



光悬浮微粒子旋转特性研究

曾凯, 蒲俊吉, 吴宇列*, 肖定邦, 吴学忠

国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073

* E-mail: ylwu_nudt@sina.com

收稿日期: 2023-02-27; 接受日期: 2023-06-19; 网络版发表日期: 2023-07-20

国家自然科学基金(批准号: 51975579)资助项目

摘要 悬浮光机械系统将微粒子悬浮在空中, 较好地隔绝了环境噪声, 在诸多精密测量及量子科学领域都发挥着重要作用. 利用圆偏振激光驱动微粒子自旋, 可以进行扭矩测量、气体辨识及真空摩擦等方面的研究. 本文基于光悬浮微粒子旋转动力学模型, 搭建了真空光悬浮及旋转实验装置, 对悬浮粒子的平均转速和转速波动进行了研究. 结果表明, 影响光力矩的激光功率越强, 激光偏振态越接近圆偏振光, 粒子的平均转速则越大. 但影响粒子平均转速的主要因素是阻尼力矩, 通过降低环境气压以减小粒子的旋转阻尼, 其平均转速可大幅提升. 通过调控这些实验参数, 约4 μm 直径的球霰石微球在环境气压为0.1 Pa时被驱动至3.93 MHz转速. 但在低气压环境下, 微粒子的热运动也变得明显, 从而导致悬浮粒子的等效激光功率随着热运动而变化, 进而使得粒子的转速波动也随着气压的下降而增大. 本文首创性地对比了相同气压不同转速下的转速波动, 进一步说明了粒子热运动对转速波动的影响规律. 此外, 本文还研究了不同气压下转速相对波动的变化规律, 这为光悬浮转子在陀螺仪领域的潜在应用奠定了基础. 这些研究结果对于提升光悬浮系统已有应用以及开拓新领域均有重要意义.

关键词 悬浮光机械系统, 光致旋转, 超快旋转, 转速稳定性

1 引言

光悬浮技术又名光镊技术, 利用光的力学效应能够以非接触和非侵入的方式操控微纳尺度的物体^[1,2]. 在生物领域可以实现细胞和病毒的抓取与测量^[3,4], 在物理领域可以测量微粒子的布朗运动^[5,6], 并将粒子冷却至宏观量子基态^[7-9]. 光悬浮系统具有极小微粒的操控以及超精密的测量能力, 所以该领域目前正处于蓬勃发展的阶段.

基于悬浮光学机械系统的丰富动力学特性, 许多

物理量可以被精确地测量. 利用悬浮粒子在光阱中的平动, 实现了弱力和加速度的测量^[10,11]. 由于悬浮微粒的尺寸较小, 它们可以对弱力表现出较大的响应, 通过使用光电探测器^[12]和干涉测量方法^[13]可以实现颗粒位置的精确测量, 从而实现微弱力及加速度信号的测量. 目前光悬浮系统能够实现 10^{-21} NHz^{-1/2}量级的力学测量^[14], 95 ngHz^{-1/2}量级的加速度测量^[15], 已成为许多领域的理想实验平台.

同时, 悬浮粒子的旋转运动也发挥着较大的实用价值. 当光学力矩施加到悬浮粒子上时, 微粒子的旋

引用格式: 曾凯, 蒲俊吉, 吴宇列, 等. 光悬浮微粒子旋转特性研究. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 1351–1359

Zeng K, Pu J J, Wu Y L, et al. Investigation of rotation characteristics of optically levitated particles (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53: 1351–1359, doi: 10.1360/SST-2023-0080

转动力学在应用中也能进行不同物理量的测量^[16~18]. 依据悬浮系统中激光的偏振态, 光学力矩可分为两类: 一种是线性偏振光引起的保守力矩, 另一种是圆偏振光引起的恒定驱动力矩^[19,20]. 通过调整激光的偏振态, 可以驱动粒子旋转或角度捕获. 在线偏振情况下, 悬浮粒子的易极化轴将会向着与激光的偏振方向重合的位置运动^[21], 并在该方位角附近摆动^[22,23]. 此时施加在粒子上的扭矩与粒子的方位角有关, 当易极化轴和电场平行时, 这种回复(保守)力矩将消失. 相反, 圆偏振光将其角动量传递给被捕获的粒子, 施加的扭矩与激光功率和粒子的双折射特性(形状不对称和各向异性光学特性)有关, 但与粒子的方位角无关. 因此, 将施加恒定的扭矩来驱动微粒旋转^[24~26]. 通过检测透过粒子的背向散射光的偏振态变化, 可以精确地测量力矩^[27]、空气压力^[28,29]和气体黏度^[30]. 在真空, 即低阻尼环境中, 粒子的旋转频率可以增加至GHz^[24,26,31], 并显示出特殊的对准^[32]和进动^[33].

利用光悬浮粒子的旋转特性已经实现了扭矩、气压等物理量的高精度测量, 且这些测量都是以粒子的转速为观察对象进行间接测量的, 粒子转速的稳定性直接影响了测量精度. 所以, 为了进一步提高测量精度, 需要对悬浮粒子的转速稳定性进行研究. 目前研究者关心更多的是如何进一步提升悬浮粒子的转速, 而忽略了转速的稳定性. 这限制了深入探究光悬浮系统的精度潜力, 所以有必要对此进行研究.

本文搭建了真空光悬浮系统, 实现了微粒子的悬浮及旋转. 进而基于粒子所受到的光驱动力矩和阻尼力矩, 建立了旋转动力学模型. 利用真空光悬浮系统实验验证了激光功率和偏振态, 以及环境阻尼对粒子平均转速的影响规律. 并通过不断降低气压以减小阻尼的方式, 将微米级尺寸的粒子旋转至MHz转速. 最后, 研究了悬浮粒子的热运动对其转速波动的影响规律.

2 光悬浮及旋转基本原理和实验装置

2.1 光悬浮及旋转基本原理

图1(a)为光悬浮系统的典型示意图, 一束汇聚的高斯激光竖直向上聚焦在微球上. 由于光的力学效应, 微球将会受到光的作用力, 分为沿着光传播方向的散射力以及沿着光强梯度方向的梯度力. 由于汇聚的高

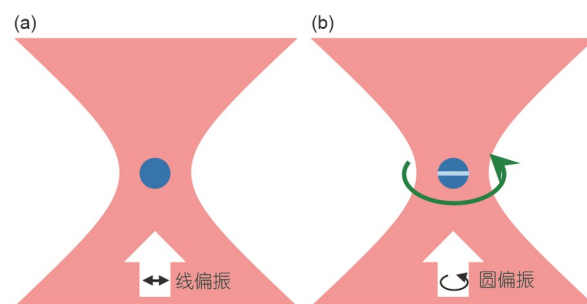


图1 光悬浮(a)及光旋转(b)原理图. (b)中粒子中间的横线代表光学双折射材料粒子的光轴

Figure 1 Schematic diagram of optical levitation (a) and optically induced rotation (b). The horizontal line in (b) represents the optical axis of the particle consists of optical birefringent material.

斯激光焦点处的光强最大, 所以最后在光力的作用下, 微球将会稳定地悬浮在激光的焦点位置附近. 此时, 不管粒子往哪个方向运动, 都会受到相反反向的力, 就好像掉入一个势阱中, 该势阱被称为光阱, 也就是熟知的光镊.

如图1(b)所示, 当悬浮捕获激光的偏振态为圆偏振时, 所捕获的粒子将会受到光力矩的作用, 从而旋转起来. 此处, 对悬浮粒子有一定的要求, 需要其具有双折射特性, 即在不同方向上对光的折射效果不一致. 这种双折射可以是几何双折射特性, 也可以是光学双折射特性. 由于不同方向的折射差异, 导致悬浮粒子将会改变激光的圆偏振状态, 即改变了激光的自旋角动量, 由此粒子本身就会受到光力矩, 从而旋转起来. 粒子所受到的光力矩大小与激光强度、粒子双折射程度以及激光偏振等参数有关.

2.2 光悬浮及旋转实验装置

在本实验中, 所搭建的实验装置如图2所示. 所选用激光器的波长为1064 nm, 功率为500 mW (3%稳定性), 出射光斑为2 mm, 经过扩束镜组后得到约4 mm直径的光斑. 图中红色代表捕获激光, 绿色代表成像光路. 所选用的聚焦物镜为100倍, 数值孔径是1.25, 以尽可能地缩小光束直径从而获得较大的光强梯度, 实现稳定捕获. 激光透过小球后, 由10倍的成像物镜收集激光, 并进行准直以便后续光路对粒子的运动信号进行检测. 相机安装在成像物镜的后焦距上, 以对悬浮粒子进行实时观测. 如图2所示, 微球被放置在薄玻璃板上, 玻璃板的厚度与物镜匹配, 且透光率高以便实现

稳定捕获. 微球的尺寸较小, 所以微球与微球之间、微球与玻璃板之间均存在较大的范德华力, 颗粒不能直接在空气中的玻璃表面被捕获. 将玻璃片固定在圆形的压电片上(直径16 mm, 厚度1 mm), 然后通过振动(110 kHz)将微粒从玻璃板上分离, 以实现捕获.

实验中所使用的微粒子为采用溶液法合成的球霏石微球, 微球的直径约为4 μm , 图3为所采用微球的扫描电子显微镜图片. 球霏石是一种正向的单轴晶体, 双折射特性 $\Delta n = n_e - n_o \sim 0.1$, 其中, $n_e = 1.65$ 和 $n_o = 1.55$ 分别为激光偏振沿着非寻常光轴和寻常光轴时的折射率. 利

用球霏石晶体制备的微球在圆偏振激光中能够获得较大的光力矩, 从而很容易克服阻尼力矩实现粒子的旋转.

在捕获住粒子后, 通过调整聚焦物镜前的1/4波片($\lambda/4$)将激光偏振态调整至圆偏振, 从而驱动微粒子旋转. 检测粒子旋转信号的光路经二向色镜后反射至偏振分束棱镜处, 经过棱镜后的激光功率将会随着偏振方向的改变而改变. 此时粒子类似于旋转的波片, 对激光的偏振态有周期调制的作用, 且调制频率为转速的2倍^[25], 因而利用光电探测器检测偏振分束棱镜后的激光功率变化即可实现微粒子旋转信号的检测.

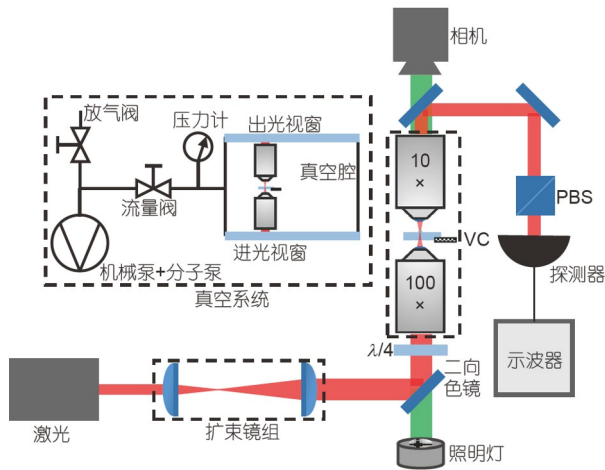


图2 实验装置. VC代表真空系统, PBS代表偏振分束棱镜
Figure 2 Experimental setup. VC represents the vacuum chamber. PBS represents the polarized beam splitter.

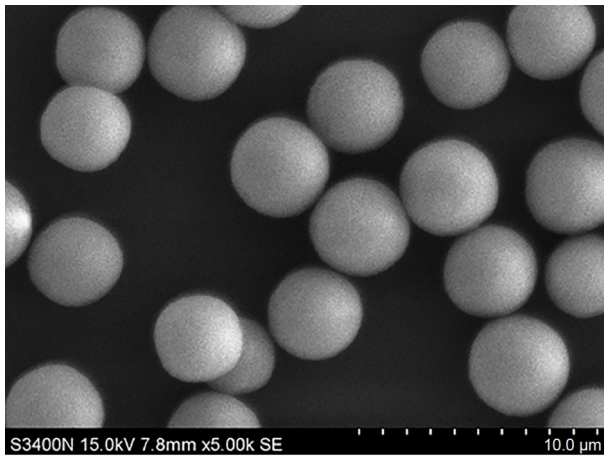


图3 球霏石微粒扫描电子显微镜图
Figure 3 Scanning electron microscopy (SEM) image of vaterite particles.

3 悬浮粒子转速及其波动的影响因素

3.1 悬浮粒子旋转动力学模型

对于球霏石微球, 当其稳定悬浮在圆偏振光阱中时, 所受到的光力矩表达式为^[19]

$$\tau_{\text{opt}} = -\frac{\varepsilon}{2\omega} E_0^2 \sin(kd(n_o - n_e)) \cos 2\varphi \sin 2\theta + \frac{\varepsilon}{2\omega} E_0^2 \{1 - \cos(kd(n_o - n_e))\} \sin 2\varphi, \quad (1)$$

其中, ε 为粒子介电常数, E_0 为电场强度, k 为自由空间的波数, d 为双折射晶体的厚度, n_o 和 n_e 分别为双折射晶体寻常光和非寻常光的折射率, φ 描述激光的椭圆偏度(0° 和 90° 表示线偏振光, 45° 表示圆偏振光), θ 为晶体光轴与产生圆偏振激光的波片快轴的夹角.

根据捕获激光的偏振状态, 光学力矩包括两部分: 一个是线性偏振光引起的保守力矩(式(1)的第一项), 另一个是圆偏振光引起的恒定力矩(式(1)的第二项). 当激光偏振为椭圆偏振时, 也可以分解为圆偏振和线偏振光的组合. 可以看到, 线偏振光产生的力矩与粒子的转角 θ 是相关的, 当粒子的光轴与激光的偏振方向重合时, 线偏振光所产生的力矩将会消失. 当粒子的主轴偏离这个位置时, 将会受到一个回转力矩, 使这两者重合, 类似于一个扭矩弹簧. 圆偏振光所产生的力矩为常量, 与激光强度、材料双折射特性、粒子等效厚度等参数有关.

通过调整激光的偏振状态, 可以驱动粒子旋转或角度捕获^[19,24]. 本文主要讨论粒子在圆偏振光的恒力矩驱动下的旋转特性, 所以建立粒子的旋转动力学模型, 其表达式为

$$2\pi I \frac{d}{dt}f(t) + 2\pi I \gamma f(t) = \tau_{\text{opt}}, \quad (2)$$

式中, I 为粒子相对自转中心的转动惯量, γ 为旋转阻尼系数, τ_{opt} 为粒子所受到的光力矩. 在不考虑噪声力矩的影响下, 可以解得转速的表达式为

$$2\pi f(t) = \frac{\tau_{\text{opt}}}{\gamma I} - \frac{c}{\gamma I} e^{-t/\gamma}, \quad (3)$$

其中 $\frac{\tau_{\text{opt}}}{\gamma I}$ 为粒子的稳定转速, 即激光驱动力矩与阻尼力矩相等时, 粒子所能达到的稳定转速. 第二项为粒子转速的变化过程, 其中转速变化的阻尼时间 $t_{\text{damp}} = I/\gamma$. 由上式可以看出, 粒子的转速主要受到光力矩、阻尼系数以及粒子的转动惯量的影响, 而粒子的转动惯量在实验时可以保持不变, 所以主要是阻尼系数及光力矩决定粒子的转速及其稳定性. 旋转阻尼系数与气压正相关, 随着气压的下降而逐渐减小, 其波动则取决于气压的稳定性. 如前所述, 粒子所受到的光力矩主要取决于激光功率、材料双折射特性、粒子等效厚度等参数, 而与材料相关的参数在实验时亦能保持不变, 所以主要受到激光功率的影响. 激光功率的波动, 除了受到激光器本身的影响外, 还受到粒子热运动导致其等效功率的下降, 具体的讨论如下.

3.2 转速的影响因素

3.2.1 光力矩的影响规律

在实验时, 被捕获的粒子通常是固定的, 所以本文主要对比不同激光实验参数下的粒子旋转特性. 如图4所示, 当改变激光功率时, 粒子的转速随着激光功率的增大而加快, 环境气压为 10^5 Pa . 激光功率的改变除了改变粒子的旋转速度外, 还会对粒子的散射力产生影响. 当激光功率增大时, 粒子所受到的散射力也会相应地增加. 由图1可以看出, 当与重力相平衡的散射力增加时, 会将粒子的悬浮高度提高, 从而使得粒子远离激光的焦点, 这将会使粒子所受到的梯度力减小, 进而降低光阱的捕获刚度, 使得粒子捕获不稳定. 同样的道理, 当降低激光功率时, 粒子的稳定捕获位置将会下降, 亦使其捕获稳定性下降. 所以在实验中, 通常控制激光功率, 使粒子尽量处于光阱刚度最大处, 增加其捕获稳定性, 而通过其他的方法来控制其转速.

另一个改变激光力矩的办法是控制激光的偏振态, 光力矩会随着圆偏振光分量的增大而增大. 如图5

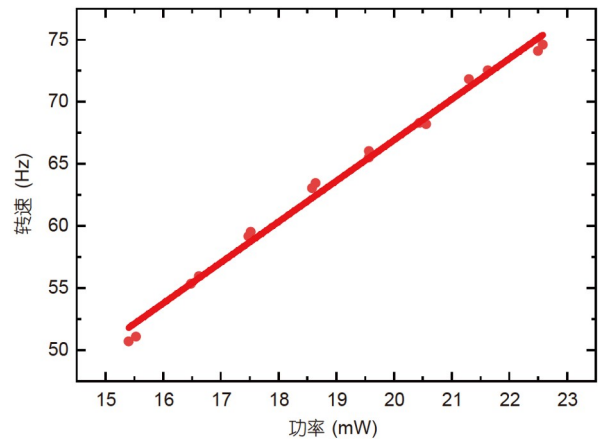


图4 不同功率下粒子的转速

Figure 4 Rotational frequencies of particles under different laser powers.

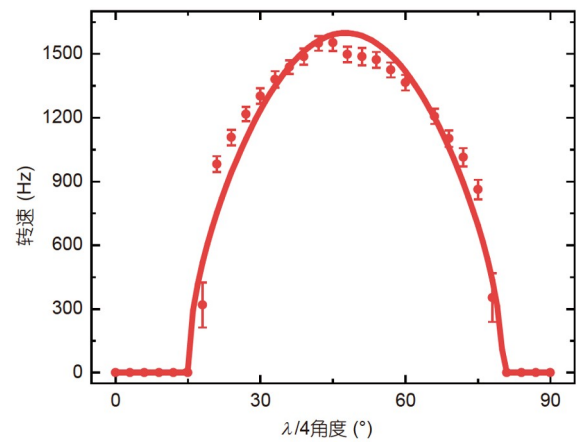


图5 不同波片角度下粒子的转速, 图中的拟合函数是 $\text{Re}\left[a\sqrt{(1-\cos b)^2 \sin^2(2\phi-c) - \sin^2(b)\cos^2(2\phi-c)}\right]$, 其中 a , b , c 为拟合常数

Figure 5 Rotational frequencies of particles under different angles of wave plate. The fitting function is $\text{Re}\left[a\sqrt{(1-\cos b)^2 \sin^2(2\phi-c) - \sin^2(b)\cos^2(2\phi-c)}\right]$, and a , b , and c are constants for fitting.

所示, 横坐标为图2中聚焦物镜前的1/4波片与线偏振激光偏振方向的夹角, 纵坐标为改变该夹角后对应的粒子转速. 可以看出, 当1/4波片与激光偏振方向成 45° 时, 粒子的转速最大, 而在其他位置粒子的转速随之减小. 由1/4波片调控激光偏振态的基本原理可知, 当其处于 45° 时, 透射光即为圆偏振光, 该结果与式(1)是相符的. 值得一提的是, 当1/4波片转角接近 15° 时, 粒子

停止转动, 而此时激光中仍有圆偏振光分量以产生驱动力矩. 粒子之所以停止旋转, 是因为此时式(1)的第1项的线偏振光所产生的定向力矩大于驱动力矩, 所以使得粒子无法实现旋转, 而是被固定在线偏振的方向上.

3.2.2 阻尼力矩的影响规律

相比于改变光驱动力矩来控制悬浮粒子的转速, 阻尼力矩的调节范围更广, 更能挖掘出粒子的旋转潜力. 如图6所示, 在实验中通过抽真空的方式降低旋转阻尼力矩, 从而不断提升粒子的转速至MHz量级. 由于空气阻尼与气压正相关, 所以在实验中不断降低气压, 可以减小阻尼力矩的大小, 从而提高悬浮粒子的稳定转速. 从图6可以看出, 粒子的转速随着气压的下降而大致线性(对数坐标下)上升. 但是在高压气段, 即 $10^5 \sim 10^4$ Pa段, 转速提升较平缓, 这是由气压对旋转阻尼的影响规律导致的: 当气压较高时, 空气分子与分子之间相互作用比较强, 所以将其等效为连续体环境; 当气压较低时, 空气分子之间的相互作用减弱, 甚至可以不考虑, 所以将其视为自由分子环境. 这两种环境下阻尼随气压的变化规律是不同的, 所以就会出现粒子转速随气压变化曲率不一致的现象.

为测试粒子的极限转速, 将气压抽至0.1 Pa, 并用谱分析仪(泰克RSA306B)记录其频谱响应曲线, 如图7所示. 测试信号的最高峰值频率达到了7.86 MHz, 对应粒子的转速为3.93 MHz. 影响粒子极限转速的因素主要是悬浮粒子在真空中的悬浮稳定性, 当气压下降后, 对应粒子的振动阻尼也会降低. 此时, 粒子的热运动也

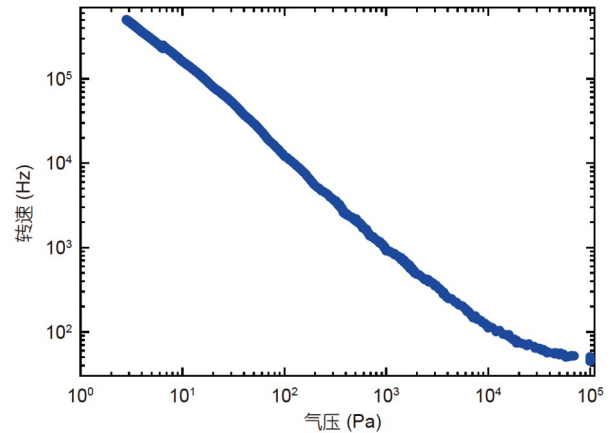


图6 不同气压下粒子的转速

Figure 6 Rotational frequencies of particles under different pressures.

会随之增强, 从而导致悬浮粒子容易从光阱中逃逸. 从图7(a)所示的转速随时间的变化曲线可以看出, 粒子的转速并不稳定, 会在一定范围内波动. 这种波动对很多利用粒子旋转来进行测量的应用来说, 是很不利的, 所以有必要对其进行研究, 以达到降低转速不稳定性的目的.

3.3 转速波动的影响因素

从悬浮粒子的旋转动力学方程(2)及光力矩的动力学方程(1)可知, 粒子的转速主要受到光驱动力矩(激光功率、激光偏振)和阻尼力矩(气压)的影响. 这些参数的波动, 即对应粒子转速的波动. 通过提高激光器的功率稳定性、偏振方向稳定性以及真空系统的气压

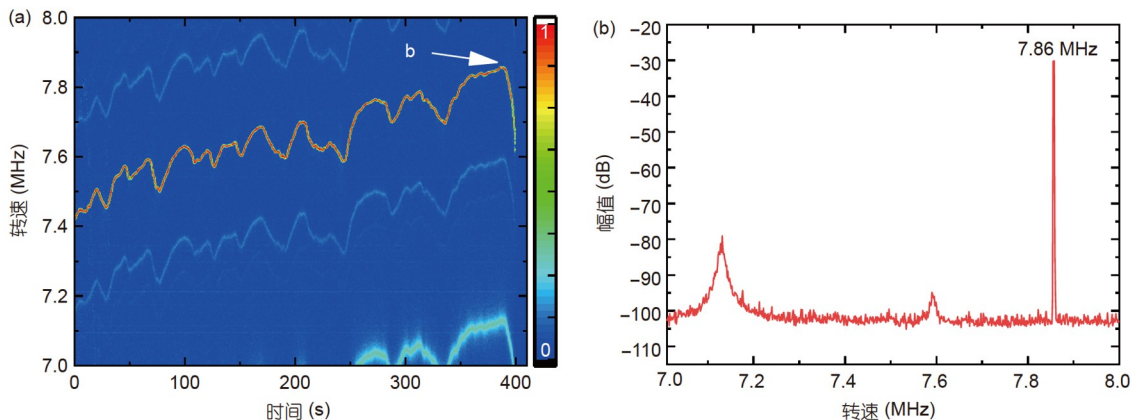


图7 (a) 粒子旋转信号频谱图随时间的变化规律(气压在不断下降); (b) b时刻的频谱图

Figure 7 (a) Spectrum of rotational signal of particles versus time (the pressure is decreasing); (b) spectrum of the moment b.

稳定性,可以很大程度地降低转速波动。

除了上述直接的影响因素外,粒子的热运动也会对转速产生间接的影响。图8为粒子的转速在30 Pa时的波动变化情况,由于此时气压相对较高,气压更加稳定,所以没有出现图7(a)所示的由于气压变化导致的转速缓变现象。此时粒子的平均转速约为15000 Hz,粒子除了围绕该转速处上下波动外,还有大幅度的下降,但却几乎没有大幅上升的变化趋势。

这是因为粒子热运动导致其偏离激光的中心,从而致使粒子所受到的等效激光功率下降,所以出现了图8所示的转速只大幅下降而不上升的波动。由于所使用的激光为高斯光束,其中心的光强最大,所以当粒子发生热运动时,总是表现为等效激光功率的减小(图9)。

为研究粒子热运动对转速的影响规律,本研究在保持粒子转速不变的情况下,连续测试了不同气压下转速波动大小。如图10所示,在不断降低气压时,通过调节1/4波片以改变驱动力矩的方法使得粒子的转速维持在1100 Hz,测试并记录转速的标准差变化规律。可以看出,粒子的转速波动随着气压的下降而逐渐增大。这与降低气压导致粒子热运动逐渐增强,进而使得粒子偏离激光中心,从而导致转速波动是相符的。

在保持气压不变的同时,只改变波片的转角,即改变光驱动力矩的大小,进而控制粒子转速变化。在不同的转速情况下,测得粒子的转速波动大小如图11所示。可以看出,当改变波片转角时,粒子的平均转速从862 Hz上升至1497 Hz,但是转速的波动并没有表现出

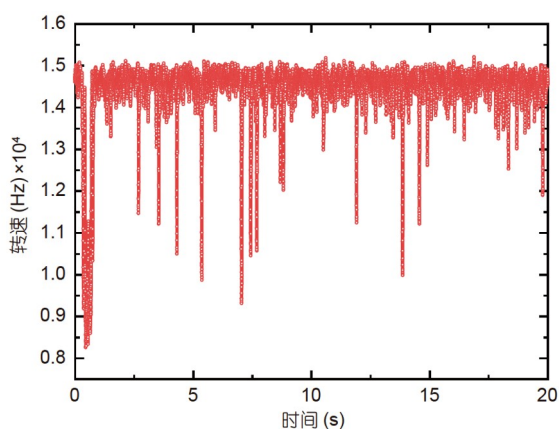


图8 粒子转速在热运动较大时的波动规律

Figure 8 Fluctuation of the particle rotation when the thermal motion is obvious.

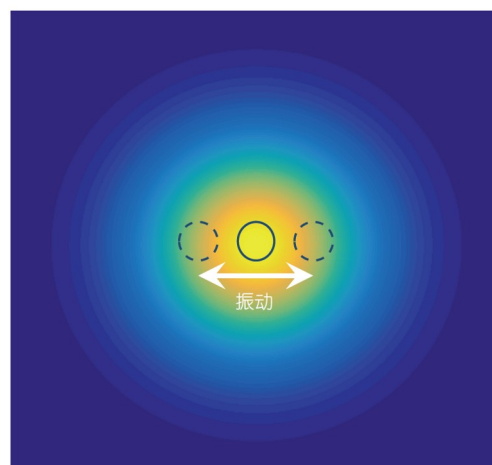


图9 粒子热运动导致的偏离激光中心,从而导致功率下降的示意图

Figure 9 Schematic diagram of the deviation from the center of the laser due to the particle thermal motion, which results in the decrease of laser power.

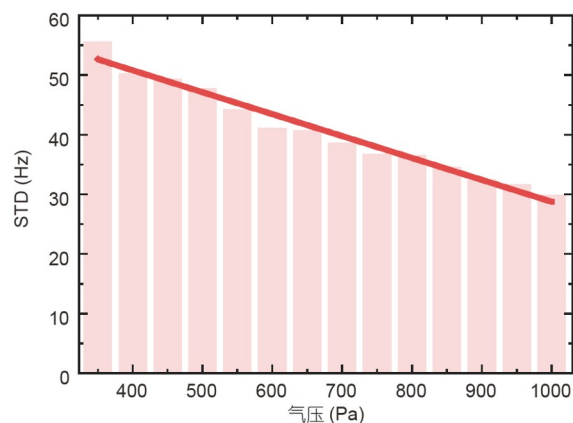


图10 不同气压下保持相同转速时,转速波动对比。STD表示测试粒子转速的标准差

Figure 10 Comparison of rotational fluctuation when the rotational frequency maintains stable under different pressures. STD represents the standard deviation of rotational frequency.

明显的变化趋势,即没有随激光偏振状态而变化。这说明在调节驱动力矩时,并不会给粒子带来额外的转速波动,也证明上述在不同气压下进行测试的转速波动为粒子热运动带来的。值得注意的是,转速的相对波动(标准差与转速的比值)随着转速上升而逐渐下降。此时粒子的热运动保持不变,而其相对转速则随着转速的提高而趋于稳定。

为进一步说明粒子的相对转速会随着转速的提升

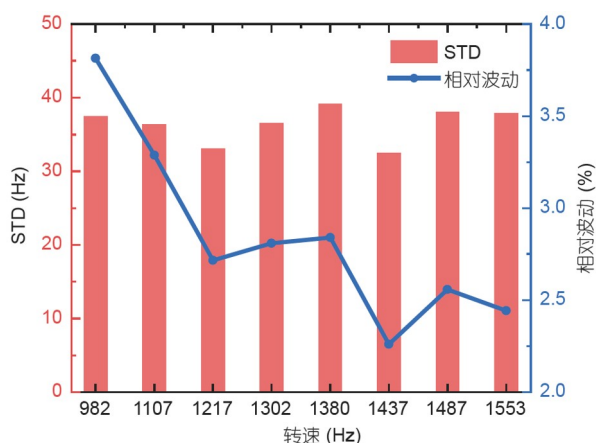


图 11 相同气压下不同转速时, 转速波动对比
Figure 11 Comparison of rotational fluctuation under the same pressure and the different rotational frequency.

而趋于稳定, 测试了不同气压下的粒子相对转速稳定性, 如图 12 所示. 可以看到, 随着气压的下降, 粒子的转速逐渐上升, 而转速相对波动则逐渐下降, 这与预期是相符的. 悬浮粒子的该旋转特性说明其转速提升后, 具有一定的稳定效果, 这为后续开展光悬浮转子陀螺的研究提供了一定的参考.

4 结论与讨论

本文研究了光悬浮球霰石粒子的光致旋转特性, 基于所建立的旋转动力学模型, 搭建了微粒子旋转特性测试系统, 并对其进行了测试, 相关实验及分析结果表明:

(1) 由于光驱动力矩随着激光功率的增大而增加, 实验验证了微粒子的转速与激光功率呈线性关系, 当激光功率由 15 mW 增加至 22 mW 左右时, 转速增加了约 25 Hz. 同时, 验证了 1/4 波片对光驱动力矩的影响规律, 当激光的圆偏振分量较低时, 无法驱动微粒子

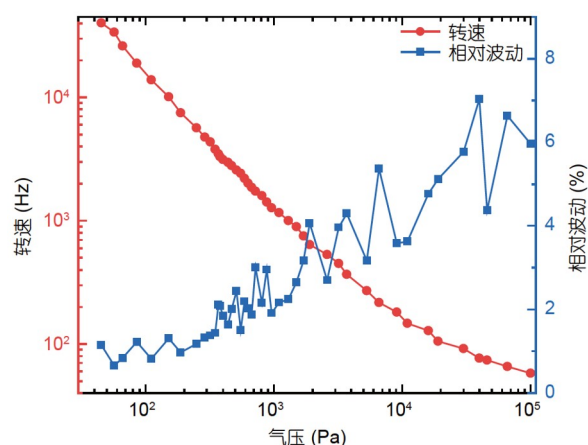


图 12 转速相对波动值随气压的变化规律
Figure 12 The relative rotational frequency fluctuation versus pressure.

旋转;

(2) 环境气压对阻尼力矩的影响显著. 当降低气压时, 旋转阻尼力矩大幅下降, 从而可以迅速提升粒子的转速. 实验中将气压由大气环境降低至 0.1 Pa 时, 微粒子的转速由 50 Hz 左右加速至 3.93 MHz, 这是国内首次报道微米级粒子的 MHz 量级旋转;

(3) 粒子热运动会增大悬浮粒子的转速波动, 但是相对转速波动会随着平均转速的提升而减小. 由于粒子的热运动导致等效激光功率的降低, 从而使得粒子的转速随着热运动而波动, 不利于维持旋转的稳定. 但从相对转速波动的角度看, 粒子的相对波动随着转速的提升而逐渐下降, 这说明转速的提升有助于减小转速的波动.

上述实验结果对于研究光悬浮粒子的旋转运动具有参考价值, 对于提升目前已经有的应用精度, 如扭矩测量、气压测量等, 也都有重要意义. 此外, 对于进一步挖掘光悬浮旋转粒子的应用, 例如转子陀螺仪、真空摩擦等应用, 也是有积极作用的.

致谢 感谢国防科技大学微纳系统教研室提供的科研支撑.

参考文献

- 1 Jones P H, Maragò O M, Volpe G. Optical Tweezers: Principles and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2015
- 2 Li Y M, Yao K. Optical Tweezers Technology (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015 [李银妹, 姚焜. 光镊技术. 北京: 科学出版社, 2015]

- 3 Gautam R, Xiang Y, Lamstein J, et al. Optical force-induced nonlinearity and self-guiding of light in human red blood cell suspensions. *Light Sci Appl*, 2019, 8: 31
- 4 Zhong M C, Wei X B, Zhou J H, et al. Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers. *Nat Commun*, 2013, 4: 1768
- 5 Huang R, Chavez I, Tautz K M, et al. Direct observation of the full transition from ballistic to diffusive Brownian motion in a liquid. *Nat Phys*, 2011, 7: 576–580
- 6 Li T, Kheifets S, Medellin D, et al. Measurement of the instantaneous velocity of a Brownian particle. *Science*, 2010, 328: 1673–1675
- 7 Delić U, Reisenbauer M, Dare K, et al. Cooling of a levitated nanoparticle to the motional quantum ground state. *Science*, 2020, 367: 892–895
- 8 Tebbenjohanns F, Mattana M L, Rossi M, et al. Quantum control of a nanoparticle optically levitated in cryogenic free space. *Nature*, 2021, 595: 378–382
- 9 Magrini L, Rosenzweig P, Bach C, et al. Real-time optimal quantum control of mechanical motion at room temperature. *Nature*, 2021, 595: 373–377
- 10 Jin Y B, Yu X D, Zhang J. Optically levitated nanosphere with high trapping frequency. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 114221
- 11 Conangla G P, Ricci F, Cuairan M T, et al. Optimal feedback cooling of a charged levitated nanoparticle with adaptive control. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 223602
- 12 Kuhn S, Kosloff A, Stickler B A, et al. Full rotational control of levitated silicon nanorods. *Optica*, 2017, 4: 356–360
- 13 Rahman A T M A, Frangescu A C, Barker P F, et al. An analytical model for the detection of levitated nanoparticles in optomechanics. *Rev Sci Instruments*, 2018, 89: 023109
- 14 Ranjit G, Cunningham M, Casey K, et al. Zeptonewton force sensing with nanospheres in an optical lattice. *Phys Rev A*, 2016, 93: 053801
- 15 Monteiro F, Li W, Afek G, et al. Force and acceleration sensing with optically levitated nanogram masses at microkelvin temperatures. *Phys Rev A*, 2020, 101: 053835
- 16 Gao X, Wang Y, He X, et al. Angular trapping of spherical janus particles. *Small Methods*, 2020, 4: 2000565
- 17 Bruce G D, Rodríguez-Sevilla P, Dholakia K. Initiating revolutions for optical manipulation: The origins and applications of rotational dynamics of trapped particles. *Adv Phys-X*, 2021, 6: 1838322
- 18 Stickler B A, Hornberger K, Kim M S. Quantum rotations of nanoparticles. *Nat Rev Phys*, 2021, 3: 589–597
- 19 Friese M E J, Nieminen T A, Heckenberg N R, et al. Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles. *Nature*, 1998, 394: 348–350
- 20 La Porta A, Wang M D. Optical torque wrench: Angular trapping, rotation, and torque detection of quartz microparticles. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 190801
- 21 Deufel C, Forth S, Simmons C R, et al. Nanofabricated quartz cylinders for angular trapping: DNA supercoiling torque detection. *Nat Methods*, 2007, 4: 223–225
- 22 Seberon T, Robicheaux F. Stability and dynamics of optically levitated dielectric disks in a Gaussian standing wave beyond the harmonic approximation. *Phys Rev Res*, 2020, 2: 43054
- 23 Hoang T M, Ma Y, Ahn J, et al. Torsional optomechanics of a levitated nonspherical nanoparticle. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 123604
- 24 Reimann R, Doderer M, Hebestreit E, et al. GHz rotation of an optically trapped nanoparticle in vacuum. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 033602
- 25 Arita Y, Mazilu M, Dholakia K. Laser-induced rotation and cooling of a trapped microgyroscope in vacuum. *Nat Commun*, 2013, 4: 2374
- 26 Ahn J, Xu Z, Bang J, et al. Optically levitated nanodumbbell torsion balance and GHz nanomechanical rotor. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 033603
- 27 Ahn J, Xu Z, Bang J, et al. Ultrasensitive torque detection with an optically levitated nanorotor. *Nat Nanotechnol*, 2020, 15: 89–93
- 28 Blakemore C P, Martin D, Fieguth A, et al. Absolute pressure and gas species identification with an optically levitated rotor. *J Vacuum Sci Tech B*, 2020, 38: 024201
- 29 Kuhn S, Stickler B A, Kosloff A, et al. Optically driven ultra-stable nanomechanical rotor. *Nat Commun*, 2017, 8: 1670
- 30 Arita Y, McKinley A W, Mazilu M, et al. Pico-liter rheology of gaseous media using a rotating optically trapped birefringent microparticle. *Anal Chem*, 2011, 83: 8855–8858
- 31 Jin Y, Yan J, Rahman S J, et al. 6 GHz hyperfast rotation of an optically levitated nanoparticle in vacuum. *Photon Res*, 2021, 9: 1344–1350
- 32 Xie S, Sharma A, Romodina M, et al. Tumbling and anomalous alignment of optically levitated anisotropic microparticles in chiral hollow-core photonic crystal fiber. *Sci Adv*, 2021, 7: eabf6053
- 33 Rashid M, Toroš M, Setter A, et al. Precession motion in levitated optomechanics. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 253601

Investigation of rotation characteristics of optically levitated particles

ZENG Kai, PU JunJi, WU YuLie, XIAO DingBang & WU XueZhong

College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

A levitated optomechanical system levitates particles in the air or vacuum, which insulates the environment noise well and plays an important role in many fields related to precision measurement and quantum science. This system uses a circularly polarized laser to drive particles to spin, which can carry out research on torque measurement, gas identification, and vacuum friction. This paper describes a vacuum optical levitation and rotation experimental device based on the rotating dynamics model of optically levitated particles. The average speed and fluctuation of the rotational speed of levitated particles are studied. The results show that the stronger the laser power that affects the optical torque and the closer the laser polarization is to the circularly polarized light, the greater the average rotational speed of particles. However, the main factor that affects the average rotational speed of particles is the damping torque. The average rotational speed can be increased by reducing the ambient pressure to reduce the rotational damping of particles. When the pressure decreases to 0.1 Pa, we drive the spherical vaterite microsphere with a diameter of 4 μm at a speed of 3.93 MHz. Simultaneously, in a low-damping environment, the thermal motion of particles also becomes obvious, resulting in a change in the equivalent laser power of levitated particles with the thermal motion. Subsequently, the rotational speed fluctuation also increases with pressure decrease. This paper, for the first time, investigated the rotational frequency fluctuation under unchanged pressure and varying mean rotational frequency. These conditions further illustrate the effect of thermal motion on rotational frequency. Besides, the relative fluctuation of rotation with changing pressure is investigated, and the results allow for the potential application of optically levitated rotors in the field of gyroscopes. These results are of great significance for improving the existing applications of optical levitation systems and opening new fields.

levitated optomechanical systems, optically induced rotation, ultra-fast rotation, stability of rotation

doi: [10.1360/SST-2023-0080](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0080)