

球差对光镊中粒子轴向力的影响

周业鹏，任洪亮

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 利用几何光学模型,取不同的粒子半径、数值孔径和探测深度,计算光镊中粒子受到的轴向力。从粒子在空间各位置的轴向力及其变化,分析球差对捕获效率的影响。计算结果表明:球差的存在,使得激光没有理想聚焦点,粒子在光镊中的稳定平衡点向负光轴方向位移,并降低了光镊捕获粒子的稳定性。

关键词: 光镊; 几何光学模型; 捕获力; 球差; 稳定平衡点

中图分类号: TN 249

文献标志码: A

1986年, Ashkin等^[1]首次用光镊实现了对生物粒子远距离捕获, 从此打开了研究活细胞的方便之门。随着光镊技术的发展, 光镊已经在生物、物理化学及微机电等学科领域取得了大量的应用成果。为了提高光镊系统的稳定捕获能力, 需要得到较大的梯度力, 通常采用具有大数值孔径的油浸物镜。然而, 由于物镜匹配油与水的折射率不匹配, 在大数值孔径物镜的聚焦作用下, 物镜边缘的光线会与光轴成较大的夹角, 光线与光轴的交点会向物镜方向偏移; 而物镜近轴光线与光轴的夹角比较小, 其偏移的距离较小。两者不同程度的偏移造成了整个光束并不像理想情况一样聚焦成一点, 而是出现在一段范围内, 称之为球差。Roosen等^[2]提出一套几何光学模型来计算光学悬浮时粒子上受到的光压。光镊问世之后, Ashkin等^[3]利用几何光学模型计算强聚焦激光作用在粒子上时所产生的梯度力和散射力; 姚新程^[4-5]等分别对物镜在满足正切条件和正弦条件时的光镊进行了分析; Vermeulen等^[6]对球差的影响进行了实验性研究, 证明了探测深度对光镊稳定性的影响; Rohrbach等^[7]根据电磁场理论分析了粒子尺寸小于或等于波长的情况。但是, 这些文献均没有详细给出微米级粒子具有横向位移时的轴向力分布^[8]。本文利用几何光学模型, 计算光镊系统存在球差时, 粒子在不同轴向位移和横向位移时光镊捕获力的分布曲线图^[9]。

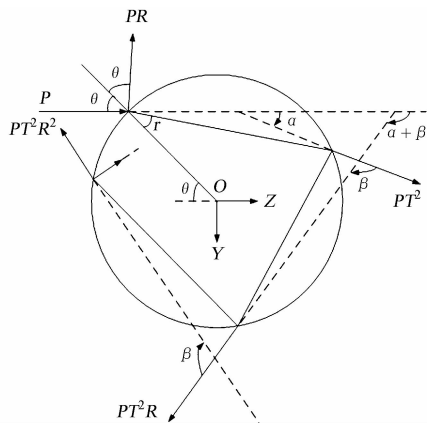


图1 功率为 P 的入射光线入射到粒子的光线追迹

1 理论分析

功率为 P 的入射光线入射到粒子的光线追迹,如图 1 所示. 功率为 P 的光线以入射角 θ 照射到粒子后发生反射和折射,反射光的功率为 PR ,折射光的功率分别为 $PT^2, PT^2R, \dots, PT^2R^n, \dots$. 其中: R 和 T 分别为入射角

光功率 P 与产生的作用力 F 的关系为 $F = Qn_1 P/c$. 其中: n_1 为周围介质的折射率; c 为真空中的光速; Q 为效率因子. 利用图 1 中的几何关系, 可以推出粒子在光线入射方向 (Z 轴方向) 上受到的作用力

收稿日期： 2012-10-28

通信作者: 任洪亮(1980-),男,讲师,主要从事光镊建设和应用,激光光束变换及应用的研究. E-mail:renhongliang@hqu.edu.cn.

基金项目：国家自然科学基金资助项目(61178015)；福建省自然科学基金资助项目(2012J05120)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JB-ZR1146)；福建省厦门市科技计划项目(3502Z20113017)

F_Z 的具体表达式为

$$F_Z = \frac{n_1 P}{c} - \left[\frac{n_1 P R}{c} \cos(\pi + 2\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n_2 P}{c} T^2 R^n \cos(\alpha + n\beta) \right]. \tag{1}$$

利用公式

$$\begin{aligned} 2\alpha \cos \beta \sum_{n=0}^{\infty} R^n \cos(\alpha + n\beta) &= \sum_{n=0}^{\infty} R^{n+1} \cos(\alpha + n\beta + \beta) + \cos(\alpha + m\beta - \beta) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} R^n \cos(\alpha + n\beta) + \sum_{n=0}^{\infty} R^{n+2} \cos(\alpha + n\beta) + R \cos(\alpha - \beta). \end{aligned} \tag{2}$$

由式(2)可知

$$\sum_{n=0}^{\infty} R^n \cos(\alpha + n\beta) = \frac{\cos \alpha - R \cos(\alpha - \beta)}{1 + R^2 - 2R \cos \beta}. \tag{3}$$

将式(3)代入式(1),最终得到 Z 轴方向作用力的表达式,即

$$F_Z = \frac{n_1 P}{c} \left[1 + R \cos 2\theta - \frac{T^2 [\cos(2\theta - 2r) + R \cos 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right]. \tag{4}$$

对于 Y 轴方向的作用力 F_Y ,可以用同样的方法得

$$F_Y = \frac{n_1 P}{c} \left[R \sin 2\theta - \frac{T^2 [\sin(2\theta - 2r) + R \sin 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \sin 2r} \right]. \tag{5}$$

式(5)中: F_Z, F_Y 分别表示单条光线的散射力分量 F_s 和梯度力分量 F_g .

将式(4)~(5)分别与功率和作用力关系式对照,可知单条光线的梯度力和散射力分量效率因子 Q 的具体解析式.

为了进一步分析玻璃和水界面的折射率不匹配,引起的球差效应^[8]对粒子所产生的散射力和梯度力的影响.结合光线追迹方法^[10],给出一条光线入射到空间某一位置的粒子的几何关系,如图 2 所示.图 2 中:坐标原点 O 为光束理想焦点; Z 方向为光线传播的方向,垂直于玻璃和水的界面,称之为轴向; X 方向垂直于光轴,称之为横向;粒子半径为 r_b ;粒子偏离光轴的距离为 x ;粒子中心 O' 在玻璃和水的界面上的投影为点 B .

光线从玻璃与水界面上距离光轴 ρ_{gw} 的位置出射,与光轴之间夹角为 φ ;光线以入射角 θ 照射到球上点 I , I 点在玻璃和水的界面上的投影为点 D ,点 I 到粒子中心 O' 的距离在 Z 轴上的投影为 z ;光线与光轴的交点到原点的距离为 Δz ,粒子中心到 X 轴的距离为 z_b ,探测深度 z_{cg} 为光束理想焦点到盖玻片与水界面的距离.

根据图 2 中的几何关系,得到单条光线所产生的梯度力 F_g ,散射力 F_s 分别在横向(沿 X 轴方向)和轴向(沿 Z 轴方向)的投影,即梯度力、散射力在横向和轴向上的分量.对于任意方向偏离光轴的粒子,都可以分解为横向位移和轴向位移.利用式(4)~(5)来计算单条光线横向力和轴向力.

对整束光而言,只需将单条光线的力 F_s 和 F_g 在光斑范围内积分.大数值孔径的物镜在聚焦光束时会对光束的偏振特性产生影响^[11],采用圆偏振捕获光可以简化计算步骤.

2 数值模拟

在光镊实验中,分散在水中的聚苯乙烯粒子是常见的捕获对象.样品池中的水的折射率为 1.33,聚苯乙烯粒子的折射率为 1.60,盖玻片的折射率为 1.516,油浸物镜的数值孔径为 1.35,激光在盖玻片上形成的光斑半径为 0.5 mm,物镜理想焦点距离盖玻片和水溶液的界面为 50 μm .粒子轴向力随轴向位

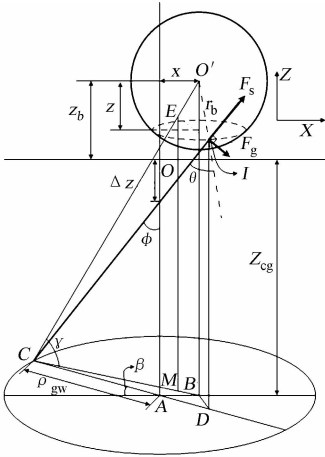
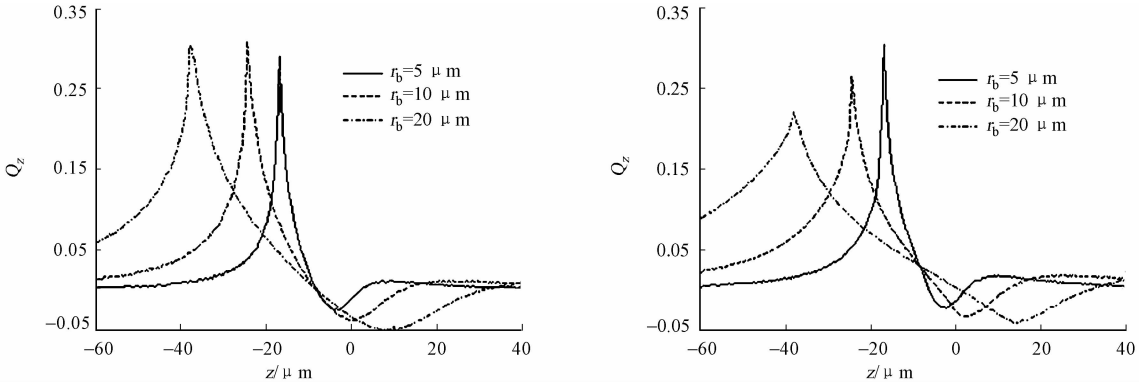


图 2 一条光线入射到偏轴的粒子的情况
Fig. 2 An single incident ray illuminated on an off-axis particle

移的变化,如图 3 所示. 图 3 中:粒子半径分别为 5,10,20 μm ;横坐标为粒子在 Z 轴上的位置;纵坐标为光镊在 Z 轴方向上的捕获效率 Q_z . 由图 3(a)可知:粒子半径越大,光镊产生的反向捕获效率越大,光镊越稳定;受到球差的影响,3 种半径的粒子的轴向平衡点都不在原点,而是均向负 Z 轴方向偏移一定距离. 由图 3(b)可以看到:数值孔径为 1.0,其余参数不变,最大反向捕获效率相比较数值孔径为 1.35 时均有所减小,如半径为 20 μm 的粒子,数值孔径为 1.35 时,最大反向捕获效率约为 0.05,而数值孔径为 1.0 时,约为 0.04. 可知,在同样条件下,数值孔径增加,光镊的反向拉力增加,光镊捕获粒子更稳定.



(a) 数值孔径为 1.35 (b) 数值孔径为 1.0

图 3 粒子轴向力随轴向位移的变化

Fig. 3 Axial force of particle changed with the displacement of axis

当粒子半径为 5 μm 时,不同探测深度(理想焦点到样品池顶的距离 z_{cg})的捕获力曲线,如图 4 所示. 从图 4 中可以看出:光镊的反向捕获效率随着探测深度 z_{cg} 的增加而减小,光镊的稳定性下降. 探测深度 z_{cg} 的增加使得球差变大,因此平衡点向负向移动的幅度也增加. 在捕获粒子的实验中,如果反向拉力太小,粒子很容易被正向推力所推开而脱离束缚,为了获得一个稳定的光镊,需要增大反向拉力,因此在构建一个光镊系统时,需要减小探测深度 z_{cg} .

不同半径的粒子,其轴向力随粒子中心到光轴距离 x 的变化,如图 5 所示. 由于文中所用的激光光强分布是圆对称的,所以只需考虑粒子位于 X 正半轴的情况,完整的受力曲线相对于原点左右对称. 从图 5 中可见:在横向位移为 0 的时候,其轴向力的捕获效率并没有为 0. 这一点与图 3,4 中零点处得到负值是一致的,说明存在 1 个反向的力. 这是由于球差的存在,使得不同位置出射的光线与光轴交点相对于理想焦点(原点)向负向移动,而在原点处产生回复力. 另外,在 X 轴上位移约为 1 个半径时,光镊的推力将达到 1 个最大值,实际在用流体力学法测量光阱刚度时,粒子一旦出现横向位移,很容易从光镊中逃逸,这与计算结果是一致的.

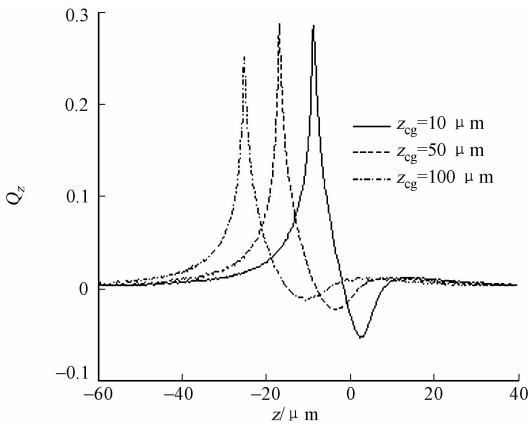


图 4 不同探测深度的轴向力分布

Fig. 4 Distribution of axial force with different detection depths

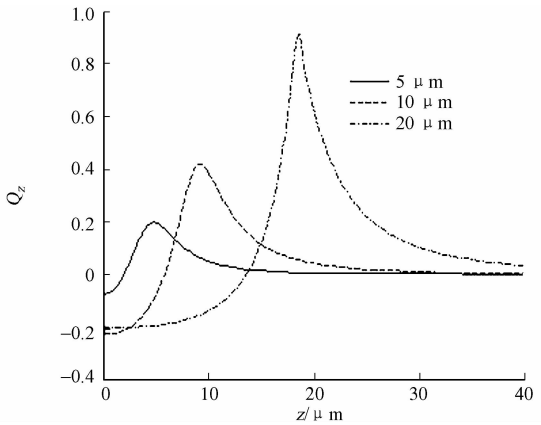


图 5 粒子沿 X 轴移动时轴向力分布

Fig. 5 Distribution of X axial force with different transverse displacements

3 结 论

利用光线追迹,计算得到存在球差时粒子具有轴向位移和横向位移时光镊捕获力的分布曲线. 由于球差的存在,使得光线与光轴交点随着光线出射位置变化,造成光束的聚焦效果与理想状态下出现偏差,削弱了捕获力,影响了光镊捕获的稳定性,使得光镊中的稳定平衡点向负 Z 轴方向移动.

数值孔径、探测深度的增加扩大了球差的影响. 因此,在具体的微操控实验中,需要充分考虑到球差带来的影响. 目前消除球差的方法基于固定的探测深度,存在一定的局限性,而需要探测深度可变时,这些方法都不再适用. 通过对球差的分析,不但能改进实验设备,提高光镊刚度标定的精度,也能正确地处理实验数据.

参考文献:

[1] ASHKIN A,DZIEDZIC J M,BJORKHOLM J E,et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. Opt Lett,1986,11(5):288-290.

[2] ROOSEN G. Optical levitation of spheres[J]. Can J Phys,1979,57(9):1260-1279.

[3] ASHKIN A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime[J]. Biophys J, 1992,61(2):569-582.

[4] YAO Xin-cheng,LI Zhao-lin,GUO Hong-lian,et al. Effect of spherical aberration introduced by water solution on trapping force[J]. Chin Phys B,2000,9(11):824-826.

[5] FALLMAN E,AXNER O. Influence of a glass-water interface on the on-axis trapping of micrometer-sized spherical objects by optical tweezers[J]. Appl Opt,2003,42(19):3915-3926.

[6] VERMEULEN K C,WUITE G J L,STIENEN G J M,et al. Optical trap stiffness in the presence and absence of spherical aberrations[J]. Appl Opt,2006,45(8):1812-1819.

[7] ROHRBACH A,STELZER E H K. Trapping forces, force constants, and potential depths for dielectric spheres in the presence of spherical aberrations[J]. Appl Opt,2002,41(13):2494-2507.

[8] ZHONG Min-cheng, ZHOU Jin-hua, LI Yin-mei. Calculation of optical trapping forces on dielectric spheres at an oil-water interface with ray-optics model[J]. Chin Opt Lett,2010,8(7):673-675.

[9] 鲍建华,龚玺,陈洪涛,等. 粒子的轴向位移对光阱力学参数标定的影响[J]. 中国激光,2005,32(10):1421-1424.

[10] ZHOU Jin-hua,REN Hong-liang,CAI Jun,et al. Ray-tracing methodology: Application of spatial analytic geometry in the ray-optic model of optical tweezers[J]. Appl Opt,2008,47(33):6307-6314.

[11] 田博,蒲继雄. 角向偏振光束大数值孔径透镜聚焦的偏振开关现象[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2012,33(3): 247-250.

Effect of Spherical Aberrations on the Axial Force of Particle in Optical Tweezers

ZHOU Ye-peng, REN Hong-liang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Axial force exerting on the particle in optical tweezers was calculated with different radii of particles, numerical apertures and detection depths in ray optics model. Through detecting the axial force and its changing versus the spatial positions, the effect of spherical aberrations on the efficiency of optical trapping was analyzed. The results of calculation show that, owing to the existing of spherical aberration, the ideal focus of the laser beam is disappear, the stable equilibrium point is moved along the negative optical axis direction, and the stability of optical trapping is reduced.

Keywords: optical tweezers; ray optics model; trapping force; spherical aberrations; stable equilibrium point

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)