

凸二次非球面反射镜的自准法检验

沈正祥¹, 郝沛明¹, 赵文才², 李可新¹, 王 鹏¹

(1. 同济大学 物理系 非球面光学实验室, 上海 200433;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要:在反射光学系统中大多采用凸非球面,但凸非球面的加工和检验一直是比较困难的问题。利用透射凸二次非球面具有自消像差的能力,从三级像差理论出发,提出了凸二次非球面的透射式自准检验和反射式自准检验两种方案,解决了采用 Hindle 球检验口径过大的问题。以某型号 $\phi 600R-C$ 系统的凸次镜为例,分析了加工过程中的检验精度,并和 Hindle 球检验方法进行比较。结果表明,凸非球面的自准检验是一种切实可行的高精度检验方法。

关键词:光学检验; 凸非球面; 自准法检验; 三级像差理论; 精度分析

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)01-0046-05

Autocollimating testing of convex conic aspheric surface

SHEN Zheng-xiang¹, HAO Pei-ming¹, ZHAO Wen-cai², LI Ke-xin¹, WANG Peng¹

(1. Laboratory of Aspheric Optics, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200433, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: Convex conic aspheric surface is widely used in the reflect optical instruments, but it is difficult for fabrication and testing at all times. Based on third-order aberration theory and the self-aplanatic capability of refractive aspheric surface, two testing methods of transmitting autocollimating testing and reflect autocollimating testing are suggested, avoiding the aperture of auxiliary lens is overmuch larger when the Hindle testing is applied. The testing precision of the two methods are analyzed by a example of $\phi 600R-C$ system. The difference between Hindle testing and autocollimating testing are also discussed. As a result, autocollimating testing of convex conic aspheric surface is useful and convenient for testing.

Key words: Optical testing; Convex aspheric surface; Autocollimating testing; Third-order aberration theory; Precision analysis

0 引言

在反射光学系统中经常使用凸非球面反射镜,例

如卡塞格林系统的次镜、航天相机三反镜 TMA 系统的凸次镜等。通常检验凸非球面面形误差的方法是使用大口径标准辅助球面镜实施无像差点检验(即

收稿日期: 2004-08-20; 修订日期: 2004-10-18

作者简介: 沈正祥(1980-),男,江苏泰兴人,硕士生,主要研究方向为光学系统的设计、加工和检验。

Hindle 球检验),或者使用补偿器检验。采用 Hindle 球检验时,因球镜面口径过于庞大,往往比被检验面大几倍^[1],使大口径高精度球面镜的加工更困难,同时还面临高精度的光路调整与大镜面的夹持的难题。

对凸非球面进行补偿检验就是专门设计的补偿器所产生的像差与凸非球面所产生的像差互补,在无像差点通过刀口仪或者数字干涉仪进行检验。补偿检验的优点是可以设计补偿器对非球面系数大的曲面进行检验,但对补偿器的加工和装配要求非常苛刻,同时对检验时的空气间隔要求也非常严格。

目前,国际上流行将计算机全息图(CGH)干涉术和位相自动探测技术结合起来,对非球面面形进行高精度、快速和实时检测。此方法基于 CGH 便于存储和提供各种特定形式的光波函数的特点。但也仅是最近才在美国和俄罗斯等少数发达国家的实验室中得到应用。这种方法所需的昂贵的实验设备,较高的实验技巧限制了其更为广泛的应用^[2,3]。

二次曲面凸镜的检验一直是比较棘手的问题,由于镜面加工的精度取决于检验的精度,所以如何准确地检测镜面的面形是加工获得高精度凸非球面的关键。

一个简便的方法是利用凸非球面的性质设计进行自准检验。本文结合 $\phi 600R-C$ 系统的凸次镜的实际应用,介绍了透射式自准检验和反射式自准检验两种方法,分析了这两种方法的检测精度,并和经典的 Hindle 球检验方法进行了比较,给出了凸次镜的最终检测结果。

1 透射式自准检验和反射式自准检验的思想基础

诺尔曼介绍过一种关于凸双曲面检验的方法。如果平凸透镜的凸面是二次曲面,并且该曲面的偏心率与制造该透镜所用的材料折射率相同时,则此平凸透镜能使位于其轴线上的无限远处的点光源形成一无像差的像点。为了确定凸表面的面形,通过检验离透镜凸面一倍焦距远处的、从其平面或一个与此平面平行的平面镜反射回来的点光源自准像,就可以判断其

凸面的面形。能用此方法检验的二次曲面的变化范围受折射率的可能变化范围的限制。当玻璃的折射率在 1.5~1.8 范围内变化时,这种方法可用于对放大率为 3.5~5 之间的双曲面的检验。此检验方法对玻璃折射率和双曲面的放大率有很大的限制,因此应用比较麻烦。

受诺尔曼的启迪,如果可以排除玻璃折射率和放大率的影响,通过利用非球面透镜的球面或者平面,总能找到一个物点 o , 使它的像点 o' 没有三级球差。此时,往往点像的像差实际上不存在,或者对于非球面相当大的相对口径有可以允许的像差。当然对于每一具体情况需要进行结构求解和光学追迹,以最终获得精确的结构参数。

2 凸二次曲面的透射式自准检验和反射式自准检验的实现^[4-8]

下面以 $\phi 600R-C$ 系统的凸次镜为例,具体介绍凸非球面的自准直检验,并和经典的 Hindle 球无像差点检验法进行比较。凸次镜的通气口径 $\phi = 100$ mm、凸二次非球面顶点曲率半径 $r_0 = 236.2$ mm、透镜中厚度 $d = 22$ mm、偏心率 $K = -e^2 = -1.669097$ 、光学材料为德国的石英玻璃(Q₀-SCHOTT),激光波长 $\lambda = 632.8$ nm 的折射率 $n = 1.45698$ 。如果采用 Hindle 球检验法,检验口径 $\phi 90$ 的凸二次面需要 $\phi 480$ 的 Hindle 面镜。

待检凸双曲面背面半径 r_2 的确定:

当 $e^2 \geq n^2$ $r_2 = \infty$; 当 $e^2 < n^2$ $r_2 \neq \infty$, 从三级像差理论可知,球差系数的表达式为^[5]:

$$S_1 = hP + h^4K \quad (1)$$

式中 $h = lu = l'u'$;

$$P = \frac{(u' - u)^2}{\left(\frac{1}{n'} - \frac{1}{n}\right)^2} \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n}\right); \quad K = \frac{(n' - n)e^2}{r_0^3}$$

式中 e^2 为凸二次非球面的偏心率; r_0 为凸二次非球面的顶点曲率半径; n 和 n' 为凸二次非球面前和后的介质折射率; h 为光线入射到凸二次非球面上的高度; 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(a)和(b)所示。将 l 和 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 代入公式(1)并利用几何光学的近轴公式,就可以求解凸二次非球面在光轴上两个消球差的共轭点,方程组为:

$$\beta = \frac{nu}{n'u'} = \frac{nl'}{n'l},$$

$$\frac{n'-n}{r} = \frac{n'(1-\beta)}{l'},$$

$$e^2 = \frac{\left(1 - \frac{n'}{n}\beta\right)^2 \left(\frac{n^2}{n'^2} - \beta\right)}{(1-\beta)^3} \quad (2)$$

已知 r 、 e^2 、 n 和 n' ,按方程组(2)可解出初始参数 $\beta = -4.02$ 、 $l_1 = -645.4454$ mm 和 $l'_1 = -3780.45$ mm。再利用初始参数进行光学设计和像差平衡,就可精确确定

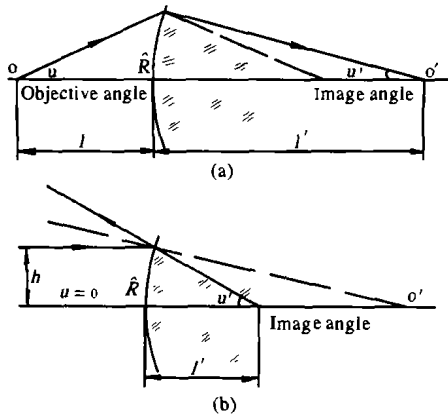


图 1 光线在非球面上反射

Fig.1 Reflection of a ray at aspheric surface

凸二次非球面透镜在光轴上两个消球差的共轭点,得出 $l_1 = -644.3$ 、 $l'_1 = 3807.41 = d + l_2 = d + l'_2 = 22 + 3785.41$,从后截距 l'_1 中减去凸二次非球面透镜的中心厚度 d ,就可以得出凸二次非球面透镜另一面为同心面的曲率半径 $r_2 = l_2 = l'_2 = 3785.41$ 。

表 1 为经光学系统设计程序优化后得出的精确参数,光学系统如图 2 所示,球差曲线如图 3 所示,波像差曲线如图 4 所示,从中可以看出设计结果是非常理想的。

表 1 透射式自准检验的结构参数
Tab.1 Surface data of transmitting autocollimating testing

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Diameter	Conic
OBJ	STAN-DARD	Infinity	644.3		0.0629	0
STO	STAN-DARD	236.2	22.0	Qc-SCHOTT	100.5	-1.669097
2	STAN-DARD	3785.41	3785.41		100.5	0
IMA	STAN-DARD	Infinity			0.3673	0

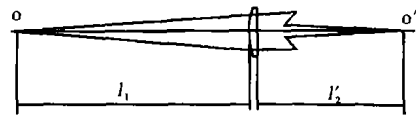


图 2 透射式自准检验光路图

Fig.2 Optical system of transmitting autocollimating testing

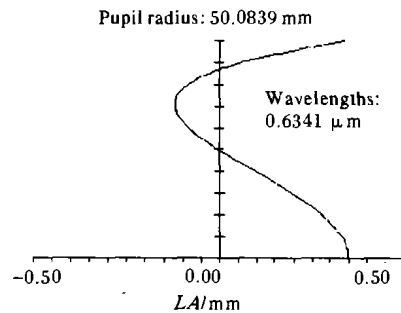


图 3 透射式自准检验球差曲线图

Fig.3 Longitudinal aberration of transmitting autocollimating testing

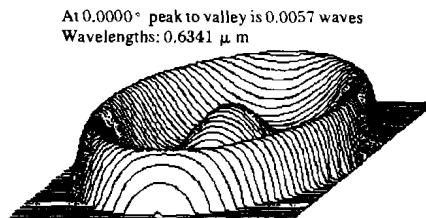


图 4 透射式自准检验波像差图

Fig.4 Wavefront aberration of transmitting autocollimating testing

求解反射式自准检验法光路初始结构时, $n=1$, $n'=-1$,此时方程组(2)简化为:

$$\beta = -\frac{l'}{l}$$

$$\frac{2}{r_0} = \frac{1}{l'} + \frac{1}{l} \quad (3)$$

$$e^2 = \left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)^2$$

同样可解出 β 、 l 和 l' 。利用 Zemax 光学设计软件得到的光学系统参数见表 2, 光学系统如图 5 所示, 球差曲线如图 6 所示, 波像差曲线如图 7 所示。从

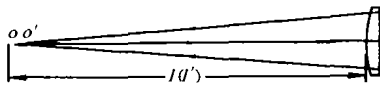


图 5 反射式自准检验光路图

Fig.5 Optical system of reflect autocollimating testing

表 2 和图 5 可以看出, 待检凸双曲面背面的球面 r_2 和凸双曲面是同心面, 在 o (o') 点放置刀口仪就可实现星点检验和刀口阴影图的检验, 也可以直接与 Wyko 数字干涉仪对接, 进行干涉检验。

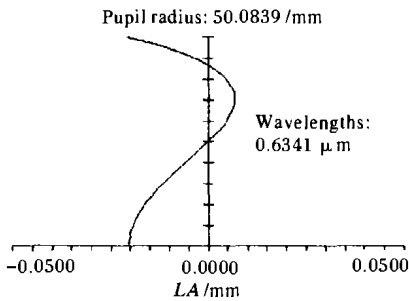


图 6 反射式自准检验球差曲线图

Fig.6 Longitudinal aberration of reflect autocollimating testing

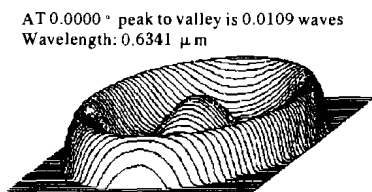


图 7 反射式自准检验波像差图

Fig.7 Wavefront aberration of reflect autocollimating testing

3 自准检验的精度分析^[1]

凸非球面的自准检验法检验的并不是非球面反射镜本身的面形, 而是整个透镜。由于光线穿过透镜,

所以透镜本身的误差将会影响凸非球面实际面形精

表 2 反射式自准检验的结构参数

Tab.2 Surface data of reflect autocollimating testing

Surf	Type	Radius	Thick-ness	Glass	Diame-ter	Conic
OBJ	STAN-DARD	Infinity	644.3		2	0
STO	STAN-DARD	236.2	22	Q ₀ -SCHOTT	100	-1.669097
2	STAN-DARD	3785.41	-22	MIRROR	100.6	0
3	STAN-DARD	236.2	-644.3		100	-1.669097
IMA	STAN-DARD	Infinity	2		0	

度的检测。但这能保证对非球面的可靠检验, 因为透镜其他参数的检验都可以用简单可靠的方法来实现。需要注意的是对透镜的辅助要求: 透镜材料有良好的均匀性, 高质量的工艺球面或平面、透镜的良好定心和必要的内反射膜层, 前三项要求是最重要的, 对于任何检验条件都是必不可少的, 但其公差甚严格。

光学玻璃的光学均匀性 Δn 是指同一块玻璃中各个部分折射率的渐变差异, 因为它直接影响透射波面质量^[9], 由

$$\Delta W = d \times \Delta n \quad (4)$$

可知, 良好的透射材料折射率不均匀性 Δn 不大于 2×10^{-6} 。 ΔW 为检测的波像差误差, d 为待检透镜的厚度。根据实验得知, 如果使用德国 Schott 进口玻璃, 光学均匀性为 2 级的石英玻璃也能满足实际使用要求。

忽略透镜材料本身的均匀性误差和透镜两个球面之间的偏心误差, 分析这两种自准检验法的检验精度, 并和经典的 Hindle 球无像差检验法进行比较。

在透射式自准检验法中, 光线在透镜的辅助球面和被检非球面上各折射一次, 故由这些因素引起的波前的总变形量 ΔW_1 一级近似可以由下式确定:

$$\Delta W_1 = (n-1)\delta_1 + (n-1)\delta_2 \quad (5)$$

在反射式自准检验法中,光线在透镜的非球面上两次折射,在辅助球面上反射一次,故波前的总变形量 ΔW_2 为:

$$\Delta W_2 = 2(n-1)\delta_1 + 2n\delta_2 \quad (6)$$

式中 δ_1 和 δ_2 分别为被检非球面和辅助球面的面形误差。

经典的 Hindle 球无像差点检验法,由于光学在非球面镜上反射两次,在 Hindle 球面上反射一次,波前的总变形量 ΔW_3 一级近似为:

$$\Delta W_3 = 2\delta_1 + 4\delta_2 \quad (7)$$

式中 δ_1 和 δ_2 分别为Hindle 球面和被检非球面的面形误差。

如果辅助球面的面形精度很高,由此引入的面形误差可以忽略,那么 $\Delta W_1 = (n-1)\delta_1$, $\Delta W_2 = 2(n-1)\delta_1$:

$$\Delta W_2 = 2\Delta W_1 \quad (8)$$

由此可见,反射式自准检验法的检验精度是透射式自准检验法精度的两倍。两者的检验精度都没有Hindle 球检验法精度高。

采用反射式自准检验法,利用 Wyko 数字干涉仪检测 $\phi 600R-C$ 系统的凸次镜,PV 值为 0.12λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$),Rms 值为 0.013λ ,如图 8(a)、(b)所示。对比利用 Hindle 球检验,测量的星点为 0.008 mm ,经过换算,误差很小。

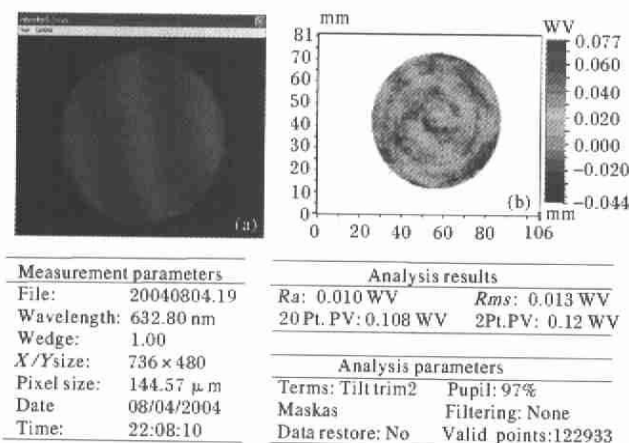


图 8 用 Wyko 干涉仪检验的结果

Fig.8 Testing result with Wyko interferometer

4 结论

对于检验而言,文中所述方案设计简单实用,只用方程组(2)就可以得到合理的结果,利用光学设计软件进行结构优化和像差平衡,很快就能得到精确的设计结果。

由于检验光路非常简单,成功地解决了采用Hindle 球检验口径过大及由此所带来的难题。

利用现有的刀口仪和干涉仪,根据阴影图或干涉图形,在加工过程中可以方便地检验非球面,评价非球面的表面质量,此方法非常适合加工中的过程检验。

按这种方法加工的非球面,采用高质量的光学材料,容易得到高精度的非球面面形。但由于需要均匀透过玻璃检验,所以对于微晶玻璃等不透明的材料,这种方法并不适用。又因为对玻璃的均匀性有较高的要求,故这种方法对于 $\phi 300$ 以下的非球面透镜的加工是非常高效和实用的。

用该方法加工的凸非球面透镜已经成功地应用于 $\phi 600R-C$ 系统中,并取得了很好的效果。

参考文献:

- [1] Д Т 普里亚耶夫;杨力.光学非球面检验[M].北京:科学出版社,1982.27-40,110.
- [2] Dorband B, Tiziani H J. Testing aspheric surfaces with computer-generated holograms: analysis of adjustment and shape errors[J]. Appl Opt, 1985, 16: 2604-2611.
- [3] Thomas Herrmann. Testing aspheric surfaces with CGH of different accuracy in industrial manufacturing environment[A]. Proc SPIE [C]. 2001, 4440. 120-126.
- [4] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].北京:科学出版社,1994.10-143.
- [5] 郝沛明.凸非球面加工[J].光学学报,1991,11(10):931-937.
- [6] 杨力.先进光学制造技术[M].北京:科学出版社,2001.
- [7] 张宝安,潘君骅.透射凸二次非球面检验方法的研究[J].光学技术,2002,28(4):7.
- [8] 张海洪.凸非球面的检验方法[J].红外,2002,12:23-26.
- [9] 郭培基.光学玻璃光学均匀性高精度测量技术[J].光学技术,2001,27(6):528-531.