3.1 概　述

3.1.1 凸轮机构的应用

凸轮机构是最简单的高副机构之一，它能将主动件的连续等速运动变为从动件的有规律往复运动，在自动机械、半自动机械中有广泛的应用。

图3-1所示为内燃机配汽凸轮机构。凸轮1以等角速度回转时，其轮廓驱动从动件2按预期的往复运动规律启闭阀门。

图3-2所示为绕线机中用于排线的凸轮机构。当绕线轴3快速转动时，绕线轴上的齿轮带动凸轮1缓慢地转动，通过凸轮轮廓与尖顶A之间的作用，驱使从动件2往复摆动，从而使线均匀地绕在绕线轴上。

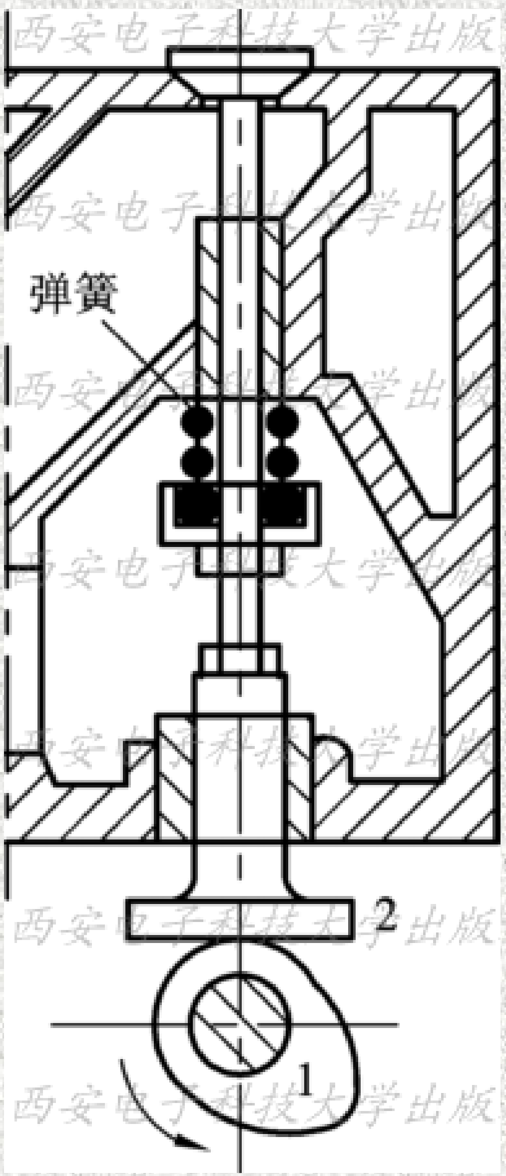

图3-1 内燃机配汽机构

图3-3所示为驱动动力头在机架上移动的凸轮机构。圆柱凸轮1与动力头连接在一起，它们可以在机架3上作往复移动。滚子2放在圆柱凸轮的凹槽中，其轴固定在机架3上。

凸轮转动时，由于滚子2的轴是固定在机架上的，故凸轮转动时带动动力头在机架3上作往复移动，以实现对工件的钻削。动力头的快进、等速工进、快速退回、静止等动作均取决于凸轮上凹槽的曲线形状。

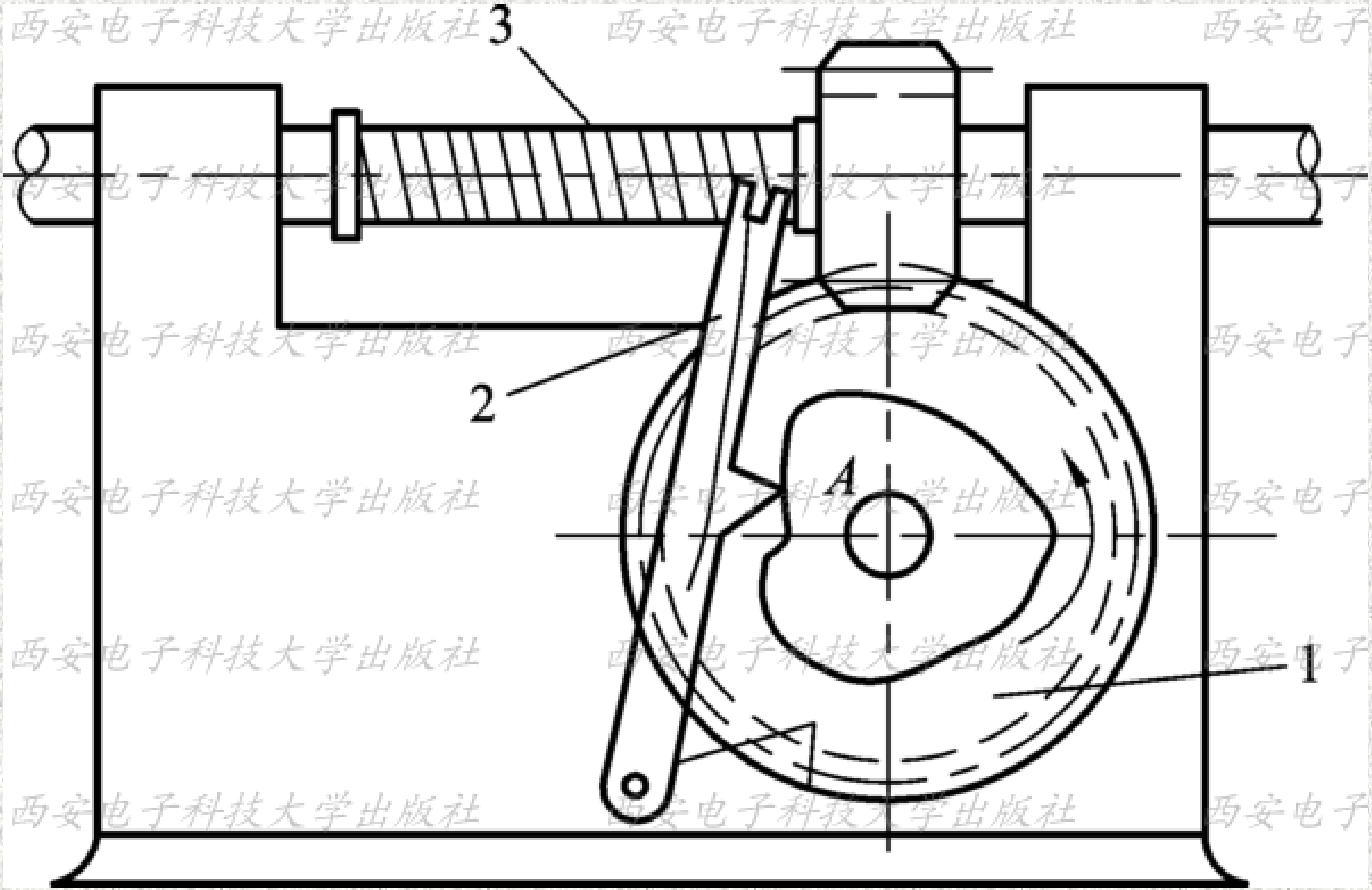

图3-2 绕线机中的排线凸轮机构

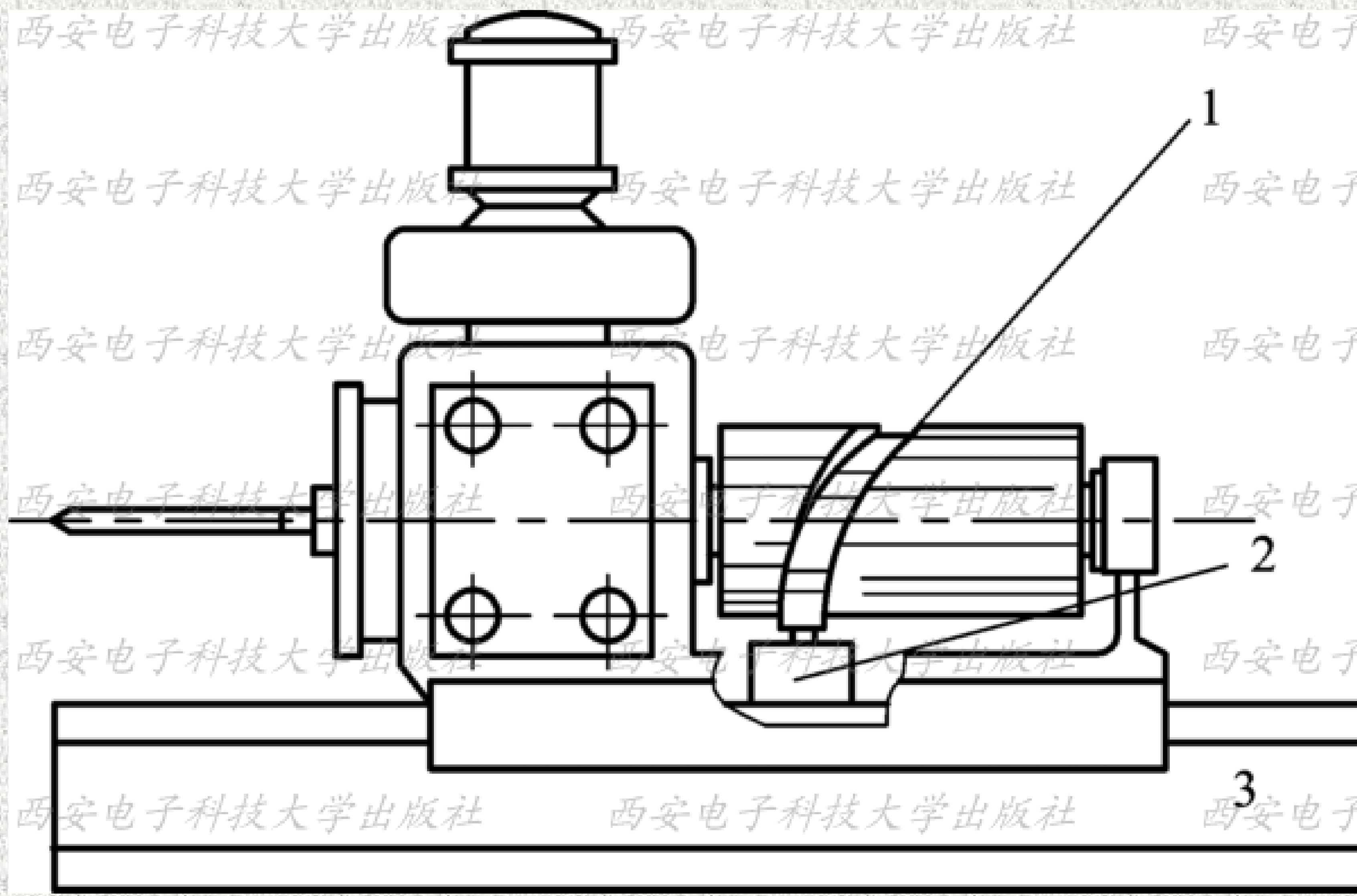

图3-3 动力头用凸轮机构

图3-4所示为应用于冲床上的凸轮机构。凸轮1固定在冲头上，当冲头上下往复运动时，凸轮驱使从动件2以一定的规律作水平往复运动，从而带动机械手装卸工件。

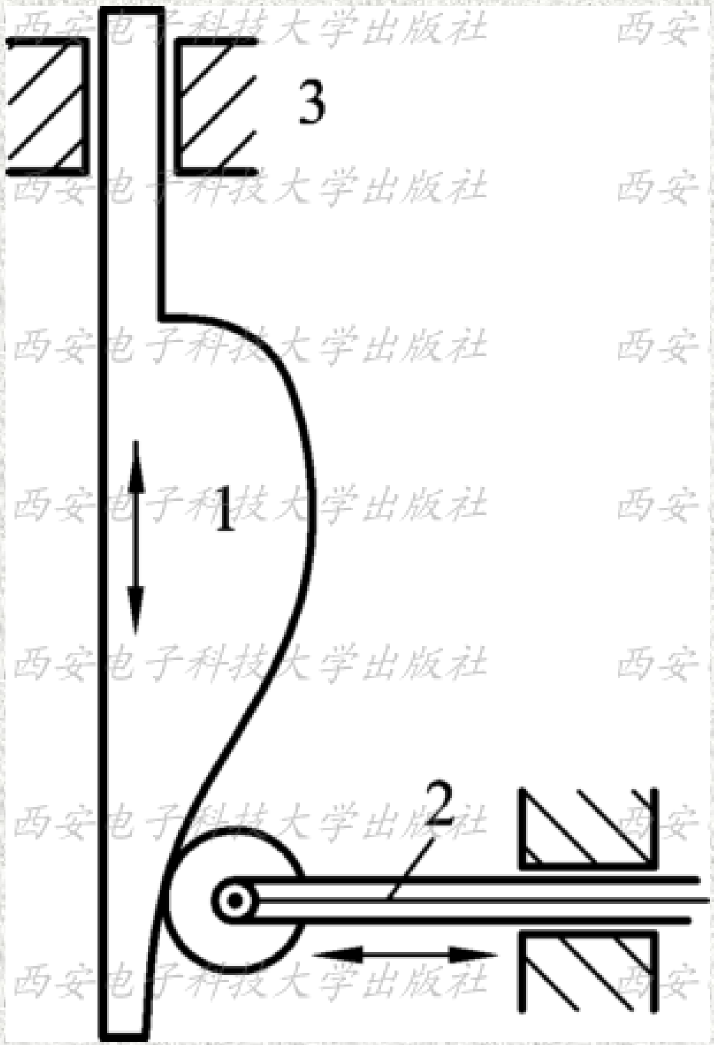

图3-4 冲床用凸轮机构

3.1.2 凸轮机构的分类

1. 按凸轮的形状分类

(1) 盘形凸轮：它是凸轮的最基本形式。这种凸轮是一个绕固定轴转动并且具有向径变化的盘形零件，如图3-1和图3-2所示。

(2) 移动凸轮：当盘形凸轮的回转中心趋于无穷远时，凸轮相对机架作直线运动，这种凸轮称为移动凸轮，如图3-4所示。

(3) 圆柱凸轮：将移动凸轮卷成圆柱体即成为圆柱凸轮，如图3-3所示。

2． 按从动件的形状分类

(1) 尖顶从动件(见图3-2)：结构最简单，能与任意复杂的凸轮轮廓保持接触，以实现从动件的任意运动规律，但因尖顶易磨损，故仅适用于作用力很小的低速凸轮机构。

(2) 滚子从动件(见图3-4)：从动件的一端装有可自由转动的滚子，滚子与凸轮之间为滚动摩擦，摩擦阻力和磨损都小，可以承受较大的载荷，因此应用最普遍。

(3) 平底从动件(见图3-1)：从动件的一端为一平面，直接与凸轮轮廓相接触。若不考虑摩擦，凸轮对从动件的作用力始终垂直于端平面，传动效率高，且接触面间容易形成油膜，利于润滑，故常用于高速凸轮机构。它的缺点是不能用于凸轮轮廓有凹曲线的凸轮机构中。

3. 按从动件的运动形式分类

(1) 移动从动件：从动件相对机架作往复直线运动(见图3-1、图3-3、图3-4)。

(2) 摆动从动件：从动件相对机架作往复摆动(见图3-2)。

3.1.3 凸轮机构的特点

从前面的应用例子可以看出，凸轮机构主要由凸轮1、从动件2和机架3三个基本构件组成，从动件与凸轮轮廓为高副接触。凸轮机构的优点是：只需设计适当的凸轮轮廓，便可使从动件得到所需的运动规律，并且结构简单、紧凑、设计方便。它的缺点是：凸轮轮廓与从动件之间为点接触或线接触，易磨损，所以通常多用于传力不大的控制机构。

3.2 从动件的常用运动规律

从动件的运动规律是指从动件的位移s_2、速度v_2和加速度a_2随时间t变化的规律。当凸轮作匀速转动时，其转角δ_1与时间t成正比($\delta_1 = \omega_1 t$)，所以从动件运动规律也可用从动件的运动参数随凸轮转角的变化规律来表示，即$s_2 = s(\delta_1)$，$v_2 = v(\delta_1)$，$a_2 = a(\delta_1)$。将这些运动规律图形化，即得到从动件运动线图。

现以图3-5所示偏置尖顶直动从动件盘形凸轮机构为例，说明凸轮与从动件的运动关系。

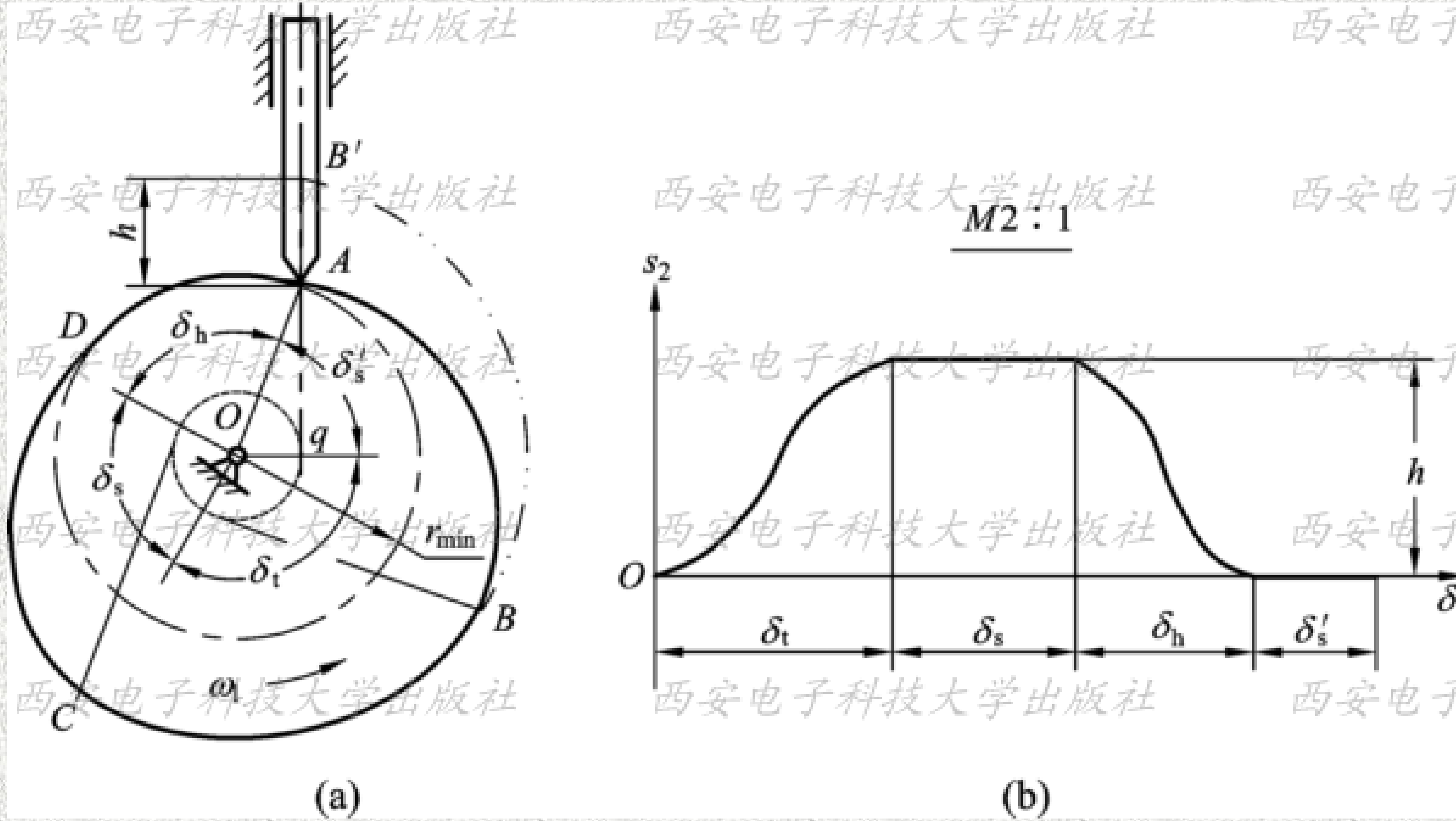

图3-5 偏置尖顶直动从动件盘形凸轮机构

(a) 机构； (b) 从动件位移曲线

如图3-5(a)所示，以凸轮转动中心O为圆心，以Oq为半径的圆称为偏距圆，从动件在运动的过程中，其运动方向将始终保持和偏距圆相切。以凸轮轮廓曲线的最小向径$r_{min}=OA$为半径所作的圆称为凸轮的基圆，r_{min}称为基圆半径。点A为凸轮轮廓曲线的起始点。当凸轮与从动件在A点接触时，从动件处于距凸轮转动中心O最近的位置。当凸轮以匀角速ω_1逆时针转动δ_t时，凸轮轮廓AB段的向径逐渐增加，推动从动件以一定的运动规律逐渐到达距凸轮轴心O最远的位置B'，这个过程称为推程。在这个过程中， 从动件移动的距离h称为升程，对应的凸轮转角δ_t称为推程运动角。

当凸轮继续转动δ_s时，凸轮轮廓BC段向径不变，此时从动件处于最远位置停留不动，相应的凸轮转角δ_s称为远休止角。当凸轮继续转动δ_h时，凸轮轮廓CD段的向径逐渐减小，从动件在重力或弹簧力的作用下，以一定的运动规律回到起始位置，这个过程称为回程，对应的凸轮转角δ_h称为回程运动角。当凸轮继续转动 时δ_s' 凸轮轮廓DA段的向径不变，此时从动件在最近位置处停留不动，相应的凸轮转角 δ_s' 称为近休止角。当凸轮再继续转动时，从动件重复上述运动循环。如果以直角坐标系的纵坐标代表从动件的位移s_2，横坐标代表凸轮的转角δ_1，则可以画出从动件位移s_2与凸轮转角δ_1之间的关系如图3-5(b)所示，简称为从动件位移曲线。

3.2.1 等速运动规律

从动件速度为定值的运动规律称为等速运动规律。当凸轮以等角速度ω_1转动时，从动件在推程或回程中的速度为常数，如图3-6(b)所示。

推程时，设推程运动角为δ_t，从动件升程为h，相应的推程时间为T。由于从动件的速度为常数$v_2 = C_1$，故位移方程为

$$s_2 = \int v_2 \mathrm{d}t = C_1 t + C_2 \tag{a}$$

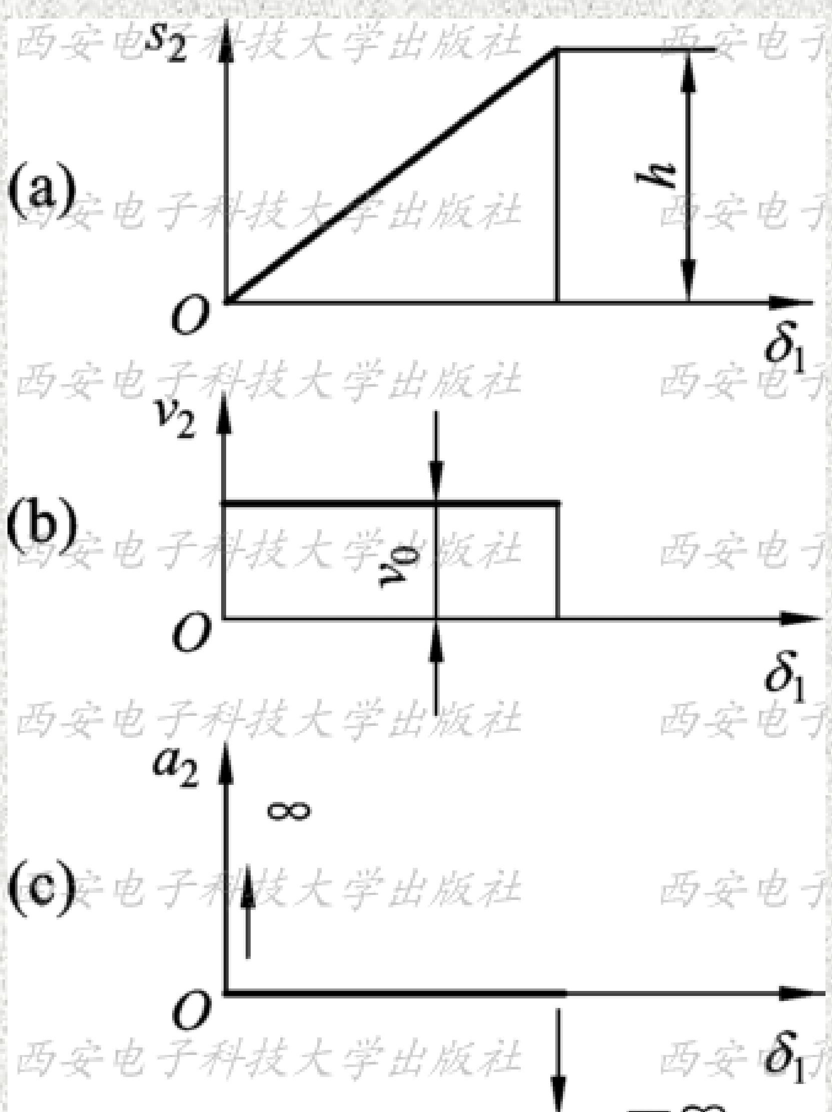

图3-6 等速运动规律

(a) s_2—δ_1曲线； (b) v_2—δ_1曲线； (c) a_2—δ_1曲线

加速度方程为

$$a_2 = \frac{\mathrm{d}v_2}{\mathrm{d}t} = 0$$

代入运动初始条件t＝0，s_2＝0；　t＝T，s_2＝h，由式(a)得

$$C_2 = 0, C_1 = \frac{h}{T}$$

因此有

$$a_2 = 0, v_2 = \frac{h}{T}, s_2 = h\frac{t}{T} \tag{3-1}$$

因凸轮转角$\delta_1=\omega_1 t$，$\delta_t=\omega_1 T$，将这两个关系代入式(3-1)，则得以δ_1表示的关系式

$$a_2=0, v_2=\frac{h}{\delta_t}\omega_1, s_2=\frac{h}{\delta_t}\delta_1 \tag{3-2a}$$

回程时，从动件的速度为负值。回程终了，凸轮转角为δ_h，$s_2=0$。同理可推出从动件的运动方程为

$$a_2=0, v_2=-\frac{h}{\delta_h}\omega_1, s_2=h\left(1-\frac{\delta_1}{\delta_h}\right) \tag{3-2b}$$

由图3-6(b)、(c)可知，从动件在推程开始和终止的瞬时，速度有突变，其加速度在理论上为无穷大，从动件将受到由无穷大的惯性力引起的冲击。这种从动件在某瞬时速度突变，其加速度和惯性力在理论上趋于无穷大时所引起的冲击，称为刚性冲击。因此，等速运动规律只适用于低速轻载的凸轮机构。

3.2.2 等加速等减速运动规律

从动件在行程的前半段为等加速，而后半段为等减速的运动规律，称为等加速等减速运动规律。如图3-7所示，从动件在升程h中，先作等加速运动，后作等减速运动直至停止。加速度和减速度的绝对值相等。由于从动件等加速段的初速度和等减速段的末速度为零，故两段升程所需的时间必相等，即凸轮转角均为$\delta_t/2$； 两段升程也必相等，即均为$h/2$。

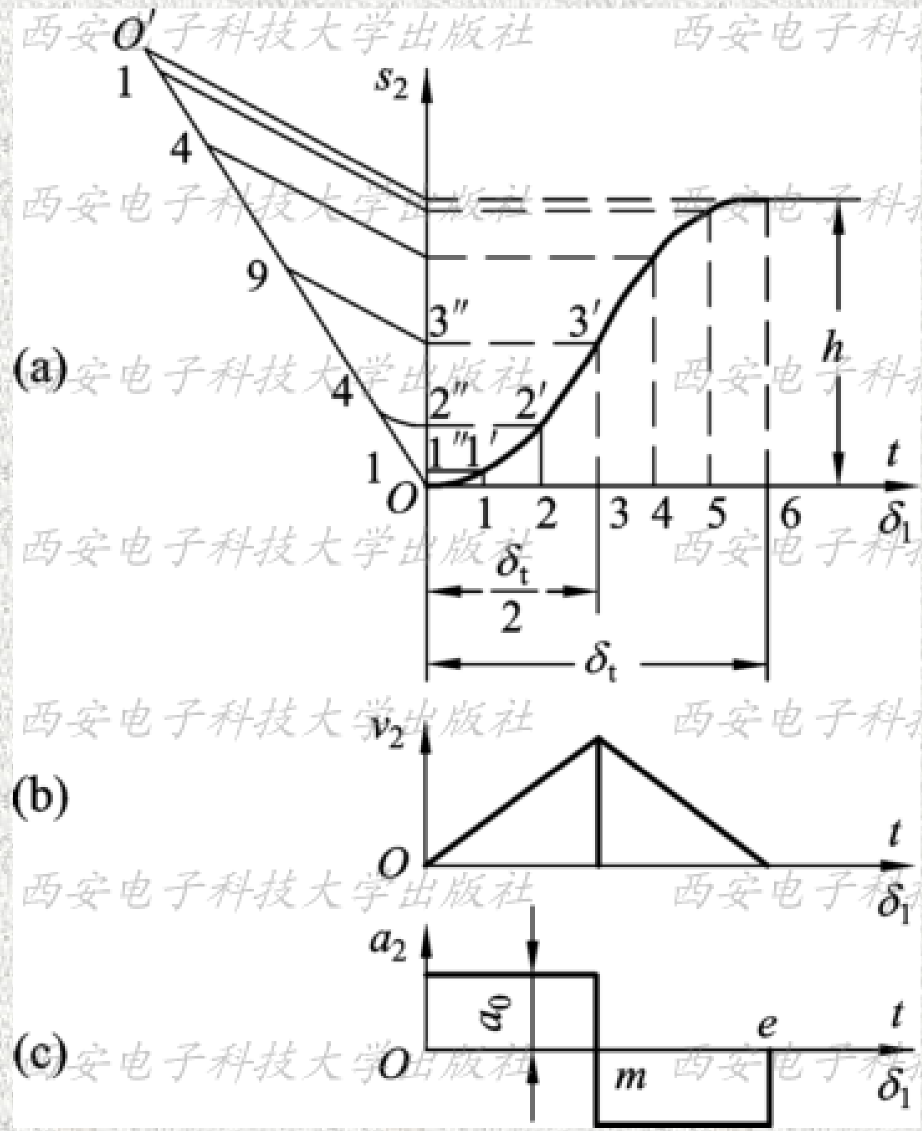

图3-7 等加速等减速运动规律
(a) 位移线图； (b) 速度线图； (c) 加速度线图

等加速段的运动时间为$T/2$(即$\delta_t/2\omega_1$)，对应的凸轮转角为$\delta_t/2$。由于是等加速运动，因此$s_2=a_0t_2/2$。利用上述分析结果可得

$$a_2 = a_0 = \frac{4h}{T^2} = 4h\left(\frac{\omega_1}{\delta_t}\right)^2, \frac{h}{2} = \frac{1}{2}a_0\left(\frac{T}{2}\right)^2 \tag{3-3}$$

将上式积分两次，并代入初始条件，由δ_1＝0时，v_2＝0，s_2＝0，可推出从动件前半行程作等加速运动时的运动方程如下

$$a_2=\frac{4h\omega_1^2}{\delta_t^2},v_2=\frac{4h\omega_1}{\delta_t^2}\delta_1,s_2=\frac{2h}{\delta_t^2}\delta_1^2 \qquad (3\text{-}4a)$$

推程的后半行程从动件作等减速运动，此时凸轮的转角是由$\delta_t/2$开始到δ_t为止。同理可得其减速运动方程为

$$a_2=\frac{4h\omega_1^2}{\delta_t^2},v_2=\frac{4h\omega_1}{\delta_t^2}(\delta_t-\delta_1),s_2=h-\frac{2h}{\delta_t^2}(\delta_t-\delta_1)^2 \qquad (3\text{-}4b)$$

图3-7(a)为按公式作出的等加速等减速位移线图。该图的位移曲线由一凹一凸两段抛物线连接而成。等加速部分的抛物线可按下述方法画出：在横坐标轴上将线段分成若干等份(图中为3等份)，得1、2、3各点，过这些点作横轴的垂线；再过点O作任意的斜线OO'，在其上以适当的单位长度自点O按1∶4∶9量取对应长度，得1、4、9各点；连接直线9-3″，并分别过4、1两点作其平行线4-2″和1-1″分别与s_2轴交于2″、1″点；最后由1″、2″、3″点分别向过1、2、3各点的垂线投影，得1′、2′、3′点，将这些点连接成光滑的曲线，即为等加速段的抛物线。如法炮制可得等减速度段的抛物线。

由加速度线图3-7(c)可知，从动件在升程始末以及由等加速过渡到等减速的瞬时(即O、m、e三处)，加速度出现有限值的突然变化，这将产生有限惯性力的突变，从而引起冲击。

这种从动件在瞬时加速度发生有限值突变时所引起的冲击称为柔性冲击。所以等加速等减速运动规律不适用于高速机构，仅用于中低速凸轮机构。

3.2.3 简谐运动规律

点在圆周上做匀速运动时，它在这个圆的直径上的投影所构成的运动称为简谐运动，如图3-8所示。因这种运动规律的加速度为余弦函数，故又称为余弦加速度运动规律。

简谐运动规律位移线图(见图3-8(a))的作法是：把从动件的行程h作为直径画半圆，将此半圆分成若干等份(图示为6等份)，得1″，2″，3″，4″，…点。再把凸轮运动角也分成相应的等份，并作垂线11′，22′，33′，44′，…，然后将圆周上的等分点投影到相应的垂直线上得1′，2′，3′，4′，…点。用光滑的曲线连接这些点，即得到从动件的位移线图。

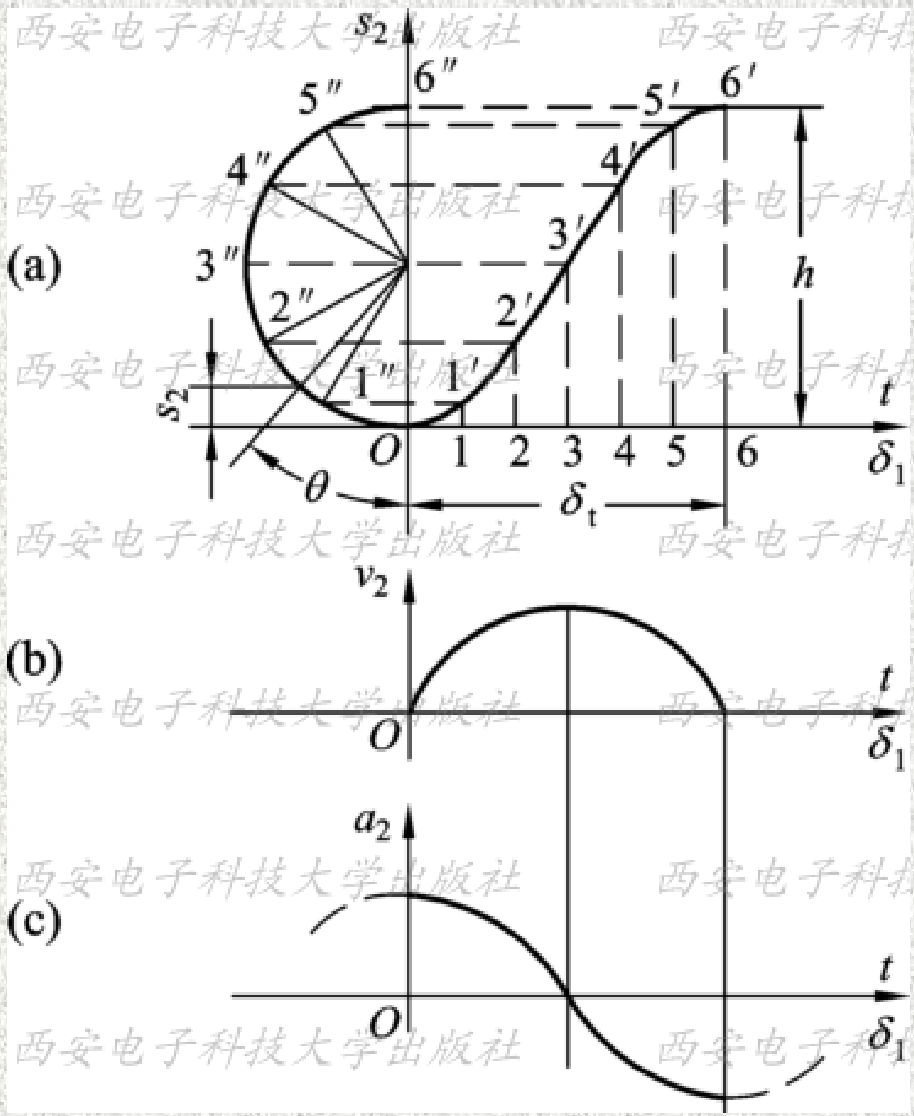

图3-8 简谐运动规律

(a) 位移线图； (b) 速度线图； (c) 加速度线图

简谐运动规律的从动件的位移方程为

$$s_2 = \frac{h}{2}(1 - \cos\theta) \tag{a}$$

将式(a)求导两次，由图可知当θ＝π时，δ_1＝δ_t，而凸轮作匀速转动，故θ＝πδ_1/δ_t，由此可导出从动件推程作简谐运动的运动方程为

$$s_2 = \frac{h}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{\delta_t} - \delta_1\right)\right]$$

$$v_2 = \frac{\pi h \omega_1}{2\delta_t}\sin\left(\frac{\pi}{\delta_t} - \delta_1\right)$$

$$a_2 = \frac{\pi^2 h \omega_1^2}{2\delta_t^2}\cos\left(\frac{\pi}{\delta_t} - \delta_1\right) \tag{3-5a}$$

同理可求得从动件作简谐运动的回程运动方程为

$$s_2 = \frac{h}{2}\left[1-\cos\left(\frac{\pi}{\delta_h}-\delta_1\right)\right]$$

$$v_2 = \frac{\pi h\omega_1}{2\delta_h}\sin\left(\frac{\pi}{\delta_h}-\delta_1\right)$$

$$a_2 = \frac{\pi^2 h\omega_1^2}{2\delta_h^2}\cos\left(\frac{\pi}{\delta_h}-\delta_1\right)$$

(3-5b)

由加速度线图(见图3-8(c))可见，这种运动规律的从动件只是在运动开始和结束时存在柔性冲击，因此这是一种较好的运动规律。

除上述运动规律外，为使加速度曲线保持连续而避免冲击，还可应用正弦加速度、高次多项式曲线等，但由于这些曲线也存在一些缺点，因此实际效果并不是太好。工程上更多是采用将前述运动规律组合使用的方法，详细内容可参见有关书籍。

3.3 凸轮轮廓设计的图解法

3.3.1 反转法的原理

凸轮机构工作时，凸轮和从动件都是运动的。用图解法绘制凸轮轮廓曲线时，却需要凸轮与图面相对静止。为此，图解设计常用反转法，其原理如下：

图3-9所示为一对心直动尖顶从动件盘形凸轮机构。设凸轮的轮廓已按预定的从动件运动规律设计。当凸轮以角速度ω_1绕其转动中心O转动时，从动件的尖顶沿凸轮轮廓曲线相对其导路(机架)按预定的运动规律移动。现设想给整个机构加上一个公共角速度-ω_1，机构各构件间的相对运动不会改变。

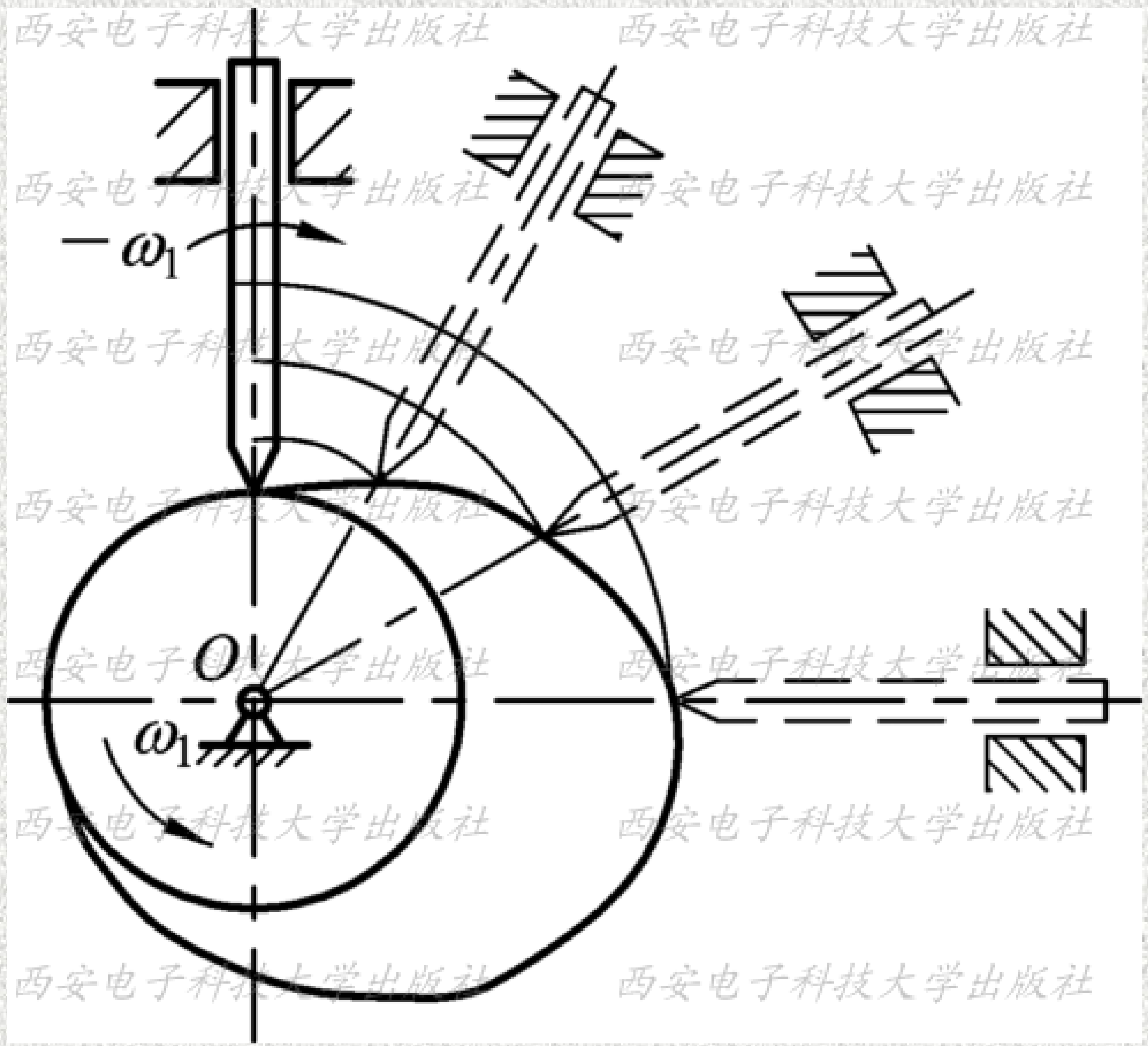

图3-9 反转法原理

但这样一来凸轮就不再转动，而机架和从动件将以角速度-ω_1绕凸轮的转动中心O反转，同时从动件保持相对于机架的往复移动。由于从动件尖顶始终与凸轮轮廓相接触，因此反转后尖顶的运动轨迹就是凸轮的轮廓，绘制凸轮廓线就是绘制尖顶的运动轨迹。这种以凸轮作参考系，按相对运动原理设计凸轮轮廓曲线的方法称为反转法。

3.3.2 直动从动件盘形凸轮轮廓曲线设计

通常，已知条件为从动件位移的运动规律和凸轮转动方向。偏距e、基圆和滚子半径则需根据设计的具体情况确定。

作图步骤如下(参见图3-10)：

(1) 根据已知的从动件运动规律作出从动件的位移线图，并将横坐标用若干点等分分段。

(2) 任选一点为圆心，以合适的偏距e为半径作偏距圆，再以合适的基圆半径r_{min}作出基圆。基圆与导路的交点A_0便是从动件尖顶的起始位置。