

## · 港 口 ·



# 基于 AQWA 的集装箱船舶 装卸作业系泊响应分析<sup>\*</sup>

肖力旗<sup>1</sup>, 曹 民<sup>1</sup>, 张柳明<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200082;  
2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 针对集装箱船装卸作业系泊安全问题, 基于三维势流理论, 利用 AQWA 软件对系泊集装箱船进行频域水动力分析和时域耦合分析。计算不同装载状态下六自由度响应幅值算子(response amplitude operator, RAO)、时域运动及各风浪流载荷下系统最大张力; 分析不同装载状态对集装箱船六自由度 RAO 和运动量的影响, 评估装卸作业下码头系泊安全。结果表明: 1) 不同装载状态对横摇运动影响最大; 2) 满载时集装箱船运动量大于压载工况, 系泊缆负载更大。试验结果为评估船舶装卸作业时的系泊安全提供仿真分析依据, 对优化码头系泊方案也具有一定的指导价值。

**关键词:** 码头系泊; 装卸作业; 水动力分析; 系泊缆张力

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0026-06

## Mooring response analysis of ship stevedoring operations based on AQWA

XIAO Li-qi<sup>1</sup>, CAO Min<sup>1</sup>, ZHANG Liu-ming<sup>2</sup>

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Aiming at the mooring safety problem of container ship stevedoring operations, based on the three-dimensional potential flow theory, the AQWA software is used to conduct frequency domain hydrodynamic analysis and time domain coupling analysis for moored container ships. The six-degree-of-freedom response amplitude operator, time-domain motion and the maximum tension of the mooring cable under various wind, wave and current loads under different loading conditions are calculated. The effects of different loading conditions on the six-degree-of-freedom RAO and the amount of movement of the container ship are analyzed. Wharf mooring safety is assessed under stevedoring operations. The results show that: 1) Different loading conditions have the greatest impact on rolling motion. 2) When fully loaded, the amount of movement of the container ship is greater than that of ballast conditions, and the mooring cable has a greater load. The test results provide a simulation analysis basis for evaluating the mooring safety of ships during stevedoring operations, and also have certain guiding value for optimizing the mooring scheme of the wharf.

**Keywords:** wharf mooring; stevedoring operation; hydrodynamic analysis; mooring cable tension

随着经济全球化的发展, 国际贸易越来越密集。航运作为国际贸易的主要交通方式, 其安全

性是保障国际贸易正常进行的关键。特别是集装箱船在码头装卸货物时, 由于作业时间长、船舶

收稿日期: 2021-01-09

\*基金项目: 浦东新区科技发展基金项目(PKX2019-R12)

作者简介: 肖力旗(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为船舶稳性安全。

通讯作者: 曹民(1970—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为港机及系泊自动化、检测仪器及认证认可等创新技术。

E-mail: mincao@usst.edu.cn

重心偏移、港口风浪等因素, 对集装箱船装卸作业安全性带来挑战<sup>[1]</sup>。国内外专家在研究船舶运动响应时一般采用切片法和三维势流理论两种方法。切片法主要是针对细长船体, 其波浪流动主要局限于船体的横截面, 因此将波浪三维流动简化为船体横截面的平面运动, 求解各横截面的流体作用力后再沿船长方向积分。切片法计算速度快、船体适应性好, 但其忽略了非线性因素, 模型过于简化, 在准确性上存在不足<sup>[2]</sup>。三维势流理论因其更合理的理论模型而受到重视。目前对于船舶系泊运动问题, 主要利用物理模型试验和数学模型仿真进行研究, 沈雨生等<sup>[3-4]</sup>利用 10 万吨级散货轮模型试验分析了不同波浪和不同装载状态系泊船舶横摇运动的影响; 雷林等<sup>[5]</sup>利用 AQWA 软件分析了有无码头遮蔽对系泊船舶六自由度运动的影响。但对于装载状态对集装箱船六自由度运动影响的问题, 现有研究不够充足。

本文基于三维势流理论, 采用 AQWA 构建集装箱船系泊系统模型, 在不同装载条件下分别进行频域水动力分析和时域耦合分析。分析不同装载状态对六自由度 RAO 的影响, 并模拟港口风浪条件, 分析各工况下六自由度运动响应及该船的码头系泊能力, 为集装箱船装卸作业系泊安全性提供参考。

## 1 模型建立

船舶基本信息见表 1。

表 1 船舶基本信息

装载状态	平均型吃水 $d/m$	型宽 $B/m$	总长 $L/m$
压载	8.1	36	186
满载	11.4	36	186

以船舶中心为原点建立坐标系,  $y$  轴指向码头,  $x$  轴指向船尾,  $z$  轴垂直于  $xoy$  平面。坐标系定义见图 1, 集装箱船及码头模型网格划分见图 2。

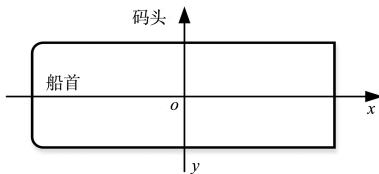


图 1 坐标系定义

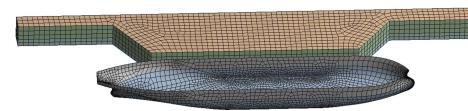


图 2 集装箱船及码头模型网格划分

根据实际系泊情况, 本系统布置 6 条尼龙绳系泊缆, 系缆横截面积为  $0.01 \text{ m}^2$ , 破断载荷 1 000 kN, 在船首中尾部有 3 个橡胶护舷, 其线性拉伸参数为 50 kN/m, 弹性模量为  $3 \text{ kN/m}^2$ , 系泊方式见图 3。

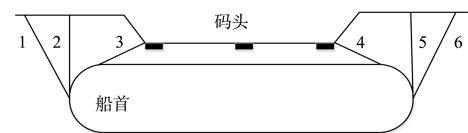


图 3 系泊方式及系缆编号

## 2 频域分析

将船身视为刚体, 满足牛顿第二定律:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{M}_{ij} \ddot{\mathbf{x}}_j \quad (1)$$

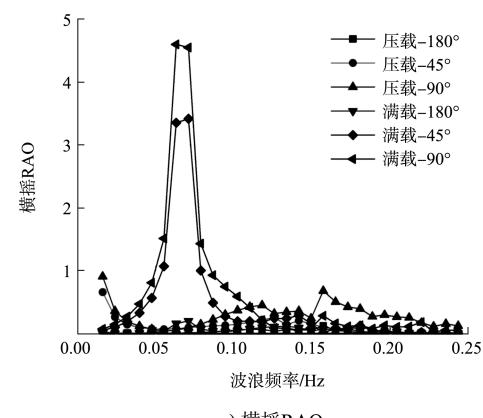
式中:  $\mathbf{F}_i$  为波浪力;  $\mathbf{M}_{ij}$  为广义附加质量矩阵;  $\ddot{\mathbf{x}}_j$  为船体运动加速度/角加速度。根据三维势流理论,  $\mathbf{F}_i$  可分解为 Froude-Krylov 力入射势  $\mathbf{F}_i^k$ 、绕射势  $\mathbf{F}_i^d$ 、辐射势  $\mathbf{F}_i^r$ 、静水恢复力  $\mathbf{F}_i^s$ 。Froude-Krylov 力相关表达式见文献[6]。将 Froude-Krylov 力代入式(1)可得:

$$\mathbf{F}_i^k + \mathbf{F}_i^d + \mathbf{F}_i^r + \mathbf{F}_i^s = \mathbf{M}_{ij} \ddot{\mathbf{x}}_j \quad (2)$$

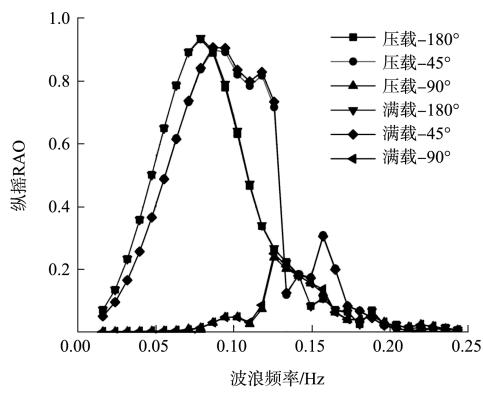
将  $\mathbf{F}_i^s$  表达式代入式(2)可得一阶波浪力的动力学方程:

$$(\mathbf{M}_{ij} + \boldsymbol{\mu}_{ij}) \ddot{\mathbf{x}}_j + \boldsymbol{\lambda}_{ij} \dot{\mathbf{x}}_j + \mathbf{C}_{ij} \mathbf{x}_j = \mathbf{F}_i^k + \mathbf{F}_i^d \quad (3)$$

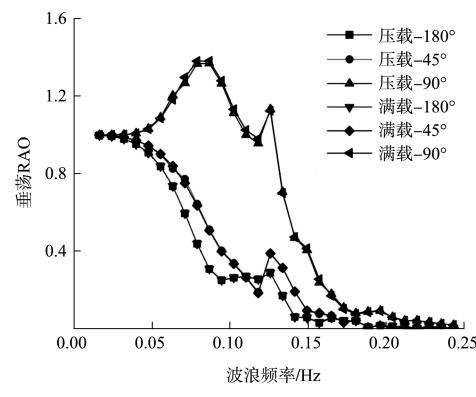
式中:  $\boldsymbol{\mu}_{ij}$  为阻尼系数;  $\mathbf{x}_j$  为船体运动位移/角度;  $\dot{\mathbf{x}}_j$  为船体运动速度/角速度;  $\boldsymbol{\lambda}_{ij}$  为附加质量系数;  $\mathbf{C}_{ij}$  为静水恢复力系数矩阵。



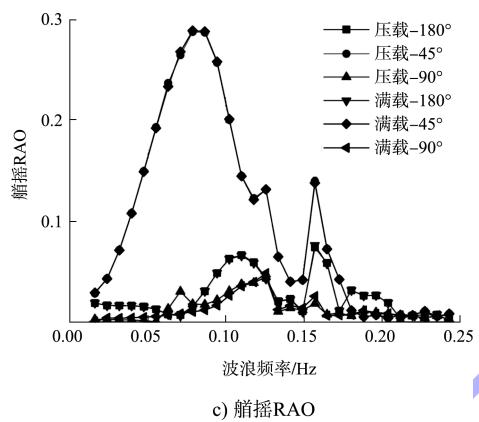
a) 横摇RAO



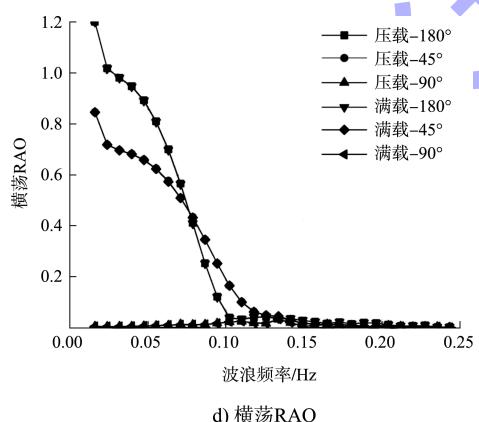
b) 纵摇RAO



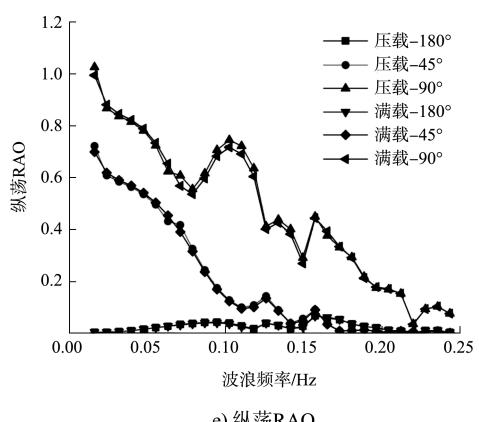
f) 垂荡RAO



c) 艄摇RAO



d) 垂荡RAO



e) 纵荡RAO

图 4 集装箱船六自由度响应幅值算子(RAO)

将 0.16~0.24 Hz 规则波作为激励输入动力学方程(3)中, 得到集装箱船六自由度 RAO(图 4), 可以得出以下结论:

1)由图 4a)、d)可见, 集装箱船装载状态对横摇 RAO 影响最大、对纵摇影响很小。满载状态横摇 RAO 最大值的波浪频率为 0.071 Hz, 压载状态横摇 RAO 最大值的波浪频率为 0.157 Hz, 对应两工况下横摇固有周期分别为 14.08、6.37 s。说明装卸作业会改变船舶固有周期, 与文献[4]中结论一致。装载货物增加, 集装箱船固有周期增大, 且满载时横摇 RAO 幅值远大于压载, 船舶稳定性降低。

2)由图 4b)可知, 波向垂直  $y$  轴 ( $-180^\circ$ ) 对纵摇 RAO 影响较大, 垂直于  $x$  轴 ( $90^\circ$ ) 时影响小, 且最大 RAO 所在频率会随波向变化, 装载状态对集装箱船纵摇 RAO 影响较小。

3)六自由度运动中, 横摇 RAO 极值最大, 说明横摇是影响船舶稳定性的主要因素, 图 4a)中可见, 横摇 RAO 与波向相关, 波向垂直于  $x$  轴时 RAO 最大, 垂直于  $y$  轴时 RAO 最小。

4)由图 4c)可见, 集装箱船艏摇受装载状态影响较小, 受波向影响较大, 其中斜浪 ( $-45^\circ$ ) 对艏摇影响尤为明显。由图 4e)可见, 垂直  $x$  轴波向对纵荡影响较大, RAO 随波浪频率增大呈下降趋势。图 4f)可见, 不同装载状态对垂荡影响不明显, 垂荡受垂直于  $x$  轴波浪影响更大。

### 3 时域分析

为分析集装箱船装卸作业下的工况安全, 利

用 AQWA-drift 模块, 在风、浪载荷共同作用下分析运动响应, 研究系统张力变化情况, 模拟计算时长 1 h(步长 0.5 s, 共 7 200 步)。本次时域分析中波浪波高为 1.5 m, 周期 10 m/s, 波向 135°, 涌流方向 0°, 流速 0.5 m/s, 风向 180°, 风速 12 m/s。

根据码头实际情况<sup>[7]</sup>, 本系统风向主要为开风(风向 90°, 由陆向海)和拢风(风向 -90°, 由海向陆), 风速为 3 级风(4 m/s)、6 级风(12 m/s)、9 级风(22 m/s), 风谱为 API 谱。不规则波选择 JONSWAP 谱, 有义波高为 0.5、1.5、2.0 m, 波浪谱峰周期分别为 10、7 s, 波向均为 135°。涌流流速均为 0.5 m/s, 流向分别为 0°(船首迎流)、180°(船尾迎流)。系缆编号见图 3。

### 3.1 六自由度时域运动分析

以波浪、涌浪、风环境载荷为例, 分析满载和压载状态下时域运动响应, 分别得到 1 h 内集装箱船压载偏移距离(纵荡、横荡、垂荡)曲线(图 5)、满载偏移距离(图 6)、压载偏移角度(图 7)、满载偏移距离(图 8)。

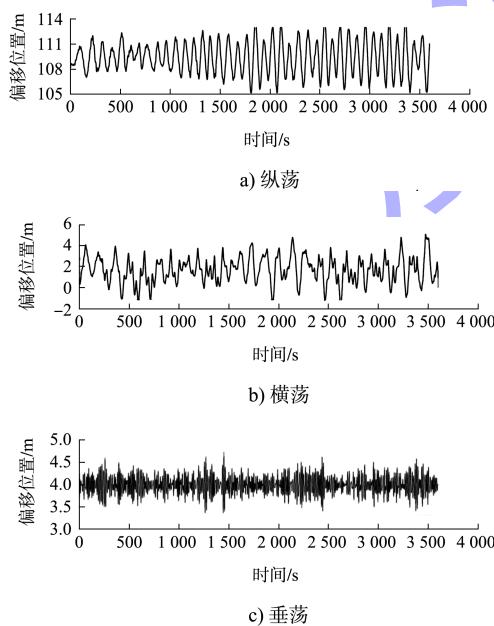


图 5 压载偏移位置

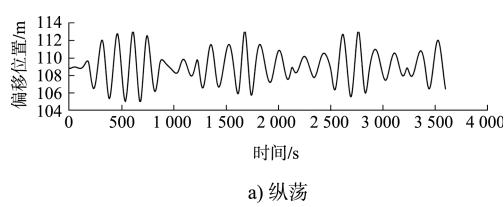


图 6 满载偏移位置

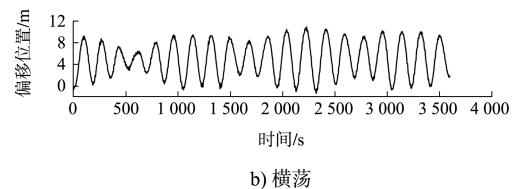


图 7 压载偏移角度

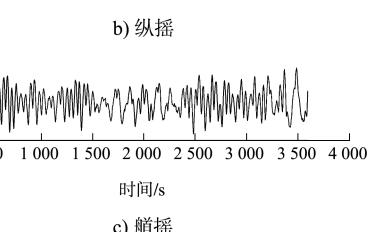
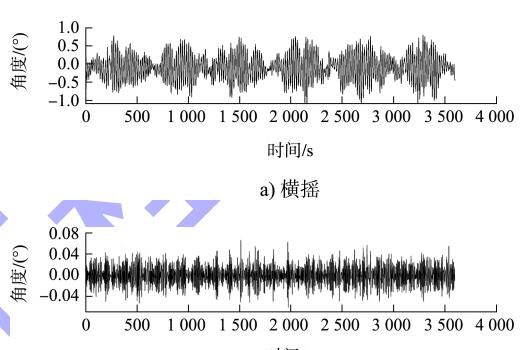


图 8 满载偏移角度

根据图 5、6 可以得出以下结论：1) 风浪流载荷下，压载和满载两种工况的垂荡运动频率相对纵荡、横荡方向较大，横荡运动频率最小，这是由于船体横荡受系缆和护舷约束较大，而垂荡受约束较小<sup>[8]</sup>。横荡和纵荡运动量相对较大，结合文献[9]中的结论，为保障系泊安全性，应更多关注系缆张力变化情况。2) 满载时纵荡运动量大于压载工况。对于纵荡和横荡，满载工况运动频率比压载更小，但是横荡运动量较大，纵荡运动量差距不大，说明集装箱船满载时对系缆负荷更大，更有断裂风险。

根据图 7、8 可以得出以下结论：1) 风浪载荷下，满载和压载的艏摇频率最小，压载最大变化幅值为 5.4°，满载最大变化幅值为 6.6°。两种工

况下纵摇运动量最小，压载最大变化幅度为 0.13°，满载最大变化幅度为 1.3°。横摇运动量相对纵摇较大，压载最大变化幅度为 1.8°，满载最大变化幅度为 7.6°，纵摇频率略大于横摇频率。2) 对于两种不同工况，横摇与纵摇运动量变化明显，满载工况运动量均大于压载工况，运动频率均有降低。艏摇运动量变化较小，压载运动频率明显大于满载工况。

### 3.2 码头系泊能力分析

为分析不同风浪流载荷、不同装载状态下，集装箱船系缆受力情况，评估码头系泊能力，确定了各载荷工况组合，工况组合见表 2。在计算时长 1 h 内，各工况下 6 条系缆最大张力见表 3。

表 2 系泊工况组合编号

工况编号	装载状态	波浪			涌流		风	
		波高/m	周期/s	浪向/(°)	流向/(°)	流速/(m·s⁻¹)	风向/(°)	风速/(m·s⁻¹)
T1	压载	0.5	10	135	0	0.5	90	4
T2		0.5	10	135	0	0.5	90	12
T3		0.5	10	135	0	0.5	90	22
T4		1.5	10	135	0	0.5	90	12
T5		2	10	135	0	0.5	90	12
T6		0.5	10	135	180	0.5	90	12
T7		0.5	10	135	0	0.5	-90	12
T8		1.5	7	135	0	0.5	90	12
T9	满载	0.5	10	135	0	0.5	90	4
T10		0.5	10	135	0	0.5	90	12
T11		0.5	10	135	0	0.5	90	22
T12		1.5	10	135	0	0.5	90	12
T13		2	10	135	0	0.5	90	12
T14		0.5	10	135	180	0.5	90	12
T15		0.5	10	135	0	0.5	-90	12
T16		1.5	7	135	0	0.5	90	12

表 3 各工况下系缆最大张力

工况编号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	工况编号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>
T1	81.7	79.5	45.9	<b>176.9</b>	93.8	90.6	T9	83.0	83.2	49.4	<b>181.2</b>	93.7	89.3
T2	82.8	79.5	45.9	<b>177.8</b>	93.8	92.7	T10	84.3	84.2	49.4	<b>183.4</b>	93.7	90.6
T3	84.2	79.5	47.3	<b>182.3</b>	93.8	90.7	T11	87.2	86.2	53.1	<b>191.4</b>	93.7	92.4
T4	97.4	110.7	89.7	<b>258.6</b>	116.8	113.7	T12	105.4	110.7	140.0	<b>373.1</b>	119.9	111.4
T5	111.1	113.8	124.8	<b>125.7</b>	97.1	123.3	T13	105.6	135.8	<b>184.2</b>	162.8	106.3	118.2
T6	84.7	79.2	41.6	<b>256.3</b>	93.2	90.6	T14	87.5	84.4	50.2	<b>264.2</b>	93.5	87.9
T7	78.8	79.5	44.1	<b>167.0</b>	91.3	90.7	T15	83.0	83.2	49.4	<b>181.2</b>	92.7	89.3
T8	85.1	88.8	53.5	<b>204.7</b>	100.2	116.4	T16	80.1	80.7	49.4	<b>184.0</b>	78.0	88.9

注：加粗为该工况下 6 条系缆张力最大值。

根据表 3 可以得出以下结论: 1) 在各种工况组合计算下, 6 条系缆绳最大张力均小于破断载荷, 满足码头安全系泊要求, 由于浪向均为  $135^\circ$ , 4 号缆绳长度较短, 最大张力较大。2) 对比工况 T2、T4、T5 和 T10、T12、T13 可以得出, 波浪周期一定时, 波高对系缆最大张力影响最大, 其中 3、4 号缆绳受影响较大, 波高增加, 除 4 号外其余缆绳最大张力呈上升趋势, 4 号缆绳最大张力先增大后减小。对比工况 T2、T6 和 T10、T14 可以得出, 相对于船首迎流, 船尾迎流时 1、4 号缆绳最大张力变大, 3、6 号缆绳最大张力变小, 2、5 号缆绳最大张力变化不大, 结合文献[10]中结论, 这与系缆绳布置方向相关, 倒缆在船尾迎流时张力变大。对比工况 T1、T2、T3 和 T9、T10、T11 可以得出, 风速对集装箱船系缆绳最大张力影响较小, 开风时, 风速增大, 缆绳最大张力略有增加。对比 T2、T7 和 T10、T15 可以得出, 拢风时船体靠近护舷, 缆绳松弛, 因而比开风时最大张力小。3) 对比满载和压载两种工况, 在其他载荷不变时, 由于横摇周期改变, 压载时 7 s 波浪周期系统最大张力较大, 满载时 10 s 波浪周期系统最大张力较大。相同风浪流载荷下, 满载工况 6 号缆绳最大张力减小, 其余缆绳最大张力均增加, 且满载时张力最大的缆绳张力普遍大于压载工况。结合图 5、6 可以看出满载工况下各自由度运动量增大, 导致系统最大张力变大。对比 T4、T12 和 T5、T13 可得波高变化对不同装载状态下的系统最大张力影响较为明显, 满载状态下, 3、4 号缆绳最大张力显著增大, 大大增加了系统断裂风险。

#### 4 结语

1) 横摇运动的 RAO 幅值相对其它运动更大, 是影响船舶系泊安全和装卸效率的主要因素。不同装载状态对横摇 RAO 的影响最大, 随船舶装载量的增大, 横摇的 RAO 幅值和固有周期也增大, 同时也将导致稳定性降低。

2) 同一装载状态下, 纵荡、横荡运动量大于

垂荡运动量, 运动频率较小, 横摇、艏摇运动量大于纵摇运动量, 艄摇运动频率较小。不同装载状态下, 集装箱船横摇、纵摇、纵荡运动量满载时更大, 横荡、纵荡、艏摇运动频率压载时更大。

3) 在风浪流载荷中, 有义波高对集装箱船系缆最大张力影响最大, 风速和风向影响较小, 涌流方向对系缆最大张力影响与系统布置方向有关。满载工况下, 6 号缆绳最大张力比压载时更小, 其余缆绳更大。且相同风浪流载荷下满载时张力最大的系统张力普遍大于压载工况, 说明装载量增大会增大系统断裂风险, 其中, 3、4 号缆绳变化最为明显。

#### 参考文献:

- [1] 王玉闯, 史国友, 李伟峰. 装卸重大件货物对船舶稳定性的影响[J]. 中国航海, 2018, 41(2): 81-85.
- [2] 祝昊, 高霄鹏. 基于三维势流理论的耐波性数值预报[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(13): 16-20.
- [3] 沈雨生, 刘堃, 杜齐鲁, 等. 波浪周期对系泊船舶运动影响试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2016, 31(2): 220-224.
- [4] 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.
- [5] 雷林, 刘添宇, 袁培银, 等. 基于 AQWA 的大型游船码头系泊水动力性能分析[J]. 中国水运, 2017(5): 41-44.
- [6] GIORGI G, RINGWOOD J V. Computationally efficient nonlinear Froude-Krylov force calculations for heaving axisymmetric wave energy point absorbers[J]. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2017, 3(1): 21-33.
- [7] 徐佳丽, 时健, 张弛, 等. 近 40 年中国近海波浪数据库的建立及极值分析[J]. 海洋工程, 2019, 37(6): 94-103.
- [8] 雷林, 刘添宇, 袁培银, 等. 基于 AQWA 的大型游船码头系泊水动力性能分析[J]. 中国水运, 2017(5): 41-44.
- [9] 代广树. 船舶靠泊过程中系缆作业仿真[J]. 上海海事大学学报, 2019, 40(4): 17-21.
- [10] 王果, 张雯, 何沁园, 等. 大型滚装船码头系泊能力数值仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(17): 15-21.