

剪切散斑干涉关键技术研究及应用进展

王永红^{1,2*}, 姚彦峰¹, 李骏睿^{1,2}, 闫佩正^{1,2}, 李晨¹, 吴双乐¹

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

²合肥工业大学测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009

摘要 剪切散斑干涉测量技术是一种非接触式高灵敏度的光学检测技术。从技术研究和应用领域等方面对剪切散斑干涉技术近年来的发展进行介绍,详细阐述空间相移剪切干涉测量、多方向剪切干涉测量、多功能复用测量等剪切散斑干涉新技术,并介绍其在航空、航天、汽车、机械、新材料等领域的无损检测应用。最后,对剪切散斑干涉技术的优势和不足进行分析讨论,并对未来的研究方向进行展望。

关键词 无损检测; 剪切散斑干涉术; 空间相移; 多方向剪切

中图分类号 TB96 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415004

Progresses of Shearography: Key Technologies and Applications

Wang Yonghong^{1,2*}, Yao Yanfeng¹, Li Junrui^{1,2}, Yan Peizheng^{1,2}, Li Chen¹, Wu Shuangle¹

¹School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

²Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

Abstract Digital shearing speckle pattern interferometry (DSSPI), also named shearography, is an extensively researched non-contact high-sensitivity optical measurement method. The recent development of shearography, ranging from key technologies to applications is presented in detail within this paper. The new technologies of shearography, such as spatial phase-shifting shear interferometry, multi-directional shear interferometry, and multi-functional multiplex measurement, are described in detail, and their applications in nondestructive testing in aerospace, automobile, machinery, new materials, and other fields are introduced. At the end of the article, the pros and cons of shearography are analyzed, and the potential research content is discussed.

Key words nondestructive testing; shearography; spatial phase-shifting; multi-directional shearing

1 引言

20世纪70年代,人们在散斑干涉技术的基础上提出剪切散斑干涉技术。该技术通过剪切装置将被测物体表面漫反射的物光分成两束,光束在成像靶面形成错位干涉的剪切散斑干涉图像。根据物体表面变形前后的剪切干涉相位变化,该技术可以获取物体变形的一阶导数信息。剪切散斑干涉技术通过测量物体在载荷下由于内部缺陷产生的表面应力集中现象,从而实现物体的无损检测。选择加载方式时需要考虑材料种类以及缺陷的尺寸和深度,其中机械加载是最简单的加载方式,能测量刚体表面的应变、斜率以及浅层裂

纹^[1-3];气压加载和热加载是一种整体均匀加载方式,容易检测出复合材料中由于分层、裂纹、脱粘等原因引起的缺陷^[4-8];此外,还有振动、微波加热等加载方式^[9-10]。剪切散斑干涉技术是一门融合激光干涉技术、相位提取技术、计算机图像处理的光学测量技术,具有非接触、全场测量、简单光路、快速响应、高灵敏度等优势,在振动测量^[11]、缺陷检测^[12-13]、残余应力评估^[14]等方面有着广泛的应用。

1974年,Hung等^[15]提出剪切散斑照相术,开启了剪切散斑干涉测量的序幕。1980年,Nakadate等^[16]使用数字图像处理设备对物体的法向位移梯度、表面应变和振幅梯度进行测量。在此之后,如Winther^[17]和

收稿日期: 2022-05-06; 修回日期: 2022-05-27; 录用日期: 2022-06-05

通信作者: *yhwang@hfut.edu.cn

Ganesan 等^[18]诸多学者使用计算机技术辅助剪切散斑干涉测量。随着计算机的普及,数字剪切散斑干涉进入快速发展阶段,在测量灵敏度提升和应用领域拓展方面取得进步^[19-22]。近年来,国内外学者们对剪切散斑干涉技术做出大量的研究。针对时间相移技术无法用于动态测量的问题,提出空间载波相移方法;针对单方向剪切散斑干涉系统容易出现缺陷漏检的问题,提出了多方向剪切干涉测量技术;针对剪切散斑干涉技术无法准确获取物体变形分布的问题,提出了同时使用剪切散斑干涉技术与数字散斑干涉技术进行测量的复用光路,实现了对变形及其一阶导数的同步测量。目前,剪切散斑干涉技术在提高测量精度、缩短响应时间、融合其他学科领域技术等方面快速发展。本文将从技术研究和应用进展两方面对剪切散斑干涉技术近年的研究进展进行详细介绍,最后对其技术本身的优势和局限性进行分析并提出展望。

2 研究技术进展

自 20 世纪 70 年代 Leendertz 和 Hung 分别提出两种剪切散斑干涉装置以来,剪切散斑干涉测量开始快速发展。使用剪切散斑干涉测量技术获取散斑中形貌变化的信息时,关键是对散斑干涉图进行相位提取、相位滤波及相位解包裹。近几年,剪切散斑干涉测量的技术研究主要集中于空间相移剪切干涉测量、多方向剪切散斑干涉测量、多功能复用测量和剪切装置的改进,下面将从这几个方面展开介绍。

2.1 空间相移技术

实现剪切散斑干涉测量的关键是对散斑干涉图进行相位提取,获取物体表面的应变信息。为了实现无损检测的实时性,研究者们提出了空间相移技术。2013 年, Xie 等^[23]提出了基于 4f 系统的空间相移剪切散斑干涉装置,在成像透镜前放置光阑以引入载波,并通过调节反射镜分离频谱,获得蜂窝板缺陷处的热变形信息。该研究者在此基础上进一步提出了双光束空间相移数字剪切测量系统^[24],通过在两个相机前放置不同的带通滤波器,该系统分离不同波长的干涉图,实现双通道测量。2013 年, Zhu 等^[25]提出一种单孔径空间相移技术,使用球面镜代替传统迈克耳孙剪切装置中的两个平面反射镜,提高了对光的利用率。该系统的空间载波由狭缝光阑引入,通过平移其中一面反射镜实现频谱分离。2015 年,王永红研究团队^[26]对空间相移技术进行研究,提出基于狭缝光阑的剪切散斑干涉动态测量系统,该系统通过单幅剪切干涉图即可实现对被测物的实时测量,如图 1 所示。

上述基于偏转镜的空间相移技术光路简单,图像的采集速率仅与相机的采集频率有关,因此能够实现动态测量。然而,这些方法难以进行剪切与载波的独立调节,实现频谱分离需要反射镜偏转较大角度,这样会导致剪切量过大。为了避免调节载波频率时对剪切

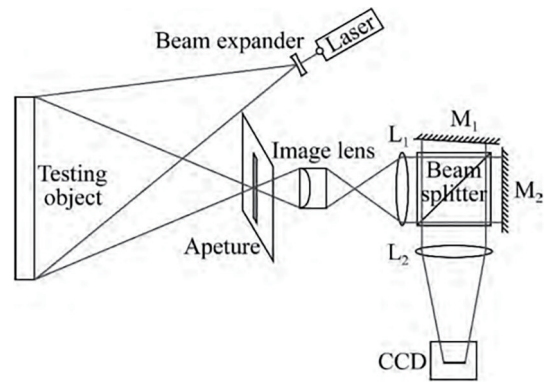


图 1 基于狭缝光阑的剪切散斑干涉动态测量系统^[26]

Fig. 1 Dynamic shearography measurement system based on slit diaphragm^[26]

量的影响,研究人员对光路进行改进。2018 年, Gao 等^[27]提出基于空间相移的剪切散斑干涉系统,系统对物体表面进行双方向照明,两束物光经过透镜 L1 和 L2 在 CCD 中分别成像,通过调节两个光阑的相对位置控制载波频率,实现了对面内变形的快速测量。2019 年, Yan 等^[28]提出一种基于可调孔径的空间相移剪切干涉系统,使用三个透镜对被测物进行多成像,并在每个成像透镜前放置孔径光阑,实现剪切和载波频率的独立调制,如图 2 所示。这两个系统均采用多成像光路,这种光路能够独立地调节每路物像的成像位置以及孔径光阑的安装位置,实现剪切方向和载波频率的自由调整。然而,孔径光阑会限制光强,只有少部分的光能够进入相机中,因此相位图的质量相对较差。

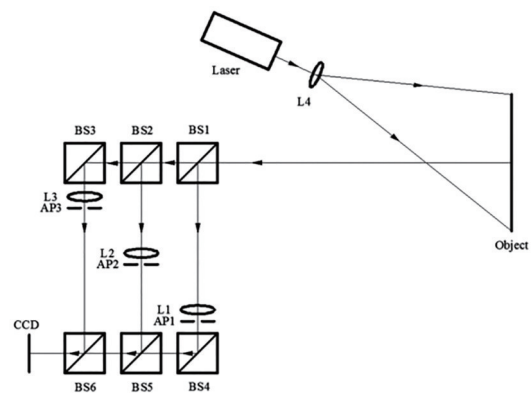


图 2 基于可调孔径的空间相移剪切干涉系统^[28]

Fig. 2 Spatial phase-shift shearography system based on adjustable apertures^[28]

除了基于偏转镜的空间相移技术和基于可调孔径光阑的空间相移技术,还可以通过微偏振阵列提取相位信息。微型偏振阵列在 2×2 的局部阵列单元中有 0° 、 45° 、 90° 、 135° 的偏振方向,在偏振相机中相同偏振方向的微型偏振阵列所对应的像素信号将会在计算机中重新组合成一幅图片。2018 年, Aranchuk 等^[29]在马赫-曾德尔系统中用偏振分光棱镜替换普通分光棱镜,

经过剪切系统后出射的 P 光和 S 光通过 1/4 波片同样形成相互正交的左旋偏振光和右旋偏振光,光束经过偏振相机的微型偏振阵列引入相位变化。2019 年, Yan 等^[30]在迈克耳孙光路的两个反射镜前分别加入偏振方向相互垂直的偏振片,经过偏振相机的捕获,四个偏振方向的散斑图相当于左旋和右旋偏振光之间的波

前引入了四个相位变化量,通过四步相移计算出相位图,最后在复域中使用提出的时空低通滤波算法进行处理,获得剪切干涉测量结果,测量光路及结果如图 3 所示。使用微偏振阵列进行空间相移测量能避免光阑对光强的限制,并且使用 8 幅散斑图进行相位提取,因此相位图中条纹对比度会高。

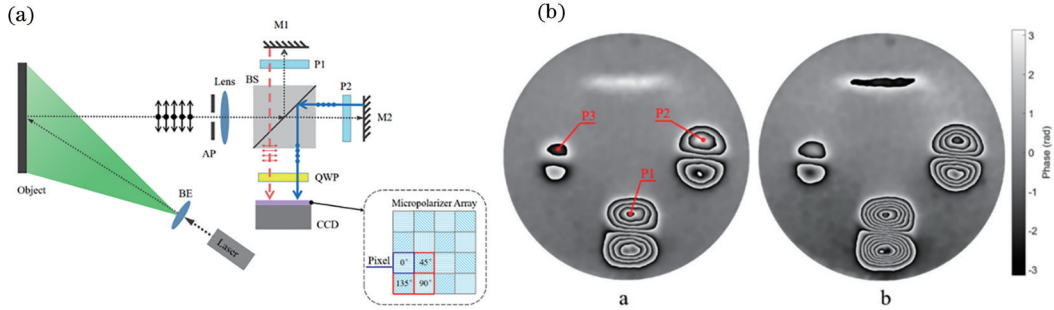


图 3 基于微偏振阵列的空间相移测量^[30]。(a)测量系统示意图;(b)时空低通滤波处理后的相位图

Fig. 3 Spatial phase-shift measurement based on micro-polarization arrays^[30]. (a) Schematic of the measurement system; (b) phase maps after spatiotemporal low-pass filtering

2.2 多方向剪切干涉测量技术

单方向剪切干涉测量系统只能测量一个方向的变形导数,容易造成缺陷漏检。通过调节光学元件改变剪切方向并对不同剪切方向的散斑图像分别进行测量,可以避免缺陷漏检,但是该方法测量效率低下。另外,多次测量难以保证加载量一致,两次测量的实际结果并不完全一致。因此,相关研究者们致力于探寻单次测量获得多个剪切方向测量结果的方法。

2015 年, Bai 等^[31]设计了一种改进的迈克耳孙剪切装置,在调节不同剪切方向的反射平面镜前装选路开关,用于选择不同剪切方向的光路。该系统使用时间相移技术提取相位信息,测量结果质量好,但是需要通过开关选择剪切方向,测量效率较低,操作复杂。2016 年, Richoz 等^[32]使用三束不同波长的激光对悬臂梁进行照明,在传统迈克耳孙剪切装置的基础上增添二向色滤光片,并采用彩色相机对散斑干涉图进行采集,在不同颜色的信道中获取悬臂梁受力后在不同方向上变形的一阶导数。2018 年, Barrera 等^[33]提出了基于光楔的剪切装置,该装置通过三个光楔引入三幅剪切散斑,实现了对铝板表面变形的多方向剪切测量。该多方向剪切装置结构紧凑,三光楔与光阑板、成像透镜的组合减少了光路中可移动光学元件的数量。然而光楔的倾角是固定值,因此测量系统的剪切量难以调整,只能使用唯一的灵敏度进行测量。2020 年, Zhang 等^[34]在传统迈克耳孙系统的基础上增加一个偏振分光棱镜,其中一束物光经偏振分光棱镜后被分成 P 光和 S 光并分别引入不同方向的剪切,与另一束无偏振物光在 CCD 靶面处干涉。该装置获得的散斑干涉图在

傅里叶域中只含有两对频谱,减少不必要的频谱,提高频谱分离的准确率。同年, Vishnyakov 等^[35]提出基于四透镜成像的多方向剪切干涉装置。该装置将一个透镜均匀地分成 4 个扇形透镜且引入相等的间隙,并在扇形透镜后方放置偏振装置,获得两对偏振方向正交的剪切干涉图像。此外, Gao 等^[36]于 2019 年提出了双成像马赫-曾德尔空间载波剪切系统,采用双成像透镜搭配双光阑分别对物体进行成像,频谱分布由两个光阑的相对位置决定,与剪切无关,因此该系统能够独立调节剪切与载波频率,提高了测量效率,如图 4 所示。2020 年, Zhong 等^[37]在此基础上加以改进,设计出多方向剪切散斑干涉系统,如图 5 所示,该系统可测量三个方向的形变导数,实现多个敏感方向的同步测量,从而避免了缺陷的漏检。

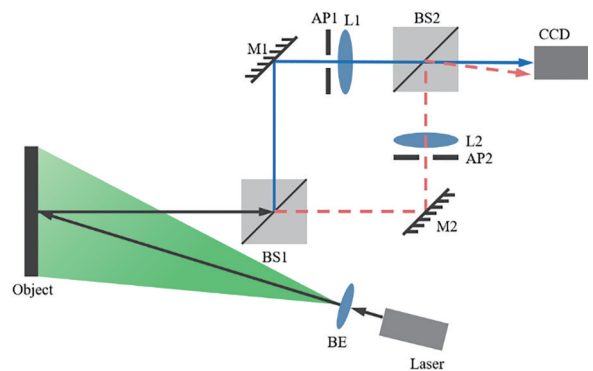


图 4 双成像马赫-曾德尔空间载波剪切系统^[36]

Fig. 4 Double imaging Mach-Zehnder space carrier shearing system^[36]

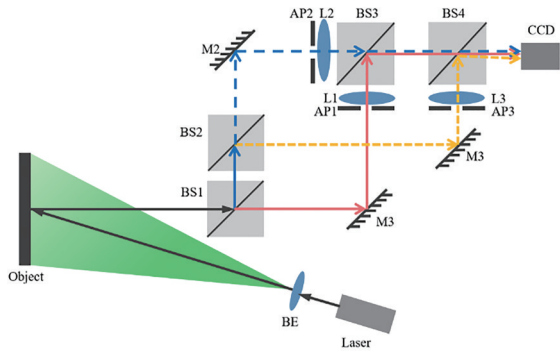


图 5 多方向剪切马赫-曾德尔干涉系统^[37]
Fig. 5 Multi-directional shearing Mach-Zehnder interference system^[37]

2.3 多功能复用测量技术

对物体表面的变形信息和变形一阶导数进行测量能获得缺陷处的应力集中情况,从而实现工业无损检测。数字剪切散斑干涉能测量变形的一阶导数信息,数字散斑干涉能测量变形信息。两者可以通过固有的数学关系进行转换,但是由于测量结果的随机性和计算的误差,转换的精度难以保证。为了提高测量的精确性,需要对两者进行同时测量。2016年, Lu 等^[38]提出基于可调孔径的复用测量系统,详细分析了系统中三个不同的干涉光路的测量原理,采用空间相移技术测量铝板在加载过程中的面外变形及变形的一阶导数,因此测量结果具有实时性。2022年, Zhou 等^[39]设计了一套复用散斑干涉测量系统,测量时通过控制开关的状态,选择剪切散斑干涉测量或数字散斑干涉测量的光路。该测量系统使用四步相移法提取相位,相位图条纹清晰,在剪切量为 50 个像素的条件下能够测量

$3\ \mu\text{m}$ 的面外变形。然而,对于使用开关组选择不同光路进行干涉测量的复用系统,其测量过程需要分开进行,因此不能满足实时性和快速测量的要求。对此, 2013 年 Xie 等^[40]在迈克耳孙干涉仪的基础上设计了一种空间相移数字剪切系统,该系统通过光纤引入的参考光与两个剪切图像干涉,在频谱中形成一对剪切散斑干涉频谱和两对数字散斑干涉频谱,实现对平面外变形及其一阶导数的同步测量。

物体的变形及其一阶导数都有三维不同的分量,针对一维测量无法获得真实变形的情况,2019 年 Zhao 等^[41]经过研究,使用三种不同波长的激光分别从三个不同照明角度照射物体表面,如图 6 所示。彩色 CCD 相机通过红色通道、蓝色通道、绿色通道将采集的散斑图分开,根据三个通道的测量信息,可解算出物体表面三维变形及其一阶导数,实现散斑干涉-剪切散斑干涉的复用测量,测量结果如图 7 所示。该测量系统能够快速获取物体的三维变形信息,在追求实时测量的工

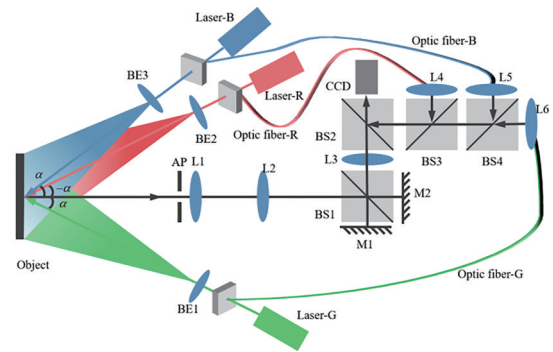


图 6 三维测量原理图^[41]
Fig. 6 Schematic of 3D measurement^[41]

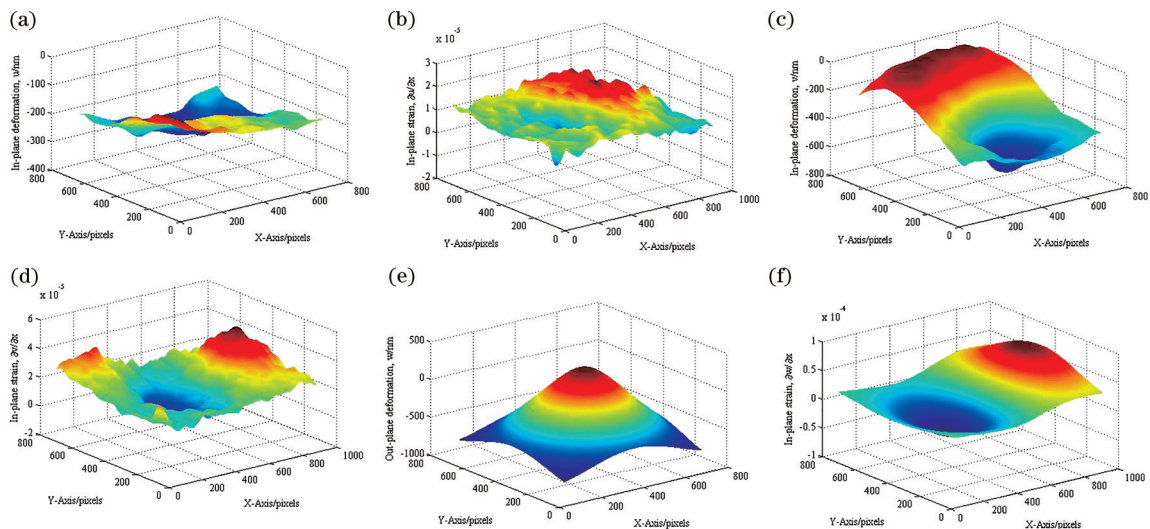


图 7 测量结果图^[41]。(a) 面内水平方向变形 u ; (b) 面内水平方向变形梯度 $\partial u/\partial x$; (c) 面内竖直方向变形 v ; (d) 面内竖直方向变形梯度 $\partial v/\partial x$; (e) 面外变形 w ; (f) 面外变形梯度 $\partial w/\partial x$
Fig. 7 Measurement results^[41]. (a) In-plane horizontal deformation u ; (b) in-plane horizontal deformation gradient $\partial u/\partial x$; (c) in-plane vertical deformation v ; (d) in-plane vertical deformation gradient $\partial v/\partial x$; (e) out-of-plane deformation w ; (f) out-of-plane deformation gradient $\partial w/\partial x$

业精密检测中有广阔的应用前景。然而,由于剪切通过迈克耳孙装置引入,在使用较大的光阑减小散斑尺寸时,需要较大的剪切量,导致测量结果的条纹过于密集,可以使用马赫-曾德尔光路进行改进。此外,2021年 Zhao 等^[42]引入偏振技术,参与剪切干涉的一束物光与参考光的偏振状态相互正交,在傅里叶域中减少一对数字散斑干涉频谱,实现了复用系统的同步一维测量并减少了重复频谱的干扰,如图 8 所示。

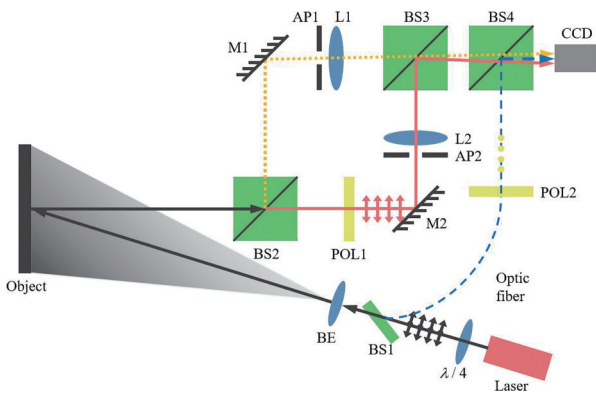


图 8 基于偏振技术的复用测量原理图^[42]

Fig. 8 Schematic of multiplexing measurement based on polarization technology^[42]

2.4 剪切装置的改进

剪切装置是剪切散斑干涉测量系统的核心。传统剪切装置的种类有很多,包括迈克耳孙结构、马赫-曾德尔结构、沃拉斯顿棱镜、衍射光栅、菲涅耳棱镜、平行平板等。这些剪切结构具有调节简单、测量精度高的优点,但是难以定量调节剪切量。随着对剪切散斑干涉技术研究的深入,不少新型剪切装置被提出。空间光调制器(SLM)是对光束进行相位调制的光学仪器,由于具有共光路测量和剪切信息易于调节的优点,近年来被广泛应用在散斑干涉测量中。2009年,Zhai 等^[43]使用空间光调制器实现三光束剪切干涉测量,并通过八步相移法获取相位信息,该光路具有自干涉的优点,有较好的抗干扰能力。2019年,Sun 等^[44]对剪切散斑干涉进行研究,提出了基于空间光调制器的剪切散斑干涉系统,该系统利用空间光调制器对入射光的相位/振幅进行调制,实现空间域中剪切的引入和准确调节,如图 9 所示。该学者对剪切干涉系统进行不断优化,提出与毛玻璃结合的镜面无损检测装置^[45]以及基于空间相移的缺陷检测装置^[46]。2020年,Zhang 等^[47]提出基于空间光调制器的双方向剪切干涉装置,该装置有效检测出 5 mm 厚试件中两个相互垂直的条形缺陷。

液晶偏振光栅(LCPG)基于几何相位引入连续渐变倾斜相位分布,并实现光束偏转。物光经液晶偏振光栅,由于衍射作用,出射的+1阶光和-1阶光间存在夹角,从而引入剪切。2022年,Jeong 等^[48]对基于偏振光栅的剪切散斑干涉系统进行了研究,将凹面镜和

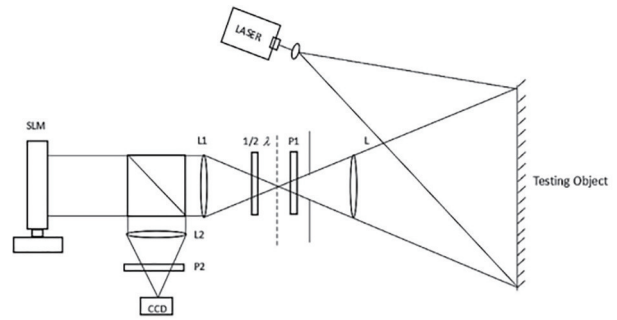


图 9 基于空间光调制器的剪切散斑干涉系统^[44]

Fig. 9 Shearography system based on spatial light modulator^[44]

非球面透镜放置在目标位置中,使用偏振光栅引入剪切,并对偏振相机获取的 4 幅偏振态图片进行相移计算,重建光学元件的形貌,系统精度可达 100 nm。同年,Yan 等^[49]提出基于液晶偏振光栅的剪切干涉装置,如图 10 所示。经过液晶偏振光栅的线偏振光被分为左旋偏振光和右旋偏振光,经过偏振相机的微偏振阵列后光束在相机靶面相互干涉,形成剪切散斑图。该装置的剪切量由液晶偏振光栅与偏振相机靶面的距离决定,因此沿着光轴方向移动偏振光栅可以实现剪切量调节。

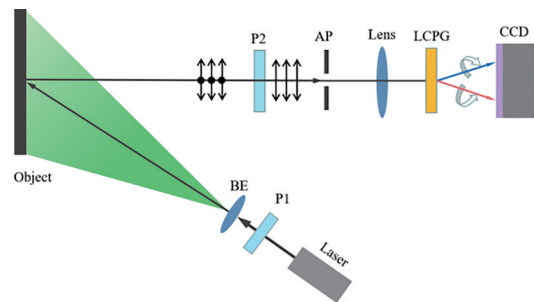


图 10 基于液晶偏振光栅的剪切干涉系统^[49]

Fig. 10 Shearography system based on liquid crystal polarization grating^[49]

3 研究应用进展

3.1 剪切散斑干涉在航空领域的应用

剪切散斑干涉技术获取的是变形的一阶导数,在无损伤检测中得到广泛应用。复合材料是航空领域中的重要零部件材料,其主要失效形式包括脱粘、断裂、分层等。在气压加载和热加载的情况下,剪切散斑干涉技术能够有效识别这些失效形式,如航空元器件在生产装配中产生的缺陷、发动机叶片疲劳裂纹、机身和机翼使用损伤,因此该技术在航空领域应用较多。2000年,Findeis 等^[50]用 150 W 功率的红外线灯对一套云雀直升机的转子叶片进行 5 s 的热加载,除了检测出已知缺陷的位置外还发现了一个潜在的缺陷。2006年,Gryzgoridis 等^[51]同时使用剪切散斑干涉技术和热成像技术对缺陷的位置信息进行测量,准确检测出“羚

羊”武装直升机的主旋翼叶片和无人飞机的机翼的缺陷。2017年,曹俊彬等^[52]使用Canny算子检测出飞机零部件缺陷条纹的边缘,经过椭圆拟合算法计算出缺陷的位置、大小及周长,并将其转换成真实的损伤尺寸,方便进行损伤评估及给出后续的维修方案。

3.2 剪切散斑干涉在流体测量的应用

由于光学干涉方法能够在大范围进行无接触测量并提供定性和定量的数据分析,因此是研究流体特性(温度、流速、浓度等)的有力工具。折射率是表征物质光学性质的主要物理参数,测量流体的性质主要是通过折射率的办法实现的^[53]。2014年,Kumar等^[54]研究了丁烷的燃烧过程,分析了在磁场中预混火焰、部分预混火焰和扩散火焰的散斑干涉条纹,定量分析磁场对火焰燃烧温度分布的影响。2015年,He团队^[55]使用多项式拟合目标光束的连续相位差,从而实现了对浓度为0.33 mol/L的氯化钾溶液在25℃下的扩散系数测定。2021年,Hassani等^[56]将待测流体放置于入射激光的扩束光后方,流体密度的变化引入额外的相位,并对蜡烛火焰温度变化、细热线周围空气密度变化、糖溶液和水的混合物浓度变化进行了测量。在测量光路中,流体被测物需要尽量覆盖一束剪切散斑的物光,或者放置在激光扩束器前,使得干涉测量的相位条纹间距较大,便于定量分析。

3.3 剪切散斑干涉在汽车领域的应用

汽车轮胎中由于气泡的存在,长期使用容易发生脱层或者爆破,因此需要对气泡缺陷进行检测。在橡胶行业中,剪切散斑干涉测量作为高精密的无损检测手段被用于检测轮胎内部或表面缺陷。2004年,Kim等^[57]提出了一种对轮胎缺陷的无损评价方法,该方法能准确检测出由于加工失误在胎面留下的气泡缺陷以及使用里程超过20000 km而产生的胎面脱粘缺陷。在算法上,一方面为了满足工业生产中流水线生产的要求,需要降低图像的处理速度并提高单次识别缺陷的数目。另一方面,为了准确获取测量结果中的条纹位置,需要改进缺陷特征识别算法;为了获取准确的条纹级数,需要改进滤波算法,增强条纹的对比度。钟浩

等^[58]在2016年根据条纹密度将相位图划分成不同滤波区域,进行多方向频域滤波。南瑞亭等^[59]在2017年设计的自动化轮胎缺陷识别检测方法提高了轮胎缺陷检测的效率和准确性。Chang团队^[60]提出的卷积神经网络模型可以准确判断出轮胎踏面和轮胎侧面散斑干涉图中的气泡缺陷,并将误警率降低到18%。2019年,王永红团队^[61]提出基于二阶梯度熵函数的条纹区域判定函数,该函数有效地剔除背景区域,实现对干涉条纹的自动提取;2020年,该团队^[62]提出基于Freeman链码的缺陷自动识别方法,该方法能够在复杂背景下快速识别出条纹不连续以及左右不对称的缺陷,一次能够识别30个缺陷,满足工业快速测量的要求。

3.4 剪切散斑干涉在其他领域的应用

除了上述领域,剪切散斑干涉技术还被应用于对其他特殊测量对象的无损检测。在医学探测方面,2018年Buchta等^[63]制造了一套硅胶样品来模拟病患处的人体组织,并使用剪切散斑干涉技术测量气压加载下硅胶试件表面的变化。在工业元件检测方面,在剪切量为1.2 mm和气压载荷为400 Pa的情况下,该技术准确判断出两个不同位置和深度的异常点。2018年,Macedo等^[64]使用锥面镜设计了一套具有径向灵敏度的新型内窥式剪切干涉系统,详细分析了测量盲区产生的原因并提出了解决方法,实现对法兰管内部缺陷的测量。2019年,Yan等^[65]将剪切散斑干涉技术应用在对镜面物体的测量,该技术无需对镜面试件进行处理就可测量出其变形和内部缺陷,如图11所示。在材料缺陷检测方面,2019年,Liu等^[66]对直径为30 mm的有机硅聚合物绝缘体进行检测,获得内部不同尺寸和深度缺陷所引起的面外位移导数。2020年,Felipe等^[67]对覆盖有复合材料的金属板进行振动加载,结合有限元分析和剪切散斑干涉技术测量其内部的孔状缺陷。2020年,de Oliveira等^[68]提出了结合热成像技术和剪切散斑干涉技术的新方法,对经过不同能量撞击后的碳纤维板进行损伤检测,使用二元融合算法对两种技术的测量结果进行分析,可以准确识别试件中6 mm左右的缺陷。

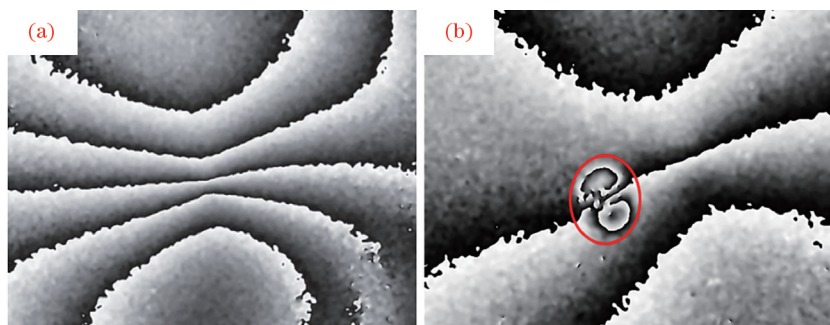


图 11 镜面测量结果图^[65]。(a)面外变形测量结果;(b)内部缺陷测量结果

Fig. 11 Measurement results for mirror^[65]. (a) Measurement result for out-of-plane deformation; (b) detection result for internal defect

4 总 结

剪切散斑干涉测量具有全场测量、测量速度快、效率高、灵敏度高的特点。剪切散斑干涉系统采用自参考光路,其测量结果是位移的一阶导数,因此对物体的刚体运动不敏感,具有较强的抗干扰能力。目前剪切散斑干涉测量技术在空间相移剪切干涉测量、多方向剪切散斑干涉测量、多功能复用测量和剪切装置的改进等的研究上取得了较大的进展,但是仍存在一些问題,需要进一步研究。1) 剪切散斑干涉技术通过测量映射在被测物表面的变形梯度判断缺陷位置,因此远离被测物表面的缺陷将难以被检测出来。同时,测量结果受被测物材料的影响,对于高强度的材料,例如厚的铝合金和铁块,其缺陷则难以被检测出。2) 剪切散斑干涉测量对环境噪声敏感,杂光和热扰动都对测量结果产生影响。因此需要稳定的测量条件,这将影响该技术的使用范围。

随着近年来剪切散斑干涉测量新技术的不断进展,剪切散斑干涉测量的应用范围进一步扩大。随着激光技术的成熟和算法的不断进步,剪切散斑干涉测量的灵敏度和缺陷识别能力将不断提高,为对不同材料中更小、更深缺陷的无损检测提供了新的测量手段。此外,随着人工智能、神经网络和深度学习等技术的出现,与这些新技术相结合,剪切散斑干涉技术将会有更加广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Krishna Murthy R, Sirohi R S, Kothiyal M P. Detection of defects in plates and diaphragms using a split-lens speckle-shearing interferometer[J]. *NDT International*, 1982, 15(6): 329-333.
- [2] Takezaki J, Hung Y Y. Direct measurement of flexural strains in plates by shearography[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1986, 53(1): 125-129.
- [3] Xie L, Chau F S, Toh S L. Nondestructive testing and evaluation using phase-shifting electronic shearography[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2921: 597-602.
- [4] Lu G W, Bard B A, Wu S D. Real-time portable phase-stepping shearography system for NDE[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3397: 156-167.
- [5] Shang H M, Tham L M, Chau F S. Shearographic and holographic assessment of defective laminates with bond-lines of different elasticities[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1995, 117(3): 322-329.
- [6] Rastogi P K. An electronic pattern speckle shearing interferometer for the measurement of surface slope variations of three-dimensional objects[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, 26(2/3): 93-100.
- [7] Hung Y Y, Ho H P. Shearography: an optical measurement technique and applications[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005, 49(3): 61-87.
- [8] Steinchen W, Yang L X, Kupfer G, et al. Nondestructive testing of microcracks using digital speckle pattern shearing interferometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3098: 528-535.
- [9] Hung Y Y. Shearography and applications in experimental mechanics[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2921: 2-28.
- [10] Liu H J, Liu M L, Zhang L, et al. Directed acoustic shearography for crack detection around fastener holes in aluminum plates[J]. *NDT & E International*, 2018, 100: 124-131.
- [11] 马银行, 蒋汉阳, 戴美玲, 等. 基于电子散斑干涉与数字剪切散斑干涉法的悬臂薄板振动分析[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0403001.
Ma Y H, Jiang H Y, Dai M L, et al. Cantilevered plate vibration analysis based on electronic speckle pattern interferometry and digital shearing speckle pattern interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0403001.
- [12] 孙方圆, 吴双乐, 谢昊天, 等. 大视场马赫-曾德尔空间相移双成像系统[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0704001.
Sun F Y, Wu S L, Xie H T, et al. Mach-Zehnder-based spatial-phase-shift double-imaging system with large field of view[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0704001.
- [13] 王永红, 谢昊天, 孙方圆, 等. 基于 LC-SLM 的空间载波相移剪切散斑干涉[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1512001.
Wang Y H, Xie H T, Sun F Y, et al. Spatial carrier phase-shift shearography based on LC-SLM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1512001.
- [14] 刘艳, 丁万山. 光学剪切电子散斑技术的改进与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(6): 47-51.
Liu Y, Ding W S. Improvement and application of optical shearography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(6): 47-51.
- [15] Hung Y Y, Taylor C E. Measurement of slopes of structural deflections by speckle-shearing interferometry[J]. *Experimental Mechanics*, 1974, 14(7): 281-285.
- [16] Nakadate S, Yatagai T, Saito H. Digital speckle-pattern shearing interferometry[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(24): 4241-4246.
- [17] Winther S. 3D strain measurements using ESPI[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1988, 8(1): 45-57.
- [18] Ganesan A R, Sharma D K, Kothiyal M P. Universal digital speckle shearing interferometer[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(22): 4731-4734.
- [19] Santhanakrishnan T, Palanisamy P K, Sirohi R S. Optical configuration in speckle shear interferometry for slope change contouring with a twofold increase in sensitivity[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(16): 3447-3449.
- [20] Habib K. Thermally induced deformations measured by shearography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5532: 44-49.
- [21] Krzemień L, Łukomski M, Kijowska A, et al. 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.
- [22] Xu N, Xie X, Chen X, et al. Shearography for specular object inspection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 61: 14-18.
- [23] Xie X, Yang L X, Xu N, et al. Michelson interferometer based spatial phase shift shearography[J]. Applied Optics, 2013, 52(17): 4063-4071.
- [24] 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.
- [25] Zhu M, Zhang H, Li X Y, et al. Single-aperture spatial phase-shifting technique for speckle shearography based on modified Michelson interferometer[J]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 094103.
- [26] 王永红, 冯家亚, 王鑫, 等. 基于狭缝光阑的剪切散斑干涉动态测量[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 645-651. Wang Y H, Feng J Y, Wang X, et al. Shearing speckle interferometry based on slit aperture for dynamic measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 645-651.
- [27] 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.
- [28] Yan P Z, Sun F Y, Dan X Z, et al. Spatial phase-shift digital shearography for simultaneous measurements in three shearing directions based on adjustable aperture multiplexing[J]. Optical Engineering, 2019, 58(5): 054105.
- [29] Aranchuk V, Lal A K, Hess C F, et al. Pulsed spatial phase-shifting digital shearography based on a micropolarizer camera[J]. Optical Engineering, 2018, 57(2): 024109.
- [30] Yan P Z, Liu X W, Wu S L, et al. Pixelated carrier phase-shifting shearography using spatiotemporal low-pass filtering algorithm[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5185.
- [31] Bai P X, Zhu F P, He X Y. Out-of-plane displacement field measurement by shearography[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 73: 29-38.
- [32] Richoz 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.
- [33] Barrera E S, Fantin A V, Willemann D P, et al. Multiple-aperture one-shot shearography for simultaneous measurements in three shearing directions[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 111: 86-92.
- [34] Zhang B, Xu W, Li J, et al. Modified Michelson interferometer based dual shearing single camera digital shearography[J]. Experimental Techniques, 2020, 44(2): 187-195.
- [35] Vishnyakov G N, Minaev V L, Ivanov A D, et al. Image-shearing speckle pattern interferometer with quadrolens[J]. Optics and Spectroscopy, 2020, 128(10): 1701-1705.
- [36] 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.
- [37] Zhong S M, Sun F Y, Wu S L, et al. Multi-directional shearography based on multiplexed Mach-Zehnder interference system[J]. Journal of Modern Optics, 2020, 67(4): 346-354.
- [38] Lu M, Wang S J, 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.
- [39] Zhou X, Jia S H, Yu H Q, et al. Simulation of dual-function speckle interferometry for the measurement of out-of-plane displacement and slope[J]. Journal of Modern Optics, 2022, 69(3): 140-149.
- [40] Xie X, Xu N, Sun J F, et al. Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography[J]. Optics Communications, 2013, 286: 277-281.
- [41] 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.
- [42] Zhao Q H, Zhang X, Wu S L, et al. A new multiplexed system for the simultaneous measurement of out-of-plane deformation and its first derivative[J]. Optics Communications, 2021, 482: 126602.
- [43] Zhai S H, Ding J P, Chen J, et al. Three-wave shearing interferometer based on spatial light modulator[J]. Optics Express, 2009, 17(2): 970-977.
- [44] Sun F Y, Wang Y H, Yan P Z, et al. The application of SLM in shearography detecting system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 114: 90-94.
- [45] Sun F Y, Zhong S M, Dan X Z, et al. Nondestructive detecting for internal defects of specular surface materials[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 31(1): 015202.
- [46] Sun F Y, Dan X Z, Yan P Z, et al. A spatial-phase-shift-based defect detection shearography system with independent adjustment of shear amount and spatial carrier frequency[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 124: 105956.
- [47] Zhang B Y, Sun F Y, Yang L, et al. Spatial-light-modulator-based dual shearing direction shearography[J]. Applied Optics, 2020, 59(35): 11080-11086.
- [48] Jeong H B, Park H M, Ghim Y S, et al. Flexible lateral shearing interferometry based on polarization gratings for surface figure metrology[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 154: 107020.
- [49] Yan P Z, Liu X W, Dong J T, et al. Robust dynamic phase-shifting common-path shearography using LCPG and pixelated micropolarizer array[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 153: 106997.
- [50] Findeis D M, Gryzagoridis J. Feasibility of optical interference-based NDE methods to inspect helicopter rotor blades[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3994: 59-67.
- [51] Gryzagoridis J, Findeis D. Simultaneous shearographic and thermographic NDT of aerospace materials[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2006, 48(5): 294-297.
- [52] 曹俊彬, 郑立胜. 基于激光散斑的某型飞机复合材料损

- 伤检测评估系统[J]. 科技通报, 2017, 33(11): 67-72.
- Cao J B, Zheng L S. Detection and evaluation system for damages of the certain aircraft's composite material using laser speckle[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(11): 67-72.
- [53] 罗劲明, 古家玮, 李俊豪, 等. 激光散斑干涉测量液体折射率的误差分析与改进[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0512001.
- Luo J M, Gu J W, Li J H, et al. Error analysis and improvement of liquid refractive index measurement using laser speckle interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0512001.
- [54] Kumar M, Agarwal S, Kumar V, et al. Study the effect of magnetic field on gaseous flames using digital speckle pattern interferometry[J]. AIP Conference Proceedings, 2014, 1620(1): 273-281.
- [55] He M G, Zhang S, Zhang Y, et al. Development of measuring diffusion coefficients by digital holographic interferometry in transparent liquid mixtures[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 10884-10899.
- [56] Hassani K, Shiva S M. Applications of digital speckle pattern shearing interferometry in characterization of fluids [J]. Applied Optics, 2021, 60(36): 11027-11033.
- [57] Kim K, Kang K S, Jung H C, et al. Non-Destructive evaluation of separation and void defect of a pneumatic tire by speckle shearing interferometry[J]. KSME International Journal, 2004, 18(9): 1493-1499.
- [58] 钟浩, 刘桂雄, 陈冬雪, 等. 轮胎激光散斑干涉相位条纹图局部多方向频域滤波方法[J]. 中国测试, 2016, 42(6): 100-103.
- Zhong H, Liu G X, Chen D X, et al. Local multidirectional frequency domain filtering for tire phase fringe patterns of laser speckle pattern interferometry[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(6): 100-103.
- [59] 南瑞亭, 陈冬雪. 轮胎剪切散斑干涉包裹相位图缺陷识别方法[J]. 中国测试, 2017, 43(4): 114-117.
- Nan R T, Chen D X. Defect recognition method in wrapped phase patterns of speckle shearing interferometry for tire[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(4): 114-117.
- [60] Chang C Y, Srinivasan K, Wang W C, et al. Quality assessment of tire shearography images via ensemble hybrid faster region-based ConvNets[J]. Electronics, 2019, 9(1): 45.
- [61] 吴双乐, 胡慧然, 钟诗民, 等. 散斑干涉条纹区域的自动提取[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1212004.
- Wu S L, Hu H R, Zhong S M, et al. Automatic extraction of speckle interference fringe regions[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1212004.
- [62] Zhang X, Wang Y H, Zhao Q H, et al. Fast automatic multi-defects recognition based on the spatial characteristics of Freeman chain code[J]. Optical Engineering, 2020, 59(12): 124103.
- [63] Buchta D, Serbes H, Claus D, et al. Soft tissue elastography via shearing interferometry[J]. Journal of Medical Imaging, 2018, 5(4): 046001.
- [64] Macedo F J, Benedet M E, Fantin A V, et al. Inspection of defects of composite materials in inner cylindrical surfaces using endoscopic shearography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 104: 100-108.
- [65] Yan P Z, Wang Y H, Sun F Y, et al. Shearography for non-destructive testing of specular reflecting objects using scattered light illumination[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 112: 452-457.
- [66] Liu L S, Guo C J, Wang L M, et al. Nondestructive visualization and quantitative characterization of defects in silicone polymer insulators based on laser shearography [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(15): 6508-6516.
- [67] Felipe D S, Benedet M, Fantin A V, et al. Procedure for detecting the shape and size of defects on metallic substrates under composite repairs using shearography[J]. Applied Optics, 2020, 59(27): 8089-8097.
- [68] de Oliveira B C F, Nienheysen P, Baldo C R, et al. Improved impact damage characterisation in CFRP samples using the fusion of optical lock-in thermography and optical square-pulse shearography images[J]. NDT & E International, 2020, 111: 102215.