

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.02.013

有限流动水域浮体结构对水流结构的影响

崔 贞¹, 顾晓峰², 傅宗甫¹, 江 文¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128)

摘要: 基于物理模型试验, 研究浮体结构在有限流动水域运行过程中对下游水流流动结构产生的影响。在不同浮体结构位置及来流条件下, 对下游水流结构特征断面的流速分布、流速不均匀系数以及回流区长度进行了测量分析。结果表明: 浮体结构位置对流速分布及流速不均匀系数存在明显影响; 来流条件的改变同样对两者有较大的影响, 其影响随着来流流量的增大而增大; 回流区的长度受浮体结构位置以及来流流量影响都较大。在实际工程中, 应重点关注浮体结构位置及来流流量变化引起的水流流动结构改变。

关键词: 浮体结构; 水流流动结构; 不均匀系数; 回流区; 有限流动水域; 结构稳定性

中图分类号: TV131.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2019)02-0170-05

Influence of floating structure on the flow structure of downstream water in finite flowing

CUI Zhen¹, GU Xiaofeng², FU Zongfu¹, JIANG Wen¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Taihu Planning and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Suzhou 215128, China)

Abstract: The influence of floating structure on the downstream flow structure in the finite flowing was studied by using a physical model test. By comparing the floating structure in different positions and under discharge conditions, the distribution of flow velocity, the non-uniform coefficient and the length of recirculation zone of the characteristic cross section are analyzed. The results show that the influence of floating structure position on the velocity distribution and the non-uniform coefficient is clearly observed, and the discharge condition also has a great influence on them. Besides, this effect shows an increasing trend with the increase of flow discharge. Both different positions and discharges have a significant impact on the length of the recirculation zone. In the practical engineering, attention should be paid to the engineering problems caused by the change of the positions and discharge. The change rule of downstream flow structure of floating structures during the process of running is obtained in this study, which can provide references for the design of floating structural stability.

Key words: floating structures; flow structure; coefficient of non-uniformity; recirculation zone; finite flowing water; structure stability

浮体结构闸门作为一种新型的环境友好型闸门在平原水利防洪工程中得到广泛的应用^[1-4]。受边界以及流动特性的影响, 有限流动水域中的浮体结构水动力变化更为复杂, 易导致浮体结构倾覆, 从而影响工程安全。水流结构的变化对浮体结构稳定性起到关键作用^[5-6]。邢殿录等^[7-8]对比无限和有限水域, 认为有限水域中边界的存在影响浮体结构的水动力系数。陆彦^[9]分析浮箱门在静水和动水中的稳定性及其影响因

基金项目: 国家自然科学基金(51279048); 中央高校基本科研业务费专项(2016B40414)

作者简介: 崔贞(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: cuizhen@hhu.edu.cn

通信作者: 傅宗甫, 副教授。E-mail: zffu@hhu.edu.cn

引用本文: 崔贞, 顾晓峰, 傅宗甫, 等. 有限流动水域浮体结构对水流结构的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 170-174.
CUI Zhen, GU Xiaofeng, FU Zongfu, et al. Influence of floating structure on the flow structure of downstream water in finite flowing[J].
Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(2): 170-174.

素,对浮箱门在运行过程中的周围水力特性进行描述,并给出了增加沉浮稳定性的措施。Johnson 等^[10]采用物理模型试验对淹没状态下的防波堤在周围波浪以及水流作用下的影响进行分析,通过3种不同的数值模型对比并描述了浮式防波堤对周围水流流态分布及波高的影响。傅宗甫等^[11-12]基于水力学模型试验,分析了新型浮体闸在动水中沉浮的水力特性,得到不同位置下影响浮体闸稳定性的因素,同时提出提高浮体闸沉浮安全性的方式。苏礼邦^[13]对浮体启闭闸门在流动水域中的运行进行了理论研究和模型试验,得到浮体门受初始潮位影响较大、减小上下游水头差可减小浮体门的受力从而提高稳定性的结论,为大型浮体门的结构设计和操作运行控制提供了技术支持。Rey 等^[14]采用试验方法模拟了水流作用下的淹没平板的水力荷载,得到水流对反射系数及作用在平板上的水平力影响巨大、对垂直作用力却影响微小的结论。Venugopal 等^[15]得到不同浮体结构体型以及吃水深度对其表面受力影响巨大。崔贞等^[16-18]采用物理模型试验以及数值模拟对不同浮体结构在不同水力特性下的水流结构以及倾覆性进行研究,研究不同参数对浮体结构的影响,为有限流动水域中浮体结构的稳定性提供参考依据。以上研究大多对浮体结构的稳定性及所受作用力进行研究,对水流结构及其影响因素研究较少。本文通过物理模型试验,对不同来流条件下及不同位置下的浮体结构在有限动水作用下的下游水流结构进行分析。通过对比不同来流以及位置下的水力特性,分别对特征断面的流速分布特征、断面流速的不均匀系数以及回流区的变化特性进行比较分析,以期有限水域浮体结构在动水运行过程中的周围水流变化特性以及其稳定性分析提供依据。

1 试验装置及参数设计

1.1 试验装置

为探究浮体结构在不同位置以及不同来流流量对下游水流结构的影响,在长、宽、高分别为 10.00 m、0.30 m 和 0.50 m 的有机玻璃水槽中进行物理模型试验(图 1)。浮体结构位于水槽中间区域,通过闸门调速装置对浮体结构的位置进行精确控制,对下游区域流速采用 ADV 进行测速,并采用电磁流量计进行流量监测。

1.2 试验参数设计

有限水域的浮体结构在不同来流动水中运行时,浮体结构位置的改变会对流场产生影响,从而影响浮体结构的泄流能力以及稳定性。试验过程中固定浮体结构的体型不变(长 $L=0.20$ m,宽 $B=0.30$ m,高 $a=0.10$ m),分别选取 4 种不同来流流量 Q 及浮体结构位置 e ,控制浮体结构在上、下游水位不变的条件下进行试验,具体试验参数设计及说明见表 1 以及图 2。

表 1 试验参数设计

Table 1 Design of experimental parameters

$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	e/m	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	e/m
0.015	0.02	0.021	0.02
0.015	0.04	0.021	0.04
0.015	0.06	0.021	0.06
0.015	0.08	0.021	0.08
0.018	0.02	0.024	0.02
0.018	0.04	0.024	0.04
0.018	0.06	0.024	0.06
0.018	0.08	0.024	0.08

注:上下游水位差 $\Delta H=0.02$ m,下游水位 $H'=0.2$ m。



图 1 试验整体模型

Fig. 1 Overall model of experiments

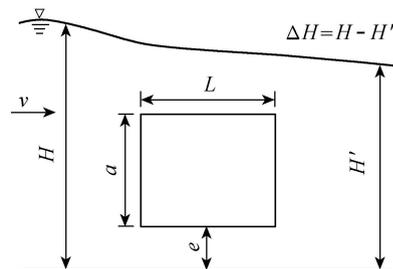


图 2 试验参数示意图

Fig. 2 Sketch map of experimental hydraulic parameters

2 结果及分析

来自上游的水体经浮体结构的阻挡作用,水流绕流经浮体结构的上部和下部区域通过,并在浮体结构背水面的下游区域形成小范围回流区,此处水流紊乱,流速分布不均匀。试验过程中,对回流区沿水流方向的

长度 D (水槽纵向中心断面处, 自浮体结构背水面到沿水流方向流速为 0 的最远位置点) 进行量测。选取浮体结构下游回流区中心点所在断面进行流速测量对比。流速测量断面位置 A—A 见图 3。

2.1 不同浮体位置对断面流速分布的影响

图 4 横坐标为断面水流方向流速, 纵坐标为测点垂向位置与下游水位的比值 y/H' 。随着浮体结构位置的上升, 最小断面流速位置同样上升。以图 3(a) 为例, 当 $e=0.02\text{ m}$ 时, 下游断面位置自下而上呈现先减小、后增大的趋势, 在 $y/H'=0.40$ 时流速达到最小, 随着浮体结构位置的上升, 最小流速呈现向上偏移的趋势。在断面位置 $y/H'=0.20$ 时, 随着 e 的增大, 流速呈现增大的趋势。当 e 较小时, 流经浮体结构下部进行下泄的水流较少, 主流出现在浮体结构的上部, 且在浮体结构的阻挡作用下出现回流区; 随着 e 上升, 主流偏向浮体结构下部区域, 流速增大。与 $y/H'=0.20$ 的流速分布正好相反, 当 $y/H'=0.80$ 时, 流速分布随着浮体位置的增大而减小。随着 e 的增大, 通过浮体结构下部泄流的水体增多, 主流开始向下偏移。试验过程中, 浮体结构处于淹没状态, 流速的分布随着浮体位置的改变呈现上大、中小、下大的分布趋势, 在浮体结构下游区域形成回流区, 回流区的位置随着浮体结构的上升而上升。

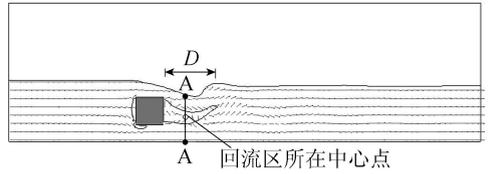


图 3 流速测量断面

Fig. 3 Measuring inter section of flowing velocity

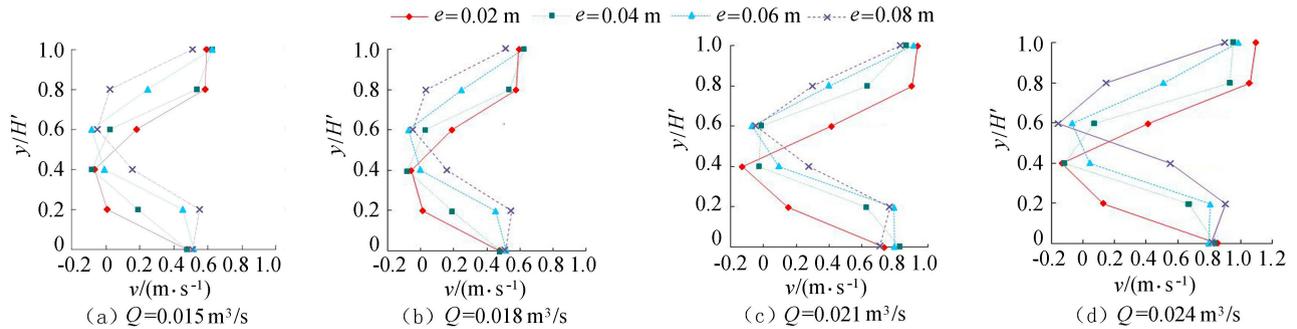


图 4 不同浮体结构位置断面流速分布

Fig. 4 Velocity distribution of the floating structure under different positions

2.2 不同来流流量对断面流速分布的影响

由图 5 可知, 当 e 相同时, 断面最小流速发生的位置相同, 发生在浮体结构下游回流区位置。随着来流流量的增大, 流经浮体结构下泄的水流流速在上层和下层水体中呈现增大的趋势。浮体结构位置不变, 由于受到浮体结构的挤压, 上游来流分别经过浮体结构上部、下部进行泄流, 因此在下游区域的上层、下层水体中, 流速较大; 受浮体结构的阻挡, 浮体结构下游区域形成回流区, 流速较小。试验过程中, 由于控制浮体结构所在水域的上游、下游水位不发生变化, 因此随着来流流量的增大, 流速呈现增大的趋势。

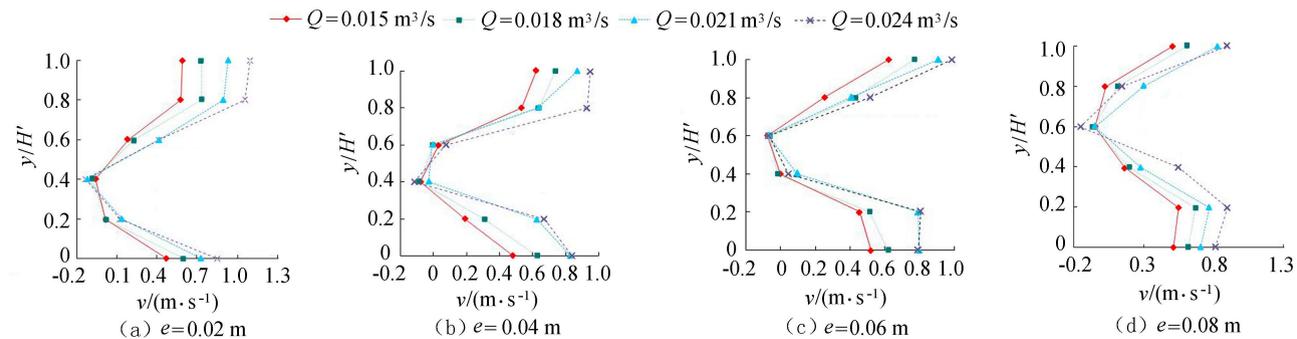


图 5 不同来流浮体结构断面流速分布

Fig. 5 Velocity distribution of the floating structure under different discharge conditions

2.3 特征流速以及不均匀系数

流速沿断面分布的均匀特性可以通过流速分布不均匀系数 δ ^[17] 进行表征, 通过所选取断面最大流速和最小流速的差值与该断面平均流速的比值, δ 值越大表明浮体结构的存在对水流断面流速的分布产生的影

响较大。

表 2 中, 当来流流量相同时, 流速的不均匀系数多数随 e 的增大而减小。浮体结构位置较小时, 主流为浮体结构上部的水流。随着浮体结构位置的上升, 来自上游的水体逐渐分成浮体结构上部和下部的两股主流, 流速分布的不均性减小。浮体结构位置及所处水位条件相同时, 来流流量的增大, 区域的平均流速增大, 因此流速不均匀性减小。

表 2 特征流速及不均匀系数

Table 2 Characteristic velocities and non-uniform coefficients

$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	e/m	$v_{min}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{max}/(m \cdot s^{-1})$	$\bar{v}/(m \cdot s^{-1})$	δ
0.015	0.02	-0.08	0.60	0.26	2.64
0.015	0.04	-0.08	0.63	0.26	2.73
0.015	0.06	-0.08	0.62	0.26	2.66
0.015	0.08	-0.07	0.58	0.26	2.46
0.018	0.02	-0.11	0.75	0.33	2.62
0.018	0.04	-0.09	0.74	0.33	2.55
0.018	0.06	-0.08	0.77	0.33	2.55
0.018	0.08	-0.08	0.70	0.34	2.27
0.021	0.02	-0.13	0.94	0.43	2.47
0.021	0.04	-0.12	0.87	0.42	2.37
0.021	0.06	-0.11	0.91	0.43	2.34
0.021	0.08	-0.06	0.89	0.45	2.13
0.024	0.02	-0.17	1.10	0.51	2.51
0.024	0.04	-0.16	1.03	0.46	2.57
0.024	0.06	-0.15	0.99	0.47	2.44
0.024	0.08	-0.17	0.90	0.50	2.16

注: v_{max} 为断面垂向平均最大流速; v_{min} 为断面垂向平均最小流速; \bar{v} 为断面垂向平均流速。

2.4 回流区长度分析

表 3 中, 当来流流量较小时 ($Q=0.015 m^3/s$), 回流区的长度 D 随着浮体结构位置的增大逐渐增大; 当来流流量较大时 ($Q=0.024 m^3/s$), 回流区的长度却随着浮体结构位置的增大呈现减小的趋势。试验过程中, 当浮体结构位置较高且来流较小时, 浮体结构上下部区域的主流流速较小, 回流区范围较大; 浮体结构位置不变时, 来流流量增大, 回流区长度减小。来流增加, 下泄水流流速较大, 并迅速将回流区内的水流带入下游区域, 因此回流区长度反而呈现减小趋势。

表 3 回流区长度

Table 3 Lengths of recirculation zone

$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	e/m	D/m	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	e/m	D/m
0.015	0.02	0.19	0.021	0.02	0.20
0.015	0.04	0.19	0.021	0.04	0.19
0.015	0.06	0.21	0.021	0.06	0.14
0.015	0.08	0.21	0.021	0.08	0.15
0.018	0.02	0.20	0.024	0.02	0.16
0.018	0.04	0.21	0.024	0.04	0.13
0.018	0.06	0.22	0.024	0.06	0.10
0.018	0.08	0.18	0.024	0.08	0.10

3 结 论

- 浮体结构下游回流区水流流速分布呈现上大、中小、下大的分布规律, 受浮体结构位置的影响较明显; 最小流速出现在浮体结构背水面的下游区域, 且主流随着浮体位置的变化而发生偏移。
- 来流流量的增大会引起整体流速增大, 而最小流速发生位置几乎不受影响。
- 随着浮体结构位置的增大, 流速的不均匀系数多数呈减小趋势。
- 不同位置的浮体结构对回流区的范围存在影响, 且随着流量的变化而发生变化: 流量较小时 ($Q=0.015 m^3/s$), 随着位置的增大回流区长度增大; 流量较大时 ($Q=0.024 m^3/s$), 回流区长度呈现减小趋势。在实际工程中, 应注意由于浮体结构位置引起的水流结构改变, 并通过合理调控来流流量确保浮体的安全。

参考文献:

[1] 王珊, 傅宗甫, 崔贞, 等. 流动水域浮体结构倾覆力矩影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 66-71. (WANG Shan, FU Zongfu, CUI Zhen, et al. Analysis of the influencing factors of overturning moment on the floating structure

- surrounded with flowing water[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(1): 66-71. (in Chinese))
- [2] 孙明, 刘培林, 孙丽萍, 等. 深海安装中多浮体作业的水动力分析[J]. *水动力学研究与进展*, 2011, 26(3): 351-358. (SUN Ming, LIU Peilin, SUN Liping, et al. Hydropower analysis of multi-floating operation in deep sea installation[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2011, 26(3): 351-358. (in Chinese))
- [3] 谢建华. 关于浮体的平衡与稳定性[J]. *力学与实践*, 2010, 32(5): 77-80. (XIE Jianhua. Study on balance and stability of floating body[J]. *Mechanics and Practice*, 2010, 32(5): 77-80. (in Chinese))
- [4] 童晓旺, 任慧龙, 李辉, 等. 浮体在时域中的瞬时运动和波浪力数值模拟[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(12): 1453-1458. (TONG Xiaowang, REN Huilong, LI Hui, et al. Instantaneous motion and wave force numerical simulation of buoy in time domain[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(12): 1453-1458. (in Chinese))
- [5] 傅宗甫, 严忠民. 新型浮体闸的稳定性分析[J]. *水利学报*, 2005, 36(8): 1014-1018. (FU Zongfu, YAN Zhongmin. Stability analysis on anew type of floating sluice[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(8): 1014-1018. (in Chinese))
- [6] 张李萍. 浮体闸定位过程水力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [7] 邢殿录. 限制水域浮体水动力特性研究[J]. *大连理工大学学报*, 1993, 33(3): 351-355. (XING Dianlu. Study on hydrodynamic characteristics of floating water[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1993, 33(3): 351-355. (in Chinese))
- [8] 邢殿录, 邓燕萍, 周美. 限制水域二维浮体水动力特性试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 1998, 38(4): 107-111. (XING Dianlu, DENG Yanping, ZHOU Mei. Experimental study on hydrodynamic characteristics of 2D floating structure in restricted waters[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1998, 38(4): 107-111. (in Chinese))
- [9] 陆彦. 大型浮箱门在动水中的稳定性分析及试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [10] JOHNSON H K, KARAMBAS T V, AVGERIS I, et al. Modelling of waves and currents around submerged breakwaters[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52(10/11): 949-969.
- [11] 傅宗甫, 殷晓锦, 顾晓峰. 浮体闸动水沉浮过程水力特性[J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34(5): 24-27. (FU Zongfu, YIN Xiaojin, GU Xiaofeng. Hydraulic characteristics of floating sluices subsiding and buoing in flowing water[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, 34(5): 24-27. (in Chinese))
- [12] 傅宗甫, 严忠民, 吕家才. 大型浮体闸水工模型试验方法[J]. *水利水电科技进展*, 2007, 27(5): 6-9. (FU Zongfu, YAN Zhongmin, LYU Jiakai. Method for hydraulic model test of large-scale floating sluice[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(5): 6-9. (in Chinese))
- [13] 苏礼邦. 大型浮体闸门在挡潮闸中的运用研究[J]. *西北水电*, 2014(3): 71-74. (SU Libang. Study on the application of large floating gate in tidal gates[J]. *Northwest Water and Power*, 2014(3): 71-74. (in Chinese))
- [14] REY V, TOUBOUL J. Forces and moment on a horizontal plate due to regular and irregular waves in the presence of current[J]. *Applied Ocean Research*, 2011, 33(2): 88-99.
- [15] VENUGOPAL V, VARYANI K S, BARLTROP N D P. Wave force coefficients for horizontally submerged rectangular cylinders [J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33(11/12): 1669-1704.
- [16] 崔贞, 傅宗甫, 陈月君. 基于正交设计的浮体结构流动特性分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2018, 51(6): 471-497. (CUI Zhen, FU Zongfu, CHEN Yuejun. Analysis of floating structure flow characteristics based on orthogonal design[J]. *Journal of Wuhan University(Engineering Science)*, 2018, 51(6): 471-497. (in Chinese))
- [17] 崔贞, 傅宗甫, 顾晓峰, 等. 浮体结构对下游水流结构影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5): 433-437. (CUI Zhen, FU Zongfu, GU Xiaofeng, et al. Influence of floating structure on the flow structure of downstream water[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2018, 46(5): 433-437. (in Chinese))
- [18] CUI Zhen, FU Zongfu, CHEN Yuejun, et al. Explore the hydrodynamic force on the surface of floating structure in finite flowing water[C]//AMINUDDIN A B G, JUNAIDAH A, AHMAD K A W, et al. Abstracts of the 37th IAHR World Congress. Kuala: IAHR, 2017: 39.