

文章编号: 1001-6791(2000)04-0381-06

# 二维半岛尾流近区流动参数分布特性的研究<sup>\*</sup>

梁东方, 李玉梁, 田晓东

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

**摘要:** 采用数字粒子图象测速技术, 在恒定来流的工况下, 分别对圆柱、正弦形状半岛的尾流近区的速度分布进行了比较详细的测量, 获得了大量的数据。从相似性的角度, 对流速在尾流摆动一个周期内的平均值进行了分析。结果显示, 沿程各断面的此种平均流速在归一化后具有一定程度的相似性, 而各断面归一化紊动参数分布的差别很大。

**关键词:** 二维半岛; 尾流; 数字粒子图象测速; 流动参数; 相似性

**中图分类号:** TV 131.2; X143      **文献标识码:** A

尾流是指流体绕过障碍物之后的流动, 其研究历史可以追溯到几百年以前。在尾流问题中, 常常碰到的一个难题是尾流区流动的非恒定性。在实验中, 传统的测量方法是点测量, 因而无法获得全场的同步信息。近年来, 随着电子技术, 信号分析理论和图象处理技术的迅猛发展, 它们向古老的流体力学领域的渗透日益显示出巨大的威力。利用这些技术不仅能够直观地反映流动现象, 还能够定量地揭示流动的规律, 已成为研究非恒定流问题的一个重要手段<sup>[1-3]</sup>。数字粒子图象测速 (Digital Particle Image Velocimetry, DPIV) 技术用于测量流速, 可同时获得流体二维或三维速度场信息。本文将这一技术应用到尾流这样复杂的流动问题的测量中。

由于尾流近区流动测量的复杂性, 以往关于尾流的研究大都局限于岛屿, 并且是针对尾流远区<sup>[4]</sup> ( $x/\theta$  130~810, 其中  $x$  为断面与绕流物体轴线的距离,  $\theta$  为动量厚度) 或中远区<sup>[5,6]</sup> ( $x/d$  10~70,  $x/\theta$  10~100, 其中  $d$  为圆柱体的直径), 并得出了如下非常经典的结论: 不论绕流物体的形状如何, 在距其足够远 (对于不同的物体, 这一距离不同, 例如对圆柱绕流, 大约为1000倍直径<sup>[4]</sup>) 以后, 都将达到一种统一的自保性状态。而本文的绕流物体为两种形状的半岛, 可以研究边壁对绕流的影响; 测量与分析的范围均属于尾流的极近区, 如表1所示, 正是旋涡脱落和扩散异常剧烈的地方。采用 DPIV 技术, 能够有效地量测这种复杂的流动。本文对这一区域流动参数的分布规律进行了一些探索。

## 1 实验方法与实验条件

图1为实验系统示意图, 它包括: ①水槽及示踪剂排放系统; ②光路及图象采集系统。

\* 收稿日期: 1999-08-30; 修订日期: 1999-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59679023)。

作者简介: 梁东方 (1975-), 男, 天津蓟县人, 清华大学水利水电工程系博士研究生, 主要从事环境水力学方面的研究。

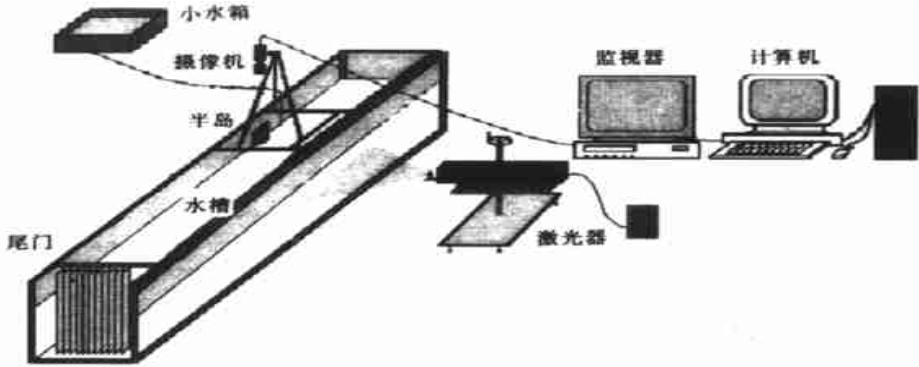
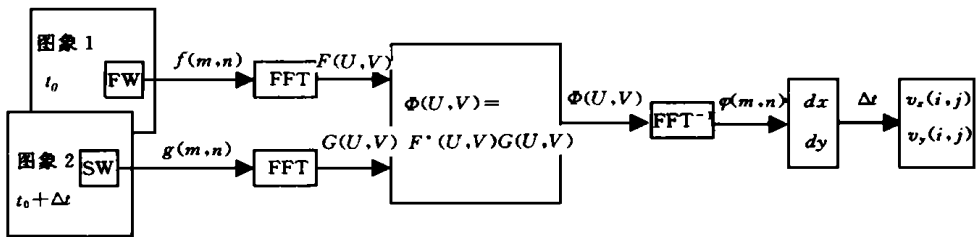


图1 实验系统示意图

Fig.1. Sketch map of the experiment system

实验水槽长 26 m, 宽 60 cm, 深 80 cm, 底坡为零。示踪粒子是直径约为  $10 \mu\text{m}$  的铝粉, 储于水槽上方的一个小水箱之中, 小水箱放置在比槽底高约 1 m 的地方。水箱与一直径为 8 mm 的“T”形紫铜管相连。在“T”形管的横管上均匀密布一系列直径约为 1 mm 的小眼。示踪剂在小水箱中混和均匀后, 通过“T”形管的小眼排放于水槽中。激光器采用美国 Coherent 公司生产的 INNIVA 70 系列的氙离子激光器, 实验中使用的是单线模式下的绿光, 功率为 1.2 W。光束通过半圆柱透镜后形成片光。摄像机为台湾敏通公司生产的 MTV-1802 黑白摄像机, 分辨率为 600 线, 最小照度为 0.02 lx, 摄像速度为每秒 25 帧。镜头是日本精工公司生产的六倍手动三可变镜头。实验所用图象板为北京微视电子公司生产的 MVPI 黑白图象采集卡, 可获得两种大小的数字化图象:  $768 \times 512$ ,  $512 \times 512$  (单位: pixel), 本文图象的分辨率为 0.4 ~ 0.5 mm/pixel。

本文所用的测速方法是以 Willert<sup>[5]</sup> 提出的采用 FFT 的 DPIV 技术为基础(见图 2), 并吸收 Huang<sup>[6]</sup> 的迭代方法的优点, 对其进行改进而形成的一种新的 DPIV 方法。迭代的第一步和 Willert 方法一样, 按图 2 所示的运算框图进行速度检测。第二步, 首先将第一个诊断窗口 FW



注: FW 和 SW 分别表示在  $t_0$  和  $t_0 + \Delta t$  时刻的图象中相同位置所开的诊断窗口; 小写字母表示空域中的函数, 大写字母表示频域中的函数;  $F^*(U, V)$  表示  $F(U, V)$  的复共扼函数;  $\Phi(m, n)$  为  $f(m, n)$  和  $g(m, n)$  的互相关函数;  $dx$ ,  $dy$  和  $v_x(i, j)$ ,  $v_y(i, j)$  分别表示诊断窗口的位移和速度。

图2 DPIV 方法运算框图

Fig. 2. Numerical processing flow-chart of DPIV

按下式:

$$\begin{cases} x_s = x + \frac{u_x \Delta t}{M} \\ y_s = y + \frac{u_y \Delta t}{M} \end{cases} \quad (1)$$

转变为新的诊断窗口 FW (式中只考虑流体质点的平移, 而忽略拉伸和旋转)。计算时  $u_x$  和  $u_y$  采用第一步的结果。因为 FW 只是作了一次平移, 窗口的大小和形状都没有改变。但是, FW 和 SW 之间的位移相对于 FW 和 SW 之间的位移要小得多。因此, 第二步的结果较第一步更为准确, 对稍大一点的速度梯度也能检测出来。第二步仍然按 Willert 方法对 FW 和 SW 进行速度检测。以后各步迭代与第二步类似, 每次利用前一次的计算结果改变诊断窗口。这样既可极大的提高处理的速度, 又保证了一定的准确性要求。有关本实验的软、硬件系统, 见参考文献[9]。

本文针对图 3 所示的两种半岛式绕流物体模型进行了测量, 一种模型为钝头体 (半圆柱形), 另一种为尖锐边缘体 (正弦形)。通过这两种模型可分析钝头体和尖锐边缘对绕流的不同影响。测量范围和实验工况如表 1 所示。

因为  $H$  和  $h$  的值相对较大, 水槽底部摩擦的影响可以忽略, 近似将流动看成是二维的。实验中每 40 ms 获得一幅图象, 即每 40 ms 获得一速度场, 这里称为流速的瞬时值, 它具有非常凌乱分布, 显示出紊流的特性。在尾流区, 不仅有速度的脉动, 而且流动呈周期性摆动, 通过分析时均流速可以获得尾流区速度分布的时均特征。这里的时均流速是在尾流摆动一个周期内的平均。实验观察尾流摆动的周期为 4 s, 所以本文采用 4 s 平均。

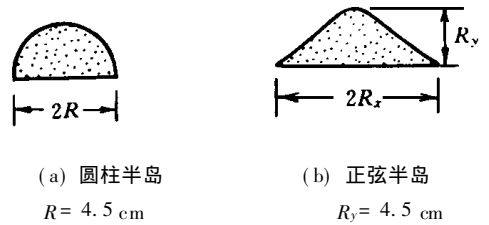


图 3 两种模型示意图

Fig. 3. Two shapes of the models

表 1 两种模型的测量范围和实验参数

Table 1. Measuring region and experimental parameters of the two models

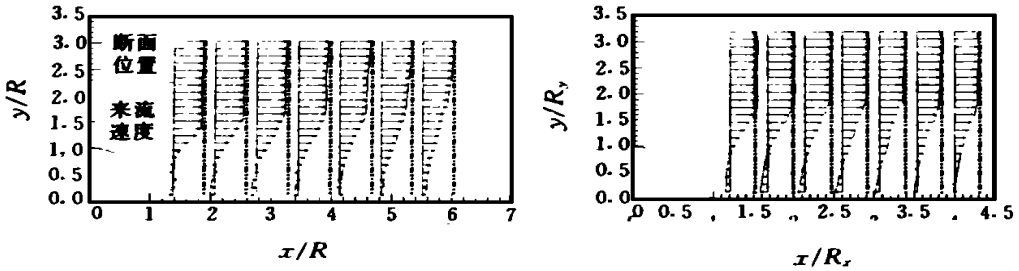
| 岛屿形状 | 测量范围            |                 | 实验参数   |        |                       |        |        |
|------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|
|      | $x/R$ 或 $x/R_x$ | $y/R$ 或 $y/R_y$ | $H/cm$ | $h/cm$ | $U_a/cm \cdot s^{-1}$ | $Re_d$ | $Re_H$ |
| 圆柱   | < 8.0           | < 3.5           | 9.6    | 8.5    | 7.2                   | 3540   | 6912   |
| 正弦   | < 4.5           | < 3.5           | 13.0   | 11.5   | 11.0                  | 4950   | 14300  |

注:  $H$  和  $h$  分别为水位高度和激光光平面高度, 均以水槽底平面为基准;  $U_a$  为均匀来流流速;  $Re_d = (U_a \times d) / \nu$ ,  $d = R$  (半圆柱形) 或  $d = R_y$  (正弦形);  $Re_H = (U_a \times H) / \nu$

## 2 时均流速分布

对于表 1 所示的来流情况, 观测了尾流中的流速分布。图 4 是从得到的流场中取出的 7 个特征横断面上的纵向时均流速分布图。因为沿  $y$  轴方向的时均流速很小, 可以忽略, 所以图中所示的流速只是沿  $x$  轴方向的流速分布。在本文的讨论中, 所有横坐标均为无量纲化的  $x/R$  (圆柱形) 和  $x/R_x$  (正弦形); 所有纵坐标均为无量纲化的  $y/R$  (圆柱形) 和  $y/R_y$  (正弦形)。

由图 4 可以看出, 半岛由于边壁无滑移条件的限制, 不可能形成与岛屿一样的对称流速分布, 但沿程断面上速度分布仍具有一定的相似性。为表示方便起见, 将下文要用到的符号用图



(a) 半圆柱形半岛

(b) 正弦形半岛

图4 不同横断面上时均流速分布图

Fig. 4. Mean velocity distribution in different transects

5 加以说明。

取  $w_a$ 、 $b_{1/2}$  分别作为各断面的参考速度和参考长度来进行归一化处理, 所得结果如图 6 所示。图中实线为用公式

$$\frac{w}{w_a} = c_1 \times \exp\left[-c_2 \left(\frac{y}{b_{1/2}}\right)^2\right] + c_3 \quad (2)$$

拟合的结果, 实验点大致分布于曲线的两侧。约束条件均为

$$\frac{w}{w_a} \Big|_{\frac{y}{b_{1/2}}=0} = 1 \quad \text{和} \quad \frac{w}{w_a} \Big|_{\frac{y}{b_{1/2}}=1} = 0.5 \quad (3)$$

其中第一个约束条件为近似的, 因为反向流速最大值所在的位置非常接近壁面。对于半圆柱形半岛  $c_1 = 0.889$ ,  $c_2 = 0.826$ ,  $c_3 = 0.111$ ; 对于正弦形半岛  $c_1 = 1.021$ ,  $c_2 = 0.673$ ,  $c_3 = -0.021$ 。

由图 6 可见, 半岛形状对尾流近区流动的影响是巨大的。由于半圆柱边壁变化较剧烈, 对均匀来流的扰动程度和范围都较大; 而正弦形半岛因其形状变化相对平缓, 对来流干扰较小,  $W/W_a$  很快就趋于零。可以推断, 污染物在圆柱半岛后方的污染严重程度和污染带范围都要比正弦形半岛大一些。这与文献 [10] 中用平面激光诱导荧光技术 (PLIF) 测量浓度场的结果一致。

### 3 紊动强度与雷诺应力分布

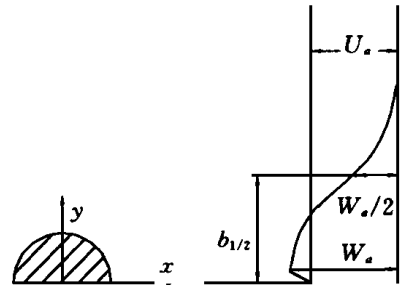
紊动强度和雷诺切应力用以下各式来计算:

$$\text{雷诺切应力} \quad Res = -\overline{u \cdot v} \quad (4)$$

$$\text{总紊动强度} \quad K = \frac{1}{2} \overline{(u \cdot u + v \cdot v)} / u_a \quad (5)$$

式中  $u = u - \bar{u}$ ;  $v = v - \bar{v}$ ;  $\bar{u}$ ,  $u$ ,  $u$  和  $\bar{v}$ ,  $v$ ,  $v$  分别是  $x$  方向和  $y$  方向的时均流速、瞬时流速和脉动流速。(5) 式总紊动强度的定义中忽略了第三个方向的流速脉动。

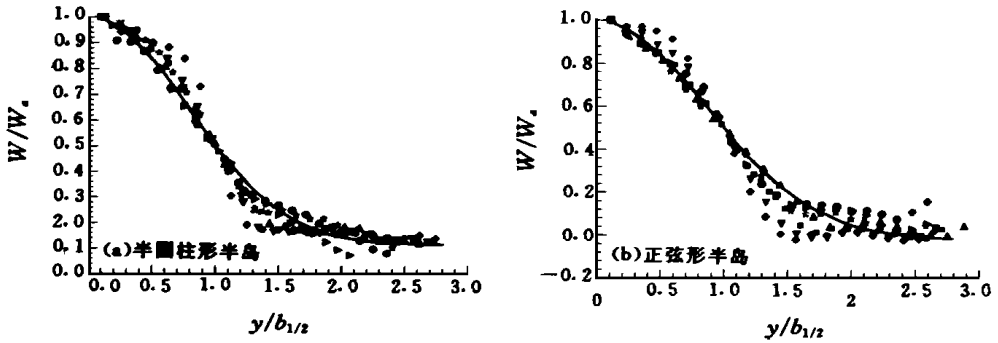
图 7 为半圆柱形半岛的紊动参数的分布。由于固体边壁的限制, 相对于岛屿来说, 半岛对



注:  $U_a$  为均匀来流速度;  $u$  为尾流区的流速;  $W$  为速度亏损 ( $W = U_a - u$ );  $W_a$  为最大的速度亏损;  $b_{1/2}$  为某一断面上边壁至最大速度亏损一半处的距离。

图5 符号说明示意图

Fig. 5. Sketch defining notation



注: 符号 $\blacklozenge$ 、 $\blacktriangledown$ 、 $\bullet$ 、 $\circ$ 、 $\square$ 、 $\triangle$ 表示由近及远7个断面(见图4)的参数,图7中也采用这种约定。

图6 各断面归一化流速分布图

Fig. 6. Normalized velocity distribution in different transects

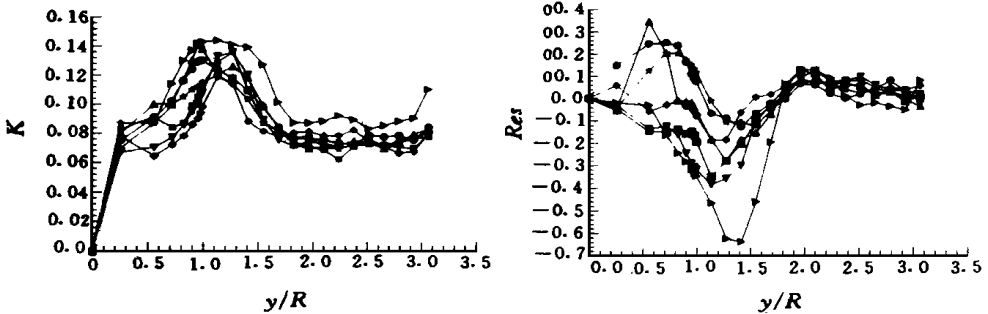


图7 半圆柱形半岛紊动强度与雷诺应力的分布图

Fig. 7. Turbulent intensity and Reynolds stress distribution

尾流区内流动的影响比较小,致使紊动参数在距壁面稍远处的分布就趋于一致( $y/R$  大于 1.5 左右)。但在固壁附近,各断面紊动参数的差别较大。总的来说,紊动参数分布的离散度较大,实验点的分布较为杂乱。注意,在图象边界处,由于粒子进出摄像范围,诊断窗口内匹配的粒子减少,会造成测量误差。

## 4 结 论

本文采用 DPIV 技术对两种形状的半岛尾流近区流动进行了测量,获得了这一区域流场的定量信息,对时均流速和脉动参数的分布特点进行了探讨。发现各断面流速的分布在长时间(文中指尾流摆动的一个周期)平均的意义上,有一定程度的相似性;各断面紊动参数的分布差别较大。必须注意到,自保性不仅是指流动的平均值的自相似,而且还要求流动的紊动值也要相似,所以在半岛尾流近区是不存在自保性的。在这一区域,尾流还处于发展阶段,而且发展的快慢和具体形式因绕流物体的不同而差别很大,所以统一的自保性状态只有在距绕流体足够的区域才能达到。

## 参考文献:

- [1] Lambertus Hesselink, James Helman, Paul Ning. Quantitative image processing in fluid mechanics[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1992, 5: 605– 6162.
- [2] Preben Buchhave. Particle image velocimetry——status and trends[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1992, 5: 586– 604.
- [3] 李玉梁, 陈朝泉, 余常昭. 环境水力学实验技术中的图象处理技术[J]. *应用基础与工程科学学报*, 1995, 3(4): 420– 436.
- [4] K R Sreenivasan, R Narasimha. Equilibrium Parameters for Two-Dimensional Turbulent Wakes[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1982, 104: 167– 169.
- [5] Willert C E, Gharib M. Digital image velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 1991, 10: 181– 193.
- [6] Huang H T, Fiedler H E, Wang J J. Limitation and improvement of PIV (Part II)[J]. *Experiments in Fluids*, 1993, 15: 263– 273.
- [7] Antonia R A, Mi J. Approach towards self-preservation of turbulent cylinder and screen wakes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1998, 17: 277– 284.
- [8] Sreenivasna K R. Approach to Self-Preservation in Plane Turbulent Wakes[J]. *AIAA*, 1981, 19: 1365– 1367.
- [9] 田晓东. DPIV 技术和尾流区流场及污染物混合输移特性的研究[D]. 北京: 清华大学水利系, 1998.
- [10] 李云生. 数字图象技术和尾流区污染物浓度分布特性研究[D]. 北京: 清华大学水利系, 1998.

## Research on the Flow Field Characteristics of the Near Wakes Behind 2-D Peninsulas<sup>\*</sup>

LIANG Dong-fang, LI Yu-liang, TIAN Xiao-dong

(*Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** By applying Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) technique, velocity fields in the near wakes behind semicircular and sinusoidal shaped peninsulas in constant inlet flow are measured in detail respectively, and a large number of quantitative data are acquired. This paper puts enough emphasis on the similarity in analyzing the mean velocity over a long period of time (where the long period is referred to as a cycle of the Karman Vortex Shedding). In this way we attempt to find out some disciplines of the velocity distribution in this region. The averaged velocity distribution in each transect seems to approximately obey the similarity law after normalization, but the turbulent parameters distributions are quite different.

**Key words:** 2-D peninsular; wake; digital particle image velocimetry; similarity

\* The project is supported by National Natural Science Fund of China(No. 59679023).