

移相器微位移旋转误差的分析及测试*

武旭华 陈 磊 颜加军

(南京理工大学电光学院, 江苏南京 210094)

摘 要 以压电陶瓷(PZT)微位移器为主要研究对象, 引入一种处理静态干涉图的新方法——虚光栅移相叠栅条纹法, 设计实验对一台实际使用的移相器微位移旋转误差进行测试研究, 对其引起的波面旋转情况进行了定量的计算分析, 并给出测试结果. 用虚光栅移相叠栅条纹法处理实验中加有载频的干涉图时, 不需要使用任何移相器件, 可以进行动态位相的检测, 整个移相过程用计算机进行控制, 避免了引入额外的移相误差.

关键词 移相干涉术; 虚光栅叠栅条纹法; PZT 移相器

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A

0 引言

移相干涉术^[1]以其优良的测试准确度被广泛用于各种现代干涉仪器中. 移相器是干涉仪的主要部件, 其结构常用三个压电陶瓷堆均匀分布在一个圆周上以保证驱动要求. 由于制作和材料原因以及每个压电陶瓷堆所受力不一致, 使得每个压电堆之间的动作不能同步, 这样不仅会造成不能等步步进的问题, 而且由于实际运用中驱动参考反射镜质量较大, 使移相器每一步移相的干涉图条纹发生旋转及条纹数目发生变化, 这显然与移相干涉算法的要求不一致, 同时也会影响到测量准确度.

朱煜等^[2]根据干涉条纹移动量的判读来测量压电陶瓷堆微位移量, 对采用一个压电陶瓷堆作为微位移驱动器的移相器的非线性校正原理已作过详细探讨; 他们还根据傅立叶变换原理, 提出过一种对由三个压电陶瓷堆(PZT)组成的干涉仪移相器的非线性形和平行性进行校正与标定的方法^[3].

本文引入一种处理静态干涉图的新方法——虚光栅移相叠栅条纹法, 对由三个压电陶瓷堆移相时伸长不一致而引起的条纹旋转误差进行详细分析, 用此法处理一幅加有载频的干涉图时, 可以实现干涉条纹移相的效果, 整个移相过程用计算机进行控制, 不需要使用任何移相器件, 避免了引入额外的移相误差. 另外, 虚光栅移相叠栅条纹法是对单幅载频干涉图进行处理的方法, 可以进行动态位相的检测. 而传统的移相干涉法需要采集多幅干涉图进行处理, 不适用于测试动态波面.

1 移相器微位移旋转误差理论分析

PZT 移相器通常是由多片压电陶瓷材料, 经叠层工艺制作的压电叠堆微位移器件, 移相干涉仪的标准参考镜由机械装置与其端面紧密联结. 然而在移相器制作过程中, 很难保证每片压电陶瓷在材料特性、几何特性上一致, 当移相器加上步进电压时, 每片晶片的伸长量和伸长方向在微观形貌上都会有所不同, 从整体上就表现为: 移相器在伸长的同时其端面法线方向围绕着伸长方向旋转, 但移相器的端面并不会绕着伸长方向旋转. 图 1 显示移相器在移相时使波面产生旋转的过程^[4]. 图 1 上半部分为五步法移相过程, 步进相移为 $\pi/2$, 图中没有画出 $\pi/2$ 的波面相移(端面的轴向运动), 只画出了端面法线方向的旋转. 图 1 下半部分为条纹干涉示意图, 图中示出了条纹的平移和旋转.

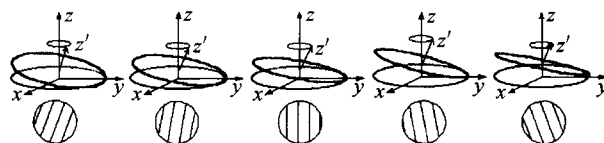


图 1 移相器微位移旋转导致条纹旋转

Fig. 1 Rotation of fringes induced by the micro-displacement error of phase-shifter

1.1 对移相算法引入误差的理论分析

根据移相算法的要求, 移相器应该作平移运动, 但由于移相器微位移旋转误差的存在, 使得实际的移相干涉图与理想情况有所不同, 为了方便分析干涉图旋转所带来的误差, 图 2 对旋转过程作了放大处理, 并且不引入波像差, 干涉条纹呈直线型. 图中实线表示某一时刻的干涉条纹(载频条纹), 虚线表示相移 $\pi/2$ 后的干涉条纹. 在光瞳中任取一点 A, 移相后其相位应和 C 点的相位相等, 但由于干涉图的旋转, 其实际测量得到的相位和 B 点相等, 所以干涉图旋转所造成的相位测量误差为 B、C 两点之

* 国防军工计量“十五”重点项目资助(60803134)

Tel: 025-84315427 Email: wuxh1977@sina.com

收稿日期: 2005-05-31

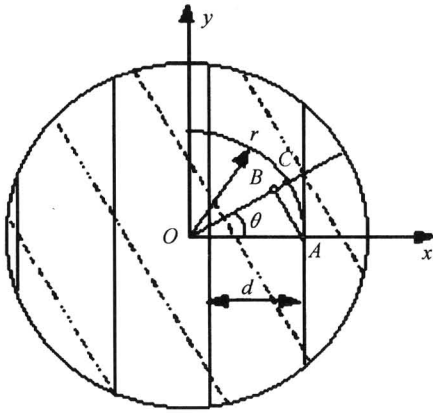


图2 条纹旋转引起相位误差的几何表示

Fig. 2 Geometrical figure of phase error induced by the rotation of fringes

间的相位差 ξ (不考虑 B、C 两点的波像差)

$$\xi = 2\pi \frac{|BC|}{d} = 2\pi \frac{r(1 - \cos \theta)}{d} \quad (1)$$

式中 d 为干涉条纹的宽度, r 为 A 点到光瞳中心的距离, θ 对应于相移 $\pi/2$ 的干涉条纹旋转角.

小角度旋转情况下, 式(1)可近似为

$$\xi = 2\pi \frac{r\theta^2}{2d} = \frac{\pi r\theta^2}{d} \quad (2)$$

以典型的五步移相算法-Hariharan 算法为例^[5], 经分析可得移相器微位移旋转对相位波面所造成的误差^[6]

$$\Delta\varphi = -\frac{\pi^2 r^2 \theta^4}{4d^2} \sin 2\varphi \quad (3)$$

式中 φ 为参考波面和测试波面间的位相差.

1.2 误差分析与误差控制

假设被测件为 80 mm 口径的标准镜面, 不考虑被测件面形误差的影响. 设视场中干涉条纹的宽度为 $d=20$ mm, 这样视场中有四条干涉条纹; 每步移相后条纹干涉图的旋转角度为 $\theta=10^\circ$, 则整个被测表面的相位解包误差可由式(3)计算得出, 其结果用图 3 的三维误差分布图来表示. 由图 3 可看出最大误差出现的位置在被测件的边缘, 轴上误差最小. 对于口径为 80 mm 的被测件, 当干涉条纹宽度调整

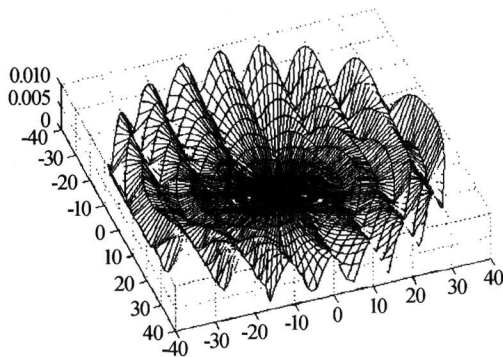


图3 测试孔径上的相位误差分布

Fig. 3 Phase error distribution on test aperture

为 20 mm, 每步条纹干涉图的旋转角度为 10° 时, 其边缘最大相位误差为: $\Delta\varphi_{\max}=0.0092$ rad, 对应的光程差为: $\lambda/343$, 这个误差是很小的. 误差除了与被测件口径有关外, 还与干涉条纹宽度的调整有关, 从式(3)可知, 误差与条纹的宽度的平方成反比, 还与条纹旋转角度有关, 由此可知, 当旋转角度和测试孔径(条纹的数目)较小时, 驱动器(PZT)微位移旋转所带来的移相误差相对较小. 从图 3 以及式(3)可以得到这样的误差控制原则^[6]

$$\frac{\pi^2 r^2 \theta^4}{4d^2} < \tau \quad (4)$$

τ 是干涉仪需要控制的相位准确度(PV 值). 当准确度在 $\lambda/200$ (对应的相位准确度为 0.0314 rad) 时, 对于 80 mm 口径的被测件, 当视场中有 4~5 个条纹($d=20$ mm)时, 可容许的旋转角约为 1.9 rad, 实验中很少会出现这么大的旋转角度, 这种情况下完全可以忽略干涉图旋转所导致的误差; 当视场中有 15~16 个条纹($d=5$ mm)时, 每步移相后干涉图的旋转角度应该小于 0.12 rad (约为 7°); 当干涉条纹比较密、被测件口径比较大时, 所允许的旋转角则更小. 这一结果可对光学系统的调整和在测试过程中测试条纹数目的选择提供理论指导和参考.

2 实验

2.1 实验原理

设计实验对一台实际使用的由三个压电陶瓷堆构成的微位移旋转误差进行测试研究. 由于是分析移相器的误差, 为了尽可能的减小误差的来源, 因此参考镜和测试镜都使用标准镜. 在此条件下, 若移相器不存在微位移旋转误差, 干涉条纹图应该是严格平行的直线. 但在实际的光学测试中, 当 PZT 驱动参考镜在水平方向上做平动的过程中, 移相器还存在微位移旋转现象, 这种情况下, 参考镜实际的运动轨迹不是严格的直线, 移相干涉图的条纹也不再完全平行, 彼此间存在一个角度. 这样即使测试镜是理想的标准平面, 测试的波面也不会是理想平面, 必定存在误差. 因此, 三个压电陶瓷堆的伸长量不相等而产生条纹旋转的误差分析, 可以转化为对其误差波面进行分析.

由实验中采集的干涉图数据计算相位波面. 本文引入一种处理静态干涉图求取相位波面的新方法——虚光栅移相叠栅条纹法^[7], 它是一种结合了移相技术、叠栅技术、虚光栅技术和载频技术的相位求取方法. 下面介绍虚光栅移相叠栅条纹法原理.

现分析一加有线性载频 f 的干涉图(称待测干涉图), 其光强表达式为

$$T(x, y) = 1 + \cos [2\pi f x - kW(x, y)] \quad (5)$$

式中 $W(x, y)$ 为被测波面相对于参考面的波相差.

利用计算机编制软件程序生成一幅参考干涉图, 它的线性载频为 f_r , 光强表达式为

$$T_r(x, y) = 1 + \cos [2\pi f_r x - kW_r(x, y) + \phi] \quad (6)$$

式中 $W_r(x, y)$ 为参考干涉图波像差, 为方便起见, 取其大小为 0, ϕ 为初始相位. 那经过乘法叠加后获得的叠栅条纹强度表达式为

$$s(x, y) = 1 + \frac{1}{2} \cos [2\pi(f - f_r)x - \phi - kW(x, y)] +$$

$$\frac{1}{2} \cos [2\pi(f + f_r)x + \phi - kW(x, y)] +$$

$$\cos [2\pi f - kW(x, y)] + \cos [2\pi f_r + \phi] \quad (7)$$

叠栅条纹图中包含有多种频率分量, 如果采用合适的滤波器, 滤掉不必要的高频分量后可提取出含有待测量的叠栅信息, 得到的叠栅条纹的强度表达式为

$$s(x, y) = 1 + \frac{1}{2} \cos [2\pi(f - f_r)x - \phi - kW(x, y)] \quad (8)$$

通过编制的程序生成所需要参考干涉图, 取 ϕ 值分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$, 用这四幅参考干涉图与待测干涉图相乘叠加后, 形成四幅叠栅条纹图, 由于干涉图由计算机生成, 故称其为虚光栅. 对这四幅叠栅条纹图进行低通滤波后就获得了四幅相位值相差 $\pi/2$ 的干涉条纹图, 其光强分别记为 s_1, s_2, s_3, s_4 , 这四幅图可以视为由移相干涉法中的四步法获得的四幅干涉图, 将这四幅图用四步法的方法来处理得到

$$2\pi(f - f_r)x - kW(x, y) = \arctan \left(\frac{s_4 - s_2}{s_1 - s_3} \right) \quad (9)$$

得到相位的包裹波面后, 利用解包算法进行解包处理, 就可得到待测连续相位波面.

因为研究的是两个平面(参考平面和测试平面)的关系, 因此可以对其相位波面进行平面拟合^[8], 假定拟合平面的表达式为

$$S(x, y) = a_1 + a_2 x + a_3 y \quad (10)$$

拟合平面的系数 a_1, a_2 和 a_3 可通过最小二乘法得到, 由于要拟合的是离散数据, 因此最终要解决的是离散情形下的最佳平方逼近问题. 通过最小二乘法计算得到的拟合波面的系数就可得到波面法方向的向量 $(a_2, a_3, 1)$. 法向量 R 的空间表示如图 4.

通过计算法向量的俯仰角和方位角就可以看出条纹的旋转情况. 从上面的空间矢量的表示中可以得到简单的得到俯仰角和方位角的计算式

$$\theta = \arccos (1 / \sqrt{a_2^2 + a_3^2 + 1}) \quad (11)$$

$$\phi = \arctan (a_3 / a_2) \quad (12)$$

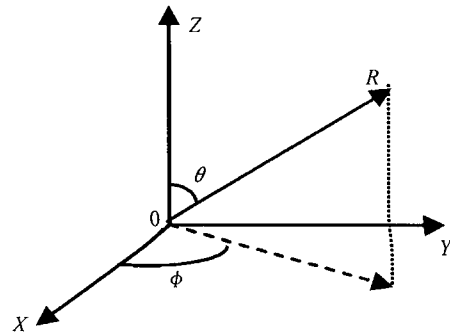


图 4 空间矢量图
Fig. 4 Spatial vector graph

2.2 测试及结果分析

图 5 是利用数字波面技术和智能化技术所开发的数字式移相斐索干涉仪(口径 ϕ 为 100 mm, 对平面测试准确度为 $\lambda/20$, 对球面测试准确度为 $\lambda/10$) 的实验装置图, 本实验主要是对该装置中的由三个压电陶瓷堆构成的移相器(图 5 中 4)的微位移旋转误差进行测试研究. 调节干涉仪参考反射镜(参考镜和测试镜都用标准镜, 条纹的数目取决于参考镜和测试镜的倾斜角的大小)的倾斜角量, 干涉图中的条纹数随之增加, 即在干涉图采集前引入一个线性空间载频, 这样采集到的每幅干涉图是一幅静态干涉图. 实验中通过控制干涉仪的移相器驱动工作方式, 采集 30 幅移相器连续工作时的移相干涉图, 根据 2.1 节提出的虚光栅移相叠栅条纹法进行处理. 如图 6 为实验所采集的其中一幅静态干涉图, 图 7 为计算机生成的参考干涉图, 通过编制的程序生成所需要的四幅位相差 $\pi/2$ 的参考干涉图, 与待测干涉图相乘叠加后就可以获得四幅移相叠栅条纹图(图 8), 再经过空域低通滤波, 就获得了四幅相位值相差为 $\pi/2$ 的叠栅条纹图(图 9), 用 4 步移相法和解包算法处理就可得到其相位波面. 因为是研究参考平面和测试平面的关系, 因此用最小二乘法对其相位波面进行平面拟合得到的拟合波面系数就可得到波面法方向的向量, 通过计算法向量的俯仰角和方位角就可看出条纹旋转情况. 如此重复计算上述所采集的 30 幅干涉图, 得到的法向量的俯仰角和方位角的具体数据如表 1, 图 10 和图 11 表示出俯仰角和方位角的变换趋势(光滑曲线为最小平方拟合曲线), 从这两图中可以看到: 方位角 ϕ (拟合波面的法向量与 X 轴的夹角)的值逐渐增大, 俯仰角 θ (拟合波面的法向量与 Z 轴的夹角)的值逐渐减小, 由图 4 的空间矢量图不难看出误差面的法方向向量是逐渐逼近中心轴(Z 轴)的, 也就是表明所采集的干涉图的误差量是在逐渐减小, 这表明计算结果和所观察到的 30 幅干涉条纹图的直观变化趋势(条纹旋转角度渐渐变小)是一致的.

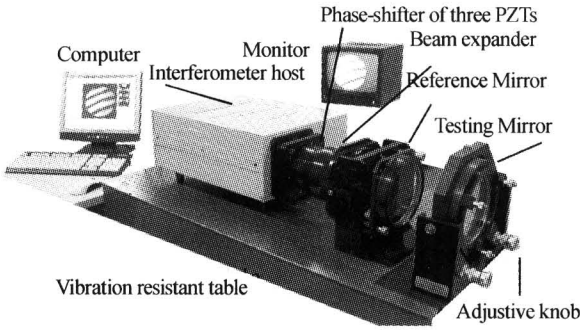


图 5 实验装置图
Fig. 5 Experimental setup

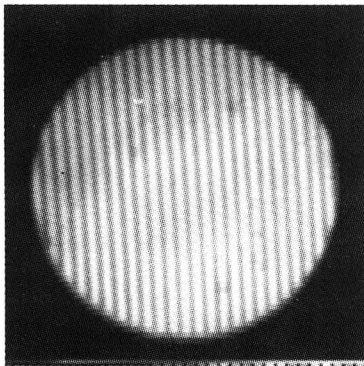


图 6 带空间载频的干涉图
Fig. 6 Interferogram with spatial frequency

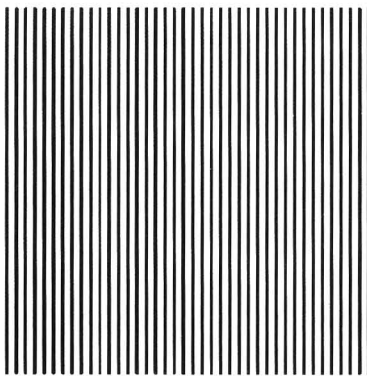


图 7 参考干涉图
Fig. 7 Reference interferogram

表 1 测量波面法线的方位角和俯仰角 (单位:°)

采样次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
方位角 ϕ	21.42	21.78	21.59	21.98	21.74	22.05	22.19	22.03	22.5	22.41	22.65	22.87	22.69	23.22	23.36
俯仰角 θ	2.29	2.3	2.29	2.3	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.28	2.29	2.28	2.28	2.27
采样次数	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
方位角 ϕ	23.35	23.74	23.79	23.76	24.45	24.29	24.68	24.96	24.98	25.1	25.69	25.54	25.88	26.19	26.77
俯仰角 θ	2.26	2.26	2.25	2.23	2.24	2.23	2.22	2.21	2.2	2.19	2.19	2.18	2.17	2.17	2.18

3 讨论

本文研究了移相干涉测量中移相器微位移旋转误差对典型移相算法的影响,给出了相位解包后的误差公式,分析了引起误差的因素,提出了控制误差的原则.一般而言,被测口径越大、条纹越密所引起的相位解包误差越大,所以移相器存在微位移旋转

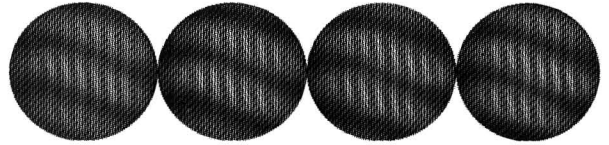


图 8 四幅移相叠栅条纹图
Fig. 8 Four phase-shifting moiré fringe interferograms

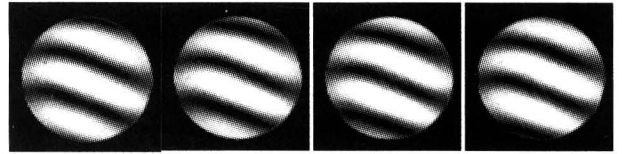


图 9 四幅叠栅条纹图滤波后的图像
Fig. 9 Four filtered interferograms

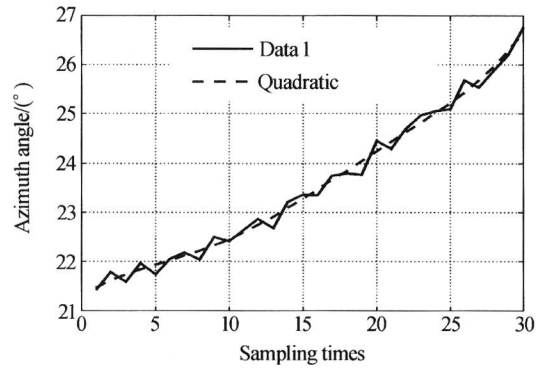


图 10 方位角的变化图
Fig. 10 Change of azimuth angle

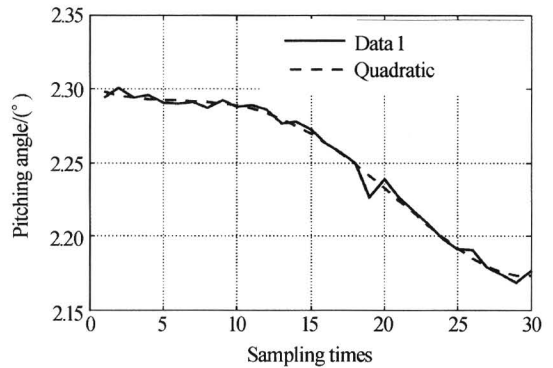


图 11 俯仰角的变化图
Fig. 11 Change of pitching angle

时,应该尽量做到将条纹调疏;对于必须采用较密的干涉条纹进行测试的场合,如果存在较大的干涉图旋转,此时应考虑对移相器进行优选或改进其机械结构.

引入虚光栅移相叠栅条纹法并设计实验对一台实际使用的移相器进行测试研究,只需要使用一幅干涉图就可以实现条纹移相效果,移相准确,并可以

进行动态位相的检测,测试准确度高,方法简便,重复性好,可很精确的测定移相器微位移旋转误差以便进行校正,实验中计算数据和观测结果相吻合,从而验证了原理的可行性.

虚光栅叠栅条纹法除了可以测量移相器微位移旋转误差外,只要在普通干涉仪上配置一高响应速度的 CCD,就可以实现对动态连续变化的波面的测试,例如对于平移导轨的直线度进行精确测试,成本低且易实现,很有应用价值. 而传统移相干涉法需要采集多幅干涉图进行处理,不适用于对动态波面的测试. 另外,此法还可用于测试光学元件的角度偏差等,应用范围十分广泛.

参考文献

- 1 Creath K. Phase-measurement interferometry techniques. *Progress in Optics*, 1988, **16**(2): 349~393
- 2 朱煜, 陈进榜, 朱日宏, 等. 干涉仪移相器相位移 $\pi/2$ 标定方法的研究. *光子学报*, 1999, **28**(10): 951~954
Zhu Y, Chen J B, Zhu R H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(10): 951~954
- 3 朱煜, 陈进榜, 朱日宏, 等. 由三个压电陶瓷堆组成的干涉仪移相器的校正与标定. *光学学报*, 2001, **21**(4): 0253~2239
Zhu Y, Chen J B, Zhu R H, et al. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 0253~2239
- 4 吴栋. 移相干涉仪自适应抗振技术研究: [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2005. 1
Wu D. [Ph. D. dissertation.], Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2005. 1
- 5 Tang S. Self-calibrating five-frame algorithm for phase shifting interferometry. *Proc SPIE*, 1996, **2860**: 91~98
- 6 颜加军. 移相干涉术中波面计算方法以及移相器校正技术研究: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2004. 1
Yan J J. [Ph. M. dissertation.], Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2004. 1
- 7 Malacara D, Servin M, Malacara Z. *Interferogram Analysis for Optical Testing*. New York: Marcel Dekker, 1998. 337~354
- 8 Han G S, Kim S W. Numerical correction of reference phases in phase-shifting interferometry by iterative least-squares fitting. *Appl Opt*, 1994, **33**(3): 7321~7325

Analysis and Test on Rotation Error Induced by the Micro-displacement of Phase-shifter

Wu Xuhua, Chen Lei, Yan Jiajun

Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094

Received date: 2005-05-31

Abstract Based on the theory of linear polynomial fitting algorithm, the micro-displacement error of phase-shifter which can induce the rotation of fringes in the processing of phase shift is analyzed. A novel method for static interferogram analysis, named the virtual grating phase-shifting moiré fringe method that is based on virtual grating technology, phase-shifting interferometry and moiré technology, is introduced and analyzed. When the static interferogram with a certain spatial frequency in the experiment is processed by this method, the phase shift is introduced mathematically and controlled by the computer to avoid any phase-shifting error, so the dynamic phase could be evaluated. Some valuable experiments are carried out and the results are presented to show the feasibility of this error-analysis method. In terms of error analysis, the criterions to control the error are presented.

Keywords Phase shifting interferometry (PSI); Virtual grating moiré fringe method; PZT phase-shifter

Wu Xuhua was born in 1977. She received the M. S degree in astrophysics from National Astronomical observatories /Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy Sciences, Nanjing in 2003. She is pursuing the Ph. D degree in optical engineering at Nanjing University of Science and Technology. Her current research interest is optical testing.

