



# 基于空间载波的单波长剪切散斑干涉面内面外变形导数同时测量方法

唐信永, 严利平, 谭 岚

(浙江理工大学纳米测量实验室, 杭州 310018)

**摘 要:** 剪切散斑干涉技术是测量物体变形导数的重要方法之一。针对单波长双光束面内面外变形导数测量系统中的干涉图获取问题, 提出了一种基于空间载波的单波长剪切散斑干涉的面内面外变形导数同时测量方法。首先设计了一种单波长剪切散斑干涉测量光路。在该测量光路中, 激光垂直入射到待测物表面, 采用两个光轴相互垂直的偏振片来保证两个观测方向的光束偏振态相互垂直; 使用透镜-光阑组合的马赫-曾德剪切装置来实现剪切量和载波量的独立调整。然后在剪切量一致的情况下, 引入两个不同的载波频率, 实现剪切散斑干涉图的相位频率分量在频谱中的分离, 并通过空间载波相移技术从记录的剪切散斑干涉频谱图中提取与面内面外变形导数相关的相位分量。最后对载频的引入进行了分析与设计, 同时进行了带槽口的三点弯曲实验板的变形测量。实验测量结果与仿真分析吻合, 验证了该实验测量系统的可行性。

**关键词:** 剪切散斑干涉; 面内面外变形导数测量; 空间载波相移技术; 马赫-曾德剪切装置; 偏振态

中图分类号: O348.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)09-0666-09

## Single-wavelength speckle-shearing pattern interferometry for simultaneous measurement of in-plane and out-of-plane deformation derivatives based on spatial carrier phase-shifting

TANG Xinyong, YAN Liping, TAN Lan

(Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Speckle-shearing pattern interferometry is one of the important methods to measure the deformation derivatives of objects. In order to solve the acquisition of interferogram in the single-wavelength dual-beam measurement system of in-plane and out-of-plane deformation derivatives, a single-wavelength speckle-shearing pattern interferometry system based on spatial carrier phase-shifting was developed for simultaneous measurement of in-plane and out-of-plane deformation derivatives. First of all, an optical path of single-wavelength speckle-shearing pattern interferometry is designed. In this optical path, the laser enters perpendicularly to the surface of the tested object, and two polarizers whose optical axes are perpendicular to each other are used to ensure that the polarization states of beams in the two observation directions are perpendicular to each other; Two Mach-Zehnder shearing devices combining a lens and a diaphragm are used to adjust the shearing amount and carrier frequency of two symmetrical directions independently. With the shearing amount being consistent, two different carrier frequencies are introduced to separate phase frequency components of the speckle-shearing pattern interferogram in the

收稿日期: 2021-04-20 网络出版日期: 2021-05-26 Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875530); 浙江省自然科学基金项目(LZ18E050003)

作者简介: 唐信永(1994—), 男, 江西上饶人, 硕士研究生, 主要从事信号与信息处理方面的研究。

通信作者: 严利平, E-mail: yanliping@zstu.edu.cn

frequency spectrum. The spatial carrier phase-shifting technology is used to extract phase components related to the in-plane and out-of-plane deformation derivatives on the recorded frequency spectrum of speckle-shearing pattern interferometry. Finally, the introduction of carrier frequency is analyzed and designed, and the deformation of a three-point bending test board with notch is measured. The measurement results are consistent with the simulation analysis, which verifies the feasibility of the proposed measurement system.

**Key words:** speckle-shearing pattern interferometry; measurement of in-plane and out-of-plane deformation derivatives; spatial carrier phase-shifting; Mach-Zehnder shearing device; polarization state

## 0 引言

数字剪切散斑干涉测量技术(Digital shearography, DS)能够直接测量物体变形的导数,并且具有全场非接触、高精度、高灵敏度等特点,被广泛应用于物体的稳态震动分析、偏转角度测量、复合材料的性能与缺陷评估<sup>[1-3]</sup>。按灵敏度分类,DS同时测量多个变形导数分量的光路可以分为单灵敏度和多灵敏度结构。通常,单灵敏度的光路只对面外变形敏感,因此可以用来测量多方向面外变形导数,如同时测量两个或者三个方向的面外变形导数<sup>[4-5]</sup>;多灵敏度的光路对面内和面外变形都敏感,在多灵敏度光路中一般采用双光束系统,两个光束会形成各自的剪切散斑干涉场,通过相移技术提取与变形相关的相位信息,并求解获得面内和面外变形导数分量<sup>[6-7]</sup>。因此,同时获取两个对称方向的干涉图是剪切散斑干涉测量面内面外变形导数的关键。

目前,在双光束系统中,基于干涉图的获取方式,可将面内面外变形导数测量光路分为时分复用型、空分复用型和频分复用型<sup>[8]</sup>。时分复用和空分复用方法都是通过将剪切散斑干涉场记录在不同图像当中来实现不同干涉场相位信息的分离,因此需要在变形前后获取多帧图像,不利于后期数据处理,并且系统抗干扰能力较弱<sup>[9-11]</sup>。频分复用型方法可以将两束光的干涉场同时记录在一帧图像中,再采用空间载波相移技术分离两束光的相位信息,该方法能够减少记录的帧数,但需要保证两束光为非相干光,防止两个干涉场之间相互干涉产生影响。在解决两束光的干涉问题上,Xie等<sup>[12]</sup>采用两个激光器保证两束光为非相干光,在一帧图像中记录两个干涉场,但由于迈克尔逊剪切装置和激光器波长相差不大的原因,无法真正实现频谱分离,因此测量效果较差。Hooshmand-Ziaf等<sup>[13]</sup>改进了该方法,将剪切装置替换为专门设计的平行玻璃板,其可以引

入较大的入射角,实现了双波长频分复用测量面内面外变形导数测量。Petry等<sup>[14]</sup>阐述了使用三个激光器实现面内面外变形导数测量的方法,并对频分复用原理进行了分析。此外,有学者<sup>[15-16]</sup>采用单个激光器实现面内变形测量,利用光的相干特性以及光的偏振态来防止不同的光束相互干涉。

目前测量面内面外变形导数的方法大多数采用多波长来避免两束光的干涉,然而多波长方法需要激光器的波长相差较大才能实现频谱分离,在可见光波段内激光波长相差不大,通常对物光的空间频率进行限制才能实现频谱分离,这就使得光的利用率降低,测量效果变差。而对于单波长面内面外变形导数测量光路,还没有利用光的偏振态或者相干长度来防止两束光的干涉场相互影响的方法。一般激光器的相干长度都长达几十米,因此采用相干长度方法不利于在狭窄的空间内测量。本文利用光的偏振态,提出了一种基于空间载波的单波长剪切散斑干涉同时测量面内面外变形导数的方法。首先设计了一种单波长剪切散斑干涉测量光路,通过两个光轴相互垂直的偏振片控制光的偏振态,防止两个方向的干涉场相互干涉,采用载波量与剪切量可独立调整的剪切装置控制两束光的干涉场剪切量一致;然后同时引入不同的载波频率,实现频分复用;最后对带槽口的三点弯曲实验板进行测量,获得面内面外变形导数分量。

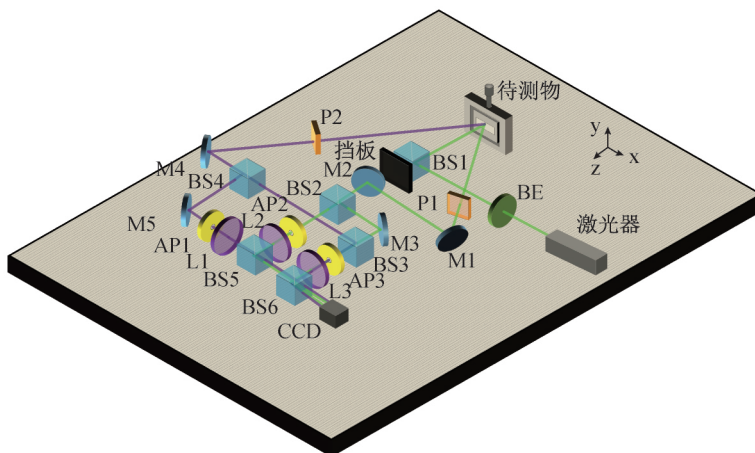
## 1 测量原理

### 1.1 基于空间载波的单波长剪切散斑干涉测量光路结构

本文提出的基于空间载波的单波长剪切散斑干涉同时测量面内面外变形导数的光路结构如图1(a)所示。激光器发出的光经过平场萤石物镜扩束器(BE)和分光棱镜(BS1)后垂直打在待测物表面。经过待测物表面漫反射后的光包含了各个偏振态,左右观测方向的反射光分别经过光轴相互垂直的偏

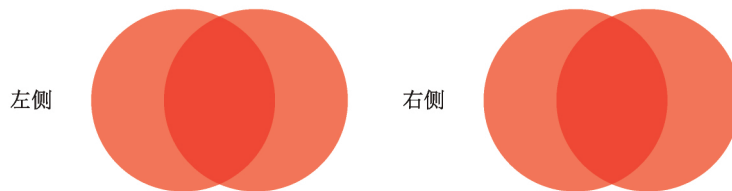
振片(P1、P2)后,产生两束偏振态相互垂直的光束(图1(a)中左右光束的箭头代表偏振方向),右侧光束由反射镜(M1、M2)与分光棱镜(BS2)分成两束光,并经过剪切装置(M3、AP2、L2、AP3、L3、BS5、BS6)后打在 CCD 靶面上,形成剪切散斑干涉场。同理左侧光束由反射镜(M4)与分光棱镜(BS4)产生两束光,再经过剪切装置(M5、BS3、AP1、L1、

AP3、L3、BS5、BS6)被 CCD 记录,其中挡板用来阻挡垂直方向的反射光。右侧与左侧观测光束的剪切量分别由反射镜 M3 和反射镜 M5 的摆放角度调整,引入剪切量后光波在 CCD 靶面形成相互剪切的像,如图1(b)所示。载波频率由小孔光阑中心与透镜光轴的相对位置引入,由于左右两束光的偏振态相互垂直,因此左右观测光束不会在 CCD 表面发生干涉。



BE: 平场萤石物镜扩束器; BS: 分光棱镜; P: 偏振片; M: 反射镜; AP: 小孔光阑; L: 成像透镜; CCD: 工业相机

(a) 光路装置



(b) 剪切像

图1 基于空间载波的单波长剪切散斑干涉测量光路结构示意图

在图1(a)所示的光路中,载波频率 $f$ 可表示为<sup>[17]</sup>:

$$f = \frac{\sin\theta}{\lambda} \quad (1)$$

其中: $\theta$ 为光束入射到 CCD 靶面的角度; $\lambda$ 为激光器的波长。

由于测量光路使用的激光器在测量过程中波长不会发生变化,因此载波频率主要由入射角度 $\theta$ 控制。图1(a)所示光路示意图中使用的剪切装置为透镜和小孔光阑组合的马赫-曾德装置,可以实现载波量与剪切量的独立调整。载波频率的引入原理如图2所示。当 AP 的中心、L 的光轴、像平面中心在同一直线时,光束1经过 AP 与 L 后垂直照射到像表面,此时载波频率为0,如图2(a)所示;当 AP 的中心与 L 的光轴、像平面中心不在同一条直线上,并且 AP 的中心与 L 光轴的水平垂直距离为 $d_x$ 时,光经过 L 产生折射以一定的夹角( $\theta$ )打在像平

面上,此时便可以引入载波频率,如图2(b)所示;本文光路中不同光阑与透镜光轴之间的位置关系示意图如图2(c)所示,各个光阑与透镜光轴之间沿 $x$ 方向( $d_{x1}$ ,  $d_{x2}$ ,  $d_{x3}$ )或者 $y$ 方向( $d_{y1}$ ,  $d_{y2}$ )的垂直距离表征了引入载波频率的大小与方向。

假设光阑 AP1 和 AP3 在 $x$ 方向与 $y$ 方向的夹角分别为 $\theta_{1,x}$ 和 $\theta_{1,y}$ , AP2 和 AP3 在 $x$ 方向与 $y$ 方向的夹角分别为 $\theta_{r,x}$ 和 $\theta_{r,y}$ ,则左侧与右侧光束引入的载波频率可以分别表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_l = (f_{l,x}, f_{l,y}) = \left( \frac{\sin\theta_{1,x}}{\lambda}, \frac{\sin\theta_{1,y}}{\lambda} \right), \\ \mathbf{F}_r = (f_{r,x}, f_{r,y}) = \left( \frac{\sin\theta_{r,x}}{\lambda}, \frac{\sin\theta_{r,y}}{\lambda} \right) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{F}_l$ 和 $\mathbf{F}_r$ 分别为左侧与右侧干涉场的载波频率矢量; $f_{l,x}$ 、 $f_{l,y}$ 、 $f_{r,x}$ 、 $f_{r,y}$ 分别代表左侧与右侧干涉场沿 $x$ 与 $y$ 方向的载波频率。

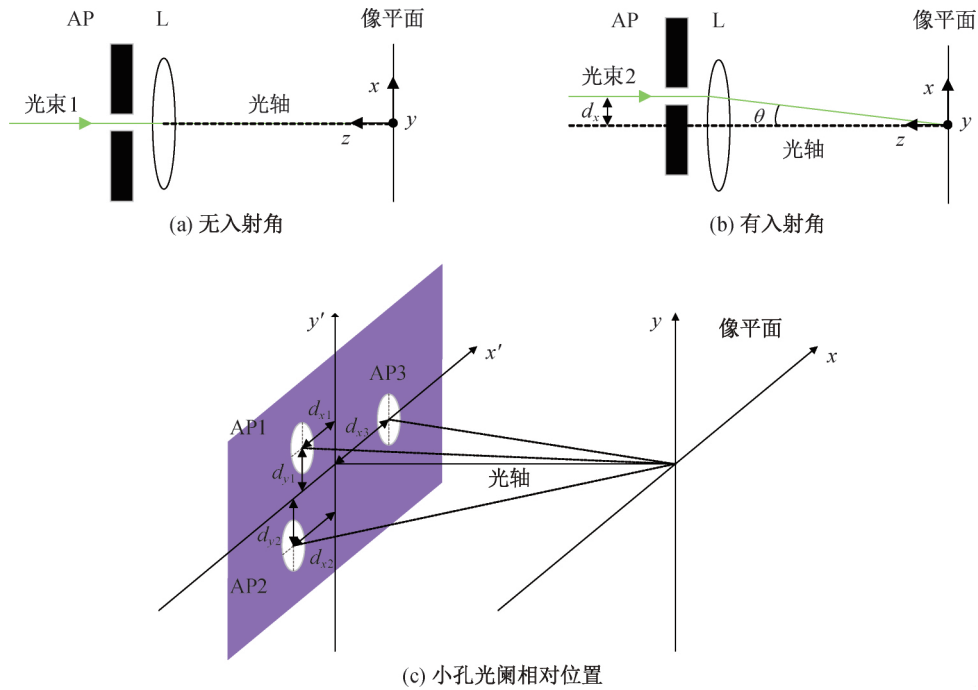


图2 载波引入原理示意图

## 1.2 干涉相位提取原理

假设左侧观测光波经过 BS4 分束后光波为  $u_{11}$  和  $u_{12}$ , 右侧观测光波经过 BS2 分束后光波为  $u_{r1}$  和  $u_{r2}$ , 其表达式可以描述为:

$$\begin{cases} u_{11}(x, y) = a_{11}(x, y) \times \exp[j\varphi_1(x, y)], \\ u_{12}(x, y) = a_{12}(x + \Delta x, y) \times \\ \quad \exp[j\varphi_1(x + \Delta x, y) + j2\pi(f_{1,x}x + f_{1,y}y)], \\ u_{r1}(x, y) = a_{r1}(x, y) \times \exp[j\varphi_r(x, y)], \\ u_{r2}(x, y) = a_{r2}(x + \Delta x, y) \times \\ \quad \exp[j\varphi_r(x + \Delta x, y) + j2\pi(f_{r,x}x + f_{r,y}y)] \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $a_{11}$ 、 $a_{12}$  和  $a_{r1}$ 、 $a_{r2}$  分别表示左侧与右侧子光波的振幅;  $\varphi_1$  与  $\varphi_r$  为左右光束的相位;  $(x, y)$  和  $(x + \Delta x, y)$  代表坐标位置;  $\Delta x$  代表剪切量。

由 CCD 记录的两个剪切散斑干涉场的强度图可以描述为:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= (u_{11} + u_{12})(u_{11} + u_{12})^* + (u_{r1} + u_{r2}) \\ &\quad (u_{r1} + u_{r2})^* = u_{11}u_{11}^* + u_{12}u_{12}^* + u_{r1}u_{r1}^* + \\ &\quad u_{r2}u_{r2}^* + u_{11}u_{12}^* + u_{12}u_{11}^* + u_{r1}u_{r2}^* + u_{r2}u_{r1}^* \end{aligned} \quad (4)$$

其中: “\*” 代表共轭运算符号。

对式(4)进行傅里叶变换操作, 得到频域表达式:

$$\begin{aligned} F(I) &= U_{11}(f_x, f_y) \otimes U_{11}^*(f_x, f_y) + U_{12}(f_x + \\ &\quad f_{1,x}, f_y + f_{1,y}) \otimes U_{12}^*(f_x - f_{1,x}, f_y - f_{1,y}) \\ &\quad + U_{r1}(f_x, f_y) \otimes U_{r1}^*(f_x, f_y) + U_{r2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\quad (f_x + f_{r,x}, f_y + f_{r,y}) \otimes U_{r2}^*(f_x - f_{r,x}, f_y - f_{r,y}) + \\ &\quad U_{11}(f_x, f_y) \otimes U_{12}^*(f_x - f_{1,x}, f_y - f_{1,y}) + \\ &\quad U_{12}(f_x + f_{1,x}, f_y + f_{1,y}) \otimes U_{11}^*(f_x, f_y) + \\ &\quad U_{r1}(f_x, f_y) \otimes U_{r2}^*(f_x - f_{r,x}, f_y - f_{r,y}) + \\ &\quad U_{r2}(f_x + f_{r,x}, f_y + f_{r,y}) \otimes U_{r1}^*(f_x, f_y) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)可以拆分为 A、B、B\*、C、C\* 五项:

A 表示左侧低频项和右侧低频项包含了背景光信息:

$$\begin{aligned} A &= U_{11}(f_x, f_y) \otimes U_{11}^*(f_x, f_y) + U_{12}(f_x + f_{1,x}, \\ &\quad f_y + f_{1,y}) \otimes U_{12}^*(f_x - f_{1,x}, f_y - f_{1,y}) + \\ &\quad U_{r1}(f_x, f_y) \otimes U_{r1}^*(f_x, f_y) + U_{r2}(f_x + f_{r,x}, \\ &\quad f_y + f_{r,y}) \otimes U_{r2}^*(f_x - f_{r,x}, f_y - f_{r,y}) \end{aligned} \quad (6)$$

B 和 B\* 分别表示左侧观测光束的正一级与负一级频谱项:

$$\begin{cases} B = U_{12}(f_x + f_{1,x}, f_y + f_{1,y}) \otimes U_{11}^*(f_x, f_y), \\ B^* = U_{11}(f_x, f_y) \otimes U_{12}^*(f_x - f_{1,x}, f_y - f_{1,y}) \end{cases} \quad (7)$$

C 和 C\* 分别表示右侧观测光束的正一级与负一级频谱项:

$$\begin{cases} C = U_{r2}(f_x + f_{r,x}, f_y + f_{r,y}) \otimes U_{r1}^*(f_x, f_y), \\ C^* = U_{r1}(f_x, f_y) \otimes U_{r2}^*(f_x - f_{r,x}, f_y - f_{r,y}) \end{cases} \quad (8)$$

若在光路中引入合适的  $f_{1,x}$ 、 $f_{1,y}$ 、 $f_{r,x}$ 、 $f_{r,y}$ , 则可以在频域中实现五个分量相互分离, 图3展示了理想情况下五个相位分量在频域中的分布示意。

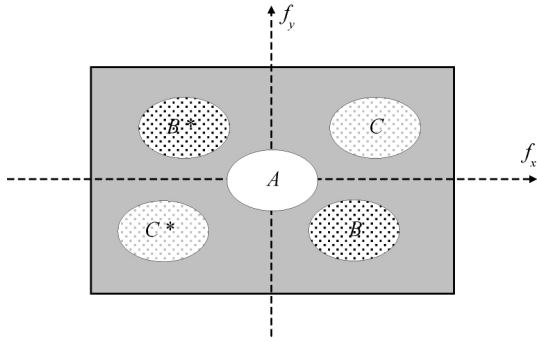


图3 理想情况下的相位分布示意

正一级与负一级频谱项中包含了干涉图的相位信息,通过合适的带通滤波器获取左右光束的正一级频谱项,并进行反傅里叶变换与反正切操作得到包裹相位,其表达式为:

$$\begin{cases} \varphi_l(x + \Delta x, y) - \varphi_l(x, y) + \\ 2\pi(f_{l,x}x + f_{l,y}y) = \arctan \frac{\text{Im}(u_{l2}u_{l1}^*)}{\text{Re}(u_{l2}u_{l1}^*)}, \\ \varphi_r(x + \Delta x, y) - \varphi_r(x, y) + \\ 2\pi(f_{r,x}x + f_{r,y}y) = \arctan \frac{\text{Im}(u_{r2}u_{r1}^*)}{\text{Re}(u_{r2}u_{r1}^*)} \end{cases} \quad (9)$$

其中:Im 和 Re 分别为求取复数的实部和虚部函数。

当测量的平面处于  $xoz$  平面时,由于加载而产生的相位变化量可以描述为<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_l = -\frac{2\pi\Delta x}{\lambda} \left[ \sin\alpha \frac{\partial u}{\partial x} - (1 + \cos\alpha) \frac{\partial w}{\partial x} \right], \\ \Delta\varphi_r = -\frac{2\pi\Delta x}{\lambda} \left[ -\sin\alpha \frac{\partial u}{\partial x} - (1 + \cos\alpha) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \end{cases} \quad (10)$$

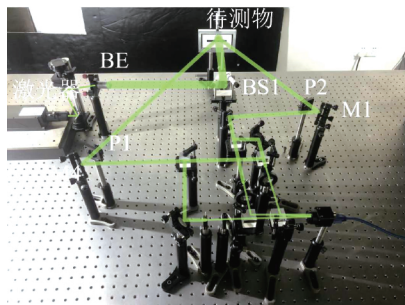
其中: $\partial u/\partial x$  代表面内变形导数; $\partial w/\partial x$  分别代表面外变形导数; $\alpha$  为观测角度。通过对式(10)求解方程组,可以获得纯面内和面外变形导数分量,其表达式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda(\Delta\varphi_l + \Delta\varphi_r)}{4\pi\Delta x(1 + \cos\alpha)}, \\ \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\lambda(\Delta\varphi_l - \Delta\varphi_r)}{4\pi\Delta x \sin\alpha} \end{cases} \quad (11)$$

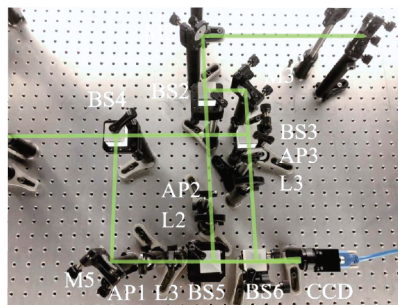
## 2 实验结果与讨论

### 2.1 实验结果

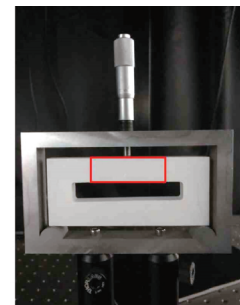
本文为了验证所提出的光路方案的可行性,基于空间载波的单波长剪切散斑干涉测量光路的原理图(见图1)搭建了实验测量光路,实验测量光路如图4(a)所示;光路中的剪切装置如图4(b)所示。对图4(c)所示的带槽口的实验板进行了三点弯曲变形测量。待测物的固定架为  $135 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$  的镂空矩形铝合金,在顶部中心位置开有螺纹孔,以便嵌入螺旋测微杆;中间待测实验板为 PMMA 材质的有机玻璃,其外边框尺寸为  $105 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,正中间开有大小为  $60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的矩形槽口,并且其表面喷有哑光白漆以提高反射率,图中矩形框区域为实际的测量视场范围。本次光路的测量视场范围为  $50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ,由于剪切量的大小一般设置为视野范围的  $5\% \sim 25\%$  左右<sup>[19]</sup>,为了兼顾测量的精度与剪切像重叠区域的大小,将  $\Delta x$  设置为  $5 \text{ mm}$ ,沿  $x$  方向的,此时剪切像重叠的区域为  $45 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。同时,通过实验调整与验证,使得干涉图的频谱各项分量能够相互分离时的  $d_{x1}$ 、 $d_{x2}$  为  $4 \text{ mm}$ , $d_{y1}$ 、 $d_{y2}$  为  $3 \text{ mm}$ ;为了增大  $x$  方向的载波频率将  $d_{x3}$  调整为  $3 \text{ mm}$ 。测量过程中采用分辨率为  $1236 \times 1915$  像素的工业相机(MU3S230 M)记录变形前后的剪切散斑干涉图。实验中激光器的波长为  $532 \text{ nm}$ ,L1、L2、L3 的焦距均为  $150 \text{ mm}$ ,左侧与右侧的观测角度为  $30^\circ$ ,AP1、AP2、AP3 的孔径大小为  $2 \text{ mm}$ 。



(a) 实验测量光路



(b) 剪切装置



(c) 待测物实物

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图5(a)为实验过程中采集到的剪切散斑干涉图,包含左右观测光束各自所产生的剪切散斑干涉

场。使用快速傅里叶变换将干涉图变换到频域,如图5(b)所示,频谱中含有背景光低频分量(A)、左

侧高频分量( $B$  和  $B^*$ )、右侧高频分量( $C$  和  $C^*$ )，分别对应式(6)——(8)中的每一项，这表明本文采用的方案成功地将左右两个剪切散斑干涉场记录在一帧图像当中。使用手动选取多边形带通滤波器，获取左侧正一级高频分量( $B$ )与右侧正一级高

频分量( $C$ )，并进行反傅里叶变换操作获得干涉相位，将变形前与变形后的相位相减，获得由载荷引起的未滤波的包裹相位图，该相位图如图 6(a)——(b)所示，分别代表左侧与右侧未滤波的包裹相位图。

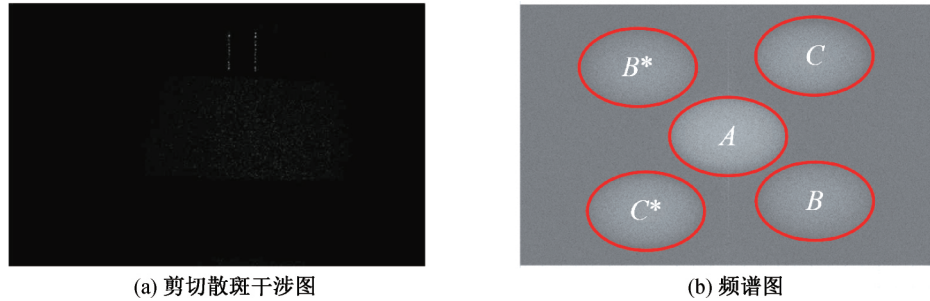


图 5 剪切散斑干涉图及对应频谱图

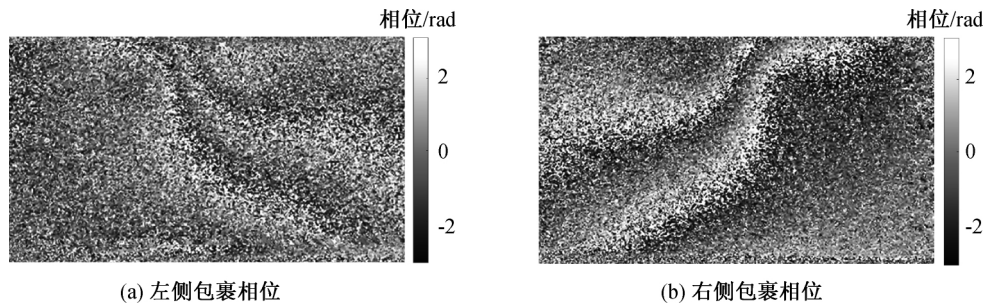


图 6 未滤波的包裹相位图

从图 6(a)——(b)可以看出，包裹相位图中包含了较多的噪声，并且可以发现，左侧包裹相位的噪声稍强与右侧的。这是由于左侧光束的光程大于右侧，光传输的过程中存在光强衰减，导致噪声影响增大。另外，在实验中，左侧光束的物距大于右侧光束，而左右光束的像距相同，在透镜焦距相同的情况

下，根据凸透镜成像原理，左侧的像比右侧的像小，在求解过程前需要进行像素点匹配，保持包裹相位图的大小一致才能进行后续求解。本文采用双三次插值对滤波后的左侧包裹相位图进行插值，同时使用正余弦均值滤波<sup>[20]</sup>对包裹相位图进行降噪。经过上述处理后的左右两侧的包裹相位图如图 7 所示。

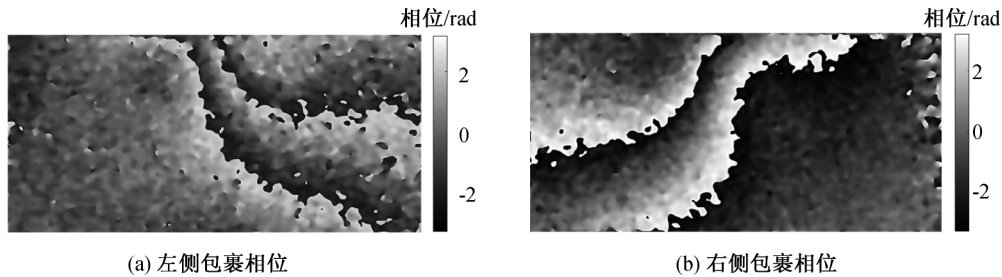


图 7 滤波并校正后包裹相位图

使用基于可靠度掩膜的加权最小二乘解包裹算法<sup>[21]</sup>对左右两侧包裹相位图进行解包裹，再根据式(10)计算得到面内面外变形导数，其结果如图 8(a)——(b)所示。为了定性分析测量的结果是否正确，采用 ANSYS 有限元分析软件对待测物进行静力分析，将分析结果与测量结果进行对比。图 8(c)展示了仿真的面内变形导数，虚线矩形框区域为实验测量的区域。从图 8(a)和图 8(c)可以看出，面内

变形导数的实验结果与仿真结果吻合。由于 ANSYS 软件无法直接获得面外变形导数，因此本文将图 8(c)中虚线路径上的面外变形量数据从 ANSYS 导出，将导出的数据沿水平方向进行 20 个像素点的差分运算，获得路径上的面外变形导数，结果如图 8(d)中缩小的坐标轴区域内的曲线，图中虚线矩形框内为实验测量视野范围内的仿真数据，大坐标轴区域内的曲线为实验获得的第 10 行面外变

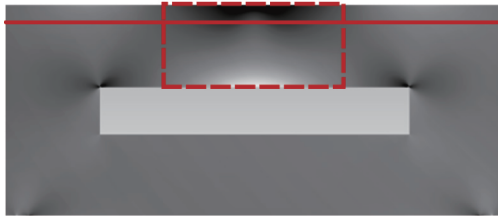
形导数实验数据,可以看出测量值与仿真值基本吻合。另外,本文对带槽口的实验板进行了多次的测量,将每次的测量结果都与仿真结果进行对比,得到



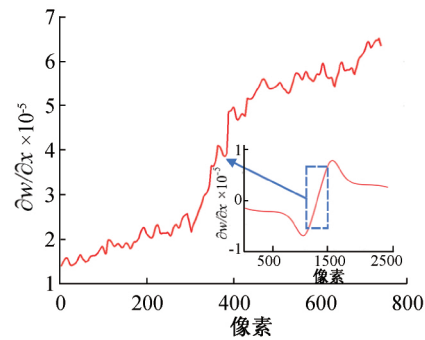
(a) 面内变形导数



(b) 面外变形导数



(c) 面内变形导数仿真



(d) 虚线位置的面外变形导数实验及仿真数据

图8 变形导数图

## 2.2 误差分析

为了获得较大的视野范围,图4(a)所示的实验测量光路采用平场萤石物镜扩束器,该扩束器具有高倍扩束、远距离工作的特点,但其扩束后的光束是非平行光束,因此光束照射到待测物表面的不同位置会形成不同的角度,该角度会影响最终测量的精度。非平行光束误差分析示意图如图9所示。为了定量分析入射角度与面内面外变形导数的关系,本文进行了公式推导。

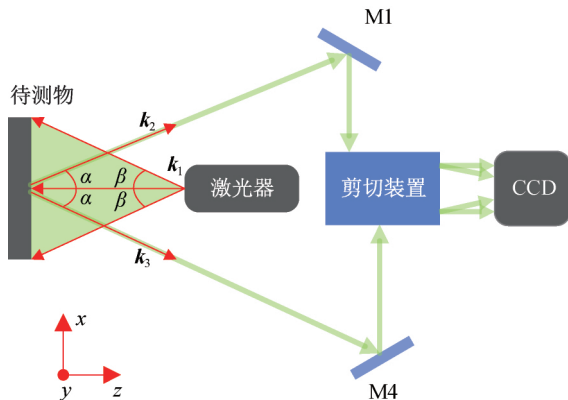


图9 非平行光束误差分析示意

记入射光束矢量为  $k_1$ , 沿  $x, y, z$  方向的单位变形矢量为  $u_0, v_0, w_0$ , 入射光束与待测物表面不同位置处的夹角记为  $\beta$ , 则在散斑干涉测量当中,  $k_1$  可以表示为:

$$k_1 = -\frac{2\pi}{\lambda}(\sin\beta \cdot u_0 - \cos\beta \cdot w_0) \quad (12)$$

的面内面外变形导数的变化趋势均与仿真分析的一致,这表明本文的分析方法具有一定的可信度,也验证了提出的光路测量面内面外变形导数的可行性。

当观测距离远远大于测量区域的尺寸时,则可将观测角度视为一个常数  $\alpha$ , 实验中的观测距离约为 1300 mm, 远远大于测量的视野尺寸 50 mm, 故观测矢量  $k_2, k_3$  可以表示为:

$$\begin{cases} k_2 = -\frac{2\pi}{\lambda}(\sin\alpha \cdot u_0 + \cos\alpha \cdot w_0), \\ k_3 = -\frac{2\pi}{\lambda}(-\sin\alpha \cdot u_0 + \cos\alpha \cdot w_0) \end{cases} \quad (13)$$

假设由于力的加载导致待测物在  $x, y, z$  方向发生的变形量分别为  $u, v, w$ , 则左右侧剪切散斑干涉场的相位差可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_1 = [(k_1 - k_3) \cdot u_0 - (k_1 - k_3) \cdot w_0] \cdot (u \cdot u_0 + v \cdot v_0 + w \cdot w_0) = \\ -\frac{2\pi\Delta x}{\lambda}[(\sin\beta + \sin\alpha)\frac{\partial u}{\partial x} - (\cos\beta + \cos\alpha)\frac{\partial w}{\partial x}], \\ \Delta\varphi_r = [(k_1 - k_2) \cdot u_0 - (k_1 - k_2) \cdot w_0] \cdot (u \cdot u_0 + v \cdot v_0 + w \cdot w_0) = -\frac{2\pi\Delta x}{\lambda} \\ [(\sin\beta - \sin\alpha)\frac{\partial u}{\partial x} - (\cos\beta + \cos\alpha)\frac{\partial w}{\partial x}] \end{cases} \quad (14)$$

对式(14)求解,获得面内面外变形导数的表达式:

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_r)}{4\pi\Delta x(\cos\alpha + \cos\beta)} + \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha + \cos\beta} \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\lambda(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_r)}{4\pi\Delta x \sin\alpha} \end{cases} \quad (15)$$

从式(15)可以看出,在非平行光束照射的情况下,实验测量光路可以正确获得面内变形导数,而对于面外变形导数,则受到 $\beta$ 和面内变形导数的影响,无法正确求解。根据面外变形导数的表达式可以看出,当 $\beta$ 变大,测量的视野范围也相应变大,面外变形导数的测量误差就越大,因此实验测量需要控制视野范围的大小。本文的平场萤石物镜扩束器距离待测物的距离为800 mm左右,水平视野范围约为50 mm,则入射光束与待测物表面所能产生的最大夹角 $\beta$ 约为 $1.80^\circ$ ,所以式(15)的第二项基本可以忽略不计。

### 3 结 论

本文提出了一种基于空间载波的单波长剪切散斑干涉面内面外变形导数同时测量方法。光路中利用剪切量与载波量可独立调整的改进型马赫-曾德剪切装置,引入双载波实现剪切散斑干涉图的频谱复用,并且采用两个光轴相互垂直的偏振片来避免左右剪切散斑干涉场相互干涉。与时分复用型测量方法相比,该方法能在一帧图像中记录两个方向的剪切散斑干涉场,有利于实时动态测量。有限元仿真与实验测量结果表明,本文方法能够实现面内面外变形导数的测量。

本方法测量的视野范围受到扩束器材的限制,采用非平行扩束镜扩束的方式会影响面外变形导数的测量精度,并且随着视野范围变大,面外变形导数精度就越低,因此增加测量视野范围是下一步需要研究的方向。

### 参考文献:

- [1] Anisimov A G, Groves R M. EXTREME shearography: High-speed shearography instrument for in-plane surface strain measurements during an impact event[C]//Proc SPIE 11056, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI. Munich, Germany: SPIE Optical Metrology, 2019, 1105: 110560J.
- [2] Lu M, Wang S J, Aulbach L, et al. Non-phase unwrapping interferometric approach for a real-time in-plane rotation measurement[J]. Optics Letters, 2017, 42(10): 1986-1989.
- [3] 钟诗民, 孙方圆, 陈维杰, 等. 马赫曾德双成像的镜面材料内部缺陷检测系统[J]. 光子学报, 2019, 48(8): 0812003.
- [4] Wang S 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.
- [5] Zhao Q H, Chen W J, Sun F Y, et al. Simultaneous 3D measurement of deformation and its first derivative with speckle pattern interferometry and shearography[J]. Applied Optics, 2019, 58(31): 8665-8672.
- [6] Francis D, James S W, Tatam R P. Surface strain measurement using multi-component shearography with coherent fibre-optic imaging bundles[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(11): 3583-3591.
- [7] Wang Y H, Gao X Y, Xie X, et al. Simultaneous dual directional strain measurement using spatial phase-shift digital shearography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 197-203.
- [8] Liu K, Wu S J, Gao X Y, et al. Simultaneous measurement of in-plane and out-of-plane deformations using dual-beam spatial-carrier digital speckle pattern interferometry[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 782: 316-325.
- [9] Dong J, Wang S J, Lu M, et al. Real-time dual-sensitive shearography for simultaneous in-plane and out-of-plane strain measurements[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3276-3283.
- [10] Kastle R, Hack E, Sennhauser U. Multiwavelength shearography for quantitative measurements of two-dimensional strain distributions[J]. Applied Optics, 1999, 38(1): 96-100.
- [11] Pascual-Francisco J B, Susarrey-Huerta O, Michtchenko A, et al. Measurement of creep strain in polymers by means of electronic speckle pattern shearing interferometry[C]//Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications VII. Orlando, Florida, USA: SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 2018, 1066: 106670H.
- [12] Xie X, Chen X, Li J R, et al. Measurement of in-plane strain with dual beam spatial phase-shift digital shearography[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(11): 115202.
- [13] Hooshmand-Ziafi H, Hassani K, Dashtdar M. In-plane deformation gradient measurement using common-path spatial phase shift shearography[C]//Optical Methods for Inspection, Characterization, and Imaging of Biomaterials IV. Munich, Germany: SPIE Optical Metrology, 2019: 1106008.
- [14] Petry C, Schuth M. Multi-wavelengths michelson interferometer based spatial phase shift shearography with color camera[J]. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 2019, 1(3): 1333-1344.

- [15] Gao X Y, Yang L X, Wang Y H, et al. Spatial phase-shift dual-beam speckle interferometry [J]. Applied Optics, 2018, 57(3): 414-419.
- [16] Yan P Z, Liu X W, Sun F Y, et al. Measurement of in-plane displacement in two orthogonal directions by digital speckle pattern interferometry [J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3882.
- [17] Gao X Y, Wang Y H, Dan X Z, et al. Double imaging Mach-Zehnder spatial carrier digital shearography[J]. Journal of Modern Optics, 2019, 66(2): 153-160.
- [18] 吴敏杨, 马银行, 程昊, 等. 基于彩色相机的双波长剪切散斑干涉法同步测量面内外位移导数[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 134-139.
- [19] 林翠翠, 刘文耀, 王晋疆. 电子错位散斑干涉系统中错位量的研究[J]. 光电工程, 2012, 39(3): 92-97.
- [20] 金炜, 王冬冬, 李小娟. 数字散斑干涉相位图正余弦自适应滤波方法研究[J]. 电子技术与软件工程, 2014(15): 107-108.
- [21] Yan L P, Zhang H Y, Zhang R, et al. A robust phase unwrapping algorithm based on reliability mask and weighted minimum least-squares method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 112: 39-45.

(责任编辑:康 锋)