

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.03.002

主支汇流比对交汇区域水流脉动特性影响试验

刘同宦^{1,2} 郭 炜¹ 詹 磊¹ 惠晓晓¹

(1. 长江科学院河流研究所 湖北 武汉 430010 ; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室 湖北 武汉 430072)

摘要 通过多组次水槽试验 ,应用 ADV 研究入汇角为 90°时不同汇流比水流条件下交汇区域的三维水流结构及其脉动特性。试验表明 :支流汇入后 ,将对主流上游水面产生顶托影响 ,使得主流水位不仅是各自流量的函数 ,还与主支流流量比大小有关。入汇口上游断面受影响范围很小 ,但下游断面受影响范围较大 ,越靠近入汇口一侧 ,受影响程度越大 ,影响范围接近入汇口下游收缩区外侧的剪切面。入汇口下游的主流边壁 (靠近入汇口一侧)的分离区附近水流脉动强度和雷诺应力均较大 ,回流现象很明显 ,水面呈现极不规则的扭曲面。入汇口下游主流右侧 (靠近分离区附近)在相对水深 $z^* = 0.2$ 附近处 , x 和 y 方向的脉动强度易出现极大值。

关键词 汇流 ; 交汇区域 ; ADV ; 脉动强度 ; 试验研究

中图分类号 :TV131.3+3 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)03-0006-03

Experiment on the influence of discharge ratio of main flow of tributary on flow fluctuation characteristics in confluence area/LIU Tong-huan^{1,2} , GUO Wei¹ , ZHAN Lei¹ , HUI Xiao-xiao¹ (1. River Institute , Yangtze River Scientific Research Institute , Wuhan 430010 , China ; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science , Wuhan University , Wuhan 430072 , China)

Abstract : Based on multiple flume experiments , the three-dimensional flow structure and its fluctuation characteristics in the confluence area , with different discharge ratios of the main channel to the tributary at junction angle 90° , are studied with ADV . The tests indicate that , beyond the confluence , the surface of the main channel upstream is influenced by the jacking action and the water level of the main flow , and tributary flow is correlated not only with each flow 's discharge but also with the discharge ratio . The influence range is quite small upstream of the entrance , and greater downstream . The influence is stronger nearer the entrance . The influence range approaches the shear plane near the side of entrance . In the distribution range downstream from the entrance (near the side of entrance) , both the turbulence intensity and Reynolds stress are greater , and the back flow is obvious , showing a very irregular warp surface . On the right-hand side of the main flow downstream from entrance (near the distribution range) , the turbulence intensity of x and y tend to reach their maximum values , while the relative water depth $z^* = 0.2$.

Key words : confluence ; confluence area ; ADV ; fluctuation intensity ; experimental study

受多种因素的影响 ,支流入汇区域的水流流动现象十分复杂。支流汇入后 ,将对主流上游水面产生顶托影响 ,使得主流水位不仅是各自流量的函数 ,还与主支流流量比大小有关^[1-6]。在汇流区和集流区的一部分水域内主流的水流急剧掺混 ,支流向主流方向挤压 ,在支流与主流的交界处紊动作用最强。在入汇口及交汇区域 ,水流现象、泥沙特征和河床形态都具有复杂多变的特点。由于主、支流流量过程的差异是影响入汇段水力特征的主要因素之一 ,为此 ,笔者通过多组次水槽试验重点研究 90°交汇区域不同主支汇流比下的三维流场及其脉动特性。

1 试验概况

试验设备由流量调节系统、水流循环系统、量测及其辅助设备组成。槽首设置阀门及静水沉池 ,在水槽上安置测量支架 ,以测量水流特征要素 ,下游水位由可调尾门控制。水深由测针量测得到 ,流速采用声速多普勒测速仪 (ADV) 测量。试验采用的坐标系及测速断面和垂线布置见图 1 ,图中 x 轴正向为主流水流方向 , y 轴正向为槽宽方向 , z 轴正向为水深方向。主流、支流及入汇口下游流量分别用 Q_m , Q_b 和 Q_t 表示 ,则 $Q_t = Q_m + Q_b$ 。定义汇流比 $q^* =$

Q_b/Q_t 即支流入汇流量与入汇后主流流量和的比值来描述主流流量过程的差异。试验水槽主流尺寸为 $30\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高,下同),支流尺寸为 $5.5\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 。为了研究入汇口三维流场情况,对主流 M1 号 ~ M11 号共 11 个过流断面应用 ADV 进行流速测量,每个测流断面上选取 Line 0.05 ~ Line 0.55 共 6 条测速垂线,其中垂线 Line 0.05 是紧邻支流入汇口对测,而 Line 0.55 是紧邻支流入汇侧,其余垂线依次间隔 10 cm 布置。

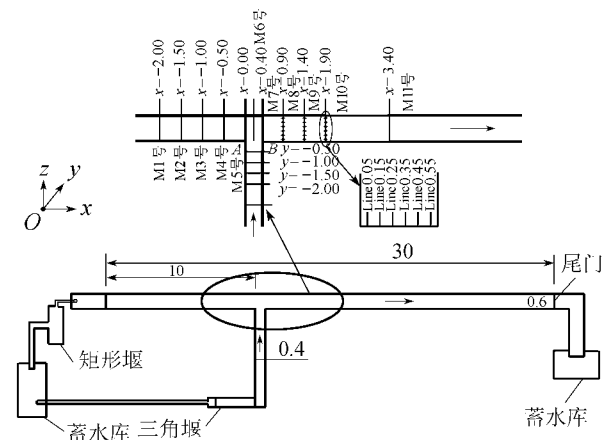


图 1 试验水槽与测量断面布置示意图(单位:m)

ADV 测速技术以声学多普勒效应为基础,利用向水体中发射的声波被水体的固体微粒子或气泡散射时所产生的频率差,并经 ADV 采样和由电子仪器来度量频率的变化,从而计算出控制体中的三维水流速度,实现实时三维流速测量^[7]。试验中对于瞬时流速测量的采样频率采用 25 Hz ,每个点采样时间为 20 s ,即对单个测点而言每次采样共获取约 500 个数据,速度范围选用 $\pm 250\text{ cm/s}$ 。各组试验参数见表 1。

表 1 支流入汇水流试验组次参数

试验组次	主流			支流			Q_b/Q_t (L/s^{-1})	q^*
	槽宽 B/m	底坡降 $J/\%$	$Q_m/$ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	槽宽 b/m	底坡降 $i/\%$	$Q_b/$ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)		
No. 1	0.60	0.1	81.6	0.40	0.1	14.4	96.0	0.15
No. 2	0.60	0.1	72.0	0.40	0.1	24.0	96.0	0.25
No. 3	0.60	0.1	62.4	0.40	0.1	33.6	96.0	0.35
No. 4	0.60	0.1	55.7	0.40	0.1	40.3	96.0	0.42

2 试验结果分析

2.1 交汇区域水流特征

试验表明,在交汇区域由于主支水流相互顶托作用,在入汇口上游主流产生一定程度的壅水,在交汇区产生急剧掺混,在入汇口下游主流靠支流侧壁处形成回流分离区,主流流向受支流侧向来流影响产生相对侧偏移,造成过流断面收缩。当汇流比 q^* 为零(无支流入汇)时,入汇口下游不会出现水流分离现象。当汇流比 q^* 较大时,支流的汇入对主

流的顶托作用很强,入汇口下游水流流态变化很大。随着 q^* 的减小,支流流量及动量相对减弱,导致分离区尺寸(包括长度和宽度)减小,水流收缩程度减小。当 $q^* = 0.15$ 时,分离区表面最大宽度约占主流槽宽的 13% ;当 $q^* = 0.42$ 时,分离区表面最大宽度约占主流槽宽的 47% 。

2.2 交汇区域脉动强度特征

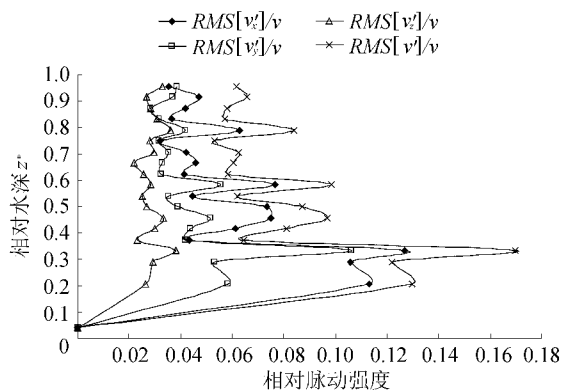
脉动强度是紊流最重要的动力特征量之一,一般定义脉动流速的均方根为紊流强度,其中脉动流速的均方根与其对应的瞬时流速的均方差(即标准偏差)是相等的^[8-11]。各方向脉动强度 $RMS[v_i']$ 计算公式如下:

$$RMS[v_i'] = \sqrt{\overline{(v_i')^2}} = \sqrt{\frac{\sum v_i'^2 - (\sum v_i)^2/n}{n-1}}$$

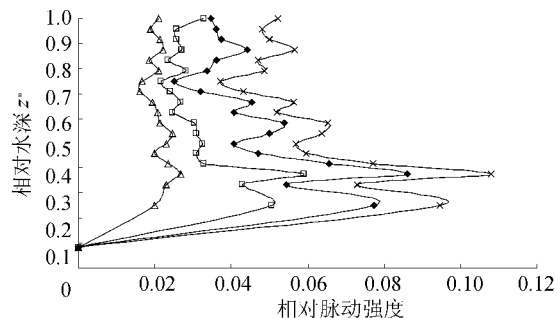
式中: $RMS[v_i']$ 为各方向脉动强度值, $i = x, y, z$; n 为样本数; v_i' 为各方向脉动流速; v_i 为瞬时流速平均值。以垂线平均流速 v 作为分母将脉动强度转化为无量纲数,同时绘制该无量纲数随相对水深 z^* ($z^* = z/h$) 的变化曲线,见图 2 和图 3。

图 2 是不同汇流比时,入汇口上游断面 M5 号部分垂线的相对脉动强度沿相对水深的分布曲线。试验结果表明,随着 q^* 的增大,入汇口上游断面 x, y 和 z 方向的脉动强度沿水深的分布趋势很接近,大小也很接近; x 方向的脉动强度略大于 y 方向的脉动强度,各条垂线上 z 方向脉动强度的分布趋势和大小很接近。就整个断面而言,3 个方向的脉动强度随水深的变化不大,靠近入汇口一侧垂线的值大于入汇口对侧的值,这也表明支流的汇入虽使得入汇口上游断面产生一定程度的壅水但其掺混影响不大,离入汇口较远的断面水流脉动强度几乎没有影响。

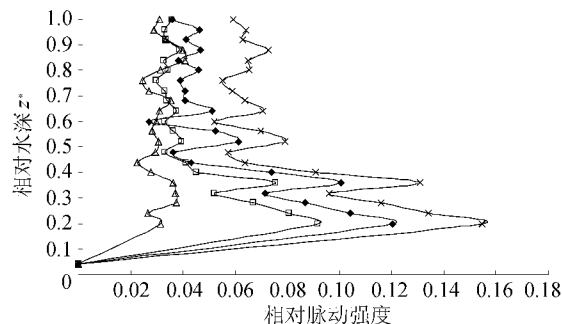
图 3 是入汇口及其下游 M7 ~ M9 号断面的水流相对脉动强度沿相对水深的分布曲线。试验表明:入汇口对侧主流边壁的垂线(Line 0.05 ~ Line 0.35)在近底处的水流脉动强度特征和入汇口主流上游断面的脉动特征很接近, x 和 y 方向的脉动强度趋于同性, x 方向的值略大于 y 方向的值,但随着水深加大, x 和 y 方向的脉动强度迅速达到极大值,其中部分垂线的 y 方向的脉动强度反而比 x 方向的脉动强度大。靠入汇口一侧主流边壁分离区附近(Line 0.45 ~ Line 0.55)各垂线的脉动强度随水深的分布呈 S 形,S 形曲线的转捩位置相对水深 z^* 值随着不同的水流特征及床面特性具有不同的变化。各方向的脉动强度开始随水深迅速增大,在 $z^* = 0.2$ 附近达到峰值,然后又减小,直至 $z^* = 0.6$ 附近又开始增大,但增加幅度不是很大,表明近底水流脉动很强



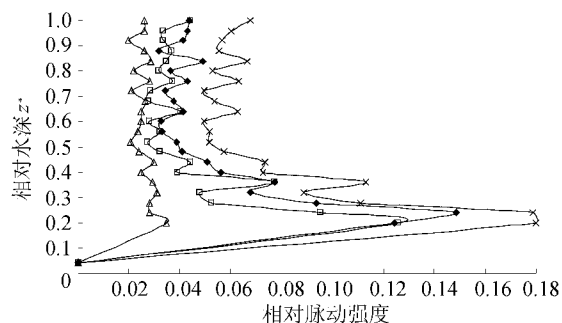
(a) No.1 $q^*=0.15$ M5号(Line0.35)



(b) No.2 $q^*=0.25$ M5号(Line0.15)



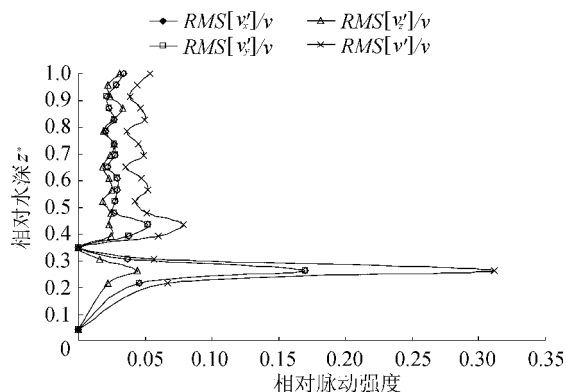
(c) No.3 $q^*=0.35$ M5号(Line0.35)



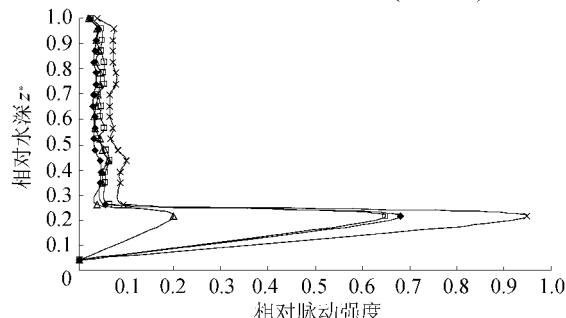
(d) No.4 $q^*=0.42$ M5号(Line0.15)

图2 不同汇流比时入汇口上游断面部分垂线上
相对脉动强度沿相对水深的分布

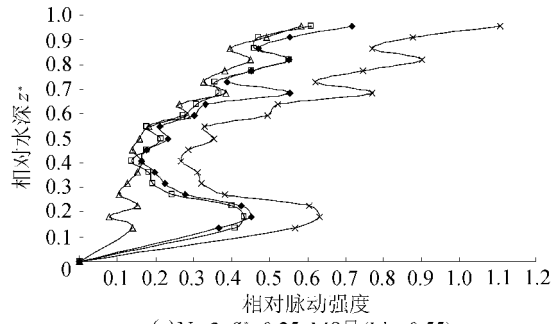
烈。由于横向和垂直方向水流掺混作用的加强,使得该区域 z 和 y 方向的脉动强度均大于 x 方向的脉动强度,尤其是近底 z 方向的脉动强度值约是 x 方向的 10 倍。已有的研究成果表明,在单一明渠中,边壁处因受空间的限制脉动强度为零,离边壁稍远处脉动强度迅速增大达到峰值。在本文试验中也观测到在入汇口下游主流右侧(靠近分离区附近)处,当 $z^*=0.2$ 附近时 x 和 y 方向的脉动强度会出现极



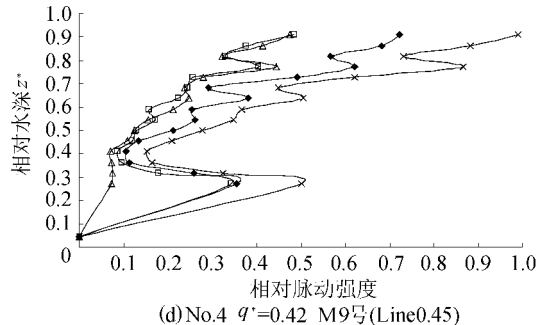
(a) No.2 $q^*=0.25$ M7号(Line0.25)



(b) No.3 $q^*=0.35$ M7号(Line0.45)



(c) No.2 $q^*=0.25$ M9号(Line0.55)



(d) No.4 $q^*=0.42$ M9号(Line0.45)

图3 不同汇流比时入汇口及其下游断面部分垂线上
相对脉动强度沿相对水深的分布

大值。

3 结 论

a. 入汇口上游断面受影响范围很小,但下游断面影响范围较大,越靠近入汇口一侧受影响程度越大,影响范围接近入汇口下游收缩区外侧的剪切面。入汇口下游的主流边壁(靠近入汇口一侧)的分离区附近水流脉动强度和雷诺应力均较大,回流现象很明显,水面呈现极不规则的扭曲面。(下转第 40 页)

表 4 测试样本诊断结果

故障类型	RBF 神经网络方法诊断结果			VPRS-RBF 神经网络方法诊断结果		
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 1	样本 2	样本 3
转子不平衡	0.5862	0.1304	0.1072	0.7991	0.1001	0.0988
转子弓形弯曲	0.1889	0.0917	0.0975	0.0257	0.0989	0.1189
轴承间隙过大	0.1011	0.0870	0.0998	0.1123	0.0997	0.1052
尾水管偏心涡带	0.0995	0.8955	0.1000	0.0961	0.9000	0.1001
卡门涡列	0.1002	0.1002	0.1001	0.0339	0.1017	0.0719
磁极不均匀	0.2871	0.0963	0.8819	0.2618	0.1001	0.8984
转子匝间短路	0.1427	0.0991	0.1035	0.1616	0.0994	0.1101
转子不对中	0.0944	0.0998	0.1000	0.1096	0.1002	0.0967

4 结 语

笔者研究了 VPRS 在处理水电机组故障诊断数据中的应用,并将其与神经网络方法相结合进行故障诊断。在 VPRS 预处理数据时通过设定阈值参数 β ,可以克服经典粗糙集模型对数据噪声过于敏感的缺点。通过对水电机组振动故障实例进行诊断分析,表明了该诊断方法可以有效地简化神经网络的规模和结构,克服了传统神经网络方法处理高维数据时网络结构复杂的不足,并增强了对含噪声数据分析和处理的鲁棒性,具有更高的容错性和诊断能力。

参考文献:

[1] 符向前,刘光临,蒋劲. BP 神经网络在水轮发电机组状态监测与诊断系统中的应用[J]. 武汉大学学报 :工学版,2002,35(1) :24-28.

[2] 贾嵘,白亮,罗兴,等. 基于神经网络的水轮发电机组振动故障诊断专家系统[J]. 水力发电学报,2004,23(6) :120-123.

[3] 杨晓萍,南海鹏,张江滨. 信息融合技术在水轮发电机组故障诊断中的应用[J]. 水力发电学报,2004,23(6) :111-115.

(上接第 8 页)

b. 入汇口上游主流断面在 $z^* = 0.2$ 处水流脉动强度沿 y 方向分布很均匀,峰值很小;而入汇口及其下游主流断面在 $z^* = 0.2$ 处各方向的水流脉动强度沿 y 方向变化很大,靠近入汇口一侧(垂线 Line0.45 ~ Line0.55 附近) x 和 y 方向的水流脉动强度值很大,远离入汇口处垂线的水流脉动强度又变小并趋于稳定。

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.

[2] 徐孝平,彭文启.直角交汇河段流场特性分析[J]. 水利学报,1993,24(2) :22-31.

[3] 吴迪,郭维东,刘卓也.复式断面河道“Y”型交汇河口水流水力特性[J]. 水利水电科技进展,2007,27(3) :21-23.

[4] 张光碧,邓军,张法星,等. VOF 模型在有支流汇入的河

[4] 朱明星,张德龙. RBF 网络基函数中心选取算法的研究[J]. 安徽大学学报,2000,24(1) :72-78.

[5] 葛强,徐俩俩,仇宝云,等. 基于 RBF 人工神经网络的电动机振动故障诊断[J]. 河海大学学报 :自然科学版,2008,36(6) :842-845.

[6] 丁晓群,蔡志慧. 人工神经网络在电力系统中的应用与研究现状[J]. 水利水电科技进展,1996,16(4) :12-16.

[7] PAWLAK Z. Rough sets theory and its applications to data analysis[J]. Cybernetics and Systems,1998,29,661-668.

[8] AN A,SHAN N,CHAN C,et al. Discovering rules for water demand prediction :an enhanced rough-set approach [J]. Engineering Application and Artificial Intelligence,1996,9(6) :645-653.

[9] 王荣荣. 基于变精度粗糙集与神经网络的水电机组振动故障诊断研究[D]. 西安 :西安理工大学,2007.

[10] 代建华,李元香. 粗糙集理论中基于遗传算法的离散化方法[J]. 计算机工程与应用,2003(8) :13-14.

[11] 陈纯毅,崔广才. 基于变精度粗糙集模型的属性约简方法研究[J]. 长春理工大学学报,2005,28(3) :52-54.

[12] 陶志,许宝栋,汪定伟,等. 基于遗传算法的粗糙集知识约简方法[J]. 系统工程,2003,21(4) :116-122.

[13] 梁武科,罗兴,张彦宁,等. 水力发电机组振动故障诊断系统中的信号预处理[J]. 水力发电学报,2003,22(3) :114-120.

(收稿日期 2008-10-13 编辑 骆超)

道复杂流场中的应用[J]. 河海大学学报 :自然科学版,2007,35(5) :592-595.

[5] WEBER L J,SCHMNATC E D,MAWER N. Experiments on flow at a 90° open-channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,2001,127(5) :340-350.

[6] 茅泽育,罗昂,罗日升,等. 矩形断面压力管道汇流口局部能量损失[J]. 水利水电科技进展,2006,26(3) :62-66.

[7] 肖洋,唐洪武,毛野,等. 新型声学多普勒流速仪及其应用[J]. 河海大学学报 :自然科学版,2002,30(3) :15-18.

[8] 王协康,杨青远,王宪业,等. 卵砾石床面时均流速分布的试验研究[J]. 四川大学学报 :工程科学版,2007,39(2) :14-19.

[9] 刘同官,郭炜,王协康,等. 入汇角为 30°时交汇区水流结构水槽试验研究[J]. 长江科学院院报,2007,24(4) :75-78.

[10] 刘艾明,徐海涛,卢金友. 矩形水槽水流紊动特性分析[J]. 长江科学院院报,2006,23(1) :12-15.

[11] 吕升奇,唐洪武,闫静. 有无植物条件下明渠水流紊动特性对比[J]. 水利水电科技进展,2007,27(6) :64-68.

(收稿日期 2008-07-15 编辑 骆超)