# 用于海气界面微尺度过程观测的水槽设计与实验

官  $\mathbf{R}^1$ , 王岩峰<sup>1</sup>, 黄振兴<sup>2</sup>, 高军伟<sup>2</sup>

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所,山东 青岛 266071;2. 青岛大学 自动化工程学院,山东 青岛 266071)

摘要:为了给海气界面研究中的仿真与验证提供较全面的研究数据,根据现有技术基础和国际前沿观 测技术及设备的发展水平,设计完成了具有造风造波能力,并满足小尺度波浪破碎和混合、微尺度坡 度场、水体内部的湍流混合、界面的热辐射及传输等过程观测需要的小型多功能水槽。实验结果表明, 该小型多功能水槽各部分配合顺畅,达到了各项观测技术的要求。该水槽可以成为海气界面研究的一 个多手段、便捷的室内实验平台。

关键词:风浪水槽;海气界面;微尺度;湍流;热辐射 中图分类号:TP273 文献标识码:A 文章编号:1000-3096(2012)10-0092-07

海气相互作用的范围跨度大、作用时间长,对天 气和气候影响深远,是全球变化中的重要因素。海气 相互作用已成为大气科学和海洋科学中重要的研究 课题。

海气相互作用研究的前提是大量的观测数据。 针对海气作用不同尺度过程,可以利用船舶、浮标、 飞机、雷达、卫星等工具,在水下、边界层和空中同 时进行立体观测。然后,采用不同的数值模式,利用 大型计算机进行各种尺度海-气相互作用的数值模 拟。但海气相互作用中一个非常重要的方面——微 尺度过程(毫米级到米级尺度)却一直面临观测难的 局面。许多微尺度过程具有典型的间歇性湍流运动 特征,其测量的难点在于如何快速、准确地获取各要 素的快速变化,研发合适的传感器和观测平台一直 是科研人员努力的方向。

为解决微尺度过程现场观测中存在的问题,室 内模拟仿真实验研究一直是很重要的方法,即利用 多功能水槽对海气界面的微尺度过程进行模拟,在 此基础上开展系列观测研究<sup>[1]</sup>。模拟过程包括:微尺 度波浪的形成及破碎过程;界面的能量传输;表层 的物质输运过程;界面和水体内部的湍流混合过程 等。微尺度过程模拟水槽可以为海气相互作用研究 提供一个高效、便捷的室内实验平台,从而获得大 量、稳定的研究数据。而我国对于海气界面微尺度 过程的观测目前还处于国际 20 世纪 90 年代的水平, 特别是偏重于机理研究的室内实验设施更为稀少。 因此,本文在现有技术基础上,参照国际前沿观测 技术及设备的发展水平,设计、建设了一座应用于海 气相互作用研究的小型多功能水槽,并开展了初步 的试验研究。

# 1 水槽功能设计

小型多功能水槽在功能设计上应能满足包括微 尺度坡度场、界面微尺度的湍流混合、界面的辐射 及传输等微尺度过程特性及参数的观测需要,鉴于 微尺度过程易受扰动的特点,测量手段尽量选择非 接触方式,因此声光测量是主要的方式。

#### 1.1 海面微尺度坡度场观测

对海面坡度场的时序观测可以较好地获取海表 面毛细波和毛细重力波的运动特征。而海表面毛细 波和毛细重力波的运动特征受到各种环境因素的调 制,对于理解海气界面动量热量和物质交换过程、电 磁波与波浪间相互作用机制、波浪能量耗散等至关 重要。非接触的光学方法是目前测量海面微尺度坡 度场的最佳选择。本水槽采用了颜色编码技术<sup>[2]</sup>。

# 1.2 界面微尺度湍流混合动力过程光学测 量装置性能设计

波浪破碎是近海面湍流混合增强效应的主要驱

收稿日期: 2011-09-06; 修回日期: 2012-08-22

海洋科学 / 2012 年 / 第 36 卷 / 第 10 期

基金项目:国家自然科学基金项目(41076062);中央级科学事业单位修 缮购置专项项目

作者简介: 官晟(1972-), 男, 山东青岛人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 海洋物理应用技术, 电话: 0532-88967114, E-mail: gsh30@163.com

动机制,同时海水内部的湍流混合能使流体的动量 和热量,以及所含的盐分等物质的扩散过程显著增 强。在海洋中,无论湍流的尺度或强度,其垂直分量 和水平分量通常都极不相同,对其四维(三维空间加 一维时间)的测量是理想的观测方式。三维数字粒子 图像测速(DPIV)是室内水槽湍流混合观测的主要技 术手段<sup>[3-4]</sup>,同时考虑采用声学多普勒流速仪(ADV) 作为惯性副区单点测量的补充<sup>[5]</sup>。

#### 1.3 界面热辐射测量装置性能设计

由于大气对太阳的短波辐射是近乎透明的,所 以到达地球表面的太阳辐射能大部分被海洋所吸 收。这些能量再通过红外辐射、感热通量和潜热通 量的方式向大气输送。海气间的热交换不仅对天气 过程的形成有重要影响,而且对长期气候过程有巨 大作用。由于海面波动以及海水皮温与体温的差异, 使得对界面水温接触式、单点测量会产生较大偏差, 因此,海气热交换在近 20 年里越来越多采用红外摄 像直接测量海面辐射量的方法<sup>[6-7]</sup>。

#### 1.4 水槽造风、造波性能设计

为有效模拟上述微尺度过程,多功能水槽需要 具备造风、造波功能。根据建设场地及水槽总体尺 寸的要求,结合测量系统的观测范围,要求造风、造 波能力为最大波高 20 cm 以上;最大风速不低于 15.0 m/s,风速均匀,在观测段内变化不超过±0.3 m/s。

#### 2 水槽功能实现方案

#### 2.1 水槽功能结构设计

小型多功能水槽由钢化玻璃水槽、造波系统、 造风系统、控制柜、仪器挂架、用于挂架移动的平 行导轨、波高传感器、风速和温度传感器以及控制 测试软件等部分构成。图 1 为水槽结构示意图。造 波功能由伺服电机提供动力,通过线性模组带动造 波板,在水槽内激起不同波长和波高的规则波或不 规则波。通过导流板和消波材料,在水槽末端实现消 波功能。造风系统由轴流风机提供动力,空气通过进 风口、导风板、风道等部分,在水槽实验段形成均匀 风场,从而在水面激起微幅波。水槽底部设置有光学 实验预留的通光孔。水槽实验段集成微结构光学测 量装置、测量湍流运动过程的粒子成像速度仪(PIV)、 测量混合扩散过程的激光诱导荧光成像装置(LIF)、 高精度红外热象仪以及声学多普勒流速仪(ADV)等 系统。



#### 图 1 小型多功能水槽结构示意图

Fig.1 The structure of small multi-functional flume 1.水槽支架; 2.水槽壁; 3.水槽盖板; 4.进风口; 5.导流板; 6.风道; 7.风机; 8.导轨支架; 9.通光孔; 10.导风板; 11.导风板调节杆; 12.造 波板; 13.线性模组; 14.伺服电机; 15.线性模组支撑架; 16.电机支 架; 17.排水孔; 18.传感器; 19.控制柜

1.the support of the flume; 2. the wall of the flume; 3. the cover plate of the flume; 4.the air intake; 5.the guide plate of water; 6. the wind tunne; 7. the draught fan; 8. the slide rail; 9. the light window 10. the guide plate of wind; 11. the adjustment lever; 12. the wave making plate; 13.the linearity module; 14.the servo motor; 15. the support of the linearity module; 16. the support of the motor; 17.the scupper; 18.the motion sensor; 19.the control cabinet

### 2.2 海面微尺度坡度场光学测量装置系统 方案

利用光学方法对海面坡度场信息的提取是从 20 世纪 40 年代开始的, 至今已有数种较为可行的测量 技术, 包括太阳光耀斑摄像技术、光强编码技术、激 光探测装置和扫描式激光坡度仪、立体观测和颜色 编码技术等<sup>[8]</sup>。光学方法的主要原理是利用光线在海 气界面的折射和反射现象, 观测入射角和反射角的 信息, 推算坡度场的斜率分布。国际上以美国 Scripps 海洋研究所、 Woods Hole 海洋研究所、德国 Heidelberg 大学等研制的测量装置为代表。国内研究 者在国家 863 计划的支持下, 完成了利用颜色编码 技术进行海面微尺度坡度场观测的实验室和船用的 海面微结构光学测量装置, 观测技术指标达到国际 同期水平。

沿用国内已研究过的,并符合国际发展趋势的 颜色编码技术,是制定小型多功能水槽中微结构测 量装置技术方案的较好选择。系统基本工作原理如 图 2 所示。设置于水槽下适当高度的光源均匀照明 其上方的彩色编码器。彩色编码器位于水下透镜的 焦面上,因此二维编码的彩色光线经透镜后,均以 平行光射入水槽中。这些彩色平行光经过水槽内水 面波浪折射后,被设置在水槽正上方空中的摄像系统, 因此获取图像中每一个像素单元的彩色灰度或色调 与水面该像素区域波浪的斜率是一一对应的。经过 计算机图像处理,即可获得摄像区域水面微结构的 全貌。而分析(连续)时序记录的多幅图像,即可获得 水面微结构随时间的变化情况。摄像系统选用索尼 公司 3CCD 相机 DXC-990P,变焦镜头选用 S206.4BMD型,短弧氙灯功率 150 W,菲涅尔透镜 型号为 NT46-392。



图 2 微结构光学测量装置系统

Fig. 2 Sketch of the micro-structure measurement system on seawater surface

# 2.3 界面微尺度湍流混合动力过程光学测量装置系统方案

PIV 技术能以光学无接触式的方式,在同一瞬态记录下大量流体空间点上的速度分布信息,可提供丰富的流场空间结构以及流动特性。因此,利用 2D/3DPIV 技术可以实现微尺度过程的二维和三维 运动场测量以及二维示踪物的扩散和混合过程测 量。

PIV 系统采用丹迪公司(Dantec)产品。系统由 Dynamic Studio 软件、4M 相机、新型高速相机以及 内置式的时序控制板组成,可以完成从极低速度的 几个毫米每秒到超音速测量。激光器采用 NewWave 公司双腔 PIV 激光器,该激光器拥有更短的脉冲间 隔时间,使得 PIV 测量由低速扩展到高速。同步单 元采用内置式时序控制板,其漂移对速度的影响可 以控制在 1×10<sup>-7</sup> m/s(100 m/s 时)以下。片光源采用 80×70 系列产品,可以改善传统片光源在高能 量(120 mJ 以上)光束下的片光质量。坐标架位移系统 选择适合小流场的精确测量型号,移动精度为每300 mm存在±5 μm的误差,具有6.25 μm的移动分辨率。 上述设备的组合可实现速度测量范围 0~6 m/s;视频 采集速度 30 帧/s。另外还配有 LIF 模块,可同时提 供荧光温度场的测量。

ADV 系统选用 NORTEK 公司的两款新型流速 仪 Vector 和 Vectrino。2 套流速仪安装于平行轨道上, 在水槽二维平面内滑动,采用非接触方式测量不同 点位流速。Vector 采样频率 1~64 Hz,最大流速范围 ±7 m/s,采样体直径 15 mm。Vectrino 采样频率 1~200 Hz,最大流速范围±4 m/s,采样体直径 6 mm。

#### 2.4 界面热辐射测量装置系统方案

为满足海气界面过程热辐射变化小的特点, 红 外热像系统热灵敏度需尽可能高。综合考虑功能与 成本, 界面红外热像系统选用 NEC 公司产品 TH5104R。测量范围-10~800℃。温度分辨率 0.1℃(30℃时),优于市场上绝大多数产品的1℃。像 素数 255(H) ×223(V),适合捕捉微尺度空间的变化。

#### 2.5 水槽造风、造波系统方案

水槽必须具备造风、造波、消波等功能,能够一 定程度上模拟海面的运动变化,形成观测海气界面 微尺度过程的模拟对象系统。目前,主流的造波方式 有机械式和气动式两种。气动式是利用空气气流或 者气压的变化产生波动。机械式是通过造波部件的 机械加扰动来产生波动,也是应用较多的方式。机械 式中,又以摇板式和推板式应用较为广泛。所谓摇板 式就是通过机械驱动,令摇板绕固定轴摆动,使池 中水产生波动;而推板式是造波板整体在水中做直 线往复运动。由于水槽主要用于模拟海洋表面的小 尺度波动情况,结合室内的可利用空间条件,并考 虑到尽量减少水下机械结构、降低能耗、减小机械 系统作用力等因素,摇板式方案成为较好的选择。图 3为摇板造波机示意图。

设计造波波长范围 0.05~1.5 m,最大波高不小于 0.2 m; 波谱类型包括 Pierson-Moskowitz 谱、ISSC 谱和 Neuman 谱,自定义波谱。造波重复性误差小于 2%。

在水槽顶部加盖密封盖板,构成风罩,与玻璃 水槽形成风道,在水槽尾部上安装轴流风机,以抽 风的方式在水槽内造风。为使进风流畅、风速均匀, 在水槽前端靠近摇板处安装进风口,在进风口的下 端安装可调仰角导风板。造风系统结构如图 4 所示。 造风最大风速不低于 15.0 m/s, 风速均匀, 在观测段

内变化不超过±0.3 m/s。



图 3 摇板造波机示意图 Fig. 3 Sketch of the shake-flap wave making system



图 4 造风系统示意图 Fig. 4 Sketch of the wind making system

造风造波功能控制软件以 Labview 为开发平台, 完成信息采集、模式计算、控制实现等功能。造风 控制模块主要功能是通过控制风机变频器实现风道 风速的闭环控制。造波控制模块的主要功能是通过 对运动控制卡的编程,控制摇板伺服系统,进而实 现波高和波长的闭环控制。

# 3 实验及结论

3.1 造风、造波系统

造风系统实验结果见图 5。

实验中, 目标风速设置为 7 m/s。风速上升时间 *t*<sub>r</sub>为 5.5 s; 调节时间 *t*<sub>s</sub>为 15.4 s; 实验段内风速降小



图 5 风速 7 m/s 造风实验槽内风速响应曲线 Fig. 5 The test results of 7 m/s wind making

Marine Sciences / Vol. 36, No. 10 / 2012

于 0.3 m/s。实验证明, 造风系统的动态响应快速, 风速精度达到设计要求, 观测段内风速变化小于 0.3 m/s, 具有较好的稳定性。

造波系统进行了多组不同规则谱和不规则谱实 验。实验结果如图 6 所示,其中 h 为水深, T 为周期, H 为振幅。规则波波高误差 4 %,周期误差 4 %,达 到设计指标。



图 6 规则波测试



3.2 海面微尺度坡度场光学测量装置系统

微结构光学测量装置在静水和有风条件下获取 的水面图像如图 7、图 8 所示。



图 7 微结构光学测量装置静水面成像效果图

Fig. 7 The image of still water by the micro-structure measurement system



图 8 风速 8 m/s 水面成像效果图 Fig.8 The image of water with 8 m/s wind

实验结果证明, 光学测量系统观测幅宽 200 mm, 斜率精度 1°, 波长分辨率 0.3 mm, 测量时间间隔<0.04 s。

#### 3.3 PIV与ADV系统

PIV 系统安装结构如图 9 所示, 流场测量数据如 图 10 所示。

使用 Vectrino 测量水槽模拟不同状态下的原始 数据如图 11 所示。

实验数据可以看出,随着风速的增大,三个方向上速度方差之和呈上升趋势,符合试验风速范围 内湍流强度的变化规律。

#### 3.4 界面热辐射测量装置系统

分别在无风和不同风速条件下,用红外相机拍 摄水面红外图像。然后,通过软件导出温度的矩阵分 布,得出温度变化趋势、偏度值和峰度值等数据。

海洋科学 / 2012 年 / 第 36 卷 / 第 10 期













图 11 ADV 系统测量数据波型图 Fig.11 The velocity data by ADV system

Marine Sciences / Vol. 36, No. 10 / 2012

#### 研究报告 REPORTS





#### 3.5 结论

上述实验证明,所设计的小型多功能水槽造波机 主要分系统都达到了设计指标和目的。系统整体运行 流畅,能够较好地模拟实际海洋环境中海气界面微尺 度过程,可成为海气相互作用研究的试验平台。

#### 参考文献:

- [1] 陈伯海, 吕红民. 波浪水槽中随机波的模拟[J]. 青岛 海洋大学学报, 1998, 28(2):179-184.
- [2] Zhang Xin, Cox C S. Measuring the two-dimensional structure of a wavy water surface optically: A surface gradient detector[J]. Experiments in Fluids, 1994, 17: 225-237.
- [3] Lawson N J, Wu J. Three-dimensional particle image velocimetry: experimental error analysis of a digital angular stereoscopic system[J]. Measurement Science

& Technology, 1997, 8: 1455-1464.

- [4] Turney D E, Anderer A, Banerjee S. A method for three-dimensional interfacial particle image velocimetry (3D-IPIV) of an air-water interface[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(4): 1-12.
- [5] Voulgaris G, Trowbridge J H. Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for turbulence measurements[J]. Atmospheric and Oceanic Technology, 1998, 15: 272-289.
- [6] Jessup A T, Zeppa C J. Defining and quantifying microscale wave breaking with infrared imagery[J]. Geophysical Research, 1997, 102, C10: 23145-23153.
- [7] Garbe C S, Spies H, Jähne B. Estimation of surface flow and net heat flux from infrared image sequences Math[J]. Imaging and Vision, 2003, 19(3): 159-174.
- [8] 王岩峰,丁永耀.光学观测小波方法的比较研究[J]. 黄渤海海洋,1999,17(1):35-39.

# Design and experiments of a flume for the observation of air-sea interface microscale

# GUAN Sheng<sup>1</sup>, WANG Yan-feng<sup>1</sup>, HUANG Zhen-xing<sup>2</sup>, GAO Jun-wei<sup>2</sup>

(1. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration People's Republic of China, Qingdao 266071, China; 2. College of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

#### Received: Sep.,6,2011

Key words: wind-wave flume; air-sea interface; microscale; turbulent flow; thermal radiation

**Abstract:** To provide more comprehensive research data for theoretical simulation and verification in the research of the air-sea interaction, a wind-wave flume is designed basing on the existing technology and the development of international cutting-edge observing technology and equipment. It can be used to meet the observation need of the process of small-scale wave breaking and mixing, microscale slope field, turbulent mixing within water, the thermal radiation and transmission at the water interface. The experiments showed that different parts of the flume worked with each other smoothly, and reached the requirements of various observation techniques. This small multifunctional flume could be a multifunctional and convenient indoor experimental platform for the research of the air-sea interaction.

(本文编辑: 刘珊珊)