

· 港 口 ·



开敞岛礁海域环境大型 LNG 码头规划布置 关键问题^{*}

薛天寒，董 敏，沈 忱，李勤荣，查雅平，张民辉
(交通运输部规划研究院，北京 100028)

摘要：舟山群岛海域规划有多个 LNG 重要港址，对于保障长三角天然气供应具有关键作用。LNG 码头具有自身建设要求高和对外排他性强的特性，在舟山群岛海域为代表的开敞岛礁海域建设具有较大技术难度。以舟山六横和上海洋山 LNG 码头为例，系统分析开敞岛礁海域对 LNG 码头规划布置的影响，分析码头和航道布置关键问题，论证多个大型 LNG 泊位联合布置的安全间距，研究 LNG 船舶通航安全和通航效率影响，提出 LNG 码头规划布置方案。结果表明，开敞环境下布置多个大型 LNG 泊位时，与掩护条件较好时相比应适当增加安全间距，注意横风、横流以及斜顶流的影响，确保船舶通航安全，要控制 LNG 合理运输规模，采取通航优化措施，提升区域船舶通航效率。

关键词：开敞岛礁海域；LNG 码头；规划布置；通航影响

中图分类号：U656.1+39

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)07-0042-06

Key issues in planning and layout of large liquefied natural gas terminals in open island and reef waters

XUE Tianhan, DONG Min, SHEN Chen, LI Qinrong, ZHA Yaping, ZHANG Minhui

(Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China)

Abstract: There are many important liquefied natural gas (LNG) ports planned in the waters of Zhoushan Islands, which play a key role in ensuring the natural gas supply in the Yangtze River Delta. The LNG terminals have the characteristics of high self-construction requirements and strong external exclusivity, and it is technically difficult to construct such terminals in the open island and reef waters represented by the Zhoushan Islands. Taking Zhoushan Liuhe and Yangshan LNG terminals as examples, this paper systematically analyzes the influence of open island and reef waters on the planning and layout of LNG terminals, discusses key issues in terminal and channel layout, and demonstrates the safety spacing of joint layout of multiple large LNG berths. Considering the influence of ship navigation safety and navigation efficiency in LNG terminals, this paper proposes the LNG terminal planning and layout scheme. The results show that when multiple large LNG berths are arranged in an open water environment, the safety spacing should be appropriately increased compared with when the cover conditions are better, and attention should be paid to the influence of crosswind and inclined top flow to ensure the safety of ship navigation. It is also necessary to control the reasonable scale of LNG transportation, adopt optimal navigation measures, and improve ship navigation efficiency.

Keywords: open island and reef waters; LNG terminal; planning and layout; navigation influence

收稿日期：2022-09-04

*基金项目：国家重点研发计划项目（2020YFE0201200）

作者简介：薛天寒（1993—），男，硕士，工程师，从事港口规划及 LNG 码头规划布置。

通讯作者：董敏（1986—），男，硕士，高级工程师，从事港口规划及通航影响评价研究。

长三角区域经济发达, 天然气消费需求巨大, 建设液化天然气(LNG)码头、提高海上LNG接卸能力对于长三角能源供应安全具有重要意义。国家在舟山群岛海域布局有多个LNG港址, 是支撑区域天然气供应的重要保障。LNG码头具有自身建设要求高和对外排他性强的双重特性, 而舟山群岛海域属岛礁环境, 是世界最繁忙的海域之一, 规划布置LNG码头须面对复杂的外部条件和较高的技术要求。

薛天寒等^[1]、张宏等^[2]分别针对营口仙人岛港区、日照岚山港的LNG码头、航道及防波堤方案开展研究; 房卓等^[3]、廖诗管等^[4]、赵笑阳^[5]通过建立仿真模型及航道通过能力模型等方法分析LNG码头的排他性影响; 吴炜煌^[6]研究LNG船舶航行安全及交通组织。

面向开敞岛礁海域环境的LNG码头规划布置, 本文以舟山海域的六横和洋山为例, 分析大型LNG码头和航道布置关键问题, 论证多个大型LNG泊位联合布置的安全间距, 集成多项模型技术研究LNG船舶通航安全和影响问题, 为复杂条件下的LNG码头规划布置提供技术参考。

1 大型 LNG 码头布置的关键问题

1.1 大型 LNG 码头布置要求

与其他码头布置相比, LNG码头由于较强的特殊性和排他性, 对自然条件、空间位置的要求较高, 同时也对港区整体产生影响。因此, LNG码头的布置需要统筹考虑自身和港区整体要求。梳理规范要求和工程经验, 大型LNG码头关键的布置要求主要包括:

1) 选址。LNG码头选址应尽量相对独立, 应与人口密集的区域保持必要的安全距离, 应在方便LNG船舶进出和靠离码头、对其他船舶航行干扰小的位置。

2) 通航条件。应尽量满足LNG船舶不乘潮通航要求, 不宜选在进出港航道较长、船舶密度较大的水域, 否则应进行专项评估。

3) 安全保障。LNG船舶在海港进出港航道航

行时, 通航组织要求较高, 通航管制相对严格, 进出港航行、靠泊操作和装卸作业时应满足作业条件标准。

1.2 开敞岛礁海域环境影响

开敞岛礁海域的水文、气象、地质条件复杂, 布置LNG码头需要开展系统研究。分析开敞岛礁海域环境特征, 对LNG码头最主要的影响集中在4个方面:

1) 水动力环境对码头位置和轴线的要求。码头轴线走向确定的原则是使LNG船舶在港停泊作业时所受的外力作用尽量小, 即码头轴线尽量顺风、顺浪、顺流。若强浪与强流的夹角较大, 无法同时满足上述“三顺”原则, 则需要分析风、浪、流的主导影响因素。

2) 多个大型LNG泊位联合的平面布置问题。开敞环境复杂, 通航和作业窗口有限, 通航及靠离泊难度更高, 平面布置上需要保证多个LNG泊位的同时作业和能力发挥。

3) 对船舶进出港和靠离泊的影响。LNG船舶通航问题是极为关键和复杂的, 开敞环境下的风、浪、流对航道尺度和走向、通航窗口期、靠泊条件、离泊条件和应急离泊等产生明显影响, 同时岛礁对航道位置、船舶通航组织等造成约束。

4) 对码头作业时间和通过能力发挥的影响。船舶作业条件直接关系通过能力发挥, 需要研究开敞条件下的泊稳条件和安全保障问题。

1.3 舟山群岛海域环境特征

舟山群岛海域是典型的岛礁海域, 通航条件复杂、航线航路密集交汇、岛屿岛礁分布广泛, 与我国其他海域差别较大^[7], 开展LNG码头规划布置具有一定技术难度。以舟山六横和上海洋山为例, 分析研究开敞岛礁海域LNG码头规划布置的关键问题。

六横LNG码头位于舟山群岛南翼, 受杭州湾水沙环境影响显著, 同时该海域具有滩槽地形复杂、岛屿众多、动力强劲、泥沙含量相对较高以及港区和航线密集等基本特征。洋山LNG码头位于舟山群岛北部的崎岖列岛, 由以大洋山岛和小

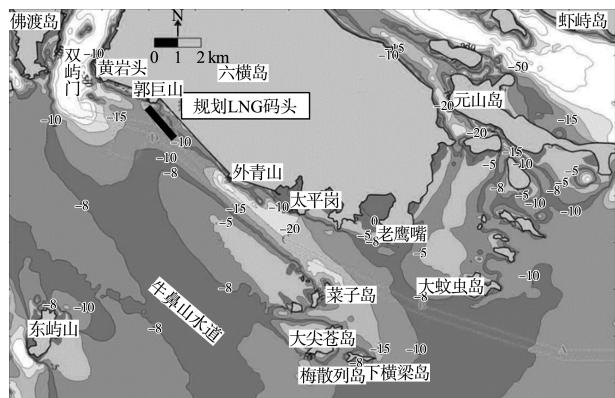
洋山岛为主的南、北两列岛链构成。洋山 LNG 码头位于北岛链南侧，海域开阔，船舶流量较大。

2 平面布置分析

2.1 码头轴线

2.1.1 风的影响分析

在舟山六横的 LNG 码头平面布置中，综合分析风、浪、流等条件确定码头轴线。舟山六横 LNG 码头区域水下地形见图 1，近岸发育水深超过-10 m 的深槽，西侧郭巨山和外青山之间深槽水深在-15~-10 m。



注：水深为理论基面。

图 1 舟山六横 LNG 码头区域水下地形（单位：m）

根据有关风况统计资料，全年风速频率最高的是 NNW—NNE 方向，频率合计为 35.43%，2018 年全年风速大于 15 m/s 的频率为 0.45%，全年平均风速为 5.8 m/s。分析认为风的影响不是主要因素。

2.1.2 波浪影响分析

受周边岛屿及六横本岛掩护，东南向外海较开放，主要受 ESE—S 向波浪影响。年平均波高 0.4 m，年平均周期 4.5 s，实测最大波高 1.8 m，最大周期 17.0 s。据虾峙门外临时波浪站 2018 年实测波浪资料统计，常浪向为 ESE 向，出现频率为 20.65%；次常浪向为 E 向，出现频率为 18.67%；强浪向为 SE 向，次强浪向为 ESE 向。大浪主要位于 ESE—SSE 向，该方向的浪可较好地通过牛鼻山水道传播进入工程海域，对本工程产生较大影响。

2.1.3 潮流影响分析

依据 2020 年 1 月中上旬进行的 7 条垂线的

小、中、大潮水文全潮测验，本区域各站涨、落潮流总体沿深槽地形呈往复运动，平均流速大潮基本为 0.40~0.71 m/s，中潮基本为 0.25~0.47 m/s，小潮基本为 0.15~0.47 m/s。从规划 LNG 码头前沿走航式流速观测结果及锚系点连续观测结果看，码头前沿自近岸边滩向深槽水域涨落潮流速逐渐增大，但涨落潮主流向差异不大，都呈往复流特征。2020 年 4 月码头前沿大潮走航流速矢量见图 2。

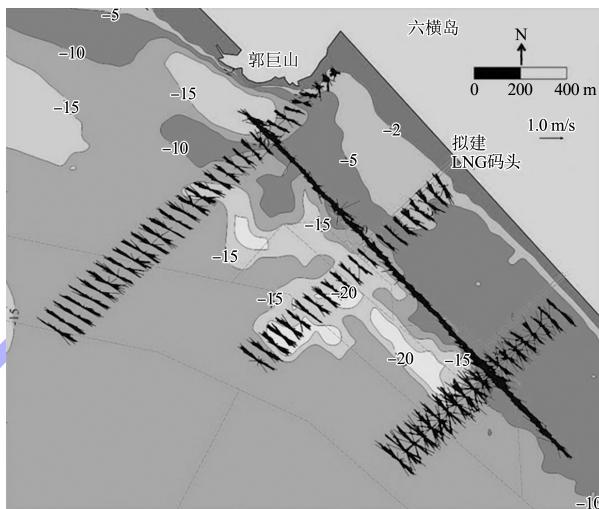


图 2 2020 年 4 月码头前沿大潮走航流速矢量图（单位：m）

波浪、潮流应是 LNG 码头轴线走向的控制性因素，因此 LNG 码头轴线走向应尽量与波浪潮流的主方向基本一致。确定六横 LNG 码头轴线顺岸，与涨落潮主流向和波浪常浪向、强浪向基本顺直。然后，结合潮流泥沙数学模型和操船试验，从减小对水动力的影响和方便 LNG 船舶靠离泊、紧急离泊等方面，对码头轴线进行优化。舟山六横 LNG 码头布置见图 3。

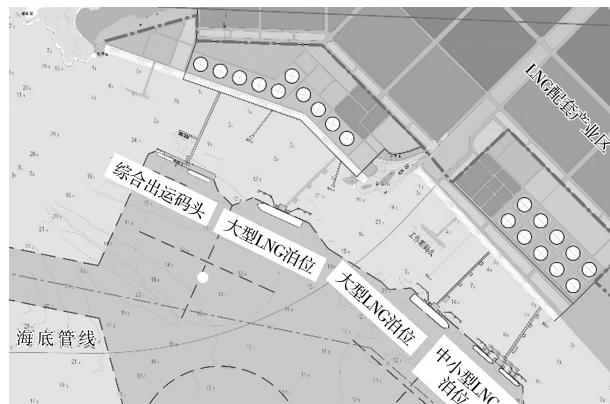


图 3 舟山六横 LNG 码头布置

2.2 多个大型 LNG 泊位联合布置

多个大型 LNG 泊位联合布置的重点是泊位间距。LNG 泊位之间的安全间距问题关系到船舶通航安全和能力发挥, 间距越大, 相互干扰越小。根据 JTS 165-5—2021《液化天然气码头设计规范》^[8], 相邻的液化天然气泊位, 或相邻的液化天然气泊位与液化烃泊位, 其船舶间净距不应小于 0.3 倍最大设计船长, 且不小于 35 m。对于无掩护或者掩护条件一般的情况, 应适当增加安全间距, 从减少泊位之间相互干扰和能够发挥多个泊位通过能力的角度应适当增加安全间距。需要考虑的是: 1) 一艘 LNG 船卸船作业时, 另一泊位靠离泊作业不受干扰, 保证 2 个泊位能够同时安全运营; 2) 根据实际适当考虑 2 个泊位中间水域施工等工作船舶进出需要, 可考虑一艘 LNG 船系泊装卸作业, 另一泊位无船舶作业条件下, 相关船舶安全进出中间水域。

在洋山第 2 个 LNG 泊位的规划中, 充分考虑开敞式布置和大、小洋山之间潮汐主通道较大潮流影响, 减少与北侧已建 LNG 码头相互影响的风险, 保障靠离泊和运营安全, 拉大 2 个 LNG 泊位的间距, 为 300 m 左右。同时考虑到南侧规划大型油品泊位与 LNG 泊位较近, 且受限于与下游岛屿的安全距离, 大型油品泊位回旋水域将向上游靠近, 较大可能与 LNG 船舶产生冲突, 考虑到洋山 LNG 码头对于上海能源安全的极端重要性, 为保障 LNG 码头能力的发挥、减少相互干扰和船舶通航、靠离泊安全, 取消大型油品泊位规划。上

海洋山 LNG 码头布置见图 4。



图 4 上洋洋山 LNG 码头布置

2.3 航道布置

以舟山六横 LNG 码头为例, 针对口外横流、横风较大的问题, 在船舶操纵试验中, 设置 2 个进港航道方案: 1) 口外 OA 段维持原轴线; 2) 口外 OA 段在礁石外侧段轴线向南偏转 30°。船舶操纵试验结果表明: 在规划航道航行时, 横风 6 级时, 受最大横流 1.00 m/s 情况下, 船舶能够自主顺利进出航道。船位在规划航道中央线 1~2 倍船宽以内。外航道 OA 段部分采用斜航道 30° 时, 增加了 1 次船舶转向, 不能明显解决在该航道船舶受横流的问题, 综合比较不建议采用此方式。

针对航道周边存在的礁盘问题, 综合考虑船舶操纵经验与试验结果, 认为岛礁与航道边缘最小距离不宜小于 LNG 船舶航迹带宽度的一半, 以保证有足够的应急反映时间。并对转弯部分进行切角处理, 增大转向区域的可航行水域。舟山六横 LNG 码头水域布置见图 5。

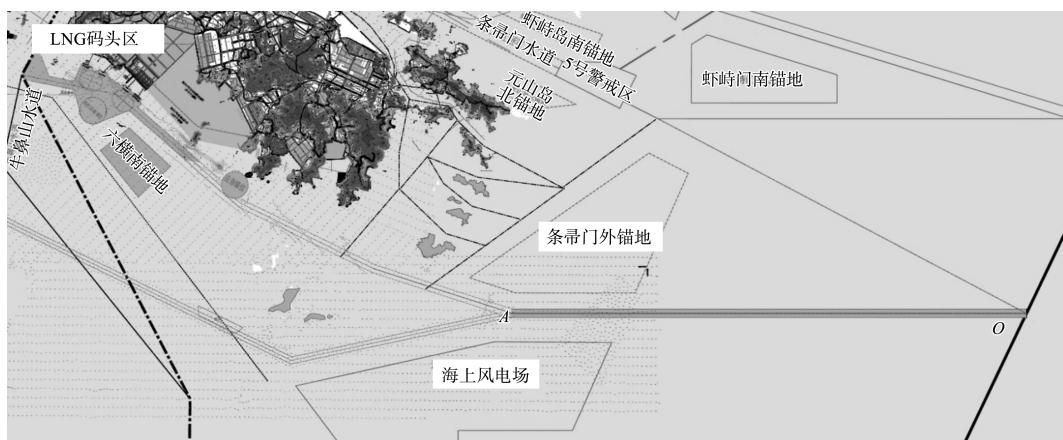


图 5 舟山六横 LNG 码头水域布置

3 通航影响论证

3.1 通航安全影响分析

通航安全影响分析的主要内容包括通航环境分析、LNG 船舶通航线路和交通组织方案、进出港和靠离泊的操纵模拟试验以及相应的优化建议等。

以舟山六横 LNG 码头为例，进行了 6 组航道操纵模拟试验和 12 组靠离泊试验。

3.1.1 航道操纵模拟

模拟试验考虑了满载进港和压载出港、不同风向的 6 级风以及不同进港航道方案，对不同航道段的试验结果进行分析。

试验结果表明，在横流+横风的不利组合条件下（如 1.00 m/s 横流和 6 级北风组合），LNG 船舶在口外段航行时无法保持在预定的计划航线上，易偏离至航道边缘。考虑在不利横风、横流组合下 LNG 船舶有一定偏离航道的风险，通航宽度取 360 m；考虑到口外段航道风、浪条件较差，横流较大，且口外段水深条件较好，需要疏浚的范围较小，口外 OA 段航道通航宽度放宽至 400 m。

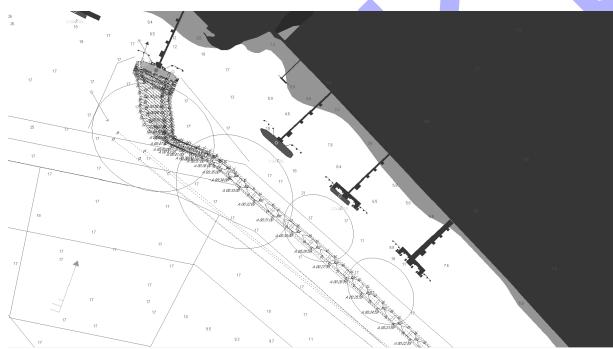


图 6 LNG 船舶靠泊轨迹

3.1.2 码头靠离泊

模拟试验考虑了直接靠泊和掉头靠泊、不同风向的 6 级风以及不同涨落潮流。在“满载进港，掉头靠泊，开风 6 级（开风风向为船舶驶离码头的方向），涨潮流速 0.75 m/s”和“满载进港，直接靠泊，开风 6 级，落潮流速 0.75 m/s”2 种工况下未能成功靠泊，主要是受到开风和斜顶流的共同作用。LNG 船舶靠泊轨迹见图 6。试验结果表明：

靠泊作业应限制在风力 6 级以内，流速应控制在 0.50 m/s 以内；离泊作业应限制在横风 6 级以内，流速不超过 0.75 m/s。

基于规范要求和操船模拟试验结论，推算码头作业时间。结合波浪数学模型和波浪观测分析，综合波高和波周期两个影响因素，8.0 万~26.6 万 m³ LNG 船和 4.0 万 m³ LNG 船在波浪影响下不可作业时间均为约 16 d，根据工程附近实测风速资料，6 级及以上风出现的时间约 32 d。综合分析，对 4.0 万 m³ 及以上 LNG 船舶，全年可作业时间在 320 d 左右。

3.2 通航效率影响分析

LNG 船舶通航管制严格，会对航道通过能力、港区其他船舶通航以及 LNG 船舶自身通航效率产生影响。六横港区作为规模化的 LNG 港址，LNG 船舶流量较大，对通航效率影响开展仿真研究，对船舶进出港全过程进行模拟。

3.2.1 工况设置

综合运输需求分析和建设条件，设置了 3 组 LNG 泊位建设规模情景：2 个大型接卸+4 个水水中转泊位、3 个大型接卸+4 个水水中转泊位、4 个大型接卸+2 个水水中转泊位。针对不同规模情景，从船舶通航组织、船舶通航管制、到港船型结构等方面的不同设计工况。仿真工况设置见表 1。

表 1 仿真工况设置

类别	不同工况
泊位建设规模	①2 个大型接卸+4 个水水中转泊位，接卸量 1 200 万 t/a，中转量 400 万 t/a； ②3 个大型接卸+4 个水水中转泊位，接卸量 1 800 万 t/a，中转量 400 万 t/a； ③4 个大型接卸+2 个水水中转泊位，接卸量 2 400 万 t/a，中转量 200 万 t/a
船舶通航组织	①单航道进出港，大小船同航路； ②多航道进出港，小船走其他航道出港
船舶通航管制	①提前清空航道，不允许尾随； ②允许尾随
到港船型结构	①主力船型占比 95%，更大船型占比 5%； ②主力船型占比 85%，更大船型占比 15%

3.2.2 影响分析

当布置 2 个大型 LNG 接卸泊位+4 个 LNG 水水中转泊位、LNG 接卸量达 1 200 万 t 时, 受 LNG 接卸船舶影响的船舶占进出港总船舶数量的 14.5%, 受 LNG 通航影响的船舶单船平均等待时间达 7.9 h, 其中 LNG 接卸船舶自身影响时间超 10 h, 增加监管风险; 采用 LNG 船舶后允许尾随的通航组织模式, 全年的等待船舶数量下降 22.3%, 单船平均等待时间减少 2.4 h。

当布局 3 个大型 LNG 接卸泊位+4 个 LNG 水水中转泊位、LNG 接卸量达 1 800 万 t 时, LNG 船舶通航密度较大, 为确保 LNG “运进来” 和 “输出去”, 在保障安全前提下, 同时采取允许尾随 LNG 船舶、多航道分道通航等优化措施。建议适当控制 LNG 船舶承运数量, 降低 LNG 运输船舶的通航干扰。

当布局 4 个大型 LNG 接卸泊位+2 个 LNG 水水中转泊位、LNG 接卸量达 2 400 万 t/a 时, 即使同时采取允许尾随 LNG 船舶、多航道分道通航、优化 LNG 船型结构等措施, 多个 LNG 泊位同时运营相互之间依旧存在明显制约, 尤其是 LNG 大型接卸船舶进出港效率较低。

3.2.3 建设规模建议

近期以 2 个大型 LNG 接卸泊位+4 个 LNG 水水中转泊位起步, 在保障安全的前提下允许船舶尾随进港。结合发展需求和通航管理经验, 采取优化 LNG 船型结构、优化调度等方式, 逐步扩大建设规模。

4 结语

1) 开敞岛礁海域建港条件和通航环境复杂, 要充分论证建设规模、码头布置、航道布置、通航安全和通航影响等, 保障码头运营安全, 减少相互干扰。

2) 开敞环境下布置多个大型 LNG 泊位时, 与掩护条件较好时相比应适当增加安全间距, 主要考虑一艘 LNG 船系泊装卸作业, 另一泊位靠离泊作业不受干扰, 可按船舶净距 300 m 左右考虑, 并结合操船模拟等进一步确定。

3) 深入研究 LNG 船舶进出港和靠离泊作业条件, 注意横风、横流以及斜顶流的影响, 确保船舶通航安全。

4) 开敞岛礁环境下易受风流等影响, 大型 LNG 船舶通航窗口有限, 互相干扰可能性加大。应控制 LNG 合理运输规模, 采取允许船舶尾随、船舶组队、错峰错时通航等优化调度措施, 提升区域船舶通航效率。

参考文献:

- [1] 薛天寒, 杨欣, 沈忱, 等. 营口港仙人岛港区 LNG 码头选址规划方案[J]. 水运工程, 2022(2): 64-69, 94.
- [2] 张宏, 高涛, 马杰, 等. 日照港 LNG 码头配套航道及防波堤工程方案[J]. 水运工程, 2019(2): 107-111, 169.
- [3] 房卓, 姚海元, 黄俊, 等. 多智能体仿真在 LNG 码头选址及港口规划中的应用[J]. 水运工程, 2017(12): 123-128.
- [4] 廖诗管, 翁金贤, 胡甚平. 液化天然气船通航模式下的航道通过能力评价方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 290-297.
- [5] 赵笑阳. LNG 船舶进出港对航道通航效率影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [6] 吴炜煌. 港口水域 LNG 船舶航行安全领域及交通组织研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [7] 曾建峰, 郭天润. 宁波舟山港条帚门外锚地工程设计[J]. 水运工程, 2020(7): 88-93.
- [8] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 液化天然气码头设计规范: JTS 165-5—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.

(本文编辑 王璁)