

浮体闸动水沉浮过程水力特性

傅宗甫¹,殷晓锦¹,顾晓峰²

(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: 为了解新型浮体闸在动水中沉浮过程的水力特性, 基于水力学模型试验, 分析了水舱进(排)水量、浮体闸沉浮速度、抗倾覆特性及浮体闸对底板的撞击力变化, 提出了倾覆率的概念, 推导了浮体闸静水沉浮速度公式, 并与动水沉浮实测值进行了比较与分析, 研究了浮体闸倾覆率与压舱的关系, 得到了最大撞击力与进水流量的关系。结果表明: 试验范围内浮体闸的沉浮速度受河道水位及流速的影响较小; 增加压舱可有效减小倾覆率, 最大撞击力与进水流量成幂函数关系; 通过增加压舱及减小进水流量的方式可以提高浮体闸的沉浮安全性。

关键词: 浮体闸; 沉浮; 倾覆; 抗倾覆; 撞击力; 水力特性; 水力学模型试验

中图分类号: TV663⁺.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)05-0024-04

Hydraulic characteristics of floating sluices subsiding and buoying in flowing water//FU Zongfu¹, YIN Xiaojin¹, GU Xiaofeng² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Taihu Water Planning and Designing Institute, Suzhou 215128, China)

Abstract: In order to know the hydraulic characteristics of a new type of floating sluice in subsiding and buoying in flowing water hydraulic experiments in laboratory have been conducted. For achieve this goal, we analyzed the variations such as water filling and displacement of water tank, subsiding and buoying speed, characteristics of anti-overturning, and impact forces with river bottom. The overturning rate has been put forward, the formula for floating sluice subsiding or buoying speed in still water was derived and compared with the measured value in flowing water. The relation between overturning rate and ballasting was studied and the relation between maximum impact force and mass flow of water filling was obtained. The water level and velocity of river flow have small influence on subsiding and buoying speed in the experiment range. Increasing ballasting can decrease overturning rate, and the maximum impact force is power function with mass flow of water filling. We can improve safety of floating sluice by means by increasing ballasting and decreasing mass flow of water filling.

Key words: floating sluice; subsiding and buoying; overturning; anti-overturning; impact force; hydraulic characteristics; hydraulic model test

传统形式的水闸由于采用截断河流的围堰施工、闸孔宽度小(一般小于12 m)、上部结构庞大以及运行方式等原因,对通航、生态环境及景观的影响日益加剧,在平原经济发达地区尤为突出^[1-3]。大跨度新型闸门可以在工厂制作预安装和现场安装,采用不断航施工工艺,可以兼顾防洪、通航、生态环境保护和景观等功能,在我国平原地区的河流防洪工程中已逐步得到推广。目前大跨度新型闸门的主要形式有浮体闸(门)、平面双开弧形闸门和卧倒式闸门3种。大跨度新型闸门的共同特点是结构新颖、跨度大、运行方式独特,在闸门控制运行时,以门顶或两扇门之间的门缝过流代替了传统闸门的门底出流^[4-5]。但是,大跨度新型闸门水流条件复杂,许多新的水动力问题需要研究^[6-7]。例如由于跨度大,闸门的受力呈数量级倍数增加;浮体闸需要突破规范规定只能在静水或者流速很小水域中使用的限制,要求靠自身在动水中稳定沉浮^[8-9];还可能由于下沉速度过快而撞击底板,定位转动过程动力舱容量难以计算确定等。因此开展对大跨度新型闸门水动力特性的研究,解决闸门运行过程中的关键技术问题,确保闸门安全运行,对于新型闸门的推广使用是非常必要的。此外,浮体闸施工中的下沉速度、稳定性及撞击力等也是这类闸门施工安装中的重要参数。

浮体闸属于浮体式结构,浮体式结构的水动力特性研究目前主要集中在波浪对浮体的作用及阻力^[10-11]、浮体的动力响应^[12]、多浮体缝隙对波浪力的影响^[13]和浮体的振动特性^[14]等几方面。浮体闸是在传统浮箱式闸门的基础上发展起来的,是一座

可以浮动的旋转启闭式水闸,非汛期浮体闸浮于专门的门库内,处于不碍航状态,可以全河道通航(图1(a));汛期利用动力舱将浮体闸围绕定位中枢牵引就位(图1(b)),然后利用浮体闸自身的充排水设备充水下沉,利用其浮箱上部的卧倒门控制水流;汛期过后排水上浮,将浮体闸牵回门库^[15-16]。本文以实际防洪控制工程目前净尺寸为亚洲最大的某新型大型浮体闸(长64 m、宽10 m、总高8.5 m,甲板至底部的浮箱高度4.2 m,浮箱对称分成4个水舱)为研究对象,通过水力学模型试验,对浮体闸沉浮过程中的水力特性进行全面的分析和研究,为浮体闸的安全控制运行提供参考依据。

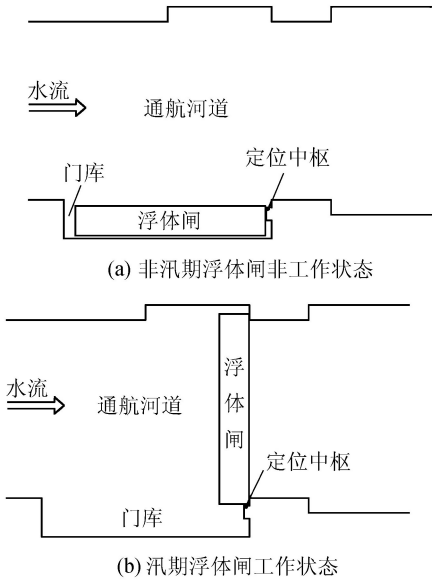


图1 浮体闸工作原理示意图

1 模型试验

1.1 模型设计

浮体闸沉浮过程中,需对浮体闸的浮性、稳定性(倾斜情况)、对底板的撞击力进行观测与控制。稳定性不但与浮体闸的质量、重心高度、内外部几何形状有关,还与动水压力、水流剪切力、下游门槽摩阻力有关^[15,17-19],模型按重力相似准则进行设计。撞击力的试验中,为了保证工况相似,模型还需满足以下相似准则^[20-21]:

$$\frac{F_z}{EL^2} = f\left(\frac{v}{\sqrt{E/\rho}}, \theta\right) \tag{1}$$

其中

$$\frac{v}{\sqrt{E/\rho}} = Ca^2$$

式中: F_z 为撞击力; E 为浮体闸的弹性模量; L 为浮体闸的特征尺寸; v 为浮体闸的撞击速度; ρ 为浮体闸的质量密度; θ 为撞击角度; Ca 为柯希数。本文试验的浮体闸模型几何比尺采用1:15,图2为浮

体闸模型布置示意图。

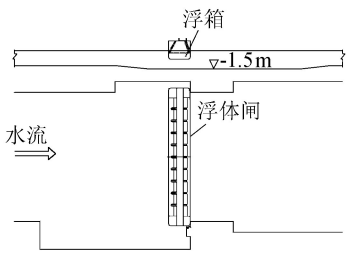


图2 浮体闸模型布置示意图

浮体闸沉浮试验中需要对沉浮速度进行控制,为此需对浮体闸浮箱的进(排)水流量进行控制。充水下沉控制采用带溢流装置的供水箱,以自流方式向浮箱各舱充水,由浮子流量计(测量精度为1%)对流量进行监控;排水上浮则由真空泵、水气分离器、真空度表、阀门等组成的系统进行控制,通过控制水气分离器上部的真空度来达到控制排水流量的目的,图3为模型浮体闸沉浮控制设备平面布置图。

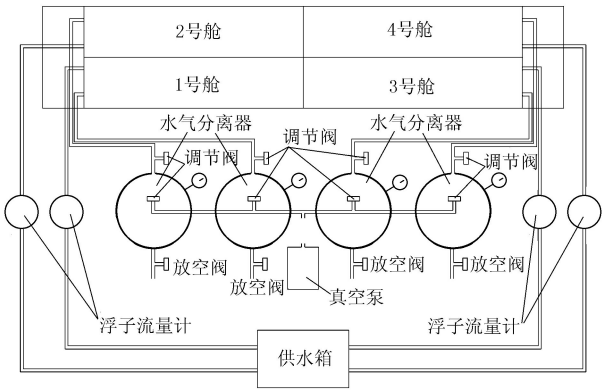


图3 浮体闸模型沉浮控制设备平面布置

1.2 试验参数

1.2.1 进(排)水流量及水位、流量组合

沉浮试验参数主要参照浮运法施工工程的充排水设计,下沉过程中模型进水流量按4 400 L/h控制,上浮过程模型排水流量为2 200 L/h,为了解河道水位及来流量对试验结果的影响,下沉和上浮试验中分别选择了两种水位、流量组合(表1)。

表1 浮体闸沉浮试验水位、流量组合

试验编号	水位/m		河道流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	河道流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
	闸上	闸下		
s1	5.48		314	0.75
s2	4.20		150	0.45
f1		4.8	250	0.66
f2		3.6	150	0.49

注:s1、s2为下沉试验,f1、f2为上浮试验,浮体闸闸位处河底高程-1.5 m。

1.2.2 抗倾覆特性试验压舱方案参数

根据关于浮体闸的稳定性分析^[8]可知,当水流条件相同时,浮体闸的抗倾覆特性(稳定性)与浮体

闸的质量与重心高度密切相关,浮体闸抗倾覆特性试验的主要目的是通过逐渐增加浮体闸的质量(压舱)同时降低重心高度来观察浮体闸的抗倾覆性能。试验在方案1(浮体闸总质量1221 kg,重心高度2.495 m,吃水深度为1.956 m)的基础上采用逐级增加压舱的方法进行抗倾覆试验观测,浮体闸各压舱方案的主要参数列于表2。鉴于浮体闸沉浮稳定性的重要性以及水流参数的随机变化特性,分别对各种方案的两种下沉和上浮水位、流量组合进行10次重复沉浮试验。

表2 浮体闸各压舱方案主要参数

方案	浮体闸总质量/kg	重心高度/m	空载吃水深度/m
1	1221	2.495	1.956
2	1518	2.038	2.425
3	1650	1.895	2.628
4	1750	1.804	2.783
5	1806	1.760	2.871
6	1856	1.721	2.949

1.2.3 撞击力传感器安装尺寸

为了全面观测浮体闸下沉时对底板的撞击作用,在浮体闸定位后相应的底板4个顶点上安装了4个撞击力传感器(测量精度2%~3%),来测量其下沉后对底板的撞击作用,传感器安装尺寸见图4。

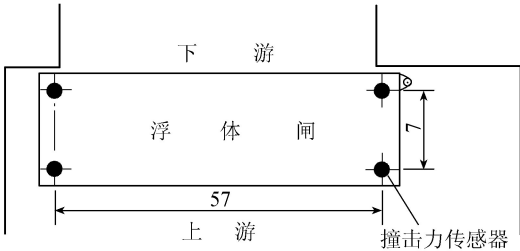


图4 撞击力传感器安装位置(单位:m)

2 试验结果与分析

2.1 水舱进(排)水量

水舱的进(排)水量与吃水深度的变化关系可以为浮体闸的进(排)水控制提供依据。图5为浮体闸下沉及上浮过程中吃水深度与进(排)水量之间的关系。可以看出,两种沉浮水位、流量组合下,浮体闸在吃水深度4.2 m(甲板水平水面位置)附近进(排)水量曲线都出现一个转折点,在吃水深度4.2 m以上及以下,浮体闸的进(排)水量与吃水深度均呈线性变化,吃水深度4.2 m以上及以下直线的斜率 k 约分别为600和166。理论上直线的斜率等于浮体闸水线面面积(浮体闸吃水线围成的面积),上述结果表明在吃水深度4.2 m附近浮体闸的水线面面积出现突变,这与浮体闸甲板以下部分水线面面积大(600 m²)、上部结构水线面面积小

(166 m²)的外形结构是相符的。

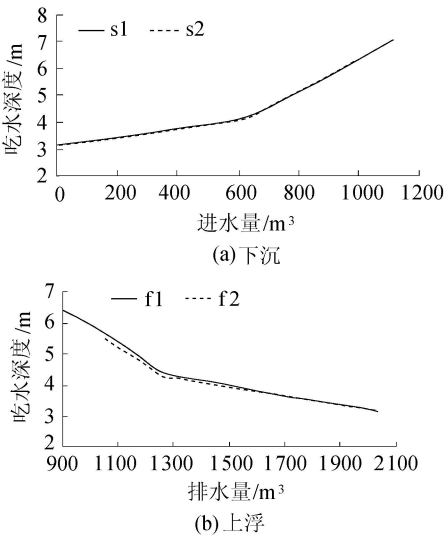


图5 浮体闸吃水深度与进(排)水量的关系

2.2 浮体闸沉浮速度

浮体闸在静水中沉浮时,设 t_1 、 t_2 时刻浮体闸对应的吃水深度分别为 h_1 和 h_2 ,浮箱进(排)水流量为 Q ,浮体闸水线面面积为 A ,则根据浮体闸的受力平衡原理可得:

$$|h_2 - h_1| A = |t_2 - t_1| Q \tag{2}$$

即 $|h_2 - h_1| / |t_2 - t_1| = Q/A \tag{3}$

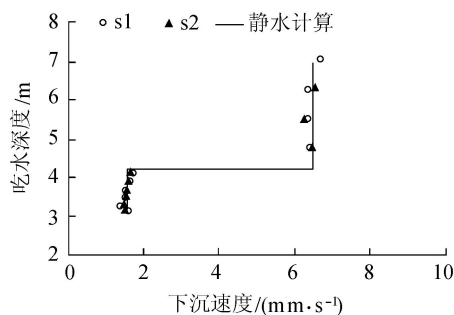
式(3)左边就等于浮体闸的沉浮速度 v ,因此浮体闸在静水中沉浮时,其沉浮速度仅取决于浮箱进(排)水流量和浮体闸水线面面积 A 。

动水沉浮试验中通过观测浮体闸沉浮过程中闸底高程随时间的变化得到浮体闸动水沉浮速度。试验发现,下沉过程在甲板未入水以前,浮体闸下沉较慢,下沉速度约1.6 mm/s;当甲板入水以后,浮体闸下沉较快,测得下沉速度约6.5 mm/s。上浮过程则相反,在浮体闸甲板出水面以前,浮体闸上浮较快(上浮速度约3.2 mm/s);而甲板出水面以后上浮速度较慢(上浮速度约0.8 mm/s),图6为浮体闸沉浮速度与吃水深度的关系。

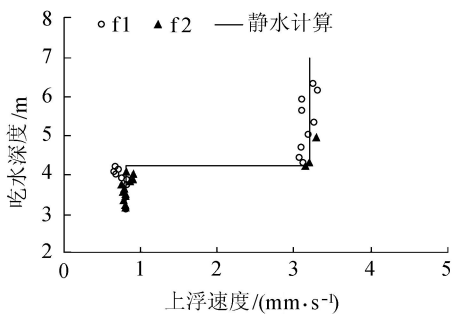
从图6可以看出,浮体闸动水沉浮速度与静水计算结果基本一致,即浮体闸动水沉浮速度只与浮体闸浮箱进(排)水流量和浮体闸水线面面积有关,而与河道来流情况及水位、流量组合没有关系。

2.3 抗倾覆特性

为了衡量浮体闸的抗倾覆特性(稳定性),定义浮体闸各方案倾覆次数与沉浮试验次数的比值为该方案的倾覆率 ε_q ,浮体闸的质量比 δ 为各压舱方案浮体闸总质量与方案1浮体闸总质量的比值,根据沉浮试验记录计算的各压舱方案倾覆率 ε_q 与浮体闸质量比 δ 的关系见图7。



(a) 下沉



(b) 上浮

图6 浮体闸吃水深度与沉浮速度的关系

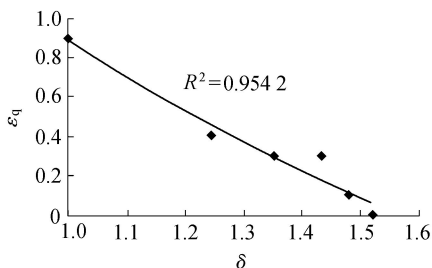


图7 倾覆率与浮体闸质量比的关系

图7表明,浮体闸的倾覆率与压舱的关系密切,增加压舱可以有效减小倾覆的概率。理论上河道的流速对倾覆率会有影响,但是在试验范围内的4种河道流速条件下测得的倾覆率基本满足一种函数关系,说明一定范围的流速变化对倾覆率的影响不大。将倾覆率与浮体闸质量比(范围1~1.55)的关系进行拟合,可以得到:

$$\varepsilon_q = -1.9743 \ln \delta + 0.8891 \quad (4)$$

从式(4)可以看出,当 $\varepsilon_q > 0$ 时,浮体闸有倾覆的危险;当 $\varepsilon_q \leq 0$ 时,浮体闸处于稳定状态。 $\varepsilon_q = 0$ 时的 δ 为浮体闸稳定所需的最小浮体闸质量比。

2.4 底板撞击力

试验中观测了不同闸门自重、不同闸门总质量(闸门自重加进水量)、不同进水量(浮体闸将要下沉到底时关闭进水阀时的进水量)和改变进水流量情况下的底板撞击力,结果发现,进水流量对底板撞击力的影响显著,图8为进水流量与底板最大撞击力的关系,可见,浮体闸对底板的撞击力与进水流量呈正相关关系,说明可以通过减小进水流量的方

式来减小底板的撞击力。

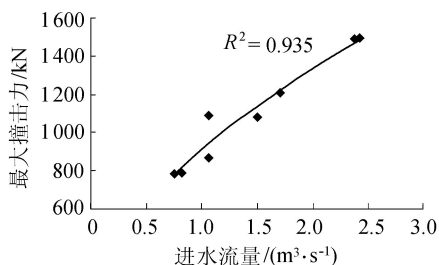


图8 浮体闸下沉过程底板最大撞击力与进水流量的关系

利用最小二乘法对试验测量结果进行拟合,可以得到如下的经验公式:

$$F_{\max} = 910.67 Q^{0.5536} \quad (5)$$

式中: $F_{\max}$ 为浮箱底板最大撞击力,kN; Q 为浮箱总进水量(4个水舱进水量之和), m^3/s ,试验范围为1~3 m^3/s 。从式(5)和图7可以看出,当进水流量减小到接近零时,底板最大撞击力即为最小的撞击力。

3 结论

a. 浮体闸的进(排)水量与吃水深度以甲板入(出)水面为转折点分段呈线性关系。

b. 本文试验条件下浮体闸动水沉浮速度与静水条件基本一致,即浮体闸动水沉浮速度主要与浮体闸浮箱进(排)水流量和水线面面积有关,而与河道来流流量(流速)及水位、流量组合关系不大。

c. 浮体闸的倾覆率与压舱的关系密切,增加压舱可以有效减小倾覆的概率,倾覆率等于零时得到的就是动水稳定所需最小的浮体闸质量比。

d. 浮体闸的最大撞击力与进水流量呈幂函数关系,减小进水流量可以减小撞击力,当进水流量减小到接近零时,可以得到底板的最小撞击力。

参考文献:

- [1] RAN Hongxing, WU Chao, ZHENG Yonghong, et al. Study on hydraulic characteristics of emergency gate for a surge-tank [J]. Journal of Hydrodynamics, 1996(4): 439-447.
- [2] YILMAZ L, OZGEN A. The design of hydraulic steel gates subject to wave motion and fatigue life prediction according to the theory of stochastic dynamic analysis [J]. ARI: An International Journal for Physical and Engineering Sciences, 1998, 51(2): 105-112.
- [3] ROTH A, HAGER W H. Underflow of standard sluice gate [J]. Experiments in Fluids, 1999, 27(4): 339-350.
- [4] WU Jianhua, FENG Shurong, WU Weiwei, et al. Hydraulic characteristics of partial opening of the working gate for a discharge tunnel [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser B, 2007, 19(4): 488-493.

(下转第94页)

- Chinese))
- [72] 任小龙,贾志宽,韩清芳,等. 半干旱区模拟降雨下沟垄集雨种植对夏玉米生产影响[J]. 农业工程学报,2007,23(10):45-50. (REN Xiaolong, JIA Zhikuan, HAN Qingfang, et al. Effect of ridge and furrow rainfall harvesting planting system on production of summer corn (*Zeamays L.*) under simulated rainfall conditions in semi-arid areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(10):45-50. (in Chinese))
- [73] 张建新,郑大玮. 国内外集雨农业研究进展与展望[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(2):223-229. (ZHANG Jianxin, ZHWNG Dawei. Advances and expectations of international rainwater catchment researches [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(2):223-229. (in Chinese))
- [74] 李锋瑞. 干旱农业生态系统研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1998.
- [75] TABOR J A. Improving crop yields in the Sahel by means of water-harvesting [J]. Journal of Arid Environments, 1995,30(1):83-106.
- [76] 宋云民,周泽福,党宏忠. 北方半干旱沙地植被建设中节水技术的应用研究进展[J]. 世界林业研究,2006,19(6):22-26. (SONG Yunmin, ZHOU Zefu, DANG Hongzhong. Progress of application research of water-saving technologies in vegetation recovery in Northern semi-arid sandy area[J]. World Forestry Research,2006,19(6):22-26. (in Chinese))
- (收稿日期:2013-09-17 编辑:熊水斌)

(上接第27页)

- [5] KIM D G. Numerical analysis of free flow past a sluice gate [J]. Journal of Civil Engineering,2007,11(2):127-132.
- [6] ROTH A,HAGER W H. Underflow of standard sluice gate [J]. Experiments in Fluids,1999,27(4):339-349.
- [7] WANG Huaming, ZOU Zaojian, TIAN Ximin. Numerical simulation of transient flow around a ship in unsteady berthing motion [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2009,21(3):379-385.
- [8] 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))
- [9] ZOU Lin, LIN Yufeng. Force reduction of flow around a sinusoidal wavy cylinder [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B,2009,21(3):308-315.
- [10] ZHANG Jun, MIAO Guoping. A liner hybrid model of mse and bem for floating structures in coastal zones [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B,2006,18(3):649-658.
- [11] SHI Zhongkun, WU Fangliang, ZHOU Feng. Fluid dynamic performance of grooved planing boat and its effect on resistance [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B,2005,17(5):571-579.
- [12] ZHANG Jun, MIAO Guoping. Analytical models of floating bridges subjected by moving loads for different water depths [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2008, 20(5):735-740.
- [13] ZHU Renchuan, MIAO Guoping, YOU Yunxiang. Influence of gaps between 3-D multiple floating structures on wave forces [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2005, 17(2):141-147.
- [14] SUN Ren, CHWANG A T. Interaction of a floating elliptic cylinder with a vibrating circular cylinder [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B,2006,18(4):481-491.
- [15] 傅宗甫,严忠民,吕家才. 大型浮体闸模型水工试验方法[J]. 水利水电科技进展,2007,27(5):6-9. (FU Zongfu, YAN Zhongmin, LÜ 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] KOVALEV S V. Investigation and operation of water gates [J]. Power Technology and Engineering,2009,43(2):99-102.
- [17] FU Zongfu, YAN Zhongmin. Experimental study on resistance characteristics in pulling process of pontoon gate [C]//Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. Beijing: Tsinghua University Press,2008:1646-1651.
- [18] WANG Wei, YANG Yongquan, XU Weilin, et al. Experimental investigation of emergency gate shutting for orifice tunnel [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B,2002,14(3):29-34.
- [19] 陆志妹,缪国平,朱仁传,等. V形贯底式防波堤上波浪作用力的解析研究 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007,22(1):135-141 (LU Zhimei, MIAO Guoping, ZHU Renchuan, et al. Analytical research on the wave force exerted on V-shaped bottom-mounted breakwaters [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser A,2007,22(1):135-141. (in Chinese))
- [20] 林建筑,郑振飞,卓卫东. 泉州后渚大桥船撞力试验研究 [J]. 中国公路学报, 2003, 16(2):58-60. (LIN Jianzhu, ZHENG Zhenfei, ZHOU Weidong. Experimental study of force of ship collision with Houzhu bridge of Quanzhou [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003,16(2):58-60. (in Chinese))
- [21] WU Chao, HUANG Guofu, ZHANG Ting, et al. Bearing forces of emergency gate during shut off [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B,2000,(1):42-48.
- (收稿日期:2014-05-04 编辑:熊水斌)