



连续蝶形多装卸区油气化工码头 改扩建工程平面布置要素

王硕，张鹏，田万青

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：连续蝶形多装卸区油气化工码头改扩建工程边界条件复杂，可用岸线长度普遍受限，靠泊船型组合多，系缆布置形式复杂且较为特殊，安全要求高。虽然目前国际石油公司海运协会的《系泊设备指南》基于船舶系缆对码头的平面布置进行了一定的研究，但是对于油气化工码头改扩建工程的平面布置研究目前相对较少。以某码头改扩建工程为例，通过对已建码头进行利旧分析，归纳了改扩建工程的平面布置原则。依托船舶系缆布置图，研究多装卸区码头船舶系缆特点，优化系缆点位布置。运用 OPTIMOOR 数学模型核实平面布置可行性，并提出离泊控制条件。

关键词：改扩建工程；平面布置；油气化工码头；多装卸区；蝶形；系泊分析

中图分类号：U 658.5

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)02-0080-07

Layout elements of reconstruction and expansion project of liquid chemical wharf with continuous butterfly shaped multi loading and unloading area

WANG Shuo, ZHANG Peng, TIAN Wan-qing

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The reconstruction and expansion project of liquid chemical wharf with continuous butterfly shaped multi loading and unloading area has complex boundary conditions, generally limited available shoreline length, multiple berthing ship types, complex and special mooring line layout, and high safety requirements. Although the *Mooring Equipment Guidelines* published by OCIMF has carried out certain study on the layout of the wharf based on the ship mooring, there are few studies focused on the layout for liquid chemical wharf reconstruction projects. Taking the reconstruction and expansion project of a wharf as an example, the plane layout principles of the reconstruction and expansion project are summarized by analyzing the utilization of the existing wharf. Based on the layout plan of ship mooring lines, the characteristics of ship mooring lines in multi loading dock and optimizing the layout of mooring points are studied. The OPTIMOOR mathematical model is used to verify the feasibility of the plane layout and the departure control conditions are proposed.

Keywords: reconstruction project; layout; liquid chemical wharf; multi-loading zone; butterfly arrangement; mooring analysis

目前我国油品及液体化工品的市场快速增长，对我国沿海港口的油气化工品装卸储运能力提出了更高的要求，但沿海可利用的岸线已日渐稀缺，国内既有油气化工老旧码头改扩建有着广泛的市场需求。对已建油气化工品码头进行升级改造可

提高岸线资源的利用效率，兼顾提升码头功能以及工程经济性。但是改扩建工程也面临许多难题：1) 改扩建工程的对象多为已建的老旧码头，需对已建结构进行合理利旧，平面布置及施工限制较多；2) 已建码头普遍位于成熟或在建港区内，受

制于港区规划以及不同码头之间的安全距离要求,改扩建工程可使用岸线长度受限;3)改扩建后提升码头功能的要求高,普遍须满足多艘船舶同时靠泊作业要求;4)改扩建后码头兼顾船型种类多、吨级跨度范围大,系缆布置复杂且安全要求高。

本文以浙江海港中奥能源有限责任公司码头改扩建工程^[1]为例,对码头功能和等级提升大、船型组合复杂、可用岸线长度受限的连续蝶形多装卸区油气化工码头改扩建工程平面布置要素进行了分析。

1 工程概况

已建工程于2010年建设完工。现状1#泊位长度370 m,在限制条件下可靠泊12万t船舶;2#泊位长度160 m,最大可靠泊5 000 t船舶。

改扩建工程将1#泊位改扩建为15万吨级泊位(兼顾1艘5 000吨级船舶和1艘3 000吨级船舶同时靠泊),码头结构按30万吨级设计;将2#泊位改扩建为15万吨级泊位(兼顾2艘5 000吨级船舶同时靠泊)。改扩建后,两泊位总长度由原工程的530 m调整为732 m,设计通过能力由原工程的189万t/a提高至990万t/a。装卸货种为化工品和成品油,火灾危险性分类为甲B类。改扩建后1#、2#泊位码头前沿线方位角与已建工程保持一致,涨潮阶段各码头最大横流分量为0.05~0.20 m/s,落潮期间各码头最大横流分量为0.05~0.30 m/s(开流),码头前沿水域全潮时刻1#、2#泊位前沿最大落潮流速为1.28 m/s、最大涨潮流速1.23 m/s。工程设计高水位为4.03 m,设计低水位为0.82 m,极端高水位为5.35 m,极端低水位为-0.41 m(设计水位均为理论最低潮面基准)。

2 工程特点及应对措施

2.1 合理利旧已建结构

2.1.1 工程特点

已建1#泊位采用高桩墩式结构,平面呈蝶形布置。包含1个工作平台墩、4个靠船墩及5个系缆墩,各结构物之间通过钢便桥及预应力混凝土空心板连接。在码头前沿设置3个装卸区,其中1

个装卸区位于工作平台墩上,2个装卸区位于靠船墩之间的应力混凝土空心板上。已建2#泊位平面呈蝶形布置,包含1个高桩梁板式工作平台、2个系缆墩,在2#泊位工作平台上设置1个装卸区,各水工建筑物之间通过钢便桥连接。2个泊位码头与堤岸间分别通过2座引桥相连。在1#、2#泊位后沿上各布置1座工作房。

2.1.2 应对措施

对已建结构从平面布置角度以及结构角度进行研究,分析已有结构与码头功能、等级的适应性以及对施工的影响,从而确定利旧原则。通过对结构进行功能调整、加固或拆除重建,满足码头功能提升需求并控制工程投资。

根据已建工程结构检测结果^[2],现状1#泊位码头结构可满足12万吨级油船靠泊需求,因此充分利用已建1#泊位结构,在已建结构加固的基础上新增系缆墩满足30万吨级油船的靠泊要求。打桩作业面受已有结构限制,为方便系缆墩加固施工作业,在系缆墩前沿进行打桩加固扩建。对于无打桩作业面的靠船墩,在后沿以及侧面打设灌注桩进行加固扩建。

现有1#-1和1#-3工作平台为搭设在靠船墩上的预应力空心板结构,当靠船墩承受船舶撞击力后,工作平台也随之产生位移。为保证平台上部工艺管线不受位移应力影响,拆除1#-1与1#-3装卸区空心板,并在原位新建独立工作平台。继续利用已建1#引桥,管线沿引桥敷设与陆域相连。受已建引桥承载力限制,在引桥旁打设灌注桩新建两个补偿平台设置水平π型补偿。由于陆域已建库区空间受限,在引桥根部增设一个切断阀平台。

本工程装卸货种为甲B类,根据JTS 158—2019《油气化工码头防火设计规范》^[3],含消防控制室、消防水泵房的油气化工码头建(构)筑物外墙与码头前沿线防火间距不宜小于35 m,1#泊位现有工作房距码头前沿线仅26 m。因此拆除工作房,在现有工作房后沿新建综合楼平台,保证改建后综合楼与码头前沿线防火间距大于35 m。改扩建后1#泊位平面布置见图1。

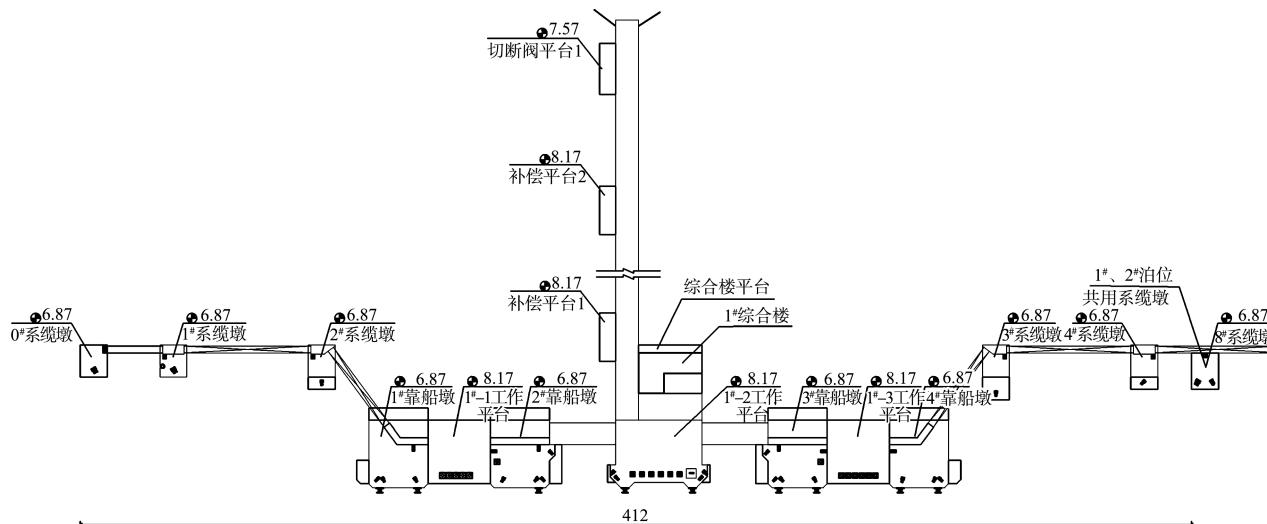


图 1 改扩建后 1#泊位平面布置 (单位: m)

现状 2#泊位结构由 1 个工作平台及 2 个系缆墩组成, 仅能满足最大 1 艘 5 000 t 船舶靠泊作业。通过对码头结构进行加固处理难以满足改扩建后码头等级及功能的巨大提升需求。因此考虑在改变已有码头结构功能的基础上新建 2#泊位码头结构。

在已建工作平台前沿新建 3 个工作平台及 2 个靠船墩, 在工作平台上布置装卸区。将已建工作平台调整为综合楼平台, 拆除平台上已有工作房

并新建 2#综合楼。将 5#系缆墩由原属 1#泊位调整为归属 2#泊位, 并在前沿进行打桩加固处理。新建 8#系缆墩, 在结构设计时按照 2#与 1#泊位共用考虑, 从而减少新建系缆墩个数。在已建工作平台北侧新建 9#、10#系缆墩, 新建系缆墩与 5#、8#系缆墩对称布置。继续利用已建 2#泊位引桥敷设管线, 由于无打桩作业面, 在引桥南侧通过打设灌注桩新建 2 个补偿平台以及 1 个切断阀平台。改扩建后 2#泊位平面布置见图 2。

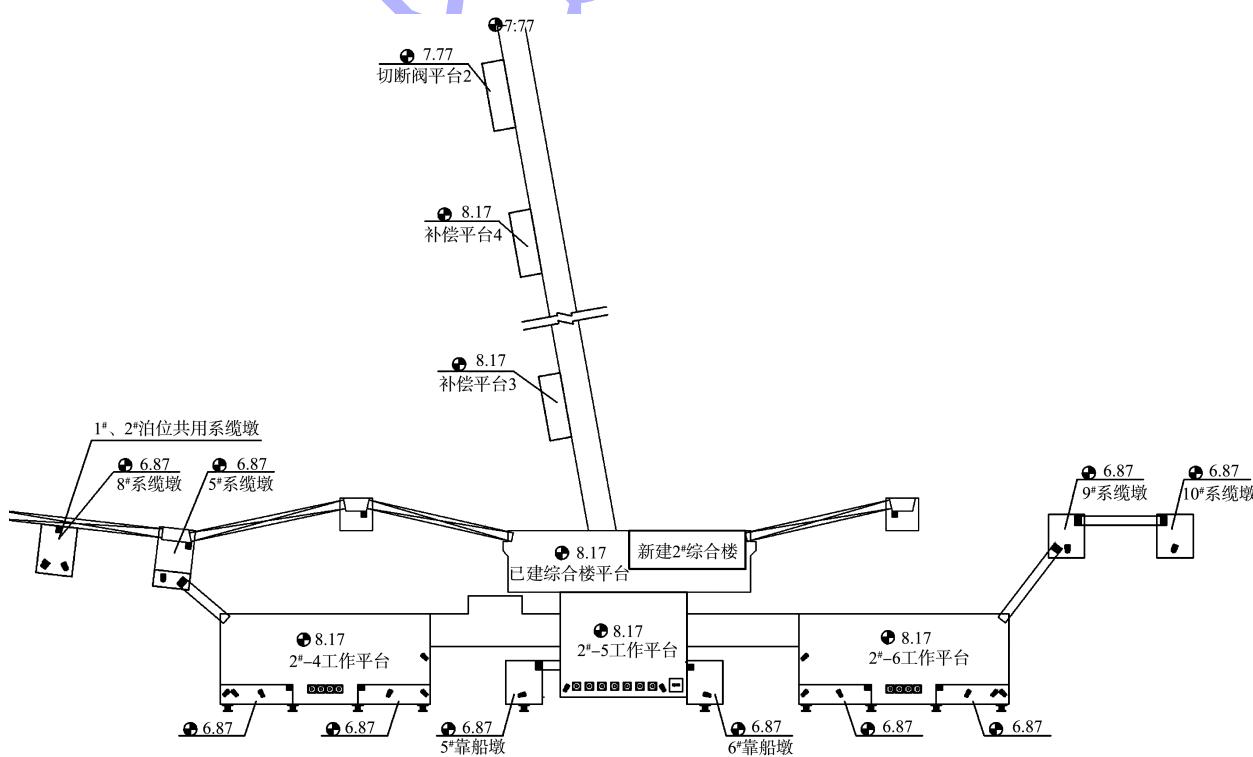


图 2 改扩建后 2#泊位平面布置 (单位: m)

2.2 工程可用岸线长度受限

2.2.1 特点

本工程 2#泊位北侧依次为拟建自在盛达 3#码头以及六横头湾物流基地配套码头。本工程 1#泊

位南侧依次为东鹏船舶修造有限公司码头以及大岙客运码头。本工程及拟建 3#码头(5 万吨级油品码头)可用岸线长度仅约 1.2 km, 见图 3。



图 3 本工程周边已建码头位置

2.2.2 应对措施

1#泊位在原有结构基础上进行加固改造, 不改变已有 1#泊位装卸区位置。按照 JTS 158—2019

《油气化工码头设计防火规范》中规定的两相邻油品及液体化学品泊位之间的船舶最小净间距要求, 确定 2#泊位各装卸区位置, 见表 1。

表 1 相邻危险品码头的船舶净间距

设计船长 L/m	$L \leq 110$	$110 < L \leq 150$	$150 < L \leq 182$	$182 < L \leq 235$	$L > 235$
船舶净间距/m	25	35	40	50	55

为最大限度减少泊位占用岸线的长度, 改扩建后 1#泊位靠泊 30 万吨级油船时, 2#泊位船舶与 1#泊位船舶最小净间距约 55.1 m。当 2#泊位同时

靠泊 2 艘 5 000 吨级油船时, 两船净间距为 35 m, 见图 4。

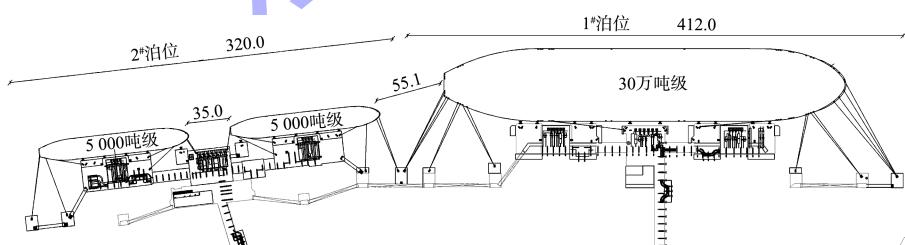


图 4 改扩建后泊位长度及两泊位船舶间距 (单位: m)

实践表明, 对于垂直于船舶轴线的横向风、浪、流荷载, 橫缆对横向船舶位移起主要约束作用; 对于纵向荷载, 倒缆因与船舶轴线夹角较小将发挥主要作用。对于蝶形码头, 与纵向约束相比, 船舶的横向约束更为重要, 难度也大, 需要进行强化。倒缆主要承受大部分的纵向荷载, 通过减少艏艉缆系统角度加强纵向约束的效果并不好。因此艏艉缆水平系统角度在 $45^\circ \sim 75^\circ$ 较合理,

大致对应 1.1~1.3 倍船长。较大的艏艉缆系统水平角度以及适中的缆绳长度将使得蝶形码头长度大为缩减。结合项目通航安全咨询报告^[4], 改扩建后泊位长度见表 2。

表 2 改扩建后泊位长度与设计船长关系

泊位	最大设计船型	船长/m	泊位长度/m	泊位长度/倍船长
1#	30 万吨级油船	334	412	1.23
2#	15 万吨级油船	274	320	1.17

2.3 船型组合复杂系缆模式多样

2.3.1 特点

1) 改扩建后泊位既要顺应船舶大型化趋势又要兼顾小吨级燃供船。因此 1# 泊位远期靠泊船舶等级为 3 000~30 万吨级, 2# 泊位靠泊船舶等级为 3 000~15 万吨级, 船舶吨级跨度巨大。燃供船舶有着作业时间和次数不规律、进出港频繁的特点, 需多个装卸区满足船舶同时作业需求。多装卸区布置以及船舶吨级跨度大导致船舶系缆模式多样、系缆点布设复杂。

2) 靠船墩、系缆墩受波浪浮托力限制, 面高程较高, 小吨级船舶存在吊缆现象。

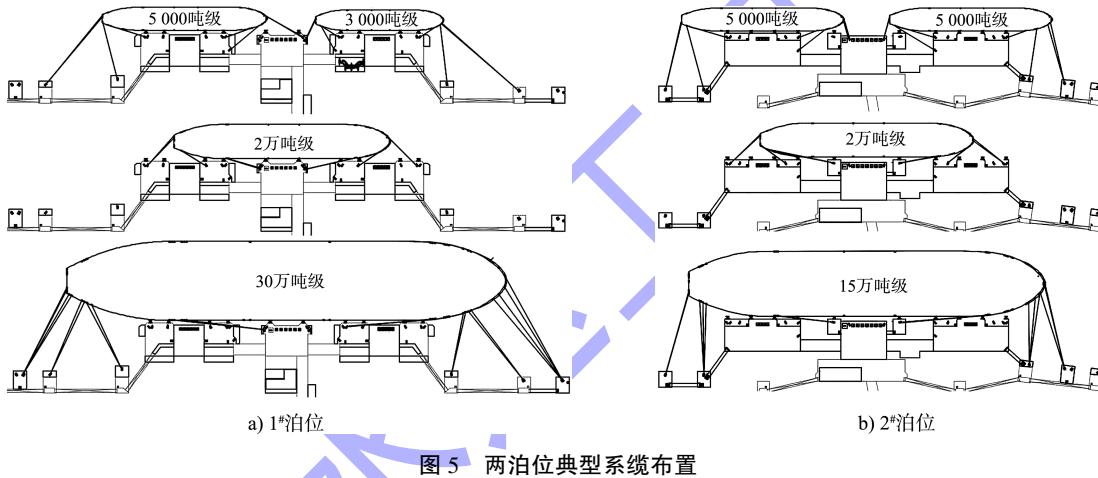


图 5 两泊位典型系缆布置

1#、2# 泊位防火等级为特级, 根据规范^[6]要求, 改扩建后所有系船设施均采用快速脱缆钩。快速脱缆钩水平转动角度有限, 钩子水平转角为 45°(内侧)~90°(外侧), 根据系缆布置图确定各点位快速脱缆钩安装角度。对于不同船型共用一个系缆点位但水平系缆角度相差较大的情况, 在该系缆点设置两套朝向不同的快速脱缆钩。

2) 小型船舶在满载设计低水位工况下出缆孔位置高程较低。在 2#-4 工作平台以及 2#-6 工作平台前沿设置局部 2 层系缆平台降低码头前沿系缆点高程, 减少小型船舶的吊缆影响。

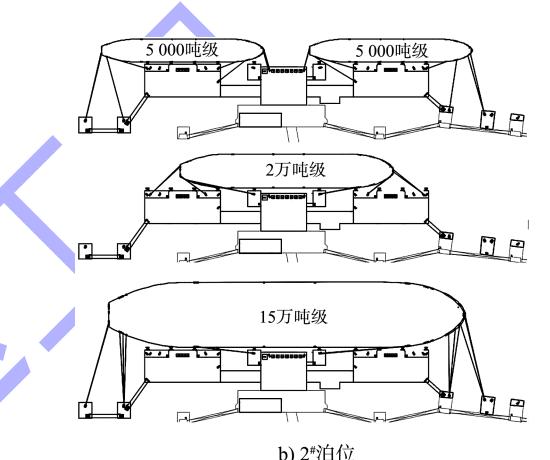
3) 由于系缆墩的加固效果差、经济性差, 本工程在系泊分析的基础上, 减少加固系缆墩上的脱缆钩数量, 并适当增加新建系缆墩上的脱缆钩数量, 在新旧结构之间合理分配系缆力, 降低加固施工难度以及成本。

3) 大型船舶系缆对系缆墩承载力要求高, 已建系缆墩加固施工相对困难且承载力提升效果有限, 经济性差。

4) 项目区域掩护条件较差, 需保证各船舶系缆布置模式下缆绳内力及船舶位移满足规范要求。

2.3.2 应对措施

1) 参考实船出缆孔位置^[5], 依照规范中不同吨级的船舶尺度绘制船舶系缆布置图, 核实缆绳与码头结构及上部设施的干涉情况以及各船舶之间缆绳的干涉情况。结合系缆布置图不断优化系缆点位, 保证所有船舶系缆布置的可行性, 两泊位典型船舶系缆布置见图 5。



4) 改扩建后两泊位平面布置均为多装卸区蝶形布置, 由于靠泊船舶的船型尺度各不相同, 系缆布置形式也有所区别, 其中 3 000~5 000 吨级船舶为不对称系缆、1 万~3 万吨级船舶为一字型泊位系缆、5 万~30 万吨级船舶为蝶形泊位系缆。采用 OPTIMOOR 系泊分析软件^[7], 对 1#、2# 泊位典型靠泊船型进行系缆分析, 验证不同船型系缆布置的可行性。

系缆分析的自然条件参考《六横中奥能源集团有限公司码头扩建工程水文测验分析报告》^[8]《中奥能源六横库区码头升级改造工程潮流泥沙数学模型研究》^[9]进行确定。经分析, 最不利情况下的自然条件组合选取如下: 1) 风, 18 m/s(水面以上 10 m 处, 持续时间 10 min), 风向 -45°(8 级开向风); 2) 浪, $H=2 \text{ m}$, $T=5.5 \text{ s}$, 浪向 90°(逃逸波高, 横向浪); 3) 流, 根据全潮实测资料及数模试验结果, 1#、2# 泊位计算所用流态见表 3。

表3 泊位计算流态

泊位	编号	流速/(m·s⁻¹)	流向/°	备注
1 [#]	C-1	1.00	170±10	落潮流
	C-2	1.15	170±10	落潮流
2 [#]	C-3	1.20	350±10	涨潮流
	C-4	1.20	350±10	涨潮流

考虑各种自然条件的组合,1[#]、2[#]泊位船舶系缆工况组合见表4。参考实船所使用的缆绳材质和破断力与OCIMF发行的第4版系泊设备指南^[10],系泊分析各吨级船型所采用的缆绳种类及缆绳分

布见表5、6。

表4 系缆计算工况

泊位	工况	风/(m·s⁻¹)	浪/m	流(编号)	潮位	吃水
1 [#]	1	18	2	C-1	设计低	满载
	2	18	2	C-1	设计高	压载
	3	18	2	C-2	设计低	满载
	4	18	2	C-2	设计高	压载
2 [#]	1	18	2	C-3	设计低	满载
	2	18	2	C-3	设计高	压载
	3	18	2	C-4	设计低	满载
	4	18	2	C-4	设计高	压载

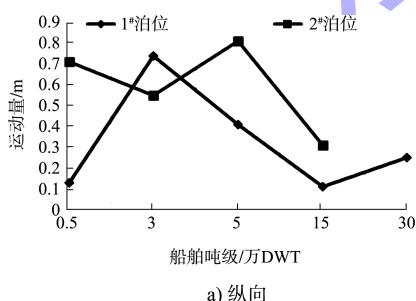
表5 各吨级船舶采用缆绳种类

船舶吨级/DWT	缆绳材质	缆绳直径/mm	缆绳破断力/kN	尾索材质	尾索直径/mm	尾索破断力/kN
30万	钢缆(纤维芯)	44	1 320	尼龙	100	1 400
8万~15万	钢缆	44	1 070	尼龙	88	1 090
1万~5万	尼龙	80	900	尼龙	80	900
3 000~5 000	尼龙	60	520	尼龙	60	520

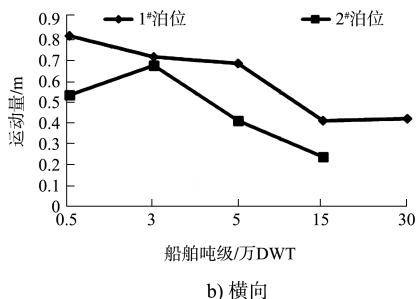
表6 各船型缆绳分布

船舶吨级/DWT	艏、艉缆/根	艏、艉横缆/根	艏、艉倒缆/根	缆绳总数/根
30万	4	4	2	20
12万~15万	1 [#] 泊位4、2 [#] 泊位3	1 [#] 泊位2、2 [#] 泊位3	2	16
5万~8万	3	2	2	14
1万~3万	2	2	2	12
3 000~5 000	2	1	1	8

通过使用OPTIMOOR系泊分析软件对两泊位典型船型在各种工况下进行系泊分析后,各典型船舶的最大位移量见图6,最大缆力占比情况见图7。



a) 纵向



b) 横向

图6 各吨级船型最大位移

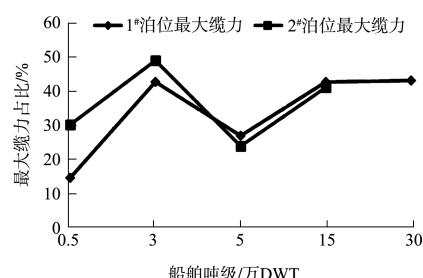


图7 各吨级船舶最大缆力占比

码头作业允许的船舶运动量根据JTS 165—2013《海港总体设计规范》^[11]进行确定。本工程各装卸区均采用装卸臂进行作业,船舶纵移允许最大运动量为2 m、横移最大运动量为2 m,其中纵移允许最大运动量为正负最大值,横移为0至最大值。本工程各典型船型的最大纵移量绝对值以及最大横移运动量均约为0.8 m,各典型船舶中最大缆力均小于50%缆绳最大破断力,因此本工程的平面布置可以满足各吨级船舶的系缆要求。

分析系泊结果发现,由于多装卸区蝶形泊位

的平面布置较为特殊，3 000~5 000 吨级船舶为非对称系统，船舶运动量较大；1 万~3 万吨级船舶布置为一字型泊位布置，缆绳受力情况相对较差，且船舶运动量也较大。同时本工程系缆点位较多，船舶在系缆过程中缆绳可能系至错误的系缆点位导致脱缆钩损坏。为了保证后续船舶作业过程中的系泊安全，本工程将所有吨级船型的带缆图加入设计文件，给出推荐的系统布置形式。同时参考各船型允许作业波高情况以及系泊分析结果，对各类船舶的离泊波高进行限制，进一步保证船舶系缆安全。各船型建议离泊波高见表 7。

表 7 两泊位各船型建议离泊波高

船舶吨级/DWT	离泊波高/m	
	1#泊位	2#泊位
3 000~5 000	1.2	1.2
1 万~3 万	1.5	1.5
5 万~15 万	2.0	2.0
30 万	2.0	-

3 结论

1) 改扩建工程要从结构及平面布置角度对已建结构进行分析研究。根据改扩建后码头功能需求，对已建码头结构保留、功能调整、加固或拆除重建。设计过程中应综合考虑施工难易程度以及工程经济性，在码头使用功能以及码头利旧程度之间寻求平衡点。

2) 对于可用岸线长度受限的油气化工码头改扩建项目，须明确周边已建码头实际船舶靠泊情况，根据船舶安全间距要求确定装卸区位置。参考现行标准以及系泊分析结果，通过增大艏艉缆水平系缆角度加强船舶的横约束、减少艏艉系缆墩之间的距离，控制泊位长度。

3) 对于船舶吨级跨度大、船舶靠泊组合复杂的多装卸区蝶形码头，应绘制所有船型组合下的系统布置图，不断优化系统点位布置。对于小吨级船舶吊缆的问题，可通过设置二层系统平台减小吊缆影响。

4) 采用快速脱缆钩作为系船设施时应注意脱缆钩转角的局限性，合理确定设置方向。

5) 多装卸区蝶形码头平面布置较为特殊，不

同吨级船舶的系统布置形式存在不对称系统、一字型泊位系统、蝶形泊位系统等 3 种系统模式，因此开展系统的系泊分析是非常必要的。通过系泊分析可以核实系统布置的可行性、了解最不利工况下各种系统模式下船舶运动量特点以及缆绳受力特点，给出推荐的船舶系统布置形式以及船舶离泊标准，为码头的安全运营提供参考。

参考文献：

- [1] 中交水运规划设计院有限公司.浙江海港中奥能源有限责任公司码头改扩建工程初步设计[R].北京:中交水运规划设计院公司, 2021.
- [2] 青岛中航工程试验检测有限公司.浙江海港中奥能源有限责任公司码头改扩建工程水工结构检测报告[R].青岛:青岛中航工程试验检测有限公司, 2020.
- [3] 中交水运规划设计院有限公司.油气化工码头设计防火规范: JTS 158—2019[S].北京:人民交通出版社有限公司, 2019.
- [4] 武汉理工大学.浙江海港中奥能源有限责任公司码头改扩建工程通航安全咨询报告[R].武汉:武汉理工大学, 2020.
- [5] FISK S, SAVVIDES N. Significant ships of 2012.[M].London: The royal Institution of Naval Architects, 2013.
- [6] 中交水运规划设计院有限公司.码头附属设施技术规范: JTS 169—2017[S].北京:人民交通出版社有限公司, 2018.
- [7] ALAN R, JHON F F. Optimoor mooring analysis computer program users guide[R]. Northumberland: Tension Technology International Ltd., 2012.
- [8] 浙江广盛环境建设集团有限公司.浙江海港中奥能源集团有限公司码头扩建工程水文测验分析报告[R].舟山:浙江广盛环境建设集团有限公司, 2017.
- [9] 南京水利科学研究院.中奥能源六横库区码头升级改造工程潮流泥沙数学模型研究[R].南京:南京水利科学研究院, 2020.
- [10] OCIMF. Mooring Equipment Guidelines(MEG4) Fourth Edition.[M]. Livingston: Witherby Seamanship International Ltd., 2018.
- [11] 中交水运规划设计院有限公司.海港总体设计规范: JTS 165—2013[S].北京:人民交通出版社, 2014.