

同步移相干涉测试中的系统误差校正

李 博 陈 磊 李金鹏 李 燕

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 相比于传统的时域移相干涉术(TPSI),同步移相干涉术(SPSI)能够抵抗振动等时变干扰因素的影响,但其普遍采用的分光 and 偏振移相结构给测试系统引入了新的误差。提出一种系统误差校正方法,在同步移相测试系统中将球面被测件离焦得到圆载频干涉图,使用圆载频处理技术获得每步移相干涉图的能量和相位信息,为引导对系统中的分光不一致、移相量不准确、干涉图空间位置不匹配三项重要的系统误差进行独立校正,各项误差之间不会相互干扰。该方法的可行性通过数值仿真和实验进行了验证,可用于所有采用分光结构的同步移相干涉系统。

关键词 测量;同步移相;系统误差;圆载频

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s108002

Systematical Errors Correction of the Simultaneous Phase Shifting Interferometry

Li Bo Chen Lei Li Jinpeng Li Yan

(School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Contrast to the traditional temporal phase shifting interferometry (TPSI), the simultaneous phase shifting interferometry (SPSI) immune to the time variant error sources such as the vibration but suffers from some new systematical errors caused by the light splitter and polarization phase shifting structures adopted in most SPSI systems. A method is proposed to correct the systematical error in the SPSI, which tests a spherical surface in the SPSI system and obtains the circular carrier interferograms by defocusing, then the power and phase information of each phase shifting interferogram can be calculated using the demodulation method of circular carrier. Guided by these information the systematical errors containing the light splitter, the inaccurate phase shift and the mismatch of interferograms can be corrected respectively. This method is validated by the numerical simulations and experiments, which is suitable for all the SPSI system with light splitter structure.

Key words measurement; simultaneous phase shifting; systematical error; circular carrier

OCIS codes 050.1950; 120.3940; 120.5050

1 引 言

同步移相干涉(SPSI)技术,有时也被称作动态干涉技术或空域移相干涉技术,能够于同一时刻在空间的不同位置采集到一系列具有固定相位差的干涉图并恢复被测相位。因此,相比于时域移相干涉技术,该技术可以抵抗振动等时变干扰因素造成的误差,并且能够对动态过程进行测试^[1~10]。

SPSI 术长期以来受到研究者的关注,许多方案相继被提出。这些方案可以被分为两类,第一类

通过分光器件得到数组参考光和测试光,在每一组之间通过偏振器件引入不同的相位差^[1~9],分光器件包括分光镜^[7~9]、一维光栅^[1]和二维正交光栅^[4,5]等。第二类方案则是利用像素掩膜技术在条纹图的相邻像素之间产生固定相位差^[10]。

在第一类方案中,均存在以下三项显著的系统误差:1)分光比例误差,由于分光器件的分光比例或者探测器响应的不一致,导致各移相干涉图的背景光强不同,在棱镜分光和多探测器采集干涉图的方

收稿日期: 2011-07-21; 收到修改稿日期: 2011-08-31

作者简介: 李 博(1985—),男,博士研究生,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: 542134007@qq.com

导师简介: 陈 磊(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: chenleiy@126.com

案中尤为明显^[3]; 2) 位置匹配误差, 由于系统中得到的一系列移相干涉图在空间上是相互分离的, 其相对空间位置关系未知, 会引起位置匹配误差; 3) 移相误差, 由于引入移相量的偏振器件的制造(如波片的延迟量)和装调(如偏振片的方向角)可能存在误差, 导致各幅干涉图之间的移相量偏离理想值。而第二类方案中, 虽避免了分光比例误差, 移相量精度也能控制在很高的水平, 但像素掩膜器件的制作成本远高于第一类方案; 而在位置匹配误差方面, 尽管各干涉图像素之间具有唯一对应关系, 不需要进行标定计算, 但由于具有移相关系的是空间位置上的相邻像素而非同一个像素, 所以实际上存在着 x 或 y 方向恒定为 1 个像素的位置匹配误差^[11,12]。

对于第一类 SPSI (采用分光结构) 的方案, Kujawinska 等^[2,6,13] 综合分析了该类系统中各类误差对于相位恢复计算的影响。一些研究者提出以迭代法和线性载频干涉图校正移相量误差^[8,14], 然而, 在没有校正位置匹配误差的情况下, 移相量的计算精度将受到显著影响^[6]。还有一些研究者则提出了位置匹配误差的解决方案, 但主要采用了基于图像灰度的相关运算, 如 Kiire 等^[8] 通过取出特定器件使同步移相干涉图的四幅子图之间的相位差为 0, 即四幅图具有相似的灰度分布, 之后使用互相关运算确定各幅子图之间的位置匹配关系。而 Chen 等^[9] 则直接在分光前的光路中加入目标, 由于分光后各成像器件均对该目标成像, 因此同样可用相关运算计算位置匹配关系。这类方法依赖于图像灰

度, 可靠性容易受到成像质量、分光比例误差等因素的干扰, 且有些方法只能用于特定结构。

本文针对采用分光结构的 SPSI 方案, 提出一种通用的系统误差校正方法。该方法使用一个球面被测件得到圆载频干涉图(离焦干涉图), 通过圆载频处理技术得到每幅子图的基频能量和相位信息, 以基频能量信息校正分光比例误差, 并通过各子图之间的相位差校正位置匹配误差和移相量误差。

2 原理与算法

2.1 SPSI 的系统误差

一种典型的 SPSI 系统如图 1(a) 所示, 偏振方位角 45° 的准直光经偏振分光棱镜分光后, p 光和 s 光经分别被测件与经参考镜反射而产生相位差 φ , φ 反映了被测件的面形。这一对正交回射光束被二维光栅衍射, 分出多个衍射级次的光线, 利用光阑取得其中四路($\pm 1, \pm 1$)级衍射光, 并使四路光分别经过一个波片组的四个象限, 四象限分别为平板玻璃、 $\lambda/4$ 波片、 $\lambda/2$ 波片和 $3\lambda/4$ 波片(快轴方向均与 s 光方位角一致), 因而在 p 光(此时为参考光)与 s 光(此时为被测光)之间引入的相位差分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$, 最后经过检偏器, 由 CCD 同时采集到四幅相位依次差 90° 的干涉图, 如图 1(b) 所示, 每幅子图均为移相干涉图的一帧, 其表达形式与一般时域移相干涉(TPSI)图相同, 即

$$I_n(x, y) = A + B\cos[\varphi(x, y) + \delta_n], \quad (1)$$

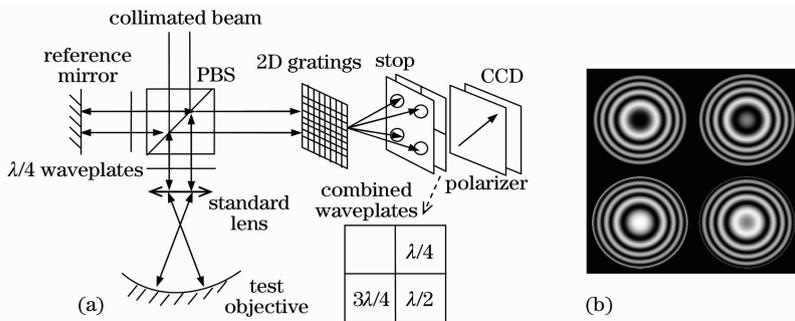


图 1 典型的 SPSI 系统结构示意图(a)及 SPSI 图(b)

Fig. 1 Layout of a typical SPSI system (a) and the SPSI (b)

式中 A 为平均光强, B 为条纹对比度, φ 为被测相位, δ_n 为第 n 幅移相干涉图对应的移相量。 $\varphi(x, y)$ 可表示为

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin \delta_n}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos \delta_n} \right]. \quad (2)$$

SPSI 系统虽然方案众多, 但所有采用分光结构的方案都具有以下特征: 将参考光与测试光分为数支光路, 在每支光路中用偏振器件引入不同移相量, 于不同空间位置得到一系列移相干涉图。也因此引入了分光比例、移相量和位置匹配的误差, 使系统得到的移相干涉图不再是(1)式的理想值 I_n , 而可表

示为

$$I'_n(x, y) = R_n \{ A + B \cos[\varphi(x + \Delta x_n, y + \Delta y_n) + \delta'_n] \}, \quad (3)$$

式中 R_n 是由分光比例非均匀造成的每幅干涉图之间不同的整体光强系数, δ'_n 是偏离于理想移相量 δ_n 的实际移相量, Δx_n 和 Δy_n 是第 n 幅干涉图在 x 方向和 y 方向的位置匹配误差。如果把含有误差的移相干涉图 I'_n 当作理想值 I_n 代入(2)式计算相位, 则必然影响到相位恢复精度, 因此本文提出以圆载频干涉图校正以上系统误差的方法。

2.2 圆载频干涉图校正系统误差

圆载频干涉图是一种近似于同心圆环状的条纹图, 如图 2(a) 所示, 在任何干涉系统中通过将球面被测件离焦均可以得到圆载频干涉图。圆载频干涉图的表达形式与(1)式相同, 但其中相位 φ 改写为

$$\varphi(x, y) = D(x^2 + y^2) - \varphi_0(x, y), \quad (4)$$

式中 φ_0 为不包含离焦量的原始相位, D 为圆载频系数。通过圆载频干涉图的傅里叶变换处理技术, 可以解调出干涉图 I'_n 的背景光强 $R_n A$, 以及每一幅干涉图的相位 φ_n 。前者可直接用于校正分光比例误差, 而由后者可以进一步得到任意两幅移相干涉图之间的相位差

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{mn}(x, y) &= \varphi_m(x, y) - \varphi_n(x, y) \approx \\ &\left(2D + \frac{\partial\varphi_0}{\partial x} \right) (\Delta x_n - \Delta x_m) x + \\ &\left(2D + \frac{\partial\varphi_0}{\partial y} \right) (\Delta y_n - \Delta y_m) y + \delta_n - \delta_m, \end{aligned} \quad (5)$$

这里使用了一阶近似。引入圆载频后, 干涉图条纹圆心附近以外的部分, 载频项的局部空间频率远大于原始相位 φ_0 , 即

$$\begin{cases} |2Dx| \gg \left| \frac{\partial\varphi_0}{\partial x} \right|, \text{ if } |x| > L_x \\ |2Dy| \gg \left| \frac{\partial\varphi_0}{\partial y} \right|, \text{ if } |y| > L_y \end{cases} \quad (6)$$

式中正整数 L_x, L_y 界定了圆条纹中心附近的邻域, 由于并不需要知道完整的相位分布, 可以在后续计算中去掉这一部分的数据, 因此可以忽略(5)式中 φ_0 的空间频率分量。此外, 以第 m 幅移相干涉图的空间位置作为基准, 即令 $\Delta x_m = 0, \Delta y_m = 0$, 则(5)式可简化为

$$\Delta\varphi_{mn}(x, y) \approx 2D\Delta x_n x + 2D\Delta y_n y + \delta_n, \quad (7)$$

由(7)式可知, 在 SPST 系统中引入离焦后, 各移相干涉图之间的相位差可以近似为一个平面, 其 x 方向和 y 方向的斜率与匹配误差 Δx_n 和 Δy_n 成正比的平面方程。因此, 对两幅圆载频移相干涉图的相位之

差拟合平面方程, 当该平面的斜率最小时, 即可判定两幅干涉图之间的位置偏差为零。计算步骤为, 利用圆载频干涉图处理技术获得第 m 幅和第 n 幅移相干涉图的相位, 通过简单的预处理可以将两幅图的相位进行粗略的位置匹配, 预处理方法可以采用遮挡参考光或测试光使干涉条纹消失, 成为 4 个光斑, 将图像二值化求取 4 个光斑的质心, 可得到任意两个子图像之间大致的相对位置关系。该项处理的结果通常包含几个像素的位置匹配误差。因此, 设定 $\xi \in (-\beta, \beta), \eta \in (-\beta, \beta), \beta$ 为位置匹配误差最大可能值的常数, 对于 $300 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$ 的移相干涉图, 一般取 5 足够。之后, 对于每一组给定的 ξ, η , 求取第 m 幅与第 n 幅干涉图之间的相位差 $\Delta\varphi_{mn}(x - \xi, y - \eta)$, 并按目标函数求解最小二乘方程组

$$\sum_{x, y \in L} [\Delta\varphi_{mn}(x - \xi, y - \eta) - a_1 x - a_2 y - a_3]^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

得到一组系数 a_1, a_2, a_3 , 并由

$$(\Delta x_n, \Delta y_n) = \arg \min_{\xi, \eta} (\sqrt{a_1^2 + a_2^2}) \quad (9)$$

确定 Δx_n 和 Δy_n , 其中符号 $\arg \min$ 表示能够使 $\sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ 取得最小的一组参数 ξ, η 。

求取 Δx_n 和 Δy_n 后, 重新对两幅干涉图进行位置匹配消除误差, 由(7)式可知, 当 Δx_n 和 Δy_n 为 0 时, 相位差 $\Delta\varphi$ 为常数, 且等于两幅图之间的实际移相量, 即

$$\delta'_n = a_3, \text{ if } \Delta x_n = \Delta y_n = 0 \quad (10)$$

此时标定实际移相量, 则不会像文献[8, 14]中直接令相位相减的方法一样受到像素匹配误差的影响。

2.3 圆载频干涉图的处理方法

2.2 节使用圆载频干涉图的能量和相位信息实现对 SPST 系统误差的标定, 本节介绍提取这些信息的方法。

$$I_n = R_n A + \frac{R_n B}{2} \exp(i\varphi) + \frac{R_n B}{2} \exp(-i\varphi), \quad (11)$$

因此对(11)式作低通滤波, 即可得到能量信息 $R_n A$, 从而对各幅子图的分光比例误差 R_n 进行标定。

$$R_n A = \text{FT}(I_n) g_1(u, v), \quad (12)$$

式中 FT 表示二维傅里叶变换, g_1 为滤波窗函数, u, v 为频域坐标。而对 I_n 的频谱作半侧带通滤波可以重构干涉图的相位^[15]

$$Z_{\text{Re}}(x, y) + iZ_{\text{Im}}(x, y) =$$

$$\begin{cases} \frac{b}{2} \cos[i\varphi(x, y)] + i \frac{b}{2} \sin[i\varphi(x, y)], & \text{if } \frac{\partial \varphi}{\partial y} \geq 0 \\ \frac{b}{2} \cos[i\varphi(x, y)] - i \frac{b}{2} \sin[i\varphi(x, y)], & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

式中 $Z_{\text{Re}}(x, y) + iZ_{\text{Im}}(x, y) = \text{FT}(I_n)g_2(u, v)$ 。之后通过反正切运算恢复相位

$$\varphi_e = \arctan\left[\frac{Z_{\text{Im}}(x, y)}{Z_{\text{Re}}(x, y)}\right]. \quad (14)$$

图 2(b)以一维形式显示了图 2(a)圆载频干涉图的频谱,以及两个滤波窗函数 g_1 、 g_2 。由(14)式恢复的相位在空间频率为正的半侧等于原始相位,而在另外半侧为原始相位的共轭,即具有相位符号不确定性^[15],其包裹相位的分布如图 2(c)所示。由

于圆载频的存在,符号突变位置在图像上接近于直线分布,可使用边缘检测技术探测其位置并将半侧相位符号取负值,即可消除符号不确定。图 2(c)的符号跃变位置处,因 y 方向的空间频率低,相位重构误差较大,可以通过对干涉图频谱作 x 方向的半侧带通滤波得到一个在 x 方向存在符号跃变的重构相位,并综合两个相位结果以改善重构精度^[16]。然而,在条纹圆心附近,由于 x 和 y 方向的局部空间频率都很低,滤波损失不可避免,使得该处的恢复相位存在失真。但求解(8)式的最小二乘方程组并不需要完整的相位数据,因此在校正位置匹配误差和移相量误差时排除这一部分数据即可。

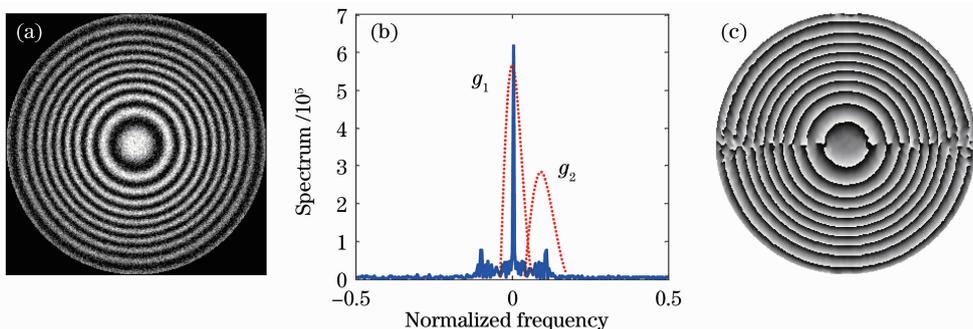


图 2 圆载频干涉图(a)及其中间一行数据的频谱(b)、含有符号不确定的包裹相位(c)

Fig. 2 Circular carrier interferogram (a) spectra of its one column (b) and wrapped phase with sign ambiguity (c)

3 仿真与实验结果

使用如图 3(a)所示的仿真干涉图验证算法,图中包括两幅相位差 90° 的圆载频干涉图,其光强比例为 0.6:1.0。每幅干涉图包含了各自最大光强幅值 15% 的随机噪声,且光强幅值被设定为高斯分布,边缘幅值约为中心处的一半。

由(12)式计算光强比例,结果为 0.615:1.000,与预设值接近。利用圆载频干涉图处理技术得到两个相位解调相位,计算不同像素匹配误差下两者的相位差,其中相位差 $\Delta x = \Delta y = 5$ 时的相位差如图 3(b)所示,条纹圆心附近误差较大的数据被排除,可以看出相位差分布接近于一个斜面,与(7)式预言的结果一致。对相位差数据按照(8)式的最小二乘方程组拟合平面,可以得到其线性项,对于每一组 $\{\Delta x, \Delta y\} \in [-5, 5]$ 均计算其线性项系数大小,其分布如图 3(c)所示,其数值随位置匹配误差 Δx 和 Δy 的增大而递增,并且在匹配误差为零时取得最小值,因此可以证明通过一对圆载频移相干涉图的相位差可以准确地标定出 SPSI 系统的位置匹配误差。位置匹配误差为

零时,根据(10)式可得到移相量计算结果 94.45° ,同样与预设值吻合较好。至此三项系统误差的标定都得到了验证。

在图 1(a)所示的实验系统中获取同步移相干涉图,如图 4(a)所示,被测件是一个曲率半径 100 mm、口径 50 mm 的反射球面。简洁起见,取其中两幅移相干涉图按照上述方法标定其系统误差。通过手动或自动的方式粗略地确定两幅子图的空间位置关系,在图 4(a)中用白色方框标识出,对这两幅圆载频干涉图按上述方法进行标定,其相位差的线性项系数值随 x 和 y 方向偏移量的变化情况如图 4(b)所示,根据线性项的最小值位置,可知位置匹配误差为: $\Delta x = 0, \Delta y = 1$ 。之后,根据(10)式得两幅图的相位差 -111.17° ,两幅图之间存在较大的移相误差。而两幅图之间的光强比例为 1.027:1.000,可见,由于系统中利用二维光栅的同衍射级次实现分光,以及单个 CCD 采集干涉图,故能够得到均匀度很高的分光比例。

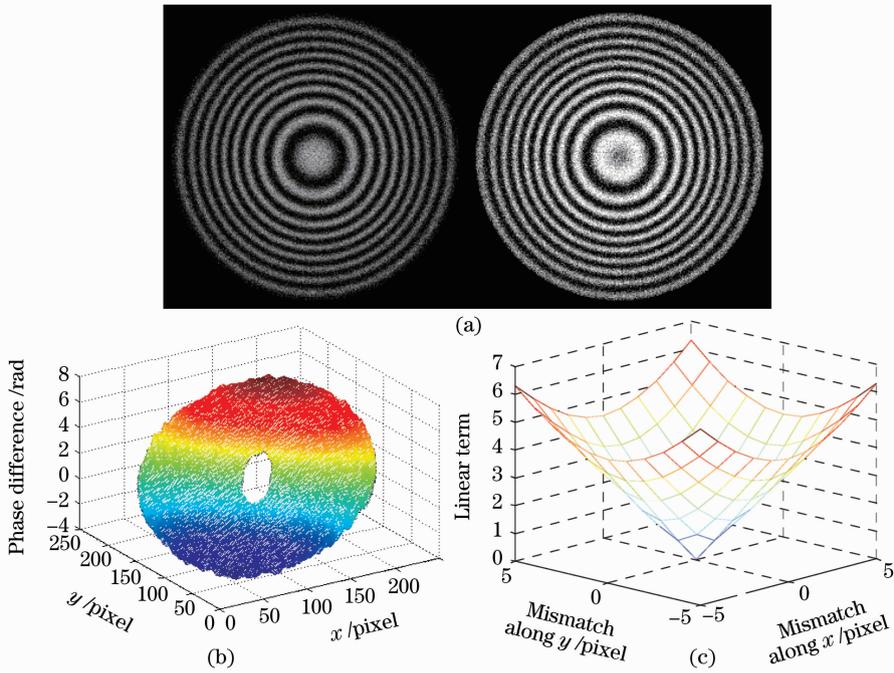


图 3 仿真干涉图(a), 相位差(b)及不同像素匹配误差对应的相位差线性项大小(c)

Fig. 3 Simultaneous interferograms (a), their phase difference (b) and linear term under different mismatches (c)

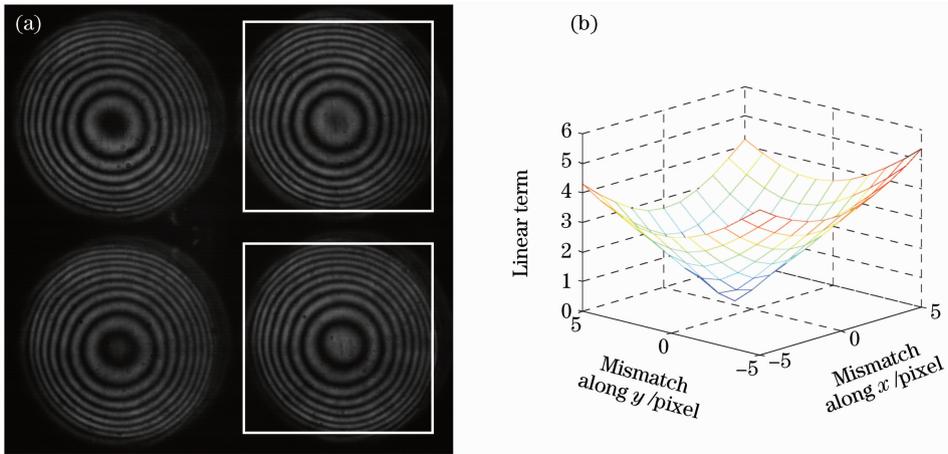


图 4 实验干涉图(a)和其中两幅子图的位置匹配误差标定结果(b)

Fig. 4 Actual interferograms (a) and mismatch calibration result of two interferograms (b)

4 结 论

提出利用圆载频干涉图校正采用分光结构的SPSI系统中存在的三项系统误差,即:分光比例误差、干涉图位置匹配误差和移相量误差。在SPSI系统中,通过将球面被测件离焦得到包含圆载频的同步移相干涉图,计算每幅子图(移相干涉图)的基频能量和相位信息。利用每幅图的基频能量校正分光比例误差,并根据两幅子图之间相位差的线性项系数大小标定位置匹配误差;当校正好位置匹配误差后,相位差即可正确地反映出两幅干涉图之间的移相量,实现对移相量误差的标定。通过仿真干涉

图和实验采集的干涉图验证了算法的可行性。该方法可用于所有采用分光结构的SPSI系统,提升系统的测试精度。

参 考 文 献

- 1 Osuk Y, Kwon. Multichannel phase-shifted interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(2): 59~61
- 2 M. Kujawinska, D. W. Robinson. Multichannel phase-stepped holographic interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27** (2): 312~320
- 3 Chris L. Koliopoulos. Simultaneous phase shift interferometer [C]. *SPIE*, 1992, **1531**: 119~127
- 4 Qian Kemao, Miao Hong, Wu Xiaoping. A real time polarization phase shifting technique for dynamic measurement [J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 64~67
- 钱克矛, 缪 泓, 伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 64~67
- 5 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chunsheng. Simultaneous phase-shifting interferometry based on two-dimension grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 263~267
- 左 芬, 陈 磊, 徐春生. 基于二维光栅分光的同步移相干涉测量技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 263~267
- 6 Qian Kemao, Wu Xiaoping, Anand Asundi. Grating-based real-time polarization phase-shifting interferometry error analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(13): 2448~2453
- 7 Hagyoung Kihm, Seung-Woo Kim. Fiber-diffraction interferometer for vibration [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2059~2061
- 8 Tomohiro Kiire, Suezou Nakadate, Masato Shibuya. Phase-shifting interferometer based on changing the direction of linear polarization orthogonally [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(21): 3784~3788
- 9 Terry Yuan-Fang Chen, Yi-Liang Du. One-shot surface profile measurement using polarized phase-shifting [C]. *SPIE*, 2009, **7511**: 751102
- 10 James Millerd, Neal Brock, John Hayes *et al.*. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[C]. *SPIE*, 2004, **5531**: 304~314
- 11 Bradley T. Kimbrough. Pixelated mask spatial carrier phase shifting interferometry algorithms and associated errors [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(19): 4554~4562
- 12 M. Servin, J. C. Estrada, O. Medina. Fourier transform demodulation of pixelated phase-masked interferograms[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 16090~16095
- 13 Soo-Gil Kim. Phase error analysis in polarization phase-shifting technique using a Wollaston prism and wave plates[J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2005, **9**(4): 145~150
- 14 Y. J. Yu, J. Peng, Z. Q. Wang. Spatial phase-shifting interferential system on polarization interference and grating beam-splitting; phase-shifting error testing[J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2006, **48**(1): 992~997
- 15 Jorge García-Marquez, Daniel Malacara-Hernandez, Manuel Servin. Analysis of interferograms with a spatial radial carrier or closed fringes and its holographic analogy[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(34): 7977~7982
- 16 Bo Li, Lei Chen, Jiang Bian *et al.*. A demodulation method for the circular carrier interferogram using phase stitching[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2011, **49**(9-10): 1118~1122

栏目编辑:何卓铭