

文章编号 1004-924X(2011)08-1763-08

离轴抛物镜检测中调整误差对波前畸变的影响

李俊峰*, 宋淑梅

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学
系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:对离轴非球面在光学加工和后期装调阶段的光学检测进行了研究,分析了检测过程中调整误差对波前畸变的影响。以加工半径为 10 000 mm、二次曲面系数为 -1、口径为 500 mm、离轴量为 425 mm 的离轴抛物面为例,建立了各个调整参数对波前畸变影响的物理模型及数学模型,调整误差主要包括俯仰与高低、偏摆与离轴量及绕其子光轴旋转 3 组参数。应用 matlab 软件对调整误差对波前畸变的影响进行了仿真分析,对相应的仿真结果进行了实验验证。结果显示,仿真与实验结果一致性很好,证明了理论模型的正确性。分析得到的相应结论适用于所有离轴非球面镜的调整误差分析。

关键词:离轴非球面;光学检测;波前畸变;调整误差

中图分类号:TH703;TQ171.65 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111908.1763

Influence of adjustment error on wavefront aberration in off-axis paraboloid test

LI Jun-feng*, SONG Shu-mei

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: ljf220@sohu.com

Abstract: Optical tests for the off-axis aspherics in optical processing and optical assembling were researched and the effect of adjustment errors on the wavefront aberration was analyzed. By taking an off-axis aspherics with the radiu of 10 000 mm, quadratic surface coefficient of -1, diameter of 500 mm and the lateral displacement of 425 mm for an example, the physical model and mathematical model to describe the relationship between the adjustment parameters and the wavefront aberration were established. The adjustment parameters included the pitch and high-low errors, beat and off-axis distance errors, and the rotating parameters around the secondary optical axis. The matlab software was used to simulate the influence of the wavefront aberration on the adjustment errors. Then, the experiments were performed to examine the simulation results. It shows that the the simulation results are well coincident with the experiment ones, which proves the theory model in correct. The obtained results

收稿日期:2010-12-10;修订日期:2010-12-28.

基金项目:中国科学院三期知识创新工程资助项目

are also suitable for the test and alignment of other off-axis aspherics.

Key words: off-axis aspherics; optical testing; wavefront aberration; adjustment error

1 引言

随着光学加工与检测技术的不断进步,几何焦点无像差的二次非球面在大口径光学系统的研制中极受关注,而离轴二次非球面因具有简化光学系统、提高系统的成像质量、减小仪器的尺寸和重量并可避免光学系统遮拦等特点而在天文仪器和空间光学系统中得到了广泛的应用^[1]。

抛物面反射镜作为二次非球面的一种,因具有产生独特的无像差平行光束的光学性质,经常被用作光学基本定标工具平行光管。离轴抛物面镜因能以简单的面形产生高质量的无中心遮拦的平行光束比其它形式的平行光管更具优势而使用更为广泛。离轴非球面的缺点是加工比较困难,当然因为它不是旋转对称曲面,其应用场合也有所限制。离轴抛物面镜的设计相对简单,主要根据使用要求决定口径、离轴量、离轴角、焦距等几何关系,也可以根据需要计算可用视场的大小。

离轴非曲面在加工阶段和后期的装调阶段都需要进行光学检测。在加工阶段,一般采用非在线检测,而且加工状态与检测状态不同,每次检测时都需要对检测光路进行细微的调整,因此,不同程度地存在着一定的调整误差。在后期的装调阶段,需要对光学元件进行检测,以验证其是否达到设计要求。由于机械支撑、应力变形以及环境因素的不同都会对镜面的面形造成影响,使其不能够完全复原为加工完成时的检测状态,故这一阶段也存在调整误差^[2-4]。因此,掌握离轴非球面镜调整误差对镜面误差的影响非常重要。

本文以加工检测一个圆形离轴抛物面镜为例,建立了离轴抛物面检测过程中存在调整失调量对波前畸变影响的物理模型及数学模型,并分析了各偏差对检测结果的影响,该分析得到的相应结论对于离轴非球面镜的加工、检测与装调具有一定的指导意义。

2 离轴抛物镜检测

2.1 离轴抛物面的几何模型及参数

同轴的二次曲面表达式可写为:

$$z = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2\rho^2}}, \quad (1)$$

其中: c 为非球面的顶点曲率, k 为二次曲面常数, $\rho^2 = x^2 + y^2$ 。

当 $k = -1$ 时,非球面为抛物面,此时表达式可以简化为:

$$z = c\rho^2/2, \quad (2)$$

其中: $\rho^2 = x^2 + y^2$

轴对称抛物面面形只要给出通光口径及焦距或顶点曲率半径就完全确定了,而离轴抛物面则需要给出通光口径、离轴量、离轴角或轴上焦距等

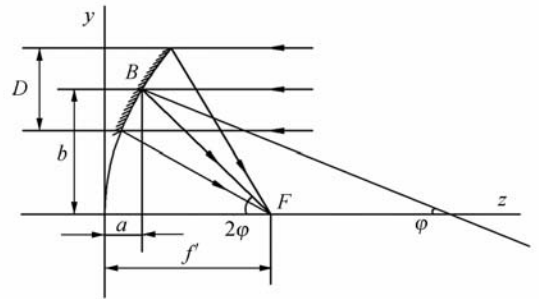


图 1 离轴抛物镜参数

Fig. 1 Parameters of off-axis paraboloid

参数,如图 1 所示。图中 B 为离轴抛物面镜的中心, b 为 B 点到原光轴的距离,即离轴量, F 为焦点, 2φ 为离轴角, f' 为母抛物面的焦距, a 为 B 点的矢高, D 为口径,这些量中, b , φ 及 f' 不是完全独立的,它们之间的关系为^[5]:

$$\tan(2\varphi) = \frac{b}{f' - a} = \frac{b}{f' - \frac{b^2}{4f'}}. \quad (3)$$

2.2 离轴抛物面镜的检测光路及调整参数

抛物面反射镜具有独特的无像差平行光束的光学性质,对其进行面形检测时采用自准直检验,检测光路如图 2 所示。

对一个圆形离轴非球面镜进行检测时,所需的调整共有相互独立的 6 个自由度,但其调整的

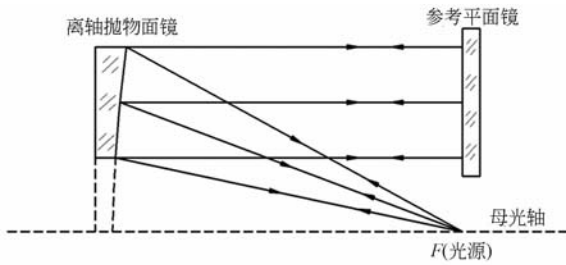


图 2 离轴抛物面检测光路

Fig.2 Testing of off-axis paraboloid

位置偏差是成对出现并相互关联的,主要包括俯仰与高低、偏摆与离轴量及绕其子光轴旋转 3 组失调参数。由于各参数与理论参数存在一定的偏差,将使检测结果中包含由失调量引起的波前畸变,只有明确地认识这些波前畸变产生原因,才可以获得真实准确的镜面面形误差。本文对以上提到的 3 种调整误差对波前畸变的影响进行了分析。

2.2.1 俯仰和高低误差

当离轴抛物面镜处于理想的检测位置时,其沿 Y 方向的投影所在的坐标系为 ZOX,如图 3 所示。调整俯仰与高低误差时,镜面位置可以看作是由理想位置绕 Y 轴旋转 θ 角(顺时针旋转为负角度,逆时针为正角度),再分别沿 Z, X 轴分别进行平移,得到新的坐标系 Z'O'X',其中心点 O' 坐标为 $(\Delta z, \Delta x)$,此时获得的镜面位置与在理想位置检测时具有相同的焦点,将此时的镜面位置转换到坐标系 ZOX 并计算出这个位置所产生的波前畸变就可以得到由俯仰与高低误差得到的波前畸变。

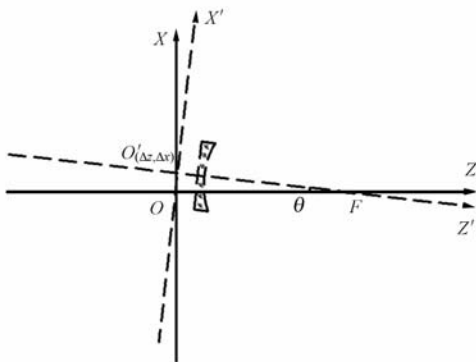


图 3 俯仰和高低误差失调时的 ZOX 面内坐标转换
Fig.3 Coordinate transformation in ZOX for misadjustment of pitch and high-low errors

在坐标系 ZOX 中,离轴非球面的曲线方程可以表示为:

$$z = cx^2/2. \tag{4}$$

在坐标系 Z'O'X' 中,离轴非球面的曲线方程可以表示为:

$$z' = cx'^2/2. \tag{5}$$

为了计算由调整误差产生的波前畸变,必须将两个位置的曲面方程转换到一个坐标系下,通过一定的几何关系可以计算出转换方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ 0 \\ \Delta z \end{bmatrix}. \tag{6}$$

在此转换方程中, θ 为给定的转换参量,而 $\Delta x, \Delta z$ 为未知的转换参量,转化成由坐标系 X'Y'Z' 到坐标系 XYZ 的转换方程为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - \Delta x \\ y \\ z - \Delta z \end{bmatrix}. \tag{7}$$

这样,就可以通过上面的转换方程推导出在同一坐标系下的两曲面的方程,由此可计算出由调整误差所带来的波前畸变。

2.2.2 偏摆与离轴量误差

当离轴抛物面镜处于理想的检测位置时,其沿 X 方向的投影所在的坐标系为 ZOY,如图 4 所示。当镜面位置存在偏摆与离轴量误差时,镜面位置可以看作是由理想位置绕母光轴旋转 θ 角,再分别沿 Z, Y 轴分别进行平移,得到新的坐标系 Z'O'Y',其中心点 O' 坐标为 $(\Delta z, \Delta y)$,此时获得

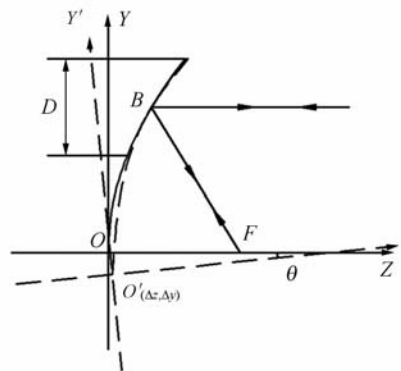


图 4 偏摆和离轴量误差失调时的 ZOY 面内坐标转换
Fig.4 Coordinate transformation in ZOY for misadjustment of beat and off-axis errors

的镜面位置与在理想位置检测时亦具有相同的焦点,将此时的镜面位置转换到坐标系 ZOY 并计算出这个位置所产生的波前畸变就可以得到由偏摆与离轴量误差得到的波前畸变。

为了计算由调整误差产生的波前畸变,必须将两个位置的曲面方程转换到一个坐标系下,利用下面的公式对坐标系进行平移和旋转,转换方程为:

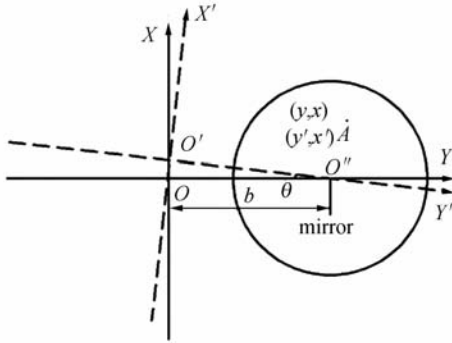
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (8)$$

同理,也可以得出曲面从坐标系 $X'Y'Z'$ 到坐标系 XYZ 的坐标转换方程:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y - \Delta y \\ z - \Delta z \end{bmatrix} \quad (9)$$

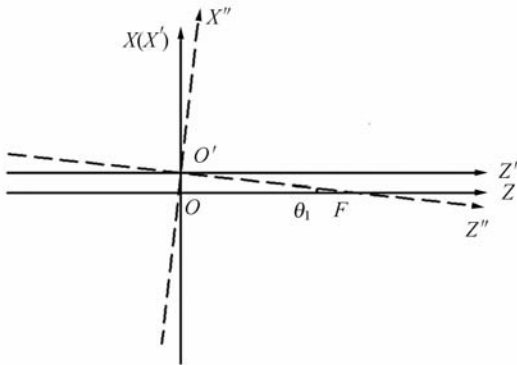
2.2.3 绕子光轴旋转误差

当离轴抛物镜处于理想的检测位置时,其沿 Z 方向的投影所在的坐标系为 YOX ,如图 5(a)所示。若非球面的调整存在绕子光轴旋转误差时,



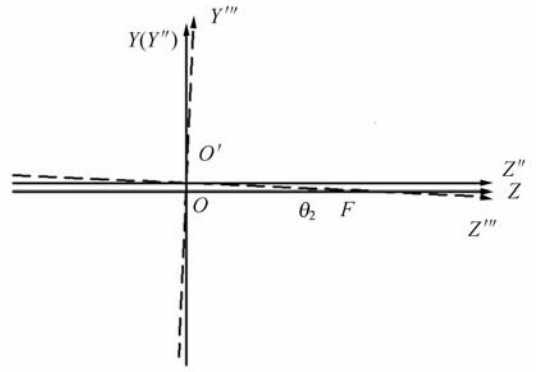
(a) YOX 面内绕子光轴旋转 θ 角

(a) Rotating θ around secondary optical axis in YOX



(b) $Z'O'X'$ 面内绕 Y' 轴旋转 θ_1 角

(b) Rotating θ_1 around Y' axis in $Z'O'X'$



(c) $Z''O''Y''$ 面内绕 X'' 轴旋转 θ_2 角

(c) Rotating θ_2 around X'' axis in $Z''O''Y''$

图 5 绕子光轴旋转的坐标变换

Fig. 5 Coordinate transformations rotating around secondary optical axis

镜面位置可以看作是由理想位置绕子光轴中心 O' 旋转 θ 角,得到新的坐标系 $Y'O'X'$ 。为了使两次检测位置具有相同的焦点位置,则还需曲面在 $Z'O'X'$ 面内绕 Y' 轴旋转 θ_1 角,然后在 $Z'O''Y''$ 面内绕 X'' 轴旋转 θ_2 角,这样就使得调整前后的曲面具有相同的焦点位置,从而可以计算此误差位置对波前畸变的影响。

为了计算由调整误差产生的波前畸变,必须将两个位置的曲面方程转换到一个坐标系下,曲面绕子光轴旋转的转换方程如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -b \sin \theta \\ b - b \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

曲面在 $X'Y'Z'$ 坐标系中绕 Y' 轴旋转 θ_1 角后的坐标转换方程为:

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (11)$$

曲面在 $X''Y''Z''$ 坐标系中绕 X'' 轴旋转 θ_2 角后的坐标转换方程为:

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ 0 & -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \quad (12)$$

将方程(11)代入方程(12)中,可以得到:

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_1 \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \quad (13)$$

再将(10)代入方程(13)中,就可以得到最终的由坐标系 $X''Y''Z''$ 到坐标系 XYZ 的坐标转换方程。

2.3 波前畸变的评价

评价一个光学元件的好坏有很多指标,其中用于直接测量光学元件的物理表面或波前形状的均方根值(RMS)是光学表面的一个重要指标。均方根值(RMS)的计算方法可以由下式得出:

$$RMS = \left(\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 [\Delta W(\rho, \theta) - \overline{\Delta W}]^2 \rho d\rho d\theta \right)^{1/2} = (\overline{\Delta W^2} - (\overline{\Delta W})^2)^{1/2}. \quad (14)$$

在实际检测或者计算中用于计算 RMS 面形数据的是离散点的集合,因此,可以利用下面的公式计算 RMS^[6-7]:

$$RMS = \left[\sum_{i=1}^N (x_i - \sum_{i=1}^N x_i / N)^2 / N \right]^{1/2}, \quad (15)$$

式中 N 为采样点数, x_i 为面形的高度数据。

为了计算出调整误差引起的波前畸变,设定处于理想位置的离轴抛物面镜的波前畸变为零,当存在调整误差时,用此时的波面畸变代表由此误差产生的波前畸变。在同一坐标系下,设理想位置时的波面为 z ,带调整误差的波面为 z' ,则每一点的面形高度差为 $\Delta z = z' - z$,由此产生的波前畸变用 RMS 可以表示为:

$$RMS = \left[\sum_{i=1}^N (\Delta z_i - \sum_{i=1}^N \Delta z_i / N)^2 / N \right]^{1/2}. \quad (16)$$

3 计算机仿真及实验分析

为了验证物理模型的正确性及各调整参量对波前畸变的影响,应用 matlab 模拟生成的离轴抛物面镜进行仿真实验,并加入一定的镜面位置调整误差,对此产生的波前畸变进行了仿真分析。

对于非球面的检验,最常用的方法是干涉检验。在干涉检验中,为了能够探测到非球面的面形误差,其非球面的位置应处在检测光路中使该检测光路产生最小波前畸变的位置。当非球面的某一参量产生固定误差时,应调整其它的参量使非球面检测能够进入干涉域,此时产生的波像差也是存在该调整误差时的最小波前畸变。根据这个波像差最小理论,在给定某一调整误差数值时,可以应用 matlab 软件以波像差最小为目标函数进行优化求解,从而确定其它的调整量,最终确定

此调整误差所产生的波前畸变以及波前误差分布形态。仿真中应用的优化函数可以由下式表示:

$$\min \text{rms}(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \theta_x, \theta_y, \theta_z), \quad (17)$$

其中, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 是失调后的中心坐标, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别为绕 x, y, z 轴旋转的角度。

当给定某一调整参数时,应用迭代的方法优化求解最小的目标函数,从而确定其它变量的值来确定各参数的失调量。

应用 matlab 仿真程序,对半径 $R = 10\ 000$ mm, $k = -1$ 、口径 $D = 500$ mm,离轴量 $b = 425$ mm 的离轴抛物面数据进行了仿真分析。

3.1 俯仰和高低误差仿真分析

在仿真分析中,设定离轴抛物镜在坐标系 XYZ 中绕轴逆时针旋转产生 $\theta = 0.1^\circ$ 的俯仰误差,应用仿真程序进行分析,可以得到其相应的坐标轴平移量分别为 $\Delta x = -17.472$ mm 和 $\Delta z = 0.016$ mm,波前畸变的 $RMS = 0.152\lambda$ ($\lambda = 633$ nm),其产生的波前畸变误差分布如图 6 所示。

从分析中可以得出:当离轴抛物镜绕轴逆时针旋转产生倾斜误差时,波面将产生包含 45° 的马鞍形像散误差(角度按 ZYGO 干涉仪坐标标准)和上下方向的彗差。

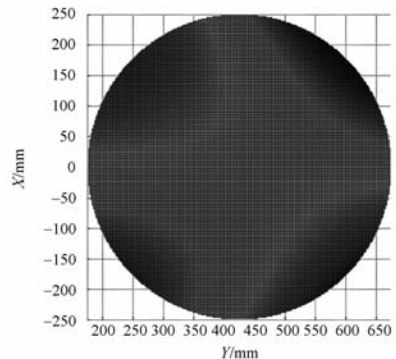


图6 俯仰和高低误差失调时的波前畸变误差分布图
Fig. 6 Wavefront aberration distribution in misadjustment of pitch and high-low errors

3.2 偏摆与离轴量误差仿真分析

当离轴抛物镜在调整过程中绕轴逆时针旋转产生 $\theta = 0.1^\circ$ 的偏摆误差时,应用 matlab 仿真程序进行波像差分析,可以得到其相应的坐标轴平移量分别为 $\Delta y = -17.506$ mm 和 $\Delta z = 0.014$ mm,波前畸变的 $RMS = 0.265\lambda$ ($\lambda = 633$ nm),其产生的波前畸变误差分布如图 7 所示。

表 1 给出几组仿真的参数及结果,从分析中

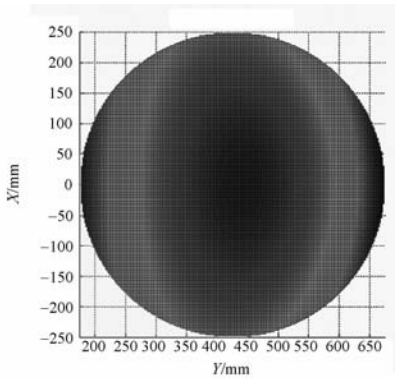


图 7 偏摆与离轴量误差失调时的波前畸变误差分布图
Fig. 7 Wavefront aberration distribution in misadjustment of beat and off-axis distance errors

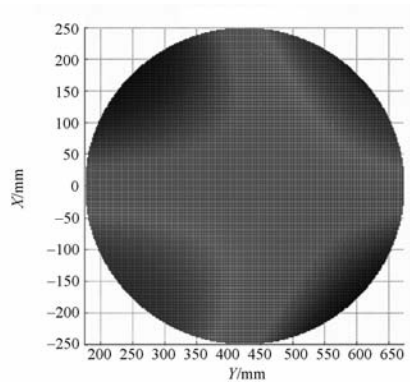


图 8 绕子光轴旋转误差失调时的波前畸变误差分布图
Fig. 8 Wavefront aberration distribution in misadjustment of rotation around secondary optical axis

可以得出:当离轴抛物镜在 XYZ 坐标系中绕轴逆时针旋转产生偏摆误差时,非球面的离轴角变大,离轴量变小,产生 90° 的椭圆像散误差(角度按 ZYGO 干涉仪坐标标准);顺时针旋转时,离轴角变小,离轴量变大,产生 0° 的像散误差。

表 1 仿真参数及结果

Tab. 1 Simulation parameters and results

	1 组	2 组	3 组	4 组	5 组	6 组
$\theta/(\circ)$	0.01	0.02	0.05	0.1	0.1	0.1
$b/(\text{mm})$	425	425	425	425	375	325
RMS(λ)	0.050	0.055	0.136	0.265	0.245	0.216

同时,由偏摆误差产生的像散误差与离轴量大小有关,离轴量越大,像散误差对旋转角度越敏感,即旋转角度相同时,离轴量越大,像散量越大,反之亦然。

3.3 绕子光轴旋转误差仿真分析

若离轴抛物镜在坐标系 XYZ 中绕子光轴逆时针旋转产生 $\theta=1^\circ$ 的角度误差,应用 matlab 仿真程序进行分析,可以得到其相应的坐标轴偏转角度分别为 $\theta_1=0.000740862 \text{ rad}$ 和 $\theta_2=-0.00000644205 \text{ rad}$,所产生的波前畸变的 RMS=0.065 λ ($\lambda=633 \text{ nm}$),其波前畸变误差分布如图 8 所示。

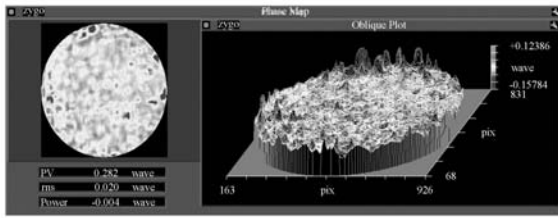
从分析中可以得出:当离轴抛物镜在 YOX 平面内绕子光轴旋转产生角度误差时,将产生一定的像散误差和彗差。

通过以上的仿真分析可知:当检测中存在多

种调整误差时,在波前误差的形态上表现为像散和彗差,文中的第 1 对和第 3 对误差都可产生像散和彗差,存在着一定的耦合现象。但是,以上分析的内容主要是对工程中的装调进行指导,在实际的非球面装调中,首先对出现的彗差进行调整,然后对产生的像散误差进行调整,从而得到理想位置的非球面,而且位置唯一,大量的工程实验表明该方法是正确的,且行之有效的。

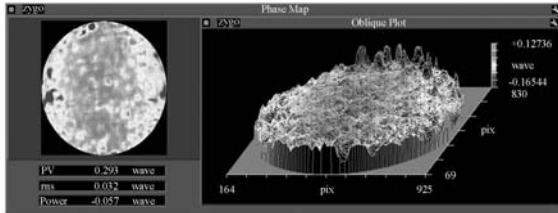
在光学元件装调时,其面形误差与位置偏差所引起的波前畸变是混合在一起的,但是由位置偏差引起的波前畸变其分布形态是比光学元件的面形误差本身空间频率更低的误差,而且误差值也更大些,因此,与加工的最后检测结果相比对,可以很容易从装调的检测结果中分辨出调整误差。

为了验证物理模型及仿真结果的正确性,在应用多模式组合加工技术^[8]对该离轴抛物镜加工的过程中,对调整误差对测量结果的影响进行了验证实验。图 9 所示为对离轴抛物镜进行偏摆和离轴量的调整时产生波前畸变前后的抛物镜面形检测结果,图 9 中(a)为理想位置的检测结果,(b)为在(a)图离轴抛物镜所在的位置的基础上,在抛物面所在的坐标系绕轴逆时针旋转并进行相应的调整所得到的检测结果。从检测结果可以看出,由于存在偏摆和离轴量误差,检测结果中包含了椭圆形的像散误差,该实验结果与理论分析所得到的结论相一致,从而验证了理论模型以及仿真分析的正确性。



(a)在理想位置时

(a) In ideal position



(b)偏摆和离轴量失调时

(b) In misadjustment of beat and off-axis distance

图9 离轴非球面面形检测结果

Fig.9 Wavefront aberration test results of off-axis paraboloid

参考文献:

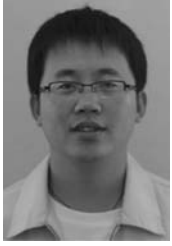
- [1] 周洋,李新南.离轴二次曲面面型参数测量归算方法的研究[J].天文研究与技术,2008,5(3):307-311.
ZHOU Y, LI X N. Algorithm for the measurement of the parameters of off-axis conic surface[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008,5(3):307-311. (in Chinese)
- [2] 杨晓飞,韩昌元.利用计算机辅助装调检测矩形大口径离轴非球面的方法研究[J].光学技术,2004,30(5):532-534.
YANG X F, HAN CH Y. Study on testing methods of large-aperture rectangle off-axis aspherical surface with computer aided alignment [J]. *Optical Technique*, 2004,30(5):532-534. (in Chinese)
- [3] YANG H S, LEEA Y W, KIM B E D, et al.. Alignment methods for Cassegrain and RC telescope with wide-field of view[J]. *SPIE*, 2004,5528:334-341.
- [4] 杨晓飞,张晓辉,韩昌元.Zemax软件在离轴三反射镜系统计算机辅助装调中的应用[J].光学精密工程,2004,12(3):270-274.
YANG X F, ZHANG X H, HAN CH Y. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,2(3):270-274. (in Chinese)

4 结论

本文分析了离轴抛物镜检测中调整误差对波前畸变的影响,以离轴抛物面镜检测为例,建立了检测中存在调整误差时非球面位置的物理模型及数学模型,应用 matlab 仿真软件分析了各模型中存在的调整误差对检测结果的影响。实验证明,所建立的物理模型及计算机仿真结果正确,该分析得到的相应结论对离轴抛物镜的加工、检测和装调具有指导意义,也为下一步的系统装调指明了方向。该方法不仅适用于分析离轴抛物镜装调误差对波前畸变的影响,而且也适用于所有的离轴非球面的调整误差分析。

- [5] 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.
PAN J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces* [M]. Suzhou: Suzhou University Press,2004. (in Chinese)
- [6] 戴斌飞,余景池.中心点亮度和均方根值两种评价方法间的联系[J].光学仪器,2005,27(5):51-55.
DAI B F, YU J CH. Relationship between Strehl ratio and root mean square for assessing optical surface[J]. *Optical Instruments*, 2005,27(5):51-55. (in Chinese)
- [7] 吴冬良,戴一帆,王贵林.光学面形误差对环围能量比的影响[J].光学精密工程,2007,15(9):1328-1335.
WU D L, DAI Y F, WANG G L. Influence of optical surface error on encircled energy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1328-1335. (in Chinese)
- [8] 李俊峰,宋淑梅,陈亚,等.应用多模式组合修正大口径非球面环带误差[J].光学精密工程,2010,18(7):1460-1467.
LI J F, SONG S M, CHEN Y, et al.. Zonal error removal with multi-mode combine manufacture technique for large aspheric[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(7):1460-1467. (in Chinese)

作者简介:



李俊峰(1980—),男,吉林长春人,2005年于长春理工大学获得学士学位,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大口径非球面多模式组合加工技术的研究。E-mail:ljf220@sohu.com



宋淑梅(1963—),女,吉林吉林人,研究员,硕士生导师,主要从事大口径非球面先进加工与检测技术方面的研究。E-mail:smsong@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:严寒)

●下期预告

CCD 分段测量位移光学测量系统设计

李雅倩,付献斌,周 坤

(燕山大学 电气工程学院,河北 秦皇岛 066004)

为了实现大范围的高精度位移测量,在传统激光三角法测量基本原理的基础上,提出一种基于虚拟探测器的激光三角法测量位移的方法。该方法采用 3 个 CCD 分段测量的思想来实现位移的测量,3 个 CCD 互相独立且沿光轴均匀分布,扩大了传统测量方法的范围。使用平面反射镜作为虚拟探测器进行探测,当成像光束经平面镜反射,在 CCD 上成像,系统相当于增加一个 CCD,使该方法测量范围得到扩展。由准直系统、偏振片、光阑组成准直滤光系统,缩小在探测器光敏面上的像点直径,减小被测表面并不是理想的光点对测量精度的影响,从而实现较高精度下的大位移测量。最后通过实验验证方法的可行性。