

文章编号 1004-924X(2017)10-2682-07

## 子孔径拼接干涉的快速调整及测量

郭福东\*, 唐 锋, 卢云君, 王向朝

(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)

**摘要:** 考虑高精度子孔径拼接干涉测量技术对自动化拼接的要求, 提出了一种子孔径零条纹自动快速调节方法。分析了干涉条纹数量对拼接误差的影响, 分析显示: 当子孔径干涉条纹数量少于 5 条时, 干涉仪回程误差小于  $\lambda/50$  (PV 值)。对子孔径拼接测量装置进行了结构优化, 提出了拼接位移台角位移偏差自动补偿方法, 实现了各个子孔径的零条纹测量, 进而控制了子孔径拼接的累积误差。对  $450\text{ mm} \times 60\text{ mm}$  长条镜进行了子孔径拼接干涉测量, 结果表明: 自动测量结果与手动调整零条纹测量结果在面形分布上更为一致; 但前者测量速度及测量效率都有所提高, 测量时间平均减少 5 min。提出的方法不仅能完成干涉拼接测量装置的自动定位及自动快速调整, 还提高了测量重复性与检测效率。

**关键词:** 干涉测量; 自动测量; 子孔径拼接; 拼接误差

中图分类号: O436.1 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20172510.2682

## Rapid adjustment and measurement for subaperture stitching interferometry

GUO Fu-dong\*, TANG Feng, LU Yun-jun, WANG Xiang-zhao

(Laboratory of Information Optics and Opto-electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

\* Corresponding author, E-mail: gfdouble@163.com

**Abstract:** An automatic and quick adjustment method for zero interference fringes was proposed to meet the requirement of high precision subaperture stitching interferometry. The influence of interference fringe numbers on stitching errors was analyzed, and the analyzed results show that the interferometer return error is less than  $\lambda/50$  (PV value) when the interference fringe numbers of subaperture are less than 5. A subaperture stitching measurement apparatus was optimized, and an auto-compensation method of angular displacement deviation for the motion stage was proposed. By which, zero fringe of each subaperture was realized, and the cumulative error of subaperture stitching was controlled finally. A  $450\text{ mm} \times 60\text{ mm}$  flat mirror was measured by subaperture stitching interferometry, the experiment result shows that the surface distributions of automatic stitching measurement results are more consistent with that of the zero fringe measurement by manual adjustment, the measuring speed and measuring efficiency are improved and the measuring time is reduced by 5 min on average. As compared with zero fringe measurement by manual adjustment. The proposed method not only

收稿日期: 2017-04-22; 修订日期: 2017-05-24.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2011zx02402-003)

completes the automatic positioning and automatic adjustment of the interference stitching measurement apparatus, but also improves the measuring repeatability and detection efficiency.

**Key words:** interferometry; automatic measurement; subaperture stitching; stitching error

## 1 引言

随着科学技术的不断进步与发展,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,大口径光学镜面面形误差的高精度检测也受到越来越多的关注。若使用大口径相移干涉仪来检测大口径光学元件,需要标准面形的尺寸等同于被测元件的尺寸,但是大口径标准镜加工难度大,成本高,制造周期长。针对上述问题,1981年美国 Arizona 大学光学中心的 Kim 和 Wyant 首先提出了子孔径检测的概念<sup>[1]</sup>。子孔径拼接测量是基于“以小拼大”的思想,将大口径镜面划分为若干相互重叠的子孔径,每个子孔径用标准干涉仪进行测量,然后通过适当的算法将各个子孔径拼接干涉测量结果拼接到一起来获得全口径上的面形误差分布。30 多年来子孔径拼接测量方法取得了相当的进展<sup>[2-8]</sup>,特别是对于大口径平面镜测量的应用日趋成熟。随着该技术的不断发展和完善,对干涉拼接测量装置的自动化程度也提出了更高的要求,主要体现在子孔径配置的最优化设计、测量装置调整的自动化,测试数据的自动化采集等。不过,在现有子孔径拼接干涉测量方法中,对自动拼接控制方法仍少有文献报道。本文提出了子孔径拼接快速调整控制方法。该方法可在完成干涉拼接测量装置的自动定位及测量装置的自动快速调整的同时,提高测量重复性与检测效率。

## 2 子孔径拼接基本原理

子孔径拼接的基本原理<sup>[9]</sup>如图 1 所示,图中  $W_1, W_2$  分别表示两次相邻检测区域,它们之间有一定面积重叠。子孔径拼接首先将整个口径分割成相互之间有一定重叠区域的若干子孔径,用干涉仪分别测量各部分的面形,然后从重叠区域提取出相邻子孔径的参考面之间的相对位移、旋转,并依次把这些子孔径的参考面统一到某一个指定的参

考面,最后通过拼接算法恢复出全口径的面形。

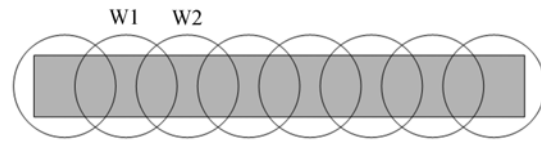


图 1 子孔径拼接基本原理

Fig. 1 Principle of subaperture stitching

## 3 子孔径拼接干涉的快速调整及测量

### 3.1 子孔径拼接干涉测量装置的结构优化

子孔径拼接测量系统中,单个子孔径的测量误差会在拼接过程产生累积,形成拼接累积误差<sup>[10-11]</sup>。在已有文献中,对拼接累积误差的控制主要集中在消除干涉仪标准镜的面形误差。而实际拼接测量中,每个子孔径的测量过程都可能会引入更大的测量误差。如 Fizeau 干涉仪仅在零条纹测量状态下测量光与参考光会在干涉仪内部经过相同的光路,在非零条纹条件下,均会产生回程误差,且干涉条纹越多,回程误差越大。在典型的子孔径拼接系统中,测量样品或干涉仪由拼接位移台带动进行线性扫描,但拼接位移台在线性运动过程中,也存在俯仰和偏摆角位移,会引起被测面与参考面间的夹角在不同子孔径间发生变化,使得不同拼接位置会有不同数量的干涉条纹,引入不同的干涉仪回程误差,直接影响子孔径的测量精度,并导致拼接累计误差无法通过绝对检验等方法进行消除,从而制约了拼接检测精度。如图 2 所示,以干涉仪零条纹时测量结果为参考值,对不同条纹数量情况下 Zygo 公司 DynaFiz 干涉仪的实际回程误差进行了测量,当干涉条纹数量为 30~40 条时,回程误差已达到  $\lambda/20$  (PV 值) 以上;对于长度为 500 mm 的拼接测量样品,拼接 9 次,拼接累计误差有可能达到  $0.5\lambda$  (PV 值),离焦、像散等面形误差对子孔径拼接累计误差的影响最大<sup>[11]</sup>,且子孔径间干涉条纹数量变化越大,单个子孔径拼接干涉测量误差越大。

影响干涉条纹变化的主要因素是拼接位移台

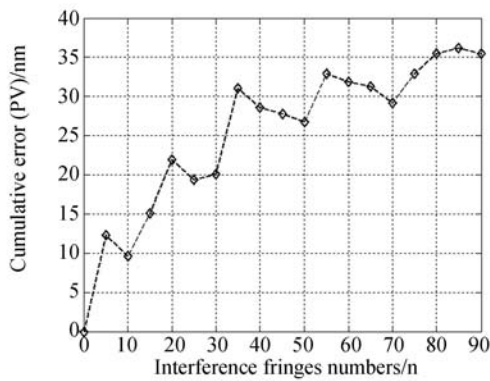


图 2 干涉条纹数量对测量误差的影响

Fig. 2 Influence of interference fringe numbers on stitching error

角位移,干涉条纹变化与位移台运动过程中最大倾角之间的关系为  $\theta = (\lambda n / 2) / \Phi$ , 其中  $\lambda$  为干涉仪的激光波长,  $n$  为干涉条纹变化数,  $\Phi$  为子孔径大小,  $\theta$  为位移台最大倾角。针对上述拼接位移台角位移所引起拼接过程中干涉条纹变化的问题,最直接的解决方案是采用高直线度的拼接位移台系统。假设全行程内干涉条纹数量变化小于 5 条时,拼接位移台移动过程中水平方向直线度误差为  $0.0009^\circ$ , 其中  $\lambda$  为  $632.8 \text{ nm}$ ,  $n$  为 5,  $\Phi$  为  $100 \text{ mm}$ , 这一方面大大提高了拼接系统的成本,另一方面对于  $500 \text{ mm}$  以上拼接口径也不具有实际可行性。本文提出在拼接位移台上增加俯仰、偏摆二维角位移台,动态补偿拼接位移台在每个子孔径的俯仰、偏摆偏差,在每个子孔径均实现零条纹检测,提高子孔径测量精度,从而控制拼接累积误差。图 3 为所提出的优化的一维子孔径拼接干涉测量系统的结构图。

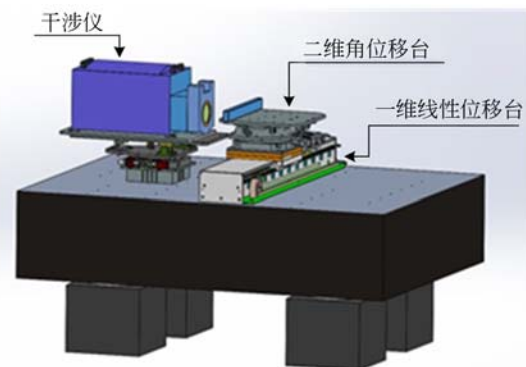


图 3 一维子孔径拼接干涉测量系统结构

Fig. 3 System structure of one-dimensional subaperture stitching interferometry

### 3.2 角位移偏差自动补偿

线性位移台移动所带来俯仰、偏摆角位移运动偏差可由二维角位移台进行调节补偿。该定量补偿角度可以通过对干涉仪测量得到的子孔径面形结果进行 zernike 多项式拟合然后根据拟合结果中的  $Z_2$ 、 $Z_3$  项(X 倾斜和 Y 倾斜)系数  $a_2$ 、 $a_3$  来计算(对于非圆形孔径,也可采用最小二乘平面来确定准确的倾斜角度),  $Z_2$ 、 $Z_3$  项的定义分别为  $x$  和  $y$ (单位圆归一化坐标), 系数  $a_2$ 、 $a_3$  与 X、Y 两个倾斜方向倾斜角  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  的关系为  $\theta_x \approx a_2 / R$ ,  $\theta_y \approx a_3 / R$ , 其中  $R$  为求解系数  $a_2$ 、 $a_3$  为单位圆的半径。因此,针对一个待测子孔径位置,可首先进行一次子孔径面形的测量,然后对测试所得到的子孔径面形结果进行 Zernike 多项式拟合,根据系数  $a_2$ 、 $a_3$  计算出 X、Y 两个倾斜方向的倾斜角  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ ,最后通过控制系统对二维角位移台进行调节,从而完成角位移偏差的自动补偿。

### 3.3 子孔径拼接干涉测量控制系统软件界面及算法流程图

子孔径拼接干涉测量控制软件如图 4 所示,该软件用于精密运动控制与干涉仪自动测量,其功能是通过三维精密运动控制系统将待测光学元件能够自动运动到测量某个子孔径的位置,并自动调整干涉条纹,使干涉条纹数最少,测量完该子孔径后系统显示出每个子孔径测得面形的 Zernike 多项式系数,并且保存测得的子孔径面形数据,当所有子孔径测量完成后,系统自动调用最小二乘法拼接所有子孔径面形。

子孔径拼接干涉测量快速调整方法如下:首先根据干涉仪视场及待测镜面的尺寸大小、子孔径之间重叠区域的大小确定子孔径的个数、扫描台目标移动量及拼接方向等拼接参数;接着利用线性位移台将待测光学元件自动运动到测量某个子孔径的起始位置,等干涉条纹稳定后,开始对子孔径的面形进行测量;然后,对测量结果进行 Zernike 多项式拟合,如果  $Z_2$  和  $Z_3$  项的系数  $a_2$ 、 $a_3$  小于设定的容许值,那么就可以将测量得到的子孔径测量面形数据保存起来,扫描台则运动到下一个子孔径位置进行下一次子孔径测量;否则可根据  $Z_2$  和  $Z_3$  项的系数  $a_2$ 、 $a_3$  与 X、Y 两个倾斜方向倾斜角的关系,自动调节被测件二维角位移台在 X、Y 两个倾斜方向的倾斜角,使得  $Z_2$  和  $Z_3$  系数最小,即干涉条纹数最少,并对被测件的

该部分面形进行测量,得到子孔径面形数据。如此,扫描台依次进行直线运动,当所有子孔径个数全部测量完毕后,会自动调用最小二乘法拼接所有子孔径面形并进行显示。子孔径拼接快速调整方法流程图如图 5 所示。



图 4 子孔径拼接干涉测量软件界面

Fig. 4 Software interface of subaperture stitching interferometry

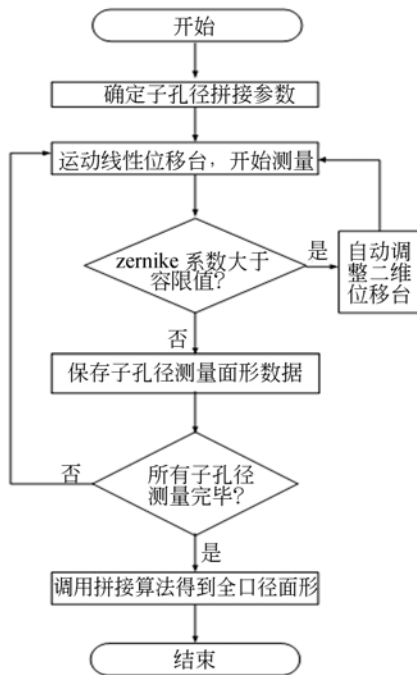


图 5 子孔径拼接干涉测量快速调整流程图

Fig. 5 Flow chart of rapid adjustment for subaperture stitching interferometry

#### 4 实验及结果分析

子孔径拼接干涉测量实验系统图如图 6 所

示,采用 Zygo 公司 4 in(100 mm) DynaFiz 干涉仪,对 450 mm×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 个子孔径进行拼接测量,部分子孔径面形如图 7 所示,扫描台每次目标移动量为 61.376 mm,共测试 3 组数据,其中第一组为手动调整非零条纹测量拼接结果如图 8(a)所示,第二组为手动调整零条纹测量拼接结果如图 8(b)所示,第三组为自动调整测量拼接结果如图 8(c)所示。手动调整测量、自动测量以及自动测量与手动调整测量面形相减结果的 PV 值与 RMS 值及测量时间如表 1 所示。

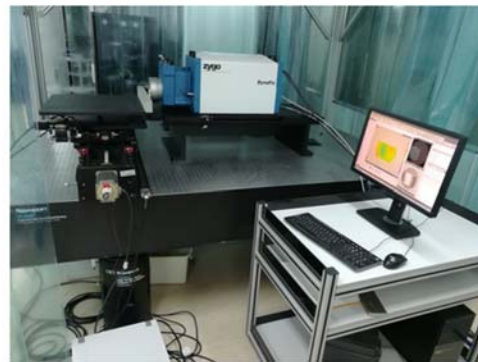


图 6 子孔径拼接干涉测量实验系统

Fig. 6 Experimental system of subaperture stitching interferometry

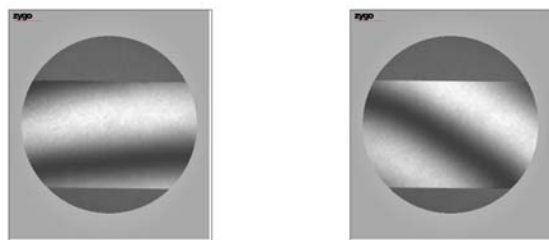


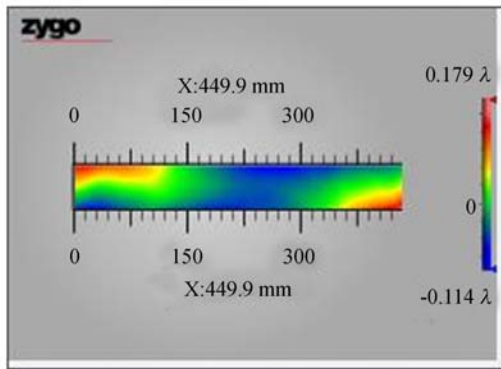
图 7 部分子孔径面形

Fig. 7 Part of subaperture surface

表 1 拼接结果(PV 与 RMS 值)及测量时间

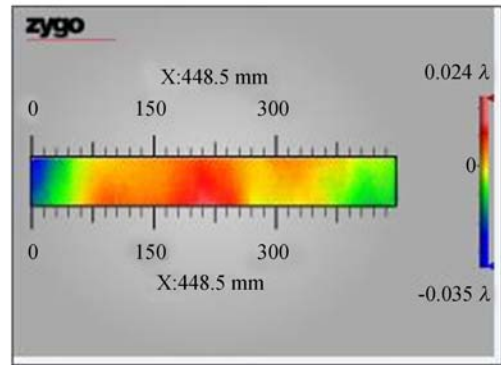
Tab. 1 Stitching results (PV and RMS) and measurement time

测试结果	PV/ $\lambda$	RMS/ $\lambda$	测试时间 /min
(a) 手动调整非零条纹测量	0.35	0.05	3
(b) 手动调整零条纹测量	0.32	0.04	10
(c) 自动测量	0.31	0.04	5
(d) 自动测量与手动零条纹 测量面形相减	0.06	0.01	/
(e) 自动测量与手动非零条 纹测量面形相减	0.14	0.02	/



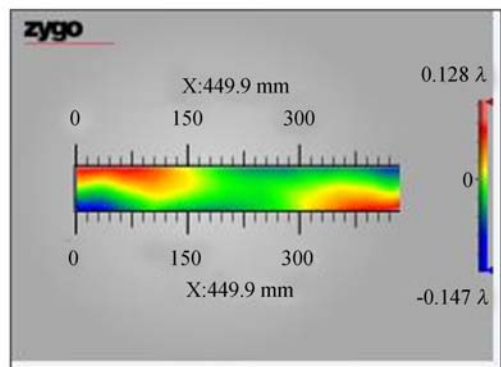
(a) 手动调整非零条纹测量拼接结果

(a) Stitching results of non-zero fringe measurement by manual adjustment



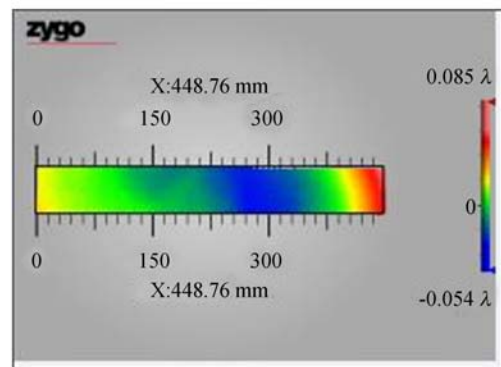
(d) 自动测量与手动零条纹测量面形相减结果

(d) Surface subtraction results between automatic measurement and zero fringe measurement by manual adjustment



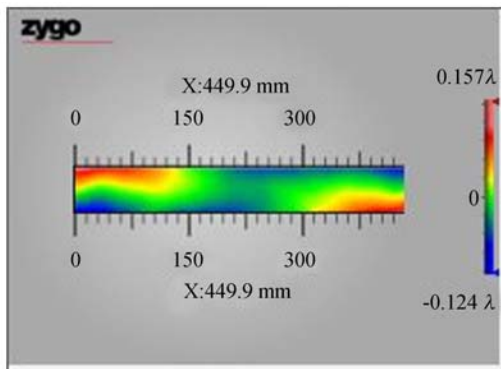
(b) 手动调整零条纹测量拼接结果

(b) Stitching results of zero fringe measurement by manual adjustment



(e) 自动测量与手动非零条纹测量面形相减结果

(e) Surface subtraction results between automatic measurement and non-zero fringe measurement by manual adjustment



(c) 自动测量拼接结果

(c) Stitching results of automatic measurement

图 8 子孔径拼接干涉测量结果

Fig. 8 Results of subaperture stitching interferometry

从图 8 及表 1 可以看出,将自动测量面形数据与手动调整零条纹测量面形数据相减,相减结果如图 8(d)所示,将自动测量面形数据与手动调整非零条纹测量面形数据相减,相减结果如图 8

## 5 结 论

由于现代超精密平面加工对子孔径高精度自动化拼接干涉测量提出了更高的要求,本文提出

(e)所示。两组相减结果表明:自动测量结果与手动调整零条纹测量结果在面形分布上更为一致。另外,由于整个自动测量过程中不需要人工参与调整与测量,测量用时比手动调整零条纹测时少,所以自动测量比人工测量更具有优势,提高了测量效率。

了一种子孔径零条纹自动快速调节方法。分析了干涉条纹数量对拼接误差的影响,对子孔径拼接测量装置进行结构优化并提出了拼接位移台角位移偏差自动补偿方法,实现了各个子孔径的零条纹测量,提高了子孔径测量效率,从而控制了拼接

累积误差。实验结果显示:自动测量结果与手动调整零条纹测量结果在面形分布上更为一致,相比手动调整零条纹测量,提高了测量速度及测量效率,测量时间平均减少 5 min。

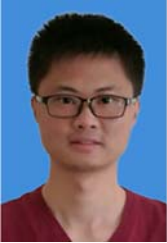
#### 参考文献:

- [1] KIM C J, WYANT J C. Subaperture test of a large flat or a fast aspheric surface[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71:1587.
- [2] 刘丁泉, 盛伟繁, 王秋实, 等. 拼接干涉技术在同步辐射领域的发展现状及趋势[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 2357-2369.
- LIU D X, SHENG W F, WANG Q S, *et al.*. Current status and trends of stitching interferometry in synchrotron radiation field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2357-2369. (in Chinese)
- [3] CHEN S Y, DAI Y F, LI S Y, *et al.*. Surface registration-based stitching of quasi-planar free-form wavefronts[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 063605.
- [4] 王孝坤, 王丽辉, 邓伟杰, 等. 用非零位补偿法检测大口径非球面反射镜[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 520-528.
- WANG X K, WANG L H, DENG W J, *et al.*. Measurement of large aspheric mirrors by non-null testing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 520-528. (in Chinese)
- [5] 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.
- CHEN Y W, WANG F, WANG G W, *et al.*. New sub-aperture stitching algorithm based on transformation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912004. (in Chinese)
- [6] ZHAO W R, LIANG Z N, PAN G Y. Based on the method of subaperture splicing detection on spherical [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8557: 85571S.
- [7] 王孝坤. 子孔径拼接检测非球面时调整误差的补偿[J]. *中国光学*, 2013, 6(1): 88-95.
- WANG X K. Compensation of misalignment error on testing aspheric surface by subaperture stitching interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 88-95. (in Chinese)
- [8] 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): 935-940.
- ZHANG M, SUI Y X, YANG H J. Mechanical error compensation algorithm for subaperture stitching interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 935-940. (in Chinese)
- [9] 张蓉竹, 杨春林, 许乔, 等. 使用子孔径拼接法检测大口径光学元件[J]. *光学技术*, 2001, 27(6): 516-517.
- ZHANG R Z, YANG CH L, XU Q, *et al.*. Testing the large aperture optical components by the stitching interferometer [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6): 516-517. (in Chinese)
- [10] 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.
- LI Y, TANG F, LU Y J, *et al.*. A method for reducing the error accumulation in sub-aperture stitching interferometer for flat optics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0708006. (in Chinese)
- [11] 朱鹏辉, 唐锋, 卢云君, 等. 高精度平面子孔径拼接算法研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1104002.

ZHU P H, TANG F, LU Y J, *et al.*. Research on high accuracy sub-aperture stitching algorithm

for flat optics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1104002. (in Chinese)

作者简介:



郭福东(1983—),男,江苏扬州人,硕士,工程师,2007年于南京信息工程大学获得学士学位,2010年于南京信息工程大学获得硕士学位,主要从事精密运动控制及检测技术研究。E-mail: gfdouble@163.com



唐 锋(1979—),男,陕西岐山人,博士,研究员,2001年于天津大学获得学士学位,2006年于天津大学获得博士学位,主要从事干涉测量技术与仪器相关研究。E-mail: tangfeng@siom.ac.cn

(本栏目编辑:严 寒)