

离轴二次非球面反射镜无像差点法检测的 误差分离技术

陈钦芳^{1,2} 李英才¹ 马 臻^{1,2} 李旭阳^{1,2} 梁士通^{1,2}

(¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 非球面光学元件检测中, 获得准确的面形信息是实现元件确定性制造的关键因素之一。在无像差点法检测离轴非球面中, 为了实现反射镜的高精度检测, 对其干涉检测结果中的误差信息进行了分析。利用偏心光学系统的波像差分析方法, 分析了在非球面检测系统中, 被测镜的调整误差对系统波像差的影响, 建立了调整误差分离的数学模型。利用该模型对离轴非球面反射镜进行实际的调装实验, 经过四次调整, 被测离轴二次非球面的最终检测的方均根结果为 0.037λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$), 有效地提高了检测效率。

关键词 光学制造; 非球面检测; 无像差点法检测; 调整误差; 误差分离矩阵

中图分类号 O348.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0222001

Alignment of off-Axis Conic Aspheric Mirrors in Stigmatic Null Test

Chen Qinfang^{1,2} Li Yingcai¹ Ma Zhen^{1,2} Li Xuyang^{1,2} Liang Shitong^{1,2}

(¹*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*)

²*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract During interferometric testing, an accurate evaluation of the surface information is one of the key factors in realizing deterministic manufacturing of off-axis aspheric mirrors. The method used in the analysis of wavefront aberration due to centring error in optical system is valid for test piece misalignment in an interferometric setting as well. The mathematic model of error separation is developed. In experiment, the test result of an off-axis aspheric mirror after alignment is 0.037λ (RMS, $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$), the test efficiency is improved effectively.

Key words optical fabrication; aspheric testing; stigmatic null test; alignment error; error-separation matrix

OCIS codes 220.1140; 220.1250; 220.4840

1 引 言

自 20 世纪 90 年代以来, 空间光学遥感器在国防、国民经济领域的需求快速增长。由于离轴反射式光学系统可满足对地观测光学遥感器大视场、高分辨率和较小质量的要求, 是新一代空间光学系统的发展方向。但是离轴非球面的加工是比较困难的, 其中一个原因是离轴非球面的面形检测比较困难^[1~5]。在非球面抛光阶段通常采用无像差点法、

补偿法和计算全息图(CGH)检测非球面面形。其中无像差点法检测是最早、最经典也是最可靠的检测方法之一, 它是利用二次曲面存在的一对无像差的共轭点, 并借助于辅助镜构成自准光路实现干涉检测^[6,7]。离轴非球面不容易检测是因为检测光路的调整问题, 当被测镜是旋转对称的非球面时, 如果非球面相对于检测仪器有轴向位置误差, 则会产生球差; 如果被测镜有纵向位置误差, 则主要会产生彗

收稿日期: 2010-07-06; 收到修改稿日期: 2010-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(60808028)资助课题。

作者简介: 陈钦芳(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事非球面加工和检测等方面的研究。

E-mail: chenqingfang20060718@126.com

导师简介: 李英才(1945—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学与观测技术等方面的研究。

E-mail: lyc@opt.ac.cn

差。而对于离轴非球面,如果被测离轴非球面镜相对于检测仪器的间隔有误差,则在检测结果中不仅表现为球差而且还会引入倾斜、彗差和像散;如果被测镜在纵向上有调整误差,也会产生倾斜、彗差和像散,此时若采取通过对面形干涉条纹的表现形式进行人工判断的方法,则随机性强而且比较复杂,因此有必要分析调整误差对干涉检测结果的影响,这对准确、有效地指导被测镜的调整有重要意义^[8]。H. H. Hopkins 等^[9]通过计算光线通过单个偏心光学表面的光程变化,分析了偏心对系统波像差的影响。该方法也适用于分析在非球面干涉检测系统中由被测镜的调整误差引入的波像差,本文计算了以被测镜调整误差为作用分量的系统影响参数,建立了镜面面形误差和调整误差的分离矩阵。实验利用一离轴二次非球面镜进行实际调整来验证,调整前干涉检测的均方根波像差为 0.294λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$),调整后为 0.037λ 。

2 理论分析

如图 1 所示,由费马原理可知,当光入射在具有中心偏离的光学表面时,实际的出射光线与理想的出射光线光程差为^[10,11]

$$\Delta l = n l_{PQ} - n' l_{PG}, \quad (1)$$

根据图 2 的几何关系可知

$$l_{PG} = l_{PQ} \cos(I - I'), \quad (2)$$

故

$$\Delta l = l_{PQ} \cos I (n \cos I - n' \cos I'), \quad (3)$$

由于被测镜是反射面, $\cos I = \cos I'$, 而且检测光路两次通过镜面,故(3)式用向量表示为

$$W = -2\Delta l = -4(\delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{g})(\mathbf{I}' \cdot \mathbf{g}), \quad (4)$$

式中 $\delta\mathbf{r}$ 为任意光线入射点 P 在镜面失调后的位移矢量 PQ ; \mathbf{g} 为镜面上任意点 P 的单位法向量; \mathbf{I}' 为出射光线的单位向量。

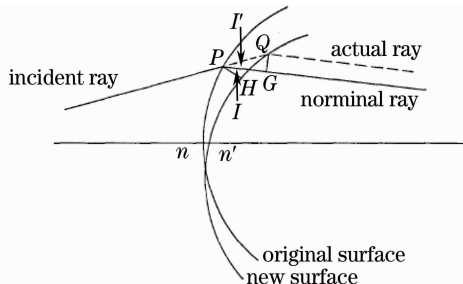


图 1 偏心的表面

Fig. 1 Surface with centring errors

如图 2 所示的离轴双曲面的检测光路示意图,检测光路的主光轴由干涉仪的焦点和标准球面镜的曲率中心确定,设该轴为 Z 轴,建立直角坐标系 XYZ ,其坐标原点在离轴非球面镜的母镜顶点,则标准球面镜相对于干涉仪只有一个沿主轴方向的自由度,在实际调整过程中,可以通过球差的调整保证干涉仪与标准球面镜的相对位置,由标准镜和被测镜的相对位置可知标准镜在其它方向的自由度都可以转为被测镜的自由度,因此被测镜在 XYZ 标系下有 6 个自由度,分别是沿 X, Y, Z 轴的平动 D_x, D_y, D_z 和绕轴的转动 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$,由于在该标系下被测镜是关于 Z 轴旋转对称,所以 θ_z 不会引入误差。

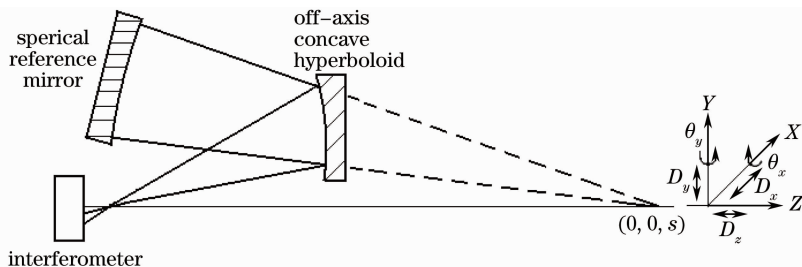


图 2 离轴双曲面的无像差点法检测

Fig. 2 Stigmatic null test of an off-axis concave hyperboloid

根据坐标变换关系可得镜子引入失调误差 D_x, D_y, D_z 和 θ_x, θ_y 后镜子上任一光线入射点的位移矢量为

$$\delta\mathbf{r} = [D_x - \theta_y z, D_y + \theta_x z, D_z + \theta_y x - \theta_x y], \quad (5)$$

对于被测非球面

$$z = \frac{1}{2} c p^2 + \frac{k+1}{8} c^3 p^4 + \dots, \quad (6)$$

式中 $p^2 = x^2 + y^2$ 表示非球面口径内任一点与镜面

几何中心的距离, c 为顶点曲率, k 为二次曲面系数,则该面上任一点的单位法向量可表示为

$$\mathbf{g} = \left[-\frac{\partial z}{\partial x}, -\frac{\partial z}{\partial y}, 1 \right] \left[\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 + 1 \right]^{-1/2}. \quad (7)$$

图 2 中设任一光线入射点在被测镜上的入射点坐标为 (x, y, z) , 被测二次非球面的一个焦点坐标 $(0, 0, s)$, 易得出射光线的单位向量表示为

$$\mathbf{i}' = [x, y, z - s][p^2 + (z - s)^2]^{-1/2}, \quad (8)$$

将(5),(7)和(8)式代入到(4)式得到

$$\begin{aligned}
 W = & -4D_z + && \text{piston} \\
 & 4x(cD_x - \theta_y) + 4y(cD_y + \theta_x) + && \text{tilt} \\
 & 2c^2 D_z(1 - k)p^2 + && \text{focus} \\
 & 2kc^2(2cD_x - \theta_y)p^2 x + && X - \text{coma} \\
 & 2kc^2(2cD_y + \theta_x)p^2 y + && Y - \text{coma} \\
 & kc^4 D_z p^4 && \text{spherical}
 \end{aligned} \quad (9)$$

式中右侧对应表示误差来源。如图3所示离轴镜和母镜的几何关系,从离轴反射镜的坐标系变换到母镜坐标系是

$$\begin{cases} x = x' + h_x, & y = y' + h_y \\ p^2 = h^2 + 2h_x x' + 2h_y y' + r^2. \end{cases} \quad (10)$$

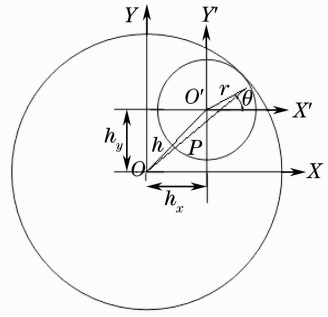


图3 离轴非球面镜与母镜的几何关系
Fig.3 Geometry of off-axis aspheric segment relative to parent mirror

将(10)式代入(9)式得到坐标变换到离轴非球面坐标系 $X'O'Y'$ 后调整误差引入的波像差公式为

$$\begin{aligned}
 W_{\text{off}} = & [4(cD_x - \theta_y) + 4(1 - k)c^2 D_z h_x + 2kc^2(2cD_x - \theta_y)h^2 + \\
 & 4kc^2(2cD_x - \theta_y)h_x^2 + 4kc^2(2cD_y + \theta_x)h_x h_y + 4kD_z c^4 h^2 h_x]x + \\
 & [4(cD_y + \theta_x) + 4(1 - k)c^2 D_z h_y + 2kc^2(2cD_y + \theta_x)h^2 + \\
 & 4kc^2(2cD_y + \theta_x)h_y^2 + 4kc^2(2cD_x + \theta_y)h_x h_y + 4kD_z c^4 h^2 h_y]y + \\
 & [2(1 - k)c^2 D_z + 2kc^2(2cD_x - \theta_y)h_x + 2kc^2(2cD_y + \theta_x)h_y + 2kD_z c^4 h^2]r^2 + \\
 & 4kc^2(2cD_x - \theta_y)h_x x^2 + 4kc^2(2cD_x - \theta_y)h_y x y + \\
 & 4kc^2(2cD_y + \theta_x)h_y y^2 + 4kc^2(2cD_y + \theta_x)h_x x y + \\
 & 4kD_z c^4 h_x^2 x^2 + 4kD_z c^4 h_y^2 y^2 + 8kD_z c^4 h_x h_y x y + \\
 & 2kc^2(2cD_x - \theta_y)r^2 x + 4kD_z c^4 h_x r^2 x + \\
 & 2kc^2(2cD_y + \theta_x)r^2 y + 4kD_z c^4 h_y r^2 y + \\
 & kD_z c^4 r^4,
 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{piston + tilt} \\ \text{focus} \\ \text{astigmatism} \\ \text{coma} \\ \text{spherical} \end{array} \quad (11)$$

从(11)式可看出,当 $\theta_y = 2D_x, \theta_x = -2D_y$ 时,它们对离焦、像散和彗差的贡献量为零,所以它们之间有一定的补偿关系。本文采用最小二乘拟合法确定失调量,即检测得到的波像差 $W_o(r, \theta)$ 与失调引入的波像差 $W_{\text{off}}(r, \theta, D_x, D_y, D_z, \theta_x, \theta_y)$ 的方差最小:

$$(\Delta W)^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^a \rho d\rho d\theta [W_{\text{off}}(r, \theta, D_x, D_y, D_z, \theta_x, \theta_y) - W_o(r, \theta)]^2, \quad (12)$$

a 为离轴非球面的半口径。满足上述要求的充要条件是

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\Delta W)^2}{\partial D_x} = 0; & \frac{\partial(\Delta W)^2}{\partial D_y} = 0; & \frac{\partial(\Delta W)^2}{\partial D_z} = 0; \\
 \frac{\partial(\Delta W)^2}{\partial \theta_x} = 0; & \frac{\partial(\Delta W)^2}{\partial \theta_y} = 0.
 \end{aligned} \quad (13)$$

根据该方法调整被测镜,可满足失调误差对测量结果的影响最小,同时被测镜所需修改的面形量也是最小。

3 实验验证

根据上述分析建立的误差分离模型,编制计算机调整软件,根据实验中测得的波像差数据,分别求解出系统的失调量 D_x, D_y, D_z 和 θ_x, θ_y 的值。实验利用一离轴椭球面进行调整,被测镜初始时处于某一状态,将检测获得的波像差数据代入到软件中,计算检测光学系统的失调量,依据计算出的失调量调整检测光路,重复以上步骤直至最终的波像差满足要求。实际的计算结果如表1所示。

表 1 实验失调量结果

Table 1 Calculated misalignment in experiment

| NO. | D_x /mm | D_y /mm | D_z /mm | $\theta_x/10^{-5}$ rad | $\theta_y/10^{-5}$ rad |
|-----|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|
| 1 | -0.118 | -0.056 | -0.012 | 10.97 | -15.88 |
| 2 | -0.025 | -0.040 | -0.030 | 5.302 | -62.13 |
| 3 | -0.026 | -0.018 | -0.023 | 5.121 | -5.0402 |
| 4 | -0.017 | -0.010 | -0.018 | 3.4987 | -2.646 |

被测镜在初始位置干涉仪检测结果如图 4(a)所示,均方根波像差为 0.294λ ,经过四次调整面形检测结果如图 4(b),(c),(d)和(e)所示,最终的检测结果 0.037λ 。

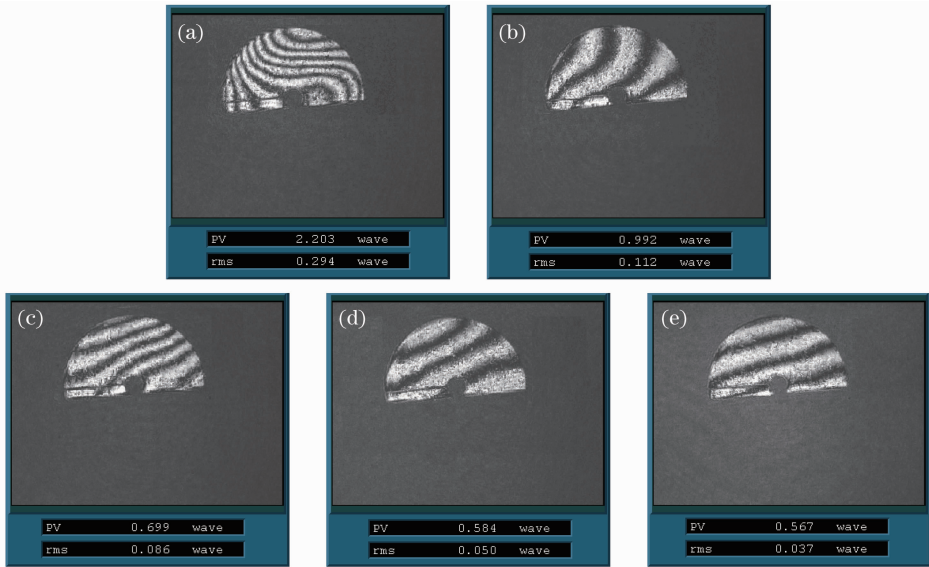


图 4 干涉仪检测结果。(a)调整前,(b)第一次调整后,(c)第二次调整后,(d)第三次调整后,(e)第四次调整后

Fig. 4 Test results of interferometer. (a) before alignment, (b) after the first alignment, (c) after the second alignment, (d) after the third alignment, (e) after the forth alignment

从实验数据结果可以看出,利用本文建立的调整误差分离模型调整被测离轴非球面相对于检测系统的位置,经过四次调整,均方根波相差由调整前的 0.294λ 到调整后的 0.037λ 。实验结果表明本文提出的离轴非球面的误差分离算法是收敛的,可以有效提高检测效率。

4 结 论

非球面面形检测过程中,检测结果不可避免的要受到镜面调整精度的影响,如果从面形干涉条纹的表现形式进行人工判断,其结果随机性强。本文根据偏心光学系统像差原理,提取干涉条纹中调整误差作用分量的影响参数,实现了干涉检测中系统调整量的确定性。实验表明经过四次调整后,最终检测结果满足实际要求,采用该方法缩短了离轴二次非球面的检测周期,具有较好的应用价值。

参 考 文 献

- 1 H. J. Juraneck, Sand Rolf, J. Schweizer *et al.*. Off-axis telescopes-the future generation of earth observation telescopes [C]. *SPIE*, 1998, **3439**: 104~115
- 2 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lu Baobin. Design of new-style unobscured three-mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1144~1147
郭永祥,李英才,吕保斌.一种新型无遮拦三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1144~1147
- 3 Cui Xiangqun, Gao Bilie, Wang Dazing *et al.*. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 402~407
崔向群,高必烈,汪达兴等.一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 402~407
- 4 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Optical design of the uncoaxial three mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683
郭永祥,李英才,梁天梅等.一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2680~2683
- 5 Yang Bingxin. Characteristics and main specification of IKONOS and QuickBird2 satellite camera-some points for developing such like satellite camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, **23**(4): 14~16

- 杨秉新. 美国 IKONOS 和 QuickBird2 卫星相机的主要性能和特点分析及看法[J]. 航天返回与遥感, 2002, **23**(4): 14~16
- 6 Wang Peng, Zhao Wencai, Hu Mingyong *et al.*. Hindle testing of the off-axis convex asphere surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(2): 139~142
- 王 鹏, 赵文才, 胡明勇 等. 离轴凸非球面的 Hindle 检测[J]. 光学精密工程, 2002, **10**(2): 139~142
- 7 H. Philip Stahl. Aspheric surface testing techniques [C]. *Fabrication and Testing of Asphere*, OSA, 1999, **24**: 86~102
- 8 Mitchell Curtis Ruda. Methods for null testing sections of aspheric surfaces[D]. The University of Arizona, 1979. 1~10
- 9 H. H. Hopkins, H. J. Tiziani. A theoretical and experimental study of lens centring errors and their influence on optical image quality[J]. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1966, **17**: 33~54
- 10 M. Rimmer. Analysis of perturbed lens systems[J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(3): 533~537
- 11 W. B. Wetherell, M. P. Rimmer. Schwarzschild telescopes[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(12): 2817~2832