

· 特邀综述 ·

# 光轨道角动量分离、成像、传感及微操控 应用研究进展

杨伟东, 邱晓东\*, 陈理想\*\*

厦门大学物理科学与技术学院物理学系, 福建 厦门 361005

**摘要** 光不仅可以携带自旋角动量, 还可以携带轨道角动量。其中, 自旋角动量与光波的圆偏振态有关, 而轨道角动量来源于光波的螺旋相位结构。自 Allen 等 1992 年首次理论确认了光子轨道角动量的物理概念和内涵以来, 这类具有特殊螺旋相位波前的新型光场吸引了越来越多的研究兴趣, 在经典光学及量子光学领域均展示出了诸多重要的应用前景。本文从基础物理及应用物理两个层面出发, 着重介绍了轨道角动量光束的制备与探测技术, 特别是近年来轨道角动量调控在螺旋相衬成像技术、远程旋转多普勒效应探测技术及光学微操控技术等领域的研究进展。

**关键词** 量子光学; 轨道角动量; 螺旋相衬成像; 旋转多普勒效应; 光学微操控

中图分类号 O431

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0500013

## Research Progress in Detection, Imaging, Sensing, and Micromanipulation Application of Orbital Angular Momentum of Beams

Yang Weidong, Qiu Xiaodong\*, Chen Lixiang\*\*

Department of Physics, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

**Abstract** Light can carry spin angular momentum and orbital angular momentum. The spin angular momentum is associated with the circular polarization state of the beam, while the orbital angular momentum is related to the spiral phase of the beam. Since Allen *et al.* theoretically confirmed the physical concept of the orbital angular momentum of photons in 1992, this novel type of light field with a special spiral phase wavefront has attracted many research interests and found many important applications in both classical and quantum optical realms. This study, from both the fundamental and applied physics, reviews the preparation and detection methods of the orbital angular momentum beam, especially the recent progress in a variety of fields with the orbital angular momentum ranging from spiral-phase contrast imaging and remote sensing of the rotational Doppler effect to optical micromanipulation.

**Key words** quantum optics; orbital angular momentum; spiral phase contrast imaging; rotational Doppler effect; optical micromanipulation

**OCIS codes** 270.5585; 280.3340; 050.4865; 100.5010; 350.4855

## 1 引言

1909 年, Poynting<sup>[1]</sup> 提出了光子自旋角动量的概念, 即圆偏振光场中每一个光子都具有  $\sigma\hbar$  的自旋角动量 ( $\sigma=1$  为左旋圆偏振光,  $\sigma=-1$  为右旋圆偏振光)。1936 年, Beth<sup>[2]</sup> 利用圆偏振光和由细纤维悬挂着的双折射石英波片证明了光子的自旋角动量

向波片传递过程中产生的力学效应。几乎同一时期, 科学家们也意识到光子还可能携带轨道角动量 (OAM)<sup>[3]</sup>。早在 1970 年, 科学家们就提出光学涡旋的概念, 并对涡旋光场的环状光强分布<sup>[4]</sup> 和光轴处存在的相位奇点等特征开展了诸多研究<sup>[5-6]</sup>。但直到 1992 年, Allen 等<sup>[7]</sup> 才从理论上明确了携带有轨道角动量的涡旋光场的物理图像: 涡旋光束具有

收稿日期: 2020-02-04; 修回日期: 2020-03-27; 录用日期: 2020-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(91636109, 61975169)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0495)、福建省杰出青年基金(2015J06002)、厦门大学校长基金(20720190057)

\* E-mail: qiuxiaodong7709@126.com; \*\* E-mail: chenlx@xmu.edu.cn

的螺旋相位因子使得自身相位波前在传播过程中呈螺旋状分布,这样垂直于光束波前的坡印廷矢量便具有了角向分量,而当这个角向分量随光束的传播绕光轴旋转时,光场中的每一个光子便具有了轨道角动量,即光子轨道角动量实际上是具有螺旋相位波前光束的一种自然属性。具有相位结构 $\exp(i\ell\varphi)$ 的涡旋光场中的每一个光子都携带有 $\ell\hbar$ 的轨道角动量( $\varphi$ 为空间方位角, $\ell$ 为轨道量子数),因此涡旋光束又称为轨道角动量光束<sup>[8]</sup>,与自旋角动量不同,这里 $\ell$ 可以取任意整数,即利用光子的轨道角动量可以构建一个高维的希尔伯特空间,因而其可成为高维经典信息及量子信息的理想载体,相关研究进展可以参阅中国科学技术大学史保森教授和华南师范大学郭邦红研究员的综述文章<sup>[9-10]</sup>。值得注意的是,具有螺旋相位结构 $\exp(i\ell\varphi)$ 的光束,如拉盖尔-高斯(LG)光束和贝塞尔-高斯(BG)光束等,其相位绕光轴任意闭合环路的积分为 $2\pi$ 的 $|\ell|$ 倍,且光束的波前旋向由 $\ell$ 的正负决定。光轨道角动量不单是纯粹的数学概念,它还是一个实在的物理概念,具有真实的物理内涵。特别地,这种特殊的螺旋相位结构,及由此产生的相位奇点和环状的光强分布为光学的诸多领域注入了新的活力<sup>[11-13]</sup>。例如:拓扑荷数为1的螺旋相位具有反对称特性,因而其在光学成像过程中可以实现径向希尔伯特变换,目前已被广泛应用于螺旋相衬显微成像<sup>[14-15]</sup>和天文观测<sup>[16]</sup>等领域;同时,由于具有螺旋状的相位分布,轨道角动量光束可用于旋转多普勒效应的高效观测<sup>[17-19]</sup>,实现对旋转物体的远程遥感探测;此外,基于轨道角动量光束

的环状光强分布特征,以及光与物质发生相互作用过程中角动量相互传递的特性,在光镊系统中,采用轨道角动量光束可以实现对微观粒子的三维囚禁和光致旋转等微观操控<sup>[20-21]</sup>。本文将对上述三个应用的相关研究进展进行回顾和探讨。由于轨道角动量光束的诸多应用均依赖于其高效的制备与探测,因此本文首先介绍这一领域的一些主要技术方案。

## 2 轨道角动量的制备与探测分离

### 2.1 轨道角动量的制备

近年来,应用比较广泛的轨道角动量光束制备技术方案主要包括三种。1)空间光调制器<sup>[22-24]</sup>:如图1(a)所示,将基模高斯光入射到加载有相位信息 $\exp(i\ell\varphi)$ 的空间光调制器的液晶阵列后,一级衍射光便是具有 $\ell$ 重螺旋相位结构的轨道角动量光束。2)Q板(Q-plate)<sup>[25-26]</sup>:如图1(b)所示,2006年Marrucci等<sup>[25]</sup>提出利用Q板制备轨道角动量光束的方案,Q板是一种由液晶分子构成的各向异性双折射相位板,它通过实现光子自旋角动量和轨道角动量的耦合产生轨道角动量光束,目前基于液晶光控取向技术可实现高阶轨道角动量制备的新型的Q板也已面世。3)液晶达曼叉形光栅法和 meta-Q板<sup>[27-28]</sup>:如图1(c)和图1(d)所示,这两种方法均是由南京大学胡伟副教授和陆延青教授团队在2016年提出的,液晶达曼叉形光栅法是将达曼叉形光栅引入液晶微结构体系并利用液晶光取向技术实现轨道角动量光束制备,该方案可以将入射的高斯光束等能量地转化为目标级次的轨道角动量光束,使光

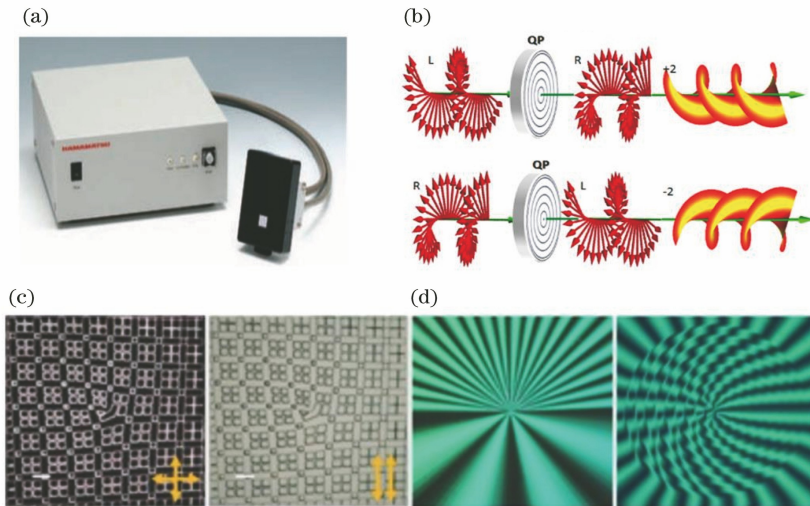


图1 轨道角动量光束的制备方法。(a)空间光调制器<sup>[24]</sup>; (b) Q板<sup>[25]</sup>; (c)液晶达曼叉形光栅<sup>[27]</sup>; (d) meta-Q板<sup>[28]</sup>

Fig. 1 Generation methods of OAM beam. (a) Spatial light modulator<sup>[24]</sup>; (b) Q-plate<sup>[25]</sup>; (c) liquid-crystal Damman vortex grating<sup>[27]</sup>; (d) meta-Q-plate<sup>[28]</sup>

栅衍射效率得到显著提升; meta-Q 板是针对传统 Q 板无法实现对光场的灵活调控而设计的新型液晶相位板,利用 meta-Q 板可实现对光场波前的点对点控制,制备出许多新颖的轨道角动量光束,极大地增强了光场调控的灵活性。另外,柱透镜模式转换器和螺旋相位板也可用于制备轨道角动量光束<sup>[11]</sup>,近年来基于硅基光波导微腔和角光栅制备微米级涡旋阵列的方法<sup>[29]</sup>亦在量子信息和光子集成芯片等领域展示了独特的应用价值。

### 2.2 轨道角动量的探测和分离

依据光路可逆原则,上述介绍的轨道角动量制备方法也可用于轨道角动量光束的探测<sup>[30-32]</sup>,如将轨道量子数为  $l$  的光束入射到一个相位为  $\exp(-il\varphi)$  的全息叉形光栅中,使之成为基模高斯光束,通过单模光纤耦合实现基模的选择滤波,便可构成一种直接的轨道角动量光束模式探测器<sup>[33]</sup>。除此之外,采用干涉仪法和几何变换(衍射)法实现轨道角动量光束的分离探测是目前这一领域的研究热点。

干涉仪法最早可以追溯到 1998 年, Courtial 等<sup>[34]</sup>设计了一种双臂均带有 Dove 棱镜的马赫-曾德尔干涉仪,通过观测一臂中旋转的 Dove 棱镜对光束频率产生的影响实现了对光束轨道量子数  $l$  的测量。之后, Leach 等<sup>[35]</sup>则利用该装置实现了单光子水平下轨道量子数的探测分离。如图 2 所示,在干涉仪两臂各放置一个 Dove 棱镜,且使两者间有一个  $\alpha/2$  的角度差,这样当轨道量子数为  $l$  的光束入射进干涉仪后会在两臂之间形成一个  $l\alpha$  的相位差,若  $\alpha/2 = \pi/2$ ,那么轨道量子数  $l$  为偶数的光束会在分束器的 A1 输出端相干加强,轨道量子数  $l$  为奇数的光束则会在分束器的 B1 输出端相干加强,如图 3 所示。原则上,将多个干涉仪级联,通过调整每一级中  $\alpha$  的数值便可以实现对轨道角动量叠加态的连续分离检测,这种方法避免了与外部光束的干涉,可使轨道角动量光束保留原有的相位信息。在国内,西安交通大学张沛教授团队<sup>[36]</sup>利用带有 Dove 棱镜的 Sagnac 干涉仪实现了对轨道角动量光束更稳定的测量。厦门大学陈理想教授团队<sup>[37]</sup>基于光束轨道角动量和偏振态的耦合设计了一种改进型含 Dove 棱镜的马赫-曾德尔干涉仪,并通过实验模拟法拉第旋转效应实现了对分数阶光束轨道角动量的探测。

上述基于干涉仪的轨道角动量光束的探测分离主要围绕相位因子  $\exp(-il\varphi)$  展开。对于特定轨道角动量光束如拉盖尔-高斯光束,在柱坐标系下其光场为

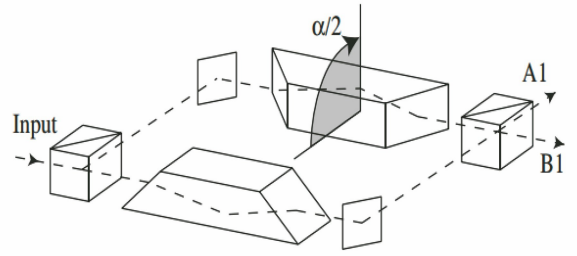


图 2 轨道角动量分束器<sup>[35]</sup>

Fig. 2 OAM beam splitter<sup>[35]</sup>

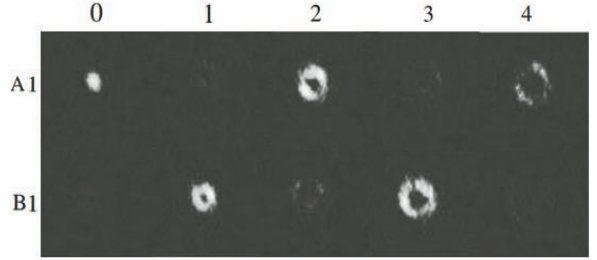


图 3 轨道角动量光束的分离实验结果<sup>[35]</sup>

Fig. 3 Separation experimental results of OAM beam<sup>[35]</sup>

$$E_{pl}(r, \varphi, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \frac{1}{\omega_z} \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_z}\right)^{|l|} L_p^{(|l|)} \left(\frac{2r^2}{\omega_z^2}\right) \times \exp\left[-\frac{r^2}{\omega_z^2} + i\left(\frac{kr^2}{2R_z} - kz\right) + il\varphi - i(2p+|l|+1)\varphi_g\right], \quad (1)$$

式中:  $p$  为径向量子数;  $\omega_z$  表征光束在  $z$  处的半径;  $R_z$  为光束波前的曲率半径;  $k$  为光束波数;  $L_p^{(|l|)}$  为拉盖尔多项式;  $\varphi_g = \arctan(z/z_R)$  为 Gouy 相位<sup>[38]</sup>。若在干涉仪中改变其中一路光束的 Gouy 相位,则两路光束在干涉前会形成依赖于径向量子数  $p$  的相位差。这与轨道角动量干涉分离基本原理相似,因此也简要介绍一下。

几乎同一时期, Zeilinger 团队<sup>[39]</sup>和 Boyd 团队<sup>[40]</sup>均设计了类似图 4 所示的实验装置,通过在

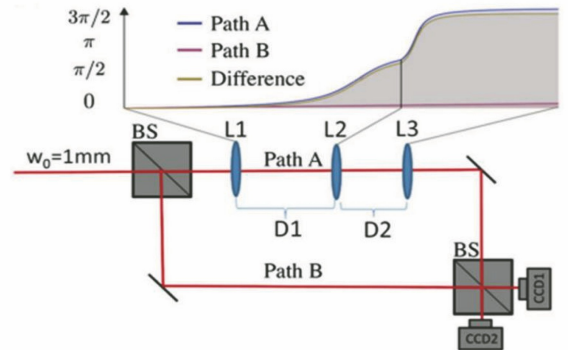


图 4 依赖 Gouy 相位的干涉装置<sup>[39]</sup>

Fig. 4 Interferometer device relying on Gouy phase<sup>[39]</sup>

光路 A 中设计一系列透镜使得 A 路中光束的 Gouy 相位不断累积,并最终使得 A、B 两路 Gouy 相位差值为  $\Delta\varphi_g = \pi/2$ ,这样经过  $(2p + |l| + 1)$  的

倍增后,不同径向及角向模式的拉盖尔-高斯光束就可以在分束器的不同端口出射,实验结果如图 5 所示。

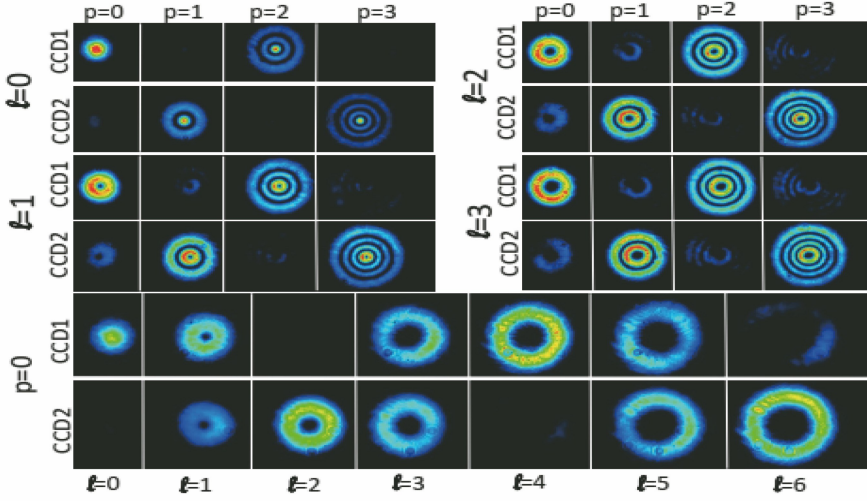


图 5 拉盖尔-高斯光束的分离探测结果<sup>[39]</sup>

Fig. 5 Separation detection results of LG beams<sup>[39]</sup>

干涉仪法利用两路光束的相位差实现了轨道角动量的探测分离,但是在此过程中往往存在模式简并问题,若想实现轨道角动量光束的逐个分离,需要级联多个干涉仪,但缺乏足够的稳定性和鲁棒性。为了克服这一问题,科学家们基于光学衍射元件提出了几何变换法。该方法的灵感来源于:透镜聚焦平面波过程中焦点的横向位置依赖于平面波的横向相位梯度。人们注意到轨道角动量光束的波前相位沿角向均匀递增,若将轨道角动量光束展开,使其环状相位梯度变为横向相位梯度,便可以利用透镜实现模式的探测。基于这一思想,在 2010 年,Padgett 团队<sup>[41]</sup>利用直角坐标到对数极坐标的变换将轨道角动量光束展开为具有横向相位梯度的光束,并利

用透镜的聚焦作用实现了不同轨道角动量光束的分离探测,具体实验装置如图 6(c)所示,图 6(a)和图 6(b)分别为加载在空间光调制器 SLM2 和 SLM3 上的衍射元件  $\phi_1(x, y)$  和  $\phi_2(u, v)$  的相位剖面。 $\phi_1(x, y)$  和  $\phi_2(u, v)$  的具体表达式为

$$\begin{cases} \phi_1(x, y) = \frac{2\pi a}{\lambda f} \left[ y \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - x \ln\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{b}\right) \right] \\ \phi_2(u, v) = -\frac{2\pi a}{\lambda f} \exp\left(-\frac{u}{a}\right) \cos\left(\frac{v}{a}\right) \\ u = -a \ln\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{b}\right) \\ v = a \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \end{cases} \quad (2)$$

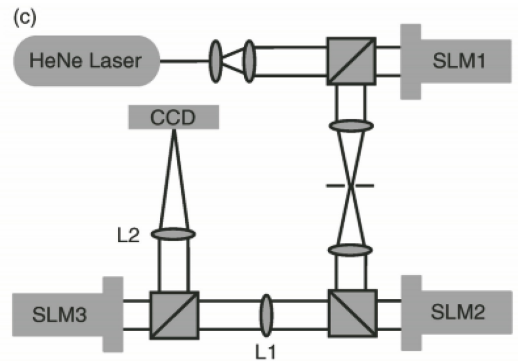
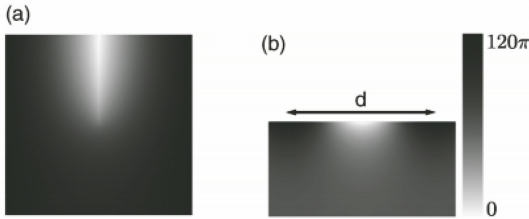


图 6 基于坐标变换实现轨道角动量模式分离<sup>[41]</sup>。(a)加载在 SLM2 上的衍射元件;  
(b)加载在 SLM3 上的衍射元件;(c)实验光路图

Fig. 6 OAM mode separation based on coordinate transformation<sup>[41]</sup>. (a) diffractive element loaded on SLM2;  
(b) diffractive element loaded on SLM2; (c) diagram of experimental device

式中： $a$ 、 $b$  为常数； $\lambda$  为光束波长； $f$  为透镜焦距； $(x, y)$ 和 $(u, v)$ 代表 SLM2 和 SLM3 平面上的直角坐标。

实验中，入射光经 SLM1 衍射后成为轨道角动量光束，如图 7 第一列所示，随后经 SLM2 实现直

角坐标向对数极坐标的变换，变换过程中因光程长度变化会引入相位畸变，故利用 SLM3 进行相位调制，这样轨道角动量光束最终成为如图 7 第二列所示的横向相位梯度光束，经透镜聚焦后的模拟结果和实验结果分别如图 7 第三和第四列所示。

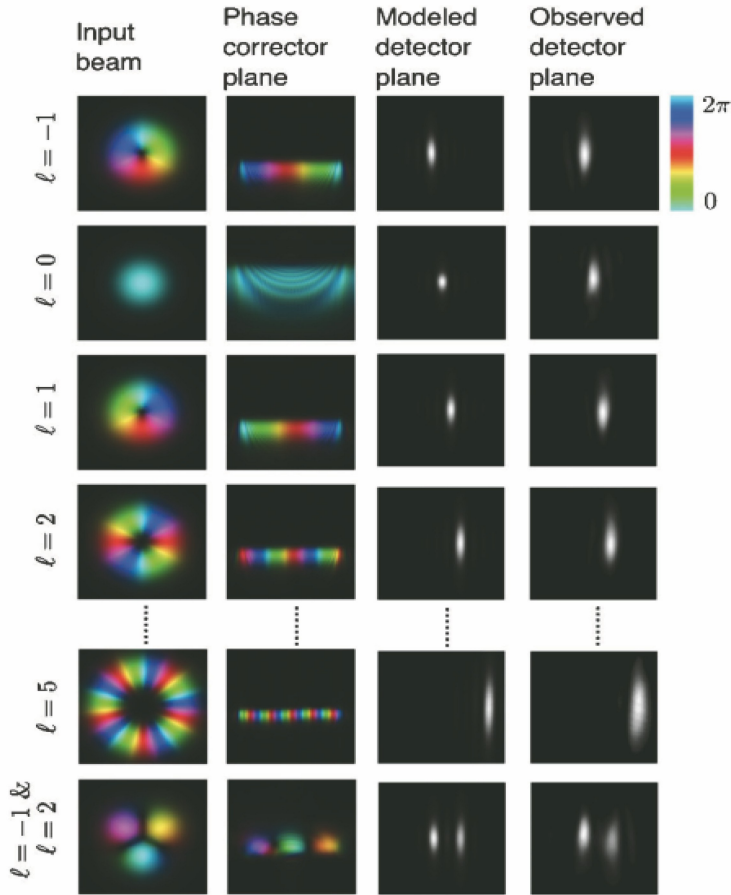


图 7 光路中各平面模拟和观测到的相位和强度分布<sup>[41]</sup>

Fig. 7 Simulated and observed phase and intensity distributions at various planes in the optical system<sup>[41]</sup>

人们注意到因衍射极限影响，经透镜聚焦后相邻模式的轨道角动量光束会出现模式交叠现象，为了克服这一问题，2013 年，Boyd 团队<sup>[42-43]</sup>提出通过添加衍射元件来实现坐标变换后展开光束的复制方案，该方案可使相邻模式的轨道角动量光束的横向相位梯度的差异呈倍数变化，使得多模态的分束效率从之前的 77% 提升至 92% 以上，实现了更加高效的探测分离。此外，在 2018 年，国内中山大学余思远教授团队<sup>[44]</sup>提出一种螺旋变换方案，其基本思想如下：传统的坐标变换方式是通过将同心圆映射为平行线的方式来展开轨道角动量光束，如图 8(a) 所示，而螺旋变换方案是通过将螺旋映射为平行线的方式来完成该过程，如图 8(b) 所示，可看出螺旋变

换可在不使用光束复制衍射元件的条件下实现光束横向相位梯度倍增的效果，实现相邻轨道角动量模式的高分辨率探测分离，而且他们在随后的对比中发现，无论在数值模拟环节还是实验环节，螺旋变换的分束效率均接近传统极坐标变换分束效率的 3 倍，对数极坐标变换和螺旋变换的对比效果如图 9 所示。

需要指出的是，几何变换法虽然可以实现轨道角动量光束的逐一分离探测，但是在分离过程中破坏了轨道角动量光束的本征模式特征，如何在保存模式特性的前提下实现轨道角动量光束的高效分离，即轨道角动量路由器，仍是目前该领域的一个研究热点。

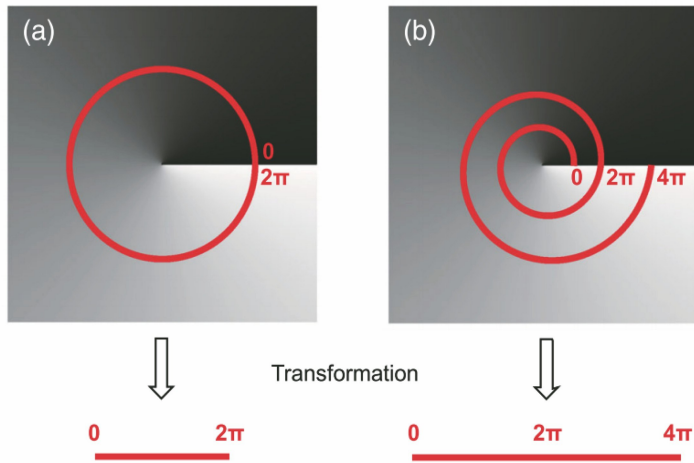


图 8 坐标变换方式<sup>[44]</sup>。(a)对数极坐标变换;(b)螺旋变换

Fig. 8 Coordinate transformation ways<sup>[44]</sup>. (a) Log-polar transformation; (b) spiral transformation

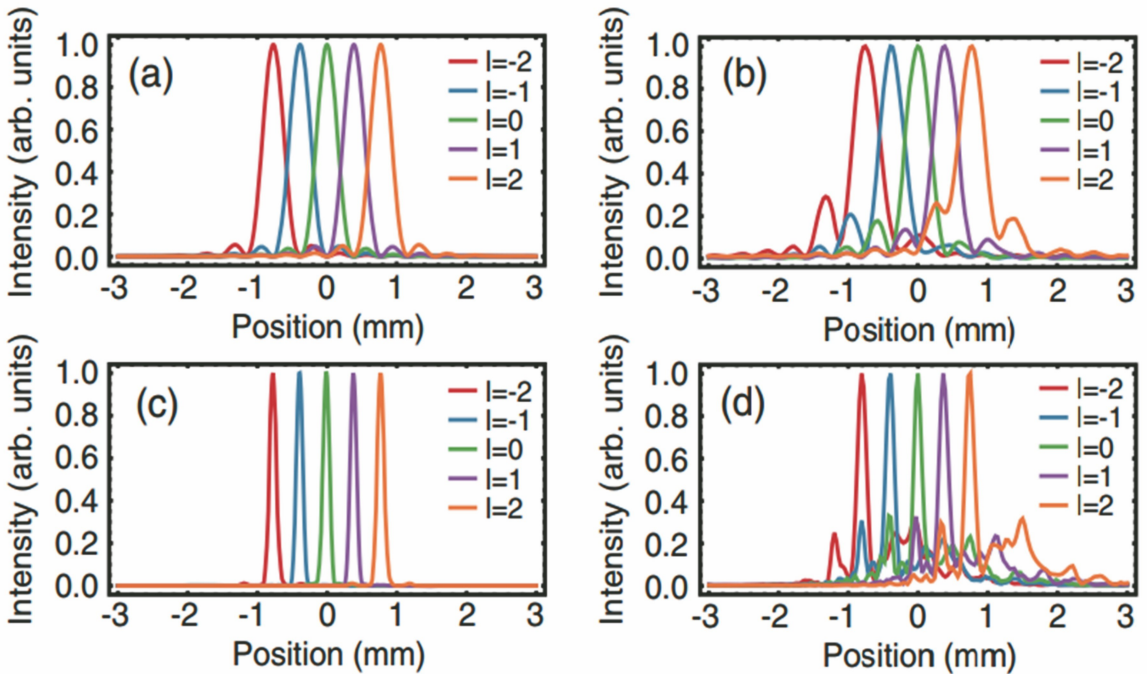


图 9 不同轨道角动量模式的强度分布<sup>[44]</sup>。(a)(b)极坐标变换下的数值模拟和实验结果;

(c)(d)螺旋变换下的数值模拟和实验结果

Fig. 9 Intensity distributions of different OAM modes<sup>[44]</sup>. (a)(b) Numerical simulation and experimental results for polar coordinate transformation; (c)(d) numerical simulation and experimental results for spiral transformation

### 3 光轨道角动量在光学成像、遥感探测及光学微操控中的应用

#### 3.1 螺旋相衬成像

相衬成像技术最早可追溯至 1935 年 Zernike 的细胞显微观测工作<sup>[45]</sup>,在物体边缘探测方面,Zernike 提出物体的相位或强度梯度可以成为物体特征识别的有效手段。数字图像处理主要依赖二

维希尔伯特变换方法实现对物体的边缘探测<sup>[46]</sup>,而边缘探测的光学实现技术主要是螺旋相衬成像技术<sup>[47]</sup>,该技术主要将拓扑荷数  $l=1$  的螺旋相位板置于  $4f$  系统的傅里叶平面作为滤波器,通过螺旋相位的奇对称性,使物体的相位梯度和强度梯度均可等向性增强。最早是在 2000 年,Davis 等<sup>[48]</sup>首次在实验上利用螺旋相位滤波器实现了对物体所有边缘等向性的增强。在 2005 年,Fürhapter 等<sup>[49]</sup>率先将螺旋相衬成像与光学显微

技术相结合,并通过实验证明了该方法物体成像的对比度相较于传统的亮场成像有极大提升,其实验装置和实验结果如图 10 和图 11 所示。同年, Jesacher 等<sup>[50]</sup>通过改变加载在空间光调制器上的螺旋相位全息图中心区域的相位分布,有意地打破螺旋相衬成像对物体边缘增强的等向性,实现了螺旋相衬成像下具有浮雕效果的阴影成像。利用类似实验装置, Bernet 等<sup>[51]</sup>则实现了对生物细胞样本的振幅和相位信息的定量重建。 Sharma 等<sup>[52-53]</sup>则通过引入正弦函数实现了对物体边缘任意方向选择性的增强。最近,通过螺旋相位滤波器和全息重建等方法将轨道角动量引入电子束中进行显微成像的实验也已广泛开展<sup>[54-55]</sup>。

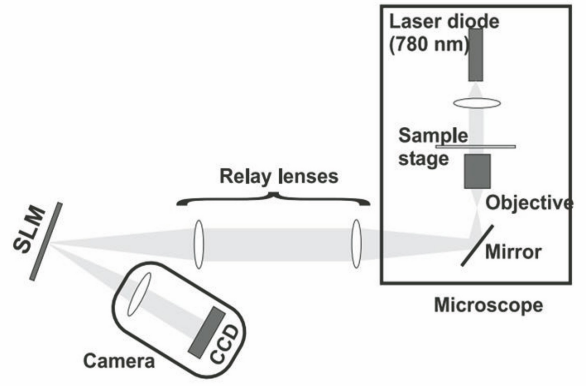


图 10 螺旋相衬成像显微装置示意图<sup>[49]</sup>

Fig. 10 Schematic of microscopic device for spiral phase contrast imaging<sup>[49]</sup>

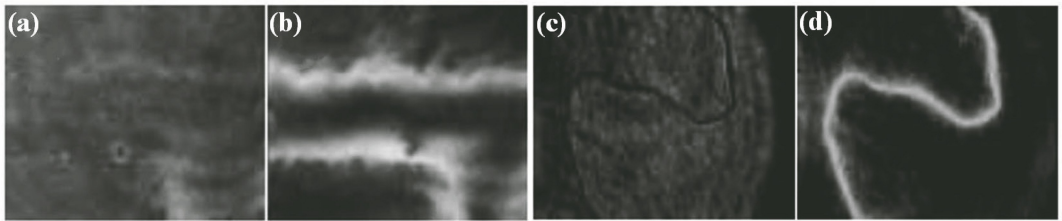


图 11 传统亮场成像与螺旋相衬成像结果对比图<sup>[49]</sup>。(a)(c)物体的亮场成像结果;(b)(d)相应的螺旋相衬成像结果

Fig. 11 Comparison of traditional bright field imaging and spiral phase contrast imaging results<sup>[49]</sup>.

(a)(c) Bright field imaging results of objects; (b)(d) corresponding spiral phase contrast imaging results

国内的研究团队在这一领域也取得了诸多进展。2006 年, 山东师范大学国承山教授团队<sup>[56]</sup>提出采用拉盖尔-高斯调制相位滤波器替代传统螺旋相位板,产生的边缘增强具有更高对比度和更高分辨率等优势。2011 年,深圳大学袁小聪教授团队<sup>[57]</sup>通过理论和实验证明,贝塞尔调制相位滤波相较于传统的螺旋相位滤波、暗场螺旋相位滤波和拉盖尔-高斯调制相位滤波等方法,可以更加有效地降低成像衍射噪声,同时他们给出:在成像质量方面,贝塞尔调制相位滤波器和拉盖尔-高斯调制相位滤波器比传统的螺旋相位滤波器分别高出 11.5% 和 6.8%。2012 年,中国科学院光电技术研究所罗先刚教授团队<sup>[58]</sup>理论研究了螺旋相位滤波器对螺旋相衬成像系统性能的影响。2016 年,南京师范大学袁操今教授团队<sup>[59]</sup>提出利用艾里调制相位滤波器可以实现比贝塞尔调制相位滤波器更高对比度和分辨率的边缘增强效果。在 2009 年 Situ 等<sup>[60]</sup>从实验和理论上证明了分数阶螺旋相位滤波器可以实现选择性边缘增强的效果后,在 2015 年,厦门大学 Wang 等<sup>[61]</sup>利用加载在空间光调制器上的可连续变化的分数阶螺旋相位滤波器实现了对纯相位物体渐变的边缘增强,并结合分数阶螺旋相位滤波器的轨道角动量谱

给出了理论解释。

目前,螺旋相衬成像的实验研究大多处在可见光领域,且集中在线性光学范畴。回顾螺旋相衬成像的原理,如图 12(a)所示,其核心为在  $4f$  成像系统的傅里叶平面处实现待测物体频谱与螺旋相位的乘积,继而通过傅里叶变换实现图像与螺旋相位的卷积。结合非线性光学过程,2018 年,厦门大学 Qiu 等<sup>[62]</sup>首次在实验上构建了一个非线性螺旋滤波器。与一般直接在  $4f$  系统的傅里叶平面放置拓扑荷数  $l=1$  的螺旋相位滤波器来实现相衬成像的装置不同,如图 12(b)所示,他们利用非线性晶体(KTP)的倍频效应,对待测物体的频谱和一束轨道角动量光束进行倍频,从而实现了不可见光波段物体的可视化边缘增强,该倍频过程可表示为

$$\frac{d \tilde{E}_{\text{out}}(r, \varphi, \lambda_{\text{vis}})}{dz} \propto \tilde{E}_{\text{in}}(r, \varphi, \lambda_{\text{invis}}) F(r, \varphi, \lambda_{\text{invis}}), \quad (3)$$

式中:  $\tilde{E}_{\text{out}}(r, \varphi, \lambda_{\text{vis}})$  表示倍频后的光场;  $\lambda_{\text{invis}}$  和  $\lambda_{\text{vis}}$  分别表示入射的不可见光束波长和出射的可见光束波长;  $\tilde{E}_{\text{in}}(r, \varphi, \lambda_{\text{invis}})$  为物体的傅里叶谱;  $F(r, \varphi, \lambda_{\text{invis}})$  为螺旋滤波器的透射率函数。(3)式表明,借助非线性光学过程实现了待测物体频谱与螺旋相位的

乘积。实验结果如图 13 所示,借助非线性光学过程在不可见光照射下实现了图像的可视化边缘增强,

这一工作展示了螺旋相衬成像技术在红外检测及无损生物成像方面的潜在应用前景。

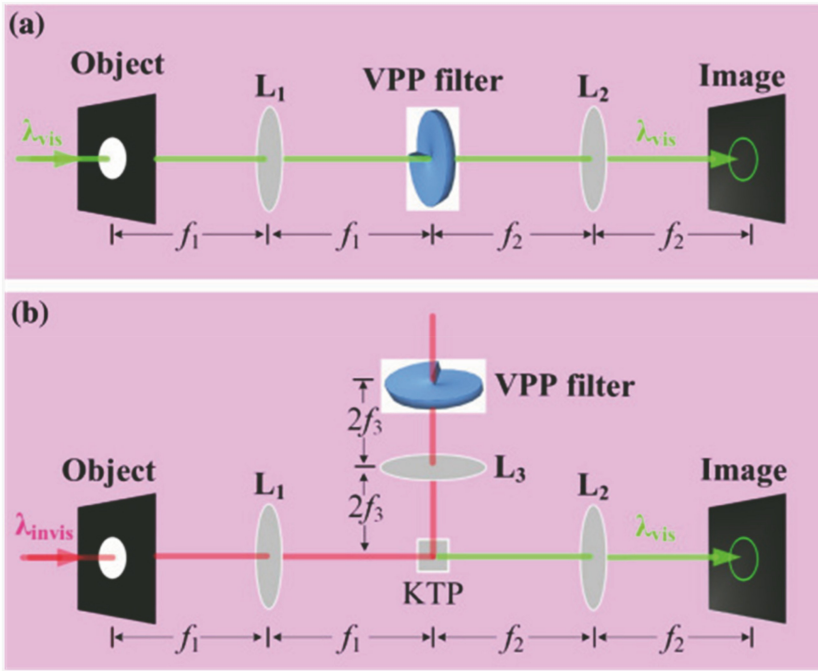


图 12 螺旋相衬成像原理图<sup>[62]</sup>。(a)线性光学螺旋相衬原理图;(b)非线性光学螺旋相衬原理图

Fig. 12 Schematic of spiral phase contrast imaging<sup>[62]</sup>. (a) Principle of linear optical spiral phase contrast; (b) principle of nonlinear optical spiral phase contrast

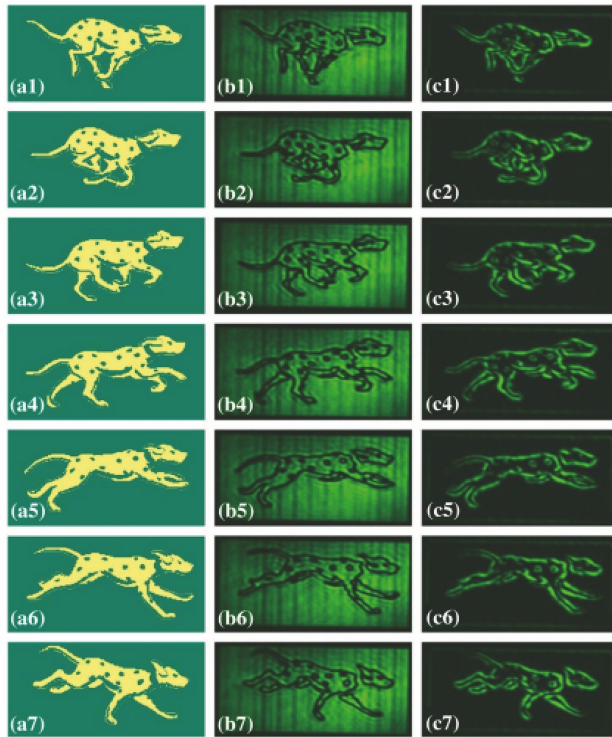


图 13 螺旋相衬成像实验结果图<sup>[62]</sup>。(a1)~(a7)纯相位小狗图片;  
(b1)~(b7)非螺旋相衬成像图;(c1)~(c7)螺旋相衬成像图

Fig. 13 Experimental results of spiral phase contrast imaging<sup>[62]</sup>. (a1)~(a7) Pictures of purely phased dog; (b1)~(b7) non-spiral phase contrast images; (c1)~(c7) spiral phase contrast images



经过十多年的发展,螺旋相衬成像已不仅是一种成熟的图像边缘增强处理工具,凭借其高对比度和高分辨率等优势,螺旋相衬成像技术在物体的实时探测、生物光学显微成像,甚至天体观测等领域都已经体现出了巨大的应用价值。

### 3.2 物体自旋的遥感探测

众所周知,线性多普勒效应是一种因波源相对观测者平移运动而导致观察者所探测波源辐射频率或波长发生变化的一种物理现象,依据多普勒效应频移量的大小可以实现对波源平移运动速度的探测。实际上,物体和观察者之间的相对旋转运动也会引起探测频率的频移,即旋转多普勒效应。在1979年,Garetz等<sup>[63-64]</sup>首次在实验上观测到了由光子自旋角动量引发的旋转多普勒效应,因此当光子轨道角动量的概念提出后,有关轨道角动量光束能否引发旋转多普勒效应的研究工作<sup>[65-66]</sup>相继开展。

在1998年,Courtial等<sup>[34]</sup>首次在实验中利用旋转的Dove棱镜使携带有轨道量子数 $l$ 的光束发生了 $l\Omega$ 的频移,其中 $\Omega$ 为光束角速度,实验装置和实验结果如图14和图15所示。基于类似装置Courtial等<sup>[67]</sup>又探测了自旋角动量和轨道角动量同时引发旋转多普勒效应时频移量的大小并给出了相应的经典解释。

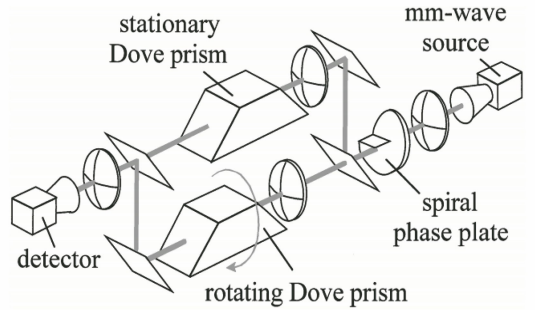


图14 频移探测装置示意图<sup>[34]</sup>

Fig. 14 Schematic of frequency shift detection device<sup>[34]</sup>

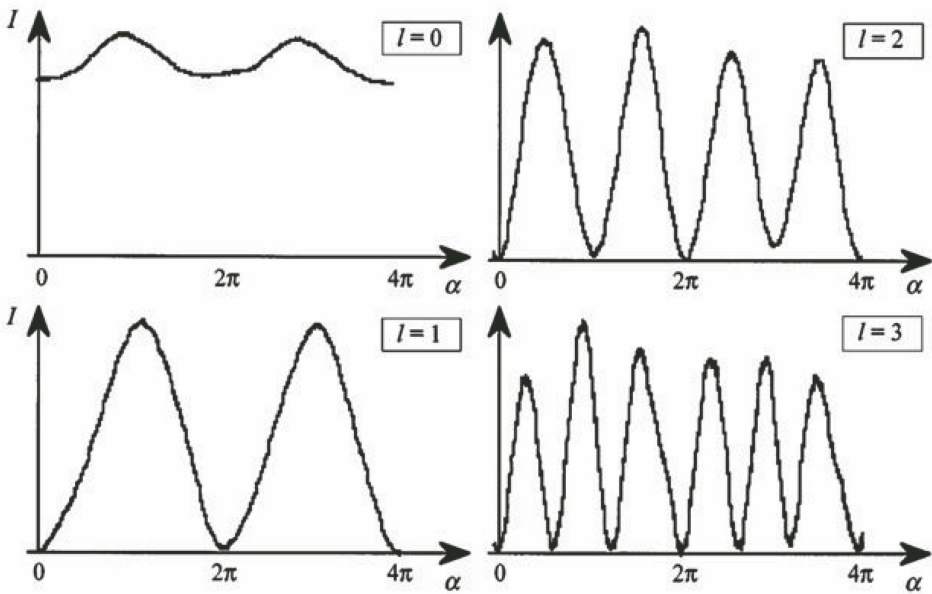


图15 频移探测结果<sup>[34]</sup>

Fig. 15 Results of frequency shift detection<sup>[34]</sup>

如何探测物体的角速度一直是科学家们的关注热点,基于光学轨道角动量的旋转多普勒效应为其提供了一种潜在的解决方案。Lavery等<sup>[18,68]</sup>在这一领域取得了突破性进展。实验中,他们将轨道角动量为 $\pm l$ 的叠加态光束和基模高斯光束先后入射到旋转角速度为 $\Omega$ 的金属圆盘上,如图16(a)和图16(c)所示,然后将经圆盘散射后的光束耦合进光电探测器中,最终对这些光强信号进行快速傅里叶变换转为频域信号并对其进行频率调制分析,得出调制频率峰值为 $f_{\text{mod}} = 2|l|\Omega/2\pi$ ,相应的实验结果如图16(b)和图16(d)所示。在Lavery等的开创性工

作之后,Rosales-Guzmán等<sup>[69]</sup>将旋转多普勒效应和平移多普勒效应相结合成功实现了对粒子三维运动的完整测量。

国内的学者在这一领域也做出了突出贡献。厦门大学陈理想教授和中山大学余卫龙教授<sup>[70]</sup>提出利用旋转的Q板来实现单光子的自旋,以及轨道角动量和旋转多普勒频移的多自由度纠缠,并给出了频移和Q板旋转对称性的相关联系。湖南大学文双春教授团队<sup>[71]</sup>提出左手性材料的角动量可以通过旋转多普勒效应向轨道角动量光束传递。北京邮电大学黄善国教授团队<sup>[72]</sup>则将旋转多普勒效应的

探测光束拓展到了射频波段,而且在实验室环境下实现了对物体角速度的高效探测(平均误差为0.36%)。华中科技大学董建绩教授和西安交通大学张沛教授<sup>[73]</sup>合作在旋转多普勒效应基础上成功设计出可以同时测量轨道角动量光束功率和相位分布的复合轨道角动量谱分析仪。北京理工大学高春清教授团队<sup>[17]</sup>则利用旋转多普勒效应实现了对物体角加速度的测量。华中科技大学王健教授团队和

Padgett 团队<sup>[74]</sup>探讨了线性多普勒效应和旋转多普勒效应的共同起源以及相互推导关系。在实验室环境下旋转多普勒效应的研究已成熟的基础上,在2018年,厦门大学 Zhang 等<sup>[75]</sup>在室外环境 120 m 自由空间内,利用轨道角动量光束实现了对自旋物体的遥感探测,而且在单光子水平下将实验误差控制在 0.6%,其实验装置和部分功率谱如图 17 和图 18 所示。

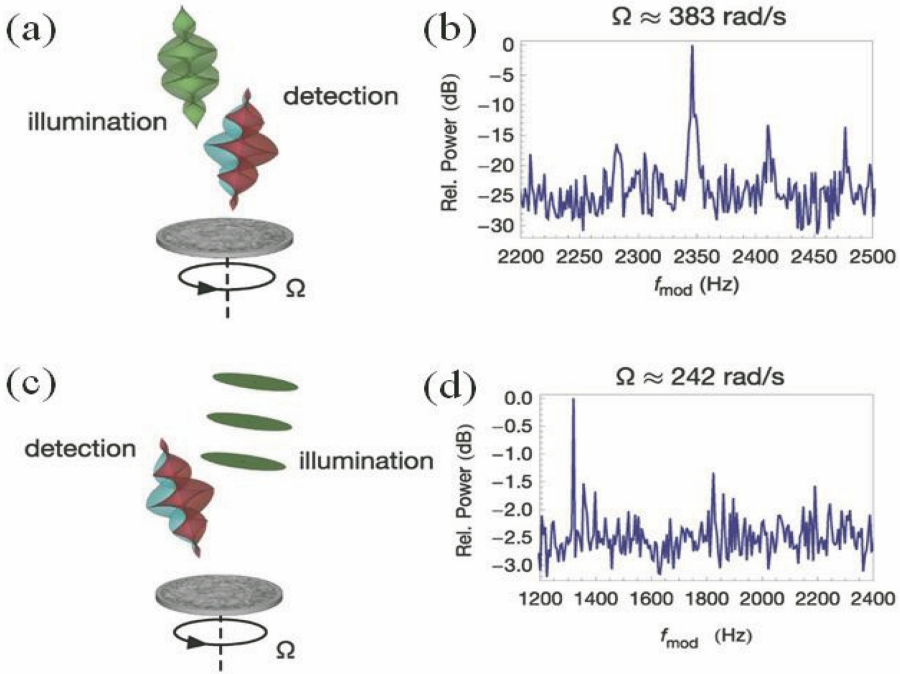


图 16 自旋物体角速度的探测<sup>[18]</sup>。(a)叠加态光束入射;(b)叠加态光束入射时的实验结果;  
(c)基模-高斯光束入射;(d)基模-高斯光束入射时的实验结果

Fig. 16 Detection of angular velocity of spin objects<sup>[18]</sup>. (a) Incidence of superposition beam; (b) experimental results of superposition beam incident; (c) incidence of fundamental mode-Gaussian beam; (d) experimental results of fundamental mode-Gaussian beam incident

可以注意到,轨道角动量光束与旋转多普勒效应结合对旋转物体的角速度测量具有  $2|l|$  倍的放大效果,因此如果将该技术和高阶轨道角动量光束相结合<sup>[76]</sup>,那么高精度的遥感探测甚至天文领域中星体转速的探测精度都会有数个量级的提升。

### 3.3 光镊与光致旋转

3.1 节和 3.2 节介绍了利用轨道角动量光束对物体轮廓的成像及自旋运动的探测,实际上轨道角动量光束还可与光镊技术结合实现对微观粒子三维空间运动的光学操控。光镊是一种通过强聚焦光束的梯度力作用实现对微粒的俘获和操控的技术<sup>[77]</sup>,最早可以追溯到 1970 年,美国贝尔实验室的 Ashkin<sup>[78]</sup>首次利用聚焦光束实现了对水溶液中微米级乳胶球的径向俘获和轴向加速,随后 Ashkin

等<sup>[79]</sup>又实现了对真空条件下数微米玻璃小球的悬浮操控和径向俘获。在 1986 年,Ashkin 等<sup>[80]</sup>发表在《Optics Letters》的工作正式宣告了光镊技术的问世,他们在实验中引入高数值孔径物镜并利用经物镜强聚焦后的单束激光成功地实现了对微米尺寸和纳米尺寸粒子的三维光学囚禁,此后这种可以产生皮牛力并对微粒进行非机械性捕获和操控的技术被广泛应用于细胞生物学<sup>[81]</sup>和单分子测量<sup>[82]</sup>等微观领域。光镊为观察和控制微观粒子提供了全新的手段,Ashkin 也凭借该技术的发明获得了 2018 年度的诺贝尔物理学奖。图 19 是紧凑型光镊装置示意图。

微观粒子因受光场梯度力被囚禁,依据粒子的不同尺寸及不同极化等特性,又可以利用几何光学法<sup>[83]</sup>、偶极近似法<sup>[84]</sup>和 T 矩阵算法<sup>[85]</sup>等分析其受

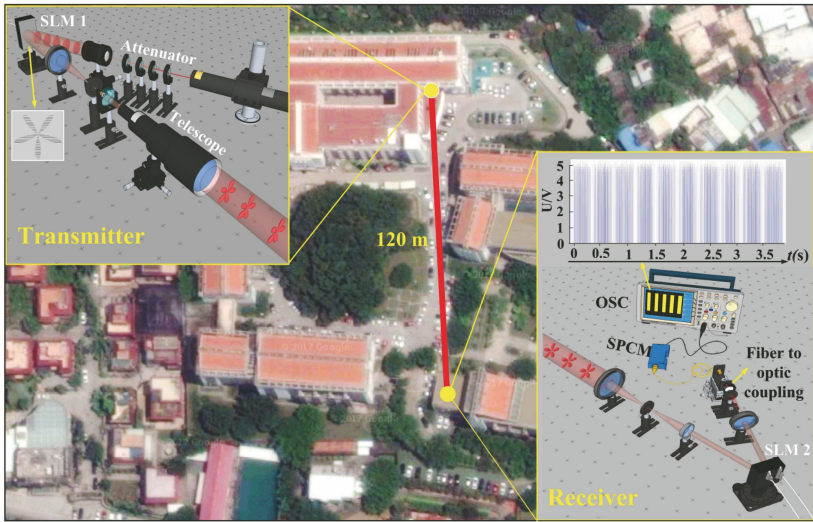


图 17 自由空间旋转遥感实验装置图<sup>[75]</sup>

Fig. 17 Installation diagram of free-space rotation remote sensing experiment<sup>[75]</sup>

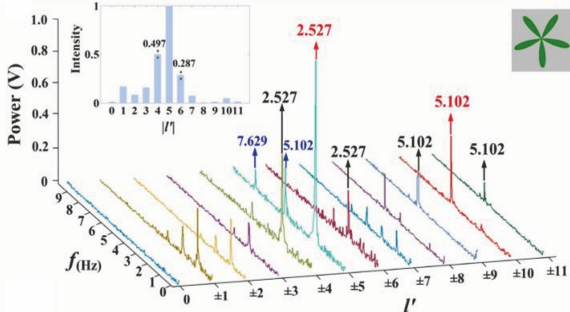


图 18 旋转多普勒频移功率谱<sup>[75]</sup>

Fig. 18 Power spectra of rotational Doppler shifts<sup>[75]</sup>

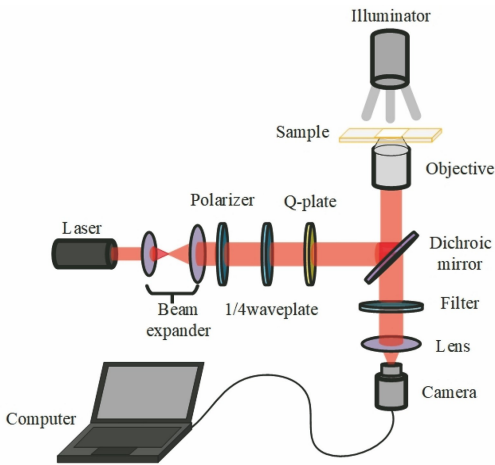


图 19 光镊装置示意图

Fig. 19 Schematic of optical tweezers device

力情况,实际上光与微粒的相互作用不仅会产生俘获力,也会因光束角动量向微粒的传递产生可以使微粒旋转的力矩,由此产生的旋转现象称为光致旋转<sup>[86]</sup>。因此,在 Allen 等<sup>[7]</sup>指出具有螺旋相位波前  $\exp(i\ell\varphi)$  的涡旋光束中每个光子都具有  $\ell\hbar$  的轨道

角动量后,轨道角动量和物质的相互作用就成了热点研究方向。在光子轨道角动量概念提出三年后,即 1995 年,澳大利亚的 Rubinsztein-Dunlop 等<sup>[87-88]</sup>首次在实验上利用强聚焦线偏振拉盖尔-高斯光束在光轴附近囚禁了一个  $2\mu\text{m}$  的 CuO 微粒,并且观测到了约  $1\text{ r/s}$  的自旋现象。在 1996 年,Friese 等<sup>[89]</sup>通过在光路中添加四分之一波片实现了对拉盖尔-高斯光束右旋圆偏振、线偏振和左旋圆偏振这三种自旋态的转换,使自旋角动量和轨道角动量可以同时作用于吸收性的 CuO 微粒,并测量出被囚禁的 CuO 微粒在三种不同情况下的自旋频率比值约为  $2:3:4$ ,这一结果和 Barnett 等<sup>[90]</sup>的理论预测结果一致。1997 年,Simpson 等<sup>[91]</sup>采用相同实验装置将  $\ell=1$  的拉盖尔-高斯光束耦合进光镊系统,实验中通过改变光束偏振态,实现了对聚四氟乙烯颗粒的自旋启动和停止操控,并且证明了  $\ell=1$  的拉盖尔-高斯光束中每个光子携带有  $\hbar$  的角动量。

原则上,光子自旋角动量的传递引起被囚禁粒子的自旋现象,光子轨道角动量的传递引起被囚禁粒子绕光轴的旋转,但是因上述诸实验观测的均为光轴附近处吸收性粒子的旋转,所以宏观上并不能有效地区分被囚禁粒子是自转还是绕光轴旋转。直到 1998 年,Friese 等<sup>[92]</sup>实现了对被囚禁的非规则双折射  $\text{CaCO}_3$  晶体微粒的准直和自旋控制,并且观测到微粒在  $300\text{ mW}$  的激光囚禁下存在高达  $350\text{ r/s}$  的自旋现象,因为实验过程中光束的相位波面并未改变,所以该实验证明了被囚禁粒子的自旋源自光束自旋角动量的传递。接着在上述实验基础上,Friese 和 Rubinsztein-Dunlop<sup>[93]</sup>又合作设计了

一个光学驱动微型机械传动器件。2000年, Padgett 团队<sup>[94]</sup>利用倒置的光镊系统证明了轨道角动量会引起非近轴的微米金属粒子做绕轴转动,随后在 2002 年,他们<sup>[95]</sup>又开展了对轨道角动量的内

禀和外禀属性的研究,2003 年,他们<sup>[96]</sup>又利用高阶贝塞尔光束观察到被囚禁微粒可以同时绕自身转动轴的自旋运动和绕光轴的轨道运动,如图 20 所示,并证实了两种运动角速度的径向依赖性。

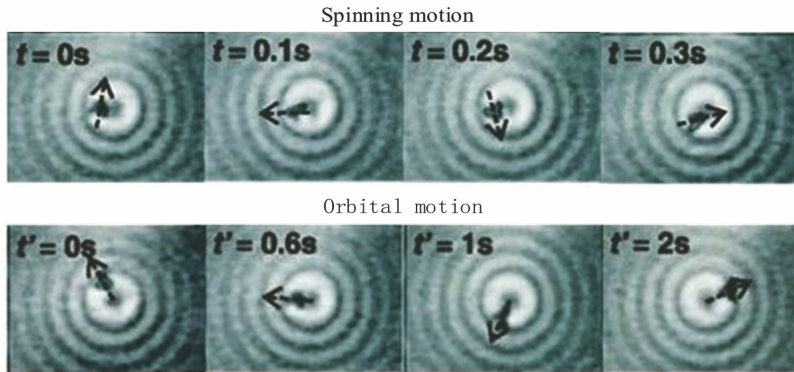


图 20 粒子自旋运动与绕光轴旋转运动<sup>[96]</sup>

Fig. 20 Spin motion and orbital motion of particle<sup>[96]</sup>

借助于空间光调制器的商业化应用,全息光镊技术得到了充分的发展<sup>[97-98]</sup>,利用全息光镊不仅可以同时设计多个涡旋光阱而且可以对每个光阱内的微粒进行独立操控<sup>[99-100]</sup>。在 2004 年, Ladavac 等<sup>[101]</sup>利用加载在空间光调制器上的全息光栅产生了一个  $2 \times 3$  的涡旋阵列,成功构建了一个依赖于轨道角动量向被囚禁粒子传递而形成的光学驱动泵。而 Mei 等<sup>[102]</sup>则将轨道角动量光束和消逝波相结合,实现了亚波长级别的光致旋转。最近, Gecevičius 等<sup>[103]</sup>则在光路中将  $1/4$  波片和涡旋波片相结合,产生了具有可调谐轨道角动量的光学涡旋,在不改变光强分布的情况下通过入射光的偏振变化实现了对非吸收非双折射二氧化硅微球转速的连续调制,实验结果如图 21 所示。

并利用产生的矢量场证明了在没有附加相位涡旋的情况下可以实现对捕获的各向同性微粒力矩作用并产生轨道运动。复旦大学林志方教授团队<sup>[107]</sup>则从理论分析了在不同环境阻尼下轨道角动量光束中粒子表现出的非周期性的轨道运动等动力学行为。2015 年,东南大学崔一平教授团队<sup>[108]</sup>提出将径向偏振轨道角动量光束聚焦到一维光子带隙结构上,利用由此产生的具有可调谐角动量的消逝贝塞尔光束实现对金属纳米粒子的操纵。中国科学院物理研究所李志远教授团队<sup>[109]</sup>提出了一种基于几何光学的理论方法,并利用该方法计算了金属介电 Janus 微粒在光阱中的光力和转矩。2016 年,中国科学院西安光学精密机械研究所姚保利研究员团队<sup>[110]</sup>研究了在圆偏振及径向偏振的强聚焦轨道角动量光束下吸收性粒子的非轴向自旋和轨道运动,并利用 T 矩阵法分析了粒子被困在光强极大处所受的横向自旋转矩、纵向自旋转矩和轨道转矩。最近,河南科技大学李新忠教授和山东师范大学蔡阳健教授<sup>[111]</sup>合作利用相位重建技术,实现了一种嫁接式可控轨道角动量光学涡旋产生方法。这种方法克服了传统涡旋中轨道角动量分布对光强分布的较强依赖性,即实现了对光环上局部轨道角动量的大小和方向的自由调控,并利用该特点实现了嫁接涡旋光环上被囚禁微粒不同速度或不同方向的光致旋转。

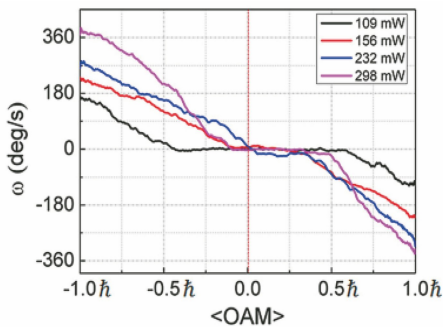


图 21 粒子旋转速度与可调谐轨道角动量关系图<sup>[103]</sup>

Fig. 21 Relationship curves between particle rotation speed and tunable OAM<sup>[103]</sup>

国内的研究组在这一领域也取得了许多重要研究成果<sup>[104-105]</sup>。2010 年,南京大学王慧田教授团队<sup>[106]</sup>研究了一种与偏振旋度有关的轨道角动量,

轨道角动量在传统光镊系统对微粒实行三维操作的基础上增加了一维角向操作,因而极大地拓展了光学微操控技术的实用性,且由于轨道角动量光束光强呈环形分布,对样品及其周围介质环境具有

更小的热损伤,因此光致旋转技术在生物驱动蛋白和微机械传动齿轮等领域都展现了其重要应用价值。

## 4 结束语

轨道角动量作为光子的全新自由度,自1992年被提出以来,已广泛应用于光学研究的各个领域。本文简要回顾了近30年来轨道角动量光束的一些重要研究进展,包括轨道角动量光束的制备及探测、螺旋相衬成像、物体自旋的遥感探测和光致旋转等,通过这些工作可以发现轨道角动量光束因其独特的螺旋相位结构在诸多领域均有着显著的优势和巨大的应用价值。当前,以轨道角动量光束为代表的结构光场已经成为光学研究领域的热点之一。轨道角动量光束的一些崭新特性和潜在应用,例如时空涡旋、高维量子信息处理等,仍等待着科学家们的不断挖掘和探索。今后几年作为轨道角动量光束发展的关键时期,必将充满机遇。

## 参 考 文 献

- [1] Poynting J H. The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light [J]. Proceedings of the Royal Society A, 1909, 82(557): 560-567.
- [2] Beth R A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light [J]. Physical Review, 1936, 50(2): 115-125.
- [3] Darwin C G. Notes on the theory of radiation [J]. Proceedings of the Royal Society A, 1932, 136(829): 36-52.
- [4] Bryngdahl O. Radial- and circular-fringe interferograms [J]. Journal of the Optical Society of America, 1973, 63(9): 1098-1104.
- [5] Nye J F, Berry M V, Charles F F. Dislocations in wave trains [J]. Proceedings of the Royal Society A, 1974, 336(1605): 165-190.
- [6] Couillet P, Gil L, Rocca F. Optical vortices [J]. Optics Communications, 1989, 73(5): 403-408.
- [7] 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.
- [8] Padgett M. Light's twist [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2014, 470(2172): 20140633.
- [9] Shi B S, Ding D S, Zhang W. Quantum storage of orbital angular momentum states [J]. Progress in Physics, 2017, 37(3): 98-118.
- [10] Guo J J, Guo B H, Cheng G M, et al. Research progress on photon orbital angular momentum in quantum communication applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 080003.
- [11] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 161-204.
- [12] Shen Y J, Wang X J, Xie Z W, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 90.
- [13] Li H T, Wang X K, Zhang Y. Study and applications of terahertz special beams [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614007.
- [14] Wei S B, Bu J, Zhu S W, et al. Image edge-enhancement in optical microscopy with a phase mismatched spiral phase plate [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(3): 031001.
- [15] Maurer C, Jesacher A, Bernet S, et al. What spatial light modulators can do for optical microscopy [J]. Laser & Photonics Reviews, 2011, 5(1): 81-101.
- [16] Swartzlander G A. Peering into darkness with a vortex spatial filter [J]. Optics Letters, 2001, 26(8): 497-499.
- [17] Zhai Y W, Fu S Y, Yin C, et al. Detection of angular acceleration based on optical rotational Doppler effect [J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15518-15527.
- [18] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum [J]. Science, 2013, 341(6145): 537-540.
- [19] Fu Z L, Wang Z, Cui C, et al. Angular velocity measurement based on rotational Doppler effect of vortex beam [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 180501.
- [20] Lei M, Yao B L. Experimental and theoretical studies of optically driven rotation of calcium

- carbonate particles [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(5): 816-819.
- 雷铭, 姚保利. 碳酸钙微粒光致旋转的实验和理论研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(5): 816-819.
- [21] Curtis J E, Koss B A, Grier D G. Dynamic holographic optical tweezers [J]. *Optics Communications*, 2002, 207: 169-175.
- [22] Bazhenov V Y, Vasnetsov M V, Soskin M S. Laser beams with screw dislocations in their wavefronts [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 1990, 24(1): 951-962.
- [23] Bazhenov V Y, Soskin M S, Vasnetsov M V. Screw dislocations in light wavefronts [J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, 39(5): 985-990.
- [24] Savage N. Digital spatial light modulators [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 170-172.
- [25] Marrucci L, Karimi E, Slussarenko S, et al. Spin-to-orbital conversion of the angular momentum of light and its classical and quantum applications[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(6): 064001.
- [26] Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(16): 163905.
- [27] Chen P, Ge S J, Ma L L, et al. Generation of equal-energy orbital angular momentum beams via photopatterned liquid crystals[J]. *Physical Review Applied*, 2016, 5(4): 044009.
- [28] Ji W, Lee C H, Chen P, et al. Meta-Q-plate for complex beam shaping [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25528.
- [29] Cai X, Wang J, Strain M J, et al. Integrated compact optical vortex beam emitters[J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363-366.
- [30] Feng W Y, Fu D Z, Wang Y L, et al. Survey on the methods of detecting the orbital angular momentum of a vortex beam [J]. *Physics Experimentation*, 2019, 39(2): 1-12.
- 冯文艳, 付栋之, 王云龙, 等. 轨道角动量模式识别方法综述[J]. *物理实验*, 2019, 39(2): 1-12.
- [31] Liu M. Novel method to detect the orbital angular momentum in optical vortex beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0326002.
- 刘曼. 探测涡旋光束轨道角动量的新方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0326002.
- [32] Pei C Y, Mao Z X, Xu S P, et al. Interferometric detection method for orbital angular momentum of vortex beams [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 140502.
- 裴春莹, 茅志翔, 徐素鹏, 等. 涡旋光束轨道角动量的一种新型干涉检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(14): 140502.
- [33] Mair A, Vaziri A, Weihs G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- [34] Courtial J, Dholakia K, Robertson D A, et al. Measurement of the rotational frequency shift imparted to a rotating light beam possessing orbital angular momentum [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(15): 3217-3219.
- [35] 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.
- [36] Fu D Z, Jia J L, Zhou Y N, et al. Realisation of orbital angular momentum sorter of photons based on Sagnac interferometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(13): 130704.
- 付栋之, 贾俊亮, 周英男, 等. 利用 Sagnac 干涉仪实现光子轨道角动量分束器[J]. *物理学报*, 2015, 64(13): 130704.
- [37] Zhang W H, Qi Q Q, Zhou J, et al. Mimicking Faraday rotation to sort the orbital angular momentum of light [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(15): 153601.
- [38] Boyd R W. Intuitive explanation of the phase anomaly of focused light beams[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1980, 70(7): 877-880.
- [39] Gu X M, Krenn M, Erhard M, et al. Gouy phase radial mode sorter for light: concepts and experiments [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(10): 103601.
- [40] Zhou Y Y, Mirhosseini M, Fu D Z, et al. Sorting photons by radial quantum number [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(26): 263602.
- [41] Berkhout G C G, Lavery M P J, Courtial J, et al. Efficient sorting of orbital angular momentum states of light [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(15): 153601.
- [42] O'Sullivan M N, Mirhosseini M, Malik M, et al. Near-perfect sorting of orbital angular momentum and angular position states of light [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24444-24449.
- [43] Mirhosseini M, Malik M, Shi Z M, et al. Efficient separation of the orbital angular momentum eigenstates of light [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2781.
- [44] Wen Y H, Chremmos I, Chen Y J, et al. Spiral transformation for high-resolution and efficient sorting of optical vortex modes[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(19): 193904.
- [45] Zernike F. Phase contrast, a new method for the

- microscopic observation of transparent objects[J]. *Physica*, 1942, 9(7): 686-698.
- [46] Kohlmann K. Corner detection in natural images based on the 2-D Hilbert transform [J]. *Signal Processing*, 1996, 48(3): 225-234.
- [47] Ritsch-Martel M. Orbital angular momentum light in microscopy[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, 375(2087): 20150437.
- [48] Davis J A, McNamara D E, Cottrell D M, et al. Image processing with the radial Hilbert transform: theory and experiments[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(2): 99-101.
- [49] Fürhapter S, Jesacher A, Bernet S, et al. Spiral phase contrast imaging in microscopy[J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 689-694.
- [50] Jesacher A, Fürhapter S, Bernet S, et al. Shadow effects in spiral phase contrast microscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(23): 233902.
- [51] Bernet S, Jesacher A, Fürhapter S, et al. Quantitative imaging of complex samples by spiral phase contrast microscopy [J]. *Optics Express*, 2006, 14(9): 3792-3805.
- [52] Sharma M K, Joseph J, Senthilkumaran P. Selective edge enhancement using anisotropic vortex filter[J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (27): 5279-5286.
- [53] Sharma M K, Joseph J, Senthilkumaran P. Selective edge enhancement using shifted anisotropic vortex filter[J]. *Journal of Optics*, 2013, 42(1): 1-7.
- [54] Uchida M, Tonomura A. Generation of electron beams carrying orbital angular momentum [J]. *Nature*, 2010, 464(7289): 737-739.
- [55] Verbeeck J, Tian H, Schattschneider P. Production and application of electron vortex beams [J]. *Nature*, 2010, 467(7313): 301-304.
- [56] Guo C S, Han Y J, Xu J B, et al. Radial Hilbert transform with Laguerre-Gaussian spatial filters[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1394-1396.
- [57] Wei S B, Zhu S W, Yuan X C. Image edge enhancement in optical microscopy with a Bessel-like amplitude modulated spiral phase filter[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(10): 105704.
- [58] Wang J, Zhang Y D, Li G J, et al. Influences of spiral phase plate's parameters on spiral phase contrast microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0411002.  
王炯, 张雨东, 李国俊, 等. 螺旋相位板参数对螺旋相衬成像系统性能影响研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0411002.
- [59] Zhou Y, Feng S T, Nie S P, et al. Image edge enhancement using Airy spiral phase filter [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25258-25268.
- [60] Situ G H, Pedrini G, Osten W. Spiral phase filtering and orientation-selective edge detection/enhancement[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(8): 1788-1797.
- [61] Wang J K, Zhang W H, Qi Q Q, et al. Gradual edge enhancement in spiral phase contrast imaging with fractional vortex filters[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15826.
- [62] Qiu X D, Li F S, Zhang W H, et al. Spiral phase contrast imaging in nonlinear optics: seeing phase objects using invisible illumination [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 208-212.
- [63] Garetz B A, Arnold S. Variable frequency shifting of circularly polarized laser radiation via a rotating half-wave retardation plate [J]. *Optics Communications*, 1979, 31(1): 1-3.
- [64] Garetz B A. Angular Doppler effect[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71(5): 609-611.
- [65] Allen L, Babiker M, Power W L. Azimuthal Doppler shift in light beams with orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1994, 112 (3/4): 141-144.
- [66] Nienhuis G. Doppler effect induced by rotating lenses[J]. *Optics Communications*, 1996, 132(1/2): 8-14.
- [67] Courtial J, Robertson D A, Dholakia K, et al. Rotational frequency shift of a light beam [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(22): 4828-4830.
- [68] Lavery M P J, Barnett S M, Speirits F C, et al. Observation of the rotational Doppler shift of a white-light, orbital-angular-momentum-carrying beam backscattered from a rotating body [J]. *Optica*, 2014, 1(1): 1-4.
- [69] Rosales-Guzmán C, Hermosa N, Belmonte A, et al. Measuring the translational and rotational velocities of particles in helical motion using structured light[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 16504-16509.
- [70] Chen L X, She W L. Sorting photons of different rotational Doppler shifts (RDS) by orbital angular momentum of single-photon with spin-orbit-RDS entanglement[J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14629-14634.
- [71] Luo H L, Wen S C, Shu W X, et al. Rotational Doppler effect in left-handed materials[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(3): 033805.
- [72] Zhao M Y, Gao X L, Xie M T, et al. Measurement

- of the rotational Doppler frequency shift of a spinning object using a radio frequency orbital angular momentum beam[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2549-2552.
- [73] Zhou H L, Fu D Z, Dong J J, et al. Orbital angular momentum complex spectrum analyzer for vortex light based on the rotational Doppler effect [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6 (4): e16251.
- [74] Fang L, Padgett M J, Wang J. Sharing a common origin between the rotational and linear Doppler effects[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11 (6): 1700183.
- [75] Zhang W H, Gao J S, Zhang D K, et al. Free-space remote sensing of rotation at the photon-counting level[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(4): 044014.
- [76] Chen L X, Zhang Y Y. Research progress on preparation, manipulation, and remote sensing applications of high-order orbital angular momentum of photons[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(16): 164210.  
陈理想, 张远颖. 光子高阶轨道角动量制备、调控及传感应用研究进展[J]. *物理学报*, 2015, 64(16): 164210.
- [77] Padgett M J. Orbital angular momentum 25 years on [Invited] [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11265-11274.
- [78] Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(4): 156-159.
- [79] Ashkin A, Dziedzic J M. Optical levitation by radiation pressure [J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 19(8): 283-285.
- [80] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 288-290.
- [81] Bayouhd S, Nieminen T A, Heckenberg N R, et al. Orientation of biological cells using plane-polarized Gaussian beam optical tweezers [J]. *Journal of Modern Optics*, 2003, 50(10): 1581-1590.
- [82] Block S M, Goldstein L S B, Schnapp B J. Bead movement by single kinesin molecules studied with optical tweezers [J]. *Nature*, 1990, 348 (6299): 348-352.
- [83] Callegari A, Mijalkov M, Gököz A B, et al. Computational toolbox for optical tweezers in geometrical optics[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(5): B11-B19.
- [84] Ashkin A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime [J]. *Biophysical Journal*, 1992, 61(2): 569-582.
- [85] Cao Y Y, Chen L X, Ding W Q, et al. Optical collection of multiple spheres in single tightly focused beams [J]. *Optics Communications*, 2013, 311: 332-337.
- [86] Simpson N B, Allen L, Padgett M J. Optical tweezers and optical spanners with Laguerre-Gaussian modes [J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(12): 2485-2491.
- [87] He H, Heckenberg N R, Rubinsztein-Dunlop H. Optical particle trapping with higher-order doughnut beams produced using high efficiency computer generated holograms [J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, 42(1): 217-223.
- [88] He H, Friese M E J, Heckenberg N R, et al. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(5): 826-829.
- [89] Friese M E J, Enger J, Rubinsztein-Dunlop H, et al. Optical angular-momentum transfer to trapped absorbing particles [J]. *Physical Review A*, 1996, 54(2): 1593-1596.
- [90] Barnett S M, Allen L. Orbital angular momentum and nonparaxial light beams [J]. *Optics Communications*, 1994, 110(5/6): 670-678.
- [91] Simpson N B, Dholakia K, Allen L, et al. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(1): 52-54.
- [92] Friese M E J, Nieminen T A, Heckenberg N R, et al. Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles [J]. *Nature*, 1998, 394 (6691): 348-350.
- [93] Friese M E J, Rubinsztein-Dunlop H, Gold J, et al. Optically driven micromachine elements [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(4): 547-549.
- [94] O'Neil A T, Padgett M J. Three-dimensional optical confinement of micron-sized metal particles and the decoupling of the spin and orbital angular momentum within an optical spanner [J]. *Optics Communications*, 2000, 185(1/2/3): 139-143.
- [95] O'Neil A T, MacVicar I, Allen L, et al. Intrinsic and extrinsic nature of the orbital angular momentum of a light beam [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(5): 053601.
- [96] Garcés-Chávez V, McGloin D, Padgett M J, et al. Observation of the transfer of the local angular momentum density of a multiringed light beam to an optically trapped particle [J]. *Physical Review*



- Letters, 2003, 91(9): 093602.
- [97] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003, 424(6950): 810-816.
- [98] Liang Y S, Yao B L, Ma B H, et al. Holographic optical trapping and manipulation based on phase-only liquid-crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0309001.  
梁言生, 姚保利, 马百恒, 等. 基于纯相位液晶空间光调制器的全息光学捕获与微操纵[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0309001.
- [99] Tao T, Li J, Long Q, et al. 3D trapping and manipulation of micro-particles using holographic optical tweezers with optimized computer-generated holograms [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(12): 120010.
- [100] Tao S H, Yuan X C, Niu H B, et al. Dynamic optical manipulation using intensity patterns directly projected by a reflective spatial light modulator[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(5): 056103.
- [101] Ladavac K, Grier D G. Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays[J]. Optics Express, 2004, 12(6): 1144-1149.
- [102] Mei S T, Huang K, Zhang T H, et al. Evanescent vortex: optical subwavelength spanner[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(19): 191107.
- [103] Gecevičius M, Drevinskas R, Beresna M, et al. Single beam optical vortex tweezers with tunable orbital angular momentum [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(23): 231110.
- [104] Li Y M, Gong L, Li D, et al. Progress in optical tweezers technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0101001.  
李银妹, 龚雷, 李迪, 等. 光镊技术的研究现状[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0101001.
- [105] Ren Y X, Zhou J H, Wu J G, et al. Holographic tweezers: the most vigorous member in optical tweezers' family [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(11): 35-41.  
任煜轩, 周金华, 吴建光, 等. 全息光镊-光镊家族中极具活力的成员[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(11): 35-41.
- [106] Wang X L, Chen J, Li Y N, et al. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(25): 253602.
- [107] Ng J, Lin Z F, Chan C T. Theory of optical trapping by an optical vortex beam [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(10): 103601.
- [108] Rui G H, Wang X Y, Cui Y P. Manipulation of metallic nanoparticle with evanescent vortex Bessel beam[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25707-25716.
- [109] Liu J, Zhang C, Zong Y W, et al. Ray-optics model for optical force and torque on a spherical metal-coated Janus microparticle[J]. Photonics Research, 2015, 3(5): 265-274.
- [110] Li M M, Yan S H, Yao B L, et al. Spinning and orbiting motion of particles in vortex beams with circular or radial polarizations[J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20604-20612.
- [111] Zhang H, Li X Z, Ma H X, et al. Grafted optical vortex with controllable orbital angular momentum distribution[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 22930-22938.