

文章编号 1004-924X(2007)02-0192-07

子孔径拼接干涉法检测非球面

王孝坤^{1,2}, 王丽辉^{1,2}, 张学军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 研究生院, 北京 100039)

摘要:介绍了子孔径拼接干涉检测非球面的理论和方法,分析了其基本原理,基于齐次坐标变换、最小二乘法 and Zernike 多项式拟合建立了一种合理的拼接算法和数学模型。对一抛物面镜进行了五个子孔径的计算机模拟拼接实验,拼接前后全口径面形误差分布是一致的,其 PV 值和 RMS 值的偏差分别为 -0.0092λ 和 0.0013λ ;全口径相位分布的 PV 值和 RMS 值的相对误差分别为 -0.39% 和 0.44% 。实验结果表明,利用子孔径拼接技术不需要零位补偿就能实现对较大口径非球面的测量。

关键词:子孔径拼接;干涉测量;非球面;齐次坐标变换;最小二乘拟合

中图分类号:TQ171.65;O436.1 **文献标识码:**A

Testing asphere by subaperture stitching interferometric method

WANG Xiao-kun^{1,2}, WANG Li-hui^{1,2}, ZHANG Xue-jun¹

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

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A subaperture stitching interferometric method was introduced, and the basic principle was analyzed. A reasonable mathematical model and a effective stitching algorithm were established based on homogeneous coordinates transformation, least square method and Zernike polynomial fitting. Meanwhile the computer simulation experiment was carried on with five subapertures for a parabolic mirror, the phase map after stitching is consistent to the inputed map, the difference of the PV and RMS of the full aperture surface error is -0.0092λ and 0.0013λ after stitching, and the relative error of PV and RMS is -0.39% and 0.44% , respectively. The results show that the method is feasible and accurate, and can test large aspheric surfaces without compensators and other auxiliary null optics.

Key words: subaperture stitching; interferometry; aspheric surface; homogeneous coordinates transformation; least square fitting

1 引言

在光学系统和光学仪器中利用非球面元件,能矫正像差,改善像质,而且可以减小光学系统的尺寸和重量,因此非球面光学元件越来越多的被用于航空、航天、天文光学、国防军事等高科技领域^[1-4]。但是,随着科学技术的不断发展,人们对非球面元件的制造提出了更高要求:口径越来越大,面形精度越来越高。制造高精度、大口径的非球面需要与之相应的高精度检测方法和设备。

由于干涉检验具有高分辨、高精度、高灵敏度、重复性好等优点,因此该技术已成为检测光学面形的主要手段。但是对于非球面尤其是大偏离量的非球面,都需要专门设计和定做补偿器或借助 CGH 等辅助元件^[2,3],通过零位补偿才能对其进行干涉测量,这不仅提高了成本、延长了工期,而且辅助元件将会引入一定的制造误差和装调误差。同时现代光学系统,尤其是高功率激光系统(如 NIF、ICF、Laser MegaJoule 等)^[7,8]都要考虑到光学元件亚毫米量级的波前信息,特别是中高频相位信息。检测大尺寸、高精度的光学元件需要相应的大口径干涉仪,但是大口径干涉仪只能探测到元件上数毫米的波前信息,更高频的信息则被系统截止了。所以现有大口径相移干涉仪的分辨率还不能满足中高频段分析的要求。

利用子孔径拼接技术,可以拓展干涉仪测试非球面的横向和纵向动态范围,使干涉仪测量光学元件的口径和相对孔径都有了很大的增加。因此,将干涉检验技术与子孔径拼接技术相结合将会提供一种高效、快捷的检测非球面方法,而且可以获得中高频的相位信息,提高测量空间分辨率,降低成本。

2 子孔径拼接干涉的基本原理

由图 1 知,与传统干涉仪相比,子孔径测试干涉仪的测量范围有了明显的扩大^[9],其基本原理如图 2 所示。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和相应的标准镜头并

决定子孔径的大小及数目。通过计算机精确控制,移动、旋转、摆动干涉仪或被检非球面,使干涉仪出射波面法线与被测区域法线近似重合,这样入射到被测区域的光线就能够沿原路返回。用干涉方法分别测量整个大口径光学非球面元件的一部分圆形区域(称之为子孔径),并使得各个子孔径间稍有重叠。利用综合优化全局拼接的方式求得各个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相对定位误差,并利用齐次坐标变换把所有的子孔径测量数据统一到同样的参考面上,然后再从有统一基准的子孔径中采集多个位相数据,并将其在全口径上进行 Zernike 多项式拟合,从而可以得到整个面形的信息。

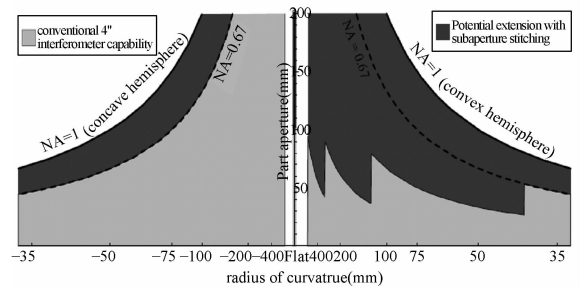


图 1 子孔径测试干涉仪与传统干涉仪测量范围的比较
Fig. 1 Testable capabilities of a commercial 4-in. interferometer and the expanded capability of a stitching interferometer

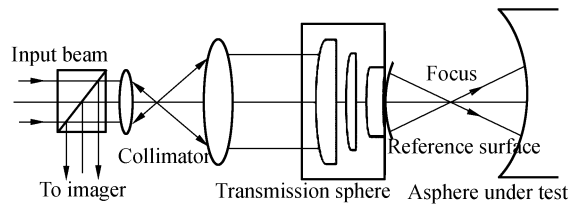


图 2 子孔径拼接检测非球面的实验装置示意图
Fig. 2 Sketch of setup for testing asphere by subaperture stitching method

3 子孔径拼接的数学模型和拼接算法

3.1 子孔径数据的采集和坐标变换

如图 3 所示, ω_1, ω_2 分别表示小口径干涉仪

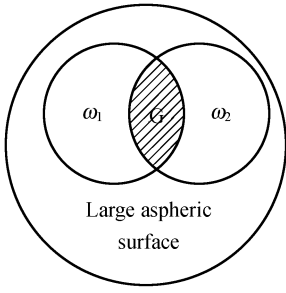


图 3 子孔径示意图

Fig. 3 Two subapertures with a common area

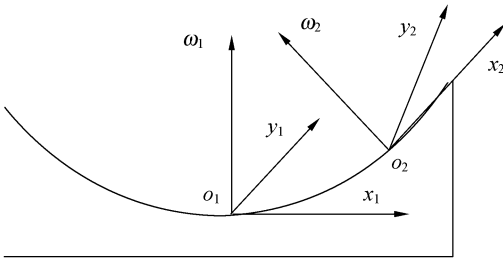


图 4 子孔径坐标示意图

Fig. 4 Coordinate of subapertures

在大口径非球面上进行的两次检测区域,它们之间有一定面积的重叠(图中阴影部分的区域),每一个区域对应的相位分布分别用 $\omega_1(x_1, y_1)$ 和 $\omega_2(x_2, y_2)$ 表示(由 Zygo 数字干涉仪可以直接测得),由于两个子孔径坐标系之间存在相对平移和倾斜,为了实现拼接,必须把两个坐标系统一起来,建立如图 4 所示的坐标系(坐标原点分别位于各子孔径的几何中心),并假定坐标系 2 相对坐标系 1 理论上的平移量为 p_x, p_y, p_w ,绕 x, y, w 轴的转动分别为 α, β 和 γ (以逆时针转为正),根据齐次坐标变换理论^[10,11],对于重叠区域内的任一点 G 有:

$$(x_1, y_1, \omega_1, 1) = (x_2, y_2, \omega_2, 1) \cdot T, \quad (1)$$

其中行矩阵 $(x_1, y_1, \omega_1, 1)$ 为点 G 在坐标系 $(O_1, x_1, y_1, \omega_1)$ 中的齐次坐标表示, $(x_2, y_2, \omega_2, 1)$ 为点 G 在坐标系 $(O_2, x_2, y_2, \omega_2)$ 中的齐次坐标表示。变换矩阵 T 为旋转矩阵 R 与平移矩阵 P 的乘积,即:

$$T = R \cdot P, \quad (2)$$

其中 R 和 P 的具体表示如下:

$$R = R_x \cdot R_y \cdot R_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ P_x & P_y & P_w & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

所以可得:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ P_x & P_y & P_w & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

3.2 两个子孔径的拼接

在实际测量过程中, $\alpha, \beta, \gamma, p_x, p_y, p_w$ 会引入定位误差 $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma, \Delta x, \Delta y$ 和 Δw 。 $\Delta x, \Delta y$ 很容

易控制在几微米以内,而且待测非球面一般可以认定为光滑连续的曲面,这对 $\Delta x, \Delta y$ 更加不敏感,所以可以忽略不计(此定位误差与具体的非球

面有关,对于中等精度、浅度的非球面,此误差一般可以不考虑)。轴向定位误差 Δw 可控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以内,但是它检测结果有很大的影响,必

须考虑。一般待测元件是回转对称的,无需绕 W 轴转动,所以可令 $\gamma=0, \Delta\gamma=0$ 。因此实际的 T 可表达为下式:

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\beta+\Delta\beta) & 0 & -\sin(\beta+\Delta\beta) & 0 \\ \sin(\alpha+\Delta\alpha)\sin(\beta+\Delta\beta) & \cos(\alpha+\Delta\alpha) & \sin(\alpha+\Delta\alpha)\cos(\beta+\Delta\beta) & 0 \\ \cos(\alpha+\Delta\alpha)\sin(\beta+\Delta\beta) & -\sin(\alpha+\Delta\alpha) & \cos(\alpha+\Delta\alpha)\cos(\beta+\Delta\beta) & 0 \\ P_x & P_y & P_w + \Delta w & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

此外 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 可控制在 $10''$ 以内,因此 $\sin(\Delta\alpha) \approx \Delta\alpha, \cos(\Delta\alpha) \approx 1, \sin^2\Delta\alpha \approx 0, \sin(\Delta\beta) \approx \Delta\beta, \cos$

$(\Delta\beta) \approx 1, \sin^2(\Delta\beta) \approx 0, \sin(\Delta\alpha) \cdot \sin(\Delta\beta) \approx 0$, 经三角函数运算和化简可得:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\beta - \Delta\beta\sin\beta & 0 & -\sin\beta - \Delta\beta\cos\beta & 0 \\ \sin\alpha\sin\beta + \Delta\alpha\cos\alpha\sin\beta + \Delta\beta\sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha - \Delta\alpha\sin\alpha & \sin\alpha\cos\beta - \Delta\beta\sin\alpha\sin\beta + \Delta\alpha\cos\alpha\cos\beta & 0 \\ \cos\alpha\sin\beta - \Delta\alpha\sin\alpha\sin\beta + \Delta\beta\cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha - \Delta\alpha\cos\alpha & \cos\alpha\cos\beta - \Delta\beta\cos\alpha\sin\beta - \Delta\alpha\sin\alpha\cos\beta & 0 \\ P_x & P_y & P_w + \Delta w & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

因此若令 $\cos\alpha\cos(\beta y_2) - \sin\alpha\cos(\beta w_2) = s, -\cos(\beta x_2) - \sin\alpha\sin(\beta y_2) - \cos\alpha\sin(\beta w_2) = t, -\sin(\beta x_2) + \sin\alpha\cos(\beta y_2) + \cos\alpha\cos(\beta w_2) + P_w = v$, 则由式(1)、(7)可得:

$$w_1 = \Delta\alpha s + \Delta\beta t + \Delta w + v, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\beta \\ \Delta w \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \sum ss & \sum st & \sum s \\ \sum ts & \sum tt & \sum t \\ \sum s & \sum t & n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum s(w_1 - v) \\ \sum t(w_1 - v) \\ \sum (w_1 - v) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

实际检测过程中 $\alpha, \beta, P_x, P_y, P_w$ 都是已知的(即 s, t, v 已知),所以只要在重叠区域采集 n 个数据点,利用最小二乘法求得式(9)就能够得到未知量 $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta w$ 的最优解。将求解的系数代入式(6)并利用式(1)就可以将任意两个子孔径的坐标和位相分布统一起来,这就实现了非球面上任意两个子孔径的拼接。

假定系统高阶误差可以忽略,则第 i 个子孔径波前的实际相位测量值可以表示为:

$$w_i(x_i, y_i) = f_i(x_i, y_i) - s_i(x_i, y_i, R_i) + e_i(x_i, y_i) + \epsilon_i(x_i, y_i), \quad (10)$$

式中 $f_i(x_i, y_i)$ 为以 (o_i, x_i, y_i, w_i) 为参考坐标系的非

球面方程, $s_i(x_i, y_i, R_i)$ 为曲率半径为 R_i 的参考球面波前方程, $e_i(x_i, y_i)$ 表示待测非球面表面加工误差, $\epsilon_i(x_i, y_i)$ 为相对基准子孔径的机构定位误差。将 $f_i(x_i, y_i) - s_i(x_i, y_i, R_i)$ 代入式(10)就可以消除每次测量使用不同曲率半径参考球面波前对测量的影响。因此可得仅具有装调误差和表面误差的子孔径相位分布函数:

$$w_i'(x_i, y_i) = e_i(x_i, y_i) + \epsilon_i(x_i, y_i), \quad (11)$$

由式(8)可得:

$$\epsilon_i(x_i, y_i) = \Delta\alpha s_i + \Delta\beta t_i + \Delta w_i, \quad (12)$$

因此将式(12)代入式(11)就可以求得待测元件的表面加工误差分布。

3.3 多个子孔径的综合优化拼接

反复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,但是这样会带来误差传递和累积。因此,必须对此进行综合优化处理。以任一子孔径为基准(为了便于分析和处理,一般情况选取所测元件的中心区域为基准),假设其它子孔径相对基准子孔径的拼接因子分别为 $\Delta\alpha_i, \Delta\beta_i, \Delta w_i$, 所有重叠区域数目为 N , 在每个重叠区域的采样点数为 M , 则对所有重叠区域进行数据采集使得其残差平方和为最小可得:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [\Delta\alpha_i s_{ij} + \Delta\beta_i t_{ij} + \Delta w_i + v_{ij} - w_{ij}]^2 = \min, \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma^2}{\partial \Delta \alpha_i} = 0 \\ \frac{\partial \sigma^2}{\partial \Delta \beta_i} = 0 \\ \frac{\partial \sigma^2}{\partial \Delta w_i} = 0 \end{cases}, \quad (14)$$

利用最小二乘法,使式(13)对 $\Delta \alpha_i$ 、 $\Delta \beta_i$ 、 Δw 分别求偏导,并使其偏导为零即式(14)就可求得相应的拼接因子,从而能够获得以基准子孔径坐标系为参考的相位值和非球面表面误差分布。

3.4 全孔径面形数据的重构

如果子孔径覆盖整个被检元件,利用综合优化的拼接模式同时求得各个子孔径的机构调整误差,并通过齐次坐标变换,把所有子孔径数据都校正统一后,就可以获得整个面形的位相分布,从而实现全孔径的检测。但是在实际检测大口径、超大口径的非球面时,要使子孔径覆盖整个表面,所需的子孔径数目将达几十个甚至上百个,这将带来更多的误差传递和累积,而且增加了测量时间,会引入更多的随机误差,同时也使数据处理变得更为复杂。

经过抛光后的非球面元件通常是光滑连续的,因此在实际检测中,可对整个元件表面进行若干个子孔径测量(通常以非球面的中心区域为基准,依次向四周取其它子孔径),利用齐次坐标变换把所有子孔径的相位数据统一到相同的基准上,然后再从有相同参考的子孔径中采集多个相位数据,并将其进行全孔径 Zernike 多项式拟合,即得:

$$\sum_{i=1}^N [\omega_i(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^k a_j u_j(x_i, y_i)]^2 = \min, \quad (15)$$

式中 $\omega_i(x_i, y_i)$ 为从已校正统一过的子孔径中采集的相位数据(仅具有装调误差和加工误差),总的采样点为 N , $u_j(x_i, y_i)$ 为全口径 Zernike 多项式, a_j 为其系数。由广义逆矩阵理论可以求解得:

$$a = (u^T u)^{-1} u^T \omega, \quad (16)$$

其前四项分别对应平移、 x 方向倾斜、 y 方向倾斜和离焦,可以将其作为整个系统的调整误差,由此将 ω 减去该误差就可得到整个非球面的表面误差分布,从而完成对整个非球面形的检测。(为了避免因直接构造法方程组而引入计算误差,可以通过 Gram-Schmidt 正交法或应用 Householder 变换来求解拟合系数)^[12,13]。

4 计算机模拟实验和精度分析

为了验证以上数学模型和拼接算法的可行性,进行了计算机模拟实验。对一 $\Phi 200$ mm,顶点曲率半径 R 为 500 mm 的抛物面光学元件进行了拼接检测。

(1)先用计算机模拟产生一全孔径面形误差分布 w (用 Zernike 多项式前 36 项表示)如图 5 所示,其 PV 值和 RMS 值分别为 2.3804λ 和 0.29848λ ($\lambda = 632.8$ nm)。

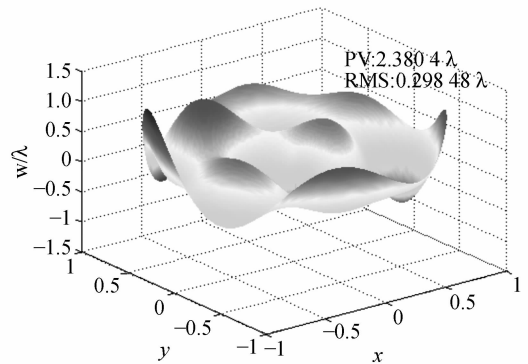


图 5 计算机模拟拼接前全孔径面形误差分布三维图
Fig. 5 3-D surface error map of full aperture before stitching

(2)对全孔径进行 5 个子孔径的模拟拼接实验,子孔径半径 $r = 50$ mm,子孔径分布如图 6 所示。其中取中心区域的子孔径 ω_0 为基准,其它 4 个子孔径与其都有一定的重叠区域,它们相对基准子孔径的坐标变换量和定位误差见表 1(下标为定位误差)。

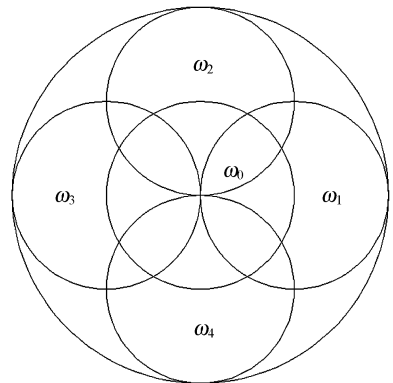


图 6 子孔径分布示意图

Fig. 6 Distribution of subapertures

表 1 子孔径输入和拟合的调整系数对照表

Tab.1 Compare input data with data after stitching

	subaperture	α	β	P_w/mm	P_x/mm	P_y/mm
Input data	1	$0^{\circ}_{+5''}$	$-5.710\ 6^{\circ}_{-6''}$	$2.5_{-0.007}$	50	0
	2	$5.710\ 6^{\circ}_{-4''}$	$0^{\circ}_{+7''}$	$2.5_{+0.006}$	0	50
	3	$0^{\circ}_{+3''}$	$5.710\ 6^{\circ}_{+5''}$	$2.5_{-0.004}$	-50	0
	4	$-5.710\ 6^{\circ}_{-6''}$	$0^{\circ}_{-8''}$	$2.5_{+0.005}$	0	-50
	subaperture	α'	β'	$P_{w'}/\text{mm}$		
Data	1	$0^{\circ}_{+5''}$	$-5.710\ 6^{\circ}_{-5.9405''}$	$2.5_{-0.006\ 937\ 9}$		
after	2	$5.710\ 6^{\circ}_{-3.960\ 4''}$	$0^{\circ}_{+6.930\ 7''}$	$2.5_{+0.005\ 945\ 4}$		
fitting	3	$0^{\circ}_{+3''}$	$5.710\ 6^{\circ}_{+4.950\ 5''}$	$2.5_{-0.003\ 966\ 4}$		
	4	$-5.710\ 6^{\circ}_{-5.940\ 6''}$	$0^{\circ}_{-7.920\ 7''}$	$2.5_{+0.004\ 943\ 3}$		

(3)对重叠区域数据进行最小二乘拟合求得各个子孔径相对基准子孔径的调整系数,从表 1 可比较其输入的装调系数与拟合求解的系数偏差非常小。

(4)将所有子孔径的数据减去各自的定位误差,然后再从校正统一的位相分布中采集数据,在全孔径上进行 Zernike 多项式拟合,得到拼接后的全孔径面形误差分布 w' 如图 7 所示,其 PV 值为 $2.371\ 2\ \lambda$,RMS 值为 $0.299\ 79\ \lambda$ 。可以看出拟合后的全孔径面形与拼接前的全孔径面形分布是非常接近的,其 PV 值和 RMS 值的偏差分别为 $-0.009\ 2\ \lambda$ 和 $0.001\ 3\ \lambda$ 。

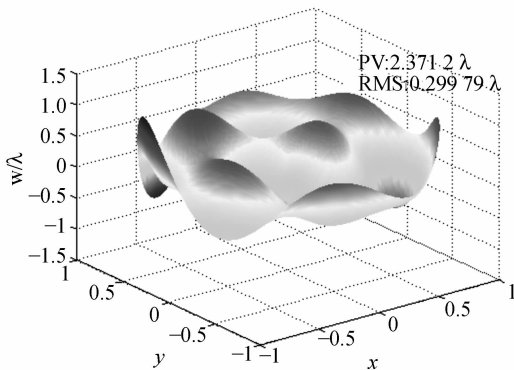


图 7 拼接后的全孔径面形误差分布三维图

Fig. 7 3-D surface error map of full aperture after stitching

(5)为了进一步评价该模型的可行性,求得重构全孔径相位与输入全孔径相位的 PV 值和 RMS 值的相对误差分别为:

$$\Delta_{R(PV)} = \frac{\Delta(PV)}{PV} \times 100\% = \frac{-0.009\ 2}{2.380\ 4} \times 100\% = -0.39\% \quad (17)$$

$$\Delta_{R(RMS)} = \frac{\Delta(RMS)}{RMS} \times 100\% = \frac{0.001\ 3}{0.298\ 48} \times 100\% = 0.44\% \quad (18)$$

由上分析可得,拼接前后全孔径面形分布的偏差很小,说明该算法和模型是可行的。

5 结 论

本文的子孔径拼接检测技术采用了综合优化的拼接方式,有效地扼制了误差传递和累积,一般抛光后的非球面元件可以看作是连续光滑的,这就无需子孔径覆盖整个非球面,比子孔径扫描法^[14,15]缩短测试时间,但是对于非光滑连续的曲面,应该使子孔径覆盖整个待测元件,否则由于采样不均匀,拟合误差会很大。从计算机模拟结果可以看出,拼接前后全孔径相位分布的 PV 值和 RMS 值的偏差分别优于 $\lambda/100$ 和 $\lambda/700$,说明该技术是切实可行的。该技术具有很宽的适用范围,不仅可以检测大口径、大相对孔径的非球面,对于高陡度的非球面甚至离轴的非球面也同样有效。此外,若将该技术与补偿技术联用,可降低补偿器的设计难度^[16]。同时,利用子孔径测试技术能够测量非球面上任意一处的面形精度,并且可以用于大口径表面的精密装调^[17],从而为超精加工和检测提供了有效的手段。

参考文献:

- [1] 张学军,张云峰,余景池,等. FSGJ-1 非球面自动加工及在线检测系统[J]. 光学 精密工程,1997,5(2):70-76.
ZHANG X J,ZHANG Y F,YU J CH,*et al.*. FSGJ-1 aspheres automatic fabrication and on-line testing system[J].
Opt. Precision Eng.,1997,5(2):70-76. (in Chinese)
- [2] 郭培基,余景池. 用校正法提高补偿器检测的精度[J]. 光学 精密工程,2006,14(2):202-206.
GUO P J,YU J CH. Improving precision of null lens method with correction technique[J]. *Opt. Precision Eng.*,
2006,14(2):202-206. (in Chinese)
- [3] 薛栋林,郑立功,王淑平,等. 离轴二次非球面补偿检验计算机辅助调整技术研究[J]. 光学 精密工程,2006,14
(3):380-385.
XUE D L,ZHENG L G,WANG SH P,*et al.*. Research of off-axis conic asphere null testing using computer-aided
alignment method[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(3):380-385. (in Chinese)
- [4] 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.
WANG X K,ZHANG X J,WANG L H,*et al.*. Mathematical model and simulation for testing aspheric surface by
annular subaperture stitching interferometry[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(5):527-532. (in Chinese)
- [5] 卢振武,刘华,李凤有. 利用曲面计算全息图进行非球面检测[J]. 光学 精密工程,2004,12(6):555-559.
LU ZH W,LIU H,LI F Y. Aspheric surface testing with CGH on curved surface[J]. *Opt. Precision Eng.*,
2004,12(6):555-559. (in Chinese)
- [6] 郭培基,余景池,孙侠菲. 一种大数值孔径小非球面检测用补偿器设计[J]. 光学 精密工程,2002,10(5):518-522.
GUO P J,YU J C,SUN X F. Null lens design for small aspherical surface with large NA[J]. *Opt. Precision Eng.*,
2002,10(5):518-522. (in Chinese)
- [7] AIKENS D M, WOLFE R. The use PSD function in specifying optics for the NIF[J]. *SPIE*,1995,2576: 281-292.
- [8] MICHAEL B. Stitching interferometry: how and why it works[J]. *SPIE*,1999,3739: 259-273.
- [9] MARC T. Subaperture metrology technologies extend capabilities in optics[J]. *SPIE*,2005,59650B-1-59650B-11.
- [10] 朱华统,杨元喜,吕志平,等. GPS 坐标系的变换[M]. 北京:测绘出版社,1994.
ZHU H T, YANG Y X, LV ZH P,*et al.*. *Coordinate transformation of GPS* [M]. Beijing: Mapping Press,
1994.
- [11] 陈明仪,吴德柱,程维,等. 用条纹图形拼接法测量三维大物体面形[J]. 光学学报,1998,18(1):74-79.
CHEN M Y,WU D ZH,CHEN W,*et al.*. Fringe-pattern connection method for shape measurement of 3-D large
objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998,18(1):74-79. (in Chinese)
- [12] 鄢静舟,雷凡. 用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J]. 光学 精密工程,1999,7(5):119-128.
YAN J ZH, LEI F. Algorithms for wavefront fitting using Zernike polynomial[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7
(5):119-128. (in Chinese)
- [13] D. Malacara. *Optical shop testing*[M]. J. Wiley& Sons, New York,1992.
- [14] MAURO M. Testing aspheric surfaces using multiple annular interferograms[J]. *Opt. Eng.*,1993,32(5):1073-1079.
- [15] PAULE M, JON F, GREG F,*et al.*. High precision metrology of domes and aspheric optics[J]. *SPIE*,2005,5786:
113-121.
- [16] LIU H L, ZHU Q D. Design on novel part-compensating lens used in aspheric testing[J]. *SPIE*,2003, 5253:480-484.
- [17] O'DONOHUE S, DEVRIES G, MURPHY P,*et al.*. New methods for calibrating systematic errors in interfero-
metric measurements[J]. *SPIE*,2005,58690T-1-58690T-9.

作者简介:王孝坤(1980—),男,江苏丹阳人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事光学超
精加工和检测技术研究。E-mail:jimwzk@sohu.com