

激光探测尾流微气泡的偏振特性研究

唐 勳, 张 宇

(哈尔滨工业大学 物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了研究尾流中激光照明气泡幕的散射光强度和偏振的特性, 利用基于偏振光传输的蒙特卡洛模型, 对偏振激光入射含气泡群水体的三维空间分布模式进行仿真计算。研究了气泡和气泡群在不同气泡尺度, 不同散射角条件下的散射光强和偏振状态; 分析了气泡幕的气泡数密度, 厚度对于散射光强度和偏振状态的影响。研究表明, 散射光的强度和偏振度对气泡尺度和散射角较为敏感, 气泡尺度参数越大, 散射光强和偏振特征越趋向于集中在传输方向的小角度散射; 气泡幕的数密度和厚度越大, 散射光的强度随散射角度变化的敏感度下降, 退偏振效果增强。

关键词: 气泡群; Mie 散射; 偏振

中图分类号: O436.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0105006

Research on polarization characteristics of micro-bubbles laser detection in wake

Tang Meng, Zhang Yu

(School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to study the scattering intensity and polarization characteristics of the bubble curtain illuminated by laser in the wake, a Monte Carlo model based on the propagation of polarized light was used. A simulation of the 3D distribution pattern of water with a group of bubbles incident on it by a polarized laser beam was presented. The scattering intensity and polarization state of bubbles and bubble groups at different bubble scales and different scattering angles were studied, and the influence of bubble number density and thickness on scattering intensity and polarization state was analyzed. The results show that the intensity and polarization of the scattered light are sensitive to the bubble size and the scattering angle. The larger the bubble size is, the more the scattering intensity and polarization tend to be concentrated in the small angle scattering in the transmission direction. With the increase of the number density and thickness of the bubble curtain, the sensitivity of the intensity of the scattered light decreases with the change of the scattering angle, and the depolarization effect increases.

Key words: bubbles groups; Mie scattering; polarization

收稿日期: 2019-11-05; 修订日期: 2019-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61450002); 重点实验室基金(9140C260306130C26097)

作者简介: 唐勳(1976-), 男, 博士生, 主要从事光探测的理论和仿真方面的研究。Email: tangmeng@hit.edu.cn

导师简介: 张宇(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光探测的理论和技術方面的研究。Email: zhangyunn@hit.edu.cn

0 引言

随着激光探测技术在海洋军事、渔业、环境监测等领域的不断发展和应用,如何对尾流中的气泡特性进行更有效地检测成为一个重要的研究方向^[1-6]。尾流具有与周边海水明显不同的光学、声学、力学、热学、电磁学等物理特征。相比于传统的声学检测方法,光学方法利用对海水穿透能力强的蓝绿激光代替声纳使用的声波进行探测。光学检测具有灵敏度高、抗干扰性强、分辨率高等优点^[7],对海洋军事、渔业、海洋环境监测等领域都具有很高的应用价值和现实意义。

由于尾流光学检测具有一定的军用背景,国外文献报道较少,国内对于尾流检测方法主要分为成像检测,脉冲回波检测和连续激光检测三种方法。尾流成像研究方面,运用高速摄像装置拍摄尾流图像,提取尾流特征,根据图像的特征信息进行尾流检测。脉冲回波检测方法理论和实验研究较为深入,建立了散射相位函数模型,利用蒙特卡洛方法模拟气泡散射回波信号,分析了尾流特性激光脉冲宽度等对散射回波信号的影响。连续激光检测方面,对于单气泡的理论模型比较成熟,但是对于具有实际意义的气泡群的散射特性,由于涉及到大量不同尺寸的气泡的复杂散射特性,尚未建立公认的理论模型和完整的理论体系。

在尾流微气泡的激光检测方法中,由于海水对激光的散射比对声波的散射严重^[8],因而很大程度影响了激光探测系统的作用距离和探测性能。这样,对激光在尾流中的传输特性(尤其是散射特性)的研究就显得尤为重要。偏振是光的一个重要特性,对于尾流气泡群探测具有重要的理论和实际意义。利用散射的偏振特性,结合相对较成熟强度、图像等探测手段,有望提供探测尾流的新方法。文中针对激光尾流气泡散射特性,特别是偏振特性进行了理论研究。首先对单气泡的散射特性进行了理论分析;建立了气泡群的多重散射蒙特卡洛仿真模型,对气泡群中存在的多次散射现象进行了仿真计算。研究了气泡尺度,气泡群数密度,厚度因素对散射光强及其偏振状态的影响,为进一步进行尾流的探测和识别实验提供了理论依据。

1 单气泡散射模型

尾流是由舰船、鱼群在水面水中运动而产生的一个含有大量不同直径气泡和湍流的区域。直径范围在 20~300 μm 的气泡较为稳定^[9],可以有一个较长的生存时间,这部分水中的气泡在激光照射下的散射特性是笔者感兴趣的。

根据 Mie 散射理论^[10-11],如图 1 所示,设 O 点为气泡中心,入射光强为 I_0 ,方向沿 z 轴正方向,若入射光为线偏振光,电矢量方向沿 x 轴正方向。

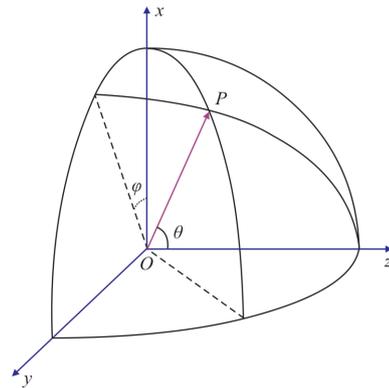


图 1 单气泡散射模型

Fig.1 Single bubble scattering model

P 点为观测点,则平面 POZ 称为散射面; θ 为散射光线与入射方向的夹角,称为散射角; φ 为入射光电场振动方向与散射面的夹角,称为极化角。

Mie 散射理论将电磁波在球坐标系下展开,分解为一系列收敛的子波。将垂直和平行于散射面 POZ 的光波振幅称为散射振幅。

散射振幅的垂直与平行分量的表达式为:

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \quad (1)$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \quad (2)$$

其中, π_n 、 τ_n 由以下公式给出:

$$\pi_n = \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} = \frac{dP_n(\cos\theta)}{d\cos\theta} \quad (3)$$

$$\tau_n = \frac{dP_n^1(\cos\theta)}{d\theta} \quad (4)$$

式中: P_n 为勒让德函数; P_n^1 为 n 阶一次缔合勒让德函数; a_n 、 b_n 为 Mie 散射系数。定义 i_1 为垂直于散射平

面的散射光强函数分量; i_2 为平行于散射平面的散射光强函数分量, 有 $i_1=|S_1|^2, i_2=|S_2|^2$ 。

对于自然光入射, 散射光强^[12]为:

$$I(\theta, x, m_1) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} [i_1(\theta, x, m_1) + i_2(\theta, x, m_1)] I_0 \quad (5)$$

对于线偏振光入射, 则散射光强为:

$$I(\theta, x, m_1, \phi) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} [i_1(\theta, x, m_1) \sin^2 \phi + i_2(\theta, x, m_1) \cos^2 \phi] I_0 \quad (6)$$

在散射光强表达式中, 与 i_1 相关的项表示 POZ 平面上散射光的垂直分量, 与 i_2 相关的量表示 POZ 平面上散射光的平行分量。这样可以定义散射光的偏振度 P :

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} \quad (7)$$

偏振度表示散射光的偏振特征: $P=1$ 为线偏振光, $P=0$ 为非偏振光, $P>0$ 时散射光的主要成分为垂直分量, $P<0$ 时散射光的主要成分为水平分量。可见散射光的偏振度与入射强度无关, 只与气泡尺度、折射率和角度参量有关。

一般来说, 除了某些特定角度, 散射光均为部分偏振光。由于 Mie 散射理论中并未直接给出部分偏振光入射情况下的散射光强表达式, 而涉及到多次散射的计算中, 对二次以上散射的计算都需要解决部分偏振光入射情况下散射光强的计算方法。为此, 采用了一种全角度模拟的数值计算方法。部分偏振光是彼此无固定相位关系, 振动方向任意, 不同方向上振幅不同的大量光振动的组合(见图 2)^[13]。在垂直于光传播方向的平面内沿各个方向振动的光矢量都有, 但是振幅不对称, 在某方向振动较强, 在其垂直方向振动较弱。

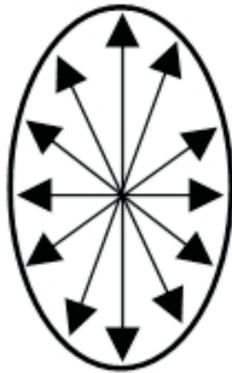


图 2 部分偏振光全角度模拟

Fig.2 Full angle simulation of partially polarized light

可以将这些光振动在 POZ 平面沿着垂直 POZ 和平行于 POZ 面的两个方向对其进行分解, 得到两部分线偏振光: I_{\perp} 和 I_{\parallel} , 也可以根据实际需要在任意两个互相垂直的方向上分解。根据已知的 I_{\perp} 和 I_{\parallel} , 构建垂直于传播方向的若干光矢量 $E_{\alpha}(0 \leq \alpha \leq 2\pi)$, 让这些光矢量的叠加结果满足在垂直和平行 POZ 平面的两个方向的分量分别等于 I_{\perp} 和 I_{\parallel} 。这样, 部分偏振光的散射结果就是计算这些光矢量散射结果并叠加:

$$I(\theta, x, m_1, \phi) = \sum_{\alpha} I_{\alpha} \quad (8)$$

2 气泡群的多重散射仿真模型

对于气泡群这样的复杂多粒子随机系统, 采用一般的解析方法很难求解。因此对于气泡群散射特性的研究, 采用了蒙特卡洛^[14-15]仿真方法。对于文中的光散射问题, 可以把入射激光看成若干独立光能单元。每一份光能单元在传输过程中随机遇到气泡, 经散射抽样函数确定的随机角度继续传输或吸收。这样由大量光能单元逐个计算并累加的结果可以对气泡群的散射特性进行研究与分析。

首先将入射光束分成若干个独立的光能单元, 在传输方向确定后, 随机抽取一个传播步长 L , 由如下公式^[16]确定:

$$L = \frac{-\ln(\xi)}{\rho u_t} \quad (9)$$

式中: ξ 表示 $(0, 1]$ 区间均匀分布的随机数; $u_t = u_a + u_b$ 为消光系数; ρ 为气泡数密度; $1/(\rho u_t)$ 是平均自由程, 表示光子与气泡发生碰撞的平均距离。这样得到了光能单元本次传输距离 L_n , 再根据之前的方向 w_n 与当时光能单元的位置 x_n , 可以计算出下次碰撞的位置 x_{n+1} 。若 x_{n+1} 仍在气泡群范围内, 则光能单元继续传输, 否则表面光能单元已经脱离气泡群, 此光能单元计算完毕。

判定光能单元发生散射后, 可直接利用单气泡散射的光强分布计算结果生成随机角度抽样函数。确定了散射方向, 并利用公式(9)得到步长 L 后, 可计算下次碰撞的位置。若已知第 n 次碰撞气泡位置坐标 (x_n, y_n, z_n) , 第 n 次碰撞到第 $n+1$ 次碰撞位置距离为 L_{n+1} , 第 n 次碰撞后光能单元传输方向用方向余弦表示为 $(u_{n+1}, v_{n+1}, w_{n+1})$, 则第 $n+1$ 次碰撞的气泡位置应为 $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + u_{n+1}L_n \\ y_{n+1} &= y_n + v_{n+1}L_n \\ z_{n+1} &= z_n + w_{n+1}L_n \end{aligned} \quad (10)$$

式中的方向余弦是在初始的直角坐标系下的数值。在第 n 次碰撞后,得到散射方向角度,散射角 θ_n ,极化角 φ_n ,通过坐标变换得到光能单元与气泡碰撞后的方向余弦,并由此可得到第 $n+1$ 次碰撞的气泡位置 $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$ 。将此坐标位置与气泡群范围对比,若未超出范围,则进行第 $n+1$ 次散射角度抽样,第 $n+1$ 次光能单元步长 L 的生成,并循环。若已超出气泡群范围,则该光能单元追迹完毕,记录其出射位置(第 n 次),飞行方向,偏振方向。至此,完成了一个光能单元由入射气泡群到离开气泡群的全过程。将此过程循环往复,待所有光能单元都执行完毕,则得到了光束在气泡群的全部仿真结果。由于每个光能单元计算过程相对独立,可考虑多核心多线程并行计算甚至 GPU 并行计算^[7]加速计算过程以缩短运算时间。

3 仿真计算结果与分析

根据实验室设备条件和项目需求,设定仿真参数如下:入射线偏振光波长 $0.532 \mu\text{m}$,其电矢量沿 X 轴正方向,传播方向为 Z 轴正方向,光束截面直径 5mm 。气泡直径分别为 $20、50、100 \mu\text{m}$ 。气泡群存在于一个球体内,其半径分别为 $50、100、150 \text{mm}$,坐标原点位于气泡群中心。气泡数密度为 $10^7、10^8、10^9 \text{m}^{-3}$,水体折射率 1.33 ,空气折射率 1.00 ,每光学单元光子数 10^3 个,共 10^9 个光学单元。仿真结果采用远场近似,即观察点距离散射气泡群较远,可近似认为所有的散射光单元都是从球形气泡群的中心发出。仿真结果如图 3~5 所示。

首先考虑气泡直径不同的情况:当气泡群中气泡直径分别为 $20、50、100 \mu\text{m}$,气泡群密度和气泡群厚度不变,分别为 $10^7/\text{m}^3$ 和 50mm 的时候,考虑气泡直径对于气泡群散射光的光强和偏振度的影响。带入设定参数计算得到仿真结果如图 3。图中可以看出,散射光强在 $0\sim 180^\circ$ 的分布规律:(1) 前向散射光远大于后向散射光强。(2) 随着气泡直径的增加,散射光强的振荡随角度变化越来越剧烈。从仿真计算角度分析,计算公式中存在高阶贝塞尔函数,气泡直径越大则贝塞尔函数阶数也越高,造成振荡加剧。(3) 气泡直径越大,光能相对更加集中在 0 度附近,

即沿传输方向集中,造成后向散射比例更小。这是在实际信号探测过程中应该注意的。偏振度方面:(1) 与散射光强类似,偏振度随角度也存在着剧烈的振荡,随着气泡直径的增大,振荡的频率也有增大。(2) 在散射角 110° 附近,无论直径大小,均存在一个偏振度为 1 的位置,此角度对应的散射光为线偏振光。(3) 随着气泡直径的增大, 110° 以前的偏振度的振荡幅度在减小,即散射光的退偏振度随气泡直径的增大而增加。

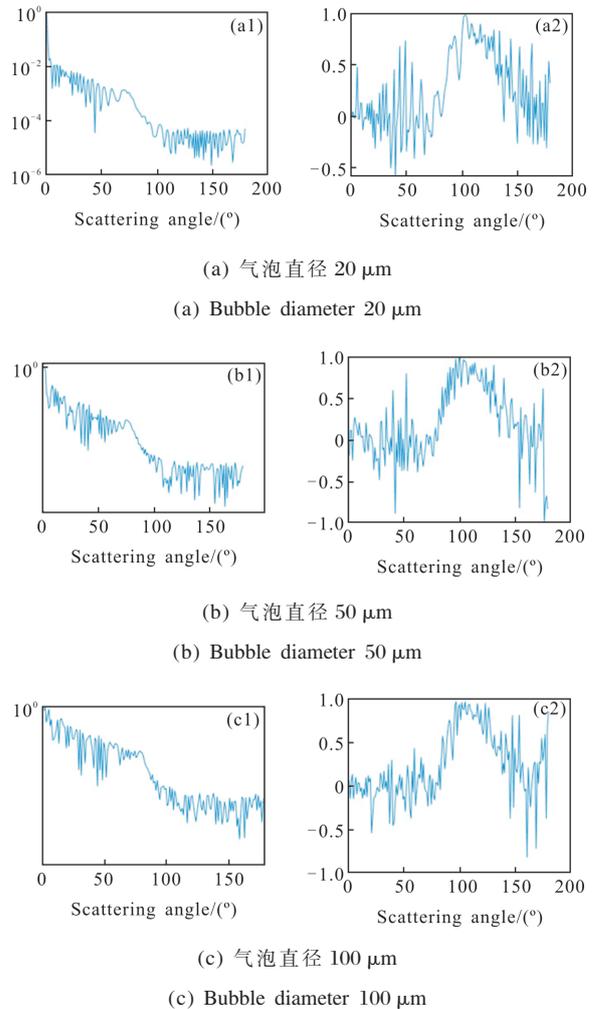


图 3 不同直径的归一化散射强度和偏振度分布
Fig.3 Distribution of normalized scattering intensity and degree of polarization for different diameters

将气泡直径、气泡群厚度设为固定值,分别为 $20 \mu\text{m}, 50 \text{mm}$, 气泡数密度变化,分别为 $10^7、10^8、10^9 \text{m}^{-3}$,讨论气泡群数密度对散射光的影响。按照参数设定的计算结果如图 4 所示。可见气泡数密度对偏振度影响较大。气泡数密度增加,偏振度的振荡频率基本不变,但是整体的偏振度均值有明显减小的

趋势,而且振荡幅度也有衰减。原来存在的 110° 角度附近散射光偏振度的极值接近于 1, 即散射光近似线偏振光的现象消失, 但该角度仍存在偏振度的极大值。从物理过程考虑, 每次散射都会造成偏振度的减小, 而气泡群数密度的增大则使得传输光能单元进行二次甚至更多次散射的几率增加, 从而造成了整体偏振度的下降。多次散射的随机性也造成偏振度振荡的幅度减小。

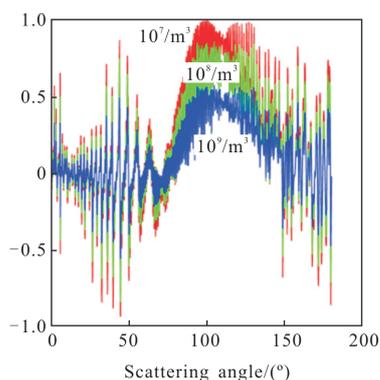


图 4 不同气泡数密度的偏振度分布

Fig.4 Distribution of degree of polarization for different bubble number density

将气泡直径、气泡数密度设为固定值, 分别为 $20 \mu\text{m}$, $10^7/\text{m}^3$, 气泡群厚度变化分别设置为 50、100、150 mm, 仿真结果如图 5 所示。

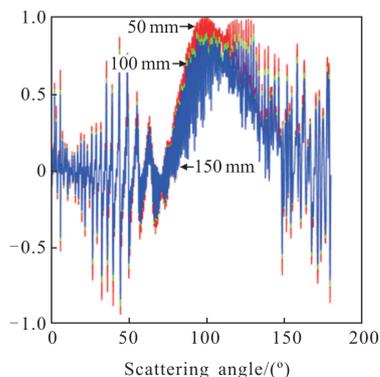


图 5 不同气泡群厚度的偏振度分布

Fig.5 Degree of polarization distribution for different bubble groups thickness

可见,随着气泡群厚度的增加,散射光的偏振度振荡频率变化不大,但是整体均值和振荡幅度会减小。同样地,偏振度原有极值 1 的角度位置上,对应的极值不再为 1。即不存在散射光近似为线偏振光

的现象,但是该角度对应偏振度仍然是角度范围内的极大值。对比图 4 和图 5,气泡群厚度增加对偏振状态的影响,类似于气泡数密度增加,但是没有气泡数密度影响大。从其成因考虑,增加气泡群厚度,可以等效于增加散射光单元在气泡群中发生多次散射的概率,同样也会降低出射光的偏振度。

4 结论

以 Mie 散射理论为基础,进一步针对一般角度散射光是部分偏振光的实际情况,采用部分偏振光全角度仿真模型,并利用蒙特卡洛方法对激光在气泡群中传输的散射光强和偏振度进行了仿真计算。研究了气泡直径,气泡群数密度和厚度分别对散射特性的影响。研究表明,散射光的强度和偏振度对气泡尺度和散射角较为敏感,随散射角度变化剧烈振荡。气泡直径越大,散射光越强趋向于集中在传输方向的小角度范围,光强和偏振度的振荡频率都随着气泡尺寸的增加而增加,偏振度达到极值对应角度之前的偏振度整体有所减小;气泡尺寸不变而气泡群的数密度和厚度增大,散射光发生多次散射概率增加,散射光强度随散射角度变化的敏感度下降,偏振度的振荡频率基本不变,偏振度均值有减小的趋势,而且振荡幅度也有衰减。散射光特定角度近似线偏振光的现象消失,但仍存在偏振度的极大值。此分析方法和仿真计算结果对后续的尾流检测与识别实验提供了理论依据。

参考文献:

[1] Zhang Jiansheng. The development and measurement of ship wake optical specialty [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2001. (in Chinese)
 张建生. 尾流的光学特性研究与测量[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001.

[2] Sun Chunsheng. Investigation into the forward light scattered ship wakes and its detecting technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.(in Chinese)
 孙春生. 舰船气泡尾流的前向光散射特性及探测技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.

[3] Liang Shanyong, Wang Jiang'an, Zong Siguang, et al. Laser detection method of ship wake bubbles based on multiple scattering intensity and polarization characteristics [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(6): 95-105. (in Chinese)

- 梁善勇, 王红安, 宗思光, 等. 基于多重散射强度和偏振特征的舰船尾流气泡激光探测方法 [J]. 物理学报, 2013, 62(6): 95–105.
- [4] Jin Fangyuan, Wang Yunying, Guo Yuanyuan, et al. A method for calculating IR emissivity of ship turbulent trailing wake [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0504003. (in Chinese)
金方圆, 王运鹰, 郭媛媛, 等. 舰船湍流尾迹红外发射率计算方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(5): 0504003.
- [5] Mei Fenghua, Li Chao, Zhang Yuxin. Application of spectral imaging technology in maritime target detection [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 708–718. (in Chinese)
梅风华, 李超, 张玉鑫. 光谱成像技术在海域目标探测中的应用[J]. 中国光学, 2017, 10(6): 708–718.
- [6] Tian Jing, Bai Guangfu, Jiang Yang. Research of scattering Stokes parameters for ship wake bubbles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0206003. (in Chinese)
田晶, 白光富, 江阳. 舰船气泡尾流散射斯托克斯特征研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0206003.
- [7] Shen Zhenmin, Zhao Tong, Wang Yuncai, et al. Underwater target detection of chaotic pulse laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0406004. (in Chinese)
沈振民, 赵彤, 王云才, 等. 混沌脉冲激光雷达水下目标探测[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0406004.
- [8] Wei Haoming, Zhao Wei, Dai Xingcan. Influence of fog and aerosol particles' forward-scattering on light extinction [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(6): 1354–1361. (in Chinese)
魏昊明, 赵威, 戴兴灿. 雾和气溶胶前向散射对消光的影响[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1354–1361.
- [9] Gu Jiannong, Zhang Zhihong, Zhang Xiaohui. Numerical simulation of bubble distribution characters in ship's far field wakes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(8): 1504–1509. (in Chinese)
顾建农, 张志宏, 张晓晖. 舰船远场尾流气泡分布特性的数值模拟[J]. 光子学报, 2007, 36(8): 1504–1509.
- [10] Garrettson G A. Bubble transport theory with application to the upper ocean[J]. *Fluid Mech*, 1973, 59(1): 187–206.
- [11] Ven de Hulst H C. Light Scattering by Small Particles[M]. New York: John Wiley & Sons, 1957.
- [12] Xiang Jiansheng. Research on bubble measurement technology based on Mie light scattering theory [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optical and Precision Mechanics of CAS, 2007. (in Chinese)
项建胜. 基于 Mie 光散射理论的气泡测量技术研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2007.
- [13] Zhao Kaihua. New Concept Physics Course. Optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 272–273. (in Chinese)
赵凯华. 新概念物理教程. 光学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 272–273.
- [14] Kurt Binder Dieter W. Heermann Monte Carlo Simulation in Statistical Physics [M]. Berlin: Springer, 2014: 3.
- [15] Han Qi, Chen Guimin, Shao Xiaodong. Uncertainty analysis of MEMS force gauges based on Monte Carlo method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(9): 2290–2294. (in Chinese)
韩琪, 陈贵敏, 邵晓东. 基于蒙特卡罗法的 MEMS 测力计不确定性分析 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(9): 2290–2294.
- [16] Witt A N. Multiple scattering in reflection nebulae. I. A Monte Carlo approach [J]. *Astrophysical Journal*, 1977(35): 1–6.
- [17] Zhang Fan, Han Shukui, Zhang Liguoguo, et al. Parallel acceleration of Canny algorithm based on GPU [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 737–743. (in Chinese)
张帆, 韩树奎, 张立国, 等. Canny 算法的 GPU 并行加速 [J]. 中国光学, 2017, 10(6): 737–743.