



# 第三章 凸轮机构

3.1 凸轮机构的应用和类型

3.2 从动件的运动规律

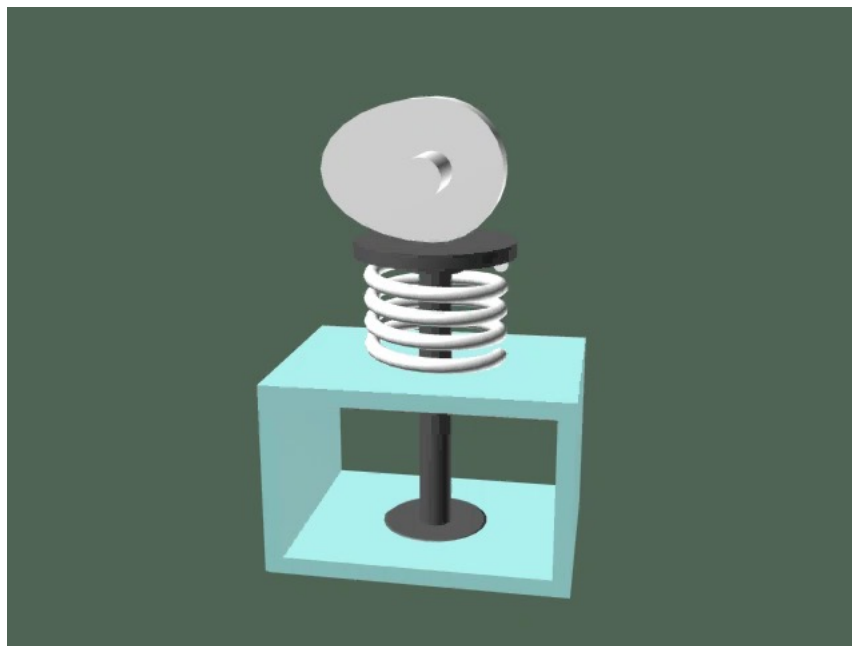
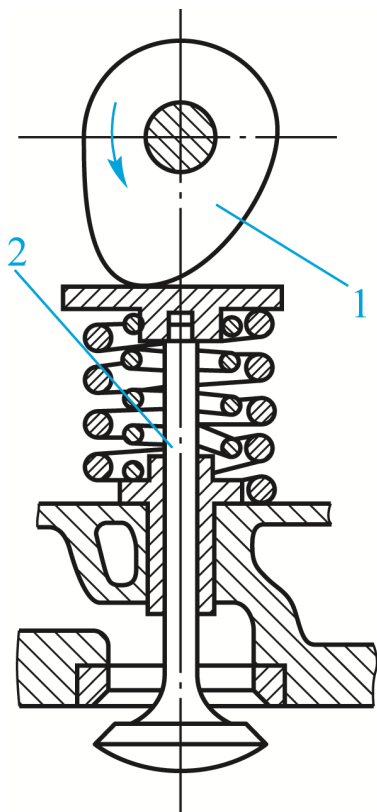
3.3 凸轮机构的压力角

3.4 图解法设计凸轮轮廓

机械设计基础主要研究机械中的**常用机构**和**通用零件**的工作原理、结构特点、基本的设计理论和方法。

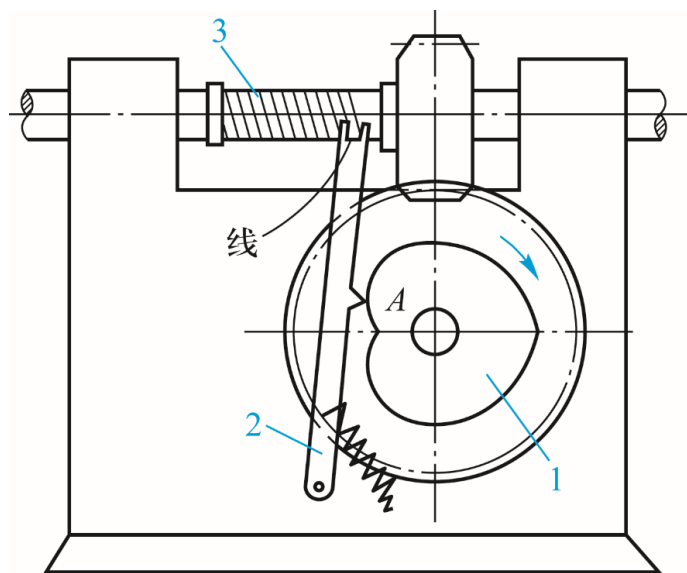
# 凸轮机构的应用和类型

凸轮机构是一种高副机构，理论上可以实现从动件任意复杂的运动，而且结构简单、紧凑，设计方便，所以在自动化和机电一体化产品中得到广泛应用。

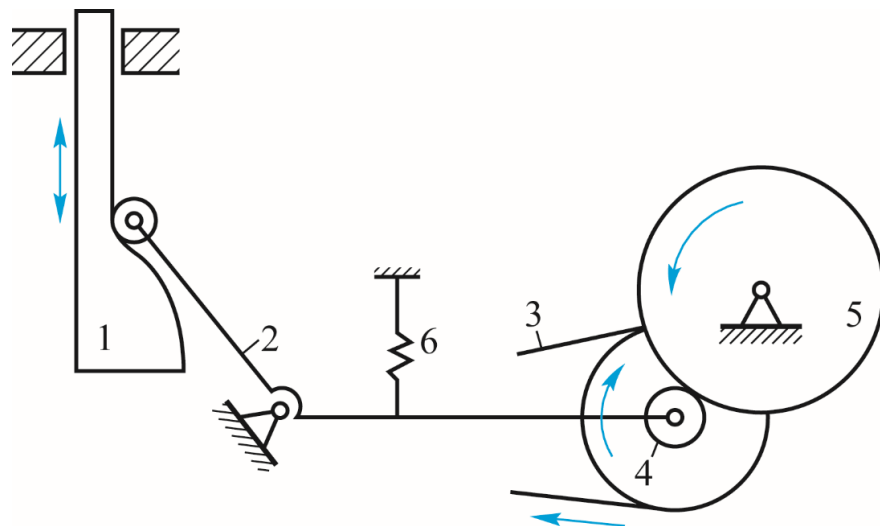


内燃机配气凸轮机构

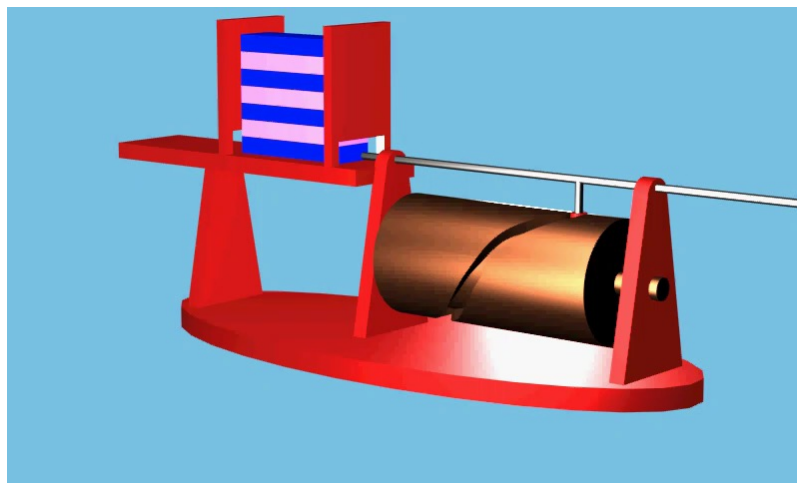
# 凸轮机构的应用和类型



绕线机构



录音机卷带机构



送料机构

# 凸轮机构的应用和类型

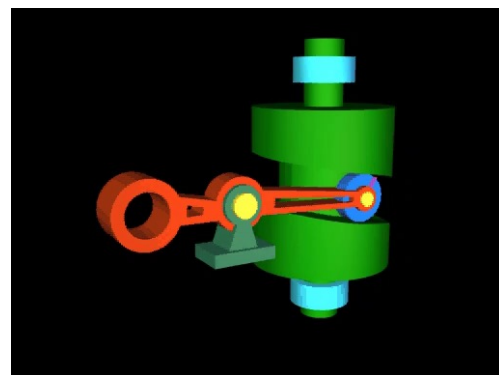
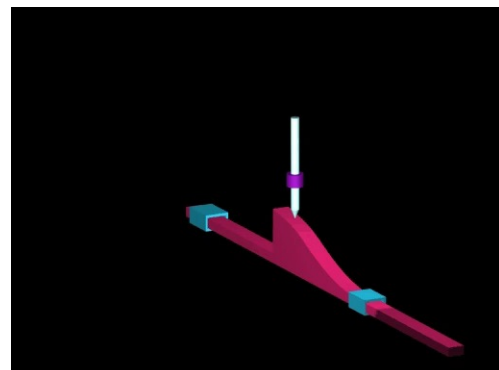
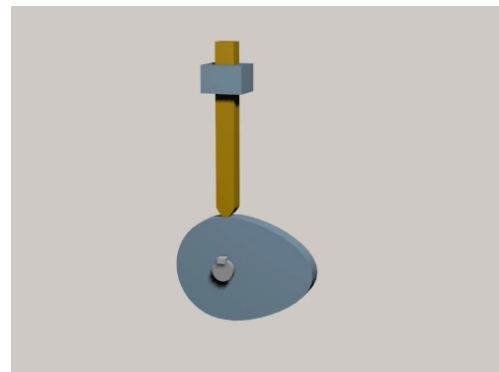
凸轮机构的组成——**凸轮**、**从动件**、**机架**

凸轮机构的类型——按凸轮形状分

(1) **盘形凸轮**：绕固定轴线转动且具有变化半径的盘形零件，与从动件之间的相对运动为平面运动，平面机构

(2) **移动凸轮**：作直线往复移动，与从动件之间的相对运动为平面运动，平面机构

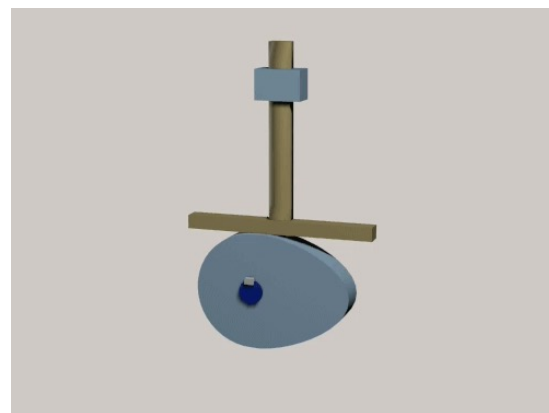
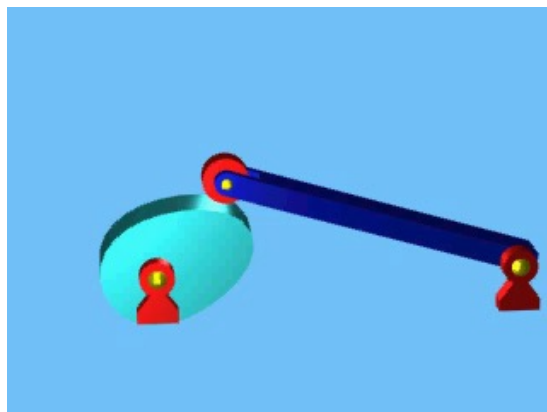
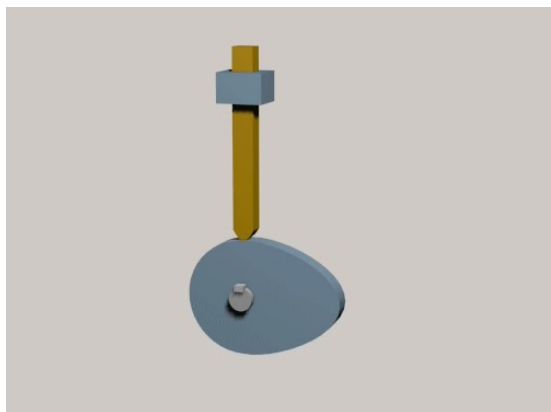
(3) **圆柱凸轮**：推动从动件运动的轮廓槽分布于圆柱面上，相当于将移动凸轮卷成圆柱，与从动件之间的相对运动为空间运动，空间机构



# 凸轮机构的应用和类型

凸轮机构的类型——按从动件端部形式分

- (1) 尖顶从动件：能与复杂的凸轮轮廓保持接触，点接触易磨损
- (2) 滚子从动件：耐磨损，承载能力高
- (3) 平底从动件：不能与内凹的凸轮轮廓接触，当平底与从动件移动方向垂直时压力角始终为零

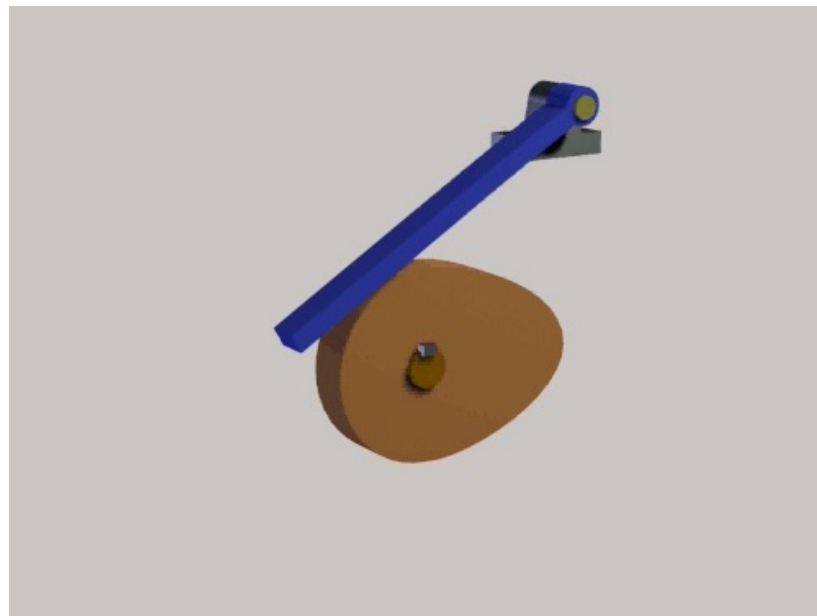
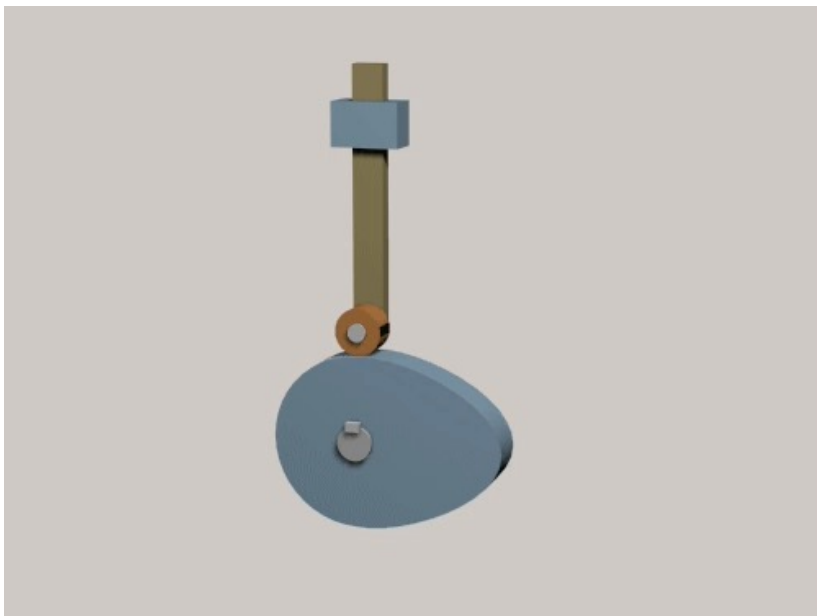


# 凸轮机构的应用和类型

## 凸轮机构的类型——按从动件的运动形式分

(1) 直动从动件

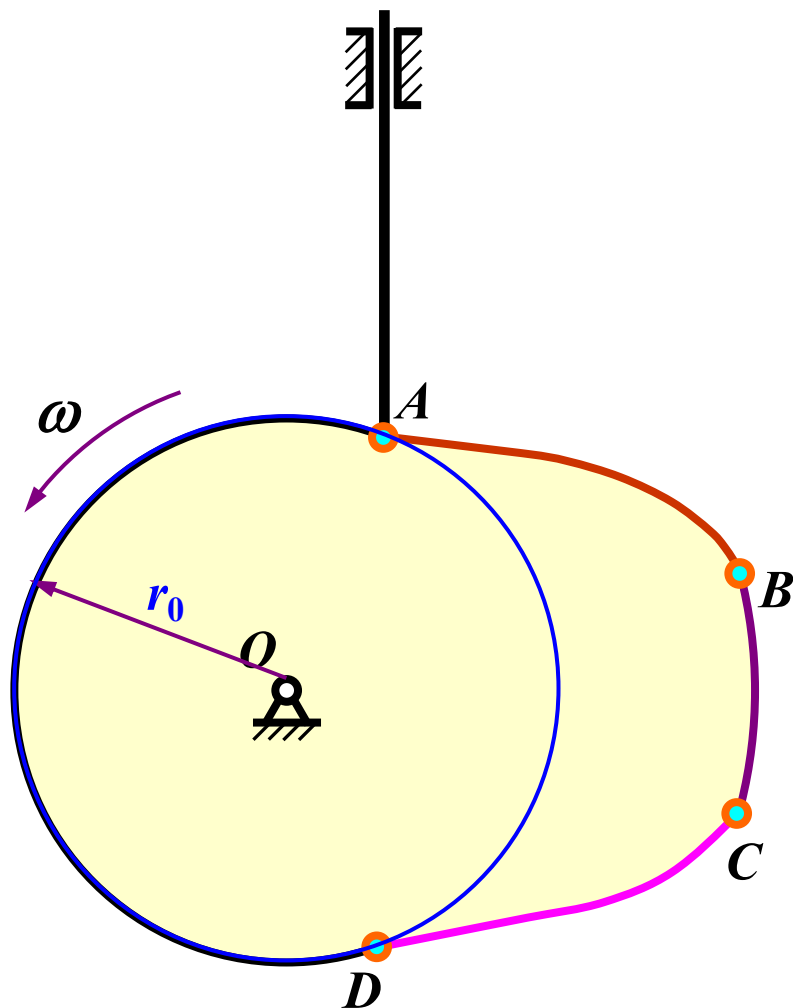
(2) 摆动从动件



凸轮的轮廓形状取决于想要达到的从动件的运动规律。因此  
在设计凸轮轮廓曲线之前，应首先根据工作要求确定从动件  
的运动规律。

# 从动件的运动规律

## 一、凸轮机构的基本参数和运动过程



如图：凸轮轮廓由四段曲线组成，其中 $BC$ 、 $DA$ 段是圆心位于凸轮回转中心 $O$ 的圆弧，凸轮转向为逆时针。

**基圆**——以凸轮轮廓最小向径 $r_0$ 为半径的圆， $r_0$ 称为**基圆半径**；

**推程**——从动件由最低位置移至最高位置的过程（上升）；

**回程**——从动件由最高位置移至最低位置的过程（下降）；

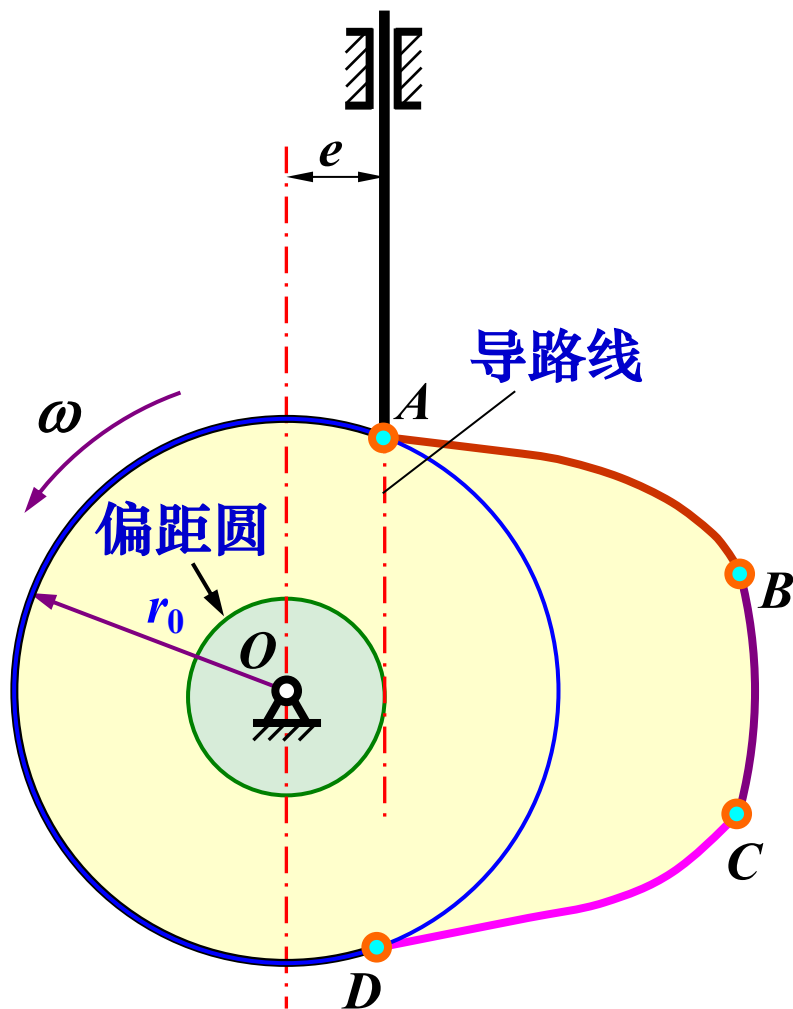
# 从动件的运动规律

从动件导路线——过尖顶A并平行于从动件移动方向的直线；

偏距——凸轮回转中心O至导路线的距离， $e$ ；

偏距圆——以凸轮回转中心O为圆心、偏距 $e$ 为半径的圆；

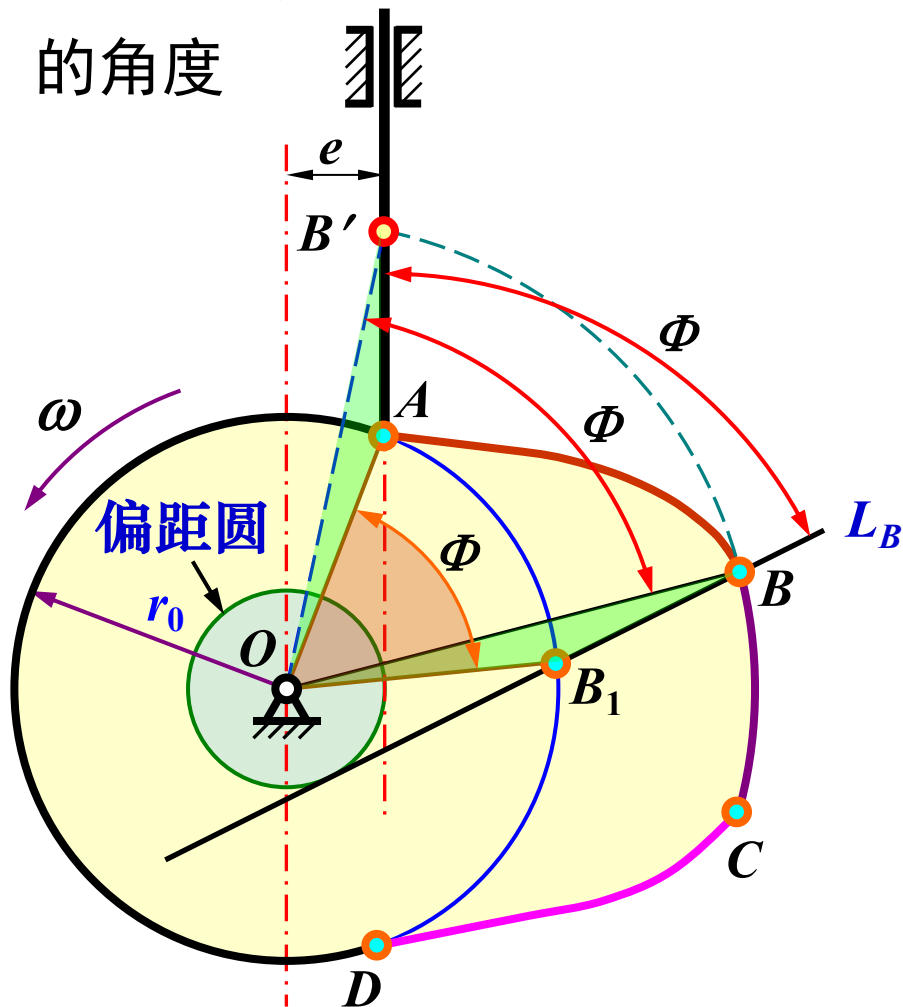
图示时刻，从动件处于最低位置，即推程开始位置。





## 从动件的运动规律

(1) 推程运动角  $\Phi$ ——推程（ $A$ 点接触到 $B$ 点接触）凸轮转过的角度



过 $B$ 点作偏距圆的切线 $L_B$ ， $L_B$ 为 $B$ 点接触时的从动件导路线， $L_B$ 与 $A$ 点接触时的从动件导路线之间的夹角即为推程运动角 $\phi$

$L_B$ 与基圆的交点为 $B_1$ ，则有 $\angle AOB_1 = \phi$

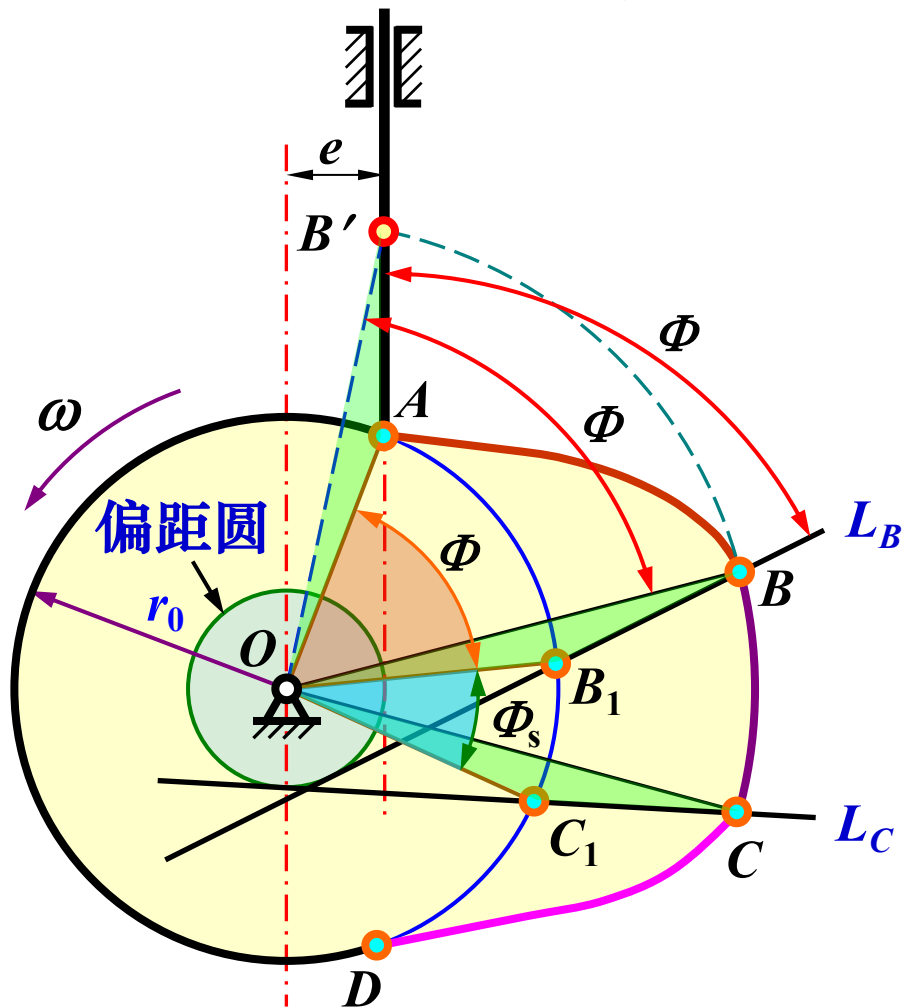
以 $O$ 为圆心、过 $B$ 点画圆弧，交 $A$ 点接触时的从动件导路线于点 $B'$ ，因

$$\triangle OAB' = \triangle OB_1B,$$

故  $\angle B'OB = \angle AOB_1 = \phi$

# 从动件的运动规律

(2) 远休止角  $\Phi_s$  —— 从动件静止于最高位置（B点接触到C点接触）凸轮转过的角度



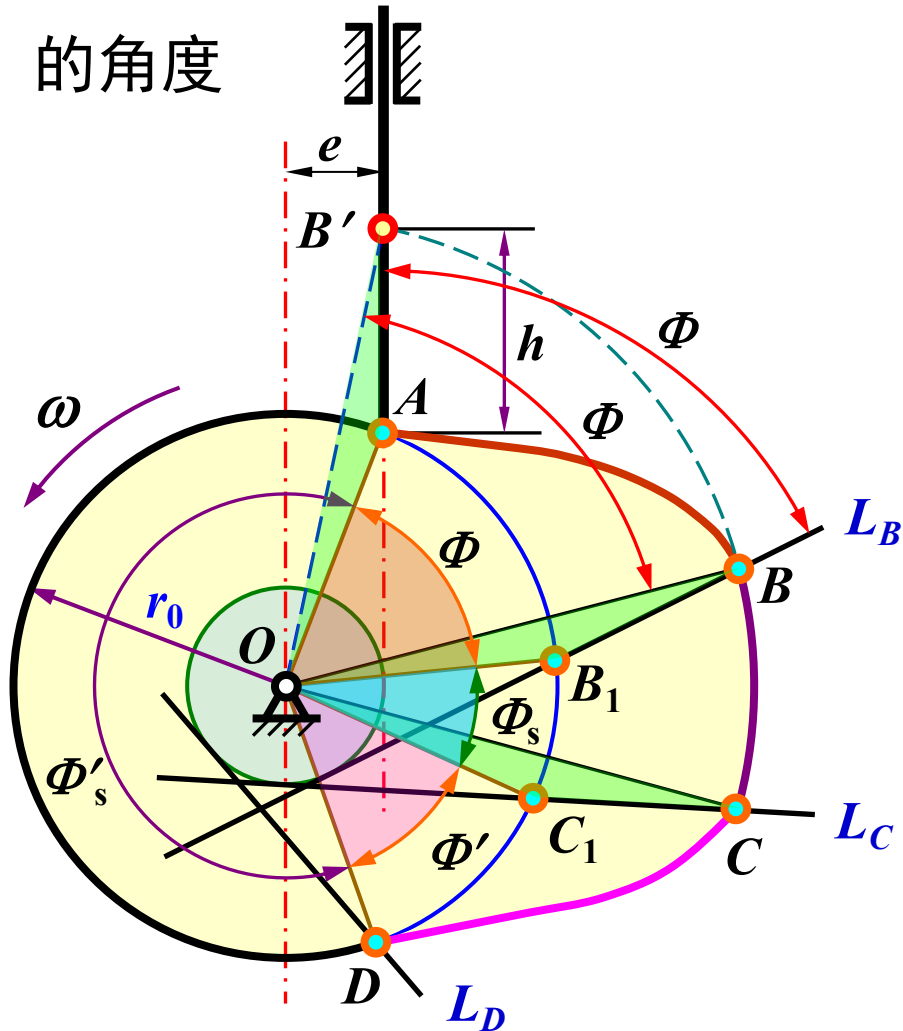
过C点作偏距圆的切线 $L_C$ ， $L_C$ 为C点接触时从动件相对于凸轮的导路线， $L_C$ 与 $L_B$ 的夹角即为推程运动角 $\Phi_s$

$L_C$ 与基圆的交点为 $C_1$ ，则有 $\angle B_1OC_1 = \angle BOC = \Phi_s$

同样有 $\triangle OC_1C = \triangle OB_1B$

# 从动件的运动规律

(3)回程运动角  $\phi'$ ——回程（ $C$ 点接触到 $D$ 点接触）凸轮转过的角度



过 $D$ 点作偏距圆的切线 $L_D$ ， $L_D$ 为 $D$ 点接触时从动件相对于凸轮的导路线， $L_D$ 与 $L_C$ 的夹角即为推程运动角 $\Phi'$ 。

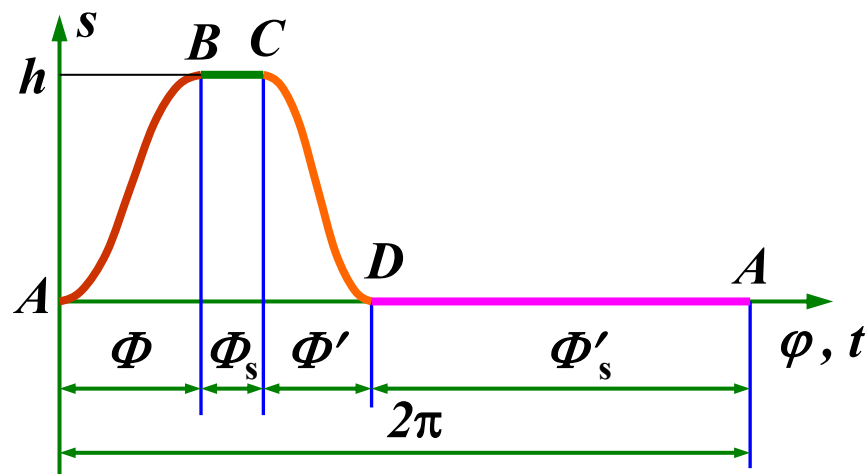
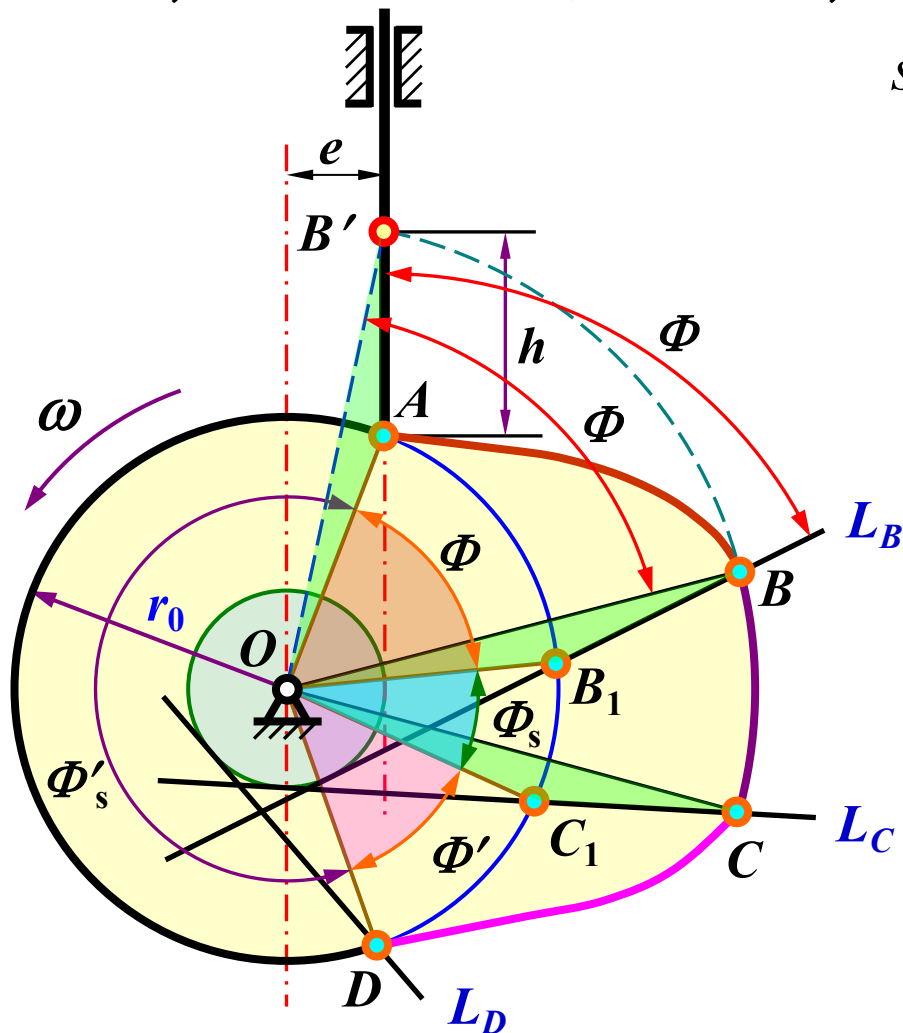
在基圆上标注的角度  
 $\angle C_1OD = \Phi'$ 。

(4) 近休止  $\phi'_s$  ——从动件静止于最低位置（ $D$ 点接触到  $A$ 点接触）凸轮转过的角度

(5) 从动件升程 $h$

# 从动件的运动规律

**从动件位移线图**——以横坐标表示凸轮转角 $\varphi$ （因凸轮作匀速转动，横坐标也表示时间 $t$ ），纵坐标表示从动件位移 $s$ ，反映 $s$ 随 $\varphi$ （或 $t$ ）变化关系的线图。



# 从动件的运动规律

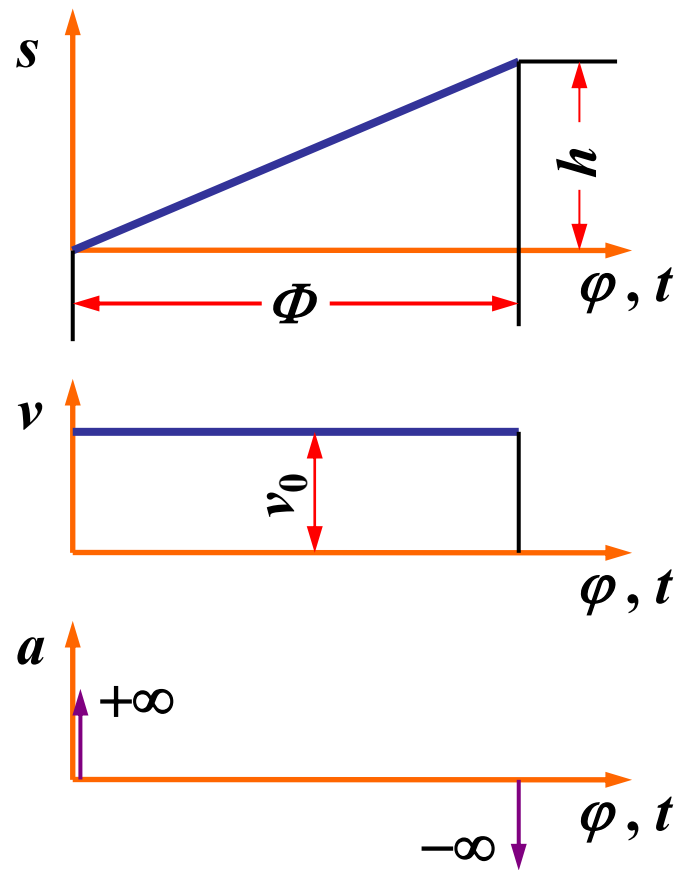
## 二、从动件的运动规律

### 1. 等速运动规律

从动件推程运动方程

$$s = \frac{h}{\Phi} \varphi \quad v = v_0 = \frac{h}{\Phi} \omega \quad a = 0$$

在行程开始和终止位置，加速度及惯性力在理论上突变为无穷大（由于材料的弹性变形，实际上加速度和惯性力不会达到无穷大），致使机构受到强烈的冲击，这种由于加速度发生无穷大突变而引起的冲击称为**刚性冲击**。



推程运动线图

# 从动件的运动规律

## 2. 简谐运动规律

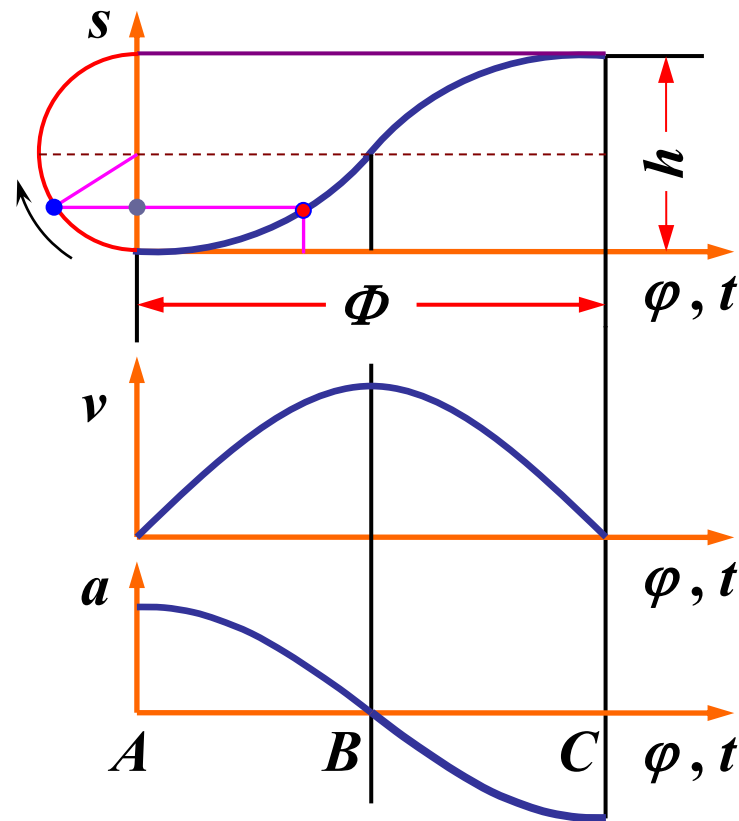
当质点在圆周上作匀速运动时，它在直径上的投影点的运动即为简谐运动。从动件位移作简谐运动时，其加速度按余弦规律变化，故又称余弦加速度规律。

$$s = \frac{h}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{\Phi} \varphi \right)$$

从动件推程  
运动方程

$$v = \frac{h\pi\omega}{2\Phi} \sin \frac{\pi}{\Phi} \varphi$$

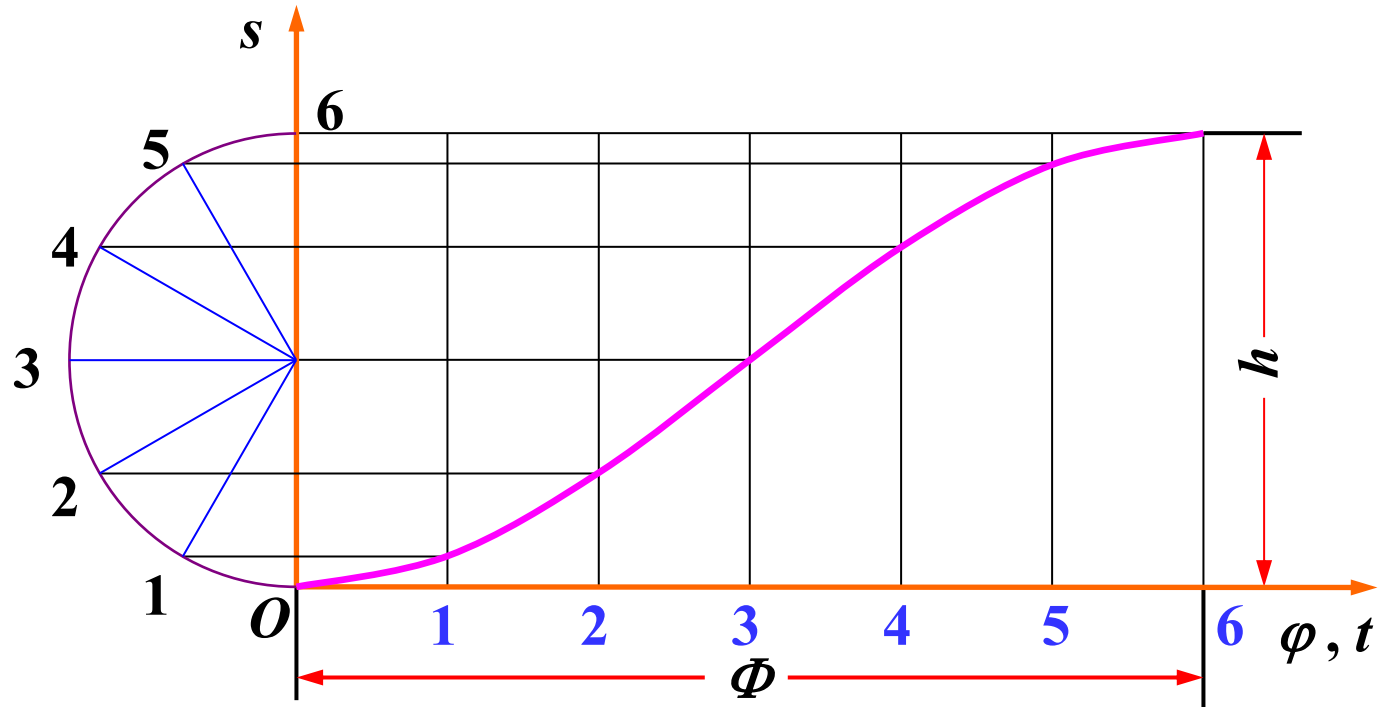
$$a = \frac{h\pi^2\omega^2}{2\Phi^2} \cos \frac{\pi}{\Phi} \varphi$$



推程运动线图

在行程开始和终止位置，加速度存在有限值突变，引起的冲击称为柔性冲击。

# 从动件的运动规律



简谐运动规律位移线图的绘制

# 从动件的运动规律

## 3. 正弦加速度运动

当滚圆沿纵轴匀速滚动时，圆周上一点的轨迹为一条摆线，此时该点在纵轴上的投影即为摆线运动规律，其加速度按正弦规律变化，故称正弦加速度规律。

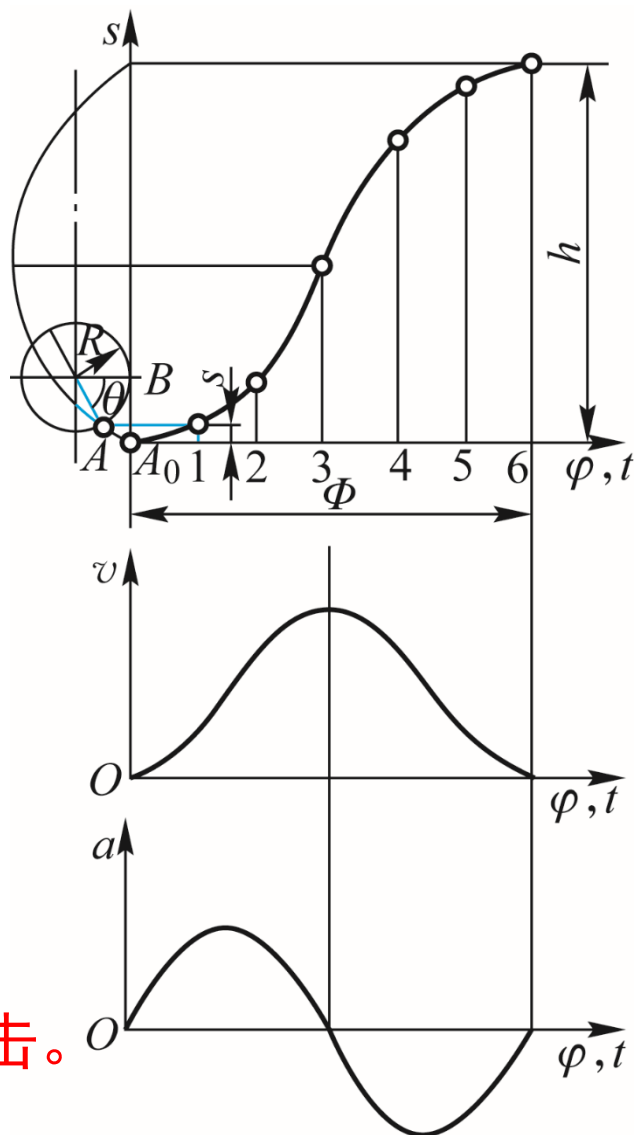
$$s = h \left( \frac{\varphi}{\Phi} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{\Phi} \varphi \right)$$

从动件推程  
运动方程

$$v = \frac{h\omega}{\Phi} \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{\Phi} \varphi \right)$$

$$a = \frac{2h\pi\omega^2}{\Phi^2} \sin \frac{2\pi}{\Phi} \varphi$$

加速度曲线连续，理论上不存在冲击。





# 凸轮机构的压力角

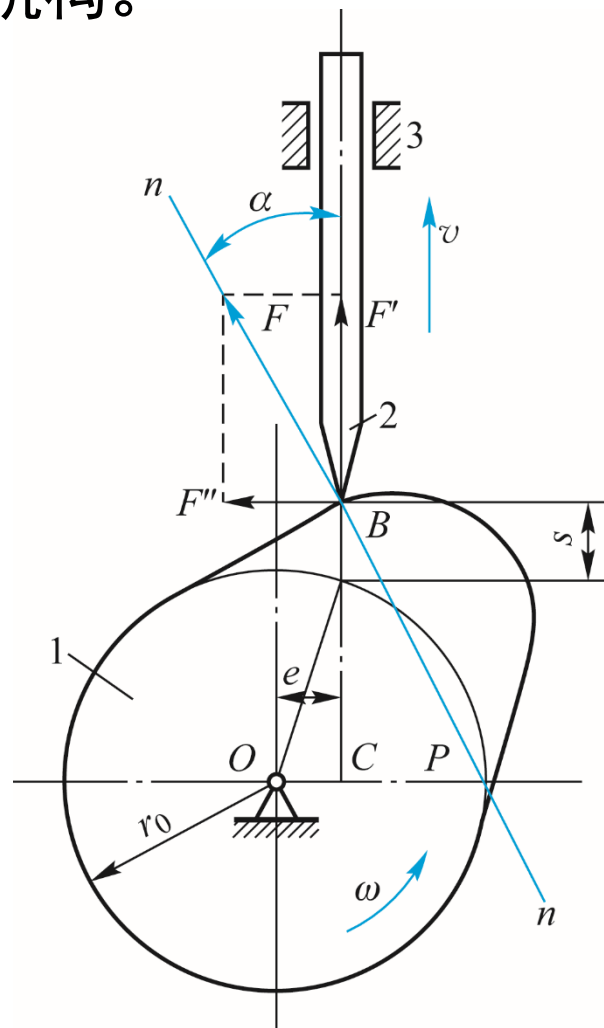
压力角， $\alpha$  ——驱使从动件运动的作用力方向与受力点速度方向之间的夹角（锐角）。定义同连杆机构。

## 一、压力角与作用力的关系

如图，不计各杆重力和运动副中的摩擦力时，凸轮加于从动件尖顶的作用力 $F$ 沿法线方向， $F$ 与从动件移动速度 $v$ 方向之间的夹角即为压力角 $\alpha$ 。

将 $F$ 分解为有用分力 $F'$ 和有害分力 $F''$

$$F'' = F' \tan \alpha$$



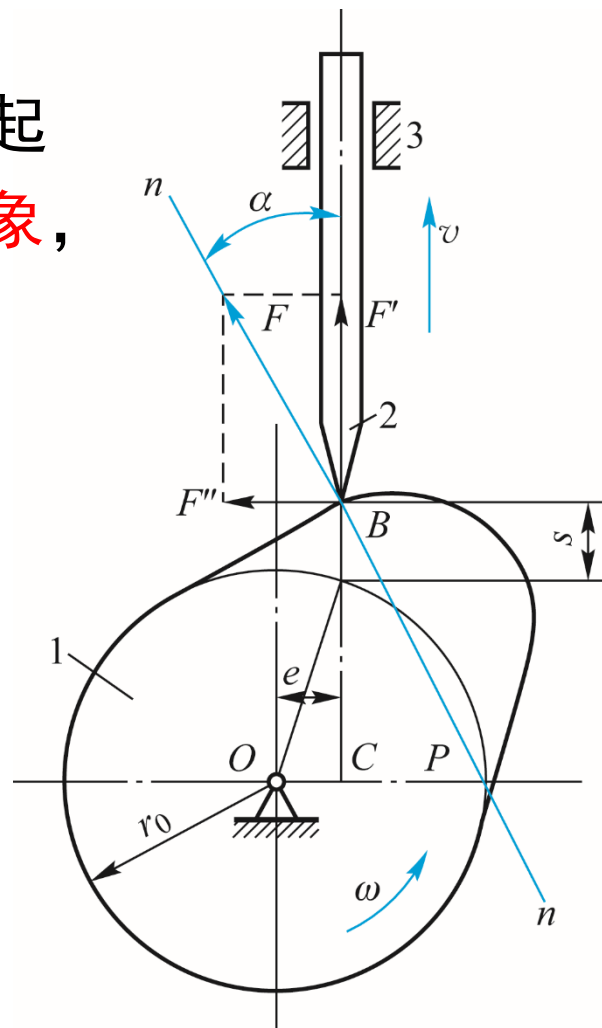
# 凸轮机构的压力角

$F$ 大小一定时，压力角 $\alpha$ 越大， $F''$ 越大，即  $F'' = F' \tan \alpha$   
力的有效利用程度（效率）越低。

当 $\alpha$ 大到一定程度，以致 $F''$ 在导路中引起的摩擦阻力大于 $F'$ 时，将出现**自锁现象**，即无论 $F$ 多大，从动件都不能运动。

$\alpha$ 的大小一般随机机构位置而变化，为保证机构具有较好的传力性能，常规定最大压力角不超过**许用值** $[\alpha]$ ：

- 直动从动件，常取 $[\alpha] = 30^\circ$
- 摆动从动件，常取 $[\alpha] = 40^\circ$



# 凸轮机构的压力角

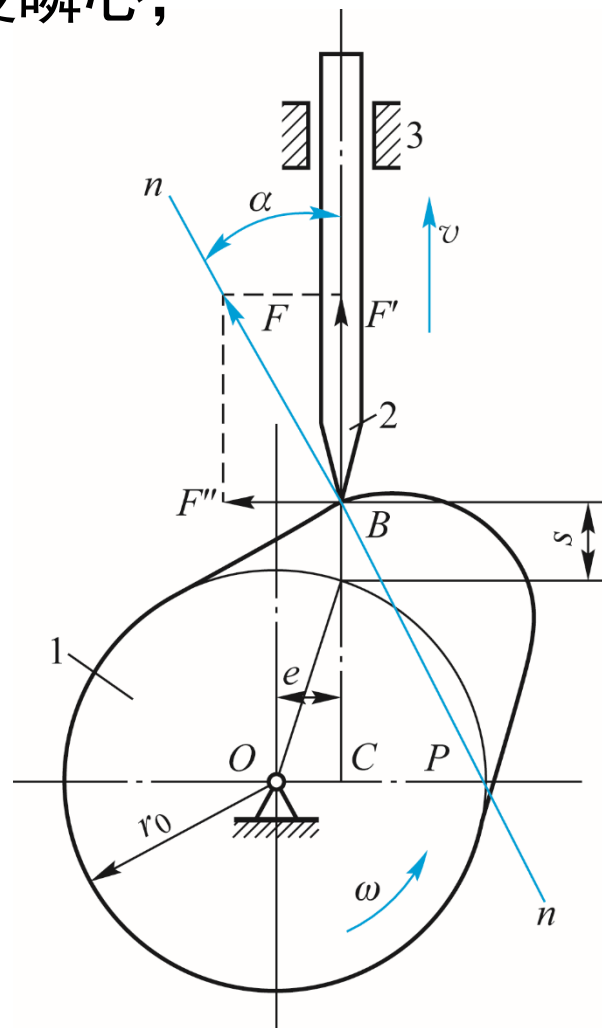
## 二、压力角与凸轮机构尺寸的关系

如图，点 $P$ 为凸轮1与从动件2的相对速度瞬心，

$$v = l_{OP} \times \omega \quad l_{OP} = \frac{v}{\omega} = \frac{ds/dt}{d\varphi/dt} = \frac{ds}{d\varphi}$$

$$\alpha = \arctan \frac{|ds/d\varphi \mp e|}{s + \sqrt{r_0^2 - e^2}}$$

$r_0$ 越小， $\alpha$ 越大。欲使结构紧凑应使 $r_0$ 尽可能小，但 $r_0$ 太小又会导致 $\alpha$ 超过许用值。设计时应在 $\alpha_{\max} \leq [\alpha]$ 的前提下，选取尽可能小的 $r_0$ 。



# 凸轮机构的压力角

$$v = l_{OP} \times \omega \quad l_{OP} = \frac{v}{\omega} = \frac{ds/dt}{d\varphi/dt} = \frac{ds}{d\varphi}$$

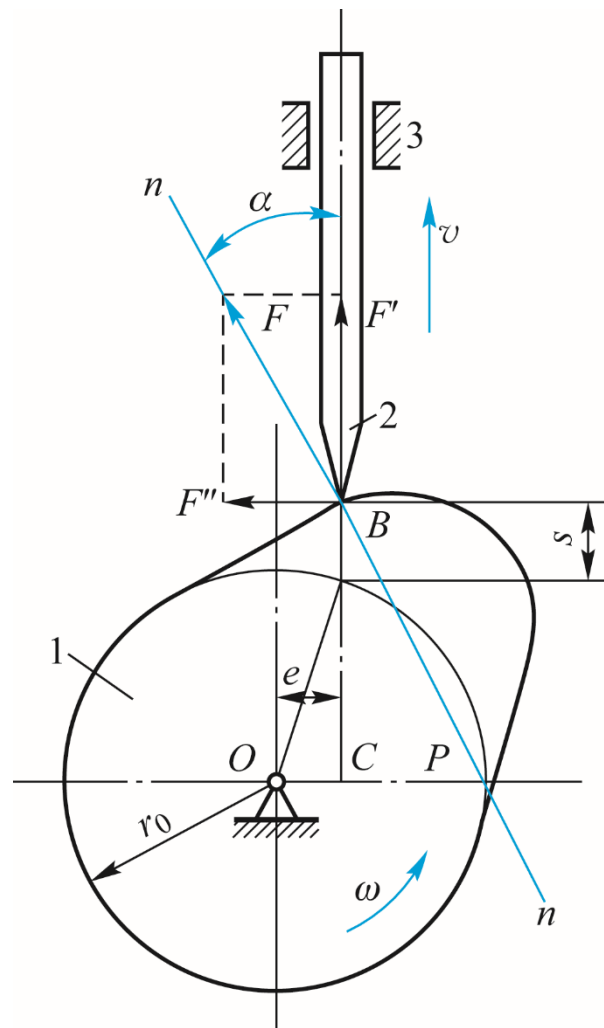
$$\alpha = \arctan \frac{|ds/d\varphi \mp e|}{s + \sqrt{r_0^2 - e^2}}$$

推程 $ds/d\varphi \geq 0$ ，回程 $ds/d\varphi \leq 0$ ；

➤ 当导路和 $P$ 在凸轮轴心 $O$ 同侧时，  
式中取“-”号，可使推程 $\alpha$ 减小；

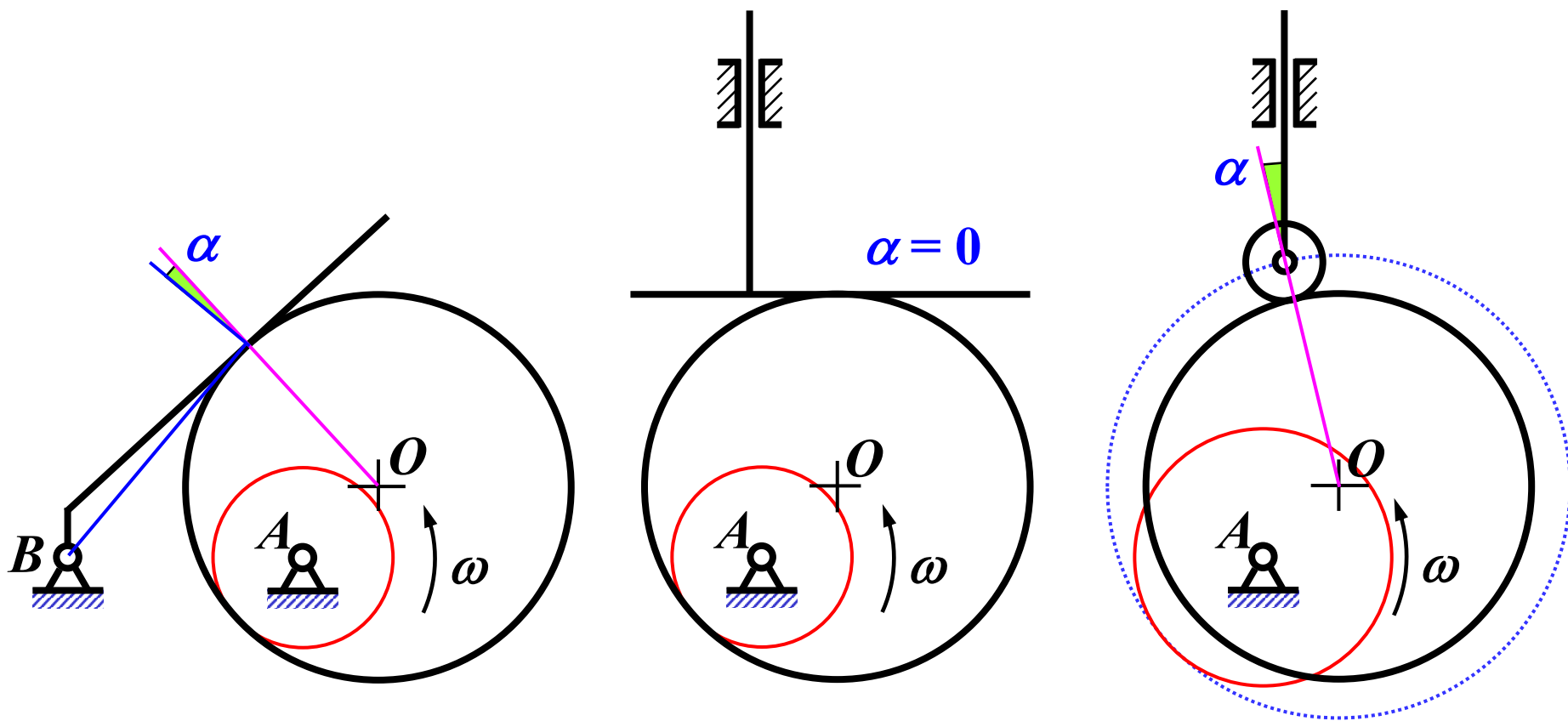
➤ 当导路和 $P$ 在凸轮轴心 $O$ 异侧时，  
式中取“+”号，推程 $\alpha$ 将增大；

为减小推程 $\alpha$ ，应将从动件导路向推程相对速度瞬心的同侧偏置。



# 凸轮机构的压力角

下列三种凸轮机构：分别画出凸轮的基圆；分别标出图示位置时的机构压力角。

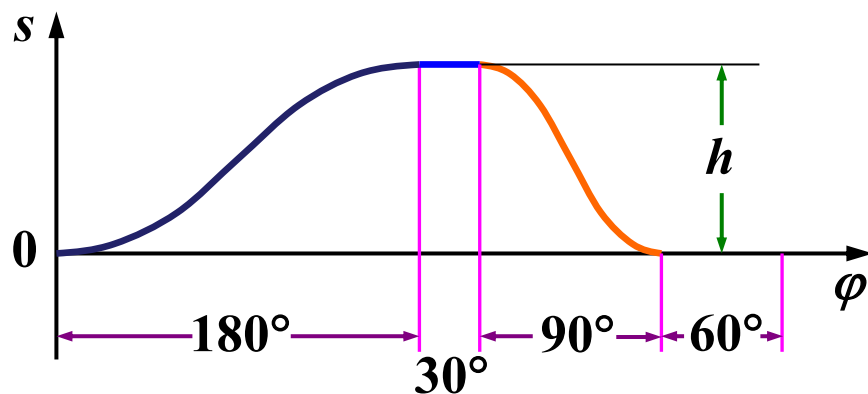
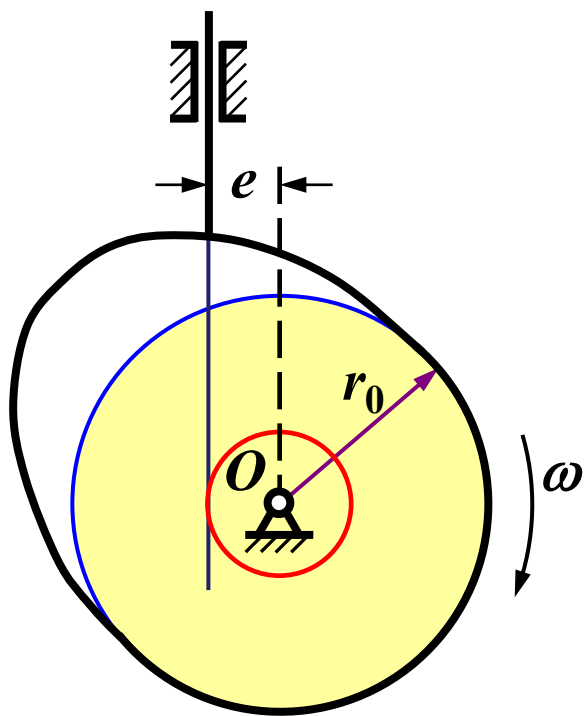


# 图解法设计凸轮轮廓

## 一、直动从动件盘形凸轮轮廓的绘制

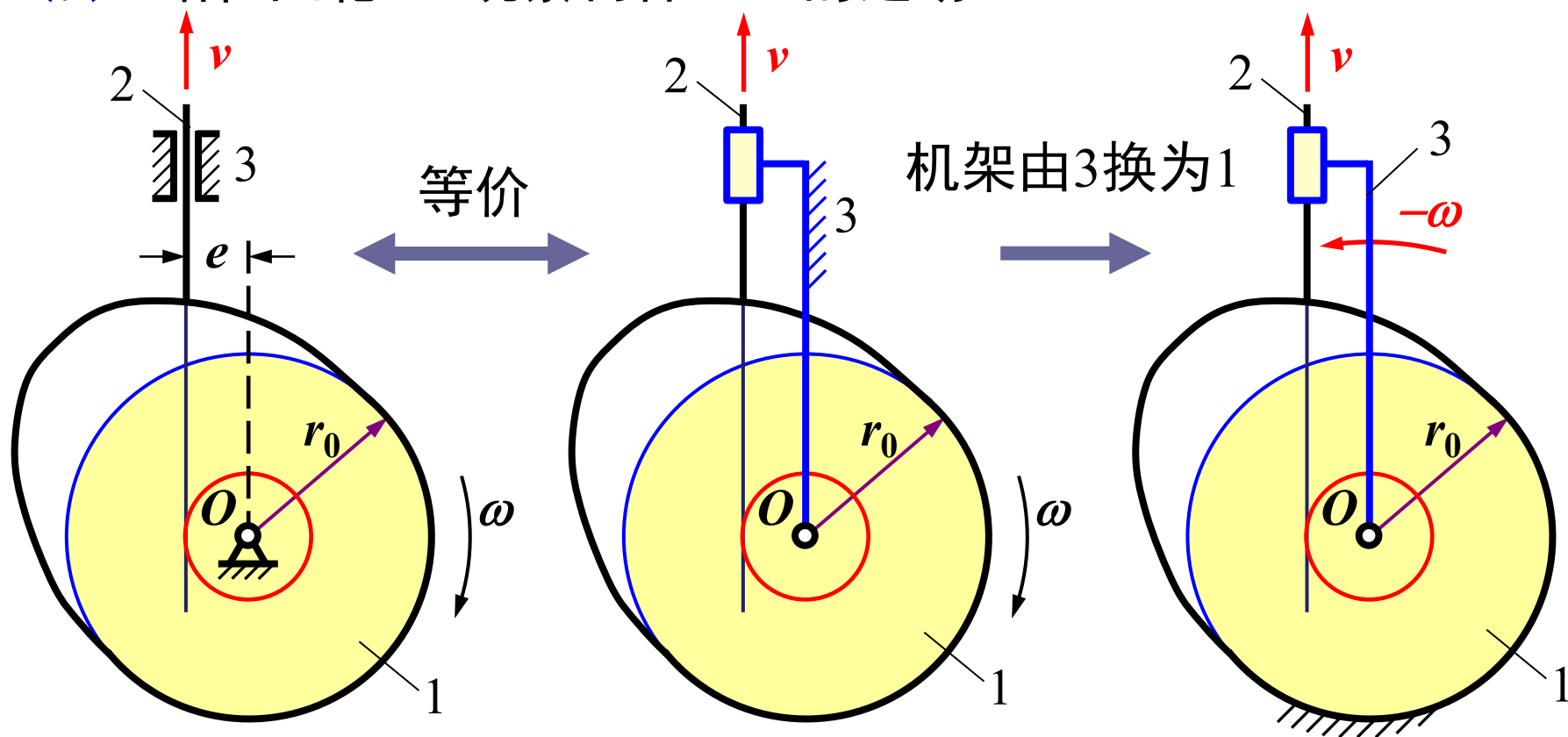
### 1. 偏置尖顶直动从动件盘形凸轮

已知：从动件位移线图 $s(\varphi)$ ，从动件导路的偏距 $e$ ，凸轮的基圆半径 $r_0$ 以及凸轮以等角速度 $\omega$ 顺时针方向回转。要求绘出此凸轮的轮廓。



# 图解法设计凸轮轮廓

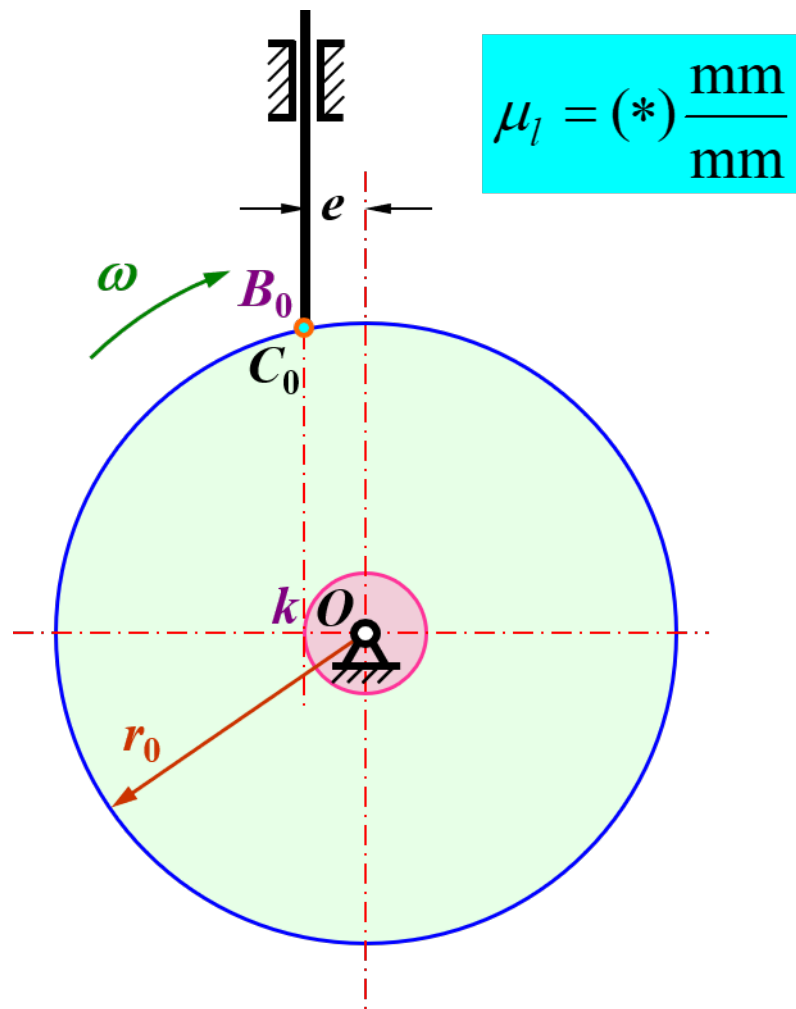
凸轮机构工作时，凸轮和从动件都在相对于机架运动。为了在图纸上画出凸轮轮廓曲线，应当使凸轮与图纸平面相对静止，为此，可采用**反转法**（给整个机构加 $-\omega$ ），或**变换机架法**（站在凸轮1上观察构件2、3的运动）。



# 图解法设计凸轮轮廓

## 反转法设计步骤：

(1) 选取适当的长度比例尺 $\mu_l$ ，以 $r_0$ 为半径作基圆，以 $e$ 为半径作偏距圆，点 $k$ 为从动件导路线与偏距圆的切点，导路线与基圆的交点 $B_0(C_0)$ 便是从动件尖顶的起始位置。



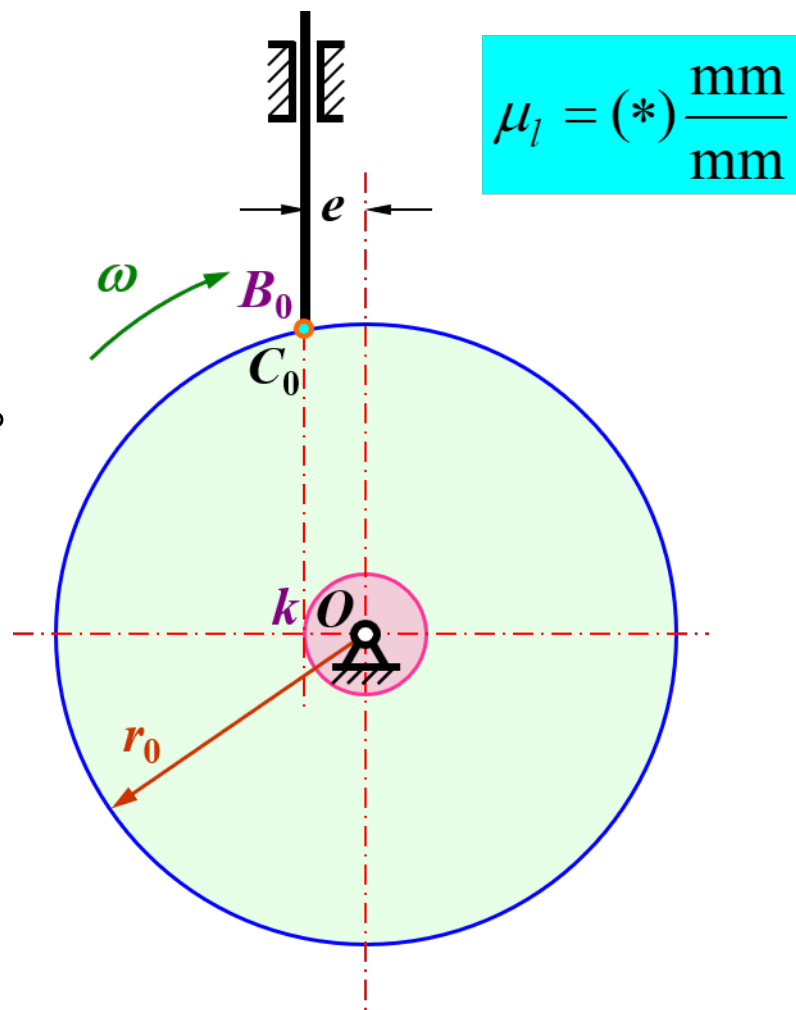
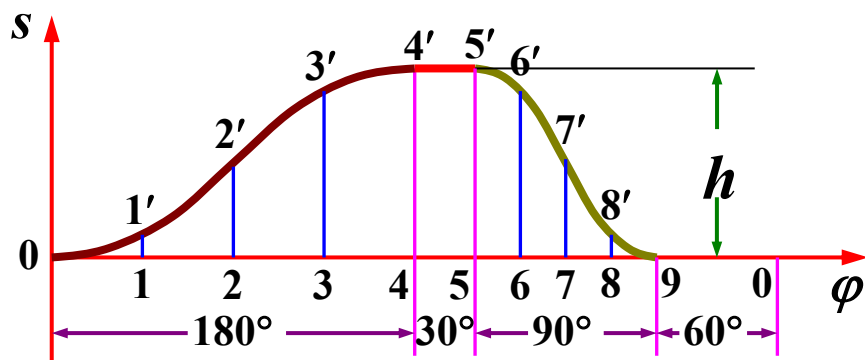


# 图解法设计凸轮轮廓

(2) 选取横坐标角度比例尺 $\mu_\varphi$ ，并取纵坐标长度比例尺 $\mu_s = \mu_l$ ，绘制从动件的位移线图 $s-\varphi$ ，将推程运动角和回程运动角分别进行若干等分（图中各为4等分）。

$$\mu_\varphi = (*) \frac{(\circ)}{\text{mm}}$$

$$\mu_s = (*) \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

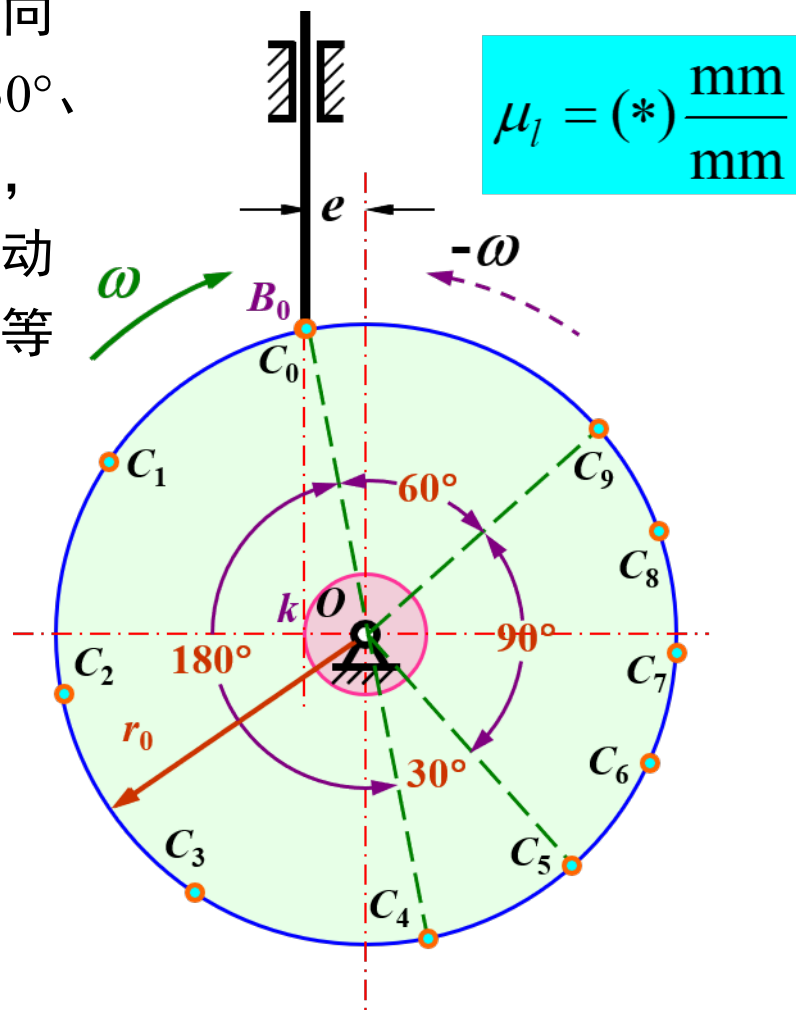
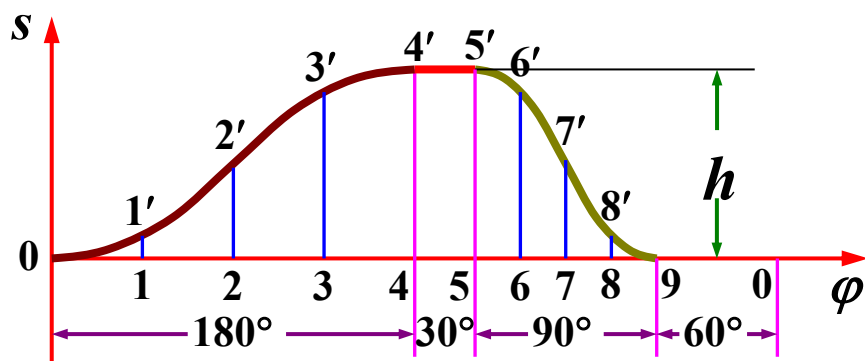


# 图解法设计凸轮轮廓

(3) 在基圆上，自 $OC_0$ 开始沿 $\omega$ 的相反方向取推程运动角 $\Phi = 180^\circ$ 、远休止角 $\Phi_s = 30^\circ$ 、回程运动角 $\Phi' = 90^\circ$ 、近休止角 $\Phi'_s = 60^\circ$ ，在基圆上得 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_9$ 诸点。将推程运动角和回程运动角分成与位移曲线对应的等分，得 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 和 $C_6$ 、 $C_7$ 、 $C_8$ 诸点。

$$\mu_\phi = (*) \frac{(\circ)}{\text{mm}}$$

$$\mu_s = (*) \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

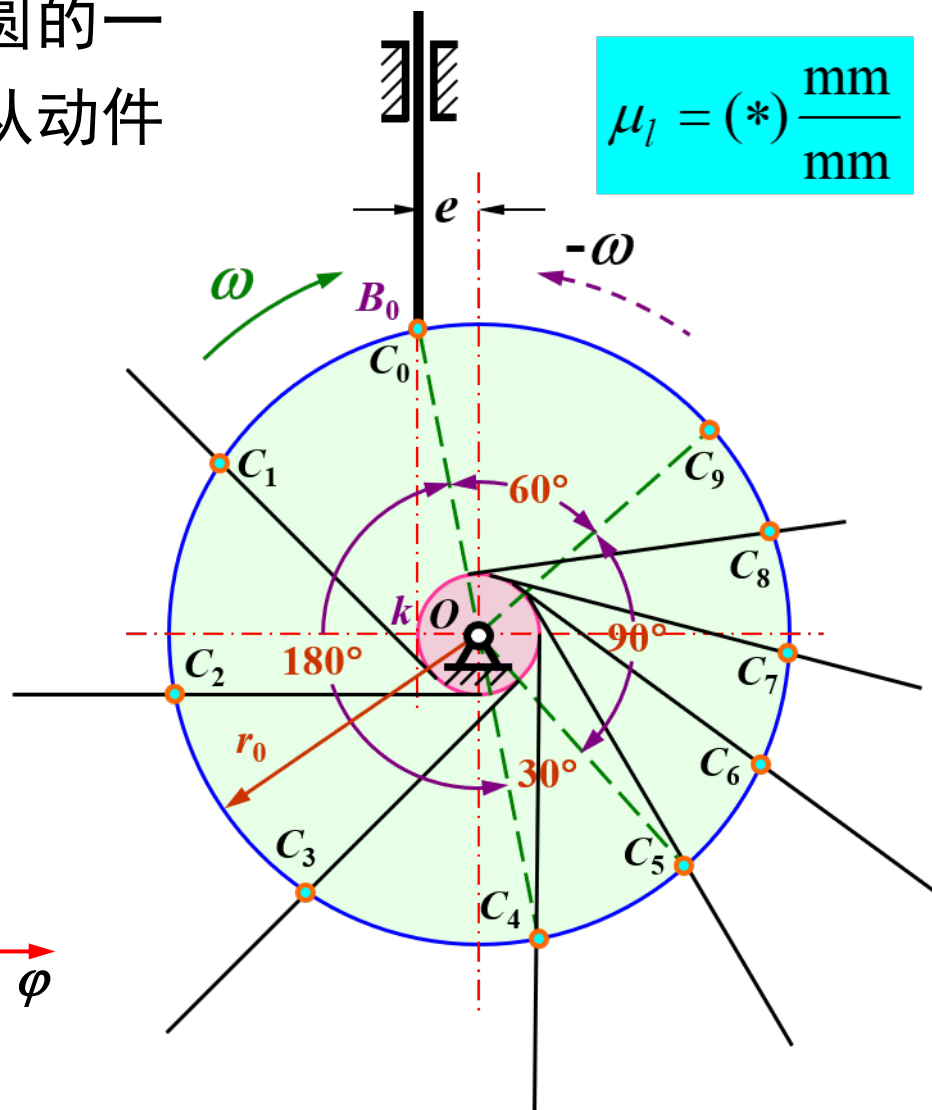
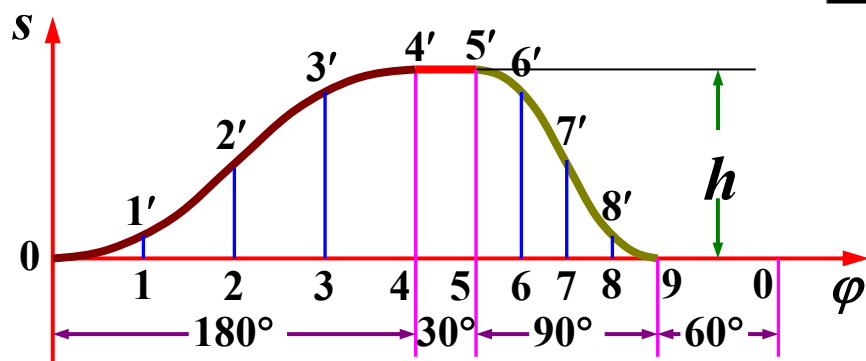


# 图解法设计凸轮轮廓

(4) 过 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ ...作偏距圆的一系列切线，它们便是反转后从动件导路的一系列位置。

$$\mu_{\varphi} = (*) \frac{(^{\circ})}{\text{mm}}$$

$$\mu_s = (*) \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$



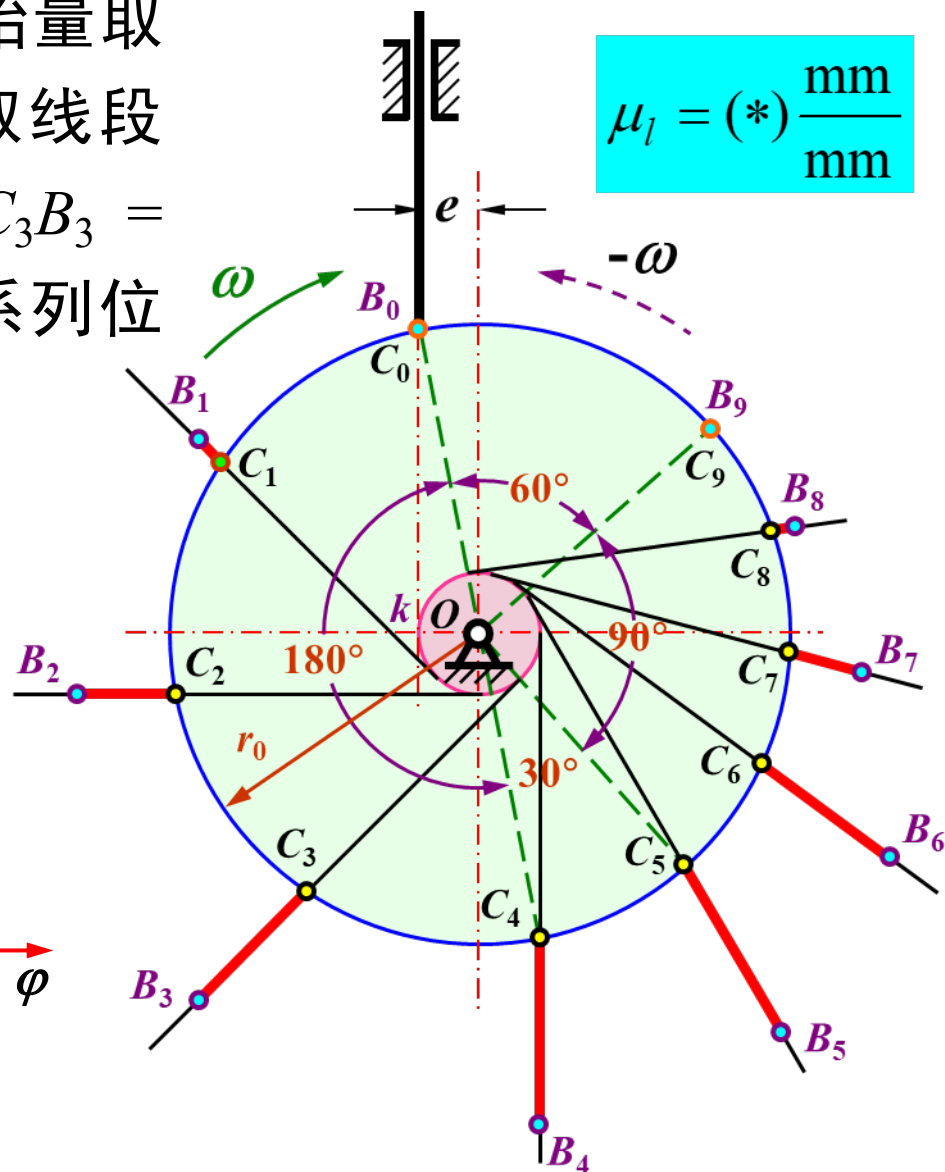
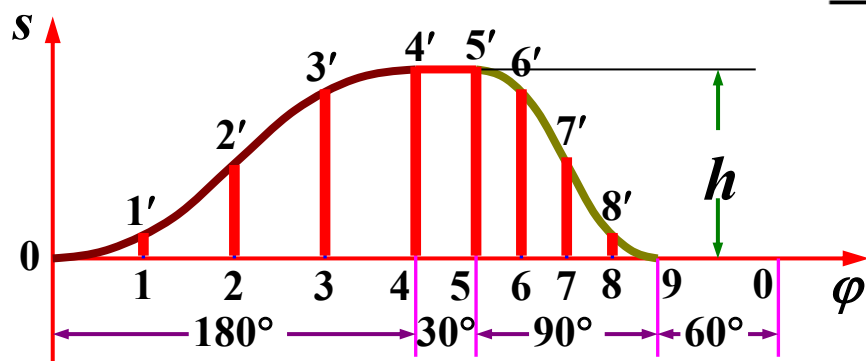
$$\mu_l = (*) \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

# 图解法设计凸轮轮廓

(5) 沿以上各切线自基圆开始量取从动件相应的位移量，即取线段  $C_1B_1 = 11'$ 、 $C_2B_2 = 22'$ 、 $C_3B_3 = 33'$ ...，得反转后尖顶的一系列位置  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ ...。

$$\mu_\varphi = (*) \frac{(\circ)}{\text{mm}}$$

$$\mu_s = (*) \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$



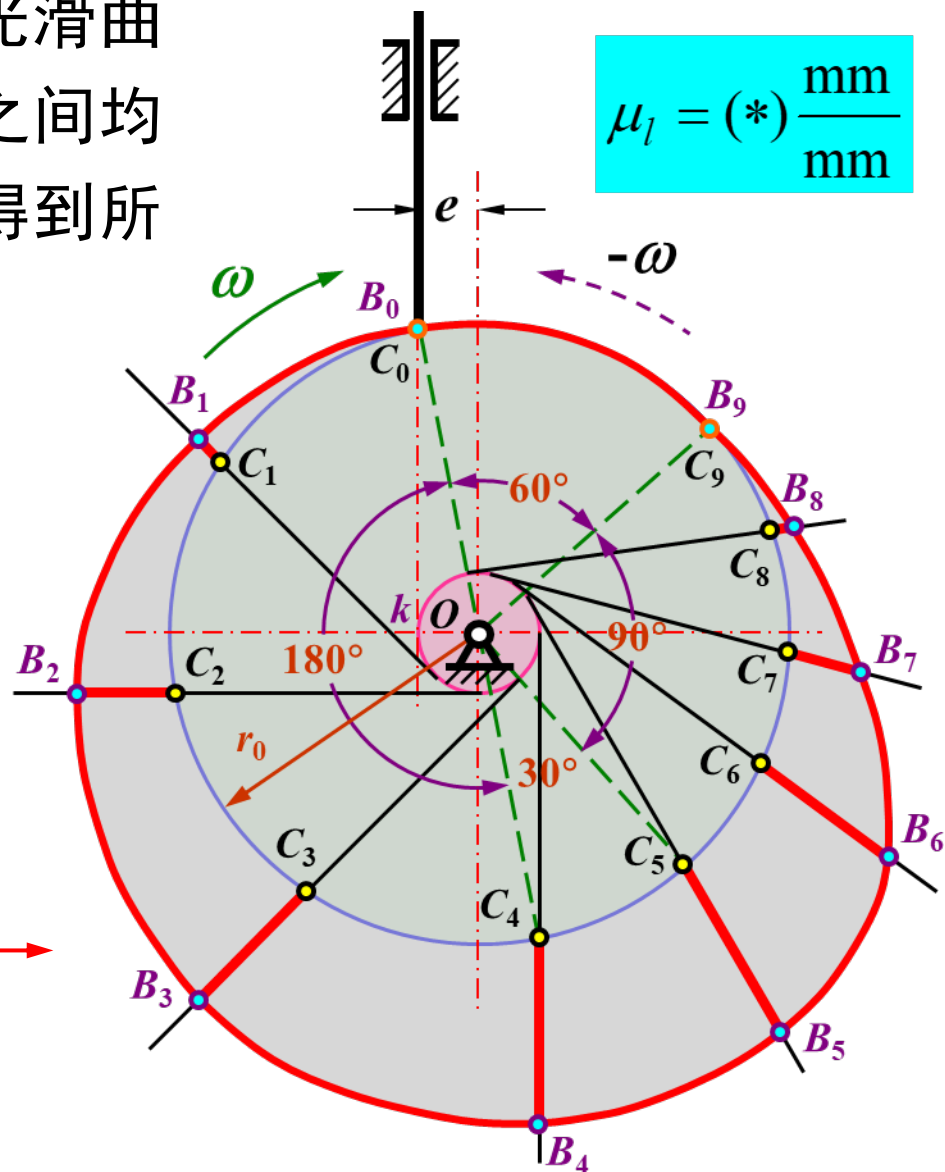
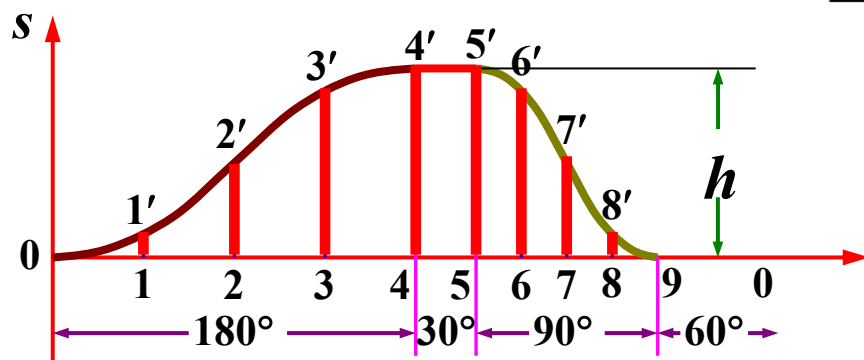
$$\mu_l = (*) \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

# 图解法设计凸轮轮廓

(6) 将点 $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ ...连成光滑曲线（ $B_4$ 和 $B_5$ 之间以及 $B_9$ 和 $B_0$ 之间均为以 $O$ 为圆心的圆弧），便得到所求的凸轮轮廓曲线。

$$\mu_\varphi = (*) \frac{(\circ)}{\text{mm}}$$

$$\mu_s = (*) \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$



$$\mu_l = (*) \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

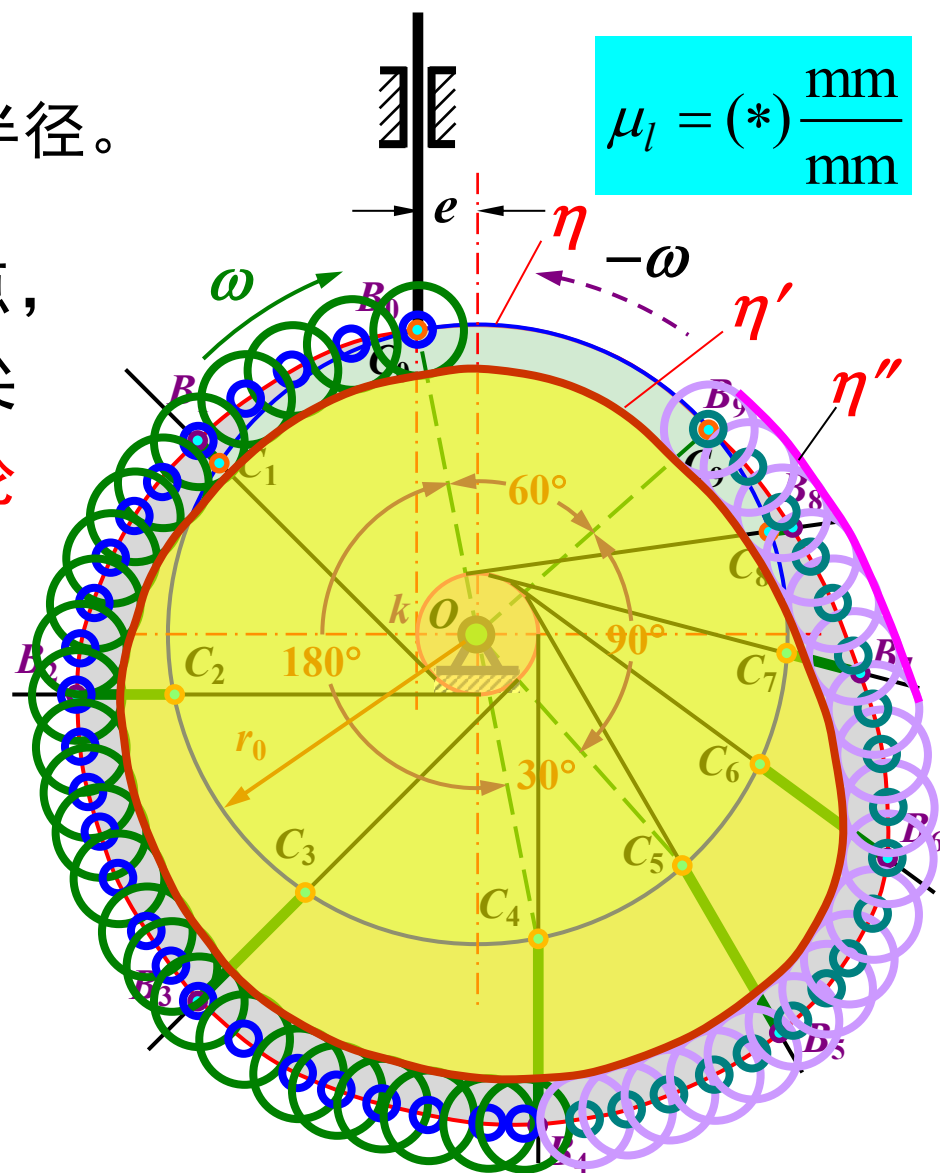
# 图解法设计凸轮轮廓

## 2. 滚子直动从动件盘形凸轮

$r_0$ 是指理论轮廓曲线的基圆半径。

首先取滚子中心作为参考点，把该点当作尖底从动件的尖底，按照上述方法求出理论轮廓曲线 $\eta$ 。

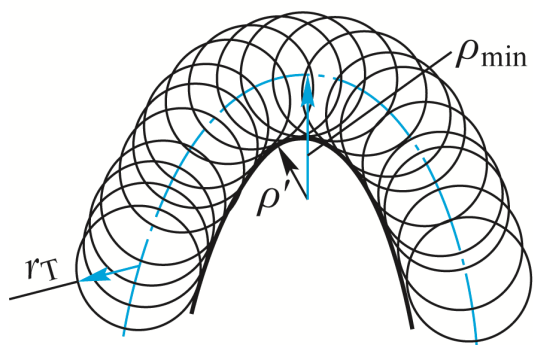
再以 $\eta$ 上各点为中心画一系列滚子，最后作这些滚子的内包络线 $\eta'$ （对于凹槽凸轮还应作外包络线 $\eta''$ ），即实际轮廓曲线。



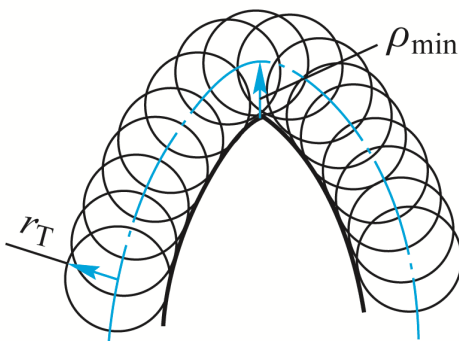
# 图解法设计凸轮轮廓

当理论轮廓曲线外凸时，设理论轮廓外凸部分的最小曲率半径为 $\rho_{\min}$ ，相应位置实际轮廓曲率半径 $\rho' = \rho_{\min} - r_T$ ：

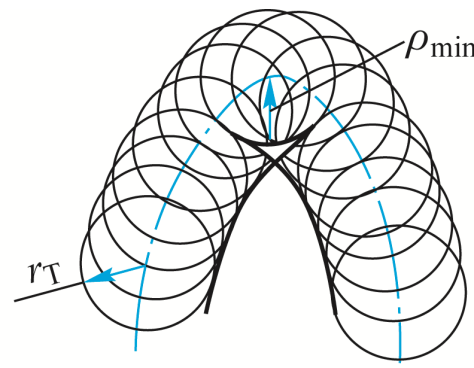
- $\rho_{\min} > r_T$ ， $\rho' > 0$ ，这时实际轮廓为一平滑曲线（图a）；
- $\rho_{\min} = r_T$ ， $\rho' = 0$ ，这时实际轮廓变成尖点，极易磨损（图b）；
- $\rho_{\min} < r_T$ ， $\rho' < 0$ ，实际轮廓已相交，交点以外的轮廓在实际加工时将被切去，因而导致从动件运动失真（图c）。



(a)  $\rho_{\min} > r_T$



(b)  $\rho_{\min} = r_T$



(c)  $\rho_{\min} < r_T$

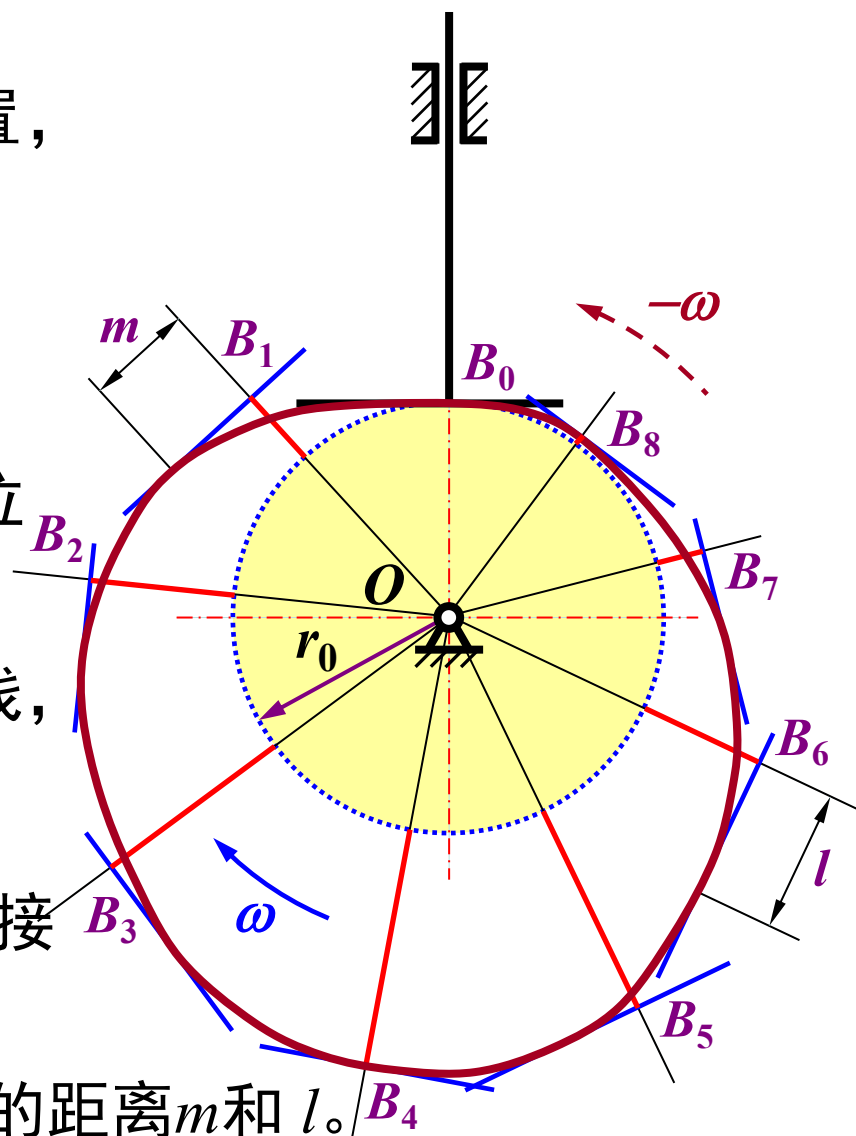
滚子半径 $r_T$ 必须小于理论轮廓外凸部分的最小曲率半径 $\rho_{\min}$ 。

# 图解法设计凸轮轮廓

## 3. 平底直动从动件盘形凸轮

- 用垂足点 $B_i$ 点表示平底的位置， $B_0$ 为推程开始的最低位置；
- 沿 $-\omega$ 方向，过 $O$ 作径向射线，对基圆进行周向分割；
- 从基圆开始向外截取从动件位移，得平底位置 $B_i$ ；
- 作一系列平底位置线的包络线，便得凸轮的实际轮廓。

平底宽度：保证与凸轮轮廓相切接触，平底左、右两侧的宽度必须分别大于导路至左、右最远切点的距离 $m$ 和 $l$ 。



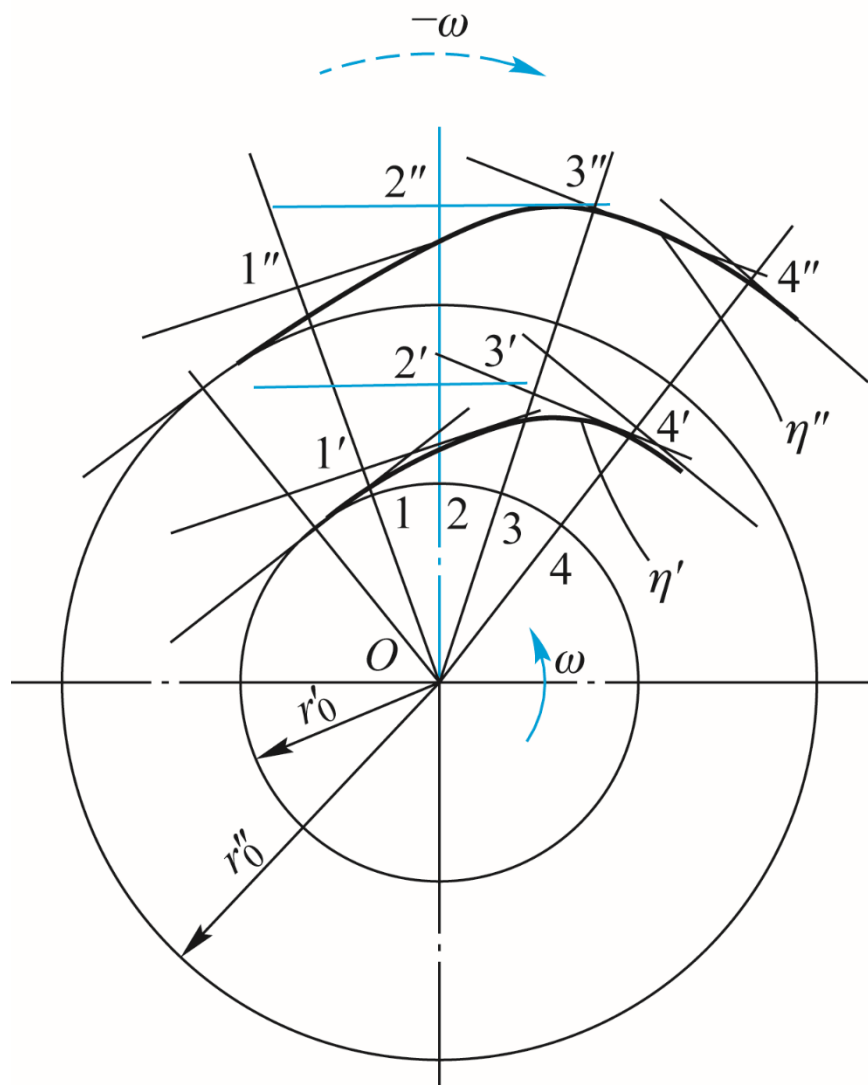


# 图解法设计凸轮轮廓

平底只能相切接触于外凸的轮廓曲线，不允许轮廓曲线有内凹。

当无法作出与所有平底位置线相切的包络线时，如图2'位置的平底，则不能实现从动件的预期运动规律，也即出现运动失真。

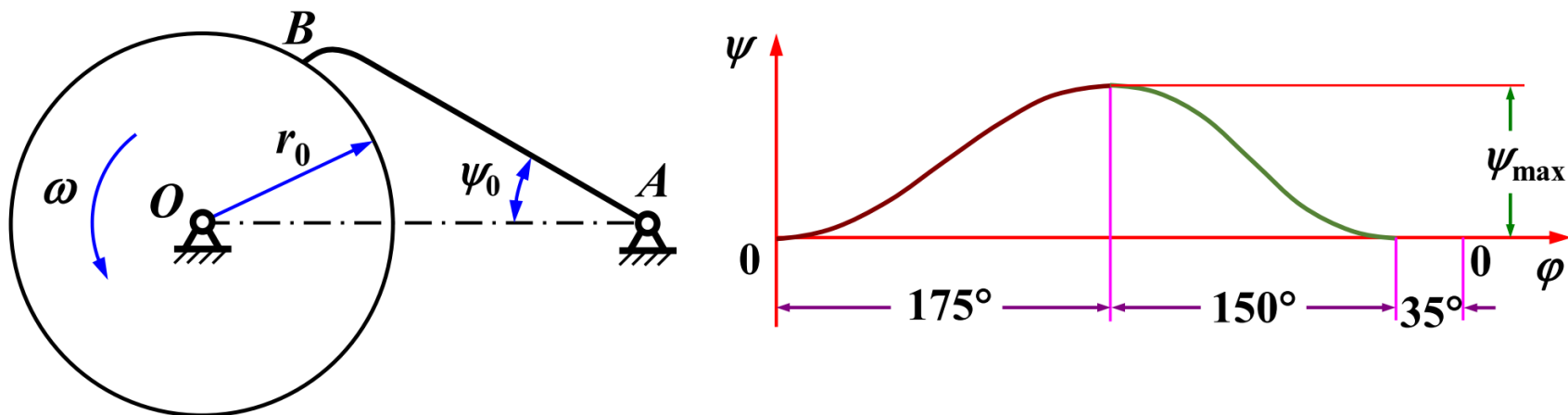
此时可增大基圆半径 $r_0$ 重新设计，如图。



# 图解法设计凸轮轮廓

## 二、摆动从动件盘形凸轮轮廓的绘制

已知：从动件角位移线图  $\psi(\varphi)$ ，凸轮与摆动从动件的中心距  $l_{OA}$ ，摆动从动件的长度  $l_{AB}$ ，凸轮的基圆半径  $r_0$ ，凸轮以等角速度  $\omega$  逆时针回转。要求绘出此凸轮的轮廓。

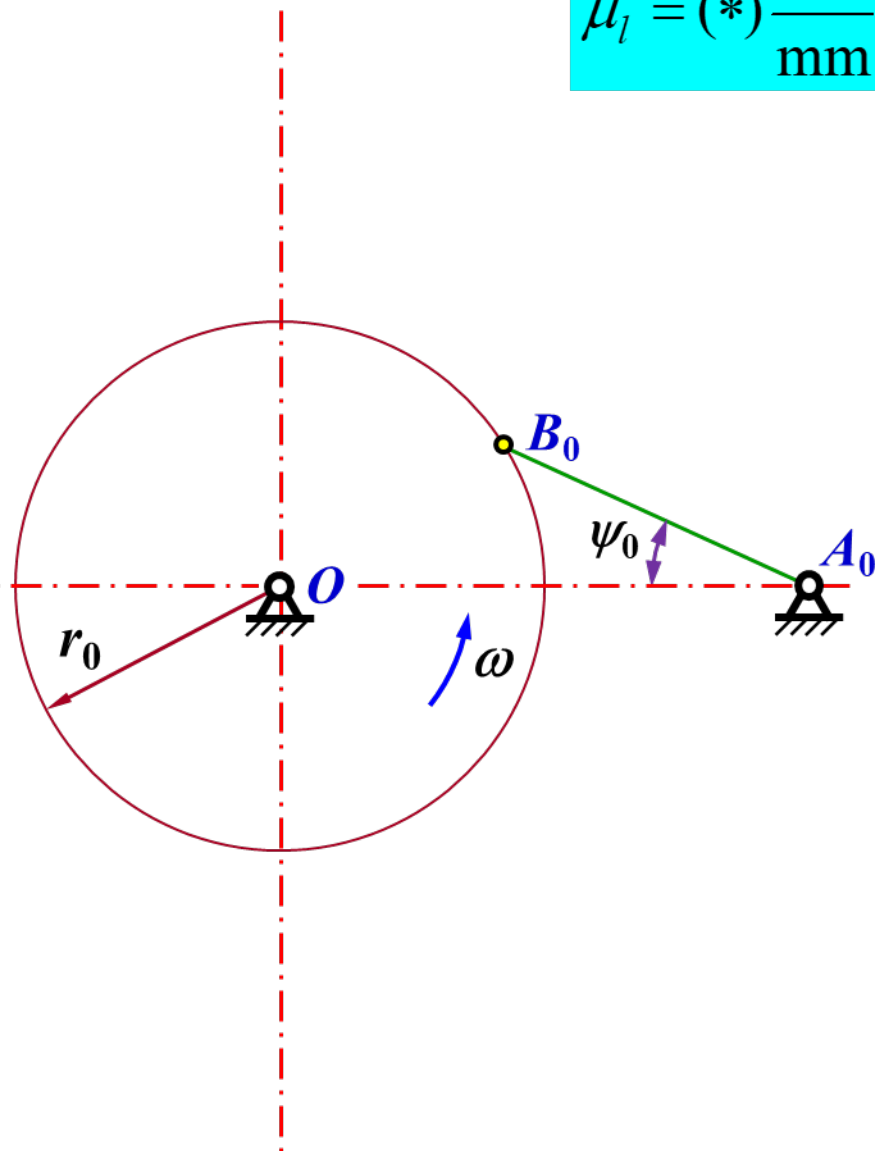


# 图解法设计凸轮轮廓

## 反转法设计步骤：

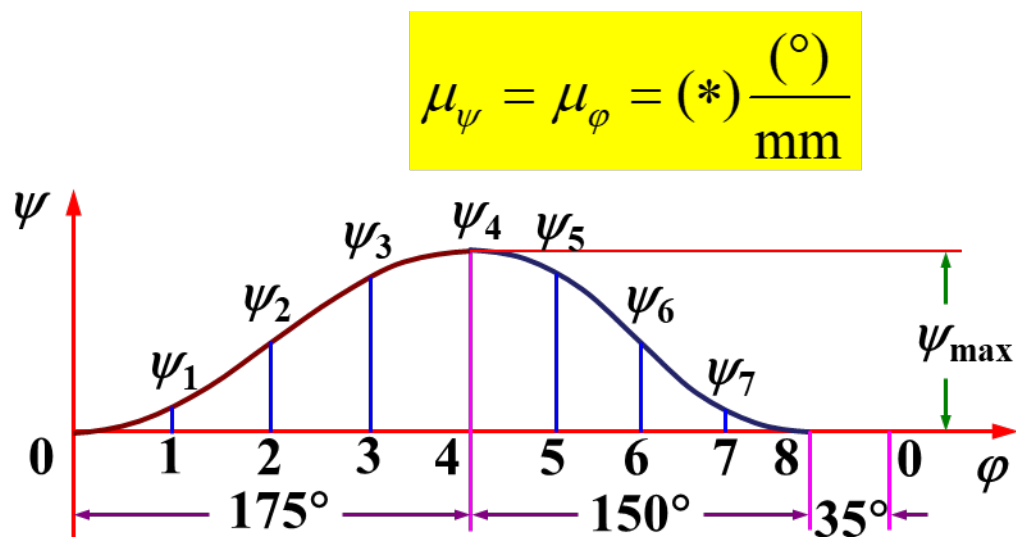
(1) 选取适当的长度比例尺 $\mu_l$ ，根据 $l_{OA}$ 定出 $O$ 点与 $A_0$ 点的位置，以 $O$ 点为圆心、 $r_0$ 为半径作基圆，再以 $A_0$ 点为中心、 $l_{AB}$ 为半径作圆弧交基圆于 $B_0$ 点，该点即为从动件尖顶的起始位置。

$$\mu_l = (*) \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$



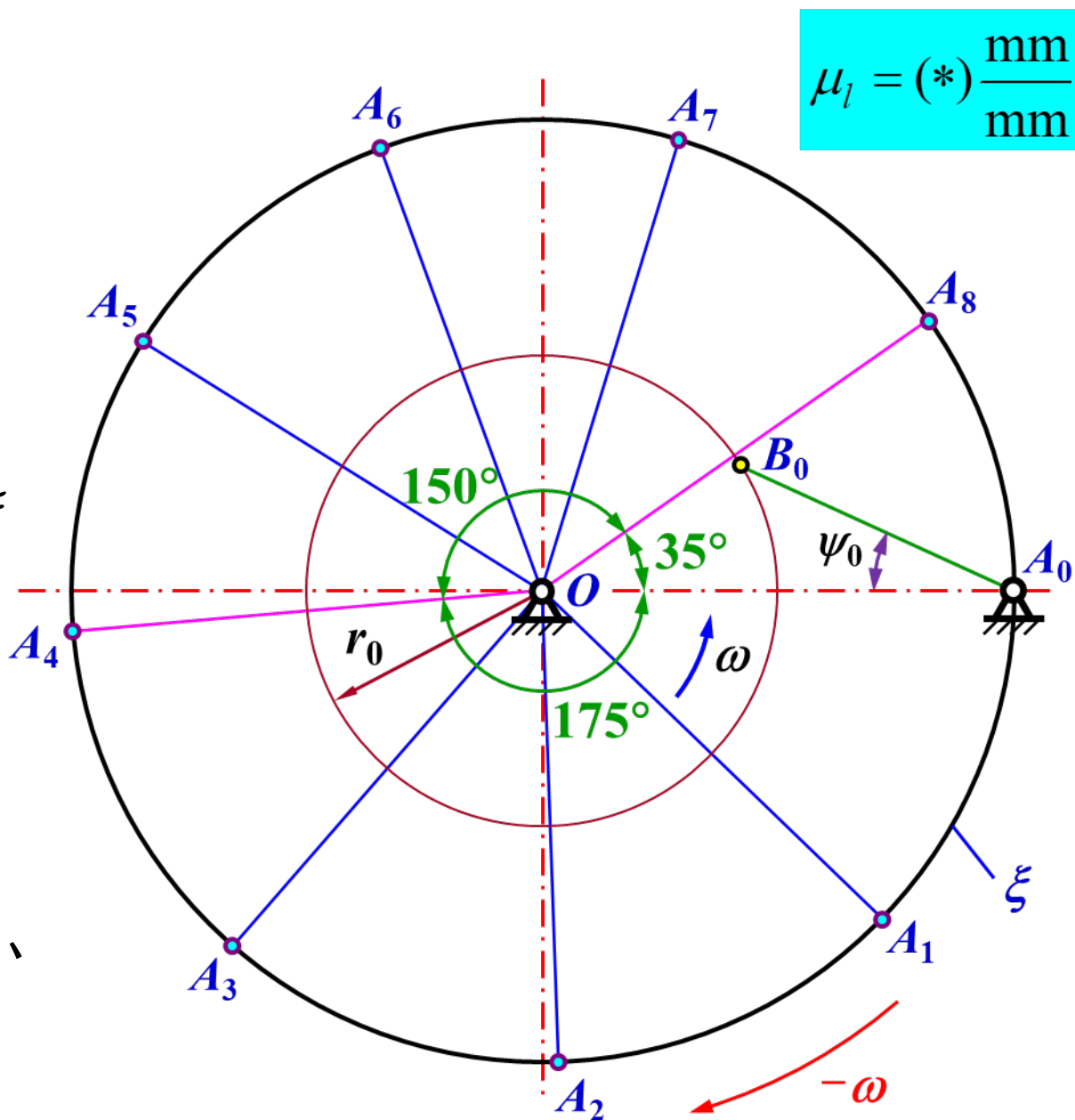
# 图解法设计凸轮轮廓

(2) 选取纵、横坐标角度比例尺  $\mu_\psi = \mu_\varphi$ ，绘制从动件的角位移线图  $\psi - \varphi$ ，将推程运动角和回程运动角分别进行若干等分（图中各为4等分）。



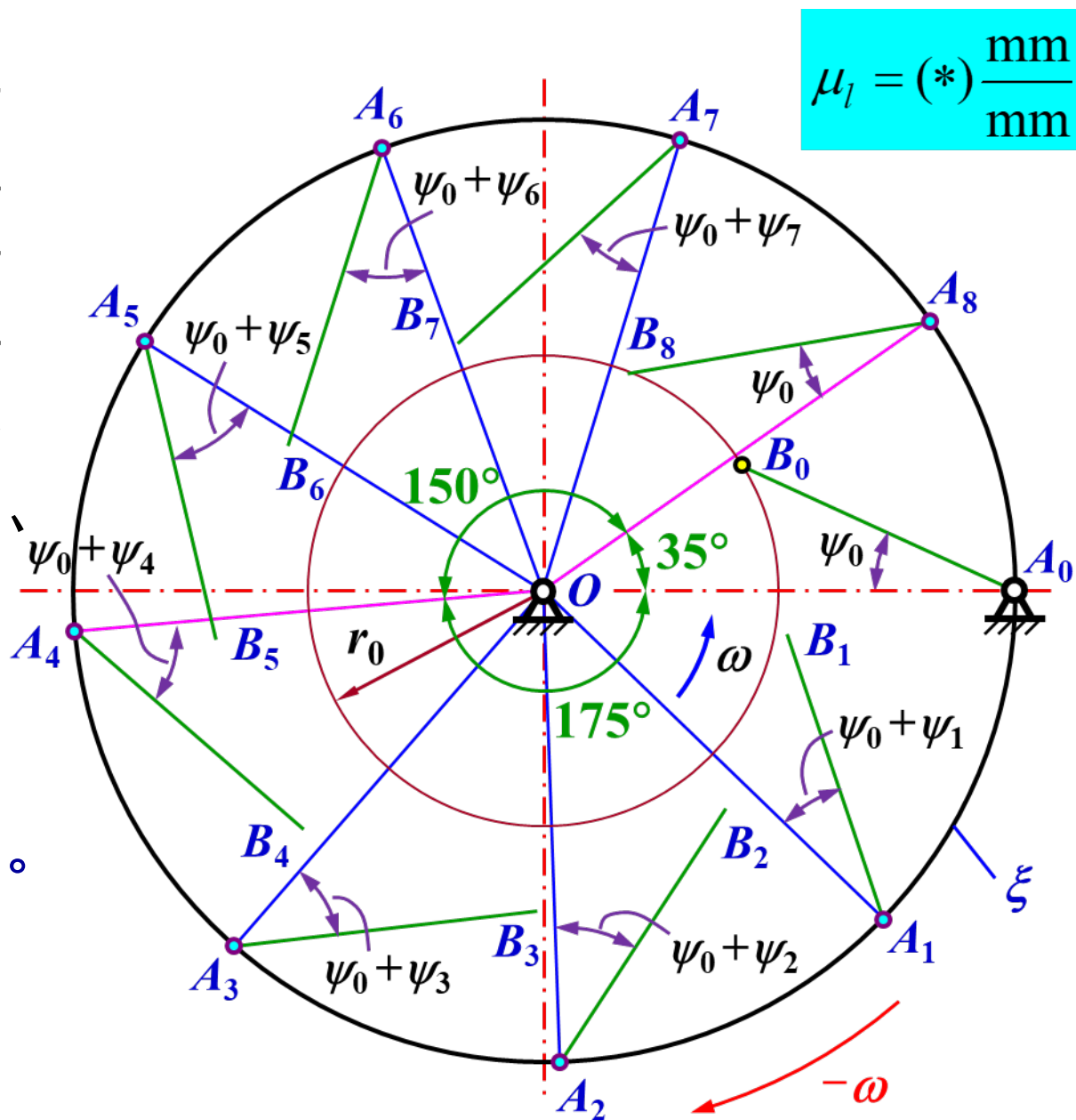
# 图解法设计凸轮轮廓

(3) 以  $O$  为圆心、 $OA_0$  为半径画圆  $\xi$ ，并沿  $-\omega$  的方向取推程运动角  $175^\circ$ 、回程运动角  $150^\circ$ 、近休止角  $35^\circ$ ，在圆  $\xi$  上得点  $A_4$ 、 $A_8$ 。将推程运动角和回程运动角分成与位移曲线对应的等分，得  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_5$ 、 $A_6$ 、 $A_7$  诸点。



# 图解法设计凸轮轮廓

(4) 由位移线图求得各等分点的摆角值  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$  ...，据此画出摆动从动件相对于机架的一系列位置  $A_1B_1$ 、 $A_2B_2$ 、 $A_3B_3$  ...，即  $\angle OA_1B_1 = \psi_0 + \psi_1$ 、 $\angle OA_2B_2 = \psi_0 + \psi_2$ 、 $\angle OA_3B_3 = \psi_0 + \psi_3$  ...。



# 图解法设计凸轮轮廓

(5) 以  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3 \dots$  为圆心、 $l_{AB}$  为半径作圆弧截  $A_1B_1$  于  $B_1$  点，截  $A_2B_2$  于  $B_2$  点，截  $A_3B_3$  于  $B_3$  点  $\dots$ 。最后将点  $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3 \dots$  连成光滑曲线，便得尖顶摆动从动件盘形凸轮的轮廓。

滚子从动件、平底从动件情况，方法类似。

