

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.05.021

分汊型河道水流运动特性和污染物输移规律研究进展

顾莉^{1,2,3}, 华祖林^{1,2,3}, 褚克坚^{1,2,3}, 刘晓东^{1,2,3}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要 对分汊型河道的水流运动特性和污染物输移扩散规律的相关研究进行综述, 分别从分汊型河道中分汊口、交汇口、整个分汊河道的水流特性及分汊型河道中的污染物输移特性等 4 个方面进行总结。介绍分汊口和交汇口处的水流从其能量损失、水位变化、水流分离等一维、二维过流特征到三维流动结构和紊动特性的研究过程, 从野外现场试验、室内物理模型试验和数学模型模拟等角度出发阐述了整个分汊河道的水流特性, 认为污染物在分汊河道中的输运规律研究主要集中在数值模拟上, 并进行了回顾和分析, 提出分汊河道水流水质输移特性研究中一些有待深入探究的问题, 尤其亟待加强不同排放方式、不同污染物密度和不同分汊形态下污染物输移机制的试验研究。

关键词 分汊河道; 水流运动特性; 污染物输移; 综述

中图分类号: TV133 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2011)05-0088-07

Advances in flow characteristics and pollutant transport laws in braided rivers//GU Li^{1,2,3}, HUA Zu-lin^{1,2,3}, CHU Ke-jian^{1,2,3}, LIU Xiao-dong^{1,2,3} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The relevant researches on the flow characteristics and pollutant transport laws in braided rivers were reviewed. They were summarized from four aspects, namely the flow characteristics of bifurcation, confluence and the whole braided river, and the pollutant transport laws in braided rivers. Firstly, as to the flows at the bifurcation and confluence of braided rivers, the research achievements from the 1D and 2D flow characteristics including energy loss, water level variation, flow separation and so on to the 3D flow structure and turbulent characteristics were introduced. Secondly, the flow characteristics of the whole braided river were described by means of field tests, laboratory tests and numerical simulations. Thirdly, the relevant researches on the pollutant transport laws in braided rivers were reviewed and analyzed, and the numerical simulations were found out to be the main method. Finally, some further problems about the flow characteristics and pollutant transport laws in braided rivers were put forward, especially the experimental studies on the pollutant transport mechanism under different discharge modes, pollutant densities and braided forms.

Key words : braided river; flow characteristic; pollutant transport; review

分汊型河道是一种特定而时常遇到的河道形态, 由于江心洲的存在, 河道水流发生分汊现象, 如长江中下游、珠江广东段、赣江、湘江、松花江、黑龙江、美国 Mississippi 河、非洲 Niger 河和 Benue 河等都时常遇到。分汊型河道一般由顺直段、分汊段和再汇合段 3 部分组成, 边界条件复杂, 其水流结构和污

染物输移规律不同于顺直或弯曲河道, 具有自身的独特性。由于分汊型河道与一般河道同样也担负着供水、纳污和灌溉等众多重要的功能。因此, 深入研究分汊型河道中水流和污染物输运特性可为确定该类河道中污染物的掺混机制、纳污能力和水污染控制提供依据, 并为国民经济生产服务提供支撑, 具有

基金项目: 国家 973 计划(2008CB418202); 国家自然科学基金(51009048, 50979026); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07103-006); 中央高校基本科研业务费专项(2009B16714, 2009B17814); 江苏省六大人才高峰计划(08-C); 河海大学自然科学基金(2009422611)

作者简介: 顾莉(1981—), 女, 江苏盱眙人, 讲师, 博士, 从事环境水力学、污染物输移规律研究。E-mail: gulique@hhu.edu.cn
通讯作者: 华祖林(1965—), 男, 江苏江阴人, 教授, 博士, 从事水环境研究。E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn

重要的理论意义和实际应用价值。

笔者拟对分汊型河道中水流运动特性和污染物输移扩散规律的研究进展进行综述,介绍有关分汊型河道中分流口、交汇口和整个分汊河道的水流运动规律方面的研究成果,总结和分析污染物在分汊型河道中的输运扩散规律,并提出分汊型河道中有待深入研究的问题。

1 分汊型河道水流运动特性的研究进展

由于分汊型河道的水流结构和运动特性十分复杂。因此,分汊型河道水流结构的探索一直为人们所关注,下面分别对分汊河道中分流口、交汇口及整个分汊河道的水流运动特性的研究进展进行阐述。

1.1 分汊口水流运动特性

在分汊口,水流被江心洲分成2股或多股,流线弯曲产生离心作用,从而形成水面横向比降和横向环流,流线方向改变剧烈时,支汊进口段还可能形成分离区,成为污染物滞留的场所。分汊口复杂的水流结构与分汊口的平面形态、地形特征和上游来流等众多因素有关。20世纪40年代从边界相对简单的分汊明渠开始,众多学者利用物理模型试验和理论分析的方法研究了分汊明渠一维和二维水流的过流特征,包括主支汊流量、明渠上下游水深、支汊回流尺寸、最大断面收缩系数以及能量损失等。其中,具有代表性的有:Taylor^[1]通过等宽直角分汊明渠试验,发现分流量的多少取决于分汊口水动力条件和支汊的回流特性,并图示了分流比与水深比之间的关系,但由于Taylor假设支汊的入流不受尾门控制,致使关系图的应用有一定的局限性^[2];Law等^[3]通过理论分析,建立了 Fr 与分流比、收缩系数等因子之间的关系,同时通过试验观测水位随 Fr 增大的变化规律;Ramamurthy等^[4]从能量、连续和动量方程出发,推导了主汊 Fr 与支汊分流比以及主汊上下游水深比之间的理论关系式,支汊分流比与收缩系数、主支汊宽度比以及主支汊速度比之间的理论关系式,这些关系式在主汊下游 Fr 小于0.7和支汊下游 Fr 大于0.35等条件下与试验结果吻合良好;Hager^[5]通过假设支汊收缩断面处水流处于临界状态,推导得出支汊能量损失系数的表达式。后来,Ramamurthy等^[6]还研究了直角分汊流的能量损失情况,得出主支汊间能量损失与分流比和主支汊宽度比有关,而主汊在分汊前后断面的能量损失主要取决于分流比,并给出了不同主支汊宽度比情况下的流速和压力分布图。Hsu等^[7]通过试验研究了直角等宽分汊明渠的水力特性,发现支汊的收缩系数反比于主汊的上下游流量比,并建立了能力损失系数

与流量比、上游 Fr 和水深比的关系。Kesserwani等^[8]提出一个可以计算多种流态分汊明渠分流比的模型,通过与前人试验数据比较可知该模型计算结果优于其他估算公式。

随着测量技术的提高,从20世纪90年代开始有关分汊口三维特性的研究逐渐开展起来。Nearby等^[9]对直角分汊明渠不同水深处的流场进行了测量,发现分汊口表、中、底层水流结构具有较大差异,支汊分离区尺寸和主支汊分流面均沿水深方向变化,底床糙度和主支汊流速比对分汊口水流结构有显著影响。罗福安等^[10]根据对直角分水口前不同水深处平面流场的测量结果,将水流流态划分为加速区、稳速区、扩散减速区、分离减速区、潜流加速区、潜流减速区、滞留区和回流区共8个区,分析并说明了每个区的特征、范围和形成原因,还建立了分流宽度与单宽分流比、相对流速和水流 Fr 之间的关系。遗憾的是由于测量手段的限制,Nearby等^[9]和罗福安等^[10]没能测量出断面二次环流结构的分布特征。Barkdoll等^[11]测量了明渠分汊流的流速分布和自由表面的水位变化,发现明渠中存在显著的二次流,并且支汊中转弯水流的外缘水位高于内缘水位。童朝铎^[12]测量了30°角分汊口水流结构,比较了表层和底层流场的差别,并给出了主支汊横断面上方向相反的2个环流结构。近来,Ramamurthy等^[13]进一步详细地观测了直角分汊明渠的水流结构,得到了分汊口区域水位变化图和三维流速分布图,分析了不同水深处平面流场和不同断面二次流,指出支汊进口处回流区尺寸反比于支汊流量比,主支汊不同断面二次环流结构存在较大差异。

数值模拟也是研究分汊口水流结构的一个重要手段。在二维紊流模型方面,Chen等^[14]以及李克锋等^[15]分别建立了二维 $k-\epsilon$ 紊流模型,对分汊明渠流场进行模拟,Chen的模型适合于分流比较小,对于分流比较大的情况,模型计算结果存在较大偏差,李克锋等^[15]提出了区域坐标系统法来处理分汊口的不规则边界,模型计算结果令人满意。Shamloo等^[16]利用二维RSM紊流模型模拟分汊明渠的水流结构,模型较好地再现了分汊口的回流区,回流区尺寸的计算值与试验值吻合良好。在三维紊流模型方面,Issa等^[17]首先采用三维紊动模型模拟了“T”形分汊流,模型采用 $k-\epsilon$ 紊流方程闭合三维时均N-S方程,并采用壁函数和一阶精度的有限体积法求解方程。Nearby等^[18]也建立了一个三维紊流模型,探讨了“T”形口复杂的三维结构和底沙输运过程,并考虑底床糙率变化对分汊水流结构的影响,但是模型没有考虑水面变化的影响。由于分汊河道受

复杂边界的限制,较难生成具有良好正交性的曲线网格。赵朝锋^[12]建立了广义曲线坐标系下的三维水流数学模型,解决了网格非正交的影响。模型采用逆变流速张量作为主变量,模拟了试验条件下不同边界分汉口水动力结构,并成功地对天然分汉河道的水流结构进行模拟。Ramamurthy 等^[13]利用VOF方法追踪自由表面的水位变化,建立了具有自由表面的三维紊流模型,模型较好地重现了支汉进口处和主汉在“T”形口下游处的回流特性。李琳琳等^[19]采用带旋流修正的 $k-\epsilon$ 双方程紊流模型,成功地模拟了分汉口门处表底层水流的差异及横向环流的存在,并发现分汉口门处的环流强弱和悬移质垂线分布是影响分沙比与分流比关系的主要因素。Li 等^[20]建立了三维 RANS 紊流模型,对 Ramamurthy 等^[13]的分汉明渠试验结果进行模拟,模型较好地计算了三维流速值与水面线的变化情况。

1.2 交汇口水流运动特性

交汇口是分汉型河道另一个重要的组成部分,交汇河道的水流流动结构与单一河槽相比有显著不同。交汇处水流相互顶托,发生紊动掺混,形成旋涡,流速小,其能量损失使泥沙、卵石在汇口处淤积成滩,同时,支汉水流受上游来流的挤压和河岸固壁的限制,在交汇口下游附近易形成分离区。束窄过流断面,而且断面环流明显。Taylor 早在 1944 年就推导出了明渠交汇口汇流比的关系式,并与汇流角为 45° 和 135° 的试验结果进行比较,结果表明在小交汇角时该方法比较有效^[1]。Modi 等^[21]利用理论分析方法研究明渠汇流处分离区的宽度和长度变化特征。Best 等^[22-23]通过试验研究分离区的最大宽度,指出 Modi 的理论方法计算出的分离区宽度偏大,并发现汇流角度为直角情况下,分离区的宽度和长度比为常数 0.19。Biron 等^[24]研究了被前人忽略的河床高差对交汇流的影响,河床高差的存在可使下层分离区受到空间限制,甚至消失,还会引起混合层垂向轴线发生偏转扭曲,不再与河床垂直。Ramamurthy 等^[25]在理论分析基础上,通过试验测定了直角封闭矩形水槽的汇流区域二维流场、压力分布,研究了不同主支汉流量比及主支汉形态大小对能量损失系数、支流到主流的动量传递与汇流区几何形态等的影响。Hsu 等^[26]研究了 30° 、 45° 和 60° 的交汇口分离区结束断面处的能量和动量校正系数,建立了主河道上下游水深比的函数关系式,分析发现水深比与交汇角和 Fr 成正相关,并且建立了能量损失系数与主河道上游流量比、水深比以及 Fr 之间的函数关系式。茅泽育等^[27]对等宽明渠交汇口水流分离区的形状及尺寸进行了试验研究,研究

结果表明,明渠汇流所引起的水流分离区的尺寸(长度和宽度)随交汇角及流量比的增加而增大,但其形状基本保持不变,通过理论分析提出了分离区收缩系数及能量损失系数的表达式。王协康等^[28]则以较为翔实的水槽实验资料为基础,采用流线法和等值线法对实验资料进行比较,发现水流分离区几何尺度随着水深及流量比而变化,而这种变化取决于交汇区域内二次流对流速分布的影响。

除上述有关明渠交汇口的一维和二维水力特性、能量损失情况和水流分离特征研究外,Rhoads 等^[29]测量了一个天然非对称交汇河流的流速分布,在枯水期时水流结构主要受主支汉动量比、上游来流流量和河床地形等条件影响。Weber 等^[30]利用 ADV 对直角明渠汇流处的三维水流结构进行测定,分析了流场分布、紊动结构和水面变化等规律,并利用部分试验数据验证了前人关于水深比的模型,结果表明这些关于汇流的简单模型是可信的。茅泽育等^[31]采用试验手段探索等宽 45° 交汇角的汇流区三维流动结构,对于给定的交汇口形状及尺寸、分离区形状基本保持不变,分离区尺寸随主支渠流量比变化并具有较好的相关关系。郭维东等^[32]通过试验发现“Y”形汇流口水流总体向下游呈螺旋流,随着汇流比的增大,河床高差的存在,这种螺旋流趋势减弱。吴迪等^[33]对复式断面河道“Y”形交汇河口水流进行试验研究,发现交汇口处水流水位呈现中间低、两边高的形态,滩地上水位出现干流侧水位低、支流侧水位高的现象,河流洪水漫滩以后,在滩槽交界面附近水深发生急剧变化,水面形成大大小小的旋涡。刘同宦等^[34]研究了支流 90° 入汇后的水面比降变化和时均流速分布特征,试验发现汇流比增大时,入汇口上游断面时均流速减小,入汇口下游断面产生高、低流速带,形成回流分离区,入汇口上游的干支流水面坡降取决于干支流相互顶托影响,入汇口处及其下游合流掺混区水面坡降随汇流比增大而减小。

关于交汇口的二维数学模型从 20 世纪 80 年代后期开始发展,但是这些模型主要考虑横向剪切作用,忽略了水力参数在垂向的变化^[35-36]。在发现交汇口的二次环流结构后,三维模型渐渐发展起来。Weerakoon 等^[37]利用三维数学模型对汇流口水流结构进行模拟计算,模型采用刚盖假定,表层与底层水流特征的模拟结果与实测值吻合较好,不足的是回流区的长度误差较大,两者相差 30% 左右。Bradbook 等^[38]也对汇流口进行了三维数值模拟,研究了非对称汇流口存在高差的河床对水流结构的影响,模拟结果表明主支汉河床的高差作用显著增大了二次流强度,虽然该模型不能完全定量地再现交

汇口细微的水流结构,如上升流的流速大小存在一定差异,但模拟结果是对交汇流研究的重要补充和延续。Huang 等^[39]建立的三维数学模型经 90°角的交汇明渠试验数据验证后,进一步探索了其他交汇角对明渠水流特性的影响。Wang 等^[40]利用三维数学模型模拟了主支汉有高差的“Y”形交汇明渠的水流结构,与试验结果吻合较好。最近,张挺等^[41]采用雷诺平均 N-S 方程和 $k-\omega$ 涡黏紊流模型成功地模拟了交汇口下游附近的分离区和二次流等主要水流特性,模型计算出的交汇口分离区形状参数、支渠入流角及断面收缩系数等参数值与前人实测值吻合良好。冯镜洁等^[42]采用 $k-\epsilon$ 双方程模型结合 VOF 方法,对不同入汇角及不同汇流比的入汇型水槽中水流进行了三维数值模拟,成功模拟出了分离区的出现、分离区的几何尺度、交汇区域的水位变化等现象。最近,Shakibainia 等^[43]利用三维数学模型系统深入地研究了交汇明渠的水力特性,模拟结果表明交汇角、流量、宽度比和 Fr 对流速的转向、分离以及二次环流有显著影响。

1.3 分汉型河道整体水流运动特性

上述研究都是针对分汉型河道中分汉口和交汇口处的水流特性研究,对整个分汉型河道水流结构的野外观测与物模试验研究相对较少。Richardson 等^[44]测量了雅鲁藏布江上 Jamuna River 中分汉河道的三维流场结构和支汉地形地貌演变过程,分析得出单一河道中流场分割成多流线的水流结构早于河底地形的分汉,是分汉型河流形成的前提条件。余新明等^[45]通过水槽试验探索了分汉型河道底沙输移演化特征和整体水流结构,长条状的江心洲模型固定在矩形断面水槽中,试验对江心洲周围的纵向流速分布进行了测量和分析,着重关注了底沙输移特征的研究。华祖林等^[46]建立了不同分汉角度和不同支汉宽度比的汉道物理模型试验系统,详细测量了整个分汉河道的水流结构和紊动特征,试验结果表明在大分汉角模型的支汉进口段存在回流区,回流区的尺寸和位置随支汉宽度比而变化,小分汉角模型中不存在回流区,大、小分汉角模型支汉中的二次流旋转方向相反;水流紊动能分布规律也与回流区相关。

相对于物理模型试验,采用数学模型模拟包含江心洲的天然分汉河道水流的比较多。不少二维或三维数学模型模拟了长江口多级分汉河道的水流特性、底沙输运或盐度分布情况,如龚希萍等^[47]在正交坐标系下建立了能较好拟合长江口边界的平面二维潮流和全沙数学模型,该全沙数学模型成功复演了长江口流场、含沙量场和地形变化;龚政等^[48]建

立了 σ 坐标系下长江口正压、斜压诊断及斜压预报模式的三维流场数学模型,通过模拟结果的定量比较,发现长江口三维斜压诊断模式与斜压预报模式的流场计算结果在量值上有可观的差异(一般在 10 cm/s 左右),斜压预报模式更为精确;马钢峰等^[49]利用 ECOM 模式建立了一个长江口水动力盐度三维数值模型,计算和分析了南北槽垂向盐度分布和盐水通量过程。此外,Nicholas 等^[50]计算了瑞士阿尔卑斯山下 Ferpècle River 中分汉河流的三维流场,模型精细地模拟出分汉口前断面二次流发生分汉现象,右支汉弯曲度和断面放宽率大,其进口部分存在回流区,且右支汉中水深浅、流速慢,相反,左支汉则水深大、流速快,在交汇断面存在 2 个高流速区。余新明等^[51]基于无结构化网格,建立了分汉型河道二维水沙数学模型,模拟了武汉天兴洲汉道段的水流泥沙运动,模型较好地再现了天然分汉河段的流场变化、泥沙输移、左右汉水沙分配及河床冲淤演变过程。张为等^[52]针对分汉浅滩河道的特性,建立了正交曲线坐标下河道二维水流泥沙数学模型,较好地模拟了沙市河段的沿程水面线、断面流速大小及分布,反映了该河段的水流运动规律。齐珺等^[53]建立了长江水系武汉段的三维水动力模型,计算发现天兴洲右岸河道内流速大,与冲蚀沟一起构成了逆时针环状流场,加剧了冲蚀沟的冲蚀,而天兴洲左岸河道内的流速小,河床淤积严重。虽然这些研究没有系统地探明分汉河型的水流运动特性,但客观上促进了分汉型河道研究的深入。

2 分汉型河道中污染物输移特性研究进展

关于分汉型河道中污染物输运规律的研究并不多,而且主要集中在数值模拟上。李克锋等^[54]利用二维 $k-\epsilon$ 紊流模型研究了污染物在上游岸边横向入射后分汉明渠口的浓度分配规律,结果表明,当排放口到分汉点的距离增大,或者入射动量增大时,同岸侧汉道的分污比均呈下降趋势。杨春平等^[55]利用二维模型计算了弯曲型分汉河道中水质的浓度场分布,污染物在左岸边排放后,污染源下游有一个明显的污染带,大部分污染物进入江心洲左侧的支汉,在下游交汇口处左右汉污染物进一步掺混,浓度趋向均匀。杨具瑞等^[56]建立了江心洲型分汉河流平面二维数学模型,计算结果表明,污染物位于江心洲上游 2 km 排放后,污染物流经汉道时还没有完全达到全断面混合,污染物在扩散、降解过程中受到江心洲地理位置的影响,混合长度增加。Biron 等^[57]用三维数学模型对污染物在实验室和天然交汇河道中交汇口及下游河道中的混合过程进行了模拟,实验室

中交汇明渠的两汉存在底部高差时混合过程加速,天然情形下交汇口的上游来流小时混合较快,远区的混合主要由河道的弯曲程度决定。江帆等^[58]采用有限元方法求解弯曲性分汊河道中的污染物扩散数学模型,污染物在弯道分离处回流和绕流等水流作用下,呈现出不同的扩散态势,其中在岸边扩散有减缓的趋势,在弯道分离处污染物扩散呈现多向性,而在回流状态下和绕流尾迹区,污染物扩散缓慢,有利于污染物的收集和集中治理。Lee等^[59]利用数学模型对韩国 Han River 某一分汊河段中污染物的传输过程进行了模拟,也分析了污染物流经 Nodeul Island 时在左右两汉中的分布特征。此外,还有不少针对长江口多级分汊河口的岸边排放污染物后浓度场的数值模拟研究^[60-61]。

利用物理模型进行研究的成果报道非常零星,顾莉^[62]通过分汊型河道物理模型试验,在分汊口上游断面的不同横向位置处点源排放污染物,探索分汊型河道中污染物的输移扩散规律,研究表明左侧岸边排放下,污染物分配受支汊宽度比的影响较小,污染物大部分进入左支汊,在下游 2 支汊水流交汇界面附近浓度等值线密集;河道中心、1/3 河宽与 2/3 河宽位置排放下,污染物分配规律与支汊宽度比密切相关,通过计算不同工况下污染物进入支汊的分配比,建立了不同排放位置下分汊型河道分污比与分流比的函数关系式。顾莉^[62]还对分汊型河道中污染物的纵向离散能力进行研究,进行纵向离散示踪试验,计算分汊型河道纵向离散系数,分析表明纵向离散系数与平均流速、水深、糙率和分汊角呈递增关系,并随两汉宽度的差值增加而增大,并建立了分汊型河道污染物纵向离散系数与流量、分汊角、分流比、水深等因子的经验公式。

3 结 语

分汊型河道是自然界广泛存在的一种河道形态,目前,分汊型河道水流结构的研究主要集中在分汊口和交汇口处。分汊口部分关注较多的是分汊明渠,分汊明渠的水流特性研究成果在一、二维上较为丰富,三维水流结构的探究仍值得深入,目前主要对直角平底分汊明渠的三维流场进行了测量与分析,对分汊口水流的紊动特征关注较少。此外,对于天然分汊口详细的水流结构和紊动特征的研究尚不多见,值得进一步深入探究。

交汇口部分的研究不论是室内模型还是天然交汇口水流特性研究均有较多报道,主支汊的河床高低差异和冲刷坑等多种复杂因素的影响均有被考虑到。但是,对于交汇口的螺旋结构形态以及水面

变化规律等方面的问题还存在争议,野外汇流口在众多复杂边界和水力条件下的水流结构研究也较为欠缺,还有继续深入探索的空间。

由于分汊型河道的复杂性,有关整个分汊型河道的水流特性研究相对较少。目前研究主要为对包含江心洲的分汊型河道的数值模拟,对水流细部结构探究不够。主支汊纵向与横向比降、江心洲形状、江心洲数量等众多因子对整个分汊型河道水流流场的影响尚不清楚,此外分汊型河道中岸边浅滩分布以及浅滩上有无植被的影响也值得深入探究。

有关分汊型河道中污染物输移特性的研究更少,除了数值模拟计算外,亟须加强试验研究,深入地探讨不同排放方式下污染物在汊道中的分布特征和分配比例,不同密度的污染物与汊道水流相互作用下输移扩散机制的研究以及不同的分汊形态对污染物输运扩散的影响研究,从而为掌握复杂分汊型河道的污染物输移规律提供科学基础。

参考文献:

[1] TAYLOR E H. Flow characteristics at rectangular open-channel junction[J]. Trans. ASCE, 1944, 109: 893-912.

[2] RAMAMURTHY A S, TRAN D M, CARBALLADA L B. Dividing flow in open channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1990, 116(3): 449-455.

[3] LAW S W, REYNOLDS A J. Dividing flow in an open channel[J]. J Hydr Div, ASCE, 1966, 92(2): 207-231.

[4] RAMAMURTHY A S, SATISH M G. Division of flow in short open channel branches[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114(4): 428-438.

[5] HAGER W H. Discussion of "Dividing flow in open channels" by Ramamurthy A S, Tran D M, and Carballada L B[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1992, 118(4): 634-637.

[6] RAMAMURTHY A S, ZHU Wei-min, CARBALLADA B L. Dividing rectangular closed conduit flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1996, 122(12): 687-691.

[7] HSU C C, TANG C J, LEE W J, et al. Subcritical 90° equal-width open-channel dividing flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2002, 128(7): 716-720.

[8] KESSERWANI G, VAZQUEZ J, RIVIERE N, et al. New approach for predicting flow bifurcation at right-angled open-channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2010, 136(9): 662-668.

[9] NEARY V S, ODGAARD A J. Three dimensional flow structure at open channel divisions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1993, 119(11): 1223-1230.

[10] 罗福安, 梁志勇, 张德茹. 直角分水口水流形态的实验研究[J]. 水科学进展, 1995, 1(1): 71-75.

[11] BARKDOLL B D, HAGEN B L, ODGAARD A J. Experimental

- comparison of dividing open channel with duct flow in T-junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1998 , 124(1) 92-95.
- [12] 童朝锋.分汉口水沙运动特征及三维水流数学模型应用研究[D].南京 :河海大学 2005.
- [13] RAMAMURTHY A S , QU J , VO D. Numerical and experimental study of dividing open-channel flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE 2007 ,133(10) :1135-1144.
- [14] CHEN Hong-bo ,LIAN Gui-sheng. The numerical computation of turbulent flow in tee-junctions[J]. J Hydrodynamics , Amsterdam Ser B ,1992(3) :19-25.
- [15] 李克锋 ,赵文谦 ,李嘉 ,等.河渠分汉段的流速分布与不规则边界处理[J].水动力研究与进展 :A 辑 ,1994 ,9(2) :131-137.
- [16] SHAMLOO H ,PIRZADEH B. Investigation of characteristics of separation zones in T-junctions[C]//3rd IASME/WSEAS Int Conf on Water Resources ,Hydraulics & Hydrology (WHH ' 08). Cambridge :University of Cambridge 2008 :157-161.
- [17] ISSA R I , OLIVEIRA P J. Numerical prediction of phase separation in two phase flow through T-junctions[J]. Computers & Fluids ,1994 ,23(2) :347-372.
- [18] NEARY V S , SOTIROPOULOS F , ODGAARD A J. Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1999 ,125(2) :126-140.
- [19] 李琳琳 ,余锡平.分汉河道分沙的三维数值模型[J].清华大学学报 :自然科学版 ,2009 49(9) :1492-1497.
- [20] LI C W ,ZENG C. Flow division at a channel crossing with subcritical or supercritical flow[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids 2010 62(1) 56-73.
- [21] MODI P N , DANDEKAR M M , ARIEL P D. Conformal mapping for channel junction flow[J]. J Hydr Div ,ASCE , 1981 ,107(12) :1713-1733.
- [22] BEST J L ,REID I. Separation zone at open-channel junctions [J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE ,1984 ,110(11) :1588-1594.
- [23] BEST J L ,REID I. Closure on " Separation zone at open-channel junctions " [J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE ,1987 ,113(4) 545-548.
- [24] BIRON P , BEST J L , ROY A G. Effects of bed discordance on flow dynamics at open-channel confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1996 ,122(12) 676-682.
- [25] RAMAMURTHY A S , ZHU Wei-min. Combining flows in 90° junctions of rectangular closed conduits [J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1997 ,123(11) :1012-1019.
- [26] HSU C C , LEE W J , CHANG C H. Subcritical open-channel junction flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE , 1998 ,124(8) 847-855.
- [27] 茅泽育 ,赵升伟 ,罗昂 ,等.明渠交汇口水流分离区研究 [J].水科学进展 2005 ,16(1) :1-12.
- [28] 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.
- [29] RHOADS B L ,KENWORTHY S T. Flow structure at an asymmetrical stream confluence[J]. Geomorphology ,1995 ,11(4) 273-293.
- [30] WEBER L J , SCHUMATE E D , MAWER N. Experiments on flow at a 90° open-channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE 2001 ,127(5) 340-350.
- [31] 茅泽育 ,赵升伟 ,张磊 ,等.明渠交汇口三维水力特性试验研究[J].水利学报 2004 35(2) :1-71.
- [32] 郭维东 ,王晓刚 ,曹继文 ,等." Y "形汇流水流水力特性试验研究[J].水电能源科学 2005 23(3) 53-56.
- [33] 吴迪 ,郭维东 ,刘卓也.复式断面河道" Y "形交汇河口水流水力特性[J].水利水电科技进展 2007 27(3) 21-23.
- [34] 刘同宦 ,郭炜 ,詹磊.90°支流入汇区域时均流速分布特征试验研究[J].水科学进展 2009 29(4) 485-489.
- [35] CHU V H , BABARUTSI S. Confinement and bed-friction effects in shallow turbulent mixing layers[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1988 ,114(10) :1257-1274.
- [36] UIJTTEWAAL W S J , TUKKER J. Development of quasi two-dimensional structures in a shallow free-surface mixing layer [J]. Exp Fluids ,1998 24 :192-200.
- [37] WEERAKOON S B , KAWAHARA Y , TAMAI N. Three-dimensional flow structure in channel confluences of rectangular section[C]//Proceedings of 25th IAHR Congress : part A. Madrid : International Association for Hydraulic Research ,1991 373-380.
- [38] BRADBOOK K F ,LANE S N ,RICHARDS K S ,et al. Role of bed discordance at asymmetrical river confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE 2001 ,127(5) 351-368.
- [39] HUANG J C ,WEBBER L J ,LAI Y G. Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2002 ,128(3) 268-280.
- [40] WANG Xiao-gang ,YAN Zhong-min ,GUO Wei-dong. Three-dimensional simulation for effects of bed discordance on flow dynamics at Y-shaped open channel confluences[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B 2007 ,19(5) 587-593.
- [41] 张挺 ,许唯临 ,伍平 ,等.90°明渠交汇口三维水力特性数值模拟[J].水利学报 2009 40(1) 52-59.
- [42] 冯镜洁 ,李然 ,王协康 ,等.河流交汇分离区特性研究 [J].水动力学研究与进展 :A 辑 2009 24(3) 320-325.
- [43] SHAKIBAINIA A ,TABATABAI M R M ,ZARRATI A R. Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences[J]. Canadian Journal of Civil Engineering ,2010 , 37(5) :772-781.
- [44] RICHARDSON W R ,THORNE C R. Multiple thread flow and channel bifurcation in a braided river : Brahmaputra-Jamuna River ,Bangladesh[J]. Geomorphology 2001 38 :185-196.
- [45] 余新明 ,谈广鸣 ,张悦 ,等.分汉河道水沙输移特征试验 [J].武汉大学学报 :工学版 2007 40(4) 9-11.
- [46] HUA Zu-lin , GU Li , CHU K J. Experiments of three-dimensional flow structure in braided rivers[J]. Journal of

- [47] 窦希萍, 窦国仁. 长江口全沙数学模型研究[J]. 水利水运科学学报, 1999(2): 136-145.
- [48] 龚政, 张长宽, 张东生, 等. 长江口正压、斜压诊断及斜压预报模式: 三维流场数值模拟[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 39-45.
- [49] 马钢峰, 刘曙光, 戚定满. 长江口盐水入侵数值模型研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2006 21(1): 53-61.
- [50] NICHOLAS A P, SMITH G H S. Numerical simulation of three-dimensional flow hydraulics in a braided channel[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(6): 913-929.
- [51] 余新明, 谈广鸣, 赵连军, 等. 天然分汊河道平面二维水流泥沙数值模拟研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(1): 33-37.
- [52] 张为, 李义天, 江凌. 长江三峡水库蓄水后长江中下游典型分汊浅滩河段演变趋势预测[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(4): 17-24.
- [53] 齐珏, 杨志峰, 熊明, 等. 长江水系武汉段水动力过程三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008, 23(2): 212-219.
- [54] 李克锋, 赵文谦. 分汊河段污染物扩散混合规律研究

[J]. 水资源保护, 1994, 10(1): 8-12.

- [55] 杨春平, 袁兴中, 曾光明, 等. 二维弯曲分汊河流水质数值计算[J]. 湖南大学学报, 1995, 22(2): 38-43.
- [56] 杨具瑞, 刘爱云, 方铎. 江心洲河段平面二维数值模拟[J]. 水利学报, 1998, 29(9): 71-74.
- [57] BIRON P M, RAMAMURTHY A S, HAN S. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2004, 130(3): 243-253.
- [58] 江帆, 陈维平, 陈敏, 等. 弯曲性分汊河道中污染物扩散性的初步研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(4): 30-32.
- [59] LEE M E, SEO I W. Analysis of pollutant transport in the Han River with tidal current using a 2D finite element mode[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2007, 1(1): 30-42.
- [60] 刘成, 李行伟, 韦鹤平, 等. 长江口水动力及污水稀释扩散模拟[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(5): 474-483.
- [61] 吴德安, 严以新, 谢锐. 徐六泾控制节点污染物运移轨迹模拟[J]. 海洋学报: 中文版, 2009, 31(3): 158-166.
- [62] 顾莉. 分汊河道污染物输移特性及纵向离散系数的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.

(收稿日期: 2010-09-16 编辑: 方宇彤)

(上接第 26 页)

b. 具有径向回流平衡孔的低比速离心泵与传统轴向回流平衡孔及无平衡孔结构相比, 能够有效地改善蜗壳隔舌处的压力脉动情况, 对叶轮进口处的压力脉动情况具有一定的改善, 但不是非常明显; 尽管蜗壳出口处的压力脉动幅值很小, 从相对值看径向回流平衡孔的低比速离心泵仍可有效改善蜗壳出口处的压力脉动。

c. 径向回流平衡孔的低比速离心泵蜗壳隔舌处在设计工况下的压力脉动最小, 偏离设计工况时其压力脉动值变大, 且小流量工况时的压力脉动大于大流量工况时的压力脉动; 叶轮进口处的压力脉动随流量的增大而减小, 蜗壳出口处的压力脉动幅值很小, 几乎不受工况变化的影响。

参考文献:

- [1] 丛国辉, 王福军. 双吸离心泵隔舌区压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 60-63, 67.
- [2] 王福军, 张玲, 张志民. 轴流泵不稳定流场的压力脉动特性研究[J]. 水利学报, 2007, 38(8): 1003-1009.
- [3] 刘厚林, 任芸. 双流道泵内压力脉动的 CFD 计算及测试[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(4): 277-281.
- [4] 祝磊, 袁寿其, 袁建平, 等. 阶梯隔舌对离心泵压力脉动和径向力影响的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2010, 41(S1): 21-26.
- [5] 郑源, 刘君, 周大庆, 等. 大型轴流泵装置模型试验的压

力脉动[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(1): 51-55.

- [6] 付宗甫, 严忠明, 周春天, 等. 双向进水流道模型脉动压力测试及其特性[J]. 中国农村水利水电, 2005(1): 88-91.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 161.
- [8] 陈红勋, 朱兵, 李随波, 等. 轴流泵模型多叶片安放角的数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 378-383.
- [9] 商威, 廖伟丽, 郑小波. 考虑流固耦合的轴流式叶片强度分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(4): 441-445.
- [10] 吴玉林, 刘树红, 钱忠东. 水力机械计算流体动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 139-140, 172.

(收稿日期: 2011-05-10 编辑: 高建群)

