

明渠交汇流分离区形态及二次流强度分析

曾 诚¹, 陈 辰¹, 周 舟², 周 婕³, 徐剑波⁴, 王玲玲¹, 尹雨然¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019;
3. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100; 4. 中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081)

摘要:采用基于雷诺应力模型与体积函数法的等宽明渠交汇流三维数值模型,对7种交汇角和3种流量比的21种组合工况进行了模拟计算;采用基于主流向流速的等值线法定义分离区,对分离区尺度及其三维形态进行了分析,并根据断面涡量值的计算结果对交汇口下游二次流强度沿程分布规律进行了归纳总结。结果表明:当流量比增大或交汇角减小时,分离区的水平尺寸变小,平面形态变狭长;分离区域平均水深随着流量比或交汇角的增大而降低;交汇口下游二次流强度随着流量比的增大而逐渐减弱;在交汇口附近二次流强度受交汇角影响较大,沿主流方向交汇角影响逐渐降低。

关键词: 交汇流; 交汇角; 流量比; 分离区; 二次流; 明渠

中图分类号: TV131.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2022)02-0050-06

Analysis on separation zone shape and secondary current intensity in open-channel combining flows//ZENG Cheng¹, CHEN Chen¹, ZHOU Zhou², ZHOU Jie³, XU Jianbo⁴, WANG Lingling¹, YIN Yuran¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. JSTI Group Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China; 4. China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan 430081, China)

Abstract: Numerical simulations for open-channel combining flows with equal channel width were performed with a three-dimensional numerical model with RSM and VOF method. The results were analyzed for 21 cases, in which seven junction angles and three discharge ratios were combined. The separation zone is defined with the isoline method of longitudinal velocity. The sizes and the three-dimensional shape of the separation zone were analyzed. Meanwhile, the streamwise distribution of the secondary-current intensity downstream the junction was summarized in terms of the sectional vorticity. The results reveal that as the discharge ratio increases or the junction angle decreases, the horizontal sizes of the separation zone decrease, and its shape becomes long and narrow. The averaged depth of separation zone decreases while the discharge ratio or the junction angle increases. The intensity of the secondary currents downstream of the junction gradually reduces while the discharge ratio increases. The impact of the junction angle is significant near the junction and gradually reduces along the streamwise direction.

Key words: combining flow; junction angle; discharge ratio; separation zone; secondary currents; open channel

明渠交汇现象广泛存在于天然河网和各类水利工程中。明渠交汇口作为多个渠道输运水体的汇集区域,其水动力特性复杂,影响因素众多^[1-5]。对明渠交汇流水动力特性的研究,多年来一直是水利工程中的基础性难题。近年来,随着水资源开发的不断深入和优化,明渠交汇流水动力特性研究已受到越来越多国内外研究者的重视。

由于交汇口分离区域的存在,过流断面被压缩,

水流在经过分离区时被挤压,这直接影响了河道过流能力,导致输移物沉积。因此,研究分离区特征非常有必要,不仅可以丰富和完善交汇水流理论,而且对确定交汇口下游附近渠道有效过流断面等具有重要意义。分离区特征研究中,分离区形状和尺寸一直是很多学者关心的焦点。Best等^[3]在水槽试验中控制交汇口上下游水深不变,在水面投放示踪剂并监测示踪剂运动轨迹,对近水面分离区形状进行了

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(B200202116, B200204044);国家重点研发计划(2021YFC3200403);国家自然科学基金(51879086);中国一冶集团有限公司科研项目(22AQT210861S00)

作者简介:曾诚(1981—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:c.zeng@foxmail.com

通信作者:周婕(1981—),女,讲师,博士,主要从事流体力学研究。E-mail:zhoujie@hhu.edu.cn

试验研究。Modi 等^[6]采用势流理论预测了非黏性、无旋流动情况下的分离区尺寸,但数值模型的计算结果稍大于试验观测结果。徐孝平等^[7]通过水槽试验研究了分离区二维层面的几何尺度,认为分离区长度与动量比之间存在 $3/8$ 次幂的变化规律。Hsu 等^[8-9]与相关试验数据进行了比较,研究了分离区以及水流通过分离区时的收缩程度,并且通过改变交汇角计算了分离区末端的能量和动量修正系数。Weber 等^[10]通过物理模型试验测量发现了交汇口下游二次流现象,并且认为随着水体交换影响力的减弱,在水流恢复区域,该二次流现象会沿着主流方向逐渐减弱。Luo 等^[11]的研究表明,在顺水流方向,断面内二次流的结构会发生改变。茅泽育等^[12-13]采用理论及试验方法对明渠交汇口水流结构进行了研究发现,分离区尺寸随交汇角及流量比的增大而增大,并通过数值模拟对交汇水流分离区下游断面环流进行了分析比较,给出断面出现逆向环流的可能原因。郭维东等^[14]根据数值模拟结果提出 Y 型交汇水流分离区的定义和分离区尺寸与汇流比的函数关系。王协康等^[15]通过水槽试验分析,发现分离区几何尺寸随水深和流量比的变化而变化,且这种变化取决于交汇区内二次流对流速分布的影响。周晶^[16]研究发现不同数值计算方法均能够模拟出分离区下游断面二次流现象,但模拟的环流中心与试验结果有不同程度的偏差:采用 $k-\varepsilon$ 模型只能模拟出大尺度涡旋,而采用雷诺应力 (RSM) 模型可以模拟出局部逆向环流。刘盛赞等^[17]对交汇区水流进行数值模拟研究发现,分离区的范围随交汇角、流量比和动量比的减小而逐渐缩小直至分离区消失。Schindfessel 等^[18]着眼于交汇口下游的分离结构,通过改变交汇渠道断面的形状研究了分离区域流速的变化规律。Ramos 等^[19]建立了基于大涡模拟 (LES) 的数值模型,研究了 4 种不同床面悬垂比工况下的水流结构,发现随着床层高度不一致性的增大,分离区范围减小。林青炜等^[20]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,并对汇流区水平面内的涡旋结构进行了系统观测和分析。

综上所述,前人对明渠交汇流的研究大多局限于一定的交汇角范围或流量比范围,未对分离区形态和二次流强度进行系统全面的研究。本文对 3 种流量比和 7 种交汇角的 21 种组合工况进行模拟计算,分析流量比与交汇角的变化对等宽明渠交汇流分离区特征及二次流强度的影响规律,以期在实际工程应用提供科学依据。

1 数值模型

明渠交汇水流的模拟应满足质量守恒方程与动量方程。本文采用有限体积法对控制方程进行离散,采用体积函数法 (VOF) 追踪自由表面,采用 RSM 模型封闭控制方程建立三维数值模型。速度与压力解耦采用 PISO 算法,其他项离散均采用 QUICK 格式。数值模型控制方程、数值方法、边界条件和模型验证等内容见文献[21-22]。该数值模型经过充分率定并已用于研究交汇水流流速分布和交汇口壅水特性^[21-22]。

交汇口流动二维概化模型见图 1,图中 l_s 和 b_s 分别为分离区的长度和宽度, b 为渠宽, θ 为交汇角, Q_u 和 Q_d 分别为主渠入口和出口流量, Q_b 为支渠入口流量。计算区域如图 2 所示,主渠和支渠入口均为速度进口,流速方向垂直于进口断面;下游出口为压力出口,尾水位高度采用 Weber 等^[10]的试验测量值,出口压力满足静水压强分布,液面相对压强为 0。主支渠渠宽 b 均为 0.914 m,主渠长度为 $20b$ (18.28 m),支渠长度为 $10b$ (9.14 m)。支渠距离主渠入口为 $10b$ (9.14 m)。坐标原点位于支渠入口上游侧渠底,坐标方向如图 2 所示。为便于数据分析,以渠宽 b 为纲对坐标系无量纲化, $x^* = x/b, y^* = y/b, z^* = z/b$;以平均流速 u_d 为纲对 $x、y、z$ 方向的速度分量 $u、v、w$ 进行无量纲化, $u^* = u/u_d, v^* = v/u_d, w^* = w/u_d$ 。计算区域采用六面体和四面体网格剖分,并沿 $x、y$ 方向对交汇口与近壁区域加密,沿 z 方向对液相区域加密。

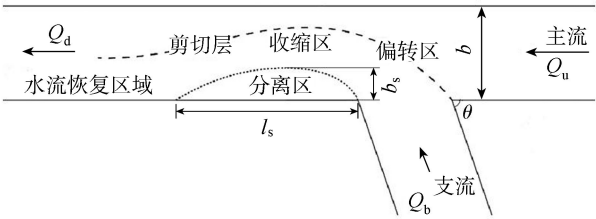


图 1 交汇口流动二维概化模型

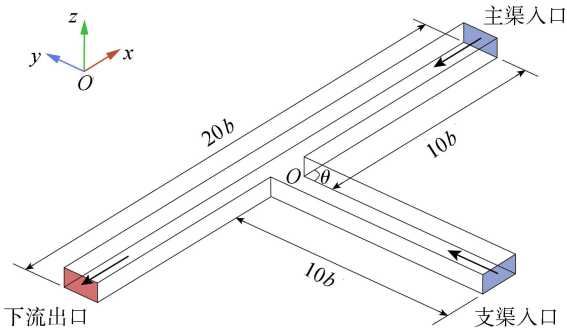


图 2 计算区域示意图

2 模拟结果与分析

2.1 数值模拟工况

为比较不同流量比和交汇角对明渠交汇口下游分离区形态及二次流强度的影响,对3种流量比($q = Q_u/Q_d = 0.250、0.417、0.750$)和7种交汇角($\theta = 30^\circ、45^\circ、60^\circ、65^\circ、75^\circ、85^\circ、90^\circ$)的21种组合工况进行模拟计算。各计算工况的下游流量均为 $0.17\text{ m}^3/\text{s}$,下游水位均为 0.31 m 。出口处雷诺数 $Re = 186\,000$,出口处弗劳德数 $Fr = 0.37$ 。经过网格无关性验证,本文所涉及不同交汇角工况下的网格数在31万($\theta = 90^\circ$)至36万($\theta = 30^\circ$)之间。

2.2 分离区几何形态

由前期研究成果^[21-22]可知,分离区位于交汇口下游的支渠入汇侧,是一个紧贴交汇口和边壁的翼形区域。分离区最明显的特征即其水流的三维回流结构特性:水平环流较强,竖直方向的流速较小,呈现出上大下小的螺旋流结构。因为分离区水流的螺旋流特征,分离区域内的水面相对交汇口下游的其他区域较低。

图3为 $q = 0.417、\theta = 65^\circ$ 时由 $u^* = 0$ 等值面所确定的分离区域边界三维示意图,图4为该分离区边界的三视图。由图3可见,分离区的三维几何形状呈现类锥形,由表层水体到底层水体,分离区水平方向几何尺寸逐渐减小。分离区域在水平方向上以支渠入汇口下游侧为起始端,沿顺水流方向在近侧边壁区域内呈翼形状分布,竖直方向上几何形态近似。类比锥形,分离区域表层尺寸和深度可作为分离区域几何特征参数。由图4可见,分离区域在直角坐标系的3个坐标轴方向均呈现明显的几何特征。根据边界等值面在水平与竖直方向上几何形状上大下小的变化规律,参考等值线法定义分离区域长度为表层沿 x^* 轴方向的无量纲长度 l_s^* ,宽度为表层沿 y^* 轴方向最大无量纲宽度 b_s^* 。当 $q = 0.417、\theta = 65^\circ$ 时, $l_s^* = l_s/b = 1.5, b_s^* = b_s/b = 0.168$ 。

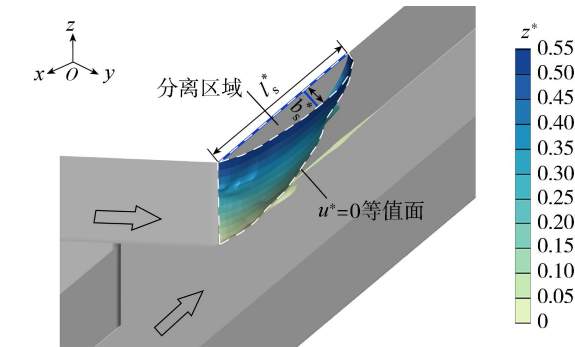


图3 分离区域三维示意图

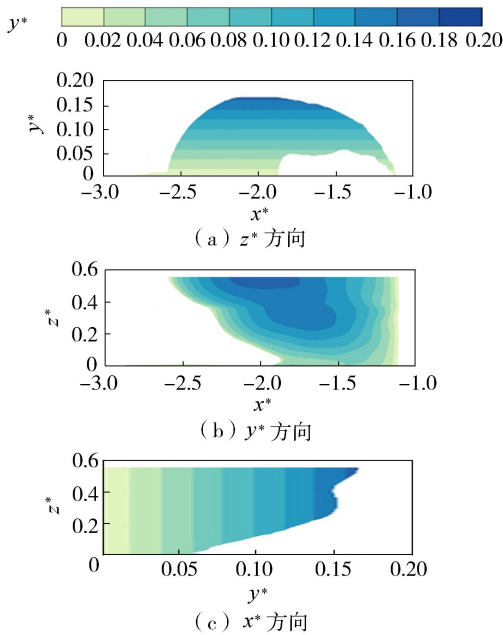


图4 $q = 0.417、\theta = 65^\circ$ 时分离区域三视图

在分离区内,由于回流结构的存在,液面下陷,呈现出中间低、边缘高的分布规律。为研究分离区域内自由液面的变化规律,定义分离区域内液面高度为区域内自由液面的平均水深 h_s ,其无量纲水深 $h_s^* = h_s/b$ 。由图4可知,当 $q = 0.417、\theta = 65^\circ$ 时, $h_s^* = 0.55$ 。

2.3 分离区三维特性变化规律

图5和图6分别为 $q = 0.250$ 时不同交汇角工况下分离区域 y^* 和 x^* 方向视图。可以看出,当 q 不变时,随着 θ 的减小,分离区域边界的几何尺寸逐渐变小,竖直方向上尺寸变化的梯度增大,几何形态也出现明显变化。当 θ 减小为 45° 时,近底面分离区

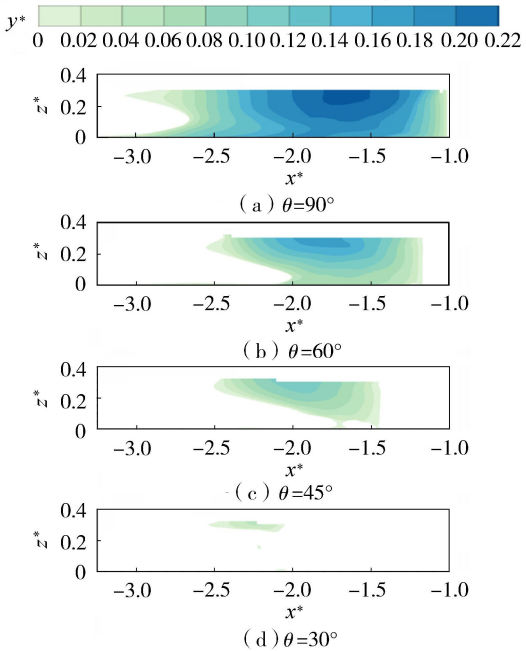


图5 $q = 0.250$ 时不同交汇角下分离区域 y^* 方向视图

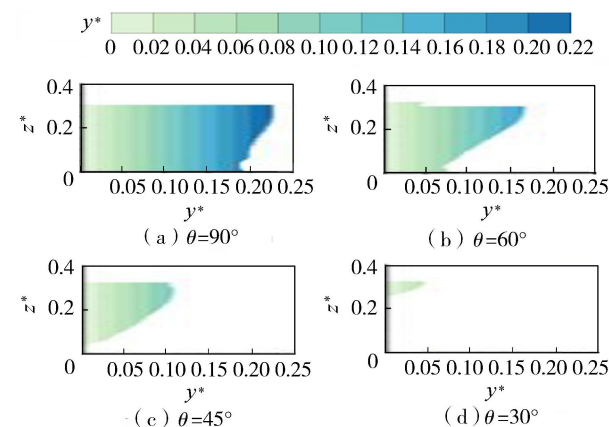


图6 $q=0.250$ 时不同交汇角下分离区域 x^* 方向视图
域消失;当 θ 减小为 30° 时,渠道内分离区域消失。

图7为 $\theta = 60^\circ$ 时不同流量比工况下分离区域 z^* 方向视图。由图7可见,当 θ 不变时,随着 q 的增大, l_s^* 与 b_s^* 呈减小趋势,当 q 从 0.250 增大到 0.417 时,分离区尺寸变化较小,当 q 从 0.417 增大至 0.750 时,分离区尺寸变化较大。经分析表明, q 与分离区尺寸之间为非线性关系。当 q 较小时,随着 q 的增大, l_s^* 与 b_s^* 变化缓慢;当 q 逐渐接近 1.0 时,随着 q 的增大,分离区的长宽尺寸变化逐渐明显。

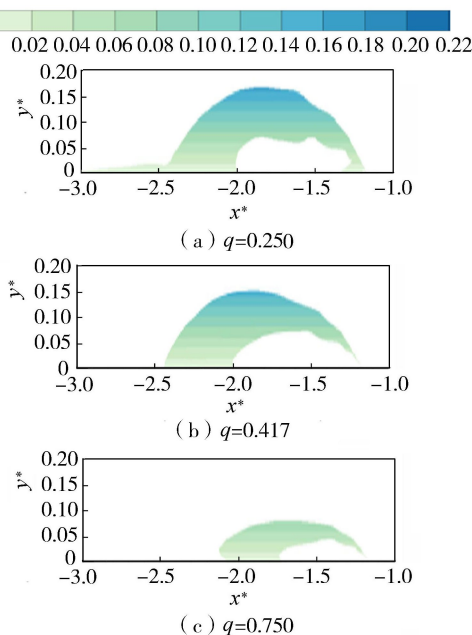


图7 $\theta=60^\circ$ 时不同流量比工况下分离区域 z^* 方向视图

图8为不同流量比与交汇角工况下 l_s^* 与 b_s^* 的计算结果。由图8可见,当流量比不变时,随着交汇角增大,分离区的长度与宽度均增大;当 $q=0.250$ 或 0.417 时, θ 的变化对 l_s^* 和 b_s^* 的影响较大;而当 $q=0.750$ 时,随着 θ 的变化,分离区长度与宽度的变化相对较小,即对于较大的流量比工况,支渠入汇的影响较弱,交汇角变化对分离区域的影响也减小。另一方面,当交汇角不变时,随着流量比增大,分离

区域的长度和宽度计算结果减小,且 q 与 l_s^* 、 b_s^* 之间为非线性关系,当交汇角较大时,该非线性关系更加显著。因此,流量比对分离区域尺寸的影响随着交汇角的增大而增大,流量比越大,则分离区越小;当流量比较大时,分离区水平尺寸随流量比变化的幅度较大。

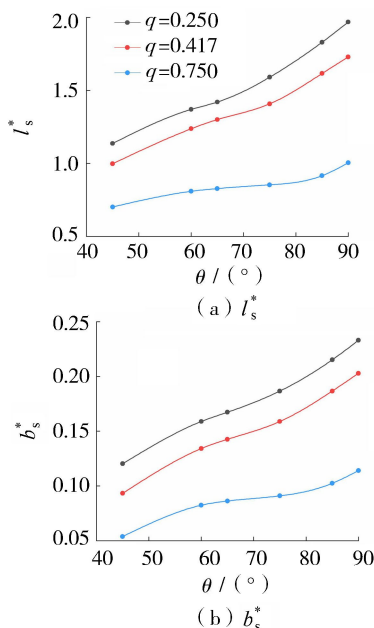


图8 分离区域的 l_s^* 与 b_s^* 计算结果

定义长宽比 δ 为分离区水平尺寸长度与宽度的比值,即 $\delta = l_s^* / b_s^*$ 。图9(a)为各工况下分离区 δ 的计算结果,可见分离区水平几何形态与 q 、 θ 存在单调相关性。当 q 越大或 θ 越小时, δ 越大,分离区的平面形态越狭长;对于 3 组流量比工况而言,当 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 时, δ 始终大于 8;当 θ 较大时, δ 的变化更加平缓,即较大的 θ 使得支渠入汇产生的回流结构较强,能够在 θ 或 q 轻微变动时更好地保证水平环流结构的形态,而随着 q 的减小,回流强度减弱, q 与 θ 的改变对分离区长宽比的影响更加明显。

图9(b)为不同 q 与 θ 工况下分离区域内 h_s^* 的计算结果。一方面, h_s^* 随着 θ 单调递减,当 θ 增加时,相同流量比工况下分离区域的水位逐渐降低;另一方面,流量比增大的同时,同一交汇角下分离区水位抬升。分离区域局部的水位可以看作回流结构对自由液面的作用结果。所以当流量比越小或交汇角越大时,分离区域内平均水深越低,由支干渠水流交汇形成的下游回流结构强度就会越强。

2.4 交汇口下游涡量变化规律

二次流是明渠交汇口下游流场的主要特征。图10为 $\theta=90^\circ$, $q=0.25$ 工况下, $x^* = -2$ 、 -4 、 -6 、 -8 断面处的二次流与横向流速分布。其中, $x^* = -2$ 断面位于收缩区与分离区所在渠段, $x^* = -4$ 断面位于

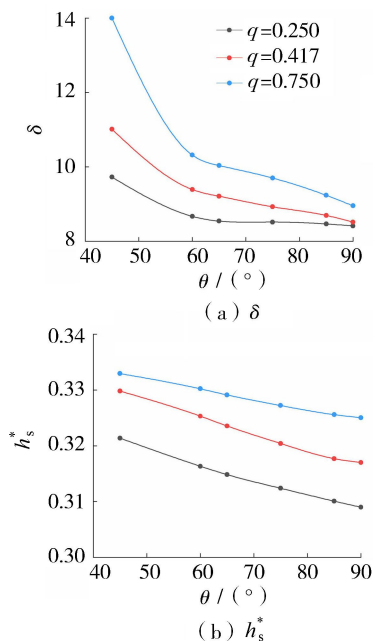


图9 分离区域 δ 与 h_s^* 计算结果

分离区下游,位于水流恢复区起始段, $x^*=-6$ 断面与 $x^*=-8$ 断面依次位于恢复区中段与末端。由图10可见,在收缩区所在渠段,水流横断面内仅能观察到较强的顺时针环流;而在水流恢复区域,水体

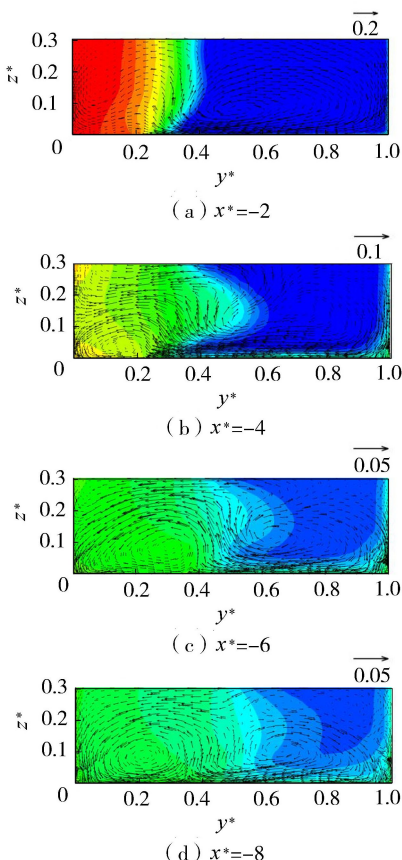


图10 $\theta=90^\circ$ 、 $q=0.250$ 工况交汇口下游不同断面二次流与横向流速分布

横断面内存在更多不同的环流结构。以上二次流现象源于交汇口处支渠水体入汇,随着水流交汇影响减弱,二次流现象沿水流方向逐渐减弱。

为进一步定量分析明渠交汇口下游二次流强度分布规律,对交汇口下游 x 方向沿程横断面涡量 Ω_x 进行计算:

$$\Omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (1)$$

Ω_x 数值越大代表该断面内二次流强度越大。

图11为交汇口下游 $x^*=-6 \sim -1$ 范围内沿 x 轴方向多个横断面内的涡量计算结果,曲线表示特定流量比条件下不同的交汇角工况涡量 Ω_x 在交汇口下游沿程过流断面内的平均值,误差线表示不同交汇角工况下断面涡量值的标准差。由图11可见,交汇口下游二次流强度沿顺水流方向呈现上游大下游小的变化规律,且变化梯度逐渐降低;不同流量比对二次流的影响显著,流量比越大,二次流强度越小,这种影响在交汇口分离区域附近较强,在下游较远处消失;交汇角的改变对二次流强度的影响不如流量比显著,在交汇口附近,二次流强度受交汇角的影响较大,随着水流流态逐渐平顺,该影响逐渐降低。

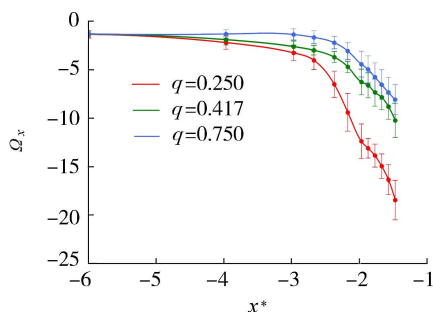


图11 Ω_x 计算结果

3 结 论

- 当流量比增大或者交汇角减小时,支渠水流对干渠水体的影响减小,分离区的水平尺寸变小,分离区域的平面形态越狭长。
- 当交汇角较大或流量比较小时,交汇口下游回流结构较强,分离区长宽比受入流条件变化的影响较小,分离区尺寸受入流条件变化的影响更明显。
- 分离区域平均水深随着流量比增大而减小,随交汇角增大而降低。
- 随着流量比的增加,交汇口下游二次流强度逐渐减弱。在交汇口附近,二次流强度受交汇角的影响较大,沿着主流方向,该影响逐渐降低。

参考文献:

[1] TAYLOR E. H. Flow characteristics at open-channel

- junctions [J]. American Society of Civil Engineers Transactions, 1944, 109: 893-902.
- [2] WEBBER N B, GREATER C A. An investigation of flow behavior at the junction of rectangular channel [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1966, 34 (3): 321-334.
- [3] BEST J L, REID I. Separation zone at open-channel junctions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(11): 1588-1594.
- [4] HAGER W H. Discussion of "Separation zone at open-channel junctions" by James L. Best and Ian Reid [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 113(4): 539-543.
- [5] YANG Qingyuan, XIAO Yewang, LU Weizhen, et al. Experimental study on characteristics of separation zone in confluence zones in rivers [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(2): 166-171.
- [6] MODI P N, DANDEKAR M M, ARIEL P D. Conformal mapping for channel junction flow [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1981, 107(12): 1713-1733.
- [7] 徐孝平, 彭文启, 李炜. 直角交汇河段分离区流场的几何特性研究 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1993, 26 (6): 638-645. (XU Xiaoping, PENG Wenqi, LI Wei. Experiment study for geometrical characteristics of the open channel junction with right angel [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1993, 26(6): 638-645. (in Chinese))
- [8] HSU C C, WU F S, LEE W J. Flow at 90° equal-width open-channel junction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(2): 186-191.
- [9] HSU C C, LEE W J, CHANG C H. Subcritical open-channel junction flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(8): 847-855.
- [10] WEBER L J, SCHUMATE E D, MAWER N. Experiments on flow at a 90° open-channel junction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5): 340-350.
- [11] LUO H, FYTANIDIS D K, SCHMIDT A R, et al. Comparative 1D and 3D numerical investigation of open-channel junction flows and energy losses [J]. Advances in Water Resources, 2018, 117: 120-139.
- [12] 茅泽育, 赵升伟, 罗昇, 等. 明渠交汇口水流分离区研究 [J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 7-12. (MAO Zeyu, ZHAO Shengwei, LUO Sheng, et al. Study on the separation zone in open-channel junction [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1): 7-12. (in Chinese))
- [13] 茅泽育, 赵雪峰, 许昕, 等. 交汇水流三维数值模型 [J]. 科学技术与工程, 2007(5): 800-805. (MAO Zeyu, ZHAO Xuefeng, XU Xin, et al. 3-D numerical model for confluence flow [J]. Science Technology and Engineering, 2007(5): 800-805. (in Chinese))
- [14] 郭维东, 梁岳, 冯亚辉, 等. Y型明渠交汇水流分离区的数值分析 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 49-52. (GUO Weidong, LIANG Yue, FENG Yahui, et al. Numerical analysis of flow separation zone at junctions of Y-shaped open channels [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(6): 49-52. (in Chinese))
- [15] 王协康, 杨青远, 卢伟真, 等. 交汇水流分离区特征研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(6): 1-6. (WANG Xiekang, YANG Qingyuan, LU Weizhen, et al. Study on characteristics of separation zone in confluence river [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(6): 1-6. (in Chinese))
- [16] 周晶. 明渠交汇水流三维数值模拟 [D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [17] 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))
- [18] SCHINDFESSEL L, CREELLE S, DE MULDER T. How different cross-sectional shapes influence the separation zone of an open-channel confluence [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(9): 4017031-4017036.
- [19] RAMOS P X, SCHINDFESSEL L, PEGO J O P, et al. Influence of bed elevation discordance on flow patterns and head losses in an open-channel confluence [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(3): 235-243.
- [20] 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. (in Chinese))
- [21] 周舟, 曾诚, 周婕, 等. 等宽明渠交汇口流速分布特性数值模拟 [J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 32-39. (ZHOU Zhou, ZENG Cheng, ZHOU Jie, et al. Numerical investigation on distribution characteristics of velocities at equal-width open-channel confluences [J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(1): 32-39 (in Chinese))
- [22] 周舟, 曾诚, 周婕, 等. 等宽明渠交汇口壅水特性数值模拟 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 347-353. (ZHOU Zhou, ZENG Cheng, ZHOU Jie, et al. Numerical simulation of backwater characteristics at equal-width open-channel confluences [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 347-353. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-05-05 编辑: 雷燕)