



哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



# 第六章 凸轮机构及其设计

**徐鹏**

**哈尔滨工业大学（深圳）**



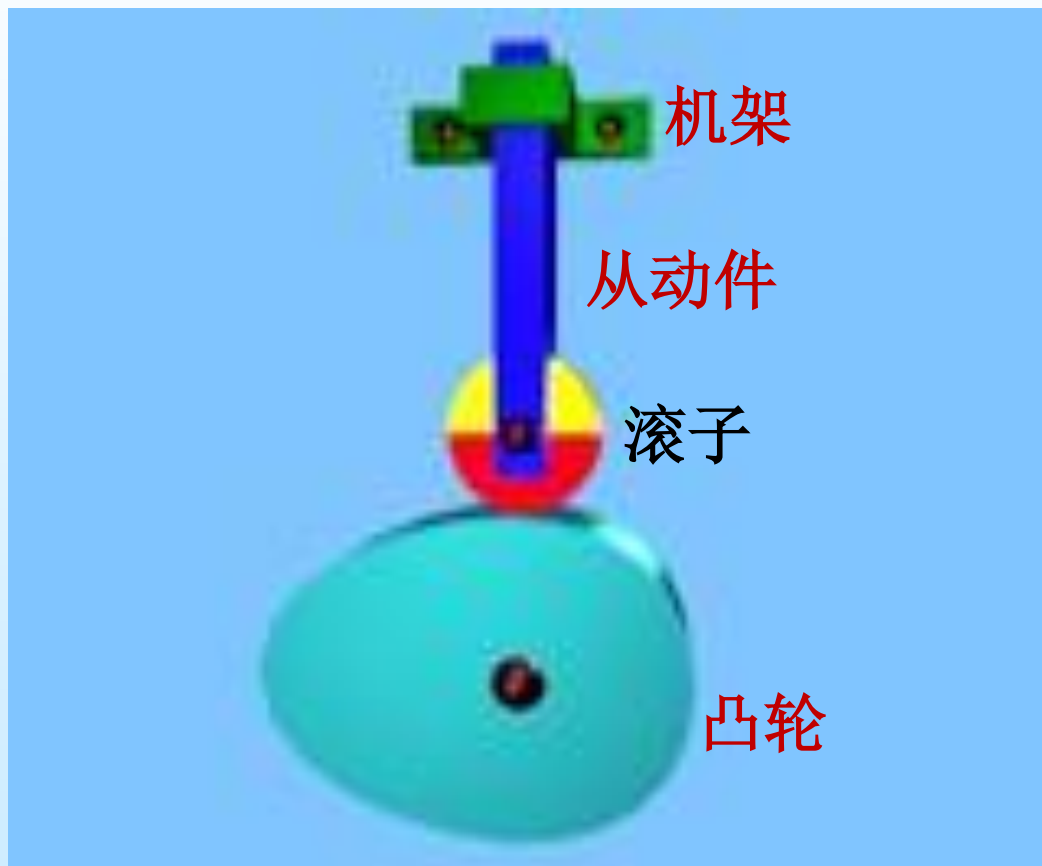
## 本章重点：

- 1) 从动件运动规律特征及其选择原则（**掌握**）；
- 2) 凸轮轮廓曲线的设计（**作图法**，解析法）；
- 3) 凸轮机构的基本尺寸确定，包括**压力角**、**基圆半径**等。



## 典型的凸轮机构的工作原理

凸轮机构可以通过合理设计凸轮的轮廓曲线，推动从动件精确的实现各种预期的运动规律。





## § 6-1 凸轮机构的应用及分类

### 一、凸轮机构的应用

配气凸轮机构 ( 00 )

等速运动凸轮绕线机 ( 00 )

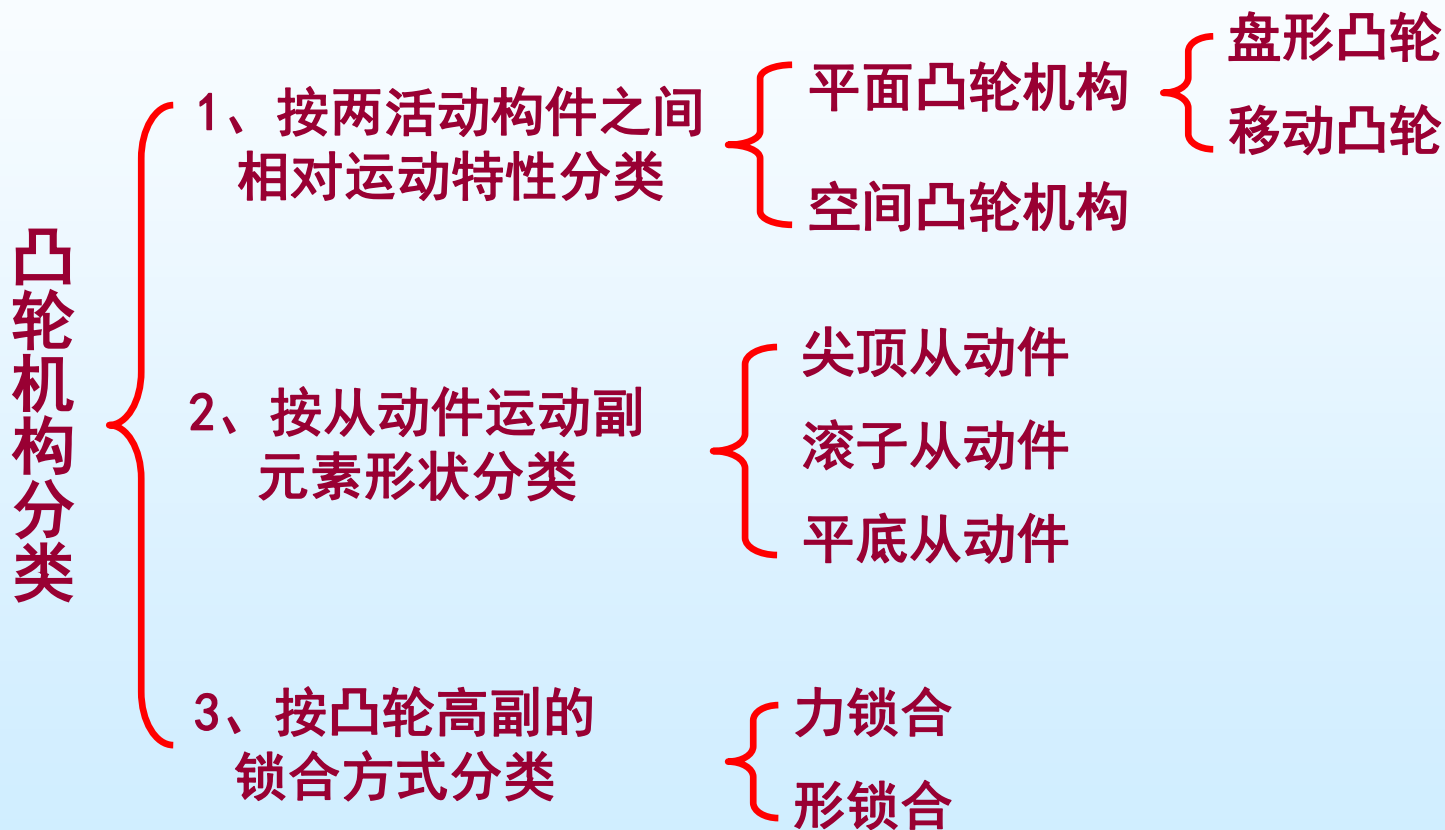
圆柱凸轮输送机 ( 00 )

双凸轮组合写R字机构 ( 00 )

凸轮间歇机构 ( 00 )



## 二、凸轮机构的分类

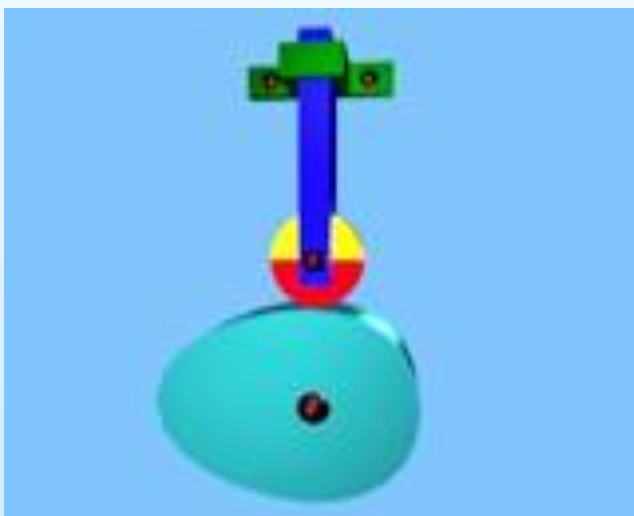




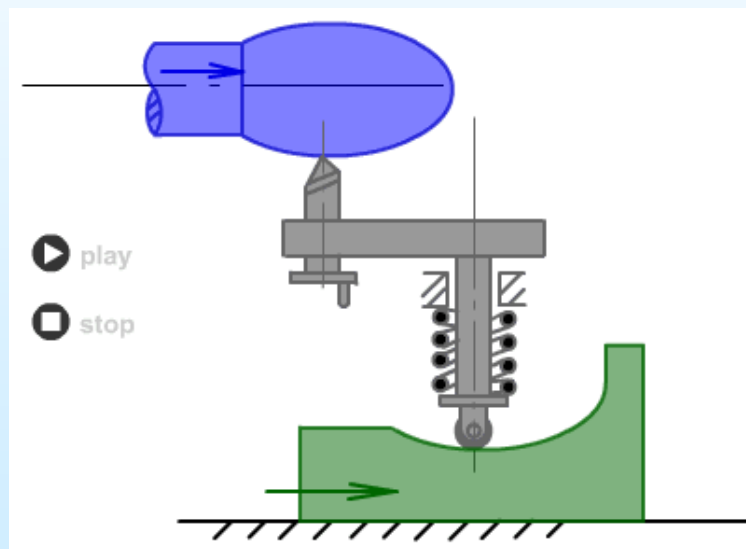
# 1、按两活动构件之间的相对运动特性分类

## (1) 平面凸轮机构

### ① 盘形凸轮

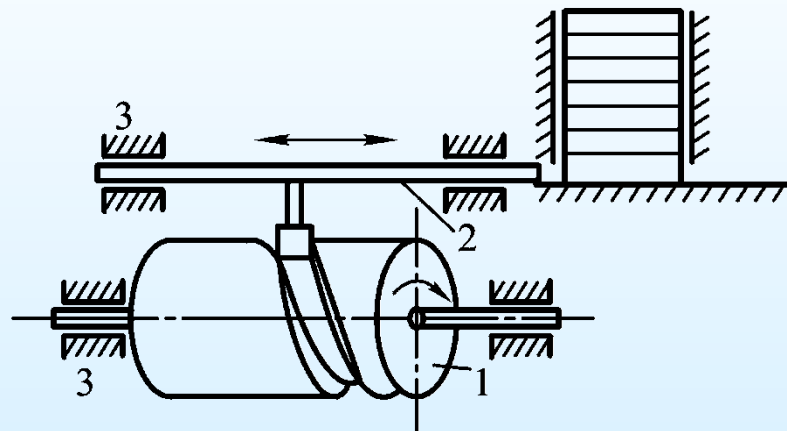
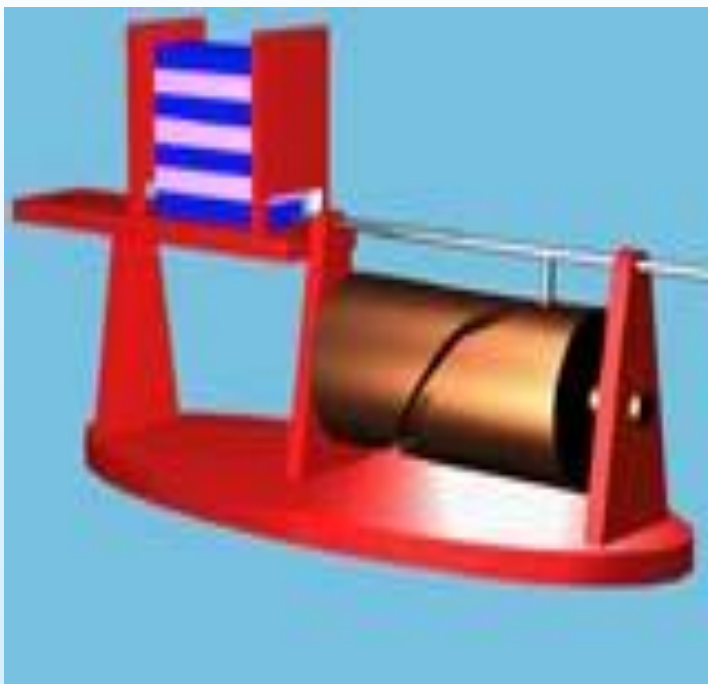


### ② 移动凸轮





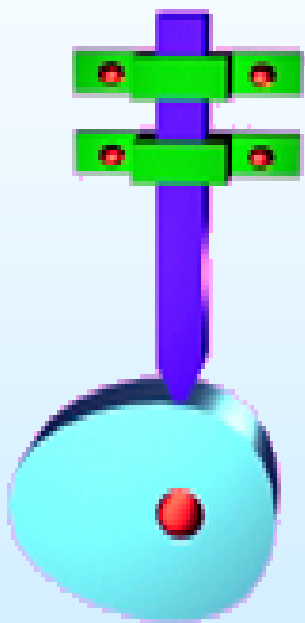
## (2) 空间凸轮机构



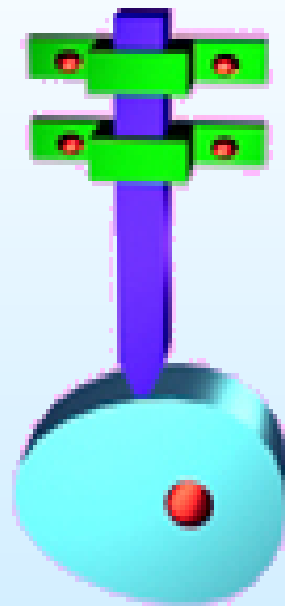


## 2、按从动件运动副元素形状分类

### (1) 直动尖顶从动件



① 对心直动尖顶从动件

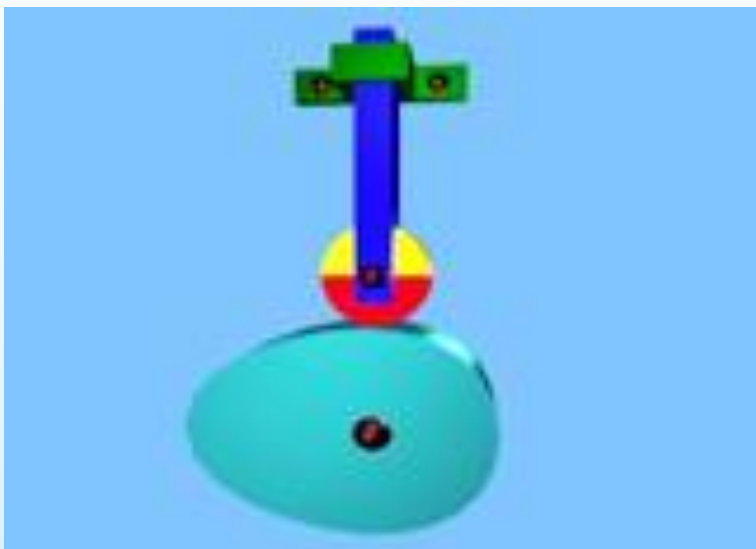


② 偏置直动尖顶从动件

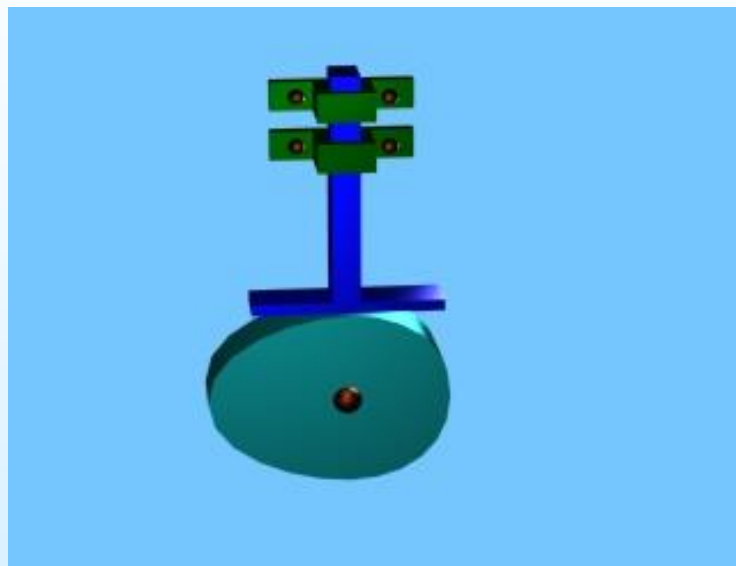




## (2) 直动滚子从动件

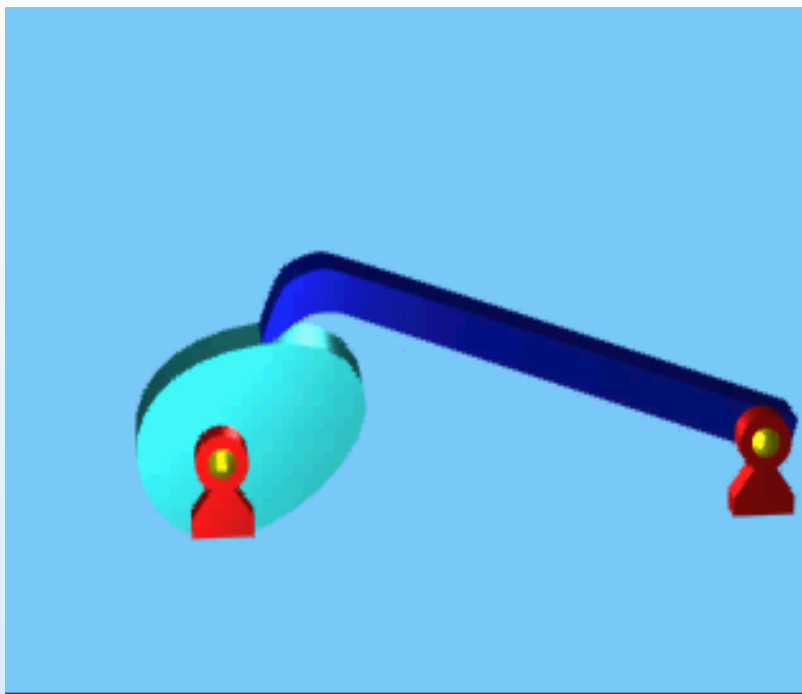


## (3) 直动平底从动件

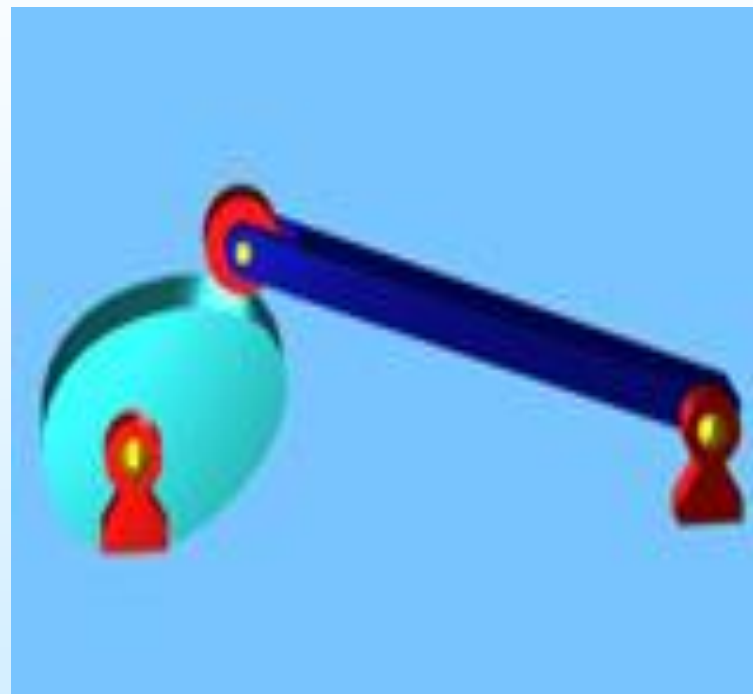




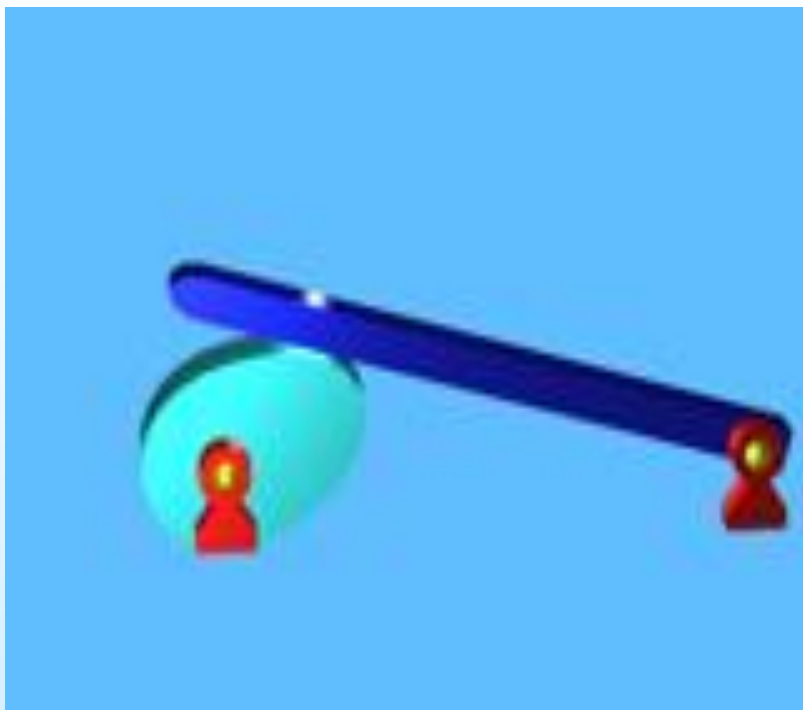
根据运动形式的不同，以上三种从动件还可分为  
直动从动件，摆动从动件，平面复杂运动从动件。



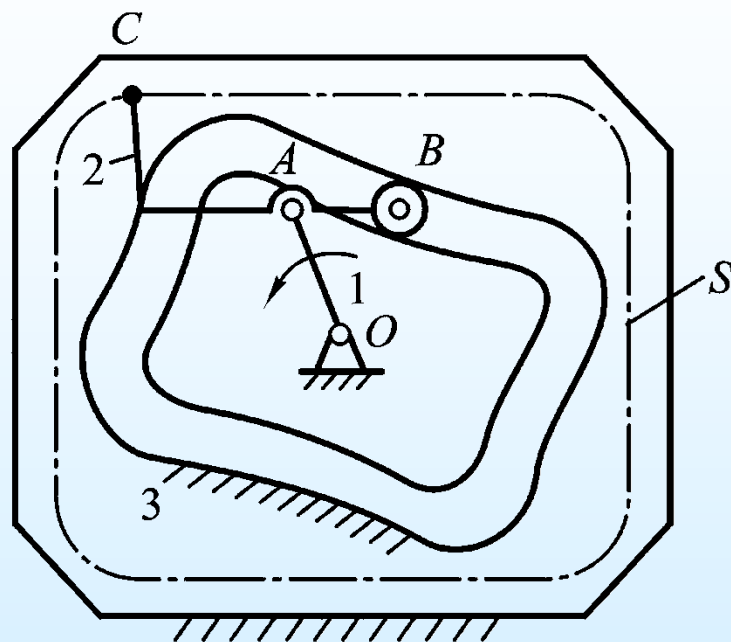
① 摆动尖顶从动件



② 摆动滚子从动件



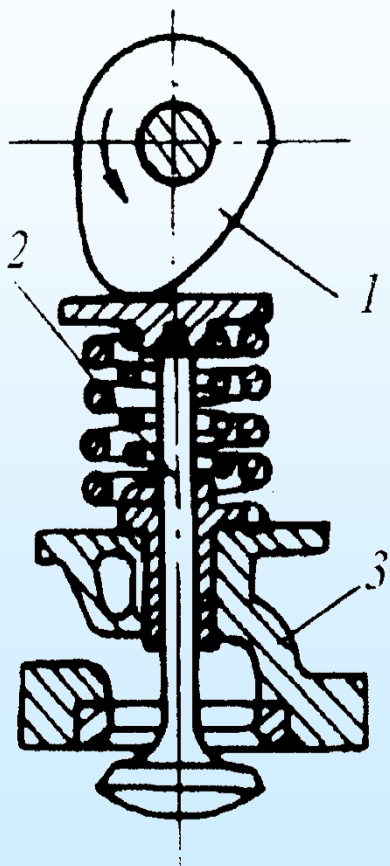
③ 摆动平底从动件



④ 平面复杂运动从动件



### 3、按凸轮高副的锁合方式分类



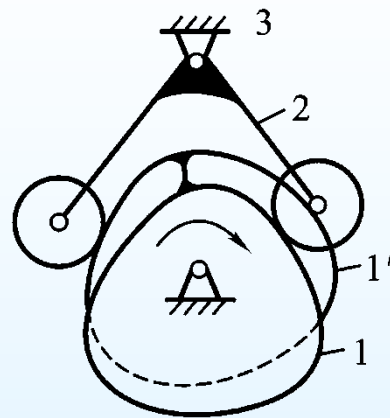
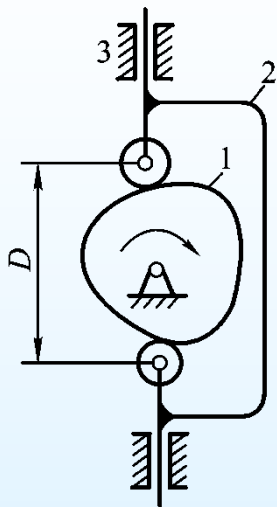
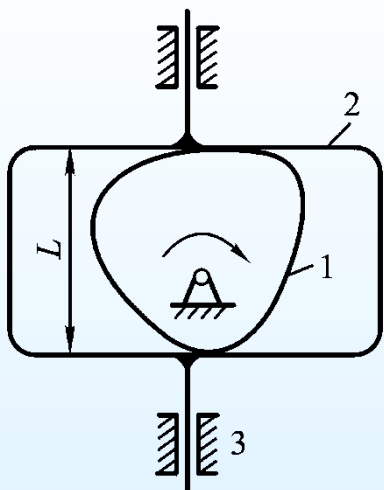
(1) 力锁合（重力，弹簧）

a) 重力锁合凸轮 (00)

b) 弹簧锁合凸轮 (00)



## (2) 形锁合



槽道凸轮机构 (00)

等宽凸轮机构 (00)

等径凸轮机构 (00)

共轭凸轮机构 (00)



## 凸轮机构的优缺点：

### 优点：

只要设计出适当的凸轮轮廓，即可使从动件实现预期的运动规律；结构简单、紧凑、工作可靠。应用：自动机床，轻工、纺织、印刷、食品、包装等机电一体化产品中。

### 缺点：

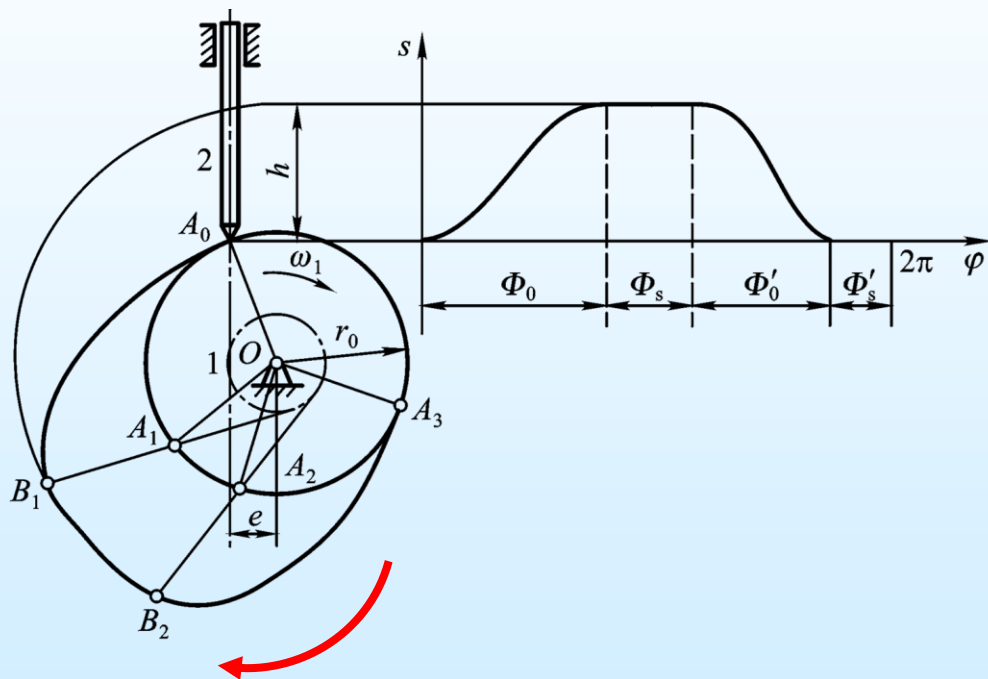
凸轮为高副接触（点或线），压强较大，容易磨损。不可变。



## § 6-2 从动件运动规律及其选择

### 一、凸轮机构的运动循环及基本名词术语

名称	代号	名称	代号
凸轮基圆		从动件远休程	
基圆半径	$r_0$	从动件近休程	
偏距	$e$	从动件位移	$s$
偏距圆		推程运动角	$\Phi_0$
从动件行程	$h$	回程运动角	$\Phi'_0$
从动件推程		远休程角	$\Phi_s$
从动件回程		近休程角	$\Phi'_s$





## 二、从动件运动规律

从动件的**运动规律 (Law of motion)**，由**凸轮轮廓曲线 (Cam profile)** 形状决定。从动件不同的运动规律，要求凸轮具有不同形状的轮廓曲线。正确选择和设计从动件的运动规律，是凸轮机构设计的重要环节。

所谓“从动件运动规律”是指凸轮的从动件的位移 ( $s$ )、速度 ( $v$ )、加速度 ( $a$ ) 随**凸轮转角 ( $\varphi$ )** 的变化规律。

$$s = s(\varphi) \quad (\text{规划, 给定})$$

$$v = v(\varphi) = \frac{ds}{dt} = \frac{ds}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{ds}{d\varphi} \omega$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d\left(\frac{ds}{d\varphi} \omega\right)}{dt} = \frac{d\left(\frac{ds}{d\varphi}\right)}{dt} \omega + \frac{d\omega}{dt} \frac{ds}{d\varphi} = \frac{d\left(\frac{ds}{d\varphi}\right)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \omega + \frac{d\omega}{dt} \frac{ds}{d\varphi} = \frac{d^2s}{d\varphi^2} \omega^2$$



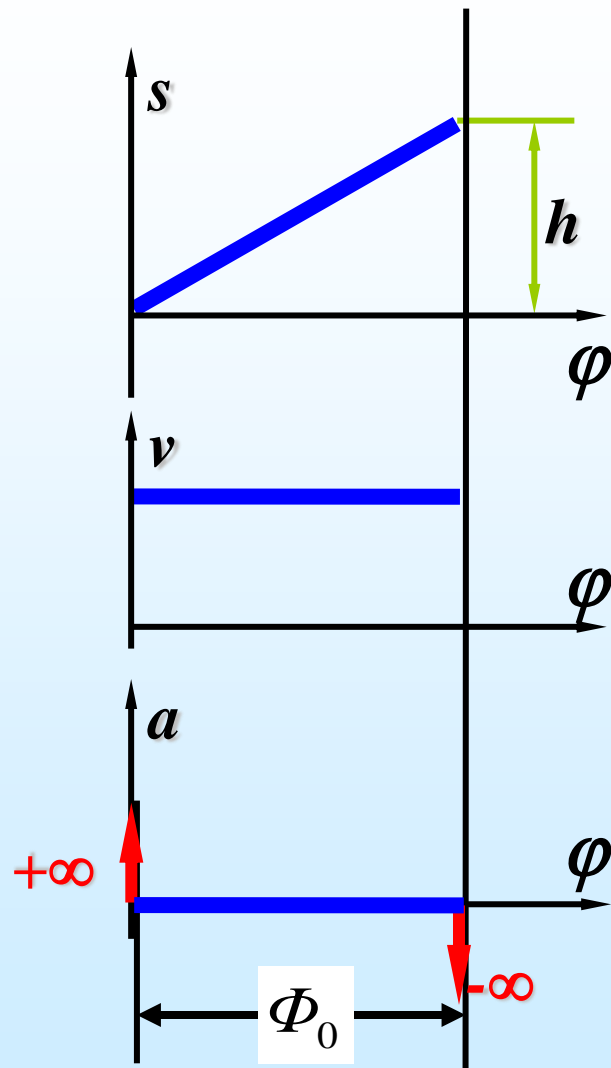


## 基本运动规律（理想）

### (1) 等速运动

$$s = \frac{h}{\Phi_0} \varphi \quad v = \frac{h}{\Phi_0} \omega \quad a = 0$$

- **特点**：有刚性冲击。
- **刚性冲击**：  
加速度无穷大突变引起的冲击。
- **应用**：低速，轻载。





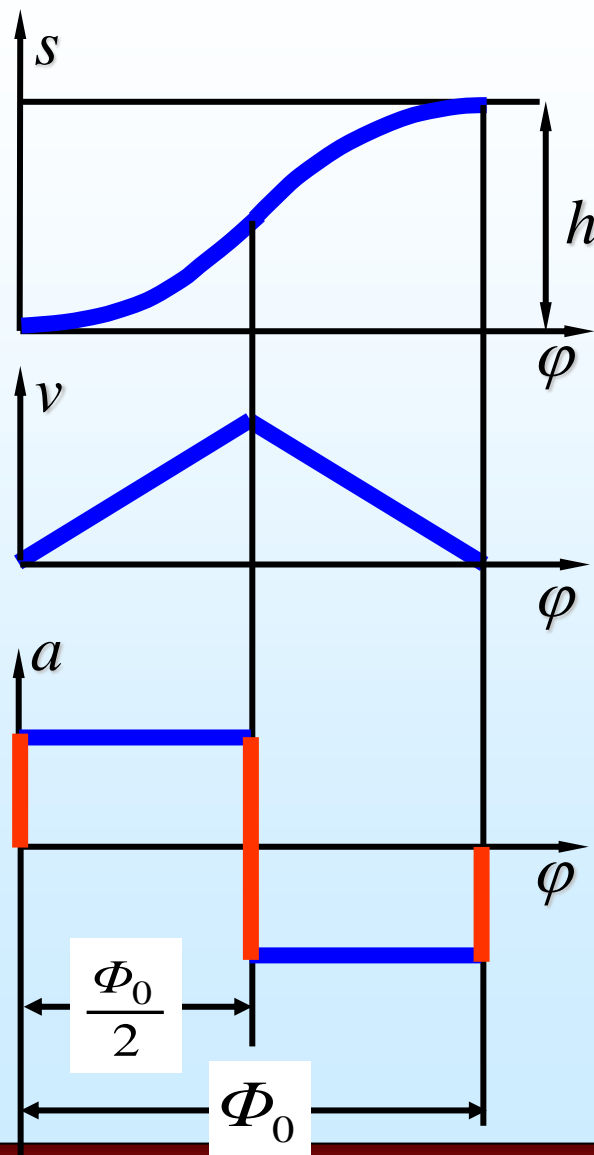
## (2)等加等减速运动

推程（前半段）  $s = \frac{2h}{\Phi_0^2} \varphi^2$

$$v = \frac{4h\varphi}{\Phi_0^2} \omega$$

$$a = \frac{4h}{\Phi_0^2} \omega^2$$

- **特点**：有柔性冲击
- **柔性冲击**：  
加速度有限值突变引起的冲击。
- **应用**：中速，轻载。





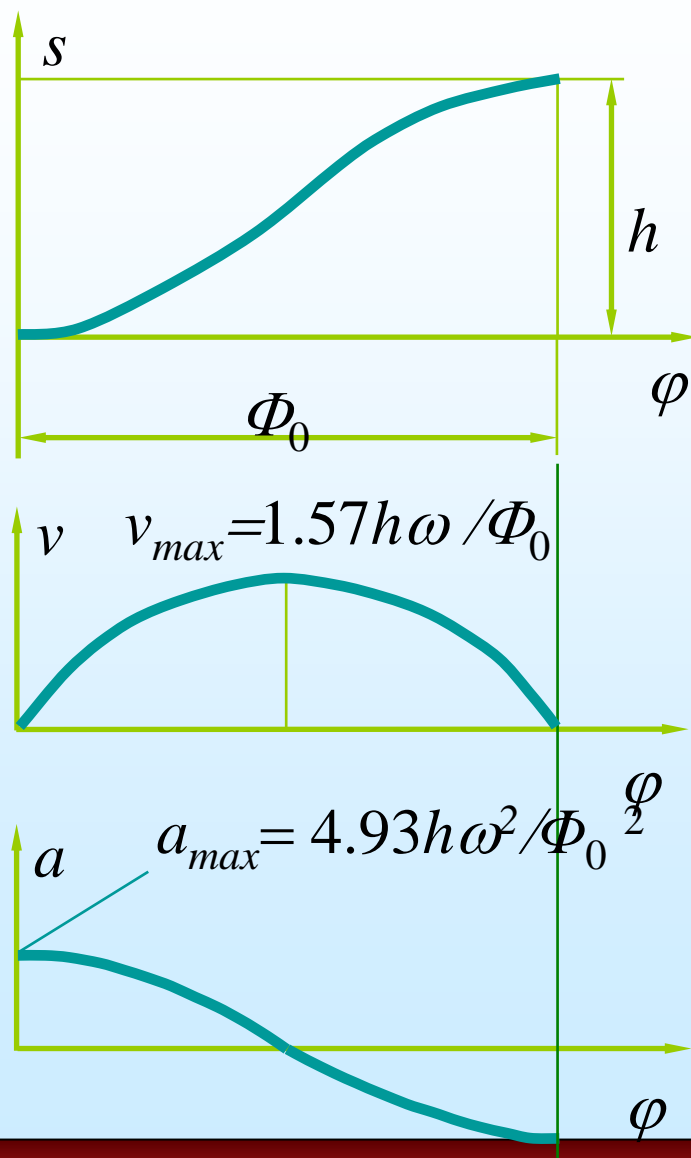
### (3)余弦加速度运动规律

推程 
$$s = \frac{h}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi}{\Phi_0} \varphi \right) \right]$$

$$v = \frac{\pi h \omega}{2 \Phi_0} \sin \left( \frac{\pi}{\Phi_0} \varphi \right)$$

$$a = \frac{\pi^2 h \omega^2}{2 \Phi_0^2} \cos \left( \frac{\pi}{\Phi_0} \varphi \right)$$

加速度曲线不连续，存在**柔性冲击**。余弦加速度运动规律适用于**中速中载**场合。



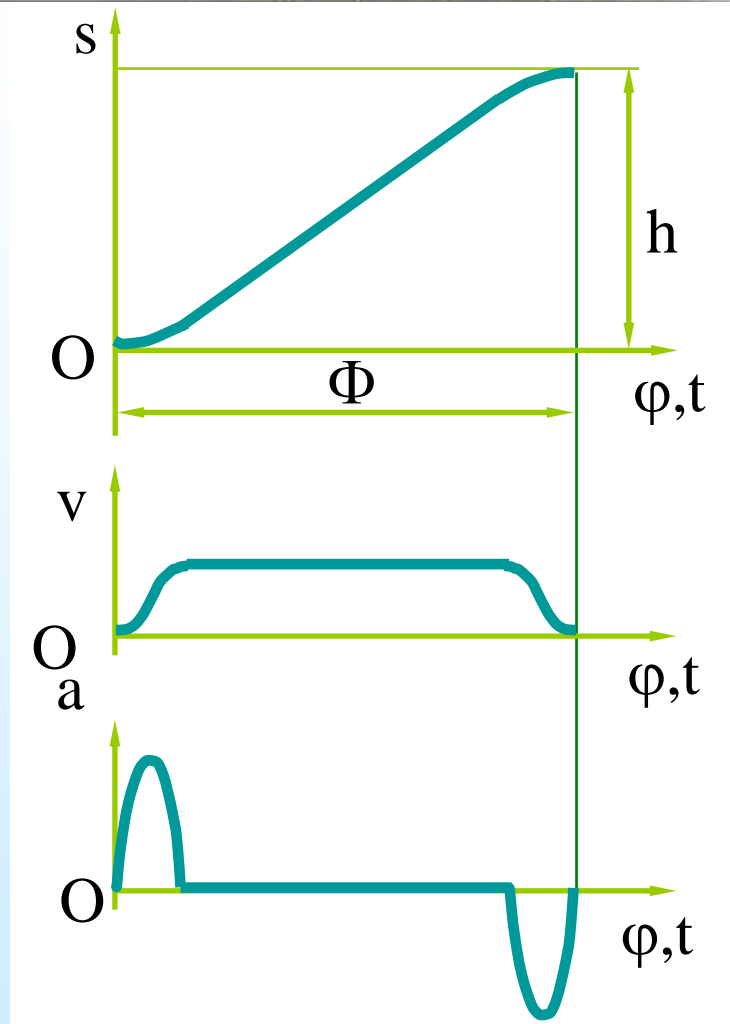
## 组合运动规律

为了克服单一运动规律的某些缺陷，获得更好的运动和动力特性，可以把几种运动规律拼接起来，构成**组合运动规律**(Law of combined motion)。

### 组合原则

**位移曲线、速度曲线必须连续，高速凸轮机构加速度曲线也必须连续。**

各段运动规律的位移、速度和加速度曲线在连接点处其值应分别相等。



正弦加速度曲线与直线组合



## 凸轮从动件的运动规律有两类

基本运动规律	组合运动规律
等速（直线）	抛物线、直线、抛物线
等加等减速（抛物线）	简谐、直线、简谐
余弦加速度（简谐）	摆线、直线、摆线运动规律
正弦加速度（摆线）	摆线、抛物线、摆线
改进正弦加速度	
3-4-5多项式	
4-5-6-7多项式	



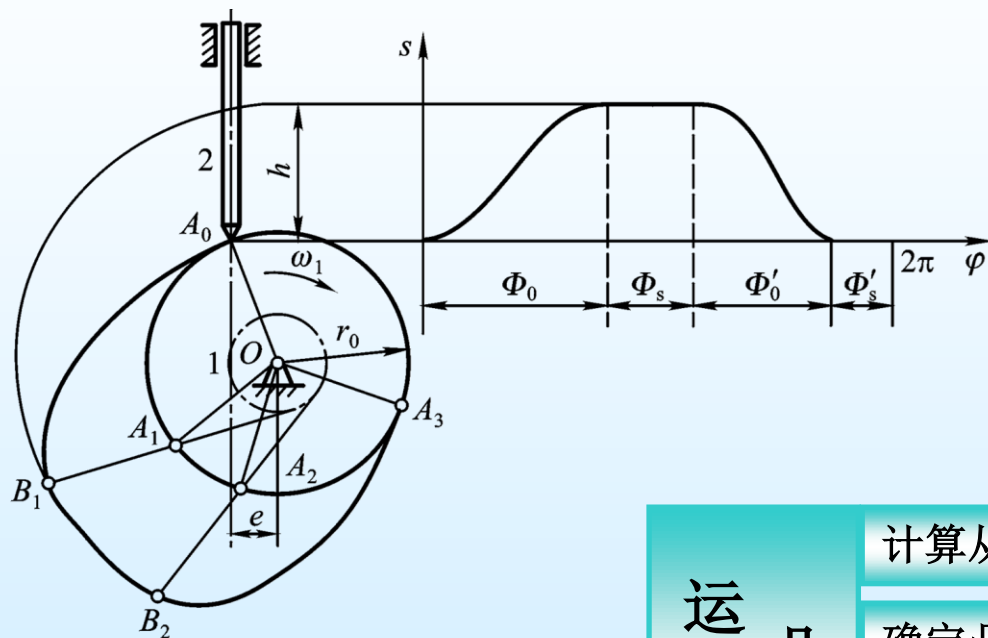
## 若干种从动件运动规律特性比较

运动规律	$v_{\max}$ $(h\omega / \Phi_0) \times$	$a_{\max}$ $(h\omega^2 / \Phi_0^2) \times$	冲 击	应用场合
等速	1.00	$\infty$	刚 性	低速轻负荷
等加速等减速	2.00	4.00	柔 性	中速轻负荷
余弦加速度	1.57	4.93	柔 性	中低速中负
正弦加速度	2.00	6.28	——	中高速轻负
3-4-5多项式	1.88	5.77	——	高速中负荷
改进型等速	1.33	8.38	——	低速重负荷
改进型正弦加速度	1.76	5.53	——	中高速重负
改进型梯形加速度	2.00	4.89	——	高速轻负荷



## § 6-3 按预定运动规律设计盘形凸轮廓线

### 一、凸轮设计的基本问题



凸轮机构选型



运动学设计  
凸轮机构

计算从动件位移参数

确定凸轮各个转角

设计从动件运动规律

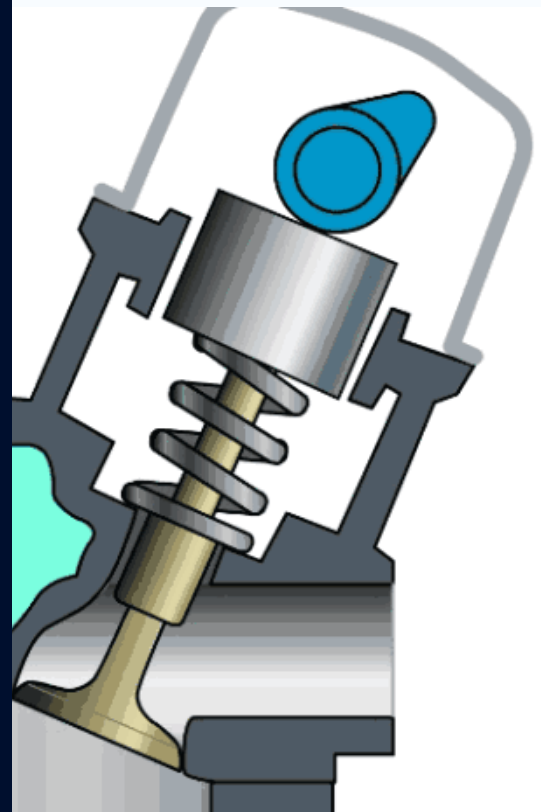
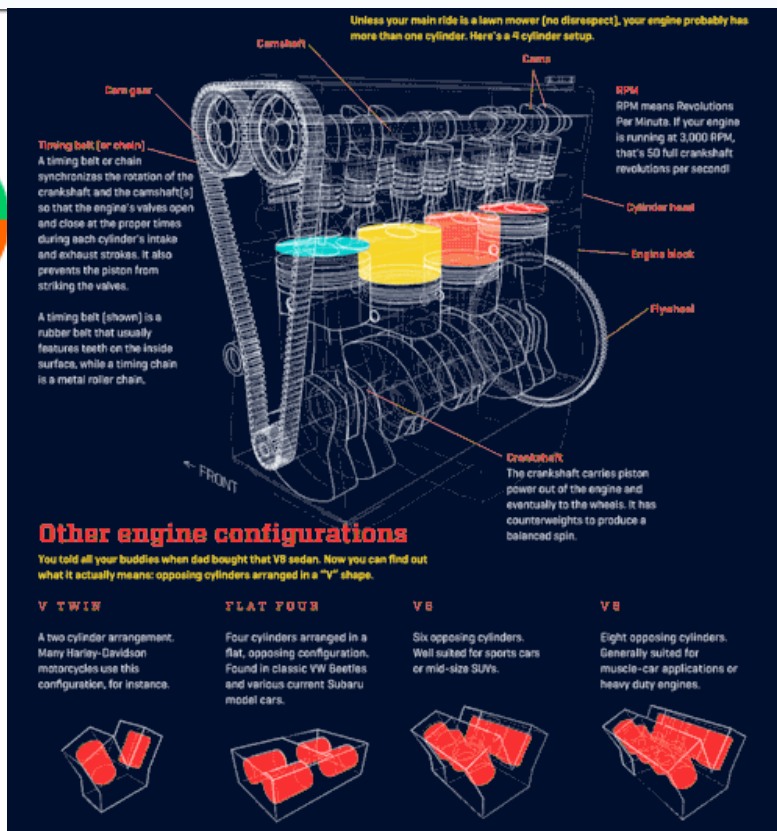
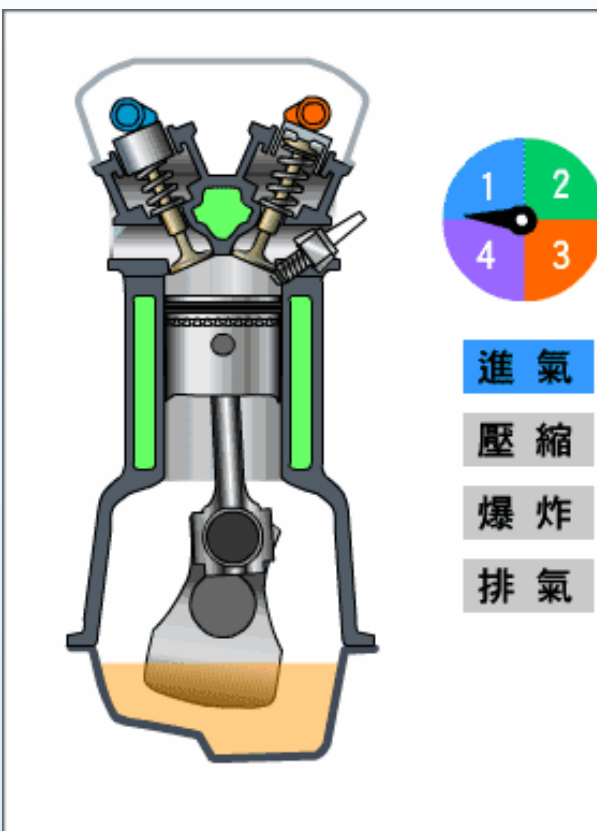
凸轮基本尺寸设计

凸轮轮廓曲线设计





## 以内燃机为例：内燃机动画



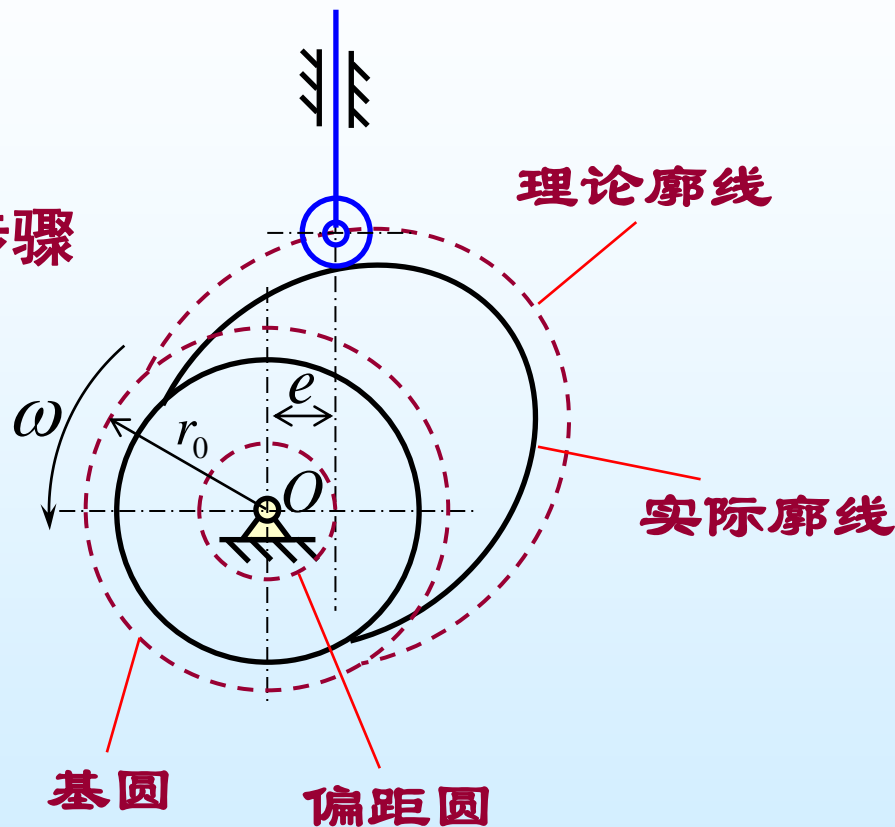




## 二、凸轮设计步骤

### 直动从动件盘形凸轮的设计步骤

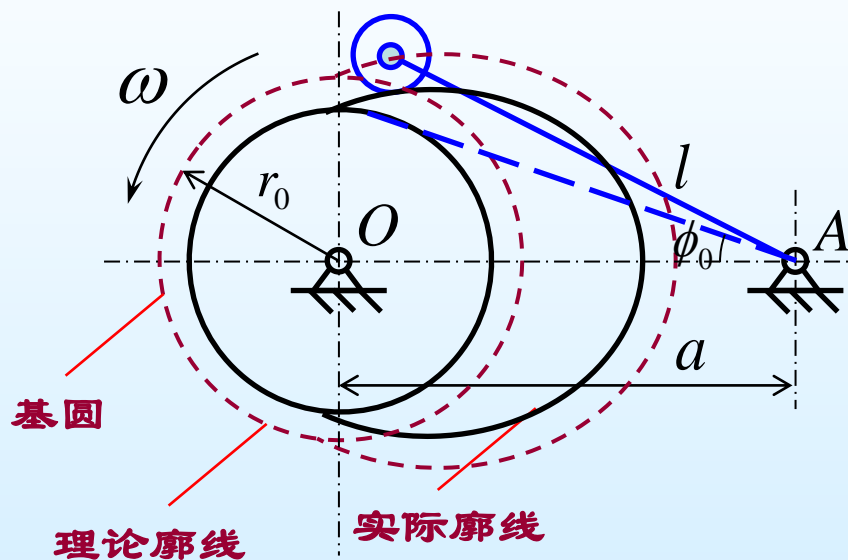
- 1、确定  $s = s(\varphi)$
- 2、确定  $r_0, e$
- 3、设计理论廓线
- 4、设计实际廓线





## 摆动从动件盘形凸轮的设计步骤

- 1、确定  $\phi = \phi(\varphi)$
- 2、确定  $a, l, r_0$
- 3、设计理论廓线
- 4、设计实际廓线





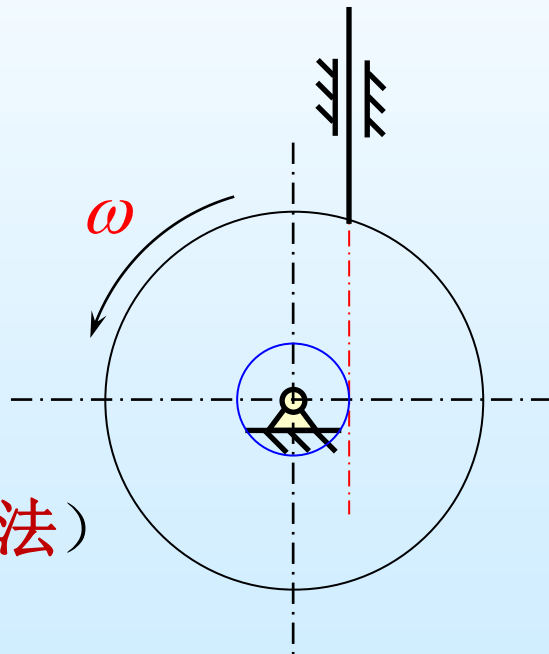
### 三、凸轮理论廓线设计的基本原理

凸轮轮廓线的设计方法有两种——图解法和解析法。

#### 1、直动从动件凸轮理论轮廓设计——图解法

确定凸轮回转方向，**绘制凸轮基圆、偏距圆**和去掉滚子。

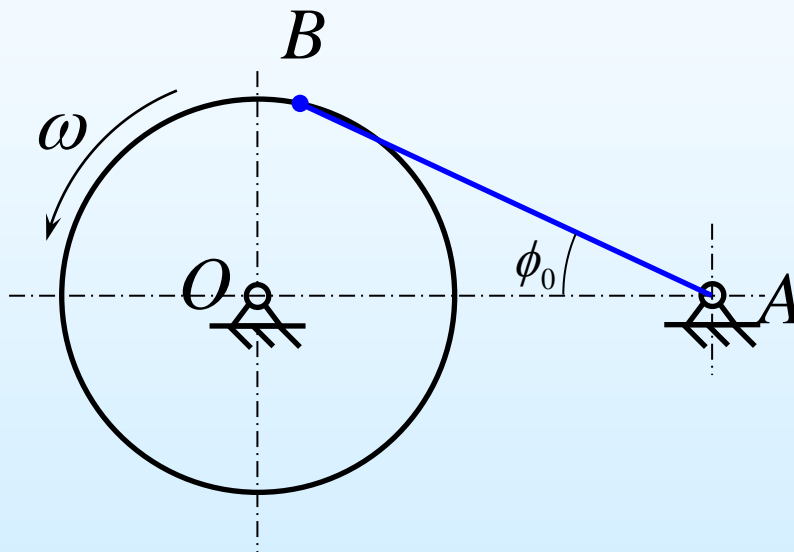
凸轮轮廓线设计方法基本原理 (61)  
直动推杆盘形凸轮设计 (61) (**作图法**)





## 2、摆动从动件凸轮理论轮廓设计——图解法

确定凸轮回转方向，**绘制凸轮基圆、机架和摆杆长**和去掉滚子。



摆动推杆盘形凸轮设计（**作图法**）



### 3、直动从动件凸轮理论轮廓设计——解析法

#### 作图法的缺点

繁琐、误差较大。

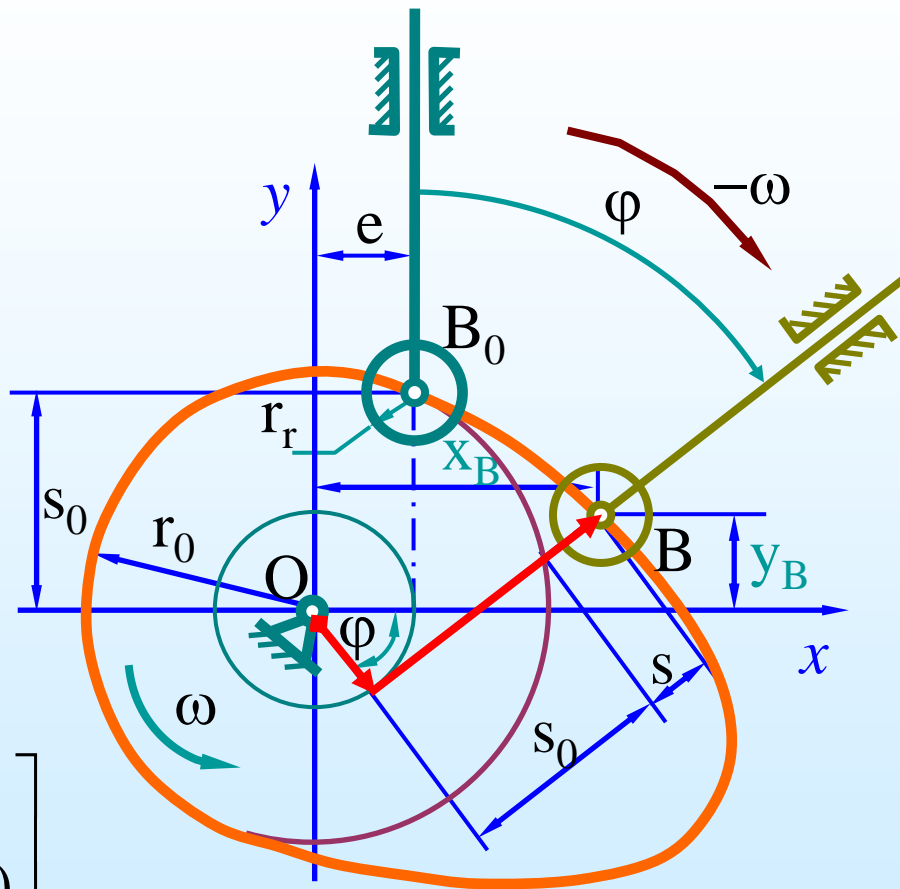
#### 解析法的优点

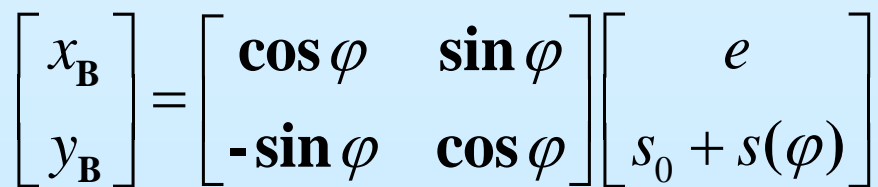
计算精度高、速度快，计算结果得到的数据点，编制加工程序，用于凸轮在数控机床上的加工。

#### 解析法的设计结果

根据基本尺寸的设计结果以及从动件的运动规律，求出凸轮轮廓曲线的方程，利用计算机精确地计算出凸轮轮廓曲线上各点的坐标值。









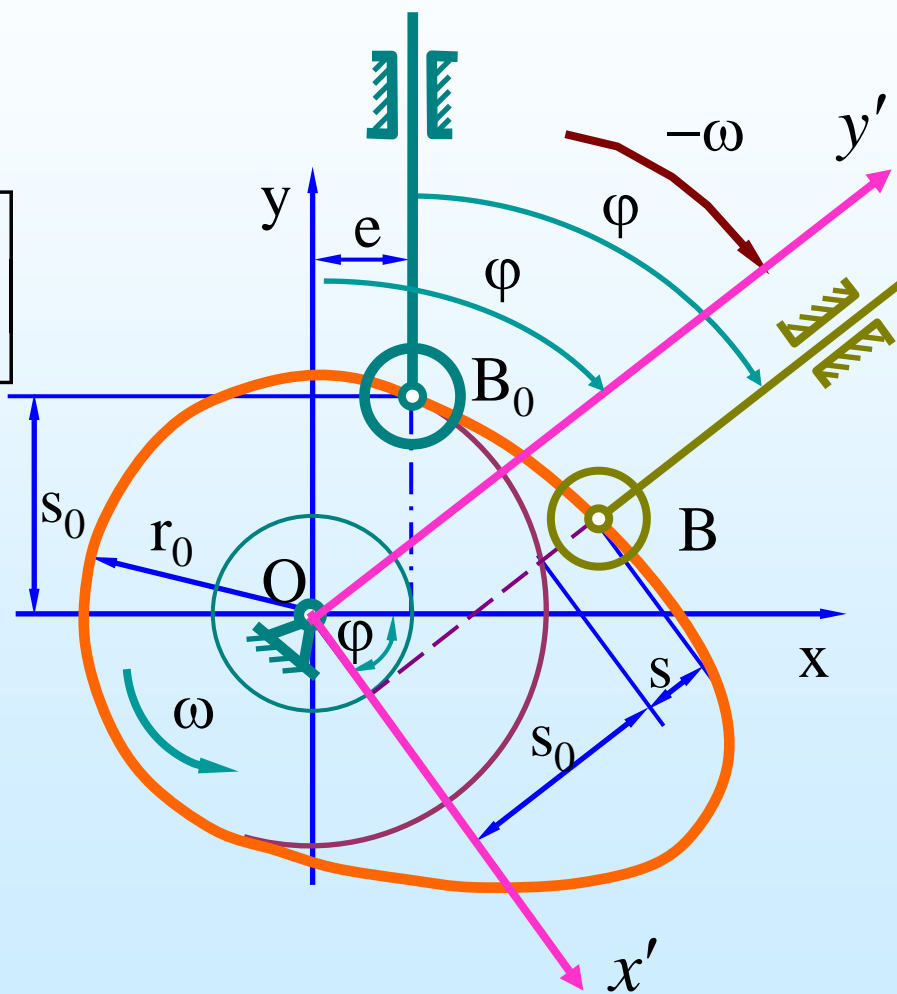




### (3) 坐标变换

$$B(x', y') \rightarrow B(x, y)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$





## (4) 固定坐标系中凸轮理论轮廓的方程

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad \begin{cases} x = x' \cos \varphi + y' \sin \varphi \\ y = -x' \sin \varphi + y' \cos \varphi \end{cases}$$

式中：  $\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \\ s_0 + s \end{bmatrix}$

### 理论轮廓曲线方程

$$\begin{cases} s = s(\varphi) \\ x = (s_0 + s) \sin \varphi + e \cos \varphi \\ y = (s_0 + s) \cos \varphi - e \sin \varphi \end{cases}$$



## 4、摆动从动件凸轮理论轮廓设计——解析法

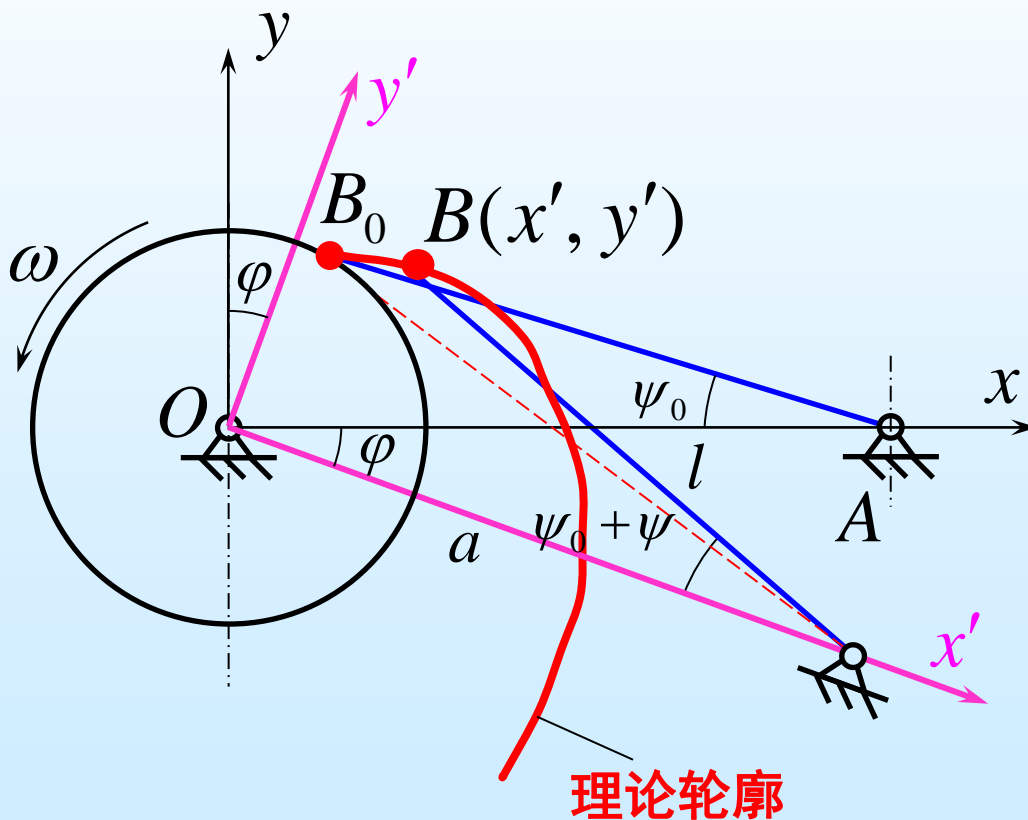
### (1) 建立坐标系

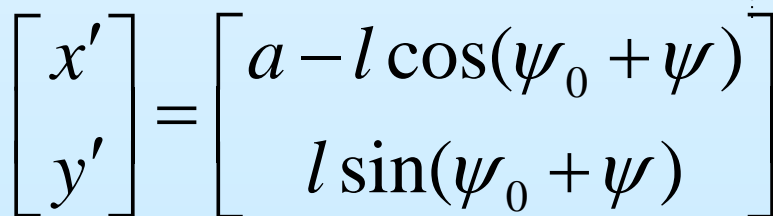
坐标系  $O-x, y$

与凸轮固连，为固定坐标系

坐标系  $O-x', y'$

与从动件固连，为动坐标系



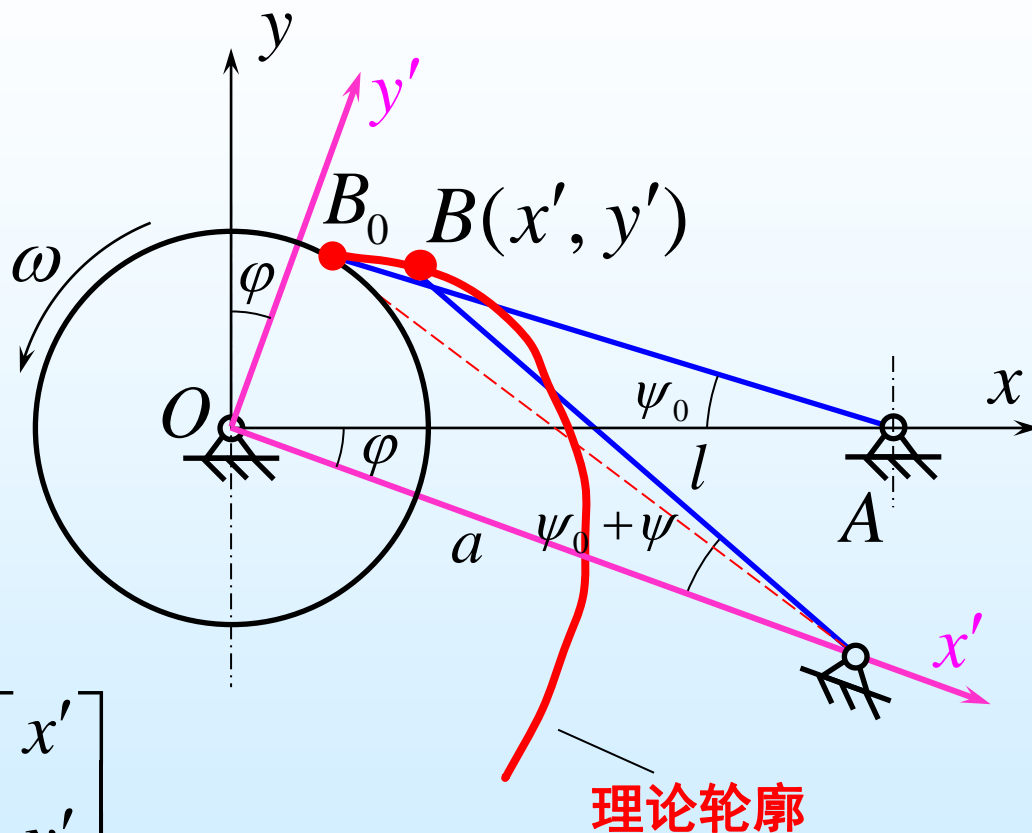




### (3) 坐标变换

$$B(x', y') \rightarrow B(x, y)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$





#### (4) 固定坐标系中凸轮理论轮廓的方程

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad \begin{cases} x = x' \cos \varphi + y' \sin \varphi \\ y = -x' \sin \varphi + y' \cos \varphi \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a - l \cos(\psi_0 + \psi) \\ l \sin(\psi_0 + \psi) \end{bmatrix}$$

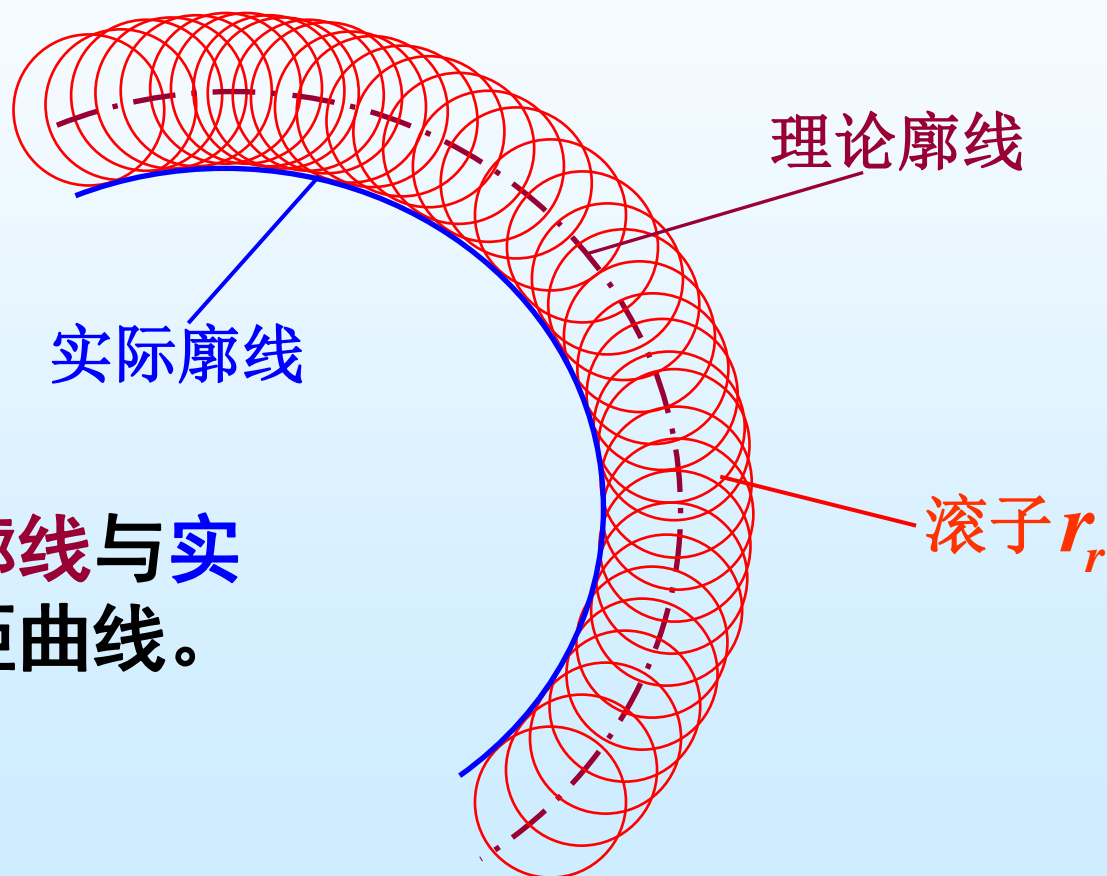
#### 理论轮廓曲线方程

$$\begin{cases} \psi = \psi(\varphi) \\ x = [a - l \cos(\psi_0 + \psi)] \cos \varphi + l \sin(\psi_0 + \psi) \sin \varphi \\ y = -[a - l \cos(\psi_0 + \psi)] \sin \varphi + l \sin(\psi_0 + \psi) \cos \varphi \end{cases}$$



## 四、凸轮实际廓线设计

### 1、滚子从动件凸轮实际廓线设计——图解法



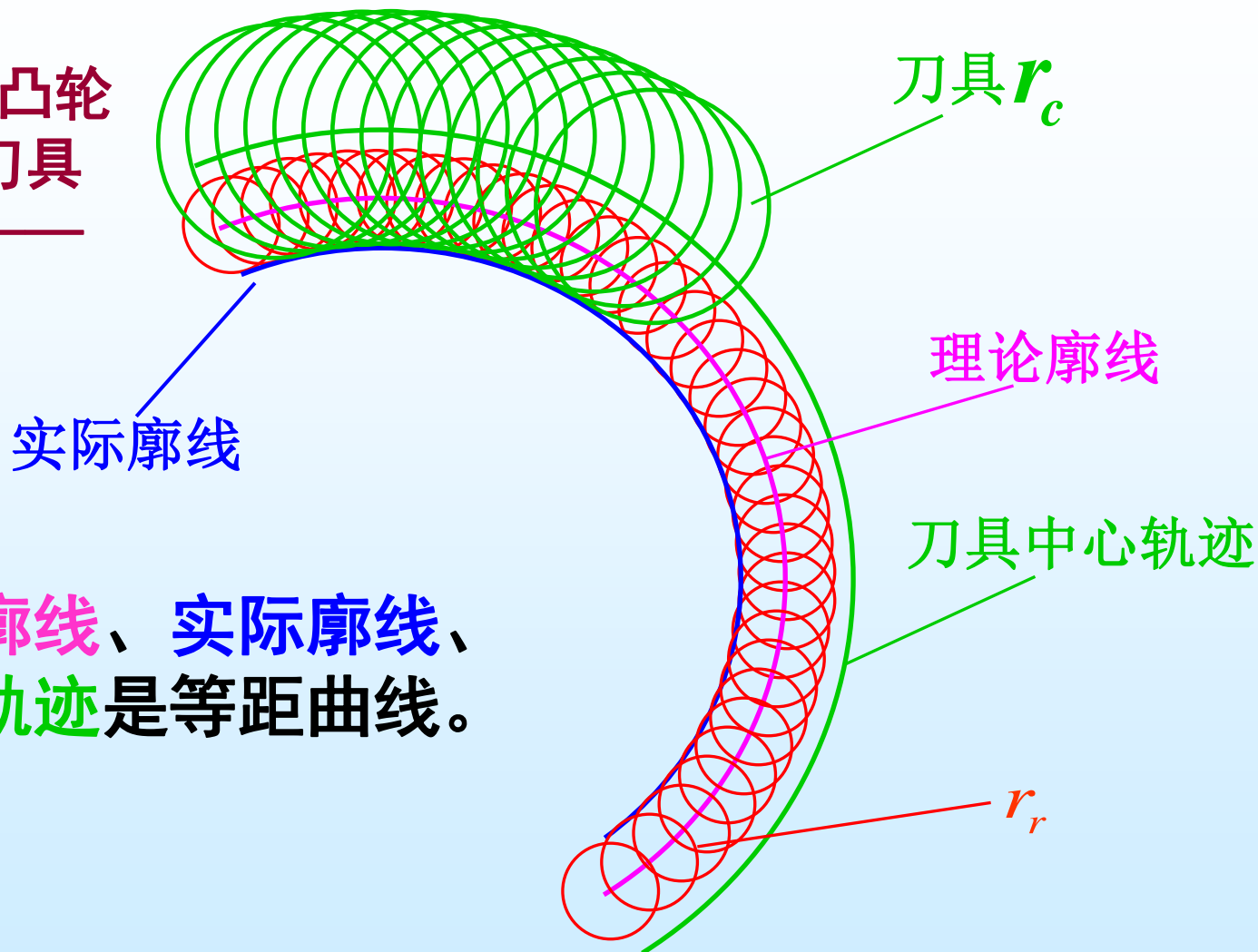
凸轮的理论廓线与实际廓线是等距曲线。





## 2、滚子从动件凸轮 实际廓线加工刀具 中心轨迹确定—— 图解法

凸轮的**理论廓线**、**实际廓线**、  
刀具的**中心轨迹**是等距曲线。





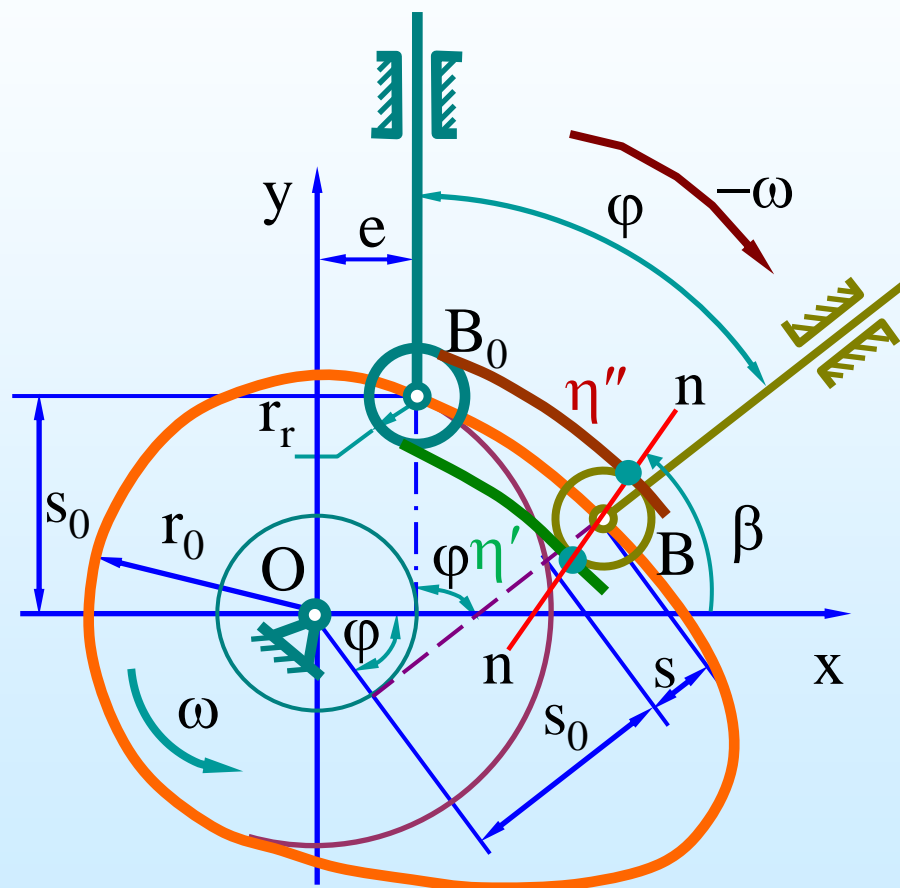
### 3、滚子从动件凸轮实际廓线设计——解析法

曲线在B点的法线n-n的斜率

$$\tan \beta = \frac{dx_B}{-dy_B} = \frac{dx_B/d\varphi}{-dy_B/d\varphi} = \frac{\sin \beta}{\cos \beta}$$

$$\cos \beta = \frac{-dy_B/d\varphi}{\sqrt{\left(\frac{dx_B}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy_B}{d\varphi}\right)^2}}$$

$$\sin \beta = \frac{dx_B/d\varphi}{\sqrt{\left(\frac{dx_B}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy_B}{d\varphi}\right)^2}}$$





$$\left. \begin{aligned} x &= x_B \mp r_r \cos \beta \\ y &= y_B \mp r_r \sin \beta \end{aligned} \right\}$$

**注意：**上面一组**减减号**表示一条内包络线 $\eta'$ ，下面一组**加加号**表示一条外包络线 $\eta''$ 。

## 刀具中心直角坐标方程

$$\left. \begin{aligned} x_c &= x_B \pm |r_c - r_r| \cos \beta \\ y_c &= y_B \pm |r_c - r_r| \sin \beta \end{aligned} \right\}$$

当 $r_c > r_r$ 时，取上面一组**加加号**；当 $r_c < r_r$ 时，取下面一组**减减号**。



## 4、直动平底从动件盘形凸轮实际廓线设计——解析法

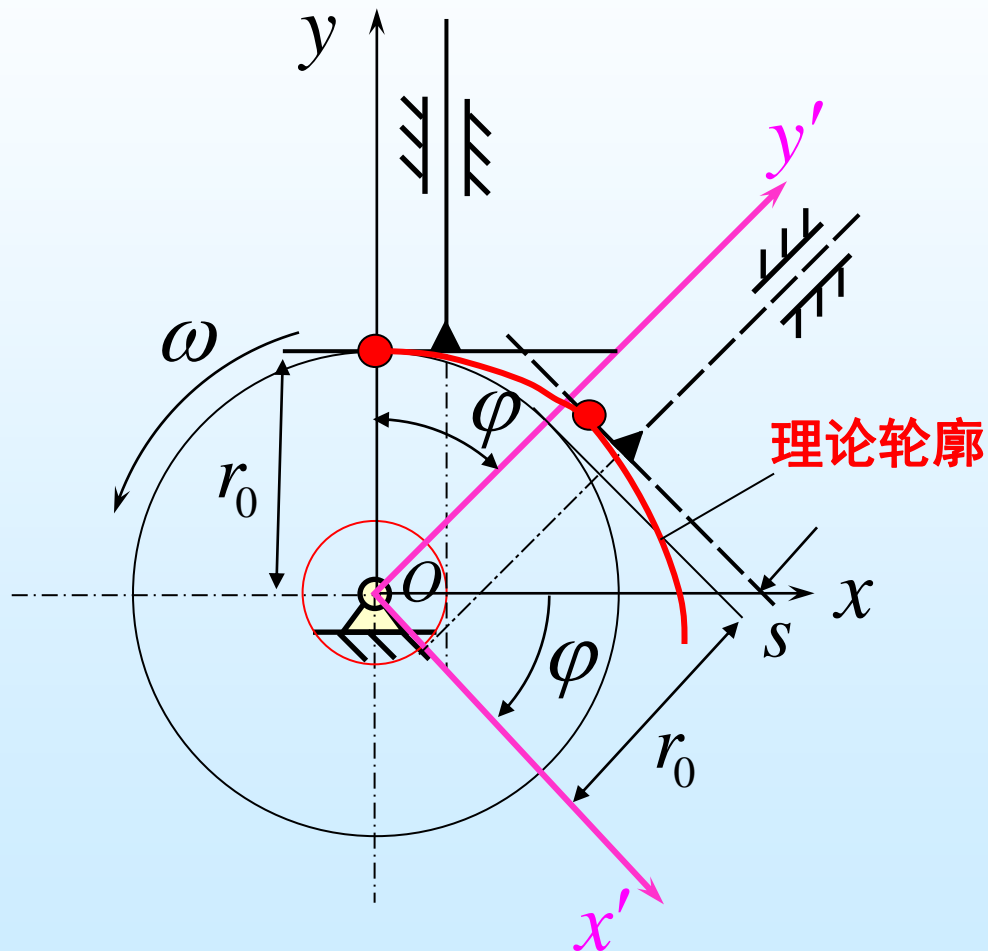
### (1) 建立坐标系

坐标系  $O-x, y$

与凸轮固连，为固定坐标系

坐标系  $O-x', y'$

与从动件固连，为动坐标系





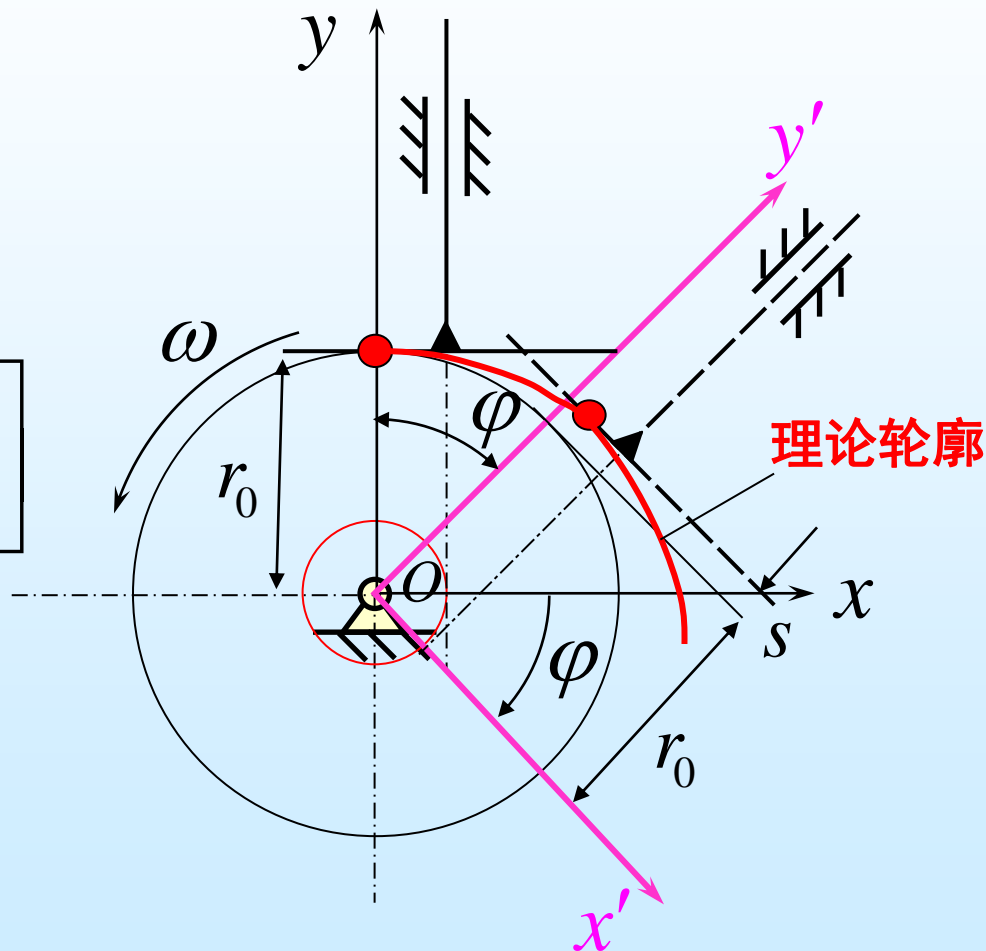
## (2) 动坐标系中平底直线的方程

$$x' = ?$$

$$y' = r_0 + s$$

## (3) 坐标变换

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$





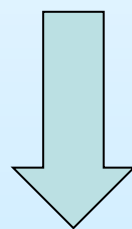
#### (4) 固定坐标系中平底直线的方程

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad \begin{cases} x = x' \cos \varphi + y' \sin \varphi \\ y = -x' \sin \varphi + y' \cos \varphi \end{cases}$$

$$x' = ?$$

$$y' = r_0 + s$$

$$\begin{cases} x = x' \cos \varphi + (r_0 + s) \sin \varphi \\ y = -x' \sin \varphi + (r_0 + s) \cos \varphi \end{cases}$$



平底直线族的包络线

$$f(x, y, \varphi) = x \sin \varphi + y \cos \varphi - (r_0 + s) = 0$$



## (5) 固定坐标系中凸轮实际廓线的方程

$$\begin{cases} f(x, y, \varphi) = x \sin \varphi + y \cos \varphi - (r_0 + s) = 0 \\ \frac{\partial f(x, y, \varphi)}{\partial \varphi} = x \cos \varphi - y \sin \varphi - \frac{ds}{d\varphi} = 0 \end{cases}$$

**轮廓曲线方程**

$$\begin{cases} s = s(\varphi) \\ x = (r_0 + s) \sin \varphi + \frac{ds}{d\varphi} \cos \varphi \\ y = (r_0 + s) \cos \varphi - \frac{ds}{d\varphi} \sin \varphi \end{cases}$$



## § 6-4 盘形凸轮机构基本尺寸的确定

### 一、压力角 $\alpha$ 及其许用值

#### 1、直动从动件

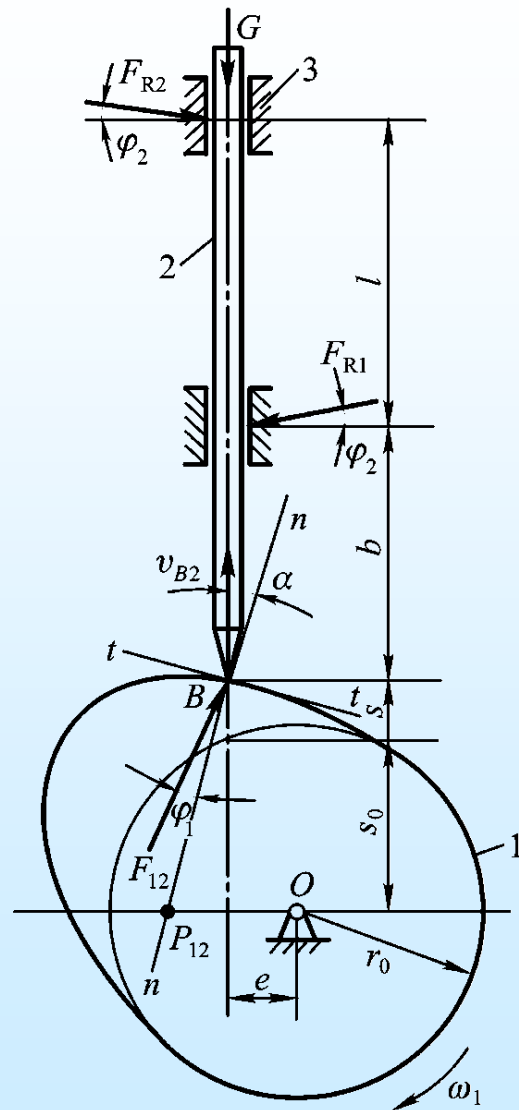
$$x: F_{12} \sin(\alpha + \varphi_1) - (R_1 - R_2) \cos \varphi_2 = 0$$

$$y: F_{12} \cos(\alpha + \varphi_1) - G - (R_1 + R_2) \sin \varphi_2 = 0$$

$$\Sigma M_B: R_2(l + b) \cos \varphi_2 - R_1 b \cos \varphi_2 = 0$$

#### 考虑摩擦时驱动力的表达式

$$F_{12} = \frac{G}{\cos(\alpha + \varphi_1) - \left(1 + \frac{2b}{l}\right) \sin(\alpha + \varphi_1) \tan \varphi_2}$$







## 理想情况（无摩擦）时驱动力的表达式

$$F_{120} = \frac{G}{\cos \alpha} \quad \varphi_1 = 0, \quad \varphi_2 = 0$$

## 凸轮机构的瞬时效率

$$\eta = \frac{F_{120}}{F_{12}} = \frac{\cos(\alpha + \varphi_1) - \left(1 + \frac{2b}{l}\right) \sin(\alpha + \varphi_1) \tan \varphi_2}{\cos \alpha}$$

$\eta \leq 0$  时，机构自锁。



## 解方程

$$\eta = \frac{F_{120}}{F_{12}} = \frac{\cos(\alpha + \varphi_1) - \left(1 + \frac{2b}{l}\right) \sin(\alpha + \varphi_1) \tan \varphi_2}{\cos \alpha} \leq 0$$

$$\Rightarrow \cos(\alpha + \varphi_1) - \left(1 + \frac{2b}{l}\right) \sin(\alpha + \varphi_1) \tan \varphi_2 \leq 0$$

$$\Rightarrow \arctan \frac{1}{\left(1 + \frac{2b}{l}\right) \tan \varphi_2} - \varphi_1 \leq \alpha \quad \text{自锁的条件}$$

$$\text{临界压力角: } \alpha_c = \arctan \frac{1}{\left(1 + \frac{2b}{l}\right) \tan \varphi_2} - \varphi_1$$



## (二)许用压力角

在工程实际中，为保证较高的机械效率，改善受力状况，通常规定凸轮机构的最大压力角应小于或等于某一许用压力角。

### 凸轮机构能正常工作的重要条件

工程上要求：（设计值 $\alpha_{\max}$ ） $\leq [\alpha] \ll \alpha_c$

推程 移动从动件 $[\alpha] = 30^\circ \sim 40^\circ$ ；摆动从动件 $[\alpha] = 35^\circ \sim 45^\circ$ 。

回程  $[\alpha'] = 70^\circ \sim 80^\circ$ 。



## 二、按许用压力角确定凸轮机构的基本尺寸

### 1、直动从动件

#### (1) 轮廓压力角的计算

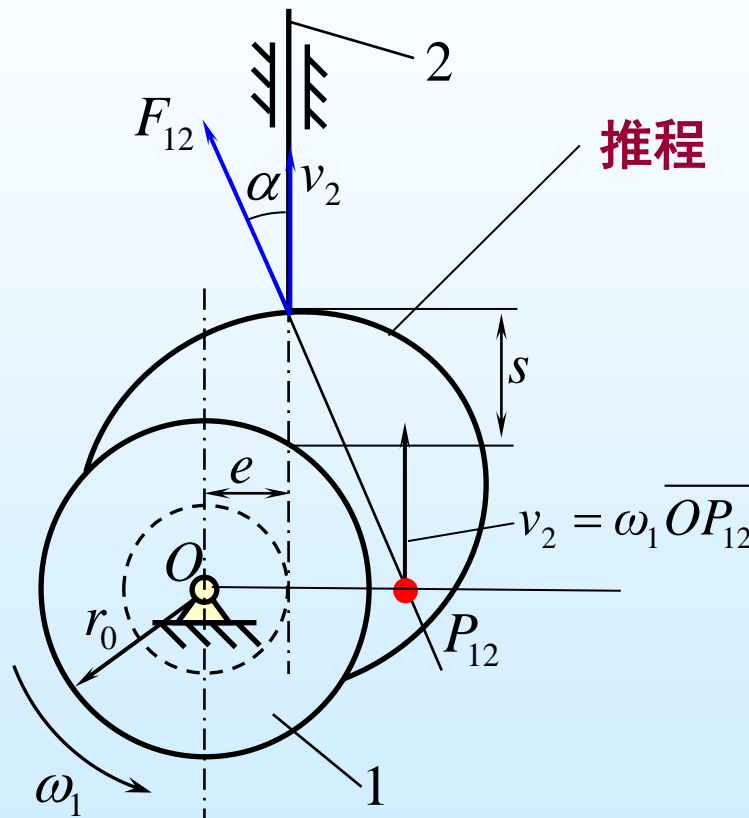
推程：

在点  $P_{12}$  :  $v_2 = \omega_1 \overline{OP_{12}}$

$$\overline{OP_{12}} = \frac{v_2}{\omega_1} = \frac{ds}{d\varphi}$$

$$\tan \alpha = \frac{\overline{OP_{12}} - e}{s_0 + s} = \frac{\frac{ds}{d\varphi} - e}{s_0 + s}$$

$$s_0 = \sqrt{r_0^2 - e^2}$$





回程：

在点  $P'_{12}$  :  $v_2 = \omega_1 \overline{OP'_{12}}$

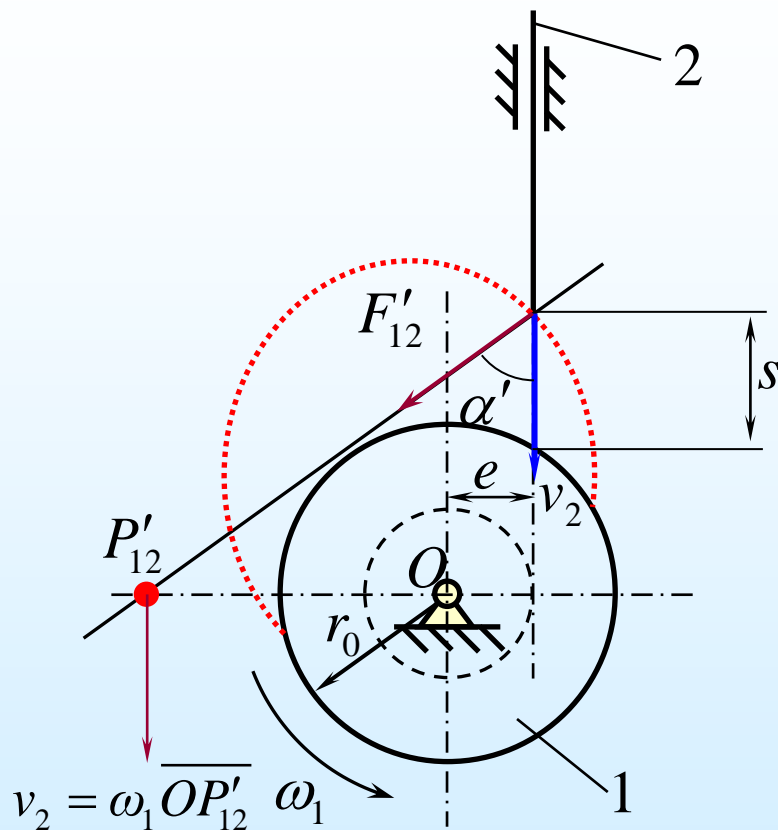
$$\overline{OP'_{12}} = \frac{v_2}{\omega_1} = \frac{ds}{d\varphi}$$

$$\tan \alpha' = \frac{\overline{OP'_{12}} + e}{s_0 + s} = \frac{\frac{ds}{d\varphi} + e}{s_0 + s}$$

压力角计算的统一表达式：

$$\tan \alpha = \frac{\overline{OP_{12}} \mp e}{s_0 + s} = \frac{\frac{ds}{d\varphi} \mp e}{s_0 + s}$$

速度瞬心与从动件处于凸轮中心同一侧时取“-”号，否则，取“+”号。





## (2) 影响凸轮压力角变化的因素

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

$\frac{ds}{d\varphi}$ ,  $s$ —凸轮运动规律

$r_0$ ,  $e$ —凸轮基本尺寸

在设计凸轮时, 应保证凸轮机构的最大压力角小于或等于许用压力角。

$$\text{即: } \alpha_{\max} \leq [\alpha]$$



### (3) 凸轮机构基本尺寸确定

如何在满足凸轮许用压力角的前提下确定凸轮的基圆半径和偏距？

- ① 凸轮轮廓何处有最大压力角？
- ② 如何根据许用压力角确定凸轮的基圆半径和偏距？

这个表达式能否解决这样的命题？

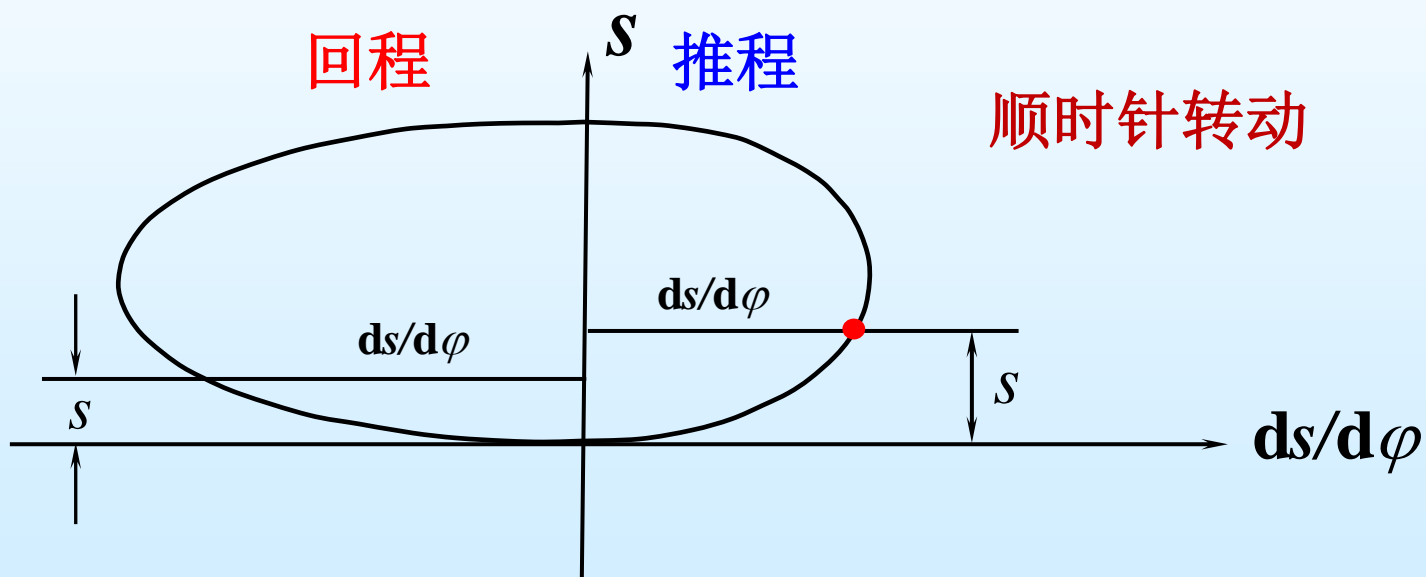
$$\tan \alpha = \frac{ds / d\varphi \mp e}{\sqrt{r_0^2 - e^2} + s} = \frac{(ds / d\varphi) / e \mp 1}{\sqrt{\left(\frac{r_0}{e}\right)^2 - 1} + s/e}$$





# ① 凸轮轮廓何处有最大压力角？（作图法，前人智慧）

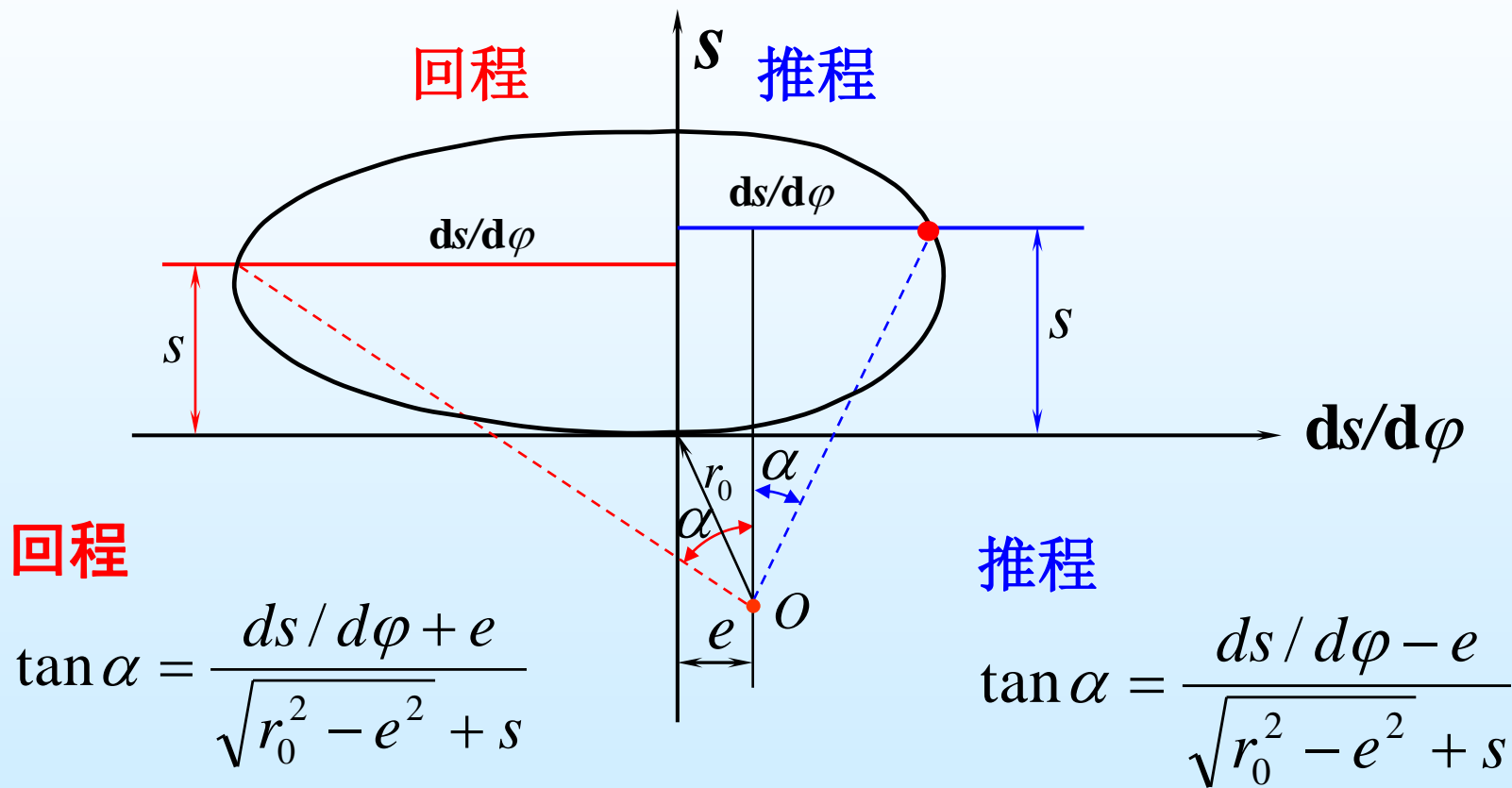
根据凸轮从动件的运动规律  $s = s(\varphi)$  绘制  $s - \frac{ds}{d\varphi}$  线图

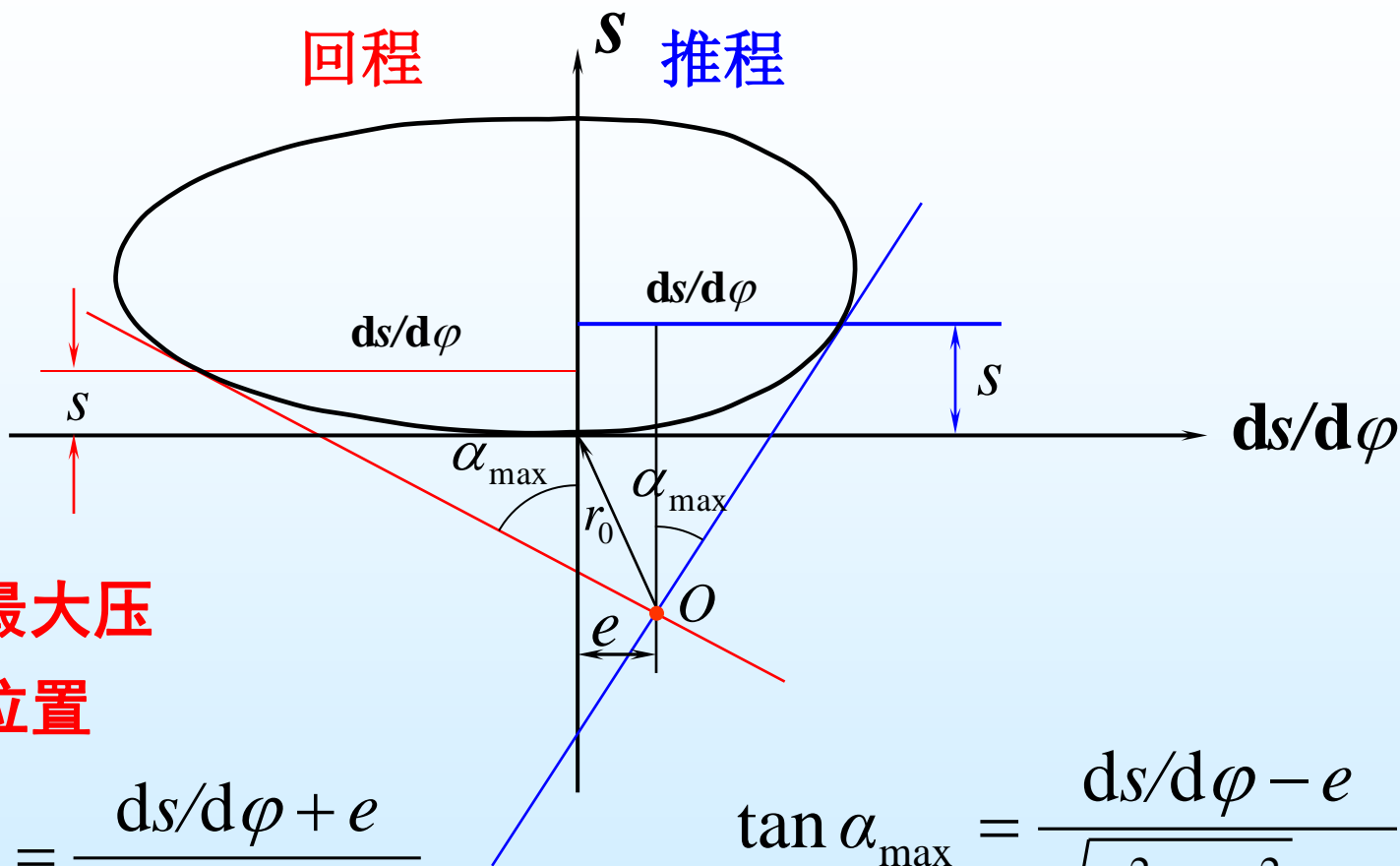






如果已知基圆半径 $r_0$ ，和偏距 $e$ ，确定推程回程最大压力角。





找到了最大压力角的位置

$$\tan \alpha_{\max} = \frac{ds/d\varphi + e}{\sqrt{r_0^2 - e^2} + s}$$

$$\tan \alpha_{\max} = \frac{ds/d\varphi - e}{\sqrt{r_0^2 - e^2} + s}$$



## ② 如何根据许用压力角确定凸轮的基圆半径和偏距？

(注意条件发生变化)

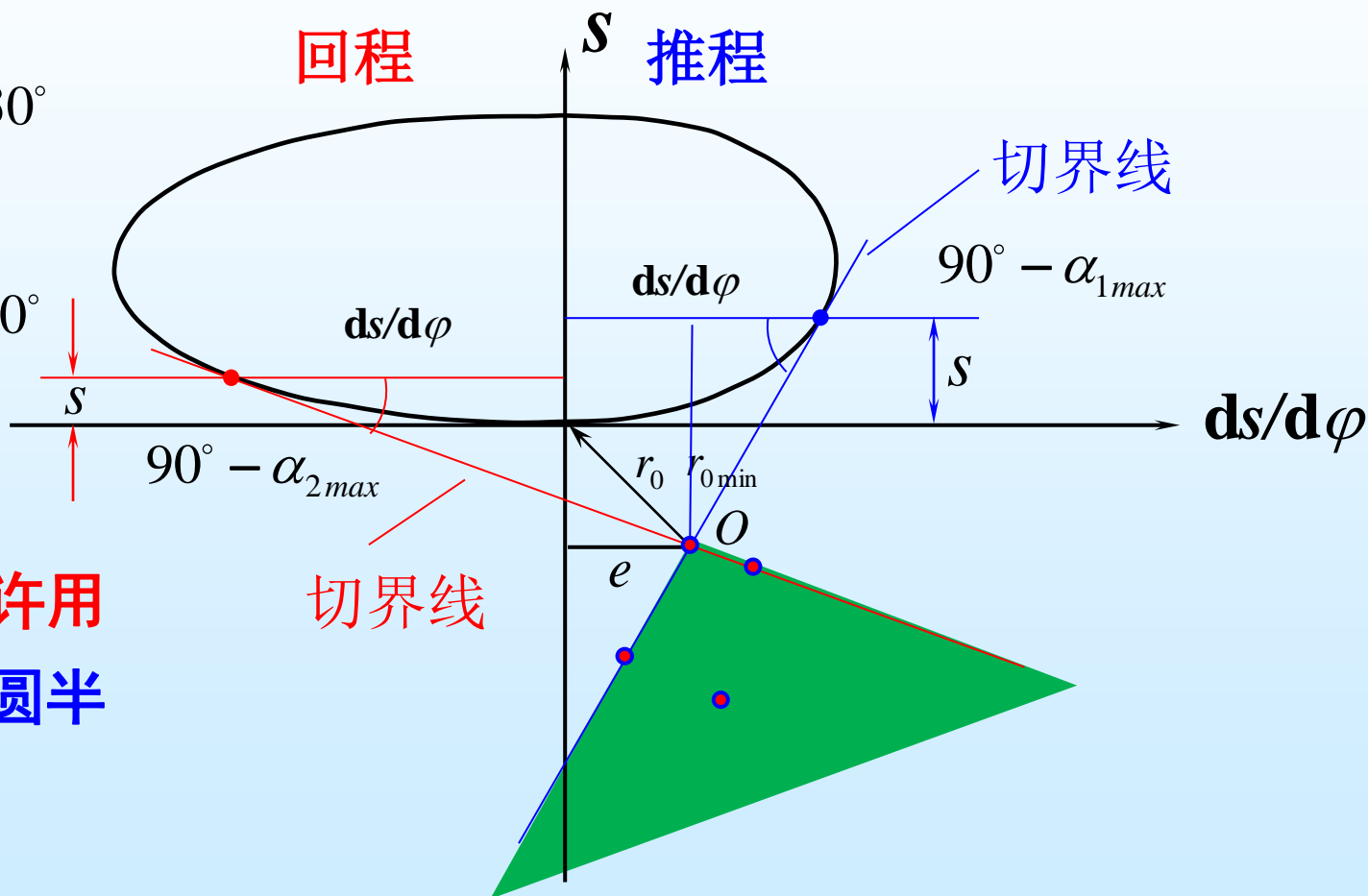
令推程

$$\alpha_{1max} = [\alpha_1] = 30^\circ$$

令回程

$$\alpha_{2max} = [\alpha_2] = 70^\circ$$

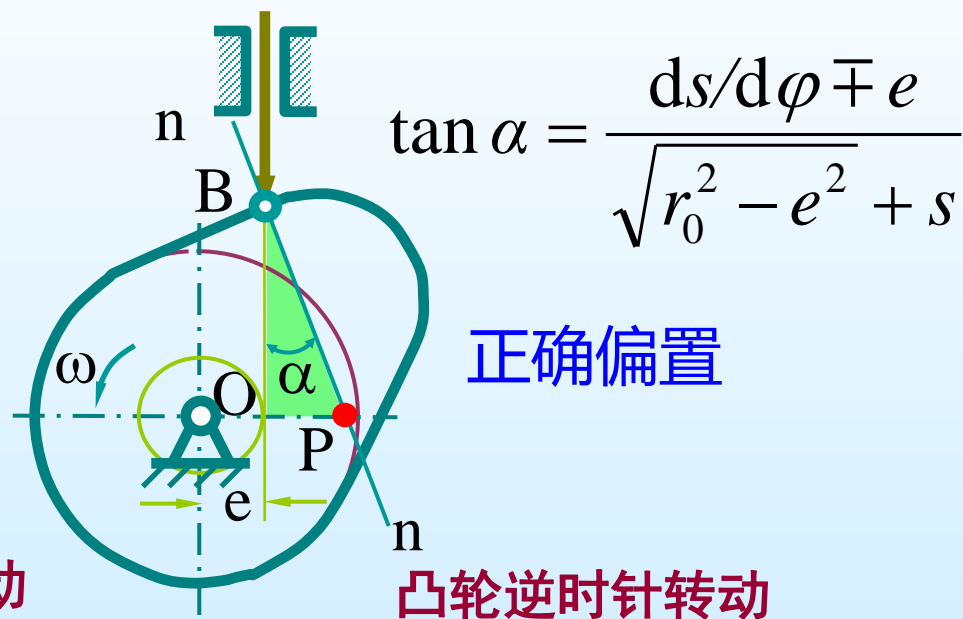
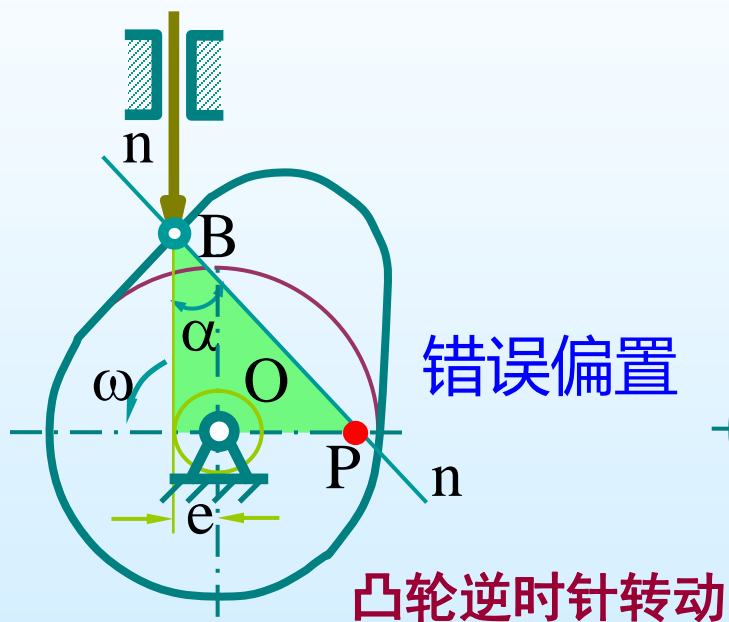
确定了满足许用  
压力角的基圆半  
径和偏距







偏置方位的选择应有利于减小凸轮机构推程时的压力角。应当使从动件偏置在推程时瞬心P的位置的同一侧。



需要注意的是，若推程压力角减小，则回程压力角将增大，故偏距e不能太大。



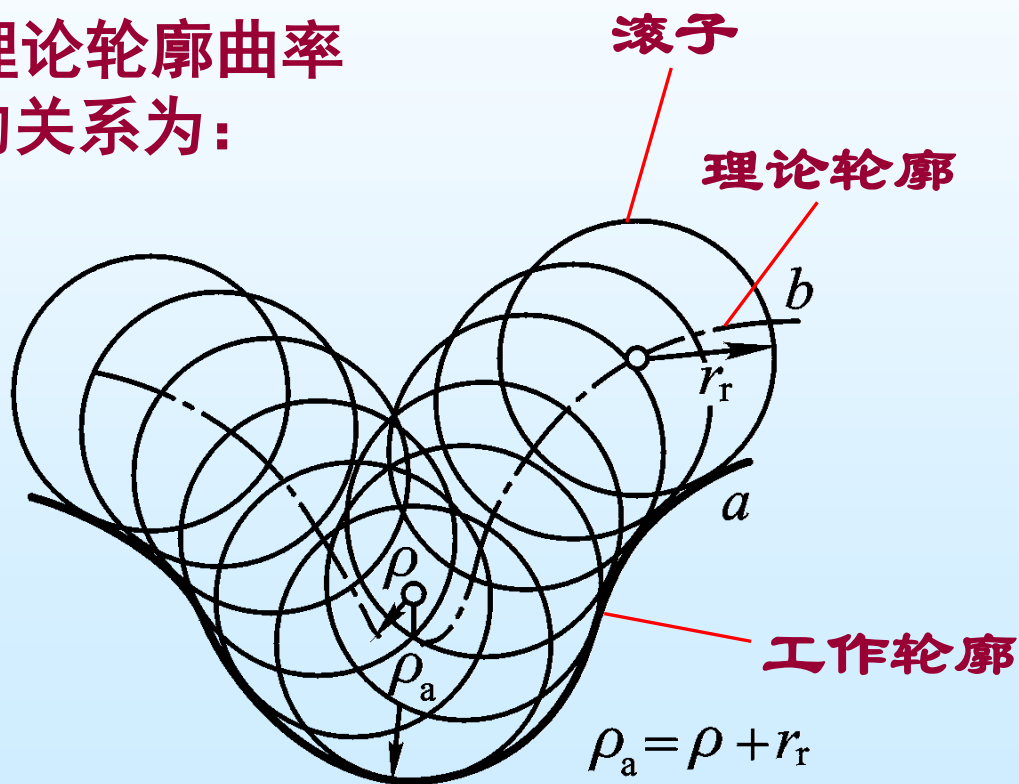
### 三、滚子半径的选择

#### 1、凸轮理论轮廓的内凹部分

工作轮廓曲率半径、理论轮廓曲率半径与滚子半径三者之间的关系为：

$$|\rho_a| = |\rho| + r_r$$

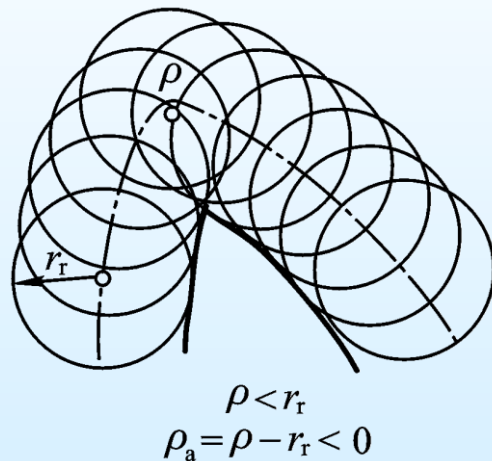
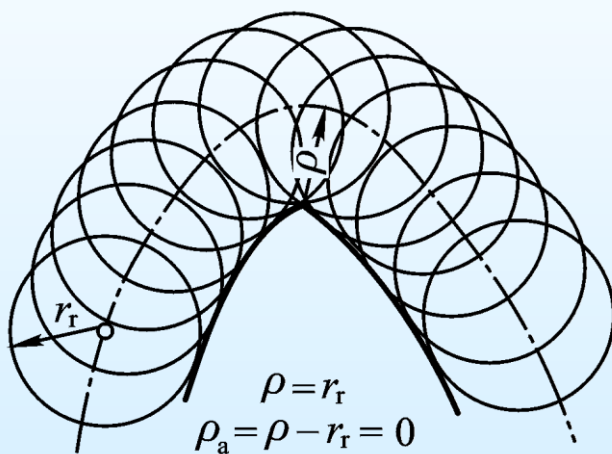
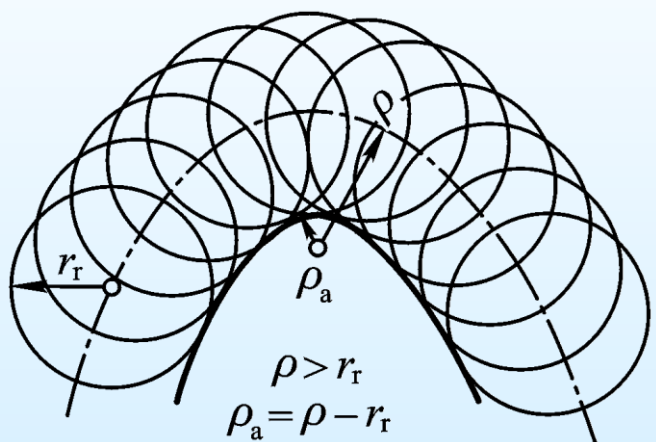
$$|\rho_a| > |\rho|$$





## 2、凸轮理论轮廓的外凸部分

工作轮廓曲率半径、理论轮廓曲率半径与滚子半径三者之间的关系为：



外凸轮理论轮廓，一般推荐：

$$\rho_{\min} = r_r + \Delta, \quad \Delta = 3 \sim 5\text{mm}$$



谢谢!



规格严格 功夫到家