

# 动态气泡直径的远场干涉测量方法\*

李建民<sup>1</sup>, 宋元军<sup>1</sup>, 王蕴芬<sup>2</sup>, 王增波<sup>1</sup>, 杨富<sup>1</sup>, 李崇香<sup>1</sup>, 冯浩<sup>1</sup>, 孟旭东<sup>1</sup>

(1 河北北方学院 物理系, 河北 张家口 075000)

(2 河北建筑工程学院 机械系, 河北 张家口 075024)

**摘 要:** 利用气泡远场干涉对动态气泡直径进行测量, 结果表明, 当透明液体中的动态气泡经过激光束时必然在远场产生圆环状干涉条纹. 对传统分光仪进行改制, 用数码相机代替望远镜, 并连接计算机, 组合成动态气泡直径测量系统, 拍摄得到干涉条纹, 对干涉条纹的角半径进行测量, 并计算出气泡直径, 测量相对差为 1.1%. 该系统还可对单个气泡束流或多个气泡束流进行气泡直径的统计.

**关键词:** 测量与计量; 气泡直径测量; 远场干涉; 动态气泡

**中图分类号:** TN206

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)06-1229-4

## 0 引言

平行激光束照射到透明液体中的气泡时, 气泡具有分波阵面的作用, 在远场产生干涉并形成内密外疏且干涉级内高外低的圆环状干涉条纹<sup>[1]</sup>, 利用远场干涉可以对气泡进行相关测量. 本文提出用远场干涉对水中运动气泡的直径进行测量, 根据测量结果求出气泡直径. 用 CCD 等光电器件接收条纹图像, 用计算机进行运算处理, 每次测量一个气泡的直径, 要统计多个气泡直径的分布可通过多次测量来实现. 目前已有的气泡直径测量方法大多集中于光通过众多微气泡时的散射<sup>[2-4]</sup>、激光全息术<sup>[5]</sup>及使用成像或视频技术<sup>[6]</sup>等. 干涉测量法的引入为透明介质中动态气泡直径的检测提供了新方法.

## 1 气泡远场干涉模型

由图 1 平行激光束照射到半径等于  $r$  的气泡上, 泡外介质折射率  $n_1$ , 泡内介质折射率  $n_2$ , 一近轴光线(入射角  $i_1$  小于临界角)入射于气泡界面  $a$  点, 折射角为  $i_2$ , 经界面两次折射后光线  $a''b''$  最终以折射角  $i_1$  出射, 一远轴光线(入射角大于临界角)入射于气泡界面  $a'$  点, 全反射光线  $a'b'$  与  $a''b''$  平行出射, 图 1 中两出射光线  $a'b'$  与  $a''b''$  在远场的光程差为

$$\Delta = 2r[\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2 \cos \alpha} - n_1 \sin \alpha] \quad (1)$$

如  $n_1$  与  $n_2$  已知,  $2\alpha_1$  与  $2\alpha_2$  可测,  $2\alpha_1$  与  $2\alpha_2$  两方向间的条纹数  $N$  可读出, 由式(1)得气泡直径为

$$2r = N\lambda / [\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2 \cos \alpha_1} - n_1 \sin \alpha_1 - (\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2 \cos \alpha_2} - n_1 \sin \alpha_2)] \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为真空中的波长.

如果在图 1 中气泡右侧放置一凸透镜且与气泡共轴, 则在凸透镜右侧焦平面上必然呈现内密外疏且干涉级内高外低的圆环状干涉条纹.

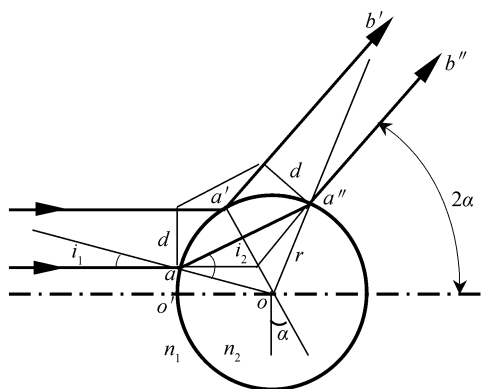


图 1 气泡远场干涉示意图

Fig. 1 Diagram of bubble far-field interference

## 2 干涉法测动态气泡直径

### 2.1 测量装置

测量装置见图 2(俯视), 发自氦氖激光器 L 的激光束经过变束镜 T, T 的作用有二, 一为控制光束的发散角, 氦氖激光器输出的激光束往往有明显的发散角, 调节 T 中两个透镜的距离可使光束更为平行, 二为控制光束的粗细, 可通过调整两透镜的焦距来实现, 一般使光束直径略大于气泡直径为好. W 为透明玻璃水箱, 用 5 mm 厚平板玻璃经挑选后粘制, F 为置于水箱下面的分光仪(也称测角仪), 聚焦于无穷远的数码相机 C(本文选用索尼 717 数码相机也可选用摄像机)固定于 F 的活动臂上, C 的光轴与 F 的中央竖直轴垂直, 活动臂可绕 F 的中央竖直轴转动, C 可接收来自 L 并通过 W 的激光束, 激光束的光轴与水箱右壁垂直, C 的光轴与激光束可

\* 河北省教育厅科学研究基金(Z2006410)资助

Tel: 0313-2222832 Email: ljmx318@tom.com

收稿日期: 2007-09-10

实现共轴.  $W$  内还放置有发泡器和选泡器(图中未画出),选泡器仅让一束待测气泡上升,其它气泡被分流到两侧空间. 数码相机  $F$  还连接有计算机(图中未画出).

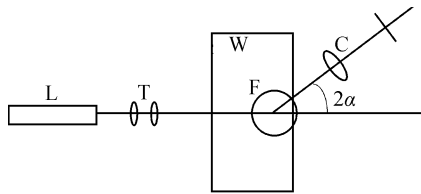


图2 测量装置  
Fig. 2 Diagram of measuring device

## 2.2 测量与计算

### 2.2.1 测量激光束直射方向角位置

让发泡器处于停机状态,激光束已与图2中  $W$  右侧箱壁垂直,使  $C$  与直射激光束共轴,记录此时角位置  $2\alpha_0 = 197^\circ 18' 00''$ .

### 2.2.2 观察干涉条纹并测量角位置

将  $C$  旋转至图2所示位置,记录此时角位置,即箱外相机光轴角位置  $2\alpha_m = 161^\circ 57' 00''$ ,开启发泡器,沿激光束方向调整发泡器位置,使操作者(在相机外用眼直接)看到之被激光束照射气泡  $o$  的折射“像”在  $C$  的光轴  $f$  点处,此时  $C$  焦平面处的图形见图3,干涉条纹外轮廓呈圆斑状,应是以  $C$  的光轴为圆心的圆(在  $C$  的显示屏上看到的是将图3旋转  $180^\circ$  的图形),拍摄此图形.



图3 相机焦平面处干涉图  
Fig. 3 Interferogram on the focal plane of camera

### 2.2.3 计算角位置差 $2\alpha_s$

$$2\alpha_s = 2\alpha_0 - 2\alpha_m = 197^\circ 18' 00'' - 161^\circ 57' 00'' = 35^\circ 21' 00'' = 35.350^\circ \quad (3)$$

为相机  $C$ (在水箱外)旋转的角度.

### 2.2.4 $2\alpha_1$ 与 $2\alpha_2$

式(2)中  $2\alpha_1$  应为图3中最左侧  $M$  级(不必知道  $M$  是多少)相长干涉条纹在水中方向与激光束直射方向的夹角,  $2\alpha_2$  应为图3中最右侧  $M-N$  级相长干涉条纹在水中方向与激光束直射方向的夹角. 水箱内外光线及方向关系见图4. 图3中干涉条纹数  $N$  为24.

### 2.2.5 数码相机光轴对应的像素

数码相机的光轴即镜头光轴必与一个 CCD 的像素相交,调至激光束直射时数码相机的光轴与激

光束共轴,由 Windows 图像浏览器的编辑器或 Photoshop 通过激光束直射光斑图确定此像素的横向序号为1373,文中简称光轴像素.

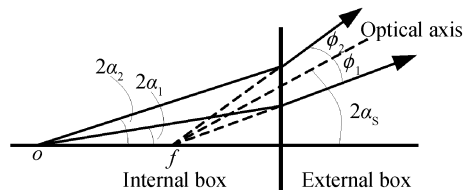


图4 水箱内外光线方向示意图  
Fig. 4 Light direction inside and outside the box

### 2.2.6 计算待测条纹与相机光轴角度差

图3中  $M$  级干涉条纹对应横向像素序号为643,  $M-N$  级干涉条纹对应横向像素序号为1975,此时从光轴像素1373到643共有  $1373 - 643 = 730$  个像素距离,CCD 横向相邻像素间距为  $0.00348 \text{ mm}$ ,数码相机焦距  $48.5 \text{ mm}$ ,730个像素距离等于  $730 \times 0.00348 \text{ mm} = 2.54 \text{ mm}$ ,有角度差

$$\phi_1 = \arctan(2.54 \text{ mm} / 48.5 \text{ mm}) = 2.998^\circ \quad (4)$$

同理,从1373到1975共有  $1975 - 1373 = 602$  个像素距离,为  $602 \times 0.00348 \text{ mm} = 2.09 \text{ mm}$ ,角度差

$$\phi_2 = \arctan(2.09 \text{ mm} / 48.5 \text{ mm}) = 2.468^\circ \quad (5)$$

### 2.2.7 计算 $\alpha_1$ 与 $\alpha_2$

$$2\alpha_s - \phi_1 = 35.350^\circ - 2.998^\circ = 32.352^\circ \quad (6)$$

据图4由折射定律有

$$2\alpha_1 = \arcsin[(n_2/n_1) \sin(2\alpha_s - \phi_1)] \quad (7)$$

式(7)中水折射率  $n_1$  为1.3333,空气折射率  $n_2$  为1.0003<sup>[7]</sup>,代入式(7)得

$$2\alpha_1 = 23.670^\circ; \alpha_1 = 11.835^\circ.$$

同理

$$2\alpha_s + \phi_2 = 35.350^\circ + 2.468^\circ = 37.818^\circ \quad (8)$$

$$2\alpha_2 = \arcsin[(n_2/n_1) \sin(2\alpha_s + \phi_2)] \quad (9)$$

同样可得

$$2\alpha_2 = 27.388^\circ; \alpha_2 = 13.694^\circ \quad (10)$$

### 2.2.8 计算气泡直径

将  $\alpha_1 = 11.835^\circ$ ,  $\alpha_2 = 13.694^\circ$ ,  $n_1 = 1.3333$  与  $n_2 = 1.0003$  代入式(2)计算得气泡直径

$$2r = 0.780 \text{ mm} \quad (11)$$

## 3 讨论

### 3.1 对多个气泡进行统计测量

当统计一个气泡束流时,需要多次拍摄测量,若统计多个气泡束流时,整个装置不变,仅需移动发泡器的位置使不同的气泡束流通过激光束进行拍摄测量,即  $2\alpha_0$  和  $2\alpha_m$  不变,则  $2\alpha_s$  不变,计算过程同上,使用相关计算程序或软件可使运算速度加快.

### 3.2 相邻像素横向间距测量

照相机说明书上一般并不告知相邻像素间距等详细指标,最可靠的方法是对其进行测量.本文采用 550 平行光管,所用平行光管物镜焦距 550.04 mm,选用玻罗板线距分别为 2.000 0 mm 和 3.999 5 mm 的线对,所用数码相机最长焦距 48.5 mm,使其影像尺寸处于最大为  $2\ 560 \times 1\ 920$  并聚焦无限远再与已准直的平行光管共轴,拍摄玻罗板的像,由 Windows 图像浏览器的编辑器或 Photoshop 可测得玻罗板像线距所对应的像素数,算得横向相邻像素间距为 0.003 48 mm.

### 3.3 照相机或摄像机的选择

摄像机的连续摄像功能优于照相机的连拍功能,捕捉能力强,而数码相机及相关软件容易获得且成本低,数码相机也有视频输出可连接电视机作监视器.对两种机型的共同要求:

1) 有较大的光圈且可手动调整.图 3 中干涉条纹外轮廓是一个圆,焦距不变时光圈越小则该圆的直径越小,使  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  的差值就越小,用式(2)计算所得结果有效数字位数变少,索尼 717 在长焦段最大光圈系数为 2.4.自动光圈不适于这里使用.

2) 使用固定光学焦距.拍摄干涉条纹宜使用固定光学焦距或变焦镜头的最长光学焦距,在反复拍摄时不容易出差错.由于使用长焦拍摄且远离干涉环圆心使得图 3 中干涉条纹成为接近直线的圆弧.

3) 成功拍摄干涉图的关键.从气泡进入到离开平行激光束这段时间内,虽然气泡在动,但焦平面上的远场干涉图是不动的<sup>[8]</sup>,这使得干涉条纹得以成功拍摄.

### 3.4 怎样使测量精准到一个像素

要使测量精准到一个像素<sup>[6]</sup>,必须做到:1) 相机镜头光轴在 CCD 上的位置必须精准到一个像素.面阵 CCD 作为一种光电接收转换器件,表面在横竖两个方向都周期排列光电接收单元,从表面形状来说可认为面阵 CCD 是两维反射光栅,当激光束与镜头共轴并垂直照射到 CCD 上时,必有在正交方向不同级别的衍射光束出现,而镜头靠近 CCD 的光学面又把这些衍射光束反射到 CCD 上形成诸多光斑,这样的画面可以被摄并显示到连接相机的计算机屏幕上,只有激光束与光轴共轴且垂直照射到 CCD 上时,这些光斑才会有位置的对称性,还表现为这些光斑可连成放射状直线而不弯曲,这可通过分光仪及固定相机的微调来实现.放射线的交点应为光轴像素.2) 分光仪 F 的最小角度指示值应小于或等于相邻像素间距对相机镜头像方节点的张角.

本文中相邻像素间距 0.003 48 mm,镜头焦距 48.5 mm,算得相邻像素间距对相机像方节点的张

角约为  $15''$ ,这就要求 F 的最小角度指示值应等于或小于  $15''$ ,或者说要使测量精准到一个像素所用分光仪 F 必须有相适应的角度调整和指示准确度.

### 3.5 激光源的选用

激光器选用 1~3 mW 的单模氦氛激光器为宜.

### 3.6 测量精准程度及省略

引起测量误差的主要因素有:夫琅和费圆屏衍射对远场干涉的影响;使用分光仪及测量方法和过程所引入的误差;使用水箱时水箱玻璃和水的均匀性所引入的误差.

1) 圆屏衍射对干涉的影响.平行激光束经过气泡时会发生夫琅和费圆屏衍射,会使干涉与衍射条纹相互调制而影响测量结果,圆屏衍射规律与圆孔相同,其主要能量集中于平行激光束直射方向附近,测量时应远离直射方向,当偏离直射方向  $20^\circ$  时,其衍射主极大光强值约为  $10^{-10} I_0$ .数量级,其中  $I_0$  为爱里斑中心处的光强,远小于相长干涉条纹的光强.当  $2\alpha$  值大于  $20^\circ$  时,衍射的影响可略.

2) 使用分光仪及测量方法和过程所引入的误差.这与静态气泡直径测量情况相同,要考证测量的精准程度应参考静态气泡直径的测量方法,使用分光仪测量静态气泡直径的相对差<sup>[1]</sup>为 0.85%.考虑到静态气泡时夫琅和费圆屏衍射也存在,此项误差中也包括了圆屏衍射对远场干涉之影响所引入的误差.

3) 水箱平板玻璃光学不均匀性所引入的误差.测量中水箱所引起的光学不均匀性主要有:平板玻璃两表面不平行、玻璃折射率不均匀、水在扰动后折射率不均匀,通过相关实验测量及计算知平板玻璃两表面不平行所引入的误差为最大,后两者引入的误差与此相比可略.

为减小平板玻璃两表面不平行所引入的误差,在粘制水箱前应先一阿贝自准直望远镜对玻璃进行挑选,望远镜物镜通光孔径 20 mm,焦距 168 mm,十字透光窗十字的线宽为 0.103 mm,望远镜物镜正对着玻璃时,从望远镜目镜中可看到十字透光窗的两个反射像,玻璃两表面越是平行两十字像越近,当两十字像重合且刚可看见微小错位时,玻璃的劈尖角为  $0.002\ 3^\circ$ .测量时激光束经过水箱玻璃的面积不大,保证水箱上有  $8 \times 20\ \text{cm}^2$  的面积其劈尖角不大于  $0.002\ 3^\circ$  即可,经计算由此劈尖角引入的相对误差不大于 0.23%.

4) 测量总误差.由以上两项相对误差相加为 1.08%,计算中应取 1.1%.

## 4 结论

本文提出一种新的测量动态气泡直径的方法—

远场干涉法,平行激光束照射到透明液体中的气泡时,在远场产生干涉并形成圆环状干涉条纹,可推导出气泡直径测量公式,将分光仪进行改造,用数码相机代替望远镜,对所接收的动态干涉条纹进行拍摄测量,对水箱外所测角度值及干涉条纹在数码相机图像接收器 CCD 上的位置进行计算,计算出  $M$  级和  $M-N$  级干涉条纹与直射激光束之间在水中的夹角  $2\alpha_1$  和  $2\alpha_2$ ,经气泡直径计算可计算出气泡直径  $2r$ . 用一计算机与数码相机连接并使用相关程序及软件,有利于仪器调整,可加快处理速度特别是对大量气泡进行统计测量时尤其必要. 远场干涉测气泡直径方法的引入是对已有方法的重要补充,有望在生产 and 科研中得到应用.

#### 参考文献

- [1] LI Jian-min, YANG Fu, WEI Jian-yu, *et al.* Far Field Interferometric Analysis and Application of Bubble[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1031-1034.  
李建民,杨富,魏建宇,等. 气泡的远场干涉分析和应用[J]. 光学学报, 2007, **27**(7):1031-1034.
- [2] JI Yan-jun, MA Xiang, HE Jun-hua, *et al.* The Influence of Bubble on the Transmitting of Light in Wake [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):626-628.  
纪延俊,马祥,何俊华等. 尾流中气泡对光传播的影响[J]. 光子学报, 2004, **33**(5):626-628.
- [3] ZHANG Jian-sheng, LIU Jian-kang, JI Bang-jie, *et al.* Mathematical model for the optical specialty of bubble film in ship wakes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8):1032-1036.  
张建生,刘建康,冀邦杰,等. 尾流气泡幕光学特性的数理模型[J]. 光子学报, 2002, **31**(8):1032-1036.
- [4] WANG Jiang-an, JIANG Xing-zhou, MA Zhi-guo, *et al.* Study on back light-scattering property of bubbles in ship wake[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2):205-218.  
王江安,蒋兴舟,马治国,等. 舰船尾流气泡后向光散射特性研究[J]. 激光技术, 2005, **29**(2):205-218.
- [5] XIE Jian-jun, LU Yang, PAN Qin-min, *et al.* Holography application in characterization of dynamic bubbles of Foam-DV in cyclohexane/PDMS[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, **27**(2):159-164.  
谢建军,鲁阳,潘勤敏,等. 激光全息在环己烷/PDMS 体系起泡泡脱挥气泡场中的应用[J]. 中国激光, 2000, **27**(2):159-164.
- [6] ZHAO Xiao-fei, HE Jun-hua, WEI Ming-zhi, *et al.* A New Method of Getting Wake Character Based Image Process Technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3):443-446.  
赵晓飞,何俊华,韦明智,等. 一种基于图像处理技术获取尾流特性的新方法[J]. 光子学报, 2006, **35**(3):443-446.
- [7] YE Shen-gua. Laser application in measuring in precision [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1980. 113-114.  
叶声华. 激光在精密计量中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980. 113-114.
- [8] YI Ming. Optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 116-117.  
易明. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 116-117.

## Measurement of Dynamic Bubble Diameter with Method of Distant Field Interference

LI Jian-min<sup>1</sup>, SONG Yuan-jun<sup>1</sup>, WANG Yun-fen<sup>2</sup>, WANG Zeng-bo<sup>1</sup>,  
YANG Fu<sup>1</sup>, LI Chong-xiang<sup>1</sup>, FENG Hao<sup>1</sup>, MENG Xu-dong<sup>1</sup>

(1 Department of Physics, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China)

(2 Department of Machine, Hebei Architectural Engineering College, Zhangjiakou 075024, China)

Received date: 2007-09-10

**Abstract:** Dynamic bubble diameter is measured with distant field interference. When the bubble in a transparent liquid passes through a parallel laser beam, the interference rings will be produced in the distant field. A traditional spectrometer is transformed by means of a digital camera replacing a telescope and connecting a computer so as to form a system to measure dynamic bubble diameter. By shooting the interference rings and measuring their angular radii, the diameter of bubble is calculated. The relative difference of measurement is 1.1% and the diameter of single bubble beam or more can also be counted.

**Key words:** Measurement and metrology; Measurement of bubble diameter; Distant field inference; Dynamic bubble



**LI Jian-min** was born in 1956. He is an associate professor of the Department of Physics, Hebei North University. His research interests focus on optics, physical measurement and teaching.