

基于 LC-SLM 的空间载波相移剪切散斑干涉

王永红*, 谢昊天, 孙方圆, 刘向玮, 吴双乐, 葛朋祥

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 针对传统空间载波相移剪切散斑干涉系统中剪切量难以快速、定量、精确调节的问题,提出了一种利用液晶空间光调制器(LC-SLM)调制剪切量的空间载波相移剪切散斑干涉测量系统。采用 LC-SLM 作为剪切量调制器件,通过电寻址的方式对 LC-SLM 工作区域内每个微小液晶单元的相位精确控制,通过透镜的傅里叶变换,将频域内的相移调制转化为空间域的位移调制,从而达到精确调整剪切量的目的。组建实验系统,对本文方法进行了实验验证,实验结果表明,该系统可以对物体变形引起的干涉相位变化进行全场测量,通过在 LC-SLM 中写入周期条纹图像,可以调节剪切量,同时也可以对空间载波频率进行调整。该系统与传统空间载波剪切散斑干涉系统相比,具有定量、精确、快速调节剪切量的优势。

关键词 测量; 剪切散斑干涉; 液晶空间光调制器; 空间载波; 剪切量

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1512001

Spatial Carrier Phase-Shift Shearography Based on LC-SLM

Wang Yonghong*, Xie Haotian, Sun Fangyuan, Liu Xiangwei, Wu Shuangle, Ge Pengxiang

*School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology,**Hefei, Anhui 230009, China*

Abstract To solve the problem that the shearing amount in traditional spatial carrier phase-shift shearography systems is hard to be rapidly, quantitatively, and precisely modulated, this paper proposes a spatial carrier phase-shift shearography system based on a liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM). With LC-SLM as a shearing amount modulator, the phase of each tiny liquid crystal unit in the working area of LC-SLM is precisely controlled by electrical addressing, and the phase-shift modulation in the frequency domain is converted into displacement modulation in the spatial domain through the Fourier transform of lens. As a result, the shearing amount can be modulated accurately. An experimental setup is developed to verify the proposed method. The experimental results show that this system can carry out the full-field measurement of interference phase changes caused by object deformation. By writing the periodic fringe images in LC-SLM, this system can modulate the shearing amount and the spatial carrier frequency. Compared with the traditional spatial carrier phase-shift shearography system, the proposed system can quantitatively, accurately, and rapidly modulate the shearing amount.

Key words measurement; shearography; liquid crystal spatial light modulator; spatial carrier; shearing amount

OCIS codes 120.6165; 230.6120; 120.1880

1 引言

液晶空间光调制器(LC-SLM)是一种利用液晶的电光效应对光波的空间分布进行调制的光学元

件^[1-2]。LC-SLM 可以精确地对入射光波的振幅、相位、偏振态、波长等参数进行调制^[1,3-4],并且具有结构紧凑、响应速度快、无机械惰性、可编程等优点^[5-7],被广泛应用于全息成像^[8]、激光光镊技术^[9]、

收稿日期: 2021-01-16; 修回日期: 2021-02-19; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0101803)、国家自然科学基金(51805137)

通信作者: *yhwang@hfut.edu.cn

光束整形^[10-11]、光场调制^[12-13]、自适应光学^[14]等领域。

剪切散斑干涉作为一种新型光学无损检测技术,以其全场、非接触、高灵敏度、稳定性好等优点被广泛应用于复合材料无损检测、振动测量等领域中^[15-18]。在传统的时间相移剪切散斑干涉装置中,相移量和剪切量的引入分别由压电陶瓷和机械调整架来实现。然而,机械调整架的低精度和压电陶瓷的非线性、迟滞、重复性差等缺点极大地影响了测量精度^[19],并且利用机械调整架调整剪切量具有主观性,无法对剪切量进行定量调整,无法产生纯 x 方向或 y 方向的剪切,产生的剪切量分布不均匀^[20-21]。Zastavnik 等^[20]论述了迈克耳孙型剪切散斑干涉系统中剪切畸变的产生原因,分析了剪切量误差对于剪切散斑干涉测量技术精度的影响,提出了一种利用平板的刚体旋转来校正剪切量分布不均匀的方法,提高了剪切散斑干涉的测量精度;文献^[21]介绍了一种补偿算法,修正了剪切量分布不均匀带来的影响。但是这些方法无法从根本上解决剪切量不均匀和难以定量调节的问题。由于液晶空间光调制器具有调制精度高、响应快等优势,国内外研究人员利用 LC-SLM 作为调制元件实现了剪切散斑干涉测量。Kadono 等^[22]利用液晶电控双折射效应,将向列型液晶盒引入剪切干涉光路中,通过控制加在液晶盒两端的电压,能够较为精确地实现相移;Zhao 等^[23]通过 LC-SLM 实现了动态二元相位光栅,通过改变 LC-SLM 上显示的光栅图形和光栅周期,实现了时间相移和剪切量的调整;Sun 等^[24]利用 LC-SLM 的电控双折射效应实现了四步相移和剪切量的精确调整,并且将其应用于光滑表面物体的无损检测^[25];Zhang 等^[26]利用 LC-SLM 作为相移元件和剪切量调整元件,实现了离面变形在两个正交方向上的一阶导数的测量。这些利用 LC-SLM 实现剪切散斑干涉测量的方法都是通过时间相移技术实现的相移,时间相移技术需要在同一状态不同相移量下记录多幅干涉图来获取相位,耗时

较长^[27],无法实现动态测量。

本文提出了一种基于 LC-SLM 的迈克耳孙型空间载波相移剪切散斑干涉系统。该系统采用反射式 LC-SLM 产生剪切量和空间载波频率。基于该设计,该系统可以快速、定量、精确地调节剪切量。由于采用空间载波相移技术,仅需采集一幅干涉图就可以计算出物体在该状态下的相位图,与时间相移技术需要在不同时间同一状态下记录多幅干涉图相比^[27],该系统更适用于测量动态形变的物体。

2 基本原理

2.1 LC-SLM 的相位调制特性

液晶是一种具有光学各向异性的物质,其光学性质类似于单轴晶体。对于向列型液晶和近晶型液晶,液晶分子的长轴方向即它的光轴方向^[28]。光束垂直入射至液晶时,如图 1 所示,存在下列几种情况。当光沿着液晶光轴方向入射时,不会产生双折射现象,光的行进方向不变,如图 1(a)所示。当光的传播方向不与液晶光轴方向平行时,则会产生双折射现象:图 1(b)中入射光的偏振方向垂直于光线与液晶光轴所组成的平面,该光线为寻常光(o 光),依然遵守折射定律,不改变传播方向;图 1(c)中入射光的偏振方向平行于光线与液晶光轴所组成的平面,该光线为非常光(e 光),光线向液晶光轴方向偏折。e 光在液晶中的折射率为

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}}, \quad (1)$$

式中: θ 为波法线与液晶光轴的夹角, n_o 为单轴晶体中 o 光折射率, n_e 为单轴晶体中 e 光主折射率^[28]。e 光在液晶中的折射率是波法线与液晶分子长轴的夹角的函数。相位调制量为

$$\delta(\theta) = \frac{2\pi}{\lambda} [n_e(\theta) - n_o] d, \quad (2)$$

式中 d 为液晶分子层的厚度, λ 为入射光波长。

本研究中所使用的 LC-SLM 为纯相位型 LC-SLM,内部液晶分子为平行取向向列型液晶。由

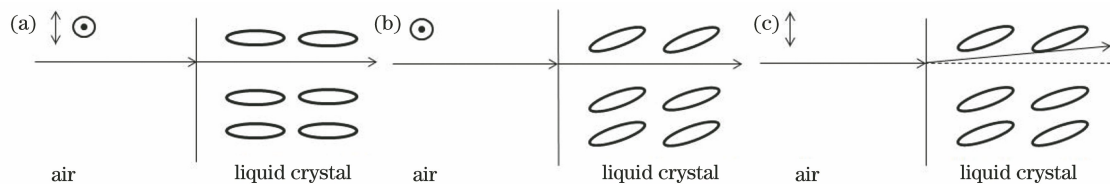


图 1 液晶中入射光线的传播方向。(a)光线沿光轴方向入射;(b)寻常光;(c)非常光

Fig. 1 Propagation direction of light in liquid crystal. (a) Incident light along the optical axis; (b) ordinary light; (c) extraordinary light

(1)式和(2)式可知,通过调整施加在液晶盒上的电压,可以改变液晶分子的偏转角度,从而达到相位调制的目的。在液晶分子层两端没有施加电压时,液晶分子长轴方向平行于空气层与液晶层的分界面,此时 o 光与 e 光的相位差最大;在液晶分子层两端施加电压时,液晶分子发生偏转,相位差减小。LC-SLM 的工作区域由多个行列排布的微小单元组成,通过电寻址的方式对施加在每个小单元上的电压进行控制,可以实现对出射光束的空间相位和方向分布的控制。

2.2 LC-SLM 空间载波剪切散斑干涉系统原理

利用 LC-SLM 的空间载波相移剪切散斑干涉原理如图 2 所示。激光器发出的光经扩束照射在被测物上,表面粗糙的被测物被激光照射后在空间中形成随机分布的散斑,通过光阑和成像镜头进入系统,通过调节光阑的尺寸,可以控制散斑大小和空间频谱分布。激光器发出的光是线偏振光,由于被测物粗糙表面的漫反射作用,进入系统的光的偏振方向具有随机性^[29],偏振片 P1 和半波片分别用来产生线偏振光和调整线偏振光的偏振方向,使得光的偏振方向与光线和液晶分子长轴所在平面的夹角为 45°。此时,被 LC-SLM 调制的寻常光(e 光)与不被调制的非常光(o 光)的强度相等,可以产生质量较好的干涉图。e 光被液晶分子调制后发生偏折,与 o 光产生一定的空间错位,并产生一定的载波频率。旋转偏振片 P2,使得偏振片 P2 透光轴方向与 o 光和 e 光偏振方向的夹角都为 45°,偏振方向相互垂直的 o 光和 e 光经偏振片 P2 后,产生一致的偏振方向,因此,被 LC-SLM 调制的光与不被调制的光可以发生干涉,剪切散斑干涉图被互补金属氧化物半导体(CMOS)相机记录。凸透镜 L1 和凸透镜 L2 组成的 4f 系统被用来扩大视场^[30]和对光波进行傅里叶变换。LC-SLM 被放置在凸透镜 L1 和 L2 的公共焦平面上,通过透镜 L1 的傅里叶变换,在频域内对光波的相位进行调制,再通过透镜 L2 的傅里叶变换,将频域内的相移转化为空间域的位移,从而实现了对剪切量的精确调制。

4f 系统前后透镜的公共焦平面也可以叫作孔径平面,孔径平面上的 LC-SLM 工作窗口过小会影响图像亮度分布的均匀性^[30],呈现视场中间亮、边缘暗的现象,即产生渐晕现象。在本文提出的光学系统中,为使空间频谱有效分离,镜头处的光阑尺寸一般较小。将小通光口径的光阑作为该光学系统的入瞳,可以保证光路中的光束直径与 LC-SLM 的工

作窗口相匹配,从而保证了光场的有效调制。

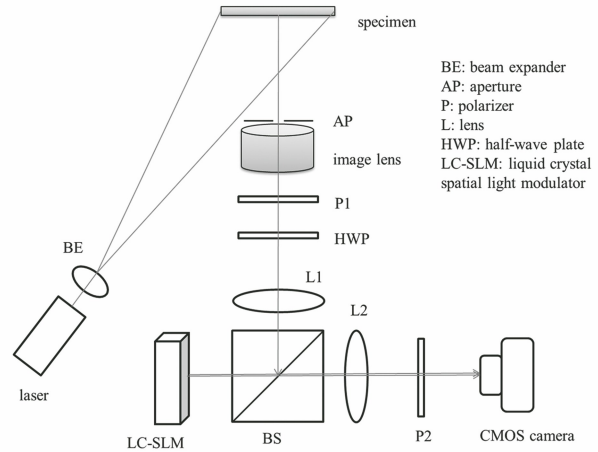


图 2 系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of proposed system

经光阑、成像镜头、偏振片 P1、半波片后出射的光波 $U_0(x, y)$ 可表示为

$$U_0(x, y) = |f(x, y)| \exp[i\phi(x, y)], \quad (3)$$

式中 $f(x, y)$ 和 $\phi(x, y)$ 分别表示光波在 (x, y) 处的振幅和相位, i 为虚数单位。 $U_0(x, y)$ 经过凸透镜 L1 傅里叶变换后可得 $U_1(f_x, f_y)$, 表达式为

$$U_1(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{U_0(x, y)\} = CF(f_x, f_y), \quad (4)$$

式中: $C = \frac{\exp(ikf_1)}{i\lambda f_1} \exp\left[i\frac{k}{2f_1}(f_x^2 + f_y^2)\right]$ 为常量; λ

为激光波长; f_1 为凸透镜 L1 焦距; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为空间角频率(或波数); f_x 和 f_y 为空间频率坐标; $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换操作; $F(f_x, f_y)$ 为 $f(x, y)$ 的傅里叶变换结果。分光棱镜将入射光波分为光强相同的两束光,一束透射后进入环境,另一束被反射进入 LC-SLM,经 LC-SLM 调制后,出射光为 $U_{2,e}$ 和 $U_{2,o}$, 可表示为

$$U_{2,e}(f_x, f_y) = \frac{\sqrt{2}}{4} CF(f_x, f_y) t_{\text{SLM}}(f_x, f_y), \quad (5)$$

$$U_{2,o}(f_x, f_y) = \frac{\sqrt{2}}{4} CF(f_x, f_y), \quad (6)$$

式中: $t_{\text{SLM}}(f_x, f_y)$ 为 LC-SLM 的调制因子,剪切量的调制方向位于 x 方向或 y 方向时,调制因子可表示为

$$t_{\text{SLM},x}(f_x, f_y) = t_\varphi \exp[-2\pi i(f_{ax}f_x + f_y)], \quad (7)$$

$$t_{\text{SLM},y}(f_x, f_y) = t_\varphi \exp[-2\pi i(f_x + f_{ay}f_y)], \quad (8)$$

其中 $t_\varphi = \exp(i\varphi)$ 为空间光调制器的相位常量, f_{ax} 和 f_{ay} 为与剪切量相关的调制参数,通过改变写入图像的条纹方向和空间频率可以分别对剪切方向和剪切量进行调整。 x 方向剪切量 Δx 和 y 方向剪切量 Δy 分别为

$$\Delta x = \lambda f_2 f_{ax} = \lambda f_2 f_v P_v, \quad (9)$$

$$\Delta y = \lambda f_2 f_{ay} = \lambda f_2 f_h P_h, \quad (10)$$

式中: f_2 为凸透镜 L2 的焦距, f_v 和 f_h 分别为写入 LC-SLM 纵向条纹图像的空间频率和横向条纹图像

的空间频率, P_v 和 P_h 分别为 LC-SLM 工作区域的纵向分辨率和横向分辨率。在 LC-SLM 中写入纵向条纹图像, 剪切量位于 x 方向, 凸透镜 L2 对 $U_{2,e}$ 作傅里叶变换后, 透过偏振片 P2, 可得

$$U_{3,e}(x, y) = \frac{\sqrt{2}}{2} \mathcal{F}\{U_{2,e}(f_x, f_y)\} = \frac{1}{4} |f(-x + \Delta x, -y)| \exp[i\phi(-x + \Delta x, -y) + 2\pi i f_c x] \exp(i\varphi), \quad (11)$$

其中 f_c 为载波频率。 $U_{2,o}$ 经凸透镜 L2 傅里叶变换后, 透过偏振片 P2, 可得

$$U_{3,o}(x, y) = \frac{\sqrt{2}}{2} \mathcal{F}\{U_{2,o}(f_x, f_y)\} = \frac{1}{4} |f(-x, -y)| \exp[i\phi(-x, -y)], \quad (12)$$

负号表示经 $4f$ 系统傅里叶变换后所成的像为倒像。 $U_{3,e}$ 和 $U_{3,o}$ 在相机 CMOS 靶面发生干涉, 两束光相干叠加后可表示为

$$I = (U_{3,e} + U_{3,o})(U_{3,e}^* + U_{3,o}^*) = |U_{3,e}|^2 + |U_{3,o}|^2 + U_{3,e}U_{3,o}^* + U_{3,e}^*U_{3,o}, \quad (13)$$

其中 $*$ 表示共轭。 联立(11)、(12)、(13)式, 可得

$$I(x, y) = \frac{1}{16} \{ |f(-x + \Delta x, -y)|^2 + |f(-x, -y)|^2 + |f(-x + \Delta x, -y)| |f(-x, -y)| \exp\{i[\phi(-x, -y) - \phi(-x + \Delta x, -y) - 2\pi i f_c x - \varphi]\} + |f(-x + \Delta x, -y)| |f(-x, -y)| \exp\{-i[\phi(-x, -y) - \phi(-x + \Delta x, -y) - 2\pi i f_c x - \varphi]\} \}. \quad (14)$$

对(14)式作傅里叶变换, 可得

$$\mathcal{F}\{I(x, y)\} = A(f_x, f_y) + B(f_x + f_c, f_y) + C(f_x - f_c, f_y), \quad (15)$$

其中: $A(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{|U_{3,e}|^2 + |U_{3,o}|^2\}$ 包含了背景光信息, 为低频项; $B(f_x + f_c, f_y) = \mathcal{F}\{U_{3,e}U_{3,o}^*\}$ 和 $C(f_x - f_c, f_y) = \mathcal{F}\{U_{3,e}^*U_{3,o}\}$ 为相互共轭的高频项, 包含了相位信息。 调整光阑大小和写入条纹图像的空间频率使得频谱分离后, 通过频域带通滤波器提取出高频项 $B(f_x + f_c, f_y)$ 或 $C(f_x - f_c, f_y)$, 通过傅里叶逆变换可以求出相干光 $U_{3,e}$ 和 $U_{3,o}$ 的相位差^[31], 即

$$\phi(-x, -y) - \phi(-x + \Delta x, -y) - \varphi - 2\pi i f_c x = \arctan \left[\frac{\text{Im}(U_{3,e}^*U_{3,o})}{\text{Re}(U_{3,e}^*U_{3,o})} \right], \quad (16)$$

同理, 对被测物进行加载后, 可以得到被测物加载后的相干光 $U'_{3,e}$ 和 $U'_{3,o}$ 的相位差为

$$\phi'(-x, -y) - \phi'(-x + \Delta x, -y) - \varphi - 2\pi i f_c x = \arctan \left[\frac{\text{Im}(U'_{3,e}{}^*U'_{3,o})}{\text{Re}(U'_{3,e}{}^*U'_{3,o})} \right]. \quad (17)$$

(16)式和(17)式相减可以求出被测物加载前后的相位变化, 即

$$\Delta\phi(x, y) = \phi'(-x, -y) - \phi'(-x + \Delta x, -y) - [\phi(-x, -y) - \phi(-x + \Delta x, -y)]. \quad (18)$$

根据文献[32]中的推论, 将激光照明角度调整至很小, 通过被测物加载前后的相位变化可以直接求出物体面外变形 w 在剪切方向上的一阶导数, 即

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta\phi}{4\pi \Delta x}. \quad (19)$$

3 实验与结果分析

根据图 2 中所示的光路原理图, 在光学平台上搭建了基于 LC-SLM 的空间载波相移剪切散斑干涉系统, 如图 3 所示。

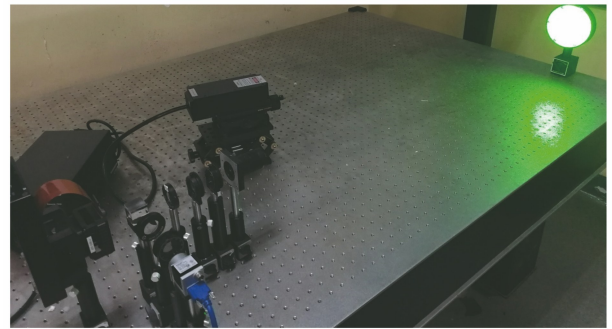


图 3 实验装置

Fig. 3 Experiment setup

该系统采用波长为 532 nm 的固体激光器作为光源; 采用的液晶空间光调制器的分辨率为

1920 pixel \times 1152 pixel,刷新速率可达 31 Hz;采用高分辨率 CMOS 相机采集图像;采用的成像镜头配有手动可调光圈,将成像镜头内部光圈作为孔径光阑,可以调节空间频谱大小。组成 $4f$ 系统的凸透镜 L1、L2 焦距都为 100 mm。

为了验证该系统测量变形一阶导数的全场分布和检测材料内部缺陷的能力,本研究采用顶尖加载试样和气压加载缺陷试样作为被测物,如图 4 所示。图 4(a)为一个四周固定,中间装有顶尖的圆盘,通过转动螺旋顶尖,可以使圆盘中心产生微米级的变形。图 4(b)为一个预先制有缺陷的试样,圆盘内部的上下左右方向有 4 个大小、壁厚不一的缺陷,缺陷 A 为长条形缺陷,缺陷 B、C 为圆形缺陷,D 为方形缺陷,圆盘内部为中空,缺陷处的壁厚比无缺陷处的薄,圆盘外部与气压加载装置相连,通过加载气压,可使整个圆盘发生微变形,缺陷处的变形明显大于无缺陷处,故该装置可通过测量圆盘表面全场变形的一阶导数分布,检测出圆盘的缺陷。

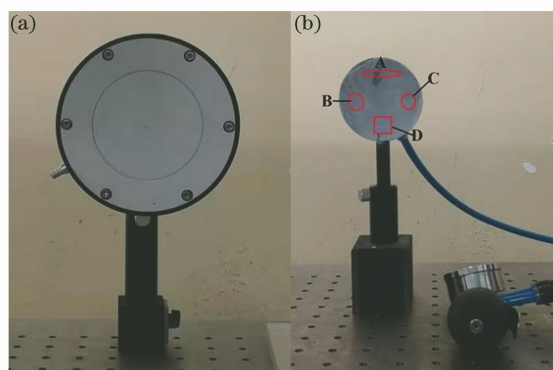


图 4 被测物照片图。(a)顶尖加载试样;(b)缺陷试样
Fig. 4 Specimens photos. (a) Thimble loading specimen;
(b) specimen with defects

在 LC-SLM 中写入空间频率为 $f_v=0.15$ cycle/pixel 的竖条纹图像和空间频率为 $f_h=0.22$ cycle/pixel 的横条纹图像,如图 5 所示,根据(9)式和(10)式,分别在 x 方向上产生 15.3 mm 的剪切量和在 y 方向上产生 13.5 mm 的剪切量。

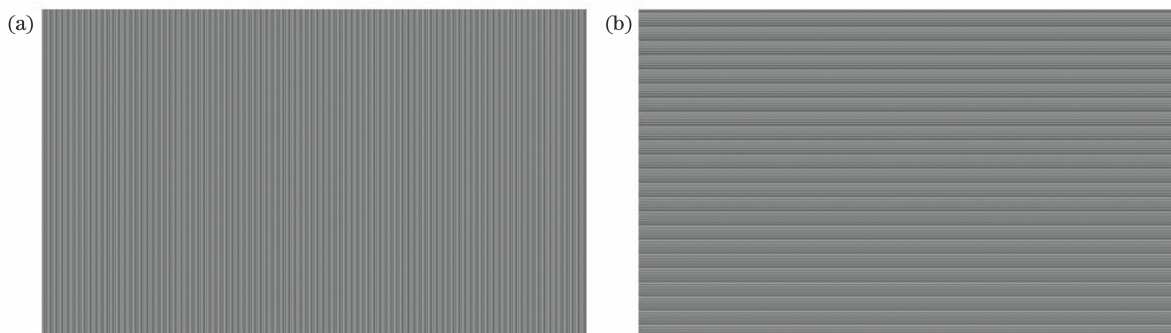


图 5 写入 LC-SLM 中的周期条纹图像。(a)竖条纹图;(b)横条纹图

Fig. 5 Periodic fringe images written in LC-SLM. (a) Vertical fringe image; (b) horizontal fringe image

对顶尖加载试样进行加载后,选取某个变形状态,截取圆盘中心变形区域,结果如图 6 所示。图 6(a)和图 6(b)为剪切量在 x 方向上的剪切散斑干涉相位图,图 6(c)和图 6(d)分别为剪切量在 y 方向上的剪切散斑干涉相位图,图 6(b)和图 6(d)分别为对图 6(a)和图 6(c)进行相位滤波^[33]的结果。对图 6(b)和图 6(d)进行解包裹处理后,由(19)式可以计算出圆盘变形在 x 方向和 y 方向一阶导数分布场。

对于图 4(b)中的缺陷试样,采用气压加载的方式对其进行加载,检测结果如图 7 所示,缺陷处呈现出的相位图案明显异于无缺陷处,图 7 中上下左右 4 处异常,分别与试样中的实际缺陷相对应。其中缺陷 A、B 壁较厚,加载时相对于无缺陷处变形较小,条纹较为稀疏;缺陷 C、D 壁较薄,加载时相对于

无缺陷处变形较大,条纹级次较为密集。

从上述两组实验结果可以看出,本文提出的基于 LC-SLM 的空间载波相移剪切散斑干涉系统具有快速、定量调节剪切量的优点,并且可以获得质量较高的干涉相位图。通过干涉相位变化,可以得到被测物变形的一阶导数分布和试件内部缺陷分布情况,验证了该系统在变形一阶导数测量和缺陷无损检测领域具有较好的适用性。

由于本文提出的系统采用 LC-SLM 作为剪切量调制元件,产生的剪切量误差明显小于传统的迈克耳孙剪切散斑干涉系统。该系统的误差来源主要有硬件系统误差(包括光学系统像差、相机噪声、LC-SLM 的调制误差等)、散斑噪声、图像处理(相位重建、滤波、解包裹)方法等。通过采用高质量的光学元件、降低光学元件的装调误差和采用合适的图

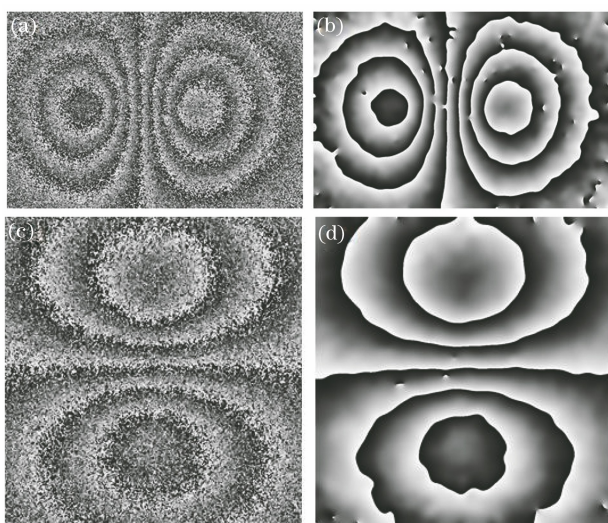


图 6 顶尖加载结果。(a) x 方向剪切相位图;(b)滤波后 x 方向剪切相位图;(c) y 方向剪切相位图;(d)滤波后 y 方向剪切相位图

Fig. 6 Results of thimble loading. (a) Phase map in x shearing direction; (b) filtered phase map in x shearing direction; (c) phase map in y shearing direction; (d) filtered phase map in y shearing direction

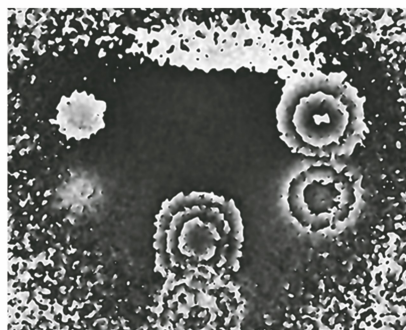


图 7 缺陷检测结果

Fig. 7 Results of detecting defects

像处理方法,可以有效提高该系统的测量精度。

4 结 论

提出一种利用 LC-SLM 定量、精确、快速调制剪切量的空间载波相移剪切散斑干涉测量系统。该系统可以对物体变形引起的干涉相位变化进行动态全场测量,通过写入周期条纹图像,LC-SLM 可用来精确调节剪切量,产生空间载波频率,调制速率最高可达 31 Hz。本研究通过实验验证了该系统在物体变形一阶导数测量和无损检测领域的可行性以及该系统具有剪切量调节的优势。此外,采用电寻址的方式对每个微小液晶单元上的相位进行精确调控,结果表明,该系统与传统的空间载波剪切散斑干涉

系统相比,具有定量、精确、快速调节剪切量的优势。

参 考 文 献

- [1] Hu X G, Xue W. Liquid crystal phase-only spatial light modulator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2001, 38(12): 35-42.
胡晓改, 薛唯. 液晶纯相位空间光调制器[J]. 激光与光电子学进展, 2001, 38(12): 35-42.
- [2] Chen K H, Wang J K, He W J. Correction for the phase modulation accuracy of liquid crystal on silicon based spatial light modulator [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 43(2): 20-26.
陈柯含, 王加科, 贺文俊. 液晶空间光调制器相位调制精度的校正[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(2): 20-26.
- [3] Kong D J, Sun X Y, Dong Z L, et al. Progress in femtosecond laser processing technology based on space beam shaping [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111416.
孔德键, 孙小燕, 董卓林, 等. 飞秒激光空间光束整形加工技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111416.
- [4] Pei L L, Huang D J, Fan W. Stability analysis for optically-addressed phase-only spatial light modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0801002.
裴丽丽, 黄大杰, 范薇. 相位型光寻址空间光调制器稳定性分析[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0801002.
- [5] Liu S Y, Zhang J Y. Principles and applications of ultrafast laser processing based on spatial light modulators[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111431.
刘思垣, 张静宇. 基于空间光调制器的超快激光加工原理及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111431.
- [6] Shan X, Duan M Y, Ai Y, et al. Calibration approaches of the phase nonlinearity of the phase-only liquid crystal spatial light modulator [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(6): 0623001.
单欣, 段梦云, 艾勇, 等. 纯相位液晶空间光调制器相位校正方法[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 0623001.
- [7] Li X P, Hu W S, Yu H L, et al. Quantitative analysis on phase diversity technique based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(3): 234-239.
李小平, 胡五生, 于洪丽, 等. 基于液晶空间光调制器的相位差波前探测技术定量研究[J]. 液晶与显示, 2017, 32(3): 234-239.
- [8] Xia J, Chang C L, Lei W. Holographic display based

- on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 124213.
夏军, 常琛亮, 雷威. 基于液晶空间光调制器的全息显示[J]. *物理学报*, 2015, 64(12): 124213.
- [9] Liang Y S, Yao B L, Lei M. Applications of holographic optical tweezers in biological research[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207020.
梁言生, 姚保利, 雷铭. 全息光镊在生物学研究中的应用[J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207020.
- [10] Li S S, Wu F, Lü Z W. Beam shaping of laser nearfield based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(3): 19-23, 58.
李森森, 吴凡, 吕志伟. 基于液晶空间光调制器的激光近场光束整形[J]. *光电技术应用*, 2017, 32(3): 19-23, 58.
- [11] Yu X C, Hu J S, Wang L B. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0514001.
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 基于液晶空间光调制器的激光束整形[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0514001.
- [12] Shi Z Y, Zhou L Q, Zhang L C, et al. Dynamic laser parallel fabrication based on multifocal array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1014004.
史志勇, 周立强, 张立春, 等. 基于多焦点阵列的动态激光并行加工[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1014004.
- [13] Liu J Q, Wang J M, He C J, et al. Research on the generation of Ince-Gaussian vector optical field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0826001.
刘佳晴, 王吉明, 赫崇君, 等. Ince-Gaussian 矢量光场的产生研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0826001.
- [14] Hu L F, Peng Z H, Wang Q D, et al. Calculation of electro-optical characteristics of phase-only liquid crystal modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(3): 182-189.
胡立发, 彭增辉, 王启东, 等. 纯位相液晶调制器的响应特性计算[J]. *液晶与显示*, 2017, 32(3): 182-189.
- [15] Zhao Q H, Dan X Z, Sun F Y, et al. Digital shearography for NDT: phase measurement technique and recent developments [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2662.
- [16] Liu B, Wei Q, Tu J, et al. Inspection of the interior surface of cylindrical vessels using optic fiber shearography [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(9): 095202.
- [17] Asemanni H, Park J, Lee J R, et al. Development of PZT-excited stroboscopic shearography for full-field nondestructive evaluation [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(5): 053301.
- [18] Kirkove M, Guérit S, Jacques L, et al. Determination of vibration amplitudes from binary phase patterns obtained by phase-shifting time-averaged speckle shearing interferometry [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(27): 8065-8077.
- [19] Wu S J, Zhu L Q, Feng Q B, et al. Digital shearography with *in situ* phase shift calibration [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(9): 1260-1266.
- [20] Zastavnik F, Pyl L, Gu J, et al. Calibration and correction procedure for quantitative out-of-plane shearography [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(4): 045201.
- [21] Richoz G L, Schajer G S. Simultaneous two-axis shearographic interferometer using multiple wavelengths and a color camera [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 77: 143-153.
- [22] Kadono H, Toyooka S, Iwasaki Y. Speckle-shearing interferometry using a liquid-crystal cell as a phase modulator [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, 8(12): 2001-2008.
- [23] Zhao S A, Chung P S. Digital speckle shearing interferometer using a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Optical Engineering*, 2016, 45(10): 105606.
- [24] Sun F Y, Wang Y H, Yan P Z, et al. The application of SLM in shearography detecting system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 114: 90-94.
- [25] Sun F Y, Zhong S M, Dan X Z, et al. Nondestructive detecting for internal defects of specular surface materials [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(1): 015202.
- [26] Zhang B Y, Sun F Y, Yang L, et al. Spatial-light-modulator-based dual shearing direction shearography [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(35): 11080-11086.
- [27] Xie X, Yang L X, Xu N, et al. Michelson interferometer based spatial phase shift shearography [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(17): 4063-4071.
- [28] Yu D Y, Tan H Y. *Engineering optics* [M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 473-527.
郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 473-527.
- [29] Xie X, Lee C P, Li J R, et al. Polarized digital shearography for simultaneous dual shearing directions measurements [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(8): 083110.
- [30] Wu S J, He X Y, Yang L X. Enlarging the angle of view in Michelson-interferometer-based shearography by embedding a 4f system [J]. *Applied Optics*, 2011,

50(21): 3789-3794.

- [31] Yang L X, Xie X. Digital shearography: new developments and applications [M]. Bellingham: SPIE Press, 2016: 143-163.
- [32] Hung Y Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing [J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 391-395.
- [33] Wang Y H, Li J R, Sun J F, et al. Frequency domain filtering for phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry [J]. Chinese Optics, 2014, 7(3): 389-395.
王永红, 李骏睿, 孙建飞, 等. 散斑干涉相位条纹图的频域滤波处理 [J]. 中国光学, 2014, 7(3): 389-395.