



## 油气化工码头偏心靠泊响应分析

章一凡<sup>1</sup>, 付博新<sup>2</sup>, 张鹏<sup>2</sup>, 徐文严<sup>1</sup>, 陈冬<sup>1</sup>

(1. 江苏港航投资发展有限公司, 江苏南京 210009; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 针对油气化工码头因装卸臂密集布置引发偏心靠泊, 进而导致断缆与船舶运动量超限的安全风险, 以宁波某油气化工码头为例, 开展偏心靠泊响应分析。基于 OPTIMOOR 系泊分析软件, 模拟 15 万、5 万和 5 000 吨级船型在满载设计低水位、压载设计高水位工况下, 不同偏心靠泊位置上的系缆力与船舶运动量响应。结果发现: 3 种船型系缆力均低于设计破断力; 船舶右偏时纵移量显著增加, 15 万吨级压载右偏 10.5 m 时超限, 5 万吨级满载右偏超过 8.4 m 时、压载右偏超过 4.2 m 时超限, 2<sup>#</sup>-4 装卸区 5 000 吨级满载右偏 3.75 m 时临界; 横移量均小于 2.0 m 限值。研究表明, 船型尺度与偏心距离是系泊约束衰减的关键因素, 据此提出调整系缆点、优化缆绳配置等增强纵向约束的措施, 为同类码头设计提供理论依据与技术参考。

**关键词:** 偏心靠泊; 响应分析; OPTIMOOR; 系缆力; 船舶运动量

中图分类号: U653.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0043-06

### Response analysis of eccentric berthing at oil and gas chemical terminals

ZHANG Yifan<sup>1</sup>, FU Boxin<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>, XU Wenyan<sup>1</sup>, CHEN Dong<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Port and Shipping Investment Development Co., Ltd., Nanjing 210009, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Aiming at the safety risks of mooring line breakage and excessive vessel motions induced by eccentric berthing due to the dense layout of loading arms at oil and gas chemical terminals, this study takes a specific oil and gas chemical terminal in Ningbo as an engineering case to conduct an eccentric berthing response analysis. Based on the OPTIMOOR mooring analysis software, simulations are carried out for ship types of 150,000, 50,000, and 5,000 DWT under the working conditions of full load at design low water level and ballast at design high water level, so as to examine the response laws of mooring line forces and vessel motion quantity at different eccentric berthing positions. The results show that the mooring line forces of the three ship types are all lower than the design breaking strength, the longitudinal displacement increases significantly when the vessel drifts to the right. Specifically, the 150,000 DWT vessel in ballast condition exceeds the limit at a right drift distance of 10.5 m, the 50,000 DWT vessel exceeds the limit when its right drift distance exceeds 8.4 m in full load condition and 4.2 m in ballast condition, and the 5,000 DWT vessel in full load condition at 2<sup>#</sup>-4 berth reaches the critical state at a right drift distance of 3.75 m. All transverse displacements are within the 2.0 m limit. The study indicates that ship dimensions and drift distance are the key factors leading to the attenuation of mooring restraint effects. On this basis, measures such as adjusting mooring bollard positions and optimizing mooring line configurations are proposed to enhance longitudinal restraint capacity, which can provide theoretical basis and technical reference for the design of similar terminals.

**Keywords:** eccentric berthing; response analysis; OPTIMOOR; mooring line forces; vessel motion quantity

早期国内 10 万吨级以上的大型原油码头装卸臂数量较少, 多使用软管或少量装卸臂。随着经

济发展, 5 万~10 万吨级的中型码头逐渐增多, 运输货种趋于多样化且系泊作业安全要求提高, 装

收稿日期: 2025-07-26 录用日期: 2025-09-04

作者简介: 章一凡(1999—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港航工程建设管理工作。

卸臂逐渐取代软管,由于专管专用需求,装卸臂数量增加至6座以上,导致船舶系缆时易发生偏心靠泊,此系泊模式受力不均可能引发断缆风险。

此类由设备配置引发的偏心靠泊安全问题已引发广泛关注。付博新等<sup>[1]</sup>以液化烃码头为例,指出装卸臂数量增多且使用外侧装卸臂时,会导致船舶偏心靠泊,并通过模拟分析偏心靠泊的安全风险,提出针对性改进建议。谭凤等<sup>[2]</sup>基于宁波码头改扩建项目,利用OPTIMOOR系泊分析对比船舶居中与偏心靠泊的缆力分布及运动量差异,针对中等船型横缆过短、缺失、小船型系缆设备不足等问题,提出解决方案。李江文等<sup>[3]</sup>对大型蝶形油码头靠船墩间距设计开展研究,对比中外规范并分析实船数据,指出间距上限需重点考虑油船压载时的船舶平行体长度和集管中心偏心导致的艏艉平行体长度差。英国规范<sup>[4]</sup>中提到,某些船舶(如沿海油轮)的管汇并不总是布置在船舶横向中线位置,因此并不总是靠泊在泊位中心。既有研究虽揭示偏心靠泊现象,但对于船舶偏心靠泊响应分析仍为空白。

偏心靠泊的本质是系泊系统的力学平衡问题。本文研究选取15万、5万和5000吨级3种尺度船型,基于OPTIMOOR系泊分析软件研究不同偏心靠泊位置下系缆力与船舶运动量响应特性,以期对相关类型偏心靠泊模式的码头工程设计提供理论指导。

## 1 工程概况

宁波某油气化工码头2#泊位,设计最大船型为15万吨级油船,设计最小船型为3000吨级油船,码头长度315m,码头前沿线顺岸布置,前沿线方位角为170.4°~350.4°,基本平行于水流方向。2#泊位包含2#-4~2#-6共3个装卸区,满足1艘15万吨级油船的靠泊要求,或同时靠泊两艘5000吨级船舶。码头采用蝶形布置和高桩结构,由3个工作平台、2个靠船墩和4个系缆墩组成,4个系缆墩采用“一”字形布置,与码头前沿相距32.3m。

由于该泊位为多装卸区“一”字形布置,设计

船型为3000~15万吨级船舶,靠泊船型尺度范围大,其中2#-5装卸区靠泊船型为1万吨级以上船型,2#-4和2#-6设计船型为3000吨级和5000吨级。研究选取大尺度船型15万吨级,中尺度船型5万吨级和小尺度船型5000吨级进行研究,实验船型尺度数据见表1。

表1 实验船型尺度

Tab.1 Dimensions of experimental ship types

船型/DWT	载态	吃水/m	稳心高/m	总长/m	型宽/m	型深/m
15万	满载	17.10	5.1	274	50.0	24.2
	压载	9.00	10.2			
5万	满载	12.80	3.8	229	32.2	19.1
	压载	7.76	8.0			
5000	满载	7.00	2.1	125	17.5	8.6
	压载	5.13	4.1			

## 2 研究方法 with 试验设计

本文使用系泊分析软件OPTIMOOR(Version6.5.4 16 November 2018)进行数模试验,该软件采用静力模型,基于大量船模水流试验与风洞试验所得经验系数及拟合公式,计算水流与风对不同船舶的作用力。在处理波浪作用下的系泊船舶的运动响应时,OPTIMOOR采用频域分析法,得出波浪作用下运动量的振幅响应因子<sup>[5]</sup>。

### 2.1 外荷载条件

风荷载、流荷载和波浪荷载是影响船舶系泊的主要环境因素。参数取值:风速18m/s,与码头前沿线夹角-35°;潮流流速1.2m/s,与码头前沿线夹角-10°;波高0.8m,周期6.3s,波向与码头前沿线夹角-80°。设计高水位1.76m,设计低水位-1.45m。

### 2.2 模型设定

依据既有研究基础<sup>[6-7]</sup>,将船舶管汇中心位置设定于船中。同时,为评估最不利工况下的系泊安全性,针对每组系泊布置方案,对满载设计低水位和压载设计高水位<sup>[8-9]</sup>进行分析。为进一步细化偏心靠泊研究,以小于相邻装卸臂间的距离来分析不同尺度船型由居中靠泊到最左侧或最右侧偏心靠泊情形下的系缆力和船舶运动量变化规律,各装卸区偏心参数见表2。

表 2 各装卸区偏心参数

Tab. 2 Eccentricity parameters in each berth

装卸区	装卸臂数量/座	相邻装卸臂间距/m	装卸区 1/2 宽度/m	偏心步距/m	左右偏心步数/步
2 <sup>#</sup> -4	4	2.5	3.75	1.25	3
2 <sup>#</sup> -5	7	3.5	10.50	2.10	5
2 <sup>#</sup> -6	4	2.5	3.75	1.25	3

2.3 平面布置

2<sup>#</sup>泊位上的船艏及横缆系统缆点均齐平布置, 设置 2 个靠船墩, 根据系泊船尺寸差异在系统缆墩上布置 3 钩快速脱缆钩, 装卸区内布置 2 钩快速脱缆钩。15 万、5 万和 5 000 吨级的船(艏)缆、船(艏)横缆和船(艏)倒缆数量分别为 3-3-2、3-2-2 和 2-1-1, 其中 15 万吨级船舶在 2<sup>#</sup>-5 装卸区居中靠泊时, 整体系统缆布置呈对称, 见图 1。

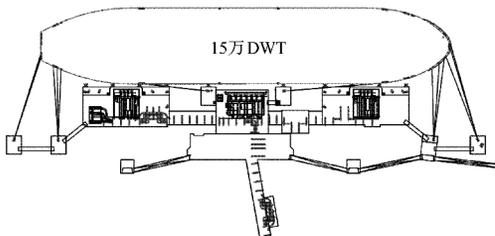


图 1 15 万吨级船舶靠泊

Fig. 1 Berthing of 150,000 DWT vessel

2.4 分析指标

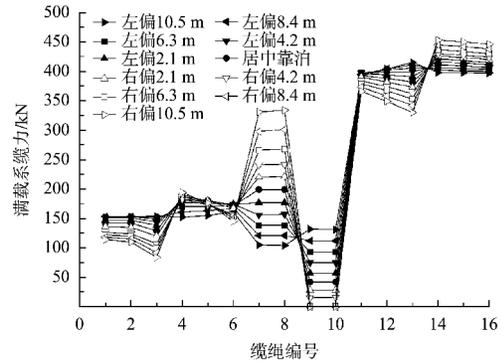
本文研究以系统缆力与船舶运动量作为分析指标。15 万吨级船舶缆绳采用钢缆, 最小破断荷载 (minimum breaking load, MBL) 为 1 070 kN, 参照国际石油海事论坛 (oil companies international marine forum, OCIMF) 标准, 其设计破断力取 588.5 kN, 为 MBL 的 55%。5 万与 5 000 吨级船舶缆绳采用尼龙缆, 其 MBL 分别为 900 和 580 kN; 参照 OCIMF 标准, 设计破断力分别取 405 和 261 kN, 均为 MBL 的 45%。船舶运动量按照 JTS 165—2013《海港总体设计规范》<sup>[10]</sup>取值, 相对于装卸臂位置, 船舶横移量不超过 2.0 m, 单方向纵移量不超过 1.0 m。

3 系泊分析结果

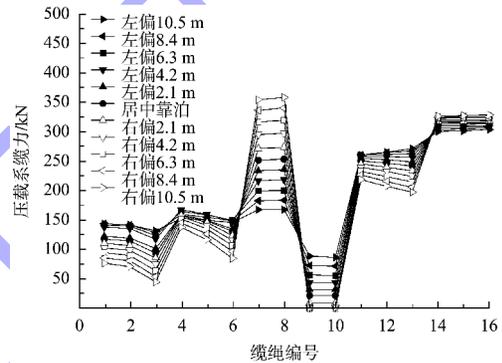
3.1 2<sup>#</sup>-5 装卸区

15 万吨级船舶靠泊在 2<sup>#</sup>-5 装卸区, 居中靠泊

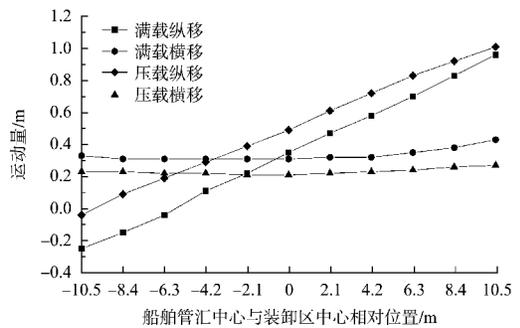
时系统缆布置呈均匀对称, 偏心靠泊时不改变系统缆点位置, 其系统缆力及运动量结果见图 2。



a) 满载系统缆力



b) 压载系统缆力



c) 船舶运动量

图 2 15 万吨级船舶系统缆力和运动量

Fig. 2 Mooring force and motion quantity of a 150,000 DWT vessel

当 15 万吨级船舶靠泊位置由最左侧向最右侧变化时, 由图 2a) 和 b) 可知, 其在各靠泊位置系统缆力均低于设计破断力, 其中满载、设计低水位工况缆力最大, 需重点关注; 船缆长度增大、刚度减小且趋于纵向, 削弱横向约束; 船倒缆及艏缆长度减小、刚度增大; 艏倒缆长度增大、刚度减小; 船横缆与艏横缆长度变化较小, 但艏横缆

角度右偏致受力减小。由图 2c)可知,横移变化不显著,纵移量则因纵向约束能力减弱而持续增大,压载船体右偏 10.5 m 时纵移量超限。因此,为控制运动量满足安全作业需求,建议在偏心靠泊时重点加强纵向约束。

5 万吨级船舶在 2<sup>#</sup>-5 装卸区居中靠泊时,系缆布置呈均匀对称,偏心靠泊时不改变系缆点位置,由于船型尺寸相对 15 万吨级船舶减小,艏缆艉缆出缆角度及长度发生变化,其系缆力及运动量结果见图 3。

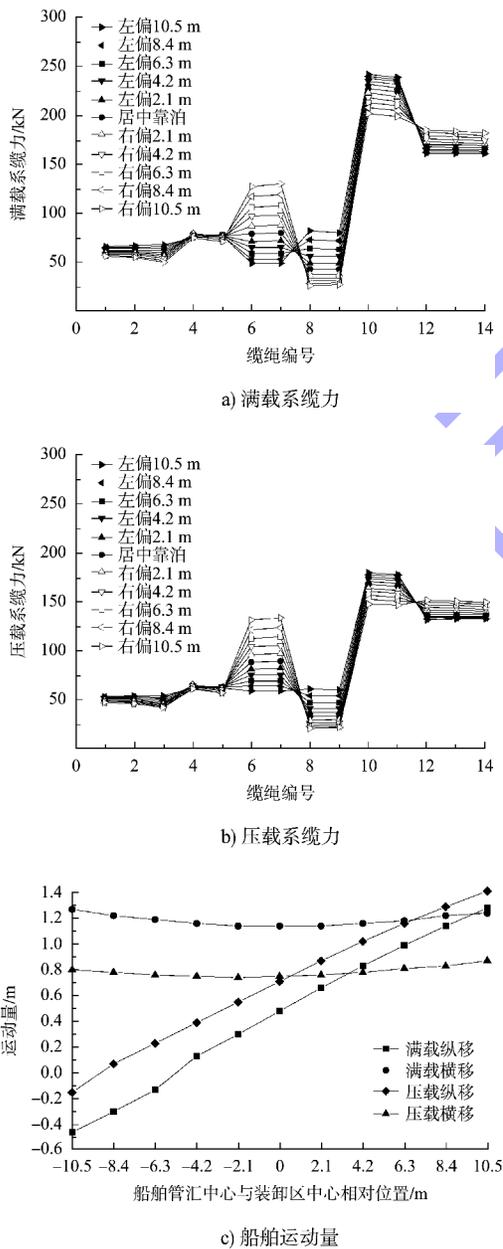


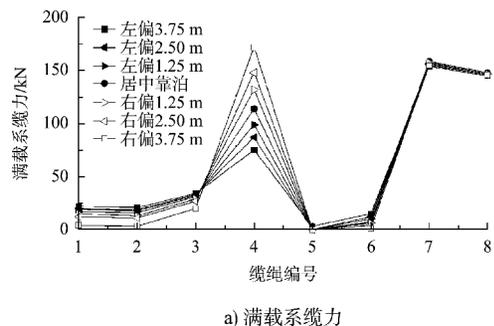
图 3 5 万吨级船舶系缆力和运动量  
Fig. 3 Mooring force and motion quantity of a 50,000 DWT vessel

当 5 万吨级船舶靠泊位置由最左侧向最右侧变化时,由图 3a)和 b)可知,其在各靠泊位置系缆力均低于设计破断力,富余率达 37%~50%,其中满载、设计低水位工况缆力最大,需重点关注;缆绳长度与刚度变化规律与 15 万吨级相似,但因艉横缆长度更短且角度与外荷载方向趋于一致,受力尤为突出。由图 3c)可知,横移量先减后增(满载工况整体较高),系泊系统横向约束较弱但变化不显著;纵移量则因纵向约束持续减弱而明显增大,船舶在满载右偏心距大于 8.4 m 时和压载右偏心距大于 4.2 m 时发生纵移量超限。结果表明,中尺度型船型需重点评估不同偏心距离对运动量的影响,通过调整系缆点、优化缆绳配置等措施增强纵向约束来控制风险。

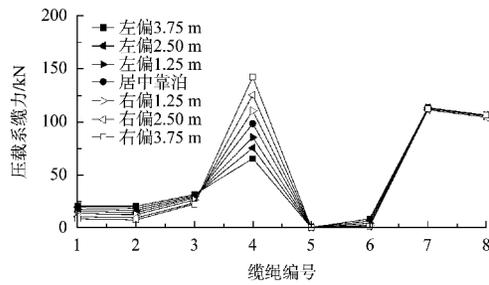
### 3.2 2<sup>#</sup>-4 及 2<sup>#</sup>-6 装卸区

5 000 吨级船舶靠泊在 2<sup>#</sup>-4 装卸区时,其系缆点位于系缆墩及装卸平台上,系缆布置呈非对称,系缆力及运动量结果见图 4。

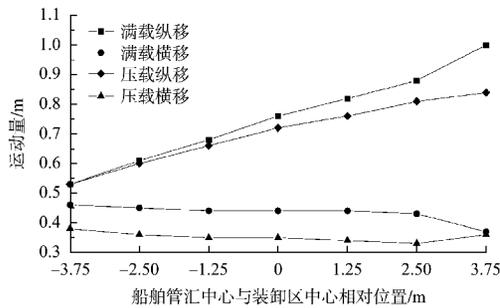
当 2<sup>#</sup>-4 装卸区 5 000 吨级船舶靠泊位置由最左侧向最右侧变化时,由图 4a)和 b)可知,其在各靠泊位置系缆力均低于设计破断力,满足安全要求,富余率达 40%~60%,满载工况缆力普遍高于压载工况;艏倒缆因长度减小、刚度增大,受力显著上升,成为受位置影响最显著的缆绳。由图 5c)可知,满载工况横移量随右移递减,压载工况变化平缓;纵移量持续增大,满载船舶在最右偏心位时纵移量临界达标。该船型因尺度差异与不对称系泊模式,受力与运动特征显著区别于中间装卸区船型。研究表明,小尺度船舶需通过系泊分析与受力优化控制运动风险,尤其需关注满载工况的纵向位移。



a) 满载系缆力



b) 压载系缆力

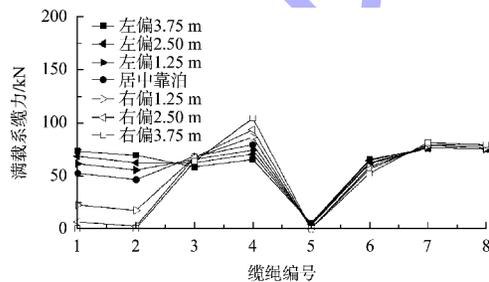


c) 船舶运动量

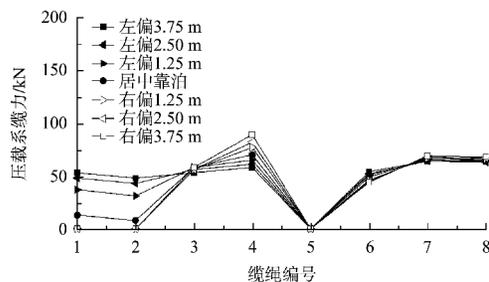
图 4 2<sup>#</sup>-4 装卸区 5 000 吨级船舶系缆力和运动量

Fig. 4 Mooring force and motion quantity of a 5,000 DWT vessel of 2<sup>#</sup>-4 berth

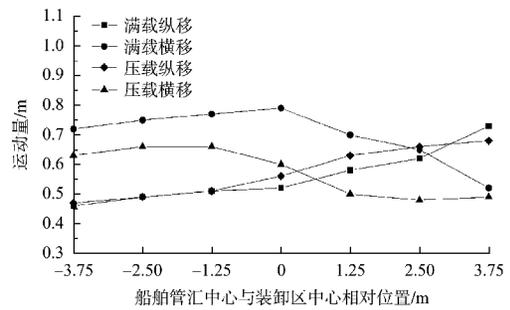
5 000 吨级船舶靠泊在 2<sup>#</sup>-6 装卸区时, 其系缆点位于系缆墩及装卸平台上, 系缆布置呈非对称, 系缆力及运动量结果见图 5。



a) 满载系缆力



b) 压载系缆力



c) 船舶运动量

图 5 2<sup>#</sup>-6 装卸区 5 000 吨级船舶系缆力和运动量

Fig. 5 Mooring force and motion quantity of a 5,000 DWT vessel of 2<sup>#</sup>-6 berth

当 2<sup>#</sup>-6 装卸区 5 000 吨级船舶靠泊位置由最左侧向最右侧变化时, 由图 5a) 和 b) 可知, 其在各靠泊位置系缆力均低于设计破断力, 满足安全要求且富余率达 60%, 满载工况缆力普遍高于压载工况; 船缆因长度增大、刚度减小且趋于横向, 受力显著降低; 船倒缆则因长度减小、刚度增大且趋于横向, 受力持续上升。由图 5c) 可知, 横移量呈先增后减趋势, 纵移量小幅递增但未超限, 整体符合安全标准。该船型因不对称系缆布置导致受力分布异于其他泊位船型, 虽当前荷载下安全, 但外荷载方向或大小变化可能引发风险。

#### 4 结语

1) 研究的 3 种尺度船型系缆力均满足安全要求, 因系泊布置差异导致其运动量响应特征不同, 在靠泊位置右偏时均存在纵移量超限隐患。作为航运市场主力船型, 5 万吨级船舶出现超限频次最多, 需通过调整系缆点位置、优化缆绳刚度配置等措施, 均衡系泊系统受力。

2) 研究揭示的船型尺度、偏心距离和系泊响应三者间的关联规律填补了现有偏心靠泊响应分析的空白, 可为同类码头的设计优化与运营风险管控提供理论依据与技术参考。

3) 实际运营中,需重点监测船舶装卸及系泊作业的实时数据,如系缆力和船舶运动量,结合模拟分析结果提升运行管理水平,全面保障偏心靠泊状态下的系泊安全。

4) 研究仅针对特定外荷载条件开展分析,其他外荷载组合下的系泊响应仍需进一步研究;OPTIMOOR系泊分析软件模拟能力难以完全还原真实环境,且研究中缆绳配置基于部分船舶带缆情况假设,后续需通过实船缆绳调研统计,提升分析精度。

#### 参考文献:

- [1] 付博新,刘玉晗,陈刚.液化烃码头设计中的问题分析[J].水运工程,2019(10):61-67,72.  
FU B X, LIU Y H, CHEN G. Analysis of problems in design of liquefied hydrocarbon terminal [J]. Port & waterway engineering, 2019(10): 61-67, 72.
- [2] 谭凤,胡家顺,张鹏.长平台蝶形布置的液体化工码头系泊分析[J].水运工程,2021(6):89-96.  
TAN F, HU J S, ZHANG P. Mooring analysis of liquid chemical wharf with long platform butterfly arrangement [J]. Port & waterway engineering, 2021 (6): 89-96.
- [3] 李江文,何翔,李永焯.大型蝶形布置油码头靠船墩间距分析[J].水运工程,2022(12):72-76.  
LI J W, HE X, LI Y Y. Breasting dolphin spacing of large oil wharves with butterfly layout [J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 72-76.
- [4] Maritime works: part 4: code of practice for design of fendering and mooring systems: BS 6349-2: 2014 [S]. London: British Standards Institution, 2014.
- [5] The Oil Companies International Marine Forum. Mooring equipment guidelines [M]. 4th ed. Livingston: Witherby Publishing Group, 2018.
- [6] 秦子君.大型油码头设计船型的系靠泊尺度研究[J].水运工程,2011(11):82-93.  
QIN ZJ. Typical ship dimensions for berthing and mooring of large tanker in jetty design [J]. Port & waterway engineering, 2011(11): 82-93.
- [7] 中国船级社.签发OCIMF“油船和化学品船管汇及相关设备建议”符合性声明的指导性文件[Z].北京:中国船级社,2019.  
China Classification Society. Guidance document for the issuance of OCIMF statement of compliance with “recommendations for manifolds and associated equipment on tankers and chemical tankers” [Z]. Beijing: China Classification Society, 2019.
- [8] 张弛,孟照意,刘新勇.大型墩式码头系缆墩优化布置探讨[J].港工技术,2018,55(5):32-34.  
ZHANG C, MENG Z Y, LIU X Y. Optimization study on layout of 300,000 t oil wharf [J]. Port engineering technology, 2018, 55(5): 32-34.
- [9] 杨波,朱永凯,杨静,等.基于OPTIMOOR软件的船岸兼容性分析[J].天津科技,2022,49(3):39-42,46.  
YANG B, ZHU Y K, YANG J, et al. Ship-shore compatibility analysis based on OPTIMOOR software [J]. Tianjin science & technology, 2022, 49(3): 39-42, 46.
- [10] 海港总体设计规范:JTS 165—2013[S].北京:人民交通出版社,2014.  
Design code of general layout for seaports: JTS 165-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.

(本文编辑 王传瑜)