

凸非球面加工

郝沛明

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

提 要

凸非球面加工一直是很困难的。本文从三级像差理论出发, 对以前凸非球面加工方法作一简单描述, 对目前采用新方法进行详细的讨论, 并给出加工凸非球面的实例。

关键词: 凸非球面, 三级像差理论。

从三级像差理论可知, 球差系数表示式为

$$\left. \begin{aligned} S &= hp + h^4 K, \\ h &= lu = l'u', \quad K = -e^2(n' - n)/r^3, \\ P &= \frac{(u' - u)^2}{[(1/n') - (1/n)]^2} \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 e^2 为非球面偏心率, r 为非球面顶点曲率半径, n 和 n' 为非球面前和后的介质折射率, h 为光线入射到非球面上的高度, u 和 u' 为入射到非球面和从非球面出射的光线与光轴的夹角, 如图 1 所示。从图 1 将 l 知 l' 作为变数, 即保持入射高度 h 不变, 把 u 和 u' 作为变数, 令 $s_1 = 0$, 将 P 和 K 代入 (1) 式并利用几何光学的近轴公式, 就可以求解在光轴上的两个消球差的共轭点, 方程组为

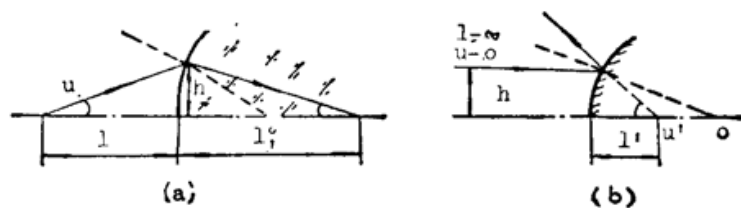


Fig. 1 Refraction of a ray at aspherical surface

$$\left. \begin{aligned} \beta &= nu/n'u' = n'l'/n'l, \\ (n' - n)/r &= n'(1 - \beta)/l', \\ e^2 &= [1 - (n'/n)\beta]^2 [(n^2/n'^2) - \beta]/(1 - \beta)^3. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在方程组 (2) 式中, 若 β^2 , e^2 , n 和 n' 为已知, 可解出 β , l 和 l' 。下面, 对方程组 (2) 式进行分析。

一、以前采用的凸非球面加工方法

以前采用的凸非球面, 多半用于天文望远镜系统中, 对反射式凸非球面而言, 这样方程

组(2)式就变成

$$\beta = -l/l, \alpha/r = (1 - \beta)/l, e^2 = (1 + \beta)^2(1 - \beta)^{-2}. \tag{3}$$

(3)式对 $e^2 < 0$ 的扁球面是无解的, 只有 $e^2 \geq 0$ 才有解, 现将 $e^2 \sim \beta$ 的关系表示在图 2, 显然, 除 $\beta = -1$, 此时 $e^2 = 0$ 为球面外, $-\infty < \beta < 0$ 的区间, 对椭圆面有两个消球差的共轭点; $\beta = 0, e^2 = 1$ 为抛物面; $0 < \beta < \infty$ 的区间, 对双曲面有两个消球差的共轭点, 如图 3 所示。根据图 3 可以得出各种非球面的检验方法, 这就是辛特尔法 (Hindle) 凸双曲面的检验示意图如图 4 所示, 凸抛物理的检验示意图如图 5 所示, 使凸非球面的一个消球差点 F 与球面辅助镜的球心重合, 可实现光线自准的目的。这种方法有两个缺点: (1)球面辅助镜的尺寸要很大; (2)凸非球面不能做到整个面形检验, 因为中心有遮拦。为了改进上述缺点, 可用单块弯月形透镜法, 如图 6 所示, 它是辛特尔法的改进, 其缺点是弯月形透镜的尺寸要比加工件的尺寸大, 还有残余带差, 由于加入半反半透球面, 光能量损失比较大。对于反射式凸扁球面, $e^2 < 0$, 只能用补偿法检验^[3,5]。

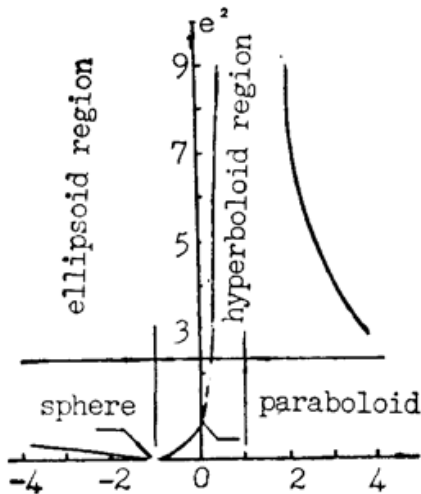


Fig. 2

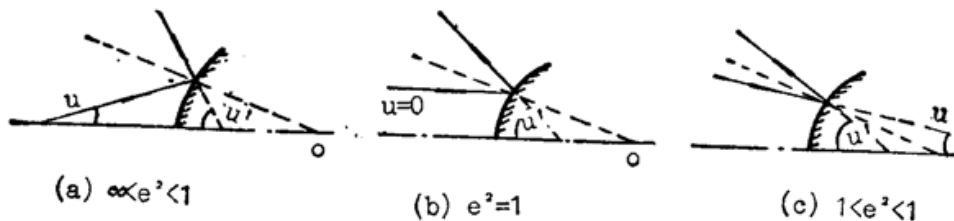


Fig. 3

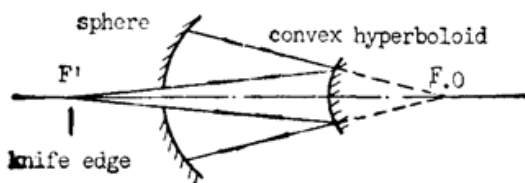


Fig. 4

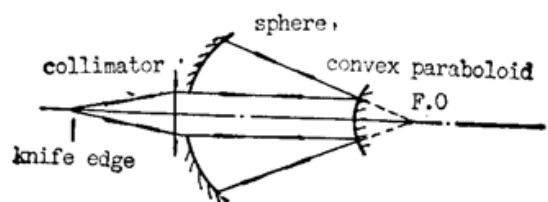


Fig. 5

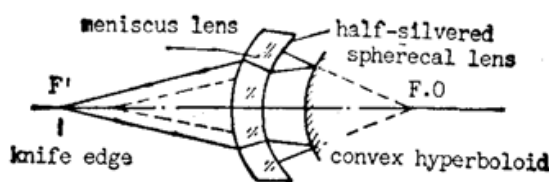


Fig. 6

二、现在采用的凸非球面加工法

随着科学技术的发展, 非球面透镜在照相镜头, 变焦距镜头, 投影镜头, 制板镜头, 微缩

镜头, 望远镜和目镜……中得到应用, 所以必须采用透射检验, 方程组(2)式对透射也是实用的。例如加工光学材料为 K_9 的凸非球面透镜, 将 $n=1, n'_D=1.5163$, 代入(2)式得出

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 0.6595l'/l, r^{-1} = 2.9369(1-\beta)/l', \\ e^2 &= (1 - 1.5163\beta)^2(0.4349 - \beta)(1-\beta)^{-3}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

利用(4)式, 将 $e^2 \sim \beta$ 的关系表示如图 7 所示, 显然, 随着放大率 β 由 $-\infty \rightarrow \infty$ 过程, 相应的 e^2 也改变, 其图形也随着变化。其情况如表 1 及图 8 所示。图 8 中描绘出光线经同一半径凸扁球面、球面、椭圆面、抛物面、双曲面上折射所得出的在光轴上二个消球差共轭点变化的光路图, 这给出凸非球面检验的示意图, 说明对折射而言, 包括扁球面在内的所有非球面都可以进行检验。

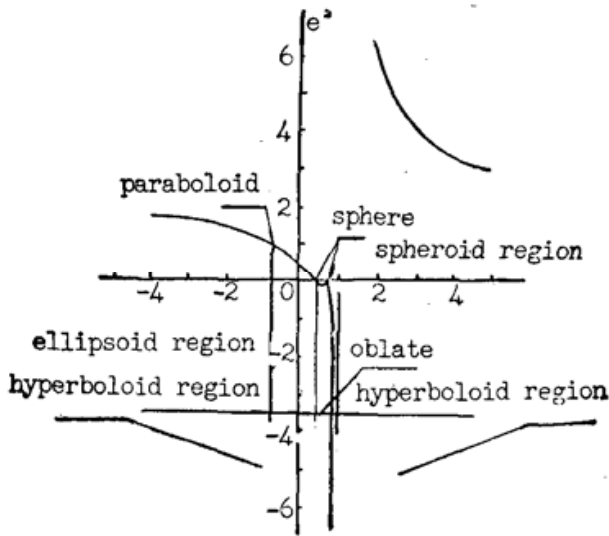


Fig. 7

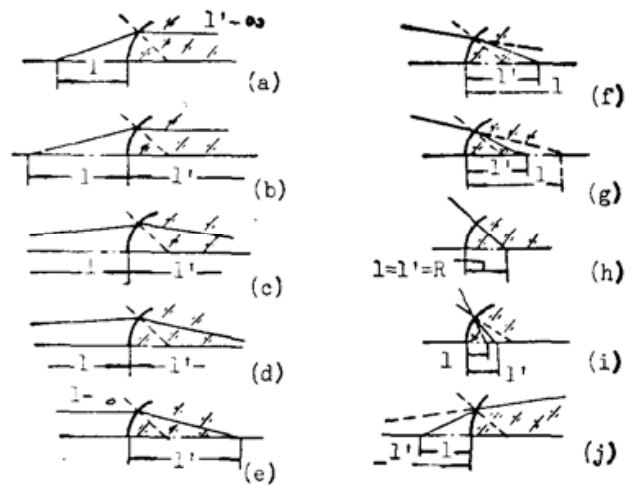


Fig. 8

Table 1

B	e^2	geometric figure
$-\infty$	2.3	hyperboloid fig. 8(a)
$(-\infty, -0.74)$	$(2.3, 1)$	hyperboloid fig. 8(b)
-0.74	1	paraboloid fig. 8(c)
$(-0.74, 0)$	$(1, 0.4349)$	ellipsoid fig. 8(d)
0	0.4349	ellipsoid fig. 8(e)
$(0, 0.4349)$	$(0.4349, 0)$	ellipsoid fig. 8(f)
0.4349	0	sphere fig. 8(g)
$(0.4349, 0.66)$	$(-0.03, 0)$	oblate spheroid
0.66	0	sphere fig. 8(h)
$(0.66, 1)$	$(-\infty, 0)$	oblate spheroid fig. 8(i)
$(1, \infty)$	$(2.3, \infty)$	hyperboloid fig. 8(j)
∞	2.3	hyperboloid fig. 8(a)

三、实 例

利用上述理论, 我们加工了用于高倍投影仪, 如图 9 所示的凸 $\phi 120, K_9$ 光学凸非球面

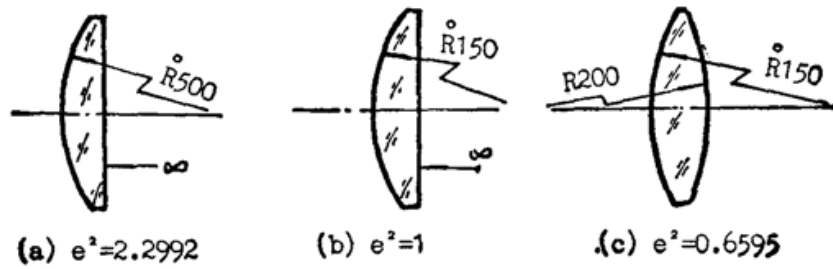


Fig. 9

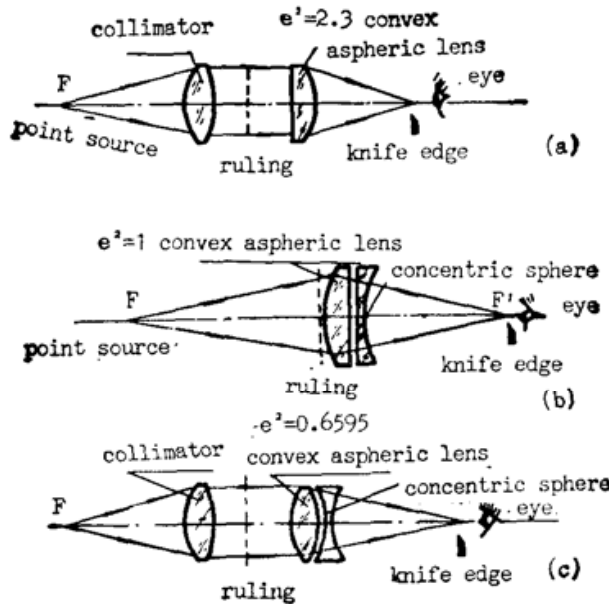


Fig. 10

透镜。按(4)式求解,对图9(a)的参数而言,得出 $\beta \rightarrow \pm\infty$, $l = -290.528$, $l' \rightarrow \pm\infty$, 如同图8(a)相同,这样检验加工方案按图10(a)所示进行;对图9(b)的参数而言,得出: $\beta = -0.74$, $l = 683.14$, $l' = 766.53$,如同图8(c)相同,这样检验加工方案按图10(b)所示进行;对图9(c)的参数而言,得出: $\beta = 0$, $l \rightarrow \infty$, $l' = 290.528$,如同图8(c)所示,这样检验加工方案如图10(c)所示进行,数据列于表2,表3和表4,按表2~4的数据追迹光线证定,生成的高级球差很小,可忽略不计,这充分说明上述原理是可行的。采用自准检验还是透射检验均可,为了达到非球面修磨量最小的目的,必须选择最佳比较球面 R 和最大修磨量 δ_{max} ,如图11所示^[5],

$$R = r + (xe^2/2), \delta_{max} = D^4e^2/4096r^3 = y^4e^2/256r^3, \tag{5}$$

式中非球面方程式为 $y^2 - 2rx + (1 - e^2)x^2 = 0$, 这样

Table 2

No	R	d	n
collimator		∞	1
1	∞	15	1.5163
2	-150	290.53	1

Table 3

No	R	d	n
point source		683.14	1
1	150	15	1.5163
2	∞	0.05	1
3	∞	10	1.5163
4	756.48	756.48	1

Table 4

No	R	d	n
collimator		∞	1
1	150	15	1.5163
2	-200	0.05	1
3	-200	10	1.5163
4	280.48	280.48	1

$$x = \frac{r \pm \sqrt{r^2 - (1 - e^2)y^2}}{(1 - e^2)} \quad (6)$$

对于抛物面

$$x = y^2 / 2\gamma \quad (7)$$

将图 9 的非球面透镜参数,按(5)、(6)和(7)式计算的数据列于表 5,最大修磨量 δ_{\max} 都大于 0.01 mm,靠抛光修改是不可能的,这样确定凸非球面的加工方法如下:

- (1) 加工凹非球面铁样板;
- (2) 将凸非球面按最佳比较球面加工,在图 10 检验方案中,可观察到如图 12(a) 的弯曲朗奇图^[2];
- (3) 用 302* 金刚砂修磨,是采用靠模,还是不同形状的模具,根据实际情况而定,如图 13 所示;
- (4) 用铁样板检查好以后抛光;
- (5) 按图 10 方案检查,修磨—抛光—修磨—抛光,直至观察到如图 12(b) 所示直线朗奇图为准;

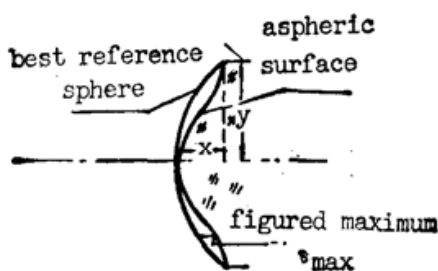


Fig. 11

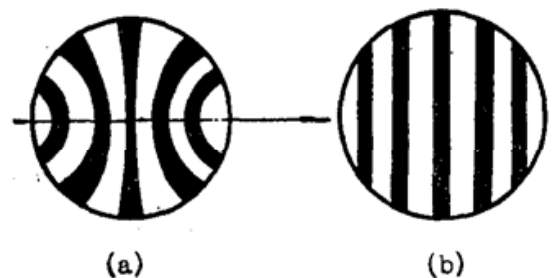


Fig. 12

Table 5

\bar{R}	e^2	x	R	δ_{\max}
150	2.30	11.433	163.15	0.0345
150	1.00	12.00	156.00	0.0150
150	0.6595	12.168	154.01	0.0100

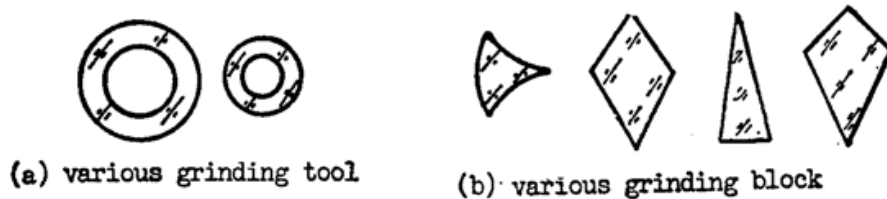


Fig. 13

(6) 改用刀口阴影检验带差^[2,6], 再修磨—抛光—修磨—抛光, 直至阴影图无带差为准;

(7) 最后用读数显微镜观察星点, 星点直径大小 ϕ_1 可按下式计算

$$\phi_1 = (\phi_2 / \Gamma) - \phi_0, \quad (8)$$

式中, ϕ_2 为用读数显微镜读数鼓轮测得星点直径值; $\Gamma = (f_1 / f_2)$ 为放大率, f_1 为平行光管的焦距, f_2 为凸非球面透镜和辅助透镜的组合焦距; 对于自准检验, $\Gamma = 1$; ϕ_0 为平行光管点光源的直径或刀口仪星点直径。

按上述方法加工的三种凸非球面透镜的真实星点(或弥散斑)直径都可以达到 0.01~0.05 mm 是符合设计要求的。

五、结 论

通过大量凸非球面透镜加工证实, 用折射检验加工凸非球面有许多优点:

- (1) 对检验而言, 方案设计简单实用, 只用方程组(2)式计算就可得出合理的结果。
- (2) 辅助透镜的光学材料不大于非球面透镜的尺寸, 这方法对 ϕ 150 以下的非球面透镜的加工是非常实用的。
- (3) 按这种方法加工非球面透镜, 采用高质量光学材料, 容易得到高精度的非球面面形。
- (4) 按此方法可加工非球面样板, 对凸和凹非球面都是实用的, 这样为大批加工非球面提供了良好的检验工具。

本法加工好的凸非球面透镜, 用于高倍投影镜头中, 取得非常好的效果。说明折射方法加工非球面透镜是有效可行的。

最后, 向帮助作者作了大量工作的顾华英、舒斌、耿家金等同志表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 王之江;《光学设计理论基础》, (科学出版社, 北京 1965), 295~317。
[2] 潘君骅, 郝沛明;《天文学报》, 1965, 13, No. 1, 46~56。
[3] D. Malacara; 《Optical Shop Testing》, (John Wiley & Sons Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, 1987), 283~323。
[4] Д. Д. Максудов; «Астрономическая Оптика», (Москва, 1946 Ленинград), 293~305。
[5] 郝沛明;《长春光机学院院报》, 1980, No. 1, 18~28。

Fabrication of a convex aspherical surface

HAO PEIMING

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academic Sinica, Hefei 230031)

(Received 16 October 1990; revised 18 March 1991)

Abstract

Fabrication of a convex aspherical surface is always difficult. Based on the third-order aberration theory, general method of the fabrication has been described simply in this paper. A new method is discussed in detail and some examples are given.

Key words: convex aspherical surface; third-order aberration theory.