

文章编号 1004-924X(2006)03-0380-06

# 离轴二次非球面补偿检验计算机辅助调整技术研究

薛栋林<sup>1,2</sup>, 郑立功<sup>1</sup>, 王淑平<sup>1</sup>, 张学军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研究中心, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**分析了非球面补偿检验过程中由补偿器和镜面支撑结构的失调引入的调整量误差,给出了计算机辅助调整方法。建立了离轴二次非球面补偿检验计算机辅助调整系统的物理数学模型,求解了被检非球面镜的失调方位和量值,利用计算机控制调整架实现了系统辅助调整。建立了实验装置,给出了模拟调整 and 实际调整结果。经过计算机辅助调整后,被检离轴二次非球面的最终检验结果为  $0.028\lambda(\text{RMS})(\lambda=632.8\text{ nm})$ 。

**关键词:**非球面检验;补偿器;调整误差;计算机辅助调整

**中图分类号:**TQ171.68 **文献标识码:**A

## Research on off-axis conic asphere null testing using computer-aided alignment method

XUE Dong-lin<sup>1,2</sup>, ZHENG Li-gong<sup>1</sup>, WANG Shu-ping<sup>1</sup>, ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** The misalignment-induced aberrations by corrector and the support of the asphere were analyzed in this paper. A computed-aided alignment method was presented combining the interferometric test with the computer optimization for optical alignment, and a mathematical model was established to determine the misalignment. The simulated and actual experimental results of the alignment show that after four times alignment the test results of the asphere can reach up to  $0.028\lambda(\text{RMS})(\lambda=632.8\text{ nm})$ .

**Key words:** asphere testing; null corrector; alignment error; computer-aided alignment

## 1 引言

零位补偿检验技术广泛应用于非球面抛光阶段,非球面面形检验时,调整误差会对测量结果造成一定影响<sup>[1-2]</sup>。这些测量误差完全是由干涉仪、

补偿器和被检镜相互位置关系不正确引入的,而非镜面本身的面形误差。如果不消除这些误差,就会在抛光操作中作为面形误差予以修正,从而导致非球面面形加工产生错误<sup>[3]</sup>。因此分析、计算调整误差对获得准确的检测结果以及合理设计调整装置有很大的指导意义。

收稿日期:2005-10-14;修订日期:2006-04-08.

基金项目:国家杰出青年基金资助项目(No. 69925512)

从理论上讲任何由装调引入的误差都可以通过重新调整五维调整架去除。由于采用传统的手工调整周期长、实现光路的准确定位非常困难,因此本文研究二次非球面检验光学系统失调引入的波像差,计算出光学系统中各零件失调的方位和量值,采用计算机控制调整调整机构,以实现非球面检验光学系统的精确定位。在检验过程中,可以有目的地使各光学元件达到最佳的位置状态,提高干涉检验的效率,为加工出合格的非球面面形提供保障。

上世纪80年代,国外一些光学工作者已经意识到分析、计算装调引入误差的重要性,随即展开了一系列的研究,提出了相关算法<sup>[4-5]</sup>。

中科院长春光机所张学军研究员对算法进行了优化,将其扩展到离轴二次非球面<sup>[6]</sup>。郑立功博士在论文中论述了误差分离相关技术<sup>[7]</sup>,对算法进行了进一步优化,提出了在母镜坐标下求解的思想,能够更精确地计算出调整量。

本文将对由补偿器和非球面元件支撑结构的失调引入的调整误差进行详细分析计算,给出离轴非球面计算机辅助调整的数学模型,并且通过实验进行验证。

## 2 理论分析

装调前,通常应作相应的处理来确定调整架的失调量,失调量的确定过程是数据处理过程也是优化过程,在算法上即是建立失调量和像差之间的关系<sup>[6]</sup>。干涉零位检验获得的干涉图波像差 $W(x,y)$ 可以表达成 $x,y$ 的函数, $(x,y)$ 代表镜面上某一点的位置。 $W(x,y)$ 包括被检镜面的实际加工残留误差 $W_m(x,y)$ 和由调整架的失调引入的误差产生 $W_a(x,y)$ 。干涉图波像差可用下式表示:

$$W(x,y) = W_m(x,y) + W_a(x,y), \quad (1)$$

所以要获得合格的非球面面形,必须从测试结果中去除调整误差 $W_a(x,y)$ 。

空间刚体存在6个自由度,分别为沿 $x,y,z$ 轴的平动 $D_x, D_y, D_z$ 和绕 $x,y,z$ 轴的转动 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ,绕 $z$ 轴的旋转 $\theta_z$ 因回转对称性可忽略。设镜面上任意点坐标为 $P(x,y,z)$ ,引入调整量后该点坐标为 $P'(x',y',z')$ 由刚体运动定理可知:

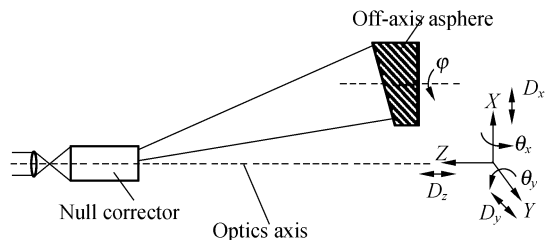


图1 离轴非球面干涉零位检验装置

Fig. 1 Schematic of off-axis aspheric null testing system

$$P' = \begin{pmatrix} \cos(\theta_y)x - \sin(\theta_y)z + D_x \\ \sin(\theta_x)\sin(\theta_y)x + \cos(\theta_x)y + \sin(\theta_x)\cos(\theta_y)z + D_y \\ \cos(\theta_x)\sin(\theta_y)x - \sin(\theta_x)y + \cos(\theta_x)\cos(\theta_y)z + D_z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

由于角度量很小,可以认为:

$$\sin \theta = \theta; \cos \theta = 1, \quad (3)$$

令:

$$\delta d = \begin{pmatrix} -\theta_y z + D_x \\ \theta_x z + D_y \\ \theta_y x - \theta_x y + D_z \end{pmatrix}, \quad (4)$$

补偿检验时光线沿被检镜面的法线方向入射,所以调整误差为该点的位移矢量在其法线方向上的投影,由于镜面为反射面,则调整引入的波像差为:

$$W_a(x,y) = -2(\delta d \cdot n), \quad (5)$$

其中 $n$ 为非球面的单位法向量。对于二次曲面,工程中常使用其级数展开式:

$$z = f(x,y) = \frac{cp^2}{2} + \frac{kc^3 p^4}{8} + \dots, \quad (6)$$

由式(5)有:

$$n = \left[ 1 + \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \left\{ -\frac{\partial f}{\partial x}, -\frac{\partial f}{\partial y}, 1 \right\}, \quad (7)$$

经整理,得:

$$W_a(x,y) = -2D_z + 2x(cD_x + \theta_y) + 2y(cD_y - \theta_x) + p^2 c^2 D_z + x p^2 c^3 k D_x + y p^2 c^3 k D_y + p^4 c^4 \frac{4k+1}{8} D_z, \quad (8)$$

在式(8)中: $p^2 = x^2 + y^2$ ( $x,y$ 为镜面坐标), $c = 1/r$ , $r$ 为被检非球面镜的曲率半径, $k$ 为被检非球面镜的二次曲面常数;各项物理意义如下:

$-2D_z$ : 平移;  $2x(cD_x + \theta_y)$ :  $X$ -倾斜;  
 $2y(cD_y - \theta_x)$ :  $Y$ -倾斜;  $p^2 c^2 D_z$ : 离焦;  
 $x p^2 c^3 k D_x$ :  $X$ -彗差;  $y p^2 c^3 k D_y$ :  $Y$ -彗差;  
 $p^4 c^4 \frac{4k+1}{8} D_z$ : 球差

可见,对于同轴系统,由调整量引起的像差主要是倾斜、离焦、彗差和球差。考虑到离轴二次非球面可以看作同轴母镜的一部分,因此式(8)也适用于对离轴二次非球面的调整量误差拟合。在获得采样点在同轴母镜下的坐标后,可以使用同轴二次非球面的拟合条件对离轴二次非球面的失调量误差进行拟合。

采用赛德尔(Seidel)像差多项式作为基底拟合获得被检非球面镜失调引入波像差为  $W_a(x, y)$ , 设:

$$\begin{cases} c_0 \sum a_{0i} a_{0i} + c_1 \sum a_{0i} a_{1i} + c_2 \sum a_{0i} a_{2i} + c_3 \sum a_{0i} a_{3i} + c_4 \sum a_{0i} a_{4i} + c_5 \sum a_{0i} a_{5i} + c_6 \sum a_{0i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{0i} \\ c_0 \sum a_{1i} a_{0i} + c_1 \sum a_{1i} a_{1i} + c_2 \sum a_{1i} a_{2i} + c_3 \sum a_{1i} a_{3i} + c_4 \sum a_{1i} a_{4i} + c_5 \sum a_{1i} a_{5i} + c_6 \sum a_{1i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{1i} \\ c_0 \sum a_{2i} a_{0i} + c_1 \sum a_{2i} a_{1i} + c_2 \sum a_{2i} a_{2i} + c_3 \sum a_{2i} a_{3i} + c_4 \sum a_{2i} a_{4i} + c_5 \sum a_{2i} a_{5i} + c_6 \sum a_{2i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{2i} \\ c_0 \sum a_{3i} a_{0i} + c_1 \sum a_{3i} a_{1i} + c_2 \sum a_{3i} a_{2i} + c_3 \sum a_{3i} a_{3i} + c_4 \sum a_{3i} a_{4i} + c_5 \sum a_{3i} a_{5i} + c_6 \sum a_{3i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{3i} \\ c_0 \sum a_{4i} a_{0i} + c_1 \sum a_{4i} a_{1i} + c_2 \sum a_{4i} a_{2i} + c_3 \sum a_{4i} a_{3i} + c_4 \sum a_{4i} a_{4i} + c_5 \sum a_{4i} a_{5i} + c_6 \sum a_{4i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{4i} \\ c_0 \sum a_{5i} a_{0i} + c_1 \sum a_{5i} a_{1i} + c_2 \sum a_{5i} a_{2i} + c_3 \sum a_{5i} a_{3i} + c_4 \sum a_{5i} a_{4i} + c_5 \sum a_{5i} a_{5i} + c_6 \sum a_{5i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{5i} \\ c_0 \sum a_{6i} a_{0i} + c_1 \sum a_{6i} a_{1i} + c_2 \sum a_{6i} a_{2i} + c_3 \sum a_{6i} a_{3i} + c_4 \sum a_{6i} a_{4i} + c_5 \sum a_{6i} a_{5i} + c_6 \sum a_{6i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{6i} \end{cases} \quad (11)$$

设:

$$A = \begin{pmatrix} \sum a_{0i} a_{0i} & \sum a_{0i} a_{1i} & \cdots & \sum a_{0i} a_{6i} \\ \sum a_{1i} a_{0i} & \sum a_{1i} a_{1i} & \cdots & \sum a_{1i} a_{6i} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum a_{6i} a_{0i} & \sum a_{6i} a_{1i} & \cdots & \sum a_{6i} a_{6i} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \cdots \\ c_6 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} \sum \sigma_i a_{0i} \\ \sum \sigma_i a_{1i} \\ \cdots \\ \sum \sigma_i a_{6i} \end{pmatrix}$$

则:

$$C = A^{-1} B, \quad (12)$$

在求得  $C$  的最小二乘解以后,可根据拟合波像差与失调引入波像差的相互对应关系得到失调量  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  以及  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  的数值。在实践中应根据获得的近似解重新调整光路,然后再求解、再调整,直到光学调整达到满意的精度为止。在光学

$$W_a(x, y) = c_0 + c_1 x + c_2 y + c_3 (x^2 + y^2) + c_4 x(x^2 + y^2) + c_5 y(x^2 + y^2) + c_6 (x^4 + y^4), \quad (9)$$

采用最小二乘法,即:

$$F(x, y) = [\omega(x, y) - w_a(x, y)]^2 = \min,$$

求解系数:  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 、 $c_4$ 、 $c_5$ 、 $c_6$ 。

令:

$$a_{0i} = 1; a_{1i} = x_i; a_{2i} = y_i; a_{3i} = x_i^2 + y_i^2;$$

$$a_{4i} = x(x_i^2 + y_i^2); a_{5i} = y(x_i^2 + y_i^2); a_{6i} = x_i^4 + y_i^4$$

由于  $F(x, y) = \min$  的充要条件为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial c_0} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_1} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_2} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_3} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial c_4} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_5} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_6} = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

由式(4),可以获得一个包含 7 个未知量的线性方程组:

调整精确的情况下,测得的结果必然是一个不包含失调量误差的面形误差分布,使用这种方法可以较为精确地实现失调量误差与加工误差的分离。

### 3 实验验证

按照要求,设计两套调整机构:将光学补偿器与第一调整机构固定连接,用于精密调整光学补偿器的位置,将被检非球面镜与第二调整机构固定连接,用于精密调整被检非球面镜的位置,并确保调整机构具有合适的行程范围。第一调整机构主要实现被检非球面镜的平动调整(即  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向的平动),第二调整机构主要实现被检非球面镜的转动调整(即俯仰和扭摆)。调整机构的控制系统由计算机、运动控制卡、驱动器和步进电机组成,编制程序利用计算机控制步进电机实现调整机构调整光学补偿器和被检非球面镜

的精确位置。实验利用一离轴二次非球面镜进行模拟调整和任意位置进行实际调整来验证,利用计算机控制调整架,实现被检非球面系统辅助调整。

### 3.1 检验系统光路模拟调整

模拟装调的基本思路为:在调整好的离轴非球面检验光学系统中,人为引入某方向的失调量,实时采集一副干涉图,用检验获得的波像差数据代入到计算机辅助调整软件中,计算检验光学系统的失调量,用引入的失调量数据与计算机辅助调整软件计算出的数值进行比较,验证程序的正确性。引入失调量数值: $D_x = 1\ 200\ \mu\text{m}$ ,  $D_y = -650\ \mu\text{m}$ ,  $D_z = -450\ \mu\text{m}$ ,实际计算检测结果如表 1 所示。

表 1 实验结果 1

Tab.1 Experiment results

编 号	$D_x$	$D_y$	$D_z$	$\theta_x$	$\theta_y$
1	0.650	-0.391	-0.182	-2.599e-4	-3.440e-4
2	0.295	-0.164	-0.121	2.033e-5	-1.564e-4
3	0.157	-0.050	-0.083	1.715e-5	-0.339e-5
4	0.080	-0.038	-0.055	-1.599e-5	-2.636e-5
5	0.010	-0.008	-0.005	-0.641e-5	1.636e-5

引入失调量后,干涉仪检测镜面面形精度结果如图 2 所示,经过第一次调整、第二次、第三次、第四次调整后镜面面形精度结果如图 3、4、5 所示,从结果可以看出,经过四次调整后,检验结果优于  $1/30\lambda$  ( $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ )。

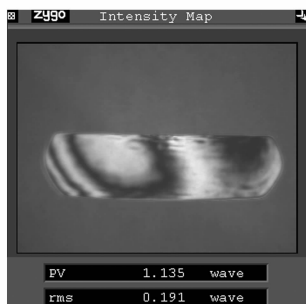


图 2 引入失调量后面形检测结果

Fig.2 Tested result of the surface after misalignment

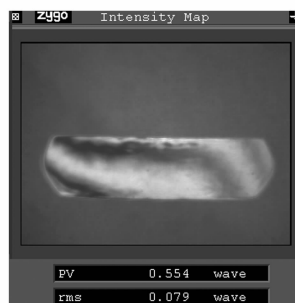


图 3 第一次调整后面形检测结果

Fig.3 Tested result of the surface after the first alignment

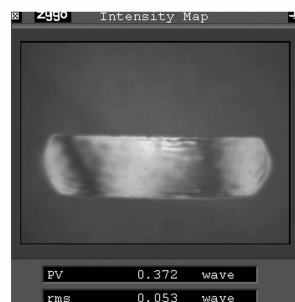


图 4 第二次调整后面形检测结果

Fig.4 Tested result of the surface after the second alignment

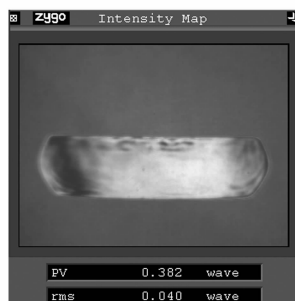


图 5 第三次调整后面形检测结果

Fig.5 Tested result of the surface after the third alignment

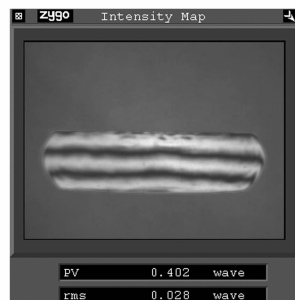


图 6 第四次调整后面形检测结果

Fig.6 Tested result of the surface after the fourth alignment

### 3.2 被检离轴非球面处于任意位置时的光路实际调整

非球面镜处于任一位置状态,实际调整结果如表 2 所示。

表 2 实验结果 2

Tab. 2 Experiment results

编号	调整量拟合计算结果				
	$D_x$	$D_y$	$D_z$	$\theta_x$	$\theta_y$
1	0.295	0.383	-0.304	$1.030e-4$	$-5.210e-5$
2	0.171	0.194	-0.237	$2.033e-5$	$-1.564e-4$
3	0.098	0.110	-0.121	$2.241e-5$	$-9.047e-5$
4	0.064	0.042	-0.054	$5.833e-5$	$-3.413e-5$
5	-0.018	0.016	-0.020	$8.580e-6$	$9.646e-6$

初始位置干涉仪检测镜面面形精度结果如图 7 所示,经过第一次调整、第二次、第三次、第四次调整后镜面面形精度结果如图 8、9、10、11 所示,从结果可以看出,经过四次调整后,检验结果优于  $1/30\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )。

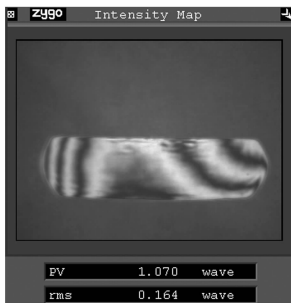


图 7 调整前面形检测结果

Fig. 7 Tested result of the surface before alignment

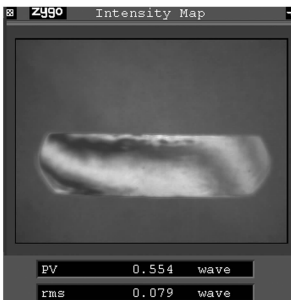


图 8 第一次调整后面形检测结果

Fig. 8 Tested result of the surface after the first alignment

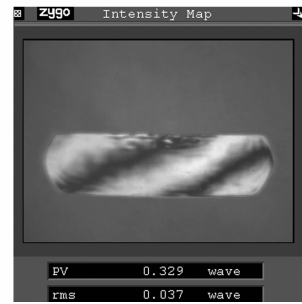


图 9 第二次调整后面形检测结果

Fig. 9 Tested result of the surface after the second alignment

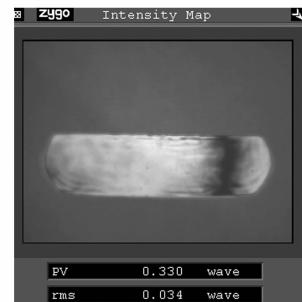


图 10 第三次调整后面形检测结果

Fig. 10 Tested result of the surface after the third alignment

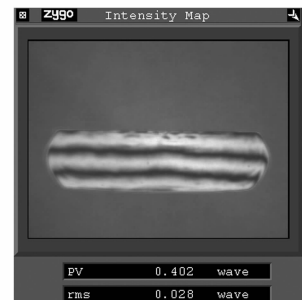


图 11 第四次调整后面形检测结果

Fig. 11 Tested result of the surface after the fourth alignment

## 4 结论与展望

从实验数据结果可以看出,在干涉检验过程中,通过对某二次离轴非球面元件进行计算机模拟调整的验证和任意位置的实际调整,实验表明经过四次调整后,最终检验结果的 RMS 值优于  $1/30\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),表明该离轴非球面计算机辅助调整算法收敛,调整系统具有较高的精度,采用该方法缩短了离轴二次非球面补偿检验周期。

但是,论文中建立的计算机辅助调整数学模型仅适用于二次非球面。因此,需要研究适用于离轴高次非球面计算机辅助技术,进一步完善离轴非

球面计算机辅助调整技术,为加工出合格的非球面面形提供保障。

### 参考文献:

- [1] 张忠玉. 用补偿器测量非球面的研究[J]. 光学精密工程,1999,(1):125-129.  
ZHANG Z Y. Study of testing aspheric surface with null corrector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, (1):125-129. (in Chinese)
- [2] 郭培基. 一种大数值子孔径小非球面检测用补偿器设计[J]. 光学精密工程,2002,(5):518-522.  
GUO P J. Null lens design for small aspherical surface with large NA[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, (5):518-522. (in Chinese)
- [3] 曹根瑞. 补偿透镜法检验抛物面镜的调整误差分析[J]. 光学技术,1992,(3):2-5.  
CAO G R. Analysis of alignment error in aspherical mirror testing a null lens [J]. *Optical technique*, 1992, (3):2-5. (in Chinese)
- [4] YOUNG E W, DENTE G C. The effects of rigid body motion in interferometric tests of large-aperture, off-axis, aspheric optics[J]. *SPIE*, 1985, 540:59-69.
- [5] DENTE G C. Separating misalignment from misfigure in interferogram on off-axis asphere [J]. *SPIE*, 1983, 429:187-193.
- [6] ZHANG X J. Manufacturing and testing of two off-axis aspherical mirrors [J]. *SPIE*, 2001, 4451:118-125.
- [7] 郑立功. 离轴非球面CCOS加工过程关键技术的研究[D]. 中国科学院研究生院, 2003:63-81.  
ZHENG L G. *Study on the key technique of CCOS fabricating for off-axis aspheric mirrors* [D]. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2003:63-81. (in Chinese)

作者简介:薛栋林(1979—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事非球面加工与检测技术研究。