论文

分层流风波水槽中基于线阵 CCD 水面影像反演内孤立波的实验研究

魏岗*, 王欣隆, 陈祥瑞, 曾文华, 杜辉, 李万鹏

解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

*联系人, E-mail: weigangweigang12@163.com

收稿日期: 2014-03-28; 接受日期: 2014-07-14

国家自然科学基金(批准号: 11072267, 11472307)和国家高技术研究发展计划(编号: 2008AA09Z316)资助项目

摘要 在大型重力式分层流风波水槽系统中, 利用风生波原理模拟水面随机小尺度波场, 采用重力塌陷方式产生大振幅孤立子内波, 通过线阵 CCD 影像记录其传播过程中引起的水面小尺度波结构变化, 分析孤立子内波对水面短重力波及毛细(重力)波的影响规律, 建立线阵 CCD 图像灰度特征与内波要素特征的关系, 进而由水面波场变化反演出水下孤立子内波的特征结构. 实验结果证实了本文方法的有效性, 也为实际利用海面粗糙度及海水层化特性遥感海水内部动力学研究提供了新的途径.

关键词 分层流水槽, 孤立子内波, 水面粗糙度, 线阵 CCD 影像

PACS: 47.54.De, 92.10.hj, 47.35.Pq, 78.68.+m

doi: 10.1360/SSPMA2014-00064

海面小尺度波浪包括短重力波、毛细重力波和毛细波, 海面粗糙度是描写海面小尺度随机波浪变化的特征量. 现代海洋遥感技术中, 海面粗糙度是微波传感器遥感海面和海水内部动力特征的重要媒介物理量. 以海洋内波遥感为例, 由于内波在传播过程中产生的海面辐聚辐散流动会引起海面粗糙度的分布发生变化, 当合成孔径雷达(简称 SAR)发射的微波遇到粗糙度分布变化的海面时, 会使微波回波信号产生反差异常, 从而在微波影像中留下内波踪迹^[1]. 因此, 弄清海面粗糙度变化与海水内部动力学过程的关系是海洋微波遥感反演海洋内波特征的关键.

海面粗糙度受到海气、波波、波流等相互作用影

响, 通常根据特定海区情况由气象要素或海浪要素、或由兼顾两者的经验参数拟合描述, 迄今并无普适的表达形式^[2]. 另一方面, 海洋波浪的测量手段除传统的浮标、压力式波浪仪和水声波浪仪外, 高频地波雷达、卫星高度计以及星载 SAR 等海浪测量技术日趋成熟, 受到测量方式和测量精度的限制, 这些技术手段对于描述海面粗糙度的毛细(重力)波及其变化难以进行有效测量, 从而限制了利用海面粗糙度变化反演海水内部动力学结构的精度和有效性^[3].

随着实验室模拟与测量技术的发展, 在大型分层流水槽中不仅可以实现海洋分层与海洋内波的有效模拟, 而且可以同时实现海面风及风生海面小尺

引用格式: 魏岗, 王欣隆, 陈祥瑞, 等. 分层流风波水槽中基于线阵 CCD 水面影像反演内孤立波的实验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 014702
Wei G, Wang X L, Chen X R, et al. Experimental study on extracting internal solitary wave in a wind-wave tank of stratified fluid using line array CCD images at the free surface (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 014702, doi: 10.1360/SSPMA2014-00064

度随机波浪的模拟,使得开展分层海洋中内波对海面粗糙度影响的实验室研究成为可能^[4].近年来,测量微幅水面波的光学成像技术结合数字图像处理方法得到新的发展^[5-7],特别是基于 CCD 图像传感器的非接触微幅水面波测量技术,它集成了光学、电子学、流体力学和图像处理技术,具有动态响应快、时空分辨率高、测量面积大和非接触性等优点,为分层环境中水面粗糙度变化的精细测量奠定了基础.

鉴于上述,本文借助风生波和重力塌陷内波造波方式,同时在大型分层流水槽中产生水面随机小尺度波和孤立子内波,采用线阵 CCD 水面成像记录孤立子内波对水面粗糙度影响的物理过程,探索在分层流风波水槽中孤立子内波与随机微尺度水面波相互作用的机理,并利用水面粗糙度变化反演水下孤立子内波特征结构的技术途径.

1 试验与测量系统

实验在解放军理工大学分层流风波水槽系统中进行,该系统由水槽主体、分层水制取装置、内波造波机与消波装置、直流式风道装置以及水下内波动态测量仪和水面微尺度波测量系统组成,图 1 为试验与测量系统示意图.

水槽主尺度为 $12\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高). 分层水制取装置由两座水箱及承台、搅拌装置和注流控制系统组成,采用重力式“双缸”分层原理,可获得上/下层为淡/盐水的两层流体结构. 孤立子内波生消采用旋转百叶门重力式内波造波机和楔形内波消波器^[4],

两者分别安装于水槽两端,造波方式为重力塌陷式,最大造波幅度 0.3 m . 水槽上方为直流式风道装置,主尺度为 $10\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 0.33\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),一端为进风口,安装有蜂窝状整流器,另一端为出风口,安装有变频轴流风机,风速无极调节范围为 $0\text{--}15\text{ m/s}$.

水面下密度扰动测量由内波动态测量仪完成^[8],它由电导率探头阵列和数据采集与处理系统组成,可同时进行 32 通道电导率探头数据的自动采集和实时分析,其工作原理是将盐溶液的电导率信号转变为对应的数字电压信号,再利用率定公式换算成盐溶液的密度值,该仪器具有较高的信噪比,电信号变化的分辨率为 0.1 mV ,实际可分辨的密度扰动变化为 10^{-6} g/cm^3 .

水面微尺度表面波测量由基于线阵 CCD 传感器的数字图像处理系统完成,它由线阵 CCD 传感器、LED 光照源与散光板、数字图像分析程序等组成,通过线阵 CCD 传感器记录由水槽风道产生的随机小尺度水面波的变化,由数字图像分析获得水下孤立子内波对小尺度水面波要素的调制,这里采用了 2048 像素和 300 s^{-1} 响应频率的线阵 CCD 传感器,其实际时空分辨率分别达到 $3.3 \times 10^{-3}\text{ s}$ 和 $5.0 \times 10^{-4}\text{ m}$.

2 测量技术与反演方法

2.1 内波动态测量

试验中通过布置电导率探头阵列获得孤立子内波的传播特征结构. 在跃层深度附近沿水槽长度方向(x 方向)设置间距为 Δx 的两只电导率探头,记录内

图 1 试验与测量系统示意图

Figure 1 Schematic of experiment and measurement.

波经过时两只探头电导率扰动峰值间的时间间隔 Δt , 可获得内波的传播速度 $c=\Delta x/\Delta t$. 当孤立子内波经过密度跃层附近的电导率探头时, 记录电导率扰动的时间序列值 η , 由下列积分计算孤立子内波特征宽度:

$$\lambda = \frac{1}{\eta_0} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(x-ct) d(x-ct),$$

式中 η_0 为密度扰动最大值. 沿水槽深度方向(z 方向)设置若干电导率探头, 记录孤立子内波经过时不同深度位置探头电导率扰动的时间序列值, 将其换算为密度时间序列值, 再进行等密度面分析, 利用最大浮力频率处的等密度曲线确定孤立子内波最大波幅. 图2为试验中获得的典型下凹型孤立子内波等密度面分布.

2.2 水面小尺度波测量

根据图 1 中试验与测量系统坐标系 $Oxyz$, 其原点位于水槽轴线的静止水面上, x 轴沿内波传播方向, z 轴垂直向上为正, 图中 (h_1, ρ_1) 和 (h_2, ρ_2) 分别为上、下层流体的厚度和密度, $H=h_1+h_2$ 为总水深, h_3 和 h_4 分别为 CCD 传感器和 LED 光源距水面高度. 测量分为三个步骤.

首先, 对 CCD 图像信息采集区光照强度进行线性化标定. 采用 LED 作为场景照射光源, 利用遮光栏和散光板配合光源位置的改变, 使得成像区域光照度均匀, 选取光强呈近似线性分布的水面区域作为图像信息采集的有效光照区, 如图 3 所示, 小图为光照强度沿 x 轴的实际分布, 大图为所取光强呈近似线性分布的有效光照区域. 有效光照区域的选择应避免光照过强和过弱, 以提高图像后期处理的质量和效率.

其次, 对 CCD 图像像素点进行空间位置定标. 取一块与水槽等宽、悬浮于水面的矩形定标板, 其上刻有

图 2 (网络版彩图)下凹型孤立子内波等密度线分布

Figure 2 (Color online) Distribution of iso-density lines for an internal solitary wave.

图 3 图像信息采集有效区

Figure 3 Valid range to collect image information.

间隔 0.02 m 的 30 根栅格线, 将标定板移置 CCD 传感器视野内(正下方), 调整 CCD 焦距和光圈, 使之恰好清晰成像上述栅格线. 测量并记录第一根栅格线到 CCD 的水平距离 L_0 , 由此推算第 n 根栅格线到相机的水平距离 $L_n=L_0+(n-1)\times 0.02$ m. 计算每一根栅格线的位置对应 CCD 的仰角 $a_n=\text{ctg}^{-1}(L_n/h_3)$, 根据三角形几何性质可计算出相邻栅格线在 CCD 中的视角 $b_n=a_n-a_{n+1}$, 统计相邻栅格线间的像素点数目 $N_{n-1,n}$, 利用等角分辨近似计算出像素点对应 CCD 的仰角 $s_x=b_n/N_{n-1,n}$, 由此可将图像中像素点转换成空间坐标 $x=h_3\times \text{ctg}(s_x)$.

最后, 对风生水面小尺度波成像. 撤去定标板, 控制水面风速剖面以产生随机小尺度水面波浪, 使线阵 CCD 沿 x 轴约 1.0 m 宽范围成像, 完成对时间序列图像信息的处理. 若线阵 CCD 沿 y 轴成像, 记录的风生小尺度水面波时间序列图谱, 如图 4, 图中短重力波特征波长约为 $O(10^{-1}$ m), 叠加在短重力波上的毛细波清晰可辨, 这些毛细波寄生于短重力波传播方向的波面上(峰前), 特征波长约为 $O(10^{-3}$ m).

2.3 水槽中孤立子内波反演

基于水面 CCD 图像的水下孤立子内波反演主要

图 4 风生水面波的时间序列图谱

Figure 4 Time-series image pattern of surface wave generated by wind.

针对其特征宽度和波幅, 即由 CCD 图像中相邻灰度峰值的变化反演特征宽度, 再根据两层流体模型理论推算波幅, 具体过程如下.

利用水槽风道产生稳定风速场下的水面波动(即风生水面波), 充分发展的水面波型为不规则的短重力波和寄生毛细波. 利用内波造波机产生孤立子内波, 其传播方向(正 x 轴)与水面波相反. 将线阵 CCD 传感器沿孤立子内波传播方向对水面成像, 由于水下孤立子内波会产生辐聚辐散的水面流动^[9], 如图 5, 其对水面短重力波或寄生毛细波的影响将改变 CCD 传感器接收的散射光强, 在 CCD 灰度图像中呈显著明暗相间的条纹分布, 由此可反演出水下孤立子内波的特征宽度. 为了获得图像中内波截面最亮点与最暗点的准确位置, 采用经验模态分解滤波(简称 EMD)^[10], 将灰度时间序列值根据数据特征尺度进行层化分解, 对各层本征模态信号做方差运算并归一化, 可估算出各层信号相对能量的大小. 试验中孤立子内波能量最大, 因此归一化方差最大的信号即代表孤立子内波信号.

进一步, 可根据相关模型推算孤立子内波波幅. 考虑具有跃层分布的两层流体模型, 其内波垂向方程^[10]

$$\frac{d^2 W(z)}{dz^2} + \left[\frac{N^2(z)}{\omega^2} - 1 \right] k^2 W(z) = 0, \quad (1)$$

其中, $W(z)$ 为内波垂向波幅变化函数, ω 为内波角频率, k 为内波水平波数, $N(z)$ 为浮力频率, 即

$$N(z) = \left(-\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中, g 为重力加速度, ρ 为分层水密度. 假设内波波长较水深大得多, 解方程(1), 并利用内波色散关系式, 可以得到波速解

图 5 孤立子内波宽度反演示意图

Figure 5 Schematic of retrieving the width of internal solitary wave.

$$c = \sqrt{\frac{(g\Delta\rho/\rho)h_1(H-h_1)}{H}}, \quad (3)$$

由两层流体模型的 KdV 方程可得孤立子内波半波宽度的表达式

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{2h_1h_2}{\sqrt{3\eta_0|h_2-h_1|}}, \quad (4)$$

式中 η_0 为内波波幅, 由方程(2)和(3)解得

$$\eta_0 = \frac{4H^2c^4}{3g'\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2\sqrt{g'^2H^2-4g'Hc^2}}, \quad (5)$$

式中 $g'=g(\Delta\rho/\rho)$ 若已知内波波速和密度变化率, 式(3)还可作为推算孤立子内波所在水深 h_1 的反演公式.

上述水槽中孤立子内波反演过程可用流程图表示, 见图 6 表示.

3 实验结果及分析

利用“双缸”原理可在水槽中获得两层流体的分层环境, 试验中工作水深 $H=0.8$ m, 上下层厚度和密度分别为 $(h_1, h_2)=(15.0, 65.0)$ cm 和 $(\rho_1, \rho_2)=(0.997, 1.023)$

图 6 水槽中孤立子内波反演流程

Figure 6 Process chart of inversion for an internal solitary wave in the tank.

g/cm^3 . 图 7 为该分层环境下密度剖面测量和依据式 (2) 计算的浮力频率随水深变化的分布图, 图中浮力频率最大值 $N_{\max}=2.2 \text{ rad/s}$ 位于水深 17.0 cm 位置.

3.1 孤立子内波水面 CCD 图像的灰度时间序列特征

在水槽风道中设定 2.5 m/s 的稳定风速, 当风生水面波动得到充分发展后, 水面形成不规则小尺度波图谱. 由内波造波机产生波幅为 8.6 cm 的孤立子内波, 并由线阵 CCD 传感器沿 x 轴连续记录内波经过前后图像灰度的时间序列值.

图 8 为从有效光照区域提取空间点的灰度时间序列值, 图中横坐标为时间, 纵坐标为像素灰度值, 其孤立子内波经过前后的灰度时间序列可分为 4 个时段: 进入前、进入后、退出前和退出后. 图 9 为线阵 CCD 沿 x 轴记录水面波 4 个时段的灰度图像, 经 Fourier 频谱分析, 其特征为: 进入前($t \leq 40 \text{ s}$), 短重力波平均周期为 0.156 s, 灰度均值 60.2 (图 9(a)); 进入后($40 < t \leq 50 \text{ s}$), 此时水面波处于孤立子内波的峰前辐聚区, 短重力波平均周期为 0.185 s, 灰度平均幅值增至 95.1, 毛细波数量减少, 短重力波变得光滑 (图 9(b)); 退出前($50 < t \leq 60 \text{ s}$), 此时水面波处于孤立子内波的峰后辐散区, 短重力波

图 7 密度剖面(a)与浮力频率曲线图(b)

Figure 7 Distributions of density (a) and buoyancy frequency (b) along the depth of water.

图 8 孤立子内波经过前后空间点线阵 CCD 图像灰度时间序列变化

Figure 8 Time-series grey-scale values of line array CCD image when an internal solitary wave passes through.

图 9 四个时段灰度序列时间值(左)及对应图谱(右). (a) 进入前; (b) 进入后; (c) 退出前; (d) 退出后

Figure 9 Time-series grey-scale values (left) and image patterns (right) in four time sections. (a) Before entry; (b) after entry; (c) before exit; (d) after exit.

平均周期仍为 0.185 s, 但灰度幅值减至 45.1, 毛细波数量明显增加, 短重力波变得粗糙 (图 9(c)); 当孤立子内波经过后($t > 60 \text{ s}$), 水面波图像灰度时间序特征恢复原

状(图 9(d)).

分析表明: 当水下孤立子内波经过时, 所引起的水面辐聚辐散流对不规则短重力波谱的影响较小, 但会显著改变寄生毛细波的波谱特征. 根据毛细波逆色散特性^[11], 即传播较慢的毛细波之波长会变得 longer. 因此, 在水面辐聚区, 由于波速相对减小, 毛细波波长增加, 导致小尺度重力波表面变得光滑, 光散射减弱, 使得 CCD 图像灰度值增大(变暗), 在水面辐散区的效果则刚好相反, 此时光散射增强使得图像灰度值减小(变亮).

3.2 水面 CCD 图像反演水下孤立子内波

通过确定水面 CCD 图像中最亮点与最暗点的间距, 可反演出水下孤立子内波的特征宽度. 为此, 对有效光照区域某空间点的灰度时间序列值作 EMD 滤波, 由此获得孤立子内波经过时灰度极值变化的时间包络曲线, 这里阈值选取采用了模幅值 $\delta(t) = (\eta_{\max}(t) - \eta_{\min}(t))/2$ 和估计函数 $\sigma(t) = |\eta(t)/\delta(t)|$ 的筛选法则, 取 EMD 滤波中的默认值^[9]. 测量包络线最大值与最小值间距, 并转化为空间灰度分布图, 即可获得孤立子内波的特征宽度. 再利用试验获得的孤立子内波传播速度和特征宽度, 由公式(5)可推算出其波幅值, 由此反演出完整的波形.

以风速 2.5 m/s、振幅 8.6 cm 孤立子内波为例, 图 10 给出了孤立子内波经过有效光照区域点反演得到的灰度极值包络线和空间灰度图, 以及与实测波形的比较, 图中显示两者吻合程度较好.

表 1 给出了风速为 2.5、2.7 和 2.9 cm/s 条件下, 分别对振幅为 8.6、7.8 和 4.7 cm 的孤立子内波进行反演的结果, 试验表明: 存在一个最佳反演风速条件, 例如本文试验中 2.7 cm/s 为最佳风速, 大于或小于该风速值反演出的孤立子内波特征结构误差都将增大, 且风速愈大反演效果愈差; 在同一风速下, 孤立子内波的振幅愈大, 所产生的辐聚辐散流对水面粗糙度影响愈大, 使得反演误差愈小; 此外, 理论模型选取、跃层位置和 CCD 传感器方位角等因素也会直接影响反演的效果.

4 结论

本文在大型分层流风风水槽中借助风生水面波和重力塌陷内波造波技术, 采用线阵 CCD 影像记录

图 10 孤立子内波反演: 极值包络线(a)、空间灰度图(b)和实测波形(c)

Figure 10 Retrieving internal solitary wave: extremum envelope line (a), grey-scale image (b) and measured waveform (c).

表 1 不同风速不同振幅孤立子内波反演试验

Table 1 Retrieval tests for different wind speeds and solitary wave's amplitudes

风速 (cm/s)	实测波速 (cm/s)	反演半波 长(cm)	反演振幅 (cm)	实测振幅 (cm)	相对误差 (%)
2.5	16.3	163	8.4	8.6	2.3
	15.7	157	7.5	7.8	3.8
	15.1	151	4.2	4.7	11
2.7	16.3	170	8.5	8.6	1.2
	15.7	163	7.6	7.8	2.6
	15.1	156	4.5	4.7	4.3
2.9	16.3	140	8.0	8.6	7.0
	15.7	137	7.0	7.8	10.3
	15.1	133	3.6	4.7	23.4

孤立子内波对水面粗糙度的调制影响, 实现了利用水面粗糙度变化反演水下孤立子内波的结构特征. 试验表明: 水下孤立子内波引起的水面辐聚辐散流

对寄生毛细波谱的影响决定反演效果, 存在一个最佳反演试验风速条件, 孤立子内波的振幅愈大反演误差愈小. 本文提出的基于水面 CCD 影像反演孤立

子内波的实验室方法, 对于实际微波遥感海水内部动力学特征的机理认识和提高水下目标反演精度都具有重要的参考价值.

参考文献

- 1 种劲松, 欧阳越, 李飞, 等. 合成孔径雷达图像海洋内波探测. 北京: 海洋出版社, 2010
- 2 Wen F, Su Z Y, Lv H M. Dependence of surface roughness on spectral width and wave steepness (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 2005, 36(1): 32–35 [文凡, 苏泽宇, 吕红民. 粗糙度与风浪特征量关系的研究. *海洋与湖沼*, 2005, 36(1): 32–35]
- 3 李铜基, 林明森, 何贤强, 等. 中国近海海洋—海洋光学特性与遥感. 北京: 海洋出版社, 2012
- 4 Wei G, Du H, Xu X H, et al. Experimental investigation on generation of large-amplitude internal solitary wave and its interaction with a submerged slender body. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2014, 57(2): 301–310
- 5 Wang W, Ni G, E X Q. Fourier transform method for measuring the micro amplitudes of water surface waves (in Chinese). *J Exp Mech*, 2002, 17(4): 425–432 [王薇, 倪刚, 鄂学全. 用 Fourier 变换莫尔法测量流体自由表面微幅波的振幅. *实验力学*, 2002, 17(4): 425–432]
- 6 Tong P X, Zhao Z Z. Measuring the vibration frequency and the spread velocity of water wave with laser beam (in Chinese). *Phys Exp*, 2005, 25(5): 7–9 [童培雄, 赵在忠. 测量水的振动频率与水波传播速度. *物理实验*, 2005, 25(5): 7–9]
- 7 Sun H Q, Qiu D H, Shen Y M, et al. Wave measurement based on light refraction (in Chinese). *J Harbin Inst Tech*, 2006, 38(4): 609–6412 [孙鹤泉, 邱大洪, 沈永明, 等. 基于光学折射的波面形态测量. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(4): 609–6412]
- 8 Wei G, Wu N, Xu X H, et al. Experiments on the generation of internal waves by a hemispheroid in a linearly stratified fluid (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2011, 60(4): 044704 [魏岗, 吴宁, 徐小辉, 等. 线性密度分层流体中半球体运动生成内波的实验研究. *物理学报*, 2011, 60(4): 044704]
- 9 Liu A K, Chang Y S, Hsu M, et al. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas. *Geophys Res*, 1998, 103: 795–808
- 10 Flandrin P, Rilling G, Alvé's P G. Empirical mode decomposition as a filter bank. *IEEE Signal Process Lett*, 2004, 11: 112–114
- 11 Crapper G D. *Introduction to Water Waves*. London: Ellis Horwood Ltd, 1984

Experimental study on extracting internal solitary wave in a wind-wave tank of stratified fluid using line array CCD images at the free surface

WEI Gang*, WANG XinLong, CHEN XiangRui, ZENG WenHua,
DU Hui, & LI WanPeng

College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China

According to the principles of wind-generating-wave and gravity fluid trapping-motion at the interface respectively, both the small-scale random surface wave and the large-amplitude internal solitary wave can be generated simultaneously in a large wind-wave tank of stratified fluid. The micro-structure variation of the small-scale wave on the surface of water is recoded continuously on a line array CCD image when an internal solitary wave is propagating under the water, and then its influence to the properties of those surface short gravitational waves and capillary waves is analyzed. So the underwater internal solitary wave can be retrieved by analyzing the weak variation of surface-wave field to establish the relation between the features of internal wave elements and CCD grey levels. The obtained results are shown to verify its effectiveness of this experimental method, and also provide a new avenue for the study on the remote sensing of ocean internal dynamics through the practical utilization of surface roughness and stratification properties.

stratified fluid tank, internal solitary wave, surface roughness, CCD imagery

PACS: 47.54.De, 92.10.hj, 47.35.Pq, 78.68.+m

doi: 10.1360/SSPMA2014-00064