

带 FSU+FRU 接收终端的浮式 LNG 码头平面设计



卢生军, 丁建军, 陈良志, 覃杰

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510290)

摘要: 基于西非某带 FSU+FRU(储气船+再气化浮平台)接收终端的浮式 LNG 码头工程实例, 探讨该类码头平面设计要点。结果表明, 带 FSU+FRU 接收终端的浮式 LNG 码头在选址、作业标准、安全距离、泊位布置、工作平台形式等方面与常规码头有较大差别, 设计时应重点给予关注。

关键词: FSU; FRU; 浮式 LNG 码头; 平面设计

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0112-06

Layout design of floating LNG terminal with FSU and FRU receiving system

LU Sheng-jun, DING Jian-jun, CHEN Liang-zhi, QIN Jie

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The key issues for a floating LNG terminal is discussed. Based on a project of floating LNG terminal with FSU(floating storage unit) + FRU(floating regasification unit) receiving system in the West Africa, we discuss the key issues concerning the layout design of a floating LNG terminal. The results show that the layout location, operation criteria, safety distance, berth layout and arrangement, as well as the working platform form are quite different from the conventional ones. Thus the special attention shall be paid in the design.

Keywords: FSU; FRU; floating LNG terminal; layout design

与传统陆式 LNG 接收码头相比, 海上浮式 LNG 接收码头具有建造成本低、周期短、选址方便、灵活度高及可重复利用等诸多优点, 随着清洁能源需求的增加而具有广阔的发展应用前景^[1]。目前, 已建成的浮式 LNG 码头多采用储气再气化平台 FSRU 作为其接收终端, 采用 FSU+FRU 接收终端的浮式 LNG 码头在国外并不常见, 在国内更无先例。该类型 LNG 码头将储气和再气化功能分开在 FSU 和 FRU 两个独立的浮体上实现, 相比 FSRU, 其建造和维护的技术难度更低, 且 FSU 可直接由旧的 LNG 船简单改装而成, 特别适合在技术和经济不发达地区使用。

采用 FSU+FRU 接收终端的浮式 LNG 接收码头的平面设计与传统陆式及采用 FSRU 的浮式 LNG 码头均存在差异。本文结合西非采用 FSU+

FRU 接收终端的某浮式 LNG 码头工程为例, 对其码头平面设计要点进行探讨。

1 工程概况

该在建浮式 LNG 码头位于西非的加纳特码市, 采用的是 FSU+FRU 的接收终端形式。为满足当地天然气进口需求, 计划每 10~14 d 由 17.4 万 m³ 的 LNG 船向储气船 FSU 加注液化天然气, 其一次加注时间约为 36 h。FSU 中的液化天然气经由再气化浮平台 FRU 气化后, 经 1 根直径为 406 mm 的柔性海底管线输送上岸。

项目主要建设内容包含码头水域疏浚、防波堤、FSU、FRU、海底管线、靠船墩、系缆墩、人行桥以及码头附属设施等。总平面布置如图 1 所示。

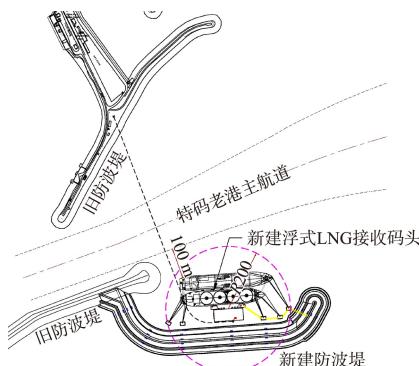


图 1 总平面布置

1.1 自然条件

1.1.1 潮位及设计水位

项目位于西非的几内亚湾海域, 潮位参数如表 1 所示。

该 LNG 码头的设计使用年限为 25 a, 但防波堤设计需考虑 50 a 一遇水位和设计波浪。考虑近岸波浪增水、海平面上升等的影响后, 确定用于码头设计的高水位和低水位分别为 2.1 和 -0.2 m。

表 1 潮位参数

最高天文潮 HAT	平均大潮高潮位 MHWS	平均水位 MSL	平均大潮低潮位 MLWS	最低天文潮 LAT
1.9	1.5	0.9	0.2	-0.2

1.1.2 波浪条件

受源自大西洋高纬度地带的温带气旋长距离传播而来的波浪影响, 工程区域波浪以长周期涌浪为主, 其风浪和涌浪具有如下显著特征:

- 1) 工程海域既有风浪又有涌浪, 波浪以涌浪为主, 波浪谱峰周期 T_p 分布范围较大, 为 6~20 s;
- 2) 涌浪波高 H_s 一般小于 2.5 m, 但在波高 H_s 为 1.5 m 时, 其周期 T_p 可达 20 s, 周期较长;
- 3) 风浪波高 H_s 一般小于 2.0 m, 周期 T_p 小于 8 s;
- 4) 波浪方向集中于南偏东或偏西 10° 范围, 即波向为 170°~190°。

防波堤堤脚处的近岸设计波浪要素如表 2 所示。

表 2 设计波高

波浪重现期/a	1	10	25	50
有效波高 H_s/m	2.38	2.71	2.82	2.93

1.1.3 风

全年盛行西南风。根据对工程附近机场测站数据分析, 工程位置营运状况下风速为 12 m/s, 极端状况下风速为 20 m/s。

1.1.4 流

潮流方向多为东北向, 流速较小, 大部分时候垂线平均流速小于 0.1 m/s, 最大不超过 0.5 m/s。

1.1.5 地质

项目周边海域地质分布均匀, 海床面以下 2~3 m 为松散砂层, 该层以下即是风化的片麻岩地层。片麻岩强度较高, 疏浚开挖难度大。

1.2 设计船型

项目设计船型单一, LNG 运输船仓容为 17.4 万 m³, FSU 储气船考虑由一艘旧的 12.7 万 m³ 的 LNG 船改装而成以节约建设成本。LNG 船和 FSU 船的设计参数见表 3。

表 3 FSU 及 LNG 船设计参数

船型	仓容量/ 万 m ³	船舶尺度 (长×宽×型深)/ (m×m×m)	满载 吃水/m	压载 吃水/m
FSU	12.75	272×47.2×26.5	11.4	9.03
LNG	17.40	298×45.8×26.5	11.5	9.40

FRU 再气化浮平台为长 95.0 m、宽 38.4 m、型深 19.8 m 的方形结构, 其仓容量为 2.80 万 m³。平台自质量 1.29 万 t, 设计吃水 6.7 m, 满载时干舷 13.1 m, 故受风面积较大。

2 码头选址要求

采用 FSU+FRU 接收终端的浮式 LNG 码头选址不仅要满足常规陆式 LNG 码头的选址要求, 而且 FSU 和 FRU 须永久系泊在码头上, 即使在最极端的环境条件下也不能紧急离泊。另外, 浮体单元对波浪的动态响应也远比固定式码头结

构敏感。因此，码头需要选址在自然条件良好的港湾，必要时需要建设足够长的防波堤进行掩护。

项目位于加纳特码市，附近无掩护条件良好的天然港湾，而已建成的特码老港水域空间狭窄，布置 LNG 码头受到安全距离的限制。为此，通过多方案比选，最终将码头选址于特码老港防波堤口门处(图 1)，利用特码老港已有防波堤及新建的约 780 m 长防波堤为码头提供足够的掩护。该码头选址方案具有如下显著优点：

1) 在无占用老港水域的情况下，充分利用老港已有防波堤结构和配套设施，节约投资；

2) 老港防波堤口门处天然水深接近码头设计水深，可大幅减少码头水域疏浚工程量，尤其是炸礁量；

3) 新建防波堤不仅能为新码头提供掩护，同时改善了老港进港航道的船舶航行条件。

但是，因码头位于防波堤口门处，北侧紧邻特码老港主航道，需要评估其他航行船舶对码头营运条件及安全的影响，增加了码头平面设计的技术难度。

3 作业条件

与陆式 LNG 码头不同，FSU 与 FRU 在极端环境条件下不能紧急离泊，因此除了需要满足在正常营运条件下 LNG 船的安全操作要求外，还需要考虑在极端环境条件下的浮体结构运动量及受力也能满足浮体运动量、缆绳安全工作荷载、护舷变形以及 FRU 锚碇结构承载力等的相关要求。

3.1 浮体运动量标准

FRU 浮平台采用大直径钢管桩锚碇，考虑 FRU 营运及其设备安全需要，要求在极端风、浪、流作用下的 FRU 浮体纵、横向水平位移均不超过 0.5 m。

LNG 船和 FSU 船的运动量标准采用 PIANC 规范^[2]中的建议值，如表 4 所示。

表 4 LNG 船及 FSU 船运动量标准

纵移/m	横移/m	升沉	回转/(°)	纵摇/(°)	横摇/(°)
±2	±2	-	±2	±2	±2

3.2 缆绳安全工作荷载

LNG 船和 FSU 船系泊时，系缆力不应超过缆绳的安全工作荷载(SWL)，其标准采用 OCIMF 规范^[3]的建议值(表 5)。

表 5 系缆力限值

缆绳材质	钢缆	尼龙缆	合成纤维缆
系缆力/缆绳破断力/%	55	45	50

3.3 护舷变形限值

系泊船舶的挤靠力导致的护舷变形不应超过选定护舷的额定限值。本项目 LNG 船与 FSU 船并靠，之间设置气动护舷，变形限值为 60%。FSU 船与靠船墩间布置锥形橡胶护舷，变形限值为 72%。

3.4 FRU 锚碇结构承载力

极端环境条件下的 FRU 浮平台所受风、浪、流等水平荷载较大，其传递到锚桩的水平力不应超过锚桩的水平承载力。

上述 4 点是确定码头作业标准的关键性因素，目前尚无经验公式可供计算，须进行专门动态系泊分析。通过对不同波高、波周期、不同系泊情况下共 32 个控制工况的模拟，最终确定港内波浪标准如下：当谱峰周期 T_p 为 20 s 时的有效波高 H_s 不应超过 0.5 m，远比一般陆式 LNG 码头港内作业标准严格。

4 平面设计要点

4.1 码头水域

码头选址于特码老港防波堤口门位置的深水区，回旋水域往外海处天然水深超过 16.0 m，满足设计船舶安全航行吃水要求，不需要专门设置外航道。

为优化回旋水域尺度，对各种可能的风、浪、流条件下的船舶操纵情况进行模拟(图 2)，最终采用 1.5 倍设计船长(LNG 船)，即直径为 450 m 的小回旋圆直径方案。



图 2 操船试验轨迹

码头前沿停泊水域按 LNG 船与 FSU 双船并靠设计, 宽度取 125 m, 停泊水域长度为设计船长加上艏、艉各 50 m 的安全距离。

码头水域底高程按船舶系泊或进出港航行时龙骨下富余深度 $UKC \geq 1.0$ m 为控制标准。考虑规范经验公式计算确定的水深与船舶实际航行时的水深偏差较大且往往偏保守, 项目采用 UKC 仿真试验对不同风、浪、流情况下的船舶系泊和进出港航行情况进行模拟, 得到所有工况均满足 $UKC \geq 1.0$ m 标准时, 有、无防波堤掩护的码头水域底高程应至少分别为 -15 和 -16 m。

4.2 防波堤布置

因 FSU 船及 FRU 不能紧急离泊, 港内作业标准需考虑极端波浪, 且因浮体受力对港内波浪十分敏感, 故港内允许作业波高较小。因此, 在评估防波堤对港内的掩护效果时, 堤身透浪和堤顶越浪不可忽略。考虑一般波浪数模无法模拟堤身透浪和堤顶越浪, 针对该类型码头建议通过三维波浪物模对港内波浪做进一步验证。

为了给码头提供足够掩护, 在已有防波堤堤头位置处新建约 780 m 长防波堤延长段。因外海波浪方向为正南向($170^\circ \sim 190^\circ$), 防波堤轴线采

用东西向 U 形布置。堤顶高程设置在高水位以上约 1.4 倍波高位置 6.3 m 处, 极端波浪条件下存在越浪。堤身采用抛石斜坡堤结构, 堤心透浪。最终通过波浪数模及三维波浪物模试验对防波堤掩护效果进行评估。

4.3 码头平面布置

4.3.1 安全距离评估

PIANC 规范^[4]中规定: 1) LNG 码头装卸点周围 200 m 范围为安全区域, 在 LNG 码头进行装卸作业时其他任何船舶不能进入该区域; 2) 通航船舶与系泊船舶的最小安全距离为 50 m。

为节省投资, 将码头选址在特码老港防波堤口门处, 码头距离陆地超 1 km, LNG 船及安全区距离北侧主航道边界的最小安全距离分别为 100 和 50 m。针对该安全距离进行分析论证:

1) 航行安全评估。通过统计分析当地船舶类型、大小、航速、航线等, 评估系泊船舶与主航道上过往船舶发生碰撞的风险, 当过往船舶距离主航道安全距离为 100 m 时, 发生船舶碰撞的可能性较低。

2) 船行波影响分析。采用动态系泊数值模拟手段, 对特码老港主航道航行船舶产生的船行波对系缆船舶的影响进行分析, 结果表明安全距离 100 m 时船行波对系泊船舶的影响很小。

3) 定量安全风险分析。采用定量安全风险分析法评估项目对周边公众安全的风险。浮式 LNG 码头距离陆地超 1 km, 远离居民区及工业区, 每年可能发生公众安全风险的频率远小于 10^{-6} , 属于可被广泛接受的风险。

4.3.2 泊位布置

码头采用 LNG 船与 FSU 双船并靠模式以节约泊位数量, 泊位平面采用墩式布置形式, 共设置 2 个靠船墩和 5 个系缆墩, 见图 3。

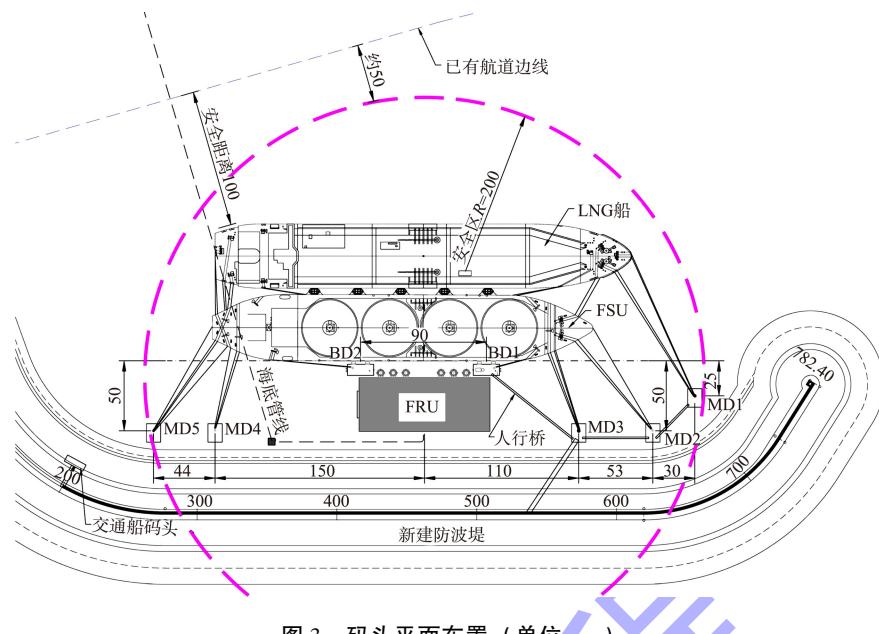


图 3 码头平面布置 (单位: m)

4.3.3 FRU 浮平台

本项目与一般采用 FSRU 的浮式 LNG 码头最大的不同是将再气化装置单独设置在一个浮平台上，相比 FSRU 的操作空间更大，可将气态天然气装卸臂直接集成在 FRU 上，省去单独建设一座固定式工作平台的费用。

再气化浮平台 FRU 长 95.0 m，宽 38.4 m，型深 19.8 m，设计吃水 6.7 m，采用 6 根直径 2.5 m 的钢管桩进行固定，钢管桩壁厚 50 mm。因 FRU 浮平台为永久系泊，锚桩设计时应考虑波浪、水流等循环往复荷载下的疲劳破坏。

4.3.4 靠船墩

与一般陆式 LNG 码头相比，采用 FSU+FRU 接收终端的浮式 LNG 码头的靠船墩布置时应考虑如下特点：

1) 与靠船墩直接作用的仅有 FSU 船，设计船型单一且固定；

2) 采用的是 LNG 船与 FSU 双船并靠的系泊方式，且极端条件下 FSU 无法紧急离泊，船舶系泊时的挤靠力而非靠泊时的撞击力是决定靠船墩上护舷性能、数量及靠船墩结构设计的控制性因素；

3) 靠船墩上护舷的布置和性能对系泊船舶运动量和缆绳缆力影响相比传统陆式 LNG 码头更大。

靠船墩布置的核心目标是保证船舶靠泊时靠船墩上的护舷防冲板能尽量对称地作用在船体平直段上，且尽量使靠泊船体受力均衡稳定。

码头设 2 个靠船墩，其中心距 90 m，满足英标 BS6349-2 的 0.25~0.40 倍设计船长要求。通过动态系泊试验，确定在 FSU 船侧安装 5 个气动护舷，气动护舷尺寸为 4.5 m×9.0 m，内压 80 kPa，在每个靠船墩上布置 2 个 SCN2000 型护舷。

4.3.5 系缆墩

LNG 船+FSU 双船并靠的浮式 LNG 码头的系缆墩布置、缆绳受力等均与常规码头有较大差异，双船并靠系泊的稳定性及缆绳受力是设计时须重点考虑的关键因素。

为满足 LNG 船和 FSU 船共同系缆的要求，码头平面采用墩式布置，在船首和船尾分别设置 3 个和 2 个共 5 个系缆墩。艏墩 MD1 距离 FSU 船靠泊线 25 m，其他系缆墩 MD2~MD5 距离 FSU 船靠泊线 50 m，艏艉系缆墩中心距离 387 m。

双船并靠系缆方式如下：

1) 首墩 MD1 设 4 钩 (150t) 快速脱缆钩，用于系 LNG 船艏缆；

2) LNG 船除艏缆外的其他缆绳系于 FSU 船上；

3) 系缆墩 MD2 和 MD5 分别设 3 钩和 4 钩

(150 t) 快速脱缆钩, 用于系 FSU 船舶艉缆;

4) 系缆墩 MD3 和 MD4 分别设 4 钩和 3 钩

(150 t) 快速脱缆钩, 用于系 FSU 船舶横缆;

5) 在 FSU 船上设系缆点用于 LNG 船除艏缆外的其他缆绳系统;

6) 在两个靠船墩 BD1 和 BD2 上设 2 钩(150 t)快速脱缆钩, 用于系 FSU 船倒缆。

系缆墩布置及系泊方案通过动态系泊试验进行验证, 保证船舶运动量、缆绳缆力及护舷变形满足规定的限值要求。

4.3.6 海底管线

LNG 管线需穿过特码老港主航道, 不具备建设管线栈桥的条件, 相比栈桥方案, 海底管线成本更低。因此, 考虑将由 FRU 气化后的天然气经由一根 406 mm 直径的柔性海底管线输送上岸。

海底管线采用开挖埋管方案, 埋深考虑远期航道浚深要求, 且在穿过主航道的区域设置保护结构防止落锚, 在海底管线海、陆两端设置安全警示牌和警示灯。

4.4 船岸联系

该浮式 LNG 码头没有连接码头和陆地的引桥, 为满足船岸联系做如下设计:

1) 人员通过交通船由陆地至防波堤, 经堤顶通道及人行桥至靠船墩, 再由安装在靠船墩上的大型登船梯分别至 FSU 船或 FRU 平台;

(上接第 111 页)

参考文献:

- [1] 刘欢. 高桩码头结构设计与桩基内力分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [2] 冯浩, 张蕊, 赵敏. 鱼山码头结构设计条件及重点问题分析[J]. 水运工程, 2021(5): 108-115.
- [3] 刘祥玉, 邓宏彦. 感潮河段施工工艺对高桩码头设计方案合理性影响[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(2): 50-54.
- [4] 程达, 赵张益, 庞启秀, 等. 基于三维数模对连云港港连云港区回淤强度的研究[J]. 水道港口, 2019, 40(1): 41-47.
- [5] 王玉生, 高华喜. 桩土作用下斜桩对高桩码头岸坡稳定性的影响[J]. 水运工程, 2016(8): 46-49.
- [6] 张振超, 李慧娣. 高桩码头桩后回淤对桩的影响数值分

2) 不设海底电缆及通讯光缆, 在 FRU 平台上设置专门发电设备用于供电, 船岸采用无线电通信。

5 结论

1) FSU+FRU 接收终端的 LNG 码头的港内作业标准主要受极端环境条件下的浮体结构运动量及受力控制, 远比一般陆式 LNG 码头要求严格, 码头应选址于掩护条件良好的海域, 防波堤透浪和越浪不能忽略, 宜通过三维波浪物模进行模拟。

2) 码头安全距离应通过航行安全评估、船行波影响分析、定量安全风险分析等一系列研究论证确定。

3) 相比 FSRU, FRU 操作空间更大, 可将气态天然气装卸臂直接集成在 FRU 上, 从而取消固定式工作平台。

参考文献:

- [1] 袁巍. LNG-FSRU 系泊性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [2] PIANC. Report 24-Criteria for movements of moored ships in harbours [S]. Brussels: PIANC, 1995.
- [3] OCIMF. Mooring equipment guidelines [S]. London: Witherby Seamanship International, 2008.
- [4] PIANC. Safety aspects affecting the berthing operations of tankers to oil and gas terminals [S]. Brussels: PIANC, 2012.

(本文编辑 郭雪珍)

析[J]. 港工技术, 2021, 58(1): 54-58.

[7] 黄飞宇, 赵飞, 沈伟平. 洋山深水港区四期工程码头下方清淤技术[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(3): 43-47.

[8] 汤星旗. 九江江出海口浅水深用码头基床清淤对策[J]. 港工技术, 2017, 54(2): 75-78.

[9] 罗小峰, 路川藤, 张功瑾, 等. 苏北大丰港海域航道临时抛泥区悬沙扩散影响研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 129-136.

[10] 程飞, 金泽林. 土方量计算方法研究与应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(1): 176-180.

[11] 刘聪聪, 冯先导, 朱博渊, 等. 强浪环境下围堰龙口泄流与冲刷特性研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1): 104-107.

(本文编辑 武亚庆)