



董家口港 40 万吨级矿船套泊作业 关键要素确定^{*}

刘君伟¹, 于周讯¹, 朱成斌¹, 胡 滨¹, 刘 刚²

(1. 青岛港国际股份有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 武汉理工大学 航运学院, 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘要: 为进一步提升青岛港董家口港区矿石码头泊位通过能力、提高卸船作业效率, 在当前董家口港区矿石泊位使用率居高不下以及无新增码头投建的背景下, 考虑 2 艘 40 万吨级矿船在吃水受限港池进行套泊作业的高风险系数, 基于船舶操纵模拟试验, 仿真 40 万吨级矿船在不同风、浪、流工况组合条件下进行套泊作业试验, 并根据试验结果确定 40 万吨级矿船套泊作业的关键要素。结果表明, 在确定的套泊作业关键要素条件下, 董家口港区可安全进行 40 万吨级矿船套泊作业。

关键词: 40 万吨级矿船; 受限港池; 套泊作业; 船舶操纵模拟

中图分类号: U 612; U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0072-06

Determination of key elements of 400,000-ton ore ship mooring operations in Dongjiakou Port

LIU Junwei¹, YU Zhouxun¹, ZHU Chengbin¹, HU Bin¹, LIU Zhao²

(1. Qingdao Port International Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2. Hubei Province Key Laboratory of Inland Waterway Transport Technology, School of Navigation,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to improve the berth throughput capacity of the ore wharf in Dongjiakou Port area of Qingdao Port and enhance the efficiency of unloading operations, this paper considers the high risk factor for two 400,000-ton ore ships to conduct mooring operations in a port with a limited basin under the background that the utilization rate of the ore berth in Dongjiakou Port area is currently high, and no new wharf is built. Based on the ship maneuvering simulation test, the paper simulates a mooring operation test of the 400,000-ton ore ships under different conditions of wind, wave, and current and determines the key elements of 400,000-ton ore ship mooring operations according to the test results. The results show that under determined key elements of mooring operations, Dongjiakou Port area can safely carry out the 400,000-ton ore ship mooring operations.

Keywords: 400,000-ton ore ship; limited basin; mooring operation; ship maneuvering simulation

董家口港区是青岛港的重要组成部分, 是青岛港优化港口布局和实现可持续发展的重要依托。目前董家口港区共建成并投入运营 25 个泊位, 其中琅琊台湾作业区 17 个泊位, 包括 1 个 40 万吨级

矿石泊位、2 个 20 万吨级矿石泊位、3 个 10 万吨级通用泊位、3 个 7 万吨级通用泊位、4 个 5 万吨级通用泊位、4 个 3.5 万吨级通用泊位; 董家口嘴作业区 8 个泊位, 包括 2 个 30 万吨级原油泊位、

收稿日期: 2022-07-15

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1407404)

作者简介: 刘君伟 (1983—), 男, 高级工程师, 从事水上交通安全与港口航道评估。

2个15万吨级原油泊位、1个10万吨级原油泊位、1个27万m³液化天然气(LNG)泊位、2个5万吨级液货泊位。

40万吨级矿石码头为开敞式泊位, 泊位前沿涨落潮流速较大, 其传统靠离泊模式为: 离泊船出港进入主航道, 且满载进港大矿船须高潮前3 h到达引航站上引水, 在高平潮前到达泊位前沿, 利用涨潮流或高潮平流顶流时机靠泊。离泊船出港进入主航道需要1.0 h, 靠泊船上引水至靠妥码头需要3.0 h, 因此, 40万吨级矿石泊位从离泊船出港至靠泊船靠泊大约空泊4.0 h, 在矿石码头泊位使用率居高不下且无新建码头投产情况下, 极大降低了泊位有效利用率以及作业效率, 与码头快速增长的生产需求不相适应^[1]。目前青岛董家口港区20万吨级以上矿石码头泊位呈满负荷运转状态, 锚地满载大矿船压港形式严峻, 导致有限的泊位资源和船舶压港的矛盾越来越突出。因此, 为解决40万吨级矿船在董家口港区进行套泊作业, 基于船舶操纵模拟试验^[2], 仿真建立三维董家口港区水域环境, 配合不同风、浪、流工况, 模拟得出40万吨级矿船在董家口港区受限港池进行套泊作业的安全性和可靠性, 最终根据模拟试验结果确定40万吨级矿船受限港池进行套泊作业的关键要素。

1 董家口港区通航环境

1.1 航道及泊位现状

董家口港区共形成5条进港航道: 董家口港区进港主航道(南航道)、琅琊台湾进港航道(北航道)、开敞式码头支航道、董家口嘴作业区中港池支航道、LNG支航道, 其中主航道北端依次与另外4条航道相接, 见图1。董家口港区兼有煤炭矿石泊位、散杂货泊位、集装箱泊位、原油泊位、液化泊位、LNG泊位, 基于港区独特的地理位置以及防波堤的影响, 港区内潮流复杂多变, 泊位与码头分布见图2。

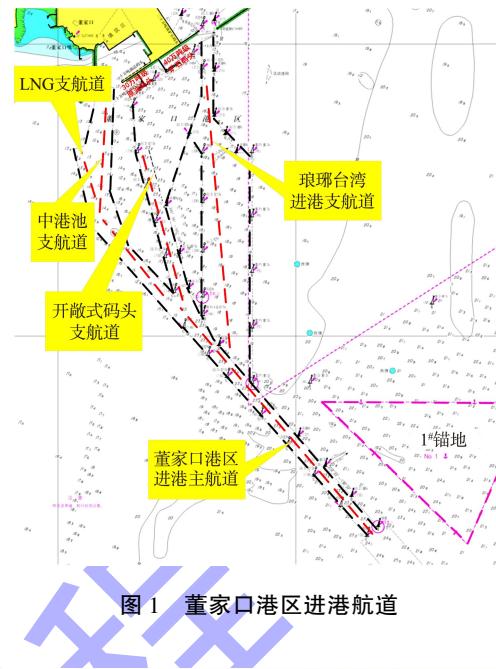
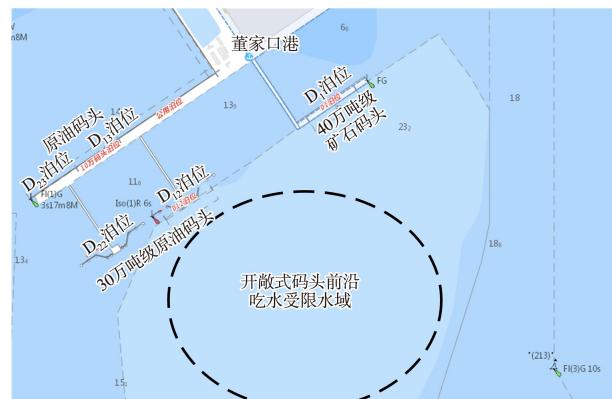


图1 董家口港区进港航道



a) 港区泊位分布



b) 开敞式码头泊位分布

图2 董家口港区泊位与码头分布

1.2 交通流

统计 2018—2021 年不同船型进出青岛港董家口港区船舶数量变化见表 1, 20 万吨级及以上矿船进出董家口港区船舶数量变化见表 2。

表 1 不同船型进出董家口港区船舶数量变化

年份	船舶数量/艘次			
	矿船	危险品船	集装箱船	散杂货船
2018	2 884	998	98	2 993
2019	2 985	1 096	105	3 101
2020	3 001	1 136	116	3 120
2021	3 014	1 251	122	3 256

表 2 20 万吨级及以上矿船进出董家口港区船舶数量变化

年份	船舶数量/艘次	
	20 万~30 万吨级	40 万吨级
2018	298	118
2019	305	125
2020	311	133
2021	324	140

根据近 4 年进出董家口港区的船舶交通流特征变化趋势可知: 1) 进出董家口港区的矿船、危险品船以及散杂货船等不同船型数量均呈增长趋势; 2) 董家口港区到港船型以矿船、危险品船以及散杂货船为主, 且 20 万吨级及以上到港大型矿船中 40 万吨级矿船数量呈逐年增长趋势, 到港船舶大型化趋势较明显。

1.3 船舶通航现状

受董家口港区进港主航道水深和可航水域宽度受限, 董家口港区在靠泊 LNG 船、20 万吨级以上散矿船、20 万吨级以上原油船时须乘潮单向通过主航道进入 LNG 支航道、琅琊台湾进港航道、开敞式码头支航道以及中港池支航道进港靠泊。受复杂潮流影响, 开敞式码头前沿 30 万吨级原油码头以及 40 万吨级矿石码头船舶须在高潮前进入受限港池水域乘潮顶流靠泊或高潮平流靠泊。40 万吨级离泊散矿船须通过琅琊台湾作业区航道离泊出港^[3-4]。

1.4 自然环境

1.4.1 风况

根据胶南董家口港区风观测站资料, 本区域

内强风向为 ENE, 最大风速 12.8 m/s; 次强风向为 NE, 风速 11.8 m/s; 常风向为 NW, 频率 11.2%; 次常风向为 NNW, 频率 8.5%。

1.4.2 水文情况

董家口港区属于正规半日潮。根据验潮资料, 计算得出不同潮高数值见表 3(潮位值以董家口理论最低潮面起算)。

表 3 董家口潮位特征值

平均高潮位/m	平均低潮位/m	最高高潮位/m	最低低潮位/m	最大潮差/m	平均潮差/m
4.27	1.46	5.19	-0.15	4.79	2.94

1.4.3 潮流情况

董家口港区为典型往复流, 涨潮流时围堤堤头附近流速较大, 最大流速 1.14 m/s, 水流与 40 万吨级矿石码头夹角为 20° 左右。开敞式码头处流向受防波堤导流影响, 流向与码头轴线方向基本一致。

落潮流时董家口嘴与围堤之间形成逆时针和顺时针回流, 回流强度较弱, 最大流速 0.2 m/s, 水流与码头夹角较大, 在 37° 左右。落潮潮流绕过董家口防波堤, 沿西防波堤和东防波堤从西南向东北方向流动, 中港池内水体绕过防波堤向东南移动。

1.4.4 波浪情况

根据实测资料, 本海区波浪属风涌混合浪。波向主要分布在 ESE—SSE 向, 频率为 59.52%, 其中 SE 为常浪向, 其频率占 29.34%。实测最大波高出现在 ENE 向, 波高为 2.5 m, 对应平均波周期 5.2 s, 对应风向 324°, 即 NW 向, 风速 3.2 m/s。而 $H_{1/10} \geq 2.0$ m 出现的频率在 ESE 向最大, 为 0.68%。

2 套泊作业可行性分析

2.1 套泊作业关键影响要素分析

根据船舶交通流统计分析以及董家口港区航道通航环境可知:

1) 目前董家口港区通航船舶种类、数量较多, 船况以及航速差别较大, 经进港主航道分汊

的支航道较多, 船舶交通流向交叉多变, 通航环境复杂, 给 40 万吨级矿船套泊作业带来一定的通航风险。

2) 受水深限制, 董家口港区航道可航水域宽度有限, 且受限航道拐点多、航道长, 20 万吨级以上大型散货船、油船以及 LNG 船^[5]为单向通航, 此类船舶吃水较大、操纵受限、航速较慢, 且通常将 30 万吨级油船以及 40 万吨级矿船安排在同一高潮水流时段进港靠泊。若船舶出现主机故障、全船跳电等突发事故影响船舶航行安全, 且 30 万吨级油船和 40 万吨级矿船共用同一个开敞式码头港池水域^[6], 油船在靠泊过程中对矿船套泊作业有安全风险^[7]。

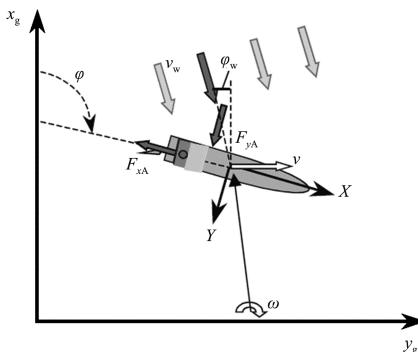
3) 董家口港区进港主航道端点处分汊为 3 条支航道: 中港池支航道、开敞式码头支航道以及琅琊台湾进港航道, 航道交汇水域处船舶交通流汇聚, 通航环境复杂, 通航风险较大^[8]。

4) 董家口港区开敞式码头前沿为外海水域, 受风、浪、流影响较大, 如遇大风浪等恶劣天气将会对 40 万吨级矿船套泊作业带来极大的操纵风险^[9]。

2.2 船舶套泊操纵模拟试验

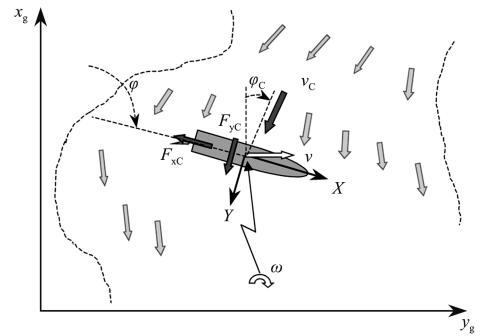
2.2.1 船舶运动数学仿真模型

作用于船体上的空气动力可视为以一定的方向和速度的风作用力, 见图 3a)。水流的作用模式视水流为稳定流, 水流流速分量的变化不随水深变化, 见图 3b)。



注: φ 为航向角, v 为航速, v_w 为风速, F_{xA} 为风作用力在 x 轴上的分解, F_{yA} 为风作用力在 y 轴上的分解, φ_w 为风作用力下的船舶偏转角度, ω 为角速度。

a) 风作用力(水平面)



注: v_c 为水流流速, F_{xc} 为水流作用力在 x 轴上的分解, F_{yc} 为水流作用力在 y 轴上的分解, φ_c 为水流作用力下的船舶偏转角度。

b) 水流作用力(水平面)

图 3 船舶运动数学仿真模型

2.2.2 六自由度船舶仿真试验模型建立

代表船型吨级为 40 万 DWT, 总长 362 m, 型宽 65.6 m, 型深 30.5 m, 吃水 23.0 m。船舶仿真视景建模流程见图 4, 三维船舶视景效果见图 5。

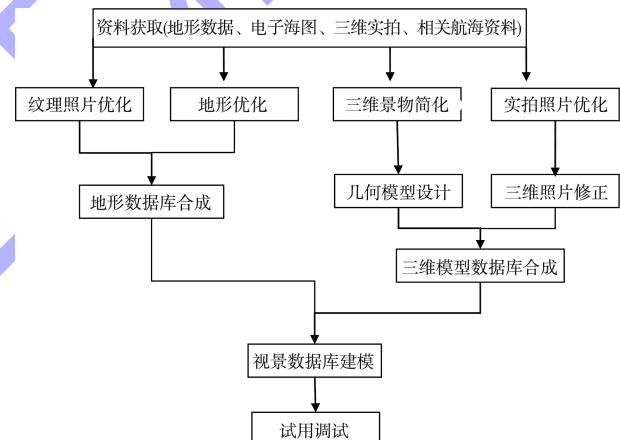


图 4 仿真视景建模流程



图 5 三维效果

2.2.3 套泊作业模拟试验工况

建立董家口港区三维仿真水域环境, 基于船舶操纵模拟试验模拟各类工况下进行 2 艘 40 万吨级矿

船典型套泊作业试验过程，并根据试验结果确定套泊作业过程中的关键要素。模拟试验工况选择为：

1) 该区域常见风向和船舶进出港航行左舷和右舷受风兼顾选择 NE 和 SW 风向，选择最不利于船舶套泊作业的 NE 风向，风力 5、6、7 级；水平能见度不小于 1 km。

2) 根据 40 万吨级矿石码头水域附近流场测流大潮期资料，对该水域可能最大流速进行计算，选择对船舶影响较大的涨潮流急时段的流速 1.1、1.5 m/s，选择该区常浪向 SE，浪高 1.0、1.5 m。

3) 靠泊船舶吃水设定为满载 23.0 m，离泊船为空船。

2.2.4 套泊作业模拟试验

根据船舶操纵模拟试验，在各类工况组合条件下模拟 2 艘 40 万吨级矿船套泊作业试验情况。不同风流压条件下船舶满载和空载状态的航迹带宽度及所需单向航道宽度试验数据见表 4，各类工况组合条件下两船靠离泊套泊作业试验结果见表 5。

表 4 40 万吨级散货船操纵模拟试验数据

载况	航向	风力/ 级	风流 压角/(°)	潮流	航迹带 宽度/m	所需单向 航道宽度/m
满载 进港	5	7		高潮前至 高平潮	185.2	283.4
	6	10			203.7	302.1
	7	14			258.1	356.4
空载 出港	5	8		高平潮转 落潮	198.5	301.5
	6	12			226.3	322.3
	7	15			282.4	371.4

表 5 不同工况组合条件下模拟试验结果

工况	风力/ 级	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	浪高/ m	试验结果
				靠泊船 离泊船
1	5	1.1	1.0	安全靠泊 安全离泊
2	5	1.1	1.5	拖轮顶拖困难 安全离泊
3	5	1.5	1.0	船位保持困难 安全离泊
4	5	1.5	1.5	无法保证安全 无法保证安全
5	6	1.1	1.0	安全靠泊 安全离泊
6	6	1.1	1.5	拖轮顶拖困难 拖轮顶拖困难
7	6	1.5	1.0	船位保持困难 船位保持困难
8	6	1.5	1.5	无法保证安全 无法保证安全
9	7	1.1	1.0	无法保证安全 无法保证安全
10	7	1.1	1.5	无法保证安全 无法保证安全
11	7	1.5	1.0	无法保证安全 无法保证安全
12	7	1.5	1.5	无法保证安全 无法保证安全

基于董家口港区进港主航道、琅琊台湾进港支航道、中港池支航道以及开敞式码头支航道分布特点以及 40 万吨级矿石码头泊位前沿吃水受限港池特点，以及在不同风、浪、流工况组合条件下的模拟试验结果，建议按照如图 6 所示的船舶靠离泊操纵模式进行套泊，即靠泊船高潮前到达泊位前沿吃水受限港池，乘缓涨流水顶流及高潮平流靠泊，离泊船为当靠泊船进入吃水受限港池前必须做好离泊准备，靠泊船进入港池时离泊船解缆掉头走琅琊台湾进港航道出港(图 7)。



图 6 船舶套泊操纵



图 7 董家口港区通航环境

2.3 试验结果分析

由模拟试验结果可知，2 艘 40 万吨级矿船在套泊作业过程中受风、浪、流影响最大。离泊船在离泊时受风、浪、流的影响所需航迹带宽度和单向宽

度较满载靠泊船宽度要宽, 且浪高达到 1.5 m 时, 拖轮顶拖较困难^[10], 附近水流流速达到 1.5 m/s 时, 无法保持安全船位^[11], 当风力达到 6 级时, 为极限作业风力, 即 40 万吨级矿船套泊作业需要较高的作业条件。因此, 当 2 艘 40 万吨级矿船在码头前沿受限港池进行靠离泊套泊作业时, 以上极限条件均不能确保两船安全套泊作业。

3 交通组织

为保障 2 艘 40 万吨级矿船安全套泊作业, 提高船舶通航效率, 防止水上交通事故的发生, 制定以下船舶交通组织^[12-13]规则:

1) 锚地等待潮水靠泊的 40 万吨级矿船附近锚泊船较多, 且都是大型重载船舶, 临近日照—青岛习惯航路(灵山水道)以及海军训练区(图 7), 附近穿越航道、锚地的船舶较多, 船舶在起锚进港过程中吃水较大、操纵受限, 易与其他船舶发生拥挤局面。因此, 40 万吨级矿船在到达引航站时, 护航拖轮须提前到达引航站警戒护航。

2) 董家口港区进港主航道与中港池支航道以及琅琊台湾航道交汇(图 8), 各航道内进出港船舶在交汇区域形成交叉会遇局面, 易形成拥挤局面, 通航风险较大。引航站与港口调度要合理调配其他船舶进出港时机, 避免在航道交汇处与进港 40 万吨级矿船发生会遇。

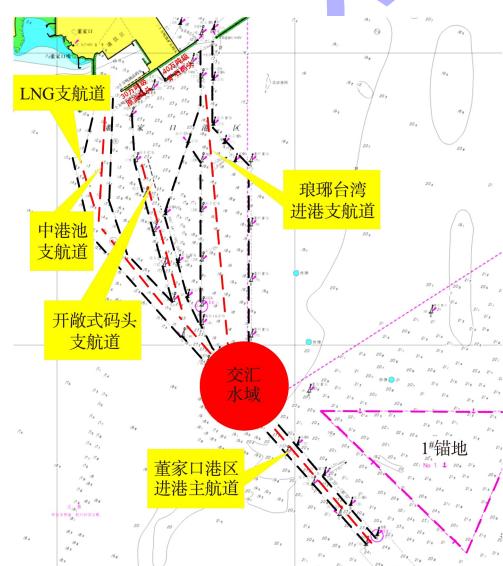


图 8 董家口港区航道分布

3) 由于董家口港区进港主航道可航水域宽度受限, 20 万吨级及以上重载船舶须单向乘潮进港。因此在 40 万吨级矿船进港过程中应禁止其他船舶在航道内对遇及追越, 且同向航行的前后船舶应保持安全距离。

4 实例

2022-02-23T08:00, 40 万吨级矿石码头在泊船“上海矿业”轮顺利离泊, 此时, 40 万吨级满载矿船“天津矿业”轮缓慢安全到达泊位前沿并安全靠泊(图 9), 正式开启了全国矿石船舶套泊作业模式的新时代。



图 9 套泊作业

5 结语

1) 基于 40 万吨级开敞式矿石码头处于外海水域、无防波堤围护以及码头前沿港池水深受限特点, 与附近 40 万吨级原油码头泊位共用同一个港池, 受风、浪、流影响较大, 由此根据模拟试验结果确定, 影响 2 艘 40 万吨级矿船安全套泊作业的关键要素为风、浪、潮流, 其他安全要素包括能见度、交通流、拖轮配置等。

2) 确定的套泊作业关键要素条件为: 极限作业风力为 6 级; 浪高不大于 1.0 m; 水平能见度不小于 1.0 n mile; 靠泊船为高潮前到达泊位前沿, 乘涨潮顶流或高潮平流靠泊, 当靠泊船进入受限港池时离泊船解缆离泊; 控制套泊作业水域范围内其他船舶动态; 当风力达到 6 级、浪高到达 1.0 m 时, 两船套泊作业应加强拖轮配置。

3) 该研究成果可为后续临近的新建 40 万吨级矿石泊位、航道改扩建以及其他沿海港口进行套泊作业提供重要安全指导与参考。