

大口径激光钕玻璃均匀性拼接检测技术

白云波^{1**}, 周游¹, 刘世杰^{1*}, 邵建达¹, 徐隆波²

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800;

²南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 提出了基于 600 mm 口径干涉仪的一维子孔径拼接测量方法, 通过像素错位误差模拟分析结果, 设计并研制了一维大行程气浮型精密扫描拼接平台, 实现了对角线接近 1 m 的大口径激光玻璃的全口径光学均匀性拼接检测, 并对该技术的拼接测量精度和重复性进行了验证。结果表明: 拼接结果平滑, 均匀性拼接测量与直接测量结果的相对误差优于 2×10^{-7} , 全口径均匀性的重复性优于 4×10^{-8} , 单口径均匀性测量结果与拼接后相同区域的均匀性结果最大差异为 2×10^{-7} 。

关键词 测量; 光学均匀性; 拼接检测; 激光玻璃

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0912004

Splicing Detection Technique of Homogeneity of Large-Aperture Laser Neodymium Glass

Bai Yunbo^{1**}, Zhou You¹, Liu Shijie^{1*}, Shao Jianda¹, Xu Longbo²

¹Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract A measurement technique of one-dimensional (1D) sub-aperture splicing based on an interferometer with the aperture of 600 mm is proposed. With the analysis of pixel offset error simulation results, a 1D large air-float precision scanning splicing platform is designed and developed, the splicing detection of full aperture optical homogeneity of a large aperture laser glass with a diagonal close to 1 m is realized, and the accuracy and the repeatability of this technique are tested. The results show that the splicing results are smooth, the relative error between the homogeneous splicing and direct measurement results is superior to 2×10^{-7} , the repeatability of full aperture homogeneity is superior to 4×10^{-8} , and the largest difference between the measurement homogeneity results of single-aperture and the same region after splicing is 2×10^{-7} .

Key words measurement; optical homogeneity; splicing detection; laser glass

OCIS codes 120.5050; 080.2710; 160.2750

1 引 言

随着科学技术的不断发展, 大口径光学元件在天文光学、空间光学、惯性约束聚变(ICF)等高新技术领域得到了越来越广泛的应用。特别是在 ICF 应用中, 需要大量的高精度透射波前激光钕玻璃元件。光学材料的光学均匀性可表征同一块光学材料内部折射率的不一致性, 通常用其折射率的最大差值表示^[1]。光学均匀性是制约大口径高精度钕玻璃透射

波前加工精度的关键材料参数之一, 为了获取高精度的透射波前, 往往要求光学材料具有极高的光学均匀性, 一般要求光学材料的均匀性需优于 4×10^{-6} , 甚至优于 2×10^{-6} 。基于干涉仪的光学均匀性四步测量方法是目前公认的最高精度测量方法^[2], 可为光学材料研制及质量评判提供高置信度数据。现阶段商业化的大口径干涉仪一般直径为 600 mm, 最大直径为 800 mm, 更大尺寸的高精度标准平面的加工受到工艺制约而难以制造与检定,

收稿日期: 2018-03-02; 修回日期: 2018-04-08; 录用日期: 2018-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(11602280)

* E-mail: shijieliu@siom.ac.cn; ** E-mail: yunbobai2012@siom.ac.cn

对于对角线接近 1 m 的大口径光学元件,其均匀性尚无法直接实现全口径评价。为了寻求便捷、高效、低成本的检测手段,国外开展了一系列子孔径拼接技术的研究^[3],利用比待测元件口径小的干涉仪,对光学元件的面形或透射波前进行拼接检测,从而获得光学均匀性测量所需的波面数据。基于子孔径拼接原理,目前国内已实现直径为 300 mm 口径的光学材料的均匀性拼接测量,与全口径干涉仪直接测量的光学均匀性结果比较,拼接所得结果的相对误差为 0.23%^[4]。然而,受拼接次数和拼接算法的限制,该方法无法满足米量级口径激光钕玻璃均匀性测量要求。本文基于子孔径拼接测量原理,提出了一种大口径激光钕玻璃均匀性拼接方法,并建立了实验装置,实现了 810 mm×460 mm×40 mm 的大口径光学材料全口径均匀性的拼接检测,并对其精度进行了验证。

2 光学均匀性子孔径拼接检测技术

2.1 光学均匀性子孔径拼接检测原理

采用四步法对光学材料均匀性进行检测,首先分别对光学材料的透射波前 T 、反射面形 S_1 、透过前表面和材料至后表面的反射面形 S_2 、干涉仪空腔液面误差 C 进行测量,并由此得到材料均匀性 Δn 的表达式^[5-6]为

$$\Delta n = [n(T - C) - (n - 1)(S_2 - S_1)]/t, \quad (1)$$

式中 n 为材料在干涉仪波长下的折射率, t 为材料的厚度。

子孔径拼接光学均匀性检测的基本方法是将整个全口径元件分割成相互之间有一定重叠区域的若干子孔径,用口径为 600 mm 的干涉仪分别测量各子孔径光学均匀性,从重叠区域提取出相邻子孔径参考面之间的相对平移倾斜量,并依次把这些子孔径的坐标统一到同一个坐标系下,而后通过拼接算法即可恢复出全口径的光学均匀性^[7-11]。图 1 所示为两个子孔径拼接检测原理图^[7],其中 Φ 和 Φ' 分别为两个子孔径的检测区域, W 为子孔径间的重叠部分。

2.2 子孔径规划要求

子孔径数目确定的关键在于相邻子孔径重叠区域大小的选择,在拼接检测中,重叠区域的大小直接影响到拼接的精度。重叠区域过小,则求得的拼接参数就会损失精度,拼接检测得到的波面信息就不够准确。重叠区域越大,可以参加计算的拼接因子的采样点就越多,计算得到的拼接因子的精度就越高,故在实验阶段尽量采用大重叠区域。但是重叠

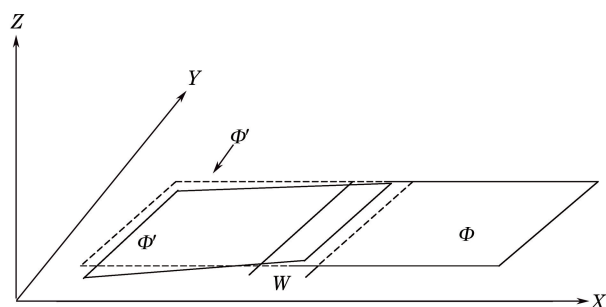


图 1 两个子孔径拼接原理图^[7]

Fig. 1 Schematic of two sub-aperture splicing^[7]

区域太大,又会影响到拼接的面积,增加子孔径数目,这样会累积更大的拼接误差,以致于影响到拼接的精度。只有在重叠区域面积不小于 1/4 子孔径面积的情况下,才能保证拼接参数精度,从而确保拼接精度^[12-13]。

针对 810 mm×460 mm 的激光钕玻璃,取圆形子孔径口径为 580 mm,重叠区域面积约占子孔径面积的 60%,子孔径移动间隔 252.5 mm,子孔径数目为 3 个,正好覆盖整个激光钕玻璃,如图 2 所示。

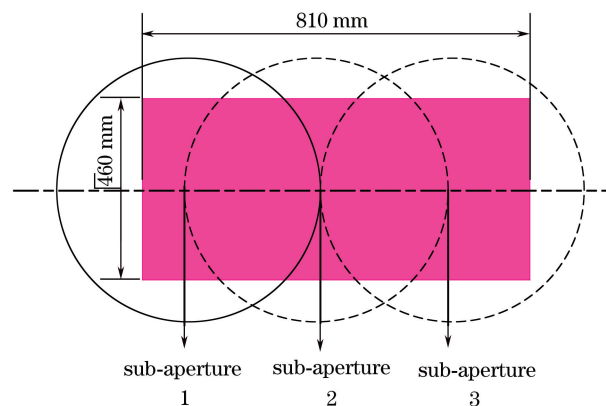


图 2 子孔径分布示意图

Fig. 2 Schematic of sub-aperture distribution

2.3 拼接装置设计

采用的检测设备为 600 mm 口径的激光平面干涉仪,由于 600 mm 口径的干涉仪难以移动,该拼接系统使用了元件移动的方案,故高精度移动平台的精度将成为影响检测精度的重要因素之一,检测装置结构示意图如图 3 所示。

为了获取移动拼接平台的移动定位精度,模拟仿真了由移动定位误差造成的子孔径间像素错位对拼接精度的影响。对原始理想波前数据在一维水平方向上进行了三个子孔径的分割,利用拼接算法对三个子孔径数据进行拼接。原始波前数据的峰谷值(PV)为 0.604λ(λ 为干涉仪使用的波长),波前误差均方根(RMS)为 0.156λ,如图 4 所示。

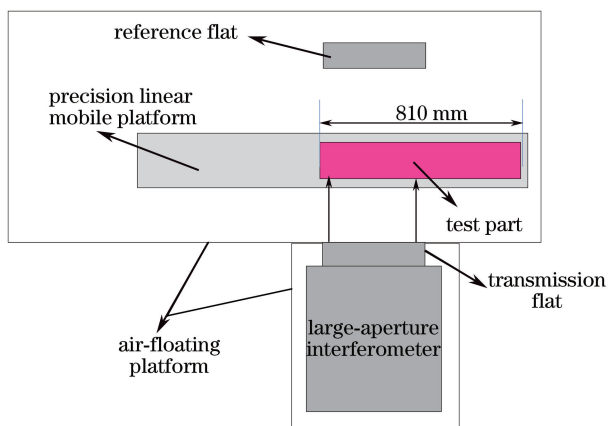


图 3 光学均匀性检测装置示意图

Fig. 3 Schematic of detection device of optical homogeneity

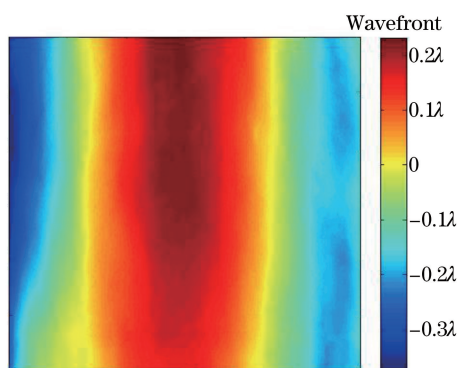


图 4 原始波前

Fig. 4 Raw wavefront

在子孔径划分的过程中,各个子孔径之间的像素错位量分别选择 0,1,2,⋯,10 pixel,计算不同错位量下拼接后的波前误差 RMS 与原始波前误差 RMS 的差值,用该值来评估像素错位对拼接误差的影响,模拟过程中的像元尺寸设定为现有大口径干涉仪的实际像元尺寸 0.547 mm/pixel,得到的结果如图 5 所示。

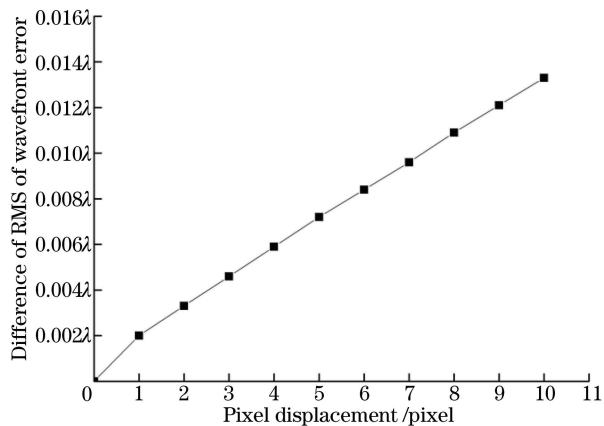


图 5 像素错位量与波前误差 RMS 差值的变化关系

Fig. 5 Pixel displacement versus RMS difference of wavefront

从模拟结果可以看出,为了保证拼接后波前与理想波前误差 RMS 的差值小于 0.002λ ,需要严格控制位移平台在拼接过程中的位移误差,使其在子孔径测量移动过程中产生的像素错位量小于 1 pixel。现有干涉仪横向分辨率为 0.547 mm/pixel,要求位移平台运动方向上的绝对定位精度最好优于所使用干涉仪横向分辨率的十分之一,即 0.05 mm;为了保证每次子孔径测量过程中的干涉条纹在干涉仪监视器的视场中可见,要求位移平台每次移动后的俯仰和偏摆位置变化误差不大于 $5''$;为了保证每次子孔径的干涉条纹可以基本调到“零条纹”,要求位移平台俯仰和偏摆姿态的调节灵敏度优于 $1''$ 。

为了满足上述指标要求,选择使用气浮型移动导轨,其机械结构如图 6 所示,该平台由一条超高精密梯形大理石作为导轨,平面气浮和侧面气浮等精密机械部件组成超高精密移动滑台,平面气浮承载来自垂直方向的负载,侧面气浮平衡由平面气浮产生的向上的浮力、震颤及气隙,以保证整个精密气浮滑台沿精密导轨作精确位移。

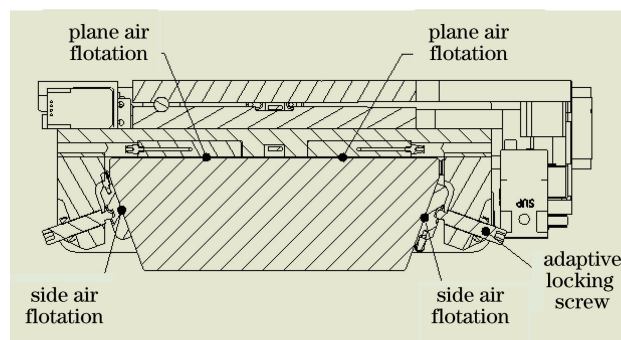


图 6 气浮型导轨机械设计图

Fig. 6 Mechanical design diagram of air-float guide

拼接移动平台主要结构:由超高精密大理石、气浮滑台等组成精密机械本体,由绝对值光栅尺、伺服电机、同步带、带轮等组成传动机构,由运动控制器、REMOTE 控制器、触摸显示器、气压比例阀、压力传感器等组成闭环控制系统。

3 光学均匀性子孔径拼接检测的实验研究

3.1 实验设备

实验中使用由美国 Zygo 公司生产的型号为 MST VeriFire 的通光口径为 600 mm 的激光平面干涉仪准确检测各子孔径的相位数据,分别对激光钎玻璃的前表面反射面形、透过前表面和材料至后表面的反射面形、透射波前和干涉仪空腔进行检测,

进而分别计算子孔径的光学均匀性^[2],最后将各子孔径的均匀性进行拼接计算,得出激光钎玻璃全口径的光学均匀性。分别对拼接后全口径均匀性的重复性、拼接后子孔径局部均匀性与子口径测量均匀性、全口径均匀性和子孔径均匀性进行了比较。

干涉仪的检测精度为:标准平面面形误差 $\lambda/12$,干涉仪空腔波前误差 RMS 的重复性优于 0.63 nm,波长 $\lambda=632.8$ nm。

基于所提出的一维拼接方法对高精度的位移及定位精度的要求,研制了一套高精度移动平台,用于各孔径间精确的水平移动,其载物台可实现光学元件倾斜和俯仰姿态的高精度调节,实物图如图 7 所示。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 拼接精度验证

实验首先选用一片 400 mm \times 400 mm 熔石英材料,分别进行全口径直接测量和拼接测量,以验证测量精度,拼接时取矩形子孔径口径 222.22 mm,重叠区域面积约占子孔径面积的 60%,子孔径移动间隔为 133.33 mm,子孔径数目为 3 个,正好覆盖整个

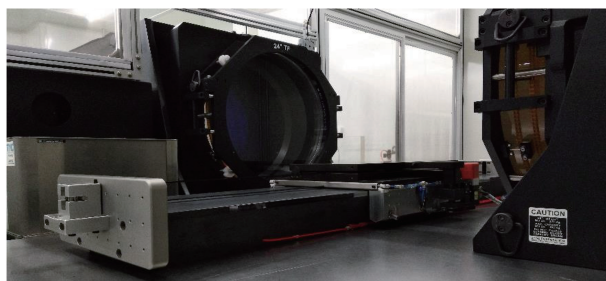


图 7 拼接检测装置实物图

Fig. 7 Physical picture of splicing detection device

400 mm \times 400 mm 熔石英材料。直接测量结果如图 8(a)所示,均匀性波前的 PV 值为 0.465 λ ,误差 RMS 为 0.059 λ 。全口径拼接测量结果如图 8(c)所示,均匀性波前 PV 值为 0.449 λ ,误差 RMS 为 0.058 λ ,与干涉仪直接检测比对可知,PV 值的误差为 0.016 λ ,除以厚度后的值为 2×10^{-7} ,误差 RMS 差值为 0.001 λ ,与模拟的结果相吻合。为进一步比对局部差异,选取了均匀性分布中的一部分区域作为比对,如图 8(b)所示。由图 8(b)可以看出,拼接后的结果与直接检测结果的局部特征分布基本一致。

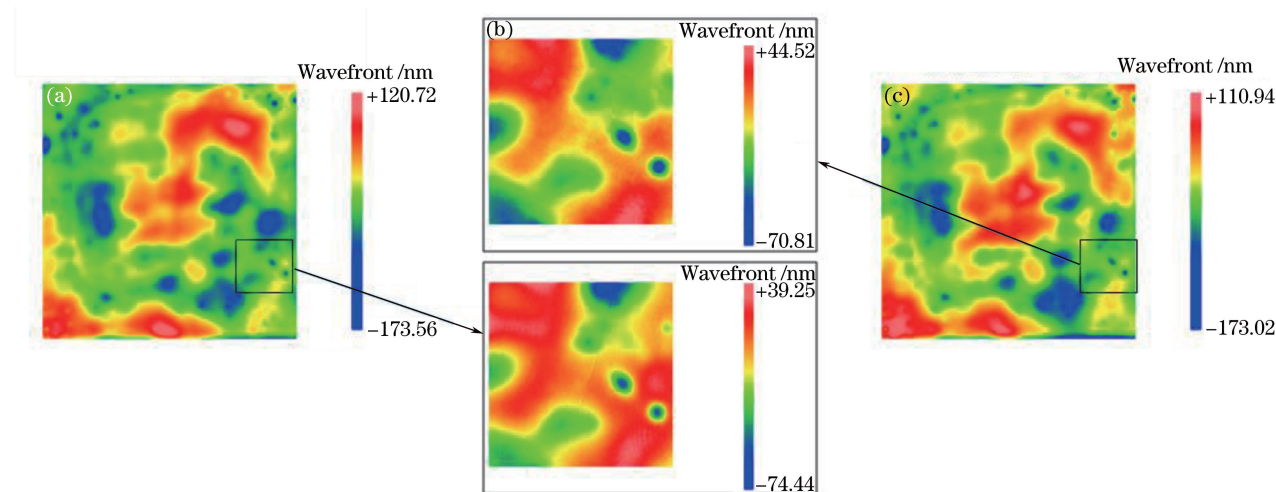


图 8 400 mm \times 400 mm 熔石英材料均匀性测量结果。(a)直接测量;(b)局部对比;(c)拼接测量

Fig. 8 Homogeneity measurement results of 400 mm \times 400 mm fused quartz.

(a) Direct measurement; (b) local comparison; (c) splicing measurement

3.2.2 大口径样品光学均匀性测量结果

实验中对同一片外形尺寸为 810 mm \times 460 mm,厚度为 40.66 mm 的激光钎玻璃重复进行了 6 次均匀性拼接检测,在 765 mm \times 416 mm 的分析口径下对该激光钎玻璃的均匀性进行了计算,由于该元件口径大,测量过程用时较长,测量过程中存在由气流扰动及温度漂移引起的随机误差,故第 1、2、6 次的检测结果与其他结果相比有

较大的偏差,但该偏差均在测试精度范围内。6 次拼接检测的均匀性结果的重复性为 $\sigma=4\times 10^{-8}$,均匀性分布较一致,6 次重复检测的结果及均匀性分布如图 9 所示。

实验对比了另一片激光玻璃元件的单口径均匀性测量结果和拼接后相同区域的均匀性结果,发现均匀性最大差异为 2×10^{-7} ,最小差异为 0.1×10^{-6} ,检测结果见表 1。单口径检测与拼接

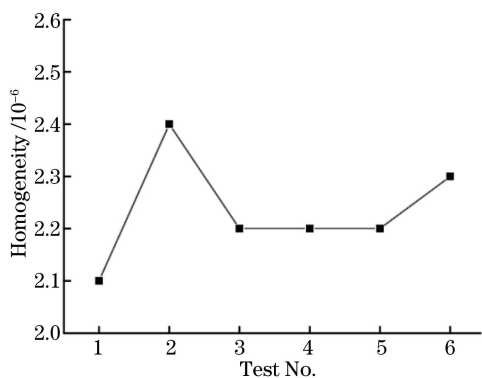


图 9 810 mm×460 mm 激光钕玻璃的均匀性测量结果
Fig. 9 Homogeneity measurement results of 810 mm×460 mm laser neodymium glass

检测特征分布如图 10 所示,结果差异较小,特征分布较一致,进一步验证了检测系统运行的稳定性及可靠性。

表 1 单口径与拼接后相同区域的均匀性测量结果比较

Table 1 Comparison of measurement results of single aperture and same region after splicing

Part	Single aperture measurement result / 10 ⁻⁶	Splicing measurement result / 10 ⁻⁶
1	1.3	1.2
2	1.8	1.6
3	1.9	1.8

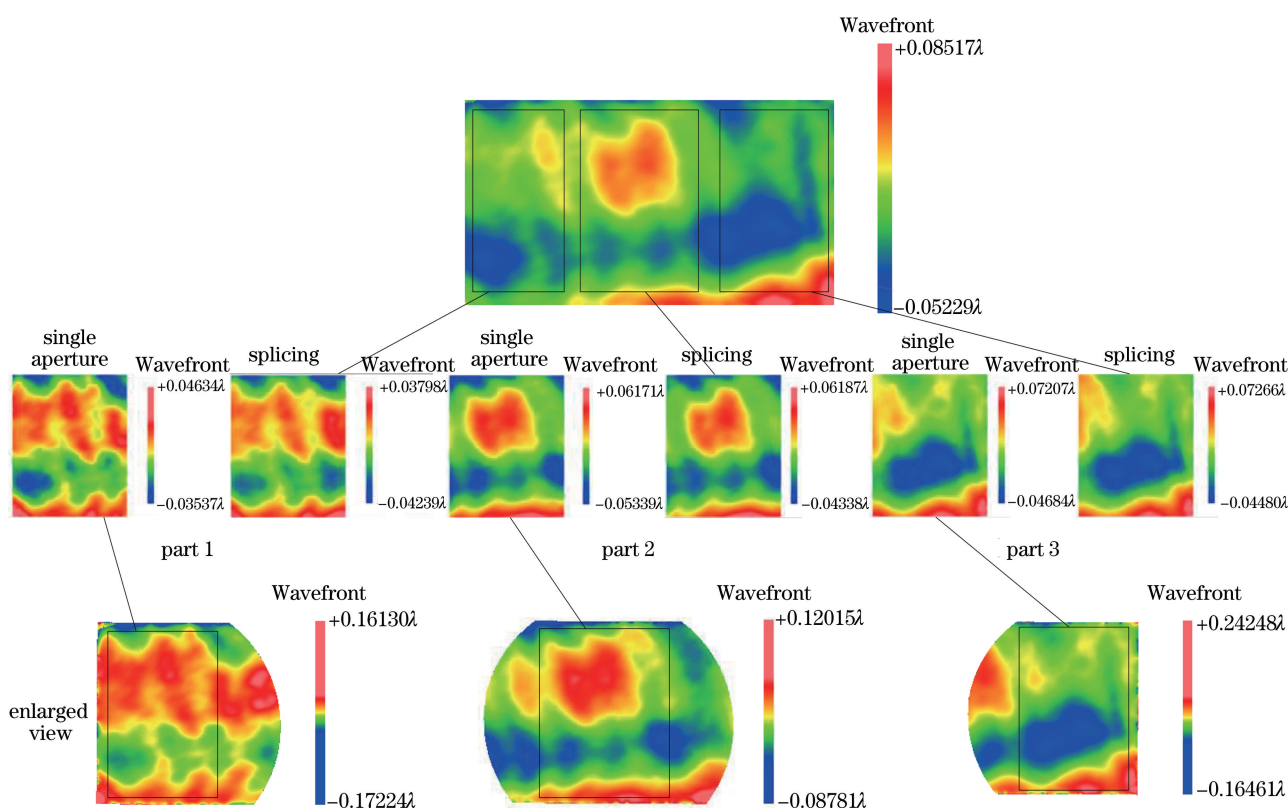


图 10 单口径与拼接后相同区域的均匀性特征分布图

Fig. 10 Homogeneous feature distributions of single aperture and same region after splicing

4 结 论

基于一维子孔径拼接方法,提出了一种测量大口径激光钕玻璃光学均匀性的高精度方法。设计并研制了一套高精度、运行稳定的拼接检测装置,研究了大口径激光钕玻璃材料光学均匀性的子孔径拼接检测,验证了拼接算法的可靠性和拼接装置的稳定性。

参 考 文 献

[1] Li J X, Guo R H, Zhu R H, *et al.* Two-step

wavelength tuning absolute testing method of the optical homogeneity of optical material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112007.

李建欣, 郭仁慧, 朱日宏, 等. 光学材料光学均匀性的波长调谐两步绝对测量法 [J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112007.

[2] Ai C, Wyant J C. Measurement of the inhomogeneity of a window [J]. *Journal of Optical Engineering*, 1991, 30(9): 602-610.

[3] Negro J E. Subaperture optical system testing [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(12): 1921-1930.

- [4] Xu X H, Wang Q, Song B, *et al.* Measurement system of optical homogeneity of large-size optical material based on subaperture stitching technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412002.
徐新华, 王青, 宋波, 等. 基于子孔径拼接技术的大尺寸光学材料均匀性检测系统[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412002.
- [5] Guo P J, Yu J C, Ding Z Z, *et al.* High accuracy testing method of the homogeneity of optical glass [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6): 528-529.
郭培基, 余景池, 丁泽钊, 等. 光学玻璃光学均匀性高精度测量技术[J]. *光学技术*, 2001, 27(6): 528-529.
- [6] Schwider J, Burow R, Elssner K E, *et al.* Homogeneity testing by phase sampling interferometry[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(18): 3059-3061.
- [7] Zhang M Y, Li X N. Accuracy analysis of stitching interferometry for test of large diameter mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(5): 446-449.
张明意, 李新南. 子孔径拼接法检验大口径光学镜面精度分析[J]. *应用光学*, 2006, 27(5): 446-449.
- [8] Li X N, Zhang M Y. Study on the sub-aperture stitching interferometry for large plano-optics [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(4): 514-517.
李新南, 张明意. 大口径光学平面的子孔径拼接检验研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(4): 514-517.
- [9] Guo P J, Yu J C, Ding Z Z, *et al.* Absolute testing method of the homogeneity of optical glass[J]. *Laser Journal*, 2003, 24(3): 26-27.
郭培基, 余景池, 丁泽钊, 等. 光学玻璃光学均匀性的绝对测量技术[J]. *激光杂志*, 2003, 24(3): 26-27.
- [10] Yang W K, Deng W R, Yang Y J. Large size and high quality optical glass uniformity detection device [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1998, 19(6): 638-640.
杨文库, 邓文荣, 杨宇晶. 大尺寸高质量光学玻璃均匀性的检测装置[J]. *仪器仪表学报*, 1998, 19(6): 638-640.
- [11] Zhang R Z, Yang C L, Xu Q, *et al.* Anti-tilting technology of the sub-aperture stitching interferograms [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(7): 879-882.
张蓉竹, 杨春林, 许乔, 等. 子孔径拼接干涉检测中去倾斜处理技术[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(7): 879-882.
- [12] Zhang R Z, Yang C L, Xu Q, *et al.* Testing the large aperture optical components by the stitching interferometer [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6): 516-517.
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.
- [13] Hou X, Wu F, Yang L, *et al.* Status and development trend of sub-aperture stitching interferometric testing technique [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2005, 3(3): 50-53.
侯溪, 伍凡, 杨力, 等. 子孔径拼接干涉测试技术现状及发展趋势[J]. *光学与光电技术*, 2005, 3(3): 50-53.