

引用格式: LI Yang-yang, WU Si-jin, LI Wei-xian, *et al.* Simultaneous Measurement of Displacement and Slope with Dual-function Digital Speckle Pattern Interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6):0612002

李洋洋,吴思进,李伟仙,等. 双功能数字散斑干涉位移及空间梯度同时测量[J]. 光子学报, 2020, 49(6):0612002

双功能数字散斑干涉位移及空间梯度同时测量

李洋洋, 吴思进, 李伟仙, 董明利

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要: 为了满足无损检测中复合材料在复杂载荷下多参数变量评估的需求, 提出了一种基于光路复用的双功能数字散斑干涉系统, 能够同时实现数字散斑干涉和数字剪切散斑干涉测量功能. 通过控制其中一个反射镜-波片组合, 当该组合离位时, 构成数字散斑干涉测量光路, 实现离面位移测量; 当该组合在位时, 构成数字剪切散斑干涉测量光路, 实现离面位移空间梯度的测量. 测量过程中只需简单切换该组合的位置就可以实现单次加载下被测物体表面离面位移及其空间梯度的同时测量. 该系统光路结构简单、切换效率高, 能够同时获得高质量的位移及空间梯度测量结果. 实验证明, 双功能数字散斑干涉系统既具备高抗干扰能力, 又具备高灵敏度测试能力, 适合复合材料无损检测现场使用.

关键词: 散斑干涉术; 多功能数字散斑干涉; 光路复用; 剪切散斑干涉; 位移测量; 空间梯度测量; 无损检测

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204906.0612002

Simultaneous Measurement of Displacement and Slope with Dual-function Digital Speckle Pattern Interferometry

LI Yang-yang, WU Si-jin, LI Wei-xian, DONG Ming-li

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to meet the needs of multi-parameter variable evaluation of composite materials under complex loads in nondestructive testing, a dual-function digital speckle pattern interferometry system based on optical multiplexing is proposed to realize the measurement functions of both digital speckle pattern interferometry and digital shearography. By controlling one of the combinations of a mirror and quarter-wave plate, the optical setup of digital speckle pattern interferometry is formed when the combination is in the first position, allowing the out-of-plane displacement to be measured. The optical setup of digital shearography is formed to realize measurement of slope when the combination is in the second position. During the process of measurement, the out-of-plane displacement and slope of the object surface due to a single load can be simultaneously measured by simply switching the position of the combination. The optical setup of the dual-function digital speckle pattern interferometry enjoys the advantages of simple structure and high switching efficiency. High quality measurement results of displacement and slope can be obtained using the dual-function digital speckle pattern interferometry. It has been proved experimentally that the dual-function digital speckle pattern interferometry is suitable for field use in nondestructive testing of composite materials due to its superior performance in anti-interference and high-sensitivity testing.

Key words: Speckle pattern interferometry; Multi-function digital speckle pattern interferometry; Optical

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2016YFF0101801), 国家自然科学基金(Nos. 51675055, 51705025, 11672045)

第一作者: 李洋洋(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为数字剪切散斑干涉. Email: 806319961@qq.com

导师(通讯作者): 吴思进(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为全场光学测试技术. Email: swu@bistu.edu.cn

收稿日期: 2019-12-19; 录用日期: 2020-03-27

multiplexing; Shearography; Displacement measurement; Slope measurement; Non-destructive testing
OCIS Codes: 120.6160; 120.4290; 120.4820; 120.4630

0 引言

随着复合材料在航空航天等领域的广泛应用,复合材料的无损检测已经成为制造过程中不可或缺的重要一环。目前,常用的复合材料无损检测方法包括超声检测、X射线照相检测、红外热像检测、电涡流检测、液体渗透检测等等,但是由于各技术对测量条件有独特的要求而限制了各自的应用场景^[1]。比如X射线检测技术需要安全防护,红外热像技术对被测工件的传热性能要求较高,而目前应用最为广泛的传统超声检测技术需要使用耦合剂,容易破坏材料表面特性且检测效率较低。空气耦合超声和激光超声两种新技术虽然能够摆脱了耦合剂的限制,但是检测效果和适用性还难以达到现场使用要求,因此对高效复合材料无损检测技术的探索仍然是研究热点。

数字散斑干涉技术(Digital Speckle Pattern Interferometry, DSPI)作为一种高精度、非接触的 optical 全场测量方法,可直接测量复合材料在加载状态下微小变形导致的离面位移,并且根据测量得到的条纹图案直观显示出缺陷的形状和位置等信息,其检测灵敏度高^[2]。数字剪切散斑干涉技术(Digital Shearography, DS)是DSPI的技术分支。DS直接测量离面位移沿剪切方向的一阶导数,同样能够高灵敏度和高效率地检测出复合材料的内部缺陷^[3]。与DSPI相比,DS具有干涉光路简单、集成度高、对刚体位移不敏感、对系统的隔振性能和激光光源的相干长度要求低等特点,已经被美国材料与试验协会、美国无损检测协会、英国标准学会等机构作为无损检测的执行标准,广泛应用于民航客机、军用飞机、航天器以及风力发电机叶片、涡轮叶片等装置和部件的材料内部隐藏缺陷的现场检测中。我国也于2018年5月开始实施无损检测复合材料激光错位散斑检测方法的国家标准,规范了DS在复合材料无损检测领域的应用。

在复合材料制造过程中,为了全面详细地评估复合材料在复杂载荷作用下的结构安全和力学性能,材料的离面位移和空间梯度信息作为缺陷检测和评估的关键参数需要被同时收集并进行比对分析。虽然这个过程可以通过在同一对象上先后单独使用DSPI仪器和DS仪器来实现,但是这种做法需要大量的时间来布置测试装置,测量效率低下;而且由于需要进行两次独立的加载,每次加载的差异将导致检测结果偏差,使检测结果不具有可比性^[4,5]。另一方面,虽然离面位移及其空间梯度可以通过数值计算来实现相互转换,比如DSPI获得的离面位移通过微分计算即可得到其对应的空间梯度,DS测量空间梯度也可以通过数值积分得到相应的位移量,但是通过数学计算得到对应物理量的方式也不可避免地继承了单一测量方法固有的局限性^[6-8]。比如,在复合材料内部缺陷的无损检测过程中,DS灵敏度低,对微小缺陷的检出率低;而DSPI抗干扰能力不强,复合材料刚体位移对测量结果影响大,因此采用数值计算的方法同样也继承了两者的缺点。可见,在单一装置上同时实现基于DSPI的离面位移测量和基于DS的离面位移空间梯度测量,综合两者的优点、融合所得到的离面位移分布和位移空间梯度信息,将有助于提高缺陷的检出率,具有重要的实际应用价值。

目前已提出一些方法,来实现数字散斑干涉技术对离面位移及其空间梯度的同时测量。如MOHAN N K等在测量系统中引入特定的参考波来实现这一功能,但是需要设计复杂的光阑组件,并且探测器的分辨率降低了一半^[9]。该团队后来又提出了一种多孔径测量系统,可以同时测量离面位移及其空间梯度,该系统利用一种特殊设计的三孔掩模产生三种不同的空间载频,然后利用傅里叶变换从一幅图像中提取离面位移及其空间梯度信息^[10]。然而,当物体被替换时,需要重新设计系统的多孔掩模来改变空间载频,这在很大程度上限制了系统的实际应用。为此,LU M提出了一种利用可调孔径多路复用技术代替多孔径掩模的测量系统,从而当测量不同物体时,可以方便地调整载波频率,提高了测试的便利性,但是应用该方法时,被测物尺寸受到限制^[11]。XIE X提出了基于空间载波技术的迈克尔逊型剪切散斑干涉测量系统,能够很方便地实现离面位移及其空间梯度的同时测量^[12]。但是该方法的剪切量与载波频率密切相关,使用过程中受载波频率的限制,导致剪切量基本上不能改变,实际应用不便;同时,由于孔径光阑较小,系统的光能利用率较低;并且,相对较低的空间分辨率导致测量分辨率不够理想。UDUPA G提出一种用于硅晶圆缺陷检测的光纤数字剪切和散斑干涉系统,可以根据应用需要使用DS或DSPI技术,但是参考准直光束的直径必须与CCD传感器的尺寸相匹配,并且该系统使用强度相减技术来获得干涉条纹图像,而没有使用相移技术,测量效果较差^[13]。相对于以上使用空间载波技术或强度相减技术来实现相位提取的方法,时间相移法通过在时间序列

上引入不同的相移量来求取相位分布,能够获得高质量的相位图,具有更高的测量精度和检测灵敏度^[14].基于时间相移技术,BHADURI B 和 NG T W 等通过改变参考光反射镜的状态来实现 DSPI 与 DS 测量系统的切换,但是这两种采用分时测量方法得到的离面位移及空间梯度是独立的参量,相互之间无关联,即获得的离面位移及空间梯度信息分别对应于不同的加载状态,因而限制了在一次测量任务中对不同评价参数的采集工作^[15,16].若改变测量方案,使离面位移及其空间梯度能够被同时测量,则 BHADURI B 方法中,反射镜需要在 45° 倾斜状态时将 DSPI 参考光引入,在接近垂直于光轴的状态作为 DS 中迈克尔逊剪切镜引入剪切量,两种状态切换时反射镜的旋转角度变化量较大,导致复位后剪切镜难以保持在原位从而引入相位误差.类似地,NG T W 提出的结构由于参考被测物的设置,将系统的测量范围限制在相机视场的一半区域内,且在 DSPI 测量模式下反射镜需要更大的倾斜角度使被测对象和参考对象图像产生叠加,无法保证加载前后剪切量一致而导致测量误差.

本文提出了一种应用时间相移技术的双功能数字散斑干涉离面位移及其空间梯度同时测量方法,通过光路复用技术,只需调整光学支路中的波片-反射镜组合件的位置就可以实现单次加载下被测物体离面位移及其空间梯度的同时测量.与上述方法相比,本文方法只需一次加载,即可同时得到离面位移及其空间梯度的测量结果,且光路简单、操作方便、效率高,更加适合于现场使用.

1 测量原理

本文所设计的双功能数字散斑干涉离面位移及其空间梯度同时测量系统的光路如图 1.激光器所输出的相干光经分光棱镜后分为两部分,其中透射光经扩束后作为物光照亮被测表面;反射光经扩束后照射到毛玻璃上,产生较为均匀的散射光,作为干涉系统的参考光.电动马达可驱动 1/4 波片-反射镜组合 1 绕轴旋转,该组合件处于光路内时为在位状态,此时参考光被该组合件阻挡,整体光路构成 DS 测量光路;转动组合件使其处于光路外时为离位状态,此时参考光可通过偏振分光棱镜到达检偏器处,整体光路构成 DSPI 测量光路.在同时测量离面位移及空间梯度的过程中,一次测量过程可分为四个阶段,其中第一、二阶段对应于被测物未施加载荷状态,第三、四阶段对应于施加载荷以后,一次加载即可同时测量离面位移及其空间梯度.

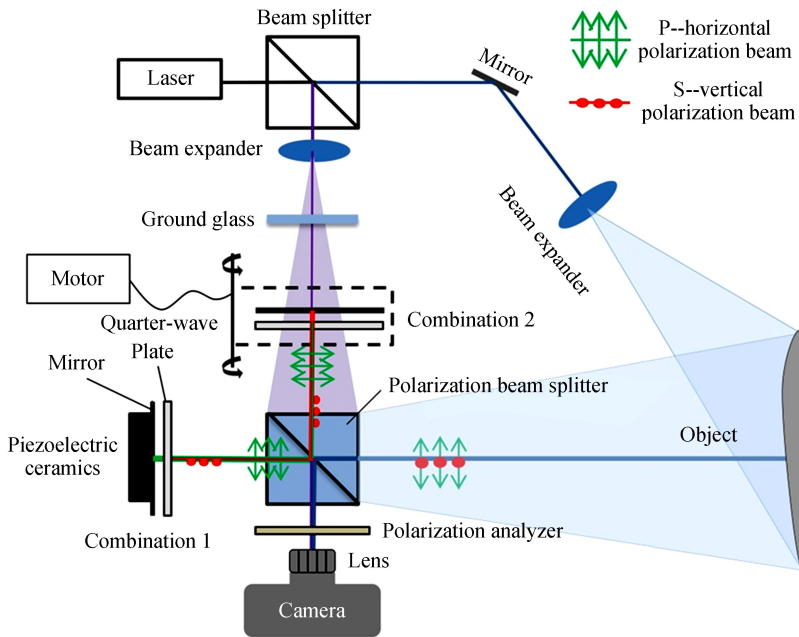


图 1 双功能数字散斑干涉系统光路原理图

Fig.1 Optical setup of dual-function digital speckle pattern interferometry system

第一阶段:在对被测物施加载荷前,1/4 波片-反射镜组合 1 处于离位状态,构成 DSPI 测量光路.参考光经过偏振分光棱镜后分为偏振方向相互垂直的 P 光和 S 光,其中水平偏振的 P 参考光透射后照射到检偏器上,垂直偏振的 S 参考光则反射离开光路系统.物光经被测物表面散射后,部分散射光入射至偏振分光棱镜,分成水平偏振的 P 光和垂直偏振的 S 光,其中水平偏振的 P 光透射,到达 1/4 波片-反射镜组合 2 后反射.该

P光先后两次通过1/4波片,其偏振方向旋转了 $\pi/2$ 变为S光,再次经过偏振分光棱镜后反射到检偏器上,与参考光混合并发生干涉.另一路垂直偏振的S物光则反射离开光路系统.采用四步相移技术^[17],由压电陶瓷驱动1/4波片-反射镜组合2沿光轴三次引入步长为 $\lambda/8$ 的位移量(λ 为激光波长),从而改变其支路光程,在P、S两路相干光之间引入相位差,然后由相机记录下对应的四幅数字散斑干涉光强分布图,进而求取相位分布 ϕ_1 .

第二阶段:1/4波片-反射镜组合1切换为在位状态,构成DS测量光路.此时参考光束被1/4波片-反射镜组合1遮挡,偏振分光棱镜和1/4波片-反射镜组合1和2组成迈克尔逊剪切装置.物光在偏振分光棱镜处反射的S光经1/4波片-反射镜组合1后变为P光,再次经过偏振分光棱镜,透射后到达检偏器;物光在偏振分光棱镜处透射的P光经1/4波片-反射镜组合2后变为S光,再次经过偏振分光棱镜,反射后到达检偏器.两者在检偏器处混合并发生干涉,所产生的剪切散斑干涉图像由相机采集并记录.同样采用四步相移技术,获得此时的相位分布 ϕ_2 .

第三阶段:保持第二阶段测量光路状态,对被测物施加载荷,相机采集四幅剪切散斑干涉光强分布图并计算相位分布 ϕ_3 .光路的原理和测量过程与第二阶段一样.

第四阶段:维持第三阶段的加载状态,将1/4波片-反射镜组合1切换到离位状态,再次将参考光束引入到测量系统,重新构成DSPI测量光路.相机采集四幅加载后的数字散斑干涉光强分布图并计算相位分布 ϕ_4 .光路的原理和测量过程与第一阶段一样.

第一阶段和第四阶段构成了DSPI离面位移测量过程,此时离面位移为

$$w = \frac{\lambda}{4\pi}(\phi_4 - \phi_1) \quad (1)$$

而DS测量的是离面位移的空间梯度(离面位移沿剪切方向的一阶导数),对应于第二阶段和第三阶段,表示为

$$\frac{\partial w}{\partial r} = \frac{\lambda}{4\pi\delta_r}(\phi_3 - \phi_2) \quad (2)$$

式中, δ_r 为沿 r 方向的剪切量.

由于四幅相位图 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 和 ϕ_4 可以在一次加载过程中同时获得,因此可同时进行离面位移 w 及其空间梯度 $\partial w/\partial r$ 的测量.

2 实验验证及分析

根据图1在光学实验平台上搭建实验系统并进行实验.采用中心波长为532 nm、功率为200 mW的固体激光器(长春新产业,MSL-FN-532)作为相干光源,采用130万像素的黑白工业相机(北京凯视佳,MU3I130M)作为图像传感器.照明角度较小,实验过程中可认为近似为0.被测件垂直放置在测量光路的光轴上,转动相机前的检偏器使两路不同偏振干涉光的强度一致.调整相机镜头进行对焦,以获得被测件表面清晰的像后进行测量.沿水平方向(X轴)调节剪切,剪切量约为13 mm,约对应50个像素.

2.1 标准圆盘试验

为了验证测量系统对离面位移及其空间梯度同时测量的能力,对周边固定、中心加载、直径为180 mm的圆形金属薄板进行了测量,被测物如图2.采用手动加载的方式,通过旋转支架背部的螺旋丝杆对被测面板施加载荷使被测物产生形变.

按照前面所述的步骤进行测量,采用四步相移法提取散斑干涉图中的相位,并将在加载前后提取的四幅散斑干涉相位图进行相减,即第三阶段所得到的相位分布 ϕ_3 减去第二阶段所得到的相位分布 ϕ_2 、第四阶段所得到的相位分布 ϕ_4 减去第一阶段所得到的相位分布 ϕ_1 ,获得表征被测金属圆盘在同一次加载下的离面位移及其空间梯度的原始干涉相位图.以加载点为中心,取面积约为72 mm×72 mm的区域(对应273×273个像素)为感兴趣区域,截取原始相位图,如图3(a)、(d)所示.原始相位图经加窗傅里叶滤波方法^[18]处理后,消除了噪声,得到如图3(b)、(e)所示的平滑相位图.经滤波后的相位信息仍然是被包裹在 $(-\pi, \pi]$ 之间的包裹相位图,利用解包裹技术^[19]可以将包裹相位图还原成真实相位图,从而得到对应的连续相位图,如图3(c)、(f)所示.由图3可见,尽管最窄的条纹间距只有20多个像素,但相位图的质量仍然非常好,能够获得理

想的平滑相位图和真实相位图, 证明了双功能数字散斑干涉系统能够获得高质量的离面位移及其空间梯度的测量结果.

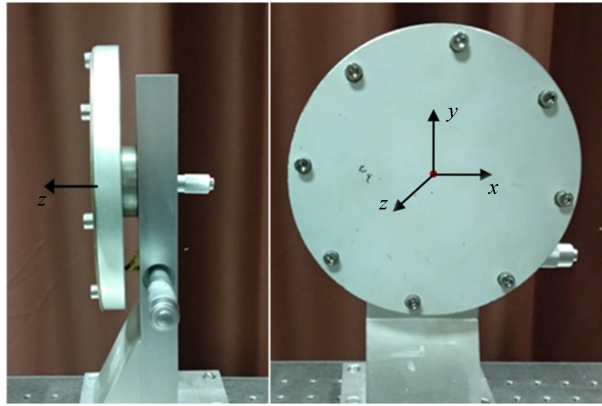


图2 圆形金属被测物(左为侧视, 右为正视)

Fig.2 The round metal sheet under test (left: side view; right: front view)

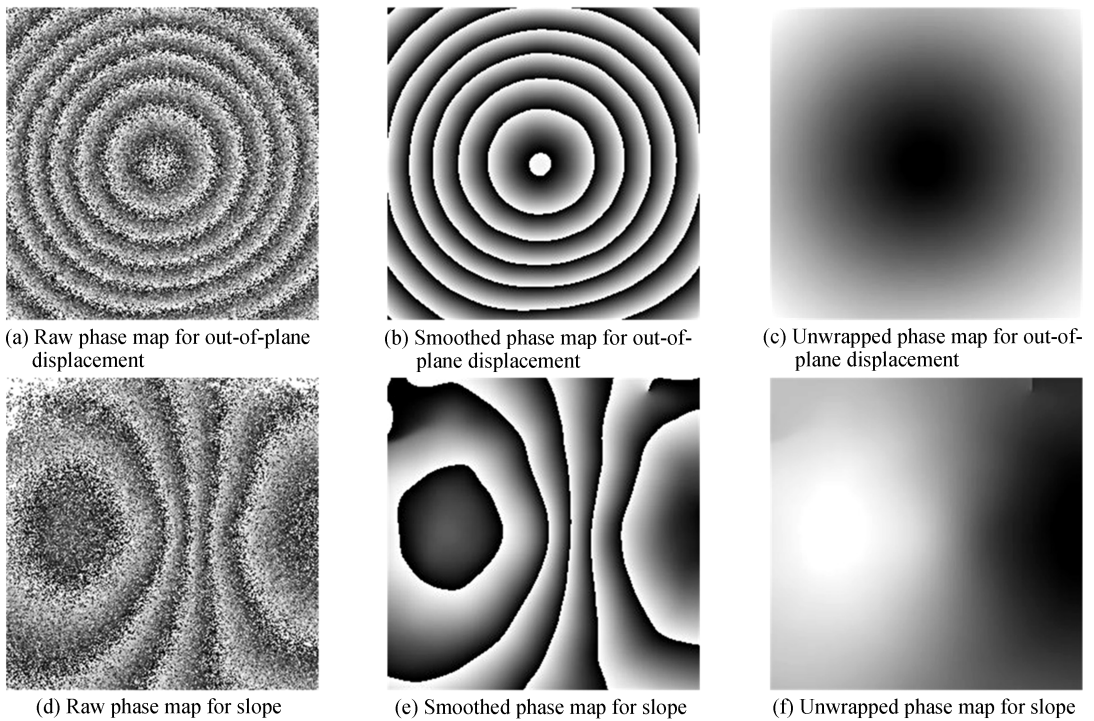


图3 圆形金属薄板离面位移及其空间梯度测量相位图

Fig.3 Phase maps corresponding to the out-of-plane displacement and slope of the round metal sheet

图3(a)所对应的区域和图3(d)完全一样, 但图3(d)的相位图存在水平偏移, 这是由于沿X方向的剪切所导致的, 使得相位图沿水平方向平移了一个剪切长度.

根据式(1)和(2)进行计算, 得到的离面位移及其空间梯度的三维分布如图4.

为了验证本系统获得的离面位移与空间梯度的一致性, 将图4(a)所示的离面位移进行数值微分, 计算其空间梯度, 与图4(b)所示的由实验直接获得的空间梯度分布结果进行比较. 以边缘为起点, 剪切方向(X轴正向)为微分方向, 剪切量(50个像素)作为微分步长, 对离面位移逐点进行微分运算, 计算所对应的位移空间梯度, 结果如图5.

图4(a)、(b)中的三维分布图对应的测量区域尺寸长(X轴)宽(Y轴)各为 273×273 个像素, 而图5中的空间梯度场对应于 223×273 像素内的测量区域. 原因在于对图4(a)对应的离面位移场进行微分计算过程中, 采用50个像素作为步长进行计算, 所以在尾部要舍弃50个像素长度的数据.

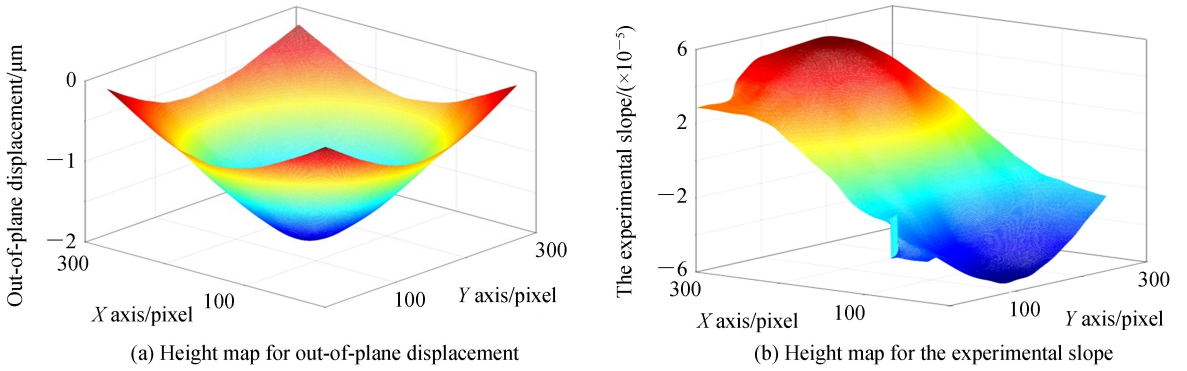


图4 离面位移和空间梯度三维高度图

Fig.4 Three-dimensional height maps for out-of-plane displacement and slope

截取图 4(b)中 X 轴 0~223 个像素区域与图 5 数据进行对比.沿 X 方向过峰值点作剖面线,分别得到图 4(b) 和图 5 所示的空间梯度曲线,并进行比较,结果如图 6.其中绿色实线表示实验直接得到的空间梯度曲线,来自于图 4(b)所示的分布;红色短划线表示计算所得到的空间梯度曲线,来自于图 5 所示的分布.可以看出计算所得到的结果和实验直接得到的结果趋势一致,但存在一定的差别,且差距向两侧处增大,最大差值为 1.235×10^{-5} .对计算得到的空间梯度乘以常数 1.27,那么修正后的曲线如图 6 中黑色点状线所示,该曲线与实验所得到的空间梯度曲线吻合程度较高,最大差值变为 0.224×10^{-5} ,标准差为 0.086×10^{-5} .由此可知计算所得的空间梯度和实验直接得到的空间梯度具有一致性,但实验测量过程存在系统误差,导致两者存在一定的差异.系统误差主要来源于剪切量的测定误差和图像滤波所导致的误差.本实验采用人工观察图像的方式来确定剪切量,本身存在一定的误差,容易使实验直接测量得到的空间梯度出现偏差.图像滤波能够抑制随机噪声,但也会导致测量结果发生变化,且变化的程度与滤波的深度存在关系^[20,21].因此 27% 的系统误差是合理的,实验结果能够说明所提出的方法在单次加载下测量离面位移及其空间梯度的一致性.

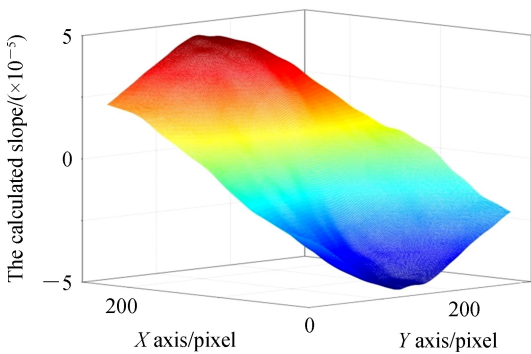


图5 计算得到的离面位移空间梯度分布图
Fig.5 Height map for the calculated slope

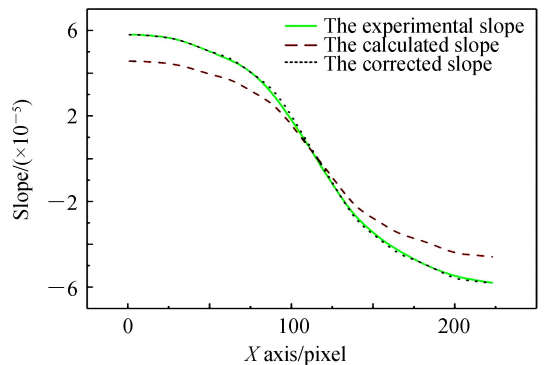


图6 计算的与实验直接测量的空间梯度的比较
Fig.6 Comparison of slopes obtained by experiment and calculation

2.2 无损检测应用

将提出的方法应用于复合材料蜂窝结构件的无损检测中,采用热加载的方式进行激励.被测复合材料采用厚度为 0.3 mm 的铝蒙皮和边长为 5 mm 的铝蜂窝芯格制作成的三明治夹芯结构.测试区域长为 180 mm,宽为 100 mm.该试件已在蒙皮与铝蜂窝的胶接处预制了两个深度相同、半径不同的圆形脱粘缺陷,左侧缺陷直径为 15 mm,右侧缺陷直径为 50 mm,如图 7 所示.

将复合材料板固定在测试平台上,测量距离为 800 mm.用热风枪对试件表面进行热加载,然后用实验装置进行检测.以热加载前获得的相位图作为参考图,将加载后所得到相位图减去参考图,得到的测量结果如图 8.图 8(a)所示的三幅图分别对应于用 DSPI 功能所获得的测试结果,而图 8(b)所示的三幅图分别对应于用 DS 功能所获得的测试结果.从左到右的三幅图分别是在不同的加温时长下获得的,即加载程度逐步加大,得到不同的相位图.

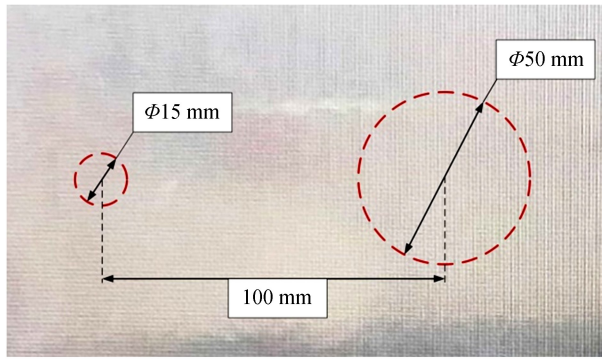


图7 复合材料缺陷

Fig.7 Composite structure with defects

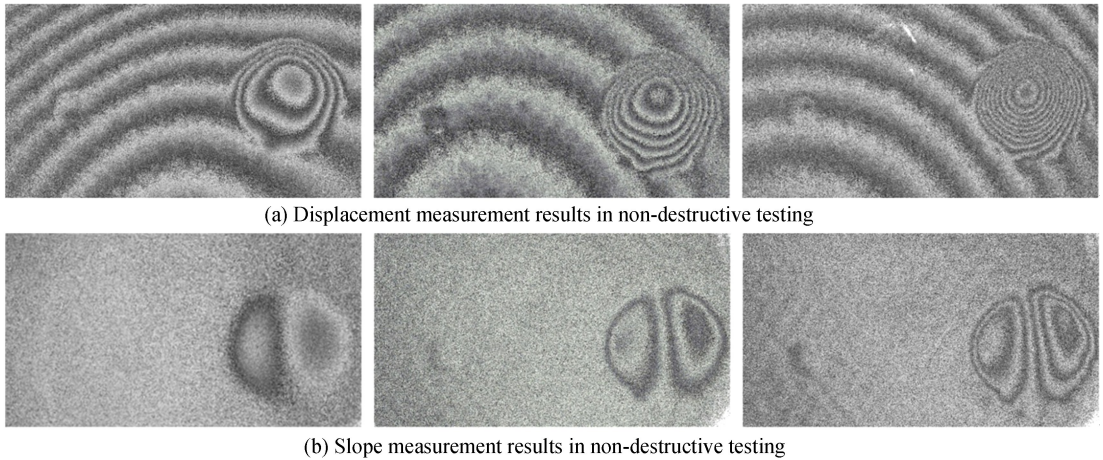


图8 热载荷作用下蜂窝板无损检测结果

Fig.8 Non-destructive testing of a honeycomb plate under thermal loading

图8表明,随着热载荷的增加,右侧 $\Phi 50\text{ mm}$ 的缺陷相位图条纹级数明显增加,因变形产生的离面位移和空间梯度变化也相应增大.对于这类比较明显的缺陷,DSPI功能和DS功能都能够有效检出缺陷.然而对于左侧相对较小的 $\Phi 15\text{ mm}$ 缺陷,当载荷量较小时,DS功能未检出该处缺陷;而DSPI功能能够清晰观察到条纹的异常,条纹发生明显扭曲,能够顺利检测缺陷.随着载荷量继续增大, $\Phi 15\text{ mm}$ 缺陷处对应于离面位移的条纹已出现两级条纹,缺陷已清晰可辨;而DS只能模糊地观察到条纹异常.由此可见,对于复合材料中尺寸较小的缺陷,DSPI的检出能力明显优于DS,即同等测量条件下,DSPI具有更高的灵敏度.

另一方面,尽管DSPI测量灵敏度更高,但由于被测试件的刚体位移和整体变形,其测量结果常常伴有误导性的背景条纹;且当载荷较大时,由于条纹过于密集导致难以分辨.与之相比,DS获得的相位图背景整洁、条纹光滑密度均匀,缺陷检出结果一目了然.DSPI测量的是物体的离面位移,因此对物体的刚体位移和整体变形同样敏感;而DS测量的是位移导数,刚体位移的导数为零,因此不会产生混乱的背景条纹图案^[22].DS功能对测量现场复杂的测试条件具有较好的抗干扰能力,更加有利于现场测试.

在复合材料无损检测应用中,双功能数字散斑干涉系统可以同时获得离面位移及其空间梯度的测试结果,能够对复合材料内部缺陷进行更加全面的检测,提高检出率.同时,该系统还具有更好的适应能力,可以满足不同环境下的检测需求.

3 结论

提出了一种双功能数字散斑干涉系统的实现方法,基于该方法实现了在单次加载过程中对离面位移及空间梯度的同时测量.该方法有助于数字散斑干涉技术在现场复杂载荷下的无损检测应用,使数字散斑干涉技术能够同时获得离面位移及其空间梯度测试结果,既可以满足高抗干扰能力的应用需求,又满足了高灵敏度的测试需求.该方法同时具有结构简单、操作方便、稳定性好、效率高、干涉性能优良等特点,基于该方法,

能够研制适合工业检测现场应用的多功能数字散斑干涉系统.

参考文献

- [1] LIU Song-ping, LIU Fei-fei, LI Le-gang, *et al.* Review of research progress on nondestructive testing and evaluation[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, **62**(14): 14-27.
刘松平, 刘菲菲, 李乐刚, 等. 航空复合材料无损检测与评估技术研究进展回顾[J]. 航空制造技术, 2019, **62**(14): 14-27.
- [2] YANG L, XIE X, ZHU L, *et al.* Review of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for three dimensional displacement measurement[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, **27**(1): 1-13.
- [3] ZHAO Q, DAN X, SUN F, *et al.* Digital shearography for NDT: phase measurement technique and recent developments [J]. *Applied Sciences*, 2018, **8**(12): 2662.
- [4] JORIS S, JORIS J D. Full-field displacement and strain measurement of small complex bony structures with digital speckle pattern interferometry and shearography[C]. SPIE, 2010, **7387**: 73870C1.
- [5] KRZEMIEN L, ŁUKOMSKI M, KIJOWSKA A. Combining digital speckle pattern interferometry with shearography in a new instrument to characterize surface delamination in museum artefacts[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2015, **16**(4): 544-550.
- [6] BAI P, ZHU F, HE X. Out-of-plane displacement field measurement by shearography[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, **73**: 29-38.
- [7] RICHOGZ 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.
- [8] WANG Y, GAO X, 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.
- [9] MOHAN N K, SALDNER H, MOLIN N E. Electronic speckle pattern interferometry for simultaneous measurement of out-of-plane displacement and slope[J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(21): 1861-3.
- [10] BHADURI B, MOHAN N K, KOTHİYAL M P. Simultaneous measurement of out-of-plane displacement and slope using a multiaperture DSPI system and fast Fourier transform[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(23): 5680.
- [11] LU M, WANG S, AULBACH L, *et al.* Simultaneous displacement and slope measurement in electronic speckle pattern interferometry using adjustable aperture multiplexing[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(22): 5868-5875.
- [12] XIE X, XU N, SUN J, *et al.* Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography[J]. *Optics Communications*, 2013, **286**: 277-281.
- [13] UDUPA G, WANG Jun, NGOI B K A. A combined fiber optic digital shearography and holography system for defect inspection in Si-wafers[C], International Conference on Experimental Mechanics, 2005, **5852**: 413-420.
- [14] WU S, DONG M, FANG Y, *et al.* Universal optical setup for phase-shifting and spatial-carrier digital speckle pattern interferometry[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2016, **12**(1): 14.
- [15] BHADURI B, MOHAN N K, KOTHİYAL M P. A dual-function ESPI system for the measurement of out-of-plane displacement and slope[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**(6): 637-644.
- [16] NG T W. Digital speckle pattern interferometer for combined measurements of out-of-plane displacement and slope[J]. *Optics Communications*, 1995, **116**(1-3): 31-35.
- [17] YANG Lian-xiang, ZHU Lian-qing, XIE Xin, *et al.* New development of phase-shift techniques in electronic speckle pattern interferometry[J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University (Natural Science Edition)*, 2013, **28**(2): 1-8.
杨连祥, 祝连庆, 谢辛, 等. 电子散斑干涉测量中相移技术的新发展[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2013, **28**(2): 1-8.
- [18] QIAN K. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2007, **45**(2): 304-317.
- [19] WU S, ZHU L, PAN S, *et al.* Spatiotemporal three-dimensional phase unwrapping in digital speckle pattern interferometry[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(5): 1050-1053.
- [20] XIAO Qi-yang, LI Jian, WU Si-jin, *et al.* Denoising of DSPI phase map using sine-cosine filtering and signal energy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(4): 936-943.
肖启阳, 李健, 吴思进, 等. 基于能量的 DSPI 相位图正余弦降噪[J]. 光学精密工程, 2018, **26**(4): 936-943.
- [21] NING X, LI W, WU S, *et al.* Fast phase denoising using stationary wavelet transform in speckle pattern interferometry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, **31**(2): 025205.
- [22] HUNG Y Y. Digital shearography versus TV-holography for non-destructive evaluation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, **26**(4-5): 421-436.