

基于子孔径拼接技术的大尺寸光学材料 均匀性检测系统

徐新华¹ 王青¹ 宋波² 傅英¹

(¹ 南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094; ² 中国建筑材料科学研究总院, 北京 100024)

摘要 为实现大尺寸光学材料折射率均匀性的高精度、低成本检测, 提出一种基于子孔径拼接技术的干涉绝对测量方法, 并研制了一套由 Zygo 干涉仪、五维气浮调整平台、子孔径拼接软件、计算机等组成的测量计算系统。待测件安放在精密的五维气浮调整架上, 通过移动调整架来对各个子孔径区域进行精密检测, 再利用子孔径拼接软件自动拼接计算出全口径待测件的光学均匀性分布。对直径为 300 mm 的石英待测件进行了口径为 180 mm 的 8 个子孔径拼接检测实验, 并将拼接所得结果与全口径干涉仪直接测量的结果进行了分析和比较, 波面峰谷值相对误差为 0.21%, 光学均匀性值相对误差为 0.23%, 精度与大口径干涉仪直接测量的精度相当, 实现了绝对检验下的平面类波前子孔径拼接技术的实用化。整套系统集成光、机、电、算于一体, 操作简便, 测量精度高。

关键词 测量; 光学均匀性; 子孔径拼接; 大尺寸光学材料

中图分类号 TN247; TP319 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0412002

Measurement System of Optical Homogeneity of Large-Size Optical Material Based on Subaperture Stitching Technique

Xu Xinhua¹ Wang Qing¹ Song Bo² Fu Ying¹

¹ School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

² China Building Materials Academy, Beijing 100024, China

Abstract In order to realize high-precision, low-cost measurement of optical refractive-index homogeneity of large-size optical material, an interference absolute testing method based on subaperture stitching technique is proposed and a measurement system comprised of a Zygo interferometer, a sophisticated five-dimensional adjustment air-floatation platform, subaperture stitching software and a computer is developed. The optical component under test is placed on the five-dimensional adjustment platform and all subaperture areas of the component can be measured precisely by moving the platform. Then optical-homogeneity distribution of the whole optical component is calculated out automatically by subaperture stitching software. In the experiment, a ϕ 300 mm quartz optical component is measured in stitching mode of eight subapertures by using a ϕ 180 mm interferometer. The stitching result is compared with the direct measurement result obtained by using full-aperture interferometer. The relative error of wavefront peak-to-valley value is 0.21%, the relative error of optical homogeneity value is 0.23%. This precision can be compared with the precision of directly measured result. The practicability of subaperture stitching technology of plane-type wavefront measured by using absolute test method is realized. The whole system integrates optics, mechanics, electrics and computer together and can be operated conveniently with high accuracy.

Key words measurement; optical homogeneity; subaperture stitching; large-size optical material

OCIS codes 120.3940; 120.4630; 120.3180; 220.4840

1 引言

光学镜片的制作基础是光学反射、透射材料, 其

光学性能很大程度上影响着光学系统的成像质量。光学透射材料的光学性能主要包括应力双折射、色

收稿日期: 2011-10-11; 收到修改稿日期: 2011-11-28

基金项目: 中国建筑材料科学研究总院和南京理工大学自主科研专项计划(2011YBXM15)资助课题。

作者简介: 徐新华(1972—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光学计量测试方面的研究。E-mail: xxhfwx@163.com

散、条纹气泡以及光学均匀性等,其中光学均匀性^[1]是指当光透射通过光学镜片时,材料内部不同位置折射率的不一致性。材料内部折射率的不一致主要是元件加工时在退火过程中,由退火炉中各位置温度不均匀引起的,光学均匀性通常用内部折射率的最大差值表示。

如果光学材料内部折射率不一致,当光波透射经过时,将改变光波波面,从而降低了光学系统的性能。研究表明,微米量级的材料不均匀性将引起透射波面产生波长量级的变化,当材料内部折射率变化较大并超出了一定的范围时,就会引起透射波面产生严重的变形,使得其无法通过光学冷加工与装校来挽回。因此光学材料的均匀性对于高精度光学系统来说,是非常重要的性能指标。随着一些重大光学工程项目的开展,光学材料均匀性的定量测定在光学研究领域以及各类光学仪器的设计和加工中都是十分重要的,高精度测量光学均匀性,特别是测量大口径光学元件的光学均匀性变得十分迫切。

子孔径拼接技术作为一项新的高精度检测大尺寸光学元件面形质量的方法,近年来引起了人们的广泛关注^[2~11]。其特点是采用高分辨率的小口径干涉仪经拼接技术来实现大尺寸光学元件面形误差的检测,既保留了干涉测试的高精度优势,同时又无需制造同尺寸的标准件,从而大大降低了测量成本,另外还可以获得波面高频信息,这些信息是大口径干涉仪所不能获得的。

在现有仪器设备的基础上,研制了一套基于子孔径拼接技术的大口径光学材料折射率均匀性的干涉测量系统。其创新点如下:1)由于干涉仪内部结构精密复杂,不宜移动,为此,设计制作了一套精密的五维气浮调整平台,把待测件放在精密五维调整架上对各个子孔径区域进行精密检测,通过移动调整架来满足子孔径横向、纵向测量要求;2)采取8个子孔径覆盖整个待测面的拼接方案,由于每一子孔径都含有一小段待测件边缘,利用图像边缘提取算法提取出各个子孔径波面的轮廓,再依据待测件整体轮廓进行图像配准,从而得到各个子孔径的精确定位信息,提高了拼接精度,并降低了实际测量中对调整平台的精度要求;3)子孔径拼接软件采用了去除波面数据奇异点(含粗大误差点)、双线性插值、拼接残差最小二乘处理算法、加权平滑拼接法等算法,进一步提高了拼接精度;4)验证了绝对检验下的平面类波前的子孔径拼接精度足够与大口径干涉仪直接测量的精度相比。

2 光学均匀性的干涉绝对测量法

干涉绝对测量法^[12~17]是定量测试光学材料均匀性准确度较高、且方便有效的方法,它的优势是可以消除由测试系统及样品面形带来的误差,其检测过程示意图如图1所示,TF为透射镜,RF为反射镜,本文采用此法来测量待测件的均匀性。

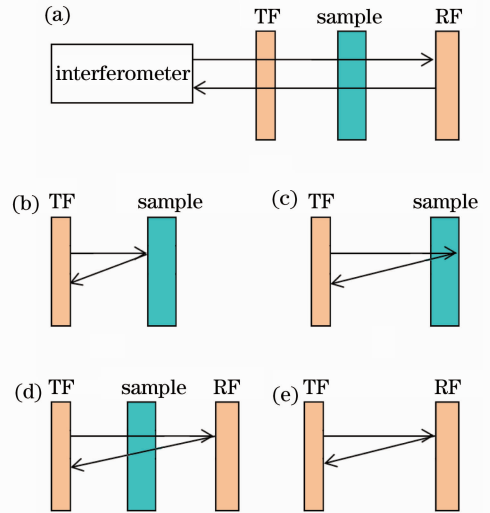


图1 均匀性干涉绝对检验法示意图。(a)光路图;(b)步骤1:前表面测试;(c)步骤2:后表面测试;(d)步骤3:透射测试;(e)步骤4:空腔测试

Fig.1 Schematic diagram of interference absolute measurement of optical homogeneity. (a) Light path map; (b) step 1: front surface testing; (c) step 2: back surface testing; (d) step 3: transmission testing; (e) step 4: cavity testing

均匀性的干涉绝对检测方法又叫四步法,它的测量思想是分离参与干涉测量的各个表面面形误差的影响,因此是一种多测试对象的绝对检验,测量精度高。所说的多测试对象,是指构成干涉腔的要素在各次测试中是不同的。通过空腔 $C(x,y)$ 、前表面反射 $S_1(x,y)$ 、后表面反射 $S_2(x,y)$ 与透射 $T(x,y)$ 四次测量获得的干涉波前,可以解算得到样品折射率与面形无关的结果。假设系统的标准透射平面面形误差为 $T(x,y)$,待测件前表面的面形误差为 $A(x,y)$,待测件后表面的面形误差为 $B(x,y)$,系统后反射面的面形误差为 $R(x,y)$,待测件的厚度为 t ,折射率为 n_0 ,待测件的折射率变化量(即不均匀性)用 $\Delta n(x,y)$ 表示。具体测量步骤及结果如下:

步骤1:干涉仪参考光与样品前表面反射光相干涉检测得到波面分布为

$$S_1(x,y) = 2A(x,y) - 2T(x,y); \quad (1)$$

步骤2:干涉仪参考光与样品后表面反射光相

干涉检测得到的波面分布为

$$S_2(x, y) = 2A(x, y) - 2T(x, y) + 2n_0[B(x, y) - A(x, y)] + 2\Delta n(x, y)t; \quad (2)$$

步骤 3: 样品放置于干涉仪的标准透射板和反射板之间时, 系统参考光与标准反射板的反射光相干涉检测得到波面分布为

$$T(x, y) = 2A(x, y) - 2T(x, y) + 2n_0[B(x, y) - A(x, y)] + 2\Delta n(x, y)t + 2R(x, y) - 2B(x, y); \quad (3)$$

步骤 4: 空腔时, 系统后表面反射光与参考光干涉产生的波面分布为

$$C(x, y) = 2R(x, y) - 2T(x, y). \quad (4)$$

由(1)~(4)式可以解出样品光学均匀性为

$$\Delta n(x, y) = \{n_0[T(x, y) - C(x, y)] + (n_0 - 1)[S_1(x, y) - S_2(x, y)]\} / (2t). \quad (5)$$

从(5)式可以看出, 均匀性结果中不包含任何表面面形信息, 降低了对样品面形以及干涉仪标准镜的精度要求, 减少了拼接测试过程中的系统误差, 提高了拼接测试精度。

3 子孔径的拼接

子孔径的拼接, 采用的是经典的重叠子孔径方法, 即根据相邻两个子孔径重叠区域中的数据来求取相对倾斜等系数, 达到统一的目的。为此, 首先需要考虑的是子孔径的排列方式——在保证全覆盖的前提下, 既需要保证子孔径之间有足够的重叠度以减小拼接误差, 又需要以尽量少的子孔径数目来减少测试工作量。

现有 Zygo 干涉仪口径为 300 mm, 希望采用子孔径拼接技术之后, 能将测试口径拓展到 500 mm, 在综合考虑了各种测量方法及拼接模式的优缺点后, 选择采用如图 2 所示的子孔径排列模式, 这样既能满足检测需求和精度要求, 又减小了检测平台机械设计和调校的难度, 图中子孔径按测量顺序编号。

其次, 需要考虑各个子孔径相对位置的精确确定, 由图 2 可知, 8 个子孔径都含有圆形待测件的边缘, 利用这一特点, 可采取图像配准的方法对子孔径进行精确定位。首先, 采用图像边缘提取算法^[18]对各个子孔径的 Mask 数据进行处理, 得到子孔径波面轮廓二值图像; 再以待测件的轮廓作为标准图像, 采用图像相减算法, 对各个子孔径图像进行平移配准, 将子孔径统一到同一坐标系中, 图 3 示出采用图像配准方法得到的实测数据的子孔径定位图。这一定位方法不依赖于五维移动调整架的精度, 降低了

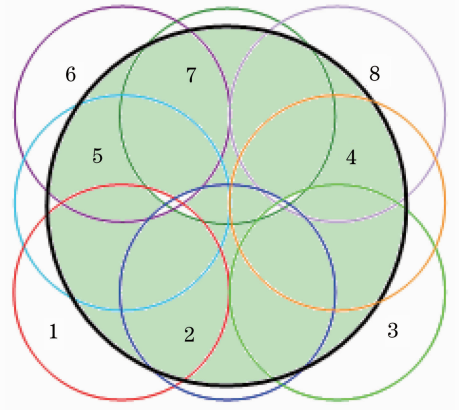


图 2 子孔径划分方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of subaperture division mode

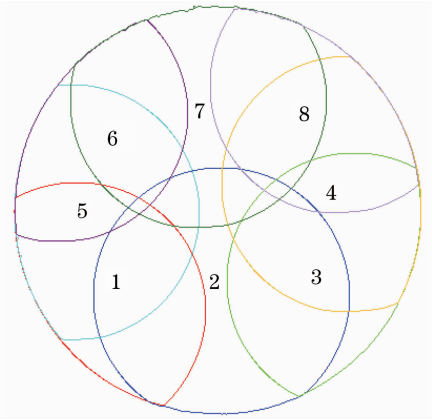


图 3 实测数据子孔径定位图

Fig. 3 Subaperture location map of measured data

对实验设备的要求。

另外需要提出合适的拼接顺序与算法来控制拼接残差的影响。采用的拼接顺序为 1→2→3→4→8→7→6→5→1, 形成一个闭合的环路。为控制拼接残差的影响, 采用了残差最小二乘处理算法, 具体如下:

1) 在整个测量平面上, 共有 8 个子孔径 A_1, A_2, \dots, A_8 , 以子孔径 A_1 为基准孔径, 其余子孔径 A_2, A_3, \dots, A_8 相对它的变换系数为 $(a_2, b_2, c_2), (a_3, b_3, c_3), \dots, (a_8, b_8, c_8)$, 其中 $a_i, b_i, c_i (i = 2, 3, \dots, 8)$ 分别为子孔径 A_i 相对于子孔径 A_1 在 x 方向和 y 方向的倾斜量以及在光轴方向的平移量;

2) 子孔径的拼接顺序为 1→2→3→4→8→7→6→5→1, 共有 8 个重叠区, 16 份重叠区数据, 若子孔径 j 和子孔径 k 相邻并具有重叠区域, 则可分别根据两个子孔径的重叠区域波面数据计算出倾斜系数 (x_{jk}, y_{jk}, p_{jk}) 和 (x_{kj}, y_{kj}, p_{kj}) , 于是, 相邻两个子孔径的相对倾斜为

$$\begin{cases} a_{jk} = x_{jk} - x_{kj} \\ b_{jk} = y_{jk} - y_{kj} ; \\ c_{jk} = p_{jk} - p_{kj} \end{cases}$$

3) 以子孔径 A_1 为基准, 则其余子孔径需要消除的倾斜系数分别为(按拼接顺序)

$$\begin{aligned} A_2: & \begin{cases} a_2 = x_{21} - x_{12} \\ b_2 = y_{21} - y_{12} , \\ c_2 = p_{21} - p_{12} \end{cases} , & A_3: & \begin{cases} a_3 = a_2 + x_{32} - x_{23} \\ b_3 = b_2 + y_{32} - y_{23} , \\ c_3 = c_2 + p_{32} - p_{23} \end{cases} , & A_4: & \begin{cases} a_4 = a_3 + x_{43} - x_{34} \\ b_4 = b_3 + y_{43} - y_{34} , \\ c_4 = c_3 + p_{43} - p_{34} \end{cases} , & A_8: & \begin{cases} a_8 = a_4 + x_{84} - x_{48} \\ b_8 = b_4 + y_{84} - y_{48} , \\ c_8 = c_4 + p_{84} - p_{48} \end{cases} , \\ A_7: & \begin{cases} a_7 = a_8 + x_{78} - x_{87} \\ b_7 = b_8 + y_{78} - y_{87} , \\ c_7 = c_8 + p_{78} - p_{87} \end{cases} , & A_6: & \begin{cases} a_6 = a_7 + x_{67} - x_{76} \\ b_6 = b_7 + y_{67} - y_{76} , \\ c_6 = c_7 + p_{67} - p_{76} \end{cases} , & A_5: & \begin{cases} a_5 = a_6 + x_{56} - x_{65} \\ b_5 = b_6 + y_{56} - y_{65} , \\ c_5 = c_6 + p_{56} - p_{65} \end{cases} , \end{aligned}$$

但是, 在一个封闭的循环中会出现拼接残差, 即 A_9 也就是 A_1 :
$$\begin{cases} a_9 = a_1 = a_5 + x_{15} - x_{51} = \Delta x \neq 0 \\ b_9 = b_1 = b_5 + y_{15} - y_{51} = \Delta y \neq 0 ; \\ c_9 = c_1 = p_5 + p_{15} - p_{51} = \Delta p \neq 0 \end{cases}$$

4) 把上述闭合拼接过程中出现的残差分布到所有子孔径上, 用最小二乘法拟合使得其平方和达到最小, 这里以平移项(倾斜项类似)为例, 给出变换系数的方程组

$$\begin{cases} c_1 = c_5 + p_{15} - p_{51} + v_1^p = 0 \\ c_2 = p_{21} - p_{12} + v_2^p \\ c_3 = c_2 + p_{32} - p_{23} + v_3^p \\ c_4 = c_3 + p_{43} - p_{34} + v_4^p \\ c_5 = c_6 + p_{56} - p_{65} + v_5^p \\ c_6 = c_7 + p_{67} - p_{76} + v_6^p \\ c_7 = c_8 + p_{78} - p_{87} + v_7^p \\ c_8 = c_4 + p_{84} - p_{48} + v_8^p \end{cases} \quad (6)$$

由(6)式整理出矩阵形式的最小二乘残差方程^[19]

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_1^p \\ v_2^p \\ v_3^p \\ v_4^p \\ v_5^p \\ v_6^p \\ v_7^p \\ v_8^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{51} - p_{15} \\ p_{12} - p_{21} \\ p_{23} - p_{32} \\ p_{34} - p_{43} \\ p_{65} - p_{56} \\ p_{76} - p_{67} \\ p_{87} - p_{78} \\ p_{48} - p_{84} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \end{bmatrix} = \Delta \mathbf{P} - \mathbf{A} \mathbf{C}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{A} 为系数矩阵, 然后, 通过最小二乘法^[19]求解得到平移系数

$$\mathbf{C} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{P}. \quad (8)$$

同理, 可求得倾斜系数;

5) 利用求得的变换系数 (a_2, b_2, c_2) , (a_3, b_3, c_3) , \dots , (a_8, b_8, c_8) 对子孔径 A_2, A_3, \dots, A_8 的波面数据进行消倾斜, 将其统一到以子孔径 A_1 为基准的平面上。

最后, 在构建全口径波面的时候, 还要考虑到消除拼接痕迹的问题。为此引入权重的思想, 对于处于

子孔径重叠区域的波面数据采取加权平滑拼接算法。如图 4 所示, 对于两个孔径重叠区域中的点, 到子孔径 A_1 中心的距离为 d_1 , 到子孔径 A_2 中心的距离为 d_2 , ω_1, ω_2 分别表示子子孔径 A_1 和 A_2 上该点的波面相位值, ω 表示拼接后该点的波面相位值, 子孔径 A_1 半径为 r_1 , 子孔径 A_2 半径为 r_2 , 则有

$$\omega = \frac{\omega_1(r_1 - d_1) + \omega_2(r_2 - d_2)}{(r_1 - d_1) + (r_2 - d_2)}, \quad (9)$$

由(9)式可以看出离孔径边缘越近的点波面相位值所占的权重越小。利用此算法使得拼接区域平滑

过渡,控制了拼接的痕迹。对于多个子孔径重叠区域,(9)式可改为

$$\omega = \frac{\omega_1(r_1 - d_1) + \omega_2(r_2 - d_2) + \dots + \omega_n(r_n - d_n)}{(r_1 - d_1) + (r_2 - d_2) + \dots + (r_n - d_n)} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i(r_i - d_i)}{\sum_{i=1}^n (r_i - d_i)} \quad (10)$$

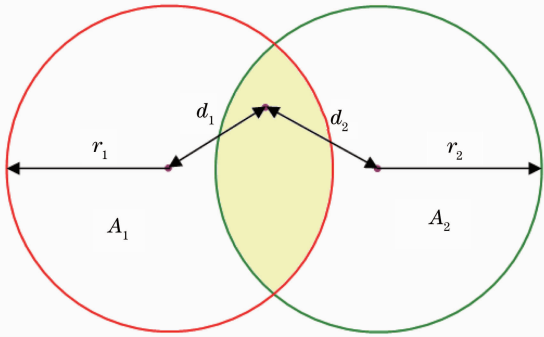


图4 加权平滑拼接算法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of weighted smoothing stitching algorithm



图5 (a) 测试系统实物图; (b) 五维气浮调整平台实物图

Fig. 5 (a) Picture of actual measurement system; (b) five-dimensional adjustment air-floatation platform

4.2 系统软件

光学均匀性的子孔径测量数据拼接系统软件界面如图6所示,软件采用C++语言编写,界面友好,使用方便,主要包含以下功能:

- 1) 待测件折射率、厚度、样品编号、测试者姓名、测试日期和激光波长等信息的输入和显示功能;
- 2) 待测件类型的选择功能,可实现圆形待测件和方形待测件的拼接;
- 3) 读入Zygo干涉仪测试数据文件,并检查数据文件有无错误;
- 4) 采用优化算法,进行拼接运算,运算完成后,在界面上输出并显示光学均匀性分布图、波面峰谷

4 子孔径拼接系统与实验

4.1 系统硬件

整套系统由口径为300 mm的Zygo干涉仪、五维气浮调整平台、子孔径拼接软件和计算机等组成。五维气浮载物调整平台如图5所示,结构平稳、紧凑,便于移动,刚度好,具有较高的测量精度。移动方式:左右为气浮移动,上下为三个定位挂钩。为保证测量空间及移动件的稳定性,主架和定板均设计成下宽上窄的梯形。此外主架、动板和定板均采用铸铝制造,以便减轻重量,减小隔振台的承载要求。这种结构的整体刚性较好,抗振动和其他干扰能力较强,工件安装固定在工作台上,承载能力较强,工件质量对干涉仪的动态性能影响较小。具体技术指标如下:

- 1) x 、 y 、 z 方向的定位精度达到0.01 mm;
- 2) x 、 y 方向的调整范围0~400 mm, z 方向调整范围0~140 mm;
- 3) 在平台元件的装夹架上含有二维调节架,可对光学元件的俯仰、左右旋转进行微调,调整范围均为 $\pm 3^\circ$,精度均为 0.005° 。

(PV)值、波面均方根(RMS)值、光学均匀性值和光学均匀性RMS值等重要信息。

4.3 实验结果与分析

为验证拼接系统的精度,进行了对比实验,实验所用待测件是直径为300 mm的平面光学元件,折射率为1.456,厚度为56.4 mm。首先采用口径为300 mm的Zygo干涉仪进行全口径测试,得到全口径测试波面作为约定真值;再采用 $\phi 180$ mm口径干涉仪对待测件进行子孔径分区测试,利用拼接软件计算得到拼接后的波面图。图7是测得全口径和拼接所得全口径的光学均匀性分布图,表1给出了两者相关参数的对比。

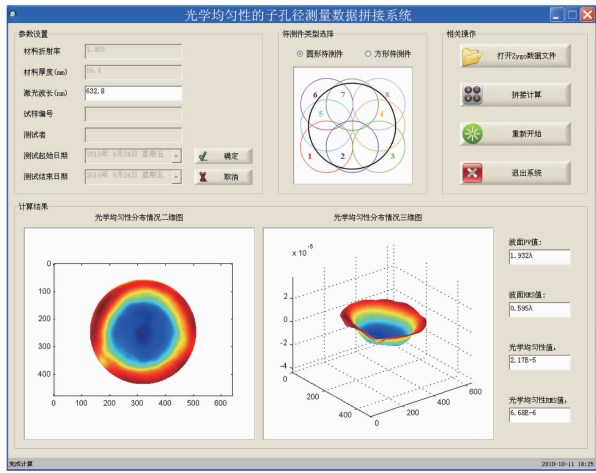


图 6 软件界面图

Fig. 6 Software interface diagram

由图 7 和表 1 可知,拼接所得结果与实际测得结果非常相近,波面 PV 值的相对误差为 0.21%,波面 RMS 值的相对误差为 1.19%,光学均匀性值

的相对误差为 0.23%,光学均匀性 RMS 值的相对误差为 1.37%。实验结果表明:绝对检验下平面类波前的子孔径拼接已经可以替代大口径干涉仪直接测量。

作为均匀性绝对测试的子孔径拼接方法,其精度首先依赖于各个子孔径波面的测试精度;其次是拼接算法精度。干涉仪是一种高精度的计量测试仪器,测试过程中受温度、气流和振动等环境因素的影响,测量数据不可避免地带有随机噪声,为减小随机噪声对测量精度的影响,实际测试中,对每一波面重复测量 6 次取其平均值作为测量结果。另外,采用罗曼诺夫斯基准则^[19]对波面数据中可能含有粗大误差的异常数据进行判别,若含粗差则予以剔除。拼接过程中,显著影响拼接精度的主要是子孔径的精确定位,对于这点采取了基于图像配准的子孔径定位方法,使得定位精度达到像素量级,进一步提高了拼接精度。

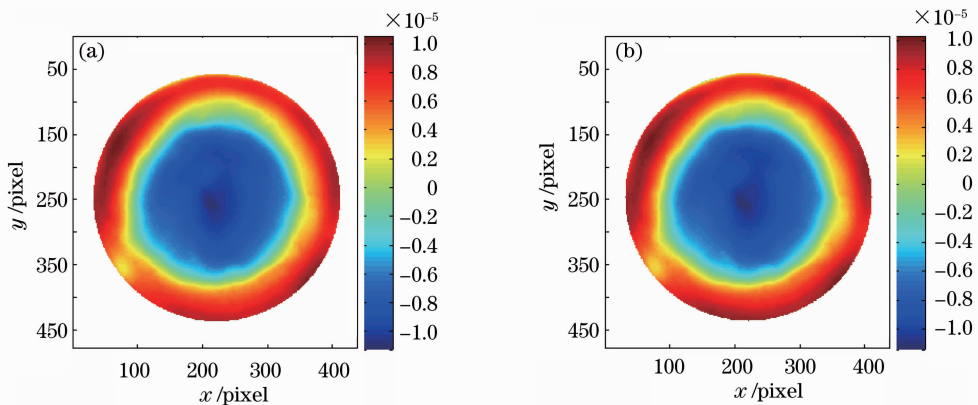


图 7 (a)测得全口径的光学均匀性分布图;(b)拼接所得全口径的光学均匀性分布图

Fig. 7 (a) Optical homogeneity distribution map of measured full aperture; (b) optical homogeneity distribution map of stitched full aperture

表 1 测得全口径与拼接所得全口径的相关参数

Table 1 Parameters of measured and stitched full apertures

	PV value of wavefront	RMS value of wavefront	Value of optical homogeneity	RMS value of optical homogeneity
Measured full aperture	1.936λ	0.588λ	2.172 × 10 ⁻⁵	6.59 × 10 ⁻⁶
Stitched full aperture	1.932λ	0.595λ	2.167 × 10 ⁻⁵	6.68 × 10 ⁻⁶
Absolute error	-0.004λ	0.007λ	-5 × 10 ⁻⁸	9 × 10 ⁻⁸
Relative error /%	0.21	1.19	0.23	1.37

5 结 论

在现有口径为 300 mm 的 Zygo 干涉仪基础上,设计制作了精密三维气浮调整平台,编写了基于子孔径拼接技术的光学均匀性分析计算软件,实现了

尺寸为 φ500 mm 的圆形或尺寸为 430 mm × 430 mm 的方形光学材料均匀性检测,实现了绝对检验下的平面类波前的子孔径拼接,使得平面子孔径拼接技术走出实验室走向实用化。在子孔径重叠拼

接基本算法之外,基于图像配准的子孔径定位法降低了实际测量中对五维气浮平台的调整精度要求、拼接残差最小二乘处理算法和加权平滑拼接法等算法提升了对随机误差干扰的抵抗性,进一步提高了拼接精度。整套系统具有检测精度高、操作简单、对实验设备要求不高等优点,为采用子孔径拼接原理进行大口径光学元件光学均匀性测量和分析计算提供了一种可行的方法。

参 考 文 献

- 1 Song Bo. Measurement of optical homogeneity of large-sized quartz glass [J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2006, **15**(1): 31~32
宋波. 大尺寸石英玻璃光学均匀性的测量[J]. *中国建材科技*, 2006, **15**(1): 31~32
- 2 Hou Xi, Wu Fan, Yang Li *et al.*. Status and development trend of sub-aperture stitching interferometric testing technique [J]. *Optics & 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
- 3 Wang Yuezhu, Tian Yi, Li Hongyu *et al.*. Modeling and experiment of testing asphere by annular subaperture stitching interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3082~3087
王月珠, 田义, 李洪玉等. 环形子孔径拼接干涉检测非球面的建模与实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3082~3087
- 4 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2022~2026
王孝坤, 郑立功, 张学军. 子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2022~2026
- 5 Chen Shanyong, Dai Yifan, Xie Xuhui *et al.*. Approach to accuracy evaluation for subaperture stitching interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 883~888
陈善勇, 戴一帆, 解旭辉等. 子孔径拼接干涉测量的精度估计方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 883~888
- 6 Chai Liqun, Yu Yingjie, Shi Qikai *et al.*. Wavefront testing of large-aperture continuous phase plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 809~814
柴立群, 于瀛洁, 石琦凯等. 大口径连续相位板波前检测[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 809~814
- 7 Xu Hongyan, Xian Hao, Zhang Yudong. Algorithm for reconstructing the whole-aperture wavefront from annular subaperture Hartmann-Shack gradient data [J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2011, **31**(1): 0112005
徐洪艳, 鲜浩, 张雨东. 利用环形子孔径哈特曼夏克斜率数据复原全孔径波前相位算法研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112005
- 8 W. M. Cheng, M. Y. Chen. Transformation and connection of subapertures in the multiaperture overlap-scanning technique for large optics tests [J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(8): 1947~1950
- 9 Q. Wang, J. B. Chen, R. H. Zhu *et al.*. A new technique for testing large optical flat [C]. *SPIE*, 1993, **2003**: 389~397
- 10 M. Bray. Stitching interferometer for large plano optics using a standard interferometer [C]. *SPIE*, 1997, **3134**: 39~50
- 11 Zhang Rongzhu, Yang Chunlin, Shi Qikai *et al.*. Principle and accuracy of the stitching interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1241~1244
张蓉竹, 杨春林, 石琦凯等. 子孔径拼接干涉检测及其精度分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1241~1244
- 12 Guo Peiji, Yu Jingchi, Ding Zezhao *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
- 13 A. S. De Vany. Using a murty interferometer for testing the homogeneity of test samples of optical materials [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(6): 1459~1460
- 14 Chiayu Ai, James C. Wyant. Measurement of the inhomogeneity of a window [J]. *Opt. Engng.*, 1991, **30**(9): 1399~1404
- 15 Lin Juan. Interference absolute measurement for homogeneity of large-aperture optical glass [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(1): 120~123
林娟. 大口径光学玻璃光学均匀性干涉绝对测量方法[J]. *应用光学*, 2008, **29**(1): 120~123
- 16 J. Schwider, R. Burow, K. -E. Ellsner *et al.*. Homogeneity testing by phase sampling interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18): 3059~3061
- 17 Yang Wenku, Deng Wenrong, Yang Yujing. Measurement apparatus of optical homogeneity of large-sized high-quality optical glass [J]. *J. 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
- 18 Zhu Hong. Foundation of Digital Image Processing [M]. Beijing: Science Press, 2005
朱虹. 数字图像处理基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 19 Fei Yetai. Error Theory and Data Processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2005
费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005

栏目编辑: 何卓铭