

## 第三章 凸轮机构

凸轮机构的组成与类型

凸轮机构的特点和功能

从动件运动规律设计

凸轮轮廓的设计

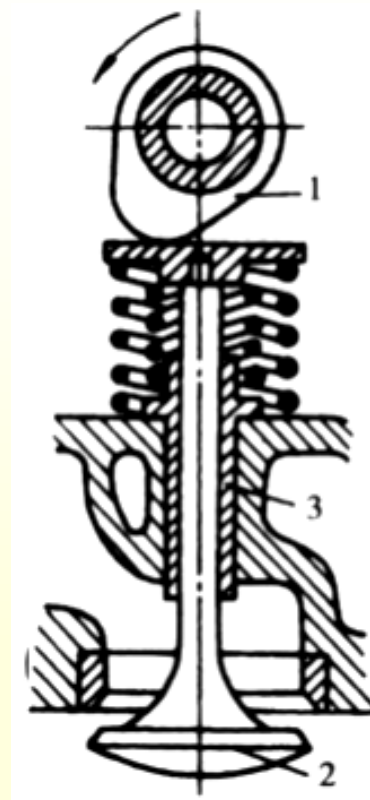
凸轮机构基本尺寸的确定



## 3.1 凸轮机构的组成和分类

### 3.1.1 凸轮机构的组成

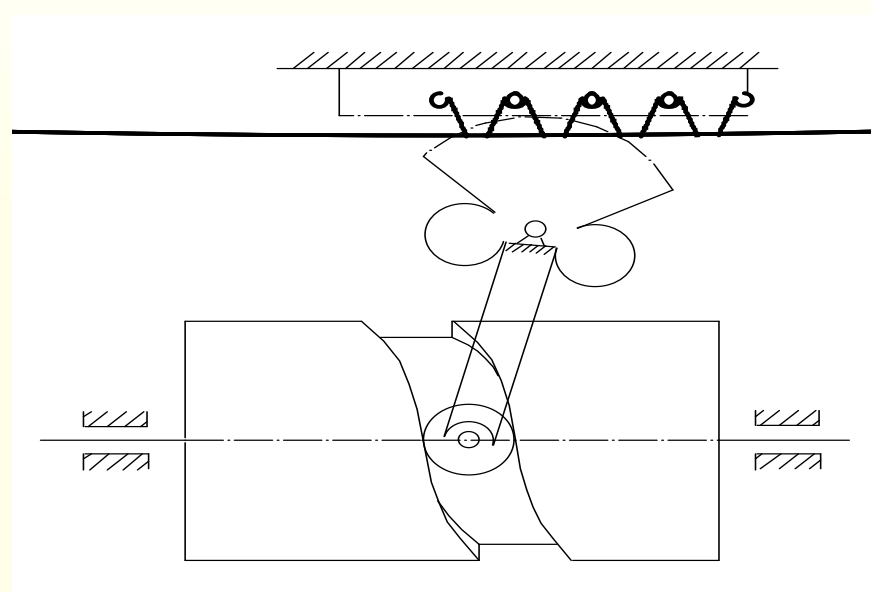
- 1 — 凸轮
  - 2 — 从动件
  - 3 — 机架
- } 高副机构



内燃机配气凸轮机构

## 自动机床进刀凸轮机构

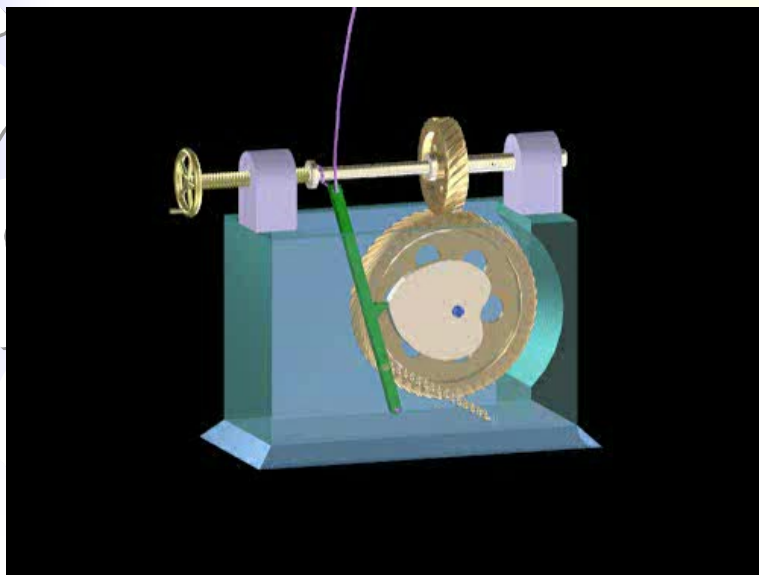
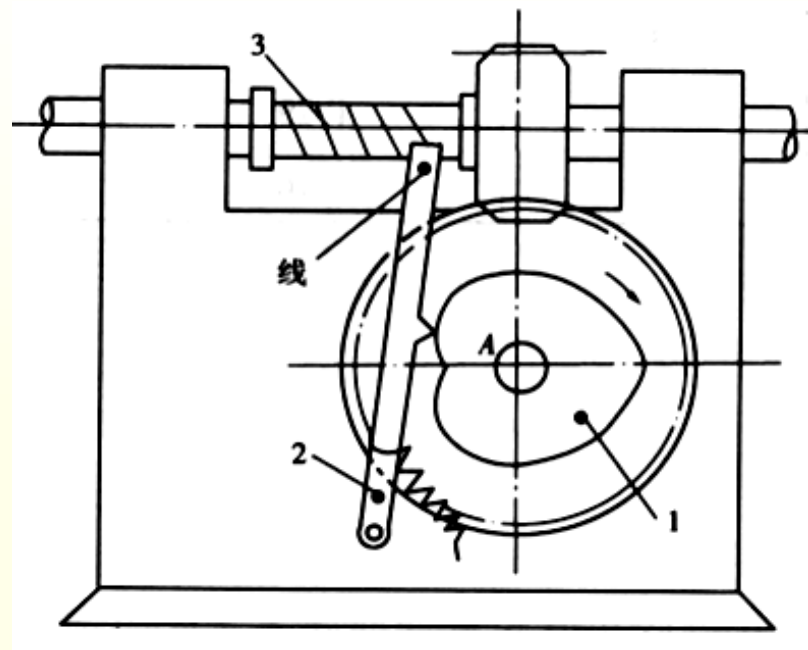
- 当圆柱凸轮绕其轴线转动时，通过其沟槽与摆杆一端的滚子接触，并推动摆杆绕固定轴按特定的规律作往复摆动，同时通过摆杆另一端的扇形齿轮驱动刀架实现进刀或退刀运动。



1-圆柱凸轮 2-摆杆  
3-滚子

## 绕线机凸轮机构

- 这种凸轮在运动中  
能推动摆动从动件2  
实现均匀缠绕线绳  
的运动学要求。



绕线机凸轮机构 1-  
凸轮 2-摆动从动件 3-  
线轴

### 3.1.2 凸轮机构的分类

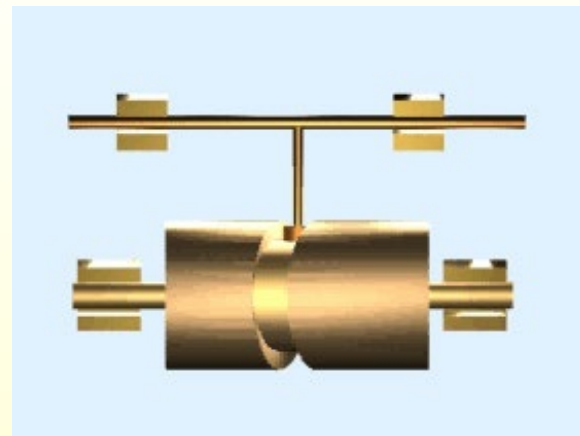
#### 1. 按照凸轮的形状分类



1) 盘形凸轮



2) 移动凸轮



3) 圆柱凸轮

**盘形凸轮：**最基本的形式，结构简单，应用最为广泛

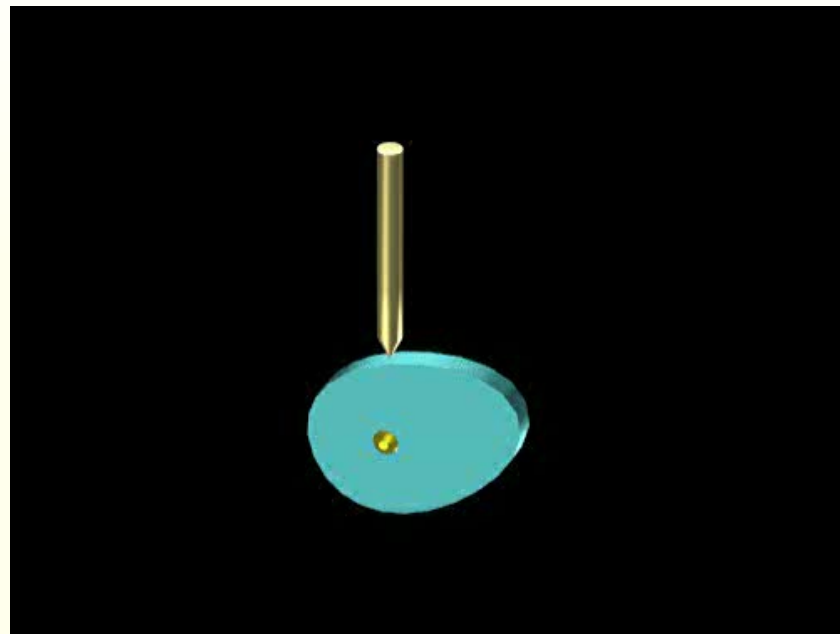
**移动凸轮：**凸轮相对机架做直线运动

**圆柱凸轮：**空间凸轮机构

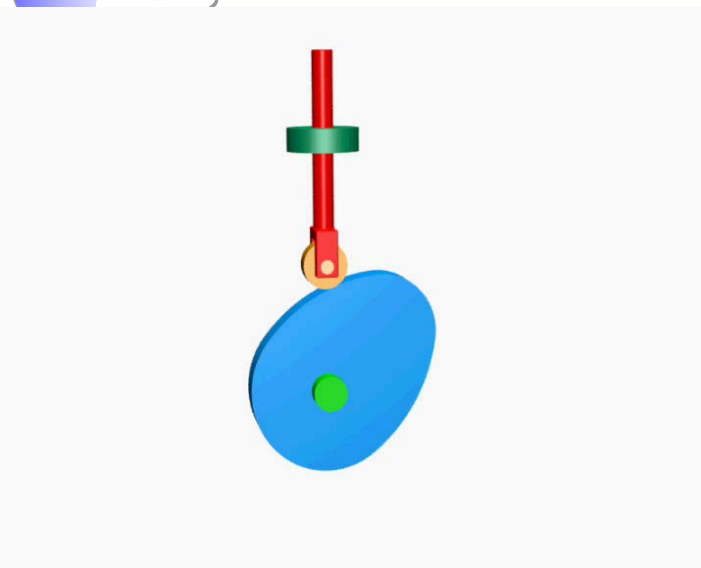
## 2. 按照从动件的形状分类

### 1) 尖端从动件

尖端能以任意复杂的凸轮轮廓保持接触，从而使从动件实现任意的运动规律。但尖端处极易磨损，只适用于低速场合。

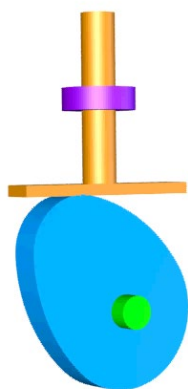


## 2) 滚子从动件



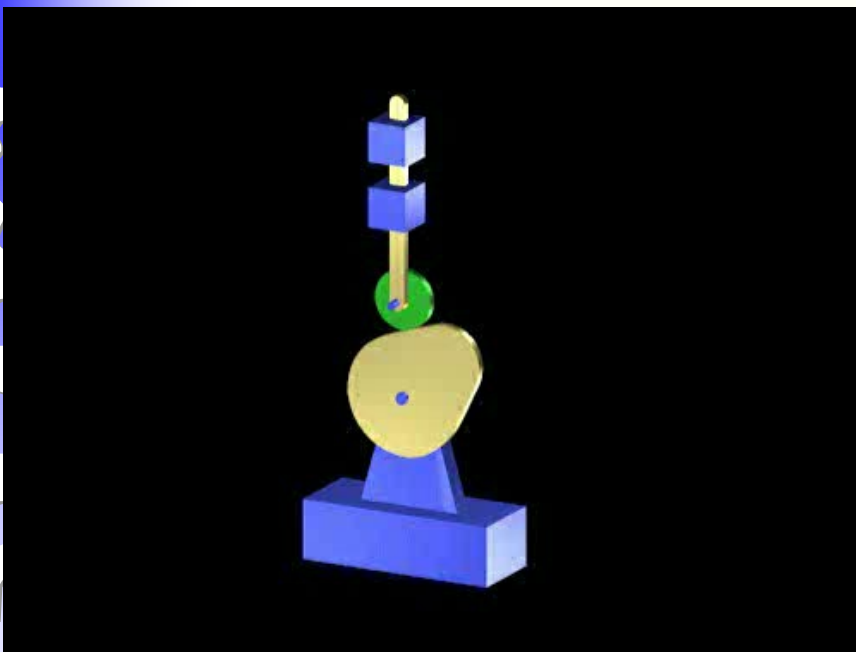
凸轮与从动件之间为滚动摩擦，因此摩擦磨损较小，可用于传递较大的动力。

## 3) 平底从动件

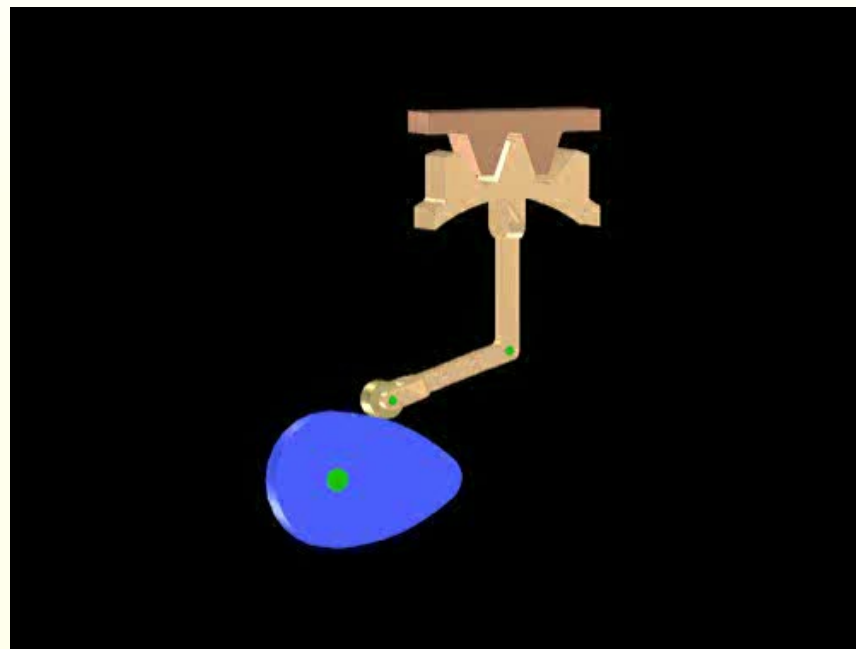


从动件与凸轮之间易形成油膜，润滑状况好，受力平稳，传动效率高，常用于高速场合。但与之相配合的凸轮轮廓须全部外凸。

### 3. 按照从动件的运动形式分类



1) 移动从动件

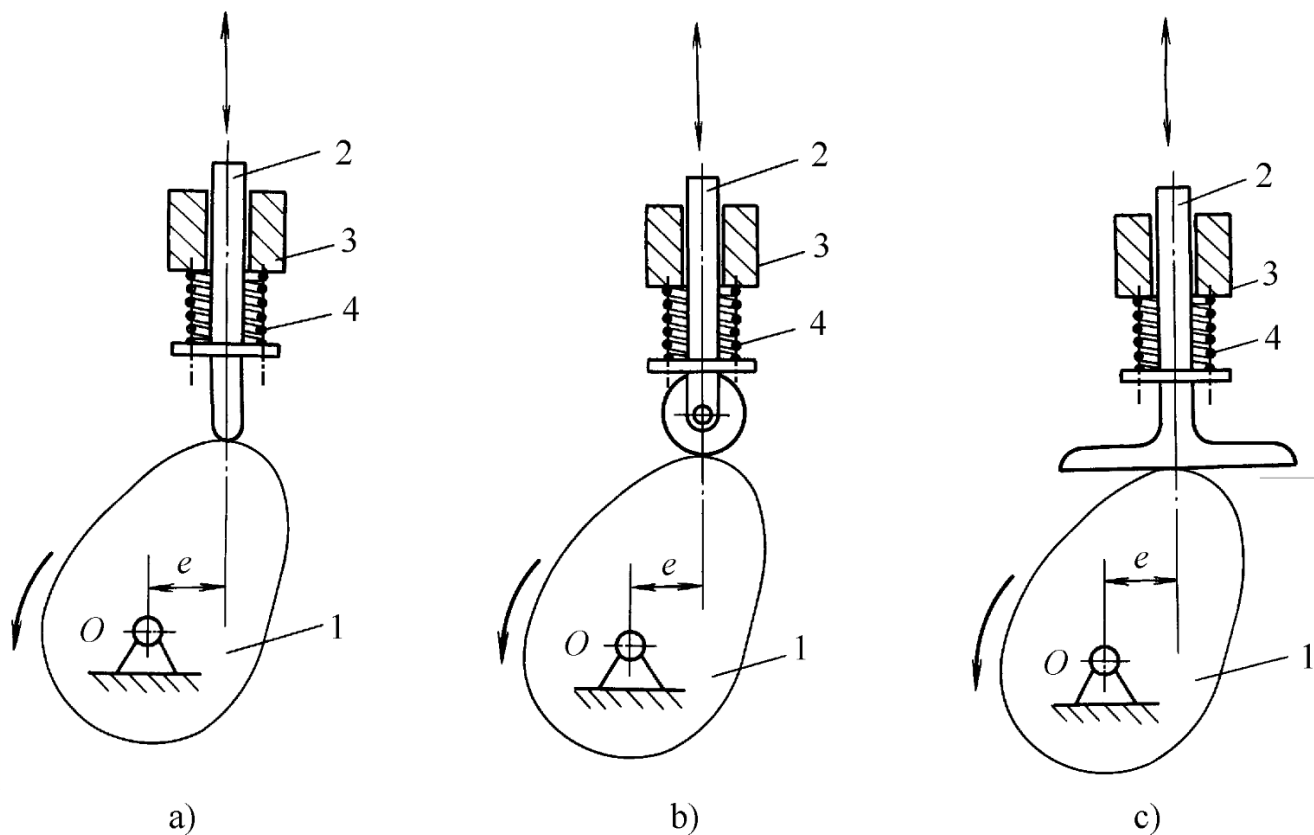


2) 摆动从动件



## 4. 按照凸轮与从动件维持高副接触的方法分类

1) 力封闭型凸轮机构 — 依靠从动件的重力、弹簧力或其他外力使从动件与凸轮轮廓始终保持高副接触。



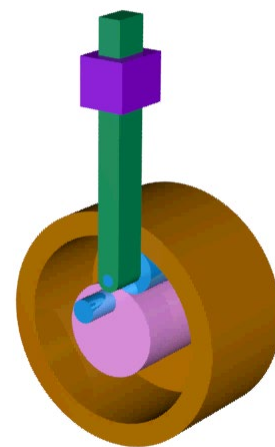
### 2) 型封闭型凸轮机构——依靠凸轮与从动件的特殊几何结构来保持两者始终接触

沟槽凸轮机构：

通过其沟槽两侧的廓线始终保持与从动件接触。

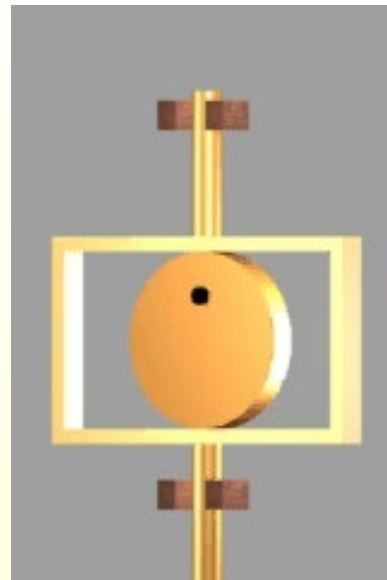
优点：封闭方式结构简单

缺点：加大了凸轮的尺寸和重量



### 等宽凸轮机构：

凸轮廓线上任意两条  
平行切线间的距离都等于  
框架内侧的宽度。



**缺点：** 从动件的运动规律的选择受到一定的限制，  
当 $180^\circ$ 范围内的凸轮廓线根据从动件运动规律确定  
后，其余 $180^\circ$ 内的凸轮廓线必须符合等宽原则

等径凸轮机构：

两滚子中心间的距离  
始终保持不变。

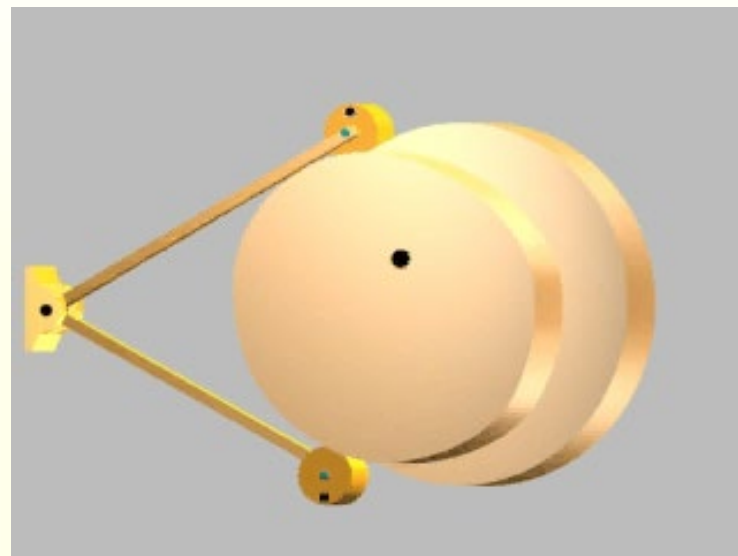
缺点：

从动件运动规律的选择受  
到一定的限制



### 共轭凸轮机构：

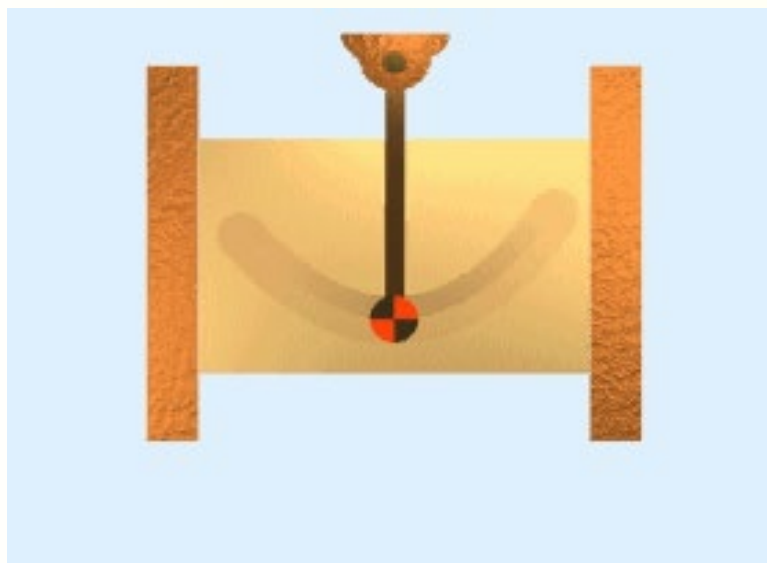
一个凸轮推动从动件完成正行程运动，另一个凸轮推动从动件完成反行程的运动



**优点：**克服了等宽、等径凸轮的缺点

**缺点：**结构复杂，制造精度要求高

## 5. 反凸轮机构



摆杆为主动件，凸轮为从动件

## 3.2 凸轮机构的特点和功能

### 3.2.1 凸轮机构的特点

凸轮机构只有很少几个活动构件，并且占据的空间较小，是一种结构十分简单、紧凑的机构。凸轮机构最吸引人的特征是其多用性和灵活性，从动件的运动规律取决于凸轮轮廓的形状，只要适当的设计凸轮的轮廓曲线，就可以使从动件获得各种预期的运动规律。

凸轮机构的缺点：凸轮轮廓线与从动件之间是点或线接触的高副，易于磨损，故多用在传力不太大的场合。

### 3.2.2 凸轮机构的功能

#### 1. 实现无特定运动规律要求的工作行程

在一些控制装置中，只需要从动件实现一定的工作行程，而对从动件的运动规律及运动和动力并无特殊要求，采用凸轮机构可以很方便地实现从动件的这类工作行程。

#### 2. 实现有特定运动规律要求的工作行程

在工程实际中，许多情况下要求从动件实现复杂的运动规律，利用凸轮机构可以实现复杂的运动规律。

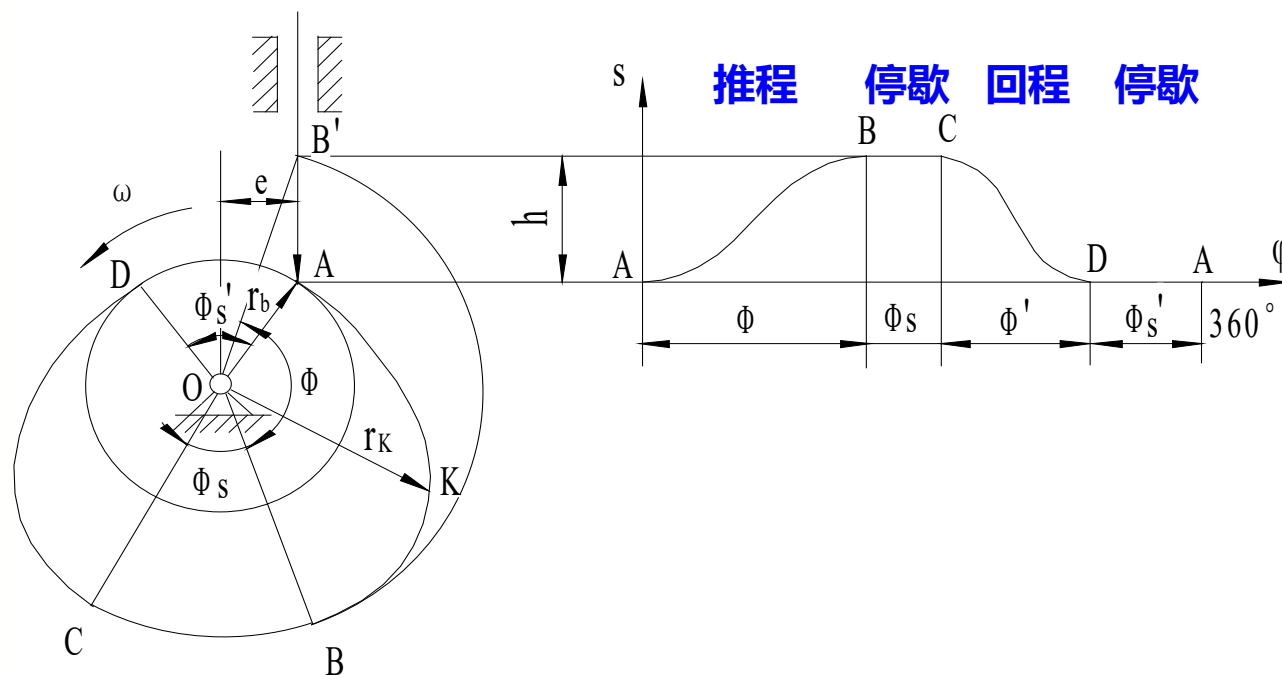
#### 3. 实现对运动和动力特性有特殊要求的工作行程

有些装置要求机构必须具有良好的动力学性能，而凸轮机构只要轮廓线设计得当，就完全可以胜任这一工作。另外，凸轮机构经过适当组合，还可以实现复杂的运动轨迹。



## 3.3 从动件常用运动规律

### 3.3.1 凸轮机构的运动学设计参数



## 凸轮运动参数

**基圆** $r_b$ ——凸轮理论轮廓曲线最小矢径所作的圆。

**偏距圆**——从动件导路与凸轮回转中心O的偏负距离为 $e$ ，并以 $e$ 为半径O为圆心所作的圆。

**行程** $h$ ——从动件由最低点到最高点的位移 $h$ （或摆角）

**推程运动角** $\Phi$ ——从动件由最低运行到最高位置，凸轮所转过的角。

**回程运动角** $\Phi'$ ——从动件由最低运行到最高位置，凸轮所转过的角。

**远休止角**——从动件到达最高位置停留过程中凸轮所转过的角。

**近休止角**——从动件在最低位置停留过程中所转过的角。

**从动件位移线图**——从动件位移 $S$ 与凸轮转角（或时间 $t$ ）之间的对应关系曲线。

**从动件速度线图、加速度线图统称从动件运动线图。**

### 推杆运动规律的名词术语及符号



近休

开始

上一步

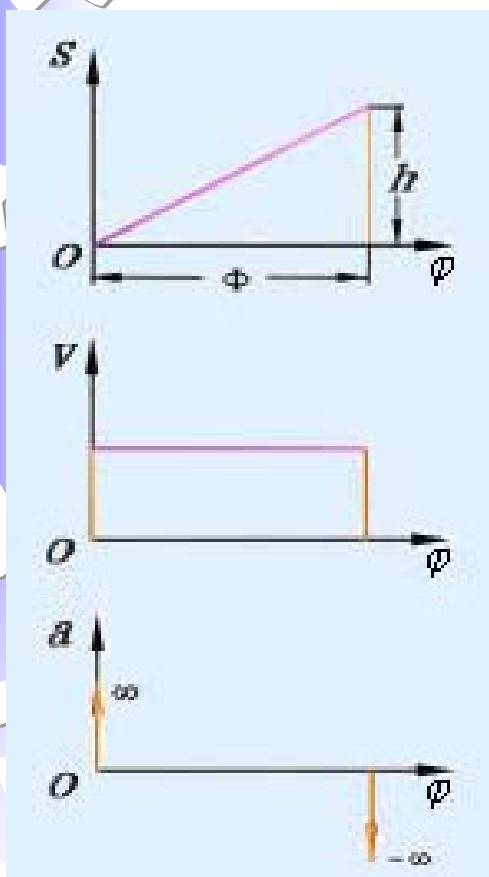
下一步

结束



凸轮

## 3.3.2 从动件常用运动规律

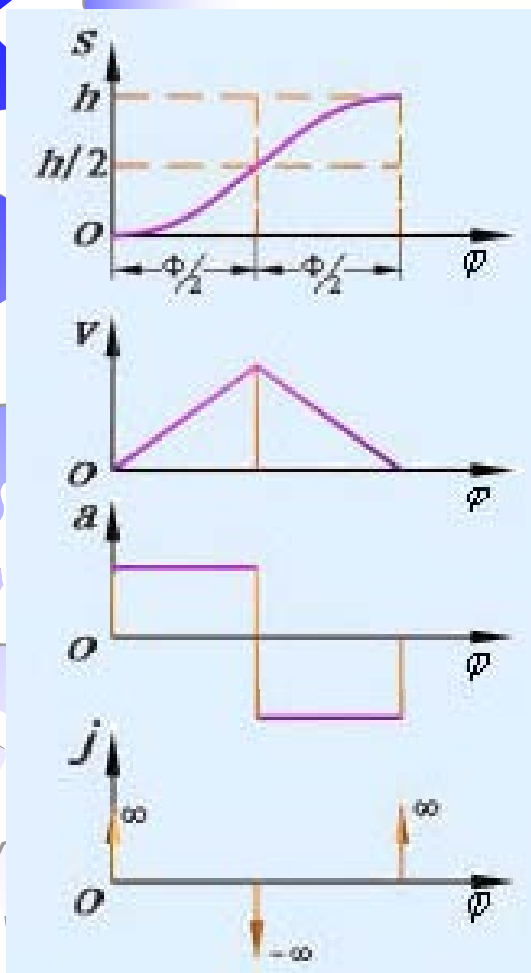


## 1. 等速运动

**特点：**速度有突变，加速度理论上由零至无穷大，从而使从动件产生巨大的惯性力，机构受到强烈冲击——**刚性冲击**

**适应场合：**低速轻载

## 2. 等加速等减速(抛物线)运动



**特点：**加速度曲线有突变，加速度的变化率(即跃度 $j$ )在这些位置为无穷大——柔性冲击

**适应场合：**中速轻载

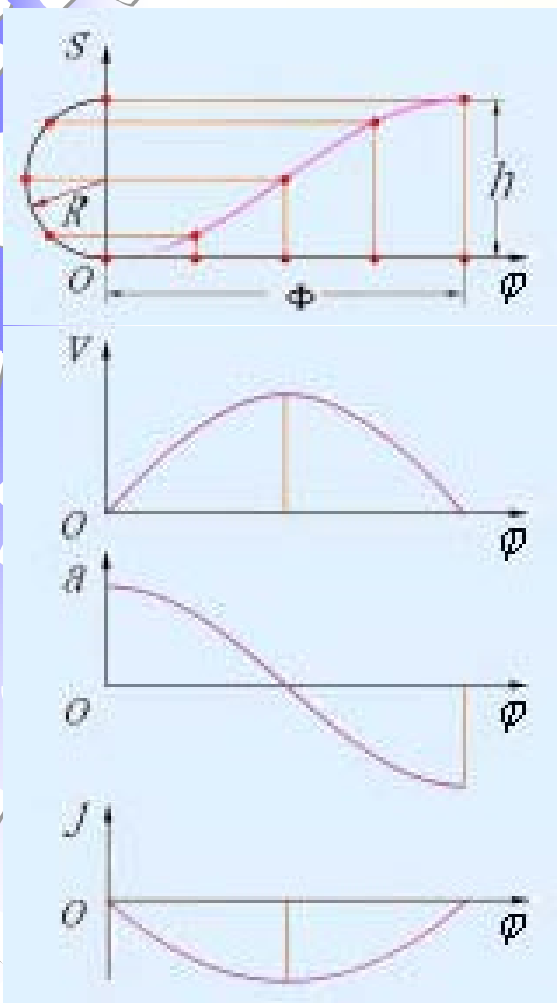
## 3. 简谐运动(余弦加速度运动)

当质点在圆周上作匀速运动时，它在该圆直径上的投影所构成的运动规律——简谐运动

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

特点：有柔性冲击

适用场合：中速轻载(当从动件作连续运动时，可用于高速)



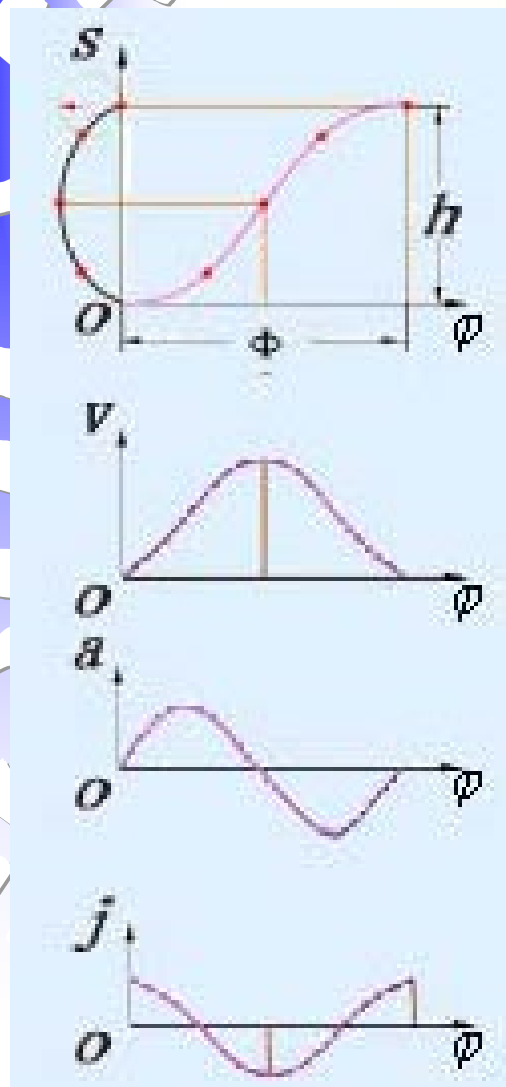
## 4. 摆线运动

半径  $R=h/2\pi$  的滚圆沿纵座标作纯滚动，圆上最初位于座标原点的点其位移随时间变化的规律——摆线运动

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

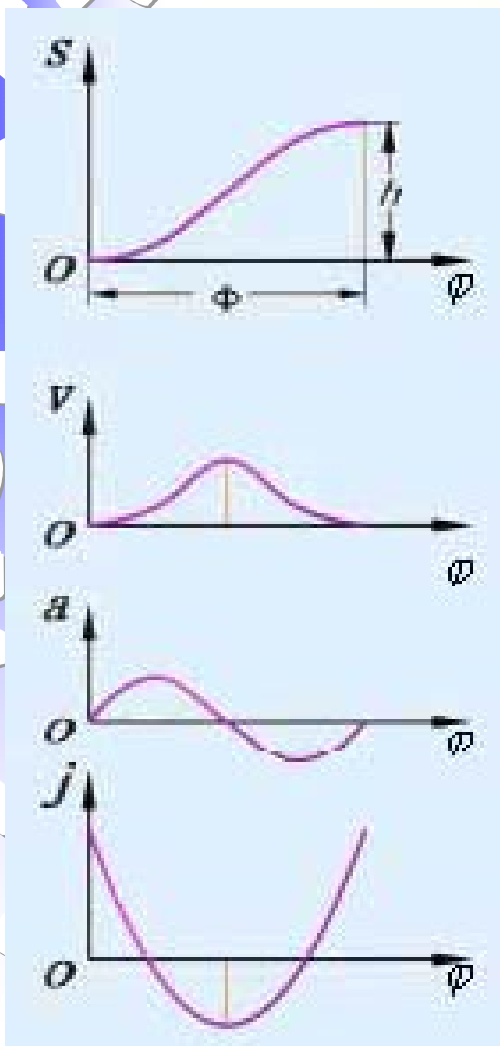
特点：无刚性、柔性冲击

适用场合：适于高速



## 5.3-4-5 多项式运动(简介)

$$s = h \left[ 10 \left( \frac{\varphi}{\Phi} \right)^3 - 15 \left( \frac{\varphi}{\Phi} \right)^4 + 6 \left( \frac{\varphi}{\Phi} \right)^5 \right]$$



特点：无刚性冲击、柔性冲击

适用场合：高速、中载



## 3.3.3 从动件运动规律的选择

## 1. 常用运动规律性能比较

运动规律	冲击特性	$v_{\max}$ $(h\omega/\Phi) \times$	$a_{\max}$ $(h\omega^2/\Phi^2) \times$	$j_{\max}$ $(h\omega^3/\Phi^3) \times$	适用场合
等速 (直线)	刚性	1.00	$\infty$	—	低速 轻载
等加等减速 (抛物线)	柔性	2.00	4.00	$\infty$	中速 轻载
简谐 (余弦加速度)	柔性	1.57	4.93	$\infty$	中速 中载
摆线 (正弦加速度)	无	2.00	6.28	39.5	高速 轻载
3-4-5次多项式 (五次多项式)	无	1.88	5.77	60.0	高速 中载

## 2.从动件运动规律的选择原则

考虑因素：

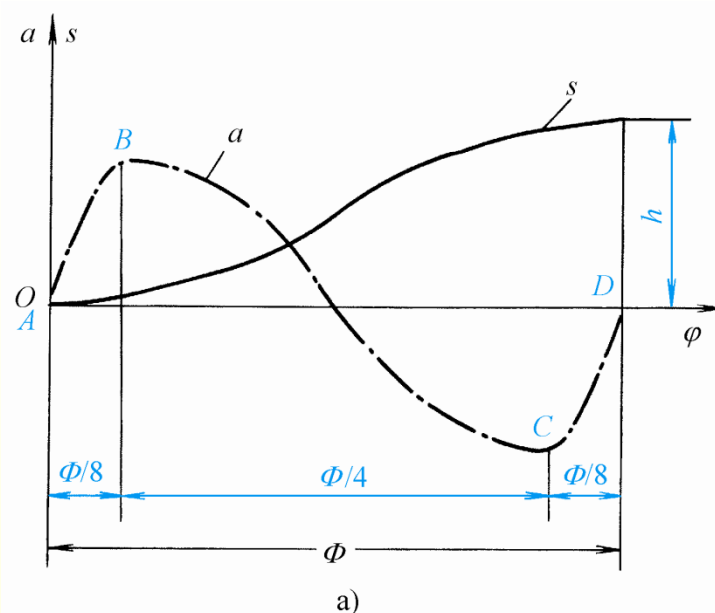
- 1.对运动规律的要求
- 2.凸轮的转速（动力特性和便于加工）

### 3.3.4 从动件运动规律的组合

- 1.满足工作对运动规律的特殊要求；
- 2.为避免刚性冲击，位移曲线和速度曲线必须连续；  
而为避免柔性冲击，加速度曲线也必须连续。
- 3.在满足以上两个条件的前提下，尽量减小速度和加速度的最大值。

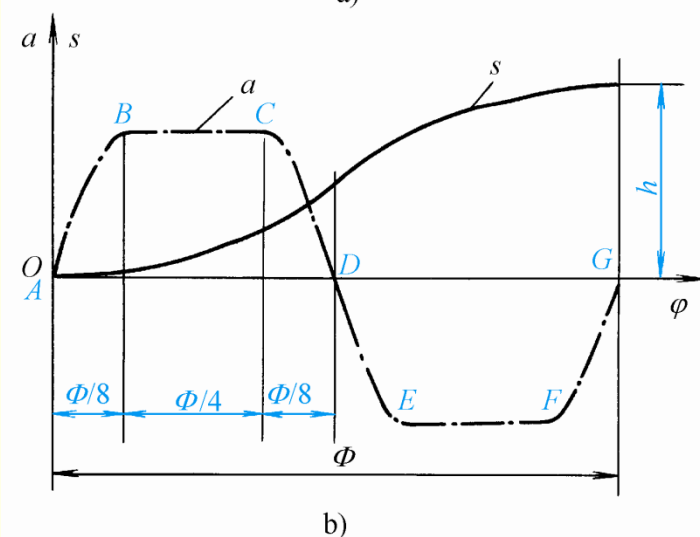
## 1、改进型正弦运动规律

该曲线在运动起始的段和终止的段，采用周期相同的正弦函数；在两段中间的段则采用一段周期较长的简谐函数。



## 2、改进型等加速等减速运动规律

用几段简谐函数使加速度成为连续曲线。加速段和减速段的加速度曲线是对称的。



组合型运动规律运动线图

### 3.3.5 选择或设计从动件运动规律时应考虑的问题

1. 当机械的工作过程只要求从动件实现一定的工作行程，而对其运动规律无特殊要求时，应考虑所选择的运动规律使凸轮机构具有较好的动力特性和便于加工。

2. 当机械的工作过程对从动件的运动规律有特殊要求，而凸轮转速又不太高时，应首先从满足工作需要出发来选择从动件的运动规律，其次考虑其动力特性和便于加工。

3. 当机械的工作过程对从动件的运动规律有特殊要求，而凸轮的转速又高时，应兼顾两者来设计从动件的运动规律。

4. 在选择或设计从动件运动规律时，除了要考虑其冲击特性外，还应考虑其具有的最大速度、最大加速度和最大跃度，因为这些值也会从不同角度影响凸轮机构的工作性能。

## 3.4 图解法设计平面凸轮轮廓曲线

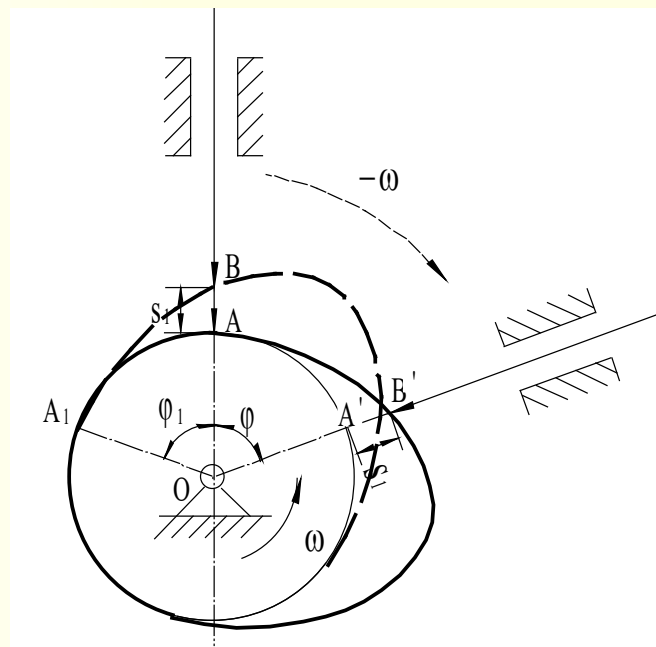
### 3.4.1. 凸轮廓线设计的基本原理

当根据凸轮机构的工作要求和结构条件选定了其机构的型式、基本尺寸，推杆的运动规律和凸轮的转向之后，就可以进行凸轮轮廓曲线的设计了。

凸轮廓线设计的方法： **作图法和解析法**

无论是采用作图法还是解析法设计凸轮廓线，所依据的基本原理都是**反转法原理**。

**例** 尖顶推杆盘形凸轮机构



### (1) 凸轮的轮廓曲线与推杆的相对运动关系

当给某个凸轮机构加一个公共角速度 $\omega$ ，使其绕轴心转动时，凸轮静止不动，而推杆则一方面随其导轨作反转运动，另一方面又沿导轨作预期的往复运动。推杆在这种复合运动中，其尖顶的运动轨迹即为凸轮就轮廓曲线。

### (2) 凸轮廓线设计的基本方法

在设计凸轮廓线时，可假设凸轮静止不动，推杆和导路相对凸轮作反转运动，同时又在其导路内作往复运动，作出推杆在这种复合运动中的一系列位置，则其尖顶的轨迹就是所要求的凸轮廓线。这就是凸轮廓线设计的**反转法原理**。

## 凸轮廓线设计方法的基本原理



开始

上一步

下一步

结束



凸轮设计的基本原理



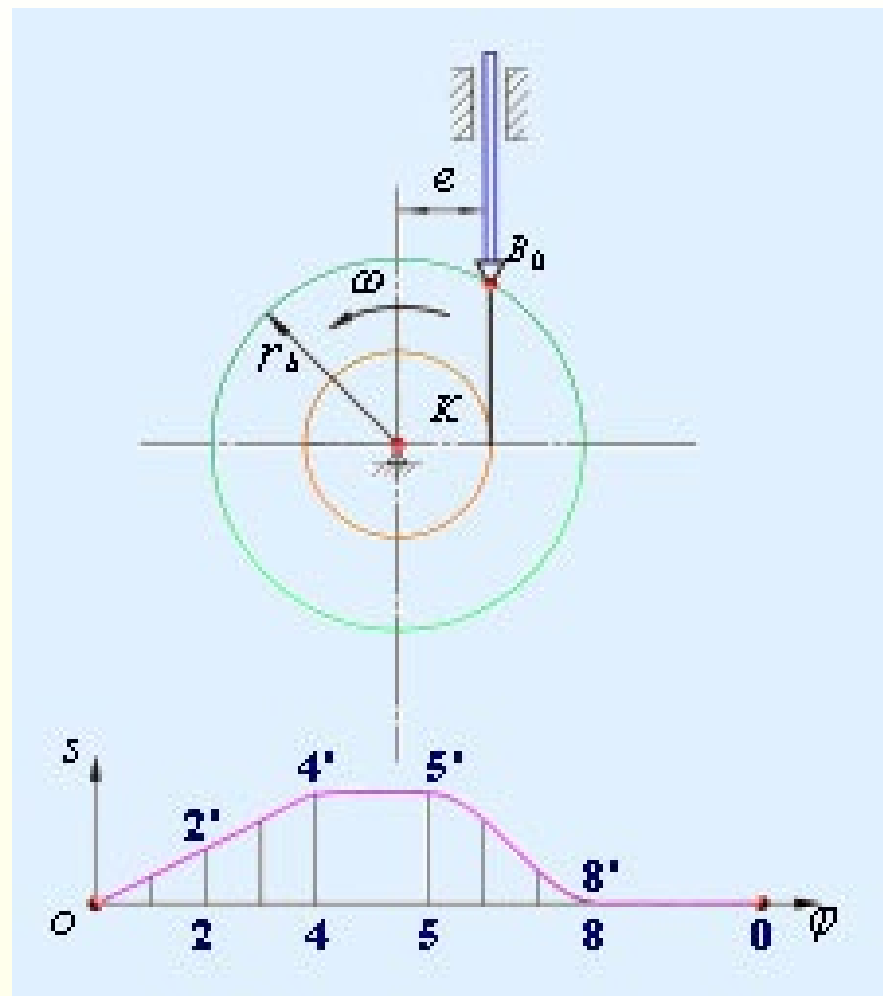
## 3.4.2 图解法设计凸轮轮廓

## 1. 尖顶从动件盘形凸轮

## (1) 尖顶直动从动件盘形凸轮

**已知：**从动件运动规律， $s$ - $\varphi$ 曲线图，等角速度 $\omega$ （逆时针）旋转，从动件偏置于凸轮轴心右侧，偏距 $e$ ，基圆半径 $r_b$ 。

**要求：**画出凸轮轮廓曲线



## 设计步骤:

- ① 选取适当的比例尺，作位移线图，分成若干等份。
- ② 选取同样的比例尺以 $O$ 为圆心， $r_b$ 为半径作基圆，并根据从动件的偏置方向画出从动件的起始位置线，与基圆的交点 $B_0$ 即是从动件尖端的初始位置
- ③ 以 $O$ 为圆心， $OK=e$ 为半径作偏距圆。该圆与从动件的起始位置线切于 $K$ 点。
- ③ 过 $K$ 点作从动件等路交点。
- ④ 等分偏距圆1, 2, 3……12，过1, 2, 3……, 12作切线，交于基圆， $C_1, C_2, \dots, C_{12}$
- ⑤ 应用反转法，由图中量取从动件位移，量取从动件在各切线对预置上的位移，得 $B_1, B_2, \dots$ ，即 $C_1B_1=11'$ ， $C_2B_2=22'$ ……
- ⑥ 将 $B_0, B_1, \dots$ 连成光滑曲线，即为凸轮轮廓曲线

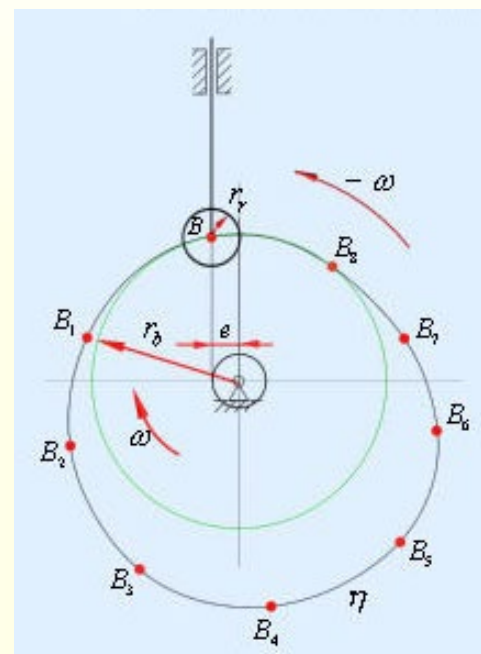
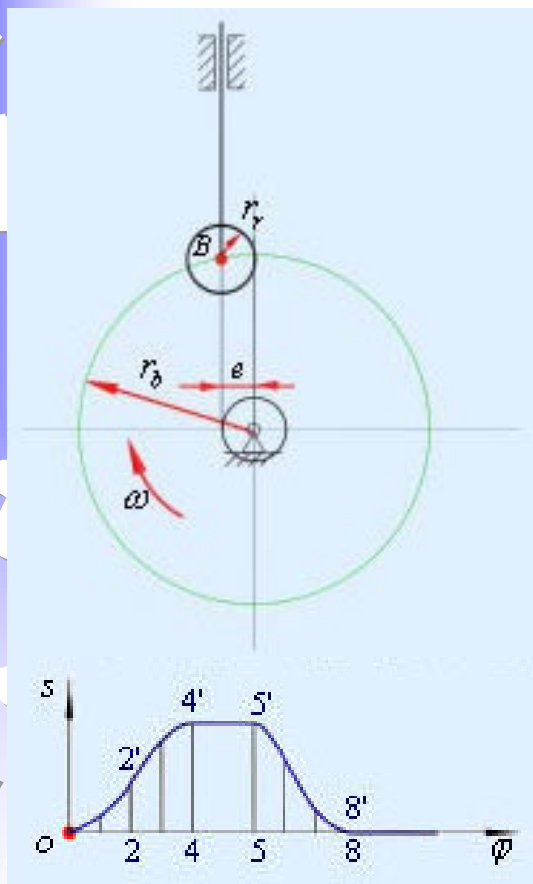
对于滚子从动件星形凸轮机构，设计与上相同，只是只要把它看作滚子中心看作为尖顶从动件凸轮，则由上方法得出的轮廓曲线称为理论轮廓曲线，然后以该轮廓曲线为圆心，滚子半径为半径画一系列圆，再画这些圆所包络的曲线，即为所设计的轮廓曲线，这称为实际轮廓曲线。其中指理论轮廓曲线的其圆半径。

对于平底从动件，则只要做出不同位置平底的包络线，即为实际轮廓曲线。

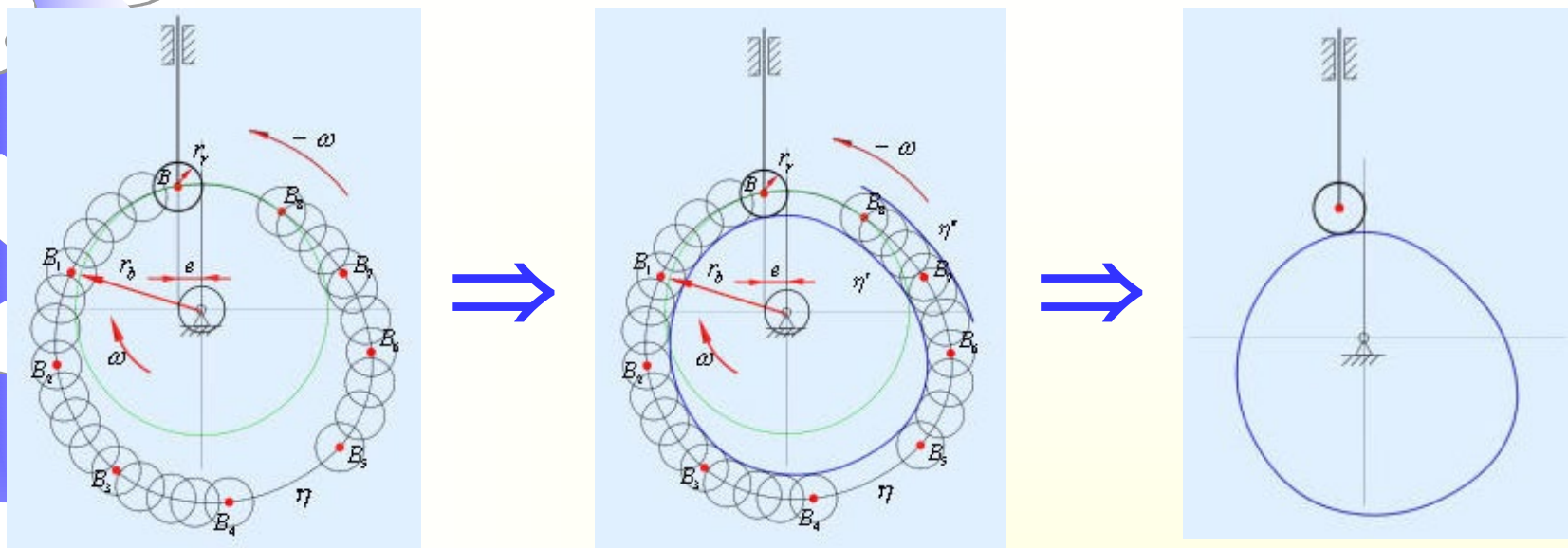
## (2) 滚子从动件

已知:  $r_b$ ,  $\omega$ ,  $e$ , 滚子半径  $r_r$ ,  $s-\phi$  曲线。

反转法  
 $\Rightarrow$

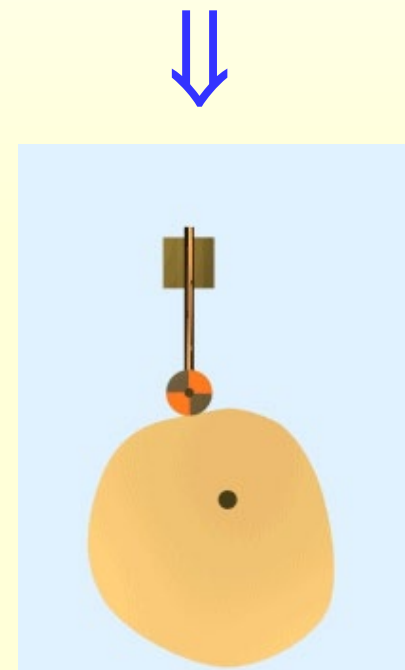


滚子中心将描绘一条与凸轮廓线法向等距的曲线——理论廓线。 $R_b$ 指的是理论廓线的基圆。



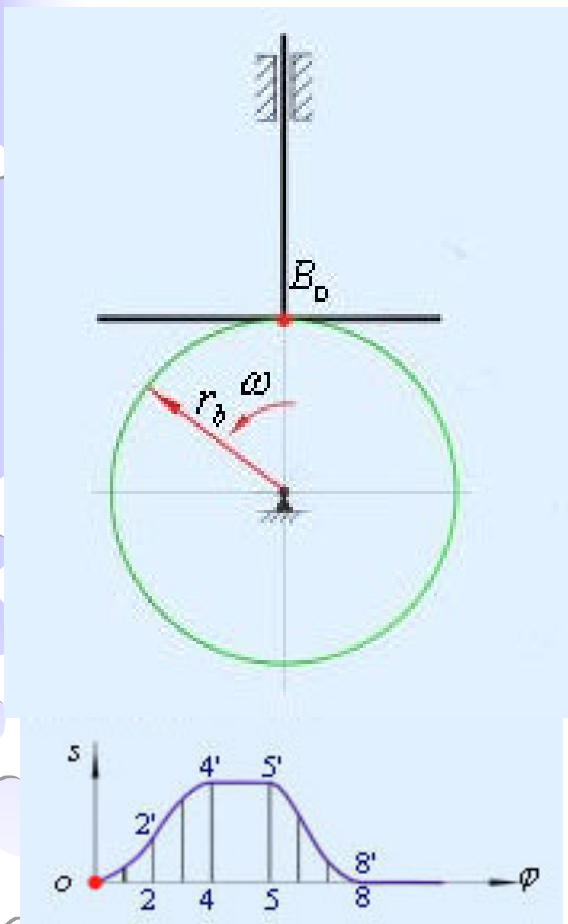
作内包络线，得到凸轮的实际廓线；若同时作外包络线，可形成槽凸轮廓线。

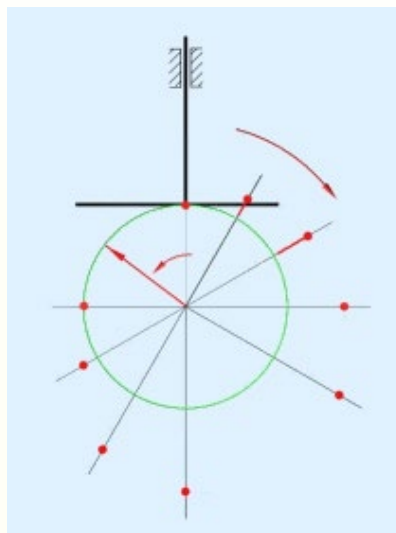
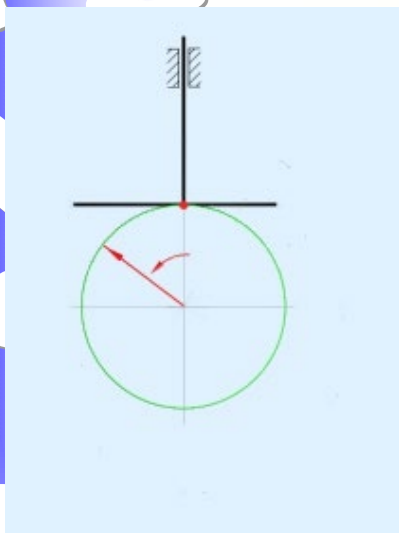
各种曲线顶点（所谓的峰点）相切连接起来形成的一条平滑曲线，就是“包络线”，看起来就像把许多抛物线“包”起来一样！



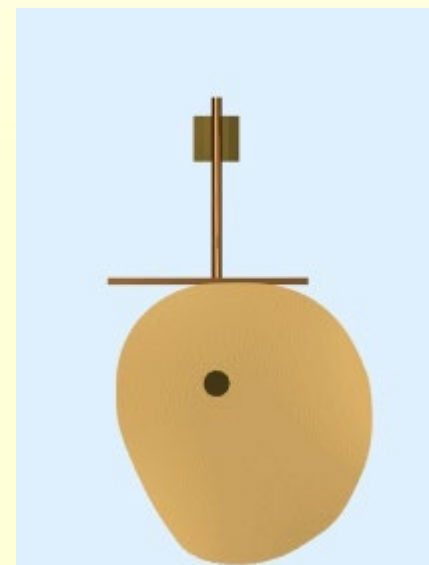
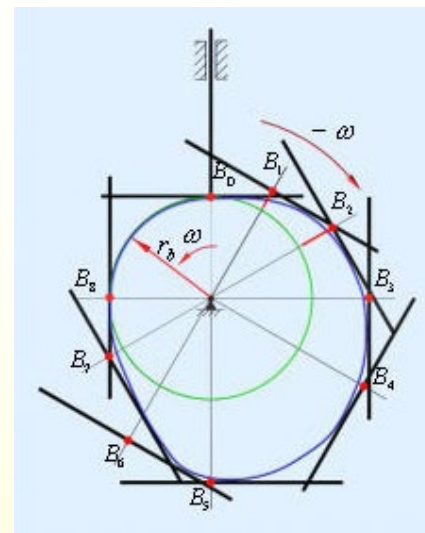
## (3) 平底从动件

取平底从动件表面上的点 $B_0$ 作为假想的尖端从动件的尖端。





包络线



为了保证在所有位置从动件平底都能与凸轮轮廓曲线相切，凸轮轮廓线必须是外凸的。

### 用作图法设计直动推杆盘形凸轮廓线



开始

上一步

下一步

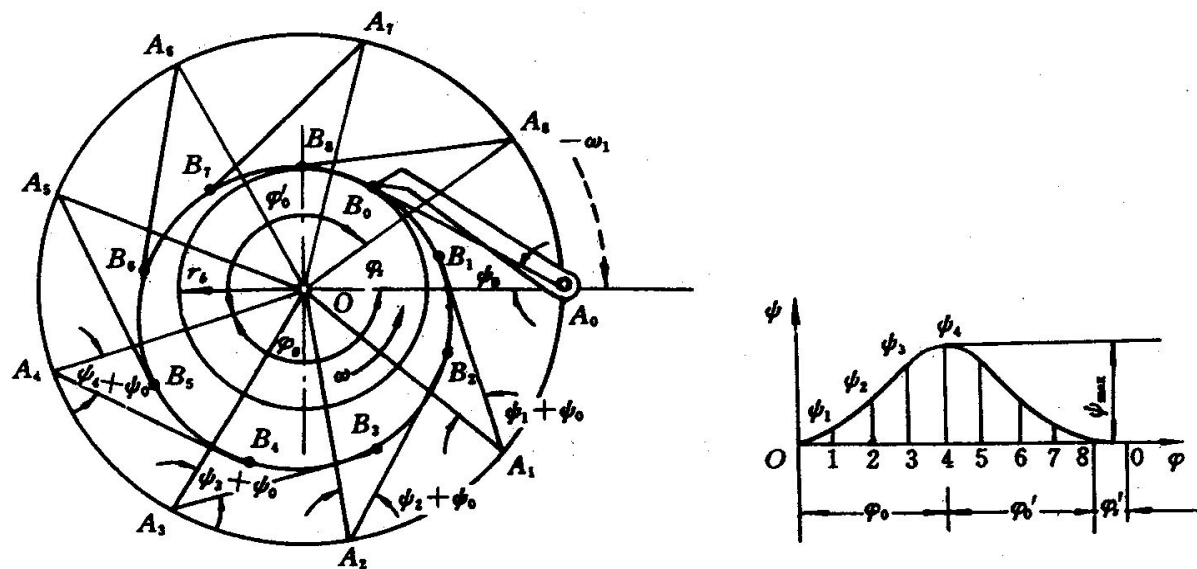
结束



直动推杆凸轮设计



## 2. 尖顶摆动从动件盘形凸轮



已知：基圆半径 $r_b$ ，凸轮轴心与从动件转轴之间中心距 $a$ ，摆杆长 $l$ ，凸轮以等角速度 $\omega$ 逆时针旋转，从动件运动规律图

求：凸轮轮廓曲线

## 设计步骤:

- ①选适当比例尺, 作从动件位移线图, 并将横坐标分成若干等分。这里纵坐标代表从动件的摆角, 即1mm代表多少度。
- ②以O为圆心, 以 $r_b$ 半径作基圆; 根据中心距为a, 确定从动件转轴的位置 $A_0$ ; 作摆杆长为l与基圆交点于点 $C_0$ , 即从动件尖端的初始位置。
- ③以O为圆心, 以中心矩a为半径, 画转轴圆。
- ④在转轴圆上, 用反转法作位移线图对应等得点 $A_0, A_1, A_2, \dots$
- ⑤以l为半径, 以 $A_1, A_2, \dots$ , 为圆心作一系列圆弧 $\dots$ 交于基圆 $C_1, C_2, \dots$ 点, 得线段 $A_1C_1, A_2C_2, \dots$ 。
- ⑥以 $A_1C_1, A_2C_2, \dots$ 为一边, 分别做 $\angle C_1A_1B_1, \angle C_2A_2B_2, \dots$ , 使它们分别等于位移线图中对应的角位移。得线 $A_1B_1, A_2B_2, \dots, B_1, B_2, \dots$ 即为反转过程中从动件尖端的运动轨迹。
- ⑦将点 $B_0, B_1, B_2, \dots$ 连成光滑曲线。

发现从动杆与轮廓干涉, 通常作成曲杆, 避免干涉, 或摆杆与凸轮轮廓不在一个平面内仅靠头部伸出杆与轮廓接触。

### 用图解法设计摆动推杆盘形凸轮廓线



开始 上一步 下一步 结束



摆动推杆凸轮设计

## 3.4.3 解析法设计平面凸轮轮廓曲线

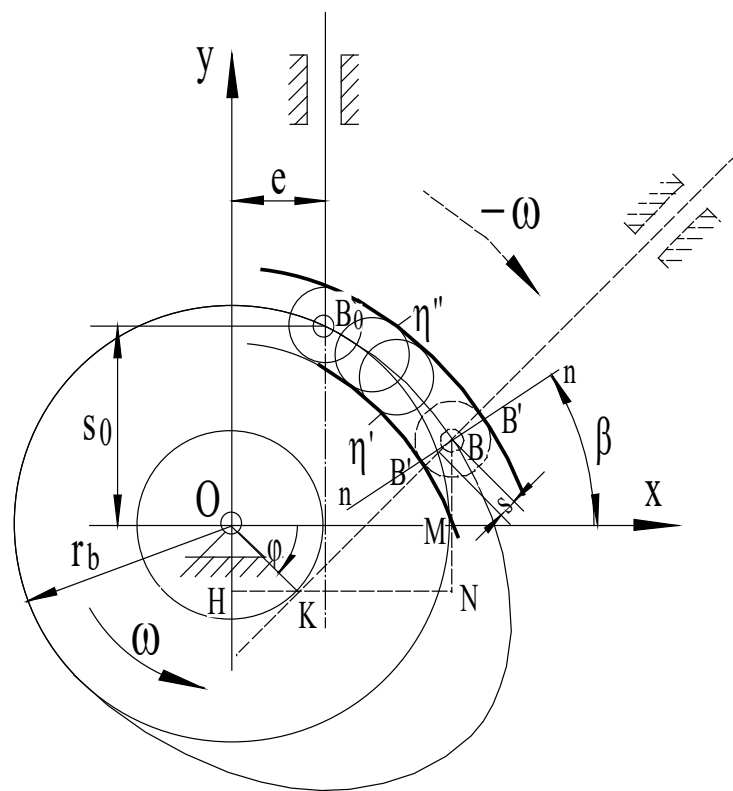
## 1. 直动滚子从动件盘形凸轮

已知：凸轮以等角速度  $\omega$  逆时针方向转动，凸轮基圆半径  $r_b$ 、滚子半径  $r_r$ ，导路和凸轮轴心间的相对位置及偏距  $e$ ，从动件的运动规律  $s = s(\varphi)$ 。

1. 理论廓线方程:  $B(x, y)$

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

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



## 2. 实际廓线方程: $B'(x', y')$

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = x \mp r \cos \theta \\ y' = y \mp r \sin \theta \end{array} \right.$$

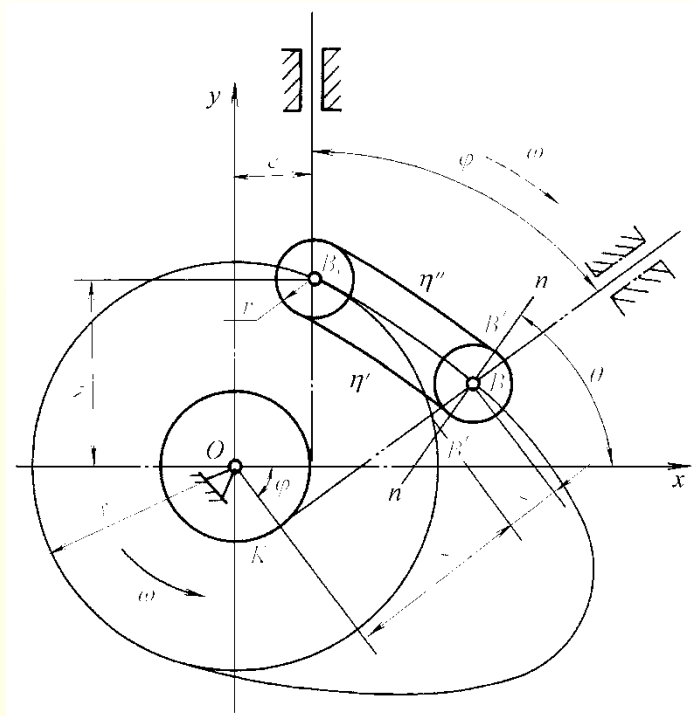
$$\tan \theta = -\frac{dx}{dy} = \frac{dx}{d\varphi} \bigg/ \left(-\frac{dy}{d\varphi}\right) = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$dx/d\varphi = (ds/d\varphi - e)\sin\varphi + (s_0 + s)\cos\varphi$$

$$dy/d\varphi = (ds/d\varphi - e) \cos \varphi - (s_0 + s) \sin \varphi$$

$$\sin \theta = \frac{dx/d\varphi}{\sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}}$$

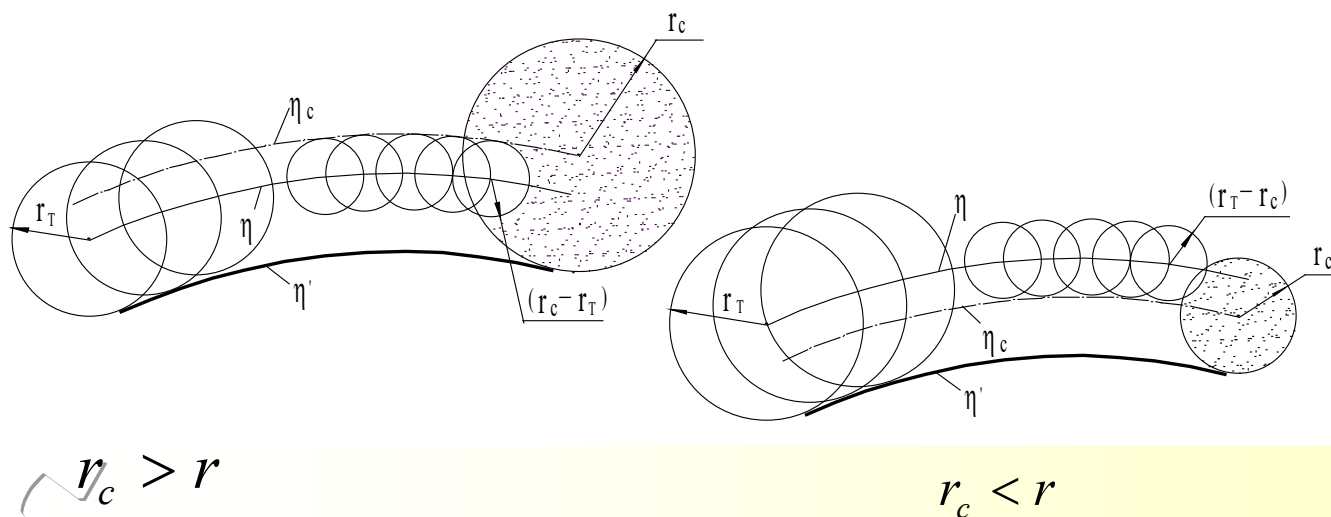
$$\cos \theta = \frac{-dy/d\varphi}{\sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}}$$



### 3. 刀具的中心轨迹方程

应用数控铣床或凸轮磨床可加工凸轮的实际廓线。  
在加工凸轮前需计算刀具的中心轨迹方程。

$$\left. \begin{aligned} x_c &= x \pm |r_c - r| \frac{dy/d\varphi}{\sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}} \\ y_c &= y \mp |r_c - r| \frac{dx/d\varphi}{\sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}} \end{aligned} \right\}$$

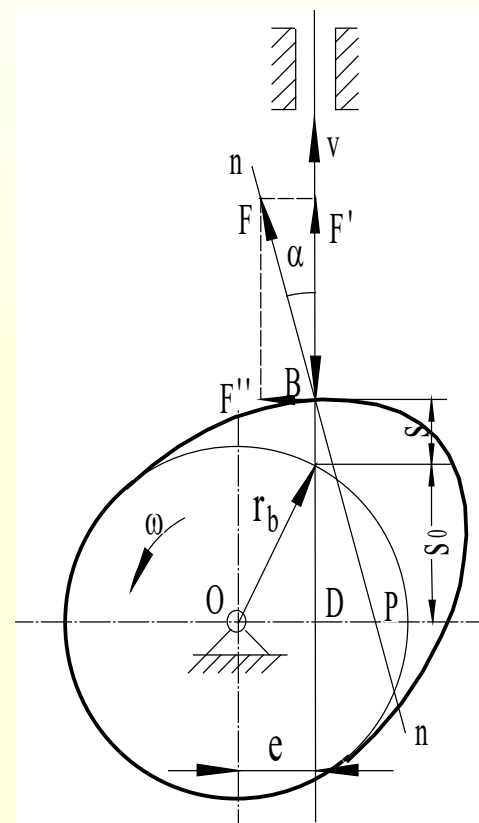


## 3.5 凸轮机构基本尺寸的确定

### 3.5.1 凸轮机构的压力角及其许用值

1. 压力角：从动件与凸轮在接触点处的受力方向与其在该点绝对速度方向之间所夹的锐角 $\alpha$

$$\tan \alpha = \frac{\overline{PD}}{\overline{BD}} = \frac{|\overline{OP} \mp e|}{s_0 + s} = \frac{|ds/d\varphi \mp e|}{\sqrt{r_0^2 - e^2} + s}$$



## 2. 许用压力角

**许用压力角**：为改善凸轮机构的受力情况、提高机械效率，规定了允许采用的**最大压力角**  $[\alpha]$ 。

$$\alpha_{\max} \leq [\alpha]$$

**推程**（工作行程）推荐的许用压力角为：

直动从动件  $[\alpha] = 30^\circ \sim 40^\circ$

摆动从动件  $[\alpha] = 35^\circ \sim 45^\circ$

**回程**（空回行程）  $[\alpha] = 70^\circ \sim 80^\circ$



## 凸轮机构的压力角



开始

上一步

下一步

结束



凸轮机构的压力角

### 3.5.2 基圆半径的确定


#### 理论计算

$$r_0 \geq \sqrt{\left(\frac{ds/d\varphi \mp e}{tg[\alpha]} - s\right)^2 + e^2}$$

为保证凸轮机构在整个运动周期中均能满足  $\alpha_{\max} \leq [\alpha]$ ，应选取计算结果中的最大值作为凸轮的基圆半径。

## 凸轮基圆半径的确定



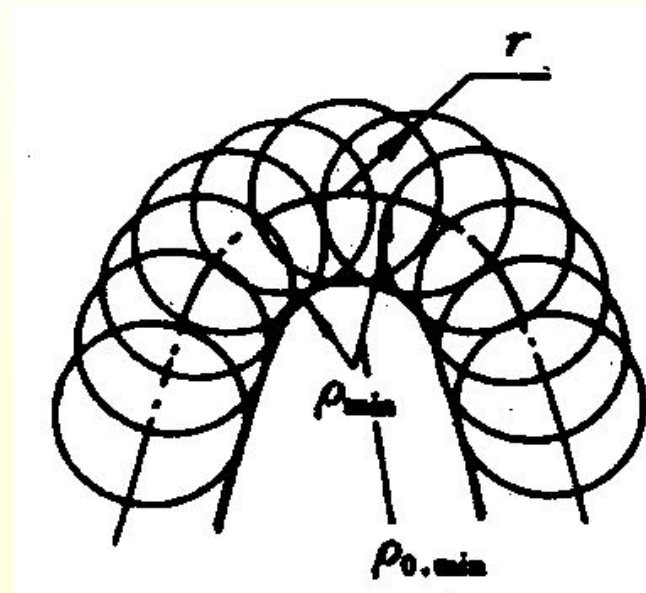
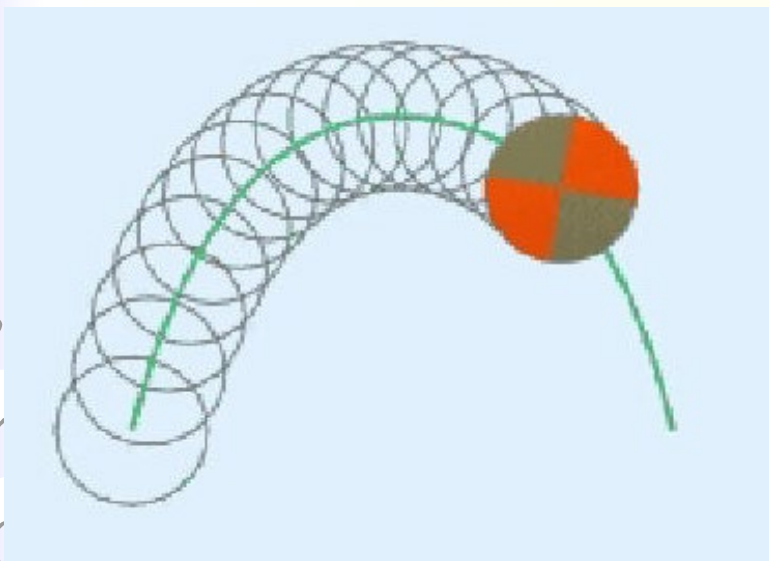
开始 上一步 完成 结束 

凸轮基圆半径的确定



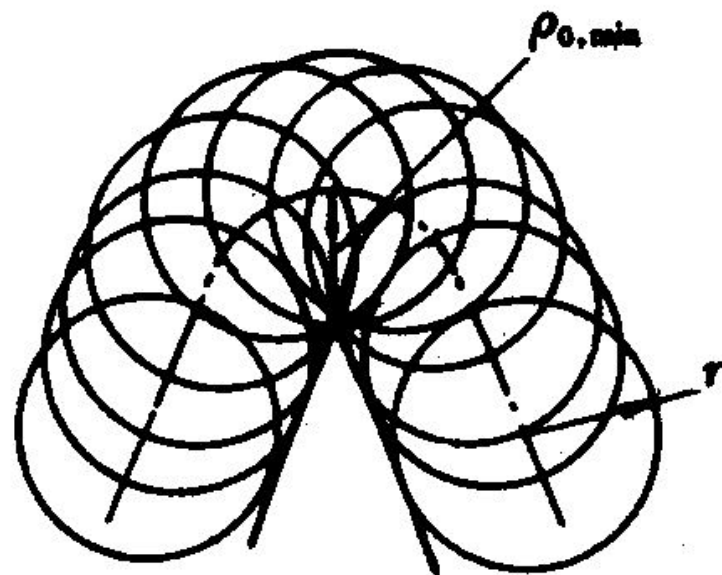
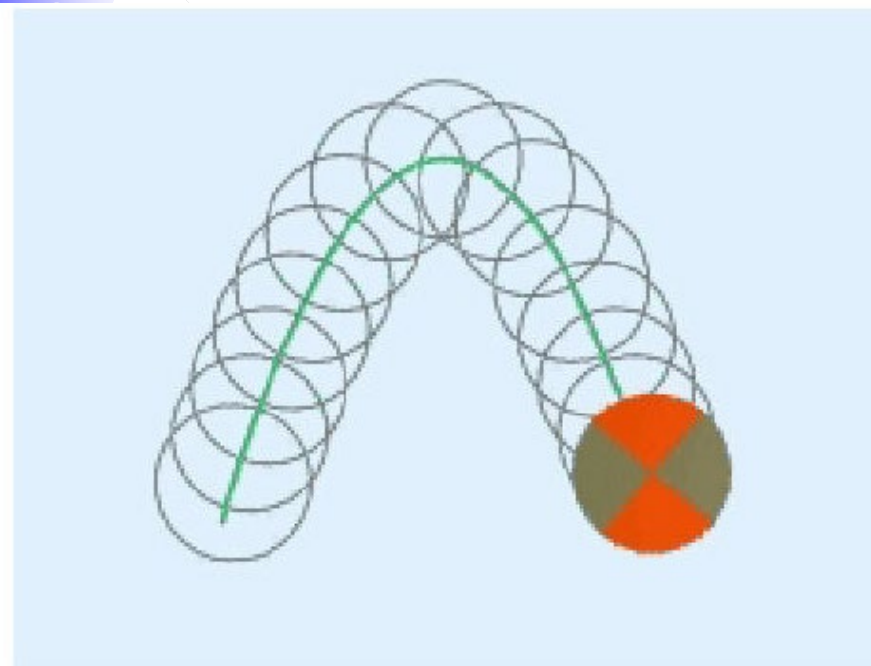
## 3.5.4 凸轮轮廓形状与滚子半径的关系

## • 外凸凸轮轮廓线

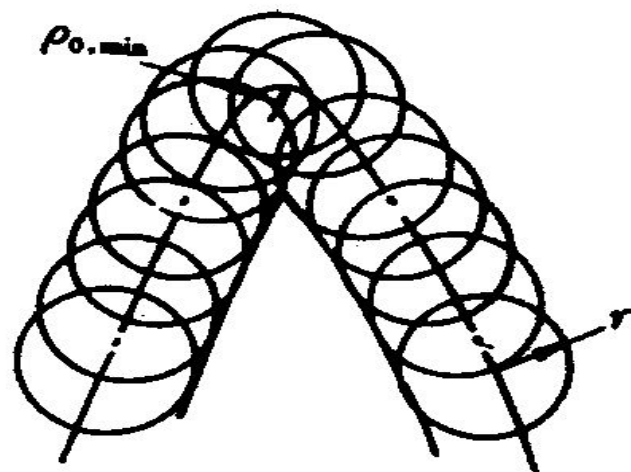
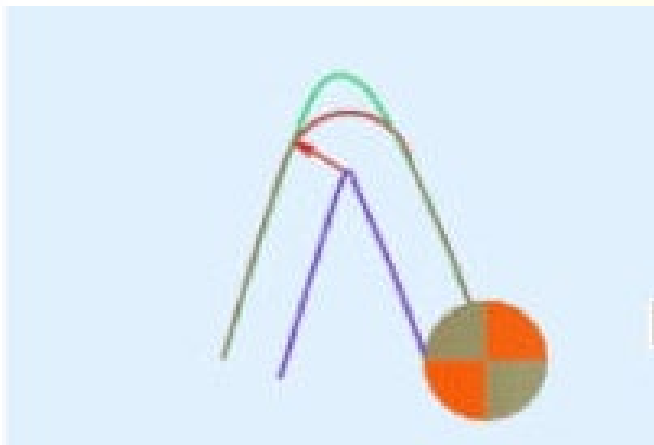
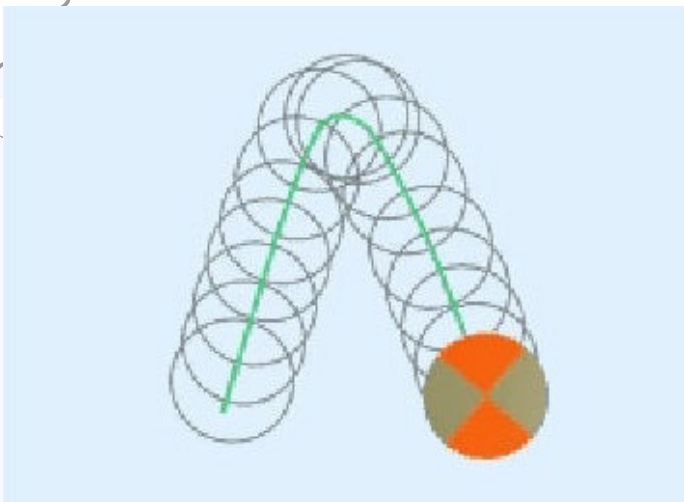


$$\rho_{0min} > r$$

$$\rho_{min} = \rho_{0min} - r > 0$$



$$\left. \begin{aligned} \rho_{0\min} &= r \\ \rho_{\min} &= \rho_{0\min} - r = 0 \end{aligned} \right\} \text{实际廓线出现尖点}$$

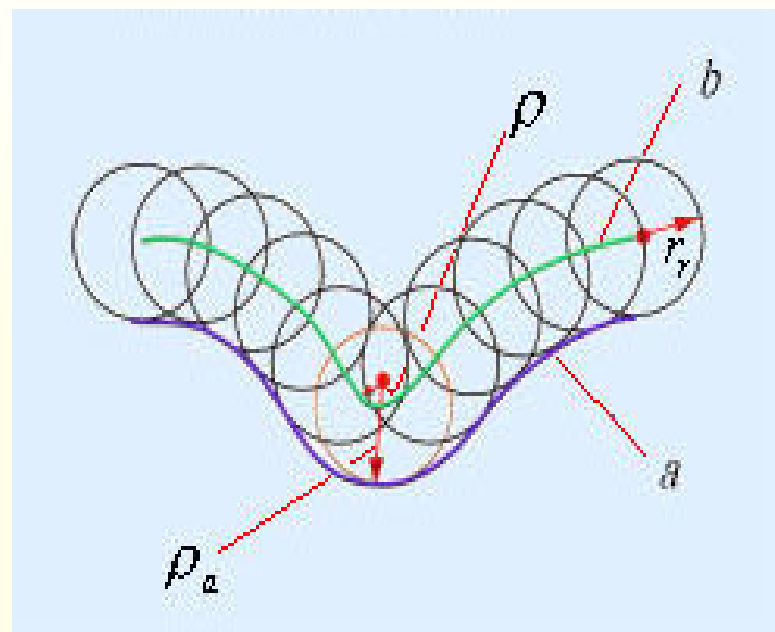
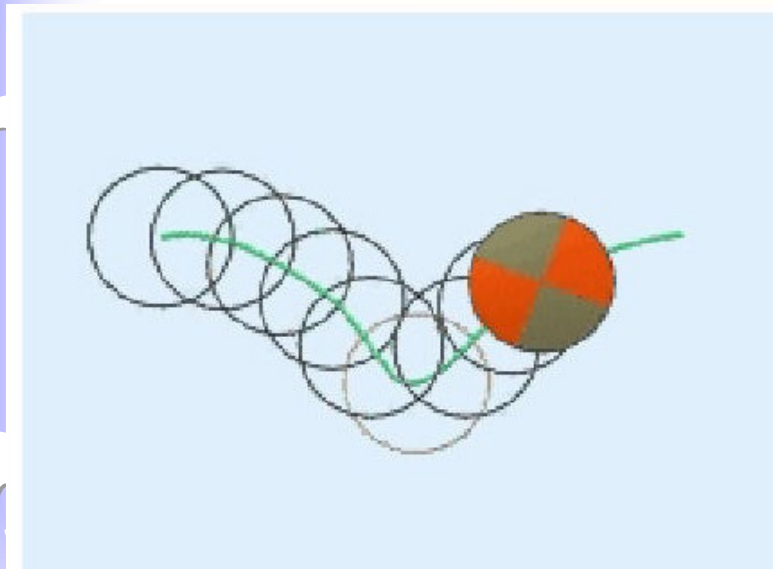


$$\rho_{0min} < r$$

$$\rho_{min} = \rho_{0min} - r < 0$$

实际廓线出现交叉，从动件不能准确地实现预期的运动规律——**运动失真**

## 内凹凸轮廓线



无论滚子半径多大，总能由理论轮廓求出实际轮廓。



- 运动失真

原因:  $\rho_{0\min} < r$

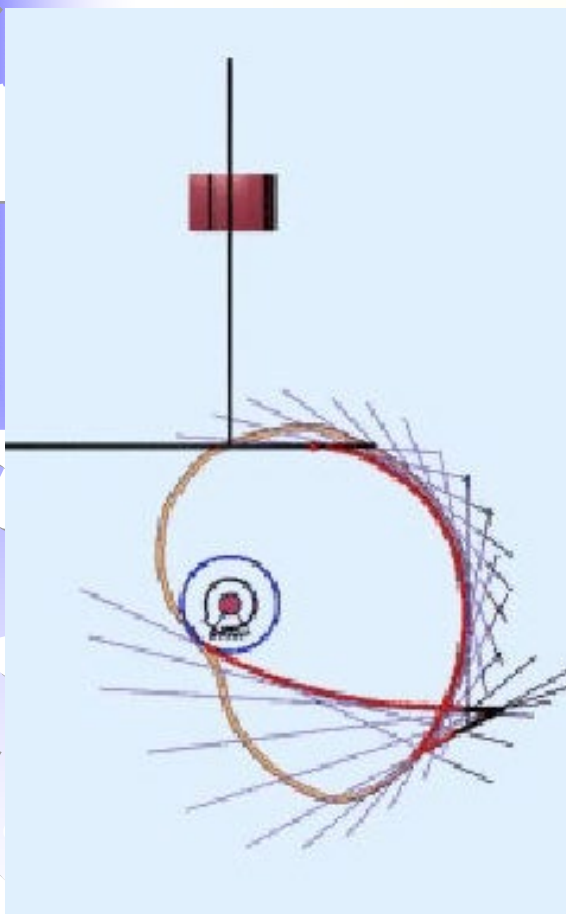
避免方法:  $\left\{ \begin{array}{l} \square \square \square \square \square \square r (r \leq 0.8 \rho_{0\min}) \\ \square \square r_b \rightarrow \square \square \rho_{0\min} \end{array} \right.$

- 滚子半径的选择

考虑结构、强度与运动规律等因素

滚子半径的选择

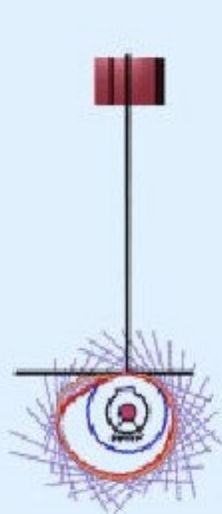
### 3.5.5 移动平底从动件盘形凸轮



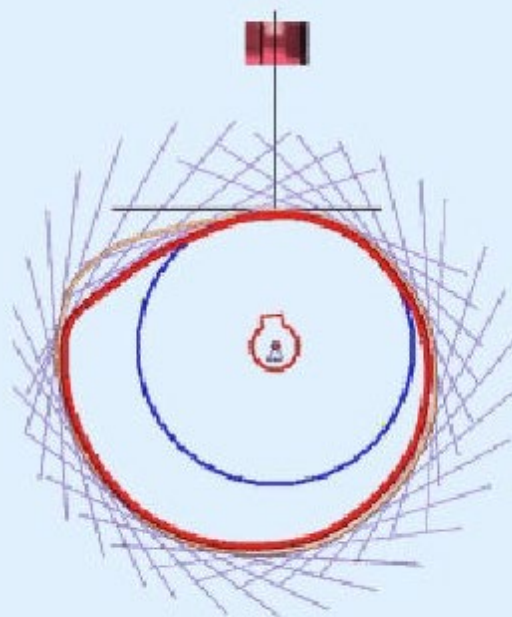
凸轮出现过度切割的现象，从动件无法完全实现预期的运动规律。

原因？ ？ ？

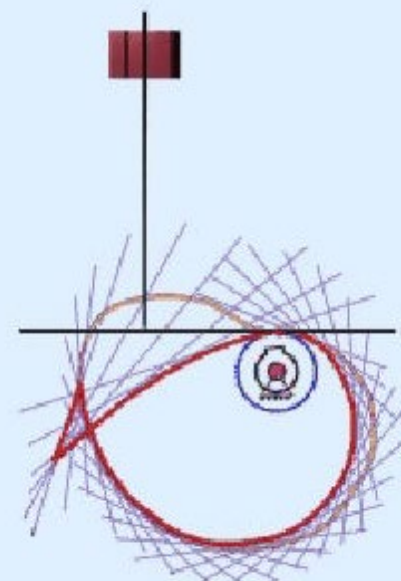
平底尺寸的确定




减小升程 $h$



增大基圆 $r_b$



增大偏心 $e$

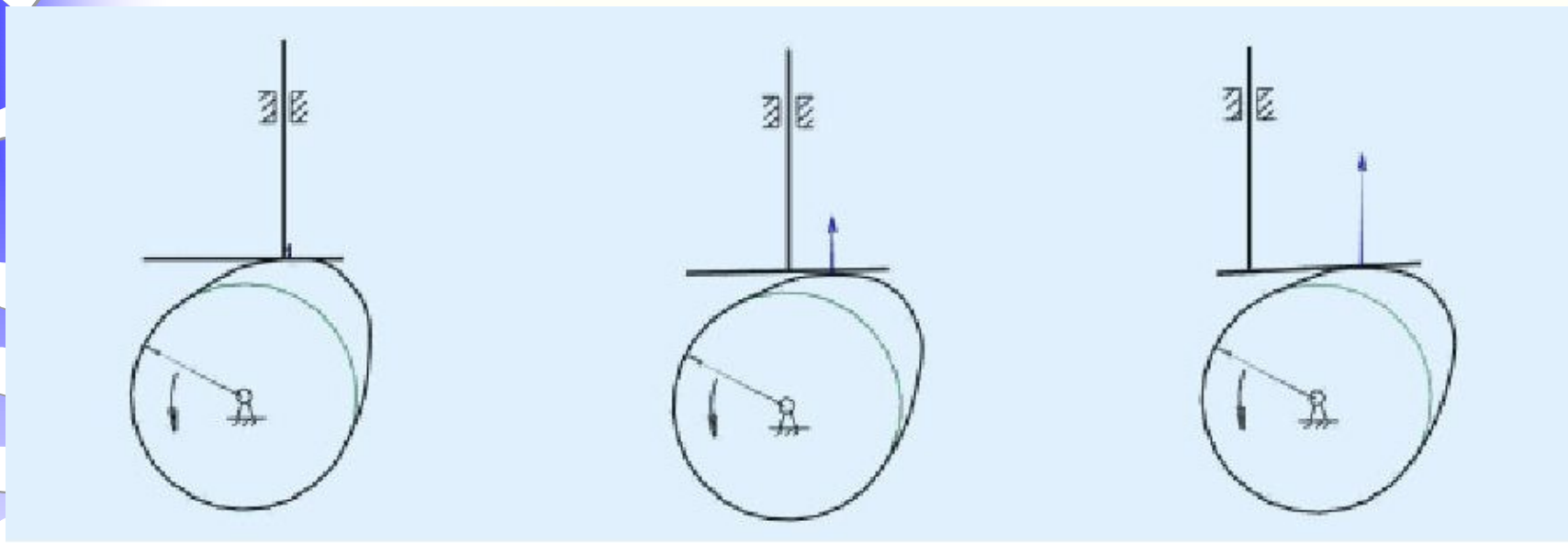


- 运动失真 { 基圆半径过小  
从动件升程过大

- 基圆半径的确定

避免运动失真

## 从动件偏置方向的选择



从动件偏置并不影响凸轮廓线的形状，选择偏置的主要目的是为了减小从动件在推程阶段所受的弯曲应力。



### 3.6.2 摆动从动件圆柱凸轮机构

