

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.02.014

# 基于图像处理的明渠紊流近壁区条带结构试验

王 浩<sup>1</sup>, 李丹勋<sup>1</sup>, 陈启刚<sup>2</sup>, 王兴奎<sup>1</sup>

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 基于图像处理技术,对明渠紊流近壁区的水流低速条带结构进行了测量和分析。条带结构采用天然沙进行示踪,使用高清相机拍摄高分辨率图像,通过形态学方法提取其几何特征。分析条带的宽度及间距的变化特点,得到结果:① 低速条带宽度从水槽中线到两侧壁逐渐变小,沿中线基本呈对称分布;② 摩阻雷诺数在 276~465 范围时,条带宽度和间距量纲一值的变化范围分别为 20.8~29.8 和 99.3~126.7,条带面积占图像总面积百分比为 23.4%~15.9%;③ 随摩阻雷诺数增大,低速条带的宽度和间距加大,而条带面积百分比逐渐减小。试验结果表明,低速条带结构随水流摩阻雷诺数的变化非常复杂,而图像处理技术提供了一种高效率、高精度的测量手段。

**关键词:** 明渠;紊流;低速条带;图像处理;摩阻雷诺数

中图分类号: TV143 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2015)02-0257-08

紊流近壁区包括边界层的粘性底层和缓冲层,条带结构是紊流近壁区相干结构的重要组成部分,其主要特征为高低速流带沿横向均匀分布。高低速条带结构的广泛研究始于 Kline 等<sup>[1]</sup>,使用氢气泡可视化方法,发现边界层水流以不稳定的低速区、高速区相间排列流动,并伴随以低速流体抬升和高速流体向下清扫为主要特征的猝发运动。

许多学者对紊流近壁区水流低速条带的宽度、间距和长度等进行了定量观测,并就上述特征尺度获得了许多一致的认识。Kim 等<sup>[2]</sup>通过可视化试验方法,在低摩阻雷诺数条件下对低速条带的横向平均间距进行了计算,得到平均量纲一间距  $\lambda^+ = 100 \pm 20$ 。Gupta 等<sup>[3]</sup>开展不同摩阻雷诺数试验,结果表明条带间距会随着摩阻雷诺数的增加而增大,当  $Re_\tau = 2170$  时,  $\lambda^+$  增加到 151; Kahler<sup>[4]</sup>、Carlier 和 Stanislas<sup>[5]</sup>在后续的研究中也观察到相同的条带间距变化趋势。Lin 等<sup>[6]</sup>采用 PIV 技术,利用图像处理方法分析近壁区  $14.5 < y^+ < 48$  范围,得到低速条带面积占总面积的 22%~26%。

此外一些学者对紊流近壁床面固体颗粒条带结构分布和运动特征也进行了研究。Kaftori 等<sup>[7]</sup>观测了固体颗粒在紊流床面运动、沉积及水流挟带颗粒运动的过程,指出颗粒的带状结构受相干结构影响。Nino 和 Garcia<sup>[8]</sup>指出小粒径固体颗粒在床面受水流相干结构的影响,可以形成稳定的条带结构,而大粒径颗粒将会出现不稳定状况。Nezu 和 Nakagawa<sup>[9]</sup>提出近壁区相邻纵向涡反向运动,造成固体颗粒横向交换运移,导致固体颗粒聚集在低速区域形成规则的带状结构。Hetsroni<sup>[10]</sup>计算了固体颗粒条带结构量纲一宽度也在 100 左右,条带结构量纲一长度范围为 1000~2000。

以往对近壁区条带结构的研究多采用烟线法、氢气泡法示踪水流流速,通过高低速流带速度的差异性,获得低速条带结构特征尺度,其样本量偏小且无法批量运算,导致处理速度偏慢和精度偏低。且以固体颗粒为低速条带示踪粒子,定量分析低速条带结构特征尺度及与水流条件关系的研究较少。因此,本文在前人研究的基础上,使用天然沙示踪水流条带结构,直接将沙粒堆积的区域表征为近壁区低速流条带区,通过图

收稿日期: 2014-10-08; 网络出版时间: 2015-03-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150316.1454.014.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379101)

作者简介: 王浩(1985—),男,安徽蚌埠人,博士研究生,主要从事水力学及河流动力学方面研究。

E-mail: wanghao\_0512@163.com

像处理方法提取条带,采用统一算法完成较大样本量计算,提高低速条带宽度和间距值的计算效率和精度。并据此分析沙示踪低速条带结构的分布特征及与水流条件之间的关系,为相关研究提供依据和参考。

## 1 明渠紊流试验

### 1.1 试验水槽

试验采用高分辨率 CCD 相机,对高精度明渠循环玻璃水槽沙示踪条带结构进行测量。水槽长 11 m,宽 0.25 m,高 0.4 m,变坡范围 0~1%,边侧壁和底板均采用超白玻璃铺设。循环水由进口水箱以溢流形式进入水槽,入口设 4 层孔径渐变的蜂窝状整流器,起整流和消除大尺度涡结构的作用,出口设活页尾门控制水深以保证恒定均匀流。流量用变频器调节水泵转速来控制,通过电磁流量计测量,误差在 0.5% 以内。水深由沿水槽中心线安装的 6 个超声水位计测量。测量段距水槽入口 7 m,可以保证紊流充分发展,距出口 4 m 可消除尾门对水流的扰动<sup>[11]</sup>。试验水槽结构如图 1 所示( $X$ 、 $Y$  和  $Z$  分别表示流向、垂向和横向)。

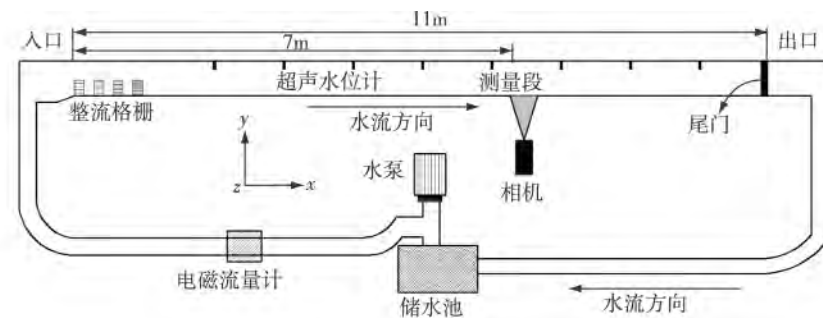


图1 试验水槽示意

Fig. 1 Sketch of the hydraulic flume

### 1.2 试验方案

选用比重 2.65、粒径 0.15 mm 的天然均匀沙作为示踪粒子。试验时,在距进口 1.5 m 处沿断面横向放置一薄钢尺,其上游铺设等厚的示踪沙,可保证持续稳定供沙。沙粒在水流作用下从钢尺上缘均匀向下游运动,并在试验段形成带状结构,为维持输沙恒定,试验过程中仅需加入少量泥沙颗粒。

采用分辨率为  $7\,360 \times 4\,912$  像素的 Nikon D800E 相机拍摄沙带图像,相机竖直向上安装在水槽正下方,镜头光轴与床面垂直,见图 2。镜头焦距 25 mm,拍摄区域大小  $37\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ ,分辨率 19.6 pix/mm。设置拍

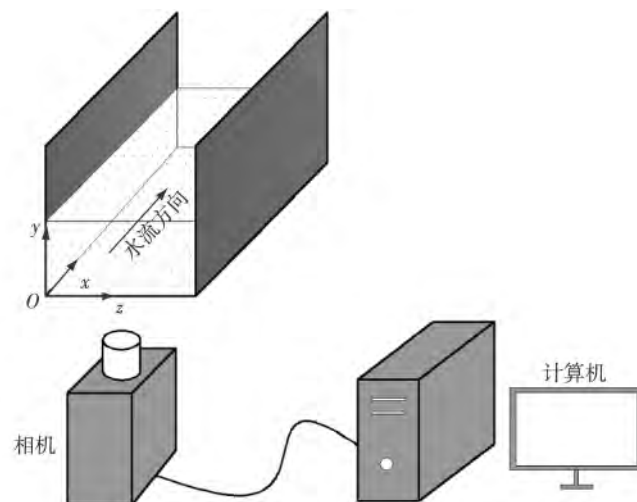


图2 相机设置

Fig. 2 Setup of the measuring system

摄频率为 5 帧/s, 连续拍摄 20 张后存储入计算机, 循环拍摄, 每组试验拍摄约 600 张图片。共进行 6 种摩阻雷诺数的恒定均匀流试验, 本文  $Re$  均大于 4 000, 属于低雷诺数紊流, 各试验组次的水流条件见表 1。

表 1 明渠试验水流条件  
Table 1 Flow parameters

组次	坡降 $J$	水深 $H/cm$	流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	宽深比 $B/H$	平均流速 $U_m/(m \cdot s^{-1})$	摩阻流速 $u_* / (cm \cdot s^{-1})$	雷诺数 $Re$	摩阻雷诺数 $Re_*$
C276	0.001	2.15	1.18	11.6	0.22	1.45	4 182	276
C309	0.001	2.31	1.31	10.8	0.23	1.51	4 665	309
C343	0.001	2.48	1.49	10.1	0.24	1.56	5 276	343
C386	0.001	2.68	1.65	9.3	0.25	1.62	5 868	386
C429	0.001	2.88	1.93	8.6	0.27	1.68	6 864	429
C465	0.001	3.04	2.42	8.2	0.32	1.72	8 590	465

## 2 条带结构图像处理方法

考虑沙条带现象从水槽中线向两侧壁逐渐减弱, 统一截取水槽中间宽度 15 cm 区域进行分析计算。在低摩阻雷诺数水流条件下, 示踪沙在水槽底部将形成明显的沙粒条带结构, 图 3(a) 为所拍摄到的沙粒示踪图像, 能够观察到明显的条带结构存在。但由于细沙颗粒的分散性, 部分泥沙颗粒散布在条带周边, 在图片中形成“噪点”。形态学方法是通过图像处理提取图像几何结构的有效分析方法, 本文采用此方法对原始图像进行处理, 以获得准确的条带结构。

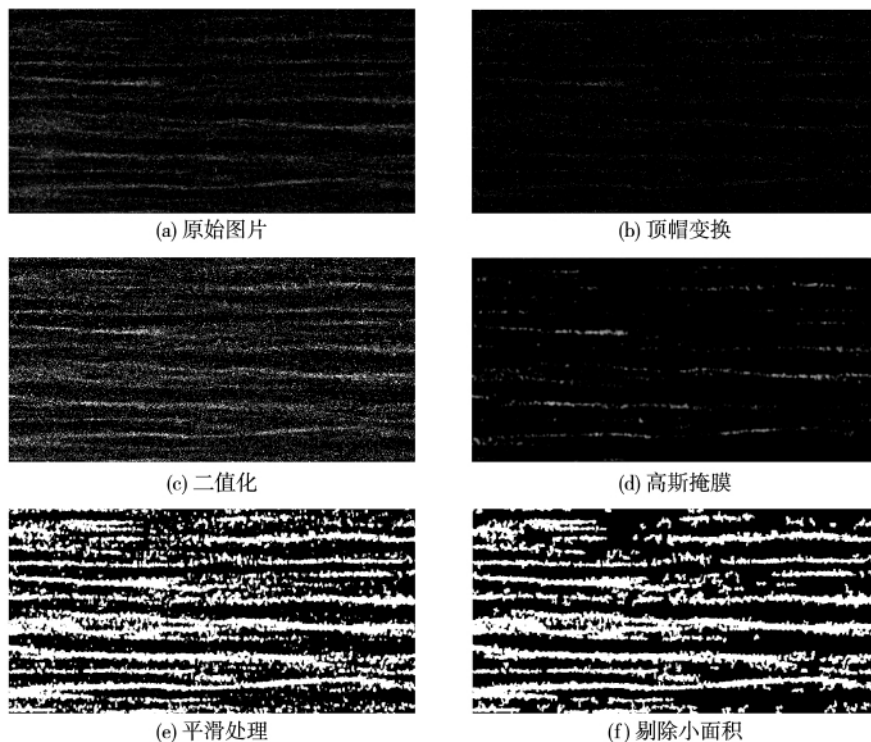


图 3 图像处理过程

Fig. 3 Image processing

### 2.1 背景去噪

图 3(a) 为相机拍摄的原始图像, 由于背景光线的不平衡性, 在图中出现了不均匀的背景色。利用顶帽变换对图像进行处理可以消除背景色, 该变换包括开运算减运算两个步骤。开运算是先对图像先腐蚀后膨胀, 当选择适当的结构元素时, 使用开运算可得到背景图像; 在此基础上, 使用减运算从原图像中减去背景图像, 即可获得背景均匀的条带图像, 见图 3(b)。根据试验图像中的噪点大小及条带结构特性, 本文选用长 20 像素、宽 60 像素的矩形作为结构元素。

### 2.2 图像二值化及高斯掩膜处理

采用经典的大津法对顶帽变换处理后的图像进行二值化处理, 结果见图 3(c), 其中白色代表沙粒, 表征低速带; 黑色代表间隙, 表征高中速带。为将低速条带结构与背景无关的细节加以分离, 对图像先后进行高斯空间掩膜运算和高斯平滑处理, 结果见图 3(d) 及图 3(e)。

### 2.3 条带结构提取

经过上述处理后, 图像仍存在个别较大的噪点, 但尺寸尚不能达到条带结构尺度, 将面积小于一定阈值的图像斑点剔除后, 获得图 3(f) 中的条带结构二值图像。

## 3 条带结构分析方法

### 3.1 特征尺度的定义

定义条带结构二值化图像中有沙点的值为 1, 无沙点的值为 0,  $X$  轴为水流方向,  $Z$  轴为横向。为提高计算精度, 将图像分割为多个  $X$  方向 18 个像素、 $Z$  方向 2 个像素的单元结构体, 参照以往研究<sup>[12]</sup>, 对每个  $2 \times 18$  的单元进行灰度值累加, 累加值的范围为 0~36。选定阈值为最大数值的一半 18, 大于等于阈值的单元认定为低速条带结构组成部分, 赋值为 1, 小于阈值的单元赋值为 0, 结果示意如图 4(a) 所示。

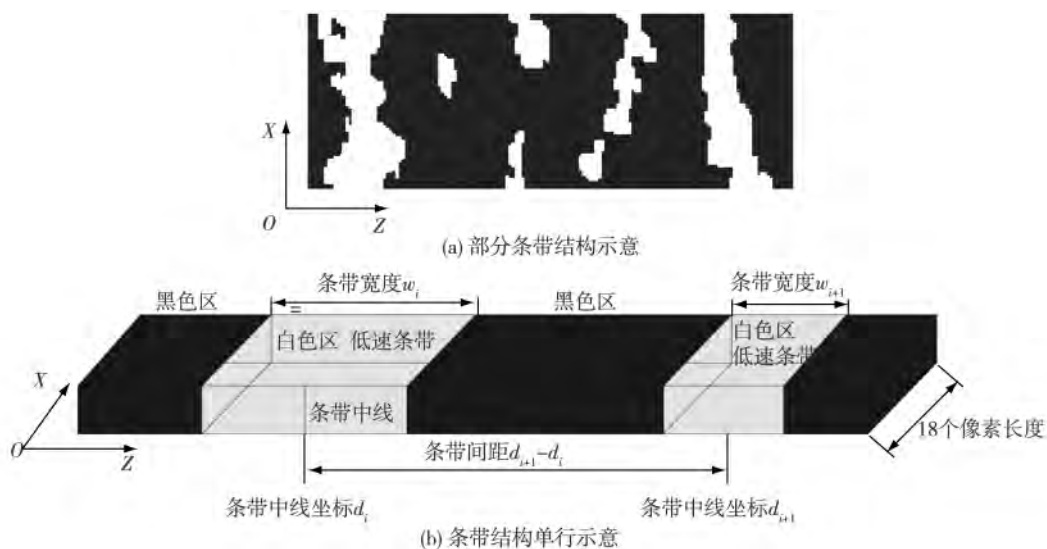


图 4 条带宽度和间距计算

Fig. 4 Calculation of streak width and the distance between neighboring streaks

### 3.2 特征尺度的计算

选取图 4(a) 中一行做示意图 4(b), 图中白色区宽度为条带宽度  $w$ , 条带中线位置坐标为  $d$ , 条带间距为相邻条带中线之间的距离。沿  $Z$  方向进行统计, 当遭遇数值为 1 (条带结构起点单元) 开始, 至数值为 0 时为止, 统计单元个数即为该条带的宽度, 依次统计此行共有的  $n$  个条带, 第  $i$  个条带的宽度为  $w_i$ , 条带中心坐标值为  $d_1, d_2, \dots, d_n$ 。将  $w$  和  $d$  值进行量纲一化, 如下式所示:

$$w^+ = 2wu_* / v \quad (1)$$

$$d^+ = 2du_* / v \quad (2)$$

式中  $u_*$  为摩阻流速;  $v$  为粘滞系数;  $w^+$  为每个条带宽度量纲一值;  $d^+$  为条带中心坐标量纲一值; 乘以 2 表示单元结构体的宽度为 2 个像素。

设一帧图像共有  $m$  行;  $w_{(r)}^+$  代表第  $r$  行  $n$  个条带的平均宽度。使用下式分别计算 1 ~  $m$  行平均条带宽度:

$$w_{(r)}^+ = \frac{\sum_{i=1}^n w_i^+}{n} \quad (r = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

整幅图像的平均条带宽度  $W^+$  为

$$W^+ = \frac{\sum_{r=1}^m w_{(r)}^+}{m} \quad (4)$$

条带的间距定义为两条带中心线的距离, 每行  $n-1$  个条带间距的平均间距  $d_{(r)}^+$  和整幅图像的平均条带间距  $D^+$  分别为

$$d_{(r)}^+ = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (d_{i+1}^+ - d_i^+)}{n-1} \quad (r = 1, 2, \dots, m); \quad D^+ = \frac{\sum_{r=1}^m d_{(r)}^+}{m} \quad (5)$$

将每组试验获得的 600 张二值化图像重复上述判读, 获得条带宽度和间距的统计样本, 并据此计算条带结构的平均宽度和间距。

### 3.3 计算出现的 3 种情况及修正

由于条带结构分布的随机性, 计算过程中会出现一些不确定情况, 需要使用判别条件对此进行专门修正。① 如图 5(a) 所示, 白色的条带结构与边界不相交, 按照 3.2 节的计算方法可以正确得到条带的宽度和间距; ② 如图 5(b) 所示的两个红框内, 白色的条带结构与边界相交, 此时运用 3.2 节方法计算相交处的条带宽度和间距, 只能获取不完整条带的中线位置和宽度, 无法获得准确值, 为解决上述问题, 所有与图像边界相交的条带结构均不计入统计样本; ③ 若一行内识别出的条带个数少于 2 个, 则此行中的条带结构均不计入统计样本。此种情况在试验中出现较少。



图5 条带结构位置

Fig. 5 Position of streaks relative to flow boundary

## 4 结果与讨论

### 4.1 低速条带宽度和间距随 $Re_*$ 变化规律

将各组次条带结构的平均宽度和间距值与摩阻雷诺数进行绘图, 如图 6、图 7 所示。可见随摩阻雷诺数的增大, 条带结构的宽度和间距均随之增大, 条带宽度量纲一值变化范围为 20.8 ~ 29.8, 条带间距量纲一值的变化范围为 99.3 ~ 126.7, 与以往经典结果相符<sup>[1-2]</sup>。

从条带结构的形成机理看,沙条带结构的形成是由近壁区内相邻两纵向旋涡的反向旋转所导致。沙粒堆积在低速流场区,条带结构的宽度和间距正比于纵向涡尺度,而纵向涡尺度随摩阻雷诺数的增大而增大<sup>[9,12]</sup>,可以得到条带间距和宽度也将随摩阻雷诺数增大而增大。进行趋势线拟合,获得式(6)、式(7),相关系数  $R$  均大于 0.9,表明条带宽度和间距随摩阻雷诺数增大呈较好的线性增长趋势。

$$W^+ = 0.046Re_* + 8.06 \quad R^2 = 0.98 \quad (6)$$

$$D^+ = 0.140Re_* + 60.38 \quad R^2 = 0.99 \quad (7)$$

#### 4.2 低速条带总宽度百分比随 $Re_*$ 变化规律

对拍摄到的图像进行图像处理和二值化后,统计沙条条带所占据的总面积除以图像面积,可以计算出条带总面积占图像面积的百分比值  $F$ :

$$F = \frac{A_s}{A} \times 100\% \quad (8)$$

式中  $A_s$  为图像中条带所占面积;  $A$  为图像总面积。

将不同摩阻雷诺数条件下,低速条带总面积占图像面积百分比值绘于图7。图中显示随摩阻雷诺数增大,低速条带所占面积百分比逐渐减小,其变化范围为 23.4% ~ 15.9%。表明随着摩阻雷诺数的增大,紊动猝发机制的俯冲事件更强烈,影响了低速条带结构的稳定性,条带结构逐渐不明显。进行趋势线拟合,获得下式:

$$F = 86.8 - 11.5 \ln Re_* \quad R^2 = 0.85 \quad (9)$$

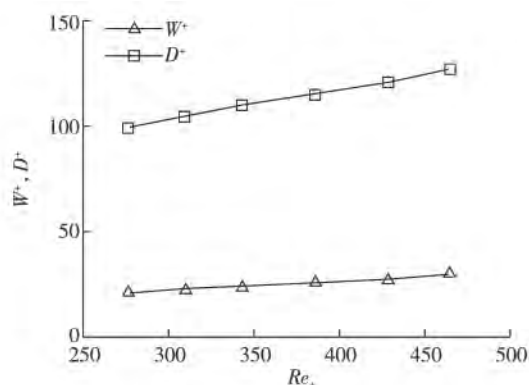


图6 条带结构特征尺度随摩阻雷诺数变化规律

Fig. 6 Variation of sizes of streaks with  $Re_*$

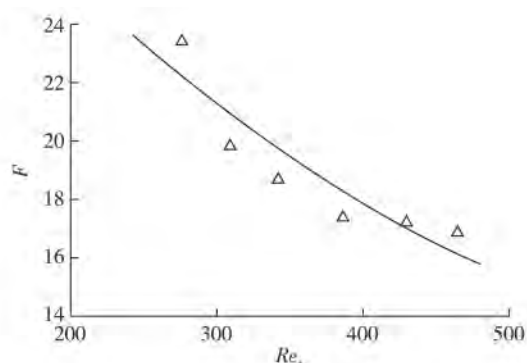


图7 条带结构面积占百分比随摩阻雷诺数变化规律

Fig. 7 Variation of steak area with  $Re_*$

#### 4.3 低速条带宽度沿横向的变化规律

为获得低速条带宽度在  $Z$  方向的分布规律,将横向测量区域等分为 11 份,根据条带中线坐标确定条带所处的区域,再分别计算每个区域中条带结构的平均宽度。

图8中  $Z$  为距离水槽中线位置的横向距离,水槽中线位置  $Z=0$ ,  $B$  为图像宽度,  $Z/B$  为以水槽中线为起点的相对横向距离。结果表明,水槽中线位置条带宽度最大,从中线位置到水槽两侧壁面条带宽度逐渐变小,条带宽度关于水槽中线基本呈轴对称分布。

以往研究表明<sup>[13]</sup>,水流近壁面处剪切应力从水流中线沿横向方向逐渐减小,中线位置剪切应力最大,至两边壁逐渐减小。而水流剪切应力反映水流强度大小,纵向涡尺度将随中线位置至边壁水流强度的逐渐减小而减小,条带结构的宽度正相关于纵向涡尺度,使得水槽中轴线位置处条带宽度值将达到最大,沿横向方向变小。本试验结果与这一结论相符。

此外,观察不同水流条件条带宽度变化曲线图可以发现,条带宽度随摩阻雷诺数的增大而变大,其中水槽中部最大条带宽度由摩阻雷诺数为 276 时的 21.1 增加至 465 时的 39.2。

#### 4.4 低速条带宽度与横向距离和摩阻雷诺数的关系

由图8可以看出,条带宽度与摩阻雷诺数和横向位置具有一定关系。根据条带结构形成机理可知,条带宽度  $W^+$  与  $Re_*$  成正相关关系,与相对横向位置  $Z/B$  的绝对值成负相关关系,根据试验数据拟合下式:

$$\frac{W^+}{Re_*^{1.2}} = 0.05 \left( 0.5 - \left| \frac{Z}{B} \right|^2 \right) \quad R^2 = 0.87 \quad (10)$$

将试验数据与拟合公式曲线共绘于图9中,其中以  $Z/B$  为横坐标,  $W^+ / Re_*^{1.2}$  为纵坐标,公式曲线呈开口向下抛物线,具有良好的相关性。

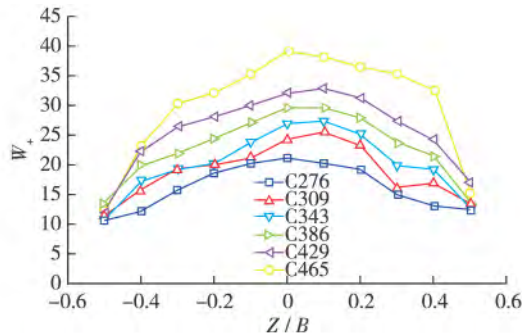


图8 不同摩阻雷诺数条件条带宽度沿横向的分布

Fig. 8 Distribution of streak width along the spanwise direction at various  $Re_*$ .

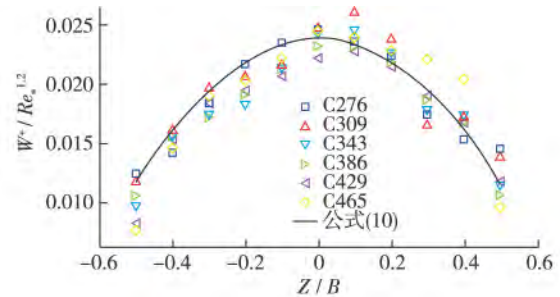


图9 不同水流条件条带宽度与摩阻雷诺数比值沿横向的分布

Fig. 9 Relationship between  $W^+ / Re_*^{1.2}$  and  $Z/B$

## 5 结 论

(1) 运用图像处理中形态学方法识别沙示踪条带结构,通过逐行识别低速条带的宽度和间距,剔除不完整条带信息,能够较好获得沙示踪低速条带结构的宽度和间距值。

(2) 摩阻雷诺数在 276 ~ 465 范围时,低速条带的宽度和间距随摩阻雷诺数的增大呈线性增大趋势,其中条带宽度量纲一值的变化范围为 20.8 ~ 29.8,条带间距量纲一值的变化范围为 99.3 ~ 126.7;而低速条带面积占图像总面积百分比随摩阻雷诺数增大逐渐减小,所占百分比范围为 23.4% ~ 15.9%。

(3) 低速条带宽度值在水槽中线处最大,从中线到水槽壁面逐渐变小,基本呈左右对称分布,这与床面横向方向水流强度分布有关。

### 参考文献:

- [1] KLINE S J, REYNOLDS W C, SCHRAUB F C, et al. The structure of turbulent boundary layers [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1967, 30(4): 741-773.
- [2] KIM H T, KLINE S J, REYNOLD 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.
- [3] GUPTA A K, LAUFER J, KAPLAN R E. Spatial structure in the viscous sublayer [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971, 50(3): 493-512.
- [4] KAHLER C J. Investigation of the spatio-temporal flow structure in the buffer region of a turbulent boundary layer by means of Multi-plan stereo PIV [J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 36(1): 114-130.
- [5] CARLIER J, STANISLAS M. Experimental study of eddy structures in a turbulent boundary layer using particle image velocimetry [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 535: 143-188.
- [6] LIN J, LAVAL J P, FOUCAUT J M, et al. Quantitative characterization of coherent structures in the buffer layer of near-wall turbulence: Part 1: Streaks [J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 45(6): 999-1013.
- [7] KAFTORI D, HETSRONI G, BANERJEE S. Particle behavior in the turbulent boundary layer Motion, deposition and entrainment

- [J]. *Physics of Fluids*, 1995, 7(5): 1095-1106.
- [8] NINO Y, GARCIA M. Experiments on particle-turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: Implications for sediment transport [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, 326(1): 285-319.
- [9] NEZU I, NAKAGAWA H. Cellular secondary currents in straight conduit [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1984, 110: 173-193.
- [10] HETSRONI G. Particles-turbulence interaction [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1989, 15(5): 735-746.
- [11] 陈槐 李丹勋 陈启刚 等. 明渠恒定均匀流试验中尾门的影响范围 [J]. *实验流体力学*, 2013, 27(4): 12-16. ( CHEN Huai, LI Danxun, CHEN Qigang, et al. Influence of tail gate on uniform open channel flows [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2013 27(4): 12-16. ( in Chinese) )
- [12] 王殿常. 明槽紊流床面的带状结构及颗粒运动规律研究 [D]. 北京: 清华大学水利系, 2000. ( WANG Dianchang. On the spatial structure of low-speed streaks and particle motion in the near wall region of turbulent open channel flow [D]. Beijing: Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University 2000. ( in Chinese) )
- [13] CAO S, KNIGHT D. Design for hydraulic geometry of alluvial channels [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(5): 484-492.

## Image-based measurements of low-speed streaks in near-bed region of open channel flow\*

WANG Hao<sup>1</sup>, LI Danxun<sup>1</sup>, CHEN Qigang<sup>2</sup>, WANG Xingkui<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)*

**Abstract:** Image-based experiments have been conducted to measure low-speed streaks in the near-bed region of open channel flow. The measurements involve tracing the streaks with natural sand, recording the streak images by a high-resolution camera, and extracting geometrical features of the streaks through mathematical morphology procedure. Analysis of the measured data yields the following findings: ① The streak width is symmetric with respect to the midline of the bed, attaining its maximum value at the center and decreasing gradually toward the side wall; ② At friction Reynolds number from 276 to 465, the low-speed streaks vary from 20.8 to 29.8 in dimensionless width, from 99.3 to 126.7 in dimensionless interval, and from 23.4% to 15.9% in percentage area; and ③ An increase of friction Reynolds number leads to an increase in the width and interval of streaks together with a reduction in the percentage area. The experimental results indicate that image processing technique provides an efficient and accurate tool for investigating complex low-speed streaks in open channel flow.

**Key words:** open channel flow; turbulence; low-speed streak; image processing; friction Reynolds number

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China( No. 51379101) .