

doi: 10.3788/gzxb20144301.0101004

基于 CMOS 探测模拟气泡幕前向光散射动态特性

张建生, 孙建鹏, 陈焱, 李旭东, 刘华成

(西安工业大学 理学院, 西安 710021)

摘 要:提出了基于 CMOS 图像传感器探测前向激光近轴的散射横面角和散射纵面角的概念. 使用 CMOS 采集了模拟气泡幕前向散射光动态图像序列, 通过计算每帧灰度图像行和列像元均值将其可以用一个列向量和行向量表示, 从而图像序列可以用一个图像序列矩阵描述. 实验模拟了压强 0.005 MPa 和 0.01 MPa 产生的气泡幕, 通过计算两种压强产生的气泡幕前向光散射图像序列的横向灰度均值和纵向灰度均值, 定性分析了 100 帧图像序列的灰度分布和演化特点, 并定量分析了 5 帧连续图像的动态变化范围和相关性. 分析 CMOS 探测气泡幕前向散射光动态图像序列实验结果表明, 随着压强增大, 产生气泡幕尺度增大、密度增加、上升速度加快, 导致图像序列横向和纵向散射光灰度变化范围增加, 并且相邻图像帧之间变化波动幅度增大.

关键词:尾流; 气泡幕; 前向光散射; CMOS; 像元

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)01-0101004-5

Dynamic Characteristics of Forward Light Scattering by Simulated Bubble Film based on CMOS

ZHANG Jian-sheng, SUN Jian-peng, CHEN Yan, LI Xu-dong, LIU Hua-cheng

(School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The concept of Vertical-plane and Horizontal-plane scattering angle of forward laser paraxial were proposed based on CMOS. The dynamic image sequence of light scattering by simulated bubble film, which was captured by CMOS, can be expressed by an image sequence matrix whose line vector and column vector represented one frame image through computing gray average of column pixel and line pixel of the frame image. The gray distribution and evolution characteristics of 100 frame image sequence of forward light scattering by bubble film generated under presser 0.005 and 0.01 MPa, was analyzed qualitatively through calculating the mean horizontal and vertical gray, as the dynamic range and correlation of 5 frame image was analyzed quantitatively. Through analyzed the dynamic image scattered by bubble film with the increasing pressure on CMOS, the range and amplitude of horizontal and vertical gray of forward light scattering image sequence increased as the increasing scale, number density and rising speed of bubble film.

Key words: Ship wake; Bubble film; Forward light scattering; CMOS; Pixel

OCIS Codes: 010.0280; 010.4458; 010.1350

0 引言

舰船、潜艇航行产生大量的气泡, 称为尾流气泡^[1]. 气泡的存在使得尾流区的声学、光学和磁学等

物理特性与周围海水介质有所不同^[2], 而尾流气泡的光学散射特性为鱼雷光尾流制导和水中运动目标探测识别跟踪提供了一个新的思路, 因此尾流气泡光散射已成为国防军事研究的一个热点^[3]. 研究气泡光散射

基金项目: 武器装备预研基金(No. 51448030101ZK1801)和陕西省教育厅专项科研计划项目(No. 2010JK585)资助

第一作者: 张建生(1966—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为气泡尾流光学检测、水下信息光学等. Email: zhangjsh@xatu.edu.cn

通讯作者: 孙建鹏(1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水下信息光学. Email: alquaeda@163.com

收稿日期: 2013-05-02; 录用日期: 2013-06-28

<http://www.photon.ac.cn>

特性的实验,一种方法是使用照度计探头测量散射光强度,但由于其尺寸不可调整、探测方位的准确度和测量区域的局限性,难以探测大量不同尺度分布的气泡幕光散射特性.随着图像传感器应用技术的发展,图像传感器(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)已应用许多光电探测领域,相对传统光电探测探头,具有高分辨率、快速响应、高准确度等优势,随着处理器的发展 CMOS 已成为具有相当优势的研究光散射技术^[4-5].

Mahshid 使用流体可视化方法研究了气体和液体两相流体中微通道中气泡动态分析实验技术^[6]; Stanley 通过 Matlab 和 Phantom 相机控制软件,用高速摄影技术研究了气泡波动运动对于气泡尺寸、密度和速度的影响^[7], Thomaneck 设计了自动气泡图像采集、存储处理系统,在一千多米的海水中实地研究了一定通量气体产生气泡的尺寸、上升速度^[8]; Pierre 使用平面诱导激光荧光(Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF)方法测量了上升气泡的密度^[9]. 文献[10-11]研究了尾流气泡散射光信号处理方法,利用一维小波分析不仅可以提取散射光共性,而且还可展现与散射光的区别. 文献[12]利用图像处理技术研究模拟气泡尺度分布,得出不同压强下气泡的等效直径分布范围. 崔红利用图像处理技术处理尾流图像,研究了船舶航速对于尾流图像参量的影响^[13]. 常洋根据 BP 神经网络研究了气泡幕的分类识别^[14]. 孙春生使用辐射传输方程的小角度近似解,通过引入有尾流气泡和无尾流气泡时探测截面上接收到的辐射功率之比作为透射函数,研究了气泡群密度对光束衰减测量的影响^[15]. 然而使用 CMOS 探测气泡幕的光散射研究相对较少,项建胜^[16]使用 Mie 散射计算验证了 CMOS 探测气泡散射光的可行性,并分析了散射光环厚度的划分应考虑准确度和时间复杂性因素. 本文利用 CMOS 采集气泡幕前向光散射动态图像,用 Matlab 处理动态图像序列,研究了气泡幕前向光散射特性.

1 实验系统

实验采用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器作为光源,光束直径约为 2.0 mm. 可调压低噪音空气压缩机,向微孔陶瓷管注入空气产生气泡幕,微孔陶瓷孔径 1~10 μm ,平均孔径约为 2 μm . 使用相机的 CMOS 接收散射光,其尺寸长 23.6 mm,宽 15.6 mm,最大分辨率为 4 928×3 264,采集视频分辨率为 1 280×720,频率为 30 fps. 实验在暗室中进行测量,实验示意图如图 1.

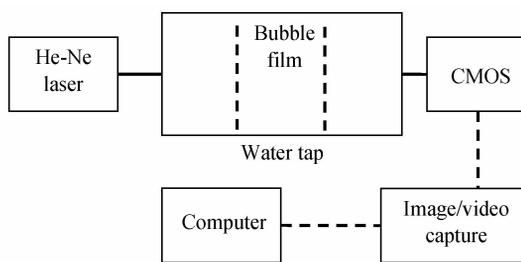


图 1 实验示意图

Fig. 1 Scheme of Experiment

2 分析讨论

基于 CMOS 探测气泡幕散射光可以计算空间的散射角,考虑到 CMOS 像元的纵横排列,可以引入横面散射角和纵面散射角. 横面散射角为 CMOS 横向行像元对于气泡幕散射中心所张成的二面角,纵面散射角为 CMOS 纵向列像元对于气泡幕散射中心所张成的二面角. 图 2 为横面散射角示意图,面 ABCD 代表 CMOS 图像传感器, MN 为一行横向像元, P 为气泡幕散射中心, PQ 为激光传输方向, α 即为横面散射角. 关于某行像元或者某列像元所对应散射二面角的计算,需要的参量包括光束传输方向对应的像元位置,即传输方向对应的纵横像元坐标,像元参量之间的距离,以及探测器距离气泡幕散射中心的距离. 尾流气泡幕前向光散射的研究,可以使用散射横面和纵面角,当 CMOS 偏离光束时,就不能直接确定传输方向对应的像元坐标,从而散射横面和纵面角就不能直接确定,但是可以通过适当的透镜改变光路,将偏离光束方向的散射光传输到探测区域.

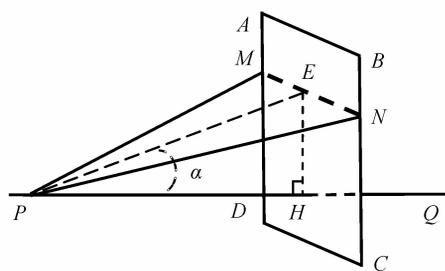


图 2 横面散射角示意图

Fig. 2 Scheme of Horizontal-plane scattering angle

使用 CMOS 探测气泡幕散射光,首先采集运动气泡幕散射光动态图像序列,其次计算每帧图像之间灰度的相对变化,进而分析气泡幕光散射特性. 每帧图像的分析方法,一个简单方法是计算每一帧的平均灰度值,通过平均灰度的变化推断气泡幕的密度和运动快慢. 另一个方法是通过对每一帧灰度图像进行快速傅里叶变换,得到其在频域的信号,分析能量谱密度. 本文提出了一种新的计算方法,该方法对采集到的每帧图像进行处理,图 3 是其流程图.

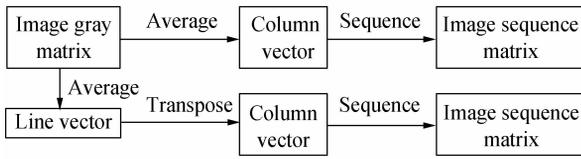


图3 图像序列处理流程

Fig. 3 Flow diagram of image sequence processing

首先对每帧灰度图像的列求均值得到一维行向量,或者对每行求均值得到一个列向量,这样将一帧图像即可转换为一个行或列向量,采集到图像序列按时间演化构成一个矩阵,而该矩阵的每行或者每列就代表了一帧图像,因此也就包含了气泡幕光散射的动态特性。

对一帧灰度图像 $f(k)$,求得每行灰度均值得到列向量,记为 $I(k)$,即

$$f(k) = \begin{bmatrix} g(0,0) & \cdots & g(0,j) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(i,0) & \cdots & g(i,j) \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{行求平均}} \begin{bmatrix} \overline{g(0)} \\ \vdots \\ \overline{g(i)} \end{bmatrix} = I(k) \quad (1)$$

式中 $g(i,j)$ 为图像像元灰度值, $\overline{g(i)}$ 为行像元灰度均值, $I(k)$ 表示图像的横向灰度均值向量。而多帧图像按列方式构成图像序列矩阵,记为 $L(m)$,即

$$L(m) = [I(0) \cdots I(k)] \quad (2)$$

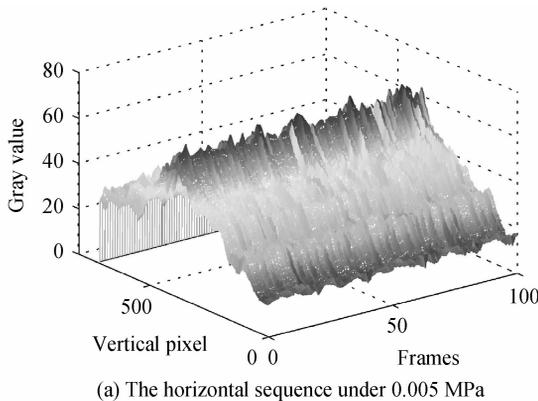
$L(m)$ 表示图像序列横向灰度均值矩阵, m 为图像序列的帧数。

同理,可以得到图像纵向灰度均值向量 $c(k)$,其中需要将行向量转置得到列向量,图像序列纵向灰度均值矩阵 $C(m)$,即

$$f(k) = \begin{bmatrix} g(0,0) & \cdots & g(0,j) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(i,0) & \cdots & g(i,j) \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{列求均值}} [\overline{g(0)} \cdots \overline{g(i)}] \xrightarrow{\text{转置}} \begin{bmatrix} \overline{g(0)} \\ \vdots \\ \overline{g(i)} \end{bmatrix} = c(k) \quad (3)$$

$$C(m) = [c(0) \cdots c(k)] \quad (4)$$

为了表述方便,将 $I(k)$ 、 $c(k)$ 和 $L(m)$ 、 $C(m)$ 分别简称为横向灰度向量、纵向灰度向量和横向序列矩阵、



纵向序列矩阵。

3 结果分析

为了研究气泡幕前向光散射动态特性,实验首先采集单帧图像,分析单帧图像在 CMOS 的灰度,其次连续采集气泡幕的动态序列图像,将每帧图像表示为一个向量,得到气泡幕前向光散射动态图像序列矩阵,定性分析了两种压强产生的模拟气泡幕的图像序列,定量计算连续图像帧的散射特性。

3.1 单帧图像

实验拍摄的气泡幕前向光散射单帧图像如图 4。光强呈圆环分布,和文献[8]中采集到的气泡幕散射图像接近,部分区域有所增强,可能由于激光中心较强在 CMOS 表面发生反射,在玻璃水槽经反射到图像传感器上引起。图中中心圆形最亮区域为激光束光斑。

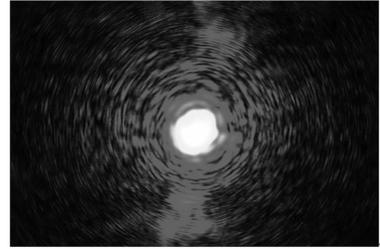


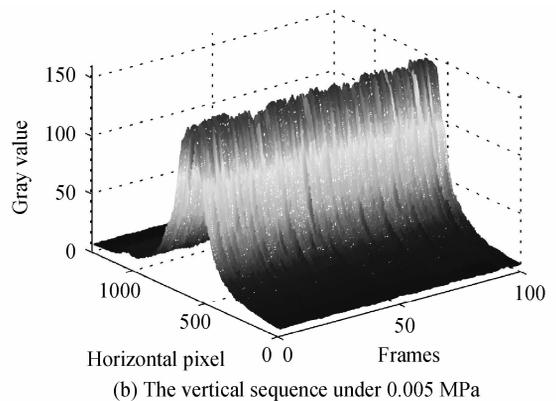
图4 气泡幕前向光散射的单帧图像

Fig. 4 Single frame image of forward light scattering by bubble film

3.2 动态图像序列

为了研究气泡幕的前向光散射动态特性,实验模拟了压强分别为 0.005 MPa 和 0.01 MPa 产生的气泡幕,采集了两种气泡幕的前向激光散射图像序列 300 多帧。考虑到人为操作机身快门,在开始和停止采集图像序列的瞬间,对相机产生不稳定性从而影响所采集图像序列的散射光,所以本文选择图像序列中间的第 101 帧到 200 帧分析。然而可以通过相关相机控制或者图像采集软件代替人为操作,使得该方法可以在实际探测尾流气泡光散射中应用。

图 5 给出了两种气泡幕前向散射光图像横向和纵向序列矩阵。比较分析图 5(a)和(b)、(c)和(d)容易看



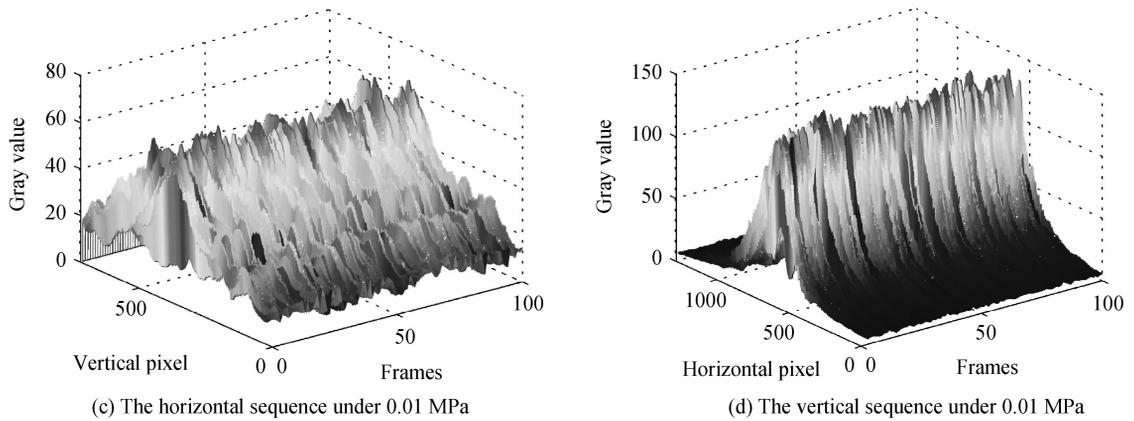


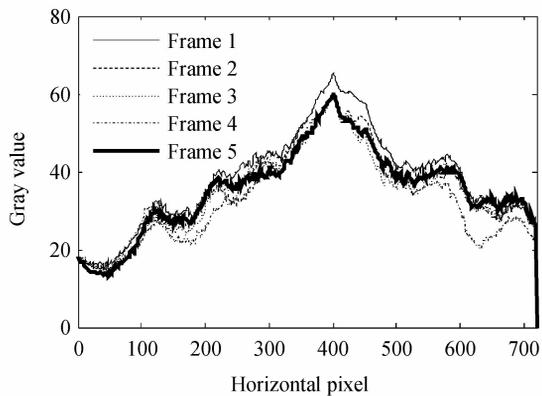
图5 压强 0.005 和 0.01 MPa 时气泡幕 100 帧连续图像序列横向与纵向序列

Fig. 5 The horizontal and vertical gray value of 100 continuous frame image sequence scattered by bubble film under pressure 0.005 and 0.01 MPa

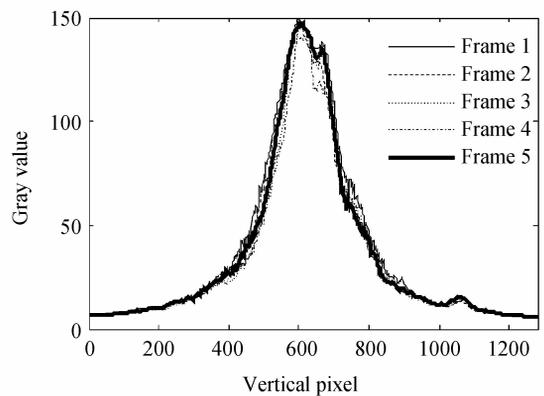
出,对于同一压强产生的气泡幕,由于 CMOS 自身矩形尺寸的特点,横向探测较多偏离光束方向的散射光,而且偏离光束方向的散射光逐渐减小,因此在行像元求均值后波动变化较小,其灰度变化动态范围较大,而列像元计算的均值相对波动变化较大,其动态范围较小.比较图 5(a)和(c)可以明显地看出,随着压强增大产生气泡幕尺度、密度和上升速度有所增加,气泡幕散射光动态图像横向序列波动变化幅度和频率均有所

增加.

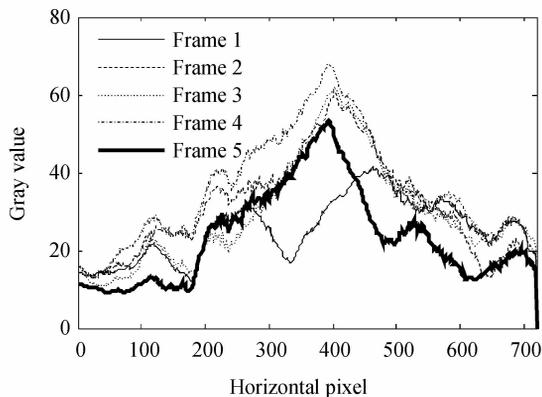
为了定量分析图像序列横向和纵向灰度向量变化,实验对两种气泡幕的前向散射光图像随机选择连续 5 帧,如图 6 所示.首先从整体上看,无论是横向还是纵向灰度向量,较大压强产生气泡幕的横向散射光和纵向散射光动态范围变化幅度增加.从图 6(a)、(c)可以看出,5 帧图像横向散射光最大值在图像传感器纵向第 400 行像元附近,0.005 MPa 产生的气泡幕中



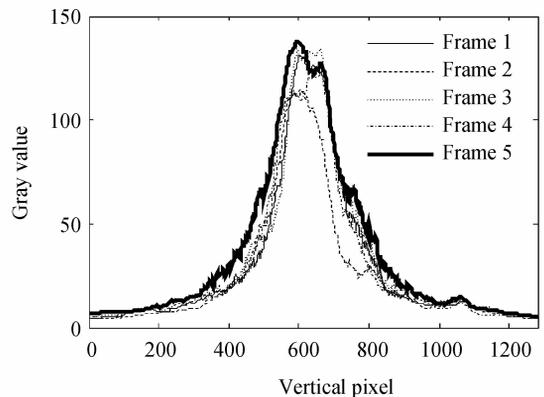
(a) The horizontal gray of five frames under 0.005 MPa



(b) The vertical gray of five frames under 0.005 MPa



(c) The horizontal gray of five frames under 0.01 MPa



(d) The vertical gray of five frames under 0.01 MPa

图6 压强 0.005 和 0.01 MPa 时连续 5 帧气泡幕图像横向和纵向散射光

Fig. 6 The horizontal and vertical gray value of 5 continuous frame images scattered by bubble film under pressure 0.005 and 0.01 MPa

心横向散射光灰度在 60 附近变化较小;而 0.01 MPa 产生气泡幕中心横向散射光变化明显加大,从 30 到 70 之间波动变化;边缘区域 5 帧图像后者相互差距相对较大. 在纵向散射光图像序列中,图 6(b)、(d)纵向散射光在连续图像变化浮动规律上基本相近,但是动态范围有所扩展,散射光最大值在横向像元 600 列附近,最大值分别达到 150 和 140,而边缘区域在 5 到 20 范围变化.

考虑到采集到图像序列为气泡幕的散射光,所以据此推算气泡上升速度为大量气泡上升速度的一个参量,此方法还受到其他因素的影响,比如采集图像的频率和图像处理时间,然而对于单个气泡,可以根据局部的散射光变化推算其上升速度.

4 结论

实验使用 CMOS 图像传感器代替照度计探头,直接采集气泡幕散射光的动态图像序列,对每帧灰度图像行像元和列像元分别求均值,转换成列向量进而将采集的图像序列转换为图像序列矩阵,定性分析了两种压强产生气泡幕散射光的每帧图像的变化规律. 提出了行像元和列像元对应的横面散射角和纵面散射角的概念,为研究 CMOS 探测气泡幕光散射提供了一个新的思路. 此外在分析图像序列矩阵时,发现较小的压强产生的微气泡幕前向散射光图像序列中,可能存在连续帧灰度值相同的情况,主要归因于微气泡上升速度较慢,采集图像的频率相对较高导致,而当压强增大时产生气泡上升速度明显增大,图像序列连续帧灰度值发生变化,这就为根据图像序列矩阵变化和采样频率推算气泡上升速度提供了一个参考.

参考文献

- [1] ZHANG Jian-sheng. The development and measurement of ship wake optical specialty[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, 2001.
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] PELTZER R, GARRETT W, SMITH P. A remote sensing study of a surface ship wake [A]. OCEANS' 85-Ocean Engineering and the Environment, 1985, **17**(1): 277-286.
- [3] ZHANG Jian-sheng, LIN Shu-yu, HE Jun-hua, *et al.* Comparison research of simulated and effective wakes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1920-1923.
张建生, 林书玉, 何俊华, 等. 模拟尾流气泡幕及实际尾流光学性质对比研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(10): 1920-1923.
- [4] SCHEFFOLD F, CERBINO R. New trends in light scattering [J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2007, **12**(1): 50-57.
- [5] ZAKHAROV P, SCHEFFOLD F. Advances in dynamic light scattering techniques[M]. *Light Scattering Reviews* 4, 2009, 433-467.
- [6] MOHAMMADI M, SHARP V. Experimental techniques for bubble dynamics analysis in microchannels; a review [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2013, **135**(2): 1-10.
- [7] HONG Gang, YAN Xiao, YANG Yan-hua, *et al.* Experimental research of bubble characteristics in narrow rectangular channel under heaving motion[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, **42**(1): 42-50.
- [8] THOMANEKL K, ZIELINSKI O, SAHLING H, *et al.* Automated gas bubble imaging at sea floor-a new method of in situ gas flux quantification [J]. *Ocean Science Discussions*, 2010, **7**(1): 291-334.
- [9] PIERRE V, NICOLAS S, MAHMOUD E H, *et al.* Concentration measurement in the wake of a free rising bubble using planar laser-induced fluorescence (PLIF) with a calibration taking into account fluorescence extinction variations[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, **54**(1): 1501-1510.
- [10] ZHANG Jian-sheng, LIN Shu-yu, MIAO Run-cai, *et al.* Wavelet analysis on managing of scattered optical semaphore from bubble films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 557-564.
张建生, 林书玉, 苗润才, 等. 小波分析在气泡幕散射光信号处理中的应用[J]. 光子学报, 2007, **36**(3): 557-564.
- [11] ZHANG Jian-sheng, LIN Shu-yu, LIU Peng, *et al.* Scattered light signal of ship wakes and one-dimension disperse wavelet analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2106-2110.
张建生, 林书玉, 刘鹏, 等. 船舶尾流散射光信号及一维离散小波分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(11): 2106-2110.
- [12] ZHANG Jian-sheng, LIN Shu-yu, MIAO Run-cai, *et al.* Research of stimulated wakes bubble film based on image processing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2371-2376.
张建生, 林书玉, 苗润才, 等. 基于图像处理的模拟尾流气泡幕研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(12): 2371-2376.
- [13] CUI Hong, CHANG Yang, ZHANG Jian-sheng. Digital processing of wake images based on MATLAB[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2274-2278.
崔红, 常洋, 张建生. 基于 MATLAB 的尾流图像数字化处理[J]. 光子学报, 2010, **39**(12): 2274-2278.
- [14] CHANG Yang, CUI Hong, ZHANG Jian-sheng. SWBF classification based on BP neural network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1066-1070.
常洋, 崔红, 张建生. 基于图像处理的模拟尾流气泡幕分类识别[J]. 光子学报, 2011, **40**(7): 1066-1070.
- [15] SUN Chun-sheng, ZHANG Xiao-hui, ZHU Dong-hua. Influence of bubbles number density on measurement of beam attenuation in ship wakes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1516-1519.
孙春生, 张晓晖, 朱东华. 气泡数密度对尾流光束衰减测量的影响[J]. 光子学报, 2009, **38**(6): 1516-1519.
- [16] XIANG Jian-sheng, HE Jun-hua, CHEN Min, *et al.* Study of character of the forward scattered light of bubbles based on mie's light scattering theory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2111-2114.
项建胜, 何俊华, 陈敏, 等. 基于 Mie 光散射理论的尾流气泡前向散射光特性研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(11): 2111-2114.