

最大似然估计法去除子孔径拼接检测中的支撑误差

张 敏, 高松涛, 苗二龙, 隋永新, 杨怀江

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 为了去除拼接干涉检测中支撑对面形检测的影响,提出了利用最大似然估计法计算支撑造成的面形误差的方法。首先,保持支撑工装不动,旋转待测镜检测各子孔径面形;然后,用最大似然估计法计算出支撑造成的面形误差;最后,各子孔径面形数据减去估算出的支撑面形误差,利用拼接算法拼接出全口径面形。以全口径直接测量结果为准进行对比实验,验证了该方法可去除支撑造成的面形误差,提高了拼接检测精度。

关键词 测量;干涉检测;子孔径拼接检测;支撑;测量误差

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041204

Maximum Likelihood Estimation Method to Eliminate Supporting Error in Subaperture Stitching Interferometry

Zhang Min, Gao Songtao, Miao Erlong, Sui Yongxin, Yang Huaijiang

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In order to eliminate the measurement error caused by the support of the subaperture stitching interferometry, the method of maximum likelihood estimation is proposed to calculate the deformation due to the support. The first step is to maintain the brace immobility, rotating the test lens to measure the subaperture surface. Then, the maximum likelihood estimation method is used to calculate the deformation caused by the support. Finally, the interferometer measurement data of the subaperture surfaces subtract the estimated support surface error, and the stitching algorithm is used to splice a full aperture surface shape. The experiment results are compared with the result of the full aperture direct interferometer measurement, which shows that the method can remove the deformation caused by the support and improve the accuracy of the stitching detection.

Key words measurement; interferometer; subaperture stitching interferometry; support; measurement error

OCIS codes 120.6650; 120.4640; 120.4610

1 引言

通过将大口径光学元件划分为多个子孔径的检测方法,实现了用小口径干涉仪检测大口径光学元件面形的目的,从而大大降低了大口径光学元件的检测成本以及提高了所检测光学元件的范围^[1-3]。与一般的干涉检测相同,拼接干涉检测需要将光学元件固定在检测工装上,但在重力和夹持力的作用下光学元件表面会发生变形,导致光学元件面形的测量结果里包含了固定支撑引入的面形变化,极大地限制了干涉仪检测光学元件面形的精度^[4]。因此,需要找到一种能够分离出光学元件固定支撑造成的面形误差的检测方法。

针对支撑造成的面形误差,目前的方法主要采用绝对检测来去除支撑的影响,如单次旋转法^[5-6]、 N 步旋转平均法^[7-8]、多序列独立测量法^[9-10]和三平板绝对检测法等,这些方法在保证检测复现性的同时得到了高精度的面形检测结果。其中,Evans等^[7]建立了旋转参考面或待测面的旋转绝对检测法,通过旋转平均获

收稿日期: 2016-09-12; **收到修改稿日期:** 2016-12-02

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 张 敏(1988—),女,博士,助理研究员,主要从事精密光学检测技术方面的研究。

E-mail: zhangminxiaowei@163.com

得光学元件的绝对面形, 可以去除测量系统的非对称误差和部分旋转误差。Griesmann 等^[11]改进了三平板绝对检测法, 通过两个平板和一个参考面的多组组合测量将支撑变形误差消除。旋转法需要利用待测镜与支撑在两个或多个不同的角度下测量, 三平板需要利用两个平板和一个参考面进行多组测量。若在拼接检测中用旋转法和三平板法去除支撑, 将多出不止一次面形干涉检测, 而是一组子孔径的面形检测, 从而会降低检测效率, 累积机械定位误差。因此, 本文提出一种采用最大似然估计法去除拼接检测中支撑误差的方法, 该方法在检测各子孔径时保持支撑装置固定不变, 通过待测元件旋转完成各子孔径的测量, 最后测量出的一组子孔径数据通过最大似然估计法计算出支撑造成的面形误差, 有效分离出了支撑面形, 从而提高拼接检测精度。

2 基本原理

2.1 最大似然估计法计算支撑变形

在检测各个子孔径时支撑装置始终固定不变, 仅通过旋转待测元件完成各子孔径的面形检测, 各子孔径的检测数据中均包含相同的支撑变形, 各子孔径检测数据可表示为

$$W_i = W_i^f + R = \sum_{p=1}^m T_p Z_p(\rho_T, \theta_T) + \sum_{q=5}^m S_q Z_q(\rho_R, \theta_R) + R, \quad (1)$$

式中 W_i 表示各子孔径面形的干涉检测结果, W_i^f 是各子孔径面形用泽尼克多项式表示的部分, R 为测量值减去泽尼克多项式拟合部分的残差, m 是指取到泽尼克多项式第几项, Z_p 为泽尼克多项式第 p 项, T_p 、 S_q 分别为待测面、支撑变形的泽尼克多项式系数, ρ 、 θ 为极坐标中的半径和角度。

一般情况下, 各子孔径面形测量的随机误差服从相同的正态分布, 则子孔径测量的似然函数可写为

$$L(T_p, S_q | W_i) = (\sqrt{2\pi}\sigma)^{-N} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=0}^N (W_i - W_i^f)^2\right], \quad (2)$$

式中 σ 为各子孔径干涉检测的标准差。使似然函数最大的 T_p 、 S_q 值是 T_p 、 S_q 的最大似然估计值。要使似然函数 $L(T_p, S_q | W_i)$ 最大, 则需解如下等式:

$$\min\left[\sum_{i=0}^N (W_i - W_i^f)^2\right] = \min\left\{\sum_{i=0}^N \left[W_i - \sum_{p=1}^m T_p Z_p(\rho_T, \theta_T) - \sum_{q=5}^m S_q Z_q(\rho_R, \theta_R)\right]^2\right\}, \quad (3)$$

由(3)式可根据最小二乘法拟合出支撑变形的泽尼克多项式系数, 估计出支撑造成的面形误差, 就能在拼接之前去除各子孔径面形检测结果中的支撑误差。

2.2 机械误差补偿拼接算法

本研究采用机械误差补偿算法拼接各子孔径, 下面简单介绍机械误差补偿算法, 设 $W_i(x, y)$ 和 $W_j(x, y)$ 分别为去除支撑误差的两相邻子孔径的面形测量结果, 两子孔径的面形测量结果的关系可以表示为^[12]

$$W_i(x, y) = W_j(x, y) + a + bx + cy + s \frac{\partial W}{\partial x}(x, y) + t \frac{\partial W}{\partial y}(x, y) + \delta \left[x \frac{\partial W}{\partial y}(x, y) - y \frac{\partial W}{\partial x}(x, y) \right], \quad (4)$$

式中 a 为面形平移系数, b 和 c 分别为待测元件表面在 x 和 y 轴倾斜的子孔径倾斜系数, s 和 t 分别为沿待测元件表面 x 和 y 方向的平移定位误差系数, δ 为绕光学元件中心轴的旋转定位误差系数, 通过(4)式利用最小二乘法就可以求出子孔径间的机械误差补偿系数。

综上所述, 基于最大似然估计法去除支撑误差的子孔径拼接检测过程为: 1) 将检测光学元件固定在机械调整机构上, 待测光学元件可划分为多个子孔径进行测量; 2) 机械调整机构支撑待检测光学元件, 保持支撑工装固定不动, 旋转待检测光学元件以检测其各子孔径面形; 3) 用最大似然估计法计算机械调整机构支撑待检测光学元件造成的面形误差; 4) 各子孔径面形减去支撑误差后, 采用机械误差补偿算法拼接出光学元件的全口径面形。

3 仿真分析

以一块口径为 150 mm、厚度为 20 mm、材料为熔石英的平面镜作为分析对象。利用 UG 建模并进行有

限元仿真计算平面镜的支撑变形,设定边界条件为三点支撑,负载为重力和夹持力,将变形数据导入 Matlab 绘制,结果如图 1 所示,支撑误差的峰谷值(PV)、均方根值(RMS)分别为 36.98,8.74 nm,主要是低频成分。用泽尼克多项式生成口径大小为 150 mm 的面形,面形的 PV、RMS 分别为 107.71,9.47 nm,将其按图 2 所示的子孔径规划分割成 7 个子孔径,子孔径直径为 100 mm,每个子孔径中心距离全口径面形中心 60 mm。每个子孔径加入支撑误差,再引入如表 1 所示的机械误差, Δx 、 Δy 表示平行于工件台的两个方向的平移误差, $\Delta\alpha$ 为待测光学元件的旋转误差,并引入 RMS 为 0.5 nm 的随机面形误差。首先用最大似然估计算法计算支撑误差,然后将各子孔径面形减去支撑误差拼接出光学元件的全口径面形,与生成的面形点对点相减残差分布如图 3 所示,PV、RMS 分别为 19.88,0.69 nm,该残差图显示其主要成分是高频率误差,低频成分很少,说明了该去除支撑误差方法的有效性和可行性。

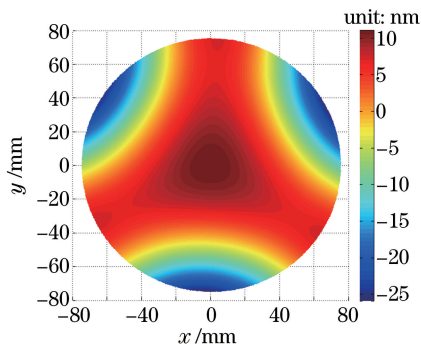


图 1 支撑变形图

Fig. 1 Deformation image because of brace

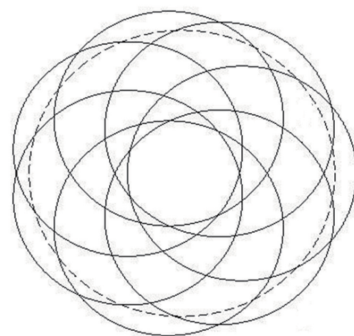


图 2 子孔径规划

Fig. 2 Layout of subaperture

表 1 机械误差

Table 1 Mechanical errors

Subaperture number	$\Delta x / \mu\text{m}$	$\Delta y / \mu\text{m}$	$\Delta\alpha / \mu\text{rad}$
1	0.63	-0.12	112.1
2	0.81	-0.24	-44.1
3	-0.75	0.51	-103.32
4	0.83	0.59	-38.44
5	0.26	-0.63	-161.42
6	-0.80	-0.02	-147.21
7	-0.44	-0.11	76.82

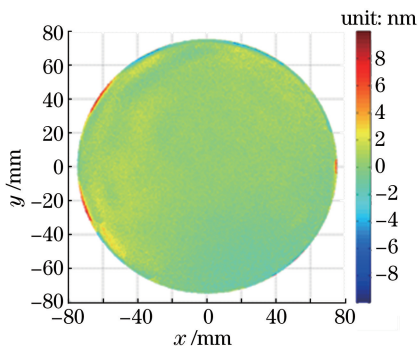


图 3 点对点相减图

Fig. 3 Point-to-point subtraction image

4 实验验证

利用子孔径拼接方法检测口径为 150 mm 的非球面,子孔径口径为 100 mm,子孔径规划和上节一致,并以大口径干涉仪全口径检测的结果作为参考值。大口径干涉仪参考面面形已知,子孔径拼接干涉检测采

用口径为 150 mm、面形未知的参考面。子孔径拼接检测系统如图 4 所示,包括干涉仪面形检测系统、机械调整机构及计算机处理模块。干涉仪面形检测系统包括面形检测干涉仪及计算机生成全息图(CG H),机械调整机构包括夹持机构和多维调整台,夹持机构支撑待测量光学元件,计算机处理模块与多维调整台连接,也控制着面形检测干涉仪。对待测量光学元件的各子孔径进行检测时,保持夹持机构固定不变,通过多维调整台调整待检测光学元件旋转完成各子孔径的测量;将测量出的一组子孔径数据通过最大似然估计法计算出支撑造成的面形误差,再将各子孔径检测面形去除支撑误差之后进行拼接,最终得到待检测光学元件的全口径面形。

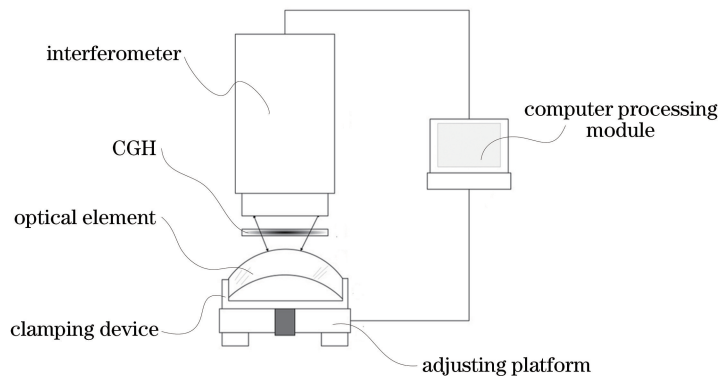


图 4 子孔径拼接检测系统示意图

Fig. 4 Schematic of subaperture stitching detection system

利用图 2 中规划的子孔径进行实验。图 5(a)为旋转平均法计算出的各子孔径支撑误差,PV、RMS 分别为 14.11,3.01 nm;图 5(b)为本方法计算出的支撑误差,PV、RMS 分别为 15.24,2.58 nm,两种方法的 RMS 仅相差 0.43 nm,验证了本研究所提计算支撑误差方法的有效性。

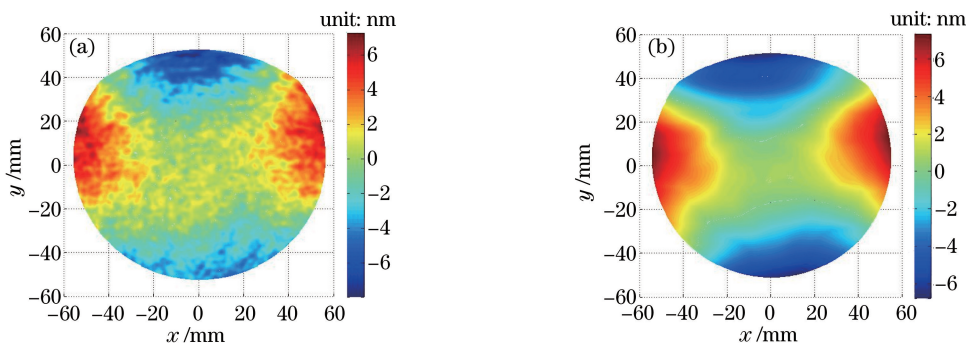


图 5 计算出的支撑误差。(a)旋转平均法结果;(b)最大似然估计法结果

Fig. 5 Calculated brace error. (a) Result of rotation mean method; (b) result of maximum likelihood estimation method

此非球面全口径直接测量的结果如图 6 所示,PV、RMS 分别为 129.18,9.67 nm。各子孔径数据去除本

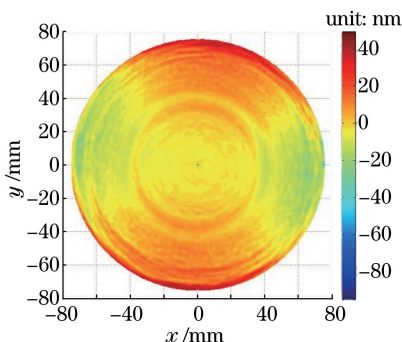


图 6 全口径直接测量结果

Fig. 6 Full-aperture direct testing result

方法计算出的各子孔径支撑误差后,拼接出的全口径面形[图 7(a)]的 PV、RMS 分别为 93.85,9.70 nm;未去除支撑误差拼接出的全口径面形的 PV、RMS 分别为 128.63,9.72 nm,如图 7(b)所示。本拼接方法与直接测量的全口径面形点对点相减,PV、RMS 分别为 42.16,1.46 nm,如图 8(a)所示;未去除支撑误差的拼接结果与全口径检测结果相减的残差图如图 8(b)所示,图中有明显的拼接痕迹,PV、RMS 分别为 49.14,4.03 nm,而用去除支撑误差的拼接结果[图 8(a)]没有明显的拼接痕迹,PV、RMS 均低于图 8(b)的数值,说明本方法可有效提高拼接检测精度。本拼接方法与直接测量的面形点对点相减的面形 RMS 大于模拟分析残差的 RMS 是由于直接测量的全口径测量过程也会受测量环境的影响,与理想的真值仍有差别。

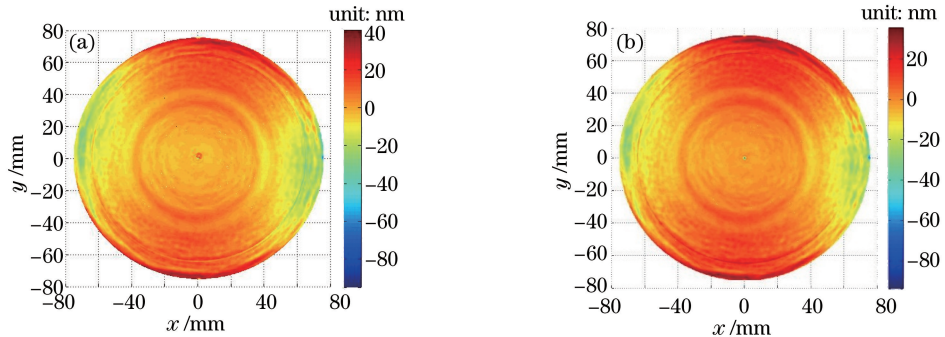


图 7 (a)去除支撑误差的拼接结果;(b)未去除支撑误差的拼接结果

Fig. 7 (a) Stitching result without brace error; (b) stitching result with brace error

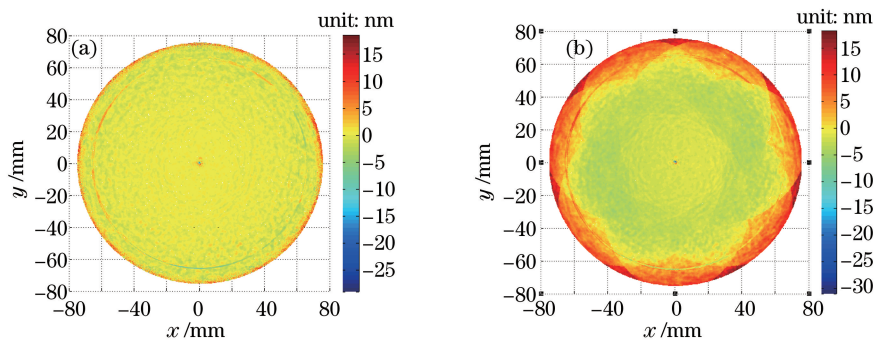


图 8 点对点相减图。(a)去除支撑误差的拼接残差;(b)未去除支撑误差的拼接残差

Fig. 8 Point-to-point subtraction images. (a) Stitching residual without brace error; (b) stitching residual with brace error

5 结 论

提出了一种去除拼接检测中支撑误差的方法,采用最大似然估计法去除拼接检测中的支撑误差,避免了多次子孔径面形检测,减少多次测量过程的检测时间以及机械误差的累积,提高检测的效率和精度,有效分离出了支撑面形。首先仿真分析了本研究所提去除支撑误差方法的可行性;然后,以全口径测量为标准,并与直接拼接检测做对比,实验验证了本研究所提去除支撑误差的方法能够有效提高拼接检测的精度。

参 考 文 献

- [1] Chen Haiping, Xiong Zhao, Cao Tingfen, *et al.* Research on surface measure device for process of large aperture mirror assembly[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0212002.
陈海平, 熊 召, 曹庭分, 等. 大口径反射镜组件面形检测系统及方法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0212002.
- [2] Shi Tu, Zang Zhongming, Liu Dong, *et al.* Retrace error correction for non-null testing of optical aspheric surface[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0812006.
师 途, 臧仲明, 刘 东, 等. 光学非球面面形非零位检测的回程误差校正[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0812006.
- [3] 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.
- [4] Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong, *et al.* Rotating chuck test for removing chuck error of optical surface[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812004.
王 平, 田 伟, 王汝冬, 等. 旋转支撑法去除元件面形测量的夹持误差[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812004.
- [5] Greco V, Tronconi R, Vecchio C D, *et al.* Absolute measurement of planarity with Fritz's method: uncertainty evaluation[J]. Applied Optics, 1999, 38(10): 2018-2027.
- [6] Shariharan P. Interferometric testing of optical surfaces: absolute measurements of flatness[J]. Optical Engineering, 1997, 36(9): 2478-2481.
- [7] Evans C J, Kestner R N. Test optics error removal[J]. Applied Optics, 1996, 35(7): 1015-1021.
- [8] Song Weihong, Wu Fan, Hou Xi, *et al.* Absolute calibration of a spherical reference surface for a Fizeau interferometer with the shift-rotation method of iterative algorithm[J]. Optical Engineering, 2013, 52(3): 033601.
- [9] Seitz G, Otto W. Method for the interferometer measurement of non-rotationally symmetric wavefront errors: US, 7277186[P]. 2007-10-02.
- [10] Otto W. Method for the interferometric measurement of non-rotationally symmetric wavefront errors: US, 6839143[P]. 2005-01-04.
- [11] Griesmann U. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry[J]. Applied Optics, 2006, 45(23): 5856-5865.
- [12] Zhang Min, Sui Yongxin, Yang Huaijiang. Mechanical error compensation algorithm for subaperture stitching interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(4): 22-28.
张 敏, 隋永新, 杨怀江. 用于子孔径拼接干涉系统的机械误差补偿算法[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 22-28.