

doi:10.3788/gzxb20154404.0422002

凸非球面背向零位补偿检验的设计方法

叶璐¹, 张金平¹, 郑列华¹, 郝沛明²

(1 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

(2 同济大学, 上海 200083)

摘要:为了实现大口径凸非球面的高准确度检测,提出了凸非球面背向零位补偿检验方法.该方法在非球面背面引入辅助球面并在光路中加入球面补偿透镜来达到零位补偿检验.辅助球面既可以使凸非球面等效为凹非球面,还可以补偿部分非球面法线像差.依据三级像差理论,对辅助球面曲率半径及补偿透镜结构参量进行初始结构求解,并编写了求解初始结构软件,再利用光学设计软件对初始结构进行优化,优化结果满足设计要求,使凸非球面背向零位补偿检验理论化.在实际应用中,以 $\Phi 120$ mm 凸非球面为例设计了凸非球面背向零位补偿检测系统,检测系统设计的剩余波像差 PV 为 0.024λ 、RMS 为 0.007λ .利用此检测方法加工完成后的凸非球面的面形准确度优于 $\lambda/40$.

关键词:几何光学;辅助面补偿;零位补偿;凸非球面检测

中图分类号:TN247;O435.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)04-0422002-6

Design of Back Null Compensator Test Method of Convex Aspherical Surface

YE Lu¹, ZHANG Jin-ping¹, ZHENG Lie-hua¹, HAO Pei-min²

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

(2 Tongji University, Shanghai 200083, China)

Abstract: In order to measure a convex aspherical surface with large aperture, back null compensator test method was proposed. By introducing an auxiliary spherical surface at the back of convex aspherical surface and introducing spherical compensator in optic system, this novel test method is able to realize null test. The auxiliary spherical surface is not only essential to form an aspherical lens with convex aspherical surface, but also can compensate part of normal aberration of convex aspherical surface. Based on the third-order aberration theory, the radii of auxiliary spherical surface and optical parameter of compensator of initial system are calculated. By using commercial optical design soft the initial system is optimized and back null compensator is designed. An aspherical surface with 120 mm diameter is tested to prove the practicability of this method. As the result, the residual wavefront error is smaller than 0.007λ rms (PV 0.024λ). The precision of convex aspherical surface which is measured by this method is better than $1/40\lambda$.

Key words: Geometric optics; Auxiliary surface compensation; Null compensation; Convexasphere testing

OCIS Codes: 220.1250; 220.1000; 220.4830; 220.4840

0 引言

随着近代光学技术的不断发展与进步,非球面在光学系统中的应用也越来越多^[1-5],非球面的加工相对比较困难^[6],主要原因在于非球面的检测难度较大^[7-8].对于非球面来说,一般用补偿镜补偿非球面的

法线像差^[9-11],凸非球面经典检测方法主要为辅助球面检测和 Hindle 球检测^[12],依据经验,辅助球面检测一般要求镜面材料具有良好的透过性和均匀性,同时需要一个特定的辅助平面或球面进行自准,可以检测 $-1/n^2 < e^2 < 1/n^2$ 的非球面.经典的 Hindle 球检测方法使用大口径辅助球面镜进行无像差点法检验,不可

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2011CB013206)资助

第一作者:叶璐(1986—),女,助理研究员,硕士,主要研究方向为光学加工与检测等. Email: yeludun@163.com

收稿日期:2014-11-07;录用日期:2015-01-14

<http://www.photon.ac.cn>

避免地存在中心遮拦的缺陷,往往由于辅助球面镜口径过大导致加工装调困难,尤其是大相对孔径的凸面镜问题更加突出.一般口径小于 150mm 并中心允许遮拦的凸面镜才考虑 hindle 球检测,否则 hindle 球口径过大,加工成本和检验难度都会大大增加.因此对于大口径大相对孔径大非球面度的凸非球面^[13-14],前面两种方法往往不能满足检测要求,存在一定的检测盲点.

补偿器检测方法的优点是不受被测镜口径的限制,适当增加补偿镜的镜片数量,增大补偿镜的口径,即可设计出满足要求的非球面补偿检测结构.缺点是每一个被测镜都需要专门的补偿器,一对一的设计,并且高准确度的非球面检测对其补偿镜材料的均匀性、镜面的加工准确度都有较高的要求.对于补偿器的装配仍需要较高的准确度.

本文提出辅助面加补偿镜组合的检测方法,从三级像差理论出发^[15],将辅助面加补偿镜的凸非球面的检测方法理论化、公式化,并将此方法应用实际的加工检测中,并得到了良好的加工测量结果.

1 三级像差理论

光学系统的初始结构计算通常采用代数法和缩放法,代数法是根据三级像差理论来求解满足成像质量要求的初始结构的方法,缩放法根据相近似的结构作为初始结构.对于凸非球面而言,非球面的参量千变万化,所以根据三级像差理论来求解凸非球面检测系统的初始结构更加的快速便捷.

利用三级像差理论求解初始结构时,没有考虑高级像差,又忽略了透镜的厚度,因此它只是一个近似解,若要求解更加准确的结构参量,还需要对初始结构进行缩放、加厚,通过光学软件进行优化.

图 1 和图 2 为有限远背向零位补偿光路图.图 3 和图 4 为无限远背向零位补偿光路图.如图所示的凸

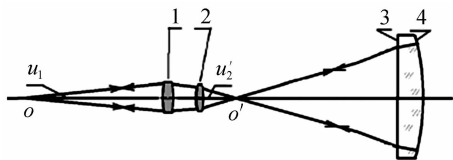


图 1 $e^2 > 0$ 有限远背向零位补偿
Fig. 1 Finiteray back null compensation of $e^2 > 0$

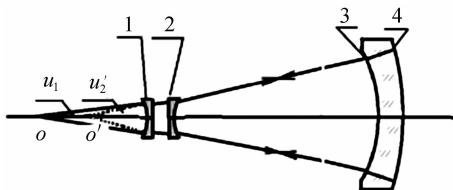


图 2 $e^2 < 0$ 有限远背向零位补偿
Fig. 2 Infinity ray back null compensation of $e^2 < 0$

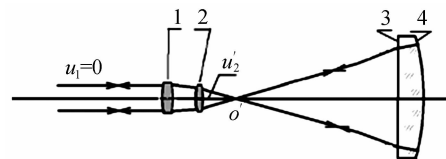


图 3 $e^2 > 0$ 无限远背向零位补偿
Fig. 3 Finite ray back null compensation of $e^2 > 0$

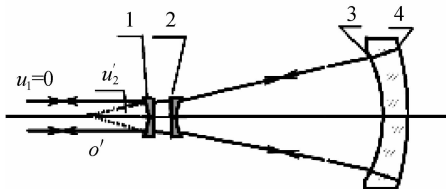


图 4 $e^2 < 0$ 无限远背向零位补偿
Fig. 4 Infinityray back null compensation $e^2 < 0$

非球面背向(变成凹面)零位补偿检验由补偿透镜 1 和 2,辅助面 3 所组成,4 为待检凸非球面.光线由 o 点发出,经补偿透镜 1 和 2,辅助面 3 的折射光线与待检凸非球面的法线重合,从待检非球面 4 反射的光线按原路返回与 o 点重合.

按三级像差理论令球差系数

$$S_1 = h_1 \vec{P}_1 + h_2 \vec{P}_2 + h_3 \vec{P}_3 + h_4 P_4 + h_4^4 K + h_5 \vec{P}_5 + h_6 \vec{P}_6 + h_7 \vec{P}_7 = 0 \quad (1)$$

式中, $h_1 = h_7, \vec{P}_1 = \vec{P}_7 = P_1, h_2 = h_6, \vec{P}_2 = \vec{P}_6 = P_2, h_3 = h_5, \vec{P}_3 = \vec{P}_5 = P_3, P_4 = 0, n_1 = n'_1 = n_2 = n'_2 = n_3 = 1, n'_3 = n_4 = n_0, n'_4 = n_5 = -n_0, n'_5 = n_6 = n'_6 = n_7 = n'_7 = -1.$

n_0 为待检凸非球面透镜的折射率, n 为补偿透镜 1 和 2 的折射率. h 为各镜面的光线入射高度, 规范化与设定:

$$h_4 = -1, r_{06} = -1, h_4/r_{06} = u'_3 = u_4 = u'_4 = 1.$$

各符号的表达式为

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

$$K = -(n' - n)e^2/r_o^3, h = lu = l'u'$$

设定放大率 β 和遮拦比 α 为

$$\alpha_1 = h_1/h_4, \alpha_2 = h_2/h_4, \alpha_3 = h_3/h_4.$$

$$\beta_1 = u_1/u'_1, \beta_2 = u_2/u'_2, \beta_3 = u_3/u'_2,$$

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \beta_3.$$

则

$$P_3 = \left[\frac{n_3 n'_3 (u'_3 - u_3)}{n_3 - n'_3} \right]^2 \left(\frac{u'_3}{n'_3} - \frac{u_3}{n_3} \right) = n_0 \left(\frac{1 - \beta_3}{1 - n_0} \right)^2 (1 - n_0 \beta_3) \quad (2)$$

将式(2)值代入式(1)

$$\alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 + n_0 e^2 = 0 \quad (3)$$

按式(3),待检凸非球面生成的法线像差,由补偿透镜 1 和 2 与辅助面 3 分别负担,即

$$\begin{cases} \alpha_1 P_1 = -m_{11} n_0 e^2, P_1 = -\frac{m_{11} n_0 e^2}{\alpha_1} \\ \alpha_2 P_2 = -m_{12} n_0 e^2, P_2 = -\frac{m_{12} n_0 e^2}{\alpha_2} \\ \alpha_3 P_3 = -m_{13} n_0 e^2, P_3 = -\frac{m_{13} n_0 e^2}{\alpha_3} \end{cases} \quad (4)$$

$m_{11} + m_{12} + m_{13} = 1$, m_{11} , m_{12} 和 m_{13} 是像差系数因子.

2 初始结构求解

2.1 辅助面的曲率半径的求解

在上述公式中, n_0 和 e^2 是已知的, 设定 α_3 和 m_{13} , m_{13} 的经验取值为 $0.1 \leq m_{13} \leq 0.4$, 式(2)和式(4)中 p_3 表示式相等, 即

$$P_3 = -\frac{m_{13} n_0}{\alpha_3} e^2 = n_0 \left(\frac{1 - \beta_3}{1 - n_0} \right)^2 (1 - n_0 \beta_3)$$

可求解 β_3 , 接近轴公式求解辅助面 3 的曲率半径 r_5 , 如式(5)所示, n_0 为辅助面 3 和凸非球面 4 构成透镜的折射率, d_0 为玻璃规划的厚度.

$$\begin{aligned} h_3 &= l'_3 u'_3, l'_3 = -(1 - d_0) \\ (n_0 - 1)/r_5 &= n_0/l'_3 - 1/l_3 \\ r_5 &= -\frac{(n_0 - 1)(1 - d_0)}{n_0 - \beta_3} \end{aligned} \quad (5)$$

一般情况下, 为了装调方便, 取辅助面为平面, 平面的加工相对容易, 但是这样往往会加大设计的难度, 出现过补偿的情况. 设计者可以根据实际情况选择合适的曲率半径.

当辅助面为平面时, 即 $r_5 = \infty$, $\beta_3 = n_0$.

由 β_3 可以反求 m_{13} , 再来设定 m_{11} 和 m_{12} . 从而求得其他补偿面的结构参量.

2.2 补偿镜曲率半径的求解

补偿透镜 1 和 2 与辅助面 3 的光焦度分配为

$$\begin{cases} h\varphi = h_1 \varphi_1 + h_2 \varphi_2 + h_3 \varphi_3 = 1 - \beta \\ h_1 \varphi_1 = u'_1 - u_1 = \beta_2 \beta_3 (1 - \beta_1) \\ h_2 \varphi_2 = u'_2 - u_2 = \beta_3 (1 - \beta_2) \\ h_3 \varphi_3 = u'_3 - u_3 = 1 - \beta_3 \end{cases} \quad (6)$$

用 PP 表示补偿透镜 1 和 2 的 P 的归化值, 将上述值代入式(7)可求解出 Q_1 和 Q_2 .

$$\begin{cases} PP_1 = \frac{P_1}{(h_1 \varphi_1)^3} \\ PP_2 = \frac{P_2}{(h_2 \varphi_2)^3} \end{cases}$$

将式(4)和式(6)代入上式即可计算出

$$\begin{cases} Q_1 = av_1 - b \pm \sqrt{c[PP_1 - P_0^\infty + c(v_1 + v_1^2)]} \\ Q_2 = av_2 - b \pm \sqrt{c[P_2 - P_0^\infty + c(v_2 + v_2^2)]} \end{cases} \quad (7)$$

当补偿检测系统为平行光入射, 则

$$\begin{cases} Q_1 = av_1 - b \pm \sqrt{c(P_1 - P_0^\infty)} \\ Q_2 = av_2 - b \pm \sqrt{c[PP_2 - P_0^\infty + c(v_2 + v_2^2)]} \end{cases}$$

式中

$$\begin{cases} v_1 = u_1 / (h_1 \varphi_1) \\ v_2 = u_2 / (h_2 \varphi_2) \\ P_0^\infty = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right] \\ a = \frac{2n+2}{n+2} \\ b = \frac{3n}{2(n-1)(n+2)} \\ c = \frac{n}{n+2} \end{cases}$$

用式(8)可求解补偿透镜 1 和 2 的曲率半径 r_1, r_2 和 r_3, r_4 .

$$\begin{cases} c_1 = Q_1 + \frac{n}{n-1}, c_2 = Q_1 + 1, \\ c_3 = Q_2 + \frac{n}{n-1}, c_4 = Q_2 + 1 \\ r_1 = \frac{1}{c_1 \varphi_1}, r_2 = \frac{1}{c_2 \varphi_1}, r_3 = \frac{1}{c_3 \varphi_2}, r_4 = \frac{1}{c_4 \varphi_2} \end{cases} \quad (8)$$

2.3 各面之间的归化间距的求解

点光源到第一个面之间的距离用 d_{01} 表示, 第一面到第二面之间的间距用 d_{02} 表示, 依次类推, 计算出各面之间的归化间距为

$$\begin{aligned} d_{01} &= 0 - l_1, d_{12} = 0, \\ d_{23} &= l'_1 - l_2, d_{23} = (h_1 - h_2)/u'_1, \\ d_{34} &= 0, d_{45} = l'_2 - l_3, \\ d_{45} &= (h_2 - h_3)/u'_2, d_{56} = d_0. \end{aligned}$$

2.4 光学结构实际尺寸的求解

由上述公式可以推导计算出检测系统规划的初始结构参量, 将初始尺寸缩放到实际要求的尺寸, 纵向尺寸按实际非球面的顶点曲率半径缩放, 所有的 r, d 和 l 都乘以 $-r_0$, 横向尺寸按实际非球面的半口径缩放, 在各面上的入射高度 h 乘以实际非球面的 $-h_{\#}$.

设补偿透镜厚度为 d , 原补偿透镜的厚度为零的焦距为 f' , 加厚的补偿透镜的焦距为 f'_d , 将加厚透镜的焦距 f'_d 缩放到薄透镜的焦距 f' .

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \\ \frac{1}{f_d} &= (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{n r_1 r_2}. \end{aligned}$$

缩放后, 求解厚透镜的主面和主距, 即

$$\begin{cases} l_{H1} = -\frac{r_1 d_{12}}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d_{12}} \\ l'_{H1} = -\frac{r_2 d_{12}}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d_{12}} \end{cases} \quad (9)$$

即可求出各面顶点之间的间距, 这样就求解了光学系统的全部实际尺寸. 为了方便, 也可直接在光学设计软件中直接优化初始结构参量, 实现计算机软件辅助下的缩放, 加厚和实际尺寸的求解.

2.5 优化与像差平衡

可以看出,有限远辅助面加补偿镜的凸非球面背向零位补偿检验的变量增加,有利于优化各面的曲率半径,透镜之间的间距,设计出满足要求的检测系统.当 $u_1=0$ 时,上述推导为平行光入射的辅助面加补偿镜的凸非球面背向零位补偿检验,这对光学设计而言是非常有利的,对于光学加工而言是非常方便的.

3 实际应用

上述的分析计算,应用于实例中一个口径为 $\Phi_0=120\text{ mm}$,顶点曲率半径为 $R_0=180\text{ mm}$,二次常量为 $K=-3.5$ 的凸非球面反射镜的加工与检测,用补偿镜加辅助面补偿的方法计算其检测光路的光学结构参数.为了方便以后工作中的大量运算,用 Matlab 编写界面程序,如图 5.



图 5 软件界面

Fig. 5 Software interface

经计算,点光源入射的检测系统规化初始尺寸如表 1.

表 1 点光源系统的归化值

Table 1 Normalization of Finite ray

Radius	Thickness	Glass	Conic
Infinity	2.666 67	—	0
-6.869 763	0	K9	0
-0.370 951	0.266 667	—	0
0.618 592	0	K9	0
-0.906 087	1.049 056	—	0
-3.080 393	0.11	SILICA	0
-1	0.11	MIRROR	-3.5
-3.080 393	-1.049 056	—	0
-0.906 087	0	K9	0
0.618 592	-0.266 667	—	0
-0.370 951	0	K9	0
-6.869 763	-2.666 67	—	0

将初始结构进行缩放,加厚并进行优化,优化后实际数据如表 2.

表 2 点光源系统的实际优化结果

Table 2 Actual optimization result of Finite ray

Radius	Thickness	Glass	Conic
Infinity	475.777 441	—	—
1 799.934 138	20	K9	0
-75.853 453	90.011 238	—	0
65.126 769	10	K9	0
604.895 857	180.553 88	—	0
-393.849 831	19.8	SILICA	0
-180	-19.8	MIRROR	-3.5
-393.849 831	-180.553 88	—	0
604.895 857	-10	K9	0
65.126 769	-90.011 238	—	0
-75.853 453	-20	K9	0
1 99.934 138	-475.777 441	—	0

点光源入射补偿检测的光路图,剩余波像差,如图 6 和图 7.

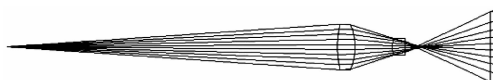


图 6 点光源光路图

Fig. 6 Light Path of Finite ray

PV=0.024λ RMS=0.007λ

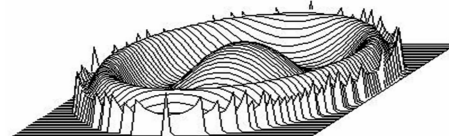


图 7 点光源剩余波像差

Fig. 7 Wave Aberration of Finite ray

经计算,平行光入射的检测系统规一化初始尺寸如表 3.

表 3 平行光系统的归化值

Table 3 Normalization of Infinity ray

Radius	Thickness	Glass	Conic
Infinity	1	—	0
-1.123 711	0	K9	0
-0.368 963	0.266 667	—	0
0.617 545	0	K9	0
-0.908 636	0.048 768	—	0
-3.089 486	0.11	SILICA	0
-1	0.11	MIRROR	-3.5
-3.089 486	-0.048 768	—	0
-0.908 636	0	K9	0
0.617 545	-0.266 667	—	0
-0.368 963	0	K9	0
-1.123 711	-1	—	0

将初始结构进行缩放,加厚并进行优化,优化后实际数据如表 4.

表 4 平行光系统的实际优化结果

Table 4 Actual optimization result of Infinity ray

Radius	Thickness	Glass	Conic
Infinity	180	—	
-507.380 305	20	K9	0
-82.130 974	83.615 456	—	0
64.699 494	15	K9	0
614.374 673	169.554 477	—	0
-606.845 702	19.8	SILICA	0
-180	-19.8	MIRROR	-3.5
-606.845 702	-169.554 477	—	0
614.374 673	-15	K9	0
64.699 494	-83.615 456	—	0
-82.130 974	-20	K9	0
-507.380 305	-180	—	0

平行光入射的补偿检测的光路图,剩余波像差,球差曲线,如图 8 和图 9.

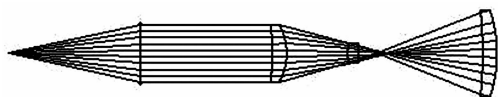


图 8 平行光光路图

Fig. 8 Light Path of Infinity ray

PV=0.038λ RMS=0.011λ

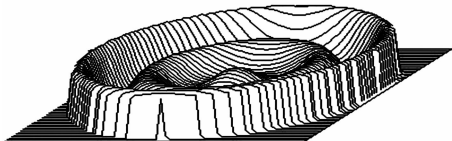


图 9 平行光剩余波像差

Fig. 9 Wave Aberration of Infinity ray

凸非球面背部零位补偿检验光路的设计,验证了公式推导的正确性,平行光入射检测光路和点光源入射检测光路在光学设计上没有本质的区别,但是在光学加工和检验过程中有着各自的优缺点,平行光入射检测光路搭建相对容易,控制补偿器到被测镜之间的距离,即可准确地控制非球面的光学参量.点光源入射检测光路则需要准确控制点光源到补偿器之间的距离和补偿器到被测镜之间的距离.点光源检测光路能更好地实现粗加工到精加工之间的过渡,可顺利完成从刀口仪的粗检测到干涉仪的精检测.此处,用点光源的检测方案,制作补偿器,搭建检测光路(图 10).



图 10 检测光路装置图

Fig. 10 Device of test

图 10 在实际的设计方案中,对补偿器检测系统进行鬼像分析和各镜片的公差分析,经分析表明,补偿器第三个面将产生较大的鬼像,影响测量.因此,对补偿器的透镜表面镀增透膜,减小反射所引起的鬼像问题.随着非球面表面面形准确度的提高,鬼像所引起的影响会越来越小.对补偿器的结构参量进行公差分析,分析后得到公差在可加工范围内,最终根据补偿镜的实测曲率半径,实测中心厚度,优化镜间距,修改补偿器的隔圈厚度,使光学镜面的加工误差对补偿器补偿准确度的影响减小到最低程度.同时,补偿镜的面形准确度的加工 PV 需优于 0.1λ ,这样严格控制补偿器设计、加工、装配中的误差源,就可以保证非球面面形的高准确度测量.

上述的检测光路中,先对准补偿器与干涉仪之间的相对位置,然后以此为基准,调节非球面的多个自由度,得出非球面的面形.在加工过程中需严格控制干涉仪到补偿器,补偿器到非球面的距离,在此处通过具有 0.02 mm 准确度的量棒和 0.001 mm 光栅尺来测量控制各元件之间的距离.

点光源检测光路中设计的系统剩余波像差 $PV=0.024\lambda$, $RMS=0.007\lambda$,通过图 10 的检测装置,对凸非球面的表面进行加工,干涉仪测量,此方案为透射检验,需考虑到玻璃的折射率,干涉仪的比例因子应该为 $1/(2n_0)$,加工后的面形误差为 $PV=0.633\lambda$, $RMS=0.021\lambda$,如图 11 所示,满足加工图纸的要求.

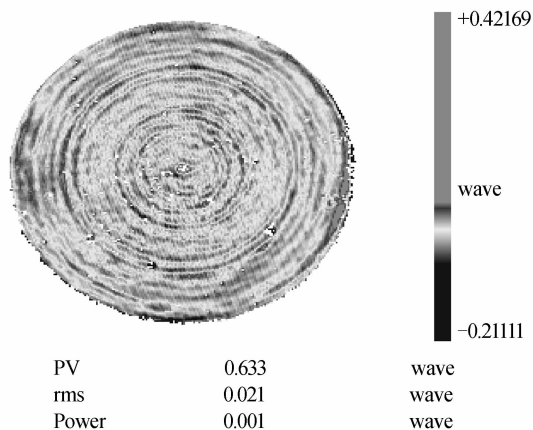


图 11 面形图

Fig. 11 Surface Map

4 结论

辅助面加补偿镜的背向零位补偿检验扩展了 Offner 零位补偿检验的应用,设计过程中光学系统的可调整变量增加,有利于结构优化,也为补偿检验凸高次非球面的设计奠定了基础.此检测方法不仅解决了大口径大相对孔径大非球面度的凸非球面透镜的高准确度检测问题,并且求解初始结构的公式和算法,同时适用于球面波入射和平面波入射,可应用于刀口仪检

测和干涉仪检测. 适用于大多数二次凸非球面. 不足之处在于对非球面材料本身有很高的要求. 在实际应用中验证了辅助面加补偿镜的凸非球面背向零位补偿检验的实用性与可靠性. 对推导公式进行软件编程, 即可实现快速便捷的凸非球面检测系统的光学设计, 对光学设计、加工和检测有着重要的意义.

参考文献

- [1] WANG Xiao-kun, ZHENG Li-gong, ZHANG Xue-jun, *et al.* Testing an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 92-97.
王孝坤, 郑立功, 张学军, 等. 子孔径拼接干涉检测离轴非球面的研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(1): 92-97.
- [2] WANG Xiao-kun. Measurement of aspherical surface by laser tracker[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 379-383.
王孝坤. 激光跟踪仪检验非球面面形的方法[J]. 光子学报, 2012, **41**(4): 379-383.
- [3] CHEN Qin-fang, LI Ying-cai, MA Zhen, *et al.* Computer-aided alignment of off-axis aspheric mirrors in null testing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2220-2223.
陈钦芳, 李英才, 马臻, 等. 离轴非球面反射镜补偿检验的计算机辅助装调技术研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(12): 2220-2223.
- [4] CHEN Wei, XUE Chuang. Design of wide field of view off-axis three-mirror telescope for imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8): 950-955.
陈伟, 薛闯. 用于成像光谱仪的宽视场离轴三反望远镜设计[J]. 光子学报, 2013, **42**(8): 950-955.
- [5] LI Jun-sheng, FAN Qi, MO Wei-dong, *et al.* A method for getting the best fitting spheric surface parameters for aspheric surface point diffraction measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1865-1869.
李均盛, 范琦, 莫卫东, 等. 用于非球面点衍射检测的最佳匹配球参量获取方法研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(12): 1865-1869.
- [6] HAO Pei-ming, FU Lian-xiao, YUAN Li-yin, *et al.* Compensating test of the reflective mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **26**(6): 831-835.
郝沛明, 付联效, 袁立银, 等. 反射镜补偿检验[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 831-835.
- [7] 潘君骅. 光学非球面的设计加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004, 51-61.
- [8] MALACARA Daniel. Optical shop testing [M]. Wiley-Interscience, 2007: 122-134, 435-445.
- [9] PAN Jun-he, HU Ming-yong, SHEN Shi-dong, *et al.* The method of convex aspheric surface using lens for compensation tests with the beam incidence at a distance [J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(3): 420-423.
潘俊鹤, 胡明勇, 沈世东, 等. 有限距离的凸非球面的透镜补偿检测方法[J]. 光学技术, 2010, **36**(3): 420-423.
- [10] TAO Chun, PAN Jun-hua, HU Ming-yong. A new method of convex aspheric surface compensation tests [J]. *Optical Technique*, 2009, **3**(51): 123-126.
陶春, 潘君骅, 胡明勇. 一种凸非球面透镜补偿检测的新方法[J]. 光学技术, 2009, **3**(51): 123-126.
- [11] FU Lian-xiao, WU Yong-gang, HAO Peiming, *et al.* The study and analysis of lens compensation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2057-2061.
付联效, 吴永刚, 郝沛明, 等. 透镜补偿检验的研究与分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(11): 2057-2061.
- [12] MA Jie, ZHU Zheng. Testing convex aspherical surface with optimized modified hindle arrangement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(2): 277-281.
马杰, 朱政. 改进的 Hindle 方法检测凸非球面的研究[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(2): 277-281.
- [13] CHEN Xun, LIU Wei-qi. Design and tolerance analysis of offner compensator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **8**(1): 88-93.
陈旭, 刘伟奇. Offner 补偿器的结构与装调[J]. 光学精密工程, 2010, **8**(1): 88-93.
- [14] CHEN Qin-fang, MA Zhen, ZHAO Meng, *et al.* Testing of large relative aperture lens with doublets [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(3): 1-5.
陈钦芳, 马臻, 赵蒙, 等. 双胶合透镜法检测大相对孔径凸非球面透镜[J]. 光子学报, 2014, **43**(3): 1-5.
- [15] SONG Qiang, YANG Bao-xi, YUAN Qiao, *et al.* Study on large convex aspherical lens testing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(4): 1-5.
宋强, 杨宝喜, 袁乔, 等. 大口径凸非球面面形检测方法研究[J]. 中国激光, 2014, **41**(4): 1-5.