文章编号 2097-1842(2025)04-0803-08

涡旋光束轨道角动量的十字线检测法

王 彤[1,2,3], 熊 晗[1,2,3]*, 王华鑫[1,2,3], 来右丽[1,2,3]
（1. 江苏省高校低碳能源高效转化与利用重点实验室 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏苏州 215009;
2. 江苏高校智能光电子器件与芯片重点实验室 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏苏州 215009;
3. 太湖光子中心前沿技术研究院 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏苏州 215009）

摘要: 本文提出一种利用十字线衍射进行涡旋光束 OAM 检测的方法, 其远场分布中与 OAM 相关的主亮斑包含了入射光束的大部分能量(50%~84%), 且不存在干扰检测的次亮斑。相比之下, 传统小孔衍射法中的主亮斑能量比例极低, 尤其是 7 阶拓扑荷以上的远场主亮斑中只包含不到 1% 的入射光束能量, 且拓扑荷级数越高, 次亮斑的干扰性越强。因此, 十字线测量法对弱涡旋光束的检测尤为适用, 这对于远程的自由空间光通讯发展具有重要影响。

关 键 词: 衍射; 涡旋光束; 轨道角动量; 拓扑荷
中图分类号: O436 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2024-0209 **CSTR:** 32171.14.CO.2024-0209

Crosshair detection method for orbital angular momentum of vortex beams

WANG Tong[1,2,3], XIONG Han[1,2,3]*, WANG Hua-xin[1,2,3], LAI You-li[1,2,3]
（1. *Key Laboratory of Efficient Low-carbon Energy Conversion and Utilization of Jiangsu Provincial Higher Education Institutions*, *School of Physical Science and Technology*, *Suzhou University of Science and Technology*, *Suzhou* 215009, *China*;
2. *Key Laboratory of Intelligent Optoelectronic Devices and Chips of Jiangsu Provincial Higher Education Institutions*, *School of Physical Science and Technology*, *Suzhou University of Science and Technology*, *Suzhou* 215009, *China*;
3. *Frontier Technology Research Institute of Taihu Photon Center*, *School of Physical Science and Technology*, *Suzhou University of Science and Technology*, *Suzhou* 215009, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *xh*1980*xh*@126.*com*

Abstract: In this paper, a method for vortex beam OAM detection using crosshair diffraction is proposed. The OAM-related main bright spot in the far-field distribution contains most of the energy of the incident beam (50%~84%) and there is no secondary bright spot that interferes with the detection. In contrast, the en-

收稿日期: 2024-11-19; **修订日期:** 2024-12-24
基金项目: 十四五”江苏省重点学科资助(No. 2021135);
Supported by Jiangsu Key Disciplines of the Fourteenth Five-Year Plan (No. 2021135)

ergy proportion of the main bright spot in the conventional small-hole diffraction method is extremely low, particularly in the far-field main bright spot above the 7th-order topological charge, which contains less than 1% of the energy of the incident beam. Furthermore, as the topological charge level increases, the secondary bright spot becomes more intrusive. Consequently, crosshair measurements are particularly applicable to the detection of weak vortex beams, which has potentially important implications for the development of long-range free-space optical communications.

Key words: diffraction; vortex beam; orbital angular momentum; topological charge

1 引 言

1992 年, Allen 等人指出涡旋光束携带有轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM)[1]。之后, 涡旋光束的 OAM 特性在超大容量光通信[2-6]、光学微操纵[7-9]、超分辨成像[10]、光学测量[11-12] 等领域得到了广泛的应用研究。快速、精准的 OAM 检测对于涡旋光的应用研究具有非常重要的意义。拓扑荷 l 是描述涡旋光束拓扑结构的量子数, 单个光子携带的 OAM 对应无穷多个本征值 l, 故一般也用拓扑荷来描述涡旋光束的 OAM。

目前常用的涡旋光束 OAM 检测方法有干涉法[13-15]、衍射法[16]。2019 年, Lan B 等人[17] 利用迈克耳孙剪切干涉测量系统, 通过涡旋光自干涉图像中叉分点处多出的干涉条纹数目和叉分方向来确定涡旋光拓扑荷数, 研究发现当干涉图像中两叉分点的距离大于拓扑荷数+2 个条纹周期时, 更容易从图像中分辨出涡旋光拓扑荷数。2020 年, 陈天驰等人[18] 通过杨氏双缝干涉方法检测到部分相干涡旋光束的轨道角动量, 通过双裂后部分相干涡旋光束的交叉光谱密度分布来测量部分相干涡旋光束的拓扑荷的符号和幅度。2018 年, Melo L A 等人[19] 利用三角形孔径衍射测量了椭圆光束中的拓扑荷值, 但对于特定的椭圆涡旋光束需要特定形状的三角孔径, 采用最佳的孔径尺寸才能实现准确测量。2022 年, 庄京秋等人[20] 改进了基于小孔衍射的涡旋光束 OAM 检测技术, 采用软边小孔对涡旋光束 OAM 进行检测, 提高了涡旋光束 OAM 的检测范围。综上所述, 干涉法的 OAM 检测范围更大, 但所需光学元件多且光路调节复杂, 易受激光偏振、相位差以及光路或光束传播轴的微小波动等影响, 导致干涉模式不稳定, 难以获得清晰的干涉图样。衍射法的 OAM 检测范围相对较小, 但具有光路简单、光阑制造容易、成本较低的特点。除此之外, 机器学习、神经网络等算法模块也被用于涡旋光束 OAM 的检测研究中。2022 年, 王佳琪等人通过调整后的 Efficient Net(一种深度神经网络)诊断轨道角动量谱[21]。2023 年, 李小吉等人进行了基于卷积神经网络的轨道角动量识别技术研究[22]。

由于二元化光阑制造容易且成本较低, 其在涡旋光检测中的应用前景十分广泛。但基于小孔光阑衍射的检测方法, 在光束束宽和光阑尺寸相匹配时才会发生明显的衍射现象。此外, 衍射分布中除了与 OAM 值相关的主亮斑外, 还有大量与 OAM 值无关的次亮斑, 而且拓扑荷阶数越高, 次亮斑对于主亮斑识别的干扰就越强, 超过一定阶数甚至会使得主、次亮斑无法区分, 导致涡旋光束 OAM 检测失效。

针对上述问题, 本文提出利用十字线对涡旋光束 OAM 进行检测的方法。该方法尤其适用于对弱涡旋光束的检测。这对于远程的自由空间光通讯发展具有潜在的重要影响。

2 理论分析与实验

2.1 理论分析

十字线检测法是利用高斯涡旋光束通过十字线后的远场衍射分布特性对涡旋光束 OAM 进行检测。设光束的传播方向为 z 方向, 光路中生成的高斯涡旋光束可以表示为[23]:

$$G_l(x,y,z)=\frac{1}{w_0}\left[\frac{\sqrt{2}(x^2+y^2)^{\frac{1}{2}}}{w(z)}\right]^{|l|}\left[\frac{2(x^2+y^2)}{w(z)^2}\right]\times \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{w(z)^2}\right]\exp(il\theta)\exp(i\varphi) \quad , \tag{1}$$

其中, x, y 分别表示直角坐标系下的 x 轴和 y 轴, θ 为极坐标系下的方位角, w_0 为基模束腰半径, l 为拓扑荷, $w(z)$ 和 φ 分别为

$$w(z)=w_0\sqrt{1+\left(\frac{z}{z_R}\right)^2}\quad , \tag{2}$$

$$\varphi=(1+l)\arctan\left(\frac{z}{z_R}\right)-k\left[z+\frac{x^2+y^2}{2\left(z+\frac{z_R^2}{z}\right)}\right]\quad , \tag{3}$$

式中, k 为波数, $z_R=\pi\omega_0^2/\lambda$ 为瑞利长度。高斯涡旋光束经过十字线会发生衍射现象, 十字线的透过率函数 $t(x_0,y_0)$ 可表示为:

$$t(x_0,y_0)=\begin{cases}0, & -a\leqslant x\leqslant a\ \&\ -a\leqslant y\leqslant a\\ 1, & \text{else}\end{cases}\quad , \tag{4}$$

其中 a 为十字线的线宽。

远场衍射分布可由菲涅尔衍射积分公式给出:

$$E(x,y,z)=\frac{\exp(ikf)}{ikf}\iint G_l(x,y,z)t(x_0,y_0)t_0(x_0,y_0)\times \exp\left\{\frac{ik}{2f}\left[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right]\right\}\mathrm{d}x_0\mathrm{d}y_0, \tag{5}$$

其中 f 为透镜焦距, $t_0(x_0,y_0)$ 为透镜的相位变换因子,

$$t_0(x_0,y_0)=\exp\left[-i\frac{k}{2f}\left(x^2+y^2\right)\right]\quad . \tag{6}$$

光束经透镜后在透镜焦面上形成衍射图样, 根据远场衍射分布的图样可以推知入射涡旋光束的拓扑荷。

2.2　仿真模拟

以光束束宽为 8 mm、透镜焦距为 1 000 mm 为例, 采用拓扑荷 l 为 8 的高斯涡旋光束来分析单线、十字线产生的衍射图样, 则光束经过不同线结构发生远场衍射的光场表达式为:

$$E(x,y,z)=\frac{\exp(ikf)}{ikf}\iint G_l(x,y,z)T_1t_0(x_0,y_0)\times \exp\left\{\frac{ik}{2f}\left[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right]\right\}\mathrm{d}x_0\mathrm{d}y_0, \tag{7}$$

其中, T_1 是不同线结构的透过率函数。衍射结果如图 1(彩图见期刊电子版) 所示。图 1 中第一行是衍射线的结构分布, 其中衍射线的线宽为 0.2 mm, 基膜束宽半径为 1 mm, 第二行是相应的远场衍射分布。图 1(a) 表示光束中心经过横向线的情况, 衍射结果如图 1(d) 所示, 横向线衍射形成上下分散开的场分布, 与远场圆形叠加, 不同位置的相位差不同导致圆环上形成亮暗分布, 同理, 图 1(b) 表示光束中心经过竖直线的情况, 衍射结果如图 1(e) 所示, 竖直线导致圆环在左右方向的位置上形成亮暗分布。光束中心经过十字线中心的衍射结果如图 1(f) 所示, 是图 1(d) 和图 1(e) 的结果叠加, 此时整个圆环上的亮斑是均匀分布的, 亮斑的数量为 16, 是 8 阶拓扑荷的两倍。

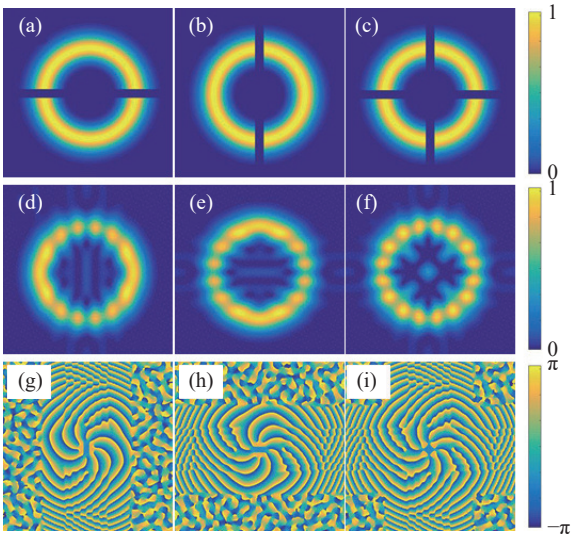


图 1　高斯涡旋光束经过不同线结构衍射的远场分布。(a)横线; (b)竖线; (c)十字线; (d)~(f)为(a)~(c)线结构对应的远场衍射结果; (g)~(i)为(d)~(f)远场衍射结果的相位分布

Fig. 1　Far-field distribution of Gaussian vortex beams diffracted by different line structures. (a) Horizontal line; (b) vertical line; (c) crosshair; (d)-(f) the far-field diffraction results corresponding to (a)-(c); (g)-(i) the correspond phase distributions of (d)-(f)

通过相位跳跃变化对光斑数量进行分析, 可得: 图 1(g) 是横线衍射结果的相位分布, 图 1(h) 是竖线衍射结果的相位分布, 二者干涉叠加形成十字线衍射结果的相位分布。在干涉中: 相位差为 π 时干涉相消, 形成暗点; 相位差为 2π 时干涉相长, 形成亮点; 在图 1(i) 中, 螺旋状的相位跳跃变化了 32 次, 其中相位差为 π 的是 16 次, 相位差

为 2π 的也是 16 次，故在十字线的衍射结果中形成了 16 个暗点和 16 个亮点。

图 2 是 1 到 8 阶拓扑荷的涡旋光束中心经十字线中心发生远场衍射的仿真模拟结果。

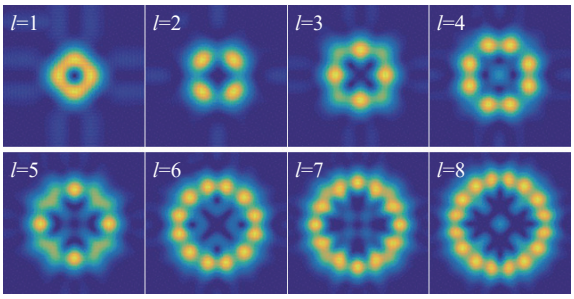


图 2 十字线检测法的远场衍射结果

Fig. 2 Far-field diffraction results of the crosshair detection method

从图 2 可以看出，涡旋光束经过十字线的衍射结果为呈环形分布的一系列亮斑。随着拓扑荷阶数的逐渐增大，亮斑数量逐渐增多，但亮斑数量总是 4 的倍数，当拓扑荷数为偶数时，亮斑数量为 $N=2l(N\in Z)$。

奇数拓扑荷数相当于是偶数拓扑荷数的过渡状态，对于奇数拓扑荷数 l，里面总存在 4 个拉长的半亮斑，这些拉长的半亮斑原本是偶数拓扑荷数 l−1 中的一个亮斑，拉长之后光强分布减弱，形成半亮斑。若拉长的半亮斑继续分开，则将形成两个亮斑，也就是偶数拓扑荷数 l+1 中的光强分布。因此，对于奇数拓扑荷数，若将半亮斑当做是一个亮斑，则总亮斑数为 $N=2(l-1)$。

若将拉长的半亮斑看成两个亮斑，则总亮斑数为 $N=2(l+1)$。

除十字线外，本文对光束经三条线和米字线结构的情况也分别进行了仿真模拟，结果如图 3 所示。图 3(a) 是三条线结构的示意图，图 3(b)~3(e) 是 3~6 阶拓扑荷经过三条线结构的远场衍射结果，图 3(f) 是米字线结构的示意图，图 3(g)~(j) 是 3~6 阶拓扑荷经过米字线结构的远场衍射结果。图 3 中三条线衍射图样的亮斑数量皆为 3 的倍数，而米字线衍射图样的亮斑数量皆为 4 的倍数，三条线和米字线的衍射图样中亮斑数量与拓扑荷之间均没有一一对应的关系。

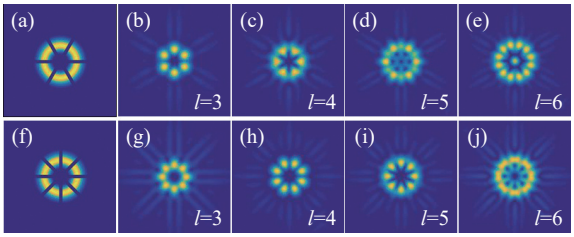


图 3 三条线和米字线结构的远场衍射结果

Fig. 3 Far-field diffraction results of three line structure and star patterned structure

将十字线中心偏离光束中心，其衍射结果如图 4 所示。设光束中心为坐标原点 (0, 0)，当十字线中心从坐标原点沿 x、y 轴分别移动 Δx、Δy 时，十字线的偏移量为 $(\Delta x, \Delta y)$，如图 4(a) 所示。图 4(b) 给出了拓扑荷数分别为 8 和−8 时，十字线沿 x、y 各均偏移中心位置 0 mm、0.2 mm、0.4 mm 和 0.6 mm 的远场衍射结果。从图 4 可以看出：十字线中心位置偏移对衍射结果有明显影响；当十字型位置存在偏移时，拓扑荷为 8 和−8 时的衍射结果相似，但环形上的亮斑分布并不均匀，亮斑密集和分散的位置正好相反，以此可以区分拓扑荷的符号。

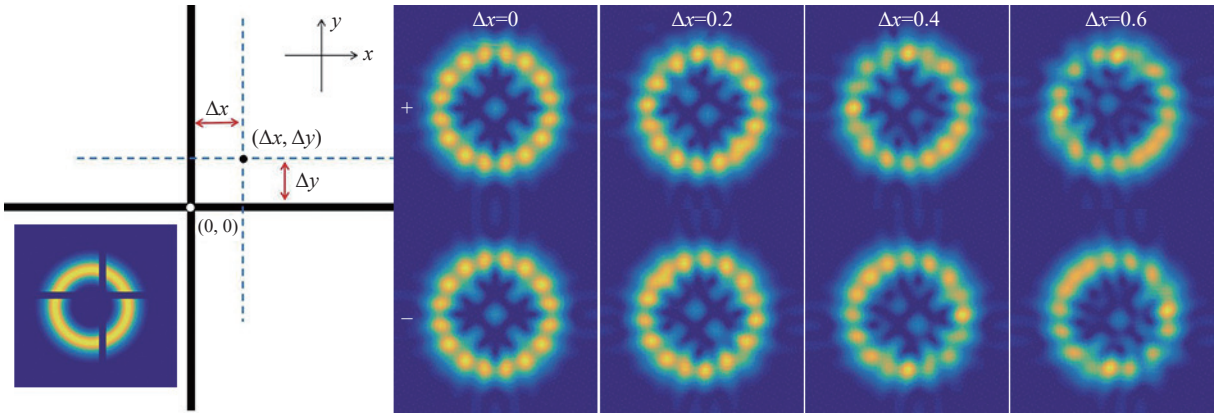


图 4 (a)十字线中心位置偏移示意图及其(b)远场衍射结果

Fig. 4 (a) Schematic diagram of the crosshair position offset and (b) it's far-field diffraction results

图 5(彩图见期刊电子版) 是拓扑荷为 8 和 −8, Δx=0.6 mm、Δy=0.6 mm 时, 十字线沿不同方向偏移的衍射结果。根据图 5(a)、5(e) 和 5(i) 可知, 当十字线中心位置往右上偏移时, 8 阶拓扑荷的衍射图样中左上方的亮斑分散, 右下方的亮斑密集; −8 阶拓扑荷的衍射图样与之相反, 左上方的亮斑密集, 右下方的亮斑分散。其他 3 种情况与此类似。通过分析可知, 十字线的偏移方向与衍射结果中亮斑密集和分散的位置关系是固定的, 因此可以由此来确定涡旋光拓扑荷的正负号。

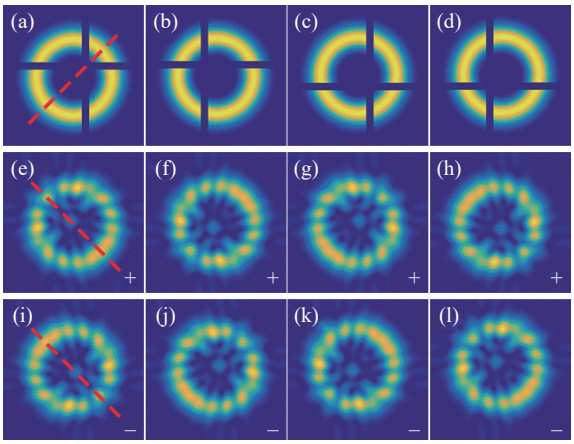


图 5　改变十字线偏移方向的远场衍射结果

Fig. 5　Far-field diffraction results for changing the direction of the crosshair offset

图 6(彩图见期刊电子版) 是拓扑荷为 10 时高斯涡旋光束传输分别经过十字线、传统的矩孔和三角孔的远场衍射分布。第一行是二维俯视图, 第二行是三维立体视图。其中, 入射的高斯涡旋光束的波长为 632.8 nm, 基膜束宽半径为 1 mm, 透镜焦距为 1 m, 十字线线宽为 0.2 mm, 矩孔光阑边长为 1 mm, 三角孔光阑边长为 2 mm, 三维坐标下远场衍射图样的光强经过归一化处理。矩孔光阑和三角孔光阑的衍射图样需要区分主次亮斑(白色虚线框中是主亮斑区域)。通过识别主亮斑来确定涡旋光束的拓扑荷值, 但次亮斑不仅会分散、削弱主亮斑的能量, 还会对主亮斑数量的识别产生干扰, 而十字线衍射分布中的绝大部分能量都集中在主亮斑中。

高斯涡旋光束经过不同光阑衍射后保留的能量比例如表 1 所示。衍射能量指整个远场衍射分布的能量与入射光束能量之比, 主亮斑能量指远场衍射分布中主亮斑区域所包含的能量与入射光束能量之比。矩孔和三角孔衍射分布中的绝大部分能量都被衍射光阑挡住, 主亮斑能量随着拓扑荷数的增加而减少, 超过 7 阶后衍射分布中主亮斑包含的能量不足 1%, 例如基模束宽半径为 1 mm 的 1 阶拓扑荷高斯涡旋光分别经过边长为 1 mm 的矩孔和 2 mm 的三角孔时, 主亮斑能量占总能量的 89.84% 和 78.05%, 到 10 阶拓扑荷时仅占 0.01% 和 0.10%。而十字线衍射的远场能量基本都被保留下来, 衍射主光斑的能量随着拓扑荷数的增加而增加, 以基模束宽半径同样为 1 mm 的高斯涡旋光为例, 1~10 阶拓扑荷的高斯涡旋光经过线宽为 0.2 mm 的十字线时, 主亮斑均保留了 50% 以上的光束能量。

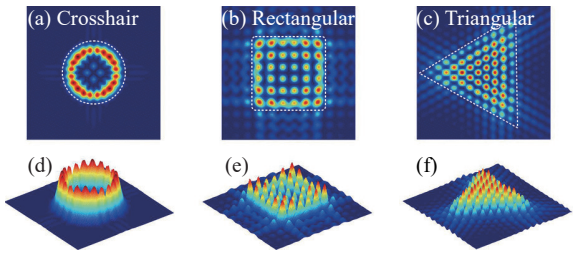


图 6　10 阶拓扑荷涡旋光束经不同光阑后的远场衍射分布

Fig. 6　Far-field diffraction distributions of a 10th-order topological charge vortex beam passing through different apertures

表 1　高斯涡旋光束经不同光阑衍射后的远场主亮斑能量

Tab. 1　Far-field primary spot energy of Gaussian vortex beams through different apertures

Topological charge	Cross line	Rectangular aperture	Triangular aperture
1	50.65%	89.84%	78.05%
2	63.67%	50.27%	44.63%
3	68.63%	21.58%	23.12%
4	74.07%	9.32%	10.84%
5	77.11%	3.81%	5.34%
6	79.37%	1.46%	2.67%
7	81.13%	0.48%	1.25%
8	82.60%	0.16%	0.57%
9	83.77%	0.05%	0.24%
10	84.49%	0.01%	0.10%

2.3　实验装置及结果

十字线检测法的实验光路如图 7 所示。He-Ne

激光器发出波长为 632.8 nm, 束腰半径为 1 mm 的激光, 经透镜组（焦距分别为 50 mm 和 400 mm）扩束 8 倍后, 利用小孔光阑筛选出光强均匀分布的光束, 并利用偏振片将光束偏振方向调制到空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 液晶面的偏振方向后, 经分束器后入射到反射式的 SLM 中。SLM 中加载有叠加闪耀光栅的叉状光栅图样 (如图 8(a) 所示)。当激光光束通过叉状光栅图样的中心时, 则会产生一组不同级次的高斯涡旋光束。利用分束器将其分出并通过小孔光阑筛选出 1 级或−1 级的高斯涡旋光束, 经过十字线发生衍射, 再经焦距为 1 000 mm 的透镜后, 通过电荷耦合器件 (Charge-coupled device, CCD) 采集远场衍射分布结果。

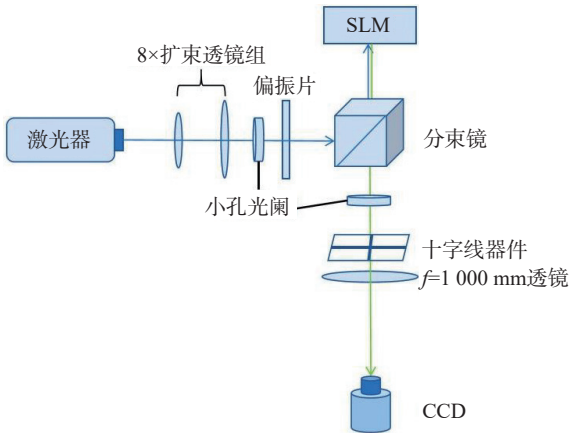
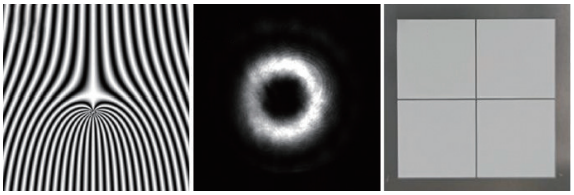


图 7 十字线检测法的实验光路示意图

Fig. 7 Experimental light path diagram of the crosshair detection method



(a) 叉型光栅 (b) 涡旋光束 (c) 十字线器件

(a) Fork grating (b) Vortex beam (c) Crosshair device

图 8 实验器件及产生的涡旋光

Fig. 8 Experimental device and the generated vortex beam

实验中生成的涡旋光束如图 8(b) 所示。所用十字线器件如图 8(c) 所示。该十字线是利用激光微孔精密技术对不锈钢掩模板进行加工制作而成的, 十字线的线宽为 0.2 mm, 其加工精度为 ±0.01 mm, 孔径公差为±0.002 mm。

实验中分别生成了拓扑荷为 1 到 8 阶的高斯涡旋光束, 并进行了衍射实验, 得到的实验结果如图 9 所示。可以看出, 光路实验结果与仿真结果基本一致。但由于产生的涡旋光束的光强分布不均匀, 导致远场衍射结果中亮斑的光强分布也不均匀。

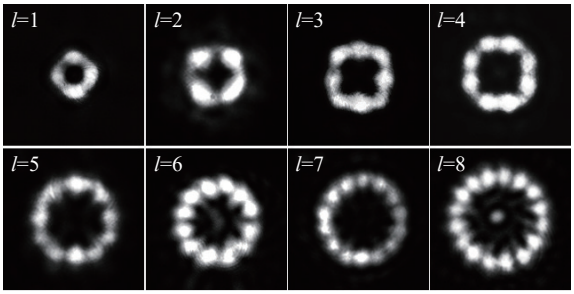


图 9 十字线检测法的实验结果

Fig. 9 Experimental results of the crosshair detection method

涡旋光束的 OAM 阶数越高, 衍射光斑越容易粘连在一起, 导致相邻的奇数阶和偶数阶不好区分。为此, 本文采用非线性的阈值方法对实验结果进行处理。通过增加衍射分布中的光强, 而且光强越大的地方增加的倍数越高, 从而提高亮斑中的光强峰值与周围区域之间的对比度。经过阈值处理后的实验结果如图 10 所示。由图 10 可知衍射光斑更加独立清晰, 光斑粘连情况得到了进一步改善。

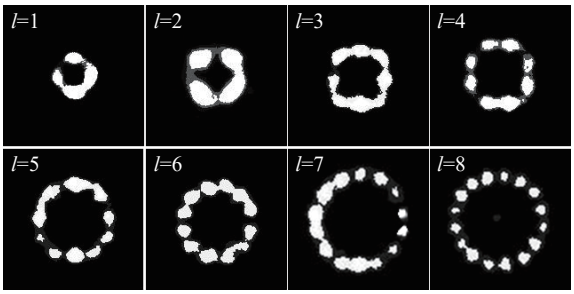


图 10 阈值处理后的实验结果

Fig. 10 Experimental results after thresholding

之后, 对涡旋光经偏移十字线的情况进行实验, 图 11 为 5 ~ 8 阶和−5 ~ −8 阶涡旋光在十字线偏移情况下的实验结果。由于实验器件和精度有限, 无法对十字线偏移量进行精确调整, 实验中将十字线的横线和竖线统一放置在涡旋光束圆环的内环边缘位置, 偏移方向与图 4(a) 中一致, 为右上方向。根据图 11 可知, 当拓扑荷为正时, 衍射图样中右下方区域的亮斑变得密集, 而左上方区域

的亮斑变得分散, 拓扑荷为负时的情况正好相反。实验结果中亮斑分散和密集情况与图 4(b)的仿真结果基本一致。

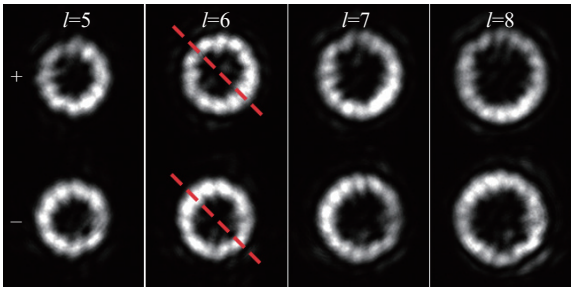


图 11　十字线偏移情况的实验结果

Fig. 11　Experimental results of the crosshair center position offset

3　结　论

本文提出利用十字线结构对高斯涡旋光束的拓扑荷进行检测, 并进行了理论模拟、仿真模拟和光路实验。结果显示, 拓扑荷为 1-8 阶的高斯涡旋光束的仿真结果与实验结果基本一致, 验证了该方法的可行性。通过十字线中心位置的偏移可以对 OAM 的正负进行判断。接下来, 对高斯涡旋光束经过十字线、矩孔、三角孔衍射后的远场主亮斑能量进行分析。传统矩孔、三角孔等小孔光阑中的光束能量衍射绝大部分会被衍射光阑挡住, 且其中的大部分又以次光斑的形式存在。这不仅降低了用于观测拓扑荷数的主亮斑的能量, 同时降低了主亮斑的可识别度, 使得主亮斑可能无法与不需要的次级亮斑区分开来。而十字线衍射的远场能量保留了 50% 以上的光束能量, 且基本上集中在主亮斑中, 极易于识别, 从而使得十字线结构特别适用于检测强度上相对很弱的涡旋光束 OAM。这在推进涡旋光束应用发展上具有非常重要的意义。

参考文献:

[1] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, *et al*.. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.

[2] 娄岩, 陈纯毅, 赵义武, 等. 高斯涡旋光束在大气湍流传输中的特性研究[J]. 中国光学, 2017, 10(6): 768-776.
LOU Y, CHEN CH Y, ZHAO Y W, *et al*.. Characteristics of Gaussian vortex beam in atmospheric turbulence transmission[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 768-776. (in Chinese).

[3] LIU J, CHEN SH, WANG H Y, *et al*.. Amplifying orbital angular momentum modes in ring-core erbium-doped fiber[J]. *Research*, 2020, 2020: 7623751.

[4] LIU J Y, ZHANG J X, LIU J, *et al*.. 1-Pbps orbital angular momentum fibre-optic transmission[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 202.

[5] LIU Z Q, ZHANG H K, LIU K G, *et al*.. Data transmission under high scattering based on OAM-basis transmission matrix[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(17): 4580-4583.

[6] KONG A R, LEI T, WANG D W, *et al*.. Extending orbital angular momentum multiplexing to radially high orders for massive mode channels in fiber transmission[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(14): 3717-3720.

[7] LAMPERSKA W, MASAJADA J, DROBCZYŃSKI S, *et al*.. Optical vortex torque measured with optically trapped microbarbells[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(15): 4703-4707.

[8] STUHLMÜLLER N C X, FISCHER T M, DE LAS HERAS D. Colloidal transport in twisted lattices of optical tweezers[J]. *Physical Review E*, 2022, 106(3-1): 034601.

[9] ZENG K, PU J J, XU X M, *et al*.. Gradient torque and its effect on rotational dynamics of optically trapped non-spherical particles in the elliptic Gaussian beam[J]. *Optics Express*, 2023, 31(10): 16582-16592.

[10] WANG J Y, LI F F, KANG G G. Multiwavelength achromatic super-resolution focusing via a metasurface-empowered controlled generation of focused cylindrically polarized vortex beams[J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 30811-30821.

[11] 赵冬娥, 李诺伦, 马亚云, 等. 基于剪切干涉的双涡旋光干涉图样特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1108001.
ZHAO D E, LI N L, MA Y Y, *et al*.. Characteristics of double-vortex optical interferogram based on shearing interference[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1108001. (in Chinese).

[12] 刘泽隆, 李茂月, 卢新元, 等. 高动态范围条纹结构光在机检测技术及应用进展[J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(1): 1-18.

LIU Z L, LI M Y, LU X Y, *et al*.. On-machine detection technology and application progress of high dynamic range fringe structured light[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 1-18. (in Chinese).

[13] MA J B, LI P, ZHOU Z H, *et al*.. Characteristics of fork-shaped fringes formed by off-axis interference of two vortex beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2021, 38(1): 115-123.

[14] COX M A, CELIK T, GENGA Y, *et al*.. Interferometric orbital angular momentum mode detection in turbulence with deep learning[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(7): D1-D6.

[15] QIN H, FU Q, TAN W, *et al*.. Highly accurate OAM mode detection network for ring Airy Gaussian vortex beams disturbed by atmospheric turbulence based on interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2023, 40(7): 1319-1326.

[16] SILVA J G, JESUS-SILVA A J, ALENCAR M A R C, *et al*.. Unveiling Square and triangular optical lattices: a comparative study[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 949-952.

[17] LAN B, LIU CH, RUI D M, *et al*.. The topological charge measurement of the vortex beam based on dislocation self-reference interferometry[J]. *Physica Scripta*, 2019, 94(5): 055502.

[18] CHEN T CH, LU X Y, ZENG J, *et al*.. Young's double-slit experiment with a partially coherent vortex beam[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 38106-38114.

[19] MELO L A, JESUS-SILVA A J, CHÁVEZ-CERDA S, *et al*.. Direct measurement of the topological charge in elliptical beams using diffraction by a triangular aperture[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6370.

[20] 庄京秋, 熊晗, 虞天成, 等. 基于软边小孔的涡旋光轨道角动量检测研究[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(12): 1394-1405.
ZHUANG J Q, XIONG H, YU T CH, *et al*.. Orbital angular momentum detection of vortex beam based on soft-edge aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(12): 1394-1405. (in Chinese).

[21] WANG J Q, FU SH Y, SHANG Z J, *et al*.. Adjusted EfficientNet for the diagnostic of orbital angular momentum spectrum[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(6): 1419-1422.

[22] LI X J, SUN L M, HUANG J M, *et al*.. Research on orbital angular momentum recognition technology based on a convolutional neural network[J]. *Sensors*, 2023, 23(2): 971.

[23] 谌娟, 柯熙政, 杨一明. 拉盖尔高斯光的衍射和轨道角动量的弥散[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0427001.
CHEN J, KE X ZH, YANG Y M. Laguerre-Gaussian beam diffraction and dispersion of the orbital angular momentum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0427001. (in Chinese).

作者简介：

熊　晗(1980—)，男，江西高安人，博士，副教授，硕士生导师，2014 年于苏州大学现代光学技术研究所获得工学博士学位，现工作于苏州科技大学物理科学与技术学院，主要从事涡旋光传输及检测和高功率激光方面的研究。E-mail: xh1980xh@126.com