

doi:10.3788/gzxb20184711.1114003

非正则光涡旋通过倾斜透镜的动态传输

闫红卫, 王养丽

(武警工程大学 物理教研室, 西安, 710086)

摘 要: 基于广义惠更斯-菲涅尔衍射积分公式, 研究了寄居于高斯光束背景下含有相位拓扑荷(拓扑电荷) $m=+1, +2$ 的非正则光涡旋通过倾斜透镜后的动态演化特性. 研究发现, 拓扑电荷 $m=+1$ 的非正则光涡旋通过倾斜透镜后非正则度和拓扑电荷保持不变; 而由于非正则度的影响, 拓扑电荷 $m=+2$ 的非正则光涡旋通过倾斜透镜后会分裂成两个拓扑电荷为 $m=+1$ 、非正则度相等(等于初始面处拓扑电荷为 $+2$ 的非正则光涡旋的非正则度)的非正则光涡旋. 通过倾斜透镜传输后非正则光涡旋的位置取决于相对传输距离、离轴参数、非正则参数、倾斜因子、束腰宽度, 且在传输过程中拓扑电荷总和保持不变.
关键词: 非正则光涡旋; 倾斜透镜; 非正则度; 倾斜因子; 拓扑电荷

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)11-1114003-8

Dynamic Evolution of Noncanonical Optical Vortex through Tilted Lens

YAN Hong-wei, WANG Yang-li

(Teaching and Research Section of Physics, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: According to the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral, the dynamic evolution of a noncanonical optical vortex with phase topological charge (topological charge) of $m=+1$ and $+2$ in the background of a Gaussian beam passing through a tilted lens is studied. It is found that after passing through the tilted lens, the noncanonical strength and topological charge of the noncanonical optical vortex with topological charge of $m=+1$ remain unchanged, while the noncanonical optical vortex with topological charge of $m=+2$ will split into two noncanonical optical vortices with the same noncanonical strength (the noncanonical strength is equal to the noncanonical strength of the noncanonical optical vortex with topological charge of $+2$ at the initial plane) and the same topological charge of $m=+1$ due to the influence of noncanonical strength. The position of the noncanonical optical vortex after passing through the tilted lens depends on the relative propagation distance, off-axis parameter, noncanonical parameters, tilt coefficients, waist width, and the sum of the topological charge remains unchanged during the propagation.

Key words: Noncanonical optical vortex; Tilted lens; Noncanonical strength; Tilt coefficient; Topological charge

OCIS Codes: 140.0140; 260.6042; 050.4865; 350.5500

0 引言

在光场中振幅为零值的点, 位相变得不确定, 奇点光学研究具有位相奇异特性的光束, 不仅具有理论上的重要意义, 而且在原子俘获、光纤通信、遥感、光信息处理、新型超分辨光学显微镜以及奇异测偏振术等多方面具有潜在应用^[1-2]. 对寄居于高斯光束^[3]、贝塞尔光束^[4-6]、椭圆高斯光束^[7]、拉盖尔高斯光束^[8,9]中的正则光涡旋及其传输特性的研究分析指出高阶正则光涡旋在自由空间传输时很稳定. 非正则光涡旋的特点是光

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划面上项目 (No. 2017JM6113), 武警工程大学基础研究项目 (No. WJY201505) 和国家自然科学基金 (No. 11547050) 资助

第一作者: 闫红卫 (1982-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为高功率激光技术 (奇点光学). Email: 254862292@qq.com

收稿日期: 2018-07-01; **录用日期:** 2018-09-06

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

场的实部和虚部零值线相交形成一个非直角,交点是非正则光涡旋的核心,围绕非正则光涡旋的核心逆时针方向相位的增加量与围绕该光涡旋核心的方位角不成线性比例关系.MOLINA-TERRIZA G 等^[10]分别研究了寄居于高斯光束、椭圆高斯光束中的拓扑电荷为+1的非正则光涡旋在自由空间和非均匀介质中传输时的变化情况,指出当背景光束为高斯光束时,单拓扑电荷光涡旋的非正则度在传输时保持不变,而当背景光束或者传播介质表现出不对称时,单拓扑电荷光涡旋的非正则度会发生改变.SINGH R P 等^[11-12]在理论和实验上证实了寄居于高斯光束中的正则光涡旋通过柱面透镜后转化成非正则光涡旋.ROUX F S^[13]分析了非正则光涡旋的耦合,指出寄居于同一高斯光束中的不同拓扑电荷的正则光涡旋在传输过程中会转化成非正则光涡旋.闫和吕^[14]的研究表明寄居于一般椭圆高斯光束中拓扑电荷为+1的正则光涡旋通过自由空间和失调透镜后会转化成非正则光涡旋,拓扑电荷不总是守恒.王亚东^[15]等提出一种利用非正则(非传统)螺旋相位调控高阶涡旋光束拓扑结构的方法,指出非正则螺旋相位对高阶涡旋光束的调控特性,可抑制相位噪声等扰动所引起的拓扑结构随机退化现象.HABIBI H 等^[16]用 Hadgin 插值法模拟了非正则光涡旋.程等^[17]比较研究了径向非正则涡旋艾里光束阵列和径向非正则涡旋高斯光束阵列的远场特性.MAJI S 等^[18]研究了受高阶螺旋位错控制的非正则旋涡,发现每个非正则光涡旋周围相位变化率的行为有了新变化.实际中的光学透镜由于制造缺陷和失调常出现像差,本文通过倾斜透镜的动态传输特性,对寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+1和+2的非正则光涡旋做了详细研究,发现+1阶非正则光涡旋通过倾斜透镜传输过程中拓扑电荷总是守恒,非正则度保持不变,并且发现高阶非正则光涡旋通过倾斜透镜后不稳定.

1 理论模型

考虑寄居于高斯光束中的拓扑电荷为 m 的非正则光涡旋在初始平面 $z=0$ 处的场分布为^[10]

$$E(x_0, y_0, 0) = [x_0 - s + i(a + ib)y_0]^m \exp\left(-\frac{x_0^2 + y_0^2}{w_0^2}\right) \quad (1)$$

式中, w_0 表示高斯光束的束腰宽度, s 表示非正则光涡旋的离轴参数, $a + ib$ 为 m 阶非正则光涡旋的非正则度, a 和 b 为非正则参数, 拓扑电荷与非正则参数有关. 当 $a > 0$, 非正则光涡旋的拓扑电荷为 m , 当 $a < 0$, 非正则光涡旋的拓扑电荷为 $-m$.

假定焦距为 f 的倾斜透镜位于 $z=0$ 平面处, 由于倾斜对光场的影响可通过相位因子 $\exp[-ik(C_1x + C_2y)]$ 描述, C_1 和 C_2 为透镜 x 和 y 方向的倾斜因子^[19]. 基于傍轴近似理论和相应的广义惠更斯-菲涅尔衍射积分公式^[20], 并考虑倾斜透镜的影响, 寄居于高斯光束中的非正则光涡旋在 z 平面处的场分布表达式为

$$E(x, y, z) = (i/\lambda B) \exp[-ikD(x^2 + y^2)/2B] \iint E(x_0, y_0, 0) \times \exp[-ik(C_1x + C_2y)] \cdot \exp[-ikA(x_0^2 + y_0^2)/2B] \times \exp[ik(x_0x + y_0y)/B] dx_0 dy_0 \quad (2)$$

式中, k 是与波长 λ 有关的物理量, $k = 2\pi/\lambda$, 而 A, B, C, D 是传输矩阵元, 即

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - z/f & z \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

1.1 拓扑电荷 $m = +1$ 时

经过冗长和直接积分计算得到拓扑电荷为+1的非正则光涡旋通过倾斜透镜后在 z 平面处的场分布表达式为

$$E(x, y, z) = Q_M(ik/2\xi f) [x - s_z + i(a + ib)(y - Q)] \quad (4)$$

式中,

$$\begin{cases} Q_M = (i\pi/\lambda f \xi p_0^2) \exp[-ik(x^2 + y^2)/2f\xi] \exp[(q_1^2 + q_2^2)/p_0] \\ p_0 = 1/w_0^2 + ik(1 - \xi)/2f\xi \\ q_1 = ikx/2f\xi - ikC_1/2 \\ q_2 =iky/2f\xi - ikC_2/2 \\ s_z = (a\xi f C_1 k w_0^2 + a A k s w_0^2 - 2b\xi f s) / a k w_0^2 \\ Q = (a C_2 k w_0^2 - 2s) \xi f / a k w_0^2 \\ \xi = z/f \end{cases} \quad (5)$$

从式(4)和式(5)可以看出,拓扑电荷为+1的离轴非正则光涡旋通过倾斜透镜后光涡旋的非正则度不发生变化,都是 $a+ib$,进一步得出通过倾斜透镜后非正则光涡旋的位置取决于相对传输距离 ξ 、离轴参数 s 、非正则参数 a 和 b 、倾斜因子 C_1 和 C_2 、束腰宽度 w_0 ,且在传输过程中拓扑电荷保持不变。

1.2 拓扑电荷 $m=+2$ 时

经过积分得到拓扑电荷为+2的非正则光涡旋通过倾斜透镜后在 z 平面处的场分布表达式为

$$E(x, y, z) = Q_M(1/2p_0)[p_0 + 2q_1^2 + 2s^2p_0^2 - (a+ib)^2(p_0 + 2q_2^2) - 4sq_1p_0] + Q_M(1/2p_0)[4i(a+ib)q_1q_2 - 4i(a+ib)sq_2p_0] \quad (6)$$

当拓扑电荷为+2的非正则光涡旋共轴,即 $s=0$ 时,通过倾斜透镜后在焦平面处的场分布表达式为

$$E(x, y, z) = Q_M(-k^2/4f^2\xi^2p_0)[x-s_1+i(a+ib)(y-m_1)][x-s_2+i(a+ib)(y-m_2)] \quad (7)$$

式中

$$\begin{cases} R = \sqrt{\frac{(a^2-b^2-1)f^2}{a^2k^2w_0^2} + \sqrt{\frac{(a^2-b^2-1)^2f^4}{a^4k^4w_0^4} + \frac{4a^2b^2f^4}{a^4k^4w_0^4}}} \\ s_1 = bR - 2f^2b/Rk^2w_0^2 + fC_1 \\ m_1 = R + fC_2 \\ s_2 = -bR + 2f^2b/Rk^2w_0^2 + fC_1 \\ m_2 = -R + fC_2 \end{cases} \quad (8)$$

从式(7)可以看出,拓扑电荷为+2的共轴非正则光涡旋通过倾斜透镜后在焦平面处分裂成2个拓扑电荷为+1的非正则光涡旋,位置分别为 (s_1, m_1) 和 (s_2, m_2) ,并且这两个光涡旋的非正则度与初始平面处的2阶非正则光涡旋的非正则度一样都是 $a+ib$.被分裂的两个非正则光涡旋的距离为

$$\delta = \sqrt{4R^2(1+b^2) + 16f^4b^2/R^2k^4w_0^4 - 16f^2b^2/k^2w_0^2} \quad (9)$$

从式(9)可以看出拓扑电荷为+2的共轴非正则光涡旋通过倾斜透镜后在焦平面处分裂的两个光涡旋的距离仅仅与非正则参数 a 和 b 、束腰宽度 w_0 有关,与其他参数没有关系.根据式(7)也可以推出式(6)中的任意离轴($s \neq 0$)的+2阶非正则光涡旋通过倾斜透镜后,在 z 平面处的场分布表达式中 x^2 和 y^2 前面的系数与式(7)中 x^2 和 y^2 前面的系数相等,所以得出拓扑电荷为+2的离轴非正则光涡旋通过倾斜透镜后也分裂成2个拓扑电荷为+1的非正则光涡旋,并且这两个光涡旋的非正则度与初始平面处的拓扑电荷为+2的非正则光涡旋的非正则度一样,都是 $a+ib$,进一步得出通过倾斜透镜后两个非正则光涡旋的位置取决于相对传输距离 ξ 、离轴参数 s 、非正则参数 a 和 b 、倾斜因子 C_1 和 C_2 、束腰宽度 w_0 ,且在传输过程中拓扑电荷总和保持不变。

2 拓扑电荷 $m=+1$ 的非正则光涡旋通过倾斜透镜的动态传输

图1给出了寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+1的离轴非正则光涡旋通过倾斜透镜的三维轨迹和相应的相对传输距离处的等位相线图(线的间隔是 $\pi/4$),其中计算参数 $\lambda=632.8$ nm, $w_0=1$ mm, $f=100$ mm, $C_2=2 \times 10^{-3}$, $b=1$ 固定,取 $s=0.5$ mm, $a=1$, $C_1=1 \times 10^{-3}$.

从图1(a)可以看出,寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+1的非正则光涡旋通过倾斜透镜后,在横平面上非正则光涡旋的位置随着相对传输距离增加线性变化:涡旋的 x 位置随着相对传输距离增加线性减小,涡旋的 y 位置随着相对传输距离增加线性增大.当 $\xi=0.8$ 时,在初始平面处位于(0.5 mm, 0)的非正则光涡旋通过倾斜透镜后移动到(0.17 mm, 0.15 mm),围绕该非正则光涡旋的核心逆时针方向相位的增加量与围绕该光涡旋核心的方位角不成线性比例关系,如图1(b).随着传输距离增大,如图1(c),非正则光涡旋通过倾斜透镜后在焦平面处,该光涡旋移动到(0.09 mm, 0.19 mm).当相对传输距离进一步增大到 $\xi=1.2$ 时,该光涡旋移动到(0.008 mm, 0.23 mm).从图1(b)~(d)可以看出在不同的传输面上,非正则光涡旋的等位相线分布完全一样,所以通过倾斜透镜后,光涡旋的非正则度不发生变化,这与式(4)和(5)所得结论一致,并且通过倾斜透镜传输后拓扑电荷守恒。

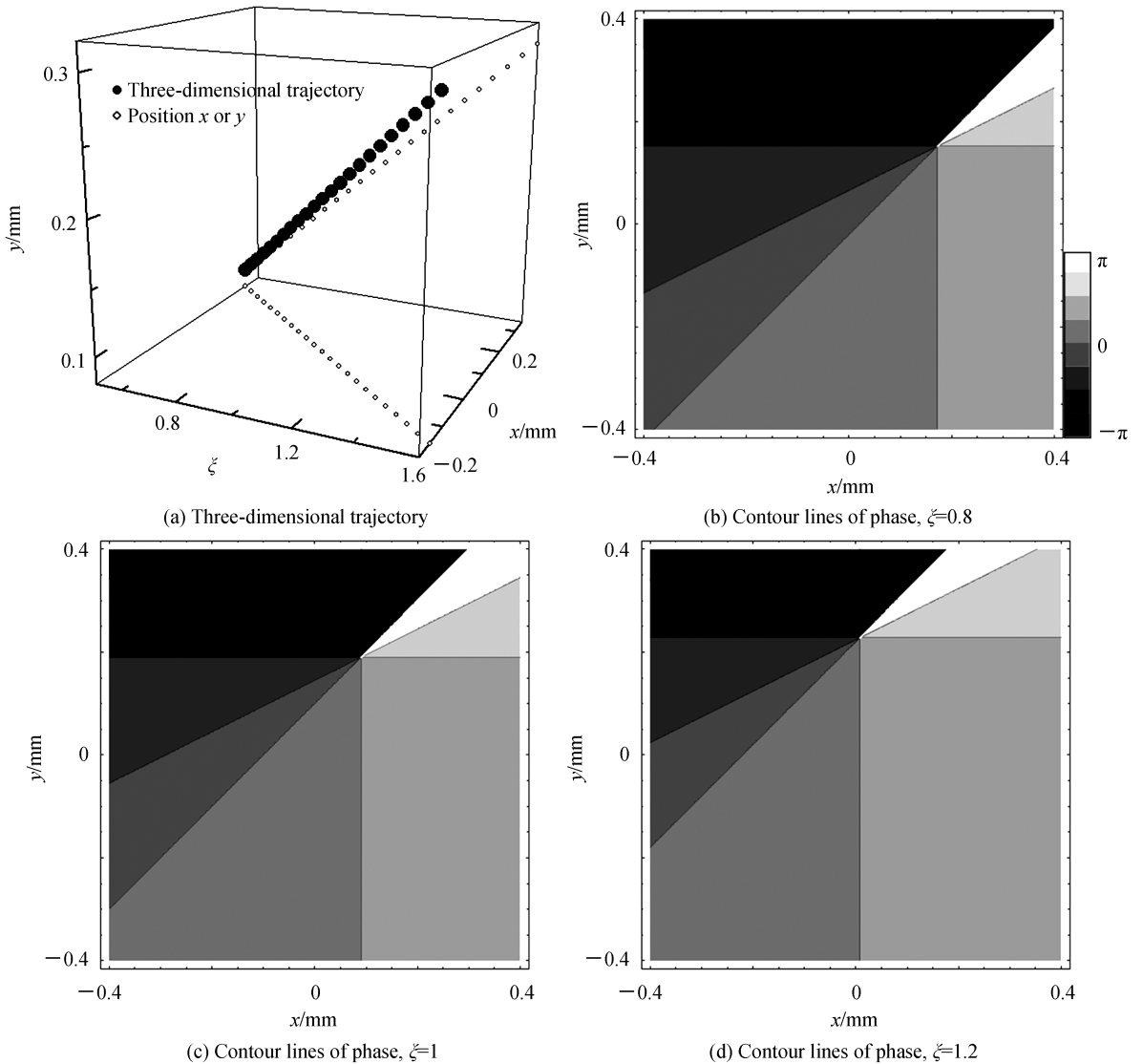


图 1 拓扑电荷为+1的离轴非正则光涡旋通过倾斜透镜的动态演化

Fig.1 The dynamic evolution of the off-axis noncanonical optical vortex with topological charge of +1 through the tilted lens

3 拓扑电荷 $m = +2$ 的非正则光涡旋通过倾斜透镜的动态传输

3.1 相对传输距离对非正则光涡旋的影响

图 2 给出了寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+2的离轴非正则光涡旋通过倾斜透镜的三维轨迹和相应的相对传输距离处的等位相线图,其中计算参数与图 1 相同。

从图 2 可以看出,寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+2的非正则光涡旋通过倾斜透镜后分裂成两个拓扑电荷都是+1的非正则光涡旋 A 和 B,随着相对传输距离增大,涡旋 A 和 B 的距离逐渐减小,且在焦平面处时,涡旋 A 和 B 的距离减小到最小.随着相对传输距离继续增大,涡旋 A 和 B 之间彼此远离.当 $\xi=0.8$ 时,如图 2(b),在初始平面处位于(0.5 mm, 0)的拓扑电荷为+2的非正则光涡旋通过倾斜透镜后分裂成两个拓扑电荷都是+1的非正则光涡旋 A 和 B,分别位于(0.10 mm, 0.14 mm)和(0.24 mm, 0.16 mm),且两涡旋的距离为 0.14 mm,围绕涡旋 A、B 的核心逆时针方向相位的增加量与围绕涡旋 A、B 核心的方位角不成线性比例关系,但是涡旋 A 和 B 由于非正则度相同所以等位相线分布完全相同.如图 2(c),当拓扑电荷为+2的非正则光涡旋通过倾斜透镜后在焦平面处,光涡旋 A 和 B 分别移动到(0.08 mm, 0.20 mm)和(0.10 mm, 0.18 mm),并且在此焦平面处非正则光涡旋 A 和 B 的距离减小为 0.03 mm,和图 2(a)一样,在焦平面处光涡旋 A 和 B 的距离达到最小.当相对传输距离进一步增大到 $\xi=1.2$ 时,如图 2(d),非正则光涡旋 A 和 B 分

别移动到(0.06 mm, 0.30 mm)和(-0.04 mm, 0.16 mm),且两光涡旋的距离增大为 0.17 mm.从图 2(b)~(d)可以看出在不同的传输面上,随着传输距离增大两个非正则光涡旋 A 和 B 先靠近再远离,但是在整个传输过程中两个光涡旋的拓扑电荷、等位相线分布始终不变,只不过由于非正则光涡旋 A 和 B 的相互作用,虽然它们的等位相线分布与图 1(b)~(d)的等位相线分布有差别,但是根据式(6)~(8),图 2(b)~(d)和图 1(b)~(d)的光涡旋的非正则度完全一样.所以通过倾斜透镜后,光涡旋的非正则度不发生变化,且拓扑电荷总和不变.

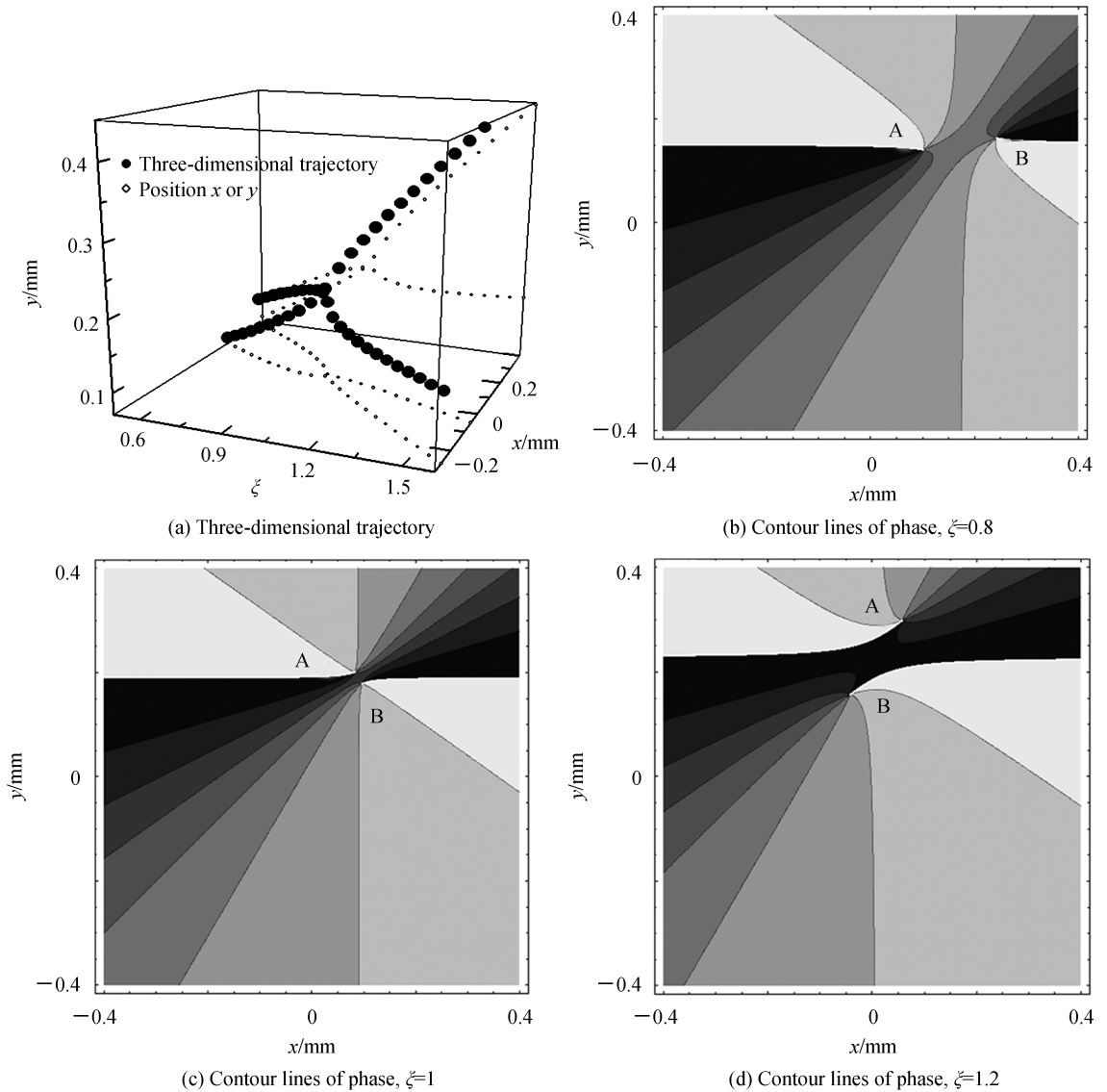


图 2 拓扑电荷为+2的离轴非正则光涡旋通过倾斜透镜的动态演化

Fig.2 The dynamic evolution of the off-axis noncanonical optical vortex with topological charge of +2 through the tilted lens

3.2 离轴参数对非正则光涡旋的影响

图 3 给出了寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+2的离轴非正则光涡旋通过倾斜透镜后,在焦平面处的横向位置 x 和 y 与离轴参数 s 的关系,其中,计算参数为 $z=100$ mm, $C_1=1 \times 10^{-3}$, $a=1$.从图 3 可以看出,寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+2的非正则光涡旋通过倾斜透镜后分裂成两个拓扑电荷都是+1的非正则光涡旋 A 和 B,并且光涡旋 A 和 B 的位置随着离轴参数呈现线性变化,它们之间的距离始终是 0.026 mm,不随离轴参数的改变而变化.

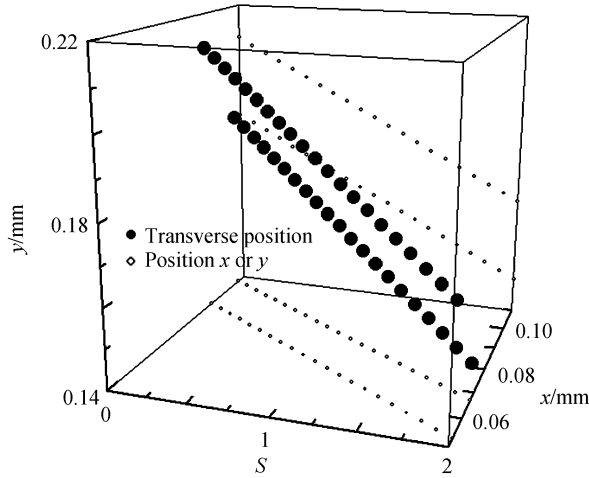


图3 非正则光涡旋的横向位置 (x, y) 与离轴参数 s 的关系

Fig.3 Transverse position (x, y) of the noncanonical optical vortex versus off-axis parameter s

3.3 非正则参数对非正则光涡旋的影响

图4给出了寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+2的共轴非正则光涡旋通过倾斜透镜后,在焦平面处的横向位置 (x, y) 与非正则参数 a 的关系,图5为非正则光涡旋A和B的距离 δ 与 a 的关系,计算参数为 $s=0, z=100\text{ mm}, C_1=1\times 10^{-3}$.从图4和5可以看出,寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+2的非正则光涡旋通过倾斜透镜后分裂成两个拓扑电荷都是+1的非正则光涡旋,并且光涡旋A和B的横向位置 (x, y) 随着非正则参数 a 的变化而变化.由图5可以看出存在一个临界值 $a_c=1.414$,随着非正则参数 a 从0增大到 a_c ,两个非正则光涡旋的距离越来越近;当 $a=a_c$ 时,两个非正则光涡旋A和B的距离最近,为 0.0259 mm ;当非正则参数 a 从 a_c 开始增大时,涡旋A和B的距离越来越远,但是在非正则参数 a 从0增大过程中,两个涡旋A和B的距离始终都小于 0.0285 mm .

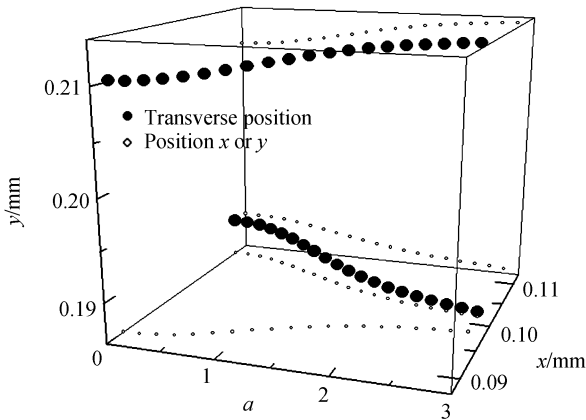


图4 非正则光涡旋的横向位置 (x, y) 与非正则参数 a 的关系

Fig.4 Transverse position (x, y) of the noncanonical optical vortex versus noncanonical parameter a

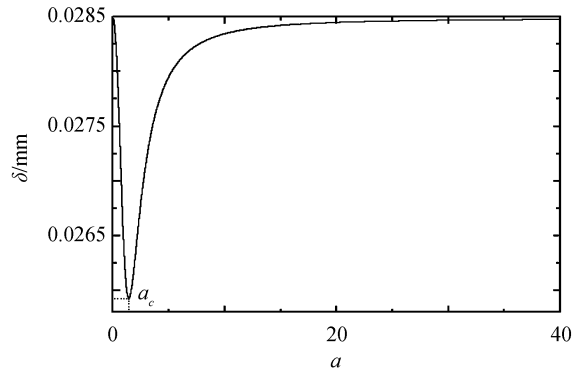


图5 非正则光涡旋A和B的距离 δ 与 a 的关系

Fig.5 Distance δ between noncanonical optical vortices A and B versus a

3.4 倾斜因子 C_1 对非正则光涡旋的影响

图6给出了寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+2的共轴非正则光涡旋通过倾斜透镜后,在焦平面处的横向位置 (x, y) 与倾斜因子 C_1 的关系,图7为非正则光涡旋A、B的距离 δ 与倾斜因子 C_1 的关系,计算参数为 $s=0, z=100\text{ mm}, a=1$.从图6和7可以看出,寄居于高斯光束中的拓扑电荷为+2的非正则光涡旋通过倾斜透镜后分裂成两个拓扑电荷都是+1的非正则光涡旋,并且两个非正则光涡旋的横向位置 (x, y) 随着倾斜因子 C_1 的变化而变化,但是由图7可以看出被分裂成的两个非正则光涡旋之间的距离 δ 始终保持 0.026 mm 不变,与倾斜因子 C_1 无关.

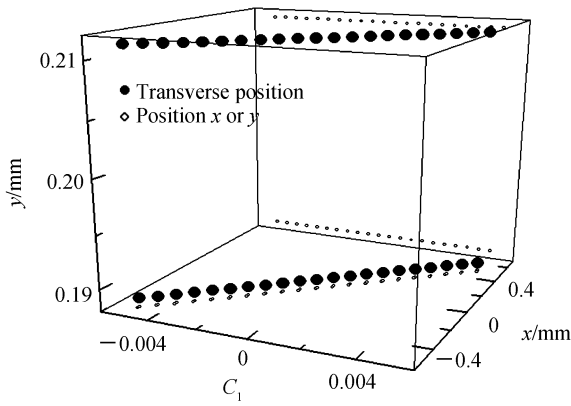

 图6 非正则光涡旋的横向位置(x, y)与倾斜因子 C_1 的关系

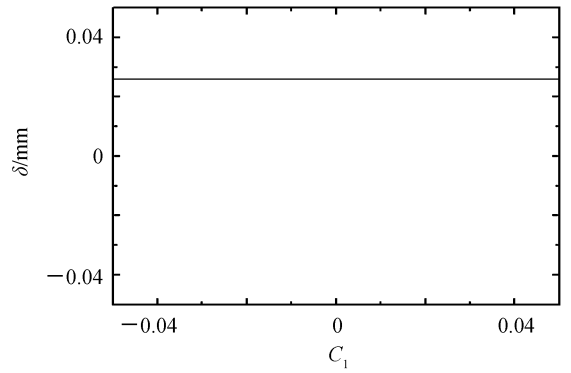
 Fig.6 Transverse position(x, y)of the noncanonical optical vortex versus tilt coefficient C_1

 图7 非正则光涡旋 A 和 B 的距离 δ 与 C_1 的关系

 Fig.7 Distance δ between noncanonical optical vortices A and B versus C_1

4 结论

本文研究了寄居于高斯光束中的拓扑电荷 $m = +1$ 和 $+2$ 的非正则光涡旋通过倾斜透镜的传输特性.结果表明,拓扑电荷为 $+1$ 的非正则光涡旋通过倾斜透镜后在空间传输时拓扑电荷和非正则度都保持不变,但是涡旋的位置与相对传输距离 ξ 、离轴参数 s 、非正则参 a 和 b 、倾斜因子 C_1 和 C_2 、束腰宽度 w_0 有关.拓扑电荷为 $+2$ 阶非正则光涡旋通过倾斜透镜后在自由空间传输时,由于受到非正则参数的影响会分裂成两个单拓扑电荷(一阶)非正则光涡旋,其非正则度在通过倾斜透镜传输后不变,且与初始平面处的拓扑电荷为 $+2$ 的非正则光涡旋的非正则度一样,都是 $a + ib$.进一步得出通过倾斜透镜后两个非正则光涡旋的位置取决于相对传输距离 ξ 、离轴参数 s 、非正则参数 a 和 b 、倾斜因子 C_1 和 C_2 、束腰宽度 w_0 ,且在传输过程中拓扑电荷总和保持不变.所得结果对认识 $+1$ 阶和高阶非正则光涡旋通过倾斜透镜的变化规律和对高阶非正则光涡旋的控制有参考意义,在基于涡旋高斯光束的光通信、光操控等方面具有潜在应用.

参考文献

- [1] SOSKIN M S, VASNETSOV M V. Singular optics[J]. *Progress in Optics*, 2001, **42**: 219-276.
- [2] NYE J F, BERRY M V. Dislocations in wave trains[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1974, **336**: 165-190.
- [3] INDEBETOUW G. Optical vortices and their propagation[J]. *Journal of Modern Optics*, 1993, **40**(1): 73-87.
- [4] SCHWARZ U T, SOGOMONIAN S, MAIER M. Propagation dynamics of phase dislocation embedded in a Bessel light beam[J]. *Optics Communications*, 2002, **208**(4): 255-262.
- [5] ORLOV S, STABINIS A. Free-space propagation of light field created by Bessel-Gauss and Laguerre-Gauss singular beams[J]. *Optics Communications*, 2003, **226**(1): 97-105.
- [6] ORLOV S, REGELSKIS K, SMILGEVICIUS V, et al. Propagation of Bessel beams carrying optical vortices[J]. *Optics Communications*, 2002, **209**(1): 155-165.
- [7] MOLINA-TERRIZA G, RECOLONS J, TORRES JP, et al. Observation of the dynamical inversion of topological charge of an optical vortex[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **87**(2): 023902.
- [8] ORLOV S, REGELSKIS K, SMILGEVICIUS V, et al. Free-space propagation of second harmonic Laguerre Gaussian beams carrying phase singularity[J]. *Journal of Optics A Pure & Applied Optics*, 2004, **6**(5): S255-S258.
- [9] FLOSSMANN F, SCHWARZ U T, MAIER M. Propagation dynamics of optical vortices in Laguerre-Gaussian beams[J]. *Optics Communications*, 2005, **250**(4-6): 218-230.
- [10] MOLINA-TERRIZA G, WRIGHT E M, TORNER L. Propagation and control of noncanonical optical vortices[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(3): 163-165.
- [11] SINGH R P, CHOWDHURY S R. Trajectory of an optical vortex: canonical vs. non-canonical[J]. *Optics Communications*, 2002, **215**(4-6): 231-237.
- [12] SINGH R P, CHOWDHURY S R. Noncanonical vortex transformation and propagation in a two-dimensional optical system[J]. *Journal of the Optical Society of America, A*, 2003, **20**(3): 573-576.
- [13] ROUX F S. Coupling of noncanonical optical vortices[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, **21**(3): 664-670.
- [14] YAN H W, LU B D. The transformation of canonical vortices embedded in a general elliptical Gaussian beam to

- noncanonical vortices[J]. *Journal of Optics A Pure & Applied Optics*, 2009, **11**(1): 015702.
- [15] WANG Ya-dong, GAN Xue-tao, JU Pei, *et al.* Control of topological structure in high-order optical vortices by use of noncanonical helical phase[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(3): 034204.
王亚东, 甘雪涛, 俱沛, 等. 利用非传统螺旋相位调控高阶涡旋光束的拓扑结构[J]. *物理学报*, 2015, **64**(3): 034204.
- [16] HABIBI H, MORADI M. Simulation of the noncanonical optical vortex by use of Hadgin interpolation method[J]. *Optics and Photonics Society of Iran*, 2016, **22**: 268-271.
- [17] CHENG K, JIANL Y, ZHONG X Q, A comparison of far-field properties of radial noncanonical vortex airy beam arrays and radial noncanonical vortex Gaussian beam arrays[J]. *Optics Communications*, 2016, **367**: 112-122.
- [18] MAJI S, BRUNDAVANAM M M. Controlled noncanonical vortices from higher-order fractional screw dislocations[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(12): 2322-2325.
- [19] ALDA J, ALONSO J, BERNABEU E. Characterization of aberrated laser beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, **14**(10): 2737-2747.
- [20] COLLINS S A. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1970, **60**(9): 1168-1177.

Foundation item: Science and Technology Research and Development Program of Shaanxi Province (No. 2017JM6113), Basic Research Foundation of Engineering University of CAPF (No. WJY201505), National Natural Science Foundation of China (No. 11547050)

引用格式: YAN Hong-wei, WANG Yang-li. Dynamic Evolution of Noncanonical Optical Vortex through Tilted Lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1114003

闫红卫, 王养丽. 非正则光涡旋通过倾斜透镜的动态传输[J]. *光子学报*, 2018, **47**(11): 1114003