

# 自加速艾里光束的生成及控制

李绍祖<sup>1</sup>, 沈学举<sup>1</sup>, 王龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

<sup>2</sup>武警士官学校, 浙江 杭州 311400

**摘要** 基于切线簇的概念,从几何光学的角度分析了自加速艾里光束的形成过程,以及艾里光束入射面相位分布与其自加速轨迹的关系,并给出了根据自加速轨迹分布函数推算艾里光束入射面相位分布的迭代算法,讨论了艾里光束自修复特性的形成原理。利用液晶空间光调制器调制准直激光束实验生成了二维艾里光束,并对其无衍射、自加速、自修复等特性进行了验证。此外还通过对一维艾里光束的调控实验生成了自聚焦光束和类贝塞尔光束等新型的光束。

**关键词** 激光光学; 光束整形; 艾里光束; 自聚焦光束; 类贝塞尔光束; 液晶空间光调制器

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0505003

## Generation and Control of Self-Accelerating Airy Beams

Li Shaozu<sup>1</sup>, Shen Xueju<sup>1</sup>, Wang Long<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics and Optics Engineering, Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

<sup>2</sup>Non-Commissioned Officers School of CAPF, Hangzhou, Zhejiang 311400, China

**Abstract** The generating process of self-accelerating Airy beams is researched from the viewpoint of geometric optics, and the relationship between the phase distribution on the incident plane and the self-accelerating trajectory of Airy beams is analyzed based on the concept of tangent clusters. A iterated algorithm for calculating the phase distribution of the airy beam incidence surface based on the self-acceleration trajectory distribution function is proposed, and the formation principle of the self-healing property of Airy beams is also discussed. Two-dimensional Airy beams are generated by collimated laser modulated with spatial light modulator, and the features of these beams such as non-diffraction, self-healing and self-accelerating are verified. In addition, the one-dimensional Airy beams are modulated to generate autofocusing beams and Bessel-like beams.

**Key words** laser optics; laser beam shaping; Airy beam; autofocusing beam; Bessel-like beam; liquid-spatial light modulator

**OCIS codes** 140.3300; 050.1940; 060.5060

## 1 引 言

1979年, Berry和Balazs<sup>[1]</sup>通过求解薛定谔方程得出了艾里波包解,该波包在自由空间中传播时能保持稳定的形态并且具有自加速特性,由于该解是平方不可积的,即这种理想的艾里光束携带无穷能量,所以在实验中无法产生。2007年, Christodolides等<sup>[2]</sup>利用指数函数作为衰减因子对

“无限能量艾里光束”进行“截趾”得出了“有限能量艾里光束”,并利用计算全息图(CGH)生成了具有有限能量的艾里光束。此后,研究者对艾里光束的无衍射特性、自加速特性和自修复特性<sup>[3-5]</sup>及其潜在的应用<sup>[6-20]</sup>进行了大量研究。

目前实验室多采用计算全息的方法生成艾里光束<sup>[21-25]</sup>,基本的实验步骤可分为两个部分:首先需根据要生成的艾里光束的傅里叶谱编码制作CGH,再

收稿日期: 2017-11-28; 收到修改稿日期: 2018-01-16

作者简介: 李绍祖(1993—),男,硕士研究生,主要从事光束整形方面的研究。E-mail: lishaozu2017@163.com

导师简介: 沈学举(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光技术和光学信息处理方面的研究。

E-mail: shxjoptics@aliyun.com

对经 CGH 调制的准直激光束进行光学傅里叶逆变换,即可获得目标光束。本文根据艾里光束的预定自加速轨迹求出相位模板的相位分布,并编码生成相位模板,利用空间光调制器(SLM)对准直光束整形直接生成了艾里光束,实验研究了其传输特性。此外,还通过对一维艾里光束的调控生成了其他新型光束。

## 2 基本原理及特性分析

### 2.1 自加速艾里光束入射面相位分布的求解

首先,从结构相对简单的一维(1D)艾里光束开始分析。根据文献[3],一维艾里光束的波函数可表示为

$$\psi(\xi, s) = A_i [s - (\xi/2)^2] \exp[i(s\xi/2) - i(\xi^3/12)], \quad (1)$$

式中: $A_i$  为艾里函数; $\xi = z/kx_0^2$  为归一化传输距离, $x_0$  为常量, $k = 2\pi n/\lambda_0$  为波数, $n$  为折射率, $\lambda_0$  为真空中波长; $s = x/x_0$ , 为无量纲横坐标。

从(1)式可以看出,艾里光束在空间中的分布具有明显边界,即其自加速轨迹,并且在该边界的一侧不存在光场分布。因此,通过边界上点的光线一定是边界切线,如图 1 所示,图中曲线表示光束的自加速轨迹,直线表示光线。

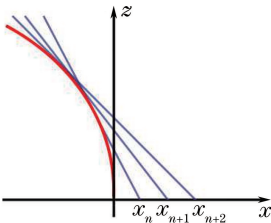


图 1 一维自加速艾里光束的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 1D self-accelerating Airy beams

由于光束边界上每一点的切线与其入射面有唯一的交点,该交点处光场的波矢方向可由切线的斜率确定,则艾里光束入射面上个点的波矢分布可根据目标光束自加速轨迹的形状确定,再依照光波波前和波矢间的关系即可逆向推导出入射面上的相位分布,详细推导过程如下。

令一维艾里光束的自加速轨迹为抛物线形,即

$$x = bz^2, \quad (2)$$

式中: $x$  为径向坐标; $z$  为传输距离; $b$  为常数。则自加速轨迹上 $(x_n, z_n)$ 点的切线簇方程为

$$x = 2\sqrt{bx_n}(z - z_n) + x_n, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

由(2)式和(3)式得切线和入射面的交点坐标

$x_m = -x_n$ , 则入射面上  $x_m$  处波矢的斜率  $k_m$  为

$$k_m = -\frac{[P(x_m) - P(x_{m-1})] \times \lambda}{2\pi(x_m - x_{m-1})}, \quad (4)$$

式中: $P(x_m)$  为入射面上  $x_m$  处的相位 [ $m = 0, 1, 2, 3, \dots; P(x_0) = 0$ ];  $\lambda$  为波长。由(4)式得入射面上相位分布为

$$P(x_m) = \frac{2\sqrt{bx_m}(x_m - x_{m-1}) \times 2\pi}{\lambda} + P(x_{m-1}). \quad (5)$$

对于具有其他形状自加速轨迹的艾里光束,给出如下通用公式。设自加速轨迹方程为

$$z = f(x), \quad (6)$$

则自加速轨迹上点 $(x_n, z_n)$ 处切线与入射面交点的坐标  $x_m$  为

$$x_m = g(x_n), \quad (7)$$

式中: $g(*)$  为  $x_n$  和  $x_m$  间的映射算符。入射面上的相位分布  $P(x_m)$  与自加速轨迹间的关系为

$$P'(x_m) = -1/f'(x_n), \quad (8)$$

式中: $P'(*)$  和  $f'(*)$  分别为  $P(x)$  和  $f(x)$  的导数,再对(8)式进行积分运算便可求解出  $P(x_m)$ 。

二维艾里光束可以看作两个相互正交的一维艾里光束线性叠加的结果,求解其入射面相位分布的方法与上述过程相似。首先,对二维(2D)艾里光束的自加速轨迹进行正交分解,如图 2 所示,将其自加速轨迹  $L$  分别投影到  $xoz$  面和  $yo z$  面。然后,按照投影轨迹  $l_x$  和  $l_y$  分别求解两投影分量相应的相位分布  $P(x_m)$  和  $P(y_m)$ ,最后将两者线性叠加便可得到入射面的相位分布:

$$P(x_m, y_m) = P(x_m) + P(y_m). \quad (9)$$

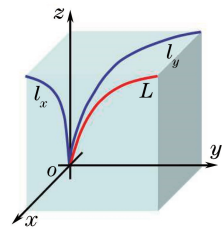


图 2 二维艾里光束的自加速轨迹投影示意图

Fig. 2 Projection diagram of self-accelerating trajectory of 2D Airy beams

当给定自加速轨迹后,便可利用上述方法计算出目标艾里光束的入射面相位分布,将其编码为相位模板,并加载到 SLM,通过准直激光束照射直接输出艾里光束。由于相位模板的孔径是有限的,所以如此生成的艾里光束传输距离也是有限的,其最大值可表示为

$$z_{\max} = f^{-1}(x_{\max}), \quad (10)$$

式中： $f^{-1}(\ast)$ 为自加速轨迹方程的反函数； $x_{\max}$ 为入射面上相位模板边界的坐标。

以上内容从几何光学的角度论述了艾里光束自加速轨迹与其入射面相位分布的关系，这种方法不但免去了复杂的公式推导，还有助于直观理解艾里光束的形成过程及其各种特性的形成原理。

### 2.2 自修复特性分析

通常所说的自修复特性都是针对艾里光束的主

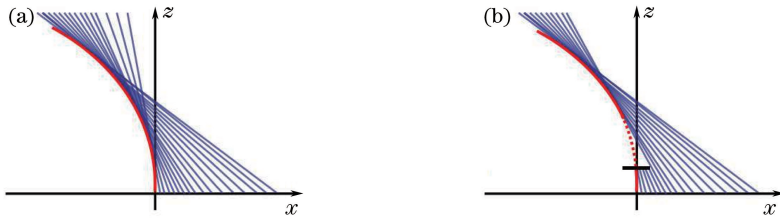


图 3 自修复原理示意图。(a)未遮挡主光斑；(b)遮挡主光斑，虚线表示消失的主光斑轨迹  
Fig. 3 Schematic diagram of self-healing principle. (a) Main light spot that is not blocked; (b) main light spot is blocked by a baffle, dotted line depicts vanishing trajectory

当某处的主光斑被障碍物遮挡住后，如图 3(b)所示，来自入射面且仅会聚在障碍物附近的光线被遮挡，其他光线则继续传播，分别会聚在自加速轨迹不同的位置上，即障碍物仅遮挡住了一部分主光斑，这就导致了主光斑自修复的错觉。此外，障碍物遮挡的光线是其后面次级光斑的组成成分，所以还可以预知障碍物后方次级光斑的发生情况。

### 3 仿真及实验结果

实验装置示意图如图 4 所示，波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光束经准直光学系统准直后透过分光棱镜 (BS) 照射至载有相位模板的 SLM (Holoeye, PLUTO-VIS-014, 像素间距 8  $\mu\text{m}$ , 像素数 1920  $\times$  1080), 准直激光束经相位模板调制转换成艾里光束, 再由分光棱镜输出。输出光束在不同截面上的相对光强度分布由 OK-AM1110 型 CCD 摄像头记录。

光斑而言，即自加速轨迹附近的光场特性。因此可从几何光学的角度出发对这种特性作直观解释。如图 3(a)所示，从几何意义上讲，构成艾里光束的光线为其自加速轨迹的切线簇，因此自加速轨迹附近的光线分布比较密集，而远离轨迹的位置光线分布稀疏，这导致自加速轨迹附近的光较强，从而形成主光斑。值得注意的是，在自加速轨迹某处的主光斑并不是由入射面发出的所有光线会聚而成，而是由一小部分的光线会聚而成。

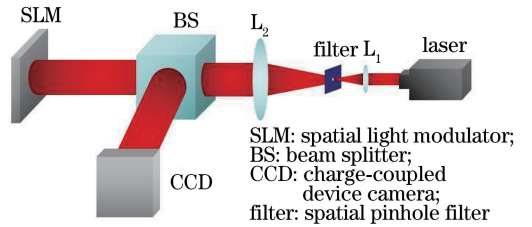


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental device

实验中选择一维艾里光束的自加速轨迹及二维艾里光束两个投影分量的轨迹均为  $b = 9 \times 10^{-6}$  的抛物线。为便于实验中观察生成的艾里光束，令艾里光束最大传输距离不超过 60 cm, 经(10)式计算，将相位模板的宽度取为 3 mm。为了比较，实验结果中也给出了相应的仿真结果。

按(5)式和(9)式计算得到一维和二维相位模板的相位分布，如图 5 所示。

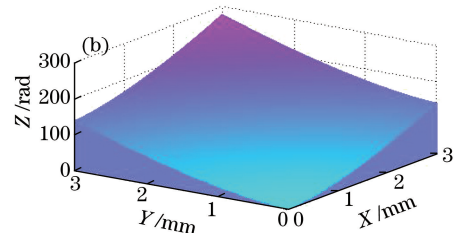
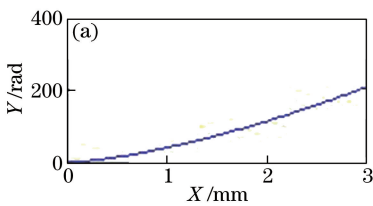


图 5 相位模板的相位分布。(a)一维；(b)二维

Fig. 5 Phase distribution of phase mask. (a) One dimension; (b) two dimension

按图 4 所示的实验装置示意图搭建实验光路，将图 5 所示的相位分布编码成相位模板并加载到纯相

位 SLM 上，在准直激光束照射下由相位模板变换生成的艾里光束如图 6 所示，其中图 6(a)是由图 5(b)

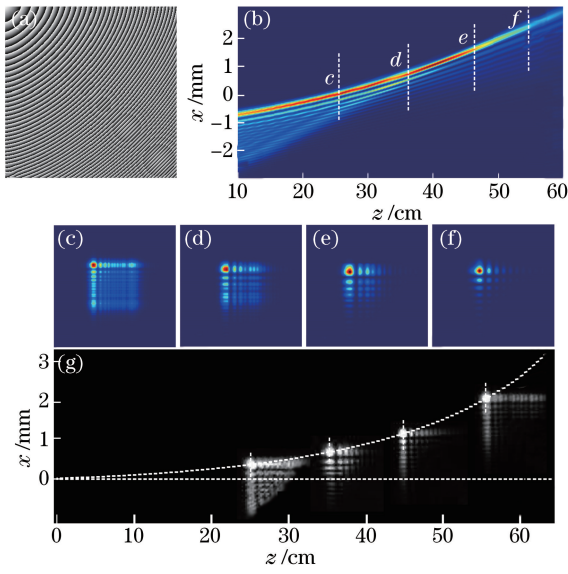


图 6 仿真和实验结果。(a)相位模板;(b)仿真艾里光束侧视图;(c)~(f)  $z=25, 35, 45, 55$  cm 处仿真艾里光束的光斑强度分布;(g)对应于(b)~(f)的实验结果

Fig. 6 Results of simulation and experiment. (a) Phase mask; (b) simulated side view of Airy beams; (c)-(f) transverse intensity distribution of the simulated beams, the  $z$  coordinates are 25, 35, 45, 55 cm, respectively; (g) experimental results corresponding to (b)-(f)

所示的相位分布编码生成的相位模板,图 6(b)为仿真得到的艾里光束侧视图,图 6(c)~(f)分别为图 6(b)中虚线处对应的光斑强度分布。图 6(g)为对应于图 6(b)~(f)的实验结果,可以看出从 SLM 输出的光束的确沿抛物线轨迹传输,并且各截面处的光斑具有稳定的分布形态,呈现出自加速和无衍射特征。

为进一步验证所生成光束的自修复特性,在光路中放置障碍物遮挡住艾里光束的主光斑,图 7(a)为未经遮挡的光斑,图 7(b)为紧贴障碍物之后的光强分布,图 7(c)~(f)分别为障碍物之后每隔 10 cm 处艾里光束强度分布。由图 7(b)~(d)可以看出,当主光斑被遮挡后,随着光束的传输,主光斑又逐渐恢复出来,当传播距离达 40 mm 时,恢复的主光斑已非常明显。而且可以看出,在光束的自恢复过程中,次级光斑的强度逐渐变弱,其轮廓也变得模糊不清,这一现象也与笔者对自修复特性分析的结果相符。

#### 4 一维艾里光束的调控

基于上述方法,将一维艾里光束的相位分布作为基本操作单元,通过不同的排列设计得到其他新型的光束相位模板,下面列举了两种不同的排列方式及相应的实验结果。

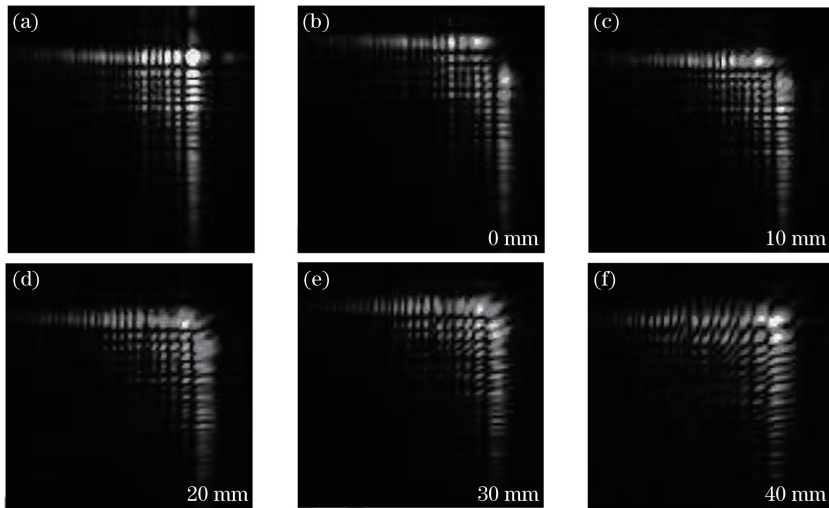


图 7 自修复实验结果。(a)未遮挡的光斑;(b)障碍物之后的光斑;(c)~(f)距障碍物分别为 10,20,30,40 mm 处的光斑  
Fig. 7 Results of self-healing experiment. (a) Light spot that is not blocked; (b) intensity distribution behind block; (c)-(f) intensity distribution at plane with relative distance  $d=10, 20, 30, 40$  mm, respectively

#### 4.1 自聚焦光束

生成步骤如下:1)将图 3(a)所示的一维相位分布绕半径为 1.32 mm 的圆周均匀分布,生成自聚焦光束的相位分布,再将其编码生成相位模板;2)将设计的相位模板和闪耀光栅叠加在一起,如图 8(a)所示,闪耀光栅的作用是将目标光束和 SLM 的零级分离;3)

将叠加了闪耀光栅的相位模板加载到 SLM 上,在准直激光束照射下即可生成自聚焦光束。图 8(b)~(g)是距离 SLM 分别为 15,16,17,18,19,20 cm 处由 CCD 摄像头记录的光斑。从图 8 可以看出,随着光束的传输,环形光斑逐渐会聚成一个小光点,生成的光束和文献[7]中用传统方法生成的自聚焦光束相同。

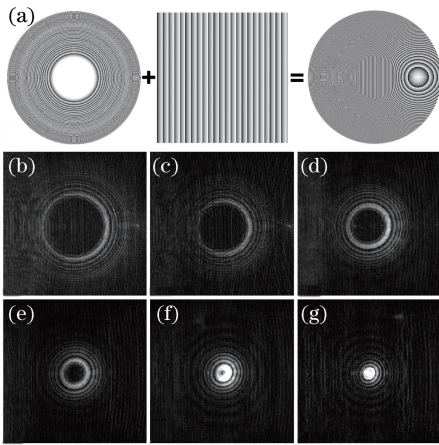


图 8 自聚焦光束。(a)相位模板;(b)~(g)距离 SLM 分别为 15,16,17,18,19,20 cm 处的光斑

Fig. 8 Abruptly autofocusing beam. (a) Phase mask; (b)-(g) transverse intensity distribution at different location, the propagation distances are  $d=15, 16, 17, 18, 19, 20$  cm, respectively

#### 4.2 类贝塞尔光束

将图 3(a)所示的一维相位分布绕着一点均匀分布,生成类贝塞尔光束的相位分布,再将其编码生成相位模板,然后在相位模板上叠加闪耀光栅以消除 SLM 零级的影响,具体过程如图 9(a)所示。

图 9(a)所示的相位模板调制准直激光束生成的类贝塞尔光束如图 9(b)~(d)所示。从图 9(b)~(d)可以看出,所生成的光束具有与贝塞尔光束相似的强度分布形式,并且在一定的传输距离内可以保持稳定的形态,呈现出无衍射特性。

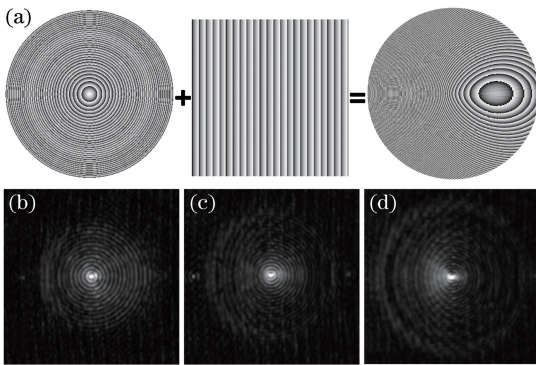


图 9 类贝塞尔光束。(a)相位模板;(b)~(d)距离 SLM 分别为 8,9,10 cm 处的光斑

Fig. 9 Bessel-like beam. (a) Phase mask; (b)-(d) transverse intensity distribution at different location, the propagation distances are  $d=8, 9, 10$  cm, respectively

## 5 结 论

基于切线簇的概念,从几何光学的角度得出艾

里光束入射面的相位分布及其自加速轨迹间的迭代关系式。根据上述关系对具有预定自加速轨迹的艾里光束入射面的相位分布进行求解,并通过以一维艾里光束相位模板的组合设计获得其他特殊光束。最后利用纯相位 SLM 对所介绍的理论及方法进行实验验证。结果表明,这种方法简单、有效,不但可以简化生成艾里光束实验系统的结构,还可通过设计光束的自加速轨迹的形状及分布来直观控制艾里光束,使艾里光束在应用过程中更加灵活便捷。

### 参 考 文 献

- [1] Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets [J]. American Journal of Physics, 1979, 47(3): 264-267.
- [2] Christodoulides D N, Siviloglou G A. Accelerating finite energy Airy beams [J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 979-981.
- [3] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, et al. Observation of accelerating Airy beams [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(21): 213901.
- [4] Dogariu A, Christodoulides D N, Siviloglou G A, et al. Self-healing properties of optical Airy beams [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12880.
- [5] Yang B, Qin Y L, Liu X, et al. Self-healing property of two-dimensional Airy beams [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070501. 杨斌, 覃亚丽, 刘鲜, 等. 二维艾里光束的自愈特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070501.
- [6] Schley R, Kaminer I, Greenfield E, et al. Loss-proof self-accelerating beams and their use in non-paraxial manipulation of particles' trajectories [J]. Nature Communications, 2014, 5(5): 5189.
- [7] Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets [J]. Nature Photonics, 2008, 2(11): 675-678.
- [8] Xu H, Zhang Y H, Zhang X, et al. Airy beam light sheet microscopy with deconvolution [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0318013. 徐豪, 张运海, 张欣, 等. 结合去卷积的艾里光束片状光显微成像研究 [J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0318013.
- [9] Zhang P, Prakash J, Zhang Z, et al. Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing Airy beams [J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2883-2885.
- [10] Li J X, Fan X L, Zang W P, et al. Vacuum electron acceleration driven by two crossed Airy beams [J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 648-650.
- [11] Li J X, Zang W P, Tian J G. Vacuum laser-driven

- acceleration by Airy beams [J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 7300-7306.
- [12] Epstein I, Arie A. Arbitrary bending plasmonic light waves[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(2): 023903.
- [13] Volochbloch N, Lereah Y, Lilach Y, *et al.* Generation of electron Airy beams[J]. *Nature*, 2013, 494(7437): 331-335.
- [14] Zhang P, Wang S, Liu Y, *et al.* Plasmonic Airy beams with dynamically controlled trajectories [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3191-3193.
- [15] Rose P, Diebel F, Boguslawski M, *et al.* Airy beam induced optical routing[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(10): 046602.
- [16] Mathis A, Courvoisier F, Froehly L, *et al.* Micromachining along a curve: Femtosecond laser micromachining of curved profiles in diamond and silicon using accelerating beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(7): 106-678.
- [17] Liang Y, Hu Y, Song D, *et al.* Image signal transmission with Airy beams [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5686.
- [18] Jia S, Vaughan J C, Zhuang X. Isotropic 3D super-resolution Imaging with a self-bending point spread function[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 302-306.
- [19] Vettenburg T, Dalgarno H I C, Nylk J, *et al.* Light-sheet microscopy using an Airy beam [J]. *Nature Methods*, 2014, 11(5): 541-544.
- [20] Clerici M, Hu Y, Lassonde P, *et al.* Laser-assisted guiding of electric discharges around objects [J]. *Science Advances*, 2015, 1(5): e1400111.
- [21] Davis J A, Mitry M J, Bandres M A, *et al.* Generation of accelerating Airy and accelerating parabolic beams using phase-only patterns [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(17): 3170-3176.
- [22] Salandrino A, Cannan D, Zhang P, *et al.* Generation of linear and nonlinear nonparaxial accelerating beams [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(14): 2820-2822.
- [23] Davis J A, Mintry M J, Bandres M A, *et al.* Observation of accelerating parabolic beams [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12866-12871.
- [24] Vaveliuk P, Lencina A, Rodrigo J A, *et al.* Symmetric Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2370-2373.
- [25] Cheng Z, Zhao S H, Chu X C, *et al.* Research progress of the generation methods of Airy beam[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030008.
- 程振, 赵尚弘, 楚兴春, 等. 艾里光束产生方法的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 030008.