

## 数字粒子图像处理技术及其在明渠交汇试验 研究中流速测量的应用

茅泽育<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 陈嘉范<sup>1</sup>, 黄继汤<sup>1</sup>

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

**摘要:** 为了克服传统的点测量方法无法获取明渠交汇口非恒定流场同部信息的缺陷, 本文应用PIV (Digital Particle Image Velocimetry) 数字粒子测速技术对明渠交汇口流场进行了实验研究。试验结果表明, 对于给定交汇口形状及尺寸, 分离区的大小主要随主支渠水流的流量比发生变化, 但其形状基本保持不变。说明DPIV测速方法可直观完整地测量非恒定流动, 且运算速度快, 是研究复杂流场的有效工具。

**关键词:** 数字粒子测速; DPIV; 交汇水流; 流速场; 互相关函数

中图分类号: TV133 文献标识码: A

明渠水流交汇存在于很多水力系统中, 从废水处理设施到渔道输水构筑物及许多水利设施, 因此对干、支流交汇问题的研究具有重要的理论与实际意义<sup>[1,2]</sup>。正确阐述明槽水流交汇混掺而产生的复杂流动现象具有相当的难度, 至今有关研究成果相对较少, 尤其是对于支主流汇合后, 在紧邻交汇口的下游分离区特性研究, 至今仍未有较为完善的研究结果。对于给定交汇口形状及尺寸, 分离区的大小与主支槽的流量相对大小有很大关系。由于边界几何形状的复杂性和存在自由水面, 目前, 明渠交汇口的水流特性绝大多数情况下, 很难由理论分析的方法解决。而且常常遇到的另一个难题是交汇口流动的非恒定性, 这给理论分析和数值模拟都带来较大的难度。在实验中, 传统的量测方法是点测量, 因而无法获得场的同步信息。实际上, 由于交汇口流动的复杂性, 理论分析上的困难和瞬时速度场、浓度场等全场同步信息的难以获得正是交汇水流研究所面临的两大难题。

图像测速技术应用于流体速度测量, 不仅能够直观地反映流动现象, 还能够定量地揭示流动规律; 能够进行多点同时量测, 迅速得到二维或三维速度场分布; 图像测速方法是非接触式测量, 不干扰流场。近年来, 随着电子技术、信号分析理论和图像处理技术的发展, 粒子成像测速技术得到了广泛应用<sup>[3,4]</sup>。图像信息处理和分析既有二维的, 也有三维的方法。在二维的方法中, 有PTV (Particle Tracking Velocimetry)、PIV (Particle Image Velocimetry) 和LSV (Laser Speckle Velocimetry) 以及许多改进的方法<sup>[5-7]</sup>。数字粒子图像测速DPIV (Digital PIV) 最大优点是可同时获得速度的大小和方向, 处理速度快, 可实现现场处理和实时处理。而应用光学PIV方法则需要一套光学诊问系统, 加上图像漂移技术, 整个实验系统相对较为复杂。DPIV方法其具体形式多种多样。本文采用以Willert提出的DPIV方法为基础, 对其进行改进从而增加了测速范围, 并应用这一DPIV技术对明渠交汇口流场进行了试验研究。

### 1 采用快速傅立叶变换 (FFT) 的DPIV测速技术

收稿日期: 2003-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50079008)

作者简介: 茅泽育 (1962-), 男, 浙江绍兴人, 副教授, 主要从事水力学及河流动水学研究。

DPIV测速技术是Willert提出的PIV的数字化方法。如图1所示,假设图像1和图像2分别是 $t_0$ 和 $t_0+\Delta t$ 时刻得到的两幅图像,分别在两幅图像的相应位置上开一个诊断窗口,在 $\Delta t$ 时间内,诊断窗口中的粒子有一个位移。窗口 $f(m, n)$ 可看作对系统的输入,而窗口 $g(m, n)$ 则是 $\Delta t$ 时刻后系统的输出。系统本身包含两个函数,位移函数 $s(m, n)$ 和附加的噪音函数 $d(m, n)$ 。 $d(m, n)$ 既包括图像本身的噪音,也包括粒子跑出诊断窗口而导致的噪音。这一噪音可在图像处理时加以消除<sup>[7]</sup>。

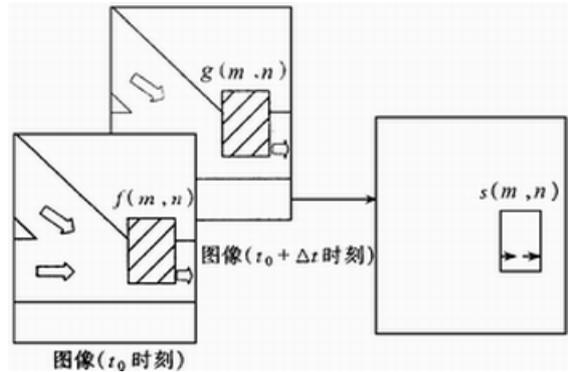


图1 随时间变化的数字化图像序列

按照信号分析的方法,忽略附加噪音,则图1中的数字化图像序列模型可转化为以下数学表达式<sup>[3]</sup>

$$g(m, n) = f(m, n) * s(m, n) \tag{1}$$

其中,“\*”表示两个函数的卷积。DPIV方法的关键就是要找到位移函数 $s(m, n)$ 。由卷积定理可得

$$G(U, V) \approx F(U, V) S(U, V) \tag{2}$$

其中 $G(U, V)$ ,  $F(U, V)$ 和 $S(U, V)$ 分别是 $g(m, n)$ 、 $f(m, n)$ 和 $s(m, n)$ 进行离散傅立叶变换的结果。由式(2)可得

$$S(U, V) \approx F^*(U, V) G(U, V) / |F(U, V)|^2 \tag{3}$$

其中 $F^*(U, V)$ 表示 $F(U, V)$ 的复共轭函数。对 $S(U, V)$ 作傅立叶逆变换,即得到位移函数 $s(m, n)$ 。只要检测到 $s(m, n)$ 的峰值位置,就可以获得粒子的位移,由于分析的对象是一个离散的二维信号场,对于式(3)来说,  $|F(U, V)|$ 只会改变 $s(m, n)$ 的大小(包括峰值的大小),而不会改变峰值的位置,因此,式(3)可简化为

$$\phi(U, V) = F^*(U, V) G(U, V) \tag{4}$$

只需对 $\phi(U, V)$ 作傅立叶逆变换,然后检测 $\phi(m, n)$ 的峰值,就可以得到粒子的位移。DPIV的整个运算过程如图2所示。由式(4)和相关定理可以看出,  $\phi(m, n)$ 为 $f(m, n)$ 和 $g(m, n)$ 的互相关函数,因此DPIV方法的实质就是检测 $f(m, n)$ 和 $g(m, n)$ 的互相关函数的峰值。

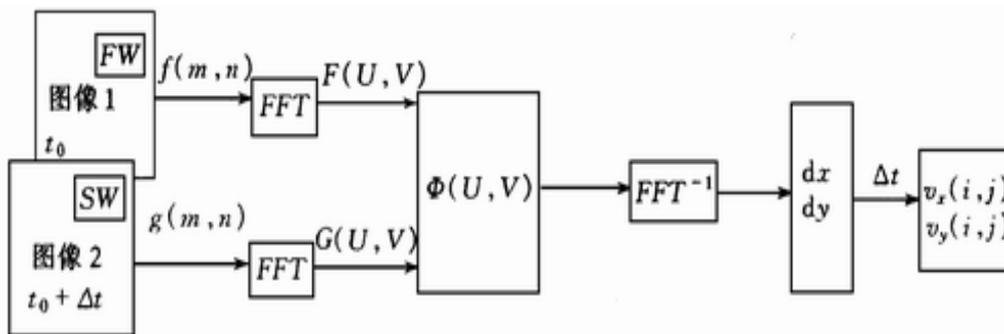


图2 DPIV数据采集及数据处理系统总框图

如前所述,数字化方法的处理对象是一系列随时间变化的数字化图像,对于这些序列图像的处理方法主要有傅立叶变换法和互相关方法<sup>[7]</sup>。目前对互相关方法的研究和应用相对较多,其基本原理是对连续两帧图像,在相应位置开设检测窗口,计算并检测两个窗口的互相关函数峰值,这一峰值的位置相对于某个固定点(如检测窗口的中心点)的位移和方向,即代表了窗口内粒子的平均位移和方向。Kimura由数学上的互相关函数定义出发,采用以下互相关函数 $\phi(m, n)$ 的计算方法对两帧图像之间作互相关分析:

$$\phi(m, n) = \frac{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f(k, l) g(k + m, l + n)}{\sqrt{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f^2(k, l) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} g^2(k, l)}} \quad (5)$$

显然, 采用式(5)计算互相关函数运算量巨大。Willert对上述互相关函数的计算曾进行了改进, 但是这两种方法和傅立叶变换法及其它一些改进的互相关计算方法, 在原理和运算上仍然都十分复杂。而对于DPIV方法, 由于采用了快速傅立叶变换FFT, 其运算速度得到了极大的提高。

根据Nyquist采样定理, Willert所采用的DPIV方法所能检测到的最大位移应当是诊断窗口边长的1/2, 但因为存在噪音和不匹配粒子, 这一最大位移只能达到窗口边长的1/3, 即诊断窗口边长必须大于最大位移的3倍, 否则将引起误检, 从而限制了DPIV技术的测速范围。传统的DPIV方法由于测得的速度是诊断窗口所有质点的平均速度, 因此很难增加诊断窗口的尺寸来克服测速范围限制<sup>[7]</sup>。

为了提高流速测量范围, 本文对DPIV算法进行了改进。以两幅图像的相应点为中心开两个不同大小窗口, 第一个窗口大小为M1×M2(32×32pixel), 第二个窗口大小为M2×M2(64×64pixel), 如图3所示。将较小窗口四周补零, 使其与较大窗口相同。只要两个窗口的相对位移不超过(M2-M1)/2, 小窗口总被完全包含在大窗口内, 粒子跑入或跑出诊断窗口不会造成不匹配粒子数增加。这样检测精度与位移大小无关, 仅与相关函数的计算精度有关。以第一幅图像中大小为M1的窗口和第二幅图像中以某一位置为中心所开M1大小的窗口为研究窗口, 计算这两个窗口灰度分布的相关函数, 得到的是一组没有归一化的相关系数。在进行归一化相关系数计算时, 第一个窗口灰度平方和开方出现在分母中, 不影响相关系数相对大小, 可不考虑其影响。以第一个窗口的中心在第二个窗口中相应的位置为中心, 在第二个窗口中开一个大小为M1的窗口, 按上述方法计算的值是第一幅图像中未补零的诊问窗口与此窗口的相关系数, 除此窗口内灰度平方的平均, 即完成归一化。

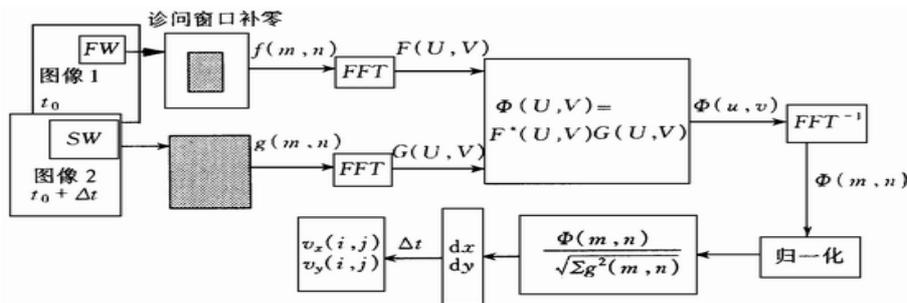


图3 DPIV改进算法流程图

最大测量位移可由下式估计:

$$V_{max} = 12(M2 - M1) + 13M1 \quad (5)$$

## 2 实验设备

交汇水流实验设备由水流循环系统、流量调节系统、量测系统及辅助设备组成, 干支槽交汇角  $\alpha = 30^\circ$ , 如图4所示。水流循环系统由两台四寸潜水泵、输水管路、汇流水槽以及蓄水库组成的半封闭自循环系统; 由潜水泵从尾水库提水进入输水管路, 然后分别注入量水堰箱(三角形薄壁堰箱和矩形薄壁堰箱), 并经实验水槽流回水库; 输水管路上装有控制节门, 可同时对汇流水槽的干、支槽水流流量进行调节控制。

在干槽和支槽入口处各装有三层多孔有机玻璃筛板，以起平水作用。试验汇流水槽由过渡段、交汇段及合流段组成，试验段有效长度为9m，其中交汇口以上有效长度为5m。水槽过流断面为矩形，宽 $B=0.25\text{m}$ ，高 $0.2\text{m}$ 。水深由测针量测得到(精度为 $0.1\text{mm}$ )。实验时在上游量水堰箱内撒示踪剂铝粉(球形固体粒子，直径 $d_p$ 为 $10\ \mu\text{m}$ ，密度 $\rho_p$ 为 $2.7\times 10^3\text{kg/m}^3$ )。下游水槽尾水水深由一个可调节的尾水闸门控制。

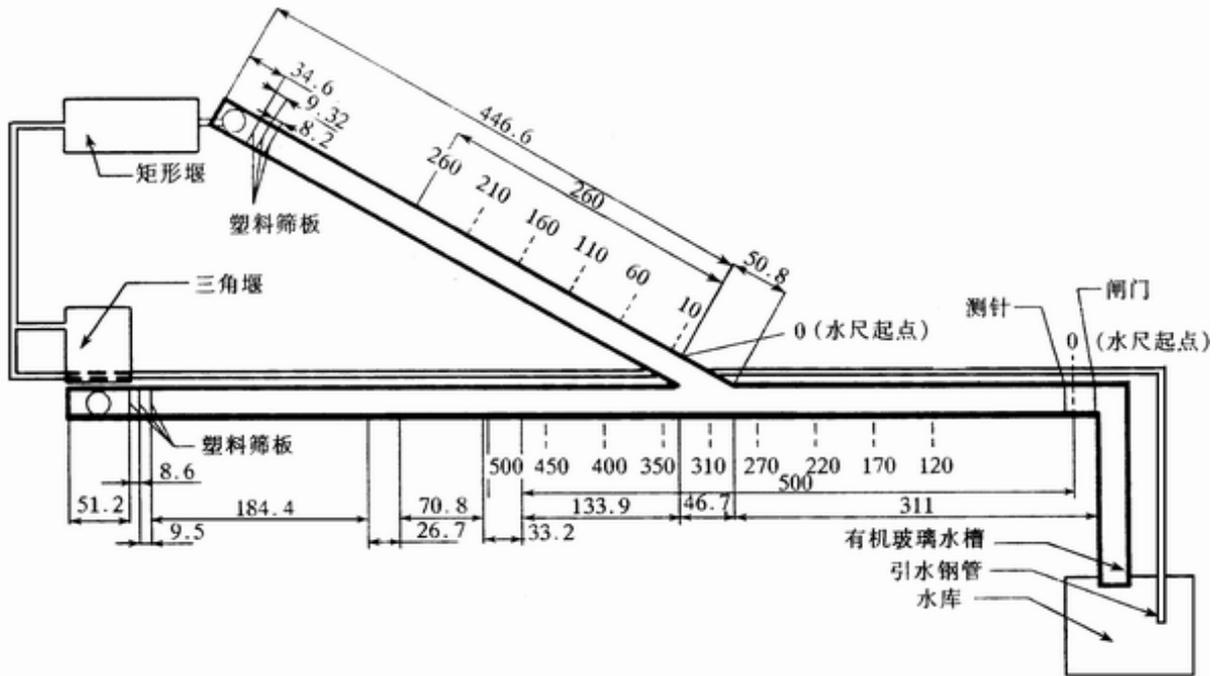


图4 交汇水流试验水槽平面

光路以及图像采集系统如图5所示。采用美国Coherent公司生产的INNIVA70系列的氩离子激光器，实验中使用的是单线模式下的绿光，绿光(510nm)的最大输出功率为1.5W，实验使用功率为1.2W；光束直径为1.5mm，片光厚度不超过2.0mm，输出激光光速为高斯分布；采用的半圆柱透镜直径为4.0mm，折射率为1.6。使用台湾敏通公司生产的MTV-1802黑白摄像机，分辨率为600线，最小照度为 $0.021\text{x}$ ，摄像速度为每秒25帧。镜头为日本精工公司生产的六倍手动三可变镜头，变焦范围为8.5~51mm。图像板为北京嘉恒中自图像技术有限公司生产的OKC30/S彩色和黑白两用图像采集卡，仅使用黑白图像处理功能。通过该图像卡可获得大小如下的数字化图像： $768\times 576(\text{pixel})$ ，本文图像分辨率为 $1.3\sim 1.4\text{mm}/\text{pixel}$ 。

### 3 水流交汇口流场测量结果

如图6所示，试验采用的坐标系原点0取在汇流口上游角A点底部(支槽一侧)；x轴正向指向干槽上游，流速为 $u$ ；y轴为槽宽方向，流速为 $v$ ；z轴铅垂朝上为正。最大干流流量 $Q_{u\text{max}}$ 和最大支流流量 $Q_{b\text{max}}$ 均为 $12\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ ，汇流比 $R_q = Q_b / (Q_u + Q_b) = 0.0\sim 1.0$ ，实验最大雷诺数 $Re_{\text{max}} = 49988$ ，最大佛汝德数 $F_{r\text{max}} = 0.382$ 。对测点坐标位置采用水槽宽度 $B$ 进行无量纲化，即 $x^* = x/B$ ， $y^* = y/B$ ， $z^* = z/B$ 。流速量测结果以下游断面平均流速 $V^d$ 进行无量纲化，即 $u^* = u/V^d$ ， $v^* = v/V^d$ 。使用DPIV测速技术对距槽底距离 $z^*$ 分别为0.24、0.18、0.12和0.06等4个平面进行了交汇口平面二维流场量测。

图6为根据试验结果给出的交汇口水流流动特征示意图。汇入主槽后，支流所具有的动量使得其水流进入主渠后从边壁分离，在邻近交汇口下游B点附近，靠支槽一侧的近壁区，形成低流速、低紊动强度、低压强的回流旋涡区(分离区)。分离区的尺寸大小随 $R_q$ 及 $z^*$ 而变。近水面的分离区内，水面呈极不规则的

扭曲面，并且低于同断面的外部水面。由于分离区存在，外部水流产生收缩现象，形成折偏干槽外侧边壁的收缩区。最大水流流速出现在收缩区内。由于主流与支流的相互作用，支流并非以  $(\theta + \beta)$  的角度汇入主流，而与支槽边壁方向存在一个角度  $\beta$ ，由于支流入射角  $\theta$  (主流流动方向夹角) 沿水深变化，分离区尺寸由水面至槽底也随着发生变化，近水面的分离区尺寸(包括长度和宽度)与近槽底的分离区相比显得较大些。水流通过收缩区(或分离区)后，流速分布恢复为典型的明渠流型态，近表面流速较大。

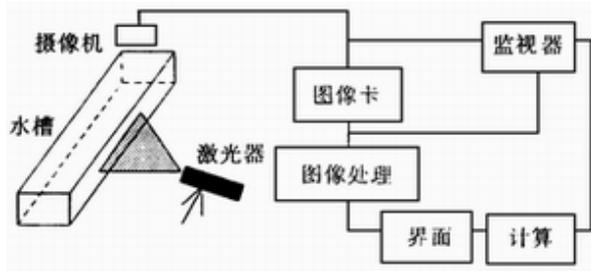


图5 光路及DPIV图像采集系统示意

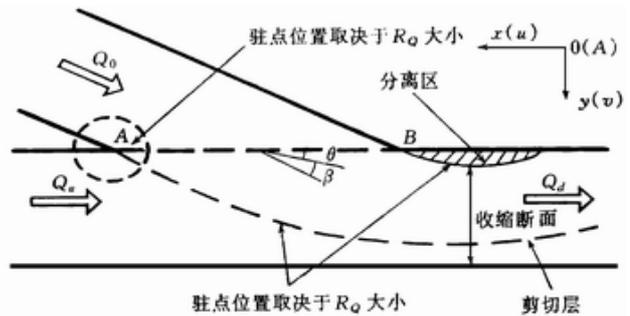


图6 交汇口水流流动特征

通过针对各种  $R_q$  的试验结果 ( $x$ - $y$  流速矢量场) 的研究分析，可以发现分离区的尺寸大小与  $R_q$  存在着密切关系。当流经交汇口的水流均来自干槽上游时，即  $R_q=0.0$ ，汇流口下游B点附近没有出现水流分离现象；当  $R_q$  较小时，主槽干流流经交汇口，速度矢量向水槽边壁的偏折程度较小，且距交汇口较短距离的下游断面，沿  $y$  方向水流流速很快变为均匀；随着  $R_q$  增大，汇入的支流流量及动量相对增加，使得支流在向下游方向折转之前向干流扩展掺入加剧，从而导致分离区尺寸(宽度和长度尺寸)增加，收缩区尺寸增大(水流收缩程度变得急剧)，汇流区内流速相对增加。同时，交汇口上游角A点附近的滞流点位置由支槽边壁逐渐移到主槽边壁上。

从试验结果看，一般来说，随着  $R_q$  增加，分离区尺寸随之增加。但试验结果发现，分离区尺寸变化存在极限情况。当  $R_q$  接近某一临界值时，这时，相对而言大量支流进入交汇口，直抵交汇口对面的水槽边壁，从而产生折射并脱离对壁，这一水力现象在B点下游很不稳定，从而缩短了分离区长度。这一水力现象在较大  $R_q$  时出现，在本实验中，只有  $R_q=0.931$  时显示了这一流动特征。以前的研究结果并没有提及这一现象，认为随着支渠水流增加，分离区尺寸将连续增大。

对于充分发展的水流，在汇入断面上，与底部流速相比，近表面支槽水流具有较大流速及较大的入射角  $\theta$ ，使得其入射动量相对于底部要大。由于支流上、下层水流入射动量及入射方向差异，形成不同的流速场、分离区及水流恢复区。通过对  $x$ - $y$  流速矢量场的研究分析发现，近水槽底部，由于主槽干流流动的收缩程度减小，并且支槽水流的入射角  $\theta$  减小，两股水流的流动方向趋近于一致，从而导致渠底附近出现较大流速。试验结果表明，当  $R_q$  减小时，支槽底部和表面水流在汇入断面上的入射角  $\theta$  之差减小。

图7给出了近水面及近槽底  $x$ - $y$  平面二维流速矢量场的流动图形。可以看出，在支流汇入主渠的入口断面上，支流在槽底和水面的汇入情况有所不同。在槽底附近，支流入射后明显向下游方向折偏，表明近槽底支流以较小入射角  $\theta$  汇入主槽，导致沿  $y$  方向的侧向输入动量减小，而表面水流则以较大入射角  $\theta$  进入主槽，因此槽底附近的水流分离区宽度比水面的分离区小。在  $x^*=-2.33$  断面附近，槽底附近的过流宽度约为槽宽的85%，而水面附近仅为槽宽的75%。将过流断面  $x^*=-2.00$  与  $x^*=-4.00$  间的分离区相比较，可以看出两者水面附近及槽底附近分离区长度相差较为明显。

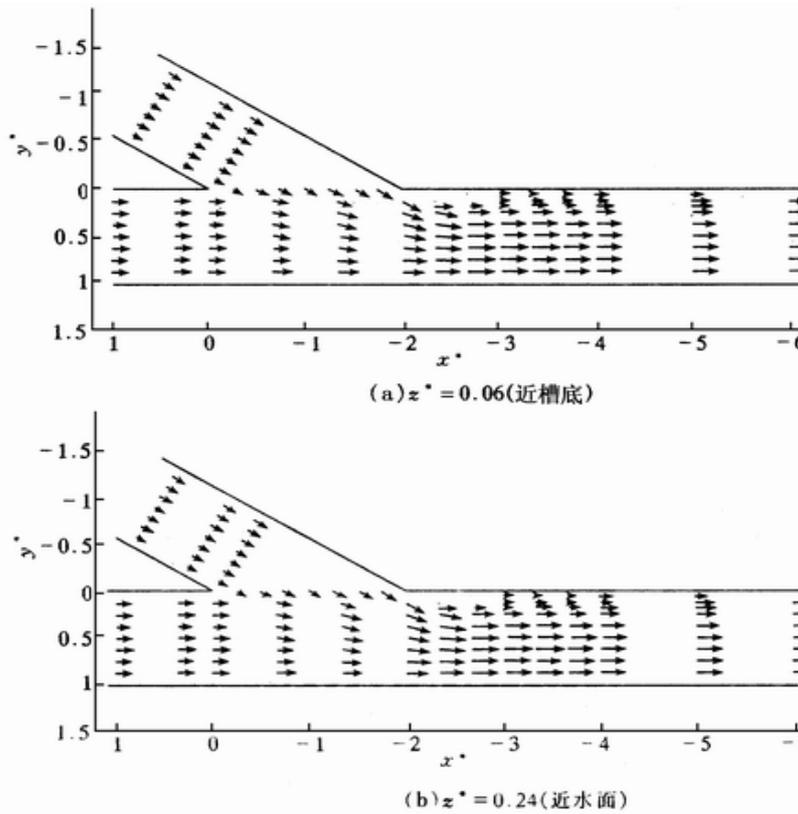


图7 x-y 平面流速矢量场 ( $R_Q=0.487$ )

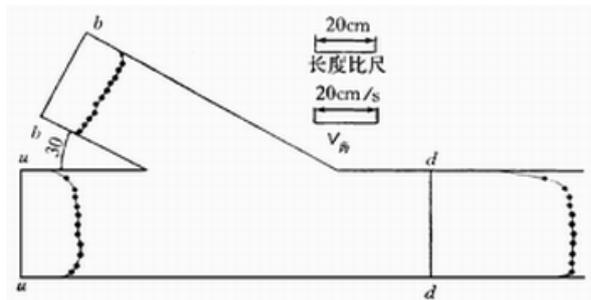


图8 垂线平均流速  $V_{Bj}$  横向分布

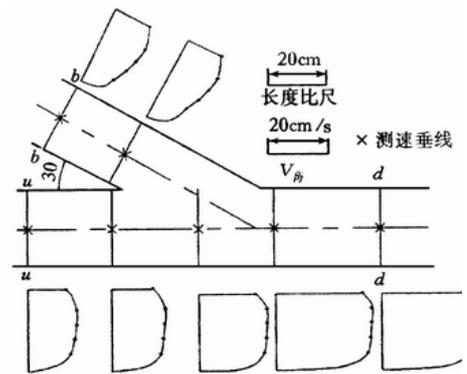


图9 断面中心垂线流速分布

图8给出了汇流口上下游3个过流断面上, 测速垂线平均流速  $V_{Bj}$  沿  $y$  方向的变化情况, 图9则给出了不同过流断面上  $y=B/2$  即中心测速垂线流速分布情况。可以看出, 水流流经交汇口, 干支流的过流断面逐渐减小, 导致水流平均流速增加。实验研究发现, 交汇口上游附近断面, 干支流水位近似相等, 均比下游水位高。在交汇口, 干支水流剧烈掺混及顶托使得在入口处上游发生壅水现象, 由壅水区过渡到下游准均匀流区存在一段调整距离, 上下游水面通过交汇口的跌水面线相衔接, 并且由交汇口水流掺混引起的水力因子变化的范围将延伸到交汇口以外一定区域。在交汇口下游, 因流线束窄使得下游水深并不简单地与  $Q_0$  相关, 这种水流的侧向收缩与无坎宽顶堰情形相类似, 因篇幅所限, 对这一问题的研究成果将单独给出。

#### 4 结语

对明槽水流交汇问题的研究具有重要的理论与实际应用意义。本文应用DPIV测速方法对交汇口瞬时流场进行了试验研究,并对其测速范围进行了改进,获得了良好结果。试验结果表明,交汇口附近的分离区尺寸大小与流量比 $R_0$ 有很大关系,并且沿水深方向发生变化,但其形状基本保持不变。

DPIV测速方法直观完整地反映水流流动特征,包括流速大小与方向,又具有运算速度快优点,是研究复杂流场的有效工具之一。为进一步提高测速精度,可采用高分辨率摄像机或采用小模型。若测量高速流体,可采用高速摄像机。此外,运用DPIV方法测量流场时,应尽可能使撒播的粒子在流场中均匀分布,粒子越均匀,测量的准确率越高。

致谢 李玉梁教授、博士研究生梁东方等在实验方案及测速技术等方面给予帮助与支持,在此一并表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] Wu R, Mao Z Y, She Y T, et al. Simulation of channel combining flow at 90 degree junction [C]. Proceedings of the 5th international conference on Hydrodynamics. 2002:333-338.
- [2] James L Best, Ian Reid. Separation zone at open channel junctions [J]. Journal of Hydraulic Engineering ASCE:1984,110(11):1588-1593.
- [3] Huang H T, Fiedler H E, Wang J J. Limitation and improvement of PIV Part I: Limitation of conventional techniques due to deformation of particle image patterns [J]. Experiments in Fluids, 1993, 15:168-174.
- [4] 李玉梁, 陈朝泉, 余常昭. 环境水力学实验研究中的图像处理技术 [J]. 应用基础与工程科学学报, 1993, 3(4): 420-436.
- [5] 唐洪武. 复杂水流模拟问题及图像测速的研究 [D]. 南京: 河海大学, 1996.
- [6] 田晓东, 陈嘉范, 李云生, 李玉梁. DPIV技术及其应用于潮汐流动表面流速的测量 [J], 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(1): 103-106.
- [7] 田晓东. DPIV技术和尾流区流场及污染物混合输移特性的研究 [D]. 北京: 清华大学, 1998.
- [8] 冬俊瑞, 黄继汤, 主编. 水力学实验 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.