



岸端船对船 LNG 加注的系泊布置及数值分析

胡士博¹, 韩 强¹, 李 朋², 丁 标¹, 田 玖¹

(1. 上海船舶研究设计院, 上海 201203; 2. 交通运输部东海救助局, 上海 201203)

摘要: 为研究液化天然气(LNG)加注船在非专用码头极限工况下旁靠装卸货船舶加注时的系泊稳定性问题, 以3万m³LNG加注船在集装箱码头加注1.4万TEU LNG双燃料集装箱船的船对船(STS)系泊系统为研究对象, 提出一种岸端STS系泊解决方案, 采用数值分析软件建立岸端STS耦合系泊模型对风、浪、流复合环境荷载作用下的船舶位移、系缆张力及碰撞受力进行数值仿真, 预报全方向极限环境承载能力(临界风速/流速), 并结合多种船型组合拓展分析, 系统量化系缆预紧力对系泊性能的影响。结果表明, 在标准集装箱码头环境条件下, 该方案满足规范对LNG加注作业时的系泊稳定性要求; 当预张力优化至系缆最小破断力的13%附近时, 系缆峰值张力最低且船舶运动位移可衰减至无预张力工况的35%以下。

关键词: LNG 加注; 系泊分析; 岸端STS 系泊

中图分类号: U661.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0081-07

Mooring layout and numerical analysis for STS LNG bunkering at berth

HU Shibo¹, HAN Qiang¹, LI Peng², DING Biao¹, TIAN Yu¹

(1. Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute, Shanghai 201203, China;

2. Donghai Rescue Bureau of the Ministry of Transport, Shanghai 201203, China)

Abstract: In view of the mooring stability of liquefied natural gas(LNG) bunkering vessels during alongside bunkering of cargo ships at non-dedicated terminals under extreme conditions, the ship-to-ship (STS) mooring system for a 30,000 m³ LNG bunkering vessel and a 14,000 TEU LNG dual-fuel container ship at a container terminal is focused on. A shore-side STS mooring solution is proposed. A coupled shore-side STS mooring model is established by numerical analysis software to simulate vessel displacements, mooring line tensions, and fender forces under combined environmental loads (wind, waves, and current). The omnidirectional ultimate environmental load-bearing capacity (critical wind speed/current speed) is forecasted. Furthermore, the impact of mooring line pre-tension on mooring performance is systematically quantified through extended analyses involving various ship type combinations. The results demonstrate that under standard container terminal environmental conditions, this solution meets regulatory requirements for mooring stability during LNG bunkering operations. When the pre-tension is optimized to approximately 13% of the minimum breaking load of the mooring lines, the peak line tension is minimized, and vessel motion displacements can be reduced to below 35% of those observed in scenarios without pre-tension.

Keywords: LNG bunkering; mooring analysis; STS mooring at berth

在全球绿色低碳的变革时代背景下, 越来越多的大型LNG双燃料货船和LNG加注船进入市场^[1-2]。然而由于液化天然气(liquefied natural gas, LNG)的特殊性, 建造LNG码头的要求极高^[3-4], 现有泊位资源十分有限。因此为减少LNG码头加注的泊

位压力、优化货船运输周期、降低运营成本, 对非LNG码头进行船对船(ship-to-ship, STS)加注的安全稳定性进行研究十分必要。罗肖峰等^[5]对STS在码头加注工况下的安全区域进行研究分析; 程康等^[6]对海上STS加注时的安全距离进行研究;

黄立文等^[7]通过数值分析的方法对一字锚泊与单锚锚泊时的STS过驳的稳定性进行对比分析；郑坤等^[8]运用水动力软件Araine对LNG船靠泊浮式储存及再气化装置(floating storage and regasification unit, FSRU)的系泊力进行分析。目前多数研究主要针对海上开阔水域以锚泊的方式开展STS过驳或加注作业的系泊稳定安全性研究，针对STS靠泊码头的系泊研究较少。而在相同标准环境条件下，通过靠泊码头实现STS系泊的系泊力比单点锚泊时的STS系泊力更危险^[9]。

本文提出一种岸端的STS靠泊系泊方案，利用OPTIMOOR仿真软件预报分析在STS加注作业时的船舶运动位移、系泊缆及碰垫受力等情况，研究系缆张力对船舶相对位移的影响，并对整个系泊布置方案在各个方向上所能承受的极限环境条件进行分析，从而指导船上操作人员合理设置出缆数量、系缆角度及缆绳预张力，为非专用码头LNG加注作业的安全性和效率提供理论依据及一套安全有效的系泊指导方案。

1 系泊力计算基本原理

系泊力主要采用准静力的方式进行数据分析与计算，参照石油公司国际海事论坛(Oil Companies International Marine Forum, OCIMF)规范《系泊设备指南》执行^[10]，不考虑波浪引起的动态效应，假定波浪力与风同向，与风荷载叠加计算，但若风的方向来自码头，则不考虑波浪力^[11]。

1.1 风荷载

风荷载的计算公式为：

$$F_{x,w} = \frac{1}{2} C_{x,w} \rho_a v_w^2 A_T \quad (1)$$

$$F_{y,w} = \frac{1}{2} C_{y,w} \rho_a v_w^2 A_L \quad (2)$$

$$X_w = \frac{C_{xy,w}}{C_{y,w}} L_{BP} \quad (3)$$

$$M_{xy,w} = F_{y,w} \frac{X_w}{C_{y,w}} \quad (4)$$

式中： $F_{x,w}$ 、 $F_{y,w}$ 分别为纵向、横向风荷载，N； $C_{x,w}$ 、 $C_{y,w}$ 分别为纵向、横向风阻系数； ρ_a 为空气

密度，kg/m³； v_w 为风速，m/s； A_T 、 A_L 分别为为艏向、侧向受风面积，m²； X_w 为横向力臂，m； $C_{xy,w}$ 为风艏摇力矩系数； L_{BP} 为两间柱长，m； $M_{xy,w}$ 为风产生的艏摇力矩，N·m。

1.2 流荷载

流荷载的计算公式为：

$$F_{x,c} = \frac{1}{2} C_{x,c} \rho_w v_c^2 L_{BP} T \quad (5)$$

$$F_{y,c} = \frac{1}{2} C_{y,c} \rho_w v_c^2 L_{BP} T \quad (6)$$

$$X_c = \frac{C_{xy,c}}{C_{y,c}} L_{BP} \quad (7)$$

$$M_{xy,c} = F_{y,c} \frac{X_c}{C_{y,c}} \quad (8)$$

式中： $F_{x,c}$ 、 $F_{y,c}$ 分别为纵向、横向流荷载，N； $C_{x,c}$ 、 $C_{y,c}$ 分别为纵向、横向水流阻力系数； ρ_w 为水的密度，kg/m³； v_c 为水流速度，m/s； T 为平均吃水，m； X_c 为横向力臂，m； $C_{xy,c}$ 为流艏摇力矩系数； L_{BP} 为两柱间长，m； $M_{xy,c}$ 为流造成的艏摇力矩，N·m。

1.3 力/力矩

力/力矩平衡方程为：

$$\sum F_x + \sum P_x = 0 \quad (9)$$

$$\sum F_y + \sum P_y = 0 \quad (10)$$

$$\sum M_{xy} + \sum N_{xy} = 0 \quad (11)$$

式中： F_x 、 F_y 分别为外部施加在纵向、横向的分力，N； P_x 、 P_y 分别为系泊缆绳或碰垫在纵向、横向的分力，N； M_{xy} 为外部施加在水平面的偏转力矩，N·m； N_{xy} 为系泊缆绳或碰垫在水平面的偏转力矩，N·m。

2 系泊方案设计

2.1 船舶信息

以3万m³LNG加注船(LNGBV-30k)加注1.4万TEU LNG双燃料集装箱船(CT-14k)靠泊某集装箱码头的实际应用项目为例。船舶的主要参数见表1。

表 1 LNG 加注船与受注船的主要参数
Tab. 1 Main Parameters for LNG bunkering vessel and receiving vessel

船舶	船长/ m	垂线 间长/m	船宽/ m	型深/ m	压载 吃水/m	满载 吃水/m
LNGBV-30k	184.7	175.0	28.1	18.7	6.0	7.6
CT-14k	335.0	324.6	51.0	29.9	13.0	17.0

2.2 系泊设计原则

一般来说，对于 LNG 船 STS 靠泊码头加注的系泊设计主要遵循以下原则。

1) 对称布置原则。为使系泊系统受力均匀,减少船舶偏心受力,提高系泊稳定性。船对岸的系泊缆绳尽可能对称布置于 LNG 受注船的船舯附近。船对船的系泊缆绳尽可能对称布置于 LNG 受注船加注口附近。

2) 倒缆系固原则。为增强船舶在加注过程中
的纵向稳定性, 在尽可能靠近 LNG 受注船加注站

的位置为STS靠泊加注时提供倒缆系固点。

3) 横缆布置原则。为提供最大的横向约束力, 保证船舶横向稳定性, 横缆布置应尽量垂直于船纵向中心线, 尽可能地靠近艏部或艉部。

4) 系缆垂向角度限制原则。应保证所有系缆垂向角度不大于 30° ，避免过大的无效垂向分力，减少系缆磨损速率。

5) 碰垫布置原则。为增大碰垫的有效接触面积并缓冲碰撞力, 碰垫应布置在水线靠近平行中体处。

6) 运动位移限制原则。为保证船舶加注作业的安全性,根据相关规定,系泊布置应保证STS加注作业时船舶运动位移应不大于2 m^[12]。

船对船靠泊间的碰垫参照 OCIMF 规范^[13] 选取，配备在 LNG 加注船上，锚系泊设备按照国际船级社协会(IACS)规范^[14] 选取，详细系泊设备参数见表 2。

表 2 LNG 加注船与 LNG 受注船的系泊设备参数
 Tab. 2 Mooring equipment parameters for LNG bunkering vessel and LNG receiving vessel

船舶	缆绳数量/根	缆绳材质	最小破断负荷/kN	碰垫尺寸/m	碰垫数量/个	碰垫支持反力/kN	系泊绞车工作荷载/kN	系泊绞车刹车力/kN
LNGBV-30k	16	高模量聚乙烯纤维	660.0	靠球直径 3.3,	4	1 900	165	528
CT-14k	20	聚酰胺纤维	1 528.8	长 4.5			385	1 223

2.3 系泊布置方案

以靠泊某集装箱码头(设计高水位 43.91 m、设计低水位 40.29 m)为例,结合码头和船舶的实际系泊件位置,整体系泊采用船对船对岸的系泊方式见图 1。其中 CT-14k 船与码头的系缆模式采

用 4 艏缆+4 艏横缆+2 艏倒缆+2 艏倒缆+4 艏横缆+4 艏缆；LNGBV-30k 船与 CT-14k 船的系缆模式采用 3 艏缆+3 艏横缆+2 艏倒缆+2 艏倒缆+3 艏横缆+3 艏缆。

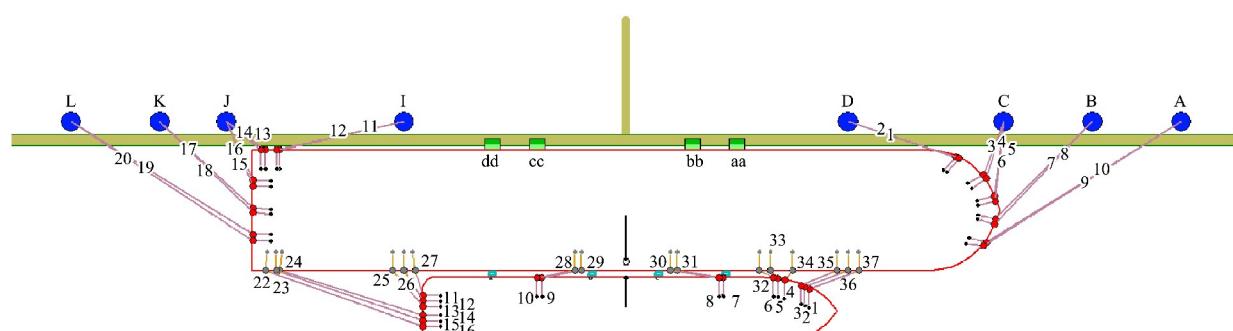


图 1 船对船码头加注系泊布置
Fig. 1 Mooring layout for STS bunkering at berth

2.4 环境条件

根据 MEG4 规范^[15]要求, CT-14k 船在装卸货时与 LNGBV-30k 船系缆加注时, 考虑到环境与吃水的变化对系泊力的影响, 选取满载低水位和压载高水位两个极端状态进行数据分析。风荷载计算采用集装箱码头推荐的风速 30 kn, 流荷载计算参照 MEG4 规范推荐的环境设定, 波浪荷载计算取有义波高 2 m。环境条件参数见表 3。

表 3 船对船靠泊集装箱码头环境条件参数

Tab. 3 Environmental condition parameters for STS at container terminal

工况	水位	风		波浪		流	
		风速/kn	方向	有义波高/m	方向	流速/kn	方向
0-1	满载低水位	30	全方向	2	与风同向	3	对船逆流
0-2		30	全方向	2	与风同向	3	对船顺流
0-3		30	全方向	2	与风同向	2	对船顺流向码头外偏 10°
0-4		30	全方向	2	与风同向	2	对船逆流向码头外偏 10°
0-5		30	全方向	2	与风同向	0.75	对船横流吹离码头
1-1	压载高水位	30	全方向	2	与风同向	3	对船逆流
1-2		30	全方向	2	与风同向	3	对船顺流
1-3		30	全方向	2	与风同向	2	对船顺流向码头外偏 10°
1-4		30	全方向	2	与风同向	2	对船逆流向码头外偏 10°
1-5		30	全方向	2	与风同向	0.75	对船横流吹离码头

3 系泊仿真与数值分析

OPTIMOOR 作为一款系泊分析预报软件, 不仅可以预报每根缆绳的系泊张力、碰垫支持反力, 还可以分析出绞车刹车是否失效、每根缆绳收放长度、系缆垂向角度、带缆桩强度等, 能够更真

实地模拟出动态平衡时实际系泊情况, 可为船舶或船岸兼容系泊问题提供有效的指导。

3.1 系泊预报分析结果

根据表 3 的环境条件对 STS 靠泊码头系泊方案进行数值分析, 结果见表 4。

表 4 船对船码头系泊力计算结果

Tab. 4 Calculation results of mooring forces for STS at berth

工况	碰垫最大压力 T/kN	系缆最大张力				船舶最大运动位移/m			
		加注船		受注船		受注船		加注船	
		张力 F/kN	$(F/F_{MBL})/\%$	张力 F/kN	$(F/F_{MBL})/\%$	纵荡 S_x	横荡 S_y	纵荡 S_x	横荡 S_y
0-1	283.1	208	31	473	30	0.77	0.65	0.19	0.90
0-2	283.1	193	29	415	27	0.34	0.54	0.25	0.91
0-3	253.3	205	31	509	33	0.34	0.70	0.21	0.96
0-4	298.0	230	35	491	31	0.55	0.73	0.25	1.01
0-5	283.1	203	30	534	34	0.47	0.78	0.21	0.91
1-1	298.0	210	31	495	32	0.73	0.72	0.20	0.95
1-2	298.0	200	30	447	29	0.30	0.62	0.24	0.96
1-3	268.2	208	31	528	34	0.38	0.77	0.20	0.98
1-4	312.9	231	35	513	33	0.55	0.79	0.25	1.05
1-5	298.0	207	31	557	36	0.49	0.86	0.22	0.96

注: F_{MBL} 为系缆最小破断力。

结果显示, 系缆张力低于 50% 的缆绳最小破断力, 船舶纵向和横向的运动位移均小于 2 m。该

系泊方案满足 OCIMF 对 STS 加注作业的系泊要求。

3.2 LNG 加注船的极限工作环境计算分析

根据表 4 的计算结果选取 LNGBV-30k 船出现缆绳张力最大的工况 1-4 为研究对象, 针对系缆峰值张力达到系缆的 50% F_{MBL} ($F_{max} = F_{MBL}$)、系缆峰值张力达到绞车最大刹车力 ($F_{max} = B_{max}$)、碰垫最大受力达到能力极限 ($T = T_{max}$)、纵向运动位移 2 m ($S_x = 2$ m)、横向运动位移 2 m ($S_y = 2$ m) 等 5 个影响 STS 系泊性能关键因素, 计算 LNGBV-30k 船在不同风向上的风速限制和在不同流向上的流速限制, 结果见图 2。

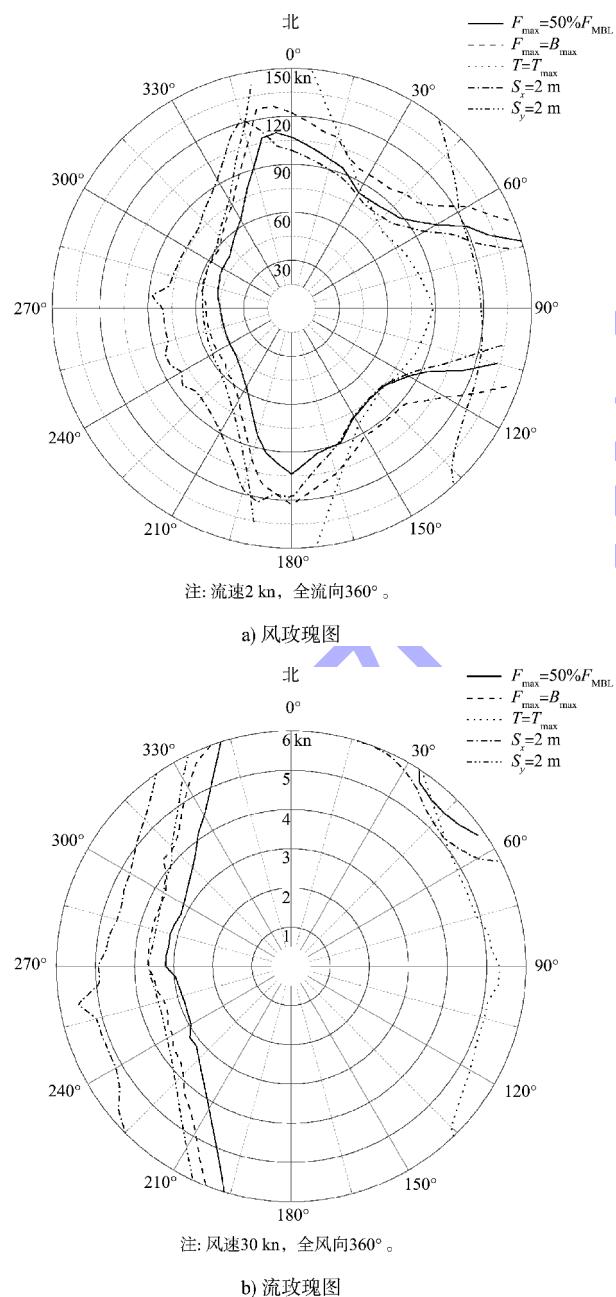


图 2 风和流玫瑰图
Fig. 2 Roses of wind and flow

由图 2 可知, 在对船横风或横流吹向码头方向, 碰垫的能力大小决定了 LNGBV-30k 船系泊时所能承受的极限风速或流速; 在对船横风或横流吹离码头方向, 系缆的最小破断力 F_{MBL} 决定 LNGBV-30k 船系泊时所能承受的极限风速或流速。经分析, 从目前的系泊布置整体来看, 在对船横风或横流吹离码头方向上, LNGBV-30k 船所能承受的极限风速和流速最小, 表明该系泊系统中的横向系缆能力决定了所承受环境条件的上限, 可通过调整系缆布置增加横向系泊力的方式提高整船的系泊性能。

3.3 系缆预张力对系泊性能的影响

船舶运动位移与系缆最大张力是 STS 安全稳定加注的关键系泊性能指标, 针对不同的作业环境及相应加注设备情况, 船舶运动位移与系缆最大张力有所不同。为研究不同船型系泊组合下的系缆预张力与系泊性能的关系, 本文选取 4 种典型 STS 系泊模型为研究对象:

1) LNGBV-20k 靠泊 CT-14k (简称 LNGBV-20k/CT-14k); 2) 2 万 m³ LNG 运输船 (LNGC-20k) 靠泊 FSRU (简称 LNGC-20k/FSRU); 3) LNGBV-30k 靠泊 CT-14k (简称 LNGBV-30k/CT-14k); 4) LNGBV-30k 靠泊 2.3 万 TEU 双燃料集装箱船 (CT-23k) (简称 LNGBV-30k/CT-23k)。相关船型主要参数信息见表 5。

表 5 STS 系泊船型的主要参数
Tab. 5 Main parameters for STS vessels

船型	船长/m	船宽/m	型深/m	吃水/m
LNGBV-30k	175.0	28.1	18.7	7.6
LNGBV-20k	157.2	25.0	14.0	5.7
LNGC-20k	157.2	25.0	14.0	5.7
CT-23k	393.9	61.3	33.5	16.0
CT-14k	324.6	51.0	29.9	17.0
FSRU	192.0	36.6	23.6	8.3

通过系统计算不同预张力下的系泊响应, 分析预张力对船舶运动位移与系缆最大张力的影响机制, 结果见图 3。

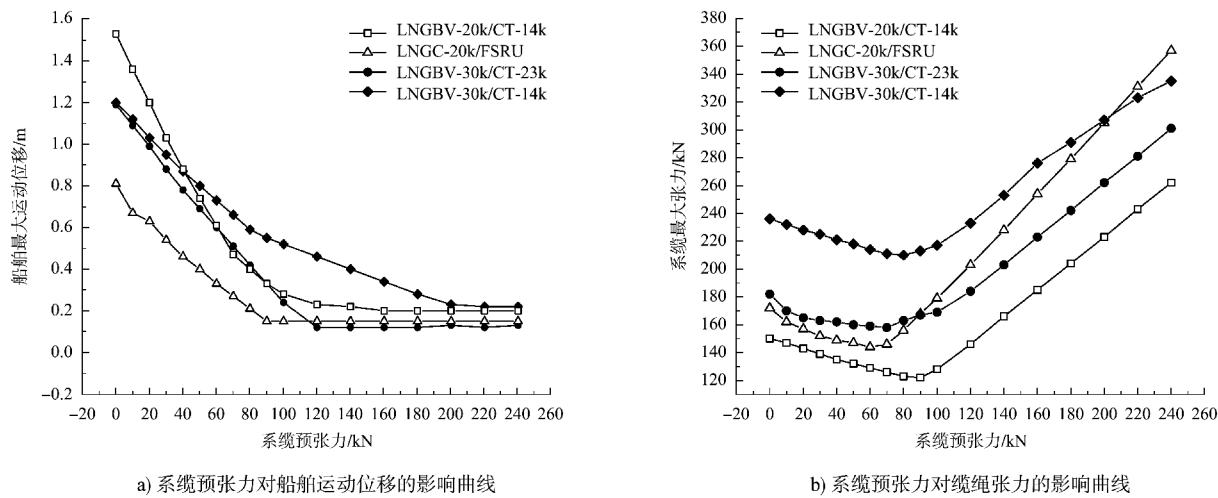


图 3 系缆预张力对船舶运动位移和缆绳张力的影响曲线

Fig. 3 Effect curves of mooring pre-tension force and ship displacement on cable tension

由图 3a) 可知, 在无预张力工况下, 船舶运动位移达到最大值。随着系缆预张力的增大, 位移呈现先快速减少、随后趋于稳定的变化趋势, 表明预张力对位移的限制效果在达到一定程度后趋于饱和。由图 3b) 可知, 系缆最大张力随着预张力的增大呈现先缓慢降低、后快速增大的非线

性变化特征, 表明存在一个使缆张力最小的最优预张力值。系缆最小破断力 F_{MBL} 的定量分析结果见表 6。可以看出, 当系缆预张力值为 $13\%F_{MBL}$ 附近时, 系缆峰值张力达到最小, 同时船舶运动位移可显著衰减至无预张力工况时的 35% 以下。

表 6 预张力对系缆张力与船舶位移的影响结果

Tab. 6 Effect results of pre-tension force on mooring line tension and vessel displacement

STS 组合	系缆动张力				船舶运动位移		
	T_s /kN	F_{min} /kN	F_{MBL} /kN	$(F_{min}/F_{MBL})\%$	S_{max} /m	$S_{F,min}$ /m	$(S_{F,min}/S_{max})\%$
LNGBV-20k/CT-14k	80	122	583	13.7	1.53	0.40	26.1
LNGC-20k/FSRU	70	144	583	12.0	0.81	0.27	33.3
LNGBV-30k/CT-23k	80	158	674	12.0	1.19	0.42	35.3
LNGBV-30k/CT-14k	90	210	674	13.4	1.20	0.59	18.3

注: T_s 为最优系缆预张力; F_{min} 为最优系缆预张力下的最小系缆动张力; F_{MBL} 为系缆最小破断力; S_{max} 为系缆无预张力下的最大船舶运动位移; $S_{F,min}$ 为在最优系缆预张力下的最大船舶运动位移。

4 结论

1) 根据舾装数选型的系泊设备, 在 OCIMF 规范推荐环境条件下, 采用本文提出的STS 靠泊码头的系泊布置方案, 其安全余量满足 LNG 加注作业要求。该方案可为 LNG 燃料货船同步实现装卸货与燃料加注的系泊设计提供核心设计依据及分析方法支撑。

2) 针对特定系泊系统配置, 当将系缆预张力

控制在 $13\%F_{MBL}$ 左右时, 存在最优系缆张力, 此时船舶运动位移可显著降低至无预张力时的 35% 以下。

3) 针对特定方向的系泊过载问题, 结合风-流玫瑰图分析提出双路径优化方法, 一方面可通过调整缆绳布设角度或预张力, 针向降低高负荷方向受力; 另一方面可根据船舶偏移方向, 提高相应系缆的预制力将运动位移控制在加注安全阈值内。

参考文献:

- [1] 龚世杰. 船对船原油过驳技术对港口发展的重要意义[J]. 中国港口, 2023(7): 13-15.
GONG S J. Importance of ship-to-ship crude oil barge technology to port development[J]. China ports, 2023(7): 13-15.
- [2] 陈海, 丁宝喜, 杨万博, 等. 大型双燃料集装箱船 LNG 船对船加注关键技术及安全管理[J]. 中国船检, 2020(12): 40-44.
CHEN H, DING B X, YANG W B, et al. Key technology and safety management of LNG ship-to-ship bunkering of large dual-fuel container ship [J]. China ship survey, 2020(12): 40-44.
- [3] 商丹, 张勇. 液化天然气码头选址关键因素[J]. 水运工程, 2014(2): 96-99.
SHANG D, ZHANG Y. Essential factors in site selection of LNG terminal[J]. Port & waterway engineering, 2014(2): 96-99.
- [4] 赵鑫哲. 沿海港口 LNG 加注站选址及设备配置优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
ZHAO X Z. Research on site selection and equipment configuration optimization of LNG bunkering stations in coastal ports [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [5] 罗肖峰, 范洪军, 程康, 等. 集装箱船 LNG 燃料加注与装卸货同时操作的安全区域分析[J]. 船舶工程, 2016, 38(4): 13-17, 69.
LUO X F, FAN H J, CHENG K, et al. Safety zone analysis of LNG ship-to-ship bunkering and cargo loading/unloading simultaneous operations for containership [J]. Ship engineering, 2016, 38(4): 13-17, 69.
- [6] 程康, 甘少炜, 范洪军, 等. LNG 运输船舶对船过驳安全性评估[J]. 船海工程, 2017, 46(6): 54-57.
CHENG K, GAN S W, FAN H J, et al. Study on safety assessment method of LNG ship to ship transfer [J]. Ship & ocean engineering, 2017, 46(6): 54-57.
- [7] 黄立文, 陶可健, 石峰, 等. LNG 船对船过驳作业锚泊稳定性数值模拟[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(1): 70-77.
HUANG L W, TAO K J, SHI F, et al. Numerical simulation of anchoring stability of LNG ship to ship transfer operation[J]. Ship science and technology, 2023, 45(1): 70-77.
- [8] 郑坤, 杨波, 白鑫, 等. 10 000 m³ LNG-FSRU 系泊分析[J]. 船海工程, 2017, 46(5): 82-85, 89.
ZHENG K, YANG B, BAI X, et al. Analysis of mooring system for the 10,000 m³ LNG-FSRU[J]. Ship & ocean engineering, 2017, 46(5): 82-85, 89.
- [9] 齐克亮, 赵永康, 刘亮, 等. 实验研究泊船系泊安全性能[J]. 船舶与海洋工程, 2021, 36(3): 5-11.
QI K L, ZHAO Y K, LIU L, et al. Experimental investigation on the hydrodynamic performance of quay-moored FSRU and LNG carrier [J]. Journal of ship mechanics, 2021, 25(6): 760-771.
- [10] 李永福, 梁圣英, 矫珊珊, 等. 大型 LNG 船系泊安全分析[J]. 船舶与海洋工程, 2020, 36(3): 5-11.
LI Y F, LIANG S Y, JIAO S S, et al. Large LNG carrier mooring safety evaluation [J]. Naval architecture and ocean engineering, 2020, 36(3): 5-11.
- [11] 孙明坤. 系泊船舶缆绳受力控制系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
SUN M K. Research on force control of mooring rope[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [12] 伍丹, 叶涛. 某小型 LNG 船系泊布置数值计算分析[J]. 船海工程, 2019, 48(2): 152-154, 158.
WU D, YE T. Safety analysis of large LNG ships mooring [J]. Ship & ocean engineering, 2019, 48(2): 152-154, 158.
- [13] Ship to ship transfer guide for petroleum, chemicals and liquefied gases[S]. London: Oil Companies International Marine Forum, 2013.
- [14] Recommendation No. 10-anchoring, mooring and towing equipment [S]. London: International Association of Classification Societies, 2017.
- [15] Mooring equipment guidelines (MEG4) [S]. London: Oil Companies International Marine Forum, 2018.