

## 同步相移横向剪切干涉中偏振器件的误差建模

张郁文 刘丙才 王红军 田爱玲 任柯鑫 王凯

### Error modeling of polarization devices in simultaneous phase-shifted lateral shearing interferometry

ZHANG Yu-wen, LIU Bing-cai, WANG Hong-jun, TIAN Ai-ling, REN Ke-xin, WANG Kai

引用本文:

张郁文, 刘丙才, 王红军, 田爱玲, 任柯鑫, 王凯. 同步相移横向剪切干涉中偏振器件的误差建模[J]. *中国光学*, 2024, 17(3): 640–647. doi: 10.37188/CO.2023–0152

ZHANG Yu-wen, LIU Bing-cai, WANG Hong-jun, TIAN Ai-ling, REN Ke-xin, WANG Kai. Error modeling of polarization devices in simultaneous phase-shifted lateral shearing interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 640–647. doi: 10.37188/CO.2023–0152

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0152>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 双面抛光晶圆干涉测量法及误差分析

Interferometry of double-sided polished wafer and error analysis

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 916 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0226>

#### 面向空间激光干涉的多通道相位测量系统

Multi-channel phase measurement system for the space laser interferometry

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1089 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0258>

#### 光学自由曲面自适应干涉检测研究新进展

Research advances in adaptive interferometry for optical freeform surfaces

中国光学 (中英文). 2021, 14(2): 227 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0126>

#### 基于主成分分析的白光干涉微观形貌测量算法

White light interferometry micro measurement algorithm based on principal component analysis

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 637 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0172>

#### 面向天基引力波探测的时间延迟干涉技术

Time-delay interferometry for space-based gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2021, 14(2): 275 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0098>

#### 基于相移条纹投影的动态3D测量误差补偿技术

Dynamic 3D measurement error compensation technology based on phase-shifting and fringe projection

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 184 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022–0004>

文章编号 2097-1842(2024)03-0640-08

## 同步相移横向剪切干涉中偏振器件的误差建模

张郁文, 刘丙才\*, 王红军, 田爱玲, 任柯鑫, 王凯  
(西安工业大学陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 为了对同步相移横向剪切干涉系统中偏振器件的选型、装调以及误差补偿提供可靠的理论依据, 本文根据琼斯矩阵原理, 构建了系统中 1/4 波片和偏振片阵列误差对测量结果影响程度的误差模型, 对四分之一波片的相位延迟误差、快轴方位角误差以及偏振片阵列透光轴方位角误差对测量结果的影响进行了定量分析。仿真结果表明: 1/4 波片的相位延迟误差在 $\pm 1^\circ$ 以内时, 波面测量误差为  $0.00002\lambda(\text{PV})$  和  $0.000062\lambda(\text{RMS})$ ; 1/4 波片的调整精度在 $\pm 2^\circ$ 以内时, 波面测量误差为  $0.0001\lambda(\text{PV})$  和  $0.00006\lambda(\text{RMS})$ ; 偏振片阵列方位角误差在 $\pm 1^\circ$ 以内时, 测量误差为  $0.003\lambda(\text{PV})$  和  $0.001\lambda(\text{RMS})$ 。根据仿真结果对测量系统中偏振元器件进行选型, 同时选择两种不同精度的偏振元器件进行对比实验。实验结果的残差值与仿真结果的残差值的 PV 以及 RMS 值偏差均小于  $\lambda/20$ , 可以在一定程度上验证模型的有效性。本文提出的数学模型可以为同步相移横向剪切干涉系统中偏振器件的选型提供可靠的理论依据。

**关键词:** 横向剪切干涉; 同步相移; 偏振器件; 误差建模; 琼斯矩阵

中图分类号: O436.1 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0152

## Error modeling of polarization devices in simultaneous phase-shifted lateral shearing interferometry

ZHANG Yu-wen, LIU Bing-cai\*, WANG Hong-jun, TIAN Ai-ling, REN Ke-xin, WANG Kai

(Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test,  
Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

\* Corresponding author, E-mail: liubingcai@xatu.edu.cn

**Abstract:** To provide a reliable theoretical basis for the selection, mounting, and error compensation of the polarization device in the synchronous phase-shift transverse shear interference system, based on the Jones matrix principle, we construct an error model reflecting the degree of influence of the errors of quarter-waveplate and polarizer array on the measurement results in the system. Then, we quantitatively analyze how the measurement results are influenced by the following factors: the phase delay error of quarter-waveplate, fast-axis azimuthal angle error, and transmission-axis azimuthal angle error of the polarizer array. The simulation results show that the wavefront measurement errors are  $0.00002\lambda(\text{PV})$  and  $0.000062\lambda(\text{RMS})$  when the phase delay error of the quarter-waveplate is within  $\pm 1^\circ$ ,  $0.0001\lambda(\text{PV})$  and  $0.00006\lambda(\text{RMS})$  when the adjustment

收稿日期: 2023-08-30; 修订日期: 2023-09-12

基金项目: 国家基础科研项目 (No. JCKY2020426B009); 陕西省科技厅“科学家+工程师”队伍项目 (No. 2023KXJ-066)

Supported by National Basic Scientific Research of China (No. JCKY2020426B009); "Scientist + Engineer" Team Project of Shaanxi Science and Technology Department (No. 2023KXJ-066)

accuracy of the quarter-waveplate is within  $\pm 2^\circ$ , and  $0.003\lambda$ (PV) and  $0.001\lambda$ (RMS) when the azimuthal angle error of the polarizer array is within  $\pm 1^\circ$ . According to the simulation results, the polarization components in the measurement system were selected. At the same time, two polarization components with different levels of accuracy were chosen for comparison experiments. The experimental results indicate the following conclusions: the deviations of the residual values of the experimental results from the residual values of the simulation results in terms of the PV and the RMS values are less than  $\lambda/20$ , and the validity of the model can be verified to a certain extent. The mathematical model proposed in this paper can provide a reliable theoretical basis for the selection of polarization devices in synchronous phase-shifted transverse shear interference systems.

**Key words:** lateral shearing interferometry; simultaneous phase-shifted interferometry; polarization device; modeling of errors; Jones matrix

## 1 引言

现代光学系统中,对于高精度光学元件的应用需求不断提高<sup>[1-3]</sup>,从而对能够直观反映光学元件表面质量优劣的评价手段,即面形检测技术的精度也提出了更高的要求。

同步偏振相移干涉技术作为一种有效的面形检测方法<sup>[4-5]</sup>,其拥有较高的测量精度并且可以实现光学元件表面面形的瞬时检测<sup>[6]</sup>。为了提高同步偏振相移干涉技术在实际应用中的抗干扰性能,将横向剪切干涉技术与同步偏振相移干涉技术相结合<sup>[7-8]</sup>,能够极大程度地提高光学系统的鲁棒性<sup>[9-10]</sup>,保证面形检测精度。但是在实际应用中,会由于系统中存在系统误差而对测量结果产生影响。从文献[11]中可知,同步相移横向剪切干涉系统的误差源可以分为以下几种:(1)实验器件引入的系统误差,包括:透镜、光栅、偏振元件;(2)剪切器件的分光误差;(3)CCD分辨率问题导致的干涉图分辨率降低。从文献中可知,针对误差(2),可以在后续对干涉图预处理时进行修正;针对误差(3),可以替换分辨率更高的CCD以避免这个问题。而对于误差(1)中的相关系统误差而言,暂时并未找到合适且有效的定量分析方法。因此,本文主要关注的是影响同步相移的关键偏振器件的误差对于测量结果的影响。

为了对同步相移横向剪切干涉系统中偏振器件的选型、装调以及后续误差补偿提供理论依据,需要对偏振元器件引入的误差对测量结果的影响进行分析。目前,从现有的研究结果中可

知<sup>[12-14]</sup>,同步偏振相移干涉方法中的关键器件为1/4波片和偏振片阵列,其易产生的误差主要有:1/4波片的方位角误差、相位延迟误差以及偏振片阵列透光轴的方位角误差。对于上述误差的分析,目前已取得了一些定性或不完整的定量结果。

钱克矛<sup>[15]</sup>对同步偏振相移方法的误差源进行了完整分析,利用琼斯矩阵<sup>[16-17]</sup>给出误差表达式,根据线性误差理论进行分析,给出误差与相位测量误差之间的量级关系。由于上述半定量结果在反映误差对测量结果影响时不够全面,所以左芬<sup>[18]</sup>在对同步相移干涉测量系统中偏振器件误差进行分析时给出了误差值固定时的波面测量误差的变化曲线,并未从定量分析的角度给出波面测量误差变化曲线。蒋超<sup>[19]</sup>对基于波片延迟阵列的同步相移干涉系统中的偏振器件也进行了误差分析,但是同样并未进行偏振器件误差对波面测量结果影响程度定量分析。对于误差模型的推导,除了琼斯矩阵外还可以使用斯托克斯矢量和穆勒矩阵来表示偏振光学元件。郑东晖<sup>[20]</sup>在对同步相移干涉测量系统中的偏振器件进行误差分析时使用斯托克斯矢量和穆勒矩阵对误差模型进行计算。

针对上述分析,围绕同步相移横向剪切干涉测量系统中偏振器件误差对测量结果的影响展开研究。基于系统测量原理,利用琼斯矩阵建立测量系统数学模型。在系统数学模型的基础上,分别建立关键器件的误差模型,主要对系统中的1/4波片以及偏振片进行建模。根据模型设计误差定量分析算法,进一步对系统中由偏振器件误差所引入的测量结果误差进行定量分析,从而得

到系统测量结果误差变化趋势曲线,并给出所允许的器件误差范围。

## 2 误差模型

同步相移横向剪切干涉实现原理如图 1 所示。从待测件表面返回的被测波前经平行偏振分束器剪切后得到两束振动方向垂直的线偏振光  $E_o$ 、 $E_e$  入射至 1/4 波片,经相位光栅衍射分束后通过特制的小孔光阑,该光阑将  $(\pm 1, \pm 1)$  级次衍射光筛选出来,筛选过的光线出射后垂直入射至偏振片阵列,分别在 4 个小偏振片上产生干涉,最终在 CCD 上采集到四幅相移剪切干涉图。

根据琼斯矩阵,可对图 1 所示原理图进行建模,1/4 波片与偏振片的琼斯矩阵表达式分别为(1)和(2)所示:

$$G = \cos \frac{\delta}{2} \begin{bmatrix} 1 - i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\theta & -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \\ -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\theta & 1 + i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$E''_o = P \cdot G \cdot E_o = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \frac{1}{2} \sin 2\alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \eta \\ 0 \end{bmatrix} \exp[iW(x,y)] = \frac{\cos \theta}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \exp[iW(x,y) + \alpha], \quad (3)$$

$$E''_e = P \cdot G \cdot E_e = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \frac{1}{2} \sin 2\alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \eta \end{bmatrix} \exp[iW(x+s,y)] = \frac{-\sin \theta}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \exp[iW(x+s,y) - \alpha], \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为两束线偏振光的光矢量与  $x$  轴的夹角;  $W(x,y)$  和  $W(x+s,y)$  分别为沿  $x$  方向剪切时入射至每个小偏振片上的两束光线的相位。当偏振阵列的偏振角度  $\alpha$  分别取  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ , 引入的相移量分别为  $0$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$  和  $3\pi/2$ 。则最终在探测器上接收到的 4 幅相移干涉图的光强分布可以表示为:

$$\begin{aligned} I_1 &= 1 + \sin 2\theta \cos(\Delta W_x) \\ I_2 &= 1 + \sin 2\theta \cos\left(\Delta W_x + \frac{\pi}{2}\right) \\ I_3 &= 1 + \sin 2\theta \cos(\Delta W_x + \pi) \\ I_4 &= 1 + \sin 2\theta \cos\left(\Delta W_x + \frac{3\pi}{2}\right), \quad (5) \end{aligned}$$

$$P = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \frac{1}{2} \sin 2\alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $\delta$  为波片的相位延迟量;  $\theta$  为波片快轴方位角与  $x$  轴的夹角;  $\alpha$  为偏振片阵列的角度。

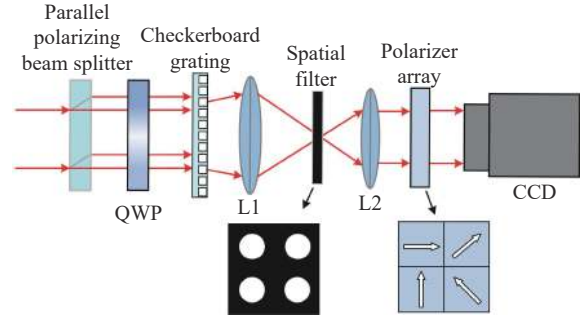


图 1 同步相移横向剪切干涉原理图

Fig. 1 Schematic diagram of simultaneous phase shift lateral shearing interferometry

假设  $\delta$  为  $\pi/2$ ,  $\theta$  为  $45^\circ$ , 则在偏振片阵列中每个小偏振片上干涉光线的琼斯矢量可以表示为:

后续利用四步相移算法<sup>[21]</sup>可计算出  $x$  方向的待测差分相位  $\Delta W_x$  及  $y$  方向的差分相位  $\Delta W_y$ :

$$\Delta W_x = W(x,y) - W(x+s,y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1}\right), \quad (6)$$

$$\Delta W_y = W(x,y) - W(x,y+s) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1}\right). \quad (7)$$

后续对获得的差分相位进行相位解包裹后利用差分 Zernike 算法<sup>[22]</sup>进行波面拟合。

### 2.1 四分之一波片误差模型

#### 2.1.1 相位延迟误差

当 1/4 波片由于制造误差而产生相位延迟

误差时, 会导致线偏振光经过它的时候, 不会变成理想的左旋或右旋圆偏振光。假设存在相位延迟误差的 1/4 波片的相位延迟量为  $\delta = \frac{\pi}{2} + \Delta\delta$ , 令  $\varepsilon = \frac{\delta}{2} = \frac{\pi}{4} + \frac{\Delta\delta}{2}$ , 则 1/4 波片的琼斯矩阵可以表示为:

$$G' = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon & -i\sin\varepsilon \\ -i\sin\varepsilon & \cos\varepsilon \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(8)分别代入式(3)、式(4)中, 可得到探测器像面上接收到的干涉图光强分布:

$$I = (E''_0)^2 + (E''_c)^2 + 2\sqrt{(E''_0)^2(E''_c)^2} \cos(\varphi_{E''_0} - \varphi_{E''_c}) = \sin 2\alpha \cos \varphi + \cos 2\alpha \sin 2\varepsilon \sin \varphi + \cos^2 \alpha \cos^2 \varepsilon + \sin^2 \alpha \sin^2 \varepsilon + \sin^2 \alpha \cos^2 \varepsilon \cos^2 \varphi + \sin^2 \alpha \sin^2 \varphi \cos^2 \varepsilon + \cos^2 \alpha \sin^2 \varepsilon \cos^2 \varphi + \cos^2 \alpha \sin^2 \varphi \sin^2 \varepsilon \quad (9)$$

式中:  $\varphi_{E''_0}$  与  $\varphi_{E''_c}$  为入射至每个小偏振片上两束光线的相位;  $\varphi$  为待测相位。

### 2.1.2 快轴方位角误差

如果 1/4 波片的快轴方向与  $x$  轴夹角不为  $45^\circ$ , 则在装调时会产生方位角误差。假设 1/4 波片快轴的方位角误差为  $\omega$ , 则 1/4 波片的琼斯矩阵可以表示为:

$$G' = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 - i\cos 2(\theta + \omega) & -i\sin 2(\theta + \omega) \\ -i\sin 2(\theta + \omega) & 1 + i\cos 2(\theta + \omega) \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(10)分别代入式(3)、式(4)中, 可得在探测器像面上接收到的干涉图光强分布:

$$I = (E''_0)^2 + (E''_c)^2 + 2\sqrt{(E''_0)^2(E''_c)^2} \cos(\varphi_{E''_0} - \varphi_{E''_c}) = 1 + \sin^2(2\omega - \alpha) + \cos^2(2\omega + \alpha) + 2\cos \alpha \sin \varphi \cos(2\omega + \alpha) - 2\cos \varphi \cos(2\omega + \alpha) \sin(2\omega - \alpha) + 2\sin \alpha \sin \varphi \sin(2\omega - \alpha) + 2\sin \alpha \cos \varphi \sin \varphi \cos(2\omega + \alpha) \quad (11)$$

## 2.2 偏振片阵列方位角误差模型

当偏振片阵列存在方位角误差时, 会导致相邻两个小偏振片透振方向之间的角度差不是  $45^\circ$ , 导致引入干涉图的相移量不是  $\pi/2$ 。假设偏振片阵列的方位角误差为  $\Delta\alpha$ , 令  $\gamma = \alpha + \Delta\alpha$ , 则偏振片阵列中每个小偏振片的琼斯矩阵可以表示为:

$$P = \begin{bmatrix} \cos^2\gamma & \frac{1}{2}\sin 2\gamma \\ \frac{1}{2}\sin 2\gamma & \sin^2\gamma \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(10)分别代入式(3)、式(4)中, 可得在探测器像面上接收到的干涉图光强分布:

$$I = (E''_0)^2 + (E''_c)^2 + 2\sqrt{(E''_0)^2(E''_c)^2} \cos(\varphi_{E''_0} - \varphi_{E''_c}) = 2 + 2\sin \varphi \cos 2\gamma + \sin 2\gamma \cos \varphi \quad (13)$$

## 3 误差分析与讨论

对系统中偏振器件误差对系统测量结果产生的影响进行仿真分析, 设计定量分析算法, 利用 MATLAB 软件进行仿真。仿真时首先利用前 36 项 Zernike 多项式构建原始波面, 网格数设置为 500 pixel $\times$ 500 pixel; 其次, 根据第二部分建立的数学模型, 对原始波面进行调制, 生成  $x$ 、 $y$  方向的剪切干涉图, 生成干涉图时选取剪切量为 50 pixels。最后, 利用四步相移算法以及差分 Zernike 波面拟合算法进行相位提取和波面重建, 得到最终的拟合波面, 并计算拟合波面与原始波面之间的残差值。

### 3.1 四分之一波片误差对测量结果的影响

#### 3.1.1 相位延迟误差

由文献 [23] 可知, 普通低级波片的相位延迟精度一般在  $(\pm 1)^\circ$  以内, 进行仿真时, 在  $-1^\circ \sim 1^\circ$  区间内以  $0.05^\circ$  为间隔对相位延迟误差  $\Delta\delta$  进行取值, 利用四步相移算法以及差分 Zernike 拟合对误差波面进行重建, 得到系统中 1/4 波片存在相位延迟误差时的残差 PV 值、RMS 值。根据得出的数据绘制出重建面形残差的 PV、RMS 值曲线, 如图 2(彩图见期刊电子版) 所示。

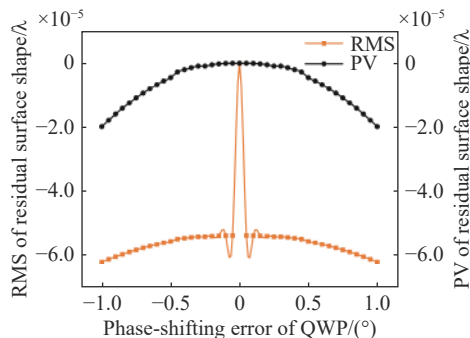


图 2 重建面形残差随相位延迟误差变化曲线  
Fig. 2 Residual surface shape varying with waveplate phase delay error

由图 2 可知, 当 1/4 波片的相位延迟误差达到  $1^\circ$  时, 重建面形的残差 PV 值与残差 RMS 值分别小于  $0.00002\lambda$  和  $0.000062\lambda$ 。

### 3.1.2 快轴方位角误差

1/4 波片快轴方位角误差的大小与 1/4 波片的调整误差有关, 目前市面上的波片调整架精度一般为  $(\pm 2)^\circ$ 。在进行仿真时, 在  $-2^\circ \sim 2^\circ$  区间内, 以  $0.1^\circ$  为间隔对波片快轴方位角误差  $\omega$  进行取值, 利用四步相移算法以及差分 Zernike 拟合对误差波面进行重建, 得到系统中 1/4 波片快轴存在方位角误差时的残差 PV 值、RMS 值数据。根据得出的数据绘制出重建面形残差 PV 值、RMS 值曲线, 如图 3 (彩图见期刊电子版) 所示。

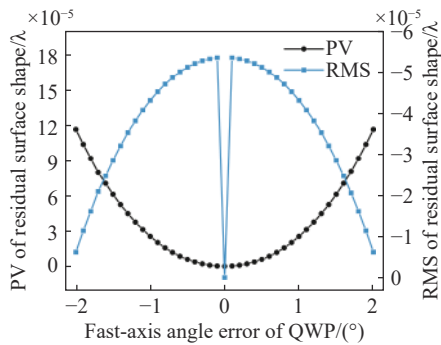


图 3 重建面形残差随快轴方位角误差变化曲线

Fig. 3 Residual surface shape varying with waveplate fast axis azimuth error

由图 3 可知, 当保证波片快轴方位角误差即调整架精度在  $2^\circ$  时重建波面的 PV 值以及 RMS 值偏差分别小于  $0.0001\lambda$  和  $0.00006\lambda$ 。

### 3.2 偏振片阵列方位角误差对测量结果的影响

基于现有偏振片阵列的加工精度水平, 进行仿真时, 在  $-1^\circ \sim 1^\circ$  区间内以  $0.05^\circ$  为间隔对偏振片阵列方位角误差  $\Delta\alpha$  进行取值, 利用四步相移算法

以及差分 Zernike 拟合对误差波面进行重建, 得到系统中存在偏振片阵列方位角误差时的重建面形残差的 PV 值、RMS 值。根据所得数据绘制偏振片阵列方位角误差与重构波面残差的 PV 值、RMS 值关系曲线图, 如图 4 (彩图见期刊电子版) 所示。

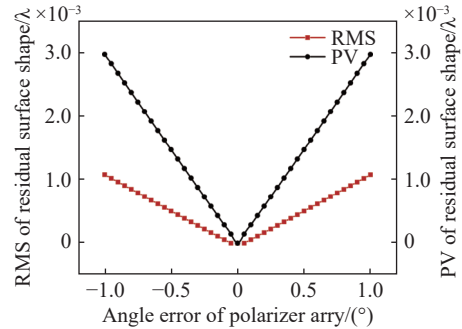


图 4 重建面形残差随偏振片阵列方位角误差变化曲线  
Fig. 4 Residual surface shape varying with polarizer array azimuth error

由图 4 可知, 偏振片阵列方位角误差与重建面形残差成正比关系, 偏振片阵列方位角误差越大, 波面测量误差越大。从仿真结果中可知当偏振片阵列方位角误差在  $\pm 0.3^\circ$  以内时, 可以保证残差 PV 值小于  $0.001\lambda$ , RMS 值小于  $0.0003\lambda$ ; 当偏振片阵列方位角误差在  $\pm 0.4^\circ$  至  $\pm 1^\circ$  之间时, 残差 PV 值在  $0.001\lambda$  至  $0.003\lambda$  之间, 残差 RMS 值在  $0.0004\lambda$  至  $0.001\lambda$  之间。

## 4 实验研究

### 4.1 实验装置

按照图 1 所示原理图搭建同步相移横向剪切干涉测量系统, 搭建的实验装置如图 5 所示。

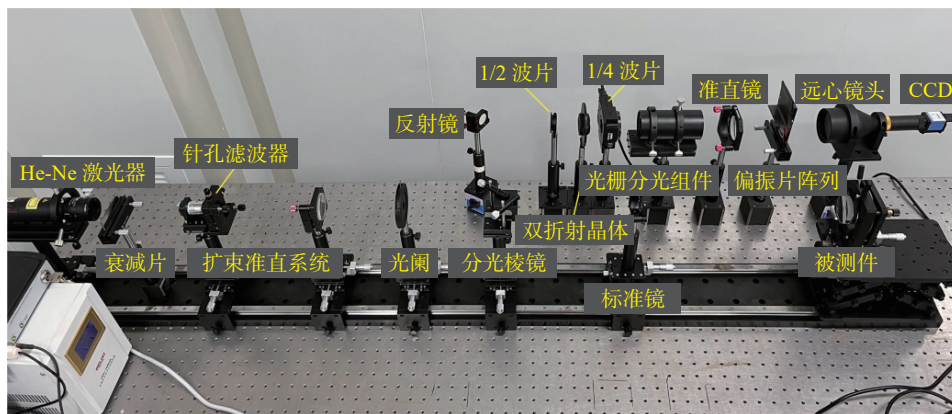


图 5 同步相移横向剪切干涉测量系统

Fig. 5 Synchronous phase-shift transverse shear interferometry system

系统中使用的氦氖激光器的波长为 632.8 nm; 衰减片为矩形金属膜渐变衰减片, 透过率为 1%~83%; 选用 40×显微物镜以及 5 μm 针孔相互配合对激光进行扩束并提高光束质量; 孔径光阑的通光孔大小为 10 mm; 作为剪切器的双折射晶体 o 光与 e 光的折射率分别为  $n_o = 1.65578$ ,  $n_e = 1.48520$ , 厚度为 9.28 mm, 经计算可以得到 o 光和 e 光的分束距离为 1.0 mm; 系统中所使用的棋盘光栅有效尺寸为 15 mm×15 mm, 基底为熔石英, 折射率  $n=1.457$ , 光栅周期为 20 μm, 刻蚀深度为 692 nm。被测件为口径  $D=50.8$  mm, 曲率半径  $R=400$  mm 的凹面反射镜。

#### 4.2 实验结果及讨论

为了验证所建立误差模型的有效性, 使用不同精度的器件在相同实验条件下进行对比实验, 并与仿真结果进行对比。分别选择相位延迟误差小于 1°以及 2°的四分之一波片进行实验, 相应的调整架精度分别为 0.001°和 2°。进行对比实验的两个偏振片阵列的尺寸均为 20 mm×20 mm, 但透光轴方位角的精度分别为  $\pm 1^\circ$  和  $\pm 2^\circ$ 。

对采集到的同步相移横向剪切干涉图进行图像分割、去噪、边缘提取等预处理后, 利用四步相移算法提取相位信息并对其解包裹, 最后使用 36 项差分 Zernike 多项式进行面形拟合, 表 1 给出了使用两种不同精度偏振器件得到的实验结果之间的残差与仿真结果之间的残差。

表 1 残差对比结果

Tab. 1 Comparative analysis of residual (Unit: λ)

	PV	RMS
实验结果残差	0.0058	0.0026
仿真结果残差	0.0040	0.0015

从表 1 中结果可以看出, 实验结果的残差值

与仿真结果的残差值之间的 PV 以及 RMS 偏差均小于  $\lambda/20$ , 在一定程度上说明了所建立模型的有效性。

## 5 结 论

为了对系统装调和误差补偿方法提供可靠的理论依据, 本文基于同步相移横向剪切干涉系统, 利用琼斯矩阵构建了系统中四分之一波片和偏振片阵列的误差模型, 并编写程序对系统中 1/4 波片的快轴方位角误差、相位延迟误差以及偏振片阵列的方位角误差进行定量仿真分析。理论分析结果表明: 当 1/4 波片的相位延迟误差达到 1°时, 重建波面的 PV 值与 RMS 值偏差分别小于 0.00002λ 和 0.000062λ; 装夹 1/4 波片的调整架精度影响着 1/4 波片快轴方位角误差, 当其偏差在 2°时重建波面的 PV 值以及 RMS 值偏差分别小于 0.0001λ 和 0.00006λ; 基于现有加工水平, 对于偏振片阵列而言, 当偏振片阵列方位角误差在  $\pm 1^\circ$  以内时, 重建波面的 PV 值与 RMS 值偏差分别小于 0.003λ 和 0.001λ。基于理论分析选择满足要求的器件展开实验研究, 使用不同精度的偏振器件验证本文提出模型的有效性, 实验结果的残差值与仿真结果的残差值的 PV 以及 RMS 值偏差均小于  $\lambda/20$ , 可以在一定程度上验证模型的有效性。

本文仅对同步相移横向剪切干涉系统中的偏振元器件误差进行具体理论分析, 建立误差模型, 并基于仿真结果对偏振元器件进行选型, 但为了获得精度更高的测量结果, 还需要进一步优化系统, 减小其余误差源对测量结果的影响, 如光路中的透镜俯仰角误差、干涉图配准误差、棋盘光栅刻蚀误差等对测量结果的影响, 这几部分误差的分析将在后续工作中进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] 侯溪, 张帅, 胡小川, 等. 超高精度面形干涉检测技术进展[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 200209. HOU X, ZHANG SH, HU X CH, et al.. The research progress of surface interferometric measurement with higher accuracy[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 200209. (in Chinese).
- [2] 张梦瑶, 田爱玲, 王大森, 等. 基于逆向优化策略的面形绝对检测平移量研究[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1804003. ZHANG M Y, TIAN A L, WANG D S, et al.. Translation of surface shape absolute testing based on reverse optimization strategy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1804003. (in Chinese).
- [3] LIU X, GAO Y, CHANG M. A new lateral shearing interferometer for precision surface measurement[J]. *Optics and*

- Lasers in Engineering*, 2009, 47(9): 926-934.
- [4] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1504001.  
TAN Y D, XU X, ZHANG SH L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1504001. (in Chinese).
- [5] 梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 161-186.  
LIANG Z J, Yang Y Y, ZHAO H Y, *et al.*. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 161-186. (in Chinese).
- [6] WANG S Q, LIU B C, WANG H J, *et al.*. Improving the phase reconstruction accuracy of simultaneous phase-shifted lateral shearing interferometry using a polarization redundant sub-region interpolation method[J]. *Optics Express*, 2022, 30(19): 34297-34313.
- [7] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(1): 26-46.  
SHI T, YANG Y Y, ZHANG L, *et al.*. Surface testing methods of aspheric optical elements[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 26-46. (in Chinese).
- [8] GU L Y, LIU L, HU SH Y, *et al.*. Polarization phase-shifting lateral shearing interferometer with two polarization beam splitter plates[J]. *Optical Review*, 2017, 24(4): 600-604.
- [9] ZHANG R, YANG Y Y, ZHAO H Y, *et al.*. Non-null testing of the aspheric surface using a quadriwave lateral shearing interferometer[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(18): 5447-5456.
- [10] LI P, TANG F, WANG X ZH. Relationship between shear ratio and reconstruction accuracy in lateral shearing interferometry[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(3): 034113.
- [11] 徐春生. 同步移相抗振干涉的研究[D]. 南京理工大学, 2006.  
XU CH SH. *Study on simultaneous phase-shifting anti-vibration interference*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006. (in Chinese).
- [12] 李杰, 唐锋, 王向朝, 等. 光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0508006.  
LI J, TANG F, WANG X ZH, *et al.*. System errors analysis of grating lateral shearing interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(5): 0508006. (in Chinese).
- [13] MIAO X Y, MA J, YU Y F, *et al.*. Modelling and correction for polarization errors of a 600 mm aperture dynamic Fizeau interferometer[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 33355-33370.
- [14] ZHU Y H, TIAN A L, WANG H J, *et al.*. Analysis of the influence of simultaneous phase-shifting shearing interference polarizer[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(10): 104102.
- [15] 钱克矛, 伍小平. 利用位相光栅的实时偏振相移方法的误差分析[J]. *激光杂志*, 2000, 21(6): 17-20.  
QIAN K M, WU X P. A real-time polarization phase shifting method: error analysis[J]. *Laser Journal*, 2000, 21(6): 17-20. (in Chinese).
- [16] WANG H J, WANG Z, TIAN A L, *et al.*. Modeling and analysis of commonpath phase shifting shear system based on birefringent optical devices[J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2008, 17(4): 503-510.
- [17] WANG D D, WANG CH, TIAN XB, *et al.*. Snapshot phase-shifting lateral shearing interferometer[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106032.
- [18] 左芬, 陈磊. 一种同步移相干涉测量系统的误差研究[J]. *光学技术*, 2009, 35(4): 536-540.  
ZUO F, CHEN L. Errors researching for a simultaneous phase shifting interferometer[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(4): 536-540. (in Chinese).
- [19] 蒋超, 郭仁慧, 张辉钦, 等. 基于四分之一波片的菲佐型同步移相干涉测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101203.  
JIANG CH, GUO R H, ZHANG H Q, *et al.*. Method of Fizeau simultaneous phase-shifting interferometry based on quarter-wave plate[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101203. (in Chinese).
- [20] ZHENG D H, CHEN L, LI J P, *et al.*. Simultaneous phase-shifting interferometry: immune to azimuth error of fast-axes in retarder array[J]. *Appl. Opt.*, 2015, 54(33): 9803-9808.
- [21] MIAO X Y, YU Y F, LI A B, *et al.*. Optical phase-shifting methods based on low coherence laser for large aperture Fizeau interferometer[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106513.
- [22] LIU K, WANG J N, WANG H, *et al.*. Wavefront reconstruction for multi-lateral shearing interferometry using



- difference Zernike polynomials fitting[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 75-81.
- [23] 郑东晖, 李金鹏, 陈磊, 等. 空域移相偏振点衍射波前检测技术[J]. *物理学报*, 2016, 65(11): 114203.
- ZHENG D H, LI J P, CHEN L, *et al.*. Spatial phase-shifting polarization point-piffraction interferometer for wavefront measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(11): 114203. (in Chinese).

作者简介:



刘丙才(1981—), 男, 山东梁山人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2015年于西安交通大学仪器科学与技术学院获得博士学位, 主要从事数字全息、光学信息处理与精密光学仪器方面的科研工作。  
E-mail: [liubingcai@xatu.edu.cn](mailto:liubingcai@xatu.edu.cn)