



# 天津港大港港区 LNG 双泊位 联合运行通航管理方案\*

李延伟<sup>1,2</sup>, 周瑞赛<sup>3</sup>, 王闻恺<sup>4</sup>

(1. 武汉理工大学, 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456;

3. 天津海事局, 天津 300211; 4. 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** 为满足北方地区冬季 LNG 高峰期保供目标, 部分渤海沿海港口在同一港池内规划布置双 LNG 泊位。鉴于双泊位联合运营下的 LNG 船舶关联性强且操纵难度高的特点, 有必要对 LNG 双泊位联合运行进行调度管理方案研究。以国内首座正式投产运营的 LNG 双泊位为例, 基于船舶操纵模拟仿真方法, 通过分析 LNG 船舶航行对航道通航效率影响及相邻泊位联动性, 提出双泊位运营下的 LNG 船进出港优先级。在此基础上, 结合 LNG 双泊位运营特点和通航管理规则, 制定近期和远期不同阶段的船舶联合调度组织模式。研究结论可为单港池 LNG 双泊位的通航管理提供决策依据。

**关键词:** LNG 双泊位; 联合运行; 进出港优先级; 调度组织模式

中图分类号: U653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0042-07

## Management plan for joint operation of LNG double berths in Tianjin Port area

LI Yanwei<sup>1,2</sup>, ZHOU Ruisai<sup>3</sup>, WANG Wenkai<sup>4</sup>

(1. Intelligent Transportation Systems Research Centre, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Tianjin Research Institute For Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China;

3. Tianjin Maritime Safety Administration, Tianjin 300211, China;

4. China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China)

**Abstract:** To meet the target of maintaining LNG supply during the winter peak period in northern China, two LNG berths are planned for the same harbor basin in Bohai Sea. In view of the complexity and relevance of LNG ships entering and departing ports under the joint operation of berth groups, it is necessary to study the joint operation and dispatching management of two LNG berths. Taking the first LNG double berth officially put into operation in China as an example, based on the ship maneuvering simulation method, this paper analyzes the influence of LNG ship navigation on the passage capacity of the waterway and the adaptability of adjacent berths, and puts forward the priority of LNG ships in and out of the port under the operation of double berths. On this basis, combined with the characteristics of LNG double berths operation and navigation management rules, the short-term and long-term ship joint dispatching organization model at different stages are formulated. The research results can provide decision-making basis for the navigation management of LNG double berths at a single port site.

**Keywords:** LNG double berths; joint operation; priority of inbound and outbound; scheduling organization model

收稿日期: 2023-08-25

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(51979132); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS20230407)

作者简介: 李延伟(1986—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为交通信息工程。

随着国家加快推动煤改气工程,环渤海地区将重点布局多个具备液化天然气储运能力的重要港口,对于保障国家能源结构和运输安全具有重要意义<sup>[1]</sup>。按照国家上位规划,为完善环渤海地区液化天然气(liquefied natural gas, LNG)码头布局,环渤海地区将新建多个 LNG 泊位。受港口条件和接收站限制,未来同一 LNG 接收站将配套 2 个 LNG 泊位,或同一水域出现多个 LNG 泊位。

由于 LNG 船舶航行于港口水域时采取交通管制、设置移动安全区和安排警戒船等保障措施,长时间、大范围占用航道资源,造成航道通过能力明显损失<sup>[2-4]</sup>。吴炜煌<sup>[5]</sup>构建了 LNG 船舶航行安全领域范围模型,通过船舶仿真试验和理论计算,研究 LNG 船舶进出港交通组织方案;甘浩亮<sup>[6]</sup>从非传统交通组织角度出发,提出降低 LNG 船舶航行对整体交通组织影响最小方案;沈忱等<sup>[7]</sup>利用多智能体仿真建模,通过定量分析曹妃甸 LNG 码头数量与航道通过效率关系,提出优化船舶航行方案;李红亮等<sup>[8]</sup>分别构建船舶航行影响率模型和航道占用率模型,研究 LNG 船通航对航道通航效率影响;沈忱等<sup>[9]</sup>分析单个港区多个 LNG 泊位同时运营对航道通航效率的影响,测算了 LNG 码头合理建设规模;邬惠国等<sup>[10]</sup>利用熵值法确定因素权重,建立单个 LNG 泊位船舶进出港航行组织方案比选体系,评价不同进出港航行方案。

目前,国内尚未有 2 个 LNG 泊位同时运营调度管理经验。本文基于船舶操纵模拟方法,在分析 LNG 双泊位运营对船舶通航安全及航道通航效率影响基础上,研究双泊位联合调度组织模式,以期 2 个及多个 LNG 泊位同时运行管理及港口调度提供理论支撑和科学引导。

## 1 LNG 双泊位通航影响研究

### 1.1 航道通过能力影响

由于 LNG 船舶危险特殊性,在航道内航行期间应远离其他通航船舶。根据通航管理规则,天津港大港港区 LNG 船舶进出港采取独占式通航模

式, LNG 船在大港双向航道内航行及港池内靠离泊旋回作业期间清空封锁航道,其他船舶不得进入航道, LNG 船完成靠泊作业后方可允许其他船舶进出航道。该模式下, LNG 船单次进出港同时延误同向及对向航行船舶,对航道通过能力影响明显。

影响 LNG 船同向航行通航船舶数量的因素有延误航道实施封航时正常通航船舶数量、等待恢复正常通航船舶数量以及 LNG 船舶安全距离外通航船舶数量,计算式为:

$$N_d^s = \frac{L_{ch} + L_{sh} + S_c}{v_{sh} T_{int}} + \frac{S_{LNG} + Z_{saf} + L_{LNG}}{v_{LNG} T_{int}} + \frac{S_w}{v_{sh} T_{int}} \quad (1)$$

影响 LNG 船对向航行船舶数量的因素有延误同向通航船舶数量以及无法对向通航船舶数量,计算式为:

$$N_d^r = \frac{L_{ch} + L_{sh} + S_c}{v_{sh} T_{int}} + \frac{S_{LNG} + Z_{saf} + L_{LNG}}{v_{LNG} T_{int}} + \frac{S_w}{v_{sh} T_{int}} + \frac{L_{ch}}{v_{LNG} T_{int}} \quad (2)$$

式中:  $N_d^s$  为 LNG 船影响同向航行船舶数量;  $N_d^r$  为 LNG 船影响对向航行船舶数量;  $L_{ch}$  为大港航道长度,取 36 km;  $L_{sh}$  为航道航行船舶平均长度,取 110 m;  $S_c$  为清空航道时,其他船舶位于锚地-航道或泊位-航道间距离,取 1 n mile;  $S_{LNG}$  为清空航道前,到港 LNG 船与航道端部距离,取 6 n mile;  $Z_{saf}$  为 LNG 船移动安全区,取 2 n mile;  $L_{LNG}$  为到港 LNG 船平均长度,取 290 m;  $S_w$  为锚地-航道间距离,取 6 n mile;  $v_{sh}$  为船舶平均航速,取 10 kn;  $v_{LNG}$  为 LNG 船平均航速,取 8 kn;  $T_{int}$  为船舶到港时间间隔,取 2 h。

由式(1)计算,影响单艘 LNG 船舶同向航行船舶的数量为 1.89 艘;由式(2)计算,影响单艘 LNG 船对向航行船舶的数量为 3.14 艘。

根据实际操船经验, LNG 船尽量选择平潮缓流时段靠离泊作业,最优靠离泊时间在高平潮后 0~0.5 h 和低平潮后 1.5~2.0 h,该窗口期流速较缓,利于 LNG 船靠离泊作业,港池水域流场见图 1。因此, LNG 船存在靠离泊操纵时间窗口。同时,我国多数规模化港口要求 LNG 船仅在白天通航,使得进出港窗口期及航行时间受到限制。目前,中石化一期 LNG 泊位进港船舶通常

选择 08:00 时进入大港航道, 12:00—13:00 时完成靠泊作业, 一艘船舶进港、靠泊时间约 4~5 h, 该时段其他船舶不得利用航道。LNG 船在航道、港池航行、作业期间, 其他船舶不得进入航道, 单个 LNG 泊位的运营对大港港区航道通过能力影响明显。

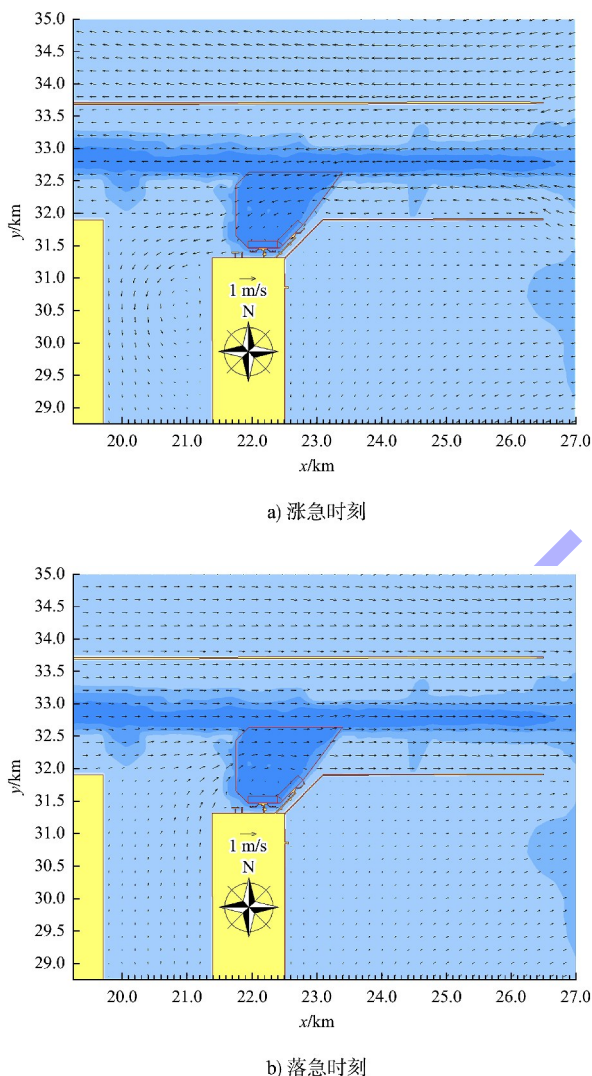


图 1 中石化 LNG 双泊位港池水域流场

随着双泊位投产运营, 大港港区 LNG 船数量进一步增加, 预计到港船舶流量由每月 8~9 艘增加至 13~15 艘, 一天内可能 2 艘 LNG 船同时进港。到港 LNG 船数量的增多加剧了挤占港区其他船舶通航的时间, 2 艘 LNG 船同天到港将完全占用航道资源, 严重影响和制约航道通航效率, 对港口船舶组织调度提出新的挑战。

## 1.2 LNG 双泊位间作业干扰

中石化 LNG 码头一、二期泊位相邻, 回旋水域位于码头正前方。一、二期两泊位船舶共用同一港池水域靠离泊作业, LNG 船进出港及作业相互之间存在干扰性和联动性, 两泊位布置关系见图 2。因此, 两泊位船舶不可同时靠离泊, 应合理调度两泊位的船舶进出港交通组织。

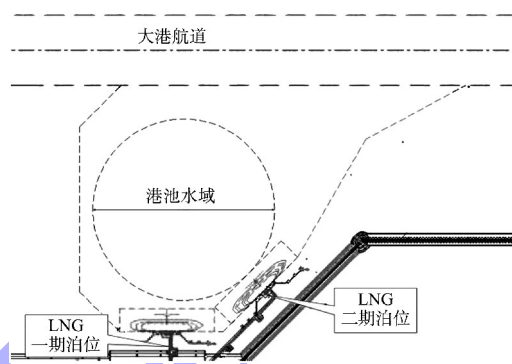


图 2 中石化天津 LNG 码头一、二期泊位关系

## 1.3 双泊位船舶靠、离泊安全

中石化 LNG 一、二期泊位同时停靠最大 26.6 万  $\text{m}^3$  LNG 船时, 两船最小净距仅为 160.88 m。双泊位船舶在靠泊、离泊作业时很可能影响相邻泊位船舶安全。LNG 船吃水小, 空载时水上建筑物受风面积较大, 船体受偏 N 或 NW 大风作用易发生航行偏移, 特别是遇到主机、舵机、拖轮失灵等突发紧急情况时, 船舶航行态势易偏离预定轨迹, 碰撞相邻泊位停靠的船舶。

## 2 进出港顺序

### 2.1 进港顺序

1) 船舶进港靠泊时长。中石化一期泊位 LNG 船停泊状态下呈东西向  $90^\circ \sim 180^\circ$ ; 二期泊位 LNG 船停泊状态下呈  $45^\circ \sim 135^\circ$ , 船头朝外。二期泊位 LNG 船掉头完成停泊作业所需转向角度更大, 作业用时更长。因此, 二期泊位 LNG 船进港靠泊时长明显长于一期泊位。

2) 船舶靠泊操纵安全性。通过开展船舶操纵模拟试验, 研究双泊位同时运营条件下的船舶靠泊安全性, 船舶进港靠泊轨迹见图 3。中石化一、二期泊位船舶共用港池进行回旋作业, 需充分考



虑船舶离泊时与相邻停靠的船舶关系和安全性。若二期泊位 LNG 船优先进港停靠,则当一期泊位 LNG 船进入港池靠泊作业时,易受停泊二期泊位的 LNG 船遮挡,驾驶人员视野受限,影响对一期泊位位置的准确判断;同时,受到强风向 NW 作用,停靠一期泊位的船舶极易偏向二期泊位,碰撞二期泊位停靠的船舶,发生危险事故。

为充分利用进港窗口期和保障船舶安全,在中石化一、二期双泊位靠泊条件相同时,LNG 船舶优先靠泊一期泊位。

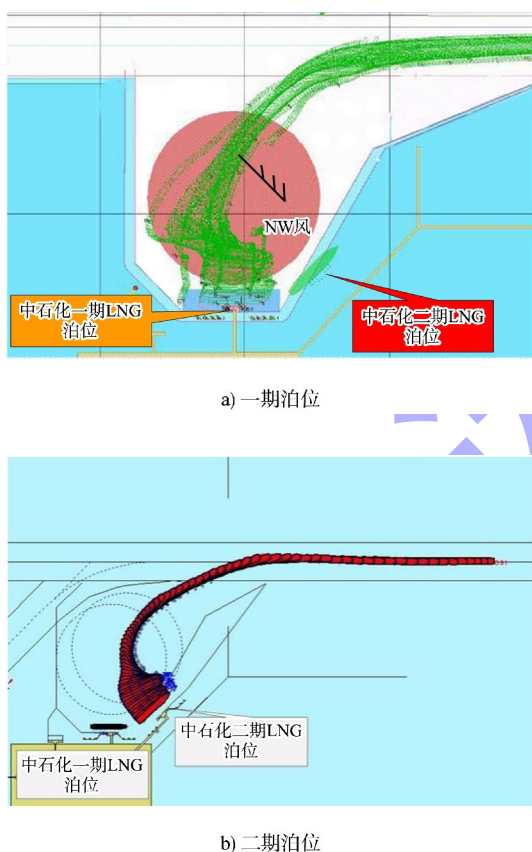


图3 中石化泊位船舶进港靠泊轨迹

## 2.2 出港顺序

当中石化 LNG 码头一、二期泊位同时停靠 2 艘 LNG 船时,受进港顺序、泊位装卸作业效率等制约,优先具备离泊条件的船舶率先离港。当两泊位同时具备离泊条件时,从船舶出港离泊时长和船舶操纵安全两方面确定以下离泊优先级:

1) 船舶出港离泊时长。根据 JTS 165-5—2021

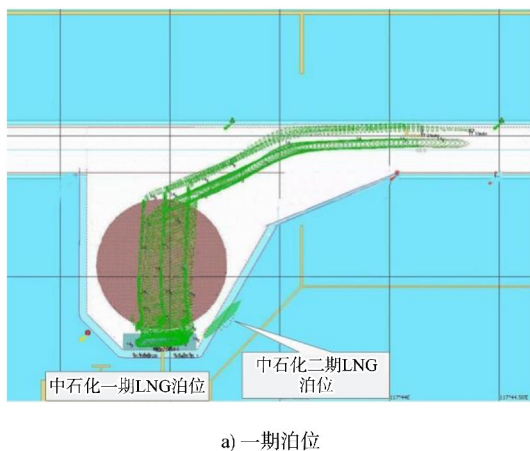
《液化天然气码头设计规范》<sup>[11]</sup>,LNG 船停靠二期泊位时,船头朝向航道有利于最快离港,二期 LNG 船离泊时摆正船位后可直接驶离港池;一期 LNG 船离泊时需利用拖船将船舶拖离码头一定横向距离,然后在拖船协助下掉头转向驶离港池。可见,一期泊位船舶离港操纵作业过程复杂,作业时长明显长于二期泊位。

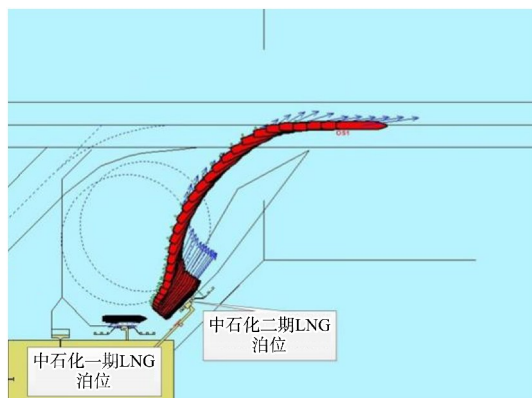
2) 船舶离泊操纵安全性。通过开展船舶操纵模拟试验,研究双泊位同时运营条件下的船舶离泊安全性,船舶离泊轨迹见图 4。中石化一、二期泊位船舶共用港池进行回旋掉头作业出港离泊,应充分考虑两泊位船舶离泊时与相邻停靠船舶的关系和安全性。

①一期泊位船舶优先离泊:一期泊位 LNG 船离泊时,船首朝向二期泊位。一期船舶在拖船协助下平行于一期泊位离泊,逐渐远离泊位进入港池。在此过程中,离泊运动中一期泊位船舶与二期泊位停靠船舶距离较近,受 NW 强风向作用或发生操纵失控,船舶很可能偏向二期泊位方向,发生两船碰撞事故,船舶操纵难度明显较大,安全性相对较小。

②二期泊位船舶优先离泊:二期泊位 LNG 船离泊时,利用拖船将船舶偏向港池外侧航道水域拖离,其运动趋势是远离一期泊位停靠船舶,且两者距离越来越大,船舶操纵安全性相对较大。

因此,在中石化一、二期双泊位离泊条件相同时,二期泊位 LNG 船优先于一期泊位 LNG 船出港离泊。





b) 二期泊位

图4 中石化泊位船舶离泊出港轨迹

### 3 双泊位运营联合调度组织

#### 3.1 近期双泊位调度组织

目前, LNG 船舶进港航行期间配置护航船舶警戒及协助靠泊作业。天津港大港港区现有拖船数量无法满足 2 艘 LNG 船舶同时进港要求。针对 2 艘 LNG 船舶同时抵达港外进港可能性, 研究船舶同天上、下午或前后两天分别进港方案, 制定相应交通组织。

##### 3.1.1 同天上、下午方案

上午 08:00 时, 第 1 艘 LNG 船舶抵达大港航道端部、进入航道, 航行 2 h 左右(10:00 时)到达码头港池水域, 船舶转向驶入港池水域进行回旋掉头靠泊作业, 完全停靠码头, 所需时长约 1.25 h (11:15 时)。之后, LNG 船舶进行系缆作业, 所需时长约 1 h (12:15 时);

下午 13:00 时, 第 2 艘 LNG 船舶抵达大港航道端部、进入航道, 航行 2 h 左右(15:00 时)到达港池水域, 船舶转向驶入港池水域进行回旋掉头靠泊作业, 完全停靠码头, 所需时长约 1.25 h (16:15 时)。之后, LNG 船舶进行系缆作业, 所需时长约 1 h (17:15 时)。因此, 正常情况下, 2 艘 LNG 船舶可同天内上、下午时段内进港。

##### 3.1.2 前后两天方案

LNG 船舶通常选择白天进港。受航道长度、船舶进港航行时长、日出日落时刻等因素限制, 白天可供 LNG 船舶进港时段是有限的。由于冬季白天时长较短且 LNG 船舶进出港非必要不得夜航

限制, 一年中部分月份第 2 艘 LNG 船舶下午进港时段超出窗口期, 即 2 艘 LNG 船舶无法完成同天上下午分别进港靠泊作业, 双泊位 LNG 船舶需在抵达港外水域后两天选择合适时段进港。

天津 2015—2035 年日出日落时间统计表明<sup>[12]</sup>, 每天日落时间年际变化最多相差 40 s, 故选取 2021 年 5 月—2022 年 4 月一年内日落时间作为典型数据。分析一年内每个月份均具备 LNG 船 12:00 时进港条件, 3—8 月具备 LNG 船 13:00 时进港条件, 6—8 月具备 LNG 船 14:00 时进港条件, 见图 5。因此, 2 艘 LNG 船舶同时抵港后, 根据一年中不同到港时间选择前后两天相应时段进港靠泊, 均满足船舶进港要求。

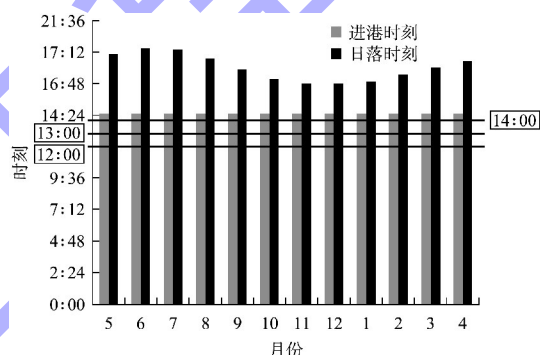


图5 天津 2021 年 5 月—2022 年 4 月进港时刻

#### 3.2 远期双泊位调度组织

大港港区远期配备至少 8 艘拖船, 以满足 2 艘 LNG 船舶成编队同时进港。为严格、精准控制两船之间安全距离和作业时间差, 制定联合调度管理模式。

##### 3.2.1 模式 1

上午 08:00 时, 第 1 艘 LNG 船抵达大港航道端部、进入航道, 航行 2 h 左右(10:00 时)到达码头港池水域, 船舶转向驶入港池水域进行回旋掉头靠泊作业, 完全停靠码头所需时长约 1.25 h (11:15 时)。之后, LNG 船进行系缆作业, 所需时长约 1 h (12:15 时)。

上午 11:30 时, 第 2 艘 LNG 船抵达大港航道端部、进入航道。此时, 第 1 艘 LNG 船已完成停靠并进行系缆作业。第 2 艘 LNG 船航行 2 h 左右 (13:30 时) 到达码头港池水域, 转向驶入港池水

域进行回旋掉头靠泊作业,完全停靠码头所需时长约 1.25 h(14:45 时),此时,第 1 艘 LNG 船已完成系缆作业。之后,第 2 艘 LNG 船舶开始系缆,所需时长约 1 h(15:45 时)。因此,正常情况下,

2 艘 LNG 船成编队先后进港用时约 7.75 h,见表 1。根据天津港通航管理规则,LNG 船舶在航道、港池作业期间独自占用航行、作业水域。因此,限定 08:00—15:45 时禁止其他船舶利用航道。

表 1 模式 1 远期双泊位两艘 LNG 船成编队进港

第 1 艘 LNG 船		第 2 艘 LNG 船	
时刻/时段	作业阶段/状态	时刻/时段	作业阶段/状态
08:00	开始进入航道	-	-
08:00—10:00	航道航行至码头港池水域	-	-
10:00	转向进入港池	-	-
10:00—11:15	掉头靠泊作业、停靠码头	-	-
11:15	码头开始系缆	-	-
11:15—12:15	完成系缆、靠泊作业	11:30	开始进入航道
12:15	船舶完成进港靠泊,停靠泊位	11:30—13:30	航道航行至码头港池水域
-	-	13:30	转向进入港池
-	-	13:30—14:45	掉头靠泊作业、停靠码头
-	-	14:45	码头开始系缆
-	-	14:45—15:45	系缆作业,完成靠泊作业
-	-	15:45	船舶完成进港靠泊,停靠泊位

### 3.2.2 模式 2

模式 2 的第 1 艘 LNG 船通航组织模式与模式 1 相同。

上午 09:30 时,第 2 艘 LNG 船抵达大港航道端部。此时,第 1 艘 LNG 船已在航道中航行约 14 n mile。第 2 艘 LNG 船航行 2 h 左右(11:30 时)到达港池水域,此时,第 1 艘 LNG 船舶正在进行系缆作业。

第 2 艘 LNG 船转向驶入港池水域进行回旋掉头靠泊作业,完全停靠码头所需时长约 1.25 h(12:45 时)。之后,第 2 艘 LNG 船开始系缆作业,所需时长约 1 h(13:45 时)。因此,正常情况下,2 艘 LNG 船成编队先后进港用时约 5.75 h。因此,限定 08:00—13:45 时禁止其他船舶进出航道,见表 2。

表 2 模式 2 远期双泊位两艘 LNG 船成编队进港

第 1 艘 LNG 船		第 2 艘 LNG 船	
时刻/时段	作业阶段/状态	时刻/时段	作业阶段/状态
08:00	开始进入航道	-	-
08:00—10:00	航道航行至码头港池水域	09:30	开始进入航道,距离第 1 艘 LNG 船舶约 14 n mile
10:00	转向进入港池	-	-
10:00—11:15	掉头靠泊作业、停靠码头	09:30—11:30	航道航行至码头港池水域
11:15	码头开始系缆	-	-
11:15—12:15	完成系缆、靠泊作业	11:30	转向进入港池
12:15	船舶完成进港靠泊,停靠泊位	11:30—12:45	掉头靠泊作业、停靠码头
-	-	12:45	码头开始系缆
-	-	12:45—13:45	系缆作业,完成靠泊作业
-	-	13:45	船舶完成进港靠泊,停靠泊位

### 3.2.3 模式比选

以上两种联合调度管理模式相比较,模式 1 满足现有通航管理规则,即 LNG 船在航道及港池

作业期间,其他船舶不得利用航道。但是,该模式中双泊位 LNG 船通航基本完全占据航道资源,严重挤压其他船舶进出港,不利于港区健康有序

运营发展。模式 2 中双泊位 LNG 船通航对航道通过能力影响较小, 航道通航效率有效提升, 可作为远期通航管理规则优化后的选择。2 种模式均是在拖船数量满足 2 艘 LNG 船成编队同时进港且两泊位具备同等进港作业条件下的通航方案。

#### 4 结论

1) 由于 LNG 船航行具有排他性, 对航道通航效率和港区码头运营均存在显著影响。单一港池布局 2 个 LNG 泊位, 加剧了 LNG 船的通航影响, 且导致两泊位运营相互干扰。

2) 天津港大港港区中石化 LNG 码头一、二期泊位集中布局, 共用航道、港池且回旋掉头作业冲突。从 LNG 双泊位对大港航道通过能力影响、双泊位间作业干扰及双泊位船舶靠离泊安全等 3 方面分析 LNG 双泊位通航影响。

3) 结合船舶进出港时长和船舶靠离泊操纵安全, 确定双泊位 LNG 船靠离泊优先级。双泊位靠泊条件相同时, 一期泊位 LNG 船优先于二期泊位; 双泊位离泊条件相同时, 二期泊位 LNG 船优先于一期泊位。

4) 针对双泊位运营对港区通航船舶通航效率不同程度影响和不同阶段通航管理规则, 提出近期和远期 2 种联合调度通航管理模式: 近期, 两艘 LNG 船同时抵港在同天上、下午先后进港或根据不同到港时间选择前后两天相应时段进港靠泊; 远期, 2 艘 LNG 船控制距离和把控航行作业时间差成编队同时进港。

#### 参考文献:

- [1] 房卓, 张民辉, 沈忱, 等. 我国沿海港口液化天然气码头建设运营现状研究[J]. 水运工程, 2020(10): 63-69.
- [2] 孙红彦, 查恩尧. 面向航道管理约束下的液化天然气码头通过能力仿真分析[J]. 水运工程, 2019(8): 156-160.
- [3] 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.
- [4] 姚海元, 房卓, 郝军, 等. 基于多智能体仿真的 LNG 船舶进出港通航影响的评价指标研究[J]. 水运工程, 2018(3): 52-58.
- [5] 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.
- [6] 甘浩亮. 港口水域 LNG 船舶交通组织优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [7] 沈忱, 孙路, 鲍建宇, 等. 曹妃甸 LNG 码头建设规模与通航效率的适应性[J]. 水运工程, 2019(12): 70-74.
- [8] 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.
- [9] 沈忱, 房卓, 张民辉, 等. 单航道多泊位的液化天然气码头建设规模仿真研究[J]. 水运工程, 2019(11): 122-126, 132.
- [10] 邬惠国, 刘春姣, 肖英杰. 基于格序决策理论的 LNG 船舶进出港组织方案比选[J]. 上海海事大学学报, 2012, 33(2): 10-13, 21.
- [11] 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, 2016.
- [12] 孔宪卫, 孔令臣, 米伟, 等. 天津港大港港区 LNG 船舶进出港通航时段研究[J]. 水道港口, 2022, 43(3): 364-369.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 35 页)

- [12] 杨松, 郑山锁, 田忠祥, 等. 锈蚀 Q345B 钢力学特性试验及循环本构模型研究[J/OL]. 工程力学: 1-11. (2023-06-19) [2023-08-14]. <https://hffgc1d129f57bb244a4hp0fkp5oq9cuw6wfbfgfy.eds.tju.edu.cn/kcms/detail/11.2595.03.20230616.1421.002.html>.
- [13] 朱晨浩. 含沙水流对水位变动区钢构件锈蚀影响试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [14] 董俊华. Mn-Cu 低合金钢在模拟海岸大气条件下的锈

蚀演化规律[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(4): 261-265.

- [15] 尹程辉, 潘吉林, 陈俊航, 等. 热带海洋大气环境下不锈钢的腐蚀寿命评估[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 183-193, 246.
- [16] 梁彩凤, 侯文泰. 钢的大气腐蚀预测[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(3): 3129-3135.

(本文编辑 王璁)