

· 综合 ·



中长周期波作用下系泊集装箱船 水动力响应数值模拟*

严明宇, 马小舟, 郑振钧, 董国海, 王潇晨

(大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 海外港口建设的海域中, 显著的中长周期波浪给系泊船的稳定性带来一定影响。基于波浪周期的变化开展系泊船水动力响应的数值模拟研究, 并考虑船舶在系泊过程中可能遇到的不同装载状态和不同系泊布置情况。利用系泊分析模型 MIKE21 Maritime 进行验证和分析。结果表明, 系泊船的水动力响应主要受到波浪周期的影响, 特别是纵荡和横荡运动; 横荡运动受系泊布置方式的影响较为明显, 横摇运动受装载状态的影响最为明显; 相较于其他缆绳而言, 系泊船的横缆系统力对入射波浪谱峰周期的变化最为敏感。

关键词: 波浪周期; 模型验证; 系泊船; 水动力响应

中图分类号: U661.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0011-07

Numerical simulation of hydrodynamic response for moored container ships under medium-long period waves

YAN Mingyu, MA Xiaozhou, ZHENG Zhenjun, DONG Guohai, WANG Xiaochen

(The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The stability of moored ships is affected by the significant medium-long period waves in the sea area where overseas ports are constructed. We carry out a numerical simulation study on the hydrodynamic response of moored ships based on the change of wave periods, and consider different loading states and different mooring arrangements that may be encountered by the ship during the mooring process. Then we carry out the validation and analysis work using the mooring analysis model MIKE21 Maritime. The results show that the hydrodynamic response of the moored ship is mainly affected by the wave period, especially the surge and sway motions. The sway motion is more obviously affected by the mooring arrangement, and the roll motion is most obviously affected by the loading state. The breast line force of moored ship is the most sensitive to changes in incident wave periods compared to the other lines.

Keywords: wave period; model validation; moored ship; hydrodynamic response

随着近年来国家“一带一路”倡议下港口建设的开展, 中国企业参与海外港口建设的步伐也逐渐加大。已有的工程案例显示, 无论是早期援建的西非毛里塔尼亚友谊港, 还是近些年扩建的以色列阿什杜德港、斯里兰卡汉班托塔港等所处海域都存在中长周期波浪, 这对港内系泊船舶的安全作业产生

了一定的威胁^[1-3]。因此, 中长周期波作用下系泊船研究是目前近岸工程研究的热点问题之一。

系泊船水动力响应是衡量安全系泊的重要指标。近年来, 众多学者对波浪作用下的系泊船响应展开深入研究。Shi 等^[4]、沈雨生等^[5]通过物理模型试验研究横浪作用下波浪周期对系泊船水动

收稿日期: 2023-11-22

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52071060)

作者简介: 严明宇 (1993—), 男, 博士研究生, 从事港口工程及系泊船水动力响应研究。

通讯作者: 马小舟 (1977—), 男, 博士, 教授, 从事近岸波浪非线性变形的研究。E-mail: maxzh@dlut.edu.cn

力响应的影响,揭示横摇运动随波浪周期的变化规律;袁治巍等^[6]利用数值模型研究波浪周期对系泊船响应的影响,结果表明波浪周期对横荡和横摇有显著影响。值得注意的是,在研究波浪作用下的系泊船水动力响应问题已有较多成果^[7-8],但是这些研究大多考虑单一的船舶装载状态和系泊布置设置,而在实际工程中,船舶的装载状态会随着作业过程发生变化,且由于系泊的不确定性,船舶靠泊后的系泊布置也不是固定不变的。因此,本文基于波浪的三维势流理论的水动力分析模型 MIKE 21 Maritime 对中长周期波浪作用下的系泊船水动力响应开展数值模拟研究,并考虑不同装载状态和不同系泊布置的影响。

1 计算方法

对于系泊船舶的动力响应研究主要有数值模拟、物理模型试验和现场观测 3 种手段,由于计算机技术层面和数值理论层面的不断进步,数值模拟因其良好的高效性、通用性和经济效益,逐渐成为主流分析手段。MIKE 21 Maritime 是丹麦水利研究所(DHI)开发的系泊分析模型软件,在势流理论假设的基础上可以模拟风、浪、流条件下系泊船舶动力行为。其中系泊系统外部的风、流荷载参考石油公司国际海事论坛(OCIMF)^[9]推荐的风流力计算公式和风流力系数进行计算;入射波浪场考虑常规的单向不规则波列;缆绳和护舷的计算则利用缆绳的荷载-延伸曲线和护舷的反力-变形曲线中的数据点通过线性插值的方式进行受力计算的模拟。

模型采用 Cummins^[10]提出的间接时域法求解系泊船舶时域运动,基于频域模型计算出的水动力系数,通过傅里叶变换可在时域内将系泊船舶的运动方程表示为:

$$\sum_{k=1}^6 (M_{jk} + a_{jk}) \ddot{x}_k(t) + \int_0^t K_{jk}(t-\tau) \dot{x}_k(\tau) d\tau + C_{jk} x_k(t) = F_{jd}(t) + F_{jnl}(t) \quad (1)$$

其中非线性外力表达式为:

$$F_{jnl}(t) = F_{j,mooring}(t) + F_{j,visc}(t) + F_{j,w}(t) + F_{j,c}(t) + F_{j,drift}(t) + F_{j,fric}(t) \quad (2)$$

式中: M_{jk} 和 C_{jk} 为与浮体广义质量和静水恢复力系数,取决于浮体的几何性质; t 、 τ 为时间和延迟时间; $x_k(t)$ 、 $\dot{x}_k(\tau)$ 、 $\ddot{x}_k(t)$ 分别为笛卡尔坐标系下的六自由度运动矩阵、运动速度矩阵、加速度矩阵; a_{jk} 和 $K_{jk}(t-\tau)$ 分别为时域内附加质量和迟滞函数,由频域内附加质量和阻尼系数逆傅里叶变换得出; $F_{jd}(t)$ 为时域波浪激励力; $F_{jnl}(t)$ 为非线性外部作用力; $F_{j,mooring}(t)$ 、 $F_{j,visc}(t)$ 、 $F_{j,w}(t)$ 、 $F_{j,c}(t)$ 、 $F_{j,drift}(t)$ 、 $F_{j,fric}(t)$ 分别为系泊力、黏滞阻尼力、风力、流力、慢漂移力、摩擦阻尼力。非线性外力 $F_{jnl}(t)$ 中的风力和水流量基于 OCIMF 提出的经验公式计算,系缆力和护舷力是根据 t 时刻的船舶位移和速度,通过缆绳和护舷的相应荷载-变形关系计算得出,黏滞阻尼力采用线性项加二次方项和三次方项的形式求解。时域运动方程的数值时间积分方法采用的是 4 阶龙格-库塔法^[11]。

2 模型验证

为验证所建立的系泊船数值模型模拟时域水动力响应的有效性,对在南京水利科学研究院海岸工程试验厅的长 70 m、宽 52 m 水池中 1 艘横浪状态下 1:58 比尺的 6 000 TEU 满载集装箱船物理模型试验进行数值模拟。原型共 12 根缆绳,预张力为 10% 缆绳破断力取 1 650 kN,缆绳布置方式采用 2:2:2 方式,而模型试验中采用双根缆绳简化为 1 根缆绳的方式,共设置 6 根缆绳,相应的缆绳预张力设置为 3 300 kN。波浪条件为 JONSWAP 谱模拟的不规则波(有效波高 $H_s = 0.5$ m、周期 $T_p = 11.6$ s)。船舶、码头系缆及环境荷载方向见图 1。船舶尺寸参数为:总长 290.0 m,垂线间长 279.2 m,型宽 32.2 m,满载吃水 13.0 m,重心高 11.87 m。采用 SUC2000H 型护舷及聚丙烯缆绳。

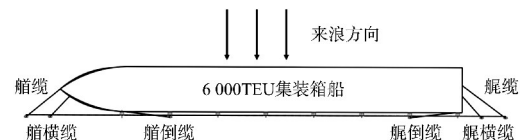


图 1 试验布置

集装箱船六自由度运动统计值见表 1。可以看出, 数值结果与模型试验结果存在一定的偏差。数值模拟的升沉运动和纵摇运动比试验偏小的主要原因是试验过程中船底和池底之间水层较薄(约 0.085 m), 横浪作用下波浪能量集中传播, 且尺度效应对升沉和纵摇运动的影响较为明显, 使得船舶在横浪作用下纵摇和升沉运动挤压水层产生的辐射波与入射波及直墙码头的反射波相叠加, 造成纵摇和升沉运动的试验结果和数值结果相差较大。相似的情况在文献[12]中也有所提及。集装箱船缆绳系缆力统计值见表 2。可以看出, 数值计算得到的系缆力有效值与试验数据十分吻合, 而最大值存在一定的差异, 但误差率均控制在 30% 以内。对于数值计算与试验结果之间存在的偏差, 在数值计算中很难保证对试验中出现的如尺度效应产生的阻尼等非线性因素的准确模拟, 但总体而言, 数值计算结果与试验结果吻合较好。

表 1 集装箱船六自由度运动统计值

统计值	类型	纵荡/ m	横荡/ m	升沉/ m	横摇/ (°)	纵摇/ (°)	艏摇/ (°)
最大值	计算值	0.32	1.65	0.37	2.24	0.24	0.28
	试验值	0.34	1.57	0.68	2.31	0.77	0.37
	误差率/%	5.88	5.10	45.59	3.03	68.83	24.32
单幅度有效值	计算值	0.22	0.71	0.26	2.02	0.17	0.15
	试验值	0.18	0.77	0.37	1.83	0.32	0.23
	误差率/%	22.22	7.79	29.73	10.38	46.88	34.78

表 2 集装箱船缆绳系缆力统计值

统计值	类型	系缆力/kN					
		艏缆	艏横缆	艏倒缆	艏横倒缆	艏横缆	艏缆
最大值	计算值	2 562	2 352	1 559	1 370	2 111	1 467
	试验值	3 230	3 011	1 686	1 948	2 511	1 747
	误差率/%	20.68	21.89	7.53	29.67	15.93	16.03
有效值	计算值	673	555	427	306	593	525
	试验值	941	926	736	489	826	651
	误差率/%	7.91	7.42	2.36	9.28	2.61	0.15

3 系泊集装箱船的水动力响应分析

世界运输总量的 70% 以上通过海运, 其中 17% 采取集装箱运输的方式。由于当前船舶的发展趋势逐渐大型化, 本文选取 1 万 TEU 集装箱船展开水动力响应分析, 船舶参数见表 3。系泊系统中的缆绳和护舷与试验系泊船中的设置保持一致, 系泊布置 1 见图 2。

由于本文重点研究中长周期波浪对系泊船的影响, 因此设定风的环境参数为常数。其中, 向岸风速 4 m/s, 风向为 WSW 方向, 与艏夹角为 22.5°。为考虑不同波浪周期的影响, 波浪周期变化设为 8~18 s, 波浪为斜浪 45° 方向, 设定入射波浪的有效波高为 0.4 m。此外, 考虑了系泊船不同装载状态和不同系泊布置的影响。

表 3 集装箱船参数

装载状态	船舶总长/m	垂线间长/m	型宽/m	吃水/m	排水量/万 t	重心高/m
满载	350	330	45.6	15.0	14.900 2	16.5
压载	350	330	45.6	7.6	6.495 2	10.3

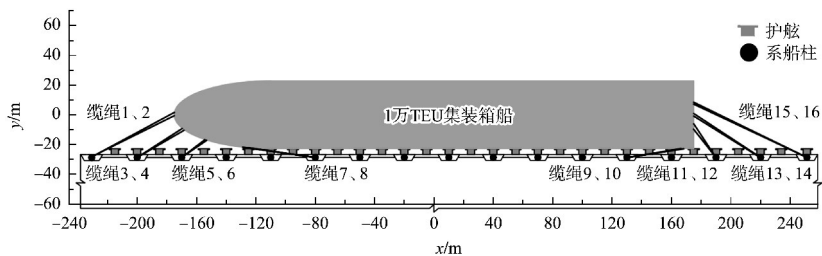


图 2 1 万 TEU 集装箱船系泊布置 1

3.1 不同装载状态

不同装载状态对船舶六自由度运动响应的影响见图 3。可以看出, 除了压载状态的横摇外, 其他自由度都随着波浪周期的增大而整体呈现增长

的趋势。集装箱船在 10~18 s 周期范围内, 除了 18 s 时的横摇和横荡运动外, 其他压载状态下运动响应幅度较满载状态下的运动响应幅度更大。与压载状态相比, 集装箱船在满载状态时的纵荡、

横荡和艏摇运动对于波浪周期的变化更为敏感。对于10 s周期下压载状态的大横摇幅值情况，不难看出是横摇共振所导致(船体幅值响应算子RAO分析确定压载状态下横摇固有周期为10 s左右)。

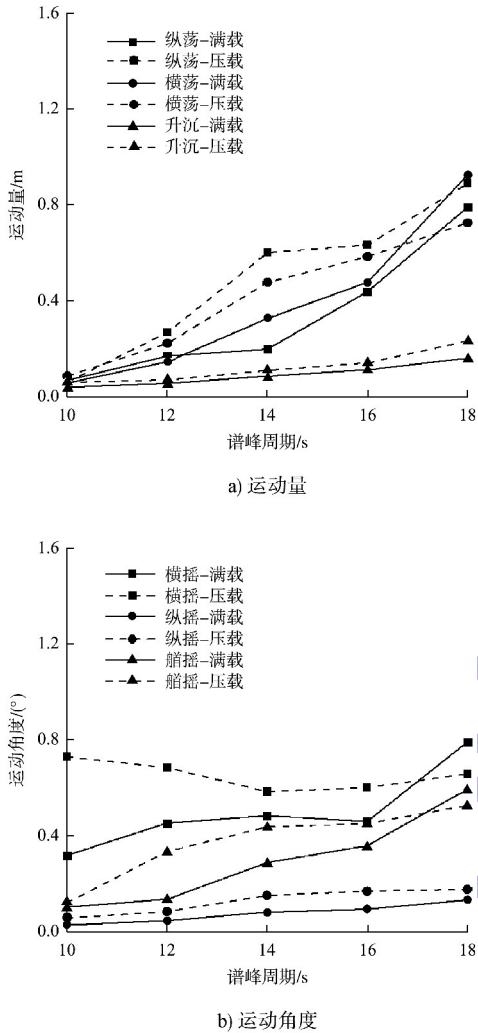


图3 不同装载状态对船舶运动响应的影响

集装箱船在不同装载状态下各缆绳所受系缆力的对比见图4。可以看出，在10 s周期时，16根缆绳在满载和压载状态下的系缆力相差较小。而对于18 s周期，满载状态下大部分缆绳的系缆力要明显大于压载状态下的系缆力。这主要是因为18 s周期下满载状态的横摇和横荡运动与压载状态的对应运动相差较大，较大的横向荷载施加给受力缆绳，使得满载状态下大部分缆绳的系缆力要明显大于压载状态下的系缆力，而缆绳中倒缆(缆绳7~10)主要提供纵向约束，因此与其他缆绳相比，倒缆的缆力变化不明显。

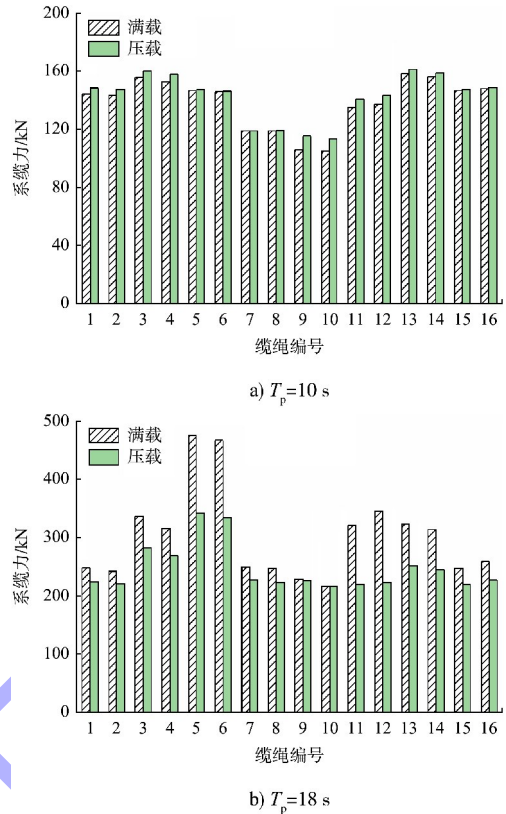
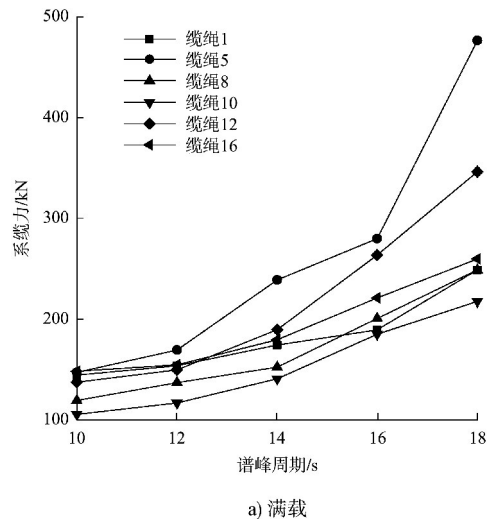


图4 10和18 s周期时满载和压载状态下的集装箱船系缆力对比

集装箱船在不同装载状态下各缆绳所受系缆力随波浪周期的变化见图5。可以看出，不同装载状态下的缆绳系缆力随波浪谱峰周期的增加整体呈现增大的趋势。其中，缆绳5(艏横缆)在18 s时受力显著增大的原因在于系泊集装箱船在此条件下发生了非常显著的横荡和横摇运动。结合图3可知，缆绳5由于相对最短，对船舶运动施加的纵向和横向荷载更为敏感。因此，在实际系泊过程中，相对较短的横绳的安全性尤其需要注意。



a) 满载

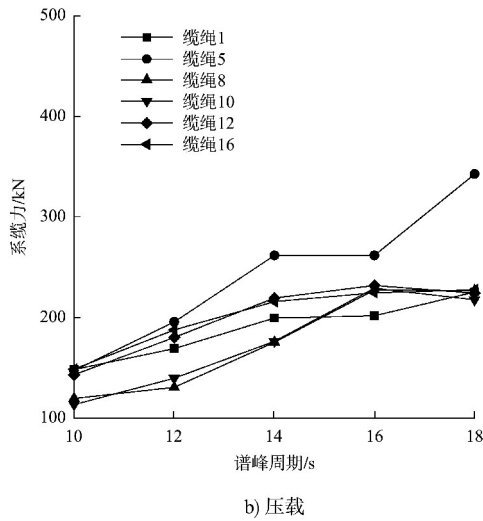


图5 满载和压载状态下集装箱船缆绳受力随谱峰周期的变化

3.2 不同系泊布置

为了研究满载状态下不同系泊布置方式对集装箱船运动响应和系缆力的影响, 考虑两种系泊布置情况。其中, 系泊布置1为2:2:2:2(艏/艉

缆1:艏/艉缆2:横缆:倒缆), 见图2; 系泊布置2为3:3:2(艏/艉缆1:艏/艉缆2:倒缆)布置, 见图6。

不同系泊布置对船舶运动响应的影响见图7。可以看出, 系泊集装箱船的六自由度运动均随波浪周期的增大而整体呈现增长的趋势, 特别是纵荡和横荡运动的变化趋势较为明显。另外可见, 除了18 s周期下的横荡存在一定的差异外, 其他自由度运动的变化幅度较小。考虑横荡运动属于低频运动, 对长周期波浪较为敏感; 在较大波浪周期的影响下, 主要提供横向约束的横缆影响了系泊集装箱船的整体横荡运动。系泊布置2与1相比, 将横缆调整为艏缆, 对于横荡运动提供的横向荷载没有直接通过缆绳进行约束。因此, 系泊布置方式1在长周期波浪影响下比系泊布置方式2更能约束系泊船的横荡运动, 保证港口装卸作业的有效进行。

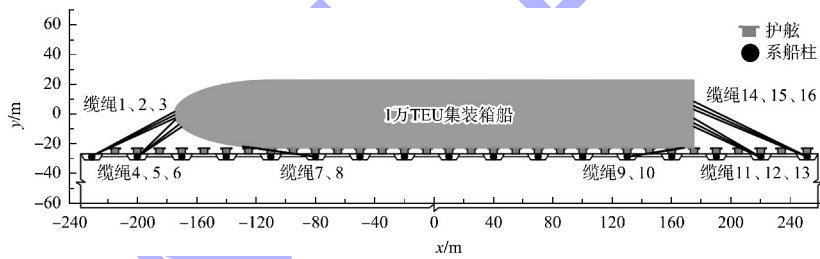


图6 1万TEU集装箱船系泊布置2

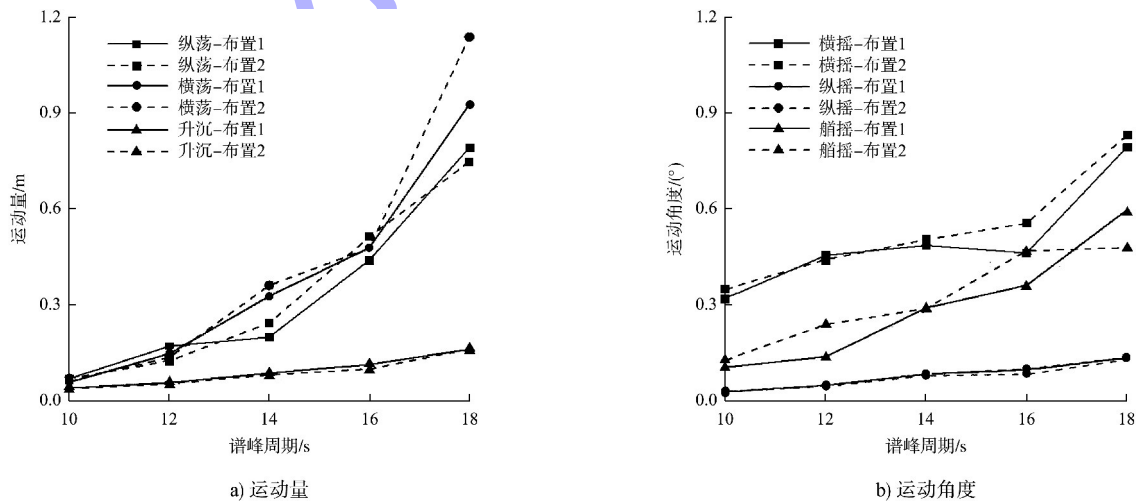


图7 不同系泊布置对船舶运动响应的影响

不同系缆布置方式下集装箱船各缆绳所受系缆力的对比见图8。可以看出,在10 s周期时,除了缆绳5和6外,其余缆绳的系缆力在不同系泊布置方式下均相差不大;在18 s周期时,相比于系泊布置方式2,系泊布置方式1缆绳5和6的系缆力大得多。主要是因为缆绳5和6在系泊方式1中承担的横向荷载较多,受横荡运动影响导致系缆力较大。

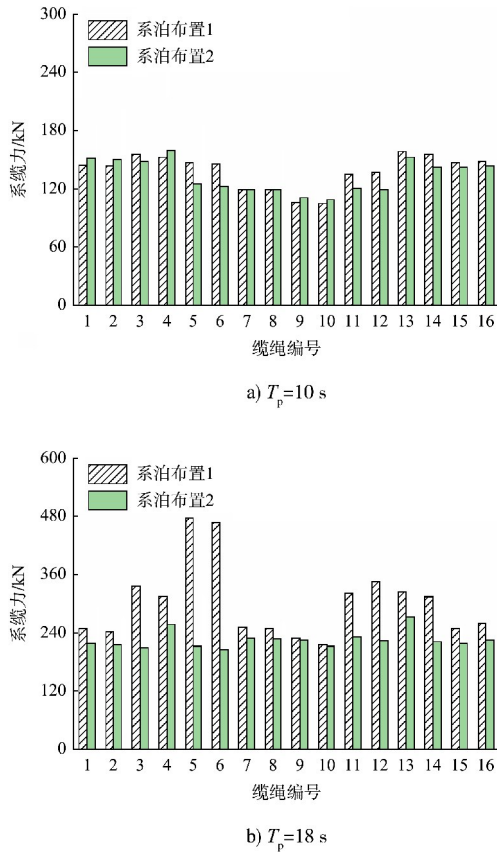


图8 10和18 s周期时不同系泊布置方式下的集装箱船系缆力对比

不同系泊布置方式下集装箱船各缆绳系缆力随波浪周期的变化见图9。可以看出,不同系泊布置方式下,各缆绳系缆力随波浪谱峰周期的增加整体呈现增大的趋势。与系泊布置1相比,系泊布置2的各缆绳受力较为均匀,系缆力变化也较为稳定。而系泊布置1中的缆绳5(艏横缆),极易出现受力过大的情况,因此,需要提高对系泊横缆的关注。

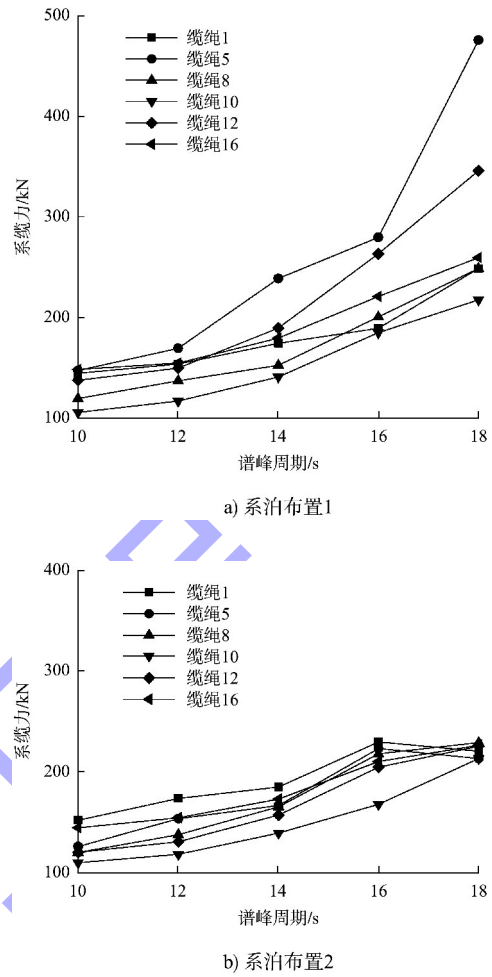


图9 不同系泊布置方式下的集装箱船缆绳受力随谱峰周期的变化

4 结论

1) 在不同装载状态和系泊布置的影响下,系泊集装箱船的运动响应和系缆力随波浪周期的增大而整体呈现增长的趋势,特别是纵荡和横荡运动对波浪周期的变化极为敏感。此外,由于横摇固有周期接近波浪周期,容易激发出横摇共振情况。

2) 系泊船的横荡运动受系泊布置方式的影响较大,以横缆的系缆位置为主要影响因素。并且相较其他缆绳而言,系泊船的横缆系缆力对入射波浪谱峰周期的变化最为敏感,特别是在波浪周期较大的情况下更易达到缆绳安全工作的极限荷载,从而影响缆绳的安全使用。

3) 对于数值计算与试验结果之间存在的偏差, 在数值计算中很难保证对试验中出现的如尺度效应产生的阻尼等非线性因素的准确模拟, 这与数值计算中的假设相关。

4) 本文主要针对的系泊集装箱船在中长周期波作用下的水动力响应研究。实际上, 承担海上货运的船舶还有很多种。以本文的集装箱船为例, 其在码头系泊过程中的作业方式为起重机作业, 本文的研究结果可为相同装卸作业方式的船舶提供参考。但对于汽车运输船这类滚装滚卸作业方式的船舶需要重新开展研究工作。

参考文献:

- [1] 杨宪章. 长周期波的特性及对系泊船舶动态特性的影响[J]. 港口工程, 1989(6): 37-43.
- [2] 滕爱国, 熊韬, 彭晟, 等. 新扩建以色列阿什杜德港 (ASHDOD) 施工关键技术[J]. 水运工程, 2018(3): 213-220.
- [3] DONG G H, ZHENG Z J, MA X Z, et al. Characteristics of low-frequency oscillations in the Hambantota Port during the southwest monsoon[J]. Ocean engineering, 2020, 208: 107408.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 袁治巍, 柳淑学, 李金宣, 等. 波浪入射角度和周期对系泊船舶运动影响的数值模拟研究[J]. 水运工程, 2022(1): 13-18, 26.
- [7] ROSA-SANTOS P, TAVEIRA-PINTO F, VELOSO-GOMES F. Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships [J]. Coastal engineering, 2014, 85: 60-71.
- [8] 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]//中国海洋学会海洋工程分会. 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: 174-178.
- [9] OCIMF. Mooring equipment guidelines (MEG3) [M]. 3rd ed. Edinburgh: Witherby Seamanship International Ltd., 2008.
- [10] CUMMINS W E. The impulsive response function and ship motions[J]. Schiffstechnik, 1962(9): 124-135.
- [11] DHI. MIKE 21 Maritime-frequency response calculator and mooring analysis[R]. Copenhagen: DHI, 2018.
- [12] 周宏康, 李欣, 杨建民, 等. FSRU 码头系泊模型实验与数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2017, 35(1): 12-20.

(本文编辑 王隽)

· 消 息 ·

湖南岳阳长岭码头项目竣工验收

近日, 中交天航局承建湖南岳阳中石化长岭分公司码头通过竣工验收。

该项目位于岳阳云溪港区陆城作业区, 建设内容包括拆除原有码头, 新建3个5000吨级油品化工品泊位和2个3000吨级油品化工品泊位, 设计年吞吐量为402万t。主要施工内容包括新建水工码头结构、趸船以及配套设施。

该项目建成后, 将改善码头化工品卸货能力, 发挥泊位作业能力, 满足长岭炼化公司原料、产品的接卸中转需求和承接周边市场化工产品中转业务需求。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202407/t20240701_215009.html (2024-07-01)