



横浪作用下拖轮动态系泊及撞击力研究

路卫卫¹, 李树均², 余神光¹, 宋兰芳¹, 覃杰¹, 陈良志¹

(1. 中交第四航务工程勘测设计院有限公司, 广东 广州 510290;

2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 目前, 横浪作用下船舶动态系泊分析及撞击力的研究全部集中于大型码头, 但对于拖轮目前尚无相关研究。结合东南亚某集装箱码头附属拖轮码头工程, 进行拖轮在横浪作用下拖轮系泊稳定分析及撞击力研究。采用动态系泊分析软件 aNyMOOR TERMSIM 计算横浪作用下动态系泊稳定性, 得到正常使用和极端工况下船舶撞击力、系统力及船舶运动量, 将撞击能量与中国《港口工程荷载规范》的计算结果进行对比, 并对比分析国内外规范对小型船舶系泊条件及船舶运动量的规定, 结合本工程给出适用于拖轮的波浪及运动量推荐标准。结果表明, 对于拖轮这种小型船舶, 在横浪作用下, 采用动态系泊分析软件计算船舶撞击能量大于规范计算结果, 约为其 2.3 倍; 在极端情况下, 传统 DA 形及 V 形护舷可能已无法满足码头结构需求, 需采用鼓形或锥形护舷才能满足经济合理的码头结构; 另外推荐拖轮正常运营、极端工况允许运动量控制标准分别为纵移不大于 1.5 m 和横移不大于 1.0 m、纵移不大于 2.0 m 和横移不大于 1.5 m, 推荐横浪波高控制标准为正常系泊不大于 0.4 m、极端系泊不大于 1.4 m。

关键词: 横浪; 拖轮; 动态系泊分析; 护舷; 撞击力

中图分类号: U 653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0081-06

Dynamic mooring and impact force of tugboats under beam seas

LU Wei-wei¹, LI Shu-jun², YU Shen-guang¹, SONG Lan-fang¹, QIN Jie¹, CHEN Liang-zhi¹

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2. China Harbour Engineering Company Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: At present, the studies on dynamic mooring analysis and impact force of vessels under beam seas all focus on large-scale wharves, and no study pays attention to tugboats. Therefore, on the basis of an auxiliary tugboat berth project of a container terminal in Southeast Asia, the analysis of dynamic mooring stability and impact force of tugboats under beam seas are studied in this paper. The dynamic mooring analysis software aNyMOOR TERMSIM is adopted to calculate the dynamic mooring stability under beam seas, and the impact force, mooring force, and vessel motion are obtained from the calculation under normal use and extreme conditions. The result of the impact energy is compared with that from the *Load Code for Harbor Engineering* of China, and the regulations on the mooring conditions and motion of small vessels from different design codes at home and abroad are compared and analyzed. As a result, the recommended standards for waves and motion of tugboats are given in combination with this project. The results reveal that for small vessels like tugboats, the impact energy calculated by dynamic mooring analysis software is about 2.3 times greater than that from the Chinese design code. Under extreme conditions, the traditional DA fender or V-shaped fender could not meet the demand of wharf structure; instead, drum-shaped or conical fenders are more suitable for economic and rational wharf structure. Moreover, it is recommended

that regarding the surge and sway amplitude, the motion of tugboats should be less than 1.5 m and 1.0 m under normal operation conditions and less than 2.0 m and 1.5 m under extreme conditions, respectively. The recommended limit of the beam sea height is less than 0.4 m under normal operation conditions and less than 1.4 m under extreme conditions.

Keywords: beam sea; tugboat; dynamic mooring analysis; fender; impact force

国内外关于横浪作用下船舶动态系泊及撞击力的研究都是针对大型开敞式码头(例如1万吨级以上),且多是针对风浪条件较差的油气码头,很少见关于小码头例如拖轮或工作船在横浪作用下撞击力的研究。究其原因,主要是拖轮泊位多数位于掩护较好的区域或者在极端大波浪下离泊。而东南亚某集装箱码头工程的附属拖轮泊位却位于波浪较大区域,除了要求满足平时波浪下码头安全运营外,还要求在极端波浪(有效波高1.4 m)情况下,拖轮须系泊在码头上。另外除拖轮本身需要升级改造以满足系靠泊要求外,常规拖轮泊位系船柱、护舷的选取方法已不能满足要求,需要进行动态系泊分析并研究船舶撞击力。

船舶撞击力主要取决于以下2种情况:船舶靠岸时撞击力以及船舶系泊时风浪流作用下产生的挤靠撞击力。对于船舶系泊时候允许系泊条件(风浪流),分为2种情况:1)作业工况,取决于装卸设备要求、人员上下要求、人员舒适度,对于部分船型,规范会给出推荐的风浪限制条件,也可用船舶运动量控制;2)不作业工况,取决于船舶安全(船舶运动安全、船上系船设施限值)及码头结构安全两方面。

关于横浪作用下撞击力的研究,可采用的方法包括经验公式法、物理模型试验法和数值模拟方法。经验公式法,例如中国的《港口工程荷载规范》^[1]的计算公式,英国、日本、德国等研究均是基于动能理论^[2],并且侧重于船舶附加水体质量系数研究,例如国外的Costa公式、Wilson公式、Stelson公式,国内大连理工大学、天津大学、南京水利科学研究院等关于附加水体质量系数的研究,一般是通过物理模型试验验证或总结附加水体质量系数,从而用于修正公式^[3-5]。数值模拟方

法采用动力分析软件,不同科研单位采用不同软件^[6],例如美国TTI公司的Optimoor^[7]、荷兰Alkyon公司的Ship-mooring^[8]、法国BV船级社的Ariane^[9]、荷兰MARIN公司的aNyMOOR TERMSIM软件等。

本文研究不同规范对拖轮泊位作业及系泊的作业波浪、运动量要求,根据《港口工程荷载规范》计算护舷在横浪作用下撞击力,并通过aNyMOOR TERMSIM软件进行拖轮动态系泊分析,最后对比分析计算结果,确定合适护舷,给出推荐的拖轮运动量及波浪控制标准。

1 工程实例

1.1 工程概况

东南亚某集装箱码头附属配套拖轮码头位于集装箱码头东侧,拖轮码头长80 m,共计2个泊位,总体布置如图1所示。拖轮船长30 m,吃水5 m,总排水量670 t。集装箱码头和拖轮码头都采用桩基结构。拖轮码头系船柱初始假设为250 kN,护舷为V形护舷(G2.0),护舷高600 mm、长3 200 mm,码头断面如图2所示。



图1 拖轮码头总体布置

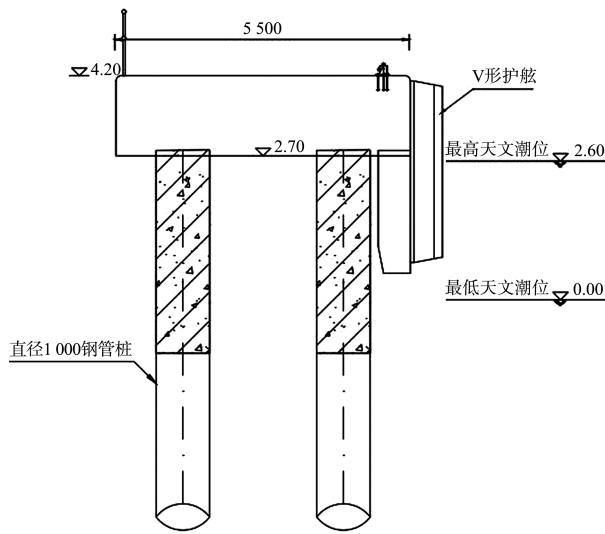


图2 码头断面(高程: m; 尺寸: mm)

1.2 自然条件

最低天文潮位 0 m, 最高天文潮位 2.6 m; 风速为 15.1 m/s, 潮流速度为 0.2 m/s。

北侧拖轮泊位波浪要素为: 极端工况为 100 a 一遇有效波高 1.43 m, 周期 8.9 s; 正常使用工况采用超越概率 5% 有效波, 波高为 0.4 m, 周期 5 s; 波向为西北向, 波浪与码头方向夹角在 45° 左右。由于拖轮码头西侧的集装箱码头为桩基结构, 所以不考虑集装箱码头对波浪的折减作用。

2 横浪下船舶撞击能量计算

目前, 只有《港口工程荷载规范》和西班牙

ROM 规范^[10]提到了横浪作用下船舶挤靠撞击计算, 其中《港口工程荷载规范》是基于动能的撞击能量计算, ROM 规范只是静态地采用波浪在船舶作用范围的波浪推力, 因此本文只采用《港口工程荷载规范》进行计算。

《港口工程荷载规范》中横浪作用下船舶撞击能量的计算公式为:

$$E_{w0} = \frac{1}{2} k C_m m v_B^2 \quad (1)$$

$$C_m = \alpha_m + \beta_m \cdot \frac{D^2}{Bd} \quad (2)$$

$$v_B = \alpha \cdot \frac{H}{T} \left(\frac{L}{B} \right)^{\beta} \left(\frac{D_0}{D} \right)^{\gamma} \quad (3)$$

$$E_w = K_2 E_{w0} \quad (4)$$

式中: k 为偏心撞击折减系数; C_m 为附加水体影响系数; m 为船舶质量; v_B 为法向撞击速度; α_m 、 β_m 均为码头结构形式影响系数; D 为船舶平均吃水; B 为船舶宽度; d 为码头前沿水深; α 、 β 、 γ 均为码头结构影响系数; H 为有效波波高; T 为波周期; L 为波长; D_0 为船舶满载吃水; K_2 为撞击不均匀系数; E_{w0} 为有效撞击能量; E_w 为每组护舷有效撞击能量。

计算参数及结果见表 1。结合码头靠泊撞击力, 综合考虑选择型号为 G1.5 的护舷, 高 600 mm、长 3 200 mm, 护舷吸能量为 180 kJ/m, 护舷反力为 536 kN/m。

表1 横浪下船舶撞击能量计算参数及结果

水位/m	H/m	L/m	T/s	k	C_m	v_B	α_m	β_m	m/t	B/m	D_0/m	D/m	d/m	α	β	γ	E_{w0}/kJ	K_2	E_w/kJ
2.6	1.43	68	7.7	0.97	1.25	0.67	1.04	0.9	670	10.4	5	5	10.1	0.3	1.32	1.0	181.0	0.5	90.0
0.6	1.43	62	7.7	0.97	1.31	0.59	1.04	0.9	670	10.4	5	5	8.1	0.3	1.32	1.0	148.0	0.5	74.0
2.6	0.40	37	5.0	0.97	1.25	0.13	1.04	0.9	670	10.4	5	5	10.1	0.3	1.32	1.0	6.5	0.5	3.2
0.6	0.40	35	5.0	0.97	1.31	0.12	1.04	0.9	670	10.4	5	5	8.1	0.3	1.32	1.0	6.0	0.5	3.0

3 拖轮系泊允许波高及运动量标准

3.1 拖轮系泊允许波高

国内外规范均无针对拖轮系泊波高的要求, 因此, 只列出其他小型船舶系泊波高要求。

《游艇码头设计规范》^[11]关于游艇系泊允许波高: 横浪 50 a 一遇 $H_{1\%}$ 不大于 0.5 m, 顺浪 50 a 一遇 $H_{1\%}$ 不大于 1.1 m。

澳大利亚游艇设计规范^[12]关于游艇系泊允许波高: 对于周期大于 2 s 的斜向浪, 50 a 一遇有效波高不大于 0.5 m, 1 a 一遇有效波高不大于 0.375 m; 对于周期大于 2 s 的横浪, 50 a 一遇有效波高不大于 0.3 m, 1 a 一遇有效波高不大于 0.19 m。

国际航运协会 (PIANC) 系泊船舶运动量标准^[13]规定: 对于长 20 m 的小船, 横浪有效波高不大于 0.3 m。

澳大利亚游艇设计规范^[12]关于游艇系泊允许

PIANC 航道设计准则^[14]规定：正常运营条件下，对于休闲娱乐船舶，顺浪有效波高不大于 0.4 m，横浪有效波高不大于 0.2 m，主要靠人员舒适度控制。对于其他小型船舶未做要求。对于船舶系泊允许极限波高取决于码头结构。

西班牙 ROM 规范关于允许作业条件：对于休闲船舶，有效波高不大于 0.4 m；对于船长 ≥ 30 m 的渔船，有效波高不大于 1 m。该规范未区分横浪和顺浪。

以上规范主要考虑人员舒适度控制，实际小码头在更大波浪下，更多地取决于缆绳及护舷，将作用反馈到结构上，则需要码头结构足够稳定。因此，本文建议考虑拖轮泊位平时波高不大于 0.4 m，极端波浪取决于动态系泊分析结果中缆绳、护舷及相应码头结构受力安全。

3.2 拖轮允许运动量

PIANC 系泊船舶运动量标准规定：对于渔船，装卸作业工况为纵移不大于 1 m、横移不大于 1 m、升沉不大于 0.4 m；抽水泵作业工况为纵移不大于 2 m、横移不大于 1 m。

Thoresen 的港口设计手册^[15]规定：对于渔船，装卸作业工况为纵移不大于 0.75 m、横移不大于 1.5 m、升沉不大于 0.3 m；抽水泵作业工况为纵移不大于 1.5 m，其他运动量无限制。

国内外规范均没有拖轮的允许运动量，参考以上规范对于渔船的运动量要求。由于拖轮比渔船具有更好的适应能力，因此，本文推荐拖轮在正常工况的允许运动量为纵移不大于 1.5 m、横移不大于 1.0 m；非工作极端状况允许运动量为纵移不大于 2 m、横移不大于 1.5 m。

4 动态系泊软件计算分析

4.1 V 形护舷

4.1.1 模型参数

aNyMOOR TERMSIM 是一种时域仿真程序，用于分析风浪流作用下船舶系泊动力特性，该软件由荷兰 MARIN 公司开发。模型中波浪数据输入

如图 3 所示，系统布置如图 4 所示。

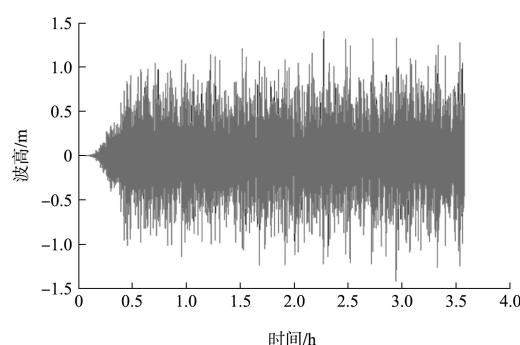


图 3 极端工况的模型输入波浪时间序列

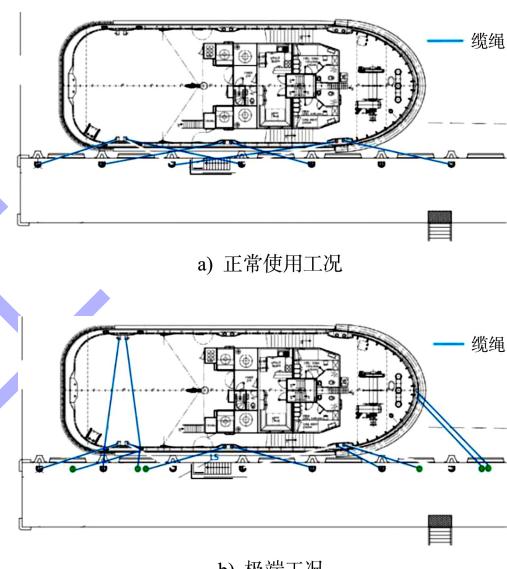


图 4 使用 V 形护舷时的码头系缆布置

4.1.2 计算结果

1) 正常使用工况(有效波高 0.4 m, 水位 0.6 m)的单根缆绳系缆力为 0.090~0.320 MN，共需 6 根缆绳；单组护舷反力为 0.331~1.016 MN(考虑 3.2 m 护舷长度全部参与受力)；船舶运动量为纵移 1.4 m、横移 1.2 m

2) 极端工况(有效波高 1.43 m, 水位 0.6 m)的单根缆绳系缆力为 0.310~0.480 MN，共需 9 根缆绳；单组护舷反力为 1.293~1.608 kN(考虑 3.2 m 护舷长度全部参与受力)，4 组护舷反力的合力随时间变化如图 5 所示，根据结果，合力最大值为 7.207 MN，撞击能量最大值为 444 kJ；船舶运动量为纵移 1.9 m、横移 1.9 m。

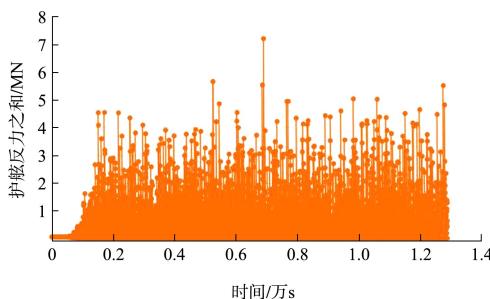


图 5 4组护舷反力合力随时间变化

根据以上计算结果, 在极端波浪情况下, 虽然 V800 护舷反力在产品额定范围内, 但是吸能比只有 23%。护舷吸能未充分发挥, 而护舷反力已接近最大值。拖轮接触到的 4 个护舷中, 其中 3 个同时接近最大反力。产生巨大挤靠力, 原码头结构无法承受。因此, 在极端波浪情况下, 需要采用吸能更好同时反力更小的护舷。

4.2 锥形护舷

4.2.1 模型参数

护舷改为锥形护舷, 采用两鼓一板 SPC800 (G2.0) 护舷, 最大吸能量为 498 kJ, 最大反力为 1.186 MN。在锁链的作用下, 护舷将整体发挥作用, 也更适用于大波浪大运动量的情况。码头断面见图 6, 码头系统缆布置见图 7。

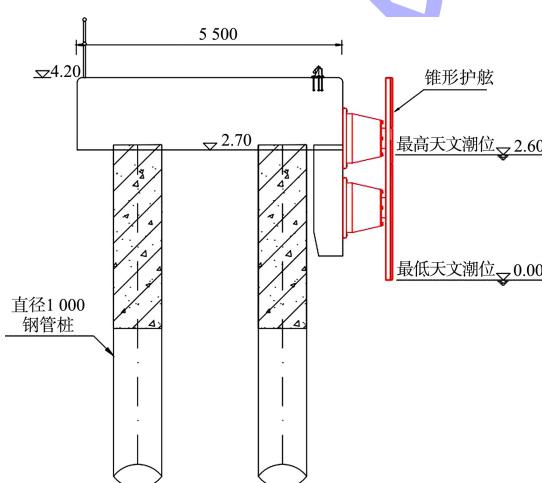
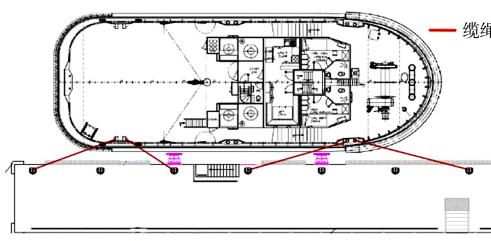


图 6 使用锥形护舷时的码头断面 (高程: m; 尺寸: mm)



a) 正常使用工况

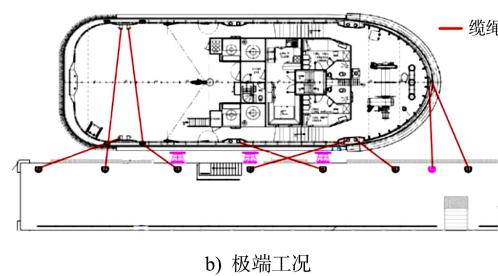


图 7 使用锥形护舷时的码头系统缆布置

4.2.2 计算结果

1) 正常使用工况下(有效波高 0.4 m, 水位 0.6 m)的单根缆绳系统缆力为 0.110~0.380 MN, 共需 4 根缆绳; 单组护舷反力最大值为 0.659~0.680 MN; 船舶运动量为纵移 1.4 m、横移 1.0 m。

2) 极端工况下(有效波高 1.43 m, 水位 0.6 m)的单根缆绳系统缆力为 0.022~0.052 MN, 共需 7 根缆绳。3 组护舷反力的合力随时间变化见图 8, 根据结果, 合力最大值为 2.692 MN(3 组护舷反力分别为 1.179、0.980、0.533 MN), 撞击能量合计最大值为 398 kJ; 船舶运动量为纵移 2 m(即 -1~1 m)、横移 1.1 m。

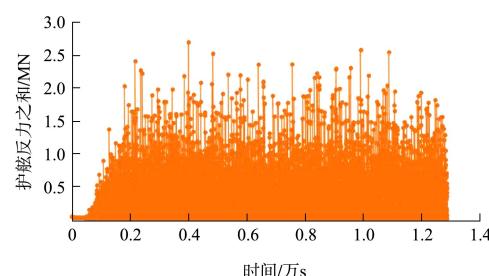


图 8 护舷反力和值随时间变化曲线

经核实, 在护舷更改为锥形护舷后, 按实际护舷反力核算码头结构满足受力要求。

5 计算结果对比

5.1 规范与动态系泊软件的结果对比

根据《港口工程荷载规范》进行计算, 在横浪作用下船舶撞击总能量为 181 kJ; 而根据动态系泊分析软件计算, 横浪作用下船舶撞击总能量为 444 kJ(V 形护舷)、398 kJ(锥形护舷), 平均值为 421 kJ。

规范计算船舶能量结果和动态系泊软件分析

结果比值为 1:2.3。结果差异较大的原因可能是：

1) 规范中横浪作用船舶撞击能量公式对小型船舶适用性较差。《港口工程荷载规范》是根据大型船舶试验结果修正的，可能不适用于拖轮这种小型船舶。

2) 缆绳的影响。缆绳的布置方式及数量可能影响船舶撞击能量的大小。

3) 波浪周期的影响^[16]。本工程极端工况下的波浪周期为 8.9 s，周期较长，导致能量较大。

4) 波高和波向影响。对于小型船舶来讲，1.4 m 有效波高属于非常大的波高，且波浪与船舶夹角 45° 属于横浪，所以船舶运动量大且运动复杂。

5.2 不同水位和潮流下的结果对比

高水位(2.6 m)和低水位下(0.6 m)下，护舷和系缆力差别不大(差别不超过 8%)。但低水位船舶运动量比高水位船舶运动量大 30% 左右。原因可能与码头面高程有关，低水位下码头面高程与船舶系缆点高差较大。

潮流影响很小。经过敏感性分析，潮流对计算结果影响值为系缆力 20 kN、护舷反力 50 kN。主要是因为波浪较大，潮流影响相对非常小，对结果不敏感。

6 结论

1) 拖轮泊位在横浪较大的情况时，采用动态系泊分析软件计算船舶撞击能量大于规范计算结果，约为其 2.3 倍。

2) 推荐拖轮允许运动量控制标准：正常运营工况纵移 1.5 m、横移 1.0 m；极端工况纵移 2.0 m、横移 1.5 m。

3) 推荐拖轮系泊横浪限制波高为正常运营工况有效波高 0.4 m、极端工况为 1.4 m。

4) 拖轮虽可在较大的横浪下系泊，但运动量非常大，需要更大吸能量护舷和更多缆绳，特别是需要对系船柱缆绳等进行改造，但建议极端工况尽可能离泊。后续有条件的工程，可进一步开

展整体物理模型试验验证。

参考文献：

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [2] 宗绍利. 船舶撞击力及系泊船舶波浪作用下的撞击力研究[D]. 重庆, 重庆交通大学, 2008.
- [3] 郭士勇, 滕斌, 刘昌凤. 横浪作用下系泊船舶撞击能量的分析和研究[J]. 水运工程, 2010(12): 88-92.
- [4] 滕斌, 刘昌凤, 张俊生, 等. 码头前沿系泊船舶的附加水体质量系数[J]. 水道港口, 2011, 32(1): 1-6.
- [5] 陈际丰, 刘强, 牛恩宗. 波浪作用下船舶撞击力计算参数的选择[J]. 水运工程, 2007(11): 6-8, 44.
- [6] 高峰, 孟祥玮, 郑宝友, 等. 船舶系泊问题的试验研究技术[J]. 水道港口, 2012, 33(2): 106-112.
- [7] 王琳, 杨斌. 基于 Optimoor 的内河码头船舶运动量下系泊分析[J]. 水运工程, 2016(10): 57-60.
- [8] 高峰, 沈文君, 李焱, 等. 船舶系泊动力分析数值模拟计算研究[J]. 水道港口, 2015, 36(6): 494-501.
- [9] 王翔, 孙克俐, 王东凯. 开敞式码头船舶系缆力数值分析[J]. 港工技术, 2012, 49(4): 16-18.
- [10] Madrid Ministerio De Obras Publicas. Action in the design of maritime and harbour works: ROM 0.2/90 [S]. Madrid: Madrid Ministerio De Obras Publicas, 1992.
- [11] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 重庆市交通规划勘察设计院. 游艇码头设计规范: JTS 165-7—2014[S]. 北京: 人民交通出版, 2014.
- [12] Technical Committee CE 030. Guidelines for design of marinas: AS 3962-2001[S]. Sydney: Standard Australia, 2001.
- [13] International Navigation Association. Criteria for movements of moored ships in harbors[S]. Brussels: PIANC, 1995.
- [14] International Navigation Association. Harbor approach channels design guidelines[S]. Brussels: PIANC, 2014.
- [15] THORESEN C A. Port designer's hand book[S]. 3rd ed. New York: ASCE, 2014.
- [16] 宋伟华, 谷文强, 周惊慧. 长周期波浪对船舶系泊稳定性的影响[J]. 水运工程, 2019(5): 21-26.

(本文编辑 王璁)