



鱼山 LNG 码头规划选址中的船舶通航关键问题及对策

龚海明¹, 李勤荣^{2,3}, 查雅平^{2,3}, 董 敏²

(1. 舟山市港航和口岸管理局, 浙江 舟山 316000; 2. 交通运输部规划研究院, 北京 100028;
3. 交通安全应急技术实验室, 北京 100028)

摘要: 舟山市鱼山绿色石化基地是我国七大石化基地的重要组成部分, 也是打造全国首个绿色发展标杆的石化基地, 液化天然气(LNG)码头建设对基地发展十分重要。通过挖掘水域优势, 将LNG船舶移动安全区设定为前1 n mile、后0.5 n mile、左右各1倍船长(约300 m), 给对向船舶预留了约360 m宽的通道, 解决了LNG船舶航行过程中对向封控的问题。通过使用代入法, 分区段定量分析LNG船舶进出港过程中需要协调避让的船舶数量, 形成LNG码头建设后的交通场景。通过对沪舟通道岱山北航道桥、LNG船舶和周围水域的三维建模, 采用操纵试验手段, 得出LNG专用航道转向点与跨海大桥的安全间距不宜小于6倍船长。

关键词: 鱼山绿色石化基地; LNG 船舶; 航道通过效率; 航道转弯与桥轴线安全距离

中图分类号: U658.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0043-06

Key issues and countermeasures for ship navigation in planning and site selection of Yushan LNG terminal

GONG Haiming¹, LI Qinrong^{2,3}, ZHA Yaping^{2,3}, DONG Min²

(1. Port and Waterway Administration of Zhoushan, Zhoushan 316000, China;
2. Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China;
3. Laboratory of Transport Safety and Emergency Technology, Beijing 100028, China)

Abstract: The Yushan green petrochemical base in Zhoushan is an important component of China's seven major petrochemical bases, and also the first petrochemical base to build a green development benchmark in the country. The construction of liquefied natural gas (LNG) terminal is very important for the development of the base. We explore the advantages of water areas to reasonably set up the movement safety zone for LNG ships as 1 n mile in front, 0.5 n miles behind, and 300 meters in each side, reserve a 360 meters wide channel for opposing ships, and solve the problem of opposing containment during the navigation process of LNG ships. By using the substitution method, we conduct a quantitative analysis on the number of ships that need to be coordinated and avoided during the entry and exit process of LNG ships, vividly depicting the traffic scene after the construction of the LNG terminal. Through three-dimensional modeling of the Daishan North Channel Bridge on the Shanghai-Ningbo Channel, LNG ships, and surrounding water areas, we use maneuvering test methods, and propose that the safety distance requirements for the turning point of the LNG dedicated channel and the cross sea bridge should not be less than 6 times the length of the ship.

Keywords: Yushan green petrochemical base; LNG ships; channel passage efficiency; safe distance between channel turning and bridge axis

收稿日期: 2023-06-02

作者简介: 龚海明 (1972—), 男, 高级工程师, 从事舟山航道锚地规划建设管理。

通讯作者: 李勤荣 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事安全和应急系统规划, 以及桥梁、码头等涉水工程通航安全研究。E-mail: 360123782@qq.com

舟山市鱼山绿色石化基地是我国七大石化基地的重要组成部分，是打造全国首个绿色发展标杆的石化基地，对构建我国新型石化产业格局、促进国际国内双循环、优化长江经济带和长三角地区化工产业结构、支撑浙江自贸试验区发展等具有重大战略意义。天然气是基地运行必需的煤炭替代燃料，也是乙烯裂解、制氢和下游新材料产业的重要化工原料，液化天然气(liquefied natural gas, LNG)气化产生的冷能在炼化产业中的梯级综合利用能够节约大量的用电能耗。LNG 泊位初步选址在鱼山岛北侧，在船舶通航方面，需要回答 2 个方面关键问题：1) 在舟山北侧开展 LNG 码头的建设，对现有岱山北航道船舶通航的影响；2) 进港航道转向点距离规划的沪舟跨海通道岱山通航孔较近。

针对类似问题，Vanem 等^[1]对 LNG 船的营运风险进行分析，评估远洋 LNG 船的全球运营风险；Nwaoha 等^[2]使用风险矩阵法对 LNG 船在运输过程中的主要危险源进行识别，并依托故障树方法分析其成因；Guo 等^[3]利用佩德森接地模型，对 LNG 船舶安全航道设计情况进行研究；甘浩亮等^[4]通过构建 LNG 船舶航行影响效率及时间模型，对影响程度进行解析；李红亮等^[5]解析 LNG 船舶航行时的特殊要求，建立航行占用率模型，并得到对其他船舶的航行影响程度；赵仓龙等^[6]通过构建数学模型计算 LNG 船舶航行对航道

内其他船舶通过能力的影响，并在深圳港进行实例应用；王超敏^[7]建立基于聚合法的模糊综合评价模型量化研究 LNG 船舶进出港航道适应性；ZHU 等^[8]用构建的综合评价云模型开展 LNG 船舶进出港适应性研究。

本文通过挖掘水域优势，合理设置 LNG 船舶移动安全区，使用代入法定量分析 LNG 船舶进出港过程中需要协调避让的船舶数量，通过三维建模和操纵试验给出 LNG 专用航道转向点与跨海大桥的安全间距，旨在为类似 LNG 船舶泊位的通航分析提供参考。

1 舟山北侧水域 LNG 码头建设对航道通航效率影响

1.1 码头选址及通航环境

本工程推荐的选址位于鱼山岛西北侧的天然矶头西侧，利用北侧矶头冲刷形成的深槽布置蝶形码头，通过反 L 形栈桥与后方陆域连接，代表船型为 18 万 m³ LNG 船舶，该船长 300 m、型宽 52 m、吃水 12 m，所需单向航道宽度 340 m，通航水深 14.3 m。自码头前沿至规划沪舟跨海通道岱山北航道桥轴线西侧约 1.8 km 处，布置 LNG 船舶专用航道，乘潮水位 2.8 m，乘潮保证率 90%，满足 JTS 165—2013《海港总体设计规范》^[9]关于乘潮水位一般不低于 90% 的要求。鱼山北侧 LNG 码头布置及进港航道见图 1。



图 1 鱼山北侧 LNG 码头布置及进港航道 (单位: m)

LNG 船舶主要通过岱山北航道驶入 LNG 进港专用航道, 再到达 LNG 码头港池水域。岱山北航道是舟山中部港域的主要进港航道, 全长约 90 km, 航道宽度 1 000 m, 为自然水深航道, 船舶密度较小, 日均 30 艘次左右。沿线主要同 2 条航路相交, 自东向西依次是东航路、三江—衢山客渡航线, 船舶密度分别约 75、45 艘次。在岱山北航道上分布

有 2 处浅点, 其中 1 处位于专用航道转向前的约 5 km 航道内, 最浅点 11.9 m, 18 万 m³ LNG 满载船舶需要乘潮 2.4 m, 码头靠泊时机一般选择在高潮后的初落时刻, 潮高大于 2.4 m, 满足船舶通航要求; 另 1 处位于岱山岛东北侧约 1 n mile 航道段(岱油 1 号浮西侧), 最浅点 13.8 m, 仅需要乘潮 0.5 m, 如图 2 中矩形区域所示。



图 2 工程周围通航环境

1.2 可作业时间分析

本工程 LNG 船舶在专用航道内受水深限制需要乘潮通航, 码头靠泊时机宜选择在高潮后的初落时刻, LNG 船舶压载离泊时, 吃水在 9.4 m 左右, 航道水深不再受限。LNG 船舶进港航道较长, 总航行时间约 4 h, 要求 LNG 船舶航行和靠离泊尽量在白昼进行, 对工程水域 2021 年 1 月(冬季)和 7 月(夏季)逐天的船舶在进港航道内航行和靠离泊时间窗口进行分析, 发现 1 月有 2 个连续 4 d、7 月有 2 个连续 2 d 的潮流窗口不满足要求。鱼山 LNG 码头年运输需求约 310 万 t, 平均 8d 1 艘次 LNG 船舶进港, 可满足作业时间的要求。

1.3 移动安全区设置

工程水域周边的 LNG 码头移动安全区设置差别较大。洋山 LNG 船舶移动安全区为前后 1 n mile、左右 1 倍船长(约 300 m), 避免与集装箱船在洋山警戒区以西水域会遇。穿山 LNG 船舶移动安全区为前 1 n mile、后 0.5 n mile、左右 0.2 n mile, 安排 1 艘消拖两用船和 2 艘拖轮形成移动安全

区。新奥 LNG 船舶移动安全区为 4 艘拖轮在前后 1 n mile、左右 500 m 建立移动安全区。考虑本工程进港航道较长, 船舶密度不大, 情形与洋山 LNG 类似, 建议鱼山 LNG 船舶移动安全区按照前 1 n mile、后 0.5 n mile、左右各 1 倍船长(约 300 m)进行控制。

1.4 LNG 船舶航行对岱山北航道的效率影响

岱山北航道在船舶通航方面存在 3 个特点: 1) 船舶密度不大, 每天约 30 艘次; 2) 船舶尺度较大, 其中船长在 100~200 m 的约占 62%, 船舶自身管理较规范; 3) 可航水域较宽, 东侧约 2/3 航道长度范围内, 以及航道宽度 1 000 m、两侧各 500 m 范围内, 水深基本都在 15 m 以上。为此 LNG 船舶在进出港过程中, 可充分利用航道宽度, 尽量靠右航行, 为对向航行船舶留出约 360 m 的可航水域(图 3), 远大于该航道目前最大航行船舶 5 万吨级单向航道所需通航宽度(约 230 m)。LNG 船舶在岱山北航道内航行过程中, 受对向船舶通航限制较小。



图 3 LNG 船舶航行过程中移动安全区在岱山北航道内情形

LNG 船舶在岱山北航道航行过程中，与东福山东—嵊山东习惯航路、东航路、蛇移门南向航道、三江—衢山—嵊泗客渡航路存在交叉，航行时需要协调船舶避让，会遇船舶须采取降速或绕行 LNG 船尾等措施。会遇时间很短，按照 12 kn 航速计算，避让 1.5 n mile 移动安全区耗时约 10 min，为此，定性来看对这些交叉航路的通航效率影响较小。此外，LNG 船舶在航经规划的沪舟通道岱山北航道通航孔时，按照现行相关桥区通航管理规定，需要对桥区水域内 LNG 对向船舶进行管控，岱山北航道船舶密度较小，船舶在桥区会遇概率较小；定性来看，LNG 船舶航行带来的桥区水域对向封航，对其他船舶影响较小。

使用岱山北航道的港区主要是嘉兴港、上海港金山作业区以及宁波舟山港岱山港区鱼山作业区和衢山作业区。嘉兴港、上海港金山作业区码头建设基本成熟；鱼山作业区与本 LNG 码头属同一业主，相互间影响可协调；衢山作业区在本工程东侧，靠近外海海域，其船舶进出与本工程 LNG 船舶交叉较少。综合来看，岱山北航道和周围习惯航路的船舶密度保持相对稳定。为了定量分析 LNG 船舶航行过程中对 3 条交叉航路以及沪舟通道岱山北航道通航孔桥区封航对其他船舶通航的影响，采用代入法对某大潮时段的 LNG 船舶航经岱山北航道各个时段（图 4）实际影响的船舶进行研究，分析结果见表 1。可以看出，LNG 船舶航行过程中，对东航路、东福山东—嵊山东习惯航路影响很小，一般协调 1~2 艘船舶避让；在航经三江—衢山—嵊泗客渡航线时，需要协调 4~5 艘次船舶避让，其中多数为客滚船，航速较快，船舶性能较好，避让较为便利；在航经大桥通航孔时，桥区水域对向封航最多影响 1 艘次船舶通航。

表 1 代入法分析结果

时间段	航段长度及交叉航路	交叉相遇船舶	对遇船舶	同向船舶
08:50:00—09:50:00	10 n mile, 形成护航船队	1 艘渔船	无船	无船
09:50:00—10:20:00	5 n mile, 东航路	1 艘客船	无船	无船
10:20:00—11:00:00	8 n mile 蛇移门南航道	1 艘客船	无船	无船
11:00:00—11:15:00	6 n mile	无船	无船	1 艘货船
11:15:00—11:35:00	3 n mile 客渡航路	2 艘客船, 2 艘货船	无船	1 艘货船
11:35:00—12:05:00	7 n mile	无船	2 艘货船	1 艘货船
12:05:00—12:25:00	3 n mile 桥区管控	无船	无船	1 艘货船



图 4 LNG 船舶使用岱山北航道的代入观测航段划分

2 进港航道转向点与规划的沪舟跨海通道岱山通航孔的安全距离研究

受水域限制, 岱山北航道转入专用航道的转向点距离规划的沪舟通道岱山北航道通航孔较近, 约 6 倍船长, 转向角约 60° 。船舶处在降速阶段, 操纵性能变差, 进一步增加了通航风险。分析 LNG 船舶在满载航经岱山北航道通航孔后转向进入专用航道, 或压载经专用航道转向经过桥区的操纵安全性, 是鱼山北侧进行 LNG 码头在通航方面需研究的另一主要问题。解决思路为利用船舶操纵模拟试验解决这一微观安全问题。

2.1 开展工程水域三维水深数据库和岱山北航道桥、LNG 船舶建模

运用挪威 Kongsberg 模拟器进行鱼山岛北侧附近水域的三维水深数据库建模; 按照桥跨方案对岱山北航道桥进行三维建模(图 5), 以 LNG 船舶 AL RUWAIS 轮为原型船进行 LNG 船舶数学建模。

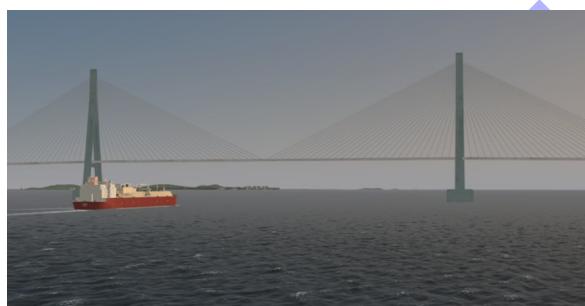


图 5 规划沪舟通道岱山北航道桥三维建模

2.2 开展船舶操纵试验分析安全间距

邀请舟山引航站高级引航员主导、社会船员配合, 共进行 19 次进出港和靠离泊操纵模拟试验, 均成功完成。满载进港过程中, 在 6 级横风情况下桥区水域航行时, 航行速度在 10 kn 左右, 船首向在 270° 左右, 船舶可以平稳过桥, 且船位处于航道中央左右 1 倍船宽以内。过桥后, 适当调整船位偏向航道中央右侧 1 倍船宽, 便于左转进入斜航道, 东南风较西北风更易左转; 航行速度在 8 kn 以下, 船首向在 245° 左右, 船位处于航道中央左右 1 倍船宽以内。操纵较为便利, 且船舶保向保位均较容易。船舶满载进港轨迹如图 6 所示, 工况为南风 6 级, 桥区航道落流流速 2 kn。

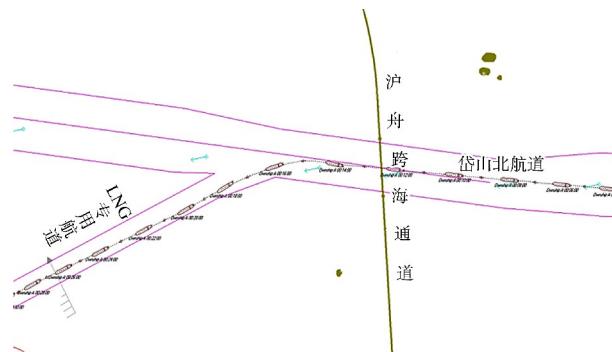


图 6 LNG 船舶满载进港桥区轨迹

压载出港过程中, 在 6 级横风情况下桥区水域航行时, 经过专用航道加速, 在转向点前船速已达 10 kn, 船舶舵效已恢复, 利用右舵中等舵角逐步右转进入桥区西侧航道, 正舵时, 船舶保向性能较好, 能保持在桥区航道中间驶过。船舶离泊出港轨迹如图 7 所示, 风、流与进港相同。

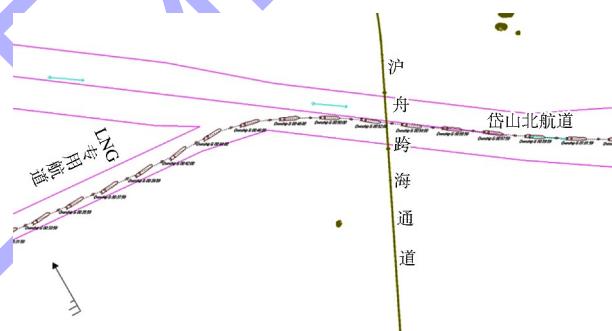


图 7 LNG 船舶离泊出港桥区轨迹

通过多轮的试验验证, 对于 LNG 船舶, 航道转向角度 60° 情形下, 航道转向位置与桥梁通航孔位置间距 6 倍船长, 符合船舶通航要求。

3 结论

1) 鱼山绿色石化基地 LNG 码头在船舶通航方面存在 2 个关键问题, 即 LNG 船舶移动安全区设置和对向封控措施对岱山北航道的影响, 以及专用航道转向点距离规划的沪舟跨海通道岱山通航孔较近。

2) 考虑岱山北航道宽度达 1 000 m, 将鱼山基地 LNG 船舶移动安全区设定为前 1 n mile、后 0.5 n mile、左右各 1 倍船长(约 300 m), 为对向航行船舶留出约 360 m 的可航水域, 远大于该航道目前最大航行船舶 5 万吨级单向航道所需通航宽度(约 230 m), 对向船舶交通流不用进行封控, 加之该航道船舶密度不大, 对岱山北航道船舶通

航影响总体较小。

3) 采用代入法分析 LNG 船舶航行过程中对所在航道和交叉航道内船舶通航的影响,能够直观地反映影响程度,可作为当前业界普遍采用的船舶交通流仿真的重要补充。

4) 经过多轮的船舶操纵模拟试验,对于 LNG 船航道转向角度近 60°情形下,转向位置与桥梁通航孔轴线安全间距不宜小于 6 倍 LNG 船长。

参考文献:

- [1] VANEM E, ANTAO P, QSTVIK I, et al. Analysing the risk of LNG carrier operations[J]. Reliability engineering and system safety, 2008, 93(9): 1328-1344.
- [2] NWAHOA T C, YANG Z, WANG J, et al. Adoption of new advanced computational techniques to hazards ranking in LNG carrier operations [J]. Ocean engineering, 2013, 72(11): 31-44.
- [3] GUO W Z, TONG X L. Study on the economic channel design for LNG ships using Pedersen grounding model[C]// IEEE. Proceedings of 4th International Conference on Transportation Information and Safety. New York: IEEE, 2017: 129-133.
- [4] 甘浩亮, 李惠敏, 王艳杰. LNG 船舶对航道通航效能影响的量化研究[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(1): 14-15, 17.
- [5] 李红亮, 杨传波. LNG 船舶进出港对珠海港主航道通过能力影响[J]. 水运工程, 2013(6): 85-88, 113.
- [6] 赵仓龙, 龚少军. LNG 船进出深圳港对航路通过能力的影响[J]. 中国航海, 2015, 38(1): 90-93, 126.
- [7] 王超敏. LNG 船舶进出港航道适应性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [8] ZHU M, WEN Y Q, ZHOU C H et al. Comprehensive evaluation cloud model for ship navigation adaptability[J]. TransNav-international journal on marine navigation and safety of sea transportation, 2014, 8(3): 331-336.
- [9] 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, 2013.
- (本文编辑 王璁)
- [10] MUFTI A A. Structural health monitoring of innovative Canadian civil engineering structures[J]. Structural health monitoring, 2002, 1(1): 89-103.
- [11] XU J S, GE G S. Application of FBG sensors in high-pile wharf structure monitoring system[C]//ICIT. Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Transportation. Singapore: Springer, 2016: 43-56.
- [12] 杨富春, 黄张裕, 洪毅, 等. GPS 在码头水平位移监测中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报. 2011, 9 (6): 155-158.
- [13] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [14] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [15] 张劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.
- [16] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范(2016 年版): GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [17] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [18] 朱立岩, 刘红彪, 张强, 等. 冲击荷载作用下高桩码头结构的动力响应分析[J]. 水道港口, 2014, 35 (4): 422-426.
- [19] 交通运输部天津水运工程科学研究院, 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范: JTS 304—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- (本文编辑 赵娟)