



# 一种新增靠泊簇桩系统及其工程应用<sup>\*</sup>

刘亚男，沈惠龙，江义

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司，上海，200032)

**摘要：**为有效推进绿色低碳发展，且随着 LNG（液化天然气）船型发展呈现出小型化返加注的新需求，改造已建大型 LNG 码头，以适应新增小型 LNG 加注船的靠泊逐渐成为一种趋势。本文基于既有大型蝶形布置 LNG 码头提出了一种新增靠泊簇桩系统的改造方式，利用空间模型对该结构进行模拟，分析其受力和系统位移，并验证大型 LNG 船系泊时对该系统的影响，最终提出一套针对该结构的设计流程。改造后的码头可靠泊返装多种小型 LNG 加注船型或运输船，适应性强、安全可靠、耐久性优越，且改造工期短、投资省，具有较好的应用价值和推广前景。

**关键词：**LNG 码头；LNG 加注船；码头改造；靠泊簇桩系统；设计流程

中图分类号：U656

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)09-0038-06

## A new berthing pile cluster system and its engineering application

LIU Yanan, SHEN Hui long, JIANG Yi

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

**Abstract:** With the development of liquefied natural gas (LNG) ship types, there is a new demand for small-scale refueling. To effectively promote green and low-carbon development, it is a trend to retrofit the existing large LNG wharf to adapt to the berthing of new small LNG bunker vessels. This article proposes a retrofit method for adding a berthing pile cluster system based on the existing large butterfly-arranged LNG terminal. The space model is used to simulate the structure, analyze its force and system displacement, and verify the influence of large mooring LNG ships on the system. Finally, the article proposes a set of design processes for the structure. The wharf after retrofit can berth and refuel a variety of small LNG refueling ships or carriers, with better adaptability, safety and reliability, superior durability, short retrofit period, and low investment, which has good application value and broad promotion prospects.

**Keywords:** LNG wharf; LNG bunker vessel; wharf retrofit; berthing pile cluster system; design process

液化天然气(LNG)生产、运输、储备、应用等技术日趋成熟。随着国家“碳达峰”“碳中和”双碳目标的提出，我国天然气需求量和进口量大幅增长。在全面采用清洁能源之前 LNG 是理想的过渡燃料，根据 2020 年 12 月《中国交通的可持续发展》白皮书，我国已建成 290 多艘 LNG 动力船，大部分已投运。集装箱船、油船、散货船、渡船

和邮轮等选择 LNG 作为燃料的需求日益增强，LNG 动力船需求陡增，直接带动了 LNG 加注业务增长，预计到 2024 年，海运业对 LNG 的需求将增加 2 倍，达到 350 万 t 以上，为此，港口 LNG 加注基础设施的建设将在近年内加速推进，为绿色低碳发展提供更大助力，为实现 2060 年碳中和的目标贡献力量。

收稿日期：2022-12-28

\*基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFB2600700）

作者简介：刘亚男（1981—），女，博士，高级工程师，从事港口工程设计与研究工作。

LNG 加注模式主要有槽车、岸基、趸船和加注船加注, 目前大部分港口主要采取机动性好、操作灵活的加注船加注。截至 2021 年底, 全球共有 141 个港口可以提供 LNG 加注服务。目前我国的 LNG 港口加注也发展良好, 鉴于 LNG 正在成为船舶燃料首选, 越来越多的港口开始新增加注业务。

LNG 加注船加注与 LNG 内贸转运目前均处在起步阶段, 根据《全国沿海与内河 LNG 码头布局方案(2035 年)》、广东省“气化珠江”等从国家到地方的政策安排, 未来 LNG 加注船加注、大型 LNG 接收站向沿江沿海中小型接收站二程转运等必将迎来快速发展, 预计未来将形成较大的气源缺口。加快水运行业的绿色低碳发展, 大力发展 LNG 加注码头的应用具有十分重要的意义。

通常 LNG 码头作为接卸 LNG 的关键节点, 是 LNG 接收站的重要配套设施。传统 LNG 码头一般以接卸国际 LNG 运输航线上 17 万  $m^3$  以上主力船型。该类码头通常为蝶形布置, 具有建造成本低、

周期短等诸多优点。然而, 近年来随着港口及航运业发展的转型升级和结构调整, LNG 船型发展呈现出一些新需求、新特点, 中小型 LNG 二程转运、LNG 动力船舶、LNG 加注船等发展迅速, 出现了小于 8 万  $m^3$  的 LNG 转运船, 特别是船舱舱容小于 2 万  $m^3$  的 LNG 加注船型。如何在已建大型 LNG 码头的基础上进行系靠泊设施改造, 以适应蓬勃发展的小型 LNG 加注船舶靠系泊作业, 有效提升现有大型 LNG 码头泊位利用率, 完善港口服务功能, 提升综合竞争力, 成为 LNG 码头建设领域的热点问题之一。

## 1 新增靠泊簇桩系统改造方法

### 1.1 新增靠泊簇桩系统

通常外海大型 LNG 码头呈蝶形布置, 由 1 个工作平台、若干组靠船墩和系缆墩组成, 工作平台与相邻靠船墩/系靠船墩之间采用人行钢桥连接, 靠船墩上布置橡胶护舷(图 1), 以满足大型 LNG 船靠泊作业。

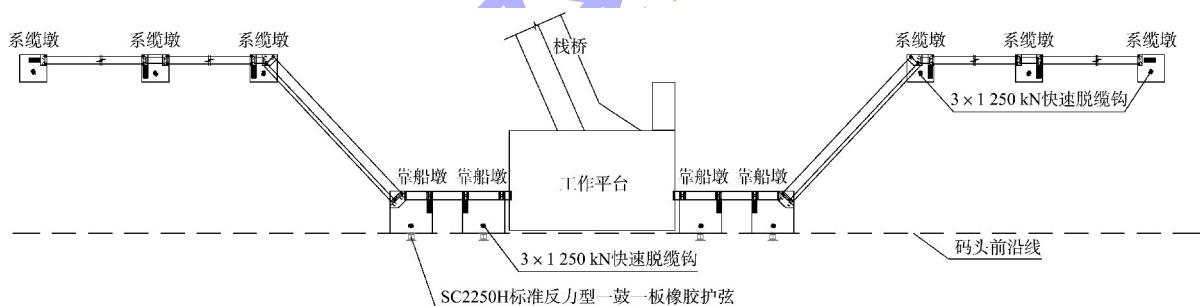


图 1 蝶形布置大型 LNG 码头

目前全球最大的 LNG 加注船为 2 万  $m^3$ 。中海油 1 艘 3 万  $m^3$  LNG 运输船正在进行加注功能改造。根据 JTS 165-5—2021《液化天然气码头设计规范》<sup>[1]</sup> 规定, 靠船墩中心间距为设计船长的 25%~45%。当停靠船型差别较大时, 可设置辅助靠船墩。

已建大型 LNG 码头内侧靠船墩间距无法停靠 3 万  $m^3$  以下 LNG 船舶。为满足其靠泊要求, 结合新增船舶的直线段长度及靠船点的位置分布、原工作平台平面布置等条件, 在已建工作平台前沿增设 2~3 组靠泊簇桩系统, 对称布置于工作平台

中心。新增靠泊簇桩系统的靠泊前沿线退后原码头靠泊前沿线一定距离。

每组靠泊簇桩系统包括 1 个外侧护舷、2 个内侧护舷和 2 根钢管桩, 通过钢支撑板连成整体。钢支撑板外侧安装橡胶护舷, 直接承受新增 LNG 加注船的靠泊撞击力。钢支撑板两端与钢套筒焊接, 钢套筒与钢管桩之间采用灌浆固定, 较好地适应钢管桩打桩偏位。2 个内侧护舷岸侧安装在工作平台的钢支座上, 2 个内侧护舷海侧固定于钢支撑板上。典型靠泊簇桩系统平面和断面见图 2。

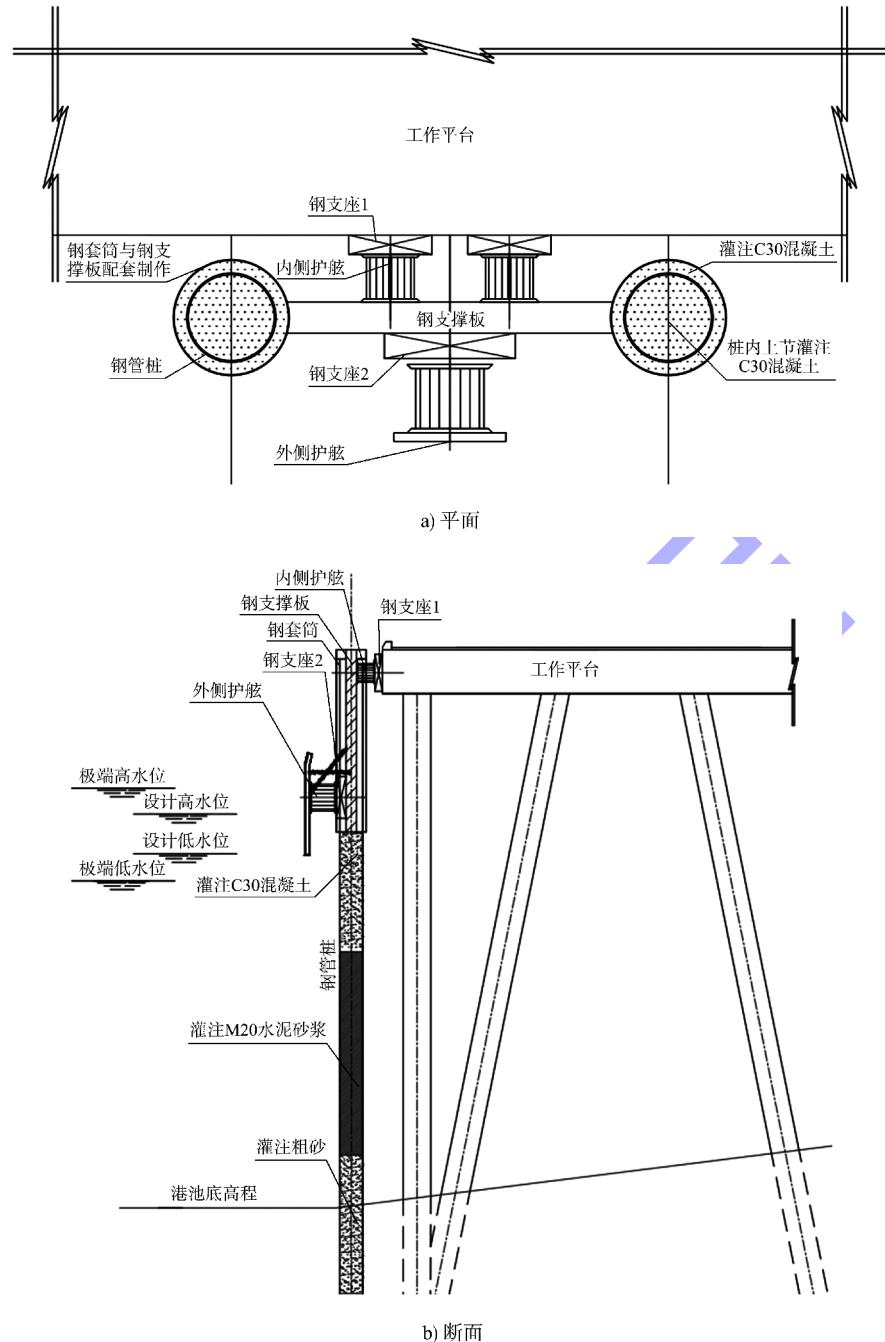


图 2 新增靠泊簇桩系统

## 1.2 新增靠泊簇桩系统设计

### 1.2.1 外侧护舷的选取

外侧护舷直接承受新增小型设计 LNG 船靠泊时的撞击力。根据 BS: 6349-4—2014 *Code of practice for design of fendering and mooring systems*<sup>[2]</sup> 计算 LNG 加注或运输船型靠泊时的最大撞击能，以选取相应的外侧护舷。

### 1.2.2 内侧护舷及桩基的选取

新增靠泊簇桩系统护舷的设计变形量需要与

既有码头靠船墩上的橡胶护舷的设计变形量相当，即外侧护舷和内侧护舷最大压缩变形之和与原码头靠船墩上护舷的最大压缩变形相当。因此，在原有大型 LNG 运输船靠泊时，新增靠泊簇桩系统不影响原护舷的正常使用。利用 Robot 空间模型分别模拟新增靠泊簇桩系统的受力及位移，计算模型见图 3。

1) 假设船舶靠泊时，外侧护舷已达到 55% 的最大变形。

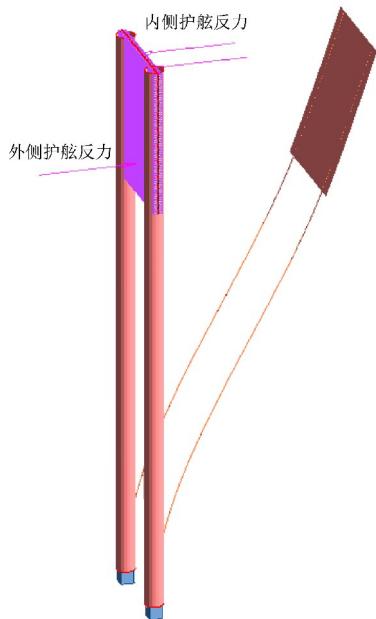


图3 新增靠泊簇桩系统计算模型

- 2) 内侧护舷的反力和整个靠泊系统的位移应遵循内侧护舷的性能曲线,选取最佳内侧护舷型号。
- 3) 根据计算得到的桩力及桩身应力选取合适的桩型及桩长。

4) 为保证整个靠泊簇桩系统的变形协调性,可在钢管桩内从下到上依次灌注粗砂、M20 水泥砂浆和 C30 混凝土,见图 2a)。

### 1.2.3 复核横摇及挤靠力对新增靠泊簇桩系统的影响

依据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》<sup>[3]</sup>, 计算在横浪作用下原码头系泊的大型 LNG 船及新增小型 LNG 船的有效撞击能量, 复核新增靠泊簇桩系统的护舷总吸能量是否满足有效撞击能量的要求。

作用于码头的挤靠力主要由垂直船舶纵轴的风荷载和水流力组成, 因此需要依据《港口工程荷载规范》计算原码头系泊的大型 LNG 船以及新增小型 LNG 船的挤靠力, 并通过复核新增靠泊簇桩系统的外侧护舷最大反力判断是否满足挤靠力的要求。

### 1.2.4 复核新增靠泊簇桩系统对原工作平台的影响

新增靠泊簇桩系统内侧护舷, 海侧固定于钢

支撑板, 岸侧安装在工作平台的钢支座上。工作平台上新增水平荷载为若干个内侧橡胶护舷的设计反力, 而且作用在新增靠泊系统钢支撑板上的波浪力亦通过该靠泊系统传递至原工作平台。根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》<sup>[4]</sup>, 在新增水平荷载作用下, 对实际在工作平台上同时出现的作用, 按承载能力和正常使用极限状态进行组合, 分析新增靠泊系统簇桩后, 原工作平台桩力、桩应力、位移是否满足要求。

### 1.3 新增靠泊簇桩系统设计流程

根据船型以及原码头平面布置确定新增靠船簇桩系统的组数, 每组靠船簇桩系统的设计应遵循图 4 所示的设计流程, 保证原设计和新增设计船型安全有效地靠泊, 原工作平台可继续安全可靠地使用。

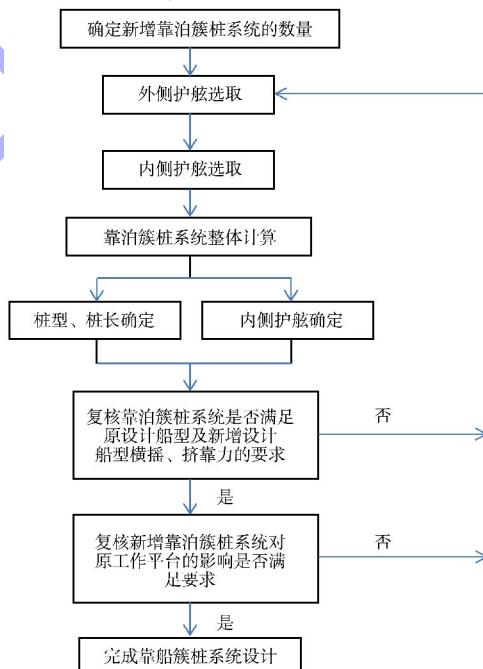


图4 新增靠船簇桩系统设计流程

## 2 工程案例

某已建 LNG 码头呈蝶形布置, 由 1 个工作平台、4 个靠船墩、6 个系缆墩组成, 靠船墩上布置 SC2250H 标准反力型一鼓一板橡胶护舷, 满足 8.0~26.6 万 m<sup>3</sup> LNG 船靠泊作业。项目需新增 8 万 m<sup>3</sup> 以下 LNG 加注船以及 LNG 运输船靠泊/装卸功能。新增船型对应的靠船点中心距见表 1。

表 1 新增船型靠船点中心距

船型	总长 L/m	靠船点中心距/m		
		0.25L	0.35L	0.45L
0.85 万 m <sup>3</sup> 加注船	119.3	29.8	41.8	53.7
1.20 万 m <sup>3</sup> 加注船	132.9	33.2	46.5	59.8
2.00 万 m <sup>3</sup> 加注船	159.8	40.0	55.9	71.9
3.00 万 m <sup>3</sup> 运输船	185.0	46.3	64.8	83.3
6.00 万 m <sup>3</sup> 运输船	216.0	54.0	75.6	97.2

现状码头共布置 4 个靠船墩，内侧一对靠船墩中心距 72 m，无法使 3 万 m<sup>3</sup> 以下的 LNG 船舶靠泊。为满足其靠泊要求，结合新增船舶的直线段长度及位置分布、原工作平台平面布置等条件，工作平台前沿新增设 2 组靠泊簇桩系统，中心间距 40 m，对称布置于工作平台中心，新增靠泊簇桩系统的靠泊前沿线退后原码头靠泊前沿线 100 mm，见图 5。

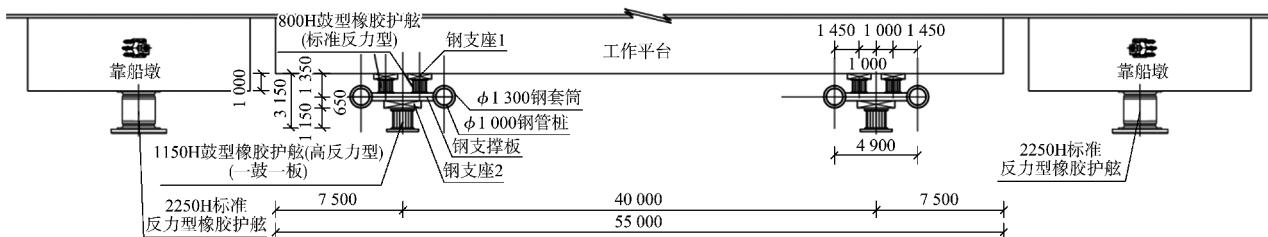


图 5 某已建 LNG 码头工作平台前沿新增靠泊簇桩系统平面(单位: mm)

## 2.1 外侧护舷的选取

根据 BS 6349-4—2014 *Code of practice for design of fendering and mooring systems* 计算 2 万 m<sup>3</sup> LNG 船靠泊时最大撞击能 393 kJ，外侧护舷选取 1150H 高反力型—鼓—板鼓型护舷，其最大压缩变形达到 55% 时设计吸能为 408 kJ，每鼓护舷设计反力为 811 kN。

## 2.2 内侧护舷的选取

新增护舷系统的设计变形量需与既有靠船墩上的 2250H 鼓型橡胶护舷的设计变形量相当。因此 800H 和 1000H 鼓型橡胶护舷均满足要求。

初选内侧护舷反力(小于护舷设计反力)输入

模型，若计算得到的靠泊系统位移小于或大于护舷性能曲线上该反力对应的变形，则减小或增大输入反力，继续读取新的靠泊系统位移，直至输入的内侧护舷反力同靠泊系统位移均与该护舷的性能曲线匹配为止。

## 2.3 内侧护舷及桩基的选取

2 根 φ1000 mm 钢管桩通过钢支撑板连成整体，钢管桩中心距 4.9 m。钢支撑板两端与 φ1300 mm 钢套筒焊接，钢套筒套在 φ1000 mm 钢管桩上。选取不同的内侧护舷，新增靠泊簇桩系统的内力及位移见表 2。

表 2 新增靠泊系统的内力及位移

内侧护舷型号	外侧护舷作用力/kN	内侧护舷作用力/kN	靠泊系统位移/mm	内侧护舷变形/%	桩压力/kN	桩应力/MPa
800H 鼓型橡胶护舷(标准反力)	811	250	230	28.7	1 115	263
1000H 鼓型橡胶护舷(低反力)	811	270	118	12.0	1 115	201

根据护舷性能曲线，800H 鼓型橡胶护舷(标准反力)变形为 28.7% 时，对应的反力约为 250 kN；1000H 鼓型橡胶护舷(低反力)，变形为 12.0% 时，对应的反力约为 270 kN；由此可见选取上述两种护舷时，整个靠泊系统的位移和内侧护舷的作用反力均遵循对应护舷的性能曲线。从经济性和护舷的有效利用率上，800H 鼓型橡胶护舷

(标准反力)更优。新增桩基的应力须满足 JTS 152—2012《水运工程钢结构设计规范》<sup>[5]</sup> 的要求。

## 2.4 复核横摇对新增靠泊簇桩系统的影响

依据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》计算在横浪作用下，原码头系泊的大型 LNG 船以及新增小型 LNG 船的有效撞击能量。单组护舷横摇

撞击能量计算结果见表3。得出码头原设计以及新增船舶在波浪作用下的撞击能量均小于单组3个护舷的总吸能量。

表3 单组护舷横摇撞击能量计算结果

船舶类别	计算波高 $H/m$	接触护舷 组数 $n$	撞击不均 匀系数 $K_1$	横摇撞击 能量 $E_0/kJ$
26.60万 $m^3$ LNG船	1.5	4	2.0	370.05
8.00万 $m^3$ 运输船	1.5	4	2.0	378.36
3.00万 $m^3$ 运输船	1.0	4	2.0	225.79
2.00万 $m^3$ 加注船	1.0	2	1.6	397.74
1.20万 $m^3$ 加注船	1.0	2	1.6	215.61
0.85万 $m^3$ 加注船	0.8	2	1.6	125.58

## 2.5 复核撞击力对新增靠泊簇桩系统的影响

依据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》计算原码头系泊的大型 LNG 船以及新增小型 LNG 船的挤靠力, 结果见表4。得出码头原设计以及新增船舶挤靠力均小于新增靠泊系统外侧 1150H 鼓型护舷的最大反力。

表4 挤靠力计算结果

船舶类别	计算风速/ $(m \cdot s^{-1})$	计算流速/ $(m \cdot s^{-1})$	受力护舷组 数量	挤靠力/ kN
26.6 万 $m^3$ LNG 船	20	0.37	6	332
8.00 万 $m^3$ 运输船	20	0.37	4	441
3.00 万 $m^3$ 运输船	20	0.37	4	247
2.00 万 $m^3$ 加注船	20	0.37	3	157
1.20 万 $m^3$ 加注船	20	0.37	3	132
0.85 万 $m^3$ 加注船	20	0.37	3	101

## 2.6 复核新增靠泊簇桩系统对原工作平台的影响

计算新增的水平荷载以及同时出现的荷载, 按承载能力和正常使用极限状态进行组合, 原工作平台桩力、桩应力、位移均满足要求。

在已建大型蝶形布置的 LNG 码头工作平台海侧新增靠泊簇桩系统的主要施工顺序依次为: 1) 桩基施工, 并依次在钢管桩内灌注粗砂、水泥砂浆和混凝土; 2) 工作平台前沿种植螺栓达到强度后安装钢支座; 3) 将内侧橡胶护舷安装于钢支座; 4) 钢支撑板两端的钢套筒安装在钢管桩上, 并在

钢套筒和钢管桩之间灌注混凝土; 5) 待钢管桩及钢套筒之间的混凝土强度达到 80%以上, 安装外侧橡胶护舷。项目技术改造在 1 个月内圆满完成, 对原有码头运营影响小、施工期短、投资见效快。

## 3 结论

- 1) 在原蝶形布置的靠泊大型 LNG 船舶的码头基础上, 提出了一种新增靠泊簇桩系统设施, 可满足小型 LNG 船靠泊, 变形协调性优越。
- 2) 该新型靠泊簇桩系统既满足新增小型 LNG 船的靠泊撞击力, 又兼容大型船舶系泊时产生的横摇撞击力和挤靠力, 亦不影响原工作平台的稳定性。
- 3) 该新型靠泊簇桩系统施工方便、工期短、投资较小, 施工期和使用期对原结构影响小, 安全可靠。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] BSI. Maritime works-Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems BS: 6349-4 [S]. London: BSI Standards Limited, 2014.
- [3] 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: 人民交通出版社股份有限公司, 2010.
- [4] 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.
- [5] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程钢结构设计规范: JTS 152—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2012.

(本文编辑 赵娟)