



基于全设计船型的 LNG 码头设计技术

叶小红, 沈瑜, 周娜

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 国内已建大型 LNG 码头设计船型舱容量大多在 8 万 m³ 及以上, 为满足装船需求, 往往是在建设大型卸船泊位之外, 另行建设小型装船泊位, 或对现有大型卸船泊位进行改造以满足装船需求。针对建设现状, 提出一种基于全船型的设计理念, 使得码头能满足各等级 LNG 船的靠泊和作业要求, 避免后期改造, 同时可提高岸线资源利用率。通过对靠泊船型、平面布局、水工结构等方面的分析及研究, 提出符合该理念的一种码头布置模式, 工作平台采用梁板结构, 其下方设置 2 座辅助靠船墩, 并对靠船墩局部落低处理、新增系缆平台等, 满足多种船型船岸匹配的要求。水工结构创新性地采用工作平台与辅助靠船墩脱离的形式, 并在辅助靠船墩侧面设置辅助靠泊激光传感器及安装平台, 解决了小型 LNG 船的靠泊问题。采用物理模型试验进行船舶稳泊安全专题论证, 明确全船型的作业标准。

关键词: 全设计船型; LNG 码头; 平面布置; 结构设计

中图分类号: U656.1+39

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0084-08

LNG terminal design technology based on full design ship types

YE Xiaohong, SHEN Yu, ZHOU Na

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Domestic large-scale LNG terminal designs typically feature ship-type tank capacities of 80,000 m³ or more. To satisfy the loading requirements, it is common to construct small loading berths in addition to large unloading berths, or to retrofit existing large unloading berths to accommodate the loading needs. In response to this situation, a design concept based on all types of ships is proposed. The terminal can meet the berthing and operation requirements of LNG ships of all grades, avoid retrofitting in the later stage, and at the same time, improve the utilization rate of shore resources. Through analysis and research on aspects such as the types of berthed vessels, plan layout, and hydraulic structures, a terminal layout mode that conforms to this concept is proposed. The working platform adopts a beam-slab structure, with two auxiliary berthing dolphins set underneath. Partial lowering of the berthing dolphins is also carried out to add new mooring platforms, thus meeting the requirements for matching various types of vessels with the shore. The hydraulic structure innovatively adopts a form where the working platform is separated from the auxiliary ship berthing piers, and auxiliary berthing laser sensors and installation platforms are set on the side of the auxiliary ship berthing piers, solving the berthing problem of small LNG ships. Physical model tests are used to conduct a special argument on the safety of ship mooring, and the operation standards for all types of ships are clarified.

Keywords: full design ship type; LNG terminal; plan layout; structural design

液化天然气(LNG)是全球公认的清洁低碳能源, 因其环境效益显著, 越发受到青睐。2015年以来, 全球 LNG 年贸易量由 2.5 亿 t 增长至 2022 年

的 4.0 亿 t, 增幅高达 60%。我国力争 2030 年前实现“碳达峰”、2060 年前实现“碳中和”目标的提出, 进一步促进了天然气在能源转型中的桥梁作

收稿日期: 2024-12-30

作者简介: 叶小红(1987—), 女, 高级工程师, 从事水运工程设计。

用。截至2022年底,全国沿海共有在营LNG泊位26个,主要是大型接卸泊位,作为重要的天然气进口通道。而随着全球LNG动力船舶的陆续投放以及我国各区域打造保税燃料加注中心,未来LNG加注的业态将给区域LNG消费带来一定新增增长点^[1-4]。我国正推动新一批小型LNG接收站建设,主要选址于沿海、长江内河,运营企业多样化,未来江海联运、二程转运市场潜力大。

我国已建LNG码头设计船型舱容量大多在8万 m^3 及以上,而世界上已建(新建或改建)的LNG加注船舱容量多在3万 m^3 及以下。早期建造的大型LNG接收站并未考虑LNG装船功能,使得LNG码头工作泊位长度、靠船墩间距和卸料臂的工作范围无法满足小型LNG船舶作业的要求^[5]。改造已建大型LNG码头以适应新增小型LNG加注船的靠泊成为一种趋势,通过新增护舷系统等技术措施,实现LNG加注船反输装船功能^[6]。鹿特丹港、新加坡港、上海港、盐田港和宁波舟山港,是目前全球少数具备国际船舶LNG加注服务能力的枢纽港。

基于全设计船型建设、避免后期改造的LNG码头工程目前尚未有先例。本文依托上海LNG站线扩建项目码头工程,提出一种覆盖全船型的LNG装卸码头建设理念,分析归纳主要的设计要点,总结出一套针对该建设需求的设计技术,可为类似条件的码头建设提供借鉴意义。

1 工程概况

上海LNG接收站建有1座14.5万 m^3 LNG码头(兼靠21.5万 m^3 LNG船舶),接收能力300万 t/a ,后方建有3座16.5万 m^3 LNG储罐和2座20万 m^3 储罐,设计输送能力为600万 t/a 的输气管线工程。为满足上海天然气消费量的持续快速增长,落实国家天然气产供储销体系建设要求,上海市政府决定加快推进上海LNG站线扩建项目的建设。

扩建工程位于北岛链南侧、已建上海LNG码头东侧岸段,西侧毗邻上海国际航运中心洋山深

水港集装箱港区,东与洋山石油储运项目码头相邻,见图1。码头工程建设1座15万GT LNG码头。码头设计吞吐量为600万 t/a ,设计通过能力为625万 t/a 。



图1 工程位置

Fig.1 Project location

2 LNG码头现状及设计难点

2.1 LNG码头建设现状

国内已建大型LNG码头设计船型往往在8万 m^3 及以上,如浙江LNG、上海LNG一期、深圳LNG、温州LNG、潮州华瀛LNG、烟台LNG、舟山新奥LNG码头(1#码头)等,平面布置多采用1个工作平台、4个靠船墩+6个系缆墩的蝶形布置形式。内侧靠船墩中心间距在72~74 m。

为满足装船需求,国内已建LNG项目往往是在建设大型卸船泊位之外,另行建设小型装船泊位,如舟山新奥LNG项目建设2座3万 m^3 LNG装船泊位(2#码头)、2个LNG槽车滚装船泊位;烟台LNG项目建设1个0.25万~2.0万 m^3 的装船泊位。

已建洋山LNG一期码头进行技术改造,在工作平台前沿设置2组护舷系统,中心间距40 m,对称布置于工作平台中心,以满足2万 m^3 LNG加注船靠泊及装船需求。已建浙江LNG的改造设计思路及方案与洋山LNG一期码头类似,在工作平台前沿对称新增2组靠船设施,橡胶护舷中心间距取32 m。改造后满足靠泊0.85万~3万 m^3 LNG加注船(其中1.2万~2万 m^3 加注船为主力船型)需求。

分别建设装、卸船泊位对于岸线资源的利用率低,码头整体建设费用高;后期改造卸船泊位以满足装船需求,往往是利用工作平台增设靠泊

系统，改变了原工作平台的受力模式，且改造期间码头需停止运营。

本文提出一种覆盖全船型的 LNG 装卸码头建设理念，码头设计主力船型为 15 万~18 万 m³ LNG 船，兼顾 0.5 万~26.6 万 m³ LNG 船靠泊，避免分别建设装、卸船码头，也避免后期改造以满足装船需求，可提高岸线资源利用率。设计船型主尺度见表 1。

表 1 设计船型主尺度

Tab.1 Main dimensions of design ship

设计船型/ 万 GT	舱容/ 万 m ³	船长/ m	型宽/ m	型深/ m	艏、艉长/ m
15	26.6	345.0	53.8	27.0	12.2
	21.5	325.0	50.0	28.0	12.0
	21.0	315.2	52.0	27.0	12.2
	18.0	300.0	52.0	26.25	12.0
10	14.7	290.0	43.35	26.25	11.5
5	8.0	239.0	40.0	26.8	11.0
3	6.0	216.0	35.0	17.5	9.0
	4.0	204.0	30.0	17.0	9.0
2	3.0	185.2	28.1	18.5	7.5
	2.0	152.0	28.0	15.0	7.6
新奥实船	1.86	135.9	24.5	16.0	6.6
海油集团实船	1.2	132.9	22.0	9.8	5.8
1	1.0	128.0	19.8	11.0	6.0
新奥实船	0.85	119.3	19.8	11.0	5.9
0.5	0.75	120.0	19.8	11.0	5.9
0.3	0.50	99.0	18.2	7.8	4.8

2.2 设计难点

在考虑平面布局时，要在合理利用岸线资源和满足船舶装卸作业的基础上，对码头布置进行

统筹考虑，优化系缆布置。对于大型 LNG 船，带缆采用艏艉缆+艏艉横缆+倒缆的方式；小型 LNG 船带缆则一般采用艏艉缆+倒缆的方式。上海 LNG 站线扩建项目建设初期考虑在码头操作平台上布置 4 台卸船臂和 3 台装船臂，工作平台尺度确定为 80 m×30 m (长×宽)，并利用工作平台实现小船靠泊。大船卸船采用平台中部卸船臂，装船采用平台西侧装船臂，工艺的不对称布置导致小型 LNG 船的系靠泊存在不足。

以 0.5 万 m³ LNG 船舶靠泊为例，增设靠船墩和工作平台位置见图 2，小船的靠泊问题能够通过增设靠船墩予以解决，但偏心带来的艏、艉缆系缆问题不易解决。小船在横浪作用下横摇运动量过大，艉缆长度偏长，存在缆绳约束力不足的问题，会给码头运营带来不利影响。

大型 LNG 船存在干舷大、船舶平直段短、集管中心与船体中心不一致等特点^[7]，并且 LNG 船舶船体的平直段从甲板往下会减小，部分船型船底处只有甲板处的 25%~35%，在水面处的变化较快。如果不考虑这些情况，可能会造成靠泊期间船舶与护舷接触面小、护舷局部压强大，船体有局部受损的可能。

小型 LNG 船由于干舷高度小，船体侧面平直段长度也较小，易出现由于靠船墩上橡胶护舷中心线间距过大，船侧船体平直段无法接触护舷的情况，以及低水位时船体接触护舷面积过小的情况。在满载低水位条件下，缆绳还会出现“吊缆”现象。

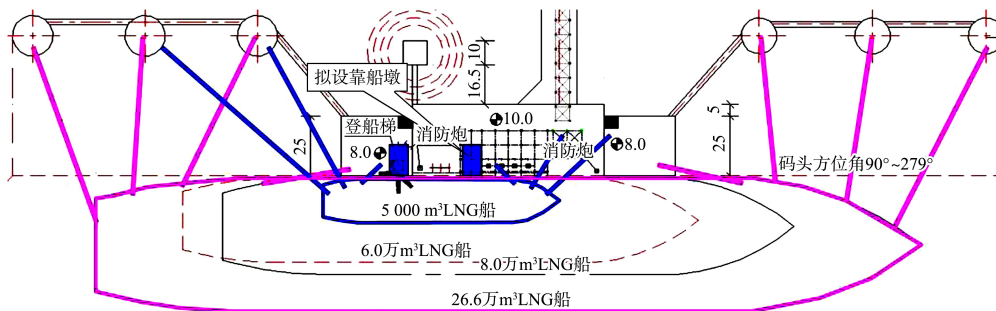


图 2 平面布置 1 (单位: m)
Fig.2 Plan layout 1 (unit: m)

覆盖全船型的码头设计时, 船型跨度大, 在满足主力设计船型的前提下, 需要充分考虑兼靠最大及最小船型的靠泊适应性, 重点关注护舷中心距和安装高程, 分析不同船舶作业情况下橡胶护舷设置的位置和船体平行舢体长度匹配度, 优化橡胶护舷布置, 保证船舶与护舷有足够的接触面积, 避免脱离。

此外, 常规大型 LNG 码头靠泊辅助系统激光传感器安装在靠船墩面上, 而小型 LNG 船的型深较小, 在设计低水位靠泊时激光传感器无法有效探测。

以上均是基于全设计船型建设的 LNG 码头需要面临的难题。

3 解决方案

3.1 码头平面布置

3.1.1 平面尺度

根据 JTS 165-5—2021《液化天然气码头设计规范》^[8], 靠船墩中心间距可为设计船长的 25%~45%; 根据 JTS 165—2013《海港总体设计规范》^[9] 规定, 两个靠船墩中心间距可为设计船长的 30%~45%。

通过船岸匹配分析, 对各类船型对应护舷(两墩)中心间距进行计算, 合理布置靠船墩及护舷的位置、数量, 以满足各类 LNG 船舶靠泊。以洋山 LNG 二期码头为例, 最外侧靠船墩中心间距 116 m, 中间组间距 72 m, 最内侧靠船墩布置在工作平台下方, 中心间距为 38 m, 分别适用 8 万 m³ 以上、3 万~6 万 m³ 和 2 万 m³ 及以下 LNG 船舶靠泊, 见表 2 和图 3。

表 2 设计船型对应护舷(两墩)中心间距
Tab. 2 Spacing of fenders (for two dolphins) corresponding to design ship type

等级/ 万 m ³	船长/ m	船身平直段长度/m		靠船墩 间距/m
		25%	45%	
18	300	75.0	135.0	外侧 116
14.7	290	72.5	130.5	
8	239	59.75	107.55	内侧 72
6	216	54.0	97.2	
4	204	51.0	91.8	
3	185.2	46.3	83.34	
2	152	38.0	68.4	辅助 38
0.5	99	25.0	45.0	

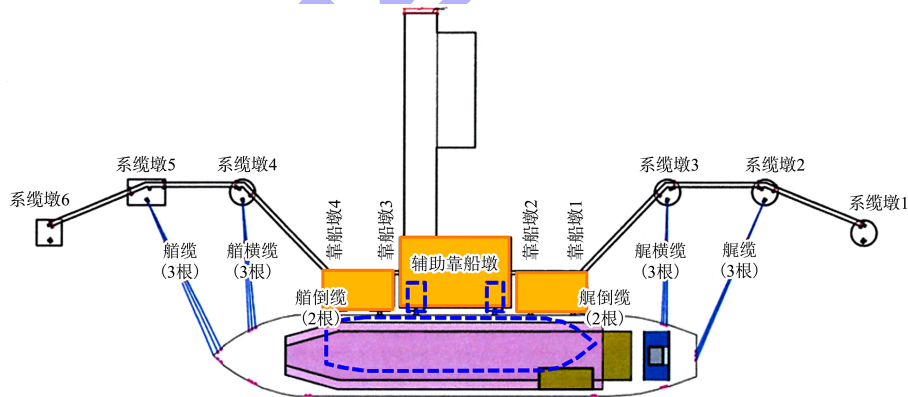


图 3 平面布置 2

Fig. 3 Plan layout 2

针对小型 LNG 船在满载低水位条件下的“吊缆”问题, 将 1[#]、4[#]靠船墩平台局部落低处理, 降低带缆高程, 供 1 万 m³ 及以下的小型 LNG 船系缆, 见图 4。码头的平面布置结合工艺系统统筹优化, 将 7 台装卸臂调整为 5 台装卸臂, 装船与卸

船不同时进行, 平台尺度大幅度优化为 55 m × 36 m (长 × 宽), 结构成本和设备成本都有不同程度的降低。小型 LNG 船舶靠泊在工作平台下方增设 2 个辅助靠船墩。

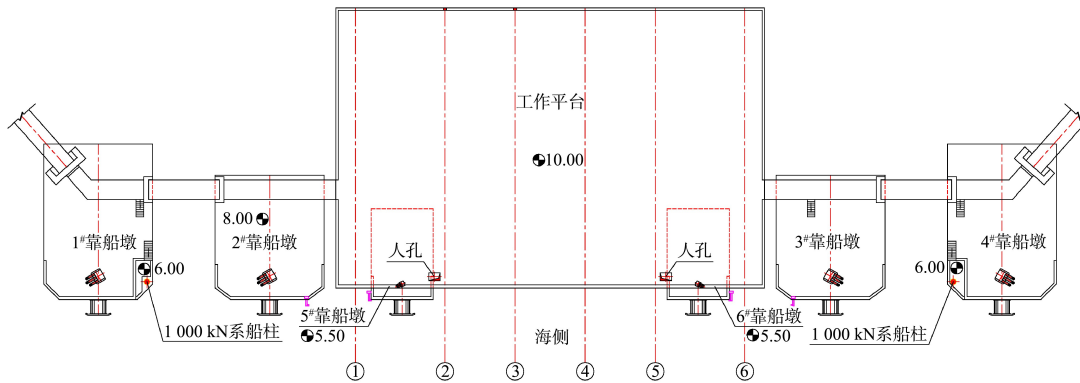


图 4 典型靠船墩位置 (单位: m)

Fig. 4 Typical berthing dolphins location (unit: m)

3.1.2 高程设计

对于大型 LNG 船, 护舷布置应避免高水位时部分护舷不在 LNG 船舶护舷接触区。而在小型船舶靠泊时, 由于干舷高度小, 船体侧面平直段长度也较小, 在靠船设施的设置上应格外注意小船靠泊的适应性。对于 0.5 万~2 万 m³ 的小型 LNG 船舶, 护舷中心高程较大船应有所降低, 避免低水位时接触不到护舷。

护舷高程须结合水位及船型资料共同确定, 确保不同船型在各水位都能接触到橡胶护舷。以洋山 LNG 二期码头为例, 0.5 万~2 万 m³ LNG 船舶靠泊冲击力由工作平台下方的靠船墩上的橡胶护舷承受; 3 万~8 万 m³ LNG 船舶靠泊冲击力由工作平台邻近的靠船墩上橡胶护舷承受; 8 万 m³ 以上船舶靠泊冲击力最外侧靠船墩上的 2 个橡胶护舷(两鼓一板) 共同承受。设计高水位 4.51 m, 设计低水位 0.53 m, 工作平台下方的靠船墩护舷中心高程为 4.00 m, 3 万~8 万 m³ LNG 船舶靠泊的靠船墩护舷中心高程为 5.20 m, 8 万 m³ 以上的 1#、4# 靠船墩护舷中心高程为 2.00、5.50 m, 见表 3。复核设计高、低水位下各船型与护舷的高程, 护舷均能满足不同船型的靠泊需求, 见图 5。

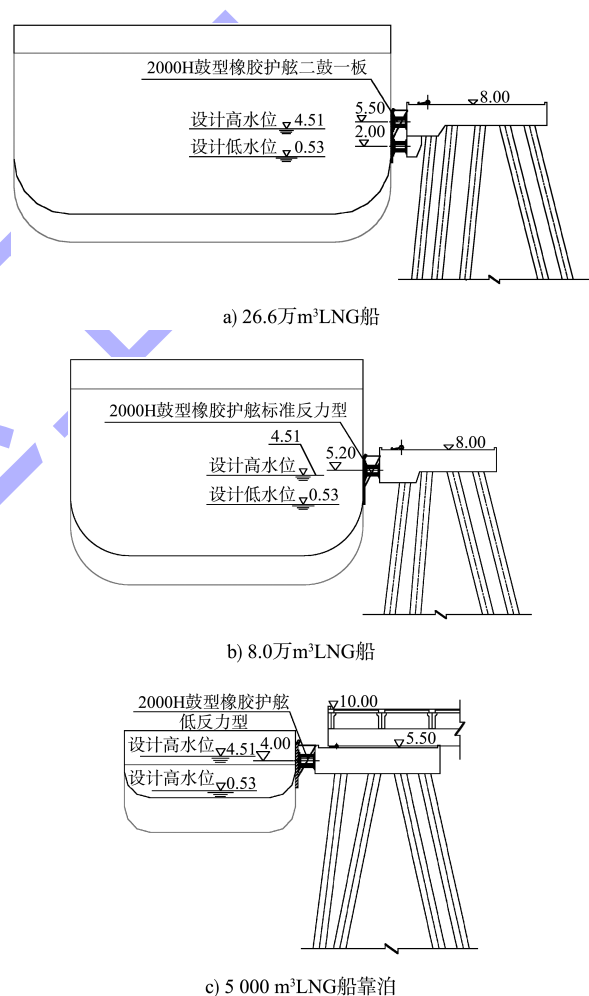


图 5 设计高、低水位下各船型与护舷的高程关系 (高程: m)
Fig. 5 Elevation relationship between each ship type and fender at design high and low water levels (elevation: m)

表 3 高程关系

Tab. 3 Elevation relationship

设计高水位/m	设计低水位/m	1#、4#靠船墩护舷高程/m	2#、3#靠船墩护舷高程/m	5#、6#靠船墩护舷高程/m
4.51	0.53	2.00、5.50	5.20	4.00

3.2 水工结构的创新

常规大型 LNG 码头的工作平台往往采用大体积现浇墩台结构, 码头整体性好, 上部设备建筑等基础预埋件埋设方便。其现浇工程量大, 对搅拌船能力要求高。

为满足装船需求的改造项目一般是在已建 LNG 码头工作平台前沿设置 2 组护舷系统, 对称布置于工作平台中心。由于原工作平台不承受船舶荷载, 新增加注船靠泊作用后, 工作平台在反输装船作业时将产生一定的位移。该位移是否影响装船作业需要由管线设计单位论证。

相较于码头改造项目, 新建项目推荐采用工作平台与辅助靠船墩脱离的结构形式, 能够有效避免小型 LNG 船舶靠离泊码头时对工作平台产生位移, 保证 LNG 码头装卸作业安全可靠。工作平台采用排架结构, 平面尺度为 55 m×36 m (长×宽), 顶面高程 10.00 m。排架间距一般段为 9 m, 两侧调整为 11.5 m 以设置辅助靠船墩。基桩采用 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$ 钢管桩, 上部结构为现浇横梁+叠合式

纵向梁系+叠合式面板。工作平台上预留登船梯、装卸臂、操作平台等设备基础。辅助靠船墩采用独立高桩墩式结构, 位于工作平台下方, 并与工作平台结构脱离, 平面尺寸为 11.7 m×8 m (长×宽), 顶高程 5.50 m, 基桩采用 $\phi 1\ 500\ \text{mm}$ 钢管桩, 上部结构为现浇混凝土墩台。在工作平台上预留 2 座人孔并设置钢爬梯, 形成工作平台与辅助靠船墩之间的通道。工作平台和辅助靠船墩布置见图 6, 其桩位见图 7。

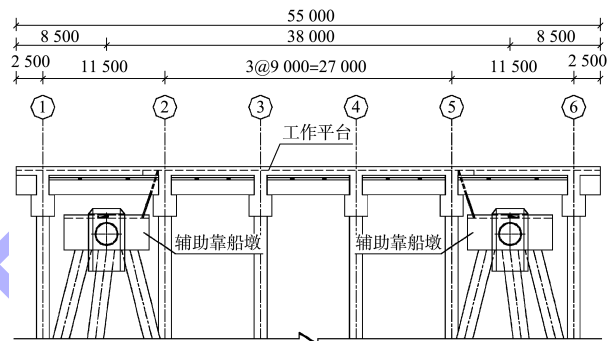


图 6 工作平台和辅助靠船墩布置 (单位: mm)

Fig. 6 Working platform and auxiliary berthing dolphins (unit: mm)

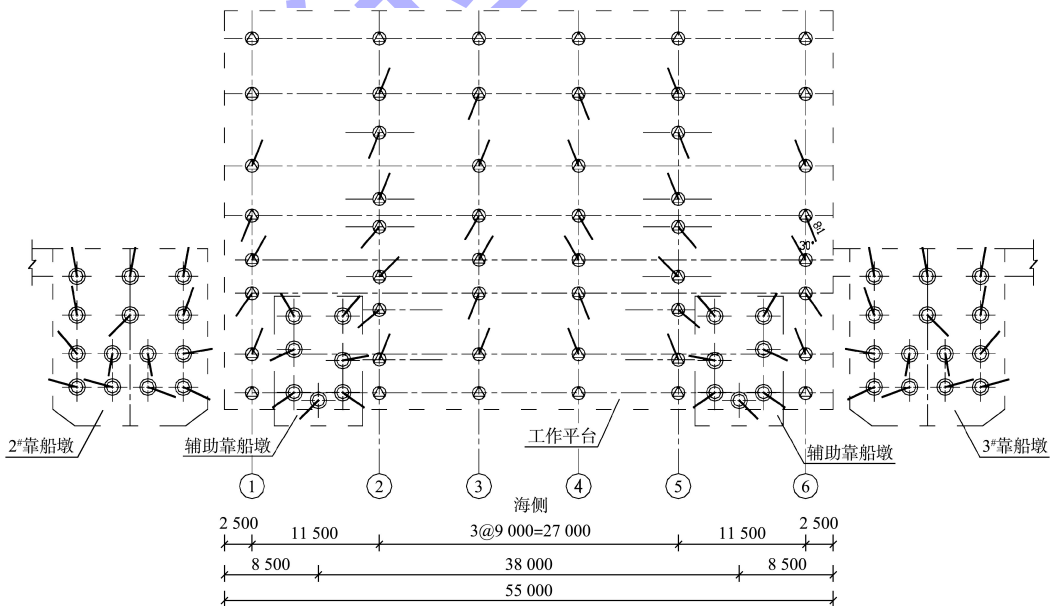


图 7 工作平台和辅助靠船墩桩位 (单位: mm)

Fig. 7 Pile positioning of working platform and auxiliary berthing dolphins (unit: mm)

由于工作平台与2#、3#靠船墩间距较小,且工作平台下方还有2座辅助靠船墩,导致桩基数量多、间距小,同时因靠船墩需要承担较大的水平荷载,桩基扭角较大,沉桩较为困难。经综合考虑,采用航工桩801船进行沉桩,该打桩船是工程施工期间国内唯一的全回转打桩船,沉桩效率高、设备灵活,目前已顺利完成所有钢管桩的沉桩。

3.3 靠离泊和系泊设计

常规大型LNG码头靠泊辅助系统激光传感器安装在靠船墩面上,而小型LNG船型深较小,在设计低水位靠泊时激光传感器无法有效探测。因

此在辅助靠船墩侧面设置激光传感器及安装平台,通过降低高程的方式解决激光传感器探测新增小型LNG船靠泊问题。探测器可配置探头升降装置。

目前对于大型LNG船的作业标准已经有较多经验,而对于小型LNG船,其船舶的横摇周期往往与波浪周期接近,尤其在横向波浪作用下,极易产生谐摇,出现大幅运动。通过船舶稳泊安全专题论证^[10],明确小型LNG船的稳泊控制条件、离泊时机。本文基于系泊试验成果,提出全船型的作业标准,可供类似码头参考。提出的全船型的作业标准见表4。

表4 LNG船舶作业标准
Tab.4 LNG ship operation standards

舱容 V/万 m ³	作业阶段	允许风速/ (m·s ⁻¹)	允许波高/m		周期/s	能见度/m	流速/(m·s ⁻¹)	
			横浪 H _{4%}	顺浪 H _{4%}			横流	顺流
V>18	靠泊操作	≤15	≤1.2	≤1.5		≥1 000	<0.5	<1.0
	装卸作业	≤15	≤1.2	≤1.5	≤7	-	<1.0	<2.0
	系泊	≤20	≤1.5	<2.0		-	≤1.0	<2.0
8≤V≤18	靠泊操作	≤15	≤1.2	≤1.5	≤7	≥1 000	<0.5	<1.0
	装卸作业	≤15	≤1.2	≤1.5	≤6	-	<1.0	<2.0
	系泊	≤20	≤1.5	<2.0	≤7	-	≤1.0	<2.0
4≤V<8	靠泊操作	≤15	≤1.0	≤1.5	≤7	≥1 000	<0.5	<2.0
	装卸作业	≤15	≤1.0	≤1.2	≤6	-	<1.0	<2.0
	系泊	≤20	≤1.2	<1.5	≤7	-	≤1.0	<2.0
1≤V<4	靠泊操作	≤15	≤1.0	≤1.2		≥1 000	<0.5	<2.0
	装卸作业	≤15	≤0.5	≤0.8	≤5	-	<1.0	<2.0
	系泊	≤20	≤1.0	<1.2		-	≤1.0	<2.0
V<1	靠泊操作	≤15	≤0.6	≤0.8	<6	≥1 000	<0.5	<2.0
	装卸作业	≤15	≤0.6	≤0.8	<4	-	≤0.5	<2.0
	系泊	≤20	≤0.6	≤0.8	<6	-	≤1.0	<2.0

4 结语

1) 本文提出一种基于全船型的设计理念,码头不仅能满足大型LNG船舶靠泊和作业,也要满足中小型LNG船舶靠泊和作业要求,避免了后期改造,同时可提高岸线资源利用率。

2) 设计时需要采集多种实际船型,合理布置靠船墩间距,确定护舷高程等,以满足多种船型船岸匹配的要求。通过对靠船墩局部落低处理,新增系缆平台,可满足小型LNG船在设计低水位条件下满载靠泊带缆的要求。

3) 水工结构创新性地采用工作平台与辅助靠船墩脱离的形式,能够有效避免小型LNG船舶靠离泊码头时对工作平台产生的位移,保证LNG码头装卸工作安全可靠。

4) 通过在辅助靠船墩侧面设置辅助靠泊激光传感器及安装平台,可解决设计低水位时小型LNG船的靠泊问题。小型LNG船的横摇周期往往与波浪周期接近,尤其是在横向波浪作用下,极易产生谐摇,出现大幅运动,需进行船舶稳泊安全专题论证,明确作业标准。

参考文献:

- [1] 刘国良,龚家勇,郭秀娟,等.内河液化天然气(LNG)加注站布局规划方法[J].水运工程,2019(9):16-19,26.
LIU G L, GONG J Y, GUO X J, et al. Layout planning method of inland river LNG fueling station [J]. Port & waterway engineering, 2019(9): 16-19, 26.
- [2] 罗明汉,莫斌珍,黄钦文.LNG燃料动力船舶发展前景[J].中国船检,2019(1):58-62.
LUO M H, MO B Z, HUANG Q W. Development prospects of LNG fuel-powered ships [J]. China ship survey, 2019(1): 58-62.
- [3] 潘海涛,何正榜,魏彤彤.我国LNG动力船舶燃料加注技术[J].水运工程,2016(10):46-49.
PAN H T, HE Z B, WEI H T. Fuel bunkering technology of LNG fuelled ship in China [J]. Port & waterway engineering, 2016(10): 46-49.
- [4] 王红尧,覃杰,陈良志.内河液化天然气岸基式加注码头设计要素及要点[J].中国港湾建设,2022,42(11):46-49.
WANG H Y, QIN J, CHEN L Z. Design elements and key points of inland river LNG shore-based bunkering wharf[J]. China harbour engineering, 2022, 42(11): 46-49.
- [5] 方灿明.浅析新建LNG接收站如何开展中小型LNG船舶业务[J].城市燃气,2016(3):42-46.
FANG C M. A brief analysis on how new LNG receiving terminals can develop business with small and medium-sized LNG vessels[J]. Urban gas, 2016(3): 42-46.
- [6] 刘亚男,沈惠龙,江义.一种新增靠泊簇桩系统及其工程应用[J].水运工程,2023(9):38-43.
LIU Y N, SHEN H L, JIANG Y. A new berthing pile cluster system and its engineering application[J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 38-43.
- [7] 钱怡杰,潘志刚.LNG泊位靠泊设施及结构设计[J].水运工程,2024(5):61-66.
QIAN Y J, PAN Z G. LNG berth berthing facilities and structure design [J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 61-66.
- [8] 液化天然气码头设计规范:JTS165-5—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
Code for design of liquefied natural gas port and jetty: JTS165-5-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- [9] 海港总体设计规范:JTS 165—2013[S].北京:人民交通出版社,2014.
Design code of general layout for sea ports: JTS 165-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [10] 交通运输部天津水运工程科学研究所.上海LNG站线扩建项目码头工程船舶系泊物理模型试验研究报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2023.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering. Research report on physical model test of vessel mooring for dock engineering of Shanghai LNG station line expansion project [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, 2023.

(本文编辑 王隽)