

# 用于瞬态波前检测的四波横向剪切干涉系统

朱文华 陈磊 谷晨风 郑东晖 李金鹏 曹慧

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 为检测瞬态波前的三维分布,提出了一种共光路结构的剪切干涉测试系统。该系统使用棋盘光栅与光阑,将待测波前分解为四支互相错位的波前,这些波前两两相干,最终叠加形成一幅高载频的干涉图。根据光强传输方程以及傅里叶光学理论,建立了剪切干涉测试系统的理论模型,采用傅里叶变换算法提取待测波前。提出了一种剪切量标定算法,通过讨论线性载频的影响因素与光栅的衍射效率,给出了棋盘光栅的具体设计参数。实验搭建了瞬态波前检测装置,实现了自动化高精度测量,波面检测结果的峰谷(PV)值、均方根(RMS)值以及Zernike拟合系数均与SID4波前探测器所测波面结果一致。因此采用该技术能够实现瞬态波前检测。

**关键词** 测量;四波横向剪切干涉;瞬态波前检测;棋盘光栅;剪切量标定

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.121201

## Four-Wave Lateral Shearing Interferometry System for Transient Wavefront Measurement

Zhu Wenhua Chen Lei Gu Chenfeng Zheng Donghui Li Jinpeng Cao Hui

*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China*

**Abstract** In order to detect the three-dimensional distribution of transient wavefront, a shearing interferometric measurement system with common path configuration is proposed. The system uses a chessboard grating and aperture to divide the wavefront under test into four replicas with shear. Each two of the replicas are coherent to form an interferogram with high carrier frequency. According to the transport of intensity equation and Fourier optics, the theoretical model of shearing interferometric measurement system is established and the wavefront under test is reconstructed by Fourier transform algorithm. A calibration method of shear is proposed. The design of chessboard grating is given by discussing linear carrier frequency and diffraction efficiency of the grating. Experimentally the proposed system is applied to measure transient wavefront, and automatic measurement with high precision is achieved. Peak-to-valley (PV) value, root-mean-square (RMS) value and Zernike fitting coefficient of the measured result are in good agreement with those obtained by SID4 wavefront sensor. This system can be applied to transient wavefront measurement.

**Key words** measurement; four-wave lateral shear interferometry; transient wavefront measurement; chessboard grating; calibration of shear

**OCIS codes** 120.3180; 120.4820; 070.6020; 220.4840

## 1 引言

近年来,瞬态波前检测在天文光学、强激光等领域中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。天文光学中通过检测瞬态波前来对光学系统进行自适应补偿<sup>[2]</sup>,强激光领域中,特别是大口径激光系统中,对波前质量的要求相当严格,微小的波前畸变会对聚焦到目标上的能量分布产生较大影响<sup>[3]</sup>。

目前最常用的波前检测方法是哈特曼波前传感器与干涉测量,其中哈特曼传感器<sup>[4-5]</sup>主要是通过使用一

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-06-29; 网络出版日期: 2015-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(U1231111)

作者简介: 朱文华(1992—),男,博士研究生,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: mlwdjq@163.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等方面的研究。

E-mail: chenlei@njust.edu.cn(通信联系人)

个微透镜阵列测量其不同子孔径下的斜率来检测。哈特曼波前传感器有一个很大的动态范围,但其分辨率相对干涉测量来说较低。对于干涉测量来说,传统的时间移相干涉术难以满足瞬态波前的测试要求。目前现有的基于干涉测量原理的瞬态波前检测方法主要有点衍射法<sup>[6-8]</sup>与剪切干涉法<sup>[9]</sup>。点衍射方法检测波前的关键器件为点衍射板,待测的会聚波前经点衍射板上的针孔衍射,产生近似理想的参考球面波,从点衍射板中直接透射或反射的为携带待测波前信息的测试光波,两者发生干涉,待测波前的相位分布可从干涉图中解调出来。点衍射干涉法检测波前的精度较高,结构紧凑,但由于针孔尺寸很小,调整过程中,会聚光波与针孔的对准较为困难,并且对振动较为敏感。基于剪切干涉法的瞬态波前检测方法是通过恢复干涉图中包含的波面梯度信息并结合波前重构算法得到待测波面。对于径向剪切干涉仪来说,由于其共光路的特点,拥有很高的精度与重复性,但是其机械结构很大<sup>[10-12]</sup>。而横向剪切干涉仪相对来说结构紧凑。传统的横向剪切干涉仪在检测波前时,需要分别在两正交方向上进行剪切干涉,调整过程既费时,又易引入误差。四波横向剪切干涉仪<sup>[13-17]</sup>一般采用二维光栅作为分光器件将待测波前分为四支,并使它们发生横向剪切干涉,此时得到的单幅载频干涉图中包含两正交方向的差分波前信息,通过波前重构,可实现瞬态波前检测。由于二维光栅很难设计成理想的正弦透射结构以实现只产生 $(\pm 1, \pm 1)$ 级四支光,故而只能设计成近似正弦透射结构的矩形结构以较大程度上地抑制其他级次的衍射光。虽然其他级次的衍射光较弱,但难免会对干涉图产生影响。此外,由于没有使 CCD 靶面与出瞳共轭的成像镜头,难以直接对出瞳处的波前进行测量。

本文采用四波横向剪切干涉的原理,提出了一种共光路结构紧凑的剪切干涉测试系统。该系统使用棋盘光栅与光阑相结合产生四支互相错位的测试波前。在 CCD 靶面上叠加形成一幅高载频的干涉图。采用傅里叶变换算法<sup>[15,18]</sup>提取待测波前,实现了瞬态波前的测量。根据光强传输方程以及傅里叶光学相关理论建立了剪切干涉测试系统的理论模型。为实现自动化高精度测量,提出了一种剪切量标定算法,通过讨论线性载频的影响因素与光栅的设计,给出了光栅的具体设计参数。

## 2 原理

剪切干涉测试系统如图 1 所示,该系统由棋盘型位相光栅、光阑、成像透镜、CCD 组成。待测波前经过棋盘光栅衍射,产生多束包含待测波前信息的光束,在待测波前的焦平面上将产生多个焦点。将光阑置于待测波前焦面处,仅让 $(\pm 1, \pm 1)$ 级衍射光能从光阑通过,而滤除其他级次的衍射光。在 CCD 靶面处,上述四束光产生干涉,形成干涉图。其中成像透镜对出瞳成像。

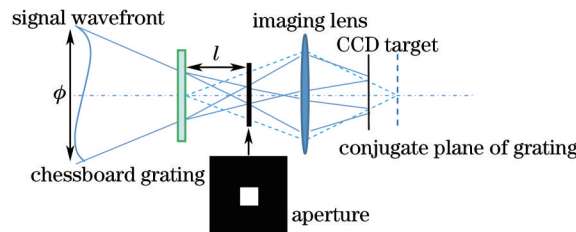


图 1 波前检测系统示意图

Fig.1 Schematic of wavefront measurement system

利用光强传输方程以及傅里叶光学相关理论建立波前检测系统的理论模型。假设待测光波的复振幅分布为

$$A(\mathbf{r}) = \exp[ikW(\mathbf{r})], \quad (1)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为光源波长,  $W(\mathbf{r})$  为待测波面函数。经光栅后得到的四个同等级次的衍射波前,可表达为

$$A_m(\mathbf{r}) = \exp\{i[kW(\mathbf{r}) + \mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r}]\}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{k}_m$  ( $m=1,2,3,4$ ) 分别为四支复制光波的波矢。

光栅出瞳位置处的光强分布  $I_0$  可表示为

$$I_0(\mathbf{r}) = \left| \sum_{m=1}^4 A_m(\mathbf{r}) \right|^2 = 4 + \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^4 \exp[i(\mathbf{k}_m - \mathbf{k}_n) \cdot \mathbf{r}]. \quad (3)$$

假设成像透镜是理想的,并且忽略其放大率的影响,则光栅共轭面处的光强分布  $I'_0 = I_0$ 。根据光强传输方程,在距离光栅共轭面距离  $L$  的 CCD 靶面处,干涉光场为<sup>[19]</sup>

$$I_L(\mathbf{r}) = I_0(\mathbf{r}) + L[\nabla I_0(\mathbf{r}) \cdot \nabla W(\mathbf{r}) + I_0(\mathbf{r}) \cdot \nabla^2 W(\mathbf{r})] = 4f(\mathbf{r}) + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^4 \left[ f(\mathbf{r}) + iL \| \mathbf{k}_m - \mathbf{k}_n \| \alpha_{mn} \frac{\partial W}{\partial x_{mn}}(\mathbf{r}) \right] \times \exp[i(\mathbf{k}_m - \mathbf{k}_n) \cdot \mathbf{r}], \quad (4)$$

式中  $\nabla$  为梯度算子,  $f(\mathbf{r}) = 1 + L\nabla^2 W(\mathbf{r})$ ,  $x_{mn}$  是  $\mathbf{k}_m - \mathbf{k}_n$  的方向,  $\frac{\partial W}{\partial x_{mn}}(\mathbf{r})$  是  $W(\mathbf{r})$  对  $x_{mn}$  方向的偏导数,系数  $\alpha_{mn}$  由两个复制波前  $A_m$  和  $A_n$  之间的距离决定,  $\|\cdot\|$  为向量范数运算符,如果  $\{m,n\} = \{1,4\}$  或  $\{2,3\}$ ,则  $\alpha_{mn}$  等于  $\sqrt{2}$ ,其他情况下  $\alpha_{mn}$  等于 1。

将空域得到的光强信息转换到频域,即对(4)式给出的  $I_L$  进行傅里叶变换,可得

$$F_T(I_L)(\mathbf{u}) = 4F_T(f)(\mathbf{u}) + \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^4 \left[ F_T(f)(\mathbf{u}) + iL \| \mathbf{k}_m - \mathbf{k}_n \| \times \alpha_{mn} F_T\left(\frac{\partial W}{\partial x_{mn}}\right)(\mathbf{u}) \right] * \delta[(\mathbf{k}_m - \mathbf{k}_n) - \mathbf{u}], \quad (5)$$

式中  $\mathbf{u}$  为空域中的矢量  $\mathbf{r}$  在频域对应的矢量,  $*$  为卷积运算,  $\delta$  为狄拉克函数。由(5)式可看出,光强分布  $I_L$ ,即所获取的四波剪切干涉图的频谱成分由与  $\delta$  函数相关联的零频信号(0,0)和四对基频信号( $\pm 1,0$ )、( $0,\pm 1$ )、( $\pm 1,\pm 1$ )组成。零频信号对应于缓慢变化的背景光强,四对基频信号则对应于四个方向,即  $x$ 、 $y$ 、 $x+y$ 、 $x-y$  方向的差分波前信息。 $\|\mathbf{k}_m - \mathbf{k}_n\|$  表示对应方向上载频的大小,由光栅常数、光栅到光阑的距离、测试光束  $F$  数等因素决定。其具体形式将在第 4 节进行讨论。

利用傅里叶算法<sup>[20-22]</sup>,通过选取(1,0)或(-1,0)级基频信号做逆傅里叶变换即可得到  $x$  方向的差分波前,同理也可以得到  $y$  方向的差分波前。最后通过波前重构算法由  $x$ 、 $y$  方向差分波前重构出原始波前。

### 3 实 验

实验装置如图 2 所示。由点光源发出一个中心波长为 532 nm 的标准球面波,该球面波通过一个直径为 25.4 mm 的待测透镜会聚形成待测波前,其  $F$  数为 10。待测波前被一个光栅常数  $\Lambda = 200 \mu\text{m}$  的棋盘光栅衍射产生多束光波。经过光阑后,最终被滤出的四支衍射光通过成像透镜到达 CCD 靶面,形成一幅四波剪切干涉图。

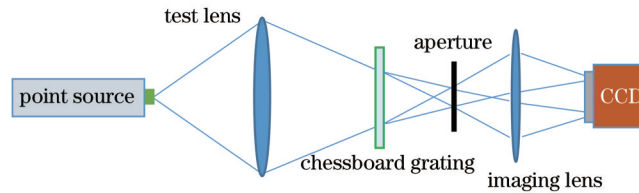


图 2 实验装置图

Fig.2 Experimental setup

CCD 采集到的一帧四波剪切干涉图(分辨率为 900 pixel×900 pixel)如图 3(a)所示。由图可知干涉图具有高线性载频特征。利用傅里叶方法重构出的相位如图 3(b)所示,其峰谷(PV)值为  $3.272 \lambda$ ,均方根(RMS)值为  $0.714 \lambda$ 。为了定量化验证所提方法的可靠性,在同样的实验条件下,利用 SID4 波前传感器<sup>[15]</sup>测量波前,测得的结果如图 3(c)所示,其 PV 值为  $3.254 \lambda$ ,RMS 值为  $0.716 \lambda$ 。此外,利用 35 项 Zernike 多项式拟合图 3(b)和(c)的波面,将拟合的系数在同一坐标轴下绘制成如图 3(d)所示的曲线,两条曲线基本重合。对比以上实验数据,可以看出两者的测试结果基本吻合,从而证明所提方法的正确性。

### 4 讨 论

#### 4.1 剪切量的标定

波前的重构是利用两个正交方向的差分波面计算得到,而差分波前的准确性与剪切量密切相关<sup>[18]</sup>。根据图 1 中光路的几何关系可以得到剪切量

$$s = \frac{2\lambda f}{\Lambda \delta} - \frac{2\lambda f}{\Lambda d \phi F}, \quad (6)$$

式中  $f$  为成像透镜的焦距,  $A$  为光栅常数,  $d$  为 CCD 像元的边长,  $l$  为光栅与光阑之间的距离,  $\phi$  为出瞳直径,  $F$  为待测波前的  $F$  数。从(6)式可知,对于不同孔径和不同  $F$  数的入射波前而言,剪切量均会发生变化,故而剪切量的准确性直接影响波前重构精度。为实现自动化高精度测量,需要对剪切量自动化标定。对于一般的两波横向剪切干涉,其确定剪切量的方法主要有公式法<sup>[23]</sup>和成像法<sup>[24]</sup>。

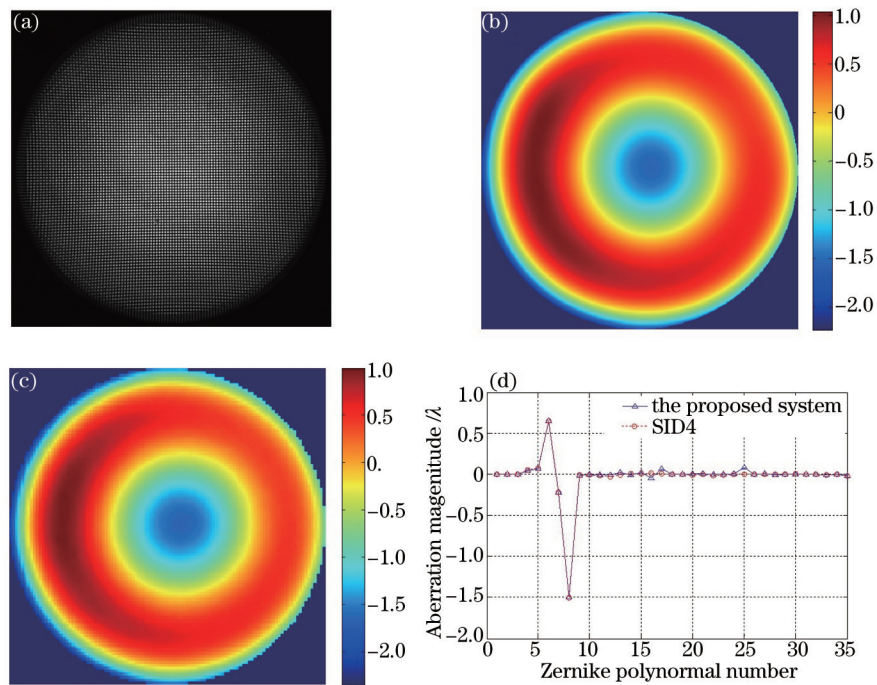


图3 实验结果。(a) 四波剪切干涉图; (b) 本系统重构相位; (c) SID4 重构相位; (d) Zernike 拟合系数

Fig.3 Experimental results. (a) Interferogram; (b) reconstructed phase by the system; (c) reconstructed phase by SID4; (d) Zernike polynomial fit coefficients

以上两种方法通常适用于一般两波横向剪切干涉的剪切量标定,但对于这里采用的四波横向剪切干涉方案,若采用公式法对剪切量进行标定,需要事先知道被测光束的参数,不能保证测量的实时性,且相关参数的测量相对困难;若采用成像法,由于四波剪切干涉图分为非干涉区域、两波干涉区域、三波干涉区域和四波干涉区域,其光强分布较两波剪切干涉图更为复杂,故光强特征点的选取及其位置的确定较为困难,剪切量标定的不确定性较大。

这里提出一种子孔径成像方法标定剪切量。将一个直径微小的圆形光阑(实验中使用的圆形光阑直径为 0.3 mm)放置在待测系统的出瞳位置,此时经过光阑后的光束相当于原出瞳的一个子孔径光束,故而其传播的路径与原光束相同,因此经过剪切干涉系统后,在 CCD 靶面上的剪切量也相同。不同的是由于子孔径较小,CCD 靶面上得到的将是四个相互错位的光斑。实验结果如图 4 所示。

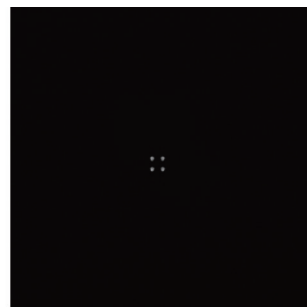


图4 子孔径光斑

Fig.4 Sub-aperture spots

剪切量的标定等价于计算图 4 中四个光斑中任意相邻两个光斑的间距。下面给出一种精确计算光斑间距的步骤:

- 1) 对图 4 进行二值化处理<sup>[25]</sup>;

- 2) 对二值化后的四个光斑区域贴标签;
- 3) 分别计算每个区域的质心<sup>[26]</sup>;
- 4) 分别计算相邻两个质心的距离;
- 5) 为了提高精度,对步骤4)所求的四个距离求平均值作为最终的剪切量。

由图4计算得到的剪切量为27.9 pixel。另一方面,由于这里实验中 $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $\phi = 25.4 \text{ mm}$ ,  $F = 10$ ,  $\Lambda = 200 \mu\text{m}$ ,  $\delta = 3.75 \mu\text{m}$ ,  $l = 112 \text{ mm}$ ,  $f = 35 \text{ mm}$ ,根据(6)式计算剪切量为27.7 pixel,验证了算法的准确性。

#### 4.2 载频的选取

根据傅里叶变换算法,载频越大,测量的动态范围越大。然而根据奈奎斯特采样定理,干涉图上的每个网格点的采样点必须多于 $2 \times 2$ 个。根据图1中光路的几何关系可以得到水平或垂直方向的网格点数

$$N = \frac{2l}{\Lambda F} - \frac{2sdl}{\Lambda f} \quad (7)$$

由于剪切量 $s$ 较小,(7)式可以近似为

$$N \approx \frac{2l}{\Lambda F} \quad (8)$$

由(8)式可以得出,光栅到光阑的距离 $l$ 越大,或者光栅常数与待测波面 $F$ 数越小,网格点数将越多,从而对CCD分辨率的要求将更高。由于光栅常数 $\Lambda$ 为 $200 \mu\text{m}$ ,对于实验中所测量的 $F/10$ 待测波面,为使干涉图的网格点数为110,光栅到光阑的距离 $l$ 设计为 $112 \text{ mm}$ ,结合(6)式和(7)式理论上网格点数约为110,图3(a)所示的干涉图网格点数为109,与设计值相符。

#### 4.3 光栅衍射效率

这里使用 $(\pm 1, \pm 1)$ 级衍射光作为相干光束,为了充分利用入射光束的能量,必须保证这四支光具有较高且相等的衍射效率,与此同时,衍射光栅还应尽可能地抑制其他级次衍射光束的能量。因此这里选用了棋盘光栅作为分光器件。棋盘光栅是一种具有棋盘结构的位相光栅,其刻蚀区与非刻蚀区之间的相位差为 $\pi$ <sup>[6]</sup>。其 $(0,0)$ 、 $(0, \pm 1)$ 和 $(\pm 1, 0)$ 衍射级次被完全抑制,即衍射效率为0%; $(\pm 1, \pm 1)$ 级四支光中每支光的衍射效率相同且最大,总衍射效率超过65%<sup>[27]</sup>。由于这里实验中入射光波长为 $532 \text{ nm}$ ,光栅基底材料为融石英玻璃,相应的刻蚀深度应设计为 $577 \text{ nm}$ ,从而有效利用衍射光的能量,较大程度上保证最终获得的四波横向剪切干涉图的质量。

#### 4.4 光阑设计

光阑的作用是将经过光栅衍射的 $(\pm 1, \pm 1)$ 衍射级次保留,而将其他衍射级次滤除。根据4.3节分析,由于 $(0,0)$ 、 $(0, \pm 1)$ 和 $(\pm 1, 0)$ 衍射级次被完全抑制,故而将光阑设计为一个正方形小孔即可保证只滤出 $(\pm 1, \pm 1)$ 衍射级次。此外,采用正方形小孔的设计将使得调整更为方便。

为了较好地滤出 $(\pm 1, \pm 1)$ 级四支光,需要合理选择光阑的大小。根据图1中光栅与光阑的位置关系,可得光阑面上相邻衍射级次之间的距离为 $\lambda/\Lambda$ 。故而正方光阑的边长应大于 $2\lambda/\Lambda$ ,同时小于 $4\lambda/\Lambda$ 以保留 $(\pm 1, \pm 1)$ 衍射级次,而将其他衍射级次滤除。实验中相邻衍射级次之间的距离约为 $0.3 \text{ mm}$ ,光阑边长选择为 $1 \text{ mm}$ 可满足设计要求。

#### 4.5 成像透镜引入的像差

成像透镜的引入是为了使CCD靶面与出瞳共轭,从而获得出瞳处的测试波面。然而成像透镜自身是含有像差的,由于从光阑滤出的四支衍射光是互相剪切的,并不是完全共光路,故而由成像透镜所引入的像差将不能互相抵消。本系统中光阑与成像透镜构成像方远心光路结构,即光阑位于成像透镜的前焦面,使得CCD靶面的四个光斑大小不随CCD的位置改变。因此可以设计成像透镜使其对前焦面消像差,从而使得透过光阑的四支光经过成像透镜后引入的像差可以忽略。

为了满足高精度测量的要求,需要对实验中使用的成像镜头进行标定。由于 $(\pm 1, \pm 1)$ 衍射级次是对称分布的,且成像透镜是旋转对称的,因此只需测量任意一个级次经过成像透镜引入的像差即可。使用一个标准的点光源产生一标准的发散球面波,使其球心位于成像透镜的前焦面,并且与成像透镜的前焦点相距 $0.42 \text{ mm}$ ,即 $(\pm 1, \pm 1)$ 衍射级次与 $(0,0)$ 级次之间的距离,经过成像透镜之后的波前利用SID4波前探测器测量,其中发散角可以通过光阑来调整,由此可以测出 $F/10$ 条件下,成像透镜的透射波前误差,消去倾斜与离焦

后的结果如图5所示,其PV值为  $0.067\lambda$ , RMS值为  $0.011\lambda$ 。从测量结果中可以发现成像透镜所引入的像差相对较小,其四个波面剪切后的误差将更加微不足道。此外还可以在测试结果中减去该误差。

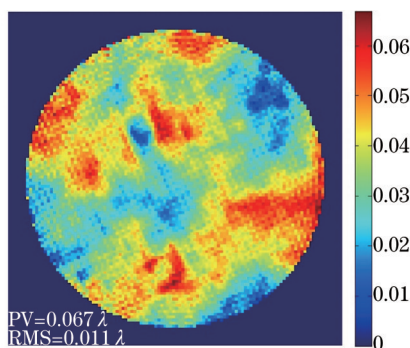


图5 成像透镜引入的像差

Fig.5 Wavefront aberration introduced by imaging lens

## 5 结 论

本文采用四波横向剪切干涉的原理,提出了一种共光路结构紧凑的剪切干涉测试系统。使用棋盘光栅与光阑相结合产生四支互相错位的测试波前。在 CCD 上叠加形成一幅高载频的干涉图。实现了瞬态波前的高分辨测量。实验结果与 SID4 波前探测器基本一致,证明了所提方法的正确性。通过在出瞳处放置一个微小的圆形光阑,高精度的标定了剪切量。在该系统中可以通过设计光栅参数以及光栅与光阑之间的距离参数实现干涉图的高线性载频加载。选择位相型棋盘光栅,可以有效利用衍射光能量,保证最终获得四波横向剪切干涉图的质量。

## 参 考 文 献

- 1 Daniel Malacara. Optical Shop Testing[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- 2 T Shirai, T H Barnes, T G Haskell. Adaptive wave-front correction by means of all-optical feedback interferometry[J]. Opt Lett, 2000, 25(11): 773-775.
- 3 C Hernandez-Gomez, J L Collier, S J Hawkes, *et al.*. Wave-front control of a large-aperture laser system by use of a static phase corrector[J]. Appl Opt, 2000, 39(12): 1954-1961.
- 4 J Primot. Theoretical description of Shack-Hartmann wave-front sensor[J]. Opt Commun, 2003, 222(1): 81 - 92.
- 5 J Primot, N Guérineau. Extended Hartmann test based on the pseudoguiding property of a Hartmann mask completed by a phase chessboard[J]. Appl Opt, 2000, 39(31): 5715-5720.
- 6 Fuzhong Bai, Xiaoqiang Wang, Kaizheng Huang, *et al.*. Analysis of spatial resolution and pinhole size for single-shot point-diffraction interferometer using in closed-loop adaptive optics[J]. Opt Commun, 2013, 297: 27-31.
- 7 J E Millerd, N J Brock, J B Hayes, *et al.*. Instantaneous phase-shift point-diffraction interferometer[C]. SPIE, 2004, 5531: 264-272.
- 8 R M Neal, J C Wyant. Polarization phase-shifting point-diffraction interferometer[J]. Appl Opt, 2006, 45(15): 3463-3476.
- 9 V Ronchi. Forty years of history of a grating interferometer[J]. Appl Opt, 1964, 3(4): 437-451.
- 10 P Hariharan, D Sen. Radial shearing interferometer[J]. J Scientific Instruments, 1961, 38(11): 428.
- 11 Tong Ling, Dong Liu, Yongying Yang, *et al.*. Off-axis cyclic radial shearing interferometer for measurement of centrally blocked transient wavefront[J]. Opt Lett, 2013, 38(14): 2493-2495.
- 12 Dong Liu, Yongying Yang, Lin Wang, *et al.*. Real time diagnosis of transient pulse laser with high repetition by radial shearing interferometer[J]. Appl Opt, 2007, 46(34): 8305-8314.
- 13 P Bon, G Maucort, B Wattellier, *et al.*. Quadriwave lateral shearing interferometry for quantitative phase microscopy of living cells[J]. Opt Express, 2009, 17(15): 13080-13094.
- 14 C Rouyer, S Mousset. Piston measurement by quadriwave lateral shearing interferometry[J]. Opt Lett, 2006, 31(17): 2634-2636.
- 15 S Velghe, J Primot, N Guérineau, *et al.*. Wave-front reconstruction from multidirectional phase derivatives generated by multilateral shearing interferometers[J]. Opt Lett, 2005, 30(3): 245-247.

- 16 S Velghe, J Primot, N Guérineau, *et al.*. Advanced wave-front sensing by quadri-wave lateral shearing interferometry[C]. SPIE, 2006, 6292: 62920E.
- 17 J C F Chanteloup, M Cohen. Compact high resolution four wave lateral shearing interferometer[C]. SPIE, 2004, 5252: 282-292.
- 18 F Roddier, C Roddier. Wavefront reconstruction using iterative Fourier transforms[J]. Appl Opt, 1991, 30(11): 1325-1327.
- 19 S Velghe, R Haïdar, N Guérineau, *et al.*. In situ optical testing of infrared lenses for high-performance cameras[J]. Appl Opt, 2006, 45(23): 5903-5909.
- 20 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(1): 156-160.
- 21 C Roddier, F Roddier. Interferogram analysis using Fourier transform techniques[J]. Appl Opt, 1987, 26(9): 1668-1673.
- 22 W W Macy. Two-dimensional fringe-pattern analysis[J]. Appl Opt, 1983, 22(23): 3898-3901.
- 23 B Bhaduri, M P Kothiyal, N K Mohan. Curvature measurement using three-aperture digital shearography and fast Fourier transform[J]. Opt & Lasers in Eng, 2007, 45(10): 1001-1004.
- 24 T W Ng, F S Chau. Automated linear shear measurements in digital shearing speckle interferometry[J]. Opt Eng, 1994, 33(5): 1728-1729.
- 25 Xu Wenyu, Bai Tingzhu, Liu Yang, *et al.*. Real-time laser facula detection based on top-three-neighborhood-region continuous-pixels numbering[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1212002.  
徐文宇, 白廷柱, 刘洋, 等. 基于上三邻域连续点计数的激光光斑实时检测[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1212002.
- 26 Wu Congjun, Yan Changxiang, Liu Wei. Analysis of optical aberration impact on acquisition performance[J]. Chinese J Lasers, 40(10): 1005004.  
吴丛均, 颜昌翔, 刘伟. 像差对通信捕获光斑质心的影响分析[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1005004.
- 27 Fang Bo. Research on Wavefront Measurement by Four-Wave Lateral Shear Interferometry Based on Phase Grating[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014: 26-27.  
方波. 基于位相光栅的四波横向剪切干涉法波前检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 26-27.

栏目编辑: 何卓铭