

# 新型剪切散斑干涉系统研究

蔡长青 张永山\* 汪大洋 韩启浩 唐承志

广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006

**摘要** 剪切散斑干涉是一种广泛应用于工程结构中进行静态和动态离面位移导数测量的光测力学方法。鉴于基于马赫-曾德尔干涉的剪切散斑干涉系统的光能利用率较低,提出了一种新型剪切散斑干涉系统。该系统由五块平面反射镜、一块半反半透光棱镜、一块表面有涂层的棱镜、一个双孔掩膜、成像透镜和电荷耦合器件(CCD)相机组成,具有提高光能利用率的优点。并可以通过双孔掩膜产生空间载波,通过旋转其中一块反射镜可以产生剪切;通过平移另外一块反射镜可以对空间载波进行调节,相位由改进的 sinusoidal-fitting 方法进行提取,为了验证本文提出的系统的有效性,用该系统对周边固定中心加载圆盘模型进行实验,并将该系统应用于轮胎的无损检测,结果表明,该系统能够取得很好的效果。

**关键词** 测量;剪切散斑;马赫-曾德尔干涉;改进的 sinusoidal-fitting 方法;双孔掩膜

中图分类号 O348.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.111201

## Research on New Shearing Speckle Interferometry System

Cai Changqing Zhang Yongshan Wang Dayang Han Qihao Tang Chengzhi

School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract** Shearing speckle interferometry is a well known optical tool for qualitative as well as quantitative measurements of displacement components' derivatives of engineering structures subjected either static or dynamic load. Shearing speckle interferometry, based on Mach-Zehnder interferometer, suffers from the disadvantage of low light efficiency due to the structure. A novel digital shearography set-up with two fold which can improve light efficiency for the measurement of first order derivative of out-of-plane displacement (slope) is demonstrated. There is a double aperture mask in front of the imaging lens for spatial phase shifting. Independent control of the shear and the frequency of the spatial carrier can be attained with this set-up. A shear is introduced between the two scattered fields. The double aperture which can introduce spatial carrier fringes within the speckle for spatial phase shifting is employed in this system. Phase extraction is obtained through advanced sinusoidal-fitting method, which is applied to interference patterns with a spatial carrier in the primary fringes. The experimental implementation of the set-up and the results obtained with it are presented and discussed.

**Key words** measurement; digital shearography; Mach-Zehnder interferometer; advanced sinusoidal-fitting method; double aperture mask

**OCIS codes** 120.6200; 120.6160

## 1 引言

自1971年电子散斑干涉问世以来,其作为一种具有全场、高精度、实时性和良好抗振性的非接触测量手段已广泛应用于位移<sup>[1]</sup>和形貌<sup>[2]</sup>测量、表面粗糙度评价<sup>[3]</sup>等领域。随着剪切装置在电子散斑干涉装置中的应用,具有测量离面位移导数的剪切散斑干涉应运而生。由于具有同光路的特点,使得其抗振性能大大提高,在无损检测、变形测量和振动分析<sup>[4-6]</sup>等领域得到了广泛的应用。在过去的几十年里,国内外研究人员先

收稿日期: 2014-04-10; 收到修改稿日期: 2014-05-16; 网络出版日期: 2014-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(51378135)

作者简介: 蔡长青(1985—),男,讲师,博士,主要从事无损检测、数字图像处理等方面的研究。

E-mail: 409414771@qq.com

\*通信联系人。 E-mail: 993486551@qq.com

后对不同的剪切散斑干涉的应用<sup>[7-10]</sup>进行了研究和报道。如迈克耳孙干涉<sup>[11-12]</sup>, 玻璃楔块干涉<sup>[13-14]</sup>, 菲涅耳双棱镜干涉<sup>[15]</sup>, 沃拉斯顿棱镜干涉<sup>[16-17]</sup>, 平行玻璃板干涉<sup>[18]</sup>和马赫-曾德尔干涉<sup>[19-20]</sup>等。其中, 迈克耳孙干涉由于具有结构紧凑、容易调节等优点而被广泛应用。但当采用脉冲激光进行振动测量时, 用于空间相移法的空间载波引入变得非常复杂, 光路调节难度很大。基于马赫-曾德尔干涉的剪切散斑干涉装置, 可以对两支光路进行独立调节。空间载波可以通过平移其中一支光路<sup>[21]</sup>进行调节, 而通过旋转另外一支光路可以产生剪切。然而, 基于马赫-曾德尔干涉的剪切散斑干涉装置的光能利用率由于其光路的自身特点受到很大的限制。

对一些特定的应用场合, 比如对于反光不敏感材料进行测量, 光能利用率对测试影响较大。为了提高光能利用率, 本文尝试提出了新的光路系统。由于马赫-曾德尔干涉两支光路的光在第二块分光棱镜发生干涉时, 只有一半的光能得到利用。因此当两束光发生干涉时, 如果将这两支光全部利用, 从理论上讲可以将光能利用率提高一倍。在新的系统中, 第二块棱镜由几块平面反射镜和一块表面有涂层的棱镜替换。为了使两束干涉光波在成像平面内干涉, 引入了双孔掩膜。同时, 为了进行相位提取, 提出了改进的 *sinusoidal-fitting* 方法。

## 2 提高光能利用率的剪切散斑干涉

基于马赫-曾德尔干涉的剪切散斑干涉装置如图 1 所示, 近乎一半的光能在第二块分光棱镜处都被损失掉。提出的能提高光能利用率的剪切散斑干涉装置如图 2 所示。该装置由五块平面反射镜、一块半反半透分光棱镜、一块表面涂有反射层的三角棱镜、一个双孔掩膜、成像透镜和电荷耦合器件 (CCD) 相机组成。其中 M3 和 M5 可以独立调节。通过旋转 M5 可以产生空间载波; 而通过平移 M3 可以产生剪切。扩束后的激光以近乎垂直于被测物表面的方向照射被测物。由表面反射的激光进入分光棱镜并分成两束, 分别透射和反射出分光棱镜。透射的激光分别通过 M1, M2 和 M3 反射到达表面有涂层的棱镜 P; 反射的激光通过 M4 和 M5 的反射到达表面有涂层的棱镜 P。到达棱镜 P 的两支激光通过反射进入双孔掩膜 A, 并通过成像镜头 L 在 CCD 上成像。为了得到效果良好的干涉图, 要保证两束光的光路尽量相等。

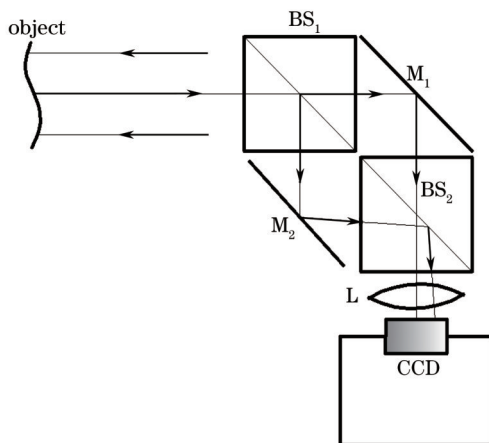


图1 马赫-曾德尔干涉的剪切散斑干涉装置

Fig.1 Shearing speckle interferometry device based on Mach-Zehnder interferometer

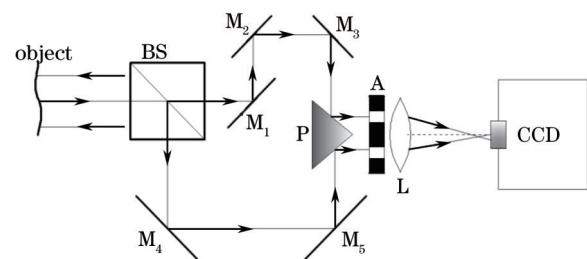


图2 提出的能提高光能利用率的剪切散斑干涉装置

Fig.2 Proposed shearing speckle interferometry device which can improve light efficiency

要强调的一点是, 这里引入双孔掩膜是为了得到空间载波相移<sup>[6]</sup>所需要的空间载波。该双孔掩膜含有两个 3 mm 宽的长条形缝, 缝的间距为 3.25 mm。该间距对空间载波相移量的大小起了决定性的作用。为了后续的相位提取等工作, 空间载波相移量取为相邻像素间为 90。

由物体加载引起的相位变化  $\Delta\phi$ <sup>[22]</sup>可表示为

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \Delta x, \quad (1)$$

其中  $\Delta\phi$  与离面位移  $w$  对  $x$  方向的一阶导数有关,  $\lambda$  为激光波长。

### 3 改进的 sinusoidal-fitting 相移提取法

用 CCD 相机采集加载前的散斑干涉图时,为了引入空间载波相移,要使两束相干光之间产生一定的夹角。CCD 相机上第  $k$  列上的光强信息可以表示为

$$I_n(x_{k+n}, y) = I_b(x_{k+n}, y) + \gamma(x_{k+n}, y) \cos[\varphi(x_{k+n}, y) + 2\pi f_0(k+n)], \quad (2)$$

其中,  $n$  为计算相位所取的列数,  $n = -1, 0, 1; 1 < k < M; M$  为 CCD 的总列数;  $I_n$  为相移图沿着  $x$  方向第  $k$  列的灰度,  $I_b(x_{k+n}, y)$  为背景光强,  $\gamma(x_{k+n}, y)$  为调制度,  $\varphi(x, y)$  为所求相位,  $f_0$  为  $x$  方向的载波频率。

当对物体施加荷载, 如果测量点的位移小于散斑尺寸<sup>[23]</sup>, 载波条纹可写成

$$I_n(x_{k+n}, y) = I_b(x_{k+n}, y) + \gamma(x_{k+n}, y) \cos[\phi(x_{k+n}, y) + \beta + 2\pi f_0(k+n)], \quad (3)$$

其中  $\beta$  为加载引起的与被测物表面离面位移导数相关的相位变化量。

当散斑尺寸大于 3 pixel, 并且相邻像素之间的相位变化缓慢时, 可以在相邻像素间引入相移, 例如  $\pi/2$ 。可以将(2)式和(3)式用改进的 sinusoidal-fitting 相移提取法求取相位, 即

$$\beta = \arctan \left\{ \frac{[(I'_1 - I'_{-1})(I_1 + I_{-1} - 2I_0) - (I_1 - I_{-1})(I'_1 + I'_{-1} - 2I'_0)] \tan(2\pi f_0/2)}{(I'_1 + I'_{-1} - 2I'_0)(I_1 + I_{-1} - 2I_0) + (I_1 - I_{-1})(I_1 - I_{-1}) \tan^2(2\pi f_0/2)} \right\}. \quad (4)$$

### 4 实验验证

为了验证上述原理的可行性, 搭建了可提高光能利用率的剪切散斑干涉装置, 用来测量周边固定中心加载圆盘的离面位移导数。圆盘的直径为 150 mm。成像装置由 8 mm 焦距的镜头和 0.5 inch(相当于 12.7 mm) CCD 芯片组成。剪切散斑干涉装置由一块边长为 10 mm 的分光棱镜、五块边长为 15 mm 的平面反射镜和一块边长为 10 mm 的表面有涂层的棱镜组成。激光器为波长为 532 nm 的半导体激光器。工作距离为 30 cm。分别用实时相减法和空间载波相移法对散斑图进行后处理。

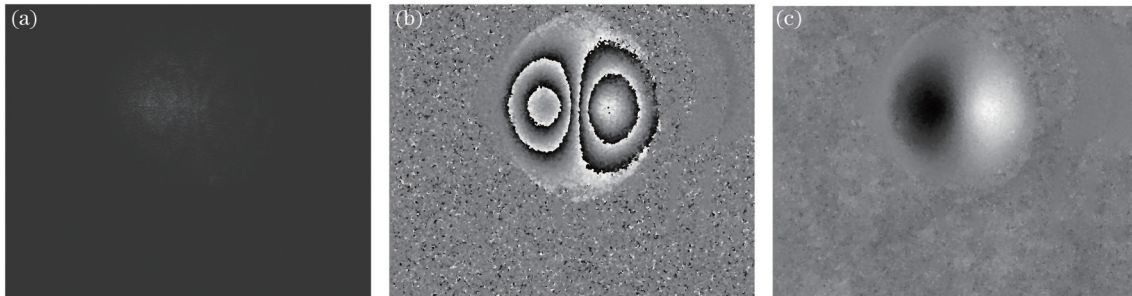


图3 实验结果。(a)实时相减干涉图样; (b)包裹相位图; (c)解包裹相位图

Fig.3 Experimental results. (a) Real-time subtraction fringe pattern; (b) wrapped phase map; (c) unwrapped phase map

实验结果如图 3 所示。其中图 3(a)为对分别在物体加载前后得到的散斑图进行实时相减得到的干涉图样。加载前采集的散斑图作为参考图, 对物体加载, 采集加载后的散斑图, 并与加载前的散斑图进行实时相减。图 3(b)为由改进的 sinusoidal-fitting 方法得到的离面位移导数的相位图, 在对其用最小二乘法<sup>[24]</sup>进行解包裹后, 得到如图 3(c)所示的解包裹相位图。

将该装置应用于轮胎无损检测的实验结果如图 4 所示。首先将轮胎放入真空箱, 并采用真空加载。如

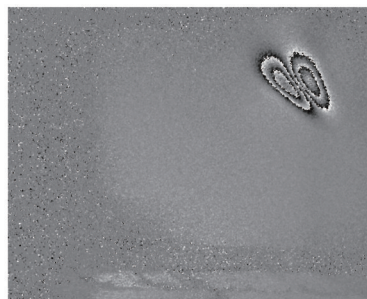


图4 轮胎无损检测应用

Fig.4 Non destructive test application for tire

果轮胎含有脱层、气泡等缺陷,当施加真空荷载时,缺陷处的离面位移会明显大于周围部分的离面位移,由剪切散斑干涉方法求得的离面位移导数会出现类似蝴蝶斑的形状,由此可以进行缺陷的无损检测。由图4可知,提出的剪切散斑干涉系统能够得到清晰的轮胎缺陷图,取得了很好的效果。经与马赫-曾德尔干涉<sup>[20]</sup>得到的相位图的光能利用率进行对比可知,该装置能够将光能利用率提高70%以上。

## 5 结 论

为了解决基于马赫-曾德尔干涉的剪切散斑干涉装置的光能利用率的问题,提出了提高光能利用率的剪切散斑干涉系统。该系统由五块平面反射镜、一块半反半透光棱镜、一块表面涂有反射层的三角棱镜、一个双孔掩膜、成像透镜和CCD相机组成,具有可提高光能利用率、测量物体离面位移导数和产生空间载波等优点。由于空间载波的应用,使得避免采集多幅散斑干涉图进行相位计算成为可能。周边固支中心加载圆盘实验和轮胎无损检测测试结果表明,该系统具有很好的性能。

## 参 考 文 献

- 1 Han Yanjiao. The Research of Measure In-plane Small Displacement by Using Digital Speckle Photography [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. 23-25.  
韩艳娇. 利用数字散斑照相术测量面内微小位移的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. 23-25.
- 2 Dai Xiangjun, Dai Meiling, Yang Fujun, *et al.*. Shape measurement method based on in-plane displacement measurement and rigid body rotation [J]. Journal of Southeast University ( Natural Science Edition ), 2013, 43(6): 1203 - 1207.  
代祥俊, 戴美玲, 杨福俊, 等. 基于面内位移测量和刚体旋转的形貌测量方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(6): 1203-1207.
- 3 Dhanasekar B, Ramamoorthy B. Digital speckle interferometry for assessment of surface roughness [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(3): 272-280.
- 4 Francis D, Tatam R P, Groves R M. Shearography technology and application: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(10): 102001 .
- 5 Andersson A, Mohan N K, Sjudahl M, *et al.*. TV shearography: quantitative measurement of shearmagnitude fields by use of digital speckle photography [J]. Appl Opt, 2000, 39(16): 2565-2568.
- 6 Bhaduri B, Mohan N K, Kothiyal M P, *et al.*. Use of spatial phase shifting technique in digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital shearography (DS) [J]. Opt Express, 2006, 14(24): 11598-11607.
- 7 Yang L, Chen F, Steinchen W, *et al.*. Digital shearography for nondestructive testing: potentials, limitations and applications [J]. J Holography and Speckle, 2004, 1(2): 69-79.
- 8 Yang L. Recent developments in digital shearography for nondestructive testing [J]. Material Evaluation, 2006, 64(7): 704-709.
- 9 Sun C, Chen J, Lu H. Improved phase-shifted digital speckle shearography for time-dependent deformation measurement [J]. Opt Engng, 2008, 47(6): 065601.
- 10 Huang Y H, Ng S P, Liu L, *et al.*. NDT&E using shearography with impulsive thermal stressing and clustering phase extraction [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(7-8): 774-781.
- 11 Tay C J, Fu Y. Determination of curvature and twist by digital shearography and wavelet transforms [J]. Opt Lett, 2005, 30(21): 2873-2875.
- 12 Kumar U P, Kothiyal M P, Mohan N K. Microscopic TV shearography for characterization of microsystems [J]. Opt Lett, 2009, 34(7): 1612-1614.
- 13 Hung Y Y, Liang C Y. Image-shearing camera for direct measurement of surface strains [J]. Appl Opt, 1979, 18(7): 1046-1051.
- 14 Bhaduri B, Kothiyal M P, Mohan N K. Curvature measurement using three-aperture digital shearography and fast Fourier transform [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(10): 1001-1004.
- 15 Ochoa M A, Silva-Moreno A A. Fringes demodulation in time-averaged digital shearography using genetic algorithms [J]. Opt Commun, 2006, 260(2): 434-437.
- 16 Kim S. Polarization phase-shifting technique in shearographic system with a wollaston prism [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2004, 8(3): 122-126.

- 17 Hung Y Y, Huang Y H, Liu L, *et al.*. Computerized tomography technique for reconstruction of obstructed phase data in shearography [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(17): 3158–3167.
- 18 Mihaylova E, Whelan M, Toal V. Simple phase-shifting lateral shearing interferometer [ J ]. *Opt Lett*, 2004, 29(11): 1264–1266.
- 19 Santos F, Vaz M, Monteiro J. A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(1): 131–140.
- 20 Pedrini G, Zou Y L, Tiziani H J. Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(2): 313–321.
- 21 Fernandez A, Doval A F, Davila A, *et al.*. Double-pulsed carrier speckle-shearing pattern interferometry for transient deformation analysis [C]. *SPIE*, 1998, 3478: 352–358.
- 22 Rastogi P K. *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques* [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2001.
- 23 Goodman J W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* [M]. Greenwood Village: Roberts & Company Publishers, 2007.
- 24 Li Y G, Zhu J Q, Shen W X. Phase unwrapping algorithms, respectively, based on path-following and discrete cosine transform [J]. *Optik*, 2008, 119(11): 545–547.