

高精度平面子孔径拼接算法研究

朱鹏辉^{1,2} 唐 锋¹ 卢云君¹ 王向朝¹ 郭福东¹ 李 永^{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 对平面子孔径拼接累积误差的理论分析及数值仿真表明,参考镜面形的拼接重叠区域的局部斜率差和直流偏差是产生累积误差的原因。为了提高大口径平面光学元件子孔径拼接检测精度,提出一种简单有效的可以减小子孔径拼接测量累积误差的方法,该方法采用第 4 项和第 6 项泽尼克像差拟合一个假设的准参考镜面形,再从每个子孔径测量结果中减去,最后拼接成全口径面形。对 450 mm×60 mm 的平面镜进行了 8 个子孔径的拼接检测,去除准参考镜面形前后,拼接测量结果与 Zygo 公司 24 英寸(600 mm)口径干涉仪检测结果的偏差峰谷(PV)值从 $\lambda/7$ 减小至 $\lambda/100$ 。所拟合的准参考镜面形误差为 0.02λ (PV 值),与标准镜的面形误差为同一量级,其对每个子孔径测量结果的影响可以忽略。实验结果表明,本文方法能够有效控制拼接累积误差,提高拼接检测精度。

关键词 测量;干涉测量;大口径平面镜;子孔径拼接;误差累积

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1104002

Research on High Accuracy Sub-Aperture Stitching Algorithm for Flat Optics

Zhu Penghui^{1,2} Tang Feng¹ Lu Yunjun¹ Wang Xiangzhao¹ Guo Fudong¹ Li Yong^{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 Theoretical analysis and numerical simulation on the error accumulation in sub-aperture stitching for flat optics show that the slope and piston difference of the surface figure of the reference flat in the overlap region lead to error accumulation. In order to improve the measurement accuracy of the stitching interferometer for large aperture flat optics, a simple and effective method is proposed to reduce the accumulated error of the sub-aperture stitching measurements. The 4th and 6th Zernike aberration are used to synthesize the virtual reference flat. Sub-apertures with the virtual reference surface figure removed are stitched together to obtain a full aperture surface figure. A flat mirror with aperture of 450 mm×60 mm is tested by 8 sub-apertures. The deviation between the stitching result and the test result of a Zygo 24 inch (600 mm) interferometer peak-valley (PV) value is reduced from $\lambda/7$ to $\lambda/100$ after removing the virtual reference surface figure. The flatness of the virtual reference surface is 0.02λ (PV value), which is comparable to the real figure of the reference flat. The influence of removing of virtual reference surface on the measurement results of each sub-aperture can also be ignored. Experimental results show that the accumulated error is controlled effectively and the measurement accuracy is evidently improved by the proposed method.

Key words measurement; interferometry; lager-aperture flats; sub-aperture stitching; error accumulation

OCIS codes 120.3180; 120.6650; 120.6660

收稿日期: 2016-04-11; 收到修改稿日期: 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(60938003,61205102,61275207)、中国科学院青年创新促进会

作者简介: 朱鹏辉(1991—),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: leslie@siom.ac.cn

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)

1 引 言

随着现代光学的发展,大口径平面光学元件在极大规模集成电路制造、天文望远镜、惯性约束聚变和同步辐射等系统中的应用越来越广泛,也对大口径光学元件的面形检测精度提出了很高的要求。子孔径拼接方法易拓展测量口径、测量空间分辨率高、系统成本低,能够实现大口径光学元件的高精度检测。

1981年, Kin等^[1]提出子孔径拼接的概念。1983年, Thunen等^[2]提出 Thunen-Kwon 算法, Chow等^[3]提出同步拟合算法。1986年, Stuhlinger^[4]提出离散相位方法。1994年, Otsubo等^[5]在无迭代的拼接算法中引入误差均化思想。1997年, Bray^[6]研发的拼接干涉仪成功应用于国家点火装置(NIF)和兆焦耳激光装置(LMJ)等惯性约束聚变(ICF)系统的大口径平面光学元件检测中。21世纪,美国 QED公司和英国 Zeeko公司相继开发出商用的子孔径拼接干涉仪^[7-9]。在国内,1992年,上海科技大学 Chen等^[10]提出多子孔径重叠扫描技术(MAOST)。随后,南京理工大学、浙江大学、四川大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等逐渐对子孔径拼接检测技术展开研究^[11-15]。

对于平面检测,由于拼接累积误差难以消除,目前尚没有商用的平面子孔径拼接干涉仪检测精度能够媲美大口径干涉仪。2001年, Bray^[16]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误差的累积,并提出一种类似剪切干涉的方法标定参考镜面形。Arizona光学中心^[17]、QED公司^[7]和 Zeeko公司^[8-9]等均采用类似旋转平移绝对检验方法消除参考镜面形误差,但是绝对检验技术实际上无法准确标定参考面离焦项,而离焦项是影响子孔径拼接累积误差的重要因素之一。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所采用液面法精确标定平面参考镜的离焦,对实验环境提出了很高的要求^[18]。本课题组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^[19],但是忽略了直流偏差和垂直于拼接方向的局部斜率差的影响。

本文对拼接累积误差的产生进行了理论分析和数值仿真,提出拼接累积误差是参考面拼接重叠区域的局部斜率差和直流偏差导致的。为了提高大口径平面光学元件子孔径拼接检测精度,提出一种简单有效的方法,该方法利用第4项和第6项泽尼克像差拟合一个假设的准参考镜面形,再从每个子孔径面形测量结果中减去,最后拼接合成全口径面形。所拟合的准参考镜面形峰谷(PV)值误差为 0.02λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),与标准镜的面形误差为同一量级,其对每个子孔径测量结果的影响可以忽略。实验结果表明,该方法能有效地控制拼接累积误差,提高拼接检测精度。

2 最小二乘法拼接子孔径的基本原理

图1描述了平面子孔径拼接干涉仪及基本原理。 W_j 和 W_{j+1} 是相邻的两个子孔径,它们之间有一部分互相重叠;由于测量过程中存在机械定位误差,相邻的子孔径之间存在相对倾斜和平移;通过最小二乘法使重叠区域数据差别最小,计算相对平移与倾斜量,调整 W_{j+1} ,从而实现两个子孔径面形数据的拼接,

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

式中 a 、 b 、 c 分别表示 W_{j+1} 相对 W_j 沿 x 、 y 方向的倾斜量及沿光轴方向的平移量。

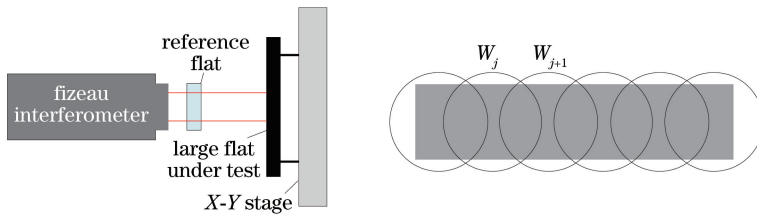


图1 平面子孔径拼接干涉仪

Fig. 1 Sub-aperture stitching interferometer for flats

3 重叠区域的斜率差与直流偏差对累积误差的影响分析

最小二乘法拼接子孔径能消除拼接过程中的机械倾斜和平移,但是由于参考镜不同区域的面形差异,导

致子孔径重叠区域测量结果会存在斜率和直流量的微小差异,这个微小差异会在每次拼接过程中累积放大。如图 2 所示,拼接过程中,相邻两个子孔径的拼接重合区域对应被测镜的同一局部面形,但是包含了不同区域的参考镜面形误差 W_{rr} 和 W_{rl} 。

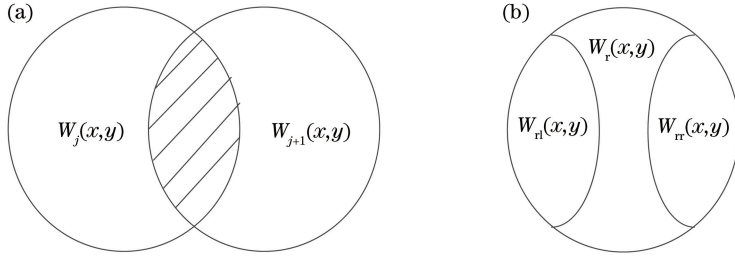


图 2 (a)相邻子孔径的重叠区域和(b)其对应的参考面误差

Fig. 2 (a) Overlapping area and (b) corresponding reference error in adjacent sub-apertures

假设参考镜拼接重合区域 W_{rl} 和 W_{rr} 具有不同的局部倾斜角, W_{rl} 与 W_{rr} 在 x, y 方向倾斜角差分别为 2α 和 2β 。图 3、4 表明,若被测面为理想平面,每次拼接均会在 x, y 方向分别引入累增的 2α 和 2β 倾斜角调整误差,使拼接结果与理想平面产生较大偏离,即产生了拼接累积误差。

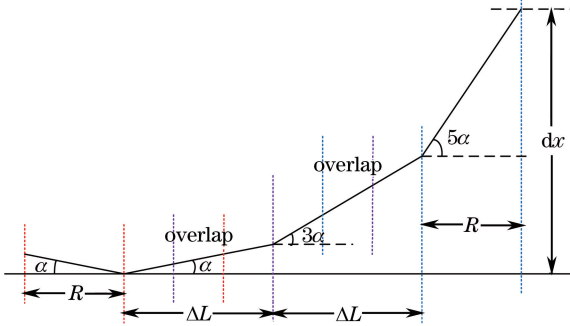


图 3 x 方向累积误差分析

Fig. 3 Analysis of accumulated error in x -direction

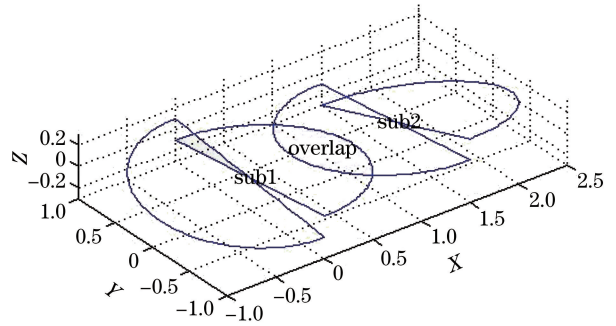


图 4 拼接后的第一个子孔径和第二个子孔径

Fig. 4 1st and the 2nd sub-aperture after stitching

在不去倾斜的情况下,拼接重合区域 x 方向斜率差引起的拼接累积误差可以表示为

$$d_x = k_x \cdot [\Delta L \cdot (n - 1)^2 + L \cdot (2n - 1)] / 2, \quad (2)$$

式中 k_x 是 x 方向斜率差, d_x 是 x 方向中心采样线最大误差, ΔL 是子孔径拼接距离, L 是子孔径半径大小, n 是子孔径个数。 y 方向斜率差引起的拼接累积误差可以表示为

$$d_y = k_y \cdot [H \cdot (n - 0.5)], \quad (3)$$

式中 k_y 是 y 方向斜率差, d_y 是 y 方向采样线最大误差, H 是采样线的长度。

图 5 是拼接重合区域直流偏差在拼接过程中的累积,在去倾斜处理后,直流累积误差被消除,仅影响子孔径面形精度。直流偏差越小,拼接次数越多,直流偏差的累积误差相对于 x, y 方向的累积误差就越小。但是,由于存在直流累积误差,通过(2)式无法直接从最大误差准确计算 x 方向的局部斜率差,这是课题组之前报道的工作^[19]未考虑到的。

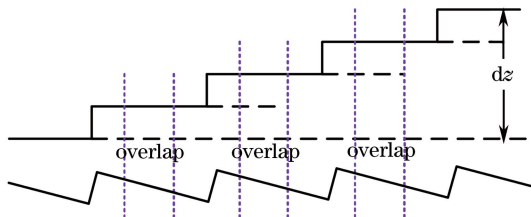


图 5 z 方向累积误差分析

Fig. 5 Analysis of accumulated error in z -direction

4 参考面各项泽尼克像差对拼接影响的仿真分析

假设被测镜为理想平面,用前 37 项泽尼克多项式来描述参考镜面形,设置各项泽尼克系数分别为 1(归一化,任意量纲),子孔径半径大小 $R=600$ pixel,拼接距离 $\Delta L=700$ pixel,一共 8 个子孔径进行 7 次拼接。

图 6 分别给出了第 4、6、10 项泽尼克像差图,以及这几项作为参考镜面形进行拼接时左右两侧拼接重合区域的局部面形差。表 1 给出了图 6(d)~(f)拼接重合区域局部斜率差和直流量偏差的最小二乘拟合结果。可见,第 4 项泽尼克像差拼接重合区域在 x 方向有局部斜率差,第 6 项泽尼克像差有 y 方向局部斜率差,第 10 项泽尼克像差只存在直流偏差。

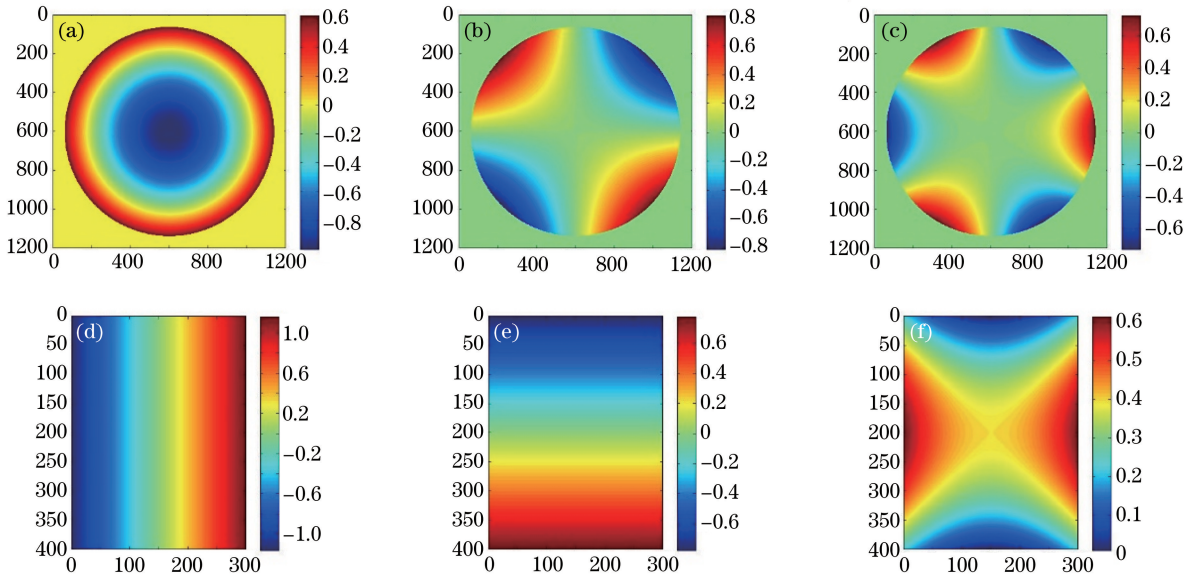


图 6 泽尼克像差图的(a)第 4 项;(b)第 6 项;(c)第 10 项;(d)~(f)对应的泽尼克像差左右两侧拼接重合区域局部面形差

Fig. 6 (a) 4th; (b) 6th; (c) 10th of Zernike aberration images; (d)-(f) corresponding local shape error of left and right stitching overlap region of Zernike aberration

表 1 局部面形的斜率差、直流量偏差

Table 1 Slope and piston difference of the local shape

No.	k_x	k_y	Piston
4th Zernike	-0.0078	0	1.9483
6th Zernike	0	-0.0039	2.3353
10th Zernike	0	0	-0.3403

图 7 给出了标准镜面形分别为第 4、6、10 项泽尼克像差时的拼接仿真结果,与上文第 3 节的分析结果相一致。第 4 项泽尼克像差(拼接方向 x 方向局部斜率差)拼接结果的 PV 值从 1.6241 增加到 49.6397;第 6 项泽尼克像差(拼接垂直方向 y 方向局部斜率差)拼接结果的 PV 值从 1.6193 增加到 15.3063;第 10 项泽尼克像差(局部直流偏差)的拼接结果的 PV 值变化不大,但每个子孔径有明显的测量误差并存在拼接痕迹。可见,每项泽尼克像差在拼接重合区域存在不同的 x 、 y 方向局部斜率差和局部直流偏差,拼接方向的局部斜率差产生的拼接累积误差最大,拼接垂直方向的局部斜率差次之。

图 8、表 2 对上述仿真条件下第 4~37 项泽尼克像差产生的拼接累积误差进行了总结。第 4 项泽尼克像差产生的拼接累积误差最大,其次是第 16、21 项,这 3 项均存在拼接方向即 x 方向的局部斜率差;第 6、13、29 项存在拼接垂直方向即 y 方向的局部斜率差,拼接累积误差相对较小;第 7、10 项等只有直流偏差的泽尼克像差,拼接累积误差并不明显;没有一项泽尼克像差能同时产生 x 、 y 两个方向的局部斜率差。

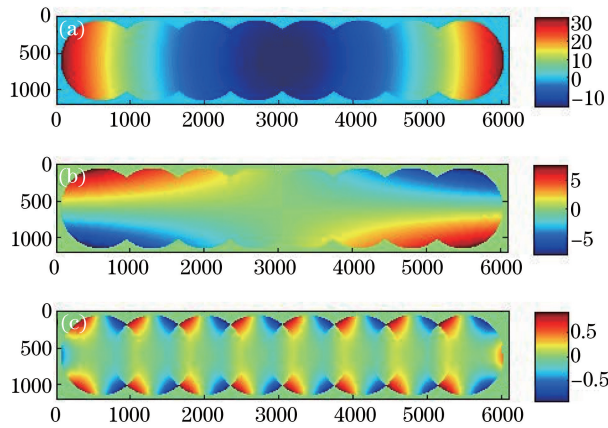


图 7 泽尼克像差的拼接结果的(a)第 4 项;(b)第 6 项;(c)第 10 项

Fig. 7 (a) 4th; (b) 6th; (c) 10th of stitching results of Zernike aberration

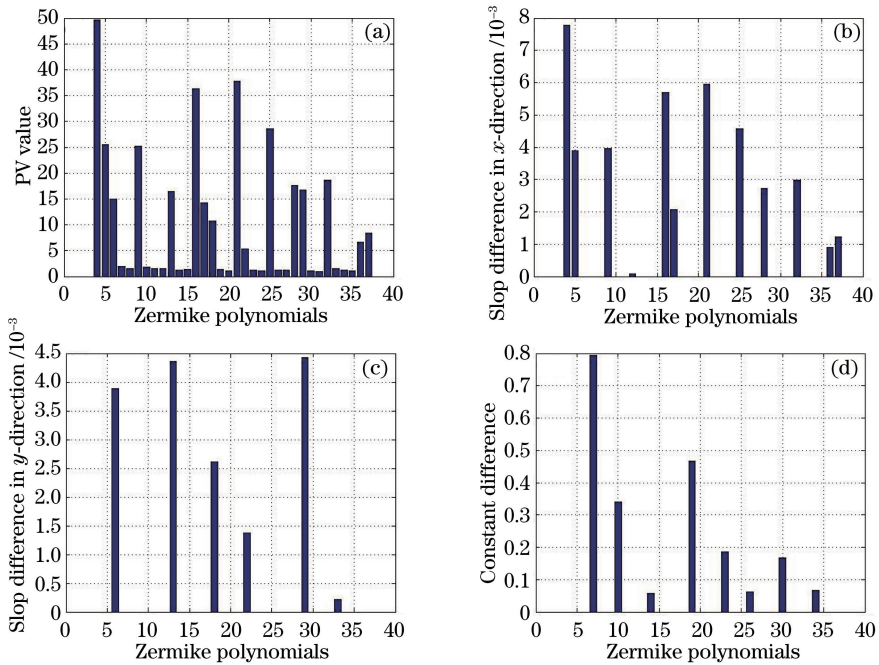


图 8 不同泽尼克像差的(a)未减去局部斜率差和直流偏差的拼接结果的 PV 值;

(b) x 方向局部斜率差;(c) y 方向局部斜率差;(d) 直流偏差

Fig. 8 (a) PV value of stitching result without the slope and piston difference removed; (b) local slope difference in x -direction; (c) local slope difference in y -direction; (d) piston difference of different Zernike polynomials

表 2 拼接的影响及相对应的泽尼克像差

Table 2 Different effects on stitching and corresponding Zernike aberration

Different effects on stitching	Zernike polynomials
Slope in x -direction and piston	4,5,9,12,16,17,21,25,28,32,36,37
Slope in y -direction and piston	6,13,18,22,29,33
Only piston	7,10,14,19,23,26,30,34
No effect	8,11,15,20,24,27,31,35

5 消除拼接累计误差及拼接痕迹

按照上文分析,如果在每次拼接时减去拼接重合区域的局部斜率差,则原理上可以消除累积误差。采用

第 5 项和第 13 项泽尼克像差产生组合波面,其中第 5 项泽尼克系数为 1、第 13 项泽尼克系数为 0.03。图 9 分别给出了该组合波面直接拼接以及在拼接过程中减去局部斜率差的拼接结果。可见减去局部斜率差后,拼接累积误差得到了良好的控制。但是,在拼接结果存在明显的拼接痕迹,也不符合一般光学表面的连续性特征。

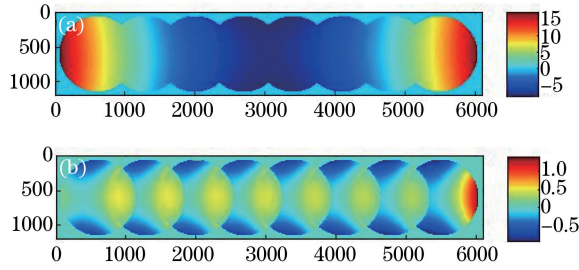


图 9 第 5 项和第 13 项泽尼克像差组合波面的(a)直接拼接和(b)减去局部斜率差拼接结果

Fig. 9 Stitching results of synthetic figure using 5 th and 13 th Zernike aberrations (a) directly and (b) with the local slope difference removed

对第 4~37 项泽尼克像差进行拼接仿真发现,只有第 4~6 项泽尼克像差的拼接结果是没有拼接痕迹的,其他像差均存在与图 9(b)类似的拼接痕迹。因此,采用 4~6 项泽尼克像差拟合出与参考面具有相同局部斜率差的准参考面面形,从每个子孔径测量结果中减去,则可以消除拼接累积误差,并避免引入拼接痕迹。由于第 4 项泽尼克像差在 x 方向产生累积误差,第 6 项在 y 方向产生累积误差,因此本文采用第 4 项和第 6 项泽尼克像差合成具有相同 x 、 y 方向局部斜率差的准标镜面形。

在上文所述仿真条件下,拼接重叠区域的局部斜率差 k_x 、 k_y 和所拟合的准参考面的第 4 项和第 6 项泽尼克系数呈正比关系,即

$$c_4 = -k_x / 0.0078, c_6 = -k_y / 0.0039, \quad (4)$$

式中 c_4 是第 4 项泽尼克系数, c_6 是第 6 项泽尼克系数。当拼接重叠区域改变时,合成准参考面的泽尼克系数与局部斜率差之间的比例系数也会改变,需要重新计算。

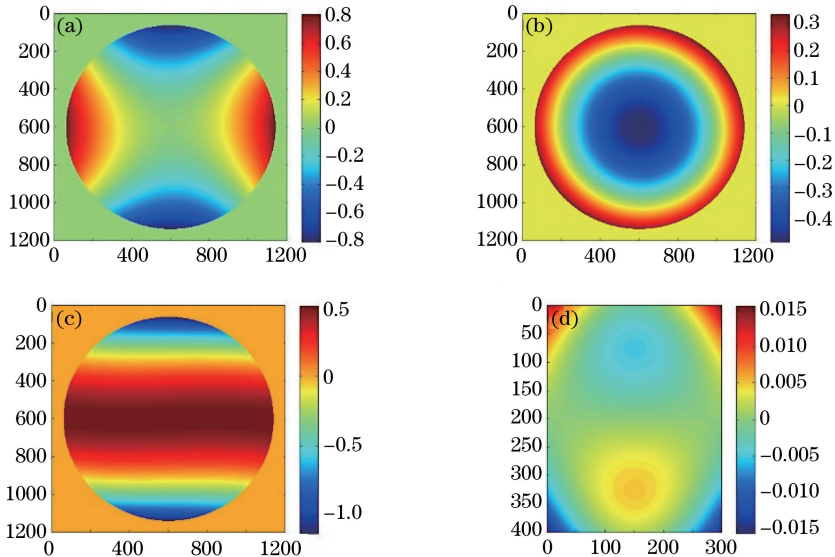


图 10 (a)参考镜面形;(b)合成准参考镜面形;(c)参考镜面形与准参考镜面形之间的残差;(d)残差的局部面形差

Fig. 10 (a) Reference surface; (b) synthetic virtual reference surface; (c) mismatch between the real and virtual reference surface; (d) local surface difference of the mismatch

将图 9 对应的局部斜率差代入(4)式中,求得合成准参考面的泽尼克系数分别为 $c_4 = 0.5$, $c_6 = -0.0336$ 。图 10 给出了仿真中参考镜面形、合成的准参考镜面形、参考镜面形与准参考镜面形之差,以及减去准参考镜面形后,拼接重叠区域的面形差。可见,所合成的准参考镜面形并非参考镜的真实面形,而

是为了消除拼接累积误差及拼接痕迹而引入的数学上的辅助面形。准参考镜面形的引入理论上会影响每个子孔径的检测精度,但由图 10 可知,引入的准参考镜面形与参考镜真实面形在同一量级,减去准参考镜面形后,并不会影响每个子孔径的面形检测精度量级。图 11 为组合波面减去该准参考面的拼接结果,可见拼接累积误差被消除且没有明显的拼接痕迹。

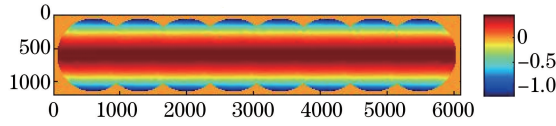


图 11 组合波面减去合成准参考面的拼接结果

Fig. 11 Stitching result of the synthetic figure with the virtual reference surface removed

本文方法不仅适用于一维拼接,也适用于二维拼接。不同于一维拼接,二维拼接在 x 、 y 方向分别有一组拼接重合区域,即具有两组拼接重合区域。二维拼接时需要首先进行 x 和 y 两个方向的一维拼接,分别标定两组拼接重合区域的局部斜率差,然后合成一个兼顾两组局部斜率差的准参考镜面形,从子孔径测量结果中减去后再拼接合成全口径面形,则可以消除二维拼接过程中的子孔径拼接累积误差。

6 实 验

采用 Zygo 公司 4 英寸 (100 mm) DynaFiz 干涉仪组建平面子孔径拼接干涉测量系统,对 $450\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 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 个子孔径进行一维拼接测量,如图 12 所示。图 13 是 Zygo 公司 24 英寸 (600 mm) 干涉仪测量结果,参考镜标称面形精度为 $\lambda/12$ (PV 值),作为拼接测量结果的比对标准。

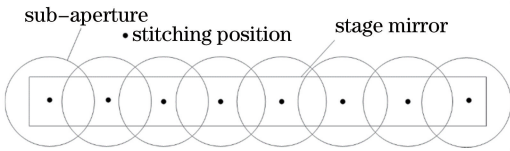


图 12 子孔径拼接路径

Fig. 12 Stitching routine of sub-aperture

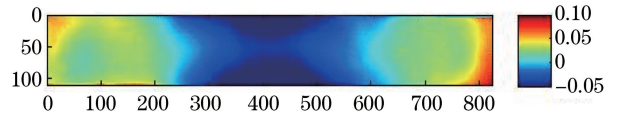


图 13 大口径干涉仪测量结果

Fig. 13 Measurement with large-aperture interferometer

在子孔径拼接测量中,保证每个子孔径具有较少的干涉条纹数,避免干涉仪回程误差对子孔径测量精度的影响;去除子孔径测量结果的直流和倾斜量,则子孔径面形测量结果与子孔径拼接测量过程中的机械平移和倾斜无关。每个子孔径测量结果中拼接重叠区域的局部斜率主要由标准镜拼接重叠区域局部斜率以及非重叠区域被测面形不同导致。子孔径拼接过程中的倾斜调整量是拼接重叠区域的标准镜面形局部斜率差与非重叠区域被测面形不同导致的随机斜率差之和,当拼接数量较大时,非重叠区域被测面形不同导致的随机斜率差之和趋于 0,因此对多组子孔径倾斜调整量求均值,理论上就可以得到标准镜的拼接重叠区域的局部斜率差,如表 3 所示。当拼接数量不足时,可以通过辅助拼接测量进行标定。

表 3 相邻子孔径的倾斜调整量

Table 3 Slope adjustment value of adjacent sub-apertures

Sub-aperture	k_x	k_y
1,2	-3.1936×10^{-5}	-6.5980×10^{-5}
2,3	5.9680×10^{-5}	-8.9759×10^{-5}
3,4	-4.4554×10^{-5}	-5.8576×10^{-5}
4,5	-7.5903×10^{-5}	-6.2201×10^{-5}
5,6	-3.3922×10^{-5}	-5.4277×10^{-5}
6,7	3.3342×10^{-5}	-6.2668×10^{-5}
7,8	-3.8579×10^{-5}	-5.2214×10^{-5}
Mean value	-1.8839×10^{-5}	-6.3668×10^{-5}

从表 3 得到重叠区域的局部斜率差 $k_x = -1.8839e^{-5}$, $k_y = -6.3668e^{-5}$, 根据(4)式,得到 $c_4 = 0.0024$,

$c_6 = 0.0163$, 然后通过第 4 项和第 6 项泽尼克多项式拟合标准镜面形, 如图 15(a) 所示, 其误差为 $\lambda/50$ (PV 值), 与标准镜的面形误差为同一量级, 对每个子孔径测量结果的影响可以忽略。图 15(b) 为合成准参考镜拼接重合区域的局部面形差, 其 x 、 y 两个方向的斜率等于需合成的局部斜率差。

图 14 分别给出了直接拼接, 从每个子孔径中减去 k_x 、减去 k_y , 以及同时减去 k_x 、 k_y 的拼接结果。对比图 14 和图 13 可以发现, 减去 k_x 后, y 方向累积误差仍然存在; 同时减去 k_y 后, x 方向累积误差仍然存在, 且拼接痕迹比较明显; 同时减去 k_x 、 k_y 后, 面形与大口径测量结果已经非常接近, 只是存在拼接痕迹。而减去准参考面后, 累积误差被消除且没有拼接痕迹, 如图 16 所示。去除准参考镜面形前后, 拼接测量结果与大口径干涉仪测量结果的 PV 偏差从 $\lambda/7$ 减小至 $\lambda/100$ 。

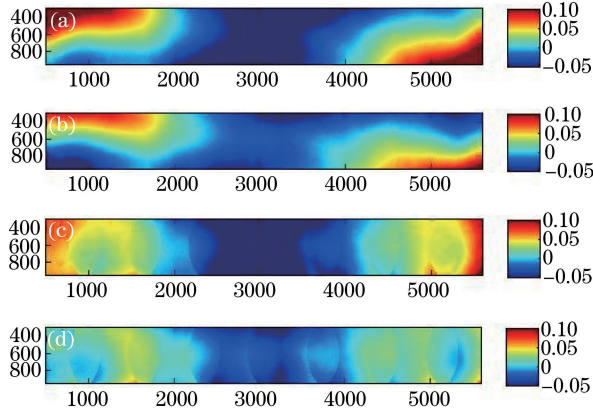


图 14 (a)直接;(b)减去 k_x ;(c)减去 k_y ;(d)减去 k_x 和 k_y 的拼接结果

Fig. 14 Stitching results (a) directly; (b) k_x removed; (c) k_y removed; (d) k_x and k_y removed

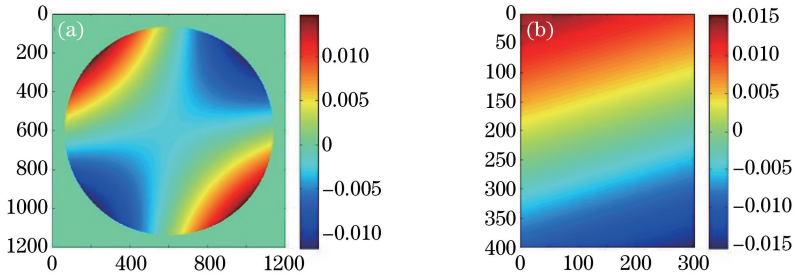


图 15 (a)合成准参考镜面形;(b)局部面形差

Fig. 15 (a) Synthetic virtual reference surface; (b) difference of the local surface

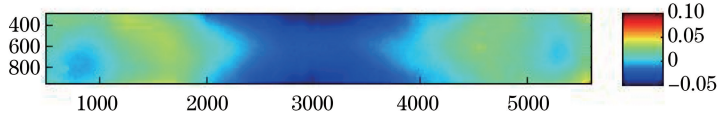


图 16 减去准参考面的拼接结果

Fig. 16 Stitching result with virtual reference surface removed

表 4 图 13、图 14 和图 16 的 PV 值和 RMS 值

Table 4 PV and RMS values in Fig. 13, Fig. 14 and Fig. 16

Measurement method	PV / λ	RMS / λ
Directly	0.3180	0.0509
k_x removed	0.2515	0.0345
k_y removed	0.2591	0.0434
k_x and k_y removed	0.1731	0.0220
Synthetic reference removed	0.1539	0.0213
Measured by large-aperture interferometer	0.1663	0.0335

直流量偏差不会引起拼接累积误差,只会影响每个子孔径的面形测量精度,但是当直流偏差较大时,在 x 方向和 y 方向斜率差被充分去除后,直流偏差将成为限制高精度拼接测量的主要因素。而直流偏差不能无拼接痕迹的独立拟合,为了实现高精度拼接检测,拼接系统需要采用面形精度较高的标准镜。

本课题组已报道的工作忽略了 y 方向局部斜率差和直流偏差对拼接的影响^[19]。实际上该报道中, y 方向的拼接累积误差是通过对标准镜的绝对检验数据消除的。但是,一方面,由于直流量的累积,通过最大误差无法准确求得离焦,导致拼接结果具有一定误差。另一方面,标准镜的面形会随着时间和外部温度、湿度的变化而改变,要保证拼接检测精度,必须对标准镜面形进行周期性标定,这在拼接干涉仪的实际应用中会带来不便。本文方法不需要对标准镜面形进行绝对标定,只通过对拼接数据的处理即可实现对累积误差的有效控制,提高拼接检测精度。

7 结 论

对平面子孔径拼接累积误差产生的原因进行了系统分析,提出拼接累积误差是干涉仪标准镜面形的拼接重合区域的局部斜率差及直流偏差导致的。在此基础上,提出了一种新的减小平面子孔径拼接累积误差的方法。该方法通过子孔径拼接过程中的倾斜调整量计算拼接重合区域局部斜率差,然后根据该斜率差利用第 4 项和第 6 项泽尼克像差合成一个准参考镜面形,从每个子孔径面形测量结果中减去,最后拼接合成全口径面形。实验中,对 450 mm×60 mm 的平面镜进行了 8 个子孔径的拼接检测,去除准参考镜面形前后,拼接测量结果与 Zygo 公司 24 英寸(600 mm)口径干涉仪检测结果的 PV 偏差从 $\lambda/7$ 减小至 $\lambda/100$ 。合成准参考面与标准镜的面形精度为同一量级,因此,对每个子孔径测量结果的影响可以忽略。实验结果表明,所提出的方法能够有效地控制拼接累积误差,提高拼接检测精度,而且该方法仅通过对拼接数据的处理即可实现,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。

参 考 文 献

- 1 Kin C J, Wyant J C. Subaperture test of a large flat or a fast aspheric surface[J]. J Opt Soc Am, 1981, 71: 1587.
- 2 Thunen J G, Kwon O Y. Full aperture testing with subaperture test optics[C]. SPIE, 1983, 351: 19-27.
- 3 Chow W W, Lawrence G N. Method for subaperture testing interferogram reduction[J]. Optics Letters, 1983, 8(9): 468-470.
- 4 Stuhlinger T W. Subaperture optical testing: Experimental verification[C]. SPIE, 1986, 655: 350-359.
- 5 Otsubo M, Okada K, Tsujiuchi J. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms [J]. Optical Engineering, 1994, 33(2): 608-613.
- 6 Bray M. Stitching interferometer for large optics using a standard interferometer: Description of an automated system[C]. SPIE, 1997, 3047: 911-918.
- 7 Murphy P, Forbes G, Fleig J, *et al.* Stitching interferometry: A flexible solution for surface metrology[J]. Optics and Photonics News, 2003, 14(5): 38-43.
- 8 King C W. An automated metrology workstation for the measurement of large convex surfaces[C]. Optical Society of America, 2014: OTh3B. 2.
- 9 King C W, Bibby M. Development of a metrology workstation for full-aperture and sub-aperture stitching measurements [C]. Procedia CIRP, 2014, 13: 359-364.
- 10 Chen M, Cheng W, Wang C W W. Multiaperture overlap-scanning technique for large-aperture test[C]. SPIE, 1992, 1553: 626-635.
- 11 Wang Q, Chen J, Zhu R, *et al.* New technique for testing large optical flat[C]. SPIE, 1993, 2003: 389-397.
- 12 Bai Jian, Cheng Shangyi. Object function analysis for subaperture testing and connection[J]. Optical Instruments, 1997, 19(4): 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):36-39.
- 13 Zhang 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.
- 14 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): 091204.

- 15 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.

- 16 Bray M. Stitching interferometry and absolute surface shape metrology: Similarities[C]. SPIE, 2001, 4451: 375-383.
- 17 Su P, Burge J H, Parks R E. Application of maximum likelihood reconstruction of subaperture data for measurement of large flat mirrors[J]. Applied Optics, 2010, 49(1): 21-31.

- 18 Miao Erlong, 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.

- 19 Li Yong, Tang Feng, Lu Yunjun, *et al.* A method for reducing the error accumulation in sub-aperture stitching interferometer for flat optics[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0708006.

李 永, 唐 锋, 卢云君, 等. 一种降低平面子孔径拼接累积误差的方法[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708006.