文章编号: 1672 - 3317 (2020) 02 - 0078 - 06

# 含刚性沉水植物明渠水流结构的试验研究

王子建,丁雪,吉庆丰\*

(扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘 要:【目的】得到含刚性沉水植物明渠的水流结构。【方法】采用粒子图像测速仪 (PIV),用有机玻璃棒模拟刚 性植物,在不同来水流量、植物密度条件下对明渠水流结构进行了试验研究。【结果】无植物时平均流速沿垂向呈对 数分布规律,有植物时则呈现明显的分区分布特性。无植物时紊动强度值沿垂向变化不大,有植物时在植物顶端位 置处紊动最剧烈。流量或植物密度越大,植物顶端位置的流速梯度就越大,植物层上方的流速最大值也越大。植物 密度越大,植物顶端位置的紊动强度越大,植物密度对水流紊动强度由最大值减小到最小值的区域影响很大。【结论】 刚性沉水植物的存在会改变水流结构,增强紊动掺混,增强流体质点交换和能量传递,且上述影响会随着流量或植 物密度的增大而增强。

关键词:刚性沉水植物;明渠流动;水流结构;试验研究

中图分类号: TV131.61+5

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019040

王子建, 丁雪, 吉庆丰. 含刚性沉水植物明渠水流结构的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 78-83. WANG Zijian, DING Xue, JI Qingfeng. Experimental study on flow structure of open channels with rigid submerged plants [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 78-83.

0 引 言

自国务院发布《水污染防治行动》以来,全国各 个地区都在积极采取行动治理黑臭河道。整治黑臭河 道最重要的就是加强河流生态系统建设<sup>[1]</sup>,而水生植 物作为河流生态系统中必不可少的组成部分<sup>[2]</sup>,不仅 可以净化河湖水系,为河流中的生物提供良好的生存 环境,而且河岸种植的植物还具有美化景观的作用。 因此,研究水生植物对于黑臭河道的治理具有非常重 要的意义。

David 等<sup>[3]</sup>在铺有细碎石子的槽底种植不同密度 的柔性植被,植被的高度小于水深,呈淹没状态,通 过物理试验研究了水流的阻力特性和紊动特性。Ortiz 等<sup>[4]</sup>研究了种有淹没柔性植物和非淹没刚性植物明 渠的水流特性和泥沙沉积。Zeng 等<sup>[5]</sup>对水流流经半刚 性植被时的阻力特性进行了研究,采用了2种研究方 法,一是进行了物理试验,二是建立数学模型进行了 数值模拟。Shi 等<sup>[6]</sup>对不同流量不同植物密度的含植 物水槽进行了试验,将流动分为3个区域,研究了曼 宁糙率系数、雷诺数以及弗劳德数3个参数的变化规 律。渠庚等<sup>[7]</sup>利用 ADV 对无植物、含淹没型植物、 含非淹没型柔性植物水流阻力特性的变化规律进行 了研究,对不同植物的水流阻力进行分区回归分析, 得到各植物的水流阻力在不同分区的经验表达式。景 何仿等<sup>[8]</sup>利用水位计及 LDV 等仪器对不同工况下的 流速分布、水位分布等进行了测量,指出植物区域的 流速、水面坡降与植被的种植密度、排列方式密切相 关。李坤芳等<sup>[9]</sup>通过在水槽中布置交错排列的竹签研 究非淹没的刚性植物对水流不同方向的紊动能所产 生的影响,发现植物对不同方向的紊动能分布影响程 度不一样。

含植物明渠流速分布的变化对于明渠水流的阻 力特性、紊流特性等都会产生影响<sup>100</sup>,而且含植物明 渠的流速分布与普通明渠的流速分布差异很大,植物 自身刚度特性、高度、分布密度等因素都会影响含植 物明渠的流速分布。紊动强度的分布直接反映了水流 紊动的强弱程度,雷诺应力是剪切流场中紊动引起的 动量交换的结果,也是反映水流紊动特性的重要指标。 对以上物理量的测量对于研究含植物明渠中水流具 有重要的意义。现代测量仪器的发展,为流场测量提 供了新的契机。粒子图像测速仪(PIV)克服了单点 测量的不足,能够提供瞬时全场的流动信息。本文利 用 PIV 对含刚性沉水植物明渠的水流特性进行了水 槽试验,研究了不同流量、不同密度情况下流速、紊 动强度以及雷诺应力的分布规律。

收稿日期: 2019-04-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51376026)

作者简介: 王子建(1995-),男,江苏常州人。硕士研究生,主要从事工 程水力学研究。E-mail: jswangzijian@hotmail.com

通信作者: 吉庆丰(1964-), 男, 江苏高邮人。教授, 博士生导师, 主要 从事工程水力学研究。E-mail: qfji@yzu.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

试验在长×宽×高为8m×1m×0.35m的有机玻璃 水槽中进行。试验装置图见图1,水槽为自循环供水, 在管路中装有电磁流量计、混流泵、调节阀门。为了 确保试验段水流平稳,在水槽进口处设有2道整流栅, 并在2道整流栅之间布置稳水隔板。在水槽出水处使 用水管吸水,在出口处距离吸水管上游30cm的地方 也布置了一道整流栅。试验方案设计的植物带长度为 2m,在水槽底部中间位置铺设有PVC塑料板,塑料 板的厚度为1cm,板上钻有距离相等的小孔用于安插 植物。



表1 工况参数

Table 1   Working condition parameter					
工况 Working condition	D/ (plant·m <sup>-2</sup> )	$Q/(\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1})$	$v/(\mathbf{m}\cdot\mathbf{s}^{-1})$	R	<i>T</i> /℃
1	0	120	0.12	33 267	20
2	2 400	120	0.12	39 161	27
3	2 400	85	0.08	26 698	28
4	2 400	40	0.04	13 642	29
5	600	120	0.12	40 926	29

## 1.2 试验工况及方法

采用有机玻璃棒代替刚性植物,有机玻璃棒直径为6mm,长度分别为7cm和10cm,布置完成后淹没情况的模拟植物高度分别为6cm及9cm。试验时水深 h 为 0.28 m;流量 Q 分为3个量级,分别为120、85、40 m<sup>3</sup>/h;植物密度 D 有 2 种,分别为600、2 400 p/m<sup>2</sup>,模拟植物采用等间距平行布置,其平面布置如

图 2 所示。雷诺数 *Re=vh/v*,式中:v为水的运动粘度, 用断面平均流速 *u<sub>m</sub>*代入; *Re*=13 642~40 926,大于 500 为紊流;水温 *T* 用温度计测量;试验工况见表 1。

试验时先对上下游水位进行测量,通过电磁流量 计和混流泵调节阀门,调整水槽中的流量为所需流量。 在水位和流量调整好后,待水流稳定,利用 PIV 测量 获得流场数据,然后在 Dynamic Studio 中对相机拍摄 的流场照片进行处理,导出流场数据。本试验采用自 适应互相关算法,拍摄时采用双帧模式,采集 80 对 图片,处理后剔除数据明显不合理的矢量图,然后进 行后续处理。

## 2 结果与分析

## 2.1 流速分布规律

工况1和工况2下测得的平均流速分布见图3。





Fig.3 Comparison of average velocity distribution between plants and no plants

由图 3 可以看出, 无植物时流速沿垂向呈对数分 布, 由于水槽槽底黏滞力的存在, 在水槽底部流速较 小, 沿水深往上, 由于摆脱了黏滞力的作用, 流速逐 渐增大至最大值, 然后保持最大值基本不变。有植物 存在时, 流速不再符合对数分布规律, 而是呈现明显 的分区分布特征, 在植物带内部, 由于植物的阻水作 用, 流速逐渐增大, 在靠近水面处增至最大值, 然 后保持最大值基本不变。有植物存在时水槽中的最大 流速大于无植物存在时的最大流速。

工况 2、工况 3、工况 4 下测得的平均流速分布 见图 4。由图 4 可知,水槽中进水流量越大水流的流 速就越大,同时植物顶端位置的流速梯度以及植物带 上方所达到的流速最大值也越大。工况 2、工况 5 下 测得的平均流速分布见图 5。由图 5 可知,植物的种 植密度越大,植物带内部的速度越小,而植物带上方 的流速最大值越大,同时植物顶端位置的流速梯度随 着密度的增大而增大。





河底的刚性植物将会极大地改变水流的流速分 布,含刚性沉底植物明渠中自由水面附近与水底附近 的流速大小差异很大,植物顶端位置上部较大的流速 梯度意味着在这一区域水流紊动程度较强。对于实际 河道,流速分布的改变将会导致河道过流能力的改变, 势必将对河道行洪、排涝、灌溉等功能产生影响。

#### 2.2 紊动强度分布规律

紊动强度的表达式为:  $N=\sqrt{\frac{1}{3}u_i^2}=\sqrt{\frac{2}{3}k_o}$ 式中:  $u_i'为 i 方向的脉动流速; k 为紊动能,$  $k=\frac{1}{2}(\overline{u_x'^2}+\overline{u_y'^2}+\overline{u_z'^2}), x 方向为纵向; y 方向为横向; z 方$ 向为垂向。

工况 1 和工况 2 下测得的紊动强度分布规律见 图 6。由图 6 可知,水槽中无植物时紊动强度沿垂向 分布的变化不大;有植物存在时,水流明显紊动剧 烈,紊动强度自槽底开始逐渐增加,在植物顶端位 置紊动强度达到最大值,而后紊动强度又逐渐减小, 在靠近水面处一段距离紊动强度保持较小的数值且 几乎不变。

工况 2、工况 3、工况 4 下紊动强度沿垂向的分 布见图 7。由图 7 可知,无论是植物顶端位置以上或 是以下区域,流量越大,紊动强度越大。工况 2 和工 况 5 下紊动强度沿垂向的分布见图 8,由图 8 可知, 在植物顶端位置以下以及靠近水面的区域,分布密度 对紊动强度的影响较小;分布密度对紊动强度在植物 顶端位置以上区域影响最大,在该区域,紊动强度随 植物密度的增大而增大。



图 6 有植物与无植物紊动强度分布规律对比图



between plants and no plants





Fig.7 Vertical distribution of turbulence intensity under

different flow conditions





相比于普通明渠,含刚性沉水植物明渠中的水流 紊动强度显著增强,植物密度或者流量的增大都会扩 大这一影响。紊动强度增大,意味着水流紊动掺混更 加剧烈,流体质点交换和能量传递增强。在实际河道 中,紊动作用的增强有利于污染物质输移,水体水质 净化,这对于改善河道环境,改良河道生态等都具有

## 重要的意义。

#### 2.3 雷诺应力分布规律

通过 PIV 测量得到的雷诺应力可表示为:

$$\tau_{xz} = -\rho \overline{u'_z u'_x} \quad . \tag{1}$$

工况1和工况2下测得的雷诺应力沿垂向的分布 见图 9,工况 2、工况 3、工况 4 下雷诺应力沿垂向 的分布见图 10,工况 2 和工况 5 下测得的雷诺应力 分布见图 11。将雷诺应力的分布规律与紊动强度的分 布规律做比较,发现二者的分布规律相似。有植物时 雷诺应力的最大值同样出现在植物顶端位置附近。流 量或植物密度越大,植物顶端位置的雷诺应力也就越 大。雷诺应力是由于紊动水团的交换在流层之间产生 的附加切应力,由雷诺应力的表达式可以看出,雷诺 应力与脉动流速及液体密度有关,对于本试验而言, 雷诺应力在不同工况下的不同分布主要与脉动流速  $u'_x$ 、 $u'_z$ 有关,这与脉动强度是一致的,而不同工况下 脉动流速的差异是流量和植物密度的不同导致的,因 此雷诺应力的分布规律与紊动强度的分布规律相似 是合理的。





between plants and no plants





Fig.10 Vertical distribution of Reynolds stress under different flow conditions





图 12 数值模拟与水槽试验的流速分布对比图

Fig.12 Comparison of flow velocity distribution between numerical simulation and physical model experiment



图 13 数值模拟不同流量工况下紊动强度沿垂向分布图 Fig.13 Vertical distribution of turbulence intensity under different flow conditions(numerical simulation)

## 3 讨 论

丁雪等<sup>[11]</sup>采用多孔介质模型的结果与本研究中 水槽试验的结果基本一致。流速沿垂向的分布在植物 顶端位置以下吻合较好,在植物顶端位置以上部分, 水槽试验结果的流速梯度更大,流速曲线拐点位置相 比数值模拟的结果更高。

对于紊动强度,水槽试验和数值模拟的结果也是 基本吻合的,在细节上有所区别。数值模拟时,紊动 强度在沿 z 轴正方向达到最大值后迅速减小,在水面 附近区域都保持较小的数值。而在水槽试验中,紊动 强度在沿 z 轴正方向达到最大值后逐渐减小,在接近

2 585-2 599.

水面时降至一较小值后保持稳定。此外,数值模拟时 素动强度的最大值所在的高度稍高于植物顶端位置 高度,这一现象在物理模拟中不明显,但在数值模拟 中极为明显。

### 4 结 论

 1)在水槽槽底布置植物,改变了水槽的槽底结构。由于受到植物的阻碍,水流结构发生改变,流速 分布较之于普通明渠区别很大。

2)水流紊动掺混增强,流体质点交换和能量交换则增强。

3)在植物顶端位置附近,植物的阻水作用尤为 明显,此处出现了最大的流速梯度,最大的紊动强度 和最大的雷诺应力,且这一特征随着流量、植物密度 的增大而表现得越发明显。

#### 参考文献:

- [1] 王翔龙,张少博,刘谦,等. 2010—2014 年长沙市各县(区)水资源供 给与用水量情况分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S1): 96-99.
  WANG Xianglong, ZHANG Shaobo, LIU Qian, et al. Analysis of water resources supply and water consumption in various counties (Districts) of changsha city from 2010 to 2014[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018,37(S1): 96-99.
- [2] 薛城,王文娥,胡笑涛,等. 沟灌简易长喉道量水槽水力性能初探
  [J]. 灌溉排水学报,2018,37(10):87-93.
  XUE Cheng, WANG Wene, HU Xiaotao, et al. Preliminary Study on Hydraulic Performance of Simple Long Throat Flume for Ditch Irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 87-93.
- [3] DAVID VELASCO, ALLEN BATEMAN, JOSE M, et al. An Open Channel Flow Experimental and Theoretical Study of Resistance and Turbulent Characterization Over Flexible Vegetated Linings[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2003(70): 69-88.
- [4] ORTIZ A C, ASHTON A, NEPF H. Mean and Turbulent Velocity Fields Near Rigid and Flexible Plants the Implications for Deposition[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, 118(4):

- [5] ZENG C, LI C W. Measurements and modeling of open-channel flows with finite semi-rigid vegetation patches[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2014, 14(1): 113-134.
- [6] SHI Z J, LI YANHONG, et al. Hydrological characteristics of vegetated river flows: a laboratory flume study[J]. Hydrological Sciences Journal, 2013, 58(5): 1 047-1 058.
- [7] 渠庚, 张小峰, 陈栋,等. 含柔性植物明渠水流阻力特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(11):1 344-1 351.
  QU Geng, ZHANG Xiaofeng, CHEN Dong, et al. Experimental Study on Flow Resistance Characteristics of Open Channel Containing Flexible Plants[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(11):1 344-1 351.
- [8] 景何仿,张凯,杨程,等.非淹没挺水植被水流特性试验研究[J].水 力发电,2017,43(12):105-108.

JING Hefang, ZHANG Kai, YANG Cheng, et al. Experimental Study on Flow Characteristics of Non-submerged Inrush Vegetation[J]. Water Power, 2017, 43(12): 105-108.

- [9] 李坤芳, 王丹, 杨克君, 等. 植被群落作用下河道水流紊动能分布
  [J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 116-118.
  LI Kunfang, WANG Dan, YANG Kejun, et al. Distribution of turbulent kinetic energy of river flow under vegetation communities[J].
  Hydropower Energy Science, 2017, 35(2): 116-118.
- [10] 鲁显赫,高庆方,王新福,等.无为大堤防洪保护区河道建模方法研 究[J]. 灌溉排水学报,2019,38(1):116-121.
  LU Xianhe, GAO Qingfang, WANG Xinfu, et al. Study on River Modeling Method of Wuwei Dam Flood Protection Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 116-121.
- [11] 丁雪,吉庆丰,朱字泽. 含刚性沉水植物水槽二维流场的数值模拟 研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 215-219.
   DING Xue, JI Qingfeng, ZHU Yuze. Numerical Simulation of Two-Dimensional Flow Field in Submerged Plant Water Channel with Rigid Submerged Plants[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(4): 215-219.

# Experimental Study on Flow Structure of Open Channels with Rigid Submerged Plants

### WANG Zijian, DING Xue, JI Qingfeng\*

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: [Objective] This study is to explore the flow structure of open channel with rigid submerged plants. [Method] The flow structure of open channel was studied under different inflow and plant density conditions using particle image velocimeter (PIV) and plexiglass rod to simulate rigid plants. [Result] It was found that the average velocity distribution along the vertical line was logarithmic in the absence of plants, while it showed obvious zonal distribution in the presence of plants. The intensity of turbulence did not change much in the direction of water depth when there was no plant, but the turbulence was most intense in the canopy when there were plants. The greater the flow rate or plant density, the greater the velocity gradient at the canopy and the maximum velocity above the plant layer were. The greater the plant density, the greater the turbulence intensity were in the canopy. The plant density had a great influence on the region where the turbulence intensity decreased from the maximum to the minimum.

【Conclusion】 The existence of rigid submerged plants will change the flow structure, enhance turbulent mixing, enhance fluid particle exchange and energy transfer, and these effects will increase with the flow or plant density. **Key words:** rigid submerged plant; open channel flow; flow structure; experimental study

责任编辑: 白芳芳

(上接第77页)

# Experimental Study on Uniformity of Combination and the Paving Spacing for Thin Wall Micro Spray Belt

WANG Jinyi<sup>1</sup>, YANG Luhua<sup>1, 2</sup>, GOU Wanli<sup>1</sup>, DI Zhigang<sup>1</sup>

(1.College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Agricultural Water Conservancy Technology Engineering Center, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** [Objective] We aimed to study the combination uniformity and optimum laying space about the thin wall micro spray belt. [Method] Three kinds of micro spray belts were chosen which were often used in water saving engineering. Experiments were carried out on the intensity, uniformity and width of micro-spray belt under different pressures, and the Surfer software Kriging interpolation method of mesh data was used according to water volume combination principle about the thin wall micro spray belt with pipe diameter of N44 mm.Within the range of 1.0~2.0 *R* (spraying width), the spraying intensity and uniformity of micro-spraying belt for combination were analyzed, and the optimal spacing of micro-spraying belt for combination was determined. [Result] The results showed that the spraying intensity of single tube micro-spraying belt distributed as single and double peak with the increase of spraying distance, and the spraying width increased with the pressure. In addition, the combined spraying intensity decreased with the laying distance and the combination uniformity presented a trend of "large-small-large-small" with the increase of paving spacing. When the paving spacing of micro-spray belt was 1.6 *R*, the combination uniformity reached its peak. [Conclusion] The combined spraying intensity is smaller and the combined uniformity is larger when paving spacing is 1.8 *R* and 1.9 *R*, which meets the requirements of the commonly specification using micro spraying belt with pipe diameter of 44 mm in the market.

**Key words:** thin wall micro spray belt; spraying width; laying spacing; uniformity of combination; spraying intensity of combined

责任编辑:白芳芳