

# 尾流气泡群的激光多普勒检测方法

王 贇 刘继芳 鲁振中 孙艳玲

(西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 提出了一种基于气泡群后向散射光多普勒频移谱特性的舰船尾流检测方法。利用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法对尾流区运动气泡群后向散射激光多普勒频移谱进行了理论模拟,分析了气泡数密度和速率分布对后向散射光信号多普勒频移谱特性的影响。在此基础上,利用差动型激光多普勒探测方法,实验研究了模拟尾流气泡群后向散射光多普勒频移谱特性,实验结果与理论模拟基本符合。研究表明,随着尾流中气泡数密度和速率分布范围的增大,后向散射光信号的多普勒频移谱的幅度、截止频移也随之增大。这证明了激光后向散射多普勒频移谱特性分析法可作为一种有效的尾流检测方法。

**关键词** 海洋光学;尾流气泡检测;激光多普勒技术;后向散射;频移谱

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0813002

## Laser Doppler Method for the Detection of Wake Bubbles

Wang Yun Liu Jifang Lu Zhenzhong Sun Yanling

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** A method for ship wake detection is proposed, which is based on the characteristics of the laser Doppler shift spectrum of the backscattering light signal. A simulation of the Doppler shift spectrum because of the moving bubbles in wake is performed by Monte Carlo method. The influence of the bubble population and the velocity distribution on the laser Doppler shift spectrum is analyzed. Using the differential Doppler method, the influence of imitated wake on the Doppler shift spectrum is studied experimentally. Experimental results agree with the theoretical analysis basically. The results show that the amplitude and the cutoff frequency of the shift spectrum will increase with the increasing of bubble population and range of velocity distribution. It indicates the effectiveness of the detection method.

**Key words** oceanic optics; detection of wake bubbles; laser Doppler technique; backscattering; shift spectrum

**OCIS codes** 010.4450; 010.7340; 280.3340; 290.1350

## 1 引 言

舰船在水中航行时,由于螺旋桨的旋转空化、海面波浪的破碎以及吃水线附近空气的卷入,会在船尾形成含有大量气泡和湍流的尾流<sup>[1]</sup>。光波在尾流区域内外传播特性的不同,为尾流的光学检测提供了依据。尾流光学检测方法研究的重点是尾流的后向散射特性<sup>[2-3]</sup>。现有相关报道主要是针对激光在尾流区域内外传输时,后向散射信号强度在时间域<sup>[4-6]</sup>、空间域<sup>[7-8]</sup>以及偏振特性<sup>[9-10]</sup>的变化判断尾流的存在与否以及尾流的强弱。然而,水体自身

对光波的散射和吸收很强,这使得尾流后向散射光强度检测的信噪比很低<sup>[4]</sup>。此外,现有文献鲜有关于尾流气泡群散射光信号频域特性方面的研究。而尾流中的气泡由于尾流中湍流的作用不断运动,并且随着时间的推移,气泡群整体的速度分布和气泡数密度也发生变化<sup>[11]</sup>。根据激光多普勒效应<sup>[12]</sup>,运动气泡与激光相互作用会造成散射光的频移,而频移的大小与气泡的运动速率成正比。

鉴于此,本文提出了基于气泡群后向散射光多普勒频移谱特性的尾流光学检测方法,并进行了相

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(61378079, 11304240)

作者简介: 王 贇(1990—),男,硕士研究生,主要从事水下光学信息处理方面的研究。E-mail: 3776921wy@sina.com

导师简介: 刘继芳(1957—),男,博士,教授,主要从事光电子技术应用方面的研究。E-mail: jfliu@xidian.edu.cn

关的理论和实验研究。建立了基于蒙特卡罗方法的气泡群后向散射光多普勒频移的理论模型,分析了气泡数密度和速率分布对频移谱的影响。在此基础上搭建了基于气泡群激光多普勒频谱特性分析的舰船尾流光学检测实验系统,实验研究了不同尾流气泡条件下的后向散射光多普勒频移谱特性。

## 2 理论分析

### 2.1 差动多普勒探测原理

激光多普勒测速系统普遍使用光外差技术进行光频移的检测<sup>[13]</sup>,可以很好地抑制水体自身的散射信号,而它所具有的高光增益特性又能进一步提高检测的信噪比。在已有的多普勒外差检测模式中,差动模式<sup>[14]</sup>因其多普勒频移大小与散射光的方向无关的优点而被广泛使用,本文采用差动模式。差动多普勒探测方式的基本原理如图1所示。激光器出射的光束经分光系统分成同频率、等强度的两束平行光,其光斑直径均为 $D$ ,两光束间距为 $d$ 。两光束经焦距为 $f$ 的透镜聚焦后以不同方向入射到散射粒子上,由于散射粒子的运动速度 $\mathbf{v}$ 与两束光的波矢 $\mathbf{k}_1$ 、 $\mathbf{k}_2$ 相对方向不同,两束光在交汇点发出的散射光频率 $f_1$ 、 $f_2$ 也因此不同,它们分别为<sup>[15]</sup>

$$f_1 = f_0 \left[ 1 - \frac{\mathbf{v}(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_s)}{c} \right], \quad (1)$$

$$f_2 = f_0 \left[ 1 - \frac{\mathbf{v}(\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_s)}{c} \right], \quad (2)$$

式中 $f_0$ 是激光器的辐射频率, $c$ 为光速, $\mathbf{k}_s$ 是散射粒子运动方向的单位矢量。

频率分别为 $f_1$ 、 $f_2$ 的散射光在光电探测器上干涉得到中频信号的频率,即多普勒频移为

$$f_d = |f_1 - f_2| = \frac{f_0}{c} |\mathbf{v}(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)| = \frac{2|\mathbf{v}_y|}{\lambda_0} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{v}_y$ 是散射粒子在两光束波矢量差 $(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)$ 方

向(即图1中 $y$ 轴方向)的分量, $\lambda_0$ 是入射光在真空中的波长, $\alpha$ 是两光束间的夹角。

### 2.2 单个粒子散射光信号的多普勒频移谱

激光是以高斯光强分布在空间传播的;两束偏振方向相同、功率和频率相等的激光束相交时在相交区域(称为控制体)内形成一定的光强分布。当一个粒子以一定速度穿过控制体发生散射时,光电探测器中产生的光电流可表示为<sup>[16]</sup>

$$i(t) = i_a \exp \left\{ - \left[ \frac{2\sqrt{2}(t-t_0)}{\tau} \right]^2 \right\} + i_a \exp \left\{ - \left[ \frac{2\sqrt{2}(t-t_0)}{\tau} \right]^2 \right\} \cos [2\pi f_d(t-t_0)], \quad (4)$$

式中 $\tau = N_t/f_d$ 是粒子穿过控制体的有限渡越时间; $N_t = 1.27 d/D$ 是控制体中的干涉条纹数; $t_0$ 是粒子到达控制体的时刻, $f_d$ 是反映粒子速率的多普勒频移,与速率大小成正比; $i_a$ 和 $i_d$ 是经干涉调制产生的与入射光强度成正比的光电流信号幅值。对(4)式作傅里叶变换可以得到信号在频域的表达式(即单个粒子散射光信号的多普勒频移谱):

$$i(f) = \left( \frac{i_d \tau}{2} \right) \left( \frac{\pi}{2} \right)^{1/2} \exp \left[ - \left( \frac{\pi f \tau}{2\sqrt{2}} \right)^2 \right] + \left( \frac{i_a \tau}{4} \right) \left( \frac{\pi}{4} \right)^{1/2} \left\{ \exp \left\{ - \left[ \frac{\pi(f+f_d)\tau}{2\sqrt{2}} \right]^2 \right\} + \exp \left\{ - \left[ \frac{\pi(f-f_d)\tau}{2\sqrt{2}} \right]^2 \right\} \right\}. \quad (5)$$

### 2.3 基于蒙特卡罗方法的气泡群散射光信号多普勒频移谱计算

在2.2节中单个粒子散射光信号的多普勒频移谱的基础上,为了建立气泡群散射光信号多普勒频移谱的蒙特卡罗模型,作如下假设:

1) 由于不同气泡散射光之间的干涉效率很低,因此忽略不同气泡散射光之间的干涉效应,即光电探测器接收的信号是控制体内所有单个气泡沿干涉条纹方向(图1中 $y$ 方向)速度分量产生的多普勒信号的线性叠加,即

$$I_M(f) = \sum_j^M i_j(f). \quad (6)$$

2) 对于单个散射气泡,光电流信号幅值与入射光的强度成正比,而两者的比值 $i_a/i_d$ 则与散射特性、入射光的偏振特性、光接收器参数及其位置等有关。而在差动多普勒探测光路系统中,控制体内各气泡的上述参数基本一致,故认为各散射气泡的 $i_a/i_d=1$ 。

将控制体内的气泡数记为 $M$ ,其在干涉条纹方

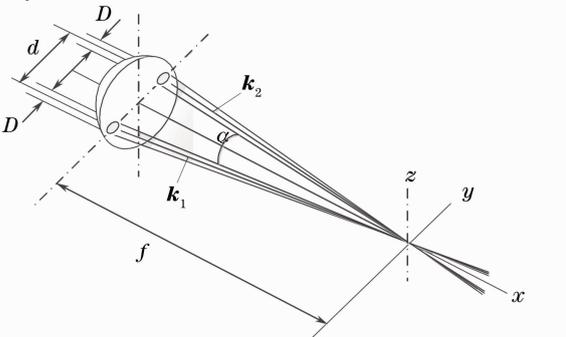


图1 差动多普勒探测光路

Fig.1 Optical path of differential Doppler detection

向的速率取为均值为 0 的高斯分布,则由(3)式知,相应的多普勒频移  $f_d$  也服从均值为 0 的高斯分布,

设其分布为  $N\sim(0, \sigma^2)$ ,则由(6)式,气泡群散射光信号多普勒频移谱为

$$I_M(f) = \sum_j^M i_j(f) = \sum_j^M \left(\frac{i_{d,j}\tau}{2}\right) \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \exp\left[-\left(\frac{\pi f \tau_j}{2\sqrt{2}}\right)^2\right] + \left(\frac{i_{a,j}\tau}{4}\right) \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/2} \left\{ \exp\left\{-\left[\frac{\pi(f+f_{d,j})\tau_j}{2\sqrt{2}}\right]^2\right\} + \exp\left\{-\left[\frac{\pi(f-f_{d,j})\tau_j}{2\sqrt{2}}\right]^2\right\} \right\}. \quad (7)$$

由于信号频谱的幅值范围大,频谱仪以  $H_M(f) = 10 \lg I_M(f)$  的形式显示成分贝毫值。

考虑到光电探测器噪声电流的影响,在此,设定了适合的阈值(对应噪声电流分贝毫值),将小于阈值的信号幅值取为阈值,称幅值首次下降到阈值所对应的频率值为截止频移。最后根据函数  $H_M(f)$  可以获得散射光信号的频移谱。

## 2.4 气泡群特征参数对后向散射光信号的多普勒频移谱的影响

### 2.4.1 气泡数密度对后向散射光多普勒频移谱的影响

气泡数密度对气泡群后向散射多普勒频移谱的影响如图 2 所示。其中,干涉条纹数  $N_f=8$ ,取电流幅值  $i_a=i_d=1 \text{ mA}$ ,速率分布服从  $N\sim(0, 5^2)$ ,阈值为  $-10 \text{ dBm}$ ,控制体内气泡数  $M$  分别为 300、800、1300。

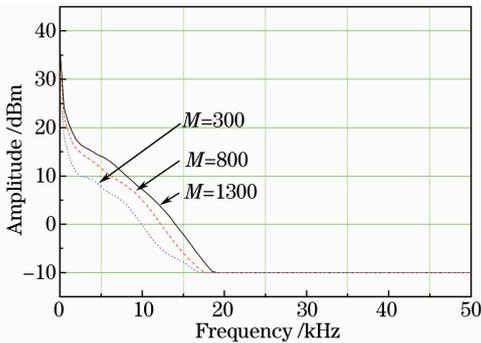


图 2 气泡数密度对散射光信号频移谱的影响  
Fig.2 Influence of bubble population on shift spectrum of scattering signal

由图 2 可知,在气泡群速率分布相同的条件下,随着气泡数密度的增大,后向散射信号的各频移谱分量的幅值有所增大,且对应的截止频移也增大。当控制体内粒子数  $M$  由 300 增大到 1300 时,尾流气泡群的后向散射信号频移谱的截止频移由  $17.0 \text{ kHz}$  增大到  $19.0 \text{ kHz}$ 。

### 2.4.2 气泡速率分布对散射光信号频移谱的影响

气泡速率分布对气泡群后向散射信号多普勒频移谱的影响如图 3 所示。其中,干涉条纹数  $N_f=8$ ,取电流幅值  $i_a=i_d=1 \text{ mA}$ ,控制体内粒子数  $M$  为 1000,阈值为  $-10 \text{ dBm}$ ,气泡速率分布标准差  $\sigma$  分别为 5、10、15。

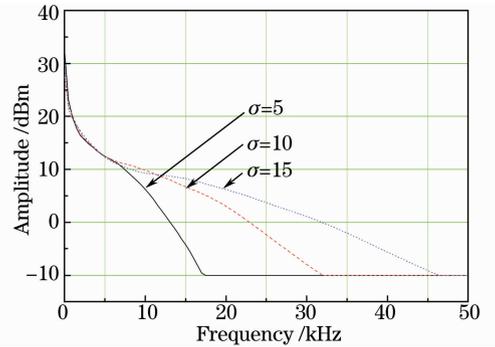


图 3 速率分布对后向散射光信号频移谱的影响  
Fig.3 Influence of velocity distribution on shift spectrum of backscattering signal

由图 3 可知,在气泡数密度一定的条件下,随着速率分布标准差  $\sigma$  的增大,即气泡速率分布范围的增大,后向散射信号频移谱的截止频移逐渐增大。当速率分布标准差  $\sigma$  由 5 增大到 15 时,尾流气泡群的后向散射信号频移谱的截止频移由  $17.5 \text{ kHz}$  增大到  $46.3 \text{ kHz}$ 。

### 2.4.3 气泡数密度和速率分布同时变化的情况

随着时间的推移,尾流中气泡数密度和速率分布范围都会逐渐减小。为了模拟气泡群特征参数随时间的演化,取电流幅值  $i_a=i_d=1 \text{ mA}$ ,干涉条纹数  $N_f=8$ ,阈值为  $-10 \text{ dBm}$ ,对粒子数  $M$  依次等间隔取为 500、1000、1500,相应速率分布的标准差  $\sigma$  等间隔取为 3、4、5 时的散射信号频移谱进行模拟,其结果如图 4 所示。

由图 4 可知,随着气泡数密度和速率分布范围的增大,散射光信号各频移分量的幅值会随之增大,截止频移也增大(依次为  $9.9$ 、 $14.6$ 、 $20.4 \text{ kHz}$ )。换言之,随着尾流存在时间的延长,尾流气泡群的气泡数密度和速率分布范围会随之减小,散射光信号各频移分量的幅值会随之减小,截止频移也减小。

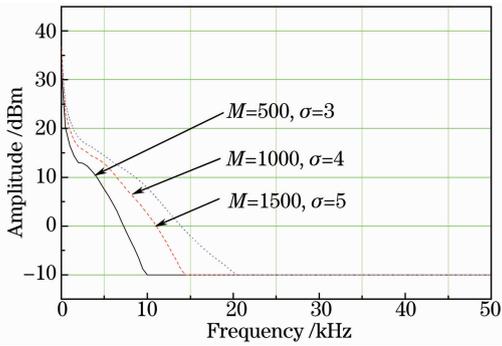


图 4 气泡数密度和速率分布同时变化时的  
散射光信号频移谱

Fig. 4 Backscattering signal shift spectra of different  
bubble populations and velocity distributions

理论结果表明:气泡群后向散射光信号多普勒频移谱与气泡数密度和速率分布范围密切相关;随着气泡数密度和速率分布范围的增大,频移谱的幅度增大,截止频移亦增大。这表明后向散射信号频移谱的谱线特征可以作为尾流识别的判据。在后续的实验研究中,可以通过调节施加于尾流模拟装置

的气压,产生气泡数密度和速率分布范围同时变化的不同模拟尾流气泡群,来验证图 4 的理论结果。

### 3 后向散射信号多普勒频移谱的实验研究

#### 3.1 实验装置

尾流气泡群后向散射光多普勒频移谱检测的实验系统如图 5 所示。

实验中采用波长为 532 nm 的连续激光,由分光棱镜(SP)分成等强度的两束平行光,经焦距  $f=380$  mm 的透镜 L1 聚焦后入射到模拟尾流区域形成干涉场(即控制体)。控制体内气泡的后向散射光通过焦距  $f=105$  mm 的透镜 L2 收集后由光电倍增管(PMT)接收,最后输入到泰克公司的 RSA3303A 实时频谱分析仪中进行频谱分析。实验中模拟尾流气泡是与气泵相连的微孔陶瓷阵列产生的;通过调节气泵气压控制气泡的数密度以及气泡的速率分布。

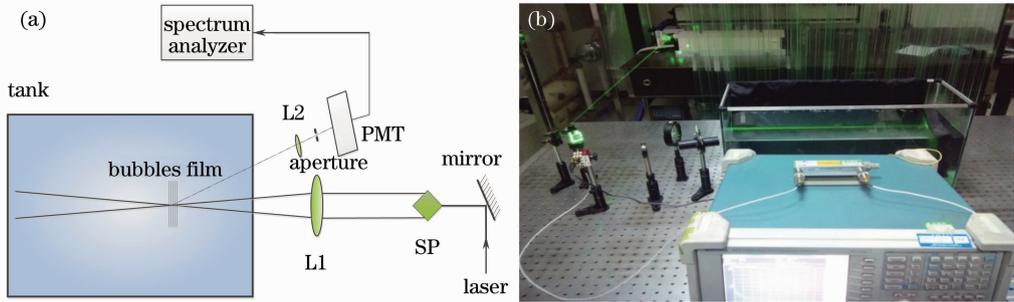


图 5 (a)实验装置示意图和(b)实物图

Fig. 5 (a) Schematic diagram and (b) physical figure of experimental setup

#### 3.2 实验结果及分析

##### 3.2.1 模拟尾流产生前后的后向散射信号多普勒频移谱比较

由频谱分析仪获得的无模拟气泡和存在模拟气泡时的后向散射光信号频移谱如图 6 所示。其中,

图 6(b)是加到微孔陶瓷阵列的气压为 0.010 MPa 时的频移谱,截止频移约为 12 kHz。由图 6 可知,无尾流气泡存在的情况下后向散射信号几乎没有多普勒频移,而在模拟尾流存在的条件下后向散射信号会产生明显的多普勒频移。

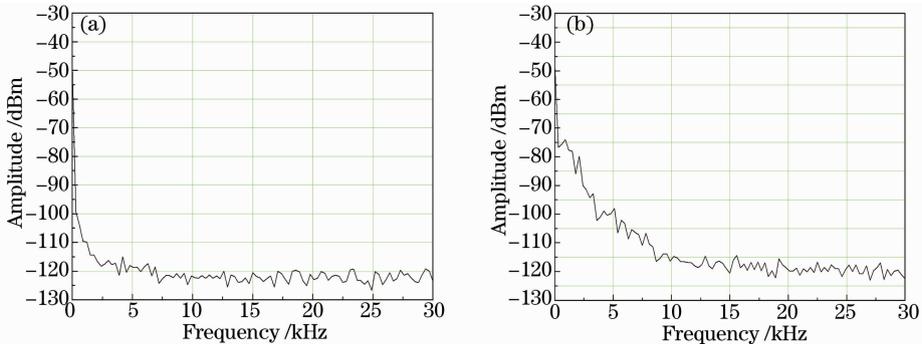


图 6 后向散射光信号频移谱。(a) 无模拟气泡; (b) 存在模拟气泡

Fig. 6 Shift spectra of backscattering signal. (a) Without bubbles; (b) with bubbles

### 3.2.2 不同尾流气泡条件下多普勒频移谱的比较

在保持系统其他参数不变的前提下,改变施加于微孔陶瓷阵列的气压(分别为 0.014、0.011、0.008 MPa),获得的频移谱如图 7 所示。

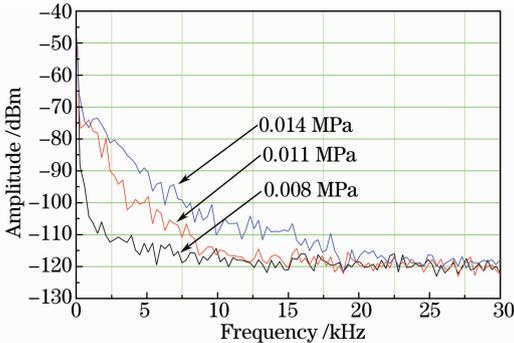


图 7 气压对模拟尾流散射光信号多普勒频移谱的影响

Fig. 7 Influence of pressure on shift spectrum of wake bubbles

由图 7 所示的尾流频移谱,可以得到三种不同气压对应模拟尾流下的截止频移(频谱仪的阈值为  $-120$  dBm),再根据(3)式计算得到截止频移所对应的速率范围(实验中两束光的夹角为  $6.52^\circ$ ),所得数据如表 1 所示。

表 1 不同气压条件下的数据

Table 1 Data of different pressures

Pump pressure /MPa	Cut-off frequency /kHz	Speed range /(mm/s)
0.008	10.77	50.27
0.011	15.00	70.01
0.014	18.75	87.51

由图 7 可知,随着加到微孔陶瓷阵列气压的增大,尾流气泡群的气泡数密度和速率分布范围也随之增大,散射光信号各频移分量的幅值会随之增大,截止频移值也逐渐增大,而这与图 4 给出的理论结果相一致。

对于实际的舰船尾流,随着时间的推移,一定水域内气泡群的气泡数密度和速率分布会发生变化,使得后向散射光信号的频移谱特性发生变化;并且距离舰船越近,气泡数密度和速率分布越大,频移谱的幅度与截止频移也随之增大。因此,可以利用激光多普勒测量方法检测后向散射光信号的频移谱,并根据频移谱的幅度、截止频移的变化对舰船尾流及其位置进行识别。

## 4 结 论

本文模拟分析并实验研究了尾流中运动气泡群后向散射光信号的多普勒频移谱特性,并根据研究

结果提出了基于频移谱的谱线特征的光学尾流检测方法。研究表明:1) 当水中存在尾流气泡时,散射光信号有明显的多普勒频移;随着气泡数密度和气泡运动速率范围的增大,后向散射光信号多普勒频移谱的各频移分量幅度增大,截止频移增大;2) 利用差动激光多普勒探测方法,检测尾流气泡群后向散射光信号多普勒频移谱,根据频移谱的幅度和截止频移等谱线特征可以对舰船尾流气泡群进行识别并研究其时间演化特性。

## 参 考 文 献

- 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. 1-2.
- 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. 1-2.
- Zhao Weijiang, Su Liping, Ren Deming, *et al.*. Measurement on the angular scattering properties of wake bubbles[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(5): 744-747.
- 赵卫疆, 苏丽萍, 任德明, 等. 尾流气泡激光散射的测量[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 744-747.
- Zhang Xiaohui, Lei Xuanhua, Rao Jionghui, *et al.*. Study of homing means for laser-wake-homing torpedoes [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 494-496.
- 张晓晖, 雷选华, 饶炯辉, 等. 舰船尾流激光制导方法研究[J]. 激光技术, 2005, 29(5): 494-496.
- Yi Yuanyuan, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui, *et al.*. Laser backscattering characteristics of bubbles in water[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(6): 38-41.
- 易媛媛, 杨克成, 张晓晖, 等. 激光在水中气泡微粒的后向散射特性[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(6): 38-41.
- 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.
- Han Biao, Liu Jifang, Liu Kunlun, *et al.*. Study of backward optical detection method for ship wake bubbles[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101001.
- 韩彪, 刘继芳, 刘昆仑, 等. 舰船尾流后向光学检测方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101001.
- Deng Zhongfang, Liu Jifang, Li Zengrong. Study of air bubbles in water based on spatial spectrum intensity of backward scattered light[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(8): 1216-1219.
- 邓仲芳, 刘继芳, 李增荣. 利用后向散射光空间谱强度分布探测尾流气泡的实验研究[J]. 光子学报, 2006, 35(8): 1216-1219.
- Liu Jifang, Liu Haiyang, Ji Bangjie. A study of light scattering spectrum intensity and distribution of bubbles in water [J]. Torpedo Technology, 2003, 11(2): 17-19.
- 刘继芳, 刘海洋, 冀邦杰. 气泡光散射谱强度分布研究[J]. 鱼雷技术, 2003, 11(2): 17-19.
- 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 Physica Sinica, 2013, 62(6): 1-11.
- 梁善勇, 王江安, 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): 1-11.
- Tian Jing, Chen Hang, Xu Wangyang. Some useful results for detecting ship wake obtained from depolarization of light scattered

- from micro-bubbles[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(1): 129-133.
- 田 晶, 陈 航, 许望洋. 舰船尾流微气泡光偏振特性分析[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 129-133.
- 11 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.
- 12 B M Watrasiewicz, M J Rudd. Laser Doppler Measurements [M]. Xu Fangtong, *et al.* Transl. Beijing: Water Conservancy Press, 1980. 20-24.
- B M 瓦切西威克兹, M J 鲁德. 激光多普勒测量[M]. 徐枋同, 等译. 北京: 水利出版社, 1980. 20-24.
- 13 Zhu Donghua, Zhang Xiaohui. Ship wake detection based on laser Doppler effect[J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 298-300.
- 朱东华, 张晓晖. 基于激光多普勒效应的舰船尾流探测研究[J]. 激光技术, 2006, 30(3): 298-300.
- 14 L E Drain. The Laser Doppler Technique[M]. New York: John Wiley, 1980. 105-130.
- 15 Gu Weizhou. Measurement of the liquid current velocity based on the laser Doppler frequency shift technique[J]. Laser Journal, 2003, 24(3): 81-82.
- 顾伟舟. 基于激光多普勒频移技术测量液流速度[J]. 激光杂志, 2003, 24(3): 81-82.
- 16 Shen Xiong. The Laser Doppler Velocimetry and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 37-39.
- 沈 熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 37-39.

栏目编辑: 王晓球