

凸非球面的检验方法

张海洪*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘 要 本文对光学凸非球面的检验方法进行了总结, 主要介绍了在无像差点法和补偿法的原理上发展起来的各种检验方法。对 Hindle 球检验法在轴上和离轴两种情况下的使用都做了介绍, 并且比较详细的介绍了折射式和反射式 Offner 补偿器。

关键词 凸非球面 检验 无像差点法 补偿法

Method For Testing Convex Aspheric surfaces

Zhang Haihong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083)

Abstract: This paper is a summary of the methods for testing convex aspheric surfaces. The main point is the method based on the principles of aberration-free point and compensation methods. The on-axis and off-axis testing of Hindle sphere are presented, and the Offner refractive and reflective compensators are also presented in detail.

Key words: convex aspheric surface, test, aberration-free point, compensator

1 引言

随着天文、军事以及空间技术的不断发展, 人类对光学系统的性能要求也越来越高。光学仪器采用非球面能够改善像质, 提高光学特性, 简化仪器结构, 从而减小重量和外形尺寸。由于非球面只有一个对称轴, 各带区的曲率不等, 所以对非球面的加工、检验要比球面复杂得多。特别是对一些大孔径、大相对口径的非球面的检验就尤为困难。本文对常用的凸非球面的检验方法做了总结, 介绍了一系列基于两种不同原理的检验方法。

2 几种非球面的检验方法

目前在光学系统中使用的非球面主要是二次轴对称非球面。由于检验时需要有一束口径

不小于镜面口径的会聚光束, 所以对凸非球面镜面形的检验要比凹非球面镜困难得多。从检验原理上看, 对凸非球面的检验方法主要有无像差点法和补偿法。

2.1 无像差点法

由二次曲面的几何特性可知, 与曲面几何焦点共轭的像没有像差。无像差点法利用的就是这个原理。

2.1.1 凸抛物面的检验

由抛物面的数学性质可知, 当一束平行光束射向抛物面并被它反射后, 将成为一束发散的同心光束, 这束同心光的延伸交点就是抛物面的焦点, 如图 1(a) 所示。根据这个特性, 就可以构成检验凸抛物面的无像差点光路。如图 1(b) 所示, 令辅助球面镜的球心与抛物面的焦点重合, 准直物镜用于产生平行光束。

* 2000 级硕士研究生

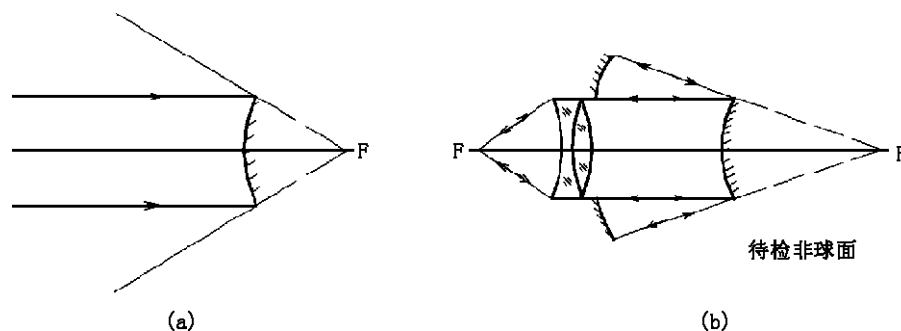


图 1 抛物面的无像差点检验光路

2.1.2 凸椭球面及双曲面的折射无像差点检验

根据三级像差理论可知，三级球差系数的表达式为：

$$S_1 = hP + h^4K$$

其中， $h = lu = l'u'$

$$K = -e^2(n' - n)/R^3$$

$$P = \frac{(u' - u)^2}{(1/n' - 1/n)} \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right)$$

式中， e^2 为二次曲面偏心率的平方，也就是非球面系数， n' 和 n 分别为非球面前后介质的折射率， 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 2 所示。

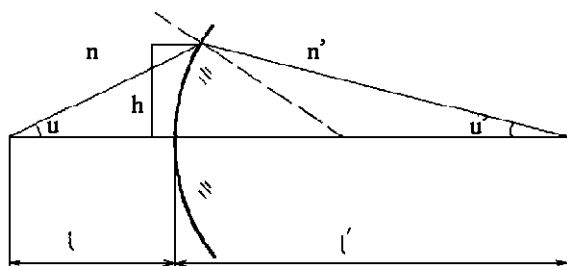


图 2 非球面的折射光路

令 $S_1 = 0$ ，保持入射高度不变，将 l 作变数，利用几何光学的近轴公式：

$$(n' - n)/R^3 = n'(1 - \beta)/l'$$

以及放大率公式：

$$\beta = nl'/n'l$$

就可以求解在光轴上的两个消球差的共轭点 l

和 l' 。

2.1.3 轴上 Hingdle 球检验法

Hindle 球检验法就是利用无像差点原理来检验的，其光路图如图 3 所示。在所有非球面的检验方法中，Hindle 球检验是最早、最经典的，同时也是可靠性最高的检验方法。Hindle 球主要用于检验凸非球面，具有检验精度高、装调简单等优点，但缺点是当检验大口径凸非球面时，就需要更大口径的Hindle球，这就造成了材料和工艺上的难度。

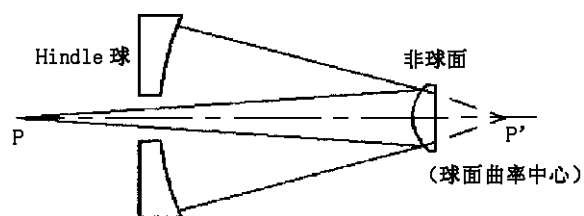


图 3 Hindle 球检验图

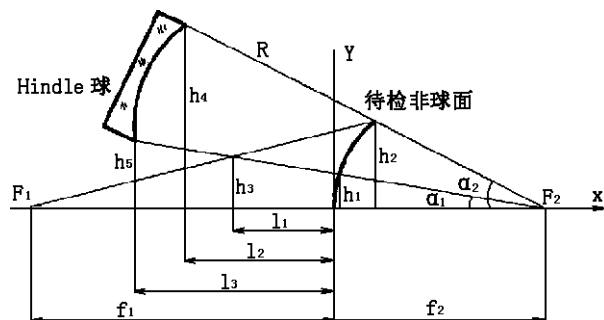


图 4 离轴 Hindle 球检验法光路图

2.1.4 离轴 Hingdle 球检验法

在用Hindle球对离轴凸非球面进行检验时，Hindle球均与待检非球面同轴，为了检验整个非球面，则需要更大口径的Hindle球。如

果待检非球面本身的口径就比较大, 由于材料和工艺的因素, 就能造成 Hindle 球检验方案的失败。针对这种情况, 可以采用离轴 Hindle 球进行检验。

图 4 为系统光路图, Hindle 球的球心与待检非球面的第二个焦点重合。由非球面方程可推导出:

$$\frac{\left[x - \frac{1}{(1+k)c}\right]^2}{\frac{1}{(1+k)^2c^2}} + \frac{y^2}{\frac{1}{(1+k)c^2}} = 1$$

两个焦点之间的距离为 $F_1F_2 = 2d$, $d = \sqrt{\frac{1}{(1+k)^2c^2} - \frac{1}{(1+k)c^2}}$, 且 d 在 x 方向上有 $\frac{1}{(1+k)c}$ 的平移, 则两个焦距为:

$$f_{1,2} = \frac{-\sqrt{-k} \pm 1}{(1+k)c}$$

为了保证刀口在 F_1 处能横向切入和检测到凸双曲非球面上子午方向的所有面积, 则需计算 Hindle 球的半径所允许的最大半径 r_{max} 和最小半径 r_{min} :

$$r_{max} = -f_1 + f_2 + d$$

$$r_{min} = f_2 - l_1$$

其中, d 为 Hindle 球的边缘厚度。

一般在允许的最大半径和最小半径范围中选取一个适当值作为 Hindle 球的半径值。此时由简单的三角关系可求出 Hindle 球的口径:

$$S = \sqrt{(h_4 - h_5)^2 + (L_3 - L_2)^2}$$

其中: $h_4 = R \times \sin \alpha_2$

$$h_5 = R \times \sin \alpha_1$$

$$L_2 = R \times \cos \alpha_2 - f_2$$

$$L_3 = R \times \cos \alpha_1 - f_2$$

在实际检测中, 离轴使用 Hindle 球检验离轴非球面并不能检测到全部的工件口径。可以通过转动非球面使从 Hindle 球反射回来的光覆

盖整个被检区域, 也可以进一步增大 Hindle 球的尺寸和增大对离轴凸非球面的检测面积。

2.1.5 结论

在离轴情况下使用可以大大地减小 Hindle 球的尺寸, 从而间接增大了待检离轴凸非球面的尺寸, 同时增加了检测精度。

2.2 补偿检验法

非球面透镜在球心处产生的法距差可以用补偿透镜补偿得出消像差, 这就是补偿检验法的原理。补偿检验的发展具有一定的历史, 柯德 (Couder, 1927)、伯奇 (Burch, 1936)、罗丝 (Ross, 1943) 以及多尔 (Dall 1947, 1953) 和奥夫纳 (Offner, 1963) 等人都分别提出过比较经典的校正非球面像差的补偿器, 并且一直被沿用至今。

2.2.1 折射式 Offner 补偿器

由于凸镜具有发散作用, 所以应首先将凸球面的检验利用内反射转换为凹球面检验。图 5 所示为折射式 Offner 补偿器的光路示意图, 场镜的作用是将补偿透镜 C 成像在抛物面上。

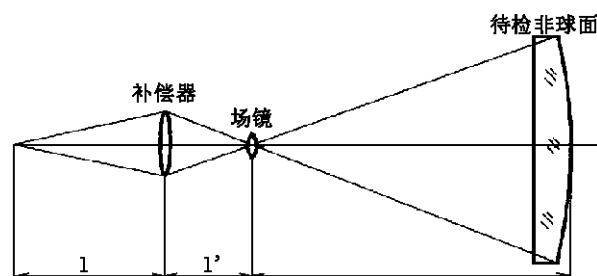


图 5 Offner 折射式补偿光路

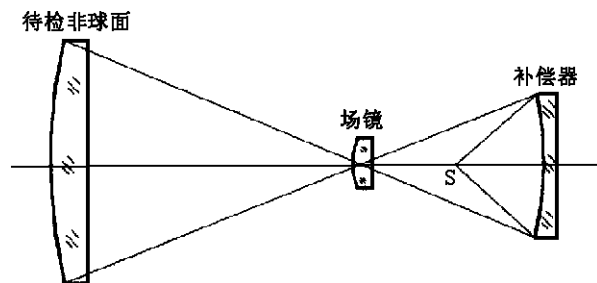


图 6 Offner 反射式补偿光路

为了校正非球面的三级像差, 透镜 C 的焦距 f 、折射率 μ 必须满足关系式:

$$-\frac{KR}{f} = (1-m)^2 \left[\frac{\mu^2(1-m)^2}{(\mu-1)^2} + \frac{(3\mu+1)m(1-m)}{\mu-1} + \frac{(3\mu+2)m^2}{\mu} \right]$$

式中, $K = -e^2$, $m = l' / l$ 。

2.2.2 反射式 Offner 补偿器

透射式 Offner 补偿器对光学材料的均匀性和折射率精测误差要求非常严格, 往往使得补偿器加工完成后失去可靠性。为克服这个缺点, 可以使用一球面和非球面反射镜来代替透射补偿器, 在光路中仍保留场镜来校正高级像差, 如图 6 所示。

图中点光源 S 发出的光经补偿器反射后再透过场镜, 由非球面反射回到原处, 三级像差得到平衡。根据补偿原理, 要使两次经补偿器

和场镜产生的球差 S_1^1 和 S_1^2 与被检非球面在近轴曲率中心产生的球差 $S_1^{(M)}$ 相匹配, 那么必要条件是:

$$2(S_1^1 + S_1^2) + S_1^{(M)} = 0$$

对满足条件的补偿器, 可以得到其近轴曲率半径为:

$$R_1 = \frac{2(1-m_2)^4 f_2' P_2 - 8e^2 R}{(m^2 - 1) - e_1^2 (m+1)^4}$$

其中:

$$P_2 = \frac{n^{-2}}{n-1} + B \times \frac{n+2}{n(n-1)^2} + \frac{2(n^2-1)(m_2+1)^{-2}}{(n+2)(m_2-1)} - \frac{n(m_2+1)}{(n+2)(m_2-1)^2}$$

式中, R 、 e^2 分别为被检非球面的曲率半径和非球面系数, f_2' 、 m_2 、 n 分别为场镜的焦距、放大率和材料的折射率, m 、 e_1^2 分别为补偿器反射镜的放大率和非球面系数。

当场镜为平凸透镜且平面对光源时, $B = -1$; 反之, $B = 1$; 当场镜为双凸镜时, $B = 0$ 。

当场镜位于补偿器反射镜的曲率中心且补偿器为球面时, $l_2' = 0$, $e_1^2 = 0$, 则可得此时的补偿器曲率半径的表达式为:

$$R_1 = -\frac{8e^2 R}{(m^2 - 1)^2}$$

2.2.3 结论

补偿检验可以用小口径的球面系统来检验大口径、大相对口径的非球面镜, 所以在当今非球面加工检验最常用的就是补偿检验。

3 结束语

非球面的检验方法基本上都是在无像差点法或补偿法原理的基础上发展起来的。以上所

诉的方法都可以用在检验中常用的阴影法及干涉法中, 对于提高检验精度、加快检验进程将起到很大的促进作用。

参考文献

- [1] 潘君骅, 光学非球面的设计、加工与检验, 科学出版社, 1994.
- [2] 郝沛明, 凸非球面加工, 光学学报, Vol. 11, No. 10, 1991.
- [3] 伍凡, 非球面零检验的反射式 Offner 补偿器设计, 应用光学, Vol. 19, No. 5, 1998.
- [4] 普里亚耶夫·著, 杨力·译, 潘君骅·校, 光学非球面检验, 科学出版社, 1982.
- [5] Offner A. and Malacara, D. Hindle tests, in Optical shop testing, 2nd., Wiley, New York: D. Malacara, ed., 1992, p427-454.
- [6] Percino-Zacarias Maria E.. N-Hindle-sphere arrangement with an exact ray trace for testing hyperboloid convex mirrors, Appl. Opt., Vol. 38, No. 28, 1999, p6050-6054.