

文章编号: 0253-2239(2010)01-0014-05

舰船尾流激光后向散射特性研究

王向伟 周田华 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 根据尾流气泡群的密度随深度和时间的变化规律以及尾流气泡的浮升运动规律,建立了一种尾流气泡分布模型。基于单个气泡的米氏散射理论,利用多层介质蒙特卡罗模拟方法,对 I, IA, IB 类海水下的尾流气泡激光后向散射特性进行了模拟。对激光发射深度分别位于海面以下 20 m 和 30 m 处,综合考虑浮游植物影响的散射结果进行了分析。结果表明,沿尾流纵向,由尾流远区到舰船尾流中心区的激光后向散射逐渐增强;海水中浮游植物对后向散射光有显著影响。同时也证明了可利用尾流气泡群的激光后向散射做为鱼雷的引信。

关键词 散射;舰船尾流;蒙特卡罗方法;气泡群;浮游植物

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0014

Study on Laser Backscattering Properties by Ship Wakes

Wang Xiangwei Zhou Tianhua Chen Weibiao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Preliminary bubble distribution model of ship wake is presented according to the law of bubbles density varying with time and depth, and bubble motion. The laser backscattering properties of air bubbles of the ship wakes under I, IA, IB-type seawater are numerically simulated with the multilayer Monte Carlo method and Mie scattering theory. Different results under 20 m and 30 m depth with the effect of phytoplankton are analyzed. Simulation result shows the light backscattering of ship wakes is increased along the ship stern from far to center; and the backscattering is influenced by phytoplankton in ocean obviously. Results show that the laser backscattering of bubbles of the ship wakes can be used as a fuse of torpedo.

Key words scattering; ship wake; Monte Carlo method; bubbles; phytoplankton

1 引 言

舰船在海洋中运动都会对海水产生扰动,并在船后形成尾流。尾流中的气泡群是由直径不同的气泡组成,气泡密度随深度和时间变化。由于海水压力和气泡中气体扩散,大气泡以较快的速度浮升到水面破裂,而小气泡可以存活较长时间,可以利用光波在尾流中的传输特性与在海水中的传输特性的差异作为探测尾流的依据。现在由于各个国家军事发展的需要,对激光尾流制导鱼雷的研究越来越重视。对尾流气泡的研究也有助于水污染问题的研究。可见对尾流光特性的研究具有重要的理论意义和实际意义。

关于尾流特性的研究,在尾流的几何尺寸、声学特性等方面的研究已较为全面,但在其光学特性方面的分析较少,也不系统^[1]。早在 1943 年,美国海军无线电和声学实验室就开始了舰船尾流几何尺寸的研究。20 世纪 90 年代, Trevor M. K. 等^[2]利用高频声纳(28~400 kHz)测量了 10 节(5 m/s)和 5 节(2.5 m/s)航行的海洋考察船尾流,探测到尾流内气泡尺寸分布在 8~200 μm 范围内,并得出了尾流内气泡尺寸分布函数 $n(r, z)$ 随气泡半径 r 和尾流深度 z 的变化关系式^[3]。Stramiski^[4]最初研究了气泡群体的光学特性——半径在 10~150 μm 范围内

收稿日期: 2008-12-16; 收到修改稿日期: 2009-04-12

作者简介: 王向伟(1984—),男,硕士研究生,主要从事舰船尾流激光散射特性方面的研究。

E-mail: wxiangwei@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光遥感、遥测和激光雷达等方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shnc.ac.cn

干净气泡的光散射,发现这些气泡对海水后向散射的贡献可达 10%。张建生^[5]通过高速摄影技术对尾流气泡的光学特性以及所受浮力和上升速度与气泡半径的关系进行了研究,提出了尾流气泡幕光散射特性的物理模型。王慧丽等^[6]通过图像方法研究气泡,得出尾流气泡总数密度随时间以指数规律衰减。顾建农等^[7]研究了气泡数密度的最大值沿尾流纵向距离的衰减规律和气泡存活时间,得出半径为 10~30 μm 的气泡存活时间最长,在舰船远场尾流中所探测的气泡尺度应以半径 10~30 μm 的气泡为主。刘慧开等^[8]对气泡群的光散射特性,气泡在不同散射方向的散射强度,尾流不同位置的散射情况进行了研究,证明利用光的散射特性探测和识别尾流是可行的。石晟玮等^[9]对舰船尾流中气泡分布规律和气泡的激光后向散射特性做大量研究工作,提出利用尾流中气泡对激光的后向散射光特性探测舰船的方法。

关于尾流气泡分布规律的研究,由于所能查到的尾流气泡数密度的数据资料有限,同时由于不同舰船形成不同尾流,不同海域光散射系数的差别极大限制了气泡尾流光探测的应用,到现在仍然没有建立确切的尾流模型。本课题以目前国内外的研究结果为基础建立了一种多层多区域的尾流模型,并以此模型为基础,综合考虑海水中的浮游植物体细胞对激光产生的后向散射,利用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法对 I, IA, IB 类海水的激光后向散射特性进行了模拟仿真。

2 尾流特征和探测方法

2.1 舰船尾流特征

尾流内气泡密度分布函数 $n(r, z)$ 随气泡半径 r 和尾流深度 z (尾流横截面内某一点到达尾流表面的垂直距离) 的变化关系可表示为^[3]

$$\begin{cases} n(r, z) = n_0 \left(\frac{r}{r_{\text{peak}}} \right)^{-4.5} \exp\left(-\frac{z}{L}\right), & r > r_{\text{peak}} \\ n(r, z) = n_0 \exp\left(-\frac{z}{L}\right), & r < r_{\text{peak}} \end{cases} \quad (1)$$

其中 n_0 为尾流表面的气泡数密度, r_{peak} 为气泡的峰值半径, L 为气泡的测深标尺。虽然尾流内气泡的分布规律与海水中气泡分布规律相似,但气泡数量要比海水表面的多(如图 1 所示)。15 节(27.78 km/h)航行驱逐舰的尾流表面数量为 $6 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, Zhang 等^[10]利用光学的方法测量了不同水域内舰船尾流表面的气

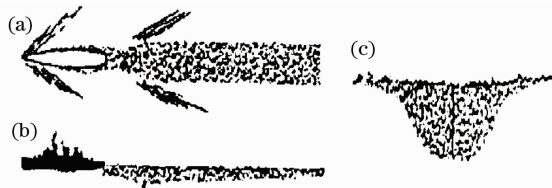


图 1 尾流的几何外观。(a)俯视图;(b)侧视图;
(c)后视图

Fig. 1 Geometrical shape of ship wakes. (a) Top view of ship wakes; (b) side view of ship wakes; (c) back view of ship wakes

泡数量在 $1.6 \times 10^6 \sim 6.5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 范围内。

2.2 探测方法

目前对于尾流气泡的探测国内主要有 2 种方案: 1) 收发同轴的中空方式, 探测系统安装在鱼雷头部, 发射和接收单元相隔较近并同轴中空相隔, 利用鱼雷进入到尾流区域时, 由于气泡的存在增大了后向散射系数, 使得接收到的信号减弱来加以判断是否进入到尾流区域, 由于必须进入到尾流区域时才能有明显的变化响应, 同时由于探测系统安装在头部因而在鱼雷高速行进时可能产生的空化现象将使得探测失效, 因而该方式局限于中低速近距离探测和跟踪制导。2) 探测方式就是水下探测, 同轴收发的方式, 也就是本仿真采用的探测方式, 该探测系统可以安装在鱼雷的前端或者中段, 采用鱼雷水平平行进而探测激光向上发射的方式, 主要利用气泡的存在导致后向散射系数增大从而使得接收到的光信号增强的原理来进行判决, 可以用于高速、远距离的尾流探测。

3 尾流模型和数值模拟

3.1 尾流模型的建立

不同舰船种类、不同海域的尾流模型各不相同, 综合国内外的研究结果, 假设了表 1 所示的尾流气泡分布模型: 尾流深度 z 为距离海面的距离, 尾流中心区最深处为 9 m, 沿尾流深度方向分为 5 层; 沿尾流纵向分为 6 个区域, 尾流中心区为尾流 5 区, 尾流远区纯海水区为尾流 0 区, 每个区域由不同深度尾流层组成, 并对其进行模拟。

在建模和计算过程中采用 Trevorrow 等^[2]对 10 节航行的海洋考察船尾流的测量数据和美国国防研究委员会第 6 局 1946 年用声纳对 15 节航行的驱逐舰的尾流测量数据为依据^[11], $r_{\text{peak}} = 20 \mu\text{m}$, $r_{\text{min}} = 8 \mu\text{m}$, $r_{\text{max}} = 200 \mu\text{m}$, 尾流时间 $t = 3 \text{ min}$, $L = 9 \text{ m}$; 令 $n_0 = 6.0 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ ^[12]。

表 1 尾流气泡尺寸分布模型

Table 1 Bubble size distribution model in ship wake

Wake depth z/m	Bubble size distribution of ship wake $r/\mu\text{m}$					
	Region 5	Region 4	Region 3	Region 2	Region 1	Region 0
0~1	8~200	10.3~180	10.3~150	10.3~100	10.3~37.4	Sea
1~3	8~160	10~140	10~95	10~37	Sea	
3~5	8~120	9.5~90	9.5~36	Sea		
5~7	8~80	9~34	Sea			
7~9	8~30	Sea				
9~30	Sea					

3.2 模拟方法

蒙特卡罗方法(或称计算机随机模拟方法)是一种基于“随机数”的计算方法。蒙特卡罗方法已经在原子弹工程的科学研究中发挥了极其重要的作用,并正在日益广泛地应用于物理、医学、材料、经济的各个方面。激光在大气和海水中的传输特性研究中,蒙特卡罗模拟方法更能接近实际物理过程。

蒙特卡罗模拟光子运动的过程是在入射到水中气泡群的无限窄光子束的传输过程中,追踪每一个光子在水中的行迹,每遭遇一个气泡建立一个随机输出值,并把这次的输出值作为下一次遭遇的输入值,依次循环,直至最后输出状态为止^[13]。

根据米氏(Mie)散射理论和水中气泡的 Mie 散射特性^[14],计算过程中采用气泡群的 Mie 散射系数近似公式

$$b = NK\pi r^2, \quad (2)$$

式中 r 为气泡半径, N 为气泡密度, K 为单个气泡的等效散射因子,可取为 2。

对多层气泡群的蒙特卡罗模拟^[15]过程中,光子下一步的散射角分布采用修正的 Henyey-Greenstein 相位函数^[16]

$$p(\theta) = \begin{cases} \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}}, & (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \\ \frac{1-g^2}{(1+g^2+2g\cos\theta)^{3/2}}, & (\frac{\pi}{2} < \theta < \pi) \end{cases} \quad (3)$$

其中 θ 为散射角; $g = \langle \cos\theta \rangle$, 是散射角平均余弦,反映了气泡群散射的各向异性程度。修正的 Henyey-Greenstein 函数能够很好地模拟海水 Mie 散射的前向和后向双峰值散射特性。

计算后向散射过程中由于散射和吸收,必须考虑光子的权重,且初始化为 1。其到下一个散射点的散射步长、权重计算公式如下($\mu_t = \mu_a + \mu_s$, μ_a 和 μ_s 分别为吸收系数和散射系数):

$$s = -\ln \xi / \mu_t, \quad (4)$$

$$\Delta W = W \frac{\mu_a}{\mu_t} \quad (5)$$

对多层介质的蒙特卡罗模拟仿真,必须考虑层与层交界面处的反射和透射,来决定下一步散射的层面,再根据不同层的散射系数和吸收系统确定下一步的散射步长和权重^[17]。在光子跟踪过程中,采用“轮盘赌”的方法更为合理地终止光子,而不是强行终止。其物理思想是:给定一整数 m ,然后产生一个均匀分布的随机数 ξ ,如果 $\xi \leq 1/m$,光子的权重更新为 mW ,光子继续传输;如果 $\xi > 1/m$,光子的权重就为零,此时就结束对该光子的跟踪。显然,这种方法再给光子一次存活的机会,它将光子的 $1/m$ 的概率保存下来,使光子的终止更接近自然终止,因此模拟的结果精度更高。

4 舰船尾流后向散射模拟仿真结果及分析

模拟仿真过程中采用的参数分别为:激光波长 λ 为 532 nm,激光发射深度为 20 m 和 30 m,海水折射率为 1.34,海水非对称因子平均值 g 为 0.85。模拟过程中采用的光子数为 10^6 个,接收面半径为 1 m。

通过(1)式和建立的尾流模型,得到各个尾流区不同层总散射系数如表 2 所示。

表 2 尾流区各层气泡总散射系数

Table 2 Total scattering coefficient in ship wake regions

Wake depth z/m	Total scattering coefficient b/m^{-1}					
	Region 5	Region 4	Region 3	Region 2	Region 1	Region 0
0~1	0.2584	0.2509	0.2488	0.2415	0.1872	0
1~3	0.2562	0.2489	0.2413	0.1871	0	
3~5	0.2519	0.2414	0.1857	0		
5~7	0.2416	0.1805	0			
7~9	0.1662	0				
9~30	0					

浮游植物对后向散射的影响主要取决于色素叶绿素的含量,I类,IA类,IB类海水的散射系数和吸收系数及叶绿素含量如表 3 所示。

表 3 I, IA, IB类海水参数表

Table 3 I, IA, IB-type parameters of seawater

Water type	Scattering coefficient	Absorption coefficient	Chlorophyll C/(mg/m ³)
	B/m^{-1}	A/m^{-1}	
I	0.036218	0.05236	0.03
IA	0.136001	0.05184	0.1
IB	0.250001	0.051677	0.4

浮游植物中叶绿素含量对吸收系数的贡献值为

$$a_{chl}(\lambda) = 0.06A(\lambda)C^{0.65} + a_y(440)\exp[-0.014(\lambda - 440)], \quad (6)$$

其中

$$a_y(440) = 0.2[a_w(440) + 0.06A(440)C^{0.65}],$$

其中 C 是叶绿素含量 (mg/m^3), λ 是波长, $a_w(440)$ 为波长 440 nm 的激光在纯水中的吸收系数, 取值 0.0145 m^{-1} ; $A(\lambda)$ 的取值如表 4 所示。

浮游植物中叶绿素含量对散射系数的贡献值为

$$b_{chl}(\lambda) = 0.3 \frac{550}{\lambda} C^{0.62}. \quad (7)$$

假设激光发射深度距离海面 20 m, 考虑浮游植物的影响, 对 I 类 IB 类海水尾流中心区 5 区进行仿真, 如图 2 所示, 横轴 r 为距接收中心半径, S_r 和 T_r 分别表示后向散射和漫透射率。

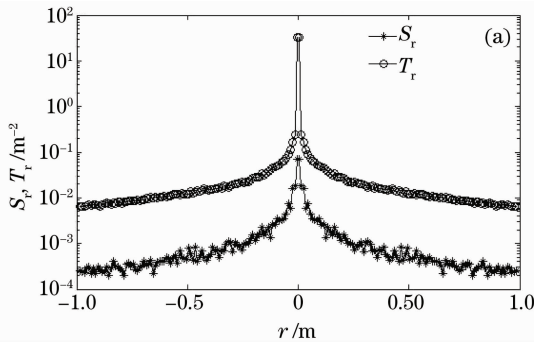


表 4 参数 $A(\lambda)$ 取值
Table 4 The value of parameters $A(\lambda)$

Wavelength λ/nm	$A(\lambda)$
440	1.000
450	0.944
460	0.917
470	0.870
480	0.798
490	0.750
500	0.668
510	0.618
520	0.528
530	0.474

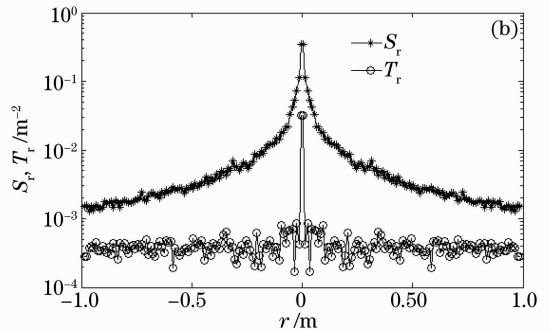


图 2 I 类(a)和 IB 类(b)海水尾流 5 区的后向散射率和漫透射率 S_r 和 T_r

Fig. 2 S_r , T_r Backward scattering ratio and transmittance of region 5 in ship wake in I-type(a) and IB-type(b) seawater

可见后向散射主要集中在距接收中心半径为 0.5 m 的区域内。I 类海水的透射出海面的光强于后向散射光强, IB 类海水的透射光强弱于后向散射光强, 水质越差后向散射越强, 透射出海面的光子越少。

对激光发射深度分别位于海面下 20 m 和 30 m

处, 考虑和不考虑浮游植物影响, 分别对每类海水 4 种不同情况的后向散射光强进行了模拟仿真, 如图 3(a) 为 I 类海水的归一化后向散射光强, 图 3(b) 为 IA 类海水的归一化后向散射光强, 图 3(c) 为 IB 类海水的归一化后向散射光强, 其横轴为划分的各个尾流区, 即由尾流远区 0 区到尾流中心区 5 区。

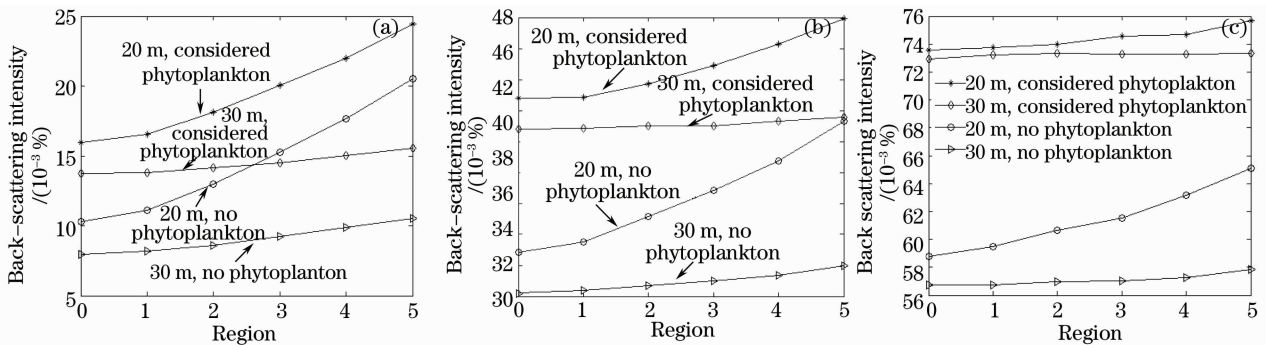


图 3 I 类(a), IA 类(b)和 IB 类(c)海水后向散射光强

Fig. 3 Back-scattering intensity of I-type(a), IA-type(b) and IB-type(c) seawater

由以上结果可知,在 I, IA, IB 类海水中,激光发射深度位于海面下 30 m 探测,考虑浮游植物影响比不考虑浮游植物影响的后向散射光强分别多 47%~72%, 30%~35%, 27%~29%; 激光发射深度位于海面下 20 m, 考虑浮游植物影响比不考虑浮游植物影响的后向散射光强分别多 19%~55%, 16%~30%, 16%~25%; 不考虑浮游植物影响, 20 m 处的后向散射光强比 30 m 处的后向散射光强分别多 29%~94%, 9%~29%, 4%~12%; 考虑浮游植物影响, 20 m 处的后向散射光强比 30 m 处的后向散射光强分别多 16%~57%, 5%~15%, 1%~3%。

在 I, IA, IB 类海水中,由尾流远区(0 区)到尾流中心区域 5 区,激光发射深度位于海面下 30 m, 不考虑浮游植物影响的后向散射光强增幅分别为 122%, 6%, 2%; 位于 20 m 不考虑浮游植物影响的后向散射光强增幅分别为 99%, 26%, 11%; 位于 30 m 考虑浮游植物影响的后向散射光强增幅分别为 13%, 2%, 0.6%; 位于 20 m 考虑浮游植物影响的后向散射光强增幅分别为 53%, 12%, 3%。

5 结 论

通过分析尾流气泡的分布规律和浮升运动特性,建立了一种尾流模型,利用蒙特卡罗方法对此模型进行模拟。由结果得知,当鱼雷由尾流远区进入尾流中心区,接收面接收到的后向散射光逐渐增强,到达尾流中心区底部时,接收到的后向散射光最强,后向散射光强主要集中在距接收中心半径为 0.5 m 的范围内。可利用尾流的激光后向散射做为鱼雷引信。

鱼雷由尾流远区进入尾流中心区的尾流后向散射探测中,海水中浮游植物的叶绿素含量和激光发射深度都影响后向散射光强和光强增幅,水质越好受这些因素的影响越大。激光发射深度距海面越近,后向散射光强和光强增幅越大。海水中浮游植物的叶绿素含量越高,后向散射光强越大,后向散射光强增幅越小。在研究舰船尾流激光后向散射的实验中必须考虑浮游植物的影响。

参 考 文 献

- 1 Cao Jing, Kang Ying, Jiang Xiaoqin *et al.*. An overview in the research of the optical properties of air bubbles in the wake [J]. *Ship Science and Technology*, 2005, **27**(6): 5~8
曹 静, 康 颖, 蒋小勤等. 气泡尾流光学特性研究的发展评述 [J]. *舰船科学技术*, 2005, **27**(6): 5~8
- 2 Mark. V. Trevorrow, S. Vagle, D. M. Farmer. Acoustical

- measurement of microbubbles within ship wakes[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1994, **95**(4): 1922~1930
- 3 Mark V. Trevorrow. Boundary scattering limitations to fish detection in shallow waters [J]. *Fisheries Research*, 1998, **35**(1~2): 127~135
- 4 D. Stramski. Gas microbubbles: an assessment of their significance to light scattering in quiescent seas[C]. *SPIE*, 1994, **2258**: 704~710
- 5 Zhang Jiansheng. *The Development and Measurement of Ship Wake Optical Specialty* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001. 1~7
张建新. 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. 1~7
- 6 Wang Huili, Zhang Yufen, Tian Ji. Simulation of wake bubble distribution characteristics based on image method[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(3): 47~50
王慧丽, 张毓芬, 田 稷等. 基于图像方法模拟尾流气泡分布特性的研究[J]. *光学与光电技术*, 2007, **5**(3): 47~50
- 7 Gu Jiannong, Zhang Zhihong, Zhang Xiaohu. Numerical simulation of bubble distribution characters in ship's far field wakes [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1504~1509
顾建农, 张志宏, 张晓辉. 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
- 8 Liu Huikai, Yang Li, Shen Liangwen *et al.*. The laser scattering properties of the ship wakes [J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(4): 265~267
刘慧开, 杨 立, 沈良文等. 舰船尾流的激光散射特性[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(4): 265~267
- 9 Shi Shengwei, Jiang Xingzhou, Wang Jiang'an. Back scattering characteristic of laser in bubble film [J]. *Torpedo Technology*, 2005, **13**(3): 11~14
石晟玮, 蒋兴舟, 王江安. 激光在气泡中的后向散射特性研究 [J]. *鱼雷技术*, 2005, **13**(3): 11~14
- 10 X. Zhang, M. Lewis, W. P. Bissett *et al.*. Optical influence of ship wakes[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(15): 3122~3132
- 11 E. W. Miner, O. M. Griffin. Near-surface bubble motions in sea water[R]. AD-A168 395, 1986, 3, 31
- 12 Su Liping, Ren Deming, Qu Yanchen *et al.*. Study of scattering properties by ship wakes [J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(1): 70~71
苏丽萍, 任德明, 曲彦臣等. 舰船尾流散射特性的研究[J]. *激光杂志*, 2007, **28**(1): 70~71
- 13 Cao Jing, Kang Ying, Wang Jiang'an. Monte-Carlo simulation of the optical properties of air bubble in water [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(5): 392~395
曹 静, 康 颖, 王江安. 水中气泡光学特性的蒙特卡罗模拟 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(5): 392~395
- 14 W. J. Lentz, Anthony A. Atchley, D. Felipe Gaitan. Mie scattering from a sonoluminescing air bubble in water[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(15): 2648~2654
- 15 Xia Min, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui *et al.*. Monte-Carlo simulation of backscattering signal from bubbles under water[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**: 350~354
- 16 Vladimir I. Haltrin. One-parameter two-term heney-greenstein phase function for light scattering in seawater [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6): 1022~1028
- 17 Wang Lihong, Steven L. Jacques, Zheng Liqiong. MCML-Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995, **47**: 131~146