

文章编号 1004-924X(2014)01-0013-05

大视场双缝载频散斑干涉成像检测系统

朱 猛*, 李翔宇, 龙宁波, 黄战华

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:针对大面积的动态检测对大视场角散斑干涉技术的需求,研究了一种基于 $4f$ 成像的大视场载频散斑干涉系统。该成像系统由前置广角镜头和 $4f$ 成像系统组成;利用双缝干涉产生稳定的载频,在其中一个狭缝上加入不同楔角的光楔来控制剪切量的大小。分析了 $4f$ 系统的焦距与双缝的间距和载频值之间的关系;采用散斑场自相关标定了 $4f$ 系统中散斑统计的平均尺寸。分析证明:采用孔距为2 mm的双缝配合80 mm焦距的 $4f$ 系统可以实现 $2\pi/3$ 的稳定载频。分别采用12 mm和6 mm的标准成像镜头测量了动态形变的橡胶板,实现了 40° 和 65° 视场角的散斑干涉检测系统。实验结果证明该系统能实现大视场测量,载频与剪切量调节相互分离,提高了散斑检测系统的效率。

关键词:散斑干涉;剪切干涉;成像系统;空间载频;视场角

中图分类号:O436.1 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20142201.0013

Double-slit based carrier frequency speckle interferometric system with large viewing field

ZHU Meng*, LI Xiang-yu, LONG Ning-bo, HUANG Zhan-hua

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology of the Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China,)

* Corresponding author, E-mail: zhumeng@tju.edu.cn

Abstract: For the requirements of a large area dynamic detection for the speckle interferometry with a large viewing field, a carrier frequency speckle interferometric system based on $4f$ imaging is proposed. The imaging system includes a wide-angle lens and the $4f$ imaging lenses. The carrier frequency is introduced by a double-slit aperture and a prism is attached to generate an adjustable shearing image. The relation among the distance of slits, imaging length and the carrier frequency is analyzed. The statistical averaging speckle size in the $4f$ imaging system is also calibrated by the self correlation of speckle field. The analysis results show that the $4f$ imaging system combined with a double-slit in a separation of 1 mm and a 0.5° prism can produce $2\pi/3$ carrier frequency in the 80 mm focus length. The 16 mm and 6 mm wide-angle lenses combined with the $4f$ imaging system are used to measure a rubber sheet and to demonstrate the proposed method. The experimental results show that this system can enlarge the viewing field and complete a speckle interferometric system with view angles of 40° and 65° . It concludes that the proposed system can adjust the carrier frequency and shear distance

收稿日期:2013-05-09;修订日期:2013-06-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61275009);国家科技支撑计划资助项目(No. 2007BA000013);高等学校博士学科点专项基金资助项目(No. 20110032120059)

separately and can extend the dynamic detection area in a high efficiency.

Key words: speckle interferometry; shearing interferometry; imaging system; spatial carrier frequency; angle of view

1 引言

载频散斑干涉技术利用干涉条纹产生的像素之间的相移重建散斑场相位,其计算基于相邻像素之间的固定相移值。一般假设一个散斑统计尺寸内的散斑初始相位是相等的或线性的,如果相位是相等的,那么引入的载频值即为相移值,可以采用已知相移值的定步长算法;如果相位是线性的,那么引入载频值后,相邻像素的相移值依然固定,但不确定具体的值,可以采用等步长 Carre 算法^[1-4]。载频散斑干涉技术的光路结构有分振幅式的迈克尔逊光路,马赫-曾德尔光路以及分波前式的双孔或双缝光路。前两种干涉光路利用倾斜或者平移光场实现载频条纹,载频和剪切量不能独立调节,不利于多场合检测使用。而双孔结构的载频干涉光路采用杨氏干涉原理实现载频,只要固定双孔孔距和像距载频值就随之固定,剪切量可由其中一缝上的光楔调节;但该光路的视场角一般较小,而且要使载频值保持不变,工作距离也需要固定。

随着散斑干涉技术的不断成熟,大面积动态检测的需求越来越多,设计一种大视场角的载频散斑干涉检测结构成为急需解决的问题。基于 $4f$ 成像的大视场时间相移和载频相移的系统已有报道^[5-6]。本文提出了一种基于双缝结构的 $4f$ 成像系统,该系统既可以实现载频和剪切量的可调,又能满足大视场检测的需要。它通过更换广角镜头可以实现不同视场的切换,通过调整广角镜头的工作距离可以满足不同检测距离的需要。

2 测量原理

2.1 光学系统构成

大视场双缝载频干涉系统的光路如图 1 所示。成像系统由大视场成像镜头和 $4f$ 成像系统构成,在 $4f$ 成像系统的第二片镜片后加入双缝光阑,在其中某一缝上加入光楔或者平行平板。大视场成像镜头成像后经过 $4f$ 系统 1:1 的延迟成像于 CCD 接收平面,CCD 平面上接收的是经

过两个单缝成像的干涉光场。光楔或者平行平板用于产生剪切像。

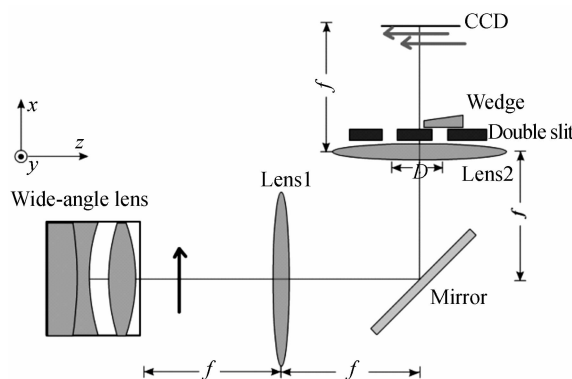


图 1 大视场双孔载频干涉光路

Fig. 1 Optical arrangement of double-slit carrier frequency optical system with large viewing filed

接收平面采集图像中第 $n+k$ 列的某点光强为:

$$I_k(x_{n+k}, y) = I_0(x_{n+k}, y) + \gamma(x_{n+k}, y) \times \cos[\varphi_s(x_{n+k}, y) + (n+k)\beta], \quad (1)$$

式中: I_0 为平均光强, γ 为调制光强, β 为相邻像素之间的相位差, φ_s 为反应物面信息的散斑相位。选择 $k \in \{-1, 0, 1, 2\}$ 。假设 I_0, γ, φ_s 在这 4 个像素上近似相等或者变化梯度较小。当 $\beta = \pi/2$ 时,将这相邻 4 点作为 4 个方程组的值带入相移公式可得:

$$\varphi_s + n\beta = \arctan\left(\frac{I_{n+2} - I_n}{I_{n-1} - I_{n+1}}\right). \quad (2)$$

当被检测物面的状态发生变化后,散斑相位可表示为:

$$\varphi'_s + n\beta = \arctan\left(\frac{I'_{n+2} - I'_n}{I'_{n-1} - I'_{n+1}}\right). \quad (3)$$

利用式(2)和式(3)得到形变相位差为:

$$\Delta\varphi = \varphi'_s - \varphi_s. \quad (4)$$

利用式(4)计算相位差时需要将式(2)和式(3)中的正余弦部分分别带入求解,这样处理可以防止相位差超出包裹相位范围,也有利于正弦和余弦的滤波。

双缝之间的距离决定了载频值。焦距为 f 的成像系统中载频与缝间距之间的关系为^[7-8]:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{f} d_x, \quad (5)$$

式中: d 为双缝距离, λ 为照明光波长, d_x 为 CCD 像素宽度。一般当 $4f$ 系统的参数确定时,双缝间距也随之固定。

2.2 剪切量的影响

采用 $4f$ 系统的大视场成像光路会带来一些不利于测量的影响,如成像面上采集到的光强不均匀,像面上的像为倒像,测量精度的降低等。光强不均匀性可以通过调整激光器的排列方式来弥补,成倒像可以采用图像处理方法进行图像转置,而测量精度的降低是无法避免的。此外,在 $4f$ 成像系统中剪切量的选择是决定系统检测能力的重要因素,其直接影响散斑干涉系统的灵敏度、分辨力和条纹对比度。设前置镜头的放大倍率为 M ,光楔楔角为 α ,则物方剪切量为:

$$\Delta = Mf(n-1)\alpha, \quad (6)$$

式中: n 为光楔材料的折射率, f 为 $4f$ 系统的单透镜焦距。若需要分辨的缺陷最小尺寸为 s ,物方剪切量应满足 $\Delta < s$ 。一般为了得到相关性较好的错位散斑场,剪切量 Δ 要比 s 小得多。

剪切量和离面位移灵敏度之间的关系为^[9]:

$$S_{\frac{\partial w}{\partial x}} = \frac{4\pi}{\lambda}(1 + \cos \theta)\Delta, \quad (7)$$

式中: θ 为照明光角度。剪切量越大,检测灵敏度越高。此外,剪切量还会影响检测精度和条纹对比度。剪切量越大,精度越低,条纹对比度越低。

综上,选择较小剪切量能提高检测系统的整体性能,但检测灵敏度会有所下降。一般的缺陷检测系统可以通过提高加载量来弥补灵敏度低的缺陷。

3 实验与分析

3.1 散斑统计尺寸标定

双缝的另一个参数是缝的宽度 D ,缝宽决定散斑的横向尺寸。在载频干涉系统中,采用 N 步相移公式就需要散斑覆盖 N 个像素。单透镜成像系统中,散斑尺寸 σ 与缝宽 D 之间的关系为 $\sigma = 1.22D/f$; 但本成像系统较复杂,尤其是前置大视场镜头的焦距和相对孔径需要随测量的需要变换,所以本文采用标定方式得到散斑的统计尺寸。散斑统计平均尺寸即为散斑强度图的自相关距离^[10-12]:

$$u(l, m) = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} I(i, j) I(i+l, j+m)}{(N_x - l)(N_y - m) \langle I(i, j) \rangle}, \quad (8)$$

式中: $l=0, 1, 2 \cdots N_x, m=0, 1, 2 \cdots N_y, N_x$ 和 N_y 分别为 CCD 的横向和纵向单元数。通过标定散斑尺寸可以针对不同光学成像系统的参数来选择缝宽。

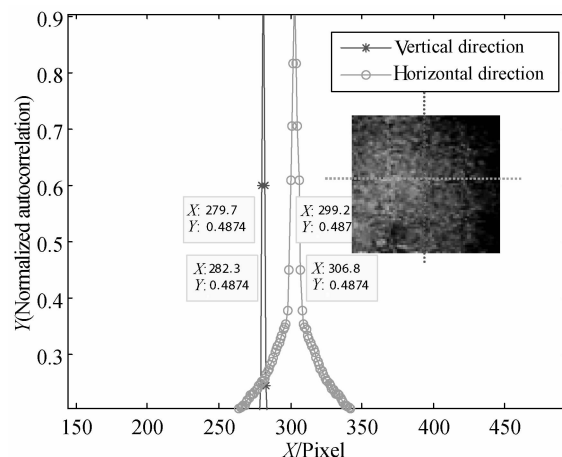


图 2 散斑强度归一化自相关曲线

Fig. 2 Normalized autocorrelation curves of speckle intensity

从相关函数曲线的高斯形分布可以推算出散斑的统计平均尺寸,以归一化相关系数的半宽度作为散斑统计尺寸的代表距离。使用焦距 80 mm 的 $4f$ 系统,缝宽 1 mm 的双缝干涉成像光路,采集得到散斑的横纵向相关函数一维曲线,如图 2 所示。由图可以看出,散斑的横向尺寸大于其纵向尺寸,这也符合单缝衍射规律,图中散斑的横纵向统计尺寸分别为 7.6, 2.6 pixel。一般的载频计算方法最多使用 5 个像素,图中横向尺寸符合一般载频干涉相位的计算要求。

3.2 载频值标定与测量实验

检测光路如图 1 所示,照明光波长为 532 nm,单透镜焦距 $f=80$ mm。双缝间距为 2 mm,缝宽为 1 mm。光楔楔角为 0.5° ,将光楔与双缝紧贴并安装于单透镜后表面。所使用的 CCD 像素尺寸为 $6.45 \mu\text{m}$,分辨率为 1384×1038 。

根据式(5)可计算出相邻像素之间产生相位差的理论值为 0.6π 。采用傅里叶频带分析方法对载频值进行验证^[13-14]。图 3 为载频散斑场的傅里叶频谱及一维谱曲线,其旁瓣频带中心像素位置分别为 250 和 1136。频带为:

$$\beta = 2\pi \frac{|N_s - N/2|}{N}, \quad (9)$$

式中: N_s 为频带中心对应的像素位置, N 为频谱

图宽度。经计算可得,图 3 中两旁瓣频带中心分别为 0.642π 和 0.638π ,取平均值为 0.64π ,与理论值偏差为 6.2% 。

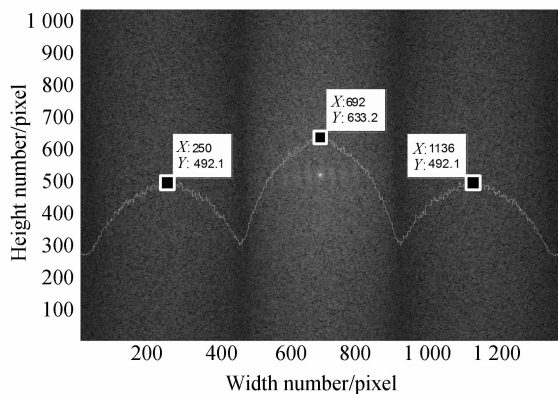


图 3 载频强度图的傅里叶频谱

Fig. 3 Normalized autocorrelation curves of speckle intensity

实验被测对象为直径 60 mm,厚 2 mm 的橡胶板。图像采集速率为 15 frame/s。前置镜组选择焦距分别为 12 mm 和 6 mm,视场角为 40° 和 65° 的成像镜头,测量物距为 320 mm。对橡胶板中心施加载荷,采用等步长 Carre 算法进行相位计算。前置镜头为 12 mm 时测得的变形包裹图如图 4 所示,6 mm 镜头的测量结果如图 5 所示。

本系统进行视场切换时可以不改变基本光路参数,只更换前置镜组,如果采用变焦镜头更好。本系统只采用单路激光器扩束照明,从相位测量结果可以看出,图像边缘无照明部分的测量结果表现为随机的散斑相位。这是载频干涉与时间相移干涉之间的区别,主要是由采集到的系统电子噪声产生的。要克服大视场测量条件下边缘噪声的问题,可以采用多激光器拼接照明方式,但多光束拼接照明会造成条纹对比度下降^[15]。为了兼顾

测量精度与测量效率,选用 12 mm 焦距, 40° 成像视场的前置镜组可以满足大多数的测量要求。

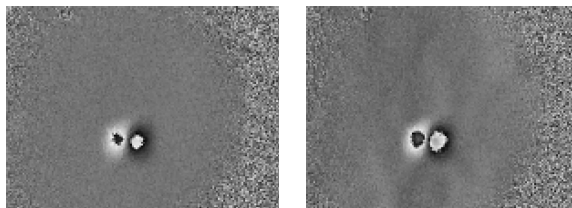


图 4 12 mm 镜头测量相位图(相邻两帧)

Fig. 4 Phase maps measured by 12 mm lens (two adjacent frames)

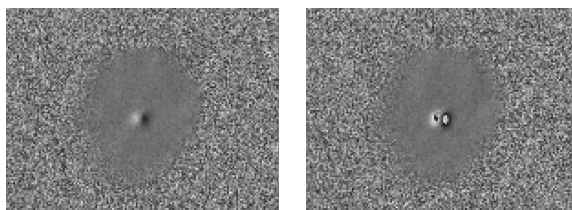


图 5 6 mm 镜头测量相位图(相邻两帧)

Fig. 5 Phase maps measured by 6 mm lens (two adjacent frames)

4 结 论

为了提高载频散斑干涉系统的检测效率,本文采用大视场成像镜头和 $4f$ 系统组合成像的方式,利用双缝干涉产生稳定载频。分析了散斑统计尺寸和载频值标定方法,讨论了剪切量选取的参考因素。采用间距为 2 mm,缝宽为 1 mm 的双缝光阑配合 80 mm 的单透镜实现了近似 $2\pi/3$ 的载频值。实验分别采用 12 mm 和 6 mm 的成像镜头,对动态形变的橡胶板进行了测量,构成了 40° 和 65° 视场角的散斑干涉检测系统。实验结果表明,本方案适合于大面积缺陷检测,并且满足载频值和剪切量灵活可调的要求。

参考文献:

- [1] JACQUOT P. Speckle interferometry: a review of the principal methods in use for experimental mechanics applications [J]. *Strain*, 2008, 44:57-69.
- [2] BHADURI B, MOHAN N K, KOTHIYAL M P. Digital speckle pattern interferometry using spatial phase shifting: influence of intensity and phase gra-

dients [J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, 55 (6): 861-876.

- [3] 周文静,于瀛洁. 基于光纤的三维电子散斑干涉测量系统设计[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16 (10): 1815-1821.

ZHOU W J, YU Y J. Design of 3D ESPI system by optical fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (10): 1815-1821. (in Chinese)

- [4] 蔡怀宇,李宏跃,朱猛,等. 用空间载频法测量玻璃平板的厚度均匀性[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2):260-265.
CAI H Y, LI H Y, ZHU M, *et al.*. Measurement of thickness uniformity for glass plate by spatial carrier [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):260-265. (in Chinese)
- [5] CAI CH Q, HE L F. Improved Mach-Zehnder interferometer-based shearography [J]. *Opt. Laser Eng.*, 2012, 50: 1699-1705.
- [6] 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]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(21): 1699-1705.
- [7] SIROHI R S, BURKE J, HELMERS H, *et al.*. Spatial phase shifting for pure in-plane displacement and displacement-derivative measurements in electronic speckle pattern interferometry (ESPI) [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36:5787-5791.
- [8] 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: 11598-11607.
- [9] LEE J R, YOON D J, KIM J S, *et al.*. Investigation of shear distance in Michelson interferometer-based shearography for mechanical characterization [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2008, 19:115303.
- [10] 朱猛,黄战华,王小军,等. 显微动态散斑相关法测量压电陶瓷位移特征曲线[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):844-849.
ZHU M, HUANG ZH H, WANG X J, *et al.*. Piezoelectric displacement characteristic curve measurement using dynamic speckle correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):844-849. (in Chinese)
- [11] 孙涛,梁晋,蔡勇,等. 用数字散斑法测量铜/铝复层板拉伸变形[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2600-2606.
SUN T, LIANG J, CAI Y, *et al.*. Measurement of deformations for copper/aluminum clad under tension with digital correlation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12):2600-2606. (in Chinese)
- [12] THOMAS F B. Three dimensional deformation field measurement with digital speckle correlation [J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(34):6783-6796.
- [13] SU X Y, CHEN W J. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Opt. Laser Eng.*, 2001, 35: 263-284.
- [14] BOTHE T, BURKE J, HELMERS H. Spatial phase shifting in electronic speckle pattern interferometry: minimization of phase reconstruction errors [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36:5310-5316.
- [15] ZHU M, HUANG ZH H, CAI H Y. Uniform illumination for large area digital speckle pattern interferometry using multibeam [J]. *SPIE.*, 2010, 7656:7656514.

作者简介:



朱 猛(1984—),男,河北秦皇岛人,博士,2006年于燕山大学获得学士学位,2008年,2011年于天津大学分别获得硕士和博士学位,2011年至今为天津大学博士后流动站在站博士后,主要从事全息与散斑检测、光学信息处理等方面的研究。E-mail: zhumeng@tju.edu.cn