

大口径光学元件功率谱密度的拼接干涉检测

刘昂, 何宇航, 李强, 高波, 石琦凯, 柴立群, 许乔*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 为实现大口径光学元件波前功率谱密度(PSD)的高精度、低成本检测,提出了一种将干涉与拼接技术结合的检测方法。推导了波前 PSD 的计算方法,提出了基于相关匹配的子孔径拼接算法,分析了拼接干涉检测的误差来源。对拼接检测算法进行了仿真验证,结果表明,拼接检测的波前畸变峰谷值(d_{pv})与 PSD 的均方根值(P_{RMS})的相对偏差分别为 1.2% 和 0.1%。采用口径为 620 mm×450 mm 光学元件开展了 5 次拼接检测实验,比较了拼接检测与全口径直接检测结果,两者分布一致, d_{pv} 偏差不大于 0.012λ ($\lambda=632.8$ nm), P_{RMS} 偏差不大于 0.03 nm,表明该算法稳定可靠,可实现大口径光学元件波前 PSD 的拼接检测。

关键词 测量; 子孔径拼接; 相关匹配; 功率谱密度; 波前测量

中图分类号 TN247; O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0204008

Power Spectral Density Test of Large Aperture Optical Elements by Stitching Interferometry

Liu Ang, He Yuhang, Li Qiang, Gao Bo, Shi Qikai, Chai Liqun, Xu Qiao*

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract In order to realize high-precision and low-cost detection of wavefront power spectral density (PSD) of large aperture optical elements, a detection method combining the interference and splicing techniques is proposed. The method for calculating the wavefront PSD is deduced, and the subaperture stitching method is proposed based on the correlation match algorithm. Then the error sources in the stitching interferometry are analyzed. The simulation by the stitching method is performed and the results show that the relative deviations of the wavefront distortion peak-valley value (d_{pv}) and the root mean square value (P_{RMS}) of the PSD during the stitching detection are 1.2% and 0.1%, respectively. Five experiments with 620 mm×450 mm aperture elements are accomplished and the corresponding stitching results are compared with the direct test results of the full aperture elements. The distributions are consistent with each other. The deviation of d_{pv} is 0.012λ ($\lambda=632.8$ nm) and that of P_{RMS} is 0.03 nm, which indicating the proposed method is stable and reliable for the stitching test of wavefront PSD of large aperture optical elements.

Key words measurement; subaperture stitching; correlation match; power spectral density; wavefront measurement

OCIS codes 100.1160; 120.3180; 220.4840; 240.6690

1 引 言

科学技术的快速发展,对光学加工与制造提出了更高的要求。天文光学、光刻技术和惯性约束聚变等领域的大口径光学系统,均对其中的光学元件提出了大口径、超光滑和高面形精度的综合要求。

区别于传统光学系统,高功率激光系统要求对光学元件的波面误差进行全频段控制,因为大口径光学元件的低频位相调制将影响激光束焦斑主瓣的能量分布,直接关系到能否满足打靶要求;中高频位相调制既影响了焦斑旁瓣的能量分布,又增大了光斑的尺寸,甚至会导致严重的光学元件损伤,降低激光光

收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2018-10-31; 录用日期: 2018-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(61505186)、国家科技重大专项基金(2013ZX04006011-102)、中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室开放基金(KF14007)

* E-mail: xuqiao@vip.sina.com

束的输出质量^[1]。因此,对高功率激光系统来说,评价光学元件质量不能仅分析波前畸变的峰谷值 d_{pv} 和均方根值 W_{RMS} ,而应引入波前误差的频谱分布进行评价。

波前功率谱密度(PSD)是光学元件波面误差的傅里叶变换与空间频率间隔的比值,表征位相误差各种空间频率成分的权重分布,可用于光学元件中高频加工误差的评价。采用高分辨率干涉仪测量光学元件的波面误差再进行傅里叶变换可分析得到 PSD。但高分辨率干涉仪的检测口径通常不能满足大口径光学元件的检测需求。高精度大口径干涉仪的标准镜加工难度大,口径一般不超过 600 mm,对 CCD(charge coupled device)分辨率及光学系统传递函数要求也较高,因而价格昂贵。为降低检测成本,徐建程等^[2]研究了功率谱密度的统计测量方法,由于该方法不能得到全口径的 PSD 分布及一维(1D)塌陷曲线,且要求采样区域的数量不低于 8×8 ,故无法高效、准确地反映元件中高频误差。杨相会等^[3]认为干涉仪的传递函数关系到 PSD 检测精度,并提出了依据干涉仪传递函数与 PSD 的关系对测量结果进行修正的方法,但该方法不确定因素多且无法解决检测口径不足的问题。因此,有必要提出一种拼接检测方法实现对光学元件高精度、低成本及全口径的检测需求。

拼接测量技术最早由美国 Arizona 大学光学中心的 Kim^[4]于 1982 年提出,采用小口径干涉仪、离轴抛物面准直镜及参考镜面建立测量装置,实现了 1.6 m 平面镜的面形测量^[5]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所采用精密平移系统定位子孔径坐标,基于综合优化和误差均化的拼接模型实现了大口径光学元件的面形测量,并提出了机械定位误差的补偿算法;但是检测系统依赖的电控精密平移装置,不仅挤占了有限的测量空间,增大了检测系统复杂程度,而且伺服电机在长期使用后会因耗损产生控制故障,产生安全隐患^[6-9]。

本文利用小口径干涉仪的高分辨优势结合拼接技术拓展检测口径的能力,提出了一种波前 PSD 拼接检测方法。通过图像处理算法精确定位子孔径,设计误差抑制算法消除分次测量引入的误差,最后对波前畸变进行傅里叶分析并求取 PSD。该方法未引入电控机械平移装置,且整个拼接过程由算法自动完成,可降低检测成本,提高检测效率。

2 PSD 的检测技术

波前 PSD 的检测实际是通过检测光学元件的反射波前或透射波前,然后对波前数据进行傅里叶分析。光学元件波前干涉检测光路如图 1 所示,TF 为干涉仪标准参考镜,RF 为标准反射镜。

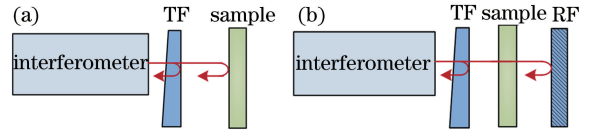


图 1 光学元件波前检测示意图。

(a)反射波前检测;(b)透射波前检测

Fig. 1 Schematic of wavefront detection of optical elements. (a) Reflected wavefront detection; (b) transmitted wavefront detection

2.1 二维波前 PSD 计算方法

二维 PSD 离散化后,二维 PSD 分布可表示为^[2]

$$W_{PSD}(\nu_x, \nu_y) = \frac{\Delta x \Delta y}{N_x N_y} \times \left| \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} W(x, y) \exp \left[-i \cdot 2\pi \left(\frac{mx}{N_x} + \frac{ny}{N_y} \right) \right] \right|^2, \quad (1)$$

式中: ν_x, ν_y 分别为空间频率; $\Delta x, \Delta y$ 为采样间距; $W(x, y)$ 为波前畸变; N_x, N_y 分别为 x, y 方向的采样点数; m, n 分别为采样点序号。波前畸变在传播过程中可看作周期信号的叠加,依据 Parseval 定理:

$$\sum_{\nu_x=1}^{\nu_x2} \sum_{\nu_y=1}^{\nu_y2} |W(\nu_x, \nu_y)|^2 = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{n=0}^{N_y-1} |W(m, n)|^2, \quad (2)$$

可得到用频域波前表示的波前均方根值 W_{RMS} :

$$W_{RMS} = \sqrt{\sum_{\nu_x=1}^{\nu_x2} \sum_{\nu_y=1}^{\nu_y2} |W(\nu_x, \nu_y)|^2}. \quad (3)$$

二维波前 PSD 与频域波前畸变的关系可表示为

$$W_{PSD}(\nu_x, \nu_y) = W^*(\nu_x, \nu_y) W(\nu_x, \nu_y) L_x L_y, \quad (4)$$

式中, L_x, L_y 分别为 x, y 方向的采样长度, $W^*(\nu_x, \nu_y)$ 为波前畸变 $W(\nu_x, \nu_y)$ 的共轭。基于上述理论推导,为使二维 PSD 更加直观地反映光学元件的中频误差,可对波前畸变进行中频波段的带通滤波,并以波前均方根值表示二维 PSD:

$$W_{RMS} = \sqrt{\sum_{\nu_x=\nu_x1}^{\nu_x2} \sum_{\nu_y=\nu_y1}^{\nu_y2} \frac{W_{PSD}(\nu_x, \nu_y)}{L_x \cdot L_y}}, \quad (5)$$

式中： ν_{x2}, ν_{y2} 分别为光学元件中频段的上截止频率； ν_{x1}, ν_{y1} 分别为中频波段的下截止频率。由于波前数据为有限序列，进行傅里叶变换的过程会引入误差，为提高计算精度需按以下步骤进行处理。

1) 对波前数据的填充。波前数据中的缺失点会在滤波过程中产生高频噪声，而矩形元件波前数据的四角通常因数据异常，滤波后会发生塌边、塌角，影响 PSD 的客观评价。因此，针对矩形口径元件，需要进行先倒角后填充的处理。数据填充方式

$$F(f_x, f_y) = \begin{cases} 0.5 \times \left[1 - \operatorname{erf}\left(20 \left| \frac{f}{f_{lc}} - 1 \right| \right) \right] + 0.5 \times \left[1 - \operatorname{erf}\left(20 \left| \frac{f}{f_{hc}} - 1 \right| \right) \right], & f \notin [f_{lc}, f_{hc}] \\ 1 - \left\{ 0.5 \times \left[1 - \operatorname{erf}\left(20 \left| \frac{f}{f_{lc}} - 1 \right| \right) \right] + 0.5 \times \left[1 - \operatorname{erf}\left(20 \left| \frac{f}{f_{hc}} - 1 \right| \right) \right] \right\}, & f \in [f_{lc}, f_{hc}] \end{cases}, \quad (6)$$

式中： F 表示滤波窗函数； $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ ， f_x, f_y 分别为水平及竖直方向的空间频率； erf 为误差函数； f_{lc}, f_{hc} 分别为波前 PSD 滤波窗的下截止频率及上截止频率。

2.2 一维 PSD 计算方法

由二维 PSD 分布统计计算得到的一维 PSD 塌陷曲线可用于直观判别产生空间调制各频率成分的影响程度。一维 PSD 塌陷曲线的计算方法是先选取特定方向，再基于二维 PSD 分布计算垂直于该方向的线积分。如图 2 所示，选取 x' 轴(蓝线)方向，其与水平轴 x 轴成 θ 角，则其一维 PSD 曲线可通过计算 W_{PSD} 沿 y' 轴(红线)方向的线积分得到。为提高一维 PSD 评价的准确性，一般 θ 的取值分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ ，各方向角的塌陷曲线与指标截止线构成综合评价方法。

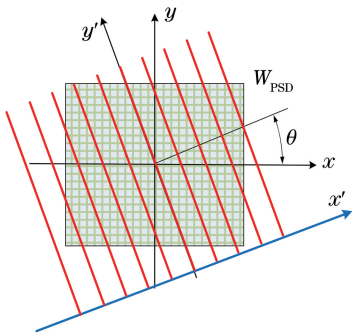


图 2 一维 PSD 计算示意图

Fig. 2 Schematic of 1D PSD calculation

一维 PSD 塌陷曲线可通过拉东(Radon)变换计算得到，拉东变换的表达式为

采用双线性插值方法。

2) 对波前数据矩阵进行扩展。波前数据在傅里叶变换时会因边缘截断产生振铃效应，造成高频起伏，因此需采用空间扩展方法(quad-flip)将大小为 $N \times N$ 的波前矩阵，扩展为 $2N \times 2N$ 的矩阵，使得波前边缘数值连续。对扩展后的矩阵再进行傅里叶变换。

3) 选取误差函数窗进行带通滤波并计算均方根值^[10]。滤波窗函数为

$$W_{1D}^\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} W_{\text{PSD}}(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy', \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 W_{1D}^θ 表示 θ 方向的一维 PSD 分布。

3 子孔径的拼接

拼接检测的关键在于子孔径的定位与校正，可采用图像配准的算法取代精密机械平移系统。本研究采用 5 维气浮平台取代常规电控机械平台，移动表面有标记的光学元件进行子孔径测量，首先基于标记特征初步确定重叠区，再从重叠区提取模板通过相关算法对子孔径进行定位，最后通过校正算法消除拼接误差。关键过程分为子孔径的定位和拼接误差校正^[11-13]，具体流程如图 3 所示。

3.1 子孔径定位

对子孔径重叠区的识别与匹配是子孔径精确定位的关键。测量前，在光学元件通光口径外(如下边缘)人为设置一处标记，要求标记图像与波前数据有明显差异，且尺寸不大于元件尺寸的 5%。由检测人员操作气浮平台移动元件进行分区域测量，要求每个子孔径区域都包含标记。由于本研究的重叠区定位算法不依赖元件移动位置与平移精度，可以不限限制每次移动的行程与路径。

子孔径精确定位分以下 4 步完成。

1) 识别光学元件波前数据边界，提取有效数据，

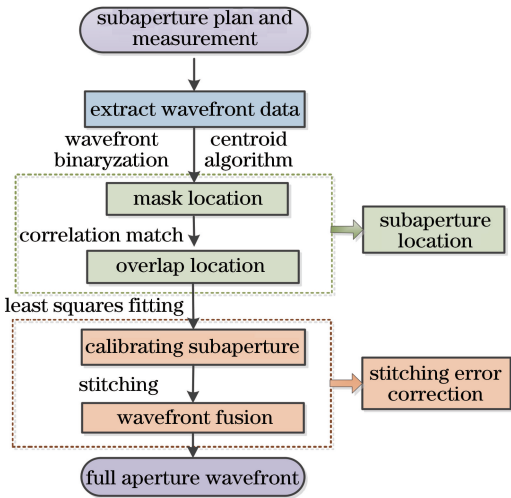


图 3 子孔径的拼接流程图

Fig. 3 Flow chart of subaperture stitching

剔除无效点。由于光线散射,元件波前数据边缘外的 CCD 背景中,存在杂散点,会对波前数据提取分析构成干扰,应剔除。分别取波前数据中间三行(或列)的像素数平均值为参考值,如果数据矩阵的某行(或列)的像素个数小于参考值的 90%,则认为此行(或列)为元件边界,将边界外的数据定义

为无效数据。

2)波前数据插值与二值化。为实现子孔径的亚像素级精度定位,采用双线性插值方法对各子孔径波前数据进行插值,将 1 pixel 细分为 4 pixel,即像素尺寸减小一半;定义各子孔径边界内波前数据点取值为 0,标记数据取值为 1,得到波前数据(含标记)的二值图像。

3)重叠区粗定位。对每个二值化后的子孔径数据求质心坐标,可快速确定标记在各子孔径中的位置,即可初步识别重叠区的位置,粗定位偏差不大于标记尺寸。

4)相关运算精确定位子孔径。选择一子孔径为基准,根据质心坐标(G_i, G_j),从基准孔径波前重叠区选取一方形区域作为模板 A ,大小为 31 pixel \times 31 pixel;从另外子孔径中选取相同大小的待匹配矩阵 B ,矩阵 B 中心像素的行和列坐标分别为 i 和 j 。由于已通过重叠区粗定位,为提高匹配效率和精度,限定 B 沿横向与纵向遍历范围均不超过标记尺寸。以标记在底部边缘为例,匹配过程如图 4 所示, M 为波前数据取整后的中心行坐标, G_{j1} 与 G_{jr} 分别为两子孔径质心的列坐标。

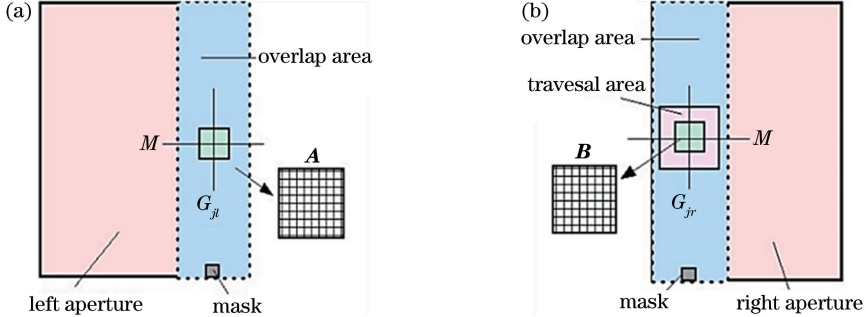


图 4 相关匹配示意图。(a)左子孔径模板提取;(b)右子孔径待匹配矩阵的选取

Fig. 4 Schematic of correlation match. (a) Template extraction from left aperture; (b) matrix to be matched extracted from right aperture

模板 A 与矩阵 B_{ij} 的二维相关系数 r 的求解式为

$$r = \frac{\sum_{x=1}^{31} \sum_{y=1}^{31} [W(x, y) - \bar{W}(x, y)][T(s, t) - \bar{T}(s, t)]}{\left\{ \sum_{x=1}^{31} \sum_{y=1}^{31} [W(x, y) - \bar{W}(x, y)] \sum_{s=1}^{31} \sum_{t=1}^{31} [T(s, t) - \bar{T}(s, t)] \right\}^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

式中: $W(x, y)$ 为模板 A 的波前数据; $\bar{W}(x, y)$ 为模板各像素的平均值; $T(s, t)$ 为待匹配矩阵 B 的波前数据; $\bar{T}(s, t)$ 为矩阵 B 各像素的平均值; s, t 分别为矩阵 B 的行和列坐标。经相关运算后,相关系数最大的位置表示 B 与模板 A 在全口径中位置重

叠^[14]。依据矩阵 A 与 B 在各自子孔径中的位置,可确定重叠区域的尺寸及子孔径的相对位置关系。经插值后,波前数据的横向分辨能力提高了一倍,基于相关匹配得到的定位精度相比插值前提高 0.5 pixel。

3.2 拼接误差校正

因测量过程中的元件姿态及外部环境等因素不同,各子孔径测量结果中会引入倾斜和平移,若不消除此类像差,即使子孔径定位准确,拼接后的全口径数据也会失真^[15-16]。另外,各子孔径数据拼接成全口径后,在重叠区会形成明显的拼接痕迹,这会影
响功率谱密度的计算。拼接误差的校正主要分两部分:子孔径姿态校正和全口径重叠区修正。其中,子孔径姿态校正的原则是保持子孔径重叠区的姿态一致,利用重叠区姿态调整子孔径的姿态。

假设左右两个子孔径的波前数据分别为 $\phi_1(x_1, y_1)$ 和 $\phi_2(x_2, y_2)$, 因测量环境不同它们之间的重叠区会存在位相偏差 $\sigma(x, y)$, 进行 zernike 多项式拟合可得:

$$\sigma(x, y) = ax + by + c, \quad (10)$$

式中, a 、 b 为行、列方向的倾斜系数, c 为平移系数。可按

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x^2 & \sum xy & \sum x \\ \sum xy & \sum y^2 & \sum y \\ \sum x & \sum y & n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum x\sigma(x, y) \\ \sum y\sigma(x, y) \\ \sum \sigma(x, y) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

采用最小二乘法求得 a 、 b 、 c 的值。根据子孔径姿态校正的原则,采用重叠区的姿态差异对右孔径的波前值 $\phi_2(x_2, y_2)$ 进行校正,得到 $\phi'_2(x_2, y_2)$, 其表达式为

$$\phi'_2(x_2, y_2) = \phi_2(x_2, y_2) + ax + by + c. \quad (12)$$

最后将校正后的子孔径依据相对位置关系进行拼接,可得到全口径波前数据。为消除全口径拼接

结果中的拼接痕迹,采用融合算法对重叠区数据进行修正,得到修正后的全口径波前数据。融合算法可表示为

$$\phi_0(x, y) = \frac{d_0 - d_1(x)}{d_0} \phi_1(x_1, y_1) + \frac{d_1(x)}{d_0} \phi_2(x_2, y_2), \quad (13)$$

式中, d_0 为重叠区域的宽度, $\phi_0(x, y)$ 为重叠区的波前数据, $d_1(x)$ 为像素点与重叠区域左边界之间的距离。

4 仿真实验

仿真实验验证拼接方法的拼接精度,以口径为 $713 \text{ pixel} \times 508 \text{ pixel}$ 的波前数据作为全口径参考值,将全口径划分为左右两个子孔径,且均包含标记,设置重叠区大小为 $41 \text{ pixel} \times 508 \text{ pixel}$ 。为贴合实际检测现状,引入干涉仪系统噪声(峰谷值为 0.015λ , 其中波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 并将波前峰谷值 (d_{pv})、 W_{PSD} 的均方根值 (P_{RMS})、数据口径 (D) 作为评价指标。仿真实验结果如表 1 所示。

表 1 仿真实验结果

Table 1 Simulation results

Parameter	d_{pv}	$P_{\text{RMS}} / \text{nm}$	D / pixel
Reference surface	0.2607λ	1.839	713×508
Stitching surface	0.2574λ	1.837	713×508

由表 1 可知,拼接波前与参考波前的尺寸相同,拼接结果与参考值的 d_{pv} 偏差为 0.0033λ , P_{RMS} 偏差为 0.002 nm , 相对偏差分别为 1.2% 和 0.1% 。根据图 5 的仿真结果,拼接波前和参考波前的分布基本一致,证明了所提拼接算法的准确性。

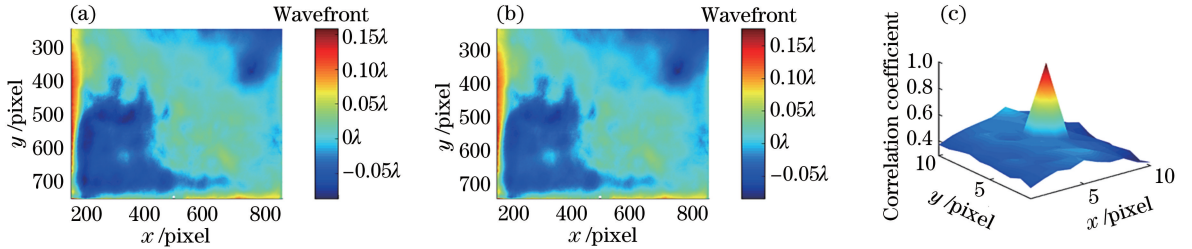


图 5 仿真实验结果。(a)参考面;(b)拼接波面;(c)相关系数

Fig. 5 Simulation results. (a) Reference surface; (b) stitching surface; (c) correlation coefficient

5 实验与误差分析

5.1 实验验证

采用美国 ZYGO 公司 $32''$ Verifire MST 干涉仪对口径为 $620 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 的反射镜进行波前

PSD-1(空间周期: $2.5 \sim 33 \text{ mm}$) 检测,干涉仪参考镜面形的 P_{RMS} 为 0.5 nm , 测量重复性为 0.05 nm 。为排除设备差异性,子孔径与全口径波前检测均采用该干涉仪。

根据实验需要,将反射镜通光面划分为左右两

个子孔径,如图 6(a)所示。按图 3 的拼接流程,分别检测左右两个子孔径的波前畸变,如图 6(b)和

6(c)所示,并按顺序通过质心算法和相关匹配对重叠区进行识别。运算结果如表 2 所示。

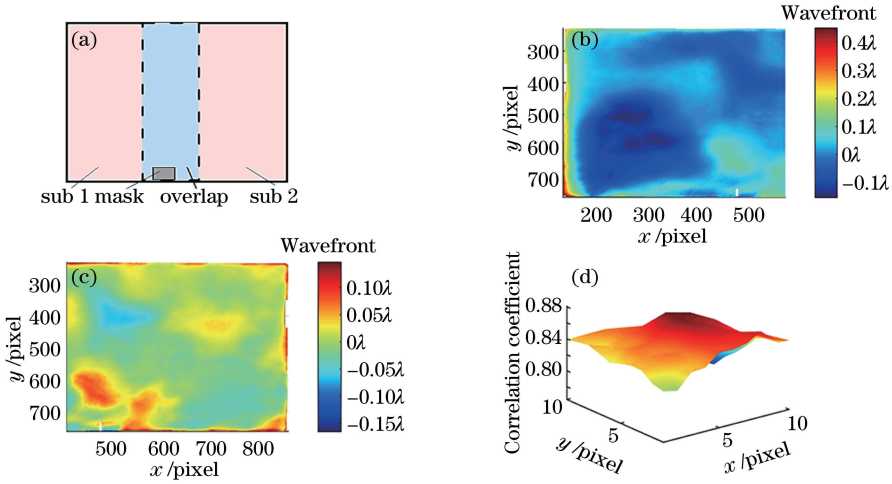


图 6 拼接运算过程。(a)子孔径规划;(b)子孔径 1;(c)子孔径 2;(d)相关系数

Fig. 6 Process of stitching operation. (a) Plan of subaperture; (b) sub1; (c) sub2; (d) correlation coefficient

表 2 拼接运算结果

Table 2 Results of stitching operation

Mask location /pixel		Correlation match /pixel		Correction coefficient		
Left	Right	Row	Column	X tilt	Y tilt	Translation
(753,480)	(755,93)	330	92	$-9.97 \times 10^{-6} \lambda$	$1.48 \times 10^{-4} \lambda$	-0.0356λ

由表 2 可知,采用质心法对左右子孔径的标记进行定位,标记的行位置相差 2 pixel,列位置相差 387 pixel。从左子孔径近似重叠区中(329,480)处选取一矩阵作为模板,遍历右子孔径近似重叠区进行相关匹配后,得到二维相关系数矩阵,如图 6(d)所示,最大系数为 0.88,匹配位置为(330,92)。可以发现,相关匹配在质心法定位基础上对行和列均进行了 1 pixel 的精度调整。利用

(5)式得到的重叠区校正系数对右子孔径进行姿态校正,并通过(7)式数据融合后拼接得到全口径波前数据,如图 7(a)所示。按二维 PSD 计算方法进行带通滤波,可得到以均方根值表示的 W_{PSD} ,如图 7(c)所示。由图 7 可知,拼接检测与全口径直接检测相比,波前畸变分布完全一致, d_{pv} 与 P_{RMS} 的偏差分别为 0.006λ 与 0.030 nm,相对偏差分别为 2.6% 和 2.2%。

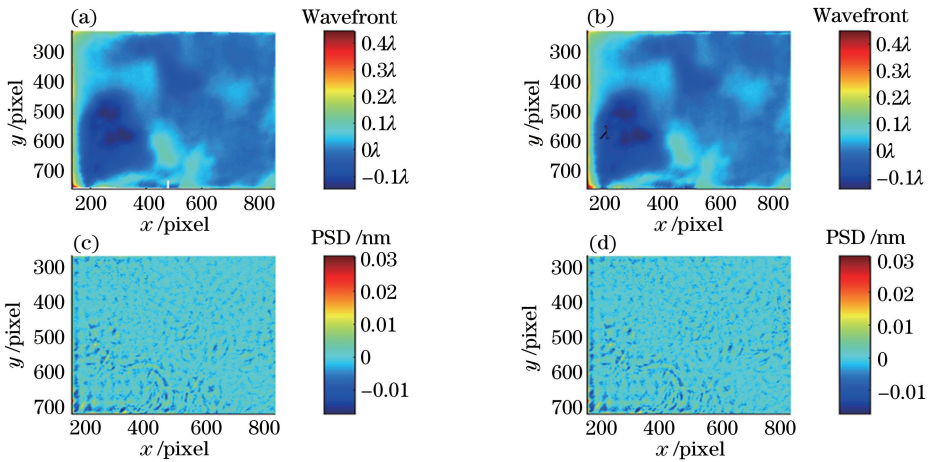


图 7 拼接结果与全口径检测结果对比。(a)拼接检测的波前;(b)全口径检测波前;(c)拼接检测的波前二维 PSD 分布;(d)全口径检测的波前二维 PSD 分布

Fig. 7 Comparison between stitching and full-aperture test results. (a) Stitching wavefront measurement; (b) full-aperture wavefront measurement; (c) stitching wavefront W_{PSD} ; (d) full-aperture wavefront W_{PSD}

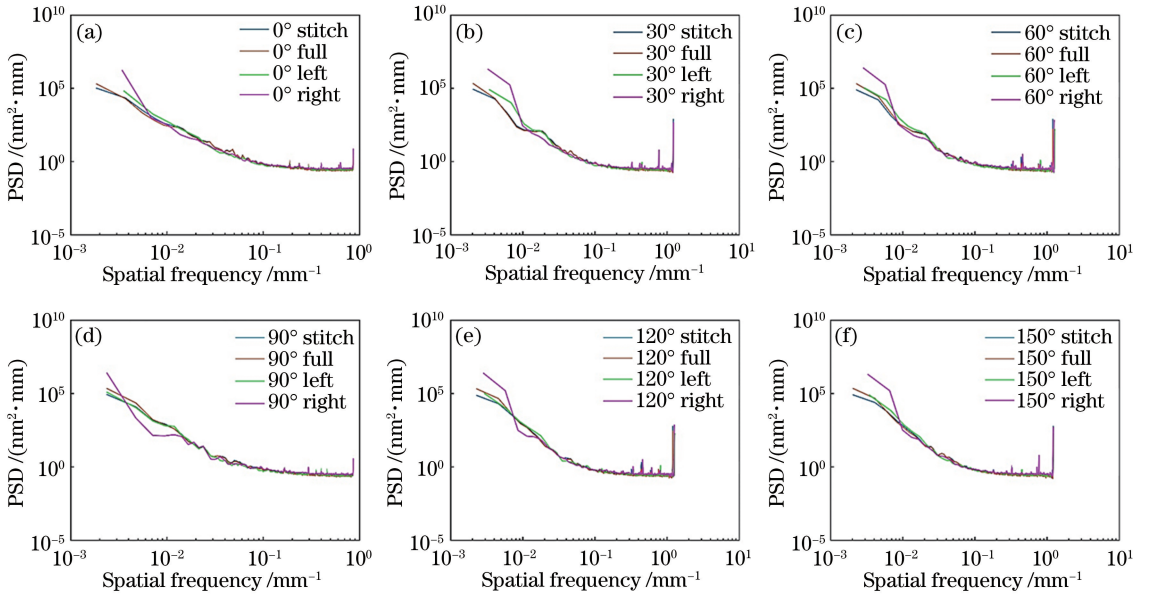


图 8 一维 PSD 曲线结果比对。(a) 0°; (b) 30°; (c) 60°; (d) 90°; (e) 120°; (f) 150°

Fig. 8 Comparison of 1D PSD calculation. (a) 0°; (b) 30°; (c) 60°; (d) 90°; (e) 120°; (f) 150°

为验证拼接检测方法的可靠性,另选取 5 件口径为 620 mm×450 mm 的光学元件进行拼接检测实验,实验结果如表 3 所示。5 次实验结果中,拼接

检测与全口径直接检测的波前 d_{pv} 最大偏差为 0.012λ , P_{RMS} 最大偏差为 0.020 nm; 拼接检测误差均小于干涉仪重复测量误差。

表 3 可靠性实验结果

Table 3 Experimental results of reliability

Experiment	d_{pv}		P_{RMS}/nm		Deviation	
	Stitching	Full	Stitching	Full	d_{pv}	P_{RMS}/nm
1	0.268λ	0.271λ	1.178	1.189	-0.003λ	-0.011
2	0.114λ	0.116λ	1.010	1.030	-0.002λ	-0.020
3	0.186λ	0.198λ	1.068	1.078	-0.012λ	-0.010
4	0.081λ	0.086λ	0.687	0.694	-0.005λ	-0.007
5	0.202λ	0.200λ	0.922	0.921	0.002λ	0.001

为验证拼接检测方法计算一维 PSD 曲线的有效性,对一口径为 620 mm×450 mm 的反射镜进行实验,比较左子孔径、右子孔径、拼接全口径和全口径直接检测的一维 PSD 结果。图 8 为分别按 0°、30°、60°、90°、120°、150° 这 6 种角度投影得到的一维 PSD 曲线。由图 8 可知,特定角度下,拼接检测与全口径检测的一维 PSD 在中频段(空间周期:2.5~33 mm)基本一致,曲线接近重合,而两个子孔径在中频段的低频区(空间周期:10~33 mm)与拼接检测及全口径检测结果均有明显差异,因此,对一维 PSD 采用所提拼接检测方法能代替全口径检测结果,且相比子孔径统计法具有信息更全面的优势。

5.2 误差分析

拼接干涉检测的误差来源主要有随机噪声、干涉仪系统噪声、子孔径定位误差及干涉仪标准镜面

形引入的误差。

1) 随机噪声。随机噪声是由干涉腔内的环境因素(气流扰动、温湿度波动)及干涉仪电子噪声等因素引起的,噪声源的变化具有随机性,通过多次重复测量取平均值的方式可明显降低随机噪声,随机噪声对检测结果的影响可忽略。

2) 干涉仪系统噪声。干涉仪系统噪声主要由干涉仪光路结构、元件装夹机构及隔振平台的低频振动引入。上述机械结构如不能保证元件测量过程中的稳定状态,会导致干涉条纹发生漂移或抖动,影响相位展开的准确性,该噪声为测量误差的主要来源。因此,对干涉仪装夹系统的稳定性要求较高,同时可采取多次重复测量取平均值的方式降低该部分的影响。

3) 子孔径定位误差。定位误差会导致拼接错

位,从而引入高频误差。但所提算法可将定位误差降低到 0.5 pixel 以内,该误差对大口径光学元件的检测结果显示可忽略。

4) 干涉仪标准镜面形引入的误差。相邻子孔径的重叠区是相对标准镜不同位置的检测结果,通常会引入倾斜、平移及高阶像差。在多次拼接后,重叠区的差异会导致误差累积,应在拼接前去除参考镜面形^[17]。

6 结 论

检测口径、分辨率及传递函数是影响大口径干涉仪检测光学元件波前 PSD 的关键因素。在推导 PSD 计算方法的基础上,提出了一种基于标记特征和相关匹配结合的拼接检测方法。通过设置标记初步获取重叠区位置,采用相关匹配精确识别重叠区,最后通过误差校正算法降低拼接误差。开展了仿真模拟及验证,结果表明波前 d_{pv} 偏差及 P_{RMS} 偏差均在重复测量误差范围内,且针对一维 PSD,拼接检测比子孔径统计法检测更准确。另外,所提拼接方法不需额外引入机械位移平台,仅对波前数据进行处理即可自动拼接,子孔径定位精度为亚像素级,操作简便及安全性高,可实现大口径光学元件功率谱密度的高精度和低成本检测。

参 考 文 献

- [1] Xu Q, Gu Y Y, Chai L, *et al.* Measurement of wavefront power spectral density of large optical components[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(3): 344-347.
许乔, 顾元元, 柴林, 等. 大口径光学元件波前功率谱密度检测[J]. *光学学报*, 2001, 21(3): 344-347.
- [2] Xu J C, Xu Q, Chai L Q. Statistical measurement of power spectrum density of large aperture optical component [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1905-1908.
徐建程, 许乔, 柴立群. 大口径光学元件功率谱密度的统计法测量[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(8): 1905-1908.
- [3] Yang X H, Shen W X, Zhang X J, *et al.* Comparison among different interferometers for measuring power spectral density of optical elements [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904002.
杨相会, 沈卫星, 张雪洁, 等. 不同干涉仪检测光学元件功率谱密度的比较[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904002.
- [4] Kim C J. Polynomial fit of interferograms [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(24): 4521-4525.
- [5] Kin C J, Wyant J C. Subaperture test of a large flat or a fast aspheric surface [J]. *Journal of Optical Society of America*, 1987, 71: 1587.
- [6] 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.
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.
- [7] Wang X K, Wang L H, Zhang X J. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(2): 192-198.
王孝坤, 王丽辉, 张学军. 子孔径拼接干涉法检测非球面[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 192-198.
- [8] Yan L S, Wang X K, Luo X, *et al.* Sub-aperture stitching interferometry based on non-ideal standard mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 178-183.
闫力松, 王孝坤, 罗霄, 等. 基于非理想标准镜的子孔径拼接干涉检测技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 178-183.
- [9] Zhang M, Sui Y X, Yang H J. Mechanical error compensation algorithm for subaperture stitching interferometry [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 934-940.
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.
- [10] Chai L Q, Xu J C, Xu Q. Modification of power spectrum density of wavefront after applying window [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(12): 1835-1838.
柴立群, 徐建程, 许乔. 加窗后波前功率谱密度的计算值修正[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(12): 1835-1838.
- [11] Chen S Y, Li S Y, Dai Y F, *et al.* Testing of large optical surfaces with subaperture stitching [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(17): 3504-3509.
- [12] Maurer R, Schneider F, Vogt C, *et al.* Physical marker based stitching process of circular and non-circular interferograms [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8083: 80830Q.
- [13] Chen S Y, Zhao C Y, Dai Y F, *et al.* Stitching algorithm for subaperture test of convex aspheres with a test plate [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 307-315.
- [14] Zheng B, Lu P F, Chen Y H, *et al.* Co-phase error detection of segmented mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1112002.
郑彬, 陆培芬, 陈永和, 等. 拼接式反射镜共相误差

- 检测[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1112002.
- [15] 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.
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.
- [16] Otsubo M, Okada K, Tsujiuchi J. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms [J]. Optical Engineering, 1994, 33(2): 608-613.
- [17] Lu Y J, Tang F, Wang X Z, *et al.* Analysis on the accuracy of flat sub-aperture stitching interferometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (4): 0404002.
卢云君, 唐锋, 王向朝, 等. 平面子孔径拼接干涉测量精度分析[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0404002.