

南海浮式码头与系泊系统动力耦合分析

王建华, 万德成*

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。本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, 并且将结果同静力分析进行对比, 得出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

1 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, 成本昂贵并且不便实施; 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, 国内外都对其做了相关的研究。张荣钟^[1]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^[2]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^[3]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^[4]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, 可对同类工程提供参考和借鉴。Shan Huang^[5]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。D.T. Brown 等^[6]利用时域和频域方法分别对系泊缆绳和链锁进行数值求解, 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^[7]是基于开源平台 OpenFOAM 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、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^[8]与平台等结构物^[9,10]运动进行有效的预报。本文应用 naoe-FOAM-SJTU 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。文中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分析对比。同时还给出了浮式码头运动和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。

2 数学模型

2.1 流体控制方程

对于非定常、不可压、黏性流体，采用流动的控制方程为 RANS 方程：

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(U - U_g))U = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla U) + f_\sigma + f_s \quad (2)$$

其中， U 和 U_g 分别表示流场速度和网格节点速度； $p_d = p - \rho g \cdot x$ 为流场动压力，等于总压力减去静水压力； g 、 ρ 和 μ 分别为重力加速度、流体密度和动力粘性系数； f_σ 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。

2.2 六自由度运动^[8]

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

物体受力可分为三部分：流场力、重力和系泊力。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得，具体求解见 2.3 节。

2.3 锚链力求解

锚链力的求解采用基于集中质量法的动力分析方法。求解中将系泊缆索离散为一组由 N 段无质量的弹簧（缆索元）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锁运动的加速度，建立起链锁动力学平衡方程：

$$M_i \vec{a}_i = \vec{F}_{T_i} - \vec{F}_{T_{i-1}} + \vec{F}_{D_i} + \vec{F}_{A_i} - \vec{W}_i \quad (3)$$

$$\vec{F}_{D_i} = \frac{1}{2} \rho C_D A \vec{u} |\vec{u}| \quad (4)$$

$$\vec{F}_{A_i} = \rho C_M V (-\vec{a}_i) \quad (5)$$

式中， M_i 表示节点 i 的质量， \vec{a}_i 为节点 i 的加速度矢量， \vec{F}_{T_i} 与 $\vec{F}_{T_{i-1}}$ 分别为节点 i 所连接的链索元 i 与 $i-1$ 产生的张力矢量， \vec{F}_{D_i} 与 \vec{F}_{A_i} 分别为由链索元 i 与 $i-1$ 分配给节点 i 的流体阻力与惯性力，流场中的流体惯性力和阻力由莫里森方程 (4) 和式 (5) 得到，式 (5) 中的负号表示忽略水流速的相对加速度， \vec{W}_i 为节点 i 所受重力。

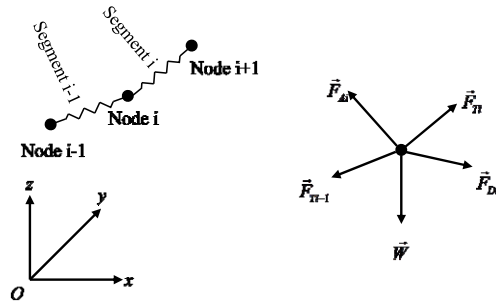


图1 集中质量法节点受力分析示意图

3 计算模型

3.1 模型及计算网格

本文计算的浮式码头模型和计算域如图2所示，浮式码头沿流向长度为20m，垂直于流向的宽度为50m，其他主要参数列于表1。计算域局部网格划分示意图如图3所示，数值水池左侧入口为入射波浪边界，右侧选取30m长的海绵消波区。

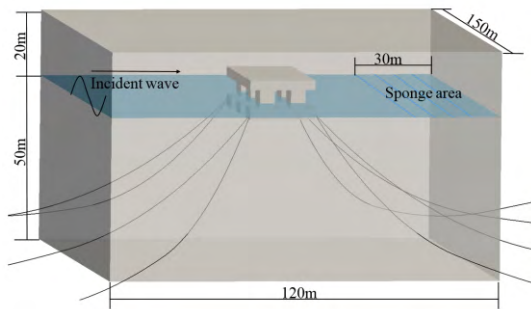


图2 模型及计算域

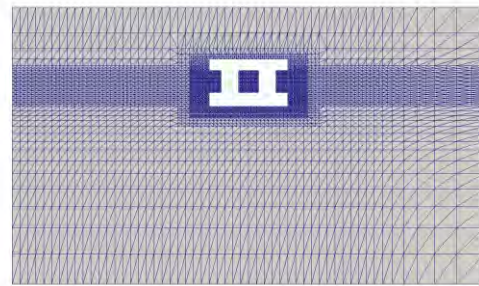


图3 网格划分

表1 浮式码头主要参数

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

3.2 系泊系统布置

本文中系泊系统锚链根据浮式码头系泊方案设计，如图4所示，由8根锚链组成，每两根为一组，组间夹角为 60° ，组内夹角为 30° 。由于系泊线长度为660m，考虑到整个系泊系统经济性，选取分段式系泊线，单根链索系泊示意图如图5，第1段和第3段分别

采用锚链材料，中间第 2 段采用缆索，各段链索参数列于表 2。

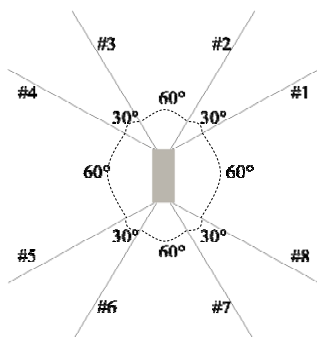


图 4 系泊布置

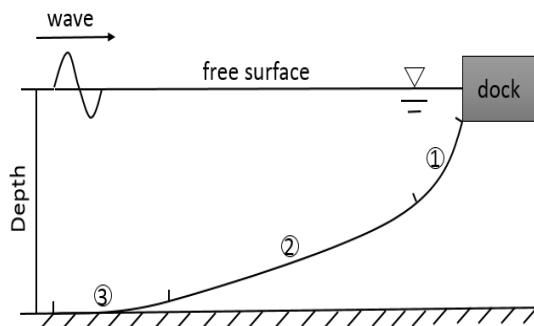


图 5 单根系泊链索示意图

表 2 系泊线主要参数

参数	锚链	缆索	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(kg/m)	324.6	67.73	324.6
轴向刚度 EA(N)	1.69×10^9	1.30×10^9	1.69×10^9

4 计算结果

4.1 锚链测试

为直观表现静力学与动力学方法的差异，针对本算例中的系泊系统，首先设定链锁上端导缆孔以 $x(t) = 0.1t$ 的规律运动，计算出单根链索的静力学特性曲线如图 6 所示。然后设定导缆孔以 $x(t) = 3\sin(0.628 \times t)$ 的规律运动，分别采用静力学方法和动力学方法计算得出各自的张力曲线如图 7 所示。

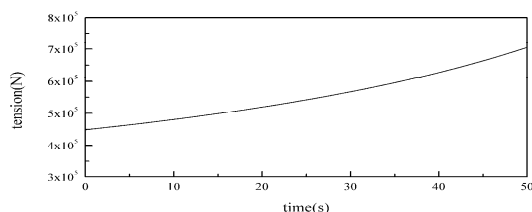


图 6 匀速运动下锚链张力曲线

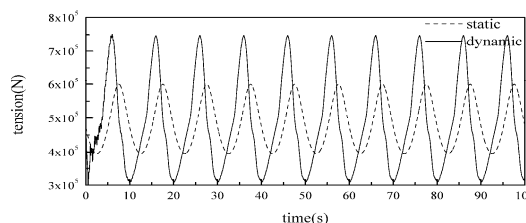


图 7 正弦速度运动下不同方法张力曲线

匀速运动条件下给出了链索的静力学特性曲线接近于一条直线，即在运动幅值为 5m 范围以内时基本满足胡克定律。而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静力分析所得的结果，这也验证了动力分析系泊系统的必要性。

4.2 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。最后计算得到平台在该规则波下的运动时历曲线如图 8 所示。

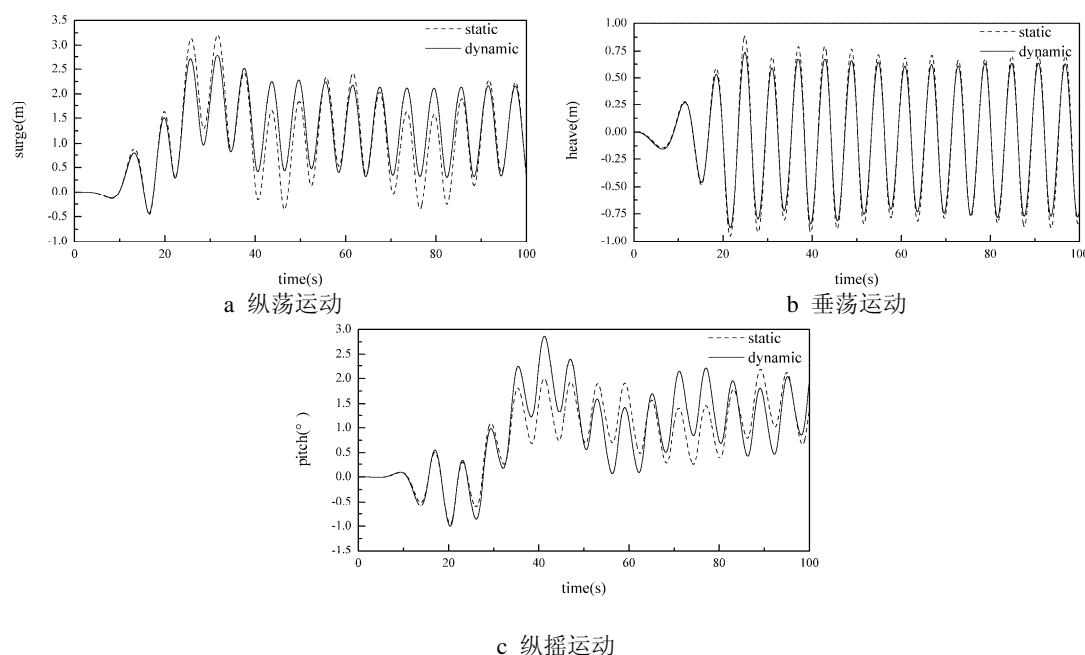


图 8 不同分析方法对平台运动响应比较

从图 8 中可以看出，不同的分析方法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提供，因此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，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，动力分析得出的这个响应衰减较快，而静力分析得出的低频响应较为明显，直至计算结束仍然存在，两种方法唯一的区别是系泊系统的求解方法不同，也就是说动力分析计算锚链时，由于考虑到系泊缆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。

4.3 系泊张力

图 8 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 号锚链张力幅值明显大于背浪方向上的 2 号锚链，之前的纵荡曲线表明，平台在迎浪条件下产生了一个水平方向的平均漂移，即迎浪方向上的锚链持续处于拉伸状态，张力值也更大；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，因此计算时不能忽略。

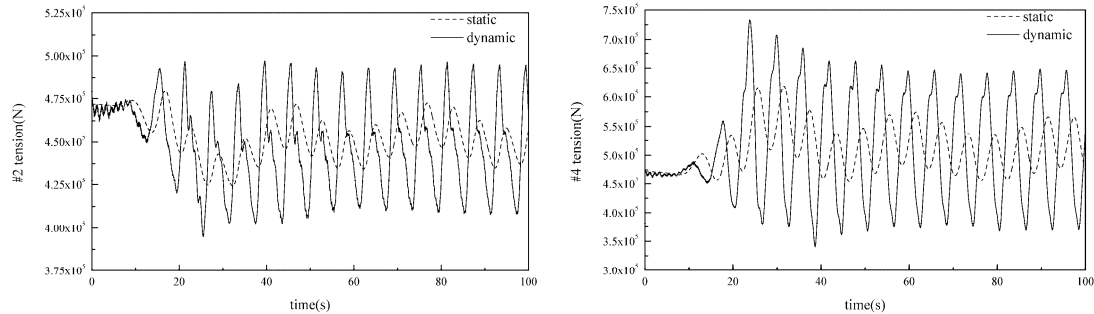


图8 #2和#4锚链的张力变化曲线

5 结论

本文基于自主开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器——naoe-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，同静力学分析所得张力结果进行对比分析，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考虑到了更为真实的系泊阻尼，可以有效抑制纵荡运动方向上的低频响应。计算所得结果展示了 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以很好的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，可为接下来的浮式码头和系泊系统的设计提供相应的参考。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目 (Grant No. 11072154, 51379125, 11272120)，上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划 (Grant No. 2013022)，国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (Grant No. 2013CB036103)，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 (HPC) 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. 水运管理, 2003.
- 2 颜锦. 浮式栈桥码头总体研究. 天津大学, 2004.
- 3 刘远传. 系泊浮式码头波浪上运动响应计算. 第12届全国水动力学会议, 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. 港工技术, 2013.
- 5 Shan Huang. Dynamic Analysis of Three-Dimensional Marine Cables. Ocean Engineering, 1994, 21(6): 587-605.
- 6 D.T. Brown, S. Mavrakos. Comparative study on mooring line dynamic loading. Marine structures, 1999, 12: 131-151.
- 7 Shen Z, Cao H, Ye H, etc. The manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU. Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- 8 Shen Z, Wan D. RANS computation of added resistance and motions of a ship in head waves. Journal of

- Offshore and Polar Engineering, 2013, 23(4): 263-271.
- 9 Cao H, Liu Y, Wan D, etc. Numerical simulation of solitary wave impact on fixed offshore platform. The 7th International Workshop on Ship Hydrodynamics, 2011, 138-143.
- 10 Liu Y, Wan D. Numerical simulation of motion response of an offshore observation platform in waves. Journal of Marine Science and Application, 2013, 12(1): 89-97.

Dynamic coupling analysis of a moored floating pier in waves

WANG Jian-hua, WAN De-cheng

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 is based on the Lumped Mass Method. Curves 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 we draw the conclusion 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.