

基于正交试验半潜平台锚泊系统参数敏感性分析

胡安华¹ 罗 宁² 柳 帅¹ 孙成生¹ 顾嘉辉¹

1. 青岛船研深海技术有限公司 山东青岛 266427;

2. 长沙中联重科环境产业有限公司 湖南长沙 410000

【摘 要】考虑半潜式平台与系泊系统的耦合关系,建立平台与锚链的耦合动力学分析模型,计算获得平台的水动力参数以及时域运动曲线。将平台的漂移量和锚链动张力作为目标函数,以锚链重度、预张力和水平跨度作为自变量,进行正交试验与方差分析,分析结果发现:锚链重度是影响平台漂移量的主要因素;锚链的重度和预张力是影响锚链最大动张力的主要因素。

【关键词】半潜式平台;系泊系统;正交试验;方差分析

一、引言

系泊定位系统是海洋工程领域常见的一种定位形式,在1500m以浅区域具有非常广泛的应用。考虑到系泊系统与定位平台是强耦合关系,在对系泊系统的设计过程中,必须要考虑与目标平台之间的耦合动力性能,因此在对系泊定位系统进行参数优化时,必须开展全系统的耦合水动力学分析,才能完成相应的优化设计。Fredriksson^[1]采用了数值和物理模型相结合,对养殖网箱的系泊系统的动力特性进行的分析研究。J. Decew等^[2]针对单点系泊式半潜网箱开展数值模拟,研究其在海流作用下的水动力问题。Montasir等^[3]采用AQWA对FPSO进行的系统的水动力分析。Cozi jn等^[4]考虑系泊系统的影响对深水CALM系统进行了耦合分析。

罗宁等^[5]针对某深水半潜式平台进行了系泊系统的优化设计,给出了优化配置方案。余龙等^[6]利用基于准静态方法,给出了多成分系泊悬链线方程,基于遗传算法对某半潜式平台的系泊系统进行优化。王磊等^[7]为优化深水钻井液举升系统,采用遗传算法对1500m水深的系泊系统进行优化验证。成海亮^[8]针对海上风电运输驳船的锚泊定位系统开展了优化设计。

考虑半潜式平台与系泊系统间的耦合作用,本文对系泊系统的各主要参数进行统计分析,确定主要影响参数,为系泊系统的优化提供数据参考。

二、复合式系泊系统力学模型

耦合分析模型由半潜式平台和系泊系统组成,如图1所示,为系泊状态下半潜式平台的系统组成图。平台为系泊系统提供动态边界条件,系泊系统为平台提供回复力,因此他们之间存在耦合作用。准确的参数优化工作既可以合理的控制平台动响应,又可以降低系统建造成本,因此掌握半潜式

平台的动态响应对系泊系统参数的敏感性具有工程意义。

在开展系泊半潜式平台系统耦合动力学分析时,需要明确系泊系统的动边界条件。在风浪流作用下,平台的运动方程:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F_{\text{风}} + F_{\text{流}} + F_{\text{浪}} + F_{\text{系泊}} \quad (1)$$

式中, M 为质量, C 为阻尼系数, K 为回复刚度。

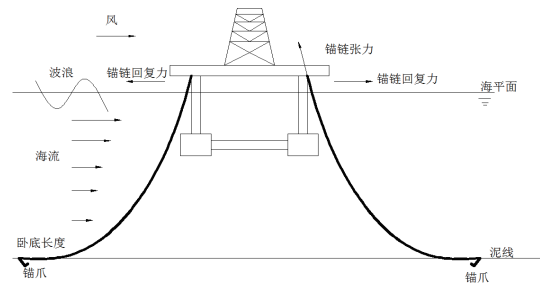


图1 系泊状态下半潜式平台系统组成

以锚链为研究对象,开展受力分析。当平台动边界实时变化时,锚链线的张力倾角也实时变化,进而系泊系统回复力是时间函数^[14]。

$$Q(t) = \left[\sum_{i=1}^{n+1-p} W_{n+1-i} L_{n+1-i} \right] \tan \theta_p(t) \quad (2)$$

式中, $Q(t)$ 为回复力, W_p 为第 p 段锚链的重度, L_p 为第 p 段锚链的长度, $\theta_p(t)$ 为第 p 段锚链水平倾角。

当顶部动边界条件的实时变化,锚链张力也会随之变化,根据力的分解,锚链的张力将产生一个水平分量,我们称之为回复力,锚链的动张力与回复力之间关系如下:

$$T(t) = \sqrt{Q(t)^2 + \left(\sum_{k=1}^n W_k L_k \right)^2} \quad (3)$$

三、半潜式平台水动力参数计算

采用AQWA建立某平台水动力计算模型，通过频域计算获得各类幅值响应算子。计算模型如图2所示。

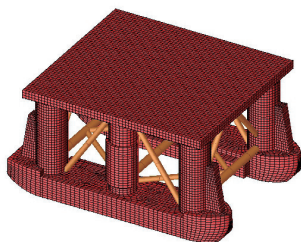


图2平台水动力模型

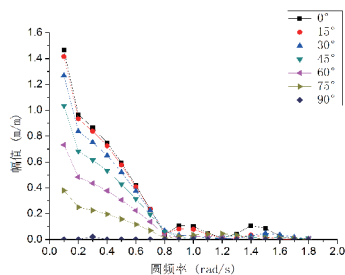


图3 纵荡RAO

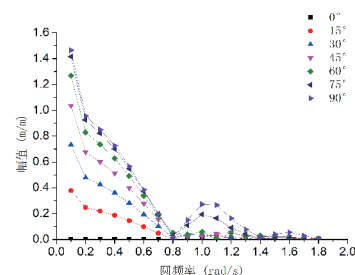


图4 横荡RAO

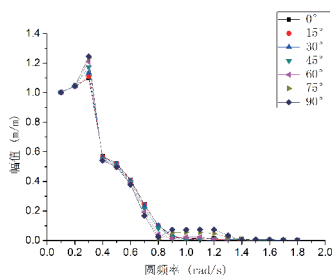


图5 垂荡RAO

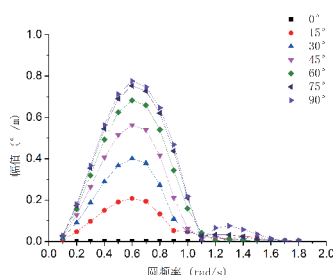


图6 横摇RAO

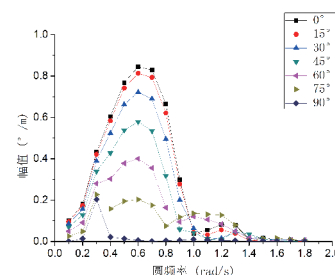


图7 纵摇RAO

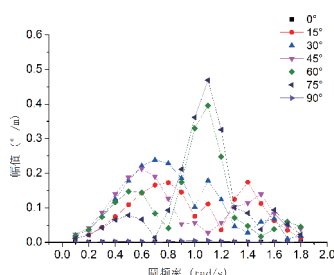


图8 首摇RAO

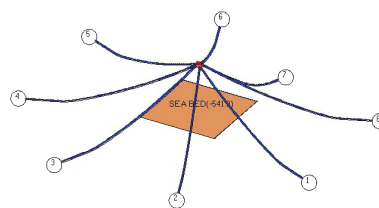


图9 系泊定位的平台模型

本文将三维势流理论和莫里森方程相结合，获得水动力参数，计算结果如图3~8所示。

四、半潜式平台时域计算

建立系泊定位的半潜式平台动力分析模型，如图9所示，施加波浪、风和海流荷载等，其中波浪采用P-M谱进行描述，如图10所示。

通过动力计算，可以获得平台各自由度的漂移量以及各锚链的动张力，计算结果如图11~13所示，分别为平台在某方向上的时域运动曲线，平台运动轨迹以及某锚链的时域动张力。

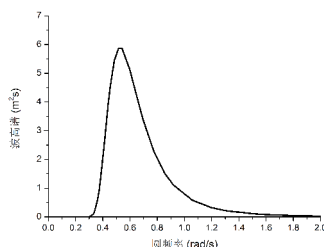


图10 PM波浪谱

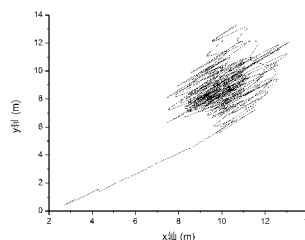


图11 平台运动轨迹

五、系泊系统参数敏感性分析

将系泊半潜式平台动力分析方法与数理统计理论相结合，采用正交试验和方差分析的方法进一步研究系泊系统的参数敏感性。本文将锚链重度、锚链预张力和水平跨度作为敏感性参数进行分析，具体参数分配见表1~2。

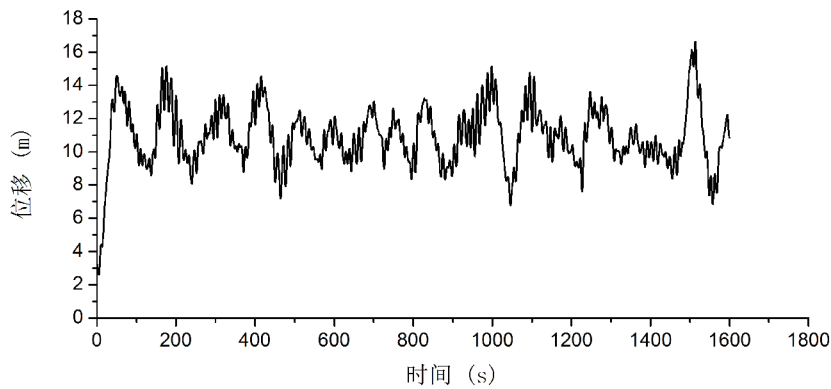


图12某方向漂移量

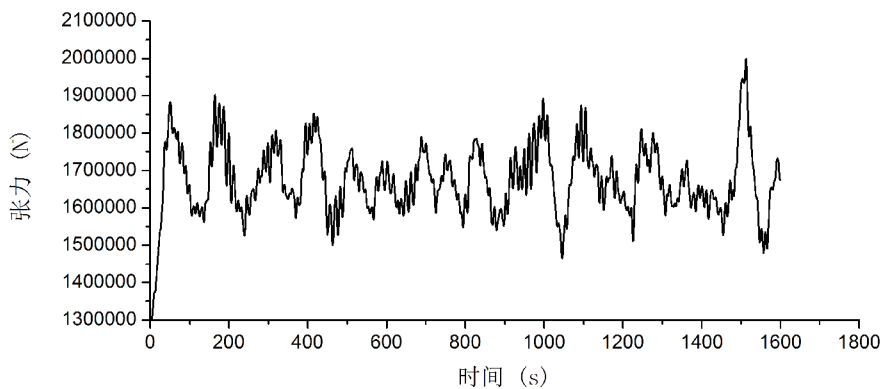


图13 锚链动张力

表1 锚链重量与预张力

级别	1	2	3
A-锚链重量 (kg/m)	29	43.5	19.5
B-锚链预张力 (t)	129t	137t	156t

表2 水平跨度

编号	C-水平跨度1(m)	C-水平跨度2(m)	C-水平跨度(m)
1	2059.83	3089.75	1380.09
2	2136.38	3204.57	1431.37
3	2095.25	3142.87	1403.81
4	2075.11	3112.67	1390.32
5	2051.00	3079.49	1375.51
6	1722.86	2584.29	1154.31
7	2049.14	3073.71	1372.93
8	2062.99	3094.49	1382.20

表3 漂移量正交分析

组合序号	A重量	B预张力	C水平跨度	评分
1	1	1	1	17.9
2	1	2	2	14.48
3	1	3	3	12.28
4	2	1	2	0
5	2	2	3	6.24
6	2	3	1	16.58
7	3	1	3	9.42
8	3	2	1	22.45
9	3	3	2	25.37
R	11.47333	8.97	9.6633333	
优先水平	A2	B2	C3	
因子主次	1	3	2	
S_j^2	202.2198	121.966	141.55496	

分别以平台漂移量和锚链的动张力为目标函数，采用 $L_9(34)$ 表进行正交试验和方差分析。其中漂移量的评分规则：默认9组数据中位移最大的为零分，其他组数据得分为

9组中最大位移与其相应位移的差,故所得分析将会与漂移量成反比,即漂移量越小,得分越高。锚链动张力的评分法则为:默认9组数据中数值最大的为零分,其他组数据得分为9组中最大数值与其相应最大动张力的差,因此所得分析将会与最大动张力成反比,即最大动张力越小,得分越高。分析结果见表3~6。

表4 漂移量方差分析

方差源	平方和	自由度	平均平方和	F	显著性
A	202.2198	2	101.1099	5.4646	显著
B	121.9660	2	60.9830	3.2959	不显著
C	141.5550	2	70.7775	3.8252	不显著

表5 动张力正交分析

	A重度	B预张力	C水平跨度	评分
1	1	1	1	0.356
2	1	2	2	0.257
3	1	3	3	0.092
4	2	1	2	0.507
5	2	2	3	0.339
6	2	3	1	0.12
7	3	1	3	0.391
8	3	2	1	0.217
9	3	3	2	0
R	0.119333	0.347333	0.043	
优先水平	A2	B2	C3	
因子主次	2	1	3	
S_j^2	0.022855	0.182383	0.0027829	

表6 动张力方差分析

方差源	平方和	自由度	平均平方和	F	显著性
A	0.0229	2	0.0114	9.2347	显著
B	0.1824	2	0.0912	73.6934	非常显著
C	0.0028	2	0.0014	1.1245	不显著

由正交试验和方差分析可知:锚链的重度是控制平台漂移量的主要因素,考虑到悬链线系泊系统是通过锚链自重提供回复力的。同时锚链的预张力和锚链的重度对于锚链的最大动张力影响显著。

六、结束语

将水动力计算与统计相结合,对半潜式平台的系泊系统参数进行敏感性分析,分析发现:锚链的重度是控制平台漂移量的主要因素,这与悬链线系泊系统的定位机理相一致;同时锚链的预张力是影响系泊系统动张力的最主要因素,其次是锚链的重度,而锚链的水平跨度对于动张力的影响较小。

参考文献:

[1] Fredriksson D. , Swift M. , Irish J. , et al. Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 27(2): 117-146.

[2] J. Decew, I. Tsukrov, A. Risso, et al. Modeling of dynamic behavior of a single-point moored submersible fish cage under currents[J]. Aquacultural Engineering, 2010, 43(2):38-45..

[3] M. O. A. Ali, I. A. Jae, M. G. Z. Hwa. Effects of water depth, mooring line diameter and hydrodynamic coefficients on the behaviour of deepwater FPSOS[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2020, 11(3): 727-739.

[4] Cozijn J. L. , Bunnik T. H. J. . Coupled mooring analysis for a deep water CALM buoy[C]. Proceedings of 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2004: 51370.1-51370.6.

[5] 罗宁, 张浩, 宋强等. 半潜式平台复合系泊系统组分配比优化设计[J]. 海洋工程, 2017, 35 (5): 19-26.

[6] 余龙, 谭家华. 基于准静定方法的多成分系泊线优化[J]. 海洋工程, 2005, 23 (1): 169-173.

[7] 王磊, 张辉, 柯珂等. 基于遗传算法的深水无隔水管钻井液举升系统系泊定位方案优化[J]. 中国海上油气, 2022, 34 (6): 142-148.

[8] 成海亮, 劳军. 海上风电设备甲板运输驳船四锚系泊系统优化设计[J]. 水运管理, 2022, 44 (5): 33-36.