

第十三章凸輪 學習目標

- 1.學生能瞭解凸輪的定義及各部位名稱。
- 2.學生能瞭解凸輪的種類及用途。
- 3.學生能瞭解凸輪及從動件的接觸方法。
- 4.學生能瞭解凸輪及從動件的運動方式。
- 5.學生能瞭解凸輪的周緣設計。
- 6.學生能具有應用凸輪的能力。

13-1、凸輪的用途

- 凸輪的定義：凡具有曲線周緣或溝槽之主動輪，以等速運動，直接接觸傳給從動件，使從動件得到預期的運動方式，則稱此輪為凸輪。
- 機械中各運動機件均具有特定之運動，可能是連續運動、不連續運動，等速、不等速或間歇運動。若使用連桿組或其他機構傳達這些運動，有時不但裝置複雜且不準確，如採用凸輪傳動則可使從動件得到可預期之不規則運動，且較為簡捷而準確。

接上頁

凸輪可將主動件的連續等速運動，轉換成從動件可預期的往復直線運動、擺動、或者更複雜的運動，因此凡需要拘束某特定之運動，皆可採用凸輪傳動。故在許多自動機械中，凸輪成爲不可或缺之機件，例如內燃機、**CNC**銑床、印刷機、紡織機及縫紉機等之傳動機構中，皆應用凸輪來傳動。

13-2、凸輪的種類

凸輪的種類很多，依形狀之不同，可分為：

13-2-1 平面凸輪 (plane cam)

- 一、平板凸輪
- 二、面凸輪 (face cam)
- 三、反凸輪 (inverse cam)
- 四、平移凸輪 (translation cam)

13-2-2 立體凸輪 (solid cam)

- 一、圓柱形凸輪 (cylindrical cam)
- 二、圓錐形凸輪 (conical cam)
- 三、球形凸輪 (spherical cam)
- 四、端面凸輪 (end cam)
- 五、斜盤凸輪 (swash plate cam)

13-2-1 平面凸輪

構成凸輪周緣的曲線為同一平面的徑向曲線，且從動件運動方向與凸輪軸垂直的凸輪稱為平面凸輪。

一、平板凸輪

如圖13-1及圖13-2所示，為平板凸輪，平板凸輪為具有凸輪輪廓曲線的平板。其從動件運動方向與凸輪軸垂直，從動件之位置常位於凸輪軸之上方，有時也可偏離凸輪之旋轉中心。平板凸輪為應用最普遍之凸輪。

平板凸輪有二種分類方式，分述如下：

1. 依凸輪形狀可分為：(a)切線凸輪 (b)偏心凸輪 (c)三角凸輪凸輪等，如圖13-1所示。
2. 依從動件之形狀可分為：(d)平板凸輪 (e)菌形凸輪 (f)滾子凸輪 (g)擺動凸輪等，如圖13-2所示。

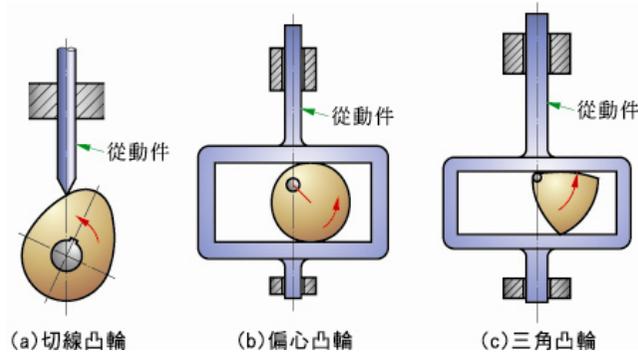


圖13-1 平板凸輪

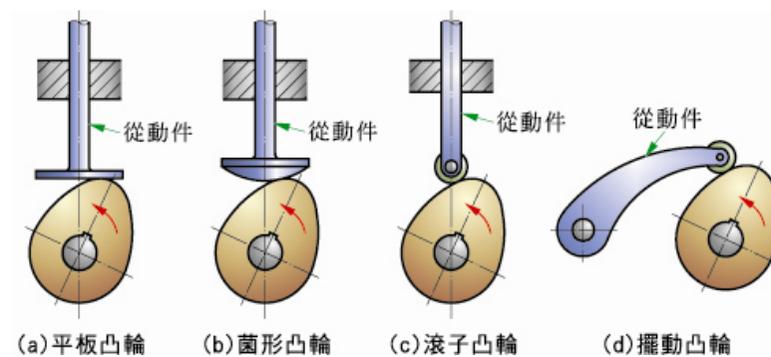


圖13-2 平板凸輪



二、面凸輪

如圖13-3所示為面凸輪又稱板形槽凸輪(groove plate cam)，此種凸輪在板之正面刻有凸輪輪廓曲線的凹槽，從動件滾子則嵌入槽中，隨凸輪轉動作運動。

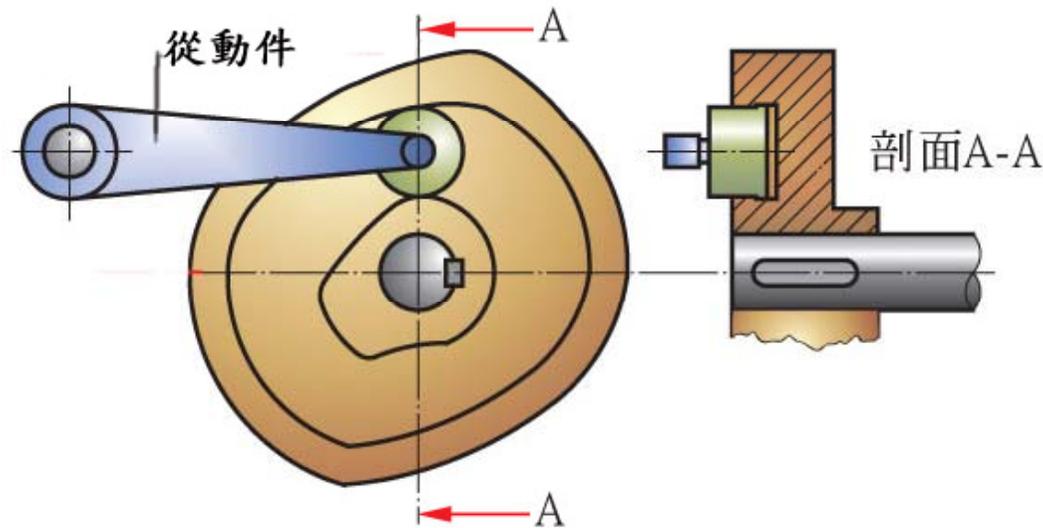


圖13-3 面凸輪



動畫13-3

三、反凸輪

如圖13-4所示，為反凸輪又稱倒置凸輪，與面凸輪相反，滾子和擺動桿為主動件。從動件上製成相當於凸輪輪廓曲線的凹槽，而主動件上之滾子嵌入溝槽中作擺動，使得從動件作上下往復運動。

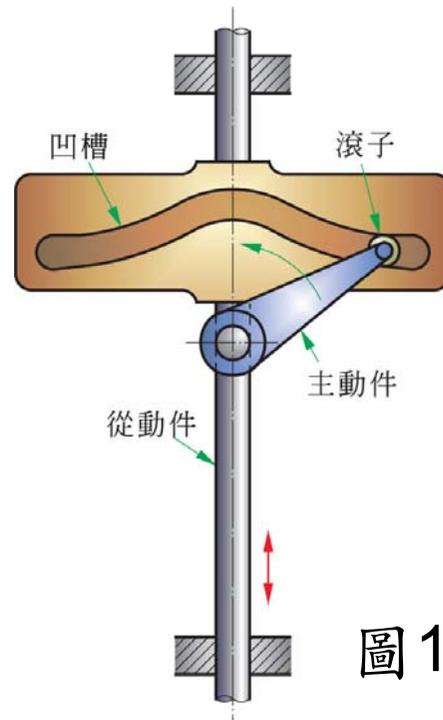


圖13-4反凸輪



動畫13-4

四、平移凸輪

如圖13-5所示為平移凸輪，此類凸輪之運動方式為直線平移，採直線往復運動方式來傳動從動件。

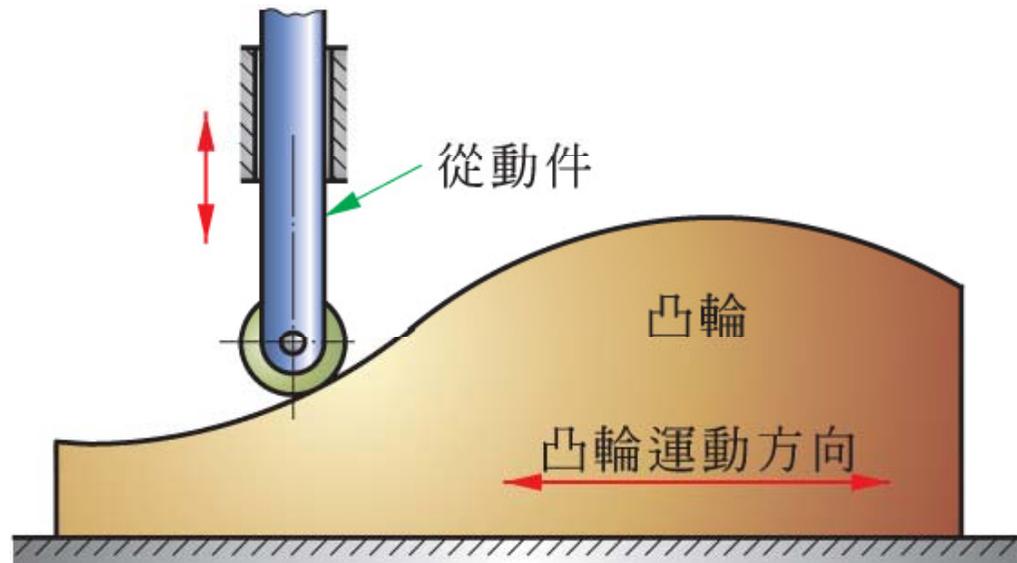


圖13-5 平移凸輪



動畫13-5

13-2-2 立體凸輪

立體凸輪傳動從動件之動路是一個空間曲線，常見者有五種，分述如下：

一、圓柱形凸輪

如圖13-6所示，圓柱形凸輪就是在圓柱體表面刻有凸輪輪廓凹槽的凸輪，當圓柱體旋轉時，從動件即沿著凹槽作往復運動。若凸輪旋轉一圈，從動件即完成一個往復循環者，稱為單周圓柱形凸輪，如圖13-6(a)(b)所示。若凸輪旋轉二或四圈，才使從動件完成一個往復循環者，稱為雙周或四周圓柱形凸輪，如圖13-5(c)(d)所示。

接上頁

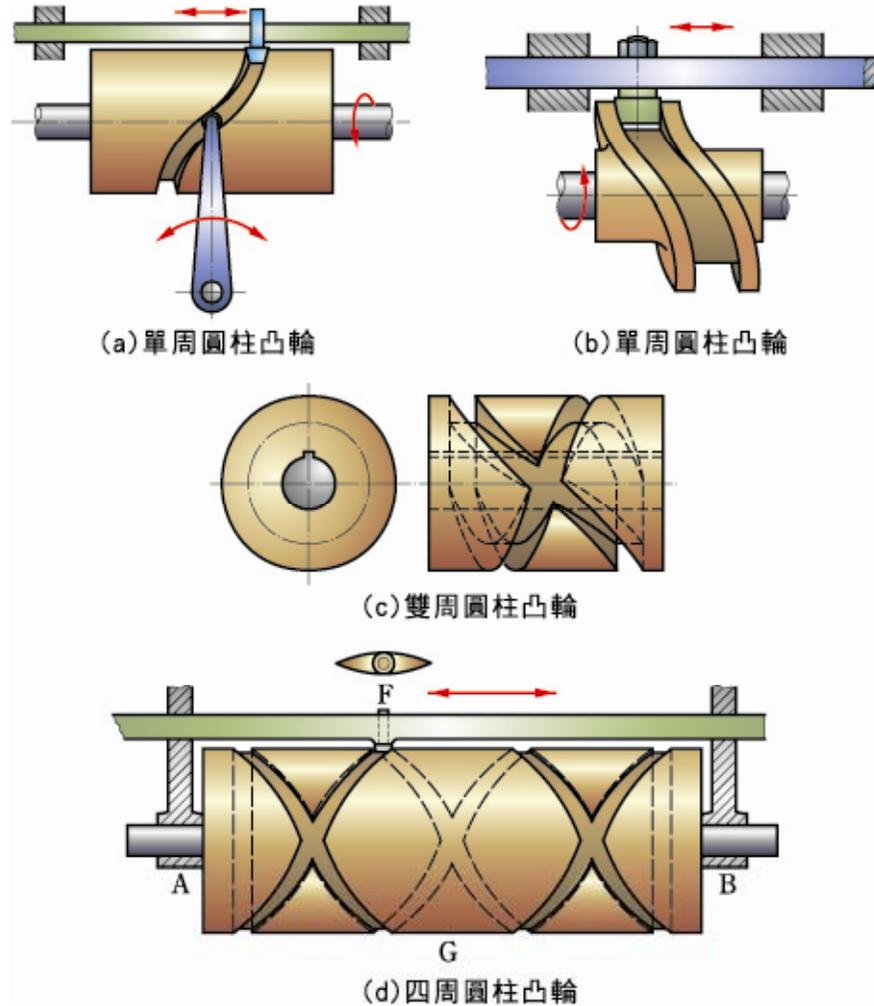


圖13-6圓柱形凸輪



動畫13-6a

動畫13-6b

二、圓錐形凸輪

如圖13-7所示，為圓錐形凸輪，與圓柱形凸輪相似。凸輪是由一表面刻有凸輪輪廓凹槽的截頭圓錐體所構成。

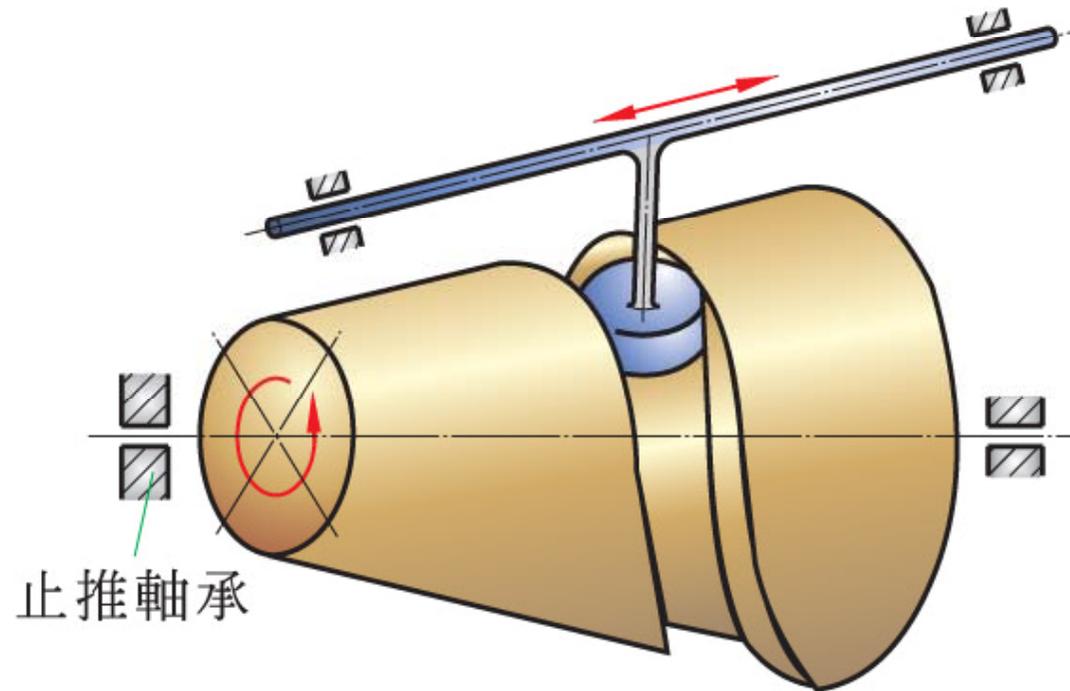


圖13-7圓錐形凸輪



動畫13-7

三、球形凸輪

如圖13-8所示，在圓球上刻有凸輪輪廓凹槽，從動件滾子端被嵌入凹槽內，因而使從動件作可預期角度的搖擺運動。

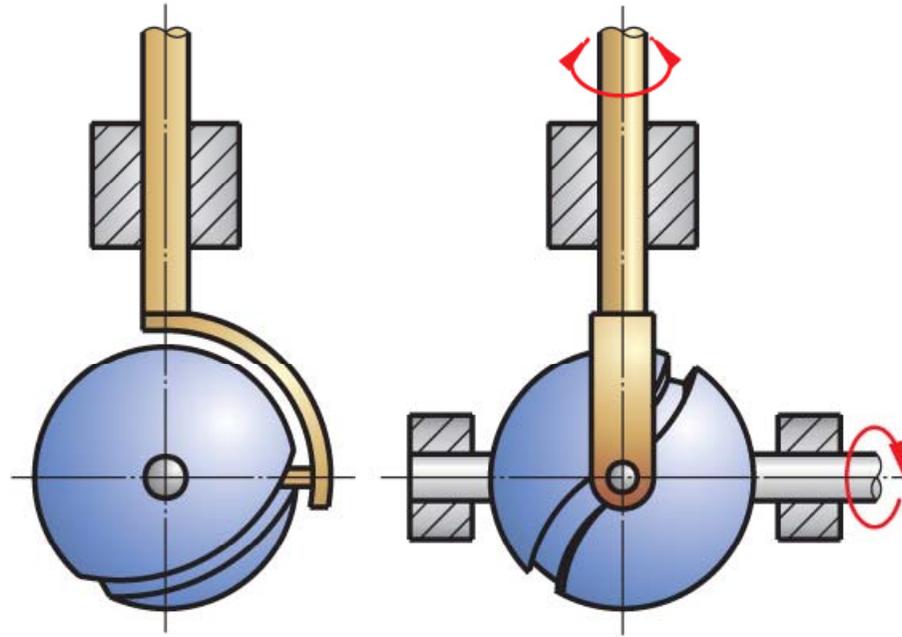


圖13-8球形凸輪

四、端面凸輪

如圖13-9所示，將圓柱一端作成凸輪輪廓曲線，當凸輪旋轉時，其從動件即作往復直線運動者。

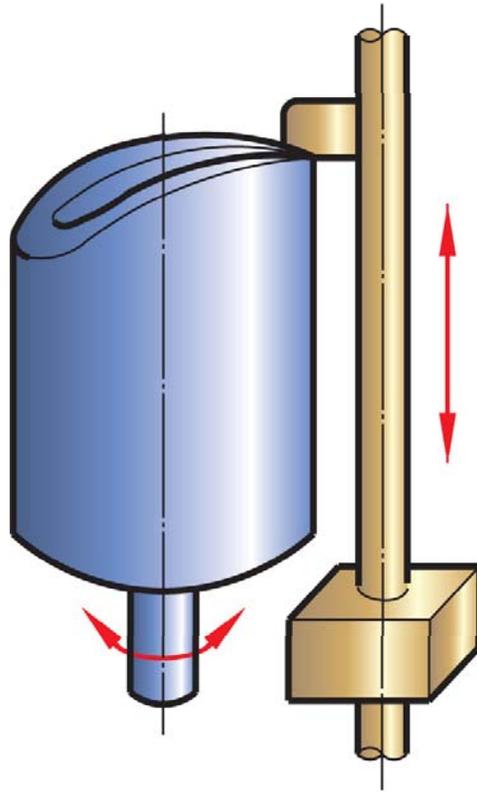


圖13-9 端面凸輪

五、斜盤凸輪

如圖13-10所示，將圓板傾斜安裝在迴轉軸上，從動件在導路上作預期的往復直線運動，也算是端面凸輪的一種。

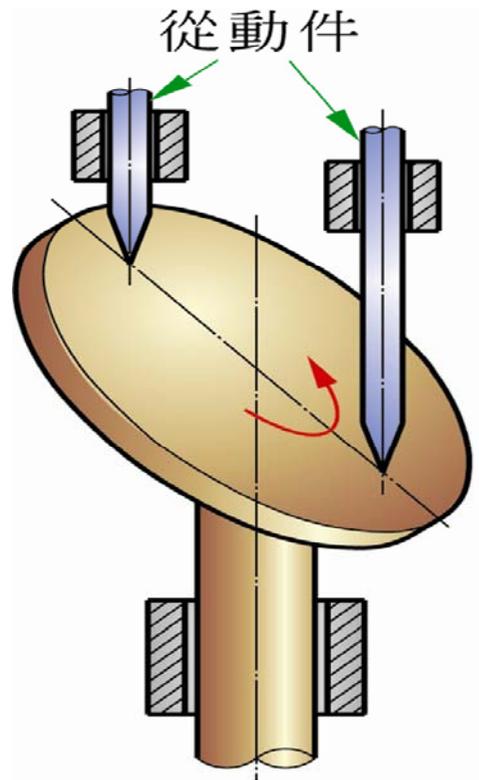


圖 13-10 斜盤凸輪



動畫13-10

13-3、凸輪及從動件接觸方法

- 凸輪與從動件的接觸方式有二種：
(1)滑動接觸，(2)滾動接觸。
- 滑動接觸又可分為點接觸與線接觸。如圖13-11(a)所示為尖劈形從動件 (**pointed follower**)，是屬於滑動接觸。此類方式能敏銳的反應凸輪周緣曲線的變化，但磨擦損耗較大。
- 滾動接觸均為線接觸。如圖13-11(b)所示為滾子從動件 (**roller follower**)，此類從動件將滑動接觸變為滾動接觸，可減低磨損，提高效率。

接上頁

如圖13-11(c)所示為平板從動件 (flat follower)，屬於滑動接觸，此類從動件不適合於凸輪周緣曲線激烈變化的場合，適合從動件的升距小、負荷輕的場合。

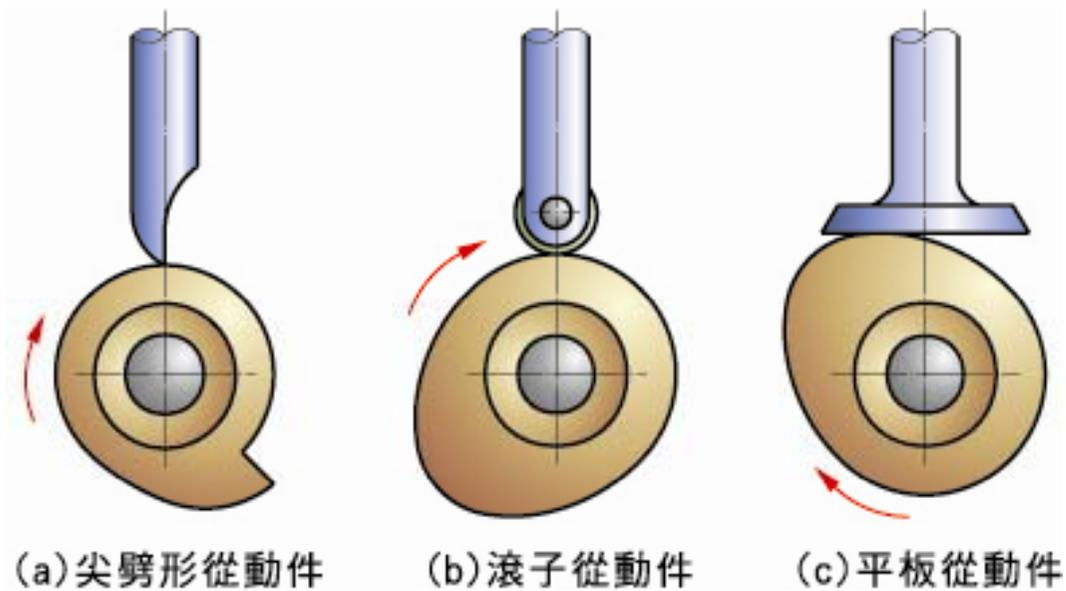


圖13-11從動件的接觸方式



動畫13-11a



動畫13-11b



動畫13-11c

接上頁

配置從動件的方式有三種，如圖13-12所示，為徑向配置 (radial)、偏置配置 (offset) 及擺動配置 (swinging)。

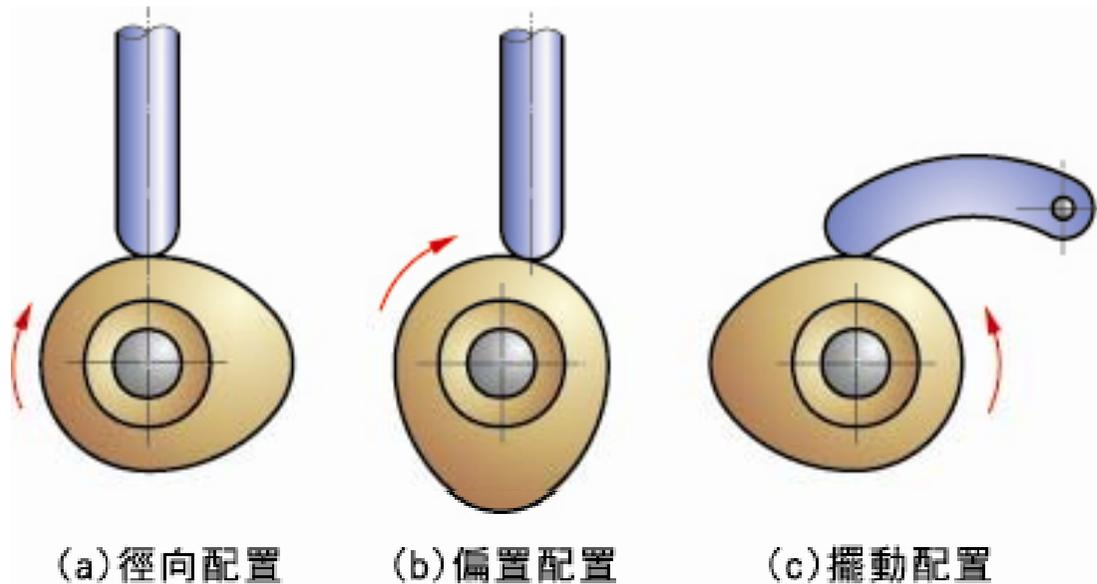


圖13-12從動件的配置方式



動畫13-12a



動畫13-12b



動畫13-12c

13-4、凸輪及從動件的運動

一、凸輪各部名稱

凸輪各部名稱如圖13-13所示如下：

- 1.軌跡點(trace point)：滾子從動件為滾輪之中心點，尖劈從動件為尖點，平板從動件為端面與工作曲線之交點。
- 2.節曲線(pitch curve)：凸輪轉動時，軌跡點連續經過軌跡所成的凸輪周緣曲線，又稱為凸輪的理論曲線(theoretical curve)。

接上頁

- 3.工作曲線(working curve)：即凸輪輪廓周緣，凸輪實際用來產生作用之曲線。
- 4.基圓(base circle)：以凸輪軸中心至工作曲線最短距離為半徑所繪之圓。通常以基圓為凸輪設計的基礎。
- 5.主圓：以凸輪軸中心至節曲線最短距離為半徑所繪之圓。
- 6.壓力角(pressure angle)：節曲線上一點之法線與從動件運動方向之夾角稱為壓力角。如圖13-14所示之 θ 角。

接上頁

7.總升程(total lift)：從動件最低位置至最高位置之垂直距離。

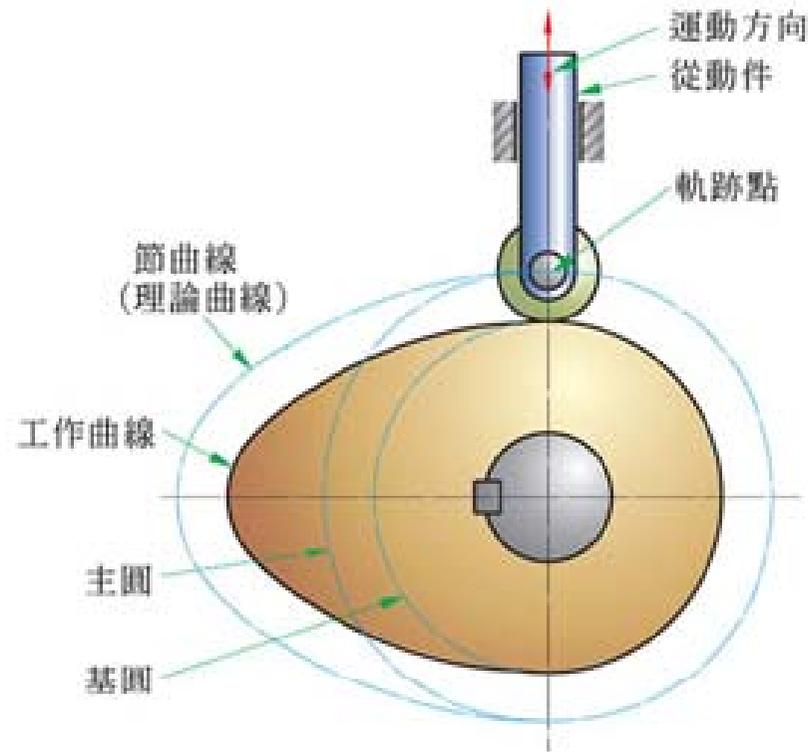


圖13-13凸輪各部名稱

二、凸輪周緣形狀對側壓力與傳動速度之影響

如圖13-14所示，**CD**為從動件的總升距，如果**CD**之長度不變，不論凸輪周緣形狀如何變化，都不會影響從動件的總升距。但凸輪周緣形狀改變，對側壓力及傳動速度會造成很大的影響。

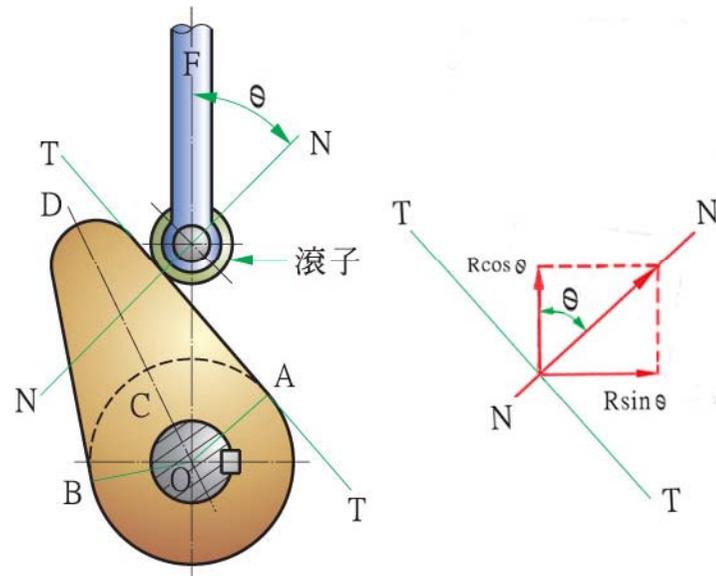


圖13-14凸輪與從動件

接上頁

T：接觸點的公切線。 **NN**：接觸點的公法線。

θ 角：凸輪壓力角。 角**AOC**：升角。

角**COB**：降角。 **CD**：總升距角。

角**AOB**：作用角(angle of action) 等於升角+降角。

凸輪之作用力**R**，沿著公法線**NN**的方向作用，**R**可分為互相垂直的兩分力：一為 **$R\cos\theta$** ，此力為推動從動件上升之力；一為 **$R\sin\theta$** ，此力與從動件運動方向垂直，產生從動件與導路之正壓力，稱此分力為側壓力，側壓力為從動件在導路內摩擦阻力的來源。當壓力角 **θ** 愈小時，則側壓力亦小。故壓力角 **θ** 小時，可減少從動件運動的阻力及接觸部位的磨損。

接上頁

如圖13-14所示，AD對OD之傾斜角，亦即TT與OD延長線之夾角，稱為周緣傾斜角。在升角與升距相同的情況下，周緣傾斜角愈大則側壓力愈小，傳動速度愈慢。反之，周緣傾斜角愈小則側壓力愈大，傳動速率愈快。故就側壓力而言，周緣傾斜角宜大，就傳動速率較快而言，周緣傾斜角宜小。

接上頁

在相同的升角及升距之下，增大基圓直徑可使得周緣傾斜角增大、壓力角變小，降低側壓力也降低了傳動速度。由此可知側壓力與從動件傳動速度兩者間的關係是相互消長。故當設計凸輪時，有關凸輪周緣形狀的考慮，應就側壓力與傳動速度兩者間的重要性而作考慮。

- 結論：對相同的升角及升距而言，基圓直徑愈大→周緣傾斜角愈大→壓力角愈小→側壓力愈小→從動件速率愈慢。

三、從動件的運動方式

凸輪從動件的運動方式很多，設計時只要能達到從動件預期的運動方式都可採用。一般的運動方式可分爲：

- 1.等速運動
- 2.修正等速運動
- 3.等加(減)速運動
- 4.簡諧運動等四種方式。

1.等速運動

如圖13-15(a)所示，凸輪作等速圓周運動，從動件做等速直線運動。若在橫坐標上取凸輪旋轉角度12等分數，縱坐標取總升距分成6等分，連接各等分線相對應的交點，可得等速運動的線圖(diagram)。等速運動的線圖為一直線。(b)及(c)為速度圖及加速度圖。

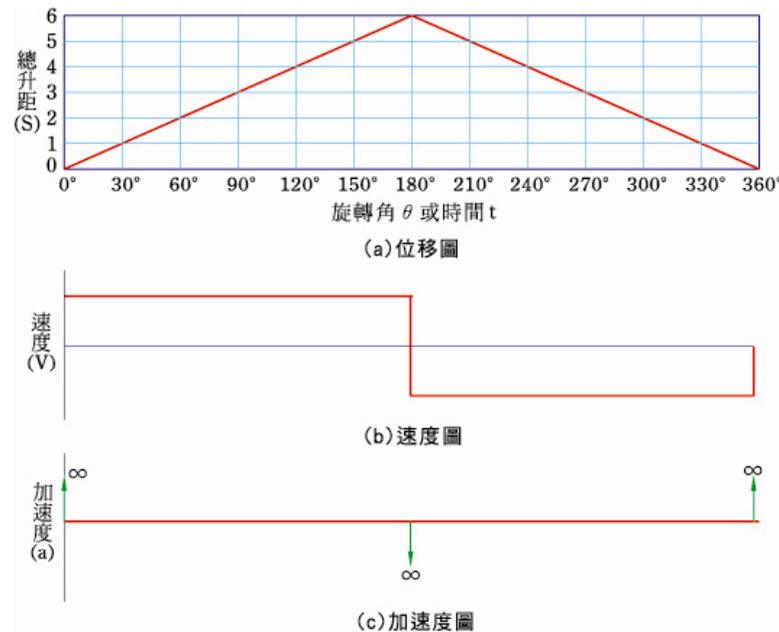


圖13-15等速運動

2.修正等速運動

- 如圖13-15(c)中可以看出，從動件在 $\theta=0^\circ$ 、 180° 、 360° 時，產生無限大的加速度，太大的加速度會使從動件產生急跳，造成機件損壞，應盡量避免。
- 修正等速運動可以消除上述缺點，使其得到較均勻的運動，修正方法是在等速度之前段加一段等加速度運動，另外在等速度之後段再加一段等減速度運動。如圖13-16所示為修正等速運動之位移圖、速度圖、加速度圖等。

接上頁

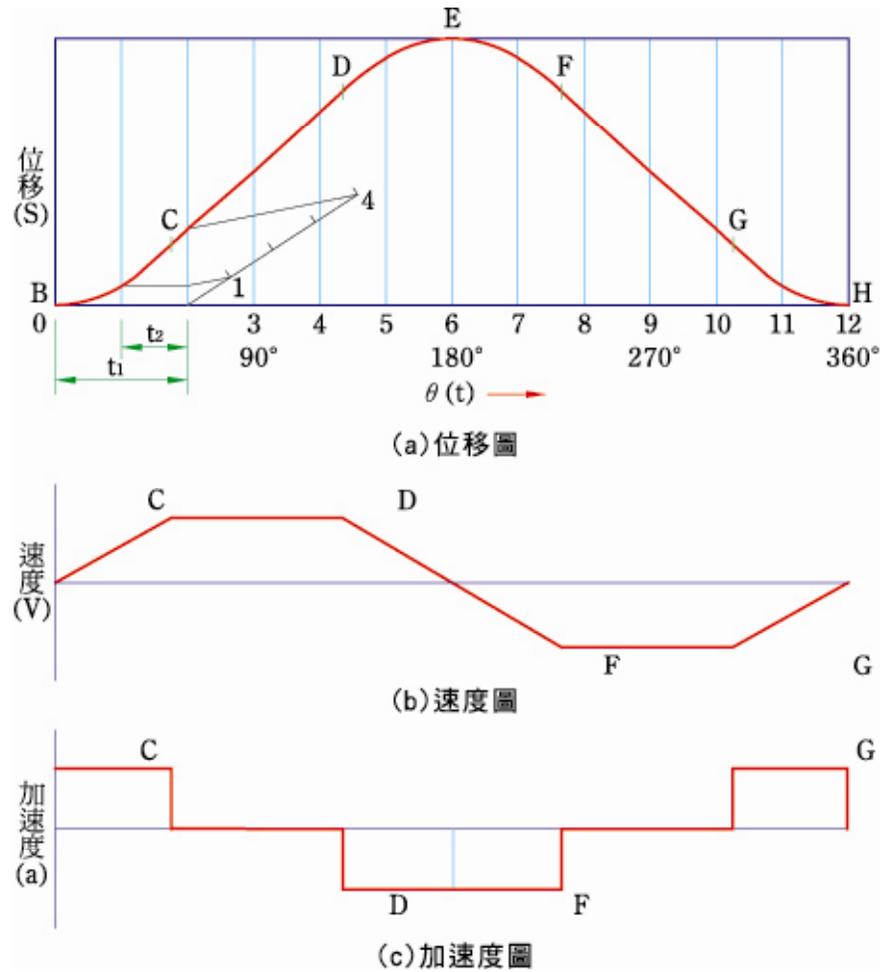


圖13-16修正等速運動線圖

3.等加(減)速運動

從動件由靜止開始以等加速率運動所行經之距離**S**。

$$S = \frac{1}{2} at^2 \quad (\mathbf{s} : \text{位移} \quad \mathbf{a} : \text{加速度} \quad \mathbf{t} : \text{時間})$$

此方程式的圖形為拋物線，因此又稱為拋物線運動 (parabolic motion)。由於**a**為常數，距離**S**與時間平方 t^2 成正比。即表列如下：

t	S	$S_2 - S_1$	$\frac{S_2 - S_1}{a}$
1	$\frac{1}{2} a$	$\frac{1}{2} a - 0 = \frac{1}{2} a$	1
2	$\frac{4}{2} a$	$\frac{4}{2} a - \frac{1}{2} a = \frac{3}{2} a$	3
3	$\frac{9}{2} a$	$\frac{9}{2} a - \frac{4}{2} a = \frac{5}{2} a$	5
4	$\frac{16}{2} a$	$\frac{16}{2} a - \frac{9}{2} a = \frac{7}{2} a$	7
5	$\frac{25}{2} a$	$\frac{25}{2} a - \frac{16}{2} a = \frac{9}{2} a$	9

接上頁

從動件各單位時間內位移成比例為

$$\frac{1}{2}a : \frac{3}{2}a : \frac{5}{2}a : \frac{7}{2}a : \frac{9}{2}a = 1 : 3 : 5 : 7 : 9$$

如圖13-17所示，將縱坐標依1 : 3 : 5 : 5 : 3 : 1之比例分成6份，橫坐標則分成12等分。連接各對應點成圓滑曲線，即得等加(減)速運動之線圖。

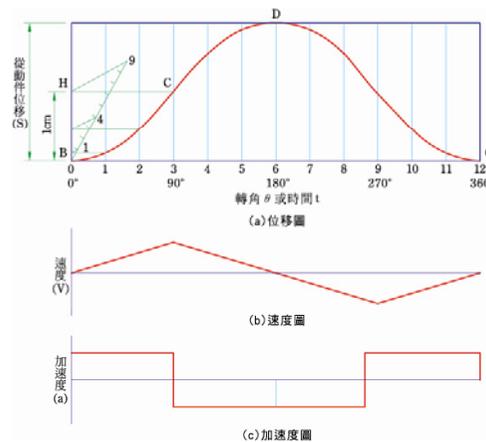
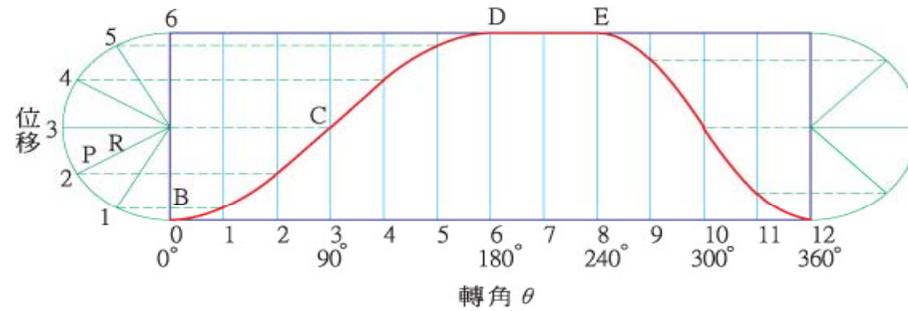


圖13-17等加(減)速運動線圖

4. 簡諧運動 (simple harmonic motion)

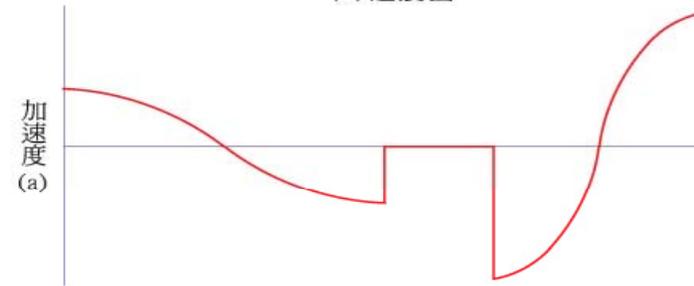
如圖13-18所示為簡諧運動之位移圖。先畫出水平軸及垂直軸，並設凸輪旋轉 θ 角時，從動件以簡諧運動方式上升 h 高度。將水平軸等分12段，以為半徑在垂直軸上畫一半圓，再將半圓周等分6等分。最後把圓周上的點0、1、2、...等，投影至垂直於水平軸上0、1、2、...諸點之直線上，並連接各交點，得一圓滑曲線即為簡諧運動之線圖。



(a) 位移圖



(b) 速度圖



(c) 加速度圖

圖13-18 簡諧運動

四、凸輪與從動件之傳動

凸輪與從動件之間的傳動方式是以直接接觸（**direct contact**）傳動。其主動件與從動件維持接觸的方式，可借用從動件本身的重力、彈簧力或其他方式來完成。凡不藉從動件本身的重力、彈簧張力或其他外力，就能使從動件在凸輪迴轉時，能回到原來位置之凸輪，謂之確動凸輪(**positive motion cam**)。

確動凸輪的種類

確動凸輪的種類如下：

- 1.面凸輪 (face cam)
- 2.等徑凸輪 (constant diameter cam)
- 3.主凸輪與回凸輪 (main and return
- 4.等寬凸輪 (constant breadth cam) cam)
- 5.隆起凸輪 (ridge cam)
- 6.反凸輪 (bmverse cam)
- 7.其他確動凸輪
 - (1)偏心凸輪。
 - (2)三角凸輪。
 - (3)圓柱形凸輪。
 - (4)圓錐形凸輪。
 - (5)球形凸輪。

1.面凸輪

如圖13-19所示，為一簡單形式的確動凸輪，稱為面凸輪。槽中有兩條工作曲線，槽寬與滾子的直徑相等，以容納從動件的滾子於槽中。凸輪迴轉時，從動件即作相應之運動，前述圖(13-2)之面凸輪即為此類確動凸輪。

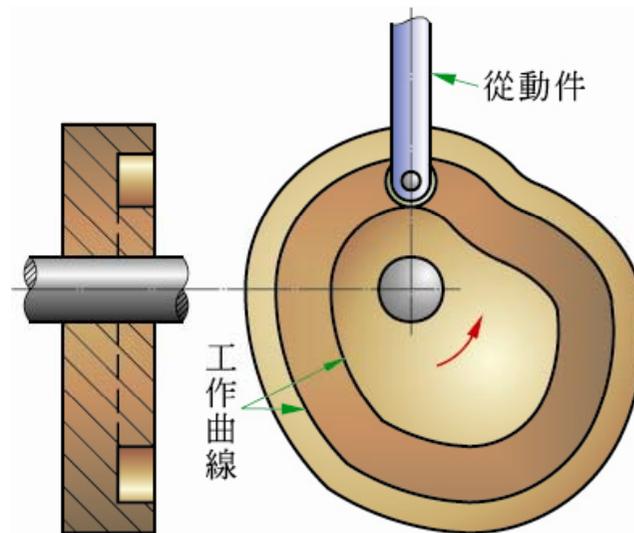


圖 13-19 面凸輪



動畫13-19

2.等徑凸輪

- 如圖13-20及圖13-21所示之等徑凸輪，又稱心形凸輪(heart cam)。從動件有兩個滾子，分別在凸輪之上、下與凸輪之工作曲線同時接觸。所以等徑凸輪經過凸輪軸(徑向)任意方向的兩滾子中心距離永遠相等。
- 如圖13-20所示， $AB=1g=2f=3e=4d=5c=6b=7a=$ 定值。當從動件向上運動時，凸輪即作用於上部滾子。當從動件向下運動時，凸輪即作用於下部之滾子，從動件可得確實的位移。

接上頁

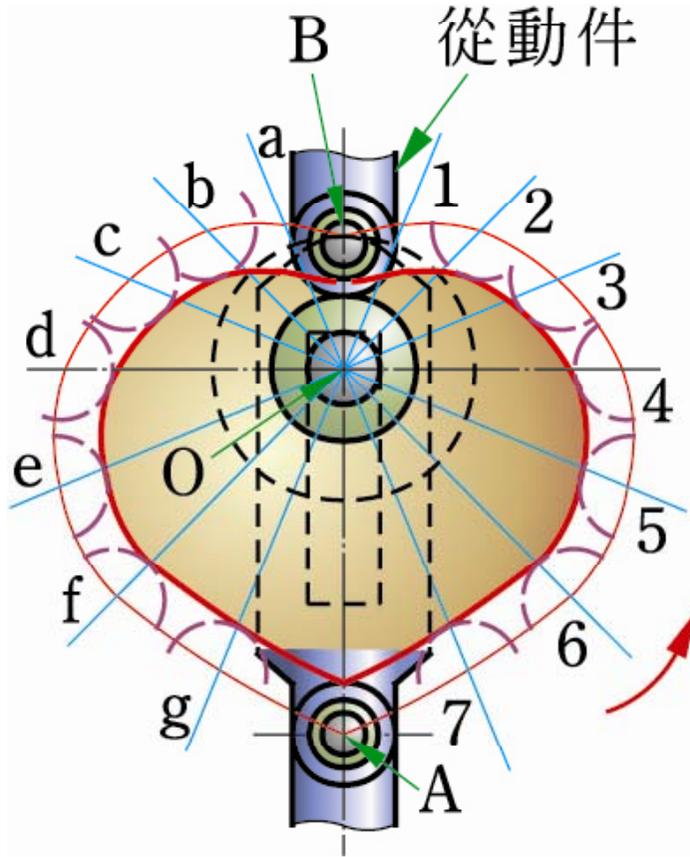


圖13-20等徑凸輪

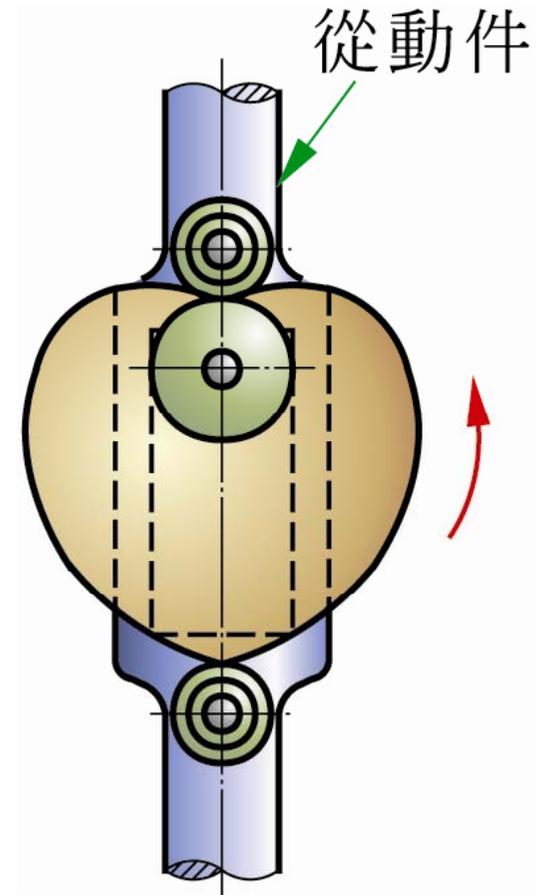
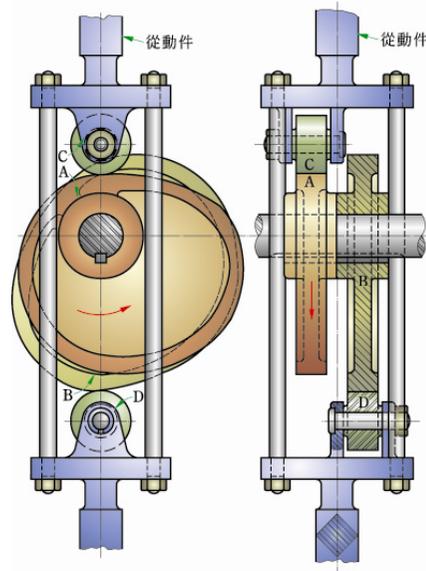


圖13-21等徑凸輪

3.主凸輪與回凸輪

如圖13-22所示，從動件也有兩個滾子。滾子C與凸輪A接觸。滾子D與凸輪B接觸。凸輪A為主導從動件之確動位移，其輪廓曲線即是工作曲線，是為主凸輪。滾子C與D之間距離一定，凸輪B的形狀只需隨時保持與滾子D接觸就可以，凸輪B為回凸輪。從動件運動狀態決定於整個凸輪A之輪廓曲線，所以凸輪形狀不一定要對稱的。



動畫13-22

圖 13-22 主凸輪與回凸輪

4.等寬凸輪

- 如圖13-23所示為等寬凸輪，在凸輪的工作曲線上兩平行切線間的距離永遠相等，即等寬之意。凸輪同時與從動件上的上、下二個平行面相接觸，藉此傳達運動。
- 等寬凸輪只能設計前半周的工作曲線，而另一半的工作曲線，則必須由前半周的工作曲線來決定。等寬凸輪從動件的上升及下降運動，與等徑凸輪相同。

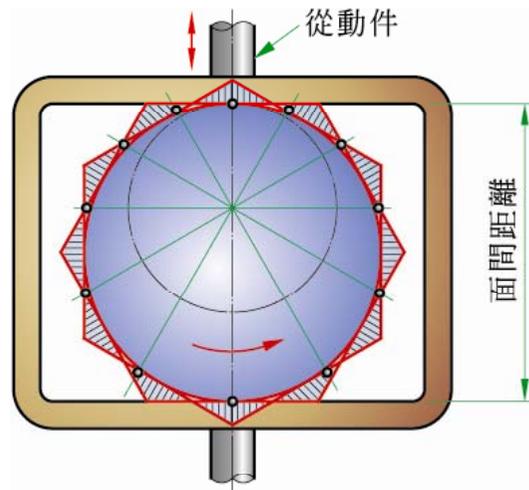


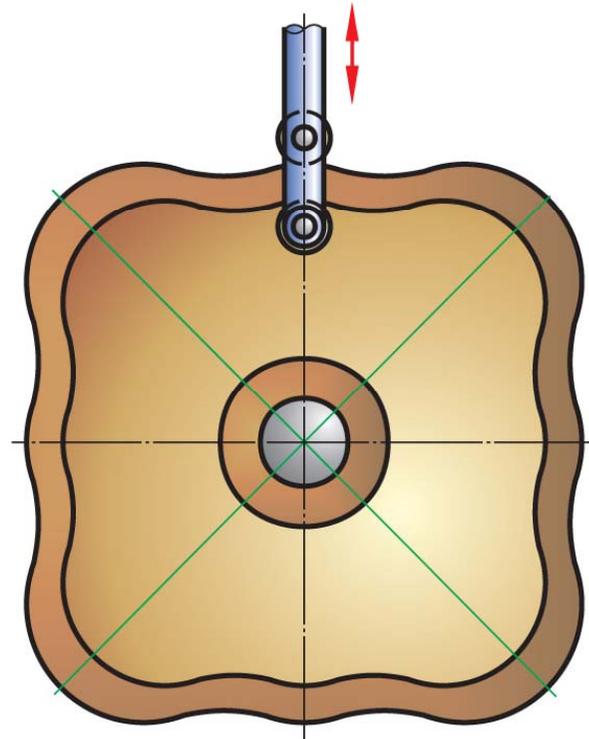
圖 13-23 等寬凸輪



動畫13-23

5.隆起凸輪

如圖13-24所示為隆起凸輪，從動件的上、下兩滾子夾住凸輪隆起的周緣工作曲線，當凸輪轉動時，從動件作上下直線往復運動。



動畫13-24

圖13-24 隆起緣凸輪

6.反凸輪

6.反凸輪 (bmverse cam)

如圖13-4所示為反凸輪。

7.其他確動凸輪

(1)偏心凸輪：如圖13-1(b)所示。

(2)三角凸輪：如圖13-1(c)所示。

(3)圓柱形凸輪：如圖13-6所示。

(4)圓錐形凸輪：如圖13-7所示。

(5)球形凸輪：如圖13-8所示。

13-5、凸輪周緣設計

凸輪之周緣設計決定於凸輪尺寸(基圓大小)及從動件的種類、位置總升距及位移圖。以下為數種板凸輪的周緣設計。

- 一、板凸輪與往復式尖劈形從動件。
- 二、板凸輪與往復式滾子從動件。
- 三、板凸輪與偏置滾子從動件。
- 四、板凸輪與擺動式滾子從動件。
- 五、板凸輪與往復式平板從動件。

一、板凸輪與往復式尖劈形從動件

- 如圖13-25所示，凸輪以反時鐘方向旋轉，從動件於徑向作直線往復運動，凸輪以鍵固定於Q軸上，凸輪轉 180° ，從動件由基圓升高至最高點， $180^\circ \sim 210^\circ$ 時從動件不動， $210^\circ \sim 360^\circ$ 由最高點下降至基圓上。
- 將位移圖上每一個對應 θ 的縱座標值標記在從動件上，當凸輪以反時針方向旋轉兩個區間，欲使從動件尖端將由0升到2'，則可以Q為圓心，Q2'為半徑畫弧，交於Q2之延長線上2''，即可定出點2''。凸輪周圍各點1''、3''、4''等均可用相同方法求出其確切的位置，再用平滑曲線連接以上諸點，即為凸輪的輪廓。

接上頁

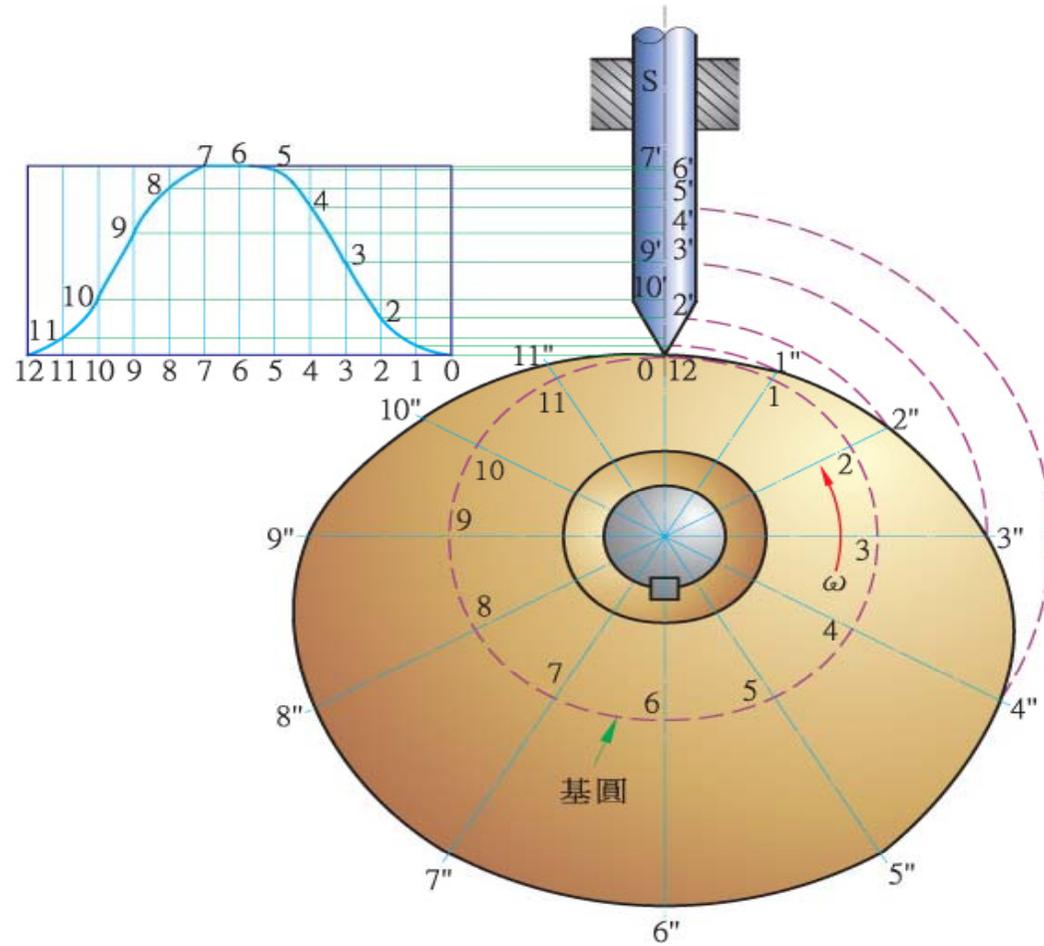


圖13-25板凸輪與往復式尖劈形從動件

二、板凸輪與往復式滾子從動件

- 如圖13-26所示為板凸輪與往復式滾子從動件。凸輪以反時針方向旋轉，而從動件以徑向作直線往復運動。當滾子的中心通過基圓時為從動件在最低位置。
- 將滾子的中心軸視為上例中尖劈形從動件之尖端，即可應用上例的方法求得點1"、2"、3"、．．．等之位置，連接這些點的平滑曲線，即為節曲線(理論曲線)。取上諸節點為圓心，滾子半徑為半徑畫弧，並以一圓滑曲線切與各圓弧，此得凸輪的輪廓線，此線稱為工作曲線。

接上頁

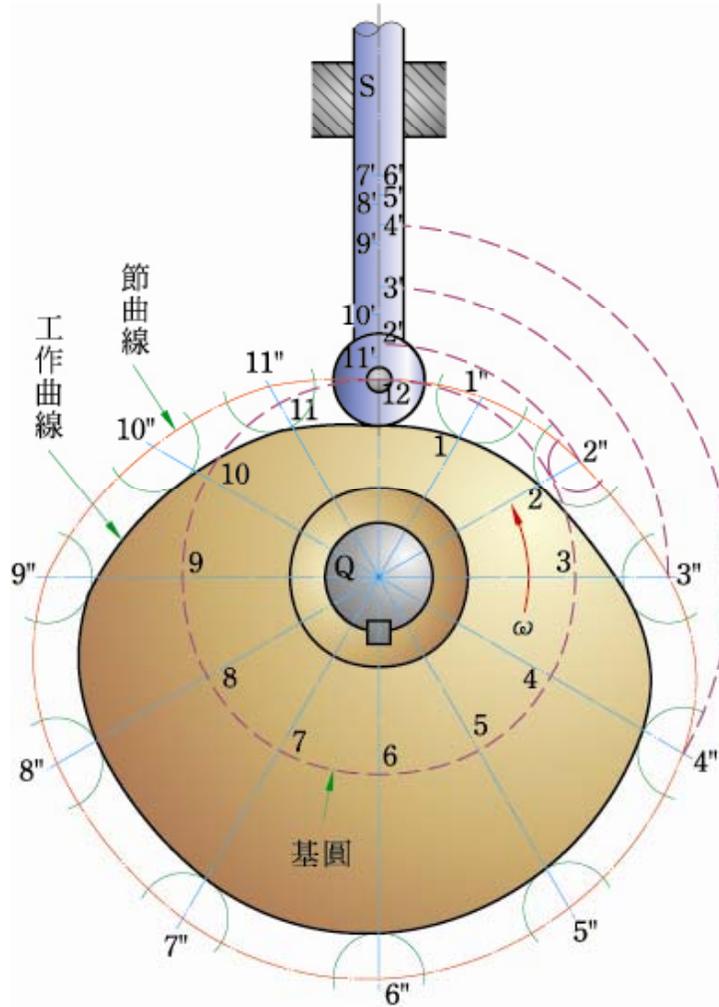


圖 13-26 板凸輪與往復式滾子從動件

三、板凸輪與偏置滾子從動件

如圖13-27所示從動件中心未通過凸輪軸的中心，即為偏置。由凸輪中心至從動件中心軸的垂直距離，稱為偏置量(**amount of the offset**)。從動件偏置的理論，有時是為配合空間的設計，最主要是為了減少從動件側壓力，當凸輪逆時針旋轉時，偏置在右方。當凸輪順時針旋轉時，偏置在左方。如此才可確實減少側壓力。此類機構之凸輪輪廓繪製與上例相同，先將節曲線求出再求凸輪輪廓，亦即工作曲線。但求取節曲線時，是以偏心圓為基準。以偏置量為半徑所畫之圓稱為偏心圓。

接上頁

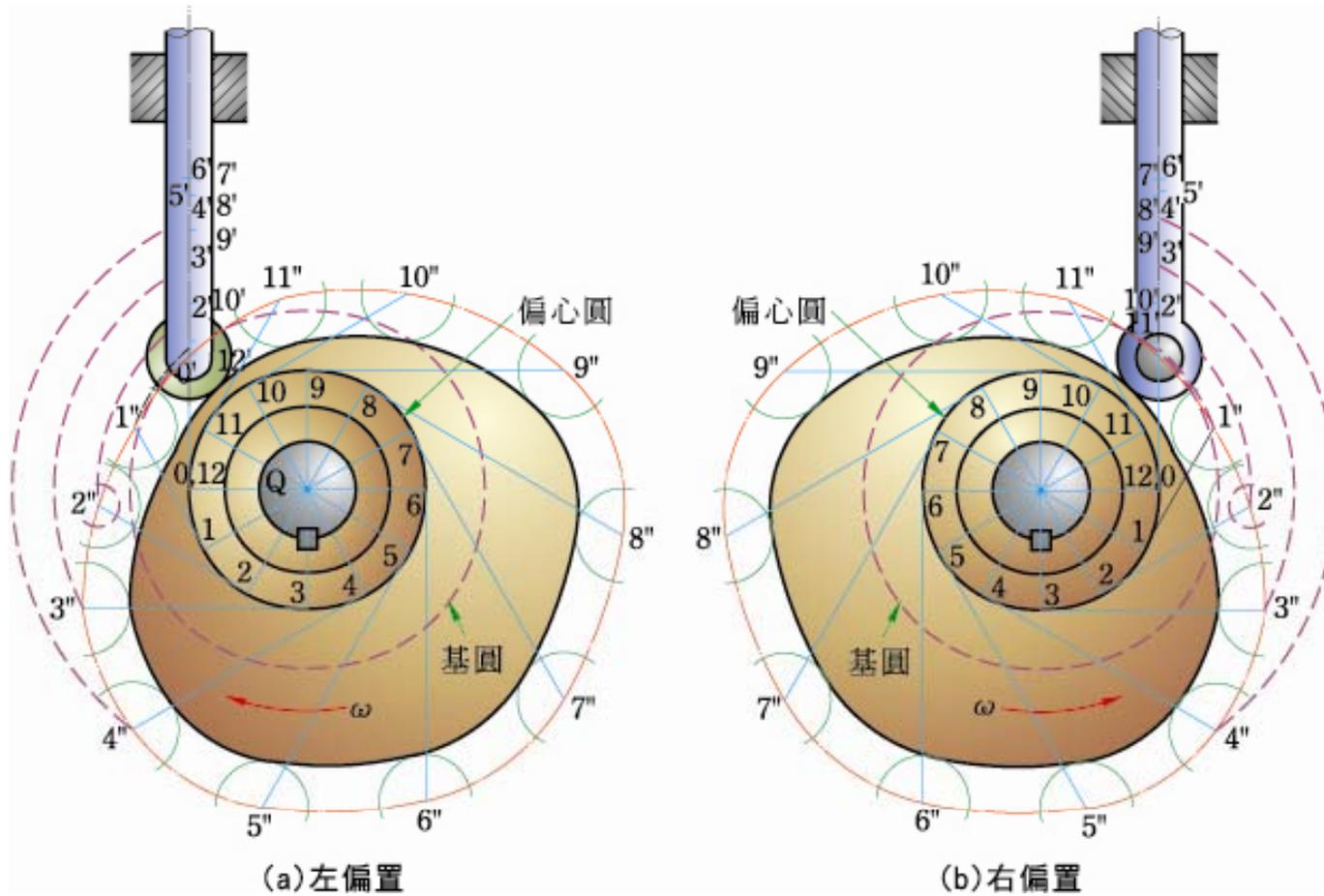


圖13-27板凸輪與偏置滾子從動件

四、板凸輪與擺動式滾子從動件

- 如圖13-28所示為板凸輪與擺動式滾子從動件。凸輪以順時針方向旋轉，從動件隨之上下擺動。
- 此件之凸輪畫法與圖13-26類似，但從動件之擺動為弧線而不是直線，故滾子之位移以弧長來代替直線。作法如下：
 - 1.取位移圖投至從動件之擺動圓弧上，如1'、2'、3'、...、12'等。
 - 2.畫出基圓及樞軸圓，基圓半徑為Q，樞軸圓半徑為0Q。

接上頁

3. 將樞軸圓周分爲12等分(以與位移圖上時間軸的間隔數相對應)，分別標以0、1、2、3、...、12等。
4. 以點1、2、3、...等爲圓心，R爲半徑畫弧，再以Q爲圓心，由點Q1'、Q2'、Q3'、...等爲半徑畫弧，交於前者各弧，得交點爲1''、2''、3''、...等。
5. 再以1''、2''、3''、...這些交點爲圓心，滾子半徑爲半徑畫弧，並畫一圓滑曲線切於這些圓弧，即得凸輪之輪廓。

接上頁

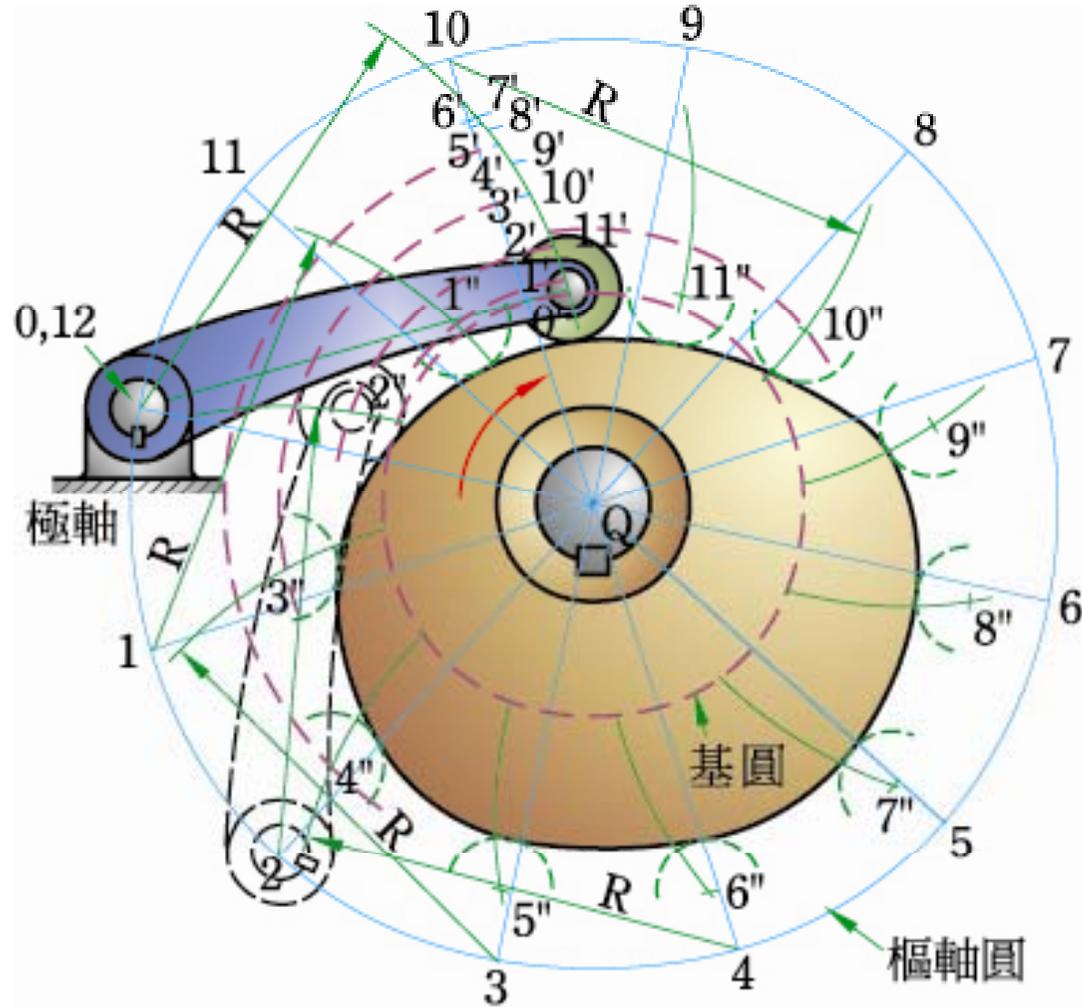


圖13-28板凸輪與擺動式滾子從動件

五、板凸輪與往復式平板從動件

如圖13-29所示為板凸輪與往復式平板從動件。以圖13-28的方法求出1"、2"、3"、. . .等點的位置，在這些點上畫垂直於凸輪徑向線的直線。這些直線即代表平板從動件的端面，相對於凸輪的各種位置。畫一圓滑曲線與這些直線相切，即得凸輪之輪廓，即為凸輪之工作曲線。

接上頁

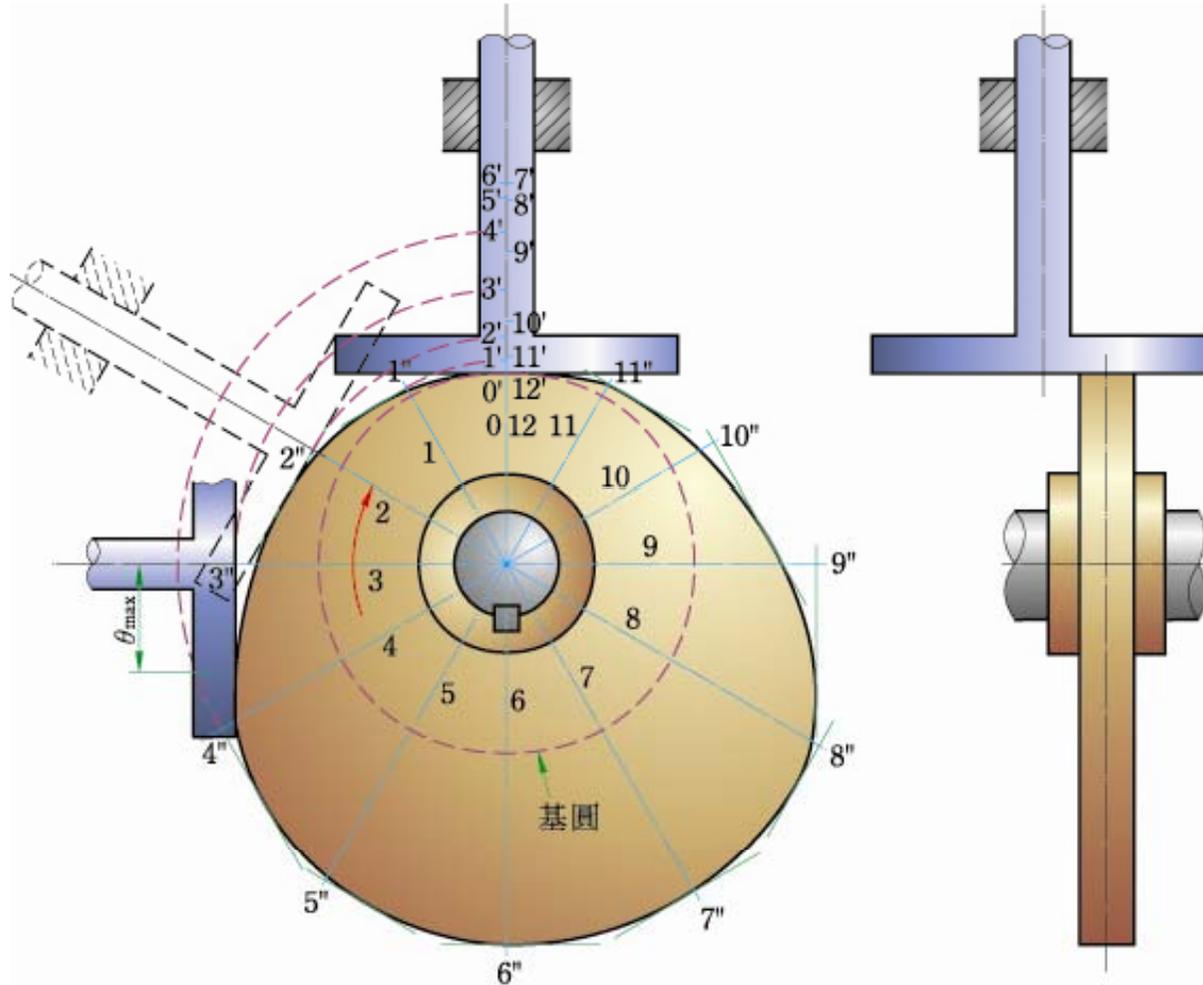


圖13-29板凸輪與往復式平板從動件

凸輪機構應用動畫

1. 偏心輪夾緊裝置 動畫13-30