

# 表面驻波作用下紊动射流运动特性的试验研究

陈兴伟<sup>1</sup>, C. T. Hsu<sup>2</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007;

2. Dept. of Mech. Eng., Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong)

**摘要:** 对表面驻波作用下紊动射流运动进行了试验研究。应用多普勒激光测速仪(LDV)进行流速场量测,应用电容式波高仪测量表面波动特性。结果表明,在表面驻波作用下,紊动射流流量主导远区流速的横向变化仍然可以用高斯分布表达,横剖面上流速的等值线图由原来对称于轴心的圆形变形为椭圆形;表面波动增强了紊动射流的扩散能力。

**关键词:** 表面驻波; 紊动射流; 运动特性; 试验研究

中图分类号: O353.2; O357.5; O358 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2004)02-0173-05

紊动射流是一种在许多工程领域都存在的流动现象,因此,也是一个比较活跃的研究领域。20世纪60年代以来,发表了很多成果<sup>[1,2]</sup>。作为一种重要的排放方式,工农业、生活等污水常常通过管道,排放到海岸带或海洋中去。污水的这种排放方式及其运动规律,通常可以概化为紊动射流或羽流与表面波动的相互作用问题。因此,研究表面波动对紊动射流的影响,在海岸带与海洋污水排放工程设计方面有着重要的意义。

由于表面波动的影响,紊动射流的运动特性比较复杂,已进行的研究不多。主要成果有 Shuto 和 Ti<sup>[3]</sup>、Chin<sup>[4]</sup> 等对由于表面波动使得射流表面稀释增强问题的试验研究。90年代以来,由于量测仪器的改进,取得了比较重要的研究成果,如 Chyan 和 Huang<sup>[5]</sup> 及 Koole 和 Swan<sup>[6]</sup> 等应用多普勒激光测速仪对前进波作用下的射流流动结构进行了量测,使得对该问题的认识有了很大的提高。但在国内,尚未见类似研究的报道。

以上研究,主要是探讨前进波对紊动射流或羽流的影响。笔者应用多普勒激光测速仪(LDV)及激光诱发荧光法(LIF),对表面驻波作用下的紊动射流运动进行了比较全面的试验研究,并在理论上进行了初步的探讨<sup>[7]</sup>。本文简要介绍其中有关时均流速变化的成果,由此对表面驻波作用下的射流运动特性进行初步的讨论。

## 1 试验设备

试验在香港科技大学机械系环境流体力学试验室进行。主要包括如下试验设备:

### 1.1 水池

试验水池底部为 1.8 m 长的正方形,高 1 m,壁面为有机玻璃,如图 1 所示。水池的左边是造波仪。造波仪包括楔型插板、变频马达及连接装置。通过插板的上下运动,使得水池中的水体表面产生波动,而右边壁面的反射,最终形成了水体表面的驻波。驻波理论表明,根据插板插入频率和水池的大小,可以在池中生成多种频率、波高的驻波。

圆形射流喷口垂直放置在水池底部,其出口高出底部一定距离,以避免水池底部边界的影响。射流出流流量由平水塔及阀门控制,喷口直径分别为 3 mm 和 5 mm。

收稿日期: 2003-08-21; 修订日期: 2003-09-25

基金项目: RGC Grant of HKSAR (HKUST6254/02E); 福建省自然科学基金资助项目 (D0310014)

作者简介: 陈兴伟(1963-),男,福建福鼎人,副教授,博士后,主要从事水动力学、水资源水环境研究。

## 1.2 三维多普勒激光流速仪

该流速仪为美国 TSI 公司生产, 三色 5 束激光, 可进行三维量测。流速仪安装在控制平台上, 可以精确地控制量测位置, 其误差为 0.01 mm。

## 1.3 电容式波高仪

驻波的波动特性, 可以通过水体表面位移的测量而统计分析得出。位移的变化由电容式波高仪量测。与水体接触的为针灸银针, 直径仅为 0.3 mm, 对波动干扰可以忽略不计。电容式波高仪将水面位移的变化转化为电压输出。电子信号采集系统将电压值实时转化为数字信号, 通过电脑控制存储。数据采集频率可达 200 Hz。

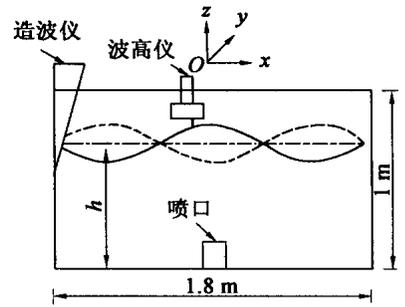


图1 试验水池及有关设置示意图

Fig. 1 Water tank schematic

## 2 试验结果及其分析

本试验首先对生成的驻波及紊动射流的运动特性分别进行了量测。在此基础上, 对表面驻波作用下的紊动射流运动进行了量测分析。试验中, 只进行流速的二维测量。试验时水池水深为 0.74 m。射流雷诺数(=  $d_0 w_0 / \nu$ ) 都大于 6000。

### 2.1 驻波特性

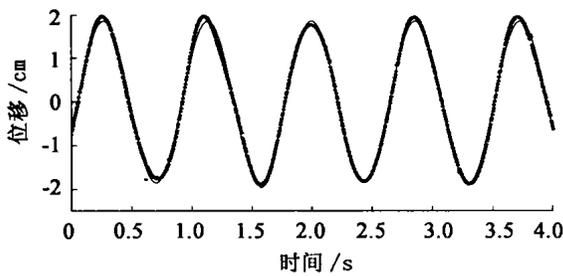


图2 水面波动测量及其余弦函数拟合

Fig. 2 Measurement and data fitting of wave height at antinode

驻波理论表明, 驻波表面位移  $\eta$  可表示为

$$\eta(x, t) = a \cos kx \cos \omega t \quad (1)$$

式中  $a$  为振幅;  $k$  为波数;  $\omega$  为频率。波节时  $\cos kx = 0$ ; 波腹时  $\cos kx = 1$ 。

本试验生成了三波节驻波。将波高仪置于波腹所测水面波动时间变化如图 2 所示。用方程(1)拟合该过程, 得  $a = 1.85 \text{ cm}$ ,  $\omega = 1.16 \text{ Hz}$ 。计算得反射系数为 0.92。

试验中, 还用 LDV 系统对表面波动形成的流场进行了量测, 所得结果与理论计算的结果符合甚好。

### 2.2 紊动射流特性

首先对紊动射流运动进行了验证性量测分析。已有的研究表明, 圆形紊动射流形成后区流速横向分布是轴对称的, 具有自相似性, 一般可用正态高斯分布表示, 即

$$w(r, z) = W_c(z) \exp\left\{-\left[r/b_w(z)\right]^2\right\} \quad (2)$$

式中  $W_c(z)$  为距射流喷嘴  $z$  的横剖面中心轴上的流速;  $w(r, z)$  为该断面上距中心轴  $r$  的某点的流速;  $b_w(z)$  为该断面的流速特征厚度。

由式(2)可知, 通过对不同位置横剖面流速分布的测量, 也可以求得  $W_c(z)$  和  $b_w(z)$  沿中心轴的变化规律, 它们可以分别表示为

$$w_0/W_c(z) = \alpha z/d_0 + \alpha_0 \quad (3)$$

$$b_w(z)/d_0 = \beta z/d_0 + \beta_0 \quad (4)$$

式中  $\alpha$  和  $\alpha_0$  为流速衰减系数;  $\beta$  和  $\beta_0$  为流速特征厚度变化系数;  $w_0$  为射流喷嘴处流速;  $d_0$  为管嘴孔径。

图 3 为紊动射流流速横向分布及其正态高斯分布拟合, 表明其符合正态高斯分布, 且具有良好的自相似性。图 4 为中心轴上的流速和相应的流速特征厚度沿轴线变化规律, 以式(3)和式(4)线性拟合, 所得系数  $\alpha$  为 0.168,  $\beta$  为 0.108, 该结果与文献[2]所列的 0.164 和 0.107 非常接近。

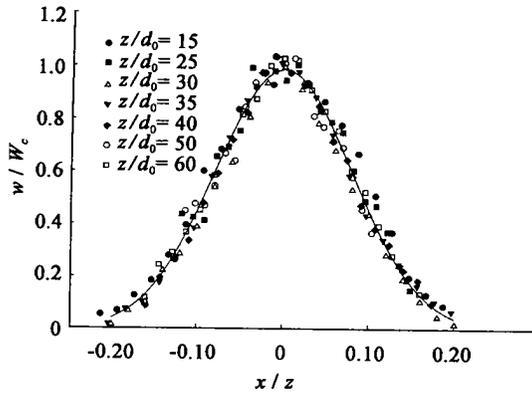


图 3 射流时均流速横向分布

Fig. 3 Normalized transverse profiles of velocity for turbulent jet

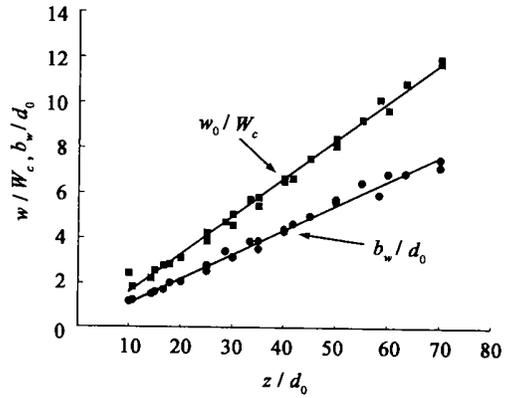


图 4 射流轴线上流速的轴向变化

Fig. 4 Variation of non-dimensional centerline velocity and jet width along the jet axis for turbulent jet

### 2.3 表面驻波作用下的紊动射流特性

由图 1 所示的驻波形态可知，其对紊动射流的影响还取决于驻波与射流的相对位置。为简单计，这里主要研究紊动射流置于波腹之下时的运动特性。

理论分析和时均流速实测结果表明<sup>[7]</sup>，不同于静止状态下紊动射流轴向变化分为形成区和形成后区的规律，在表面驻波作用下，紊动射流轴向变化可以依次分成 3 个区域，分别是动量主导近区(Momentum Dominated Near Field)、动量主导远区(Momentum Dominated Far Field)和波动主导区(Wave Dominated Field)。3 个区域的范围随着射流动量大小与波动强弱的对比而变化。其中，动量主导近区的特性与形成区相类似，动量主导远区与形成后区相类似。本文主要研究在表面驻波作用下，紊动射流动量主导远区的运动特性。

#### 2.3.1 时均流速横向分布

紊动射流及其受到表面驻波影响时的时均流速横向分布见图 5。图中的圆点为仅有紊动射流时的流速分布，实线为其高斯分布拟合；圆圈为驻波作用下紊动射流在  $xz$  平面上的流速分布，虚线为其高斯分布拟合。两相比较说明，驻波作用下紊动射流的流速变化仍然符合高斯分布，但其大小及型态产生了变化。在表面驻波的影响下，中心轴附近的流速变小，而两侧的流速变大，从而导致了式(2)中流速特征厚度的增大。

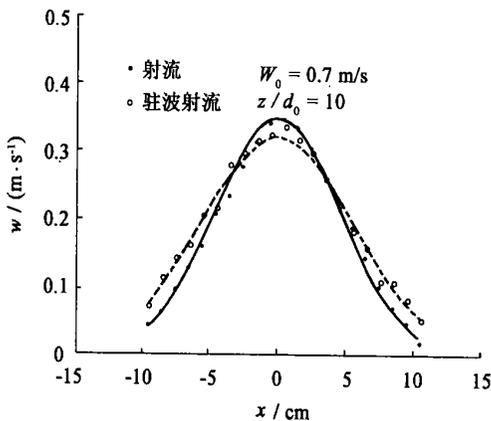


图 5 流速横向变化的高斯分布( $xz$  平面)

Fig. 5 Transverse profile of velocity for jet with and without wave ( $xz$  direction)

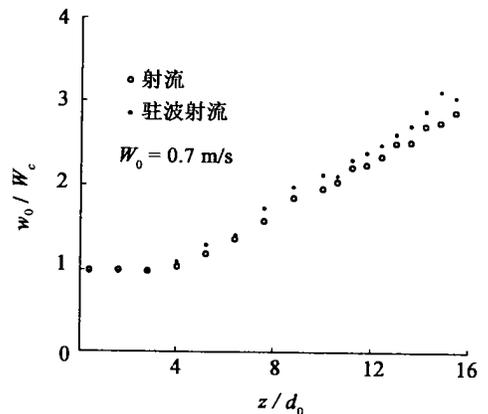


图 6 流速沿中心轴变化

Fig. 6 Variation of centerline velocity along the jet for jet with and without wave

同样地, 表面驻波影响时的时均流速横向分布也是自相似的。

### 2.3.2 时均流速沿中心轴变化

图6表示紊动射流及其在表面驻波作用下, 其流速沿射流中心轴的衰减过程。该图表明, 对相同初始流速 ( $w_0 = 0.7 \text{ m/s}$ ) 的射流来说, 在表面驻波的作用下, 其流速沿中心轴的衰减过程加快, 即在轴线的同一位置上,  $w_0/W_c$  值要比没有驻波作用时为大。显然, 图6的结果与图5相一致。

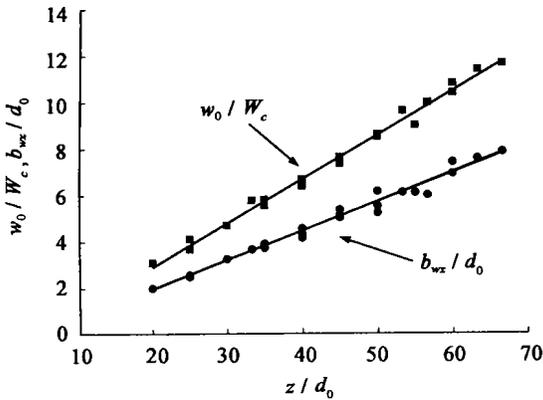


图7 表面驻波作用下射流流速及其特征厚度的轴向变化( $xz$  平面)

Fig. 7 Variation of non dimensional centerline velocity and jet width along the jet axis for jet with wave

如图1所示的表面驻波, 只在  $xz$  平面上变化。因此, 驻波在  $xz$  平面上对射流产生影响要比在  $yz$  平面上大, 从而使得圆形射流的轴对称特性产生变化, 流速在  $xz$  平面上的横向分布与在  $yz$  平面上不同。因此, 本试验分别在上述两个平面上对流速的横向分布进行了量测, 并应用式(2)分别对两平面上横向分布进行拟合, 从而分别求得两平面上中心轴上的流速  $W_c(z)$  及相应流速特征厚度  $b_{ux}(z)$  和  $b_{uy}(z)$  沿轴线的变化规律, 其中  $xz$  平面上的结果见图7。图7表明, 在表面波动的作用下, 中心轴上的流速和相应的流速特征厚度沿轴线的变化仍然遵循式(3)和式(4)的线性变化, 只是系数不同。而流速在  $xz$  平面上的横向分布与在  $yz$  平面上的不同, 使得式(4)在表面波动条件下应改写为

$$b_{ux}(z)/d_0 = \beta_x z/d_0 + \beta_{x0} \quad (5)$$

$$b_{uy}(z)/d_0 = \beta_y z/d_0 + \beta_{y0} \quad (6)$$

用式(3)、式(5)和式(6)拟合图7中相应的实测点子, 所得的系数见表1。表1表明了, 在表面驻波作用下, 紊动射流流速沿中心轴衰减变快, 流速特征厚度相应变大的变化规律; 显示了在表面驻波作用下, 射流扩散能力得以增强, 与周围水体的混掺、交换变快。

表1数据也说明了流速横向分布在  $xz$  及  $yz$  平面上的不同, 即  $xz$  平面上的流速特征厚度  $b_{ux}(z)$  不同于  $yz$  平面上的  $b_{uy}(z)$ , 且  $b_{ux}(z)$  要大于  $b_{uy}(z)$ 。因此, 流速等值线形状由式(2)所表示的对称于轴的圆形分布变为下式所代表的椭圆分布:

$$w(x, y, z) = W_c(z) \exp\left\{-\left[\left(\frac{x}{b_{ux}(z)}\right)^2 + \left(\frac{y}{b_{uy}(z)}\right)^2\right]\right\} \quad (7)$$

## 3 结 语

通过应用多普勒激光测速仪及电容式波高仪等测量仪器, 对表面驻波、圆形射流及表面驻波作用下紊动射流的运动特性进行了试验研究。试验结果表明, 在表面驻波作用下, 紊动射流动量主导远区流速的横向变化仍然可以用高斯分布表达; 横剖面上流速的等值线图由原来对称于轴心的圆形变形为椭圆形。结果还表明, 表面波动增强了紊动射流的扩散能力。

表1 流速及其特征厚度系数变化

Table 1 Summary of the coefficients of the centerline velocity decaying and the jet width spreading

物理量	系 数	紊动射流	波腹下紊动射流
$W_c$	$\alpha$	0.168	0.19
	$\alpha_0$	-0.06	-0.46
$b_{ux}$	$\beta_x$	0.108	0.126
	$\beta_{x0}$	0.02	-0.60
$b_{uy}$	$\beta_y$	0.108	0.118
	$\beta_{y0}$	0.02	-0.46

## 参考文献:

- [ 1 ] Abramovich G N. The theory of turbulent jets[M]. MIT press, Cambridge, Mass, USA, 1963.
- [ 2 ] 李 炜, 槐文信. 浮力射流的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [ 3 ] Shuto N, Ti L.H. Wave effects on buoyant plumes[A]. Proc 14th Int Conf Coastal Eng[C]. Copenhagen, 1974, 2 199- 2 209.
- [ 4 ] Chin D A. Influence of surface waves on outfall dilution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1987, 113: 1 006- 1 018.
- [ 5 ] Chyan J.M, Hwang H H. On the interaction of a turbulent jet with waves[J]. Journal of Hydraulic Research, 1993, 31: 791- 810.
- [ 6 ] Koole R, Swan C. Measurements of a 2 D non buoyant jet in a wave environment[J]. Coastal Engineering, 1994, 24: 151- 169.
- [ 7 ] Chen Xingwei. Investigations of turbulent jets interacting with standing water waves[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science & Technology, 1997.

## Experimental study on turbulent jet interacting with surface standing wave<sup>\*</sup>

CHEN Xingwei<sup>1</sup>, C. T. Hsu<sup>2</sup>

(1. College of Geographic Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Dept. of Mech. Eng., Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong)

**Abstract:** The mean velocity characteristics of turbulent jet interacting with surface standing wave were studied experimentally. The experiments were performed in a square water tank. The turbulent jet was driven by a constant head water tank, and the surface standing wave was generated by a plunger-type wave maker. The jet nozzle was positioned under the antinode of the standing wave. The wave amplitude was measured with a capacitance wave gage and the data acquisition system. The velocity profiles were measured with a laser doppler velocimeter. Based on the measurements, it was concluded that the generated waves were nearly perfect standing waves, and the results of turbulent jets were well consistent with the published one. The measurement results of turbulent jet interacting with surface standing water wave indicated that the velocity profiles of the turbulent jets in the momentum dominated far field were still Gaussian, the imposition of the wave oscillations was to deform the jet structure from circular to elliptic, and the wave oscillations enhanced greatly on the jet mixing.

**Key words:** surface standing wave; turbulent jet; movement characteristic; experimental study

<sup>\*</sup> The project is supported by Natural Science Foundation of Fujian Province(No. D0310014).