

用于在线检测的紧凑型多测量模式干涉仪

王道档^{1,2}, 相超², 朱其幸², 孔明², 许新科²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江杭州 310027;
2. 中国计量大学计量测试工程学院, 浙江杭州 310018)

摘要: 光学干涉仪由于高精度、全口径、非接触特点在光学元件的检测中具有极其广泛的应用。针对光学元件加工在线检测需要, 提出了一种紧凑型的多测量模式瞬态干涉仪。该系统可同时实现单波长激光干涉、多波长激光干涉以及 LED 干涉显微测量等多种工作模式, 以分别满足不同动态范围宏观面形以及表面粗糙度等显微结构的干涉检测。针对在线检测应用中复杂的环境振动影响, 系统采用偏振相机来实现瞬态的偏振移相波前检测。为验证系统方案的可行性, 对测量系统的主要误差因素进行了分析, 并对不同工作模式下的金刚石车削机床在线检测结果与 Zygo 激光干涉仪和 Zygo 光学轮廓仪进行了比对实验, 同时也利用多波长技术对自由曲面进行了在线检测。结果表明该系统可实现高精度的多测量模式, 并且还可以满足大动态范围波前测量要求。该系统结构紧凑, 整体尺寸仅为 195 mm×160 mm×65 mm, 极其适合车削机床的在线安装及检测。同时系统基于瞬态波前检测, 具有对环境扰动不敏感的特点, 在机床对中工具在线调整以及加工元件等在线检测中具有广泛的应用前景。

关键词: 在线检测; 干涉仪; 瞬态波前; 多工作模式

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190472

Compact multi-measurement mode interferometer for on-machine testing

Wang Daodang^{1,2}, Xiang Chao², Zhu Qixing², Kong Ming², Xu Xinke²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: With the advantages of high precision, full field and non-contact testing, the interferometers have been widely applied in the testing of optical elements. To meet the need of on-machine testing of optical elements in the machining stage, a compact interferometer with multiple working modes was proposed to achieve transient testing. The proposed system can work in modes including single-wavelength laser interferometer, multi-wavelength interferometer and LED interferometric microscope, enabling the testing of surface figure with large dynamic range, surface roughness microscopic structures. A polarization camera was utilized to realize the simultaneous phase-shifting measurement with a single shot, by which the effect environmental disturbance can be minimized. To demonstrate the feasibility of the proposed interferometer, the on-machine testing in various working modes have been carried out on diamond turning machine, as well as the control experiment with Zygo laser interferometer and Zygo optical profiler; Besides, the freeform surface testing has also been achieved with

收稿日期:2020-02-03; 修订日期:2020-03-20

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)基金项目(GD18205); 中国博士后科学基金(2017M621928)

作者简介:王道档(1986-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电精密检测技术方面的研究。Email: wangdaodang@sina.com

the proposed interferometer. High measurement accuracy and large dynamic range has been achieved in experiments. It was compact in system with dimensions of 195 mm×160 mm×65 mm, making it extremely suitable for installing and testing on machining equipment. Besides, the transient wavefront testing makes the proposed system insensitive to environmental disturbance, and it has a great prospect for application in on-machine testing of alignment tool and various optical elements in machining stage.

Key words: on-machine testing; interferometer; transient wavefront; multiple working modes

0 引言

光学干涉仪由于具有高精度和非接触式全场测量特点,在光学元件的面形检测中得到了极其广泛的应用。针对处于加工阶段的光学元件而言,通常需要同时测得其不同空间频率范围内的面形信息,进而对其表面加工特性进行评价反馈。针对不同空间频率范围的干涉检测需要,可采用激光干涉仪和干涉显微镜来分别获取低频和中高频范围面形信息。其中激光干涉仪包括 Fizeau 型^[1]、Twyman-Green 型以及点衍射干涉仪^[2-3]等,它可用于实现低频段宏观面形误差的检测;干涉显微镜^[4]可实现微观轮廓(表面粗糙度)测量。现有商业干涉仪由于系统体积和抗干扰能力的限制一般只能用于实验室环境的离线式测量,因而只能将被测元件从车削机床上拆卸下来进行检测,这也对其复位到车削平台的安装调整精度提出了很高的要求,整个测量过程费时费力且效率低。尤其是在加工前的对刀阶段,需要对对中工具的整体面形以及微观加工刀痕进行反复检测,在此基础上对刀具进行调整,因而极其需要可直接在线测量的检测仪器。

针对加工在线检测需要,学者们对紧凑型干涉仪^[5]、共焦显微测头^[6]、立体视觉测量技术^[7]和光学偏折术^[8-10]等方法 and 装置进行了研究,并开发了相应的应用装置。但干涉仪在内各种的现有测量仪器,都只能实现单一工作模式,即宏观面形或面形粗糙度的测量,而无法同时实现两种测量模式。这也导致需要同时用多个测量仪器组合才能实现加工过程中光学元件面形信息的全面评价。针对此问题,美国亚利桑那大学提出了一种双测量模式干涉系统^[11],可同时用于宏观面形和面形粗糙度的在线测量。该系统将两种测量模式下的两路光路集成到一个系统中,光路较为复杂,同时实际测量中需要对系统元件进行安装或移除才能实现测量模式的切换,因而给实际应用带来了一定的不便。

针对光学元件加工阶段在线检测需要,文中提出了一种紧凑型的多测量模式干涉仪,可分别实现单波长激光干涉、多波长激光干涉以及 LED 干涉显微测量等多种工作模式。针对多工作模式下的高精度在线检测要求,对所涉及的关键系统元件选择、布局设计以及主要误差因素进行了分析。为了验证所以提出的可用于在线检测的紧凑型多测量模式干涉仪的可行性,利用所搭建的原理样机在金刚石车削机床上进行了在线检测,并与 Zygo 干涉仪和 Zygo 光学轮廓仪测量结果进行了比对;同时也利用该系统对金刚石车削自由曲面进行了在线检测。

1 原理

1.1 系统光路布局

用于在线检测的紧凑型多测量模式干涉仪系统光路布局如图 1 所示,其中光源系统包含波长分别为 632.8 nm 和 543 nm 的气体激光器以及 470 nm LED 光源,并且三个波长光束可进行切换开启。来自光源系统的光经光纤耦合接入干涉系统的光纤准直器后变为准直光束,再经一个线偏振片得到某一方向的线偏振光。为了缩短系统尺寸,采用折光反射镜对光路进行 90°转折。线偏振光分别经过分光棱镜 (BS) 和偏振分光棱镜 (PBS) 后分为透射 p 偏振光和反射 s 偏振光,其中 p 偏振光作为检测光,先后经长波通过滤光片 (F1)(三波长光束均透射) 和显微物镜 1 后入射到待测元件表面并沿原路反射回来;s 偏振光作为参考光,其中 632.8 nm 和 543 nm 波长激光束被短波长通过滤光片 (F2) 第一个面反射回来,470 nm 波长 LED 光束透射短波长通过滤光片 (F2) 后经显微物镜 2 入射到位于焦平面上的参考反射镜并沿原路返回。p 偏振检测光和 s 偏振参考光沿原路返回并在偏振分光棱镜 (PBS) 透射、反射汇合后,分别经分光棱镜 (BS) 反射和宽波段消色差 1/4 波片 (AQWP) 透射后,变为两个旋向相反的圆偏振光。两束圆偏振光经成像透

镜在偏振相机上可同时得到相移量为 $\pi/2$ 的四个通道移相干涉条纹,利用四步移相算法即可计算得到与待测元件表面信息相对应的瞬态波前分布,进而实现待测元件表面的瞬态检测。

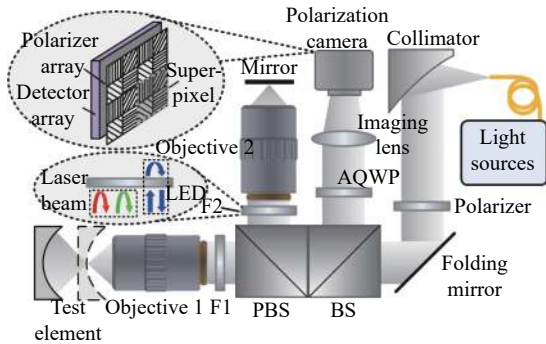


图 1 紧凑型多测量模式干涉仪系统布局

Fig.1 System layout for compact multi-measurement mode interferometer

为了满足不同工作波长应用要求,系统中光纤准直器采用了离轴抛物线反射式光纤准直器,分光棱镜(BS)、偏振分光棱镜(PBS)和 1/4 波片(AQWP)都为宽工作波段。针对在线检测中环境扰动影响问题,系统采用了偏振相机来实现波前的四步偏振移相瞬态检测,以最大程度提高系统的抗干扰能力。偏振相机是在传统的象元面阵前加入了由 2×2 微偏振器(透光轴方向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135°)为超像素单元所组成的偏振面阵(图 1),因而可实现一帧图像同时获取四个偏振方向对应四个通道图像信息^[12]。

1.2 测量原理

为了利用单一光路来实现不同测量模式的切换,系统采用短波长通过滤光片(F2,截止波长:500 nm,反射波段:512~715 nm,透射波段:300~490 nm)实现激光光束的反射和 LED 光束的透射,同时利用长波通过滤光片(F1,截止波长:350 nm,反射波段:200~340 nm,透射波段:358~1 600 nm)来补偿光程。在单波长或多波长激光干涉测量模式中,可采用 512~715 nm 范围激光器作为光源,该模式下滤光片(F2)的第一入射面的反射光作为参考光;在干涉显微测量模式中,可采用 358~490 nm 中心波长范围的 LED 作为光源,该模式下参考反射镜的反射光作为参考光。

在单波长激光干涉测量模式或者 LED 显微测量模式中,利用偏振相机单帧采集得到四通道 $\pi/2$ 移相

条纹,设 0° 、 45° 、 90° 和 135° 透光轴方向对应的干涉图强度分布为 $I_j(j=1, \dots, 4)$,可得对应的待测波前光程差为:

$$\Delta = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \arctan\left(\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}\right) \quad (1)$$

式中: λ 为光波长。

在单波长干涉检测中,其表面相邻两个采样点可测高度差最大值为 $\lambda/4$,即对应 632.8 nm 光波长为 0.158 2 μm)。为了满足实际加工中到自由曲面等大动态范围面形测量需要,可采用多波长干涉技术来扩展干涉检测系统的测量范围。对于 λ_1 和 λ_2 两个波长组合情况,其表面相邻两点可测高度差最大值为 $\lambda/4$,其中等效波长 $\lambda = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2)$ 。对应两个波长为 632.8 nm 和 543 nm 的激光波长,其组合对应的等效波长为 $\lambda = 3.826 4 \mu\text{m}$,若采用两个更为接近的波长则可得到更大的等效波长。

2 误差因素分析

图 1 所示紧凑型多测量模式干涉仪中,主要误差因素包括滤光片面形误差、1/4 波片相位延迟误差、偏振相机视场误差和多波长干涉误差等。

在宏观面形干涉检测中,滤光片(F1)的透射像差和滤光片(F2)的入射面(为参考面)会对检测结果引入误差;微观干涉显微测量中,滤光片(F1)和滤光片(F2)的透射像差会对检测结果引入误差。为了最大程度减小滤光片对测量结果的影响,系统中滤光片玻璃基底选用面形精度较高的平板玻璃。实际系统中滤光片面形误差均方根(RMS)约为 10 nm 量级,测量中可利用高精度干涉仪测得滤光片面形误差并作为系统误差,在最后被测结果中加以校正消除。

干涉系统利用 1/4 波片(AQWP)将振动方向相互垂直的两个线偏振测量光和参考光转换为旋向相反的圆偏振光。针对不同光波长应用要求,采用宽波段消色差 1/4 波片(AQWP),其对应 470、543、和 632.8 nm 光波长的相位延迟量分别为 $0.251 7\lambda$ 、 $0.245 4\lambda$ 和 $0.246 0\lambda$,而非理想情况下的 $\lambda/4$ 。1/4 波片对不同相位所引入的波前误差分布曲线如图 2 所示,对应 470、543、632.8 nm 光波长的波前测量误差峰谷(PV)值分别仅为 $0.9 \times 10^{-5}\lambda$ 、 $6.6 \times 10^{-5}\lambda$ 和 $5.0 \times 10^{-5}\lambda$,因而可忽略其对测量结果的影响。

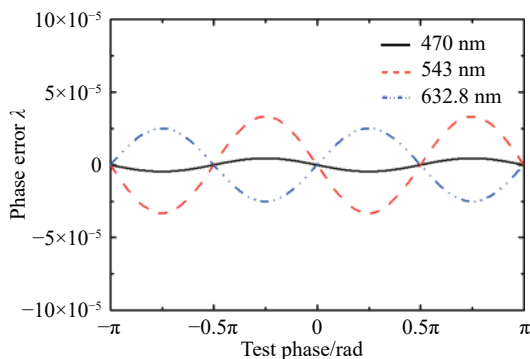


图 2 1/4 波片引入波前测量误差

Fig.2 Wavefront measurement error introduced by quarter-wave plate

在对偏振相机所采集的单帧图像提取四个通道移相干涉条纹并根据式 (1) 进行相位或光程差求解时, 近似认为同一超像素单元 (对应 2×2 pixel) 内的相位分布保持不变, 而该近似处理对测量结果会有一定的测量误差, 即偏振相机视场误差。偏振相机视场误差的大小与入射波前斜率有关, 可利用相邻像素相位值的加权平均线性插值方法^[13], 对该误差因素实现有效的校正。图 3 所示为不同波前斜率对应偏振相机视场误差以及采用 3×3 相邻像元加权平均线性插值方法校正后引入的波前误差 PV 值。以图 3 所示的 3×3 相邻像元相位加权平均线性插值校正为例, 各个通道的强度 $I_j (j=1, \dots, 4, \text{分别对应 } 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ \text{ 和 } 135^\circ \text{ 透光轴方向})$ 计算公式为:

$$\begin{cases} I_1 = I_{m,n} \\ I_2 = (I_{m-1,n} + I_{m+1,n})/2 \\ I_3 = (I_{m-1,n-1} + I_{m-1,n+1} + I_{m+1,n-1} + I_{m+1,n+1})/4 \\ I_4 = (I_{m,n-1} + I_{m,n+1})/2 \end{cases} \quad (2)$$

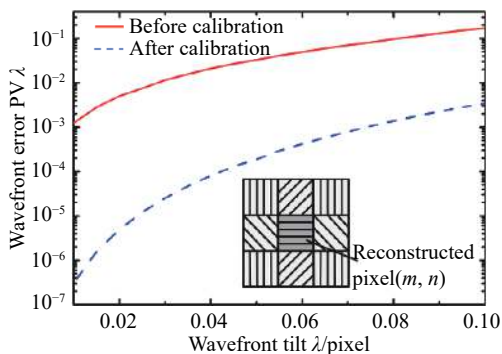


图 3 偏振相机视场误差影响

Fig.3 Error of field of view in polarization camera

根据图 3 可知, 偏振相机视场误差会随着波前斜率的增大而快速增大, 对应 $0.02\lambda/\text{pixel}$ 的波前斜率,

其引入的波前误差 PV 值为 0.2517λ ; 利用相邻像元相位加权平均线性插值法可实现偏振相机视场误差的有效校正, 校正后对应 $0.02\lambda/\text{pixel}$ 的波前斜率引入的波前误差 PV 值仅约为 $5.0 \times 10^{-5}\lambda$ 。

在多波长波前干涉检测中, 通过等效波长概念可实现测量范围的有效放大, 但其对应的相位噪声 (如透射元件对不同波长的色散作用) 也会同时按波长同等放大倍数被放大, 进而会对最后测量结果引入误差, 即多波长干涉误差。可采用条纹级次法^[14-15]来校正多波长干涉误差, 令两组 λ_1 和 λ_2 不同光波长测得波面相位分别为 φ_1 和 φ_2 , 则待测光程差 W 对应等效波长 Λ 的等效相位为 $\psi = \varphi_1 - \varphi_2$:

$$W = \Lambda\psi/2\pi \quad (3)$$

由此可将其转换为单波长 λ_1 对应测得光程差 W_1

$$\begin{cases} W_1 = \lambda_1 (\varphi_1/2\pi + N_1) \\ N_1 = \text{INT}(W/\lambda_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: INT 表示取整函数。当波长组数大于 2 时, 可根据公式 (4) 类推。根据条纹级次法可以使多波长干涉测量获得与单波长测量相同的测量精度。

3 实验测量

为了验证所提出用于在线检测的紧凑型多测量模式瞬态干涉仪的可行性, 根据图 1 搭建了相应的系统样机, 并将其用于 Moore Nanotech 350FG DTM 金刚石车削机床在线检测, 如图 4 所示。所采用的偏振相机象元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$, 像素数为 2448×2048 ; 光源系统包含了 632.8 nm 和 543 nm 的气体激

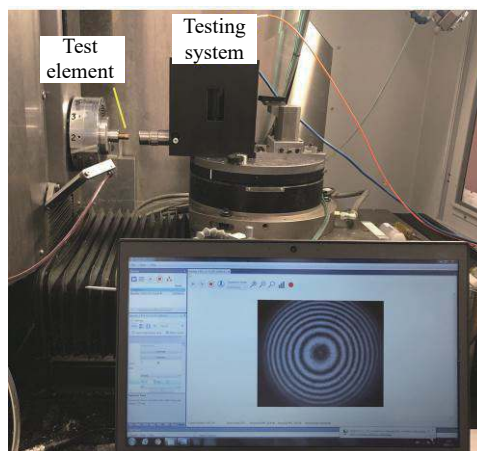


图 4 系统样机照片

Fig.4 Photo of system device

光器以及 470 nm LED 光源,可分别用于单、多波长宏观面形干涉测量和单波长干涉显微测量。所搭建的系统样机整体尺寸仅为 195 mm×160 mm×65 mm,结构的紧凑性使其能很好的满足在线检测的安装要求。利用所搭建的系统样机,分别对加工机床对中工具和自由曲面元件进行了在线检测。

3.1 对刀阶段对中工具在线测量

在车削机床对刀阶段,需要同时测量对中工具表面宏观面形和微观轮廓,作为车削刀具状态的判断和调整依据。利用所搭建的系统样机,对机床的对中工具表面进行了在线检测,同时利用 Zygo Verifire 系列激光干涉仪和 NewView 8300 型白光轮廓仪分别对其宏观面形和微观轮廓进行比对测量。被测对中工具表面为一凸球面,对应口径和曲率半径分别为 12.7 mm 和 19.990 mm。

利用本系统 (632.8 nm 波长激光束) 对对中工具进行宏观面形测量时,从偏振相机四个偏振通道提取的四幅 $\pi/2$ 移相干涉图如图 5(a) 所示。图 5(b) 为利用该系统和 Zygo 激光干涉仪测得面形结果,其中本系统测得面形 PV 和 RMS 值分别为 0.141 6 μm 和 0.022 6 μm , Zygo 干涉仪测得面形 PV 和 RMS 值分别为 0.116 5 μm 和 0.020 5 μm ,二者对应 PV 和 RMS 值的差值为 0.025 1 μm 和 0.001 1 μm 。

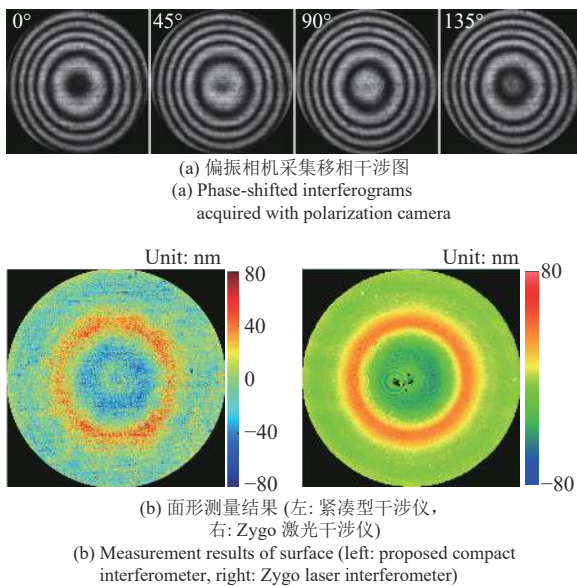


图 5 宏观面形测量结果

Fig.5 Measurement results of surface

利用本系统 (采用 470 nm 波长 LED 光源) 对对

中工具进行微观轮廓测量时,从偏振相机四个偏振通道提出的四幅 $\pi/2$ 移相干涉图 (对应的视场大小约为 0.6 mm×0.6 mm) 如图 6(a) 所示。图 6(b) 为利用该系统和 Zygo 白光轮廓仪所测得微观轮廓结果,其中本系统测得面形 PV、RMS 和 Ra 值分别为 0.209 0 μm 、0.005 4 μm 和 0.003 5 μm , Zygo 干涉仪测得面形 PV、RMS 和 Ra 值分别为 0.173 1 μm 、0.005 5 μm 和 0.004 1 μm ,二者对应 PV、RMS 和 Ra 值的差值为 0.035 9 μm 、0.000 1 μm 和 0.000 6 μm 。由于在线检测中被测元件表面个别位置存在车削残余碎屑,使得本系统的检测结果 PV 值相对较大。

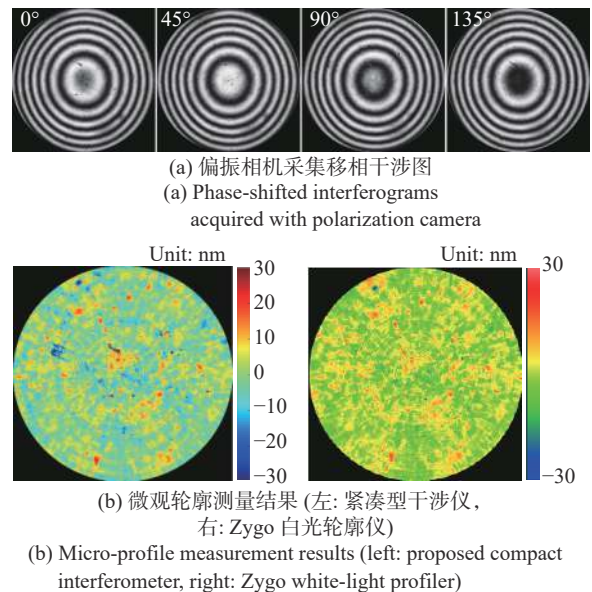


图 6 面形粗糙度测量结果

Fig.6 Measurement results of surface roughness

由测量结果如图 5 和图 6 所示的对中工具宏观面形和微观轮廓在线检测结果可知,利用所搭建的干涉仪在面形形状分布和量值上均实现了较高的检测精度,尤其是系统的结构紧凑性和瞬态波前检测特性,使其可很好的满足在线检测要求。

3.2 多波长干涉测量

为验证本系统在自由曲面检测中的可行性,基于多波长技术,利用所搭建的系统样机对一个口径为 25.4 mm、x 方向圆锥系数和曲率半径分别为 -2 和 23.5 mm、y 方向圆锥系数和曲率半径分别为 -1 和 26 mm 的金刚石车削反射自由曲面进行了在线检测,其测量结果如图 7 所示。图 7(a) 和图 7(b) 分别为 632.8 nm

和 543 nm 激光波长所对应采集提取的干涉图, 由于条纹过密, 无法直接利用单波长干涉解调得到连续波面。在此基础上, 利用多波长技术和条纹干涉级次法, 可计算得到连续的干涉波前如图 7(c) 所示, 其 PV 和 RMS 值分别为 45.388 0 μm 和 7.628 1 μm , 因而实现了大动态范围波前的测量。基于所测得波前信息, 可在进一步消除光线回程误差基础上, 实现自由曲面面形的有效测量。

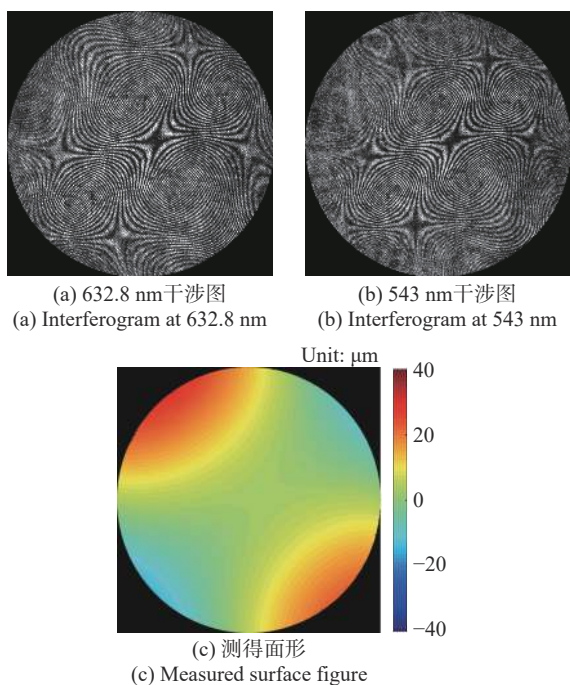


图 7 多波长干涉面形测量结果

Fig.7 Measurement results about surface figure with multi-wavelength method

4 结 论

文中针对光学元件在线检测需要, 提出了一种紧凑型多测量模式瞬态干涉仪, 利用不同工作光源的切换, 可在单一系统光路基础上, 实现单波长激光干涉和多波长干涉测量以及 LED 干涉显微测量等多种工作模式。定量分析了系统测量误差因素及其影响, 并给出了相应的校正方法。所提出的干涉系统结构紧凑, 可满足在线安装和测量应用要求。在对金刚石车削机床对刀阶段的对中工具在线检测中, 同时实现了对其宏观面形和微观轮廓的高精度测量, 且相对 Zygo 激光干涉仪和 Zygo 白光轮廓仪的面形 RMS 值

偏差分别达到了 0.001 1 μm 和 0.000 1 μm 。在基于所提出干涉仪多波长技术的自由曲面测量中, 实现对 PV 值达到 45 μm 的大动态范围波前的有效测量, 同时也为自由曲面面形的进一步评价提供了可行的检测手段。由于该系统基于瞬态波前检测, 对环境扰动不敏感, 在机床对中工具在线调整以及加工元件等在线检测中具有广泛应用。

参考文献:

- [1] Nomura T, Yoshikawa K, Tashiro H, et al. On-machine shape measurement of workpiece surface with Fizeau interferometer [J]. *Precision Engineering*, 1992, 14(3): 155-159.
- [2] Wang Daodang, Yang Yongying, Chen Chen, et al. Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(16): 2342-2348.
- [3] Zhang Yu, Jin Chunshui, Ma Dongmei, et al. Key technology for fiber phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 254-259. (in Chinese)
- [4] Wang D, Liang R. Simultaneous polarization Mirau interferometer based on pixelated polarization camera [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(1): 41-44.
- [5] Xie Fang, Wang Jian, Ma Sen, et al. Multiplexing optical fiber low coherence and high coherence interferometric system with large range and high resolution for online measurement [J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 171-176.
- [6] Zou Xicong, Zhao Xuesen, Li Guo, et al. Non-contact on-machine measurements using a chromatic confocal probe for an ultra-precision turning machine [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(5-8): 2163-2172.
- [7] Sims-Waterhouse D, Piano S, Leach R K. Verification of micro-scale photogrammetry for smooth three-dimensional object [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(5): 055010.
- [8] Oh C J, Lowman A E, Smith G A, et al. Fabrication and testing of 4.2 m off-axis aspheric primary mirror of daniel K inouye solar telescope[C]// SPIE ,2016, 9912: 991200.
- [9] Liu Dong, Yan Tianliang, Wang Daodang, et al. Review of fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0917001. (in Chinese)
- [10] Gong Zhidong, Wang Daodang, Wang Chao, et al. Misalignment calibration in reverse Hartmann surface test based on Zernike polynomials [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*,

- 2018, 39(8): 178–184. (in Chinese)
- [11] Tian X, Zhang Y, Sohn A, et al. Dual-mode snapshot interferometric system for on-machine metrology [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(4): 044104.
- [12] Millerd J, Brock N, Hayes J, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[C]//SPIE, 2004, 5531: 304-314.
- [13] Novak M, Millerd J, Brock N, et al. Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(32): 6861–6868.
- [14] Creath K. Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(14): 2810–2816.
- [15] Zhuo Yongmo, Li Tianping. The two-wavelength digital wavefront interferometry and the method for the error-reduction [J]. *Journal of Zhejiang University (Natural Science)*, 1989, 4(23): 499–508. (in Chinese)