

# 大型 LNG 船舶进出港航道适应性模拟仿真研究

赵 晶

(江苏航运职业技术学院 航海技术学院, 江苏 南通 226010)

**摘 要:** LNG 船是一种危险品货物运输船舶, 若在港区内发生碰撞、搁浅而发生泄漏事故, 将对港区产生巨大的危害。为确保 LNG 船进入港区的航行安全, 构建了基于风、流作用下大型 LNG 船舶漂移量数学计算模型, 利用 360°大型船舶操纵模拟器模拟 LNG 船舶进出港航行, 对比分析 LNG 船舶在不同工况下对航道宽度的要求, 进而得到 LNG 船舶进出港航行限制性工况条件, 为 LNG 船舶驾引人员进出港航行提供参考。

**关键词:** LNG 船; 进出港; 操纵; 模拟仿真

**中图分类号:** U675.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2097-0358(2023)4-0035-05

## 0 引言

LNG 船舶运输不同于常规的海上运输, 具有高风险。LNG 船舶进出港航行对航道要求较高, 不允许其他船舶横越 LNG 船舶进出港航道, 因此有必要对 LNG 船舶进出港航行时的操纵技术进行研究。船舶模拟仿真所采用的三维视景可直接反映船长、驾驶员、引航员在驾驶台所看到的航道、LNG 船舶进出港航行及 LNG 码头实景,<sup>[1]</sup>为驾引人员熟悉航道、进出港航行及靠离泊提供了条件。基于此, 本文构建了基于风、流作用下大型 LNG 船舶漂移量计算模型, 了解 LNG 船舶在不同工况下对航道宽度的要求, 分析得出 LNG 船舶进出港航行时限制条件<sup>[2]</sup>, 为船长及引航员操纵 LNG 船舶进出港航行提供参考。

## 1 船舶漂移量数值计算模型

本文构建的大型 LNG 船舶进出港航行漂移量计算模型主要由四个部分组成, 分别是无风、流情况下 LNG 船舶航迹带宽度  $B_1$ , LNG 船舶进出港航行中风致漂移量  $B_F$ , LNG 船舶进出港航行中流致漂移量  $B_L$  和 LNG 船舶进出港航行中由偏航角引起的航迹带宽度增加量  $B_P$ 。这四个部分组成 LNG 船舶在有风、流作用下所需航道宽度数值计算模型, 如图 1 所示。

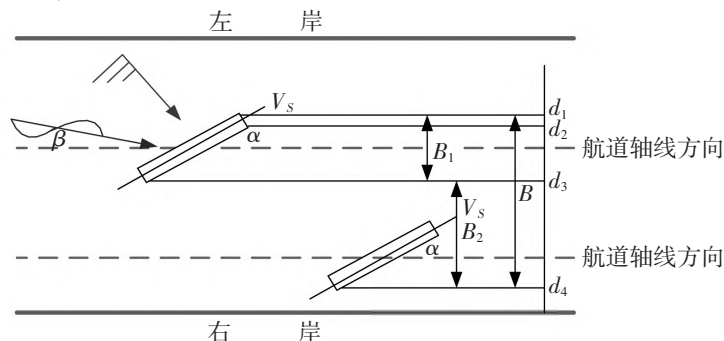


图 1 船舶漂移量数学模型

(1) 无风、流情况下 LNG 船舶航迹带宽度  $B_1$ 。LNG 船舶在无风、流的情况下进出港航行的航迹带宽度  $B_1$

收稿日期: 2022-08-27

基金项目: 江苏航运职业技术学院科技类项目 (HYKY/2022B05)

作者简介: 赵晶 (1976—), 男, 江苏南通人, 江苏航运职业技术学院航海技术学院讲师、船长, 硕士。

可按下式进行计算:

$$B_1 = d_1 d_2 + d_2 d_3 = B \cos \alpha + L \sin \alpha \quad (1)$$

(2) LNG 船舶进出港航行中风致漂移量  $B_F$ 。考虑在极限的情况下 (LNG 船舶正横受风, 其风舷角为  $90^\circ$ ), 风对船舶的作用力最大, 则船舶航行中风致漂移速度  $V_F$  可由下式计算得出:

$$V_F = K \cdot \left( \frac{B_\alpha}{B_w} \right)^{1/2} \cdot e^{-0.14 V_s} \cdot V_\alpha \quad (2)$$

式中:  $K = \left( \frac{\rho_\alpha C_\alpha}{\rho_w C_w} \right)^{1/2}$ , 一般取 0.038~0.041;  $B_\alpha$  为船体水线上侧受风面积,  $B_\alpha = c_2 L_{BP}^2$ , 其中  $c_2$  为系数,  $L_{BP}$  为船舶垂线间长, 在估算时以设计船长代替; 对本工程代表船型, 满载时可用  $B_\alpha = (h - d) \times L$  代替, 其中  $h$  为船舶型深<sup>[3]</sup>;  $B_w$  为船体水线下侧面积, 取  $B_w = L \cdot d$ ,  $L$  为设计船长,  $d$  为船舶吃水;  $V_s$  为船速;  $V_\alpha$  为相对风速。

因此, LNG 船舶进出港航行中受风影响情况下的漂移量  $B_F$  可用下式计算:

$$B_F = K \sqrt{B_\alpha / B_w} e^{-0.14 V_s} V_\alpha \frac{S}{V_s \cos \alpha \pm V_w \cos \beta} \quad (3)$$

(3) LNG 船舶进出港航行中流致漂移量  $B_L$ 。LNG 船舶进出港航行在各种水流共同作用下的流致漂移量  $B_L$  可用下式计算:

$$B_L = V_{wL} \frac{S}{V_s \cos \alpha \pm V_w \cos \beta} \quad (4)$$

式中:  $V_w$  为水流流速;  $V_s$  为船速;  $V_{wL}$  为横向流速;  $\alpha$  为船首尾线与  $X$  轴的夹角, 称为偏航角;  $S$  为计算河长。

(4) LNG 船舶进出港航行中由偏航角引起的航迹带宽度增加量  $B_p$ 。偏航角所引起的航迹带宽度的增加量  $B_p$  可用下式进行计算:

$$B_p = V_s \sin \alpha \frac{S}{V_s \cos \alpha \pm V_w \cos \beta} \quad (5)$$

(5) LNG 船舶进出港航行中航迹带宽度  $B$ 。综上所述, LNG 船舶进出港航行过程中在最为不利的风流组合下, LNG 船舶进出港航行时所需的航迹带宽度应为:

$$B = B_1 + B_2 = |L \sin \alpha + B \cos \alpha| + |B_F| + |B_L| + |B_p| \quad (6)$$

## 2 LNG 船舶及航路概况

本文研究对象为某 260 000 m<sup>3</sup> LNG 船, 该船船长 332 m、型宽 51 m、型深 30 m、满载吃水 13.5 m。本文模拟仿真该 LNG 船舶进出港航行所需航道宽度与船舶漂移量计算模型计算结果, 并对其进行对比分析。

本项目 LNG 船舶自外海航行至老铁山水道, 从老铁山水道转向点北纬 38°37.3'N、东经 120°55.0'E 处转向, 航向 276°, 至北纬 38°48.5'N、东经 118°44.5'E, 然后转向 278°, 航行至曹妃甸港区附近的警戒区, 进入警戒区航行至北纬 38°50.2'N、东经 118°32.5'E 时, 逐步调整航向至 018°, 航行到北纬 38°51.8'N、东经 118°32.3'E 时, 可利用曹妃甸东侧锚地的边界浮为参照物, 直至 LNG 码头前沿回旋水域。进出港航道宽度设计为 350 m, 航道设计水深为 15.7 m。

## 3 基于船舶漂移量计算模型对 LNG 船舶进出港航行的研究

根据 LNG 船舶漂移量数值计算模型, 可以计算出本项目 LNG 船舶进出港航行时对航道的要求, 从而判断进出港航道宽度是否满足船舶安全通航要求。根据大型船舶进出港航行时航速一般控制在 10 kn 以下, 在不利风、流条件 (船舶正横受风时) 下, 分别讨论在风力为 4 级、5 级、6 级、7 级, 船速为 10 kn、8 kn、6 kn、4 kn, 偏航角为 3° 情况下的 LNG 船舶航行所需航道宽度, 结果如表 1 所示。

(1) 本项目 LNG 船舶进出港航行时, 建议船舶偏航角控制在 3°, 应做到及时调整船舶偏航角, 使船舶航向保持在进出港航道中轴线上。

(2) 本项目 LNG 船舶进出港航行时, 船速应尽可能在 8 kn~10 kn, 但不能高于 10 kn, 以满足曹妃甸港区对 LNG 船舶进出港航速的要求。

(3) 本项目 LNG 船舶进出港航行时, 应选择风况较好的天气情况下合理安排 LNG 船舶进出港航行作业, 建议当风速在 6 级以上时禁止 LNG 船舶进出港航行。

(4)本项目 LNG 船舶进出港航行时,应确保本项目 LNG 船舶进出港航道为单向通航,避免与任何其他船舶构成会遇局面,同时海事部门应研究制定 LNG 船舶进出港交通组织方案及护航方案。

表 1 260 000 m<sup>3</sup>LNG 船舶单向航行的漂移量及所需航道宽度

船速	流	风	航迹带宽/m	所需航道宽度 (航迹带宽+ 2 倍富裕宽度)/m	判断 (航道宽度 350 m)
10 kn	航段 018°/198°	4 级	143.18	245.18	√
	(流速 0.875 m/s,	5 级	145.01	247.01	√
	流向 251°)	6 级	147.04	249.04	√
	涨潮	7 级	149.20	251.20	√
	(流速 0.997 m/s,	4 级	143.65	245.65	√
	流向 059°)	5 级	145.58	247.58	√
	落潮	6 级	147.71	249.71	√
		7 级	149.99	251.99	√
8 kn	航段 018°/198°	4 级	160.69	262.69	√
	(流速 0.875 m/s,	5 级	163.42	265.42	√
	流向 251°)	6 级	166.43	268.43	√
	涨潮	7 级	169.64	271.64	√
	(流速 0.997 m/s,	4 级	162.49	264.49	√
	流向 059°)	5 级	165.39	267.39	√
	落潮	6 级	168.61	270.61	√
		7 级	172.04	274.04	√
6 kn	航段 018°/198°	4 级	192.51	294.51	√
	(流速 0.875 m/s,	5 级	196.92	298.92	√
	流向 251°)	6 级	201.80	303.80	√
	涨潮	7 级	207.00	309.00	√
	(流速 0.997 m/s,	4 级	198.18	300.18	√
	流向 059°)	5 级	203.02	305.02	√
	落潮	6 级	208.37	310.37	√
		7 级	214.08	316.08	√
4 kn	航段 018°/198°	4 级	267.54	369.54	×
	(流速 0.875 m/s,	5 级	276.06	378.06	×
	流向 251°)	6 级	285.49	387.49	×
	涨潮	7 级	295.53	397.53	×
	(流速 0.997 m/s,	4 级	290.68	392.68	×
	流向 059°)	5 级	300.68	402.68	×
	落潮	6 级	311.75	413.75	×
		7 级	323.53	425.53	×

4 基于船舶操纵模拟器对 LNG 船舶进出港航行模拟分析

江苏航运职业技术学院拥有大型船舶操纵模拟器,模拟环境可选用船上所使用的海图,采用国际通用的数字化手段,建立模拟当地水工环境及进出港航道环境等海图,并根据工程所在地区的水文气象概况进行模拟船舶进出港航行环境条件,同时模拟船舶航行环境可以人工进行输入设定<sup>[4]</sup>。本项目 LNG 船舶所需航道宽度模拟仿真结果如表 2 所示,设计最大船型 260 000 m<sup>3</sup> LNG 船舶在 4 级风条件下航迹带宽度为

165 m 以下,在 6 级风条件下航迹带宽度为 220 m 以下。从安全角度考虑,LNG 船距离航道边界保持一倍船宽时,所需航道宽度为 322 m。因此,进港航路宽度设计为 350 m,能够满足设计最大船型 260 000 m<sup>3</sup>LNG 船在 6 级及以下风条件进出港安全航行的需要。

表 2 模拟仿真 260 000 m<sup>3</sup>LNG 船进出港航行所需航道宽度

编号	风流				航迹带宽度/m	所需航道宽度 (航迹带宽+ 2 倍富裕宽度)/m
	风向	风级	流向	流速		
1	097	4	涨潮	各测点最大垂线平均流速	153	255
2	277	4	涨潮	各测点最大垂线平均流速	132	234
3	097	6	涨潮	各测点最大垂线平均流速	184	286
4	277	6	涨潮	各测点最大垂线平均流速	200	302
5	097	4	落潮	各测点最大垂线平均流速	158	260
6	277	4	落潮	各测点最大垂线平均流速	165	267
7	097	6	落潮	各测点最大垂线平均流速	186	288
8	277	6	落潮	各测点最大垂线平均流速	220	322
9	097	6	涨潮	各测点最大垂线平均流速	185	287
10	277	6	涨潮	各测点最大垂线平均流速	195	297
11	097	6	落潮	各测点最大垂线平均流速	186	288
12	277	6	落潮	各测点最大垂线平均流速	198	300
13	097	4	涨潮	各测点最大垂线平均流速	146	248
14	277	4	涨潮	各测点最大垂线平均流速	138	240
15	336	6	涨潮	各测点最大垂线平均流速	188	290
16	156	6	涨潮	各测点最大垂线平均流速	192	294

注:1.模拟试验工况为设计最大船型 260 000 m<sup>3</sup>LNG 船舶重载进港、空船压载离港。

2.进港的 LNG 船舶在通航分道航行的船速为 10 kn(主机 Half Ahead),转向进入 LNG 进港航路航向稳定后主机降为 Dead Slow Ahead,由于大幅度转向导致船速下降至约 6 kn(主机 Dead Slow Ahead),舵效差时,适当加车以提高舵效。

## 5 航迹带宽度对比分析

将根据本文构建的船舶漂移量计算模型与大型船舶操纵模拟器对本项目 LNG 船舶进出港航行所需航道宽度进行多次模拟测试结果进行对比,具体如图 2 所示。本项目 LNG 船舶进出港航道宽度为 350 m,完全可以满足 260 000 m<sup>3</sup>LNG 船舶进出港对航道宽度的需求。通过对基于船舶漂移量计算模型和船舶操纵模拟器仿真结果的对比可知,两者结果相差不大,都能够比较客观地反映出 LNG 船舶进出港航行所需航道宽度,计算结果可以为船舶驾引人员进出港航行提供参考。

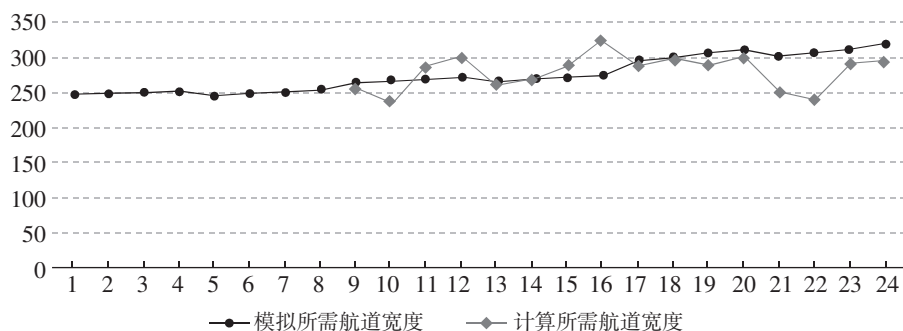


图 2 260 000 m<sup>3</sup>LNG 船舶进出港航行所需航道宽度对比

## 6 结束语

本文运用船舶模拟仿真技术对大型 LNG 船舶进出港航行过程进行动态模拟,并提出具有针对性、预见性和可操作性的安全操纵技术建议。同时,本文运用船舶漂移量计算模型对大型 LNG 船舶进出港航行过程中对航道宽度的校验,根据现有航道宽度提出大型 LNG 船舶航行限制性工况(风、流)条件,建议在风速 6 级以上的情况下禁止 LNG 船舶进出港航行,应选择风况较好的天气情况下合理安排作业,同时将船速尽可能地控制在 8 kn~10 kn,以确保大型 LNG 船舶进出港航行安全。

## 参考文献:

- [1]边晓丽,严庆新,陈立家.海港航道设计宽度模拟试验研究[J].水运工程,2013(9):99-102.
- [2]阮馨,郭国平,吴兵.大型 LNG 船舶在航宽受限航道航行关键技术[J].航海技术,2021(4):1-5.
- [3]赵仓龙.AIS 与雷达信号数据融合在船舶避碰系统中的应用[J].舰船科学技术,2022(12):169-172.
- [4]赵吉东.天津港大港港区 LNG 船舶进出港操纵方案[J].天津航海,2018(3):13-16.

(责任编辑:张 利)

# Study on Adaptive Simulation for a Large LNG Ship Entering and Leaving a Port Channel

ZHAO Jing

(School of Nautical Technology, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China)

**Abstract:** A LNG ship is a kind of dangerous goods transportation ship, if LNG ships' collision, grounding and leakage accidents occur in a harbor area, it will cause significant harm to the harbor area. In order to ensure a LNG ship's navigation safety in the harbor area, a mathematical calculation model based on the drift amount of a large LNG ship under the effect of wind and current is constructed. Using 360° large ship handling simulator to simulate the LNG ship entering and leaving a port, a comparative analysis is carried out by simulating the LNG ship in different working conditions on channel width requirements, and then the restrictive conditions for the LNG ship entering and leaving the port can be derived, which provides theoretical reference for those navigating and piloting the LNG ship to enter and leave the port.

**Key words:** LNG ship; entering and leaving port; maneuvering; simulation