



# 广西防城港赤沙1号泊位港池 水域通航安全分析

纪懿桓<sup>1</sup>, 田中南<sup>2</sup>

(1. 北部湾港股份有限公司, 广西南宁 530200; 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510290)

**摘要:**本工程远期为30万吨级专业散货码头,采用开敞式布置。码头回旋水域紧邻主航道(为主潮汐通道),船舶操纵难度大,30万吨级散货船靠离泊与单向航道相互影响较大,为使大型散货船进出港及靠离泊时满足安全、高效的前提,通过船舶操纵仿真模拟,合理优化连接水域切入回旋圆角度,减小炸礁工程量,对总平面布置方案提出科学的意见,并从拖轮配置、靠离泊限制条件、进出港操作方案、进出港通航保障措施及注意事项等给出全过程指导。结果表明设计长轴为847.5 m、短轴为678.0 m的椭圆,可满足6级大风、涨落潮最大流速下的安全靠离泊的要求。

**关键词:** 仿真模型; 船舶操纵; 水域通航安全; 靠离泊; 总平面

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0087-05

## Navigation safety in water area of berth 1, Chisha, Fangchenggang, Guangxi

Ji Yihuan<sup>1</sup>, Tian Zhongnan<sup>2</sup>

(1. Beibu Gulf Port Co., Ltd., Nanning 530200, China; 2. CCCC FHD Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** This project will be a professional bulk cargo terminal with a capacity of 300,000-ton in the future, adopting an open layout. However, the turning water area of this project is adjacent to the main channel (the main tidal channel), and the difficulty of ship maneuvering is high. The berthing and departure of 300,000-ton bulk carriers have a significant impact on the one-way channel. In order to ensure the safety and efficiency berthing and disembarking of large bulk carriers, through ship maneuvering simulation, the angle of connecting the water area to the turning circle is reasonably optimized, reducing the amount of reef blasting work. Scientific opinions are proposed on the overall layout plan, and guidance is provided throughout the process from tugboat configuration, berthing and departure restrictions, port entry and exit operation plans, port entry and exit navigation guarantee measures, and precautions. The results show that the ellipse with a design major axis of 847.5 m and a design minor axis of 678.0 m can meet the requirements of safe berthing and unberthing under the maximum flow velocity of level 6 strong winds and rising and falling tides.

**Keywords:** simulation model; ship maneuvering; water navigation safety; berthing and disembarking; overall plane

随着我国深入推进西部陆海新通道、北部湾国际门户建设、中国—东盟自由贸易区建设等,广西在国家对外开放大格局中的地位更加凸显,迎来了历史性的发展机遇。

拟建码头位于防城湾东湾东岸,濒临暗埠江深槽,位于企沙半岛西南侧沿岸。工程位于防城港钢铁项目西侧临海岸线,规划防城港域企沙港区赤沙作业区内。拟建1个20万吨级散货泊位

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 纪懿桓(1979—),男,高级工程师,从事水运工程设计研究建设管理工作。

(远期按 30 万吨级预留), 使用岸线总长 415 m, 设计年吞吐量 950 万 t, 年设计通过能力 980 万 t<sup>[1]</sup>。项目位置及规划见图 1。



图 1 防城港赤沙 1 号泊位总体规划

### 1 工程概况

工程远期的 30 万吨级码头为开敞式布置, 码头前沿线要求船舶停泊时所受外力最小, 即码头轴线方位尽量与风、浪、流的主导方向一致, 并充分考虑与航道、周边水、陆域的衔接, 以及船舶靠、离泊操作方便<sup>[2]</sup>。

结合《北部湾港总体规划(2021—2035年)》, 项目布置于赤沙作业区规划 20 万吨级码头岸线, 码头前沿方位角 0°~180°, 与风、浪、流的夹角较小, 码头前沿线与进港 20 万吨级航道平行, 距 20 万吨级航道边线约 672 m。

开敞的回旋水域为潮汐通道, 存在往复潮流<sup>[3]</sup>, 椭圆回旋水域长轴取 2.5 倍设计船型船长, 短轴取 2.0 倍设计船型船长。根据计算, 远期 30 万吨级船舶回旋水域长轴取 847.5 m, 短轴取 678.0 m, 且占用部分主航道, 回旋水域设计底高程-22.5m<sup>[4]</sup>。设计船型见表 1。

表 1 设计代表船型

船型	总长 L/m	型宽 B/m	型深 H/m	满载吃水 T/m	备注
20 万吨级散货船	312	50	25.5	18.5	设计代表船型
30 万吨级散货船	340	60	30.2	21.1	结构设计船型

## 2 理论研究

### 2.1 水流仿真数值模拟

水流仿真数值模拟通常采用 CARDINAL 通用软件, 可较全面、真实地反映船舶航行、靠离码头作业、船舶泊稳状态以及桥区等复杂水域对船舶操纵的影响等。

### 2.2 船舶运动仿真数学模型

采用计算机数值模拟方法预报船舶操纵性, 需要对船舶动力及外界环境影响进行建模。数学模型总体分为两类: 基于运动方程的数学建模和将船舶作为一个动态系统引入运动响应模型。本模拟采用 NT-PRO 5000 型模拟器, 是基于运动方程的数学模型, 主要将作用于船舶上的流体动力和力矩按照物理意义分解为作用于裸船体、敞水螺旋桨和敞水舵上的流体动力和力矩<sup>[5-6]</sup>, 以及它们之间相互干涉流体动力和力矩, 见图 2。

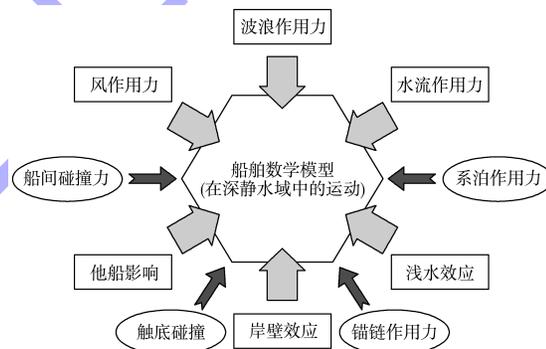


图 2 作用于船舶外部的力

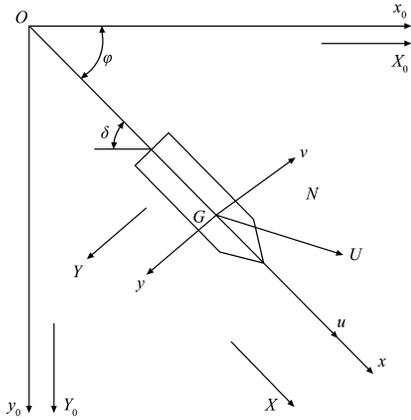
船舶在水中的运动可分为绕船舶重心的 3 类运动, 即横摇、纵倾、偏航, 以及由于复合运动产生的前进、横移和旋回的复合运动<sup>[7]</sup>。

图 3 为船舶航行受力, 为了应用方便, 可将船舶运动方程式转化为船体坐标的表达式, 以船体重心 G 为原点, 船首尾为 x 轴, 垂直于船首尾向为 y 轴, 得到:

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11})\dot{u} - (m + \lambda_{22})vr - (mx_g + \lambda_{26})r^2 = \sum v_x \\ (m + \lambda_{22})\dot{v} + (m + \lambda_{11})ur + (mx_g + \lambda_{26})\dot{r} = \sum v_y \\ (I_z + \lambda_{66})\dot{r} + (mx_g + \lambda_{26})(\dot{v} + ur) = \sum N \end{cases} \quad (1)$$

式中: r 为转头角速度, rad/s; v<sub>x</sub>、v<sub>y</sub> 是船速 v 在

船首尾方向及横向的分量, kn;  $m_x$ 、 $m_y$  为  $x$ 、 $y$  向的附加质量, g;  $m$  为船的质量, kg;  $\lambda$  为各运动分量之间相关的运动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;  $I_z$  为附加惯性矩,  $\text{m}^4$ 。



注:  $x_0, y_0$  为整体坐标轴;  $x, y$  为局部坐标轴;  $X_0$  为作用于船的  $x_0$  轴方向的合力;  $Y_0$  为作用于船的  $y_0$  轴方向的合力;  $X$  为作用于船的  $x$  轴方向的合力;  $Y$  为作用于船的  $y$  轴方向的合力;  $N$  为绕船重心垂直轴的合力矩;  $\varphi$  为船的转头角;  $U$  为船速;  $u$  和  $v$  分别为船速在船首尾方向及横向的分量;  $\delta$  为航行方向与  $x$  坐标轴之间的夹角。

图 3 船舶航行受力

采用通常的水动力模型, 可将  $X$ 、 $Y$ 、 $N$  表达为:

$$\begin{cases} X = X_H + X_R + X_P + X_W + X_{WV} \\ Y = Y_H + Y_R + Y_W + Y_{WV} + Y_{r_i} \\ N = N_H + N_R + N_P + N_W + N_{WV} + N_{\dot{V}r_i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: 下标 H、R、P、W、WV 分别表示裸船体、舵、螺旋桨、风和浪。每一时刻船舶的运动可以通过离散方程逐次积分计算求得对水流的速度, 最终计算出对岸运动的参数, 对岸速度为:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + (u_{x,i} \cos \varphi_i - u_{y,i} \sin \varphi_i) \Delta t \\ u_{x,i+1} = v_{x,i+1} - v_F \cos(\psi_F - \varphi_{i+1}) \\ u_{y,i+1} = v_{y,i+1} - v_F \sin(\psi_F - \varphi_{i+1}) \\ Y_{i+1} = Y_i + (u_{x,i} \sin \varphi_i + u_{y,i} \cos \varphi_i) \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $u_x$ 、 $u_y$  为船对地运动速度在  $x$ 、 $y$  向的分量,  $v_F$  为流速,  $\psi_F$  为水流流向,  $x$ 、 $y$  为船舶重心对地坐标。

### 3 实船验证

#### 3.1 实船试验条件

选定 30 万吨级散货船作为模拟试验主要船

型, 其模型三维视景效果见图 4。

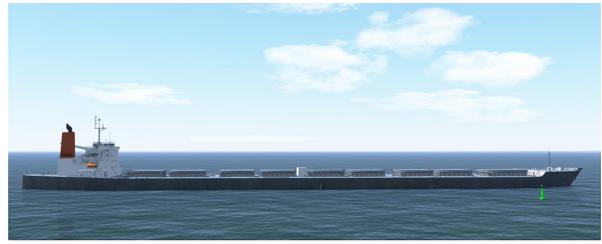


图 4 30 万吨级散货船三维视景效果

选取 NNE、SSW 2 个风向, 6 级风, 波浪方向同风向一致, 波高根据参考资料进行设置: NNE、6 级风时波高 1.3 m; SSW、6 级风时波高 2.0 m。港外进出港航道涨潮最大流速约 87 cm/s, 港内涨潮流速略小于港外, 流向均为  $10^\circ$ ; 港外进出港航道落潮最大流速约 77 cm/s, 港内涨潮流速略小于港外, 流向均为  $185^\circ$ 。

#### 3.2 地质条件

码头水域岩面较高, 平均岩面为  $-12 \sim -11$  m, 主要以强风化粉砂质泥岩、中风化粉砂质泥岩、强风化千枚岩等为主, 炸礁单价高<sup>[8]</sup>, 见图 5。

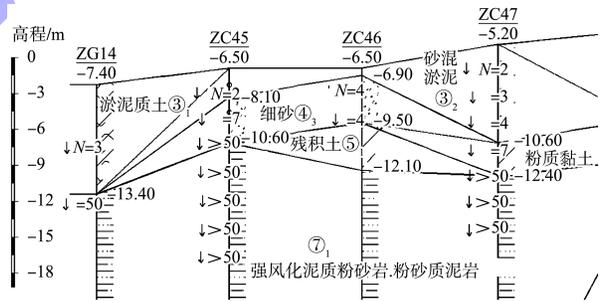


图 5 水域地质剖面

#### 3.3 操船模拟方案

工程水域岩面高、水深浅、疏浚工程投资占总投资的 63.53%, 调整后一期总疏浚工程量相比初步设计(按 20 万吨级船舶回旋圆)工程量减少 212.4 万  $\text{m}^3$ , 其中土类减少 140.0 万  $\text{m}^3$ , 炸礁减少 72.4 万  $\text{m}^3$ , 一期节省工程费用约 3.52 亿元。操船仿真模拟通过加大切入角  $\alpha$  以减小疏浚量, 3 种边线优化角度分别为  $52^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $69^\circ$ <sup>[9]</sup>。

#### 3.4 操船模拟分析

工程原设计回旋水域切入角  $45^\circ$ , 但规范指出, 位于港池顶端泊位的  $\alpha$  可不受上述限制, 根

据规范, 连接水域边线与码头前沿线夹角越小, 越有利于船舶进入港池水域顺靠码头, 可减少靠泊时间, 降低乘潮历时, 从而提高乘潮水位、减少水域疏浚量。

当采用掉头靠离泊时, 1号泊位需通过2号泊

位前方回旋水域, 当  $\alpha$  过大, 船舶切入2号泊位或从2号泊位转入航道时, 由于舵效较差, 风流同侧影响, 极易造成安全隐患, 冲出北边线或冲出主航道, 影响靠泊效率。30万吨级散货船进港靠泊航迹见图6。

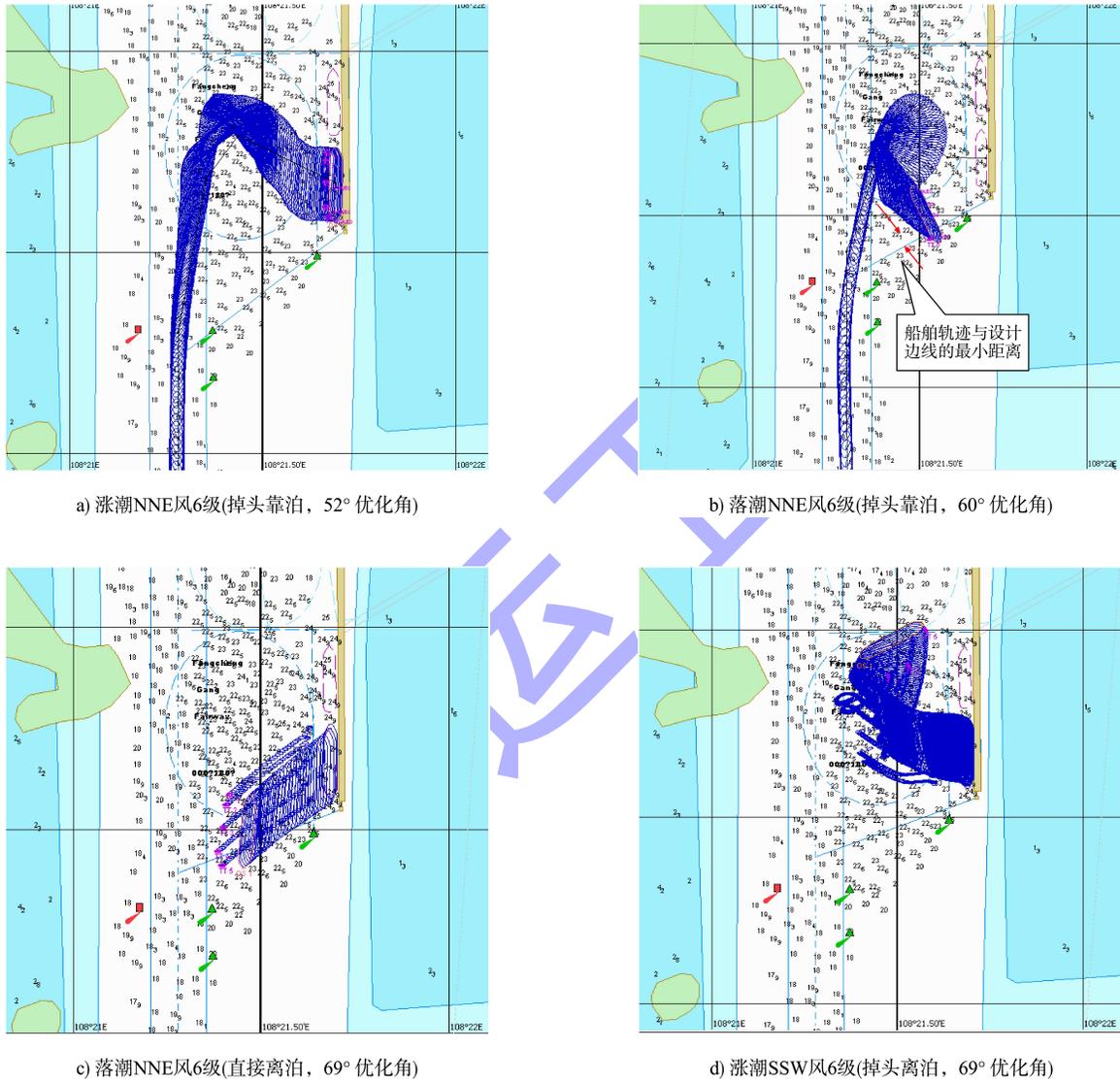


图6 30万吨级散货船进港靠泊航迹

当船舶在码头前沿不掉头直接靠离1号泊位时, 只能横靠或横离, 为非常规操作方式, 极易冲出南边线造成安全隐患, 靠泊效率低下。尤其  $\alpha$  过大, 风流同侧时, 这种横靠方式需拖轮在主航道时就进入协助靠泊, 影响主航道船舶通航。

当靠泊效率降低, 靠泊时间延长时, 将导致乘潮历时增加, 乘潮水位降低, 增加回旋水域疏浚量, 影响工程投资。

3种优化角度方案, 共完成240次船舶靠离泊模拟试验, 每种工况进行5次模拟试验, 见表2。

表 2 30 万吨级散货船模拟试验完成情况

优化角/ (°)	风向	风级	港外 流速	流向	进港/ 出港	完成 情况
52	NNE	6	最大	涨潮	进港掉头靠	成功
	NNE	6	最大	涨潮	进港直接靠	成功
	SSW	6	最大	涨潮	进港掉头靠	成功
	SSW	6	最大	涨潮	进港直接靠	成功
	NNE	6	最大	落潮	进港掉头靠	成功
	NNE	6	最大	落潮	进港直接靠	成功
	SSW	6	最大	落潮	进港掉头靠	成功
	SSW	6	最大	落潮	进港直接靠	成功
	NNE	6	最大	涨潮	出港直接离	成功
	NNE	6	最大	涨潮	出港掉头离	成功
	SSW	6	最大	涨潮	出港直接离	成功
	SSW	6	最大	涨潮	出港掉头离	成功
	NNE	6	最大	落潮	出港直接离	成功
	NNE	6	最大	落潮	出港掉头离	成功
	SSW	6	最大	落潮	出港直接离	成功
	SSW	6	最大	落潮	出港掉头离	成功
60	NNE	6	最大	涨潮	进港掉头靠	成功
	NNE	6	最大	涨潮	进港直接靠	成功
	SSW	6	最大	涨潮	进港掉头靠	2 次失败
	SSW	6	最大	涨潮	进港直接靠	成功
	NNE	6	最大	落潮	进港掉头靠	2 次失败
	NNE	6	最大	落潮	进港直接靠	成功
	SSW	6	最大	落潮	进港掉头靠	成功
	SSW	6	最大	落潮	进港直接靠	成功
	NNE	6	最大	涨潮	出港直接离	成功
	NNE	6	最大	涨潮	出港掉头离	成功
	SSW	6	最大	涨潮	出港直接离	成功
	SSW	6	最大	涨潮	出港掉头离	成功
	NNE	6	最大	落潮	出港直接离	2 次失败
	NNE	6	最大	落潮	出港掉头离	1 次失败
	SSW	6	最大	落潮	出港直接离	成功
	SSW	6	最大	落潮	出港掉头离	成功
69	NNE	6	最大	涨潮	进港掉头靠	成功
	NNE	6	最大	涨潮	进港直接靠	成功
	SSW	6	最大	涨潮	进港掉头靠	2 次失败
	SSW	6	最大	涨潮	进港直接靠	2 次失败
	NNE	6	最大	落潮	进港掉头靠	3 次失败
	NNE	6	最大	落潮	进港直接靠	成功
	SSW	6	最大	落潮	进港掉头靠	成功
	SSW	6	最大	落潮	进港直接靠	成功
	NNE	6	最大	涨潮	出港直接离	成功
	NNE	6	最大	涨潮	出港掉头离	成功
	SSW	6	最大	涨潮	出港直接离	成功
	SSW	6	最大	涨潮	出港掉头离	成功
	NNE	6	最大	落潮	出港直接离	3 次失败
	NNE	6	最大	落潮	出港掉头离	2 次失败
	SSW	6	最大	落潮	出港直接离	成功
	SSW	6	最大	落潮	出港掉头离	成功

由表 2 可见, 52°优化角方案在 6 级风最大涨落潮情况下, 除个别试验失败外, 其他试验均顺利完成; 60°、69°优化角方案由于回旋圈与边线之间的可航水域面积减小, 尤其在风流同侧(即 NNE 风 6 级落潮流最大、SSW 风 6 级涨潮流最大)的条件影响下, 船舶操纵性能降低, 模拟试验的成功率也大大降低。

#### 4 结论

1) 模拟试验表明, 在 6 级大风伴随涨落潮最大情况下, 尤其是在风流同侧(即 NNE 风 6 级落潮流最大、SSW 风 6 级涨潮流最大)且船舶顺流掉头时, 回旋水域相对较小, 除此以外, 回旋水域尺度及其水深条件均满足试验工况下(6 级大风、涨落潮最大流速)的安全靠离泊要求。

2) 52°优化角度方案强风流条件下的船舶轨迹距离设计边线最远, 通航风险最小, 操船性最好, 但是该方案的疏浚范围最大, 施工成本高。

3) 69°优化角方案的疏浚水域面积最小, 施工成本最小, 但由于在强风流条件下船舶轨迹距离设计边线最近, 通航风险最大, 操船性最差。

4) 虽然 60°优化角方案的疏浚水域面积、施工成本、通航风险及操船性等均介于 52°和 69°方案之间, 但在强风流条件下的船舶轨迹距离设计边线对于超大型船舶仍然过小, 其通航风险较高。

#### 参考文献:

[1] 防城港企沙港区赤沙作业区 1 号泊位工程初步设计[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2020.

[2] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

[3] 应翰海, 关宏旭. 福姜沙中水道船舶操纵模拟试验研究[J]. 水运工程, 2020(9): 126-131.

[4] 防城港企沙港区赤沙作业区 1 号泊位工程工程可行性研究报告[R]. 广州: 中交广州水运工程设计研究院有限公司, 2020.