

文章编号: 0253-2239(2008)10-2006-04

# 舰船远程尾流的散射光能量分布特性

孙春生<sup>1,2</sup> 张晓晖<sup>2</sup> 朱东华<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; <sup>2</sup> 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要** 为探索光尾流的探测和自导模式,研究了舰船远程尾流中气泡群的散射光能量分布特性。根据米氏理论推导了舰船尾流气泡群的光散射能量分布函数的计算公式,基于此公式对干净的尾流气泡群和覆盖着两种典型有机膜的脏尾流气泡群的能量分布函数进行了数值计算,得到了它们的能量分布特性。计算和分析结果表明,气泡群的前向光散射能量远大于后向散射,前向散射能量占总散射能量的 90% 以上;散射能量分布函数在小于 1° 的前向小角度散射角范围内迅速增加到 40% 以上,然后随散射角的增加缓慢增加;气泡表面附着的有机膜会较显著的增强气泡群的后向散射能量,但由于后向散射能量占总散射能量的比例很小,有机膜对前向散射能量的减小幅度不大。

**关键词** 物理光学; 能量分布; 米氏理论; 光散射; 舰船尾流; 气泡群

**中图分类号** O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082810.2006

## Energy Distribution Properties of Light Scattered by Far Ship Wakes

Sun Chunsheng<sup>1, 2</sup> Zhang Xiaohui<sup>2</sup> Zhu Donghua<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

<sup>2</sup> Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

**Abstract** The energy distribution properties of light scattered by bubbles in far ship wakes were studied to study the detection and homing mode of optical wakes. By means of Mie theory, the energy distribution function's expression of bubble populations was derived. Based on this derived formula, the energy distribution functions about clean bubbles and dirty bubbles coated with two mainly organic films were obtained by numerical calculation. The results show that the forward scattering energy of bubbles is far higher than that of backscattering, and occupies above 90% of all scattering energy; the scattering energy within forward 1° expands to beyond 40% rapidly, and then increases slowly with the scattering angle; the organic film coated to bubbles can enhance the bubbles' backscattering energy significantly, but has little influence on its forward scattering energy.

**Key words** physical optics; energy distribution; Mie theory; light scattering; ship wakes; bubble populations

## 1 引 言

由于螺旋桨的空化、波浪的破碎和空气的卷吸,在舰船尾部产生一条包含大量不同尺度气泡的气幕带,这就是舰船尾流<sup>[1,2]</sup>。在尾流涡旋的作用下,一些尺度较小的气泡不能在短时间里消溶、扩散,特别是半径为 20  $\mu\text{m}$  左右的气泡在舰船航迹中停留较长的时间,远至船后 100 km 还能观察到<sup>[3]</sup>。尾流区的声学、光学、热学及电磁学等特性与正常海水不同,通过对这些声学、光学、热学或电磁学等特征信号的探测和追踪,可以引导鱼雷沿着舰船的尾流运动并击中舰船<sup>[4,5]</sup>。研究尾流中气泡群的散射光能

量分布特性,对探索舰船尾流的激光探测技术及光尾流自导模式具有理论指导意义。

水中单个气泡的光散射特性已得到了广泛的研究<sup>[6~8]</sup>,Stramiki 最早用米氏理论研究了半径在 10~150  $\mu\text{m}$  范围内干净气泡群的光学特性<sup>[9]</sup>;Zhang 用米氏理论先后研究了海洋中干净气泡和脏气泡的光散射特性、尾流气泡群对空间遥感的光学影响等<sup>[2,10~11]</sup>;苏丽萍等人也利用米理论研究了舰船尾流的散射特性<sup>[12]</sup>。但这些文献对水中气泡群或舰船尾流气泡群的研究主要侧重于后向散射特性。本文从米氏理论出发,推导了气泡群的散射光

收稿日期: 2007-12-24; 收到修改稿日期: 2008-04-30

基金项目: 国家 973 计划(舰船光尾流感知基础研究)资助课题。

作者简介: 孙春生(1977—),男,博士研究生,主要从事激光探测方面的研究。E-mail: scs96581@163.com

导师简介: 张晓晖(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事激光探测和 underwater 光电成像等方面的研究。

E-mail: Xiaoyan6481@sina.com

能量分布函数的计算公式,针对远程尾流中气泡群的尺度分布,通过数值计算分析了干净气泡群和覆盖有不同成分、不同厚度有机膜的脏气泡群的散射光能量分布特性。

## 2 理论推导

假设激光经过含有气泡群的水体发生散射时,各个气泡的散射光互不相关。气泡群的散射光强由各气泡的散射光强叠加得到,从米氏散射理论<sup>[13,14]</sup>出发,可推导出能量分布函数的计算公式。

体散射函数  $\beta(\theta)$  定义为单位体积元上单位辐照度沿给定方向  $\theta$  发出的辐射强度,依据米氏散射理论,推导出气泡群的体散射函数的计算公式为

$$\beta(\theta) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\beta}(\theta, r) \pi r^2 n(r) dr = \frac{1}{k^2} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} F(\theta, r) n(r) dr, \quad (1)$$

其中  $Q_{\beta}(\theta, r) = F(\theta, r) / \pi k^2 r^2 = F(\theta, r) / \pi x^2$  表示尺度为  $r$  的气泡在  $\theta$  方向的散射效率 ( $\text{sr}^{-1}$ );  $n(r)$  为气泡的尺度分布函数 ( $\text{m}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ );  $F(\theta, r)$  为无量纲的散射强度函数,其具体表达式见文献<sup>[13]</sup>;  $r_{\max}$ 、 $r_{\min}$  分别为气泡尺度分布的最大和最小半径。

将气泡群的体散射函数作归一化处理,得到气泡群的归一化体散射函数即散射相函数,其计算公式为

$$p(\theta) = \frac{\beta(\theta)}{b} = \frac{1}{k^2 b} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} F(\theta, r) n(r) dr, \quad (2)$$

式中  $b$  为总的体散射系数 ( $\text{m}^{-1}$ ), 计算公式为

$$b = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{scat}}(r) \pi r^2 n(r) dr, \quad (3)$$

其中  $Q_{\text{scat}}(r)$  表示半径为  $r$  的气泡的散射效率<sup>[14]</sup>。当入射光为非偏振光时,散射相函数计算公式为

$$p(\theta) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (|S_1(r, \theta, m)|^2 + |S_2(r, \theta, m)|^2) f(r) dr / \left[ 2k^2 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{scat}}(r, m) \pi r^2 f(r) dr \right], \quad (4)$$

式中  $S_1$  和  $S_2$  分别为平行和垂直于入射光偏振方向的散射强度函数,是关于气泡半径  $r$ 、散射角  $\theta$  和气泡对外围介质的相对折射率  $m$  的函数<sup>[14]</sup>;  $f(r)$  为气泡尺度分布的概率密度;  $k = 2\pi n/\lambda$  表示波长为  $\lambda$  的光波在折射率为  $n$  的海水中的波数。则当入射光为线偏振光时,散射相函数计算公式为

$$p(\theta) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (|S_1|^2 \cos^2 \varphi + |S_2|^2 \sin^2 \varphi) f(r) dr / \left[ 2k^2 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{scat}}(r, m) \pi r^2 f(r) dr \right], \quad (5)$$

式中  $\varphi$  表示入射光电矢量方向与散射平面的夹角。 $p(\theta)$  满足  $\int p(\theta) d\omega = 1$ 。相函数  $p(\theta)$  表征的是粒子的散射光强度在整个  $4\pi$  立体角内的归一化分布情况,  $d\omega$  为立体角微分元,  $d\omega = \sin \theta d\theta d\phi$ , 对球形散射体, 散射强度的空间分布特性与方位角  $\phi$  无关, 因此将相函数简记为  $p(\theta)$ ,  $\int p(\theta) d\omega = 1$  表示  $p(\theta)$  对整个散射空间的积分为 1。

为了便于研究舰船尾流气泡群的散射光能量分布特性,参照概率论中概率分布函数的定义,引入气泡群散射能量分布函数  $F(\psi)$ :

$$F(\psi) = 2\pi \int \psi_0 \sin \theta p(\theta) d\theta = \pi \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \int_0^{\psi} [|S_1|^2 + |S_2|^2] \sin \theta f(r) d\theta dr / \left[ k^2 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{scat}} \pi r^2 f(r) dr \right], 0 \leq \psi \leq \pi \quad (6)$$

式中  $\psi$  表示散射角。 $F(\psi)$  为散射角小于  $\psi$  的散射光能量占气泡群所有散射光能量的比例,故有  $F(\pi) = 1$ 。在本文中约定,  $F(0 \leq \psi < \pi/2)$  表示前向散射光能量分布函数;  $F(\pi/2 \leq \psi < \pi)$  表示后向散射光能量分布函数。

## 3 舰船远程尾流中气泡群的尺度分布模型

舰船远程尾流中气泡群的尺度分布基本稳定<sup>[3]</sup>, 舰船远程尾流中气泡群的尺度分布函数  $n(r, z)$  随气

泡半径和尾流深度  $z$  的变化关系为<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} n(r, z) &= n_0 (r/r_{\text{peak}})^{-4.5} \cdot \exp(-z/L), & r > r_{\text{peak}} \\ n(r, z) &= n_0 \cdot \exp(-z/L), & r < r_{\text{peak}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $n_0$  为尾流表面的气泡谱密度,与尾流表面的气泡数密度满足线性关系; $r_{\text{peak}}$  为尾流气泡的最可几半径; $L$  为尾流的深度标尺。尺度分布函数  $n(r)$  与尺度分布概率密度  $f(r)$  满足关系式

$$n(r) = N_0 f(r), \quad (8)$$

式中  $N_0$  为气泡群的数密度。舰船尾流中半径小于  $10 \mu\text{m}$  的气泡会溶解于水,半径大于  $150 \mu\text{m}$  的气泡会在几个数十秒之后浮升到水面而破灭<sup>[1]</sup>,因此在远程尾流中只剩下尺度分布范围为  $10 \sim 150 \mu\text{m}$  的气泡。在本文的计算中,不考虑尾流深度的影响,取  $r_{\text{peak}} = 20 \mu\text{m}$ ,  $r_{\text{max}} = 150 \mu\text{m}$ ,  $r_{\text{min}} = 10 \mu\text{m}$ ,这与 Stramski 研究平静海水中干净气泡群的散射特性时所取的气泡尺度分布范围是一样的<sup>[9]</sup>。

气泡一旦在海水中形成,小于  $300 \mu\text{m}$  的气泡会在几秒中之内附上有机膜<sup>[10]</sup>,因此舰船尾流气泡群在大部分生命时间内是由覆盖着有机膜的脏气泡组成的。有机膜的厚度从  $0.001 \sim 1 \mu\text{m}$  不等,其成

分主要有蛋白质膜(相对折射率  $m = 1.2$ )和油脂膜(相对折射率  $m = 1.1$ )两种<sup>[10]</sup>。在本文的计算中,取气泡相对于海水的折射率为  $0.75$ ,有机膜相对于海水的折射率包括  $1.2$  和  $1.1$  两种典型情况。

## 4 数值计算结果及分析

为研究有机膜对远程尾流气泡群散射光能量分布特性的影响,利用(6)式以及文献[13,14]中的相关公式,采用上节中气泡群的尺度分布模型,取入射光为波长  $532 \text{ nm}$  的非偏振激光束,我们计算了干净的和覆盖着不同成分的有机膜的脏气泡群的能量分布函数,如图 1(a)、图 1(b)所示。图 1(a)为  $180^\circ$  全散射角范围内的 3 种气泡群(干净气泡,  $0.1 \mu\text{m}$  厚油脂膜的气泡和  $0.1 \mu\text{m}$  厚蛋白质膜的气泡)的能量分布函数。图 1(b)为前向  $10^\circ$  范围内的 3 种气泡群的能量分布函数;计算了干净的和覆盖着不同厚度蛋白质膜的尾流气泡群的能量分布函数,如图 1(c)、图 1(d)所示,图 1(c)为  $180^\circ$  全散射角范围内的 4 种气泡群(干净气泡,  $0.01 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \mu\text{m}$  和  $1 \mu\text{m}$  厚蛋白质膜气泡)的能量分布函数。图 1(d)为前向  $10^\circ$  范围内的 4 种气泡群的能量分布函数。

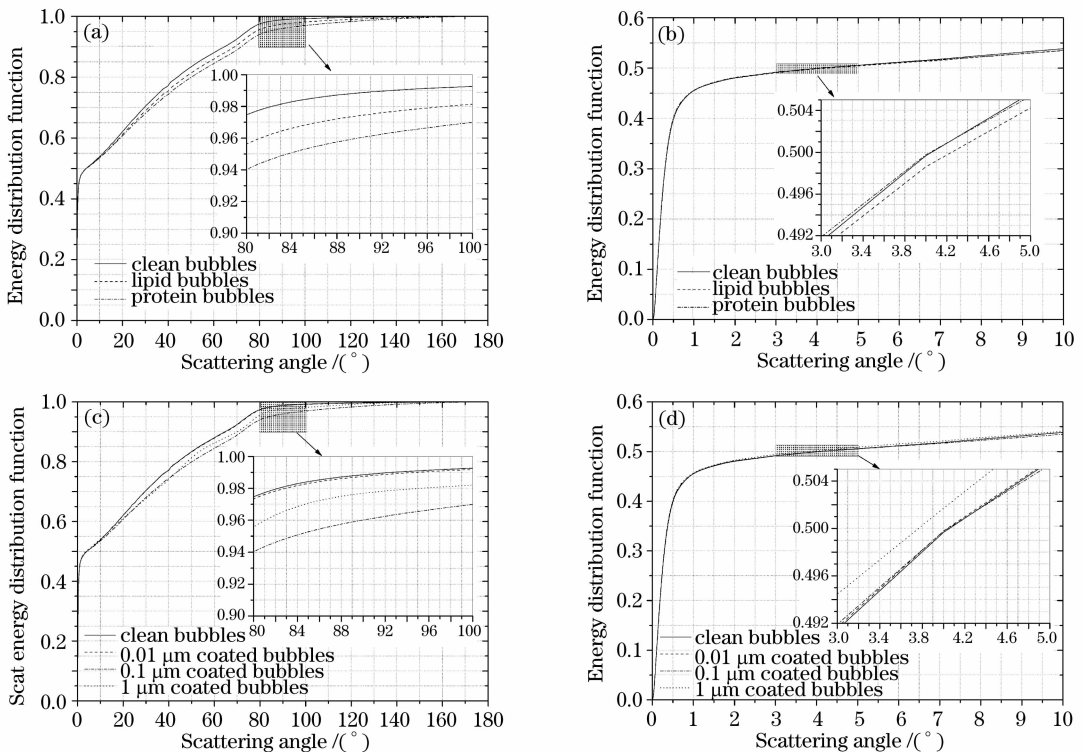


图 1 干净气泡群和覆盖着不同成分[(a),(b)],不同厚度[(c),(d)]有机膜的脏气泡群的能量分布函数

Fig. 1 Energy distribution functions of clean bubbles and dirty bubbles coated with organic films of different components (a), (b), and different thickness (c), (d)

尾流气泡群的散射光能量主要集中在前向半球散射空间内,散射能量分布函数在小于 $1^\circ$ 的前向小角度散射角范围内迅速增加到40%以上,然后随散射角的增加缓慢增加;前向 $4^\circ$ 范围内的散射能量约占总散射能量的一半;前向半球空间内的散射能量约占总散射能量的90%以上。

从散射角为 $90^\circ$ 处的能量分布函数的值可以看出,有机膜较显著地增强了气泡群的后向散射能量。图1(a)、图1(b)中干净气泡, $0.1\ \mu\text{m}$ 厚油脂膜的气泡和 $0.1\ \mu\text{m}$ 厚蛋白质膜的气泡 $90^\circ$ 处的能量分布函数分别为0.988、0.974和0.960,因此有机膜相对折射率越大的气泡群对后向散射的增强越显著。图1(c)、图1(d)中干净气泡, $0.01\ \mu\text{m}$ 、 $0.1\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \mu\text{m}$ 厚蛋白质膜气泡 $90^\circ$ 处的能量分布函数分别为0.988、0.987、0.960和0.977。因此不同厚度的有机膜对后向散射的影响不同,有机膜的厚度不大于 $0.1\ \mu\text{m}$ 时,膜越厚对后向散射的增强越显著。但当有机膜的厚度达到 $1\ \mu\text{m}$ 时,膜对后向散射的增强反而有所下降。

由于后向散射能量占总散射能量的比例很小,有机膜虽然能较明显地增强气泡群的后向散射能量,但对前向散射能量的减小幅度不大,尤其对前向 $10^\circ$ 范围内的散射能量分布影响很小。

本文的研究表明,探测尾流气泡的前向散射光比后向散射光容易。光尾流自导模式有前向导和后向导两种方式<sup>[5]</sup>,后向导是通过探测尾流的后向散射光实现自导的,前向导是通过探测光束经过尾流后气泡群的散射衰减实现自导的。文献<sup>[5]</sup>提出了一种实现后向光尾流自导的技术途径,因后向散射光光强很弱,很容易淹没在水体的后向散射光中,因此探测舰船尾流的灵敏度有限。文献<sup>[16]</sup>描述了一种典型的前向光尾流自导的装置结构,接收天线(或探测器)位于光束的传播方向上,因接收系统总有一定的视场角,探测器探测到的光能量包括透射光和接收视场角内的小角度前向散射光。由数值计算结果可知,当接收视场角较小(小于 $4^\circ$ )时,因尾流气泡群散射衰减损失的能量占气泡群总散射能量的50%以上。因此光束的衰减对尾流气泡群浓度的变化很敏感,且气泡群的散射衰减包含着气泡群的大小和浓度信息,通过探测光束通过尾流气泡群的衰减可进一步得到尾流气泡群的数密度。

## 5 结 论

气泡表面附着的有机膜有利于探测尾流气泡群

的后向散射光。但有机膜的存在往往意味着水质较差,对尾流的后向导来说,较差的水质同样会增强水体的后向散射,并且会增强水体对气泡群散射光的衰减。因此有机膜虽能增强气泡群的后向散射,但对尾流的后向导未必有利。而有机膜对气泡群的前向散射光的分布基本没有影响,水体对气泡群的前向散射光的影响可以通过背景相消的方法减除。

从尾流激光探测的灵敏度和实现的难易程度方面衡量,前向光尾流自导优于后向光尾流自导。

## 参 考 文 献

- 1 Trevor M V, Vage S, Farmer D M. Acoustical measurements of microbubbles within ship wakes[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1994, **95**(4): 1922~1930
- 2 Zhang X, Lewis M, Bissett W P *et al.*. Optical influence of ship wakes[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(15): 3122~3132
- 3 Peltzer R D, Garrett W D, Smith P M. A remote sensing study of surface ship wake[J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1987, **8**: 689~704
- 4 Zhang Xiaohui, Ge Weilong, Zhu Donghua. Study on light characteristics of ship wake for self guided torpedo [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1355  
张晓晖,葛卫龙,朱东华.鱼雷激光尾流自导方法的研究[J].中国激光,2004, **31**(11): 1355
- 5 Zhang Xiaohui, Lei Xuanhua, Rao Jionghui *et al.*. Study of homing means for laser-wake-homing torpedoes [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(5): 494~500  
张晓晖,雷选华,饶炯辉等.舰船尾流激光制导方法的研究[J].激光技术,2005, **29**(5): 494~500
- 6 Davis G E. Scattering of light by an air bubble in water[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1955, **45**(7): 572~581
- 7 Maston P L. Critical angle scattering by a bubble: physical-optics approximation and observations[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(9): 1205~1211
- 8 Li Wei, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui *et al.*. Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 647~651  
李微,杨克成,张晓晖等.水中气泡上的体散射函数的模拟与计算[J].光学学报,2006, **26**(5): 647~651
- 9 Stramski D. Gas microbubbles: an assessment of their significance to light scattering in quiescent seas[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2258**: 704~710
- 10 Zhang X, Lewis M, Johnson B. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6525~6536
- 11 Zhang X, Lewis M, Lee M *et al.*. Volume scattering function of natural bubble populations [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2002, **47**(5): 1273~1282
- 12 Su Liping, Ren Deming, Qu Yanchen *et al.*. Study of scattering properties by ship wakes[J]. *Laser J.*, 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 van de Hulst H C. *Light Scattering by Small Particles* [M]. 1957
- 14 Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. New York: Wiley, 1983
- 15 Trevor M V. Boundary scattering limitation of fish detection in shallow waters[J]. *Fisheries Research*, 1998, **35**: 127~135
- 16 Ji Bangjie, Zhou Deshan, Zhang Jiansheng. Torpedo homed by light beam attenuation effect in ship wakes [J]. *Torpedo Technology*, 2000, **8**(3): 40~43  
冀邦杰,周德善,张建生.基于舰船尾流光效应的制导鱼雷[J].鱼雷技术,2000, **8**(3): 40~43