

含植物明渠紊流流速分布无量纲化方法及流动分区

闫 静¹, 鲁经宇¹, 赵汗青², 雷 燕³, 彭显峰¹, 林青炜¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038;
3. 河海大学期刊部, 江苏 南京 210098)

摘要:基于流速分布曲线的几何特点,提出一种新的无量纲化方法,结合水槽实验数据的回归分析,对含植物明渠紊流流速分布律及流动分区进行了研究。基于流速梯度变化率的特点,确定两个特征高度,采用特征高度、特征高度位置处的流速、水深、最大流速4个变量定义了新的无量纲流速和高度,对实验得到的流速数据进行无量纲化处理,进一步拟合得到流速分布律。结果表明,提出的无量纲流速在自由水面附近呈对数分布,对数分布律区域以下到床面的区域可用4段函数表示。根据分布律适用的区域明确流动分区边界,发现边界高度与特征高度并不重合,但和混合层的上下边界近似相等。与其他研究的对比表明,提出的无量纲化方法和流速分段函数分布律以及流动分区对速度描述有效,具有较好的适用性。

关键词:含植物明渠紊流;流速分布;无量纲化;流动分区

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)03-0101-06

Dimensionless method for velocity distribution in vegetated open channel turbulent flows and flow sub-division//
YAN Jing¹, LU Jingyu¹, ZHAO Hanqing², LEI Yan³, PENG Xianfeng¹, LIN Qingwei¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 3. Periodical Press of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the geometric characteristics of the velocity profile, a new dimensionless method was proposed and combined with the regression analysis of the flume experimental data, the vertical velocity distribution law and turbulent flow sub-division in vegetated open channel were presented. According to the characteristics of variation rate of velocity gradient, two characteristic heights are determined. New dimensionless velocity and height are defined by the characteristic heights and corresponding velocities, water depth and maximum velocity, and the velocity distribution law is further obtained by the dimensionless experimental velocity data. The results show that the proposed dimensionless velocity is logarithmically distributed near the free water surface, and in the region between the logarithmic law zone and bed, it can be represented by a four-piecewise function. According to the applicable region of each distribution function, the flow sub-division is determined. It is found that the boundary heights do not coincide with the characteristic heights, but are approximately equal to the upper and lower boundaries of the mixing layer. The comparison with other studies illustrates that the proposed dimensionless method, the piecewise functions and the flow sub-division are effective for describing the velocity with good applicability.

Key words: turbulence in vegetated open channel; velocity distribution; non-dimensionalization; flow sub-division

植物是生态河道的重要特征,其存在影响了流场结构,平均流速、雷诺应力等紊流统计特性参数的分布都表现出与光滑明渠截然不同的规律。流速垂线分布律是描述明渠流动特性的主要内容,含植物明渠流速分布在植物顶部出现了拐点,不再遵循经典的明渠流速对数分布律^[1-4]。早期研究者们尝试用各种方法获取含植物明渠流速分布律,但得到的

分布律并不统一。

为了解决分布律的统一性、普适性问题,研究者们尝试借助流动分区的方法,根据植物几何特性(如植物高度)或流速分布特点(如流速分布存在的拐点)作为界限,将流动沿整个水深划分为若干区域,然后在不同区域内确定各自的无量纲形式的分布律。然而,目前流动分区界限和各区域分布律表

达式尚未得到统一^[5-6]。部分研究者认为仅用植物顶部作为边界进行二区划分即可^[7-9],但 Nepf 等^[10-15]认为三区划分的观点更为合理。此外,还存在两个问题:①即使流动分区相同,因各区流速分布的无量纲化方法不同,得到的分布律结果也不尽相同;②目前已有的一些无量纲方法适用性不强。例如:对于植物层以上的区域,Kouwen^[9]选取摩阻流速 u_* 和植物高度 h 作为无量纲化参数,得到对数分布律;Cheng 等^[16]选取 $u_{\max}-u_h$ ($u_{\max}$ 是最大流速值, u_h 为植物顶部流速)和半水深 $H_{1/2}$ 得到指数分布律;Ghisalberti 等^[17]选取整个混合层的平均流速 $\bar{u}$ 和速度差 Δu 确定无量纲速度 $(u-\bar{u})/\Delta u$,选取混合层平均高度 $\bar{z}$ 和2倍的动量厚度 θ 确定无量纲高度 $(z-\bar{z})/2\theta$,最终得到了无量纲形式的流速双曲正切函数,但 Nezu 等^[13]采用类似的无量纲化方法,选取 $(u-\bar{u})/\Delta u$ 和 $(z-\bar{z})/\theta$ 作为无量纲参数,发现不同植物密度的数据拟合性较差,分布律和双曲正切分布具有较大偏差,根据每一条流速分布曲线推断的边界具有较大差异,无法确定分布律和流动分区。这表明 Ghisalberti 等^[17]的无量纲化方法在 Nezu 等^[13]的研究中并不适用。

综上,合理的流速无量纲化方法和流动分区的提出,统一、普适的流速分布律的建立,是含植物明渠研究有待解决的问题。本文以流速分布曲线的几何特点为基础,结合水槽实验测量数据,提出一种新的流速无量纲化方法,探索统一的、适用性较好的流速垂线分布律和流动分区边界。

1 实验装置和工况

1.1 实验装置

实验在可循环矩形断面水槽(长12 m,宽0.6 m,高0.6 m)中进行,供水设备、循环水道、整流装置、模拟刚性植物布置如图1所示。沿水流方向为 x 方向,垂直床面的方向为 z 方向。

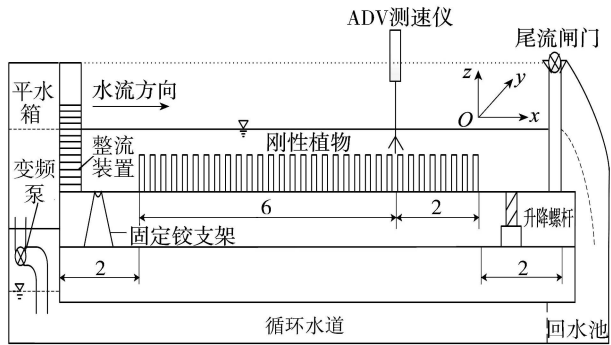


图1 水槽装置和 ADV 测量系统示意图(单位:m)

利用变频泵控制流量 Q ,电磁流量计测量流量。采用尾流闸门调节水位 H ,沿水槽玻璃侧壁的水位

标尺测量沿程水位,确保水位沿程大致相同,流动为整体均匀流。利用声学多普勒测速仪(ADV)进行流速测量。植物段全长8 m,ADV 测量位置位于距植物段起点6 m处,植物段起点距水槽进水口2 m。设定 ADV 测量参数:采样频率200 Hz,采样历时180 s,样本总数大约为36 000个,信噪比大于15 dB,相关度大于70%。

1.2 实验工况

植物选用直径6 mm的圆柱铝棒模拟,固定在打好圆孔的碳素底板中,按照不同植物密度要求对齐布置,如图2所示(b 为相邻模拟植物横向间距, c 为纵向间距)。为使流场测量的数据更具有代表性,选用1~4号共4个位置,测量4条垂线上的流速进行空间平均。植物布置完成后的实际高度 h 为6 m。距床面0.1 cm处为 ADV 起测高度,测量步长为0.2 cm,测至垂向探头的盲区范围(距自由水面大致6~8 cm范围),改用侧向探头测量。

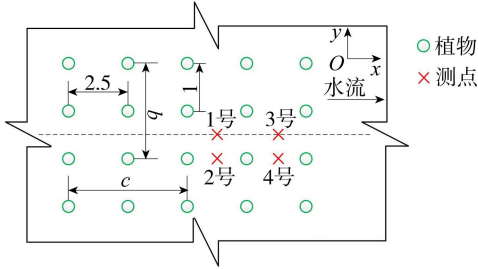


图2 植物分布与测线布置的平面示意图(单位:cm)

根据植物直径 d 和排列间距(b 和 c)可以得到迎面面积系数 $a=d/(bc)$ ^[18-19],取阻力系数 $C_D\approx 1$,以无量纲密度系数 C_Dah 表示密度。在相同水深 $H=18$ cm、淹没度 $S_{ub}=H/h=3$ 的条件下,各工况的实验参数如表1所示。

表1 不同植物密度的实验工况

工况	b/cm	c/cm	a/cm^{-1}	C_Dah	S_{ub}	$u_m/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$Q/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	$Re/10^4$	$S/\%$
A	1	2.5	0.240	1.4400	3.0	30.07	32.48	3.573	37.5
B	1	3.3	0.182	1.0909	3.0	30.03	32.43	3.568	35.2
C	1	5.0	0.120	0.7200	3.0	30.00	32.40	3.564	30.8
D	2	3.3	0.091	0.5455	3.0	30.02	32.42	3.567	26.5
E	2	5.0	0.060	0.3600	3.0	30.00	32.40	3.564	23.3
F	4	5.0	0.030	0.1800	3.0	30.01	32.41	3.565	15.8
G	8	5.0	0.015	0.0900	3.0	29.99	32.39	3.563	13.6
H	8	10.0	0.008	0.0450	3.0	30.03	32.43	3.568	11.2

注: u_m 为表观断面流速, $u_m=Q/BH$; Q 为实际调节流量; B 为水槽宽度; Re 为雷诺数; S 为底坡。

2 实验结果与分析

2.1 无量纲化特征高度与特征流速

对 ADV 获取的垂线流速数据进行时间和空间平均后,将流速分布绘制在以高度为纵轴、以流速为横轴的图中,对离散的流速数据进行平滑拟合,得到

流速分布曲线,如图3所示。

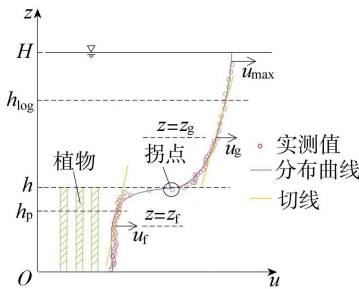


图3 特征高度和特征流速的定义(以 $C_D ah=0.72$ 为例)

Nepf 等^[10-11]指出,植物顶部一定高度范围内存在大尺度的剪切涡,这种剪切涡和植物上下流层间的速度差有直接关系。足够的速度差是植物条件下大尺度剪切涡产生的必要条件,该速度差使得流速分布曲线呈现直观的数学特征。将流速分布(离散)曲线某点处的一阶偏导定义为

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\Delta u}{\Delta z} \quad (1)$$

式中 Δu 、 Δz 分别为流速和高度微元。式(1)能够计算某微元位置处的流速梯度,在流速曲线中表示某点处的切线斜率,其物理意义为该微元的黏性剪切应变速率。

基于两个微元间的流速梯度,取流速梯度变化的绝对值 T ,定义为

$$T = \left| \frac{\partial u_{i+1}/\partial z_{i+1} - \partial u_i/\partial z_i}{\partial u_i/\partial z_i} \right| \quad (2)$$

式中 i 表示流速分布曲线的点。 T 反映了 $i+1$ 点位置的流速梯度变化率,表征黏性剪切应力变化的剧烈程度。

结合流速分布曲线几何特点,以植物顶部($z=h$ 处)附近的拐点为界,将整个水深分为上、下两个区域,经过计算,两个区域分别存在一个流速梯度变化率最大的点,将它们的高度定义为特征高度 z_g (自由水面以下一定高度)和 z_f (植物层内一定高度)。将特征高度 z_g 和 z_f 对应的流速定义为特征流速 u_g 和 u_f ,可作为无量纲化参数。

2.2 自由水面区域流速无量纲化方法及流动界限

Okamoto 等^[12-13]和 Nepf 等^[10-11]分别指出三区流动分区划分的中间区域,上边界为流速对数分布律起点 $h_{\log}$,下边界为剪切涡进入植物层内的最远距离对应的高度 h_p (KH 涡^[20]的渗透高度)。本文计算表明,两个边界高度 $h_{\log}$ 、 h_p 和特征高度 z_g 、 z_f 并不重合(数值比较详见后文)。

在自由水面至特征高度 z_g 的区域内,定义新的无量纲流速 u_1^+ 和高度 z_1^+ :

$$u_1^+ = \frac{u - u_g}{u_{\max} - u_g} \quad (3)$$

$$z_1^+ = \frac{H - z_g}{z - z_g} \quad (4)$$

式中 $u_{\max}$ 为该区域最大流速。

本实验测得的无量纲流速 u_1^+ 和高度 z_1^+ 的分布规律如图4所示。图4中“红点”数据来源于 Nezu 等^[13](密度 $C_D ah=1.55$)。自由水面高度对应 $z_1^+=1$ ($z=H$),无量纲流速 u_1^+ 从自由水面至 z_g 整体的分布趋势为对数分布,取对数分布数据拟合度最好的无量纲起点高度为 z_{1e}^+ ,不同植物密度条件下 z_{1e}^+ 不同,最大为5.8(对应 $C_D ah=0.045$),最小为3.8(对应 $C_D ah=1.0909$)(如图4中 $(z_{1e}^+)_{\max}$ 和 $(z_{1e}^+)_{\min}$ 所示)。将 z_{1e}^+ 对应的实际床面高度定义为 z_e ,换算得到 z_e 范围为 (9.6 ± 1.3) cm, z_e 和 z_g 存在一定的差距。自由水面至 z_e 的对数分布律为

$$u_1^+ = \alpha_1 \ln(\beta_1 z_1^+) \quad (5)$$

式中 α_1 、 β_1 为常数, $\alpha_1 = -2.33 \pm 1.66$, $\beta_1 = 0.11 \pm 0.03$ 。

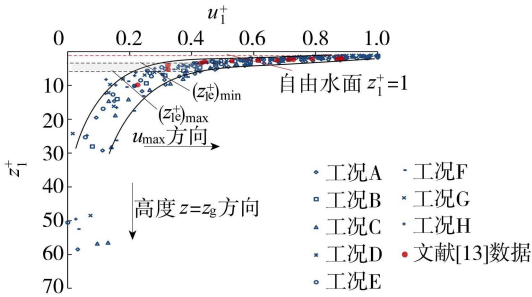


图4 z_g 以上区域无量纲流速和高度的分布规律

式(5)与 Nezu 等^[13]得到的 u^+ 关于 z^+ 的对数分布律形式一致。Nezu 等^[13]指出,当密度 $C_D ah=0.39 \sim 1.55$ 时, $h_{\log}=1.72h \sim 1.88h$ 。基于 Nezu 等^[13]的流速数据用本文的方法确定的对数分布律起点高度 $z_e=1.69h \sim 1.90h$, z_e 和 $h_{\log}$ 较为接近。基于本文工况数据确定的 $z_e=1.38h \sim 1.78h$,在密度 $C_D ah=0.5455 \sim 1.44$ 范围内对应的 $z_e=1.72h \sim 1.78h$,同样与 Nezu 等^[13]的结论接近。

2.3 z_e 以下至床面区域无量纲化方法及流动界限

针对 z_e 高度以下至床面区域,定义新的无量纲流速 u_2^+ 和高度 z_2^+ 。

$$u_2^+ = \frac{u - u_f}{u_g - u_f} \quad (6)$$

$$z_2^+ = \frac{z - z_f}{z_g - z_f} \quad (7)$$

本实验测得的无量纲流速 u_2^+ 和高度 z_2^+ 的分布规律如图5所示。由图5可见,自 $z=z_e$ 向床面的流速分布规律大致分为4段:线性分布区、常数区、双曲正切区、密度函数相关的线性分布区分别对应①至④区。图中红点数据来源和图4来源相同^[13],

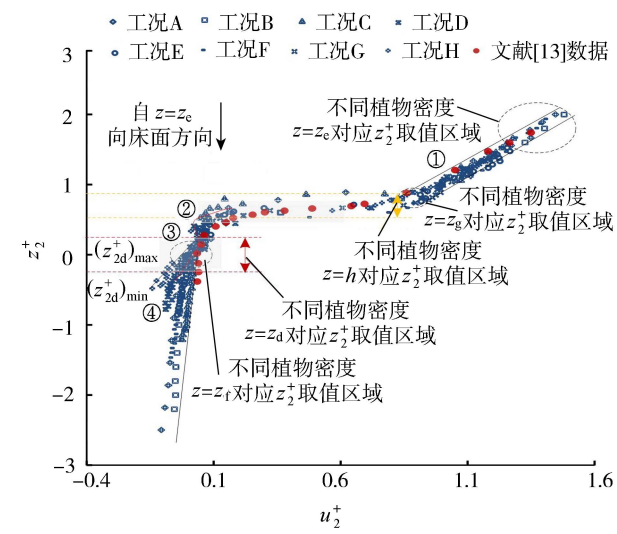


图5 z_e 以下至床面区域无量纲流速的分布规律
其分布与本实验工况数据的分布规律较为一致。

a. 线性分布区①($h < z \leq z_e$): 从 $z = z_e$ 至植物顶部 $z = h$ 的区域, 包含了 $z = z_g$, 线性分布律为

$$u_2^+ = \alpha_2 z_2^+ + \beta_2 \quad (8)$$

式中 α_2, β_2 为常数, $\alpha_2 \approx 2.0, \beta_2 = -1.75 \pm 0.25$ 。

b. 常数区②($z = h$): 在植物顶部 $z = h$ 附近产生流速突变, 不同植物密度对应突变高度相同, 对应的无量纲高度 z_2^+ 不同, 所有工况下植物高度 h 对应的 z_2^+ 最大、最小值分别为 0.8 和 0.5。该区域内流速分布律为

$$u_2^+ = C \quad (9)$$

式中 C 为常数, $C = 0.1 \sim 0.8$ 。

c. 双曲正切区③($z_d < z \leq h$): 从 $z = h$ 至 $z = z_d$ 的区域, 流速分布可用双曲正切函数表示。通过对数据的回归分析发现, 区域④流速为线性分布, 将流速自床面线性分布的终点定义为边界高度 z_d 。 z_d 对应的无量纲高度 z_{2d}^+ 在不同植物密度下不一致, 最大 0.45, 最小 -0.35 (即图 5 的 $(z_{2d}^+)_{\max}$ 和 $(z_{2d}^+)_{\min}$)。基于 Nezu 等^[13] 的流速数据 ($C_D ah = 0.39 \sim 1.55$), 得到 $z_{2d}^+ = -0.21 \sim 0.29$, 满足本文给出的取值范围。 $z_2^+ = 0$ 对应 $z = z_f$, 密度 $C_D ah > 0.18$ 时 $z_d > z_f$, $C_D ah \leq 0.18$ 时 $z_d \leq z_f$ 。该区域流速分布为

$$u_2^+ = \alpha_3 \tanh(\beta_3 z_2^+) + \gamma \quad (10)$$

式中 $\alpha_3, \beta_3, \gamma$ 为常数, $\alpha_3 \approx 2.5, \beta_3 = 0.5 \pm 0.1, \gamma = 0.1 \pm 0.3$ 。

d. 线性分布区④($0 \leq z \leq z_d$): z_d 至床面呈线性分布。该区域流速分布为

$$u_2^+ = \alpha_4 z_2^+ + \beta_4 \quad (11)$$

式中: α_4 为关于密度的函数, 大致随植物密度的减小而增大, $\alpha_4 = f[(C_D ah)^{-1}]$; β_4 为常数。

2.4 各种特征高度和分区界限的对比

不同植物密度条件下, 两个特征高度和各种边

界高度如表 2 所示。

表 2 不同植物密度条件的特征高度和边界高度

密度	z_f/cm	z_g/cm	z_e/cm	z_d/cm	z_e/h	z_d/h	h_p^*/cm	h_p'/h
0.045	4.5	6.3	8.3	4.5	1.38	0.75		
0.090	4.8	6.8	9.2	4.1	1.53	0.60		
0.18	3.7	6.7	8.9	3.3	1.48	0.55	3.7	
0.36	3.5	8.0	10.0	4.3	1.67	0.72	3.9	0.36
0.5455	3.7	7.9	10.3	4.5	1.72	0.75		0.42
0.72	4.5	7.5	10.5	4.7	1.75	0.78	4.7	0.71
1.0909	2.9	8.3	10.9	4.9	1.82	0.82		0.80
1.44	2.7	8.1	10.7	5.1	1.78	0.85	5.5	0.84
0.39*	3.6	7.1	8.5	2.9	1.69	0.57		
0.78*	3.4	7.3	9.3	4.0	1.85	0.80		
1.55*	2.4	8.5	9.5	4.2	1.90	0.83		

注: h_p^* 来源于赵汗青^[21] 混合层下边界的计算结果, 密度 0.39*、0.78*、1.55* 数据来源于 Nezu 等^[13] (植物高度 $h = 5\text{ cm}$), 应用本文方法计算得到。 h_p'/h 的数据采用 Nepf 等^[22] 的估算方法确定。

渗透高度 h_p' 和密度存在如下关系^[22]:

$$\frac{h_p'}{h} = 1 - (0.23 \pm 0.06) (C_D ah)^{-1} \approx 1 - 0.23 (C_D ah)^{-1} \quad (12)$$

混合层下边界 h_p^* 和 KH 涡渗透高度 h_p' 均可作为 KH 涡下边界^[23], 对比特征高度 z_d 和两种方法的计算结果表明, z_d 与 h_p^* 的大小近似相等, z_d/h 的数值和 h_p'/h 在密度较大时较为接近, 即密度越大, z_d 和 KH 涡渗透高度越接近并可作为 KH 涡的下边界。与两种计算结果对比存在差异, 可能是由于本研究和赵汗青^[21] 的实验工况基本一致, 而与 Nepf 等^[22] 密度条件存在一定差异。

此外, 在相同水深和植物高度下, 闫静等^[23] 计算密度为 0.36 和 0.72 时的 h_p 分别为 4.4 cm 和 4.8 cm, 本文得到的 z_d 分别为 4.3 cm 和 4.7 cm; 在淹没度为 3 的情况下, Nezu 等^[13] 在密度范围 0.39 ~ 1.55 得到的 $h_p = 0.5h \sim 0.78h$, 本文在密度范围 0.36 ~ 1.44 得到的 $z_d = 0.72h \sim 0.85h$, 略微偏大。如 2.2 分析所述, z_e 和混合层上边界 $h_{\log}$ 接近。因此, 本文确定的两个边界高度和混合层上下边界基本一致。同时, 基于本文方法和文献^[13] 流速数据得到的 z_e/h 和 z_d/h 与本实验工况的结论较为接近, 且符合随密度变化的规律 (除 z_e/h 在密度最大时略微偏大)。

2.5 流速分布律的适用性和流动分区

为进一步分析流速分布律的适用性, 将提出的沿整个水深的分布律、本实验流速实测值、余洋^[24] 采用 PIV (图像例子测速技术) 得到的流速数据 (选取 $C_D ah = 1.44$) 和双曲正切分布律进行对比分析, 如图 6 所示。

图 6 中的横纵坐标 u^+ 和 z^+ 分别为无量纲流速和无量纲高度, $z = z_e$ 高度以上区域采用 u_1^+ 和 z_1^+ , $z =$

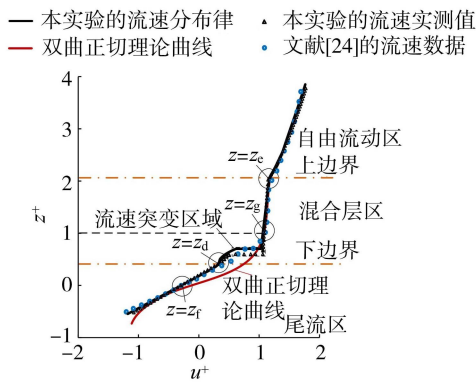


图6 沿整个水深的流速分布律和实验数据及正切曲线的对比(以 $C_D ah=1.44$ 为例)

z_e 高度以下区域采用 u_1^+ 和 z_2^+ 。为保证两个无量纲流速分布同时反映在同一坐标轴内,对 $z=z_e$ 高度以上区域的数据作适当处理:对 $z=z_e$ 高度以上的对数分布律作中心对称,将纵坐标缩小 2 倍,再整体向右平移大致 0.5 个单位,使得两个无量纲分布律在 $z=z_e$ 处连接(z_e 包含在上部区域)。本研究各分段函数中常数取相应的平均值。对数分布律以下的分段函数和双曲正切理论曲线对比,双曲正切的理论曲线为 $u^+ = \alpha \tanh(\beta z^+) + \gamma$ (α, β, γ 均为常数,取 $\alpha = 2.5, \beta = 0.5, \gamma = 0.1$)。

图6表明,本文得到的沿整个水深的流速实测值及其他研究者 PIV 流速数据吻合良好,在 $z=z_e$ 高度以下,与双曲正切理论曲线相比,分段函数分布律与实测值吻合更好。可以以 z_e 和 z_d 分别作为上下边界,将整个水深分为 3 个区域:自由流动区、混合层区、尾流区,其中,自由流动区与经典明渠外区流动类似;混合层区内,第一段线性分布区 ($h < z \leq z_e$) 为 KH 涡单独作用的范围,第二段流速突变区为植物顶部,第三段双曲正切分布区 ($z_d < z < h$) 为 KH 涡与尾涡共同作用的区域;尾流区(第四段线性分布区 ($0 \leq z \leq z_d$))内尾涡单独存在。

沿整个水深的流速分布律可归纳如下:

$$u_1^+ = \alpha_1 \ln \beta_1 z_1^+ \quad z_e < z \leq H \quad (13)$$

$$u_2^+ = \begin{cases} \alpha_2 z_2^+ + \beta_2 & h < z \leq z_e \\ C & z = h \\ \alpha_3 \tanh(\beta_3 z_2^+) + \gamma & z_d < z < h \\ \alpha_4 z_2^+ + \beta_4 & 0 \leq z \leq z_d \end{cases} \quad (14)$$

式中 C 为常数。

3 结 论

a. 根据流速分布曲线的梯度突变确定的两个特征高度 z_f, z_g , 及其分别对应特征速度 u_f 和 u_g , 采用 $z_f, z_g, u_f, u_g, u_{\max}, H$ 组成无量纲参数,提出新的无量纲化方法,能够对流速进行有效的无量纲化。

b. 根据不同流速分布律的适用区域确定了两个边界高度 z_e 和 z_d , z_e 至自由水面无量纲流速呈对数分布; z_e 至床面的分布律可用 4 段函数表示。经过和其他研究的对比验证,整个垂线的分布律具有合理性和适用性。

c. 无量纲流速在自由水面区对数分布的起点 z_e 和近床面区线性分布的终点 z_d 作为流动分区的两个边界,分别和混合层上下边界 $h_{\log}$ 和 h_p 的大小近似相等,是一种合理的分区方法。

参考文献:

- [1] NEZU I, NAKAGAW H. Turbulence in open-channel flows [M]. Rotterdam: Balkema, 1993.
- [2] 槐文信, 韩杰, 曾玉红, 等. 淹没柔性植被明渠恒定水流水力特性的试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 791-797. (HUAI Wenxin, HAN Jie, ZENG Yuhong, et al. Experimental study on hydraulic behaviors of steady uniform flow in open channel with submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 791-797. (in Chinese))
- [3] 渠庚, 陈栋, 赵占超, 等. 含植物明渠水流运动特性试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2019, 34(4): 539-547. (QU Geng, CHEN Dong, ZHAO Zhanchao, et al. Experimental study on the characteristics of flow movement in open channel with vegetation[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2019, 34(4): 539-547. (in Chinese))
- [4] 王付, 王超. 含挺水植物和沉水植物水流紊动特性[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 816-822. (WANG Cun, WANG Chao. Turbulent characteristics in open-channel flow with emergent and submerged macrophytes[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 816-822. (in Chinese))
- [5] 闫静, 陈扬, 唐洪武, 等. 含植物明渠流动分区和特征尺度研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(6): 428-434, 441. (YAN Jing, CHEN Yang, TANG Hongwu, et al. Advances in research on sub-division and characteristic scales of open channel flows with vegetation[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(6): 428-434, 441. (in Chinese))
- [6] 刘宏哲, 娄厦, 刘曙光, 等. 含植物水流动力特性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(4): 85-94. (LIU Hongzhe, LOU Sha, LIU Shuguang, et al. Advances in hydrodynamic characteristics of flows with vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(4): 85-94. (in Chinese))
- [7] STEPHAN U, GUTKNECHT D. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(1/2): 27-43.

- [8] YANG W, CHOI S U. Impact of stem flexibility on mean flow and turbulence structure in depth-limited open channel flows with submerged vegetation [J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47 (4) : 445-454.
- [9] KOUWEN N. Field estimation of the biomechanical properties of grass [J]. Journal of Hydraulic Research, 1988, 26 (5) : 559-568.
- [10] NEPF H M, VIVONI E R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2000, 105 (C12) : 28547-28557.
- [11] NEPF H, GHISALBERTI M. Flow and transport in channels with submerged vegetation [J]. Acta Geophysica, 2008, 56 (3) : 753-777.
- [12] OKAMOTO T A, NEZU I. Turbulence structure and “Monami” phenomena in flexible vegetated open-channel flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47 (6) : 798-810.
- [13] NEZU I, SANJOU M. Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2008, 2 (2) : 62-90.
- [14] POGGI D, PORPORATO A, RIDOLFI L, et al. The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2004, 111 (3) : 565-587.
- [15] 李艳红, 赵敏. 含植物河流动力学实验研究-流速、摩阻流速及曼宁糙率系数垂线分布 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2004, 19 (4) : 513-519. (LI Yanhong, ZHAO Min. Experimental studies of hydrodynamics in vegetated river flows; vertical profiles of velocity, shear velocity and Manning roughness [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2004, 19 (4) : 513-519. (in Chinese))
- [16] CHENG Niansheng, NGUYEN H T, TAN S K, et al. Scaling of velocity profiles for depth-limited open channel flows over simulated rigid vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138 (8) : 673-683.
- [17] GHISALBERTI M, NEPF H M. Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107 (C2) : 3011.
- [18] CHEN Zhengbing, JIANG Chunbo, NEPF H. Flow adjustment at the leading edge of a submerged aquatic canopy [J]. Water Resources Research, 2013, 49 (9) : 5537-5551.
- [19] OKAMOTO T A, NEZU I. Spatial evolution of coherent motions in finite-length vegetation patch flow [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2013, 13 (5) : 417-434.
- [20] 闫静, 刘杰夫, 陈红, 等. 植物条件下明渠紊流 KH 涡相关问题研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (2) : 90-94. (YAN Jing, LIU Jiefu, CHEN Hong, et al. Advances in related issues on KH vortex in vegetated open channel flows [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (2) : 90-94. (in Chinese))
- [21] 赵汗青. 含淹没植物明渠的紊流涡结构及床面形态影响研究 [D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [22] NEPF H, GHISALBERTI M, WHITE B, et al. Retention time and dispersion associated with submerged aquatic canopies [J]. Water Resources Research, 2007, 43 (4) : W04422.
- [23] 闫静, 王晓丽, 陈红, 等. 淹没植物条件下明渠 KH 涡的垂向几何尺度和频率 [J]. 水科学进展, 2021, 32 (5) : 770-779. (YAN Jing, WANG Xiaoli, CHEN Hong, et al. Vertical geometry scale and frequency of KH vortex in open channel flow through submerged vegetation [J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (5) : 770-779. (in Chinese))
- [24] 余洋. 植物密度对明渠紊流拟序结构的影响研究 [D]. 南京: 河海大学, 2022.
- (收稿日期: 2022 - 12 - 05 编辑: 俞云利)

(上接第 61 页)

- [17] 于守兵, 张朝晖, 徐丛亮. 黄河河口鱼类春季生态需水 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (3) : 1-7. (YU Shoubing, ZHANG Zhaohui, XU Congliang. Spring ecological water requirement for fishes in Yellow River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (3) : 1-7. (in Chinese))
- [18] 余明勇, 张海林. 基于综合效益发挥的南方平原区城市湖泊景观水位 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2015, 43 (3) : 222-229. (YU Mingyong, ZHANG Hailin. Suitable water level for landscape function of lakes in southern plains of China based on optimization of comprehensive benefits [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43 (3) : 222-229. (in Chinese))
- [19] 冉红达, 程伍群, 张福洋. 城市水系生态环境需水量分析与计算 [J]. 水电能源科学, 2017, 35 (8) : 35-39. (RAN Hongda, CHENG Wuqun, ZHANG Fuyang. Analysis and calculation of eco-environmental water demand in urban water system [J]. Water Resources and Power, 2017, 35 (8) : 35-39. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022 - 11 - 08 编辑: 刘晓艳)