

文章编号:1004-4213(2011)01-0092-6

子孔径拼接干涉检测离轴非球面研究

王孝坤, 郑立功, 张学军, 张忠玉

(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, 长春 130033)

摘 要:将子孔径拼接技术与干涉技术相结合提出了一种新的检测离轴非球面的方法,该方法无需其他辅助光学元件就可以实现对大口径、离轴非球面的测量.对其基本原理进行了分析和研究;并基于齐次坐标变换、最小二乘拟合建立了综合优化和误差均化的拼接数学模型;开发了子孔径拼接检测非球面的算法软件,并设计和搭建了子孔径拼接干涉检测装置;利用综合优化的拼接模型对一口径为 $376 \times 188 \text{ mm}^2$ 的离轴非球面进行了拼接干涉测量,通过子孔径拼接算法得到了精确的全口径面形分布;且对该非球面进行零位补偿测量,其全口径面形与拼接全口径面形是一致的,面形分布的 PV 值和 RMS 值的偏差仅为 0.047λ 和 0.006λ .从而提供了除零位补偿检测外另一种定量测试大口径非球面以及离轴非球面的手段.

关键词:光学测试;子孔径拼接干涉;离轴非球面;最小二乘拟合

中图分类号: TQ171.65; O436.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114001.0092

0 引言

R-C 系统和 Gregory 系统具有结构简单、无色差等优点,在大口径天文望远镜系统、红外或紫外光学系统中这些两镜系统得到了广泛的应用.但是共轴两镜系统的主镜一般存在中心遮拦,同时该系统存在像散.离轴三反消像散系统(Three-Mirror Anastigmatic, TMA)具有组件少、无遮拦、宽波段、抑制杂光能力强、调制传递函数高等特点,因此该系统已成为长焦距大视场光学系统发展的一种新趋势^[1-2].但是 TMA 系统中的主镜和第三镜为矩形离轴非球面元件,一般需要借助补偿器或者 CGH 等通过零位补偿才能实现对面形进行检测,这不仅

延长了周期,增加了成本,而且辅助元件将会引入一定的加工误差和装调误差^[3-5].

利用子孔径拼接技术,可以拓宽干涉仪测量非球面的横向和纵向的动态范围,无须辅助元件就能够实现对大口径非球面、甚至离轴非球面的检测,这不仅节省了时间,而且降低了成本^[6-7].本文提出了一种利用子孔径拼接检测离轴非球面的方法,利用参考球面波对离轴非球面的各个区域进行干涉测量,通过子孔径拼接算法可求得整个非球面的面形.

1 基本原理和步骤

子孔径拼接检测非球面的实验装置如图 1,其中包括干涉仪、透射球、调整机构、数控设备及计算

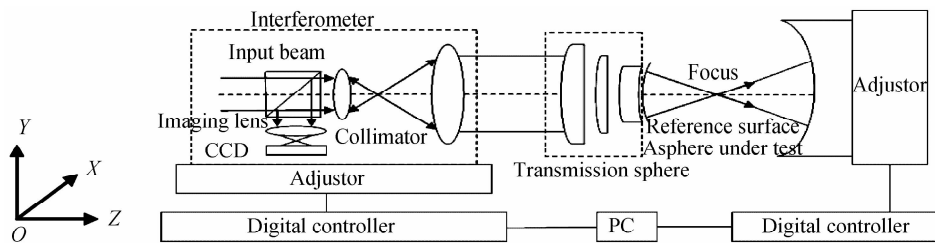


图 1 子孔径拼接检测非球面的装置和模型示意图

Fig. 1 Sketch of setup and model for testing asphere by SSI

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新三期基金资助

第一作者:王孝坤(1980-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为先进光学制造. Email:jimwxk@sohu.com

导师(通讯作者):张忠玉(1964-),男,研究员,博导,主要研究方向为先进光学制造.

收稿日期:2009-09-14;修回日期:2009-12-21

机.干涉仪安装在精密调整架上,可以实现干涉仪在 Y 方向(竖直方向)的平动,待测非球面安放在四维精密转台上,可以精确调整非球面的俯仰和扭摆以及沿 X 方向和沿 Z 方向(光轴方向)的平动.

具体的检测步骤为:首先,根据待测非球面的口径和顶点曲率半径计算非球面度,根据各区域非球面度和干涉仪的分辨本领,确定子孔径的大小及数目,并给干涉仪配备相应的标准镜头;将待测非球面安置在利用干涉仪和透射球产生的标准球面波前,通过精确调整干涉仪、透射球和被检测非球面的相对位置,使透射球出射的标准球面波法线与被测子孔径区域法线近似重合,这样入射到被测子孔径区域的光线就能够沿原路返回;对被测非球面各子孔径的相位分布进行逐次测量,并使得各子孔径间稍有重叠,得到各子孔径的相位分布数据.

利用齐次坐标变换把采集的所有子孔径测量数据统一到待测非球面的物理坐标系上,然后从各子孔径相位分布数据中剔除理论非球面与标准球面的偏差;运用综合优化全局拼接的方式,即:利用所有子孔径间重叠部分的相位分布数据求得所有子孔径相对基准子孔径的相对定位误差,从测量的相位数据中消除该误差;最后再从各子孔径中采集多个离散的相位数据,并将其进行最小二乘拟合,拟合出整个系统的调整误差,减去该调整误差就能够得到待

测非球面全口径的面形误差分布^[8-10].

2 数学模型

利用干涉仪可以测定每个子孔径的相位分布,由于使用标准球面波作为参考检测非球面子区域,该相位分布中包含标准球面波与所测定区域理论曲面的偏差,因此必须首先从测定的相位数据中减去该部分理论误差,然后利用齐次坐标变换可以将所有子孔径的坐标统一到待测非球面的物理坐标系上,可以通过重叠区域的数据求解相邻两个子孔径的相对调整误差,实现子孔径两两拼接.多次利用两个子孔径的拼接原理就可以实现多个子孔径的拼接,但是这样往往会造成误差传递和累积,从而降低了整个孔径的检测精度.因此,在子孔径拼接过程中存在综合优化的问题.当拼接区域大于两个时,假设共有 M 个子孔径拼接,可以先选定其中任一个子孔径作为基准,为了便于定位和测量,一般选择非球面中心区域的子孔径作为参考标准.

由于是对非球面元件进行拼接测量,子孔径间位置的相对失调量不仅带来相对平移和倾斜,还将带来相对离焦、象散和彗差^[11].假使基准子孔径的相位分布为 w_0 (剔除了理论偏差),则其它子孔径相位分布与基准子孔径相位分布的关系为式(1)

$$\begin{aligned} w_0 &= w_1 + a_1 x_1 + b_1 y_1 + c_1 (x_1^2 + y_1^2) + d_1 x_1 y_1 + e_1 (x_1^2 - y_1^2) + f_1 x_1 (x_1^2 + y_1^2) + g_1 y_1 (x_1^2 + y_1^2) + h_1 \\ &= w_2 + a_2 x_2 + b_2 y_2 + c_2 (x_2^2 + y_2^2) + d_2 x_2 y_2 + e_2 (x_2^2 - y_2^2) + f_2 x_2 (x_2^2 + y_2^2) + g_2 y_2 (x_2^2 + y_2^2) + h_2 \\ &\vdots \\ &= w_{M-1} + a_{M-1} x_{M-1} + b_{M-1} y_{M-1} + c_{M-1} (x_{M-1}^2 + y_{M-1}^2) + d_{M-1} x_{M-1} y_{M-1} + e_{M-1} (x_{M-1}^2 - y_{M-1}^2) + \\ &f_{M-1} x_{M-1} (x_{M-1}^2 + y_{M-1}^2) + g_{M-1} y_{M-1} (x_{M-1}^2 + y_{M-1}^2) + h_{M-1} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中 w_1, w_2, \dots, w_{M-1} 是其它子孔径的相位分布,所有相位数据均剔除了理论偏差, a_i, b_i, c_i 和 h_i 分别是其它子孔径相对基准子孔径沿 x 方向的倾斜系数、沿 y 方向的倾斜系数、相对离焦系数和相

对平移系数, d_i 和 e_i 是相对象散系数, f_i 和 g_i 是相对彗差系数.

利用最小二乘法,使得所有重叠区域相位差的平方和值为最小,可得式(2)

$$\begin{aligned} S &= \sum_{j_1 \neq i_1}^{N_1} \sum_{j_1 \subset w_1, w_{j_1}}^n \{ [W_0(x_{j_1 i_1}, y_{j_1 i_1}) - [W_{j_1}(x_{j_1 i_1}, y_{j_1 i_1}) + a_{j_1} x_{j_1 i_1} + b_{j_1} y_{j_1 i_1} + c_{j_1} (x_{j_1 i_1}^2 + y_{j_1 i_1}^2) + d_{j_1} x_{j_1 i_1} y_{j_1 i_1} + \\ &e_{j_1} (x_{j_1 i_1}^2 - y_{j_1 i_1}^2) + f_{j_1} x_{j_1 i_1} (x_{j_1 i_1}^2 + y_{j_1 i_1}^2) + g_{j_1} y_{j_1 i_1} (x_{j_1 i_1}^2 + y_{j_1 i_1}^2) + h_{j_1}] \}^2 + \sum_{j_2 \cap j_3 \neq 0}^{N_2} \sum_{j_2 \subset w_{j_2}, w_{j_3}}^n \{ [W_{j_2}(x_{j_2 i_2}, y_{j_2 i_2}) + \\ &a_{j_2} x_{j_2 i_2} + b_{j_2} y_{j_2 i_2} + c_{j_2} (x_{j_2 i_2}^2 + y_{j_2 i_2}^2) + d_{j_2} x_{j_2 i_2} y_{j_2 i_2} + e_{j_2} (x_{j_2 i_2}^2 - y_{j_2 i_2}^2) + f_{j_2} x_{j_2 i_2} (x_{j_2 i_2}^2 + y_{j_2 i_2}^2) + g_{j_2} y_{j_2 i_2} (x_{j_2 i_2}^2 + \\ &y_{j_2 i_2}^2) + h_{j_2}] - [W_{j_3}(x_{j_3 i_2}, y_{j_3 i_2}) + a_{j_3} x_{j_3 i_2} + b_{j_3} y_{j_3 i_2} + c_{j_3} (x_{j_3 i_2}^2 + y_{j_3 i_2}^2) + d_{j_3} x_{j_3 i_2} y_{j_3 i_2} + e_{j_3} (x_{j_3 i_2}^2 - y_{j_3 i_2}^2) + \\ &f_{j_3} x_{j_3 i_2} (x_{j_3 i_2}^2 + y_{j_3 i_2}^2) + g_{j_3} y_{j_3 i_2} (x_{j_3 i_2}^2 + y_{j_3 i_2}^2) + h_{j_3}] \}^2 = \min \end{aligned} \quad (2)$$

式中 N_1 是其它子孔径与基准子空间的重叠区域数, N_2 是其它子孔径间的重叠区域数, n 是重叠区域内的采样点数.

利用最小二乘拟合, 对各个系数分别求偏导并令其值为零可得式(3)

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_i} = 0, \frac{\partial S}{\partial b_i} = 0, \frac{\partial S}{\partial c_i} = 0, \frac{\partial S}{\partial d_i} = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial e_i} = 0, \frac{\partial S}{\partial f_i} = 0, \frac{\partial S}{\partial g_i} = 0, \frac{\partial S}{\partial h_i} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $1 \leq i \leq M-1$, 利用式(3)就可以得到各子孔径相对基准子孔径的最佳拼接因子, 从而把所有子孔径的位相数据校正统一到相同的基准上.

实验中一般以待测元件中心区域的子孔径为基准, 通过本文的综合优化拼接可以获得整个面形, 但是所得的相位分布中必将存在一定的系统调整和定

位误差, 必须将其消除. 假定系统高阶误差可以忽略, 则经过综合优化拼接获得的全孔径波前误差的相位测量值可表示为式(4)

$$W(X, Y) = e(X, Y) + \epsilon(X, Y) \quad (4)$$

式中: (X, Y) 是以基准子孔径为统一标准的坐标分布; $e(X, Y)$ 表示待测元件加工残留误差; $\epsilon(X, Y)$ 为系统调整误差. 通常整个系统的装调定位误差为四项, 分别对应为平移、 X 方向倾斜、 Y 方向倾斜和离焦项, 即为式(5)

$$\epsilon(X, Y) = AX + BY + C(X^2 + Y^2) + D \quad (5)$$

利用最小二乘拟合, 即式(6)可求得系统调整误差系数的最优解. 将 W 减去该误差就可得到待测非球面确切的表面残差分布, 从而完成对整个面形的测量.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum XX & \sum XY & \sum X(X^2 + Y^2) & \sum X \\ \sum YX & \sum YY & \sum Y(X^2 + Y^2) & \sum Y \\ \sum (X^2 + Y^2)X & \sum (X^2 + Y^2)Y & \sum (X^2 + Y^2)^2 & \sum (X^2 + Y^2) \\ \sum X & \sum Y & \sum (X^2 + Y^2) & N \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum XW \\ \sum YW \\ \sum (X^2 + Y^2)W \\ W \end{bmatrix} \quad (6)$$

3 拼接检测实验

为了验证拼接原理和数学模型的准确性, 结合实际对一离轴非球面进行了拼接测量. 待测非球面的通光口径为 $376 \times 188 \text{ mm}^2$, 顶点曲率半径为 $-2\,013.343 \text{ mm}$, 二次曲面系数为 $-0.125\,888\,6$, 离轴量为 159.97 mm . 经分析和计算本文选用了 $F\#$ 为 11 的标准球面镜, 同时考虑子孔径区域的非球面度, 经分析计算各子孔径区域的非球面度所产生的干涉条纹数没有超过干涉仪的分辨极限, 而且只需三个子孔径即可覆盖整个非球面, 且相邻子孔径的重叠区域大于 30%, 从而能够保证子孔径间相对调整定位误差的去除^[9]. 子孔径分布如图 2, 阴影区域为待测非球面. 以中心区域的子孔径为基准, 求得各子孔径相对母镜坐标系的平移量和旋转角度量如表 1.

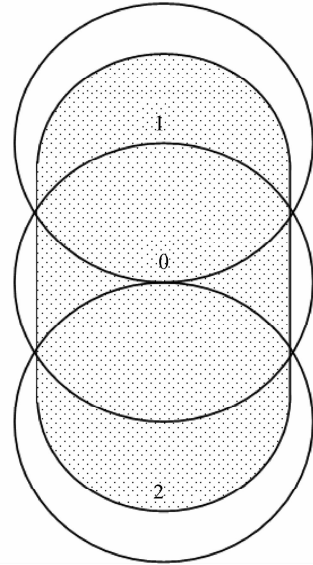


图 2 子孔径分布
Fig. 2 Distribution of subapertures

表 1 各子孔径相对母镜坐标系调整

Table 1 Translation of every subaperture with regard to asphere

	Translation of X direction/mm	Translation of Y direction/mm	Translation of Z direction/mm	Rotation of Y axis/(°)	Rotation of X axis/(°)
Fiducial subaperture	159.97	0	6.343	-4.555	0
Subaperture 1	159.97	94	8.566	-4.560	-2.683
Subaperture 2	159.97	-94	8.566	-4.560	-2.683

待测非球面安置在四维调整台上, 可以精确调整非球面在 X, Z 方向(光轴方向)上的平动以及沿 X 和 Y 方向的倾斜, 干涉仪可以调节 Y 方向上的平动. 各轴行程及控制精度:

X 轴: 行程 500 mm , 定位精度优于 $5 \mu\text{m}$, 重复精度优于 $2 \mu\text{m}$, 直线度误差小于 $2 \mu\text{m}$;

Y 轴: 行程 $1\,000 \text{ mm}$, 定位精度优于 $5 \mu\text{m}$, 重复精度优于 $2 \mu\text{m}$, 直线度误差小于 $2 \mu\text{m}$;

Z轴:行程 200 mm,定位精度优于 5 μm,重复精度优于 1 μm,直线度误差小于 2 μm;

α轴(X方向的倾斜):行程 ±15°,定位精度优于 10",重复精度优于 3";

β轴(Y方向的倾斜):行程 ±45°,定位精度优于 10",重复精度优于 3".

检测设备如图 3,首先调节好干涉仪,使得参考球面波出射波前的曲率半径与所求的中心区域的最接近球面半径吻合,干涉测量该区域的相位分布图和干涉图如图 4(a). 调整待测非球面与干涉仪之间的相对位置,可以使被测元件的上部区域和下部区域相对于参考波前的斜率差减小到干涉仪允许的测

量范围内,用干涉方法分别测量两个子孔径区域,并使得各个子孔径间有一定的重叠. 所检测的结果分别如图 4(b)、(c).

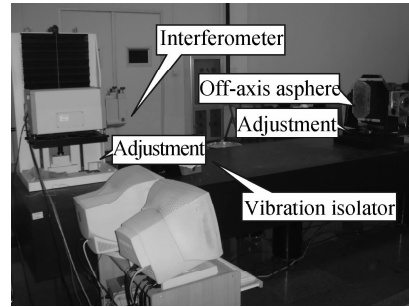


图 3 子孔径拼接检测设备图
Fig. 3 Experimental setup

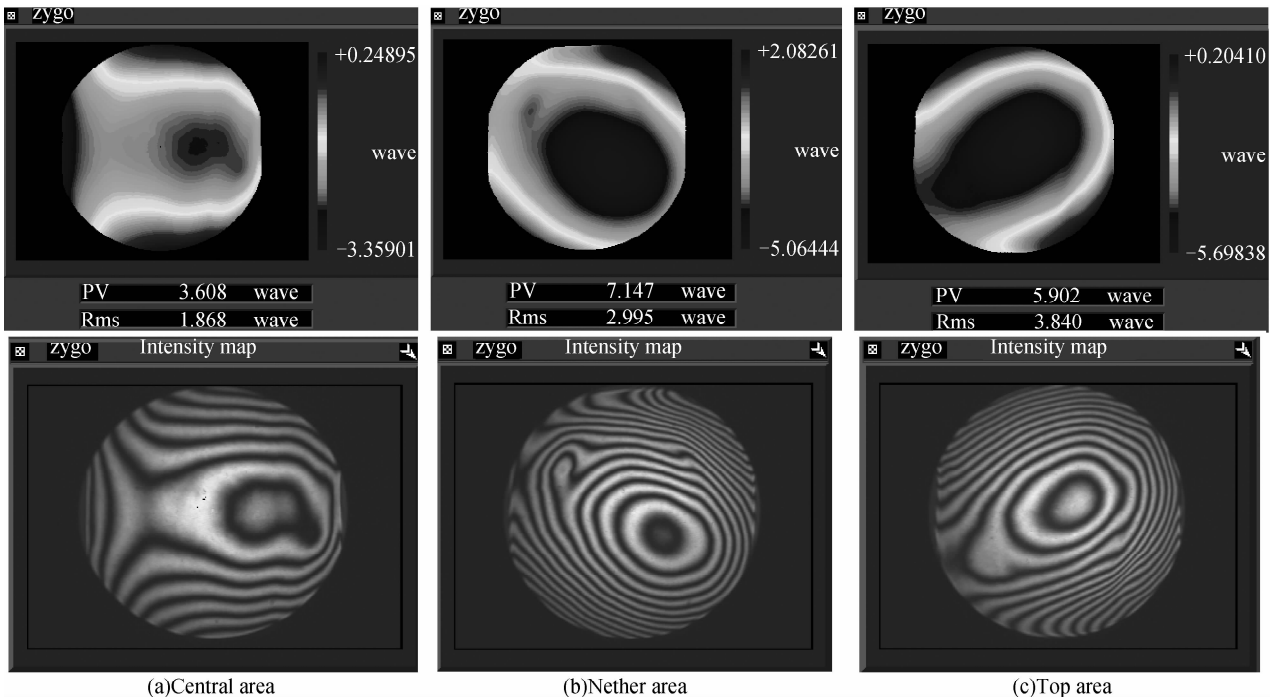


图 4 三个子孔径相位分布图和干涉图
Fig. 4 Phase map and interferogram of three subapertures

通过综合优化的拼接算法对所有重叠区域的数据进行分析和求解,同时求得各子孔径相对中心基准子孔径的调整误差,精密调整架的调节精度对拼接检测精度有一定的影响,其定位不准将会给系统带来一定的调整误差,根据式(6)求得系统的平移系

数、X方向倾斜系数、Y方向倾斜系数和离焦系数分别为: -0.012 549 7、0.005 637 3、-0.013 842 1 和 -0.007 352 1,消去该误差获得拼接后的面形分布和干涉图样如图 5 所示,其 PV 值和 RMS 值分别为 1.275 λ 和 0.113 λ.

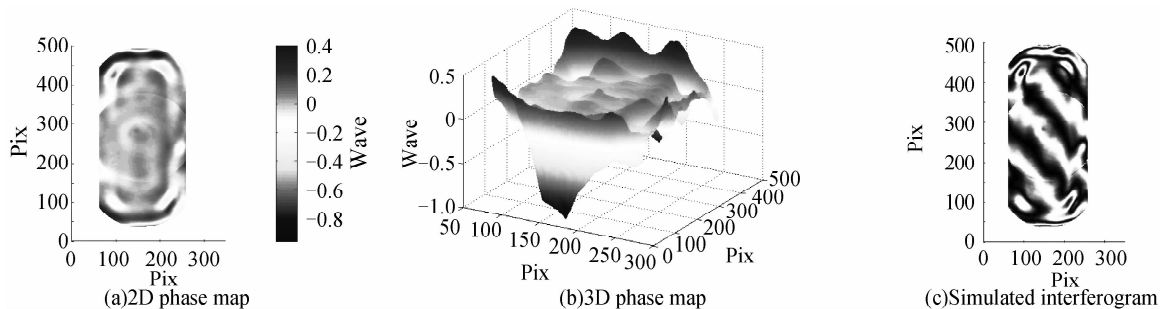


图 5 拼接后全口径面形分布图和干涉图
Fig. 5 Phase map and interferogram of whole aperture after stitching

4 零位补偿检测实验

为了验证该方法的准确性和可靠性,利用零位补偿法对该离轴非球面进行了检测,测量结果如图6,其PV值和RMS值分别为 1.228λ 和 0.107λ 。比较可得:这两种方法测量所得的面形分布是一致的,其PV值和RMS值的偏差仅为 0.047λ 和 0.006λ ,PV值和RMS值的相对偏差分别为3.83%和5.61%。此外,可以看出拼接所得的面形图比全口径

测量所得的面形图锐利,它包含的相位信息更加丰富,这也说明了子孔径拼接测量可以提高干涉仪的分辨率,特别是全口径与子孔径的比值很大时,能够获得全口径测量无法观察到的更高空间频段的面形信息。同时,由于该离轴非球面进入抛光阶段不久,进行全口径补偿检测时,镜面边缘有一些数据“丢失”,而采用子孔径拼接技术,提高了干涉仪的横向分辨本领,使得面形数据更为完整。

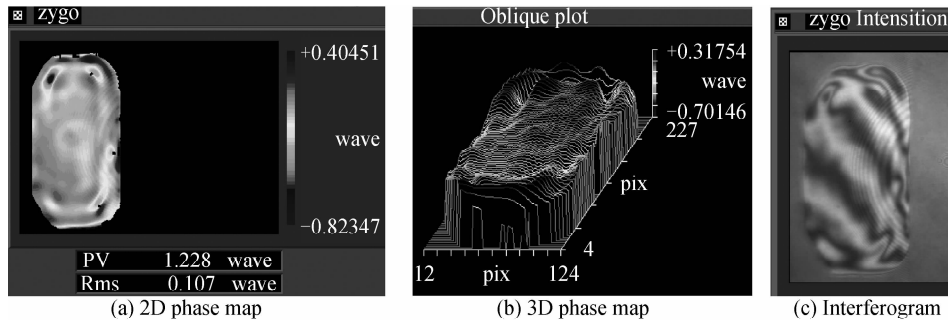


图6 零位补偿测量面形分布图和干涉图

Fig. 6 Phase map and interferogram from null-compensation test

5 结论

本文对子孔径拼接技术的基本原理进行了简要的分析,建立了合理的拼接算法和模型,并结合实例对一离轴非球面进行了拼接检测实验,其结果与零位补偿检测结果是一致的,因此该技术对检测离轴非球面是准确可行的。但是子孔径拼接检测非球面技术的精度受很多因素的影响:如拼接模式、子孔径大小和数目、系统误差、随机误差等等,这有待于本课题组进一步分析和研究。

参考文献

- [1] ZHANG Xue-jun. Manufacturing of a three mirror anastigmat telescope[C]. *SPIE*, 2003, **4829**:884-885.
- [2] HUXFORD R B. Wide FOV head mounted display using hybrid optics[C]. *SPIE*, 2004, **5249**:230-237.
- [3] LIU Hua, LU Zhen-wu, LI Feng-you. Redistribution of output weighting coefficients for complex multiplexed phase-diffractive elements [J]. *Opt Express*, 2005, **12** (19), 4348-4352.
- [4] QI Yue-jing, WANG Ping, XIE Jing-hui. A novel method of measuring convex aspheric lens using hologram optical elements[C]. *SPIE*, 2005, **6024**:60241F-1-60241F-7.
- [5] SONG J B, LEE Y W, LEE HY, et al. Optical test for the primary mirror of a space telescope using a CGH null lens[C]. *SPIE*, 2006, **6034**:60341M-1-60341M-6.
- [6] HANSEL T, NICKEL A, SCHINDLER A. Stitching interferometry of aspherical surfaces[C]. *SPIE*, 2001, **4449**:265-275.
- [7] MURPHY P E, FLEJG J, FORBES G, et al. High precision metrology of domes and aspheric optics[C]. *SPIE*, 2005, **5786**:113-121.
- [8] WANG Xiao-kun, WANG Li-hui. Measurement of large aspheric surfaces by annular subaperture stitching interferometry[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **11** (5): 645-647.
- [9] WANG Xiao-kun, WANG Li-hui, ZHANG Xue-jun, et al. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15** (2): 192-198.
- [10] WANG Xiao-kun, ZHENG Li-gong, ZHANG Bin-zhi, et al. Subaperture stitching interferometry for testing of a large hyperboloid[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38** (1): 88-93.
- [11] ZHAO C Y, BURGE J H. Stitching of off-axis sub-aperture null measurements of an aspheric surface[C]. *SPIE*, 2008, **7063**:7063-1-7.

Testing an Off-axis Asphere by Subaperture Stitching Interferometry

WANG Xiao-kun,ZHENG Li-gong,ZHANG Xue-jun,ZHANG Zhong-yu

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

Abstract: In order to test large and off-axis aspheric surfaces without the aid of other null optics, a new method subaperture stitching interferometry (SSI) is introduced. The basic principle of the technique is analysed, and the synthetical optimization stitching model and effective stitching algorithm are established based on homogeneous coordinates transformation and simultaneous least-squares method. The stitching software and prototype for testing of large aspheres by SSI are devised and developed. An off-axis asphere with the aperture of $376 \times 188 \text{ mm}^2$ is tested by this method. For the comparison and validation, the asphere is also tested by null compensation, the synthesized surface map is consistent to the entire surface map from the null test, and the difference of PV and RMS error between them is 0.047λ and 0.006λ , respectively. So it provides another quantitative measurement for testing large aspheric surfaces and off-axis aspheres besides null-compensation.

Key words: Optical testing; Subaperture Stitching Interferometry (SSI); Off-axis asphere; Least-squares fitting