

# 产生非球面的新机构原理

潘 君 骅\*

(南京天文仪器厂)

## 提 要

本文提出了两种产生常用非球面机构的原理。从不同于已有各种机构的根本原理出发,找到新的产生非球面的途径,并论证了其几何关系。这种方法的特点是以线接触产生非球面,因此将得到平滑的表面。

天文光学系统及红外技术中的光学系统都不可避免地要用到非球面。从大口径天文望远镜的发展趋势看,主镜的相对口径在不断地增大。六十到七十年代的大口径望远镜主镜的焦比已达  $f/3 \sim f/2.5$ , 今后有继续增大的倾向,因为这样可以大大降低大型望远镜的造价。在红外系统中,则早已采用  $f/1.5 \sim f/1$  的主反射镜了。众所周知,制造非球面的难度是和焦比的三次方成比例,但只和口径的一次方成正比。因此,天文望远镜总体设计的趋势对于非球面光学工艺提出了新的要求。虽然依靠熟练工人的经验和技巧能够解决单件的、难度很大的非球面加工,但是,如果下一代的望远镜要用数十台  $2 \sim 4$  米口径的望远镜列阵来组成的话,那么单件的生产是很难胜任的。在红外技术中,已经发现大量生产一种红外光学装置的主要障碍常常是非球面加工。这就要求具有效率很高的机器来完成大量制造高难度非球面的任务。

过去的一些非球面机构,如仿形、运动轨迹和程序控制等,都是从构成面形点的轨迹着眼来考虑的,这些机构都因存在各自的严重缺点而不能得到普遍推广。

从铣磨球面加工得到启发,发现如果用薄壁铣磨环在铣磨球面加工的基础上作一定的运动,或调整某种几何关系,可以产生一定类型的非球面。这种获得非球面的原理和过去完全不同。对于凹的非球面来说,是利用次法距的特性,对于 Schmidt 曲线来说,是利用空间角来产生的。以下我们对这两种情况分别讨论其几何学关系。

## 一、产生 $e^2 > 0$ 的二次凹非球面

图1中  $\widehat{OM}$  为半径为  $R$  的起始球面,  $\widehat{OM'}$  为要求加工成的非球面,  $\overline{PO}$  为铣磨环的轴,  $\overline{OM}$  为铣磨环口的投影,  $MM'$  为在镜面边缘应磨去的非球面度。

在磨非球面之前,先使铣磨环口与起始球面吻合,这时铣磨轴与机床主轴的交点  $O$ , 即起始球面的中心,就是该二次非球面的顶点曲率中心。从这个起始球面开始,在铣磨的同时,使工具轴在图平面内绕一个瞬时中心转动,这个瞬时中心是从  $O$  点开始,沿着  $OM$  直线

收稿日期: 1980年2月17日

\* 此工作系作者在长春光学精密机械研究所期间所做。

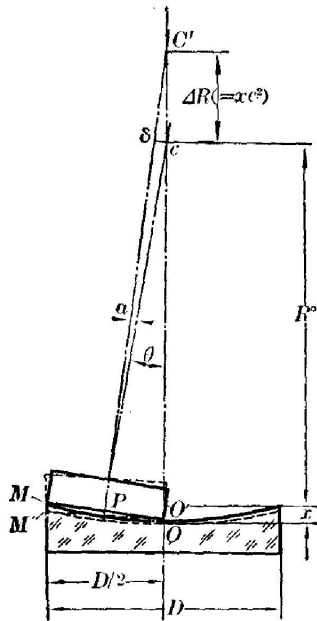


图 1

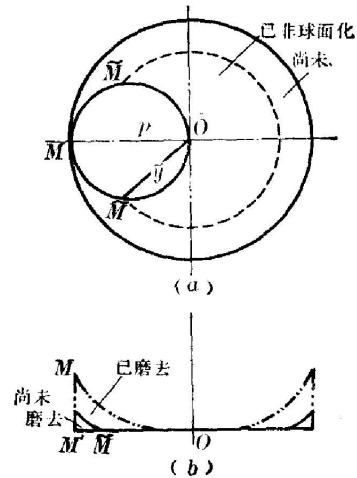


图 2

移动, 在  $M$  点停止。在这个过程中结束时, 工具轴好象绕  $P$  点转过了一个  $\alpha$  角, 并且与工件轴的交点从  $C$  移到了  $C'$ 。很明显,  $C'$  将是镜面边缘带的法线与光轴的交点。只要注意到工具是绕瞬时中心逐渐转过  $\alpha$  角, 而不是绕  $P$  点一下子转过  $\alpha$  角, 我们就可以知道磨出的将是连续的表面, 而不是在  $P$  点相接的两个球面。需要证明这个连续表面就是我们所要加工成的二次非球面。这里必须证明的主要问题是图 1 中的线段  $MM'$  等于所要求的表面非球面度, 即  $MM' = \frac{D^4 e^2}{1024 f^3}$ , 其中  $D$  为镜面直径,  $f$  为焦距,  $e$  为二次曲面偏心率。

证明的逻辑关系是这样: 假如  $CC'$  等于某一非球面的次法距差, 即  $\Delta R = xe^2$ , 则  $MM'$  等于该非球面与顶点球比较的非球面度, 即  $MM' = \frac{D^4 e^2}{1024 f^3}$ 。

从图 1 中可以直接看到

$$OM \approx \frac{D}{2}, PM \approx \frac{D}{4}, \theta \approx \frac{D}{4R}, \delta \approx \theta \cdot \Delta R。$$

故 
$$\delta \approx \theta \cdot x \cdot e^2 = \frac{D}{4R} x e^2,$$

从而 
$$\alpha = \frac{\delta}{R} = \frac{D}{4R^2} x e^2。$$

又因 
$$x \approx \frac{D^2}{8R},$$

故 
$$\alpha \approx \frac{D^3}{32R^3} e^2,$$

从而 
$$MM' \approx \frac{D}{4} \cdot \alpha = \frac{D^4 e^2}{128R^3} = \frac{D^4 e^2}{1024 f^3}。$$

另一个问题必须回答的是加工出来的非球面在中间各带的情况如何? 图 2 是未磨完时的顶视图, 虚线圆是刚要脱离接触的带, 图 3 是圆筒薄壁磨具端面的三个时间的投影, 其中

$OM$  是初始状态,  $O'M'$  是最后状态, 而  $\bar{O}\bar{M}'$  是中间某一时刻的状态。图 4 说明工具是如何滚过去的, 其中画出  $\bar{O}\bar{M}'$  线而不是  $OM$ , 因为磨具是沿着固定的斜面滚动的, 这个斜面与工具端面投影的初始位置相重合。图 3 及图 4 中的  $s$  点都是滚动的瞬时中心。为了回答上面的问题, 必须解空间几何问题以找出与  $\tilde{y}$  带相应的  $\tilde{C}'$  的位置, 并和给定的非球面的理论值加以比较。这个问题的分析解是很复杂的, 我们计算了一些具体数值。不幸的是中间带的中心  $\tilde{C}'$  不是和给定二次曲面的应有值完全重合。这说明有剩余误差存在。目前有关这个问题正在继续进行研究。但是很明显, 它不会造成严重困难, 因为在抛光阶段总是要进行检验并加以修磨的。另一方面, 可以在滚动半径  $r$  上予以修正, 这个半径可以利用使钢板变形而得到。

其次, 求  $r$  的值(见图 5)。图 5 中  $OL$  是半径为  $r$  的圆

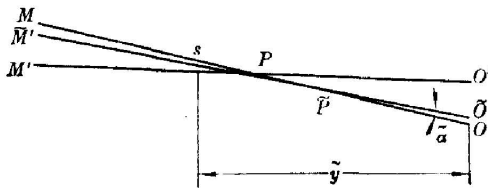


图 3

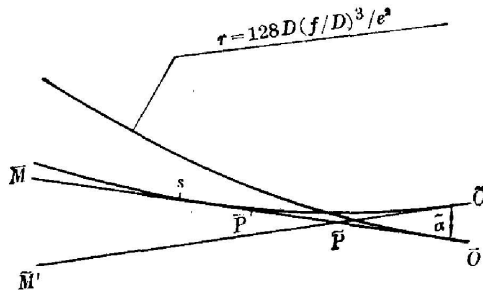


图 4

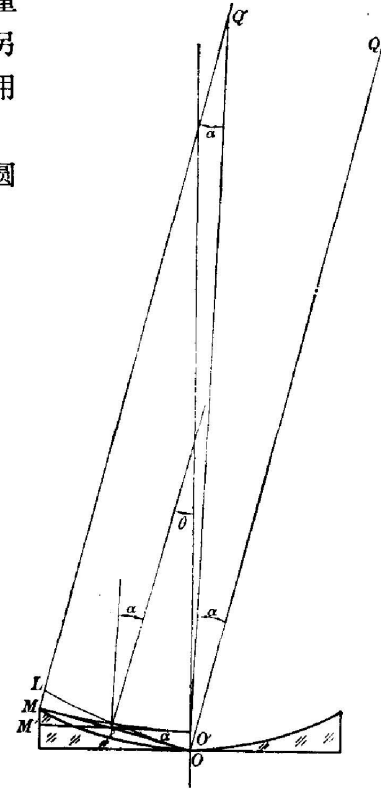


图 5

的一段弧, 处于起始状态, 即在  $O$  点与  $OM$  相切。当非球面铣磨结束时,  $OL$  弧滚动了一个  $\alpha$  角, 成为  $O'M$  弧,  $L$  点降到与  $M$  重合, 而  $O$  点升到  $O'$ 。通过  $O'$  作  $O'M$  弧的切线, 交  $OM$  于  $P$  点。显然,  $M$  点下降到  $M'$ , 而  $MM'$  即磨去的非球面量。从图 5 不难看出:

$$MM' \approx (D/2)^2 / 2r,$$

又

$$MM' \approx D^2 e^2 / 1024 f^3,$$

故得到

$$r = \frac{128 f^3}{e^2 D^2} = 128 D \left( \frac{f}{D} \right)^3 / e^2.$$

从上面可以看出, 这个方法实际上是把磨非球面转化为制造一个半径为  $r$  的模板,  $r$  的值完全由非球面的参数决定。其机构是在一般铣磨球面的基础上使工具轴有一个附加的小的转动。由于产生非球面的全部过程是在转过一个很小的  $\alpha$  角中完成, 而工具与工件除了最边缘点  $M'$  外都是线接触, 故可期望有连续而平滑的表面以及较高的精度。转角  $\alpha$  只和非球面的相对孔径及偏心率有关。对于几种相对孔径及偏心率的情况下, 转动角  $\alpha$  数值列于表 1。

表 1

$e^2$ 相对孔径	0.1	1.0	10
$f/1$	0.0224°	0.2237°	0.2379°
$f/2$	0.0028°	0.0279°	2.2796°
$f/3$	0.0008°	0.0083°	0.0828°

## 二、产生 Schmidt 型曲线

经典的 Schmidt 曲线是在 0.707 带有最低点, 如图 6(a) 所示, 有时为了使色差影响最小, 将最低点移到 0.85 带, 如图 6(b) 所示。制造这种曲线有各种各样的办法, 这里不一一评述。

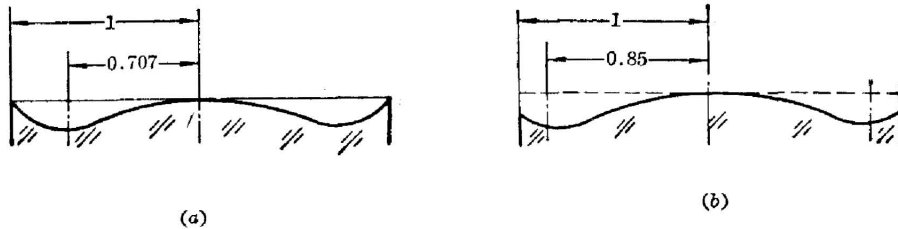


图 6

在用铣磨法磨制球面及平面的过程中, 发现如果工具轴在垂直于对称平面(包含工件轴

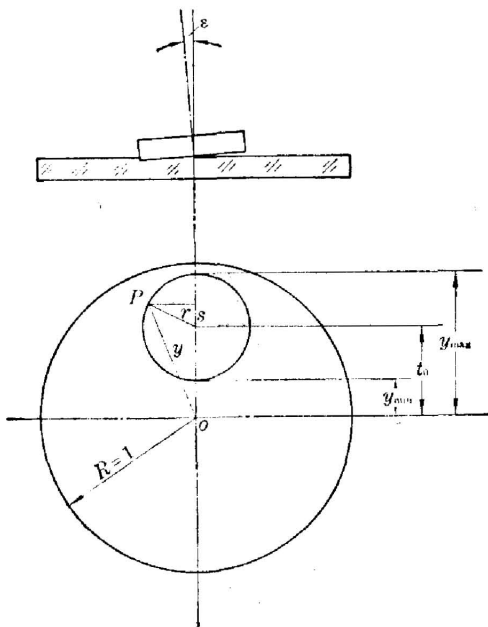


图 7

及工具轴的平面)的方向倾斜一个小的角度  $\varepsilon$ , 则在工件表面便产生中间某带特别低的现象。经过分析与计算, 发现可以利用这个“缺点”来产生 Schmidt 型曲线。曲线不是靠一次铣磨形成, 而是需要经二次或三次调整工具的倾角来分段获得。用一个通用公式逐点计算偏离量, 使逼近给定数据。下面我们推导出计算的公式以及举一个实例以观察误差情况, 如图 7 所示, 其中:  $R$  为工件的半通光口径,  $O$  为工件中心,  $r$  为铣磨环半径,  $t_0$  为铣磨环中心离开工件中心的距离,  $P$  为铣磨环上的某点,  $y$  为从  $P$  点到工件中心的距离, 即带高,  $y_{\max}$  为磨环能及的最高带,  $y_{\min}$  为磨环能及的最低带,  $y_r$  为非球面磨量最大的带, 这时  $p=r$ ,  $p_y$  为铣磨环上  $P$  点离对称面的距离,  $\varepsilon$  为空间角。

从图 7 中可以看到, 如果将工具轴以  $S$  点为转动中心, 在垂直于对称面的方向倾斜  $\varepsilon$  角, 则

薄壁圆环工具的端面有一半切入工件表面, 这样铣磨出来的表面如图 8 所示。很明显, 这个磨出的面上各点离开原始平面的量和距离  $p_y$  成正比。为了方便地推导  $p_y$  和  $y$  的关系, 令  $R=1$ 。从图 7 可以看出:

$$y^2 = p_y^2 + (t_0 + \sqrt{r^2 - p_y^2})^2。$$

解出  $p_y$  得

$$p_y = \sqrt{r^2 - \left[ \frac{y^2 - t_0^2 - r^2}{2t_0} \right]^2}。 \quad (1)$$

从图得

$$t_0 = \sqrt{y_r^2 - r^2}, \quad (2)$$

$$y_{\max} = t_0 + r, \quad y_{\min} = t_0 - r。$$

$P$  点的磨量  $x_p$  为

$$x_p = p \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

其中  $\varepsilon$  根据曲线的最大偏离量  $x_{\max}$  及磨环半径  $r$  确定:

$$\varepsilon = \frac{x_{\max}}{r},$$

故

$$x_p = \frac{x_{\max}}{r} \cdot p。$$

根据这些关系式, 有了实际曲线的数据, 就可以解出环工具的半径  $r$  及磨头中心位置  $t_0$ , 其步骤如下。

根据给定的曲线数据, 找出非球面量最大的带  $y_r$  之值, 代入 (2) 式, 再将  $t_0$  代入 (1) 式得到消去  $t_0$  值的 (1) 式。为了解出  $r$ , 还要从给定数据中取边缘带的磨量  $x_{1.0}$  与最大磨量  $x_{\max}$ , 写出

$$p_{1.0} = \frac{x_{1.0}}{x_{\max}} \cdot r。$$

将此关系代入已消去  $t_0$  之 (1) 式即可解出  $r$  之值。再从 (3) 式算出各带磨去的量  $x_p$ 。

今计算一条实际曲线, 以观察剩余误差情况。给定的是一投影电视上的 Schmidt 校正板曲线 (见表 2 左边的数据)。从中可知最大的非球面量在  $y=0.85$  带, 即

$$x_{\max} = x_{0.85} = 0.633586 \text{ 毫米。}$$

因此

$$t_0 = \sqrt{0.85^2 - r^2},$$

故

$$p_y = \sqrt{r^2 - \frac{(y^2 - 0.7225)^2}{4(0.7225 - r^2)}}。$$

此外, 从曲线数据上可看到  $y=1.0$  时, 非球面量  $x_{1.0}=0.52208$  毫米, 故

$$p_{1.0} = \frac{x_{1.0}}{x_{\max}} \cdot r = 0.824008r。$$

将此  $p_{1.0}$  值代入上式, 并取  $y=1$ , 解得两个  $r$  值:

$$r_1 = 0.79172754 \quad \text{或} \quad r_2 = 0.3093131,$$

以及

$$(t_0)_1 = 0.3093 \quad \text{或} \quad (t_0)_2 = 0.7917。$$

将  $R$  值相乘得实际尺寸:

$$r_1 = 51.462 \text{ 毫米}, \quad r_2 = 20.105 \text{ 毫米},$$

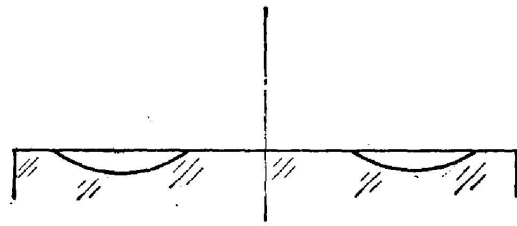


图 8



表 3

第 二 次		第 一 次				第 二 次				第 一 次			
$y/R$	$y$ mm	$x$ (给定) mm	$x$ (球面磨去) mm	空间角应磨量 $\alpha$ mm	$p$ ( $y=0.707$ 时) $p$ ( $p=r$ )	$\bar{p}$ ( $y=0.707$ 时) $\bar{p}$ ( $p=1$ )	$x$ (实际) mm	差量 mm	$p$ ( $y=0.716$ 时) $p$ ( $p=r$ )	$\bar{p}$ ( $y=0.716$ 时) $\bar{p}$ ( $p=1$ )	$x$ (实际) mm	差量 mm	
				0									
1.0	50	0.610350	0.610350		$y=47.015$ 0	0	0		$y=47.5$ 0	0	0		
0.9	45	0.555343	0.4943835	0.0609595	0.17720733	0.5906911	0.05670221	+0.00426	0.193983086	0.64661028	0.06207006	-0.0011106	
0.8	40	0.480362	0.390624	0.0897380	0.27937212	0.9312404	0.08939256	+0.000345	0.28351528	0.94505093	0.090718274	-0.0009803	
0.716	35.8	0.409037	0.3128996	0.0971374					$y_r$ 0.3	1	0.095993	+0.001144	
0.707	35.35	0.401168	0.305175	0.095993	$y_r$ 0.3	1	0.095993	0	0.29984587	0.9994862	0.0959437	+0.000049	
0.7	35	0.395034	0.2990715	0.0959625	0.29989836	0.99966119	0.0959604	+0.000021	0.2995003	0.9983944	0.09583311	+0.0001294	
0.6	30	0.307164	0.219726	0.0874380	0.27937212	0.9312404	0.08939256	-0.0019526	0.27611394	0.9203798	0.088835002	-0.000912	
0.5	25	0.223065	0.1525875	0.0704775	0.2277943	0.75931433	0.07288886	-0.0024111	0.22187144	0.7395715	0.0709937	-0.000516	
0.4	20	0.147798	0.0976506	0.0501420	0.13968536	0.46561787	0.044696056	+0.00545					
					$y=17.015$ 0	0	0		$y=17.5$ 0	0	0		
0.3	15	0.085310	0.0549315										
0.2	10	0.038601	0.024414										
0.1	5	0.009753	0.0061035										
0	0	0	0	0									

$t_0=0.65$  (32.5 mm)  
 $r=0.3$  (15 mm)  
 $y_{\min}=17.5$  mm  
 $y_{\max}=47.5$  mm  
 $\varepsilon=\frac{0.095993}{15}=0.00639953$  弧度 $\approx 0.367^\circ$

$t_0=0.6403124$  (32.015 mm)  
 $r=0.3$  (15 mm)  
 $y_{\min}=17.015$  mm  
 $y_{\max}=47.015$  mm  
 $\varepsilon=\frac{0.095993}{15}=0.00639953$  弧度 $\approx 0.367^\circ$

$R=50$  mm

$$(t_0)_1 = 20.105 \text{ 毫米}, (t_0)_2 = 51.462 \text{ 毫米}.$$

这意味着要使  $y=0.85$  及  $y=1.0$  两带得到预定的非球面量, 可以有两个解, 一个是大环, 另一个是小环。将其它带的磨去量和给定曲线的差量算出, 列于表 2 的右边。从表 2 中可以看到, 用大环及小环得到的结果完全一样, 并且在  $y=48.5$  毫米以上有足够好的精度。从表 2 中还可以看到, 在  $y=39$  毫米带的差量达 +38 微米(欠磨)之多, 所以必须再磨一次才有可能得到较好的结果。第二次磨的计算方法是将工件看作  $\phi 100$  毫米, 即取  $R=50$  毫米作为单位。这时  $y=1.0$  的非球面量为 0.610350 毫米。先用一个球面来接近, 这个球面使  $y=1.0$  及  $y=0$  和曲线吻合, 其余各带有剩余量再用空间角来磨。这个球面的半径  $R_\alpha$  为

$$R_\alpha = \frac{50^2}{2 \times 0.610350} = 2048.0 \text{ 毫米}.$$

表 3 列出取  $r=0.3$ (15 毫米) 的环在  $t_0=32.015$  及  $t_0=32.5$  两个位置分别计算得出的结果。可以看出,  $t_0=32.5$  的位置较好。差量的正值表示欠磨, 负值表示超磨。有些地方超磨量在 1 微米左右。对于最大非球面量为 0.63 毫米来说, 1 微米的误差已是不大的了。 $y=25$  毫米以下已进入中央遮拦区可以不加考虑。

为了适应第二次磨时的球面吻合, 工具轴必须在对称平面内转过  $\alpha$  角, 其值为

$$\sin \alpha = \frac{t_0}{R_\alpha} = \frac{32.5}{2048} = 0.01586914 \text{ 弧度}.$$

这个例子说明用空间角  $\epsilon$  来产生 Schmidt 非球面的办法是可行的。只要在铣磨平面的机器上, 工具轴在垂直于对称平面方向有调整倾斜的机构, 这个调整量是很小的。当然, 机器轴系的精度应足够高, 但结构是简单的, 并可适用于很大的口径范围。

## Principles of new mechanisms for producing aspherical surfaces

PAN JUNHUA

(Nanjing Astronomical Instruments Factory)

(Received 17 February 1980)

### Abstract

In this article, principles of two new mechanisms for producing usual aspherical surfaces are proposed. The geometrical relationships are discussed. As a special feature of this method, the grinding instrument is always in line contact with the work piece during grinding and continuity of produced surface will be expected.