

doi:10.3788/gzxb20154403.0312001

双波长剪切散斑干涉法在复合材料缺陷检测中的应用

郭媛,毛琦,陈小天,吴全,甄伟

(齐齐哈尔大学 计算机与控制工程学院,黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘 要:为使剪切散斑干涉能适用于物体大变形的测量,选用双波长激光照射和彩色相机,用傅里叶变换法对干涉图进行频谱分离,用红色波长相位减去绿色波长相位,得到合成波长相位,经频域滤波和相位解包裹,得到连续相位.理论计算表明合成波长相位条纹数是单波长相位条纹数的 0.189 倍.合成波长参与计算可以有效减小相位条纹密度,解决剪切散斑干涉在物体离面位移测量中由于变形条纹过于密集而导致欠采样的问题,同时降低对干涉条纹滤波和相位解包裹难度,增强图像处理可靠度,提高了测量准确度.给出了合成波长与单波长相位幅度的比较以及相同外力下二者相位条纹密度的对比,实验验证了所提方法的有效性、准确性和可靠性,实现了剪切散斑干涉对复合材料大变形的测量,扩展了剪切散斑干涉工程应用的范围,为新型剪切散斑干涉测量系统的设计提供了参考.

关键词:光学测量;缺陷检测;剪切散斑干涉;复合材料;合成波长;无损检测;相位解包裹

中图分类号:TH744.3

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0312001-5

Applied Research of Dual-wavelength Shearography for Flaw Detection of Composite Material

GUO Yuan, MAO Qi, CHENG Xiao-tian, WU Quan, ZHEN Wei

(College of Computer and Control Engineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

Abstract: A color CCD camera are adopted to make sure shearography can be applied in large deformation of objects dual-wavelength lasers illumination. By separating the spectrum in the Fourier domain, the subtraction of the red wavelength phase and the green wavelength phase yielded a new phase distribution of a synthetic wavelength. After filtering in frequency domain and phase unwrapping, the continuous phase can be gotten. The number of phase stripes of synthetic wavelength is 0.189 times smaller than that of single wavelength by theoretical derivation. Using the synthetic wavelength can reduce the phase fringe density effectively, and solve the sub-Nyquist sampling problem, which are caused by too intensive interference fringes in object's deformation. In addition, it also reduces the difficulty of image processing in filtering and phase unwrapping, enhances the reliability of image processing, and improves the measurement accuracy. Phase comparing between synthetic wavelength and single wavelength were given. Moreover, the fringe densities of the two kinds of wavelengths at the same external force also were compared. Experiments verify the effective, accuracy, and reliable of this method. It can process the large deformation measurement of composite material and dramatically expand the measurement rang of shearography in engineering application. It also provides a reference for the designing new type system of shearography.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61100103)、教育部留学回国人员启动基金、黑龙江省自然科学基金(No. F201219)、黑龙江省教育厅科研面上支持项目(No. 12521600)和齐齐哈尔大学青年重点基金支持项目(No. 2011K-02)资助

第一作者:郭媛(1974-),女,教授,博士,主要研究方向为光学信息处理、光学检测与传感器技术. Email: guoyuan171@126.com

通讯作者:毛琦(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为散斑干涉测量技术与光学图像处理. Email: asdenglish@126.com

收稿日期:2014-07-14; **录用日期:**2014-09-02

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Optical measurement; Flaw detection; Shearography; Composite material; Synthetic wavelength; Nondestructive testing; Phase unwrapping

OCIS Codes: 120.5050; 350.4600; 140.3295; 120.4290; 120.6165

0 引言

剪切散斑干涉^[1-2]是一种融光学相干^[3]、相移技术和图像处理技术^[1-4]为一体的光测量技术,它起源于1973年^[5],应用于1982年^[6]。由于其具有不需参考光、对环境扰动不敏感、无需防震措施、测试布置简单易操作、在线实时检测、过程可视化、全场、无损、高准确度和高灵敏度等优点,被广泛应用于结构缺陷检测^[7]、物体形变测量^[1,3,8]、振动稳态分析^[9]、气体泄漏检测和钻孔残余应力分析^[9]等工业无损检测中。

长期以来密集条纹滤波和相位解包裹都是难以解决的问题^[10-12]。针对密集干涉条纹去噪,高健勇等提出了改进的指数和巴特沃斯低通滤波法^[13],有一定的效果,可是对于过于密集的干涉条纹其效果不明显。在条纹密集处容易发生欠采样,张雄等改进的最小二乘算法^[14]在一定程度上增强了相位解包的抗采样的能力,可当干涉条纹过于密集时,解出来的连续相位却面目全非,误差太大。由此可见,从条纹滤波和相位解包算法上解决由密集的干涉条纹引起的欠采样问题,有一定的局限性。

本文采用双波长激光测量^[15-16],利用激光相干特性,经图像处理,减小了干涉条纹级数,有效降低了干涉条纹的密集程度,避免了由干涉条纹过于密集而导致的欠采样。在理论上推导了单波长干涉条纹相位与合成波长干涉条纹相位的数学关系,并得出单波长干涉条纹级数与合成波长干涉条纹级数的关系。实验验证了该方法的正确性和有效性,实现了剪切散斑干涉法在复合材料大变形测量中的工程应用。

1 系统原理

双波长剪切散斑干涉测量系统如图1。氦氖激光

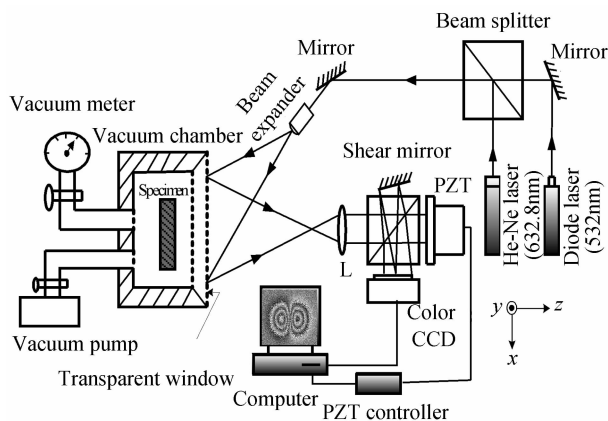


图1 双波长剪切散斑干涉测量试验布置

Fig.1 Experimental setup for two-wavelength shearography measurement

器发出的是红色光,波长为632.8 nm,二极管泵浦激光器发出的是绿光,波长532nm。由于激光有很好的相干性,两束激光相干后,光束中心光斑能量增大,可得高功率相干光束,使得波长更长、测量范围更大,合成波长为

$$\lambda_s = \frac{\lambda_r \lambda_g}{\lambda_r - \lambda_g} \quad (1)$$

式中, λ_r 为红色激光波长, λ_g 为绿色激光波长, λ_s 为合成波长。经计算, $\lambda_s = 3.3398 \mu\text{m}$ 。激光通过光分束器 (beam splitter),经反射镜和光束扩展器照射在真空箱被测物体上,携带被测物体信息的反射光经成像镜(L)和剪切干涉装置,在CCD阵面上相干成像。通过电压陶瓷(PZT)控制器来控制PZT相移量,红色光经彩色相机的R通道,绿色光经彩色相机的G通道,分别被CCD同时记录。通过压力阀调节真空箱中的压强,压强值通过压力表显示。

一幅干涉图像中包含着红色光谱信息和绿色光谱信息,经傅里叶变换可实现二者的频谱分离,红色波长相位变化量减去绿色波长相位变化量即为合成相位波长相位变化量。

2 实验与分析

2.1 合成波长测量的实现

实验对有中心大缺陷的金属蜂窝构件进行测量。构件尺寸为120 mm×120 mm,使用Baumer TXG08c型工业相机,分辨率776×1032,最小分辨像素为4.65×4.65 μm ,记录物体相位变化信息。CCD记录的是光强分布,物体变形前条纹图的数学描述为

$$I_n^b(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \mu \cos \varphi(x, y) + (n-1)\Delta\} \quad (2)$$

式中: I_n^b 为物体变形前图像的灰度值, I_0 为条纹光强的背景值, μ 为调制幅度, $\varphi(x, y)$ 为相位角, n 为相移步数, Δ 为相移量。为了降低随机噪音以及零级衍射光对干涉信息的影响,本文采用九步相移法计算相位变化量。令 $n=1, 2, \dots, 9$, $\delta = \pi/9$,经九步相移可得变形前的相位,即

$$\varphi_b(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^9 I_n^b(x, y) \sin(2\pi n/9)}{\sum_{n=1}^9 I_n^b(x, y) \cos(2\pi n/9)} \right] \quad (3)$$

同理可得变形后的相位

$$\varphi_a(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^9 I_n^a(x, y) \sin(2\pi n/9)}{\sum_{n=1}^9 I_n^a(x, y) \cos(2\pi n/9)} \right] \quad (4)$$

那么,相位变化量

$$\Delta\varphi(x, y) = \Delta\varphi_a(x, y) - \Delta\varphi_b(x, y) \quad (5)$$

由剪切散斑干涉法测量物体离面位移导数计算式及其关系^[15-16]可得

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda N}{2\delta x} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi\delta x} \quad (6)$$

式中, δx 为剪切量, N 为相位条纹数, $\Delta\varphi$ 为相位变化量, λ 为波长. 则

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{4\pi\delta x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (7)$$

所以, 合成波长相位变化量为

$$\Delta\varphi_s(x, y) = \Delta\varphi_r(x, y) - \Delta\varphi_g(x, y) = \frac{4\pi\delta x}{\lambda_s} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (8)$$

由式(6)可得

$$N_r/N_s = \lambda_s/\lambda_r \quad (9)$$

式中, N_r 为红色波长相位条纹数, N_s 为合成波长相位条纹数, 则 $N_r = 5.28N_s$.

实验采用彩色三通道 CCD, 红光经过 R 通道, 绿光经 G 通道, B 通道未用. 在同一幅干涉图上有两种干涉图谱, 通过傅里叶变换 (Fourier Transform, FT) 实现频谱分离, 红色波长的相位变化如图 2(a), 绿色波长相位变化如图 2(b). 那么红色波长相位减去绿色波长相位, 即图 2(a)~(b) 则为合成波长相位, 如图 2(d).

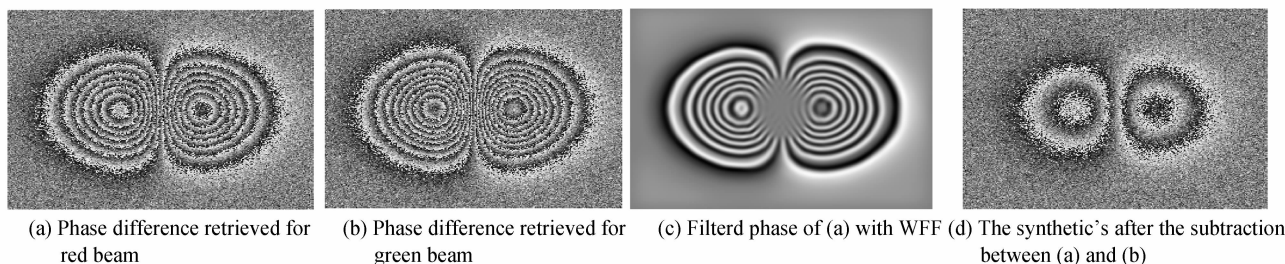


图 2 合成波长测量与单波长测量相位图

Fig. 2 Synthetic and single wavelength phase distribution

对合成波长图 2(d) 进行加窗傅里叶滤波 (Windowed Fourier Filtering, WFF) 并解其包裹相位, 如图 3(a), 相位包裹在 $(-\pi, \pi)$ 之间且呈锯齿波状, 如

图 3(b). 通过最小费用流解包算法, 得其解包相位如图 3(c), 其一维中心 x 轴向相位呈平滑曲线, 如图 3(d).

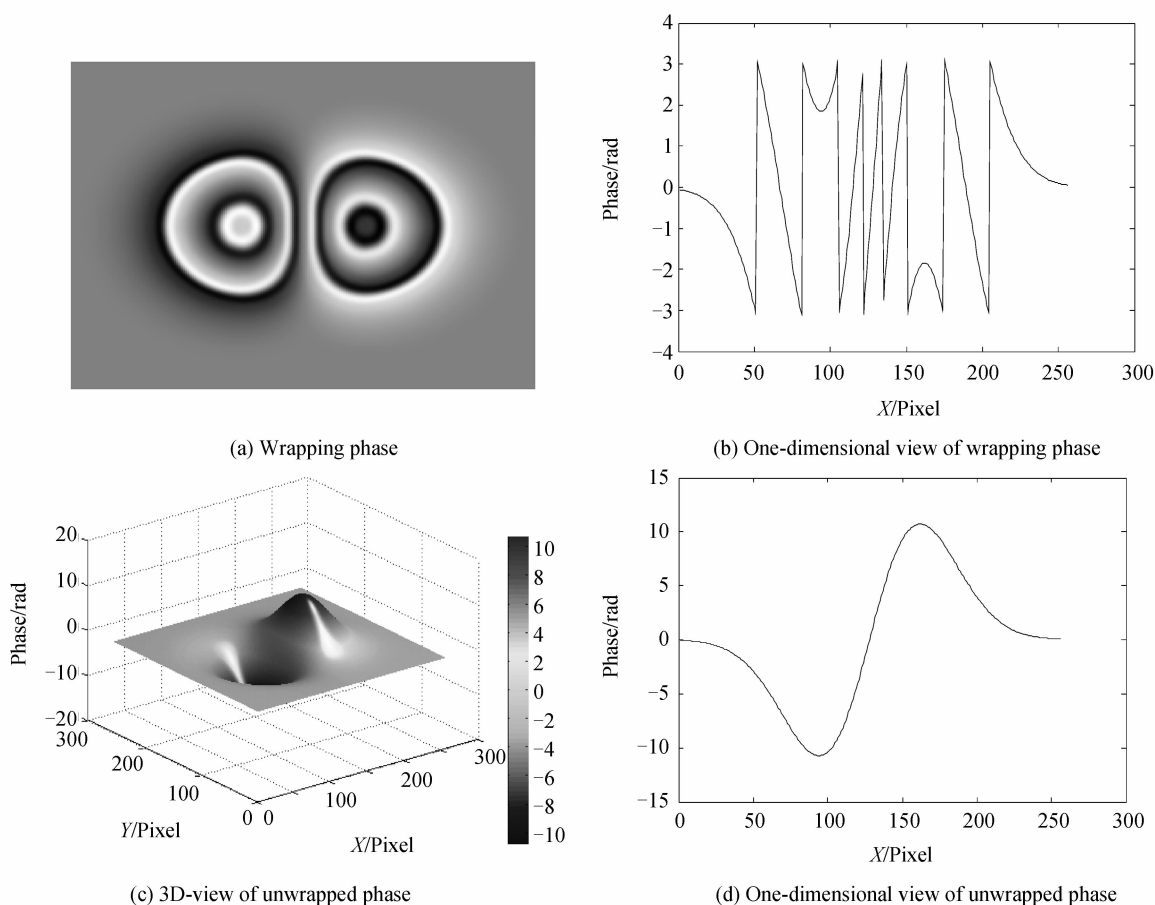
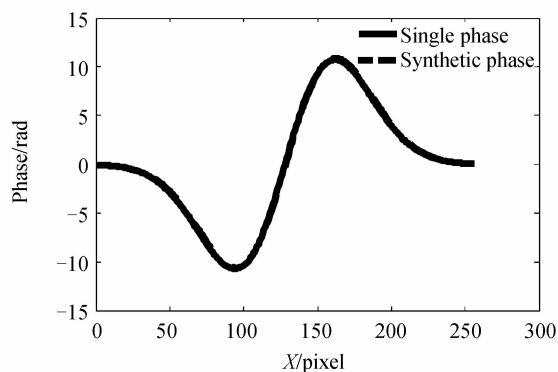


图 3 合成波长包裹相位与解包相位

Fig. 3 The synthetic wrapping phase and unwrapped phase

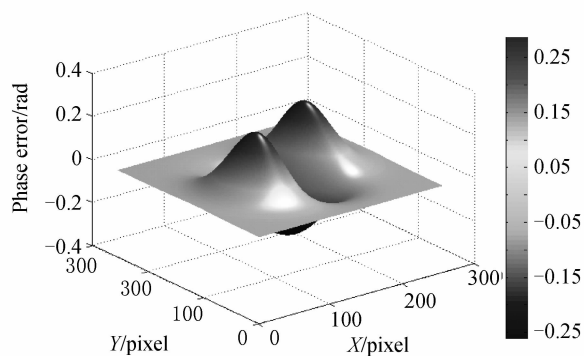
2.2 两种方法解包相位的比较

采用同样的方法可得单(这里采用 He-Ne 激光器单独测量)波长的解包相位,合成波长解包相位与单波长解包相位比较,如图 4(a)所示(其中对单波长相位幅度作 1/5.28 倍的缩放),实线为单波长解包相位,虚线为合成波长解包相位,可以看出二者基本一致.合成波



(a) Compare of phase

长与单波长解包相位误差在 $(-0.3, 0.3)$ (单位: rad) 之间,最大误差为 -0.2603 ,均值误差(Root Mean Squared Error, RMSE)为 0.0464 .由图 4(b)可以看出,双波长测量与单波长测量解包相位误差较小,测量结果相同.



(b) Phase error

图 4 合成波长与单波长解包相位对比较

Fig. 4 (Color online) Compare of unwrapped phase between synthetic and single wavelength phase map

2.3 两种方法条纹密度比较

随着外施压强的增加,蜂窝构件变形程度加深,在

不同压强的情况下,合成波长与单波长相位条纹密集情况,如图 5.

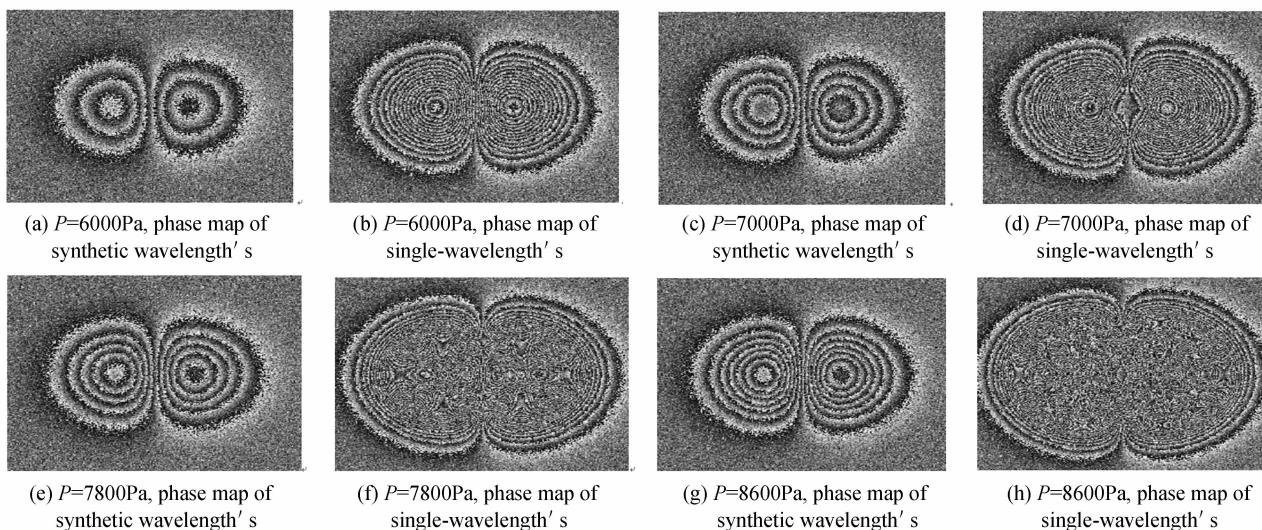


图 5 在相同压强下合成波长相位与单波长相位比较

Fig. 5 Compare the phase maps between synthetic and single wavelength when applied the same pressure

图 5 中,当外施压力 6 000 Pa 时,合成波长与单波长相位条纹都清晰可辨,如图 5 (a)、(b);当外施压力 7 000 Pa 时,合成波长与单波长相位条纹变密,如图 5 (c)、(d);当外施压力 7 800 Pa 时,单波长相位条纹出现欠采样,而合成波长相位条纹完整无缺,如图 5 (e)、(f);当外施压力 8 600 Pa 时,合成波长相位条纹清晰可辨,单波长相位出现严重欠采样,如图 5 (g)、(h).对此,无论采用何种图像处理方法都无济于事,所以传统剪切散斑干涉不适于复合材料大变形的检测,而合成波长相位则适合于复合材料大变形的测量.

3 结论

本文理论推导了合成波长相位条纹数与单波长相位条纹数之间的倍数关系,并实验验证了合成波长剪切散斑干涉法能够有效降低干涉条纹相位条纹密集程度.相位比较表明,合成波长测量法与单波长测量法同样有着准确性和可靠性.在相同压强下,随着蜂窝构件变形的加深,单波长干涉条纹相位出现了严重的欠采样,合成波长相位却能够准确地展现构件的相位变化,为准确计算构件缺陷量作了铺垫.因此,双波长剪切散

斑干涉法在复合材料缺陷检测中有着准确性、有效性和可靠性。

参考文献

- [1] SUN Ping, LIU Bin, WANG Xiao-feng, *et al.* Phase-shifting method of translating wollaston prism in electronic Speckle-shearing interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 393-396.
孙平,刘斌,王晓凤,等. 剪切电子散斑平移棱镜相移方法研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(3): 393-396.
- [2] WANG Jin-jiang, WU Ming-yun, LIU Yang. Phase unwrapping algorithm based on graph cuts[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1130-1134.
王晋疆,吴明云,刘阳. 基于图切割的相位展开[J]. 光子学报, 2012, **41**(9): 1130-1134.
- [3] SUN Liu-xing, YU Ying-jie, ZHOU Wen-jing. Transient 3D deformation measurement method with color splitting based on ESPI[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, **35**(3): 656-662.
孙流星,于瀛洁,周文静. 颜色分光电子散斑干涉瞬态三维变形测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, **35**(3): 656-662.
- [4] HE Xu, MA Jun. Design of common path radial shearing interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(9): 2029-2034.
何煦,马军. 共光路径向剪切干涉仪的设计[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(9): 2029-2034.
- [5] HUNG Y Y, TAYLOR C E. Speckle-shearing interferometric camera: a tool for measurement of derivatives of surface-displacement[C]. SPIE, 1973, **41**: 169-175.
- [6] HUNG Y Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing [J]. *Optical Engineering*, 1982, **21**(3): 391-395.
- [7] BLAIN P, PIRON P, RENOTTE Y, *et al.* An in-line shearography setup based on circular polarization gratings[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, **51**(9): 1053-1059.
- [8] GAO Yue, FU Shi-hua, CAI Yu-long, *et al.* Digital shearography investigation on the out-plane deformation of the Portevin-Le Chatelier bands[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(6): 066201-1-5.
高越,符师桦,蔡玉龙,等. 数字剪切散斑干涉法研究铝合金中 Portevin-Le Chatelier 带的离面变形行为[J]. 物理学报, 2014, **63**(6): 066201-1-5.
- [9] HUNG Y Y, CHEN Y S, NG S P, *et al.* Review and comparison of shearography and active shearography for nondestructive evaluation [J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, **64**: 73-112.
- [10] FU Y, PEDRINI G, HENNELLY B M, *et al.* Dual-wavelength image-plane digital holography for dynamic measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, **47**(5): 552-557.
- [11] BHADURI B, TAY C J, QUAN C, *et al.* Two wavelength simultaneous DSPI and DSP for 3D displacement field measurements[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(10): 2437-2440.
- [12] LIN Zhen-heng. A method to extract carrier-wave speckle pattern fringe skeletons based on modulation direction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 800-804.
林振衡. 基于调制方向提取载波散斑条纹中心线的方法[J]. 光子学报, 2012, **41**(7): 800-804.
- [13] GAO Jian-yong, WANG Kai-fu. Study and design of exponential and butterworth low-pass filters used for digital speckle interference fringe filtering [J]. *Optik*, 2013, **124**(24): 6713-6717.
- [14] ZHANG Xiong, QIAN Xiao-fan. An improvement on the least-squares phase unwrapping algorithm for under sampled interferogram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 121-124.
张雄,钱晓凡. 欠采样干涉图最小二乘相位解包裹算法改进[J]. 光子学报, 2011, **40**(1): 121-124.
- [15] TAY C J, QUAN C, NIU H, *et al.* Phase retrieval in two-wavelength DSSI using a combined filtering method [J]. *Optik*, 2011, **122**(23): 2114-2118.
- [16] NIU H, QUAN C, TAY C J, *et al.* Phase retrieval in DSSI for relatively large deformation[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(1): 118-122.
- [17] GRYZAGORIDS J. Laser based nondestructive inspection techniques[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2012, **31**(4): 295-302.
- [18] LOBANOV L M, BYCHKOV S A, PIVTORAK V A, *et al.* On-line monitoring of the quality of elements of aircraft structures by the method of electron shearography [J]. *Materials Science*, 2009, **45**(3): 366-371.