

40万吨级矿石船进出连云港旗台矿石码头仿真模拟探究

曹恩广

连云港引航站, 江苏 连云港
Email: cao6078@126.com

收稿日期: 2021年8月13日; 录用日期: 2021年9月22日; 发布日期: 2021年9月29日

摘要

随着连云港港口建设的飞速发展, 进港船舶大型化趋势明显, 为此, 连云港港旗台作业区将矿石码头进行扩建, 以适应超大型矿石船靠泊需求。本文以连云港港旗台作业区矿石码头扩建泊位、40万吨级矿石船为研究对象, 通过借助六自由度的NT-PRO 5000型大型船舶操纵模拟器进行仿真试验, 提出船舶进出港及靠离泊的安全保障措施, 为船舶引航安全提供技术保障。

关键词

40万吨级矿石船, 引航, 船舶仿真模拟, 技术保障

Research on the Simulation of 400,000-Ton Ore Ship Entering and Exiting Qitai Ore Wharf in Lianyungang

Enguang Cao

Lianyungang Pilot Station, Lianyungang Jiangsu
Email: cao6078@126.com

Received: Aug. 13th, 2021; accepted: Sep. 22nd, 2021; published: Sep. 29th, 2021

Abstract

With the rapid development of Lianyungang port construction, the trend of large-scale ships entering the port is obvious. For this reason, the Lianyungang Qitai operation area has expanded the

ore terminal to meet the berthing demand of ultra-large ore ships. This article takes the expansion of berths and 400,000-ton-class ore ships in the Lianyungang Qitai operation area as the research object. The simulation test is carried out with the help of a six-degree-of-freedom NT-PRO 5000 large-scale ship handling simulator, the safety measures for ships entering and leaving the port and berthing and unberthing are put forward, and it provides technical guarantee for the safety of ship pilotage.

Keywords

400,000-Ton Class Ore Ship, Pilotage, Ship Simulation, Technical Support

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着我国钢铁产业的快速发展,铁矿石需求持续攀升。进口铁矿石总量高达全球海运贸易总量的 70%,已经成为世界最大的铁矿石进口国和钢铁生产国[1]。旗台 40 万吨级矿石码头是连云港港目前最大也是唯一的超大型矿石码头泊位,40 万吨级矿石船进出港对连云港驾引人员来说不仅仅有巨大的风险,更多的是巨大挑战和考验,现阶段主要依靠和参考其他港口超大型船舶进出港的引航经验[2],还通过六自由度的 NT-PRO 5000 型大型船舶操纵模拟器进行仿真试验。

目前,国内有学者对 40 万吨级超大型船舶的操纵性能进行了研究。张辉[3]在四自由度数学模型的基础上,通过仿真试验,研究了 40 万吨级矿石船的操纵性,研究发现 40 万吨级矿石船相较其他同等级船舶而言,具有旋回性能好、旋回降速明显、满载旋回优于压载、横倾较大的特点。但是四自由度模型不能真实的还原船舶操纵影响因素,得出的结论也是建立在一定限制条件的基础上,与实际操纵相比,仍有较大的偏差。高世龙等[4]从实际操纵船舶的角度,分享了 40 万吨级矿石船进出青岛港的船舶操纵技术,在控制船速和流压差角选取方面给出了建议,但是作者也提到,不同的港区,不同的水文气象和通航环境,船舶操纵要求也存在差异,因此给出的船速和流压差角建议是一个弹性的范围区间,只能作为参考。本文建立在六自由度数学模型以及获取连云港真实水文气象和通航环境的基础上,充分考虑地域特点并全方位仿真建模要素,研究并开展 40 万吨级矿石船进出连云港港旗台作业区矿石码头的仿真模拟,可以为驾引人员提供技术保障,具有一定的现实指导意义。

2. 船舶操纵模拟仿真

2.1. 模拟仿真试验目的

采用六自由度大型船舶操纵模拟器及新一代仿真软件(NT-PRO 5000 型),模拟试验包括进出港航道的航行试验、掉头作业和靠离泊作业等内容。针对不同的风、流条件,进行不同工况设定,并对船位、航向、航速、主机工况、操舵舵角、风流压等运动参数以及风流数据进行跟踪记录,通过大量试验数据收集,包括船舶运动数据(轨迹、速度、航向、时间等)、船舶位置信息等,并对收集数据进行分析,得出设计代表船型在不同工况(风、浪、流)条件下的运动态势,提出船舶进出港及靠离泊的安全操纵建议及保障措施,为船舶引航安全提供技术保障。

2.2. NT-PRO 5000 型模拟器的船舶运动数学模型

船舶运动的数学模型是由一组非线性的微分方程组成的。该组微分方程习惯由船舶运动的运动参数表示，比如：随体坐标系 (x_g, y_g, z_g) ，倾斜角(横倾角，纵摇角和航向角)以及相应的速度和加速度。

船舶运动数学模型公式如下：

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{F}(\mathbf{V}, \dot{\mathbf{V}}, \boldsymbol{\Omega}, \dot{\boldsymbol{\Omega}}, \delta, n) \\ \mathbf{M} &= \mathbf{M}(\mathbf{V}, \dot{\mathbf{V}}, \boldsymbol{\Omega}, \dot{\boldsymbol{\Omega}}, \delta, n) \end{aligned} \right\}$$

式中：上式中的 δ 表示舵角，单位： $^{\circ}$ ； n 表示螺旋桨转速，单位：转/分钟； \mathbf{F} 表示总流体动力，单位：N； \mathbf{M} 表示动力矩，单位：N.m。

随船坐标系的原点为船舶中心的重心，OX轴和OY轴平行于基准面，OZ轴正交于OX、OY轴，各轴的方向表示如下：OX轴指向船首，OY轴指向右舷，OZ轴向下。倾角设定当船舶顺时针旋转时其由轴端方向看为正。

六自由度数学模型中风、流和波浪三个要素是影响较大的作用力。图1是船体所受的外部力示意图。

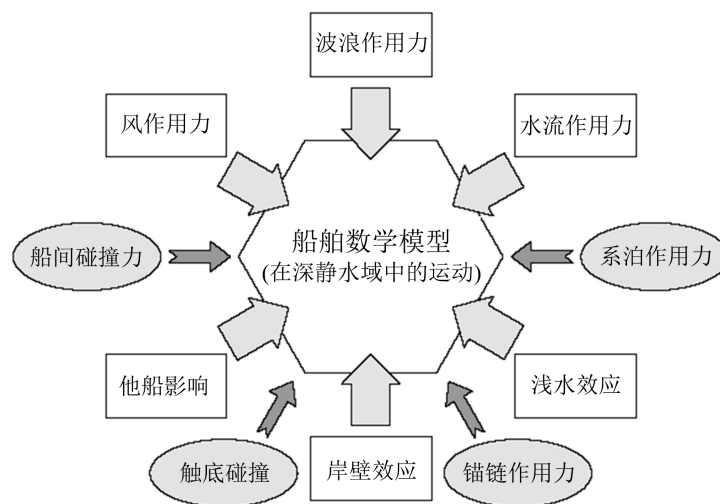


Figure 1. Schematic diagram of the external force on the hull
图1. 船体所受的外部力示意图

1) 空气动力(风)的力和力矩的计算模型：

$$\begin{aligned} F_{xA} &= [C_{xAH}(\varphi_{WK}) + dC_{xA}(\varphi_{WK}, A_{xN})] 0.5 \rho_A V_A^2 (A_x + A_{xN}) \\ F_{yA} &= [C_{yAH}(\varphi_{WK}) + dC_{yA}(\varphi_{WK}, A_{yN})] 0.5 \rho_A V_A^2 (A_y + A_{yN}) \\ M_{zA} &= [C_{mzAH}(\varphi_{WK}) + dC_{mzA}(\varphi_{WK}, A_{yN})] 0.5 \rho_A V_A^2 (A_x + A_{yN}) L \\ M_{xA} &= [C_{mxAH}(\varphi_{WK}) + dC_{mxA}(\varphi_{WK}, A_{xN})] 0.5 \rho_A V_A^2 (A_x + A_{yN}) L \end{aligned}$$

式中：

C_{xAH} , C_{yAH} , C_{zAH} —无量纲的空气动力的分量系数(纵向、横向和垂向)；

C_{mxA} , C_{mzA} —随体坐标系中无量纲的空气动力力矩分量(首摇和横摇力矩)；

$dC_{xA}, dC_{yA}, dC_{zA}$ —由于空气动力作用在上层建筑产生的额外力的无量纲值;

dC_{mxA}, dC_{mzxA} —由于空气动力作用在上层建筑产生的额外力矩的无量纲值;

V_A, ρ_A —相对风速和相对风向角, 单位: m/s 和°;

A_y, A_x —水面以上船体在船纵剖面 and 船舭横剖面的投影面积, 单位: m^2 ;

A_{xN}, A_{yN} —上层建筑在船纵剖面 and 船舭横剖面的投影面积, 单位: m^2 。

2) 水流作用力的力和力矩的计算模型:

$$F_{yC} = C_{yBH}(\beta_{ck})0.5V_{CK}^2LT + \Delta F_{yC}$$

$$M_{zC} = C_{mzBH}(\beta_{ck})0.5V_{CK}^2L^2T + \Delta M_{zC}$$

式中:

$C_{xBH}, C_{yBH}, C_{mzBH}$ —裸船体在稳流中运动时, 作用于船体的水动力的无量纲系数;

V_{ck} —船舶的相对速度, 单位: m/s;

β_{ck} —相对飘角, 单位: °;

$\Delta F_{yC}, \Delta M_{zC}, \Delta M_{xC}$ —由不规则流产生的附加的横向力和力矩, 单位: N 和 N.m。

3) 波浪干扰力的计算模型:

$$\zeta(x_g, y_g, t) = \sum_{i=1}^N \zeta_i(x_g, y_g, t) = A_i \cdot \cos(k_{xi}x + k_{yi}y - \omega_i t + \phi_i)$$

式中:

i —谐波数;

ζ —Z 坐标轴上的波面;

N —谐波总数;

$O-A_i$ —第 i 个谐波的振幅;

K_i —波浪数;

ω_i —第 i 个谐波的频率;

ϕ_i —谐波的相位。

2.3. 船舶参数设置

本次模拟试验选取 40 万吨级矿石船(满载、压载)作为试验船舶, 试验船型资料见表 1 所示。

Table 1. List of design representative ship types (Unit, m)

表 1. 试验船型资料(单位, m)

船型	船长 L	船宽 B	型深 H	吃水 T
40 万吨级矿石船满载	362	65.6	30.5	22.8
40 万吨级矿石船压载	362	65.6	30.5	11.4

2.4. 模拟工况

进港模拟工况: 大潮乘潮涨时段/大潮乘潮涨末时段, 东北/东南/西北风向, 七级风条件下, 满载进港航行模拟;

出港模拟工况: 大潮乘潮涨时段/大潮落潮流急时段, 偏东/偏南风向, 七级风条件下, 压载离泊出港航行模拟。

2.5. 模拟试验

40万吨级矿石船满载进港航行及靠泊、压载离泊及出港航行模拟试验的记录如图2(a)~(c), 图3(a)~(c); 图4(a)~(c), 图5(a)~(c)。

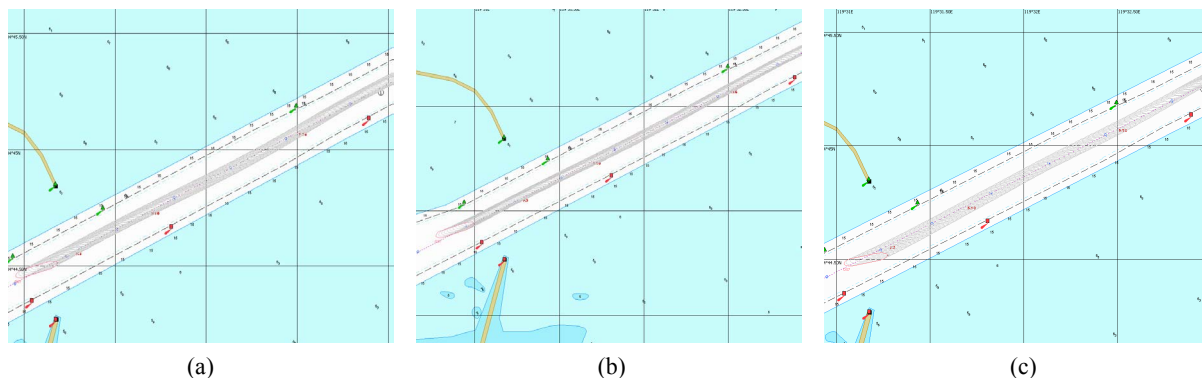


Figure 2. (a) Ships entering the port in the northeast wind direction during the rising period; (b) Ships entering the port in the southeast wind direction during the rising period; (c) Ships entering the port in the northwest wind direction during the rising period

图 2. (a) 涨时段东北风向船舶进港; (b) 涨时段东南风向船舶进港; (c) 涨时段西北风向船舶进港

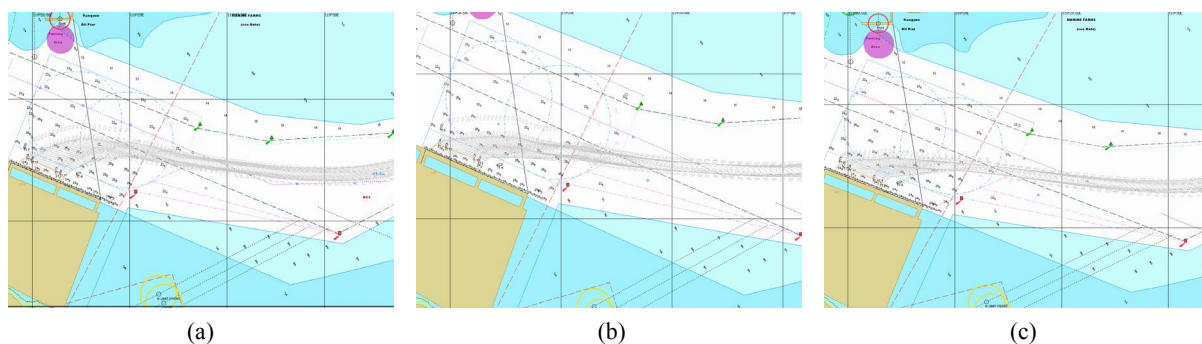


Figure 3. (a) Ship berthing in the northeast wind direction during the end of the rising period; (b) Ship berthing in the southeast wind direction during the end of the rising period; (c) Ship berthing in the northwest wind direction during the end of the rising period

图 3. (a) 涨末时段东北风向船舶靠泊; (b) 涨末时段东南风向船舶靠泊; (c) 涨末时段西北风向船舶靠泊

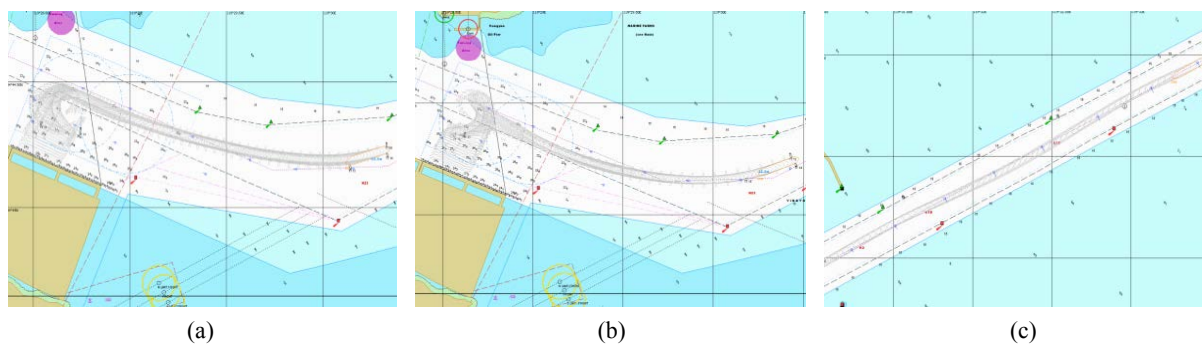


Figure 4. (a) Ships leaving the berth in the easterly wind direction during the rapid rising period; (b) Ships leaving the berth in the southerly wind direction during the rapid rising period; (c) Ships leaving the port in the southerly wind direction during the rapid rising period

图 4. (a) 涨急时段偏东风向船舶离泊; (b) 涨急时段偏南风向船舶离泊; (c) 涨急时段偏南风向船舶出港

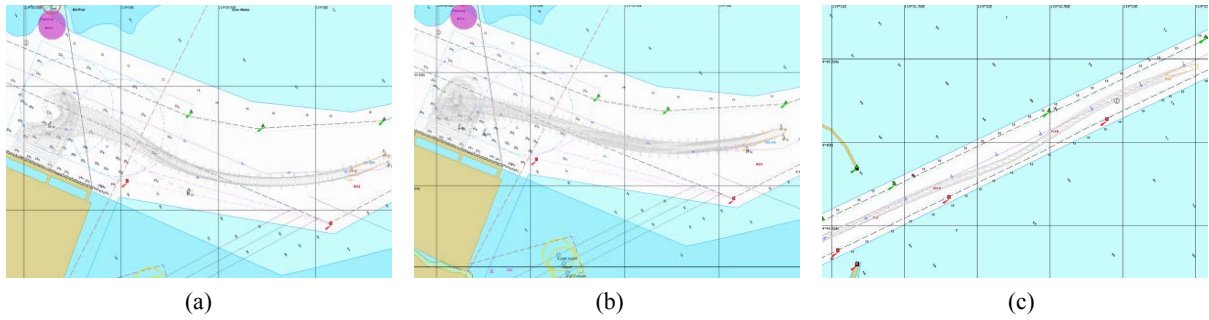


Figure 5. (a) Ship leaving the berth in the southerly wind direction during the emergency period; (b) Ship leaving the berth in the easterly wind direction during the emergency period; (c) The ship leaving the port in the southerly wind direction during the emergency period

图 5. (a) 落急时段偏南风向船舶离泊; (b) 落急时段偏东风向船舶离泊; (c) 落急时段偏南风向船舶出港

2.6. 试验数据

通过对 40 万吨级矿石船进行多组船舶操纵模拟试验, 根据模拟试验结果统计船舶航迹带宽度值, 并对船舶进港航行所需航道宽度计算和分析船舶回旋作业所需相关水域尺度。**表 2** 是 40 万吨级矿石船满载进港航行、压载出港航行单向通航宽度。**表 3** 是 40 万吨级矿石船压载状态回旋水域尺度。

Table 2. One-way navigation width of a 400,000-ton class ore ship entering the port with full load and sailing out of the port with ballast

表 2. 40 万吨级矿石船满载进港航行、压载出港航行单向通航宽度

船型	航速	流向	流速	风向	风力	单向航迹带宽度 1 (m) (按大于 6 节计算)	单向航迹带宽度 2 (m) (按小于 6 节计算)
40 万吨级矿石船 满载进港	8-6-4 kn 进港	130°~150°/ 300°~320°	0.6~0.3 kn	045°	7 级	150	142
				315°	7 级	165	158
				135°	7 级	130	115
40 万吨级矿石船 压载出港	4-6-8 kn 出港			315°	7 级	180	185
				135°	7 级	170	172

Table 3. Dimension of the rotating water area in ballast state of a 400,000-ton class ore ship

表 3. 40 万吨级矿石船压载状态回旋水域尺度

船型	流向	流速	风向	风力	试验(m)	
					长轴 L	短轴 B
40 万吨级矿石船 压载出港	涨潮流	0.4 m/s	070°	7 级	495	415
			200°	7 级	500	450
	落潮流	0.3~0.4 m/s	070°	7 级	520	400
			200°	7 级	600	400

结合有关规范[5]要求, 航道宽度理论计算如**表 4** 所示。

Table 4. Affluent width c between the ship and the bottom edge of the channel**表 4.** 船舶与航道底边间的富裕宽度 c

船舶种类	杂货船、集装箱船		散货船		油船或其他危险品船	
	≤ 6	> 6	≤ 6	> 6	≤ 6	> 6
航速(kn)	≤ 6	> 6	≤ 6	> 6	≤ 6	> 6
c (m)	0.50B	0.75B	0.75B	B	B	1.50B

航道宽度 W 的取值:

单向航道: $W = A + 2c$;

式中: W —航道有效宽度(m); c —船舶与航道底边的富裕宽度(m); A —航迹带宽度(m)。

由表 2 和表 3 可以看出: 40 万吨级矿石船满载进港航行单向航迹带宽度最大为 165 m, 所需单向航道宽度为 295 m; 40 万吨级矿石船压载出港航行单向航迹带宽度最大为 185 m, 所需单向航道宽度为 315 m。船舶掉头水域最大为 600 m \times 450 m。

3. 研究结论

1) 拖轮配置方面: 40 万吨级矿石船满载进行靠泊, 7 级风及以下需要 6 艘 5000 HP 及以上(其中两艘为 6500 HP 以上)拖轮协助; 40 万吨级矿石船压载离泊掉头操作, 需要 5 艘 5000 HP 拖轮协助掉头、调整船舶位置。应选择较大马力、操纵灵活的全回旋拖轮。偏南大风进港靠泊时, 吹拢风强风时, 应增加配置拖轮的数量或功率。40 万吨级矿石船满载靠泊旗台作业区矿石码头对连云港驾引人员、拖轮船长等是一项全新的工作, 稍有差错可能酿成无法估量的事故, 主要体现在满载 40 万吨级矿石船靠泊时横移速度和靠泊角的控制上, 通常要求横移速度小于 3 cm/s、平行靠泊码头。所以开始时的拖轮配置数量和功率都有一定的盈余, 以后随着经验的积累, 可以逐渐减少拖轮配置的数量和功率。

2) 40 万吨级矿石船靠离泊方式方面: 码头位于配套航道的左侧, 码头岸线顺直, 40 万吨级矿石船满载乘潮进港宜选择左舷靠泊; 40 万吨级矿石船压载离泊时, 由于回旋水域为 2 个泊位共用, 需将船舶用拖轮协助拖到回旋水域附近进行掉头。根据风流情况进行向右掉头或向左掉头操纵, 然后摆好船位, 加车出港。需要拖轮护送至旗台防波堤口门外航道。

3) 航速控制方面: 40 万吨级矿石船满载进港需乘潮, 压载出港不需乘潮。但流速较大时, 船舶在 40 万吨级外航道航行时受横流影响较大, 抵达航道末端时潮流较小, 航速是重要的控制因素。进港船舶外航道航行时航速可保持在 8~10 节左右, 在接近防波堤口门外航道加宽处时降至 6 节左右, 接近口门时降至 4~5 节, 逐渐降速在转弯处降至 3 节左右, 慢慢抵近码头前沿停泊水域附近, 将船舶速度降至 1 节以下慢慢抵近码头, 根据情况由拖轮协助, 摆好靠泊姿势, 控制好靠泊速度, 注意附近其他浅水区保持安全距离。

4) 配套航道建设优化建议: 40 万吨级矿石船满载进港西北风 7 级时船舶航迹带宽度达 165 m, 需要航道宽度 295 m; 40 万吨级矿石船压载出港西北风 7 级时船舶航迹带宽度达 185 m, 需要航道宽度 315 m, 现在航道最窄处 285 m, 需要适时拓宽航道, 保证航道有效宽度不小于 320 m。

本文结合连云港港实际需求, 以 40 万吨级矿石船为研究对象, 探讨其在进出港航行和涨落潮时段靠离泊连云港旗台作业区矿石码头泊位的可行性, 并从船舶通航安全的角度, 提出了相应的安全保障建议, 为连云港港 40 万吨级矿石船的引航安全提供技术保障。

参考文献

- [1] 王达川, 姚海元, 李宜军. 我国沿海港口 40 万吨级矿石码头新布局[J]. 水运工程, 2021(6): 54-60.

- [2] 郑凯雨, 杨其雷, 郝永志. 40 万 t 级散货船靠泊鼠浪湖码头技术研究[J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2018, 19(Z1): 21-25+35.
- [3] 张辉. 40 万吨级超大型散货船操纵性仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [4] 高世龙, 张进文, 蔡泓, 李先强. 40 万吨级矿石船靠泊青岛港的安全操纵[J]. 航海技术, 2016(1): 9-11.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. 海港总体设计规范: JTS165-2013 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.