

长平台蝶形布置的液体化工码头系泊分析

谭 风, 胡家顺, 张 鹏

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要:以宁波某码头改扩建工程为例,采用Optimoor数学模型,对码头各装卸区不同船型在装卸作业及极端条件系泊状态下的各种工况进行系泊分析。通过采用合理的码头作业标准,确定各船型缆绳材质、数量及安全作业缆力,设计全面的计算工况,综合考虑各船舶的系泊要求并进行大量试算调整,从而得到满足要求的计算结果。重点对比分析长平台码头船舶居中和偏心系缆时缆力分布及船舶运动量特点,针对兼靠中等船型横缆过短或无横缆及小船型无足够系统设备等等问题提出合理可行的解决方案。根据结果确定码头系统设施选型和布置,绘制出船舶系统布置,为码头安全运营提供参考。

关键词:系泊分析;偏心系缆;长平台;液体化工码头

中图分类号: U 656.1⁺39

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0089-08

Mooring analysis of liquid chemical wharf with long platform butterfly arrangement

TAN Feng, HU Jia-shun, ZHANG Peng

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

Abstract: Taking a wharf reconstruction project in Ningbo as an example, we adopt the Optimoor mathematical model to carry out the mooring analysis of various working conditions of different ship types in loading and unloading operations and mooring operations under extreme conditions in each operation area. Using the terminal operation standards, we determine the mooring rope material, quantity, and safe working strength of different ship types, design the comprehensive calculation work conditions, conduct the numerous trial calculation adjustments considering the mooring requirements for different ships, and acquire the results that meet the mooring requirements. We focus on comparative analysis of the line force distribution and motion characteristics of ship berthing at the long platform wharf in the center and eccentric mooring and propose feasible solutions to short cross lines or no cross lines for medium-sized ships and inadequate mooring equipment for small-sized ships. We determine the selection and arrangement of quick-release hook and bollard based on the analysis results and provide the schematic diagrams of mooring lines as a reference for the safe operation of the wharf.

Keywords: mooring analysis; decentration mooring; long platform; liquid chemical wharf

开敞式码头一般自然条件复杂,而危险的液体化工品为危险品的作业安全至关重要。液体化工码头常采用蝶形布置,为了提高码头兼容性和生产效率,近年来的改扩建码头工程有采用长平台兼靠两艘或多艘小船的布置情况。随着液体化工品装卸种类增多,码头所需配备的输油臂和软管吊等装卸设备也增多,码头装卸作业区变宽。输油臂对装卸船舶定位要求高,船舶汇管中心须

与输油臂中心基本对齐,允许的偏差值小,因此当码头配置较多输油臂时,采用两侧输油臂装卸的船舶会出现偏心系缆的现象。此外,高桩码头的快速脱缆钩等系统缆设施的布置须结合水工结构及输油臂等工艺设备布置确定,受限因素多,给船舶安全系缆提出挑战。因此,对长平台蝶形布置液体化工码头开展系统的系泊分析是复杂且必要的。

收稿日期: 2020-08-18

作者简介: 谭风(1988—),女,硕士,高级工程师,从事港口航道工程咨询和设计。

系泊分析可协助进行码头泊位长度的比选，可分析出码头水域风、浪、流主导方向，从而确定码头轴线方位。本文结合宁波某码头改建工程^[1]，在已确定码头长度和轴线的条件下，采用Optimoor 数学模型^[2]，对码头长平台各装卸区不同船舶在装卸作业及极端条件系泊状态下进行系泊分析。通过采用合理的作业标准、设计计算工况并进行大量试算调整，得出符合要求的船舶缆力及运动量，从而为确定各装卸区不同船型的缆绳参数、数量及布置、码头系缆设施类型及布置提供依据。本文通过分析船舶偏心系缆的特点及注意事项，针对长平台部分兼顾船型横缆过短、快速脱缆钩对小船系缆兼容性较差等问题，提出解决方案，最后绘制出船舶系缆示意图，为码头安全运营提供依据。本文可为类似工程的系泊分析提供参考。

1 工程概况

工程位于杭州湾口外穿山半岛东北侧，金塘水道南岸。原工程已建泊位 7 个，按布置分为一、二、三线码头，均通过引桥与后方陆域相连，其中二线码头东端有 2 个泊位尚未建设，如图 1 所示。

改扩建工程利用原二线泊位，扩建成 5 万吨级液体散货泊位 1 个，码头轴线方位为 $98^{\circ}26'28'' \sim 278^{\circ}26'28''$ ，泊位长度按同时靠泊 1 个 2 万吨级、1 个 5 000 吨级(或 3 个 2 000 吨级)船舶设计，泊位总长度为 384 m，设计通过能力为 195 万 t/a。码头采用双平台蝶形布置和高桩结构，由 2 个工作平台和 3 个系缆墩组成。码头保留既有工作平台及其两侧系缆墩，在东侧新建长平台及系缆墩各 1 个。原平台布置 1[#]装卸区(2 000~5 000 吨级船舶)。

新平台长 153.7 m，按照兼靠 2 艘 2 000 吨级船舶控制，平台上布置 3 个装卸区，其中，2[#]、4[#]装卸区装卸 2 000 吨级船舶，3[#]装卸区装卸 2 000~5 万吨级船舶。3[#]装卸区布置有 8 个输油臂及大量软管吊，装卸区宽度达 62.4 m，装卸货类众多。码头布置如图 2 所示。

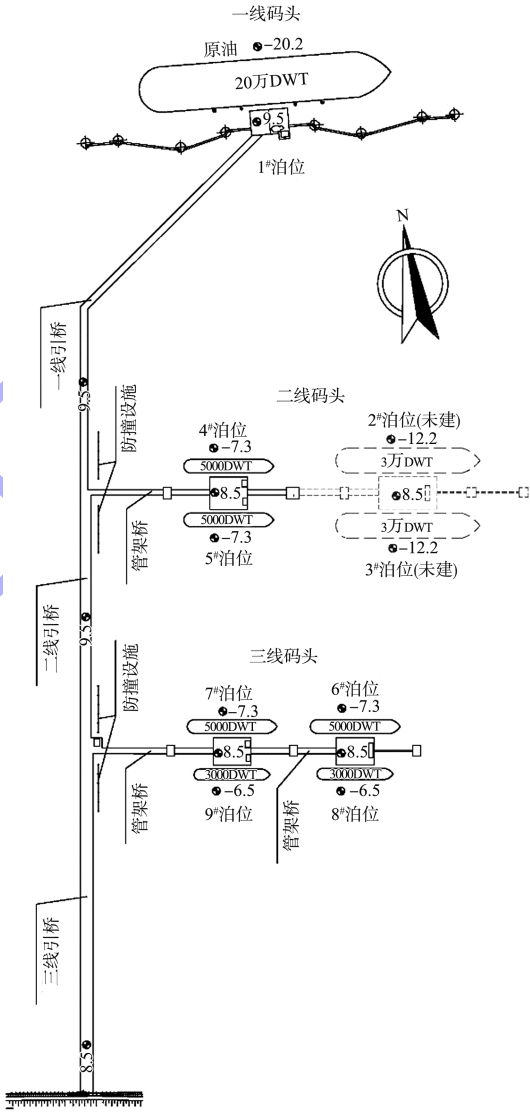


图 1 原码头布置 (单位: m)

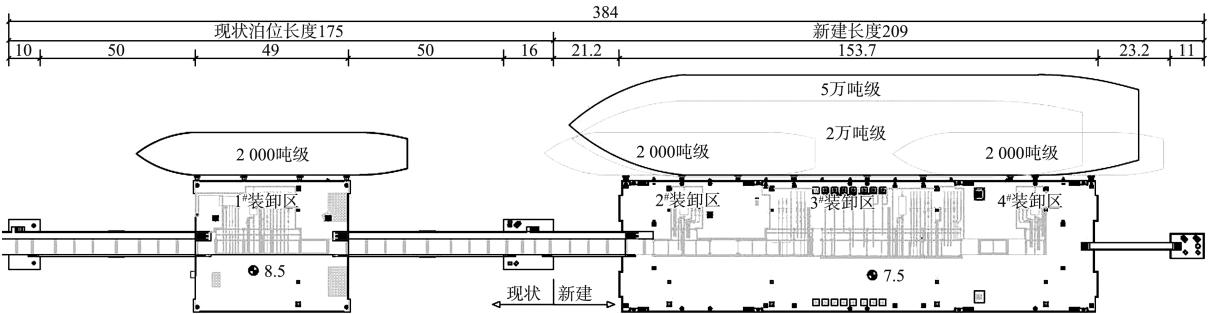


图 2 二线改扩建码头布置 (单位: m)

2 码头作业标准

各吨级船舶装卸作业及极端天气系泊标准见表 1(仅列系泊分析相关参数)。码头作业标准一般按规范^[3]要求确定,但对于自然条件复杂的水域,也可降低波浪或风作业标准。根据装卸设备技术要求,装卸作业允许的运动量见表 2。

表 1 船舶装卸作业及系泊参数标准

船舶吨级/ DWT	$H_{4\%}/\text{m}$		波周期 \bar{T}/s	风速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
	横浪	顺浪		装卸	系泊
5 万	≤ 1.2	≤ 1.5	≤ 8	≤ 13.8	≤ 22.0
3 万	≤ 1.0	≤ 1.2			
2 万	≤ 1.0	≤ 1.2	≤ 6		
3 000~1 万	≤ 0.8	≤ 1.0			
2 000	≤ 0.6	≤ 0.6			

表 2 装卸作业允许的船舶运动量

装卸设备	纵移/m	横移/m
装卸臂	2.0	3.0
软管吊	3.0	3.0

表 3 5 万吨级船舶计算工况

状态	风向或 波向/(°)	$H_{13\%}$ / m	周期/ s	风速 $v/(m\cdot s^{-1})$	水位/m	吃水/m	流速与流向	偏移量/m	总工况/个						
装卸作业	323	1.25	4.5	13.8 (10 m 高 10 min 平 均)	设计高水位 3.58、设计 低水位 0.70	船舶满载状 态 12.9、船 舶压载状 态 8.7	涨潮流速 3.2 kn、 流向 106°；落潮流 速 3.2 kn、流向 286°；流速 0 kn、 流向 0°	-10、10、0	360						
	286														
	278	0.6	3.5												
	233	0.4	2.5												
	188	0.3	2.2												
	143	0.4	2.5												
	106														
	98	1.25	4.5												
	53														
	8	1.0													
系泊	323	1.25	4.5	22.0 (10 m 高 10 min 平 均)					360						
	286														
	278	0.8	3.8												
	233	0.6	3.5												
	188	0.4	2.5												
	143	0.6	3.5												
	106														
	98	1.25	4.5												
	53														
	8	1.0													

注: Optimoor 模型波高为 $H_{13\%}$, 当 $H_{4\%}$ 为 1.5 m 时折算成 $H_{13\%}$ 为 1.25 m, $H_{4\%}$ 为 1.2 m 时折算成 $H_{13\%}$ 为 1.0 m, 当实际 $H_{4\%}$ 小于表 1 所列标准值时, 计算波高取实际 $H_{13\%}$ 值。

3.2 缆绳配置

缆绳配置与船舶朝向、码头布置及受力模式

3 计算基础资料

3.1 计算工况

在港船舶分装卸作业和极端天气系泊两个状态^[4], 计算水位取设计高、低水位, 装载状态考虑满载及压载。装卸作业最大允许风速取 13.8 m/s, 系泊状态最大允许风速取 22 m/s。工程水域以风成浪为主, 为简化计算, 将风与浪方向取成一致, 波浪取最大可能作业波浪, 方向以码头轴线为坐标轴, 按照 45°间隔取值, 再叠加上涨落潮流向共 10 个方向。流速考虑涨、落潮流最大可能流速及无流速 3 种。以 5 万吨级船舶靠泊 3[#]装卸区采用装卸臂装卸为例, 船舶中心与码头中心重合、偏移量±10 m 共 3 个代表值。各种因素叠加后, 每个作业状态共计算 360 个工况, 见表 3。

有关, 船舶朝向根据船舶操船模拟的结果确定, 本文船舶采用落流左舷靠泊、落流左舷离泊^[5]。

两个作业状态缆绳配置见表 4。

表 4 船舶缆绳分布

状态	船舶吨级/ DWT	艏(艉) 缆/根	艏(艉) 横缆/根	艏(艉) 倒缆/根	缆绳总数 量/根
装卸 作业	5 万	3	2	2	14
	3 万	2	2	2	12
	1 万~2 万	2	2	2	12
	2 000~5 000	2	0	2	8
极端 天气 系泊	5 万	3	3	2	16
	3 万	3	2	2	14
	1 万~2 万	2	2	2	12
	2 000~5 000	2	0	2	8

3.3 缆绳材质及破断力

缆力是否符合要求与安全工作缆力直接相关，因此确定合理的安全工作缆力非常重要，缆绳安全工作缆力为缆绳破断力与安全系数之比。但实际运营中船舶间配备的缆绳特性、数量及出缆孔的位置并非一致，故而并没有非常有代表性的标准。本文液体化学品船的缆绳材质均采用尼龙缆，缆绳安全工作缆力见表 5。

表 5 缆绳安全工作缆力

船舶吨级/DWT	破断力/kN	安全系数	安全工作缆力/kN
5 万	800	2.0	400
3 万	720	2.0	360
2 万	660	2.0	330
5 000	520	2.0	260
2 000	300	2.0	150

4 系泊分析

系泊分析并非一蹴而就，而是要不断试算。在计算中可能会出现某吨级船舶缆绳受力和运动量结果良好，但无法满足其他吨级船型安全系缆要求的情况，因此须结合兼靠的各船型危险工况来优化调整缆绳及快速脱缆钩或系船柱等系缆设备的布置，直至满足各船舶缆力及运动量限制要求，达到综合最优，最后为码头设计提供依据。在装卸作业和极端天气系泊状态下，船舶缆绳系缆力均须小于安全工作缆力（表 5）。在装卸作业状态下，船舶运动量须小于装卸设备允许的运动量（表 2），在极端天气系泊状态下，须切断装卸设备，可不考虑船舶运动量。

4.1 5 万吨级船舶偏心系缆分析

以 5 万吨级船舶为例进行分析，偏心系缆的缆绳系缆方式与居中系缆一致，计算模型如图 3 所示，系泊比装卸作业少 4[#]、13[#]两根缆绳，各缆绳长度 30.7~56.1 m。最大缆力及运动量结果如图 4 所示。最大缆力占比为缆绳计算缆力值与破断力之比，当最大缆力占比≤50%时，计算缆力符合要求。

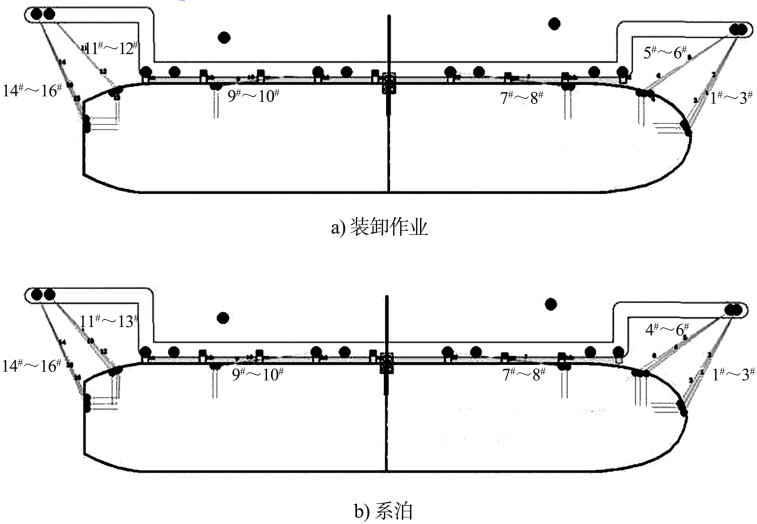


图 3 3[#]装卸区 5 万吨级船舶居中系缆计算模型

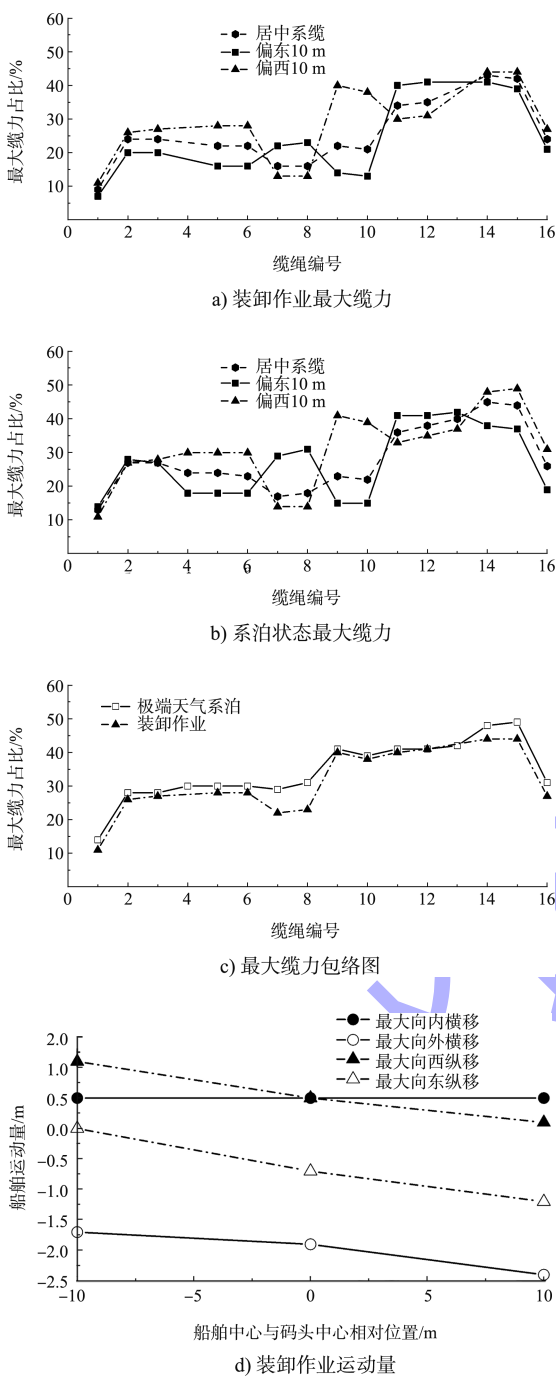
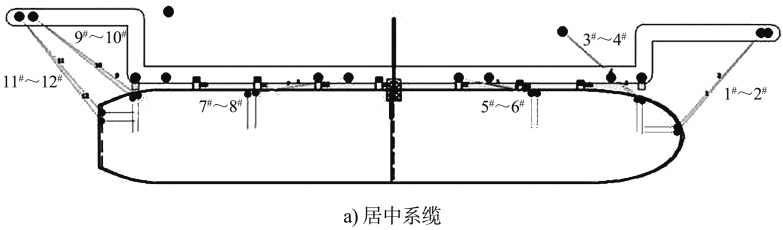


图 4 5 万吨级船舶最大缆力及运动量结果

由图 4a) 和 b) 可知, 两种作业状态下, 14[#]、15[#]缆绳的最大缆力均较大, 5 万吨级船舶居中系缆时, 各缆绳最大缆力包络值也居中, 考虑两侧偏心系缆将导致船舶缆绳最大缆力包络值增大。由图 4c) 可知, 虽缆绳数量不同, 但各缆绳的最大缆力均由极端天气系泊状态控制。从图 4d) 可知, 船舶偏东系缆的横移量最小、偏西系缆的横移量最大; 3 种船舶系缆位置船舶总纵移幅度相差不大, 居中系缆时, 两方向的偏移量相当, 但偏心系缆时, 会使船舶向反方向的偏移量增加, 向同方向的偏移量降低甚至无偏移。综上分析, 在码头运营过程中, 缆力监测应重点关注计算缆力偏大的几根缆绳, 如 14[#]、15[#]缆绳, 并关注这几根缆绳偏危险的工况; 船舶运动量监测应重点关注偏西系缆时的船舶横移值及能造成较大位移值的偏危险工况。

4.2 1 万~2 万吨级船舶横缆问题

1 万~2 万吨级船舶系缆时, 因工作平台长, 存在横缆过短的问题。为改善横缆的缆力分布, 在码头前沿设导缆器、后方设快速脱缆钩。系泊分析时在导缆器位置设 1 个系缆参考点, 在码头后方设系缆设备, 船舶缆绳连接至后方系缆设备, 通过挪动后方系缆设备, 使缆绳长度合适、缆绳轴线过导缆器, 以使缆力方向与实际一致。1 万~2 万吨级船舶两种作业状态下缆绳分布一致, 缆力由系泊状态控制, 以 2 万吨级船舶为例, 计算模型如图 5 所示, 2 万吨级船舶缆力和运动量结果见图 6。



a) 居中系缆

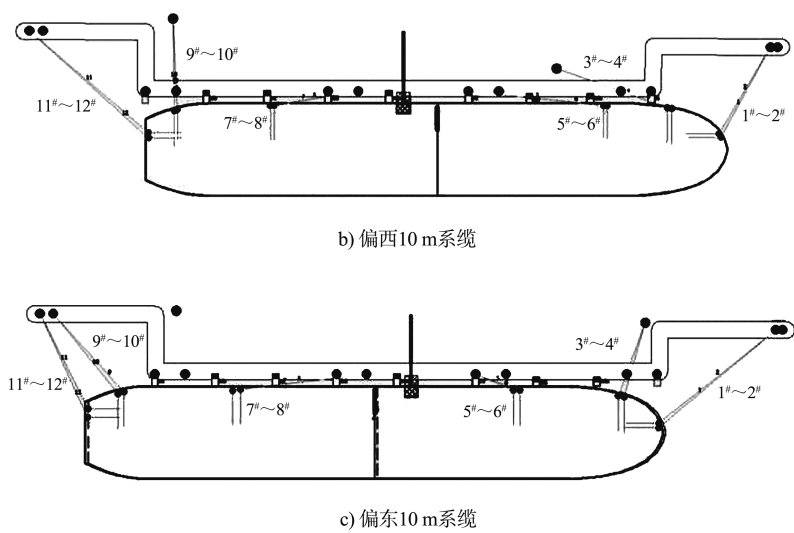


图 5 3#装卸区 2 万吨级船舶计算模型

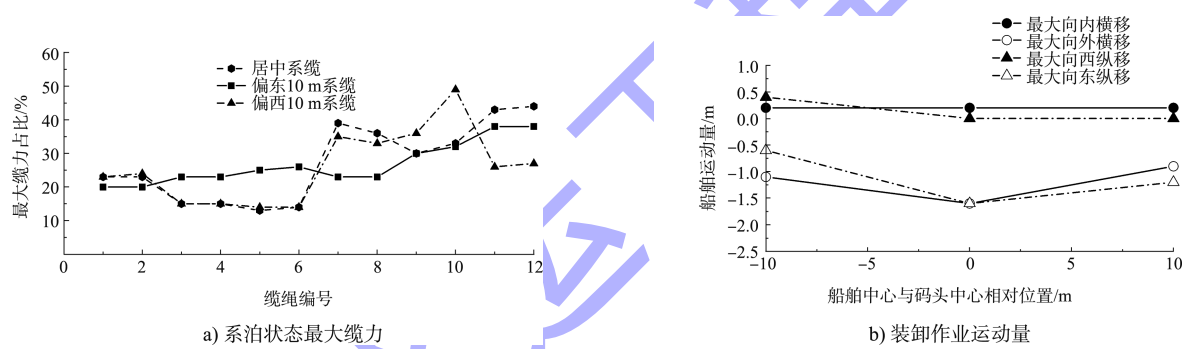
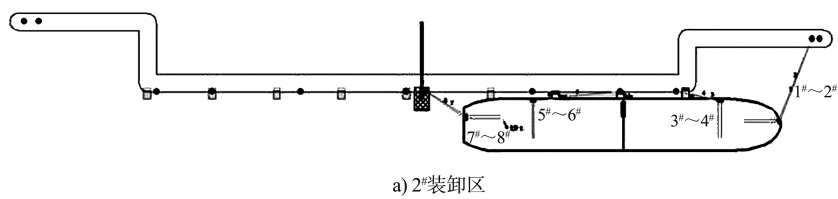


图 6 2 万吨级船舶缆力和运动量结果

由图 6a) 可知，缆力均满足要求，7#~11# 缆绳缆力值整体偏大，其中，偏西 10 m 系缆时 10# 缆力值最大，导缆器+快速脱缆钩的组合可有效解决长作业平台横缆过短的问题。由图 6b) 可知，因 2 万吨级船舶各位置的系缆方式不同，因此运动量间并无明显相关性，船舶居中系缆时，船舶运动量相对较大。

4.3 5 000 吨级及以下船舶系缆问题

快速脱缆钩布置受结构及工艺设备限制，可能无足够位置供小吨级船舶系缆。工作平台顶高程较高，小吨级船舶在系缆时吊缆较为严重。为保障小吨级船舶的安全系缆，设置二层系船柱系缆平台，供 5 000 吨级及以下船舶系缆。以 2 000 吨级船舶为例，计算模型如图 7 所示，2 000 吨级船舶缆力和运动量结果见图 8。



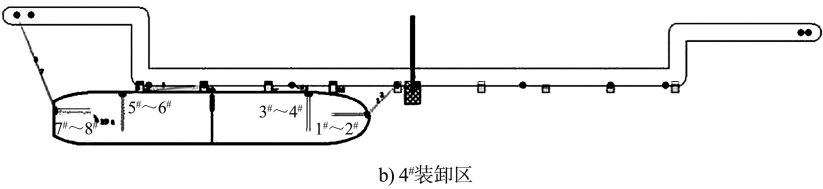


图 7 2#、4#装卸区 2 000 吨级船舶计算模型

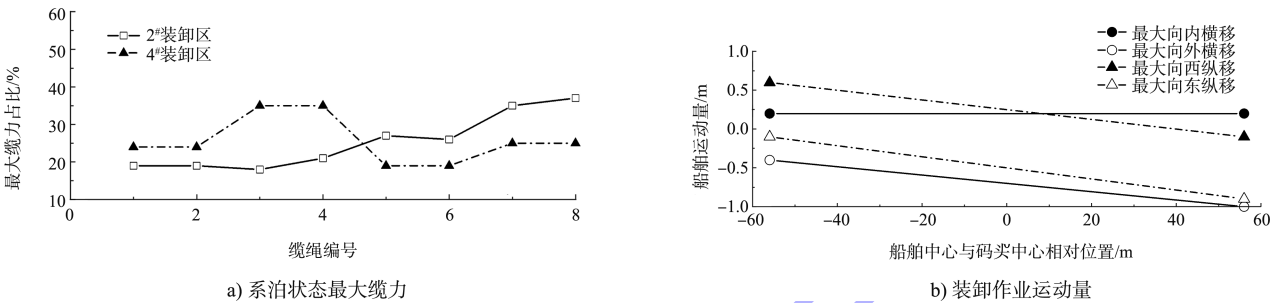
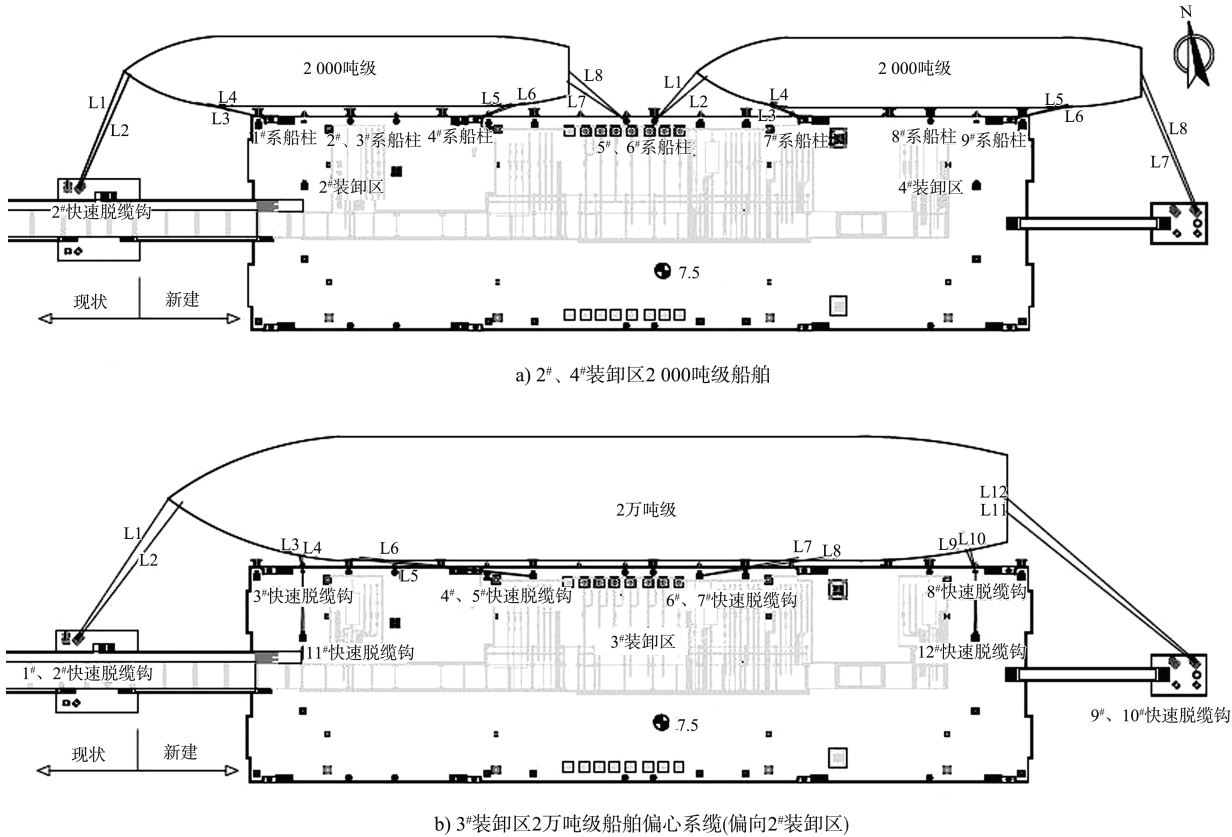


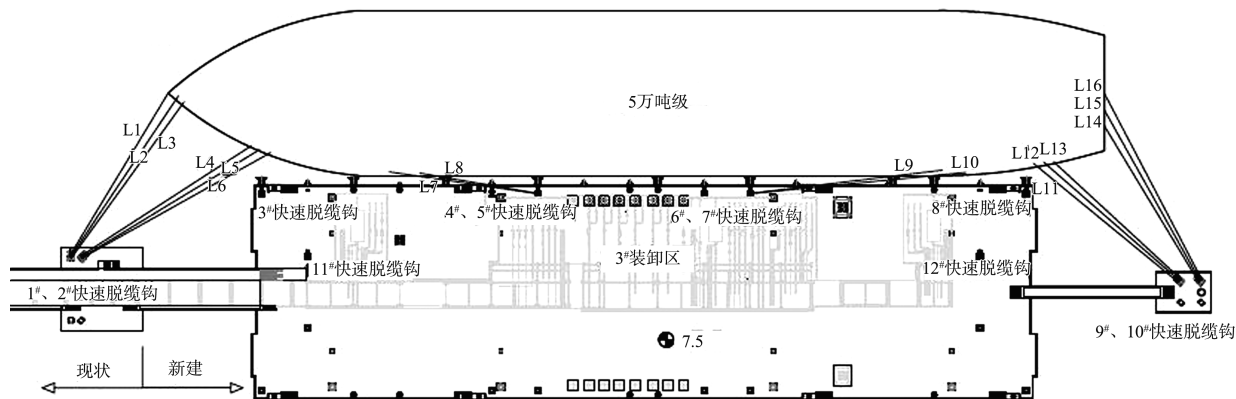
图 8 2 000 吨级船舶缆力和运动量结果

由图 8a)可知, 缆力均满足要求且有一定富余, 二层系船柱系缆平台可解决小船系缆位置不足的问题。由图 8b)可知, 2#装卸区的船舶运动量相对较大。

通过借助 Optimoor 软件进行系泊分析, 可以确定快速脱缆钩、系船柱等系缆设施的布置, 得到不同状态下满足要求的船舶系缆方式。典型船舶的系缆布置如图 9 所示。

5 典型船舶系统





c) 3#装卸区5万吨级船舶极端天气系泊

图9 典型船舶系统布置 (单位: m)

6 结论

1) 对长平台蝶形码头工程开展系统的系泊分析是非常必要的, 它既可为码头的优化设计提供依据, 协助确定码头轴向、泊位长度、系缆设施的布置等, 也可为码头的安全运营提供参考, 提供船舶系缆布置方案, 并作为码头运营方关注的重点。

2) 系泊分析需要通过确定合理的码头作业标准、缆绳材质及安全工作缆力, 设计全面的计算工况, 综合考虑各种船型的系泊要求, 并不断试算调整, 优化码头及缆绳布置, 最后获得符合要求的设计成果。

3) 船舶偏心系缆会使得船舶系缆力最大包络值增加, 船舶运动量也呈现出不同的特征, 因此对有偏心系缆需求的码头, 要重点对船舶偏心系缆时的工况进行系泊分析。

4) 针对长工作平台在兼靠中等船型无横缆或横缆过短的问题, 提出在码头前沿设导缆器、后方设快速脱缆钩的解决方案。针对小吨级船舶无足够系缆位置的问题, 提出了设置二层系船柱系缆平台, 供 5 000 吨级及以下船舶系缆的解决方案。经系泊分析计算, 以上解决方案均能有效解决问题。

5) 在实际运用中, 因各船舶的缆绳参数并不一致, 可基于最危险受力情况反推一个缆绳应具有的最小安全工作缆力, 将其与船舶实际的缆绳

参数进行对比, 当实际采用的缆绳材质较差且工况不利时, 应提前采取增加缆绳数量或降低作业标准等相关措施, 以确保船舶及码头安全。

6) 虽然 Optimoor 软件在协助码头设计和运营中有重要作用, 但其并不能完全模拟实际发生情况, 计算结果也有一定的局限性。因此, 船舶在装卸及系泊过程中应重视船舶作业条件, 加强自然条件、缆力、船舶运动量的监测, 提高管理水平, 以确保系泊船舶的安全性。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 宁波协和码头改建项目一期工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2018.
- [2] ALAN R, JOHN F F. Optimoor mooring analysis computer program users guide[R]. Northumberland: Tension Technology International Ltd., 2012.
- [3] 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.
- [4] 赵颖慧, 王琳, 王争明, 等. 20 万吨级集装箱码头船舶系缆工程实例分析[C]//中国交通建设股份有限公司. 中国交通建设股份有限公司 2018 年技术交流论文集. 北京: [出版者不详], 2018: 264-270.
- [5] 大连海事大学. 宁波协和码头改建项目一期工程通航安全咨询报告[R]. 大连: 大连海事大学, 2017.