

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0178-06

同步移相干涉仪偏振移相量的标定方法

尹嘉懿¹ 徐 晨¹ 苏俊宏² 陈 磊¹

(¹ 南京理工大学光电学院, 江苏 南京 210094; ² 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要 同步移相干涉技术在同一时刻于不同空间位置, 采集相互之间具有一定移相步长的干涉图, 通过对移相干涉图的瞬态采集, 实现动态测量。为了保证空间移相的精度, 提出了一种定量标定同步移相空间偏振移相量的方法。在偏振移相式的同步移相干涉装置的基础上, 采用了压电陶瓷(PZT)移相以及索累-巴比涅(Soleil-Babinet)补偿器移相两种方案, 可得到相邻干涉图之间的相位差以及对应偏振片的方位角偏差, 实现定量标定同步移相干涉仪的偏振移相量。实验结果表明, 偏振移相阵列的平均方位角偏差均小于 1°, 能满足同步移相干涉实验对移相精度的要求。

关键词 测量; 同步移相; 压电陶瓷; 索累-巴比涅补偿器

中图分类号 TH744 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0178

Calibration for Phase-Shifting Polarizer Array in the Simultaneous Phase-Shifting Interferometer

Yin Jiayi¹ Xu Chen¹ Su Junhong² Chen Lei¹

(¹ School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China
² School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract Simultaneous phase-shifting technology is used to capture several interferograms with certain phase intervals in different spacial positions at the same time. It can be applied to dynamic measurement because of its simultaneous interferograms-capturing characteristic. In order to guarantee the precision of the spacial phase-shifting, a method for calibrating the phase-shifting values of the polarizer array is proposed to fulfill the need. Based on the simultaneous phase-shifting interferometer, two methods by use of PZT and Soleil-Babinet compensator are utilized to obtain the phase differences of the neighbouring interferograms and the transmission direction differences of the corresponding polarizers. The experimental results indicate the average transmission direction error of the phase-shifting polarizer array is less than 1°, which can guarantee phase-shifting precision in the simultaneous phase-shifting interferometry.

Key words measurement; simultaneous phase-shifting; PZT; Soleil-Babinet compensator

1 引 言

同步移相干涉测量技术在同一时刻于不同空间位置采集具有一定移相步长的若干幅干涉图, 达到抗振目的, 可用于动态测量。光路结构一般具有 3 个或者 3 个以上的移相单元, 在每一个单元里引入

不同的移相量。其中分光 and 移相是同步移相干涉仪的关键技术。从实现移相的角度来讲, 目前主要有波片移相、偏振片移相以及光栅移相等。

Smythe 系统^[1] 基于泰曼-格林干涉仪, 利用偏振分光移相原理采用分光镜分光法。系统利用 3 个

基金项目: 教育部科技发展中心博士点基金(20070288010)和兵器预研支撑基金资助课题。

作者简介: 尹嘉懿(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学精密测试与动态干涉测量方面的研究。

E-mail: kittenkiss@qq.com

导师简介: 陈 磊(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学计量测试与光电智能化仪器方面的研究。

E-mail: chenlei@126.com

偏振分光镜和 1 个普通分光镜将入射光分为 4 组相位不同的光,分别通过 4 个 CCD 接收,从而计算被测波面。美国 4D 公司在泰曼干涉仪与斐索干涉仪上,均实现了动态波面的干涉测量,而 Millerd 等^[2]于 2001 年提出了一种综合全息分光、相位掩模板、偏振器、CCD 采样的专利技术,并于 2004 年又改进了相位掩模板^[3~6]。以微偏振移相阵列代替原来的全息分光相位掩模技术,阵列上的移相单元结构与 CCD 上的像素一一对应相关。该掩模板可以应用于任意偏振移相干涉仪中实现同步移相干涉测量。Kwon^[7]提出光栅分光,设计出多通道光栅衍射空间移相干涉仪。系统采用振幅型余弦光栅,同时承担分光 and 移相的双重任务。将入射光衍射为 0 级和 +1, -1 级,使得衍射光之间存在移相,光栅上的针孔衍射形成的标准球面波作为参考波面。由于系统为共光路,可以有效降低环境对测量结果的影响。Kranz 等^[8,9]提出了光栅分光波片移相迈克尔孙干涉系统,参考波面和被测波面为正交偏振光。经过光栅后,选择 0 级, +1 级和 -1 级衍射光,在 ±1 级衍射光路中分别放置一个 λ/4 波片。两个 λ/4 波片的快轴方向分别与两束偏振光之一的偏振方向相同,分别引进 ±90°的相移。通过一个偏振片后形成 3 幅依次移相 90°的干涉图并成像于同一 CCD 靶面上。系统采用 3 步移相算法对波面进行复原。钱克矛等^[10]将同步移相干涉测量应用到马赫-曾德尔干涉仪中,用于对液体折射率进行动态测量,其选择的二维 Ronchi 光栅衍射的一级衍射光能量达到入射总能量的 60%左右。

无论何种形式的同步移相干涉仪结构,都需要保证精确的移相精度。本文所用的同步移相干涉仪采用二维光栅分光和偏振阵列移相的方案^[11],其中偏振阵列实现移相功能,其 4 个偏振片相互之间的角度差又决定了移相量。文中通过压电陶瓷(PZT)移相以及索累-巴比涅补偿器移相两种方法,实现定量标定偏振阵列的移相量,以确定实验所用的偏振阵列是否满足同步移相对移相精度的要求。

2 原 理

2.1 同步移相干涉原理

同步移相干涉测量基于偏振式泰曼-格林干涉仪,如图 1 所示。He-Ne 激光器发出的激光经扩束系统后进入偏振分光棱镜(PBS),由于入射光束可分为两束振动方向相互正交的偏振光 s 波和 p 波,经过 PBS 分光后,s 波经过 λ/4 波片(QW1)反射到

测试镜(RM),p 波经 λ/4 波片(QW2)透射到参考镜(TM)反射。经测试镜和参考镜反射回来的两束光再次通过 λ/4 波片,光束返回后振动方向均改变了 90°。这两束正交偏振光再次返回 PBS,经过一个快轴方向与其振动方向均成 45°角放置的 λ/4 波片(QW3)后,分别成为左旋和右旋圆偏振光。正交的两束偏振光通过二元衍射光栅(G),利用空间调制器(SF)滤出(±1, ±1)级次衍射光,通过由 4 个与水平方向分别成 0°, 45°, 90°, 135°的偏振片组成的偏振阵列(PA),同时成像在 CCD 靶面上,即同一时间产生了 4 幅存在不同移相量的干涉图。半波片(HWP)可以调整入射 s 波和 p 波的光强比和图像对比度。利用 4 步移相算法就可以算出波面相位信息,实现了空间同步移相。

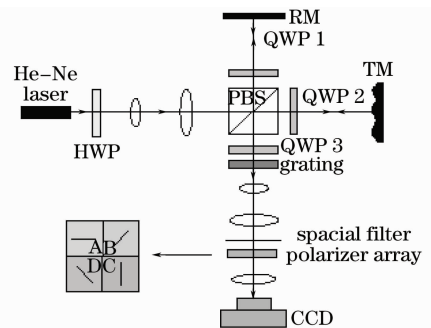


图 1 同步移相干涉实验光路图

Fig. 1 Schematic setup of the simultaneous phase-shifting interferometer

4 步移相法的相位计算方法如下,干涉场的光强分布可表示为

$$I_i(x, y, \delta_i) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[\varphi(x, y) + \delta_i], \quad (i = 1, 2 \dots n), \quad (1)$$

式中 $\varphi(x, y)$ 为被测波面的相位分布函数, $a(x, y)$ 为干涉场背景光强, $b(x, y)$ 为干涉条纹的调制度, δ_i 为参考波面的可变相位位移, (x, y) 为出瞳面上的坐标。

当采用 4 步移相法, δ_i 分别取 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 时,则干涉场的相位分布 $\varphi(x, y)$ 就可计算为

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{I_4(x, y, 3\pi/2) - I_2(x, y, \pi/2)}{I_1(x, y, 0) - I_3(x, y, \pi)} \right]. \quad (2)$$

2.2 同步移相干涉中的偏振阵列

图 2 为偏振阵列,由 4 片材料相同的偏振片组成,相邻的偏振方向相对水平方向而言为 0°, 45°, 90°, 135°。如图 1 所示,经过 QW3 后分别由参考光和测试光形成的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光,通过偏振片形成两束线偏振光即可发生干涉,形成

干涉条纹。计算可知通过相邻偏振片所形成的干涉图的相位差等于相邻偏振片方位角之差的两倍,即相邻偏振片方位角的差值表征了移相量。

偏振片组的方位角误差可定义为:任意一个偏振片的方向 θ_i 与理想情况下偏振片方向的角度偏差就是方位角的误差,记为 $\Delta\theta$ 。若偏振片存在方位

角误差(不考虑各个器件表面的透射系数和反射系数),干涉场的光强分布可表示为

$$I_i = \frac{1}{2}[\alpha^2 + \beta^2 + 2\alpha\beta\sin(\varphi + 2\theta_i)], \quad (3)$$

式中 α 为参考光振幅, β 为测试光振幅, θ_i 为偏振片的方位角, φ 为测试光与参考光的相位差。从而得到

$$\frac{\partial I_i}{\partial \theta_i} = 2\alpha\beta\cos(\varphi + 2\theta_i), \quad (4)$$

$$\Delta\varphi = \left[\frac{\cos\varphi}{2\alpha\beta} \left(\frac{\partial I_1}{\partial \theta_1} - \frac{\partial I_3}{\partial \theta_1} \right) + \frac{\sin\varphi}{2\alpha\beta} \left(\frac{\partial I_4}{\partial \theta_1} - \frac{\partial I_2}{\partial \theta_1} \right) \right] \cdot \Delta\theta_i. \quad (5)$$

令 $\theta_2 = \theta_1 + \pi/4, \theta_3 = \theta_1 + \pi/2, \theta_4 = \theta_1 + 3\pi/4$, 得到

$$(\Delta\varphi)_\theta = \cos\varphi\cos(\varphi + 2\theta_1)\Delta\theta_3 + \sin\varphi\sin(\varphi + 2\theta_1)(\Delta\theta_4 + \Delta\theta_2). \quad (6)$$

可以看出, $(\Delta\varphi)_{\theta_{\max}} \approx 3\Delta\theta$, 偏振阵列的方位角误差与测量误差属于同量级的,对测量结果的影响较大,需重点控制方位角误差。当平均方位角误差达到 $\pi/18$ (即 10°)时,波面误差达到了 0.1λ ,严重影响了测量精度。因此,平均方位角误差必须小于 3° ,这样它引起的波面测量误差小于 0.02λ 。

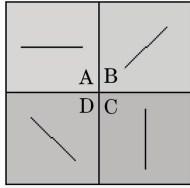


图2 偏振移相阵列示意图

Fig. 2 Polarizing phase-shifting array

2.3 偏振阵列移相量标定原理

在一个条纹周期内等间距移动条纹,可获得 N 幅同步移相干涉图。PZT 移相法将 PZT 放置在测试镜后,推动测试镜周期内等间距运动实现对偏振阵列的标定。索累-巴比涅法则将该补偿器放置在光源之后,调整 s 波和 p 波的相位延迟量,达到改变光程差的目的,使得条纹在一个周期内运动。

标定取被测件上同一点在一个条纹周期内的光强,通过最小二乘法拟合出光强表达式,再将互相相邻的两两偏振片的光强表达式拟合得到李萨如图形,可定性观察到两两偏振片方位角差值与 90° 的偏差,再计算正弦曲线相位差得到方位角差值的定量结果,从而验证偏振阵列的移相精度。

对(1)式作最小二乘法拟合,可以得到

$$\begin{pmatrix} N & \sum \cos(\varphi_i) & \sum \sin(\varphi_i) \\ \sum \cos(\varphi_i) & \sum \cos^2(\varphi_i) & \sum \frac{\sin(2\varphi_i)}{2} \\ \sum \sin(\varphi_i) & \sum \frac{\sin(2\varphi_i)}{2} & \sum \sin^2(\varphi_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum I_i \\ \sum I_i \cos(\varphi_i) \\ \sum I_i \sin(\varphi_i) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

其中 $m = b\cos\delta$, $n = -b\sin\delta$ 。

根据(7)式就可以计算得到 a, b, δ , 进而可标定同步移相干涉图之间的具体移相量。

又根据李萨如图相关分析,(1)式的光强表达式中各项参数影响: δ 影响图形的偏转以及图形的变化(正圆、椭圆、直线之间的变化), b 影响图形的椭圆度, a 影响图形中心的位置,图形随之整体移动,但不改变图形形态。标定偏振移相量时,主要考量参数 δ 的影响。

3 实 验

根据以上分析可知,当偏振阵列中两两偏振片方位角夹角为理想的 45° 时,所分别形成的同步移相干涉图两两之间的移相量差即为 $\pi/2$ 。偏振片方位角的精度就决定了移相量精度。实验基于同步移相干涉装置,而标定实验需要对每一幅干涉图实现移相,因此同步移相干涉装置本身并不包含 PZT 以及巴比涅补偿器这两种器件。当标定实验结束后, PZT 和补偿器将被取走。

3.1 PZT 移相法

图 3 为 PZT 法移相采样原理图,在原来的同步移相装置的基础上,将 PZT 放置在 TM 后,推动 TM 周期内等间距运动实现对偏振阵列的标定。图 4 表示实验干涉图的其中一帧。

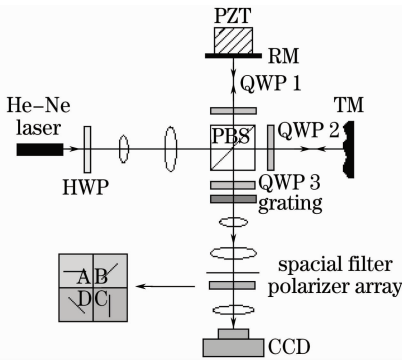


图 3 PZT 移相采样原理图

Fig. 3 Optical layout of PZT method

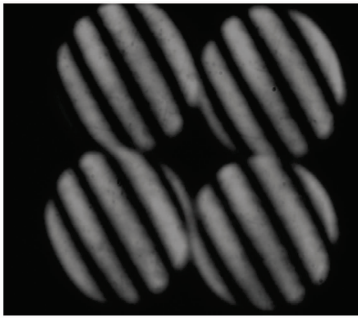


图 4 PZT 移相干涉图

Fig. 4 Interferogram by PZT method

参考光和测试光经过各个偏振片分别形成干涉图,经过 PZT 移相可以获得对于被测件同一点在 4 幅干涉图中的光强变化。调整干涉仪使视场中的干涉条纹尽量少,标记得被测件同一点在各个干涉图上的位置,读取各自的光强值。最小二乘法拟合得到光强曲线,两两相邻偏振片的光强曲线绘制成李萨如图。当角度偏差小于 90° 时,李萨如图呈现右偏椭圆;当角度偏差大于 90° 时,李萨如图呈现左偏椭圆。通过判断中心轴与垂轴的偏差大小,可以定性知道与 90° 偏差的大小。如图 5 所示,可知 (a) 图为左偏椭圆,角度偏差大于 90° ,而 (c) 图中为右偏椭圆,角度偏差小于 90° 。(b),(d) 图与中央垂线十分接近,与 90° 偏差较小。

根据 (7) 式可计算得到 4 个光强表达式的初相位分别为

$$\Delta A = -15.49^\circ, \Delta B = 76.18^\circ,$$

$$\Delta C = -14.28^\circ, \Delta D = 74.48^\circ,$$

从而得到两两干涉图的移相量之差分别为

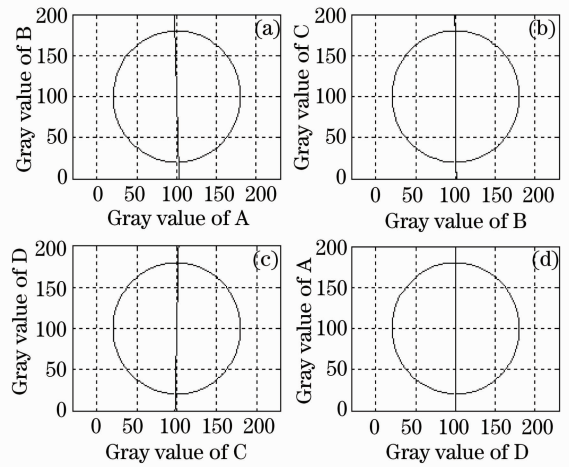


图 5 李萨如图形拟合结果。(a)AB 的李萨如图;(b)BC 的李萨如图;(c)CD 的李萨如图;(D)DA 的李萨如图

Fig. 5 Lissajous figure after data fitting. (a) Lissajous figure of AB; (b) Lissajous figure of BC; (c) Lissajous figure of CD; (d) Lissajous figure of DA

$$\delta_{AB} = 91.67^\circ, \delta_{BC} = 90.46^\circ,$$

$$\delta_{CD} = 88.76^\circ, \delta_{DA} = 89.97^\circ.$$

偏振片方位角等于相位差的一半,因此平均方位角误差为

$$\Delta \bar{\theta} =$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{|\Delta \delta_{AB}| + |\Delta \delta_{BC}| + |\Delta \delta_{CD}| + |\Delta \delta_{DA}|}{4} \right) = 0.43^\circ.$$

3.2 Soleil-Babinet 移相法

实验中采用索累-巴比涅补偿器 (SBC, GCO-030101) 是一款连续可调的宽带零级相位器件,由两块楔角相等、长度不等的晶体楔及一块晶体平行平晶组成,可用于产生相位延迟或进行相位补偿。通过旋转测微丝杆改变晶体楔对的组合厚度,从而对透过的任何波长光产生预先给定的相位延迟,获得相位补偿。将补偿器放置在光源和 HWP 之后,而 s 波和 p 波分别作为参考光与测试光,通过测微丝杆调整 s 波和 p 波的相位延迟量,达到改变光程差的

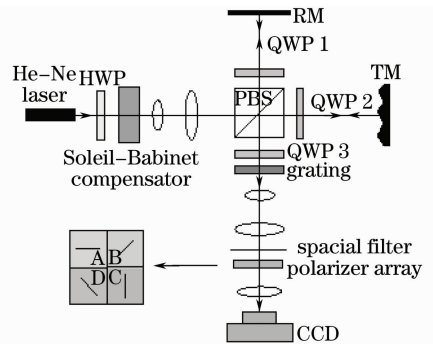


图 6 索累-巴比涅补偿器移相采样原理图

Fig. 6 Optical layout of Soleil-Babinet compensator method

目的,使得条纹在一个周期内运动,如图 6 所示。图 7 表示实验干涉图的其中一帧。

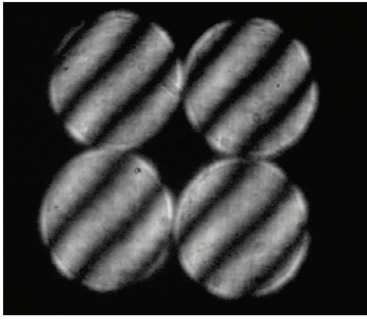


图 7 索累-巴比涅补偿器移相干涉图

Fig. 7 Interferogram by Soleil-Babinet compensator method

采用与 PZT 法相同的分析方法,如图 8 所示,可知(a),(d)图中为左偏椭圆,角度偏差大于 90° ,而(b),(c)图与中央垂线十分接近,与 90° 偏差较小。

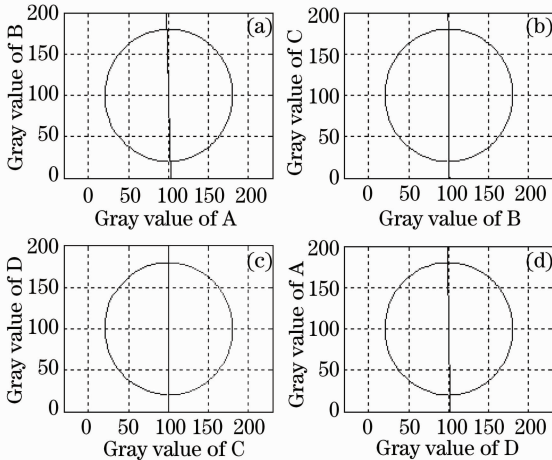


图 8 李萨如图形拟合结果。(a)AB 的李萨如图;(b)BC 的李萨如图;(c)CD 的李萨如图;(D)DA 的李萨如图

Fig. 8 Lissajous figure after data fitting. (a) Lissajous figure of AB; (b) Lissajous figure of BC; (c) Lissajous figure of CD; (d) Lissajous figure of DA

根据(7)式可计算得到 4 个光强表达式的初相位分别为

$$\Delta A = 59.97^\circ, \Delta B = -31.54^\circ,$$

$$\Delta C = 58.89^\circ, \Delta D = -30.99^\circ,$$

从而得到两两干涉图的移相量之差分别为

$$\delta_{AB} = 91.51^\circ, \delta_{BC} = 90.43^\circ,$$

$$\delta_{CD} = 89.88^\circ, \delta_{DA} = 90.96^\circ.$$

偏振片方位角等于相位差的一半,因此平均方位角误差为

$$\Delta \bar{\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{|\Delta \delta_{AB}| + |\Delta \delta_{BC}| + |\Delta \delta_{CD}| + |\Delta \delta_{DA}|}{4} \right) = 0.38^\circ.$$

4 分 析

实验中,PZT 法和 Soleil-Babinet 法测得偏振阵列的平均方位角误差均小于 1° ,满足了平均方位角偏差必须在 3° 以内的要求。

实验误差主要来源于移相误差、算法误差以及随机误差。移相误差主要由于 PZT 与索累-巴比涅补偿器非线性移相造成的误差。在利用移相之前,先标定 PZT,并对电压位移曲线做非线性校正,实现等间距移相;算法误差为最小二乘法拟合精度的误差,增加采样数和保证环境稳定可以提高计算精度。随机误差主要体现在环境干扰引起的条纹抖动等误差,实验在抗震台上进行,并保持室内恒温,可以有效地控制随机误差对测量的影响。

5 结 论

同步移相干涉仪中的偏振阵列起到了对分光后各路光移相的作用,其偏振角度差决定了移相量,因此必须保证偏振片的方位角精度。通过压电陶瓷 PZT 移相以及索累-巴比涅补偿器的移相两种实验方案,实现了偏振阵列移相量的定量标定,并编制了计算机程序处理干涉图,拟合了偏振阵列中空间同一点的光强表达式,绘制了两两相邻偏振片的李萨如曲线,定性观察方位角偏差的偏离情况。计算两两偏振片所得到的光强曲线的相位差,获得了方位角偏差的定量数值。两种方法计算得到的结果基本一致,验证了实验的准确性。实验表明所使用的偏振移相阵列的方位角偏差均小于 1° ,能满足同步移相干涉实验对移相精度的要求。测量标定得到偏振移相量的大小,可以通过标定实验的测量结果再修正偏振片的偏振方向,以求同步移相干涉仪获得更高精度的移相量,从而提高干涉仪的测量精度。

参 考 文 献

- 1 R. Smythe, R. Moore. Instantaneous phase measuring interferometry[J]. *Opt. Eng.*, 1984, **23**(4): 361~364
- 2 J. E. Millerd, N. J. Brock. Methods and apparatus for splitting, imaging, and measuring wavefronts in interferometry [P]. U. S. Patent PCT/US 2000/027343, 2001
- 3 J. E. Millerd, N. J. Brock, J. Hayes *et al.*. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[C]. *SPIE*, 2004, **5531**: 304~314
- 4 Matt Novak, J. E. Millerd, Neal Brock *et al.*. Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(32): 6861~6868
- 5 N. Brock, J. Hayes, B. Kimbrough *et al.*. Dynamic interferometry[C]. *SPIE*, 2005, **5875**: F1~F10
- 6 James C. Wyant. Vibration insensitive interferometric optical testing[C]. *Frontiers in Optics*, 2004, OTuB2

- 7 O. Y. Kwon. Multichannel phase-shifted interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(2): 59~61
- 8 J. Kranz, J. Lamprecht, A. Hettwer *et al.*. Fiber optical single frame speckle interferometer for measuring industrial surface[C]. *SPIE*, 1998, **3408**: 328~331
- 9 A. Hettwer, J. Kranz, J. Schwider. Three channel phase-shifting interferometer using polarization-optics and a diffraction grating[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(4): 960~966
- 10 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
- 11 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
- 12 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chen. Measurement performance of simultaneous phase-shifting interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1682~1687
左芬, 陈磊, 徐晨. 同步移相干涉的测量性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1682~1687