

· 光电系统与 设计 ·

基于片光源照明成像的水中群气泡特性测量

张建伟^{1,2}, 杨坤涛¹, 王江安², 宗思光², 马治国²

(1. 华中科技大学光电子科学与工程学院武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074; 2. 海军工程大学, 湖北 武汉 430033)

摘要:研究了舰船尾流分布特性规律, 分析了图像法测量舰船尾流气泡参数的难点, 提出了片光源照明、高速摄影技术结合的尾流气泡群测量方法. 采用空气泵产生压缩空气, 并通过微孔陶瓷管释放的方法建立了水中气泡产生及控制平台, 系统通过调节空压泵气压, 产生不同大小、密度、运动速度的气泡源, 并采用片光源、短曝光时间(最小曝光时间为 14 μs)高速相机对不同气泡源进行了测量分析. 结果表明: 采用片光源照明、CCD 照相技术可对气泡群进行清晰成像, 空压泵压力的调节可获取不同尺寸、密度、运动速度的气泡源.

关键词:舰船尾流; 气泡测量; 片光源照明; 高速摄影

中图分类号: TN212

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)04-0035-07

Study of Bubble Characteristic in Water by Use of High Speed Photography Based Line Lighting Lamp-House

ZHANG Jian-wei^{1,2}, YANG Kun-tao¹, WANG Jiang-an², ZONG Si-guang², MA Zhi-guo²

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The measure of warship wake bubble is a base for developing an underwater sound and light wake detector. The distribution characteristics of the warship wake were studied, and the difficulties in the bubble image measured by the image method were analyzed. A new method of bubble measure is put forward by use of high speed photography based line lighting lamp-house. The system of bubble controlling is established through the air pump and chinaware. The bubble image of different size is gained, and characteristic of bubble is analyzed based numeric image disposal. The result shows the measure of bubble characteristic by use of high speed photography based line lighting lamp-house is a good way.

Key words: warship wake; bubble measure; line lighting lamp-house; high speed photography

水面舰船在航行的过程中, 由于受船体与波浪的冲击、螺旋桨的空化、船体表面与水介质的相互作用、气-液界面上气体的渗入等因素的影响, 将在舰船尾部的海水中形成一条含有大量气泡的气泡幕带, 通常称为气泡尾流. 尾流会沿着舰船航行的方向延伸到船体长度的许多倍, 一般可达数千米甚至数十千米^[1-3]. 尾流中气泡的存在对舰船尾流的声学特性、光学特性、热力学特性等都将产生明显的影

响. 利用尾流的物理特性来探测尾流, 尾流中的气泡形状、大小、密度分布、扩展规律是探测尾流的基础. 由于存在附加压强、浮力、介质的粘滞阻力以及压差阻力, 还有不同温度、风力和光照下介质表面蒸发速率的影响, 加之在运动过程中气泡的形变、分裂、结合、熄灭以及位移, 每个气泡的运动规律和衰减情况大不相同, 这给准确测量气泡的尺度分布带来了很大的困难^[4-5].

收稿日期: 2010-08-03

基金项目: 国家部委基金资助项目(9140A14060207JB11)

作者简介: 张建伟, 男, 博士研究生, 现主要从事水下激光探测的研究.

文章研究了舰船尾流分布特性规律,分析了采用图像法测量舰船尾流气泡参数的关键技术点,提出了片光源照明、高速摄影技术结合的尾流气泡群测量方法.采用空气泵产生压缩空气,并通过微孔陶瓷管释放的方法建立了水中气泡产生及控制平台,系统通过调节空压泵气压,产生不同大小、密度、运动速度的气泡源,并采用片光源、短曝光时间(最小曝光时间为 14 μs)高速相机对不同气泡源进行了测量分析.结果表明:采用片光源照明、CCD 照相技术可对气泡群进行清晰成像,空压泵的压力的调节可获取不同尺寸、密度、运动速度的气泡源.

1 表征尾流气泡特性的理论模型

舰船尾流的几何形状取决于舰船的类型、航速和海况等,但是尾流稠密的气泡云是所有舰船尾流的共同特征.从远处观察,舰船的尾流呈窄 V 形,在舰首产生的大量泡沫远不及螺旋桨产生的泡沫看上去更明显.舰船尾流的长度、宽度、深度随着时间、空间变化,表征尾流气泡的主要参数有:(1)气泡的运动速度和尺寸变化;(2)气泡的分布及数密度变化;(3)气泡尾流的几何特性.

由于流体中气泡的运动是一个非常复杂的物理过程,在其运动过程中,包含了压缩性、粘性、表面张力、热传导、气体扩散和热力学效应等多项耦合过程,具有很强的非线性和非定常性.在假定:(1)舰船尾流中气泡周围的流场为静止流场;(2)气泡在运动过程中保持球形;(3)泡内气体保持恒温状态等条件下,气泡在水中作浮升运动时,满足气泡运动平衡方程,即

$$m_b \frac{dU_b}{dt} = F_g + F_b + F_d + F_A + F_B \quad (1)$$

式中, m_b 为泡内气体质量; U_b 为气泡上浮速度; C_D 为气泡运动的阻力系数; F_A 为虚拟质量力; F_B 为气泡所受到的 Basset 力; F_d 为运动阻力; F_b 为气泡在水中运动时的浮力; F_g 为气泡重力.由于泡内气体质量 m_b 很小,因此相对于虚拟质量力 F_A 而言,气泡本身的惯性质量力 $m_b dU_b/dt$ 可忽略不计.

气泡上浮速度方程如下^[6,7]

$$\frac{dU_b}{dt} = \frac{(\rho_f - \rho_g)g}{\rho_f K_m} - \frac{3U_b^2}{8RK_m} C_D - \frac{3K_B \sqrt{\mu_f/\pi\rho_f}}{4RK_m} \int_0^t \frac{dU_b}{d\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} \quad (2)$$

当 $dU_b/dt=0$ 时,即气泡匀速上浮运动时, $F_A = F_B = 0$,可得到气泡在水中匀速上浮时的速度为

$$U_b = \sqrt{\frac{8}{3} \frac{Rg(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f C_D}} \quad (3)$$

对于气泡的径向运动,气泡在静止流体中运动时,其半径的变化受到流体静压力、气泡表面张力、气泡表面的气体扩散率、流体中溶解气体的浓度等因素的影响.

假定在气泡的上升运动过程中,泡内气体保持等温状态

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R}{3} \left(\frac{dn}{n dt} - \frac{dP}{p dt} \right) \quad (4)$$

式中, dR/dt 为气泡半径随时间的变化量, dn/dt 反映了泡内气体摩尔数随时间的变化量, dP/dt 反映了流体静压力和气泡表面张力随时间的变化量.

将泡内气体扩散方程与泡内压力方程分别化简得气泡半径随时间的变化方程

$$\frac{dR}{dt} = \frac{3iTRW(C_a - C_s) + \rho_f g V_z R^2}{3RP_0 - 3R\rho_f g z + 4\sigma} \quad (5)$$

2 水中透明气泡群粒子照明成像测量的难点

由于尾流气泡幕处于不断的运动过程中,包括气泡的产生、形变、分裂、消亡及位移,并且气泡又具有透明性,因此气泡尺寸的测量一直是一个较难解决的问题.长期以来对尾流场参数的测试多是采用声学手段进行宏观参数的测量,作为最直观、最精确的尾流场的光学摄影照相技术一直未能得到很好的发展.光学成像尾流气泡测量的难点在于:(1)气泡尺寸是大动态范围(从 μm 级至 mm 级),对光学望远、CCD 分辨能力要求高.(2)气泡场为透明的群粒子、照明光束在气泡群中发生极其复杂的多次 Mie 散射,见图 1 所示.(3)海水对照明光束的强散射、湍流、海水波浪、海水中悬浮物、杂质等强背景干扰影响,见图 2.(4)对于水气两相流而言,气泡与水自身都是透明的,气泡与水的交界面对光线的反射明、暗层次多,另外由于运动的关系,气泡具有幅度和频率都较大的不规则变化,所以拍摄的气泡照片往往难以区分水和气泡的边界.

针对尾流气泡分布的大动态范围及气泡群散射光对成像的叠加干扰,在实验设计中考虑了以下几点事项:(1)针对拍摄气泡粒子的大动态范围,采用

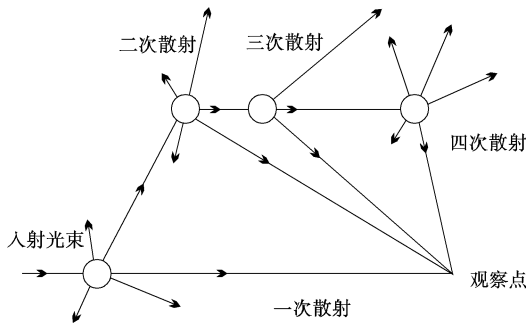


图 1 群气泡对照明光束的多次 Mie 散射图

图 2 气泡场对激光束的散射图像

多级自动调焦的光学望远以及高灵敏、短曝光、高分辨的 CCD 成像器件。(2) 针对气泡场为透明的群粒子,海水及气泡的多次散射问题,照明光束采用多级步进式片光照明,控制照明片光束位置、厚度与像机焦距、景深的相对空间位置,使得照明光束只在像机景深内,避免周围气泡粒子、海水散射光的干扰。(3) 针对海水的强散射问题,调节照明光束脉冲宽度、频率与像机的感光灵敏度、快门时间(曝光时间)、摄影帧率一致,通过高精度的时钟控制器控制照明光束发射与像机曝光的一致性。(4) 针对海水中悬浮物、杂质粒子干扰问题,在软件上采用图像滤波、识别的方法进行处理。

3 水下气泡参数图像测量实验

3.1 实验系统设计

整个测量系统的示意如图 3。系统由脉冲激光器、望远镜、柱面镜、反射镜、光学位移架、光栅、CCD 摄像头、录像机等器件组成。脉冲激光器产生高能量脉冲激光,充当光源照亮测量区域。每个激光脉冲延迟的时间相当短,只有纳秒量级,在这样短的时间内,本次试验中气泡运动的距离相当短,这就保证了每次气泡的图像不会是迹线。试验中通过调整望远

镜和光栅,片光厚度可调。其实际厚度,可以采用标靶的方式进行标定。

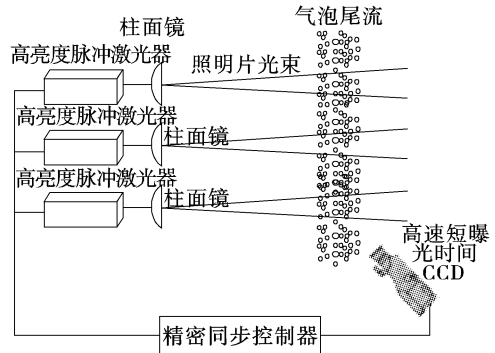


图 3 实验原理图

由于气泡运动过程的瞬态性,在调整摄像机的焦距时较为复杂。在研究中,分为粗/精两步调整。第一步粗调整时放置一标尺于气泡幕附近,通过观察标尺的清晰度来初步判断气泡幕是否位于摄像机镜头的景深内,第二步精调整时,通过实测后观测气泡的清晰度进行调整。

在片光源照明成像系统中,被照亮的流场仅仅是一个平面,该平面片光的厚度可以调置到 1 mm 以下。片光照亮带状气幕中的一个平面,采用暗室遮光操作可使获得的图像仅是片光面内的气泡图像,这样可避免气泡图像层叠,使定量化测试气幕中气泡的尺度和数量得以实现。

由于成像系统景深的存在,在成像过程中离焦气泡必然会对成像过程产生影响,进而影响到后期图像的处理和气泡密度和大小测算的准确性。采用扩束镜和柱面透镜的光束变换系统,获得面光源照明模拟尾流气泡群。这样处理后,激光对气泡群的照明区域就由空间体积形状变为片状,即只照明一个很窄的区域内的气泡,使照明区域都很好地处于成像系统的景深之内,使照明面上的气泡都能在相机的焦面清晰成像,方便了后期的处理和气泡密度和大小分布的测定。

3.2 气泡图像测量结果

典型的的气压下气泡的运动图像如图 4 所示。

3.3 气泡图像测量的理论模型

用照相技术研究气泡,具有直观、费用低等特点,配合图像处理技术可获得较为详细的关于气泡的参数。本节研究了用图像边缘提取技术提取气泡

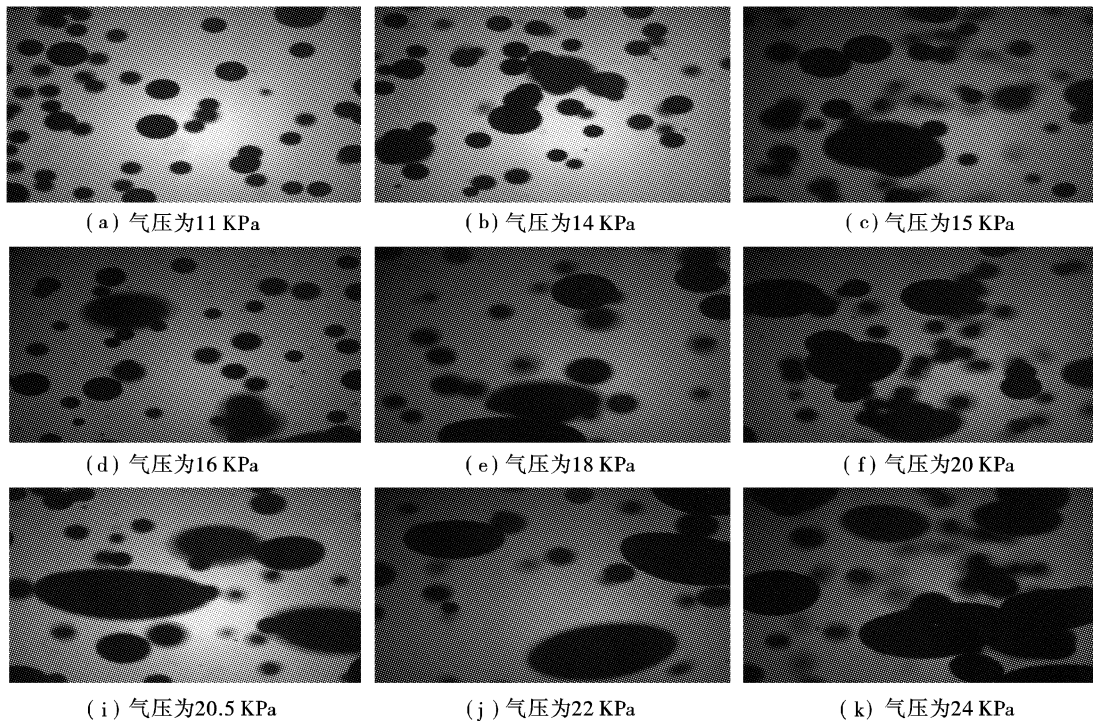


图 4 不同气压的气泡图像

轮廓,并统计计算气泡区域像素,进而得到气泡外形尺度,实验结果表明,该方法得到的气泡尺寸具有较高的准确度.在采用阈值方法分割灰度图像一般基于一定的图像模型,最常用的模型可描述如下:假设图像由具有单峰灰度的目标和背景组成,处于目标或背景内部相邻像素间的灰度值是高度相关的,处于目标和背景交界处两边的像素在灰度值上有很大的差别.

尾流气泡的图像如图 5 所示,其灰度直方图如图 6 所示.通过直方图可以看出,该图像可看作分别对应目标(气泡)和背景的 2 个单峰值直方图混合构成,这表明气泡的图像可采用阈值方法进行分割.

图像的灰度边缘是图像灰度值不连续或突变的结果,目标的边界是可通过求取图像灰度变化的导

数来确定,导数可用微分算子来计算^[8],在研究中,对气泡图像的阈值分割就是通过拉普拉斯算子进行的.

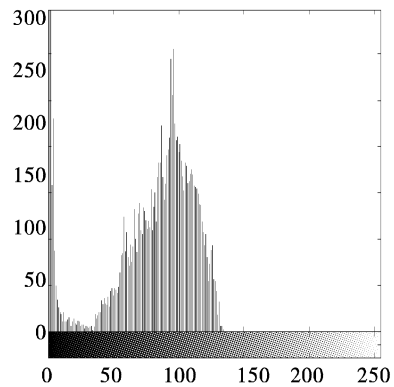


图 6 气泡图像灰度直方图

Laplacian 算子是一种二阶导数算子对一幅图像 $f(x, y)$,它在图像中位置 (x, y) 的拉普拉斯值定义如下

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (1)$$

在对气泡图像进行分割时,由于 Laplacian 算子对噪声比较敏感,为减小噪声影响,对待分割图像进行平滑后再运用 Laplacian 算子.

具有正态分布的平滑函数可定义如下

$$h(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

其中, σ 是高斯分布的均方差,对待分割图像的平滑

图 5 尾流气泡图像

结果为

$$g(x, y) = h(x, y) \otimes f(x, y) \quad (3)$$

式(3)中, \otimes 代表卷积. 令 r 是图像中像素点距离原点的距离, $r^2 = x^2 + y^2$.

对平滑后激光气泡图像运用拉普拉斯算子可得

$$\nabla^2 g = \nabla^2 (h(x, y) \otimes f(x, y)) = \left(\frac{r^2 - \sigma^2}{\sigma^4} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{2\sigma^2} \right) \otimes f(x, y) \quad (4)$$

利用二阶导数算子过零点的性质可确定图像中阶梯状边缘的位置. 图 7 是对气泡图像利用拉普拉斯算子进行分割后的结果.

从气泡的分割图像中, 可通过计算边缘像素点的位置, 进而得到气泡直径及气泡面积所占的像素, 通过像素尺寸标定, 可将气泡图像像素大小转化为气泡的实际尺寸.

像素尺寸的标定原理如下: 在气泡中心处放置一标尺, 在与对气泡相同参数下对标尺成像, 取标尺 3 个 1 cm 距离标记像素点的坐标, 分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , 1 cm 所占像素个数为

$$Pixel = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} + \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}}{2} \quad (5)$$

则单个像素所占的实际尺寸为

$$L = \frac{10^4}{Pixel} \mu\text{m} \quad (6)$$

对气泡图像序列进行分割识别处理后, 可计算得到气泡的实际尺寸大小.

3.4 气泡群参数的计算

由于对气泡图像测量系统设计中, 采用了片光源照明的方式, 避免了气泡图像层的叠加, 可获取较清晰的图像源, 便于进一步的图像识别、计算处理. 依据 3.3 节的理论模型, 对不同气压下获得的气泡图像进行滤波、边缘提取、计算, 可得到气泡的对应尺寸、速度等参数. 对图 4 所示图像进行处理, 得到的二值化后的气泡图像见图 8. 从图 8 中可以看出,

图 7 气泡的分割图

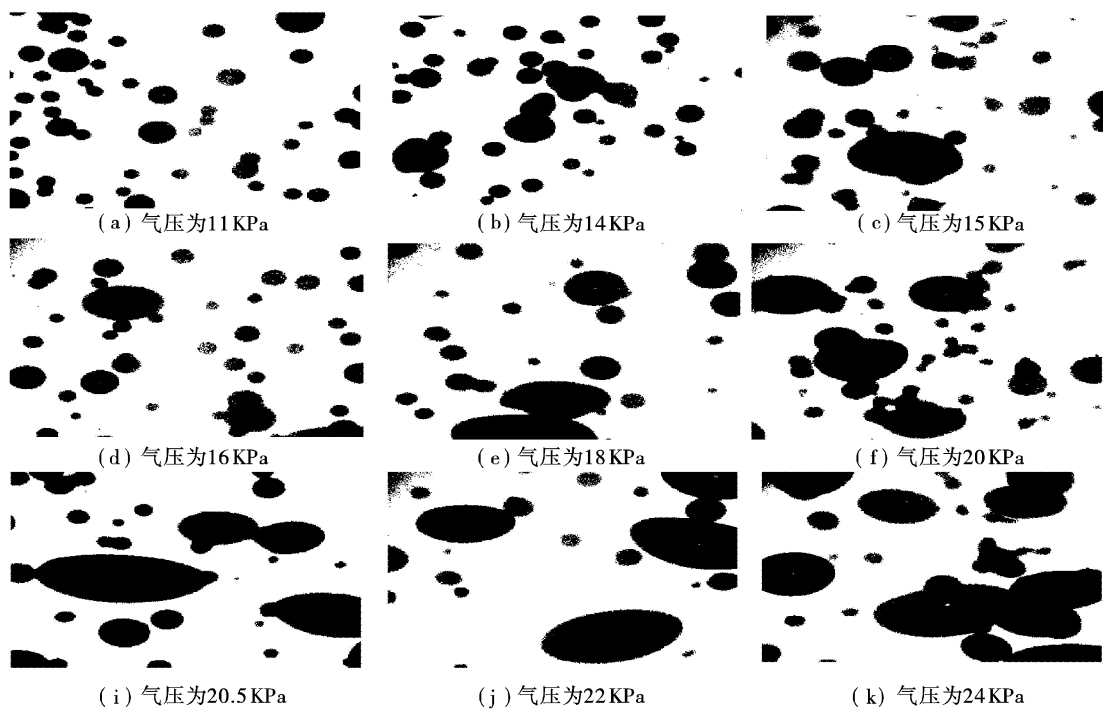


图 8 不同气压的气泡处理后图像

气泡的边界、尺寸等特征已经分辨得非常清晰,根据获取的气泡图像尺寸与实际尺寸的变化关系(式 5)可计算不同气压、不同气泡的尺寸分布。

由不同气压下获得的气泡系列图像,经过图像处理,就可以得到气泡大小,数密度等有关参数.获得的单位面积上的气泡数密度与空气泵的变化关系见图 9 所示.图 9 中的“·”点表示在一个固定气泵压力下单位面积内的气泡数量。

图 9 气泡密度与空气泵压力的变化关系曲线
不同气压下获得的不同大小尺寸的气泡分布强

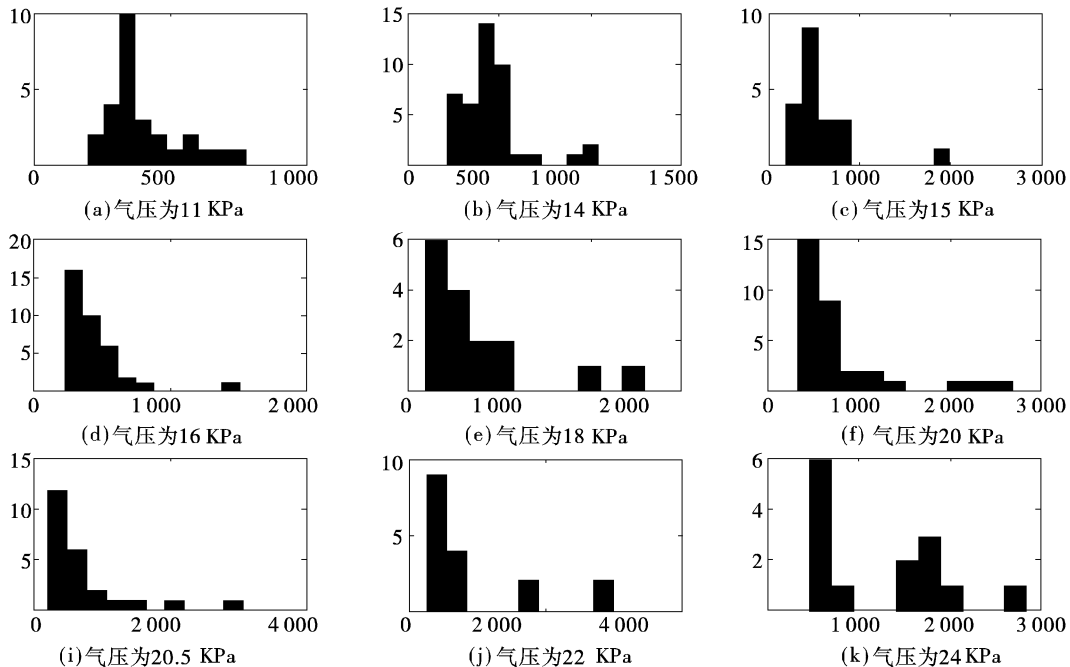


图 10 不同气压下气泡最大直径分布直方图

度见图 10。

由实验数据分析可以看出,通过微孔陶瓷棒获得模拟尾流气泡具有以下特征:(1)在低气压下,气泡外形维持较规则的圆球形,在气压较大情况下,气泡形状较为复杂,为非规则的球形泡.这与实际尾流中气泡外形的分布是一致的.(2)当气泵压力较小时,导致水槽中的陶瓷管出口气压较弱,气泡产生过程较为平缓,气泡群空间范围有限,气泡密度较小.当气泵压力很大时,陶瓷管产生水下气泡的过程非常剧烈,会产生直径很大的气泡(可达 3 mm),同时这些大气泡在上升过程中容易破裂,形成直径很小的气泡,这也就是阀压很大时气泡直径分布很广的一个原因,而且由于产生大气泡过程占用了较多的泵压资源(这时气泵也接近饱和工作状态),导致水下气泡的数密度很小.当气泵工作在中等压力时,陶瓷管出气非常平稳,产生气泡过程非常流畅,因此气泡数密度较大.从统计数据曲线可以看到,气泡直径越大,相应的数密度就会减小;空气泵工作在最佳状态附近时,气泡大小分布均匀,气泡数密度最大.(3)采用片光源照明是获得清晰气泡图像的关键要素。

4 结 论

(1)采用片光源照明、CCD 照相技术是研究舰船尾流气泡特征的非常好的手段;

(2)对水中群气泡的成像测量,其照明光源、CCD 摄影帧率、曝光是系统的关键要素;采用片光源照明 CCD 成像器件景深内的气泡,可有效地避免群气泡成像的重叠,进而获取清晰的气泡图像;

(3)采用微孔陶瓷棒、空压泵结合的方法是实验

室条件下模拟舰船尾流气泡非常好的手段,空压泵压力的调节可获取不同尺寸、密度、运动速度的气泡源;

(4)利用片光源照明成像的手段初步确定了水下气泡群参数和阀压的关系,为实验室的模拟尾流实验提供了一定的参考标准。

参考文献

- [1] 石晟玮,蒋兴舟,石敏,等. 舰船尾流气泡运动特性研究[J]. 武汉理工大学学报,2007,31(5):764-767.
- [2] 张建生,吕青,孙传东,等. 高速摄影技术对水中气泡运动规律的研究[J]. 光子学报,2000,29(10):952-955.

- [3] 纪延俊,何俊华,陈良益. 气泡的散射光与气泡尺寸分布[J]. 激光技术,2004,28(4):414-416.
- [4] 刘慧开. 舰船尾流气泡的运动及其激光散射特性研究[D]. 武汉:海军工程大学,2003.
- [5] 宁辉,杨●,唐远河,等. 基于 PIV 技术的水中气泡的拍摄与用光技巧[J]. 纺织高校基础科学学报,2005,18(4):356-358.
- [6] 马治国. 水下气泡幕光散射特性研究[D]. 武汉:海军工程大学,2008.
- [7] 石晟玮. 后向散射式激光尾流探测技术研究[D]. 武汉:海军工程大学,2008.
- [8] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津:天津大学出版社,2002.

(上接第 11 页)

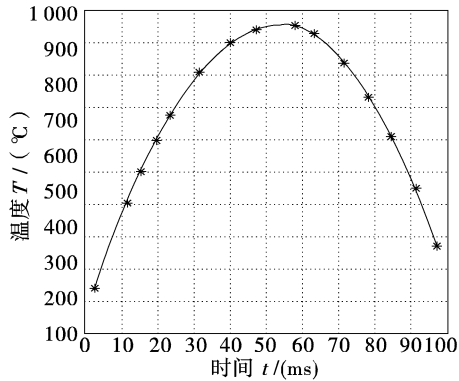


图5 传感器输出的温度时间曲线

图6 分离变量法外推曲线

在此实验条件下,采用红外测温仪测得的黑体腔外表面温度最高值出现在 49.7 ms,为 1 174 °C. 把外推结果(表 3、表 4 中的 T_g 和图 6 中不带 * 的曲线)和红外测温仪测得的黑体腔外表面温度值对比可得出:在最高温度相差 47 °C,而黑体腔内表面的最高温

度(出现在 53.5 ms 处,大小为 964 °C)与 Modline5-5R 红外测温仪测得的黑体腔外表面温度最高值相差 210 °C,可见,外推以后的结果更为合理。

4 误差分析

建模过程中引入了误差.一方面,在建模过程中假设黑体腔导热程是一个半无限大物体导热,但现实中并不存在这样的半无限大物体;另一方面,只考虑了垂直于黑体腔表面方向的传热,而忽略了平行于黑体腔表面的传热(也即黑体腔轴向传热),这给传热分析带来了一定误差。

5 结 论

在传热学和黑体辐射定律的基础上,将蓝宝石光纤黑体腔传感器与外推方法相结合,拓展了蓝宝石光纤黑体腔温度传感器的测温上限,在温度测试中降低了对传感器的性能要求,可以将该方法推广到更高的温度测试当中,具有一定的实用意义。

参考文献

- [1] Rumsey C B. Techniques and Instrumentation Associated with Rocket Model Heat - Transfer Investigation. Report AGARD[R],1997,8.
- [2] F Kreith, M S Bohn. Principles of Heat Transfer[M]. 4th Ed. Harper & Row,1986:136-137.
- [3] 王瑞. 蓝宝石光纤黑体腔传感器外推测试技术研究[D]. 太原:中北大学,2009:30-34.
- [4] 郝晓剑,孙伟,周汉昌,等. 蓝宝石光纤黑体腔高温计(EI 收录)[J]. 应用基础与工程科学学报,2004,12(2):218-223.