

doi:10.3788/gzxb20164509.0912001

环形子孔径拼接检测的中心偏移误差补偿

李兵, 刘晓, 康晓清, 高芬

(西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘要:为了减小非球面环形子孔径拼接测量时的中心偏移误差,根据检测原理及几何关系,分析了中心偏移误差在面形测量中的作用机理,推导了中心偏移误差模型,并在此基础上提出了一种基于二维像素矩阵的中心偏移误差补偿方法.该方法可以有效地得到初始面形测量数据的中心偏移量,在拼接之前减小由中心偏移误差引起的波前偏差的剔除误差,同时减小各环形子孔径中心之间的偏差.利用 Zygo 干涉仪进行了非球面环形子孔径拼接的中心偏移误差补偿实验,与零位检测结果相比,峰谷值残差为 -0.015λ ,均方根残差为 0.003λ ,表明该补偿方法大大减小了面形测量误差,提高了环形子孔径拼接的测量精度.

关键词:光学测试; 环形子孔径拼接; 二维像素矩阵; 非球面; 中心偏移误差

中图分类号: TH744

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)09-0912001-6

Compensation for Center Offset Error in Annular Subaperture Stitching Interferometry

LI Bing, LIU Xiao, KANG Xiao-qing, GAO Fen

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to reduce the center offset error in aspheric surface testing by annular subaperture stitching interferometry, the mechanism of action of center deviation error in the surface shape measurement was analyzed, and the error model based on the testing principle and geometrical relationship was established. A compensation method for the center offset based on two-dimensional matrices of pixel was proposed. The method is effective for searching the center offset of the initial surface shape measurement data and reducing the eliminate error of the wavefront error caused by the center offset error, and the error among the centers of annular subapertures can also be decreased. The error compensation experiment for the annular subaperture stitching interferometry was carried out with Zygo interferometer. The errors of peak to valley value and root mean square are -0.015λ and 0.003λ respectively compared with the null aspheric surface testing result. The experiment results show that the proposed method greatly reduces the surface measurement errors and improves the measurement precision of annular subaperture stitching interferometry.

Key words: Optical testing; Annular subaperture stitching; Two-dimensional matrices of pixel; Aspheric surface; Center offset error

OCIS Codes: 120.3180; 220.1250; 220.4840; 120.6650

0 引言

随着光学领域科学技术的发展,非球面光学元件的应用越来越广泛,其优越性和重要性日益凸显.与此同时,非球面的高精度加工和检测成为了非球面镜片

研制过程中急需解决的问题.子孔径测试的概念最先由美国 Arizona 光学中心的 C. J. Kim 于 1982 年提出^[1].1988 年,Arizona 光学中心的 Y. M. Liu 在子孔径测试概念的基础上,首先提出了环形子孔径检测技术^[2].环形子孔径拼接通过改变小口径干涉仪与待测

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 51275398,51421004)资助

第一作者:李兵(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为光电检测及精密测试技术. Email: lb@mail.xjtu.edu.cn

通讯作者:刘晓(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为光电检测及精密测试技术. Email: xiaoliu@stu.xjtu.edu.cn.

收稿日期:2016-03-30;录用日期:2016-06-02

<http://www.photon.ac.cn>

非球面之间沿光轴方向上的距离,以不同曲率半径的参考球面波匹配非球面不同的环带,再对不同环带的有效面形数据进行拼接,从而实现大口径非球面全口径面形的检测^[3-5].

通常高精度非球面的实际面形误差小于测量中引入的装调误差,如果装调误差不能得到有效补偿,面形检测精度往往难以保证,在子孔径拼接中这个问题更为突出.因而,目前环形子孔径拼接检测精度的限制主要来自于装调误差的补偿问题,传统的环形子孔径拼接方法通常只考虑低阶的误差项^[6-7],包括 x 、 y 方向的倾斜误差以及离焦误差.近些年,有研究在拼接算法中加入了高阶误差的拟合^[8-11],在拼接时求解误差系数进行误差的补偿,这类方法的拼接模型更为复杂,增加了拼接的复杂度,容易引入新的拼接误差.国内也出现了一些针对子孔径拼接误差补偿的研究,文献^[12-14]考虑 5 个自由度参数,通过参数优化来提高拼接的精度,这类方法需要保证初始测量数据满足较高的精度,参数的不确定性容易影响全局的最优化;文献^[15-16]通过采用部分零位镜代替干涉仪中的标准球面镜来减少子孔径的数量、增大重叠区域,以此降低误差累积,提高拼接精度,这种方法对零位镜的精度要求很高,而且对不同的测量对象也存在局限性.这些方法大多是在子孔径拼接时的相对调整误差校正中考虑误差补偿,而未在拼接前针对测量中存在的中心偏移误差(即 x 、 y 方向的平移误差)进行补偿.中心偏移误差是非球面测量中普遍存在的情况,尤其对于环形子孔径拼接来说,若各子孔径测量时中心偏移误差过大,不仅会直接影响到各子孔径初始面形数据的准确提取,同时也会间接降低子孔径拼接的精度,加重误差的传递^[17].

本文针对环形子孔径拼接检测中存在的中心偏移误差,分析了中心偏移误差对面形测量的作用机理,推导了环形子孔径拼接检测的中心偏移误差模型,进而提出了一种基于二维像素矩阵的中心偏移误差补偿方法,在拼接之前减少了中心偏移带来的面形误差,并进行实验验证,实现中心偏移误差的有效补偿.

1 误差模型

利用干涉仪测量非球面时,理想情况下非球面光轴与干涉仪光轴重合,如图 1(a),但是实际测量中难以达到理想的测量状态,会存在非共轴的测量情况,如图 1(b).实际测量中非球面的中心偏移误差和倾斜误差是同时存在的,进一步可以认为非球面的倾斜误差是由于非球面的中心偏移导致干涉图像倾斜,为了使干涉图像不倾斜而进行调整引入的.

当非球面光轴与干涉仪光轴出现偏差时,测试光与参考光的干涉图像并不位于 CCD 像素中心,这时候

干涉仪通过干涉条纹的识别进行相位提取就会使得面形数据的像素中心与非球面实际中心存在偏差.

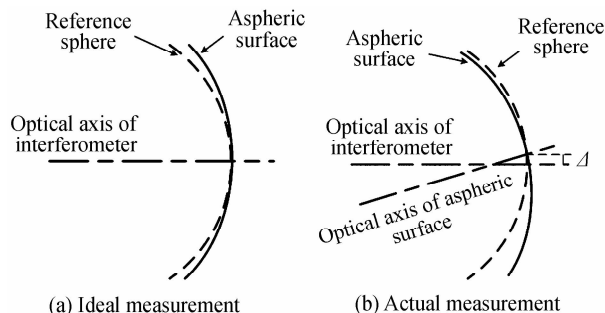


图 1 非球面测量位置关系

Fig. 1 Position relationship of aspheric surface measurement

在环形子孔径拼接测量时,每个子孔径都利用干涉仪的标准镜头产生的参考球面波来进行匹配测量,这样必然会存在波前偏差(即标准球面波与非球面之间的偏差),在进行拼接之前这部分偏差是需要剔除的,如果此时存在中心偏移误差,波前偏差的剔除误差(即剔除波前偏差时所产生的误差)就会引入到面形误差当中.以二次非球面为例分析中心偏移误差在波前偏差剔除时的作用方式.

建立坐标系如图 2,对于二次非球面,有

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)c^2 r^2}} \quad (1)$$

式中, $r^2 = x^2 + y^2$, $c = 1/R$, R 为非球面顶点曲率半径, K 为二次项系数.

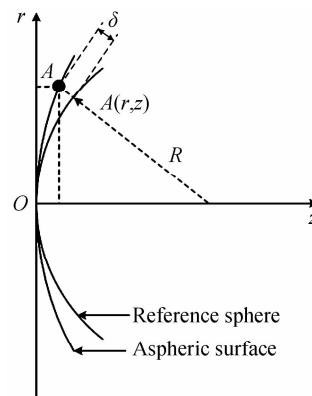


图 2 非球面测量坐标系

Fig. 2 Coordinate system of aspheric surface measurement

波前偏差为球面波前与非球面沿球面波前法向的偏离量,用顶点曲率半径的参考球面波测量非球面时,根据几何关系,非球面上任意一点 $A(r, z)$ 处的波前偏差的表达式为

$$\delta(r) = \sqrt{(R-z)^2 + r^2} - R \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),则 $\delta(r)$ 关于 r^2 在 $r^2 = 0$ 处进行泰勒级数展开得

$$\begin{aligned}
\delta(r) = & \delta(0) + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{K \cdot R + \sqrt{R^2 - (1+K) \cdot r^2}}{1+K} \right)^2 + r^2 \right)^{-1/2} \cdot \left(\frac{K(1-R \cdot (R^2 - (1+K) \cdot r^2)^{-1/2})}{1+K} \right) \Big|_{r^2=0} \cdot r^2 \\
& - \frac{1}{4} \left\{ \left(\left(\frac{K \cdot R + \sqrt{R^2 - (1+K) \cdot r^2}}{1+K} \right)^2 + r^2 \right)^{-3/2} \cdot \left(\frac{K(1-R \cdot (R^2 - (1+K) \cdot r^2)^{-1/2})}{1+K} \right)^2 + \right. \\
& \left. \left(\left(\frac{K \cdot R + \sqrt{R^2 - (1+K) \cdot r^2}}{1+K} \right)^2 + r^2 \right)^{-1/2} \cdot K \cdot R \cdot (R^2 - (1+K) \cdot r^2)^{-3/2} \right\} \Big|_{r^2=0} \cdot r^4 + \dots = \\
& - \frac{1}{4} K \cdot R^{-3} \cdot r^4 - \frac{3}{8} K \cdot (1+K) R^{-5} \cdot r^6 - \frac{3}{16} K \cdot (5K^2 + 11K + 5) \cdot R^{-7} r^8 + \dots \quad (3)
\end{aligned}$$

由于泰勒级数的系数很小,而且中心偏移量 $\Delta x, \Delta y$ 相对也很小,在近似计算中可以忽略其高次项,则中心偏移导致的波前偏差的剔除误差为

$$\begin{aligned}
\Delta\delta(x, y) = & \delta(x + \Delta x, y + \Delta y) - \delta(x, y) \approx \\
& -K \cdot R^{-3} \cdot \Delta x \cdot x \cdot (x^2 + y^2) - \\
& K \cdot R^{-3} \cdot \Delta y \cdot y \cdot (x^2 + y^2) \quad (4)
\end{aligned}$$

进一步可将式(4)改写为 Zernike 多项式形式,即

$$\begin{aligned}
\Delta\delta(x, y) = & z_2 Z_2(x, y) + z_3 Z_3(x, y) + \\
& z_7 Z_7(x, y) + z_8 Z_8(x, y) = \\
& z_2 x + z_3 y + z_7 (-2x + 3x(x^2 + y^2)) + \\
& z_8 (-2y + 3y(x^2 + y^2)) \quad (5)
\end{aligned}$$

式中, $z_2 = 2 \cdot z_7, z_3 = 2 \cdot z_8, z_7 = (-1/3) \cdot K \cdot R^{-3} \cdot \Delta x, z_8 = (-1/3) \cdot K \cdot R^{-3} \cdot \Delta y, Z_2(x, y), Z_3(x, y), Z_7(x, y), Z_8(x, y)$ 分别为 Zernike 多项式的第 2、3、7、8 项。

其余子孔径测量时,只是沿光轴方向存在一个平移量,不影响中心偏移误差的分析,其误差模型推导过程与上述过程一致。

通过分析可以看到,中心偏移引起的剔除误差 $\Delta\delta(x, y)$ 与 Seidle 像差中的倾斜误差和彗差相对应,所以中心偏移导致的剔除误差存在高阶像差,会被包裹在面形误差中,而传统消除调整误差时通常只进行低阶误差的剔除,不能将这种剔除误差消除掉,从而导致检测结果不准确。

2 误差补偿

根据误差模型的分析推导可知,非球面环形子孔径拼接测量时,中心偏移误差在面形测量误差中表现为倾斜误差和彗差。假设某一存在中心偏移误差的子孔径面形测量数据为 $w(x + \Delta x, y + \Delta y)$,根据推导的误差模型,去除波前偏差后的面形为

$$\begin{aligned}
W = & w(x + \Delta x, y + \Delta y) - \delta(x, y) = \\
& \delta(x + \Delta x, y + \Delta y) + e(x + \Delta x, y + \\
& \Delta y) + \epsilon(x + \Delta x, y + \Delta y) - \delta(x, y) = \\
& z_2 x + z_3 y + z_7 (-2x + 3x(x^2 + y^2)) + \\
& z_8 (-2y + 3y(x^2 + y^2)) + \epsilon(x + \Delta x, y + \\
& \Delta y) + e(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (6)
\end{aligned}$$

式中, e 为实际面形误差, ϵ 为低阶调整误差。

可以看到去除波前偏差后的面形 W 中包含了由中心偏移导致的低阶倾斜误差和高阶彗差,将这部分倾斜误差和彗差在中心偏移误差中一起考虑,使得这两部分误差达到最小就能实现补偿的目的。

通过对面形 W 进行 Zernike 多项式拟合,提取其中的部分倾斜误差和高阶彗差就可得到当前中心偏移误差引入的面形误差分量 E ,即

$$\begin{aligned}
E = & k_2 Z_2(x, y) + k_3 Z_3(x, y) + \\
& k_7 Z_7(x, y) + k_8 Z_8(x, y) \quad (7)
\end{aligned}$$

式中, k_2, k_3, k_7, k_8 分别为对面形 W 进行 Zernike 多项式拟合的部分倾斜误差系数和彗差系数,以彗差系数 k_7, k_8 为基准,满足 $k_2 = 2 \cdot k_7, k_3 = 2 \cdot k_8$,这里的倾斜误差仅为中心偏移引入的部分,不包含倾斜调整引入的部分。

同时建立中心偏移误差评价指标 $\text{RMS}_c, \text{RMS}_c$ 为面形误差分量 E 的均方根值,其表达式为

$$\text{RMS}_c = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (E_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E_k)^2}{N}} \quad (8)$$

式中, N 为面形数据点总个数。

分析和建模的目的是求取中心偏移量 $\Delta x, \Delta y$, 然后进行误差补偿。为此设计偏移量搜索流程,如图 3。

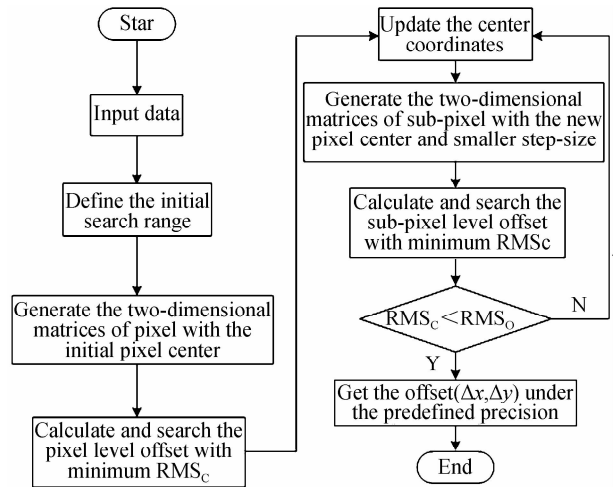


图 3 中心偏移量搜索流程

Fig. 3 Search process for center offset

中心偏移误差补偿的具体步骤为:

1) 读取非球面面形的原始测量数据 w ;

2) 选定中心偏移量的初始搜索范围

根据非球面参数和检测情况设定中心偏移量的初步搜索范围,假设 x, y 方向的偏移量均不超过 n 个像素;

3) 像素级搜索,得到像素级偏移量

以像素坐标系原点为中心建立 $(2n+1) \times (2n+1)$ 的二维像素网格矩阵 $\Delta X, \Delta Y$ 作为像素级搜索矩阵,即

$$\Delta X = (\Delta Y)^T = \begin{bmatrix} -n & -(n-1) & \cdots & 0 & \cdots & n-1 & n \\ -n & -(n-1) & \cdots & 0 & \cdots & n-1 & n \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ -n & -(n-1) & \cdots & 0 & \cdots & n-1 & n \end{bmatrix} \quad (9)$$

搜索矩阵的步长为 1 个像素, $\Delta X, \Delta Y$ 中每个元素对应相应方向的一个偏移量。

设像素坐标 (X, Y, Z) 与物面坐标 (x, y, z) 的转换比率为 p , 令面形

$$W(i, j) = w(x + \Delta x, y + \Delta y) - \delta(x + p \cdot \Delta X(i, j), y + p \cdot \Delta Y(i, j)) \quad (10)$$

式中, $i=1, 2, \dots, 2n+1, j=1, 2, \dots, 2n+1$ 。

对面形 $W(i, j)$ 进行 Zernike 多项式拟合,按照式(7)提取其中的四项拟合分量,得到中心偏移量 $\Delta X(i, j), \Delta Y(i, j)$ 在面形测量值中所对应的面形误差分量 $E(i, j)$,由式(8)计算相应的误差评价指标 $RMS_c(i, j)$ 。通过搜索计算找到最小 $RMS_c(i, j)_{\min}$ 所对应的偏移量 $\Delta X(i, j), \Delta Y(i, j)$,即为最接近非球面实际中心的像素级偏移量。

4) 亚像素级搜索,得到亚像素级偏移量

在第 3) 步得到的像素级偏移量 $\Delta X(i, j), \Delta Y(i, j)$ 的 ± 0.5 个像素范围内生成步长为 $1/h (h \geq 2)$ 个像素的亚像素级搜索矩阵,重复第 3) 步的搜索计算,得到亚像素级偏移量。如果第二轮搜索还不能达到精度要求,可继续进行更小步长的搜索计算,直到误差评价指标 RMS_c 值小于预设值 RMS_0 ;

5) 硬件补偿

根据步骤 4) 中的亚像素级偏移量,通过精密调整架对被测非球面进行逆偏移方向的位姿调整,对中心偏移误差进行初步的硬件补偿,直到中心偏移量小于精密调整架的分辨率;

6) 软件补偿

对于经过硬件补偿未能完全消除的部分中心偏移误差,采用软件补偿的方式消除,即将中心偏移量代入式(4)得到剔除误差 $\Delta \delta(x, y)$,在面形 W 中减去这部

分误差,得到补偿后的面形数据;

7) 各子孔径面形数据均进行步骤 1)~6) 的处理得到补偿后的各子孔径面形数据,再利用环形子孔径拼接方法实现非球面全口径面形测量。

3 实验验证

为了验证误差补偿方法的可行性及准确性,进行非球面环形子孔径拼接检测的误差补偿实验。实验选用一个口径为 108 mm,顶点曲率半径为 348.6 mm,二次项系数为 $-0.266\ 039$ 的凹椭球面进行拼接测量,受干涉仪标准镜头的限制,取其中的 90% 口径作为测量对象。

实验的环形子孔径拼接装置如图 4,由 Zygo 干涉仪进行原始面形数据的获取,Zygo 干涉仪的波长为 $\lambda=632.8\ \text{nm}$,选用 $F/3.3$ 的标准球面镜头进行测量。被测非球面安装在五维精密调整架上,可进行 x, y 方向的平移和倾斜以及 z 方向的平移调整,同时调整架安装在配有光栅尺的精密导轨上,可沿光轴方向平移定位来进行各环形子孔径的测量。

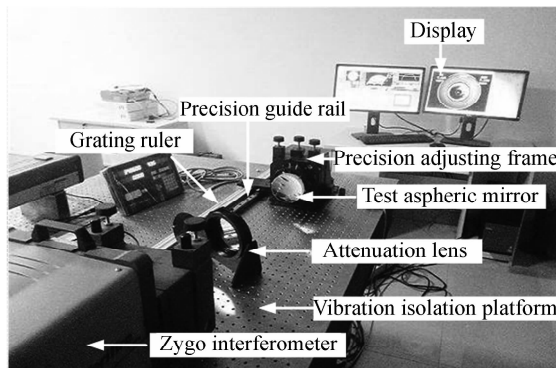


图 4 环形子孔径拼接干涉测量系统
Fig. 4 Annular subaperture stitching interferometry system

表 1 子孔径划分参数
Table 1 Subaperture partition parameter

Subaperture	Lower bound /mm	Upper bound /mm	Radius of reference sphere/mm
1	0.000 0	28.750 0	348.600 0
2	20.000 0	41.458 3	349.040 8
3	37.083 3	48.600 0	349.371 9

实验时,子孔径划分参数见表 1。实验中 Zygo 干涉仪的 CCD 像素分辨率为 640×480 (pixel),各子孔径的中心偏移量搜索结果见表 2。

表 2 子孔径中心偏移量
Table 2 Subaperture center offset

Search type	Step-size /pixel	Subaperture 1		Subaperture 2			
		Δx_1 /pixel	Δy_1 /pixel	Δx_2 /pixel	Δy_2 /pixel	Δx_3 /pixel	Δy_3 /pixel
Pixel level	1.0	0.0	1.0	-1.0	-3.0	-1.0	1.0
Sub-pixel level	0.1	0.2	1.3	-0.7	2.7	-1.4	1.2

实验得到未补偿拼接结果图 5(a)、已补偿拼接结果图 5(b)、零位测量结果图 5(c)和干涉仪标准镜头面形图 5(d). 为了与该非球面的零位测量结果作比较,拼接结果去除了相同口径的中心小孔面形数据. 其中未补偿拼接结果的峰谷值(Peak to Valley, PV)和均方根分别(Root Mean Square, RMS)为 $PV=0.272\lambda$, $RMS=0.040\lambda$, 已补偿拼接结果为 $PV=0.183\lambda$, $RMS=0.018\lambda$. 补偿前后结果偏差较大, PV 值减小了 32.72%, RMS 值减小了 55.00%, 而且面形结果中含有明显的

彗差成分, 说明存在中心偏移误差.

为了进行结果验证, 用 Zygo 干涉仪进行零位检测, 零位测量结果为 $PV=0.198\lambda$, $RMS=0.015\lambda$. 已补偿拼接结果与零位测量结果很接近, PV 值残差为 -0.015λ , RMS 值残差为 0.003λ . 实验所用标准镜头的面形误差为 $PV=0.038\lambda$, $RMS=0.006\lambda$, 残差值与标准镜头的面形误差处于同一水平. 通过实验结果的分析可知, 所提出的误差补偿方法效果明显, 而且测量得到的面形结果是准确可靠的.

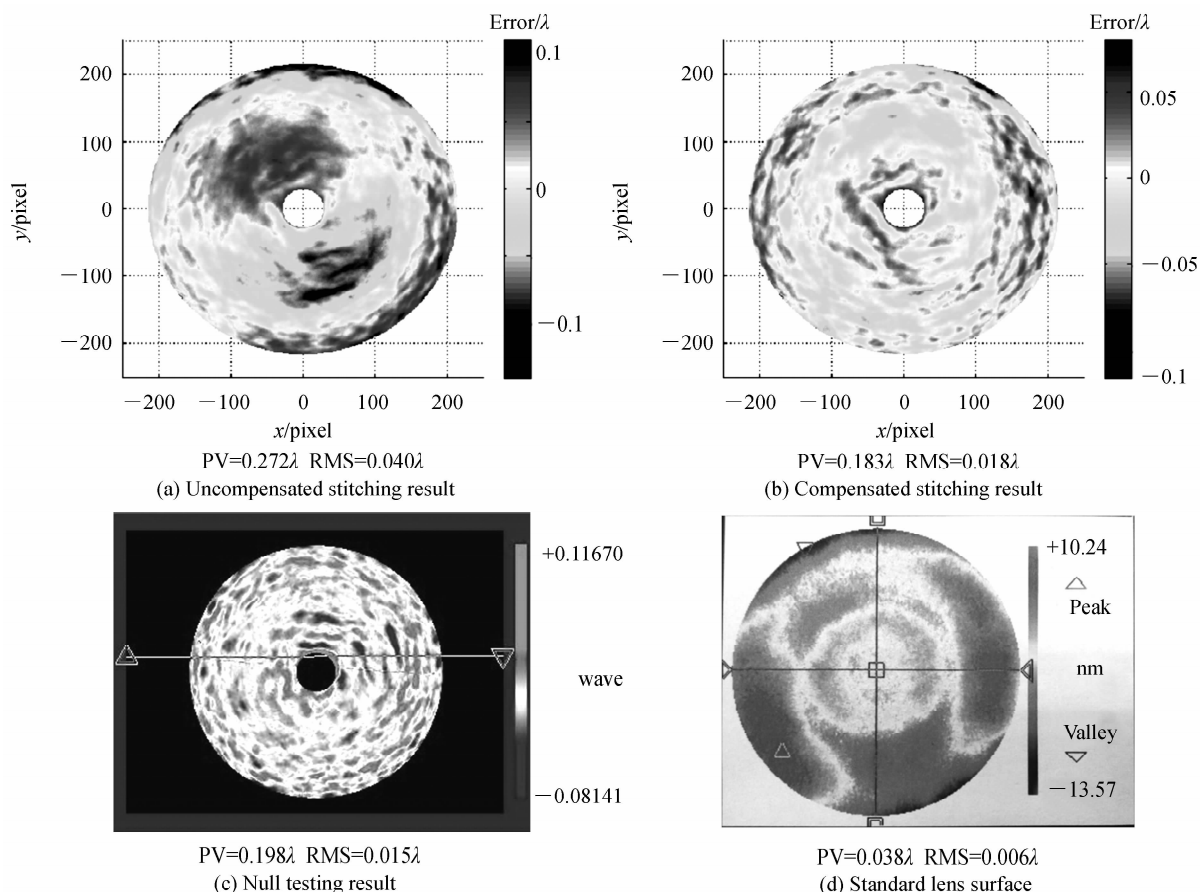


图 5 面形测量结果

Fig. 5 Measurement result of surface shape

4 结论

本文提出了一种基于二维像素矩阵的环形子孔径拼接中心偏移误差补偿方法, 可以有效地补偿由于非共轴测量导致的中心偏移误差, 能够在拼接之前减小中心偏移所引起的波前偏差的剔除误差, 同时减小各子孔径中心之间的偏差, 实现各子孔径原始面形数据的准确获取, 降低了子孔径拼接时的复杂度, 提高了拼接检测的精度. 非球面环形子孔径拼接的误差补偿实验结果表明, 该方法误差补偿的效果明显, 与零位测量结果相比, 峰谷值残差为 -0.015λ , 均方根残差为 0.003λ , 验证了该方法的可行性和准确性.

参考文献

- [1] SHI Tu, YANG Yong-ying, ZHANG Lei, *et al.* Surface testing methods of aspheric optical elements[J]. *Chinese Optics*, 2014, **7**(1): 26-46.
师途, 杨雨英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. *中国光学*, 2014, **7**(1): 26-46.
- [2] HOU Xi, WU Fan, YANG Li, *et al.* Status and development trend of sub-aperture stitching interferometric testing technique[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(3): 50-53.
侯溪, 伍凡, 杨力, 等. 子孔径拼接干涉测试技术现状及发展趋势[J]. *光学与光电技术*, 2005, **3**(3): 50-53.
- [3] HOU Xi, WU Fan, WU Shi-bin, *et al.* Annular sub-aperture interferometric testing technique for large aspheric surfaces [C]. *SPIE*, 2005, **5638**: 992-997.
- [4] WANG Xiao-kun, ZHANG Xue-jun, WANG Li-hui, *et al.* Mathematical model and simulation for testing aspheric surface

- by annular subaperture stitching interferometry[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 527-532.
- 王孝坤, 张学军, 王丽辉, 等. 环形子孔径拼接干涉检测非球面的数学模型和仿真研究[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(4): 527-532.
- [5] HOU Xi, WU Fan, YANG Li, *et al.* Stitching algorithm for annular subaperture interferometry[J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, **4**(4): 211-214.
- [6] ZHANG Rong-zhu, YANG Chun-lin, XU Qiao, *et al.* Anti-tilting technology of sub-aperture stitching interferograms[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(7): 879-882.
- 张蓉竹, 杨春林, 许乔, 等. 子孔径拼接干涉检测中去倾斜处理技术[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(7): 879-882.
- [7] HOU Xi, WU Fan, WU Shi-bin, *et al.* Testing the large aspheric mirror using annular subapertures[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(4): 506-508.
- 侯溪, 伍凡, 吴时彬, 等. 使用环形子孔径拼接检测大口径非球面镜[J]. 光学技术, 2005, **31**(4): 506-508.
- [8] WANG Xiao-kun, ZHENG Li-gong, ZHANG Xue-jun, *et al.* Testing an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 92-97.
- 王孝坤, 郑立功, 张学军, 等. 子孔径拼接干涉检测离轴非球面研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(1): 92-97.
- [9] TIAN Ai-ling, WU Shi-xia, LIU Bing-cai, *et al.* Global optimization algorithm of sub-aperture stitching weight coefficients[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8): 943-949.
- 田爱玲, 吴世霞, 刘丙才, 等. 基于权重的子孔径拼接优化算法研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(8): 943-949.
- [10] WEN Yong-fu, CHENG Hao-bo, TAM Hon-yuen, *et al.* Modified stitching algorithm for annular subaperture stitching interferometry for aspheric surfaces [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(23): 5686-5694.
- [11] WANG Dao-dang, YANG Yong-ying, CHEN Xiao-yu, *et al.* Accurate calibration of misalignment in high-precision spherical surface testing[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, **11**(1): 20-26.
- 王道档, 杨甬英, 陈晓钰, 等. 高精度球面检测中调整误差的精确校正[J]. 纳米技术与精密工程, 2013, **11**(1): 20-26.
- [12] QIAO Yu-jing, TAN Jiu-bin, WANG Wei-bo. Revising model for the bias errors correcting during stitching measure aspheric surface[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(11): 1497-1501.
- 乔玉晶, 谭久彬, 王伟波. 非球面拼接测量中偏置误差修正模型[J]. 光电子 • 激光, 2008, **19**(11): 1497-1501.
- [13] WANG Xiao-kun. Compesation of misalignment error on testing aspheric surface by surface by subaperture stitching interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(1): 89-95.
- 王孝坤. 子孔径拼接检测非球面时调整误差的补偿[J]. 中国光学, 2013, **6**(1): 89-95.
- [14] ZHANG Min, WANG Li-peng, SUI Yong-xin, *et al.* Separation of mechanical error in annular subaperture stitching interferometry[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, **34**(5): 825-830.
- 张敏, 王立鹏, 隋永新, 等. 环形子孔径拼接检测中机械误差的分离[J]. 应用光学, 2013, **34**(5): 825-830.
- [15] ZHANG Lei, TIAN Chao, LIU Dong, *et al.* Non-null annular subaperture stitching interferometry for steep aspheric measurement[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(25): 5755-5762.
- [16] ZHANG Lei, TIAN Chao, LIU Dong, *et al.* Non-null annular subaperture stitching interferometry for aspheric test [J]. *Acta Optical Sinica*, 2014, **34**(8): 0812003.
- 张磊, 田超, 刘东, 等. 非球面非零位环形子孔径拼接干涉检测技术[J]. 光学学报, 2014, **34**(8): 0812003.
- [17] HOU Xi, WU Fan, YANG Li, *et al.* Accurate data extraction method for annular subaperture stitching technique [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(8): 113-131.
- 侯溪, 伍凡, 杨力, 等. 环形子孔径检测技术中测量数据的准确提取方法[J]. 光电工程, 2006, **33**(8): 113-131.