

文章编号:1005-9865(2015)01-0031-08

半潜式起重平台系泊系统设计与优化研究

樊磊¹, 孙丽萍¹, 王宏伟¹, 王金光²

(1. 哈尔滨工程大学 深海科学和技术创新引智基地, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 烟台中集来福士海洋工程有限公司, 山东 烟台 264000)

摘 要: 近年来, 国内兴起了大力发展半潜式起重平台的势头, 系泊系统的设计与优化是该类型平台开发中的关键问题之一。采用时域方法对半潜式起重平台系泊系统进行耦合动力分析, 研究系泊系统主要参数对其动力响应特性的影响, 并给出主要参数的设计优化流程, 在此基础上, 以能够满足安全校核且性能较优的系泊方案为目标, 对该半潜式起重平台的系泊系统进行优化设计, 并研究单根系泊缆发生破断对整个系泊系统的影响。结果表明: 基于主要参数对系泊性能的影响规律, 经优化设计得到的系泊方案, 预留的安全裕度适中, 能够保障半潜式起重平台在恶劣海况下的生存能力, 同时具备较好的经济性。

关键词: 半潜式起重平台; 系泊系统; 方案设计与优化; 耦合分析

中图分类号: P751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2015.01.004

Investigation on mooring system design and optimization of a semi-submersible crane vessel

FAN Lei¹, SUN Liping¹, WANG Hongwei¹, WANG Jinguang²

(1. Deepwater Engineering Science and Technology Innovation and Talent Introducing Base, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Yantai CIMC Raffles Offshore, Ltd., Yantai 264000, China)

Abstract: In recent years, China has witnessed a rising trend triggered by the development of semi-submersible crane vessels, and mooring system design and optimization are one of the key issues in the design of the semi-submersible crane vessel. In this study, coupled-dynamic analysis of a semi-submersible crane vessel with mooring cables was performed in the time domain to design and optimize the mooring system, in which the effects of basic parameters of the mooring system on its dynamic characteristics were evaluated. Design and optimization procedure that involves basic parameters of mooring system is presented. Particular attention was paid to the reliability of the mooring system designed in both intact and damaged conditions respectively, the characteristics of mooring system were investigated when the single cable was damaged as well. It is seen that the safety margin of the mooring system designed is well-controlled, which can provide not only a guarantee for the survival ability of this semi-submersible crane vessel in an extreme environmental condition but also a good concern for economy.

Keywords: semi-submersible crane vessel; mooring system; design and optimization; coupled analysis

海洋油气资源的大力开采促使能够完成海上重型起重作业的半潜式起重平台 (semi-submersible crane vessel, 简称 SSCV) 一直处于供不应求的状态。目前, 国内正兴起大力发展半潜式起重平台的势头^[1]。然而, 随着钻采海域向深海的拓展, 半潜式起重平台在深海恶劣海况下的生存能力受到严峻挑战^[2-3], 并且该类型

收稿日期: 2013-11-28

基金项目: 教育部博士点科研基金资助项目 (20132304120008)

作者简介: 樊磊 (1988-), 男, 辽宁人, 硕士生, 主要从事海洋结构物-系泊耦合分析。E-mail: fanlei07011206@163.com

平台作业海域极为广泛,迫切需要安全可靠且对不同作业海域具有更好适应性的系泊系统。同时,系泊缆作用于锚端的垂向提升力又会对该类型平台常用的拖曳嵌入锚产生不利影响,须严格控制,因此,系泊系统的设计与优化一直被视作半潜式起重平台开发中的焦点问题和关键技术。

董璐等^[4]采用模型试验和时域准静态方法对起重船与系泊系统进行分析,研究了水深变化对浅水中的系泊起重船运动的影响;童波等^[5]分析了系泊缆直径、长度、预张力角度等因素对深水半潜平台系泊系统动力特性的影响;宋安科^[6]采用时域耦合动力分析的方法对深水半潜式钻井平台的系泊系统进行数值分析,研究了系泊缆材料、顶部张角、顶部预张力、轴向刚度以及平台作业水深对系泊系统的定位能力和强度影响;冯爱春等^[7]采用时域分析方法研究某半潜式平台在不规则波作用下的动力响应特性,重点研究了系泊缆发生断裂对其运动谱和系泊缆张力谱的影响。国内对于半潜式起重平台系泊系统设计与优化的研究较少,大多是以半潜式钻井或采油平台为研究对象。因此,文中以某半潜式起重平台为研究对象,采用耦合动力分析方法,研究系泊系统主要参数对其动力响应特性的影响,以能够满足安全校核且性能较优的系泊方案为目标,对该半潜式起重平台的系泊系统进行优化设计,并研究单根系泊缆发生破断对整个系泊系统的影响,旨在为半潜式起重平台系泊系统的方案设计和优化选型提供参考。

1 系泊系统分析方法

分析系泊浮体的运动响应以及与它相连的系泊系统的动力响应主要采取三种方法:解耦分析、耦合和半耦合分析。而根据所分析的浮体形式、设计阶段或作业工况等的不同,可以采取不同的分析方法,通常有以下几种方式:频域解耦分析、时域半耦合分析、时域半耦合分析加时域耦合分析、频域耦合分析、频域耦合分析加时域耦合分析以及频域解耦分析加时域耦合分析^[8]。

这里对所研究的半潜式起重平台及其系泊系统采用频域耦合分析与时域耦合分析相结合的分析方式,主要探讨该平台系泊系统在 1 000 m 水深时的动力响应,其中以时域耦合分析方法为主。

耦合分析是将浮体与系泊系统集成在同一个模型中,同时求解由系泊系统动力特性和浮体 6 个自由度刚体运动方程组成的系统运动方程,完全考虑浮体与系泊系统的相互作用,考虑了细长体对平台运动的所有的影响,如刚度、阻尼、波浪载荷、流载荷以及惯性等。浮体与系泊系统耦合运动方程可表示为:

$$R^I(r, \ddot{r}, t) + R^D(r, \dot{r}, t) + R^S(r, t) = R^E(r, \dot{r}, t) \tag{1}$$

式中: R^I, R^D, R^S 分别为惯性力、阻尼力和内力矢量; R^E 为外部激振力矢量。 $r, \dot{r}, \ddot{r}$ 分别为结构的位移、速度和加速度矢量^[9]。

2 系泊系统初步设计

2.1 风载荷和流载荷

为准确获得半潜式起重平台的风载荷和流载荷,对该平台分别进行了模型风洞刚性测力试验和模型水池拖航阻力试验。

根据模型试验测得风载荷和流载荷,按照式(2)计算得到风载荷系数和流载荷系数,并根据各自的模型缩尺比以及作业海域的实际风速和流速,换算得到实船的风载荷和流载荷。

$$\bar{F}_j^{w(c)}(\alpha) = C_j^{w(c)}(\alpha) V_{w(c)}^2 \tag{2}$$

式中: j 为模态(1-纵荡,2-横荡,6-艏摇); $\bar{F}_j^{w(c)}$ 为第 j 运动模态下风(流)载荷的统计平均值, N; $V_{w(c)}$ 为风(流)速, m/s; $C_j^{w(c)}$ 为第 j 运动模态下风(流)载荷系数, $N \cdot s^2/m^2$; α 为风(流)向角。

2.2 设计标准

文中所研究的半潜式起重平台的系泊系统主要是保障平台在恶劣海况下的生存能力,因此,环境条件选用十年一遇的风暴状态与一年一遇的环流状态,如表 1 所示。为了获得最不利的环境载荷,采用风浪流同向。规定环境载荷入射方向:0°为船尾指向船艏,90°右舷指向左舷。

表 1 环境条件
Tab. 1 Metocean conditions

环境名称	项目	数据	环境名称	项目	数据
波浪	谱名称	JONSWAP 谱	风	谱名称	API
	γ	3.3		1 小时平均风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	22.5
	有义波高 H_s/m	6.8	流	水表面流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.91
	峰值周期 T_p/s	12.2		流速剖面	$V_z = V_s \cdot (1+z/h)^{1/7}$
	浪向/($^\circ$)	0/30/60/75/90/105/120/150/180			

这里主要关注半潜式起重平台动力响应情况,即系泊缆的顶端张力和锚端提升力。
参考 ABS 规范^[10]和 API 规范^[8]中的设计标准,对该半潜式起重平台的系泊系统进行安全校核。
由于 ABS 规范对系泊缆安全系数的规定不完整,仅给出了采用准静态分析方法时系泊缆校核所需的安全系数,所以参考 API 规范,按照式(3)对安全系数进行修正,获得了采用动态分析方法时系泊缆的安全系数 SF_d ,并得到 ABS 的认可。

$$\frac{SF.API_{quasi-static}}{SF.API_{dynamic}} = \frac{SF.ABS_{quasi,survival}}{SF.ABS_{dynamic,survival}}$$

(3)

半潜式起重平台通常使用拖曳嵌入锚,该类型锚对于系泊缆垂向提升作用的承受能力与海底土壤条件密切相关,在砂质土壤或硬质黏土中因嵌入深度受到影响会对提升力较为敏感^[11],提升力过大会导致锚被拉离海床,造成系泊系统失效,所以须同时对系泊缆的锚端提升力进行严格控制,以确保系泊系统的可靠性。
安全系数和锚端提升力的校核标准如表 2 所示。

表 2 系泊系统校核标准
Tab. 2 Design criteria

工况	安全系数	提升力	工况	安全系数	提升力
完整	≥ 1.5	$\leq 100\text{ N}$	单根失效(稳态)	≥ 1.09	——

2.3 平台与系泊系统主要参数

该半潜式起重平台的结构形式如图 1 所示,采用 2 个浮箱,4 个大立柱,2 个小立柱以及数个斜撑和横撑,关于中纵剖面对称,平台的具体参数如表 3 所示。

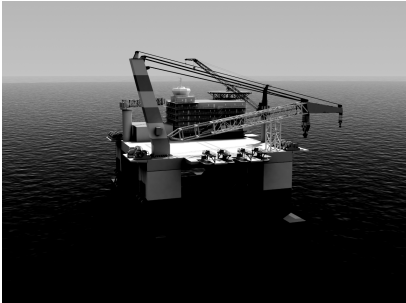


图 1 半潜式起重平台示意

表 3 半潜式起重平台主尺度参数

Tab. 3 Semi-submersible crane vessel dimensions

项目	长/m	宽/m	高/m
主甲板	80	70	38(距龙骨)
下浮体	118	15	8
前立柱	15	15	25
后立柱	17.5	15	25

该半潜式起重平台最大作业水深为 1 000 m,采用悬链式系泊系统为宜,该系泊系统由 4 组 12 根对称布置的系泊缆组成,如图 2 所示。每根系泊缆采用钢缆和钢链的组合形式,钢缆上端与平台导缆孔相连接,钢链末端与锚基础相连接,钢缆和钢链的材料属性根据统一工业标准^[11]进行选取,如表 4 所示。

表 4 系泊缆参数
Tab. 4 Mooring line properties

项目	钢缆	钢链
直径/mm	76	76
长度/m	2 250	2 000
干重/(kg·m ⁻¹)	26.85	123.00
湿重/(kg·m ⁻¹)	22.57	98.40
轴向刚度/kN	333 960	550 000
破断强度/kN	4 900	5 000
惯性力系数 C_i	2.0	2.0
纵向曳力系数 C_d	1.8	2.4

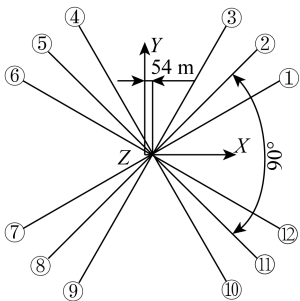


图 2 半潜式起重平台系泊系统布置形式示意
Fig. 2 Arrangement of mooring system

3 结果分析

3.1 系泊系统设计优化

影响悬链式系泊系统性能的因素主要包括:系泊系统的布置形式(系泊缆根数、系泊缆组数、布置角度等)、顶端预张力、分段系泊缆的组成成分以及组合方式、组成成分的材料属性(直径、长度、干重、湿重、轴向刚度、破断强度以及动力特性等)、绞车的应用等。在系泊系统的诸多参数中,系泊缆的破断强度是设计过程中的最为关键的参数,直接或间接地影响系泊系统中的绝大多数参数的选取,应予以优先确定,系泊缆的半径、轴向刚度等基本参数由于直接影响到系泊缆的破断强度,在后续的优化设计中通常不进行探讨,而是以初步设计方案为准。因此,本文主要研究系泊缆的布置角度、系泊缆组成成分的长度以及顶端预张力对平台运动响应和系泊系统动力响应的影响规律,以能够满足安全校核且性能较优的系泊方案为目标,采用时域耦合动力分析方法,对这些参数进行选取,并对初步确定的优化方案进行安全性与经济性评估。具体流程如图 3 所示。

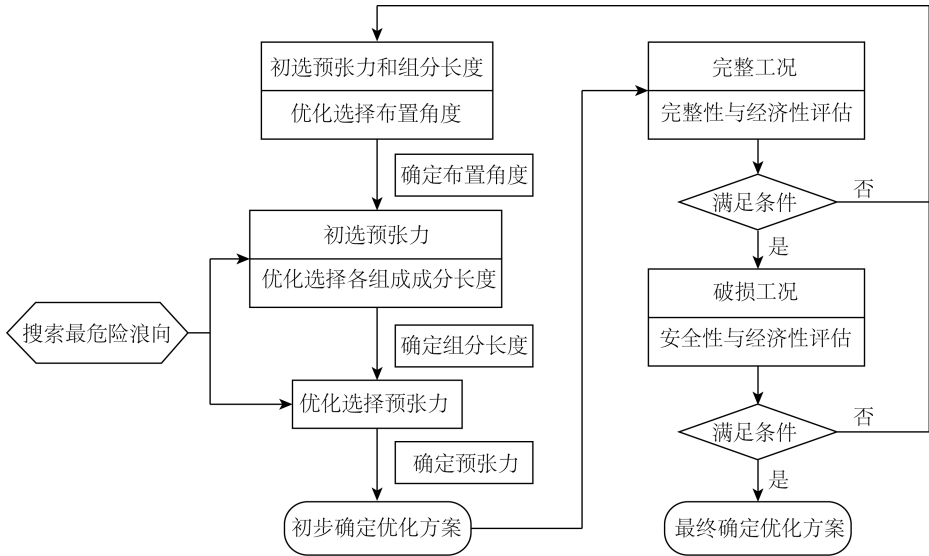


图 3 系泊方案的设计与优化流程
Fig. 3 Design and optimization procedure for mooring system

3.1.1 布置角度

系泊缆采用 2 250 m 钢缆和 2 000 m 钢链组合的初始长度,根据预先进行的频域耦合计算,初步选定预张力约为 769 kN(最小破断强度的 15.69%),系泊缆之间的夹角分别选为 7.5°、10°、12.5°、15°、17.5°和 20°,布置形式参考图 2。不同布置角度的时域耦合动力计算结果如图 4 所示。

由图 4 可见,随着系泊缆夹角的减小,各浪向下受力最大的系泊缆所在位置相同,但其顶端张力却呈减少的趋势,说明随着系泊缆夹角的减小,组内系泊缆更有效地提供系泊系统的回复力,减小受力最大的系泊缆所承受的载荷,降低了其动力响应程度,但同时也需要考虑由布置角度减小带来的同组系泊缆之间的碰撞问题。

由表 5 可知,随着系泊缆夹角的减小,平台在迎浪时的纵荡偏移量和横浪时的横荡偏移量都有所增加,说明系泊缆夹角的减小导致该布置形式的系泊系统的定位能力下降。

该半潜式起重平台的系泊系统以保证平台在恶劣海况下的生存能力为目的,因此,在优化布置角度时,应重点考虑系泊系统的动力响应,而平台的运动响应作为次要因素予以关注,同时兼顾同组系泊缆间的碰撞问题,将该系泊系统的布置角度选为 12.5°。

表 5 平台迎浪时的纵荡偏移量和横浪时的横荡偏移量

Tab. 5 Surge displacement in head sea and sway displacement in beam sea

布置角度/(°)	迎浪纵荡			横浪横荡		
	最大值/m	平均值/m	均方差/m	最大值/m	平均值/m	均方差/m
7.5	84.561	62.401	4.340	77.377	61.820	3.108
10	84.369	62.281	4.328	77.198	61.698	3.100
12.5	84.115	62.124	4.307	76.979	61.547	3.087
15	83.819	61.938	4.280	76.727	61.383	3.068
17.5	83.507	61.743	4.247	76.450	61.208	3.048
20	83.179	61.552	4.212	76.177	61.026	3.027

3.1.2 系泊缆长度

系泊半径过大会降低系泊系统抵御环境载荷的有效性,系泊系统重量过大会减小起重平台的可变载荷,降低其有效起重能力,所以在保证系泊系统安全性的前提下,合理地减小系泊半径能够有效提高平台和系泊系统性能。

预先进行的频域耦合计算结果显示:布置角度为 12.5°时,最危险环境载荷入射角度为 30°。因此,选取该角度作为系泊缆长度优化过程中环境载荷的入射角度。初选预张力约为 769 kN。由于单位长度下钢链的湿重较钢缆的湿重大得多,减小钢链的长度对提高平台作业能力和系泊系统性能更为显著,所以,设定钢链长度由初始的 2 000 m 依次减小,钢缆长度保持 2 250 m 不变,进行时域耦合动力分析,计算结果如图 5 所示。

随着钢链长度的减小,受力最大系泊缆的顶端张力和锚端提升力均逐渐增加,顶端张力呈近似线性化增加,锚端提升力在钢链长度小于 900 m 后迅速增加。参考校核标准,钢链长度宜选为 800 m。

3.1.3 顶端预张力

系泊缆的预张力对系泊系统的性能影响较大,预张力不宜过小或过大,过小会导致系泊缆出现松弛现象,降低系泊系统抵御环境载荷的有效性,过大则会造成系泊缆张紧过度,系泊系统对环境载荷过于敏感,整体安全性降低。

根据系泊缆长度优化结果,选定钢链长度为 800 m,钢缆长度为 2 250 m。调整预张力倾角,以约为 50 kN(最小破断强度的 1%)的步长将预张力由 678 kN 逐渐增大至 1 014 kN,对平台和系泊系统进行时域耦合动力分析。计算结果如图 6 所示。

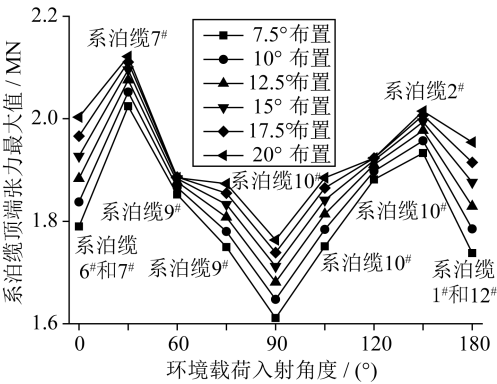


图 4 布置角度对系泊缆动力响应的影响

Fig. 4 Comparison of dynamic response results of mooring lines with different arrangement angles

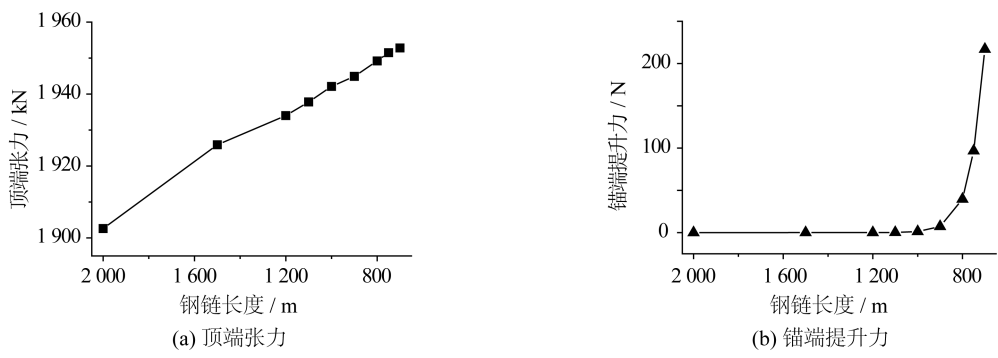


图 5 不同长度钢缆下的系泊缆顶端张力和锚端提升力的统计最大值

Fig. 5 Comparison of dynamic response results of mooring lines with different chain lengths

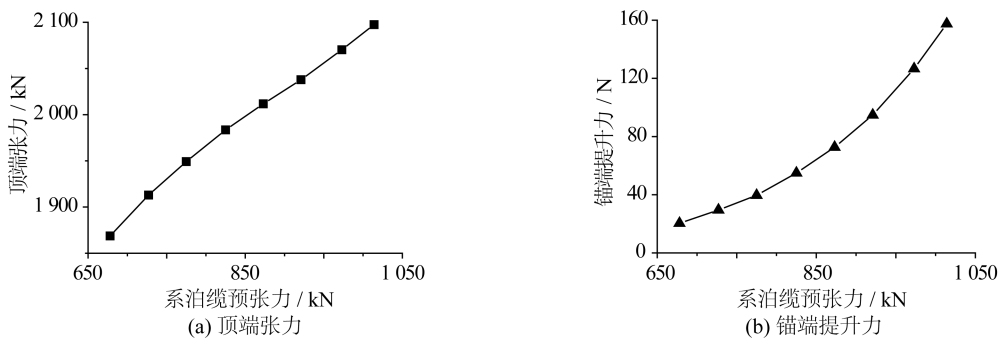


图 6 不同预张力下的系泊缆顶端张力和锚端提升力的统计最大值

Fig. 6 Comparison of dynamic response results of mooring lines with different pretensions

随着系泊缆预张力的增加,受力最大系泊缆的顶端张力和锚端提升力均逐渐增加,这是由于预张力的增加导致系泊缆的张紧程度增加,从而提高由系泊缆受到拉伸而产生的回复力。预张力的增加能够提高系泊系统的定位能力,但同时增加了系泊系统的负荷,降低其对恶劣海况的抵御能力。因此,参照校核标准,同时考虑到预张力不宜过大或过小,认为之前频域耦合计算得到的 769 kN 预张力较为适合。

根据各参数对系泊系统性能的影响规律,设计该半潜式起重平台的系泊方案,主要参数如表 6 所示。

表 6 系泊系统主要设计参数

Tab. 6 Design parameters of mooring system

项目	数值
布置角度/(°)	12.5
系泊半径/m	2 949.68
预张力/kN	769

3.2 设计方案安全性与经济性评估

为了评估设计方案的安全性和经济性,在完整和破损工况(单根失效后系泊系统进入稳态)下,进行全浪向的时域耦合动力计算。为了获得具有较高置信度的系泊系统动力响应的统计数据,根据 API 规范推荐^[8],对每个浪向均进行时长为 3 小时的 5 个波浪随机数的计算,并采用最大响应平均值法统计计算结果。

从偏于安全的角度出发,工程上对破损工况中的失效系泊缆的选取较为严格,通常将完整工况中张力第二大的系泊缆进行破损处理,从而对完整状态系泊系统中受力最大的系泊缆进行更为苛刻的检验。完整工况和破算工况的计算结果如图 7 所示。

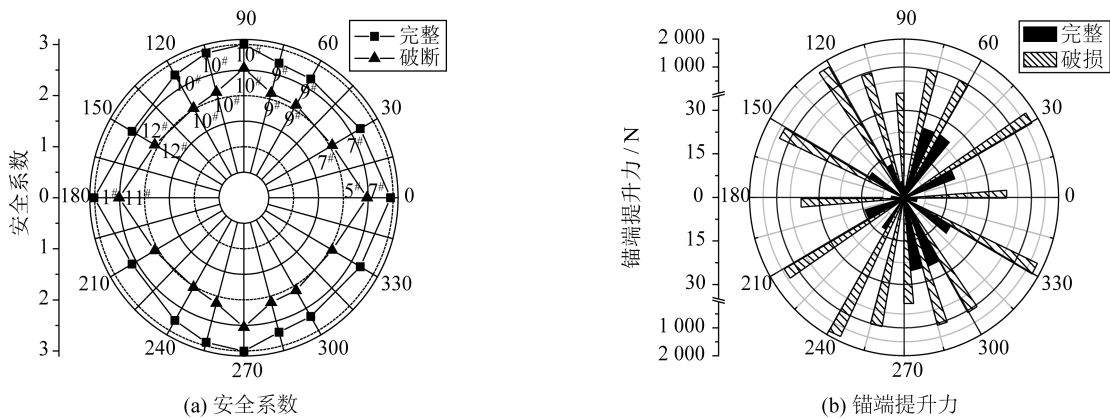


图 7 完整工况和破损工况系泊系统的安全系数和锚端提升力对比

Fig. 7 Comparison of safety factors and uplift loads between intact mooring system and damaged mooring system

分析图 7 中的计算结果可知：

1)完整工况下,危险浪向为 150°,此时 12 号系泊缆受力最大,顶端张力达到 1 887 kN,相应的安全系数为 2.60。最大的锚端提升力出现在 75°浪向下,为 25.03 N,但由于各个浪向的锚端提升力均较小且相差无几,所以认为在 150°浪向下环境载荷对系泊系统的影响最大。参照校核标准,系泊系统在完整工况下能够通过安全校核。

2)完整工况下,各个浪向下受力最大系泊缆的受力情况呈现出比较均匀的态势,说明该系泊方案对各个入射角度下的环境载荷具有良好的适应性。

3)破损工况下,危险浪向为 120°,此时系泊缆的顶端张力和锚端提升力均出现大幅增加,最小安全系数达到 2.02,最大锚端提升力达到 1 802.38 N,均能够通过安全校核。其中,尽管最大锚端提升力大幅增加,但仍不致对拖曳嵌入锚的嵌入深度造成显著影响。

4)经优化设计得到的系泊系统,在完整工况和破损工况下都具有较好的安全性和经济性,达到了优化设计的预期目标。

为了进一步研究单根系泊缆出现破损对系泊系统的影响,以完整工况下的最危险浪向 150°为例,对比分析完整工况和破损工况下各根系泊缆的受力情况,如图 8 所示。

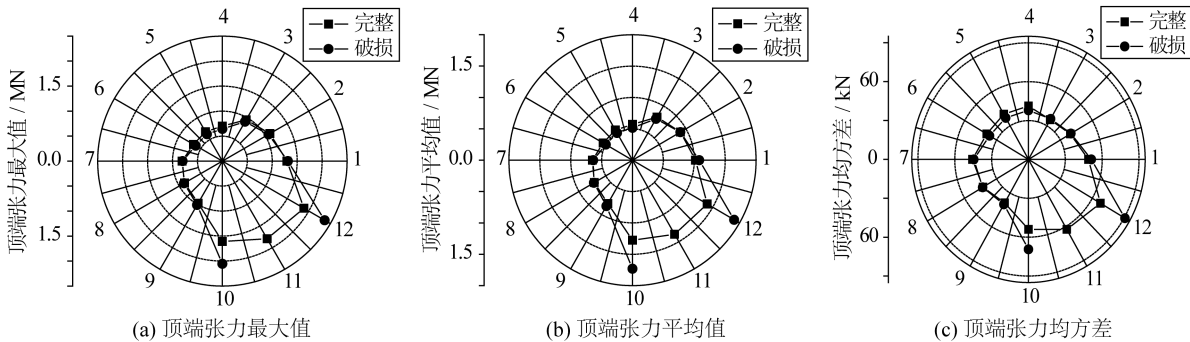


图 8 150°浪向下,完整工况和破损工况各根系泊缆受力分布情况对比

Fig. 8 Comparison of tension distributions in intact mooring system and damaged mooring system

通过对比发现,当受力第二大的 11 号系泊缆发生断裂,系泊系统重新进入稳定状态后,与发生破损的 11 号系泊缆同组的 10 号和 12 号系泊缆受力明显增加,且呈现出更不稳定的状态,而与该组相对的第 2 组中 4 号、5 号和 6 号系泊缆的受力则略有降低,稳定性也略有增加,其余两组系泊缆由于处在与发生破断的 11 号系泊缆和环境载荷垂直的方向上,并未受到明显的影响。尽管破损工况下系泊系统的稳定性略有降低,但系泊系统预留的安全余量充足,系泊缆破断不致对系泊系统的稳定性造成显著威胁,因此,该设计方案能够达到优化设计的预期目标。

4 结 语

通过对某半潜式起重平台的系泊系统进行研究和优化选型,得到以下结论:

1) 影响半潜式起重平台系泊系统的因素较多且相互关联,系泊缆布置角度的增大、预张力的增加以及系泊缆长度的减小,均会导致系泊系统顶端张力和锚端提升力的增加,在设计优化中,应对这些参数合理选取,以控制系泊系统的动力响应。

2) 基于主要参数对系泊性能的影响规律,经优化设计得到的系泊方案,预留的安全裕度适中,能够保障半潜式起重平台在恶劣海况下的生存能力,同时具备较好的经济性。

3) 系泊缆的破断会导致危险浪向发生改变,同时增加受力最大的系泊缆所承受的环境载荷,尽管在规范许可范围内,但仍对平台的安全性造成威胁,应予以关注。

4) 系泊缆出现破损,系泊系统重新进入稳态后,系泊缆受力重新分布,与破损系泊缆同组和相对一组的系泊缆受到的影响较为明显,而其余系泊缆的受力情况无明显变化。

这里只探讨了作业水深为 1 000 m 的情况,不同作业水深对半潜式起重平台系泊系统性能的影响还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 闵兵,舒仕勇. 半潜式起重工程船在海洋工程中的应用[J]. 中国造船, 2010, 51(1): 156-161. (MIN Bing, SHU Shiyong. Application of semi-submersible crane vessel in marine engineering[J]. Shipbuilding of China, 2010, 51(1): 156-161. (in Chinese))
- [2] 张志明,徐丹铮,张超,等. 大型起重船船型开发的若干技术问题初探[J]. 船舶, 2005(1): 10-15. (ZHANG Zhiming, XU Danzheng, ZHANG Chao, et al. Technical problems in ship type development of large crane ship[J]. Ship & Boat, 2005(1): 10-15. (in Chinese))
- [3] 黄山田,江锦,刘祺凤,等. 复杂海况下工程船的锚泊方案设计[J]. 中国造船, 2012, 53(S1): 179-183. (HUANG Shantian, JIANG Jin, LIU Qifeng, et al. Anchor pattern design for derrick barge in congested area[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(S1): 179-183. (in Chinese))
- [4] 董璐,徐慧,高巍,等. 水深对系泊起重船运动影响的数值与试验分析[J]. 海洋工程, 2012, 30(4): 125-130. (DONG Lu, XU Hui, GAO Wei, et al. Numerical simulation and experimental comparison about waterdepth's influences to moored floating crane ship[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(4): 125-130. (in Chinese))
- [5] 董波,杨建民,李欣. 深水半潜式平台悬链线式系泊系统耦合动力分析[J]. 中国海洋平台, 2008, 23(6): 1-7. (TONG Bo, YANG Jianmin, LI Xin. Coupled dynamic analysis of catenary mooring system for the deepwater semi-submerged platform[J]. China Offshore Platform, 2008, 23(6): 1-7. (in Chinese))
- [6] 宋安科. 深水半潜式钻井平台系泊系统方案设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005. (SONG Anke. Design and analysis of the mooring system of deepwater drilling semi-submersible[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. (in Chinese))
- [7] 冯爱春,尤云祥,范菊. 不规则波中半潜式平台及其系泊系统动力响应分析[J]. 海洋工程, 2010, 28(3): 31-36. (FENG Aichun, YOU Yunxiang, FAN Ju. Dynamic characteristics of a semi-submersible platform with mooring system in irregular waves[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(3): 31-36. (in Chinese))
- [8] API, Recommended practice for design and analysis of stationkeeping systems for floating structure[S]. 2005.
- [9] DNV, Deep water coupled floater motion analysis[S]. 2005.
- [10] ABS, Rules for building and classing mobile offshore drilling units[S]. 2008.
- [11] Vryhof Anchors. Anchor manual: the guide to anchoring [M]. 2010: 152-164.