

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605018



光镊理论模型研究进展

王娟, 任洪亮, 周业鹏

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 根据微粒尺度与入射光波长间的关系, 给出几何光学模型和电磁模型. 详细描述几何光学法、时域有限差分法(FDTD)、有限元法(FEM)、广义洛伦兹-米理论(GLMT)和瑞利散射方法等计算光镊捕获力的理论, 并列出了 T 矩阵法、离散偶极子近似法(DDA)、矩量法(MOM)及耦合偶极子法(CDM)等多种数值计算方法. 研究表明: 在光镊技术中, 这些方法可用于不同性质的光束及微粒的研究, 其研究方法与过程均有所不同.

关键词: 光镊; 光学势阱; 几何光学模型; 电磁模型; 瑞利散射理论; 捕获力

中图分类号: TN 249 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2016)05-0615-07

Research Progress on Theoretical Model of Optical Tweezers

WANG Juan, REN Hongliang, ZHOU Yepeng

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

Abstract: According to the relationship between the particles size and incident beam wavelength. The ray-optics model and the electromagnetic model were studied, mainly reviewed the ray-optics method, finite difference time domain, finite element method, generalized lorentz-mie theory and Rayleigh scattering theory, which theories were used to calculate the trapping force. And also set out several numerical methods for solving the light scattering field, such as, T -matrix method, discrete dipole approximation, method of moments and coupled dipole method. The results show that these methods can be used to study different properties of the beams and the particles in the optical tweezers, and the study methods and the processes have some all different.

Keywords: optical tweezers; optical potential well; geometric-optical model; electromagnetic model; Rayleigh scattering theory; trapping force

1986 年, 美国科学家 Ashkin 等^[1]在 AT&T 贝尔实验室发明了光镊. 光镊是强聚焦激光与微粒相互作用形成的梯度力势阱, 是一种无损伤、无接触的微操纵技术, 能在细胞生命活性正常的条件下对其进行捕获和操纵^[2-3]. 光镊系统能实现生物微作用力及纳米级微小位移的定量测定^[4]. 根据微粒尺寸大小与入射光波长间的关系, 光镊理论模型可归纳为几何光学(RO)模型^[4]和电磁(EM)模型^[5]. RO 模型适用于微粒尺寸大小远大于入射光波长($R \gg \lambda$)的情况, EM 模型适用于微粒尺寸大小与入射光波长相近($R \sim \lambda$)或远小于入射光波长($R \ll \lambda$)的情况. 本文介绍几何光学法、时域有限差分法(FDTD)、有限元法(FEM)、广义洛伦兹-米理论(GLMT)和瑞利散射理论等求解捕获力的数值方法及进展.

收稿日期: 2014-07-04

通信作者: 任洪亮(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光镊建设和应用、光电检测和应用的研. 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基金资助项目(JB-ZR1146)

1 $R \gg \lambda$ 模型

Ashkin 是应用几何光学模型对光镊进行研究的集大成者^[4]. 几何光学模型,如图 1 所示. 将照射到微粒上的光束分解成无数条光线,用空间光线追迹法分析光镊中微粒的受力情况,光线在介质交界处的反射、折射和偏振的规律均遵循菲涅耳公式. 由图 1 中的几何关系和系统动量守恒可知:微粒受到的散射力沿光线传播方向,即 Z 轴方向,而梯度力指向 Y 轴负方向. 将所有光线的散射力和梯度力进行矢量叠加,可得微粒在会聚光束中总的受力 F . 合力 F 和捕获效率 Q 的关系为 $F = (n_1 P / c) \cdot Q$.

被捕获微粒所处环境与入射光束性质的变化都会影响微粒的捕获效率. 若微粒处于水溶液中,水与微粒的折射率不同会引起球差问题,如图 2 所示. 由图 2 可知:球差的存在使微粒的轴向平衡点向 Z 轴负方向偏移一定距离^[6]. 为进一步研究球差问题,李银妹等^[7]研究空气与水界面最优光束半径对微粒轴向捕获力的影响. 徐升华等^[8]考虑油浸物镜下油与水溶液折射率不同引起的球差问题,研究光阱中两个球形微粒的轴向受力情况. 结果表明:内层折射率小于外层折射率时,捕获空间变小,但稳定性变高;内层折射率大于外层折射率时,光镊的捕获性能降低^[9]. 根据高斯光束和 LG 光束的光强分布,分别计算高斯光束和 LG 光束捕获不同微粒时的捕获效率^[10]. John 等^[11]研究线偏振高斯光束对介质球微粒在倏逝场中的力和力矩,比较了微粒半径比入射光波长小 2 倍时,电磁场理论与几何光学法对力的计算,对研究微粒的应用和表面相互作用提供了很大帮助.

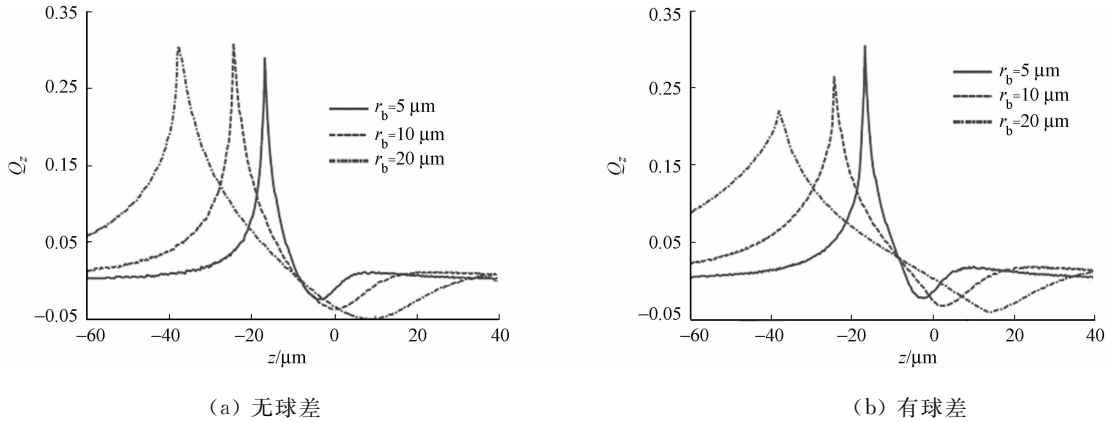


图 2 粒子轴向力随轴向位移的变化
Fig. 2 Axial force versus axis displacement

综上所述,对微粒所处环境、捕获微粒形状、性质及入射光束模型不同的研究,使得几何光学模型应用更为广泛,光镊刚度和捕获力等的计算更为精确,同时也为新型光镊的研究打下坚实基础.

2 $R \sim \lambda$ 模型

实验室常用的粒子(如生物细胞)大小处于微米量级,这些微粒的尺寸大小与入射光波长比较相近,研究时一般将其视为电磁散射问题处理,进行数值计算的方法主要有:时域有限差分法、有限元法、广义洛伦兹-米理论、 T 矩阵法等.

2.1 FDTD

FDTD 是由 Yee 首次提出的电磁场数值计算的一种直接时域方法,如图 3 所示. 应用这种离散方式将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程,在时间轴上逐步推进求解空间电磁场^[12].

对于一个闭合空间,其平均作用力可以写成对时间求平均的形式,即

$$\langle \mathbf{F} \rangle = \left\langle \int_S \left[\epsilon (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{E} + \mu (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{H} - \frac{1}{2} (\epsilon \mathbf{E}^2 + \mu \mathbf{H}^2) \mathbf{n} \right] ds - \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} \int_V \mathbf{E} \times \mathbf{H} dv \right\rangle =$$

$$\frac{1}{T} \sum_T \int_S \left[\epsilon (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{E} + \mu (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{H} - \frac{1}{2} (\epsilon \mathbf{E}^2 + \mu \mathbf{H}^2) \mathbf{n} \right] d\mathbf{s}. \tag{1}$$

式(1)中: ϵ 为微粒介电常数; μ 为微粒磁导率; \mathbf{n} 为 S 内表面向外的单位矢量; $d\mathbf{s}$ 和 $d\mathbf{v}$ 为面积元和体积元; $\langle \rangle$ 表示对时间求平均;单色光束在一段时间内的周期为 $2\pi/\lambda$.若光场沿 Z 轴正方向传播,采用完全匹配层(PML)^[13]吸收边界仿真计算区域,如图4所示.

FDTD方法可计算任意形状、任意成分和各种光学性质的微粒^[14-15],计算过程中不能忽略远场作用

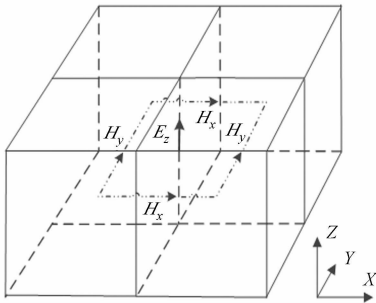


图 3 FDTD 方法中的 Yee 元胞

Fig. 3 Yee cell of FDTD method

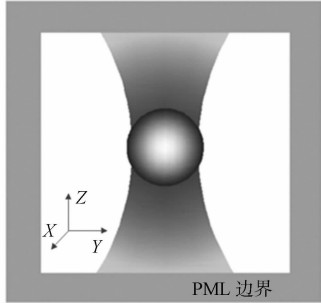
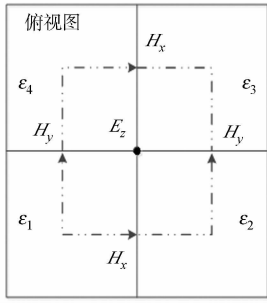


图 4 光镊计算区域

Fig. 4 Calculation region of optical tweezers

与边界条件.对同一微粒来说,在光镊中的位置或方位发生变化时,要重新计算整个过程.利用 FDTD 方法可以计算不同形状的捕获目标,如球形微粒的捕获力,Eom 等^[16]做了详细研究.Li 等^[17]利用三维 FDTD 方法和 Maxwell 应力张量模拟计算了纳米线的捕获力,并对线偏振和径向偏振光的捕获效率进行对比,得出径向偏振光更适合捕获高折射率的纳米线.FDTD 方法可用于新型光镊捕获微粒的研究,单锥形光纤光镊捕获酵母细胞实验装置^[18],如图5所示.用于光栅光镊捕获不同尺度大小的金粒子的研究^[19],也可用于凹凸不平的气溶胶微粒中的研究^[20].采用不同的模型进行研究,不仅拓宽了 FDTD 方法的应用,也对光镊有更进一步发展.

2.2 FEM

FEM 方法是在差分法和变分法的基础上发展起来的一种数值方法,分为离散和分片插值两方面,能分析任意大小、形状和结构复杂的曲面或实体,也能处理复杂的边界条件和程序编制.实际的电磁场求解边界往往曲折多变,用数值方法只求得其近似解.Daniel^[21]用矢量 FEM 方法研究了光学梯度势阱的数值模型.该方法对微粒所在空间进行划分,若划分精细度提高时,计算量会迅速增大.因此,该方法比较复杂.

对于介质微粒附近的电磁场,Maxwell 应力张量可以用来计算该介质微粒上的合力.Maxwell 应力张量为

$$\bar{\mathbf{T}} = \frac{1}{2} (\mathbf{D} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) \bar{\mathbf{I}} (\mathbf{DE} + \mathbf{BH}). \tag{2}$$

式(2)中: $\bar{\mathbf{I}}$ 为单位张量;介质微粒的合力为 $\mathbf{F} = \int_V \mathbf{r} \cdot \bar{\mathbf{T}} \cdot \hat{\mathbf{n}} d\Gamma$.

FEM 计算方法也可以用于计算光镊中不同性质的微粒.Ni 等^[22]模拟并选用酵母细胞进行实验,光诱导酵母细胞旋转的方向与它所处位置和光电极边缘的距离有关,发现光诱导酵母细胞旋转的速度与光电极和微粒之间的距离成反比.Peng 等^[23]用边界元素法(BEM)通过交错耦合算法与 FEM 相互结合.通过这种技术,首次模拟了血红细胞(RBC)在毛细管中流动,发现蛋白密度变化和脂质双分子层骨架间的相互作用力比微量细管的期望值低很多,最大的相互作用力发生在尾部边缘.同时,对有关 FEM 方法的文献和程序算法也进行了总结.利用 FEM,学者们还研究了空心光束的归一化强度和光纤的偏振特性.李曙光等^[24]通过包层区域气孔的不同排列和光子晶体光纤结构参数的改变,获得不同尺度的空心光束.

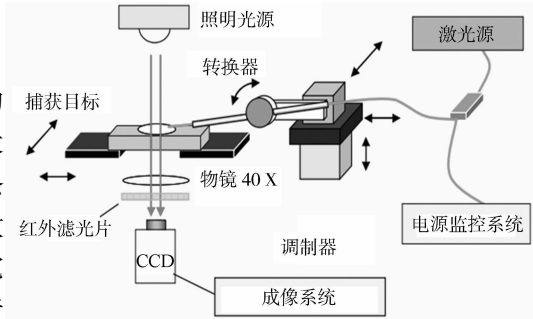


图 5 单锥形光纤光镊实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of single tapered fiber optical tweezers

2.3 GLMT

GLMT 方法也是计算电磁场常用的数值方法之一,假设入射光束为高斯光束,用 Davis 公式来描述^[25],如图 6 所示. $X'Y'Z'$ 坐标系的原点在光束束腰中心,而光束位于 XYZ 坐标系下展开.

GLMT 方法中,关键在于波束系数(g_n)^[25]的计算. 目前,计算 g_n 系数的方法^[26]有:求积分法、有限级数法、局域近似法和 s -展开法. 这些方法有各自的优缺点^[26],如利用 s -展开法计算 g_n 系数,计算比较慢,但更具有一般性,即

$$g_n^k = \sum_{j=0}^{j+2} \sum_{l=0}^{l=2k+1} \left(\frac{-2is z_0}{w_0}\right)^j (-1)^l s^{2l} \times \frac{(l+j)!}{l!j!} \frac{1}{l!} \frac{(n-1)!}{(n-1-l)!} \times \frac{(n+1+l)!}{(n+1)!} \exp(ikz_0).$$

(3)

Gouesbet 等^[27]计算了 k 为 1,3,5 时的波束系数,并比较了局域光束与标准光束的波束系数. 结果表明:只有当序数 $k = \infty$ (即 s^∞) 时才能满足 Maxwell 方程^[25], g_n 系数可以用 Maple 软件实现计算. Ren 等^[26]用 GLMT 方法计算了一束沿 Z 轴正方向传播的强聚焦高斯光束对球形微粒的纵向光辐射压力. 截面为

$$C_{pr,z} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{2n+1}{n(n+1)} |g_n|^2 \operatorname{Re}(a_n + b_n - 2a_n b_n^*) + \frac{n(n+2)}{n+1} \operatorname{Re}[g_n g_{n+1}^* (a_n + b_n + a_{n+1}^* + b_{n+1}^* - 2a_n a_{n+1}^* - 2b_n b_{n+1}^*)] \right\}.$$

(4)

式(4)中: λ 为激光束波长; a_n, b_n 为经典 Mie 系数, a_n, b_n 与微粒的尺寸大小和材料有关.

Nieminen 等^[28]阐述 GLMT 法是很重要的计算电磁散射场的方法之一. 利用 GLMT 方法, Lock^[29]应用高数值孔径物镜形成的聚焦光束,计算了沿 Y 轴偏振,沿 Z 轴传播的光束的辐射捕获力. Shane 等^[30]通过模拟和实验研究了高频率超短脉冲激光脉冲持续时间对光学捕获的影响.

综上所述,FEM 和 FDTD 要对微粒所处空间或者微粒本身进行分割,然后叠加求和;GLMT 需要利用 Maxwell 方程计算不同系数和散射截面,还会受级数收敛情况的影响. 当微粒在光镊中的位置或方位发生变化时,需要重复计算整个过程,计算过程繁琐复杂,这 3 种数值计算方法理论比较成熟,已有自己的程序代码和相应的软件,每种方法均可用于计算光镊中微粒的捕获力,且计算精度也较高,在不同计算领域有着广阔的应用前景.

2.4 其他数值计算方法

求解光散射场的数值方法还有 T 矩阵法^[31-32], T 矩阵法只取决于散射微粒的形状、尺寸大小、折射率及微粒在坐标系中的位置,不受入射场约束. 鉴于 T 矩阵法的优势,研究拉盖尔-高斯光束(LG 光束)的阶数、微粒大小和微粒折射率对光镊捕获效率的影响,得出阶数不超过 4 的 LG 光束捕获效率最高. 改变微粒大小与折射率,对 LG 光束和基模高斯光束的横向和轴向捕获效率做了对比,如随着微粒半径增加,LG 光束的轴向捕获效率和捕获域都增大,而高斯光束的捕获域逐渐增大,但最大捕获效率基本保持不变^[33]. Nieminen 等^[34]对 T 矩阵法在光镊中的应用做了详细研究,并给出相应的程序代码. Mishchenko 等^[35]总结了 T 矩阵法在不同领域的应用及相关文献^[36-39]. 除此之外,还有矩量法(MOM)^[40]、离散偶极子近似法(DDA)^[41]、耦合偶极子法(CDM)等^[42].

3 $R \ll \lambda$ 模型

若微粒折射率为 n_1 ,半径为 R ,当 $R \leq \lambda_0/20$ 时,满足瑞利近似条件,可将微粒看做一个简单的感生偶极子,采用瑞利散射理论计算光镊捕获力^[43],如图 7 所示. 在 XYZ 坐标系下,假设电场极化方向与 X 轴平行,束腰为 w_0 的光束从 Z 轴负方向到 Z 轴正方向传播,微粒中心为 O_p ,位于坐标系中 $r = (x, y, z)$ 的位置.

微粒与光束作用会产生散射力和梯度力,其散射力为

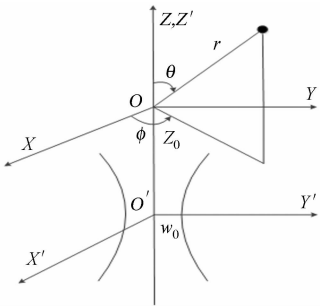


图 6 沿 Z 轴传播的聚焦高斯光束
Fig. 6 Focused Gaussian beam
that is propagating
along Z axis

$$F_{\text{scat}}(r,z) = \hat{z} \frac{8n_2\pi(ka)^4a^2}{3c} \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)^2 I(r,z).$$

(5)

式(5)中: \hat{z} 为光束传播方向的单位矢量; n_2 为粒子周围介质的折射率; c 为光在真空中的传播速度;光强 $I(r,z)$ 表示为

$$I(r,z) = \frac{n_2\epsilon_0c}{2} |\mathbf{E}(r,z)|^2.$$

(6)

式(6)中: ϵ_0 为真空中介电常数; $m=n_1/n_2$ 为相对折射率;波数为 $k=2\pi n_2/\lambda_0$.

梯度力为

$$\mathbf{F}_{\text{grad}}(r,z) = \frac{2\pi n_2 a^3}{c} \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right) \nabla I(r,z).$$

(7)

近年来,较多学者对瑞利散射理论进行研究,该理论在光镊中的应用也日趋成熟. Jiang 等^[44] 计算了任意形状瑞利粒子捕获力,如图 8 所示. 之后一些学者对生物单分子及细胞^[45-46] 进行了研究. 众多学者还研究了强聚焦柱形矢量光束^[47]、动态脉冲高斯光束^[48]、傍轴近似高斯光束^[49]、洛伦兹-高斯光束^[50]、不连续自聚焦艾里光束^[44] 和环形或空心光束^[42] 等不同模式光束对瑞利粒子的捕获力,这些不同模式的光束为光镊捕获力的计算拓宽了研究范围,同时为光镊在微观领域的发展与应用提供了广阔前景. Fu 等^[51] 研究了三维坐标系下胶体纳米瑞利微粒的捕获和追踪.

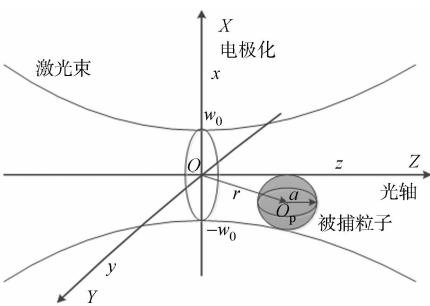
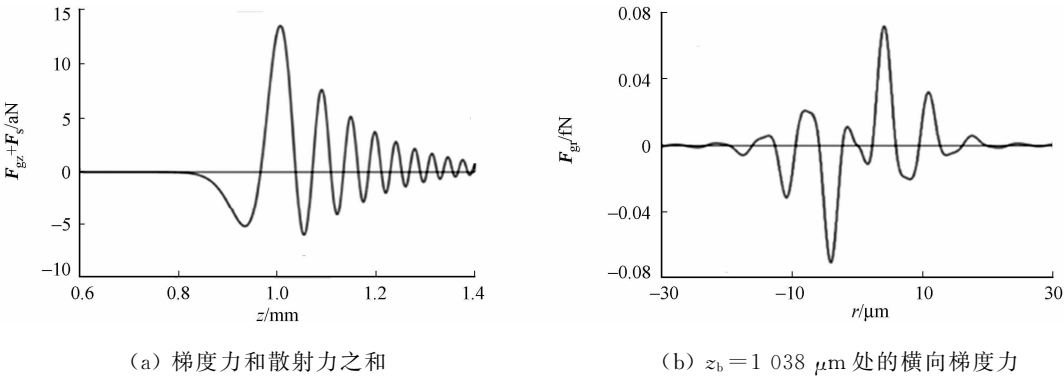


图 7 瑞利模型
Fig. 7 Rayleigh model



(a) 梯度力和散射力之和 (b) $z_b=1.038\text{ }\mu\text{m}$ 处的横向梯度力

图 8 瑞利粒子辐射力分布图

Fig. 8 Distribution of radiation force on Rayleigh particle

4 结束语

光镊操纵、捕获介质微粒在生物学、物理学和化学等领域具有重要应用意义,而光镊背后的物理模型还没有完全得到解决. 根据微粒尺度范围,给出几何光学模型和电磁模型,较详细地描述了几何光学法、FDTD、FEM、GLMT 和瑞利散射方法等计算光镊捕获力的理论,同时列出 \mathbf{T} 矩阵法,DDA, MOM 及 CDM 等多种数值计算方法. 在光镊技术中,这些方法可用于不同性质的光束(基模高斯, LG, Bessel 及偏振光束等)及微粒(单分子、细胞、电介质微粒等)的研究,其研究方法过程均有所不同,这为光镊技术提供了宽领域的发展. 课题组主要采用 \mathbf{T} 矩阵法,研究 LG 光束捕获单个微粒、双层球微粒及多微粒的捕获力情况.

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]. Optics Letters, 1986, 11(5): 288-290.

[2] ZHONG Mincheng, WEI Xunbin, ZHOU Jinhua. Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers [J]. Nat Commun, 2013, 4: 1768.

[3] REIS L A, RAMOS E B, ROCHA M S. DNA interaction with diaminobenzidine studied with optical tweezers and dynamic light scattering[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2013, 117(46): 14345-14350.

[4] ASHKIN A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime[J]. Biophysi-

- cal Journal, 1992, 61(2): 569-582.
- [5] BRATON J P, ALEXANDER D R, SCHAUB S A. Theoretical determination of net radiation force and torque for a spherical particle illuminated by a focused laser beam[J]. Appl Phys, 1989, 66(10): 4594-4602.
- [6] 周业鹏, 任洪亮. 球差对光镊中粒子轴向力的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 623-626.
- [7] ZHONG Mingcheng, WANG Xi, ZHOU Jinhua, et al. Optimal beam diameter for lateral optical forces on microspheres at a water-air interface[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(1): 011403(1-4).
- [8] XU Shenghua, LI Yinmei, LOU Liren. Axial optical trapping forces on two particles trapped simultaneously by optical tweezers[J]. Applied Optics, 2005, 44(13): 2667-2672.
- [9] 周业鹏, 任洪亮, 王娟. 光镊对双层介质球作用力分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 60801(1-6).
- [10] 周业鹏, 任洪亮, 王娟, 等. 拉盖尔高斯光束与高斯光束捕获力比较[J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1300-1304.
- [11] JOHN Y W. Ray optics calculation of the radiation forces exerted on a dielectric sphere in an evanescent field[J]. Appl Opt, 1999, 38(25): 5319-5330.
- [12] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 3 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011: 9-26.
- [13] 胡耿军, 李静, 龙潜, 等. 时域有限差分法数值仿真单光镊中微球受到的光阱力[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 030301(1-6).
- [14] GAUTHIER R C. Computation of the optical trapping force using an FDTD based technique[J]. Optics Express, 2005, 13(10): 3707-3718.
- [15] ZALJAROAM A R, MANSURIPUR M, MOLONEY J V. Radiation pressure and the distribution of electromagnetic force in dielectric media[J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2321-2336.
- [16] EOM S I, TAKAYA Y, HAYASHI T. Novel contact probing method using single fiber optical trapping probe[J]. Precision Engineering, 2009, 33(3): 235-242.
- [17] LI Jing, WU Xiaoping. FDTD simulation of trapping nanowires with linearly polarized and radially polarized optical tweezers[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 20736-20741.
- [18] LIU Zhihai, GUO Chengkai, YANG Jun, et al. Tapered fiber optical tweezers for microscopic particle trapping: Fabrication and application[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12510-12516.
- [19] YOTSUTANI R, UKITA H. Finite-difference time-domain analysis of refractive index grating on planar light waveguide circuit with optically trapped gold particles[J]. Optical Review, 2010, 17(1): 41-46.
- [20] YANG Ping, LIOU K N, MISHCHENKO M I, et al. Efficient finite-difference time-domain scheme for light scattering by dielectric particles: Application to aerosols[J]. Applied Optics, 2000, 39(21): 3727-3737.
- [21] DANIEL A W. Numerical modeling of optical gradient traps using the vector finite element method[J]. Journal of Computational Physics, 2000, 159(1): 13-37.
- [22] NI Zhonghua, ZU Shucun, CHEN Ke. Light-induced electro-rotation: Microspheres spin in micro-manipulation using light-induced dielectrophoresis[J]. Science China-Technological Sciences, 2011, 54(11): 3035-3046.
- [23] PENG Zhangli, ASARO R J, ZHU Qiang. Multiscale modelling of erythrocytes in stokes flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 686(332): 299-337.
- [24] ZHANG Xiaoxia, LI Shuguang, LIU Shuo, et al. Generation of hollow beam from photonic crystal fiber with an azimuthally polarized mode[J]. Optics Communications, 2012, 285(24): 5079-5084.
- [25] BARTON J P, ALEXANDER D R. Fifth-order corrected electromagnetic field components for fundamental gaussian beam[J]. J Appl Phys, 1989, 66(7): 2800-2802.
- [26] REN Kuanfang, GRENAN G, GOUESBET G. Prediction of reverse radiation pressure by generalized Lorenz-Mie theory[J]. Applied Optics, 1996, 35(15): 2702-2710.
- [27] GOUESBET G, LOCK J A, GREHAN G. Partial-wave representations of laser beams for use in light-scattering calculations[J]. Applied Optics, 1995, 34(12): 2133-2143.
- [28] NIEMINEN T A, RUBINSZTEIN-DUNLOP H, HECKENBERG N R. Multipole expansion of strongly focussed laser beams[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2003, 79(335): 1005-1017.
- [29] LOCK J A. Calculation of the radiation trapping force for laser tweezers by use of generalized lorenz-mie theory. I. localized model description of an on-axis tightly focused laser beam with spherical aberration[J]. Applied Optics, 2004, 43(12): 2532-2544.
- [30] SHANE J C, MAZILU M, LEE W M, et al. Effect of pulse temporal shape on optical trapping and impulse transfer

- using ultrashort pulsed lasers[J]. *Optics Express*,2010,18(7):7554-7568.
- [31] LI J L W,ONG W L,ZHENG K H R. Anisotropic scattering effects of a gyrotropic sphere characterized using the T -matrix method[J]. *Physical Review E*,2012,85(3):036601(1-16).
- [32] BAREIL P B,SHENG Yunlong. Modeling highly focused laser beam in optical tweezers with the vector Gaussian beam in the T -matrix method[J]. *Journal of the Optical Society of America A*,2013,30(1):1-6.
- [33] 王娟,任洪亮,周业鹏. 拉盖尔-高斯光束光镊捕获性质的研究[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*,2014,3(35):636-641.
- [34] NIEMINEN T A,LOLE V L Y,STILGOE A B,et al. T -matrix method for modelling optical tweezers[J]. *Journal of Modern Optics*,2010,58(5/6):528-544.
- [35] MISHCHENKO M I,VIDEEN G,BABENKO V A. Comprehensive T -matrix reference database: A 2004—2006 update[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,2007,106(1/2/3):304-324.
- [36] MISHCHENKO M I,GORDEN V,KHLEBTSOV N G,et al. Comprehensive T -matrix reference database: A 2006—2007 update[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,2008,109(8):1447-1460.
- [37] MISHCHENKO M I,ZAKHAROVA N T,GORDEN V,et al. Comprehensive T -matrix reference database: A 2007—2009 update[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,2010,111(4):650-658.
- [38] ZAKHAROVA N T,VIDEEN G,KHLEBTSOV N G. Comprehensive T -matrix reference database: A 2009—2011 update[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,2012,113(14):1844-1852.
- [39] MISHCHENKO M I,VIDEEN G,KHLEBTSOV N G,et al. Comprehensive T -matrix reference database: A 2012—2013 update[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,2013,123(1):145-152.
- [40] KAHNERT F M. Numerical methods in electromagnetic scattering theory[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,2003,79/80(1):775-824.
- [41] YURKIN M A,HOEKSTRA A G. The discrete dipole approximation: An overview and recent developments[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,2007,106(1/2/3):558-589.
- [42] KARASEK V,BRZOBOHAT O,ZEMANEK P. Longitudinal optical binding of several spherical particles studied by the coupled dipole method[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*,2009,11(3):1464.
- [43] LIU Zhirong,ZHAO Daomu. Optical trapping rayleigh dielectric spheres with focused anomalous hollow beams[J]. *Applied Optics*,2013,52(6):1310-1316.
- [44] JIANG Yunfeng,HUANG Kaikai,LU Xuanhui. Radiation force of abruptly autofocusing airy beams on a Rayleigh particle[J]. *Optics Express*,2013,21(20):24413-24421.
- [45] CHANG Yiren,LONG H,CHI S. Optical trapping of a spherically symmetric Rayleigh sphere: A model for optical tweezers upon cells[J]. *Optics Communications*,2005,246(1/2/3):97-105.
- [46] SINGER W,NIEMINEN T A,HECKENBERG N R,et al. Collecting single molecules with conventional optical tweezers[J]. *Physical Review E*,2007,75(1):011916(1-5).
- [47] ZHAN Qiwen. Radiation forces on a dielectric sphere produced by highly focused cylindrical vector beams[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*,2003,5(3):229-232.
- [48] WANG Ligang,ZHAO Chengliang. Dynamic radiation force of a pulsed Gaussian beam acting on a Rayleigh dielectric sphere[J]. *Optics Express*,2007,15(17):10615-10621.
- [49] CHEN Jun,NG J,LIU Shiyang,et al. Analytical calculation of axial optical force on a Rayleigh particle illuminated by Gaussian beams beyond the paraxial approximation[J]. *Physical Review E*,2009,80(2):026607(1-9).
- [50] JIANG Yunfeng,HUANG Kaikai,LU Xuanhui. Radiation force of highly focused Lorentz-Gauss beams on a Rayleigh particle[J]. *Optics Express*,2011,19(10):9708-9713.
- [51] FU Jinxin,ZHAN Qiwen,LIM M Y,et al. Potential energy profile of colloidal nanoparticles in optical confinement[J]. *Optics Letters*,2013,38(20):3995-3998.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)