

•光电器件与材料•

## 研磨修带法加工轴对称二次非球面

李晓奇<sup>1</sup>, 刘海欧<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学 光电信息学院光电工程分院, 长春 130012; 2. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:**非球面零件由于其在矫正像差和简化光学系统方面的优势,越来越被广泛的应用于现代光电仪器上,其中应用的最广泛的非球面零件要属轴对称二次非球面。文中研究的是国内常用的加工轴对称二次非球面的方法——研磨修带法,即在最接近比较球面的基础上修磨非球面的方法。主要讲述了由非球面方程入手,得到它的最接近比较球面及各带区的偏离量,确定加工方案,运用适当的修带工具得到所需的非球面的过程。

**关键词:**研磨修带法;轴对称二次非球面;最接近比较球面;修带工具

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-05-0032-04

## Grinding and Trimming Method for Processing Axisymmetric Two Aspheric Surfaces

LI Xiao-qi<sup>1</sup>, LIU Hai-ou<sup>2</sup>

(1. College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;  
2. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

**Abstract:** For the advantages of correcting aberration and simplifying optical system, aspheric parts are widely used in modern optical instruments, and one of the most widely used aspheric part is two axisymmetric aspheric surface. The method of grinding and trimming for processing two axisymmetric aspheric surfaces is re-searched, which is the method of grinding and trimming aspheric surfaces based on recent spherical surface. From the aspheric equation, the recent spherical surface and the deviations of the zones are obtained to determine the processing scheme. And the required aspheric process is obtained using appropriate trimming tools.

**Key words:** grinding and trimming method; axisymmetric two aspheric surface; recent spherical surface; trimming tool

### 1 理论基础

轴对称二次非球面,也称作回转二次非球面。是由二次曲线绕轴旋转而得到的,包括抛物面、椭球面、双曲面及扁椭球面。

建立坐标系(如图1所示)。则二次曲线的一般方程可表示如下

$$y^2 = 2R_0x - (1 - e^2) \quad (1)$$

式中, $R_0$ 为曲线顶点的曲率半径; $e^2$ 为偏心率平方,曲线的形状参数。

形状系数 $e^2$ 与曲线性质的对应关系如下:

$e^2 < 0$  扁圆

$e^2 = 0$  圆

$e^2 = 1$  抛物线

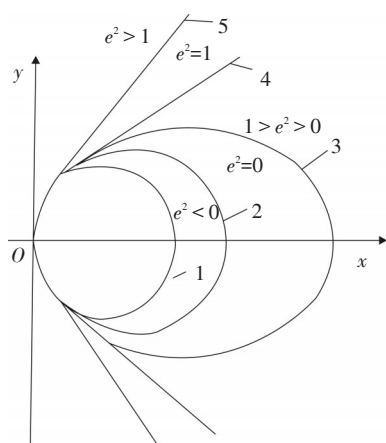
$0 < e^2 < 1$  椭圆

$e^2 > 1$  双曲线

收稿日期: 2016-10-08

作者简介: 李晓奇(1983-),女,吉林省长春市人,硕士,讲师,主要研究方向是光电工程;刘海欧(1982-),女,辽宁锦州人,学士,主要研究方向是光电工程。

曲线绕对称轴(横坐标)旋转就成了相应的二次曲面<sup>[1-2]</sup>。



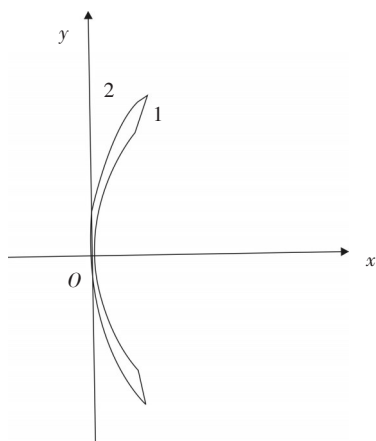
1-扁圆; 2-圆; 3-椭圆; 4-抛物线; 5-双曲线

图1 二次非球面的几何性质

由于他们各自有独特的光学性能,将单个的或组合起来的二次非球面应用在光学仪器中,可获得十分满意的效果。因此随着光学仪器的不断发展,这类非球面的应用日趋广泛。回转二次非球面,目前不论是加工工艺,还是检验都比较成熟,国内多采用研磨修带法。

## 2 最接近比较球面

研磨修带法加工轴对称二次非球面的思路是先加工出其最接近比较球面,在此球面基础上用修带工具修改成所需非球面。图2为凸二次非球面的最接近比较球面的确定结果。



1-二次非球面曲线; 2-最接近比较球面

图2 凸二次非球面的最接近比较球面的确定

最接近比较球面即通过非球面子午面内最边缘两点和中心点所确定的球面。以凸非球面为例,二者之间沿x轴的偏离量称为非球面度。

所以加工者在加工前需要通过计算得到最接近比较球面的曲率半径,和各带区的非球面度,以及最大非球面度  $\delta_{\max}$ 。

现以凸二次非球面为例,说明非球面度的计算方法(如图3所示)。它们之间的偏离量可由下式确定

$$\delta = x_1 - x_2 \tag{2}$$

由式(1)可得

$$x_1 = \frac{R_0 \sqrt{R_0^2 - (1 - e^2)y^2}}{1 - e^2} \approx \frac{y^2}{2R_0} + \frac{(1 - e^2)y^4}{8R_0^3} \tag{3}$$

$$x_2 = R - \sqrt{R^2 - y^2} \approx \frac{y^2}{2R} + \frac{y^4}{8R^3} \tag{4}$$

式中,  $\delta$  为偏离量;  $R_0$  为非球面顶点曲率半径;  $R$  为最接近比较球面曲率半径。

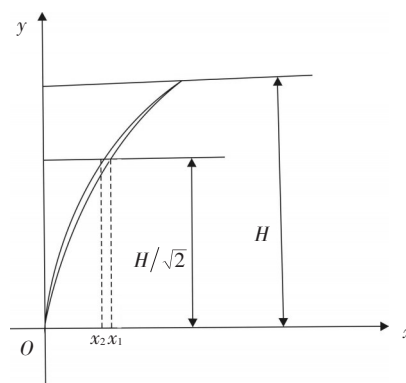


图3 二次非球面最大偏离量的确定

两曲线在边缘点  $y=H$ (见图3)处相交的必要条件为

$$x_1 = x_2$$

$$\frac{H^2}{2R_0} + \frac{(1 - e^2)H^4}{8R_0^3} = \frac{H^2}{2R} + \frac{H^4}{8R^3}$$

$$\frac{1}{R} \approx \frac{1}{R_0} - \frac{e^2 H^4}{4R_0^3} \tag{5}$$

式中,  $H$  为相当于非球面口径之半。

其偏离量为

$$\delta = x_1 - x_2 \approx$$

$$\frac{y^2}{2R_0} + \frac{(1 - e^2)y^4}{8R_0^3} - \left( \frac{y^2}{2R} + \frac{y^4}{8R^3} \right) =$$

$$\frac{y^2}{2R_0} - \frac{e^2 y^4}{8R_0^3} - \frac{y^2}{2R} = e^2 y^4 \frac{H^2 - y^2}{8R_0^3} \tag{6}$$

其最大偏离量和它的位置为

$$\frac{d\delta}{dy} = \frac{e^2}{8R_0^3}(2H^2 - 4y^2) = 0 \quad (7)$$

$$y^2 \approx \frac{H^2}{2} \quad (8)$$

由此可知,最大偏离量的位置为

$$y = \frac{H}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

$$\delta_{\max} = \frac{e^2(\frac{H^4}{2} - \frac{H^4}{4})}{8R_0^3} = \frac{e^2 H^4}{32R_0^3} = \frac{e^2 D^4}{512R_0^3} \quad (10)$$

式中,  $D$  为透镜口径。

若为凹非球面,其最接近比较球面需要将图2中的曲线2沿轴向右平移,平移的距离为最大非球面度,此时在0.7带有最小偏离量,而在中心和边缘有最大偏离量,与凸非球面的偏离情况正好互补<sup>[3-5]</sup>。

知道了比较球面和非球面偏离量的情况,这对加工回转二次非球面是非常重要的。根据最大偏离量,可以在加工工艺上确定在哪一道工序开始进行非球面的修改。例如,最大偏离量在几个微米时,可在比较球面抛光完毕之后,再将其修改成非球面;如果最大偏离量在零点几个毫米,则需要在细磨时修改成非球面;最大偏离量在几个毫米时,在粗磨时就要进行非球面的修改<sup>[6-7]</sup>。

由式(10)可以得到某一非球面的最大偏离量,从而可以知道这个非球面加工的难易。 $\delta_{\max}$ 数值越大,非球面就越难加工。

非球面加工的难易程度还与“陡度”有关,即在比较小的半径中磨去最大偏离量,比较大的半径中磨去同样的最大偏离量要困难,因为前者更加“陡峭”。当然加工的难易与零件精度的要求有关系。

### 3 研磨修带法

目前,国内二次非球面的加工大都采用研磨修带法,大多是机修和手修并用。加工高精度二次非球面更是如此,到了加工后期,几乎完全靠手修。根据加工者的不同,加工方法不是唯一的,主要明白它的加工原理。

研磨修带原理是基于磨具工作表面相对于非球面不同带区有不用接触面积,因此在单位加工时间内,磨具使零件表面产生不均匀磨损,从而达到

修带目的。

按磨具用途不同,可分为单块精磨磨具和整盘精磨磨具两类。单块精磨工具曲率半径与最接近比较球面的曲率半径相同,凸凹相反,大小和形状选择,应根据被加工非球面的类型、非球面度大小和精度而定。单块精磨工具如图4所示。

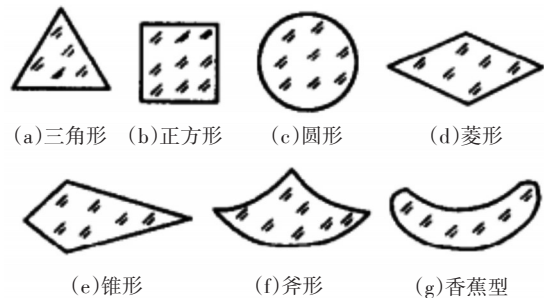
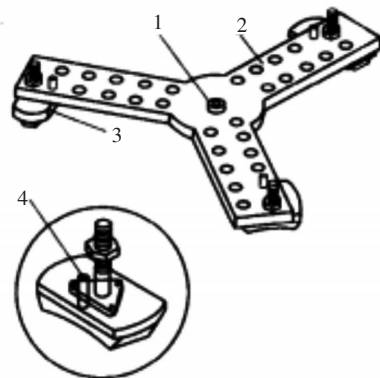


图4 单块精磨工具

例如加工离轴抛物面时,图4d中菱形磨具可适用于修改0.7带以外的面形,图4e锥形磨具适用于修改0.7带以内的面形(加工时小锐角应向零件中心),图4f斧形磨具可用来修改焦距和局部小带。

修磨非球面时,一般先修磨非球面度最大、带区最宽的部位,此时应尽可能地少磨与球面接近的部位。这样可以使曲面保持平滑。加工中按测得结果,什么带区偏离量最大,就先磨什么带区。精磨后若各带区的焦距相差很多时,就应继续精磨修改。若各带区的焦距基本上一致时,则可进行试抛。通常精磨结束时,各带区要求尽量平滑些,否则给抛光带来不便。三点工具(如图5所示)可将小磨具连接起来。



1—铁笔孔;2—三脚架;3—小磨具;4—定位销

图5 三点工具

在用手拿小工具进行加工时,优点是轨迹更复杂,镜面也会更平滑。三点工具是由环形磨具发展而来,该工具是利用三点可以组成一个圆的道理,随着中心距的改变,就可以在支架上调正其位置。为了防止小磨具的转动,一般需加定位销。三脚架通常用钢材(或铝合金)制成,而小磨具的材料为铝合金。三个小磨具的形状,大小和位置的选择,应根据被加工零件需要修改带区的宽窄及部位而定。图6为整盘精磨磨具图。

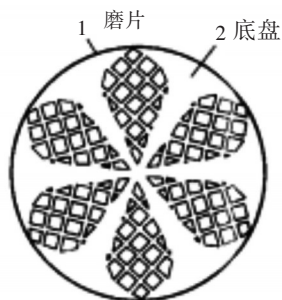
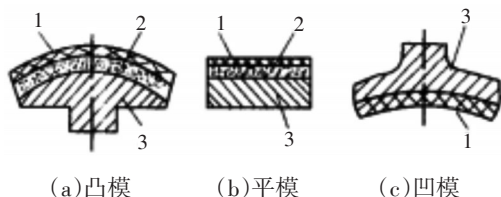


图6 整盘精磨磨具

整盘的精磨磨具可以提高工作效率减少修磨时间,工作面的曲率半径一般可选用最接近球面的曲率半径。对于零件表面曲率很小时,磨具的工作表面也可选平面。

抛光模具如图7、图8所示。



1—抛光柏油;2—泡沫塑料或毛毡;3—模具座

图7 局部抛光模具

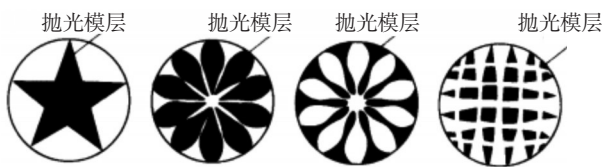


图8 全口径抛光工具

模具座可用金属制成,也可直接选用精磨时的磨具,在其上加弹性材料,如海绵、泡沫塑料、毛毡之类,再用软柏油制成所需形状。

抛光模具的外形尺寸应根据零件所需修磨带区的情况选用,一般与需要修磨的带宽相等,其面形的给定通常与加工带工区的表面贴合。

当非球面度很小时,直接用来修改非球面面形的抛光模具,外径一般和被加工零件外径相同,工件表面曲率半径为被加工球面的最接近曲面曲率半径,凸凹相反。常用的表面形状如图8所示<sup>[8-11]</sup>。

研磨修带法其加工精度高,但需要工序多,具有加工效率低、加工周期长、成本高等特点。

## 4 结 论

主要阐述了研磨修带法加工轴对称二次非球面的过程,即在其最接近比较球面的基础上,使不同的带区磨去不同的量,达到所需非球面。首先需要计算出此非球面的最接近比较球面的曲率半径,最大非球面度,从而判断出在哪道工序去修改,修改的难易,及所用修磨工具的大小和形状,确定出修磨方案。根据加工者的不同,所采用的方法并不是唯一的,重点掌握研磨修带的原理。

## 参考文献

- [1] 杨力,张雨东.现代光学制造工程[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 田守信.高精度及特种光学零件制造与检测[M].武汉:华中理工大学出版社,1991.
- [3] 李俊峰.非球面度梯度均方根法确定最佳比较球面及应用[J].电子测量与仪器学报,2015,10:1550-1556.
- [4] 莫卫东,傅振堂,范琦,等.确定非球面最佳参考球面及非球面度的一种新方法[J].光电工程,2012,12:7-11.
- [5] 阎茂盛.二次曲面非球面度计算方法及公式[J].应用光学,1990(3):46-51.
- [6] 敬娟.非球面加工工艺研究[D].南京:南京理工大学,2013.
- [7] Goela, Jitendra S, Taylor, et al. Rapid fabrication of light-weight ceramic mirrors via chemical vapor deposition[J]. Applied Physics, 1989.
- [8] Takino, Hideo, Shibata, et al. Fabrication of optics by use of plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode[J]. Applied Optics, 2002.
- [9] 庞长涛,罗松保.非球面加工先进技术[J].航空精密制造技术,2001(3):1-5.
- [10] 孙立宏.日趋成熟的非球面加工技术[J].光机电信息,2004(6):21-24.