

减模式下数字散斑干涉光强不均匀性对检测的影响和校正方法

何东升 杨德兴 古 彬 方志强

(西北工业大学理学院陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 在数字散斑干涉测量中, 照明光的不均匀或被测试物反射光的不均匀, 会导致条纹图像不均匀, 严重时甚至会引起条纹的丢失。在分析剪切型散斑干涉原理的基础上, 基于散斑相位差的主值在 $(-\pi, \pi]$ 均匀分布的假设, 提出了减模式下光强不均匀的校正方法, 即通过构建一个新的强度分布函数, 分区域消除背景光强, 从而消去光强调制项, 使干涉条纹图的显示强度变得均匀。将该方法应用于受到强烈冲撞的航空复合材料的剪切散斑干涉测量中, 将原来隐藏在光强较弱区域的条纹清晰地显示了出来。表明本文的方法能有效地降低光强不均匀性对散斑干涉条纹图的影响。

关键词 数字散斑干涉术; 图像处理; 图像校正; 减模式

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092902.0362

Impact of Inhomogeneous Light Intensity on Test and Its Correction Method for Digital Speckle Interferometry with Substraction

He Dongsheng Yang Dexing Gu Bin Fang Zhiqiang

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract In digital speckle interferometry, inhomogeneous illumination on or reflection from a tested object will lead to inhomogeneous fringe pattern, and even make the fringe missing. On the basis of analyzing the principle of shearing speckle interferometry and assuming that principal value of speckle phase difference obeys the uniform distribution between $-\pi$ and π , a method for correcting the subtracted fringe pattern modulated by uneven light intensity is proposed. This method is to construct a new function, which can eliminate background light intensity in small areas and remove the term modulated by light intensity. Thus, the fringe pattern becomes homogeneous. It is applied to shearing speckle interferometry to test a piece of aviation composite materials suffering strong impact, and the fringes which hide in dark areas are displayed. It shows the validity of this method to reduce the influence of uneven light intensity on speckle fringe pattern.

Key words digital speckle interferometry; image processing; image correction; subtraction

1 引 言

数字散斑干涉技术由于具有灵敏度高、全场非接触、适合现场测量并能够通过计算机对其进行后期处理的优点, 目前在光学无损检测技术中占有非常重要的地位^[1~6]。它的基本原理是使用 CCD 等

光电成像器件记录物体变形前后两幅散斑干涉图, 然后通过数字图像相减得到减模式下的散斑条纹图, 根据条纹图特征判断缺陷出现的位置。然而, 减模式下的条纹图除了含有比较强的散斑噪音之外, 还会因照射激光光束质量, 以及被检测物体表面的

收稿日期: 2008-06-23; 收到修改稿日期: 2008-07-17

基金项目: 国家大学生创新性实验计划项目资助课题。

作者简介: 何东升(1986—), 男, 主要从事散斑检测技术方面的研究。E-mail: hds123523000@163.com

导师简介: 杨德兴(1966—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事非线性光学、光电技术和应用等方面的研究。

反射率差异而使其受到不均匀光强调制。这常常使相减后形成的条纹图在某些位置不明显,甚至丢失条纹,因此在检测中有可能丢失某些缺陷信息,一定程度上影响了散斑干涉检测的可靠性。

本文分析了光强不均匀对减模式下散斑干涉图的影响,并基于散斑相位差主值在 $-\pi \sim \pi$ 内均匀分布的特点,提出一种减模式下条纹图的光强校正方法。

2 光场分布的不均匀性对条纹图的影响

一般来说,常用的散斑干涉测量方法有双光束型、参考光束型和剪切型。以迈克耳孙剪切干涉型为例,分析光强分布不均匀对条纹图的影响。

图 1 是迈克耳孙干涉法的典型光路。由相干光源 S 发出的激光照射到物体 O 表面。反射光通过分光棱镜 BS 分为两束,分别通过反射镜 M_1 和 M_2 反射后,经成像镜头将物体表面成像在 CCD 靶面上相干叠加,适当调节两面反射镜的夹角,使 CCD 靶面上的两个像在 x 方向上发生一定的错位。设到达 CCD 的两个像沿 x 方向的错位量为 δx 。在物体变形前,物体表面任意一点 $P_1(x, y, z)$ 经入射光照后,漫反射到 CCD 靶面上的光波复振幅为

$$F_1(x, y, z) = A_1(x, y, z) \exp[i\varphi(x, y, z)], \quad (1)$$

与 $P_1(x, y, z)$ 相对应的错位点 $P_2(x + \delta x, y, z)$ 漫反射到 CCD 靶面上的光波复振幅为

$$F_2(x, y, z) = A_2(x + \delta x, y, z) \exp[i\varphi(x + \delta x, y, z)], \quad (2)$$

在像平面上两个像干涉迭加后的复振幅为

$$F = F_1(x, y, z) + F_2(x + \delta x, y, z), \quad (3)$$

其光强为

$$I_1 = F \cdot F^* = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \alpha, \quad (4)$$

式中 $\alpha = \varphi(x + \delta x, y, z) - \varphi(x, y, z)$ 为错位引起的相位差。

物体被加载后产生变形,进行第二次记录后,其光强分布为

$$I_2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\alpha + \Delta), \quad (5)$$

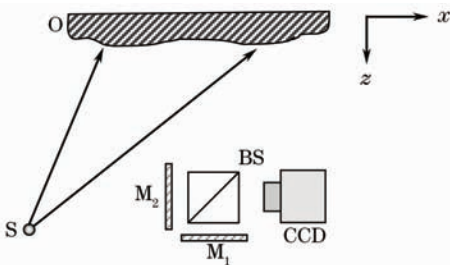


图 1 迈克耳孙错位成像示意图

Fig. 1 Diagram of Michelson shearing imaging

式中 $\Delta = \delta\varphi(x + \delta x, y, z) - \delta\varphi(x, y, z)$ 为物体形变引起的相位变化,对两次记录的光强进行相减运算得到

$$I = |I_2 - I_1| = |4A_1A_2 \sin(\alpha + \Delta/2) \sin(\Delta/2)|, \quad (6)$$

式中 $\sin(\Delta/2)$ 反映了物体的形变信息, $\sin(\alpha + \Delta/2)$ 反映了散斑的随机信息。除此之外,还受到反射光振幅 A_1A_2 的调制。因此,为了能够较为明显地反映条纹信息,这要求 A_1A_2 在整个图像上比较均匀。但是,在实际应用中,有时物体反射光在 CCD 上成的像在不同区域光强并不是均匀的,条纹就会受到光强调制,从而影响到条纹图质量。

3 减模式下光强不均匀的校正原理

3.1 散斑相位的统计特征

在散斑干涉图中,两个错位像迭加后的各个散斑间的相位差 α 是一个随机值^[7,8]。本文主要着重于对 $\cos \alpha$ 的讨论,只对 α 的主值感兴趣。因此,在后文中 α 仅代表其主值。在这里,假设对样本 α 取样足够大时,其概率密度可以看作在 $(-\pi, \pi]$ 内均匀分布,其相应的密度函数具有如下形式:

$$p(\alpha) = \frac{1}{\pi - (-\pi)} = \frac{1}{2\pi}, \quad (-\pi < \alpha \leq \pi) \quad (7)$$

$\cos \alpha$ 和 $|\cos \alpha|$ 的数学期望可以由下式求出:

$$E(\cos \alpha) = \int_{-\pi}^{\pi} \cos \alpha p(\alpha) d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos \alpha d\alpha = 0, \quad (8)$$

$$E(|\cos \alpha|) = \int_{-\pi}^{\pi} |\cos \alpha| p(\alpha) d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |\cos \alpha| d\alpha = \frac{2}{\pi}. \quad (9)$$

3.2 减模式下光强不均匀的校正方法

从(6)式可以看出,在直接减模式下 I 值受到光强 A_1A_2 调制。为了使条纹图不受光强均匀性的影响,可以设法将光强调制项 A_1A_2 消去,从而得到校正后的减模式条纹图。

假设在图像中一个小的区块内, A_1A_2 可以被看作是均匀的。实际处理时,以像素点 (i, j) 为中心选取周围的 $m \times n$ 像素窗口。在该窗口中,可以认为两个散斑干涉光场振幅均匀分布,并且所取像素点足够多使得 α 满足在 $(-\pi, \pi]$ 内均匀分布。根据

(8)式和(9)式在该窗口内可以得到

$$\langle \cos \alpha \rangle_{m \times n} = 0, \quad (10)$$

$$\langle |\cos \alpha| \rangle_{m \times n} = 2/\pi, \quad (11)$$

式中 $\langle \cdot \rangle_{m \times n}$ 表示在 $m \times n$ 像素窗口内求统计平均值。

考虑上述假设条件,并利用(10)式,则在该窗口中(4)式可写为

$$\begin{aligned} \langle I_1 \rangle_{m \times n} &= A_1^2 + A_2^2 + \langle 2A_1 A_2 \cos \alpha \rangle_{m \times n} = \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \langle \cos \alpha \rangle_{m \times n} = \\ &= A_1^2 + A_2^2, \end{aligned} \quad (12)$$

再利用(11)式可进一步得到

$$\begin{aligned} \langle |I_1 - \langle I_1 \rangle_{m \times n}| \rangle_{m \times n} &= \langle |2A_1 A_2 \cos \alpha| \rangle_{m \times n} = \\ &= |4A_1 A_2|/\pi. \end{aligned} \quad (13)$$

下面构造一个新的二维分布:

$$\begin{aligned} \eta(i, j) &= \left[\frac{|I_2(i, j) - I_1(i, j)|}{\langle |I_1(i, j) - \langle I_1 \rangle_{m \times n}| \rangle_{m \times n}} \right]^2 = \\ &= [\pi \sin(\alpha + \Delta/2) \sin(\Delta/2)]^2 = \\ &= \frac{\pi^2}{2} \sin^2(\alpha + \Delta/2) (1 - \cos \Delta), \end{aligned} \quad (14)$$

可以看出,相对于(6)式中的 I, η 的表达式中少了光强调制项,但必要的相位信息都保留下来,也就是表征物体形变大小的条纹信息被完整地保留下来。因此在灰度范围内进行归一化后的 η 即为校正后的减模式下条纹图。

4 实验验证

图2为受到强烈冲撞的条状航空复合材料在(a)加载前和(b)加载后的错位散斑图,大小均为 $375 \text{ pixel} \times 450 \text{ pixel}$ 。由于材料受到撞击变形,导致表面有褶皱,不同部位相对于光源的主反射面不相同。由采集的错位散斑图可以看出,CCD接收到的反射光强极不均匀,呈现出明显的亮条分布。

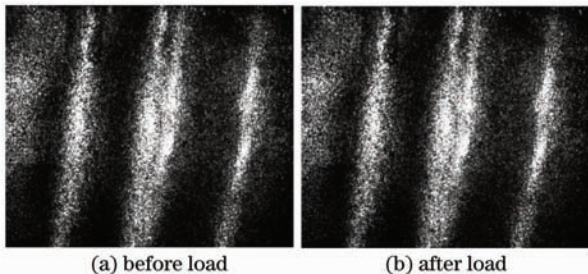


图2 加载前后两幅剪切散斑图

Fig. 2 Speckle shearograms before and after load

图3为校正前后减模式下的条纹图样,图3(a)中出现的条纹与图2中的散斑图非常相似,表明其条纹受到了不均匀分布光强的强烈调制。图3(b)是在校正窗口取为 $51 \text{ pixel} \times 51 \text{ pixel}$ 时,校正后的

减模式条纹图样,图3与(a)图相比,不仅条纹图样变得更均匀,而且能看到的条纹也更多。说明在强烈的不均匀强度调制下,未经校正得到的条纹图样有部分条纹丢失,丢失的条纹实际上是“淹没”在不均匀的光强分布中。可看出,经过校正后的减模式条纹图样质量得到了很好的改善,可更准确反映出物体表面的形变信息。同时也表明本文提出的方法能够比较好地校正在减模式下由光强不均匀性调制的条纹图。

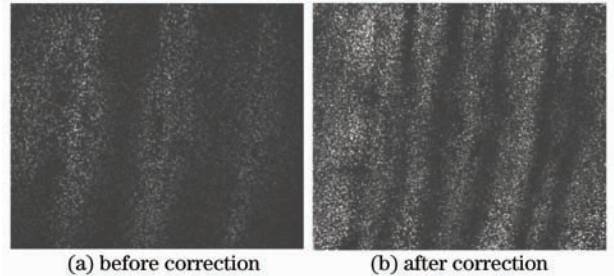


图3 校正前后的减模式条纹图样

Fig. 3 Fringe patterns before and after image correction

5 结 论

提出了一种减模式下的条纹图进行校正方法。这种基于散斑干涉相位统计特征的方法能够在减模式计算式中消去光强调制项,使条纹图受反射光强度分布的影响被有效减小。实验证明这种方法具有良好的效果。因此,采用本文的校正方法可以扩大散斑干涉技术的应用范围,使其能够检测一些表面反射不均匀的试件或者两种反射率不同材料的结合部位。

参 考 文 献

- Zhao Yanpeng, Yang Jun, Zhao Lei *et al.*. Measuring the thickness of phrase objects by laser speckle method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(4): 449~452
- 赵延鹏,杨军,赵磊等.用激光散斑法测量位相物体厚度[J]. *红外激光与工程*, 2006, **35**(4): 449~452
- Sun Yiling, Li Shanxiang, Li Jingzhen. Investigation and modification of the digital speckle correlation method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(1): 54~57
- 孙一翎,李善祥,李景镇.数字散斑相关测量方法的研究与改进[J]. *光子学报*, 2001, **30**(1): 54~57
- Liu Haowen, Zhang Qingchuan, Yu Shaojuan *et al.*. Investigation on the three-dimensional deformation of local shearing band by digital speckle metrology technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 898~902
- 刘灏文,张青川,于少娟.数字散斑法在局域剪切带三维变形中的研究应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 898~902
- Liu Cheng, Gao Shumei. Digital speckle photography based on image processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1396~1400
- 刘诚,高淑梅.基于图像处理的数字散斑照相[J]. *光学学报*,

- 1999, **19**(10): 1396~1400
- 5 Yang Xia, Yu Qifeng, Fu Sihua. Adaptive window for electric speckle pattern interferometry fringe pattern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 625~630
杨 夏,于起峰,伏思华. 散斑条纹图的自适应窗口滤波方法[J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 625~630
- 6 Wang Jing, Liu Hengbiao, Li Tongbao. Numerical simulation of surface-roughness measurement based on angular speckle-correlation method using spatial average[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 259~264
- 王 婧,刘恒彪,李同保. 空间平均的角度散斑相关粗糙度测量模拟研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 259~264
- 7 Yu Qifeng, Fu Sihua, Liu Xiaolin *et al.*. Single-phase-step method with contoured correlation fringe patterns for ESPI[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(20): 4980~4985
- 8 Yu Qifeng, Fu Sihua, Yang Xia *et al.*. Extraction of phase field from a single contoured correlation fringe pattern of ESPI[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(1): 75~83