

# 标准型半潜式支持平台生存海况下系泊系统方案优化

魏 军, 张会良, 袁宇波

(南通中远海运船务工程有限公司 海工与新能源研发中心, 江苏 南通 226001)

**摘 要:**半潜式支持平台恶劣海况下系泊方案的设计优化对平台的安全性和经济性有重要意义。以标准型半潜式平台为研究对象,基于墨西哥湾海况设计一套适用于 1 500 m 水深的八点悬链式锚泊定位系统,分析各方向系泊缆的受力,发现在 0°环境载荷下,4 号缆和 5 号缆受力最大;又分别研究了系泊缆顶端张角、各段成分的直径和长度分配、系泊缆之间的布置角度等因素对系泊缆顶端张力的影响,以系泊缆顶端张力为优化目标,给出了系泊系统方案的优化建议。

**关键词:**半潜式支持平台;锚泊定位系统;优化

**中图分类号:**U615.35

**文献标志码:**A

**文章编号:**2097-0358(2022)4-0044-05

## 0 引言

半潜式支持平台是为海上钻井平台或生产平台提供辅助支持的海上平台,其主要功能有:为海上作业人员提供舒适的生活居住设施;为海上平台提供物资补给、存储和转运;为生产平台进行故障设备零部件的修理和更换等。南通中远海运船务工程有限公司牵头各参研单位研发了两型具有自主知识产权的深水半潜式支持平台:标准型和北海型。其中标准型针对全球主要作业海域,而北海型则能适用于低温恶劣环境。本文以标准型半潜式支持平台为研究对象,基于恶劣生存海况研究系泊定位系统各设计参数对系泊缆张力的影响以及系泊方案的优化设计,此研究对平台的安全性和经济性有着重要的意义。

李辉等针对 2 000 m 水深张紧式系泊系统,研究了不同浪向完整条件和一根系泊缆断裂的破损工况下浮体运动和系泊缆张力特性<sup>[1]</sup>。沈祺欣等运用悬链线、几何受力分析、非线性约束优化等方法,得到在给定条件下系泊系统的状态数据以及在未定条件下怎样选择最优系泊系统<sup>[2]</sup>。

## 1 标准型半潜式支持平台概况

标准型半潜式支持平台的主船体由 2 个船型下浮体、4 个方形立柱和 1 个甲板包组成。下浮体和立柱布置有压载水舱、平衡水舱、燃油舱、淡水舱、泵舱、推进器舱等。甲板包为箱型结构,由 4 层甲板及横纵舱壁结构组成。平台最大承载人数为 500 人,配备有大型伸缩式栈桥和两台 100 t 的船用起重机,可利用甲板面积为 1 500 m<sup>2</sup>。平台布置有 4 个机舱,每个机舱配备 2 台 2.8 MW 发电机,平台还配有 4 台 4.4 MW 吊舱推进器,具有动力定位能力和自航能力,航速约为 10 kn。平台主尺度参数如表 1 所示。

表 1 标准型半潜式支持平台主尺度参数

单位:m

主尺度参数	数量	主尺度参数	数量
总长	95.0	主甲板(长×宽)	66.0×67.0
下浮体长	95.0	主甲板距基线高	35.7
下浮体宽	14.0	生存工况吃水	13.5
下浮体高	9.0	作业工况吃水	17.5~20.0
立柱(长×宽)	13.5×14.0		

收稿日期:2020-02-23

基金项目:工信部“深水半潜式支持平台研发专项”经费资助(工信部联装函[2016]546号)

作者简介:魏军(1983—),男,安徽砀山人,南通中远海运船务工程有限公司海工与新能源研发中心工程师,硕士。

2 系泊系统初始方案设计

2.1 环境条件选择

标准型半潜式支持平台适用于全球主要海域,在进行系泊系统设计时所参考的环境条件为墨西哥湾和巴西海域,在生存海况下,墨西哥湾环境条件更为恶劣,因此本文采用墨西哥湾海况作为设计输入。墨西哥湾作为油气开采比较活跃的几个重要油区之一,在海洋中生产运营的半潜式平台,时刻受到千变万化的风、浪、流等环境载荷的影响,为确保其能安全作业,保证平台在风、浪、流载荷作用下的运动响应适应性显得尤为重要。墨西哥湾海域的环境条件如表 2 所示,其中波浪采用 JONSWAP 谱,风谱采用 NPD 谱。风、浪、流同向耦合,风、浪的时历均采用随机种子数生成。

表 2 墨西哥湾海域环境条件

载荷	墨西哥海域环境参数	作业海况	生存海况
风	1 小时平均风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	21.5	48.0
	有义波高 $H_s/\text{m}$	5.0	15.8
浪	谱峰周期 $T_p/\text{s}$	9.0	15.4
	波浪提升因子 $\lambda$	2.0	2.0
流	表面流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.51	2.4

2.2 初始系泊方案

标准型半潜式支持平台系泊系统的最大适应水深为 1 500 m,系泊缆初步布置方案如图 1 所示,系泊系统共有 8 根系泊缆,分为 4 组,每组 2 根。每根系泊缆由两部分组成,上部与平台连接的为钢丝绳,下端为锚链(R4S),系泊缆参数如表 3 所示。生存工况下,每根系泊缆抛出的长度为 3 800 m,预张力约为 320 t。导缆孔位置根据平台布置选取,缆 1 对应导缆孔 1,缆 2 对应导缆孔 2,以此类推。假定原点选取在船体中心处,左舷为正,右舷为负,导缆孔和海底系泊点的坐标如表 4 所示。

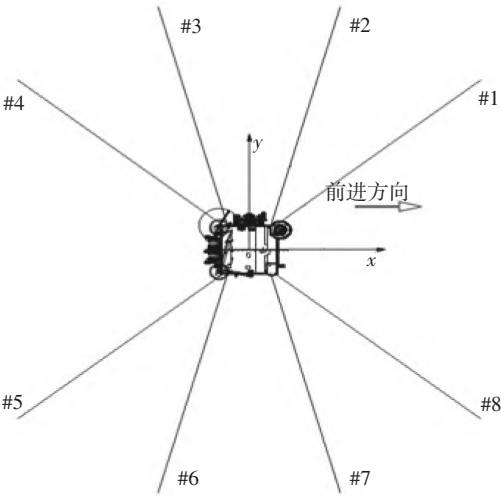


图 1 系泊系统布置方案示意图

表 3 悬链式系泊缆主要参数

系泊缆	长度/m	直径/mm	干重/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ )	湿重/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ )	刚度/N	破断强度/N
船链 R4S	400	157	540	411	2.168 e9	2.123 4e7
钢丝绳	3 400	157	129	90	2.187 e9	2.193 6e7

表 4 导缆孔和海底系泊点坐标图

单位:m

编号	导缆孔			系泊点		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
1	30	33.5	18.1	2 320	1 955	-1 500
2	26	33.5	18.1	800	2 921	-1 500
3	-26	33.5	18.1	-800	2 921	-1 500
4	-30	33.5	18.1	-2 320	1 955	-1 500
5	-30	-33.5	18.1	-2 320	-1 955	-1 500
6	-26	-33.5	18.1	-800	-2 921	-1 500
7	26	-33.5	18.1	800	-2 921	-1 500
8	30	-33.5	18.1	2 320	-1 955	-1 500

### 2.3 系泊缆张力计算结果

采用时域全耦合分析方法进行平台运动响应分析和锚泊系统分析,利用 ANSYS 水动力及系泊软件包 AQWA 进行计算,在 Workbench 中创建有限元几何模型,用 AQWA-Line 模块进行频域分析,AQWA-Drift 模块进行锚泊系统的时域分析,采用势流理论分析计算波浪载荷。分别计算环境载荷为  $0^\circ$  和  $45^\circ$  两方向的结果,如表 5 所示。通过比较计算结果,可以看出环境载荷为  $0^\circ$  时,系泊缆更为危险,5 号系泊缆受力最大达到 13 504.7 kN,安全因子为 1.63,小于 API 规范要求的 1.67,因此需要对此初始系泊方案进行优化,以减小系泊缆受力,确保平台的安全。每根系泊缆在  $0^\circ$  和  $45^\circ$  方向下的最大受力对比如表 5 所示。

表 5 系泊缆张力计算结果

系泊缆编号	组成部分	环境载荷 $0^\circ$		环境载荷 $45^\circ$	
		最大受力/kN	安全因子	最大受力/kN	安全因子
1	钢丝绳	73.4	99.99	357.2	59.45
	锚链	2 331.7	9.47	2 504.8	8.81
2	钢丝绳	920.7	23.06	725.3	29.28
	锚链	2 858.0	7.72	2 734.2	8.07
3	钢丝绳	2 770.1	7.67	1 416.1	14.99
	锚链	4 169.3	5.29	3 177.6	6.95
4	钢丝绳	12 203.0	1.74	2 853.2	7.44
	锚链	13 498.2	1.64	4 252.0	5.19
5	钢丝绳	12 209.5	1.74	6 160.7	3.45
	锚链	13 504.7	1.63	7 515.4	2.94
6	钢丝绳	2 770.4	7.66	3 753.3	5.66
	锚链	4 169.6	5.29	5 143.6	4.29
7	钢丝绳	920.9	23.06	2 367.1	8.97
	锚链	2 858.1	7.72	3 811.0	5.79
8	钢丝绳	73.5	99.99	1 096.3	19.37
	锚链	2 331.7	9.47	2 970.4	7.43

### 3 系泊系统设计参数影响分析

多成分悬链线锚泊系统设计是一个复杂的问题,设计中要综合考虑平台位移、环境载荷、定位水深、锚泊布置等因素<sup>[3]</sup>,同时也要分析多成分锚泊线的最优分配和材料选择,而且锚泊链的布置方式也会对整个平台的系泊稳定性产生很大的影响。以下从环境载荷  $45^\circ$  方向为例,从系泊缆的顶端张角、各段成分的直径、长

度以及布置角度四个参数的变化来分析各参数对系泊缆张力的影响。

### 3.1 改变顶端张角

系泊缆的顶端张角是系泊系统设计的关键参数,在系泊缆各段直径和长度不变的情况下,选取 55°、60°、65°、70°为顶端张角,研究其对系泊缆张力的影响,为优化系泊设计提供一定的参考。系泊缆张力最大值如表 6 所示,从表 6 可以看出,随着张角的不断增大,顶端张力逐渐减小,动力响应标准差减小,张力动态响应程度减小。

表 6 改变顶端张角时张力计算结果

顶端张角/°	最大值/kN	标准差/kN
55	7 515	433
60	7 276	421
65	6 611	383
70	6 468	375

### 3.2 改变各段直径

系泊缆绳各段直径是直接影响最大破断力的因素。在设计系泊系统时,缆绳的直径除了会导致张力的变化,也会影响系泊系统的成本,一味地增加直径,虽会使缆绳的承受能力变大,但是不利于经济性,所以直径的选取在满足系泊系统安全性的前提下不宜过大。

钢丝绳长度为 3 200 m,锚链长度为 400 m,顶端张角为 55°时,变量为钢丝绳和锚链的直径,表 7 列出了 4 种不同方案下的系泊缆顶端张力的最大值及安全系数,从表中可以看出,随着直径不断减小,顶端张力的最大值也逐渐减小,特别是当锚链直径减小时张力的减小更加明显,可以认为是锚链直径减小时其重力也减小,因此系泊缆所受张力亦减小。当钢丝绳直径为 141 mm、锚链直径为 147 mm 时,虽然安全系数相比前两种方案较低,但仍能满足 API 规范要求的安全系数 1.67,从经济性方面考虑,此种方案为较优选择。

表 7 改变各段直径时顶端张力计算结果

各段直径/mm	最大值/kN	标准差/kN	安全系数
钢丝绳 157,锚链 157	7 515	433	2.94
钢丝绳 147,锚链 152	7 369	449	2.78
钢丝绳 141,锚链 152	7 353	471	2.61
钢丝绳 141,锚链 147	7 085	452	2.63

### 3.3 改变各段长度

钢丝绳和锚链的长度同样会直接影响到系泊系统的经济性。固定系泊缆各段直径为 157 mm,顶端张角为 55°,改变各段长度分配,计算结果如表 8 所示。从表中结果可以看出,随着系泊缆钢丝绳和锚链长度减小,顶端张力的最大值增大,张力动态响应标准差变化不大。因此,若需要减小系泊缆张力,可以增大钢丝绳和锚链长度,但若想节约系泊系统成本,则需要减小其长度。所以需要根据具体需要优化的目标有针对性地选择方案。

表 8 改变每段长度时顶端张力计算结果

长度/m	最大值/kN	标准差/kN	安全系数
钢丝绳 3 200,锚链 400	7 515	433	2.94
钢丝绳 3 100,锚链 400	7 617	449	2.90
钢丝绳 3 100,锚链 300	7 708	448	2.87
钢丝绳 3 000,锚链 300	7 941	457	2.78

### 3.4 改变布置角度

改变每组系泊缆之间的夹角会改变系泊力在系泊缆之间的分配比例,进而会对浮式平台的系泊性能产生影响,下面列举了 4 种不同角度的系泊缆布置方案,以每组两系泊缆绳间的夹角为单一变量,分别进行耦合计算,得到缆绳顶部的张力,其最大张力结果如表 9 所示。从表中数据可以看出,随着系泊缆夹角增大,系泊缆顶端张力和标准差都有所增大。结合表 5 分析数据,可以认为系泊缆布置与最大张力时环境载荷方向越接近,系泊缆越能抵抗环境载荷,张力动态响应程度越小,这也是为什么  $0^\circ$  环境载荷比  $45^\circ$  环境载荷时系泊缆更为危险的原因。

表 9 不同布置角度时张力计算结果

系泊缆夹角/ $^\circ$	最大值/kN	标准差/kN
32.5	7 308	415
35.0	7 515	433
37.5	7 542	439
40.0	7 572	454

## 4 系泊系统方案优化总结

生存海况下,当环境载荷为  $0^\circ$  时系泊缆安全因子小于 API 规范要求值,因此优化的主要目标是减小系泊缆的张力。根据对系泊系统设计各相关参数的影响分析,我们对优化方案总结如下:

(1)增大顶端张角。增大顶端张角会有效减小系泊缆张力,为了避免对平台运动响应有太大的影响,顶端张角仅从  $55^\circ$  增大到  $60^\circ$ ;

(2)维持系泊缆各段直径。虽然顶端张力有所减小,但系泊缆破断力也减小了,安全系数进一步降低,因此维持系泊缆各段直径仍为 157 mm;

(3)适当加长钢丝绳长度。当系泊缆长度加长后,顶端张力会有所减小,为避免过大的经济成本浪费,仅将钢丝绳长度从 3 200 m 增大到 3 300 m;

(4)调整系泊缆的系泊角度。我们认为由于  $45^\circ$  环境载荷下系泊缆受力远小于  $0^\circ$  环境载荷结果,因此可以适当增大每组缆绳间的角度,考虑将初始的  $35^\circ$  增大到  $40^\circ$ ,这样在  $0^\circ$  环境载荷下,最危险的 4 号缆和 5 号缆张力会减小。

## 5 结束语

本文以标准型半潜式支持平台为研究对象,基于墨西哥湾恶劣生存海况下,设计了一套适用于 1 500 m 水深的八点悬链式锚泊系统,分析了各方向系泊缆的受力,发现在  $0^\circ$  环境载荷下,4 号缆和 5 号缆受力最大,安全因子略低于 API 规范要求值;在此系泊方案基础上,又分别研究了系泊缆顶端张角、各段成分的直径和长度分配以及系泊缆之间的布置角度等因素对系泊缆顶端张力的影响,并且根据研究结果,以系泊缆顶端张力为优化目标,给出了系泊系统方案的优化建议。研究结果对半潜式支持平台系泊系统的经济性和安全性的提高有着实际的指导意义。

## 参考文献:

- [1]李辉,刘春雷,张伟,等.深水半潜式平台张紧式系泊系统优化设计[J].船舶工程,2018(Z1):287-294.
- [2]沈祺欣,陈雪,蔡志超.基于悬链线的系泊系统优化设计[J].科技创新导报,2016(34):55-58.
- [3]余龙,谭家华.深水多成分悬链线锚泊系统优化设计及应用研究[J].华东船舶工业学院学报(自然科学版),2004(5):8-13.

(责任编辑:张 利)

(下转第 104 页)



- [4]邢辉.面向智能船舶的航海类新工科人才培养刍议[J].高等工程教育研究,2017(6):33-38.  
[5]马建文,李光正,王波.面向智能航运的应用型航海类人才培养[J].航海教育研究,2019(3):18-22.  
[6]魏立队,魏海军,曹红奋.面向智能船舶的高等航海教育变革路径[J].航海教育研究,2018(4):7-11.

(责任编辑:范可旭)

## Exploratory Analysis of the Mode for Higher Vocational New Engineering Discipline Maritime Talents' Cultivation Mode for the Age of Intelligent Shipping

CAO Shi-yong<sup>1</sup>, SHA Xiao-jin<sup>1</sup>, XU Yang<sup>2</sup>

(1. School of Nautical Technology, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China;  
2. School of Intelligent Manufacturing, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China)

**Abstract:** The cultivation of new engineering discipline maritime talents is an important measure to implement the development of national intelligent shipping. By sorting out current status and development trend of maritime talents' cultivation mode under the background of intelligent shipping, it systematically analyzes the changes brought about by intelligent shipping for higher vocational maritime education and the main practical problems encountered by the development of intelligent maritime education in China. Four aspects of constructing the higher vocational new engineering discipline maritime talents' cultivation mode for the age intelligent shipping, the intelligent navigation curriculum and teaching system featured by "AI + Navigation", the whole process assessment and evaluation system of new engineering maritime talents cultivation, and the integration of production and education to co-construct higher vocational colleges' new engineering talents cultivation system of intelligent shipping are explored to establish the mode for higher vocational new engineering discipline maritime talents' cultivation.

**Key words:** intelligent shipping; new maritime engineering discipline; talent cultivation mode; modernization of education

(上接第 48 页)

## Optimization of Mooring System Scheme for Standard Semi-Submersible Support Platform Under Survival Sea Conditions

WEI Jun, ZHANG Hui-liang, YUAN Yu-bo

(Offshore and New Energy Research and Development Center, Nantong COSCO Shipping Engineering Co., Ltd.)

**Abstract:** The design optimization of mooring scheme for semi-submersible support platform under rough sea conditions is of great significance to the safety and economy of the platform. Taking a standard semi-submersible platform as the research object, based on the sea conditions in the Gulf of Mexico, a set of eight-point catenary anchor positioning system suitable for 1,500 m water depth is designed. The forces on mooring lines in various directions are analyzed. It is found that under 0° environmental load, the forces on No.4 and No.5 cables are the largest. The effects of factors such as the top tension angle of the mooring line, the diameter and length distribution of each segment, and the arrangement angle between the mooring lines on the top tension of the mooring line are also studied. Taking the top tension of the mooring line as the optimization goal, suggestions for optimizing the mooring system scheme are given.

**Key words:** semi-submersible support platform; mooring positioning system; optimization