

文章编号 1004-924X(2013)12-3001-07

偏振正交性对偏振相移干涉检测精度的影响

宣 斌*, 宋淑梅

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高线偏振相移干涉检测的精度, 分析了参考光和测试光的偏振方向正交性对该项检测技术的影响。分析了线偏振相移干涉的原理, 提出偏振非正交引起的检测误差与波像差有关, 且检测误差峰谷值与测试光和参考光振幅之比以及偏振非正交量成正比。讨论了偏振非正交产生的原因, 认为测试光在被检元件表面的折射或者反射都有可能引起偏振非正交。针对不同被检元件, 给出了减少偏振非正交的几种方法, 包括合理镀膜、选择合理入射角偏振方向等。通过 Skip-Flat 检测对理论分析进行了验证。结果显示, 对于入射角为 45° 的检测光路, 偏振正交性引入的检测误差呈现与条纹一致的分布, 峰谷值为 0.174λ , 这与理论分析相吻合。文章指出, 进行偏振相移干涉检测时, 需要针对不同的被检元件进行分析, 以确保偏振非正交产生的检测误差能够满足技术要求。

关键词: 光学检测; 偏振相移干涉; 偏振正交性; 波像差; Skip-Flat 检测

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3001

Influence of polarization direction orthogonality on precision of polarization phase shifting interferometry

XUAN Bin*, SONG Shu-mei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xbjst@sina.com

Abstract: The influence of polarization direction orthogonality on Polarization Phase Shifting Interferometry (PPSI) was analyzed to improve its measurement precision. Based on the analysis of PPSI principle, it points out that the measurement error is a function of Optical Path Difference (OPD) and the PV of measurement error is proportional to the non-orthogonality and the ratio of amplitudes of test beam to reference beam. The polarization non-orthogonality can be introduced by the reflection or refraction on a surface. Then several approaches were recommended to depress the non-orthogonality, such as proper coatings, incident angles and polarization directions. A configuration of Skip-Flat test with incident angle of 45° was set up. It shows that the distribution of measurement error is coincident with that of OPD. Moreover, the measurement error is 0.174λ (PV), which is in agreement with that of the theoretical analysis. Finally, the paper suggests that it is necessary to analyze individually each of the component under the test for making sure the measurement precision.

收稿日期: 2013-08-30; 修订日期: 2013-10-16.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

Key words: optical testing; Polarization Phase Shifting Interferometry (PPSI); polarization orthogonality; Optical Path Difference (OPD); Skip-Flat testing

1 引言

干涉检测是一种基于光的波动性质,利用相干光源的干涉现象进行波像差检测的方法。由于干涉检测的标尺为光源的波长,因此它是一种具有极高精度的检测方法,已广泛应用于精密检测领域^[1]。干涉检测设备的光路设置从最初的接触式牛顿干涉仪,发展到现今多种多样的非接触式检测设备,例如非共光路的泰曼-格林(Twyman-Green)干涉仪,共路的菲索(Fizeau)干涉仪,以及多种形式的剪切干涉仪等。相应地,相干光源也从相干长度亚毫米级的白光光源发展到卤素灯光源,而激光器的出现使相干长度有了质的飞跃,目前检测腔长已达到几十米。同时,相移(Phase Shifting, PS)等技术的出现^[2-3]使得计算机可以自动将干涉条纹高精度地处理成波像差,常用的技术包括压电陶瓷相移^[4]、载波法^[5-6]、偏振相移干涉(Polarization Phase Shifting Interferometry, PPSI)^[7-8]等。其中,压电陶瓷相移是一种利用压电陶瓷驱动参考镜,使参考光和测试光的波像差产生特定相移量,再对各相移量的条纹进行计算得到波像差的相移方法。载波法是一种在参考光和测试光之间引入大倾斜量,使波像差信息和噪声信息在频域上不产生重叠,仅提取波像差频域信息并将它还原为波像差的方法。偏振相移是一种将偏振方向正交的线偏振态的参考光和测试光依次转变为圆偏振光和相同偏振方向的线偏振光,使干涉条纹产生类似于压电陶瓷相移效果的方法。偏振相移干涉可以通过分光,在同一时间获取不同相移量的条纹,因此能够很好地减小振动等环境因素对检测的影响,也被称为动态干涉。

在偏振相移干涉检测中,线偏振的参考光和测试光,应力双折射等因素对检测精度,尤其是对非球面检测精度^[9-10]的影响已经开始受到研究人员的关注^[11-14]。本文分析了参考光和测试光的偏振正交性对检测的影响,为提高检测精度奠定了理论基础。

2 偏振相移干涉中的偏振正交性

2.1 偏振正交性引入的检测误差分析

偏振相移干涉采用线偏振态的参考光和测试

光,依次通过一个 1/4 波片和一个偏振片,最终在 CCD 像面形成干涉条纹。假设进入干涉仪时的参考光 E_r 偏振方向平行于 x 轴,测试光 E_t 偏振方向沿 α 角,参考光及测试光可以用琼斯矩阵表示:

$$\begin{aligned} E_r &= A_r \cdot \exp(i \cdot \varphi_r) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ E_t &= A_t \cdot \exp(i \cdot \varphi_t) \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中: A_r, φ_r 为参考光的振幅和相位; A_t, φ_t 为测试光的振幅和相位。1/4 波片 Q 的快轴方向沿 -45° 角,偏振片 P 的透光轴方向沿 θ 角,1/4 波片和偏振片分别表示为:

$$\begin{aligned} P &= \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}, \\ Q &= \sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

到达 CCD 上的参考光 E_{ri} 和测试光 E_{ti} 为:

$$\begin{aligned} E_{ri} &= P \cdot Q \cdot E_r = \\ &= \sqrt{2}/2 \cdot A_r \cdot \exp[i \cdot (\varphi_r + \theta)] \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \\ E_{ti} &= P \cdot Q \cdot E_t = \sqrt{2}/2 \cdot \sin \alpha \cdot A_t \cdot \exp[i \cdot \\ &= (\varphi_t + \pi/2 - \theta)] \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + \sqrt{2}/2 \cdot \cos \alpha \cdot \\ &= A_t \cdot \exp[i \cdot (\varphi_t + \theta)] \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,CCD 上的条纹由 3 个偏振方向均沿 θ 角的线偏振光 E_1, E_2 和 E_3 干涉产生^[15-16],三者的振幅 A_n 和相位 Φ_n ($n=1, 2, 3$) 分别为:

$$\begin{aligned} A_1 &= \sqrt{2}/2 \cdot A_r \\ \Phi_1 &= \varphi_r + \theta \\ A_2 &= \sqrt{2}/2 \cdot \sin \alpha \cdot A_t \\ \Phi_2 &= \varphi_t + \pi/2 - \theta \\ A_3 &= \sqrt{2}/2 \cdot \cos \alpha \cdot A_t \\ \Phi_3 &= \varphi_t + \theta \end{aligned} \quad (4)$$

则干涉条纹的光强为:

$$\begin{aligned} I &= |E_1 + E_2 + E_3|^2 = \\ &= (A_1)^2 + (A_2)^2 + (A_3)^2 + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \cos(\Phi_1 - \\ &= \Phi_2) + 2 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \cos(\Phi_2 - \Phi_3) + 2 \cdot A_1 \cdot \end{aligned}$$

$$A_3 \cdot \cos(\Phi_1 - \Phi_3) = A_r^2/2 + A_t^2/2 + \sin \alpha \cdot A_r \cdot A_t \cdot \cos(\varphi + \delta) + \cos \alpha \cdot A_r \cdot A_t \cdot \cos \varphi + \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot A_t^2 \cdot \cos \delta, \quad (5)$$

其中: φ 为参考光与测试光之间的波像差, δ 为相

移量,分别表示为:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_t - \varphi_r \\ \delta &= \pi/2 - 2\theta \end{aligned} \quad (6)$$

为了求解 φ ,需要旋转偏振片以获取不同相移量 δ_i 形成的干涉条纹 I_i :

$$I_i = A_r^2/2 + A_t^2/2 + \sin \alpha \cdot A_r \cdot A_t \cdot \cos(\varphi + \delta_i) + \cos \alpha \cdot A_r \cdot A_t \cdot \cos \varphi + \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot A_t^2 \cdot \cos \delta_i. \quad (7)$$

较为常用的相移算法有 3 步相移、4 步相移等。以一种 3 步相移为例进行分析,令:

$$\delta_{3\text{step}} = -120^\circ, 0^\circ, 120^\circ, \quad (8)$$

相应地, φ 求解算法为:

$$\varphi_{3\text{step}} = \arctan\left(\sqrt{3} \cdot \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3}\right). \quad (9)$$

当 $\alpha \neq 90^\circ$ 时,进入干涉仪的参考光和测试光偏振方向非正交,式(9)得到的结果存在检测误差 $\Delta\varphi_{3\text{step}}$,有:

$$\Delta\varphi_{3\text{step}} = \varphi_{3\text{step}} - \varphi. \quad (10)$$

定义参考光和测试光的偏振非正交量为:

$$\Delta\alpha = \alpha - 90^\circ, \quad (11)$$

可以得知, $\Delta\varphi_{3\text{step}}$ 是一个关于 $\Delta\alpha, A_t/A_r$ 和 φ 的函数,如图 1 所示。图中, $\Delta\alpha$ 分别设置为 $-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 。

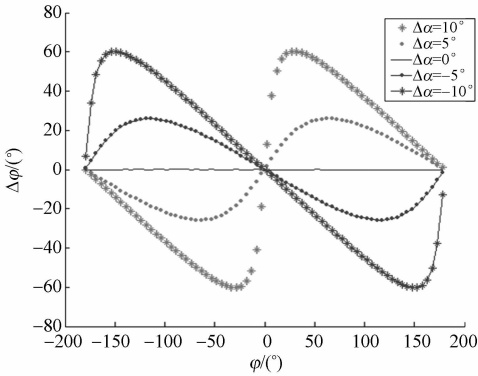
观察图 1 发现, $\Delta\varphi_{3\text{step}}$ 关于 φ 的分布类似于一条扭曲的正弦曲线,其极值为:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{3\text{step}}|_{\max} &\approx A_t/A_r \cdot |\Delta\alpha| \\ \Delta\varphi_{3\text{step}}|_{\min} &\approx -A_t/A_r \cdot |\Delta\alpha| \end{aligned} \quad (12)$$

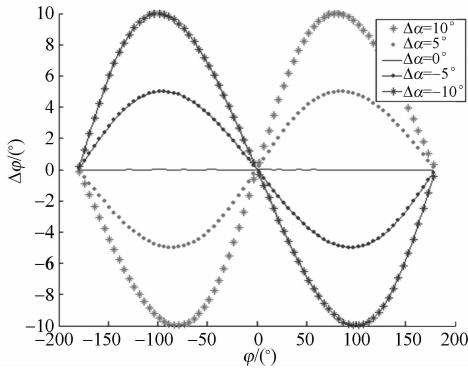
另外,还对其它几种常用相移算法的($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$)和($-\delta, 0^\circ, \delta$)进行分析,检测误差分布与 3 步相移算法($-120^\circ, 0^\circ, 120^\circ$)是相同的。

2.2 偏振非正交的产生因素

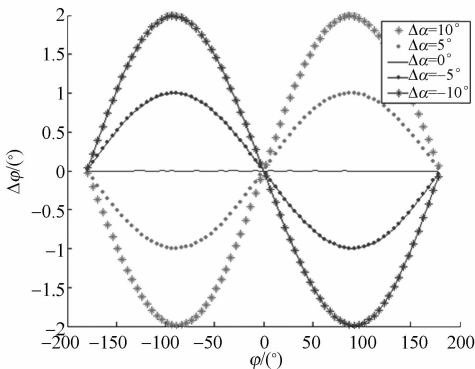
通常,从线偏振干涉仪出射的参考光和测试光是偏振方向正交的线偏振光^[17],进入干涉仪的参考光的偏振方向不变,因此,一旦测试光在经过被检测元件后的偏振方向发生改变,偏振方向的变化量就是参考光和测试光之间的偏振非正交量 $\Delta\alpha$ 。假设振幅为 A_0 的测试光入射至一个折射率为 n 的电介质表面,测试光的偏振方向与入射面之间的夹角为 ω_0 。测试光可以分解为偏振方向与入射面平行的 p 光和与入射面垂直的 s 光,其振幅分量分别为:



(a) $A_t/A_r = 5$



(b) $A_t/A_r = 1$



(c) $A_t/A_r = 0.2$

图 1 涉相移算法的相位误差 $\Delta\varphi_{3\text{step}}$ 分布图

Fig. 1 Distribution of $\Delta\varphi_{3\text{step}}$ of three-step algorithm

$$\begin{aligned} E_p &= A_0 \cdot \cos \omega_0 \\ E_s &= A_0 \cdot \sin \omega_0 \end{aligned} \quad (13)$$

p 光和 s 光的振幅反射系数 r_p 和 r_s 分别为:

$$\begin{aligned} r_p &= \frac{n \cos \eta_1 - \cos \eta_2}{n \cos \eta_1 + \cos \eta_2}, \\ r_s &= \frac{\cos \eta_1 - n \cos \eta_2}{\cos \eta_1 + n \cos \eta_2} \end{aligned} \quad (14)$$

其中: η_1 为入射角, η_2 为折射角。有:

$$\eta_2 = \arcsin \frac{\sin \eta_1}{n} \quad (15)$$

单次反射后, p 光和 s 光变为:

$$\begin{aligned} E_{rp} &= E_p \cdot r_p \\ E_{rs} &= E_s \cdot r_s \end{aligned} \quad (16)$$

反射光的偏振方向沿 ω_r 角,

$$\omega_r = \arctan \frac{E_{rs}}{E_{rp}} = \arctan \left(\frac{r_s}{r_p} \cdot \tan \omega_0 \right) \quad (17)$$

偏振方向变化产生的偏振非正交量为:

$$\Delta\alpha_r = \omega_r - \omega_0 = \arctan \left(\frac{r_s}{r_p} \cdot \tan \omega_0 \right) - \omega_0 \quad (18)$$

需要注意的是, 反射光有时会产生 180° 相位突变的半波损失, 但这不会改变偏振方向。式 (18) 可以重新表示为:

$$\Delta\alpha_r = \arctan \left(\left| \frac{r_s}{r_p} \right| \cdot \tan \omega_0 \right) - \omega_0 \quad (19)$$

测试光经过 j 次反射后引起的偏振非正交量为:

$$\Delta\alpha_{rj} = \arctan \left(\left| \prod_{m=1}^j \frac{r_{sm}}{r_{pm}} \right| \cdot \tan \omega_0 \right) - \omega_0 \quad (20)$$

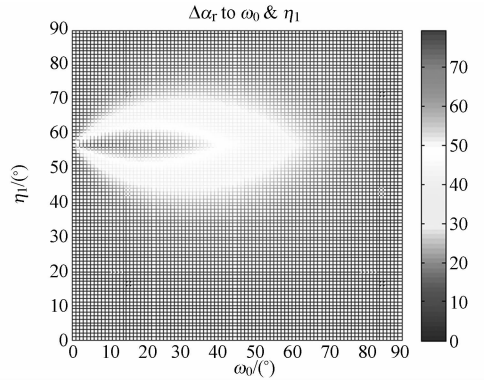
其中: r_{pm} 和 r_{sm} 分别为 p 光和 s 光第 m 次反射的振幅反射系数。

同理, 测试光经过 j 次折射后引起的偏振非正交量为:

$$\Delta\alpha_{tj} = \arctan \left(\prod_{m=1}^j \frac{t_{sm}}{t_{pm}} \cdot \tan \omega_0 \right) - \omega_0 \quad (21)$$

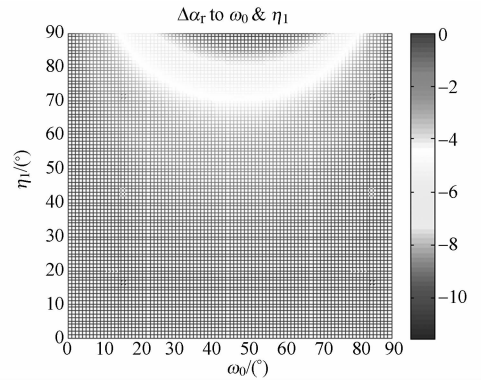
其中: t_{pm} 和 t_{sm} 分别为 p 光和 s 光第 m 次折射的振幅透射系数。

图 2 给出了 $n=1.5$ 时, 单次折反射后的 $\Delta\alpha$ 分布。由图可以看出, 反射引入的偏振非正交量分布与折射引入的存在明显区别。当测试光采用反射光时, 入射角在布鲁斯特角附近可能会引起严重的偏振方向非正交。



(a) 单次反射

(a) Single reflection



(b) 单次折射

(b) Single refraction

图 2 $\Delta\alpha$ 分布图

Fig. 2 Distribution of $\Delta\alpha$

2.3 减小偏振非正交量的途径

不同类型的被检元件, 所采用的减小偏振非正交量 $\Delta\alpha$ 的途径不同。(1) 合理镀膜^[18]。当测试光采用反射光时, 镀反射膜; 当测试光采用折射光时, 镀减反膜。合理镀膜可以在 ω_0 和 η_1 范围内, 使 $|r_s/r_p| \approx 1$ 或者 $t_s/t_p \approx 1$ 。由式 (20) 和 (21) 可知, 这可以显著减小 $\Delta\alpha$ 。(2) 选择合理的入射角。当 η_1 趋近于 0° 时, 可以使 $|r_s/r_p| \approx 1$ 或者 $t_s/t_p \approx 1$ 。但过小的 η_1 可能使干涉仪中进入多余的折反射光, 从而产生严重的鬼像^[19]。(3) 测试光只采用 p 光或者 s 光。对于一些不能镀膜并且入射角很大的被检系统, 比如 Ritchey-Common 和 Skip-Flat 系统, 可以只采用 $\omega_0 = 0^\circ$ 的 p 光或者只采用 $\omega_0 = 90^\circ$ 的 s 光。为了避免布鲁斯特角导致的反射率严重下降等问题, 可以采用 s 光; 也可以采用在干涉仪前设置偏振片的方式, 使进入干涉仪的测试光和参考光偏振方向正交。但是偏振

片本身的精度、对测试光的衰减以及偏振片透光轴需要与参考光偏振方向严格正交等因素仍然会对检测精度产生很大的影响。

3 实验及分析

本文采用一款线偏振干涉仪进行了 Skip-Flat 系统的检测,如图 3 所示。测试光从干涉仪出射后在一个未镀膜的平面上反射至一个镀反射膜的平面,自准直反射后,再次经未镀膜的平面反射回到干涉仪。线偏振干涉仪采用 $(-120^\circ, 0^\circ, 120^\circ)$ 的 3 步相移算法,测试光在未镀膜平面上的入射角为 45° 。每次检测均调整参考光和测试光的相对光强使条纹对比度最大,基本可以保持进入干涉仪的参考光和测试光的光强相等,即 $A_t/A_r \approx 1$ 。

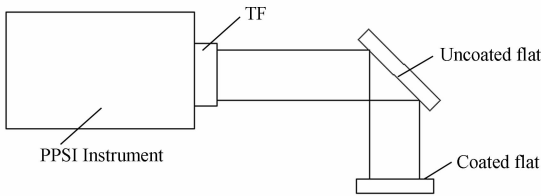
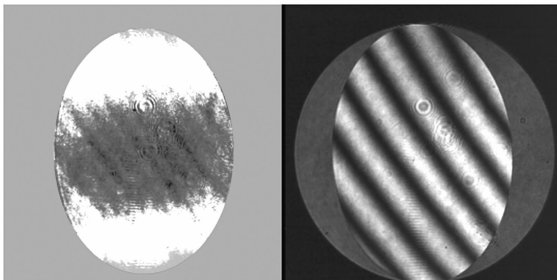
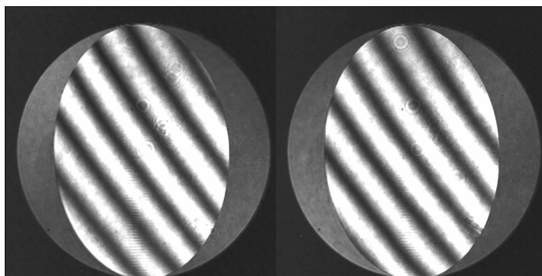


图 3 Skip-Flat 检测光路图

Fig. 3 Configuration of Skip-Flat test



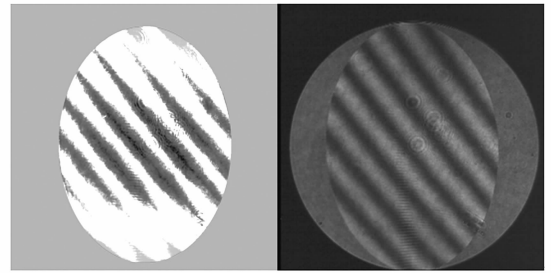
(a) 波像差 (a) OPD
(b) $\delta_1 = -120^\circ$ 的条纹 (b) Fringe at $\delta_1 = -120^\circ$



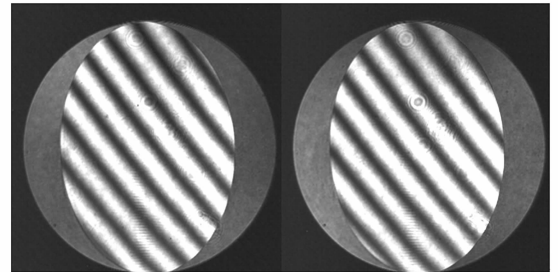
(c) $\delta_2 = 0^\circ$ 的条纹 (c) Fringe at $\delta_2 = 0^\circ$
(d) $\delta_3 = 120^\circ$ 的条纹 (d) Fringe at $\delta_3 = 120^\circ$

图 4 $\omega_0 = 90^\circ$ 的 Skip-Flat 检测结果

Fig. 4 Test results of Skip-Flat at $\omega_0 = 90^\circ$



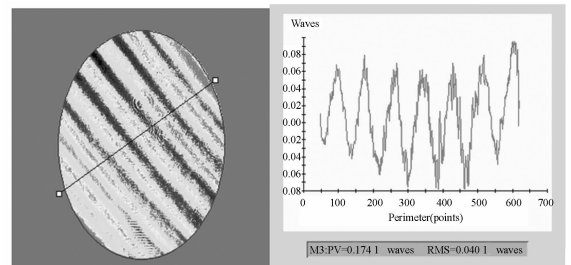
(a) 波像差 (a) OPD
(b) $\delta_1 = -120^\circ$ 的条纹 (b) Fringe at $\delta_1 = -120^\circ$



(c) $\delta_2 = 0^\circ$ 的条纹 (c) Fringe at $\delta_2 = 0^\circ$
(d) $\delta_3 = 120^\circ$ 的条纹 (d) Fringe at $\delta_3 = 120^\circ$

图 5 $\omega_0 = 60^\circ$ 的 Skip-Flat 检测结果

Fig. 5 Test results of Skip-Flat at $\omega_0 = 60^\circ$



(a) 波像差 (a) OPD
(b) 截面 (b) Profile of slice

图 6 检测误差结果

Fig. 6 Results of measurement error

图 4 给出了 $\omega_0 = 90^\circ$ 时的检测结果。由图可知,3 步相移的条纹光强和对比度相同,3 幅条纹之间的位移均为 1/3 根条纹,检测结果正常。当 $\omega_0 = 60^\circ$ 时,参考光通过 1/4 波片后仍然为圆偏振光,测试光变成了椭圆偏振光,旋转偏振片产生不同的相移量后,CCD 上条纹产生异常,检测结果如图 5 所示。由图可知,3 幅条纹光强和对比度有明显差别,条纹之间的位移不再是 1/3 根条纹。图 6 为 $\omega_0 = 60^\circ$ 减去 $\omega_0 = 90^\circ$ 的结果后的检测误

差。由图 6(a)可以看出,检测误差分布与条纹分布一致,这与图 1 的分析结论相符。根据式(12)和式(20), $\Delta\varphi|_{\max}=26.80^\circ$, $\Delta\varphi|_{\min}=-26.80^\circ$,则原理上的检测误差应为 $PV=53.60^\circ$,根据 $1\lambda=360^\circ$, $PV=0.1489\lambda$ 。这与图 6(b)的 $PV=0.1741\lambda$ 基本相符。

4 结 论

当进入干涉仪的测试光与参考光的偏振方向不正交时,偏振相移干涉会产生检测误差。本文对该现象进行了分析。分析发现,该检测误差与

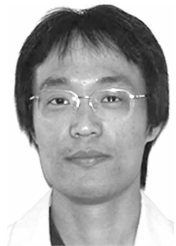
测试光和参考光的波像差有关,其峰谷值与测试光和参考光的非正交量成正比。测试光在被检元件表面的折、反射均有可能引起偏振方向的偏离,产生偏振非正交,引入较为严重的检测误差。对于常用的入射角为 45° 的 Skip-Flat 检测,合理设置检测光路可以很好地完成检测,但不合理的检测方法可以产生超过 $\lambda/6(PV)$ 的检测误差,这与理论分析结果相符。因此,在偏振相移干涉的实际应用中,有必要针对不同的被检元件进行分析,可以通过在被检测元件上镀膜、减小入射角、采用偏振光作为测试光等方法减小测试光和参考光的偏振非正交量,提高检测精度。

参考文献:

- [1] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. Wiley, 1992.
- [2] 赵智亮,夏伯才,陈立华,等. 相移干涉测量中相移误差的自修正[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1116-1121.
ZHAO ZH L, XIA B C, CHEN L H, et al.. Self-correction of phase step error in phase shifting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1116-1121. (in Chinese)
- [3] 苏志德,史振广,彭吉,等. 菲索干涉仪中精确移相的实现[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 244-250.
SU ZH D, SHI ZH G, PENG J, et al.. Implementation of accurate phase shift in Fizeau interferometer[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 244-250. (in Chinese)
- [4] 刘泊,郭建英,孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1503-1509.
LIU B, GUO J Y, SUN Y Q. Modeling control for PZT micro-displacement actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1503-1509. (in Chinese)
- [5] MITSUO T. Temporal versus spatial carrier techniques for heterodyne interferometry [J]. *SPIE*, 1987, 813: 329-330.
- [6] MITSUO T. Spatial-carrier fringe-pattern analysis and its applications to precision interferometry and profilometry. An overview [J]. *Industrial Metrology*, 1990, 1(2): 79-99.
- [7] CHATTERJEE S, KUMAR Y P, BHADURI B. Measurement of surface figure of plane optical surfaces with polarization phase-shifting Fizeau interferometer [J]. *Opt. & Laser Tech.*, 2007, 39: 268-274.
- [8] CHATTERJEE S, KUMAR Y P. Polarization phase-shifting Fizeau interferometer with a cyclic path optical configuration [J]. *Opt. Eng.*, 2009, 48(11): 115601.
- [9] 王孝坤. 子孔径拼接检测非球面时调整误差的补偿 [J]. 中国光学, 2013, 6(1): 88-95.
WANG X K. Compensation of misalignment error on testing aspheric surface by subaperture stitching interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 88-95. (in Chinese)
- [10] 莫卫东,范琦,贾晋超,等. 非球面检测中最佳入射球面波和最佳参考球面波的确定[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 263-269.
MO W D, FAN Q, JIA J CH, et al.. Determination of optimum positions of incident spherical wave and reference spherical wave in testing aspheric surface [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 263-269. (in Chinese)
- [11] ZHAO CH Y, KANG D Y, BURE J H. Effects of birefringence on Fizeau interferometry that uses a polarization phase-shifting technique [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(35): 7548-7553.
- [12] 李霞,袁艳,赵建科. 干涉仪的微应力安装力学分析以及试验结果[J]. 光子学报, 2007, 36(5): 918-921.
LI X, YUAN Y, ZHAO J K. Microstress installation and experiment result of the interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(5): 918-921. (in Chinese)
- [13] 王平,田伟,王汝冬,等. 支撑应力对光刻透镜投射波前畸变的影响[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 57-63.
WANG P, TIAN W, WANG R D, et al.. Influence of mounting stress on wavefront distortion of

- lithographic object lens [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1):57-63. (in Chinese)
- [14] 杨军,刘志海,苑立波. 波片对偏振激光干涉仪非线性误差的影响[J]. *光子学报*, 2008, 37(2):364-369.
YANG J, LIU ZH H, YUAN L B. Effects of wave plate on nonlinear errors in polarization laser interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 364-369. (in Chinese)
- [15] MENESES-FABIAN C, RIVERA-ORTEGA U. Phase-shifting interferometry by wave amplitude modulation: general case [J]. *Opt. and Lasers in Eng.*, 2012, 50: 905-909.
- [16] RIVERA-ORTEGA U, MENESES-FABIAN C, RODRIGUEZ-ZURITA G. Inhomogeneous phase-visibility modulating interferometry by space on-off non-quadrature amplitude modulation [J]. *Opt. Express*, 2013, 22(15): 17421-17434.
- [17] GHOSH N, OTANI Y, BHATTACHARYA K. Generation of collinearly propagating orthogonally polarized beams [J]. *Optik*, 2011, 122: 1164-1168.
- [18] 李刚,孙连春,于兆波,等. 光学薄膜中的偏振效应[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6):647-651.
LI G, SUN L C, YU ZH B, *et al.*. Polarization effects in optical thin films [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 647-651. (in Chinese)
- [19] 任寰,马力,刘旭,等. 多表面干涉下的光学元件面形检测[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5):1145-1150.
REN H, MA L, LIU X, *et al.*. Optical element test with multiple surface interference [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1145-1150. (in Chinese)

作者简介:



宣 斌(1983—),男,江苏南通人,副研究员,2005年于浙江大学获得学士学位,2010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,主要从事光学检测及中频误差方面的研究。E-mail: xbjst@sina.com



宋淑梅(1963—),女,吉林省吉林市人,研究员,硕士生导师,1984年于长春光学精密机械学院获得学士学位,主要从事大口径非球面加工与检测技术方面的研究。E-mail: smsong@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)