

文章编号: 0253-2239(2009)11-3082-06

环形子孔径拼接干涉检测非球面的建模与实验

王月珠¹ 田 义^{1*} 李洪玉² 鞠有伦¹

(¹ 哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)
² 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 为实现球面波干涉检测非球面镜片, 得到非球面镜片的完整面形信息, 提出了基于标记的 Givens 变换, 实现环形子孔径的精确定位和消旋转的处理。利用求解目标函数最小值的方法精确求解拟合波面以对子孔径数据进行处理, 建立了全局优化拼接数学模型。对外径 150 mm, 内径 100 mm 的抛物面镜片进行三孔径拼接检测实验, 均方根值为 0.053λ 。对比补偿器法得到的全口径干涉检测结果均方根值 $\Delta W_{\text{rms}} = 0.052 \lambda$, 相对误差为 1.92%。实验结果表明, 该方法稳定可靠, 降低了传统的环形子孔径拼接干涉检测方法中对导轨的高精度要求。

关键词 光学测量; 非球面镜; 子孔径; 目标函数; 拼接技术

中图分类号 TQ171.65 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092911.3082

Modeling and Experiment of Testing Asphere by Annular Subaperture Stitching Interferometer

Wang Yuezhu¹ Tian Yi¹ Li Hongyu² Ju Youlun¹

(¹ National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Photoelectron, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
² Space Optical Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract In order to obtain the whole aspheric lens' surface information, measurement of aspheric optical components is implemented by using spheric wave interferometry. Problems of precise location and removing relative rotation are resolved by the Givens transform of markers' position. Each subaperture's data is processed by the best fitting wave front which is the solution of the least object function value. Global optimization stitching model is established. A parabolic mirror of 150 mm in outer diameter, 100 mm in inner diameter was used in three annular subapertures stitching experiment, the obtained root mean square (RMS) is 0.053λ . Compared with full caliber interference measurement results obtained by compensator method, $\Delta W_{\text{rms}} = 0.052 \lambda$, the relative error of RMS is 1.92%. Experimental results indicate that the approach reduces the requirements of high-precision rail in traditional annular subaperture stitching interference measurement.

Key words optical measurement; aspherics; subaperture; object function; stitching technology

1 引 言

随着天文学、空间光学、地基探测等学科的发展, 对非球面的加工精度提出了更高的要求^[1~4]。非球面的加工比较困难, 作为对加工过程中面形质量评定与反馈的干涉检测技术对加工的精度起到了至关重要的作用^[5]。传统的检测手段有补偿器法、

计算全息法^[6]和自准直法, 这些方法都需要制造辅助元件如补偿器、全息板、反射镜, 辅助元件不但会引入检测误差, 而且还导致加工周期延长^[7]。1982年, C. J. Kim^[8]提出了子孔径拼接干涉检测技术。2003年, 美国 QED 技术公司^[4,5]研制成功了自动拼接干涉仪。2006年, Michael Bray 等^[5]提出

收稿日期: 2008-12-30; 收到修改稿日期: 2009-02-13

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 王月珠(1942—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术和固体激光器等方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: ty.hit.edu@163.com

了基于菲索干涉仪和拼接技术的光学平面的图像测量技术。国内逐步开始对子孔径拼接测试技术进行研究,并搭建了子孔径拼接实验系统^[9~11],且该技术用来检验了某源卫星的 RC 光学系统^[12,13]。

目前的环形子孔径拼接干涉检测技术发展还不成熟,主要原因是对于基于计算机控制的高精度的导轨进行子孔径的定位^[14,15],导轨的移动和定位精度直接影响着拼接的效果。本文建立的环形子孔径拼接检测非球面模型利用子孔径数据中的标记定位,并运用求解目标函数最小值的方法计算出最佳拟合波面以完成子孔径数据的处理。该算法不依赖于导轨精度,对实验设备要求不高。在子孔径拼接时采用全局优化算法,充分利用各子孔径之间的重叠信息求解拼接系数而达到拼接全口径面形的目的,并通过实验进行了验证。

2 环形子孔径拼接检测原理

建立干涉仪简化模型,干涉仪等效为:光学系统、CCD、电学及计算机处理系统。光学系统发出标准球面波,并能将接收到的载有非球面面形信息的光波转换为平面波,由光学系统出射的平面波被 CCD 接收转换成电学信号,最后进入电学及计算机处理系统。

实验检测原理如图 1 所示。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稀疏,边缘部分的条纹密集,通过移相技术获得中心区域的面形信息。通过沿光轴方向移动干涉仪或被检非球面,改变它们的距离 d 以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(环形子孔径),分别测量各个环形子孔径区域,并使得各个子孔径间有一定的重叠^[7]。由于环形子孔径检测的本质是以球面波为基准检测非球面,因此测得的子孔径数据要减去非球面相对于球面的拟合波面,获得此子孔径的真实面形信息,再利用重叠区域面形信息的一致性,利用全局优化拼接的方式求得各个子孔径的拼接系数,从而把所有的子孔径测量数据拼接成全口径面形。

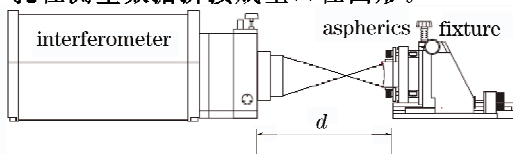


图 1 检测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring principle

3 环形子孔径拼接的数学模型和拼接算法

3.1 标记点定位与消旋转

子孔径定位与消旋转的目的是把子孔径统一到同一坐标系中,同时确定重叠区域。以两孔径的重叠区域含三个标记为例说明标记点定位与消旋转的原理。设测量的子孔径编号分别为 1,2。理想情况下测量得到的两子孔径的标记点应重合。读取子孔径 1,2 的数据并假设子孔径 1 为基准子孔径。分别搜索子孔径 1、子孔径 2 的标记所分布像素在各自数据中的坐标位置。对搜索到的每个标记的像素坐标取平均值。分别计算出子孔径 1 与子孔径 2 中三个标记构成三角形的重心坐标,使这两个三角形重心重合并令此坐标为 $(0,0)$ 点。在子孔径 1 中的一个标记点坐标是 (x_0, y_0) ,子孔径 2 中对应的标记点坐标为 (x'_0, y'_0) ,通过

$$\begin{cases} \cos \varphi = (x_0 x'_0 + y_0 y'_0) / (x_0^2 + y_0^2) \\ \sin \varphi = (-x_0 y'_0 + y_0 x'_0) / (x_0^2 + y_0^2) \end{cases} \quad (1)$$

计算出相对旋转角 φ 。

分别计算出三个标记点的相对旋转角度 φ 最后取均值 $\bar{\varphi}$ 。对子孔径 2 的所有坐标点 (x, y) 进行 Givens 平面旋转变换得到相对子孔径 1 的坐标值:

$$[x', y']^T = \mathbf{R}(\bar{\varphi}) [x, y]^T, \quad (2)$$

其中二阶矩阵

$$\mathbf{R}(\bar{\varphi}) = \begin{bmatrix} \cos \bar{\varphi} & \sin \bar{\varphi} \\ -\sin \bar{\varphi} & \cos \bar{\varphi} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

标记点分布要求:任意两个子孔径之间的重叠区域中至少含有三个且不能分布在同一直线上的标记点。

3.2 子孔径非球面的面形计算

非球面为回转对称面,其方程可由子午面上的线方程表征: $x^2 = 2R_0 z - k z^2$,其中 $k = 1 - e^2$, e 为偏心率。如图 2 所示,当 $e^2 = 1$ 时为抛物面,干涉仪发出的球面波球心与抛物面焦点重合时 $O_c = R_0$,此时球面与抛物面相切于原点,并产生零级干涉条纹。干涉仪延轴向移动 Δz ,球心移至 O'_c ,零级条纹随之移动至 W_0 ,此时球面波半径 $R'_0 = \sqrt{R_0^2 + (\Delta z)^2}$ ^[12],易知 W_0 点坐标为 $(\Delta x, \Delta z)$ 。设 $O'_c W$ 交球面与 W 坐标为 (x, z) ,延长线交抛物面与 W' 坐标为 (x', z') 。由几何关系推得

$$\begin{cases} x / \sqrt{R_0^2 - x^2} = [x' / R_0 + \Delta z - (x'^2 / 2R_0)] \\ \Delta z = (\Delta x)^2 / 2R_0 \end{cases}, \quad (4)$$

解得

$$x' = 1 \pm \sqrt{1 - 4I^2 FQ} / (2IQ). \quad (5)$$

其中 $I = x / \sqrt{R_0^2 - x^2}$, $F = R_0 + \Delta z$, $Q = -\frac{1}{2R_0}$.

$$\begin{cases} R'_0 = \sqrt{[R_0 - k(R_0 + \Delta z - R'_0)]^2 + (\Delta x)^2}, \\ x / \sqrt{R_0^2 - x^2} = x' / R_0 + \Delta z - \alpha(x'), \\ \sqrt{R_0^2 - (\Delta x)^2} = R_0 + \Delta z - \alpha(\Delta x), \end{cases} \quad (6)$$

同理当 $e^2 \neq 1$ 时,有

联立解得

$$R'_0 = \{k[R_0 - k\alpha(\Delta x)] + \sqrt{k^2[R_0 - k\alpha(\Delta x)]^2 - (1 + 2k)\beta}\} / (1 + 2k), \quad (7)$$

$$x' = (I\gamma k^2 \pm I \sqrt{k^2 R_0^2 + I^2 k R_0^2 - I^2 k^3 \gamma^2} / (k^2 + I^2 k), \quad (8)$$

其中 $\alpha(x) = R_0 - \sqrt{R_0^2 - kx^2} / k$, $\beta = -(1 + k)^2 (\Delta x)^2 + 2R_0 k\alpha(\Delta x) - R_0^2 - k^2 \alpha[(\Delta x)^2]$,

$\gamma = \sqrt{R_0^2 - (\Delta x)^2} - \sqrt{R_0^2 + (\Delta x)^2} / k$.

此时检测到的 $W(x, z)$ 处的理想相位值为 $\Delta W(x) = O'_c W' - O'_c W$, 即

$$\Delta W(x) = \sqrt{x'^2 + (x'/I)^2} - R'_0, \quad (9)$$

用 $\sqrt{x^2 + y^2}$ 替换 x 即得到在 XYZ 坐标系下的回转拟合波面 $\Delta W(x, y, \Delta x)$ 。但是只能测得大于干涉仪分辨极限的一个环带的的数据即一个子孔径。 ΔW 是坐标和 Δx 的函数,传统的环形子孔径拼接法基于精密步进工作台及数字驱动系统^[7,14,15],精密控制干涉仪与被检工件的移动距离 Δz 利用(4)式计算得到 Δx ,再计算出检测结果与 $\Delta W(x, y, \Delta x)$ 的差就是实际的非球面面形数据,而采用目标函数法可以充分利用测量得到的带标记的子孔径数据推出 Δx ,从而在没有高精度导航的情况下仍可得到满意的结果。

$y_n, \Delta x$) 与 CCD 上的与之对应的像素点的数据 $\Delta W'$ 相对应,其中 (x_m, y_n) 为 XOY 面离散的坐标对应于 $xO'y$ 面的坐标 (m, n) 。理想情况下还应满足

$$\Delta W(x_m, y_n, \Delta x) = \Delta W'[k(m - m_0), k(n - n_0)]. \quad (10)$$

由于非球面上的标记之间的距离精确可测,根据测量得到的子孔径数据中标记的像素之间的距离可精确计算出 k 。子午面中 Δx 对应于 CCD 中的 $O'P_0$, 即 $\Delta x = k \times O'P_0$,在 $xO'y$ 平面上则对应半径为 r 的一个圆且 $\Delta x = kr$ 。实际测量的数据并不严格满足(7)式,并且 r , 中心像素坐标 (m_0, n_0) 可根据子孔径数据得到搜索域 $[r_{\min}, r_{\max}]$, $[m_{0\min}, m_{0\max}]$, $[n_{0\min}, n_{0\max}]$ 。为了精确求出 r 和 (m_0, n_0) 建立目标函数:

$$E = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \{ \Delta W(x_m, y_n, kr) - \Delta W'[k(m - m_0), k(n - n_0)] \}^2. \quad (11)$$

在搜索域内利用直接搜索算法使得目标函数最小即可得到精确的 r , 环带中心像素坐标 (m_0, n_0) 。计算出最佳拟合波面 $\Delta W(x_m, y_n, \Delta x)$, 代入下式得到的 W_{real} 就是真实的非球面面形值:

$$W_{\text{real}}(m - m_0, n - n_0) = \Delta W'[k(m - m_0), k(n - n_0)] - \Delta W(x_m, y_n, kr). \quad (12)$$

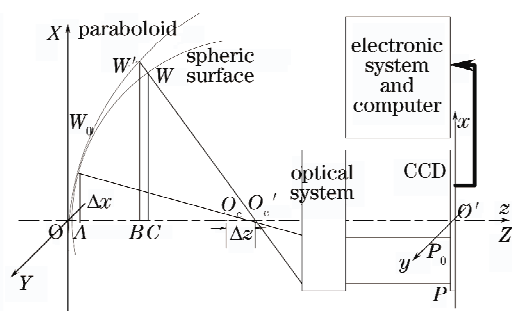


图 2 拟合波面计算原理图

Fig. 2 Schematic diagram of computing fitting wave front principle

CCD 中的像素 P 点对应球面波上 W 点且它们的坐标值呈线性关系,设比例系数为 k 。设 CCD 像素数为 $M \times N$,测到子孔径数据的中心即 O' 点的像素坐标设为 (m_0, n_0) 。 P 点像素坐标为 $(m - m_0, n - n_0)$, 其中 m 是 CCD 中的第 m 行, n 是第 n 列。 W 点在 XOY 平面坐标对应的拟合波面数据 $\Delta W(x_m,$

3.3 全局优化拼接算法

设子孔径数为 N , 每个子孔径区域记为 S_i , ($i = 1, 2, \dots, N$), 任意两个重叠的子孔径形成一个重叠区,总的重叠数为 M 。设干涉仪的基准平面和光轴构成全孔径坐标系,在此坐标系下,实验得到的第 i 个子孔径的面形数据 $W_i(x, y)$ 可表示为

$$W_i(x, y) = a_i x + b_i y + c_i + W_{0i}(x, y), \quad (13)$$

式中 a_i, b_i, c_i 分别表示第 i 个子孔径相对于全孔径坐标 x, y 方向的倾斜系数和 z 方向的平移系数。 $W_{oi}(x, y)$ 为第 i 个子孔径消倾斜后的面形数据。设第 m, n 子孔径构成第 j 个重叠区 $S_m \cap S_n$, 对此区域的数据应满足

$$W_{0mj}(x, y) = W_{0nj}(x, y), \quad (14)$$

$$W_{mj}(x, y) - W_{nj}(x, y) = (a_{mj} - a_{nj})x + (b_{mj} - b_{nj})y + (c_{mj} - c_{nj}). \quad (15)$$

由于测量中存在误差, 故对所有重叠区中的测量值不会完全满足上式, 定义子孔径目标函数 V 表示所有重叠区域的残差平方和:

$$V = \sum_{j=1}^M \iint [W_{mj}(x, y) - W_{nj}(x, y) - (a_{mj} - a_{nj})x - (b_{mj} - b_{nj})y - (c_{mj} - c_{nj})]^2 dx dy. \quad (16)$$

寻求使该目标函数达到最小的拼接系数, 减小随机误差和系统误差, 就可以实现光学元件的高精度检测^[9~11]。为寻求目标函数的最优解, 对各系数进行偏微分运算得到一组方程组, 求解此方程组得到矩阵表达式为

$$\mathbf{A}[\mathbf{E}_1 \cdots \mathbf{E}_N]^T = \mathbf{B}, \quad (17)$$

其中 $\mathbf{E}_i = [a_i, b_i, c_i]^T$, ($i = 1, 2, \dots, N$)。令矩阵 α_i , ($i = 1, 2, \dots, N$) 定义如下:

$$\alpha_i = [0 \cdots \mathbf{I}_i \cdots 0]^T, \quad (18)$$

其中 \mathbf{I}_i 为 3×3 单位矩阵。 α_i 具有维数 $3N \times 3$ 。对于由第 m, n 构成的第 j 个重叠区域存在相应的相关矩阵

$$\mathbf{A}_{mj} = \begin{bmatrix} \sum xx & \sum xy & \sum x \\ \sum yx & \sum yy & \sum y \\ \sum x & \sum y & n_{mj} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{mj} = \begin{bmatrix} \sum xl_{mj} \\ \sum yl_{mj} \\ \sum l_{mj} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中 $l_{mj} = W_{mj}(x, y) - W_{nj}(x, y)$, n_{mj} 为重叠区域采样点个数。于是矩阵 \mathbf{A}, \mathbf{B} 可以表示为

$$\mathbf{A} = \sum_{j=1}^M (\alpha_{mj} \mathbf{A}_{mj} \alpha_{mj}^T + \alpha_{nj} \mathbf{A}_{mj} \alpha_{nj}^T + \alpha_{mj} \mathbf{A}_{mj} \alpha_{nj}^T + \alpha_{nj} \mathbf{A}_{mj} \alpha_{mj}^T), \quad \mathbf{B} = \sum_{j=1}^M (\alpha_{mj} - \alpha_{nj}) \mathbf{B}_{mj}. \quad (20)$$

因此, 利用所有重叠区域的测量数据就可得到矩阵 \mathbf{A} 及向量 \mathbf{B} , 从而求解矩阵方程得到拼接误差向量 \mathbf{E} 。实际情况下 \mathbf{A} 是近奇异的, 直接求解的误差比较大^[10]。根据广义逆理论, 实验中采用求广义逆代替逆矩阵得到拼接系数向量。

4 测量实验

实验中被检测元件为微晶材料的环形抛物面镜, 抛物面方程: $y^2 = 1414.54x, k = -1, R_0 = 707.27$ 。其外径 150 mm, 内径 100 mm。Zygo 干涉仪镜头 F 数为 3.3, $\lambda = 632.8$ nm。根据标记点定位算法中对标记点分布的要求, 以中心为基准在镜片上做十二个标记, 分布如图 3 所示。三个子孔径分别编码为: Sub1, Sub2, Sub3, 可全部覆盖整个镜片。实验中各子孔径相互重叠区域百分比大于 70%, 占全口径的面积大于 60%, 保证了拼接的精度^[9, 10]。用于干涉仪的 MatroPro 软件对各子孔径数据进行消平移、倾斜、离焦, 并且去除最外圈和最内圈测量误差较大的数据, 子孔径的实验检测与波面拟合结果如图 4 所示。其中图 4(a)~图 4(c)分别为 Sub1, Sub2, Sub3 的实验检测结果, 图 4(d)~图 4(f)为与之对应的用目标函数法求解的拟合波面。表 1 为求解的 r 和 (m_0, n_0) 及比例因子 k , 图 4(g)~图 4(i)为与之对应的经过(9)式计算得到的各子孔径面形值。其次利用拼接算法得到表 2 中的拼接系数完成全口径面形的拼接。经过消 piston, tilt 处理得到最终的全口径面形值如图 5 所示, 其峰谷(PV)值 $\Delta W_{pv} = 0.720 \lambda$, 均方根值 $\Delta W_{rms} = 0.053 \lambda$ 。与用补偿器法的到的全口径面形如图 6 所示, $\Delta W_{pv} = 0.629 \lambda, \Delta W_{rms} = 0.052 \lambda$ 对比, RMS 值相对误差为 1.92%。结果吻合很好, 证明了算法的有效性。

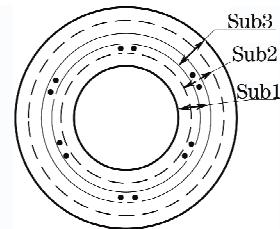


图 3 子孔径划分方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sub-aperture division mode

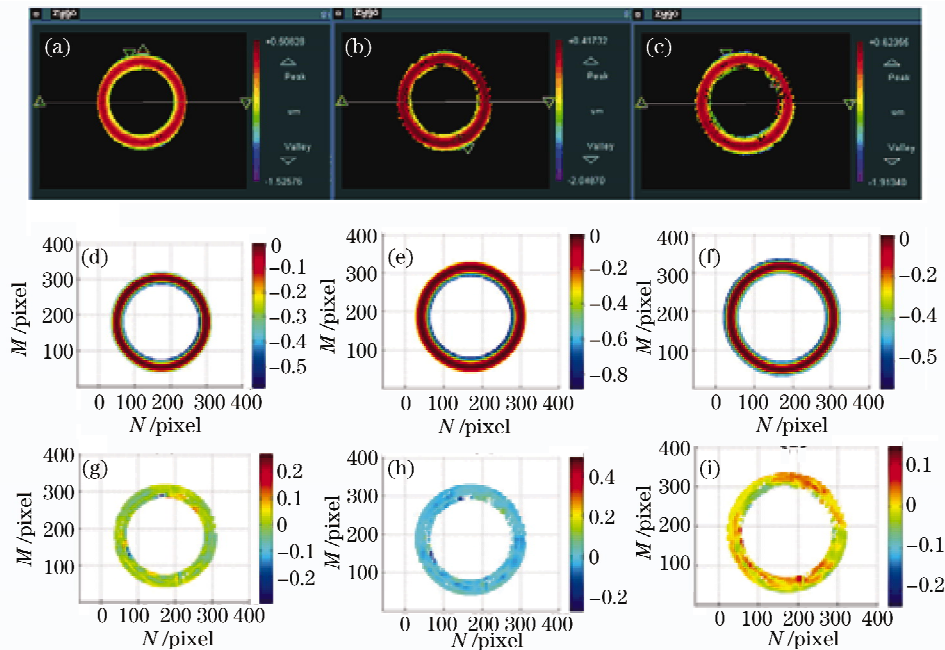


图 4 子孔径实验测量与波面拟合结果。(a)~(c) Sub1-3 实验检测结果; (d)~(f) 拟合波面; (g)~(i) 抛物面面形
 Fig. 4 Result of 9 sub-apertures measurement and wave front fitting. (a)~(c) Experiment results of Sub1-3; (d)~(f) fitting wave front; (g)~(i) surface shape of paraboloid

表 1 目标函数法求解结果

Table 1 Results of solving object function

code	r/pixel	m_0/pixel	n_0/pixel	k
Sub1	125	180	174	0.53
Sub2	130	186	170	0.53
Sub3	134	184	172	0.53

表 2 拼接系数

Table 2 Stitching coefficients

code	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$c/\mu\text{m}$
Sub1	-0.00001324	-0.00000517	0.00354134
Sub2	0.00001346	-0.00000812	-0.00138367
Sub3	-0.00000022	0.00001329	-0.00215767

频分量多、面形信息丰富,因此比补偿器法得到的结果偏大。



图 6 补偿器法全口径实验测量结果
 Fig. 6 Result of full aperture experimental by compensator

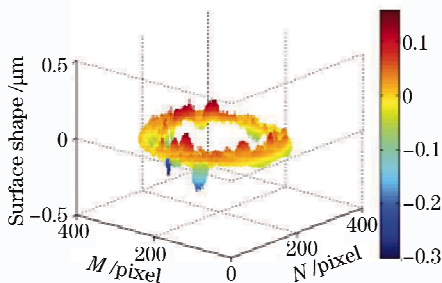


图 5 全口径拼接结果

Fig. 5 Result of full-aperture stitching experiment

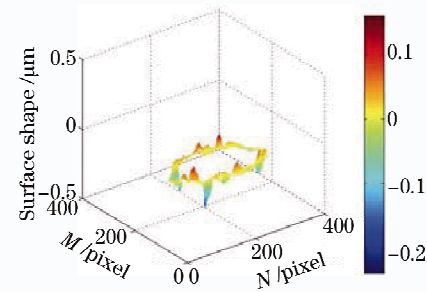


图 7 Matlab 绘制的补偿器法全口径实验测量结果
 Fig. 7 Result of full aperture experimental by compensator drawn by Matlab

为了便于面形的对比,用 Matlab 将补偿器法测得的全口径结果绘出如图 7。比较图 5 与图 7,拼接得到的全口径面形与补偿器测得的全口径面形面貌上基本一致,由于子孔径拼接法获得的数据量大、高

5 结 论

基于标记定位的搜索目标函数最小值,进而求

解子孔径非球面面形算法降低了实际测量中对导轨精度的要求。采用全局优化的方法充分利用了所有子孔径的重叠信息求解得到了精确的拼接系数。子孔径拼接实验结果与补偿器法测得的全口径面形的均方根值相对误差为 1.92%。此方法具有检测精度高,对设备要求简单,实用性强等诸多优点,为检测非球面光学镜片提供了一种可行的方法。

参 考 文 献

- Chen Jianping, Shen Lincheng. Model and control technology for machining large diameter optical aspheric mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1705~1709
陈建平,沈林成. 大口径非球面加工建模与控制技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1705~1709
- Cui Xiangqun, Gao Bilie, Wang Daxing *et al.*. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 402~407
崔向群,高必烈,汪达兴等. 一种大口径非球面度天文镜面磨制新技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 402~407
- Kan Shanshan, Huang Yu, Wang Shurong. Methodological disquisition of spherical fine metrical precision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 195~198
阚珊珊,黄煜,王淑荣. 高精度检测球面面形的研究方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 195~198
- Chen Shanyong, Dai Yifan, Xie Xuhui *et al.*. Approach to accuracy evaluation for subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 883~888
陈善勇,戴一帆,解旭辉等. 子孔径拼接干涉测量的精度估计方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 883~888
- Chen Shanyong. Geometrical Approach to Subaperture Stitching Interferometry for Aspheric Surfaces[D]. *Changsha: National University of Defense Technology*, 2006. 1~16
陈善勇. 非球面子孔径拼接干涉测量的几何方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006. 1~16
- Chang Jun, Li Fengyou, Weng Zhicheng *et al.*. Testing large convex aspherical surface with computer generated holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1266~1268
常军,李凤友,翁志成等. 用计算全息法检测大口径凸非球面的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1266~1268
- Wang Xiaokun, Zhang Xuejun, Wang Lihui *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
- Hou Xi, Wu Fan, Yang Li *et al.*. Experimental study on measurement of aspheric surface shape with complementary annular subaperture interferometric method[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(20): 12890~12899
- Zhang Rongzhu, Yang Chunlin, Shi Qikai *et al.*. Principle and accuracy of the stitching interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1241~1244
张蓉竹,杨春林,石琦凯等. 子孔径拼接干涉检测及其精度分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1241~1244
- Dong Jun, Zhang Rongzhu, Zhang Jun *et al.*. Effect of sampling number on the stitching interferometer[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(3): 37~38
董军,张蓉竹,张均等. 样本容量对子孔径拼接检测精度影响的分析[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(3): 37~38
- Hou Xi, Wu Fan, Yang Li *et al.*. Stitching algorithm for annular subaperture interferometry[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 211~214
- Ji Bo. Testing Asphere Optical Components by Subaperture Stitching Interferometer [D]. Nanjing: Nanjing University of science and technology, 2008. 12~29
季波. 子孔径拼接干涉检测非球面光学元件[D]. 南京:南京理工大学, 2008. 12~29
- Bai Jian, Cheng Shangyi, Yang Guoguang. Subaperture alignment technique for large aperture mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(7): 953~956
白剑,程上彝,杨国光. 大口径镜面的多孔径拼接技术[J]. *光学学报*, 1997, **17**(7): 953~956
- Wang Xiaokun, Wang Lihui, Yin Longhai *et al.*. Measurement of large aspheric surfaces by annular subaperture stitching interferometry[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 645~647
- Wang Xiaokun, Wang Lihui, Zhang Xuejun. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(2): 193~198
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): 193~198