

非球面非零位环形子孔径拼接干涉检测技术

张磊 田超 刘东* 师途 杨甬英 沈亦兵

(浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 提出了一种新型的非零位环形子孔径拼接干涉检测技术(NASSI)用以检测深度非球面面形误差。该方法结合了传统非零位干涉检测法与环形子孔径拼接法,采用部分零位镜替代了标准环形子孔径拼接干涉仪中的透射球面镜,产生非球面波前用以匹配被测面不同子孔径区域。该非球面波前比球面波前更加接近被测面的名义面形,使所需的子孔径数目大大减少。一方面增大了环带宽度和重叠区,提高了拼接精度;另一方面减少了各种误差累积次数。同时,配合基于系统建模的理论波前方法分别校正各个子孔径的回程误差,进一步提高了检测精度。对非球面度为 $25\ \mu\text{m}$ 的高次非球面的计算机仿真检测结果表明该方法具有很高的理论精度。针对口径 $101\ \text{mm}$ 的抛物面进行了实验检测,多次实验结果均与 Zygo[®] Verifire[™] Asphere 干涉仪检测结果一致,峰谷(PV)值误差优于 $\lambda/20$,均方根(RMS)值误差优于 $\lambda/100$,表明了 NASSI 方法的高精度与高重复性。

关键词 测量;深度非球面检测;非零位环形子孔径拼接;部分零位镜;子孔径数目;回程误差

中图分类号 TQ171.65 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0812003

Non-Null Annular Subaperture Stitching Interferometry for Aspheric Test

Zhang Lei Tian Chao Liu Dong Shi Tu Yang Yongying Shen Yibing

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A novel non-null annular subaperture stitching interferometry (NASSI) is proposed for steep aspheric test. It combines the non-null test and annular subaperture stitching method, in which a partial null lens is employed as an alternative to the transmission sphere, to generate aspherical wavefront as the reference. The aspherical wavefront has a better performance in matching the local slope of subapertures. This approach greatly reduces the subaperture number required to cover the full-aperture of test surface. On one hand, subapertures are broadened and thus the stitching accuracy increased. For another, accumulated error is decreased. Based on the system modeling, the retrace error can be corrected for each subaperture individually and the testing accuracy is further improved. A numerical simulation exhibits the high theoretical accuracy of the NASSI method, in which a high-order aspheric of $25\ \mu\text{m}$ asphericity is tested. Comparing experiments with Zygo[®] Verifire[™] Asphere interferometer for paraboloid, whose diameter is $101\ \text{mm}$, are performed. The peak-valley error is better than $\lambda/20$, the root-mean-square error is better than $\lambda/100$. The high accuracy and good repeatability of NASSI are presented.

Key words measurement; steep aspheric test; non-null annular subaperture stitching; partial null lens; subaperture number; retrace error

OCIS codes 120.6650; 120.3180; 120.3180; 220.1250

收稿日期: 2014-03-17; 收到修改稿日期: 2014-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(11275172)、中央高校基本科研业务费专项资金(2013QNA5006)、现代光学仪器国家重点实验室创新基金(MOI201208)

作者简介: 张磊(1987—),男,博士研究生,主要从事光学非球面精密检测方面的研究。

E-mail: zhangsuguan@126.com

导师简介: 杨甬英(1954—),女,教授,博士生导师,主要从事精密测试与计量技术、光电信息传感与纳米技术、气动光学及瞬态波前检测等方面的研究。E-mail: chuyyy@hzncnc.com

* 通信联系人。E-mail: liudongopt@zju.edu.cn

1 引 言

非球面面形精密检测一直存在技术难点,传统干涉检测受分辨率和口径限制,无法检测大口径深度非球面。20世纪80年代,子孔径拼接干涉检测技术(SSI)^[1-2]应运而生,通过将被测面或波前分割为不同的子孔径区域分别检测,克服了传统干涉仪的检测限制。其中,环形子孔径拼接干涉检测技术(ASSI)^[2-4]被广泛应用于检测旋转对称面(平面、球面及非球面)。即使对于非球面的检测,也不需要特定的零位补偿系统,而是采用透射球产生不同曲率半径的参考球面波,用来匹配被测面不同子孔径区域,再利用相应的拼接算法将每个子孔径的检测数据拼接得到全口径面形误差信息。Liu等^[3]最早提出了基于泽尼克圆形多项式的拼接算法。随后,Melozzi等^[5-6]分别提出了基于泽尼克环形多项式的逐次拼接法和全局拼接法,利用重叠区域校正子孔径之间的相对调整误差从而得到全口径数据。国内的子孔径拼接算法研究也取得了很大的进步,包括Hou等^[7]提出的基于泽尼克环形多项式的拼接算法和Chen等^[8]提出的迭代拼接算法等。这些拼接算法均是利用标准环形子孔径干涉仪产生参考球面波,得到各子孔径的返回波前数据进行全口径重构^[3-10]。当检测深度非球面时,其子孔径数目必然很多,一方面环带相应很窄,很难产生足够的重叠区域参与调整误差校正^[11],拼接精度和效率大大下降。另一方面,回程误差^[12]与随机误差随着子孔径数目增多会出现严重误差积累。这就意味着子孔径数目已经成为限制标准ASSI对深度非球面检测精度的重要因素。

本文提出的新型非零位环形子孔径拼接干涉(NASSI)检测技术,采用部分零位镜(PNL)^[13-15]取代了标准ASSI中的透射球(TS),产生不同的非球面波前匹配被测面不同环形区域。非球面波前可以更好地补偿被测非球面各子孔径区域的纵向法线像差,在检测深度非球面时大大减少了覆盖全口径所需的子孔径数目,一方面可以得到较大的子孔径宽度及重叠区宽度用以校正调整误差,另一方面减小了回程误差和随机噪声的积累次数。同时,配合基于系统建模的理论波前法^[16-17]有效地校正了各个子孔径的回程误差,进一步提高了整体检测精度。仿真和实验验证了NASSI的高检测精度和高重复性。

2 NASSI原理

基于移相泰曼格林干涉仪的NASSI系统原理

如图1所示,平行光向前传播至分光板处被分为两路光。一路向前传播至参考平面镜后原路返回作为参考波;另一路向前传播至PNL后先会聚后发散,发散光基本垂直被测非球面后返回,再次经过PNL后入形成检测波。二者在分光板处发生干涉,经成像镜成像于探测器处。沿系统光轴逐渐移动非球面改变其与PNL之间的距离 d_{pa} ,可以使得非球面不同环带返回波前斜率小于探测器的Nyquist采样频率而被分辨,直至这些环带区域覆盖整个非球面口径。其中,非球面的移动距离由位移测量干涉仪(DMI)精确测量。利用移相算法可从各个可分辨的环带干涉图中提取出各个环带子孔径的面形误差数据,校正各个子孔径的回程误差和调整误差后,拼接出全口径面形误差信息。

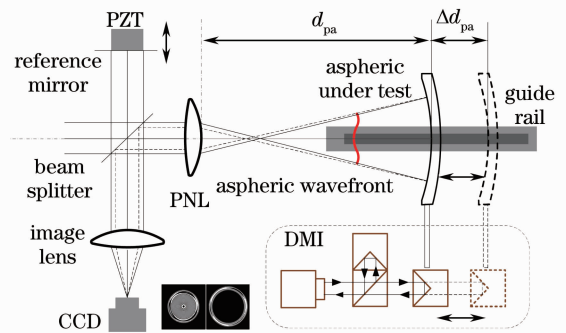


图1 NASSI检测非球面系统原理图

Fig. 1 Sketch of NASSI for aspheric

NASSI方法的特点之一在于利用PNL替代了标准ASSI系统中的TS,产生非球面波前作为参考波,比标准ASSI中的球面波更好地补偿了非球面不同环带的纵向法线像差,使得被测面环带返回的波前斜率相对较小,从而减少了覆盖全口径所需的子孔径数目,增加了子孔径宽度,有利于调整误差校正,同时减少了误差积累次数。另外,正由于PNL只需补偿非球面部分法线像差^[13],其结构相对零位补偿镜要简单,通常只采用单片式,避免了复杂的设计和装调过程。对于某些深度非球面,单片式PNL对全口径法线像差的补偿显得力有不足,因此,配合子孔径拼接方法,大大增强了系统的检测能力和动态范围。

NASSI方法的特点之二在于摒弃了传统的子孔径面形求取方法^[18-19],采用基于系统建模的理论波前法有效地校正各个子孔径的回程误差,获得精确的子孔径面形误差数据,进一步提高了整体拼检测精度。标准ASSI利用球面波作为参考波,求取每个环形子孔径的面形的方法可以表示为^[18-19]

$$W_{\text{asp}_i} = \frac{1}{2} \{ W_{\text{test}_i} - [f(x, y) - s(x, y, R_i)] \times \cos \alpha - \epsilon_i \}, \quad (1)$$

式中 W_{asp_i} 为第 i 个子孔径面形误差, W_{test_i} 为第 i 个子孔径检测波前, $f(x, y)$ 为非球面方程, $s(x, y, R_i)$ 为不同曲率半径的参考球面方程, $\cos \alpha$ 为非球面法线角 α 的余弦, $[f(x, y) - s(x, y, R_i)] \cos \alpha$ 表示参考球面波与被测面名义面形在非球面法线方向上的偏离, ϵ_i 为 i 个子孔径的调整误差。当被测面为深度非球面时, 参考球面波与被测面偏离较大, 经被测面反射的光线将不能沿原路返回, 其偏离程度随非球面度增大而增大, (1) 式中简单的“2 倍关系”已经不能获得准确的面形误差^[12]。另外, 在 NASSI 中, 经 PNL 发散的非球面波波前方程也不能用简单的数学方式表达。因此, 各个子孔径的回程误差并不能用简单的数学运算去除。Tian 等^[16]曾提出了基于系统建模的回程误差校正方法, 在校正参考路误差和忽略高阶误差后, 通过对系统理论模型的光线追迹得到

$$W_{\text{asp}} = \frac{1}{2} [(W_{\text{test}} - W'_{\text{test}}) - \epsilon], \quad (2)$$

式中 W_{test} 和 W'_{test} 分别为实验和仿真所得检测路返回波前。将该方法推广到各个环形子孔径, 则对第 i 个子孔径, 为

$$W_{\text{asp}_i} = \frac{1}{2} [(W_{\text{test}_i} - W'_{\text{test}_i}) - \epsilon_i]. \quad (3)$$

在被测面本身面形误差不大的情况下, 利用上述方法可精确地校正各个子孔径回程误差, 求取子孔径面形误差。但是, 要将各个子孔径面形误差拼接为全口径面形误差, 需将各个子孔径的数据统一到基准子孔径(一般取中心子孔径), 即校正各个子孔径对于基准子孔径的相对调整误差和基准子孔径的绝对调整误差。设第 i 个子孔径与第 $i-1$ 个的重叠区为 σ_i , 在重叠区内, 二者面形误差相同, 即 $W_{\text{asp}_i} = W_{\text{asp}_{i-1}}$, 代入(3)式可得

$$(W_{\text{test}_i} - W'_{\text{test}_i}) - \epsilon_i = (W_{\text{test}_{i-1}} - W'_{\text{test}_{i-1}}) - \epsilon_{i-1}. \quad (4)$$

利用最小二乘法, 使所有重叠区内相位的平方和最小, 构建目标函数

$$U = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{\sigma_i} [(W_{\text{test}_i} - W'_{\text{test}_i} - \epsilon_i) - (W_{\text{test}_{i-1}} - W'_{\text{test}_{i-1}} - \epsilon_{i-1})]^2 = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{\sigma_i} [(W_{\text{test}_i} - W'_{\text{test}_i}) - (W_{\text{test}_{i-1}} - W'_{\text{test}_{i-1}}) - \Delta\epsilon_i]^2, \quad (5)$$

式中 M 为总的子孔径数目, $\Delta\epsilon_i$ 为第 $i-1$ 与第 i 个子孔径之间的相对调整误差, 对(5)式中的未知量 $\Delta\epsilon_i$ 求导并令结果为零, 可求得各个子孔径的相对调整误差向量 $\Delta\epsilon_i$, 因此即可将不同子孔径内的测量数据统一到基准子孔径, 得到的全口径拼接数据 W_{stitch} 为

$$W_{\text{stitch}} = (W_{\text{test}_0} - W'_{\text{test}_0}) \oplus (W_{\text{test}_1} - W'_{\text{test}_1} - \Delta\epsilon_1) \oplus \cdots \oplus (W_{\text{test}_{M-1}} - W'_{\text{test}_{M-1}} - \Delta\epsilon_{M-1}), \quad (6)$$

式中 \oplus 表示拼接操作。实际操作中, 非重叠区数据可直接用作拼接数据, 在重叠区域, 由于测量噪声的存在, 即使消除了回程误差和相对调整误差, 重叠区域的数据也会有微小的差异, 可以取二者平均值作为拼接数据。当然, 在完成上述操作后, 整个拼接波前中仍然包含基准子孔径的调整误差 ϵ_0 , 对拼接波前进行拟合, 并去除调整误差(这里主要表现为一阶像差, 及拟合波前的前四项系数), 可得到最终全口径非球面面形误差 W_{asp} 为

$$W_{\text{asp}} = W_{\text{stitch}} - \sum_{i=1}^4 B_i Z_i, \quad (7)$$

式中 Z_i 和 B_i 分别表示 W_{stitch} 拟合后的第 i 项标准 Zernike 多项式及其系数。整个 NASSI 的检测流程如图 2 所示。

具体步骤如下:

1) 建立实验系统, 并根据实验系统参数, 在光线追迹软件 Zemax 中对 NASSI 进行理论系统建模;

2) 编写 Zemax 程序, 根据实验中探测器分辨率在系统理论模型中进行环带子孔径划分;

3) 根据建模中所得子孔径划分参数与位置参数, 将实验系统中非球面定位在与模型中一致的位置, 非球面位移量则可以由 DMI 精确控制;

4) 分别采集各个子孔径实际干涉图并解调出实际被测波前 W_{test_i} , 减去 Zemax 中各子孔径的理论被测波前 W'_{test_i} , 得到各个子孔径面形误差数据;

5) 利用(5)式求取各子孔径相对的相对基准子孔径的调整误差 $\Delta\epsilon_i$, 去除相对调整误差, 将所有子

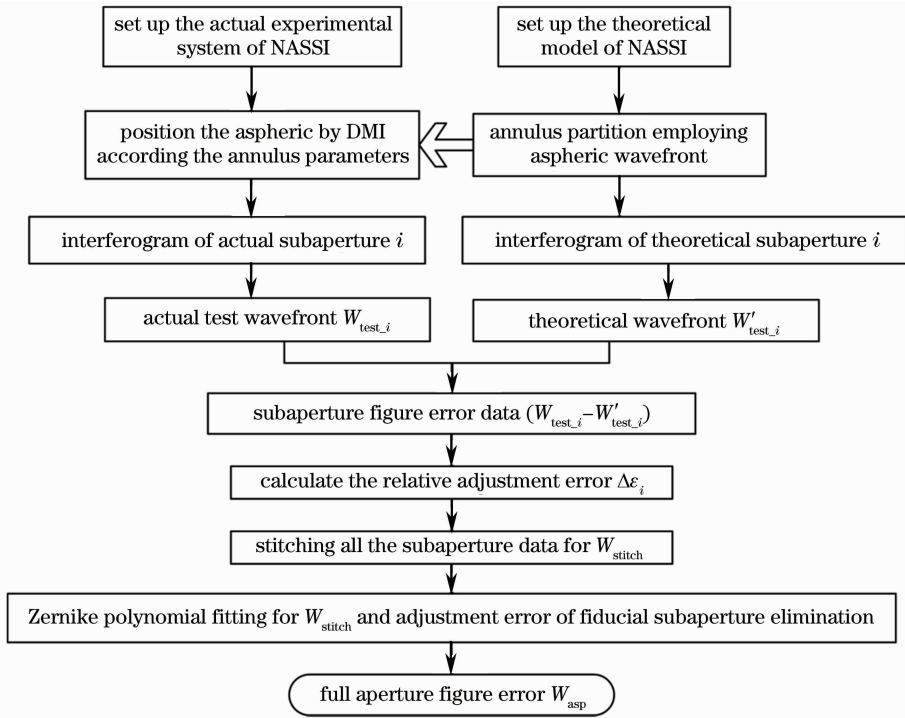


图 2 NASSI 的检测流程图

Fig. 2 Procedure of NASSI

孔径面形误差数据拼接成全口径面形误差数据 W_{stitch} ;

6) 将 W_{stitch} 拟合为 Zernike 多项式形式, 去除基准子孔径调整误差 (Zernike 多项式前四项 $\sum_{i=1}^4 B_i Z_i$), 得到以 Zernike 多项式表征的全口径面形误差 W_{asp} 。

3 NASSI 仿真

为了验证 NASSI 方法对深度非球面的检测能力与检测精度, 在光线追迹软件 Zemax 中对 NASSI 系统进行了仿真实验。其中被测面为一高次非球面凹面反射镜, 口径 100 mm, 对顶点球最大偏离 93 μm , 对最佳球最大偏离 25 μm , 其面形方程为

$$z = \frac{(x^2 + y^2)}{480} - 6 \times 10^{-9} (x^2 + y^2)^2 + \sum_{i=1}^{37} B_i Z_i(\rho, \theta), \quad (8)$$

式中 $\sum_{i=1}^{37} B_i Z_i(\rho, \theta)$ 是以 37 项泽尼克环形多项式表示的附加面形。为了避免对该高次非球面设计 PNL 的复杂过程, 建模中选择的 PNL 是针对上述非球面的二次曲面部分 (抛物面, $R=240 \text{ mm}$, $F=1.2$) 设计的, 具体参数如表 1 所示。使用该 PNL 对上述 (7) 式所示高次非球面补偿所得最佳干涉条纹峰谷

(PV) 值达 79λ , 普通的探测器 (如第 5 节中实验所用 $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$ 的 CCD) 难以分辨其干涉条纹。可见, 上述单片式部分补偿镜 (PCL) 虽然可以补偿 (7) 式中二次曲面部分, 但对 (7) 式定义的高次非球面的补偿效果不佳。因此, 需配合子孔径拼接方法建立 NASSI 系统以提高检测能力。

表 1 仿真部分补偿镜参数

Table 1 Parameters of simulated partial compensating lens

	Radius / mm	Thickness / mm	Glass	Diameter / mm
PCL	89.148	10.6	K9	45
	-50.678			45

首先建立 NASSI 理论仿真系统, 并根据被测面返回波前斜率进行环带子孔径划分。从 PNL 的出射光会聚点 (近似会聚) 移动非球面, 使之沿光轴方向逐渐远离 PNL。编写宏命令计算不同环带区域返回波前的最大斜率, 可以得到不同环带区域的可分辨干涉图 (以 $0.125\lambda/\text{pixel}$ 为波前斜率上限), 直到可分辨干涉图的环带区域覆盖全口径, 停止移动非球面。表 2 给出了该被测面具体环带划分参数, 其中相邻环带子孔径的重叠区均大于后一子孔径的 25%, 可充分满足相邻环带相对调整误差的校正要求^[11]。图 3(a) 为对应的子孔径返回波前 PV 值及对应波前斜率, 图 3(b) 为对应子孔径干涉图。从图 3 可以看出, 三个子孔径波前斜率均小于 $0.125\lambda/$

pixel,且各环带子孔径均具有一定宽度。进而,分别校正 NASSI 中三个子孔径的回程误差。对理论非球面(无面形误差)和真实非球面(含面形误差)进行系统建模,根据环带子孔径划分参数分别获得各个子孔径返回的理论波前($W'_{\text{test}_0}, W'_{\text{test}_1}, W'_{\text{test}_2}$)和真实波前($W_{\text{test}_0}, W_{\text{test}_1}, W_{\text{test}_2}$),根据第 2 节所述原理去除各环带子孔径回程误差,得到各子孔径波前数据。图 3(c)为对应子孔径校正回程误差后的子

孔径面形数据。

表 2 NASSI 中子孔径划分参数

Table 2 Parameters of subaperture partition in NASSI

Subaperture	d_{ps}/mm	Normalized zone
0	303.43	[0, 0.8]
1	304.32	[0.76, 0.92]
2	305.00	[0.88, 1]

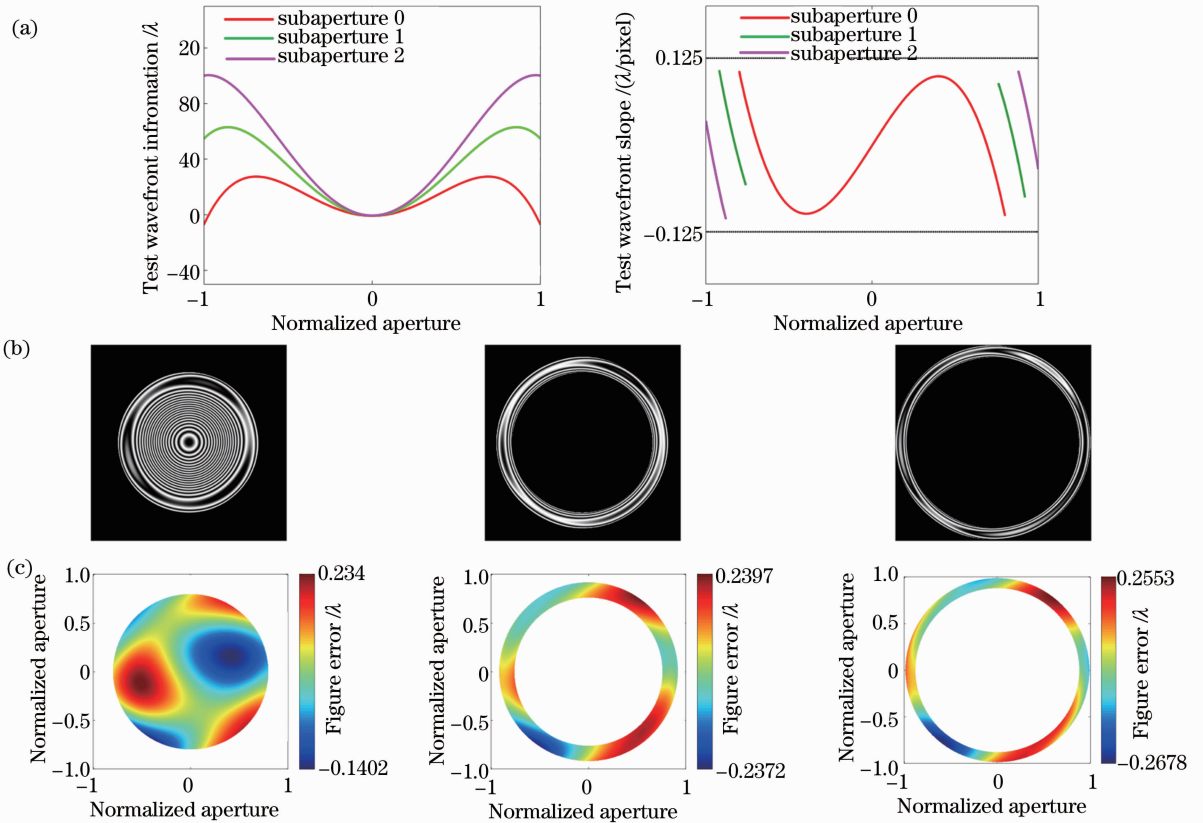


图 3 仿真中各个子孔径信息。(a)子孔径波前数据及波前斜率;(b)子孔径干涉图;(c)校正回程误差后子孔径的面形误差

Fig. 3 Subaperture information in simulation. (a) Subaperture wavefront information and its slope; (b) subaperture interferograms; (c) subaperture figure error after retrace error correction

最后,利用(5)式求取各子孔径之间的相对调整误差,将校正回程误差后的各个子孔径数据统一到基准子孔径,重构成全口径数据。为了仿真实验状况,在整个实验过程中为每个子孔径添加了一定的调整误差和随机噪声(随机噪声的标准差为被测面形误差的 1%)。为了校正基准子孔径的调整误差,拼接所得的全口径数据拟合为 Zernike 多项式形式,去除其前四项(常数项, x, y 方向倾斜项,离焦项),得到全口径面形误差如图 4(b)所示。为了与标准 ASSI 进行对比,在光线追迹软件 Zemax 中对标准 ASSI 进行了系统建模,选取匹配的透射球面镜对该高次非球面进行了环带子孔径划分(同

样以 $0.125\lambda/\text{pixel}$ 为波前斜率上限),其划分结果为 8 个子孔径,并利用了(1)式中传统的“2 倍关系”法求取每个子孔径面形数据,拼接出全口径面形结果如图 4(c)所示。图 4(a)给出了被侧面全口径真实面形误差,图 4(d)和 4(e)分别为 NASSI 和标准 ASSI 对该高次非球面的检测误差。

由图 4 中仿真结果可以看出,在存在随机噪声的情况下,NASSI 与标准 ASSI 的重构面形结果 PV 值误差分别为 0.023λ 和 1.134λ 。可见,在检测深度非球面时标准 ASSI 的检测结果只能描述面形大致轮廓,精度较低。一方面由于传统的回程误差校正方法已经不适用于深度非球面,子孔径面形求

取精度较低。另一方面,标准 ASSI 检测深度非球面时子孔径数目较多,环带窄,调整误差校正精度不高,且拼接操作对于残留回程误差和随机误差的累

积严重,导致检测精度低。而 NASSI 利用理论波前法校正回程误差,同时有效地减少了子孔径数目,极大提高了检测精度。

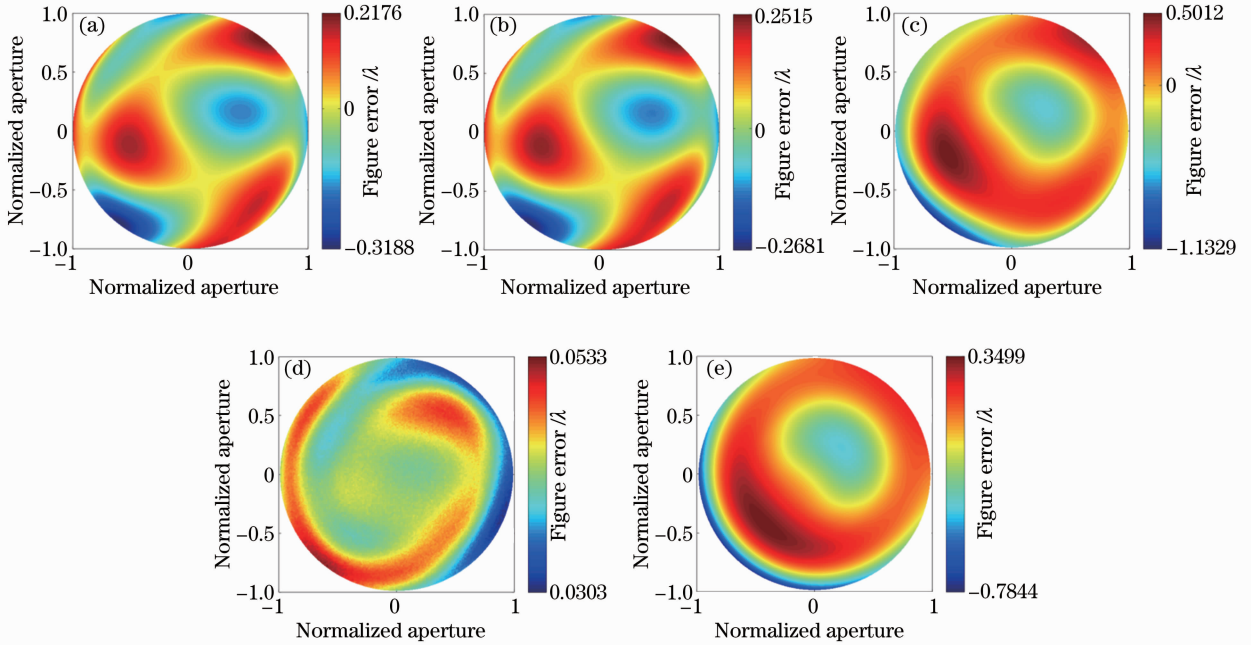


图 4 仿真面形误差检测结果。(a)真实面形误差;(b)和(d)分别为 NASSI 检测所得面形误差结果与检测误差;(c)和(e)分别为标准 ASSI 检测所得面形误差结果与检测误差

Fig. 4 Test results of figure error in simulation. (a) True figure error; (b) and (d) are the figure error test in NASSI and the test error, respectively; (c) and (e) are the figure error test in standard ASSI and its test error, respectively

4 NASSI 实验

为了验证 NASSI 方法的可行性,按照第 2 节中

NASSI 系统原理搭建了相应的实验系统,对一块顶点曲率半径 240.0 mm,口径 101.0 mm 的抛物面反射镜

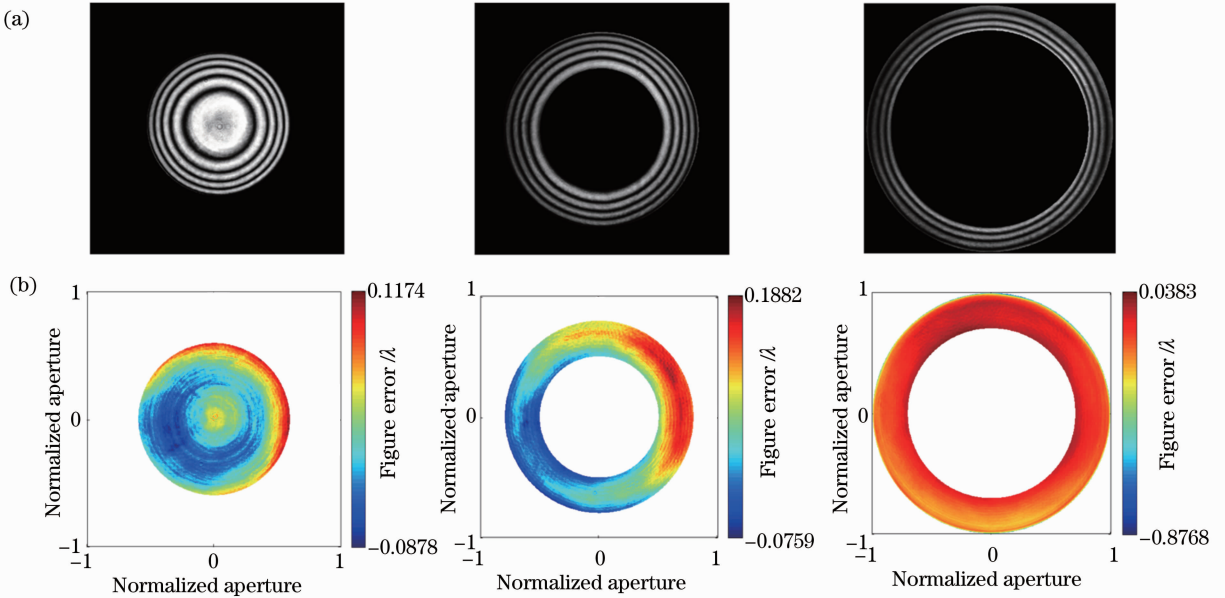


图 5 NASSI 检测非球面的三个子孔径干涉图及面形图。(a)子孔径干涉图;(b)子孔径面形图(含调整误差)

Fig. 5 Three subaperture interferograms and corresponding figure errors by NASSI. (a) Subaperture interferograms; (b) subaperture figure errors (including adjustment errors)

进行面形误差检测。系统中检测光波长 632.8 nm, 自制参考平板与分光板(镀膜后)表面面形误差 PV 值优于 $\lambda/10$, PNL 按 2.1 节表 1 中参数加工, 其表面面形误差优于 $\lambda/20$ 。线性移动平台(LS)行程 1000 mm, 全程直线度优于 $12 \mu\text{m}$ 。DMI 测长范围 0~40 m, 测长精度 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ 。成像系统畸变量优于 0.1%。探测器采用千兆网面阵 CCD 相机, 分辨率为 $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 。

根据实验系统参数, 在光线追迹软件 Zemax 中对 NASSI 进行系统建模。编写 Zemax 程序, 不断改变非球面与 PNL 之间的距离, 使被测面与 PNL 产生的检测波前在不同区域相切, 使不同环带区返

回波前斜率控制在 $\rho \leq 0.08\lambda/\text{pixel}$, 从而将全口径划分为三个子孔径, 其参数如表 3 所示。

表 3 实验中子孔径参数

Table 3 Parameters of subaperture partition in the experiment

Subaperture	d_{sub}/mm	Normalized zone
0	302.2155	[0, 0.6]
1	302.0473	[0.5, 0.8]
2	302.0241	[0.7, 1]

根据建模中所得子孔径划分参数与位置参数, 将实验系统中非球面定位在与模型中一致的位置,

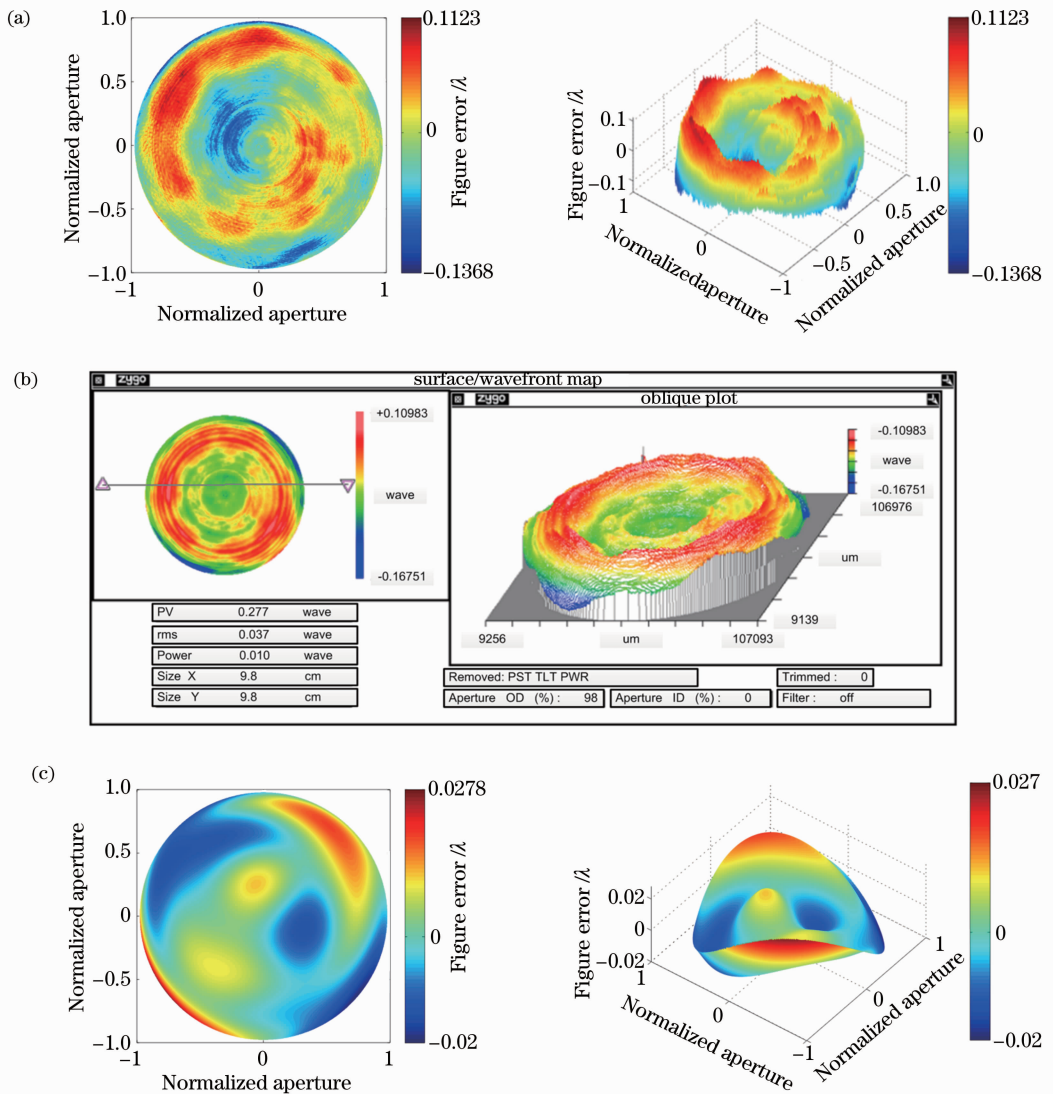


图 6 被测非球面全口径面形误差。(a) NASSI 检测所得全口径面形误差; (b) Zygo[®] Verifire[™] Asphere 干涉仪检测所得全口径面形误差; (c) 两种方法检测的面形差值

Fig. 6 Aspheric figure error of full aperture. (a) Aspheric figure error test by NASSI; (b) aspheric figure error test by Zygo[®] Verifire[™] Asphere; (c) difference of (a) and (b)

非球面的轴向平移由线性导轨控制,移动量则可以由 DMI 精确控制。同时,分别采集各个子孔径实际干涉图,如图 5(a)所示,三个子孔径干涉条纹均可被探测器分辨。

解调出 3 个子孔径对应的被测波前,并利用第二节所述的子孔径理论波前法分别校正其回程误差,得到各个子孔径面形误差,如图 5(b)所示。紧接着校正三个子孔径间的调整误差,利用(5)式求取各子孔径之间的相对调整误差,将外围两个子孔径面形误差拼接至基准子孔径,并拟合为 Zernike 多项式形式,去除基准子孔径调整误差(Zernike 多项式前四项),得到以 Zernike 多项式表征的全口径面形误差。图 6(a)所示即为 NASSI 检测所得全口径面形误差二维与三维图。图 6(b)为采用 Zygo[®] Verifire[™] Asphere 干涉仪检测所得该非球面全口径面形误差二维与三维图。图 6(c)为两种方法的检测结果差值的二维与三维图,为了对两种方法的检测结果进行尽量准确的比较,确保图 6(c)为图 6(a)与图 6(b)的对应点相减,对两种检测的面形误差结果进行了 Zernike 拟合之后再行相减,因此图 6(c)为光滑曲面。表 4 中列出了 NASSI 和 Zygo[®] Verifire[™] Asphere 干涉仪的检测结果 PV 值与均方根(RMS)值对比以及二者面形差值的 PV 值与 RMS 值。

从图 7 和表 4 中可以看出,NASSI 方法对被测非球面面形误差的检测方法与 Zygo[®] Verifire[™] Asphere 干涉仪检测结果一致,NASSI 检测结果的 PV 值误差优于 $\lambda/20$,RMS 值误差优于 $\lambda/100$,证明了该检测方法的高精度与可行性。

表 4 NASSI 和 Zygo[®] Verifire[™] Asphere 干涉仪检测结果 PV 值和 RMS 值

Table 4 PV and RMS value of test figure error by NASSI and Zygo[®] Verifire[™] Asphere

	PV / λ	RMS / λ
NASSI	0.2491	0.0374
Zygo [®] Verifire [™] Asphere	0.277	0.037
Difference	0.0478	0.008

为了检验 NASSI 方法的重复性,在相同实验条件下对该非球面进行了多次检测,检测结果 PV 值与 RMS 值如图 7 所示,PV 值误差与 RMS 值误差均分别优于 $\lambda/20$ 和 $\lambda/100$,其 PV 值与 RMS 值的方差分别为 2.53×10^{-4} 和 1.0×10^{-6} ,充分表明了 NASSI 方法具有较高的重复性。

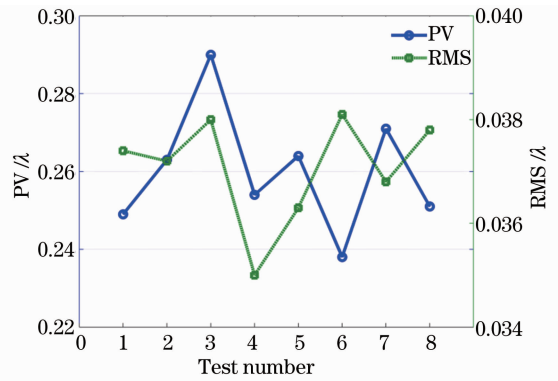


图 7 NASSI 方法的重复性实验结果

Fig. 7 Repeatability of NASSI

5 结 论

提出了一种新型的用于深度非球面检测的 NASSI 技术与系统。相比标准 ASSI 对深度非球面检测能力的不足,NASSI 利用部分零位镜替代透射球面镜,有效地减少了覆盖全口径所需的子孔径数目。一方面避免了由于子孔径数目多、宽度窄造成的拼接效率和精度不高的问题;另一方面减少了各种误差累积次数。同时,配合基于系统建模的理论波前法精确校正各子孔径回程误差,进一步提高了检测精度。

另外,NASSI 技术充分利用了非零位检测与子孔径拼接的技术优势,部分零位镜本身对非球面具有一定的动态检测范围^[14-15],配合环形子孔径拼接算法,进一步提高了非球面检测的横向与纵向动态范围。可见,NASSI 方法不仅操作简单,对于深度非球面的检测显示出高精度,高效率的优点,而且对于具有较强的动态检测范围,在非球面检测的通用化进程中又迈进了一步。今后的研究将着重于 NASSI 的系统的误差分析和检测范围研究,并完成实验中的深度非球面面形误差的高精度检测。

参 考 文 献

- 1 J G Thunen, O Y Kwon. Full aperture testing with subaperture test optics [C]. SPIE, 1983, 351: 19-27.
- 2 W W Chow, G N Lawrence. Method for subaperture testing interferogram reduction [J]. Opt Lett, 1983, 8(9): 468-470.
- 3 Y M Liu, G Lawrence, C Koliopoulos. Subaperture testing of aspheres with annular zones [J]. Appl Opt, 1988, 27(21): 4504-4513.
- 4 P Murphy, G Forbes, J Fleig *et al.*. Stitching interferometry: a flexible solution for surface metrology [J]. Opt Photon, 2003, 14(5): 38-43.

- 5 M Melozzi, L Pezzati, A Mazzoni. Testing aspheric surfaces using multiple annular interferograms [J]. *Opt Eng*, 1993, 32(5): 1073–1079.
- 6 F Granados-Agustín, J F Escobar-Romero, A Cornejo Rodríguez. Testing parabolic surfaces with annular subaperture interferogram [J]. *Opt Rev*, 2004, 11(2): 82–86.
- 7 X Hou, F Wu, L Yang, *et al.*. Full-aperture wavefront reconstruction from annular subaperture interferometric data using Zernike annular polynomials and matrix method for testing large aspheric surfaces [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(15): 3442–3455.
- 8 S Y Chen, S Y Li, Y F Dai, *et al.*. Testing of large optical surfaces with subaperture stitching [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(17): 3504–3509.
- 9 Wang Lihua, Wu Shibin, Ren Ge, *et al.*. Location error compensation algorithm for measuring optical system wavefront by sub-aperture stitching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0112003.
汪利华, 吴时彬, 任 戈, 等. 子孔径拼接检测光学系统波前机械定位误差补偿算法[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0112003.
- 10 Chen Yiwei, Wang Fei, Wang Gaowen, *et al.*. New sub-aperture stitching algorithm based on transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912004.
陈一巍, 王 飞, 王高文, 等. 基于变换的子孔径拼接新算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912004.
- 11 Hou Xi, Wu Fan, Yang Li, *et al.*. Analysis for the influencing factors to an annular subaperture stitching algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(3): 20–24.
侯 溪, 伍 凡, 杨 力, 等. 环形子孔径拼接算法的精度影响因素分析[J]. *光电工程*, 2005, 32(3): 20–24.
- 12 D Liu, Y Yang, C Tian, *et al.*. Practical methods for retrace error correction in non-null aspheric testing [J]. *Opt Express*, 2009, 17(9): 7025–7035.
- 13 H Liu, Q Zhu, Q Hao, *et al.*. Design of novel part-compensating lens used in aspheric testing [J]. *SPIE*, 2003, 5253: 480–484.
- 14 J J Sullivan, J E Greivenkamp. Design of partial nulls for testing of fast aspheric surfaces [C]. *SPIE*, 2007, 6671: 66710W.
- 15 D Liu, Y Yang, Y Luo, *et al.*. Non-null interferometric aspheric testing with partial null lens and reverse optimization [C]. *SPIE*, 2009, 7426: 74260M.
- 16 C Tian, Y Yang, Y Zhuo. Generalized data reduction approach for aspheric testing in a non-null interferometer [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(10): 1598–1604.
- 17 Lei Zhang, Dong Liu, Tu Shi, *et al.*. Practical and accurate method for aspheric misalignment aberrations calibration in non-null interferometric testing [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(5): 8501–8511.
- 18 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.
- 19 Wang Yuezhu, Tian Yi, Li Hongyu, *et al.*. Modeling and experiment of testing asphere by annular subaperture stitching interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3082–3087.
王月珠, 田 义, 李洪玉, 等. 环形子孔径拼接干涉检测非球面的建模与实验[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3082–3087.

栏目编辑: 何卓铭