

# 剪切散斑干涉技术及应用研究进展

王永红<sup>1\*</sup>, 吕有斌<sup>1</sup>, 高新亚<sup>1</sup>, 但西佐<sup>1</sup>, 杨连祥<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 仪器与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 美国奥克兰大学 机械工程系, 罗切斯特 48309)

**摘要:** 剪切散斑干涉技术是一种非接触测量物体变形缺陷的光学无损测量方法, 其通过计算物体变形前后的散斑图中的相位获取被测物的应变缺陷信息。近年来该技术在航空、航天等工业无损检测领域得到了广泛的应用。本文从系统关键技术、散斑图像处理技术两方面介绍了剪切散斑干涉技术的研究进展, 详细论述了多种剪切装置实现大视角测量、空间载波实现动态测量、多种图像处理算法的一系列剪切散斑干涉技术; 最后介绍了剪切散斑干涉技术的国内外应用进展, 展望了剪切散斑干涉技术在动态测量、光滑表面测量及定量反算形变量等方面的发展趋势。

**关键词:** 剪切散斑干涉; 大视角; 动态测量; 图像处理

**中图分类号:** O436.1; TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20171003.0300

## Research progress in shearography and its applications

WANG Yong-hong<sup>1\*</sup>, LYU You-bin<sup>1</sup>, GAO Xin-ya<sup>1</sup>, DAN Xi-zuo<sup>1</sup>, YANG Lian-xiang<sup>1,2</sup>

(1. *School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering,*  
*Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*

2. *Department of Mechanical Engineering, Oakland University, Rochester 48309, USA)*

*\* Corresponding author, E-mail: wyh@126.com*

**Abstract:** Shearography is an optical non-destructive measurement method for defects detection without contacting objects. Using this method we can obtain the information of defects by calculating phases of speckle pattern of the object before and after deformations. This technology has been widely used in aerospace and other industrial non-destructive measurement fields. In this paper, we introduce the progress of shearography from two aspects: its key technologies which include various shearing device for achieving a large viewing angle and spatial carrier technology for dynamic measurement, and speckle image processing technology which includes a variety of image processing algorithms. Finally, we describe the domestic and international application of shearography and prospect the development direction on the application of shearography to the dynamic meas-

**收稿日期:** 2017-01-11; **修订日期:** 2017-02-27

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFF0101803); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51375136); 中航工业产学研专项资助项目 (No. CXY2013HFGD22)

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2016YFF0101803); National Natural Science Foundation of China (No. 51375136); Special Project of Industry-University-Research of AVIC (No. CXY2013HFGD22)

urement, measurement of smooth surfaces and back-calculation of deformation derivatives for the amount of deformation quantitatively calculated.

**Key words:** shearography; large viewing angle; dynamic measurement; image processing

## 1 引言

剪切散斑干涉技术是运用光学、计算机、数字图像处理等现代技术发展起来的全场无损检测技术,其通过测量物体变形前后的相位信息来获取被测物的变形、应变和缺陷信息。20世纪70年代,人们在电子散斑干涉(ESPI)的基础上提出剪切散斑干涉技术(shearography)<sup>[1-2]</sup>,它的优点是2束物光互相干,不需额外引入参考光,从而简化了光路,其所用的激光器相干长度较小,降低了对测量环境的隔振要求。经过不断的研究发展,该技术在航空、航天、材料和机械等领域得到广泛应用,可对航天飞行器和飞机机身、机翼控制面、游艇壳体、风力发电叶片及雷达罩等复合材料构件的分层、脱粘、假粘、皱折、裂纹、撞击损伤等缺陷进行无损检测<sup>[3]</sup>。Shearography技术还可应用于残余应力表征、振动分析、应变测量、材料特性检测等。剪切散斑干涉的测量过程是通过CCD记录物体变形前后的散斑图,并对散斑图进行相位相减、滤波、解包裹<sup>[4-5]</sup>等一系列图像处理获得被测物的变形和应变信息。

近年来,国内外研究人员围绕shearography做了大量研究。针对测量视场角较小的问题,提出了在原有的剪切散斑光路中植入4f系统,从而实现了测量视场角的增大<sup>[5]</sup>。针对原先系统只能实现静态或准静态物体的问题,提出了空间相移技术,实现动态测量<sup>[6]</sup>。随着新的光路结构和系统关键参数的研究,shearography测量速度更快,更精确,应用更广泛。本文将从剪切散斑干涉关键技术、散斑干涉条纹处理及国内外剪切散斑干涉技术应用等方面对该技术进行详细介绍。

## 2 剪切散斑干涉关键技术研究进展

剪切散斑干涉技术进行了研究,他们使用不同的剪切装置得到了散斑图。20世纪80年代,剪切散斑技术名词出现<sup>[7]</sup>,并得到学术界的认可。传统的剪切装置类型有迈克尔逊型、马赫曾德型、反射性光楔型、菲涅尔棱镜型、渥拉斯顿型等。剪切散斑干涉技术将被测物上两个相邻物点的散射光通过剪切装置相互干涉,并在CCD上成像于一点,从而形成散斑。目前剪切散斑干涉关键技术有以下几方面研究热点:传统的剪切散斑干涉系统视场角较小限制其发展应用,而实际应用中大视场测量成为急需解决的问题;此外,在工业应用中需满足实时动态测量要求,使得近年来动态测量成为研究热点。下面针对这两方面关键技术介绍研究进展。

### 2.1 基于大视场的剪切散斑干涉系统

传统的剪切散斑干涉系统测量视场角受到光学器件尺寸影响。如常规的迈克尔逊型和马赫曾德型剪切散斑干涉系统的测量角受到分光棱镜尺寸限制,使其视场角不超过 $28^\circ$ ,限制了单次测量范围。国内外研究人员针对其视场较小问题,设计出各种大视场剪切散斑干涉系统,如在剪切散斑光路中采用4f系统。4f光学图像传递原理如图1所示,当物体(像)位于透镜1输入平面时,所成的像位于透镜1、透镜2的共焦平面上,最后

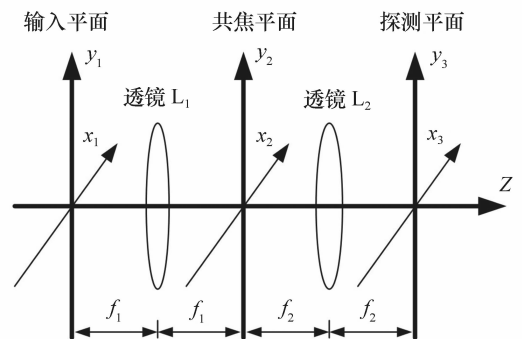


图1 4f光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 4f optical system

20世纪70年代初,Leendertz和Hung分别对

成像于透镜 2 的探测平面。将成像镜头的像平面和透镜输入平面重合,将 CCD 置于探测平面上即可成像,成像放大倍率  $M = -f_2/f_1$ 。

传统的马赫曾德型剪切装置视场角受到第一块分光棱镜尺寸限制,如图 2 所示。2012 年,Changqing Cai 提出基于 4f 的马赫曾德剪切散斑干涉系统,如图 3 所示,成像镜头 1 的焦点和透镜 7 焦点重合,透镜 7 和透镜 8 关于平面镜 6 的镜像的焦点重合。一光束通过成像透镜、透镜 7 后成为平行光经过分光棱镜 3 分成两束光,两束光分别经过平面镜 5、6 反射,通过倾斜其中的一个平面镜,产生剪切量,最终在 CCD 形成了两点。该系统的视场角只取决于成像透镜的焦距和 CCD 靶面尺寸<sup>[8]</sup>,与分光棱镜尺寸无关,从而可以通过更换不同的成像镜头和 CCD 来满足不同的测量需求。

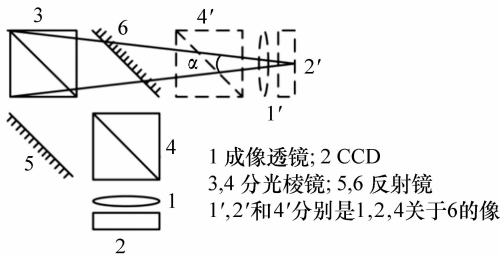


图 2 传统的马赫曾德干涉示意图

Fig. 2 Schematic diagram of traditional Mach-Zehnder interferometer

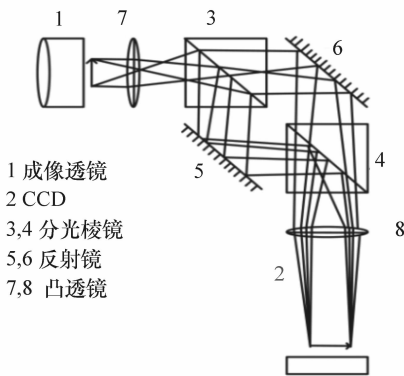


图 3 基于 4f 系统的马赫曾德干涉示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Mach-Zehnder interferometer with 4f system

2014 年,朱猛设计出大视场双缝载频散斑干涉检测系统<sup>[9]</sup>,如图 4 所示。该成像系统由广角成像透镜和 4f 成像系统组成,通过更换成像透镜实现不同视场的切换。该系统中使透镜 2 关于反射镜的镜像的焦点和透镜 1 焦点重合,从而实现 4f 系统,双缝可以实现杨氏干涉,剪切量通过光楔调节。该系统可以实现大视场动态测量,通过转折的方式使光路长度缩小,系统更加紧凑。要实现广角成像,除了上述 4f 系统外,反远距成像光路也是常用方法。2014 年,朱猛等人提出将反远距成像光路加入到剪切散斑系统中以满足大视场要求<sup>[10]</sup>,即在一组负透镜组和标准成像透镜之间加入迈克尔逊剪切装置。根据视场要求,可以增减负透镜个数。

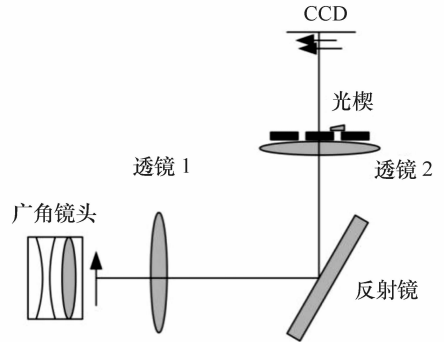


图 4 大视场双孔载频光路

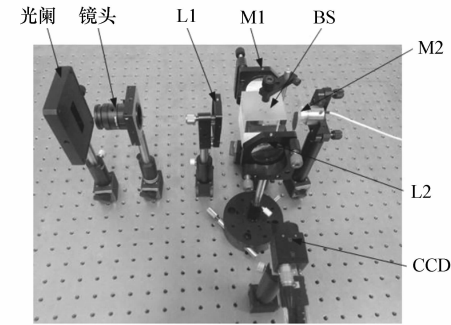
Fig. 4 Optical arrangement of double-slit carrier frequency optical system with large viewing field

王永红、吴思进等人研究了基于 4f 光路的迈克尔逊剪切散斑技术<sup>[5]</sup>,研制了基于 4f 的迈克尔逊剪切散斑干涉系统<sup>[11]</sup>。与传统剪切散斑系统相比,新系统的视场角不再受到分光棱镜尺寸影响,只取决镜头焦距和 CCD 靶面尺寸。且镜头外置,通过更换不同的镜头满足不同的测量要求。图 5(a)为研制的新型大视场剪切散斑干涉系统原理,图 5(b)为在同等测试距离下,大视场迈克尔逊剪切散斑干涉系统和传统系统测量得到的相位条纹结果,可见新系统的视场范围明显增大。

## 2.2 基于空间载波的实时动态测量技术

随着剪切散斑干涉技术的不断发展,对实时动态无损测量的需求越来越多。空间域相位提取





(a) 空间载波相移系统

(a) Spatial carrier phase-shifting shearographic system

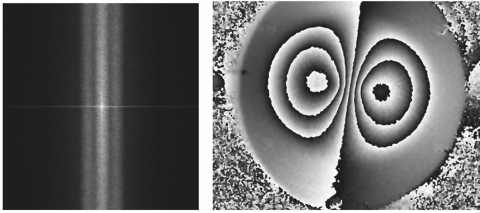
(b) 频谱图  
(b) Spectrum(c) 相位图  
(c) Phase map

图 8 空间载波相移系统、频谱图和相位图

Fig. 8 Spatial carrier phase-shifting shearography system, spectrum and filtered phase map

光阑获得的散斑干涉图的傅立叶频谱,图 8(c)为利用空间载波相移技术解算获得的滤波相位图。

### 2.3 剪切散斑干涉系统参数研究

剪切散斑干涉系统的参数对无损测量也有较大的影响,近年来也得到研究人员的重视。2012年,林翠翠研究了剪切量对测量精度、条纹对比度的影响<sup>[20]</sup>:剪切量越小,测量精度越高,散斑场的相关性越强。2012年,林超研究了剪切量对降噪的影响<sup>[21]</sup>,验证了剪切量的选择会影响理想光场相位和含有噪声的光场相位之间的线性关系,得出噪声较小时,使用较小的剪切量进行降噪处理,反之使用较大的剪切量进行降噪处理的结论。2012年,贾大功介绍了测量剪切量的四种方法<sup>[22]</sup>:公式法、成像法、莫尔条纹法和相关法,并给出了每种方法最适用的场合。2014年,丁效红对散斑条纹图进行二值化及条纹细化得到条纹骨架线,对骨架线沿剪切方向进行相位拟合,再引入高斯插值,可以定量计算出离面位移大小<sup>[23]</sup>。为了使 shearography 能适应物体大变形测量,2015年,郭媛利用双波长的剪切散斑技术对复合材料进行测量<sup>[24]</sup>,得到的双波长相位条纹数是单波长

的 0.189 倍,该方法适用于大变形缺陷的测量,避免了条纹过密或者欠采样给相位提取和解包裹带来的困难。

## 3 散斑干涉条纹处理算法研究

散斑干涉技术测量原理是对物体变形前后记录的干涉条纹进行处理,从散斑干涉场中提取出与被测物理量相关的相位信息。在散斑干涉测量中,对干涉条纹进行处理可以分为以下几个阶段:(1)相位提取;(2)图像去噪处理;(3)相位解包裹。下面分别对几方面进行介绍。

### 3.1 相位提取算法研究

上世纪 80 年代,相移技术逐渐用到 shearography 的相位提取中,使静态物体的测量精度得到极大提高。常用的相移法有时间相移法(TPM)、空间相移法(SPM)和 Fourier 变换法(FTM)等<sup>[25]</sup>。TPM 是目前应用广泛的相位提取技术,其中 4+4 算法应用最为广泛。一些学者也提出了三步相移算法<sup>[26]</sup>和五步相移算法<sup>[27]</sup>。对动态运动物体的测量,时间域上提出了 4+1 算法,空间域上提出了空间载波相移技术,该技术利用傅里叶变换在空间频谱中提取相位。近年来,国内外相继提出一些新的相位提取算法。2011年,Yuanhao Huang 提出聚类相位分析方法提取相位<sup>[28]</sup>,并基于傅里叶变换的相位滤波进行条纹频率分析和自适应滤波。2011年,Li Kai 提出用最小二乘法计算连续两幅散斑图相位差的算法<sup>[29]</sup>,将前一幅图作为参考图,不断刷新测量中的参考图,实现动态测量,并使用窗口傅里叶滤波对参考图滤波,解决了散斑去相关问题和避免了不断刷新参考图过程中积累的误差。2015年,郭媛提出单幅条纹图提取真实相位算法<sup>[30]</sup>。该算法不需要相移解包裹,直接将条纹图进行希尔伯特变换得到泊松方程,然后利用加权离散余弦变换(WDCL)求解泊松方程,得到的解即真实相位。

### 3.2 滤波算法研究

为了获得真实的相位分布,需要对干涉图进行相位解包裹计算。但是生成的包裹相位图含有大量的噪声,严重影响了相位解包裹的结果和精度,甚至会因噪声过大而造成相位解包裹的失败。

因此滤波成为散斑条纹图处理的重要部分。近年来,国内外许多学者做了大量的研究工作,提出了中值滤波、均值滤波、傅里叶变换滤波等各种算法。传统的滤波方法,在滤掉散斑噪声的同时,也会滤掉、模糊许多有用的信息。H. A. Aebischer等人提出了正余弦滤波方法,保留了图像中的“尖峰”信息;秦玉文等人提出一种基于回归算法的条纹滤波技术;于起峰等人提出的一种带门限的旋滤波方法;王开福等人提出的一种基于同态滤波原理的条纹滤波方法,对相位图去噪的同时可以增强图像的对比如;顾国庆采用了同态滤波方法对条纹图进行滤波<sup>[31]</sup>,该方法是一种将灰度变换和频域滤波相结合的图像处理方法,通过利用同态滤波原理设计的滤波器将有用信息拓展,将无用信息滤除,既滤除了噪声,也提高条纹对比度。王永红等人采用了将正余弦分解和频域低通滤波相结合的滤波方法<sup>[32]</sup>,该方法将相位图先进行正余弦变换得到两幅图,分别对着两幅图进行频域低通滤波,再将这两幅图进行合成。该方法在有效保留了跳变信息的基础上,也保证了良好的滤波效果。

### 3.3 解包裹算法研究

经过滤波后得到的是包裹相位图,相位在 $[-\pi \sim \pi]$ 之间,并不能反映真实相位信息,因此解包裹必不可缺。从20世纪70年代初开始,人们就开始研究一维的相位解包裹算法,通常采用积分的方法,计算相邻点的主值差的积分。随着数字图像处理的发展,相位解包裹算法需要应用到二维图像中,因此二维的相位解包裹技术得到了快速的发展。最早的二维相位解包裹算法是由Takeda提出的,他通过行列逐点算法,实现了对原始相位图的解包裹处理。但这种方法常常会受到噪声误差和条纹间断区的影响,出现解调错误。近年来研究人员提出了一些新的解包裹算法。2012年,何光宏提出了根据可靠度引导实现解包<sup>[33]</sup>,各像素相邻点的邻接线可靠度的高低决定了解包裹路径。传统的最小二乘法不能限制误差传递,也得不到精确的解包裹相位,2012年,钱晓凡分析该算法误差特点,提出了可以得到精确解包裹相位算法<sup>[34]</sup>。针对解包裹速度慢的不足,2014年,郭媛提出一种新的基于最小二乘的解包

裹算法<sup>[35]</sup>,该算法直接求取解包裹算法中的 $k$ 值,并取整计算,从而加快了迭代速度,减少了误差。

## 4 国内外 Shearography 技术应用发展

Shearography 具有全场、非接触、实时快速和高精度等优点,被广泛应用在科研、航空航天领域的复合材料缺陷检测。国内外研究人员用该技术对多种材料进行了缺陷检测。2005年, M. Kalms<sup>[36]</sup>介绍了用 shearography 技术对处于负压中的直升机螺旋桨转叶进行脱粘和结构缺陷检测,对于结构相当复杂的部件,采用一个6自由度的机器人来定位相机,图9(a)为固定在机械臂上的剪切散斑干涉仪,通过控制机械臂对被测物进行多方位检测,图9(b)为放置检测仪的负压装置。2010年,张坚<sup>[37]</sup>利用 shearography 技术对蒙皮为玻璃钢,蜂窝结构材料为纸的蜂窝板复合材料进行缺陷检测。2011年,李慧娟对胶接方式连接的复合材料进行了脱胶缺陷检测,测量结果精度控制在10%以内<sup>[38]</sup>。2012年,程文<sup>[39]</sup>对已知缺陷的双层蜂窝粘结复合材料和多层粘结复合材料进行检测,该系统灵敏度高,检测结果无遗漏。2014年,张旭刚利用 shearography 技术测量预埋缺陷的层压板<sup>[40]</sup>,该层压板预埋了深度不同、尺寸大小不同的缺陷,为了验证缺陷深度、尺寸大小及加热时间对测量精度的影响。

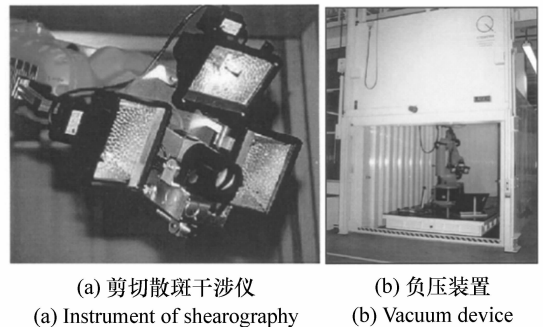


图9 6自由度的机器人检测系统

Fig.9 Robot detection system with 6 degrees of freedom

2012年, G. De Angelis 使用电压驱动器实现动态振动加载<sup>[41]</sup>,对已知缺陷的层压板进行检测,从每个缺陷的振动频率中算出缺陷大小深度。

2013 年,蔡怀宇提出基于迈克尔逊剪切散斑干涉测量玻璃厚度的均匀性<sup>[42]</sup>。待测玻璃放在一个平面镜前,倾斜另一块平面镜引入载波,通过傅里叶变换、三角变换法和相位解包裹提取相位信息。用一定长度的斜率来表示厚度的均匀性。2014 年,Leszek 结合 holography 和 shearography 技术<sup>[43]</sup>,利用扩音器使博物馆中壁画表面振动,利用振动来检测缺陷的大小和分布,图 10(a)为原始壁画图像,红色方格表示检测区域,图 10(b)表示检测区域内的两个缺陷条纹。

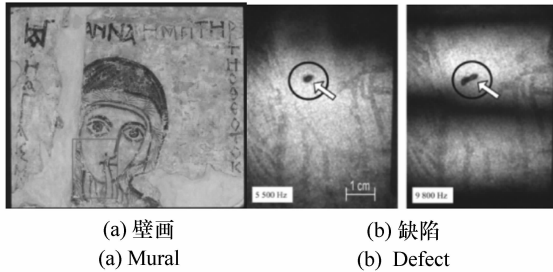


图 10 壁画的 ESSPI 检测结果

Fig. 10 Test results of mural based on ESSPI

近年来,国际上激光剪切散斑干涉无损检测技术有了较大发展,已成功应用于航空、航天及机械的无损检测中,例如飞行器部件、复合材料分离部位、蜂窝结构中的裂纹、分层、开裂和气孔等缺陷检测。如应用于阿帕奇直升机旋翼、波音 757 扰流板、空客 A330 发动机换向器、B-2 飞机蒙皮与芯子粘接层、F-22 战斗机机身、F-16 前副翼、Marshall 宇航飞行中心火箭泡沫隔热层(SOFI)及固体火箭推进器 MSA-2 等的缺陷检测。此外,剪切散斑检测技术在复合材料帆船、复合材料包裹

压力容器、风力发电机叶片等的缺陷检测方面都有成功应用。目前在国外已经有较为成熟的剪切散斑干涉检测系统,在国内外航空航天等部门都有用户。国内的一些高校和公司也开发了剪切散斑干涉系统,应用在大学及实验室开展教学和科研,但自动化程度较低,尚未达到实际工程应用的要求,与国外剪切散斑无损检测仪器相比还有一定的差距。在国家重点研发计划重大科学仪器开发专项的支持下,合肥工业大学的研究团队正在进行剪切散斑无损测量系统的自主研制与开发,实现无损检测系统的仪器化和国产化。

## 5 结束语

Shearography 技术经过了多年的发展,其全场、快速、实时、高精度等独特优势在实践应用中得到充分体现。未来剪切散斑干涉的技术发展主要有以下几方面:(1)剪切散斑干涉技术适应高速动态的测量应用领域,重点突破实时相移技术,同时有效改善散斑干涉图像质量;(2)剪切散斑干涉测量适用于粗糙表面物体,针对光滑表面的测量应用需要研究新的散斑干涉技术方法;(3)剪切散斑干涉获取的数据结果为变形/应变的导数,需要研究数据结果如何快速精确地反算成直接的变形/缺陷数据的技术方法,从而实现缺陷的准确定位与定量。随着计算机技术和图像处理技术的发展,大面积动态散斑测量技术的不断研究和提高,剪切散斑干涉技术不仅在传统的航空航天材料无损检测领域,在汽车、机械、建筑等行业的检测与测量领域都将有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] RASTOGI P K. Speckle and speckle shearing interferometry—II. at the threshold of a new era[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 1997, 26(26): 279-282.
- [2] 洪友仁,何浩培,何小元. 剪切散斑:一种光学测量技术及其应用[J]. *实验力学*, 2006, 21(6): 667-688.  
HONG Y R, HE H P, HE X Y. Shearography: an optical measurement technique and applications[J]. *J. Experimental Mechanics*, 2006, 21(6): 667-688. (in Chinese)
- [3] WANG Y H, THOMAS D, ZHANG P, et al. . Whole field strain measurement on complex surfaces by digital speckle pattern interferometry[J]. *Materials Evaluation*, 2008, 66(5): 507-512.
- [4] 李喃. 数字散斑干涉条纹信息处理技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2012: 11-40.  
LI N. Research of digital speckle pattern interferometry fringe information process[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012: 11-40. (in Chinese)

- [5] 吴思进. 新型迈克尔逊型数字剪切散斑干涉术的研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.  
WU S J. Study of novel Michelson-type digital shearography[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2012. (in Chinese)
- [6] XIN X, LIAN X Y, NAN X, *et al.*. Michelson interferometer based spatial phase shift shearography[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(17):4063-4071.
- [7] HUNG Y Y, GRANT R M. Shearography: a new optical method for nondestructive evaluation of tires[J]. *Rubber Chemistry & Technology*, 1981, 54(5):1042-1050.
- [8] CAI C, HE L. Improved Mach-Zehnder interferometer-based shearography[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2012, 50(12):1699-1705.
- [9] 朱猛, 李翔宇, 龙宁波, 等. 大视场双缝载频散斑干涉成像检测系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1):13-17.  
ZHU M, LI X Y, LONG N B, *et al.*. Double-slit based carrier frequency speckle interferometric system with large viewing field[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):13-17. (in Chinese)
- [10] 朱猛, 李翔宇, 李秀明, 等. 反远距成像相移剪切散斑干涉检测系统[J]. 激光技术, 2014, 38(1):49-53.  
ZHU M, LI X Y, LI X M, *et al.*. Phase shifting and shearing speckle interferometry system with retro-focus imaging[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(1):49-53. (in Chinese)
- [11] 冯家亚, 王永红, 王鑫, 等. 基于4f的大视角剪切散斑干涉系统设计[J]. 应用光学, 2015, 36(2):188-193.  
FENG J Y, WANG Y H, WANG X, *et al.*. Design of digital shearography with wide angle of view based on 4f system[J]. *J. Applied Optics*, 2015, 36(2):188-193. (in Chinese)
- [12] 张磊, 刘斯宁, 林殿阳, 等. 基于空间载波条纹图的相位提取方法研究进展[J]. 激光技术, 2005, 29(1):90-93.  
ZHANG L, LIU S N, LIN D Y, *et al.*. The progress of extracting phase information based on spatial carrier fringe pattern analysis[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1):90-93. (in Chinese)
- [13] 刘佩, 王永红, 冯家亚, 等. 偏转角空间载波相位检测技术[J]. 光电工程, 2015, 42(3):39-43.  
LIU P, WANG Y H, FENG J Y, *et al.*. Phase detection technology in spatial carrier based on deflection angle[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(3):39-43. (in Chinese)
- [14] 黄芳, 张文静, 王海燕, 等. 基于FFT的散斑干涉术测物体变形[J]. 激光与红外, 2012, 42(2):124-128.  
HUANG F, ZHANG W J, WANG H Y, *et al.*. Object deformation measurement based on FFT speckle pattern interferometry[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(2):124-128. (in Chinese)
- [15] 李宏跃. 空间载频剪切散斑干涉技术研究[D]. 天津:天津大学, 2012.  
LI H Y. Research on technology of spatial carrier frequency shearography[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [16] XIN X, LIAN X Y, NAN X, *et al.*. Michelson interferometer based spatial phase shift shearography[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(17):4063-71.
- [17] 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(1):277-281.
- [18] 蔡长青, 张永山, 汪大洋, 等. 新型剪切散斑干涉系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11):135-139.  
CAI CH Q, ZHANG Y SH, WANG D Y, *et al.*. Research on new shearing speckle interferometry system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11):135-139. (in Chinese)
- [19] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):645-651. (in Chinese)
- [20] 林翠翠, 刘文耀, 王晋疆. 电子错位散斑干涉系统中错位量的研究[J]. 光电工程, 2012, 39(3):88-93.  
LIN C C, LIU W Y, WANG J J. Research of shear in electronic shearography speckle pattern interferometry[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(3):88-93. (in Chinese)
- [21] 林超, 钱晓凡, 饶帆, 等. 剪切量选择对剪切干涉降噪的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3):79-83.  
LIN CH, QIAN X F, RAO F, *et al.*. The influence of shearing quantity selection in shearing interferometry noise reduction

- [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 79-83. (in Chinese)
- [22] 贾大功, 武立强, 马彩缤, 等. 剪切散斑干涉术中剪切量的测量[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 226-232.  
JIA D G, WU L Q, MA C B, *et al.*. Shear measurement of shearing speckle interferometry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 226-232. (in Chinese)
- [23] 丁效红. 基于数字剪切散斑定量计算离面位移的方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.  
DING X H. Method study on quantitative calculation of out-of-plane displacement based on digital shearography[D]. Kunming; Kunming University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [24] 郭媛, 毛琦, 陈小天, 等. 双波长剪切散斑干涉法在复合材料缺陷检测中的应用[J]. *光子学报*, 2015, 44(3): 312001-0312001.  
GUO Y, MAO Q, CHEN X T, *et al.*. Applied research of dual-wavelength shearography for flaw detection of composite material[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(3): 312001-0312001. (in Chinese)
- [25] 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.  
YANG L X, ZHU L Q, XIE X, *et al.*. New development of phase-shift techniques in electronic speckle pattern interferometry[J]. *J. Beijing Information Science and Technology University*, 2013, 28(2): 1-8. (in Chinese)
- [26] CHO J T, CHENG G Q, LUJIE C. Phase retrieval with a three-frame phase-shifting algorithm with an unknown phase shift[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(8): 1401-1409.
- [27] NOVAK J. Five-step phase-shifting algorithms with unknown values of phase shift[J]. *Optik-International J. Light and Electron Optics*, 2003, 114(2): 63-68.
- [28] YUANHAO H, FARROKH J S, YUSHENG L, *et al.*. Dynamic phase measurement in shearography by clustering method and Fourier filtering[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 606-615.
- [29] LI K, QIAN K. Dynamic phase retrieval in temporal speckle pattern interferometry using least squares method and windowed Fourier filtering[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18058-66.
- [30] 郭媛, 陈小天, 毛琦, 等. 单幅干涉条纹图相位提取新算法[J]. *激光与红外*, 2015, 45(1): 94-98.  
GUO Y, CHEN X T, MAO Q, *et al.*. Phase extraction algorithm for single interference fringe pattern[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(1): 94-98. (in Chinese)
- [31] 顾国庆, 王开福, 燕新九. 基于同态滤波的电子散斑干涉图像处理[J]. *激光技术*, 2010, 34(6): 750-752.  
GU G Q, WANG K F, YAN X J. Electronic speckle interferometry image processing based on homomorphic filtering[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6): 750-752. (in Chinese)
- [32] 王永红, 李骏睿, 孙建飞, 等. 散斑干涉相位条纹图的频域滤波处理[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 389-395.  
WANG Y H, LI J R, SUN J F, *et al.*. Frequency domain filtering for phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 389-395. (in Chinese)
- [33] 何光宏, 礼四同, 王茂林, 等. 可靠度导引的相位解包裹算法[J]. *激光杂志*, 2012, 33(3): 25-26.  
HE G H, LI S T, WANG M L, *et al.*. Phase unwrapping algorithm based on reliability[J]. *Laser Journal*, 2012, 33(3): 25-26. (in Chinese)
- [34] 钱晓凡, 饶帆, 李兴华, 等. 精确最小二乘相位解包裹算法[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 183-187.  
QIAN X F, RAO F, LI X H, *et al.*. Accurate least-squares phase unwrapping algorithm[J]. *Chinese J. Laser*, 2012, 39(2): 183-187. (in Chinese)
- [35] 郭媛, 陈小天. 基于最小二乘相位解包裹改进算法的研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 189-194.  
GUO Y, CHEN X T. Study of improved phase unwrapping algorithm based on least squares[J]. *Chinese J. Laser*, 2014, 41(5): 189-194. (in Chinese)
- [36] KALMS M, JUEPTNER W. A mobile shearography system for non-destructive testing of industrial and artwork components[J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 295-296(1): 165-170.
- [37] 张坚, 耿荣生. 复合材料的现场电子剪切散斑检测技术研究[J]. *无损检测*, 2007, 29(1): 88-92.  
ZHANG J, GENG R SH. Studies on field-applicable shearography NDT of airplane composites[J]. *NDT*, 2007, 29(7):

- 378-381. (in Chinese)
- [38] 李慧娟,张京焘,黄振华. 激光剪切散斑方法对脱粘缺陷的定量测量[J]. 宇航材料工艺,2011,41(5):85-88.  
LI H J,ZHANG J T,HUANG ZH H. Quantitative measurement for disbanding defect using shearography[J]. *Aerospace Materials & Technology*,2011,41(5):85-88. (in Chinese)
- [39] 程文,张宏菊. 激光剪切散斑检测技术在飞机复合材料检测中的应用[J]. 青岛大学学报:工程技术版,2012,27(4):80-83.  
CHEN W,ZHANG H J. Applide of shearography in aircraft composite material[J]. *J. Qingdao University(E&T)*,2012,27(4):80-83. (in Chinese)
- [40] 张旭刚,张素香,程旭,等. 层压结构复合材料的激光剪切散斑检测[J]. 无损检测,2014,36(7):56-59.  
ZHANG X G,ZHANG S X,CHENG X,*et al.*. Laser Speckle Shearography Testing of Composite Laminate[J]. *NDT*,2014,36(7):56-59. (in Chinese)
- [41] ANGELIS G D,MEO M,ALMOND D P,*et al.*. A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization[J]. *Ndt & E International*,2012,45(1):91-96.
- [42] 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):260-266.  
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):260-266. (in Chinese)
- [43] LESZEK K. Combining digital speckle pattern interferometry with shearography in a new instrument to characterize surface delamination in museum artefacts[J]. *J. Cultural Heritage*,2015,16(4):544-550.

#### 作者简介:



王永红(1972—),男,博士,教授,主要从事光学精密测试、激光散斑干涉检测和机器视觉等方面的研究。E-mail:wyhgh@126.com