

“西光所建所六十周年暨《光子学报》创刊五十周年”专辑

引用格式: LI Xinzong, ZHU Liuhao, FAN Haihao, et al. Hohmann Transfer Structure Beam and Particle Manipulation (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7):0751411

李新忠, 朱刘昊, 樊海豪, 等. 霍曼转移结构光束设计及微粒操纵(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7):0751411

霍曼转移结构光束设计及微粒操纵(特邀)

李新忠, 朱刘昊, 樊海豪, 魏文军, 马鑫, 秦雪云, 胡华杰, 台玉萍

(河南科技大学 物理工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘 要:结合光束塑形技术、坐标变换技术、傅里叶相移定理,成功产生了霍曼转移结构光束,其具备相位梯度,从而拥有在微观世界中输运粒子的能力,并且大小、结构、相位梯度,均可任意调控,在应用中可依据实际需求对光束进行相应的调整。搭建光镊实验光路,并使用霍曼转移结构光束对聚苯乙烯粒子进行了操控,其实验结果与理论相符,可以使粒子完美的沿着轨道进行输运。该研究在光学微操纵特别是粒子的变轨运输领域具有重要的意义。

关键词:物理光学;光镊;光操作;全息术;空间光调制器;光学涡旋

中图分类号:O436.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225107.0751411

0 引言

霍曼转移是 1925 年德国工程师 WALTER Hohmann 博士推导出在两条倾角相同、高度相异的圆形轨道间转移卫星的最小能量方法^[1],在航天领域应用非常广泛^[2-3]。但其实微观世界中也存在有轨道运动,且微观运动是否可以适用霍曼转移尚未经过探索。光镊作为一种无接触、无伤害的微操纵工具已经广泛应用于微操纵领域,在细胞生物学^[4-9]、材料组装^[10]、光物质相互作用物理和化学^[11-12]等领域发挥着重要的作用。

1992 年 ALLEN L 发现了轨道角动量^[13],这就直接赋予了光镊一个横向的扳手力。这个扳手力的来源就是光子绕着光轴旋转所产生的轨道角动量。在对轨道角动量的研究中已经产生了许多应用,如 2004 年 KOSTA Ladavac 就提出使用光涡旋阵列组装和驱动光机械泵^[14],2012 年 WU Tao 提出光子驱动的微电机可以诱导神经纤维生长^[15],2015 年 YAN Zijie 利用光镊的相位梯度制备银纳米粒子的材料组装^[16],2020 年,RODRIGO J A 通过定制光学推进力用于控制共振金纳米粒子和相关的热对流流体的传输^[17],之后 2021 年他又提出使用全光控制金属纳米粒子,并可以自由的定制三维轨迹^[18]。但不论光的结构被如何改变,由于轨道角动量的性质,其结构光束在具体的应用中都会使粒子始终沿着一个既定的轨道进行运动。而粒子的实时变轨运动则没有被考虑。因此目前亟需一种与以往的单一轨道角动量相比具有更加丰富的模式可以同时存在多种不同轨道角动量并实时调控粒子运动轨道的光束。

为了打破这一现状,本文通过研究霍曼转移的原理,并通过结合光束塑形技术、坐标变换技术、傅里叶相移定理将其融合到结构光场中,提出了一种霍曼转移结构光束。该光束具有非常丰富的调控方式,并且其相位梯度分布可以使粒子从停泊轨道转移至同步轨道。之后通过调整参数成功生成了复杂霍曼转移结构光束,可使粒子进行多次变轨运动。最后搭建了实验光路并使用聚苯乙烯进行了光镊实验,实验结果与理论相符,证明了其可行性。该研究成功的将霍曼转移应用至微操纵领域,对光镊的发展具有重要意义。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11974102),河南省教育厅高等学校重点科研项目(No. 21zx002),瞬态光学与光子学国家重点实验室(No. SKLST201901)

第一作者(通讯作者):李新忠(1979—),男,教授,博士,主要研究方向为光场调控及光镊技术。Email: xzli@haust.edu.cn

收稿日期:2022-05-03; **录用日期:**2022-06-02

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

1 霍曼转移轨道及其结构光产生原理及调控

1.1 霍曼转移轨道及其结构光产生

要想在光场中生成对应于霍曼转移轨道原理的结构光束,首先需要剖析霍曼转移轨道的原理。如图1(a)所示,霍曼转移轨道由三个子轨道组成,分别是黄色的停泊轨道Q1,绿色的转移轨道Q2,蓝色的同步轨道Q3,其中停泊轨道Q1和同步轨道Q3为圆形轨道,转移轨道Q2为椭圆形轨道,且 r_1, r_3 分别是轨道Q1和轨道Q3的半径, r_2 是轨道Q2的半长轴。它们之间的关系满足 $r_3=nr_1, r_2=(r_3+r_1)/2$,其中 n 为该停泊轨道和同步轨道的比值,图1(a)中 $n=3$ 。图中Q1和Q3都是圆形,光强相同,而Q2是一个椭圆,光强相对较弱。这是由于在对圆形变成椭圆的过程中结合了坐标拉伸技术,所以Q2的光强相比于Q1和Q3较弱。需要注意的是,停泊轨道Q1和同步轨道Q3的圆心是重合的,但转移轨道Q2的圆心与他们二者并不重合,两个圆心之间的间距为 r_1 。并且,转移轨道Q2的椭圆率 e 是一个自由参数,可以根据实际需要进行调整,比如当需要绕过特定的障碍物时。

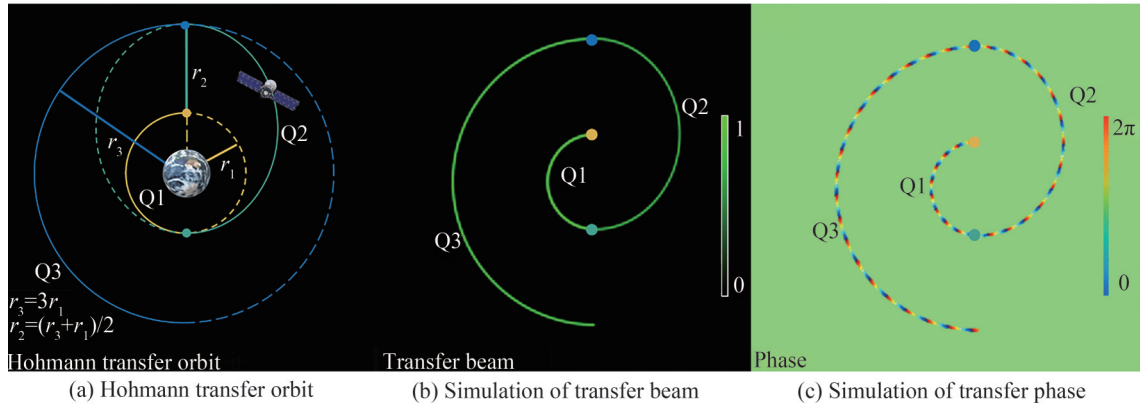


图1 霍曼转移轨道

Fig.1 Hohmann transfer orbit

若要在光场中相应的实现以上功能,需要使用光束塑形技术。但目前存在的大多结构光塑形技术非常依赖于参数方程^[19-20],只能产生已经明确具有参数方程的形状。但霍曼转移轨道并不存在相应的参数方程,因此无法直接实现。因此在普通的光束塑形基础上需要结合其他技术得到可以实现霍曼转移轨道的结构光束。

首先简单介绍一下本文中所使用到的塑形技术^[21],该光束的表达式为

$$E_i(\xi, \eta) = \mathcal{F} \{ H_i(x, y) \} \quad (1)$$

式中, (ξ, η) 是傅里叶变换后的坐标系, $H_i(x, y)$ 是计算全息图的透过率函数,可以表示为

$$H_i(x, y) = \frac{1}{\int_0^{T_i} |c'_2(t)| dt} \int_0^{T_i} \varphi_i(x, y, t) |c'_2(t)| dt \quad (2)$$

式中, $|c'_2(t)| = [x'_0(t)^2 + y'_0(t)^2]^{1/2}$, $t \in [0, T_i]$, $x_0(t)$ 和 $y_0(t)$ 是曲线的参数方程,决定着曲线的形状, $\varphi_i(x, y, t)$ 是相位项,具体可以表示为

$$\varphi_i(x, y, t) = \exp \left(\frac{i}{\omega_0^2} [yx_i(t) - xy_i(t)] + \frac{i\sigma}{\omega_0^2} \int_0^t [x_i(t)y'_i(t) - y_i(t)x'_i(t)] dt \right) \quad (3)$$

σ 是一个用来控制沿着曲线相位梯度也即拓扑荷值的自由参数。 ω_0 是光束的束腰宽度。为了得到霍曼转移轨道,首先需要单独的生成三个轨道。由于停泊轨道Q1和同步轨道Q3是圆心重合,半径不同的两个圆,因此它们参数方程分别为

$$\begin{cases} x_1(t) = r_1 \cos t \\ y_1(t) = r_1 \sin t \end{cases}, \begin{cases} x_3(t) = r_3 \cos t \\ y_3(t) = r_3 \sin t \end{cases} \quad (4)$$

若此时 $T_i=2\pi$,则可以组成两个空心圆环。但在霍曼转移轨道所需要的是两个半圆环。因此此处需要使 $T_i=\pi$,将式(4)代入式(2)即可得到生成停泊轨道 Q1 和同步轨道 Q3 所需要的全息图透过率函数 $H_1(x, y)$ 和 $H_3(x, y)$,之后再带入式(1)即可得到该光束的复振幅 $E_1(\xi, \eta), E_3(\xi, \eta)$ 。不同的是,转移轨道 Q2 是一个椭圆轨道,而且圆心与停泊轨道和同步轨道并不重合,因此这里需要使用坐标变换技术和傅里叶相移定理^[22-23],所以其参数方程可以使用圆形的参数方程,即 $x_2=r_2\cos t, y_2=r_2\sin t$,之后在带入式(2)的过程中,对其坐标系进行拉伸处理,其坐标系变为 $x_0=x, y_0=\alpha y$,其中 α 为拉伸系数,它与离心率 e 之间的关系为 $e=\sqrt{1-\alpha^2}$,之后得到其全息图透过率函数 $H_2(x_0, y_0)$ 。最后再代入式(1)对其进行相移处理,并得到其光束的表达式为

$$E_2(\xi_0, \eta_0) = \mathcal{F}\{H_2(x_0, y_0)\} \exp[-2j\pi(ux_0 + vy_0)] \quad (5)$$

式中, $\xi_0=\xi-u, \eta_0=\eta-v, u, v$ 是偏移量。此时偏移量等于 r_1 ,之后将三者相加即可得到霍曼转移结构光束的计算全息图透过率函数 $H_{\text{total}}(x, y)$ 和 $E_{\text{total}}(\xi, \eta)$ 。至此已经完成了对霍曼转移结构光束的理论描述,之后选用 $r_1=0.3 \text{ mm}$,拓扑荷值分别为 $m_1=20, m_2=20, m_3=40$ 对光束进行模拟产生。其光强 $I_{\text{total}}=|E_{\text{total}}(\xi, \eta)|^2$ 如图 1(b) 所示,其相位如图 1(c) 所示,从图 1 中可以明显的观察到光束分为 Q1、Q2、Q3 三个轨道,其相位梯度沿着轨道均匀分布。

1.2 霍曼转移结构光束的调控

依据霍曼转移轨道建立的霍曼转移结构光束,通过适当的调控,可以令其具有比霍曼转移轨道更加丰富的性质,首先由于霍曼转移轨道中三个子轨道的大小是互相联系的,如图 2(a) 所示,图中停泊轨道 Q1 与同步轨道 Q3 的比值 $n=3$ 时,意味着不论停泊轨道大小如何,在粒子经过转移轨道后,会被转移到一个三倍于停泊轨道半径的同步轨道上。因此整个系统通过改变停泊轨道 Q1 的半径就可以改变整个系统的大小,图 2(a) 为半径改变之后的霍曼转移结构光束的光强分布。同时,如图 2(b) 为相对应于图 2(a) 霍曼转移结构光束的相位分布,由于依托于塑形技术所得到的光束具有“完美性”,因此可以限定其半径不随拓扑荷值改变。这样在操纵粒子时就可以自由的控制粒子运动的速度,从而应对不同情景下的应用需求。

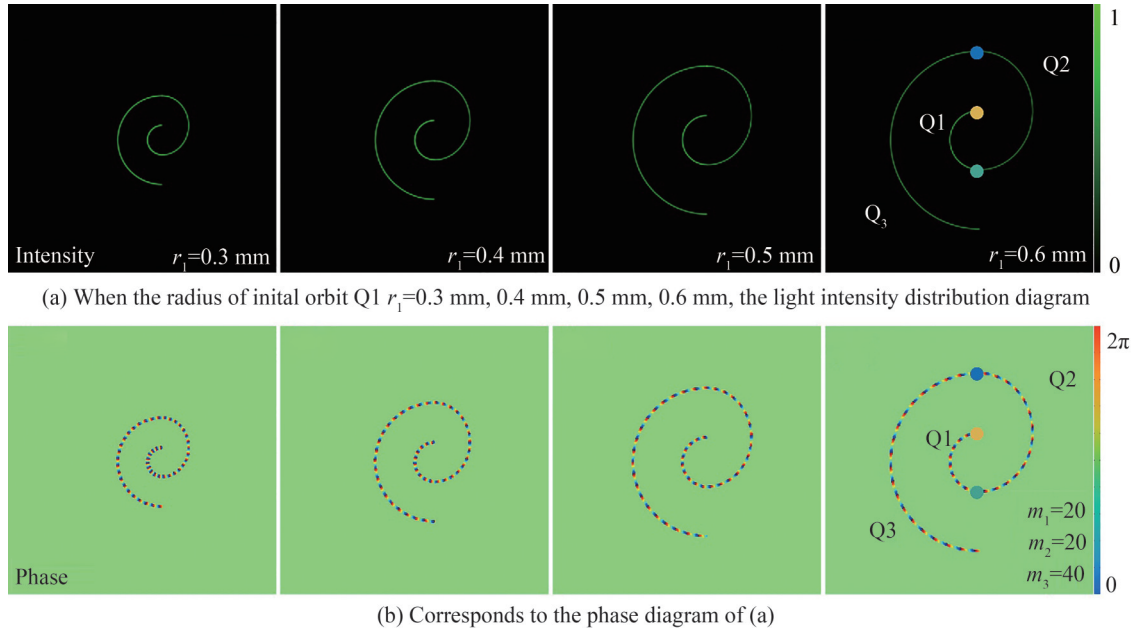


图2 不同半径停泊轨道
Fig.2 Parking orbit with different radius

更进一步地,通过继续附加额外的转移轨道以达到多次变轨的需求。接下来将对复杂霍曼转移结构光束进行模拟生成及性质研究。为了更方便的观察效果,其参数设置为:停泊轨道半径 $r_1=0.1 \text{ mm}, m_1=2, n=2$,若设 $j=1, 2, 3, \dots$ 为轨道后续依次排序的编号。则其后续所有轨道的半径需符合 $r_2=1.5r_1, r_3=2r_1, r_4$

$=1.5r_3, r_5=2r_3, r_6=1.5r_5, r_7=2r_5, r_8=1.5r_7, r_9=2r_7, \dots$, 以达到变轨的目的, 拓扑荷值设定服从 $m_j=(r_j/r_1)m_1$ 以达到相位分布均匀的目的。以此方式生成的霍曼转移结构光束计算全息图透过率函数和光束表达式可以表示为

$$\begin{cases} H_{\text{total}}(x, y) = \sum_{j=1}^{\infty} H_j(x, y) \\ E_{\text{total}}(\xi, \eta) = \mathcal{F}\{H_{\text{total}}(x, y)\} \end{cases} \quad (6)$$

最终得到的霍曼转移结构光束的光强如图3(a)所示, 每当增加一次转移轨道, 上一次的同步轨道便会成为第二次的停泊轨道。以此类推即可得到复杂的霍曼转移结构光束。同时相位图如图3(b)所示, 可以明显的观察到, 相位呈现均匀分布, 这样在微粒操纵时可以给予粒子均匀的相位梯度力。

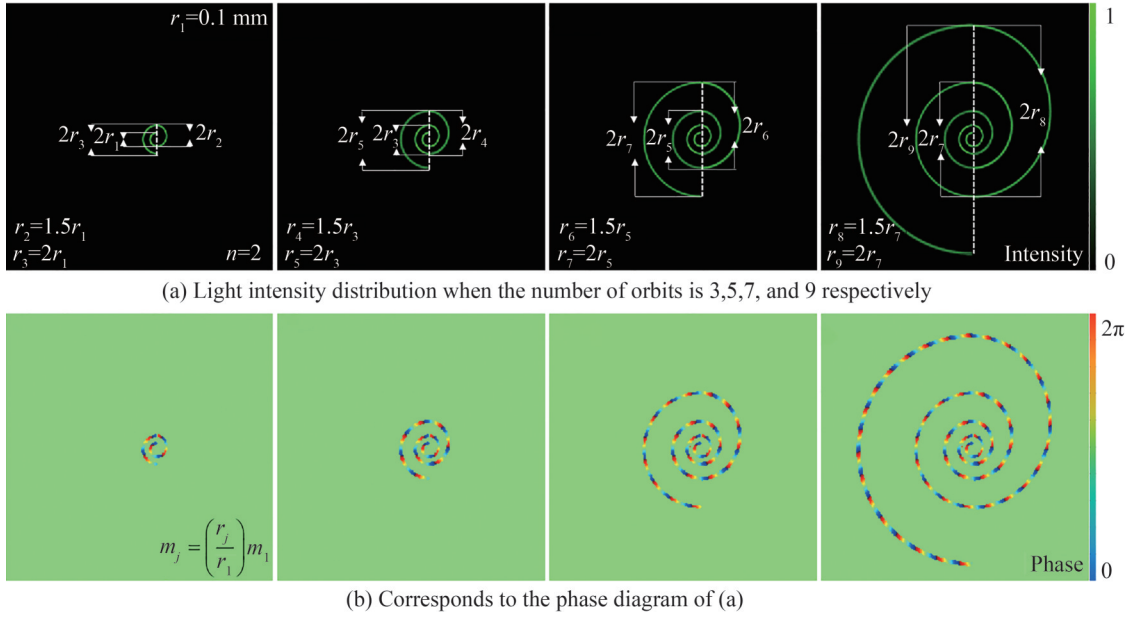


图3 不同轨道数量

Fig.3 Different number of orbits

2 微粒操纵实验验证

2.1 实验装置及微粒介绍

在模拟生成相应的霍曼转移结构光束之后, 需要对其在实验中生成并进行微粒操纵的验证。首先搭建一个实验光路, 本文使用的光路图如图4所示, 其中激光器(532 nm, 0~5 W 可调)输出的光经过透镜L1和透镜L2所组成的扩束系统进行扩束并调整为平行光, 之后经由偏振片P1转换为线偏振光输入到空间光调制器(SLM, HOLOEYE PLUTO-VIS-016, 像素尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$)上, 之后经过透镜L3和透镜L4组成4F滤波系统进行滤波得到SLM衍射出来的+1级衍射光。+1级衍射光最后经由透镜L5耦合进入显微物镜MO1($100\times$, oil, $\text{NA}=1.2$)中, 被显微物镜聚焦至样品室的粒子上。照明光路中的LED光(波长 $620 \pm 20 \text{ nm}$)经由显微物镜MO2($40\times$, $\text{NA}=0.4$)聚焦至样品室进行照明, 之后照明光经过二向色镜(反绿光透红光)输入到CCD(BasleracA1600-60gc型彩色相机, 分辨率为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $4.5 \mu\text{m} \times 4.5 \mu\text{m}$)上被计算机记录下来。同时偏振片P2可以用来去除二向色镜反射不完全的绿色光。本次实验中所使用的粒子为 $3 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯粒子, 溶剂为蒸馏水。图4(b)为本次实验中输入到SLM的掩模板, 其表达式为 $T = \exp\{i[\text{angle}(E_{\text{total}}(\xi, \eta) + 2\pi x/d)]\}$, 其中 $\text{angle}()$ 为相位函数, d 为闪耀光栅的周期。图4(c)为本次实验中的光束, 可以看到其光强分布与模拟结果基本相同。

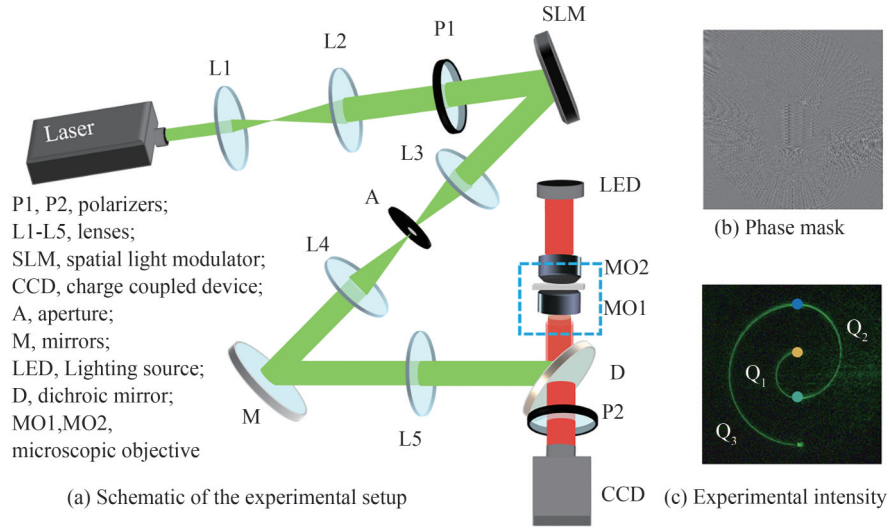


图4 实验装置及掩模板和实验光强图

Fig.4 Experimental setup, phase mask and experimental intensity

2.2 实验结果与讨论

为了证明霍曼转移结构光束的优越性,设计两个实验进行验证。第一个实验使用如图4(c)中的光束照射粒子,使粒子从停泊轨道转移到同步轨道。由于实验中的光束经过一系列反射,会导致反向,因此,实验中所使用的光束参数为 $r_1=0.3\text{ mm}$, $n=3$, $m_1=-40$, $m_2=-40$, $m_3=-60$ 。最终的实验结果如图5所示,可以看到粒子沿着既定的轨道,从小的圆轨道成功转移至目标大圆轨道。该实验验证了上文的理论预测,实现了变轨运动。

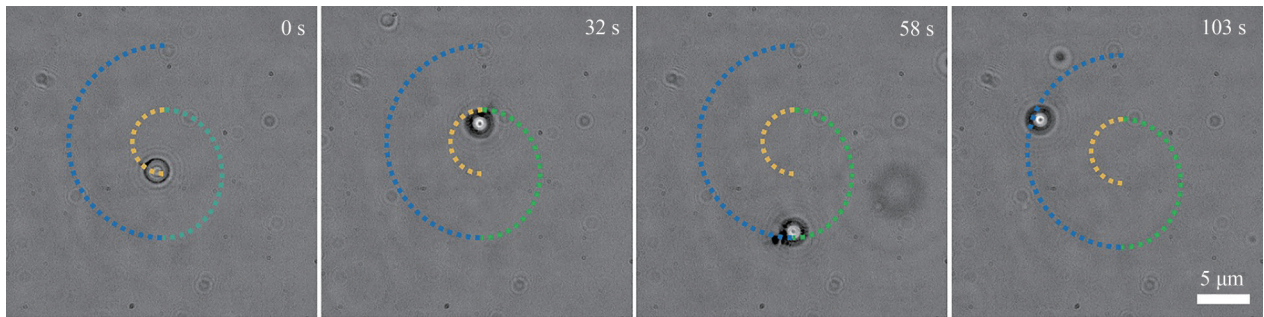


图5 霍曼转移结构光束微粒操纵实验结果图

Fig.5 Experimental results of Hohmann transfer structure beam particle manipulation

第二个实验使用动态切换SLM上掩模板的方式,由于SLM可以实时切换掩模板,因此先分别生成三个完整轨道的掩模板,即 T_i 全部等于 2π 。之后使粒子分别在停泊轨道旋转一周半之后,选择合适时机切换转移轨道掩模板,再旋转一周半之后,转移至同步轨道并在同步轨道旋转一周。以此来证明在微观世界使粒子在运动中切换轨道的可能性。最终的实验结果图6。从图中可以清楚的看到,粒子从较小的黄色轨道,之后变轨至绿色椭圆轨道,最后变轨至更大蓝色的同步轨道上。值得注意的是,三条轨道周长不相等,并且每条轨道携带的拓扑荷不相等,相位梯度不相同。并且,在轨道变换时激光器的能量是保持不变的,因此轨道上的光子分布也变得更为稀疏,最终导致粒子在三条轨道上的运动速度不同。如果需要,可以通过改变光束参数和调整激光器能量来得到稳定的匀速运动。

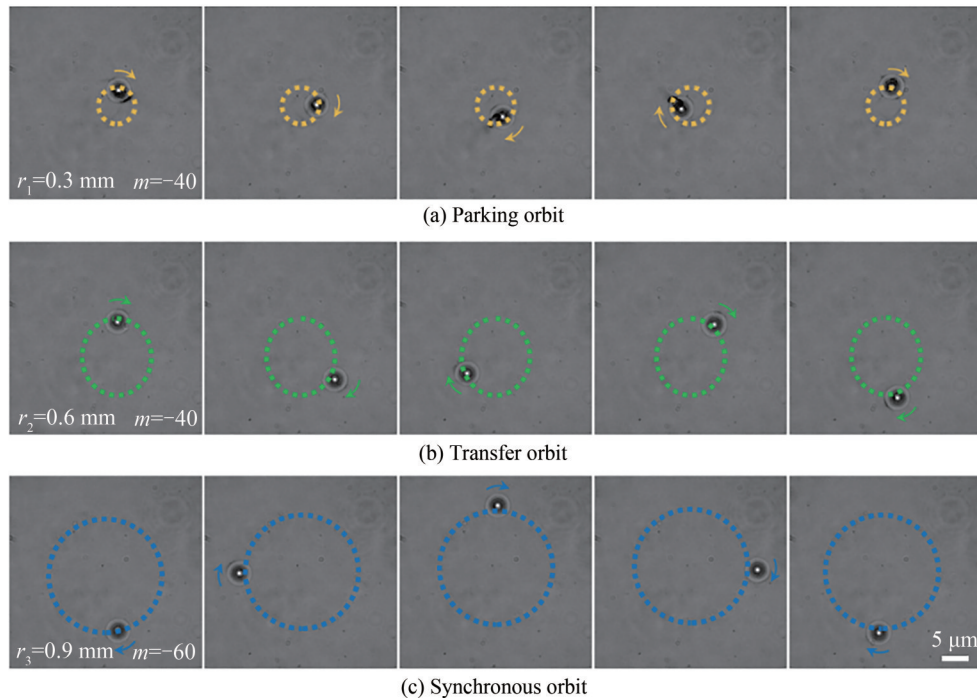


图6 SLM动态变化掩模板使粒子变换轨道
Fig. 6 Particle change the orbit via SLM dynamically changes the phase mask

3 结论

结合光束塑形、坐标变换、傅里叶相移技术成功的将霍曼转移应用至结构光中,提出了一种模式丰富可调的霍曼转移结构光束。该光束的大小,相位梯度分布均可任意调制,并且理论上允许粒子从停泊轨道转移至同步轨道。最后在实验中对其进行了验证。可预见地,该光束可以通过改变拓扑荷值的正负,来反转停泊轨道和同步轨道,或者通过分别调整各个轨道的拓扑荷值来控制粒子在各个轨道之间运动的速度,或者通过整体旋转、翻转光束来控制粒子转移的方式。该研究充分证明了霍曼转移在微观世界中的可行性,在光学微操作领域具有重大意义。

参考文献

- [1] JERRY B M. Classical dynamics of particles and systems[M]. Academic Press, 2013.
- [2] KOON W S, LO M W, MARSDEN J E, et al. Low energy transfer to the Moon[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2001, 81(1): 63-73.
- [3] BOLLT E M, MEISS J D. Targeting chaotic orbits to the Moon through recurrence[J]. Physics Letters A, 1995, 204(5-6): 373-378.
- [4] NGO T T, ZHANG Q, ZHOU R, et al. Asymmetric unwrapping of nucleosomes under tension directed by DNA local flexibility[J]. Cell, 2015, 160(6): 1135-1144.
- [5] RUI G, LI Y, ZHOU S, et al. Optically induced rotation of Rayleigh particles by arbitrary photonic spin[J]. Photonics Research, 2019, 7(1): 69-79.
- [6] ZHANG Y, MIN C, DOU X, et al. Plasmonic tweezers: for nanoscale optical trapping and beyond[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 1-41.
- [7] ZHAO Mingxue, ZHU Lihao, SHAO Tongtong, et al. Optical manipulation characteristics of yeast cells by asymmetric dynamic vortex beams[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(6): 841-847.
赵明雪, 朱刘昊, 邵彤彤, 等. 非对称动态涡旋光束对酵母菌细胞的光操纵特性[J]. 液晶与显示, 2021, 36(6): 841-847.
- [8] WANG Xiaolei, JIANG Guangke, DONG Yuxin, et al. Study on optical force characteristics of triangular metal nanoparticles[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6): 0614002
王晓雷, 姜光科, 董钰鑫, 等. 三角形金属纳米粒子的光力特性研究[J]. 光子学报, 2021, 50(6): 0614002
- [9] ZHU Lihao, QIN Xueyun, TAI Yuping, et al. Equal spacing control of particle via cycloidal beam (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(9): 20210380

- 朱刘昊,秦雪云,台玉萍,等. 摆线光束的微粒等间距操控(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 20210380
- [10] ZHOU Yuan, LI Runze, YU Xianghua, et al. Progress in study and application of optical field modulation technology based on liquid crystal spatial light modulators(invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11): 1123001
周源,李润泽,于湘华,等. 基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(11): 1123001.
- [11] YANG Y, REN Y, CHEN M, et al. Optical trapping with structured light: a review[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(3): 034001.
- [12] LIANG Y, YAN S, WANG Z, et al. Simultaneous optical trapping and imaging in the axial plane: a review of current progress[J]. Reports on Progress in Physics, 2020, 83(3): 032401.
- [13] 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.
- [14] LADAVAC K, GRIER D G. Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays[J]. Optics Express, 2004, 12(6): 1144-1149.
- [15] WU T, NIEMINEN T A, MOHANTY S, et al. A photon-driven micromotor can direct nerve fibre growth[J]. Nature Photonics, 2012, 6(1): 62-67.
- [16] YAN Z, SAJJAN M, SCHERER N F. Fabrication of a material assembly of silver nanoparticles using the phase gradients of optical tweezers[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(14): 143901.
- [17] RODRIGO J A, ANGULO M, ALIEVA T. Tailored optical propulsion forces for controlled transport of resonant gold nanoparticles and associated thermal convective fluid flows[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 1-11.
- [18] RODRIGO J A, ANGULO M, ALIEVA T. All-optical motion control of metal nanoparticles powered by propulsion forces tailored in 3D trajectories[J]. Photonics Research, 2021, 9(1): 1-12.
- [19] CONKEY D B, TRIVEDI R P, PAVANI S R P, et al. Three-dimensional parallel particle manipulation and tracking by integrating holographic optical tweezers and engineered point spread functions[J]. Optics Express, 2011, 19(5): 3835-3842.
- [20] TRIVEDI R P, LEE T, BERTNESS K A, et al. Three dimensional optical manipulation and structural imaging of soft materials by use of laser tweezers and multimodal nonlinear microscopy[J]. Optics Express, 2010, 18(26): 27658-27669.
- [21] RODRIGO J A, ALIEVA T, ABRAMOCHKIN E, et al. Shaping of light beams along curves in three dimensions[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 20544-20555.
- [22] LI X, MA H, ZHANG H, et al. Close-packed optical vortex lattices with controllable structures[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 22965-22975.
- [23] MA H, LI X, TAI Y, et al. In situ measurement of the topological charge of a perfect vortex using the phase shift method [J]. Optics Letters, 2017, 42(1): 135-138.

Hohmann Transfer Structure Beam and Particle Manipulation (Invited)

LI Xinzhong, ZHU Lihao, FAN Haihao, WEI Wenjun, MA Xin, QIN Xueyun,
HU Huajie, TAI Yuping

(School of Physics and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: Since the invention of the laser in the 1960s, the higher power of the laser has led to a better understanding of the interaction between light and matter because of its monochromaticity, directionality, and coherence. Optical tweezers, which won the 2018 Nobel Prize in Physics, are one of the best applications of lasers. In 1976 ASHKIN A discovered that a single beam of light dependent on a gradient force could capture particles. The single beam optical tweezers is widely used in the biological field. In 1992, Orbital Angular Momentum (OAM) was discovered, structural beams carrying OAM have been widely used in the field of particle manipulation and it adds the degree of freedom of lateral manipulation for optical tweezers and has more abundant manipulation modes. However, in the case of the existing structural beams, no matter how the structure of light is changed, due to the nature of OAM, its structure beam will always make particles move along a given orbit in specific applications. The real-time orbital movement of particles is not considered. Therefore, there is an urgent need for a beam with a more abundant mode than the previous single OAM, which can simultaneously exist a variety of different OAMs and control the motion of particles in real-time. The Hohmann transfer was derived by the German

engineer Dr. Walter Hohmann in 1925. It is a method to transfer the minimum energy of a satellite between two circular orbits with the same inclination and different altitudes. It's widely used in the aerospace field. Although particles move in solution, they are also affected by buoyancy and other external forces in addition to the gravity of particles themselves, and the environment they live in is relatively complex, so their motion cannot be compared with the law of planetary motion. However, the orbital switching of Hohmann transfer can still solve the existing problems of structured optical tweezers.

To solve this situation, in this paper, the corresponding orbit beam is generated by beam shaping technology, the orbit is transformed into an elliptical orbit by coordinate transformation technology, and finally, the orbit is combined by the Fourier phase shift theorem. A kind of Hohmann Transfer Structured Beam (HTSB) has been proposed via combining beam shaping technology, coordinate transformation technology and Fourier phase shift theorem. This beam has a very abundant mode of regulation and the phase gradient distribution can transfer the particles from the parking orbit to the synchronous orbit. Also, the size, structure, and phase gradient, can be arbitrarily adjusted, in the application can be based on the actual needs of the corresponding adjustment of the beam. Firstly, we analyze the relationship between each orbit of Hohmann transfer, and give the relationship between parameters corresponding to each orbit of HTSB, and the control method. The intensity and phase distribution of the HTSB with increasing radius are simulated. Secondly, we extend the HTSB according to the principle of Hohmann transfer, and discuss the parameter setting and generation method of HTSB with more orbits. The intensity and phase distribution of HTSB with more orbits are simulated. Finally, an optical tweezer experiment is set up, and the HTSB is used to manipulate the polystyrene particles. We have designed two experiments, the first experiment is using a fixed HTSB to make the particles from the parking orbit transfer to synchronous orbit, and the second experiment is using dynamic switch cover template on spatial light modulator particles in a week and a half after parking orbits respectively, choose an appropriate time to transfer orbit switch mask template, rotating again after a week and a half, Transfer to synchronous orbit and rotate once in synchronous orbit. Moreover, the beam can do a lot more. It can reverse the fixed orbit and the synchronous orbit by changing the topological charges; the velocity of particles moving between orbits can be controlled by adjusting the topological charge of each orbit; it can control the way the particles are transferred by rotating the beam as a whole. Therefore, this research proves the feasibility of Hohmann transfer in the microscopic field and has great significance in the field of optical micromanipulation.

Key words: Physical optics; Optical tweezers; Optical manipulation; Holography; Spatial light modulators; Optical vortices

OCIS Codes: 350.4855; 070.6120; 050.4865