

孤立波与水平板相互作用过程 涡演化的研究*

刚傲, 马玉祥*, 牛旭阳, 张少华, 董国海

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连, 116024, Email: yuxma@dlut.edu.cn)

摘要: 本文通过物理模型实验对孤立波与下潜水平板的相互作用进行了研究。实验采用 PIV 技术测量了水平板周围流场的演化特征, 实验结果发现在水平板的迎浪侧和背浪侧均会产生涡, 但涡的演化过程有着明显的差别。本文基于小波变换的涡结构识别方法, 对流场数据进行了分析, 得到了孤立波与平板相互作用过程迎浪侧与背浪侧的涡结构。结果表明, 水平板迎浪侧涡的尺寸会随着波高的增大而增大, 与波高呈正相关; 背浪侧涡的尺寸与波高的相关性较弱。

关键词: 涡演化过程, 小波变换, 孤立波, 淹没平板

1 引言

波浪与结构物的相互作用是海洋工程中常见的现象, 研究波浪与结构物相互作用的机理对工程应用有较为深远的意义。近些年来, 淹没结构物的应用越来越广泛, 例如桥梁的桥面、海洋平台等等, 而且这类结构物在台风等极端海况下是很容易被破坏的, 所以研究极端海况与淹没结构物的相互作用是十分必要的。

在孤立波的作用下, 淹没结构物前后两端会生成涡, 随着波浪的传播, 涡的位置也随之变化。Lin 等^[1]应用亥姆霍兹分解法结合了边界积分法和涡方法, 分析了孤立波与淹没矩形障碍物相互作用过程中涡的生成与演化过程; Lo 和 Liu^[2]进行了实验研究与数值计算, 详细分析了孤立波与淹没水平板相互作用的过程, 测量了波高、点压力以及平板周围的涡结构, 将实验数据与数值结果进行了充分的对比。了解涡的演化过程是深入分析湍流的形成机理的重要前提, 所以研究涡的演化过程是十分有意义的。当前对涡演化过程的研究方法有很多, Chong 等^[3]通过分析速度梯度张量的特征值来分析涡的运动, Adrian 等^[4]将大涡模拟 (LES) 的方法应用在 PIV 数据上分析, 过滤掉小尺度的涡, 并通过模式化的方法来表征这些被过滤掉的涡, 从而重点分析大尺度的涡结构。Camussi 等^[5]利用小波变换的方法分析 PIV 数据, 定量地计算涡的能量, 并且反演出涡的位置, 为细致地刻画涡结构提供了基础。本文基于 Camussi^[5]提出的小波变换方法, 分析孤立波与淹没平板相互作用中的淹没

* 基金资助: 辽宁省“兴辽英才计划”资助项目 (XLYC1807010), 国家自然科学基金 (51679031)

平板附近涡的演化过程，分别探究迎浪侧与背浪侧涡的结构与孤立波波高之间的关系。

2 实验及参数设置

本实验是在大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室的波浪水槽中进行的，水槽长 20m，宽 0.45m，高 0.6m。水槽的一端设置了推板造波机，另一端安置消波装置。本实验采用高速粒子图像速度系统(HSPIV)对淹没平板周围的二维速度场进行了测量。采用高速 CMOS 相机拍摄图像，分辨率为 2016*2016 像素，最大帧频为 1279 Hz。在 HSPIV 测量过程中，由于孤立波与淹没平板相互作用的涡在平板的两端较为明显，所以在淹没平板的迎浪侧和背浪侧分别选取了一个涡结构较为明显的测量区域，以此来分析平板周围的涡演化过程。迎浪侧与背浪侧测量区域的尺寸均为 $23 \times 23 \text{ cm}^2$ ，水平方向的零点设置于淹没平板的左端，竖直方向的零点设置于水槽底部，迎浪侧区域水平方向的位置为 $-0.1 \text{ m} \sim 0.13 \text{ m}$ ，竖直方向的位置为 $0.08 \text{ m} \sim 0.31 \text{ m}$ ；背浪侧区域水平方向的位置为 $0.23 \text{ m} \sim 0.46 \text{ m}$ ，竖直方向的位置为 $0.05 \text{ m} \sim 0.28 \text{ m}$ ，PIV 装置以及测量区域的布置如下图所示。

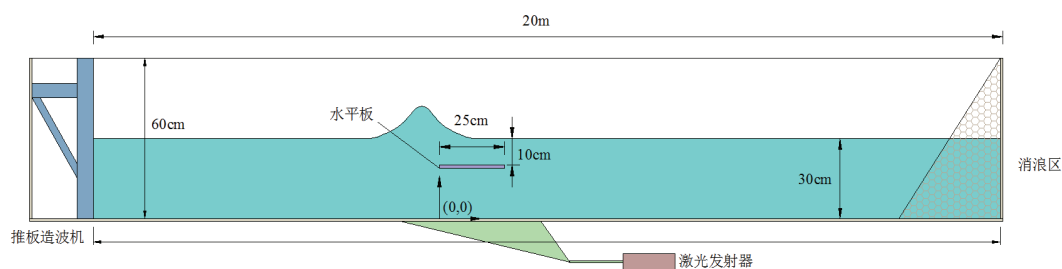


图1 实验布置示意图

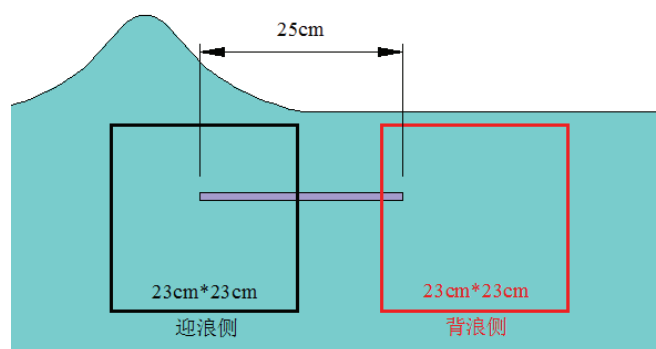


图2 流场测量区域设置示意图

本实验为了对比不同孤立波波高下涡演化过程的差异，共设置了三组不同的波高，孤立波的波面升高 η 的表达式如下：

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \sqrt{\frac{3H}{4h^3}}(x - ct), \quad (1)$$

其中 H 为孤立波波高, h 为水深, c 为孤立波传播速度。实验参数设置如表 1 所示。

表 1 实验工况设置参数

CASE	水深 $h(\text{cm})$	波高 $H(\text{cm})$	板下潜深度 $d(\text{cm})$	波速 $c(\text{m/s})$
A	30.0	3.0	10.0	1.80
B		7.0		1.90
C		11.0		2.00

3 小波变换方法

小波变换是一种常用的信号分析方法, 通过构造合理的母小波函数, 对一段时间序列进行小波变换, 从而得到该时间序列的时频谱。在小波尺度 r 下的小波变换可以写为如下表达式^[5]:

$$w^r(x) = r^{-1/2} \int f(x') \psi^*\left(\frac{x-x'}{r}\right) dx', \quad (2)$$

其中 r 为小波的尺度, ψ 为小波母函数, $*$ 代表复共轭。

Camussi^[5]修正并提出可以定量分析流场涡的演化特征的小波变换方法, 该小波变换方法是对小波变换的拓展, 在 x, y 两个方向分别对 u, v 两个方向的速度分别进行小波变换。首先定义小波变换张量:

$$w_{i,k}^r(x), \quad i, k = 1, 2 \quad (3)$$

其中 i 代表速度方向, j 代表小波变换序列的方向, 在本文中, 1 代表 x 方向, 2 代表 y 方向。例如 $i = 1, j = 1$ 时, 代表在小波尺度 r 下, PIV 测量区域中每一行的水平速度 u 沿着 x 方向进行小波变换, 每一行的空间序列都可以在小波尺度 r 下转换为对应的小波变换序列, 进而将整个测量区域的场数据的每一行都转化为对应的小波变换序列。

定义涡结构的无因次化能量:

$$E(x_1, x_2)^r = \left[\left(\frac{w_{1,2}^r w_{1,2}^{r*}}{\langle w_{1,2}^r w_{1,2}^{r*} \rangle} \right) \left(\frac{w_{2,1}^r w_{2,1}^{r*}}{\langle w_{2,1}^r w_{2,1}^{r*} \rangle} \right) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

其中 $w_{1,2}^{r*}$ 代表 $w_{1,2}^r$ 的共轭, $\langle \rangle$ 代表在测量空间的全域上取平均值。

涡心位置一般是与涡能量相关的, 即涡心处的能量一般都相对较大, 所以为了更好地反演涡心位置, Camussi^[5]选取具有较大能量的位置进行分析, 因此需要确定出涡能量的一个阈值, 并选取大于此阈值的涡能量进行分析, 根据合理的推断, 阈值的定义如下,

$$\left\langle \left[E(x_1, x_2)^r - \left\langle E(x_1, x_2)^r \right\rangle \right] \right\rangle, \quad (5)$$

选出所有大于此阈值的涡能量值进行求和平均, 即得出在小波尺度为 r 时的平均涡能,

$$\tilde{E}(r) = \left\langle E(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)^r \right\rangle_{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2}, \quad (6)$$

其中 $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$ 即为涡能大于阈值的位置。

从定义式中可以看出, 平均涡能 $\tilde{E}(r)$ 是小波尺度 r 的函数, 选出平均涡能最大时对应的尺度 $\bar{r}$, 将其做为最优尺度, 同时最优尺度下找到对应的涡能 $E(x_1, x_2)^{\bar{r}}$ 最大的位置, 即为当前时刻速度场对应的涡心的位置。

为了验证该方法的可行性, 本文选用一个单一的涡进行该算法的测试, 在 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的区域中, 设置一个点涡, 速度矢量图如图 3 左侧所示, 经过小波变换处理, 可以得到图 3 右侧的能量图, 并且可以计算出涡心的位置在 (0,0) 处, 最优小波尺度为 0.08m, 由此可以说明本方法处理涡结构可以较为有效地反演出涡的结构与位置。

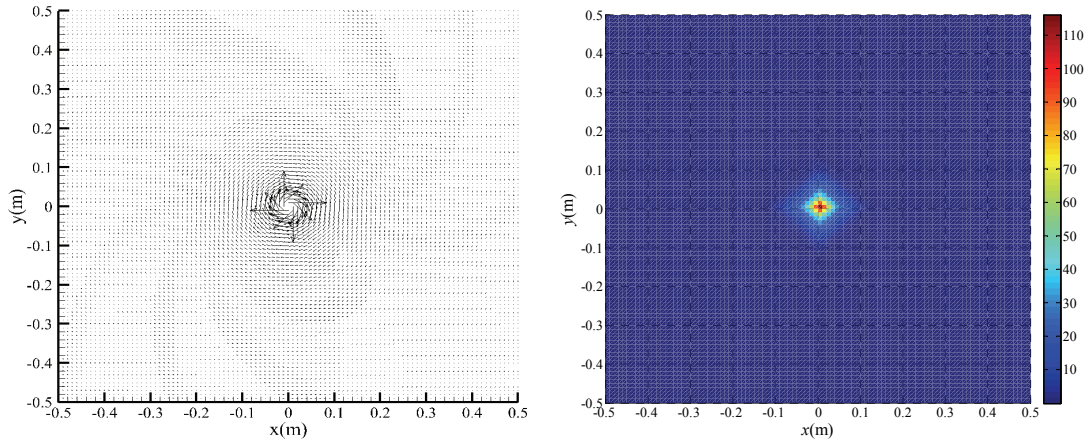


图3 点涡的速度矢量图与涡能量图

4 实验结果与讨论

本实验中 PIV 测量的窗口大小为 0.002m ，本文为了过滤掉较小的涡结构，所以选定五倍窗口大小为小波变换的最小尺度，即为 0.01m ，测量区域的一半为最大尺度，即为 0.115m 。本文应用小波变换方法，得出不同孤立波波高下涡的演化过程。

本文将时间零点定义为孤立波波峰传播至淹没平板前端的时刻，对于迎浪侧而言， $t = 0.6\text{s}$ 时涡的结构发展较为充分，而在 $t = 0.4\text{s}$ 时，在平板尾部附近生成了连续的涡，并且涡的结构较为明显。所以在迎浪侧和背浪侧分别选定 $t = 0.6\text{s}$ 和 $t = 0.4\text{s}$ 的速度场作为进行小波变换分析的场数据。

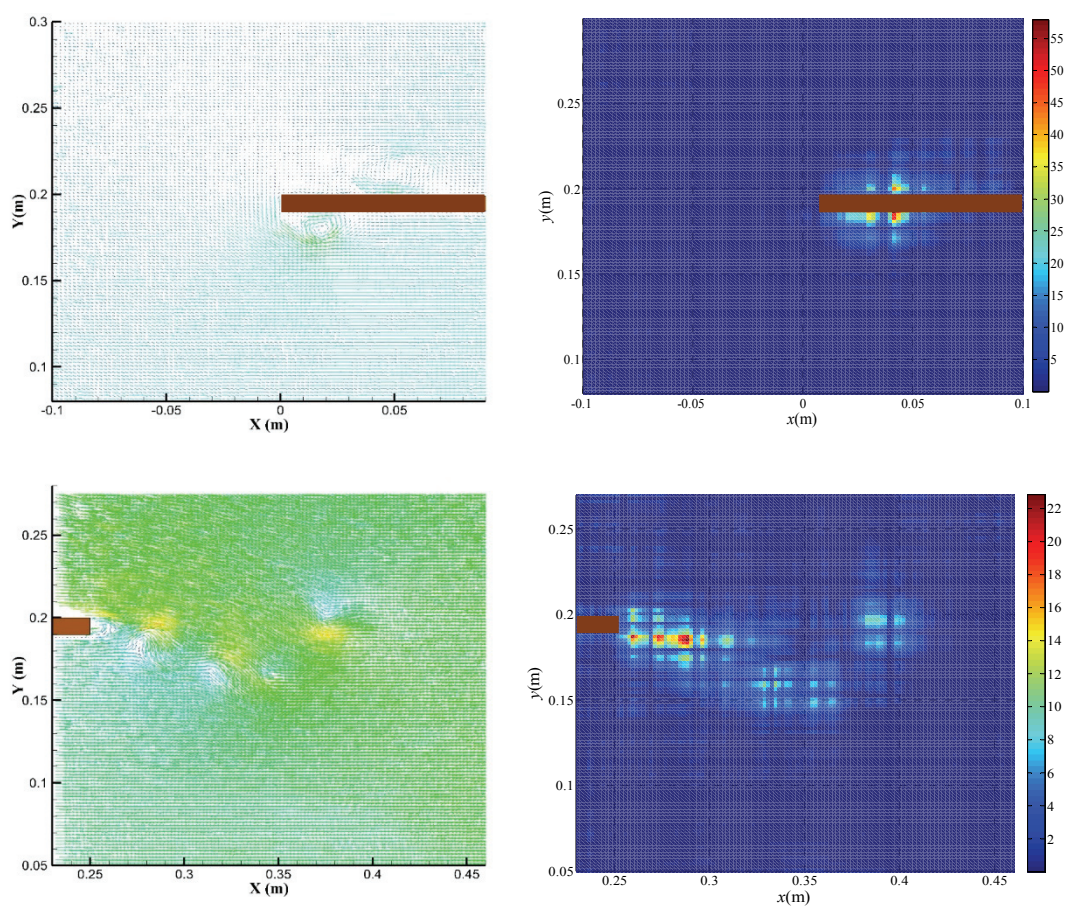


图4 $H = 3\text{cm}$ 工况下流场与涡能量的对比图

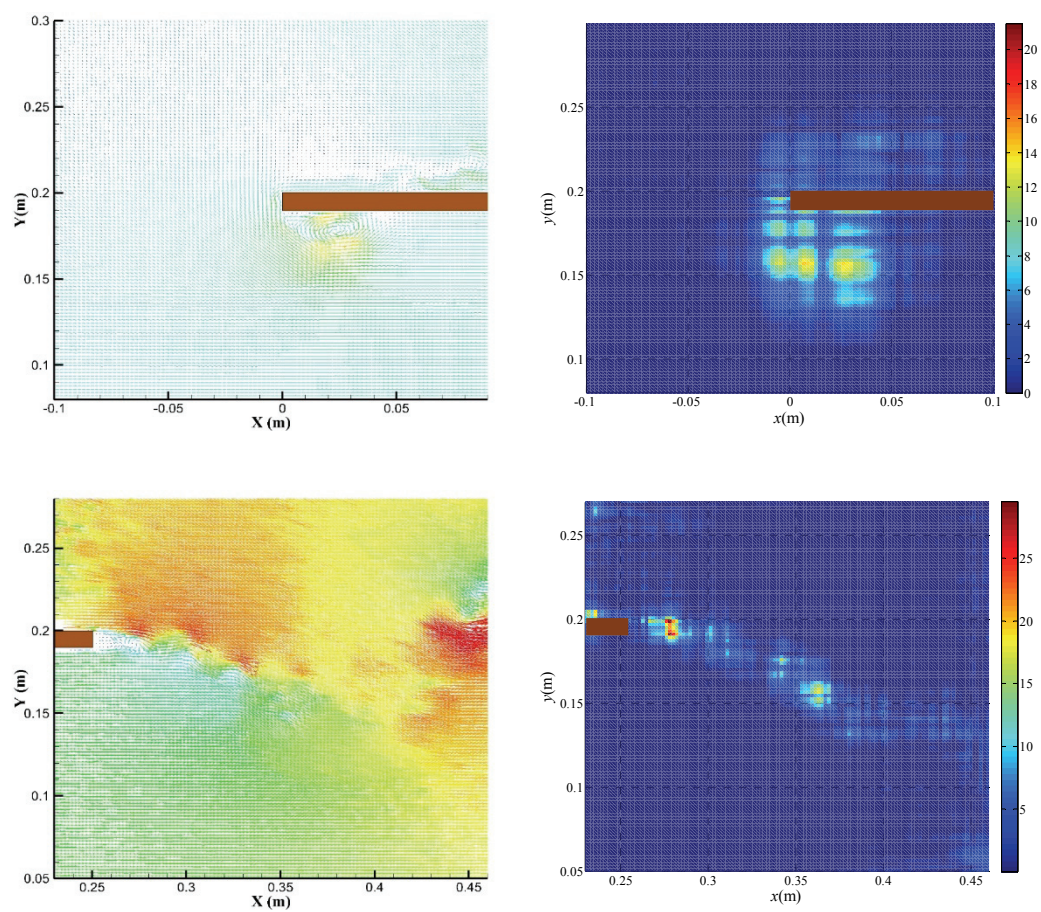
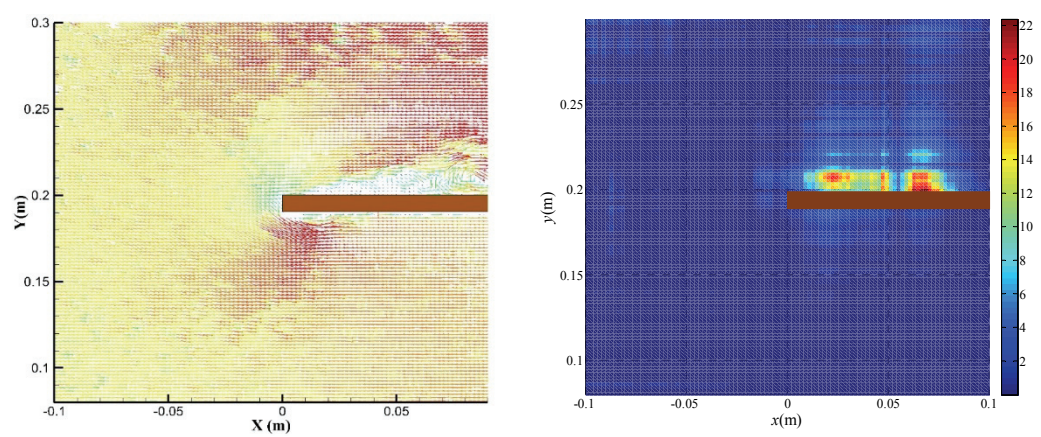


图5 $H = 7\text{cm}$ 工况下流场与涡能量的对比图



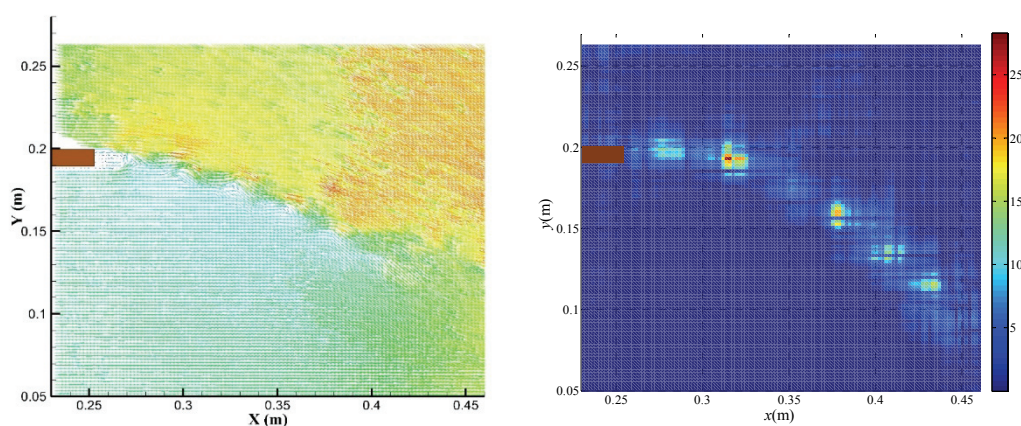
图6 $H = 11\text{cm}$ 工况下流场与涡能量的对比图

表2 不同工况下不同位置的最优小波尺度

工况	测量区域	最优小波尺度(m)
$H = 3\text{cm}$	迎浪侧	0.0173
	背浪侧	0.0289
$H = 7\text{cm}$	迎浪侧	0.0327
	背浪侧	0.0385
$H = 11\text{cm}$	迎浪侧	0.0616
	背浪侧	0.0347

从各个不同工况的对比图中可以看出，经过小波变换处理之后的涡结构基本都可以完整的反演出来，而且涡能量较大的区域与涡的位置是对应的，这也可以证明反演结果的正确性。从表2中可以发现，迎浪侧的最优小波尺度随着波高的增大而逐步增大，小波尺度的变化说明了不同波高下迎浪侧涡的结构也在发生变化，小波尺度越大，涡的结构也越大，所以随着波高的增大，迎浪侧的涡结构随之增大。相比于迎浪侧，背浪侧的小波尺度相对较为稳定，为0.03m左右，说明平板后端产生的涡结构与波高的相关性较小，而且结构较为相似。

参 考 文 献

- 1 Lin C , Ho T C , Chang S C , et al. Vortex shedding induced by a solitary wave propagating over a submerged vertical plate. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2005, 26: 894-904
- 2 Lo, H.Y., Liu, P.L., Solitary waves incident on a submerged horizontal plate. J. Waterway Port Coastal

- Ocean Eng. 2014, 14: 1–17
- 3 Chong MS; Perry AE; Cantweel BJ. A general classification of three-dimensional flow fields. Physics of Fluids A., 1990, 2: 765-777
 - 4 Adrian RJ; Christensen KT; Liu ZC. Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields. Experiment Fluids. 2000, 29: 275-290.
 - 5 Camussi R. Coherent structure identification from wavelet analysis of particle image velocimetry data. Experiments in Fluids, 2002, 32(1): 76-86.

Study on the vortex evolution in the interaction between solitary waves and submerged plates

GANG Ao, MA Yu-xiang *, NIU Xu-yang, ZHANG Shao-hua, DONG Guo-hai

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024.

Email: yuxma@dlut.edu.cn)

Abstract: In this paper, the interaction between solitary waves and submerged plates is studied by physical model experiments. In the experiment, PIV technology was used to measure the evolution characteristics of the flow field around the submerged horizontal plate. The experimental results showed that vortices were generated on both the weather side and the lee side of the horizontal plate, but the evolution process of vortices was obviously different. In this paper, the vortex structure Identification method based on wavelet transform is used to further analyze the flow field data, then the vortex structures on the weather side and the lee side are obtained. The results show that the size of the vortex increases with the increase of wave height and is positively correlated with wave height. The correlation between the size of the vortex and the wave height is weak.

Key words: vortex evolution, wavelet transform, solitary wave, submerged plate