

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2015.02.009

## 南海浮式码头与系泊系统动力耦合分析\*

王建华, 万德成

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240, Email: sjtuwjh@gmail.com)

**摘要:** 南海部分海域由于海底地形限制, 运输船舶无法正常靠泊作业, 可采用成本较低的浮式码头供运输船舶停泊使用。该文应用基于开源平台 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对一座分布式系泊系统的浮式码头在入射波浪作用下的运动响应进行了数值模拟。文中系泊系统的求解采用基于集中质量法的动力分析方法, 给出了码头运动和系泊系统所受动力的时历曲线, 并且将结果同静力分析进行对比, 验证了采用动力分析方法的可靠性和必要性。

**关键词:** 浮式码头; 系泊系统; 动力分析; naoe-FOAM-SJTU 求解器

**中图分类号:** U661.1

**文献标识码:** A

## Dynamic coupling analysis of the mooring system and floating pier in the South China Sea

WANG Jian-hua, WAN De-cheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Because of the limitation of the underwater terrain in the South China Sea, low-cost floating piers could be employed as berth for shipping vessels. In this paper, a CFD solver for naval architecture and ocean engineering named naoe-FOAM-SJTU, which is based and developed on open source platform OpenFOAM, is applied to numerically simulate the motion response of a moored floating pier in regular incident waves. Mooring lines are calculated by the dynamic method, which

\* **收稿日期:** 2014-07-25(2014-11-03 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51411130131)、国家重点基础研究发展计划(973计划, 2013CB036103), 长江学者奖励计划(T2014099)和上海高校特聘教授岗位跟踪计划(2013022)

**作者简介:** 王建华(1988 - ), 男, 河北邢台人, 博士研究生。

**通信作者:** 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

**Received:** July 25, 2014 (Revised November 3, 2014)

**Project supported by foundations:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51379125, 51490675, 11432009, 51411130131), the Major State Basic Research Development Plan of China (973 Program, 2013CB036103), Chang Jiang Scholars Program(T2014099) and Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022)

**Biography:** WANG Jian-hua (1988-), Male, Ph. D. Candidate.

**Corresponding author:** WAN De-cheng, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

is based on the Lumped Mass Method. Time histories of the pier motions and tension forces exerted by the mooring system are presented and analyzed. Results are also compared to those calculated by the static method. Finally the conclusion are drawn that dynamic analysis of the mooring system is essential for the coupling analysis in ocean engineering.

**Key words:** floating pier; mooring system; dynamic analysis; naoe-FOAM-SJTU solver

## 引言

南海海底地形复杂, 近岸处水深变化剧烈, 运输船舶无法正常靠泊作业。解决该问题的传统方式为修建固定式码头, 即围海造田, 但该方式成本昂贵且不便实施; 另一种方案就是采用浮式码头, 利用系泊系统来限制码头在海上的运动, 保持其位置的稳定性, 使得运输船舶可以顺利停泊作业。

近年来, 关于浮式码头与系泊系统的相互作用, 国内外研究者都对其做了相关的研究。张荣钟<sup>[1]</sup>基于活动式集装箱码头的国际背景, 详细探讨了浮式集装箱码头的优势及可行性。颜锦<sup>[2]</sup>对浮式栈桥码头的环境载荷采用船舶的风浪流作用下的经验公式进行估算, 为浮式栈桥码头的设计提供了参考。刘远传等<sup>[3]</sup>针对入射波浪下浮式码头的运动响应进行了数值模拟, 给出了基于悬链线方法求解系泊系统的码头运动形式, 并且对系泊系统的受力进行了分析。张国权等<sup>[4]</sup>对于国内首座浮式端天津港浮式 LNG 码头的设计要点进行了详细探讨, 其研究成果可为同类工程提供参考和借鉴。Huang<sup>[5]</sup>利用集中质量法对海洋工程中采用的三维锚链进行了动力分析, 给出了数值预报结果。Brown 等<sup>[6]</sup>利用时域和频域方法分别对系泊缆绳和链索进行数值求解, 给出了在不同波浪条件下系泊系统的动力载荷幅值。

naoe-FOAM-SJTU<sup>[7]</sup>是基于开源平台 Open-FOAM 自主开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器。该求解器包含造波与消波模块<sup>[8]</sup>、六自由度运动模块和系泊系统模块, 通过求解流场和结构物六自由度运动方程, 可以对船舶<sup>[9-12]</sup>与平台等结构物<sup>[13-17]</sup>运动进行有效的预报。本文应用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对一座分布式系泊系统定位的浮式码头在入射波浪作用下的受力及运动情况作了数值模拟。对于系泊系统的求解采用基于集中质量法的动力分析方法, 并且同静力分析得出的结果进行了对比分析, 同时还给出了浮式码头运动和系泊系统各锚链的张力时历曲线, 验证了动力分析系泊系统的可靠性。

## 1 数学模型

### 1.1 流体控制方程

对于非定常、不可压的黏性流体, 采用流动的

控制方程为 RANS 方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)] \mathbf{U} = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) + f_\sigma + f_s \tag{2}$$

其中:  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{U}_g$  分别表示流场速度和网格节点速度;  $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$  为流场动压力, 等于总压力减去静水压力;  $\mathbf{g}$ 、 $\rho$  和  $\mu$  分别为重力加速度、流体密度和动力黏性系数;  $f_\sigma$  为表面张力, 只有在自由面处有影响, 其余位置取值为零;  $f_s$  为数值造波中消波区的源项, 仅对于消波区有效。

### 1.2 锚链力求解

本文中锚链力的求解采用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器里的系泊系统模块, 系泊系统模块中对于系泊链索的分析和求解方法如图 1 所示。

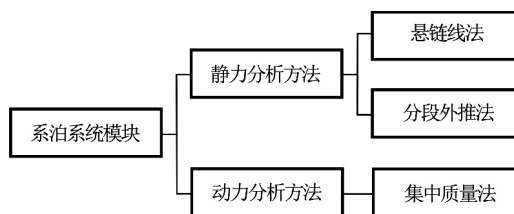


图 1 系泊系统模块  
Fig.1 Mooring system module

静力分析方法可分为悬链线方法和分段外推法。悬链线方法即忽略了链索拉伸及流场力的作用, 仅根据链索张力与重力做受力分析, 得出悬链线方程, 即

$$z = a \left( \cosh \frac{x}{a} - 1 \right) \tag{3}$$

式中:  $a = T_h / w$  为悬链线参数,  $T_h$  为任意截面处水平力,  $w$  为链索在水中单位长度重量 (单位: N/m), 通过系泊链索上下端点的相对位置即可求得系泊链索形状及张力。

静力分析方法中的分段外推法 (piecewise extrapolating method, 简称 PEM) 考虑到了系泊链索

的拉伸以及流场力的作用。由于链索元的平衡方程比较复杂，很难得到解析解，因此通常需要通过数值方法来求解，在此将系泊链索分为多段链索元，对每一段进行静力平衡分析，建立链索元的节点平衡方程求解得出响应的锚链力。后文中关于浮式码头系泊系统求解中的静力分析方法采用的就是这里介绍的分段外推法。

本文对于锚链力的求解采用基于集中质量法 (lumped mass method) 的动力分析方法。其与静力分析方法中的分段外推法的主要区别为：集中质量法考虑到了链索元实际运动过程中的动态效应。求解中将系泊链索离散为一组由  $N$  段无质量的弹簧 (链索元) 连接起来的  $N + 1$  个离散的集中质量 (节点)。作为一种动力学分析方法，集中质量法考虑了链索运动的加速度，建立起链索动力学平衡方程为：

$$M_i a_i = F_{T_i} - F_{T_{i-1}} + F_{D_i} + F_{A_i} - W_i \tag{4}$$

$$F_{D_{Ni}} = \frac{1}{2} \rho C_{DN} D u_N |u_N| \tag{5}$$

$$F_{D_{Ti}} = \frac{1}{2} \rho C_{DT} (\pi D) u_T |u_T| \tag{6}$$

$$F_{A_i} = \rho C_M V (-a_i) \tag{7}$$

其中： $M_i$  表示节点  $i$  的质量， $a_i$  为节点  $i$  的加速度矢量， $F_{T_i}$  与  $F_{T_{i-1}}$  分别为节点  $i$  所连接的链索元  $i$  与  $i-1$  产生的张力矢量， $F_{D_{Ni}}$ 、 $F_{D_{Ti}}$  与  $F_{A_i}$  分别为由链索元  $i$  与  $i-1$  分配给节点  $i$  的流体法向阻力、流体切向力和惯性力，流场中的流体惯性力和阻力由莫里森方程式 (5)、式 (6) 和式 (7) 得到。式 (7) 中的负号表示忽略水流速的相对加速度， $W_i$  为节点  $i$  所受重力。

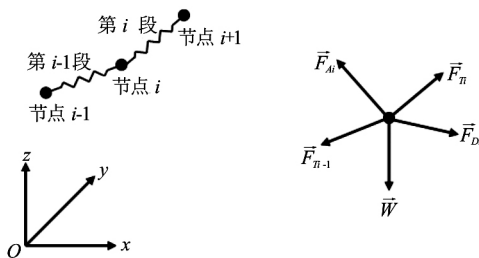


图 2 集中质量法节点受力分析示意图

Fig.2 Schematic diagram of force analysis using LMM method

### 1.3 六自由度运动

naoe-FOAM-SJTU 求解器中在研究浮体六自由度运动时，采用两个坐标系统，一个是大地坐标系，

另一个是局部坐标系。通常将运动方程建立在固结于浮体重心并随之运动的局部坐标系上，而外部载荷的计算与运动则定义在大地坐标系下。将求解得到的加速度沿时间积分得到浮体在在局部坐标系中的速度，然后由转换矩阵可得大地坐标系中的速度，将该速度沿时间积分可得出浮体的运动位移<sup>[8]</sup>。

本文中求解浮式结构物六自由度运动方程为

$$\frac{d}{dt}(mU) = F_{normal} + F_{shear} + F_{gravity} + F_{mooring} \tag{8}$$

式中物体受力可以分为三部分：流场力 (切向黏性力  $F_{shear}$  以及法向压力  $F_{normal}$ )、重力 ( $F_{gravity}$ ) 和系泊力 ( $F_{mooring}$ )。流场力通过对流场作用于物体的切向力和法向力沿物面积分得到，系泊力通过集中质量法求解得出。

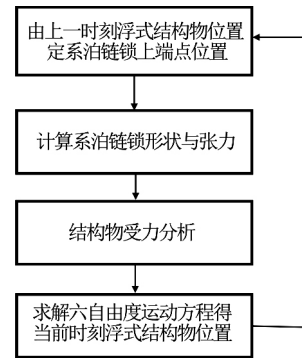


图 3 浮式结构物与系泊系统耦合求解流程

Fig.3 Coupling process between floating structure and mooring system

浮式码头同系泊系统求解时的耦合流程如图 3 所示。如图中所示，计算过程中，求解当前时刻结构物的受力时，使用上一时刻浮式码头以及系泊链索上端点的位置信息来计算系泊力，并以此来求解浮式码头当前时刻的六自由度运动。

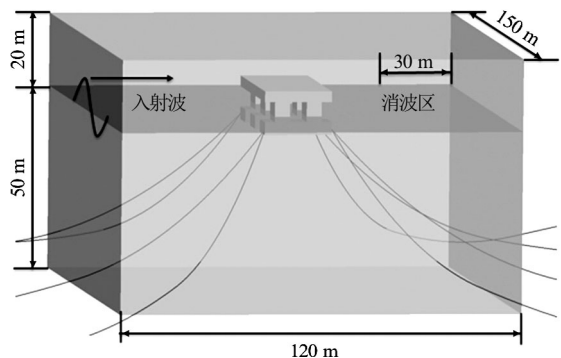


图 4 模型及计算域

Fig.4 Model and computational domain

表 1 浮式码头主要参数

Table 1. Main parameters of floating pier

主要参数	单位	数值
质量	kg	$2.331 \times 10^6$
吃水	m	5
重心位于水面以上高度	m	1.7511
横摇转动惯量 $I_{xx}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$5.9485 \times 10^9$
纵摇转动惯量 $I_{yy}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$1.1298 \times 10^9$
艏摇转动惯量 $I_{zz}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$6.2319 \times 10^9$

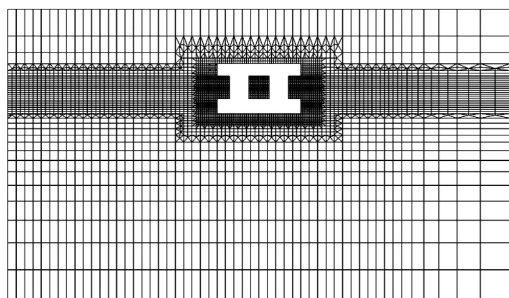


图 5 网格划分  
Fig.5 Mesh distribution

## 2 计算模型

### 2.1 模型及计算网格

本文计算的浮式码头模型和计算域如图 4 所示，浮式码头模型由甲板、6 根立柱和 3 个浮筒组成。码头沿流向长度为 20 m，垂直于流向的宽度为 50 m，吃水为 5 m，其他主要参数见表 1。计算域局部网格划分示意图如图 5 所示。计算域主尺度选取如图 4 所示，数值水池左侧入口为入射波浪边界，右侧选取 30 m 长度作为海绵消波区，用来抵消出口处的波浪反射。

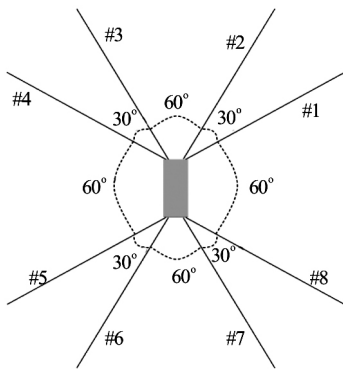


图 6 系泊布置  
Fig.6 Mooring arrangement

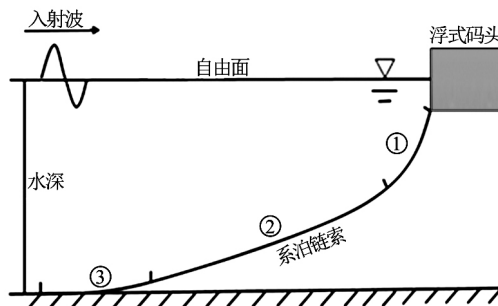


图 7 单根系泊链索示意图  
Fig.7 Schematic diagram of a single mooring line

表 2 系泊线主要参数

Table 2. Main parameters of mooring lines

参数	锚链	链索	锚链
分段	1	2	3
长度/m	80	400	180
等效直径/m	0.14	0.13	0.14
水中质量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	324.6	67.73	324.6
轴向刚度 EA/N	$1.69 \times 10^9$	$1.30 \times 10^9$	$1.69 \times 10^9$

### 2.2 系泊系统布置

本文根据浮式码头系泊方案设计系泊系统锚链，由 8 根锚链组成，每两根为一组，组间夹角为  $60^\circ$ ，组内夹角为  $30^\circ$ ，布置形式如图 6 所示。整个系泊系统呈对称分布，其中 #3 - #6 锚链处于迎浪面，其余锚链处于背浪面。由于每根系泊线长度为 660 m，考虑到整个系泊系统经济性，选取分段式系泊链索，第 1 段和第 3 段分别采用锚链材料，中间第 2 段采用缆索，单根系泊线示意图如图 7 所示，各段链索参数见表 2。

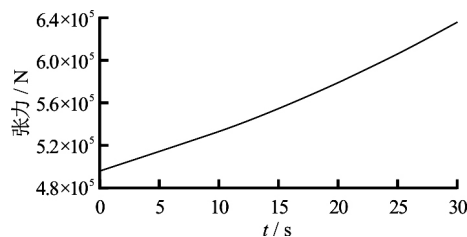


图 8 匀速运动下锚链张力曲线  
Fig.8 Mooring tension under uniform movement

## 3 计算结果

### 3.1 锚链测试

为验证布置的系泊系统的可行性，对本算例所采用的系泊系统首先进行测试验证。首先对单根锚链，设定该链索上端导缆孔以  $x(t) = 0.1t$  的规律运

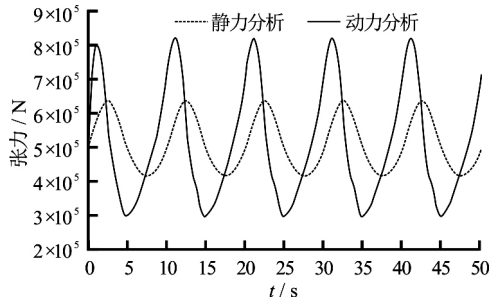


图9 正弦速度运动下不同方法张力曲线  
Fig.9 Tension comparison under sine movement

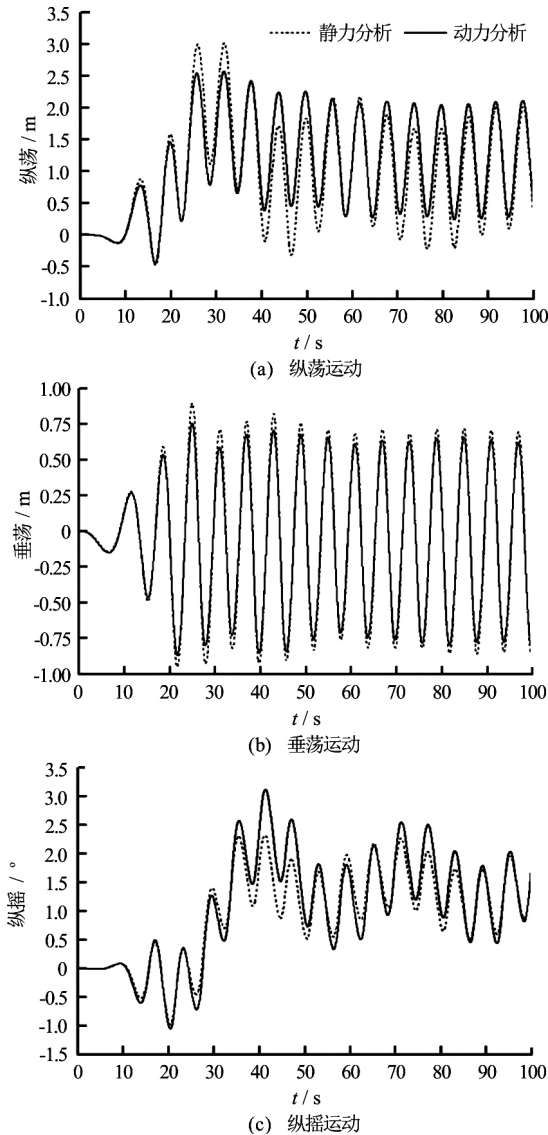


图10 不同分析方法对平台运动响应比较  
Fig.10 Time histories of platform motions by different methods

动,计算出单根链索的静力学特性曲线,如图8所示。然后设定链索导缆孔以  $x(t) = 3\sin(0.628 \times t)$  的规律运动,采用动力分析方法求解得出各时刻的锚链张力,同时基于静力分析方法求解相同条件下的锚链张力,两者得出的张力对比曲线如图9所示。

根据计算求解得出的结果可以看出,对应于匀

速运动条件下,链索的静力学特性曲线接近于一条直线,即在运动幅值为3m范围以内时基本满足胡克定律。而以振幅为3m的正弦运动条件下动力学方法计算得出的链索的载荷幅值远大于相同运动条件下的静力分析所得的结果,这点也验证了动力分析系泊系统的必要性。

### 3.2 码头运动

由于本算例考虑的是入射波浪条件下的运动响应,波浪入射方向与平台纵向一致,平台基本维持在中纵剖面内运动,因此计算中只放开了纵荡、垂荡和纵摇三个自由度。入射波浪取规则波,波高为3m,周期6s,波长为56.2m。计算时间步长设置为0.005s,总计算时间为100s。

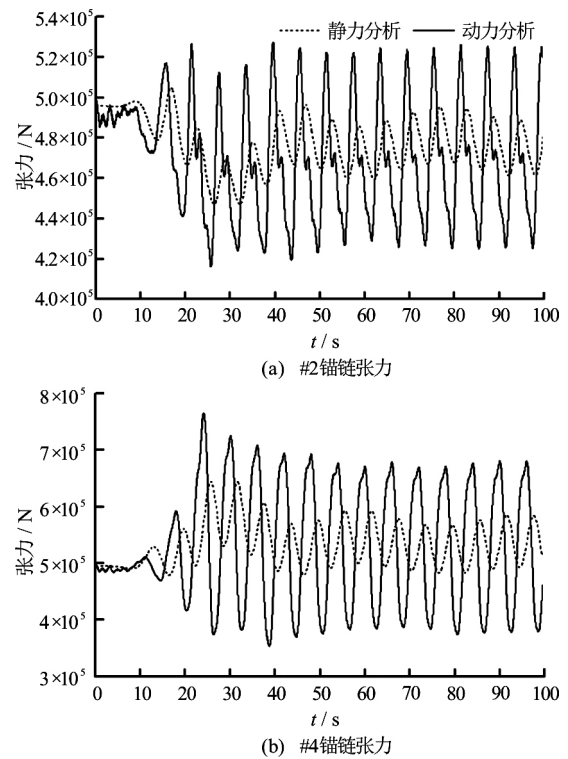


图11 锚链的张力变化曲线  
Fig.11 Tension time histories of mooring line #2 and #4

计算得到平台在该规则波下的运动时历曲线如图10所示。从图中可以看出,两种分析方法均对纵荡和纵摇的影响较大,而对于垂荡运动的影响很小。整个计算模型中,系泊系统主要提供平台水平方向的恢复力,而在垂直方向上,恢复力主要依赖于平台自身重力和浮力提供,因此用两种方法计算出的平台垂荡运动差别较小。从纵荡运动曲线可以看出,采用两种方法得出的运动结果中,独立于波频运动之外还有一个幅度更大的低频运动响应,该低频响应源于二阶低频波浪漂移力所引起的平台共振响应,用动力分析方法得出的这个响应衰减较快,而静力分析方法得出的低频响应较为明显,直至计算结束仍然存在。两种分析方法唯一的区别

是系泊系统的求解方法不同,采用动力分析方法计算锚链时,由于考虑到系泊链索加速度下的动态运动,得出的平台的系泊系统阻尼更大,即动力分析方法可以更真实的考虑到系泊链索的阻尼效应。

### 3.3 系泊张力

图 11 给出了 2 号和 4 号链索的张力时历曲线。从图中可以看出,处于迎浪方向上的#4 锚链张力幅值明显大于背浪方向上的#2 锚链张力幅值。从上文中的纵荡曲线可以看出,平台在迎浪条件下产生了一个水平方向的平均漂移,即浮式码头在迎浪方向上产生一个偏移,该方向的锚链持续处于拉伸状态,张力值也更大。此外,从不同的分析方法上看,采用动力分析方法得出的锚链张力幅值远远大于静力分析所得的结果,即动力载荷占有很大比重,因此在计算时不能忽略。

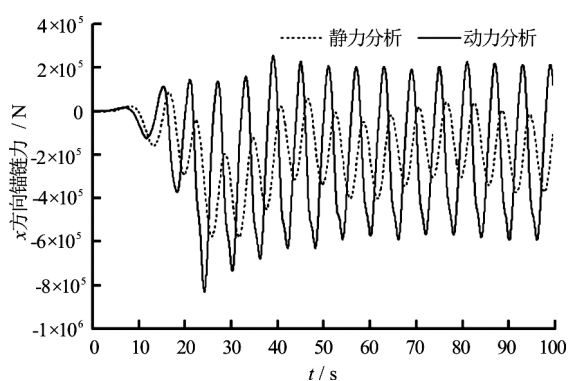


图 12 码头受到的沿  $x$  方向的系泊力

Fig.12 Mooring forces in  $x$  axis of floating pier

为了分析不同求解方法对浮式码头所受到的锚链力的影响,给出了分别由静力分析和动力分析这两种不同计算方法得出的浮式码头受到的由系泊系统提供的沿水平  $x$  方向的锚链力  $F_{mx}$  的时历曲线,如图 12 所示。从图中可以看出,通过静力分析方法求解得出的系泊张力幅值明显小于由动力分析方法求解得出的值,表明由动力分析方法求解得出的浮式码头在水平方向上的系泊回复力更大,能够更真实的反应出实际情况下的码头受力。同时,通过对比沿  $x$  方向的系泊张力曲线和浮式码头的纵荡曲线可以看出,在码头纵荡运动达到最大值时,  $F_{mx}$  值也达到最大,但是其方向与运动方向相反,这也从另一方面验证了系泊系统可通过提供水平方向的锚链力来抑制码头的纵荡运动。

## 4 结论

本文基于自主开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoc-FOAM-SJTU,数值模拟了一座分布式

系泊定位的浮式码头在入射波浪条件下的运动响应。通过基于集中质量法的动力学分析方法对系泊链索进行求解,给出了系泊链索的张力变化时历曲线以及浮式码头受到的系泊系统沿  $x$  方向的总的恢复力的时历曲线,并同基于分段外推法的静力学分析所得张力结果进行了对比分析,得出了动力分析系泊链索的必要性和可靠性。此外,给出了计算所得的浮式码头的运动时历响应曲线,并详细分析了同静力学方法计算所得结果差别的来源,得出了动力分析系泊链索可以更为真实的考虑到系泊阻尼,有效抑制纵荡运动方向上的低频响应的结论。本文计算所得结果展示了 naoc-FOAM-SJTU 求解器可以很好地处理系泊结构物在波浪条件下的运动响应,并且可以采用更符合实际的动力学方法分析系泊链索,可为浮式码头和系泊系统的设计提供相应的参考。

## 致谢

本文工作得到了工信部高技术船舶科研项目以及上海交通大学高性能计算中心的资助,在此一并表示衷心感谢。

## 参 考 文 献:

- [1] 张荣钟. 21 世纪的海上活动浮式集装箱码头[J]. 水运管理, 2003, 8: 35-39.  
ZHANG Rong-zhong. Offshore flexible container terminal in 21 century[J]. Shipping Management, 2003, 8: 35-39.
- [2] 颜锦. 浮式栈桥码头总体研究[D]. 天津, 中国: 天津大学, 2004.  
YAN Jin. General study of floating causeway pier[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2004.
- [3] 刘远传, 万德成. 锚泊浮式码头在波浪上的运动响应计算[C]. 第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议, 舟山, 浙江, 中国, 2013.  
LIU Yuan-chuan, WAN De-cheng. Calculation of motion response for a moored floating pier in waves[C]. Proceeding of the 12th National Congress on Hydrodynamics & 25th National Conference on Hydrodynamics, Zhoushan, Zhejiang, China, 2013.
- [4] 张国权, 刘新勇, 杨兴晏. 天津港南疆港区浮式 LNG 码头的设计要点[J]. 港工技术, 2013, 50(1): 9-12.  
ZHANG Guo-quan, LIU Xin-yong, YANG Xing-yan. Design characteristics of Nanjiang Harbor floating LNG

- terminal project of Tianjin Port[J]. Port Engineering Technology, 2013, 50(1): 9-12.
- [5] HUANG S. Dynamic analysis of three-dimensional marine cables[J]. Ocean Engineering, 1994, 21(6): 587-605.
- [6] BROWN D T, MAVRAKOS S. Comparative study on mooring line dynamic loading[J]. Marine Structures, 1999, 12(3): 131-151.
- [7] SHEN Z R, CAO H J, WAN D C. The manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [8] 查晶晶, 万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波[J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 1-12.  
ZHA Jing-jing, WAN De-cheng. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(3): 1-12.
- [9] SHEN Z R, WAN D C. RANS computation of added resistance and motions of a ship in head waves[J]. Journal of Offshore and Polar Engineering, 2013, 23(4): 263-271.
- [10] ZHA R S, YE H X, SHEN Z R, et al. Numerical study of viscous wave-making resistance of ship navigation in still water[J]. Journal of Marine Science and Application, 2014, 13(2): 158-166.
- [11] YE H X, SHEN Z R, WAN D C. Numerical prediction of added resistance and vertical ship motions in regular head waves[J]. Journal of Marine Science and Application, 2012, 11(4): 410-416.
- [12] 沈志荣, 叶海轩, 万德成. 船舶在迎浪中运动响应和波浪增阻的 RANS 数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2012, 27(6): 621-633.  
SHEN Zhi-rong, YE Hai-xuan, WAN De-cheng. Motion response and added resistance of ship in head waves based on RANS simulations[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(6): 621-633.
- [13] 马娟, 万德成. 典型标准水面船型阻力和黏性流场的计算[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(2): 178-193.  
MA Juan, WAN De-cheng. A numerical study of resistance and viscous flow around typical benchmark surface ship hull[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2011, 41: 178-193.
- [14] 曹洪建, 万德成, 杨驰. 三维溃坝波绕方柱剧烈流动的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2013, 28(4): 414-422.  
CAO Hong-jian, WAN De-cheng, YANG Chi. Numerical simulation of violent flow of 3-D dam-breaking wave around square cylinder[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(4): 414-422.
- [15] CAO H J, WAN D C. Development of multidirectional nonlinear numerical wave tank by naoe-FOAM-SJTU solver[J]. International Journal of Ocean System Engineering, 2014, 4(1): 52-59.
- [16] LIU Y C, WAN D C. Numerical simulation of motion response of an offshore observation platform in waves[J]. Journal of Marine Science and Application, 2013, 12(1): 89-97.
- [17] 曹洪建, 万德成. 基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建三维数值波浪水池[J]. 复旦大学学报: 自然科学版, 2013, 52(5): 627-634.  
CAO Hong-jian, WAN De-cheng. Three-Dimensional numerical wave tank based on naoe-FOAM-SJTU solver[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2013, 52(5): 627-634.