

文章编号 1004-924X(2025)15-2390-12

相位调控双向剪切散斑干涉表面变形测量

齐司源, 方未东, 刘奕隆, 常 青, 高 帅, 汪盛佳*

(哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对单向剪切散斑干涉的方向敏感性问题,提出一种基于相位调控的双向剪切散斑干涉技术。该技术将剪切干涉中的成像、剪切和相移操作视为系统对物光的相位变换作用。利用两个共面耦合的非涅尔衍射透镜在像面产生具有横向错位的两幅图像,形成剪切干涉。通过在液晶空间光调制器(LC-SLM)上动态加载具有不同相位基线的双透镜相位掩模,产生相移剪切干涉图,并采用时间相移法进行相位求解。实验结果表明:相位调控双向剪切散斑干涉系统可以自由调整剪切的方向和大小,并引入可控的时间相移;利用单向剪切相位重构变形相位时,非剪切方向上的误差水平为剪切方向上的 3.5~4.6 倍,而利用双向剪切相位重构的变形相位,在各剪切方向上都具有较低的误差水平,且一致性较高,两个方向上的误差偏差为 8%。相位调控双向剪切散斑干涉技术具有结构简单、集成度高等特点,为高精度变形测量提供了一种单波长、单偏振、单相机、单孔径的光学干涉法解决方案。

关键词:干涉测量;剪切干涉;相位调控;时间相移;表面变形测量

中图分类号:TP394.1;O436.1 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253315.2390 **CSTR:**32169.14.OPE.20253315.2390

Measurement of surface deformation using phase-manipulated dual-directional shearography

QI Siyuan, FANG Weidong, LIU Yilong, CHANG Qing, GAO Shuai, WANG Shengjia*

(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University,
Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: shengjia.wang@hrbeu.edu.cn

Abstract: To address the issue of the directional sensitivity of conventional shearography, a phase manipulating bidirectional shearography technique is proposed. This technique regards imaging, shearing, and phase-shifting as the phase transformation of the object wave. First, two Fresnel diffraction lenses are used to generate two laterally displaced images, forming shearograms. Then, by dynamically loading the dual-lens phase masks with different phase baselines on the liquid crystal spatial light modulator, phase-shifted shearograms are generated, and the temporal phase-shifting method is adopted for phase retrieval. The results indicate: the phase manipulating bidirectional shearography can adjust the shearing direction and amount, and introduce controllable temporal phase shifts. When using conventional shearography to reconstruct the deformation phase, the error in the non-shearing direction is 3.5-4.6 times that in the shearing direction. While using bidirectional shearography to reconstruct the deformation phase, the error levels

收稿日期:2025-06-12;修订日期:2025-07-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62305082);黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(No. YQ2022A003)

in both shearing directions are similar and the error deviation is 8%. The phase manipulating bidirectional shearography technique has the characteristics of simple structure and high integration, providing an optical interferometry solution with single-wavelength, single-polarization, single-camera, single-aperture for high-precision deformation measurement.

Key words: interferometry; shearography; phase manipulating; temporal phase shift; surface deformation measurement

1 引言

剪切散斑干涉技术^[1-3]是一种全场、非接触、高精度、高灵敏度的光学测量方法,其核心在于利用两束横向错位的物光形成剪切干涉,无需传统意义上的参考光,被广泛应用于航空航天、精密机械制造、工程材料无损检测等领域^[4-6]。传统剪切散斑干涉技术仅能在单一方向进行剪切操作,通过单向积分完成从剪切相位图到全相位的计算,导致垂直于剪切方向上的全相位信息误差过大。双向剪切散斑技术则通过构建两个正交的剪切方向,测量两方向上的位移导数,可通过双向积分完成变形全相位计算,弥补了单一剪切方向测量中的不足^[7]。

传统双向或多向剪切干涉技术大多采用多波长^[8]、多偏振^[9]、多孔径^[4],或多相机^[10]方案,用以构建多组具有不同剪切方向的剪切干涉图。然而,上述方案涉及多种光学元件的组合,破坏了剪切散斑干涉系统固有的共路特性,使得测试系统更容易受到外部干扰。近期的研究结果显示,空间光调制器(Spatial Light Modulation, SLM)在构建剪切散斑干涉测量系统方面展现出独特的适应性^[11-12]。通过在SLM上加载掩模图,可以生成多个横向分离的图像,使得双向剪切散斑干涉测量系统变得更加紧凑和稳定。然而,其基本原理仍局限于利用光栅衍射生成剪切图,可能因衍射级次泄漏而导致重建的相位图质量下降。

本文提出了一种基于相位调控菲涅尔衍射透镜的双向剪切散斑干涉技术,以解决单向剪切散斑干涉的方向敏感性问题。该技术将定量剪切散斑干涉测量过程视为物光的相位变换,采用单波长、单偏振、单相机、单孔径配置,构成共路光学结构。除照明与采集装置外,系统中仅存在

一个相位调控器件,即一个纯相位型液晶SLM。同时,提出了一种新的分光方式,即相位调控衍射透镜,规避光栅衍射导致的级次泄露问题。相位调控衍射透镜在一个平面内耦合两个菲涅尔衍射透镜,其功能同时包含成像、剪切和相移功能,其中透镜光心距离决定剪切量,面内相对位置决定剪切方向,并依靠透镜相位基线变化引入可控的相对相移量。为实现双透镜的有效融合,提出了像素随机化融合策略,并据此制作相位调控掩模。从菲涅尔衍射透镜的相位厚度函数入手,研究了相位调控掩模的生成方式和基于运动相位基线的相移方法。采用四步相移法分别提取双向相位梯度信息,并通过双向积分获得了离面变形相位分布。分别在顶心机械加载和气压气动加载的条件下,测试了相位调控双向剪切散斑干涉系统的剪切方向切换和剪切量调整,并通过实验验证了双向剪切相对于单向剪切在全相位复原中的优势。

2 测量原理

2.1 光路结构

相位调控双向剪切散斑干涉系统的光路配置如图1所示,系统由光源照明模块、相位调控模块和采集模块构成。其中,调控模块为系统核心单元,采用纯相位型液晶SLM,时序动态加载一组相位调控掩模实现了试件表面成像、剪切方向切换和定量相位求解的功能。将剪切干涉的成像、剪切和相移三要素进程在一个动态相位掩模中。

激光光源经扩束后照射待测试件表面,其散射光通过非偏振分光棱镜(Non-polarizing Beam Splitter, NBS)入射到SLM感光面上。来自试件的物光经时序上载于SLM的一组相位调控掩模

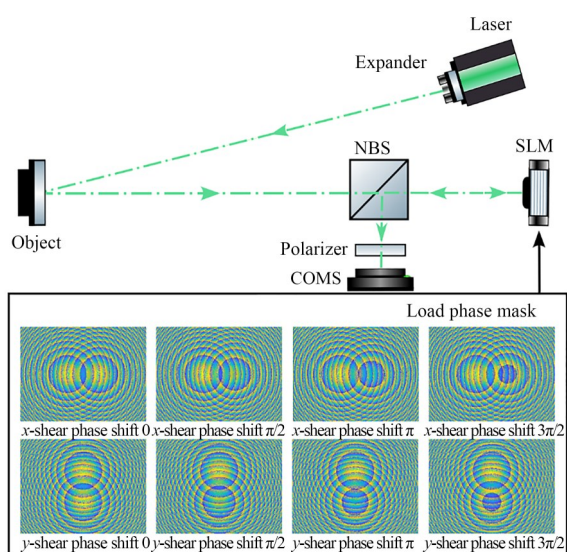


图1 相位调控双向剪切散斑干涉表面变形测量光路配置
Fig. 1 Optical arrangement for measurement of surface deformation using phase-manipulated dual-directional shearography

调制后,出射光再次通过 NBS,由相机采集一组相移剪切散斑干涉图。在一次变形测量中,时序加载 8 幅相位调控掩模,其中用于 x 向剪切的相位调控掩模 4 幅,相对相移量分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$; 用于 y 向剪切的相位调控掩模 4 幅,相对相移量分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 。根据相移量配置,两个正交方向上的剪切相位均可利用四步相移法求解。值得注意的是,四步相移法只是用以说明相位调控剪切干涉的相移和相位求解方法,所提出技术并不依赖特定的相位求解算法,常规的相位求解算法,如五步法或 N 步法,仍然适用于相位调控剪切干涉技术。

2.2 用于双向剪切的相位调控掩模

利用 SLM 实现菲涅尔衍射透镜聚焦成像的特点是无机械部件,能够自由改变透镜曲率,便于集成化^[13],适用于光束控制和全息显示等领域。其工作原理是根据透镜厚度分布,计算其相位厚度函数并上载于 SLM,以相位变换的角度完成对试件表面的聚焦成像。

在近轴条件下,考虑到球差优化,采用抛物面型曲率构建透镜的曲率分布,其透过率函数可以表示为:

$$t(x, y) = P(x, y) \exp \left[-i \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right], \quad (1)$$

其中: f 表示透镜焦距; $P(x, y)$ 为透镜的光瞳函数。通常情况下,对于相位型 SLM,当加载液晶透镜的相位函数时,透镜口径等于 SLM 的感光面区域尺寸。这里仅讨论有效区域内的相位变化情况,此时 $P(x, y) = 1$ 。在透过率函数中, e 指数内部为透镜相位厚度函数。鉴于相位型 SLM 的相位调制深度为有限值,通常为 2π ,因此将式(1)所示的相位厚度函数进行折叠,得到菲涅尔衍射透镜的相位厚度函数为:

$$\varphi(m, n) = \text{mod}_{2\pi} \left[-\frac{\pi \Delta^2}{\lambda f} (m^2 + n^2) \right], \quad (2)$$

其中: (m, n) 为 SLM 的像素坐标, $\text{mod}_{2\pi}[\cdot]$ 表示 2π 取余操作, Δ 为 SLM 的像元尺寸, λ 为照明波长, f 为设置的透镜焦距。

在剪切干涉系统中,要求在像面上产生两个具有横向错位的两个物光光场。根据高斯成像公式,对上述菲涅尔衍射透镜施加一个横向偏移量,处于像面的像则会相对于原来的位置发生偏移,如图 2 所示。当菲涅尔衍射透镜的光心距光轴的光心偏移量为 S 时,由高斯成像公式计算可得,位于像面的像场横向偏移量为:

$$\delta = S \cdot \left(\frac{q}{p} + 1 \right), \quad (3)$$

其中: p 为物距, q 为像距。通过改变光心偏移量 S ,可以灵活调整剪切量。

为在像面同时产生具有横向位移的两个像,需要构造两个菲涅尔衍射透镜,并将它们融合到一个相位掩模中。此时,两个共面菲涅尔衍射透镜所对应的相位厚度函数可表达为:

$$\Phi_1 = \text{mod}_{2\pi} \left\{ -\frac{\Delta^2 \pi}{\lambda f} \left[\left(m + \frac{S_x}{2} \right)^2 + n^2 \right] \right\}, \quad (4)$$

$$\Phi_2 = \text{mod}_{2\pi} \left\{ -\frac{\Delta^2 \pi}{\lambda f} \left[\left(m - \frac{S_x}{2} \right)^2 + n^2 \right] \right\}, \quad (5)$$

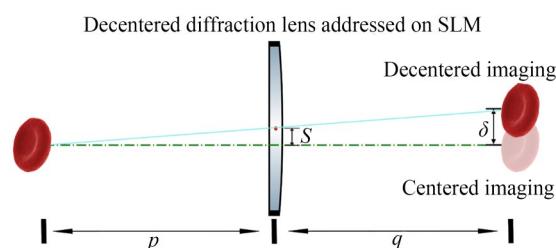


图2 偏心衍射透镜产生剪切原理
Fig. 2 Shear induced from displaced Fresnel lens

其中: S_x 代表两个透镜在 x 方向上以SLM像素为单位的光心距离。

基于上述理论,相位调控菲涅尔衍射透镜的相位掩模实现剪切干涉的关键在于如何在单幅相位掩模中实现两个共面菲涅尔衍射透镜的融合。为此,提出了一种像素随机化融合双透镜的相位掩模构建方法。该方法基于概率统计学原理,构造两个服从伯努利分布的二值随机矩阵 $R_1(m,n), R_2(m,n)$,以引导两个菲涅尔衍射透镜在像素化相位掩模中的赋值过程,其数学特性满足:

$$\begin{cases} R_{1\&2}(m,n) \in \{0,1\} R_1 \cap R_2 = \emptyset, \\ R_1 \cup R_2 = 1_{M \times N} E[R_{1 \text{ or } 2}(m,n)] = 1/2. \end{cases} \quad (6)$$

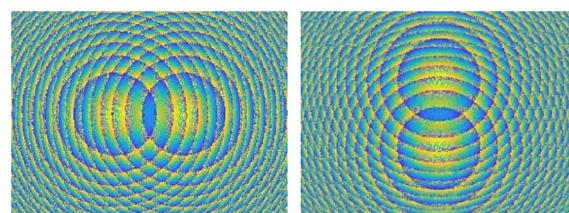
上载到SLM的相位调控掩模 $M(m,n)$ 以二维矩阵的形式对应到SLM的各个像素。二值化随机矩阵 R_1 和 R_2 作为索引矩阵,引导两个菲涅尔透镜相位分布 Φ_1 和 Φ_2 在相位调控掩模 $M(m,n)$ 的赋值过程。依据等式(6)的构造原则,二值化随机矩阵 R_1 和 R_2 的交集为空集、并集为全集,元素值非0即1,且 R_1 和 R_2 的期望均为1/2。以 R_1 和 R_2 两个二值化随机矩阵为像素坐标索引,对相位调控掩模 $M(m,n)$ 进行赋值,按照像素一对一的关系,首先确定 $R_1(m_1, n_1)=1$ 时全部 (m_1, n_1) 像素坐标位置,并令 $M(m_1, n_1)=\Phi_1(m_1, n_1)$,以此完成相位调控衍射透镜 Φ_1 在相位调控掩模 M 矩阵中的赋值操作。类似地,确定 $R_2(m_2, n_2)=1$ 时全部 (m_2, n_2) 像素坐标位置,并令 $M(m_2, n_2)=\Phi_2(m_2, n_2)$,以此完成相位调控衍射透镜 Φ_2 在相位调控掩模 M 矩阵中的赋值操作。整体融合策略的实施过程可记为:

$$M(m,n) = R_1(m,n) \cdot \Phi_1(m,n) + R_2(m,n) \cdot \Phi_2(m,n). \quad (7)$$

上述融合策略的实施可以保证每个相位调控菲涅尔透镜都占据50%的SLM像素数,并且完全覆盖SLM的感光面有效区域。从统计学角度分析,两个相位调控菲涅尔透镜具有相同的有效孔径,进而由相位调控掩模 M 在像面上产生的两个错位像场具有相同的光强分布,有利于提高剪切干涉的条纹对比度。通过像素随机化融合法,将上载于SLM的相位调控矩阵等像素数地分配给两个菲涅尔衍射透镜,以非周期的形式完

成融合,规避衍射光栅方法中存在的衍射级次泄漏问题。该结构使每个像素以1/2的概率加载任意一组透镜相位,通过打破相位分布的空间周期性,有效抑制高阶衍射级次强度。这种像素随机化机制确保每组透镜均拥有相等的有效孔径,从而保证两具有横向位移的像具有相同的分辨率和光强。

为实现 x 方向剪切,需要使两个透镜在面内沿 x 方向分布;类似地,为实现 y 方向剪切,需要使两个透镜在面内沿 y 方向分布。不同剪切方向的相位掩模如图3所示,通过时序加载可以以非机械方法实现剪切方向的快速切换。



(a) x向剪切相位掩模 (b) y向剪切相位掩模
(a) x-shear phase mask (b) y-shear phase mask

图3 用于剪切干涉的相位调控掩模

Fig. 3 Phase manipulating mask for shearing interferometry

2.3 基于运动相位基线的时间相移法

为定量提取剪切干涉图中的剪切相位信息,在前述菲涅尔衍射透镜相位厚度函数的基础上,进一步为两个衍射透镜增加了时间相移项,如图4所示。记为:

$$\Phi_{i1} = \text{mod}_{2\pi} \left\{ -\frac{\Delta^2 \pi}{\lambda f} \left[\left(m + \frac{S_x}{2} \right)^2 + n^2 \right] + \varphi_{i1} \right\}, \quad (8)$$

$$\Phi_{i2} = \text{mod}_{2\pi} \left\{ -\frac{\Delta^2 \pi}{\lambda f} \left[\left(m - \frac{S_x}{2} \right)^2 + n^2 \right] + \varphi_{i2} \right\}, \quad (9)$$

其中: i 代表相移步数, φ_{i1} 和 φ_{i2} 分别为两个菲涅尔衍射透镜引入的附加相位。当物光经由SLM上的衍射透镜作用后,像面形成的两个像具有对应的附加相位延迟,相移量为 $\varphi_{i2} - \varphi_{i1}$,在像面处的相移剪切干涉图可记为:

$$I_i(x,y) \propto \cos [\Delta \phi_x(x,y) + \varphi_{i2} - \varphi_{i1}], \quad (10)$$

其中: $\Delta \phi_x$ 是由试件表面变形引起的剪切相位。根据所选择的相移算法,对相移量进行配置,以完成剪切相位的定量提取。在四步相移

法^[11]中,要求步长等间隔且均为 $\pi/2$,则四次相移量为:

$$\begin{cases} \varphi_{12} - \varphi_{11} = 0 \\ \varphi_{22} - \varphi_{21} = \pi/2 \\ \varphi_{32} - \varphi_{31} = \pi \\ \varphi_{42} - \varphi_{41} = 3\pi/2 \end{cases} \quad (11)$$

通过四步相移法即可计算得到由试件表面变形引起的剪切相位,记为:

$$\Delta\phi_x(x, y) = \arctan \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right]. \quad (12)$$

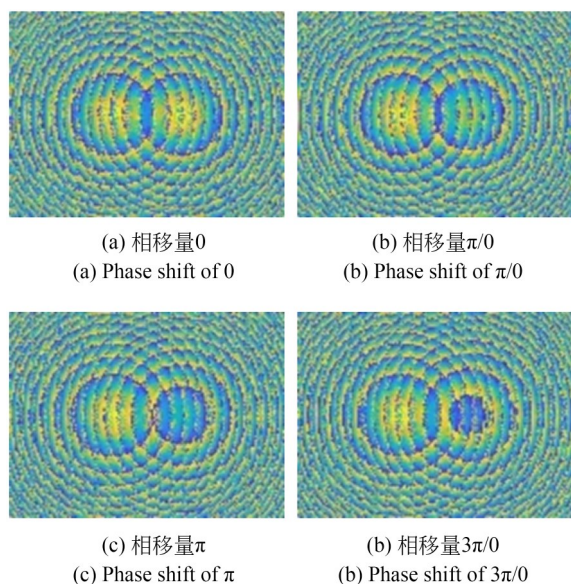


图4 具有相移功能的相位掩模
Fig. 4 Phase masks with phase shifts

在如图1所示的系统配置中,采用斜照明入射待测试件,则沿 x 方向的离面位移导数可由该方向的剪切相位分布计算^[14],即:

$$\frac{\partial w_x(x, y)}{\partial x} \approx \Delta\phi_x(x, y) \cdot \frac{\lambda}{2\pi(1 + \cos\beta)} \cdot \frac{1}{\delta_x}, \quad (13)$$

其中: δ_x 为沿 x 方向的剪切量, β 为相对于表面法线方向的照明角度。当剪切量较小时,约等号成立。

上述理论描述了 x 方向剪切干涉图及其剪切相位分布的形成原理和获取方法。为实现双向剪切干涉测量,类似地,沿 y 方向的剪切干涉测量仅需通过相位调控掩模,将双透镜的面内分布从 x 向分布切换为 y 向分布,如图3所示,即可获取 y 方向的剪切相位分布。

3 实验与结果分析

3.1 实验装置

根据图1所示光路配置搭建了相位调控双向剪切散斑干涉测量系统,如图5所示。照明单元由激光光源与扩束模块组成。激光光源采用长春新产业光电技术有限公司的MSL-III-532-100 mW单纵模半导体泵浦固体激光器,中心波长为532 nm。光源扩束采用大恒光电GCL-010301型平凹扩束透镜(焦距为-9.8 mm,直径为6 mm)。扩束激光照明待测试件,相对于试件法线方向的照明角度为 9.46° (等式(13)中 β)。液晶SLM作为核心调控单元,其性能参数直接决定相位掩模调制精度与系统集成度。系统采用中科微星FSLM-2K39型反射式相位型空间光调制器(1920×1080 ,像素尺寸为 $4.5 \mu\text{m}$)。图像记录单元选用大恒图像Mercury系列MER-504-10GM-P型CMOS相机(2448×2048 ,像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$)。实验待测件包括顶心机械加载试件和气压气动加载试件。试件均采用6061铝合金材料,圆盘直径为80 mm,材料弹性系数为110 MPa,泊松比为0.33。机械加载采用微分头在试件背侧中心实施加载。气压加载试件由压力气囊压力加载,气压为0~40.00 kPa。

纯相位型SLM一般仅对平行于其敏感轴方向的偏振态起到相位调制作用,对垂直于敏感轴方向的偏振态不调制。而介于平行和垂直方向的偏振态,一般可按马吕斯定律计算其平行与敏感轴上的偏振分量。这里采用线偏振激光器作为光源扩束后照明待测试件,经由分光棱镜入射SLM,在SLM的调制作用下,反射光返回分光棱镜,并经由偏振片反射至相机感光面上。光学粗糙表面(试件)会使入射偏振态发生退偏振化,即光学粗糙表面倾向于使高度偏振的入射光(如线偏振光)变成部分偏振光或完全非偏振光。因此,入射SLM的散射光偏振态并非都沿其敏感轴方向,可将入射SLM的光分解到垂直和平行于敏感轴的两个正交方向上。对于平行于敏感轴的偏振分量,SLM可依据上载的相位调控掩模进行调制,并在相机感光面(像面)上聚焦成像;而垂直于敏感轴的偏振分量在SLM表面不发生调制,SLM的作用相当于反射镜,经SLM后

继续向前散射至相机感光面上,不产生聚焦成像,作为背景光存在。在后续相位提取中,采用的四步相移法也能够将未调制的背景光消除。为进一步提升系统性能,在相机与分光棱镜之间放置一个平行于 SLM 敏感轴方向的偏振片(图 5),进一步滤除垂直偏振分量,仅保留经 SLM 调制后的平行偏振分量。

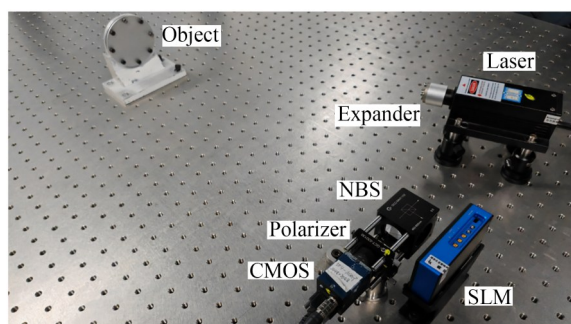


图 5 相位调控双向剪切散斑干涉测量系统实物

Fig. 5 Configuration of phase-modulated bidirectional shear speckle interferometry

基于相位调控菲涅尔衍射透镜相位掩模由两个共面菲涅尔衍射透镜组成,由于 SLM 的有限的像素数和相位调制深度,用于上载 SLM 的衍射透镜存在最小焦距,即奈奎斯特焦距^[15],记为:

$$f \geq f_{\text{Nyquist}} = \frac{N\Delta^2}{\lambda}. \quad (14)$$

依据设备选型,计算可得奈奎斯特焦距为 41 mm。

在实验光路中,由于采用非偏振分光棱镜反射,实际可调整的像距均大于 70 mm。待测物为直径 80 mm 的圆盘,为尽可能收集其表面信息,需使待测物在感光面所成的像完全被 CMOS 覆盖,因此物距像距之比应大于 11:1。考虑到便于运算,将物高与像高之比设定为 12:1。结合前述分析,光路系统中可调整的像距均大于 70 mm,故选择 70 mm 作为两个共面菲涅尔衍射透镜的焦距,此时物距为 910 mm,像距约为 75.8 mm。

3.2 结果分析

在实验测试中,首先测试了相位调控掩模的剪切功能。掩模中的两个菲涅尔衍射透镜焦距均为 70 mm。为便于展示剪切作用,光心距离设置为 200 个 SLM 像素,根据物像关系,对应 11.7

mm 的物面剪切量。图 6 展示了 x 和 y 方向剪切的相位掩模和剪切成像结果。

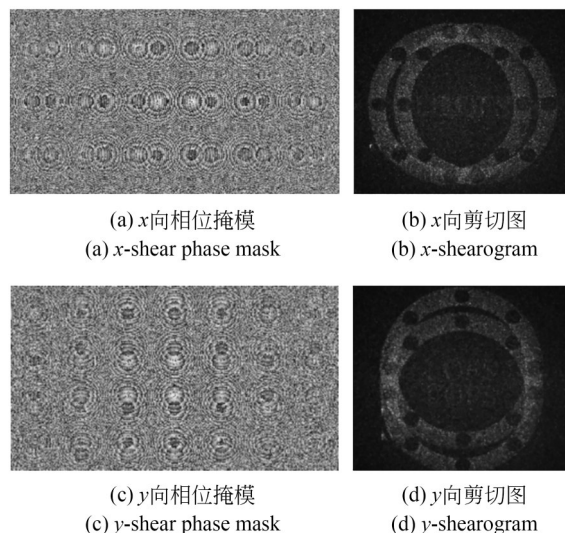


图 6 双向相位掩模及剪切图

Fig. 6 Dual-directional phase masks and shearograms

第一组实验用于论证所提出的相位调控双向剪切干涉技术具有剪切量(大小和方向)可方便调整的特点。因此,分别选取两个菲涅尔透镜在相位调控掩模上的光心距离为 20 SLM 像素、30 SLM 像素、40 SLM 像素作为剪切量控制,对相同变形在不同剪切量下完成了测量。结合系统物像关系,上述不同光心距离分别对应 1.17, 1.76, 2.34 mm 的剪切量。为保证变形量相同,通过刷新 SLM 上的相位调控掩模,3 次测量在同一次加载事件中完成。

首先,在试件变形前,时序加载 24 幅(3 组不同剪切量 $\times$ 2 个剪切方向 $\times$ 4 步相移)相位掩模。相机在像面依次采集 24 幅相位掩模所对应的剪切散斑干涉图。利用 4 步相移算法,计算出 3 幅试件变形前的相位分布,分别对应 3 组不同的剪切量。对试件进行机械加载,重复上述过程,获得 3 幅试件变形后的相位分布。利用变形前后的相位分布,可得由试件变形引起的剪切相位变化,如图 7 所示。实验中,采用了 21×21 像素窗口大小的正余弦均值滤波^[16-17]对相位变换进行了降噪处理。正余弦均值滤波作为一种常用的干涉测量相位图滤波方法,适用于本实验中的剪切相位周期性特征,其通过将剪切相位分解为正余弦分量,将相位跃变点连续化,从而规避了直接

相位滤波的截断失真。同时由于正余弦分量的变化与相位实际梯度线性相关,滤波过程能在平滑噪声的同时,通过反正切运算重构出滤波后的剪切相位,既抑制了随机扰动,又保留了微小形变或缺陷对应的局部细节的相位场,避免了细节丢失问题。此外,正余弦均值滤波基于基础三角函数变换和均值运算的核心逻辑,其计算量小、实现简单,无需复杂参数调优,能快速处理相位数据。因此,本文选用正余弦均值滤波作为降噪算法。滤波后的相位场噪声降低且梯度连续性提升,可减少相位解包裹过程中因噪声导致的路径误判或累积误差,提高真实相位的重建精度,进而保障后续形变分析等应用的准确性。

图 7 中,圆盘中心处因形变产生蝴蝶斑,在单张剪切相位分布图中,由于该区域受到集中应力作用,干涉条纹呈现出从边缘到中心由粗变细再变粗的变化趋势。在相同变形情况下,3 组不同剪切量下的剪切相位截断条纹分别为 3 条、5 条、7 条,从侧面证明了剪切系统灵敏度与剪切量之间的正比关系,即剪切量对实验的影响为系统的敏感度,剪切量越大,系统越敏感,对于相同变形,所产生的剪切相位变化越大。

第二组实验用于论证双向剪切干涉相对于单向剪切干涉的优势。采用气压气动加载试件

通过压力气囊向圆盘施加均匀载荷。为清晰展示气压变化各阶段试件剪切相位条纹的变化,实验中剪切量的选取原则为在最小气压变化 4.00~3.33 kPa 下产生最少 3 个剪切相位截断条纹,并且在最大气压变化 4.00~2.00 kPa 时剪切相位条纹仍处于可解析状态。经过多次测试,当两个菲涅尔透镜在相位调控掩模上的光心距离为 16 SLM 像素时,剪切量为 0.94 mm,在 3 组气压变化中均能得到合适的剪切相位条纹密度,并以此进行后续的计算和实验结果对比。实验中,分别测得气动加载试件在 4.00, 3.33, 2.66, 2.00 kPa 增量气压下的双向剪切相位图。通过测得 4 个气压状态下的剪切相位分布,获得 3 组与变形相关的剪切相位图,如图 8 所示。图中气压变化量依次为 4.00~3.33, 4.00~2.66, 4.00~2.00 kPa。

从实验结果可以看出,随着气压变化量的增大,测得的双向剪切干涉相位条纹密度也在增加,即反映出试件表面离面变形的梯度正比于气压变化量,也从侧面论证了等式(13)。通过分别测量 4.00, 3.33, 2.66, 2.00 kPa 状态下的剪切相位,并将 4.00 kPa 的结果分别与 3.33, 2.66, 2.00 kPa 的剪切相位做差,可以反映出 4.00~3.33, 4.00~2.66, 4.00~2.00 kPa 这 3 组由于气

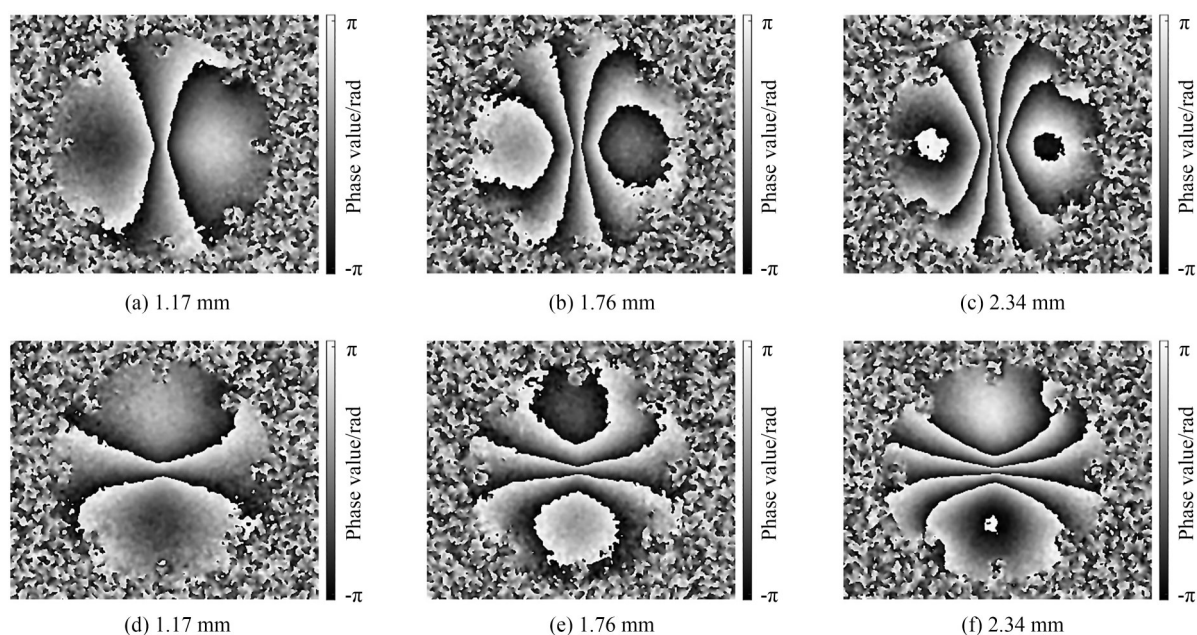


图 7 不同剪切量下获得的双向相位分布

Fig. 7 Phase distributions along two orthogonal shearing directions at different shear amounts

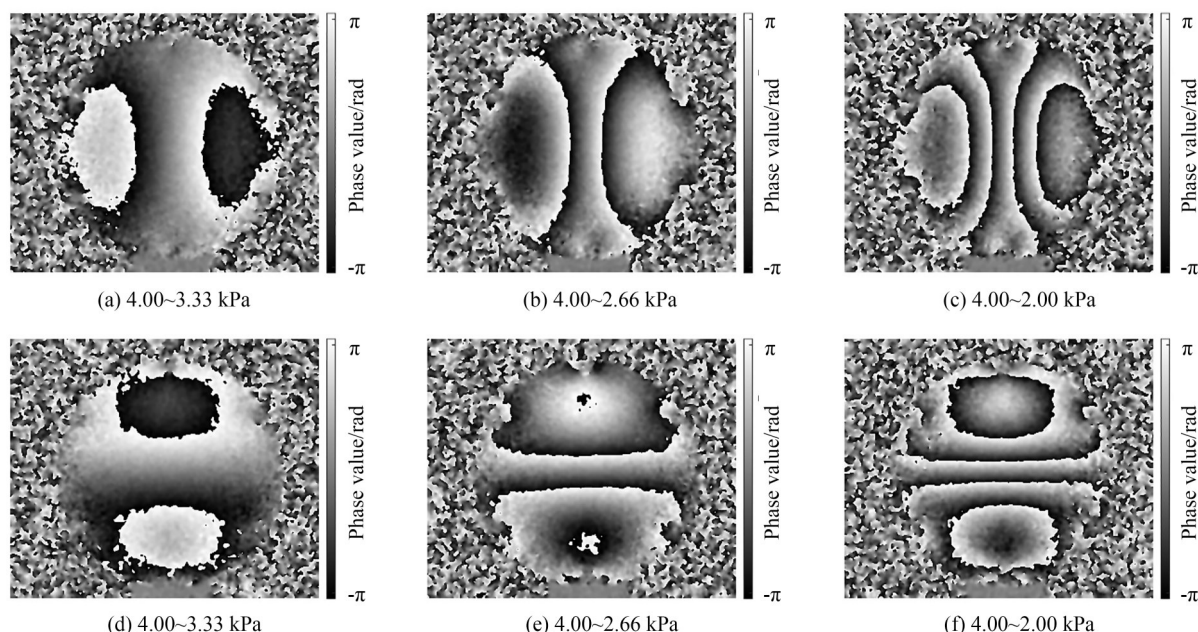


图 8 不同气压范围下的相位分布

Fig. 8 Phase distributions in different air pressure ranges

压变化下的试件表面离面变形梯度变化,如图 8 所示。实际上,在对各气压条件下试件变形的测量中,均采用相同的剪切量配置(剪切量为 0.94 mm),因此,不同气压变化对实验结果的直接影响为气压变化增大,产生的试件变形增大,离面变形梯度增大,反映到剪切相位图中即为剪切相位图条纹密度增加。最终,选取 4.00~3.33 kPa 气压变化下的剪切相位数据进行相位解包裹和双向积分运算,用以论证双向剪切双向积分在重构变形相位中的优势。

单向剪切抑或是双向剪切都无法直接反应试件表面的变形相位信息。其中,单向剪切相位表征了表面变形的单向位移导数,双向(正交)剪切相位则表征了表面变形的位移梯度分布。因此,为获得试件表面的变形相位分布,需要对剪切相位进行积分,即剪切/微分的逆过程。

为了分析双向剪切相对于单向剪切的优势,对 4.00~3.33 kPa 变化量下的剪切相位分布进行相位解包裹处理,如图 9(a)和 9(b)所示。首先,对解包裹相位进行单向积分获得变形相关相位。以 x 向剪切相位图的单向积分为例,确定数据区域,即试件在像面的成像范围,区域内数据为待积分的有效实验数据,区域外数据不参与积分运算。选取沿剪切方向最左侧有效数据定义为积分起始

点,考虑到所测得的剪切相位数据的像素化离散分布,用离散化求和代替连续积分,记为:

$$p(m, n) = \sum_{M=1}^{m-1} \Delta \phi_x(M, n) \times \Delta_p, \quad (15)$$

其中 Δ_p 为相机像元在物面的映射尺寸。利用 x 向剪切相位单向积分所获得的变形相关相位如图 9(c)所示。这种以单方向积分获取全相位分布的方式简单便捷,但是在积分过程中存在累积误差,得到的相位曲线只在积分方向上连续,垂直于积分方向的相位曲线不连续。类似地,利用 y 向剪切相位单向积分所获得的变形相关相位如图 9(d)所示。

利用双向剪切相位进行双向积分获得变形相关相位信息的过程中,首先定义有效相位区域,并确定有效区域中心点作为积分起点,再定义 $(L_x/2, L_y/2)$ 为中心点像素坐标。先沿其中一个剪切方向(如 x 方向)进行积分,利用 x 方向剪切相位信息(相位导数)结合像元尺寸累加计算相位值,相位数据从中心点向左右两侧扩展,建立 x 方向的相位变化,记为:

$$p_x(m, n) = \begin{cases} \sum_{M=L_x/2}^{m-1} \Delta \phi_x(M, n) \times \Delta_p & m > \frac{L_x}{2} \\ -\sum_{M=m}^{L_x/2-1} \Delta \phi_x(M, n) \times \Delta_p & m < \frac{L_x}{2} \end{cases}. \quad (16)$$

在此基础上,沿另一个剪切方向(如 y 方向)进行积分,并以 y 向相位增量修正 x 方向积分所获得的相位分布的连续性,记为:

$$p_{xy}(m, n) = \begin{cases} p_x(m, n) + \sum_{N=L_y/2}^{n-1} \Delta\phi_y(m, N) \times \Delta_p & n > \frac{L_y}{2} \\ p_x(m, n) - \sum_{N=n}^{L_y/2-1} \Delta\phi_y(m, N) \times \Delta_p & n < \frac{L_y}{2} \end{cases} \quad (17)$$

最终结合两个正交方向的积分结果,在减少累积误差的同时,使重建结果同时满足两个方向的梯度约束。利用双向剪切相位双向积分所获得的变形相关相位如图 9(e)所示。

在剪切相位测量过程中,采用末态减初态的操作,以获得变形相关的剪切相位信息,即将变形后的剪切相位减去变形前的剪切相位,最终获得用于积分的变形相关剪切相位信息(图 8)。在相减操作中,减去了包括系统波相差在内的非变形相关量,因此,在积分过程实现后,未对变形相位图进行去倾斜操作。

上述实验试图通过对比利用单向剪切相位单向积分和双向剪切相位的双向积分所获得的相位分布,来论证双向剪切干涉在试件表面变形

测量中的优势,如图 9(c)~9(e)所示。从数学基础上而言,剪切或微分操作会丢失部分其正交方向上的信息。实验数据中也体现了这一点,双向积分所获得的变相关相位的圆度更优,更符合圆形试件均匀加载的理论模型。

这里基于图 9(c)~9(e)中的红色标线数据,进一步绘制了图 10,可以发现,利用单向剪切单向积分所获得的变形相位分布,其仅在剪切方向(积分方向)上的数据连续性较好,而采用双向剪切数据双向积分所获得的变形相位分布在各方向上均具有较好的连续性。为进一步定量比较评估单向剪切单向积分和双向剪切双向积分计算的变形相关相位结果,以测量值与理论值之间的平均绝对误差为评价标准,对标线数据进行评价分析。平均绝对误差的计算方法为:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\phi_m(i) - \phi_t(i)|, \quad (18)$$

其中: n 为实验数据曲线数据点数, ϕ_m 和 ϕ_t 分别为实验和理论相位数据。对比实验中的平均绝对误差如表 1 所示。在 x 向剪切相位单向积分重构结果中, x 和 y 方向标线数据上的平均绝对误差分别为 0.25 和 1.14 rad,非剪切方向上的误差约

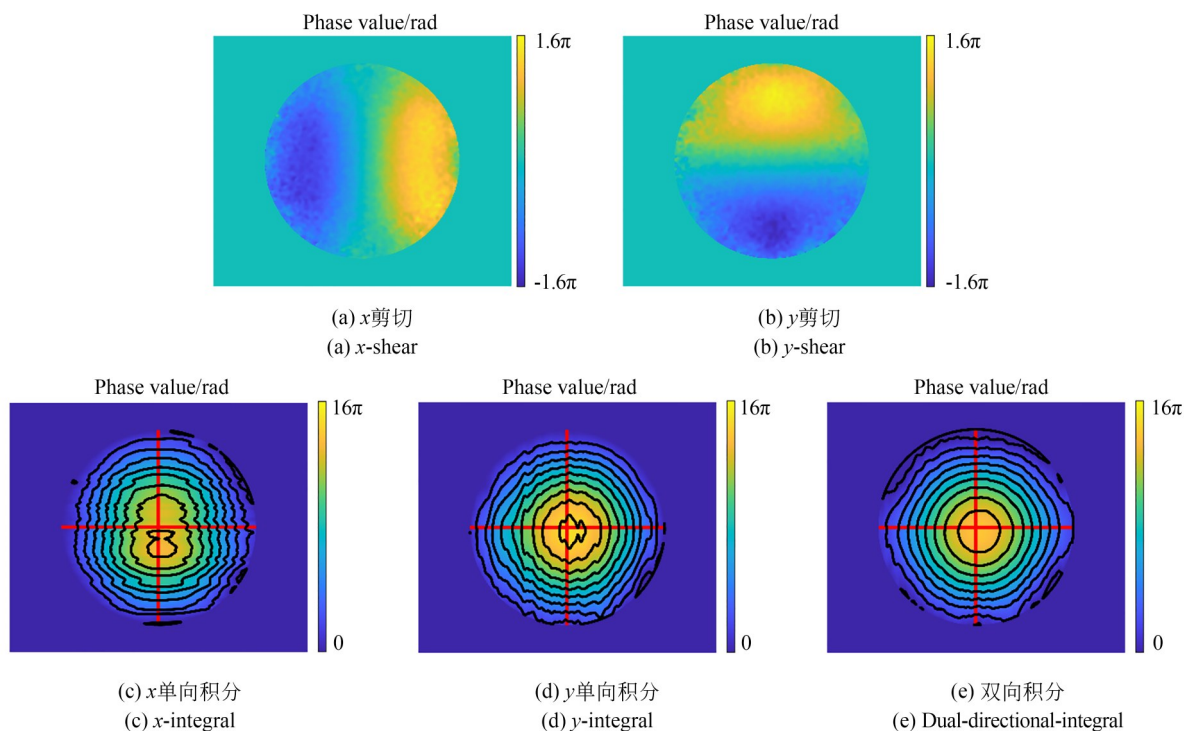


图 9 剪切相位重构变形结果

Fig. 9 Results of deformation reconstruction by sheared phase maps

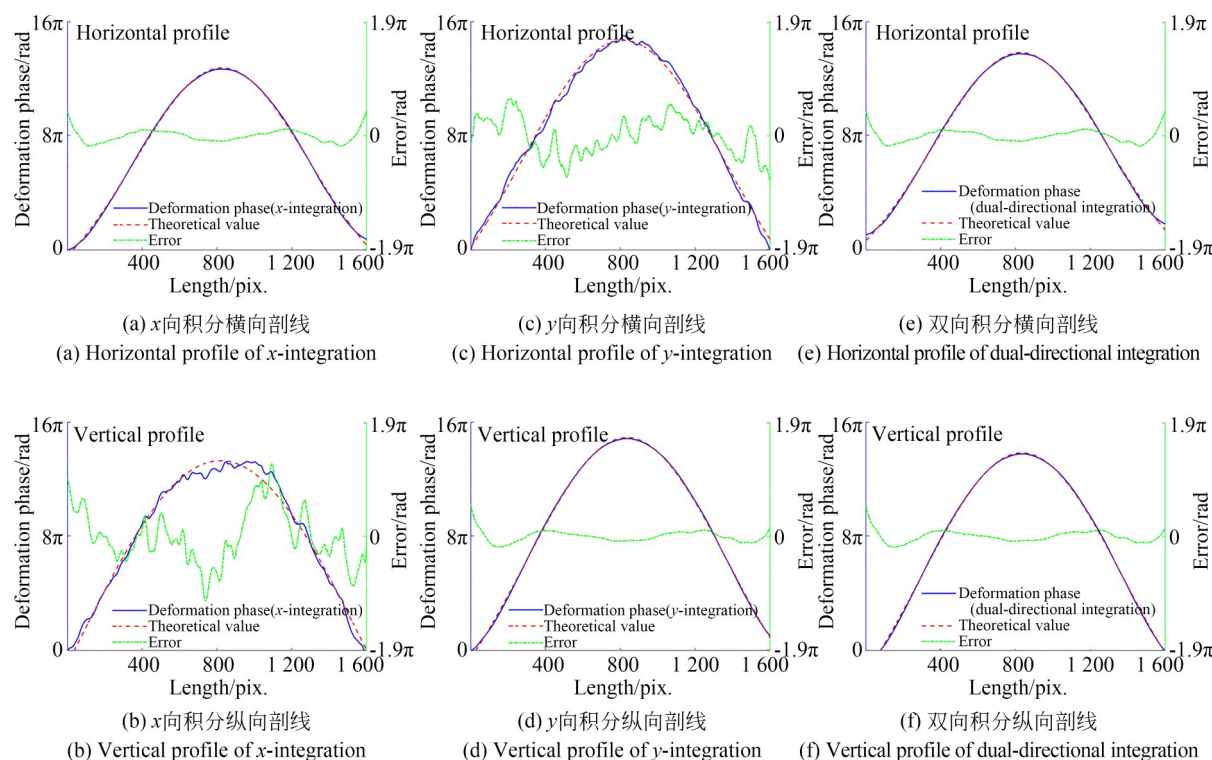


图 10 单向剪切相位与双向剪切相位在重构变形的结果对比

Fig. 10 Comparison of the deformation reconstruction between single-directional and dual-directional phase maps

表 1 平均绝对误差结果对比

Tab. 1 Comparison of mean absolute errors

方向	MAE	Difference
x-平行	0.25	78.07%
x-垂直	1.14	
y-平行	0.81	71.60%
y-垂直	0.23	
双向平行	0.25	8.00%
双向垂直	0.23	

为剪切方向上的 4.6 倍。在 y 剪切相位单向积分重构结果中, x 和 y 方向标线数据上的平均绝对误差分别为 0.81 和 0.23 rad, 非剪切方向上的误差约为剪切方向上的 3.5 倍。而在双向剪切数据重构中, 沿两个剪切方向上的重构误差分别为 0.25 和 0.23 rad, 偏差仅为 8%。

实验结果表明, 单向剪切结果具有方向敏感性, 在剪切方向和非剪切方向上的变形重构误差具有较为明显的差异, 其中剪切方向上的变形重构结果优于非剪切方向上的测量结果。双向剪

切在两个正交方向上完成测量, 通过双向积分避免了方向敏感性问题, 在两个方向上与单向剪切测量结果的误差水平相当。

4 结 论

本文提出的相位调控双向剪切散斑干涉变形测量技术, 将定量剪切散斑干涉的三要素, 即成像、剪切、相移, 集成在一个动态相位掩模中, 将剪切干涉过程视为系统对物光的相位变换作用。依托于该技术所构建的系统采用 SLM 作为相位调控器件, 在一个动态相位掩模中像素化随机融合两个菲涅尔衍射透镜。双透镜之间的光心距离决定剪切量、空间相对位置决定剪切方向, 故可以便捷地实现剪切量大小和方向的调整。通过双透镜相位基线之间的变化在剪切干涉图中引入相移, 并利用时间相移法对剪切相位进行求解。实验证明了该技术在单波长、单偏振、单孔径、单相机配置下, 实现双向剪切散斑干涉变形测量的有效性。实验中分别利用单向剪切相位图的单相积分和双向剪切相位图的双向

积分,获得了同一个加载事件中的变形相位信息。实验结果表明,利用单向积分重构的变形相位时,非剪切方向上的误差水平为剪切方向上的 3.5~4.6 倍,而利用双向剪切相位重构的变形相位,在各剪切方向上都具有较低的误差水平,且一致性较高,两个方向上的误差偏差为 8%,显示出双向剪切在变形重构中的优势。相较于传统的剪切散斑干涉技术,本文所提出的相位调控双向剪切散斑干涉技术的主要特点是较高的系统集成度和双向剪切相位定量测量。除照明和采集单元外,基于该技术的光学系统仅存在一台纯相位型液晶空间光调制器,集成了双向剪切的全部核心功能,即试件成像、双向剪切和定量相移。为现场空间狭小的测量条件下,提供了一种有效的剪切散斑干涉测量技术。该技术的双向剪切不涉及机械运动部件,且双向剪切具有像素级别的正交性,依靠 SLM 刷新相位调控掩模,可以方便快速地完成剪切方向的切换。对于一些不可重复试件加载条件,可以在一次加载事件中,完成两个正交方向上的双向剪切相位测量,更好地重构试件变形。在复合材料缺陷检测中,单一剪切方向只能识别平行于剪切方向的缺陷特征,而双向剪切测量可以避免

单一剪切方向的漏检问题,提高缺陷检测的效率。

现阶段相位调控双向剪切散斑干涉技术的方法局限性主要在于其系统光能利用率和系统有效焦距。当前系统采用了反射式 SLM,因此需要经过分光棱镜引导光路,理论上会损失 75% 的光能。潜在的解决方案主要可考虑采用透射式 SLM 或利用经过特殊设计的全反射棱镜^[18]引导光路。对于系统焦距而言,利用 SLM 产生衍射透镜存在最小焦距,即奈奎斯特焦距,当测量需要短焦(小于奈奎斯特焦距)衍射透镜时,系统会因无法进行有效调制而失效。因此,在实验设计中需要结合 SLM 选型,综合考虑系统的整体放大率、空间分辨率和选用波长等具体参数完成相位调控掩模的设计。

作者贡献声明:

齐司源:测量实验,数据分析,初稿写作;
方未东:搭建光学系统,数据分析;
刘奕隆:搭建光学系统,数据分析;
常青:试件设计,可视化呈现;
高帅:方法论,指导,论文审核与编辑写作;
汪盛佳:获取资助,项目管理,提供资源。

参考文献:

- [1] 陈朝阳,吴思进,张硕,等. 用于亚毫米范围形变测量的双波长数字剪切散斑干涉技术[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2025: 1-13. (2025-05-21). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JGDJ2025051903S&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
CHEN CH Y, WU S J, ZHANG SH, *et al.* Dual-wavelength digital shearing speckle interferometry for deformation measurement in submillimeter range [J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2025: 1-13. . <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JGDJ2025051903S&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [2] WANG SH J, SHI P Y, XIONG J X, *et al.* Single-shot time-averaged shearography for vibration strain mode shape visualization [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(7): 9639-9646.
- [3] XU Z R, LI J, BA R S, *et al.* Quantitative diagnosis of the out-of-plane displacement derivative with temporal-phase-shift shearography [J]. *Applied Optics*, 2024, 63(19): F1.
- [4] SIROHI R. Shearography and its applications - a chronological review [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 1.
- [5] YAO Y F, WANG Z Y, YAN P Z, *et al.* High-performance rotational shearography system based on dove prism for nondestructive testing [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 7002407.
- [6] 闫旭帅,李伟仙,吴思进. 基于数字剪切散斑干涉与红外热成像的复合缺陷检测[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(24): 2412005.
YAN X SH, LI W X, WU S J. Composite defect detection based on digital shearing speckle pattern interferometry and infrared thermography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(24): 2412005. (in Chinese)
- [7] WANG SH J, DONG J, PÖLLER F, *et al.* Dual-

- directional shearography based on a modified common-path configuration using spatial phase shift[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(3): 593-603.
- [8] RICHOSZ 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.
- [9] YAN L P, TAN L, HUANG L, *et al.* A simultaneous multi-directional defects measurement based on polarization-multiplexed four-directional digital shearography with large field of view [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 6003508.
- [10] ANISIMOV A G, GROVES R M. Extreme shearography: Development of a high-speed shearography instrument for quantitative surface strain measurements during an impact event [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106502.
- [11] WANG SH J, GAO SH, TANG H, *et al.* Super-compact shearography based on a single diffractive optical element with 3-in-1 phase mask[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(20): 5409-5412.
- [12] YAO Y F, WANG Y H, WANG ZH Y, *et al.* Three-directional digital shearography based on SLM using a honeycomb-like pattern [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(17): 4907-4910.
- [13] JAMALI A, BRYANT D, ZHANG Y L, *et al.* Design of a large aperture tunable refractive Fresnel liquid crystal lens [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): B10.
- [14] WANG SH J, FENG Y J, GAO SH, *et al.* Fiber-coupled common-path shearography for simultaneous measurement of surface deformation and slope [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(15): 16721-16728.
- [15] MOSER S, RITSCH-MARTE M, THALHAMMER G. Model-based compensation of pixel crosstalk in liquid crystal spatial light modulators [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25046-25063.
- [16] XIONG W Z, WANG SH J, GAO SH, *et al.* Complex amplitude domain filtering for phase measurement in speckle interferometric optics [J]. *Optics Communications*, 2023, 534: 129328.
- [17] 吴荣, 陆阳, 欧阳爱国. 正余弦变换和双调滤波相结合的剪切散斑干涉图像去噪方法[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(2): 435-443.
- WU R, LU Y, OUYANG A G. A denoising method combining bitonic filtering and sine-cosine transform for shearography fringe pattern [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 435-443. (in Chinese)
- [18] YUAN X, MIN J W, ZHOU Y, *et al.* Optical diffraction tomography based on quadriwave lateral shearing interferometry [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 177: 111124.

作者简介:



齐司源(2002—),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,2024年于哈尔滨工程大学获得学士学位,主要研究方向为光学剪切干涉技术。E-mail: siyuan.qi@hrbeu.edu.cn

通讯作者:



汪盛佳(1989—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,2012年、2015年于北京交通大学分别获得学士和硕士学位,2020年于德国慕尼黑工业大学获得博士学位,黑龙江省优青,主要从事光学精密检测与定量相位成像等方面的研究工作。E-mail: shengjia.wang@hrbeu.edu.cn