

doi: 10.3788/gzxb20164511.1112001

基于光学涡旋相移技术的离面位移测量

孙海滨^{1,2}, 孙平¹

(1 山东师范大学 物理与电子科学学院, 济南 250014)

(2 泰山学院 物理与电子工程学院, 山东 泰安 271000)

摘 要: 设计了基于光学涡旋相移技术的离面位移测量实验方案, 实现了电子散斑干涉中相移的数字控制. 该方法利用输入液晶空间光调制器中的叉形光栅产生涡旋光束, 通过涡旋光束绕轴的旋转产生相移; 同时, 产生的涡旋光束又作为参考光与物光干涉. 实验中, 在物体发生离面位移前后依次输入四幅叉形光栅, 产生相移步长为 $\pi/2$ 的涡旋光束, 利用 CCD 获得涡旋光与物光的干涉光场, 从而获得离面位移场的包裹相位; 再通过解包裹, 获得物体离面变形的相位变化. 光学涡旋相移法可应用于离面位移测量.

关键词: 光学测量; 光学涡旋相移; 离面位移; 空间光调制器

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1112001-5

Out-of-plane Displacement Measurement Using Optical Vortex Phase Shifting

SUN Hai-bin^{1,2}, SUN Ping¹

(1 School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

(2 College of Physics and Electronic Engineering, Taishan University, Tai'an, Shandong 271021, China)

Abstract: In order to realize the digital control of phase shifting in Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), a method for out-of-plane displacement measurement by applying phase shifting based on optical vortex was proposed. In the experiment, vortex beam is generated by a Reflective Liquid Crystal Spatial Light Modulator (LC - SLM), and the phase shifts are obtained by rotating the vortex beam around its axes. Vortex beam which is used as reference light interferes with object light, and the out optical field is captured by a CCD camera. Four speckle patterns with phase-step $\pi/2$ are captured by the CCD before and after the deformation, respectively. The phase difference of the deformed object is obtained by unwrapping. Experimental results demonstrate the efficacy of the proposed method for out-of-plane displacement measurement.

Key words: Optical measurement; Optical vortex phase shifting; Out-of-plane displacement; Spatial light modulator

OCIS Codes: 100.5088; 120.0120; 120.6160

0 引言

电子散斑干涉测量技术 (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI) 具有非接触、全场测量和高准确度等特点, 已被广泛应用于微位移测量^[1-5]、物体的形貌测量^[6-8] 和应力测量^[9-11] 等. 为了提高测量准确度, 在 ESPI 中往往使用时间相移和空间相移技术^[12-14]. 空间相移技术是通过分析光强分布的频谱图获取相位信息; 而时间相移技术则需要测量多幅光强

条纹图案^[15]. 利用压电陶瓷相移器是实现时间相移的相位调制的一个主要方法^[16]. 基于压电设备的相移技术, 通常利用压电陶瓷驱动反射镜或旋转平台等机械操作来实现, 并且需要在相移值的变化过程中使相位分布尽可能保持恒定^[17-18]. 为了在相移数字全息中产生精确的相移, GUO C S 等提出了利用螺旋相位板旋转涡旋光束产生整体相移的光学涡旋相移术, 并从理论和实验两个方面验证了该相移方法在数字全息中的可行性^[19-20]. 该相移方法具有很好的时间响应和相移

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61107012) 资助

第一作者: 孙海滨 (1974-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为光学测量. Email: sunhbphy@163.com

导师 (通讯作者): 孙平 (1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学测量. Email: sunpingmail@163.com

收稿日期: 2016-05-31; 录用日期: 2016-08-01

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

稳定性^[20].

为了实现电子散斑干涉中相移的数字控制,本文设计了一个基于光学涡旋相移技术的离面位移测量实验方案.在该方案中,利用输入到液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)中的四幅计算全息图产生涡旋光,作为参考光的涡旋光绕轴整体旋转,从而产生变形测量所需的四步相移.同时,由 LC-SLM 产生的涡旋光束又作为参考光与物光干涉.通过解包裹相位获得物体离面位移的分布.基于光学涡旋的相移技术可应用于 ESPI.

1 实验原理与方案

1.1 光学涡旋相移的原理

光学涡旋的螺旋波前可以由相位函数 $\Psi_1 = \exp(il\varphi)$ 描述,式中, l 是涡旋光束的拓扑荷,表示绕奇点一周相位的变化情况; φ 为围绕涡旋轴的方位角.以具有相位 Ψ_1 的涡旋光作为物波,斜入射的平面波 $\Psi_2 = \exp(ikx)$ (k 是空间频率,与平面波的倾斜角有关)作为参考波.当二者干涉时,就可以产生计算全息图.产生的干涉图样表示为^[21]

$$I = 2[1 + \cos(kx - l\varphi)] \quad (1)$$

该干涉图样在中心有分叉,称之为叉形光栅,该叉形光栅携带了拓扑荷以及涡旋光幅角的信息.

把叉形全息图输入到 LC-SLM,可以产生具有不同拓扑荷的光学涡旋^[22-23]. LC-SLM 是可以产生涡旋光束的光学衍射元件^[24].它在计算机上显示 256 阶灰度图像(称为相息图),并控制加在每个像素(液晶)上的电压,进而控制光通过它之后的相位改变量.利用反射式纯相位型 LC-SLM 产生涡旋光束的方法具有动态、实时、响应时间快、控制准确度高和分辨率高、光路结构简单、调节方便、衍射效率高、便于集成到光学系统中等优点^[25-26].已有的实验结果表明,由计算全息图产生光学涡旋相移量的实验测量值和理论值是完全一致的^[19].

图 1(a)~(d)为拓扑荷为-1、入射平面波的波长为 532 nm、倾角为 0.2 rad 时,利用 MATLAB 模拟得到的四幅叉形光栅,四幅图之间的相移依次为 0, $\pi/2$, π 和 $3\pi/2$.把叉形光栅输入到 LC-SLM 后,用平面光照射获得涡旋光.图 1(e)~(f)为产生的光学涡旋相位.从光学涡旋的相位分布可以看出,四个光学涡旋依次存在着 $\pi/2$ 的相移.

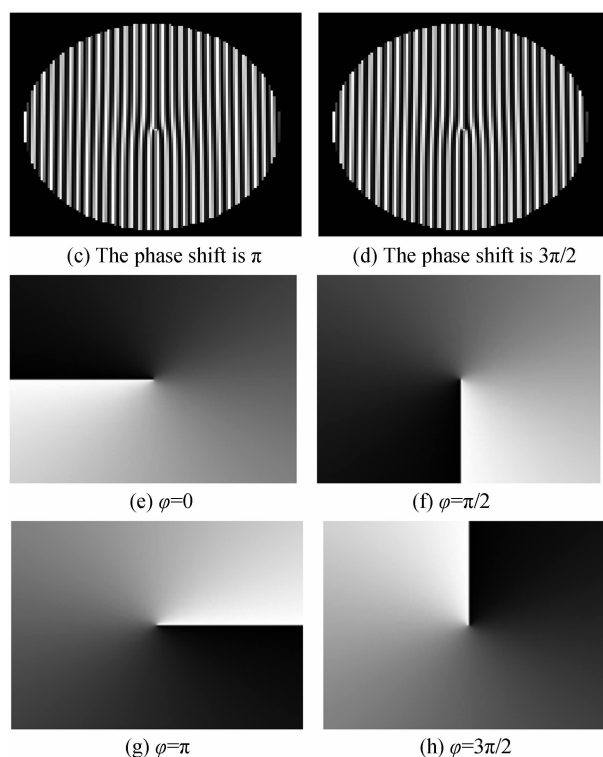
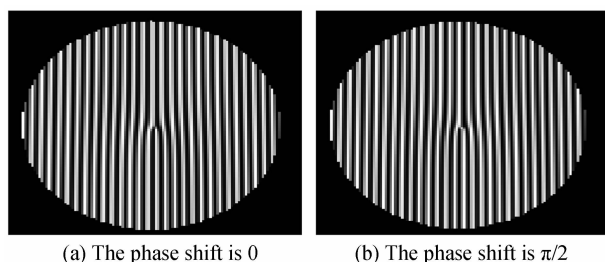
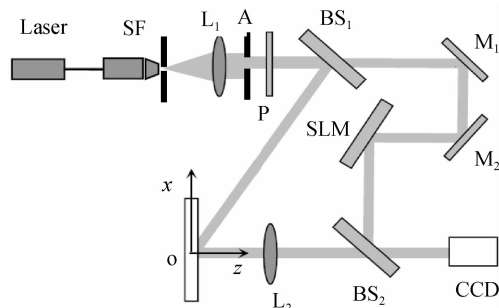


图 1 叉形光栅全息图和光学涡旋的相位分布
Fig. 1 Fork holograms and phase distributions of optical vortices

1.2 实验方案

利用光学涡旋相移技术测量物体离面位移的实验光路如图 2.图中,由 He-Ne 激光器发出的激光经过空间滤波器 SF 滤波、扩束后由透镜 L_1 准直得到平面波.平面光经过一圆形光阑 A 和偏振片 P 后,再经分光镜 BS_1 后分为两束平面光,其中一束光投射到表面光滑的物体上(物光的入射角为 θ),另一束光经过平面镜 M_1 和 M_2 反射后再经反射式 LC-SLM 反射后成为参考光.放置圆形光阑的目的是限制光束的大小,以避免入射光束溢出 LC-SLM 显示界面.偏振片 P 的作用是使投射到 LC-SLM 上的光的偏振方向沿着



SF: Spatial filter; L: lens; A: Aperture; P: Polarizer;
BS: Beam splitting; M: Mirror; SLM: Spatial light modulator; O: Object

图 2 基于光学涡旋相移技术的离面位移测量光路
Fig. 2 Setup of out-of-plane displacement measurement by optical vortex phase shifting

LC-SLM 中液晶分子的长轴方向. 作为物光的平面光经过透镜 L_2 后, 和作为参考光的涡旋光经过分光镜 BS_2 后, 在 CCD 靶面发生干涉. 物体变形前后的干涉图样被 CCD 相机逐一记录到计算机中.

物光的光场复振幅为

$$U_o = A \exp(i2\pi x/\lambda) \quad (2)$$

由 LC-SLM 产生的涡旋光束的复振幅为

$$U_R = A \exp(i l \varphi) \quad (3)$$

在 CCD 靶面上, 平面光与涡旋光干涉产生的光强为

$$I = A^2 [2 + 2 \cos(l\theta + 2\pi x/\lambda)] \quad (4)$$

物体变形前, 通过一台计算机的控制, 依次把四幅叉形光栅输入到 LC-SLM 上, 产生步长为 $\pi/2$ 的相移, 由 CCD 获得物体变形前的四幅光强分布图, 即 I_1, I_2, I_3 和 I_4 .

当物体发生离面变形后, CCD 靶面上的光强为

$$I' = A^2 [2 + 2 \cos(l\theta + 2\pi x/\lambda + \Delta\varphi)] \quad (5)$$

式中, $\Delta\varphi$ 是由离面变形引起的相位变化. 同理, 再次把四幅叉形光栅输入到 LC-SLM 上, 产生步长为 $\pi/2$ 的相移, 由另一台计算机控制的 CCD 获得物体离面变形后的四幅光强图, 即 I'_1, I'_2, I'_3 和 I'_4 .

物体离面位移引起的相位变化可由变形前后所得的 8 幅光强图像获得, 即^[27]

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{(I'_4 - I'_2)(I_1 - I_3) - (I'_1 - I'_3)(I_4 - I_2)}{(I'_1 - I'_3)(I_1 - I_3) + (I'_4 - I'_2)(I_4 - I_2)} \quad (6)$$

式(6)是物体发生离面位移时变形相位的包裹相位, 解包裹之后即可得到变形相位的分布. 再由物体离面变形的相位变化 $\Delta\varphi$ 和离面位移 Δz 的关系式^[1]

$$\Delta\varphi = 4\pi(1 + \cos \theta)\Delta z/\lambda \quad (7)$$

即可求得物体的离面位移.

2 实验结果

根据图 2 的原理图搭建了基于光学涡旋相移技术的离面位移测量系统, 如图 3. 1 为波长为 532 nm 的 He-Ne 激光器, 2 为用于调节光束高度和方向的光束提升器, 3 为偏振片, 4 为一圆形可调衰减器, 5 为空间滤波器, 6 为准直透镜, 7 为圆孔光阑, 8 为半透半反镜, 9 和 10 为平面镜, 11 为 LC-SLM, 12 为试件, 13 为焦距为 20 cm 的凸透镜, 14 为分光镜, 15 为 CCD. 实验中使用的试件是周边固定、中央加载的圆形薄铝板(直径为 10 cm, 厚度为 3 mm), 如图 4. 通过微调物体后面中央的测微丝杆(分辨率为 $1\mu\text{m}$)实现离面变形. 使用的 LC-SLM 为 Holoeye 出产的 PLUTO 反射式纯相位空间光调制器, 如图 5, 像素数为 $1\,920 \times 1\,080$, 像素大小为 $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$, 填充因子为 87%. 该 LC-SLM 具有极好的纯位相调制特性, 波长为 532 nm 时, 上载一幅灰度值在 $0 \sim 255$ 之间变化的图, 所获得的相位变化在 $0 \sim 2\pi$ 之间. 使用的 CCD 相机为 DALSA Pantera TF

11M4, 像素数为 $4\,008 \times 2\,672$, 像素大小 $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$. 由于 LC-SLM 面板有效面积的限制, 在实验中, 试件的图像采集范围是 $4.3\text{mm} \times 4.3\text{mm}$.

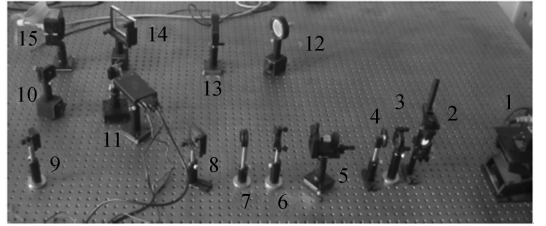


图 3 基于光学涡旋相移技术的离面位移测量系统
Fig. 3 Out-of-plane displacement measurement system based on optical vortex phase shifting

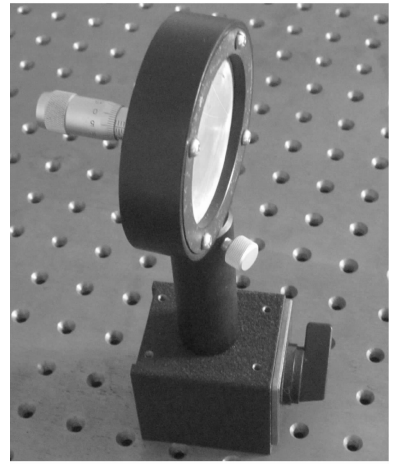


图 4 中心加载的试件
Fig. 4 Schematic of the centrally loaded sample

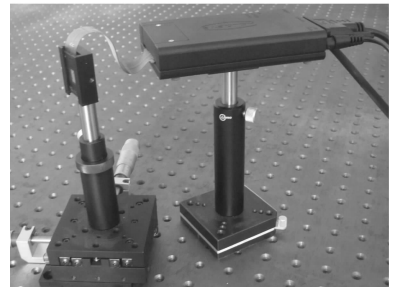


图 5 液晶空间光调制器
Fig. 5 Schematic of the LC-SLM

把设计好的 4 幅叉形光栅通过计算机依次实时显示在 LC-SLM 上并对入射光进行调制, 使产生的涡旋光束发生整体旋转, 实现步长为 $\pi/2$ 的相移. 利用 CCD 相机接收出射光场.

把图 1(a)~(d)所示的叉形光栅依次输入到 LC-SLM, 由 CCD 获得物体变形前后的散斑图样, 如图 6. 图 6(a)~(d)为物体未加载时的 4 幅散斑图样, 图 6(e)~(f)为物体加载变形后的 4 幅散斑图样. 由图 6 可以看出, 在物体变形前后, 散斑图样是出现分叉的、绕逆时针方向旋转的明暗条纹. 图 6 表明, 当涡旋光作为参考光时, 获得的离面位移变形的散斑图样与传统 ESPI 实验获得的明暗相间的同心圆散斑条纹是不一样的.

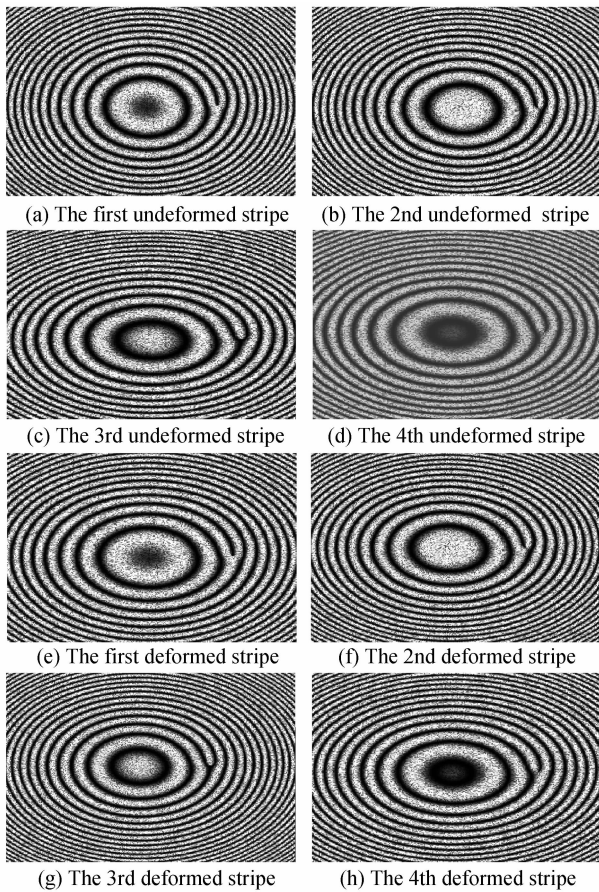


图6 离面位移测量实验结果

Fig. 6 Experimental results of out-of-plane displacement measurement

图7(a)为经过滤波后的,物体离面位移变形场的

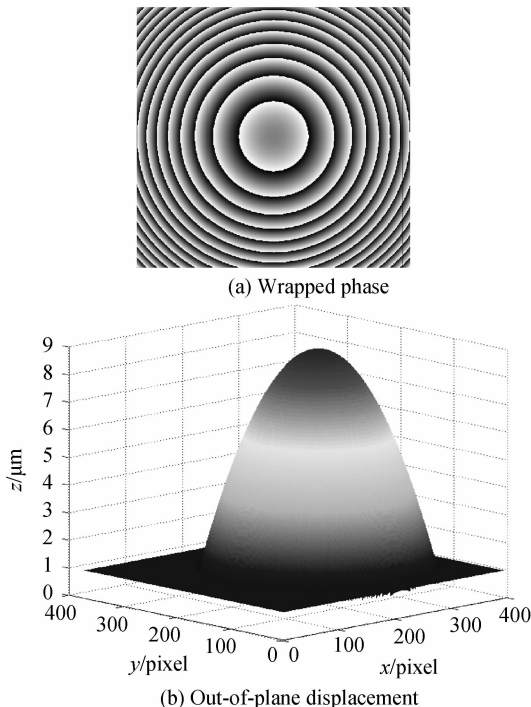


图7 解包裹相位结果

Fig. 7 Unwrapping results of out-of-plane displacement measurement

包裹相位图,图7(b)为解包裹后离面位移场的三维分布,物体中心处的最大离面位移是 $7.630 \mu\text{m}$. 在物体变形前后,分别读出螺旋丝杆的示数,得到试件的最大离面位移是 $7.980 \mu\text{m}$. 以螺旋丝杆测得的最大离面位移值为参考值(可视为真实值)来计算误差,则误差为 4.39% .

本文主要讨论了拓扑荷等于 -1 时的实验结果. 当拓扑荷为 $+1$ (即叉形光栅的开口方向改变)或者加载物体的变形方向改变时,散斑条纹的旋转方向也随之发生变化. 当拓扑荷不等于 ± 1 时,不容易实现 $\pi/2$ 的等步长相移. 基于光学涡旋的相移技术应用用于变形测量,可以测得物体的离面位移.

3 结论

在传统的 ESPI 实验光路中添加反射式 LC-SLM, 把叉形光栅输入到 LC-SLM, 利用产生的涡旋光束绕轴线的整体转动实现相移. 在物体离面变形前后实现四步相移, 从而获得变形场的包裹相位, 最终获得物体离面位移的分布. 基于光学涡旋的相移方法不需要对光学元件进行移动或转动等机械操作, 提高了 ESPI 中相移的稳定性. 实验结果表明, 基于光学涡旋的相移方法既可以实现相移, 同时还以涡旋光为参考光束实现物体离面位移的变形测量. 该相移方法可应用到三维 ESPI 中, 测量物体变形的三个位移分量; 同时, 该相移方法还拓展了光学涡旋的应用, 使涡旋光束作为参考光应用到微位移测量领域.

参考文献

- [1] SUN L, YU Y, ZHOU W. 3D deformation measurement based on colorful electronic speckle pattern interferometry[J]. *Optik*, 2015, **126**(23): 3998-4003.
- [2] SOONS J, LAVA P, DEBRUYNE D, *et al.* Full-field optical deformation measurement in biomechanics: digital speckle pattern interferometry and 3D digital image correlation applied to bird beaks[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2012, **14**:186-191.
- [3] SCHAJER G S, ZHANG Y, MELAMED S. In-plane ESPI using an achromatic interferometer with low-coherence laser source[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, **67**:116-121.
- [4] GAO Z, SHEN M, YU H, *et al.* Simple method for simultaneously measuring the magnitude and direction of 2D in-plane displacement in white-light speckle photography[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, **63**(8): 809-818.
- [5] BAI P, ZHU F, HE X. Out-of-plane displacement field measurement by shearography [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, **73**: 29-38.
- [6] LIU Z, GUO J, SHI W, *et al.* Transmission-speckle correlation for measuring dynamic deformation of liquid surface [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, **65**:110-116.
- [7] CHANG C Y, MA C C. Mode-shape measurement of piezoelectric plate using temporal speckle pattern interferometry and temporal standard deviation [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(21): 4281-4283.
- [8] WERTH N, SALAZAR-BLOISE F, KOCH A. Influence of

- roughness in the phase-shifting speckle method; An experimental study with applications[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, **85**(1): 015114.
- [9] ZHANG D, XIE G, LI Y, *et al.* Strain and mechanical properties of the VCM multilayer sheet and their composites using the digital speckle correlation method[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(25): 7534-7541.
- [10] YANG W, GENG T, YANG J, *et al.* A phase-shifted long period fiber grating based on filament heating method for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. *Journal of Optics*, 2015, **17**(7): 075801.
- [11] PETIT J, MONTAY G, FRAN OIS M. Strain rate measurements by speckle interferometry for necking investigation in stainless steel[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, **51**(2): 540-550.
- [12] PICART P, PASCAL J C, BRETEAU J M. Systematic errors of phase-shifting speckle interferometry[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(13): 2107-2116.
- [13] HARDER I, EISNER M, V LKEL R, *et al.* Measuring the modulus of the spatial coherence function using an error tolerant phase shifting algorithm and a continuous lateral shearing interferometer[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(5): 5087-5101.
- [14] XU Jian-cheng, HOU Yuan-yuan, CHEN Zhao. Non-iterative phase extraction from closed interferograms with tilt shifts[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(2): 0212001. 徐建程, 侯园园, 陈翌. 倾斜相移闭合干涉图的非迭代相位提取方法[J]. *光子学报*, 2016, **45**(2): 0212001.
- [15] DEEPAN B, QUAN C, TAY C J. Determination of phase derivatives from a single fringe pattern using Teager Hilbert Huang transform[J]. *Optics Communications*, 2016, **359**: 162-170.
- [16] XIA Y, XIANGYI S, QIFENG Y, *et al.* Direct ESPI phase estimating from only two interferograms [J]. *Optics Communications*, 2013, **290**: 63-68.
- [17] BRUNO , POGGIALINI A. Phase shifting speckle interferometry for dynamic phenomena[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(7): 4665-4670.
- [18] RODR GUEZ-ZURITA G, GARC A-ARELLANO A, TOTO-ARELLANO N I, *et al.* One-shot phase stepping with a pulsed laser and modulation of polarization; application to speckle interferometry [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(18): 23414-23427.
- [19] GUO C S, CHENG X, REN X Y, *et al.* Optical vortex phase-shifting digital holography[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(21): 5166-5171.
- [20] GUO C S, RONG Z Y, WANG H T, *et al.* Phase-shifting with computer-generated holograms written on a spatial light modulator[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(35): 6975-6979.
- [21] GE S J, JI W, CUI G X, *et al.* Fast switchable optical vortex generator based on blue phase liquid crystal fork grating[J]. *Optical Materials Express*, 2014, **4**(12): 2535-2541.
- [22] KUMAR A, VAITY P, BANERJI J, *et al.* Making an optical vortex and its copies using a single spatial light modulator[J]. *Physics Letters A*, 2011, **375**(41): 3634-3640.
- [23] ZHU L, WANG J. Arbitrary manipulation of spatial amplitude and phase using phase-only spatial light modulators [J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 7441.
- [24] OSTROVSKY A S, RICKENSTORFF-PARRAO C, ARRIZ N V. Generation of the "perfect" optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(4): 534-536.
- [25] GAO Hong-fang, REN Yu-xuan, LIU Wei-wei, *et al.* Rotation dynamics of yeast cell in vortex optical tweezers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(4): 0404002. 高红芳, 任煜轩, 刘伟伟, 等. 酵母细胞在涡旋光阱中的旋转动力学研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0404002.
- [26] CURTIS J E, KOSS B A, GRIER D G. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Optics Communications*, 2002, **207**(1-6): 169-175.
- [27] HUANG M J, YUN B S. Self-marking phase-stepping electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for determining a phase map with least residues[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(1): 136-148.