



福州港白马泊位回旋水域的通航研究

江衍煊，李道科，王仙水

(福建船政交通职业学院, 福建福州, 350007)

摘要：为验证福州港新建白马泊位的航道与回旋水域以满足 5 万吨级散货船安全航行的要求, 利用船舶参数与水文气象因素设计了船舶通航的航道, 以野本方程对船舶操纵特性进行研究并获得船舶靠、离泊操纵所需的回旋水域。采用船舶操纵横模拟器仿真航行, 以验证符合相关设计要求。结果表明: 理论设计的航道满足 5 万吨级散货船的航行, 在急流工况下船舶离泊操纵困难, 且在重载掉头离泊时, 出现回旋直径超出设计范围的情况。设置各种通航条件模拟船舶的真实航行, 既可获得在该航道航行的经验, 又验证了航道与回旋水域设计的合理性。

关键词: 泊位; 野本方程; 回旋; 仿真; 通航

中图分类号: U 698

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0160-05

Navigability study of turning water area in Baima berth of Fuzhou Port

JIANG Yanxuan, LI Daoke, WANG Xianshui

(Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: To verify whether the channel and the turning water area of the newly built Baima berth in Fuzhou Port can meet the requirements for the safe navigation of 50,000-ton bulk carriers, this paper uses ship parameters and hydrometeorological factors to design the navigable channel of the ship, and studies the ship's maneuvering characteristics with the Nomoto equation and obtains the turning water area required for ship docking and berthing operation. To verify whether the design meets the requirements, a ship handling simulator is used to simulate the voyage. The results show that the theoretically designed channel meets the requirements for the navigation of 50,000-ton bulk carriers, and there are difficulties in maneuvering under the working conditions of the torrent, and the deviation of the rotation diameter beyond the design occurs when turning away from the berth under heavy-duty. Setting up various navigation conditions to simulate the real navigation of the ship can not only obtain the experience of sailing in the channel, but also verify the rationality of the design of the channel and the turning water area.

Keywords: berth; Nomoto equation; turning water; simulation; navigation

福建省与江西省政府于 2010 年签署了《关于加强闽赣两省海西港口经济合作的框架协议》^[1], 要求位于福州白马港区湾坞作业区 8#泊位作为支持江西进出口的基地。通过对新建靠泊 5 万吨级船舶的白马泊位附属水域进行分析, 根据航行所需条件和船舶回旋水域, 设计了船舶通航的航道与靠离泊需要的回旋水域范围。采用大型船舶操纵横模拟器仿真各种船舶通航, 并依此获得相应船

型通航的数据与轨迹, 证实相关设计的合理性。

1 泊位特点

湾坞作业区位于福建省宁德三都澳内湾, 新建的 8#泊位毗邻 9#~14#泊位, 以直立式海堤为界, 从东侧陆地向西侧海域倾斜。

1.1 水文气象

三都澳内湾为正规半日潮, 最大潮差超过 8 m,

收稿日期: 2022-08-17

作者简介: 江衍煊 (1973—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为船舶通讯导航与智能交通。

涨潮时流速最大为 1.05 m/s, 落潮时流速最大为 1.01 m/s, 表 1 为当地乘潮水位。

表 1 乘潮水位

占比/%	乘潮水位/m				
	乘潮 1 h	乘潮 2 h	乘潮 3 h	乘潮 4 h	乘潮 5 h
70	6.11	5.87	5.50	5.03	4.50
80	5.89	5.68	5.36	4.93	4.42
90	5.62	5.44	5.15	4.76	4.29
95	5.41	5.24	4.97	4.63	4.21

当地泊位特征潮位: 设计高水位为 7.27 m; 设计低水位为 0.57 m; 最高潮位为 8.86 m; 最低潮位为 -0.73 m; 平均涨潮历时 6 h 32 min; 平均落潮历时 5 h 53 min。

1.2 泊位尺寸

泊位按 5 万吨级散货船靠离泊设计, 2 万吨级杂货船和集装箱船也可在此靠泊。泊位处于连续布置的码头泊位端部, 其长度满足船舶安全靠离泊和系缆的要求, 泊位长度按式(1)计算^[2]:

$$L_b = L + 1.5d \quad (1)$$

式中: L_b 为码头泊位长度, m; L 为设计代表船型船长, m; d 为富余长度, m。

表 2 停泊船型尺度

船型	船长/m	船宽/m	型深/m	满载吃水/m
5 万吨级散货船	223	32.3	17.9	12.8
2 万吨级杂货船	166	25.2	14.1	10.1
2 万吨级集装箱船	183	27.6	14.4	10.5

根据表 2 中数据计算码头泊位长度 $L_b = 260.5$ m, 因此设计泊位长度为 270.0 m。

1.3 停泊水域

按照规范码头前沿停泊水域宽度最小取 2 倍代表船型的宽度, 由表 2 得前沿停泊水域宽 64.6 m, 所以停泊水域宽度至少为 65.0 m。船舶靠泊前需为船舶设置制动水域, 制动距离取船长的 3~4 倍, 由表 2 数据得制动距离为 892 m。

1.4 回旋水域水深

船舶回旋水域的水深 D 按式(2)计算:

$$D = T + Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \quad (2)$$

式中: T 为满载吃水量, 取 12.8 m; Z_0 为航行时下沉值, 当设计船航速 6 kn 时取 0.3 m; Z_1 为航

行最小富余水深, 取 0.5 m; Z_2 为波浪富余深度, 取 0.42 m; Z_3 为纵倾富余深度, 取 0.15 m; Z_4 为备淤富余深度, 不小于 0.4 m。

5 万吨级散货船的回旋水深按式(2)计算, $D = 14.57$ m, 回旋水域设计底高程为 -14.0 m, 由设计低水位与回旋水深之差得出。

《三都岛附近乘潮水位表》显示乘潮水位在 5.15 m 历时达 3 h 以上, 而 5 万吨级船舶航行底高程以 -10.0 m 为准, 所以乘潮 4 m 以上满足回旋操纵要求。

1.5 航道宽度

航道有效宽度由航迹带宽度、船舶间富余宽度和船舶与航道底边间的富余宽度组成^[3], 航迹带宽度 A 按式(3)计算:

$$A = n(L \sin \gamma + B) \quad (3)$$

式中: n 为船舶漂移倍数; L 为设计代表船型船长; γ 为风、流压偏角; B 为设计代表船型船宽。当横流速度为 0.13~0.26 m/s 时, n 取 1.69, L 为 223 m, γ 取 7°, B 取 32.3 m。

航道有效宽度 W 按式(4)计算:

$$W = A + 2c \quad (4)$$

式中: A 为航迹带宽度; c 为船舶与航道底边间的富余宽度, 当散货船航速大于 6 kn 时, c 取 1 倍船宽。根据表 2 中 5 万吨级散货船数据, 利用式(3)~(4)计算航迹带宽度 A 为 100.5 m, 航道有效宽度 W 为 165.1 m^[4]。

2 船舶回旋水域

2.1 野本方程推算

船舶运动方程为:

$$I\ddot{r} = M\delta - Nr \quad (5)$$

$$\frac{I}{N}\dot{r} + r = \frac{M}{N}\delta \quad (6)$$

令 $T = I/N$; $K = M/N$; 则式(6)转化为野本方程:

$$Tr + r = K\delta \quad (7)$$

式中: I 为船舶运动时的转动惯性矩; r 为船舶回转角速度; N 为每单位回转角速度的黏性阻矩; Nr 为当船舶回转角速度为 r 时受到的海水黏性阻

力矩； \dot{r} 为回旋角加速度； M 为每单位舵角的回转力矩； δ 为当前船舶的舵角； $M\delta$ 为操舵转 δ 角作用于船舶的力矩； T 为船舶追随性指数； K 为船舶回旋性指数。

T 为船舶转动惯量/单位角速度回旋阻尼， T 值小则操舵后船舶的转向角加速度初始值较大，较快地向某一确定的转向角趋近。船舶操舵后，每经过 t' 时间转向角加速度减少 37%，直达到到固定转向角速度为止^[5]。

K 为单位舵角回旋力矩/单位角速度回旋阻尼，表示船舶每单位舵角给出的转向角速度值。 K 值大表示回旋性好，即操舵后转向的加速度初始值较高，可获取较大的转向角（图 1）。

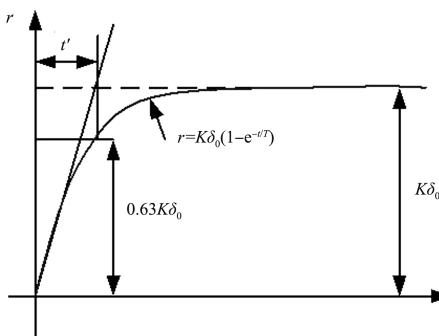


图 1 操舵后转向角的变化

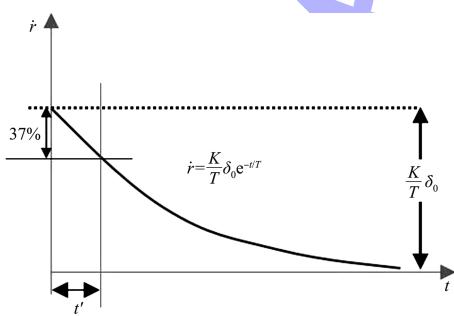


图 2 转向角加速度随时间变化

船舶处于保速保向的初始条件为 $t=0$ 、 $\delta=\delta_0$ 、 $r=0$ 时，船首转向角速度方程为：

$$r = K\delta_0(1 - e^{-r_0/T}) \quad (8)$$

船首转角加速度为：

$$\dot{r} = \frac{K}{T}\delta_0 e^{-r_0/T} \quad (9)$$

船首转向角为：

$$\varphi = K\delta_0(1 - T e^{-r_0/T}) \quad (10)$$

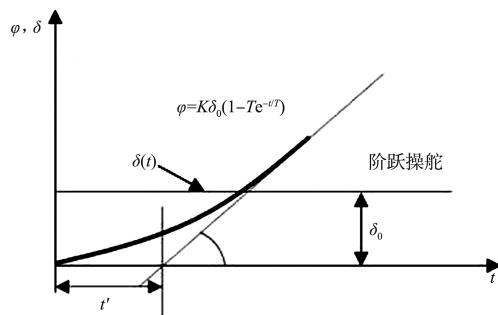


图 3 操舵后转向角和舵角的变化

船舶转舵延时 t_1 之后船首转向为：

$$\varphi = K\delta_0(1 - T e^{-r_0/T}) \Big|_{t_1}^{t_1} = K\delta_0(T - e^{-r_0/T}) \quad (11)$$

2.2 回旋半径

图 4 定常回旋运动中回旋角速度 $r_0 = K\delta$ ，则定常回旋圈半径 $R = V/r_0 = V/(K\delta)$ ，船舶由于惯性所产生的滑行距离为滞距 R_e ，见图 4 中 GB 段^[6]。根据 5 万吨级散货船参数计算得回旋圆直径为 446 m。泊位长度、栈桥的尺寸和船舶靠泊时操纵所需的回旋区域，见图 5。

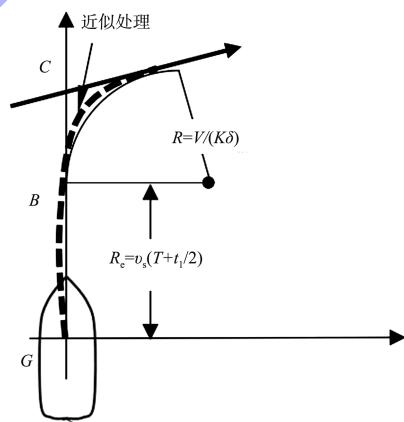


图 4 操舵后的运动曲线

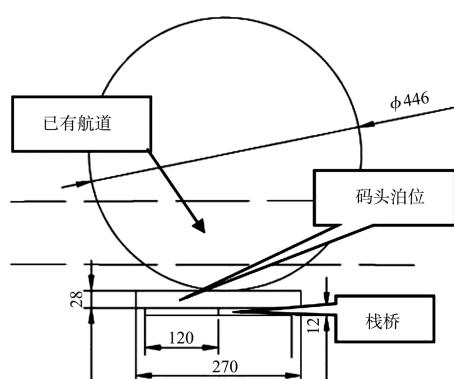


图 5 泊位俯瞰 (单位: m)

船舶靠离码头设置船舶回旋水域时需考虑当地风、浪、水流等条件以及港作拖轮配置、定位标志等因素^[7]。操舵后船舶根据 K 、 T 指数获得船舶操纵运动曲线, 考虑船舶吃水、水深、船型等因素, 变化趋势为: 舵角增加或尾倾增加或水深变浅, K 、 T 均同时减小; 吃水增加或船型肥大, K 、 T 均同时增大。

3 仿真操作验证

理论推算数据具有局限性, 航行中各种极端天气无法完全考虑周全, 当多种情况同时发生时, 最好采用仿真航行验证设计通航的可行性。要求经验丰富的资深船长利用大型船舶操纵模拟器仿真当前水域环境进行船型通航, 并对产生的数据进行分析。试验水域海图及代表船型均进行数字化设置, 以 5 万吨级散货船在航道航行及靠离码头, 要求真实模拟在车、舵、锚、缆、拖轮共同作用下, 依据当地相关的水文信息模拟各种工况并获得船舶仿真操纵数据^[8]。当前试验工况要素包括: 1) 风向为西南偏西风 5 级、东南风 6 级和偏北风 7 级 3 种。2) 流向取航道走向、涨潮和落潮流向。3) 流速为 1.03、0.51 和 0.26 m/s 3 种。4) 船舶载重按重载与压载进行靠、离码头。5) 配置 2 艘 2 205 kW 的全回转型拖轮。

3.1 航道宽度

以 5 万吨级散货船按照 5 种工况进行航道试航: 1) 重载进港航行、西南偏西风 5 级、涨潮、流速 0.51 m/s; 2) 压载进港航行、东南风 6 级、涨潮、流速 0.51 m/s; 3) 压载出港航行、东南风 6 级、落潮、流速 0.51 m/s; 4) 重载出港航行、西南偏西风 5 级、落潮、流速 0.51 m/s; 5) 重载进港航行、偏北风 7 级、落潮、流速 0.51 m/s。试验测得航道宽度最大平均值为 109.2 m, 设计航道符合要求。

3.2 船舶靠泊

仿真设备可以将船舶当前航行区域的海图数字化, 将拖轮、缆绳、风、流和浪等都进行数字化, 根据当地历年可能出现的风、流特点设置船舶 5 种工况靠泊: 1) 重载直靠、东南风 6 级、风向

135°、流向 160°、落潮、流速 0.26 m/s(工况 1); 2) 重载直靠、西南偏西风 5 级、风向 237°、流向 160°、落潮、流速 0.26 m/s(工况 2); 3) 重载直靠、偏北风 7 级、风向 015°、流向 160°、落潮、流速 0.26 m/s(工况 3); 4) 压载掉头靠、东南风 6 级、风向 135°、流向 340°、涨潮、流速 0.26 m/s(工况 4); 5) 压载掉头靠、西南偏西风 5 级、风向 237°、流向 340°、涨潮、流速 0.26 m/s(工况 5)。

在靠泊工况 4 下 5 万吨级船舶靠泊轨迹见图 6, 散货船靠泊 1~8 次时, 回旋直径分别为 405、400、387、392、419、415、371、388 m。



图 6 靠泊工况 4 掉头靠泊轨迹

3.3 船舶离泊

仿真操纵模拟器将船舶相关信息进行数字化, 船舶的 7 种离泊工况: 1) 重载直离、西南偏西风 5 级、风向 237°、流向 160°、落潮、流速 0.26 m/s(工况 1); 2) 压载直离、东南风 6 级、风向 135°、流向 340°、急涨潮、流速 1.03 m/s(工况 2); 3) 重载掉头离、东南风 6 级、风向 135°、流向 340°、急涨潮、流速 1.03 m/s(工况 3); 4) 重载掉头离、西南偏西风 5 级、风向 237°、流向 160°、落潮、流速 0.26 m/s(工况 4); 5) 压载掉头离、偏北风 7 级、风向 015°、流向 160°、落潮、流速 0.26 m/s(工况 5); 6) 压载掉头离、东南风 6 级、风向 135°、流向 340°、急涨潮、流速 1.03 m/s(工况 6); 7) 压载掉头离、西南偏西风 5 级、风向 237°、流向 160°、落潮、流速 0.26 m/s(工况 7)。

在离泊工况 3 下 5 万吨级船舶离泊轨迹见图 7, 散货船离泊 1~8 次时, 回旋直径分别为 444、435、412、421、469、420、455、438 m。

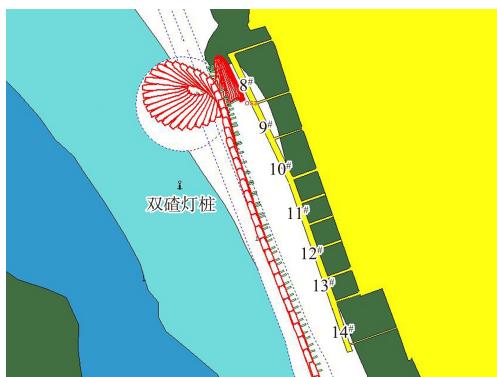


图 7 离泊工况 3 离泊轨迹

3.4 通航问题

船舶在离泊仿真操作发现在急涨潮、流速 1.03 m/s、风力 6 级条件下，5 万吨级船型掉头离泊操纵较为困难，需谨慎操作或尽量选择缓流时离泊。5 万吨级散货船在离泊工况 3 下，回旋水域尺寸在试验过程中 2 次超出了范围，因为急涨潮流速大，船舶在回旋操纵过程中容易向上游方向偏移，导致实际航行直径超出理论设计的圆形回旋水域，因此 5 万吨级船舶在急涨潮情况下尽量避免掉头回旋方式离泊，选择缓流时段离泊，或选择椭圆形回旋水域。当风、流控制航速在 6 kn 以内时，5 万吨级散货船在进港靠、离泊航行时应配备 2 艘 2205 kW 以上的全回转型拖轮协助靠离泊。

4 结论

1) 通过仿真航行证实了原设计航道的宽度正确可靠。

(上接第 148 页)

参考文献：

- [1] 交通运输部. 长江干线航道总体规划纲要 [R]. 北京: 交通运输部, 2009.
- [2] 黄成涛, 江凌. 长江干线武汉至安庆段 6 m 水深航道整治工程初步设计报告 [R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2017 年.
- [3] 张明进, 张华庆, 刘万利, 等. 长江中游戴家洲河段航道整治工程数值模拟研究 [J]. 水道港口, 2008, 29(3): 193-198.
- [4] 殷红, 伍文俊, 蔡大富, 等. 典型分汊河段航道整治鱼骨坝工程设计方法 [J]. 水运工程, 2012(10): 41-46, 56.

2) 仿真操纵过程中，在急涨潮时操纵困难，从中获得在该状态的操纵经验。

3) 在某一特殊的情况下进行船舶离泊操作时，回旋区超出设置界限，验证了理论设计的数据受到外界影响后存在不满足的可能。

4) 操纵模拟器进行仿真操纵避免了现场船舶驾驶的危险与繁重的人工工作。

参考文献：

- [1] 关于加强闽赣两省海西港口经济合作的框架协议. 网易新闻 [EB/OL]. (2010-09-07) [2022-06-11]. <https://www.163.com/news/article/6FUKSMLP00014JB5.html>.
- [2] 温清洪. 泊位设计尺度与设施靠泊安全性分析 [J]. 天津航海, 2022(1): 65-67.
- [3] 周丽丽, 柳良伟, 王若晨. 基于仿真实验的头门港进港航道宽度有效性分析 [J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2018, 19(4): 34-39.
- [4] 王仙水, 陈宏. 30 万吨级散货船在罗源湾南航道的进出港可行性分析 [J]. 南通航运职业技术学院学报, 2017, 16(3): 26-29.
- [5] 张彬. 船舶操纵性指数 K/T 计算方法及其应用研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2015.
- [6] 傅大平, 邵志伟. 满载超大型船舶在弯道突遭浓雾时的安全转向 [J]. 航海技术, 2019(1): 43-47.
- [7] 罗刚, 杨希宏, 秦福寿. 海港总平面设计规范中的设计船型尺度修订特点 [J]. 港工技术, 2003(2): 16-17.
- [8] 郑友赋, 神和龙, 陈宏, 等. 平潭海峡大桥桥区船舶通航安全模拟试验关键技术分析 [J]. 船海工程, 2013, 42(5): 126-129.

(本文编辑 赵娟)

- [5] 邓中辉, 黄蓓蓓, 刘林双. 分流比相当的典型分汊河段航道治理方案研究 [J]. 中国水运(上半月), 2020(6): 88-91.
- [6] 叶志伟, 刘玉娟, 杜勇. 新水沙条件下长江中游戴家洲河段 6 m 水深航道治理思路 [J]. 水运工程, 2021(11): 116-122, 133.
- [7] 黄成成. 武安段整治工程戴家洲鱼骨坝工程效果分析与评估 [C]//中国航海学会内河海事专业委员会 2021 年学术年会优秀论文集. 宁波: 中国船级社浙江分社, 2021: 7-10.

(本文编辑 王传瑜)