

微幅振荡流体表面波图谱显示方法*

高宇欣 鄂学全

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘要 本文介绍一种能够清晰显示微幅高频振荡的流体表面波图谱结构的方法和产生高达 100Hz 频率、波幅为毫米以下的流体表面波的实验装置, 即改进了 FARADAY 实验装置。用本实验装置和显示方法获得了精美的波幅图, 并就几种波图作了简要说明。

关键词 流动显示 流谱图 法拉第波 垂直振荡

1 引言

当阳光斜射、微风吹拂, 你站在一定的角度, 可以看见平静的湖面泛起的五光十色的涟漪; 当你双手适度摩擦龙玺两耳时, 可以看到盆中激起的美丽的波纹, 然而要用照相机拍摄下来, 以照片展现在眼前却不是容易的事。以微小振幅和一定频率上下垂直振动玻璃杯(或其它容器)时(见图 1), 你可借助光线观察杯中水表面的波动, 而此波的频率却是振动频率的一半。这就是有名的 Faraday (1831)^[1]实验。这种波为 Faraday 波。这类波从开始研究以来, 多侧重理论方面; 而在实验测量方面, 却由于波幅很小, 约在几微米至几百微米之间, 测试困难, 进展缓慢。而显示这些波, 揭示其变化形态, 就更加困难了。直到近几年, 由于计算机技术和流动显示技术的发展, Faraday 波的研究才得以深入开展。

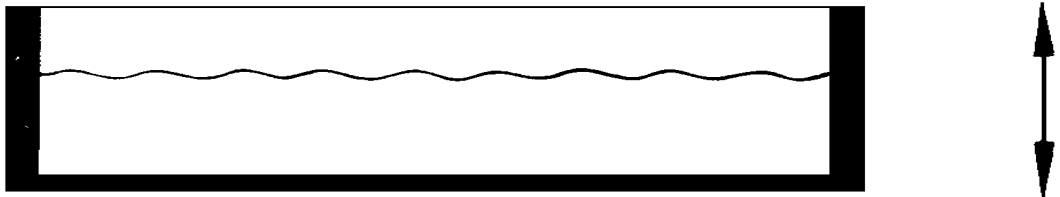


图 1 法拉第实验

Ciliberto 和 Gollub (1985)^[2]进行了水深 1cm 的 Faraday 实验, 利用数字图像处理技术研究了表面驻波的振幅及其混沌特征, 并首次用平行激光束从透明容器底部垂直向上穿出, 波的阴影在容器上方的屏幕上显示出来。这种方法只能显示出大致的驻波模态。Edwards 和 Fauve

* 国家自然科学基金资助项目

本文于 1997 年 11 月 15 日收到第 1 稿, 1998 年 4 月 21 日收到修改稿

(1994)^[3]在强迫垂直振动的圆形容器中,对深度为0.29cm的粘性流体层表面波运动图用显示方法进行了研究,所用方法是漫射光方法,给出了精美的波图照片。但是文中未详细描述流动显示方法。我们也曾用该方法得到波图照片,但不令人满意。其原因可能我们实验的水深0.5~2cm远比0.29cm的大,漫反射效果不如肥皂泡那么薄壁的好。本文作者曾用漫散射光显示方法对Faraday波图案进行了研究,给出有序结构到无序混沌图谱^[4,5]。最近,我们又在改进的Faraday实验装置上对Faraday波的可视化方法作了进一步的研究。本文首先介绍实验装置;其次介绍表面波运动图谱的显示方法;最后对用此方法获得的显示结果作简要的说明。

2 实验设备

我们的实验装置与Faraday的实验不同,Faraday实验是盛液体的容器整体上下垂直振动,而本实验是容器底部振动而侧壁不动,容器中的流体表面波是由流体底部激励产生的,边界条件与以往有明显区别。

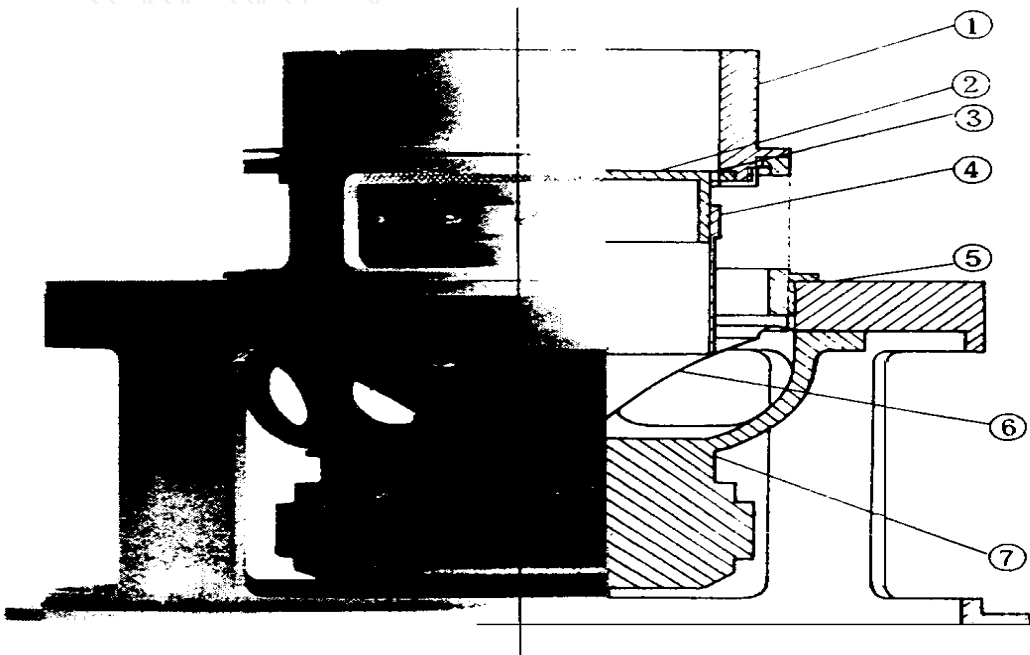


图2 试验装置结构图

1. 容器 2. 容器底 3. 密封膜 4. 底部振动传动支架 5. 底座 6. 扬声器纸盆 7. 扬声器

图2是该装置本体结构简图。它由容器、扬声器和支架三部分组成。容器是直径为10cm,高为5cm的铝质圆筒,其底部是倒扣在扬声器纸盆上的薄壁铝质圆杯(外径略小于容器直径)构成。圆杯的底与容器圆筒下端口齐平,其周围缝隙用乳胶膜粘贴密封,不漏水。杯的端口胶粘于扬声器纸盆上。圆形容器的侧壁牢牢固定在支架上。扬声器是市售大功率低重音喇叭。

图3是工作原理图。信号发生器发出的所需频率的电压信号通过示波器监视,经由功率放大器按需要放大后,输入扬声器,扬声器纸盆振动,带动圆杯上下运动,即容器底部振动,从而

激励容器中的流体振动, 经过模态竞争后, 形成表面驻波。

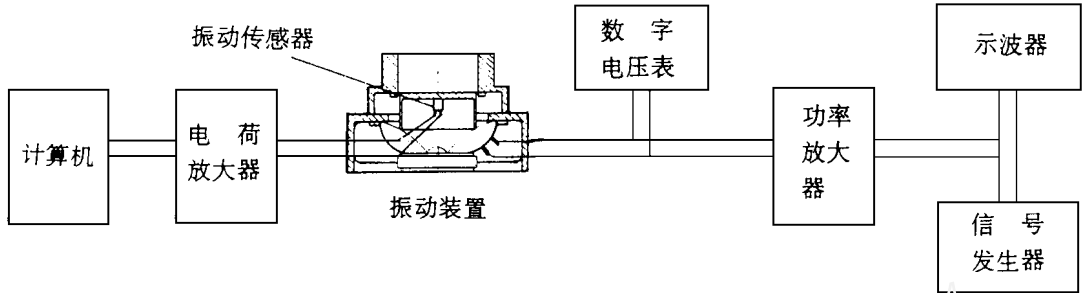


图3 试验工作原理图

容器底部振动的振幅由安装在容器底部下方很小(10g重)的加速度计测量并经信号积分处理, 或用标准振动台标定得到。将加速度信号进行频谱分析等处理可得出振动频率。经比较, 测得的频率与信号发生器发出的频率一致。说明该系统实验可靠。同时由于容器底部做得较厚(5mm), 其本身不会产生膜的自振, 因而避免了底部自振对流体表面波的影响。

该实验装置的实验参数范围较宽。振动频率 f 可达100Hz以上, 振幅 A 为毫米量级, 可根据需要给定。一般实验均在一定的参数范围内($f < 100\text{Hz}$, $A < 0.2\text{mm}$)进行。

3 显示方法

正如前面所述 Faraday 波的流谱显示, 想获得清晰的波图谱的照片不那么容易。流动显示的关键, 一是光源; 二是拍摄技巧。我们采用漫射光反射拍摄方法, 并使用两种光腔(光照射区)进行显示。下面作一介绍。

光源: 它由 18 个白炽 15 瓦的小灯泡, 沿直径为 26mm 周围均匀分布, 构成一个圆圈光源(见图 4)。灯泡必须轴对称分布, 这是表面波精细的结构所要求的。光源布置在振动容器的上方约 60cm 处并可上下移动。

光腔: 试用两种类型光腔(图 5), 一种是在光源圆圈里面放置半透明(或简称毛玻璃)塑料制成的圆筒, 其直径略比振动容器直径大, 圆筒的下端一直延伸到容器的口部(图 5a)。圆圈的光透过半透明圆筒的漫散射光照亮流体表面。光源圈的外围用黑色硬纸围住, 以屏蔽杂散光进入照相机。第二种, 将去掉里面半透明圆筒, 改用半透明的塑料圈(内径为 90mm, 外径 96mm), 其结构见图 5b。这种光源照射布置特别有利于观察波纹的细小结构。

拍摄方法: 本实验使用佳能照相机, 镜头口径 52mm。拍摄时, 将镜头插入光源圆圈内圈中, 相机镜头轴线垂直于下面容器中流体的水平面。相机上下移动找准位置。从镜头中观察流体表面无反光, 且周围无亮圈为最佳位置。光圈快门根据被拍摄波的周期和结构的不同而适当配合变化。我们也进行了录像, 方法与此相同。

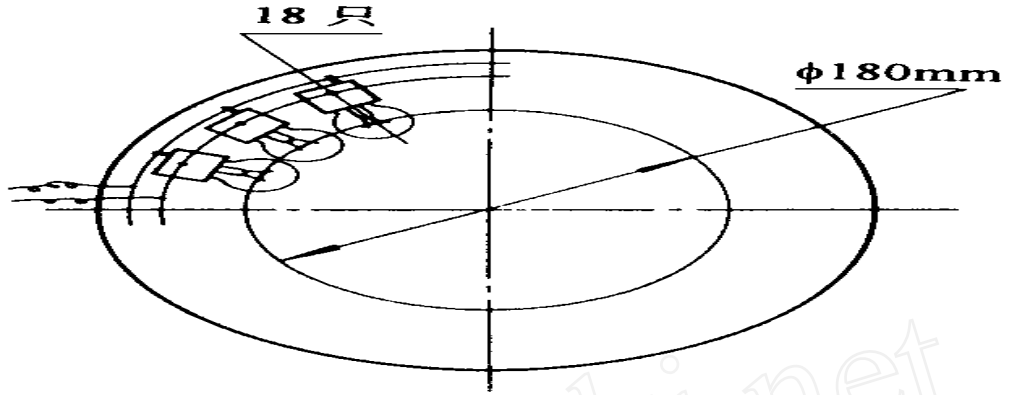


图 4 光源

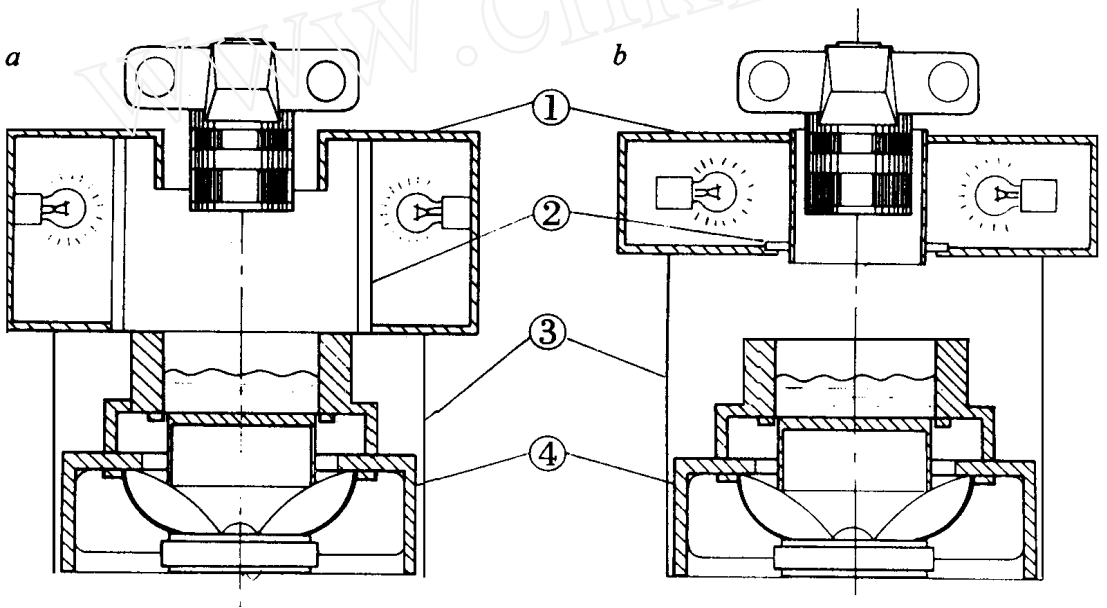


图 5 光腔示意图

- (a) 1. 光源支座 2 半透明屏 3 屏蔽罩 4 振动装置
- (b) 1. 光源支座 2 半透明玻璃圈 3 屏蔽罩 4 振动装置

4 显示结果

我们用上述方法进行多次实验。试验流体为自来水(比水粘度大的液体, 实验更好做, 在容器中的水深为 1cm, 深水比浅水的实验更难做)。实验参数: $f \leq 80\text{Hz}, A \leq 0.2\text{mm}$ 。用上述的两种光腔照射得到的两种不同的效果的照片。显示结果以图 6~ 9 给出。此处展示的只是极少的图案。从图 7 到图 9 均为用第二种光腔拍摄的照片。我们将不论及 Faraday 波的模态与参数的关系及其模态演化问题。(有关分析请参见[4])。这里只就与方法有关的问题作简要说明。

图 6 为两种光源光腔照射时所拍摄照片的比较。显然第二种光源照射比第一种好。图 7, 图 8 和图 9 表示用我们设计的光腔, 拍摄技巧所揭示的表面波不同模态的二维图案结构。

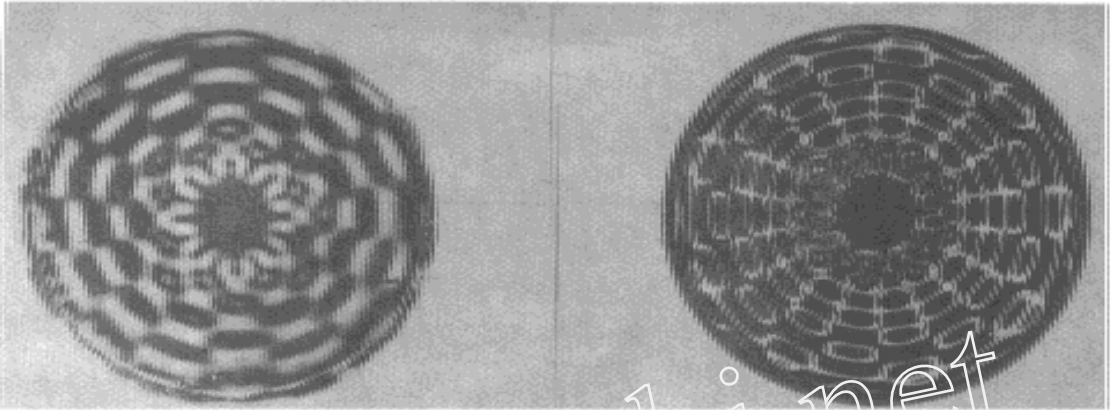


图6 两种光腔照射拍摄照片的比较
(a) 周围漫射光 (b) 顶部漫射光

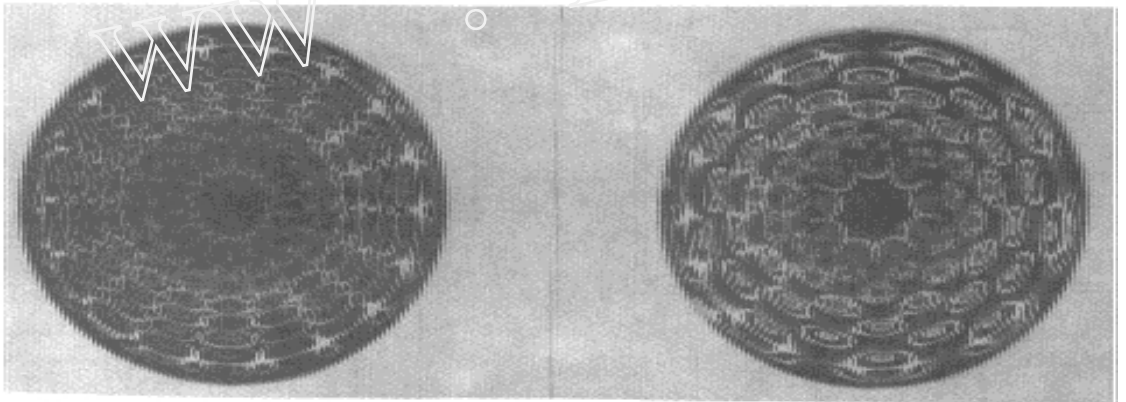


图7 不同曝光时间拍摄的表面波图谱
(驱动频率 $f_0 = 52\text{Hz}$, 振幅 $A = 0.114\text{mm}$)

(a) 曝光时间 $t = 1/30$ 秒 (b) 曝光时间 $t = 1/250$ 秒

图7为不同的曝光时间的照片。亮线表示波峰,暗处表示波谷;从图7a可以看出,驻波以 $f_0 = 52\text{Hz}$ 上下振动,当用小的曝光时间拍摄时,可照出波峰(其中有的波峰没完全变化为波谷),所显示的亮线是波峰和波谷在某时刻变化到相同水平高度,即相当于等高线,亮线交叉处或相接处为驻波的节点。它构成了18个周向节点的驻波。有人称这种结构为二维晶体结构。图7b是曝光时间长的照片。从中可以看出多圈沿周线亮线和暗区相同。这表示驻波在一周期内的波峰波谷的此起彼伏的变化。图8同一频率不同振幅下不同曝光量的照片。所得效果与图7的差不多。曝光量大时,突出了波峰的反光亮度。曝光量小时,显示出平均效果,也就是说驻波上下振动突出了平均亮度即波的等高线,所以看见亮线(波峰)相连。图9给出准稳态表面波的图案,表示波开始发生到形成稳态过程中的某一较长时刻的波图案。上部两幅是表示在形成稳态驻波过程中某一时刻的表面波图案,说明波变化是一种非线性相互作用过程,但周向角的数目基本上不变。下部两幅是波形成的初期阶段,驻波是从周边壁处开始发生,逐渐向中心发展,最后形成。周向角的数目取决于开始状态,这同振动频率和流体的粘度及边壁条件有一

定的关系。



图 8 不同振幅时, 不同曝光量的波谱图 ($f_0 = 52\text{Hz}$)
 左列 (a), (c) 为较小曝光量 (1/30 秒)
 右列 (b), (d) 为较大曝光量 (1/250 秒)

5 结束语

应用本显示方法可以揭示 Faraday 波的细微结构。对于深刻了解此类波的发生、形成及模态竞争等, 从有序到无序的演变过程, 是一种有效手段。该方法可推广应用于极微幅水波、孤立波形成、演化机制的实验以及龙玺振动驻波结构等显示。它是显示不可压缩流体微幅度波的新方法。



图9 准稳态波谱图

参 考 文 献

1. Faraday M. On the forms and states assumed by fluid in contact with vibrating elastic surfaces. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1831, 121: 319- 430
2. Ciliberto S and Gollub J P. Chaotic mode competition in parametrically forced surface waves. *J. Fluid Mech.*, 1985, 158: 381- 398
3. Edwards W S and Fauce S. Patterns and quasi- patterns in the Faraday experiment. *J. Fluid Mech.*, 1994, 278: 123- 148
4. Xuequan E & Yuxin Guo. Ordered and Chaotic Modes of Surface Wave Patterns in A Vertically Oscillating Fluid. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, 1996, 1(2): 1- 6
5. 鄂学全, 高宇欣. 强迫垂直振动流体的表面波运动图案研究. 第五届全国实验流体力学学术会议论文集, 1995. 9. 四川松潘, 41- 48 页

Surface Wave Visualization for Liquid in Micro-amplitude Vibration

GAO Yuxin E Xuequan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Abstract A flow visualization method which can clearly visualize the surface wave patterns of micro-amplitude vibrating liquid is presented. An apparatus which may produce the liquid surface waves with amplitude less than one micron and frequency up to 100Hz is also reported. Exquisite wave pattern pictures obtained by the method are shown. Several types of wave pattern are explained briefly.

Key Words flow visualization, faraday wave, wave pattern vertical vibration

作者简介

高宇欣, 男, 实验师, 1957 年 11 月出生。1984 年调入中科院力学所应用流体研究室。工作期间, 于 1988 年考入中国科学院职工科技大学无线电技术专业, 1992 年 5 月毕业, 1993 年 6 月被聘为实验师。主要从事流动显示技术的研究, 承担实验设备、实验模型的机械设计和加工工作。完成了多项国家海洋工程重大项目, 获得一项国家专利。