



# 波浪与系缆方式对系泊船舶响应的影响研究

戴江山<sup>1</sup>, 张 雷<sup>2</sup>

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 91053 部队, 北京 100070)

**摘要:** 系泊船舶响应的影响因素很多, 且十分复杂。针对影响系泊船舶响应的主要因素(波浪和系缆方式)开展研究, 通过船舶系泊物理模型试验, 研究波浪条件及系缆方式对系泊船舶响应的影响规律, 其中波浪条件包括不同的波向及波浪周期, 系缆方式包括不同缆绳配置(有无缆尾索)和不同系缆布置方案。研究表明, 45°斜向浪作用下系泊船舶的运动量和系缆力均明显小于横浪作用下的结果; 试验波浪周期范围( $T=3.5\sim6.0$  s)内, 系泊船舶的运动量和系缆力均随着波浪周期的增大而变大; 从船舶系泊安全角度看, 设置缆尾索是有利的; 码头前后沿共同系缆布置可明显提高船舶系泊(非装卸作业时)的抗风浪流能力。

**关键词:** 波浪; 缆尾索; 系缆布置; 运动量; 系缆力

**中图分类号:** U653.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2024)06-0051-07

## Influence of wave and mooring methods on responses of moored ships

DAI Jiangshan<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. 91053 Troops, Beijing 100070, China)

**Abstract:** There are many factors affecting the responses of moored ships, and they are very complex. In this paper, the main factors including waves and mooring methods are studied. By physical model tests on a moored ship, the influence of wave conditions and mooring methods on the responses of moored ships is studied. The wave conditions include different wave directions and wave periods, and the mooring methods include different mooring line configurations with or without tail ropes and different mooring arrangement schemes. The research results indicate that the motions and mooring forces of moored ships under the action of 45° oblique waves are significantly smaller than those under the action of transverse waves. Within the experimental wave period range ( $T=3.5\sim6.0$  s), the motions and mooring forces of the moored ship increase with the increase of the wave period. From the perspective of ship mooring safety, setting up tail ropes is advantageous. The arrangement of mooring lines moored at both the front and rear edges of the dock can significantly improve the resistance of ship mooring to the wind, wave and current, which is for the mooring condition without loading and unloading operations.

**Keywords:** wave; tail rope; mooring arrangement; motion; mooring line force

海港码头系泊船舶在波浪作用下的运动量和系缆力响应直接影响码头装卸作业效率和系泊安全, 是港口码头设计和运营过程中的重要问题。系泊船舶响应的影响因素很多, 包括风浪流条件、泊位长度、系缆布置、缆绳材质、船型和船舶装载度等, 导致系泊船舶响应十分复杂<sup>[1-2]</sup>。

多年来国内外学者对系泊船舶响应及其影响因素开展了较多研究。史宪莹等<sup>[3-4]</sup>对一艘 26.6 万 m<sup>3</sup> LNG 船舶的系泊试验研究结果表明, 随着波浪周期的增长, 系泊船舶的横移运动呈间歇增长, 横摇运动出现 2 次峰值, 纵移和回转运动逐渐增大。孟祥瑞等<sup>[5]</sup>利用 Ship-mooring 系泊分析软件对 31.5 万吨

**收稿日期:** 2023-10-06

**作者简介:** 戴江山 (1985—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

级系泊油船的运动量进行计算,结果表明横摇、升沉在波浪谱峰周期与横摇或升沉周期接近时出现峰值,随后逐渐降低;横移随着波浪周期增大而增大;纵移和回转在波浪谱峰周期与横摇周期接近 2 倍时出现最大值。张志明等<sup>[6]</sup>通过理论分析结合系统的物理模型试验,提出离岸深水码头系泊船舶的运动量计算公式。Kenji 等<sup>[7]</sup>开发波浪和风作用下系泊船舶运动量的数值模拟模型,研究了泊位长度与系缆方式对系泊船舶的影响。孟祥玮等<sup>[8]</sup>基于波浪作用下船舶系缆力的试验资料,提出由波浪产生的船舶系缆力的计算方法。吴澎等<sup>[9]</sup>通过船舶系泊物理模型试验和数值模拟计算相结合,提出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。林在彬等<sup>[10]</sup>通过系泊物理模型试验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,得出合理的泊位长度为 1.08~1.20 倍船长,此时系缆力分布最均匀,运动量及挤靠能量最合理。朱奇等<sup>[11]</sup>对 17.2 万 m<sup>3</sup> LNG 船的系泊物理模型试验研究结果表明,在横风横浪作用下,短泊位时横缆分开布置对船舶运动有较好的约束,能减小艏艉缆及倒缆的受力,而在泊位较长时横缆应集中布置,避免横缆长度不一导致较短的横缆承担较大的作用力。

系泊船舶响应复杂,难以考虑全部影响因素,本文针对影响系泊船舶响应的主要因素(波浪和系

缆方式)开展研究,通过船舶系泊物理模型试验,研究不同波浪条件(波浪方向和波浪周期)、不同缆绳配置(有无缆尾索)及不同系缆布置下系泊船舶的运动量和系缆力的变化规律,分析波浪与系缆方式对系泊船舶响应的影响。

## 1 物理模型试验

### 1.1 试验设备与仪器

船舶系泊试验在波浪水池中进行,水池尺寸为 40 m×20 m×1.2 m(长×宽×深)。水池的一端设置碎石消浪缓坡,另一端配有 20 m 宽的电机式不规则波造波机,造波系统由计算机控制,产生试验波浪。为产生所需要的风条件,在港池内布置有轴流叶片风机,可产生不同速度的风场,风机宽 9.6 m。

船舶六自由度运动量(横移、纵移、升沉、横摇、纵摇和回转)由南京水利科学研究院研制的非接触式 FL-NH 型运动测量系统测量,船舶系缆力采用拉力传感器进行测量。

### 1.2 试验船型及系缆布置

试验船型总长 230 m,型宽 30 m,满载吃水 7.0 m。码头为高桩梁板式结构,码头平面及系缆布置见图 1,共有 8 根直径 36 mm 的高分子聚乙烯系缆缆绳。一线码头前沿竖向护舷采用 1150H 鼓形橡胶护舷(两鼓一板,标准反力型),间距 17 m。

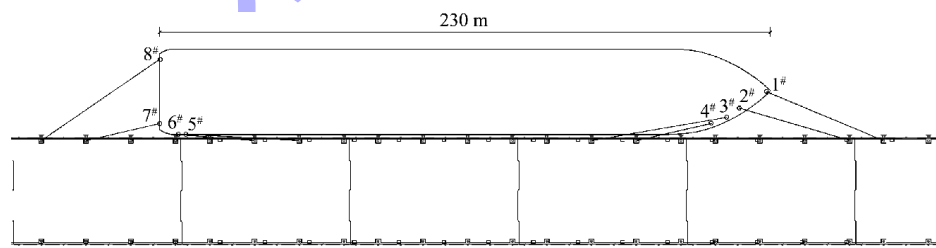


图 1 码头平面及系缆布置

### 1.3 模型设计

#### 1.3.1 模型比尺

船舶系泊物理模型试验采用正态模型,模型几何比尺为 1:50。

#### 1.3.2 船舶模拟

试验船舶模型采用木材制作,模型与原型船

舶除了保持几何相似,还保持模型质量、质心高度以及质量惯性矩等参数与原型相似。试验在船舶满载状态下进行。

#### 1.3.3 橡胶护舷模拟

橡胶护舷采用护舷传感器模拟。模型码头前沿的橡胶护舷除满足安装位置和受力点位置几何

相似外,还考虑护舷弹性变形相似,即护舷传感器模拟的护舷弹性变形曲线与原型相似。护舷弹性变形曲线模拟结果见图2。

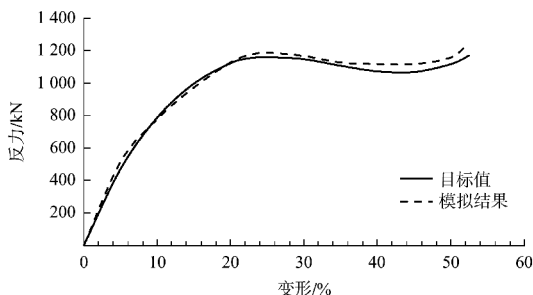


图2 护舷模拟结果

### 1.3.4 缆绳模拟

缆绳模拟时除满足船上出缆孔位置、码头上系缆点位置、缆绳长度和角度几何相似外,还满足缆绳弹性相似,即缆绳模型与原型的拉力-伸长关系曲线相似。缆绳模型采用无弹性线(试验测力范围内)与多级弹簧钢片的组合体模拟,通过改变弹簧钢片的个数和伸出长度来模拟不同的拉力-伸长曲线,以达到模型缆绳的拉力-伸长关系与原型相似。以8#缆绳(艮缆1)为例,缆绳拉力-伸长关系曲线模拟结果见图3。

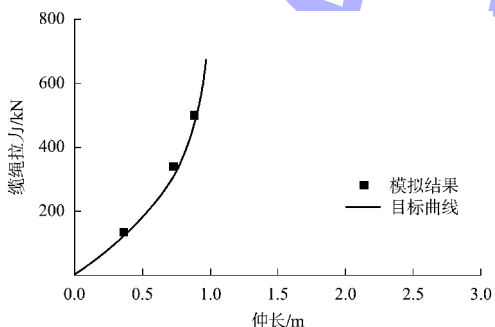


图3 缆绳模拟结果

### 1.4 试验方法及内容

试验水深12 m。试验波浪按重力相似模拟,采用不规则波,其波谱为Jonswap谱,波浪包括与船舶纵轴线夹角45°的斜向浪和夹角90°的横浪。45°斜向浪试验波高 $H_{4\%}$ 为1.0和1.5 m、波浪平均周期 $T$ 为6.0 s;横浪试验波高 $H_{4\%}$ 为0.8和1.2 m、波浪平均周期 $T$ 为3.5、4.0、5.0、6.0 s。

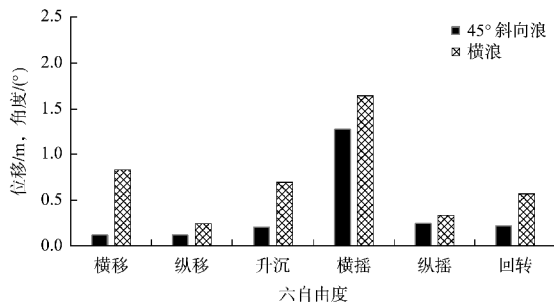
试验除了考虑波浪的作用,还考虑了风和水流的作用。风为速度13.8 m/s(6级风上限)的离岸风,采用风机吹风进行模拟;水流为流速1.5 m/s的与船舶纵轴线夹角2°的开流,依据JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》<sup>[12]</sup>中的水动力计算方法得出船舶所受水动力,换算为模型值后,采用导轮挂重方法模拟水动力。

试验时,测量不同工况下系泊船舶的六自由度运动量和缆绳系缆力,船舶运动量的采样频率为50 Hz,系缆力的采样频率为100 Hz,六分量运动量和各根缆绳的系缆力均取每次试验历时数据中的最大值,每组试验重复3次,取3次试验结果的平均值作为代表值。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 波浪对系泊船舶响应的影响

图4、5分别为相同波浪周期( $T=6$  s)条件下,横浪与45°斜向浪作用下系泊船舶运动量和系缆力的对比。由图可知:1)波浪对系泊船舶的作用方向对系泊船舶响应的影响显著,相同波浪周期条件下,即使45°斜向浪波高比横浪波高大25%,该条件下系泊船舶的运动量和系缆力均明显小于横浪作用下的结果。2)与横浪作用相比,45°斜向浪作用下系泊船舶的横移、升沉和回转相比其他运动量(纵移、横摇和纵摇)减小更为明显。相同波浪周期条件下,即使45°斜向浪波高比横浪波高大25%,该条件下系泊船舶的横移、升沉和回转为横浪作用下的0.15~0.40倍,其他运动量(纵移、横摇和纵摇)为横浪作用下的0.60~0.80倍,最大系缆力为横浪作用下的0.50~0.60倍。



a) 横浪( $H_{4\%}=0.8$  m,  $T=6.0$  s)与45°斜向浪( $H_{4\%}=1.0$  m,  $T=6.0$  s)

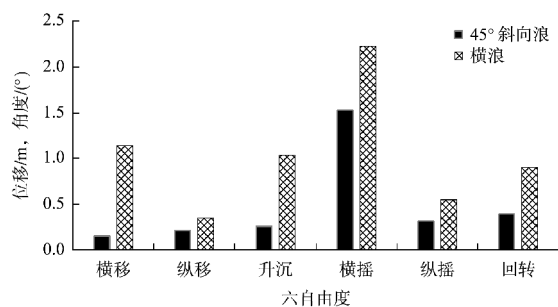
b) 横浪( $H_{4\%}=1.5$  m,  $T=6.0$  s)与45°斜向浪( $H_{4\%}=1.5$  m,  $T=6.0$  s)

图4 横浪与45°斜向浪作用下系泊船舶运动量对比

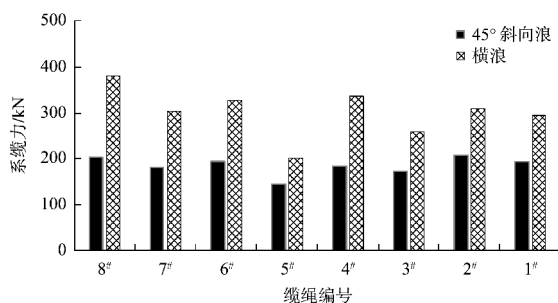
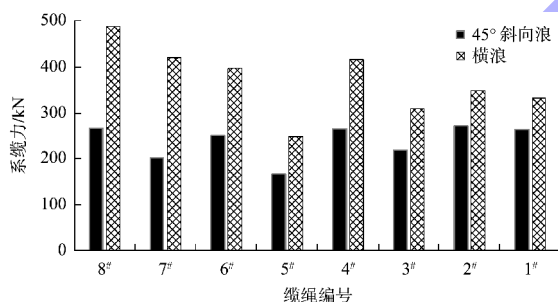
a) 横浪( $H_{4\%}=0.8$  m,  $T=6.0$  s)与45°斜向浪( $H_{4\%}=1.0$  m,  $T=6.0$  s)b) 横浪( $H_{4\%}=1.2$  m,  $T=6.0$  s)与45°斜向浪( $H_{4\%}=1.5$  m,  $T=6.0$  s)

图5 横浪与45°斜向浪作用下系泊船舶系缆力对比

图6、7分别为横浪作用下,不同波浪周期( $T=3.5\sim 6.0$  s)条件下系泊船舶运动量和系缆力的对比。由图可知:1)相同波高条件下,试验波浪周期范围内系泊船舶的运动量和系缆力随波浪周期的变化规律明显,系泊船舶的运动量和系缆力均随着波浪周期的增大而变大。其中系缆力在波浪周期由5 s增大至6 s时增加更为明显,这是由于船舶运动量增大导致缆绳伸长量变大,而所采用的高分子聚乙烯缆绳随着伸长量变大在相同相对伸长长度下缆绳拉力明显变大(图3中表现为缆绳的拉力-伸长曲线随着缆绳伸长而明显变陡,即曲线切线斜率明显变大)。2)试验波高范围

( $H_{4\%}=0.8\sim 1.2$  m)内波浪周期为6.0 s时系泊船舶的横移、纵移、升沉、横摇、纵摇和回转分别为波浪周期为3.5 s时的5.2、2.8、5.3、2.1、4.0和3.4倍,最大系缆力为波浪周期为3.5 s时的1.8倍。

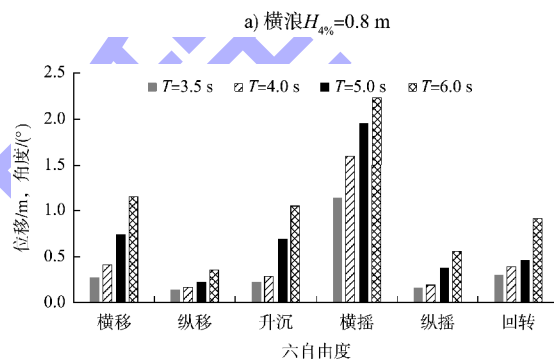
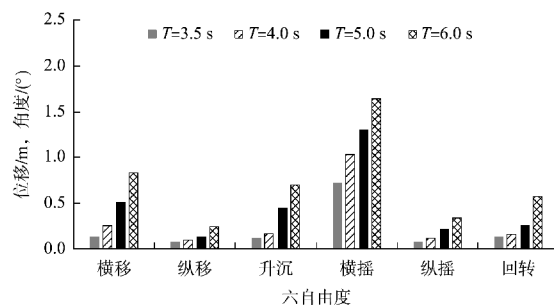


图6 不同波浪周期时横浪作用下系泊船舶运动量对比

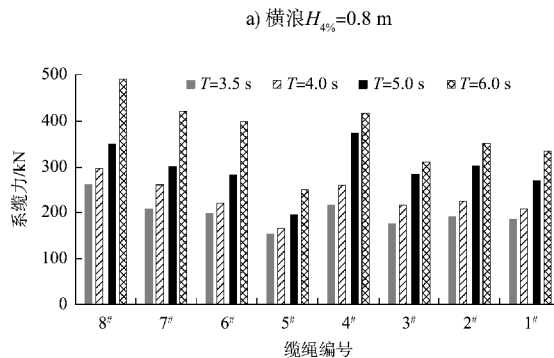
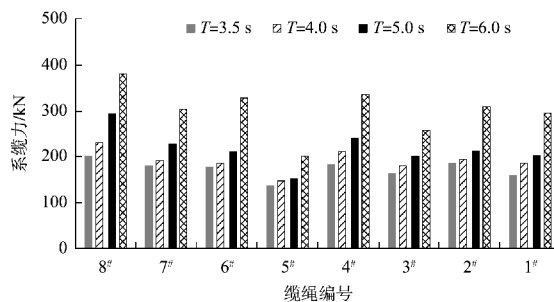


图7 不同波浪周期时横浪作用下系泊船舶系缆力对比



## 2.2 缆尾索对系泊船舶响应的影响

试验船型的高分子聚乙烯缆绳具有抗拉强度高和材质轻等优点,其弹性大于钢缆,但是远小于尼龙缆,不同种类缆绳的弹性曲线见图8。缆尾索是设置在船舶缆绳靠岸一端尾部的一段弹性大于主缆绳的尾索,通常选用11 m长尼龙缆(选用的缆尾索的设计破断力需是主缆绳设计破断力的1.2~1.3倍),可增加系泊缆绳的整体弹性<sup>[13]</sup>。本次试验基于图1中的系缆布置对有缆尾索(高分子聚乙烯缆绳尾部配置长11 m、直径88 mm尼龙缆)和无缆尾索(缆绳全段均为高分子聚乙烯缆绳)情况下的系泊船舶响应进行对比研究,有缆尾索和无缆尾索情况下缆绳的综合弹性对比见图9(以8#缆绳为例),可见与无缆尾索相比,有缆尾索情况下缆绳的综合弹性明显增加。

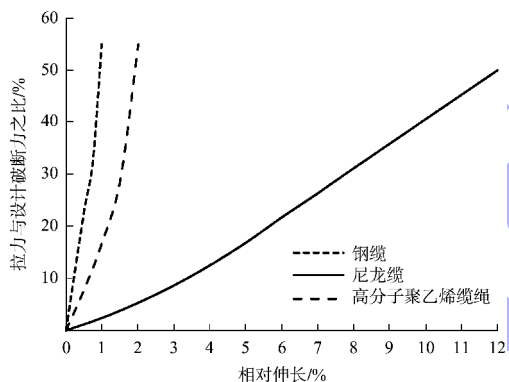


图8 不同种类缆绳的弹性曲线

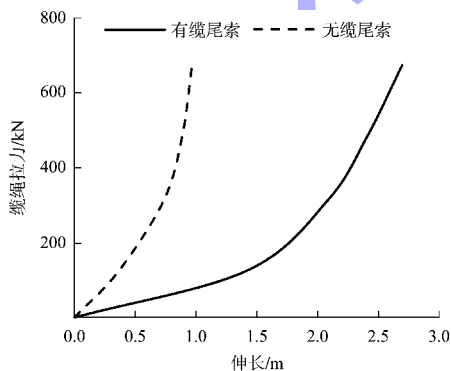
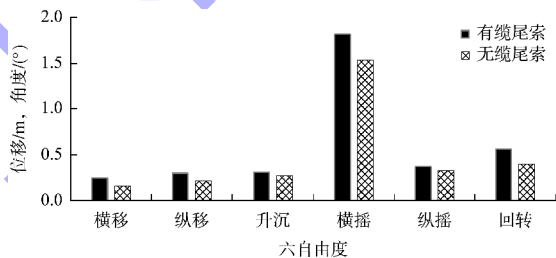


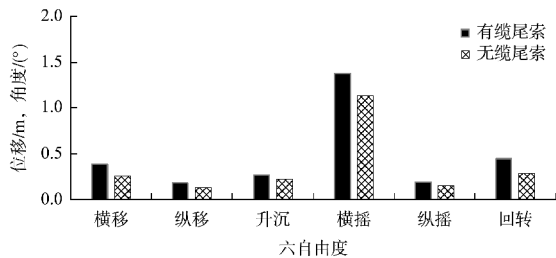
图9 有缆尾索和无缆尾索情况下缆绳的综合弹性对比

图10为纯浪作用下,有缆尾索和无缆尾索情况下系泊船舶运动量的对比。图11、12分别为纯浪和风浪流联合作用下,有缆尾索和无缆尾索情况下系泊船舶系缆力的对比。由图可见:1) 由于

有缆尾索情况下系泊缆绳的综合弹性增强,缆绳对系泊船舶的约束相对减弱,45°斜向浪和横浪作用下,相同波浪条件下有缆尾索情况下的系泊船舶运动量与无缆尾索情况相比整体上均增大。试验条件下,有缆尾索情况下系泊船舶的横移、纵移、升沉、横摇、纵摇和回转与无缆尾索情况相比分别平均增大了56%、43%、20%、21%、24%和48%。2) 相同波浪条件下,虽然与无缆尾索情况相比,有缆尾索情况下系泊船舶的运动量增大,但是由于有缆尾索情况下系泊缆绳的综合弹性增强,纯浪和风浪流联合作用下有缆尾索情况下系泊船舶的系缆力均减小。试验条件下,有缆尾索情况下系泊船舶的最大系缆力与无缆尾索情况相比减小了30%~40%。从船舶系泊安全角度看,设置缆尾索是有利的。

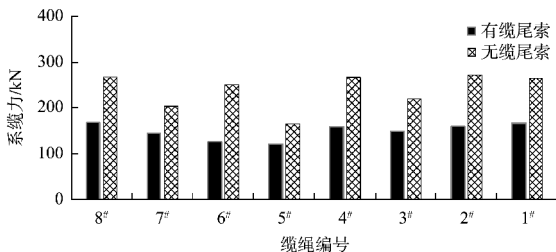


a) 45°斜向浪( $H_{4\%}=1.5\text{ m}$ ,  $T=6.0\text{ s}$ )



b) 横浪( $H_{4\%}=1.2\text{ m}$ ,  $T=3.5\text{ s}$ )

图10 纯浪作用下有缆尾索和无缆尾索情况下系泊船舶运动量对比



a) 45°斜向浪( $H_{4\%}=1.5\text{ m}$ ,  $T=6.0\text{ s}$ )

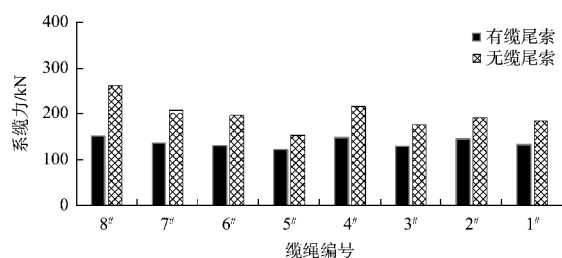


图 11 纯浪作用下有缆尾索和无缆尾索情况下系泊船舶系统缆力对比

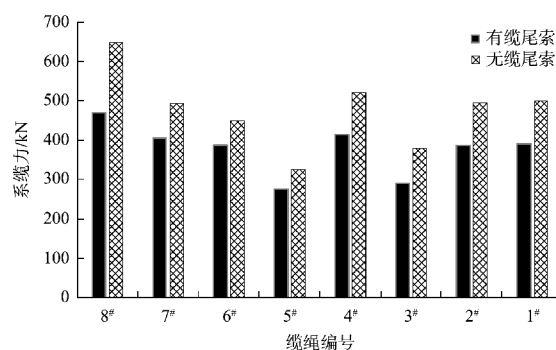
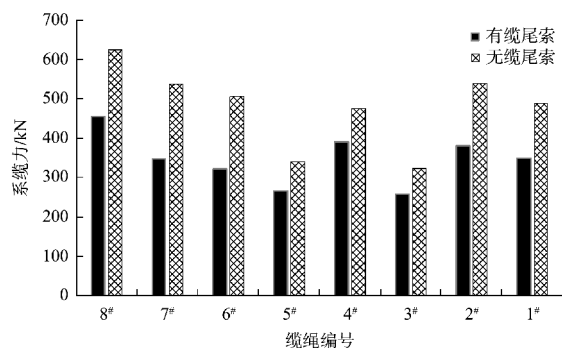


图 12 风浪流联合作用下有缆尾索和无缆尾索情况下系泊船舶系统缆力对比



a) 45°斜向浪( $H_{4\%}=1.5\text{ m}$ ,  $T=6.0\text{ s}$ )+13.8 m/s风+1.5 m/s水流

## 2.3 系缆布置对系泊船舶的影响

在无装卸作业时，码头前系泊船舶的全部缆绳不必均系于码头前沿系船柱，为了提高船舶系泊的抗风浪流能力，提出在码头后沿也设置系船柱、码头前后沿系船柱共同系缆布置，如图 13 所示，与图 1 中的码头前沿系缆布置相比，码头前后沿共同系缆时 2#、3#、4#、6# 和 7# 缆绳变长，横缆数量变多，缆绳分布更为均匀。

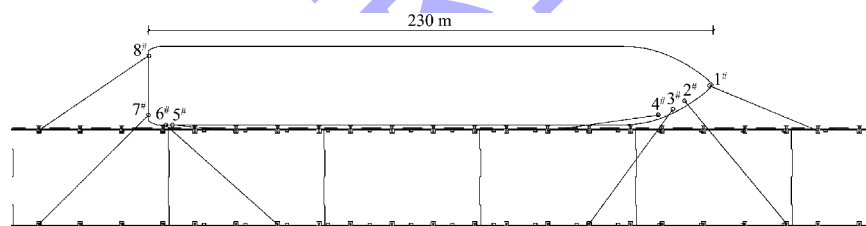
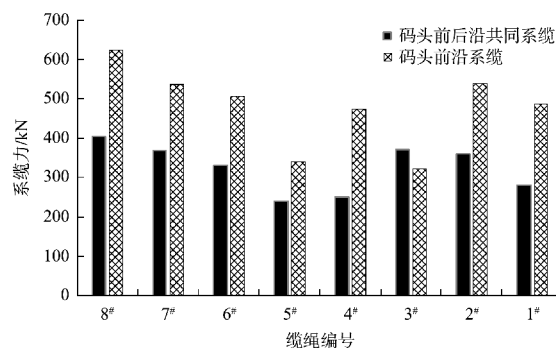


图 13 码头前后沿共同系缆布置

图 14 为风浪流联合作用下，码头前后沿共同系缆布置和码头前沿系缆布置下系泊船舶系统缆力的对比，2 种系缆布置方案的对比试验在无缆尾索情况下进行。由图可见，相同风浪流条件下，与码头前沿系缆布置相比，由于码头前后沿共同系缆布置时部分缆绳长度边长、横缆数量变多、缆绳分布更均匀，码头前后沿共同系缆布置时系泊船舶的最大系统缆力明显减小。试验条件下，码头前后沿共同系缆布置时系泊船舶的最大系统缆力与码头前沿系缆布置时相比减小了 30%~35%。由此

可见，码头前后沿共同系缆布置可明显提高船舶系泊(非装卸作业时)的抗风浪流能力。



a) 45°斜向浪( $H_{4\%}=1.5\text{ m}$ ,  $T=6.0\text{ s}$ )+13.8 m/s风+1.5 m/s水流

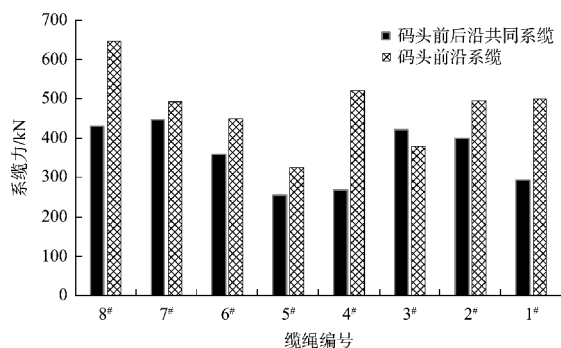
b) 横浪( $H_{4\%}=1.2\text{ m}$ ,  $T=3.5\text{ s}$ )+13.8 m/s风+1.5 m/s水流

图 14 码头前后沿共同系缆布置和码头前沿系缆布置下系泊船舶系缆力对比

### 3 结语

1) 波浪作用方向对系泊船舶响应的影响显著,相同波浪周期条件下,即使  $45^\circ$ 斜向浪波高比横浪波高大 25%,  $45^\circ$ 斜向浪作用下系泊船舶的运动量和系缆力均明显小于横浪作用下的结果。本次试验波浪周期范围( $T=3.5\sim 6.0\text{ s}$ )内,系泊船舶的运动量和系缆力随波浪周期的变化规律明显,系泊船舶的运动量和系缆力均随着波浪周期的增大而变大。

2) 有缆尾索情况下系泊缆绳的综合弹性增强,相同波浪条件下,有缆尾索情况下的系泊船舶运动量与无缆尾索情况相比增大,纯浪和风浪流联合作用下有缆尾索情况下系泊船舶的系缆力均明显减小。从船舶系泊安全角度看,设置缆尾索是有利的。

3) 相同风浪流条件下,与码头前沿系缆布置相比,码头前后沿共同系缆布置时系泊船舶的最大系缆力明显减小。码头前后沿共同系缆布置可明显提高船舶系泊(非装卸作业时)的抗风浪流能力。

### 参考文献:

- [1] 陈春升. LNG 船舶系泊试验对比分析研究[J]. 水道港口, 2019, 40(3): 267-272, 292.
- [2] 沈雨生, 周益人. 不同波浪和装载条件下系泊船舶横摇运动试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2018, 33(3): 364-369.
- [3] SHI X Y, ZHANG N C, YANG Y. Experimental study of the motion responses of a large mooring (LNG) ship in the waves with grand period [J]. Journal of ship mechanics, 2012, 16(9): 980-989.
- [4] 史宪莹, 张宁川. 系泊船舶运动响应周期试验研究[J]. 水运工程, 2012(1): 1-5.
- [5] 孟祥玮, 高峰, 李焱. 波周期对系泊条件影响的数学模型研究[C]//中国海洋工程学会. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(中). 北京: 海洋出版社, 2011: 778-792.
- [6] 张志明, 周丰, 杨国平, 等. 离岸深水港码头系泊船舶运动量研究[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 49-52.
- [7] KENJI S, ATILLA I. Numerical simulation of anchored ship motions due to wave and wind forces for enhanced safety in offshore harbor refuge [J]. Ocean engineering, 2012, 44(4): 68-78.
- [8] 孟祥玮, 高学平, 张文忠, 等. 波浪作用下船舶系缆力的计算方法[J]. 天津大学学报, 2011, 44(7): 593-596.
- [9] 吴澎, 姜俊杰, 张廷辉, 等. 开敞式蝶形码头墩位平面布置的优化研究[J]. 水运工程, 2009(1): 175-182.
- [10] 林在彬, 陈国平, 张志明, 等. 开敞式油气码头泊位长度优化[J]. 水运工程, 2012(11): 63-67, 78.
- [11] 朱奇, 王震, 王梦琪. 泊位长度与系缆方式对系泊船舶的影响[J]. 水道港口, 2020, 41(1): 44-49.
- [12] 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, 2010.
- [13] Oil Companies International Marine Forum (OCIMF). Mooring Equipment Guidelines (MEG4) [S]. London: Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), 2018.

(本文编辑 王传瑜)