

高陡度保形光学非球面环形子孔径检测方法

王洪浩¹, 明名¹, 吕天宇¹, 邹惠莹²

(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. 长春师凯科技产业有限责任公司, 吉林 长春 130033)

摘要: 环形子孔径拼接技术检测大口径、高陡度光学非球面具有低成本、高效率的特点。提出一种基于最小二乘法和泽尼克多项式拟合的环形子孔径拼接方法检测高陡度光学非球面。研究了环形子孔径拼接算法的基本原理, 对环形子孔径的划分方式进行数学公式推导及参数运算, 建立被测非球面的有效数学模型。全口径的拼接结果与原始波面基本一致, 二者 PV 和 RMS 差值分别为 $0.015\ 1\lambda$ 、 $0.004\ 7\lambda$ (λ 为 $632.8\ \text{nm}$), 残差的 PV 和 RMS 值为 $0.043\ 5\lambda$ 、 $0.005\ 2\lambda$, 验证该算法的有效性和准确性。

关键词: 高陡度; 高精度检测; 环形子孔径拼接; 拼接算法

中图分类号: TH706 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0417001

Testing methods of high-gradient conformal aspheric surfaces based on annular sub-aperture stitching

Wang Honghao¹, Ming Ming¹, Lv Tianyu¹, Zou Huiying²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Changchun Shikai Science and Technology Industry Co., LTD, Changchun 130033, China)

Abstract: Annular sub-aperture stitching interferometry technology can test steep conformal aspheric surfaces with low cost and high efficiency without auxiliary null optics. The effective splicing algorithm was established based on simultaneous least-squares method and Zernike polynomial fitting. Firstly, the basic principle of the algorithm of the annular sub-aperture stitching was studied. Secondly, the mathematical formulas of the sub-aperture effective area were derived and the parameters of the sub-aperture effective area were calculated and optimized. Finally, the reasonable mathematical model was established. The detection method of annular sub-aperture stitching high steepness aspheric has been tested through on experimental verification. As a result, the surface map of the full aperture after stitching was consistent to the input surface map, the difference of PV error and RMS error between them is $0.015\ 1\lambda$ and $0.004\ 7\lambda$ (λ is $632.8\ \text{nm}$); the PV and RMS of residual error of full aperture phase distribution is $0.043\ 5\lambda$ and $0.005\ 2\lambda$. The results conclude that this splicing model and algorithm were accurate and feasible.

Key words: high-gradient; high-precision testing; annular sub-aperture stitching; stitching algorithm

收稿日期: 2015-07-24; 修订日期: 2015-08-27

作者简介: 王洪浩(1990-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事大型光机结构装调与检测等方面的研究。Email: whh_hit@163.com

0 引言

保形光学镜面是典型的高陡度非球面光学零件。保形光学头罩由于其弹头表面的流线型设计,能大幅度减少导弹在飞行过程中的空气阻力,增加导弹的作用距离,使得其在航空航天领域广泛应用。流线型的设计随之带来的是头罩的高陡度特性,这一性质使得一般的检测方法难以对高陡度头罩进行面形检测。伴随着光学测试和光学加工不断发展,对于高陡度保形光学非球面的高效率、高精度、低成本的检测方法亟待研究。

目前,用于高陡度非球面的检测技术可分为两大类:光学检测方法和接触式检测方法^[1]。光学检测方法主要是利用波面干涉仪的补偿器检测法、动态哈特曼检测法、子孔径拼接检测法等^[2]。切斯特大学利用零位补偿镜的方法还有干涉测量法检测共形面型^[3]。它们通常被用作工件的最终检验手段,接触式测量的精度在微米亚微米量级,适用于加工过程中的面形测量。是当前非球面加工过程中面形检测的主要手段。接触式测量主要有三坐标法和轮廓仪法。以 Taylor Hobson 公司和德国 LOH 公司为代表的科研机构都对高精度光学镜面坐标测量技术展开了研究,并开发了一系列的产品。然而对于高陡度保形光学镜面而言,由于其纵向高差非常大,通常会超出传感器的量程,同时曲面陡度非常大时侧向力也会影响测量精度,甚至测头无法正常接触工件表面,因此上述商用化产品用于保形光学零件测量存在一定的困难。

文中针对基于环形子孔径拼接来检测高陡度特性保形非球面面形误差的方法进行深入研究。采取轴向方向移动干涉仪来检测各子孔径面型。这种检测方法的原则是通过精确定位干涉仪位置来分析各环形子孔径的波相差,将干涉球面波与回转中心切点坐标作为迭代算法的基准,进行全口径全局拼接。通过精确划分环形子孔径的有效区域、优化环形子孔径拼接算法,来提高面形的检测精度。

1 测量原理

测量原理如图 1 所示,将被测非球面按回转轴方向分若干被测区域。测量运动方向与干涉仪光路

方向相同。首先在测量 1 状态下用干涉仪测量基准子孔径的波前面型^[4];之后将非球面按回转轴运动一定的距离,将传感器调整到合适的量程内,测量其他子孔径波前面型。推算各相邻子孔径重叠区域的面积。虽然在测量过程中存在着名义平移运动以及各种误差运动,但是重叠区域非球面本身的面形是保持不变的,据此可以将各自孔径拼接起来,重构出被测非球面面形轮廓。该方法的关键就在于:使相邻环形子孔径部分重叠,利用重叠区域轮廓信息建立各个环形子孔径之间的相对空间位置关系,据此以坐标变换方式将各个环形子孔径统一于同一坐标系下,从而消除测量系统与待测表面之间运动误差的影响,得到真实的面形误差分布^[5]。

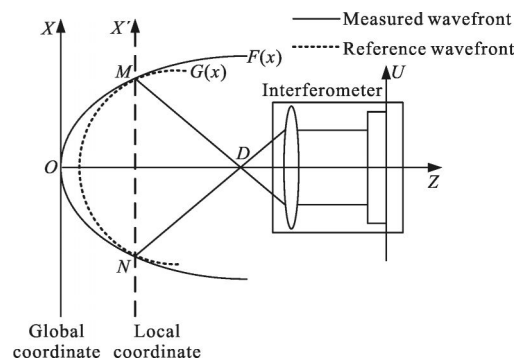


图 1 测量原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of measuring principle

2 数学模型

典型的保形光学头罩的长径比在 1.0 以上(纵向高差与口径之比,半球面的长径比为 0.5),同时面形精度要求达到微米甚至亚微米级。正是由于保形光学镜面的高陡度、高精度的特点,给加工和检测带来了极大的挑战。考虑到与国内标准头罩的口径大小相一致,文中选取的保形光学头罩的口径为 100 mm。

实际的高陡度共形光学非球面的数学表达式为:

$$g(x) = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + a_3x^3 + a_4x^4 + \dots \quad (1)$$

式中: $c = \frac{1}{R} = \frac{1}{156.47}$, $k=0$, $a_3=0$, $a_4=2.7845 \times 10^{-8}$, $a_5=0$, $a_6=2.5580 \times 10^{-12}$, $a_i=0$ ($i=7,8,9, \dots$)。

当 $k=0$ 时,高陡度非球面表达式的第一项 $g(x) = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}}$ 恰好是一个标准球面表达式。因此实际的高陡度非球面方程是一个由标准球面波方

程叠加带有高次项旋转对称曲面而得到的高次非球面。待测高陡度共形光学非球面的波面仿真图如图 2 所示。

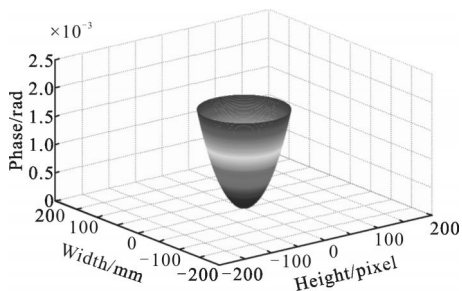


图 2 待测非球面的波面仿真图

Fig.2 Wavefront simulation map of measured tested asphere

通过减少相对传递误差可以有效提高整体非球面的拼接准确度。采用多次两两拼接来实现对非球面整体面形的拼接,将会引入较大积累误差,从而影响整体拼接精度。文中选用整体优化的拼接算法,同时考虑各子孔径之间的拼接过程,采用最小二乘法优化整体的拼接误差,使整体拼接误差达到最小,从而消除逐次拼接带来的积累误差^[6]。

环形子孔径的干涉条纹边缘密度恰好使 CCD 不发生欠采样的边缘位置作为子孔径的边境位置。由奈奎斯特香农采样定理得到:CCD 可以分辨的最小条纹宽度为 2 个像素。由物理定律可知,每个条纹的宽度对应一个波长的光程差,得出:

$$2(d_2-d_1) < \frac{\lambda}{2}$$

可以得出结论:环形子孔径的边界为条纹光程差变化率为 $\frac{\lambda}{2}$ 像素的位置,此式作为环形子孔径边缘位置的确定公式。

根据该划分依据对高陡度非球面全口径进行子孔径划分。图 3 表示四子孔径拼接框架,图中 w_1, w_2, w_3 分别为各个子孔径的重叠区域,在这些重叠区域内采样点的面形误差是一致的。

将 $f_i(x, y)$ 表示为待测高陡度头罩面型方程, $e_i(x, y)$ 表示待测非球面形误差, $x_i(x, y)$ 为第 i 个子孔径的测试球面波前, $\varepsilon_i(x, y)$ 为子孔径的调整误差。忽略系统的高阶误差,第 i 个子孔径波前误差的相位可以表示为:

$$w_i(x, y) = f_i(x, y) - s_i(x, y) + \varepsilon_i(x, y) \quad (2)$$

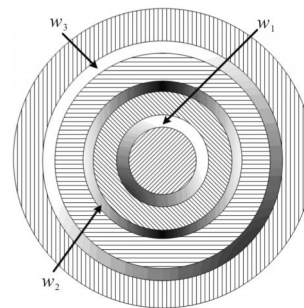


图 3 环形子孔径之间的重叠关系

Fig.3 Overlapping relationship of annular sub-apertures

在装调过程中会引入误差 $\varepsilon_i(x, y)$ 由倾斜、离焦和平移构成:

$$\varepsilon_i(x, y) = Ax_i + By_i + C(x_i^2 + y_i^2) + D \quad (3)$$

式中: $ABCD$ 分别对应为: x 方向倾斜、 y 方向倾斜、径向离焦和平移项常数项。将 $e_i(x, y) = f_i(x, y) - \varepsilon_i(x, y)$ 代入公式(3),得到包括调整误差和面形误差的各个子孔径相位分布函数为:

$$w_i(x, y) = e_i(x, y) + A_i x + B_i y + C_i(x^2 + y^2) + D_i \quad (4)$$

当拼接子孔径的个数多于两个的时候,任意选取基准子孔径,从检测效率来看,一般选择头罩的中心子孔径作为基准。把其它子孔径的调整系数设置为 $(a_1, b_1, c_1, d_1), (a_2, b_2, c_2, d_2), \dots, (a_{M-1}, b_{M-1}, c_{M-1}, d_{M-1})$,可以得到其它子孔径与基准子孔径相位分布关系式:

$$\begin{aligned} w_0(x, y) &= w_1(x, y) + a_1 x + b_1 y + c_1(x^2 + y^2) + d_1 = \\ &= w_2(x, y) + a_2 x + b_2 y + c_2(x^2 + y^2) + d_2 = \\ &\dots \\ &= w_{M-1}(x, y) + a_{M-1} x + b_{M-1} y + c_{M-1}(x^2 + y^2) + d_{M-1} \end{aligned} \quad (5)$$

采用最小二乘法作用于上式,将所有重叠区域采样点的相位差平方和取最小值,得到:

$$\begin{aligned} S = & \sum_{i=1}^n [w_1 + a_1 x + b_1 y + c_1(x^2 + y^2) + d_1 - w_0]^2 + \\ & \sum_{j=1}^{M-2} \sum_{i=1}^n \{ [w_{j+1} + a_{j+1} x + b_{j+1} y + c_{j+1}(x^2 + y^2) + d_{j+1}] - \\ & [w_j + a_j x + b_j y + c_j(x^2 + y^2) + d_j] \}^2 = \min \end{aligned} \quad (6)$$

式中:重叠区域的所取采样点数的个数为 n ,将所有子孔径拼接过程中相邻子孔径重叠区域的个数为 $M-1$,利用最小二乘法,对变量求倒数,并令其取零值,得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_j} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b_j} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial c_j} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial d_j} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $1 \leq j \leq M-1$, 公式(7)为拟合得到的各子孔径的拼接参数, 消除调整误差的影响以后, 将其余子孔径统一到与基准子孔径相同的参考标准中, 完成对整个高陡度头罩面形的检测。

3 拼接实验与误差分析

全局优化拼接算法是综合考虑所有环形子孔径的重叠区域, 将他们看作整体来进行一次性的最小二乘法拟合运算, 通过这种拼接算法得到每个环形子孔径相对于基准子孔径的相对调整误差, 有效降低了传递误差的影响^[7]。

局优化拼接算法的算法流程图如图 4 所示。

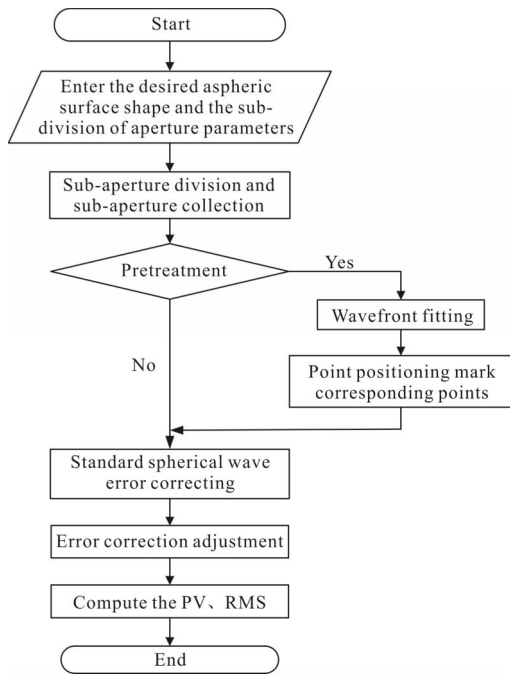


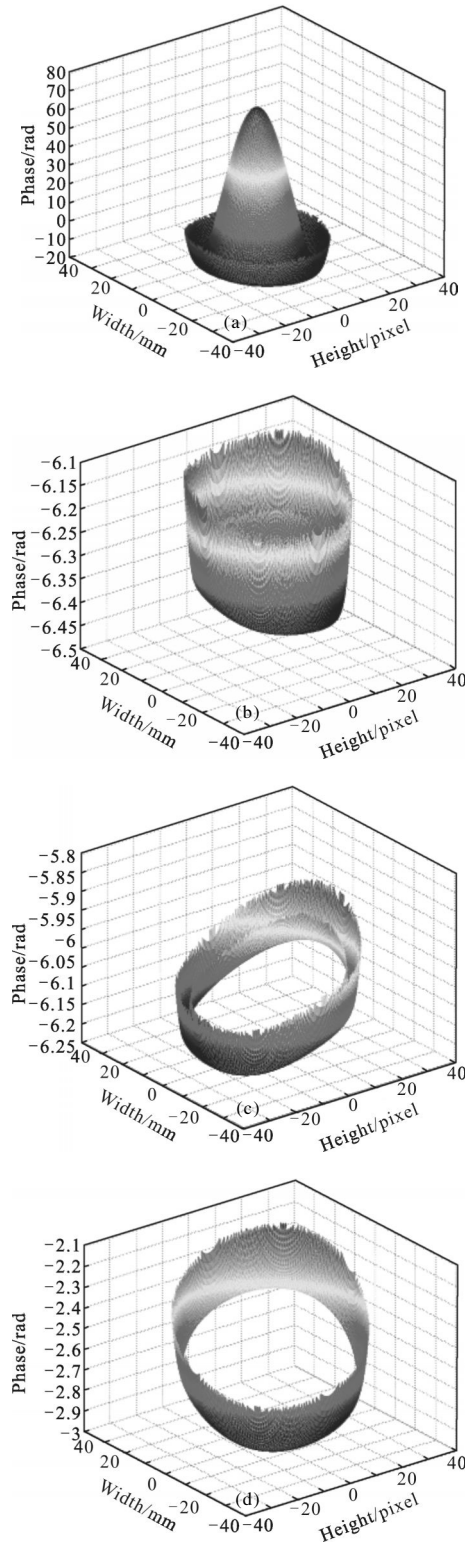
图 4 算法流程图

Fig.4 Algorithm flow chart

软件仿真得到的基准环形子孔径的波像差解包相位, 如图 5 所示, 图(a)~(e)为孔孔径 1~5。

相位理想的检测试验没有噪声影响, 考虑到实

际检测情况, 将不可避免随机噪声误差的产生。因此实际的面形检测过程中要考虑噪声对面型误差检测的影响。噪声主要影响的是环形子孔径拼接过程中的系数矩阵, 改变系数矩阵的条件数, 使拼接矩阵线性变差, 致使拼接结果收敛困难。因此合理的设置



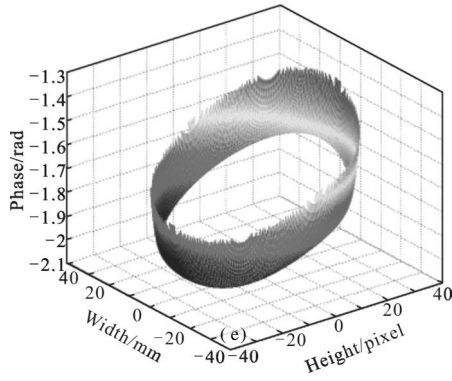


图 5 各环形子孔径的波像差相位分布图

Fig.5 Phase distribution of wavefront aberration of each annulus subaperture

随机噪声是保证算法收敛的关键，验证环形子孔径拼接算法的准确性。

设置的随机噪声服从二维标准正态分布，其概率密度分布函数为：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (8)$$

式中： $\mu=0, \sigma=1$ 。

随机噪声的设置直接影响到拼接算法的收敛性，故设置噪声强度约为干涉光强峰值的 1/20，生成的随机噪声矩阵图像如图 6 所示。

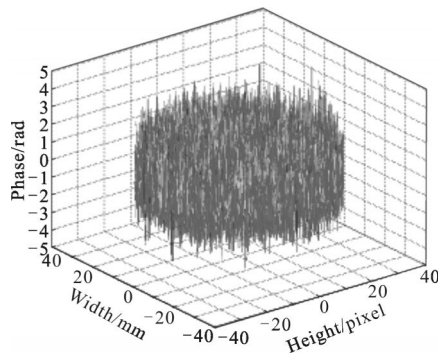


图 6 随机噪声相位分布

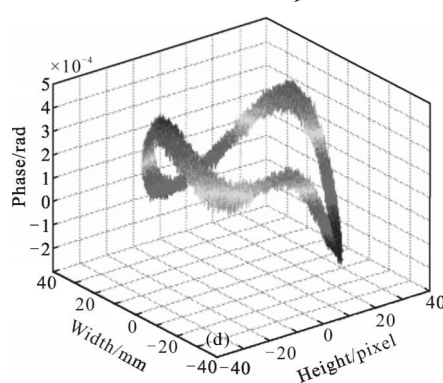
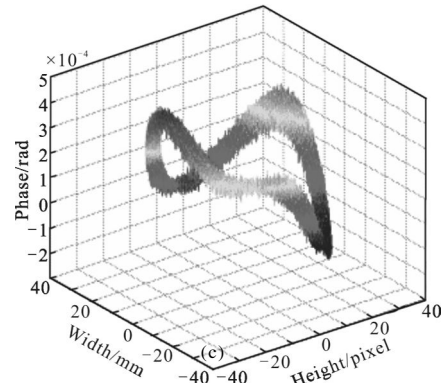
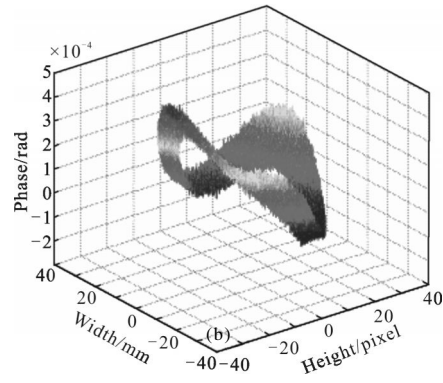
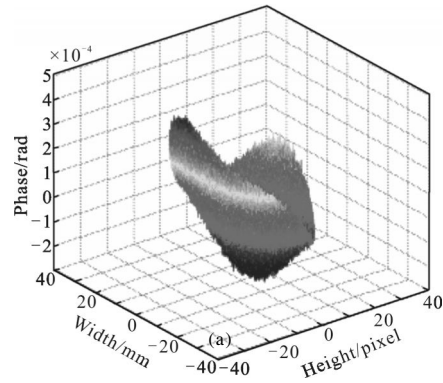
Fig.6 Phase distribution of random noise

在检测过程中，将随机噪声加入到各环形子孔径的相位分布中，如图 7 所示。

使用整体优化拼接算法拼接带有随机误差的各环带解包相位，得到的各环形子孔径相对于基准子孔径的调整误差拟合系数，其与设置的调整误差对比如表 1 所示。整体优化拼接算法在噪声环境下的拟合量与设置量基本一致，调整误差系数的拟合精度可达到 10^{-7} 。

通过全局优化拼接算法得到的拼接拟合后面形误差与全孔径波像差对比如图 8 所示。

原始数据的 PV 值为 0.5789λ ，RMS 值为 0.0987λ ，拼接后全孔径数据 PV 值为 0.5940λ ，RMS 值为 0.1034λ 。可以得出拼接后的全孔径相位图与原始波



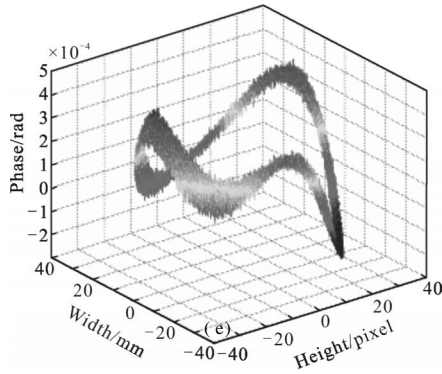


图 7 加入随机噪声后的环形子孔径解包相位图

Fig.7 Phase unfold distribution of five sub-apertures with additional noise

表 1 拼接算法拟合系数

Tab.1 Fitting coefficient of splicing algorithm

Sub-aperture		X tilt	Y tilt	Defocused	Translation
1 and 2	Settings	2×10^{-4}	3×10^{-4}	5×10^{-3}	4×10^{-3}
	Fittings	2.00×10^{-4}	2.99×10^{-4}	4.97×10^{-3}	-2.41×10^{-3}
1 and 3	Settings	6×10^{-4}	2×10^{-4}	3×10^{-3}	9×10^{-3}
	Fittings	5.99×10^{-4}	1.98×10^{-4}	3.00×10^{-3}	-7.62×10^{-3}
1 and 4	Settings	7×10^{-4}	8×10^{-4}	8×10^{-3}	7×10^{-3}
	Fittings	6.99×10^{-4}	7.97×10^{-4}	8.00×10^{-3}	-5.42×10^{-3}
1 and 5	Settings	9×10^{-4}	2×10^{-4}	8×10^{-3}	3×10^{-3}
	Fittings	9.00×10^{-4}	1.96×10^{-4}	7.98×10^{-3}	-6.42×10^{-3}

面是一致的。二者 PV 和 RMS 差值分别为 $0.015 1\lambda$ 、 $0.004 7\lambda$ 。全局优化拼接算法的残差 PV 和 RMS 由下公式得出：

$$\Delta W_{(PV)} = \Delta W_{\max} - \Delta W_{\min} = 0.043 5\lambda$$

$$\Delta W_{(RMS)} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (\Delta W_i - \overline{\Delta W})^2 \right]^{1/2} = 0.005 2$$

$$PV = 0.043 5\lambda$$

$$RMS = 0.005 2\lambda$$

比较分析可得，拼接后的全孔径数据与测得数据有微小差别，证实了该拼接算法的准确性。尽管在此次模拟中仅仅使用 5 个子孔径就可以覆盖全口径面形，该拼接算法同样适用于更大口径保形头罩非球面的拼接检测。

对于 127 mm 口径的保形光学头罩进行不同口径拼接验证性试验。为了比较不同口径头罩对拼接试验的影响，采取同样面型精度、口径为 127 mm 的保形光学头罩进行拼接试验。在原始数据的基础上进行等比例缩放，得到相同的 PV 值 $0.578 9\lambda$ ，RMS

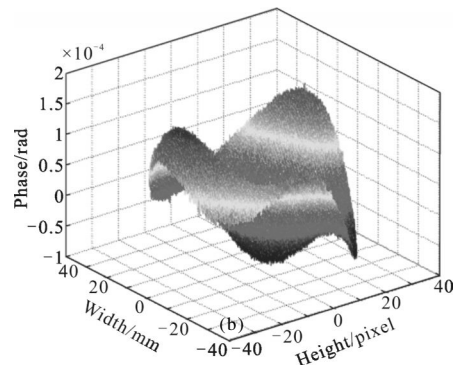
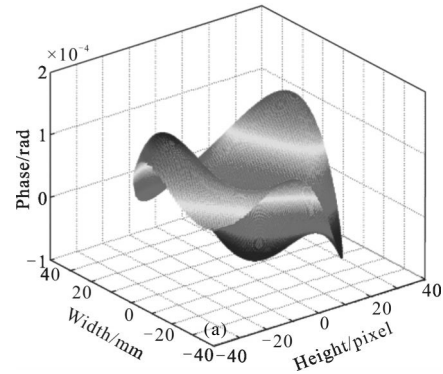


图 8 全孔径波像差与拼接波像差

Fig.8 Full aperture waveform aberration and stitching waveform aberration

值为 $0.098 7\lambda$ ，以环形子孔径的干涉条纹边缘密度恰好使 CCD 不发生欠采样的边缘位置作为子孔径的边境位置为原则进行子孔径划分。应用全局优化拼接算法得到的全孔径拼接数据 PV 值为 $0.597 2\lambda$ ，RMS 值为 $0.107 5\lambda$ 。可以得出拼接后的全孔径相位图与原始波面是一致的。二者 PV 和 RMS 差值分别为 $0.018 3\lambda$ 、 $0.008 8\lambda$ 。全局优化拼接算法的残差 $PV = 0.048 7\lambda$ 和 $RMS = 0.006 4\lambda$ 。对比不同口径保形光学头罩拼接精度如表 2 所示。

表 2 不同口径头罩子孔径拼接精度

Tab.2 Stitching accuracy of different aperture dome

Diameter	100 mm	127 mm
Stitching PV	$0.594 0\lambda$	$0.597 2\lambda$
Stitching RMS	$0.103 4\lambda$	$0.107 5\lambda$
Residuals PV	$0.004 35\lambda$	$0.048 7\lambda$
Residuals RMS	$0.005 2\lambda$	$0.006 4\lambda$

随着保形头罩口径的增大，对于拼接试验精度会略有下降，但并不影响拼接结果。该算法对于更大口径的保形头罩同样适用。

4 结论

环形子孔径拼接方法可以有效地增加干涉仪的动态量程。文中采取整体最优化拼接模式,拼接算法是基于整体最小二乘法整体优化全孔径区域,有效抑制了拼接误差的传递。数学模型清晰,数据处理方法简单是这种算法的优势。该算法拼接得到全孔径数据与测得数据对比证实拼接算法是有效性和稳定性。但本环形拼接算法仅仅增大干涉仪的动态量程,其无法提高干涉仪横向分辨率和测量范围,并且该算法只能检测具有旋转对称性质的非球面。圆形子孔径拼接可以有效扩大检测范围,可以对平面、球面以及非球面面型进行高精度测量,但其控制设备要求更复杂更困难。然而最终检测精度取决于一系列因素,包括子孔径定位精度、数据处理与采样精度、各种各样行的环境影响。目前对高陡度特性的非球面研究还处于初级阶段,检测算法有待开发,机械运动精度有待提高,检测机构设计有待优化,进一步提高检测精度、检测效率和检测稳定性。这些不足会在后续研究中进一步完善,希望高陡度非球面检测技

术得到进一步发展。

参考文献:

- [1] Lin P C, Chen Y C, Lee C M, et al. A subaperture stitching algorithm for aspheric surfaces[C]//SPIE, 2011, 5(14):15-17.
- [2] Zhang Pengfei, Zhao Hong, Liu Bincai, et al. Simple method for the implementation of subaperture stitching interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50 (9): 35-36.(in Chinese)
- [3] Zhao Wenzhe, Qin Shiyin. Multiply kernels matching for precise television guidance[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50 (8):1-3. (in Chinese)
- [4] Liang C W, Chen Y A, Lee C C. The off-axis alignment of an asphere by a Fizeau interferomete[C]//SPIE, 2011, 4(7): 83-84.
- [5] W Lyda. Automated multiscale measurement system for MEMS characterization[C]//SPIE, 2010, 38(3): 77-78.
- [6] Chen S, Liao W, Dai Y, et al. Self-calibrated sub-aperture stitching test of hyper-hemispheres using latitude and longitude coordinates[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(33):17-25.
- [7] Lin Po-Chih, ChenYi-Chun, Lee Chung-Min, et al. A subaperture stitching algorithm for aspheric surfaces [C]// SPIE, 2011, 8082: 80821G-1.