

应用 PIV 研究带自由表面的后向台阶流流动特性

周 婕¹, 王玲玲², 曾 诚²

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 利用粒子图像测速(PIV)技术,对 Re 在 450 ~ 4 490 之间的 16 种工况下的二维后向台阶定常流动的流场进行观测,并与文献资料的结果和数值模拟的结果进行比较,得到在此 Re 范围内的台阶后再附着长度 X_r 随 Re 变化的规律,以及台阶后流速分布和水面线位置等特性,对实验过程中所出现的粒子跟随性问题和存在自由表面的问题进行了讨论。

关键词 后向台阶流;自由表面;流动测量;再附着长度;PIV 系统

中图分类号 O35 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2008)04-0023-04

Flow performances of backward-facing step flow with free surface via PIV//ZHOU Jie¹, WANG Ling-ling², ZENG Cheng²
(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : In this paper, the velocity field of 2-D steady flow, with a free surface, over a backward-facing step, is measured with PIV (particle image velocimetry) technology within the range of Reynolds number from 450 to 4490. Through comparison with data from reference papers and from numerical simulations, the rule for changing the re-attachment length X_r according to the Reynolds number as well as the velocity distribution behind the step and the location of the free surface, are obtained. Furthermore, the main problems during the process of flow measurement, such as the trailing behaviors of particle tracers and the measurement of flow with a free surface, are discussed.

Key words : backward-facing step flow; free surface; flow measurement; re-attachment length; PIV system

带自由表面的后向台阶流动广泛存在于许多水利工程中,例如明渠中跌坎后的突扩分离流动、水闸和堰后的水体流动。另外河床上存在沙波的河流下游也会出现此类流动现象。在此类流动现象中,既涉及空气和水两相之间交界面的问题,又涉及水体底面边界突扩的问题,然而对台阶后流场的影响又不是这 2 种问题影响的简单相加。目前,对两相流问题和后向台阶问题的研究在理论、实验和数值模拟等方面均取得了较丰富的成果,但是对在这 2 种问题影响下的带自由表面的后向台阶流动的研究还停留在较早的水平,有必要对其进行进一步的研究与探索。

在以往的实验观测研究中,主要利用热丝(热膜)测速计^[1-2]、激光测速仪^[3-4]对气流或水流做时均流速分布观测,但是这些流动测量显示技术总是不能同时得到满意的空间分辨率和瞬态流动图像。虽然激光(LDA)单点测速技术的精度可以达到 0.1% ~ 1%,但是无法提供瞬态流场图像,而烟线法或频闪摄像等虽可以得到流场图像,但空间分辨率

很低,无法对一些物理量进行定量分析。粒子图像测速(PIV)技术就是在这样的测量技术发展需求情况下产生的,PIV 技术不仅可以显示流场的瞬态图像,而且空间分辨率可达 0.2% ~ 2%,是研究带自由表面的后向台阶流动这类具有分离和再附着等复杂流动结构的理想观测技术。

针对带自由表面的二维后向台阶流动的运动特性,笔者采用具有较高空间分辨率的 PIV 技术,对 Re 在 450 ~ 4 490 之间的 16 种工况下的二维后向台阶定常流动的流场进行了观测。观测范围覆盖了层流、过渡流和紊流 3 种流态,同时采用 Tecplot 10.0 图形软件对测量数据进行处理分析。

1 实验设备和实验方法

1.1 实验装置

实验装置为自循环系统,采用 0.5 cm 厚的有机玻璃材料制作。流道为矩形断面,台阶高度为 2 cm,维持台阶上水流深度为 2 cm,流道宽为 35 cm,宽高比为 35 : 2;流道进口距台阶 0.8 m,出口距台阶

1.6 m,以保证进口和出口水流的通畅。实验装置如图 1 所示。

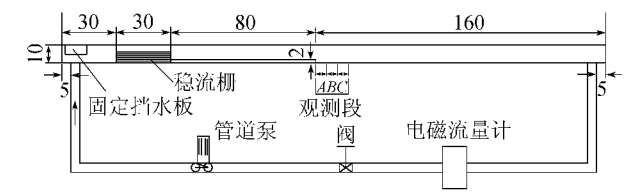


图 1 实验装置示意图(单位:cm)

1.2 测量显示技术

PIV 的基本原理是测量水中所含示踪粒子的位移 ΔX 和 ΔY ,再根据激光脉冲时间间隔 Δt 就可以得到水流速度瞬时近似值,如图 2 所示。本文实验采用美国 TSI 公司的 PIV 系统,对带自由表面的后向台阶的中心面进行二维流场的显示和测量,示踪粒子为表面活性剂十二烷基硫酸钠产生的乳化空气泡。戴光清等^[5]的测量结果表明乳化空气泡是一种品质较高并且经济实用的 PIV 示踪粒子。

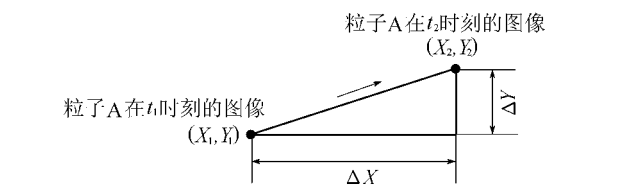


图 2 PIV 原理

该 PIV 系统主要包括 2 个子系统:微粒成像系统与流速分析显示系统。有关 PIV 测速的详细内容可参见文献[6-8]。

1.3 实验方法及实验内容

该实验定义 $Re = \frac{U_0 h}{\nu}$,其中特征长度 h 定义为台阶高度, ν 为运动黏性系数(水温 22℃),特征速度 U_0 为台阶上游来流稳定时的平均流速。

根据带自由表面的后向台阶流流动特性和 PIV 系统性能,对如图 1 所示的后向台阶流道 A、B、C 3 个测量段进行了实验测量,每个测量长度为 6.3 cm,测量段总长度为 18.9 cm。实验观测 Re 在 450 ~ 4490 之间的 16 种工况下的二维后向台阶定常流动的流场流态。观测范围覆盖了层流 ($Re < 900$)、过渡流 ($900 < Re < 1600$)、紊流 ($Re > 1600$) 3 种流态。拍摄实验测量时,在每种工况下对 A、B、C 3 个测量段分别采样 20 幅图像,采样的频率为 3.75 幅/s。采用 TSI 配置的 Insight 软件对各测量断的图像进行初步处理,剔除数据中少量的坏点,并在这些点的位置进行适当插值,使得实验结果更接近于真实的流动状态,然后进行平均处理,生成绝对速度矢量文件。最后将 A、B、C 3 个测量断的测量结果拼接在一起,得到各种工况下流场的矢量图。

2 实验结果分析

2.1 再附着长度

图 3 为实验得到的不同工况下再附着长度 X_r ($X_r = x_r/h$) 的变化曲线,图中给出了采用 realizable $k-\epsilon$ 紊流模型、用 VOF 方法处理自由表面所建立的二维带自由表面的后向台阶流数值模型的计算结果以及文献[9]的结果。经过比较可以看出各结果吻合较好,体现出 Re 在 450 ~ 4490 范围内台阶后 X_r 的变化规律。

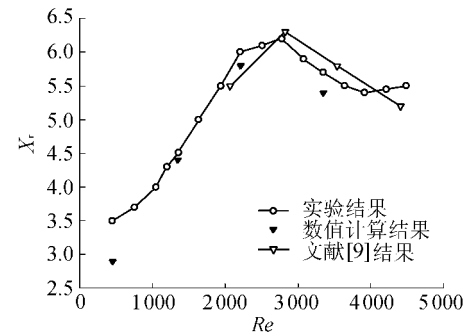


图 3 X_r 随 Re 的变化曲线

从图 3 中可以看出,当 $Re < 3000$ 时, X_r 随着上游流速的增大而逐渐增大;当 Re 在 3000 左右时, X_r 出现最大值,最大值为 6.2 左右;之后, X_r 开始随着上游流速的增大而减小。

当 $Re = 450$ 时, X_r 的实验结果与数值计算结果存在一定的误差;当 $Re > 4000$ 时, X_r 的实验结果与文献[9]存在一定的误差,分析认为误差主要是由于示踪粒子的跟随性和自由表面波动引起的。

图 4 为实验测量所得 $Re = 2780$ 时的流线分布图,与文献[10]中的结果类似。从图 4 中可以看出,后台阶下游形成一个狭长贴近壁面的回流区。沿台阶分离点的流线在 $x/h < 2.0$ 内与壁面基本平行;当 $x/h > 2.0$ 后,该流线开始向下壁面倾斜指向再附着点。

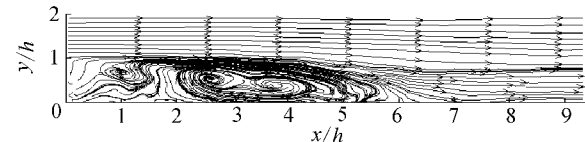


图 4 $Re = 2780$ 时的流线

2.2 自由水面位置

图 5 为实验测得的各工况下的台阶后水深变化情况,图中还给出了数值计算的结果,从图中可见实验数据与数值模拟结果吻合较好。台阶后水深随来流流速的增大而增大,但是其增大的速度却有所不同,450 < Re < 2000 时的台阶后水深增加的速度比 2000 < Re < 4500 时快。

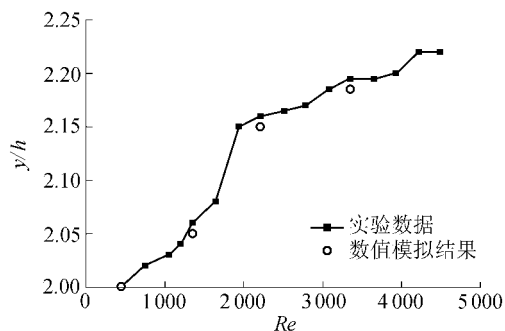


图5 不同工况下台阶后水深变化情况 ($x = 9h$)

2.3 断面流速分布

图6为 $Re = 1350$ 时,实验所测得的在 $x = h, 3h, 5h, 7h, 9h$ 断面处的时均流速分布(以台阶处为起算坐标)。

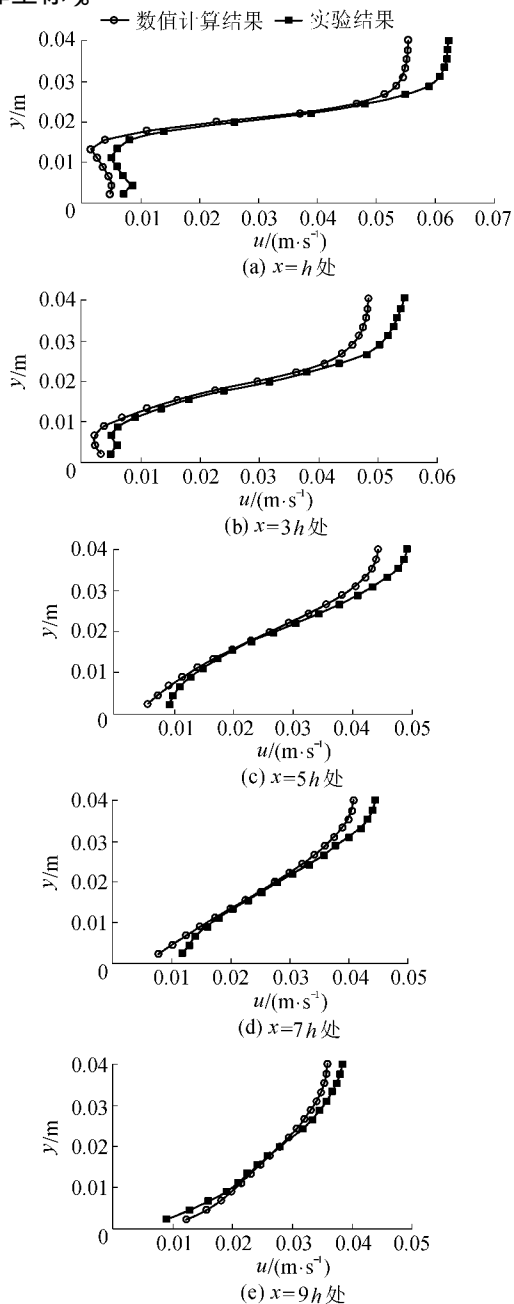


图6 $Re = 1350$ 时各断面时均流速分布

从图6中可以看出:在靠近台阶的断面($x = h, 3h, 5h, 7h$)上,中间区域($0.01\text{ m} < y < 0.03\text{ m}$)流速减小速度很快。而在靠近水面($y > 0.03\text{ m}$)和靠近底面($y < 0.01\text{ m}$)的区域内,流速变化相对缓慢。证明在靠近台阶的断面内,水流受到台阶的影响,沿 y 方向被分为几个层次,其中剪切层($0.01\text{ m} < y < 0.03\text{ m}$)内流速减小很快。这与文献[11]中对台阶后流动分层的理论一致。在 $x = 9h$ 的断面,随 y 的变化,流速变化均匀,证明台阶对此断面的影响已经不明显,断面流速分布将恢复上游来流的速度型分布。在靠近自由表面($0.04 > y > 0.03\text{ m}$)和靠近底面($y < 0.01\text{ m}$)的区域内,实验所得结果与数值计算结果存在误差。分析认为这主要是由粒子跟随性问题和自由表面的存在而引起的。

3 主要问题讨论

在该次实验中,对实验观测产生影响的因素主要有2个:粒子跟随性和自由表面的波动。

3.1 粒子跟随性对实验观测的影响

作为一种非接触测速技术,必须向需要测量的流场内加入示踪粒子,通过测量流场中各个位置的示踪粒子速度,就可得到整个流场的速度分布。示踪粒子的选用直接影响流场测量的精度。对PIV中示踪粒子的性能,主要关心其跟随性和对于光的散射性。该实验采用表面活性剂十二烷基硫酸钠产生的乳化空气泡作为该实验示踪粒子,其跟随性相对难以控制。实验过程中发现在 Re 为1050~4490的情况下,通过PIV测量可以得到较好的粒子成像。但是在小 Re (小流速)的情况下,空气泡浮力对流动的影响逐渐显现,粒子的跟随性减弱,使得实验结果不能真实反映流场情况,比如实验所得 $Re = 450$ 时的 X_r 与数值计算结果不符就体现了这一点。

要减小粒子跟随性所造成的误差还必须考虑粒子浓度的问题,当浓度大时,粒子就会重叠在一起,由于激光是干涉光,粒子会在底片上形成激光的散斑;当粒子浓度太低时则得不到足够多的速度矢量,从而不能反映全部流场特性。在实验测量以前先把表面活性剂十二烷基硫酸钠溶入水中,此时水的表面张力将大幅度降低,若加以搅拌,液面上的空气分子就会穿过水气界面进入水中,此时的水就变成了含有大量空气分子的“乳化液”。当“乳化液”流动时,由于压力改变,水中的空气分子将聚集形成大小接近且分布均匀的乳化空气泡。在该次实验过程中发现,乳化空气泡粒子浓度对实验结果的影响很大,真正适合测量并且能够得到良好测量结果的浓度持续时间不长。实验中,为了获得较多的空气泡,一般

采用增加管道阀开度的方法使水槽中水流以较高的流速通过离心泵,使水流在离心泵中被充分搅拌,以产生测量所需要的空气泡。然后再控制管道阀,得到所需要的流速(笔者称这样一个过程为1个周期)。各工况下,必须对测量区域中的A、B、C 3个观测段依次测量(图1)。在大 Re 情况下(2 210~4 490)对A、B、C观测段的3次测量可以在1个周期内完成。但是在中小 Re 情况下,由于水槽内水流的流速减小,使得水槽内空气泡存在的时间也随之变短。所以随着 Re 的减小,出现了对A、B、C 3个观测段的测量不能在1个周期内完成的情况。对A、B、C观测段的测量需要在2个或是3个周期内完成,这样就出现了3个观测段的测量结果可能不连续的情况。此时,需要对该工况下的水流进行多次测量,确保得到连续的结果,但这无疑增大了测量结果出现误差的机会。

3.2 自由表面的波动对实验观测的影响

由于PIV测速系统是利用激光作为光源照明流场的待测区域,利用示踪粒子反光的特性,用CCD摄像机记录下2次脉冲激光曝光时粒子的图像,根据所记录粒子的前后位置来确定粒子的位移和方向,进而得到其所代表流场的流速分布。但是因为在该次实验中存在自由表面,导致在实验过程中由于自由表面的波动和自由表面反射作用,使得CCD摄像机拍摄的图像的水气交界面上存在一片光斑。该次实验采用的示踪粒子是乳化空气泡,漂浮在水面上的空气泡也加剧了这一影响,造成了靠近自由表面处的流速测量结果误差较大,有时甚至出现不符合物理规律的现象。为最大限度地减小自由表面波动的影响,只能对 Re 较小的工况进行测量。当 Re 增大时,流速相应增大,引起自由表面的剧烈波动,造成PIV测速的困难,也增大了实验误差。这在很大程度上限制了实验所能得到的工况的数量,因此在带有自由表面的流动测量方面,这个问题亟待解决。

4 结 语

采用PIV测量技术对水槽内二维后向台阶定常流动进行了系统的实验研究。对 Re 范围在450~4 490之间的16种工况下带自由表面的二维后向台阶流动的流场进行了观测,得到各种工况下的时均速度场、流线图谱、流向和法向速度分量脉动场。实验结果清楚地显示了后向台阶流动中的时均流动结构,得到台阶后 X_r 与台阶后水深随 Re 变化的规律,对实验中出现的台阶后流动分层现象进行了描述,并对实验过程中出现的主要问题进行了探讨。

同时,本文也为湍流计算模型的验证提供了详细的实验数据。

参考文献:

[1] CASTRO I P, BRADSHAW P. The turbulence structure of highly curved mixing layer[J]. J Fluid Mech, 1976, 73: 265-304.

[2] SINLA S N, CUPA A K, OBERAI M M. Laminar separating flow over backsteps and cavities (Part 1: backsteps) [J]. AIAA J, 1981, 12: 1527-1530.

[3] ARMALY B F, DURST F, PEREIRA J C F, et al. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow[J]. J Fluid Mech, 1983, 127: 473-496.

[4] 王晋军, 连祺祥, 兰世隆. 后向台阶层流边界层分离实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1993(1): 52-55.

[5] 戴光清, 吴燕华, 刘齐宏. 乳化空气泡示踪粒子在PIV测速中的应用[J]. 四川大学学报, 2000, 32(1): 1-3.

[6] CENEDESE A, PAGLIALUNGA A. Digital direct analysis of a multiexposed photograph in PIV[J]. Experiment in Fluids, 1990(8): 273-280.

[7] ADRIAN R J. Multi-point optical measurement of simultaneous vectors in unsteady flow: a review[J]. J Heat and Fluid Flow, 1996(7): 127-145.

[8] ADRIAN R J. Particle image technique for experimental fluid mechanics[J]. Rev Fluid Mech, 1991, 23: 261-304.

[9] NAKAGAWA H, NEZU I. Experimental investigation on turbulent structure of backward-facing step flow in an open channel[J]. Journal of Hydraulic Research, 1987, 25(1): 67-78.

[10] 刘应征, 朴英守, 成亨镇. 后台阶分离再附湍流流动的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 810-817.

[11] 刘沛清, 邓学莹. 明渠中跌坎后突扩分离流数值研究[J]. 力学学报, 1998, 30(1): 9-19.

(收稿日期: 2007-06-21 编辑: 方宇彤)

· 简讯 ·

第16届人类学和民族学世界大会
“移民与可持续发展”
专题会议在昆明举行

第16届人类学和民族学世界大会“移民与可持续发展: 全球视野、政策、实践和人类学知识应用”专题会议于2008年7月15~23日在昆明举行。会议的主要议题为: ①移民政策与实践; ②民族学和人类学应用于移民研究; ③生态移民; ④移民风险及其规避。

(本刊编辑部供稿)