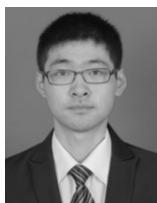


· 港 口 ·



## 基于水运行业规范的 防风单点浮筒系泊力计算

张林海, 张同旭, 王晓晖

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 针对港口工程防风单点浮筒系泊力计算问题, 根据《港口工程荷载规范》和 Daidola 公式, 求得船舶在风、浪、流荷载下的平衡位置; 在此基础上叠加瞬时的波浪冲击力, 建立单点系泊系统的受力模型。考虑到系泊船在风、浪、流共同作用下会产生偏荡运动, 参考军标《防风系船水鼓》中的相关公式, 对比物理模型试验结果, 提出风、浪、流各力的组合修正系数, 提供了一种可供工程应用的系泊力计算思路。该方法可供类似工程初步确定防风浮筒参数, 为后续物理模型试验提供必要的基础。

**关键词:** 单点系泊; 波浪作用; 系泊力

中图分类号: U 653.2; U 664.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0050-06

### Mooring force calculation of wind proof single point buoy based on water transport industry specifications

ZHANG Linhai, ZHANG Tongxu, WANG Xiaohui

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Regarding at the calculation of mooring force of windproof single point mooring system in harbour engineering, the equilibrium position of the ship under wind, wave and current loads is obtained according to *Load Code for Harbour Engineering* and Daidola formula. On this basis, the instantaneous wave impact force is superimposed, and the force model of the mooring system is established. Considering that the mooring ship will produce sway motion under the combined action of wind, wave and current, referring to the relevant formula form in the military standard *Anti-typhoon mooring buoy system*, and comparing the results of physical model test, the combined correction coefficient of wind, wave and current forces is proposed, which provides a solution for engineering application. The method in this paper can be used for the engineering under similar conditions to preliminarily determine the parameters of windproof buoy, and provide a necessary basis for subsequent physical model tests.

**Keywords:** single point mooring; wave action; mooring force

单点系泊系统主要由船舶系泊缆、浮筒、锚链、锚碇等组成, 船舶可在水平面绕浮筒旋转, 平衡时船舶系泊力能够保持在最小状态。系泊力计算是研究浮筒选型、锚链要求、锚定设计、系泊安全计算等一系列问题的基础。目前, 单点系泊系统主要运用于海上石油开采及接驳, 仅少量用于船舶的防风系泊, 国内水运工程领域尚无针

对单点系泊系统系泊力计算的专门规定, 主要通过物理模型试验确定。

本文基于船舶系缆力物理模型试验成果, 参考相关文献, 提出一种单点系泊船舶在风、浪、流作用下的系缆力计算方法, 可供初步确定防风浮筒系统参数, 为物理模型试验提供必要的基础。防风单点系泊系统见图 1。

收稿日期: 2022-06-29

作者简介: 张林海 (1989—), 男, 高级工程师, 从事水利水运工程结构设计与管理。

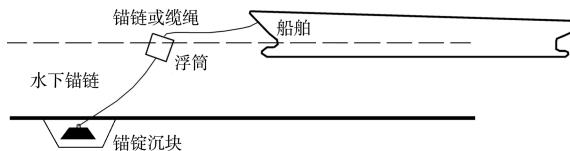


图 1 防风单点系泊系统

## 1 船舶物理模型试验

### 1.1 工程概况

为适应某地区修造船事业的迅猛发展, 拟新建2处30万吨级无动力油船和2处10万吨级无动力散货船的防风系泊浮筒, 考虑采用单点系泊方式。由于该防风浮筒系统需要承受台风期间复杂的风、浪、流联合作用, 对该系统进行了物理模型试验, 以确定在各种自然荷载联合作用下的系泊力<sup>[1]</sup>。系泊代表船型主要参数见表1, 风、浪、流参数见表2, 浮筒下锚链参数见表3。

表 1 代表船型主要参数

船型	船长/m	船宽/m	型深/m	满载吃水/m
30万吨级油船	340	58.7	31.5	22.4
10万吨级散货船	270	44.5	20.8	15.0

表 2 风、浪、流参数

单点 编号	风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	波高/ H <sub>1/3</sub> /m	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	
			涨潮	落潮
I	46.5	3.1	2.84	3.10
II	46.5	4.0	2.42	2.16
III	46.5	3.1	2.48	2.16
IV	46.5	4.2	2.44	2.44

表 3 浮筒下锚链参数

单点 编号	系泊船型	锚链 长度/m	锚链链径/ mm	试验水深/m	
				高水位	低水位
I	30万吨级油船	65	147	30.47	24.48
II	30万吨级油船	65	147	30.81	24.47
III	10万吨级散货船	45	122	18.38	12.24
IV	10万吨级散货船	50	122	18.38	12.24

模型试验依据 JTJ/T 234—2001《波浪模型试验规程》, 根据系泊船的主尺度及有关船舶型线数据, 选定合适的模型比尺, 制作成与实体几何相似的船舶模型。参考建设水域风向、浪向及流向, 确定试验组合方案如图2所示<sup>[2]</sup>。

### 1.2 模型试验结果

试验中对船舶模型进行了1/3、1/4、1/5等3个压载工况的试验, 其中无浪情况下试验65组、有浪情况下试验71组(包含图2所示6组工况)。典型试验结果见表4<sup>[3]</sup>。

表 4 单点Ⅲ工况2系泊试验结果

水位	压载 情况	风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	波高/ m	锚链力/kN	
					平均值	最大值
高水位	1/3	46.5	2.48	0.0	1 665	2 990
		46.5	2.48	3.1	1 815	4 220
	1/4	46.5	2.48	0.0	1 825	3 185
		46.5	2.48	3.1	1 915	4 855
低水位	1/3	46.5	2.48	0.0	1 520	2 840
		46.5	2.48	3.1	1 670	4 120
	1/4	46.5	2.48	0.0	1 715	2 865
		46.5	2.48	3.1	1 765	4 710

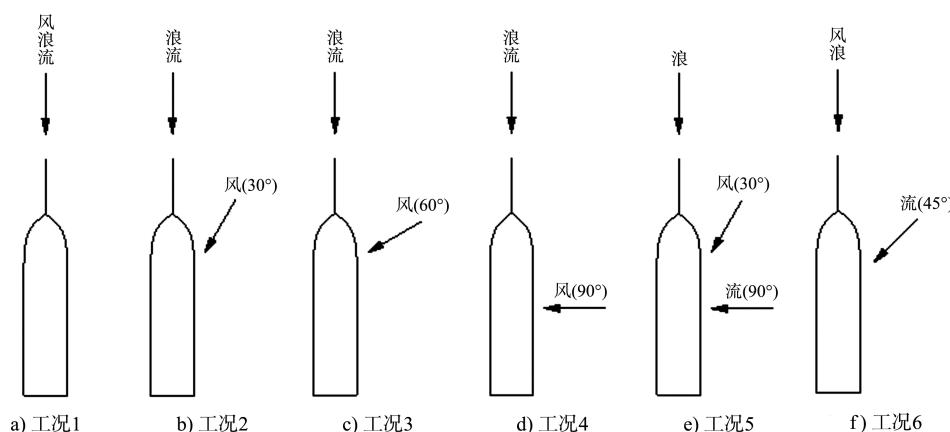


图 2 试验组合方案

### 1.3 试验结果分析

以单点Ⅲ的锚链张力为例, 若船舶仅受风、

流组合作用, 在单点系泊状态下, 平均锚链张力在1 700 kN左右。若船舶在风、浪、流的组合作

用下, 其平均锚链张力变化不大, 但因波浪冲击作用, 最大锚链张力增大明显, 单点Ⅲ在各试验工况中的最大锚链张力达 4 800 kN 左右。可见在有浪情况下, 波浪引起的锚链张力不可忽略。

由于单点系泊系统的平衡特性, 船舶在风、浪、流作用下会产生偏荡运动, 从而导致锚链张力的增加量在无浪工况下约 30%~120%, 在有浪工况下约 90%~330%。

## 2 船舶环境荷载计算模型

在台风环境中, 船舶所受到的总荷载  $\mathbf{F}_a$  包括风荷载  $\mathbf{F}_{wind}$ 、水流荷载  $\mathbf{F}_{curr}$  和波浪荷载  $\mathbf{F}_{wave}$ 。风荷载  $\mathbf{F}_{wind}$  的计算见 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》附录 E<sup>[4]</sup>; 水流荷载  $\mathbf{F}_{curr}$  根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》局部修订(作用于船舶上的水流力部分)计算<sup>[5]</sup>。

水运行业规范中尚无波浪对船舶荷载的有关规定, 因此需引入相关公式。

### 2.1 波浪对船舶的作用力

波浪对船舶的作用力根据其特征, 可分为一阶波浪力和二阶波浪漂移力。其中, 一阶波浪力主要源自波浪的压力波动, 是一种周期性的冲击作用力, 因船舶运动响应时间一般大于波浪周期, 一阶波浪力仅会使船舶在平衡位置附近微幅摆动, 对确定船舶平衡位置影响较小。而二阶波浪漂移力的计算非常复杂, 几乎不可能完全准确计算, 其中的平均波漂力是一种定常的持续性的作用力, 对船舶的系泊平衡位置会产生明显的影响, 本文引入 Daidola 公式近似计算<sup>[6]</sup>。

1) 波浪冲击力。在波浪和船舶的碰撞过程中, 会出现伴有压力峰值的冲击荷载。Hagiwara 和 Yuhara 对此进行过讨论<sup>[7]</sup>, 他们引入了一个等效静压力  $P_{eq}$ , 定义为均匀分布的静压力。在 0.45 m×0.31 m 面板的例子中, 他们发现等效静压的大小约为最大抨击压力的 1/3。

由于波浪对船舶最大瞬时抨击荷载影响因素

的复杂性, 根据以上试验结论, 波浪最大瞬时抨击荷载参照 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》附录 R 中方形或矩形柱体波浪力计算方法<sup>[8]</sup>。波浪等效冲击力  $P_{wave}$  取最大抨击压力的 1/3。

2) 平均波漂力。目前, 除船模试验外尚无更好的方法精确预报平均波漂力, 笔者利用 Daidola 提出的平均波漂力计算公式近似计算, 对于规则波有:

$$\begin{cases} X_w = \frac{1}{2} \rho g L A^2 C_{xD}(\lambda) \cos \chi \\ Y_w = \frac{1}{2} \rho g L A^2 C_{yD}(\lambda) \sin \chi \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $X_w$  和  $Y_w$  为波浪纵向、横向二阶平均波漂力;  $L$  为船长;  $A$  为波浪的波幅;  $\lambda$  为波浪的波长;  $\chi$  为波浪遭遇角;  $C_{xD}$ 、 $C_{yD}$  为波浪二阶漂移力系数, 为波长和船长的函数, 可按如下经验公式:

$$\begin{cases} C_{xD}(\lambda) = 0.05 - 0.2 \frac{\lambda}{L} + 0.75 \left( \frac{\lambda}{L} \right)^2 - 0.51 \left( \frac{\lambda}{L} \right)^3 \\ C_{yD}(\lambda) = 0.46 + 6.83 \frac{\lambda}{L} - 15.65 \left( \frac{\lambda}{L} \right)^2 + 8.44 \left( \frac{\lambda}{L} \right)^3 \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2 力系的平衡和受力模型

在风、浪、流作用力稳定, 且作用足够长时间的条件下, 整个单点系泊系统将达到动态平衡。决定船舶平衡位置的环境荷载包括风作用力、流作用力和二阶波漂力; 按作用在船舶上的方向分为横向力和纵向力; 简化起见, 忽略各环境力对船舶重心的偏转力矩, 认为均作用于船舶重心, 则风作用力、流作用力和二阶波漂力的横向作用力相抵消时, 船舶处于平衡状态。风作用力、流作用力和二阶波漂力的纵向作用力之和叠加波浪冲击力作为船舶水平向系泊力的来源。

### 2.3 与模型试验结果的初步对比

对试验结果采用锚链的悬链线方程求解出水平系泊力<sup>[9]</sup>。与上述力学模型纵向计算力简单相加值进行对比, 结果见图 3。

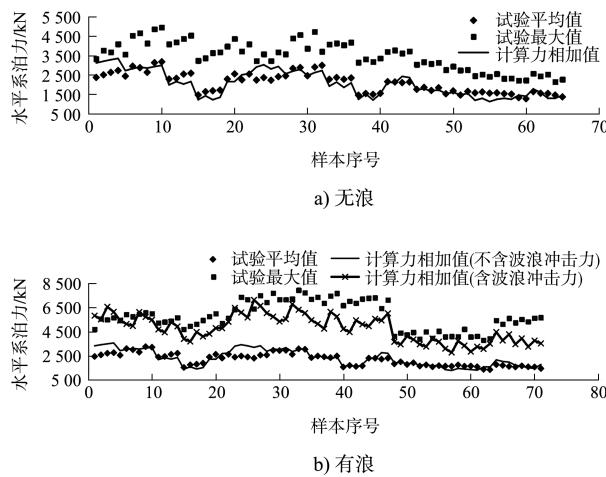


图3 试验值与计算力相加值对比

由图3可知: 1) 无论无浪、有浪工况, 上述力学模型所得出的计算力简单相加值(有浪情况下不含波浪冲击力)均与试验平均值符合程度较高, 说明此力学模型较为可靠。2) 在有浪工况下计入波浪冲击力后系泊力有明显增加, 但大部分工况下仍与试验值有一定差距, 船舶偏荡运动导致的系泊力增大值不可忽略。3) 由于偏荡运动致使船舶所受系泊力显著增加, 上述力学模型需采取适当修正方能准确计算船舶在偏荡运动下的系泊力。

### 3 系泊力计算实用公式

#### 3.1 军标 GJB 1119A—2006《防风系船水鼓》结果与模型试验值的对比

目前, 我国水运行业尚无专门的针对单点系泊的系泊力计算公式, 而军标 GJB 1119A—2006《防风系船水鼓》有单点系泊系统考虑风、流共同作用下的系泊力计算公式, 但多限于有掩护条件的小中型船舶: 船舶吨位小于8 000 t, 流速小于2.5 m/s, 且不明确考虑波浪力(波浪有效波高不大于3.0 m), 计算公式为<sup>[10]</sup>:

$$F = \mu F_w + F_c \quad (3)$$

其中:  $F_w = \frac{1}{1600} v_w^2 k_w A$  (4)

$$F_c = \xi (F_d + F_s) \quad (5)$$

式中:  $F$  为舰船系泊力;  $\mu$  为风动力影响系数, 与船舶水上水下面积比有关;  $F_w$  为风力引起的舰船

系泊力;  $F_c$  为水流力引起的舰船系泊力;  $v_w$  为风速;  $k_w$  为舰船的偏荡系数, 与水线上下面积比有关;  $A$  为舰船水下部分纵向投影面积;  $\xi$  为水流力组合系数, 与流速和水线上下面积比有关;  $F_d$  为动水压力;  $F_s$  为水流摩阻力。

为分析军标计算公式的适用性, 选取较为适用的几组试验工况与军标计算值进行分析对比, 见表5。

表5 试验值与军标计算结果对比

单点	水位	压载情况	风速/ $(m \cdot s^{-1})$	流速/ $(m \cdot s^{-1})$	波高/ m	最大锚链力/kN	
						试验值	军标计算值
II	高水位	1/3	46.5	2.42	0.0	4 690	6 312
			46.5	2.42	4.0	8 240	-
		1/4	46.5	2.42	4.0	8 820	-
			46.5	2.42	3.5	8 210	-
	低水位	1/3	46.5	2.16	0.0	4 415	7 290
			46.5	2.16	4.0	8 120	-
		1/4	46.5	2.16	0.0	5 150	11 178
			46.5	2.16	4.0	8 630	-
III	高水位	1/3	46.5	2.48	0.0	3 285	6 377
			46.5	2.48	3.1	4 465	-
		1/4	46.5	2.48	0.0	3 430	8 443
			46.5	2.48	3.1	4 855	-
	低水位	1/3	46.5	2.16	0.0	3 190	7 658
			46.5	2.16	3.1	4 415	-
		1/4	46.5	2.16	0.0	3 240	11 406
			46.5	2.16	3.1	4 880	-

通过对比发现: 1) 无论高低水位, 对于单点II的1/3压载工况, 军标计算值小于有浪工况下的试验值, 而大于无浪情况下的试验值; 2) 对于单点II的1/4压载工况, 军标计算值均大于试验值; 3) 对于单点III, 军标计算值均远大于试验值。

分析可知: 对于10~30万t船舶, 当有效波高不大于3.5 m时, 军标的计算值大于试验值; 若大于3.5 m, 则有可能在特定工况下小于试验值。这与军标公式的试验环境即波浪有效波高不大于3.0 m吻合。

综上所述, 军标公式对大型船舶在以高速风、流及大浪为特点的台风天气情况下缺乏适用性, 因此有必要结合第2节中的力学模型, 参考军标

中的公式, 提出一种考虑波浪力的大型船舶防风单点系泊系统系泊力的计算公式。

### 3.2 公式的提出

参考军标中的相关公式, 提出考虑波浪力的单点系泊系统水平系泊力最大值公式<sup>[11-13]</sup>:

$$F_a = \mu (\xi_{wind} F_{yw} + \xi_c F_{lc} + \xi_{wave} X_w + \xi_p P_{wave}) \quad (6)$$

式中:  $F_a$  为水平向系泊力最大值;  $F_{yw}$  为纵向风力;  $F_{lc}$  为纵向流力;  $X_w$  为波浪二阶漂移力;  $P_{wave}$  为波浪冲击力, 取最大抨击压力的 1/3;  $\xi_{wind}$ 、 $\xi_c$ 、 $\xi_{wave}$ 、 $\xi_p$  分别为风力、流力、二阶漂移力和波浪冲击力的组合系数;  $\mu$  为风、流、浪耦合系数, 均需根据试验数据确定。

### 3.3 参数的确定

基于本工程物理模型试验, 对试验数据观察分析, 经优化后各系数为:

1) 无浪情况:

$$\xi_{wind} = 0.0075 \theta_{wind} + 1.25 \quad (7)$$

$$\xi_c = 0.08 \theta_c + 1.20 \quad (8)$$

$$\mu = 0.101 \frac{A_u}{A_d} + 1.0713 \quad (9)$$

2) 有浪情况:

$$\xi_{wind} = 0.00383 \theta_{wind} + 1.05 \quad (10)$$

$$\xi_c = 0.0699 \theta_c + 0.65 \quad (11)$$

$$\xi_{wave} = -0.0381 \theta_{wave} + 5.3 \quad (12)$$

$$\xi_p = 0.0071 \theta_{wave} + 0.28 \quad (13)$$

$$\mu = 0.0577 \frac{A_u}{A_d} + 1.211 \quad (14)$$

式中:  $\theta_{wind}$  为风入射角;  $\theta_c$  为流入射角;  $\theta_{wave}$  为浪入射角, 以上角度均为上述力学模型受力平衡时取得;  $A_u/A_d$  为水线上下面积比。

图 4 为无浪和有浪情况下的试验值与本文经验公式值对比, 可以看出, 上述实用公式计算结果基本略大于试验最大值, 满足工程需要。求得水平系泊力后, 按悬链线方程进行计算, 求取锚链系泊力。

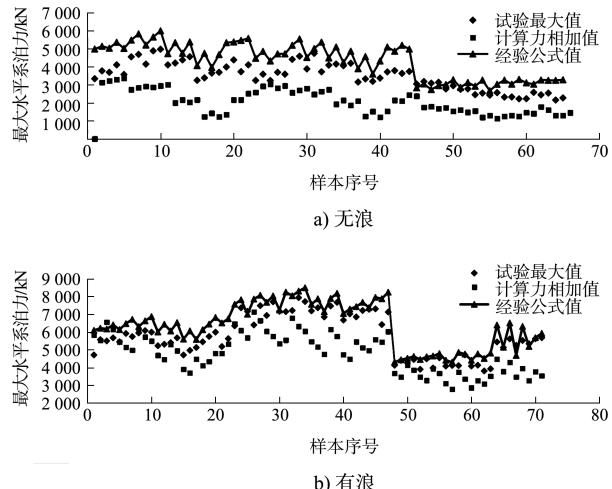


图 4 无浪和有浪情况下试验值与本文经验公式值对比

### 3.4 系缆力成分分析

为探究风、浪、流作用下占主导的环境荷载, 对图 2 中的工况 1 试验数据结合上述公式进行各力的占比分析(其他工况由于横向力的相互抵消, 纵向系泊力成分分析可能失真)。各力占比见图 5。

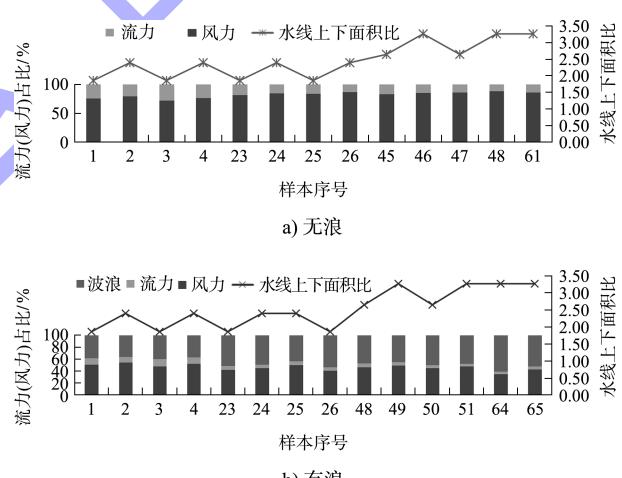


图 5 无浪和有浪情况下各力占比及水线上下面积比关系

由图 5 可知, 本工程在无浪情况下, 系缆力中风力占比达到 70%~88%, 占据主导地位, 且随着水线上下面积比的增加, 风力占比呈扩大趋势; 在有浪情况下, 波浪力及风力均占有 35%~50%, 两者作用相当, 从定量角度说明了有效波高大于 3.0 m 时, 波浪力引起的系泊力不可忽略。由于样本数量少, 且波高差异较大, 无法简单与水线上下面积比建立关系。

## 4 结论

1) 根据工程物理模型试验数据, 参考军标《防风系船水鼓》中的相关公式, 提出了一种适用于水运工程行业的单点系泊系统系泊力计算方法。本方法考虑各力入射角、船舶水上水下面积比等因素, 与试验值拟合情况较好, 可为相似环境条件下的单点系泊系统的系泊力计算提供参考。

2) 由于试验样本限制, 本公式适用于风速40~50 m/s、流速2.0~3.2 m/s、有效波高3.0~4.5 m的海况; 同时需满足系泊缆总长约为1倍船宽, 水下系泊力链长度约为2~4倍水深。

3) 由于船舶在风、浪、流作用下的运动复杂性, 后续应进一步收集相关模型试验数据或原型观测资料, 对本公式进行适当修正, 使公式扩大适用范围, 更符合实际情况。

## 参考文献:

- [1] 上海海事大学. 舟山港域无动力船舶防台浮筒试验工程数、物模研究报告[R]. 上海: 上海海事大学, 2010.
- [2] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 舟山港域无动力船舶防台浮筒试验工程方案设计[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2010.
- [3] 上海船舶运输科学研究所. 舟山港域无动力船舶防台浮筒起步工程物理模型试验[R]. 上海: 上海船舶运输科学研究所, 2010.
- [4] 中交第一航务工程勘察设计有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [5] 《港口工程荷载规范》(JTS 144-1—2010)局部修订(作用于船舶上的水流力部分)(征求意见稿), 中华人民共和国交通运输部官网信息公开[EB/OL]. (2021-07-22) [2022-06-23]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202107/t20210722\\_3612637.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202107/t20210722_3612637.html)
- [6] 包雄关, 李松. 大型无动力船舶防台浮筒系泊力数学模型研究[J]. 船舶工程, 2014, 36(2): 37-40, 80.
- [7] FALTINSEN O M. 船舶与海洋工程环境荷载[M]. 杨建民, 肖龙飞, 葛春花. 译. 2版. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- [8] 中交第一航务工程勘察设计有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2015.
- [9] 杨长义, 陈玺文. 浅析系船浮筒锚链的静力计算问题[J]. 港工技术, 2012, 49(2): 18-20.
- [10] 海军工程大学后勤指挥与工程系. 防风系船水鼓: GJB 1119A—2006[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2006.
- [11] 夏运强. 浮筒式防风单点系泊系统研究与应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [12] 李玉龙, 于定勇, 李翠琳, 等. 防风单点系泊系统系泊力试验研究[J]. 海岸工程, 2008, 27(2): 17-25.
- [13] 孟祥玮, 高学平, 张文忠, 等. 波浪作用下船舶系缆力的计算方法[J]. 天津大学学报, 2011, 44(7): 593-596.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第40页)

- [9] 徐伟杰, 王瑞彩, 陶桂兰, 等. 颗粒粒径分布对泥浆絮凝效果的影响[J]. 水电能源科学, 2022, 40(4): 0179-0182.
- [10] Wang R C, Xu W J, Wu T, et al. Study on the flocculation effect of dredged mud with flocculants for rapid sedimentation[C]//Proceedings of the 39th IAHR World Congress, Granada: [s. n.], 2022: 1117-1124.
- [11] 李婷, 张春雷, 廖岩. 疏浚泥浆的混凝沉降特性及絮体形态[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(3): 1283-1287.
- [12] 梁止水, 杨才干, 高海鹰, 等. 建筑工程废弃泥浆快速泥水分离试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 427-433.
- [13] 南京水利科学研究院. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [14] 周华. 阴离子聚丙烯酰胺的制备及应用研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2006.
- [15] 唐婉莹, 翟宇峰, 王连军, 等. 聚合氯化铝絮凝机理探讨[J]. 南京理工大学学报, 1997, 21(4): 325-328.

(本文编辑 赵娟)