

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.04.010

河道交汇区涡旋结构研究

林青炜^{1,2},唐洪武^{1,2},袁赛瑜^{1,2},陈康^{1,2},肖洋^{1,2}

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098;
2.河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:利用粒子图像测速技术(PIV)实现了基于涡量的剪切层和分离区位置的精确确定,同时对汇流区水平面内的涡旋结构进行系统观测和分析。研究发现:剪切层和分离区近水面和近底面水深平面的涡旋密度大,水深中部的涡旋密度小;支流流量增大的情况下涡旋密度均增大。槽底壁面湍流是近底面涡旋密度大的主要原因。剪切层由水流剪切产生的剪切涡以小旋转强度涡旋为主,分离区由水流分离产生的分离涡以中等及小旋转强度涡旋为主。

关键词:粒子图像测速技术;河道水流交汇区;剪切层;分离区;涡旋;涡量;旋转强度;水槽试验
中图分类号:TV133.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2019)04-0352-07

Study on vortex structure at river confluence

LIN Qingwei^{1,2}, TANG Hongwu^{1,2}, YUAN Saiyu^{1,2}, CHEN Kang^{1,2}, XIAO Yang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Particle image velocimetry (PIV) technique is used to accurately determine the location of shear layer and separation zone based on vorticity. Meanwhile, the vortices in the horizontal plane at the confluence are systematically observed and analyzed. It is found that the vortex density within both the shear layer and the separation zone is larger near the water surface and near the bottom than that in the middle of water depth. The vortex density increases with the increase of tributary discharge when the discharge of main channel is fixed. The high density of vortices near the bottom is caused by the wall turbulence. In addition, the shear layer generated by flow shear is dominated by vortices with small swirling strength, while the separation zone generated by the flow separation is dominated by vortices with medium and small swirling strength.

Key words: particle image velocimetry; river confluence; shear layer; separation zone; vortex; vorticity; swirling strength; flume experiment

河网交汇处是流域河道地形、水动力特性、物质输移的关键节点,涡旋结构是汇流区水流结构重要的组成部分,汇流区复杂的涡旋结构对两汉河流污染物等物质输移掺混扩散以及鱼类等水生生物运动有很大影响^[1-4]。前人主要对恒定条件下汇流区的水流结构开展研究^[5-7]。Best^[8]将汇流区水流划分为停滞区、水流偏折区、剪切层、最大流速区、分离区以及下游水流恢复区,其中,剪切层和分离区是最受关注的水流分

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX18_0599);中央高校基本科研业务费专项(2018B629X14);国家自然科学基金(51779080)

作者简介:林青炜(1993—),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:lqy@hhu.edu.cn

通信作者:唐洪武,教授。E-mail:hwtang@hhu.edu.cn

引用本文:林青炜,唐洪武,袁赛瑜,等.河道交汇区涡旋结构研究[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):352-358.

LIN Qingwei, TANG Hongwu, YUAN Saiyu, et al. Study on vortex structure at river confluence[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(4): 352-358.

区^[9-12]。目前交汇区水流结构的研究手段以接触式声学多普勒流速仪(ADV)单点测量为主,该技术对流场产生扰动且难以捕捉瞬时涡旋结构。粒子图像测速技术(PIV)可以实现全场非接触式测量,可以精确捕捉瞬时涡旋,是研究湍流的有效技术^[13]。陈凯霖等^[14]利用PIV实现了汇流口时均水流流速的测量。目前还没有对汇流口涡旋结构研究的相关报道。笔者采用PIV研究汇流区水平断面内涡旋结构,观察其生成和演化过程,分析不同位置涡旋的成因和特征。研究结果可为河道交汇区物质输移、鱼类运动预测提供一定的科学依据。

1 试验装置和试验设计

试验装置及其尺寸如图1所示,交汇水槽干支流上游进口端、水槽下游末端共设有3个水箱,干/支流水箱与下游水箱通过PVC管道相连。PVC管道设有变频泵和电磁流量计,变频泵将水流从下游水箱抽送到上游2个水箱,构成水流循环系统。水槽下游末端设有尾门,用于控制水深,尾门后端连接着1个水箱。通过操作控制系统可改变变频泵频率,从而实现干支流流量的自动控制。干/支流上游水箱出水口均设有整流格栅来稳定水流,下游设有尾门来控制水位。横断面a的宽为32 cm,高为40 cm;横断面b的宽为42 cm,高为40 cm。

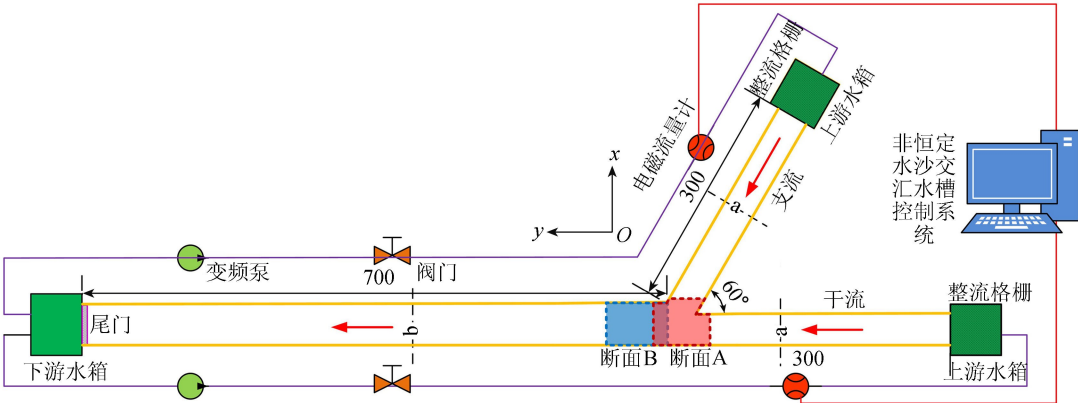


图1 试验水槽装置及待测平面位置示意图(单位:cm)

Fig.1 Diagrammatic sketch of flume device and plane to be measured (units: cm)

PIV系统主要包括CMOS相机、连续激光器与控制器、空心玻璃珠示踪粒子、图像采集卡、高性能计算机、PIV图像处理软件。CMOS相机型号为JAI SP5000M-CXP2,分辨率为2 560×2 048像素,最大帧率为211帧/s;连续激光器为Nd:YAG激光器,波长为532 nm,功率为5 W;CMOS相机镜头型号为Kowa LM25HC;示踪粒子的粒度为50 μm,密度为1.04 kg/m³。水槽周围搭设暗室,暗室内部设置了支架,支架顶部设置了滑道和滑块,CMOS相机通过球形云台倒挂在支架滑块上。CMOS相机位于待测平面位置正上方,镜头光轴垂直于待测平面位置。图像数据采集的帧率为100 fps,成像分辨率为3.75~4像素/mm。PIV测量图像数据处理软件采用的是清华大学王兴奎教授领衔的TsU团队自主研发的PIV图像处理软件^[15]。本试验使用的判读窗口为32×32像素,判读窗口之间的重叠率为50%。

由于PIV测量范围有限,故将试验研究区域分为断面A和断面B,断面A和断面B有部分重叠(图1),目的在于证实断面A和断面B水流结构的衔接性。待测平面的水深 z 分别为2 cm、4 cm、6 cm、8 cm、10 cm、12 cm、14 cm、16 cm、18 cm(水槽底面为水深零点)。本文使用的 x 、 y 轴如图1所示,顺水流方向看,坐标原点 O 与断面A和断面B区域的左下方顶点重合。 x 、 y 轴方向对应的流速分量分别是 u 、 v 。试验设置了2个工况,下游水深 H 均为20 cm,其他参数见表1。

表1 汇流区涡旋结构研究试验工况

Table 1 Experimental conditions for the study of vortex structure in confluence zone

工况	$q_1/(L \cdot s^{-1})$	$q_2/(L \cdot s^{-1})$	$q_2/(q_1+q_2)$	$Fr_{干流}$	$Fr_{支流}$	$Fr_{下游}$	$Re_{干流}$	$Re_{支流}$	$Re_{下游}$
1	8.5	3	0.261	0.095	0.033	0.098	11 723	4 138	13 927
2	8.5	6	0.414	0.095	0.067	0.120	11 723	8 275	17 560

注: q_1 为主流流量, q_2 为支流流量, Fr 为弗劳德数, Re 为雷诺数。

2 结果与分析

涡量在数学上被定义为速度场的旋度,可用来表征流体间产生的旋转剪切程度。剪切层和分离区存在着明显的流速梯度,故涡量可以很好地定义剪切层和分离区的位置。涡量计算公式详见相关文献^[16]。使用2阶中心差分格式进行离散,可一定程度上提高涡量计算结果的空间分辨率^[17]。

本文采用的涡识别方法是旋转强度法,旋转强度能够反映涡结构旋转运动的强弱程度。旋转强度可以通过滤水流相互剪切作用,提取水流中存在的涡结构。旋转强度的数学定义为速度梯度张量的共轭复特征值的虚部 λ_{ci} ^[18]。

2.1 流速、涡量及旋转强度

图2和图3给出了工况1条件下断面A不同水深 $z/H=0.1、0.6、0.9$ 的流速和涡量分布。除近底层 $z/H=0.1$ 水深平面外,蓝色(即负值)涡量主要分布在剪切层和分离区,剪切层和分离区内水流的旋转运动以顺时针运动(俯视)为主。由交汇顶点引出的一条蓝色涡量区域带即为剪切层,剪切层右侧水槽转角处蓝色涡量区域带为分离区边界区,其余蓝色涡量分布在水槽边壁,这主要由水槽侧面边壁壁面湍流引起的涡量,根据流速递增方向的不同呈现正值(如左侧水槽边壁)或负值(如右侧水槽边壁)。

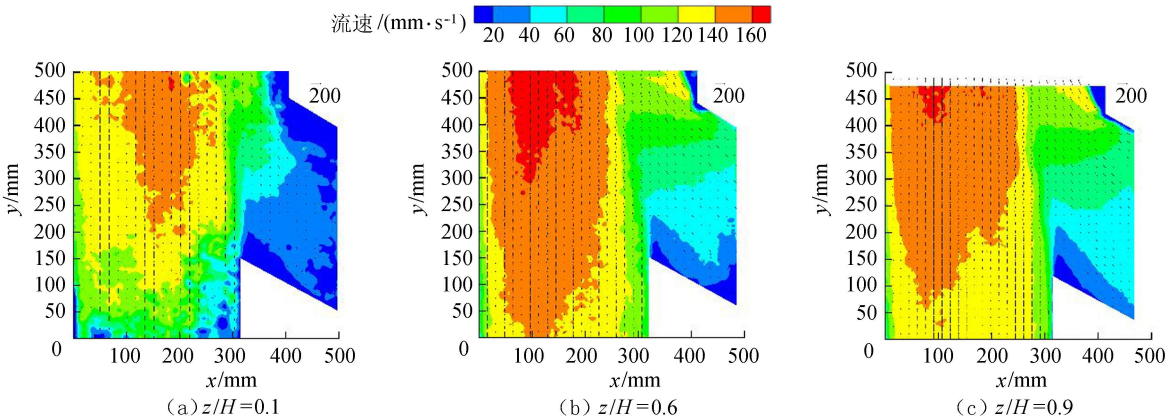


图2 工况1剪切层流速分布

Fig.2 Velocity distribution of the shear layer in case 1

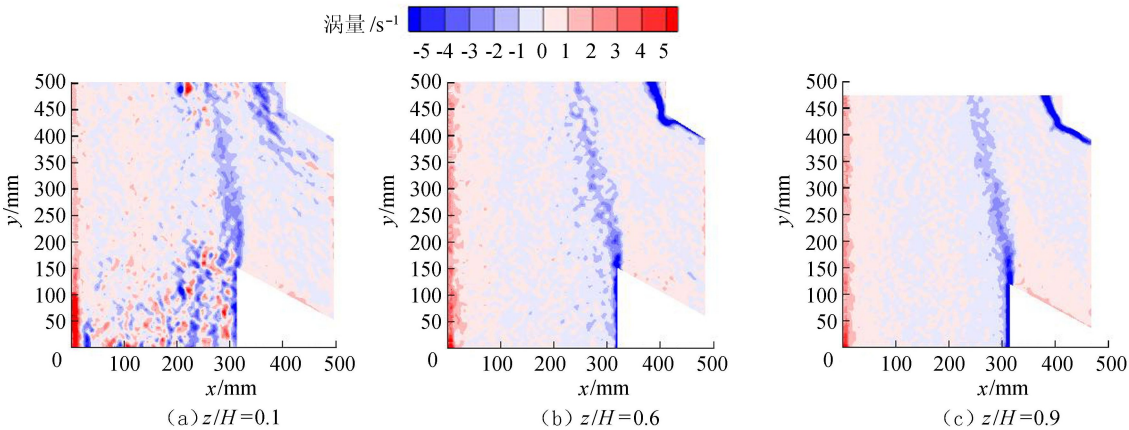


图3 工况1剪切层涡量分布

Fig.3 Vorticity distribution of the shear layer in case 1

剪切层和分离区边界层将研究区域水流划分成3块区域。剪切层左侧区域水流主要来自干流,流速较大,支流水流挤压致使干流的有效过流通道减少、流速增大。剪切层两侧流速差异大,在剪切层产生大量剪切涡旋,有助于剪切层两侧水流掺混交换。位于剪切层与分离区之间的区域水流主要来自支流,受剪切层和分离区的束缚,水流流速大幅度增加近2~3倍,远远大于剪切层左侧区域流速的增值(1.2~1.3倍)。交汇顶点右侧边壁周围存在一片流速较小的停滞区,近水面和近底面区域大、中部小;停滞区内涡量较小,壁面湍

流作用以及近水面较大的流速使近底面和近水面涡量和旋转强度相对于水深中部较大。

临近交汇尖端处剪切层蓝色涡量值相对剪切层其他位置来说都大,沿水深方向变化不大,主要是交汇尖端处是干、支流水流初始汇合处,流速梯度最大,干、支流强烈的水流剪切作用产生了很大的涡量;随着水流动量掺混,下游的涡量逐渐减小。近底面和近水面剪切层的涡量和旋转强度相对于水深中部(如 $z/H=0.6$) 较大。近底层的剪切层向支流倾斜程度较小,近水面较大的流速使剪切层倾斜程度相对较大,即剪切层沿竖向发生了一定的倾斜。 $z/H=0.6$ 处剪切层蓝色涡量分布较分散,覆盖范围较大,近底面和近水面剪切层的蓝紫色涡量分布相对集中,即剪切层在水深中部宽、近床面和近水面处窄。

图 4 和图 5 给出了工况 1 条件下断面 B 不同水深 $z/H=0.1、0.6、0.9$ 的流速和涡量分布。分离区起始于支流右侧水槽转角处,水流在此转角处分离,产生大量的分离涡旋,涡量值较大。随着向下游发展,旋涡分散,水流分离作用减弱,涡量值变小。分离区尺寸随水深的增大而增大,呈现“上大、下小”的形态;分离区内的速度大小相对于分离区外较小,且随着水深增大而缓慢增大。由图 3 和图 5 比较可知,各个水深平面的剪切层涡量从断面 A 发展到断面 B 都有明显减弱,呈现从交汇顶点开始非常强烈的剪切涡旋运动向下游逐渐能量耗散的发展过程。

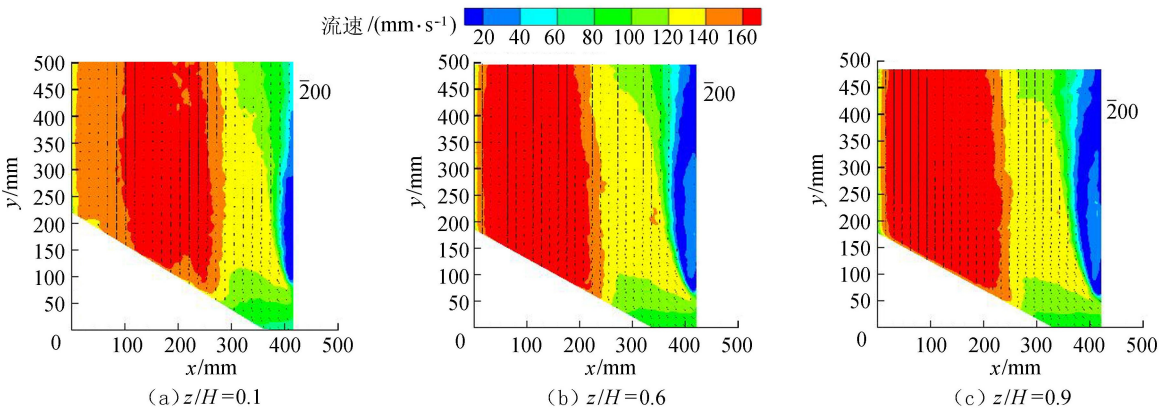


图 4 工况 1 分离区流速分布

Fig. 4 Velocity distribution of the separation zone in case 1

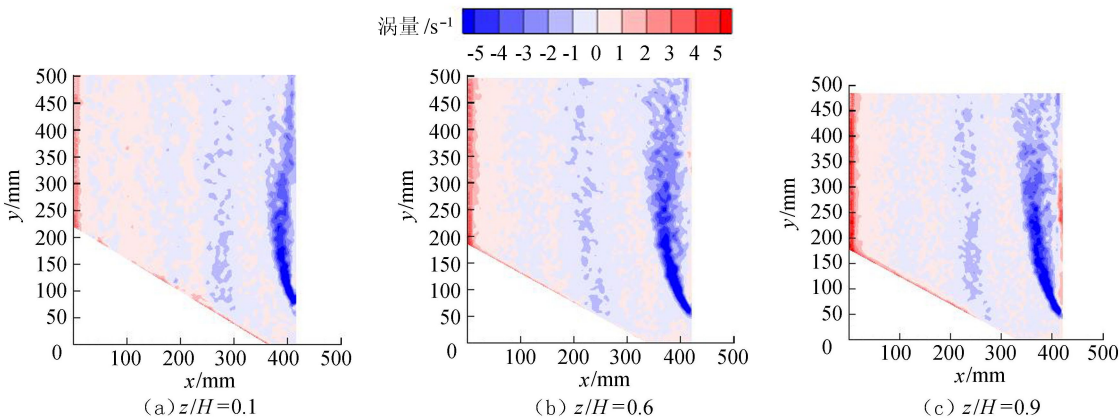


图 5 工况 1 分离区涡量分布

Fig. 5 Vorticity distribution of the separation zone in case 1

2.2 涡旋密度

选择旋转强度 $\lambda_{ci}>0.05$ 为旋涡,统计了剪切层和分离区在工况 1 和工况 2 下框选相同区域内(剪切层区域: $180\text{ mm}<x<380\text{ mm}, 150\text{ mm}<y<400\text{ mm}$;分离区区域: $325\text{ mm}<x<420\text{ mm}, 50\text{ mm}<y<475\text{ mm}$) 总的涡旋密度(旋转强度大于 0.05 的涡旋所占面积/框选区域面积)以及固定区域内不同旋转强度的涡旋密度(某旋转强度范围内涡旋所占面积/框选区域面积)。

图 6 给出了工况 1 和工况 2 剪切层区域涡旋密度沿水深的变化规律。在剪切层中,涡产生的方式有 2 类,一种是水槽床面壁面湍流引起的壁面涡,另一种是干支流水流剪切产生的剪切涡。如图 6 所示,近底

层和近水面涡旋密度大,水深中部区域涡旋密度小。近底层($z/H=0.1$)处,水槽床面引起的壁面湍流大幅度增加了近底层平面内的涡旋密度;随着 z/H 增大,壁面湍流的作用减弱,涡旋密度降低;近水面处($z/H=0.7$),两流剪切作用强,产生的剪切涡数量多,且随着 z/H 增大,涡旋密度略有增加并趋于稳定。工况2与工况1相比,汇流比增大,加剧了近底层壁面湍流作用和近水面干、支流水流的剪切作用,涡旋密度相对于工况1较大。

图7给出了工况1和工况2剪切层区域内不同旋转强度的旋涡密度分布。由图7(a)所示,各个水深平面中数量占比大的主要是旋转强度较小(旋转强度为 $0.1\sim0.3$)的涡旋;中等旋转强度(旋转强度为 $0.3\sim0.7$)的涡旋次之,所占比例远小于小旋转强度涡旋,约为小旋转强度涡旋总数的27%;大旋转强度(旋转强度大于 0.7)的涡旋密度极小。值得注意的是,近水面(如 $z/H=0.7\sim0.9$)的涡旋密度大值主要集中在小旋转强度区间,说明干支流水流交汇生成的KH剪切涡主要为小旋转强度的涡旋。近底层处(如 $z/H=0.1$),旋转强度为 $0.25\sim0.6$ 的涡旋密度与其他水深平面相比要大得多,说明近底层壁面湍流产生的壁面涡主要为中等旋转强度的涡旋。工况2与工况1相比,小旋转强度的涡旋密度有一定程度的增加,而中等、大旋转强度的涡旋密度基本不变。

图8给出了工况1和工况2分离区区域涡旋密度沿水深变化的规律。分离区涡旋的产生方式与剪切层不同,一种是由支流水槽右侧的几何边界突变导致水流发生分离而形成的分离涡,另外则由壁面湍流引起的壁面涡。由图8可见,在分离区中,总的涡旋密度分布趋势与剪切层相同,即近底面和近水面涡旋密度大,水深中部涡旋密度小。工况2和工况1相比,工况2相同水深平面的涡旋密度均比工况1大,说明支流流速增大,分离区内壁面湍流产生的壁面涡数量增多,壁面湍流作用都随水深的增大而减弱;此外,支流水流流速增大,加剧了支流水槽转角处水流分离的强度,产生更多的分离涡。

图9给出了工况1和工况2分离区区域内不同旋转强度的旋涡密度分布。由图9(a)可见,分离区内各个水深平面的涡旋密度占主导的为中等、小旋转强度旋涡,中等旋转强度的涡旋密度略大于小旋转强度涡旋密度,大旋转强度的涡旋密度最小约为小旋转强度涡旋密度的52%。与剪切层相比,分离区内各旋转强度范围的旋涡密度相对均匀,小旋转强度的涡旋密度占比大幅度降低,中等以及大旋转强度的涡旋密度占比提高。在本文的2个工况中,同一水深平面内,水流分离产生的分离涡的平均强度要大于剪切层因干、支流水流交汇剪切引起的KH剪切涡的涡旋强度。比较图9(a)(b)可见,支流流速增大,小旋转强度涡旋密度减小,中等旋转强度的涡旋密度基本不变,大旋转强度的涡旋密度有一定程度的增加,说明分离涡的旋转强度随着流速增大而增强。在分离区内近底层($z/H=0.1,0.2,0.3$)处,小旋转强度的涡旋密度占比相对于水深

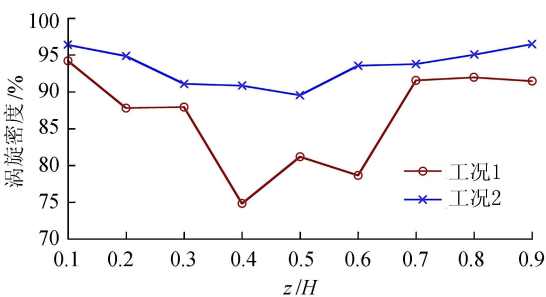


图6 剪切层区域涡旋密度沿水深分布

Fig. 6 Distribution of vortex density along water depth in the shear layer region

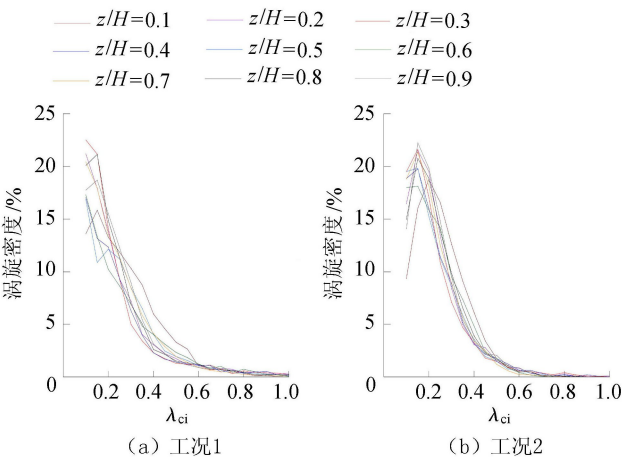


图7 剪切层各旋转强度范围的涡旋密度

Fig. 7 Vortex density of the shear layer with different swirling strength

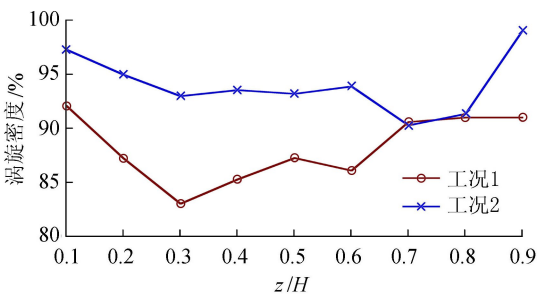


图8 分离区涡旋密度沿水深分布

Fig. 8 Distribution of vortex density along water depth in the separation zone region

中部和近水面高得多,且随着 z/H 增大,小旋转强度的涡旋密度占比逐渐减小,说明分离区内水槽底部边壁引起的壁面涡是以小旋转强度为主的涡旋。支流流速增大,近底层的涡旋强度也会增强,但仍以小旋转强度为主。

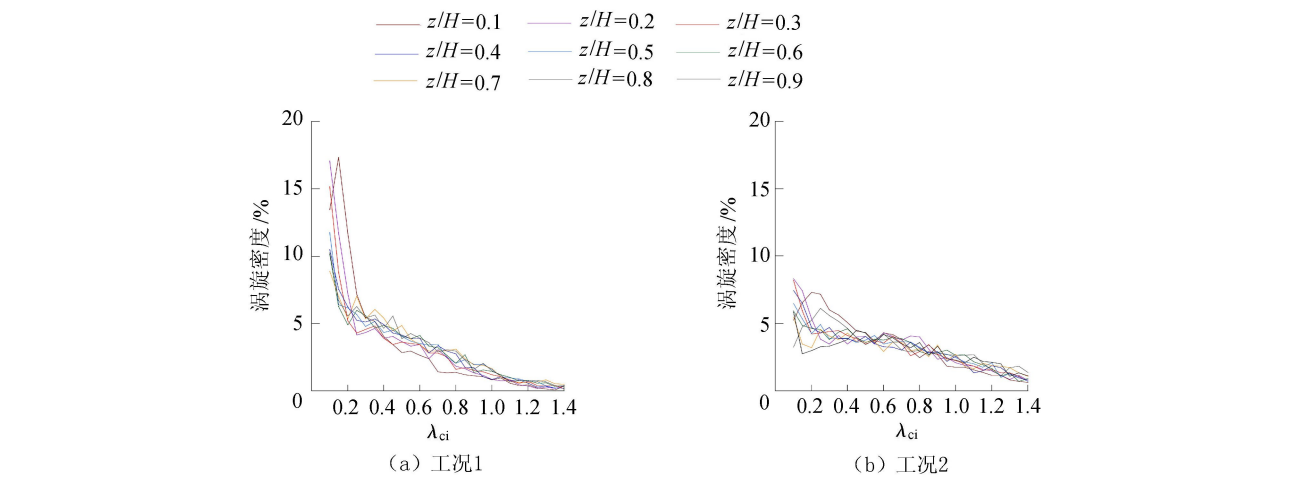


图 9 分离区各旋转强度范围的涡旋密度
Fig.9 Vortex density of the separation zone with different swirling strength

3 结 语

采用 PIV 对河道汇流区水平面的水流结构尤其是涡旋结构进行测量和分析,实现了用涡量精确确定剪切层和分离区的位置。分析了剪切层和分离区存在对汇流区水流的结构影响,并对不同汇流比工况下涡旋数量沿水深的变化规律以及不同旋转强度涡旋密度的分布进行对比分析。研究发现:剪切层和分离区将汇流区水流划分为 3 块区域,剪切层和分离区的存在大幅度增大支流来流的流速。支流水流汇入使剪切层在靠近水面位置向干流倾斜,分离区呈“下小、上大”空间曲面体。剪切层和分离区近水面和近底面水深平面的涡旋密度大,水深中部的涡旋密度小;支流流量增大的情况下涡旋密度均增大。槽底部边壁引起的壁面湍流是近底面涡旋密度大的主要原因。剪切层主要是水流交汇剪切产生的 KH 剪切涡(以小旋转强度涡旋为主),分离区主要是水流分离产生的分离涡(以中等及小旋转强度涡旋为主);分离区内大旋转强度涡旋的占比相对于剪切层而言较大。

参考文献:

[1] LIAO J C, BEAL D N, LAUDER G V, et al. Fish exploiting vortices decrease muscle activity[J]. Science, 2003, 302: 1566-1569.

[2] DRUCKER E G, LAUDER G V. Locomotor forces on a swimming fish: three-dimensional vortex wake dynamics quantified using digital particle image velocimetry[J]. Journal of Experimental Biology, 1999, 202(18): 2393-2412.

[3] PENG Jifeng, DABIRI J O. A potential-flow, deformable-body model for fluid-structure interactions with compact vorticity: application to animal swimming measurements[J]. Experiments in Fluids, 2007, 43(5): 655-664.

[4] 顾莉, 赵欣欣, 戴波, 等. 汇流比对 U 形弯曲交汇河道中污染物离散系数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 189-195. (GU Li, ZHAO Xinxin, DAI Bo, et al. The influence of discharge ratio on the pollutant dispersion coefficient in the U-shaped confluent curved river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 189-195. (in Chinese))

[5] WEBER L J, SCHUMATE E D, MAWER N. Experiments on flow at a 90° open-channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 227(5): 340-350.

[6] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study[J]. Journal of Hydraulic Research, 2017, 56(3): 333-350.

[7] RHOADS B L, SUKHODOLOV A N. Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface[J]. Water Resources Research, 2008, 44(8): 134-143.

[8] BEST J L. Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology[J]. Recent

Developments in Fluvial Sedimentology, 1987, 39: 27-35.

[9] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Turbulent flow structure at a 90-degree open channel confluence: accounting for the distortion of the shear layer[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016, 12:130-147.

[10] 王协康, 王宪业, 卢伟真, 等. 明渠水流交汇区流动特征试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(2):1-5. (WANG Xiekang, WANG Xianye, LU Weizhen, et al. Experimental study on flow structure at open channel confluences [J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2006, 38(2):1-5. (in Chinese))

[11] 刘同宦, 郭炜, 詹磊, 等. 主支汇流比对交汇区域水流脉动特性影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3):6-8. (LIU Tonghuan, GUO Wei, ZHAN Lei, et al. Experiment on the influence of discharge ratio of main flow of tributary on flow fluctuation characteristics in confluence area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(3):6-8. (in Chinese))

[12] 刘盛赞, 康鹏, 李然, 等. 水流交汇区的水动力学特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4):14-18. (LIU Shengyun, KANG Peng, LI Ran, et al. A numerical study on hydrodynamic characteristics of confluence flow[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4):14-18. (in Chinese))

[13] ZHONG Qiang, LI Danxun, CHEN Qigang, et al. Coherent structures and their interactions in smooth open channel flows[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2015, 15(3): 653-672.

[14] 陈凯霖, 冯民权, 张涛. 基于 PIV 技术的明槽交汇区流场试验研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(11): 43-55. (CHEN Kailin, FENG Minquan, ZHANG Tao. Experimental study on open-channel flow confluence based on PIV technology [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(11): 43-55. (in Chinese))

[15] KÄHLER C J, ASTARITA T, VLACHOS P P, et al. Main results of the 4th International PIV Challenge[J]. Experiments in Fluids, 2016, 57(6): 97-167.

[16] LANDRETH C C, ADRIAN R J. Impingement of a low Reynolds number turbulent circular jet onto a flat plate at normal incidence[J]. Experiments in Fluids, 1990, 9(1):74-84.

[17] 陈启刚, 陈槐, 钟强, 等. 高频粒子图像测速系统原理与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 138-139.

[18] CHEN Huai, ADRIAN R J, QIANG Zhong, et al. Analytic solutions for three dimensional swirling strength in compressible and incompressible flows[J]. Physics of Fluids, 2014, 26(8): 193-208.

(收稿日期:2019-03-08 编辑:高建群)

• 简讯 •

河海大学 3 个项目获 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项立项

近日,科技部组织开展国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项立项工作,河海大学刘斯宏教授主持的“土工袋减隔震技术研发与示范”、吉伯海教授主持的“钢结构桥梁疲劳失效维护技术及其工程标准化”和韩光洁教授主持的“基于工业物联网的智能产线实时故障诊断关键技术研究及应用”获得立项,将分别与广岛大学、九州大学和朝鲜大学在工程与技术领域、信息科学技术领域开展实质性科技创新合作工作。这是河海大学首次获得该类别专项资助。

国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项通过支持政府间科技合作项目、开展共同资助联合研发、推动科技人员交流和合作示范,从而提升我国科技创新能力,服务国家经济社会发展。

(本刊编辑部供稿)