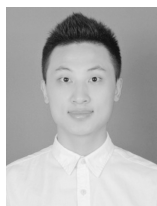


· 综合 ·



# 波浪作用下水质点示踪的简易方法研究\*

苏俊玮, 陶爱峰, 刘亚伊, 蔡颖

(海岸灾害及防护教育部重点实验室, 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

**摘要:** 由于波浪作用下水质点周期性振荡运动的特性, 对其运动轨迹的直接观测一直是比较困难的问题。然而对波浪作用下水质点运动轨迹的直接观测不仅有助于波浪理论的进一步发展, 也有助于人们对波浪运动特性的客观理解。为此提出了一种成本极低的新型水质点示踪装置。该装置可直接观测波浪作用下的水质点运动, 且结构简单、操作方便、环保安全, 不影响水槽展开其他试验。结合系列水槽试验, 详细讨论了该装置的工作原理和操作方法。试验结果充分表明, 该装置与方法可以完成对不同波浪要素下水槽中任一水质点的示踪, 试验数据符合波浪理论规律, 证明了该装置的实用性和可靠性。

**关键词:** 水槽试验; 示踪装置; 波浪作用; 水质点运动轨迹; 试验方法

中图分类号: U 652; TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)07-0000-00

## Simple method for investigation on the tracing of water particles under wave action

SU Jun-wei, TAO Ai-feng, LIU Ya-yi, CAI Ying

(Key Laboratory of Coastal Hazards and Protection of the Ministry of Education, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Because of the characteristics of the periodic oscillatory motion of the water particles under wave action, the direct observation is difficult. However, the direct observation of the moving water particles under wave action is helpful not only to the further development of the wave theory, but also helps to understand the characteristics of the wave motion. So a new water particles tracing apparatus with a very low cost is presented. This environmentally-friendly and safe apparatus can be applied in observing the orbits of water particles directly, which is simple in structure and easy in operation, and without disrupting other flume experiments. Combined with a series of flume experiments, the working principle and operation method of the apparatus are discussed in detail. The experimental results also show that the apparatus and method are applicable in tracing any water particle in the flume under different wave elements, and the experimental data are in accordance with the wave theory, which proves the practicability and reliability of the apparatus.

**Keywords:** flume experiment; tracing apparatus; wave action; orbits of moving water particles; experimental method

已有研究表明, 波浪对物体进行冲击时, 产生最大伤害的冲击力不是代表波浪前进速度的波形速度, 而是波浪内部水质点的速度<sup>[1-3]</sup>。然而由

于波浪作用下水质点的往复性运动, 直接对水质点轨迹的观测较为困难, 导致了人们难以对波浪作用下水质点运动特性<sup>[4-6]</sup>进行直观性的理解, 也

收稿日期: 2016-12-29

\*基金项目: 国家自然科学基金 (51579091, 51137002)

作者简介: 苏俊玮 (1994—), 男, 主要研究方向为波浪理论。

难以对经典波浪理论知识<sup>[7]</sup>开展必要的考证工作。

水质点示踪是指利用人为制造的示踪剂来替代水质点，将水质点的运动轨迹展示出来并用摄像机等仪器拍摄记录。水质点示踪不仅是探讨水质点运动特性的关键，而且可应用于相关波浪理论课程的教学演示。

目前对水质点运动轨迹的示踪手段多采用PIV流速测量系统，虽然PIV流速测量系统具有较高的精确度，但PIV整套设备过于昂贵，且拍摄结果不直观，后期处理步骤繁杂，不能直接展示运动轨迹<sup>[8]</sup>。另一种较为常用的示踪方法是直接利用密度与水接近的固体浮子作示踪剂，但局限于现阶段的工艺技术，试验过程中水温要受气温或水泵等影响而变化，水密度也相应发生变化，固体浮子的密度不可能做到与水密度完全一致，浮子本身在静水中具有一定沉速或浮速。虽然也有人利用液体示踪剂来研究水质点的运动，在某种程度上弥补了固体浮子的一些缺陷，但液体示踪剂有易扩散的缺点，水质点运动较为剧烈时以及追踪时间较长时容易失效，且常用的高锰酸钾等有色示踪液体会对水质造成影响<sup>[9-11]</sup>。

现有示踪手段局限于直接将示踪粒子投入水中，示踪粒子的密度与水必然存在差异，浮力与重力不能完全平衡，示踪粒子在合力作用下会产生自身的升降运动，不能等效地替代自然状态中的水质点，示踪粒子的直观性也不够好。为克服以往试验中的缺陷，本试验提供一种结构简单、操作方便、使用灵活、成本极低、环保安全、可重复使用且示踪性能良好的水槽试验中水质点示踪装置，能直观体现水槽波浪场中任意水深处的水质运动轨迹<sup>[12]</sup>。

## 1 示踪装置及工作原理

示踪装置由支架、横杆、以及示踪部件等组成。支架安装于水槽上，并且支架的尺寸根据水槽的尺寸设置；横杆安装于支架上并可沿支架长边的长度方向滑动；示踪部件包括连接绳以及固定于其上的示踪粒子，示踪粒子用连接绳串接、

连接绳缠绕于卷管上，卷管安装在支架上，通过调整卷管的位置与连接绳的长度使得示踪粒子能处于波浪场任一位置。

该装置通过示踪粒子连接绳串接密度比水稍大的示踪粒子并与可移动支架相连接，使得示踪粒子处于“悬浮状态”。其中，基于大量的材料工作和反复试验，示踪粒子采用密度 $1.03\text{ g/cm}^3$ 、直径 $2\text{ mm}$ 的球状ABS塑料小球，能够等效替代波浪场中的水质点，有效地改善了现有技术中示踪粒子沉降扩散等问题，并且用颜料染上不同颜色，能直观体现任意水深处的水质运动轨迹；示踪粒子连接绳采用可吸水的自身密度可忽略不计的细绳，连接绳吸水后密度与水接近，可近似替代所在位置的水体，几乎不对波浪场的运动产生影响。为了降低连接绳对示踪粒子在运动波浪场中的竖向约束作用，连接绳在水槽底部留有足够的富余长度。图1为该装置的简示图。

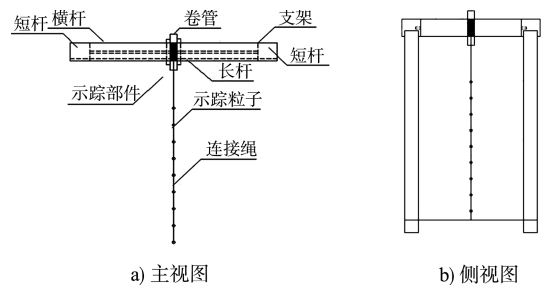


图1 水质点示踪装置

## 2 试验的设计与实施

### 2.1 试验设计

规则波的水质点的运动轨迹是封闭的椭圆，由于波浪是行进波，所以在不考虑耗散的前提下，相同波浪要素时，同一水深的任意位置处的水质点运动轨迹均相同，而不同水深位置处的水质点运动轨迹有差异，且从上往下呈缩小趋势。在这一波浪理论背景下，本次试验中示踪粒子的深度为变量，而波浪类型、水槽水深、波高、周期、皆为不变量。取水槽水深 $0.66\text{ m}$ ，规则入射水波波高为 $0.10\text{ m}$ ，周期选用 $1.20\text{ s}$ ，示踪粒子深度（距离静水面）分别取 $0.00$ 、 $0.13$ 、 $0.27$ 、 $0.36$ 、 $0.53$ 、 $0.66\text{ m}$ 。

### 2.2 试验实施

试验在河海大学海岸灾害及防护教育重点实验室(河海大学)航道实验室的风浪流水槽中开展, 该水槽如图 2 所示, 其基本尺寸为 67 m×1 m×1.5 m(长×宽×高)。



图 2 风浪流水槽

首先, 通过调节装置相关部件使 6 个示踪粒子均位于规则波浪场中所需观测水质点位置; 然后根据试验设计中的波浪参数率定波浪, 波浪经过示踪部件后, 会引起示踪粒子运动; 接着固定好摄像机于试验最佳拍摄位置, 拍摄示踪粒子的运动轨迹, 拍摄装置主体为佳能 5Dmark III 及配套三脚架(图 3)。如需研究不同波浪要素对水质点运动的轨迹, 改变波浪要素初始条件即可。



图 3 拍摄方式

### 3 有效性验证

#### 3.1 数据处理

首先将摄像机拍摄的试验记录视频转换成照片帧, 30 帧/s, 每次选取一个周期内的图片进行处理; 然后选取代表示踪粒子, 用 Surfer 软件在每帧照片中获得对应时刻示踪粒子的坐标, 见图 4、5; 接着将所得坐标数据用 Matlab 依次连接

拟合出示踪粒子的运动轨迹, 运动轨迹见图 6; 以此类推, 分别拟合出其余示踪粒子的运动轨迹, 本次试验结果见图 7、8。

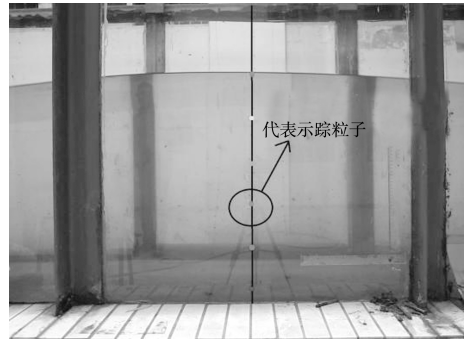


图 4 选取代表粒子

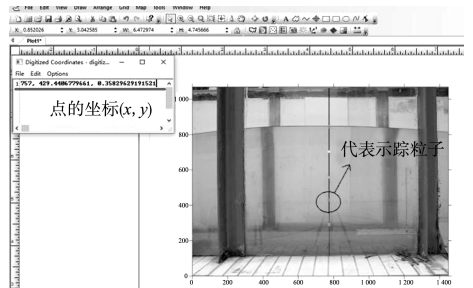


图 5 获取对应坐标

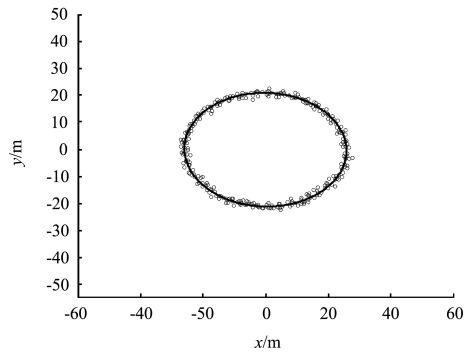


图 6 代表粒子的运动轨迹

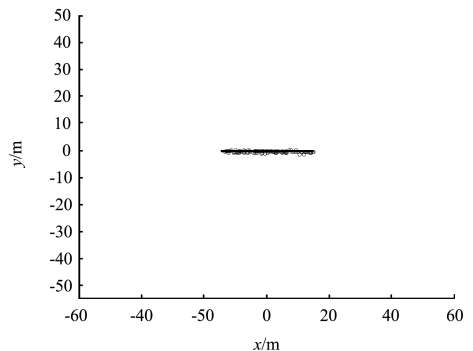


图 7 在距离静水面 0.66 m(水底)处的示踪粒子轨迹

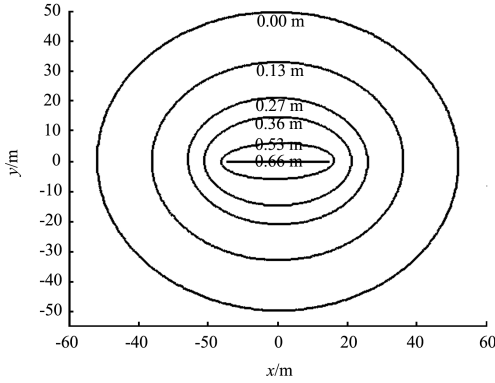


图8 在距离静水面 0.00、0.13、0.27、0.36、0.53、0.66 m (由外到内) 处的示踪粒子综合轨迹对比

### 3.2 分析验证

示踪粒子在 6 个不同深度处的拟合轨迹在同一坐标系的对比结果见图 8，可以分别求出所测示踪粒子运动轨迹的实际长半轴  $a$ 、短半轴  $b$ 。

由微幅波理论<sup>[13]</sup>可知：

$$a = A \frac{\cosh[k(z_0 + h)]}{\sinh(kh)} \quad (1)$$

$$b = A \frac{\sinh[k(z_0 + h)]}{\sinh(kh)} \quad (2)$$

式中： $a$  为长半轴； $b$  为短半轴； $A$  为振幅； $k$  为波数； $h$  为水深； $z$  为示踪粒子竖向坐标（波浪在  $xz$  平面内运动， $x$  轴位于静水面， $z$  轴竖直向上为正）。具体计算结果见表 1。

表 1 示踪粒子在不同深度下测量的结果与实际结果的误差值

示踪粒子竖向坐标/m	$a_{\text{误差}}/\%$	$b_{\text{误差}}/\%$
0.00	0.37	5.34
-0.13	0.13	5.12
-0.27	0.23	7.12
-0.36	0.24	19.69
-0.53	0.70	8.41
-0.66	0.13	0.00
平均误差	0.30	7.61

注： $a_{\text{误差}} = (a_{\text{实际}} - a_{\text{理论}}) / a_{\text{理论}}$ ， $b_{\text{误差}} = (b_{\text{实际}} - b_{\text{理论}}) / b_{\text{理论}}$ 。 $a_{\text{实际}}$  为示踪粒子拟合轨迹的长半轴； $a_{\text{理论}}$  为根据波浪理论推算的水质点轨迹的长半轴； $b_{\text{实际}}$  为示踪粒子拟合轨迹的短半轴； $b_{\text{理论}}$  为根据波浪理论推算的水质点轨迹的短半轴。

由图 7 可以看出，在水底处  $b = 0$ ，说明水质点沿水底只做水平运动；由图 8 可以看出，实测示踪粒子轨迹均呈现明显的封闭椭圆，在相同波

浪要素下，不同深度处的水质点运动轨迹随着深度的增加而变小，均符合波浪理论的基本规律。

由表 1 中的误差分析可知，数据点的拟合轨迹与理论水质点轨迹的长半轴误差均不超过 1%，精度非常高，说明示踪装置的示踪性能良好，可直接用于相关波浪试验。短半轴误差略大，经分析，主要原因是水质点垂向短半轴长度随水位迅速递减，且受竖向细线影响，但亦在 15% 以内，可以通过弱化连接绳的作用来减小误差，如保证连接绳吸水后密度与水接近，自身质量可忽略不计等。

### 4 结论

1) 最终确定的与水密度相近的示踪粒子在细线牵引下，结合粒子涂色，能直观体现任意水深处的水质点运动轨迹，经分析所得轨迹符合波浪理论的基本规律。

2) 示踪粒子轨迹与理论水质点轨迹的长半轴误差不超过 1%，精度非常高，可直接用于相关波浪试验。由于水质点垂向短半轴长度随水位迅速递减，且受竖向细线影响，短半轴误差略大，但亦在 15% 以内。通常波浪试验多考虑海堤等结构物的波浪力，或者探讨波浪对底部泥沙运动的影响，二者都是主要关注波浪作用下水质点水平方向的运动特性。因此本研究的试验装置和方法对于主要的波浪试验都是有效的。

3) 本研究所得试验装置除了可以有效且直观地实现波浪作用下水质点示踪外，还具有成本极低、操作简单、环保安全和可重复使用的优点。现有的水质点示踪方法中 PIV 造价昂贵、操作复杂，且专门研制的示踪剂属于一次性消耗品。而常用的高锰酸钾等有色示踪液体会对水质造成影响。

### 参考文献：

[1] 赵宗浩. 水流对波浪要素影响研究概况[J]. 海岸工程, 1983(2): 103-110.  
 [2] 袁德奎, 何磊, 陶建华. 平面二维流场中质点运动的可视化[J]. 海洋通报, 2004, 23(5): 77-81.

- [3] GRUE J, JESSON A. Experimental velocities and accelerations in very steep wave events in deep water[J]. Eur J Mech B, 2006, 25(5): 554-564.
- [4] 李玉成. 波浪与水流共同作用下波浪要素的变化[J]. 海洋通报, 1984(3): 1-12.
- [5] 任佐皋. 水流、波浪运动场试验研究的一种方法[J]. 华东水利学院报, 1981(3): 85-94.
- [6] 王涛, 李家春. 波流相互作用进展研究[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 331-343.
- [7] 竺艳蓉. 几种波浪理论适用范围的分析[J]. 海岸工程, 1983(2): 11-27.
- [8] 阮驰, 孙传东, 白永林, 等. 水流场 PIV 测试系统示踪粒子特性研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(2): 72-77.
- [9] 渠时勤. 同向波一流场中水质点运动轨迹的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1983(2): 78-88.
- [10] 石道明. 水波中质点的运动分析[J]. 柳州师专学报, 1994(2): 5-10.
- [11] JENSEN A, SVEEN J K, GRUE J, et al. Accelerations in water waves by extended particle image velocimetry[J]. Exp Fluids, 2001, 30(5): 500-510.
- [12] 郭晓宇. 数值波浪水槽及其应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [13] 邹志利. 海岸动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

(本文编辑 武亚庆)