



# 阶梯形丁坝区明槽紊流脉动流速的空间相关结构\*

赵紫辰<sup>1</sup>, 钟 亮<sup>1,2</sup>, 葛晨曦<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;  
2. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 阶梯形丁坝在航道整治中应用广泛, 脉动流速的空间相关结构是紊流相干结构的重要组成部分, 可有效反映阶梯形丁坝区的流场特性。基于阶梯形丁坝区明槽紊流 PIV 流场测试资料, 分析阶梯形丁坝区脉动流速空间自相关结构与互相关结构的分布特性, 研究脉动流速空间相关结构沿主流、水深及槽宽方向的变化规律。结果表明: 纵向脉动流速自相关系数  $C_{uu}$  与垂向脉动流速自相关系数  $C_{vv}$  均为正值; 自相关系数在 0.3~0.9 区间内的等值线, 其分布范围随着水深增加而减小, 随着与丁坝距离的增大而增大; 近坝区纵、垂向脉动流速互相关系数  $C_{uv}$  与垂、纵向脉动流速互相关系数  $C_{vu}$  云图在丁坝下游约一级丁坝坝长范围内出现基本对称的正负分区现象; 一级丁坝附近  $C_{uv}$  及  $C_{vu}$  云图中相关性较强的等值线分布范围在近坝区较大而水槽中心较小; 水槽中心附近, 脉动流速空间互相关系数绝对值较大的等值线基本分布在二级丁坝上方,  $C_{uv}$  为正,  $C_{vu}$  为负。

**关键词:** 阶梯形丁坝; 明渠紊流; 脉动流速; 空间相关性

中图分类号: TV 143.5; U 617.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0145-07

## Spatial correlation structure of turbulent flow velocity fluctuations of step-shaped spur dike area in open channel

ZHAO Zi-chen<sup>1</sup>, ZHONG Liang<sup>1,2</sup>, GE Chen-xi<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Step-shaped spur dike is widely used in channel regulation. As one of the important coherent structures of turbulence, the spatial correlation structure of velocity fluctuations can effectively reflect the flow field characteristics around step-shaped spur dike area. Based on PIV test data of turbulent flow of step-shaped spur dike area in open channel, the distribution characteristics of spatial auto-correlation and cross-correlation structure of velocity fluctuations in step-shaped spur dike area are analyzed, and the variation of two-point spatial correlation structures of velocity fluctuations along streamwise, wall-normal and spanwise are studied. The results show that the auto-correlation of the streamwise velocity fluctuations  $C_{uu}$  and the auto-correlation of the wall-normal velocity fluctuations  $C_{vv}$  are both positive. The value of the autocorrelation coefficient is in the interval of 0.3 to 0.9, the distribution range decreases with the increase of water depth, and increases with the increase of the distance from the step-shaped spur dike. The cloud map of the cross-correlation coefficient of streamwise and wall-normal velocity fluctuations  $C_{uv}$  and the cross-correlation coefficient of wall-normal and streamwise velocity fluctuations  $C_{vu}$  in the

收稿日期: 2022-02-18

\*基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0278)

作者简介: 赵紫辰(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

near dike area has a basically symmetrical positive and negative partition phenomenon within the length of the first-level spur dike downstream of the spur dike. The distribution range of contour lines with strong correlation in the cloud map of  $C_{uv}$  and  $C_{vu}$  near the first step-shaped spur dike is larger in the area near the dike and smaller in the center of the flume. Near the center of the flume, the contour lines with the larger absolute value of the spatial cross-correlation coefficient of the velocity fluctuations are basically distributed above the secondary spur dike,  $C_{uv}$  is positive,  $C_{vu}$  is negative.

**Keywords:** step-shaped spur dike; open channel turbulence; velocity fluctuations; spatial correlation

阶梯形丁坝在航道整治中应用广泛<sup>[1-2]</sup>，如长江上游九龙坡一朝天门河段航道整治工程中，为增加枯水期航槽冲刷和减小洪水期行洪影响，采用了考虑多级整治水位的阶梯形丁坝<sup>[3]</sup>。受多级丁坝共同束流作用影响，阶梯形丁坝水流结构复杂，并可能对丁坝局部冲刷和长期服役带来一定影响。因此，开展阶梯形丁坝水流结构研究具有重要的工程实用价值。

丁坝修建后，改变了局部水流流态，坝体尾部漩涡的产生、分离将使水流表现较强的紊动特性，紊流瞬时流速受水流质点随机脉动的影响较大。根据水流流速的雷诺分解方法，瞬时流速可分解为时均流速和脉动流速，其中时均流速结构决定着水流造床作用，而脉动流速结构与水流动量交换、泥沙颗粒悬浮及紊流形成机理等问题关系密切。研究显示，脉动流速的空间相关结构可有效反映水流结构特征和定量表征水流紊动特性，如张训时等<sup>[4]</sup>通过研究明渠水流纵向脉动流速空间相关系数的变化规律，发现空间相关系数随测点间距的增大而减小；王龙等<sup>[5]</sup>应用高频粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV) 获得光滑床面明渠紊流的瞬时流场，分析脉动流速的时空相关特性；Kim 等<sup>[6]</sup>、王浩等<sup>[7]</sup>探讨光滑床面明渠紊流近壁区脉动流速的条带结构，获得低速条带的间距和宽度；Nakagawa 等<sup>[8]</sup>采用时空相关分析方法研究明渠水流猝发运动的结构特征，提出解释猝发现象时空相关关系的定性模型；Sullivan 等<sup>[9]</sup>利用热线靶测量三维壁面射流的瞬时流速，阐明脉动流速结构的时空相关特性；Christensen 等<sup>[10]</sup>通过分析纵向流速分量和旋转强度之间的相关性获得壁面

紊流中发夹涡群的统计特征；Liu 等<sup>[11]</sup>根据纵向和垂向两个流速分量的两点空间相关性，分析明渠紊流大尺度相干结构的输运机理；Sillero 等<sup>[12]</sup>从空间两点相关函数的角度出发，对流场平均三维组织结构进行讨论；张建梅等<sup>[13]</sup>基于 PIV 水槽明渠均匀紊流试验资料，研究床面加糙对脉动流速空间结构的影响；Matsubara 等<sup>[14]</sup>通过分析弯道湍流的两点相关性和积分尺度，获得大尺度涡在弯道内的产生与发展规律；Ozkan 等<sup>[15]</sup>的研究表明，脉动流速的空间相关结构可很好地反映构筑物周围湍流平均流动结构的尺寸和强度。综上所述，目前阶梯形丁坝区明槽紊流脉动流速结构的研究较少，缺乏基于全场瞬时流速资料的脉动流速空间相关结构分析。

本文基于瞬时流场资料，研究阶梯形丁坝区脉动流速空间相关结构的特征，探讨脉动流速空间相关性沿主流、水深及槽宽方向的变化规律。研究成果可为阶梯形丁坝结构形式的优化及丁坝水毁保护提供支撑。

1 水槽试验

1.1 试验装置

试验在重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心进行，高精度整体变坡水槽长 12 m、宽 0.25 m、高 0.25 m，水槽侧面和底部均由 3.6 m 长的有机玻璃板组成，玻璃安装误差小于 0.2 mm，水槽结构变形小于 0.3 mm，水槽入口设置整流格栅，出口设置合页式尾门 (图 1)。试验时将丁坝安置于水槽左边壁，距水槽入口 8 m、出口 4 m，进口段长度满足紊流充分发展要求，出口

段长度满足消除尾门对水流影响的要求<sup>[16]</sup>。采用阶梯形丁坝, 一级丁坝长  $l_1=9\text{ cm}$ 、高  $h_1=3\text{ cm}$ ; 二级丁坝长  $l_2=4.5\text{ cm}$ 、高  $h_2=2\text{ cm}$ , 阻水面积为  $36\text{ cm}^2$ 。坐标系  $x$  轴方向为流向(坝轴线为零点, 上游为负, 下游为正)、 $y$  轴方向为垂向(槽底为零点)、 $z$  轴方向为横向(水槽左边壁为零点), 分别采用一级丁坝坝长  $l_1$ 、水深  $h$ 、槽宽  $b$  进行无量纲化处理, 得到沿程相对位置参数  $x^+$ , 沿水深相对位置参数  $y^+$ , 沿槽宽相对位置参数  $z^+$ , 试验布置见图 2。

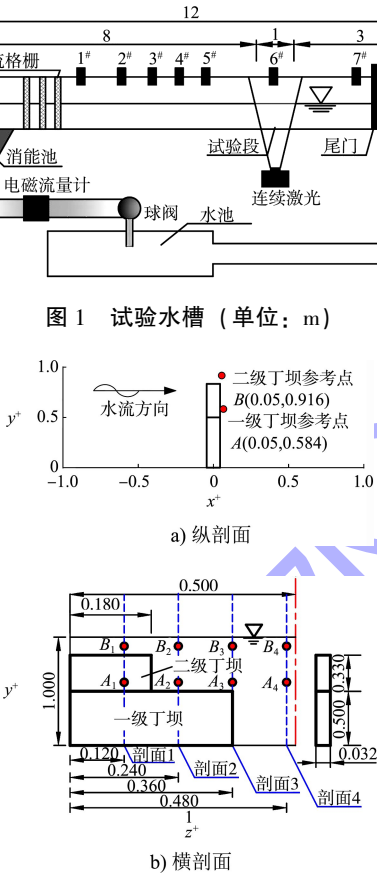


图 1 试验水槽 (单位: m)

图 2 试验布置

1.2 试验参数

开展明渠恒定均匀流试验, 试验参数结合水槽情况确定, 试验流量  $Q=5\text{ L/s}$ , 断面平均流速  $u_m=30\text{ cm/s}$ , 尾门水深  $h=6\text{ cm}$ , 底坡  $i=0.005$ , 雷诺数  $Re=11\,840$ , 弗劳德数  $Fr=0.435$ 。

1.3 流场采集

试验流量采用电磁流量计测量, 测量精度  $0.4\%$ , 采样频率为  $10\text{ Hz}$ ; 试验水深采用精度  $0.1\text{ mm}$  的水位测针 ( $1^\#\sim7^\#$ ) 测量; 水槽底坡通过

转轴调节, 坡度调整范围  $0.1\%\sim1.0\%$ 。

沿  $y$  轴由水槽左边壁向水槽中心等间距布置 4 个测量剖面(图 2)。应用二维高频 PIV 系统进行流场采集, 该系统主要由高频电荷耦合器件 (CCD) 相机、8W 半导体连续激光和 PIV 流场计算软件组成; 激光束经棱镜转变为  $45^\circ$  角的片光, 片光源从水槽玻璃底板进光, 可穿透床面玻璃珠颗粒; 相机像素  $2\,560\times1\,920$ , 采样频率最高为  $2\,500\text{ Hz}$ , 感光度可达  $3\,000\text{ ISO}$ 。试验采用的采样频率  $800\text{ Hz}$ , 各剖面的样本容量均为  $6\,084$  个 ( $12\,168$  帧流场图像)。PIV 流场计算采用多重网格迭代图像变形算法 (WIDIM), 最小诊断窗口  $256$  像素,  $x$  与  $y$  方向网格重叠系数为  $50\%$ , 得到计算流场最终分辨率为  $64$  像素。示踪粒子采用中值粒径约  $10\text{ }\mu\text{m}$ 、密度  $1.03\text{ g/cm}^3$  的空心玻璃球, 具有反光性好、跟踪性强且密度与流体相近等特征。将示踪粒子均匀地散布在流场中, 采用 CCD 相机对测量窗口进行连续 2 次图像采集, 根据图像采集时间间隔和示踪粒子通过位移, 可获得对应的粒子速度。

2 结果分析

2.1 分析方法

从脉动流速的自相关结构和互相关结构两方面, 探讨阶梯形丁坝区紊流流场的空间分布特性。

令参考点坐标为  $(x_0, y_0)$ , 其周围空间点也即分析点坐标为  $(x_1, y_1)$ , 可以求出参考点与分析点之间的空间自相关系数  $C_{uu}$ 、 $C_{vv}$  和互相关系数  $C_{uv}$ 、 $C_{vu}$ , 计算公式见式 (1)~(4), 进一步可以绘制出  $C_{uu}$ 、 $C_{vv}$  和  $C_{uv}$ 、 $C_{vu}$  的二维空间分布图。为便于描述二维空间分布图特征, 定义参考点与分析点间距离为  $d$ 。根据阶梯形丁坝区的流场特征, 选取包括一级丁坝上方特征点 ( $A_1, A_2, A_3, A_4$ ) 和二级丁坝上方特征点 ( $B_1, B_2, B_3, B_4$ ) 作为参考点 (图 2)。

$$C_{uu} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i(x_0, y_0) u_i(x_1, y_1)}{u'(x_0, y_0) u'(x_1, y_1)} \tag{1}$$

$$C_{vv} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i(x_0, y_0) v_i(x_1, y_1)}{v'(x_0, y_0) v'(x_1, y_1)} \tag{2}$$

$$C_{uv} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i(x_0, y_0) v_i(x_1, y_1)}{u'(x_0, y_0) v'(x_1, y_1)} \tag{3}$$

$$C_{vu} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i(x_0, y_0) u_i(x_1, y_1)}{v'(x_0, y_0) u'(x_1, y_1)} \tag{4}$$

式中： $u_i$ 、 $v_i$  分别为纵、垂向脉动流速； $u'$ 、 $v'$  分别为纵、垂向紊动强度； $n$  为样本个数。

2.2 自相关结构

阶梯形丁坝脉动流速空间自相关系数  $C_{uu}$  和  $C_{vv}$  二维空间分布云图见图 3~6，结果表明：1)  $C_{uu}$ 、 $C_{vv}$  均为正，且其值随  $d$  增大而减小，与文献[5]和[13]的研究结论一致；所在剖面相同的

两参考点的  $C_{uu}$  和  $C_{vv}$  云图分布也较为相似。2) 剖面 1~3，自相关系数值在 0.3~0.9 区间内的等值线主要位于丁坝下游，这是因为上游脉动流速较小，下游脉动流速较大，丁坝对水流的阻挡与消能作用使得丁坝上、下游脉动流速的相关性很弱；剖面 1、2 的  $C_{uu}$  云图分布大体呈沿主流向的条带状；在靠近水槽中心附近，其垂向尺度有所增加，大体呈椭圆形，接近天然明渠  $C_{uu}$  云图的空间分布。3) 剖面 1、2 的  $C_{vv}$  云图分布大体呈长轴沿垂向的椭圆；在靠近水槽中心附近，其纵向尺度有所增加，接近天然明渠  $C_{vv}$  云图的空间分布。

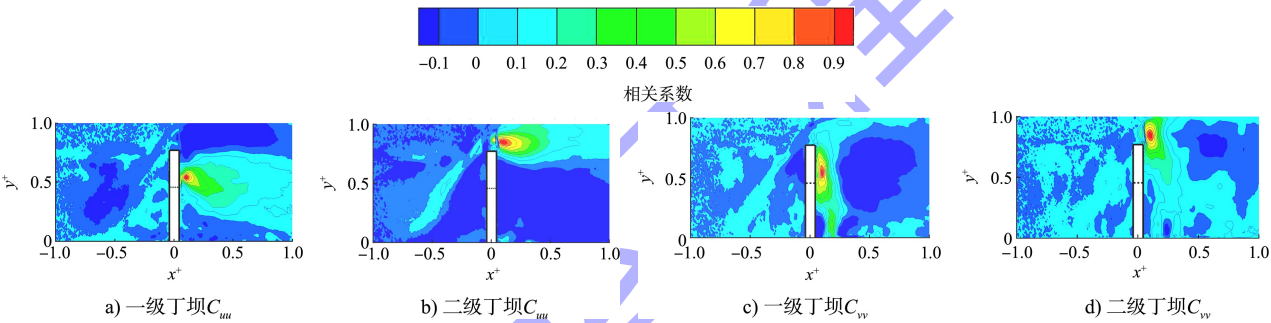


图 3 剖面 1 的  $C_{uu}$  和  $C_{vv}$  二维空间分布云图

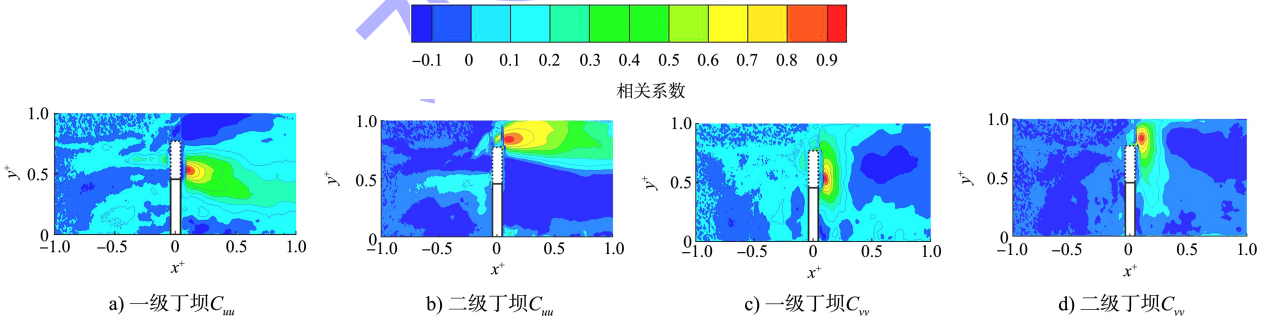


图 4 剖面 2 的  $C_{uu}$  和  $C_{vv}$  二维空间分布云图

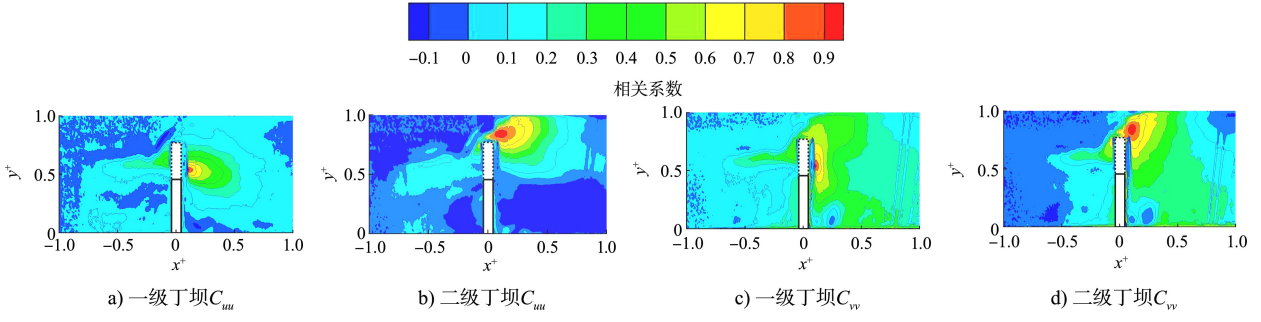


图 5 剖面 3 的  $C_{uu}$  和  $C_{vv}$  二维空间分布云图



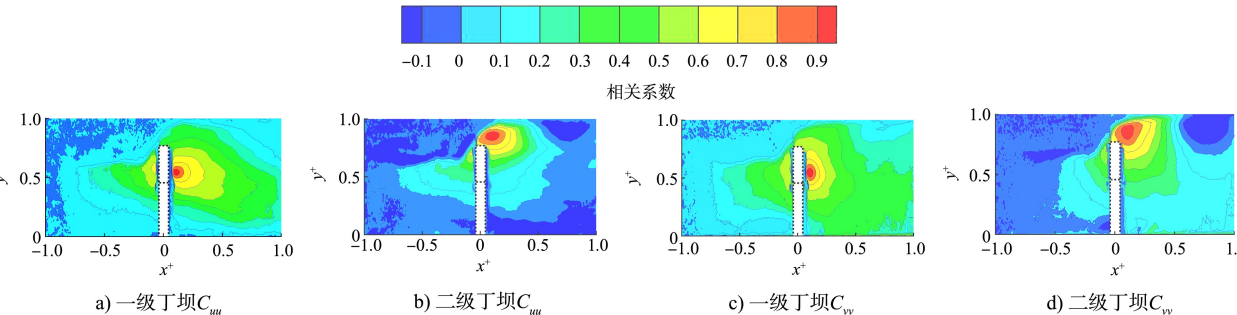
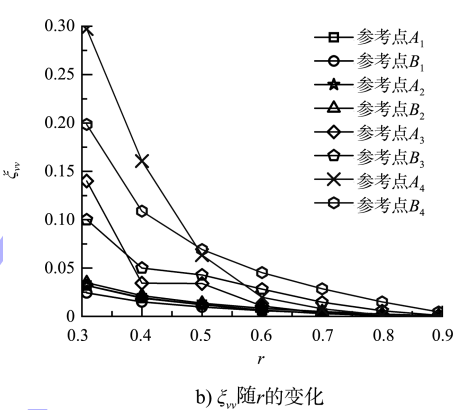


图 6 剖面 4 的  $C_{uu}$  和  $C_{vv}$  二维空间分布云图

为进一步定量分析  $C_{uu}$ 、 $C_{vv}$  的云图分布特性, 提取相关系数为  $r$  的等值线所包围的面积  $A_r$ , 并用云图窗口总面积  $A$  进行无量纲化处理, 得到面积系数  $\xi=A_r/A$ ,  $\xi$  代表了该相关系数等值线的空间分布范围。分别采用  $\xi_{uu}$ 、 $\xi_{vv}$ 、 $\xi_{uv}$ 、 $\xi_{vu}$  表示  $C_{uu}$ 、 $C_{vv}$ 、 $C_{uv}$ 、 $C_{vu}$  的面积系数,  $\xi_{uu}$ 、 $\xi_{vv}$  随  $r$  的变化规律见图 7。可以看出: 1) 相关系数  $r$  在 0.3~0.6 区间内(等值线外区)变化时, 等值线面积的变幅较大; 在 0.6~0.9 区间内(等值线内区)变化时, 等值线面积的变幅较小。2) 剖面 1~3, 二级丁坝参考点的  $\xi_{uu}$ 、 $\xi_{vv}$  总体大于一级丁坝, 这是因水流越过二级丁坝坝顶附近时, 过水断面突然缩窄, 此时势能较大的水流上升, 势能较小的水流沿丁坝下潜, 导致二级丁坝参考点附近流速紊动更加剧烈。3) 由近坝区沿槽宽向水槽中心移动,  $\xi_{uu}$ 、 $\xi_{vv}$  总体增大, 以二级丁坝 4 个剖面处的参考点为例, 当  $r=0.7$  时, 参考点  $B_1\sim B_4$  对应的  $\xi_{uu}$  分别为 0.005、0.017、0.016、0.020, 对应的  $\xi_{vv}$  则依次为 0.003、0.005、0.015、0.029。

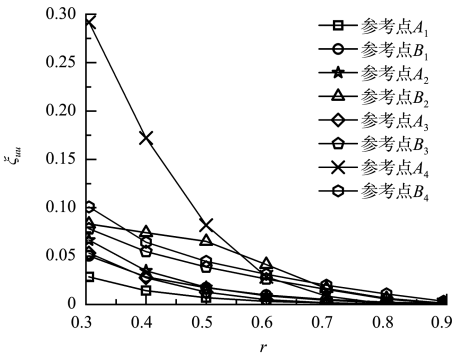


b)  $\xi_{vv}$  随  $r$  的变化

图 7  $\xi_{uu}$ 、 $\xi_{vv}$  随  $r$  的变化

2.3 互相关结构

阶梯形丁坝脉动流速空间互相关系数  $C_{uv}$ 、 $C_{vu}$  的分布云图见图 8~11, 可以看出: 1)  $C_{uv}$ 、 $C_{vu}$  的值同样随  $d$  增大而减小; 所在剖面相同的两参考点的  $C_{uv}$  和  $C_{vu}$  云图分布在剖面 1、2 较为相似, 而在剖面 3、4 的相似性较弱。2) 剖面 1、2,  $C_{uv}$  值在 0.1~0.3 区间的等值线主要分布在参考点上方,  $C_{uv}$  值在 -0.3~-0.1 区间的等值线主要分布在参考点下方, 总体呈以过参考点的水平线为对称轴的上负下正对称分布; 水槽中心附近,  $C_{uv}$  均为正, 且  $C_{uv}$  的值在 0.1~0.3 区间的等值线基本位于二级丁坝上方。3) 近坝区, 一级丁坝  $C_{vu}$  云图绝对值在 0.1~0.3 区间的等值线总体呈以过参考点的水平线为对称轴的上正下负对称分布, 二级丁坝  $C_{vu}$  云图绝对值在 0.1~0.3 区间的等值线总体呈左负右正的分布; 水槽中心附近,  $C_{vu}$  均为负, 且相关性较强的等值线基本位于二级丁坝上方。



a)  $\xi_{uu}$  随  $r$  的变化

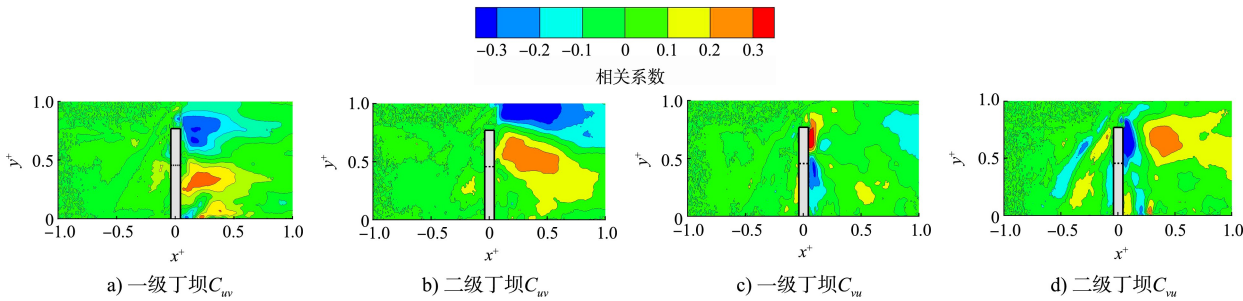


图 8 剖面 1 的  $C_{uv}$ 、 $C_{vu}$  的分布云图

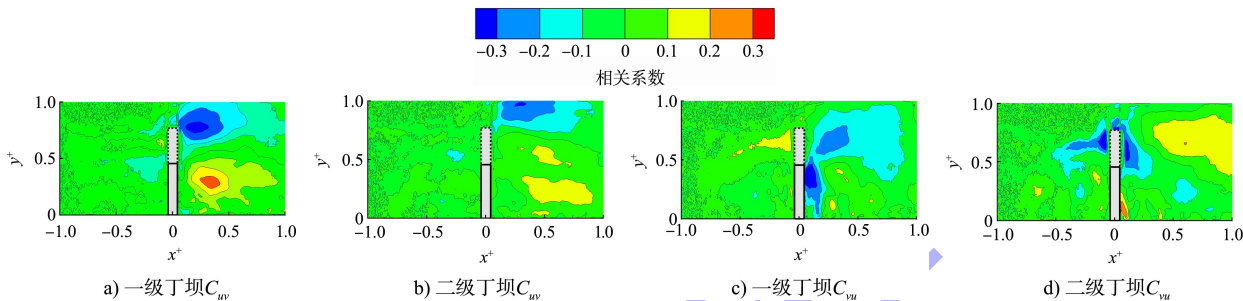


图 9 剖面 2 的  $C_{uv}$ 、 $C_{vu}$  分布云图

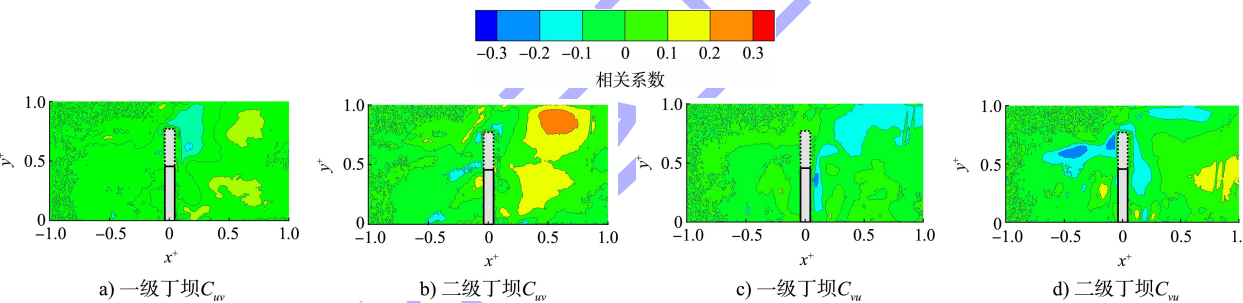


图 10 剖面 3 的  $C_{uv}$ 、 $C_{vu}$  分布云图

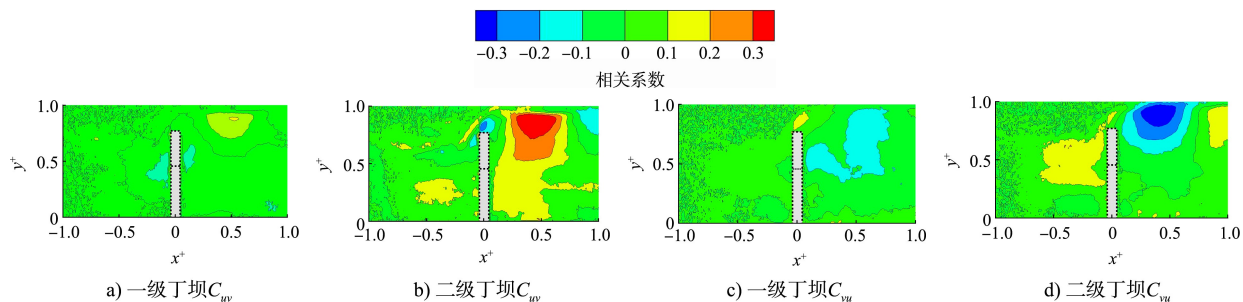


图 11 剖面 4 的  $C_{uv}$ 、 $C_{vu}$  分布云图

$\xi_{uv}$ 、 $\xi_{vu}$  随  $r$  的变化规律见图 12。可以看出：  
1)  $\xi_{uv}$ 、 $\xi_{vu}$  接近以  $r=0$  为轴的对称分布，均随相关系数的绝对值  $|r|$  的增大而减小， $|r|$  越小，减幅越大，二级丁坝参考点的  $\xi_{uv}$ 、 $\xi_{vu}$  总体大于一级丁坝。  
2) 由丁坝近坝区沿坝轴线向水槽中心移动，一级丁坝参考点 A 的  $\xi_{uv}$  减小，二级丁坝参考点 B

的相关系数  $r<0$  对应的  $\xi_{uv}$  减小， $r>0$  对应的  $\xi_{uv}$  呈先降后升的趋势。以二级丁坝 4 个剖面处的参考点为例，当  $r=-0.2$  时，剖面 1~4 对应的  $\xi_{uv}$  分别为 0.041、0.026、0.001、0；当  $r=0.2$  时，剖面 1~4 对应的  $\xi_{uv}$  分别为 0.046、0、0.026、0.073。  
3) 由近坝区沿  $z^+$  轴向水槽中心移动，一级

丁坝参考点 A 附近的  $\xi_{vu}$  值有所减小, 二级丁坝参考点 B 附近  $r>0$  对应的  $\xi_{uv}$  减小,  $r<0$  对应的  $\xi_{uv}$  增大。当  $r=0.2$  时, 参考点  $B_1\sim B_4$  对应的  $\xi_{vu}$  分别为 0.027、0.001、0、0; 当  $r=-0.2$  时,  $B_1\sim B_4$  对应的  $\xi_{vu}$  依次为 0.002、0.006、0.006、0.011。

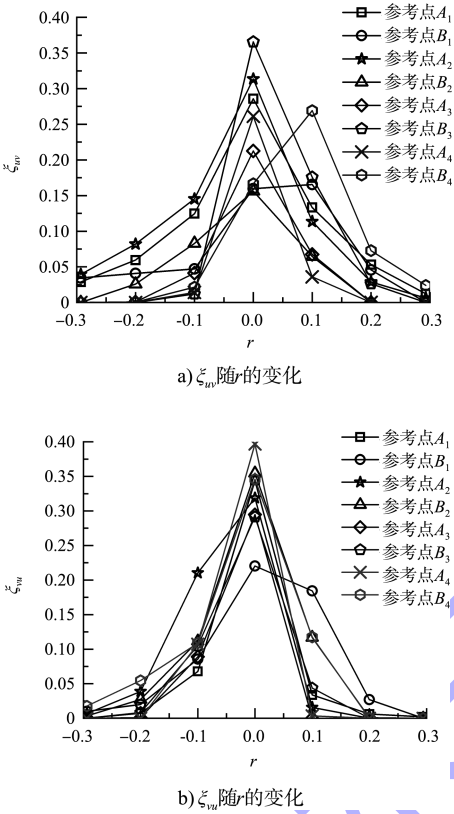


图 12  $\xi_{uv}$ 、 $\xi_{vu}$  随  $r$  的变化

3 结论

1) 脉动流速  $u$ 、 $v$  的空间自相关系数  $C_{uu}$ 、 $C_{vv}$  均为正值; 其值在 0.3~0.9 区间内的等值线, 分布范围随着水深增加而减小, 随着与丁坝距离的增大而增大, 在二级丁坝附近的分布范围总体大于一级丁坝, 在水槽中心的分布范围总体大于近坝区; 近坝区,  $C_{uu}$ 、 $C_{vv}$  云图中值大于 0.3 的等值线均沿各自速度方向尺度较大; 在水槽中心附近, 接近天然明渠  $C_{uu}$ 、 $C_{vv}$  云图的空间分布。

2) 脉动流速互相关云图在近坝区出现基本对称的正负分区现象; 由近坝区沿槽宽向水槽中心区域移动, 在一级丁坝附近, 互相关系数绝对值较大的等值线的分布范围均缩小; 二级丁坝附近  $C_{uv}$  在 0.1~0.3 区间内的分布范围扩大, 在 -0.3~

-0.1 区间的分布范围缩小,  $C_{vu}$  则相反; 水槽中心附近,  $C_{uv}$ 、 $C_{vu}$  云图中绝对值较大的等值线基本分布在二级丁坝附近,  $C_{uv}$  为正,  $C_{vu}$  为负。

3) 本文研究了阶梯形丁坝区脉动流速空间相关结构, 今后可进一步探讨脉动流速空间相关结构与局部冲刷的内在联系, 为阶梯形丁坝水毁保护提供科技支撑。

参考文献:

[1] 钟亮, 孙建云, 刘珺洁, 等. 阶梯形丁坝下游回流规律分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(5): 9-17.

[2] 王世鹏, 钟亮, 廖尚超, 等. 淹没阶梯形丁坝水流结构 PIV 试验研究[J]. 水运工程, 2022(1): 100-111.

[3] 钟亮, 许光祥. 长江上游九龙坡一朝天门河段航道建设工程工可阶段数学模型研究报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2014.

[4] 张训时, 张东宁. 紊流相关的实验研究[J]. 水利学报, 1991, 30(12): 52-58.

[5] 王龙, 李丹勋, 王兴奎. 明渠水流流速的时空相关性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 816-819

[6] KIM H T, KLINE S J, REYNOLDS W C. The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer[J]. Journal of fluid mechanics, 1971, 50(1): 133-160.

[7] 王浩, 李丹勋, 陈启刚, 等. 基于图像处理的明渠紊流近壁区条带结构试验[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 257-264.

[8] NAKAGAWA H, NEZU I. Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow[J]. Journal of fluid mechanics, 1981, 104: 1-43.

[9] SULLIVAN P, POLLARD A. Coherent structure identification from the analysis of hot-wire data [J]. Measurement science and technology, 1996, 7(10): 1498-1516.

[10] CHRISTENSEN K T, ADRIAN R J. Statistical evidence of hairpin vortex packets in wall turbulence[J]. Journal of fluid mechanics, 2001, 431: 433-443.

[11] LIU Z, ADRIAN R J, HANRATTY T J. Large-scale modes of turbulent channel flow: transport and structure [J]. Journal of fluid mechanics, 2001, 448: 53-80.