

深远海渔业养殖平台水动力特性时域分析¹

苗玉基^{1,2}, 田超¹, 周怡心¹, 俞俊¹

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2. 陆军工程大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007,
Email: miaoyuji@cssc.com.cn)

摘要: 深远海渔业养殖已受到很多国家的关注, 国内外已成功建造并安装了多座深远海渔业养殖平台, 而水动力特性对该类型平台的正常使用至关重要。本文将在传统三维水弹性力学分析理论的基础上, 进一步考虑杆件和网帘的作用, 采用波浪绕射/辐射理论分析杆件和网帘水动力载荷的时域分析方法, 并对典型新型智能化渔业养殖平台进行计算分析, 并和水池试验结果进行对比, 对比结果显示上述计算方法能够较为准确地对渔业养殖平台的运动响应进行预报分析。本文的研究将对新型智能化渔业养殖平台的波浪载荷计算和运动分析奠定基础。

关键词: 深远海渔业养殖平台; 运动响应; 数值模拟; 模型试验; 势流理论

1 引言

深远海渔业养殖平台是由大型浮体、细长杆件与网帘组成的浮式结构物。2017年9月, 挪威顺利安装了世界首座、规模最大的半潜式深海渔场“海洋渔场1号”, 如图1(a)所示; 2018年7月我国正式启用首座深海渔场“深蓝1号”, 如图1(b)所示, 这些深远海渔业养殖平台高几十米、直径可达上百米, 在风浪和海流作用下的水动力特性对其安全使用至关重要。

目前有大量学者对传统网箱开展了研究, 传统渔业养殖装备一般由浮架系统、网帘系统和配重系统组成, 浮架通常由细长结构物组成, 采用 Morison 公式可计算其受到的水动力^[1], 该公式提出了惯性力系数和阻力系数, 随后大量学者^[2,3]针对细长结构物进行了系列化试验, 研究了佛汝德数、结构物截面尺度、波浪要素等对惯性力系数和阻力系数的影响规律。对于由细长杆件组成的空间框架, 在计算其水流和波浪载荷时需要考虑杆件之间的遮蔽效应和水流阻塞效应^[4,5]; 圆杆组成的框架结构的水槽试验^[6]表明纯波浪作用下的阻塞效应较小, 波浪流联合作用下产生的阻塞效应更强; 细长结构物的布置形式^[7]也会影响遮蔽

¹基金项目: 工信部高性能船舶科研资助项目(工业和信息化部 and 财政部[2016]22号文); 中国船舶科学研究中心青年创新基金项目(J1872)

系数。深远海渔业养殖平台中的网帘是由网线纵横编织形成的，其具有数万、甚至几十万个网孔，实际计算中不可能对每一个网孔进行模拟计算。因此发展了针对网帘结构水动力特性的简化处理方法，如网目合并技术^[8]、弹簧-集中质量法^[9]、屏模型（screen model）^[10]和多孔介质模型^[11]等。水池模型试验表明屏模型对平面网帘的计算与试验吻合较好，圆柱形网帘需要考虑流速的衰减，否则数值计算结果偏大^[12]。屏模型可用于纯水流^[10,13]、波流联合¹⁴作用下单个网帘和多个网帘的受力计算分析。

自 20 世纪七八十年代，考虑惯性力、水动力和弹性力之间相互作用的水弹性力学逐渐兴起。经过数十年的发展，水弹性力学从二维到三维^[15,16]，从线性到非线性^[17]，能够对任意形状的三维浮式结构物进行计算分析。但对于深远海渔业养殖平台这类组合式浮体，其不是简单由大型浮体组成，其普遍由浮体提供浮力、细长杆件形成框架、网帘实现其特定功能。因此本文将在传统三维水弹性力学分析理论的基础上，进一步考虑杆件和网帘的作用，建立深远海渔业养殖平台的时域运动方程，发展一种可计及大型浮体、杆件和网帘水动力载荷的时域分析方法，对典型深远海渔业养殖平台进行计算分析。



(a) 海洋渔场 1 号



(b) 深蓝 1 号

图 1 典型深远海渔业养殖平台

2 基本原理

为了快速计算出这类复杂结构物受到的流体载荷和运动响应，我们需要一种简单快捷的方法。为此，我们对这类问题提出几条基本假定：①特定杆的来流条件不受相邻杆的扰动，因此，遮蔽效应是可以被忽略的；②沿杆件轴向的摩擦力采用同一摩擦系数进行计算；③假定浮体所处流场中的流体是无黏、不可压缩流体，流场的运动是无旋的，自由表面波为微幅的，则流场的运动可以采用三维势流理论来描述^[16]，且浮体为微幅运动；④网帘由网线纵横编制而成，不考虑网线的粗糙度。

在上述假定下，采用势流理论来描述平台周围的流场，采用有限元法对细长结构物进行离散，进而计算每一微段处的当地相对速度和相对加速度，进而采用 Morison 公式计算其流体载荷。采用 Screen Model 对网帘进行简化处理，计算网帘上的受力。从而构建深远海渔业养殖平台的水动力时域运动方程：

$$\begin{aligned} & [\mathbf{a} + \mathbf{A}_p + \mathbf{A}_{\text{tube}}] \{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{b}] \{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{c} + \mathbf{c}_{\text{tube}}] \mathbf{x}(t) + \int_0^t h(t-\tau) \{\ddot{\mathbf{x}}(\tau)\} d\tau \\ & = \{\mathbf{F}(t)\} + \{\mathbf{F}_{\text{tube}}(t)\} + \{\mathbf{F}_{\text{net}}(t)\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, \mathbf{a} 为结构质量矩阵, \mathbf{A}_p 为浮筒附加质量矩阵, \mathbf{A}_{tube} 为杆件的附加质量, \mathbf{c} 为浮筒回复力矩阵, \mathbf{c}_{tube} 为杆件的回复力矩阵, $\mathbf{F}(t)$ 为浮筒受到的波浪激励力, \mathbf{F}_{tube} 为杆件受到的波浪力, 包括波浪入射力、波浪惯性力和黏性力; \mathbf{F}_{net} 为网衣受到的力, 包括网帘受到的升力和阻力。

在高海况条件下, 杆件出入水差异较大, 浮力变化明显。为了进一步考虑瞬时湿表面的影响, 可计算每一时刻浮力与重力的差值, 此时则不再需要静水恢复力矩阵项, 因此时域运动方程可写为:

$$\begin{aligned} & [\mathbf{a} + \mathbf{A}_p + \mathbf{A}_{\text{tube}}] \{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{b}] \{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + \int_0^t h(t-\tau) \{\ddot{\mathbf{x}}(\tau)\} d\tau \\ & = \{\mathbf{F}(t)\} + \{\mathbf{F}_b(t)\} + \{\mathbf{G}\} + \{\mathbf{F}_{\text{tube}}(t)\} + \{\mathbf{F}_{\text{net}}(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, \mathbf{F}_b 为每一瞬时的浮力, \mathbf{G} 为平台的重力。

对于受规则波作用下的浮体来说, 可省略系统延时函数一项, 运动方程简化为:

$$[\mathbf{a} + \mathbf{A}_p + \mathbf{A}_{\text{tube}}] \{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{b}] \{\dot{\mathbf{x}}(t)\} = \{\mathbf{F}(t)\} + \{\mathbf{F}_b(t)\} + \{\mathbf{G}\} + \{\mathbf{F}_{\text{tube}}(t)\} + \{\mathbf{F}_{\text{net}}(t)\} \quad (3)$$

细长杆件受到的流体载荷通常采用 Morison 公式进行计算:

$$F_M = \frac{1}{2} \rho D C_d |u_f - u_s| (u_f - u_s) + \rho A C_m \dot{u}_f - \rho A (C_m - 1) \dot{u}_s \quad (4)$$

式中, ρ 为流体密度, D 为杆件直径, C_d 为杆件阻力系数, u_f 为流体质点速度, u_s 为杆件速度, A 为杆件横截面积, C_m 为杆件惯性系数, \dot{u}_f 为流体质点加速度, \dot{u}_s 为结构物加速度。其中 C_d 和 C_m 受雷诺数 Re 和卡彭特数 K_c 影响。

网帘受到的阻力 F_D 和升力 F_L 可采用 Screen 模型法计算, 计算公式如下:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A |U_{\text{rel}}|^2 \mathbf{n}_D \quad (5)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A |U_{\text{rel}}|^2 \mathbf{n}_L \quad (6)$$

式中, C_D 和 C_L 分别为网帘的阻力系数和升力系数, 其与实体率、雷诺数等有关; A 为网帘等效面积, U_{rel} 为网帘和流体质点相对运动速度, \mathbf{n}_D 和 \mathbf{n}_L 为阻力和升力的方向, 其中阻力平行于流向, 升力垂直于流向, 其可由下式确定:

$$\mathbf{n}_D = \frac{\mathbf{U}_{\text{rel}}}{|\mathbf{U}_{\text{rel}}|} \quad (7)$$

$$\mathbf{n}_L = \frac{(\mathbf{U}_{\text{rel}} \times \mathbf{n}_{\text{en}}) \times \mathbf{U}_{\text{rel}}}{|(\mathbf{U}_{\text{rel}} \times \mathbf{n}_{\text{en}}) \times \mathbf{U}_{\text{rel}}|} \quad (8)$$

在计算中求解每一时间步下浮筒、杆件和网帘受到的流体载荷，进而求解运动方程(3)可获得不同周期规则波作用下平台的运动响应，采用四阶龙格库塔法求解运动方程。

3 试验验证

深远海渔业养殖平台的模型试验在中国船舶重工集团公司第七〇二研究所的综合水池完成，水池主尺度为 69m×46m×4m，在水池相邻的两边布置了先进的三维摇板式造波机，可模拟规则波、长峰不规则波和短峰波。渔业养殖平台底部圆柱形浮筒直径 40m，周围框架杆件的直径为 1.0~4.0m，试验中浪向定义如图 2 所示，平台的主要力学参数如表 1 所示，渔业养殖平台模型缩尺比为 1:27.78。网帘网线直径为 3.0mm，网帘的网孔尺度为 23.5mm，试验中采用的是原型网帘。水池试验中对平台的作业工况和生存工况均进行了白噪声试验，获得了各自由度运动响应传递函数（Response amplitude operators, RAO）。水池试验中的渔业养殖平台运动如图 3 所示。试验时通过设置假底来模拟设计水深，试验中水深为 0.8m（对应实际水深为 50.0m）。

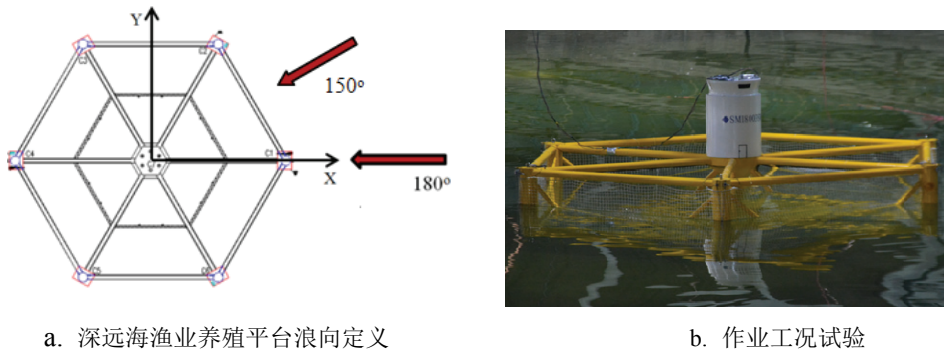


图 2 深远海渔业养殖平台浪向定义及作业工况试验

表 1 渔业养殖平台参数

项目	单位	作业工况		项目	单位	作业工况	
		原型	模型			原型	模型
排水量	吨	11792.60	0.5366	纵向惯性半径	m	20.085	0.7230
吃水	m	37.00	1.3319	横向惯性半径	m	20.03	0.7210
重心纵向位置	m	-0.05	-0.0018	艏摇惯性半径	m	21.043	0.7575
重心横向位置	m	0.06	0.0022	初稳性高	m	4.20	0.1512
重心垂向位置	m	9.08	0.3269				

采用 ANSYS 建立平台的数值模型，浮筒采用绕射单元，共 5132 个绕射单元；杆件组成的框架采用杆单元，网格尺度为 0.5m，共 4204 个杆单元；网帘采用 Screen 模型计算。

由于在进行规则波计算时上部建造不受波浪影响，因此在数值计算中未考虑上部建筑。

4 计算结果和讨论

基于三维水弹性理论，考虑杆件和网帘受到的流体载荷的影响，根据第 2 章基本原理编制了计算程序，求解得到了不同周期规则波作用下渔业平台的运动响应时程曲线，得到了不同周期下的运动幅值响应算子，图 3 展示了数值计算结果和模型试验及 AQWA 计算结果的对比曲线。

图 3 中“Test”表示有网帘的模型试验结果，“No Net”表示考虑杆件但不考虑网帘影响的数值计算结果，“With Net”表示考虑杆件和网帘影响的数值计算结果，“AQWA-Net”表示考虑杆件和网帘影响的 AQWA 计算结果。由图 3 (a) 可知，当波浪周期小于 11s 时数值计算得到的垂荡运动和模型试验结果基本一致，随之周期的增大垂荡数值计算结果与模型试验结果差距先增大后缩小；有无网帘时垂荡运动响应的计算结果基本相同，可见网帘对平台垂荡运动响应的影响较小；当波浪周期大于 12s 后 AQWA 计算结果与试验结果的偏离程度大于数值计算结果。

由图 3 (b) 可知数值计算得到的纵摇运动随波浪周期的变化趋势与试验结果基本一致，但幅值较试验结果略大，这可能是由于在数值计算中未考虑一阶阻尼的缘故；当波浪周期大于 12s 后考虑网帘影响的纵摇运动更为接近试验结果，而不考虑网帘影响的纵摇运动随波浪周期增大而剧烈增大，可见网帘的阻尼作用对平台纵摇运动的减小具有一定的效果；在周期为 25s 左右纵摇运动出现了峰值，这是由于接近纵摇固有周期（27s）而产生共振效应的缘故；AQWA 纵摇计算结果在周期小于 12s 时与试验结果吻合较好，但随着波浪周期的增大两者之间的差距有所增大。

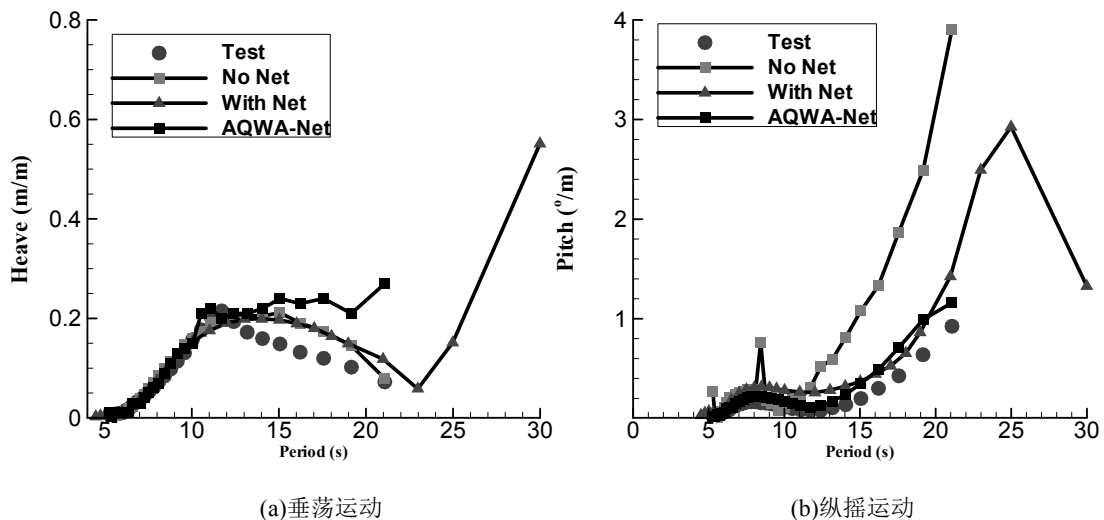


图 3 渔业平台运动响应随波浪周期的变化曲线（180° 浪向）

5 结论

本文提出的基于三维水弹性理论,采用波浪绕射/辐射理论分析大型浮体的波浪载荷,莫力森方程计算杆件框架受到的波浪载荷,屏模型计算网帘受到的波浪载荷,从而建立的时域求解方法可用于深远海渔业养殖平台的计算分析。通过计算结果发现,该方法得到的平台垂荡和纵摇运动曲线与试验结果变化趋势基本一致,在小周期下能够较好吻合;网帘对垂荡运动影响较小,对纵摇运动影响较大,因此在计算该类结构时不能将网帘忽略;此外后续研究中需考虑一阶阻尼对平台运动的影响。

参考文献

- 1 Morison J R, O'Brien M P, Johnson, J W, et al. The force exerted by surface waves on piles [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1950, 2(5): 149-154.
- 2 Vengatesan V, Varyani K S, Barltrop N. An experimental investigation of hydrodynamic coefficients for a vertical truncated rectangular cylinder due to regular and random waves [J]. *Ocean Engineering*, 2000, 27(3):291-313.
- 3 Yuan Z D, Huang Z H. An experimental study of inertia and drag coefficients for a truncated circular cylinder in regular waves [J]. *Journal of Hydrodynamics (Series B)*, 2010, 22(5):318-323.
- 4 Taylor P H, Santo H, Choo Y S. Current blockage: Reduced Morison forces on space frame structures with high hydrodynamic area, and in regular waves and current [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 57: 11-24.
- 5 Santo H, Taylor P H, Bai W, et al. Current blockage in a numerical wave tank: 3D simulations of regular waves and current through a porous tower[J]. *Computers & Fluids*, 2015, 115:256-269.
- 6 Santo H, Stagonas D, Buldakov E, et al. Current blockage in sheared flow: Experiments and numerical modelling of regular waves and strongly sheared current through a space-frame structure [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2017, 70:374-389.
- 7 Bonakdar L, Oumeraci H, Etemad-Shahidi A. Wave load formulae for prediction of wave-induced forces on a slender pile within pile groups [J]. *Coastal Engineering*, 2015, 102:49-68.
- 8 詹杰民, 苏炜. 浮式养殖网箱系统的数值模拟[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2006, 45(6):1-6.
- 9 赵云鹏, 李玉成, 董国海. 深水抗风浪网箱水动力学特性研究[J]. *渔业现代化*, 2011, 38(2):10-16.
- 10 Løland G. Current forces on, and water flow through and around, floating fish farms [J]. *Aquaculture International*, 1993, 1(1):72-89.
- 11 Chen H, Christensen E D. Investigations on the porous resistance coefficients for fishing net structures [J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2016, 65:76-107.
- 12 Zhan J M, Jia X P, Li Y S, et al. Analytical and experimental investigation of drag on nets of fish cages [J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 35(1):91-101.

- 13 Kristiansen T, Faltinsen O M. Modelling of current loads on aquaculture net cages [J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 34(Complete):218-235.
- 14 Lader P F, Fredheim A. Dynamic properties of a flexible net sheet in waves and current—A numerical approach [J]. Aquacultural Engineering, 2006, 35(3):228-238.
- 15 Price W G, Wu Y S. Structural responses of a SWATH of multi-hulled vessel travelling in waves [A]. International Conference on SWATH ships and Advanced Multi-hulled Vessel, RINA, London, 1985.
- 16 Wu Y S. Hydroelasticity of floating bodies [D]. Brunel University, U.K, 1984.
- 17 Tian C, WU YS. The second-order hydroelastic analysis of a SWATH ship moving in large-amplitude waves [J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 18(6): 631-639.

Analysis of hydrodynamic properties of the offshore aquaculture fish platform in time domain

MIAO Yu-ji^{1,2}, TIAN Chao¹, ZHOU Yi-xin¹, YU Jun¹

(1.China Ship Scientific Research Center, Wuxi, 214082; 2. Field Engineering College, PLA Army Engineering University, Nanjing, 210007. Email: miaoyuji@cssrc.com.cn)

Abstract: Many countries have paid attention to offshore aquaculture fish platform. Many offshore aquaculture fish platform have been successfully built and installed at home and abroad. The hydrodynamic characteristics are important to the normal use of this type of platform. The time-domain motion equation of the offshore aquaculture fish platform is built and calculated Based on the traditional three-dimensional hydroelastic theory. This paper will further consider the influence of bar and net on the motion response of the platform, and the wave diffraction/radiation theory is used to calculate wave load of large floating body, and Morrison equation to calculate the wave load of bar frame, screen model to calculate the wave load of net. The time-domain analysis method can take into account the hydrodynamic load of large floating body, bar and net. The calculation and analysis of a typical offshore aquaculture fish platform are carried out and compared with the results of model tests. The comparison results show that the above calculation method can predict the motion response of the fish platform. The research in this paper will lay a foundation for load calculation and motion analysis of the new type fish platform.

Key words: offshore aquaculture fish platform; motion response; numerical simulation; model test; potential theory.