第 43 卷第 9 期
2014 年 9 月

光　子　学　报
ACTA PHOTONICA SINICA

Vol. 43 No. 9
September 2014

doi:10.3788/gzxb20144309.0912001

涡旋光的干涉特性及其在变形测量中的应用

孙平，李兴龙，孙海滨，李峰
（山东师范大学 物理与电子科学学院，济南 250014）

摘　要：将涡旋光应用于电子散斑干涉，测量变形物体的离面位移.把传统的电子散斑干涉测量技术与液晶空间光调制器相结合，将所获得的涡旋光作为参考光或者物光进行变形测量.推导出物光为平面光、参考光为涡旋光，和参考光、物光均为涡旋光时物体变形后的干涉强度公式，模拟计算了变形后的干涉图样，分析了变形图样的特征.运用四步相移方法得到了物体的变形相位公式，通过解包裹得到了物体的变形相位.模拟计算得到的三维相位分布图与物体离面位移的变形相位理论值的三维分布图相吻合.模拟实验结果表明，涡旋光可以应用于物体的变形测量，为变形测量提供新的途径.

关键词：物理光学；变形测量；相移；干涉；涡旋光
中图分类号：O436.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1004-4213(2014)09-0912001-5

Interference Characteristics of Vortex Beams and Its Application in Deformation Measurement

SUN Ping, LI Xing-long, SUN Hai-bin, LI Feng
(*College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan* 250014, *China*)

Abstract: Out-of-plane displacement of deformation object can be measured by application of vortex beams in electronic speckle pattern interferometry. The deformation measurement was based on the combination of traditional electronic speckle interferometry techniques and liquid crystal spatial light modulators. The vortex beams which were generated by liquid crystal spatial light modulator can be used as reference light or object light. When the vortex beam as reference light and plane beam as object light, or the interference intensity was calculated, and the interference fringe patterns were simulated before and after the tested object deformed. The deformed interference fringe patterns were analyzed and the corresponding phase-maps were calculated though phase shifting method. The three-dimensional phase distribution of simulation is coincident with the theoretical value of out-of-plane displacement. The results show that the vortex beam can be used in out-of-plane displacement measurement, which provides a new method in deformation measurement.

Key words: Physical optics; Deformation measurement; Phase shifting; Interference; Vortex beams
OCIS Codes: 120.3180; 120.5050; 120.6650

0　引言

涡旋光是具有螺旋型相位波前和相位奇点的光束，在传播过程中波前会绕着传播方向以螺旋的方式前进.相位奇点处光波的光强为零，而相位则不确定，且相位围绕奇点沿垂直于传播方向呈螺旋状分布.涡旋光的相位因子含有与旋转方位角成正比的项[1-2].考虑到涡旋光的拓扑荷结构和轨道角动量等性质，光学涡旋可以应用到多个领域[3].例如，利用涡旋光场的轨道角动量[4-5]以及暗中空特性，可将光学涡旋用于微观粒子的捕获、控制和旋转等微操作[6-7].具备轨道角动量的涡旋光束还可用于数据的存储，信息的编码、解码、记录和传输[8-10]，以及物体的微小形变测量[11-12].涡旋光的所有应用都依赖于能否产生高质量的涡旋光

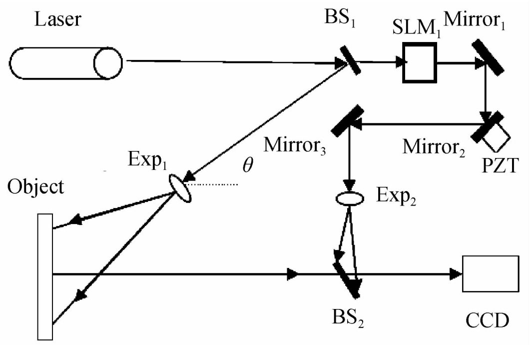
基金项目：山东省科技攻关项目(No. 2012GGB01081)资助
第一作者：孙平(1964－)，男，教授，博士，主要研究方向为光学测量. Email：sunpingmail@163.com。
收稿日期：2014-01-23；**录用日期**：2014-05-14

束.目前,产生涡旋光束的方法主要有:几何光学模式变换法[13-15]、螺旋相位板法[16-18]、计算全息法[19-21]、基于可编程的液晶空间光调制法[22-25]、中空波导法[26-28]、激光器直接输出法[29-31],等.其中,前两种方法能够实现很高的转换效率,但是对光学器件的加工制作准确度要求较高,制作难度较大,在实际应用中不够灵活,产生涡旋光束的参量难以控制[24].计算全息法具有灵活、快速和计算机实时可控等优点,应用比较广泛,但这种方法对全息图的精确度要求严格,光路比较复杂,衍射效率较低,无法抑制不需要的衍射级[24].利用液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LCSLM)形成涡旋光束的方法,光路结构简单,调节方便,衍射效率高,生成拓扑荷的范围较广,通过快速切换加载到空间光调制器上相位图的拓扑荷,可实现二维或三维微操纵[32].中空波导法的适用范围比较特殊,应用范围较小[28].激光器直接输出法可以实现模式单一、拓扑荷可控的涡旋光束的输出,而且经过相对较远距离的传播还能保持较好的螺旋相位分布[33].

传统的电子散斑干涉测量(Electronic Speckle Pattern Interferometry,ESPI)技术是基于参考光和物光在CCD靶面上产生散斑干涉进行测量的,所使用的物光和参考光多为平面光[34-35].本文以物体的离面位移测量为例,在传统的电子散斑干涉光路中加入空间光调制器(Spatial Light Modulator,SLM),把涡旋光引入ESPI中,以涡旋光束作为参考光或物光,模拟计算了物体变形之后的干涉图样特点,并利用四步相移法求出物体的变形相位.所得相位经解包裹后结果与物体离面位移变形相位的理论值相吻合,表明把涡旋光应用于物体变形的位移测量是可行的.

1 涡旋光应用于物体离面位移测量的原理分析

将涡旋光应用于变形测量,可以通过在传统的电子散斑干涉光路中增加空间光调制器来实现,如图1.



BS:Beam splitting lens,Mirror:Mirror,Exp:Expander lens,
Lens:Lens,SLM:Spatial light modulator,PZT:Phase shifter

图1 涡旋光干涉系统测量物体面形光路

Fig. 1 Setup of shape measurement by vortex beam

由激光器发出的光经半透半反镜(BS1)后分为两束,一束光经扩束照射到被测物体上,另一束光经过空间光调制器后成为涡旋光,以此涡旋光为参考光.物光和参考光在CCD靶面上干涉,干涉图像经CCD接入计算机,通过数字图像处理系统进行处理.利用该实验光路可以测量周边固定、中央加载被测试件的离面位移.

1.1 参考光为涡旋光时干涉图样的变形特征

涡旋光束的复振幅分布可表示为[36]

$$U_V = A\exp\left(\mathrm{i}l\theta\right) \tag{1}$$

式中A为振幅,为简单可取为常量.θ为旋转方位角,相位围绕奇点旋转有逆时针和顺时针两种方式,分别对应正负两种拓扑荷.l为涡旋光的拓扑荷,表示绕奇点一周相位的变化情况,可以是整数或分数.

被测物体发生离面位移后,平面物光的复振幅分布为

$$U_o' = A\exp\left\{\mathrm{i}\left[2\pi x/\lambda + \varphi(x,y)\right]\right\} \tag{2}$$

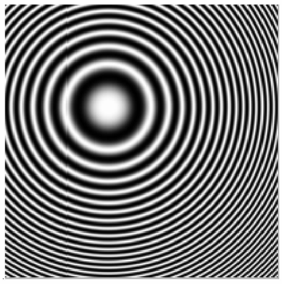
其中$\varphi(x,y)$为物体的变形相位.变形前后涡旋参考光保持不变,则变形后的干涉图样为

$$I_1 = A^2\left\{2 + 2\cos\left[l\theta + 2\pi x/\lambda + \varphi(x,y)\right]\right\} \tag{3}$$

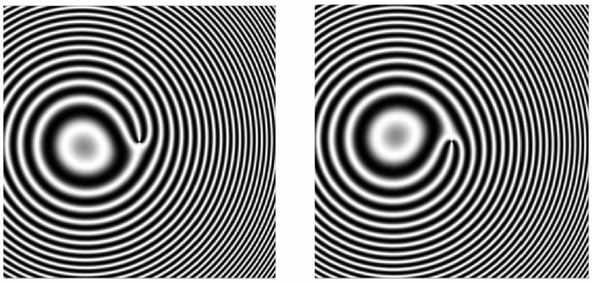
为了便于讨论,取加载物体的变形相位

$$\varphi(x,y) = 2\pi(x^2 + y^2)/1000\lambda \tag{4}$$

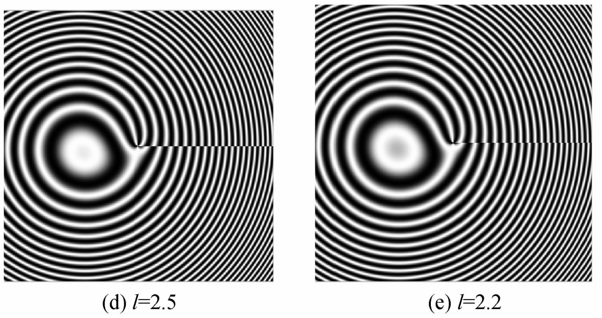
用Matlab软件模拟周边固定、中间加载的物体变形,由式(3)得到物体加载后的干涉图样,如图2.图2(a)为物光与参考光均为平面光时,所得到的明暗相间的环形干涉条纹.当物光为平面光、参考光为涡旋光时,得到了存在叉口的干涉条纹,叉口个数为拓扑荷的整数值,如图2(b)~(e)所示.当拓扑荷值为正数时叉口方向向上,为负数时叉口方向向下.拓扑荷值为整数时,干涉图样如图2(b)和2(c);拓扑荷值为分数时,干涉图样如图2(d)和2(e),干涉条纹出现了分叉和错位,错位随拓扑荷值的小数位的增加而增大.



(a) Fringe pattern between two plane beam



(b) l=2 (c) l=−2



(d) l=2.5　　(e) l=2.2

图2　平面光与涡旋光束干涉的变形图样

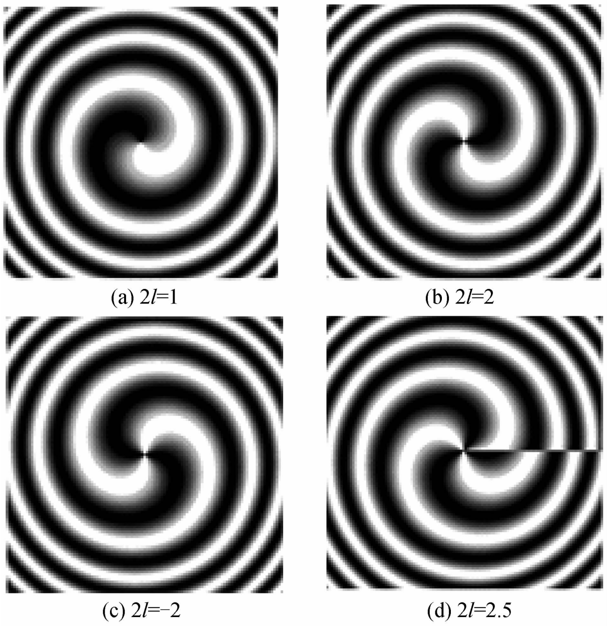
Fig. 2　Deformed fringe patterns between a plane wave and vortex beam

1.2　参考光和物光均为涡旋光时干涉图样的变形特征

在半透半反镜 BS_1 和扩束镜 Exp_1 之间再放置一空间光调制器（SLM_2），可以使物光也成为涡旋光.当被测物加载之后，物光与参考光均为涡旋光时的干涉光强为

$$I'=A^2\{2+2\cos[(l+l')\theta+\varphi(x,y)]\}\tag{5}$$

令 $l=l'$，此时，得到的干涉图样如图3.干涉图样呈螺线型明暗相间分布，干涉条纹存在叉口，叉口个数为拓扑荷的整数值.拓扑荷值为正数时，干涉条纹的旋转方向为逆时针；拓扑荷值为负数时，干涉条纹的旋转方向为顺时针；拓扑荷值为分数时，干涉条纹同样存在错位.



(a) 2l=1　　(b) 2l=2

(c) 2l=−2　　(d) 2l=2.5

图3　物光与参考光均为涡旋光束的干涉变形图样

Fig. 3　Deformed fringe pattern between vortex beam and vortex beam

2　物体离面位移的相移测量模拟计算

相位信息的提取是干涉测量的目标，一般通过采集加载物体变形前后两个状态的干涉条纹图，来求解与位移或应变有关的相位变化.为了确定加载物体的离面位移，可以在加载前后分别运用四步相移法[37].在被测物加载之前，引入四步相移，得到四幅图像的光强分布为

$$I_i=2A^2+2A^2\cos\left[2\pi x/\lambda+l\theta+\frac{\pi}{2}(i-1)\right]\quad(i=1,2,3,4)\tag{6}$$

$$\tan(l\theta+2\pi x/\lambda)=\frac{I_4-I_2}{I_1-I_3}\tag{7}$$

对被测物加载，同样运用四步相移，得到四幅图像的光强分布为

$$I_i'=2A^2+2A^2\cos\left[2\pi x/\lambda+l\theta+\varphi(x,y)+\frac{\pi}{2}(i-1)\right]\ (i=1,2,3,4)\tag{8}$$

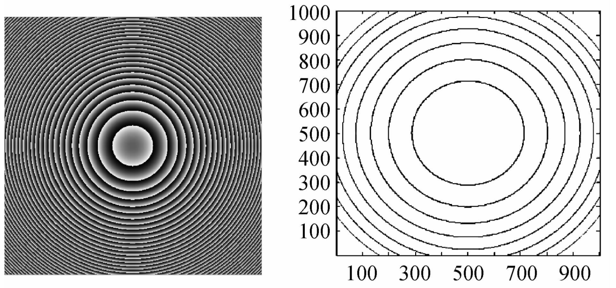
$$\tan[\mathrm{l}\theta+2\pi x/\lambda+\varphi(x,y)]=\frac{I_4'-I_2'}{I_1'-I_3'}\tag{9}$$

由式（7）、（9）可得物体的变形相位

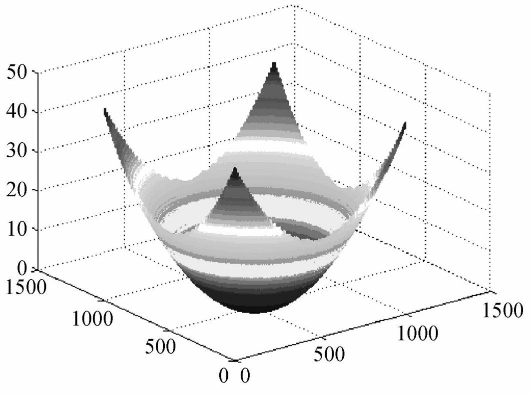
$$\varphi(x,y)=\arctan\frac{(I_4'-I_2')(I_1-I_3)-(I_1'-I_3')(I_4-I_2)}{(I_1'-I_3')(I_1-I_3)+(I_4'-I_2')(I_4-I_2)}\tag{10}$$

由式（10）解包裹之后就可以得到物体的变形相位 $\varphi(x,y)$.

无论是平面物光、涡旋参考光，还是物光与参考光均为涡旋光的情况，都得到了如图4的计算结果（对于不同的拓扑荷值，所得到的模拟结果也相同）.式（4）给出的是物体发生离面位移时的变形相位理论值，其三维相位分布如图5.显然，图4（c）和图5所给出的物体变形相位的三维相位图基本一致.由此可见，将涡旋光



(a) Wrapped phase figure　　(b) Phase counter lines



(c) 3-D phase figure

图4　物体变形场的模拟结果

Fig. 4　The simulation results of deformation

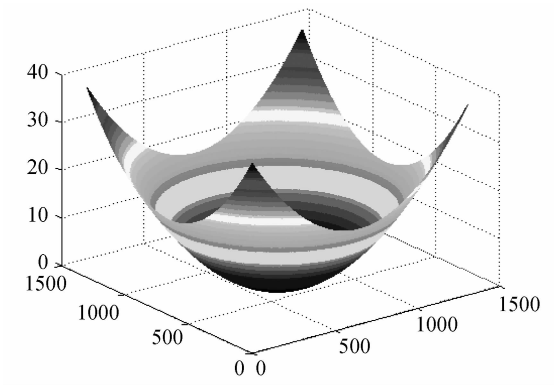


图 5 物体变形相位理论值的模拟结果

Fig. 5 The simulation results of the theoretical value of deformation

应用于物体离面位移测量所得到的模拟计算值和物体变形相位的理论值相吻合，这表明将涡旋光应用于物体变形测量的方案可行. 另外，与常规的平面光散斑相比，拓扑荷值不同的涡旋光干涉可以产生不同的条纹图样，可应用于物体的防伪和加密三维形貌和变形测量.

3 结论

分析了涡旋光与平面光、涡旋光与涡旋光的干涉特性，把涡旋光引入电子散斑干涉之中，实现物体的离面位移测量. 以周边固定、中心加载的试件为研究对象，模拟得到了物体变形前后的干涉图样. 模拟计算结果表明，物体变形后的干涉图样是明暗相间的分叉条纹，分叉的个数等于涡旋光的拓扑荷整数值. 叉口的开口方向取决于拓扑荷值的正负：拓扑荷为正数时开口向上，拓扑荷为负数时开口向下. 当拓扑荷值为非整数时，干涉条纹出现错位，拓扑荷值的小数部分决定了干涉条纹的错位大小，错位的量随小数值的增大而增大. 在物体变形前后分别进行四步相移操作，得到变形前后各四幅光强分布图，由此得到物体的变形相位，对求得的包裹相位进行解包裹之后可以求得物体的变形相位，该值与引入的离面变形相位的理论值相吻合. 理论计算和模拟实验结果表明，涡旋光可以应用于物体变形的位移测量，为变形测量提供了一种新的途径.

参考文献

[1] NYE J F, BERRY M V. Dislocations in wave trains[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 1974, **336**(1605): 165-190.

[2] SCHWARZ U T, SOGOMONIAN S, MAIER M. Propagation dynamics of phase dislocations embedded in a Bessel light beam[J]. *Optics Communications*, 2002, **208**(4): 255-262.

[3] KIVSHAR Y S, OSTROVSKAYA E A. Optical vortices folding and twisting waves of light[J]. *Optics and Photonics News*, 2001, **12**(4): 24-28.

[4] SOSKIN M S, GORSHKOV V N, VASNETSOV M V, *et al*. Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices [J]. *Physical Review A*, 1997, **56**(5): 4064-4075.

[5] LEACH J, PADGETT M J, BARNETT S M, *et al*. Measuring the orbital angular momentum of a single photon [J]. *Physical Review Letters*, 2002, **88**(25): 257901-257901.

[6] NG J, LIN Z, CHAN C T. Theory of optical trapping by an optical vortex beam[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(10): 103601.

[7] VERBEECK J, TIAN H, SCHATTSCHNEIDER P. Production and application of electron vortex beams [J]. *Nature*, 2010, **467**(7313): 301-304.

[8] ČELECHOVSKY R, BOUCHAL Z. Optical implementation of the vortex information channel [J]. *New Journal of Physics*, 2007, **9**(9): 328-340.

[9] SWARTZLANDER G A. Obtaining spatial information from an extremely unresolved source[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(24): 4731-4733.

[10] GUO Jian-jun, GUO Bang-hong, CHENG Guang-ming, *et al*. Research progress on photon orbital angular momentum in quantum communication applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(8): 080003.
郭建军，郭邦红，程广明，等. 光子轨道角动量在量子通信中应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(8): 080003.

[11] LV Fang-jie, JIN Wei-hua, LI Xin-zhong, *et al*.. Micro in-plane displacement measurement using digital speckle correlation method based on phase vortices[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(11): 2180-2185.
吕芳捷,金伟华,李新忠,等. 面内微位移测量的散斑相位涡旋相关方法研究[J]. 光电子 • 激光, 2013, **24**(11): 2180-2185.

[12] HERMO E, SPEKTOR B, SHAMIR J. Scattering of singular beams by subwavelength objects [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(1): 33-42.

[13] BEIJERSBERGEN M W, ALLEN L, VANDERVEEN H, *et al*. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular-momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, **96**(1-3): 123-132.

[14] ARLT J, DHOLAKIA K. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon[J]. *Optics Communications*, 2000, **177**(1-6): 297-301.

[15] NAM H A, COHEN M G, NOÉ J W. A simple method for creating a robust optical vortex beam with a single cylinder lens[J]. *Journal of Optics*, 2011, **13**(6): 1-5.

[16] ROTSCHILD C, ZOMMER S, MOED S, *et al*. Adjustable spiral phase plate[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(12): 2397-2399.

[17] GUO C, XUE D, HAN Y, *et al*. Optimal phase steps of multi-level spiral phase plates[J]. *Optics Communications*, 2006, **268**(2): 235-239.

[18] YUAN X C, LIN J, BU J. Achromatic design for the generation of optical vortices based on radial spiral phase plates[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(18): 13599-13605.

[19] HECKENBERG N R, MCDUFF R, SMITH C P, *et al*. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(3): 221-223.

[20] LI Hai-lian, YANG De-xing, REN Xiao-yuan, *et al*. Experimental investigation of optical vortex generated by volume holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 503-507.

李海莲，杨德兴，任小元，等. 体全息产生光学涡旋的实验研究[J]. 光学学报，2010，**30**(2)：503-507.

[21] BEKSHAEV A Y，SVIRIDOVA S V，POPOV A Y，*et al*. Generation of optical vortex light beams by volume holograms with embedded phase singularity [J]. *Optics Communications*，2012，**285**(20)：4005-4014.

[22] CURTIS J E，GRIER D G. Structure of optical vortices[J]. *Physical Review Letters*，2003，**90**(13)：133901-133904.

[23] LIU Y J，SUN X W，LUO D，*et al*. Generating electrically tunable optical vortices by a liquid crystal cell with patterned electrode[J]. *Applied Physics Letters*，2008，**92**(10)：101114.

[24] BO Bin，Menke Neimule，ZHAO Jian-lin，*et al*. Generation of vortex beams with a reflected type phase only LCSLM[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*，2012，**23**(1)：74-78.
薄斌，门克内木乐，赵建林，等. 用反射式纯相位液晶空间光调制器产生涡旋光束[J]. 光电子·激光，2012，**23**(1)：74-78.

[25] OSTROVSKY A S，RICKENSTORFF-PARRAO C，ARRIZōN V. Generation of the "perfect" optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Optics Letters*，2013，**38**(4)：534-536.

[26] BALISTRERI M L M，KORTERIK J P，KUIPERS L，*et al*. Local observations of phase singularities in optical fields in waveguide structures[J]. *Physical Review Letters*，2000，**85**(2)：294-297.

[27] JENKINS R M，BANERJI J，DAVIES A R. The generation of optical vortices and shape preserving vortex arrays in hollow multimode waveguides[J]. *Journal of Optics A：Pure and Applied Optics*，2001，**3**(6)：527-532.

[28] YIRMIYAHU Y，NIV A，BIENER G，*et al*. Vectorial vortex mode transformation for a hollow waveguide using Pancharatnam-Berry phase optical elements [J]. *Optics Letters*，2006，**31**(22)：3252-3254.

[29] ORON R，BLIT S，DAVIDSON N，*et al*. The formation of laser beams with pure azimuthal or radial polarization[J]. *Applied Physics Letters*，2000，**77**(21)：3322-3324.

[30] ORON R，DAVIDSON N，FRIESEM A，*et al*. Efficient formation of pure helical laser beams [J]. *Optics Communications*，2000，**182**(1-3)：205-208.

[31] CHU S C，OHTOMO T，OTSUKA K. Generation of doughnut like vortex beam with tunable orbital angular momentum from lasers with controlled Hermite-Gaussian modes[J]. *Applied Optics*，2008，**47**(14)：2583-2591.

[32] 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.

[33] SHAO Xiao-li，MA Juns-han，HOU Le-xin，*et al*. Generation of high order hermite gaussian modes directly in gas lasers[J]. *Optical Instruments*，2013，**35**(5)：20-23.
邵晓丽，马军山，侯乐鑫，等. 气体激光器自激励产生各高阶厄米-高斯光束[J]. 光学仪器，2013，**35**(5)：20-23.

[34] SUN Ping，FAN Xiang-ju，WANG Xing-hai. Three-dimensional electronic speckle pattern interferometry with carrier modulation by using large-shearing block prism[J]. *Acta Optica Sinica*，2011，**31**(4)：0412012.
孙平，范香菊，王兴海. 基于大错位方棱镜的三维载频电子散斑干涉技术[J]. 光学学报，2011，**31**(4)：0412012.

[35] SUN Ming-yong，CAI Kang，YANG De-yu，*et al*. Three-dimensional deformation measurement with the combination of DSCM and ESPI[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*，2012，**49**(11)：122-127.
孙明勇，蔡康，杨德宇，等. 数字散斑相关法和电子散斑干涉术 相结合的三维变形测量方法[J]. 激光与光电子学进展，2012，**49**(11)：122-127.

[36] LI Ming-yue，CHEN Zi-yang，LIU Hui，*et al*. Generation and interference of vortex beams[J]. *Acta Physica . Sinica*，2010，**59**(3)：1740-1748.
李阳月，陈子阳，刘辉，等. 涡旋光的产生与干涉[J]. 物理学报，2010，**59**(3)：1740-1748.

[37] CAI Chang-qing，HE Ling-feng. Phase difference extraction based on four-step phase shifting[J]. *Journal of South China University of Technology：Natural Science Edition*，2011，**29**(9)：93-96.
蔡长青，贺玲凤. 基于四步相移的相位差提取方法[J]. 华南理工大学学报：自然科学版，2011，**29**(9)：93-96.