

一种降低平面子孔径拼接累积误差的方法

李 永^{1,2} 唐 锋¹ 卢云君¹ 王向朝^{1,2} 郭福东¹ 李 杰^{1,2} 吴飞斌^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 干涉仪参考镜面形离焦误差难以精确标定,是导致拼接累积效应、制约平面子孔径拼接系统检测精度的主要因素。推导了参考镜离焦与拼接累积误差、拼接次数间的定量表达式,基于该表达式在拼接过程中标定并去除参考镜离焦误差,降低拼接累积误差。对450 mm×60 mm的平面镜进行了8个子孔径的拼接检测,与大口径干涉仪检测结果比对,去除参考面离焦误差前后拼接测量误差峰谷(PV)值从 $\lambda/10$ 减小至 $\lambda/30$,有效提高了拼接测量精度。结合绝对检验技术标定参考镜高阶面形误差,验证了离焦是引起拼接误差累积的主要因素,消除参考镜高阶面形误差并不能显著提高拼接检测精度。

关键词 测量; 子孔径拼接干涉测量; 误差累积; 离焦; 绝对检验

中图分类号 O436.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0708006

A Method for Reducing the Error Accumulation in Sub-Aperture Stitching Interferometer for Flat Optics

Li Yong^{1,2} Tang Feng¹ Lu Yunjun¹ Wang Xiangzhao^{1,2} Guo Fudong¹
Li Jie^{1,2} Wu Feibin^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The power of reference flat (RF) in interferometer is difficult to be calibrated accurately. It leads to stitching error accumulation effect in sub-aperture stitching interferometer for flat optics, and becomes the major restriction factor for improving stitching accuracy. A quantitative equation is deduced for calculating the power of RF from stitching accumulation error and stitching numbers. Then the power of RF is calibrated and removed in the process of stitching. The error Accumulation is reduced. A flat mirror with aperture of 450 mm×60 mm is tested by 8 sub-apertures. Compared with the test result of a large aperture interferometer, the stitching measurement error is reduced from $\lambda/10$ peak-valley value to $\lambda/30$ PV with power compensation. The stitching test accuracy is improved effectively. Using absolute flatness test, the high order surface figure of the RF is also calibrated. It is verified that the power is the main source of the error accumulation in stitching. Removing the high order surface figure of the RF cannot improve the stitching accuracy significantly.

Key words measurement; sub-aperture stitching interferometry; error accumulation; power; absolute test

OCIS codes 120.3180; 120.6650; 120.6660

1 引言

随着现代光学的发展,大口径光学平面元件在极大规模集成电路制造、天文望远镜和惯性约束聚变等系统中得到了广泛的应用,他们对大口径光学元件的面形加工精度提出了很高要求,如高端投影光刻机工

收稿日期: 2015-02-09; 收到修改稿日期: 2015-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(61205102,61275207,61405210,61474129)、上海市自然科学基金项目(14ZR1444900)

作者简介: 李 永(1988—),男,硕士研究生,主要从事子孔径拼接干涉测量技术方面的研究。E-mail: nnumber5@163.com

导师简介: 唐 锋(1979—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: tangfeng@siom.ac.cn(通信联系人)

件台方镜的面形平整度在小口径内(大约 30 mm)需优于 20 nm[峰谷(PV)值],一维横向尺寸可大于 400 mm,其在加工过程中小口径面形检测精度需优于 $\lambda/100(\lambda=632.8\text{ nm})$,检测口径需大于 400 mm,目前商用干涉仪尚不能同时满足这两种需求^[1]。子孔径拼接干涉测量仪具有测量空间分辨率高、测量口径大、子孔径测量精度高和系统成本低的优点,能够有效地解决上述问题。

1982年美国 Arizona 大学光学中心的 Kim 等^[2]提出子孔径拼接干涉测量的概念。1985年 Stuhlinger^[3]提出离散相位法,用在子孔径上分布的大量离散点的光学相位测量值来描述波前,该思想是子孔径测试发展的一个新的里程碑,是后来子孔径测试方法的雏形。1997年 Bray^[4]研制的拼接干涉仪成功应用于国家点火装置(NIF)和兆焦耳激光计划(LMJ)等 ICF 系统中。2003年后,美国 QED 公司,英国 Zeeko 公司相继开发出商用的子孔径拼接工作站,能够测量平面、球面、非球面面形,测量口径可达到 200 mm^[5-7]。在国内,子孔径测试技术的研究开始于 20 世纪 90 年代初,多家科研单位对其做了大量研究和实验^[8-13]。

对于平面面形检测,子孔径拼接干涉仪与大口径干涉仪相比具有明显的成本优势,但目前尚没有平面子孔径拼接系统检测精度能够媲美大口径干涉仪的报道,这也影响了平面子孔径拼接系统的商用化。这主要由于拼接干涉仪的拼接累积误差导致——随着拼接次数的增多,拼接检测精度迅速下降。Bray^[14]讨论了拼接累积误差,认为参考镜面形误差的二阶项在拼接过程中会造成拼接误差的累积,即误差的放大效应;Bray^[15]提出一种剪切干涉的方法,对参考镜面形进行标定。Arizona 光学中心^[16]、QED 公司^[17]、Zeeko 公司^[7]采用类似旋转平移绝对检验技术的方式在拼接过程中通过 Zernike 多项式拟合标准镜面形。国内南京理工大学^[18]、西安工业大学^[19]、中国科学院上海光学精密机械研究所^[18]等也采用了 3 平板方法标定参考镜面形,以提高子孔径拼接检测精度。

可见,国内外目前现有报道均基于类似绝对检验技术标定参考面形误差。但是绝对检验技术实际上无法准确标定参考面离焦项^[20],而离焦正是拼接累积误差的重要来源。Rayleigh^[21]提出将液体平面看作理想平面,可以标定完整的平面面形,但是液体平面易受干扰,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的采用液面法^[20]精确检测平面参考面的离焦对实验系统环境提出了很高的要求。故提出一种离焦标定方法,可在拼接过程中计算并去除参考面离焦,不需要增加额外的辅助部件或标定流程,具有易实现、精度高、不增加系统成本的优点。

本文简述了平面子孔径拼接干涉检测的原理,对由参考镜离焦产生的拼接累积误差进行了分析,推导了参考镜离焦与拼接累积误差、拼接次数间的定量表达式,基于该表达式标定离焦,通过真实面形数据仿真计算验证了该方法的正确性,进行了实验验证。并结合绝对检验技术,验证了参考面离焦误差是导致拼接累积误差的主要因素,参考面高阶面形误差对拼接累积误差的贡献较小。

2 离焦对子孔径拼接累积误差影响分析

2.1 最小二乘子孔径拼接概述

平面子孔径拼接系统的基本原理如图 1 所示。 $W_1(x,y)$ 和 $W_2(x,y)$ 是相邻的两次子孔径测量,他们之间有一定的重叠;由于测量过程中存在倾斜和平移误差,重叠区的两次测量值并不一致;采用最小二乘法对重叠区数据进行拟合,求出相对平移与倾斜量,实现两个子孔径数据的拼接。

$$\sum \{W_2(x,y) - [W_1(x,y) + ax + by + c]\}^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

式中 a 、 b 、 c 分别表示需要拟合的 W_2 相对 W_1 沿 x 、 y 方向的倾斜量,及沿光轴方向的平移量。

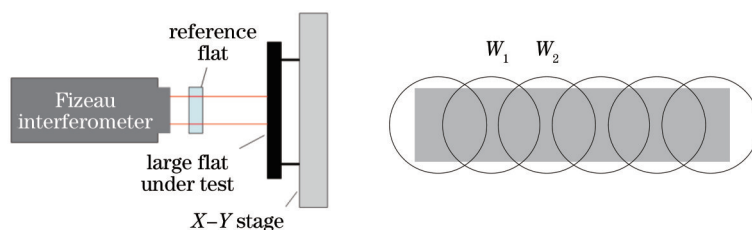


图 1 子孔径拼接系统基本原理

Fig.1 Principle of sub-aperture stitching

2.2 离焦对子孔径拼接累积误差影响分析

2.2.1 离焦对拼接累积误差的影响

在子孔径拼接过程中,相邻的两个子孔径,其重叠区域对应被测镜的同一局部面形,但是却包含了不同区域的参考镜面形误差,如图2所示。图2(a)中阴影区域表示相邻两次测量 W_j 与 W_{j+1} 之间的重叠区域;图2(b)中,重叠区域所包含的不同区域的参考镜面形误差: W_j 包含了参考镜右侧的面形误差 W_r , W_{j+1} 中包含了参考镜左侧的面形误差 W_l 。

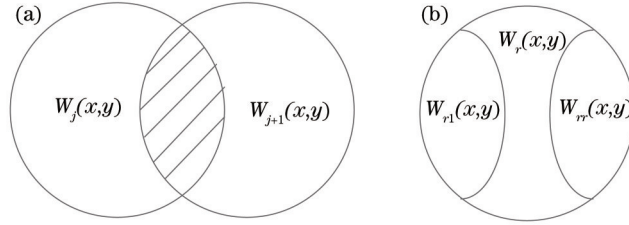


图2 重叠区域及其对应的参考面误差

Fig.2 Reference error of the overlap area in different sub-apertures

假设被测面为理想平面,仅考虑参考镜的离焦项,则每个子孔径的一维测量结果如图3所示,此时子孔径只包含参考镜的离焦项。由于离焦的存在,相邻子孔径的重叠区局部面形倾斜不同,进行子孔径拼接时,每次拼接产生相叠加的倾斜角累积,导致每次拼接均会使平面拟合角度误差增大1倍,产生拼接累积误差。从而在大口径拼接时产生极大的放大效应,使得子孔径拼接难以实现高精度测量。

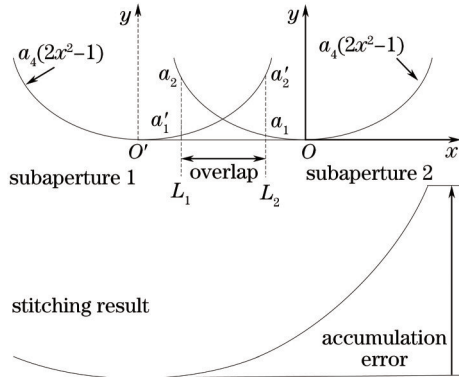


图3 拼接累积误差公式推导示意图

Fig.3 Accumulation error equation derivation

2.2.2 累积误差与离焦关系表达式

为简化问题,仅考虑一维拼接情况,设被测面为理想平面且参考镜仅包含离焦误差。如图3所示,相邻两个子孔径进行拼接, O 和 O' 为两个子孔径中心,其间距为拼接距离 ΔL ,子孔径的长度为 L , L_1 和 L_2 为参与运算的重叠区的边界,重叠区宽度为 $w = L_2 - L_1$, a_2 和 a_1 为重叠区边界值。累积误差为拼接结果边界值,如图3所示。在进行子孔径拼接时,进行最小二乘运算,在子孔径2中引入倾斜和平移,使两个子孔径重合区域的差值最小。进行一次拼接,重合区域的残差可表示为

$$f_{\text{residual}} = -a_4(4\Delta Lx + \Delta L^2), \quad (2)$$

由最小二乘拟合得到倾斜 $\Delta_{a1} = -2(a_2 - a_1)/w$, 平移 $\Delta_{c1} = -(a_2 - a_1)(w - 2L_2)/w$ 。对子孔径2进行校正,拼接结果的边界坐标为 L ,因此,拼接累积误差为

$$\Delta_1 = a_4 + \frac{a_2 - a_1}{w}(2L + w - 2L_2), \quad (3)$$

$$a_4 = \Delta_1 - \frac{a_2 - a_1}{w}(2L + w - 2L_2), \quad (4)$$

式中 a_4 为干涉仪的参考镜面形离焦系数,累积误差的单位为波长(λ)。

同理,拼接两次的拼接累积误差为

$$\Delta_2 = a_4 + \frac{a_2 - a_1}{w}(4L + 2w + 2\Delta L - 4L_2), \quad (5)$$

$$a_4 = \Delta_2 - \frac{a_2 - a_1}{w}(4L + 2w + 2\Delta L - 4L_2), \quad (6)$$

拼接 n 次的拼接累积误差为

$$\Delta_n = a_4 + \frac{a_2 - a_1}{w}\{2nL + nw + [2 + (n - 2)(n + 1)]\Delta L - 2nL_2\}, \quad (7)$$

$$a_4 = \Delta_n - \frac{a_2 - a_1}{w}\{2nL + nw + [2 + (n - 2)(n + 1)]\Delta L - 2nL_2\}. \quad (8)$$

在上述公式推导中,未考虑拼接结束后面形整体的去倾斜处理,上述拼接累积误差是拼接计算过程中的中间量。在拼接结果整体去倾斜后,拼接累积效应会减小。

当被测平面面形精度较高且拼接次数较多时,未去倾斜前拼接结果中上述拼接累积误差将远大于被测面形,可以认为未去倾斜拼接结果通过参考镜中心的采样线的峰谷值即为拼接累积误差,从而根据(8)式计算得到参考镜的离焦误差。下面将对该推论从数值仿真和实验两方面进行验证。

2.2.3 仿真分析

为了验证上文公式推导的正确性,以及能否适用于一般面形的子孔径拼接情形,采用 Zygo 公司 24 inch (600 mm)干涉仪对 450 mm × 60 mm 长条镜面形的实测结果作为需拼接测量面形,如图 4 所示,该平面面形 $f_{PV}=0.1358\lambda$, $f_{RMS}=0.0254\lambda$ 。对该面形进行 8 个 95.57 mm × 58.55 mm 子孔径分割,设重叠率为 50%。在每个子孔径中加入仅包含离焦的参考镜面形误差,不考虑随机噪声的影响。

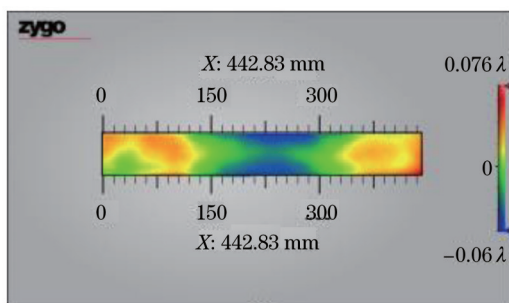


图 4 全口径测量结果

Fig.4 Full aperture test result

采用不同的离焦项进行仿真,如图 5~7 所示。图 5(a)、图 6(a)和图 7(a)为当离焦系数分别为

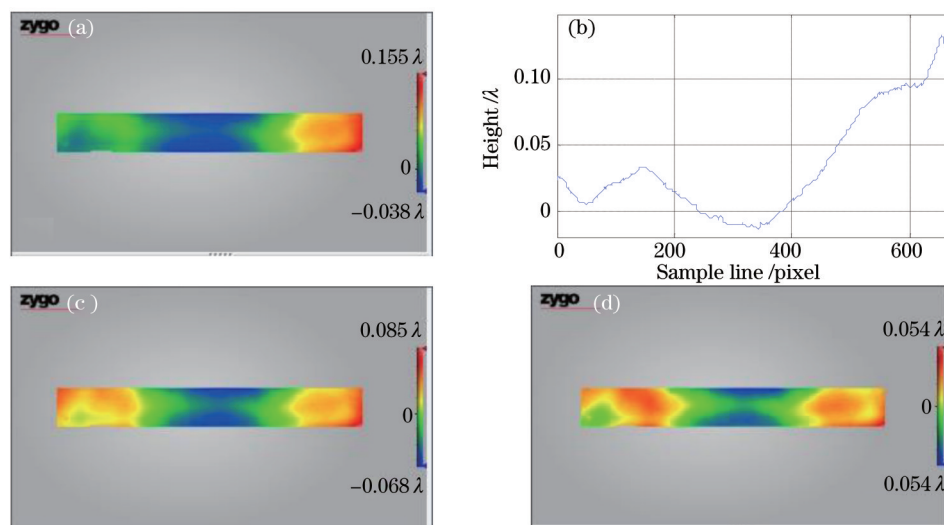


图 5 离焦系数 $a_4=0.001\lambda$ 。(a) 未去倾斜拼接面形;(b) 横向采样线;(c) 去倾斜拼接面形;(d) 去离焦后拼接面形

Fig.5 Power coefficient $a_4=0.001\lambda$. (a) Stitching result without tilt alignment; (b) sample line; (c) stitching result with tilt alignment; (d) stitching result with power removal

0.001 λ 、0.005 λ 和0.01 λ 时,未去倾斜拼接面形,图5(b)、图6(b)和图7(b)为未去倾斜拼接面形通过参考镜中心的横向采样线,图5(c)、图6(c)和图7(c)为未去除参考镜离焦误差时的去倾斜拼接结果,图5(d)、图6(d)和图7(d)为去除计算得到的参考镜离焦后的拼接检测结果。表1给出了离焦系数分别为0.001 λ 、0.005 λ 和0.01 λ 时计算得到的离焦,以及拼接结果的PV值、均方根(RMS)值比较。

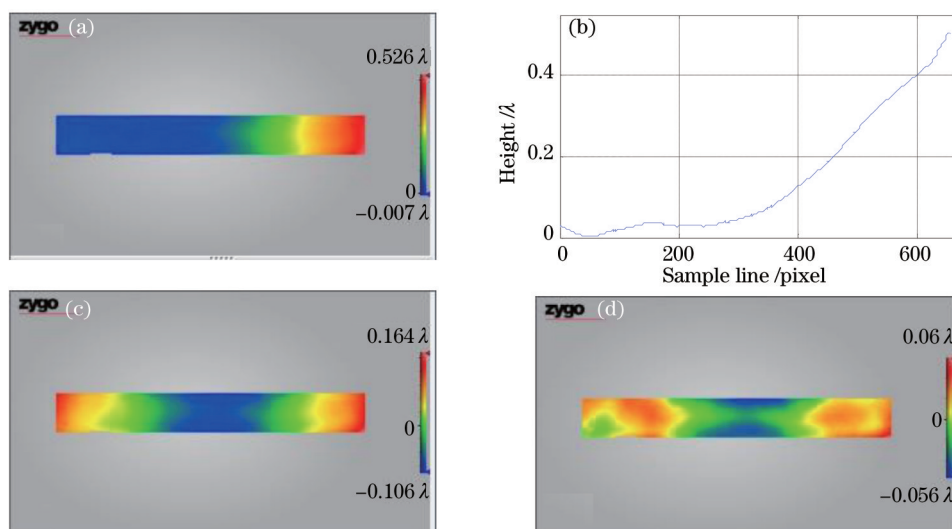


图6 离焦系数 $a_4=0.005\lambda$ 。(a)未去倾斜拼接面形;(b)横向采样线;(c)去倾斜拼接面形;(d)去离焦后拼接面形
Fig.6 Power coefficient $a_4=0.005\lambda$. (a) Stitching result without tilt alignment; (b) sample line; (c) stitching result with tilt alignment; (d) stitching result with power removal

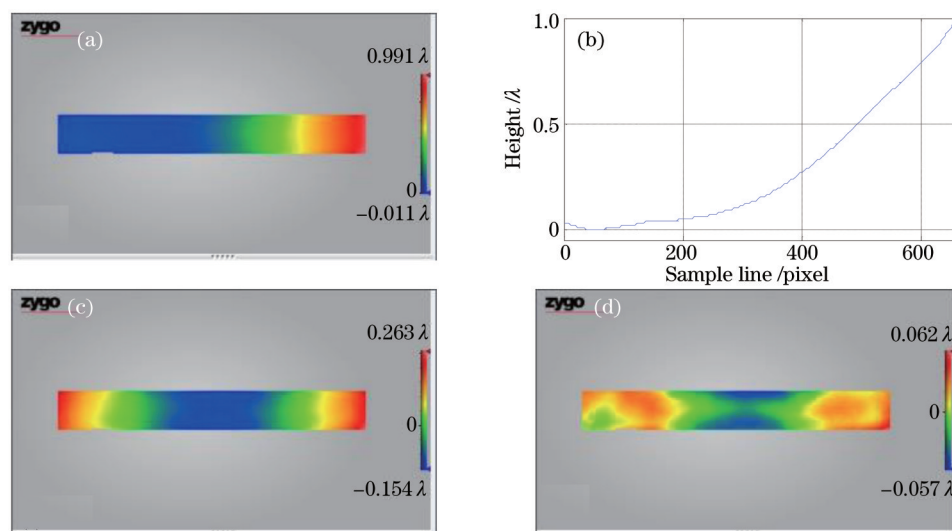


图7 离焦系数 $a_4=0.010\lambda$ 。(a)未去倾斜拼接面形;(b)横向采样线;(c)去倾斜拼接面形;(d)去离焦后拼接面形
Fig.7 Power coefficient $a_4=0.010\lambda$. (a) Stitching result without tilt alignment; (b) sample line; (c) stitching result with tilt alignment; (d) stitching result with power removal

从表1可见,拼接过程中不去除参考镜离焦误差时,参考面离焦系数越大,拼接精度越低。当参考镜离焦为 $\lambda/1000$ 时,8个子孔径的拼接误差约 $\lambda/50$ (PV值),参考镜离焦为 $\lambda/100$ 时,拼接误差达到 $\lambda/3$ 。离焦仿真系数分别为0.001 λ 、0.005 λ 和0.01 λ 时,计算得到的离焦系数分别为:0.0015 λ 、0.0053 λ 和0.0102 λ ,可见采用本文提出的方法,能够准确计算参考镜的离焦,并且随着参考镜离焦的增大,离焦计算精度提高,这是由于参考镜离焦增大时,被测面形的影响减小,累积误差影响增大。去除参考镜离焦误差后,拼接检测精度可以达到 $\lambda/40\sim\lambda/60$ (PV值)。仿真被拼接面形真值 $f_{PV}=0.1358\lambda$, $f_{RMS}=0.0254\lambda$ 。

表 1 不同离焦系数下的仿真结果

Table 1 Simulation result of different power coefficients

Power / λ	Accumulation error / λ	Calculated power / λ	Without power removal		With power removal	
			PV / λ	RMS / λ	PV / λ	RMS / λ
0.001	0.1472	0.0015	0.1538	0.0319	0.1102	0.0216
0.005	0.5044	0.0053	0.2706	0.0647	0.1160	0.0228
0.01	0.9745	0.0102	0.4170	0.1078	0.1189	0.0234

3 实验

3.1 离焦对拼接检测的影响

采用 Zygo 公司 4 inch(100 mm)DynaFiz 干涉仪组建平面子孔径拼接干涉测量系统,对上述 450 mm \times 60 mm 长条镜面形进行子孔径拼接干涉检测,参考镜标称面形精度为 $\lambda/50$ (PV 值)。采用 8 个子孔径完成全口径测量,如图 8 所示。

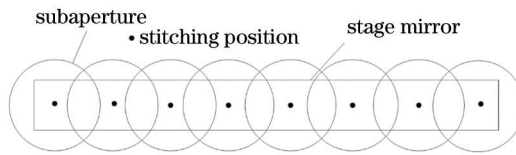


图 8 子孔径拼接路径

Fig.8 Stitching routine

图 9 为拼接测量结果,未去倾斜拼接面形[图 9(a)]、未去倾斜拼接面形通过参考镜中心的横向采样线[图 9(b)]、未去除参考镜离焦误差时的去倾斜拼接结果[图 9(c)]、去除参考镜离焦误差后的拼接检测结果[图 9(d)]。拼接检测结果的横向尺寸与大口径干涉仪有所区别是由于拼接干涉仪空间分辨率高,在长条镜边缘区域能够得到更高质量的干涉条纹的原因。

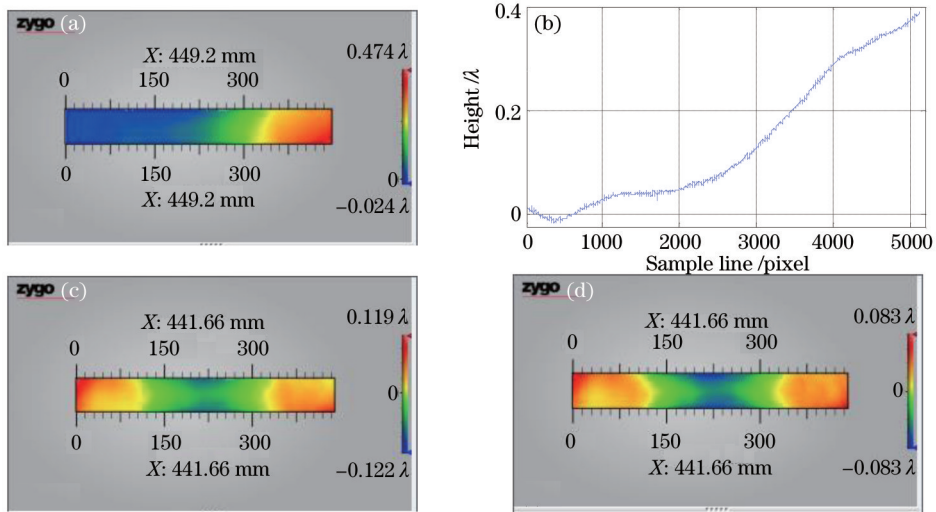


图 9 直接拼接结果。(a) 未去倾斜拼接面形;(b) 横向采样线;(c) 去倾斜拼接面形;(d) 去离焦后拼接面形

Fig.9 Directly stitching result. (a) Stitching result without tilt alignment; (b) sample line; (c) stitching result with tilt alignment;

(d) stitching result with power removal

计算得到拼接累积误差为 0.4105λ ,参考面的离焦系数为 $a_4=0.0021\lambda$ 。未去除参考镜离焦前拼接检测结果为 $f_{PV}=0.2408\lambda$, $f_{RMS}=0.0425\lambda$,去除参考镜离焦后,拼接检测结果为 $f_{PV}=0.1661\lambda$, $f_{RMS}=0.0344\lambda$ (注:大口径干涉仪测量结果 $f_{PV}=0.1358\lambda$, $f_{RMS}=0.0254\lambda$,参考镜面形误差 PV 值为 $\lambda/10$)。与大口径干涉仪测量结果相比,测量误差 PV 值从 $\lambda/10$ 减小至 $\lambda/30$,RMS 测量误差从 $\lambda/58$ 减小至 $\lambda/110$ 。由于用来对比的大口径干涉仪的检测精度为 $\lambda/10$,因此,可以认为去除离焦误差后,拼接检测精度达到 $\lambda/10$ (PV 值)以内。拼接测量结果与大口径测量结果的局部面形差别可能由单个子孔径的测试误差及测试环境、被测元件夹持条件不同等实验因素导致。

可见,实验结果与理论仿真相符,采用所提出的方法能够准确标定参考镜离焦,消除累积误差,提高拼接精度。

3.2 高阶面形误差对拼接检测的影响

为了验证参考镜面形高阶项对拼接检测的影响,对参考镜面形进行绝对检验,得到的参考镜高阶面形分布如图 10 所示,绝对检验重复性为 $\lambda/100$ (PV 值)。结合参考镜面形离焦误差和高阶面形误差,分别在拼接结果中消除面形高阶项、离焦项与高阶项的结果如图 11、12 及表 2 所示。表中的测量误差以 600 mm 口径干涉仪的测量结果作为真值[参考镜面形精度 $\lambda/10$ (PV 值)]。大口径干涉仪测量结果 $f_{PV}=0.1358\lambda$, $f_{RMS}=0.0254\lambda$ 。

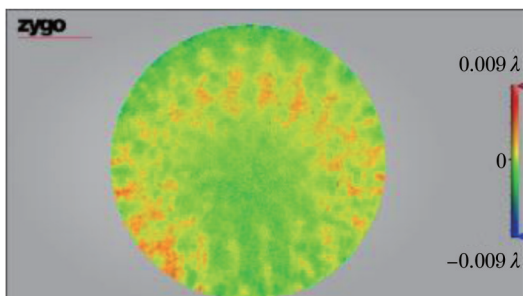


图 10 参考面高阶面形误差

Fig.10 High order surface error of reference

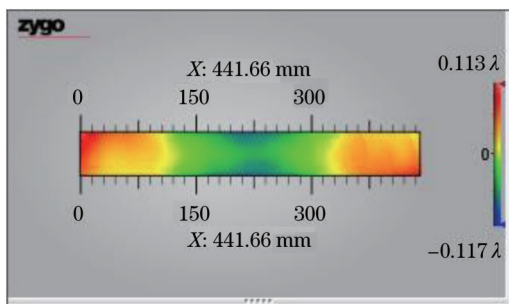


图 11 去除高阶面形误差后的拼接结果

Fig.11 Stitching result with high order surface error removal

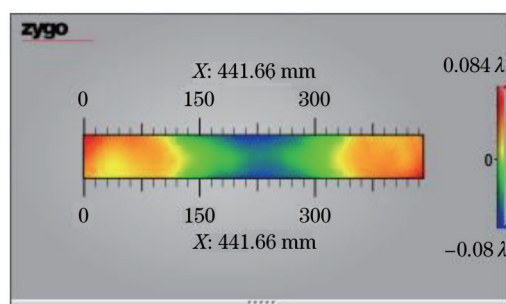


图 12 去除高阶面形误差和离焦后的拼接结果

Fig.12 Stitching result with high order surface error and power removal

表 2 拼接结果面形 PV 与 RMS 值

Table 2 PV and RMS of stitching result

	PV / λ	PV error / λ	RMS / λ	RMS error / λ
Stitching without high order	0.2292	0.0934	0.0414	0.0160
Stitching without power	0.1661	0.0303	0.0344	0.009
Stitching without high order and power	0.1640	0.0282	0.0333	0.0081

表 2 实验结果表明离焦是引起拼接误差累积的主要因素,消除参考镜高阶面形误差并不能显著提高拼接检测精度。

4 结 论

本文提出了一种降低平面子孔径拼接系统拼接累积误差的方法。该方法首先利用未补偿参考面面形误差的拼接结果计算累积误差,根据所推导的累积误差与离焦的关系表达式,计算并在拼接结果中消除参考面离焦误差。理论仿真与实验结果表明,离焦是引起拼接误差累积的主要因素,采用绝对检验方法消除参考镜高阶面形误差并不能显著提高拼接检测精度,本方法能够准确标定参考镜离焦,消除累积误差,提高拼接精度。在 450 mm 一维范围内,与大口径干涉仪检测结果比对,拼接测量误差 PV 值从 $\lambda/10$ 减小至 $\lambda/30$ 。并且,所提出的方法仅通过对拼接数据的数据处理即可实现,不需要增加额外的辅助部件或标定流程,具有易实现、精度高、不增加系统成本的优点。

- 1 Yunjun Lu, Feng Tang, Xiangzhao Wang, *et al.*. A high accuracy subaperture stitching system for nonflatness measurement of wafer stage mirror[C]. SPIE, 2014, 9276: 927617.
- 2 C Kim, J Wyant. Subaperture test of a large at on a fast aspheric surface[J]. J Opt Soc Am, 1981, 71(12): 1587.
- 3 Tilman W Stuhlinger. Subaperture optical testing: experimental verification[C]. SPIE, 1986, 656: 118-127.
- 4 M Bray. Stching interferometer for large plano optics using a standard interferometer[C]. SPIE, 1997, 3134: 39-50.
- 5 Marc Tricard, Greg Forbes, Paul Murphu. Subaperture metrology technologies extend capabilities in optics manufacturing[C]. SPIE, 5965: 59650B.
- 6 Christopher W King. An automated metrology workstation for the measurement of large diameter convex surfaces[C]. Optical Fabrication and Testing, 2014: OTh3B.
- 7 Christopher W King, Matthew Bibby. Development of a metrology workstation for full-aperture and subaperture stitching measurements [C]. Proc CIRP, 2014, 13: 359-364.
- 8 Mingyi Chen, Weiming Cheng, Cunwu Wang. Multi-aperture overlap-scanning technique for large aperture test[C]. SPIE, 1991, 1553: 626-635.
- 9 Bai Jian, Chen Shangyi. Objeet function analysis for suba perture testing and connection[J]. Optical Instrument, 1997, 19(4-5): 36-39.
白 剑, 程上彝. 子孔径检测及拼接的目标函数分析法[J]. 光学仪器, 1997, 19(4-5): 36-39.
- 10 Zahng Rongzhu, Shi Qikai, Cai Bangwei, *et al.*. Study on the experiments of the stitching interferometer[J]. Optical Technique, 2004, 30(2): 173-175.
张蓉竹, 石琪凯, 蔡邦维, 等. 子孔径拼接干涉检测实验研究[J]. 光学技术, 2004, 30(2): 173-175.
- 11 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.
- 12 Wang Xiaokun. Testing large SiC mirror by subaperture stitching interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 051202.
王孝坤. 大口径碳化硅反射镜面形子孔径拼接干涉检测[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 051202.
- 13 Zheng Ligong, Yan Lisong, Wang Xiaokun, *et al.*. Research on sub-aperture stitching testing technology based on iterative gradient algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011202.
郑立功, 闫力松, 王孝坤, 等. 基于迭代梯度算法的子孔径拼接检测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011202.
- 14 Michael Bray. Stching interferometry and absolute surface shape metrology: similarities[C]. SPIE, 2001, 4451: 375-383.
- 15 Michael Bray. MBO-metrology, stitching interferometry: the practical side of things[C]. SPIE, 2009, 7426: 74260Q.
- 16 Peng Su, James H Burge, Robert E Parks. Application of maximum likelihood reconstruction of subaperture data for measurement of large flat mirrors[J]. Appl Opt, 2010, 49(1): 21-31.
- 17 Donald Golini, Greg Forbes, Paul Murphy. Method for Self-Calibrated Sub-Aperture Stching for Surface Figure Measurement[P]. US 6956657, [2005-10-18].
- 18 Zhou You, Wang Qing, Liu Shijie. A method to modify systematic errors in the stitching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 051202.
周 游, 王 青, 刘世杰. 一种修正子孔径拼接中系统误差的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 051202.
- 19 Wu Shixia, Tian Ailing, Liu Bingcai, *et al.*. System error correcting method in sub-aperture stitching[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(4): 639-643.
吴世霞, 田爱玲, 刘丙才, 等. 子孔径拼接中系统误差的修正方法[J]. 应用光学, 2013, 34(4): 639-643.
- 20 Miao Erhong, Su Dongqi, Peng Shijun. High precise absolute flat calibration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 051203.
苗二龙, 苏东奇, 彭石军. 高精度平面绝对标定[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 051203.
- 21 L Rayleigh. Interference bands and their applications[J]. Nature, 1893, 48(1235): 212-214.