

文章编号 1004-924X(2017)07-1764-07

# 大尺寸光学元件在位动态干涉 拼接测量系统

于瀛洁\*, 齐 特, 武 欣

(上海大学 机电工程及自动化学院, 上海 200072)

**摘要:** 为了满足车间条件下大口径光学元件的高精度在位、在线检测的迫切需求, 本文构建了一个适于一般环境下应用的动态干涉拼接测量实验系统。该系统由动态干涉仪、二维移动平台、控制系统及拼接软件等部分构成。应用该系统对 200 mm×300 mm×20 mm 的光学元件在一般应用环境下进行了拼接测量实验, 采用误差均化拼接算法进行拼接, 并对拼接后的结果进行分析处理, 比较拼接测量与全口径测量结果, PV 值的相对误差为 3.1%, RMS 值的相对误差为 1.6%, Power 值的相对误差为 2.1%。该系统为在车间环境下建立大口径光学元件在位检测建立了基础。

**关键词:** 光学检测; 子孔径拼接; 动态干涉仪; 大口径光学元件; 误差均化拼接

**中图分类号:** TH74; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1764

## On-line dynamic interference stitching measurement system for large optical elements

YU Ying-jie\*, QI Te, WU Xin

(*Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University,  
Shanghai 200072, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: yingjieyu@staff.shu.edu.cn*

**Abstract:** In order to realize on-line and in-situ measurement of high precision optical elements in workshop, a dynamic interference stitching system for large optical elements measured in general environment was investigated. The system was consisted of a dynamic interferometer, two-dimensional mobile platform, control system and stitching software. A stitching experiment for an 200 mm×300 mm optical element was completed by this system in general environment, based on error averaging stitching algorithm. Moreover, the stitching results were analyzed. Comparing the results between stitching measurement and full aperture measurement, the relative deviations of PV, RMS and Power are 3.1%, 1.6% and 2.1% respectively. The system lays a foundation for the on-line and in-situ measurement system for large optical elements in the workshop environment.

收稿日期: 2017-01-19; 修订日期: 2017-03-16.

基金项目: 国家重大科技专项 (No. 2013ZX04006011-217); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175318)

**Key words:** optical testing; sub-aperture stitching; dynamic interferometer; large optical elements; error average stitching

## 1 引言

随着科学技术的不断发展,大型光学工程对大尺寸光学元件的需求不断增长。与传统光学元件相比,大尺寸光学元件对加工技术的要求更高,主要体现在对光学元件的误差控制上,这也是大尺寸光学元件加工和检测所面临的主要问题。面形检测是大尺寸光学元件误差控制的一种有效手段,用于评判光学元件的质量以及是否达标,因此大尺寸光学元件的面形检测技术一直备受关注。

子孔径拼接技术的产生和发展主要是为了解决大尺寸光学元件面形检测的问题,C. Kim 和 J. Wyant 在 1981 年提出子孔径拼接的基本概念<sup>[1]</sup>。随着该技术的不断发展<sup>[2-7]</sup>,目前子孔径拼接干涉测量技术已经成为检测大尺寸光学元件的重要方法之一,但该技术多用于计量室内条件下工件的离线测量。随着大尺寸光学元件需求量的增加,其生产效率飞速提高,大尺寸光学元件加工迫切需要在位、在线的检测方法,以免去搬动大尺寸工件的时间和成本。因此,大尺寸光学元件的在位、在线检测成为光学加工领域的研究热点。基于干涉技术的在位检测技术方面,2007 年美国亚利桑那大学将子孔径拼接技术应用于大尺寸抛光镜面的检测,利用 ESDI 公司的瞬态相移干涉仪、离轴抛物面准直镜和 1 m 参考平面建立测量装置,实现了 1.6 m 平面镜的在位测量,同时结合五棱镜扫描技术,检测被测面的低频像差,反馈给抛光系统,指导后续加工。2013 年,英国 David Walker 教授的课题组针对 E-ELT (European Extremely Large Telescope) 主镜片的 1.2 m 抛光加工,建立了 10 m 高的在位测量装置,可实现全口径面形零位干涉测量<sup>[8]</sup>。他们还建立了五棱镜扫描轮廓测量仪,用于抛光机的在位检测。近几年,该课题组与 Zeeko 公司联合将子孔径拼接检测与精密加工结合起来,推出了在机拼接干涉测量仪,将干涉仪固定于超精密抛光机的主轴上,利用磨头的运动实现多个子孔径的检测拼接。该干涉仪适用于加工直径为 800~2 400 mm 的抛光机。荷兰的 TNO 公司也推出了相关装备。综上可知,高

精度在位检测装备与加工装备的一体化是一个发展趋势<sup>[9]</sup>。

本文针对车间环境下应用的大尺寸光学元件干涉拼接测量系统开展实验研究,介绍了系统构成、干涉仪和二维拼接工作台的具体要求,给出了单个子孔径的测试结果,并在一般应用环境下对 200 mm×300 mm 的光学元件进行了拼接测量,与全口径测量结果进行了比对分析。本文工作为在车间条件下建立在位检测装置提供了技术参考。

## 2 动态干涉拼接测量原理

子孔径拼接测量的基本思想是在测量过程中将被测表面分割成多个子孔径,且相邻子孔径有一定的重叠区,每次测量一个子孔径区域的面形,然后通过相邻子孔径之间重叠区信息的相关性将所有面形拼接起来,从而获得较大区域的面形。本文基于此测量原理,在子孔径扫描测量中保持干涉仪不动,工件放在二维工作台上,工作台移动带动工件运动实现二维扫描。

由于测量在一般非隔振条件下进行,因此计量实验室常用的移相干涉仪无法获得测量结果,系统中采用 ZYGO 公司的 DynaFiz 动态干涉仪。该干涉仪能够利用单个干涉图获得表面面形信息,相比于先前应用广泛的时间相移式干涉仪而言,所需的测量时间短得多,因此也称为瞬态干涉仪。测量时被测样品与参考镜之间会形成一个小倾角,动态干涉仪生成高密度干涉条纹,并基于傅里叶变换位相分析表面面形信息。但该干涉仪的非共路布局会引入系统误差,因此测量前需要进行标定。在测量过程中,为了保证标定结果有效和测量等精度,由工件和干涉仪相对位置变化引起的条纹数变化要控制在一定的范围内,如 10 条左右。

在一般条件下,特别是车间条件下,为了减少多孔径测量过程中突然或随机误差的影响,整个过程的环境变化应尽量小,一般地测量要在尽量短的时间内完成<sup>[10]</sup>。同时,在多个子孔径的测量中,干涉仪要保持参考面基本不动和测量等精度。所以,在干涉仪或工件自动移动完成子孔径测量中,一般不再调整干涉仪或工件的姿态,也不再对

干涉仪误差进行重复标定。因此,在子孔径的扫描测量过程中,对工作台的运行精度,包括定位精度、平行度、垂直度等有一定的要求。

大尺寸光学元件的干涉拼接测量包括 3 部分工作:(1)子孔径干涉图的采集与处理,由动态干涉仪完成;(2)被测工件的精密二维移动,由精密二维移动平台完成;(3)子孔径数据的拼接计算,获得全口径面形,由误差均化拼接算法完成。误差均化算法采用全局拼接法<sup>[11]</sup>,将所有子孔径统一到同一个坐标系下,联立基于最小二乘法对全部重叠区内像素点的方程,使计算误差由所有子孔径共同承担,从而减小拼接误差的影响。

### 3 动态干涉拼接测量实验系统构建

如图 1 所示,本文构建的子孔径拼接干涉系统由干涉仪系统、二维移动工作台系统和拼接测量软件组成。其中,干涉仪系统由动态干涉仪(ZYGO 公司的 DynaFiz 型干涉仪),配套的测量软件 MetroProX 及远程控制模块等附件组成,负责采集单个子孔径的干涉图并获得面形数据。二维移动平台系统由精密二维移动平台和控制系统组成,该系统负责控制被测工件的移动,从而实现对大尺寸工件的覆盖测量。拼接测量软件为根据拼接模型自行编写的应用程序,同时控制工作台的移动,实现全自动测量,并给出拼接测量结果和数据分析。

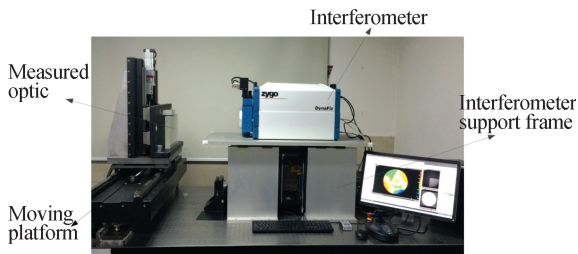


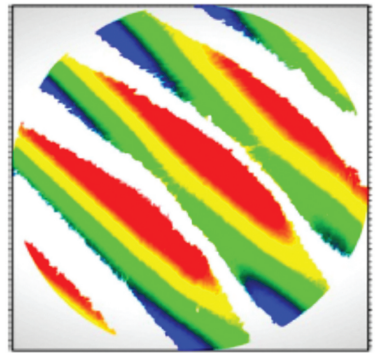
图 1 子孔径拼接干涉系统

Fig. 1 Sub-aperture stitching interferometry system

#### 3.1 动态干涉仪

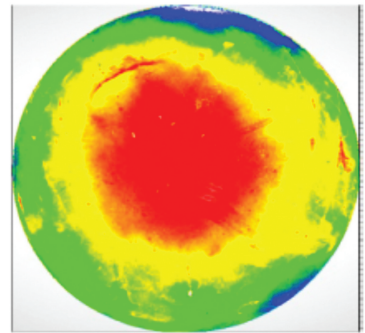
干涉仪的系统误差主要包括干涉仪自身系统误差和参考镜误差。参考镜误差在干涉仪出厂时由厂方给出标定数据,在高精度测量中可以根据需要消除它的影响。由于 DynaFiz 干涉仪采用离轴系统,通过出厂前的精确标定和测量起始时的

二步或四步标定来减少自身的系统误差。因此,相比于一般的移相干涉仪, DynaFiz 干涉仪在测量起始时有一个系统误差的标定过程。在多孔径扫描拼接测量时,这里采用的是一次标定多次测量的方法,即在测量开始时进行一次标定,测量其他子孔径时不再进行标定。多次测试研究发现,当测量过程中干涉条纹数变化在十几条以内时可以保证标定结果的有效性和测量的等精度,因此实验中控制条纹数变化在 10 条内。



(a) PSI 模式

(a) PSI mode



(b) DynaPhase 模式

(b) DynaPhase mode

图 2 不同模式下的测量结果对比

Fig. 2 Comparison of measurement results between different modes

图 2(a)所示为动态干涉仪在移相模式(PSI)下采集的干涉图,图 2(b)所示为瞬时测量模式(DynaPhase)下采集的干涉图。由此可见,动态干涉仪在 DynaPhase 模式下工作时能够顺利地完成了对工件的测量。

在随机误差方面, DynaFiz 动态干涉仪采用一个 4 mW 激光器提供稳定的 632.8 nm 激光,单次

测量一次曝光时间可短至  $12\ \mu\text{s}$ , 可以抑制环境振动、空气扰动等因素的影响, 因此对环境干扰不敏感, 适于在一般环境下应用。实验中, 根据 DynaFiz 干涉仪自带的振动测试软件的测试结果, 干涉仪系统放在气浮隔振工作台时频谱的最大振幅为十几纳米, 而放在一般工作台上时为几百纳米。

在本文的测试环境中, 根据实测条件经过多次测试, 干涉仪的工作参数选择如下: Shutter 值为 4, PPF 值为 5, Modulation Threshold 值为 7%, Auto Aperture 值为 95%。根据不同工作环境可以对干涉仪参数进行适当调控, 从而达到理想的测量条件, 以保证单孔径测量的精度在误差允许范围内。

### 3.2 二维移动平台及精度测试

图 3 所示为二维移动平台示意图, 该平台带动被测工件在竖直平面内进行二维移动, 被测工件放在载物台上, 随着载物台的移动而移动。X 轴导轨的测量行程为 400 mm, Z 轴导轨的测量行程为 150 mm。

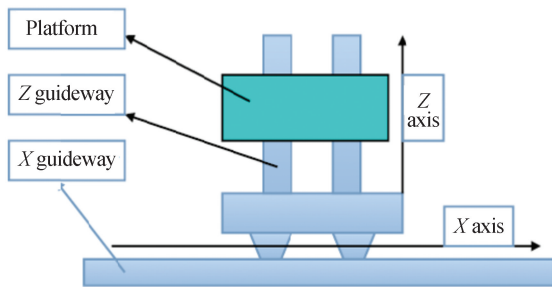


图 3 二维移动平台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of two-dimensional mobile platform

平台可以沿着水平方向（X 轴）和竖直方向（Z 轴）移动。二维移动平台导轨的定位精度、直线度、偏摆角度、垂直度的精度会直接影响子孔径数据采集的位置精度和面形精度, 从而影响拼接结果。本文对二维移动平台 X 轴和 Z 轴两个方向的导轨进行了精度测试及校正。测量仪器采用美国光动公司的 MCV-500+SQ-500 激光多普勒干涉仪和英国雷尼绍公司的 RENISHAW 双频激光干涉仪。

干涉仪 CCD 的有效区域像素数为 580, 对应参考镜的直径为 101.6 mm, 所以该动态干涉仪的像素尺寸为 0.175 mm。测试结果表明: X 轴、

Z 轴的最大定位误差分别是 0.05, 0.03 mm, 均远小于干涉仪的像素尺寸, 该误差对拼接计算造成的影响可以忽略。

工作台沿 X 轴移动时, 相对于 X 轴的最大偏摆角为  $4.32''$ , 引起像素点位置的最大变化约为 0.002 mm, 远小于干涉仪的像素尺寸; 相对于 XOZ 平面的最大偏摆角为  $2.52''$ , 引起的条纹数变化约为 4 条。工作台沿 Z 轴移动时, 相对于 Z 轴的最大偏摆角为  $1.80''$ , 引起像素点位置的最大变化约为 0.001 mm, 远小于干涉仪的像素尺寸; 相对于 XOZ 平面的最大偏摆角为  $1.44''$ , 引起的条纹数变化约为 2 条。测出 X 轴的直线度误差, 测量结束后装上五角棱镜（光学直角）, 五角棱镜将激光束旋转  $90^\circ$  后测量 Z 轴的直线度, 最后由测量软件计算出 X 轴与 Z 轴的垂直度误差为  $-15.6''$ , 远小于干涉仪的像素尺寸。

所以, 直线度误差和垂直度误差所引起的像素点匹配误差的影响较小, 可以忽略。而在工件移动过程中, 条纹变化数在单孔径测量中能达到等精度测量要求。综上数据, 二维移动平台的导轨精度处于所要求的范围内, 拼接测量产生的误差得到了较好控制, 只需要在开始测试前进行一次干涉仪系统误差标定即可, 在工件扫描拼接过程中不需再次进行标定。

## 4 实验结果及分析

实验对象为  $200\ \text{mm} \times 300\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$  的 K9 玻璃元件, 子孔径的直径为 101.6 mm, 子孔径数目共 15 个, 排列方式为 3 行 5 列, 采集时 X 轴步进为 60 mm, Z 轴步进为 70 mm。实验测试环境温度为  $23\ ^\circ\text{C}$ , 相对湿度为 40%~50%。应用动态干涉仪软件 MetroProX 中的测振模块对环境振动情况进行测试, 测得最大振幅为 223.96

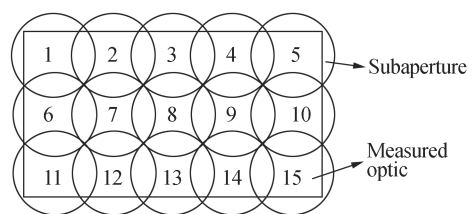


图 4 子孔径排列

Fig. 4 Sub-aperture array

nm(0.08 Hz 处)。这个振动幅度与一般车间环境比较接近。

如图 4 所示,在样板中心区域第 8 号子孔径处进行一次安装 20 次测量,求得 20 次测量峰值(Peak Value,PV)的均值及均方差、RMS 的均值和均方差,其结果如表 1 所示。从全口径测量数据中截取该位置的标准数据,得到  $PV = 0.0575\lambda, RMS = 0.0093\lambda$ 。对比可知  $\Delta PV = 0.0051\lambda, \Delta RMS = 0.0003\lambda$ 。

表 1 单孔径 20 次重复测量结果

Tab.1 Testing results of single sub-aperture measured for 20 times

	Mean( $\lambda$ )	Std Dev( $\lambda$ )
PV	0.052 4	0.003 9
RMS	0.009 0	0.000 8

图 5 为 15 个子孔径的测量结果。图 6(a)为测量数据的拼接结果,及消除二次项(图 6(b))、

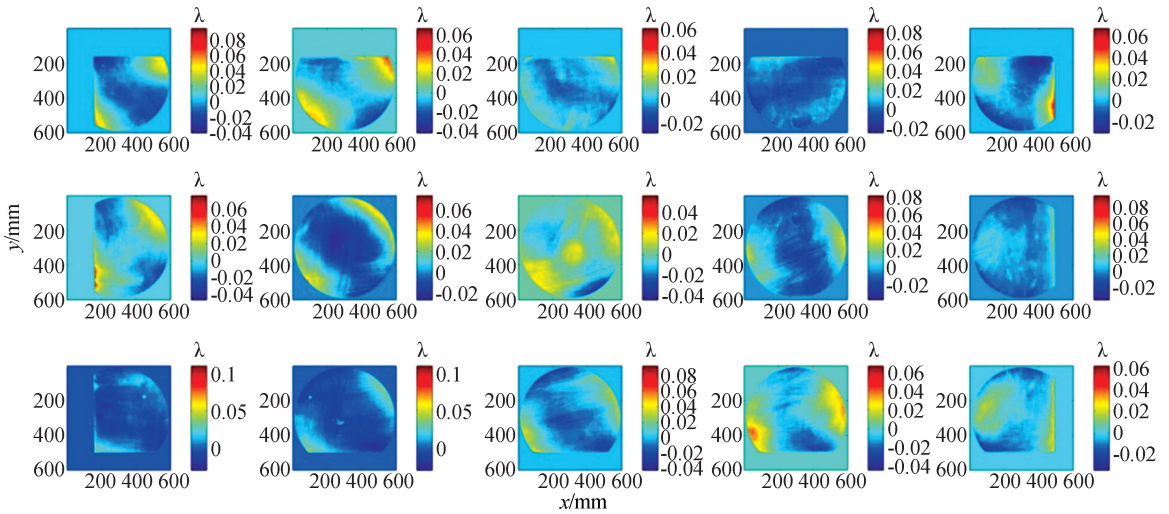


图 5 15 个子孔径的轮廓分布

Fig.5 Profile of 15 sub-apertures

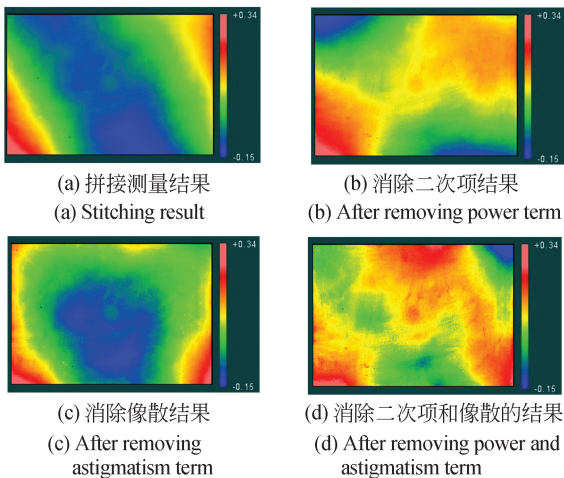


图 6 拼接测量结果

Fig.6 Stitching results

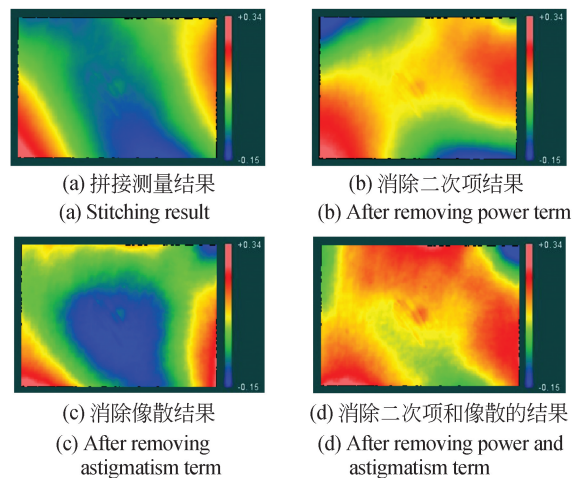


图 7 全口径测量结果

Fig.7 Testing results of full aperture

像散项(6(c))以及两者都消除的结果(6(d))。图 7(a)为上海光机所 600 mm 大口径移相干涉仪的全口径测量结果,及消除二次项(图 7(b))、像散

项 7(c)以及两者都消除的结果(7(d))。

对应图 6 和图 7 可以看出,拼接结果与全口径的面形分布非常接近。从表 2 中数值可以看

出,子孔径拼接的 PV、RMS 等参数值都和全口径很接近,PV 值的相对误差为 3.1%,RMS 值

的相对误差为 1.6%,Power 值的相对误差为 2.1%。

表 2 测量拼接结果和全口径测量结果误差

Tab. 2 Comparison of results between stitching and full aperture

( $\lambda$ )

Method	Original result			After removing power term			After removing astigmatism			Removal of astigmatism and power		
	PV	RMS	Power	PV	RMS	Power	PV	RMS	Power	PV	RMS	Power
Stitching	0.52008	0.08541	0.26768	0.40662	0.06007	0.26768	0.28738	0.07653	0.23750	0.23750	0.02268	0.26768
Full aperture	0.50443	0.08682	0.26218	0.41119	0.06353	0.26218	0.22125	0.06274	0.26218	0.23402	0.02490	0.26218

图 8 所示为拼接结果与全口径测量结果相减后得到的残差波面图,其 PV 值为  $0.031\lambda$ ,为全口径测量结果 PV 值的 6.1%;RMS 值为  $0.005\lambda$ ,为全口径测量结果 RMS 值的 5.7%。

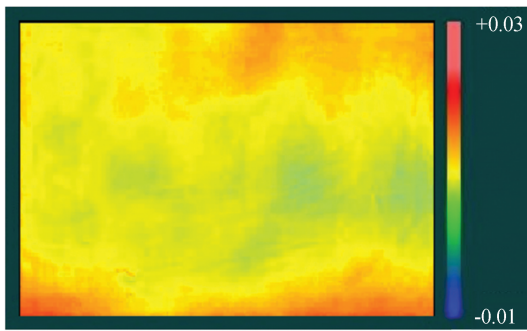


图 8 残差波面图

Fig. 8 Residual wave surface

表 3 多次拼接测量的结果统计

Tab. 3 Statistics of results of several stitching measurements

( $\lambda$ )

Set	$\overline{PV}$	$\overline{RMS}$	$\overline{Power}$	$\overline{\sigma_{PV}}$	$\overline{\sigma_{RMS}}$	$\overline{\sigma_{Power}}$
1	0.5192	0.0780	0.1549	0.0293	0.0098	0.0413
2	0.4596	0.0666	0.1253	0.0283	0.0034	0.0488
3	0.4847	0.0734	0.2197	0.0241	0.0061	0.0087
4	0.3898	0.0594	0.1592	0.0428	0.0091	0.0609
5	0.5576	0.0899	0.2501	0.0553	0.0103	0.0978
6	0.4658	0.0667	0.1750	0.0603	0.0070	0.0742
Mean	0.4794	0.0723	0.1807	0.0400	0.0076	0.0553

表 3 是多次拼接测量结果,每组数据取连续 5 次拼接测量的结果进行平均,共测量 6 组。每次测量的环境近似相同,温度为  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度在  $40\%\sim 50\%$  之间,每组数据的 5 次测量大概需要  $1.3\sim 1.5\text{ h}$ ,测量过程中的温度变化  $< 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

上述多次测量结果与全口径结果相比,相对误差  $PV=4.9\%$ 。在动态测量条件下,不同时间经不同调整,拼接测量的可靠性为:  $\overline{PV} \pm 3\sigma = 0.4974 \pm 0.12\lambda$ ,上述 6 组 30 次测量结果均未超出此范围。

## 5 结 论

本文建立了基于动态干涉仪的子孔径拼接干涉测量实验系统,讨论了系统各组成部分的具体要求,特别是对于工作台的移动精度,除了拼接测量要求外,还需要满足动态干涉仪系统误差的标定要求,即在全行程中由于工作台的直线度等误差所引起的条纹数变化要在一定数值内,具体根据精度要求确定。最后,对  $200\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  的 K9 玻璃元件进行拼接测量实验,采用误差均化拼接算法,并对拼接结果和全口径测量结果进行分析和对比,PV 值的相对误差为 3.1%,RMS 值的相对误差为 1.6%,Power 值的相对误差为 2.1%。该动态干涉拼接测量系统的测量环境与车间环境相似,这也为该系统未来在车间条件下的应用,尤其是在位、在线检测中的应用打下了基础。

## 参考文献:

- [1] KIMC J. Polynomial fit of interferograms [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(24): 4521-4525.
- [2] CHEN M Y, CHENG W M, WANG C W W. Multiaperture overlap-scanning technique for large-aperture test [J]. *SPIE*, 1991, 1553: 626-635.
- [3] 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.
- [4] 闫公敬, 张宪忠, 李柱. 子孔径拼接检测光学平面反射镜技术[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2180-2184.  
YAN G J, ZHANG X ZH, LI ZH. Technology of sub-aperture stitching testing optical flat mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2180-2184. (in Chinese)
- [5] 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): 934-940.  
ZHANG M, SUI Y X, YANG H J. Mechanical error compensation algorithm for subaperture stitching interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 934-940. (in Chinese)
- [6] WANG X K. Testing of a large rectangular mirror based on sub-aperture stitching method [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(S1): S11201.
- [7] 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, 34(10): 2357-2369.  
LIU D X, SHENG W F, WANG Q SH, *et al.*. Current status and trends of stitching interferometry in synchrotron radiation field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 34(10): 2357-2369. (in Chinese)
- [8] WALKER D. Faster production of high-quality telescope mirrors [J]. *SPIE Newsroom*, 2013, doi: 10.1117/2.1201304.004794.
- [9] ZHENG Q, CHEN L, SONG L, *et al.*. Experimental research of improved subaperture stitching method able to eliminate high-order defocus error [J]. *SPIE*, 2016, 9684: 968415, doi: 10.1117/12.2241147.
- [10] RAGAN C, MCDONNELL E. Interferometry moves beyond controlled laboratory environments [J]. *Laser Focus World*, 2012, 48(12): 58-61.
- [11] 李国培, 于瀛洁, 陈明仪. 误差均化的拼接技术[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(6): 561-564.  
LI G P, YU Y J, CHEN M Y. Stitching technique by error averaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(6): 561-564. (in Chinese)

## 作者简介:



于瀛洁(1969—),女,辽宁宽甸人,研究员,1991年于哈尔滨理工大学获得学士学位,1996年、1998年于哈尔滨工业大学分别获得硕士和博士学位,主要从事精密光学检测技术的研究。E-mail: yingjieyu@staff.shu.edu.cn



齐特(1992—),男,内蒙古通辽人,硕士研究生,2013年于上海工程技术大学获得学士学位,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: iam7483@163.com