

菲索干涉仪中精确移相的实现

苏志德^{1,2}, 史振广¹, 彭吉¹, 隋永新^{1*}, 杨怀江¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了实现移相式菲索干涉仪对光学元件面形的高精度测量, 建立了干涉仪同步采集移相系统, 并对精确移相方法进行了研究。介绍了移相系统的构成和工作原理, 计算了测量过程中移相器的速度。针对 PZT 移相器在移相过程中会引入离焦误差, 并存在加速段和减速段的问题, 详细设计了移相器的行进过程。最后, 对移相器的性能进行了标定。在改造后的干涉仪上开展了重复性验证实验, 结果表明: 干涉仪可以获得 $\lambda/11\ 340$ 的 RMS 测量重复性。对改造后干涉仪与 Zygo 公司生产的 Verifire XP/D 干涉仪的测量精度做了对比实验, 结果显示: 相同元件下两者测量结果的面形 RMS 之差约为 0.9 nm, 表明提出的移相系统及移相方法在重复性和准确度方面都能满足纳米级面形测量的要求, 为研制高精度移相干涉仪奠定了基础。

关键词: 菲索干涉仪; 移相系统; 同步采集; 面形测量; 标定

中图分类号: TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20130602.0244

Implementation of accurate phase shift in Fizeau interferometer

SU Zhi-de^{1,2}, SHI Zhen-guang¹, PENG Ji¹, SUI Yong-xin^{1*}, YANG Huai-jiang¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: suiyx@sklao.ac.cn

Abstract: To realize the high accuracy measurement of optical surfaces by a phase-shifting Fizeau interferometer, a synchronous acquisition phase-shifting system in the interferometer was established, and an accurate phase shifting method was researched. First, the composition and working principle of the phase-shifting system were introduced. Then, the velocity of PZT phase shifter during measurement was calculated. Since there exist defocus errors as well as speed-up and speed-down steps during phase shift, the moving process of phase shifter was detailedly designed. Finally, the phase shifter was calibrated. A verified experiment was carried out on the modified interferometer, and it shows that the RMS simple repeatability is $\lambda/11\ 340$. Comparative measurement was also carried out with two same components between the modified interferometer and the Verifire XP/D interferometer (Zygo company), and the RMS difference is about 0.9 nm. It can be seen that the repeatability and accuracy of this phase-shifting system and phase-shifting method have satisfied the require-

收稿日期: 2012-12-11; 修订日期: 2013-02-17

基金项目: 国家科技重大专项(02 专项)资助项目(No. 2009ZX02205)

ment of nano-scale form measurement, which can provide references for developing high accuracy phase-shifting interferometers.

Key words: Fizeau interferometer; phase-shifting system; synchronous acquisition; surface measurement; calibration

1 引言

光学干涉测量技术是以光波干涉原理为基础,以光的波长为单位的一种计量测试方法,是检测光学系统、光学元件较为有效、准确的方法之一。其中,菲索型干涉仪具有共光路,系统误差较小的优点,常用于元件的面形测量^[1]。1974年,移相技术的引入极大程度地提高了干涉仪的检测精度^[2],因此,移相式菲索干涉仪成为当前最常用的光学元件面形精度测量设备^[3]。目前,市场上已有美国 Zygo 公司和 ESDI 公司生产的干涉仪出售,但具体技术报道较少。在国内,南京理工大学和成都精密光学工程研究中心等单位也对干涉检测技术进行了研究,并研制了原理样机,但其测量精度有待提高^[4-7]。在高精度干涉仪方面,国内还处于起步阶段,因此,为打破国外公司在此领域的垄断地位,对高精度干涉测量技术开展研究是很有意义的。

在移相干涉仪中,移相误差的存在会极大地影响测量结果的准确性^[8-12],而移相误差的大小又取决于移相系统工作性能的优劣,因此,对能够实现高重复性和高精度测量的移相系统开展研究是很有必要的。本文建立了用于移相干涉仪的同步采集移相系统,并讨论了精确移相的具体实现方法,包括移相器移动速率的计算,移相器行进过程的详细设计和移相器的标定等。实验结果表明,该移相系统及移相方法具有较高的测量重复性和准确度,可满足纳米级面形测量的要求,为高精度移相干涉仪的研制奠定了基础。

2 移相系统的组成与工作原理

2.1 移相系统的组成

同步采集移相系统的框图如图 1 所示。该系统主要由 PZT 移相器、移相控制器、计算机、图像

采集卡和 CCD 相机组成。移相控制器选用德国 PI 公司的 E-712 控制箱,它包括计算机通信模块、位移监测模块。控制模块和驱动模块,各模块相互配合完成 PZT 移相器的驱动和控制。PZT 移相器内部集成有电容位移传感器,可以实时测量移相器的行进量并反馈至移相控制器的位移监测模块。NI 公司的 PCI-1433 图像采集卡被选用,于实时采集 CCD 接收的干涉图像并传送给计算机,该图像采集卡具有外触发接口,可以接收触发信号并根据配置执行单帧采集或多帧连续采集的任务。CCD 相机选用 Baumer 公司的 SXC 10 相机,可以方便地设置曝光时间和帧速率大小。计算机用于配置移相控制器和图像采集卡,并完成对 CCD 相机的参数调节和图像显示、面形计算等功能。

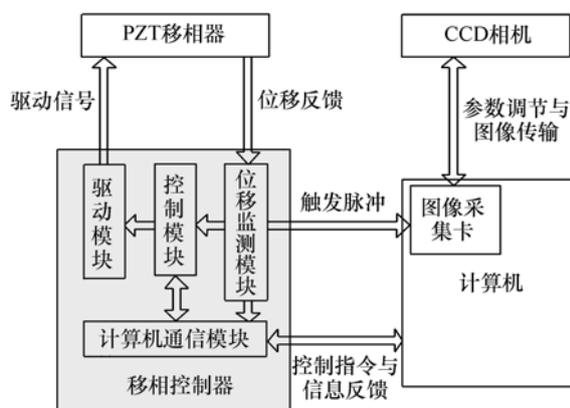


图 1 同步采集移相系统框图

Fig. 1 Block diagram of synchronous acquisition phase-shifting system

2.2 移相系统的工作原理

移相系统的工作原理为:在面形测量之前,首先对 CCD 的帧频、曝光时间和移相器的起始位置及图像采集卡的触发条件进行初始化,图像采集卡此时处于预览模式,即只实时地显示接收到的图像但并不保存图像。开始测量时,图像采集卡切换到等待触发模式,移相控制器发送电压给移

相器使之按照指定速度开始前进,并不断检测电容位移传感器的反馈值。当移相器到达某既定位置时,由移相控制器发出一电压脉冲给图像采集卡,图像采集卡收到脉冲后,按照给定的帧速率连续采集并存储满足移相算法要求的若干幅干涉图。然后,由计算机根据采集到的干涉图像进行面形求解。

3 精确移相的实现

3.1 移相速度计算

在连续式移相中,CCD 相机是对图像进行连续积分并存储的。设 CCD 的帧速率为 f ,则 CCD 每采集一幅图像所需的时间为 $1/f$ 。相位差 β 与光程差(OPD)的对应关系为:

$$\beta = 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \text{OPD}, \quad (1)$$

式中,OPD 是单程的光程差,等同于移相器的行进量 d 。设移相算法要求相邻两干涉图间的移相值 β 为 $2\pi/N$,代入上式可知此移相值对应 PZT 移相器的行进距离为:

$$d = \frac{\lambda}{2N}. \quad (2)$$

所以计算可得测量所需要的移相器行进速率为:

$$v = \frac{d}{1/f} = d \cdot f = \frac{\lambda}{2N} \cdot f. \quad (3)$$

在 632.8 nm 波长下,以 Zygo 干涉仪中使用的 13 帧算法为例,该算法要求各帧间移相值为 $\pi/4$,若 CCD 帧速率为 60 frame/s,则对应的 PZT 的速度为:

$$v = \frac{\lambda}{16} \cdot 60 = 2.373 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (4)$$

将此速度作为移相器的初始速度,在后续的移相器标定中对此速率做适当调整,即是移相器在测量过程中的行进速度。

3.2 移相器行进过程的设计

3.2.1 初始化移相器以减小离焦误差

如图 2 所示,当被测元件是球面时,参考面在 B 位置时与被测面是共焦位置,当 PZT 移相器推动参考面沿光轴平移到 C 位置时,就会出现一定的离焦量,从而引入测量误差。

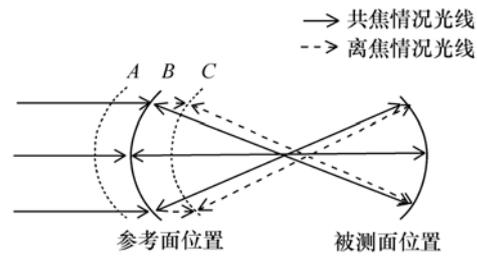


图 2 球面干涉腔离焦示意图

Fig. 2 Schematic drawing of defocus in spherical cavity

在移相过程中需尽量减小此离焦量的值,以减小测量误差。本应用中,在 PZT 初始化时将其定位在位置 B 处,调整被测元件位置使干涉图达到零条纹状态,在开始测量时,移相器退回到 A 处,开始匀速运动,到达 C 位置时停止运动,保证 CCD 的采图的时刻分布在 B 位置的两侧,则可以减小由于存在离焦而造成的误差。实际中,通过对测量结果做 Zernike 拟合得到 Power 值,并使之为零,来指导 PZT 移相器的起始位置的确定。

3.2.2 避开加速段和减速段

在移相过程中,希望移相器是匀速移动的,但实际上它的移动可分为加速-匀速-减速 3 个阶段。因此,在 CCD 帧速率恒定的情况下,要保证 PZT 的移动处于匀速阶段,需要在行进过程中为 PZT 的加速段和减速段留出余量。如图 3 所示,设面形测量需要采集 N 帧干涉图,在 N 帧干涉图采集过程中,PZT 移相器需要移动的位移为 L ,则令 B_1, B_2 对称分布在共焦位置 B 的两侧,与 B 的间隔是 $L/2$,自 A 位置开始,在 B_1 前为移相器留出充分的加速段,在 B_2 后为移相器留出充分的减速段,到 C 位置结束。本应用中,将加速段和加速段设为 $1 \mu\text{m}$,满足了应用的需求。

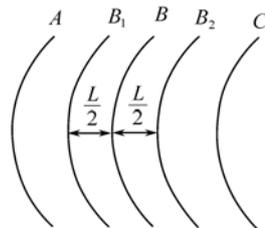


图 3 移相器移动过程示意图

Fig. 3 Schematic of moving process of phase shifter

这样,PZT 移相器的行进过程可描述为:在初始化时,将 PZT 移相器定位在 B 位置,当光路调整完毕开始面形测量时,移相器退回到 A 位置处,开始以设定的速率向前移动。到达 B_1 位置时,控制器发出一脉冲至图像采集卡,通知采集卡开始采图,移相器到达 B_2 位置时采集卡采图完毕,移相器继续移动一段位置,到 C 处停止,从而测量过程结束,整个过程的位移检测由电容位移传感器来完成。当需要做多次重复测量时,移相器移动到 C 位置后以很快的速度回到 A 位置,再按照设定速度开始移相到 C ,循环执行即可。

3.3 移相器的标定

实际工作中,PZT 移相器的行进速度不会严格按照既定速度来进行,并且 PZT 在移相中移动方向可能会与光轴有夹角,所以要对移相器进行标定,根据求解的移相值调整移相器的行进速度和安装姿态使其达到最佳的移相效果^[13-14]。本实验室有一台较旧的干涉仪,该干涉仪移相功能无法使用,但光机系统完好。对此干涉仪进行了改造,换上新的移相器和 CCD 相机,开展对移相

器性能的标定。由于当前移相器的线性度较好,所以选用基于移相算法的标定算法来求解移相值,表达式为:

$$\alpha(x,y) = \cos^{-1} \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{I_5(x,y) - I_1(x,y)}{I_4(x,y) - I_2(x,y)} \right) \right], \quad (5)$$

式中: $I_1(x,y), I_2(x,y), I_4(x,y), I_5(x,y)$ 分别是采集到的第 1、2、4、5 幅干涉图在 (x,y) 点的光强值, $\alpha(x,y)$ 是计算得到的 (x,y) 点对应的平均移相值,计算时将上式中分母比较小的像素点去除,以避免奇异点的存在对计算结果的影响。在该标定方法中,如果得到的柱状图以预期移相值为中心对称分布,但比较平缓,说明移相器在移相中行进方向与光轴产生了夹角,需要对移相器的端面进行调整。如果得到的柱状图比较尖,但对称中心偏离预期移相值,说明移相速率不准确,需要增大或减小移相速率。在实验中,干涉图应尽可能调到零条纹,以减小由于倾斜和离焦对实际移相值的影响。选取连续采集的 5 幅干涉图如图 4 所示,其移相间隔为 45° 。

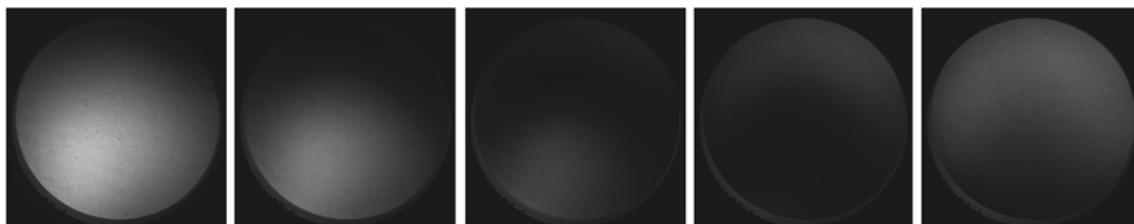


图4 移相器标定中的一组干涉图

Fig. 4 A group of interferograms for calibration of phase shifter

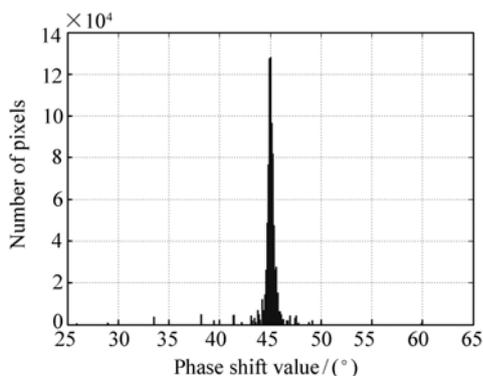


图5 移相器标定结果

Fig. 5 Calibration result of phase shifter

通过对 PZT 移相速率和安装姿态进行若干次调整,得到的移相相标定结果,如图 5 所示。

经过标定后,移相速率最终确定为 $2.380 \mu\text{m}$,干涉图上各点的移相间距平均值为 44.97° ,标准差为 0.91° ,满足了应用需求。

4 实验验证

4.1 测量重复性试验

为验证使用该移相系统的重复性,在改造后的干涉仪上开展了重复性测量实验。干涉仪放置在有隔振地基的大理石平台上,用纸带将干涉腔

罩住以减小空气扰动对测量结果的影响。在测量条件不变的情况下,对同一光学元件重复测量 50 次,用面形 RMS 的标准差来表示测量的简单重复性,测量 50 次得到的面形 RMS 分布如图 6 所示。

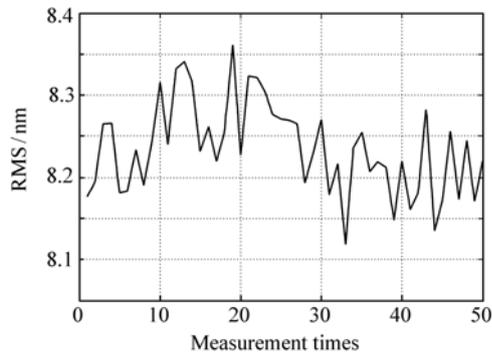


图 6 50 次连续测量的 RMS 分布

Fig. 6 RMS distribution of 50 consecutive measurements

计算可得,50 次面形测量结果的标准差为 0.055 8 nm,所以此移相系统的 RMS 简单重复性 (1σ 值)为:

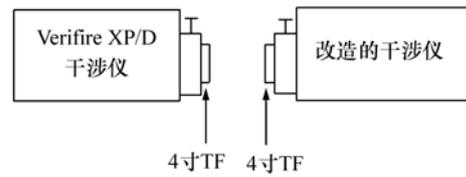
$$\frac{0.0558 \text{ nm}}{632.8 \text{ nm}} = \frac{1}{11340} \lambda. \quad (6)$$

对 50 次测量结果取平均作为面形均值,然后将此 50 次测量结果与面形均值点对点做差,得到对应的 50 个差值面形,计算可得此 50 个差值面形的 RMS 的平均值为 0.53 nm,标准差为 0.08 nm,所以此移相系统的波前重复性为:

$$0.53 + 2 \cdot 0.08 = 0.69 \text{ nm}. \quad (7)$$

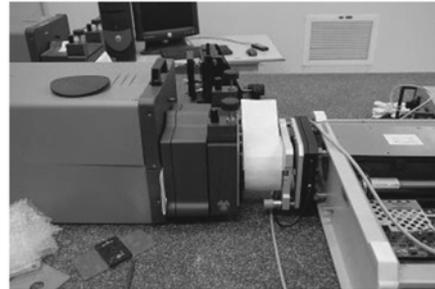
4.2 干涉仪测量精度验证

为验证利用此移相系统的测量精度,将改造后的干涉仪与 Zygo 公司的 Verifire XP/D 干涉仪做了测量比对实验。为减小由于环境影响及装夹不一致等因素引入的误差,两台干涉仪正对着放置,Verifire XP/D 上安装 15 cm(6 英寸)转 10 cm(4 英寸)的转接板,将两个 10 cm(4 英寸)的标准平面镜分别装在两个干涉仪上进行对比测量。实验中,当用其中一台干涉仪做测量时,用纸片挡住另一个干涉仪中从准直镜出来的光束,以避免杂散光对测量结果的影响。实验装置示意图及实验照片如图 7(a)、(b)所示。在改造的干涉仪上使



(a) 对比实验示意图

(a) Schematic diagram of comparative experiment



(b) 实验照片

(b) Photograph of experiment

图 7 测量精度对比实验示意图及照片

Fig. 7 Schematic diagram and photograph of comparative experiment for measurement accuracy

用的是自主编制的面形计算软件,该软件使用与 Verifire XP/D 干涉仪一样的移相算法来计算面形。在两台干涉仪上分别做 50 次连续测量,然后将对应的面形测量结果点对点做差值,并分别计算此 50 个差值的 RMS 值,统计可得此 RMS 的均值为 0.856 nm,标准差为 0.036 nm,说明改造后干涉仪的测量结果与 Zygo 干涉仪的测量结果有很好的一致性。其中一组测量结果及其差值如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,两台干涉仪测量结果的 PV 值差别较大,这主要是由边缘处存在一些毛刺造成的。测量结果之差的 RMS 值约为 0.9 nm,该差别可能是由于两台干涉仪的系统误差不一致造成的。

为了验证此移相系统测量球面元件的精度,在图 7 所示的装置上换上两个 f 数为 1.5 的 TS 镜来开展测量。同样是分别在两台干涉仪上做 50 次连续测量,并将对应的面形测量结果点对点做差值,计算可得此 50 个差值的 RMS 均值为 0.947 nm,标准差为 0.049 nm。可见,在测量球面元件时,利用此移相系统同样可以获得与 Zygo 干涉仪近似一致的测量结果。

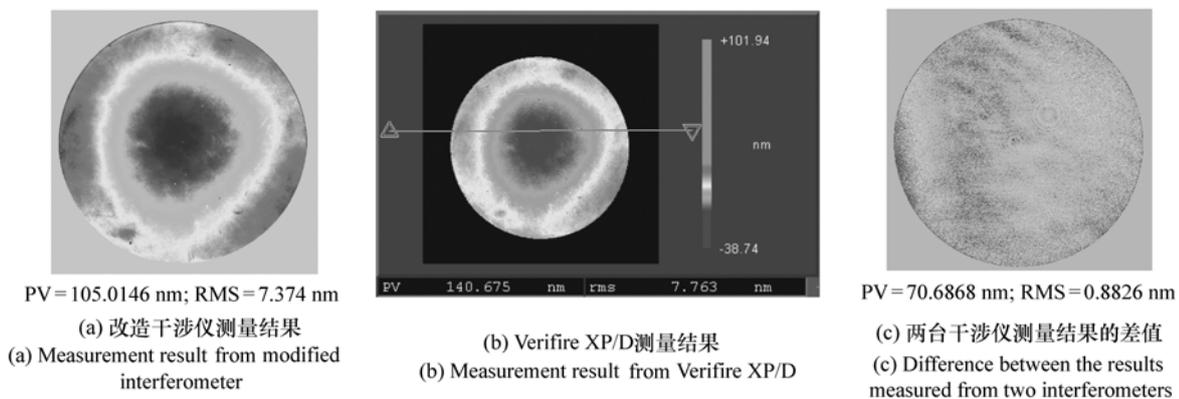


图8 两台干涉仪测量结果图

Fig.8 Measurement results of two interferometers

5 结论

本文建立了适用于移相式干涉仪的同步采集移相系统,并对PZT移相器的具体应用进行了研究。在完成移相功能的同时,详细设计了移相器的行进过程,以减少在球面测量中的离焦误差和移相误差,并利用移相标定技术对移相器的速度进行了校正。通过在改造后的干涉仪上开展面形

测量试验可知,利用该移相系统和移相方法可以获得 $\lambda/11\ 340$ 的简单重复性和0.69 nm的波前重复性,将此改造后干涉仪与Zygo的Verifire XP/D干涉仪做了比对测量试验,结果显示:相同的平面和球面元件下两者测量的面形RMS之差的均值分别为0.856和0.947 nm,表明此移相系统及移相方法在重复性和准确度方面都能满足纳米级测量的要求,可以在高精度干涉仪中实现精确移相的功能。

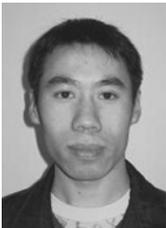
参考文献:

- [1] MALACARA D. *Optical Shop Testing*[M]. New York:John Wiley & Sons Inc.,1994:17-33.
- [2] BRUNING J H,HERRIOTT D R,GALLAGHER J E,*et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Appl. Optics*,1974,13(11):2693-2703.
- [3] 苗二龙,张健,谷勇强,等.用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*,2010,37(8):2029-2034.
MIAO E L,ZHANG J,GU Y Q,*et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. *Chinese J. Lasers*,2010,37(8):2029-2034. (in Chinese)
- [4] 刘兆栋,陈磊,韩志刚,等.斜入射干涉检测大口径碳化硅平面反射镜[J]. *光学精密工程*,2011,19(7):1437-1443.
LIU ZH D,CHEN L,HAN ZH G,*et al.*. Measurement of large aperture SiC flat mirrors by oblique incidence interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(7):1437-1433. (in Chinese)
- [5] 吴栋,朱日宏,陈磊,等.抗振型移相干涉仪中PZT移相器的改进[J]. *光学精密工程*,2003,11(6):567-571.
WU D,ZHU R H,CHEN L,*et al.*. Improvement of PZT phase shifter in vibration-resistant phase-shifting interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*,2003,11(6):567-571. (in Chinese)
- [6] CHAI L Q,XU Q,YU Y J,*et al.*. 500-mm-aperture wavelength-tuning phase-shifting interferometer[J]. *SPIE*,2005,5956:589-596.
- [7] 杨李茗,叶海仙.大口径大曲率半径光学元件的高精度检测[J]. *光学精密工程*,2011,19(6):1207-1212.
YANG L M,YE H X. High-precision metrology for optical components with large-apertures and large radii of curvature [J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(6):1207-1212. (in Chinese)
- [8] CHENG Y Y,WYANT J C. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry[J]. *Appl. Optics*,1985,24(18):

3049-3052.

- [9] CHIAYU A, WYANT J C. Effect of piezoelectric transducer nonlinearity on phase shift interferometry[J]. *Appl. Optics*, 1987, 26(6):1112-1116.
- [10] KENICHI H, BOB F O, KIERAN G L. Phase-shifting algorithms for nonlinear and spatially nonuniform phase shifts[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, 14(4):918-930.
- [11] 王道档, 杨甬英, 刘东, 等. 压电移相器的空间旋转误差建模与实验分析[J]. *光电子·激光*, 2009, 20(5):571-575.
WANG D D, YANG Y Y, LIU D, *et al.*. Modeling and analysis of space-rotation error induced by phase-shifter in phase shifting interferometry[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2009, 20(5):571-575. (in Chinese)
- [12] 张景和, 张顺国, 董跃华. 乌氏干涉测量的信息读取[J]. *中国光学*, 2011, 4(2):147-153.
ZHANG J H, ZHANG SH G, DONG Y H. Information reading of Ubbelohde interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2):147-153. (in Chinese)
- [13] BERND G, HERBERT W. Phase-shifter calibration and error detection in phase-shifting applications; a new method[J]. *Appl. Optics*, 1998, 37(32):7624-7631.
- [14] PETER D G. Phase-shift calibration errors in interferometers with spherical Fizeau cavities[J]. *Appl. Optics*, 1995, 34(16):2856-2863.

作者简介:



苏志德(1985—),男,河北邢台人,博士研究生,2008年于吉林大学获得学士学位,主要从事干涉仪移相技术及标定方法的研究。E-mail: suzhide111@gmail.com



隋永新(1970—),男,吉林长春人,博士,研究员,1993年、1996年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,2002年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光刻物镜中光学元件超高精度检测技术方面的研究。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn



史振广(1984—),男,湖北天门人,助理研究员,2006年、2009年于西北工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学元件检测方面的研究。E-mail: shizg@ciomp.ac.cn



杨怀江(1966—),男,辽宁丹东人,研究员,博士生导师,1988年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1993年于长春理工大学获得硕士学位,1996年于北京理工大学获得博士学位,主要从事网络信息安全、光学信息融合及深紫外光刻技术方面的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn



彭吉(1985—),男,湖南怀化人,助理研究员,2007年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光刻物镜中光学元件超高精度检测技术方面的研究。E-mail: pengji@ciomp.ac.cn