第三章　凸轮机构及其设计

本章教学内容

1. 凸轮机构的应用和分类
2. 推杆的运动规律
3. 凸轮轮廓曲线的设计

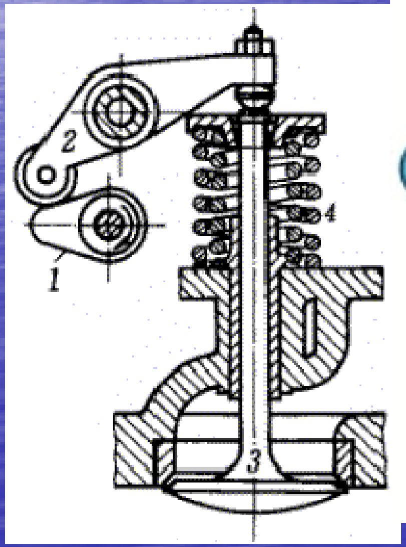
§9-1　凸轮机构的应用和分类

一. 凸轮机构的组成及应用

1 .组成： ——高副机构

1) 凸轮——具有曲线轮廓或凹槽的构件
2) 推杆——被凸轮直接推动的构件
3) 机架——相对参照系
4) 锁合装置——保证高副始终可靠接触的装置

内燃机配气机构

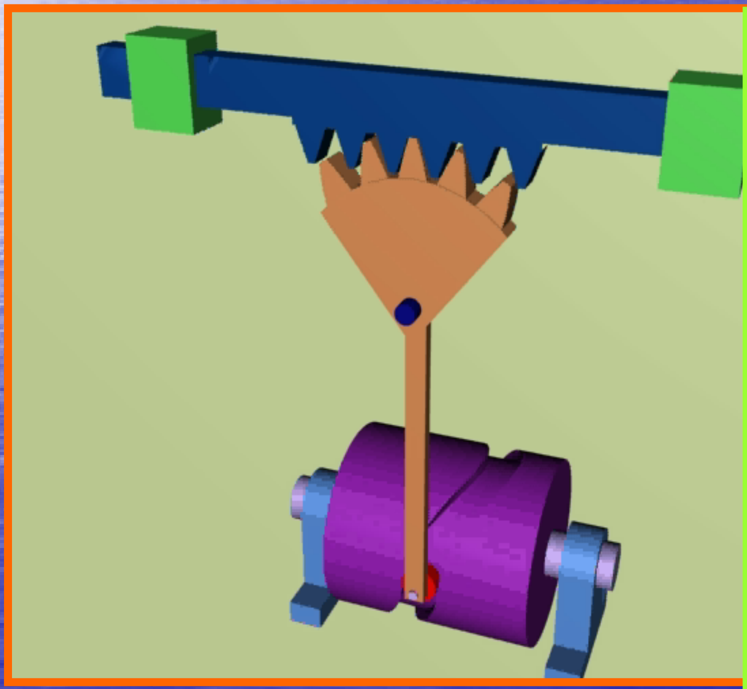


凸轮1、从动件2、机架、锁合装置4

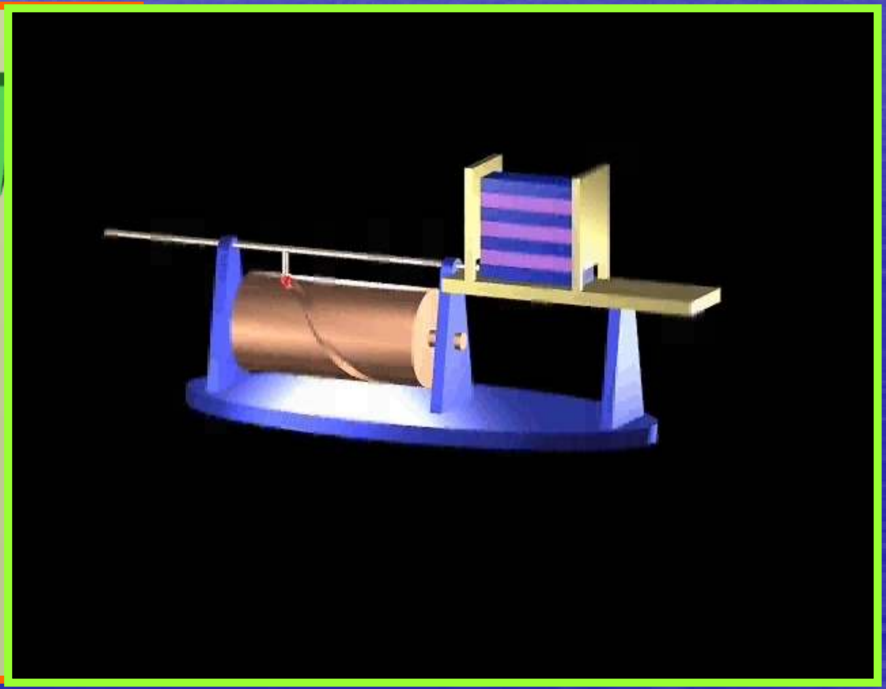
2 .应用：

凸轮机构具有结构简单，可以准确实现要求的运动规律等优点，因而在工业生产中得到广泛的应用。

自动走刀机构



自动送料机构



3 .特点：

优点：1）可使从动件得到各种预期的运动规律。

2）结构紧凑。

3）实现停歇运动

缺点：1）高副接触，易于磨损，多用于传递力不太大的场合

。

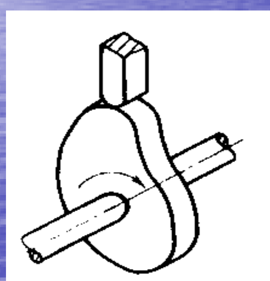
2）加工比较困难。

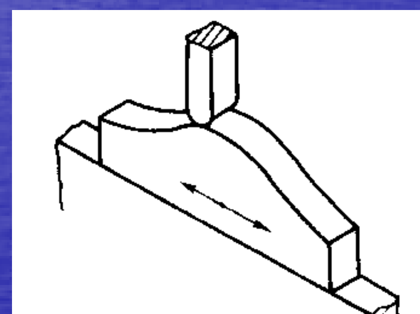
3）从动件行程不宜过大，否则会使凸轮变得笨重。

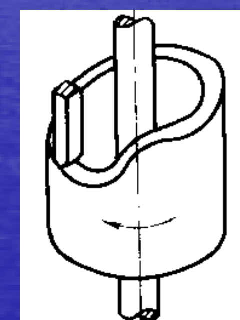
二.凸轮机构的分类

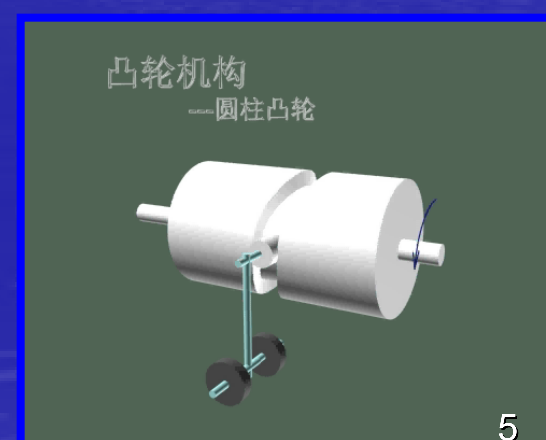
1、按凸轮的形状分:

- 平面凸轮
  - 盘形凸轮
  - 移动凸轮
- 空间凸轮
  - 圆柱面凸轮
  - 端面凸轮







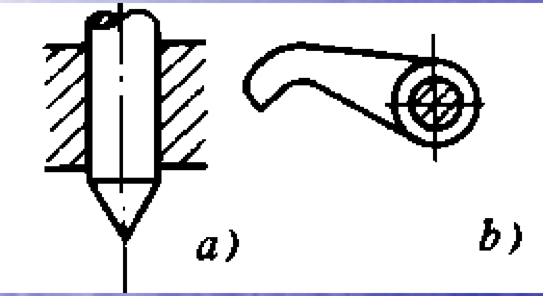


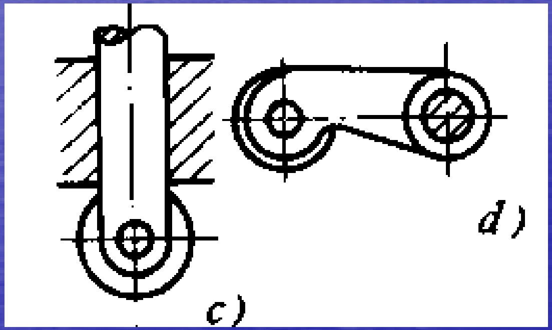
2、按从动件端部型式分：

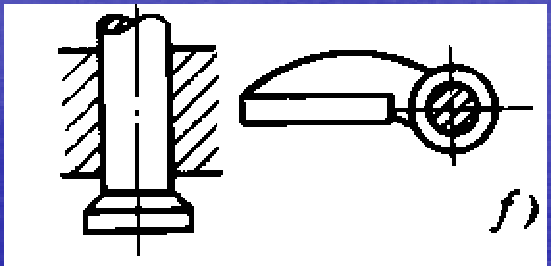
尖顶从动件——易磨损，承载能力低，用于轻载低速

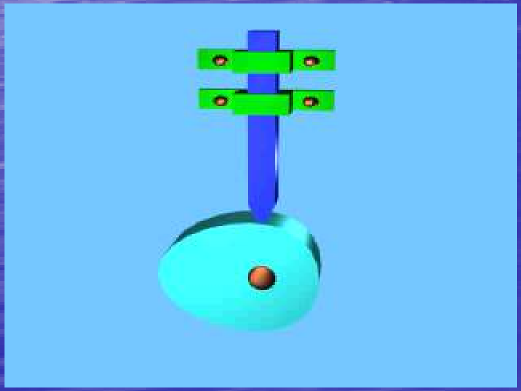
滚子从动件——磨损小，承载能力较大，用于中载中速

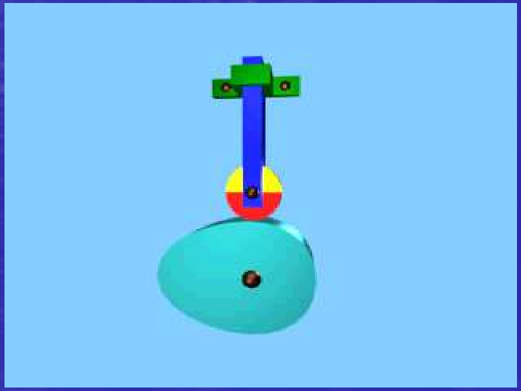
平底从动件——受力好，润滑好，常用于高速

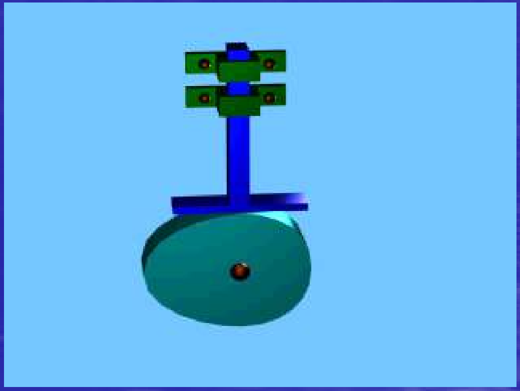








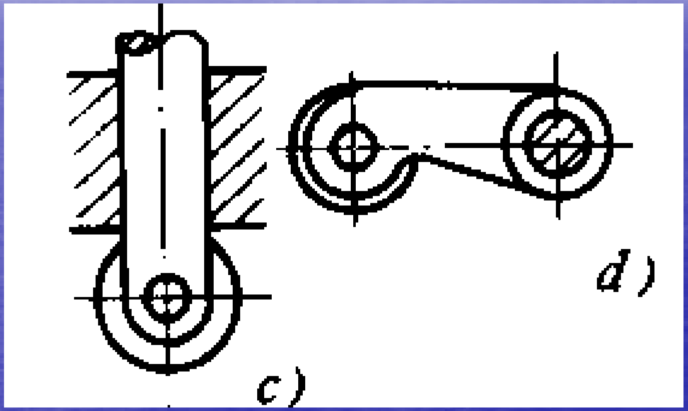


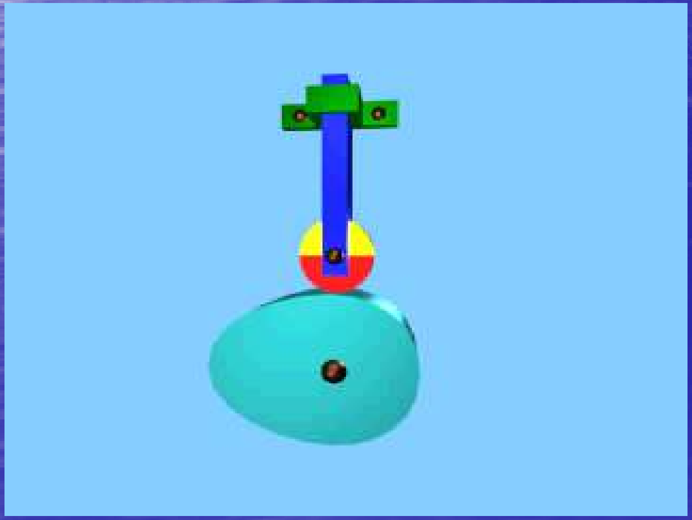


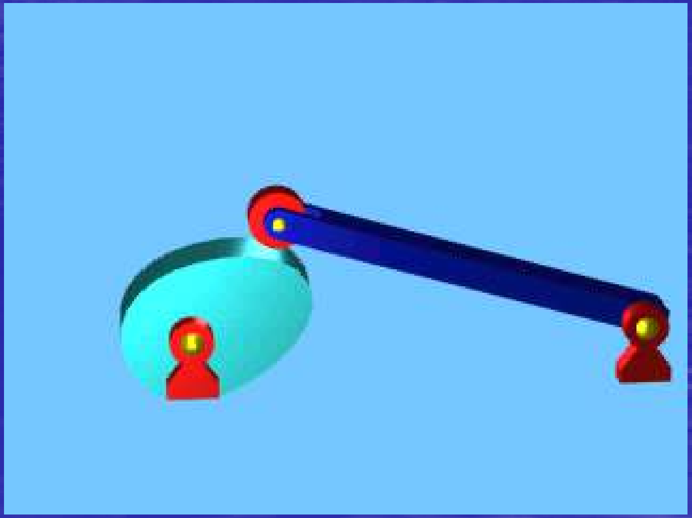
3、按从动件的运动方式分：

直动从动件 ——————— { 对心 / 偏置

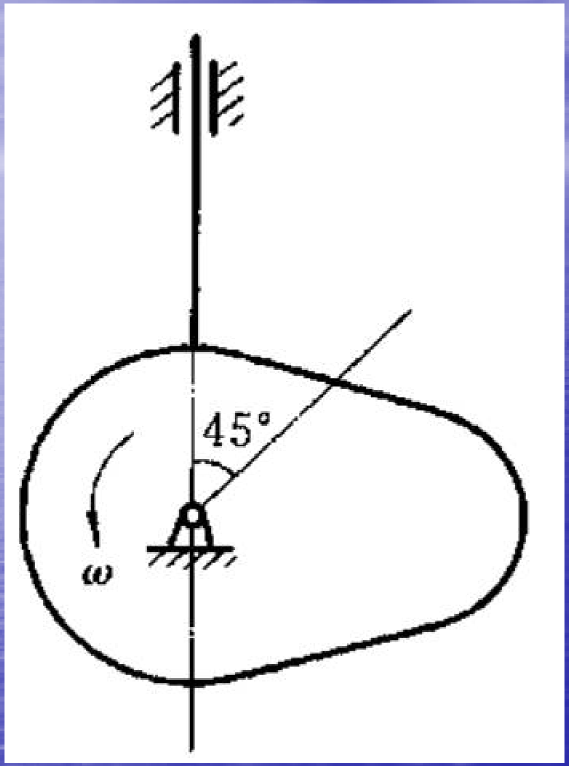
摆动从动件



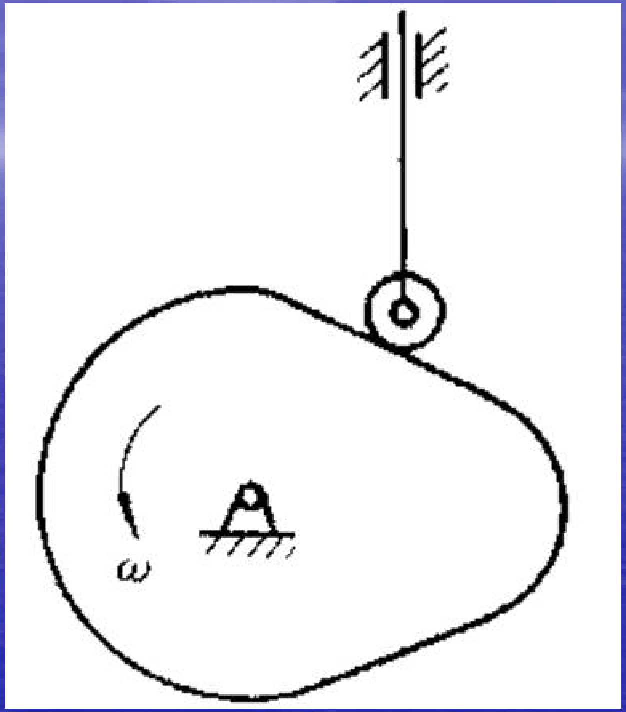




机构的命名



对心直动尖顶从动件
盘形凸轮机构



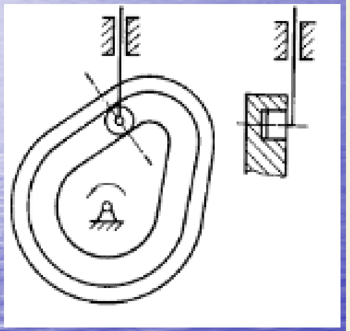
偏置直动滚子从动件
盘形凸轮机构

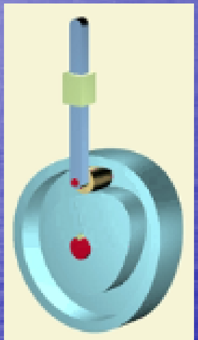
4、按凸轮与从动件保持接触的锁合装置分：

(1)力锁合 利用推杆的重力、弹簧力或其它外力使推杆始终与凸轮保持接触

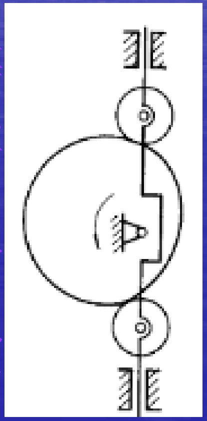
(2)形锁合 利用凸轮与推杆构成的高副元素的特殊几何结构使凸轮与推杆始终保持接触

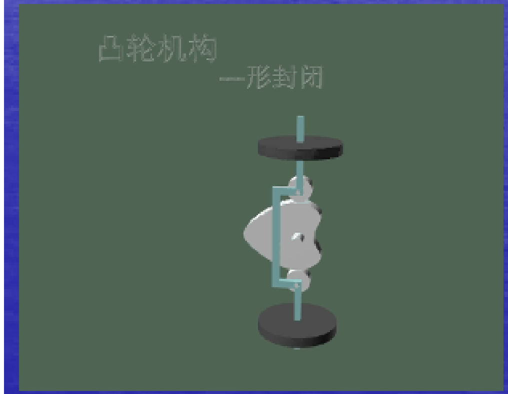
槽凸轮机构



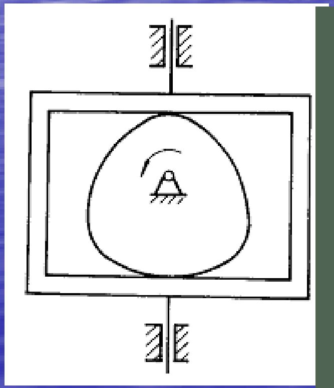


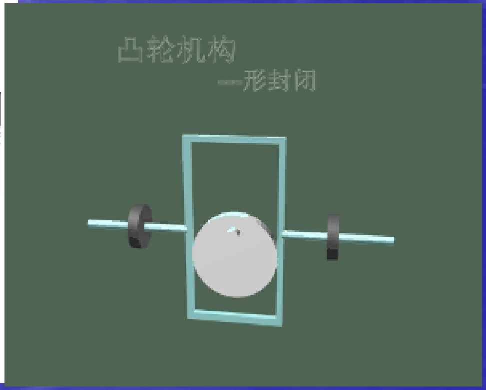
等径凸轮机构



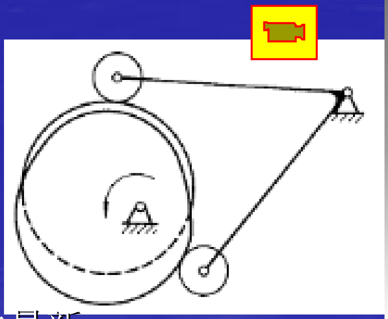


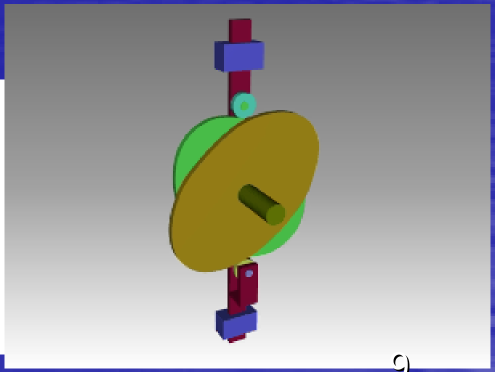
等宽凸轮机构



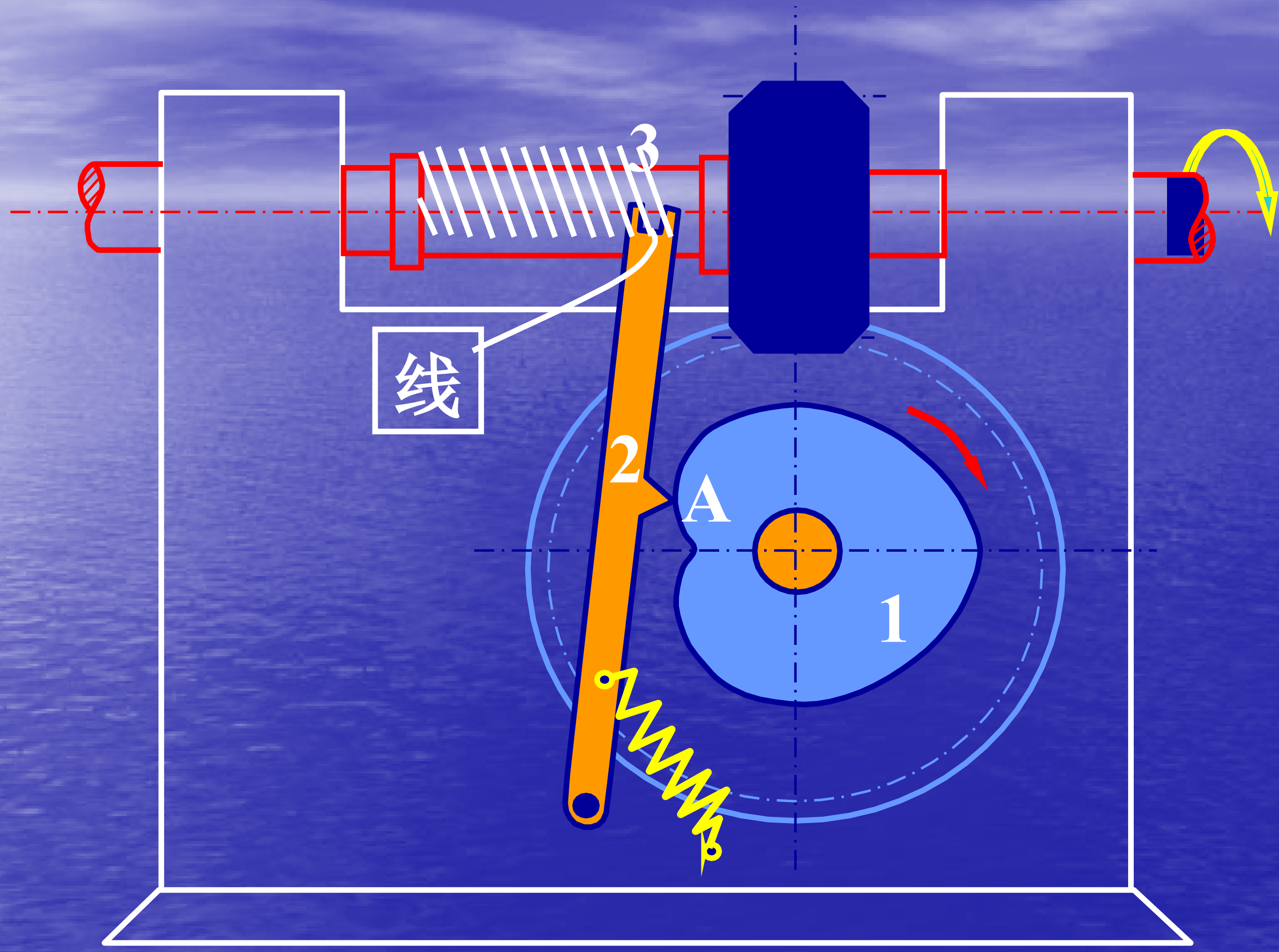


共轭凸轮机构

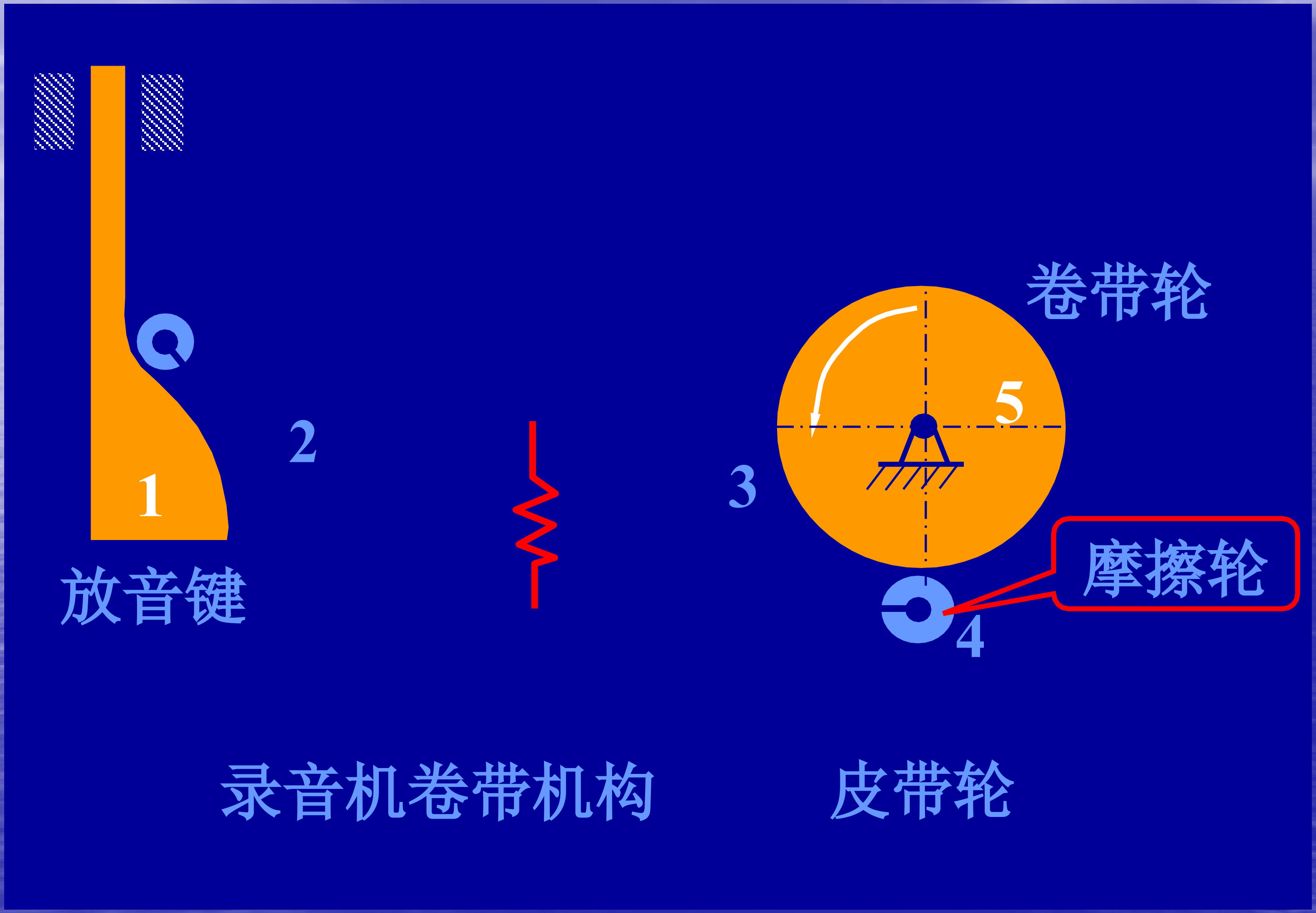


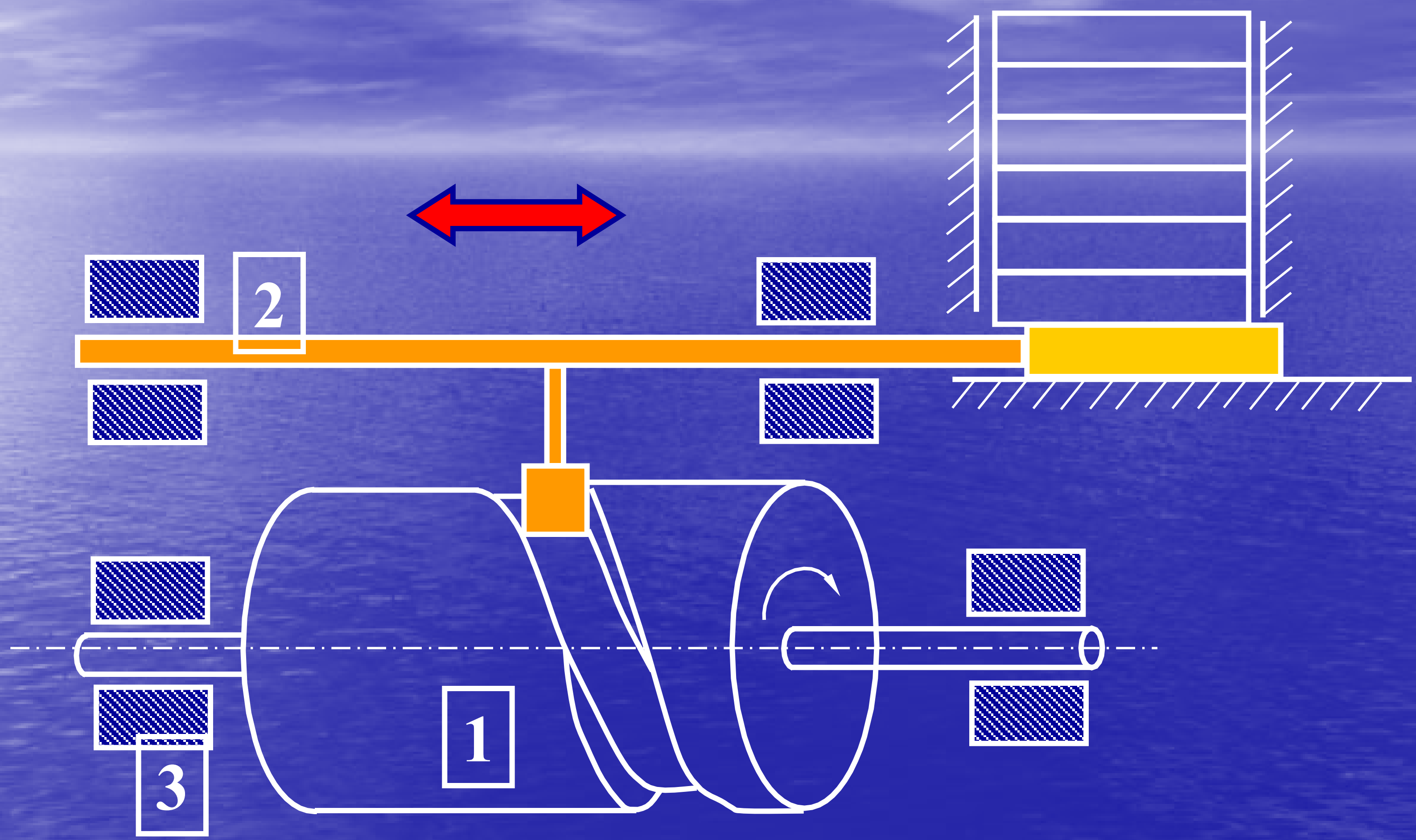


应用实例：



绕线机构


1
2
3
4
5
卷带轮
摩擦轮
放音键
录音机卷带机构
皮带轮



送料机构

§9-2 从动件常用运动规律

一. 基本概念

1. **理论廓线**——与尖端从动件相接触的廓线

2. **基圆r_0** ——凸轮理论廓线上最小向径为半径所作的圆

3. **推程h，** 推程运动角δ_0

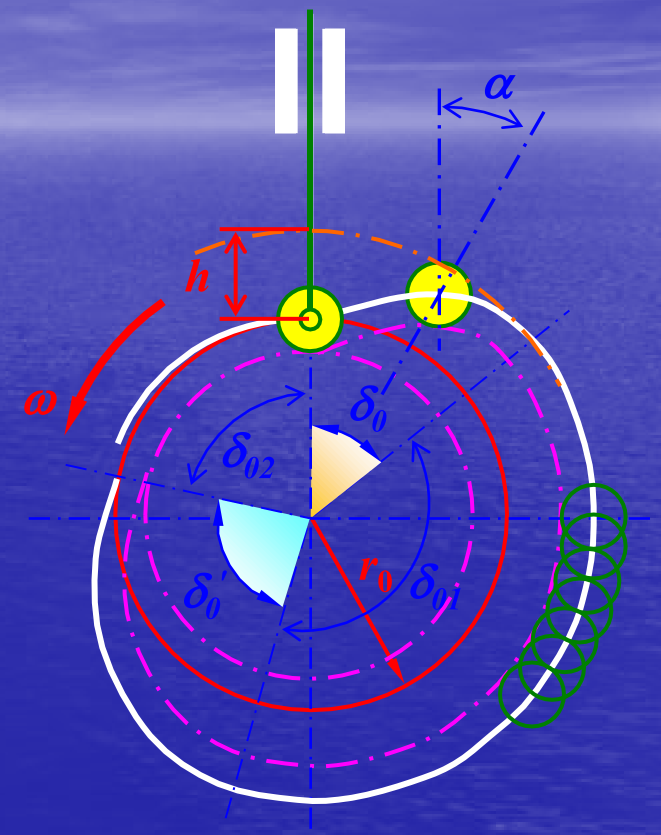
4. 回程，回程运动角δ_0'

5. 远休止，远休止角δ_{01}

6. 近休止，近休止角δ_{02}

6. 实际廓线——与滚子或平底从动件相接触的廓线

7. 压力角



运动规律：推杆在推程或回程时，其位移S、速度V、和加速度a 随时间t 的变化规律。

$$S=S(t)$$

$$V=V(t)$$

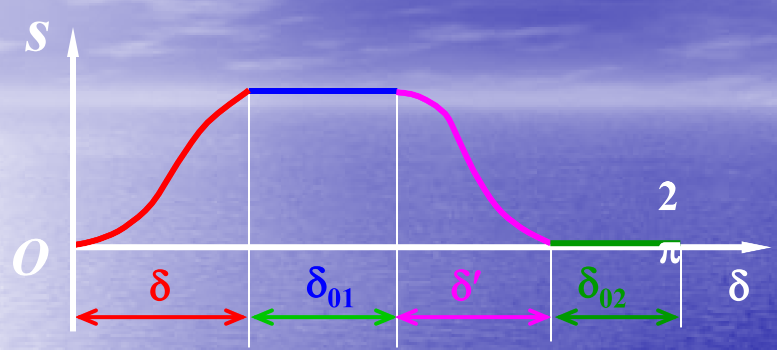
$$a=a(t)$$

形式：多项式、三角函数。

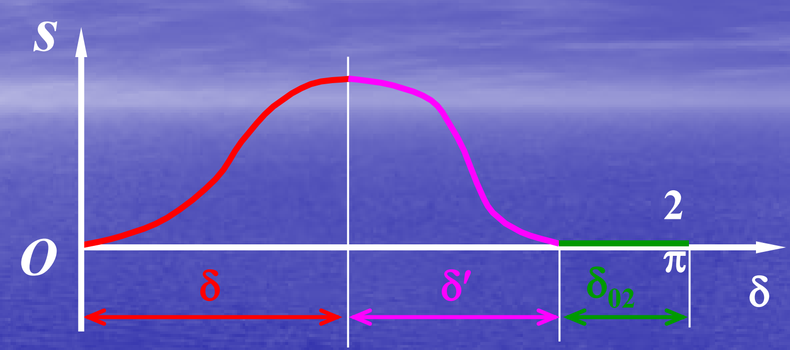
二. 从动件常用运动规律

★从动件的运动规律——从动件的运动（位移、速度和加速度）与时间或凸轮转角间的关系。

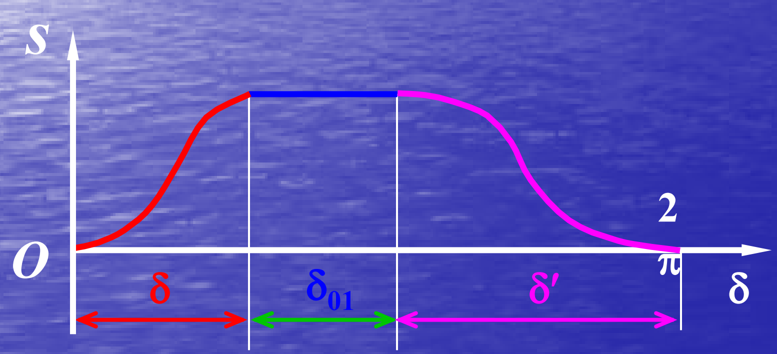
按照从动件在一个循环中是否需要停歇及停在何处等，可将凸轮机构从动件的位移曲线分成如下四种类型：



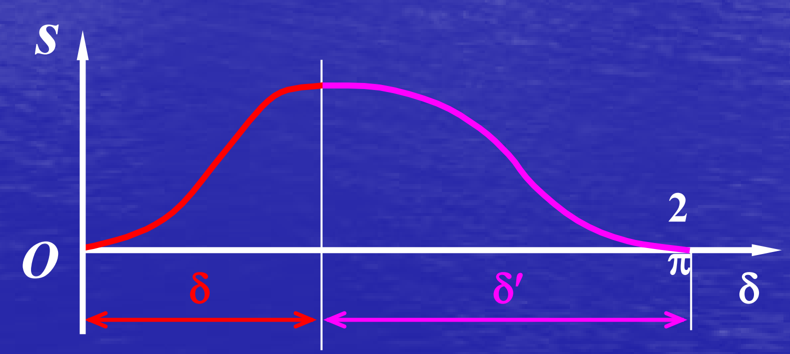
（1）升-停-回-停型



（2）升-回-停型



（3）升-停-回型



（4）升-回型

★从动件常用运动规律

1. 多项式运动规律 $s = C_0 + C_1\delta + C_2\delta^2 + \ldots + C_n\delta^n$

1.1 n=1 —— 等速运动规律

运动方程式一般表达式：

$$\begin{cases} s = c_0 + c_1\delta \\ v = ds/dt = c_1\omega \\ a = dv/dt = 0 \end{cases} \longrightarrow \text{等速运动规律}$$

➢ 推程运动方程：

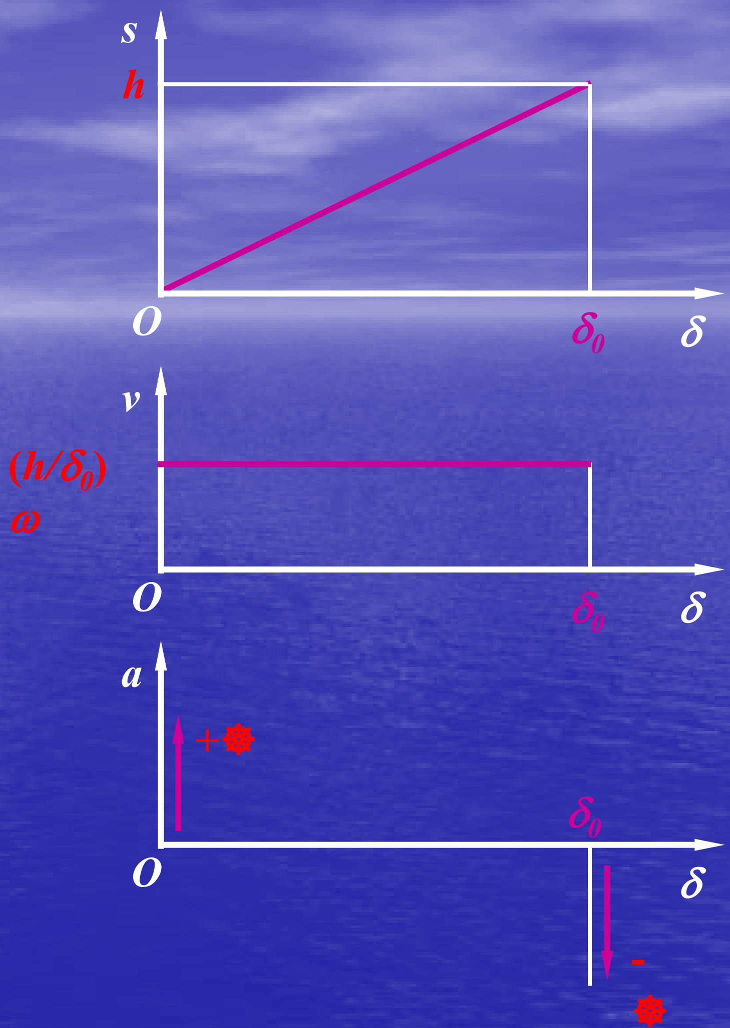
边界条件
$$\begin{cases} \text{运动始点：} \delta=0,\ s=0 \longrightarrow c_0=0 \\ \text{运动终点：} \delta=\delta_0,\ s=h \longrightarrow c_1=h/\delta_0 \end{cases}$$

推程运动方程式：

$$\begin{cases} s = (h/\delta_0)\delta \\ v = (h/\delta_0)\omega \qquad \delta \in [0, \delta_0] \\ a = 0 \end{cases}$$

作推程运动线图

$$\begin{cases} s = (h/\delta_0)\delta \\ v = (h/\delta_0)\omega \qquad \delta \in [0, \delta_0] \\ a = 0 \end{cases}$$



从动件在起始和终止点速度有突变，使瞬时加速度趋于无穷大，从而产生无限值惯性力，并由此对凸轮产生冲击 ——刚性冲击

➢回程运动方程

$$\begin{cases} s = c_0 + c_1\delta \\ v = ds/dt = c_1\omega \\ a = dv/dt = 0 \end{cases}$$

边界条件 $\begin{cases} \text{运动始点：} \delta=0, s=h \longrightarrow c_0=h \\ \text{运动终点：} \delta=\delta_0', \; s=0 \longrightarrow c_1=h/\delta'_0 \end{cases}$

$$\therefore \begin{cases} s = h(1 - \dfrac{\delta}{\delta_0'}) \\ v = -\dfrac{h}{\delta_0'}\omega \qquad \delta \in [0, \delta_0'] \\ a = 0 \end{cases}$$

★等速运动规律运动特性

✓从动件在运动起始和终止点存在刚性冲击

✓适用于低速轻载场合

1.2 n=2 等加速等减速运动规律

运动方程式一般表达式：

$$s = C_0 + C_1\,\delta + C_2\delta^2$$

$$v = ds/dt = C_1\omega + 2C_2\,\omega\,\delta$$

$$a_2 = dv/dt = 2C_2\,\omega$$ 等加速运动规律

等加速等减速运动规律亦称为抛物线运动规律

注意：

为保证凸轮机构运动平稳性，常使推杆在一个行程h中的前半段作等加速运动，后半段作等减速运动，且加速度和减速度的绝对值相等。

例如：将推程[0， δ_0]划分为两个区段：

- 加速段[0， $\delta_0/2$]
- 减速段[$\delta_0/2$， δ_0]

➢推程运动方程

$$\begin{cases} s = C_0 + C_1\delta + C_2\delta^2 \\ v = \mathrm{d}s/\mathrm{d}t = C_1\omega + 2C_2\omega\delta \\ a = \mathrm{d}v/\mathrm{d}t = 2C_2\omega^2 \end{cases}$$

推程等加速段边界条件：

运动始点：$\delta=0,\ s=0,\ v=0$ ⟶ $C_0 = C_1 = 0$

运动终点：$\delta = \delta_0/2,\ s=h/2$ ⟶ $C_2 = 2h/\delta_0^2$

加速段运动方程式为：

$$\begin{cases} s = \dfrac{2h}{\delta_0^2}\delta^2 \\ v = \dfrac{4h\omega}{\delta_0^2}\delta \qquad \delta \in \left[0, \dfrac{\delta_0}{2}\right] \\ a = \dfrac{4h\omega^2}{\delta_0^2} \end{cases}$$

推程等减速段边界条件：

运动始点：　$\delta=\delta_0/2$，　$s=h/2$

运动终点：　$\delta=\delta_0$, $s=h$ ，　$v=0$

$\Rightarrow$

$C_0=-h$，　$C_1=4h/\delta_0$

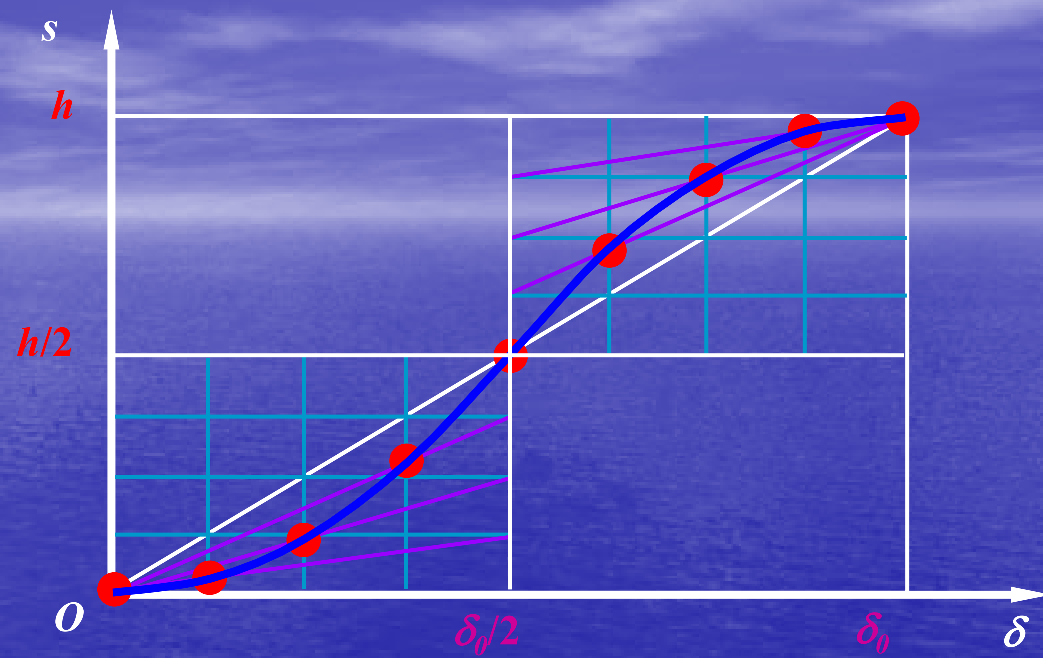
$C_2=-2h/\delta_0^2$

减速段运动方程式为：

$$\begin{cases} s=h-\dfrac{2h}{\delta_0^2}(\delta_0-\delta)^2 \\ v=\dfrac{4h\omega}{\delta_0^2}(\delta_0-\delta) \qquad \delta\in\left[\dfrac{\delta_0}{2},\delta_0\right] \\ a=-\dfrac{4h\omega^2}{\delta_0^2} \end{cases}$$

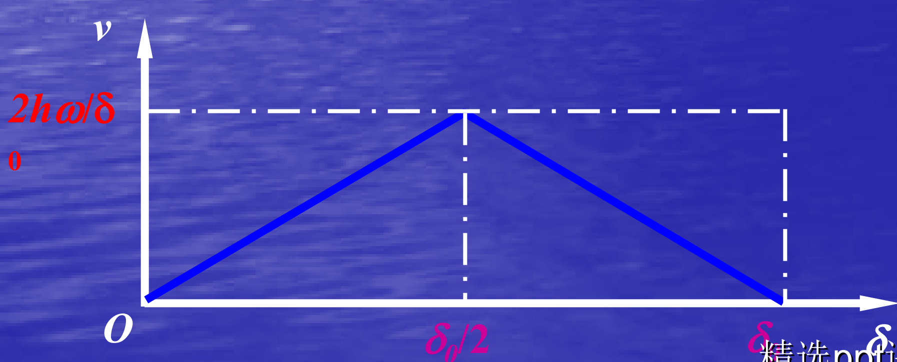
作推程运动线图

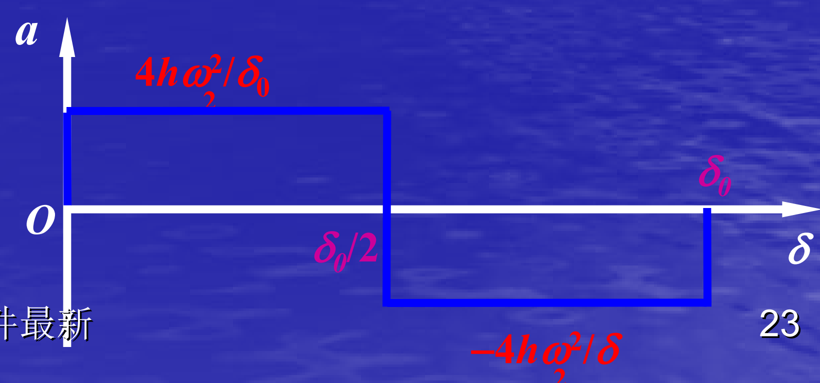
$$\begin{cases} s = \dfrac{2h}{\delta_0^2}\delta^2 \\ v = \dfrac{4h\omega}{\delta_0^2}\delta \\ a = \dfrac{4h\omega^2}{\delta_0^2} \end{cases} \qquad \delta \in \left[0, \frac{\delta_0}{2}\right]$$



s	1	2	3	4
δ	1	4	9	16

作位移曲线　　作速度曲线　　作加速度曲线





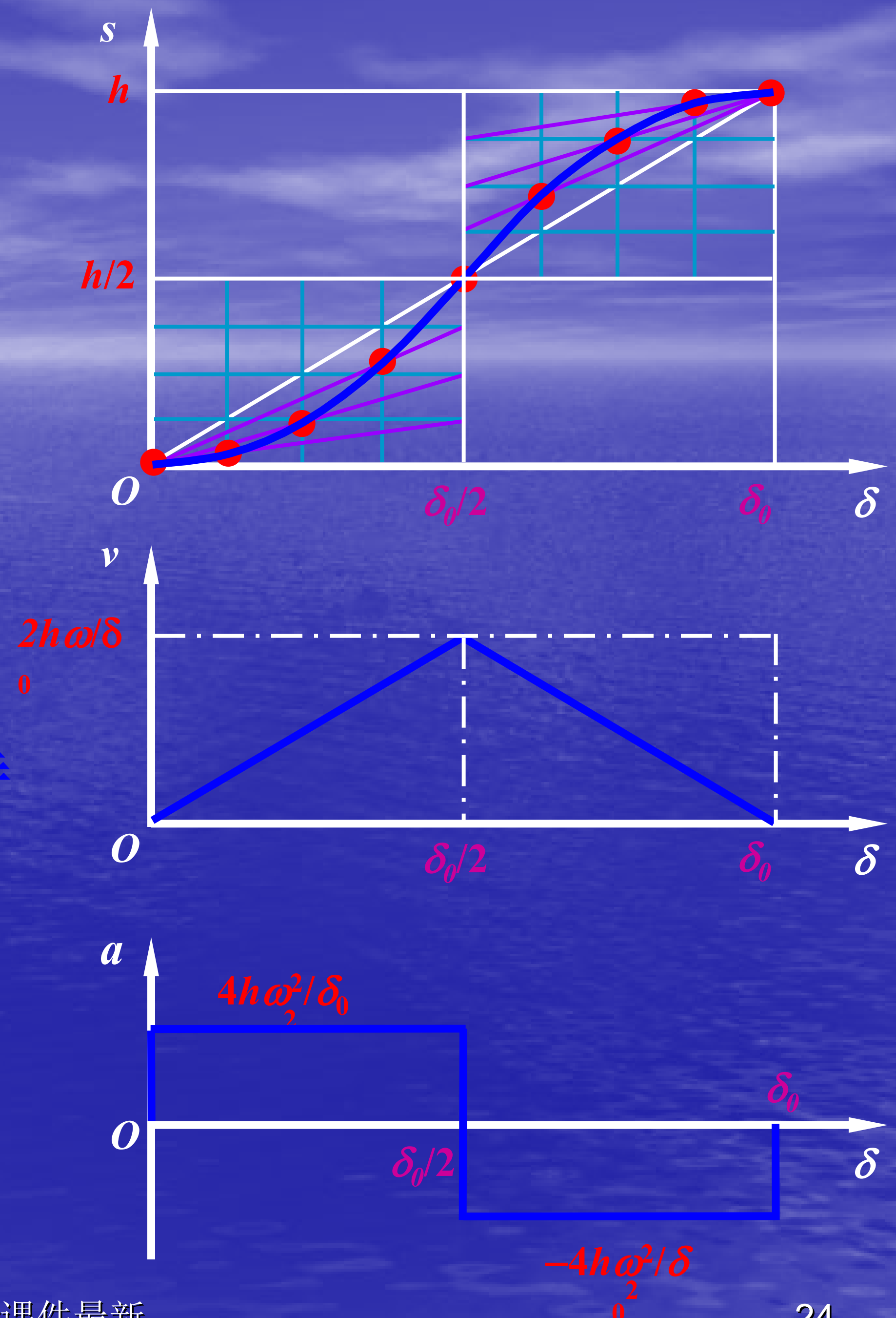
从动件在起点、中点和终点，因加速度有有限值突变而引起推杆惯性力的有限值突变，并由此对凸轮产生有限值冲击

——柔性冲击

★等加速等减速运动规律运动特性：

✓从动件在运动起始、中点和终止点存在柔性冲击

✓适用于中速轻载场合



同理可得回程运动方程：

回程加速段运动方程式：

$$\left.\begin{aligned} s &= h - \frac{2h}{\delta_0'^2}\delta^2 \\ v &= -\frac{4h\omega}{\delta_0'^2}\delta \\ a &= -\frac{4h\omega^2}{\delta_0'^2} \end{aligned}\right\} \quad \delta \in \left[0, \frac{\delta_0'}{2}\right]$$

回程减速段运动方程式：

$$\left.\begin{aligned} s &= \frac{2h}{\delta_0'^2}(\delta_0' - \delta)^2 \\ v &= -\frac{4h\omega}{\delta_0'^2}(\delta_0' - \delta) \\ a &= \frac{4h\omega^2}{\delta_0'^2} \end{aligned}\right\} \quad \delta \in \left[\frac{\delta_0'}{2}, \delta_0'\right]$$

1.3 n=5 五次多项式运动规律

★五次多项式的一般表达式为

$$\left.\begin{aligned} s &= C_0 + C_1\delta + C_2\delta^2 + C_3\delta^3 + C_4\delta^4 + C_5\delta^5 \\ v &= ds/dt = C_1\omega + 2C_2\omega\delta + 3C_3\omega\delta^2 + 4C_4\omega\delta^3 + 5C_5\omega\delta^4 \\ a &= dv/dt = 2C_2\omega^2 + 6C_3\omega^2\delta + 12C_4\omega^2\delta^2 + 20C_5\omega^2\delta^3 \end{aligned}\right\}$$

★推程边界条件

在始点处：$\delta_1=0,\ s_1=0,\ v_1=0,\ a_1=0$;

在终点处：$\delta_2=\delta_0,\ s_2=h,\ v_2=0,\ a_2=0$;

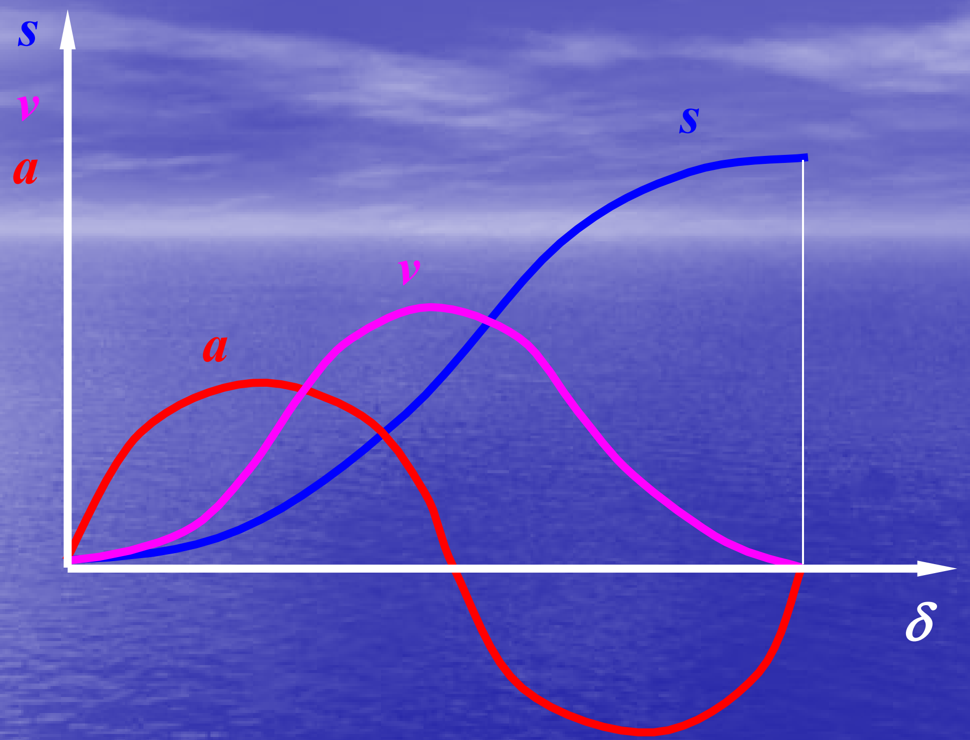
★解得待定系数为

$$C_0 = 0, C_1 = 0, C_2 = 0, C_3 = 10h/\delta_0^3, C_4 = -15h/\delta_0^4, C_5 = 6h/\delta_0^5$$

★位移方程式为

$$s = \frac{10h}{\delta_0^3}\delta^3 - \frac{15h}{\delta_0^4}\delta^4 + \frac{6h}{\delta_0^5}\delta^5$$

★五次多项式运动规律的运动线图



★五次多项式运动规律的运动特性

✓即无刚性冲击也无柔性冲击

✓适用于高速中载场合

2. 三角函数运动规律

2.1 余弦加速度运动规律（简谐运动）

升程加速度为1/2周期余弦波，故设：

$$a=C_1\cos(\pi t/t_0)=C_1\cos(\pi\delta/\delta_0)$$

则：

$$\begin{cases} v=\int a\,dt=C_1\cdot\dfrac{\delta_0}{\pi\omega}\cdot\sin\left(\dfrac{\pi}{\delta_0}\delta\right)+C_2 \\ s=\int v\,dt=-C_1\cdot\dfrac{\delta_0{}^2}{\pi^2\omega^2}\cdot\cos\left(\dfrac{\pi}{\delta_0}\delta\right)+C_2\dfrac{\delta}{\omega}+C_3 \end{cases}$$

t

边界条件：

起点： $\delta=0,\ s=0,\ v=0 \longrightarrow -C_1\dfrac{\delta_0^2}{\pi^2\omega^2}+C_3=0;\ C_2=0$

终点： $\delta=\delta_0,\ s=h \longrightarrow C_1\dfrac{\delta_0^2}{\pi^2\omega^2}+C_3=h$

$$\therefore\quad C_3=\frac{h}{2};\quad C_1=\frac{h}{2}\left(\frac{\pi\omega}{\delta_0}\right)^2;\quad C_2=0$$

升程运动规律：

$$\begin{cases} s = \dfrac{h}{2}\left[1 - \cos\left(\dfrac{\pi}{\delta_0}\delta\right)\right] \\ v = \dfrac{\pi\omega h}{2\delta_0}\cdot\sin\left(\dfrac{\pi}{\delta_0}\delta\right) \\ a = \dfrac{\pi^2\omega^2 h}{2\delta_0^2}\cdot\cos\left(\dfrac{\pi}{\delta_0}\delta\right) \end{cases} \qquad \delta \in [0, \delta_0]$$

同理，得回程运动规律：

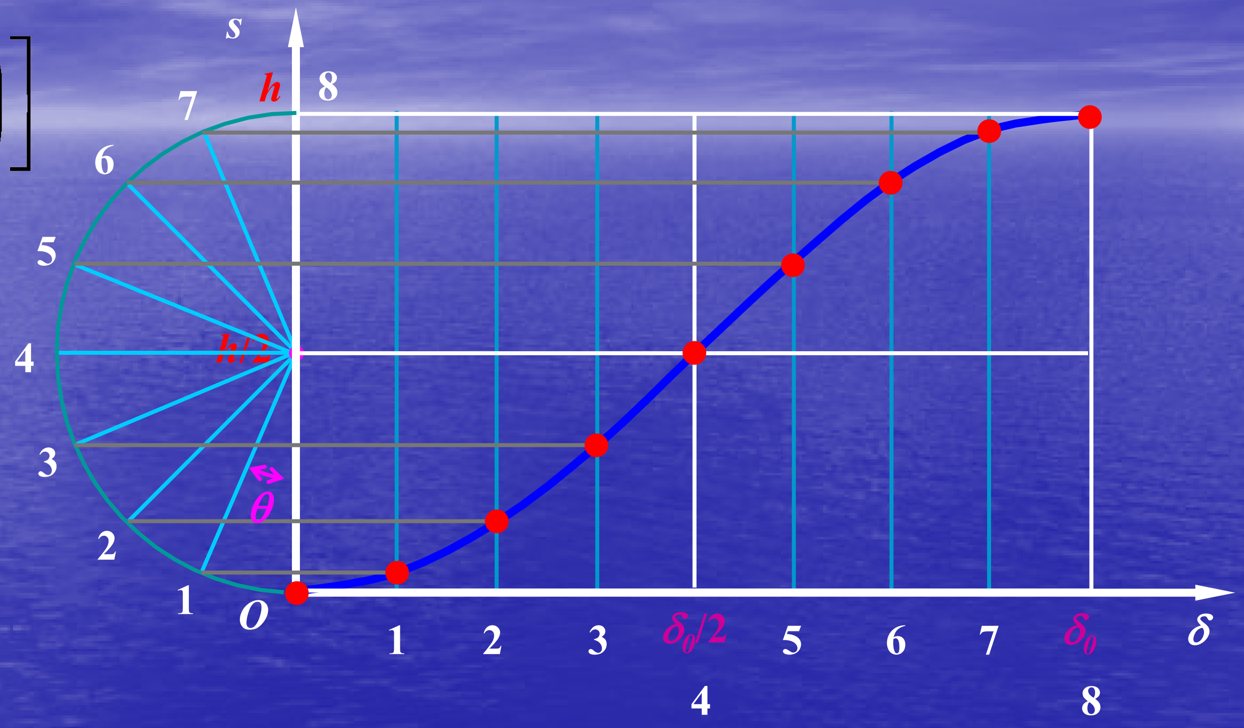
$$\begin{cases} s = \dfrac{h}{2}\left[1 + \cos\left(\dfrac{\pi}{\delta_0'}\delta\right)\right] \\ v = -\dfrac{\pi\omega h}{2\delta_0'}\cdot\sin\left(\dfrac{\pi}{\delta_0'}\delta\right) \\ a = \dfrac{\pi^2\omega^2 h}{2\delta_0'^2}\cdot\cos\left(\dfrac{\pi}{\delta_0'}\delta\right) \end{cases} \qquad \delta \in [0, \delta_0']$$

作推程运动线图

推程运动线图

位移线图

$$s = \frac{h}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{\delta_0}\delta\right)\right]$$



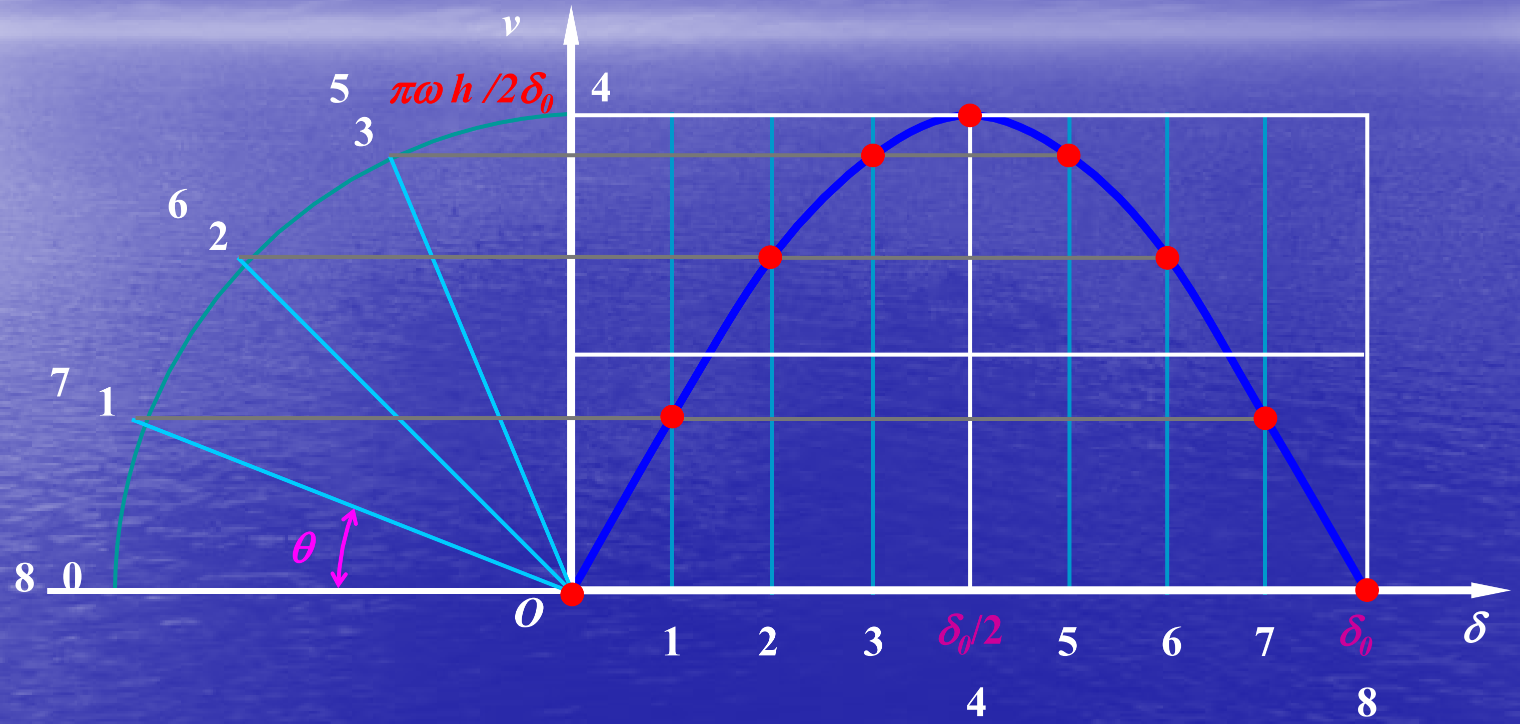
♈ $\pi : \delta_0 = \theta : \delta$

♉ $\theta = (\pi / \delta_0)\,\delta$

$$s = \frac{h}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{\delta_0}\delta\right)\right] \longleftrightarrow s = \frac{h}{2}(1 - \cos\theta)$$

速度线图

$$v = \frac{\pi\omega h}{2\delta_0}\cdot\sin\left(\frac{\pi}{\delta_0}\delta\right)$$



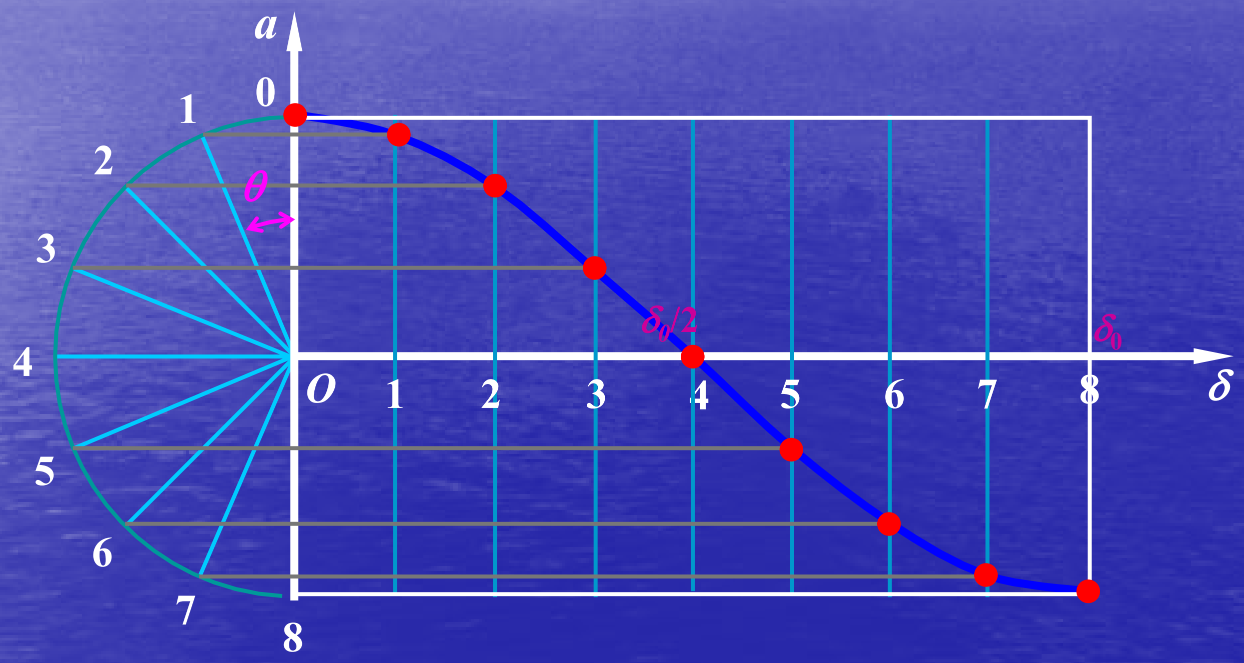
$\theta=(\pi/\delta_0)\delta$

$$v = \frac{\pi\omega h}{2\delta_0}\cdot\sin\left(\frac{\pi}{\delta_0}\delta\right) \Longleftrightarrow v = R\cdot\sin\theta$$

加速度线图

$$a = \frac{\pi^2\omega^2 h}{2\delta_0^2}\cdot\cos\left(\frac{\pi}{\delta_0}\delta\right)$$

$R=\pi^2\omega^2 h/2\delta_0^2$



$\theta=(\pi/\delta_0)\,\delta$

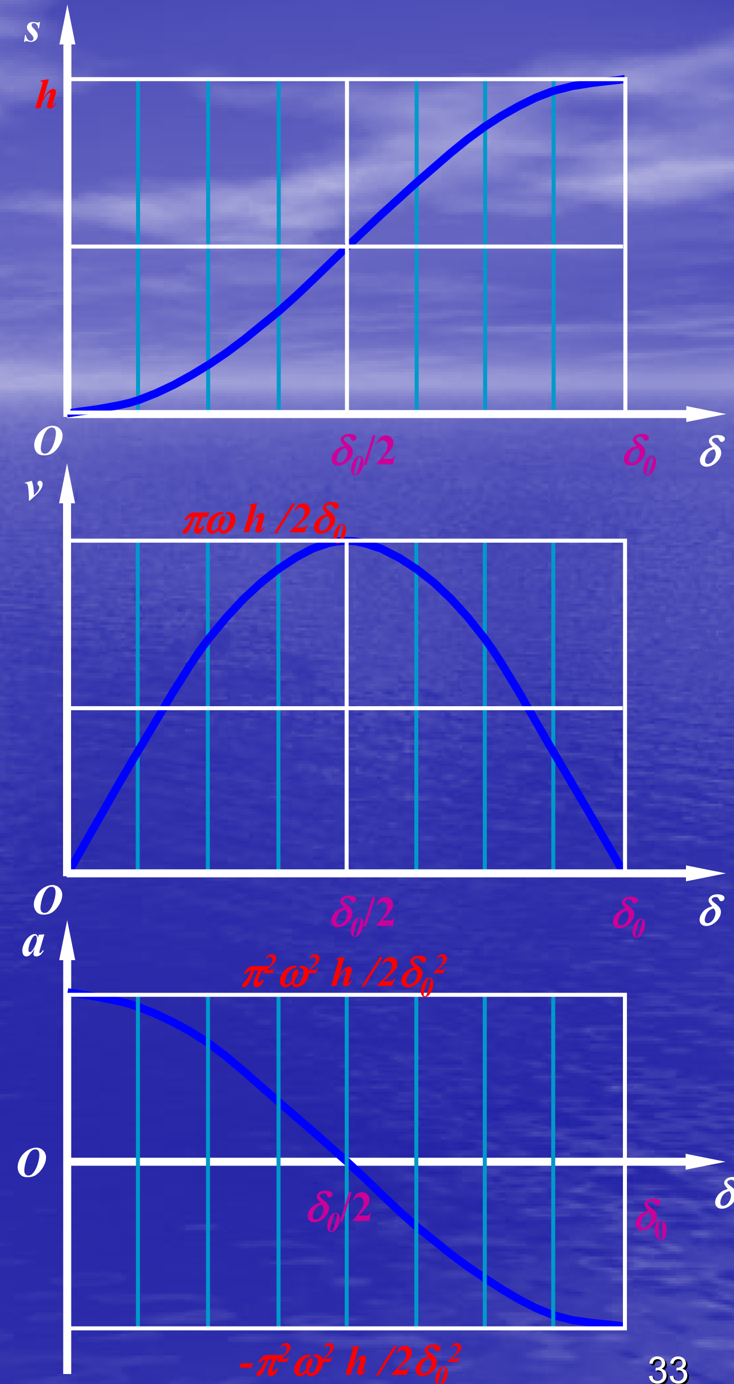
$$a = \frac{\pi^2\omega^2 h}{2\delta_0^2}\cdot\cos\left(\frac{\pi}{\delta_0}\delta\right) \Longleftrightarrow a = R\cdot\cos\theta$$

余弦加速度运动规律的运动特性：

★ 从动件加速度在起点和终点存在有限值突变，故有柔性冲击

★ 若从动件作无停歇的升—降—升连续往复运动，加速度曲线变为连续曲线，可以避免柔性冲击

★ 适用于中速中载场合



2.2 正弦加速度运动规律(1周期)（Cycloidal motion 摆线运动）

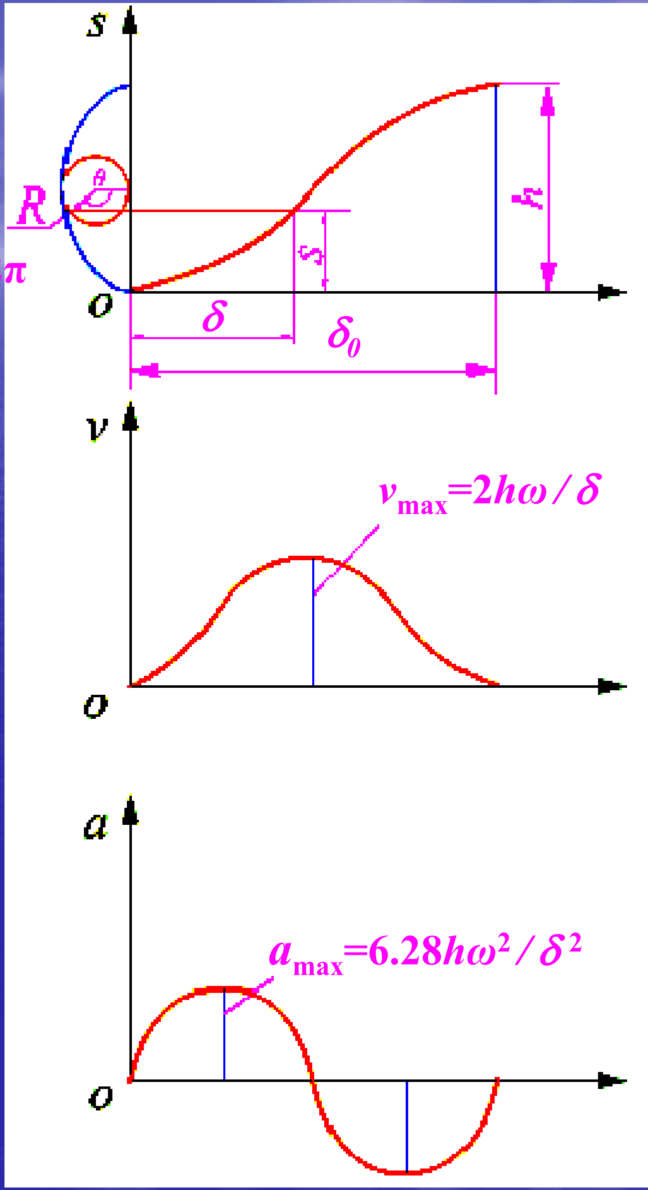
推程运动方程:

$$\begin{cases} s = h\left[\dfrac{\delta}{\delta_0} - \dfrac{1}{2\pi}\sin\left(2\pi\dfrac{\delta}{\delta_0}\right)\right] \\ v = \dfrac{\omega h}{\delta_0}\left[1-\cos\left(2\pi\dfrac{\delta}{\delta_0}\right)\right] \qquad \delta \in [0, \delta_0] \\ a = \dfrac{2\pi\omega^2 h}{\delta_0^2}\sin\left(2\pi\dfrac{\delta}{\delta_0}\right) \end{cases}$$

回程运动方程:

$$\begin{cases} s = h\left[1 - \dfrac{\delta}{\delta_0'} + \dfrac{1}{2\pi}\sin\left(\dfrac{2\pi}{\delta_0'}\delta\right)\right] \\ v = \dfrac{h\omega}{\delta_0'}\left[\cos\left(\dfrac{2\pi}{\delta_0'}\delta\right) - 1\right] \qquad \delta \in [0, \delta_0'] \\ a = -\dfrac{2\pi h}{\delta_0'^2}\omega^2\sin\left(\dfrac{2\pi}{\delta_0'}\delta\right) \end{cases}$$

$R=h/2\pi$



推程段的运动线图