

基于 Mie 光散射理论的尾流气泡前向 散射光特性研究*

项建胜^{1,2}, 何俊华¹, 陈敏^{1,2}, 陈良益¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:实验中利用 CMOS 图像传感器代替传统的光电探测器接受前向散射光,由几何光学和图像处理分析得出不同散射角的散射光与采集图像中的光环相对应.通过计算各个光环的所有像素值的总和就可以得到前向散射光光强的相对值,进而可以得出前向散射光光强变化规律.根据米氏(Mie)光散射理论可以计算出气泡各个方向的散射光光强,通过比较实验结果和 Mie 理论计算结果可以看出,采用 CMOS 图像传感器探测和图像处理技术可以准确地得出散射光强度的变化规律.

关键词:Mie 散射; CMOS; 图像处理; 像素

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2007)11-2111-4

0 引言

尾流中存在着大量的气泡,通过探测气泡可以诊断尾流的参量^[1],而探测气泡的有效方法就是通过激光入射在气泡群中利用光电探测器来接收气泡的散射光,分析得到的散射光就可以得出气泡的一些特性,如气泡的大小与密度等^[2].接收散射光传统的方法是利用环形探测器来接收,传统的光电探测器一般由多个独立的半圆环状探测单元组成,其作用是将每个环面上的颗粒群的远场散射光转换成相应的电信号输出,电信号经放大及 A/D 转换后输入计算机.这种探测器的缺点是不能够改变圆环的数目和大小,对于不同的颗粒产生的不同散射光仅靠有固定圆环数目和大小的探测器是不够的.本文实验中利用 CMOS 图像传感器代替传统的环形探测器接收散射光,通过图像处理的办法来改变圆环的数目和大小,以接收和计算不同气泡产生的不同角度的散射光.

1 Mie 光散射理论

严格来讲气泡的光散射遵循 Mie 散射理论, Mie 散射理论就是麦克斯韦方程对处在均匀介质中的均匀颗粒,在平面单色波照射下的严格数学解.由 Mie 散射可知,距散射体 r 处 p 点的散射光强为^[4]

$$I_{sca} = I_0 \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} I(\theta, \phi) \quad (1)$$

$$I(\theta, \phi) = |S_1(\theta)|^2 \sin^2 \phi + |S_2(\theta)|^2 \cos^2 \phi \quad (2)$$

式(1)中 λ 是光波波长, I_0 代表入射光强, I_{sca} 代表散射光强, θ 代表散射角, ϕ 代表偏振光的偏振角.

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n + b_n \tau_n] \quad (3)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n + b_n \pi_n] \quad (4)$$

式(3)和(4)中 $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 是振幅函数, a_n 和 b_n 是与贝塞尔函数和汉克尔函数有关的函数, π_n 和 τ_n 是关于连带勒让得函数的函数,只和散射角 θ 有关.

$$a_n = \frac{\varphi_n(\alpha) \varphi'_n(m\alpha) - m \varphi'_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha)}{\varepsilon_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha) - m \varepsilon_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha)} \quad (5)$$

$$b_n = \frac{m \varphi_n(\alpha) \varphi'_n(m\alpha) - \varphi'_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha)}{m \varepsilon_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha) - \varepsilon_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha)} \quad (6)$$

式(5)和(6)中 α 为无因次直径, $\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$, D 为气泡的实际直径, λ 是入射光的波长, m 是散射颗粒相对于周围介质的折射率,它是一个复数,虚部是气泡对光吸收的量化.可见散射光的强度与气泡的半径有着紧密地联系.

2 尾流实验

实验装置^[3]如图 1. 40 mW 的 He-Ne 激光器输出波长为 632.8 nm. 激光通过中心带一个半径为 5 mm 小孔的全反射镜,然后经过扩束准直系统入射到长 1.5 m 高 0.8 m 宽 0.6 m 玻璃缸中的气泡群上,气泡发生器主要是通过空气压缩机与置于缸底的微孔陶瓷管相连,调节气压控制气泡的大小和密度,所产生气泡的平均直径约为 700 μ m. 接收散射光装置由一个付里叶透镜和 CMOS 图像传感器组成, CMOS 接受面位于付里叶透镜的后焦面上. 图像由图像采集卡采集并保存到 PC 上.

* 国防科技重点实验室基金(51448030105ZK1801)资助
Tel: 029-88887650 Email: gogoman2000@126.com
收稿日期: 2006-08-18

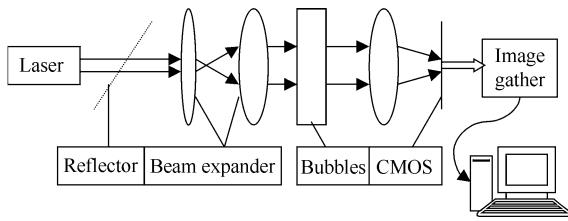


图1 尾流实验装置示意

Fig. 1 Setup of the instrument of bubbles wall in wake

3 实验分析

当激光光束通过气泡幕时被大量向上运动的气泡散射,散射角度分布于 $0\sim 180^\circ$.一个 CMOS 图像传感器是不可能探测到所有散射光的,所以实验中选择探测 $0\sim 20^\circ$ 内的前向散射光.由 Mie 散射理论知,前向散射光强较大有利于探测.前向散射光经付里叶透镜会聚于其后焦面的 CMOS 图像传感器的接收面上.

实验中的光学系统是一个同心光学系统,由几何光学知,物方孔径角 u 相同的光线在后焦面上会聚为一个圆,该圆半径 r 可由几何光学成像理论算出.假设该付里叶透镜像方焦距为 f ,散射气泡位于透镜前 L 处,即物距为 $L(L<0)$,物方孔径角 u ,像方孔径角 u' .由高斯成像公式计算像距

$$L' = \frac{fL}{f+L} \quad (7)$$

$$L \tan u = L' \tan u' \quad (8)$$

$$r = (L' - f) \tan u' \quad (9)$$

联立(7),(8),(9)式可以得出 $r = -f \tan u$, f 和 u 在实验前皆已知.可见在后焦面上的散射光会聚半径与物方孔径角 u 成正切关系.这对在图像上进行光环划分是十分不利的,但是这里处理的是小角度光散射,这时 r 近似满足 $r \approx -fu$,这样图像处理时可采用线性分环.

实验中采用的图像传感器是德国 Basler 公司生产的类型为 A602f/fc 的 CMOS 图像传感器.该传感器的最高分辨率为 656×491 ,像素尺寸为 $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$,输出格式为 8 bits/pixel,最高分辨率时最高帧率为 100 fps,可采用降低分辨率来提高帧率.本实验采集图像的分辨率是 640×480 ,采集到的图像是 8 位的灰度图像.图 2 是气泡幕的激光散射图像.由于在焦点附近处光强值太大,探测器表面有很强的反射光,该反射光又通过覆盖在其上面的玻璃面反射回来,就产生了图 2 中左侧边缘的溅射状亮斑,在图像处理中要将这个亮斑去除掉.经估算焦点附近的亮斑大小是以焦点为圆心半径约为 100 个像素的圆.图 3 是对图 2 采用滤波算子和线性分环后的结果.

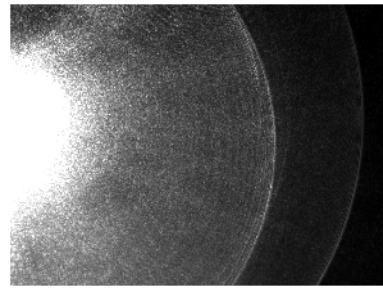


图2 气泡幕的激光散射图像

Fig. 2 The image of laser scattering of bubbles

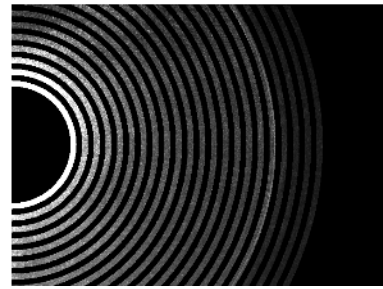


图3 采用滤波算子和线性分环后的图像

Fig. 3 The image after filter and linear rings

光环划分的原则:由于焦点在图像的左边缘的中心,按照前面光路分析知,各个环应以左边缘的中心即焦点为圆心,由于焦点附近的亮斑太强已经把散射光强完全淹没了,故圆环的起始位置就是亮斑的截止位置,圆环厚度由 CMOS 单个像元的尺寸和前面 $dr \approx -fdu$ 公式确定.

4 数据处理

采用 Matlab 数学计算工具计算每个圆环包含的所有像素值的总和,它们表征了所测角度散射光强的大小.同时根据 Mie 光散射理论^[4-5]可以计算出所测角度的理论值,比较两种方法所得结果可以得出实验正确与否.

图像处理时的光环划分采用的是线性划分原则.由 $dr \approx -fdu$ 知 $\Delta r \approx -f\Delta u$,实验中付里叶透镜焦距 f 为 30 mm,当散射角以每 0.2 度增加时 $\Delta r = 0.2 \times 30 \times \pi / 180 \approx 0.1$ mm,而 CMOS 单个像元的尺寸是 $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$,即光环的厚度 Δr 大约是 10 个像素.按照这个厚度和前面分析的光环起始位置划分图像,然后分别计算每个环包含的所有像素值的总和并与 Mie 散射理论计算结果进行比较,比较结果见图 4.原理上图像处理中划分光环的数目越多得到的采样点就越多,数据能够更精确的表示散射强度随散射角的变化规律.从这一点出发将光环数目增加一倍,即以 5 个像素为一个光环的厚度,按前面的计算知散射角大约以 0.1° 增加,当然光环的起始位置与前面相同,比较结果见图 5.

Mie 理论是针对单个散射体的理论,而实验中

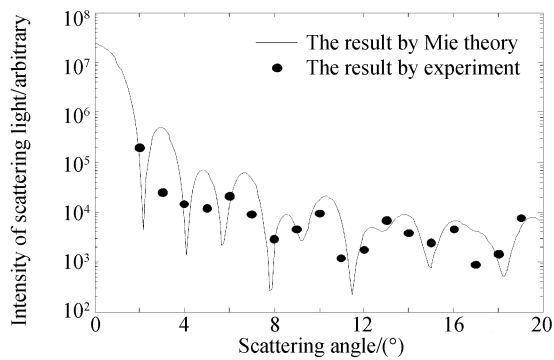


图 4 光环厚度为 10 个像素的处理结果与 Mie 理论结果的比较

Fig. 4 The comparison of results of using the thickness of light rings at 10 pixels and Mie's theory

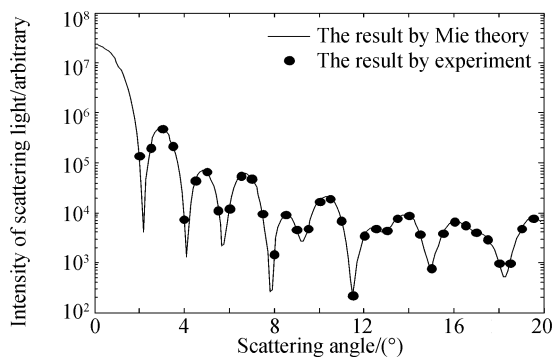


图 5 光环厚度为 5 个像素的处理结果与 Mie 理论结果的比较

Fig. 5 The comparison of results of using the thickness of light rings at 5 pixels and Mie's theory

水中存在大量的气泡,不能简单的应用此理论. 气泡直径范围大约为 $10\ \mu\text{m}$ 到 $1\ \mu\text{m}$,每立方厘米内气泡的数目不超过 100 个. 由光散射理论知,当颗粒间距至少大于其直径的三倍时满足不相关散射^[6],实验中每立方厘米内气泡的数目不超过 100 个,在这个密度下气泡群的散射满足不相关散射,所以在此条件下计算气泡群的散射时可以认为是气泡群中单个气泡散射光强的线性叠加,即气泡群在角度 θ 时的散射光强 $E(\theta)$ 可按式(10)计算,其中 $I_{\text{scat}}(\theta, D)$ 是单个气泡的 Mie 散射强度函数,气泡的个数密度分布 $f(D)$ 服从正态分布,其中 $\bar{D}=700\ \mu\text{m}, \sigma^2=1$.

$$E(\theta) = \frac{2\pi I_0}{k^2} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} I_{\text{scat}}(\theta, D) f(D) dD \quad (10)$$

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{D-\bar{D}}{\sigma}\right)^2\right) \quad (11)$$

按式(10)、(11)与前面的单个 Mie 散射强度的计算方法,可以计算出气泡群的散射强度. 在计算时水的折射率 m 为 1.342,激光波长 $\lambda=632.8\ \text{nm}$. 表 1 是本文 Mie 散射算法计算的消光系数 k_{ext} 和 Wiscombe(MIEVO)和 Du(MIECPP)^[7] 计算结果的比较. 通过比较计算结果基本一致说明算法是正确的.

表 1 应用 Mie 散射理论的消光系数计算结果的比较

m	$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$	MIEVO MIECPP	本文方法
0.75	10	2.232 26	2.224 676
0.75	1 000	1.997 91	2.008 177
1.5-i	0.055	0.101 491	0.102 094
1.5-i	100	2.097 50	2.086 088
10-10i	10 000	2.005 91	2.005 754
10-10i	100	2.071 12	2.072 381

5 结果分析

图 4 是以光环厚度为 10 个像素的划分方法实验结果与 Mie 散射理论结果的比较. 从图中可以看出,实验结果和理论结果基本吻合,但个别点存在较大的偏差. 主要原因是光环厚度过大所包的像素值总和已经不单是某个单一角度的散射光强而是散射光强对某个角度范围的积分,为了减小误差只能减少光环的厚度.

将光环厚度降低一倍即光环的厚度为 5 个像素,按照此厚度进行光环划分然后计算并与 Mie 理论结果比较,结果如图 5. 从图中看出实验结果与理论结果非常吻合,光环厚度的减少使之所包含的角度范围变得非常小,从而散射光强对角度的积分效应可以忽略. 可见图像处理时光环厚度对结果是有影响的. 为了得到比较好的实验结果,光环厚度应该在 10 个像素以内,但从另一个角度看光环厚度减少必然导致光环数目增加,这样就加大了图像处理和计算的难度,在选取时应综合考虑准确度和时间复杂度.

图 4 与图 5 说明了本实验采用 CMOS 图像传感器接受检测散射光是可行的,气泡前向散射光随着散射角度的增大整体呈下降趋势,在靠近零度的位置散射光强最大,散射光强和散射角度呈非线性关系.

6 结论

实验利用 CMOS 图像传感器代替传统的光电探测器测量尾流气泡的散射光强,并通过 Mie 光散射理论验证了实验的正确性. 在图像处理中讨论了光环的划分原则应该综合考虑准确度与时间复杂度,并比较了不同光环厚度对结果的影响. 建立数学模型将单个颗粒的 Mie 散射理论应用于多颗粒体系,计算气泡群的散射强度并与实验结果进行了比较. 在尾流探测方面该实验方案方便实用,在颗粒测量方面可以通过本实验测量出各个角度的散射光强大小,然后利用粒度反演算法可以检测颗粒的直径和密度.

参考文献

- [1] JI Yan-jun, HE Jun-hua, DONG Xiao-na, *et al.* The character of the scattered light of bubbles wall in wake [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **8**(33):1018-1020.
纪延俊, 何俊华, 董晓娜, 等. 尾流气泡幕散射光的性质[J]. 光子学报, 2004, **8**(33):1018-1020.
- [2] ZHANG Jian-sheng, HE Jun-hua, JI Bang-jie, *et al.* Managing of wake optical signal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **8**(34):1274-1277.
张建生, 何俊华, 冀邦杰, 等. 尾流光学信号的处理方法[J]. 光子学报, 2005, **8**(34):1274-1277.
- [3] ZHANG Jian-sheng, LÜ Qing, JI Bang-jie, *et al.* Optical investigation of wakes simulated in laboratory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **9**(30):1146-1149.
张建生, 吕青, 冀邦杰, 等. 实验室模拟尾流的光学研究[J]. 光子学报, 2001, **9**(30):1146-1149.
- [4] DAVE J V. Scattering of visible light by large water spheres [J]. *Appl Opt*, 1969, **1**(8):155-164.
- [5] WISCOMBE W J. Improved Mie scattering algorithms [J]. *Appl Opt*, 1980, **9**(19):1505-1509.
- [6] KERKER M. The scattering of light and other electromagnetic radiation[M]. New York: Academic Press. 1969.
- [7] SHEN Jian-qi, LIU lei. An improved algorithm of classical Mie scattering calculation [J]. *China Powder Science and Technology*, 2005, **4**(1):1-5.
沈建琪, 刘蕾. 经典 Mie 散射的数值计算方法改进[J]. 中国粉体技术, 2005, **4**(1):1-5.

Study of Character of the Forward Scattered Light of Bubbles Based on Mie's Light Scattering Theory

XIANG Jian-sheng^{1,2}, HE Jun-hua¹, CHEN Min^{1,2}, CHEN Liang-yi¹
(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China*)
(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Received date: 2006-08-18

Abstract: The forward scattering light is accepted by CMOS instead of traditional photoelectric detector in the experiment. The scattering lights in different scattered angles are related to the different light rings in the collection images after analyzing in geometry optics and image processing technology. The arbitrary intensity of scattering light can be acquired by calculating the pixel value of different light rings, and the transformation of scattering light can be acquired. The intensity of scattering light of bubbles can be calculated in all angles by Mie's light scattering theory. By comparing the results of experiment and Mie's theory, the transformation of scattering light intensity can be acquired exactly by using CMOS and image processing.

Key words: Mie's scattering; CMOS; Image processing; Pixel



XIANG Jian-sheng was born in Henan Province, China. He graduated from PMPI Department of USTC in 2004. Now he is working towards the M. S. degree in Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics of CAS. His research interests are electro-optical technology.