

同步环带子孔径干涉非球面检测方法

苏媛, 田爱玲*, 王红军, 刘丙才, 朱学亮, 王思淇, 任柯鑫, 张郁文

西安工业大学光电工程学院陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021

摘要 提出一种可用于非球面面形检测的同步环带子孔径干涉(SASI)检测方法。该方法利用双焦点透镜形成两个测量波前来匹配非球面不同子孔径区域,进而实现非球面的同步环带子孔径干涉测量。分析SASI检测非球面面形的原理,确定双焦点透镜的焦点间距选取原则,建立子孔径的基准统一模型,通过光学追迹软件辅助建模和坐标变换实现子孔径基准统一与非球面面形重构。结合实例对一个口径为90 mm、顶点曲率半径为317 mm的抛物面进行面形检测实验,SASI方法面形重构结果与Luphoshcan方法检测结果的对比,验证了SASI方法的正确性。该方法在一定程度上扩大了干涉仪直接检测非球面的动态范围,且无需复杂的运动机构就可以同步得到被测非球面两个子孔径区域的干涉图样,加快了检测速度、降低了运动误差对测量精度的影响。

关键词 物理光学; 干涉测量; 非球面检测; 非零位测量; 同步环形子孔径

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231903

1 引言

非球面光学元件因设计自由度较大而被广泛应用于空间光学、天文观测等领域^[1],将其运用于光学系统时可达到校正像差、简化仪器结构、改善像质等目的,但非球面自身的法线像差特性导致面形检测较为复杂^[2]。

非球面面形干涉测量法^[3]主要分为零位检测法和非零位检测法,其中:零位检测法^[4-7]需要为不同参数的非球面设计唯一的补偿器,因此存在通用性差的缺点;非零位检测法^[8-10]无需完全补偿非球面法线像差,仅需限制干涉条纹密度至探测器极限分辨率范围内并利用算法^[11-12]消除系统误差即可。子孔径干涉检测是实现非零位法检测的技术手段之一^[13-15],可分为环形子孔径拼接干涉(ASSI)检测和圆形子孔径拼接干涉(CSSI)检测,其中:CSSI检测的自由度较高,导致其系统误差分析难度大;ASSI系统误差相对于CSSI较小,最早由Arizona光学中心的Liu等^[16]提出,Murphy等^[17]随后提出一种基于最小二乘拟合的拼接算法,利用ASSI检测系统得到待测非球面面形。国内方面,郝群等^[18]对ASSI展开了研究,并利用该技术进行大口径非球面面形检测;王洪浩等^[19]提出一种全局优化子孔径拼接算法,实现了高陡度非球面面形测量。ASSI技术可有效增大干涉仪检测非球面的动态范围,但需要多次改变干涉仪和待测非球面的相对位置,易

引入运动误差和定位误差。为得到准确的测量结果,需要通过精密机械运动机构和复杂定位校正算法实现非球面与干涉仪相对位置的精确调控。西安交通大学的李兵等^[20]提出一种基于二维像素矩阵的中心偏移误差补偿方法,并利用该方法对各个子孔径进行误差补偿,有效减小了ASSI面形测量误差;北京理工大学的Wen等^[21]提出一种自动定位算法,该算法可在机械运动机构精度较低的情况下得到拼接参数,并获得面形测量结果。因此,ASSI技术依赖于高精度的机械运动机构和复杂的定位误差校正算法,存在运动误差大、检测系统结构复杂、检测速度较慢的问题。

本文提出一种同步环带子孔径干涉(SASI)检测方法。该方法利用双焦点透镜形成两个测量波前,两个测量波前同步匹配非球面不同子孔径区域并一次性获取全口径干涉图样;对干涉图进行相位提取后,通过光学软件辅助建模和坐标变换将子孔径数据统一至同一参考基准下,消除统一参考基准后的测量数据的回程误差和调整误差即可重构非球面面形。所提方法不仅在一定程度上增大了干涉仪直接检测非球面的动态范围,且无需移动干涉仪或待测元件,可有效缩短测量时间并减小运动误差对测量精度的影响。

2 SASI原理

2.1 检测原理

SASI方法利用双焦点透镜实现非球面两个子孔

收稿日期: 2023-12-08; 修回日期: 2024-01-25; 录用日期: 2024-01-30; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2020426B009)、陕西省科技厅项目(2023KXJ-066)

通信作者: *ailintian@xatu.edu.cn

径区域的同步干涉检测,图 1 为 SASI 方法检测非球面形体的原理图。在双焦点透镜 S_1 、 S_2 表面刻蚀不同形状的衍射层以实现光束的不同聚焦作用,平行光通过双焦点透镜 S_1 、 S_2 后分别会被会聚至 f_1 、 f_2 焦点,两个焦点的间距为 l ,光束在 f_1 、 f_2 焦点后分别形成曲率半径为

R_1 的第一测量波前和曲率半径为 R_2 的第二测量波前,两个波前分别匹配非球面的 T_1 、 T_2 区域并一次性得到非球面全口径干涉图,利用相移算法从干涉图中提取测量相位数据,对子孔径测量数据进行基准统一并消除回程误差和调整误差,即可得到非球面形体信息。

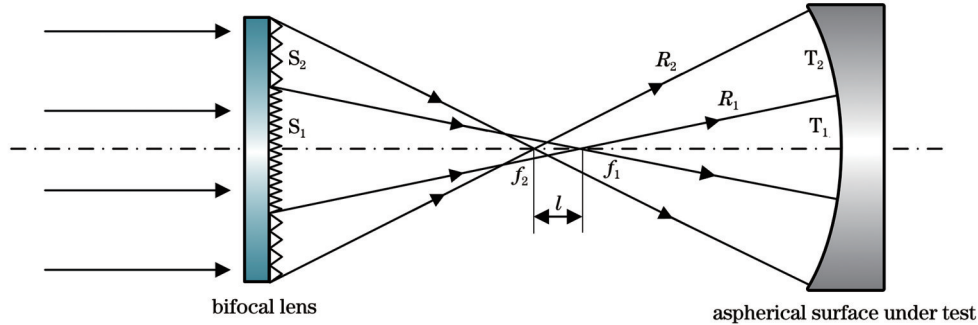


图 1 SASI 方法检测非球面形体原理图

Fig. 1 Schematic of SASI method to detect aspherical surface

实际测量中,将双焦点透镜放置在干涉仪后进行非球面形体检测,图 2 为实际测量时系统的光路示意图。由干涉仪出射的参考光入射至双焦点透镜,经双

焦点透镜形成两个测量波前并匹配非球面全口径区域,光线被反射至干涉仪即可获得干涉条纹和相位信息。

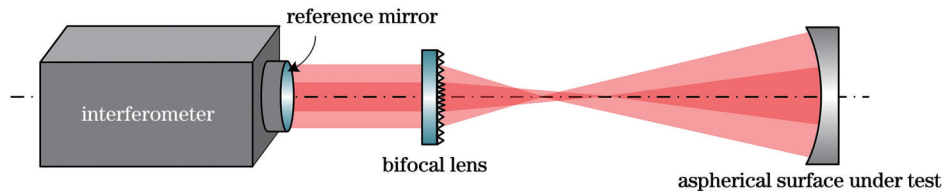


图 2 SASI 方法实际检测非球面光路示意图

Fig. 2 Lightpath diagram of aspherical surface test using SASI method

在 SASI 检测方法中,焦点间距 l 是干涉条纹密度的直接决定因素,其选取原则基于奈奎斯特采样定理^[22]。图 3 所示为 SASI 方法检测非球面的光路模型,其中 R_1 、 R_2 分别表示第一、第二测量波前半径, $G_1(x_1, y_1)$ 、 $G_2(x_2, y_2)$ 分别表示内、外子孔径极限分辨

点, $H_1(i_1, j_1)$ 、 $H_2(i_2, j_2)$ 分别为内、外子孔径干涉检测零位点,结合式 (1) 可建立数学模型^[23]求解焦点间距 l 。

$$2 \left[p(x, y) - s_i(x, y) \right] \Big|_y \cdot \frac{D}{q} < \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

式中: $s_i(x, y)$ 表示第 i 个测量波前的方程; $p(x, y)$ 为待测非球面方程; D 为非球面口径; q 为探测器的可用像素数; λ 为激光波长。

2.2 子孔径数据基准统一及面形重构原理

SASI 方法无需移动待测非球面,因此非轴向相对调整误差较小,而双焦点透镜的焦点间距会导致轴向相对调整误差,进而造成两个子孔径的测量数据基准不统一。因此,解调干涉条纹并提取相位后,需要利用双焦点透镜的设计参数将子孔径测量数据统一至同一基准子孔径下(取外环子孔径)。

设双焦点透镜的焦点 f_1 、 f_2 分别为坐标点 O_1 、 O_2 , W_{asp1, O_1} 表示以 O_1 坐标点为基准的非球面内孔径区域面形, W_{asp2, O_2} 表示以 O_2 坐标点为基准的非球面外孔径区域面形, W_1 、 W_2 分别为内、外子孔径测量数

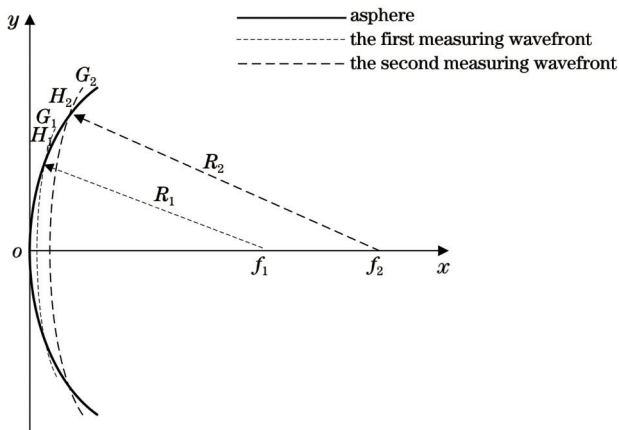


图 3 SASI 方法检测非球面光路模型

Fig. 3 Lightpath model of aspheric test using SASI method

据,则

$$W_{\text{asp1},O_1} = \frac{1}{2}(W_1 - E_1 - \varepsilon_1), \quad (2)$$

$$W_{\text{asp2},O_2} = \frac{1}{2}(W_2 - E_2 - \varepsilon_2), \quad (3)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为内、外子孔径的回程误差, ε_1 、 ε_2 分别为内、外子孔径的绝对调整误差。显然, W_{asp1,O_1} 、 W_{asp2,O_2} 的参考基准不一致。

为将内孔径面形信息 W_{asp1,O_1} 恢复到外环子孔径基准下,结合双焦点透镜设计参数建立 Zemax 系统光路模型,并求解以第二测量波前检测非球面内环子孔径区域的测量数据 W_{in} 。首先,对 W_1 进行 Zernike 拟合并消除绝对调整误差,得到 $W_{1'}$:

$$W_{1'} = W_1 - \sum_{i=1}^4 A_m Z_m, \quad (4)$$

式中: A_m 和 Z_m 分别表示 W_1 拟合后的第 m 项 Zernike 多项式及系数。在 O_1 坐标点下,利用第二测量波前检测非球面内孔径数据 W_{in,O_1} :

$$W_{\text{in},O_1} = W_{1'} + W_{\text{rel}}, \quad (5)$$

式中: W_{rel} 表示 O_1 坐标点下利用第一测量波前和第二测量波前检测非球面内孔径区域的相对偏差,其可通过 Zemax 多重结构建模无面形偏差时的 SASI 理想检测系统进行求解。当待测非球面面形偏差较小时, W_{rel} 可表示为

$$W_{\text{rel}} = 2 \left\{ [s_1(x, y) - s_2(x, y)] \cdot \cos[\alpha(x, y)] \right\}, \quad (6)$$

式中: y 的最大取值为非球面的内孔径区域半口径; $\alpha(x, y)$ 表示第一测量波前的法向角; $s_1(x, y)$ 、 $s_2(x, y)$ 分别表示第一、第二测量波前,且 $s_1(x, y)$ 、 $s_2(x, y)$ 在 O_1 坐标点下的方程分别满足

$$x^2 + y^2 = R_1^2, \quad (7)$$

表 1 双焦点透镜的焦点间距和对应检测区域参数

Table 1 Distance between two focuses of bifocal lens and corresponding detection area parameters

Parameter	l / mm	$G_1(x, y)$	$G_2(x, y)$	R_1 / mm	R_2 / mm
Value	0.8	(1.9, 30.7)	(3.2, 40.0)	251.9	252.7

图 4(a)所示为干涉仪直接测量非球面的仿真干涉图样,当像素数为 1000 时,干涉条纹极限分辨位置出现在程差变化率极限为 0.8×10^{-3} mm/pixel 处;图 4(b)所示为干涉仪测量的非球面程差变化率曲线,抛物面 72.2 mm 口径以内的程差变化率小于 0.8×10^{-3} mm/pixel,即图 4(a)红色圆圈以外的条纹不可被分辨;图 4(c)所示为相同测量情况下利用 SASI 方法测量非球面时的仿真干涉图样,此时边缘处干涉图条纹密度相较于图 4(a)明显降低;图 4(d)所示为 SASI 方法测得的全口径抛物面的程差变化率曲线,可以看到,全口径程差变化率均小于 0.8×10^{-3} mm/pixel,即全口径条纹均可被分辨。由此可见,SASI 方法可在一定程度上扩大干涉仪直接检测非

$$(x + l)^2 + y^2 = R_2^2. \quad (8)$$

将式(6)代入式(5),可得到 O_1 坐标点下利用第二测量波前检测非球面内孔径区域的测量数据 W_{in,O_1} ,将其进行坐标变换并统一至 O_2 坐标点下,则 W_{in} 可以表示为

$$W_{\text{in}} = W_{\text{in},O_1} + l. \quad (9)$$

至此,内孔径测量数据被统一至外环子孔径基准下,统一基准后的全口径非球面测量数据 W 可表示为

$$W = W_{\text{in}} + W_2. \quad (10)$$

为得到待测非球面全口径面形偏差,需对统一参考基准后的测量数据 W 去除系统调整误差和回程误差。建立第二测量波前检测全口径非球面的理论测量系统模型并得到理论波前 W' ,从统一参考基准后的测量信息 W 中去除理论测量波前 W' 以消除回程误差,随后进行全口径 Zernike 拟合并去除系统调整误差 ε ,即可得到非球面的实际面形偏差 W_{asp} :

$$W_{\text{asp}} = \frac{1}{2}[(W - W') - \varepsilon], \quad (11)$$

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^4 A_n Z_n, \quad (12)$$

式中: A_n 和 Z_n 分别表示 W 拟合后的第 n 项 Zernike 多项式及系数。

3 SASI方法仿真

为验证 SASI 方法检测非球面面形的正确性及有效性,对顶点曲率半径 $R_0 = 250$ mm、口径 $D = 80$ mm 的抛物面进行仿真验证,所选取的双焦点透镜的焦点间距 l 、内外子孔径极限分辨点坐标 $G_1(x_1, y_1)$ 、 $G_2(x_2, y_2)$,以及第一、第二测量波前半径 R_1 、 R_2 的取值如表 1 所示。

球面的动态范围。

给非球面添加以 Zernike Fringe Sag 面形表示的面形偏差,图 5(a)所示为实际 SASI 测量光路探测波前 W_{test} 的仿真结果,其峰谷(PV)值为 21.5375λ 。探测波前 W_{test} 包含相对于 f_1 、 f_2 (坐标点 O_1 、 O_2)测量的内外子孔径数据 W_1 、 W_2 ,通过第 2 节所述的基准统一原理并结合双焦点透镜设计参数,建立 SASI 仿真系统模型,将子孔径数据统一至外环参考基准下,如图 5(b)所示,统一参考基准后的全口径测量数据 W 的 PV 值为 41.8907λ 。

图 6(a)所示为实际全口径面形偏差;对统一基准后的测量数据去除回程误差并进行 Zernike 多项式拟合,随后消除系统绝对调整误差(前 4 项)得到全口径

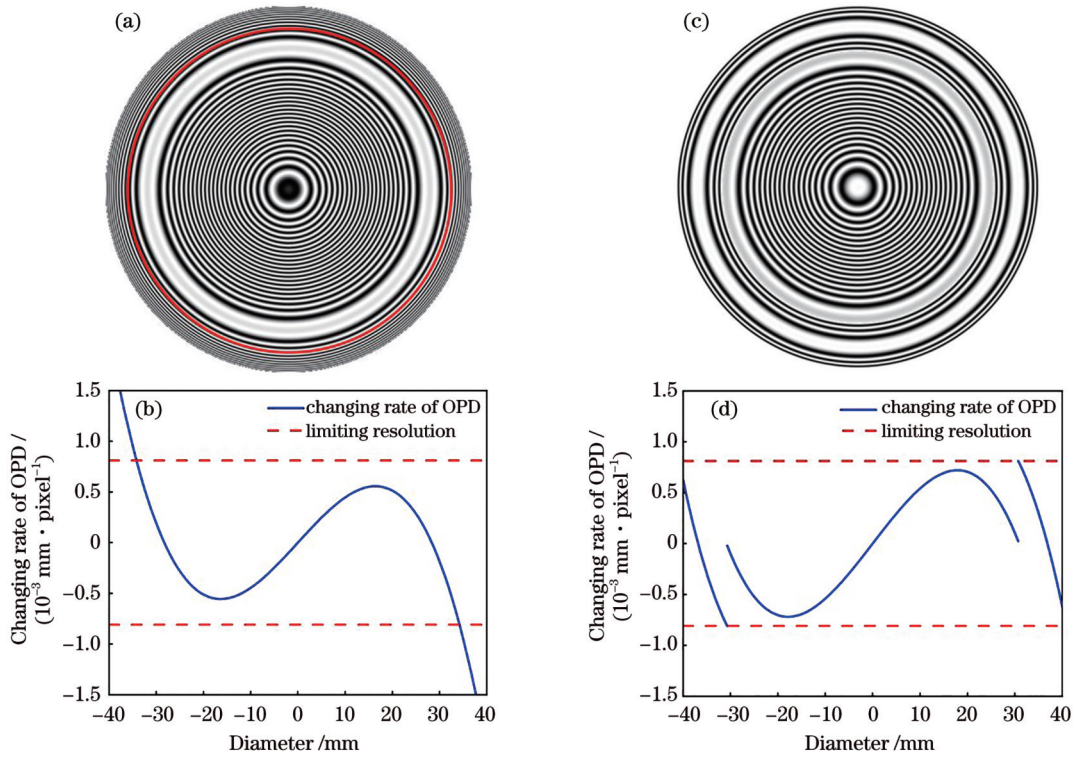


图 4 仿真干涉图样和程差变化率曲线。(a)干涉仪直接检测非球面面形的仿真干涉图样;(b)干涉仪检测非球面时的程差变化率;(c)SASI方法检测非球面面形的仿真干涉图样;(d)SASI方法检测非球面时的程差变化率

Fig. 4 Simulated interferograms and changing rate curves of OPD. (a) Simulated interferogram by interferometer; (b) changing rate of OPD measured by interferometer; (c) simulated interferogram by SASI method; (d) changing rate of OPD measured by SASI method

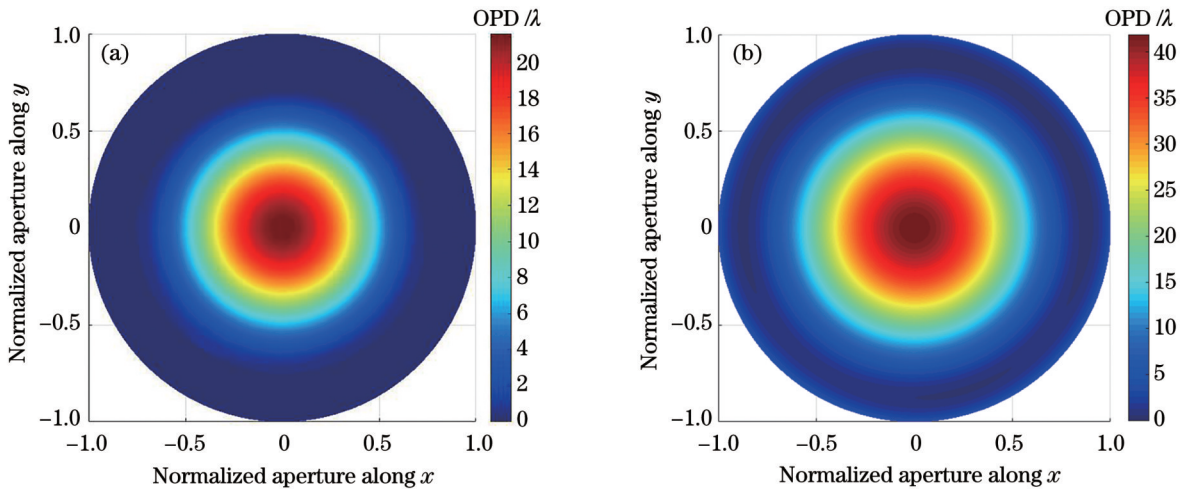


图 5 统一参考基准前后的测量数据。(a)统一参考基准前;(b)统一参考基准后

Fig. 5 Measurement data before and after unifying the reference standard. (a) Before unifying the reference standard; (b) after unifying the reference standard

面形偏差,如图 6(b)所示;图 6(c)所示为 SASI 方法检测的非球面面形残差,残差的 PV 值为 0.0282λ , 均方根(RMS)值为 0.0045λ 。

4 实 验

为进一步证明所提方法的正确性,根据图 2 所示的 SASI 实际检测非球面光路搭建检测系统,如图 7 所

示。对一顶点曲率半径 $R_0=317\text{ mm}$ 、口径 $D=90\text{ mm}$ 的抛物面镜进行面形检测实验,实验选用的 Zygo 干涉仪标准镜的面形精度 PV 值为 0.029λ 、RMS 值为 0.005λ ,因此干涉仪带来的系统误差基本可以忽略,双焦点透镜的焦点间距 l 等基本参数和内外子孔径极限分辨点坐标 $G_1(x_1, y_1)$ 、 $G_2(x_2, y_2)$ 的取值如表 2 所示。

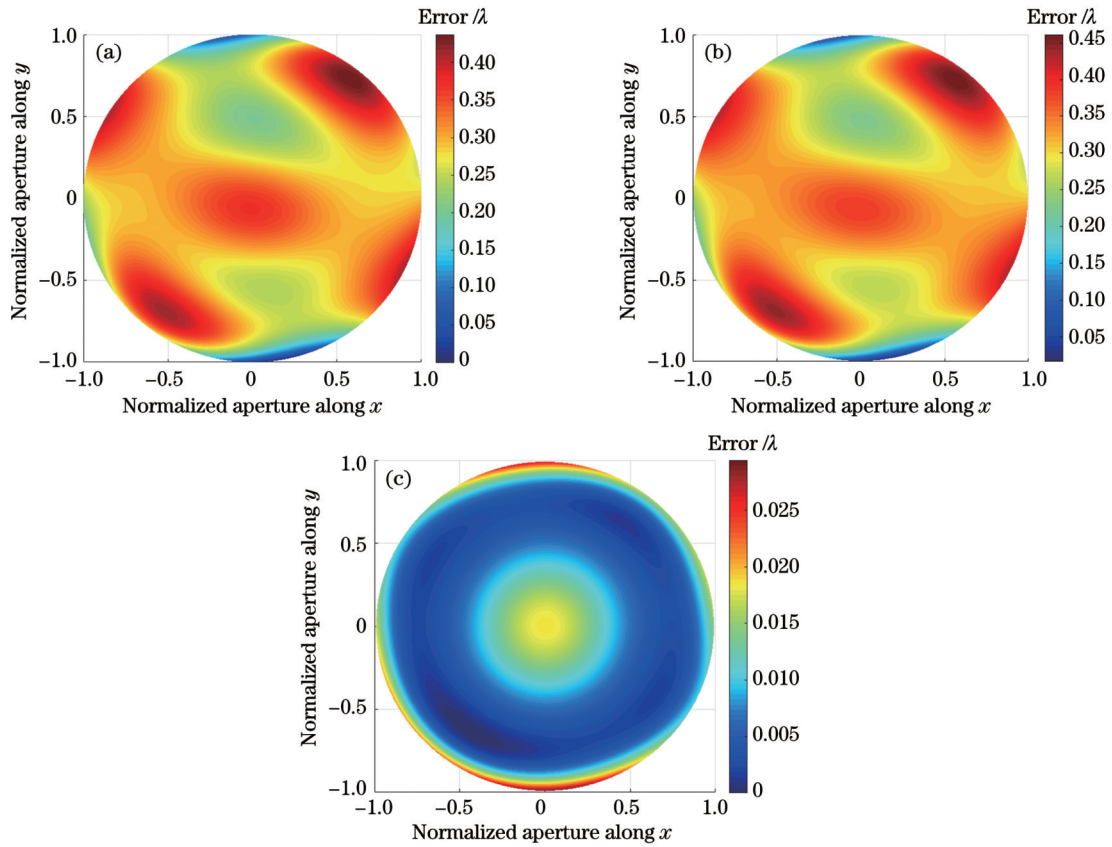


图 6 实际面形误差、SASI方法测量的非球面面形误差和面形残差。(a)实际面形误差;(b) SASI方法测量的面形误差;(c) SASI方法测量的面形残差

Fig. 6 Actual surface error and aspherical surface error and residual measured by SASI method. (a) Actual surface error; (b) surface error measured by SASI method; (c) surface residual by SASI method

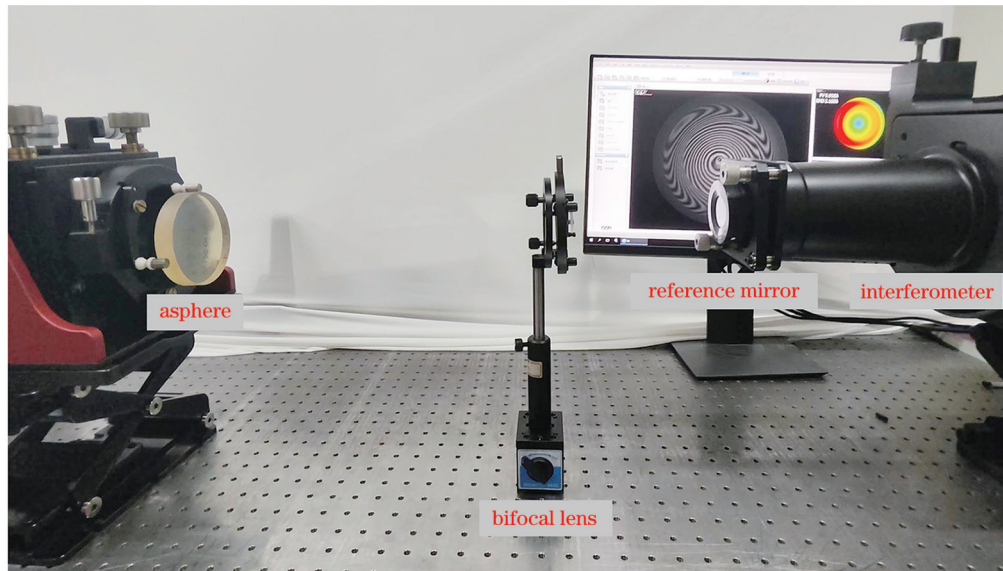


图 7 实际测量系统示意图

Fig. 7 Schematic of actual measuring system

表 2 双焦点透镜设计参数和对应检测区域参数

Table 2 Bifocal lens design parameters and corresponding detection area parameters

Parameter	Wavelength /nm	l /mm	Glass	$G_1(x, y)$	$G_2(x, y)$
Value	632.8	0.7	F_SILICA	(1.7, 32.6)	(3.7, 48.3)

图 8(a)所示为干涉仪直接测量的非球面面形的干涉图样,图 8(b)所示为利用 SASI 方法测量的非球面面形的干涉图样。明显看出,由干涉仪直接检测的干涉条

纹内部和边缘的密度较大,相比之下,SASI方法测量的干涉条纹密度明显降低,进一步验证了 SASI方法可在一定程度上扩大干涉仪直接检测非球面的动态范围。

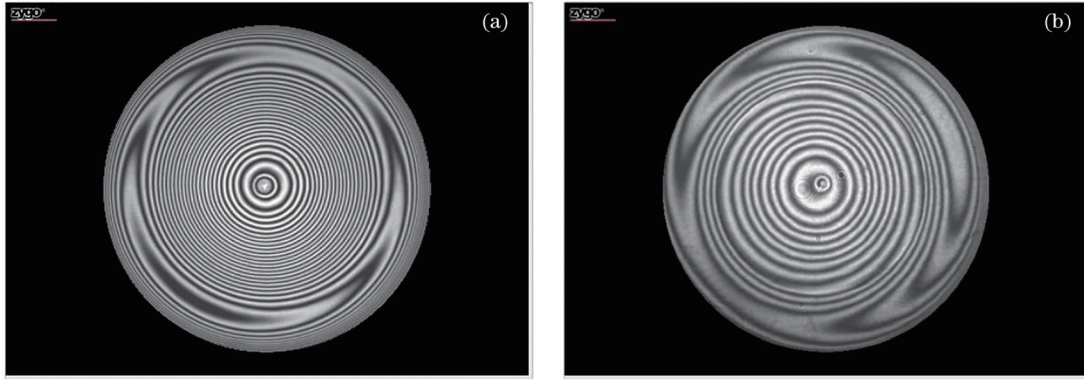


图 8 实验采集的干涉图样。(a)干涉仪直接测量的非球面面形;(b)利用 SASI方法测量的非球面面形

Fig. 8 Collected interferograms in the experiment. (a) Aspherical surface measuring by interferometer; (b) aspherical surface measuring by SASI method

对于干涉图进行解调以提取测量相位信息,并根据子孔径基准统一及面形重构原理对测量数据进行基准统一、回程误差校正和调整误差去除,得到的非球面面形偏差信息如图 9(a)所示,图 9(b)所示为

Luphoshcan 面形检测结果。为准确对比测量结果,对两种方法的测量结果进行 Zernike 拟合并计算点对点残差,如图 9(c)所示。表 3 给出了 SASI方法检测所得的非球面面形结果、Luphoshcan 检测面形结果及两种

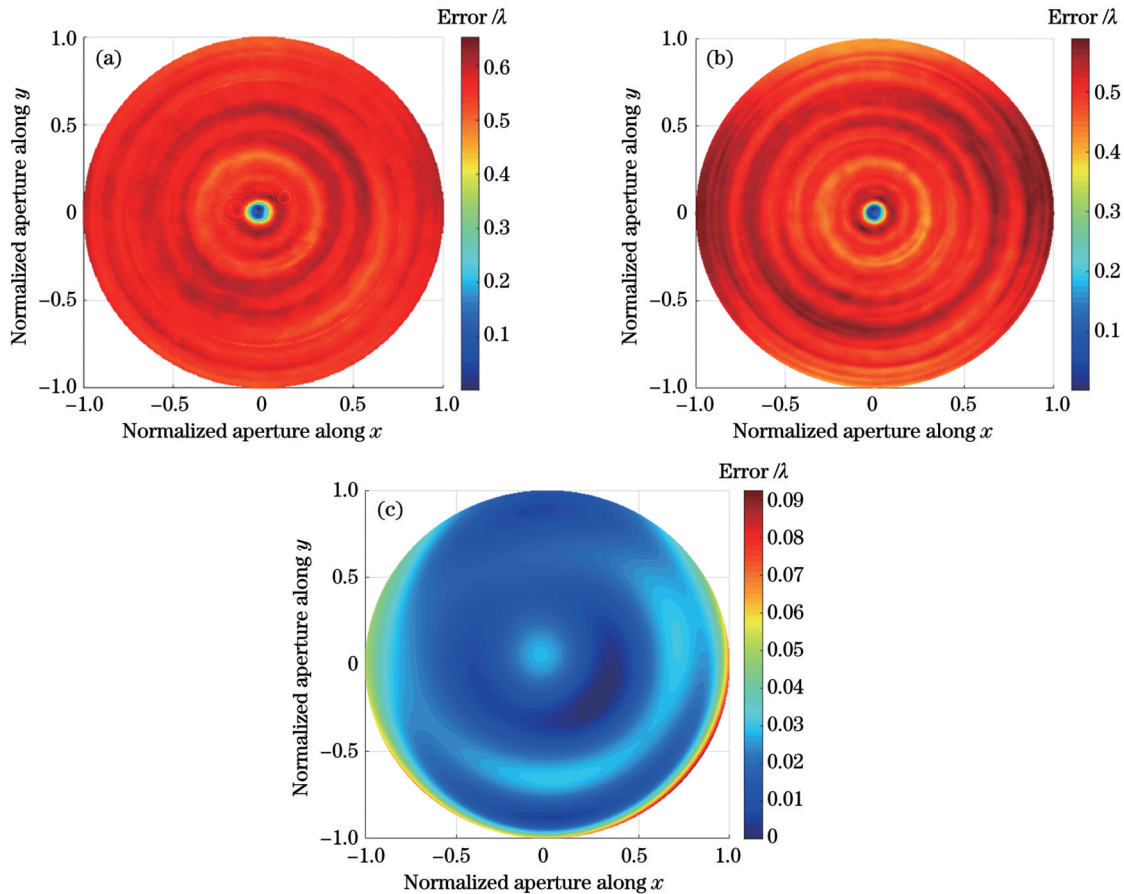


图 9 非球面面形检测结果。(a)SASI方法的检测结果;(b)Luphoshcan方法的检测结果;(c)两种方法检测结果的残差

Fig. 9 Testing results of aspheric surface. (a) Testing result by SASI method; (b) testing result by Luphoshcan method; (c) residual between test results of SASI and Luphoshcan methods

表 3 SASI方法检测结果、Luphoshcan检测结果及两种方法面形误差的PV值与RMS值

Table 3 Results of SASI and Luphoshcan methods and the PV and RMS values of surface error

Parameter	PV / λ	RMS / λ
Surface by SASI	0.6237	0.0333
Surface by Luphoshcan	0.5875	0.0424
Absolute surface error	0.0362	0.0091
Residual surface error	0.0926	0.0098

方法测量结果的绝对面形偏差与点对点残差的PV值与RMS值。将两种方法的测量结果进行对比可知，SASI方法的检测结果与Luphoshcan方法的检测结果基本一致，检测结果绝对误差PV值为0.0362 λ 、RMS值为0.0091 λ ，点对点残差PV值为0.0926 λ 、RMS值为0.0098 λ 。其中，点对点残差结果的边缘拟合无约束，导致边缘区域的残差PV值较大，除边缘区域外SASI方法的面形误差结果与Luphoshcan方法的检测结果基本一致，证明了利用SASI方法检测非球面面形的可行性及正确性。

5 结 论

所提出的SASI方法可实现非球面面形检测。一方面，该方法无需移动干涉仪或待测元件，利用双焦点透镜形成两个测量波前，两个波前同步匹配非球面不同子孔径区域，一次性得到非球面全口径干涉图样，有效简化了测量装置、缩短了检测时间，并减小了运动误差对测量精度的影响；另一方面，SASI方法在一定程度上扩大了干涉仪直接检测非球面的动态范围，结合非球面实例对SASI方法进行仿真和测量实验验证，发现SASI方法检测的干涉条纹图密度明显降低，且面形重构结果与实际面形结果一致，进一步证明了SASI方法的可行性与正确性。

SASI方法未来可被拓展为多种形式以完成更大动态范围的非球面面形检测，例如：利用两个焦点以上的多焦点透镜实现更大范围的非球面面度检测；将多焦点透镜各个区域设计为具有特定像差的结构，以减少部分补偿镜的数量、简化补偿镜装配结构。今后的研究将着重于SASI方法的系统误差分析，以达到非球面高精度面形检测的要求。

参 考 文 献

- [1] 刘锋伟, 吴永前, 陈强, 等. 大口径光学非球面镜先进制造技术概述[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 200203.
Liu F W, Wu Y Q, Chen Q, et al. Overview of advanced manufacturing technology of large-aperture aspheric mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(10): 200203.
- [2] 赵础鑫, 胡明勇, 张少伟, 等. 大口径高次非球面补偿检测方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 072203.
Zhao C C, Hu M Y, Zhang S W, et al. Research on compensation testing method for large-aperture and high-order

aspheric surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 072203.

- [3] 梁子健, 杨雨英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 161-186.
Liang Z J, Yang Y Y, Zhao H Y, et al. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology[J]. Chinese Optics, 2022, 15(2): 161-186.
- [4] 崔金龙, 胡明勇, 毕亚超, 等. 大口径半环形高次非球面检测与轻量化分析[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7): 0722003.
Cui J L, Hu M Y, Bi Y C, et al. Detection and lightweight analysis of large-diameter semi-annular high-order aspheric surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7): 0722003.
- [5] Wang X, Liu Q, Zhou H, et al. Concave aspheric test combining dall with offner null compensation using a plane wave[J]. Applied Optics, 2020, 59(28): 8987-8996.
- [6] 刘佳妮, 陈安和, 李智勇, 等. 小口径深度凸非球面的高精度面形检测[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 20220190.
Liu J N, Chen A H, Li Z Y, et al. High-precision shape measurement technology for convex aspheric with small aperture and large convex asphericity[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(9): 20220190.
- [7] 白茜, 张煜邦, 胡明勇, 等. 一种采用双球面反射补偿检测高次非球面的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7): 0722002.
Bai Q, Zhang Y B, Hu M Y, et al. Research on detection of high-order aspheric surfaces using double spherical reflection compensation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7): 0722002.
- [8] Wang Z M, Qu W J, Yang F, et al. Absolute measurement of aspheric lens with electrically tunable lens in digital holography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 88: 313-318.
- [9] Zhu D Y, Wang F, Li P, et al. Research on hybrid compensation testing of convex aspherical mirror[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 132: 106108.
- [10] Yan L S, Zhu D Y, Wang X K, et al. Measurement of rotationally symmetric aspherical surfaces with the annular subaperture stitching method[J]. Applied Optics, 2019, 58(26): 7073-7079.
- [11] Shi T, Liu D, Zhou Y H, et al. Practical retrace error correction in non-null aspheric testing: a comparison[J]. Optics Communications, 2017, 383: 378-385.
- [12] Elloumi M, Ahmad M A, Samak A H, et al. Error correction algorithms in non-null aspheric testing next generation sequencing data[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(12): 9819-9829.
- [13] Hou X, Wu F, Yang L, et al. Experimental study on measurement of aspheric surface shape with complementary annular subaperture interferometric method[J]. Optics Express, 2007, 15(20): 12890-12899.
- [14] 苏航, 王孝坤, 程强, 等. 子孔径拼接和计算全息混合补偿检测大口径凸非球面(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 20220576.
Su H, Wang X K, Cheng Q, et al. Sub-aperture stitching and CGH mixed compensation for the testing of large convex asphere (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(9): 20220576.
- [15] Chen S Y, Wu C C, Tie G P, et al. Stitching test of large flats by using two orthogonally arranged wavefront interferometers[J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9193-9198.
- [16] Liu Y M, Lawrence G N, Koliopoulos C L. Subaperture testing of aspheres with annular zones[J]. Applied Optics, 1988, 27(21): 4504-4513.
- [17] Murphy P, Fleig J, Forbes G, et al. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6293: 62930J.
- [18] 郝群, 刘一鸣, 胡摇, 等. 光学非球面面形误差和参数误差干

- 涉测量[J]. 光学学报, 2023, 43(15): 1522003.
- Hao Q, Liu Y M, Hu Y, et al. Interferometric measurement of optical aspheric surface form error and parameter error[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(15): 1522003.
- [19] 王洪浩, 明名, 吕天宇, 等. 高陡度保形光学非球面环形子孔径检测方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0417001.
- Wang H H, Ming M, Lv T Y, et al. Testing methods of high-gradient conformal aspheric surfaces based on annular subaperture stitching[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 0417001.
- [20] 李兵, 刘晓, 康晓清, 等. 环形子孔径拼接检测的中心偏移误差补偿[J]. 光子学报, 2016, 45(9): 0912001.
- Li B, Liu X, Kang X Q, et al. Compensation for center offset error in annular subaperture stitching interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 0912001.
- [21] Wen Y F, Cheng H B. Measurement of aspheric surfaces using annular subaperture stitching interferometry based on an automatic positioning method: theory and application[J]. Optical Engineering, 2014, 53(7): 074104.
- [22] Greivenkamp J E. Sub-nyquist interferometry[J]. Applied Optics, 1987, 26(24): 5245-5258.
- [23] 侯溪, 伍凡, 杨力, 等. 环形子孔径拼接检测大口非球面镜的规划模型及分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 207-212.
- Hou X, Wu F, Yang L, et al. Layout model and analysis of annular subaperture stitching technique for testing large aspheric mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2): 207-212.

Measurement Method of Aspherical Synchronous Annular Subaperture Interferometry

Su Yuan, Tian Ailing*, Wang Hongjun, Liu Bingcai, Zhu Xueliang, Wang Siqi, Ren Kexin, Zhang Yuwen

Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test, School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract

Objective Aspherical optical elements are widely employed in optical systems due to their large degree of design freedom, and the surface shape accuracy of the elements directly affects the performance of the optical system, but the normal aberration properties result in difficult detection of aspherical surfaces. Annular subaperture stitching interferometry is non-null interferometry for detecting the surface shape of aspherical surfaces, does not need to completely compensate for the normal aberration of aspherical surfaces, but relies on high-precision mechanical motion mechanisms and complex positional error algorithms. Therefore, we propose a method for synchronous annular subaperture interferometry (SASI) to synchronously obtain the interference pattern of two subapertures. Meanwhile, SASI does not need a complex motion mechanism and can increase the dynamic direct detection range of aspherical surfaces by the interferometer to some extent. Furthermore, it can effectively improve the detection speed and reduce the influence of motion error on measurement accuracy.

Methods We adopt the theoretical analysis and the combination of simulations and experiments to carry out this research. Firstly, according to the Nyquist sampling theorem, the theory of the SASI method is analyzed to determine the focal distance principle, and the reference unified model is built by coordinate change and Zemax assisted modeling to realize the surface shape reconstruction. Secondly, the measurement of SASI is simulated and verified, the Zemax is adopted to assist in building the measurement system model, and the interference images obtained by the SASI method and interferometer direct detection are simulated respectively. Additionally, the fringe density of the two interference images is compared, and the aspherical surface shape is reconstructed in the simulated measurement experiments to verify the correctness of the SASI method. Finally, we actually measure the aspherical surface and obtain the interference pattern, and the aspherical surface is placed in the best position and measured directly with the interferometer. Furthermore, the interference fringes measured by SASI method are compared with the result of Lumphoshcan method, which can further verify the correctness and validity of the SASI.

Results and Discussions Our SASI method can accomplish the detection of aspherical surfaces without a complex motion mechanism, and it can also increase the dynamic range of the interferometer for direct detection of aspherical surfaces to a certain extent. Firstly, the SASI theory is analyzed, and a unified model is proposed for reconstructing the surface shape. Secondly, simulation experiments are carried out to detect the surface shape of an asphere with a vertex radius of curvature of 250 mm and an aperture of 80 mm. The simulation results show that the density of interferometric fringe patterns

obtained by the SASI is reduced compared with that obtained by the interferometer (Fig. 4). Meanwhile, by adopting the proposed baseline unified model, the reconstructed surface shape results with the original surface shape of the residual PV of 0.0282λ , RMS of 0.0045λ are shown in Fig. 6, which initially verifies the validity of the proposed method. Secondly, the aspherical surface with vertex curvature radius of 317 mm and aperture of 90 mm is measured experimentally, and the density of the SASI method is still reduced compared with that of the interferometer directly detecting the same asphere (Fig. 8). Additionally, in Fig. 9 and Table 3, comparison of the reconstructed surface shape with the Lumphoshcan result shows that PV is 0.0362λ and RMS is 0.0091λ of absolute surface error, and the residual deviation of the surface shape is 0.0926λ (PV) and 0.0098λ (RMS), which further verifies the correctness of the proposed SASI method.

Conclusions The proposed SASI method can effectively realize the surface shape detection of aspherical surfaces. On the one hand, the method does not need to move the interferometer or the element to be measured, which utilizes a bifocal lens to form two measurement wavefronts to match different subaperture of the aspherical surface, and then realizes the synchronized annular band subaperture interferometry of the aspherical surface. Finally, this simplifies the measurement device, shortens the measurement time, and reduces the effect of the motion error on the measurement accuracy. On the other hand, this method increases the dynamic range of the interferometer for direct detection of aspherical surfaces to a certain extent. Combined with the aspherical surface example of the SASI method for simulation and measurement experiments to verify the SASI method, the density of interferometric fringe pattern under the detection of the SASI method is significantly reduced. Additionally, the results of the surface reconstruction are consistent with the actual surface results, which further verifies the correctness and validity of the proposed SASI method.

Key words physical optics; interferometry; aspheric testing; non-null testing; synchronous annular subaperture