

文章编号: 1001-3806(2022)06-0850-05

艾里涡旋光束通过负折射率介质的传输特性

许森东

(浙江科技学院 理学院, 杭州 310023)

摘要: 为了研究 Airy 涡旋光束通过负折射率介质(NIM)的传输动力学特性,利用 Collins 公式推导出了 Airy 涡旋光束通过 NIM 的传输动力学方程,并用该方程研究了 Airy 涡旋光束在 NIM 中的光强、涡旋、相位等传输特性。结果表明,通过调节 NIM 的参数可实现对 Airy 涡旋光束主峰位置、涡旋位置、主峰与涡旋的重叠位置和光强的控制。光束在 NIM 中的特性研究在光学显微操控和光学分选等领域具有潜在价值。

关键词: 物理光学;艾里涡旋光束;负折射率介质;Collins 公式;光强;传输特性

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.06.022

Study on propagation properties of vortex Airy beams through negative index medium

XU Sendong

(School of Sciences, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to investigate the propagation dynamics of vortex Airy beams passing through the negative index medium (NIM), the propagation dynamics equation was obtained based on the Collins formula. The intensity, vortex, and phase were studied by using the equation. The results show that it is possible to controlling the center lobe, superimposition position, and the intensity by adjusting the parameters of the negative index medium. All these properties of the propagation of the beam in NIM may have applications in areas such as optical micromanipulation and optical sorting.

Key words: physical optics; vortex Airy beams; negative index medium; Collins formula; intensity; propagation properties

引 言

1979 年, BERRY 在解量子力学方程时,首次引入了艾里(Airy)函数^[1]。当时, Airy 函数并未得到相关科研人员的跟进研究,直到 2007 年, SIVILOGLOU 等人对有限能量 Airy 光束进行了专门研究^[2-3]。此后,科研人员发现 Airy 光束拥有许多奇特的传输性质, Airy 光束的研究迅速成为热点^[4-8]。在此基础上,将涡旋叠加在 Airy 光束的研究也成为了研究热点。例如 Airy 涡旋光束的漂移^[9]、在手征材料中的传输特性^[10]、单轴晶体中的传输特性^[11]、 M^2 因子与传输特性^[12]、部分相干 Airy 涡旋光束的特性^[13]等。

另一方面,负折射率自 1968 年被 VESELAGO 在理论上证明^[14]后也获得了科研人员大量关注和研

究^[15-16]。目前,科研人员可以通过多种方法实现负折射率介质(negative index medium, NIM)^[17-20],并且可以制造可见光范围的 NIM^[21]。由于 NIM 具有其它介质不具有的电磁特性,科研人员利用 NIM 获得了多种反常效应^[22-23]。

在上述研究的基础上,本文作者对 Airy 涡旋光束通过新型人工复合电磁介质即 NIM 的传输特性进行了研究。与普通介质不同, Airy 涡旋光束在 NIM 中具有独特的特性。利用 Collins 公式推导出了 Airy 涡旋光束通过 ABCD 光学系统的传输方程,并具体研究了通过 NIM 的传输特征。

1 Airy 涡旋光束通过 NIM 的传输方程

2 维有限能量 Airy 光束加载涡旋后,在初始平面($z=0$),场分布为^[10,24-25]:

$$E(x, y, 0) = f_A \left(\frac{x}{w_x} \right) \exp \left(\frac{ax}{w_x} \right) f_A \left(\frac{y}{w_y} \right) \exp \left(\frac{ay}{w_y} \right) \times [(x - x_d) + i(y - y_d)]^l \quad (1)$$

作者简介:许森东(1981-),男,硕士,高级实验师,现主要从事人工复合电磁介质的研究。

E-mail: xusendong@163.com

收稿日期:2021-09-22;收到修改稿日期:2021-10-18

式中, w_x 和 w_y 为 x 和 y 方向横向尺度比例参数; a 为指数截断因子, 其大小决定了光束衰减快慢; x_d 和 y_d 为原始位置, l 为拓扑荷数; $f_A(\cdot)$ 即为 Airy 函数:

$$f_A(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{iu^3}{3} - iux\right) du \quad (2)$$

当 Airy 涡旋光束通过 NIM 时, 根据 Collins 公式得到 Airy 涡旋光束通过 NIM 的传输动力学方程:

$$E(x, y, z) = \frac{ik_0}{2\pi B} \iint E(x_0, y_0, 0) \times \exp\left\{-\frac{ik_0}{2B} [A(x_0^2 + y_0^2) - 2(xx_0 + yy_0) + D(x^2 + y^2)]\right\} dx_0 dy_0 \quad (3)$$

式中, x_0 和 y_0 为输入平面的横坐标和纵坐标, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是真空中光的波数; A, B, D 分别为 ABCD 矩阵光学的传输矩阵元。

由于拓扑荷数对光束的传输特性没有明显影响^[26], 为便于研究, 选取单位拓扑荷数。把(1)式代入(3)式, 选取涡旋的拓扑荷数 $l=1$, 经积分整理可得:

$$E(x, y, z) = \frac{B}{k_0 A^2} \exp[Q(x, y, z)] (P_1 + P_2 + P_3) \quad (4)$$

式中,

$$Q(x, y, z) = \frac{a}{A} \left(\frac{x - 2x_c}{w_x} + \frac{y - 2y_c}{w_y} \right) + \left(\frac{-ik_0 D}{2B} + \frac{ik_0}{2AB} \right) \times (x^2 + y^2) + i \left[\frac{B^3}{12A^3 k_0^3} \left(\frac{1}{w_x^6} + \frac{1}{w_y^6} \right) - \frac{a^2 B}{2Ak_0} \left(\frac{1}{w_x^2} + \frac{1}{w_y^2} \right) - \frac{B}{2A^2 k_0} \left(\frac{x}{w_x^3} + \frac{y}{w_y^3} \right) \right] \quad (5)$$

$$P_1 = \frac{k_0}{B} f_A \left(\frac{x - x_c}{Aw_x} - \frac{iaB}{Ak_0 w_x^2} \right) f_A \left(\frac{y - y_c}{Aw_y} - \frac{iaB}{Ak_0 w_y^2} \right) \times [x - Ax_d - 2x_c + i(y - Ay_d - 2y_c)] \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{-i}{w_x} \left[f_A' \left(\frac{x - x_c}{Aw_x} - \frac{iaB}{Ak_0 w_x^2} \right) + af_A \left(\frac{x - x_c}{Aw_x} - \frac{iaB}{Ak_0 w_x^2} \right) \right] \times f_A \left(\frac{y - y_c}{Aw_y} - \frac{iaB}{Ak_0 w_y^2} \right) \quad (7)$$

$$P_3 = \frac{1}{w_y} \left[f_A' \left(\frac{y - y_c}{Aw_y} - \frac{iaB}{Ak_0 w_y^2} \right) + af_A \left(\frac{y - y_c}{Aw_y} - \frac{iaB}{Ak_0 w_y^2} \right) \right] f_A \left(\frac{x - x_c}{Aw_x} - \frac{iaB}{Ak_0 w_x^2} \right) \quad (8)$$

式中, P_2 和 P_3 为 Airy 光束的复振幅, P_1 为 Airy 光束加载涡旋后的结果, 涡旋的中心可从(6)式得到: $(Ax_d + 2x_c, Ay_d + 2y_c)$; $f_A'(\cdot)$ 为 Airy 函数的导数; $x_c = \frac{B^2}{4Ak_0^2 w_x^3}, y_c = \frac{B^2}{4Ak_0^2 w_y^3}$, 为 Airy 光束主峰在 x 和 y 方向中心位置。

Airy 涡旋光束通过 NIM 介质的几何结构示意图如图 1 所示。

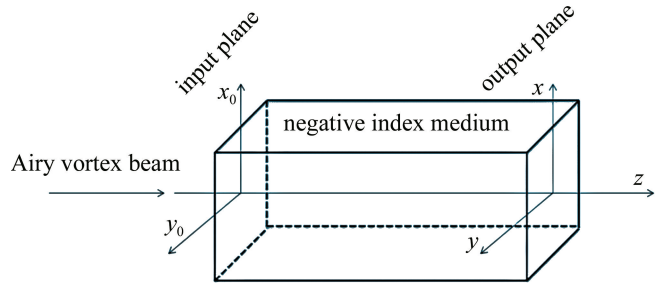


Fig. 1 Geometry of a vortex Airy beam passing through a negative index medium

根据矩阵光学理论可知, 当 Airy 涡旋光束通过 NIM 时, 光学传输系统的 ABCD 矩阵为:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & n \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, n 为 NIM 的折射率。由于 Airy 涡旋光束的主峰是自加速偏转的, 偏转加速度与 w_x, w_y 和 λ 有关。此外, 涡旋位置也随着传输距离增加而偏转。在某一特定传输距离处, Airy 涡旋光束的涡旋位置和 Airy 光束主峰位置重叠, 此时:

$$\begin{cases} x_c = Ax_d + 2x_c \\ y_c = Ax_d + 2y_c \end{cases} \quad (10)$$

根据(9)式和(10)式, 涡旋与主峰重叠时的 z 为:

$$z_0 = 2 |n| k_0 w_x \sqrt{-w_x x_d} \quad (11)$$

2 Airy 涡旋光束通过 NIM 的数值计算与分析

利用(4)式即可得到 Airy 涡旋光束通过 NIM 的光强和相位等传输特性。光源参数设定为: $a=0.05, \lambda=632.8\text{nm}, w_x=0.15\text{mm}, w_y=0.15\text{mm}, x_d=y_d=-0.3\text{mm}$ 。

当 $n = -1.1$ 时, 根据(11)式可知, 特殊传输距离 $z_0 = 695\text{mm}$ 。图2为传输距离是 $z_0, 1.8z_0, 2.6z_0, 3.4z_0$ 时光强和相位分布图。从图2a~图2d看出: 当 $z = z_0$ 时, Airy 光束主峰被涡旋破坏; 随着传输距离 z 的增加, Airy 光束的主峰又立刻恢复, 涡旋重新出现。这说明涡旋位置和 Airy 光束主峰的轨迹是不相同的, 只有在某一特定传输距离时二者重合, 重合时涡旋会破坏 Airy 光束的主峰。此外, 图2a~图2d还显示 Airy 光束主峰沿 $x=y$ 轴加速偏转, 主峰的位置始终在 x 轴和 y 轴的对角线上。图2e~图2h为传输距离是 $z_0, 1.8z_0, 2.6z_0, 3.4z_0$ 时对应的相位分布。图中箭头所指的位置

相位出现树杈型分布, 这就由涡旋的奇异性所致, 该树杈的交叉点即为涡旋的位置。从相位分布图可以看出: 当传输距离为 z_0 时涡旋被破坏, 随着传输距离的增加, 涡旋重新出现。此外, 同其它文献^[5]的相位分布对比发现, 本树杈同其它参考文献中树杈的方向是相反的, 这说明负折射会导致涡旋的方向转向。

图3为 $z = 2200\text{mm}$ 、NIM 的折射率 n 为 $-1, -1.5, -2$ 和 -2.5 时 Airy 涡旋光束光强分布图。从图3中可知, 当 z 固定时, 可以通过改变 NIM 的折射率控制 Airy 涡旋光束的主峰位置。

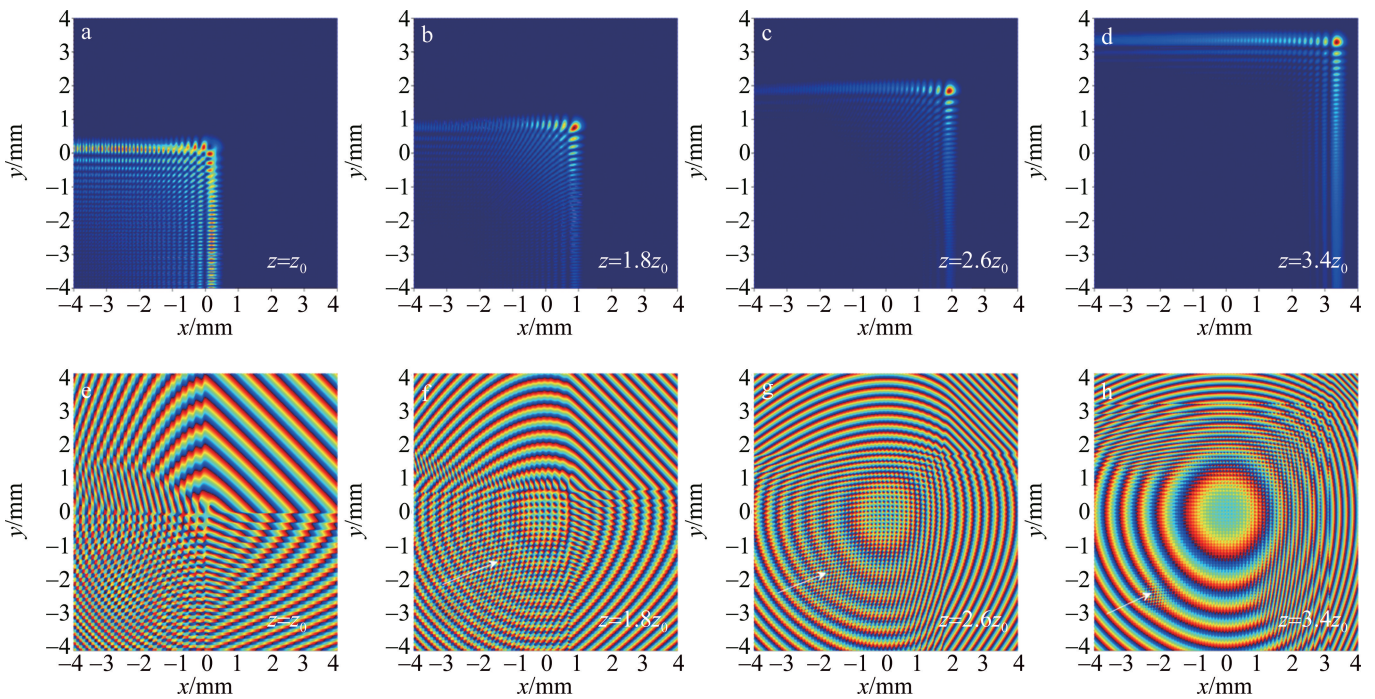


Fig. 2 Intensity and phase distributions at the positions $z_0, 1.8z_0, 2.6z_0, 3.4z_0$

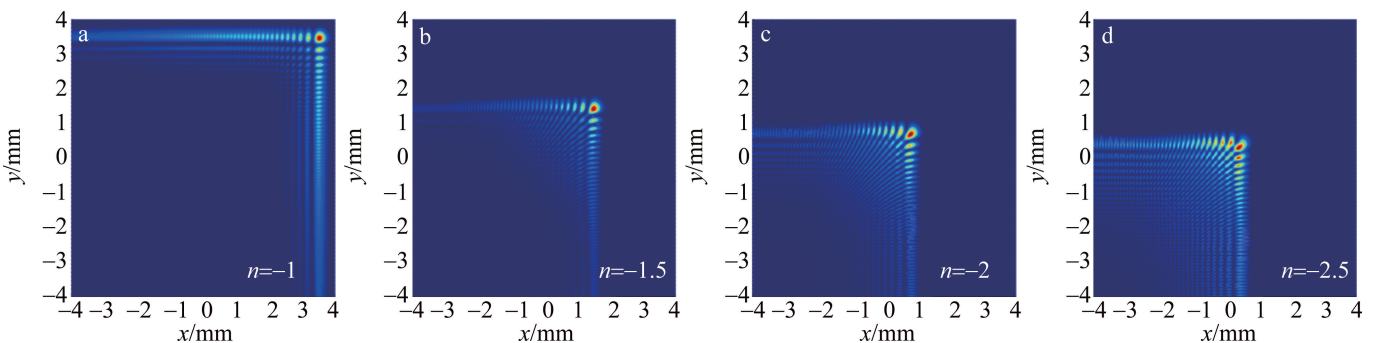


Fig. 3 Propagation dynamics of vortex Airy beams passing through the negative index medium

图4为 NIM 的折射率 n 为 $-1, -1.5, -2$ 和 -2.5 时 Airy 涡旋光束主峰位置和涡旋中心位置随传输距离变化图。从图4中可以看出, Airy 涡旋光束主峰位置和涡旋中心位置都随传输距离呈抛物线加速偏转,

但涡旋比主峰加速快。在一个特殊传输距离处, Airy 涡旋光束主峰位置和涡旋中心位置重叠。从图4中还能看出, 可以通过改变 NIM 的折射率控制该重叠位置在传输方向的位置, 但 x 轴的位置是不变的。

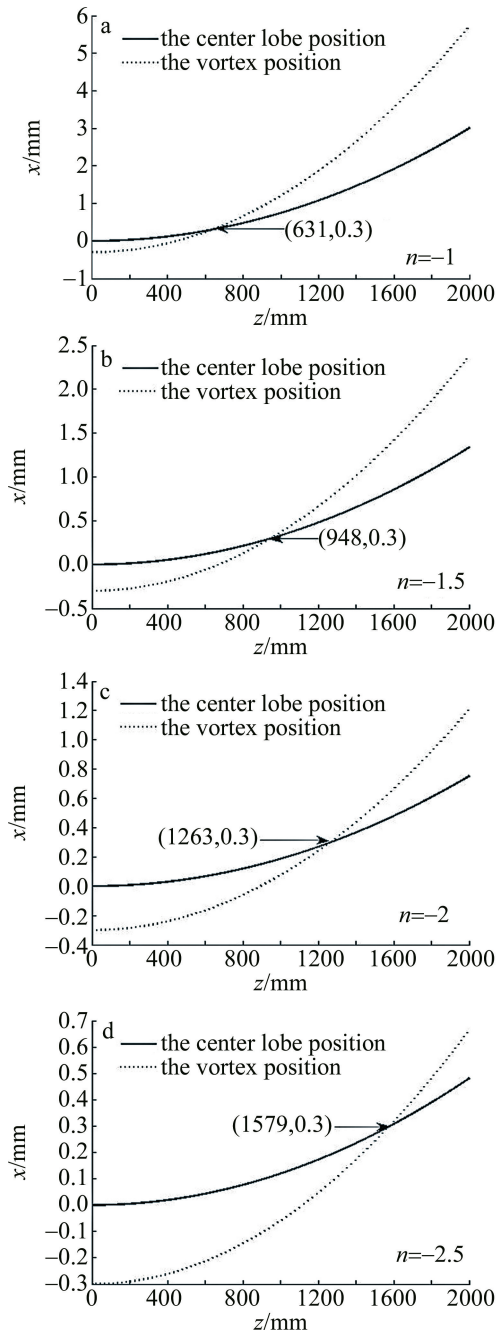


Fig. 4 Center lobe and the vortex of vortex Airy beams change with the propagation distance

3 结论

Airy 涡旋光束通过 NIM 的传输动力学特性研究表明: Airy 涡旋光束的涡旋中心位置同主峰一样随传输距离呈抛物线加速偏转, 但涡旋比主峰加速快; 在特定位置, Airy 涡旋光束的涡旋与主峰位置重叠, 此时, Airy 光束主峰被涡旋破坏, 涡旋也同时被 Airy 光束主峰破坏; 随着 z 增加, 涡旋与主峰分离, 涡旋再次出现, Airy 光束主峰恢复。由于 NIM 的独特光学性质, 导致

Airy 涡旋光束通过 NIM 时涡旋的方向与常规介质中涡旋的方向相反。此外, 通过调节 NIM 的折射率可实现对 Airy 涡旋光束光强、主峰位置和重叠位置的控制。研究显示, 可以通过 NIM 控制激光光束的偏转、强度等特性。此研究对应用物理光学对生物系统进行检测、治疗、加工和改造等方面具有实际的应用价值。

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] SIVILOGLOU G A, CHRISTODOULIDES D N. Accelerating finite energy Airy beams [J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 979-980.
- [3] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams [J]. Physical Review Letters, 2007, 99: 213901.
- [4] YUE Y Y, XIAO H, WANG Z X, *et al.* Research on diffraction and self-acceleration of Airy beam [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 044205 (in Chinese).
- [5] KE X Zh, WANG S. Evolution of the intensity of partially coherent Airy beam in atmospheric turbulence [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(7): 0701001 (in Chinese).
- [6] WANG S. Evolution of the intensity and experimental study of partially coherent Airy beam in atmospheric turbulence [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017: 5-8 (in Chinese).
- [7] QIAN Y X, MAO H X. Generation and propagation characteristics of generalized Airy beams with tunable trajectories [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(2): 0226001 (in Chinese).
- [8] JIN L, ZHANG X Q. Characteristics of Airy beam propagating in circular periodic media [J]. Laser Technology, 2019, 43(3): 432-436 (in Chinese).
- [9] CHENG Zh, CHU X Ch, ZHAO Sh H, *et al.* Study of the drift characteristics of Airy vortex beam in atmospheric turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1213002 (in Chinese).
- [10] LIU X Y, ZHAO D. Propagation of a vortex Airy beam in chiral medium [J]. Optics Communications, 2014, 321: 6-10.
- [11] DENG D, CHEN C, ZHAO X, *et al.* Propagation of an Airy vortex beam in uniaxial crystals [J]. Applied Physics, 2013, B110(3): 433-436.
- [12] CHEN R, ZHONG L, WU Q, *et al.* Propagation properties and M^2 factors of a vortex Airy beam [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2015-2019.
- [13] GAO J Q, ZHOU Zh L, XU H F, *et al.* Modal intensity of partially coherent Airy vortex beams in non-Kolmogorov turbulence [J]. Laser Technology, 2021, 45(4): 522-529 (in Chinese).
- [14] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [15] XU S D, FENG Y X. Study on propagation properties of Airy beams through negative index medium [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 0208002 (in Chinese).
- [16] XU S D, XU B J. Study on propagation properties of Gaussian schell-model beams in negative index medium [J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 595-598 (in Chinese).
- [17] FALCONE F, LOPETEGI T, LASO M A G, *et al.* Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials [J].

- Physical Review Letters, 2004, 93(19): 197401.
- [18] PIMENOV A, LOIDL A, GEHRKE K, *et al.* Negative refraction observed in a metallic ferromagnet in the gigahertz frequency range [J]. Physical Review Letters, 2007, 98(19): 197401.
- [19] RACHFORD F J, ARMSTEAD D N, HARRIS V G, *et al.* Simulations of ferrite-dielectric-wire composite negative index materials[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(5): 057202.
- [20] PARIMI P V, LU W T, VODO P, *et al.* Negative refraction and left-handed electromagnetism in microwave photonic crystals [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(12): 127401.
- [21] CHEN J, WANG Y, JIA B, *et al.* Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies [J]. Nature Photonics, 2011, 5(4): 239-242.
- [22] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [23] SEDDON N, BEARPARK T. Observation of the inverse Doppler effect [J]. Science, 2003, 302(5650): 1537-1540.
- [24] LIU X Y. Studies on propagation and optical trapping of non-Gaussian correlated partially coherent beams [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016:66-73(in Chinese).
- [25] HUA S. Research on the propagation properties of several types of the airy beams [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017:27-33(in Chinese).
- [26] DAI H T, LIU Y J, LUO D, *et al.* Propagation properties of an optical vortex carried by an Airy beam: Experimental implementation [J]. Optics Letters, 2011, 36(9): 1617-1619.