

文章编号:1004-4213(2010)09-1578-4

利用调整技术补偿离轴抛物面反射镜面形误差

陈钦芳^{1,2}, 李英才¹, 马臻^{1,2}, 李旭阳^{1,2}, 郭永祥^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:为了提高光学系统的成像质量,对离轴抛物面反射镜的面形准确度要求越来越高,这大大增加了反射镜的加工难度.本文基于波像差理论,分析了在离轴抛物面反射镜中调整量引入的波像差,提出通过适当调整离轴抛物面反射镜的位置补偿反射镜的面形误差,可以降低离轴反射镜的加工难度、缩短其加工周期、减少加工成本.并借助于 ZEMAX 软件对一块面形准确度低于 $\lambda/40$ RMS ($\lambda=632.8$ nm) 离轴抛物面反射镜进行仿真实验,根据理论计算的调整量调整反射镜的位置,得到了补偿后的离轴抛物面反射镜的面形误差小于 $\lambda/60$ RMS,仿真结果表明在离轴抛物面反射镜中引入适当的调整量可以有效地补偿反射镜的面形误差.

关键词:非球面加工;面形误差;波像差;调整技术;离轴抛物面镜

中图分类号:O348.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103909.1578

0 引言

二次非球面具有几何焦点的无像差特性,被广泛应用于大口径光学系统中,使其结构简化.由于抛物面反射镜具有无像差平行光束的光学性质,被广泛应用于基本定标工具平行光管中.离轴抛物面镜反射式平行光管由于其结构简单,无中心遮拦,具有其它形式平行光管无法比拟的优势,同时离轴抛物面反射镜也常用于 Cassegrain 和 Gregorrian 的全反射、无中心遮拦、全波段的应用光学系统中^[1-3].但是离轴反射镜的制造却是一个难题,主要是离轴反射镜的非球面度、口径和离轴量的增加和对反射镜面形准确度要求的提高^[4-5].

本文对离轴抛物面反射镜调整量引入的波像差进行了分析研究,提出通过调整离轴抛物面反射镜的位置,利用调整量引入的波像差补偿适量的面形误差^[6],从而降低了对离轴抛物面反射镜面形加工准确度的要求,在一定程度上可以降低对离轴抛物面反射镜面形加工准确度的要求,对降低离轴抛物面反射镜的加工难度,缩短加工周期、降低加工成本具有重要的意义.

1 理论分析

如图 1 所示的离轴反射镜在坐标系 XYZ 有六

个自由度^[7],分别是沿着 X、Y、Z 坐标轴的平动 D_x 、

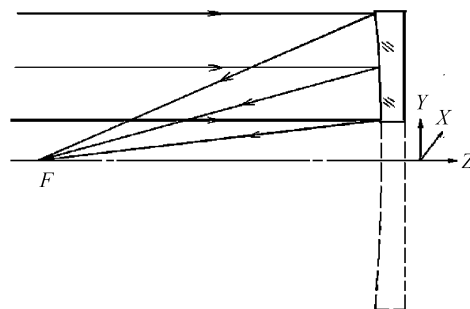


图 1 离轴抛物面镜

Fig. 1 Off-axis parabolic mirror

D_y 、 D_z , 和绕 X、Y、Z 坐标轴的旋转 θ_x 、 θ_y 、 θ_z . 由 ZEMAX 的仿真分析可知沿着 X、Y 坐标轴的平动 D_x 、 D_y 不会影响离轴抛物面镜轴上点的波像差,而 D_z 引入的波像差主要是离焦,对面形误差的补偿作用很小可以忽略,由于离轴反射镜的母镜是回转对称的,因而绕 Z 轴的转动 θ_z ,不会引入波像差^[8-9],所以在图 1 所示的离轴抛物面反射镜相对于入射的平行光有两个自由度即绕 X、Y 坐标轴的旋转 θ_x 、 θ_y ,设镜面上任意点的坐标为 $P(x, y, z)$,当引入调整量 θ_x 、 θ_y 后,该点坐标为 $P'(x', y', z')$,由坐标变换公式可知

$$P'(x', y', z') = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ \sin \theta_x \sin \theta_y & \cos \theta_y & \sin \theta_x \cos \theta_y \\ \cos \theta_x \sin \theta_y & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于调整量 θ_x 和 θ_y 很小,可以认为

$$\begin{aligned} \sin \theta_x &= \theta_x, \sin \theta_y = \theta_y \\ \sin \theta_x \sin \theta_y &= 0 \\ \cos \theta_x &= \cos \theta_y = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得

$$\begin{cases} x' = x - \theta_y z \\ y' = y + \theta_x z \\ z' = z + \theta_y x - \theta_x y \end{cases} \quad (3)$$

抛物面的方程为

$$z' = \frac{r^2}{2R} = \frac{(x')^2 + (y')^2}{2R} \quad (4)$$

R 是抛物面的顶点曲率半径.

将式(3)代入式(4)得

$$\begin{aligned} z + \theta_y x - \theta_x y &= \frac{1}{2R} [x^2 - 2\theta_y x z + \theta_y^2 z^2 + \\ & y^2 + 2\theta_x y z + \theta_x^2 z^2] \end{aligned} \quad (5)$$

因为 $\theta_y^2 z^2$ 和 $\theta_x^2 z^2$ 很小,故略去,则式(5)可整理为

$$z = \frac{\frac{1}{2R} [x^2 + y^2] - \theta_y x + \theta_x y}{1 + \frac{\theta_y x}{R} - \frac{\theta_x y}{R}} \quad (6)$$

将式(6)展开并忽略高次项得

$$\begin{aligned} z &= -\theta_y r \cos \theta + \theta_x r \sin \theta + \frac{\theta_y^2 + \theta_x^2}{2R} r^2 + \frac{1}{2R} r^2 + \\ & \left(\frac{\theta_y^2}{2R} - \frac{\theta_x^2}{2R} \right) r^2 \cos 2\theta - \frac{\theta_x \theta_y}{R} r^2 \sin 2\theta - \frac{\theta_y}{2R^2} r^3 \cdot \\ & \cos \theta + \frac{\theta_x}{2R^2} r^3 \sin \theta \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (8)$$

式(7)是引入调整量后的抛物面方程,将理想状态下的抛物面方程(4)与式(7)相减,得到调整位置后的抛物面相对于理想抛物面的偏离,反射面引入的波像差是该偏离量的两倍,则波像差公式可表示成

$$\begin{aligned} W_{\text{parent}} &= \begin{cases} 2\theta_y r \cos \theta - 2\theta_x r \sin \theta - & \text{tilt} \\ \frac{\theta_y^2 + \theta_x^2}{R} r^2 & \text{defocus} \\ - \left(\frac{\theta_y^2}{R} - \frac{\theta_x^2}{R} \right) r^2 \cos 2\theta + 2 \frac{\theta_x \theta_y}{R} r^2 \sin 2\theta + & \text{astigmatism} \\ \frac{\theta_y}{R^2} r^3 \cos \theta - \frac{\theta_x}{R^2} r^3 \sin \theta & \text{coma} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

虽然调整量引入的波像差中存在球差,但是由公式的推导可知球差量很小,所以本文主要研究调整量引入的彗差和像散.从上式可以看出,抛物面反射镜(母镜)的调整量引入的波像差主要是彗差,像散与调整量是非线性的关系.

根据图 2 的几何关系,离轴镜口径内任意一点 P'' 在母镜坐标系下与母镜的几何中心 O 的距离为

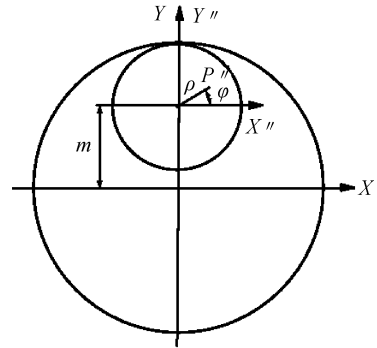


图 2 离轴抛物面反射镜与母镜的几何关系

Fig. 2 Geometric relationship between the parent parabolic mirror and the off-axis reflective parabolic mirror

$$r = \sqrt{(\rho \cos \varphi)^2 + (\rho \sin \varphi + m)^2} \quad (10)$$

式中 ρ 是 P'' 点在离轴坐标系 $X''Y''Z''$ 下的极径, φ 是极径和 X'' 坐标轴的夹角, m 是离轴量. 将式(10)代入式(9)并展开得到坐标变换到离轴抛物面坐标系后调整量引入的波像差^[10]为

$$\begin{aligned} W_{\text{off}} &= A_1 + A_2 \rho \cos \varphi + A_3 \rho \sin \varphi + A_4 \rho^2 + \\ & A_5 \rho^2 \cos 2\varphi + A_6 \rho^2 \sin 2\varphi + A_7 \rho^3 \cos \varphi + \\ & A_8 \rho^3 \sin \varphi + \dots \end{aligned} \quad (11)$$

式中系数如下

$$\begin{cases} A_1 = \frac{2m^3 \theta_x}{R} + O(\theta^2) \\ A_2 = 2\theta_y + \frac{m^2 \theta_y}{R^2} + O(\theta^2) \\ A_3 = -2\theta_x - \frac{3m^2 \theta_x}{R^2} + O(\theta^2) \\ A_4 = -\frac{2m \theta_x}{R^2} + O(\theta^2) \\ A_5 = \frac{m \theta_x}{R^2} + O(\theta^2) \\ A_6 = \frac{m \theta_y}{R^2} + O(\theta^2) \\ A_7 = \frac{\theta_y}{R^2} + O(\theta^2) \\ A_8 = -\frac{\theta_x}{R^2} + O(\theta^2) \end{cases}$$

其中 A_1 : 平移; A_2, A_3 : 倾斜; A_4 : 离焦; A_5, A_6 : 像散; A_7, A_8 : 彗差. 对比由调整量在离轴抛物面镜中引入的波像差表达式(11)和其在母镜中引入的波像差表达式(9),可以看出在母镜中由调整量引入的波像差主要是彗差,像散和倾斜量是二次方的关系,所以对于母镜通过引入 X 方向和 Y 方向的调整量可以有效补偿母镜面形误差中的彗差,而在离轴镜中像散和调整量是线性的关系,相对于彗差而言,像散对调整量更敏感,故在离轴抛物面反射镜中可以通

过引入适当的调整量有效地补偿离轴反射镜面形误差中的像散。

2 模拟仿真

利用 ZEMAX 软件对离轴抛物面反射镜进行仿真分析, 抛物面镜的参量: 顶点曲率半径 $R = 5\ 000\ \text{mm}$, 离轴量 $m = 450\ \text{mm}$, 离轴镜的有效口径 $d = 600\ \text{mm}$, 在 ZEMAX 软件中给离轴反射镜镜面加入的面形误差均方根值 (Root Mean Square RMS)^[11] 为 $\lambda/40$, 图 3 为添加了面形误差后的离轴抛物面反射镜轴上点波像差图, 此时波像差为 $0.050\ 0\lambda\ \text{RMS}$, 峰谷值 (Peak to Valley PV) 值为 $0.249\ 7\lambda$ ($\lambda = 632.8\ \text{nm}$), 表 1 列出了添加面形误差后离轴抛物面反射镜 zernike 系数的 $z_5 \sim z_9$ 项, 其中 z_5 、 z_6 、 z_7 、 z_8 、 z_9 分别代表像散、彗差和球差。

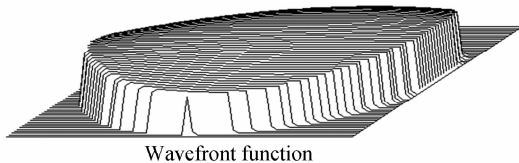


图 3 引入面形误差后的离轴抛物面反射镜轴上点的波像差图

Fig. 3 Wavefront map of the off-axis reflective parabolic mirror with surface error

表 1 引入面形误差后离轴抛物面反射镜的 zernike 系数
Table 1 Zernike coefficients of the off-axis parabolic mirror with surface error

term	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9
Value/ λ	0.061 939	0.032 084	0.006 348	-0.029 609	-0.002 048

如前面分析的, 对于离轴反射镜可以通过调整反射镜的位置补偿其面形误差中的像散, 所以将表 1 中的 z_5 、 z_6 代入到式(11)中的 A_5 、 A_6 项, 计算得到 θ_x 、 θ_y 为

$$\begin{cases} \theta_x = 5'' \\ \theta_y = 3'' \end{cases}$$

因此为了补偿离轴抛物面反射镜面形误差中的像散, 须将离轴镜绕 X 轴方向旋转 $\theta_x = -5''$, 绕 Y 方向旋转 $\theta_y = -3''$. 将这些调整量加入到 ZEMAX 软件后, 得到图 4 所示的波像差图, 此时波像差为 $0.019\ 9\lambda\ \text{RMS}$, PV 为 $0.099\ 2\lambda$, 表 2 是对应的 zernike 系数。从图 3 可以看出重新调整位置后, 离

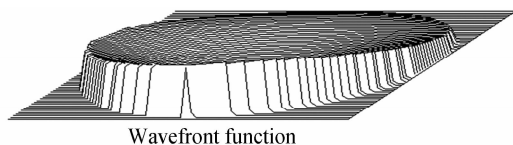


图 4 引入调整量后的抛物面反射镜的波像差图

Fig. 4 Wavefront map of the off-axis reflective parabolic mirror after alignment

表 2 引入调整量后离轴抛物面镜的 zernike 系数

Table 2 Zernike coefficients of the off-axis parabolic mirror after alignment

Term	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9
Value/ λ	0.000 205	-0.003 195	-0.001 435	-0.016 431	-0.002 157

轴抛物面反射镜轴上点的波像差有明显改善, 引入调整量后的波像差小于 $\lambda/30\ \text{RMS}$, 同时对比表 1 和表 2 的 zernike 系数, 引入调整量后, 分别将面形误差中像散系数 z_5 和 z_6 校正为原来的 0.33% 和 9.9%, 同理彗差的校正量为 22.6% 和 55.5%, 而调整量对球差的贡献很小, 这与前面的理论分析结果相吻合, 所以引入调整量可以有效地补偿离轴抛物面反射镜面形误差中像散误差, 同时可以矫正部分彗差。

3 结论

从仿真结果可以看出, 如果在系统设计中要求离轴抛物面的面形误差小于 $\lambda/60\ \text{RMS}$, 我们可以用面形加工准确度约为 $\lambda/40\ \text{RMS}$ 的离轴抛物面反射镜, 通过适当调整反射镜的位置后就可以满足实际的应用要求, 这样大大降低了对离轴抛物面镜加工准确度的要求。

本文从理论上分析了离轴抛物面反射镜的调整量引入的波像差, 通过调整离轴反射镜的位置有效补偿反射镜的面形误差, 因此降低了对离轴抛物面发反射镜的加工要求, 具有较好的工程应用价值。

参考文献

- [1] ARGUIJO P, SCHOLL M S. Exact ray-trace beam for an off-axis paraboloid surface[J]. *Appl Opt*, 2003, **42**(16): 3284-3289.
- [2] MA Zhen, LI Ying-cai, FAN Xue-wu, et al. Study on optical centering of aspheric mirror by interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1455-1458.
马臻, 李英才, 樊学武, 等. 非球面干涉定心方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1455-1458.
- [3] BURKE J, WANG K, BRAMBLE A. Null test of an off-axis parabolic mirror. I. configuration with spherical reference wave and flat return surface[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(5): 3196-3210.
- [4] FAN Xue-wu, MA Wei-hong, CHEN Rong-li, et al. Study on three-mirror reflective optics system having one image surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 1001-1003.
樊学武, 马卫红, 陈荣利, 等. 具有一次像而的二反射光学系统的研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(8): 1001-1003.
- [5] LIANG Pei. Study on collimation property of off-axis parabolic mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 909-913.
梁培. 离轴抛物镜准直特性的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 909-913.
- [6] PARKS R E. Alignment of off-axis conic mirrors[J]. *Optical Fabrication and Testing*, OSA Technical Digest Series, paper TuB4. (1980).
- [7] ZHENG Li-gong, XUE Dong-lin, ZHANG Xue-jun. Computer aided alignment for off-axis ashpere null test[C].

- SPIE*, 2005, **5638**: 319-323.
- [8] CHENG Hao-bo, FENG Zhi-jing. Error-separation model for interferometric testing aspheric surfaces based on wavefront aberrations[J]. *J Tsinghua Univ (Sci&Tech)*, 2006, **46**(2): 187-190.
程颢波,冯之敬.波像差法构建非球面干涉检测的误差分离模型[J].清华大学学报(自然科学版),2006,**46**(2):187-190.
- [9] XUE Dong-lin, ZHENG Li-gong, WANG Shu-ping, *et al.* Research on off-axis conic asphere null testing using computer-aided alignment method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(3): 380-385.
薛栋林,郑立功,王淑平,等.离轴二次非球面补偿检验计算机辅助调整技术研究[J].光学精密工程,2006,**14**(3):380-385.
- [10] MALACALA D. Optical shop testing[M]. John Wiley & Sons, Inc., 2007, 435-493.
- [11] ZEMAX Development corporation. ZEMAX optical design program user's guide[M], 2008: 324.

Surface Error Compensation of Off-axis Parabolic Mirrors by Alignment

CHEN Qin-fang^{1,2}, LI Ying-cai¹, MA Zhen¹, LI Xu-yang^{1,2}, GUO Yong-xiang^{1,2}

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

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

Abstract: In order to improve the imaging quality of optical system, high precision surface of mirrors are put forward to improve their imaging quality. It makes their fabrication harder. Wavefront aberration induced by alignment is analyzed in off-axis parabolic mirror system based on the wavefront aberration theory. The surface error of off-axis parabolic mirror can be compensated by alignment so it will reduce the fabrication difficulty, shorten its period and save its cost. In the simulations of an off-axis parabolic mirror with surface error $\lambda/40$ RMS ($\lambda = 632.8$ nm) (Root Mean Square) with ZEMAX software, the figure accuracy is under $\lambda/40$ RMS after alignment. It shows that surface error of off-axis parabolic mirrors could be compensated effectively by alignment.

Key words: Aspheric processing; Surface error; Wavefront; Alignment; Off-axis parabolic mirror



CHEN Qin-fang was born in 1982. Now she is a Ph. D. degree candidate, and her research interest focus on optical processing and testing.



LI Ying-cai graduated from Zhejiang University in 1968. He works as a research fellow and Doctoral Supervisor.