



基于 AIS 和 Anylogic 的 LNG 船舶对通航及港口服务水平的影响

马晓雪^{1,2}, 冯 敏^{1,2}, 张 哲^{1,2}, 阚冬杰^{1,2}

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 天津水运工程勘察设计院有限公司, 天津 300456)

摘要: 港口运营体系是兼具随机、动态、不均衡等复杂特性的综合体, 多智能体仿真建模技术的出现为港口全过程作业模拟, 尤其是液化天然气(LNG)船舶对通航影响的研究提供了有力支撑。仿真模拟结果是否科学合理主要基于基础数据的可靠性。以 Anylogic 仿真建模平台为基础, 结合自动识别系统(AIS)船舶动态轨迹及海洋公开数据等辅助手段, 使仿真模拟更趋于真实。结合工程实例, 通过多渠道分析通航环境条件, 模拟港区作业环境, 研究 LNG 船舶对通航及港口服务水平的影响。结果表明, 该仿真模拟方法思路清晰、易于操作, 有助于类似工程通航影响分析。

关键词: AIS; Anylogic 仿真; LNG 船舶; 通航环境条件; 影响分析; 港口服务水平

中图分类号: U 655.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0064-06

Influence of LNG ships based on AIS and Anylogic on navigation and port service level

MA Xiao-xue^{1,2}, FENG Min^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2}, KAN Dong-jie^{1,2}

(1.Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;

2.Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: The port operation system is a complex with randomness, dynamics, lack of balance, and other complex characteristics. The emergence of multi-agent simulation modeling technology provides strong support for the simulation of the whole process of port operations, especially the research on the impact of LNG ships on navigation. Scientific and reasonable simulation results are mainly based on reliable basic data. On the basis of the Anylogic simulation modeling platform, this paper uses auxiliary means such as AIS for dynamic ship tracking and open ocean data to make the simulation more realistic. Using an engineering example, the paper carries out a multi-channel analysis of navigation environment conditions, simulates the port operation environment, and studies the influence of LNG ships on the navigation and port service level. The results show that the simulation method is clear and easy to operate, which is helpful to the navigation impact analysis of similar projects.

Keywords: AIS; Anylogic simulation; LNG ship; navigation environment condition; influence analysis; port service level

在“双碳”目标的形势下, 天然气作为清洁的化石能源应用日趋广泛, 预计 2040 年我国天然气消费规模将达到峰值 6 000 亿 m³^[1]。海上通道进口液化天然气(LNG)作为我国天然气的供应渠道之一, 未来占比将会进一步提升, 这就对 LNG 海运提出了更高的要求。目前, 我国港口对 LNG

船舶的管理主要采取设置移动安全区及单向交通管制^[2]的方法, 该方法对通航存在较大的影响, 因此分析 LNG 船舶对通航的影响并进一步优化通航管制措施一直是研究的重点。

目前, 一些学者基于多智能体仿真建模技术对港口工程进行了研究, 如沈忱等^[3]提出复杂水

域船舶进出港全过程仿真建模方法; 房卓等^[4]将多智能体仿真技术应用到 LNG 码头选址及港口规划。但是现有研究中仿真模拟所需的基础数据(如泊位流量、作业时间等)主要源自港口管理部门的文字数据, 而船舶实际习惯航线、航速的动态变化、锚地内习惯锚位、非运输船统计资料等数据的缺失限制了仿真模拟的真实性。

本文基于 Anylogic 多智能体仿真平台, 结合自动识别系统(automatic identification system, AIS)数据^[5]及海洋公开数据, 通过分析船舶实时动态轨迹及航速、习惯抛锚位置、进出港船型分类统计等数据, 构建港区生产运营系统的仿真模型^[6-7], 使模拟更具真实性, 进而分析 LNG 船舶对通航的影响。本文依托烟台龙口港 LNG 码头工程, 通过多渠道分析模拟通航环境条件, 研究 LNG 船舶对现状及规划港区的通航影响, 评价港口服务水平。该仿真模拟思路可为类似通航研究提供参考。

1 研究背景

《环渤海地区液化天然气码头重点布局方案(2022年)》^[8]及《烟台港龙口港区总体规划方案调

整》^[9]提出在龙口港区新建 2 座 LNG 泊位, 最大靠泊船型均为 26.6 万 m³ LNG 船舶, 单个 LNG 泊位年到港数量约 120 艘次。目前, 龙口港航道由 10 万吨级主航道(包括外航道+内航道)和 2 万吨级航道组成, 见图 1。



图 1 港区水域布置

2 仿真建模

本文基于 Anylogic 智能体仿真建模平台, 结合龙口港区 AIS 数据及海洋公开数据, 利用 Java 程序设计语言建立船舶进出港靠离泊全过程数值仿真模型, 通过分析港口服务水平及通航影响评价指标, 研究 LNG 船舶进出港对港区整体运营的影响。仿真模拟整体思路及逻辑关系见图 2。

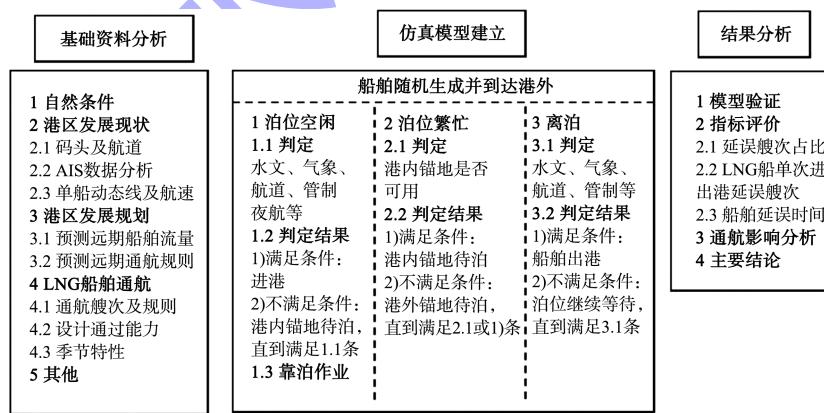


图 2 仿真模拟思路及逻辑关系

2.1 总体评价指标

港航系统的服务水平可借鉴港口服务水平指标(AWT/AST)^[10]。其中, AWT 为船舶的平均等待时间, AST 为正常情况下平均装卸一条船舶所需要的时间。AWT/AST 高, 说明船舶相对等待时间长、待泊费用高, 以牺牲船方利益为代价提升

港口吞吐量; AWT/AST 低, 说明船舶待泊时间短且费用较低, 港口对船舶服务水平高, 但由于泊位长时间空闲、利用率低, 码头的装卸能力和泊位资源未得到充分发挥。目前, AWT/AST 的取值没有统一标准。参照 *Harbour Approach Channels Design Guidelines*^[11] 以及 *Port Development a Handbook for*

Planners in Developing Countries^[12]提出的：对于发展中国家 AWT/AST 适合值为 0.5，发达国家为 0.3。综合考虑龙口港区实际情况，AWT/AST 指标小于 0.5，表明港口服务水平合理。

2.2 LNG 船舶进/出港通航影响评价指标

1) 延误船舶数量占比。受 LNG 船单向通航管制影响，延误船舶数量占比为延误船舶数量与进出港所有通航船舶数量的比值。

2) LNG 船单次进/出港平均延误船舶数量。受 LNG 船单向通航管制影响，LNG 船单次进/出港平均延误船舶数量为延误船舶数量与 LNG 船进出港数量的比值。LNG 船进港和出港均有可能对其他船舶造成延误，该指标反映 LNG 船单次航行影响情况。

3) 船舶平均延误时间。受 LNG 船单向通航管制影响，将船舶平均延误时间作为通航影响评价指标^[13]。

3 AIS 数据统计分析

AIS 信息中蕴含着大量海上交通的特性，其采用甚高频(VHF)无线电通信技术，对船舶的实时轨迹进行聚类进而获取船舶活动特性及规律。模型定义龙口港现状营运泊位 38 个，为了获取工程水域 2019—2021 年船舶航行轨迹及统计数据等资料，本文以相关部门对该海域 AIS 跟踪观测的宏观交通流分布为基础，设计主交通流跟踪观测门线 AB，见图 3。AB 门线长 2.1km，与现状 10 万吨级航道垂直，门线端点的经纬度为：A 点为 (37°40'43.09"N, 120°12'59.97"E)；B 点为 (37°40'03.67"N, 120°11'46.97"E)。

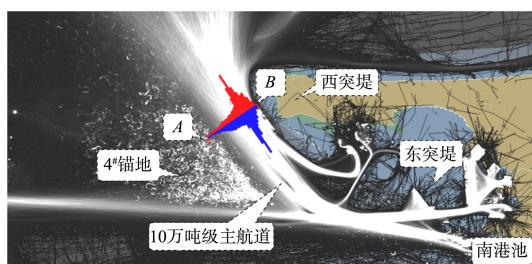
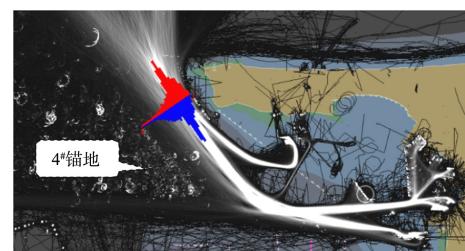


图 3 2021 年船舶 AIS 轨迹蛛丝图

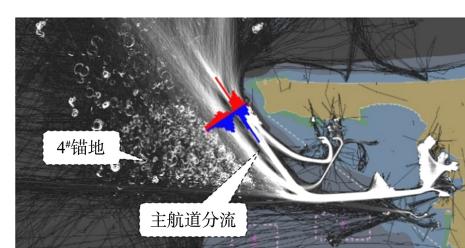
图 3 中白色部分为船舶轨迹带，可见全年船舶流量主要集中在 10 万吨级主航道，外航道航迹带宽约 2 km。船舶锚泊主要集中在 4# 锚地，习惯锚位主要分布在 4# 锚地的东南侧，该处靠近 10 万吨内外航道拐点，方便船舶直接上航道。

对比图 1、3 可知，驶往西突堤东侧船舶未严格遵守航道航行，而是在 102# 灯浮附近直接进出航道，绕过港区浅点直接进出泊位；前往 LNG 泊位 B 处附近船舶航行较为规则，由 10 万吨级外航道经内航道，在 116# 灯浮附近回旋进入港池；实际航迹与航道区别最大的主要为进出南港池的部分船舶，大多未严格按照浮标规定航路航行，而是直接从 10 万吨内外航道拐点提前驶出航道，直接驶往南港池。船舶出港时，因主航道北侧天然水深较深，大多数船舶出航道后轨迹开始发散，航行趋势主要是北偏西。

根据对环渤海区域现有 LNG 码头运营情况的调研发现，冬季 11 月—次年 2 月期间 LNG 船到港数量约占全年到港总量的 50%。由于船舶密集到港，对其他船的航行影响也最为严重。因此，本文针对 2021 年第 4 季度和 2022 年第 1 季度进行了船舶轨迹观测，结果见图 4。



a) 2021 年第 4 季度

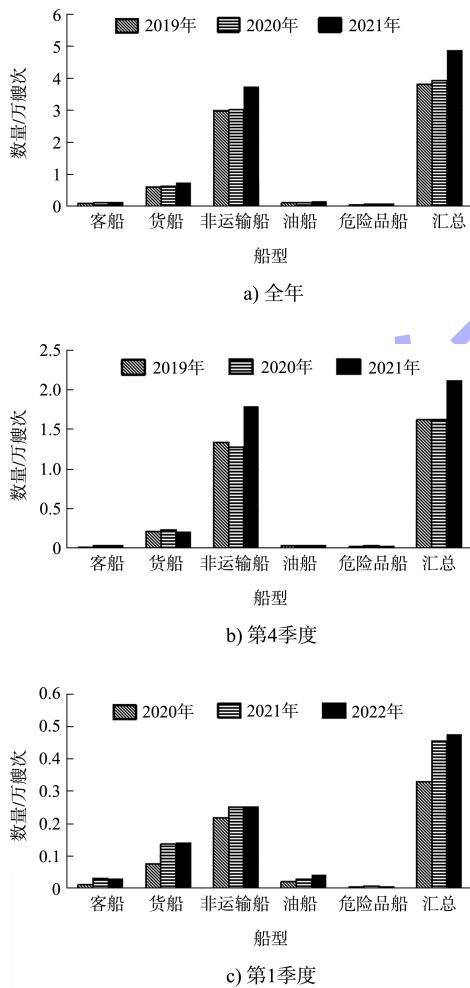


b) 2022 年第 1 季度

图 4 AIS 船舶轨迹蛛丝图

由图 4 可知, 2022 年第 1 季度的 4# 锚地锚泊数量较 2021 年第 4 季度有成倍增加, 2022 年第 1 季度在主航道附近船舶轨迹明显划分为两部分, 船舶航迹带宽度(约 2 km)远大于主航道宽度(300 m), 轨迹呈现分流的状态, 因此可以看出船舶实际习惯航路跟航道有明显的不同。

根据 AB 门线 AIS 统计, 2019—2022 年各类船型数量见图 5。可以看出, 进出港船舶在 3.8 万~5.0 万艘次, 其中非运输船占 70%~80%, 危险品船及油船占 4%~5%; 第 4 季度到港数量是第 1 季度的 4~5 倍, 存在明显的季节性。仿真模拟如按常规到港规则设置, 将存在较大的偏差。



航行动态特性数据, 见图 6。不仅可以了解船舶进港后动态变化, 还为仿真模拟港区通航环境增添真实性。

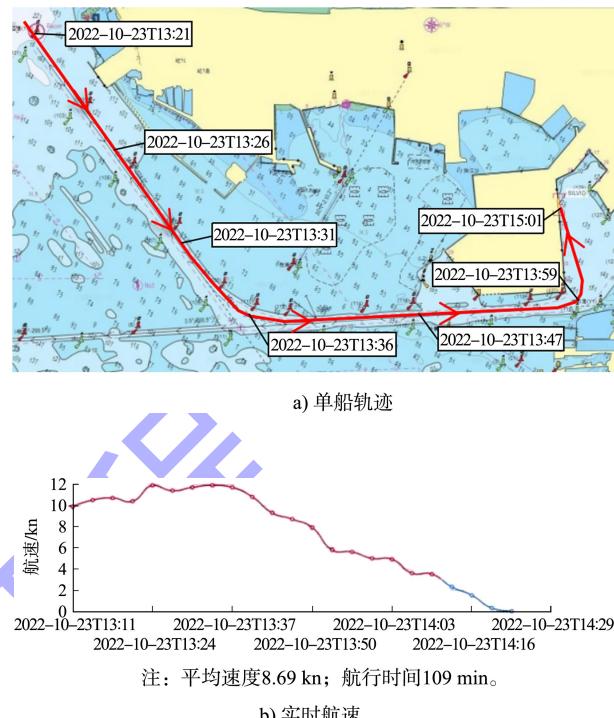


图 6 单船动态线及实时航速

由图 6 可知, 大型油轮进港航行较为规则, 严格按照进港主航道航行。航速方面, 进港时航速在 10 kn 左右, 进入航道后航速提升至 11~12 kn, 在内外航道拐点处降速至 10 kn, 内航道至泊位逐渐降速至 0 kn。目前, 大多数仿真模拟均以航道内固定航速为主。因此, 在港口管理部门提供的文字数据基础上, 通过结合 AIS 数据及海洋公开数据等辅助手段, 以期更真实地模拟、分析 LNG 船舶进出港对港区整体运营的影响。

4 通航影响分析

4.1 仿真计算工况

2020 年批复的《烟台港龙口港区总体规划方案调整》对港区及航道进行了优化升级, 泊位增加至 50 个, 提升进港主航道等级为 15 万吨级, 新

除此之外, 本文还结合了船讯网的海洋公开数据^[14], 以大型油轮为代表船型, 调取实际单船

开中支航道通往东港池, 以实现 LNG 船舶和客滚、集装箱船舶的分道通航, 见图 7。

结合港区现状及规划条件, 并考虑 LNG 船舶间的相互影响, 本文共设计 6 组工况, 见表 1。LNG 船通航规则设定: 设置移动安全区为前 1.5 n mile, 后 0.5 n mile, 左右 150 m 的区域; 进出港时实行单向交通管制, 清空对象航道交通流, 其他船舶可以尾随进出港航行; 禁止夜航。

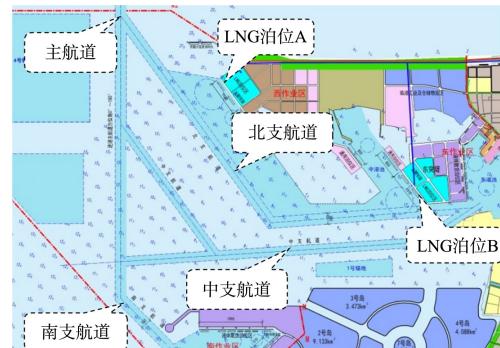


图 7 港区规划

表 1 仿真设计工况

工况	港区条件	仿真时间	LNG 泊位		说明
			数量/个	位置	
1	现状	全年	0	-	对照工况
2	现状	全年	1	A	LNG 泊位 A 首先投入运营
3	现状	全年	2	A+B	-
4	现状	冬季调峰期	2	A+B	冬季调峰期为 11 月—次年 2 月
5	规划实施后	全年	2	A+B	规划港区及航道全部投入运营
6	规划实施后	冬季调峰期	2	A+B	冬季调峰期为 11 月—次年 2 月

4.2 仿真结果分析

LNG 船舶通航影响仿真结果见表 2。通过重复运行仿真模型对照工况 30 次, 仿真得出全年进出港船舶数量与实际统计数据误差在 0.5% 以内, 且现状条件下港口服务水平指标为 0.1, 符合龙口港区现状运营状况, 从而验证了根据本文研究思路建立的仿真模型是科学且合理的。

表 2 LNG 船舶通航影响仿真结果

工况	港口服务水平	延误船舶艘次占比/%	LNG 船单次进出港平均延误数量/艘次	船舶平均延误时间/h
1	0.10	-	-	-
2	0.11	1.70	0.66	1.98
3	0.23	5.87	1.17	3.20
4	0.32	9.70	1.29	3.80
5	0.13	7.70	3.20	2.90
6	0.18	11.70	3.30	3.10

对比工况 2~4, 工况 3、4 受 LNG 船单次进出港影响延误数量分别为工况 2 的 1.70、1.95 倍, 平均延误时间为工况 2 的 1.60、1.92 倍, 延误数量占比分别为工况 2 的 3.45、5.70 倍。全年延误数量占比小于 6%, 冬季调峰期内延误数量占比小于 10%。

现状条件下受 LNG 船影响延误数量全年分

布见图 8。可以看出, 进港受影响程度大于出港, 冬季调峰期受影响程度大于其他月份。进港时受影响船舶多数在 3 艘次以内, 出港时多数在 1 艘次以内, 部分时间受天气、候潮、作业等共同影响存在 10 艘次以上的延误。

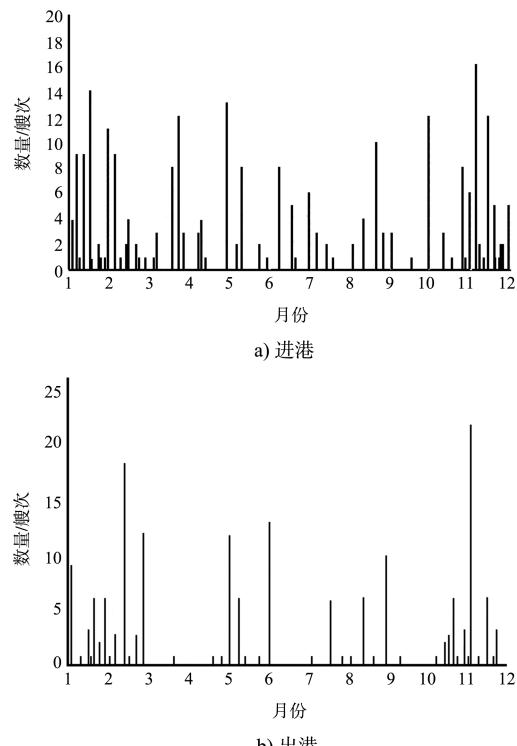


图 8 受 LNG 船影响延误数量全年分布

综合分析, 工况 1~4 随着 LNG 泊位数量的增加, 船舶短时间内集中到达, 影响评价指标均有小幅增加, 说明 LNG 码头的投产对港口服务水平带来一定的影响。但是, 港口服务水平指标均在平均值 0.4 以下, 即使在受影响最大的冬季调峰期内, 港区服务水平仍处于较高水平。现状航道能够满足到港船舶需求, 且存在较大的发展空间。

分析工况 5、6, 规划实施后随着港区泊位数量增加, 到港船舶数量变多, 因此延误数量指标均有所增加; 由于航道等级的提升, 且开辟了北支、中支航道, 使进入东作业区的船舶进行了分流, 使平均延误时间降低; 港口服务水平指标在港区规模提升的基础上仍能保持在 0.2 以下, 说明港区服务水平整体有明显提升, 航道的优化能够满足 LNG 船舶密集到港及其他规划船舶到港需求。

5 结语

1) 本文基于多智能体仿真平台, 结合 AIS 及海洋公开数据作为辅助手段, 模拟较传统数据更为真实的通航环境条件, 增加仿真模拟的可靠性, 可为分析 LNG 船舶对通航的影响、港区制定 LNG 船舶通航方案提供技术支撑。

2) 以烟台龙口港 LNG 码头工程为例进行仿真研究, 验证了本文研究思路建立的仿真模型是科学且合理的。仿真结果表明, 龙口港区在 2 个 LNG 泊位共同运营下, 港口整体服务处于较高水平, 满足现状及未来规划港区的运营。

参考文献:

[1] 周守为, 朱军龙, 单彤文, 等. 中国天然气及 LNG 产业的
(上接第 63 页)

参考文献:

[1] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 中电胡布 2×
660 MW 燃煤发电项目码头工程. 施工图设计说明[R].
武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2020.

[2] 国家气象中心. 风力等级: GB/T 28591—2012[S]. 北京:
中国标准出版社, 2012.

[3] 中交水运规划院设计有限公司. 海港总体设计规范:
JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

发展现状及展望[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 1-8.

[2] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 液化天然气
码头设计规范: JTS 165-5—2021[S]. 北京: 人民交通出
版社股份有限公司, 2021.

[3] 沈忱, 赵晓艺, 齐越, 等. 复杂水域船舶进出港全过程仿
真建模方法[J]. 港工技术, 2020, 57(1): 12-17.

[4] 房卓, 姚海元, 黄俊, 等. 多智能体仿真在 LNG 码头选
址及港口规划中的应用[J]. 水运工程, 2017(12):
123-128.

[5] 肖潇, 邵哲平, 潘家财, 等. 基于 AIS 信息的船舶轨迹聚
类模型及应用[J]. 中国航海, 2015, 38(2): 82-86.

[6] 沈忱, 房卓, 张民辉, 等. 单航道多泊位的液化天然气码头
建设规模仿真研究[J]. 水运工程, 2019(11): 122-126, 132.

[7] 宁双林, 宋向群, 郭子坚, 等. 单线航道通过能力仿真研
究[J]. 水道港口, 2008, 29(3): 166-169.

[8] 交通运输部. 环渤海地区液化天然气码头重点布局方
案(2022 年); 交办规划[2018]92 号[R]. 北京: 交通运
输部, 2018.

[9] 烟台市人民政府, 烟台港龙口港区总体规划方案调整[R].
山东: 烟台市人民政府, 2020.

[10] 郭子坚, 王文渊, 唐国磊, 等. 基于港口服务水平的沿海
港口航道通过能力[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 46-48.

[11] PIANC. Harbour approach channels design guidelines[M].
Brussels: PIANC, 2014.

[12] United Nations Conference on Trade and Development.
Port development a handbook for planners in developing
countries[M]. New York: United Nations Pubns, 1985.

[13] 姚海元, 房卓, 郝军, 等. 基于多智能体仿真的 LNG 船
舶进出港通航影响的评价指标研究[J]. 水运工程,
2018(3): 52-58.

[14] 船讯网. 船舶航行实时数据 [EB/OL]. (2022-10-23)
[2022-10-26]. <https://www.shipxy.com/>.

(本文编辑 王璁)

[4] 振华海服研究院. 振华 21 系泊计算[R]. 上海: 振华海
服研究院, 2017.

[5] 冯建国, 唐宏伟, 汪洪祥, 等. 可循环利用的系泊装置:
0063729.1[P]. 2019-01-15.

[6] 舒宁, 李炎保. 重力式钢结构底面与抛石基床顶面间摩
擦系数的测定[J]. 中国港湾建设, 2005, 135(2): 32-35.

(本文编辑 王传瑜)