

大口径离轴非球面补偿检测的畸变校正

陈 哲^{1,2} 张星祥¹ 陈长征¹ 任建岳¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种基于检测光路光线追迹的畸变校正方法。通过对面形图边界的提取和分析确定图像中畸变的对称中心位置和对检测波前的采样间隔,利用光线追迹建立镜面到检测结果的对对应关系,从而校正面形分布的畸变。针对某大口径离轴三反光学系统的730 mm×268 mm离轴非球面主镜的补偿检测,完成了面形图的畸变校正,校正前后二值化面形图与二值化镜面图的标准化互相关函数最大值从0.925提升至0.985,校正效果明显。

关键词 测量; 离轴非球面检测; 畸变校正; 光线追迹; 补偿检测

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1008001

Distortion Mapping Correction in Testing of Large Off-Axis Aspherical Mirrors with Null Lens

Chen Zhe^{1,2} Zhang Xingxiang¹ Chen Changzheng¹ Ren Jianyue¹

¹Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract A distortion correction method based on ray tracing of test optics is proposed. The position of the symmetric distortion center and the sampling interval of the test wavefront are solved by extraction and analysis of the surface boundary, then the relationship between the mirror under test and the surface map is established by ray tracing to correct the distortion. The 730 mm×268 mm primary mirror of an off-axis three-mirror optical system is tested by null lens, and this method is applied to correcting the distortion of the surface maps. After correction the maximum of the standard correlation function between the binary map and the binary mirror image increases from 0.925 to 0.985, the improvement is conspicuity.

Key words measurement; off-axis aspherical surface test; distortion correction; ray tracing; compensation test

OCIS codes 220.4840; 120.3180; 080.4228; 220.1010

1 引 言

离轴三反光学系统^[1-3]是空间光学系统的重要发展方向。大口径离轴非球面元件的高精度光学检测技术,是其加工与应用的关键。

针对大口径非球面的常规检测手段是零位补偿检测技术,但不论是利用计算全息(CGH)元件^[4-5]还是补偿器^[6-7],面形图均存在畸变^[8],尤其对大口径、小 F 数的非球面,畸变更严重,这将造成面形特征的位置和尺寸误差,影响加工的准确性。补偿检测的畸变校正方法按照原理主要分为光学校正和图像校正两种^[9]。其中,光学校正是指用中继镜头校正检测系统的畸变,然而对于商业干涉仪,其设计和安装存在困难,因此,

收稿日期: 2015-04-07; 收到修改稿日期: 2015-05-11

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20126016)

作者简介: 陈 哲(1987—),男,博士研究生,主要从事空间光学系统设计及检测技术方面的研究。

E-mail: chenzhheyizhiqiu@126.com.

导师简介: 任建岳(1952—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感器的研制和性能评价方面的研究。

E-mail: reny@sohu.com

图像校正更为方便可行。图像校正通常需要在镜面前放置基准蒙片,经检测系统成像后,通过对基准及其像进行测量和标定,采用最小二乘拟合确定物像分布函数从而校正畸变。其中拟合多项式需根据测量对象合理选择^[9-10]。对于大口径非球面,基准蒙片的制作及其位置的标定较为繁琐,同时其安装存在风险,特别是对于已镀膜的镜面。Novak 等^[8]提出移动检测平台引入离焦,通过面形图中离焦和球差的变化来反解检测系统中的畸变,但该方法需要精确控制检测系统的移动。本文在对补偿检测中畸变的成因及其影响进行分析的基础上,提出了基于检测光路光线追迹的畸变校正方法,避免了检测系统的移动和中继镜头或基准蒙片的使用,针对 730 mm×268 mm 的离轴非球面补偿检测进行了畸变校正。

2 零位补偿器及其畸变

2.1 补偿器的成像过程

大口径非球面的补偿检测主要采用 Offner 补偿器。补偿器由中继镜和场镜组成,前者补偿非球面的法线像差,后者将中继镜成像至非球面并消除部分高级像差。检测时,补偿器将干涉仪的出射波前转化为标准非球面波前,经被测镜面反射后,携带误差信息再次经补偿器转变为测量波前进入干涉仪与参考波前干涉,此过程称为检测过程。同时,作为成像镜头,补偿器将被测镜面成像至干涉仪中,见图 1,光阑位于干涉仪的焦点^[11],此过程称为成像过程。事实上,补偿器设计和加工的重点在于检测过程而非成像过程,因此补偿器往往会对于干涉图引入像差,在此只讨论畸变。图 1 中补偿器的畸变曲线和畸变网格如图 2 所示。

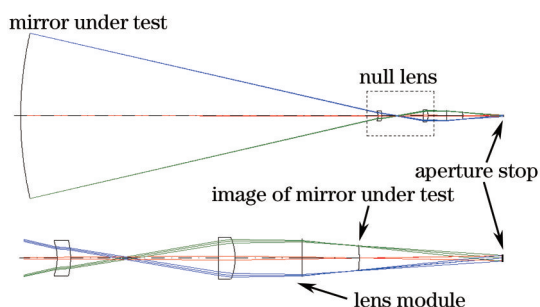


图 1 补偿器的成像过程

Fig.1 Image process of the null test

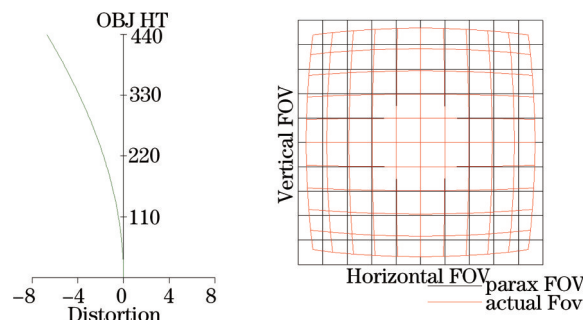


图 2 畸变曲线和网格

Fig.2 Distortion curve and grid

2.2 畸变的影响

当补偿器的畸变如图 2 所示,为 -5.59%,镜面中心 10 mm 面形特征的对像高为 0.446 mm,而镜面边缘 438 mm 处径向方向和周向方向 10 mm 面形特征的对像高分别为 0.364 mm 和 0.418 mm。同时,由于畸变,镜面 1λ 的离焦在面形图中将重新分布至 0.89λ 的离焦和 1.11λ 的球差,镜面 1λ 的彗差将重新分布至 0.83λ 的彗差和 0.17λ 的五阶彗差^[9]。可见补偿器的畸变会导致面形特征的位置和尺寸误差,还会使低阶像差重新分布并混入高阶项中,影响对像差分布的分析,最终影响加工精度。

2.3 畸变校正方法

畸变是主光线像差,分别以光轴与相应平面的交点为坐标原点,如图 3 所示,镜面上径向位置为 $\rho_m(\rho_m^2 = x_m^2 + y_m^2)$ 的特征,经过补偿器后变为 $\rho_i(\rho_i^2 = x_i^2 + y_i^2)$ 。图中虚线表示离轴非球面母镜。镜面面型、补偿器出射端波前和原始面形图分别用函数 $f_{\text{mirror}}(x_m, y_m)$ 、 $f_i(x_i, y_i)$ 和 $f_0(x_0, y_0)$ 表示,则:

$$f_0(x_0, y_0) = f_i(x_i, y_i) = 2 \cdot f_{\text{mirror}}(x_m, y_m). \quad (1)$$

系数 2 是由补偿检测中测量光经被测镜反射引起的。同时,有

$$M(Gx_0, Gy_0) = M(x_i, y_i) = (x_m, y_m), \quad (2)$$

式中 G 为采样间隔, (x_0, y_0) 和 (x_m, y_m) 间的畸变由函数关系 M 导致。假定系统只存在以光轴为对称中心的径向畸变,则有 $x_m/y_m = x_i/y_i = x_0/y_0$ 。

(1)式和(2)式中, $f_0(x_0, y_0)$ 已知, M 可由光线追迹确定,因此只要求解 G 和对称中心的位置就能确定每个 (x_0, y_0) 相应的 (x_m, y_m) ,从而校正畸变。忽略补偿器的加工和装调误差,利用 Isight 软件和光学设计软件,对每

个像素相应的 (x_i, y_i) 进行光线追迹,求得 (x_m, y_m) 。得到函数 $f_i(x_m, y_m)$:

$$f_i(x_m, y_m) = f_i(x_i, y_i). \quad (3)$$

最后经过对 $f_i(x_m, y_m)$ 进行二维插值便可得到校正畸变的面形图文件。

畸变校正流程如图4所示,图中 A_n 和 A_j 分别是畸变校正前后的二值化面形图。

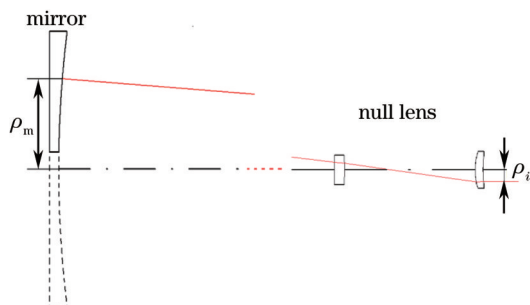


图3 离轴非球面检测示意图

Fig.3 Schematic diagram of testing an off-axis aspheric mirror

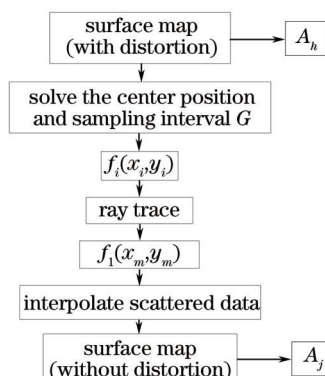


图4 畸变校正流程

Fig.4 Flow chart of distortion correction

2.4 对称中心和采样间隔的确定

对于光轴位于镜面之外的离轴非球面,母镜顶点在面形图中的位置即为畸变的对称中心。忽略干涉仪及其光学系统对畸变的影响,认为面形图是对图3中 ρ_i 所在平面的波前进行采样的数字图像,采样间隔为 G 。确定对称中心和采样间隔的基本思路是,根据镜面尺寸参数通过光线追迹确定标准二值化面形图,同时基于菲涅耳刀口衍射模型提取测量面形图边界,确定实际二值化面形形状图,通过对两个函数的比较和分析确定对称中心和采样间隔。下面以形状为矩形倒圆角的离轴非球面为例进行介绍。

首先以镜面尺寸为依据,通过光线追迹确定经补偿器后的面形图边界及对称中心位置。以对称中心为原点建立初始坐标系 $O-XY$,将边界定义为 B_A ,内部(含边界)区域定义为 A ,如图5所示,轮廓畸变明显。

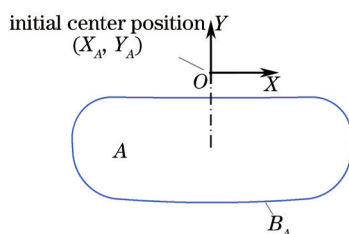


图5 边界 B_A 区域 A 和中心位置

Fig.5 Boundary B_A , field A and the center position

检测时,镜面绕光轴的方位角为 θ (未知),面形图将绕光轴旋转同样角度。则 B_A 绕初始对称中心位置旋转 θ 至 B_B (B_A, B_B 为边界 B_A, B_B 的矢量表达式):

$$B_B = B_A \times T, \quad (4)$$

式中 T 为旋转矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

B_B 及其内部的区域定义为 B ,以采样间隔 G 对 B 所在平面进行采样,尺寸为 $L \times W$, L, W 分别为两个方向的采样点数,与实际面形图尺寸相同。每个 G 对应像面上的一个像素。以左下角的采样点的中心为坐标原点,以 G 为单位长度建立理论采样坐标系 $O_N - N_x N_y$ 。则在 $O_N - N_x N_y$ 中对称中心位置 (N_{Bx}, N_{By}) :

$$\begin{cases} N_{Bx} = N_{IBx} + N_{DBx} = x_A / G \\ N_{By} = N_{IBy} + N_{DBy} = y_A / G \end{cases} \quad (6)$$

式中 N_{IBx} 和 N_{IBy} 为 N_{Bx} 和 N_{By} 坐标的整数部分, N_{DBx} 和 N_{DBy} 为小数部分。 x_A 和 y_A 分别为对称中心($O-XY$ 坐标系原

点)距 N_x 和 N_y 轴的实际距离。上述绕对称中心旋转并采样的过程及中心点位置如图 6 所示。图中每个网格代表一个采样点,各采样点中心用网格中心的“·”表示。为方便说明,网格尺寸被放大,实际检测中采样密度远高于图中所示。

在坐标系 $O_N - N_x N_y$ 中,定义标准二值化面形图 A_s :

$$A_s(n_x, n_y) = \begin{cases} 1, & (n_x, n_y) \in B \\ 0, & (n_x, n_y) \notin B \end{cases} \quad (7)$$

由图 6 可知, θ 的取值会影响区域 B 的方位和范围,从而改变 A_s 轮廓形状;采样间隔 G 的取值会影响函数 A_s 的面积大小; N_{DBx} 和 N_{DBy} 的取值会影响函数 A_s 边缘处采样点的取舍,从而影响 A_s 的轮廓形状;而 N_{Bx} 和 N_{By} 的取值只影响函数 A_s 的位置,并不会改变其大小、方位和轮廓形状。综上, G 、 θ 、 N_{DBx} 和 N_{DBy} 会影响函数 A_s 的大小、方位和轮廓形状,最终影响下文讨论的相似程度。

在实际采样坐标系 $O'_N - N'_x N'_y$ 下,运用菲涅耳刀口衍射模型确定阈值,对实际面形图提取边界 B_c ,将其内部(含 B_c)区域定义为 C ,此时坐标系 $O'_N - N'_x N'_y$ 中对称中心位置尚未确定,定义实际二值化面形图 A_i ,其尺寸为 $L \times W$:

$$A_i(n'_x, n'_y) = \begin{cases} 1, & (n'_x, n'_y) \in C \\ 0, & (n'_x, n'_y) \notin C \end{cases} \quad (8)$$

B_c 、 C 和 A_i 如图 7 所示(A_i 为阴影)。当 G 、 θ 、 N_{DBx} 和 N_{DBy} 取真值,并且测量过程、面形图边界提取过程中不存在误差时,函数 A_s 和 A_i 除在两个坐标轴方向上相差整数个采样点 ΔN_x 和 ΔN_y 外完全相同。此时只要将 $O_N - N_x N_y$ 坐标系中的对称中心 (N_{Bx}, N_{By}) 沿两坐标轴平移 ΔN_x 和 ΔN_y ,即可得到 $O'_N - N'_x N'_y$ 坐标系中的对称中心位置 (N_{c_x}, N_{c_y}) 。事实上,测量和数据处理的过程中不可避免地存在误差,各参数的真值也有待确定,函数 A_s 和 A_i 很难完全相同。因此将 G 、 θ 、 N_{DBx} 和 N_{DBy} 设为参数变量,将函数 A_s 和 A_i 的相似程度定义为优化函数,求出二者最为相似时各变量的取值及平移量 ΔN_x 和 ΔN_y ,即可得到坐标系 $O'_N - N'_x N'_y$ 中对称中心的位置。

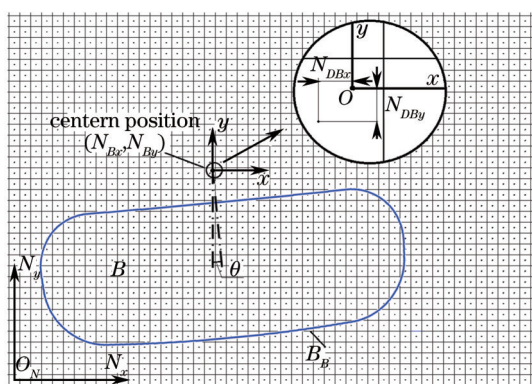


图 6 旋转、采样和中心位置

Fig.6 Rotation, sampling and the center position

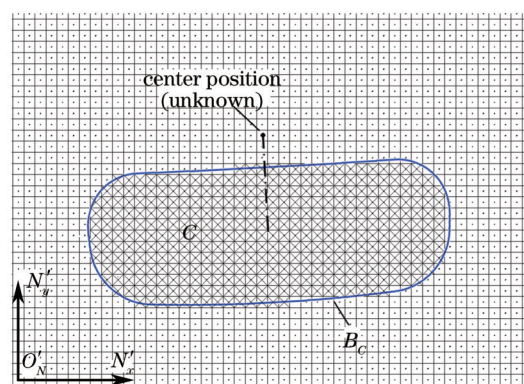


图 7 边界 B_c 、区域 C 和函数 A_i

Fig.7 Boundary B_c , field C and function A_i

通常,两个数字图像间的相似程度及平移量可通过对二者进行相关运算得到^[12]。具体过程是:以标准图像函数为模板在实际图像函数中进行搜索, (x_s, y_s) 为标准图像函数的中心点,依标准化互相关函数[(9)式]计算,求得函数最大值及其坐标 (x_c, y_c) , 则 $\Delta N_x = x_c - x_s$, $\Delta N_y = y_c - y_s$ 。

$$C(n_x, n_y) = \frac{\sum \sum A_s(\varepsilon_x + n_x, \varepsilon_y + n_y) \cdot A_i(\varepsilon_x, \varepsilon_y)}{\left[\sum \sum A_s(\varepsilon_x, \varepsilon_y)^2 \cdot \sum \sum A_i(\varepsilon_x, \varepsilon_y)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

对于两个尺度、方位和轮廓均存在差异的二维图像 A_s 和 A_i , 互相关函数最大值 $C(x_c, y_c)$ 越大,二者就越相似,当 $C(x_c, y_c)$ 取 1 时,二者完全相同。定义两个数字图像的相似性函数 F :

$$F = C(x_c, y_c) \quad (10)$$

由上文可知, F 是 G 、 θ 、 N_{DBx} 和 N_{DBy} 的函数。因此,对坐标系 $O'_N - N'_x N'_y$ 下对称中心的定位以及采样间隔 G

的确定,可表示为

$$\begin{aligned} & \max F(G, \theta, N_{DBx}, N_{DBy}), \\ & \text{subject to } -0.5 < N_{DBx} \leq 0.5, \\ & \quad -0.5 < N_{DBy} \leq 0.5, \\ & \quad -90^\circ < \theta \leq 90^\circ. \end{aligned} \tag{18}$$

即确定参数 G 、 θ 、 N_{DBx} 和 N_{DBy} 使目标函数 F 最大。编程求解各参数,程序示意图如图 8。固定 G 和 θ , 寻找 N_{DBx} 和 N_{DBy} , 使 F 取值最大,将此过程定义为子程序 Inner loop; 固定 G , 寻找 θ 、 N_{DBx} 和 N_{DBy} , 使 F 取值最大,此过程中每次改变 θ 值都将调用 Inner loop 以确定相应的 N_{DBx} 和 N_{DBy} , 将该过程定义为 Middle loop; Outer loop 即主程序,改变 G 并同时调用 Middle loop 以确定相应的 θ 、 N_{DBx} 和 N_{DBy} , 来寻找 F 的全局最大值。各层循环中先后对 G 、 θ 、 N_{DBx} 和 N_{DBy} 四个优化变量的搜索均采用牛顿下山法,设定初值,不断判断,改变步长和方向寻找最优,当各变量的步长小于设定的阈值时停止寻优。各变量阈值根据对精度的要求确定, G 和 θ 的初值通过对 C 和 A_i 的分析确定,在此不再赘述, N_{DBx} 和 N_{DBy} 的初值可直接取零。

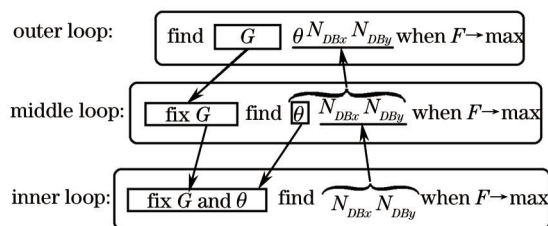


图 8 程序示意图

Fig.8 Schematic diagram of the program

理论上,该方法可准确确定对称中心和采样间隔,其实际精度和速度取决于面形图边界的质量。

3 补偿器的误差对畸变的影响

前文讨论中认为补偿器处于理想状态,实际检测过程中,存在一定的加工和装调误差。通常,补偿器的加工和装调公差都是根据检测过程的波像差要求[通过平方和平方根(RSS)误差合成原则分析]制定的,对于工作在可见光波段的镜面的补偿检测,当加工和装调误差满足此公差要求时,其对成像过程的影响极小,可以忽略。下面以某大口径离轴三反光学系统的主镜及其补偿器为例,通过蒙特卡罗方法进行分析验证。主镜为 730 mm×268 mm,离轴量为 186.7 mm,倒圆角为 117 mm,母镜口径为 $\phi 876$ mm,相应补偿器的参数和公差如表 1 所示。为方便分析畸变变化,将表面倾斜项分配至两个垂直的方向(surface tilt α 和 surface tilt β)。

表 1 补偿器公差

Table 1 Table of tolerances for the null corrector

Element	Item	Units	Design value	Tolerance
Relay lens	Radius 1	mm	-156.95	0.01
	Surface 1 tilt α	"		4
	Surface 1 tilt β	"		4
	Thickness	mm	19.51	0.02
	Radius 2	mm	-67.22	0.01
	Surface 2 tilt α	"		4
	Surface 2 tilt β	"		4
	Airspace	mm	312.93	0.02
	Field lens	Radius 1	mm	277.07
Surface 1 tilt α		"		4
Surface 1 tilt β		"		4
Thickness		mm	23.616	0.04
Radius 2		mm	1448.47	0.05
Surface 2 tilt α		"		4
Surface 2 tilt β		"		4
Airspace		mm	3469.50	0.02

补偿器装配完成后,通过计算全息进行标定以确定其可靠性。当补偿器能够进行检测时,其加工和装调误差均满足上述公差要求,即在正负公差极值以内。对于成像过程,其光学性能也相应在一个范围内变化。镜面位于母镜边缘处的畸变最大,其主光线在补偿器出射端近轴高度 $\rho_p = -29.921$ mm,实际高度(参考图3) $\rho_i = -28.249$ mm,径向畸变 $q' = (\rho_i - \rho_p)/\rho_p \times 100\% = -5.59\%$,弧矢面内高度 $\sigma_i = 0$ mm。当补偿器加工和装调存在误差时, ρ_i 和 σ_i 相对于理论值将发生偏离,其绝对值分别为 $|\Delta\rho_i|$ 和 $|\Delta\sigma_i|$ 。假设每个公差项在其极值内均以正态概率形式分布,针对 $|\Delta\rho_i|$ 和 $|\Delta\sigma_i|$,分别计算了5000个蒙特卡罗样本,每个样本实际上就是一个加工装调满足公差要求的检测系统。累积概率随 $|\Delta\rho_i|$ 和 $|\Delta\sigma_i|$ 变化的曲线见图9(a)和(b),统计结果如表2、3所示。

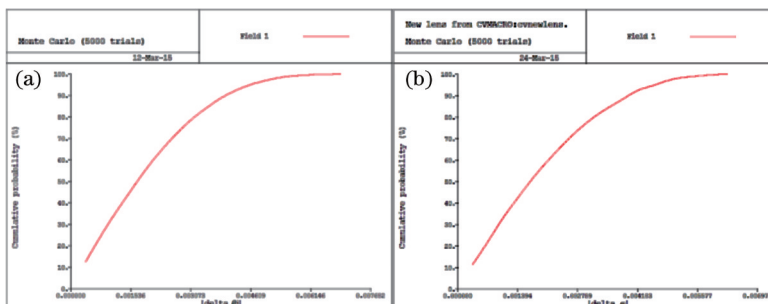


图9 累积概率曲线图。(a) $|\Delta\rho_i|$ 累积概率曲线图;(b) $|\Delta\sigma_i|$ 累积概率曲线图

Fig.9 Curves of the cumulative probability. (a) Curves of the cumulative probability to $|\Delta\rho_i|$; (b) curves of the cumulative probability to $|\Delta\sigma_i|$

表2 $|\Delta\rho_i|$ 蒙特卡罗分析结果

Table 2 Monte Carlo analysis results of $|\Delta\rho_i|$

Cumulative probability	$ \Delta\rho_i /\text{mm}$	Normalized by G	$ \Delta q' (\Delta\rho_i/\rho_p)$	$ \Delta q'/q' $
99.9%	0.006357	0.0630	2.12×10^{-4}	0.0038
97.7%	0.004688	0.0464	1.57×10^{-4}	0.0028
84.1%	0.002497	0.0247	8.35×10^{-5}	0.0015
50.0%	0.001728	0.0171	5.78×10^{-5}	0.0010

表3 $|\Delta\sigma_i|$ 蒙特卡罗分析结果

Table 3 Monte Carlo analysis results of $|\Delta\sigma_i|$

Cumulative probability	$ \Delta\sigma_i /\text{mm}$	Normalized by G
99.9%	0.006175	0.0612
97.7%	0.005047	0.0500
84.1%	0.003477	0.0345
50.0%	0.001684	0.0167

由分析结果可见,几乎所有检测系统样本的 $|\Delta\rho_i|$ 均小于0.006357 mm,所产生的畸变变化量小于0.0212%,相当于理论畸变的0.38%,相应于像面的0.063个像元。 $|\Delta\sigma_i|$ 均小于0.006175 mm,相应于0.0612个像元,变化极小。因此,认为补偿器的加工和装调误差不影响畸变的高精度校正。

4 实际工件检测的校正实例

将上述畸变校正方法应用于上述主镜的补偿检测,检测设备见图10。中心定位精度小于0.1个像元,面形图如图11所示,上方为初始面形图,下方为校正后面形图。依镜面尺寸参数建立镜面二值化形状图像函数 A_m, A_m 与校正前后二值化面形图 A_i 和 A_j 的相似性函数值分别为0.925和0.985(求解过程参考3.2节),可见,经校正,面形图的形状和比例显著接近被测镜面,残差主要由面形图轮廓的缺陷造成。

5 结 论

补偿检测中补偿器作为成像系统会给面形图引入畸变,这将影响面型特征的位置和尺寸精度,还会使低阶像差混入高阶像差。提出了基于光线追迹的畸变校正方法。该方法不需要改变检测系统,同时避免了基准蒙片的使用,适用于各种形状尺寸非球面的补偿检测。针对大口径离轴非球面,详细介绍了畸变对称



图 10 主镜检测设备

Fig.10 Setup of the primary mirror testing

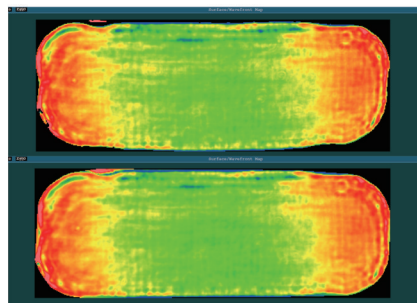


图 11 主镜面形图

Fig.11 Surface maps of primary mirror

中心和采样间隔的确定方法。通过蒙特卡罗分析验证了补偿器的加工和装调误差对畸变及其校正的影响可以忽略。运用本方法对某大口径离轴三反光学系统的主镜补偿检测结果进行了畸变校正,校正后面形图形状与镜面形状的相似性函数值由 0.925 提高至 0.985,效果显著,验证了该方法的可行性。

参 考 文 献

- 1 Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of broad width off-axis three mirror optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0722002.
林 晶, 崔庆丰, 朱 浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0722002.
- 2 Zhang Xiaofei, Chen Lizhi, Du Shaojun. Optical system design of off-axis three-mirror camera with resolution of 1 m[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 062204.
张晓飞, 陈力子, 杜少军. 1 m 分辨率离轴三反相机光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 062204.
- 3 Gong Dapeng, Guo Jiang, Wang Guoliang, *et al.*. Outdoor stereoscopic imaging of mapping camera with long focus off-axis three-mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 137-143.
龚大鹏, 郭 疆, 王国良, 等. 长焦距离轴三反测绘相机的外场立体成像[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 137-143.
- 4 Wyant J C. Computerized interferometric surface measurements[J]. Appl Opt, 2013, 52(1): 1-8.
- 5 Zeng Xuefeng, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer-generated hologram [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1109003.
曾雪锋, 闫 锋, 薛栋林, 等. 计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1109003.
- 6 Offner A. A null corrector for paraboloidal mirrors[J]. Appl Opt, 1963, 2(2): 153-155.
- 7 Zhang Binzhi, Wang Xu. Error calibration of compensator in large aperture convex aspheric mirror testing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s108004.
张斌智, 王 旭. 大口径凸非球面反射镜检测补偿器的误差标定[J]. 中国激光, 2013, 40(s1): s108004.
- 8 Novak M, Zhao C, Burge J H. Distortion mapping correction in aspheric null testing[C]. SPIE, 2008, 7063: 706313.
- 9 Burge J H. Advanced Techniques for Measuring Primary Mirrors for Astronomical Telescopes[D]. Tucson: The University of Arizona, 1993.
- 10 C Zhao, J H Burge. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, Part I: basis set derived from gradients of Zernike polynomials [J]. Opt Express, 2007, 15(26): 18014-18024.
- 11 Zhao C, Burge J H. Imaging aberrations from null correctors[C]. SPIE, 2007, 6723: 67230L.
- 12 Liu Xiaohui, Wang Min, Li Peng, *et al.*. Relationship between the noise and the calculation results of the digital image correlation method[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(4): 90-94.
刘晓辉, 汪 敏, 李 芑, 等. 噪声对数字图像相关法计算结果的影响研究[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(4): 90-94.

栏目编辑: 何卓铭