

锚泊浮式码头在波浪上的运动响应计算

刘远传, 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, 上海 200240,

*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 部分海域由于地形限制, 可采用成本较低的浮式码头供运输船舶停泊使用。本研究应用基于开源平台 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器——naoe-FOAM-SJTU, 对一座带锚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。文中给出了浮式码头六自由度运动和锚泊系统作用力的时历曲线, 同时绘制了锚泊系统中多条锚链的张力曲线, 并对结果进行了分析。

关键词: 浮式码头; 锚泊系统; 运动响应; naoe-FOAM-SJTU 求解器; 六自由度运动

1 引言

部分海域由于受到海底地形影响, 水深在靠近岛屿附近时迅速下降, 因而运输船舶无法接近停泊。为解决该问题, 如果采用修建固定式码头的方法, 需要填海造地, 成本较高; 可是如果采用修建浮式码头的方案, 辅以锚泊系统来保证其位置相对固定, 则可在有效降低成本的同时, 使得船舶可以顺利靠泊。

近年来, 国内外都对浮式码头作了相关研究。颜锦^[1]根据浮式栈桥码头系统任务需求和工作原理, 对整个系统的总体规划进行了研究。王翔等^[2]采用耦合法建立了浮式码头与靠泊船碰撞的仿真模型, 模拟了船舶与浮式码头碰撞的过程。江涛^[3]研究了浮式 LNG 接收终端 (FSRU) 的靠泊方案以及码头设计。Lee 等^[4]对带立柱支持的二维浮式码头在入射波作用下的受力和运动响应问题作线性化处理, 得到了理论解。Tajali 和 Shafieefar^[5]分析了柔性或刚性连接的多体浮式码头在入射波浪下的水动力及结构物运动。

naoe-FOAM-SJTU^[6]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锚泊系统模块, 通过求解流场和结构物六自由度运动方程, 可用于在数值波浪水池中模拟造波和消波^[7]、船舶^[8]与平台等结构物^[9-10]运动等。本研究应用 naoe-FOAM-SJTU 对一座由锚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仿真模拟。文中给出了浮式码头六自由度运动和锚泊系统作用力的时历曲线, 同时绘制了锚泊系统中多条锚链的张力曲线, 并对结果进行了分析。

2 数学模型

2.1 流体控制方程

对于不可压、黏性流体，其控制方程为：

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) \quad (2)$$

式中， \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} 、 ρ 和 μ 分别为重力加速度、流体的密度和动力黏性系数。

计算中，采用有限体积法 (FVM) 对控制方程进行离散；应用 PISO 算法处理速度、压力耦合；对于自由面的捕捉，采用流体体积法 (VOF)；为模拟物体的运动，求解器还采用了动网格变形技术。

2.2 物体六自由度运动方程

如果在流场中放入物体并放开物体自由度，当入射波浪与其作用时，物体会由于受力产生相应的运动。这里涉及两个坐标系：大地固定坐标系与物体运动坐标系。在运动坐标系下，可建立物体的六自由度运动方程^[11]：

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u} = X/m + vr - wq + x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) - z_g(pr + \dot{q}) \\ \dot{v} = Y/m + wp - ur + y_g(r^2 + p^2) - z_g(qr - \dot{p}) - x_g(qp + \dot{r}) \\ \dot{w} = Z/m + uq - vp + z_g(p^2 + q^2) - x_g(rp - \dot{q}) - y_g(rp + \dot{p}) \\ \dot{p} = \frac{1}{I_x} \{ K - (I_z - I_y)qr - m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] \} \\ \dot{q} = \frac{1}{I_y} \{ M - (I_x - I_z)rp - m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] \} \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z} \{ N - (I_y - I_x)pq - m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] \} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中， m 是物体的质量； I_x 、 I_y 和 I_z 分别为物体绕运动坐标系三根坐标轴的转动惯量； u 、 v 和 w 分别为物体在运动坐标系中线速度的三个分量，其上的点表示对时间求导，即加速度； p 、 q 和 r 则分别为物体在运动坐标系中角速度的三个分量； x_g 、 y_g 和 z_g 为物体重心在运动坐标系中的坐标值。 X 、 Y 、 Z 、 K 、 M 和 N 分别表示物体在运动坐标系中所受力和力矩，需要从固定坐标系进行坐标变换得到。由上式可以计算出运动坐标系中的加速度，进而求得速度，再对其作积分运算可以得到运动坐标系中的位移，同样通过坐标变换可以得到固定坐标系中的位移。

物体受力可分为三部分：流场力、重力和锚泊力。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；锚泊力通过准静态方法^[12]求得，即把各瞬时的锚泊线状态看作是相应的定常状态作静力分析得到其张力值。选用的锚泊线计算模型为悬链线模型，通过直接求解悬链线方程计算得到锚泊力，忽略了锚泊线的拉伸、流场力和动力响应。虽然悬链线模型比较简单，但是在水深较浅、物体运动幅度较小时是较好的近似。

3 计算模型

3.1 模型及计算域

本研究计算选用浮式码头由三部分组成：甲板、六根立柱和三个浮筒。码头尺寸如图 1 所示，并将主要参数列于表 1。整个计算域示意图如图 2 所示。码头置于数值水池中心，波浪由水池左侧入射，右侧有 30 m 长的海绵消波区^[7]。

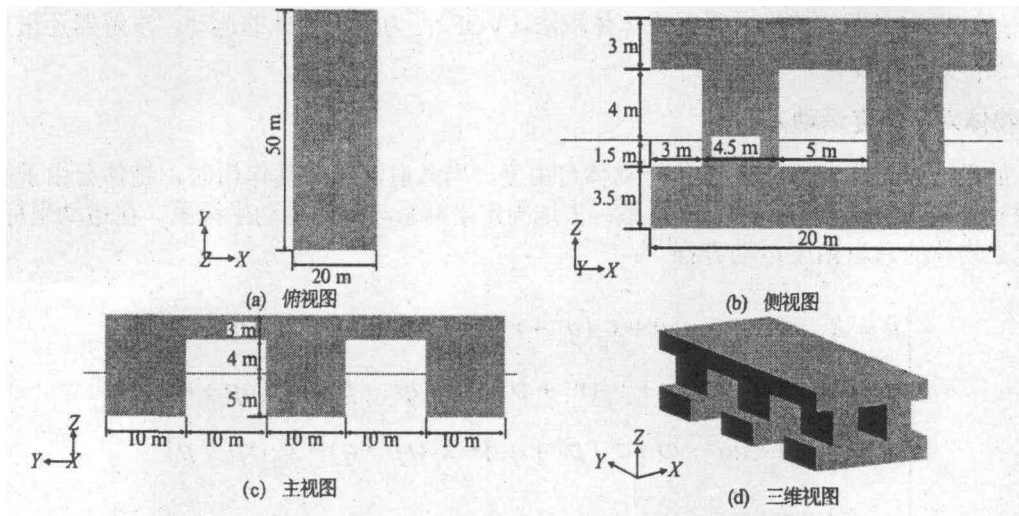


图 1 浮式码头示意图

表 1 浮式码头主要参数

主要参数	单位	数值
质量	kg	2.2586×10^6
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 锚泊系统布置

浮式码头配备的锚泊系统由 8 根锚链组成，每 2 根为一组。每组锚链间夹角为 60° ，组内夹角为 30° ，如图 3 所示。每根锚链的布置半径为 150 m，水中单位长度重量为 3000 N，给定垂向预张力值为 3.0805×10^5 N。需要说明的是，由于锚泊系统的存在，码头的浮力并不等于其重力，而是同时由重力和锚泊力来平衡。

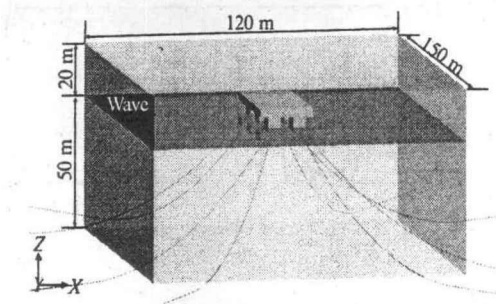


图2 计算域示意图

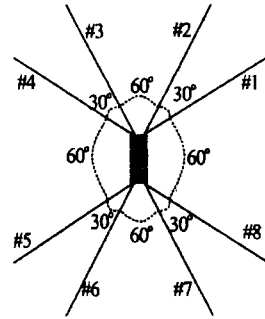


图3 锚泊系统布置示意图

4 计算结果

4.1 数值造波

计算码头运动之前，有必要验证数值水池所造波浪是否满足要求。求解器采用的是给定入口边界速度的造波方式。要求的入射波为规则波：波高为 3 m，周期为 6 s，波长为 56.2 m。在水池中心放置码头处设一测波点，该点波高的时历曲线如错误！未找到引用源。所示。从图中可以看出，入射波浪峰值与谷值均达到 1.5 m，满足要求。

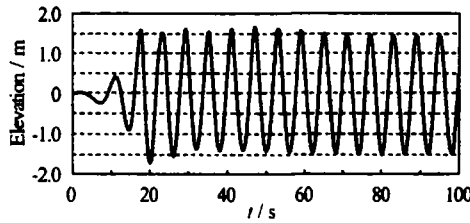


图4 水池中心测波点波高时历曲线

4.2 码头运动

图 5 为码头的六自由度运动曲线。由于码头处于迎浪状态，故只有纵荡、垂荡和纵摇三个自由度运动比较剧烈，而横荡、横摇和艏摇三个自由度运动则非常微小。

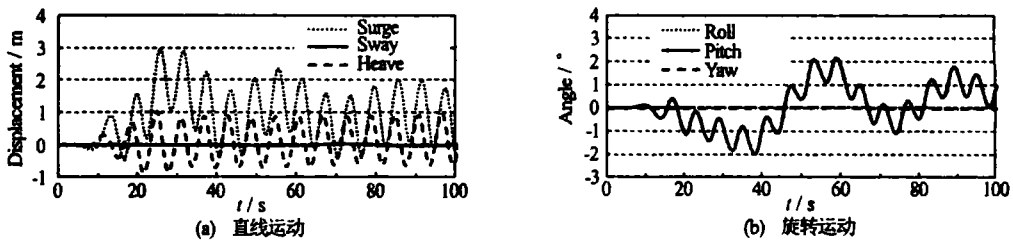


图5 码头运动曲线

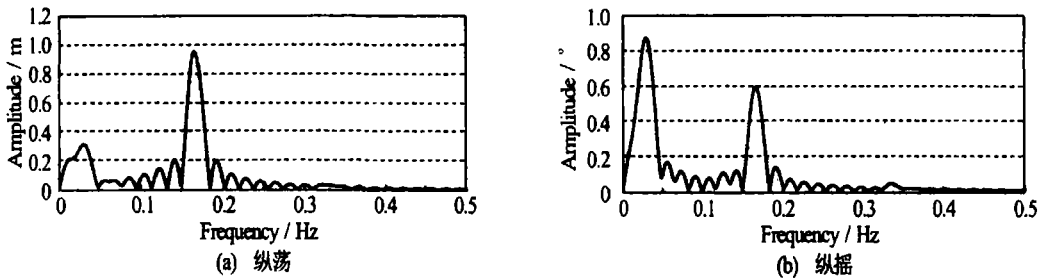


图 5 运动幅值与频率关系曲线

从图 5 中可以看出，垂荡运动曲线较为平稳，而纵荡和纵摇运动都因受到二阶力影响，曲线变化较大。对这两个运动的数据作傅里叶变换，可以得到不同运动频率对应幅值与频率的关系曲线，如错误!未找到引用源。所示。除以波浪入射频率 0.1667 Hz 为频率，幅值为 0.9581 m 的一阶运动外，纵荡还存在二阶运动，其频率为 0.031 Hz（周期为 32.26 s），幅值为 0.3151 m。纵摇一阶运动幅值为 0.5972 m，而纵摇的二阶运动占主导（从运动时历曲线也可以看出），频率和幅值分别为 0.0294 Hz（周期为 34.01 s）和 0.8791 m。

由于入射波浪波高相对码头尺寸较大，模拟过程中还出现了波浪砰击下甲板的强非线性现象（图 7）。

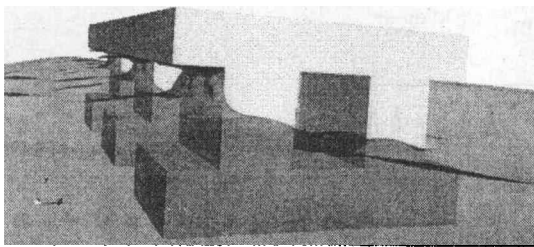


图 6 波浪砰击下甲板

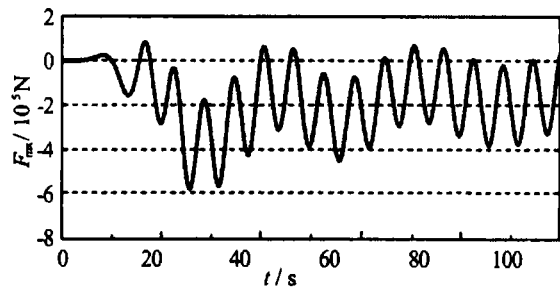


图 7 锚泊系统作用力的 x 方向分量 F_{mx}

4.3 锚泊力

图 8 为锚泊系统对码头作用力的 x 方向分量 F_{mx} 的时历曲线。比较该曲线与错误!未找到引用源。中的纵荡曲线，可以发现 F_{mx} 与纵荡成正比：当码头纵荡达到最大值时， F_{mx} 也达到最大值，但是方向与运动相反。这也验证了锚泊系统起到了抑制码头纵荡的作用。

错误!未找到引用源。给出了锚链的张力曲线。由于锚泊系统关于码头的中纵剖面对称，而该平面外的运动又非常微小，故只给出了编号为#1 到#4 的锚链张力值。从图 9 中可以看出，#3 和#4 锚链所承受张力值比#1 和#2 大，这是因为码头在波浪作用下朝#1 和#2 方向产生了偏移。对于#4 锚链，最大张力值达到 5.81×10^5 N，比预张力值 4.1×10^5 N 高出约 42%，说明码头运动对锚链张力值有较大影响。

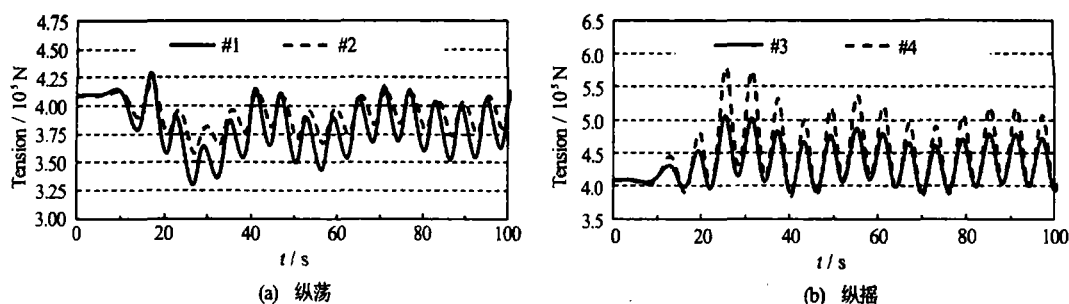


图 8 #1-#4 锚链张力曲线

5 结论

本研究应用基于开源平台 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器—naoe-FOAM-SJTU, 数值模拟了一座配备有锚泊定位系统的浮式码头在入射波浪作用下的运动响应。为验证所造波浪满足要求, 文中首先作了数值波浪水池中的造波试验, 得到满意结果; 在此基础上, 计算出浮式码头的六自由度运动响应, 给出相应时历曲线, 并对受到二阶力影响的纵荡和纵摇响应数据作傅里叶变换, 得到了二阶运动的频率和幅值, 同时观察到波浪砰击下甲板现象; 此外, 绘出锚泊系统作用力的 x 方向分量的时历曲线, 分析了该值与纵荡运动的关系, 验证了锚泊系统抑制码头纵荡运动的作用, 还得到并分析了锚泊系统中多条锚链的张力变化。所得结果展示了 naoe-FOAM-SJTU 数值模拟锚泊浮式结构物在波浪中的运动响应的巨大潜力, 并可为将来浮式码头及其锚泊系统设计提供参考。

致谢

本工作得到国家自然科学基金项目 (Grant No. 11072154), 海洋工程国家重点实验室自主研究课题基金 (Grant No. GKZD010059), 上海东方学者人才计划基金 (No. 2008007), 以及国家 973 项目子课题 (2013CB036103) 的资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 颜锦. 浮式栈桥码头总体研究. 天津大学, 2004.
- 2 王翔, 黄太刚, 宁小倩. 船舶与浮式码头碰撞过程仿真. 船舶, 2009, (03): 55-60.
- 3 江涛. 浮式 LNG 接收终端 (FSRU) 靠泊方案及码头设计研究. 大连海事大学, 2012.
- 4 Lee H H, Chen L-Y, Weng W-K, etc. The prediction of the dynamic and structural motions of a floating-pier system in waves. Ocean Engineering, 2007, 34(7): 1044-1059.
- 5 Tajali Z, Shafieefar M. Hydrodynamic analysis of multi-body floating piers under wave action. Ocean Engineering, 2011, 38(17-18): 1925-1933.

- 6 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.
- 7 查晶晶, 万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波. 海洋工程, 2011, 29(3): 1-12.
- 8 Shen Z, Wan D. RANS Computations of Added Resistance and Motions of Ship in Head Waves. Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), 2012. 1096-1103.
- 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.
- 11 Carrica P M, Wilson R V, Noack R W, etc. Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids. Computers & fluids, 2007, 36(9): 1415-1433.
- 12 缪国平. 挠性部件力学导论. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.

Calculation of motion response for a moored floating pier in waves

LIU Yuan-chuan, WAN De-cheng*

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240
*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn)

Abstract: For some sea areas limited by the underwater terrain, 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 waves. Curves of all the 6DOF motions, forces exerted by the mooring system are presented and analyzed, as well as tension force curves of several mooring lines in the mooring system.

Key words: Floating pier; Mooring system; Motion response; naoe-FOAM-SJTU solver; 6DOF motion.