

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.010

流动水域浮体结构倾覆力矩影响因素分析

王 珊,傅宗甫,崔 贞,陈月君

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:运用 CFD 数值仿真模拟方法,采用合适的网格尺度研究不同长高比、距底高度以及上下游水位差下的浮体结构在流动水域中所受到的倾覆力矩及其变化规律。结果表明:随着浮体结构距底高度的增大,其倾覆力矩总体上呈现先增大、后减小的趋势;随着长高比或上下游水位差的增大,浮体结构的倾覆力矩总体上呈现增大的趋势。

关键词:流动水域;浮体结构;长高比;距底高度;上下游水位差;倾覆力矩

中图分类号:TV663+.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)01-0066-06

Analysis of the influencing factors of overturning moment on the floating structure surrounded with flowing water

WANG Shan, FU Zongfu, CUI Zhen, CHEN Yuejun

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The hydrodynamic conditions near a floating structure are complex during its operation in the flowing water. The floating structure is easy to overturn if it gets improper handling. The overturning moment is an important factor that affects the stability of floating structure. Based on a CFD method, the overturning moment and its variation rules with different length-height ratios, different heights from the bottom and different water heads in the flowing water were explored in this paper using an appropriate grid scale. The results show that the overturning moment of floating structure decreases after the first increasing with the growth of height from the bottom; also, the overturning moment of floating structure has a tendency of growth with the increase of length-height ratio and the water head. This study can offer reference for the understanding of overturning mechanism and stability design of floating structure in flowing water.

Key words: flowing water; floating structure; length-height ratio; height from the bottom; water head; overturning moment

浮体结构作为一种新型水工结构,被广泛应用于大型采油平台、潮汐电站、大跨度的新型水闸、泵站、浮式取水构筑物等工程中^[1-2]。目前针对浮体结构的研究大多集中于浮体结构的动力响应^[3-4]、浮体结构的耦合作用^[5]、浮体结构的振动特性^[6]以及波浪作用下的受力^[7-9]。在平原水利工程中,浮体结构主要在流动水域中运行,在边界条件和水流流动特性的影响下,浮体结构的水动力特性变化较为复杂,很容易发生侧向倾覆^[10-13]。因此,有必要对流动水域中浮体结构所受到的倾覆力矩开展研究。目前关于浮体结构的倾覆性研究主要在静水和有波浪作用下的水域或者在流速较小的水域中进行,大多应用在无限水域中,而对流动水域中倾覆性的研究并不多见。傅宗甫等^[14-15]通过水力学模型试验分析了浮体闸的抗倾覆特性。吴海斌等^[16]通过稳性理论分析和模型试验,得出平台在下沉及上浮过程中的倾覆性主要与平台吃水深度、结构体型参数以及入水角等有关的结论。

在流动水域中,浮体结构在运行过程中所处的位置(即距底高度)不同,经过浮体的水流运动将会出现

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:王珊(1992—),女,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:wangshan_011@126.com
通信作者:傅宗甫,副教授。E-mail:zffu@hhu.edu.cn
引用本文: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.
DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.010.

孔流、孔堰复合流和堰流 3 种不同的流态,并且在浮体结构的上下游侧形成明显的水位差。因此距底高度和上下游水位差是影响浮体结构倾覆特性的重要因素,两者对浮体结构安全稳定的影响需进行详细探究。另外,浮体结构体型会影响其在水中的受力,所以有必要考虑浮体结构的长高比。本文拟采用 CFD 数值模拟软件模拟不同结构体型、不同距底高度和不同上下游水位差下浮体结构的侧向倾覆力矩,为研究浮体结构稳定性提供参考依据。

1 数学模型建立

FLOW-3D 仿真软件是近年来应用较为广泛的水动力学模拟软件。其所采用的 TrueVOF 技术在模拟仿真与计算结果的准确度上有明显的优势,独特的 FAVOR 方法针对自由液面等一些复杂的水力学问题更高效且精确度更高。基于上述优点,拟采用 FLOW-3D 仿真软件为计算平台,对浮体结构在流动水域中的倾覆力矩进行模拟分析。

1.1 控制方程

对于不可压缩的黏性流体,在笛卡尔坐标系下,应用 Navier-Stokes 方程得到包括连续性方程和动量方程在内的瞬时控制方程:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + f_i \tag{2}$$

式中: U_i ——流速分量, m/s; $\bar{U}_i$ 、 $\bar{U}_j$ ——流体微元速度, m/s; x_i 、 x_j ——方向分量; t ——流体质点运动时间, s; ρ ——流体的密度, kg/m³; $\bar{P}$ ——作用在流体微元上的压力, Pa; μ ——流体紊动黏性系数, Pa · s; $\rho \overline{u'_i u'_j}$ ——雷诺应力项, Pa; f_i ——体积力分量, m/s²。

考虑到 RNG $k-\varepsilon$ 模型在流动水域中有更高的可信度和精度的特点以及浮体结构在水流中的特性^[17],在此次研究过程中所建立的数学模型中,紊流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型。

1.2 计算模型

模拟区域长 7.00 m、宽 0.30 m、高 0.45 m,固体边壁选取当量粗糙度为 0.07 mm。浮体结构位于计算域中的来流条件已经达到稳定的中间位置,浮体高度 $a = 0.10$ m。左侧为上游进水口,右侧为下游出水口。在笛卡尔坐标系下进行模拟区域的网格划分,将浮体结构中心点在计算域底部的投影所在位置设置为坐标系的原点,宽度方向设置为 x 轴方向,水流方向为 y 轴的正方向,取重力加速度方向为 z 轴负方向,大小为 -9.81 m/s²。图 1 为模型求解域。

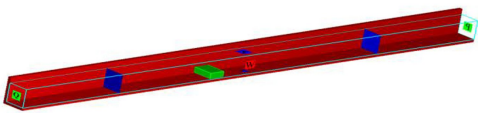


图 1 模型求解域

Fig.1 The computing domain of the model

1.3 自由表面处理

FLOW-3D 采用 Tru-VOF 技术追踪自由液面,即应用 $F(x,y,z)$ 体积分数来实现对运动界面的追踪($F = 0 \sim 1$ 表示单元被流体部分充满)。VOF 中采用如下函数来描述自由表面的复杂变化:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial (FA_x v)}{\partial x} + \frac{\partial (FA_y v)}{\partial y} + \frac{\partial (FA_z v)}{\partial z} \right] = 0 \tag{3}$$

式中: V_F ——可流动的体积分数; A_x 、 A_y 、 A_z —— x 、 y 、 z 方向可流动的面积分数; v ——水流流速, m/s。
在处理复杂的计算区域时,选用最小残量的方法进行求解,其收敛次数为 2 ~ 7。迭代方式则采用显示求解法,计算简单且精确。

2 网格独立性分析与模型验证

2.1 网格独立性分析

在水力模型数值模拟中,由于网格尺度的选择对其模拟结果的稳定性和精确性具有重要影响,因此为了确保数值模拟的精确性,需要进行网格的独立性分析。通过对比分析浮体结构水动力学特性的模拟值与相同条件下水槽模型实测值,发现网格尺度为 0.01 m 时,不仅可以满足网格的独立性要求,而且各个水力学要素(流

速、压强、水位、流量)的模拟值与试验值的平均误差都很小(<1.50%),数学模型较好地反映了水流流动特性^[18]。

2.2 模型验证

为验证数值模拟的正确性,利用室内物理模型试验对数模进行验证。物理模型试验在有机玻璃水槽中进行,水槽设计为长7.00 m、宽0.30 m、高0.45 m。试验装置主要分为4个部分:稳流控制装置、有机玻璃水槽、水位控制装置和自循环供水系统。流量由电磁流量计进行控制,水位由水槽末端的尾门进行调节。试验模型布置如图2所示。

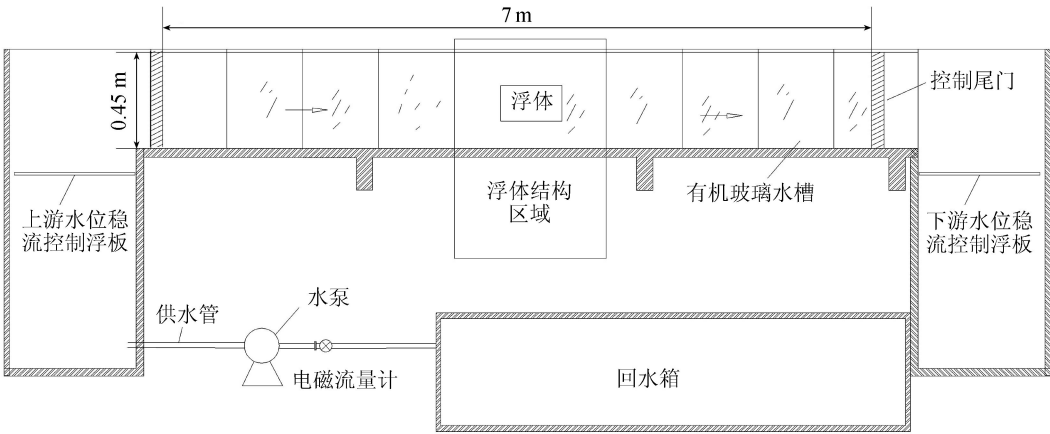


图2 试验模型剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram for the profile of experimental device

在浮体结构表面直接布设脉动压力传感器,测量浮体结构的表面时均动水压强,通过浮体表面压强微元积分法获得浮体表面的作用力,并对倾覆力矩进行计算。浮体结构的体型参数如图3所示。模型验证中浮体结构尺寸以及测点布置情况如图4所示。

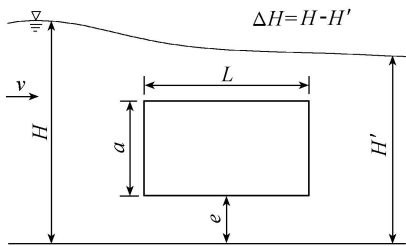


图3 体型参数示意图

Fig.3 Schematic diagram of shape parameters

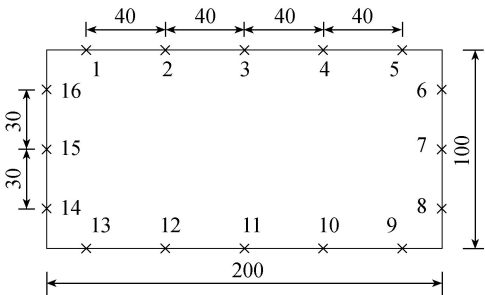


图4 测点布置示意图(单位:mm)

Fig.4 The layout of piezometer tubes (units: mm)

在数值模拟中保持浮体结构以及水力参数与物理试验一致(流量设为定值0.02 m³/s)。从数值模拟中提取不同测点位置处的压强值并与试验所测得的压强时均值进行比较,得到表1所示的对比结果。

表1 数值模拟值与试验值对比

Table 1 Comparison of the numerical simulation and the test

测点编号	数值模拟压强/Pa	实测压强/Pa	相对误差/%	测点编号	数值模拟压强/Pa	实测压强/Pa	相对误差/%
1	1685	1740	-3.16	9	2736	2744	-0.29
2	1690	1740	-2.87	10	2740	2754	-0.51
3	1695	1744	-2.81	11	2743	2744	-0.04
4	1699	1730	-1.79	12	2747	2744	0.11
5	1702	1760	-3.30	13	2750	2715	1.29
6	1924	1960	-1.84	14	2560	2592	-1.23
7	2219	2254	-1.55	15	2266	2313	-2.03
8	2513	2548	-1.37	16	1963	1994	-1.55

从对比结果中可以看出,相同水力条件下的浮体结构在数值模拟与物理模型试验对比过程中,其表面所受动水压强误差都很小,整个浮体结构模型中的平均误差仅为1.43%,数值模拟结果与模型试验所得的倾

覆力矩值吻合较好。因此,该数学模型可以用于对浮体结构在流动水域中压强的模拟,并为计算倾覆力矩提供可信的模拟数据。

3 倾覆力矩量纲分析

影响浮体结构倾覆力矩 $M[ML^2/T^2]$ 的参数有:浮体结构顺水流方向长度 $L[L]$ 、重力加速度 $g[L/T^2]$ 、水的密度 $\rho[M/L^3]$ 、流速 $v[L/T]$ 、浮体高度 $a[L]$ 、距底高度 $e[L]$ 、上下游水位差 $\Delta H[L]$ 、下游水深 $H'[L]$, 则影响倾覆力矩的完整函数关系可表示如下:

$$F(M,L,g,\rho,v,a,e,\Delta H,H')=0$$

(4)

通过量纲分析,可以得到

$$M=f\left(\frac{L}{a},\frac{e}{\Delta H},\frac{\Delta H}{H'},\frac{1}{F_r}\right)\rho v^2\Delta H^3$$

(5)

通过控制变量法,对影响倾覆力矩 M 的无量纲因子长高比 L/a 、相对距底高度 e/H 和相对上下游水位差 $\Delta H/H'$ 进行详细分析。

4 计算结果分析

4.1 L/a 对 M 的影响分析

为得到浮体结构长高比对侧倾覆力矩的影响关系,对浮体结构的长度分别采用 0.10 m、0.20 m、0.30 m、0.40 m,浮体的高度保持 0.10 m 不变,同时使浮体结构位于不同距底高度 ($e=0.02$ m、0.04 m、0.06 m、0.08 m),保持上下游水位差不变 ($\Delta H=0.01$ m) 时进行模拟,结果见图 5。

从图 5 中可以看出,随着长高比的增大,不同距底高度下浮体结构的倾覆力矩总体上呈现增大的趋势。这是因为在相同的距底高度以及水位差下,随着浮体结构长高比的增大,其上表面积增大,浮体结构上表面受力呈现增大的趋势,使得其所受水体的压力增大,上下表面所受压力的压力差同样变大。同样地,当浮体结构长高比增大时,流经浮体结构上表面的水流平顺地进入下游区域,背水面由于较大范围回流区的存在导致压力减小。

4.2 $e/\Delta H$ 对 M 的影响分析

将浮体结构保持在上下游水位差为定值 ($\Delta H=0.01$ m) 的流动水域中,同时分别对不同距底高度 ($e=0.02$ m、0.04 m、0.06 m、0.08 m) 下不同长高比的浮体结构倾覆力矩进行模拟,结果见图 6。

随着浮体结构距底高度的增大,不同长高比的浮体结构倾覆力矩总体上都呈现先增大、后减小的变化趋势。当浮体结构位于流动水域中时,水体流速所产生的流速水头对迎水面产生较大的冲击作用,迎、背水面的压力差增大,因而倾覆力矩增大。而随着浮体结构距底高度的进一步增大,倾覆力矩存在减小的趋势,在浮体上表面接近水面时,上游表面的水压力减小,浮体结构下部的水流流速增大,下表面的压力同样减小,因此,浮体结构倾覆力矩减小。

4.3 $\Delta H/H'$ 对 M 的影响分析

设定浮体在相同 H' ($H'=0.18$ m) 下,分别对不同上下游水位差下的浮体倾覆力矩进行分析,结果见图 7。图 7 中结果表明,随着上下游水位差的增大,不同长高比的浮体结构倾覆力矩总体上呈现增大的变化趋

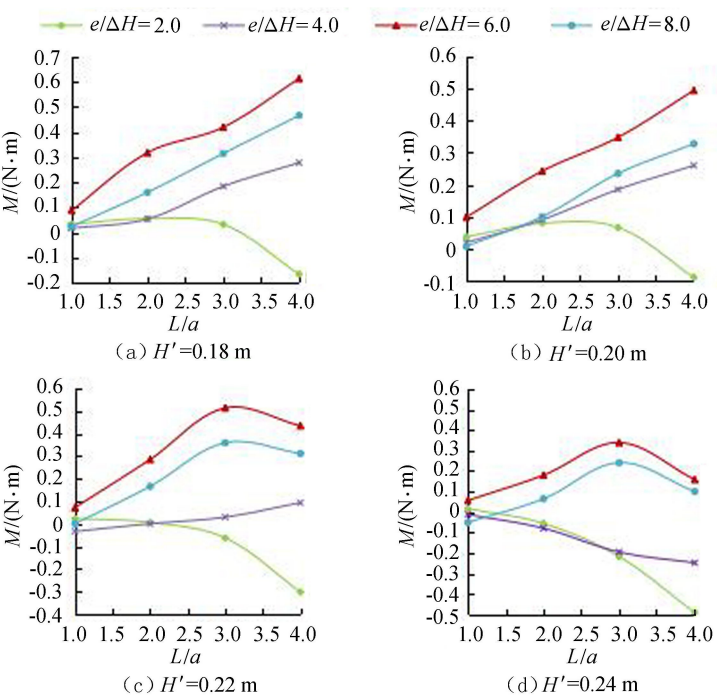


图 5 不同长高比下倾覆力矩变化趋势

Fig.5 Variation of overturning moment under different length-height ratios

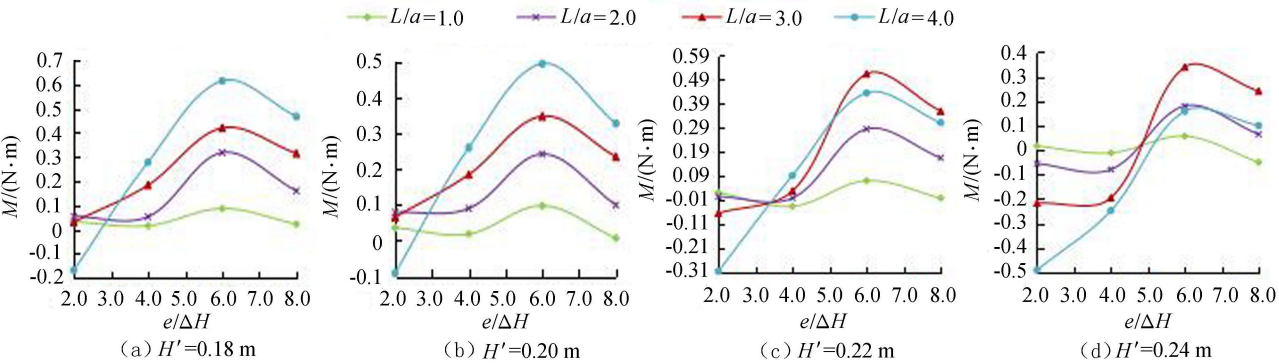


图6 不同距底高度下倾覆力矩变化趋势

Fig. 6 Variation of overturning moment under different heights from the bottom

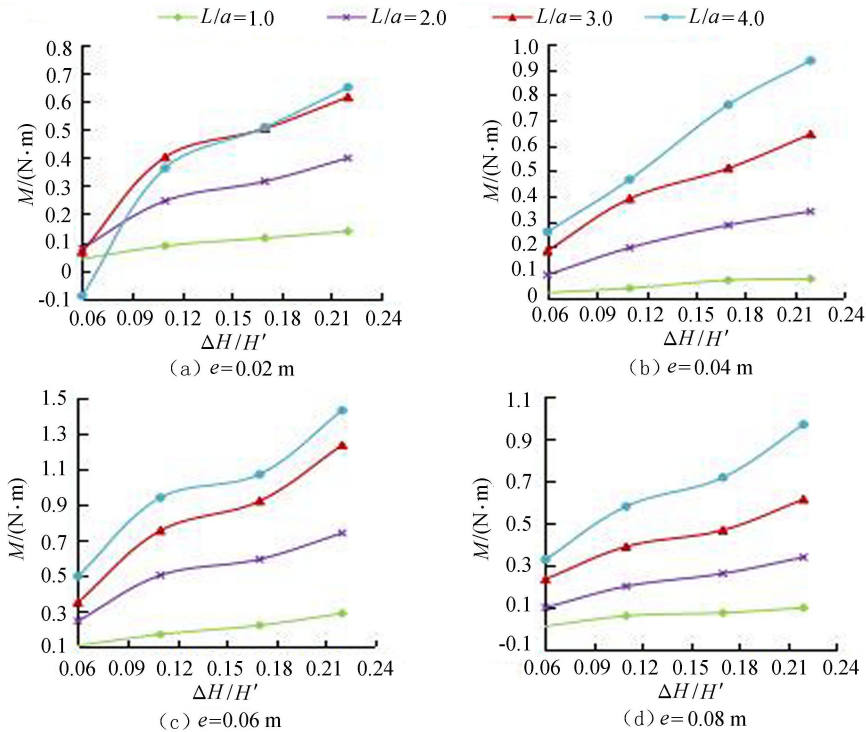


图7 不同水位差下倾覆力矩变化趋势

Fig. 7 Variation of overturning moment under different water heads

势。因为当上下游水位差增大时,浮体结构迎水面和背水面的压力差增大,倾覆力矩随之增大。另外,在相同的上下游水位差下,随着浮体结构长高比的增大,倾覆力矩也随之增大。这是因为浮体结构的上下表面压力差随着其结构体型的增大而增大,倾覆力矩增大。该结论与之前得到的结论一致。

5 结 论

- a. 当上下游水位差不变时,随着浮体长高比的增大,不同距底高度下浮体结构倾覆力矩呈现增大的趋势。
- b. 当浮体长高比不变时,随着距底高度的增大,浮体倾覆力矩呈现先增大、后减小的趋势,在相同的位置,浮体结构长高比越大,倾覆力矩值也越大。
- c. 当浮体距底高度不变时,随着上下游水位差的增大,不同长高比下浮体结构倾覆力矩呈现增大的趋势,在相同上下游水位差条件下,随着浮体结构长高比的增大,倾覆力矩值亦呈现增大的趋势。
- d. 浮体结构应用在流动水域的平原防洪工程中时,在满足工程基本要求的基础上,应避免使用较大长高比的浮体结构。同时,在上下游水位差较大时,应重点考虑工程的安全性。

参考文献:

- [1] WANG C M, TAY Z Y. Very large floating structures: applications, research and development[C]//LAM H F. Procedia Engineering. Hong Kong: Elsevier Ltd, 2011:62-72.
- [2] 卢树春. 浮体闸技术的发展与推广应用[J]. 水利水电技术, 1994, 25(1):19-21. (LU Shuchun. The development and popularization of the floating sluices technology[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1994, 25(1):19-21. (in Chinese))
- [3] RAHMAN M A, MIZUTANI N, KAWASAKI K. Numerical modeling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater[J]. Coastal Engineering, 2006, 53(10):799-815.
- [4] 刘宪庆. 气浮筒型基础拖航稳性和动力响应研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [5] TRAN T T, KIM D. The coupled dynamic response computation for a semi-submersible platform of floating offshore wind turbine[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 147:104-119.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] BELIBASSAKIS K A. A boundary element method for the hydrodynamic analysis of floating bodies in variable bathymetry regions[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2008, 32(10): 796-810.
- [9] SAMMARCO P, RENZI E. Wave actions on the side caissons of the Venice gates[J]. Applied Ocean Research, 2007, 29(4): 210-220.
- [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. 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))
- [12] 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. The balance and stability of the floating body[J]. Mechanics in Engineering, 2010, 32(5):77-80. (in Chinese))
- [13] LEONARD N E. Stability of a bottom-heavy underwater vehicle[J]. Automatica, 1997, 33(3):331-346.
- [14] 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))
- [15] 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))
- [16] 吴海彬, 朱世强, 陈鹰. 桶形基础平台沉浮过程稳性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2001, 35(6):71-74. (WU Haibin, ZHU Shiqiang, CHEN Ying. Lowering and raising stability of bucket foundation platform[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2001, 35(6):71-74. (in Chinese))
- [17] 袁新明, 贺治国, 毛根海. 用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型对截止阀三维紊流流动的数值模拟[J]. 流体机械, 2006, 34(2):34-38. (YUAN Xinming, HE Zhiguo, MAO Genhai. Numerical simulation of a turbulence flow in the cut-off valve by RNG $k-\varepsilon$ turbulence model[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(2):34-38. (in Chinese))
- [18] 崔贞, 王珊, 傅宗甫, 等. 不同网格尺度对浮体水动力学性能的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12):101-105. (CUI Zhen, WANG Shan, FU Zongfu, et al. Influence of mesh scale on hydrodynamic characteristics of floating body[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(12):101-105. (in Chinese))

(收稿日期:2017-01-13 编辑:高建群)