# 河床高差对 Y 型汇流口螺旋流结构的影响

王晓刚<sup>1</sup>, 严忠民<sup>1</sup>, 张幸农<sup>2</sup>

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098; 2 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029)

摘要:通过三维数值模拟分析了河床高差(定义为干支流河床高程差与尾水位之比)对Y型汇流口螺旋流结构的影响。通常情况下,Y型汇流口水流为表面汇聚的双螺旋流。河床高差的存在将减小干流侧水流的螺旋流强度,增强 支流侧水流螺旋度,而当支流侧螺旋流很强烈时,干流侧螺旋流将受到破坏。

关 键 词: 河床高差; 螺旋流; Y 型汇流口

中图分类号: TV133.2 文献标识码: A 文章编号: 1001 6791 (2008) 06 0828 07

明渠水流交汇现象存在于市政建设、防洪规划、航运交通等许多水力系统中。干支流交汇是发展水运的关键,也是航道整治的难点<sup>[1]</sup>;对于寒冷地区,汇流河口又是冰容易聚集阻塞航道的河段<sup>[2,3]</sup>;汇流河口对污染物输移有较强的滞留作用<sup>[4]</sup>,也是环保部门关注的重点。同时,河道水流控制着河流中包括生物栖息地大小,基质稳定性及河道地形等重要结构性质,因此,研究物理栖息条件时,水力特性显得特别重要<sup>[5]</sup>。由此可见,研究汇流口水力特性具有重要的理论与实际意义。

诸多资料显示,天然河流中汇流口可分为非对称型汇流口(即汇流口下游河道与上游干流河道衔接平顺, 汇流口仅支流河道发生弯曲,图1)及对称型汇流口(即Y型汇流口,上游干、支流河道相对于下游河道呈对称 分布,在汇流口干、支流河道都发生弯曲,图2),且两者水流特性存在很大差异<sup>[6]</sup>,非对称型汇流口流线弯曲 主要发生在支流,Y型汇流口干支流水流流线都发生弯曲,这是必须区分两类汇流口的根本原因。







目前对河道汇流口水流螺旋流结构的研究成果结论不一<sup>[6]</sup>, Ashmore 等研究发现在 Y 型汇流口存在表面汇 聚的双螺旋流<sup>[7]</sup>。2000 年 Bradbrook 研究表明<sup>[8]</sup>, Y 型汇流口有可能存在表面汇聚的双螺旋流结构, 但这会随 着河道不对称性的增大而逐渐分散。在河道不对称情况下,由于流线弯曲及地形的影响,汇流口附近双螺旋结 构可能受到限制。2006 年 Best 对 Y 型汇流口的研究认为,小汇流角度时汇流口水流并不是表面汇聚的螺旋流, 相反,水流是简单的汇聚与扩散<sup>[9]</sup>,2004 年笔者曾利用 ADV 对 Y 型汇流口进行实测<sup>[6]</sup>,发现 Y 型汇流口为单 一的大螺旋流结构,冯亚辉通过螺旋度计算证明 Y 型汇流口水流为单一的大螺旋流结构。综上可见,Y 型汇流 口水流的螺旋流结构较为复杂,有待进一步探索。

本文利用三维数值模拟对 Y 型汇流口螺旋流进行研究,旨在揭示 Y 型汇流口真实的螺旋流分布情况。

收稿日期: 2007 11 02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30490235)

作者简介: 王晓刚(1980-), 男, 江苏常熟人, 博士, 主要从事工程水力学、生态水力学研究。 E mail: wxg40007@126.com

## 模型概况

Y 型汇流口水流受到很多因素的影响,如汇流比  $Q_r$ (干流流量与总流量之比),汇流口下游弗劳德数  $Fr_d$ 、

干支流几何交汇角  $\alpha$ 、下游宽深比 Wd/Hd及干支流河 床高程差  $D_b($ 本文定义  $D_b$  为干支流河床高程差与尾水 位之比,天然河流中干支流汇流口通常存在河床高程 差,且一般支流河床高程大于干流河床高程,本文模型 设计遵循这一规律),上游干、支流宽度与汇流口下游 宽度之比  $k_1$ , $k_2$ 等,限于篇幅本文只选取其中一个控 制因素  $D_b$  对 Y 型汇流口螺旋流结构展开研究。试验工 况见表 1,研究单一控制因素对 Y 型汇流口水流结构 的影响时,控制其它各控制因素保持不变。物理模型 如图 3 所示,坐标原点位于 O 点, X、Y 轴正向如图 所示, Z 轴以向上为正。



图 3 模型水流循环系统

Fig. 3 Circulating flow system of model

表1 河床高差 D<sub>b</sub> 试验方案

Table 1	Experimental	scheme	of the	height	of	dis corda nt	bed
---------	--------------	--------	--------	--------	----	--------------	-----

工况	河段	流量/(m³•s-1)	平均流速/ (m• s⁻ ¹)	弗劳德数 Fr	雷诺数 Re	宽深比	$D_b$
	支流上游	0 0025	0. 39	0. 441	7 976. 01	1.00	
FA31	干流上游	0 002 5	0. 26	0. 294	6836.58	1.50	0
	下游	0 005 0	0. 42	0. 471	12 349. 95	1.88	
FA32	支流上游	0 002 5	0. 43	0.517	8 545. 72	1.11	
	干流上游	0 002 5	0. 26	0. 294	6836.58	1.50	0 1
	下游	0 005 0	0. 42	0. 471	12 349. 95	1.88	
FA33	支流上游	0 002 5	0. 60	0.842	10 403. 49	1.54	
	干流上游	0 002 5	0. 26	0. 294	6836.58	1.50	0 35
	下游	0 005 0	0. 42	0. 471	12 349. 95	1.88	

注:  $Fr_d = 0.417$ ,  $Q_r = 0.5$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $W_d/H_d = 1.875$ ,  $k_1 = 0.8$ ,  $k_2 = 0.53$ 。

本模型水槽进出口水位及汇流口水深采用水位测针测量,精度为0.1 nm,流速采用美国TSI公司的数字粒 子成像系统 PIV (Particle Image Velocimetry)进行测量。激光光源系统为 NewWave 双脉冲激光器,最大激光强度 200 mJ,最大频率 15 Hz,本实验中采用最高采样频率 15 Hz。采用 610034 型号激光脉冲同步器,CCD 成像系统 采用 28 mm FL F/2.8 Nikkor 可变焦镜头,采用的示踪粒子直径为 25 μm。采集的图像格式为 10 bit,有效量测区 域范围 226 mm×150 mm,图像处理采用基于 windows 2000 操作系统的 INSIGHT<sup>™</sup> 6 和 Tecplot 10.0,采用 FFT 快速 相关算法,测量精度为 1%。本试验中激光光片水平打入有机玻璃水槽中,由于水面波动非常厉害,CCD 相机 从水槽槽底向上进行拍摄,且在水面以上用深色布遮挡以减小自由水面对测量区域的影响。

## 2 数值方法

### 2.1 数值方法简介

本文求解的基本方程为时间平均的纳维埃斯托克斯方程(雷诺方程)。考虑到目前 κε 紊流模型无法很好的预测分离水流,而重整化群(Renormalization Group, RNG κε)模型适用于计算较大曲率和旋转的流动、分离流动等较为复杂的流动,本文采用 RNG 紊流模型封闭雷诺方程。对于自由水面,本文采用 VOF 方法以求解水气 交界面。

由于交汇部分水槽体形突变,本文采用分块网格法进行网格划分,即将整个模型划分为上游干流直段、上 游支流直段、下游直段及中间汇流段,如此每一部分都可采用结构网格进行划分,并且对中部汇流区及水气交 界面进行了网格局部加密。

2.2 边界条件

数学模型中具体边界条件设定如图 4 所示,入口边界根据实际入口水位设定为水相速度入口及空气相压力 入口,水相直接给定入口断面水流平均流速(根据实际方案给定),空气相则为一个大气压。出口处水相是充分





Fig. 4 Scheme of boundary condition

发展的明渠水流,由于模型设计中预留了出口与上游 汇流口间一段水流自我调整的距离,所以给定出口边 界水流符合静水压力条件,水流经过一段距离的调整 后在"有效"出口处(位于实际出口前)能够自动模拟动 水压力分布。出口处空气相给定为压力出口,为一个 大气压。

2.3 模型验证

由于试验方案众多,这里只选取 FA32 工况计算结果与物理模型试验测量结果进行验证,分别提取水体的近水面层(Z = 0.06 m)和近底层(Z = 0.01 m)两个水层,每一层水体又分别对 X = -0.05、X = 0、X = 0.05 m 3 个横断面进行顺流流速 U 及横向流速 V 的验证。验证结果如图 5 所示。



Fig. 5 Verification of the numerical model( $D_b = 0.1$ )

由图 5 可见,试验值与测量值吻合较好,仅在汇流口两侧转角处误差相对较大,可能的原因主要有两个: 一是汇流口两侧转角处水面波动非常厉害,给 PIV 测量光路产生干扰;二是本文所采用的紊流模型仍属线性紊 流模型,不能反映出各向异性紊流对平均流的影响,势必也会带来一些误差。VOF 模型带来的误差主要是由于 网格尺度较大,采用几何重构法构建自由表面时水面不够光滑,但总体而言,本模型能够成功预测 Y 型汇流 口的流场情况。由于受到试验条件的限制,物理模型试验只是获得了 3 个水层的二维流速场,实际上本文数学 模型不仅能够成功预测汇流口的二维流场,对三维流场的预测也是可靠的<sup>[10]</sup>。

#### 模拟结果 3

方便起见. 本文数据进行了量纲一处理. 各工况下X 向与Z 向长度量纲的变量除以该工况下尾水水深. Y向长度量纲的变量除以水槽宽度。所有速度量纲的变量除以下游尾门前有效平均流速。

为了能够确切的描述汇流口这种螺旋流结构,采用螺旋度对汇流口螺旋流进行研究。螺旋度 h 定义为涡 度矢量与速度矢量的点积<sup>[11]</sup>,其计算表达式为

$$h = (\nabla \times V) V = \begin{pmatrix} \frac{\partial V}{\partial Y} - \frac{\partial U}{\partial Z} \end{pmatrix} U + \begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial Z} - \frac{\partial W}{\partial X} \end{pmatrix} V + \begin{pmatrix} \frac{\partial V}{\partial X} - \frac{\partial U}{\partial Y} \end{pmatrix} W$$
(1)

式中 右边三项分别为 X、 Y 和 Z 方向的螺旋度分量,是描述流体边旋转边沿旋转方向运动的动力性质的物理 量。由于 Y 型汇流口的主要螺旋流为 沿着 X 轴旋转的,所以本文主要研究 Y 型汇流口的水平螺旋度  $h_x$ =  $\partial W$ 符合右手定则,这里取迎水逆时针方向为正向,同样的,这里 hx 的计算直接采用 按照习惯 U,  $\partial Y$  $\partial Z$ 量纲一量进行,获得的结果为量纲一数。

当汇流比 D1= 0 时,螺旋度分布如图 6 所示(由于 VOF 法中自由表面采用了几何重构法,受到计算网格尺 寸的限制, 自由表面比较粗糙), 在  $X/H_d = -0.8$  处, 在水槽底部以混合层为界左侧为负螺旋度, 而右侧为正 螺旋度,其数值较小,越往下游水平螺旋度逐渐增大,到达 X /H\_= 0~ 0.4 处时,左右两侧螺旋度绝对值达到 最大,左侧为 0.98,右侧为 1.50,且最大螺旋度中心范围达到最大。从整体来看(X/Ha= - 0.8 至 1.8),自上







![](_page_3_Figure_11.jpeg)

Fig 6 Distributions of helix flow intensity for FA31

游向下游螺旋中心向水流表层及两侧扩展。从图 6 可以判断,本工况下以混合层为界,水流两侧均有一个螺旋 流,且旋转方向相反,即本工况下水流为表面汇聚的双螺旋流结构。

在 *X* / *H*<sub>d</sub> = 0.4~ 1.8 范围内, 观察汇流口两侧近表层位置还可以发现, 干流侧总体水平螺旋度为负, 而近 表层位置存在一正螺旋度区, 支流侧总体水平螺旋度为正而其近表层位置存在一负螺旋度区, 这些螺旋度的存 在说明 "Y"型汇流口二次流结构较为复杂, 大螺旋流结构附近还存在局部小螺旋流。

当  $D_b$ = 0.1 时各断面螺旋度如图 7 所示,相比于 FA31,本工况下  $X/H_d$ = 0 处干流侧水平螺旋中心强度减 小了 32%,而支流侧水平螺旋中心强度增加 500% (为了方便两个方案的比较,图 7 中等值线未显示最大值), 水平螺旋度支流侧为负,干流侧为正,说明本工况下支流侧台阶的存在并未改变汇流口双螺旋流结构,而是大 大增强了支流侧水流水平螺旋度的强度和范围。前人资料显示,汇流口河床高程差的存在会破坏汇流口支流侧 底层的分离区<sup>[12]</sup>,通过上面的分析可以知道,支流侧底层分离区消失的原因是该处存在一较大的螺旋流。

![](_page_4_Figure_4.jpeg)

图 7 FA32 各断面螺旋度分布

Fig 7 Distributions of helix flow intensity for FA32

当河床高差  $D_b$ = 0.35 时,水平螺旋度如图 8 所示,与 FA31 相比, $X/H_d$ = 0 处支流侧螺旋中心强度减小 了 64%,而干流测螺旋中心强度增大了 900%,可见河床高差的增加将大大增大支流侧水流的螺旋度。如图 8 所示,在  $X/H_d$ = -0.4 位置已经明显存在一强度很大的向下游顺时针方向旋转的螺旋流(图 8 垂直纸面向外为 向下游方向),其强度也远远超过了 FA32 相应位置处的螺旋度值, $X/H_d$ = 0~1.8 范围内,支流侧底层螺旋流 旋转中心逐渐向上发展。在  $X/H_d$ = 0.4 位置处螺旋流中心螺旋度达到最大值(实际该断面位于汇流口最大收缩 断面附近,受到篇幅限制,这里不作详细阐述), $X/H_d$ = 0.8 位置处螺旋流中心螺旋度较上一断面略有降低,随 着螺旋流的进一步向下游发展,螺旋流范围进一步扩大,螺旋流中心螺旋度强度逐步降低。

![](_page_5_Figure_1.jpeg)

图 8 FA33 各断面螺旋度分布

![](_page_5_Figure_3.jpeg)

本工况中干流侧各个断面上水平螺旋度值都很小,小于 FA31、FA32 工况下干流侧水流的螺旋度,且不存 在强螺旋度中心,由此可以判断,此时受到支流侧特大螺旋流的影响,干流侧水流的螺旋结构被破坏,而汇流 口中间上层水体出现了一个负螺旋度中心,与支流侧螺旋流形成一涡对。总体而言,本工况下汇流口支流侧存 在一非常强的螺旋流,而干流侧水流相对平顺,其螺旋流结构被破坏。

河床高差对汇流口螺旋流结构的影响巨大,究其原因主要有:① 支流侧河床高差的存在使得在台阶面以下形成低压,干流侧水流能够直接进入台阶后方,到达支流侧边壁(台阶以下流场的流线均指向支流侧边壁,受篇幅限制这里未给出流线图。),随后沿壁面上升,从而加强了支流侧水流的螺旋度,而干流侧水流流向的改变也破坏了干流侧水流的螺旋流结构;② 支流侧汇流口水流在台阶处发生跌落,流线在台阶面上向槽底弯曲,支流来流势能降低而动能增加,这加剧了汇流口中央流体向下运动的强度。从而也加剧了汇流口支流侧螺旋流的强度。

## 4 结 论

Y型汇流口螺旋流结构非常复杂,汇流口河床地形对汇流口螺旋流结构有很大的影响。通常情况下,Y型 汇流口水流为表面汇聚的双螺旋流结构,即汇流口干支流两侧均有螺旋流存在。河床高差的存在将减小干流侧 螺旋流的强度,增强支流侧水流螺旋度。当支流侧台阶很大时,干流侧底层水流能够直接到达支流侧边壁,支 流侧螺旋流强度大大增强,干流侧螺旋流受到破坏。螺旋流在汇流口支流侧近底层台阶处形成,在汇流口收缩 断面处螺旋流强度达到最大值,随后螺旋流强度逐渐减弱,而其螺旋中心逐渐向上移动。 参考文献:

- [1] 兰 波, 汪 勇. 干支流交汇水面形态特征分析[J]. 重庆交通学院学报, 1997, 16(4):109-114 (IAN Bo, WANG Yong. Experimental study on water surface characteristics at the junction[J]. Journal of chongqing jiaotong university, 1997, 16(4):109-114 (in Chinese))
- [2] EITEMA R, MUSTE M. Laboratory observations of ice jams in channel confluences[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2001, 15(1):34-58
- [3] GUDMUNDSSON G.H. A three dimensional numerical model of the confluence area of Unteraargletscher, Bernese Alps, Switzerland [J]. Journal of Glaciology, 1999, 45(150): 219-230.
- [4] 茅泽育,武 蓉,马吉明.明渠交汇口水流及污染物输移数值计算[J].水利学报,2003(8):43-48 (MAO Ze yu, WU Rong, MA Ji ming.Numerical simulation of flowfield and pollutant transport at the junction of open channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003 (8):43-48 (in Chinese))
- [5] FRANKS C A, RICE S P, WOOD P J. Hydraulic habitat in confluences: An ecological perspective on confluence hydraulics[M]. Walling ford, ROYAOME-ONI: IAHS AISH Publication, 2002.
- [6] 王晓刚."Y"型汇流口水流水力特性试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2004. (WANG Xiaσ gang. Study of hydraulic characteristics at"Y" shaped junction[D]. Shenyang: Shenyang Agriculture University, 2004. (in Chinese))
- [7] RHOADS B L, KENWORTHY S T. Flow structure at an asymmetrical stream confluence[J]. Geomorphplogy, 1995, 11(4): 273-293.
- [8] BRADBROOK K F, LANE S N, RICHARDS K S, et d. Role of bed discordance at asymmetrical river confluences [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5): 351-368.
- [9] BEST J L. Large Confluences [EB/OL]. http://earth.leeds.ac.uk/%7 Eeardpa/confluences.shtml, 2006.
- [10] WANG Xiaσ gang, GUO Weir dong, YAN Zhong min. Three dimensional simulation for effects of bed discordance on flow dynamics at "Y" shaped open channel confluences[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(5):587-593.
- [11] 冯亚辉,郭维东,王晓刚. 明渠交汇水流的螺旋度分析[J]. 人民长江, 2007, 38(1): 119-121. (FEN Yar hui, GUO Wei dong, WANG Xiaor gang Analysis of intensity of helix flow at open channel confluences[J]. Yangtze River, 2007, 38(1): 119-121. (in Chinese))
- [12] BIRON P, BEST J L, ROY A G. Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(12):676-682.

## Effect of bed discordance on helix flow at Y shaped junction

WANG Xiao gang<sup>1</sup>, YAN Zhong min<sup>1</sup>, ZHANG Xing mong<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropowor Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The structure of flow is very complex at Y shaped junction where there are multiform helix flows. This paper anar lyzes the effect of bed discordance (the ratio of bed discordant height between mainstream and tributary channel to the tailwater depth) on helix flow at Y shaped junction through the three dimensional numerical simulation. The flow is dominated by two helical cells, usually back to back at Y shaped junction. The bed discordance will decrease the intensity of helix flow at the side of mainstream channel and increase it at the side of tributary. When the intensity of helix flow is very strong at the side of tributary, the helix flow will be destroyed at the side of mainstream channel.

Key words: bed discordance; helix flow; Y shaped juntion

<sup>\*</sup> The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30490235).