



开敞式油气码头泊位长度优化

林在彬¹, 陈国平¹, 张志明², 李叶兴¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 通过物理模型试验, 在风、浪、流不同荷载组合作用下, 进行系泊船舶系缆力和运动量研究, 分析不同系缆角及码头系缆布置形式下的系缆力、运动量及挤靠能量变化规律, 确定合理的泊位长度, 为工程设计提供参考。研究结果表明, 合理的泊位长度为1.08~1.2倍船长, 系缆力分布最均匀, 运动量及挤靠能量最合理。

关键词: 开敞式油气码头; 系缆力; 泊位长度

中图分类号: U 656.1⁷32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0063-05

Optimization on berth length of open oil terminal

LIN Zai-bin¹, CHEN Guo-ping¹, ZHANG Zhi-ming², LI Ye-xing¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

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

Abstract: Based on the physical model experiment, we carry out a research on the ship's mooring force and ship movements under various circumstance loads, such as wave, wind and current, analyze the mooring force, movement and energy variation law under different mooring angles and mooring lines' arrangements, and determine reasonable berth length to serve as reference for the engineering design. The research result shows that the most reasonable berth length is 1.08 to 1.2 times of ship length, the mooring force's distribution is most uniform, and ship motion and impact energy are most reasonable.

Key words: open oil terminal; mooring force; berth length

近年来, 由于能源需求的高速增长, 原油、液化天然气运输船舶日趋大型化, 油气码头建设也向大型化、深水化发展, 并较多选择在天然水深条件良好的开敞水域。由于开敞海域风、浪、流等动力环境较差, 系泊船舶的系缆力和船舶运动量十分复杂, 出现了一些大型油轮发生断缆的现象。合理的系缆布置方式和泊位长度, 对系泊船舶的安全起到至关重要的作用。胡昕^[1]通过规范比较、公式计算与模型试验方法对合理确定码头长度进行探讨, 吴澎^[2]通过物理模型实验和OPTIMOOR 数学模型计算, 以减少环境荷载作用下船舶运动量以及均匀系缆力分布为优化目标,

提出了开敞式蝶形码头泊位长度和墩位平面布置确定的原则和方法。我国JTJ 295—2000《开敞式码头设计与施工技术规范》^[3], 建议开敞式码头泊位长度 $L_b=(1.4 \sim 1.5)L$ (L 为设计船长)。典型的缆模式如图1所示; 英国海工规范BS 6349^[4]建议大型油气船泊位长度约为设计船长的1.08倍, 系缆模式见图2。

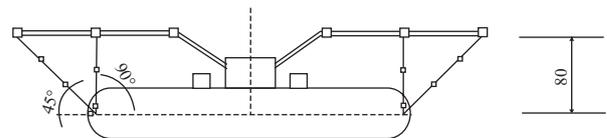


图1 我国规范系缆模式

收稿日期: 2012-04-28

作者简介: 林在彬(1989—), 男, 硕士研究生, 从事波浪与港口建筑物相互作用研究。

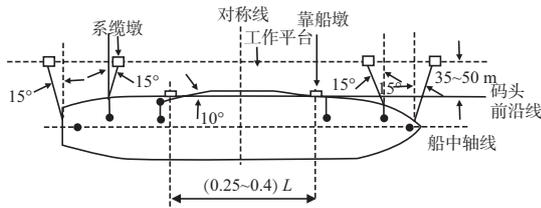


图2 英国规范系缆模式

现有研究成果表明，开敞式油气码头泊位长度和系缆方式确定方法还存在较大差异。本文将通过物理模型试验，根据外海自然环境的特征，考虑不同的风、浪、流组合，系统研究不同泊位长度和系缆布置方式对系缆力和船舶运动量的影响，提出合理的泊位长度和系缆布置方式，为工程设计提供参考。

1 仪器设备与试验方法

试验在河海大学江宁校区水资源综合试验大厅波浪港池进行。港池长40 m，宽30 m，深1.2 m。码头总平面布置：码头结构采用重力式圆沉箱结构方案，码头前沿底高程-25.3 m。码头各墩平面布置分别采用英国规范^[4-5]规定的“一字型”和国内规范^[3]规定“蝶形”布置，设有工作平台1个、靠船墩2个，系缆墩6个，结构均采用重力式圆沉箱结构，码头墩位平面布置见图3，图4。2种布置形式的各缆绳系缆角见表1。缆绳采用直径为44 mm钢丝缆绳，缆绳接头采用11 m长的直径为75 mm的尼龙缆绳，护舷原型为TD-A3000H两鼓一板（标准反力型）鼓型橡胶护舷，每组设计吸

能量 $E=5\ 110\ \text{kJ}$ ，设计反力 $P=4\ 380\ \text{kN}$ 。

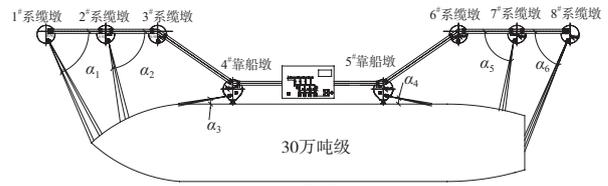


图3 “一字型”码头平面布置示意图

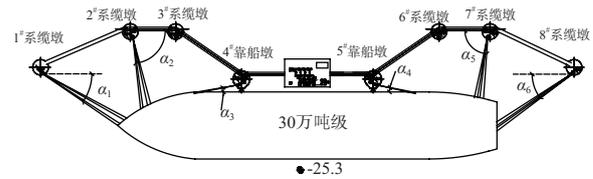


图4 “蝶形”码头平面布置示意图

试验中模型几何比尺为1:58。依据波浪和水流的运动机理以及对船舶作用的分析，波浪力和水流利按重力相似进行模拟。系缆力和挤靠力除受到外力和惯性力的影响外，还受本身弹性特性的影响，因此缆绳和护舷模拟考虑弹性相似。重力相似不适用于风对船舶作用力研究，试验中按原型计算风的作用力，再换算成模型值，施加在受风船舶上。

试验中采用数量比为艏（艉）缆：横缆：倒缆=4：3：3的形式，其中将各个位置的缆绳在模型中按照合成一根缆绳模拟，共计6根缆绳，单根缆绳破断力为1 200 kN，设计缆力为800 kN。在环境荷载作用下同步测量各缆绳上的拉力，并同步测量了护舷的受力、变形及挤靠能量。试验中浪、流、风单独作用及组合作用的工况见表2。

表1 不同缆绳布置形式对应的系缆角（30万t）

方案	布置形式	泊位长度	艏缆 $\alpha_1/(\circ)$	艏横缆 $\alpha_2/(\circ)$	艏倒缆 $\alpha_3/(\circ)$	艉倒缆 $\alpha_4/(\circ)$	艉横缆 $\alpha_5/(\circ)$	艉缆 $\alpha_6/(\circ)$
1		1.08倍船长	82	87	10	11	85	81
2	一字型	1.2倍船长	67	75	10	11	78	66
3		1.3倍船长	58	75	10	11	78	57
4	蝶形	1.4倍船长	35	75	10	11	78	33

表2 试验组次及工况

水深/m	船型/万t	波浪			潮流		风		载重情况
		波高 $H_{4\%}/\text{m}$	周期/s	来波方向/ (\circ)	流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	流向/ (\circ)	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	来风方向/ (\circ)	
31,27	15,30,40	1.1,1.5,2.2,2.5	7.8,9,10,12,14	0.45,90	0.68,1.0,1.5,2.0	0, ± 5, ± 10,35, 90	13.8,22	± 90	压载 半载 满载

2 成果分析

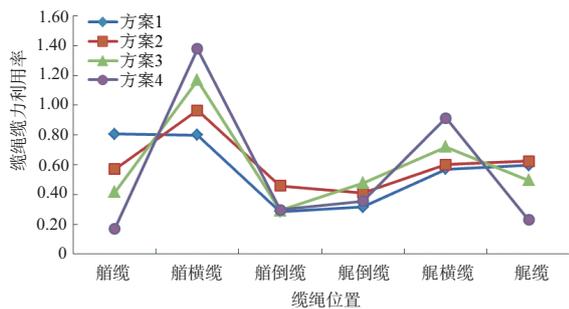
缆绳破断往往是系缆力分布不均匀造成的, 因此调整系缆角度及泊位长度使得系缆力变得均匀, 增加系泊安全。为了便于描述各缆绳受力的均匀性和安全富裕, 定义各缆绳试验值与该位置缆绳能够承受的缆绳设计缆力的比值 (F_x/F) 为缆绳系缆力利用率, 其中缆绳系缆力利用率小于 1.0, 说明该位置缆绳满足设计缆力与作业标准要求; 利用率大于 1.5 时, 则该位置的系缆力达到破断缆力与系泊标准要求。在 6 个位置缆绳中, 横缆的主要作用是约束船体向码头外侧移动, 承受船体横向受力; 倒缆为束缚船体纵向运动, 承受船体纵向作用力; 短泊位方案中的船艏缆能够在一定程度上分担横缆受力, 束缚船体横向运动, 而长泊位方案的船艏缆倾向于分担倒缆受力, 参与束缚船体纵向运动。

试验进行了 15, 30, 45 万 t 船, 不同泊位长度、波高、波向、周期、流速、流向、风速、风向、载重量、水位等工况的组合试验 2 000 多组, 试验结果表明, 不同组合工况下, 船舶系缆力、运动量和挤靠能量随泊位长度的变化规律具有较好的一致性, 本次研究和已有研究成果^[6]表明, 斜向波浪作用下的系缆力、挤靠能量及运动量都小于 90° 横浪作用, 因此本文以横浪作用为控制工况, 主要分析 30 万 t 船舶的系缆力、挤靠能量及运动量随码头泊位长度的变化规律。

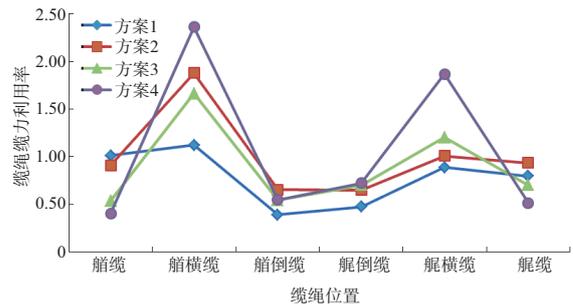
2.1 横浪作用

试验中进行了横向浪作用下的不同码头长度系缆试验研究, 结果见图 5。

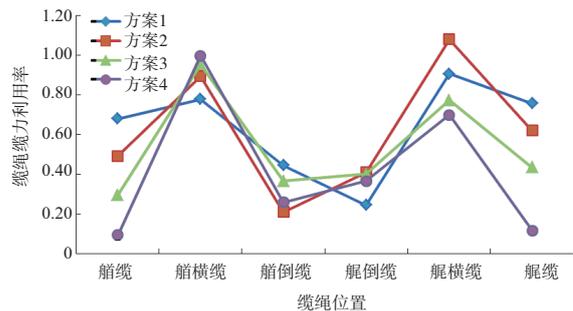
当横向波浪作用时, 不同码头长度对船舶系缆力的分布规律有明显的影 响。码头布置形



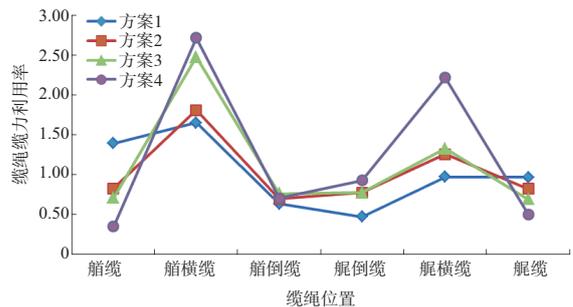
a) 波高 1 m, 周期 9 s



b) 波高 1 m, 周期 10 s



c) 波高 1.5 m, 周期 7 s



d) 波高 1.5 m, 周期 9 s

图 5 横向浪作用下, 船舶为压载时, 各系缆方式系缆力分布

式上, “一字型”布置形式的系缆力分布较“蝶形”布置均匀, 尤其是船艏缆与横缆之间的缆力分布, 如图 5 所示; 在波高 1 m 情况下, “一字型”布置中, 泊位长度越短的系缆力分布相对越均匀。在系缆力较大的位置, 如方案 1 与方案 2 中船艏缆与横缆, 二者缆绳系缆力利用率相当, 能够有效利用各位置缆绳的承载能力; 即使遇到大周期波浪作用, 如周期 10 s 时, 相比于方案 3 与方案 4, 横缆与倒缆的缆绳缆力利用率之比更小, 缆力分布更加均匀。

“蝶形”布置与“一字型”布置相比, 在横浪作用下缆绳受力更不均匀, 如图 5 所示, 横缆缆力变得很大, 在波高 1.5 m, 周期 9 s 时, 横缆缆绳

缆力利用率超过2.5, 已经远远超过破断缆力, 这是由于艏艉缆系缆角减小, 虽然加强了对船体纵向的束缚, 却削弱对船体横向的束缚, 使得横缆承担更多横向作用力, 而短泊位的布置形式, 如方案1与方案2, 艏艉缆夹角大, 更多参与分担横向作用力, 使得横缆位置缆力减小, 整个缆绳系统缆力分布均匀。

运动量试验结果表明, 如表3所示, 增加船舶系泊长度之后, 艏艉缆与水平方向的夹角减小, 对船舶横向运动的约束作用明显减小, 船舶横移、回旋量明显增大, 船舶纵移有所减小, 对船舶的升沉、横摇和纵摇影响较小。

表3 不同波浪工况作用下运动量

波高 $H_{4\%}$ /m	周期/s	方案	横移/m	纵移/m	升沉/m	横摇/ $(^\circ)$	纵摇/ $(^\circ)$	回转/ $(^\circ)$
1.0	9	1	1.64	0.53	0.51	2.44	0.35	0.89
		2	1.22	0.40	0.48	2.35	0.37	1.14
		3	1.93	0.64	0.49	2.64	0.40	0.95
		4	1.63	0.51	0.47	2.48	0.39	1.07
	10	1	2.15	0.71	0.69	3.32	0.44	1.00
		2	2.43	0.83	0.67	3.30	0.49	0.98
		3	2.02	0.84	0.70	3.29	0.49	1.09
		4	2.18	1.00	0.69	3.30	0.46	1.57
1.5	7	1	1.05	0.44	0.63	3.02	0.39	0.77
		2	1.15	0.38	0.63	2.90	0.47	0.87
		3	1.32	0.38	0.62	2.99	0.41	0.92
		4	1.29	0.48	0.62	3.11	0.48	0.67
	9	1	2.20	0.61	0.83	3.86	0.46	1.13
		2	1.96	0.89	0.80	3.63	0.52	1.07
		3	2.30	0.91	0.75	3.79	0.48	1.21
		4	2.47	0.74	0.76	3.51	0.48	1.41

考虑船舶在卸载作业状态下, 横移与纵移限定在2 m以内^[4-5], 与表3中的结果对比可得, 横浪作用下, 船舶的纵移较小, 对船舶系泊安全影响不大, 而对横移影响显著, 在波高1 m, 周期10 s与波高1.5 m, 周期9 s的工况下, 4种系缆方式的横移已经超过2 m, 船舶处于危险作业。由表3数据分析, 方案1与方案2为最有利方案, 运动量与其他2种方案相比较小, 更有利于船舶在开敞式码头泊位上安全作业。

从挤靠能量试验结果中表明, 如表4所示, 泊位长度越短, 缆绳对船舶横向束缚效果越好, 船舶与码头形成的整体刚性越强, 护舷挤靠能量就越大, 特别是大周期波浪作用下, 船体随着波浪

晃动幅度加剧, 船体与护舷的挤靠更严重, 但在所述工况中, 挤靠能量均未达到护舷设计吸收能量10 220 kJ。

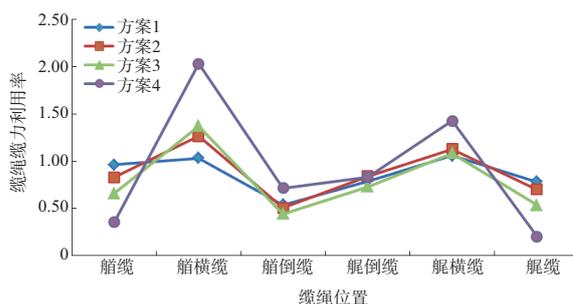
表4 不同波浪作用下护舷挤靠能量 kJ

波高 $H_{4\%}$ /m	周期/s	护舷	方案			
			1	2	3	4
1	9	1	2 804	1 063	2 446	2 004
		2	2 064	2 879	2 582	2 226
	10	1	6 318	4 726	3 587	3 549
		2	4 753	4 623	4 281	4 439
1.5	7	1	1 951	1 132	2 677	1 729
		2	2 349	3 321	2 117	1 533
	9	1	3 425	3 501	3 978	3 000
		2	3 793	4 331	5 136	5 065

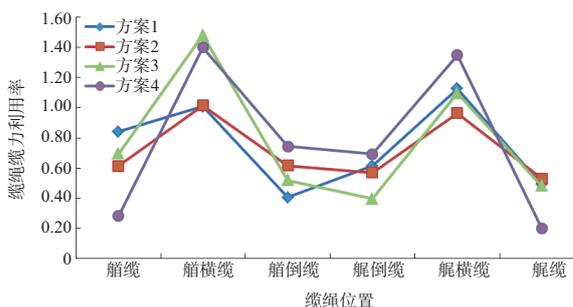
据上述分析得知, 方案1与方案2安全作业允许标准达到波高1 m, 周期9 s, 方案3与方案4则需降低安全作业标准。在以横向荷载为主的工况, 选用系缆角大, 泊位长度短的“一字型”布缆形式, 尽量保证艏艉缆能够承担一定的横向作用力, 减小横缆系缆力。

2.2 波浪、水流及风共同作用

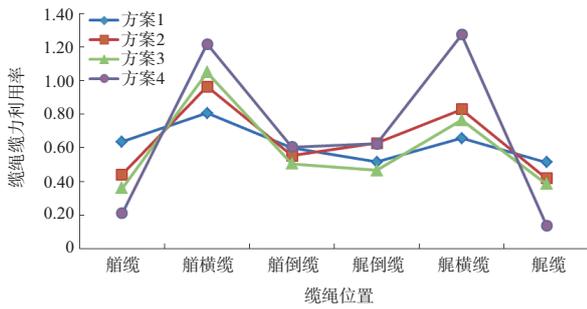
为了模拟实际中系泊船舶受载情况, 在港池中增加了水流及风荷载的模拟, 以下选用几种工况进行对比分析, 所述工况均为船舶压载, 22 m/s开风, 试验结果如图5所示。



a) 波高1.5 m, 周期7 s, 0°顶流, 流速1 m/s



b) 波高1.5 m, 周期7 s, 10°开流, 流速0.91 m/s



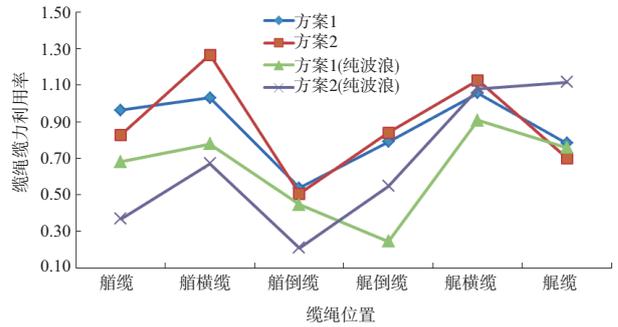
c) 波高1.5 m, 周期7 s, 35°开流, 流速0.68 m/s

图8 风浪流作用下, 船舶为压载时, 各系缆方式的系缆力分布

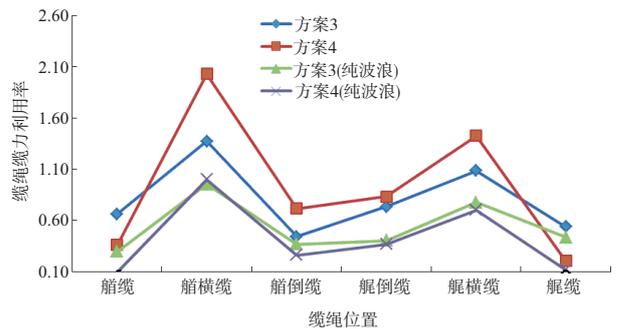
在横向波浪, 船舶开流、开风的情况下(图8), 缆力分布规律同在纯横浪作用, 横缆缆力突出, 船艏缆与倒缆缆力次之。图8中横缆缆力随泊位长度的增加而增大, 船艏缆缆力则减小, 并且缆力分布不均匀, 这是由于方案1与方案2船艏缆夹角大, 船艏缆更多的参与分担横向作用力, 纵向受力则主要由倒缆承担; 而方案3与方案4, 减小了船艏缆系缆角, 目的在于同时参与横向、纵向约束, 一定程度分担了倒缆受力, 却削弱了横向约束, 因此横缆受力较方案1与方案2大, 缆力利用率达1.2~2.0, 而船艏缆及倒缆缆力利用率在0.4~0.8, 比方案1与方案2小, 形成缆力分布不均匀, 船艏缆与倒缆仍有缆力富余。

由于“蝶形”布置的船舶横向约束减弱, 船舶横移加大, 船艏倒缆长度相对较短, 导致缆力有所增加, “蝶形”布置并不能有效分担船舶的纵向力, 却使得横缆缆力明显增大, 因此无需减小船艏缆的角度辅助纵向系缆。

加载了风与流的作用之后, 与纯浪的工况比较结果见图9, 系缆力整体上比纯浪时大, 缆绳受力更不均匀, 尤其是船横缆的系缆力增大显著, 相比达到2倍以上, 这是由于水流为船舶来流, 使得船体前后受流不均匀, 船舶部分受流作用突出。方案4在受到风浪流共同作用时, 横缆系缆力增大显著, 从1.0增大到2.1。可以推断, “蝶形”布置减小船艏缆系缆角之后, 在船舶来流纵向荷载作用下, 并不能分担倒缆受力, 却使横缆缆力急剧增大; 反观“一字型”布置, 如方案1与方案2, 船艏倒缆不仅分担了横缆缆力, 还分担了倒缆缆力, 总体上系缆力分布更均匀。



a) 方案1, 2



b) 方案3, 4

注: 波高1.5 m, 周期7 s, 0°顶流, 流速1 m/s

图9 风浪流作用下, 船舶为压载时, 各系缆方式的系缆力分布

方案1和方案2的船艏缆能够有效分担横缆受力, 使整体缆力分布均匀, 而方案3和方案4主要依靠横缆承担加载风与流之后增加的横向作用力, 造成横缆缆力达到破断缆力, 发生破断, 易形成安全事故。

表9 风浪流工况下, 船舶运动量

波高 $H_{4\%}/m$	周期/ s	水流	方案	横移/ m	纵移/ m	升沉/ m	横摇/ (°)	纵摇/ (°)	回转/ (°)
1.5	7	0°开流, 流速1 m/s	1	1.05	0.91	0.69	3.28	0.48	0.71
			2	1.15	0.67	0.56	2.97	0.45	0.41
			3	0.88	0.61	0.52	2.85	0.48	0.34
			4	0.83	0.77	0.52	2.86	0.47	0.30
	10°开流, 流速 0.91 m/s	1	0.69	0.37	0.58	3.27	0.48	0.44	
		2	0.54	0.61	0.47	3.24	0.41	0.83	
		3	0.89	0.60	0.68	3.51	0.48	0.64	
		4	0.68	0.60	0.60	3.50	0.48	0.42	
	35°开流, 流速 0.68 m/s	1	0.41	0.31	0.41	2.08	0.49	0.37	
		2	0.58	0.29	0.45	2.59	0.52	0.34	
		3	0.43	0.36	0.36	2.14	0.45	0.25	
		4	0.47	0.32	0.45	2.42	0.48	0.30	

(下转第78页)