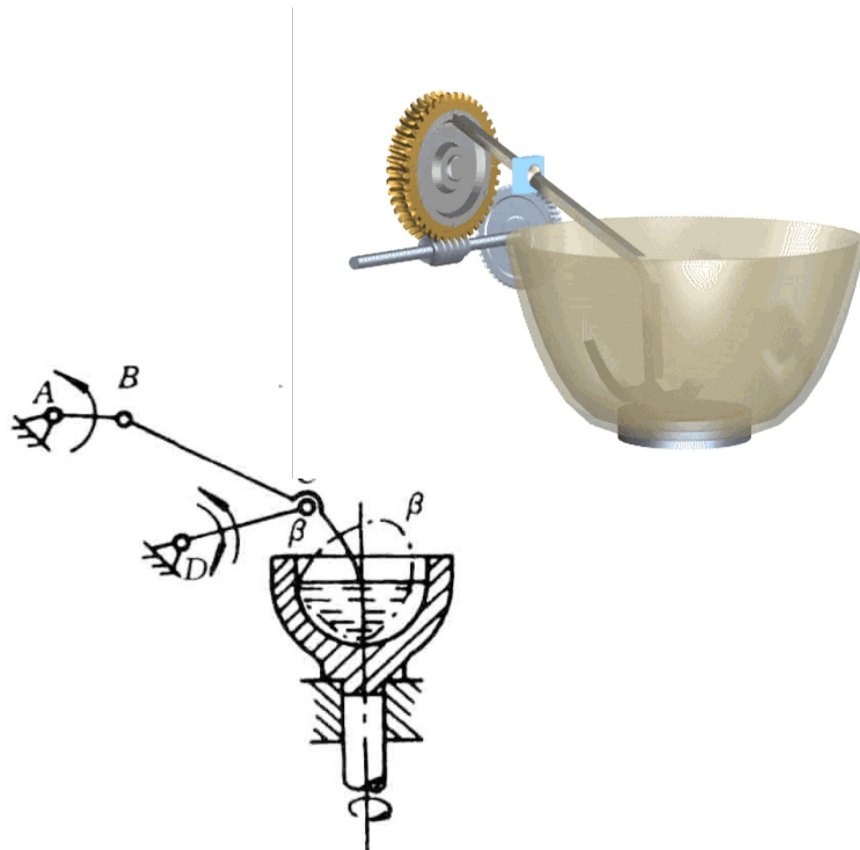


图 2-32 搅拌机机构

其连杆上某一点可以按轨迹运动

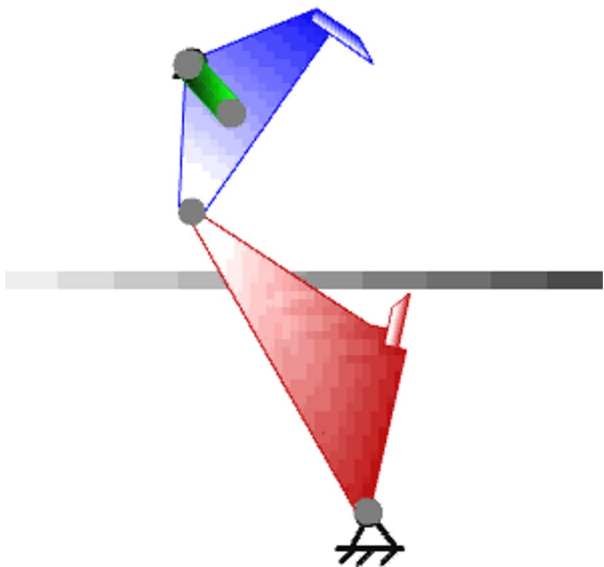
平面四杆机构设计的基本问题

• 实现综合功能的机构设计

- 可用于实现机器的某些复杂的运动功能要求

• 带钢飞剪机

- 实现连杆位置：上、剪下比须连续通过确定位置
- 实现轨迹：刀刃按一定轨迹运动
- 实现速度要求：在剪切区的水平速度有要求



用来将连续快速运行的带钢剪切成尺寸规格一定的钢板的

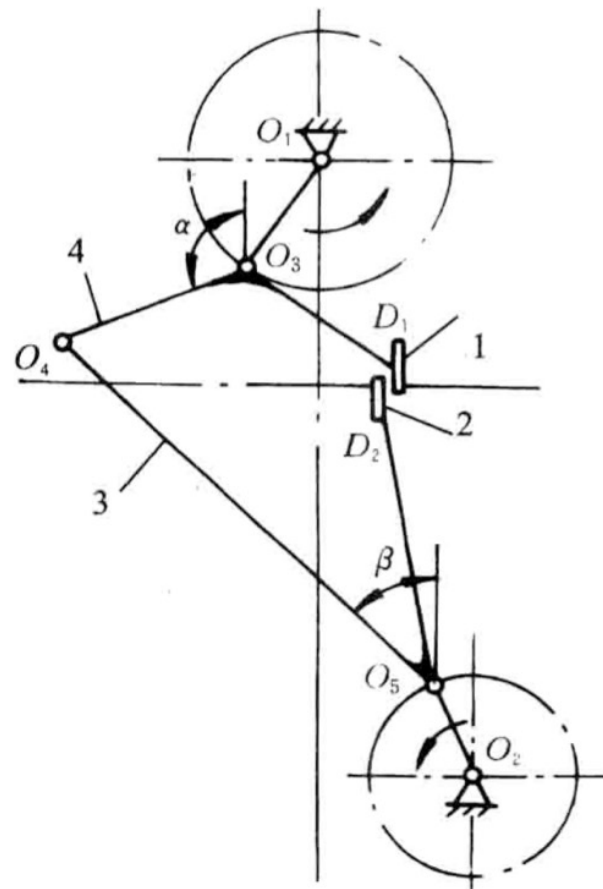


图 2-33 飞剪机剪切机构

1—上剪刀；2—下剪刀；
3—下连杆；4—上连杆

平面四杆机构的设计

几何法

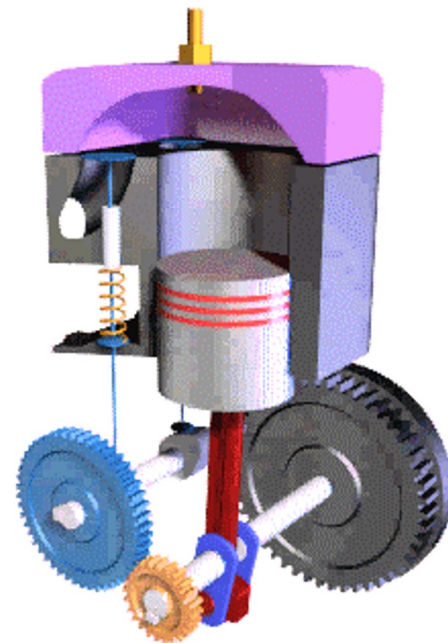
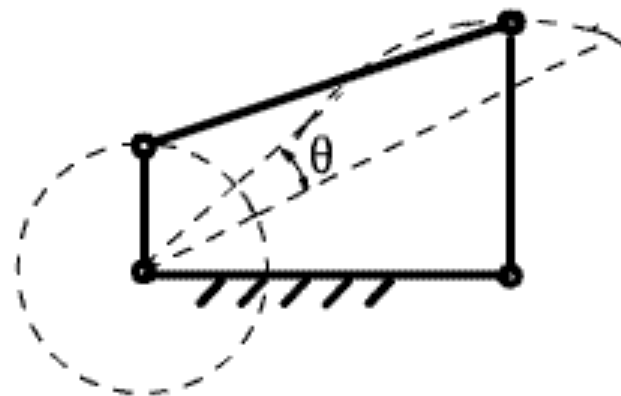
- 根据运动几何学原理，用几何作图法求解运动参数的方法。该方法直观、方便、易懂，求解速度一般较快，但精度不高，适用于简单问题求解或对精度要求不高的问题求解

解析法

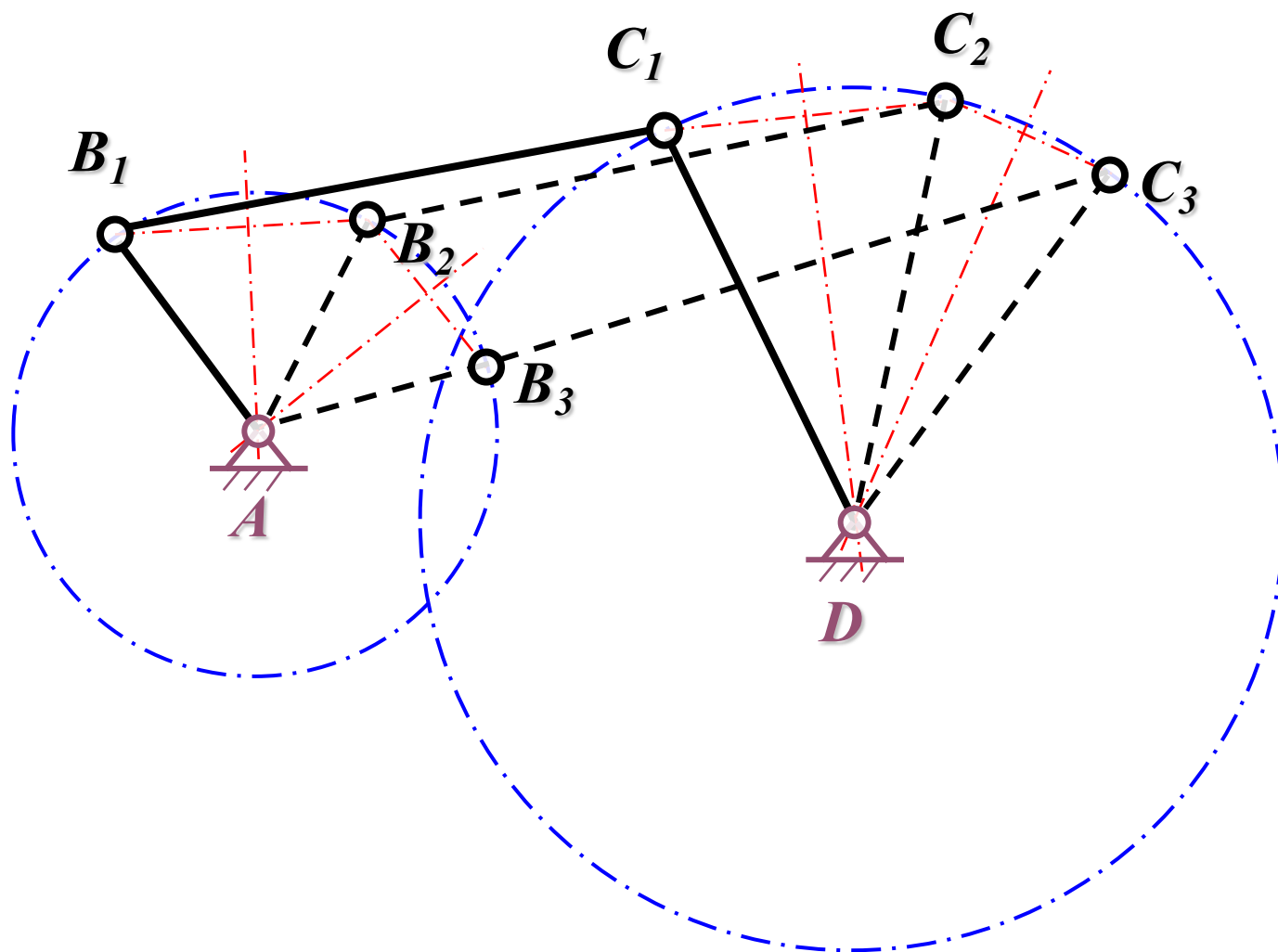
- 这种方法是以前机构参数来表达各构件间的运动函数关系，以便按给定条件求解未知数。这种方法求解精度高，能求解较复杂的问题。随着计算机的广泛应用，这种方法正在得到逐步推广

实验法

- 用作图试凑或利用各种图谱、表格及模型实验等来求得机构运动学参数。此种方法直观简单，但求解精度较低，适用于近似设计或参数预选



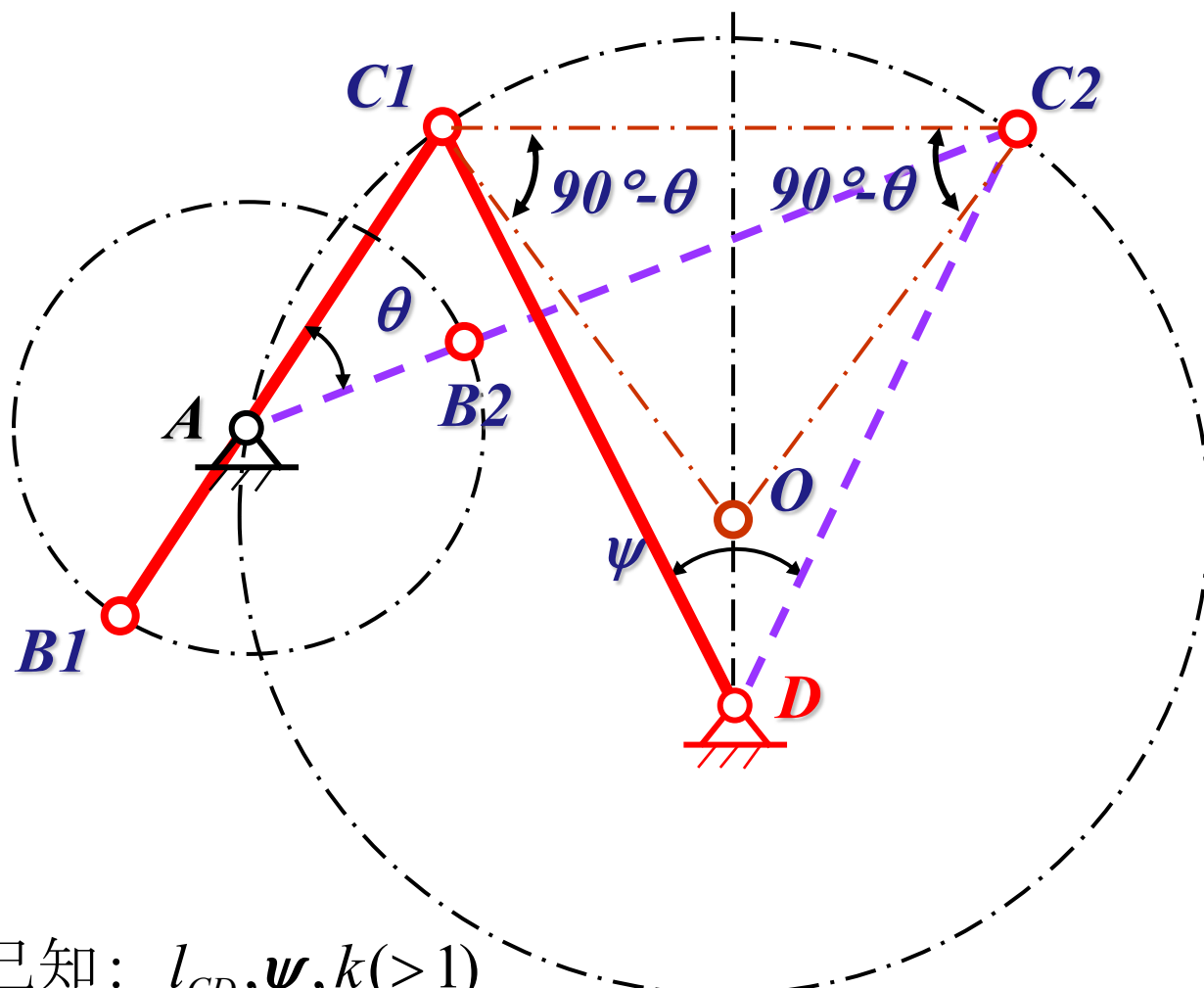
根据给定的连杆位置设计四杆机构



给定行程速度变化系数设计四杆机构

- 在设计具有急回特性的平面四杆机构时，一般是
 - 根据机械的工作性质和需要，参考机械设计手册，选定适当的行程速度变化系数 k 值
 - 然后利用机构两极限位置的几何关系，并考虑有关附加条件，从而确定机构运动简图的运动学尺寸
- 下面以实例来说明其设计方法和步骤。
 - 铰链四杆机构-设计过程
 - 曲柄滑块机构-设计过程
 - 导杆机构-设计过程

铰链四杆机构-设计过程



作图过程:

确定比例尺 μ_l

$$\theta = \frac{180^\circ (k-1)}{(k+1)}$$

$$AC_1 = BC - AB$$

$$AC_2 = BC + AB$$

$$AB = (AC_2 - AC_1) / 2$$

$$BC = (AC_1 + AC_2) / 2$$

$$l_{AB} = \overline{AB} \cdot \mu_l,$$

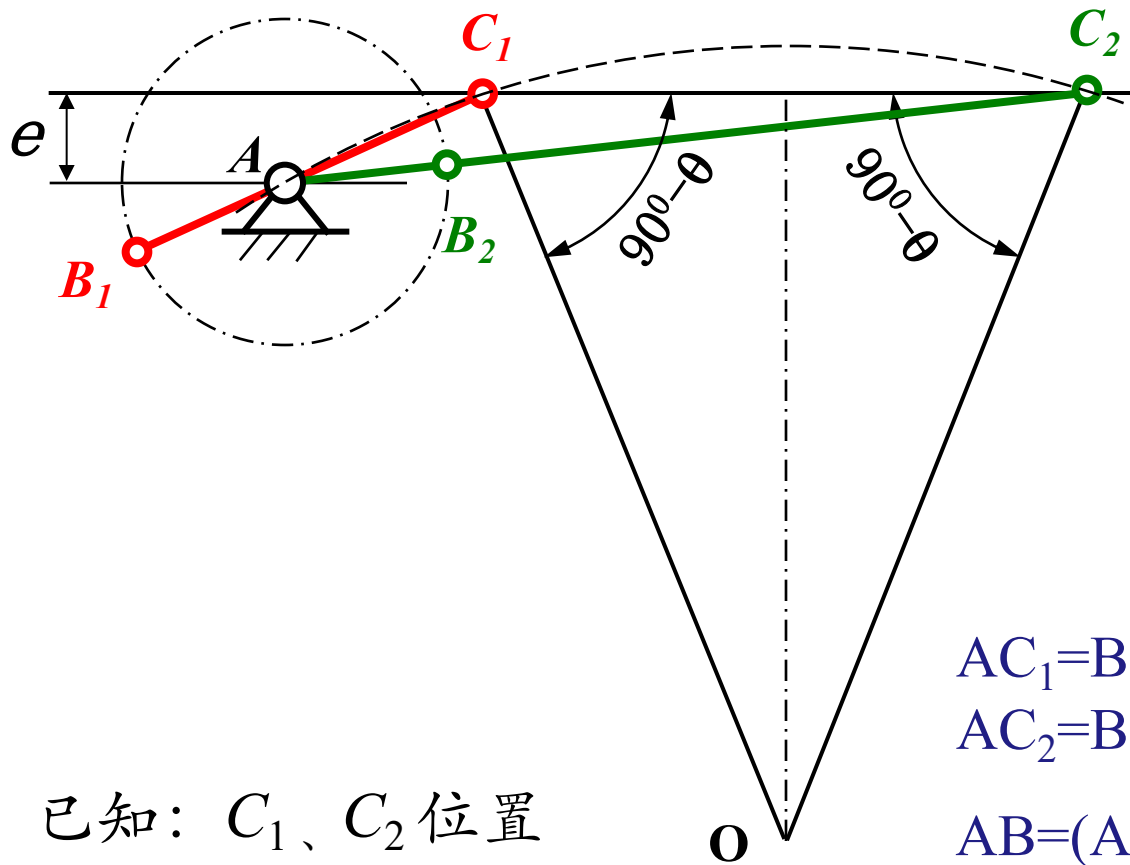
$$l_{BC} = \overline{BC} \cdot \mu_l,$$

$$l_{AD} = \overline{AD} \cdot \mu_l$$

已知: $l_{CD}, \psi, k(>1)$

求: A点位置, 并确定杆长 l_{AB}, l_{AD}, l_{BC}

曲柄滑块机构-设计过程



- 确定比例尺 μ_l
- 画出 C_1 、 C_2 及偏心距 e
- 已知 K ，求 θ
- 以 $90^\circ - \theta$ 为底边角， C_1C_2 为底作等腰三角形 C_1OC_2
- 以三角形顶点 O 为圆心作辅助圆
- 与偏心距交点即为 A 点

已知： C_1 、 C_2 位置
(行程 H)， k ， e

$$AC_1 = BC - AB$$

$$AC_2 = BC + AB$$

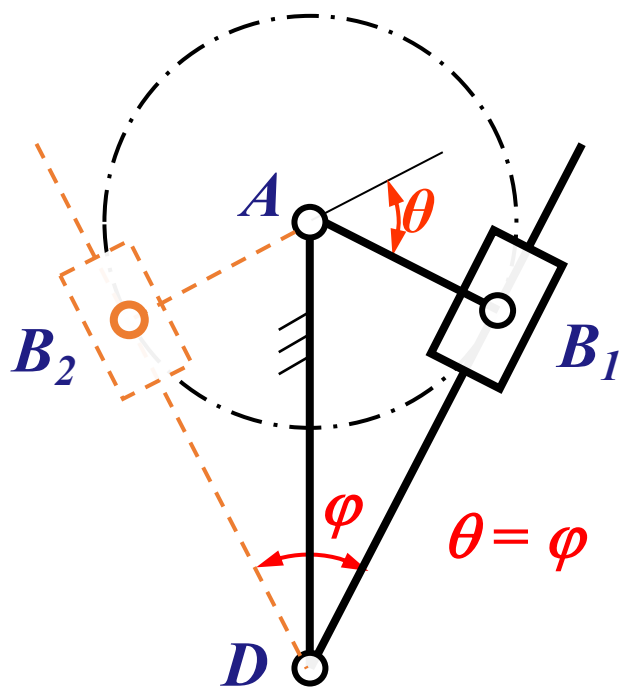
$$AB = (AC_2 - AC_1) / 2$$

$$BC = (AC_1 + AC_2) / 2$$

$$l_{AB} = \overline{AB} \cdot \mu_l$$

$$l_{BC} = \overline{BC} \cdot \mu_l$$

导杆机构-设计过程



已知: l_{AD}, K

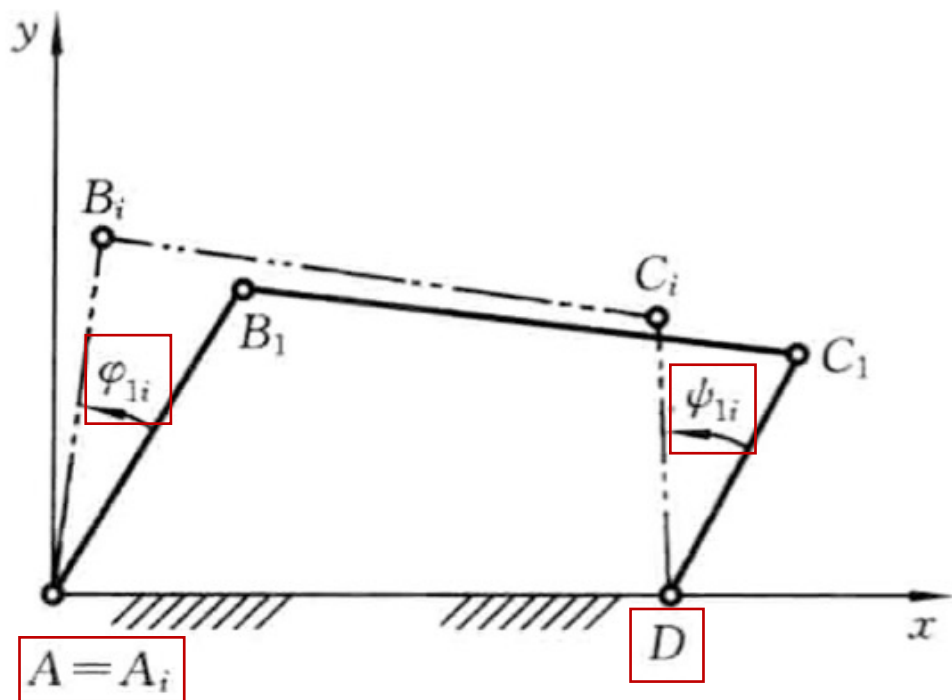
$$l_{AB} = l_{AD} \sin(\varphi/2) = l_{AD} \sin(\theta/2)$$

$$l_{BD} = l_{AD} \cos(\varphi/2) = l_{AD} \cos(\theta/2)$$

根据给定两连架杆的位置设计四杆机构

• 刚化反转法

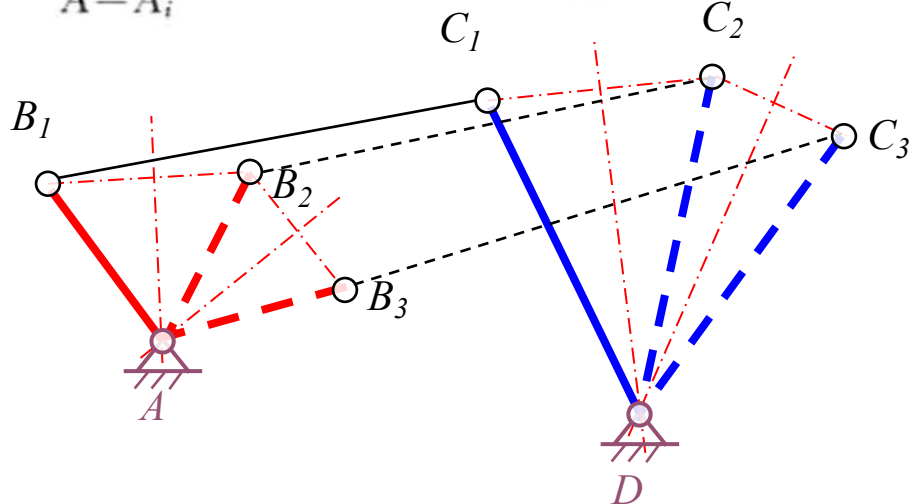
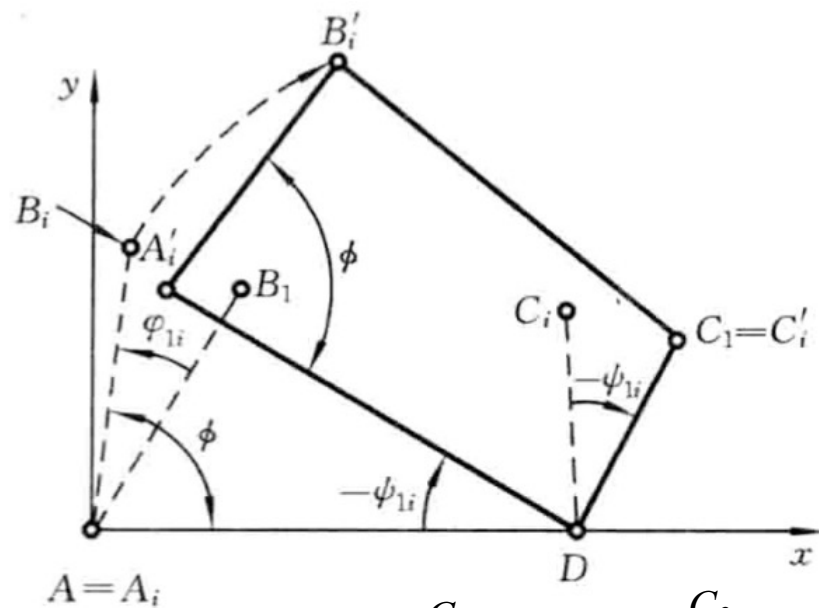
- 一铰链四杆机构，假设已确定了两连架杆的若干个对应位置，如图中第 1 和第 i 位置（分别如实线和双点画线所示）
 - 即已知输入构件转角 φ_{1i} 和输出构件转角 ψ_{1i} 的对应位置
 - 又已知 A、D 两点的位置
 - 求 B、C 两点的位置

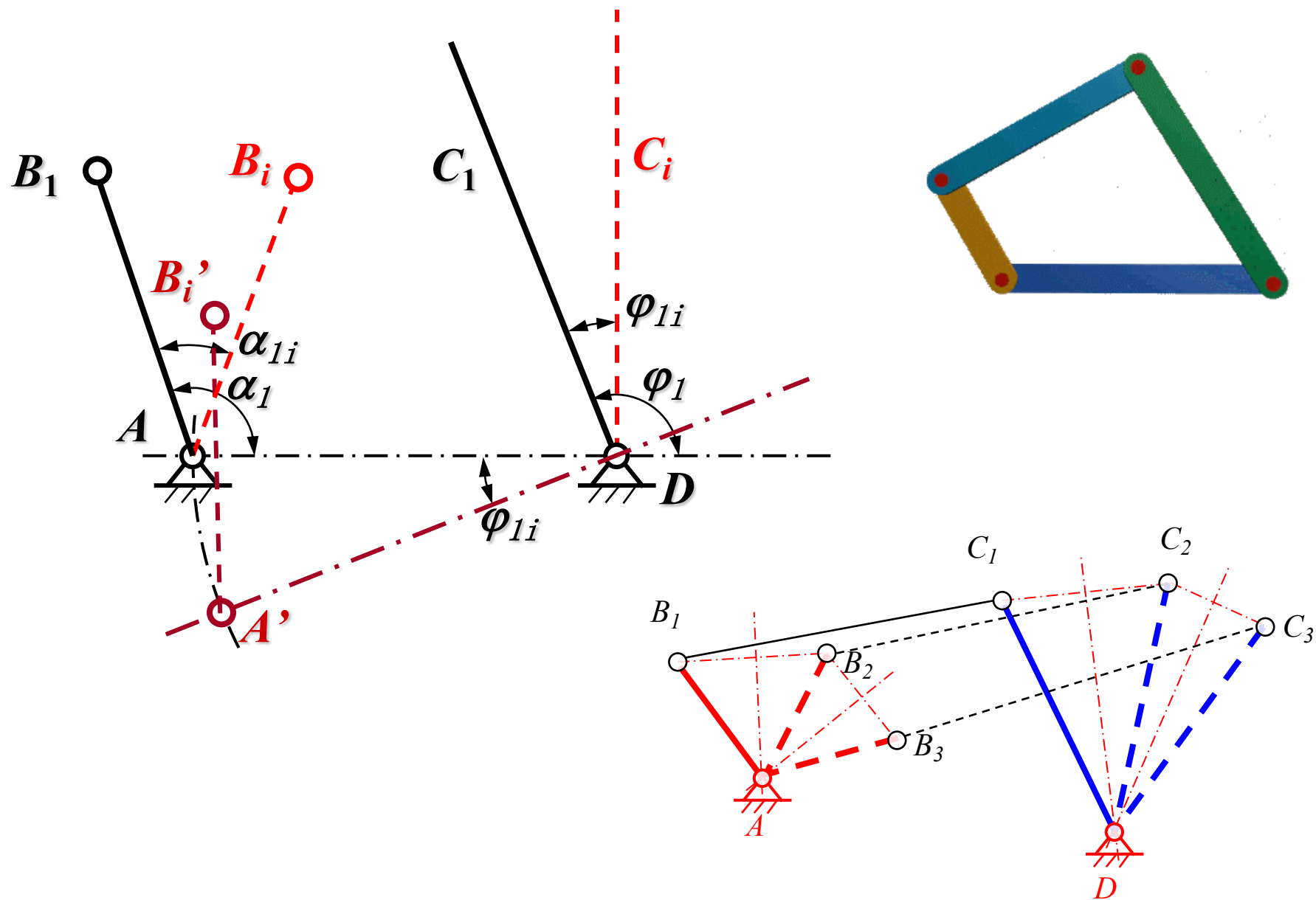


根据给定两连架杆的位置设计四杆机构

• 刚化反转法

- 如果把机构的第 i 个位置 $A_iB_iC_iD$ 看成一刚体（即刚化），并绕点 D 转过 $-\varphi_{1i}$ 角（即反转）
 - 使输出连架杆 C_iD 与 C_1D 重合
- 则机构将由位置 $A_iB_iC_iD$ 转到假想的新位置 $A'_iB'_iC'_iD$
 - 原来的输出连架杆固定在原位置上而转化成机架
 - 原来的机架和连杆变为新连架杆
 - 原来的输入连架杆 A_iB_i 相对于新机架变成了新连架杆 $A'_iB'_i$
- 这样，就将实现两连架杆对应位置问题转化成实现连杆若干位置 $A'_iB'_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 问题

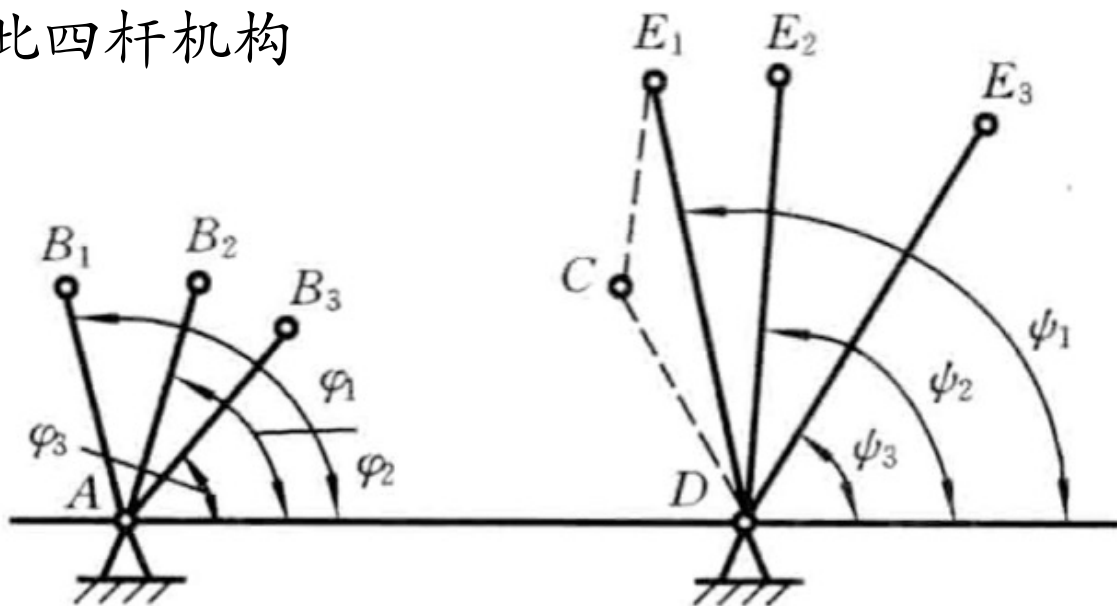




根据给定两连架杆的位置设计四杆机构

• 刚化反转法

- 设已知构件 AB 和机架 AD 的长度，要求在该四杆机构的运动过程中，构件 CD 上某一标线 DE（注意 E 不是铰链点）和构件 AB 能占据三组给定的对应位置
 - $AB_1 - DE_1, AB_2 - DE_2, AB_3 - DE_3$
 - 即给定三组对应转角： $\varphi_1 - \psi_1, \varphi_2 - \psi_2, \varphi_3 - \psi_3$
- 需设计此四杆机构

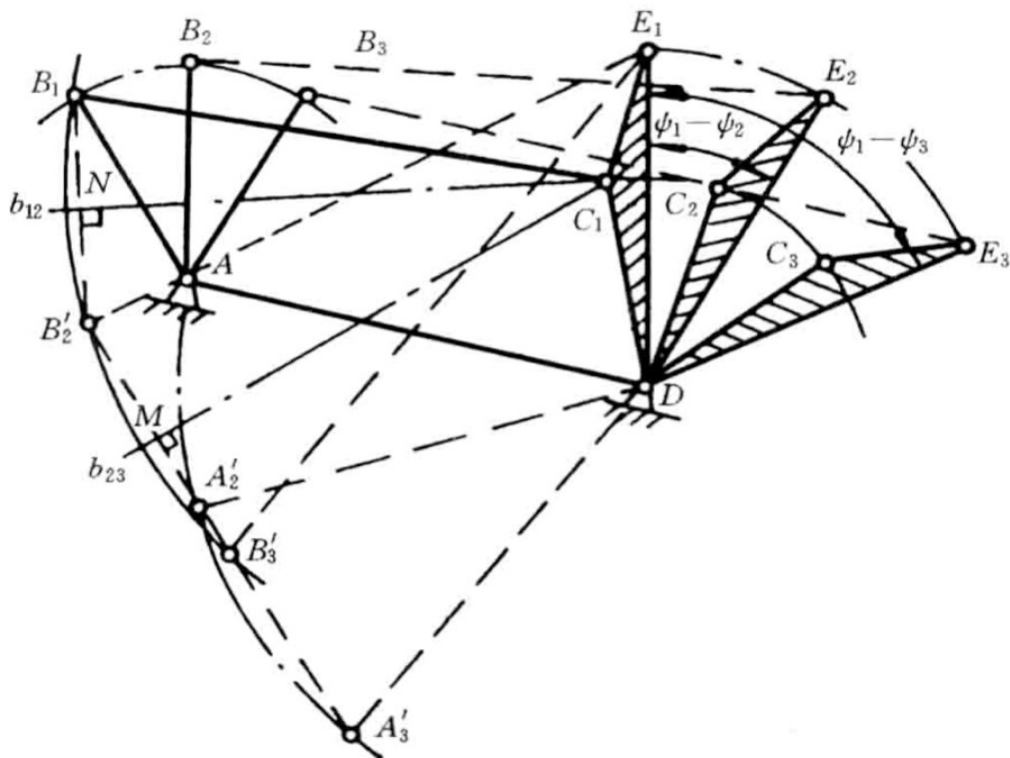


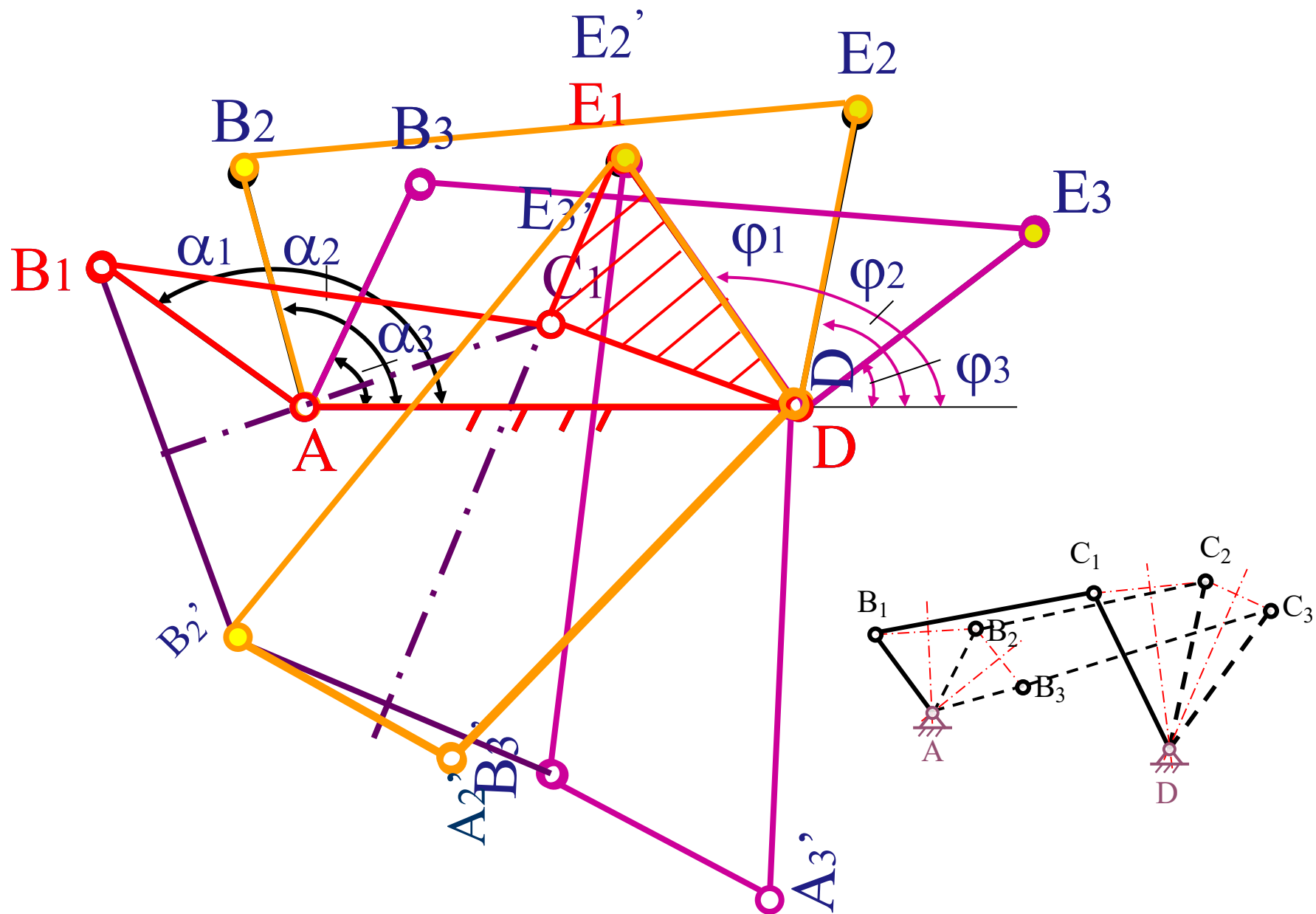
根据给定两连架杆的位置设计四杆机构

• 刚化反转法

- 可将此问题转化为以 CD 为机架、 AB 为连杆的已知连杆位置的设计问题来求解 $A'_i B'_i C'_i D$

1. 为此，首先将 AB_2 、 AB_3 绕点 D 分别反转（即逆时针转动） $\psi_1 - \psi_2$ ， $\psi_1 - \psi_3$ 角，得到 $A'_2 B'_2$ 、 $A'_3 B'_3$
2. 这样就得到了“新连杆”的三个位置： $A_1 B_1$ 、 $A'_2 B'_2$ 、 $A'_3 B'_3$
3. 然后连接 $B_1 B'_2$ 、 $B_2 B'_3$ ，并作其垂直平分线交于点 C
4. 则 $AB_1 C_1 D$ 即为所求的铰链四杆机构





按照给定的运动轨迹设计四杆机构

- 工程设计中，有时需要利用连杆上某点画出的一条封闭曲线来满足设计要求
 - 如图所示的传送机构，工件6在轨道上向左步进，需实现点E的按虚线所示的封闭曲线运动轨迹

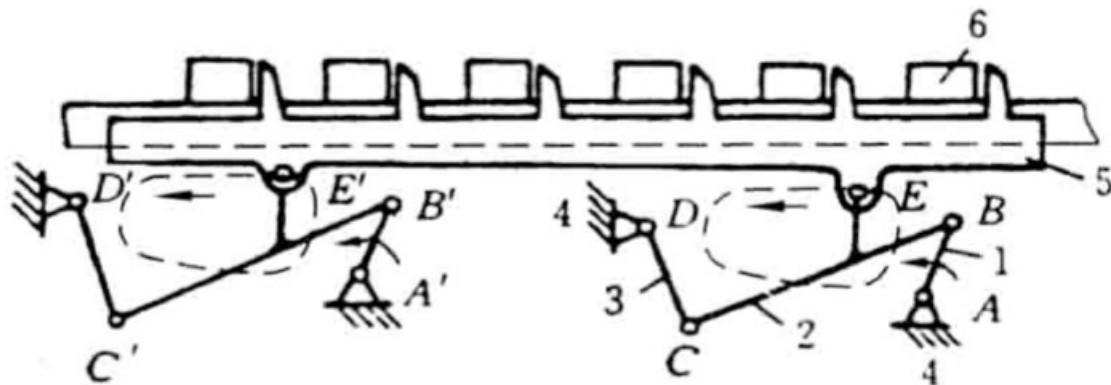


图 2-38 传送机构

1—曲柄；2—连杆；3—摇杆；4—机架；5—与连杆固连工作台；6—工件

- 如果已知运动轨迹，要求设计平面四杆机构，可以采用解析法和优化设计的方法，还可借助于连杆曲线图谱来设计

连杆机构的结构设计

- 为保证连杆机构完成预定的工作任务，当确定了机构的类型及运动学尺寸以后，还需合理设计机构构件的具体结构
- 连杆机构的结构设计应满足工艺要求，能实现预定的运动，能承受工作中连续载荷的作用，尺寸紧凑且符合整机的安装要求，易于加工与装配，而且成本低、寿命长
- 由于连杆机构的运动副全部是低副（即转动副和移动副），故以下主要讨论转动副和移动副及其构件的主要结构形式及特点



ME303: 机械设计

2022年秋季

谢谢~

宋超阳
南方科技大学