

# 酵母细胞在涡旋光阱中的旋转动力学研究

高红芳<sup>1,2</sup> 任煜轩<sup>1</sup> 刘伟伟<sup>1</sup> 李银妹<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026  
<sup>2</sup>合肥微尺度物质科学国家实验室, 安徽 合肥 230026  
<sup>3</sup>安徽省光电子科学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230026

**摘要** 利用液晶空间光调制器对高斯光束进行相位调制后可生成涡旋光束。因涡旋光束本身具有轨道角动量, 酵母细胞被光阱捕获后会绕其中心旋转, 对酵母细胞旋转的时序信号图进行傅里叶变换后可测出酵母细胞在光阱中的旋转角速度。详细讨论了酵母细胞旋转角速度随激光功率、拓扑荷以及捕获高度的变化关系。实验结果表明, 酵母细胞的旋转角速度与激光功率成正比, 与拓扑荷的平方成反比; 捕获高度在 14  $\mu\text{m}$  时角速度达到最大值; 细胞在涡旋光阱中的旋转方向可由拓扑荷的符号决定, 正号为逆时针旋转, 负号为顺时针旋转。此实验结果有望应用在细菌鞭毛马达力矩的测量实验中。

**关键词** 傅里叶光学; 涡旋光束; 轨道角动量; 酵母细胞; 旋转角速度

**中图分类号** O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0404002

## Rotation Dynamics of Yeast Cell in Vortex Optical Tweezers

Gao Hongfang<sup>1,2</sup> Ren Yuxuan<sup>1</sup> Liu Weiwei<sup>1</sup> Li Yinmei<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China  
<sup>2</sup>Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale, Hefei, Anhui 230026, China  
<sup>3</sup>Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** Vortex optical trap is generated by projecting computer-generated phase patterns to liquid crystal spatial light modulator. Because vortex beam itself owns orbital angular momentum, it can be utilized to trap and rotate yeast cell. The angular rotation rate of yeast cell is measured by Fourier transforming of rotation time-sequential signal. Besides, how laser power, topological charge and height of the vortex trap from bottom affect the angular rate of rotation is discussed in detail. The experimental results indicate that the rotation rate is proportional to laser power, but inversely proportional to the square of the topological charge. The rotation rate reaches maximum when the height of trap is about 14  $\mu\text{m}$ . The sign of topological charge determines the direction of rotation of yeast cell. When the sign of topological charge is positive, the yeast cell rotates counter-clockwise, and it rotates clockwise when the sign is negative. The results may find their potential applications in the measurement of the torque of bacterial flagella motor.

**Key words** Fourier optics; vortex beam; orbital angular momentum; yeast cell; angular rotation rate

**OCIS codes** 070.6120; 050.4865; 170.1420; 170.4520; 260.6042

## 1 引 言

由于光子动量或角动量的传递, 微粒可被聚焦的激光束捕获或旋转, 是激光力学效应的体现, 它在

生物学领域有重要的应用, 如人血红细胞的研究<sup>[1~3]</sup>, 老鼠干细胞研究<sup>[4]</sup>, DNA 的解旋<sup>[5]</sup>, 细菌鞭毛马达力矩的测量<sup>[6]</sup>, 生物系统中酶动力学测量<sup>[7]</sup>

收稿日期: 2010-12-03; 收到修改稿日期: 2011-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(21073174, 31071064)资助课题。

作者简介: 高红芳(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光镊技术及其在生物学中的应用研究。

E-mail: ghf09@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 李银妹(1953—), 女, 教授, 主要从事光镊技术及相关应用研究。E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn(通信联系人)

等。光阱<sup>[8]</sup>中微粒的旋转一般分为3种情况:1)线性动量的传递致使微粒旋转<sup>[9]</sup>,这种情况下微粒必须是不规则形状的。例如在高渗溶液中的人血红细胞可变成镰刀状,这种形状的红细胞可在线偏振光形成的光阱中旋转。2)自旋角动量的传递致使微粒旋转<sup>[10]</sup>,圆偏振光或椭圆偏振光经双折射微粒后其偏振态发生改变<sup>[11]</sup>,将自旋角动量传递给双折射微粒使其在光阱中自转。一个典型的例子是美国康奈尔大学的研究人员用先进加工技术刻蚀圆柱状碳酸钙微粒,将双链DNA链接在碳酸钙上,通过圆偏振的激光束来旋转碳酸钙微粒进而研究DNA螺旋的扭力矩<sup>[5]</sup>。3)轨道角动量的传递致使微粒旋转<sup>[12]</sup>,具有螺旋波前的涡旋光束其本身具有轨道角动量,可传递给吸收性的微粒,使微粒绕涡旋光阱的中心旋转。涡旋光束形成的光阱对捕获和旋转微粒的形状,双折射特性以及折射率都没有特殊的要求,如金属颗粒、液相中的气泡、玻璃微球等<sup>[13]</sup>都可在涡旋光阱中旋转。生物学研究中的细胞器、靶细胞以及很多细菌用前两种方法不能旋转,但这些细胞都具有吸收光的特性,可以在涡旋光形成的环形光阱中旋转。借助涡旋光阱来操纵生物细胞或生物大分子,通过研究它们的动力学特性可了解它们在活体内起作用的生物学机理。

早在1995年,H. He等<sup>[12]</sup>就观察到具有相位奇点的光束具有轨道角动量,并使微粒旋转,但他们是采用全息底片将高斯光转换成低级拓扑荷的涡旋光,其转换效率较低且由于受全息片分辨率的限制不能实现较高级次拓扑荷的涡旋光。虽然有一些其他方法可以实现涡旋光,如柱面镜光束变换<sup>[14]</sup>、数字微镜器件<sup>[15,16]</sup>、螺旋相位片<sup>[17,18]</sup>等,但它们的适用范围有限。如通过柱面镜光束变换或光束相干涉生成拉盖尔-高斯光,对光学元件的设计和加工以及光路的调整等要求很高,而且生成的涡旋光的拓扑荷很小,不便研究拓扑荷对微粒旋转速度的影响;对数字微镜产生的涡旋光一级衍射效率非常的低;多台阶螺旋相位片则需套刻加工,环节多,制作周期长。利用液晶空间光调制器形成涡旋光,光路结构简单,调节方便,衍射效率高,生成拓扑荷的范围比较广,通过快速切换加载到空间光调制器上相位图的拓扑荷可实现对光阱中微粒旋转角速度的实时控制。本文利用液晶空间光调制器生成涡旋光束,并与显微镜装置相耦合形成涡旋光阱。实验中观察到酵母细胞在涡旋光阱中匀速旋转,其旋转角速度可由激光功率、拓扑荷以及捕获高度来调节,而细胞的

旋转方向可由拓扑荷的正负来决定。

## 2 实验原理与装置

在研究酵母细胞旋转动力学前,需要对实现旋转的涡旋光束有个直观的认识,涡旋光束<sup>[19]</sup>的波前具有连续螺旋渐变的特性,光束中心为相位奇点,此处光强为零,且在传播过程中始终保持为零。涡旋光束的螺旋波前,使得光束的波印廷矢量有一切向分量,正因为这一切向分量,光束携带了轨道角动量。L. Allen等<sup>[20]</sup>指出涡旋光束具有 $\varphi = \ell\theta$ 的螺旋相位结构,且每个光子具有 $\ell\hbar$ 的轨道角动量,其光场振幅可表示为 $\psi_\ell(\mathbf{r}) = u(r, z)e^{-ikz}e^{i\ell\theta}$ ,  $u(r, z)$ 是光束在 $z$ 处的径向轮廓,  $\mathbf{k} = k\hat{z}$ 是光束的波矢量,  $\ell$ 是拓扑荷,决定着光束相位的角向分布,在光束传播过程中保持不变。尽管大部分激光器的出光模式为基模高斯光,但其经相位调制后可生成涡旋光束。实验中通过液晶空间光调制器在基模高斯光束的波前上加载 $-e^{i\ell\theta}$ 的相位信息,使基模高斯光转化为具有连续螺旋相位波前的涡旋光。

实验光路如图1所示,由激光二极管抽运的Nd:YAG激光器(HPG-5000, ELFORLIGHT, 6.0 W, CW, 532 nm)发出的线偏振基模高斯光经透镜组 $f_1$ 和 $f_2$ 组成的望远镜扩束后,以 $6^\circ$ 的入射角投射到反射型纯相位液晶空间光调制器(SLM)(Holoeyes, PLUTO)上<sup>[21]</sup>,经SLM调制后生成涡旋光束。基模高斯光的偏振方向与SLM中液晶分子的长轴方向平行,SLM由计算机控制并已加载如图1(a)所示的灰度相位图 $\varphi(\mathbf{r}) = \ell\theta \bmod 2\pi$ 。涡旋光束再经阱位透镜 $f_3$ 聚焦后由两个 $45^\circ$ 全反镜耦合到显微镜(Olympus IX-70, Japan)中,经高数值孔径100倍油浸物镜( $d_{NA} = 1.3, 1.5$ 倍辅助成像透镜)聚焦后在其后焦面上形成环状涡旋光阱。其中SLM位于阱位透镜的前焦面上。酵母细胞在涡旋光阱中的旋转录像由CMOS相机(DALSA 1.4M100)记录<sup>[22]</sup>,实验过程中相机的同步频率为50.0 Hz,曝光时间为10 ms。

实验中所用的SLM为电寻址的反射型高精度纯相位液晶空间光调制器,像素分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 与投射到SLM上的灰度相位图像素相匹配,在 $420 \sim 850 \text{ nm}$ 波长范围内最大相位调制可以达到 $2\pi$ 。基模高斯光束经加载在SLM上的灰度相位图调制后可生成衍射效率为60%的涡旋光束。SLM响应时间可小于1 ms,最大帧频速度可达60 Hz,可通过快速切换加载到

SLM 上灰度相位图拓扑荷的大小和方向, 来实时控制酵母在环形光阱中的旋转角速度和旋转方向。SLM 的有效面积为  $15.36 \text{ mm} \times 8.64 \text{ mm}$ , 在连续

光功率密度下损伤阈值为  $2 \text{ W/cm}^2$ , 实验中入射到空间光调制器前的激光光斑直径约为  $13 \text{ mm}$ , 所以照射在 SLM 的激光功率不能超过  $2.6 \text{ W}$ 。

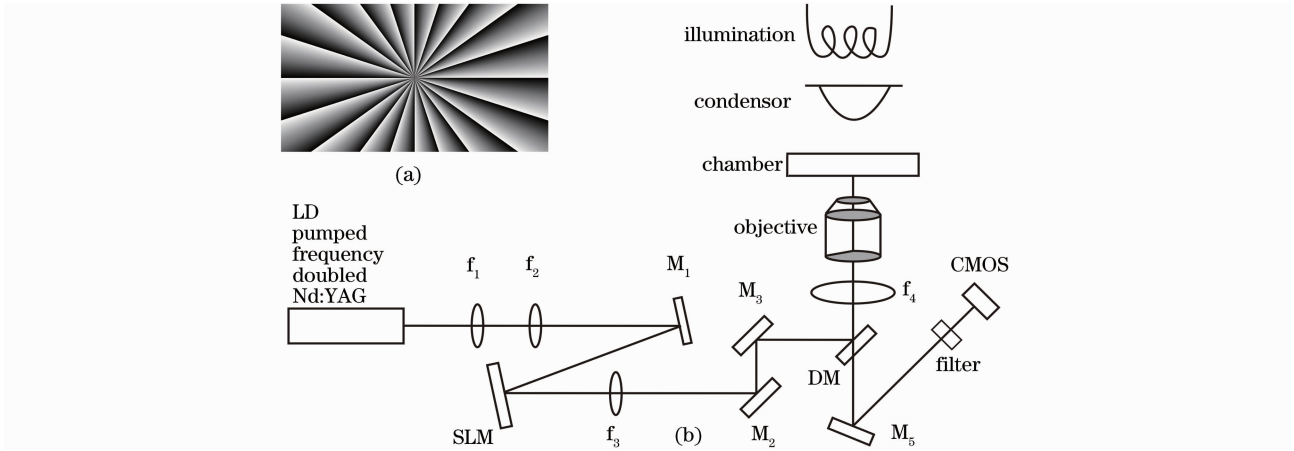


图 1 (a) 计算机生成的相位灰度图, (b) 生成涡旋光阱的全息光镊光路示意图

Fig. 1 (a) Computer-generated phase pattern, (b) schematic diagram of dynamic holographic optical tweezers

### 3 实验结果

样品为分散在水溶液中的酵母细胞, 平均每毫升大约有 1000 个细胞。由于涡旋光束的螺旋相位, 酵母细胞在涡旋光阱中受到一个切向的光阱力, 使其沿涡旋光阱的光强最大处绕光轴进行旋转。图 2(a) 为显微镜共轭点处激光功率为  $200 \text{ mW}$ , 拓扑荷  $\ell$  为 30, 涡旋光阱捕获高度为  $10 \mu\text{m}$  时酵母细胞旋转的时间序列图, 相邻两幅图之间的时间间隔为  $200 \text{ ms}$ , 圆线标记酵母细胞绕着光阱旋转的圆形轨迹, 因在 CMOS 相机的前面加了  $532 \text{ nm}$  带阻滤波片, 环状光阱的光斑已被过滤。图 2(b) 为酵母细胞在涡旋光阱中旋转的时间序列图经 Matlab 处理后的时序信号图, 峰值信号代表此刻有酵母细胞通过。

图 2(c) 为酵母细胞时序信号图傅里叶变换后的功率谱, 峰值对应着酵母细胞的旋转频率为  $0.649 \text{ Hz}$ , 由  $\omega = 2\pi f$  可知酵母细胞的旋转角速度约为  $4 \text{ rad/s}$ 。酵母细胞在涡旋光阱中除了受到沿光轴方向的光力矩, 同时还会受到反方向的水的粘滞阻力矩, 当这两个力矩达到平衡时酵母细胞就会在光阱中匀速转动。假定酵母细胞为球形, 酵母细胞在涡旋光阱中的粘滞阻力矩<sup>[12]</sup>为  $\tau = -8\pi\eta r^3\omega$ , 其中  $\eta$  为水的粘滞系数,  $r$  为酵母细胞的半径。实验温度为  $25^\circ$ , 水的粘滞系数为  $0.894 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ , 细胞的平均半径为  $2.6 \mu\text{m}$ , 可估算出酵母细胞在环形光阱中受到的光力矩约为  $1.6 \text{ pN} \cdot \mu\text{m}$ , 这与文献中报道的新月柄杆菌<sup>[23]</sup>、链球菌<sup>[24]</sup>和大肠杆菌<sup>[25]</sup>的鞭毛马达所产

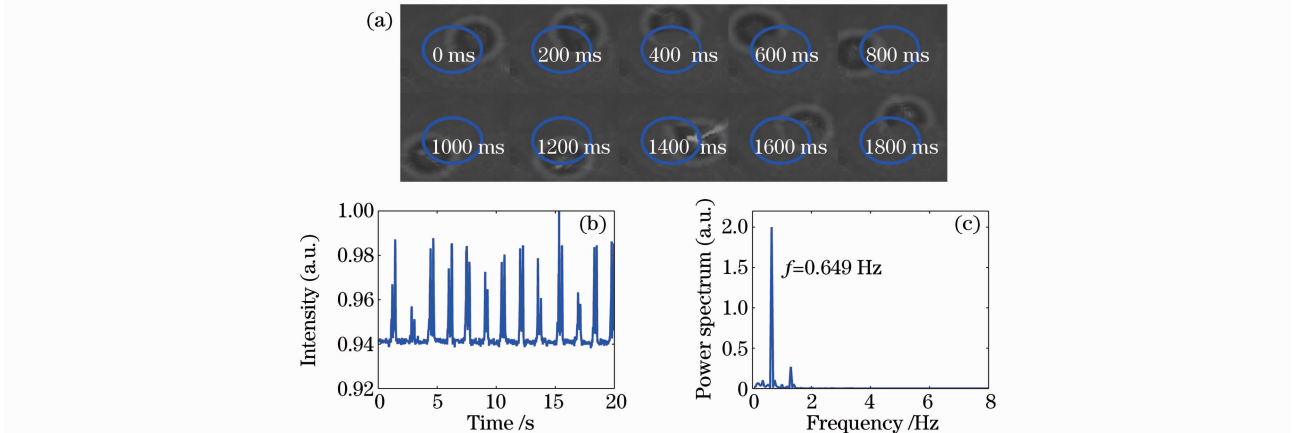


图 2 酵母细胞在涡旋光阱中旋转的图像序列图(a), 时序信号图(b)和功率谱(c)

Fig. 2 Time-lapsed sequential images (a), signal diagram (b) and power spectrum (c) of the rotation of a single yeast around the optical vortex

生的扭力矩的数值在同一个数量级<sup>[26]</sup>。改变拓扑荷的符号酵母细胞的旋转方向可改变,拓扑荷为正时酵母细胞逆时针旋转,拓扑荷为负时酵母细胞顺时针旋转。

#### 4 实验参数的讨论

细胞旋转角速度的可控性在实际应用中有非常重要的意义。激光功率、拓扑荷以及捕获高度对细胞在涡旋光阱中的旋转有很大的影响,实验上测得这三者与细胞旋转角速度的关系,并进行了理论分析对比。

##### 4.1 不同激光功率下酵母细胞的旋转角速度

图3为在拓扑荷为30,捕获高度为10 μm的条件下测得的激光功率与酵母细胞旋转角速度的关系。实验中采用一对格兰-泰勒偏振棱镜改变涡旋光场的功率,在不同的格兰-泰勒棱镜对透振方向的夹角下,用激光功率计测出显微镜共轭点的激光功率,并做出相应的标定曲线。然后再测量不同夹角下酵母细胞在涡旋光阱中旋转的角速度,通过功率的标定曲线就可以得到不同激光功率下酵母细胞旋转角速度。实验结果表明酵母细胞的旋转角速度与激光功率的大小成正比。激光功率越大,酵母细胞单位时间内吸收的光子数越多,涡旋光束传递给酵母细胞总的角动量越大,其旋转角速度就会越大。

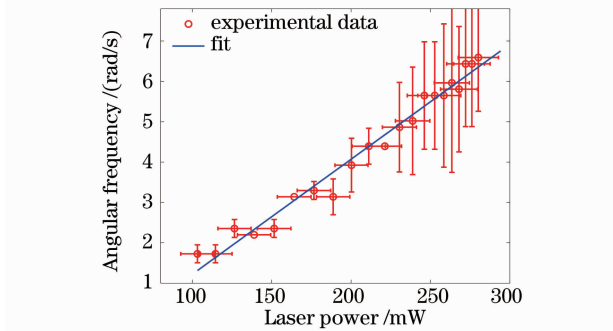


图3 不同激光功率下酵母细胞在涡旋光阱中的旋转角速度

Fig. 3 Dependence of a single yeast' rotation angular frequency on laser power

##### 4.2 不同拓扑荷下酵母细胞的旋转角速度

图4为涡旋光束经透镜聚焦后形成的环状光阱的半径与拓扑荷的关系,实验结果表明涡旋光阱的半径与拓扑荷成正比,拓扑荷 $\ell$ 为30时涡旋光阱的半径为2.5 μm,与酵母细胞的半径大小相当。图5为在显微镜共轭点处激光功率为400 mW,捕获高度为10 μm时,不同拓扑荷下酵母细胞的旋转角速

度。通过对实验数据拟合发现酵母细胞的旋转角速度与拓扑荷的平方成反比关系。从理论上亦可对此结果进行解释,涡旋光束中每个光子携带的轨道角动量为 $\ell\hbar$ ,则单位时间内酵母细胞在涡旋光阱中吸收到的总的轨道角动量<sup>[12]</sup>为 $L_z = \frac{P_{\text{abs}}}{\omega}\ell$ , $P_{\text{abs}}$ 为被酵母细胞吸收的光功率, $\omega'$ 为激光的圆频率。酵母细胞在光阱中的角动量还可表示为 $L_z = \mathbf{R}_\ell \times m\mathbf{v}$ , $v = \omega R_\ell$ 为旋转速度, $m$ 为酵母细胞的质量, $\omega$ 为旋转角速度, $R_\ell$ 为环形光阱的半径,由 $\mathbf{R}_\ell \times m\mathbf{v} = \frac{P_{\text{abs}}}{\omega}\ell$ 可推

出酵母细胞在涡旋光阱中旋转角速度为 $\omega \propto \frac{P_{\text{abs}}\ell}{R_\ell^2}$ 。

实验中所用的拓扑荷的值较大,范围为20~80,生成的涡旋光阱的半径在2~6 μm之间,这种情况下细胞在光阱中旋转时,并不是所有的光都同时照在细胞上,而只是涡旋光束的一部分,假定实验中涡旋光阱的光强是均匀分布的<sup>[27]</sup>,则 $P_{\text{abs}} \propto \frac{P}{2\pi R_\ell^2}$ , $P$ 为涡旋光阱的总功率。可推知,酵母的旋转角速度 $\omega \propto \frac{P}{R_\ell^3}\ell$ 。涡旋光束经透镜聚焦后环形光斑的大小

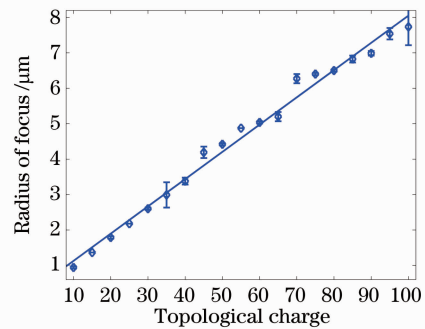


图4 涡旋光阱的半径随拓扑荷的变化

Fig. 4 Dependence of vortex optical trap' radius on the topological charge

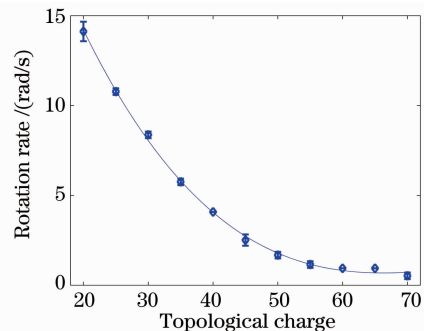


图5 不同拓扑荷下酵母的旋转速度

Fig. 5 Dependence of a single yeast' rotation angular rate on topological charge

与拓扑荷有关<sup>[27]</sup>  $R_\ell \propto \ell$ , 于是  $\omega \propto \frac{P}{\ell^2}$ , 酵母细胞的角速度与激光总功率成正比, 与拓扑荷的平方成反比。由此可知, 实验上测得的结果与理论推导相符。尽管拓扑荷越大涡旋光束中每个光子所带的角动量增大, 但同时随着拓扑荷的变化涡旋光阱的光场分布发生变化导致酵母细胞单位时间内吸收到的总的角动量减少, 从而使得酵母细胞的旋转角速度随着拓扑荷的增大而减小。

### 4.3 不同捕获高度下酵母细胞的旋转角速度

实验中选取合适的激光功率使得显微镜共轭点处的激光功率为 200 mW, 在拓扑荷为 30 时, 研究了涡旋光阱的捕获高度对酵母细胞的旋转角速度的影响。调节显微镜的物镜手轮, 可以改变光阱的捕获位置, 实验结果表明酵母细胞的旋转角速度先随着捕获高度的增大而增大, 当捕获高度达到 14  $\mu\text{m}$  时酵母细胞的旋转角速度达到最大值, 随后又随着捕获高度的增大而减小。由流体力学可知<sup>[28]</sup>, 细胞在涡旋光阱中旋转时会受到玻片底面的影响, 离玻片底面越近受到的粘滞阻力就越大, 因此细胞的旋转速度就会越小; 捕获高度继续升高, 酵母细胞的旋转角速度趋于减小, 这是因为实验中用的是油浸物镜, 油的折射率与水的折射率不相匹配使得物镜聚焦的涡旋光阱在水溶液中产生球差, 球差在一定程度上影响了光阱力, 从而使酵母细胞的旋转角速度减小。实验发现当捕获高度为 14  $\mu\text{m}$  时酵母细胞旋转最快, 图 6 给出光阱高度在 8~20  $\mu\text{m}$  时酵母细胞的转速变化趋势。总之, 在离玻片底面较近时, 水的粘致系数的大小对细胞旋转速度的影响占主要地位, 这时球差可忽略, 细胞旋转速度随着捕获高度升高而增大; 当捕获高度上升到 14  $\mu\text{m}$  以上时, 由于使用油镜引入的球差又占主导地位, 玻片底面的影响可忽略, 捕获高度越高球差越大, 光阱力越小,

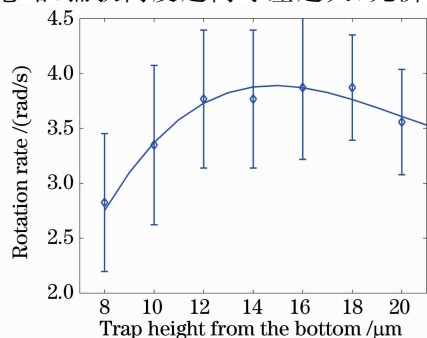


图 6 不同捕获高度下酵母细胞的旋转角速度

Fig. 6 Dependence of a single yeast' rotation angular rate on trap height from the bottom

细胞的旋转角速度随捕获高度的升高而减小。

## 5 结 论

利用 SLM 对基模高斯光进行纯相位调制后生成的涡旋光阱可用来直接捕获和旋转生物细胞或通过手柄连接技术间接操控和旋转单个生物大分子。实验结果表明细胞在涡旋光阱中的旋转角速度与激光功率成正比, 与拓扑荷的平方成反比, 由于受玻片底面以及物镜球差的影响在捕获高度为 14  $\mu\text{m}$  时旋转速度达到最大值。改变相位图  $\ell$  的值可直接改变涡旋光束的拓扑荷, 从而可实时控制细胞在光阱中的转速和方向。利用 CMOS 相机记录细胞在光阱中旋转的图像序列, 通过图像分析可求出细胞的旋转角速度。典型地, 在显微镜共轭点处激光功率为 200 mW, 拓扑荷为 30, 捕获高度为 10  $\mu\text{m}$  时测得细胞的旋转角速度为 4 rad/s, 受到的光阱力力矩为 1.6 pN  $\cdot \mu\text{m}$ , 这个力矩正好与细菌鞭毛马达产生的扭力矩在同一数量级上。通过建立细菌马达的力矩测量方法, 进一步可以测量马达在不同离子浓度、化学势等条件下的力矩, 构建马达工作的物理模型。这些可以为旋转动力学的蒙特-卡罗模拟<sup>[29,30]</sup>以及蛋白质动态结合的理论模型<sup>[31,32]</sup>提供直接的实验证据。因而利用涡旋光阱技术控制微转子的方法将在研究生物细胞和鞭毛马达旋转驱动的动力学机理方面有重要的应用前景。如将细菌鞭毛丝固定在载玻片上, 用涡旋光阱捕获细菌的菌体, 改变激光功率、拓扑荷或捕获高度可使细菌鞭毛马达的扭力矩与细菌菌体的扭力矩达到平衡, 通过测量相同条件下细菌菌体的旋转力矩可间接测出鞭毛马达的扭力矩。

## 参 考 文 献

- 1 F. Schaal, M. Warber, S. Zwick *et al.*. Marker-free cell discrimination by holographic optical tweezers[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2009, **4**: 09028
- 2 J. G. Wu, Y. M. Li, D. Lu *et al.*. Probing membrane elasticity of red blood cell with osmotic pressures using single optical tweezers[J]. *Cryo. Lett.*, 2009, **30**(2): 89~95
- 3 H. Zhang, N. Chen, A. El. Haj *et al.*. An optical-manipulation technique for cells in physiological flows [J]. *Journal of Biological Physics*, 2010, **36**(2): 135~143
- 4 J. Leach, D. Howard, S. Roberts *et al.*. Manipulation of live mouse embryonic stem cells using holographic optical tweezers [J]. *J. Mod. Opt.*, 2009, **56**(4): 448~452
- 5 C. Deufel, S. Forth, C. R. Simmons *et al.*. Nanofabricated quartz cylinders for angular trapping: DNA supercoiling torque detection[J]. *Nat. Meth.*, 2007, **4**(3): 223~225
- 6 S. M. Block, D. F. Blair, H. C. Berg. Compliance of bacterial flagella measured with optical tweezers [J]. *Nature*, 1989,

- 338(6215): 514~518
- 7 J. R. Moffitt, Y. R. Chemla, C. Bustamante. Methods in Statistical Kinetics. In: Nils G W, ed. Methods in Enzymology [M]. Amsterdam: Academic Press, 2010. 221~257
- 8 Wu Jianguang, Ren Yuxuan, Wang Ziqiang *et al.*. Time-sharing multiple optical traps using rotating glass plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2751~2756  
吴建光, 任煜轩, 王自强 等. 旋转玻片法实现分时复用多光阱[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2751~2756
- 9 S. K. Mohanty, A. Uppal, P. K. Gupta. Self-rotation of red blood cells in optical tweezers: prospects for high throughput malaria diagnosis [J]. *Biotechnology Letters*, 2004, **26** (12): 971~974
- 10 M. E. J. Friese, T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg *et al.*. Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles[J]. *Nature*, 1998, **394**(6691): 348~350
- 11 B. Gutiérrez-Medina, J. O. L. Andreasson, W. J. Greenleaf *et al.*. Methods in Enzymology[M]. Amsterdam: Academic Press, 2010. 377~404
- 12 H. He, M. E. J. Friese, N. R. Heckenberg *et al.*. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(5): 826~829
- 13 Ren Yuxuan, Zhou Jinhua, Wu Jianguang *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
- 14 J. Courtial, K. Dholakia, L. Allen *et al.*. Gaussian beams with very high orbital angular momentum[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **144**(4-6): 210~213
- 15 Y. X. Ren, M. Li, K. Huang *et al.*. Experimental generation of Laguerre-Gaussian beam using digital micromirror device[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(10): 1838~1844
- 16 Han Chao, Wei Sui, Quan Xilong *et al.*. Holographic display of digital micromirror device[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 190~194  
韩 超, 韦 穗, 权希龙 等. 数字微镜器件的全息显示[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 190~194
- 17 X. C. Yuan, J. Lin, J. Bu *et al.*. Achromatic design for the generation of optical vortices based on radial spiral phase plates [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 13599~13605
- 18 Ren Yuxuan, Wu Jianguang, Zhou Xiaowei *et al.*. Experimental generation of Laguerre-Gaussian beam using angular diffraction of binary phase plate [J]. *Acta Physica Sinica* 2010, **59** (6): 3930~3935  
任煜轩, 吴建光, 周小为 等. 相位片角向衍射产生拉盖尔高斯光束的实验研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(6): 3930~3935
- 19 Wang Tao, Pu Jixiong. Theoretical and experimental study on vortex beam transmitted through a single-slit[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2902~2907  
王 涛, 蒲继雄. 涡旋光束单缝衍射的理论和实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2902~2907
- 20 L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw *et al.*. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Phys. Rev. A.*, 1992, **45**(11): 8185~8189
- 21 Sun Qing, Ren Yuxuan, Yao Kun *et al.*. Algorithm for diffractive optical element of array optical tweezers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0109003  
孙 晴, 任煜轩, 姚 焜 等. 阵列光镊衍射元件的算法设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0109003
- 22 Y. X. Ren, J. G. Wu, M. Chen *et al.*. Stability of novel time-sharing dual optical tweezers using a rotating tilt glass plate[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(2): 028703
- 23 G. Li, J. X. Tang. Low flagellar motor torque and high swimming efficiency of caulobacter crescentus swarmer cells[J]. *Biophysical Journal*, 2006, **91**(7): 2726~2734
- 24 G. Lowe, M. Meister, H. C. Berg. Rapid rotation of flagellar bundles in swimming bacteria[J]. *Nature*, 1987, **325** (6105): 637~640
- 25 R. M. Berry, H. C. Berg. Absence of a barrier to backwards rotation of the bacterial flagellar motor demonstrated with optical tweezers[C]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of America*, 1997, **94**(26): 14433~14437
- 26 H. C. Berg. The rotary motor of bacterial flagella[J]. *Annual Review of Biochemistry*, 2003, **72**(1): 19~54
- 27 J. E. Curtis, D. G. Grier. Structure of optical vortices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(13): 133901
- 28 B. Lin, J. Yu, S. A. Rice. Direct measurements of constrained Brownian motion of an isolated sphere between two walls[J]. *Phys. Rev. E.*, 2000, **62**: 3909
- 29 Yuxuan Ren, Jianguang Wu, Mincheng Zhong *et al.*. Monte-Carlo simulation of effective stiffness of time-sharing optical tweezers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(2): 170~172
- 30 S. Mordechai. Applications of Monte Carlo Method in Science and Engineering [M]// Y.-X. Ren, J.-G. Wu, Y.-M. Li. Application of Monte Carlo simulation on optical tweezers. Rijeka: In Tech, 2011
- 31 Q. Wen, G. Li, J. Tang *et al.*. Switching statistics of a flagellar motor: first-passage time and dynamic binding[J]. *Journal of Statistical Physics*, 2007, **128**(1): 257~267
- 32 J. Yuan, K. A. Fahrner, L. Turner *et al.*. Asymmetry in the clockwise and counterclockwise rotation of the bacterial flagellar motor[C]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of America*, 2010, **107**(29): 12846~12849