

# 三模块半潜平台水动力分析及系泊设计

俞俊, 程小明, 路振, 张凯, 倪歆韵

(中国船舶科学研究中心, 江苏无锡, 214082, E-mail: yyj@cssrc.com.cn)

**摘要:** 本文研究的三模块半潜平台在艏艉部端面通过凸伸下楔形块和与之相配合的楔形槽连接, 在生存工况下释放自由度呈铰接方式, 在作业工况下通过锁定销呈刚性连接。基于水动力计算软件 AQWA, 在生存工况时, 建立三模块半潜平台铰接水动力模型, 在水动力分析的基础上进行系泊系统设计, 创造性地设计了  $60^\circ$  张角 X 布局的复合系泊系统, 赋予整体在横浪方向较小的刚度, 进而给予平台一定的运动幅度, 使得平台所受到的水动力在多根锚链上较为均匀的分布, 最终有效地降低了极个别缆绳张力峰值。在作业工况时, 建立刚性连接平台-靠泊船只-波浪水动力耦合计算模型, 设计出可行的靠泊方案, 对运动情况以及系泊缆张力进行了分析, 满足作业工况时的要求。

**关键词:** 半潜平台; 水动力分析; 系泊系统设计; 靠泊方案

## 1 前言

全面发展海洋经济、维护海洋权益、保护海洋环境是海洋强国建设的重要内容。近年来我国开放型经济体系不断完善, 国际海洋合作日益深化, 尤其是 21 世纪海上丝绸之路建设全面启动, 一带一路倡议得到广泛认可, 为我国南海的开放发展创造了有利环境。虽然我国南海管辖海域广阔, 但是岛礁列布, 陆域面积狭小, 建设发展空间不足, 需要通过浮式结构物来提高南海的综合开发保护水平<sup>[1]</sup>。为了保证浮式结构物的稳定性和安全性, 需要性能良好的系泊系统来限制平台的运动响应。悬链式系泊<sup>[2-4]</sup>呈悬链状形态, 通过自重提供回复力, 锚链在平台导缆孔处的悬挂角度因重力影响较大, 提供的水平恢复力有限, 需要平台出现较大的位移后提供恢复力。但是在岛礁附近的浅水海域<sup>[5-6]</sup>, 随着水深的减少, 悬链长度将会大大缩减, 导致锚链易于绷紧而失去悬链形态, 或将使得锚固基础所受拉力含垂向分量。结合悬链式系泊系统已有特征<sup>[7-9]</sup>, 本文针对三模块半潜平台设计的浅水系泊系统将主要具备以下特点: ①锚链耐磨, 可以直接与海床面接触。②悬链的密度大于海水, 需要平台主体采用额外的附体来平衡自重, 但在浅水海域该状况不是很明显。③悬链式系泊系统对锚固基础抗拔性能要求不苛刻, 适用于浅水不易承载垂向力的地形。④浅水情况下, 悬链式系泊系统的系泊半径更小, 相应的系泊系统占用的海床面投影也更小, 降低了三模块半潜平台和附近其他海洋结构物相碰撞的概率。所有分析设计都要保证整个系泊系

统在潜水海域的有效运作。

## 2 计算方法

### 2.1 计算理论

对三模块半潜平台的水动力计算采用基于三维势流理论的软件 AQWA。在三维势流理论中，假定流体为理想状态，假定流体无黏性和不可压缩，流动无旋，所以存在势函数。根据线性势流理论，可将流场中总的速度势  $\Phi$  分解为入射势  $\Phi^I$ 、绕射势  $\Phi^D$  和辐射势  $\Phi^R$ 。

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi^I(x, y, z, t) + \Phi^D(x, y, z, t) + \Phi^R(x, y, z, t) \quad (1)$$

由于假定浮式结构物在平衡位置周围作微幅的简谐振荡，可将速度势分解成空间速度势和时间因子的乘积，这样便可以转化为定常的求解问题。

### 2.2 三模块半潜平台基本参数

三模块半潜平台主体结构由三个模块构成(图 1)，各模块通过可调连接器连接<sup>[10]</sup>，单个模块的长 100m，型宽 40m，型深 22m，含 8 个 10m×10 m 立柱。考虑三模块半潜平台布放在较浅海域，受波浪力影响较大。为了提高三模块半潜平台的稳定性和承载能力，需针对其设计合适的系泊系统。

表 1 三模块半潜平台物理参数

名称	作业工况			自存工况		
	模块一	模块二	模块三	模块一	模块二	模块三
吃水 (m)	9	9	9	7	7	7
重心距基线 (m)	11.03	10.78	11.33	11.13	11.27	11.70
重心距艏垂线 (m)	49.87	50.00	50.11	49.85	50.00	50.12
排水量 (t)	13082.0	13043.3	13088.5	11344.3	11307.7	11351.3
横摇惯性矩 (kg·m <sup>2</sup> )	2.979e09	2.88e09	2.901e09	2.51e09	2.465e09	2.54e09
纵摇惯性矩 (kg·m <sup>2</sup> )	1.004e10	1.06e10	1.033e10	9.56e09	9.511e09	9.04e09
艏摇惯性矩 (kg·m <sup>2</sup> )	1.213e10	1.27e10	1.230e10	1.12e10	1.126e10	1.066e10

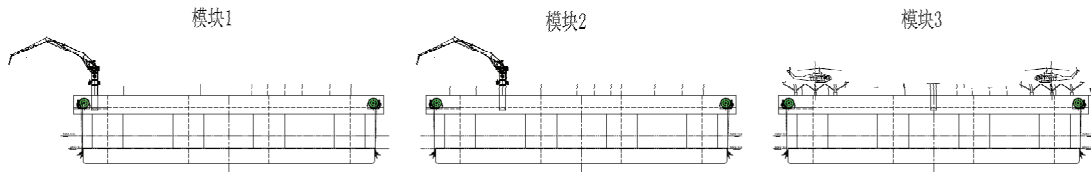


图 1 三模块半潜平台

### 2.3 海洋环境

三模块半潜平台在自存工况下<sup>[11]</sup>平台吃水 7 米，承受最大风速 51.5m/s，浪高 7.3 米。浪向、流向、风向涵盖 0°，45°，60°，90°四个方向，具体视系泊系统而定，三模块半潜平台在作业工况下平台吃水 9m，承受最大风速 23.3m/s，浪高 3.05m。浪向、流向、风向涵盖 0°，45°，60°，90°四个方向，具体视系泊系统而定。JONSWAP 谱被用来模拟随机波浪，谱峰提升因子采用 2.0。谱峰周期(Tp)选取按照规范<sup>[12]</sup>约束于有义波高(Hs)，详细海洋环境条件见表 2。

表 2 三模块半潜平台海洋环境条件

模型	水深 (m)	有义波高 Hs(m)	谱峰周期 Tp(s)	流速 (m/s)	风速 (m/s)
自存	50	7.3	12	1.0	51.5
作业	50	3.05	7.2	0.5	23.3

## 3 系泊设计

### 3.1 系泊系统设计

三模块半潜平台水动力模型如图 2 所示。在水动力分析的基础上设计相应的系泊系统，锚固点位置平面示意图 3，对所有的系泊缆绳从第一象限开始按照逆时针方向标号，考虑到靠泊作业需求，平台上系泊点设置在距离下浮体底部 1 米处的艏艉模块上。整个系泊系统共 24 根缆绳呈对称式分布，每 6 根缆绳为一组，组内缆绳平行均匀间隔 12.5m 布置，系泊在同一模块上的缆绳组间夹角为 60°，整个系泊系统呈 X 构型。缆绳在水平面的投影距离为 320m，每根缆绳总长 340m，由两段锚链组成，与三模块半潜平台相连段长 30 米，采用 171mm 锚链，与海底相连段长 310m，采用双股 180mm 锚链。171mm 锚链参数为：湿重 505 kg/m，刚度  $2.5 \times 10^9$  N/m，破断力  $1.8 \times 10^7$  N。双股 180mm 锚链参数为：湿重 1120 kg/m，刚度  $5.5 \times 10^9$  N/m，破断力  $3.8 \times 10^7$  N。0°方向表示风浪流来自负 X 轴方向，90°方向表示风浪流来自负 Y 轴。

### 3.2 靠泊船只评估

三模块半潜平台在作业时会有长度不超过 100m 的船只靠泊。典型靠泊船只的主要参数如表 3 所示。考虑到三模块半潜平台的掩蔽作用，并且本文计算浪向为 0°、45°、60°、90°，靠泊船只将布放在平台的正 Y 方向(图 4)。平台和船只之间设有 4 个防撞水鼓，并由 8 根缆绳交叉系缆。

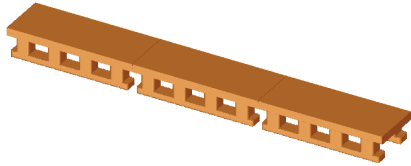


图 2 三模块半潜平台水动力模型

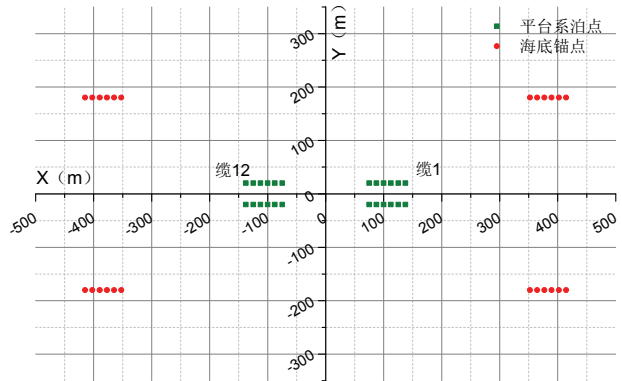


图 3 系泊系统平面布置

表 3 靠泊船只主要参数

总长 (m)	98.3
总宽 (m)	22.5
型深 (m)	6.3
吃水 (m)	4.03
排水量 (t)	6157
重心位置 (m)	X=40.3、Y=0.0、Z=4.6
(X: 距艏垂线、Y: 距中轴线、Z: 距基线)	
转动惯量 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	$I_{xx}=3.83\text{E}8$ , $I_{yy}=4.70\text{E}9$ , $I_{zz}=5.00\text{E}9$
( $I_{xx}$ : 横摇、 $I_{yy}$ : 纵摇、 $I_{zz}$ : 艏摇)	

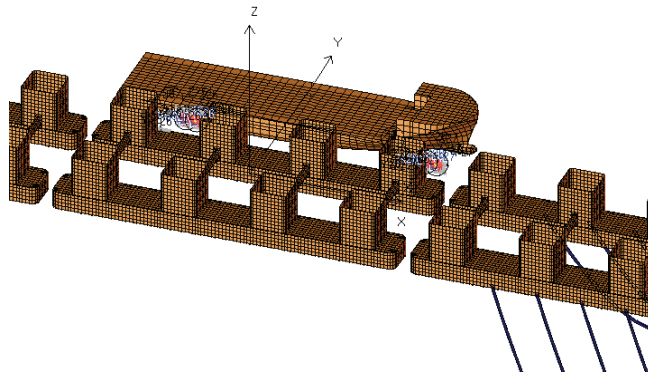


图 4 靠泊工况示意图

## 4 计算结果与分析

### 4.1 系泊系统水动力分析

频域分析中假定各模块为自由浮体，忽略连接器的影响，但考虑了模块间的水动力干扰。这一假定不影响入射波浪力、绕射波浪力、附加质量和辐射阻尼系数的计算结果，但会影响运动 RAO 的结果并因此对二阶波浪力产生影响。由于系泊系统分析在时域中进行，平台运动通过直接解运动方程得到，频域计算得到的运动 RAO 在时域运动分析中并未应用，因此对结果不产生影响。至于由忽略铰接效应导致的运动 RAO 的误差对二阶波浪力的影响，一般认为对最终二阶运动及系泊系统分析结果的影响在工程上是可接受的。系泊计算中采用准静态方法计算系泊张力，按相关规范系泊张力的安全系数取 2.0。

系泊系统数值分析通过在时域中进行平台和锚链的运动方程求解。4 种不同浪向下的锚链最大张力值结果如图 5 所示，其示意位置与实际模型中系泊缆排序方式一致，从缆 1 到缆 24 按照逆时针方向排列，但为了便于显示，具体角度没有按照实际布置显示。可以清楚地看出环境载荷方向对最大张力值的影响。时域计算的最大张力值在 60°浪向下获得 703 吨，该系泊缆张力的 3h 时域数值模拟如图 6 所示。整个系泊系统的保险系数为 2.6。

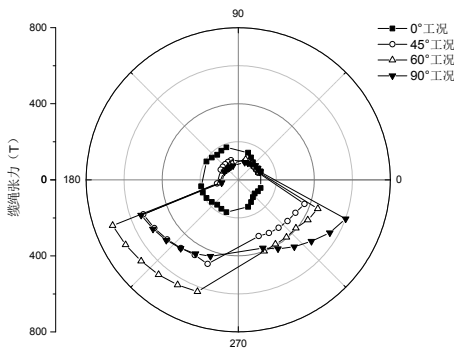


图 5 生存工况系泊缆绳张力最大值

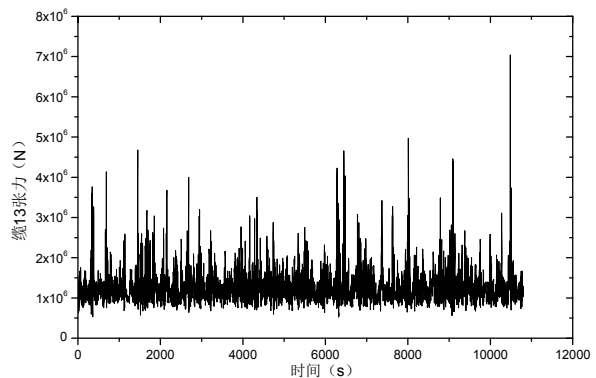


图 6 缆 13 张力时历曲线

### 4.2 靠泊分析

刚性连接平台-靠泊船只-波浪水动力耦合计算模型的数值分析在时域中进行。通过计算得到图 7 所示的 4 种不同浪向下的锚链最大张力值结果，图 8 和图 9 分别是靠船水鼓和系船缆受力最大值结果。

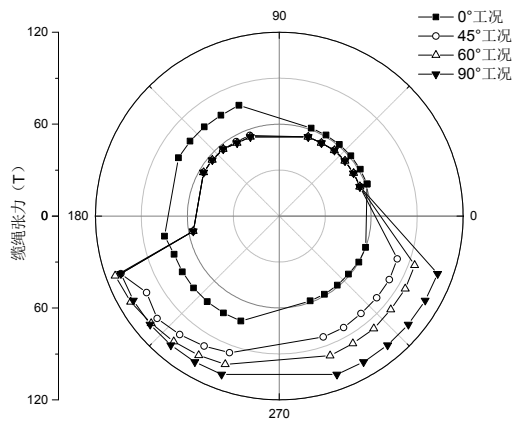


图 7 作业工况系泊缆绳张力最大值

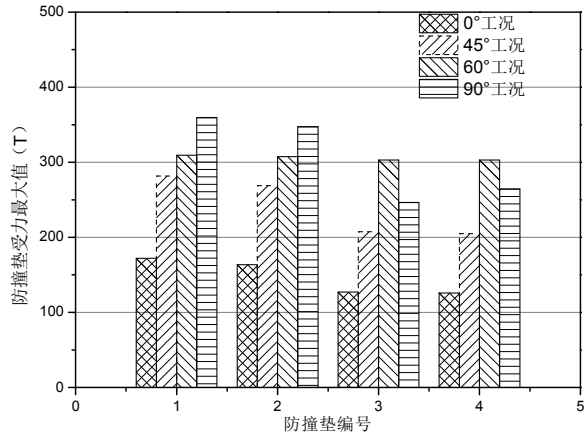


图 8 作业工况防撞垫受力最大值

在作业工况下也可以清楚地看出环境载荷方向对最大张力值的影响，总体说来顶浪一侧的锚链受力较大。此时时域计算的最大张力值在 90°浪向下出现 105t，该值远小于生存工况出现的极值，表明了整个系泊系统在作业工况的安全有效性。从图 8 可以看出，防撞垫所受压力最大值也出现在 90°浪向下，这是由于该浪向下平台与船只的相对运动幅值较大。图 9 进一步表明系船缆的最大值和防撞垫的最大值相对应，也是出现在 90°浪向下。当平台和船只相对运动时，缆绳和防撞垫交替承受拉压力作用，有效地保障了靠泊作业。

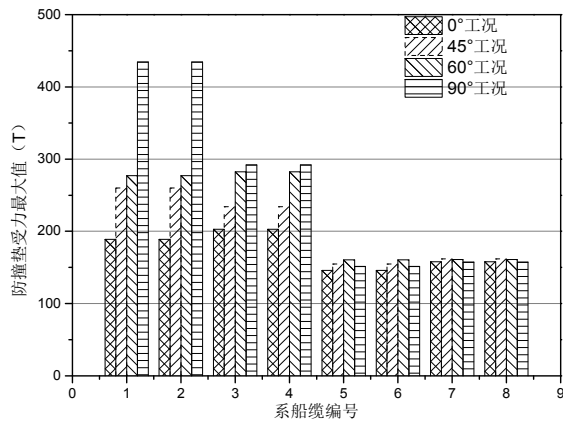


图 9 作业工况系船缆受力最大值

## 5 结语

本文分析了浅水悬链式系泊的主要特点，结合文中涉及的浅水海域三模块半潜平台，设计了 60°张角 X 布局的复合系泊系统方案并进行了性能分析，探索了一种浅水系泊使用模式，验证了其满足不同工况下的使用需求。本文研究的三模块半潜平台在艏艉部端面通

过凸伸下楔形块和与之相配合的楔形槽连接,在生存工况下释放自由度呈铰接方式,在作业工况下通过锁定销呈刚性连接。设计的系泊系统赋予整体在横浪方向较小的刚度,进而给予平台一定的运动幅度,使得平台所受到的水动力在多根锚链上较为均匀的分布,最终有效地降低了生存工况个别缆绳出现的张力峰值,使得整个系泊系统的保险系数为 2.6,留有足够的锚链腐蚀量,同时该系泊系统保证了足够的躺底段长度,有效消除了锚固基础的上拔力。在作业工况时,通过刚性连接平台-靠泊船只-波浪水动力耦合计算模型的分析,设计出可行的靠泊方案,对多个浪向下的系泊缆张力进行了分析,满足作业工况时要求。这些工作为三模块半潜平台水动力分析及其浅水系泊系统设计、靠泊方案设计和进一步优化提供了参考。

## 参 考 文 献

1. 丁军,程小明,等. 近岛礁浅水环境下浮式平台系泊系统设计研究[J]. 船舶力学, 2015, 19(7): 782-790.
2. Hooker J G, Bosman R L M. Recent investigation into physical properties of superline polyester ropes. Moorings and Anchor for Deep and Ultra Deepwater Fields, Aberdeen, 1999.
3. Harris R E, Johanning L, Wolfram J. Mooring systems for wave energy converters: A review of design issues and choices[J]. Marec2004, 2004.
4. Arcandra, Tahar, Kim M H. Coupled-dynamic analysis of floating structures with polyester mooring lines[J]. Ocean Engineering, 2008, 38(35): 1676-1685.
5. 肖龙飞,杨建民,范模,等. 160kDWT FPSO 在极浅水中运动安全性研究[J]. 船舶力学, 2006, 10(1): 7-14.
6. 史琪琪,杨建民. 半潜式平台运动及系泊系统特性研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(4):1-8.
7. Pecher A, Foglia A, Kofoed J. Comparison and sensitivity investigations of a CALM and SALM type mooring system for wave energy converters[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2014, 2(1): 93-122.
8. Pecher, Arthur, and Jens Peter Kofoed, eds. Handbook of ocean wave energy.[M] London: Springer, 2017.
9. Hsu W Y, Chuang T C, Yang R Y, et al. An Experimental Study of Mooring Line Damping and Snap Load in Shallow Water[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2019, 141(5): 051603.
10. 陈彧超,路振. 维权执法平台连接器性能评估[R]. 中国船舶科学研究中心科技报告, 2018.
11. 刘小龙,陈文伟,等. 近岛礁平台部署区域一年波浪实测结果分析[R]. 无锡:中国船舶科学研究中心科技报告, 2015.
12. DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, (2010).

## **Hydrodynamic analysis of three connected semi-submersible modules and their mooring design**

YU Jun, CHENG Xiao-ming, LU Zhen, ZHANG Kai, NI Xin-yun

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi, 214082, E-mail: yyj@cssrc.com.cn)

**Abstract:** The three connected semi-submersible modules studied here joint together by convex wedge block and a matching groove end to end. During the survival condition, each module is connected with each other using hinged joint while in the working condition, each module is linked with rigid joint by changing the locking device. The hydrodynamic software AQWA with three-dimensional potential flow theory is used to analyze models of three hinged connected semi-submersible modules in the survival condition. Furthermore, a specially designed mooring system with the shape of X and the angle of  $60^\circ$  is designed based on the hydrodynamic results, which offers the platform a smaller stiffness in the direction of beam sea to motion certainly, so that the hydrodynamic forces are distributed comparatively even within multi mooring lines to reduce the extreme tension value effectively and avoid the collisions between the three modules. What's more, the coupled hydrodynamic models containing rigid platform, mooring system, berthing ship and hydrodynamic forces are established to analyze the feasible berthing scheme in the working condition, which meets the relative movement requirement.

**Key words:** semi-submersible modules, hydrodynamic analysis, mooring design, berthing arrangement