

文章编号:1000-4653(2025)01-0009-09

# 码头水域受限下大型液化天然气船舶应急拖船部署研究

赵兴亚<sup>1,2</sup>, 李梦霞<sup>3,4,5</sup>, 吕浩然<sup>1,2</sup>, 陈志良<sup>6</sup>, 牟军敏<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063;

3. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;

4. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063;

5. 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;

6. 温州港引航站, 浙江 温州 325000)

**摘要:**为研究码头受限水域大型液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)船舶失控下的拖船安全部署,保障港口码头作业安全,研究采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析方法,基于风流干扰模型,通过模拟不同工况下大型LNG船舶的漂移过程,计算水动力学参数,确定应急拖船部署策略。以温州小门岛水域为案例研究对象,重点分析Q-max LNG船舶在工况下突发失控情况的船舶运动过程,并计算了漂移距离,用于指导拖船的紧急部署。研究表明:通过CFD分析,能明确不同工况下的拖船应急部署策略。该研究为大型LNG船舶在港口运输中的安全提供科学支持,为港口管理部门提供有效的应急决策依据,以确保港口和航运行业的安全运营。

**关键词:**大型LNG船舶;不同工况;船舶失控;拖船部署;码头水域受限

中图分类号:U676.8+1

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.002

## Study on the deployment of emergency tugs for large liquefied natural gas vessels under restricted terminal waters

ZHAO Xingya<sup>1,2</sup>, LI Mengxia<sup>3,4,5</sup>, LYU Haoran<sup>1,2</sup>, CHEN Zhiliang<sup>6</sup>, MOU Junmin<sup>1,2</sup>

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430063, China; 3. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

4. Intelligent Transportation System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

5. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China;

6. Wenzhou Pilot Station, Wenzhou 325000, China)

**Abstract:** In order to study the safe deployment of tugboats under the uncontrolled situation of large LNG (Liquefied Natural Gas) ships in the dock-constrained waters, and to ensure the safety of port terminal operations, the study adopts the CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis method, based on the wind flow interference model, and calculates the hydrodynamic parameters and determines the emergency tugboat deployment strategy by simulating the drift process of the

收稿日期:2023-11-24

基金项目:国家重点研发计划(2023YFE0203700);国家自然科学基金(52271367)

作者简介:赵兴亚(1990—),男,博士研究生,研究方向为船舶自主航行。E-mail:zhaoxingya@whut.edu.cn

通信作者:李梦霞(1994—),女,助理研究员,博士,研究方向为船舶自主避碰决策研究。E-mail:limx@whut.edu.cn

引用格式:赵兴亚,李梦霞,吕浩然,等.码头水域受限下大型液化天然气船舶应急拖船部署研究[J].中国航海,2025,48(1):9-17.

ZHAO X Y, LI M X, LYU H R, et al. Study on the deployment of emergency tugs for large liquefied natural gas vessels under restricted terminal waters[J]. Navigation of China, 2025, 48(1): 9-17. (in Chinese)

large LNG ship under different working conditions. Taking Wenzhou Xiaomendao as a case study object, the study focuses on analyzing the ship motion process of Qmax LNG ship under the working condition of sudden loss of control, and calculates the drift distance, which is used to guide the emergency deployment of tugboats. The results of the study show that the emergency deployment strategy of tugboat under different working conditions can be clarified by CFD analysis. This study provides scientific support for the safety of large LNG vessels in port transportation and provides an effective basis for emergency decision-making for port management to ensure the safe operation of ports and shipping industries.

**Key words:** large LNG ships; different operating conditions; ship out of control; tug deployment; terminal water constraints

随着全球能源结构的转变和清洁能源需求的增长,液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)作为一种高效、清洁的能源,受到各国的广泛关注和重视。据统计预测(英国石油公司,2018年),世界天然气消费量将以年均1.6%的速度增长,到2040年在能源消费结构中约占1/4。随着天然气需求日益增长,LNG船舶发展迅猛,标准化、大型化趋势明显。市场主流的17万~18万 $\text{m}^3$ 的LNG船长为300 m,宽约46 m,而舱容26.6万 $\text{m}^3$ 的Q-Max超大型LNG船总长则达到了345 m,型宽有54 m。这给许多狭窄受限水域发展LNG码头泊位带来很大的挑战。由于LNG自身的易燃、易爆等特殊性和危害性,一旦发生事故将给港口周边水域带来灾难性的后果<sup>[1]</sup>。

从1964—2010年以来<sup>[2]</sup>,根据挪威船级社(Det Norske Veritas, DNV)多年对LNG事故的跟踪研究,记录的LNG船舶事故约191起,除去34起非典型事故,由恶劣天气引起的事故占5.3%,为9起,而由装备及机械失灵引起的事故占35.3%,为59起<sup>[3]</sup>。汪金辉等<sup>[4]</sup>采用新兴热点分析技术对LNG船舶事故热点的时空趋势进行识别和分类,并与核密度估计的结果进行对比,显示中国、日本和韩国的区域事故集中程度在不断变化。LNG船舶航行安全风险管控逐渐受到重视,郭开华等<sup>[5]</sup>基于贝叶斯网络进行安全分析,获得LNG船舶内河航行定量风险管控条件,为LNG内河船运规划和管理提供了依据。牛东翔等<sup>[6]</sup>利用层次分析法建立10个评价指标,量化船舶在港作业的表现,为客观真实地评价LNG船舶运营管理情况。戴厚兴等<sup>[7]</sup>对恶劣天气的海上交通安全风险的研究,为海上交通安全监管提供参考。关于安全领域的研究,多倾向于定性探讨或宏观分析,难以有效应对港口水域空间有限与LNG船舶操作安全需求之间的根本冲突。

大型LNG船舶在靠离泊过程中,船速低,舵效差,加上一些恶劣天气条件下,船舶操纵困难,容易失控,进而引发碰撞等事故。王海翔<sup>[8]</sup>考虑到Q-Max型LNG船巨大的受风面积,开展了横风对Q-

Max型LNG船靠离泊影响及安全对策。在恶劣天气条件下,KIM等<sup>[9]</sup>通过计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)对低速船舶的操纵性进行系统的数值模拟。刘铁华等<sup>[10]</sup>通过船舶子系统、环境子系统和拖船子系统之间的有机组合,通过模拟试验研究船舶靠离江苏洋口港,确定Q-Max型LNG船舶靠离洋口港LNG码头的限制条件,管控Q-Max型LNG船舶在靠离洋口港的作业中存在的风险问题。黄明等<sup>[11]</sup>总结引航机构的靠离泊操作经验,通过虚拟仿真和实船验证了LNG船舶靠离泊操作的可行性。王超峰等<sup>[12]</sup>对船舶失控漂移建模方法,计算出不同工况下船舶失控后的碰撞概率。对于船舶失控后的应急处置,罗立科等<sup>[13]</sup>通过对船舶在港内失控的常见类型进行分析论述,阐明各类型船舶失控的应对措施以及拖船的操作方法。

因此,LNG船舶靠离泊,特别是在一些受限的港口水域,为应对可能出现的失控状况,通常需要高标准部署拖船。由于船舶靠离泊过程中低速域操纵水动力变化复杂,目前尚无具体的拖船部署标准,大多依赖经验,缺乏定量研究。鉴于LNG船舶标准化程度高,CFD能精细化地刻画出失控船舶的水动力变化,并从力学机理上开展拖船应急部署的合理性分析,为受限水域中LNG船舶靠泊的绝对安全提供科学的指导。

鉴于此,本文基于CFD分析不同工况下LNG船舶失控过程中各方向受力、船舶漂移距离,结合实际工程探索不同拖船数量部署对LNG船舶漂移的影响,建立特定工况下拖船的最佳应急部署方案,旨在为码头受限水域大型LNG船舶失控时拖船的应急配备提供理论支持。

## 1 理论模型设计

### 1.1 坐标系

船舶水动力计算涉及两种坐标系。一种为全局坐标系,坐标表示为 $(X, Y, Z)$ ,原点位于舯部干舷最低点与水面的交界处。另外一种为局部坐标系,坐标表示为 $(x, y, z)$ ,原点位于船舶的中线与水面相

交线的中心<sup>[14]</sup>见图1。

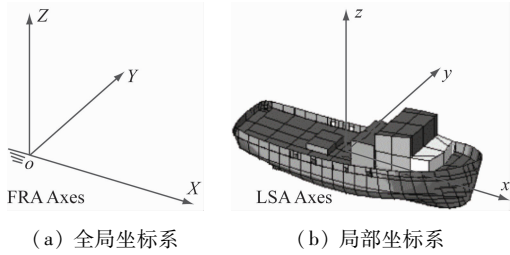


图1 全局坐标系与局部坐标系

Fig.1 Global coordinate system and local coordinate system

## 1.2 船舶水动力模型

考虑到海水的特性,本文采用求解不可压缩黏性流(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)方程的CFD方法,利用Star CCM+软件进行实际尺度代表船在顺流、横流情况下主机推进和舵力不可用时(即裸船体)代表船水动力性能求解。

张量形式下的流体控制方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{u}'_i \bar{u}'_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $\bar{u}_i$ 为平均速度分量; $-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$ 为雷诺应力; $\bar{p}$ 为平均压力; $\rho$ 为密度; $\bar{\tau}_{ij}$ 为平均黏性应力张量分量见式(3)。

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

在船体表面和水底表面,采用近壁面函数法处理,跳过黏性底层和过渡层流场求解,通过半经验公式计算壁面与湍流区域之间的黏性影响区域。为保证数值模拟精度,网格划分控制了边界层第一层网格厚度,将一定数量的网格布置于对数率层之内。

以上方程采用有限体积法进行求解计算。通过计算流体域流体的压力和速度分布,获得船体表面受到的压力及切应力,在船体表面积分即可获得船体受到的水动力。

## 1.3 船舶风载荷计算模型

根据《港口工程荷载规范》(JTS 144-1-2010)中,船舶风压的横向分量和纵向分量为

$$\begin{cases} F_{xw} = 49.0 \times 10^{-5} \cdot A_{xw} v_x^2 \zeta_1 \zeta_2 \\ F_{yw} = 73.6 \times 10^{-5} \cdot A_{yw} v_y^2 \zeta_1 \zeta_2 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $F_{xw}$ 和 $F_{yw}$ 分别为作用在船舶上风压力的纵向和横向分量; $A_{xw}$ 和 $A_{yw}$ 分别为船体上面以上纵向和横向受风面积; $v_x$ 和 $v_y$ 分别为风速的横向分量和纵向分量; $\zeta_1$ 和 $\zeta_2$ 分别为风压不均匀折减系数和高度变化修正系数,取值见表1和表2。

表1 风压不均匀折减系数

Tab.1 Uneven reduction factors for wind pressure

船舶水面以上最大轮廓尺/m	≤50	100	200	250
$\zeta_1$	1.00	0.90	0.70	0.60

表2 风压高度变化修正系数

Tab.2 Correction coefficient for wind pressure change

船水面以上高度/m	≤5	10	15	20	30
$\zeta_2$	1.00	1.18	1.30	1.39	1.54

## 1.4 船舶流载荷计算模型

水流对船舶作用产生的水动力纵向分力的计算为

$$F_{xc} = C_{xc} \frac{\rho}{2} V^2 S \quad (5)$$

式(5)中: $F_{xc}$ 为水流对船舶作用产生的水动力纵向分力; $C_{xc}$ 为水动力纵向力分力系数; $S$ 为船舶吃水线以下的表面积。

水动力纵向力分力系数 $C_{xc}$ 的计算为

$$C_{xc} = 0.046R^{-0.134} + b \quad (6)$$

式(6)中: $R$ 为水流对船舶作用的雷诺系数; $b$ 为系数,其取值见表3。

表3 系数b

Tab.3 The factor of b

方形系数C	B/D	b	
		$\theta = 0^\circ \sim 15^\circ$	$\theta = 165^\circ \sim 180^\circ$
0.825	2.2	0.009	0.015
	3.5	0.006	0.008
0.625	2.2	0.000	0.002
	3.5	0.004	0.009

## 1.5 拖船拉力

拖船拖拉下的船舶停船距离为

$$(m + m_x) \ddot{x} = F_x + F_c + F_w + F_d \quad (7)$$

式(7)中: $m$ 和 $m_x$ 分别为船舶质量和纵向附加质量; $F_x$ 和 $F_c$ 分别为船体受到的纵向阻力和流致纵向漂移力,与船舶前进速度有关,由CFD方法得到; $F_w$ 为纵向风力,与风级(风速)和船的受风面积相关; $F_d$ 为拖船拖拉力。

## 2 模型建立

### 2.1 顺流工况

顺流下计算域及边界条件见图2,计算域在船体方向向前延伸为2倍船长,向后延伸为3倍船长,

侧部边界距离艏部 2 倍船长,底部边界距离船底 2 倍船长。计算域整体采用切割体网格,在船体周围进行加密,网格数量为 1 549 万个,计算域网格划分见图 3。

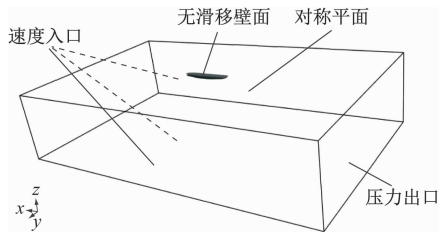


图 2 顺流下计算域及边界条件

Fig. 2 Calculation domain and boundary conditions in fair current condition



(a) 整体网格布置图 (b) 船体表面网格

图 3 计算域网格划分

Fig. 3 The grid of calculation domain

通过 CFD 进行模拟计算,船体表面  $y+$  和船舶阻力收敛图分别见图 4 和图 5。

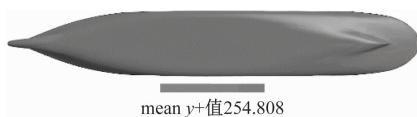


图 4 船体表面  $y+$  值(航速为 0,艏部来流 1.5 kn)

Fig. 4 The  $y+$  value on the hull surface(zero vessel speed and 1.5 kn stern flow)

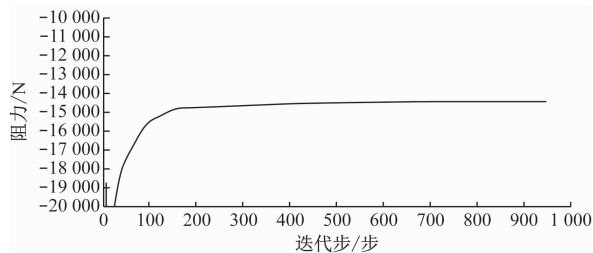


图 5 船舶阻力收敛(航速 1.5 kn,艏流 1.5 kn)

Fig. 5 Vessel resistance convergence diagram (1.5 kn ship speed and 1.5 kn stern flow)

在数值模拟计算的基础上,计算域底部边界入流边界条件改为壁面边界条件,为保证仿真工况条件与实际条件一致,水底壁面条件建立在局部运动坐标系下,保证底部壁面边界条件和来流速度为 0 kn 的实际条件。在船体周围及底部壁面进行加密,浅水数值计算局部网格划分见图 6。

考虑到码头工程水域航道水深为 14.8 m(沉深比 1.233 3),需进行浅水数值计算。船速 1.5 kn 和

船速 3.0 kn 船舶阻力收敛图分别如图 7a 和 7b 所示。

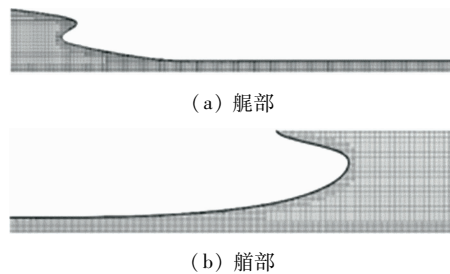
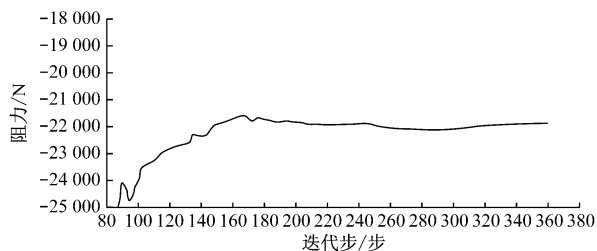
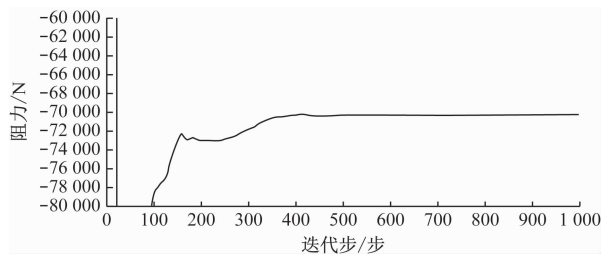


图 6 浅水数值计算局部网格划分

Fig. 6 The grid of calculation domain in shallow water



(a)  $h/d=1.233\ 3, U=1.5\ \text{kn}$



(b)  $h/d=1.233\ 3, U=3.0\ \text{kn}$

图 7 浅水工况船舶阻力收敛图

Fig. 7 Vessel resistance convergence diagram in shallow water

## 2.2 横流工况

横流下,计算域与边界条件做出如下改变:计算域在船体方向向前延伸为 2 倍船长,向后延伸为 2 倍船长,左侧部边界为入流边界距离艏部 2 倍船长,右侧边界为出流边界距离艏部 4 倍船长,底部边界距离船底 2 倍船长。计算域整体采用切割体网格,横流下计算域及边界条件见图 8。

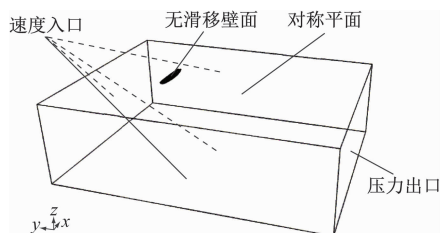


图 8 横流下计算域及边界条件

Fig. 8 Calculation domain and boundary conditions in crossflow condition

深水情况下船舶横向受力收敛图见图 9。

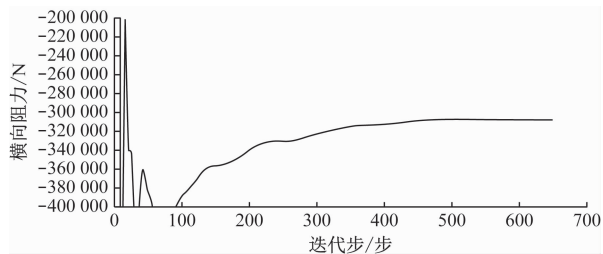


图9 横向受力收敛

Fig. 9 Vessel resistance convergence in crossflow condition

船舶整体压力云图见图 10,左舷船侧迎流面为承压面,在艏部及艉部出现压力峰值点,迎流面舭部产生明显流动分离现象,使该承压面压力较低。

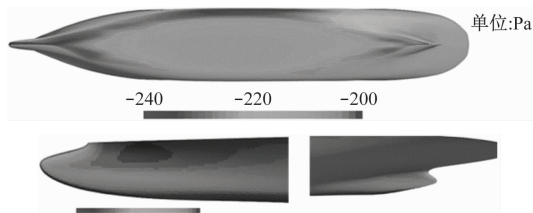
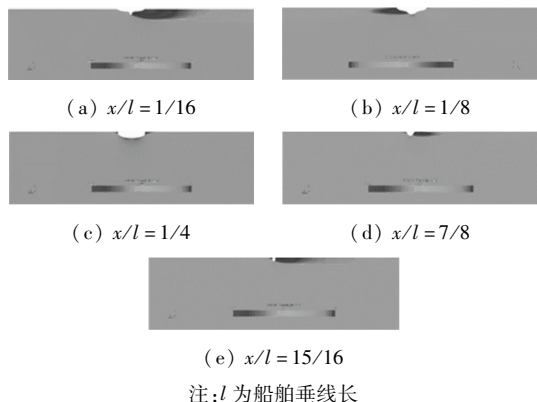


图 10 船舶整体压力云图

Fig. 10 Vessel overall pressure nephogram

船舶不同横剖面处速度云图见图 11(艉垂线为原点),艉艉部发生明显绕流。



注: $l$ 为船舶垂线长

图 11 横剖面处速度云图

Fig. 11 Vessel velocity nephogram at cross section

## 2.3 CFD 仿真流程

针对 LNG 船舶失控下应急拖船部署的问题,本文基于 CFD 仿真模拟,分析各工况下船舶失控过程中各方向受力、船舶漂移距离,研究不同拖船数量部署对 LNG 船舶漂移的影响。模型综合考虑大型 LNG 船舶操纵性、多种工况和浅水效应等,仿真流程见图 12。实现步骤如下。

1) 初始化拖船数量。

2) 判断船舶是否稳定,如稳定,结束;否则,则进入步骤 3)。

3) 根据环境信息和船舶信息,建立风流载荷和船舶水运动模型。

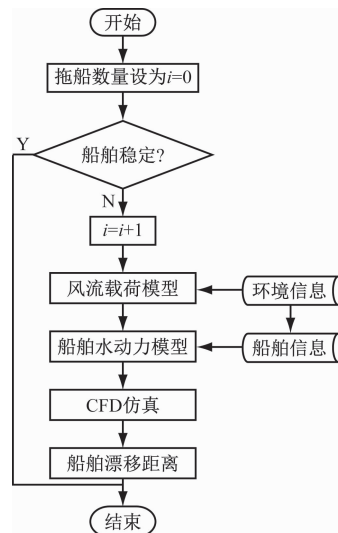


图 12 仿真流程

Fig. 12 Simulation flowchart

4) 通过 CFD 仿真,确定本船在不同拖船下的船舶漂移距离。

## 3 案例分析

### 3.1 研究水域

本文选取温州岛东北部温州液化天然气码头水域,位于小门岛东北部华尾咀码头北侧。码头地理坐标约为  $28^{\circ}00'35''N$ 、 $121^{\circ}04'37''E$ ,前沿线为  $108^{\circ} \sim 288^{\circ}$ ,LNG 码头泊位长 415 m,泊位宽 110 m,可靠泊 8.0 万  $\sim 26.6$  万  $m^3$  LNG 船,研究水域见图 13。

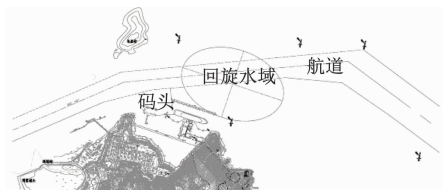


图 13 研究水域

Fig. 13 Research water area

#### 3.1.1 风

根据洞头气象站多年的风速资料,本地区夏季多为 SW 向大风,春秋季节以偏 N 向大风为主,冬季盛行 N  $\sim$  NE 向大风。全年平均风速 3.8 m/s,强风向为 SSW 向,最大风速为 32 m/s,全年常风向为 N  $\sim$  NE 向。

#### 3.1.2 流

根据水文测验成果,本区潮流以往复流为主。码头前沿流速中等,东端涨潮最大流速 1.24 m/s、对应流向  $275^{\circ}$ ,垂线平均最大流速 1.06 m/s、对应流向  $230^{\circ}$ ;落潮分层最大流速 1.32 m/s、对应流向  $130^{\circ}$ ,垂线平均最大流速 0.81 m/s、对应流向  $99^{\circ}$ 。西端涨潮分层最大流速 1.25 m/s、对应流向  $311^{\circ}$ ,

垂线平均最大流速 0.85 m/s、对应流向 282°;落潮分层最大流速 1.06 m/s、对应流向 110°,垂线平均最大流速 0.90 m/s、对应流向 108°。

### 3.2 拖船配备情况

在对拖船进行计算时,缆绳与船舶成 90°,拖船的部署与船舶系泊时有所区别,具体拖船布置见图 14。其中:顺风流下 1 艘拖船的布置,拖船系在艉部巴拿马孔如图 14a 所示;2 艘拖船的布置时,分别系在艉部的两侧如图 14b 所示;横风流下 1 艘拖船的布置,系在艉部位置如图 14c 所示;2 艘拖船的布置时,分别系在艉和艏,如图 14d 所示。

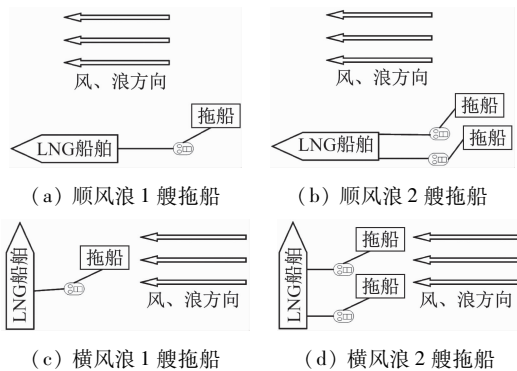


图 14 拖船布置

Fig. 14 Tugboat arrangement

拖船挂靠船舶的位置与船舶系泊时拖船的位置有所区别。拖船功率为 5 200 马力(1 马力 = 735 W),系柱拖力为 60 t,本文采用按 85% 的系柱推/拖力计算,每艘拖船可提供约  $5.0 \times 10^5$  N。

### 3.3 工况设计

#### 3.3.1 船舶设置

本文选择 26.6 万  $\text{m}^3$  Q-Max LNG 船舶满载时作为试验船舶,船舶主要参数见表 4。

表 4 代表船主要参数

Tab. 4 The main particular of representing vessel

$L/\text{m}$	$B/\text{m}$	$T/\text{m}$	$C$
345.0	53.0	12.0	0.8

#### 3.3.2 环境工况设置

LNG 船舶在靠离泊过程中,可能会遇到影响船舶操纵性的工况,对于港口的安全存在潜在的风险。考虑到当地的水文气象条件,选取两类环境开展水动力数值计算研究:

- 1) 艏向与水流方向一致;
- 2) 艏向与水流方向垂直。

具体模拟工况见表 5。考虑到船舶的傅汝德数  $Fr \ll 0.2$ ,船体运动的兴波可忽略,且在计算工况

下,垂荡、纵倾和横倾相对较小,因此,采用叠模绕流方法进行数值计算处理。

表 5 模拟工况

Tab. 5 Simulated rough weather condition

序号	航速/kn	流速/kn	流向	风级/级	风向
1	0	1.5	顺流	6	顺风
2	1.0	1.5	顺流	6	顺风
3	1.5	1.5	顺流	6	顺风
4	2.0	1.5	顺流	6	顺风
5	3.0	1.5	顺流	6	顺风
6	4.0	1.5	顺流	6	顺风
7	5.0	1.5	顺流	6	顺风
8	6.0	1.5	顺流	6	顺风
9	1.5	2.5	顺流	6	顺风
10	5.0	2.5	顺流	6	顺风
11	0	1.5	横流	6	横风
12	0	2.5	横流	6	横风
13	0	1.5	顺流	7	顺风
14	1.0	1.5	顺流	7	顺风
15	1.5	1.5	顺流	7	顺风
16	2.0	1.5	顺流	7	顺风
17	3.0	1.5	顺流	7	顺风
18	4.0	1.5	顺流	7	顺风
19	5.0	1.5	顺流	7	顺风
20	1.5	2.5	顺流	7	顺风
21	5.0	2.5	顺流	7	顺风
22	0	1.5	横流	7	横风
23	0	2.5	横流	7	横风

### 3.4 计算结果

船舶水动力计算结果见表 6,表 6 中: $F_{cx}$  为流的纵向力, $F_{cy}$  为流的横向力; $F_{wx}$  为纵向风力, $F_{wy}$  为横向风力。6 级风速取 13.8 m/s,7 级风速取 17.1 m/s。结合拖船的系柱推/拖力(拖轮挂靠船舶的位置与船舶系泊时拖轮的位置有所区别。拖轮功率为 5 200 马力(1 马力  $\approx$  735 W),系柱拖力为  $5.88 \times 10^5$  N,本文采用按 85% 的系柱推/拖力计算,每艘拖轮可提供约  $5.0 \times 10^5$  N),计算在不同工况不同拖船数量下的船舶漂移时间和距离,拖拉作用下船舶运动计算结果见表 7。

### 3.5 结果分析

Q-Max LNG 在不同风况下船舶的漂移距离见图 15。图 15 中,风流和船舶运动方向相同。

表6 水动力计算结果  
Tab.6 Hydrodynamic calculation results

单位:N

序号	$F_x$	$F_{cy}$	$F_{cx}$	$F_{ey}$	$F_{ex}$
1	0	—	17 326	—	121 832
2	-8 902	—	17 326	—	121 832
3	-20 511	—	17 326	—	121 832
4	-32 376	—	17 326	—	121 832
5	-65 946	—	17 326	—	121 832
6	-118 260	—	17 326	—	121 832
7	-179 608	—	17 326	—	121 832
8	-252 780	—	17 326	—	121 832
9	-20 511	—	48 128	—	121 832
10	-179 608	—	48 128	—	121 832
11	—	432 265	—	848 060	—
12	—	1 140 736	—	848 060	—
13	0	—	17 326	—	184 885
14	-8 902	—	17 326	—	184 885
15	-20 511	—	17 326	—	184 885
16	-32 376	—	17 326	—	184 885
17	-65 946	—	17 326	—	184 885
18	-118 260	—	17 326	—	184 885
19	-179 608	—	17 326	—	184 885
20	-20 511	—	48 128	—	184 885
21	-179 608	—	48 128	—	184 885
22	—	432 265	—	1 277 777	—
23	—	1 140 736	—	1 277 777	—

表7 拖拉作用下船舶运动计算结果

Tab.7 The results of vessel motion under the tugboat

序号	初始航速/kn	结束航速/kn	流速/kn	风级/级	拖船拖力/N	t/s	距离/m
1	1.5	0	1.5	6	999 600	183.6	70.8
2	5.0	0	1.5	6	999 600	598.7	769.9
3	6.0	3.0	1.5	6	999 600	367.1	848.8
4	1.5	0	1.5	6	499 800	438.0	169.0
5	5.0	0	1.5	6	499 800	1 387.0	1783.7
6	6.0	3.0	1.5	6	499 800	875.9	2027.5
7	1.5	0	2.5	6	999 600	190.4	73.4
8	5	0	2.5	6	999 600	620.4	797.8
9	1.5	0	2.5	6	499 800	478.8	184.7
10	5	0	2.5	6	499 800	1 509.8	1941.3
11	1.5	0	1.5	7	999 600	186.8	72.1
12	5.0	0	1.5	7	999 600	622.7	800.5
13	6.0	3.0	1.5	7	999 600	373.6	864.8
14	1.5	0	1.5	7	499 800	456.8	176.3
15	5.0	0	1.5	7	499 800	1 522.7	1958.4
16	6.0	3.0	1.5	7	499 800	913.6	2115.0
17	1.5	0	2.5	7	999 600	1 93.7	74.8
18	5	0	2.5	7	999 600	645.7	831.0
19	1.5	0	2.5	7	499 800	501.5	193.5
20	5	0	2.5	7	499 800	1 671.8	2150.0

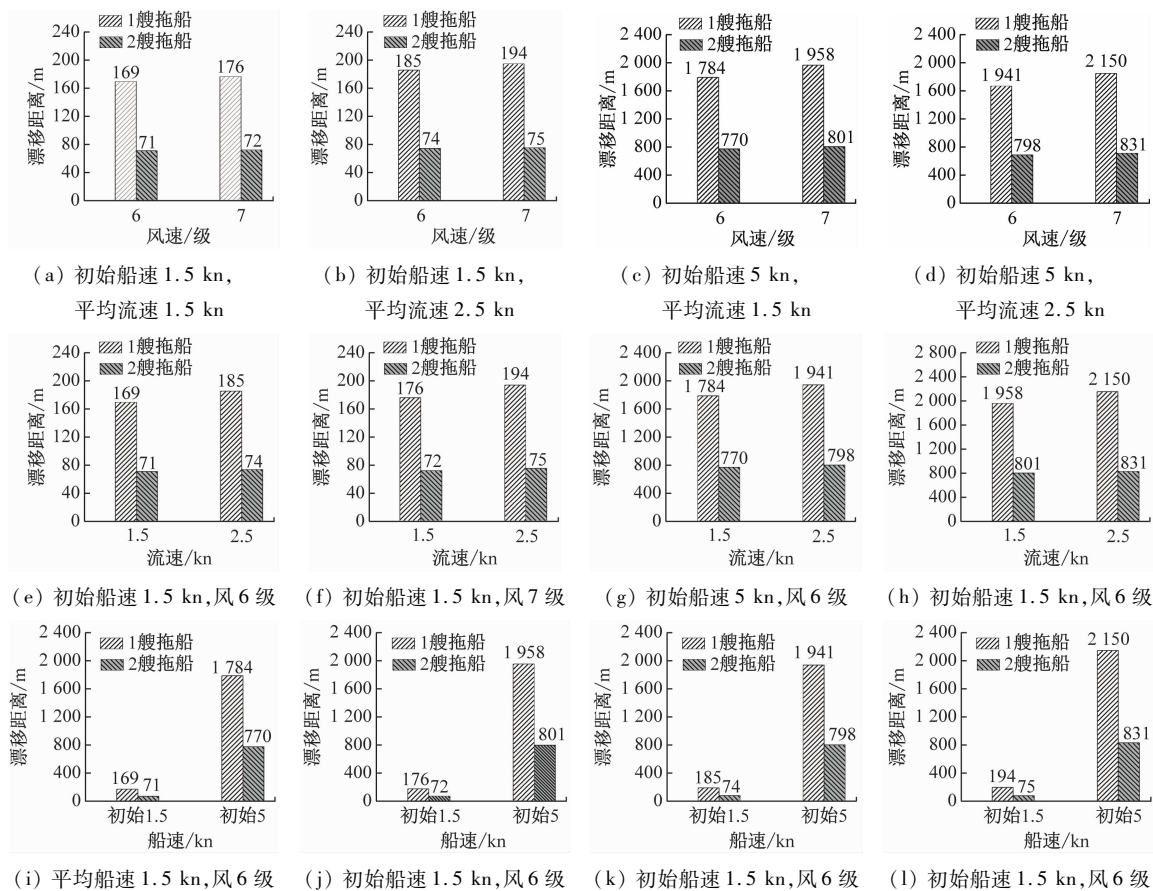


图 15 船舶漂移距离

Fig. 15 Vessel drift distance

根据统计结果,在设定的工况下,仅1艘拖船作用下 LNG 最大漂移距离为 2 150 m (约 6.2 倍船长);2 艘拖船作用下,最大的漂移距离为 831 m (约 2.4 倍船长),作业条件下初速约 1.5 kn 时拉停的距离在 100 m 以内。为更好展现变量对船舶漂移的影响,图 15 可分为 3 类,图 15a ~ 15d 变量为风力,图 15e ~ 15h 变量为平均流速,图 15i ~ 15l 变量为船舶初始速度。

1) 通过对比第一类图,当初始船速为 1.5 kn 时,风力的增加对漂移距离的影响不大于 10 m;初始速度为 5 kn 时,风力的变化增加漂移的距离不大于 200 m,风对于大型 LNG 船舶(满载时)漂移的影响较小。

2) 通过对比第二类图,初始船速为 1.5 kn 时,流速增加 1.0 kn,漂移距离增加约为 15 m;初始船速为 5.0 kn 时,漂移距离增加约为 150 m;而在 2 艘拖船作用下,漂移距离增加仅为 30 m。

3) 对比第三类图数据显示,船舶初始速度在顺风顺流的作用下,初始速度对于船舶的影响较大。初始船速为 1.5 kn 时,流速增加 1.0 kn,漂移距离增加约为 15 m;初始船速为 5.0 kn 时,漂移距离增

加约为 150 m;而在 2 艘拖船作用下,漂移距离增加为 30 m。

船舶不同流向下船舶纵向漂移力见图 16。根据统计结果,在相同的风速下,横流速度越大,船舶的漂移力越大;在相同的流速下,风力越大,船舶的漂移力也越大。对比图 16b,在其他初始条件相同的情况下,横流产生的偏移力约为顺流工况下漂移力的 8 ~ 10 倍,对船舶影响更大。

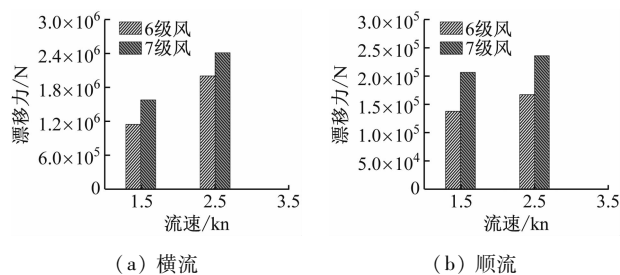


图 16 船舶不同流向下船舶纵向漂移力

Fig. 16 Vessel longitudinal drift force in different flow

由于目前相关的规范里对于失控船舶漂移时间和距离尚未有统一的标准,从实操角度定性描述应尽短距离并尽快控制住失控船舶为佳。在船舶靠泊过程控制距离以码头附近回旋水域(短轴)半径长

度为参考,使用拖船将船舶在此范围内尽快控制住。

此外,一旦船舶失控,实操上首先要使用拖船将船停住,并尽可能多增加拖船采用拖航等方式尽快将船拖至安全水域,使之彻底摆脱危险状态。尽管本文计算的结果表明2艘拖船能在作业条件下将低速域中的LNG船在一定的安全距离内拉停,这仅仅是作为应急值守经济的做法,是安全的最低标准,可为后续储备拖船及时赶来争取时间,最后可共同拖航船舶至应急锚地等安全水域。

## 4 结束语

LNG船舶航行、靠离泊的要求较一般船舶严苛,确保有绝对的安全裕度。为避免船舶出现失控等意外情况,LNG船舶进出港、靠泊过程需要配备足够的拖船,以备应急之需。针对LNG船舶靠离受限码头水域的应急拖船部署问题,本文提出一种基于CFD的拖船部署模型。模型通过分析不同工况、不同拖船数量下船舶漂移距离,确定可行的拖船部署方案。以温州小门岛水域大型LNG船舶拖船应急部署为实例,对比不同工况下船舶漂移距离以及船舶纵向漂移力,主要结论如下:

1) 采用CFD计算,定量求取实际尺度LNG主机舵机不可用时船舶漂移距离,可为大型LNG船舶失控下拖船部署、港口应急救助等工作提供量化的参考。

2) 作业条件下,顺风顺流中至少需要2艘拖船值守,以便及时控制Q-Max LNG船舶失控,这仅仅是作为应急值守经济的做法,是安全的最低标准,可为后续储备拖船及时赶来争取时间,最后将船舶拖航至应急锚地等安全水域。

3) 相同初始条件下,横流产生的偏移力约为顺流工况下漂移力的8~10倍,对船舶靠离泊影响更大。因此需要更多应急拖船。

未来还需要结合实际引航操作等工作,考虑拖船的效能发挥、具体操纵、缆绳动态变化,进一步完善大型LNG船舶失控下的应急拖船部署模型。

## 参 考 文 献

[1] 李晓冬. LNG船事故状态结构综合安全评估方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2019.  
LI X D. Study on formal safety assessment of LNG carrier structures after accidents [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)

[2] 聂细亮, 刘强, 李国帅, 等. LNG船舶海上运输安全研究现状及进展[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(5): 87-92.

NIE X L, LIU Q, LI G S, et al. Status quo of and progress in research on LNG ship maritime transport safety [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(5): 87-92. (in Chinese)

[3] 段玉龙, 胡以怀. LNG船舶事故分析及风险控制[J]. 船海工程, 2013, 42(3): 191-194.  
DUAN Y L, HU Y H. Accidents analysis and risk control for LNG ships [J]. Ship & Ocean Engineering, 2013, 42(3): 191-194. (in Chinese)

[4] 汪金辉, 周雨, 张睿卿, 等. 全球气体运输船事故的时空热点研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(2): 1106-1112.  
WANG J H, ZHOU Y, ZHANG R Q, et al. Research on spatial-temporal hotspots of gas tanker accidents based on geographic information system [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(2): 1106-1112. (in Chinese)

[5] 郭开华, 朱琳琳, 皇甫立霞, 等. LNG船舶内河航运安全定量风险管控研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1736-1742.  
GUO K H, ZHU L L, HUANGPU L X, et al. On the quantitative safety risk management of the LNG inland waterway transportation [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(5): 1736-1742. (in Chinese)

[6] 牛东翔, 谢新连. 基于层次分析法的液化天然气船舶评价[J]. 中国航海, 2019, 42(1): 125-128.  
NIU D X, XIE X L. Evaluation of operation of LNG ships by means of AHP [J]. Navigation of China, 2019, 42(1): 125-128. (in Chinese)

[7] 戴厚兴, 吴兆麟. 恶劣天气下海上交通安全风险动态预评估体系[J]. 中国航海, 2016, 39(3): 73-76.  
DAI H X, WU Z L. Dynamic risk pre-evaluation system for marine traffic safety under rough weather [J]. Navigation of China, 2016, 39(3): 73-76. (in Chinese)

[8] 王海翔. 横风对Q-Max型LNG船靠离泊影响及安全对策[J]. 航海技术, 2017(1): 38-41.  
WANG H X. The impact of cross wind on the berthing and departure of Q-Max LNG ships and safety countermeasures [J]. Marine technology, 2017(1): 38-41. (in Chinese)

[9] KIM D, YIM J, SONG S, et al. A systematic investigation on the manoeuvring performance of a ship performing low-speed manoeuvres in adverse weather conditions using CFD [J]. Ocean Engineering, 2022, 263: 1232-1257.

[10] 刘轶华, 杨小军, 肖英杰. Q-Max型LNG船舶靠离江苏洋口港模拟[J]. 上海海事大学学报, 2014, 35(3): 1-6.

- [9] JAMALI A, AHMADI P, JAAFAR M M. Optimization of a novel carbon dioxide cogeneration system using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 64 (1-2):293-306.
- [10] WANG S X, ZHANG N, WU L, et al. Wind speed forecasting based on the hybrid ensemble empirical mode decomposition and GA-BP neural network method[J]. Renewable Energy, 2016, 94: 629-636.
- [11] GANDHI A B, JOSHI J B, JAYARAMAN V K, et al. Development of support vector regression (SVR)-based correlation for prediction of overall gas hold-up in bubble column reactors for various gas-liquid systems [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 (24): 7078-7089.
- [12] SEYEDALI M, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95:51-67.
- [13] WANG X, GAO S, ZHOU S, et al. Prediction of house price index based on bagging integrated WOA-SVR model[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021 (45):1-15.
- [14] NAZARÉ G, CASTRO R, GABRIEL FILHO L R. Wind power forecast using neural networks; tuning with optimization techniques and error analysis [J]. Wind Energy, 2020, 23(3):810-824.
- [15] TASCIKARA OGLU A, UZUNOGLU M. A review of combined approaches for prediction of short-term wind speed and power[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 34:243-254.
- [16] WANG J, TANG S. Time series classification based on ARIMA and Adaboost [J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 309: 1-7.
- [17] YAN J H, BAI X H, ZHANG W Y, et al. No-reference image quality assessment based on Adaboost-BP neural network in wavelet domain [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(2): 223-237.

~~~~~

(上接第 17 页)

- LIU Y H, YANG X J, XIAO Y J. Simulation of Q-Max LNG carrier berthing Yangkou Port in Jiangsu [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2014, 35(3): 1-6. (in Chinese)
- [11] 黄明, 窦佩军, 王裕平, 等. 基于虚拟仿真和实船验证的恶劣天气下 LNG 船舶靠离泊操作分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(4): 743-748.
- HUANG M, DOU P J, WANG Y P, et al. Analysis of LNG ship berthing and unberthing operation in bad weather based on virtual simulation and real ship verification [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation science & engineering), 2022, 46(4): 743-748. (in Chinese)
- [12] 王超峰, 刘明俊, 张磊, 等. 鄱阳湖水利枢纽船舶失控漂移建模方法[J]. 中国航海, 2023, 46(2): 67-73.
- WANG C F, LIU M J, ZHANG L, et al. Modeling of ship out of control and drifting in area of Poyang Lake water control project [J]. Navigation of China, 2023, 46(2): 67-73. (in Chinese)
- [13] 罗立科, 于亮. 浅谈船舶在港内失控后的应急处置[J]. 航海技术, 2023(3): 10-13.
- LUO L K, YU L. Emergency handling of ship out of control in harbors [J]. Marine technology, 2023(3): 10-13. (in Chinese)
- [14] HE Y, JIN Y, HUANG L, et al. Quantitative analysis of COLREG rules and seamanship for autonomous collision avoidance at open sea[J]. Ocean Engineering, 2017, 140: 281-291.
- [15] 王雪刚, 苏林王, 林美鸿. 浅吃水半潜驳在浅水域运输沉管的运动响应分析[J]. 中国航海, 2022, 45(4): 94-99.
- WANG X G, SU L W, LIN M H. Motion response of shallow-water submerged barge transporting sinking tube in shallow water [J]. Navigation of China, 2022, 45(4): 94-99. (in Chinese)