

相位掩模空间载波干涉图的傅里叶分析

徐建程¹ 杜雅薇² 许 乔² 彭保进¹ 吴跟柱¹

(¹ 浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)
(² 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要 相位掩模空间载波干涉图的处理精度直接影响着动态干涉仪的性能。根据相位掩模的特点,提出了一种基于傅里叶分析的相位掩模空间载波干涉图的处理方法。该方法将采集得到的全分辨率干涉图进行像素空间重组得到一幅线性空间载波干涉图,然后采用傅里叶变换提取相位,最后再通过像素空间重组得到全分辨率的相位信息。实验结果表明,四步相移算法相位误差的峰谷值和均方根值分别为 0.7467λ 和 0.0348λ ,而傅里叶分析法相位误差的峰谷值和均方根值分别为 0.2989λ 和 0.0088λ ,因此傅里叶分析法的精度高于四步相移算法。

关键词 测量;条纹分析;相位掩模;空间载波相移;傅里叶分析

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0512004

Fourier Analysis of Phase-Masked Spatial Carrier Interferogram

Xu Jiancheng¹ Du Yawei² Xu Qiao² Peng Baojin¹ Wu Genzhu¹

(¹ Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)
(² Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract The process accuracy of phase-masked spatial carrier interferogram is related to the performance of the dynamic interferometer. According to the property of the phase mask, a method based on Fourier transform is proposed to extract the phase from the phase-masked spatial carrier interferogram. The method translates the full-resolution interferogram into a linear spatial carrier interferogram by pixel rearrangement, and then extracts the final full-resolution phase distribution by Fourier transform and pixel rearrangement again. Experimental results show that the peak-valley value and the root mean square of four-step phase shifting algorithm are 0.7467λ and 0.0348λ respectively, while those of the proposed method are 0.2989λ and 0.0088λ . Thus the proposed method is more accurate than four-step phase shifting algorithm for analyzing phase-masked spatial carrier interferogram.

Key words measurement; fringe analysis; phase mask; spatial carrier phase shifting; Fourier analysis

OCIS codes 120.3180; 120.2650; 120.5050

1 引 言

时域相移干涉测量(PSI)^[1]因为测量精度高在光学检测中得到广泛的应用,但它至少需要三幅干涉图,受环境振动影响大,所以不适合动态测量。傅里叶分析法^[2]只需要一幅空间载波干涉图、适合动态测量,但测量精度相对较低且不能判断被测相位的正负。而空间载波相移法(SCPS)^[3]结合了时域相移干涉测量法和傅里叶分析法的优点,即通过处理单幅空间载波干涉图近似达到时域相移法的精

度。目前实现空间相移的方法主要有两种:1)通过倾斜参考镜引入一个适当的空间载频量^[4],使相邻像素点间的位相差为 $\pi/2$,但是通常很难使空间载频严格等于理论值。2)利用偏振分光器件在同一个 CCD 上得到四幅相移 $\pi/2$ 的干涉图^[5~7],如美国 4D 公司研制的基于相位掩模的动态干涉仪^[7]。该系列干涉仪在同一个 CCD 上产生四幅相移 $\pi/2$ 的干涉图,然后利用传统的四步相移算法求得被测相位。这种计算方法是假设相邻像素间的相移值是恒定的

收稿日期: 2010-09-20; 收到修改稿日期: 2011-01-06

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y1110125, Y1100041)资助课题。

作者简介: 徐建程(1981—),男,博士,讲师,主要从事信息光学和精密光学检测等方面的研究。

E-mail: xujiancheng@zjnu.cn

常数,然而,相邻像素间的相移值包含相位掩模和被测相位在相邻像素间引入的相移值,只有当被测相位的变化幅度非常小时相邻像素间的相移值才能近似为常数^[8]。如果被测相位变化幅度较大,或者被测相位和参考相位间有较大的倾斜时,则四幅相移干涉图间的相移值不严格等于 $\pi/2$,此时四步相移算法将会产生较大的误差^[9]。为了实现偏振相移,动态干涉仪采用的是相干光源,因此得到的干涉图中常带有较严重的散斑噪声^[10],而四步相移算法对散斑噪声较敏感,从而限制了干涉测量的精度。另外,四步相移算法求得的相位分辨率只是 CCD 有效分辨率的一半^[10],从而限制了干涉测量的有效分辨率。因此采用四步相移算法处理相位掩模空间载波干涉图具有一定的局限性。根据相位掩模空间载波干涉图的特点,本文提出了相位掩模空间载波干涉图的傅里叶分析方法,即通过像素空间重组生成一幅线性空间载波干涉图,然后利用傅里叶分析得到被测相位。

2 四步相移算法

基于相位掩模的动态干涉仪^[10],其核心是在

CCD 前放置一个相位掩模板(微偏振阵列),使 CCD 上四个相邻像素的相移值分别为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$,如图 1(a)所示,最后 CCD 上采集得到的全分辨率干涉图如图 1(b)所示,其光强可表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \varphi_{\text{mask}}(x, y)], \quad (1)$$

式中 $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 分别表示干涉条纹在像素位置 (x, y) 处的背景光强和调制度, $\varphi(x, y)$ 和 $\varphi_{\text{mask}}(x, y)$ 分别表示被测相位和相位掩模板产生的相位分布。

图 1(a)所示的 4 pixel (2×2) 组成一个超级像素。四步相移算法是假设 $a(x, y), b(x, y)$ 和 $\varphi(x, y)$ 在同一个超级像素里为常数,然后将 $\varphi_{\text{mask}}(x, y)$ 值为 0 的所有像素组成子干涉图 $I_1(x, y)$,将 $\varphi_{\text{mask}}(x, y)$ 值为 $\pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 的所有像素分别组成子干涉图 $I_2(x, y), I_3(x, y)$ 和 $I_4(x, y)$,从而得到了四幅相移 $\pi/2$ 的干涉图,如图 1(c)所示。根据传统的四步相移算法可得被测相位^[10]

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_2(x, y) - I_4(x, y)} \right]. \quad (2)$$

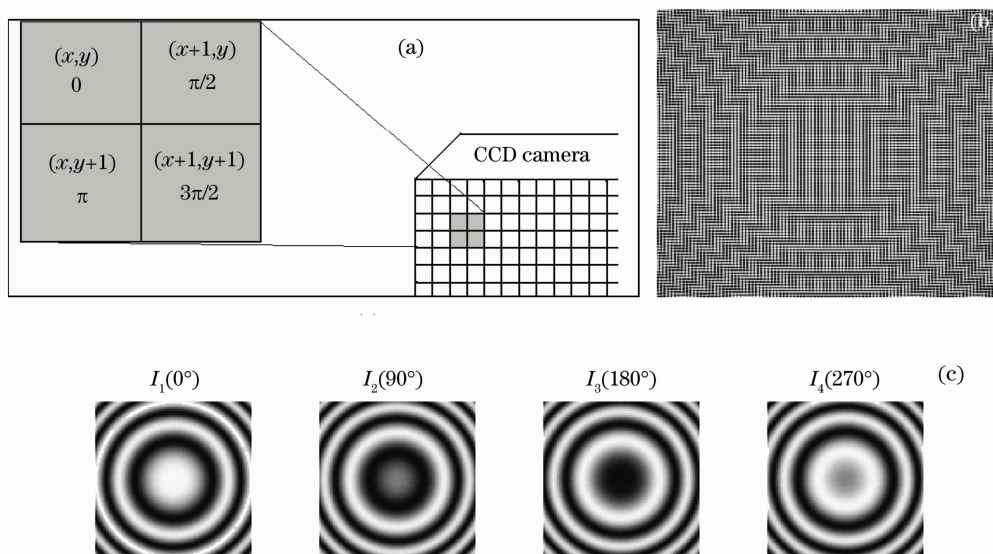


图 1 四步相移算法分析相位掩模空间载波干涉图的原理图。(a)相位掩模板,(b)全分辨率干涉图,(c)四帧相移干涉图
Fig. 1 Schematic diagram of analysis of phase-masked spatial carrier interferogram by four-step phase shifting algorithm.

(a) phase mask, (b) full-resolution interferogram in CCD, (c) four phase-shifted interferograms

然而只有当 $\varphi(x, y)$ 的变化幅度非常小时, $\varphi(x, y)$ 在一个超级像素里才能近似为常数,如果 $\varphi(x, y)$ 变化幅度较大,或者 $\varphi(x, y)$ 具有较大的倾斜,则四幅相移干涉图间的相移值将不等于 $\pi/2$,此时四步相移算法将会产生较大的误差^[9,10]。另外由图 1(b)和(c)可知,求得相位的横向分辨率只为 CCD 有效分辨率的一半,即四步相移算法不能充分

利用 CCD 的有效分辨率。

3 傅里叶分析法

傅里叶分析法^[2]是空间载波干涉图的常用分析方法,为了应用傅里叶分析,将图 1(c)所示的四幅相移干涉图(即 I_1, I_2, I_3 和 I_4)转化为一幅线性空

间载波干涉图,其方法如下

$$\begin{cases} I_c(4x-3, y) = I_1(x, y) \\ I_c(4x-2, y) = I_2(x, y) \\ I_c(4x-1, y) = I_3(x, y) \\ I_c(4x, y) = I_4(x, y) \end{cases}, \quad (3)$$

其中 $(1, 1) \leq (x, y) \leq (M/2, N/2)$ 。 I_c 表示重构的线性空间载波干涉图,其像素个数为 $2M \times N/2$,如图 2(a) 所示,其中 M 和 N 分别表示 CCD 在 x 和 y 方向的有效像素个数。对 I_c 进行傅里叶变换得到其频谱图如图 2(b) 所示,其表达式为

$$F(u, v) = A(u, v) + C(u - u_0, v) + C(u + u_0, v), \quad (4)$$

式中 $A(u, v)$ 是背景光强 $a(x, y)$ 的频谱; $C(u, v)$ 是 $b(x, y)\exp[i\varphi(x, y)]/2$ 的频谱; u_0 是空间载波频率,它约为图 2(a) 的奈奎斯特频率,即位于零频和 CCD 采样频率的中心,如图 2(b) 所示。通常情况下

$A(u, v)$ 和 $C(u, v)$ 的主要信息集中在低频区域,其频率远小于 u_0 ,而且 I_c 的相位是随着 x 线性增加的,其频谱中心位于 $+u_0$ 处,因此很容易采用低通滤波器(如 Hanning 窗)获得 $C(u - u_0, v)$ 。再将 $C(u - u_0, v)$ 移到零频位置后进行逆傅里叶变换即可得到 $b(x, y)\exp[i\varphi(x, y)]/2$,最后通过反正切函数^[2]即可得到相位 $\varphi_c(x, y)$,如图 2(c) 所示, $\varphi_c(x, y)$ 是线性空间载波干涉对应的相位,其像素分布为 $2M \times N/2$,通过像素空间重组:

$$\begin{cases} \varphi(x, y) = \varphi_c(4x-3, y) \\ \varphi(2x, y) = \varphi_c(4x-2, y) \\ \varphi(x, 2y) = \varphi_c(4x-1, y) \\ \varphi(2x, 2y) = \varphi_c(4x, y) \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $(1, 1) \leq (x, y) \leq (M/2, N/2)$,即可得到被测相位 $\varphi(x, y)$,其像素分布为 $M \times N$,与 CCD 的有效像素一致。

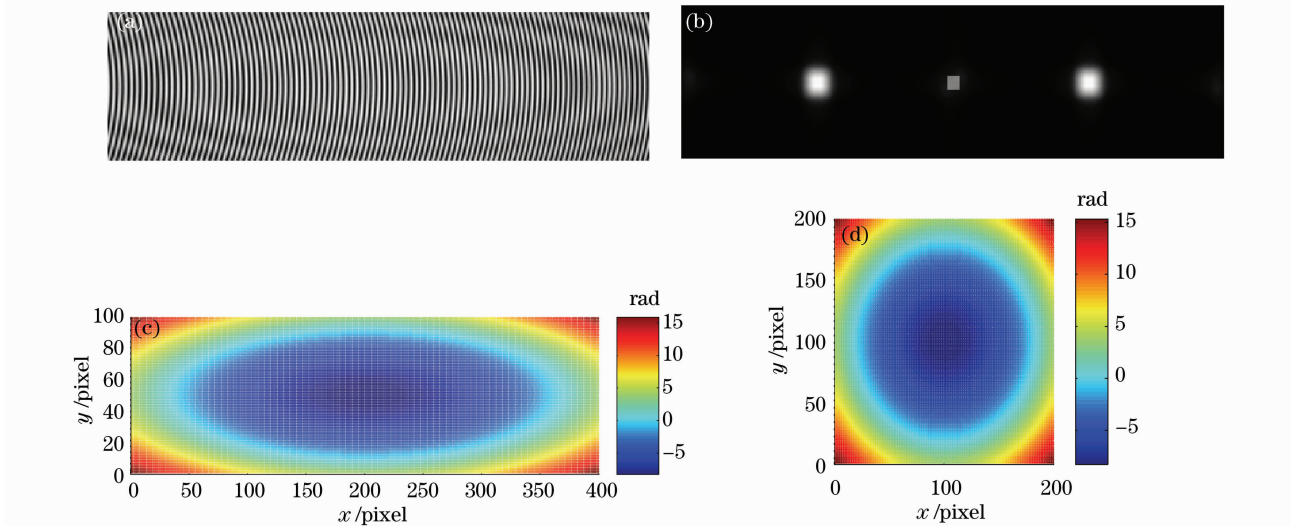


图 2 傅里叶分析相位掩模空间载波干涉图的原理图。(a)线性空间载波干涉图,(b)空间频谱,(c)提取的相位分布,(d)最后得到的相位分布

Fig. 2 Principle of Fourier analysis of phase-masked spatial carrier interferogram. (a) linear spatial carrier interferogram, (b) spatial spectrum of (a), (c) extracted phase of (a), (d) final obtained phase

4 实验与讨论

用美国 4D Technology 生产的 FizCam2000 干涉仪测量平面光学元件,该元件的尺寸约为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。CCD 上采集得到的干涉图(有效数据)如图 3(a) 所示,其像素分布为 $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$;根据相位掩模的特点得到四幅相移值约为 $\pi/2$ 的子干涉图如图 3(b) 所示,每幅子干涉图的像素分布为 $300 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$;根据(3)式得到线性空间载波干涉图如图 3(c) 所示,其像素分布为 $300 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ 。若采用四步相移算法得到

该元件的面形分布如图 3(d) 所示,采用傅里叶分析法对图 3(c) 进行处理得到最后的面形分布如图 3(e) 所示。同时我们用 ZYGO 公司的 VeriFire ATTM 干涉仪测得该元件面形作为其真实值的参考值,其结果如图 3(f) 所示。上述三种方法求得的相位分布的峰谷(PV)值和均方根(RMS)值如表 1 所示。

由图 3(d)~(f)和表 1 可知,四步相移算法求得的相位分布带有较严重的随机噪声,其 PV 值和 RMS 值与参考值的偏离量分别是 0.3427λ 和 0.0016λ ,其中 $\lambda = 632 \text{ nm}$;傅里叶分析法求得的相

位比较光滑,其分布与图 3(f)更接近,其 PV 值和 RMS 值与参考值的偏离量分别 0.0583λ 和 0.0006λ 。另外,分别将图 3(d)和(e)减去图 3(f)定义为四步相移算法和傅里叶分析法的相位误差分布,其一维分布分别如图 3(g)和(h)所示。通过计算得到四步相移

算法相位误差的 PV 值和 RMS 值分别为 0.7467λ 和 0.0348λ ;而傅里叶分析法相位误差的 PV 值和 RMS 值分别为 0.2989λ 和 0.0088λ ,均小于四步相移算法的相位误差。这说明了傅里叶分析法的精度高于四步相移算法。

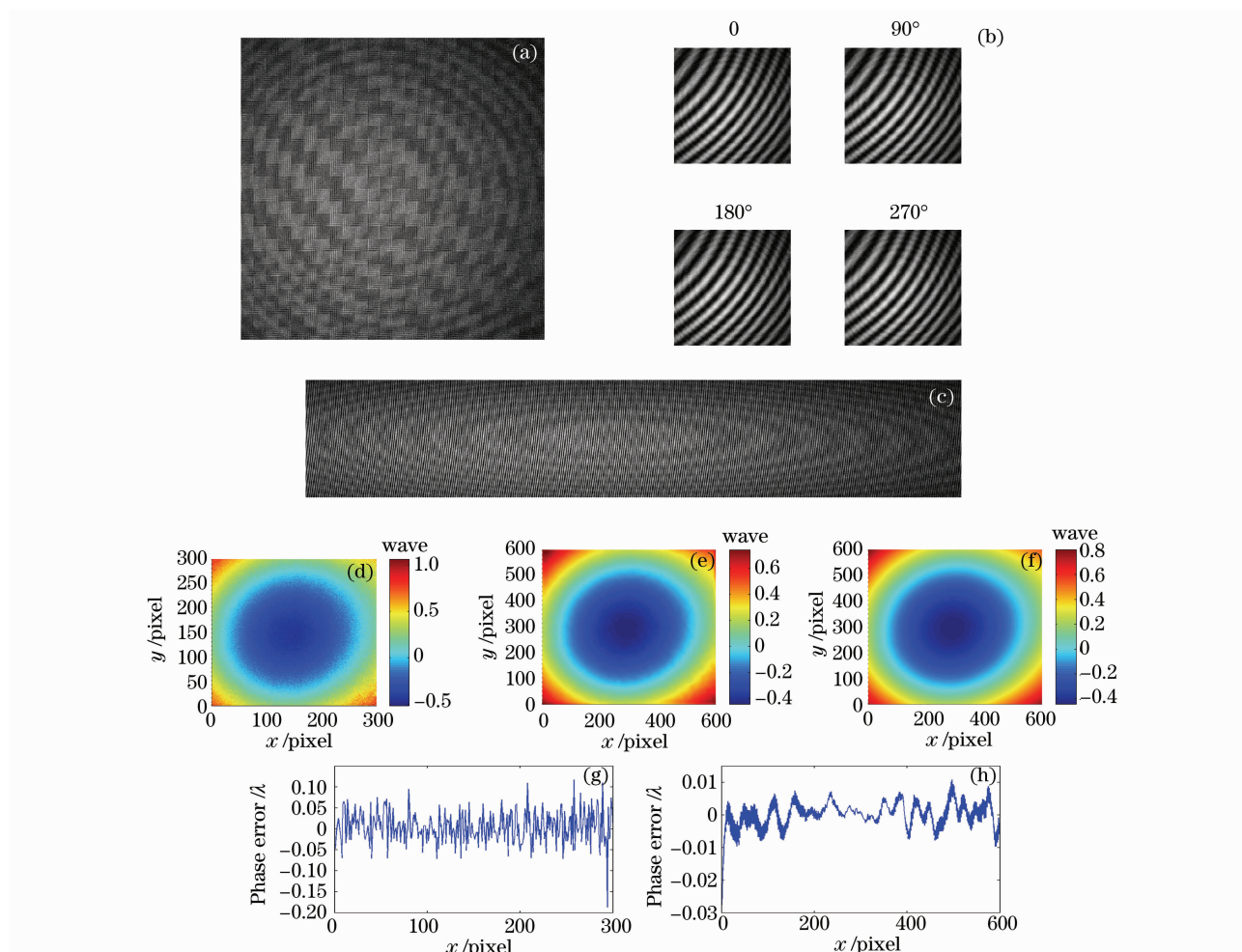


图 3 四步相移算法和傅里叶分析法的对比实验。(a)全分辨率干涉图,(b)四帧相移子干涉图,(c)线性空间载波干涉图,(d)四步相移算法得到的相位,(e)本文算法得到的相位,(f)Zygo 干涉仪测得的相位,(g)四步相移算法的相位误差,(h)本文算法的相位误差

Fig. 3 Experimental comparison between four-step phase shifting algorithm and Fourier analysis method. (a) full-resolution interferogram, (b) four phase-shifted interferograms, (c) linear spatial carrier interferogram, (d) phase by four-step phase-shifting algorithm, (e) phase by Fourier analysis method, (f) phase by Zygo interferometer, (g) phase error of four-step phase-shifting algorithm, (h) phase error of Fourier analysis method

表 1 四步相移算法和傅里叶分析法求得相位的比较

Table 1 Comparison between the phases obtained by four-step phase shifting algorithm and Fourier analysis method

	Four-step	Fourier analysis	ZYGO	Phase error of four-step	Phase error of Fourier analysis
PV / λ	1.6070	1.2060	1.2643	0.7467	0.2989
RMS / λ	0.2697	0.2675	0.2681	0.0348	0.0088

由图 3(d)和(g)可知,四步相移算法的相位误差包含了微弱的周期误差和较强的随机误差。因为被测相位具有一定的倾斜[图 3(b)中有多根条纹],

四幅子干涉图间的相移值不等于 $\pi/2$,所以产生周期性的误差分布^[9,10];另外图 3(a)带有较严重的相干噪声,而四步相移算法不能有效抑制相干噪声对

相位的影响,因而产生随机误差。另一方面,由图 3(e)和(h)可知,傅里叶分析法的相位误差主要是因为频谱泄露引起的边缘误差和微弱周期调制误差^[2],通过干涉图周期扩展可减少傅里叶分析法的相位误差。对实际的动态干涉仪而言,相干噪声和四幅子干涉图间的相移误差总是存在且较严重,傅里叶分析法受相移误差影响较小,它通过频域滤波有效地抑制了相干噪声的影响,因此利用傅里叶分析法处理相位掩模空间载波干涉图比四步相移算法更适合、更有效。

5 结 论

基于相位掩模的动态干涉仪在瞬态干涉测量方面得到广泛的应用。传统四步相移算法在计算相位掩模空间载波干涉图时存在一定的不足,如被测相位局部变化引起的相移误差和相干噪声引起的随机误差。本文根据相位掩模的特点,提出了相位掩模空间载波干涉图的傅里叶分析法。该方法将全分辨率干涉图进行像素空间重组得到一幅线性空间载波干涉图,然后采用傅里叶变换提取相位,最后再通过像素空间重组得到全分辨率的相位信息。实验结果表明,四步相移算法相位误差的 PV 值和 RMS 值分别为 0.7467λ 和 0.0348λ ,而傅里叶分析法相位误差的 PV 值和 RMS 值分别为 0.2989λ 和 0.0088λ ,即傅里叶分析法的精度高于四步相移算法。另外,本文方法能正确判断被测相位的正负并能有效地抑制干涉条纹背景噪声对相位的影响,因此,它比传统的四步相移算法更适合于处理相位掩模空间载波干涉图。

参 考 文 献

- 1 Lü Xiaoxu, Zhong Liyun, Zhang Yimo. The holographic reconstructing algorithm and its error analysis about phase-shifting phase measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1367~1371
吕晓旭, 钟丽云, 张以谟. 相移相位测量的全息再现算法及测量误差分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1367~1371
- 2 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**: 156~160
- 3 Xu Jiancheng, Xu Qiao, Chen Jianping. Spatial-carrier phase-shifting algorithm based on least-squares iteration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 592~596
徐建程, 许 乔, 陈建平. 基于最小二乘迭代的空载波相移算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 592~596
- 4 M. Servin, F. J. Cuevas. A novel technique for spatial phase-shifting interferometry [J]. *J. Mod. Opt.*, 1995, **42**: 1853~1862
- 5 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
- 6 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chunsheng. Simultaneous phase-shifting interferometry based on two-dimension grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 663~667
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): 663~667
- 7 M. Novak, J. Millerd, N. Brock *et al.*. Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(32): 6861~6868
- 8 H. Guo, Q. Yang, M. Chen. Local frequency estimation for the fringe pattern with a spatial carrier: principle and applications [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**: 1057~1065
- 9 B. T. Kimbrough. Pixelated mask spatial carrier phase shifting interferometry algorithms and associated errors [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(19): 4554~4562
- 10 J. Millerd, N. Brock, J. Hayes *et al.*. Pixelated phase-mask dynamic interferometer [C]. *SPIE*, 2004, **5531**: 304~314