

气泡成像机理及对图像测量的影响*

何思为¹, 邵建斌¹, 陈刚^{1, 2}, 张淼¹, 唐远河¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安, 710048. Email: hesiweide@163.com

2. 安康学院, 陕西 安康)

摘要: 气泡的尺寸及其分布是研究水气两相流运动规律的重要参数。迄今为止, 气泡尺寸的测量仍然是一个难题, 目前大多数处理方法具有经验性或半经验性。摄像法测量气泡尺寸已为广大科研工作者所接受, 并开始得到应用, 但此方法的误差产生机理及如何减小误差幅度尚不清楚。本研究以 CCD 成像原理为基础, 结合水中气泡的折射、反射关系计算说明气泡的光学特性及光线的不同入射角度对气泡成像的影响, 最后通过实验验证其正确性。同时还通过实验说明了气泡偏离焦平面时对于气泡尺寸测量的误差影响。

关键词: 流体力学; 图像测量; 气泡; 光学特性; 焦平面

1 引言

目前, 针对掺气水流中气泡尺寸的检测方法已有多种, 根据测量时测点和被测系统的相对位置可以分为内置法和外置法两种。内置法又叫接触式测量, 它是把传感器放到流场内部进行测量, 如探针法; 外置法又叫非接触式测量, 这种测量方法是将测量设备放在流场之外进行测量, 如声学法、摄像法。其中比较常用的是探针法和摄像法^[1]。然而, 探针法属于单点测量, 并且会干扰流场, 摄像法克服以上缺点, 具有无接触, 面测量的特点。近年来, 随着高速摄像技术的快速发展, 摄像法测量高速水流中气泡的大小及浓度成为研究热点, 但由于水中气泡具有透明且不断变形, 很难获取可用于测量的清晰气泡图像。因此, 研究光在水气两相流中的传播特征, 以及相机成像特性对气泡图像拍摄的影响, 对减少图像测量误差, 提高测量精确度具有重要的理论价值。

*基金项目: 大学生创新性实验计划项目, 国家自然科学基金委员会, 二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(项目批准号 50579085), 高等学校博士学科点专项科研基金资助(项目批准号: 20060700001), 陕西省重点学科建设专项资金资助。

2 理论原理

2.1 摄像法测量概述

摄像法是集动态照相法和计算机技术于一体的先进测量手段，它通过光学系统，首先由图像转换器将运动气泡的图像“冻结”在摄像机靶面上，然后通过图像采集卡将这些图像进行存盘，最后通过图像处理，得出气泡尺寸及浓度等参数。

CCD (Charge-Coupled Device, 电荷耦合器件) 是摄像法测量气泡时的关键部件，它的感光单元将接收到的光线转换为电荷量，其电荷量大小与入射光的强度成正比。根据 phong 模型可知^[2]，物体表面某点的灰度值 I_p 可以用该点的光强 I_i 和灰度系数 S_p 的乘积表示：

$$I_p = I_i \times S_p \quad (1)$$

I_i 为入射光的强度，它由两部分组成：

$$I_i = I_0 + I_s \quad (2)$$

其中， I_0 是没有经过气泡反射而直接由周围介质散射进入相机的光强，它与气泡表面反射无关，会降低所得图像的对比度； I_s 是拍摄光源经过气泡表面反射，再进入相机的光强，它反映了气泡表面的性质，是影响气泡成像的主要分量。即从视点观察到的气泡上任意一点 P 处的亮度 I_p 应为环境（周围介质）反射光强及镜面（气泡表面）反射光强的总和。

2.2 水中气泡的光路图简述

根据几何光学原理，光线在大气泡（直径远远大于光的波长）与水的交界面主要是发生折射和反射。在此，我们设气泡为介质均匀，几何形状完全对称的理想球体。针对一束光线的传播情况进行分析，设 α 、 β 分别为入射角和折射角，具体光路图^[3]如下：

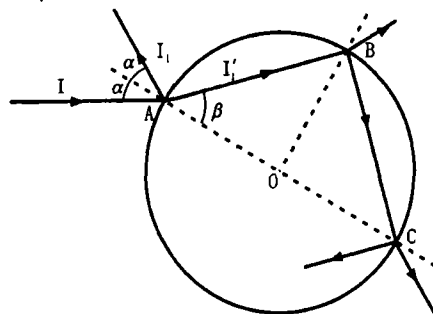


图 1 一束光线入射到水中气泡界面折反射示意图

从图 1 所示的光路图中的 A 点开始，对该束光线反复使用折射定律和反射定律，可依次

推导出各点处光线的入射角、折射角，从而确定某面上出射光线的位置和方向，再应用菲涅耳公式^[4]，可以得到该面出射光强。具体公式如下：

假设入射光的强度为 I ，则其 P 和 S 分量为：

$$I_p = I_s = \frac{I}{2} \quad (3)$$

气泡界面第一次反射和折射时，气泡界面 P 分量的反射光强 I_{1p} 和折射光强与 I'_{1p} 分别为：

$$\begin{cases} I_{1p} = I_p \frac{\tan^2(\beta - \alpha)}{\tan^2(\beta + \alpha)} \\ I'_{1p} = I_p \frac{4 \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta}{\sin^2(\beta + \alpha) \cdot \cos^2(\beta - \alpha)} \end{cases} \quad (4)$$

气泡界面 S 分量的第一次反射光强 I_{1s} 和折射光强 I'_{1s} 分别为：

$$\begin{cases} I_{1s} = I_s \frac{\sin^2(\beta - \alpha)}{\sin^2(\beta + \alpha)} \\ I'_{1s} = I_s \frac{4 \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta}{\sin^2(\beta + \alpha)} \end{cases} \quad (5)$$

由于总光强是 P 、 S 分量之和。所以在气泡界面，第一次反射光强 I_1 和折射光强 I'_1 分别为：

$$\begin{cases} I_1 = I_{1p} + I_{1s} = I_p \frac{\tan^2(\beta - \alpha)}{\tan^2(\beta + \alpha)} + I_s \frac{\sin^2(\beta - \alpha)}{\sin^2(\beta + \alpha)} \\ I'_1 = I'_{1p} + I'_{1s} = I_p \frac{4 \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta}{\sin^2(\beta + \alpha) \cdot \cos^2(\beta - \alpha)} + I_s \frac{4 \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta}{\sin^2(\beta + \alpha)} \end{cases} \quad (6)$$

2.3 水中气泡成像原理

根据上面所述的 CCD 成像原理可知，虽然不同的布光方式所成的气泡图像不同，但摄像法测量主要是利用气泡壁面对不同角度入射光线的反射和透射能力不同的原理。

3 气泡对光的反射比率

水中气泡对从不同角度入射的光反射光强占入射总光强的比例设为 r ，由式(3)与式(6)可推导出 r ，表示如下：

$$r = \frac{1}{2} \times \left[\frac{\tan^2(\beta - \alpha)}{\tan^2(\beta + \alpha)} + \frac{\sin^2(\beta - \alpha)}{\sin^2(\beta + \alpha)} \right] \quad (7)$$

水的折射率 $n = 1.33$ ，光线从水进入气泡内部是光密介质进入光疏介质的光路现象。该条件下，当入射角大于某一临界角时会在气泡壁面发生全反射，全反射的临界角 α' 满足如下关系式：

$$\sin \alpha' = \frac{1}{n} = \frac{1}{1.33} = 0.7519 \quad (8)$$

解得 $\alpha' = 48.7^\circ$ ，即当 $\alpha \geq \alpha' = 48.7^\circ$ 时，入射光会发生全反射，反射率为 100%。在发生全反射以前，气泡壁面的反射率 k 随入射角 α 的变化关系如图 2 所示。

因此，当对气泡进行逆光拍摄时，反射率越高，则进入到 CCD 的光强越小，该部分气泡图像的灰度值越低；反之，反射率越低的部位该部分气泡的图像灰度值越高。当对气泡进行顺光拍摄时，则正好相反，即反射率大的部位进入 CCD 的光强大，该部分气泡的图像灰度值越高，反射率小的部位进入 CCD 的光强越小，该部分气泡的图像灰度值低。根据入射角的大小，将气泡成像区域分为以下几种（以下均以逆光为例进行拍摄，设气泡半径为 R ）：

(1) 当入射角为 $\alpha = 0^\circ$ 时，光线全部透过气泡，不发生反射。反映在气泡所成像上，就是该点的灰度值最大，在图 3 上为中心点。

(2) 当 $0^\circ < \alpha < 35^\circ$ 时，气泡壁面对入射光线的反射率极小，被反射的光强最多不超过 3%。该区位于圆心至 $0.57R$ 间，反映在气泡所成像上，就是该范围的灰度值和入射角为 0° 处（最亮处）有微小差别，是一渐变过程，为图 3 的 A 区。

(3) 当 $35^\circ \leq \alpha < 48.7^\circ$ 时，气泡壁面对入射光线的反射率随入射角的增大而急剧增加，该范围在 $0.57R$ 到 $0.75R$ 之间，反映在气泡所成像上，就是该范围的灰度值从中心到边缘急剧减小，即很快变暗，为图 3 的 B 区。

(4) 当 $48.7^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 时，入射光会发生全反射，即在范围 $0.75R$ 到 R 之内均发生全反射，表现在气泡所成像上，该区域灰度值最小，且为同一值，为图 3 的 C 区。

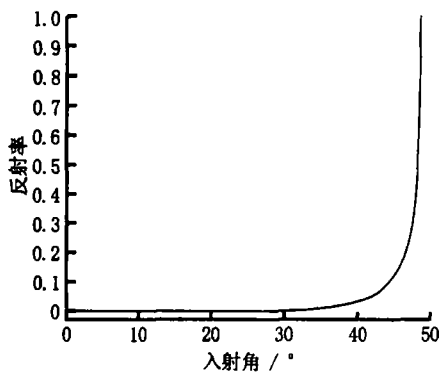


图 2 气泡壁面对光线的反射随入射角的变化曲线

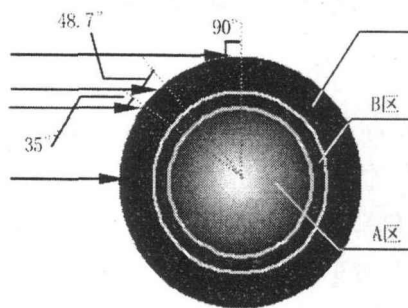


图 3 根据文中理论模拟的气泡成像图

4 摄影法测量气泡的边缘误差

根据前面的理论可知, 摄像法测量气泡时所得的气泡图像均应该是边缘锐度很大, 但实际上却常常发现气泡的边缘锐度并不是很大, 通常在一副照片中发现只有很少的一些气泡边缘较清晰。于是我们利用试验模拟了水中同一气泡分别在相机焦平面前面、焦平面和焦平面后面时的成像情况(图4)。

对于气泡边缘的变化用边缘的灰度值变化率 K 来表示, 则变化率越大表明图像边缘越锐利, 现分别计算上面三幅图像的 K 值:

$$K_a=17.86; K_b=65.42; K_c=25.63;$$

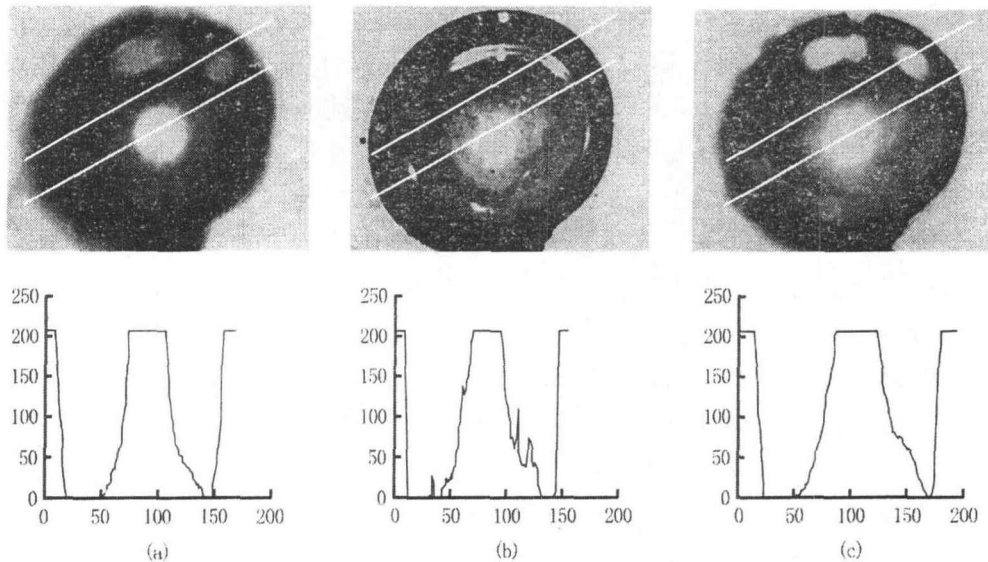


图4 同一气泡分别位于焦平面前面(a)、焦平面(b)、焦平面后面(c)时成像及其沿直线的灰度值曲线图

通过上面的计算可以说明气泡边缘锐度与其成像时是否在焦平面有密切联系, 气泡边缘锐度越高, 说明气泡越接近焦平面, 所测得的气泡尺寸精度越高。所以, 用摄影法测量气泡尺寸时对焦是一关键技术。

图5是对实际拍摄图像以阈值150、130、110、90处理后的结果, 从结果可以看出随着阈值的减小, 处理后的图像中心空白部分越来越多, 从而反映了灰度值从中心到边缘递减, 证明了我们结论的正确性。但由于水中气泡并不是文中假设的理想球型, 玻璃容器和水面对光线的影响, 加之本研究忽略了光在气泡内部折射及反射形成杂散光造成的图像对比度下降, 使得图5结果和理论不是完全相符, 但大致和理论计算吻合。

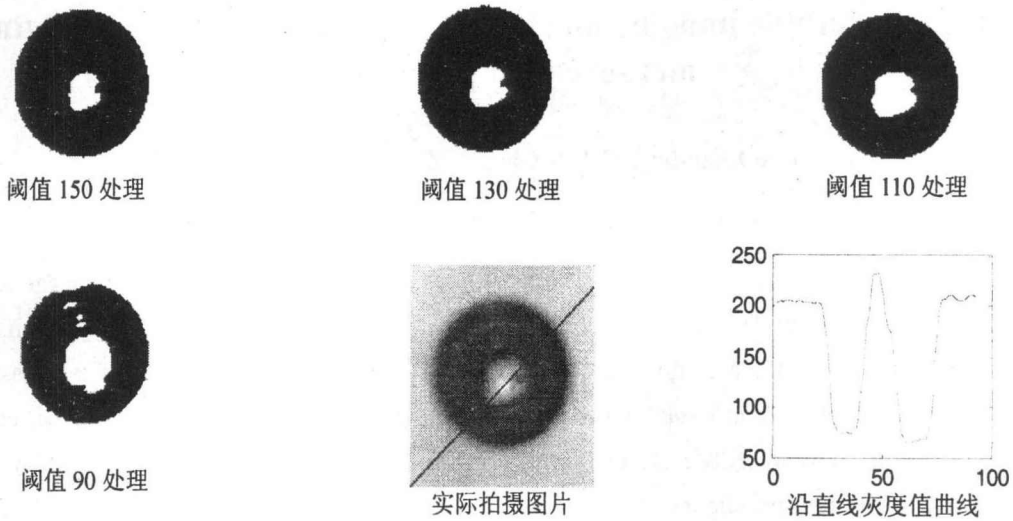


图 5 实际图片处理结果

理论上,当气泡完全位于焦平面时,其边缘的锐度很高,不会随着阈值的变化而变化,但实际上,由于焦平面的影响,气泡图像边缘锐度不高,随着阈值的减小,气泡的边缘也在不断的递缩(图 5),计算经过不同阈值处理后气泡的直径 D (单位为像素 (pixel)) 分别为:

$$D_{150}=331\text{pixel}; D_{130}=327\text{pixel}; D_{110}=325\text{pixel}; D_{90}=315\text{pixel};$$

阈值依次从 150 到 90 每隔 5 取值,分别求得气泡的直径,取所有算得直径的平均值作为测量真值, $D=320\text{pixel}$,则可以计算摄影法测量气泡尺寸时由不在焦平面导致的气泡体积的测量误差分别为:

$$E_{150}=10.67\%; E_{130}=6.71\%; E_{110}=4.76\%; E_{90}=4.61\%;$$

5 结论

(1) 通过理论计算说明了气泡的光学特性,进而得到摄像法测量水中气泡时成像从中心到边缘其灰度值的变化规律,这对理解摄像法测量具有重要意义。

(2) 通过实验解释了气泡图像边界不清晰的原因,即当气泡不在焦平面时,气泡边界会产生模糊,在本研究实验条件下,采用不同图像处理算法所测量的气泡体积的误差约为 4%~11%。

参 考 文 献

- 1 马志杰. CCD 法测量精馏设备中气泡尺寸分布. 化工纵横, 2001(11).
- 2 贺菁等. 基于高程图的光学成像模型[A]. 计算机工程, 2008, 34(1).
- 3 唐远河,等. 基于粒子成像测速技术的水中气泡界面的光学性质研究. 物理学报, 2006, 55(5).
- 4 钟锡华编著. 现代光学基础. 北京: 北京大学出版社, 2003. 118.

Research on bubble imaging mechanism and its influence on imaging measurement precision

HE Si-wei¹, SHAO Jian-bin¹, CHEN Gang^{1,2}, ZHANG miao¹, TANG Yuan-he¹

(1.Xi'an University of Technology, Xi'an; 2.Ankang School; 710048. Email: hesiweide@163.com)

Abstract: The size of bubble and its distribution have an important effect on the research of high-velocity aerated flow. The previous investigations on the bubble size were mainly by empirical or semi-empirical, it is still a difficult problem by now. The method of photograph to measure bubble has been adopted by more and more researchers, but the mechanism of measurement error in this method and how to reduce the margin of error is not clear yet. This passage combine the theory of image-forming principle of CCD with refraction law and reflection law in the surface of bubble through theoretical calculation clarify the optical properties of bubble and it's effect on the method of photograph to measure bubble. Finally, an experiment was shown to verify this theory. At the same time, this paper reveals it can cause measurement error when the measured bubble is not in the focal plane in experiment.

Key words: hydrodynamics; image measurement; bubble; optical properties; focal plane