

文章编号 1004-924X(2011)03-0520-09

# 用非零位补偿法检测大口径非球面反射镜

王孝坤<sup>1</sup>, 王丽辉<sup>2</sup>, 邓伟杰<sup>1</sup>, 郑立功<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 中国移动通信集团吉林有限公司 长春分公司, 吉林 长春 130033)

**摘要:**研究了利用圆形子孔径拼接和环形子孔径拼接检测非球面的方法,以实现非零位补偿法对大口径非球面的测量。分析和研究了该技术的基本原理,并基于齐次坐标变换和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;分别开发了圆形子孔径拼接和环形子孔径拼接检测非球面的算法软件;设计和搭建了子孔径拼接干涉检测装置,并分别利用圆形子孔径拼接和环形子孔径拼接实现了对一口径为 350 mm 的双曲面的检测。对待测非球面进行了零位补偿检测实验,结果显示,圆形子孔径拼接与全口径补偿测量结果的 PV 值和 RMS 值的偏差分别为 0.031 $\lambda$  和 0.004 $\lambda$ ;环形子孔径拼接与全口径补偿测量结果的 PV 值和 RMS 值的偏差分别为 0.028 $\lambda$  和 0.006 $\lambda$ ;3 种方法测量所得的面形分布都是一致的。所提出的方法提供了除零位补偿检测外的另一种定量测试大口径非球面的手段。

**关键词:**光学检测;圆形子孔径拼接干涉;环形子孔径拼接干涉;大口径非球面;最小二乘拟合

**中图分类号:**TQ171.65;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111903.0520

## Measurement of large aspheric mirrors by non-null testing

WANG Xiao-kun<sup>1</sup>, WANG Li-hui<sup>2</sup>, DENG Wei-jie<sup>1</sup>, ZHENG Li-gong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Changchun Branch of Jilin Ltd. Co., China Mobile Communication Corporation, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Circular Subaperture Stitching Interferometry (CSSI) and Annular Subaperture Stitching Interferometry (ASSI) were expounded to realize the best test of large aspheric surfaces without the null optics. The theories and principle of the technique were analysed, and the synthetical optimization stitching model and an effective stitching algorithm were established based on homogeneous coordinate transformation and simultaneous least-squares fitting. The softwares of CSSI and ASSI were devised, respectively, then the experiment was carried out for a  $\Phi 350$  mm hyperboloid by CSSI, ASSI and a null test, respectively. Experiments show that the differences of PV and RMS errors between null test and CSSI are 0.031 $\lambda$  and 0.004 $\lambda$ , and those between null test and ASSI are 0.028 $\lambda$  and 0.006 $\lambda$ , respectively, while their synthesized surface maps are consistent to the entire surface map from the null

**收稿日期:**2010-04-29; **修订日期:**2010-05-04.

**基金项目:**国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. O8663NJ090); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新基金重点资助项目 (No. O83Y32J080)

test. The technique proposed in this paper provides another quantitative measurement for testing large aperture aspheres besides the null-compensation method.

**Key words:** optical testing; Circular Subaperture Stitching Interferometry(CSSI); Annular Subaperture Stitching Interferometry(ASSI); large aspheric surface; least-squares fitting

## 1 引言

传统光学系统一般采用球面元件校正各种像差来实现光学系统的设计要求。与球面光学系统相比,在光学系统中使用非球面光学元件可以减少系统所需光学表面的数量,进而减小光学系统的尺寸、重量以及复杂性,提高光学系统性能<sup>[1-2]</sup>。

与球面光学元件相比,非球面的加工、检测技术更为复杂。利用干涉仪,借助补偿元件(补偿透镜或者计算全息),对非球面进行零位补偿测量仍是目前检测非球面最常用的方法<sup>[3-4]</sup>,可是每个非球面都需要专门设计和定做补偿透镜。利用计算全息,可以实现对中小口径、较小偏离量非球面的检测,但对于大口径,尤其是高陡度、大偏离量的非球面,全息图的线纹频率非常高,从而使全息图制作几乎无法实现。因此,补偿元件的设计和加工不仅增加了成本、延长了周期,而且还会引入一定的加工误差和装调误差。但利用子孔径拼接技术,可以拓宽干涉仪测试的横向和纵向动态范围,该技术无需其它辅助光学元件就能够实现对大口径非球面的测量,不仅提高了分辨率、降低了成本,而且缩短了工期、节省了时间。

子孔径拼接技术是一种通用的非球面检验技术,在非球面偏离量不是很大的前提下,适用于各种非球面的检验。该技术起源于1982年,最初用一系列较小的光学平面阵列代替了较大的参考平面,实现了对大型光学系统的检测<sup>[5]</sup>。20世纪90年代初,研究人员借鉴了子孔径测试技术,提出了子孔径拼接技术,实现了对大口径平面的检测。2003~2004年间,美国QED公司成功研制了自动拼接干涉仪,并将其集成在该公司的磁流变加工设备中。该公司开发的软件包,能够实现自动测量控制、子孔径数据采集、全口径位相拼接等过程;能够自动地对平面、球面、口径小于200 mm的非球面镜进行子孔径拼接检测<sup>[6-7]</sup>。20世纪90

年代中期到本世纪初期,子孔径测试相关技术陆续获得了美国授权专利。美国ZYGO公司为满足客户的技术要求,于2007年研制出基于“环拼接”技术的非球面测量干涉系统并投放市场,其可测量范围小于130 mm,且只能测量同轴非球面元件,测量精度按照 $F$ 数有所区别,为 $\lambda/3 \sim \lambda/10$ 。

在国外该技术正从初期的原理、实验研究阶段转入到应用研究和商业化的仪器研制阶段时,国内利用子孔径拼接检测大口径光学平面技术也取得了一些进展<sup>[8-9]</sup>,但是利用该技术检测非球面的研究则刚刚起步,2004~2006年中科院光电技术研究所报道了有关环形子孔径拼接检测非球面的研究,他们对环形子孔径拼接进行了理论分析,并利用环形子孔径对一个有中心遮拦(遮拦比约为28%)的抛物面进行了两个环形子孔径的拼接实验<sup>[10]</sup>。本课题组自2004年开始从事子孔径拼接检测技术的研究,已经建立了初步的拼接模型,并较好地实现了对离轴非球面的拼接检测<sup>[11-12]</sup>。

本文分别对圆形子孔径拼接和环形子孔径拼接检测非球面的拼接算法和数学模型进行了详细和深入的研究,开发了拼接算法软件,并结合实例对一口径为350 mm的非球面进行了两种拼接检测。

## 2 基本原理和步骤

### 2.1 圆形子孔径拼接的基本原理

圆形子孔径拼接检测非球面的装置示意图如图1所示,该装置包括干涉仪、透射球、调整机构、数控设备及计算机。干涉仪安装在三维精密调整架上,可以实现干涉仪在 $X$ 方向、 $Y$ 方向和光轴 $Z$ 方向的平动,待测非球面安放在二维精密转台上,可以精确地调整非球面的俯仰和扭摆。

具体的检测步骤如下:首先,根据待测非球面的口径和顶点曲率半径选取合适的干涉仪,给

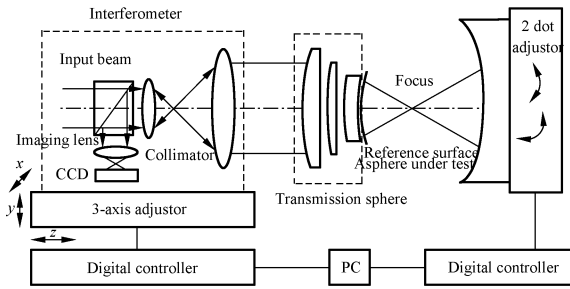


图 1 圆性子孔径拼接检测非球面的装置示意图

Fig. 1 Sketch of setup for testing asphere by CSSI

干涉仪配备相应的标准镜头,并确定子孔径的大小及数目。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就能够得到待测非球面全口径的面形误差分布。

## 2.2 环形子孔径拼接的基本原理

环形子孔径拼接检测非球面的实验装置示意图如图 2 所示,它与圆性子孔径拼接的装置是通用的,但是在检测过程中无需多轴联调,它仅需要沿光轴方向精确调整干涉仪或待测非球面。

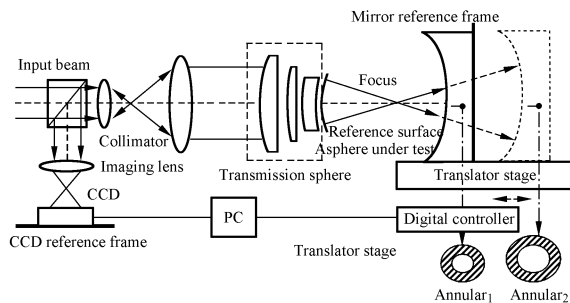


图 2 环形子孔径拼接检测非球面的装置示意图

Fig. 2 Sketch of setup for testing asphere by ASSI

拼接检测流程如下:首先调整干涉仪,使干涉仪出射的参考球面波前的曲率中心与被测非球面的顶点曲率中心重合。此时得到的干涉图中心

部分的条纹较稀,很容易分辨,记录下中心区域的位相信息。由于干涉图边缘部分的条纹比较密集,超过了干涉仪 CCD 的分辨率,会形成条纹混叠现象,很难分辨。因此可沿光轴方向移动干涉仪或被检非球面,改变它们之间的距离,使被测元件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,产生不同曲率半径的参考球面波前来匹配被测非球面不同的环带区域(称之为环形子孔径)。用干涉方法分别测量各个环形子孔径区域,并使各子孔径间有一定的重叠。将所有子孔径的 CCD 像素坐标都统一到镜面坐标上,并剔除理论非球面与标准球面的偏差,利用综合优化全局拼接方式求得各个子孔径相对基准子孔径的相对调整误差(平移、倾斜、离焦等误差),从各子孔径相位数据中消除该误差,从而得到整个面形的分布信息。

## 3 数学模型

### 3.1 圆性子孔径拼接的数学模型

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将所有子孔径的坐标统一到待测非球面的物理坐标系上。本文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可以实现多个子孔径的拼接,但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基准。

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带来的调整误差(定义为  $\Delta\omega$ )不仅包含相对平移和倾斜,还包含相对离焦、像散、彗差和球差<sup>[13]</sup>。假使基准子孔径的相位分布为  $\omega_0$ (剔除了理论偏差),则其它子孔径相位分布  $\omega_i$  与基准子孔径相位分布的关系为:

$$\omega_0 = \omega_i + \Delta\omega_i, \quad (1)$$

其中  $\Delta w_i$  的具体形式为:

$$\Delta w_i = p_i + a_i x_i + b_i y_i + c_i (x_i^2 + y_i^2) + d_i x_i y_i + e_i (x_i^2 - y_i^2) + f_i x_i (x_i^2 + y_i^2) + g_i y_i (x_i^2 + y_i^2) + h_i (x_i^2 + y_i^2)^2, \quad (2)$$

则式(1)可展开为式(3):

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \omega_1 + p_1 + a_1 x_1 + b_1 y_1 + c_1 (x_1^2 + y_1^2) + d_1 x_1 y_1 + e_1 (x_1^2 - y_1^2) + f_1 x_1 (x_1^2 + y_1^2) + g_1 y_1 (x_1^2 + y_1^2) + h_1 (x_1^2 + y_1^2)^2 = \\ & \omega_2 + p_2 + a_2 x_2 + b_2 y_2 + c_2 (x_2^2 + y_2^2) + d_2 x_2 y_2 + e_2 (x_2^2 - y_2^2) + f_2 x_2 (x_2^2 + y_2^2) + g_2 y_2 (x_2^2 + y_2^2) + h_2 (x_2^2 + y_2^2)^2 \\ & \vdots \\ & = \\ & \omega_{M-1} + p_{M-1} + a_{M-1} x_{M-1} + b_{M-1} y_{M-1} + c_{M-1} (x_{M-1}^2 + y_{M-1}^2) + d_{M-1} x_{M-1} y_{M-1} + e_{M-1} (x_{M-1}^2 - y_{M-1}^2) + \\ & f_{M-1} x_{M-1} (x_{M-1}^2 + y_{M-1}^2) + g_{M-1} y_{M-1} (x_{M-1}^2 + y_{M-1}^2) + h_{M-1} (x_{M-1}^2 + y_{M-1}^2)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{M-1}$  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,  $p_i, a_i, b_i$  和  $c_i$  分别是其它子孔径相对基准子孔径的平移系数、沿  $x$  方向的倾斜系数、沿  $y$  方向的倾斜系数和相

对离焦系数,  $d_i$  和  $e_i$  是相对像散系数,  $f_i$  和  $g_i$  是相对彗差系数,  $h_i$  是相对球差系数。

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(4):

$$\begin{aligned} S &= \sum_{j_1 \neq 0i_1 \subset W_1, W_{j_0}}^{N_1} \sum^n \{ [W_0(x_{j_1}, y_{j_1}) - [W_{j_1}(x_{j_1 i_1}, y_{j_1 i_1}) + p_{j_1} x_{j_1 i_1} + a_{j_1} x_{j_1 i_1} + b_{j_1} y_{j_1 i_1} + c_{j_1} (x_{j_1 i_1}^2 + y_{j_1 i_1}^2) + \\ & d_{j_1} x_{j_1 i_1} y_{j_1 i_1} + e_{j_1} (x_{j_1 i_1}^2 - y_{j_1 i_1}^2) + f_{j_1} x_{j_1 i_1} (x_{j_1 i_1}^2 + y_{j_1 i_1}^2) + g_{j_1} y_{j_1 i_1} (x_{j_1 i_1}^2 + y_{j_1 i_1}^2) + h_{j_1} (x_{j_1 i_1}^2 + y_{j_1 i_1}^2)^2] \}^2 + \\ & \sum_{j_2 \cap j_3 \neq 0i_2 \subset W_{j_2}, W_{j_3}}^{N_2} \sum^n \{ [W_{j_2}(x_{j_2 i_2}, y_{j_2 i_2}) + p_{j_2} x_{j_2 i_2} + a_{j_2} x_{j_2 i_2} + b_{j_2} y_{j_2 i_2} + c_{j_2} (x_{j_2 i_2}^2 + y_{j_2 i_2}^2) + d_{j_2} x_{j_2 i_2} y_{j_2 i_2} + \\ & e_{j_2} (x_{j_2 i_2}^2 - y_{j_2 i_2}^2) + f_{j_2} x_{j_2 i_2} (x_{j_2 i_2}^2 + y_{j_2 i_2}^2) + g_{j_2} y_{j_2 i_2} (x_{j_2 i_2}^2 + y_{j_2 i_2}^2) + h_{j_2} (x_{j_2 i_2}^2 + y_{j_2 i_2}^2)^2] - [W_{j_3}(x_{j_3 i_3}, y_{j_3 i_3}) + \\ & p_{j_3} x_{j_3 i_3} + a_{j_3} x_{j_3 i_3} + b_{j_3} y_{j_3 i_3} + c_{j_3} (x_{j_3 i_3}^2 + y_{j_3 i_3}^2) + d_{j_3} x_{j_3 i_3} y_{j_3 i_3} + e_{j_3} (x_{j_3 i_3}^2 - y_{j_3 i_3}^2) + f_{j_3} x_{j_3 i_3} (x_{j_3 i_3}^2 + \\ & y_{j_3 i_3}^2) + g_{j_3} y_{j_3 i_3} (x_{j_3 i_3}^2 + y_{j_3 i_3}^2) + h_{j_3} (x_{j_3 i_3}^2 + y_{j_3 i_3}^2)^2] \}^2 = \min, \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $N_1$  是其他子孔径与基准子空间的重叠区域数,  $N_2$  是其他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, 对式(4)中 9 个拼接系数分别求偏导并令其值为零, 就可以得到各子孔径相对基准子孔径的最佳拼接因子, 从而可以消除各子孔径相对基准子孔径的调整定位误差, 完成对整个非球面面形的测量。

### 3.2 环形子孔径拼接的数学模型

环形子孔径拼接检测非球面的的数学模型与圆形子孔径拼接的数学模型是完全一致的, 但是由于在环形拼接检测过程中, 仅需精确沿轴向调整待测非球面, 子孔径间位置的相对失调量仅带来相对平移、倾斜和相对离焦, 即式(2)的表现形式将改为下式:

$$\Delta w_i = p_i + a_i x_i + b_i y_i + c_i (x_i^2 + y_i^2). \quad (5)$$

圆形子孔径拼接需求解 9 个拼接因子, 而环形子孔径拼接的拼接因子将降为 4 个, 其它运算与圆形子孔径拼接算法是完全相同的。

## 4 检测实验

本文对一回转对称的非球面分别进行了圆形子孔径拼接和环形子孔径拼接测量, 镜面参数为: 口径 350 mm, 顶点曲率半径  $R_0 = 4\ 188.04$  mm, 二次曲率常数  $k = -2.816\ 915$ , 非球面度为  $1.8\ \mu\text{m}$ 。检测设备和装置如图 3 所示, Zygo 数字干涉仪安装在三维精密调整架上, 可以实现干涉仪在  $X$  方向、 $Y$  方向和光轴  $Z$  方向的平动。待测非球面元件安放在二维精密转台上, 可以精确地调整非球面的俯仰和扭摆, 所有检测装置都安放在防振气浮平台上。

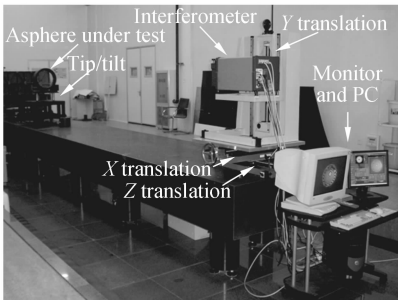


图 3 子孔径拼接检测设备图

Fig. 3 Setup of stitching interferometry

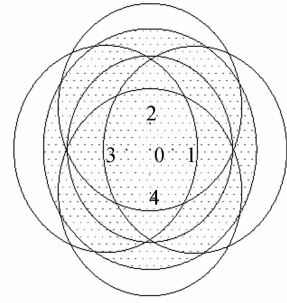


图 4 圆形子孔径分布图

Fig. 4 Distribution of circular subapertures

### 4.1 圆形子孔径拼接检测

计算分析可得,选用 5 个全口径 80% 的圆形子孔径即可覆盖整个非球面元件,圆形子孔径分布图如图 4 所示。

首先调节好干涉仪,测得非球面上 5 个子孔径的相位分布如图 5 所示。利用综合优化拼接算法对所有重叠区域的数据进行分析和求解,求得各子孔径相对中心基准子孔径的调整误差,消除这些误差,得到拼接后的归一化的面形分布如图 6 所示,其 PV 值和 RMS 值分别为  $0.319\lambda$  和  $0.044\lambda$ 。

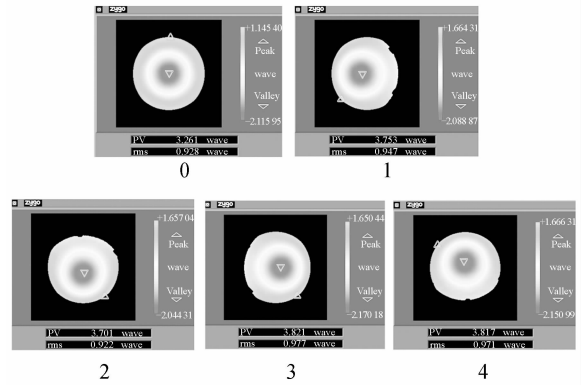
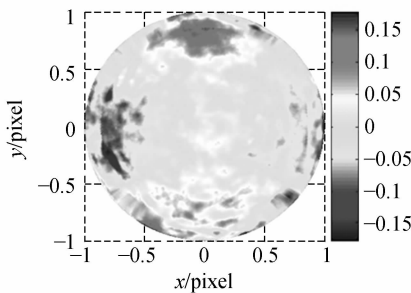


图 5 5 个子孔径相位分布图

Fig. 5 Phase maps of five subapertures



PV:  $0.319\lambda$  RMS:  $0.044\lambda$

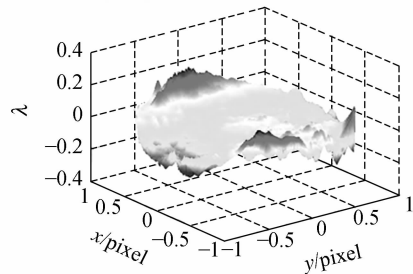
图 6 圆形子孔径拼接后的全口径面形分布图

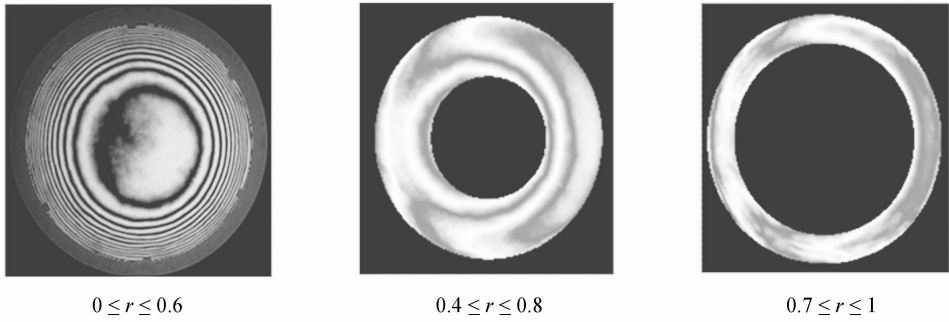
Fig. 6 Normalized surface maps of whole aperture after CSSI

### 4.2 环形子孔径拼接检测

计算分析可得,通过测定中心基准子孔径以及两个环形子孔径即可全部覆盖整个非球面。首先调节好干涉仪,测得非球面上中心子孔径和两个环形子孔径的相位分布图和干涉图如图 7 所

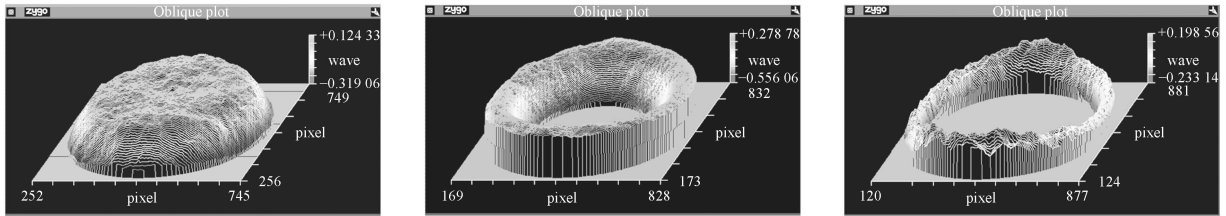
示。通过综合优化拼接算法求得两个环形子孔径相对中心基准子孔径的调整误差,去除该误差得到拼接后的归一化的面形分布如图 8 所示,其 PV 值和 RMS 值分别为  $0.315\lambda$  和  $0.046\lambda$ 。





(a)干涉图

(a) Interferograms



(b)相位分布图

(b) Maps of phase distribution

图 7 环形拼接测量干涉图和相应的相位分布图

Fig. 7 Interferograms and corresponding phase distributions of three subapertures by ASSI

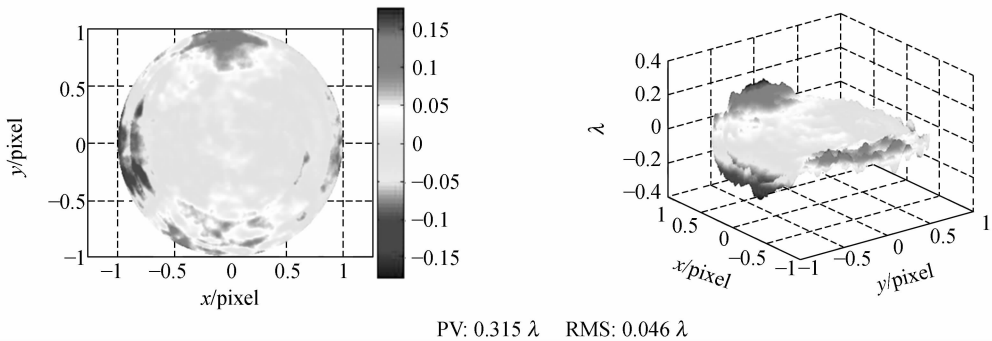


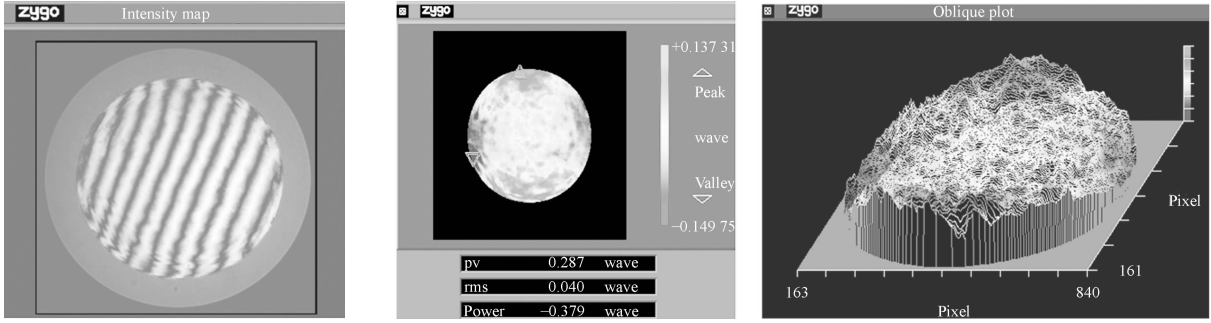
图 8 环形子孔径拼接后的全口径面形分布图

Fig. 8 Normalized surface maps of whole aperture after ASSI

### 5 零位补偿检测实验

为了分析、对比以及验证拼接检测方法的准

确性和可靠性,对该非球面进行了零位补偿干涉测量,所得的干涉图和面形分布如图 9 所示,其 PV 值和 RMS 值分别为  $0.287\lambda$  和  $0.040\lambda$ 。



(a)干涉图

(b)面形分布图

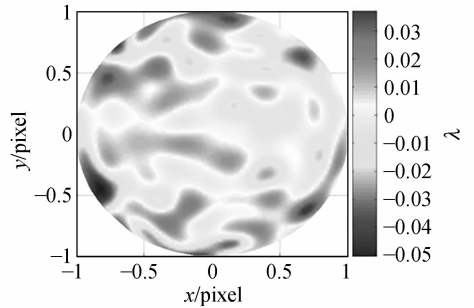
(a)Interferogram

(b)Maps of surface distribution

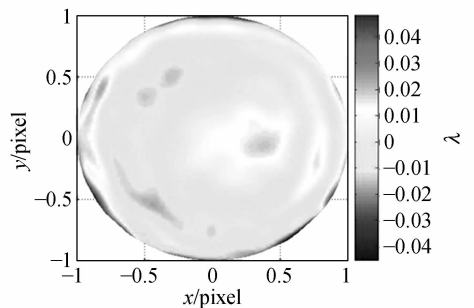
图 9 零位补偿干涉测量干涉图和面形分布图

Fig. 9 Interferogram and surface map by null-compensation

比较分析可得:两种子孔径拼接检测得到的面形误差分布与零位补偿测量的结果是一致的;环形子孔径拼接与补偿测量结果的 PV 值和 RMS 值的偏差分别为  $0.028\lambda$  和  $0.006\lambda$ ;圆形子孔径拼接与全口径补偿测量结果的 PV 值和 RMS 值的偏差分别为  $0.031\lambda$  和  $0.004\lambda$ 。为了进一步验证和对比测量结果,计算得到圆形子孔径拼接与补偿测量结果的残差分布如图 10(a)所示,其 PV 值和 RMS 值分别为  $0.090\lambda$  和  $0.013\lambda$ ;计算得到环形子孔径拼接与补偿测量结果的残差分布如图 10(b)所示,其 PV 值和 RMS 值分别为  $0.089\lambda$  和  $0.013\lambda$ ;计算得到圆形子孔径拼接与环形子孔径拼接测量结果的残差分布如图 10(c)所示,其 PV 值和 RMS 值分别为  $0.095\lambda$  和  $0.009\lambda$ 。3 种测试手段的检测结果相差很小,说明该拼接模型和数据处理方法是准确可行的。



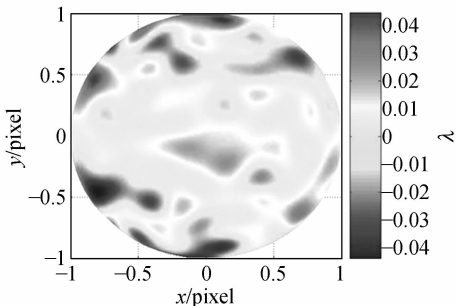
(b)环形子孔径拼接与补偿测量结果的残差分布  
(b) Residual error of ASSI and null testing



(c)圆形子孔径拼接与环形子孔径拼接测量结果的残差分布  
(c) Residual error of CSSI and ASSI

图 10 残差分布图

Fig. 10 Maps the residual errors



(a)圆形子孔径拼接与补偿测量结果的残差分布  
(a) Residual error of CSSI and null testing

## 6 结 论

本文将子孔径拼接技术与干涉测试技术相

结合,提供了一种高效、快捷的检测大口径非球面的手段。分别对圆形子孔径拼接和环形子孔径拼接的基本原理进行了分析和研究,建立了合理的数学模型,开发了拼接算法软件,并结合实例对一口径为 350 mm 的非球面分别进行了圆形子孔径和环形子孔径拼接测量,并将拼接结果与零位补偿检测结果进行了对比。结果表明,子孔径拼接与补偿测量结果的 PV 值和 RMS 值的相对偏差分别优于 10% 和 15%,两种子孔径拼接与零位

补偿测量三者相互之间残差的 PV 值和 RMS 值分别优于  $0.1\lambda$  和  $0.015\lambda$ ,且 3 种检测方法所得的面形分布是一致的,从检测结果可以看出该技术是切实可行的。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:如子孔径大小和数目、重叠区域大小、拼接模式、系统误差、随机误差等等,且对于更大口径,较高陡度非球面的拼接检测,将面临和需解决更多的问题,这有待于进一步分析和研究。

### 参考文献:

- [1] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. 2nd ed. New York: J. Wiley&Sons,1992.
- [2] HUXFORD R B. Wide FOV head mounted display using hybrid optics[J]. *SPIE*, 2004,5249:230-237.
- [3] 许英朝,周平,张新. 三次位相传播中的波像差及在 CGH 中衍射级次的分离[J]. *光学精密工程*,2008,16(11): 2104-2109.
- XU Y CH, ZHOU P, ZHANG X. Wavefront aberration of cubic phase in propagation and order separation by computer generated hologram [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2104-2109. (in Chinese)
- [4] 薛栋林,张忠玉,郑立功. 大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2491-2496.
- XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHENG L G. Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2008,16(12):2491-2496. (in Chinese)
- [5] KIM C J. Polynomial fit of interferograms[J]. *Appl. Opt.*,1982,21(24):4521-4525.
- [6] TRICARD M, SHOREY A, HALLOCK B, *et al.*. Cost-effective, subaperture approaches to finishing and testing astronomical optics [J]. *SPIE*, 2006, 6273:62730L-1-62730L-1.
- [7] MURPHY P, FLEIG J, FORBES G. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres [J]. *SPIE*, 2006,6293:62930J-1-62930J-10.
- [8] CHEN M Y, GUO H W, YU Y J, *et al.*. Recent developments of multi-aperture overlap-scanning technique[J]. *SPIE*, 2003,5180:393-401.
- [9] 张蓉竹. ICF 系统光学元件高精度波前检测技术研究[D]. 成都:四川大学,2003.
- ZHANG R ZH. *Studies on High-accuracy Wavefront Test Techniques of Optical Components in ICF* [D]. Chengdu:Si Chuan university,2003,4. (in Chinese)
- [10] HOU X, WU F, YANG L, *et al.*. Comparison of annular wavefront interpretation with Zernike circle polynomials and annular polynomials[J]. *Appl. Opt.*, 2006,45(35):8893-8901.
- [11] 王孝坤,王丽辉,张学军. 子孔径拼接干涉法检测非球面[J]. *光学精密工程*,2007,15(2):527-532.
- WANG X K, WANG L H, ZHANG X J. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(2): 192-198. (in Chinese)
- [12] WANG X K, ZHENG L G, ZHANG B Z, *et al.*. Test of an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry[J]. *SPIE*, 2009,7283:72832J-1-72832J-6.
- [13] ZHAO C Y, BURGE J H. Stitching of off-axis sub-aperture null measurements of an aspheric surface[J]. *SPIE*, 2008,7063:7063-1-7.

## 作者简介:



王孝坤(1980—),男,江苏丹阳人,博士,副研究员,2003年于徐州师范大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事为光学超精加工和检测技术的研究。E-mail: jimwxk@sohu.com



邓伟杰(1983—),男,安徽安庆人,博士,助理研究员,2004年于天津大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学表面数控成型及其检测技术的研究。E-mail: mr-deng@163.com



王丽辉(1979—),女,吉林通化人,博士,通讯工程师,2003年于吉林大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光通信和光学检测技术的研究。E-mail: leaves\_wang@tom.com



郑立功(1969—),男,吉林长春人,博士,研究员,1992年于吉林工业大学获得学士学位,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为中科院长春光学精密机械与物理研究所光学技术研究中心副主任,主要从事光学超精加工和检测技术的研究。E-mail: ligongz@yahoo.com

## ● 下期预告

## 离轴非球面 CGH 高精度检测技术

黎发志<sup>1,2</sup>, 罗 霄<sup>1,2</sup>, 赵晶丽<sup>1</sup>, 薛栋林<sup>1</sup>, 郑立功<sup>1</sup>, 张学军<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为了实现离轴非球面高精度定位、光路对准及面形检验,针对离轴非球面的特点,提出了一种使用 CGH 技术实现离轴非球面高精度光学检测的方法,将被检非球面倾斜平移后作为轴上自由曲面进行 CGH 补偿检测设计,使用该方法可减小检测光路的相对口径,并减小 CGH 所需补偿像差从而提高 CGH 检测精度。通过使用自行开发的 CGH 专用设计计算软件,设计完成的 CGH 同时具有非球面检验、检测光路对准、被检非球面基准定位等多项功能。采用该方法设计并制作了 CGH 对面形精度优于  $\lambda/50$  rms 的某离轴非球面进行检测,CGH 设计精度优于  $\lambda/10\ 000$  rms,误差分析表明,考虑了 CGH 制作和使用过程中各种误差后,其检测精度优于  $\lambda/100$ ,实际检测实验所得的检测结果与传统 null-lens 方法检测的结果精确吻合。实验表明,采用该 CGH 同时实现了离轴非球面位置高精度定位、CGH 与干涉仪对准以及离轴非球面高精度面形检验,该技术为高精度离轴非球面反射镜的研制奠定了基础。