

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905805

用于在线检测的紧凑型瞬态干涉测量系统*

付翔宇¹,王道档¹,吴振东^{1,2},孔明¹,许新科¹

(1.中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2.桂林电子科技大学
广西光电信息处理重点实验室 桂林 541004)

摘要:针对不同口径光学元件加工阶段的在线测量需求,提出了用于在线检测的紧凑型瞬态干涉测量系统。系统引入偏振相机来实现波前瞬态移相干涉测量以降低外界扰动影响。同时结合基于位形优化算法的子孔径拼接技术,可降低对运动扫描平台精度要求,并实现大口径光学元件全口径检测。为验证所提出测量系统的可行性,分别对金刚石车削机床对中工具和大口径球面镜进行在线检测和子孔径拼接测量,结果表明,与ZYGO干涉仪检测结果相比,两者对应的均方根值偏差的绝对值分别为0.003与0.007 μm 。同时该系统具有布局结构紧凑和对外界环境扰动不敏感的特点,可很好地满足复杂环境在线安装检测应用要求,在金刚石车削机床对中工具的在线调整和不同口径光学元件在线检测中具有较广泛的应用。

关键词:紧凑型干涉仪;在线检测;偏振相机;子孔径拼接

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Compact transient interferometric measurement system used for online testing

Fu Xiangyu¹, Wang Daodang¹, Wu Zhendong^{1,2}, Kong Ming¹, Xu Xinke¹

(1.College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2.Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at the online testing needs of optical elements with various optical aperture sizes during processing stage, a compact transient interferometric measurement system used for online testing is proposed. A polarization camera is applied to realize the transient phase-shifting interferometric measurement of wavefront and reduce the effect of environmental disturbance. Combining the subaperture stitching technique based on configuration optimization algorithm, the accuracy requirement for the motion scanning platform is lowered and the full-aperture surface testing of large aperture optical elements can be achieved. To verify the feasibility of the proposed system, the online testing and subaperture stitching measurement of the centering tool of diamond turning machine and a large aperture spherical mirror were carried out, respectively. The results show that compared with the detection results of ZYGO interferometer, the absolute deviations of the corresponding root mean square values for the two cases are 0.003 and 0.007 μm , respectively. The system features compact layout and insensitivity to external environmental disturbance. The proposed system can nicely meet the application requirements of online installation and testing in complex environmental condition, and has wide application in online adjustment of centering tool of diamond turning machine and online testing of the optical components with various aperture diameters.

Keywords: compact interferometer; online testing; polarization camera; subaperture stitching

0 引言

随着现代精密加工车削机床性能和工艺不断提升,

对相应的检测工具也提出了更高的应用要求。光学干涉仪作为一种非接触式、高精度、快速的测量工具,被广泛应用于光学元件面形的精密测量,其中包括 Twyman-Green 干涉仪^[1-2]、Fizeau 干涉仪^[3-4]与点衍射干涉仪^[5-6]

收稿日期:2019-11-13 Received Date:2019-11-13

* 基金项目:国家自然科学基金(51775528)、广西光电信息处理重点实验室(培育基地)基金(GD18205)、中国博士后科学基金(2017M621928)项目资助

等。这些典型的干涉仪都为非共路或者非完全共路结构,对外界扰动较为敏感,因而对检测环境也提出了较高要求。同时现有对应的商业干涉仪体积较为庞大,无法直接安装于加工机床中,因而难以满足复杂环境的在线检测应用要求。此外,现有的多数商业干涉仪一般仅适用于实验室环境的离线测量,这意味着需要将尚处于加工阶段的元件拆卸下来进行检测,并在检测完成后重新复位安装至加工平台,这一过程不仅费力且效率低,而且二次(甚至多次)安装引入的额外误差也会影响到最后加工精度。研究者基于干涉技术^[7-8]、共焦显微测头^[9-10]、立体视觉测量技术^[11-12]与光学偏折术^[13-15]等研究开发了可用于各种光学元件加工在线测量的装置和方法,但现有的在线测量装置对环境扰动的抗干扰能力或者检测精度等方面仍有待改进。同时对于大口径的光学元件,传统的在线检测装置由于受测量范围(如干涉仪的有限口径)限制,通常不能直接进行全口径测量。子孔径拼接技术作为一种可实现大口径光学元件全口径面形检测的一种有效方法^[16-17],近年来该方法受到了广泛的重视和研究,而传统子孔径拼接方法则需要高精度的多轴运动平台对待测元件不同子孔径进行扫描^[18]。

针对不同口径光学元件高精度在线测量需要,本文提出了一种基于子孔径拼接技术的紧凑型瞬态在线干涉检测系统。为了满足测量系统在线安装以及复杂环境下抗干扰要求,该干涉测量系统采用极其紧凑的系统结构,并利用偏振相机实现待测波面的瞬态多步移相测量;同时针对本文紧凑型干涉系统测量范围有限以及大口径光学元件在线检测需要,利用所提出的紧凑型干涉系统配合多轴运动平台,对大口径元件各个不同子孔径面形进行扫描测量,并采用基于位形优化的子孔径拼接技术实现元件全口径测量,由此在保证大口径面形检测精度的同时,有效降低了对多轴运动平台的精度要求,极大提高了实现的鲁棒性和实用性。为验证本文紧凑型在线瞬态测量干涉系统的可行性,利用该系统对金刚石车削加工机床对中工具和大小口径球面镜的面形误差分别进行了在线检测和子孔径拼接测量,并与ZYGO干涉仪进行了比对实验,同时对主要测量误差进行了分析。

1 系统测量原理

1.1 系统布局与测量原理

本文提出的用于光学面形在线检测的紧凑型瞬态干涉测量系统布局如图1所示,来自He-Ne激光器(光波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$)的光束通过一根单模光纤接入系统主体部分中的光学准直器,并经线偏振片后变为所需振动方向

的线偏振光。线偏振光由折光反射镜进行 90° 光路转折后先后通过分光棱镜(beam splitter,BS)和偏振分光棱镜(polarization beam splitter,PBS),由PBS透射和反射分别得到作为 p 偏振检测光和 s 偏振参考光。检测光经显微物镜得到与待测元件表面最佳匹配球面波,由待测元件表面反射并返回;参考光经参考反射镜反射并原路返回。返回的 p 偏振检测光与 s 偏振参考光分别在PBS透射、反射汇合后返回至BS,经其反射后通过一个快轴方向与 x 轴成 45° 的 $1/4$ 波片(quarter wave plate,QWP),进而转换为两个旋向相反的圆偏振光,再经成像透镜进入偏振相机。利用偏振相机的偏振方向间隔 45° 的4个通道,可瞬时采集得到4幅 $\pi/2$ 移相干涉条纹,从而利用移相算法重构得到待测表面对应的波前分布。

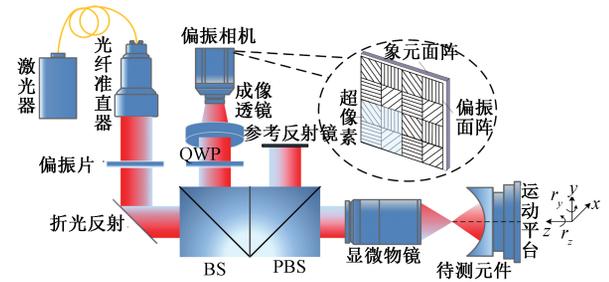


图1 紧凑型在线瞬态干涉测量系统布局

Fig.1 The layout of the compact transient interferometric testing system

针对在线测量系统的安装需要以及对其紧凑结构布局要求,系统充分利用了折光反射镜、分光镜、PBS,使得检测光和参考光同时最大程度共用系统光路,进而使得系统结构布局极其紧凑。同时,为了最大程度满足加工现场复杂环境的在线检测要求,采用偏振相机瞬时获得4幅移相干涉条纹,实现被测波前的瞬态移相检测,从而有效克服了外界扰动的影响;采用偏振相机实现瞬时多步移相也极大减少了移相有关元件的使用数量。由图1可知偏振相机是在传统象元面阵的基础上加上一个由 2×2 超像素单元(由透光轴方向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 4个彼此相邻的线偏振器组成)组成的偏振面阵,因此利用一帧图像即可同时获得4个偏振通道对应的图像信息^[19]。记偏振相机采集单帧图像中对应 0° 、 45° 、 90° 和 135° 偏振方向的干涉条纹强度分别为 I_n ($n=1,2,3,4$),利用4步移相算法可求得待测波前相位 ϕ 为:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}\right) \quad (1)$$

1.2 基于位形优化算法的子孔径拼接技术

紧凑型瞬态干涉测量系统虽然可以实现在线测量,但由于受系统光学口径的限制,其实际有效测量口径范围较为有限,对于测量系统出射检测光波的数值孔径

(numerical aperture, NA), 曲率半径为 R 的待测球面, 本文所提出测量系统对应的测量口径为 $R \cdot NA$ 。借鉴子孔径拼接技术“以小拼大”的思想, 同时为了最大程度降低子孔径扫描平台误差的影响, 采用基于位形优化的子孔径拼接技术来扩大系统的测量范围, 以满足更具通用性的大口径光学元件检测需要。

传统的子孔径拼接测量技术是利用高精度多轴运动平台实现对被测元件不同子孔径进行扫描, 并基于运动平台的位置参数对子孔径面形数据进行直接拼接。在得到基准子孔径的相位分布 ϕ_0 后, 可得到其他第 i 个子孔径 (对应相位分布为 ϕ_i) 与基准子孔径的相位分布关系为:

$$\phi_0 = \phi_i + T_{x,i} + T_{y,i} + B_i(x^2 + y^2) + C_i \quad (2)$$

式中: $T_{x,i}$ 、 $T_{y,i}$ 、 B_i 与 C_i 分别表示第 i 个子孔径相位相对基准子孔径在 x 与 y 方向的倾斜系数、离焦与平移系数。各子孔径的倾斜、离焦与平移系数可利用最小二乘拟合法求取^[20], 使得子孔径之间的重叠区域相位的平方和值最小, 即:

$$\min = \sum_i \sum_j^{j \cap i} \{ [\phi_i + T_{x,i} + T_{y,i} + B_i(x^2 + y^2) + C_i] - [\phi_j + T_{x,j} + T_{y,j} + B_j(x^2 + y^2) + C_j] \}^2 \quad (3)$$

传统的子孔径拼接技术的拼接精度主要取决于多轴运动平台精度。为了实现高精度拼接测量, 通常需要采用价格高昂的超精密多轴运动结构。基于位形优化的子孔径拼接技术有效降低了对于多轴运动平台的精度要求, 使其在较低精度的运动平台上也具有实用性。在基于位形优化的子孔径拼接技术中, 干涉测量系统通过多轴运动平台扫描可采集得到各个子孔径相位信息, 将其转化为各自局部三维坐标数据 (u_{ik} , v_{ik} , w_{ik})。在已知各子孔径的位形参数情况下, 可将子孔径局部坐标转换到全局坐标数据。

$$Q_{ik} = g_i^{-1} [u_{ik}, v_{ik}, w_{ik}, 1]^T \quad (4)$$

式中: g_i 表示局部坐标系相对全局坐标系位形; k 表示子孔径 i 中的采样点数目。再利用位形优化算法^[18] 进行迭代之前, 需首先确定子孔径之间重叠点的对应关系。如图2所示, 假设名义表面上点 P_{ik} 为子孔径 i 上点 Q_{ik} 对应的投影点, 且落在子孔径 i 与子孔径 k 的重叠区域内, 则与投影点 P_{ik} 对应的子孔径 k 上点 Q_{ik} 被认为是一个重叠点。

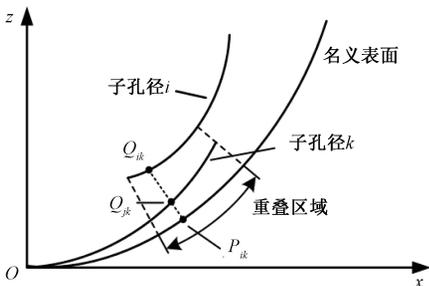


图2 子孔径重叠关系

Fig.2 Schematic diagram of subaperture overlapping relationship

在确定子孔径间重叠对应关系后, 通过迭代算法不断优化子孔径的位形分布, 自动确定子孔径重叠点对之间的对应关系, 最大程度地减少子孔径重叠区域的不匹配程度, 设立目标函数 F 用来表征不匹配程度, 如式(5)所示。

$$\min F = \lambda_1 \mu_d^2 + \lambda_2 \mu_o^2 \quad (5)$$

式中: λ_1 与 λ_2 为正权重系数, 且满足 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$; μ_d 与 μ_o 分明表示各子孔径到名义表面有向距离的均方根值和子孔径重叠点对之间有向距离偏差的均方根值, 即:

$$\begin{cases} \mu_d^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{N_i} (Q_{ik} - P_{ik}, \mathbf{n}_{ik})^2 / \sum_{i=1}^n N_i \\ \mu_o^2 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_s^{N_{ij}} [(Q_{ik,s} - P_{ik,s}, \mathbf{n}_{ik,s}) - (Q_{jk,s} - P_{jk,s}, \mathbf{n}_{jk,s})]^2 / N_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{ik} 为各子孔径沿名义表面单位法向量方向投影到名义表面的投影数据; \mathbf{n}_{ik} 表示子孔径名义表面投影点 P_{ik} 对应的单位法向量; N_i 、 N_{ij} 与 N_s 分别表示各子孔径数据点数目、子孔径 i 与子孔径 j 对应的重叠点数目与所有子孔径重叠点数目。继而利用线性规划方法及迭代算法^[21] 最小化双线性目标函数 F , 对式(4)中的位形参数 g_i 不断优化更新。

2 实验结果与测量误差分析

为了验证本文提出的紧凑型瞬态干涉测量系统对于光学元件在线检测的可行性, 根据图1搭建了系统样机, 如图3所示, 搭建完成后的系统样机尺寸大小仅为 $195 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$, 可很好地满足在线检测的安装要求。测量系统选用偏振相机的象元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$, $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。利用所搭建的紧凑型瞬态干涉测量系统对金刚石车削加工机床对中工具进行在线检测, 同时利用基于位形优化算法的子孔径拼接对大口径凹球面镜进行拼接测量。

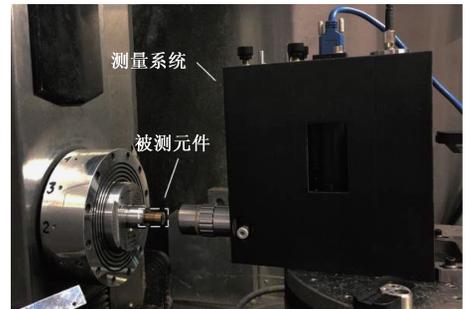


图3 系统样机

Fig.3 System prototype

2.1 对中工具面形的在线检测

由图3可知, 被测对中工具表面为一凸球面, 其口径

为 11 mm, 曲率半径为 19.985 mm。利用本文提出测量系统测得对中工具面形误差如图 4(a) 所示。同时为验证本文测量系统的高精度与有效性, 采用 ZYGO 干涉仪对中工具表面进行对比测量, 所测得的面形结果如图 4(b) 所示。其中, 本文测量系统测得的面形误差峰谷 (peak-to-valley, PV) 值与均方根 (root mean square, RMS) 值分别为 0.128、0.015 μm , ZYGO 干涉仪测得面形误差 PV 值与 RMS 值分别为 0.114、0.012 μm , 二者在 PV 值与 RMS 值偏差的绝对值分别为 0.014、0.003 μm 。因而, 本文的紧凑型瞬态干涉测量系统的面形检测中可以实现较高的检测精度, 同时系统结构的紧凑性与瞬态波前检测特性可以很好满足复杂环境在线安装检测应用要求。

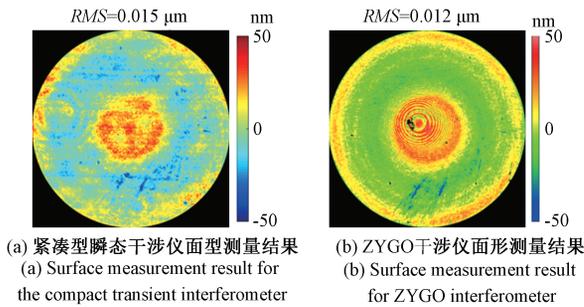


图4 对中工具面形测量结果

Fig.4 Surface measurement results for centering tool

在本文的紧凑型瞬态干涉测量系统中, 偏振相机是实现瞬态检测的基础, 但在实际测量中, 偏振相机偏振阵列自身性能的不完善会导致测量误差。在根据式(1)对偏振相机采集的 4 个通道移相干涉条纹进行相位求解时, 2×2 象元的同一超像素单元内的相位近似认为恒定不变, 但实际中由于入射波前不同导致偏振相机中存在的视场误差发生变化。偏振相机视场误差会随着波前斜率的增大而增大, 从而产生一定的测量误差。可利用 3×3 相邻象元加权平均线性插值方法^[22]对偏振相机视场误差进行校正。针对不同波前斜率, 偏振相机视场误差校正前后所引入的波前测量误差 PV 值如图 5 所示。

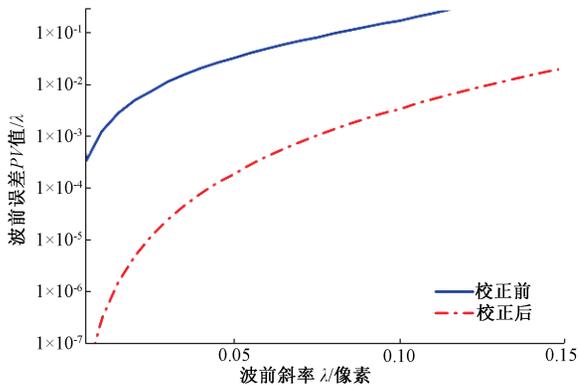


图5 偏振相机视场引入的误差

Fig.5 The measurement error introduced by the field of view error of polarization camera

从图 5 可知, 对于 $0.11 \lambda/\text{pixel}$ 的高波前斜率, 其在校正前引入的波前误差 PV 值为 0.2393λ , 校正后对应引入的波前误差 PV 值仅为 0.0053λ 。因而, 利用 3×3 相邻象元加权平均线性插值方法可对偏振相机视场误差进行有效校正, 校正后所引入的波前测量误差 PV 值呈显著下降。

2.2 大口径光学元件测量

1) 凹球面镜的拼接测量结果

为验证本文系统利用基于位形优化算法的子孔径拼接技术在大口径光学元件面形检测中的可行性。利用所搭建的测量系统配合具有 5 自由度的低精度多轴运动平台对一大口径凹球面镜进行扫描测量, 获取各子孔径的相位分布, 其中, 待测凹球面镜的口径约为 50.00 mm, 曲率半径 $R \approx 34.00 \text{ mm}$, 同时如图 1 所示, 5 自由度的多轴运动平台可以实现 3 个方向 (x, y 与 z) 的平移运动与两个方向 (绕 y, z 轴) 的旋转运动。本系统所使用的显微物镜的 NA 值为 0.28, 对应各子孔径半径大小约为 $R \cdot NA = 9.52 \text{ mm}$ 。考虑到子孔径拼接测量的精度与数据的计算量, 子孔径的划分应遵循在保证子孔径之间重叠面积不小于全口径的 $1/4$, 子孔径数目应尽量较少的原则^[23]。全口径经过划分后所获取的 16 个子孔径相位数据及其在全局位置的分布如图 6 所示。

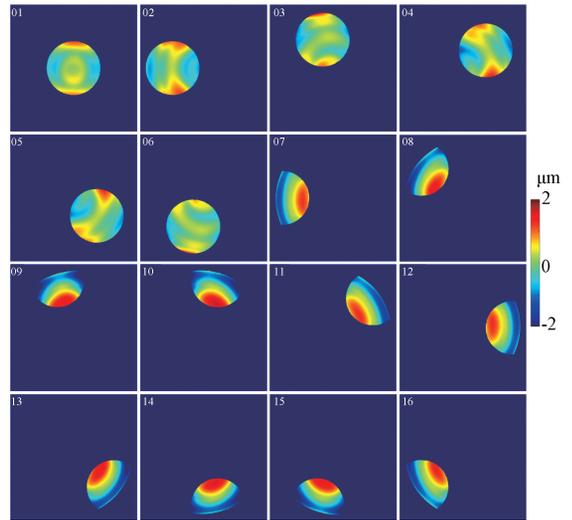


图6 子孔径的相位数据及其全局位置分布

Fig.6 The subaperture phase data and their global position distribution

利用本文提出的基于位形优化算法的子孔径拼接技术的对待测球面镜各个子孔径面形数据进行拼接测量, 在使用位形优化算法对各子孔径初始位置参数进行优化后, 利用拼接算法获取全口径面形。图 7(a) 所示为利用紧凑型瞬态干涉测量系统对球面镜全口径面形拼接测量的结果。为了验证系统拼接测量的有效性, 利用 ZYGO

干涉仪对球面镜进行了全口径面形对比测量,测得的全口径面形结果如图7(b)所示。

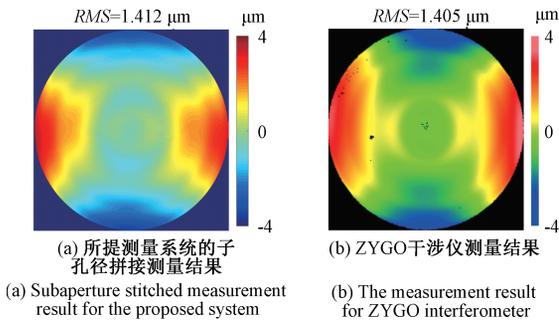


图7 球面镜全口径测量结果

Fig.7 Full-aperture measurement results of a spherical mirror

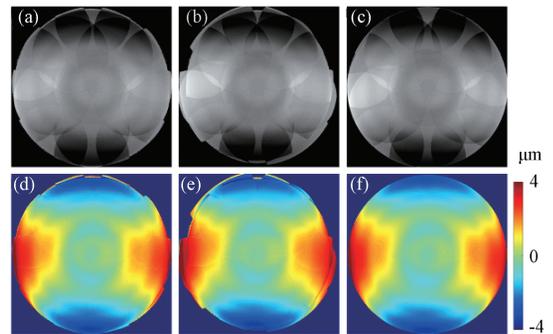
由图7可知,利用基于子孔径拼接技术的紧凑型瞬态干涉测量系统与ZYGO干涉仪测量结果接近,且子孔径拼接面形连续光滑、无明显子孔径错位痕迹。其中利用本文测量系统测得全口径面形PV和RMS值分别为7.443、1.412 μm ,ZYGO干涉仪测得全口径面形PV和RMS值分别为7.422、1.405 μm ,而两者对应的PV和RMS值偏差的绝对值分别为0.021与0.007 μm 。因而,所搭建的基于子孔径拼接技术的紧凑型瞬态干涉测量系统可满足大口径光学元件高精度检测应用要求。

2) 拼接测量的误差分析

在利用本文所提出的紧凑型瞬态干涉系统进行在线检测时,往往会受到环境扰动与系统光学元件自身性能参数的影响。单次测量中,瞬态测量特性可以最大程度减少环境扰动的影响。但在进行子孔径拼接测量时,需利用运动平台对待测面进行多次扫描测量。由于需要对各子孔径进行多次不同时间测量,就不能忽略环境扰动与系统光学元件自身性能参数的影响。所以在对子孔径进行拼接测量时,利用系统对同一位置的子孔径进行多次测量取平均的方式,选用该位置子孔径多次测量的平均数据作为子孔径数据,用来减少拼接测量中因多次扫描测量引入的测量误差。

在拼接测量系统中,多轴运动平台的精度是影响拼接测量精度的主要因素,本文主要对运动平台自身误差带来的测量误差进行了分析校正。传统的子孔径拼接方法时^[17],需要利用精密的运动调整平台对待测元件进行精确扫描测量,但在实际的测量中,运动调整平台本身误差以及测量仪器在平台上的安装定位误差都会给最后拼接测量引入一定的误差。实验中利用低精度多轴运动平台读取的各子孔径原始位置参数直接进行拼接的效果如图8(a)和(d)所示,从中可以看出子孔径之间重叠区域并未严格重合,存在一定的错移现象,且有明显的拼接痕迹。而利用基于位形优化算法的子孔径拼接技术自动确

定子孔径重叠点对之间的对应关系,严格保证子孔径重叠区的重合,从而实现对运动平台误差进行有效补偿。



注:(a)和(d)分别为原始位置参数下子全局孔径分布与拼接面形结果;(b)和(e)分别为未优化的第1组位置参数全局子孔径分布与拼接面形结果;(c)和(f)分别优化后第1组位置参数全局子孔径分布与拼接结果。

图8 全局子孔径分布及拼接效果

Fig.8 Global subaperture distribution and stitching results

为进一步验证所采用位形优化算法的有效性和鲁棒性,实验中在各子孔径原始位置参数基础上,针对每个子孔径(中心子孔径除外),在 x,y 方向分别额外引入3组 $[-1,1]$ mm的随机平移误差,用于模拟平台低精度引起的误差,各组引入平移误差的最大误差绝对值、最小误差绝对值及均值如表1所示,再利用位形优化算法分别为对3组子孔径位置参数进行优化。对应于表1中第1组子孔径位置参数情况下,位形优化前全局子孔径的分布图与拼接效果分别如图8(b)与(e)所示,相应优化后的子孔径分布与拼接效果分别如图8(c)与(f)所示。从图8可以看出,在施加随机平移误差后,子孔径出现严重的错移现象,重叠区域未能完全匹配,且拼接面形有较为明显的拼接痕迹;在进行位形迭代优化后(迭代8次),子孔径的错移得到了有效地校正。

针对子孔径在 x,y 方向引入3组 $[-1,1]$ mm随机平移误差与原始位置参数,如表1所示, x 方向引入的最大误差绝对值与最小误差绝对值分别为0.990 7、0.051 7 mm, y 方向引入的最大误差绝对值与最小误差绝对值分别为0.992 3、0.003 3 mm。可以看出施加的最大平移误差已趋近1 mm。子孔径位形优化算法迭代过程中目标函数收敛曲线如图9所示。由表1和图9可以看出,虽然由于4组初始的子孔径位置参数不同,导致迭代优化速度不同,而利用位形优化算法仅在迭代6次后,不同组的子孔径位置参数优化目标函数 F 值都趋于收敛,且趋于同一量值。由此可知,即便运动扫描平台误差达到了1 mm量级,基于位形优化算法的子孔径拼接技术仍可有效地克服其所带来的测量精度影响,具有较好的鲁棒性。

表 1 各组引入随机平移误差

Table 1 The random translation errors introduced for various groups mm

迭代组数	维度	误差绝对值		均值
		最小值	最大值	
1	x	0.122 5	0.936 3	-0.127 2
	y	0.003 3	0.919 5	0.006 1
2	x	0.057 1	0.976 2	-0.219 6
	y	0.076 7	0.992 3	0.022 2
3	x	0.137 2	0.990 7	-0.065 1
	y	0.026 5	0.848 1	-0.215 4

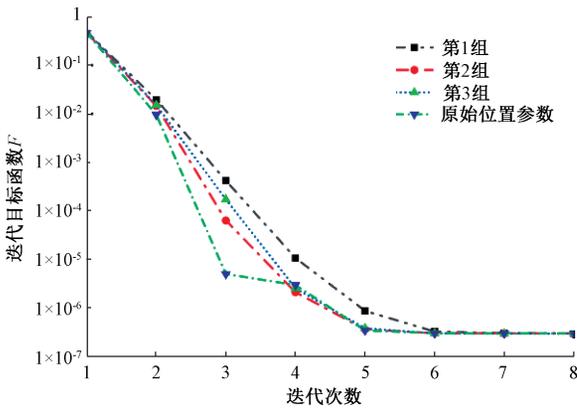


图 9 位形优化目标函数值变化曲线

Fig.9 Change curve of objective function value for configuration optimization

3 结 论

针对不同口径光学元件加工阶段的高精度在线测量需要,本文提出一种基于子孔径拼接技术的紧凑型瞬态干涉测量系统。该系统利用偏振相机瞬时获得四步移相干涉条纹以及对应的待测波前,从而最大程度降低了在线检测中复杂的环境扰动影响。利用所提出的系统配合多轴运动平台,对大口径光学元件各个子孔径进行扫描测量,结合基于位形优化算法的子孔径拼接技术,实现大口径光学元件的全口径面形测量,从而实现了系统测量范围的有效扩展。在对金刚石车削加工机床对中工具在线测量对比实验中,实现了纳米量级的高精度面形检测。同时,利用所提出了干涉系统对大口径元件面形实现了高精度子孔径拼接全口径测量,其中与 ZYGO 干涉仪全口径面形测量 PV 值与 RMS 值偏差的绝对值分别为 0.021 与 0.007 μm,并验证了该方法的鲁棒性。该系统具有结构紧凑且对外界扰动不敏感,可很好满足复杂环

境在线安装与测量应用要求,在金刚石车削加工机床对中工具的在线调整和不同口径加工元件在线检测中具有较广泛的应用前景。

参考文献

[1] GAO W, HAITJEMA H, FANG F Z, et al. On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2019, 68:843-866.

[2] 林健,王敏,韩振华,等. 一种小型在线非接触球面干涉仪系统设计[J]. 应用光学,2012,33(6):1053-1057. LIN J, WANG M, HAN ZH H, et al. Miniaturization noncontact online testing of sphericity interferometer system[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1053-1057.

[3] 代雷,吴迪,张健,等. 精磨光学元件面形的干涉检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 558-562. DAI L, WU D, ZHANG J, et al. Research on interferometric measurement technology for fine grinding optics surface[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4):558-562.

[4] NOMURA T, YOSHIKAWA K, TASHIRO H, et al. On-machine shape measurement of workpiece surface with [J]. Precision Engineering, 1992, 14(3):155-159.

[5] 李瑶,杨甬英,王晨,等. 点衍射干涉检测技术[J]. 中国光学,2017,10(4):391-414. LI Y, YANG Y Y, WANG CH, et al. Point diffraction interference detection technology [J]. Chinese Optics, 2017, 10(4):391-414.

[6] 王道档,王志超,赵军,等. 用于三维测量的双路点衍射干涉系统 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2146-2153. WANG D D, WANG ZH CH, ZHAO J, et al. Dual-path point-diffraction interference system for three-dimensional measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2146-2153.

[7] YAN J W, BABA H, KUNIEDA Y, et al. Nano precision on-machine profiling of curved diamond cutting tools using a white-light interferometer [J]. International Journal of Surface Science and Engineering, 2007, 1(4): 441-455.

[8] WANG D D, TIAN X B, XU P, et al. Compact snapshot multiwavelength interferometer [J], Optics Letters, 2019, 44(18):4463-4466.

[9] ZOU X C, ZHAO X S, LI G, et al. Non-contact on-

- machine measurement using a chromatic confocal probe for an ultra-precision turning machine [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90: 2163-2172.
- [10] CHEN X G, NAKAMURA T, SHIMIZU Y, et al. A chromatic confocal probe with a mode-locked femtosecond laser source [J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 103:359-366.
- [11] TIAN X, DENG H, FUJISHIMA M, et al. Quick 3D modeling of machining environment by means of on-machine stereo vision with digital decomposition [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2007, 56(1): 411-414.
- [12] CHEN L C, NGUYEN X L. Dynamic 3D surface profilometry using a novel colour pattern encoded with a multiple triangular model [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(5): 054009.
- [13] 郝治超, 刘元坤. 基于相位测量偏折术的透明物体表面形貌测量 [J]. *光学与光电技术*, 2019, 17(1): 63-69.
HAO ZH CH, LIU Y K. Transparent object shape measurement based on deflectometry [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2019, 17(1): 63-69.
- [14] 袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量 [J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0212004.
YUAN T, ZHANG F, TAO X P, et al. Test of optical mirror surface using fringe reflection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212004.
- [15] 徐平, 王道档, 解钟敏, 等. 基于相位偏折术的大像差透射波前检测 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(9): 99-105.
XU P, WANG D D, XIE ZH M, et al. Large-aberrated transmitted wavefront test based on phase measuring deflectometry [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(9): 99-105.
- [16] THUNEN J G, KWON O Y. Full aperture testing with subaperture test optics [C]. *SPIE*, 1983, 351: 19-27.
- [17] CHOW W W, LAWRENCE G N. Method for subaperture testing interferogram reduction [J]. *Optics Letters*, 1983, 8(9): 468-470.
- [18] 杨靖, 陈善勇, 戴一帆. 子孔径拼接测量基本算法与迭代算法的性能比较研究 [J]. *航天精密制造技术*, 2008, 44(5): 13-16.
YANG J, CHEN SH Y, DAI Y F. Comparative study on the performance of basic algorithm and iterative algorithm for subaperture stitching interferometry [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2008, 44(5): 13-16.
- [19] MILLERD J, BROCK N, HAYES J, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometer [C]. *SPIE*, 2004, 5531: 304-314.
- [20] ZHAO CH Y, H BURGR J. Stitching of off-axis subaperture null measurements of an aspheric surface [C]. *Proc. of SPIE*, 2008, 7063: 706316.
- [21] CHEN SH Y, LI SH Y, DAI L Y, et al. Experimental study on subaperture testing with iterative stitching algorithm [J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4760-4765.
- [22] NOVAK M, MILLERD J, BROCK. Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(32): 6861-6868.
- [23] 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.
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.

作者简介



付翔宇, 2018年于安徽工业大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为光电精密检测。

E-mail: neteasyxiangyu@163.com

Fu Xiangyu received his B. S. degree in 2018 from Anhui University of Technology, now, he is a master student in China Jiliang University. His main research interests include photoelectric precision detection.



王道档 (通信作者), 2007年于中国计量大学获得学士学位, 2012年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学副教授, 主要研究方向为精密检测技术。

E-mail: wangdaodang@sina.com

Wang Daodang (Corresponding author) received his B. S. degree in 2007 from China Jiliang University, and received his Ph. D. degree in 2012 from Zhejiang University. Now, he is an associate professor in China Jiliang University. His main research interests include precision testing technology.