

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.03.008

彭泽宇, 刘祚秋, 富明慧. 内河锚泊浮式码头水动力性能分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(3): 53-58. (PENG Ze-yu, LIU Zuo-qiu, FU Ming-hui. Hydrodynamic analysis of a moored floating pier on an inland river[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(3): 53-58.)

# 内河锚泊浮式码头水动力性能分析

彭泽宇, 刘祚秋, 富明慧

(中山大学 工学院 应用力学与工程学系, 广东 广州 510006)

**摘要:**近年来内河水路运输飞速发展,浮式码头以其自身优势多运用于潮差较大的河段,由于浮式结构受风浪等环境因素影响较大,故对其水动力性能的研究至关重要。应用基于三维势流理论的水动力分析软件 ANSYS/Workbench/AQWA 建立浮式码头数值仿真计算模型,对浮式码头分别进行了频域分析和时域分析,考虑 JONSWAP 波浪谱与 API 风谱联合作用下浮式码头的运动响应,研究了不同的码头宽度和吃水深度对其水动力性能的影响。分析研究结果表明,浮式码头固有周期大约为 3~8 s,设计时需注意避免固有周期与波浪遭遇周期接近,以免发生共振;浮式码头在高频区域内稳定性较好,但耐波性较差;适当增加浮式码头宽度、减小吃水深度可以减小其运动响应幅值,研究结果可为锚泊浮式码头的设计提供理论参考。

**关键词:**浮式码头;水动力分析;时/频域分析;运动响应

**中图分类号:** U656.1<sup>+</sup>17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)03-0053-06

我国内河某些河段由于受到河床地形、潮汐或风浪影响,近岸处水深变化剧烈,运输船舶无法正常停泊。对于这种潮差较大造成装卸作业困难或有人员上下要求的码头,通常采用浮式码头。

近年来,国内外学者都对浮式码头做了相关研究。其中,刘远传等<sup>[1]</sup>针对入射波浪下浮式码头的运动响应进行了数值模拟,给出了浮式码头六自由度运动的时历曲线,并且对系泊系统的受力进行了分析;王建华等<sup>[2]</sup>针对南海浮式码头与系泊系统进行了动力耦合分析,采用基于质量法的动力分析方法,并且将结果同静力分析进行对比;郑治国等<sup>[3]</sup>讨论了浮式码头不同模块的组成方案及其运动特性,并给出了设计时需要注意的问题;肖越等<sup>[4]</sup>在频域内利用数值方法研究了锚泊浮体在风、浪、流联合作用下的运动响应和锚链线张力变化;H. H. Lee 等<sup>[5]</sup>对二维浮式码头在波浪作用下的受力和运动响应求解并得到了理论解;此外,Z. Tajali<sup>[6]</sup>, I. Diamantoulaki<sup>[7]</sup>, G. V. Oortmerssen 等<sup>[8-11]</sup>也针对浮式码头的不同问题进行了分析研究。

AQWA 是全球权威的船舶与海洋工程商业软件之一,主要用于满足各种结构流体动力学特性评估。本文采用多体水动力软件 ANSYS/Workbench/AQWA 建立浮式码头的计算模型,并进行水动力分析,研究了风浪、吃水深度、模块宽度对码头运动响应的影响,为实际工程中浮式码头的设计提供参考。

## 1 理论基础

对于不可压缩的理想流体,在无旋场中,其控制方程可以简化为 Laplace 方程:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

假定自由表面的波浪运动及多体浮式码头的运动是微幅的,因此可以认为速度势为线性。应用叠加原

收稿日期: 2014-11-18

基金项目: 国家自然科学基金委中俄 NSFC-RFBR 协议项目(10811120012);国家自然科学基金资助项目(11172334)

作者简介: 彭泽宇(1990—),男,湖北洪湖人,硕士研究生,主要从事水运工程设计与优化。

E-mail: 503185042@qq.com 通信作者: 刘祚秋(E-mail: eeslzq@mail.sysu.edu.cn)

理,可将总速度势分解为入射波速度势、绕射速度势和辐射速度势:

$$\varphi = \varphi^I + \varphi^D + \varphi^R \tag{2}$$

式中: $\varphi^I$  为入射波速度势,不计浮式码头存在对入射波流场影响; $\varphi^D$  为绕射速度势,为静止浮式码头存在于流场中对流场速度分布所产生的影响; $\varphi^R$  为辐射速度势,计算浮式码头的振荡对流场速度分布的影响。

根据三维势流理论求得入射势、绕射势和辐射势之后,利用伯努利方程:

$$P = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \rho g z \tag{3}$$

可以求出流场内的压力分布,将其沿浮式码头湿表面积分,即可得到浮式码头受到的一阶波浪力:

$$f_i = - \int_s P n_i ds = - \int_s i \omega \rho (\varphi^I + \varphi^D) n_i ds \tag{4}$$

式中: $f_i$  为第  $i$  个自由度的一阶波浪力; $n_i$  为第  $i$  个自由度的法向。

浮式码头在频域下的一阶运动方程为:

$$(m_{ij} + \mu_{ij}) \ddot{x}_j + \lambda_{ij} \dot{x}_j + c_{ij} x_j = f_i (i, j = 1, 2, \dots, 6) \tag{5}$$

式中: $m_{ij}$  为质量或惯性矩; $\mu_{ij}$  为附加质量; $\lambda_{ij}$  为阻尼系数; $c_{ij}$  为回复力系数; $x_j$  为运动幅值。

求解该方程就可得到浮式码头在固定频率规则波作用下的运动响应。AQWA 中 Hydrodynamic Diffraction 模块即为频域计算模块,将其计算求得的浮式码头在频域内的水动力参数,以及给定的风、浪、流等外载荷作用力数据导入 Hydrodynamic time response 模块,应用 Cummins 脉冲理论,即可进行时域分析。时域下浮式码头的运动方程为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t, x, \dot{x}) \tag{6}$$

$$F(t, x, \dot{x}) = F_s + F_{wf} + F_{sv} + F_m \tag{7}$$

式中: $M$  为浮式码头质量矩阵; $C$  为阻尼矩阵; $K$  为刚度矩阵; $x$  为位移矢量; $F$  为激励力矢量; $F_s$  为静量力; $F_{wf}$  为波频力; $F_{sv}$  为低频慢漂力; $F_m$  为系泊力。

## 2 计算模型

本文假设浮式码头为刚体且不透水,水深 7 m,采用四缆对称系泊方式,缆绳在水平面上投影与  $x$  轴和  $y$  轴均成 45°角,分别考虑不同的码头宽度和吃水深度。浮式码头主尺度分别为:长 108 m,宽 5, 7, 9 m;高 2.6 m,吃水深度 1.3, 1.5, 2.0 m,重心高度 0.8 m,坐标系定义如图 1,环境参数如表 1。

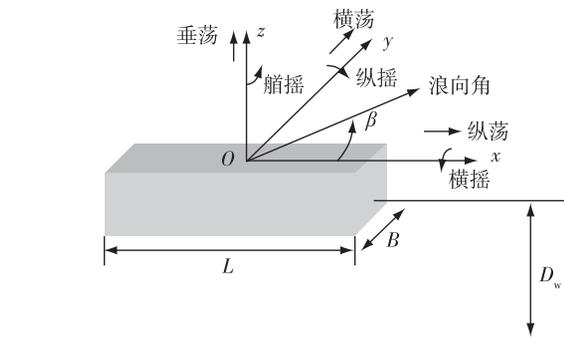


图 1 坐标系及环境力方向定义

Fig. 1 Definition of coordinate system and environment forces

针对码头结构特点,采用自由划分功能对其进行有限元网格划分,设定最大单元尺寸 1 m,最小容忍尺寸 0.5 m,最大允许频率 3.826 rad/s,网格单元数 6 240 个。在划分完网格后,输入 Hydrodynamic Diffraction 模块与 Hydrodynamic time response 模块进行频/时域计算。

表 1 主要环境参数

Tab. 1 Main environmental parameters

风			不规则波			
风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	风向/( $^{\circ}$ )	风谱	有义波高/ m	峰值频率/ ( $rad \cdot s^{-1}$ )	波谱	浪向/( $^{\circ}$ )
10	0~90	API	1.5	1.4	JONSWAP( $\gamma = 3.3$ )	0~90

### 3 计算结果分析

#### 3.1 频域分析

应用三维势流理论,计算得到浮式码头在不同浪向角和频率的规则波作用下的响应。图2给出了码头垂荡、纵摇、横摇的幅值响应算子 RAO 随浪向角和频率变化的情况,可见,垂荡固有频率为  $1.5 \text{ rad/s}$ ,固有周期为  $4.2 \text{ s}$ ;纵摇固有频率为  $0.8 \text{ rad/s}$ ,固有周期为  $7.8 \text{ s}$ ;横摇固有频率为  $1.6 \text{ rad/s}$ ,固有周期为  $3.9 \text{ s}$ ,当固有频率与遭遇频率接近时,码头将处于共振区,由此导致运动响应剧烈,所以,在设计时应特别注意避开常见波浪周期内引起的共振。由于码头外形并非双向曲面,当波浪波长大于  $40 \text{ m}$ ,其垂荡运动显著增大,这表明其耐波性能较差。

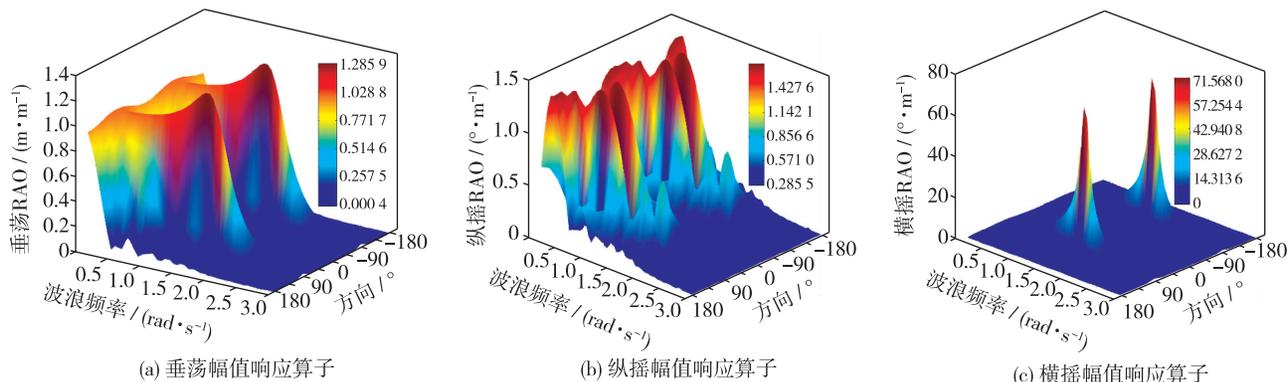


图2 不同浪向角、频率下码头幅值响应算子值

Fig. 2 Response amplitude operation in waves with different wave headings and frequencies

图3给出了不同宽度码头在不同频率波浪垂直入射条件下的垂荡、横摇和横荡幅值响应算子,计算结果显示,浮式码头垂荡、横摇和横荡的峰值频率和峰值振幅随着码头宽度的增加而减小,其原因是由于浮式码头宽度的增加导致相应的质量增加,从而增加了水动力系数。考虑到宽度的影响,在实际设计中,采用较大宽度的浮式码头更好。

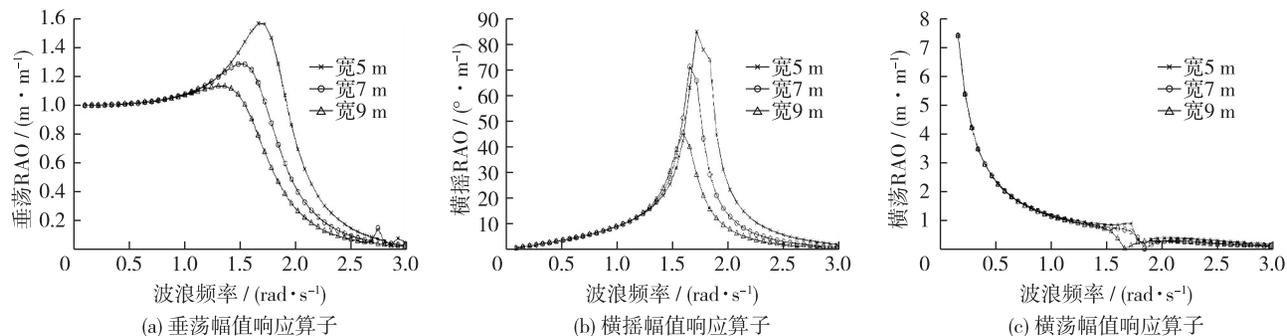


图3 不同宽度的码头在横浪中幅值响应算子值(吃水  $1.5 \text{ m}$ )

Fig. 3 Response amplitude operation in beam waves with different dimensions (draught of  $1.5 \text{ m}$ )

图4给出了不同吃水深度码头在不同频率波浪垂直入射条件下的垂荡、横摇和横荡幅值响应算子,计算结果显示,浮式码头垂荡、横摇和横荡运动峰值振幅随着码头吃水深度的增加而增加,但峰值频率随着码头吃水深度的增加而减小。考虑到吃水深度的影响,在实际设计中,浮式码头吃水深度不宜过大,以避免处于共振区。

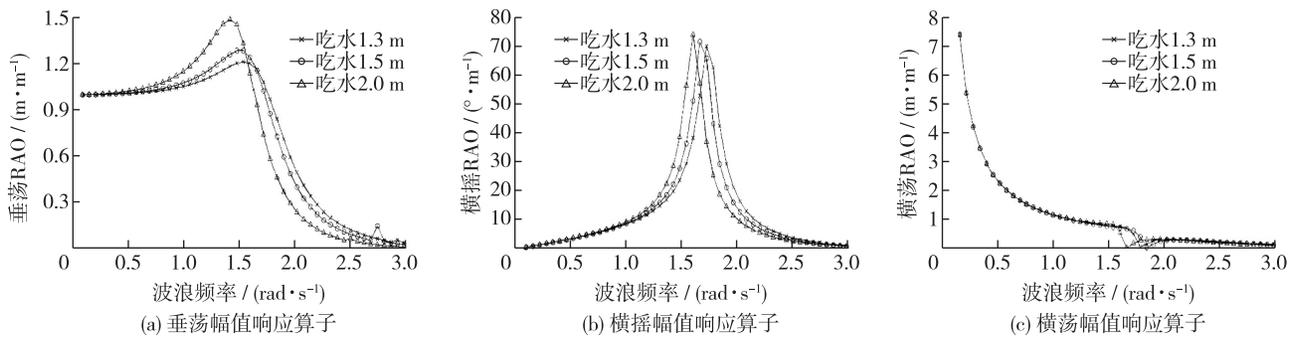


图4 不同吃水深度的码头在横浪中幅值响应算子值(宽7 m)

Fig. 4 Response amplitude operation in beam waves with different draughts (width of 7 m)

### 3.2 时域分析

为了能够准确分析浮式码头的总体响应,在时域内求解总体运动方程,并且考虑系泊缆与码头完全耦合。计算步长设为 0.1 s,总计算时间为 150 s,最后计算得出浮式码头在 JONSWAP 波浪谱下的运动时历曲线。

图5分别给出了浪向角  $90^\circ$  时,浮式码头垂荡、横荡、纵摇和横摇运动响应。在迎浪状态下,横荡运动相比于垂荡运动响应幅值较大,响应频率较低,具有低频运动特性;横摇运动响应幅值较大,响应频率也较高,这是由波浪垂直码头方向传播造成的;纵摇运动响应幅值较小,响应频率也较低,易满足要求。垂荡、横摇运动响应是评价浮式码头工作性能的重要标准,设计时一定要控制其稳定性以保证正常的装卸货物。

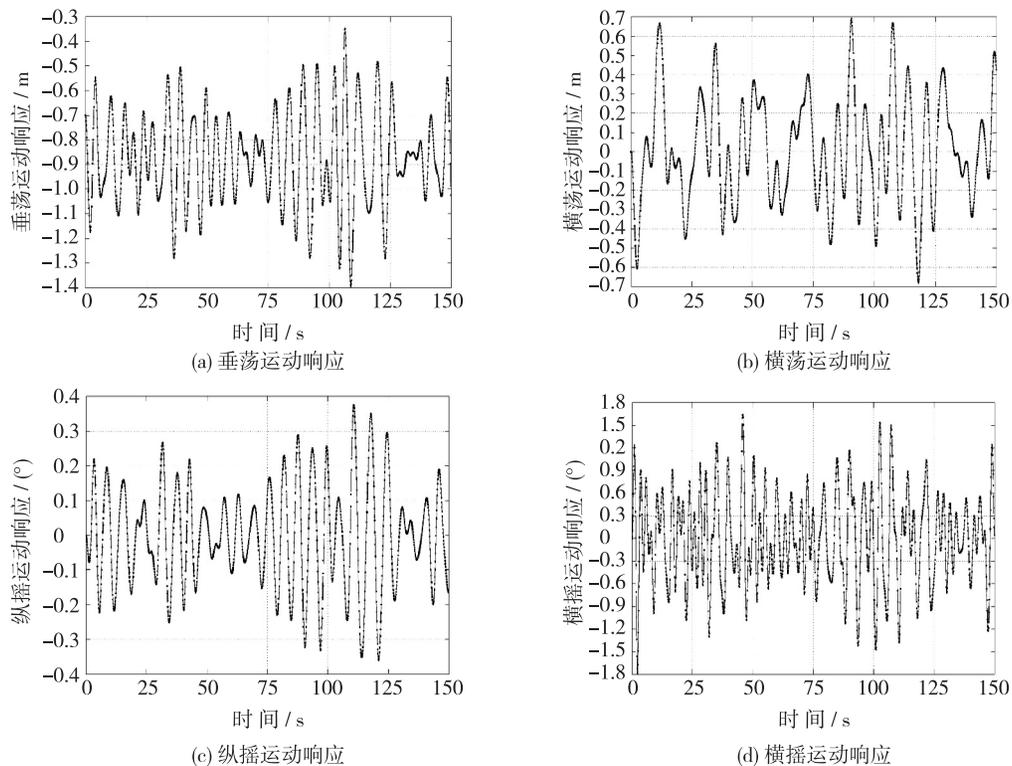


图5 浮式码头在横浪中运动时历曲线

Fig. 5 Time series of motion responses of a floating pier in beam waves

## 4 结 语

(1)浮式码头固有周期大约为3~8 s,设计时要注意避免固有周期与波浪遭遇周期接近,以免发生共振,码头在高频区域( $\omega > 1.5 \text{ rad/s}$ )内稳定性较好,但耐波性较差。

(2)浮式码头垂荡、横摇和横荡的峰值频率和峰值振幅随着码头宽度的增加而减小,设计时宜增加码头宽度;浮式码头垂荡、横摇和横荡运动峰值振幅随着码头吃水深度的增加而增加,但峰值频率随着码头吃水深度的增加而减小,设计时码头吃水深度不宜过大;浮式码头纵摇运动较小,易满足要求,垂荡、横摇运动响应是评价浮式码头工作性能的重要标准,在设计时应注意控制其响应幅值。

## 参 考 文 献:

- [1] 刘传远, 万德成. 锚泊浮式码头在波浪上的运动响应计算[C]//第十二届全国水动力学会议论文集. 北京: 海洋出版社, 2013: 306-312. (LIU Chuan-Yuan, WAN De-cheng. Calculation of motion response for a moored floating pier in waves[C]//12<sup>th</sup> National Congress on Hydrodynamics. Beijing: China Ocean Press, 2013: 306-312. (in Chinese))
- [2] 王建华, 万德成. 南海浮式码头与系泊系统动力耦合分析[C]//第十三届全国水动力学会议论文集. 北京: 海洋出版社, 2014: 1381-1387. (WANG Jian-hua, WAN De-cheng. Dynamic coupling analysis of a moored floating pier in waves[C]//13<sup>th</sup> National Congress on Hydrodynamics. Beijing: China Ocean Press, 2014: 1381-1387. (in Chinese))
- [3] 郑治国, 董艳秋, 唐友刚. 模块化浮码头技术方案的探讨[J]. 舰船科学技术, 2003, 25(5): 7-8, 11. (ZHENG Zhi-guo, DONG Yan-qiu, TANG You-gang. Investigation for the technology solution of modular pontoon[J]. Ship Science and Technology, 2003, 25(5): 7-8, 11. (in Chinese))
- [4] 肖越, 王言英. 浮体锚泊系统计算分析[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(5): 682-686. (XIAO Yue, WANG Yan-ying. Computational analysis of moored floating-body[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005: 45(5): 682-686. (in Chinese))
- [5] LEE H H, CHEN L Y, WENG W K, et al. The prediction of the dynamic and structural motions of a floating-pier system in waves[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(7): 1044-1059.
- [6] TAJALI Z, SHAFIEEFAR M. Hydrodynamic analysis of multi-body floating piers under wave action[J]. Ocean Engineering, 2011, 38: 1925-1933.
- [7] DIAMANTOULAKI I, ANGELIDES D C. Analysis of performance of hinged floating breakwaters[J]. Engineering Structures, 2010, 32: 2407-2423.
- [8] VAN OCRTMENSSEN G. Hydrodynamic interaction between two structures floating in waves [C] // London: Pro BOSS Conference, 1979:339-356.
- [9] CHEN Zhi-jie, WANG Yong-xue, WANG Guo-yu. Time-domain responses of immersing tunnel element under wave actions[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(6): 739-749.
- [10] 汪宏, 姜睿, 张新未, 等. 一种新型浮式单体结构设计及波浪稳定性试验研究[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2014, 28(4): 317-320. (WANG Hong, JIANG Rui, ZHANG Xin-wei, et al. An experiment designed to study the structure of the new monomer and floating wave stability[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 28(4): 317-320. (in Chinese))
- [11] 覃杰, 周野, 何文钦, 等. 游艇码头平面设计参数研究[J]. 水运工程, 2014(4): 91-98. (QIN Jie, ZHOU Ye, HE Wen-qin, et al. Research on design parameters of general layout for marinas[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(4): 91-98. (in Chinese))
- [12] MOLIN B. 海洋工程水动力学[M]. 刘水庚, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012. (MOLIN B. Hydrodynamique des structures offshore[M]. Translated by LIU Shui-geng. Beijing: National Defence of Industry Press, 2012. (in Chinese))

## Hydrodynamic analysis of a moored floating pier on an inland river

PENG Ze-yu, LIU Zuo-qiu, FU Ming-hui

(*Department of Applied Mechanics and Engineering, College of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China*)

**Abstract:** In recent years, waterway transport on the inland river is springing up vigorously. With their own advantages, the floating piers are located on the river where the tidal range is larger. The floating piers are greatly influenced by the wave conditions, so it is very important to carry out the research on their hydrodynamic performance. A numerical simulation model is established by using a hydrodynamic simulation software ANSYS/Workbench/AQWA based on the 3d potential flow theory. Analysis of the floating piers is carried out in the frequency domain and time domain, predicting the dynamic response of the pier in JONSWAP spectrum and API spectrum. Effects of various parameters such as the beam and draft of the pier are also studied in this paper. Finally the analysis results show that the natural period of the floating pier is about 3~8 s. In the design, attention should be paid to avoid producing resonance when the natural period of the floating pier and the wave period are close. The stability of the floating pier in the high frequency region is better, but the wave keeping is poor. For stable operation of the floating pier, it is necessary to increase the pier's width and reduce its draft appropriately. This study can provide a theoretical reference for the design of the similar floating piers.

**Key words:** floating pier; hydrodynamic analysis; time/frequency domain analysis; motion response