

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.05.009

浮体结构对下游水流结构影响

崔 贞¹,傅宗甫¹,顾晓峰²,王 珊¹,倪英荐¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 苏州市太湖水利规划设计院,江苏 苏州 215128)

摘要:采用物理模型试验研究流动水域中浮体结构对下游水流流动结构的影响,对不同长高比浮体结构及其在不同水位差条件下浮体结构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分析。结果表明:浮体结构体型的变化对流速分布及流速不均匀系数的影响并不明显,水位差对两者均有较大的影响,其影响随着水位差的增大而增大;回流区长度受浮体结构体型以及水位差影响均较敏感,在实际运用中,应该主要关注水位差变化引起的水流流动结构的变化。
关键词:浮体结构;流动水域;水位差;浮体长高比;水流流动结构;流速不均匀系数;回流区
中图分类号:TV131.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)05-0433-05

Influence of floating structure on the flow structure of downstream water

CUI Zhen¹, FU Zongfu¹, GU Xiaofeng², WANG Shan¹, NI Yingjian¹

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

Abstract: The influence of floating structure on the downstream flowing structure in the flowing water was studied by using a physical model test. By comparing the flowing structures under different aspect ratios and water levels, the flowing velocity distribution, non-uniform coefficient and the length of recirculation zone of the characteristic cross section were analyzed. The results show that the influence of aspect ratios on the velocity distribution and the non-uniform coefficient is not obvious, while the water-level difference has a great influence and it shows an increasing trend with the increase of water level. At the same time, the length of recirculation zone is more sensitive to the aspect ratio and water level. In the practical engineering, attentions should be paid to the engineering problems caused by the change of water level. This study can provide references for the design of floating structure as well as the change rule of downstream flowing structure in current during the process of running.
Key words: floating structures; flowing waters; water level difference; aspect ratio of floating structures; flowing structure; coefficient of non-uniformity of flowing velocity; recirculation zone

浮体结构已经广泛应用于无限水域的码头建设、移动式海洋平台、潮汐电站、浮式取水构筑物等^[1]。作为一种新型的环境友好装置,浮体结构正逐步在平原防洪工程的大跨度新型水闸、泵站等水利工程中发挥作用^[2-3]。现有浮体结构的研究多涉及其与波浪相互作用^[4-5]、浮体结构的动力响应^[6]、浮体结构的振动特点^[7]以及多浮体结构的耦合作用^[8]。浮体结构应用于平原防洪工程时,通常为一横跨于有限水域、两侧下游有岸墙约束的大长宽比的结构;其在沉浮运行过程中,水动力特性复杂,与无限水域中的船舶及海上平台等明显不同;浮体结构在河道等流动水域中运行时,水流受浮体结构的遮挡只能从浮体的上、下通过,不像船舶等可以从浮体结构的两端绕流通过^[9-10],因此对水流结构的影响不同于无限水域中的浮体。浮体结构下沉的速度、水流条件、撞击力、浮体体型等会对浮体结构的稳定性产生影响^[9, 11-15]。作为浮体稳定性的控制性条件,浮体结构自身的体型以及在实际应用过程中所受到的来流条件备受关注。水体流经浮体结构之后,

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,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.

水流结构发生变化,同时反作用于浮体结构^[16],对浮体结构安全运行产生影响。因此,针对流动水域中浮体结构在运行过程中的瞬态位置,对不同浮体结构在不同水位差下对水流结构的影响进行详细分析,可有效地为研究浮体结构运行过程中的流场特性提供参考并为浮体结构的安全运行提供依据。

针对不同长宽比的浮体结构体型,以水动力学基本理论为基础,通过理论分析和物理模型试验,对不同水位差条件下浮体结构下游附近区域的水流流动结构进行测量,定量分析了浮体结构长宽比以及不同的水力学参数对下游水流流动结构的影响。研究成果对浮式码头建设、移动式海洋平台、潮汐电站、浮式泵站、浮式取水构筑物等大型浮体在有限流动水域中的稳定性计算,具有重要的理论意义和实用价值。

1 试验装置及设计

1.1 试验装置

试验在自循环有机玻璃水槽中进行。该装置主要由直角三角薄壁堰测流、自循环供水系统、有机玻璃试验水槽(包括稳流浮板装置、主体试验区域、出流调节控制尾门装置)三部分组成(图1)。

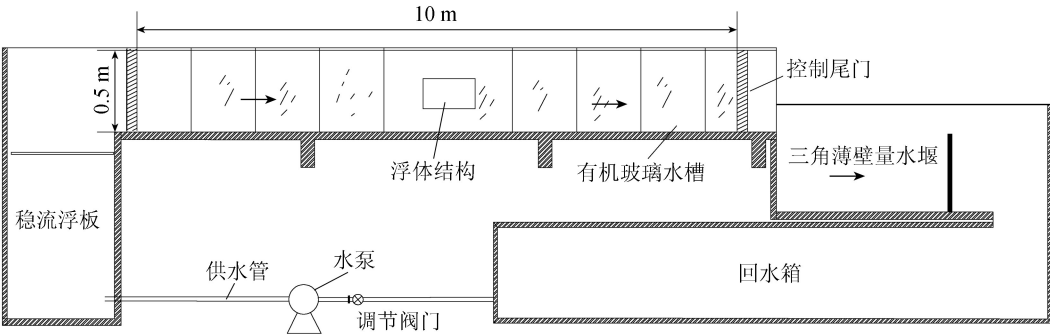


图1 试验模型剖面示意图

Fig.1 Sketch map of the experimental device

有机玻璃水槽长为10 m、宽为30 cm、高为50 cm,浮体结构试验主体区域位于水槽中部位置,浮体中心点距离上游来流和下游出口位置均为5.00 m,试验区域内水流已达到稳定。浮体结构横跨于河道水槽中,其宽度(B)与水槽宽度相同。试验过程中,采用直角三角形薄壁量水堰测量,水体经稳流浮板的调节进入试验区域,通过控制尾门对水位进行调节。

1.2 试验设计

浮体结构体型、水深会影响浮体结构下游水流的流动结构,水流流动结构的变化又反作用于浮体结构,对浮体结构的稳定性产生影响。为探讨不同体型结构、水深对水流流动结构的影响,选取4种不同长高比(L/a)的浮体结构,在固定浮体距离水槽底部的位置 $e=5.00\text{ cm}$ 以及流量 $Q=18.00\text{ L/s}$ 下,分别进行不同上下游水位差 ΔH 下 ($\Delta H=0\text{ cm}$ 、 1.00 cm 、 2.00 cm 、 3.00 cm ; $\Delta H=H-H'$, H 为上游水位, H' 为下游水位) 的试验。试验过程中浮体结构始终处于完全淹没状态,通过调节下游尾门,改变上下游水位,分别得到不同 ΔH 下的水流流态。浮体结构具体参数及试验参数见图2和表1。

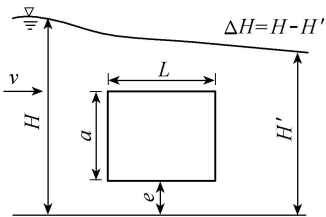


图2 试验参数示意图

Fig.2 Sketch map of experimental hydraulic parameters

表1 试验参数

Table 1 Experimental parameters

L/cm	$\Delta H/\text{cm}$	L/cm	$\Delta H/\text{cm}$
10.00	0	30.00	0
10.00	1.00	30.00	1.00
10.00	2.00	30.00	2.00
10.00	3.00	30.00	3.00
20.00	0.00	40.00	0
20.00	1.00	40.00	1.00
20.00	2.00	40.00	2.00
20.00	3.00	40.00	3.00

注: $e=5.00\text{ cm}$, $Q=18.00\text{ L/s}$, $a=10\text{ cm}$ 。

2 试验结果及分析

2.1 浮体结构下游水流流态特性

试验过程中,在浮体结构背水面出现小范围回流区域。上游来流受浮体结构的阻挡作用,分成两股水流分别经浮体结构的上部和下部进入下游区域。在浮体结构上部,整体流速较大,流速在浮体结构上部临近下游位置达到最大。流经浮体之后的下泄水流流态紊乱,流速分布极不均匀。在浮体结构下游断面处,最大流

速出现在顶层水流区域;垂线流速分布呈现“上大、中小、下大”的分布特征;在浮体结构下游临近背水面水流区域内,流速分布在实测范围内出现负值,出现回流区。沿着水流方向,水流流速的不均匀程度逐渐减小直至消失,在浮体结构下游位置 1.20 m 处,流速趋向均匀。

2.2 浮体长度对断面流速分布的影响

为保证所取断面流速分布具有对比性,将下游断面位置选择为浮体结构下游区域回流区中心点所在断面,该中心点为回流区沿水流方向长度的中心位置点。流速测量断面位置 A—A 如图 3 所示。

图 4 为不同浮体结构长度对断面流速分布的影响,横坐标为回流区中心点垂线方向流速,纵坐标为所测点垂向位置与下游水位的比值 y/H' 。流速分布呈现自下而上以及先减小、后增大的变化趋势,垂线流速分布不够理想。最大流速出现在 $y/H' = 1.00$ 附近,表明水流经调整分别从浮体结构的上、下部分经过,最大流速出现在上层水体中。负流速的产生与浮体结构沿水流方向的长度存在较小的影响关系。当水位差较小时,不同长度的浮体结构对水流产生的影响较小;随着水位差的增加,负流速发生的位置逐渐向上偏移。试验过程中发现水流经过浮体结构后,在下游位置 1.20 m 处流速分布逐渐得到“均匀化”,且随着向下游的推移,下游区域的流速在左右两侧呈现对称分布的水流流态特征。

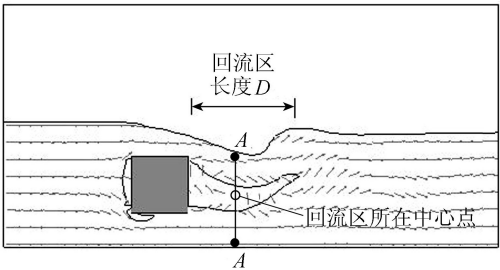


图 3 流速测量断面
Fig. 3 Section of the flow measurement

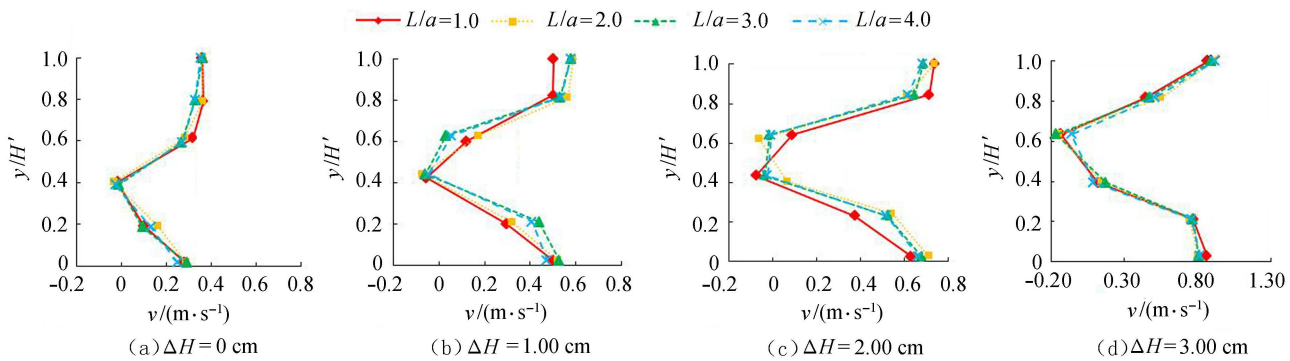


图 4 不同浮体结构下流速分布
Fig. 4 Velocity distribution under different floating structures

2.3 水位差对断面流速分布的影响

图 5 为不同水位差对浮体结构下游区域水流流速分布的影响。随着水位差的增加,浮体结构下游区域回流区中心点所在断面位置处,最大流速以及回流区产生的负流速呈现增大趋势,且其发生的位置呈现上移趋势。水流流速随着水位差的增大普遍增大,浮体结构的存在对下游水流结构存在较大影响,下游回流区流态紊乱,分布不均匀,流速分布表现出“上大、中小、下大”的分布规律。上下游水位差增大,水流流速增大,由于浮体结构存在使过水断面减小,在浮体结构下游区域出现最大流速,背水面处形成的回流区受浮体结构

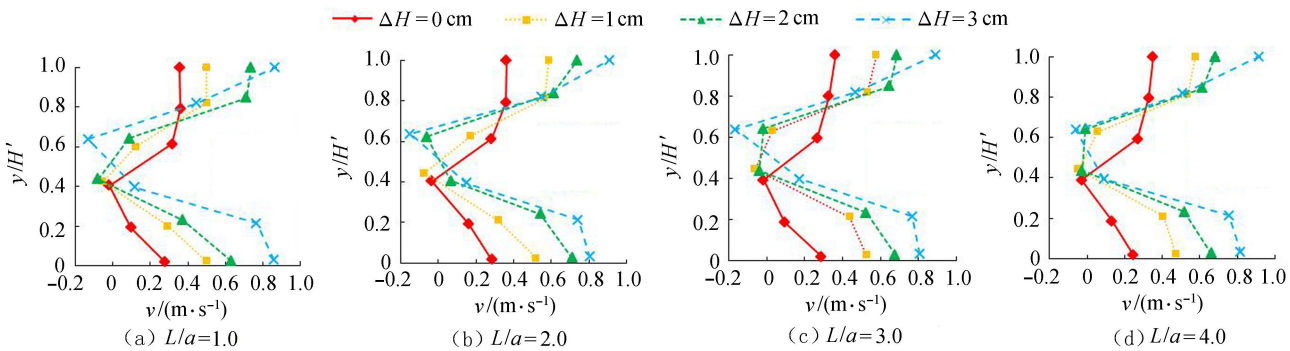


图 5 不同水位差下流速分布
Fig. 5 Velocity distribution under different water levels

上下部过水断面的挤压而减小,负流速增大。试验过程中,上层和下层水体为主流区,上层水体沿着水流方向呈弯曲形态向下游扩散,同样中部小流速区域水体也成震荡方式向下游扩散,随着水位差的增大,震荡幅度增大。水位差对水流结构的影响较敏感,对工程的稳定性以及安全性有较大影响。

2.4 特征流速以及不均匀系数

流速分布不均匀系数反映流速沿断面分布的均匀性,引入流速分布不均匀系数 $\delta^{[17]}$:

$$\delta = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v''}$$

(1)

式中: $v_{\max}$ ——断面垂向平均最大流速; $v_{\min}$ ——断面垂向平均最小流速; v'' ——断面垂向平均流速。

对应于4种不同浮体体型,下游回流区中心点处断面的特征流速及流速分布不均匀系数的计算结果见表2。 $v_{\max}$ 、 $v_{\min}$ 以及 δ 在相同的水位差下随着浮体结构体型的增大并无明显变化,即不同长高比浮体结构在相同的流量以及水位下,对水流流速的变化影响较小。在相同的浮体结构体型下,随着上下游水位差的增大,最大、最小水流流速值呈现增大趋势,同样,不均匀系数也呈现增大的趋势。

表2 特征流速及不均匀系数

Table 2 Characteristic velocities and non-uniformity coefficient

<i>L</i> /cm	ΔH /cm	$v_{\max}/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$v_{\min}/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$v'/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	δ	<i>L</i> /cm	ΔH /cm	$v_{\max}/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$v_{\min}/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$v'/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	δ
10.00	0.00	0.36	-0.05	0.23	1.79	30.00	0.00	0.36	-0.03	0.22	1.76
10.00	1.00	0.52	-0.06	0.30	1.93	30.00	1.00	0.58	-0.08	0.32	2.06
10.00	2.00	0.74	-0.09	0.36	2.29	30.00	2.00	0.72	-0.10	0.38	2.19
10.00	3.00	0.88	-0.16	0.46	2.26	30.00	3.00	0.89	-0.17	0.47	2.26
20.00	0.00	0.36	-0.04	0.23	1.77	40.00	0.00	0.35	-0.05	0.22	1.82
20.00	1.00	0.59	-0.08	0.32	2.08	40.00	1.00	0.58	-0.08	0.32	2.06
20.00	2.00	0.75	-0.09	0.39	2.16	40.00	2.00	0.71	-0.11	0.37	2.22
20.00	3.00	0.91	-0.18	0.48	2.29	40.00	3.00	0.91	-0.15	0.47	2.26

2.5 回流区长度分析

表3 回流区长度

Table 3 Lengths of recirculation zone

<i>L</i> /cm	ΔH /cm	<i>D</i> /cm	<i>L</i> /cm	ΔH /cm	<i>D</i> /cm
10.00	0.00	14.00	30.00	0.00	23.00
10.00	1.00	16.00	30.00	1.00	23.00
10.00	2.00	20.00	30.00	2.00	24.00
10.00	3.00	12.00	30.00	3.00	21.00
20.00	0.00	16.00	40.00	0.00	13.00
20.00	1.00	18.00	40.00	1.00	16.00
20.00	2.00	20.00	40.00	2.00	16.00
20.00	3.00	16.00	40.00	3.00	12.00

水流绕流经过浮体结构之后,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,浮体结构背水面所受动水压强明显小于迎水面,增加浮体结构的失稳性。试验过程中,对回流区沿水流方向的长度*D*进行了测量。不同试验工况下,回流区长度列于表3。回流区的长度随着浮体结构的增大呈增大趋势,而在*L*=40.00 cm时,回流区长度突然减小,上游来流表面流经浮体结构时近似水平,刚进入下游区域无明显水面降落,带动回流区水体进入下游区域并逐渐扩散,因此回流区较短。同样,随着上下游水位差的增大,回流区长度也呈现增大趋势, $\Delta H=3.00$ cm时,*D*同样减小,因流经浮体结构上层的水流跌落较大,主体水流呈现下斜角方式进入回流区,并迅速将水流带入下游区域。因此,随着水位差的增大,回流区长度反而呈现减小趋势。

3 结 论

- a. 浮体结构下游回流区域水流流速分布受不同长高比的浮体结构体型影响并不敏感,但其与上下游水位差的选择密切相关,水位差增大会导致流速的整体增加且出现较大的负流速,同时流体分布的不均匀性显著增大。因此应用于河道调控的浮体结构工程宜尽量在较小的水位差下运行。
- b. 不同长高比的浮体结构体型对回流区的范围存在影响,随着浮体结构长高比的增加,回流区的长度呈现先增大、后减小的趋势;当浮体结构不变时,水位差的增大导致回流区同样呈现先增大、后减小的趋势。在工程中,应慎重选择浮体结构,并需在合适的水位差下运行,以满足浮体工程的安全与稳定要求。

参考文献:

[1] WANG C M, TAY Z Y. Very large floating structures: applications, research and development[J]. Procedia Engineering, 2011,14:62-72.

[2] 孙国荣, 别大鹏, 荣雪宁. 大跨度对拉式浮体闸门流激振动特性研究:以南水北调中线一期引江济汉工程对拉式闸门为例[J]. 人民长江, 2014,45(3):55-57. (SUN Guorong, BIE Dapeng, RONG Xuening. Research on flow-induced vibration of large-span floating gate of counter-pulling[J]. Yangtze River, 2014,45(3):55-57. (in Chinese))

[3] 杨敏慧. 深水浮体式检修闸门在刘家峡水电站泄水道检修中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2013(6):27-28. (YANG Minhui. The application of deep floating bulkhead gate in the sluiceway overhaul liujiacia hydropower station[J]. Gansu Water Resource and Hydropower Technology, 2013(6):27-28. (in Chinese))

[4] LEE K, LEE P. Nonlinear hydrostatic analysis of flexible floating structures[J]. Applied Ocean Research, 2016,59:165-182.

[5] 曾东. 箱式浮体在波浪中的运动分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.

[6] CHEN L F. Numerical study of roll motion of a 2D floating structure in viscous flow[J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(4):544-563.

[7] 翟钢军, 程勇, 马哲. 超大型浮式储油船的水弹性响应预报[J]. 振动与冲击, 2014,33(1):141-148. (ZHAI Gangjun, CHENG Yong, MA Zhe. Hydroelastic response prediction of very large floating oil storage vessel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(1):141-148. (in Chinese))

[8] ZHANG H C, XUD L, XIA S Y, et al. Nonlinear network modeling of multi-module floating structures with arbitrary flexible connections[J]. Journal of Fluids and Structures, 2015,59:270-284.

[9] 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 buoying in flowing water [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014,34(5):24-27. (in Chinese))

[10] 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. Research on hydrodynamic performance of float bodies in confined zone[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1993,33(3):351-355. (in Chinese))

[11] 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))

[12] 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 a new type of floating sluice [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(8):1014-1018. (in Chinese))

[13] 黄树权, 黄少峰, 黄国富, 等. 浮体一字门动水启闭过程的数值模拟研究[C]//佚名. 第二十三届全国水动力学研讨会暨第十届全国水动力学学术会议文集. 上海:《水动力学研究与进展》杂志社, 2011: 669-675.

[14] 董华洋. 浮箱-水平板式浮防波堤水动力特性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.

[15] 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.

[16] 张李萍. 浮体闸定位过程水力特性研究[D]. 南京:河海大学, 2007.

[17] 王法猛, 傅宗甫, 吕家才, 等. 闸站合建枢纽对河口通航影响的模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2012,32(5):29-31. (WANG Fameng, FU Zongfu, LYU Jiakai, et al. Model tests on influence of combined construction of sluices and pump stations on estuarine navigation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012,32(5):29-31. (in Chinese))

(收稿日期: 2017 - 10 - 12 编辑:刘晓艳)