

文章编号 1004-924X(2005)06-0664-04

一种高灵敏度阴影法内波显示系统的设计

张明照,王伯雄,罗秀芝,刘国忠,刘振江,余超

(清华大学精密仪器与机械学系,北京100084)

摘要:设计并实现了一种平面反射双光程结构的阴影系统,该系统在减小了尺寸的同时还提高了观测的灵敏度;采用直接成像的方法,降低了系统噪声,提高了自动化程度。结果表明:该系统可以清楚地显示小到 1.0×10^{-6} g/cm³的密度梯度变化,可在海洋内波动力学研究中,对实验室中模拟内波的形态结构进行观测,满足试验场地受限的情况下大尺寸内波密度场的观测需要。

关键词:内波;阴影法;流场显示;图像处理

中图分类号:TH703;TP391 **文献标识码:**A

Design of high sensitive shadowgraph system for internal wave visualization

ZHANG Ming-zhao, WANG Bo-xiong, LUO Xiu-zhi, LIU Guo-zhong, LIU Zhen-jiang, YU Chao

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A shadowgraph system with a to-and-fro light-reflecting structure was designed and implemented. The system can reduce overall dimensions and improve visualizing sensitivity. A CCD direct imaging approach was introduced to reduce the system noise and realize full automation. The experimental results show that this system can visualize 1.0×10^{-6} g/cm³ variations in density gradient, and can be used to visualize experimental simulated internal waves in the study of ocean internal wave dynamics, and can meet the requirement of internal wave visualization with large wave field scale in limited laboratory space.

Key words: internal wave; shadowgraph; flow visualization; image processing

1 引言

物体在密度分层的海水中运动时会产生内波,研究内波的产生及传播特性,对海洋环境监测及潜艇探测等领域有着重要的意义。在实验室研究中,过去常用染色等方法^[1-2]进行波形观察,由

于这种方法无法实现三维观测,不能满足许多内波实验的观测需要。

本文将流体力学试验中常用的阴影技术应用到内波的观测中,考虑到视场尺寸要求和试验场地的限制,设计了一种平面反射的双光程结构形式,不但将昂贵的透镜从2块减少到1块,降低了成本,而且还将显示的灵敏度提高了1倍。另外,

在成像系统的设计上,使经内波调制后的阴影图像直接在 CCD 摄像机的感光芯片上成像,消除了其它方法如通过毛玻璃屏成像等所附加的图像噪声。所设计的阴影系统,不但可以对内波形态如开尔文角或潜体尾迹等进行定性观察,在一定条件下,还可以测量内波密度场,进而可以测量其它内波参数。

2 系统设计

采用平面反射双光程结构的阴影系统如图 1 所示,它由光源、镜组和成像系统组成。

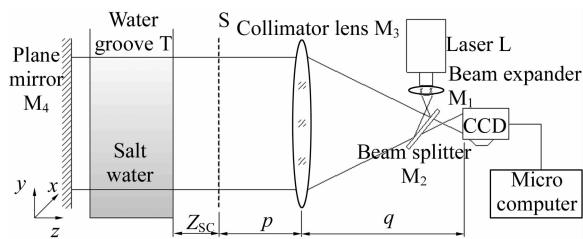


图 1 一种改进的阴影系统

Fig. 1 An improved shadowgraph system

光源选用半导体激光器,它具有体积小,质量轻,抗震性强等特点,而且它不需要高压电源,用低压直流电源就可以驱动。虽然半导体激光器发出的光束在准直后其截面上光强分布均匀性较差,但阴影法测量的是光强对比度的变化,所以光强分布的不均匀性影响不大。由于本仪器采用的是直接 CCD 摄像机摄像的图像采集方案,这就要求到达 CCD 感光芯片上的光强合适,所以需要激光器的发光功率可调。采用在直流电源和激光器之间串入可变电阻的方法,可以调节激光器的发光功率。

半导体激光器产生发散光,其内置的透镜可以令发散光准直,准直后的小口径准直光经扩束透镜 M₁ 扩束和分光镜 M₂ 扩折光后,由准直镜 M₃ 准直成口径为 $\Phi 500$ mm 的平行光,平行光穿过水槽中的模拟内波后,被平面反射镜 M₄ 反射回来,再次穿过水槽,经过两次扰动的光线经透镜 M₃ (这时它的作用是成像透镜) 缩束后,穿过分光镜直接成像于 CCD 的感光芯片上。

假想在准直镜 M₃ 和水槽 T 之间平行于水槽右壁放置了一块单向(光线可以从右到左但不能

从左到右)显示屏 S,经内波扰动的偏转光线,将在显示屏 S 上呈现出亮暗不均匀的阴影图像,所以显示屏 S 与 CCD 摄像机的感光芯片之间应具有物像共轭关系。

图像采集系统由 CCD 摄像机、图像采集卡、微型计算机和图像采集及分析软件组成。摄像机采用 Mintron 的 MTV-1881EX 型 CCD 黑白摄像机,其输出信号为 CCIR 制式,连续摄像速度为 25 帧/s。图像采集卡采用加拿大 Matrox 公司的 CronosPlus 采集卡,它可以采集 NTSC、PAL、RS-170 和 CCIR 等标准制式的视频信号。图像采集和分析软件是在 Matrox 公司提供的开发包 Millite 的基础上进行二次开发得到的。Millite 中包含了图像采集需要用到的若干 ActiveX 控件,以及一些进行图像处理的功能。整个软件可分为两大部分,一部分是图像采集,包括连续采集、单帧采集和连续采集;另一部分是分析处理,包括图像去噪、图像相减和对比度计算等。其中连续采集是进行连续的采集和显示,主要用于观察仪器的调节结果;单帧采集是采集单帧图像并显示在当前窗口中,随后可以保存;序列采集是按一定的时间间隔连续采集若干幅图像,各幅图像可分别保存。分析处理部分是软件的核心,图像去噪可以去除诸如照度不均等光学系统噪声;图像相减可以实现两幅图像相减;对比度计算可计算光强对比度,进而可以知道密度场分布情况。

3 理论分析

阴影法显示的基本原理是基于光线穿过折射率分布不均匀的相位物体会偏离原来的入射方向。图 2 显示的是光线穿过水槽的情形,水槽中装有均匀线性分层的盐水,盐水浓度(密度)从水面向水槽底线性增加。

如果水槽中没有分层盐水,从右向左穿过水槽的平行光线经平面反射镜反射后沿原路返回,而如果水槽中盛有均匀线性分层的盐水,并且其中存在由往复运动的物体产生的内波时,光线会因密度(折射率)场的变化而发生偏转。为简化问题的分析,这里假定折射率的不均匀性发生在 y 方向上,光线第一次经过水槽时,在出口处偏转了

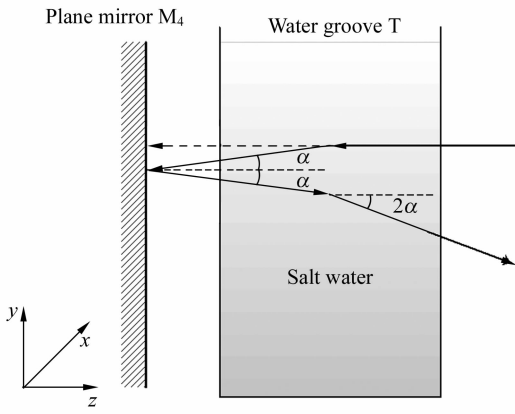


图 2 光线偏折示意图

Fig. 2 Schematic of ray deflection

一个角度 α (图中经过了简化及放大处理, 实际上光线是逐渐偏折的且偏折角很小), 偏转角是 y 的函数, 当光线经平面反射镜反射再次穿过水槽时, 如果反射镜离水槽足够近, 往返光线在 y 方向上的位移很小, 可认为其所经流场的密度变化不大, 这样当其从水槽的右边射出时, 会再次偏折一个 α 的角度, 因而, 受扰动后返回的光线与未受扰动时相比偏转了 2α 的角度。从上面的分析可以看出, 采用平面反射双光程结构, 可以使这种偏折角增大 1 倍, 因而可以使基于这种结构的阴影法的灵敏度提高 1 倍。

最终的偏折角 φ 由下式给出^[3]

$$\varphi = 2\alpha = 2 \int_R \frac{\partial(\ln n)}{\partial y} dz, \quad (1)$$

式中 R 是光线穿越水槽的路径。如果密度(折射率)场在水平方向即 z 向是常数, 此时

$$\varphi = 2W \times \frac{\partial(\ln n)}{\partial y}, \quad (2)$$

式中 W 是水槽的宽度。对于实验中圆柱体在水槽中作上下往复运动所产生的内波情况, 其密度场是二维的。现考虑二维情况, 即内波密度场在 x 和 y 两个方向上都有变化, 光线在 x 和 y 方向的偏折角分别为

$$\varphi_x = 2W \times \frac{\partial(\ln n)}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\varphi_y = 2W \times \frac{\partial(\ln n)}{\partial y}. \quad (4)$$

只有当 φ_x 或 φ_y 不为零时, 才能引起阴影图的光强变化。光强变化 ΔI 与无扰动时的光强 I

之比即对比度 R_c 。 R_c 与光线偏折角变化 $\partial\varphi_x/\partial x$ 和 $\partial\varphi_y/\partial y$ 的关系为

$$R_c = \frac{\Delta I}{I} = -Z_{sc} \left(\frac{\partial\varphi_x}{\partial x} + \frac{\partial\varphi_y}{\partial y} \right), \quad (5)$$

式中 Z_{sc} 为水槽到假想的显示屏 S 之间的距离, 将式(3)和(4)分别代入式(5)可得

$$R_c = -2WZ_{sc} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\ln n), \quad (6)$$

在盐水浓度不是很高时, 其折射率与密度有如下关系^[4]

$$n = n_0 + (\Delta n / \Delta \rho) (\rho - \rho_0), \quad (7)$$

式中 $n_0 \approx 1.3330$ 和 $\rho_0 \approx 0.00823 \text{ g/cm}^3$, 分别是清水在室温时的折射率和密度, $\Delta n / \Delta \rho \approx 0.2457 \text{ g/cm}^3$ 是盐水的折射率相对密度的变化率。

将式(7)代入式(6), 有如下的近似式

$$R_c = -0.4914WZ_{sc} \left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} \right), \quad (8)$$

可以看出, 阴影法对液体密度的二阶导数敏感, 对于密度梯度(一阶导数)为常数的情况, 其对比度为零, 因而阴影法对内波实验中盐水线性分层的“背景”并不敏感, 而只对内波引起的密度梯度变化敏感, 这刚好符合对内波显示的需要。

4 实验结果

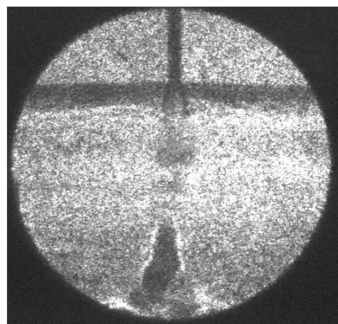
在均匀线性分层的海水中, 潜体以速度 v 行进时产生的内波兴波流场和阻力, 称为潜体兴波。研究表明^[5], 对于潜体兴波, 其内波的形成与海水密度分层、潜体特征尺寸和运行速度直接相关, 只有在潜体扰动频率低于海水的 Brunt Väisälä 频率 N 时才可能形成内波。

实验室中, 在有机玻璃水槽中用盐水配比装置配制密度梯度为 $\partial\rho/\partial y = 0.003 \text{ g/cm}^4$ 由水面向水槽底部密度逐渐增加的盐水以模拟海水分层情况, 以 3 组不同直径和运动速度的圆柱体(见表 1)进行实验, 用所设计的阴影系统进行观测得到的结果分别如图 3(a)、(b)和(c)所示。

表 1 实验参数

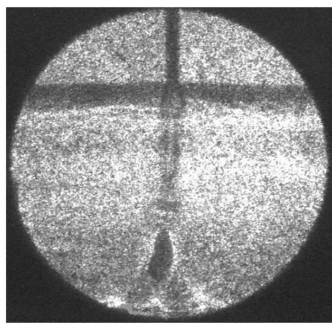
Tab. 1 Experimental parameters

直径 D/cm	速度 $v/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	频率 N/s^{-1}
1.5	0.17	1.56
1.5	0.43	1.56
0.8	5.96	1.56



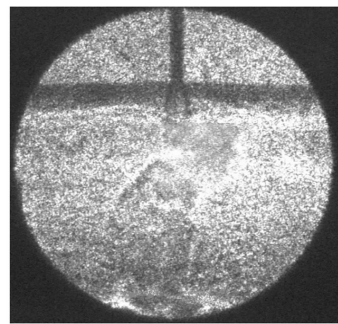
(a) 表 1 中第 1 行所列条件下的图像

(a) Image taken in the conditions listed in the first row of tab. 1



(b) 表 1 中第 2 行所列条件下的图像

(b) Image taken in the conditions listed in the second row of tab. 1



(c) 表 1 中第 3 行所列条件下的图像

(c) Image taken in the conditions listed in the third row of tab. 1

图 3 内波实验阴影图

Fig. 3 Shadowgraph images of internal waves

从图中可以看出,在前两种条件下能够观测到稳定的内波形态,而在后一种条件下观测到的则是混乱的波动情况,这与理论预测相吻合。

5 结 论

(1) 在内波实验中,阴影法能够对潜体兴波现象进行显示,且具有非侵入性等优点;

(2) 平面反射双光程结构阴影显示系统与通

常的阴影系统相比,其灵敏度可以提高 1 倍;

(3) 采用 CCD 直接成像的方式可以简化系统结构,提高显示记录的自动化程度,降低图像中的系统噪声;

(4) 平面反射双光程结构及 CCD 直接成像方法也可以用于纹影显示系统及莫尔偏折法显示测量系统中,同样会有提高灵敏度及降低噪声的效果。

参考文献:

- [1] KELLER J B, MUNCK W H. Internal wave wakes of a body moving production in a stratified fluid[J]. *Wave Motion*, 1981, (3): 1425-1431.
- [2] 马晖扬, 麻柏坤, 张入杰. 分层流体中运动物体与自由面相互作用的实验研究[J]. *流体力学实验与测量*, 2000, 14(3): 7-11.
MA H Y, MA B K, ZHANG R J. The experimental research on the interaction of a moving body with a free surface in the stratified fluid[J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2000, 14(3): 7-11. (in Chinese)
- [3] 范洁川. 近代流动显示技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
FAN J CH. *Modern flow visualization*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [4] 王肇圻, 张轶楠, 傅汝康, 等. 折/衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1): 1-4.
WANG ZH Q, ZHANG Y N, FU R L, et al. Design of hybrid refractive-diffractive Petzval objective in visible band [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(1): 1-4. (in Chinese)
- [5] SUTHERLAND B R, FLYNN M R, ONU K. Schlieren visualisation and measurement of axisymmetric disturbances [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2003, (10): 303-309.
- [6] THIERRY D, ANTHONY D, DRIC F. Observation of near-critical reflection of internal waves in a stably stratified fluid[J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16: 1936-1941.
- [7] 叶海加, 陈昱, 邢渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1): 71-75.
YE H J, CHEN G, XING Y. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(1): 71-75. (in Chinese)

作者简介:张明照(1973—),男,安徽人,北京清华大学精密仪器与机械学系博士研究生,主要研究方向为流场显示测量技术和无损检测技术。

王伯雄(1947—),男,江苏人,北京清华大学精密仪器与机械学系教授,博士生导师,主要研究方向为精密仪器与测试技术、MEMS 技术和光学测量技术。