

引用格式:张宗峰,薛绪田,杜鹏,等.弯曲影响下悬链锚腿系泊系统在南海涠洲海域适用性分析[J].油气藏评价与开发,2025,15(2):332-338.

ZHANG Zongfeng, XUE Xutian, DU Peng, et al. Applicability analysis of catenary anchor leg mooring system subjected to bending effects in Weizhou sea area of South China Sea[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(2): 332-338.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.02.018

弯曲影响下悬链锚腿系泊系统在南海涠洲海域适用性分析

张宗峰¹, 薛绪田¹, 杜鹏¹, 魏羲², 陈同彦³

(1. 中国石化上海海洋油气分公司, 上海 200120; 2. 中国石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东 东营 257000; 3. 中国石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘要:针对弯曲影响下悬链锚腿系泊(CALM)系统在南海涠洲海域的适用性进行研究,分析了该系泊系统在南海涠洲海域极限环境条件下的自存能力,并提出了考虑弯曲影响后的极限系泊力校核方法。建立了南海涠洲海域波浪有义波高-平均上穿零周期联合概率分布模型,根据该模型推算并绘制南海涠洲海域波浪有义波高-平均上穿零周期百年回归周期等值线。联合百年回归周期风条件和十年回归周期流条件,构建南海涠洲海域极限校核海况。通过莫里森方程(Morison equation)分别对直径为76.2、88.9、101.6 mm R4S级无挡锚链系泊系统进行了时域下系泊水动力分析,并通过耿贝尔分布(Gumbel distribution)评估了最可能出现的极限系泊张力。通过有限元分析,解析了止链器和锚链管系泊布置形式所致的锚链环平面外弯曲与平面内弯曲对系泊链应力分布的影响,最终对分析系泊系统在南海涠洲远海海域适应性进行了评估。分析结论表明:采用止链器和锚链管系泊布置形式,系泊锚链会受到额外的平面内弯曲与平面外弯曲所致的应力集中,需额外考虑1.3倍弯曲安全系数。直径101.6 mm锚链系泊系统在南海涠洲海域具有适用性;直径88.9 mm锚链系泊系统可以满足标准校核,但无法满足考虑锚链间弯曲影响下的系泊分析要求;直径76.2 mm锚链系泊系统则不能满足标准校核。

关键词:CALM系统;南海涠洲海域;系泊分析;弯曲影响;极限海况

中图分类号:TE95

文献标识码:A

Applicability analysis of catenary anchor leg mooring system subjected to bending effects in Weizhou sea area of South China Sea

ZHANG Zongfeng¹, XUE Xutian¹, DU Peng¹, WEI Xi², CHEN Tongyan³

(1. Sinopec Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China; 2. Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., Dongying, Shandong 257000, China; 3. Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: This study focuses on the applicability of the catenary anchor leg mooring (CALM) system subjected to bending effects in the Weizhou sea area of the South China Sea. The survivability of the mooring system under extreme environmental conditions in the Weizhou sea area of the South China Sea was analyzed, and a verification method for ultimate mooring force considering the bending effects was proposed. The joint probability distribution model of significant wave height and mean zero up-crossing period in the Weizhou sea area of the South China Sea was established. Based on this model, the 100-year return period contour of significant wave height and mean zero up-crossing period was calculated and plotted. Combined with the 100-year return period wind condition and the 10-year return period flow condition, the ultimate verification sea state of the Weizhou sea area of the South China Sea was constructed. A time-domain hydrodynamic analysis of the CALM system was conducted based on the Morison Equation, and the most probable maximum mooring tensions of R4S studless mooring chains with diameters of 76.2, 88.9, and 101.6 mm were evaluated using the Gumbel Distribution. Finite element analysis was performed to examine the effects of in-plane and out-of-plane bending of mooring chains caused by the chain stopper and hawse pipe arrangement, and the resulting stress distribution in the mooring chain was analyzed. Finally, the applicability of the CALM system in the offshore Weizhou area of the South China Sea was evaluated. The analysis results showed that when using the mooring arrangement with the chain stopper and hawse pipe, the mooring chains experienced additional stress concentration due to in-plane and out-of-plane bending, requiring a bending safety factor of 1.3.

收稿日期:2024-12-12。

第一作者简介:张宗峰(1979—),男,博士,高级工程师,从事海洋工程设计与研究工作。地址:上海市浦东新区商城路1225号,邮政编码:200120。

E-mail: zhangzf.shhy@sinopec.com

基金项目:中国石化科技部项目“涠洲油田海工设施优化关键技术研究”(P24119)。

The mooring system with 101.6 mm diameter chains was suitable for deployment in the Weizhou sea area of the South China Sea. The system with 88.9 mm diameter chains met the standard verification requirements but did not satisfy mooring analysis criteria when considering the bending effects between chain links. The system with 76.2 mm diameter chains did not meet the standard verification requirements.

Keywords: CALM system; Weizhou sea area of South China Sea; mooring analysis; bending effect; extreme sea states

系泊系统是保证浮式结构物作业安全的关键系统,根据系泊布局的不同,一般可分为单点系泊系统和多点系泊系统。单点系泊系统中,系泊单点通过锚链等方式固定于作业海域,平台或船舶主体结构通过刚性连接或系泊链、缆连接至系泊单点。该系泊方式下,平台或船舶主体结构可绕系泊单点进行回转运动,从而减小风、浪、流等海洋环境作用力。根据系泊点结构与固定方式的不同,单点系泊系统又可分为内转塔、外转塔、软刚臂、单锚腿系泊和悬链锚腿系泊(CALM)等^[1]。

由于对原油接卸的环境要求相对较为宽松、投资成本相对较低等特点,CALM系统有着广泛的应用^[2],目前世界范围内有600余套,分布于全球主要石油交易海岸。该系统在中国海域,尤其是中国非近海海域的应用案例相对较少。

部分学者针对CALM系统特点,进行了设计要点总结^[3-5],并针对CALM系统中锚链进行水动力分析^[6],不同标准下的设计差异进行分析^[7]及疲劳评估^[8]。此外,针对悬链线布置方式^[9]及CALM适用水深^[10]也开展过系列研究。但总体而言,关于CALM系统的研究相对较少。

该系统自身的系泊系统生存能力是制约该系统在非近海海域应用的关键因素之一。因此,通过合理的技术手段评估该系统自身的系泊能力,对推广CALM在中国离岸海域应用存在指导意义。

通常而言,CALM系统布置中会采用止链器和锚链管等系泊装置。相较于平直锚链,CALM系统中锚链之间会受到额外的弯曲影响,导致更高的应力集中。锚链受弯曲影响问题仅在国际范围内存在少量实验性研究^[11-12],针对受弯曲影响下锚链疲劳问题进行了基于应力区间-循环次数曲线的疲劳分析^[13-15]及基于断裂力学的疲劳分析^[16-17]。然而,在海洋工程评估标准及目前研究成果中,并无明确指导该如何评价弯曲影响下系泊锚链极限。

文中针对弯曲影响下CALM系统在南海涠洲海域的适用性进行研究,分析了该系泊系统在极限环境条件下的自存能力,并提出了考虑弯曲影响后的极限校核方法。

通过有义波高-平均上穿零周期联合概率模型绘制南海涠洲海域百年回归周期波浪有义波高-平均上穿零周期等值线,预测潜在百年回归周期下波浪极值条件。联合百年回归周期风条件和十年回归周期流条件,构建南海涠洲海域极限校核海况。通过莫里森方程(Morison

equation)分别对直径为76.2、88.9、101.6 mm R4S级无挡锚链系泊系统进行了时域下系泊水动力分析,并通过耿贝尔分布(Gumbel distribution)评估了最可能出现的极限系泊张力。通过有限元分析,解析了止链器和锚链管系泊布置形式所致的锚链环平面内弯曲与平面外弯曲对系泊链应力分布的影响,最终对该系统在南海涠洲海域的适用性进行评估。

1 南海涠洲海域CALM系统

1.1 CALM浮筒

CALM系统主要由浮筒、系泊链、系泊缆、水下软管、漂浮软管、水下管汇、锚等组成。它由浮筒作为系统主体,通过锚链固定在海床上。浮筒上部为可全方向旋转的转台,转台中心部位设有流体旋转接头,旋转接头下方连接着水下软管和海底输油管汇,上方连接着漂浮软管并通向油轮。油轮通过缆绳系泊在浮筒转台的带缆桩上,在风、浪、流的联合作用下,油轮能围绕单点自由转动,具有风向标效应,使油轮始终处于综合受力最小的位置。系统各主要组成部分及浮筒示意图见图1。

浮筒下部设置转台结构、圆形截面,周围布置六边形裙板用于布置系泊链和止链器。以南海涠洲海域油田开发方案中CALM系统为例,浮筒主要参数:质量250 t,直径12.0 m,型深5.3 m,吃水3.1 m。

1.2 系泊系统

CALM中系泊系统采用6根锚链,呈60°夹角围绕浮筒呈辐射状均匀布置。分析作业水深50 m,单根锚链采用悬链线形式布置。系泊锚链布置见图2。

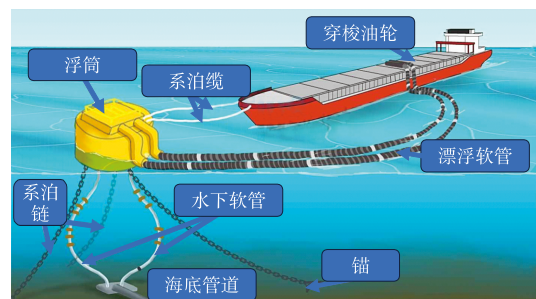


图1 CALM卸油系统及浮筒示意图

Fig. 1 Schematic of CALM offloading system and buoy

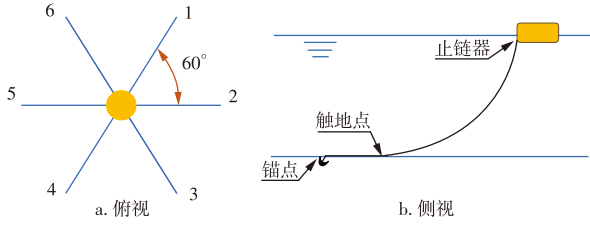


图2 系泊锚链布置示意图
Fig. 2 Schematic of mooring chain layout

文中分别对直径为76.2、88.9、101.6 mm R4S级无挡锚链作为CALM中系泊链适用性进行分析,其最小断裂力(S_c)分别为6 690、8 863、11 256 kN。

2 极限作业环境载荷

2.1 波浪载荷

作用在CALM上的波浪力可用Morison方程和JONSWAP频谱进行评估,针对浮式结构物,Morison方程可表示为:

$$F = \rho V \ddot{v} + \rho V C_A (\dot{v} - \dot{v}_p) + \frac{1}{2} \rho C_D A (v - v_p) |v - v_p| \quad (1)$$

式中: F 为波浪载荷,单位N; ρ 为流体密度,单位 kg/m^3 ; V 为杆件遮蔽面积下的体积,单位 m^3 ; \dot{v} 为波浪加速度,单位 m/s^2 ; C_A 为附加质量系数; \dot{v}_p 为浮体加速度,单位 m/s^2 ; C_D 为拖曳力系数; A 为杆件参考面积,单位 m^2 ; v 为波浪速度,单位 m/s ; v_p 为浮体速度,单位 m/s 。

波浪通过JONSWAP进行模拟,其谱函数可表达为:

$$S(w) = \frac{\alpha g^2}{w^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{w_p}{w} \right)^4 \right] \gamma^{\exp[(w-w_p)^2 / (2\sigma_s^2 w_p^2)]} \quad (2)$$

式中: $S(w)$ 为谱函数; w 为波浪频率,单位 s^{-1} ; α 为波谱参数; g 为重力加速度,单位 m/s^2 ; w_p 为波峰频率,单位 s^{-1} ; γ 为峰值参数; σ_s 为频率参数。

$$\alpha = \frac{(H_s w_p^2 / 4g)^2}{0.065 \gamma^{0.803} + 0.135} \quad (3)$$

$$\sigma_s = \begin{cases} 0.07, & \text{当 } w \leq w_p \\ 0.09, & \text{当 } w > w_p \end{cases} \quad (4)$$

式中: H_s 为有义波高,单位m。

针对长期在位浮式结构物系泊系统极限分析,一般选取百年回归周期下极限波浪。不同于固定式海洋结构物,浮式结构物运动分析需建立百年回归周期等值线,并从等值线选取一定数量海况分别进行模拟,确定极限波浪载荷。

参考挪威船级社标准《Environmental conditions and

environmental loads》(DNV-RP-C205:2019)^[18]相关建议,采用条件概率模型建立南海涠洲海域波浪有义波高-平均上穿零周期联合概率模型。该方法中,假设长期海况下, H_s 呈三参数威布尔分布(Weibull distribution),其概率密度函数可表示如下:

$$f_{H_s}(h) = \frac{\beta_{H_s}}{\alpha_{H_s}} \left(\frac{h - \gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}} \right)^{\beta_{H_s} - 1} \exp \left[- \left(\frac{h - \gamma_{H_s}}{\alpha_{H_s}} \right)^{\beta_{H_s}} \right] \quad (5)$$

式中: $f_{H_s}(h)$ 为概率密度函数; h 为有义波高自变量,单位m; β_{H_s} 为形状参数; α_{H_s} 为比例参数; γ_{H_s} 为位移参数。

H_s 下的平均上穿零周期(T_z)呈对数正态分布,其概率密度函数可表示如下:

$$f_{T_z|H_s}(t|h) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (6)$$

式中: $f_{T_z|H_s}(t|h)$ 为概率密度函数; t 为 h 下平均上穿零周期自变量,单位s; σ 为 $\ln t$ 标准差; μ 为 $\ln t$ 均值。

参考挪威船级社标准《Environmental conditions and environmental loads》(DNV-RP-C205:2019)^[18]附录所提供全球范围海况信息,可对应读取相关参数。根据南海涠洲海域波浪有义波高-平均上穿零周期联合概率模型,通过一阶可靠性分析方法,通过MATLAB自编程序推算潜在百年回归周期波浪,绘制百年回归周期波浪等值线(图3)。

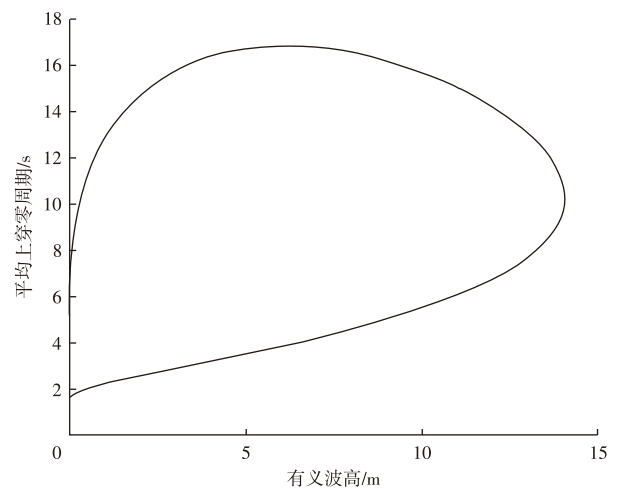


图3 南海涠洲海域百年回归周期波浪等值线

Fig. 3 Contour of 100-year return period waves in Weizhou sea area of South China Sea

根据模型推算,最大有义波高为14.0 m,对应平均上穿零周期为10.3 s。最大平均上穿零周期为16.8 s,对应有义波高为6.1 m。选取有义波高6.1~14.0 m内5组百年回归周期波浪进行系泊系统评估,所选取波浪信息参见表1。

表1 南海涠洲海域百年回归周期波浪

Table 1 100-year return period waves in Weizhou sea area of South China Sea

有义波高/m	平均上穿零周期/s
6.1	16.8
8.1	16.5
10.0	15.7
12.0	14.2
14.0	10.3

2.2 风载荷

作用在 CALM 上的风力通过下式进行估算:

$$F_w = \frac{1}{2} C_w \rho_a A_w (v_w - v_p) |v_w - v_p| \quad (7)$$

式中: F_w 为风力, 单位 N; C_w 为风拖曳力系数; ρ_a 为空气密度, 单位 kg/m^3 ; A_w 为结构物垂直于风向的受风影响遮蔽面积, 单位 m^2 ; v_w 为风速, 单位 m/s 。

不同于海上固定式结构物分析, 浮式结构物需考虑风力所致的浮体漂移力影响。因此, 需要通过风谱对风速变化进行模拟。根据美国石油行业学会标准《Design and analysis of station keeping systems for floating structures》(API-RP-2SK: 2020)^[19] 相关建议, 选取 API 风谱进行相关模拟, 其谱函数及相关系数可通过下式计算:

$$S_w(f) = \frac{[I(z)U_0(z/10)^{0.125}]^2}{(0.025U_0/z)[1 + 1.5fz/(0.025U_0)]^{5/3}} \quad (8)$$

$$I(z) = \begin{cases} 0.15 \left(\frac{z}{20}\right)^{-0.125}, & \text{当 } z \leq 20 \\ 0.15 \left(\frac{z}{20}\right)^{-0.275}, & \text{当 } z > 20 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $S_w(f)$ 为谱函数; $I(z)$ 为湍流强度; f 为风频率, 单位 s^{-1} ; z 为水平面高度, 单位 m ; U_0 为水面上 10 m 处 1 h 平均风速, 单位 m/s 。参考挪威船级社标准《Position Mooring》(offshore standards DNV-OS-E301: 2021)^[20], 南海涠洲海域百年回归周期极限平均风速值参考值为 56.3 m/s 。

2.3 流载荷

作用在 CALM 上的流力通过式(10)进行估算:

$$F_c = \frac{1}{2} C_c \rho_w A_c (v_c - v_p) |v_c - v_p| \quad (10)$$

式中: F_c 为流力, 单位 N; C_c 为流拖曳力系数; ρ_w 为海水密度, 单位 kg/m^3 ; A_c 为结构物垂直于流向的受流影响遮蔽面积, 单位 m^2 ; v_c 为流速, 单位 m/s 。参考挪威船级社标准《Position Mooring》(offshore standards DNV-OS-E301: 2021)^[20], 南海涠洲海域十年回归周期极限平均流速值参考值为 2.05 m/s 。

3 锚链间弯曲影响

3.1 锚链间弯曲

系泊锚链间弯曲的产生主要是由于锚链间夹角所导致的。根据弯矩方向, 一般可分为平面内弯曲和平面外弯曲见图 4。

由于 CALM 系统空间相对有限, 一般采用止链器和锚链管布置(图 5)。在海上运行过程中, 锚链管喇叭处锚链会形成交角, 进而引发弯曲效应。

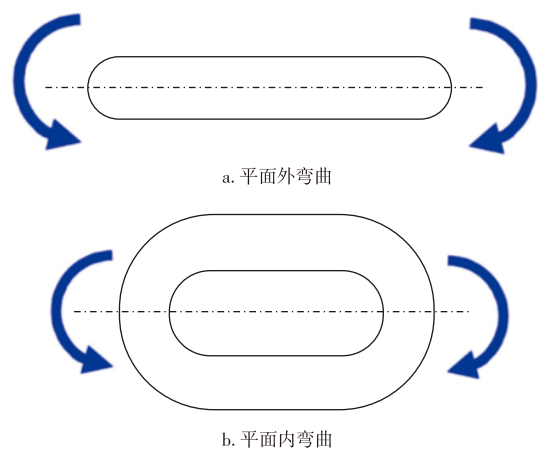


图4 锚链弯曲模式

Fig. 4 Mooring chain bending modes

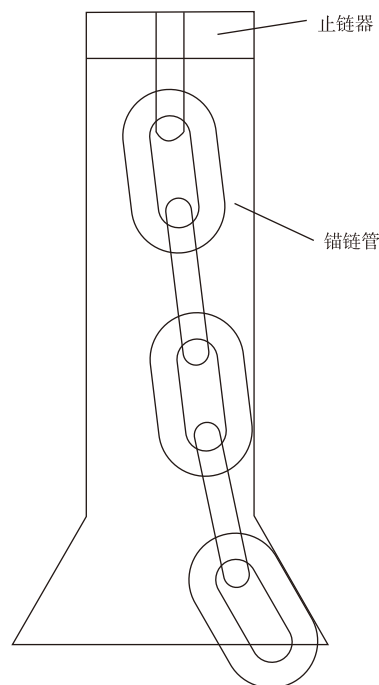


图5 受止链器和锚链管影响锚链示意图

Fig. 5 Sketch of mooring chain affected by chain stopper and hawse pipe

3.2 锚链间弯曲影响评估

通过有限元方法对水平锚链和受弯曲影响锚链进行相同载荷下应力评估,分析应力差异,进而给出所分析锚链受弯曲影响程度评估。

建立图6所示2组模型进行应力集中系数比对分析。一组模型为纯拉力作用下模型,另一组模型为受弯曲影响模型。

有限元分析应力云图见图7。有限元分析结果显示,纯拉力情况下,锚链顶点外侧为最大应力集中系数点,应力集中系数为4.1。

水平锚链受平面外弯曲影响,锚链顶点外侧为最大应力集中系数点,应力集中系数为4.2。竖直锚链受平面内弯曲影响,锚链弯曲点内侧为最大应力集中系数点,应

力集中系数为5.4。

因此,相较于纯拉力作用下系泊锚链,止链器和锚链管布局会导致系泊系统受到额外最大1.3倍的应力集中影响。

4 系泊系统极限张力评估

4.1 载荷工况

考虑同方向风、浪、流,对CALM系统在极限环境下展开系泊评估。考虑到极限环境条件下,穿梭油轮不会进行提油作业,因此,文中仅针对CALM系泊系统在极限环境下自存能力进行校核,共计5组载荷工况见表2。

表2 载荷工况

Table 2 Loading conditions

工况编号	有义波高/m	平均上穿零周期/s	风速/(m/s)	流速/(m/s)
1	6.1	16.8	56.3	2.05
2	8.1	16.5	56.3	2.05
3	10.0	15.7	56.3	2.05
4	12.0	14.2	56.3	2.05
5	14.0	10.3	56.3	2.05

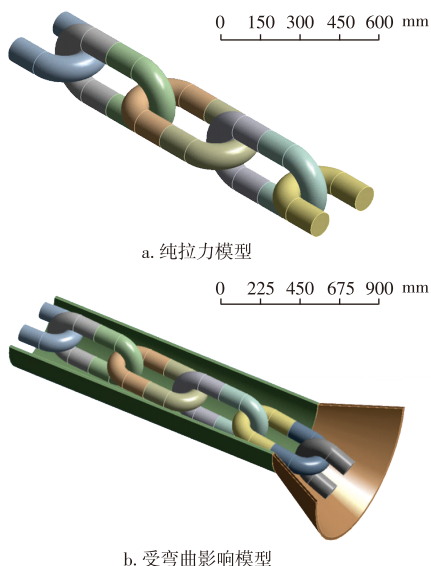


图6 锚链分析模型

Fig. 6 Mooring chain analysis model

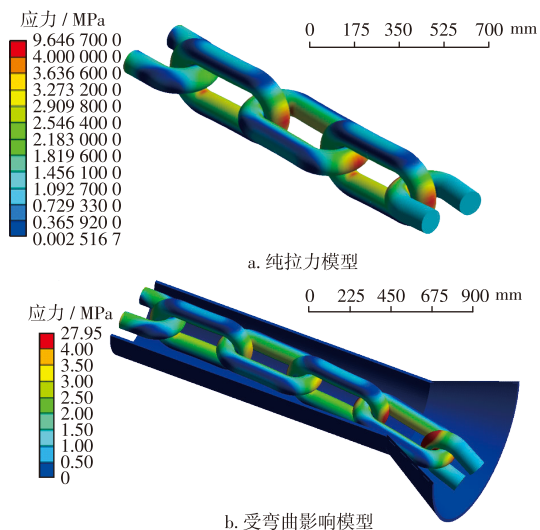


图7 锚链有限元分析结果

Fig. 7 Finite element analysis results of mooring chain

4.2 极限系泊张力评估

系泊系统张力可以表示为:

$$T = T_{Pre} + T_{Env} \quad (11)$$

式中: T 为系泊锚链张力,单位kN; T_{Pre} 为系泊锚链预张力,单位kN; T_{Env} 为由环境载荷引起的系泊系统张力,单位kN,文中考虑为风、浪、流联合作用。

文中 T_{Pre} 通过悬链线方程进行推算。对于一般大型海工结构物,分析中不考虑锚链拉力对吃水的影响,其预张力可通过求解以下悬链线方程进行推算:

$$T_{Pre} = \sqrt{T_H^2 + (WL)^2} \quad (12)$$

$$X = \frac{T_H}{W} \sinh^{-1} \left(\frac{WL}{T_H} \right) \quad (13)$$

$$Z = \frac{T_H}{W} \left[\cosh \left(\frac{WX}{T_H} \right) - 1 \right] \quad (14)$$

式中: T_H 为水平预张力,单位kN; W 为单位长度锚链湿重,单位kN/m; l 为悬链线长,单位m; X 为触地点至锚链顶端水平距离,单位m; Z 为触地点至锚链顶端垂直距离,单位m。

因浮筒吃水受预张力垂直分量影响较为严重,故该系统中需考虑平衡关系:

$$F_B = G + nWL \quad (15)$$

式中: F_B 为浮筒浮力,单位 kN; G 为浮筒重力,单位 kN; n 为锚链数。

通过联立求解式(12)一式(15),推算出直径分别为 76.2、88.9、101.6 mm 锚链下,系统单根锚链预张力分别为 365、282、232 kN。

由于随机波生成存在一定的不确定性,针对同一海况下的多次时域分析结果也会存在一定的差异性。为减少这种不确定性的影响,每组环境载荷需进行多次模拟(10~20次),每次按照单个海况时长 3 h 进行模拟。随后读取单个海况模拟下的系泊张力极大值,并将同个海况下的模拟系泊张力极大值进行概率分布拟合,推算最可能出现系泊张力极大值。参考挪威船级社标准《Position Mooring》(offshore standards DNV-OS-E301: 2021)^[20],可通过 Gumbel 分布进行拟合。在 Gumbel 分布下,最可能出现系泊张力极大值可表示为:

$$T_{MPM} = \mu_T - 0.45\sigma_T \quad (16)$$

式中: T_{MPM} 为最可能出现系泊张力极大值,单位 kN; μ_T 为 10~20 次模拟下系泊张力极大值的平均值,单位 kN; σ_T 为 10~20 次模拟下系泊张力极大值的标准差,单位 kN。

分析中通过海洋工程系泊专业软件 ORCAFLEX 分别对直径为 76.2、88.9、101.6 mm 锚链系泊系统进行系泊极限环境张力评估,单个海况模拟次数为 10 次,其模型见图 8。系泊分析结果见表 3。

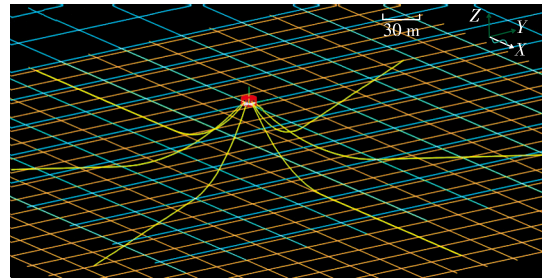


图8 系泊模型示意图

Fig.8 Schematic of mooring model

表3 系泊分析结果

Table 3 Mooring analysis results

工况编号	直径 76.2 mm 锚链			直径 88.9 mm 锚链			直径 101.6 mm 锚链		
	μ_T /kN	σ_T /kN	T_{MPM} /kN	μ_T /kN	σ_T /kN	T_{MPM} /kN	μ_T /kN	σ_T /kN	T_{MPM} /kN
1	1 038.80	37.89	1 021.76	1 109.12	53.25	1 085.16	1 275.86	105.97	1 228.18
2	1 316.76	62.86	1 288.47	1 428.94	74.32	1 395.49	1 664.11	118.88	1 610.61
3	1 745.11	80.62	1 708.83	1 893.46	94.21	1 851.09	2 184.51	111.89	2 134.16
4	2 371.83	268.90	2 250.82	2 542.91	282.43	2 415.82	2 875.88	285.08	2 747.59
5	5 322.85	580.97	5 061.42	6 140.86	645.03	5 850.60	6 220.18	573.52	5 962.10

分析结果显示: CALM 系统自存条件下,随着有义波高增加,系泊张力呈上升趋势。平均上穿零周期增加对该系泊系统极限张力影响并不显著。最大系泊张力均出现于工况 5 中,直径 76.2 mm 锚链最可能出现系泊张力最大值为 5 061.42 kN,直径 88.9 mm 锚链最可能出现系泊张力最大值为 5 850.60 kN,直径 101.6 mm 锚链最可能出现系泊张力最大值为 5 962.10 kN。

4.3 系泊系统极限评估

根据挪威船级社标准《Position Mooring》(offshore standards DNV-OS-E301:2021)^[20]相关建议,系泊系统校核标准如下:

$$V_{UC} = \frac{T_{Pre}\gamma_{Pre} + T_{Env}\gamma_{Env}}{S_c} < 1 \quad (17)$$

式中: V_{UC} 为结构利用率系数; γ_{Pre} 、 γ_{Env} 为预张力、环境力安全系数,在时域分析中,分别取值 1.2 和 1.45。

该极限校核中并未涉及弯曲影响。为考虑弯曲影

响,建议将评估标准调整为:

$$V_{UC} = \frac{\gamma_{bend}(T_{Pre}\gamma_{Pre} + T_{Env}\gamma_{Env})}{S_c} < 1 \quad (18)$$

式中: γ_{bend} 为弯曲安全系数,通过有限元分析,建议取值 1.3。系泊链极限校核结果见表 4。

分析结果显示:直径 76.2 mm 锚链系泊系统无法满足目标海域环境自存要求;如不考虑锚链间弯曲影响,直径 88.9 mm 锚链系泊系统可以满足目标海域环境自存要求;如考虑锚链间弯曲影响,直径 88.9 mm 锚链系泊系统则不能满足目标海域环境自存要求;直径 101.6 mm 锚链系泊系统可以满足目标海域环境自存要求。

表4 系泊链极限校核结果

Table 4 Ultimate verification results of mooring chains

不同直径/mm	V_{UC}	
	未考虑弯曲影响	考虑弯曲影响
76.2	1.083	1.408
88.9	0.949	1.234
101.6	0.763	0.992

5 结论

针对弯曲影响下 CALM 系统在南海涠洲海域的适用性进行了研究。建立了南海涠洲海域波浪有义波高-平均上穿零周期联合概率模型,根据该模型推算并绘制目标海域百年回归周期波浪有义波高-平均上穿零周期等值线。通过耿贝尔分布评估了直径为 76.2、88.9、101.6 mm R4S 级无挡锚链作为 CALM 系泊链下最可能出现的极限系泊张力。通过有限元分析,解析了止链器和锚链管系泊布置形式所致的锚链环平面外弯曲与平面内弯曲对系泊链应力分布的影响,给出该系泊布置下应力集中系数。最终对直径为 76.2、88.9、101.6 mm 锚链系泊系统在南海涠洲海域适应性进行了评估。

分析结论表明:

1) 南海涠洲海域百年回归周期最大波浪有义波高为 14.0 m,对应平均上穿零周期为 10.3 s。百年回归周期最大波浪平均上穿零周期为 16.8 s,对应有效波高为 6.1 m。

2) 采用止链器和锚链管系泊布置形式,系泊锚链会受到额外的平面内弯曲与平面外弯曲所致的应力集中,需考虑 1.3 倍弯曲安全系数。

3) 直径 76.2 mm 锚链系泊系统无法满足适应性要求。不考虑锚链间弯曲影响,直径 88.9 mm 锚链系泊系统可以满足适应性要求;考虑锚链间弯曲影响,直径 88.9 mm 锚链系泊系统则不能满足目标海域环境适应性要求。直径 101.6 mm 锚链系泊系统可以满足适应性要求。

参考文献

- [1] 闫宏生,苑恒,李怀亮,等.大抓力锚和吸力锚在 CALM 型单点系泊系统中的应用[J].中国海洋平台,2022,37(4):31-36.
YAN Hongsheng, YUAN Heng, LI Huailiang, et al. Application of fluke anchor and suction anchor in CALM single-point mooring system[J]. China Offshore Platform, 2022, 37(4): 31-36.
- [2] 刘帅,蔡铮,王亮,等. CALM 式单点系泊系统完工调试与检查[J].现代工业经济和信息化,2020,10(4):123-124.
LIU Shuai, CAI Zheng, WANG Liang, et al. Completion debugging and inspection of calm single point mooring system[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2020, 10(4): 123-124.
- [3] 周楠,刘旭平,李俊汲. CALM 单点系泊系统设计综述[J].海洋工程装备与技术,2017,4(2):102-104.
ZHOU Nan, LIU Xuping, LI Junji. Design method summary of calm single point mooring[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2017, 4(2): 102-104.
- [4] 周楠,董宝辉,李俊汲,等. CALM 单点系泊设施设计要点[J].海洋工程装备与技术,2020,7(6):425-429.
ZHOU Nan, DONG Baohui, LI Junji, et al. Key points in design of calm single point mooring facilities[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2020, 7(6): 425-429.
- [5] 罗晓健,张爱霞,李斌.单点系泊系统设计思路及原则[J].中国海洋平台,2013,28(2):19-23.
LUO Xiaojian, ZHANG Aixia, LI Fu. The principles and ideas for single point moorings design[J]. China Offshore Platform, 2013, 28(2): 19-23.
- [6] 於增月,黄水祥,杨泽亮. CALM 型单点系泊系统动态响应规律研

- 究[J].石油工程建设,2023,49(3):25-32.
YU Zengyue, HUANG Shuixiang, YANG Zeliang. Research on dynamic response rule of CALM-type single point mooring system[J]. Petroleum Engineering Construction, 2023, 49(3): 25-32.
- [7] 梁凯,王亚琼,徐万海,等.基于不同规范的 CALM 单点系泊系统锚链直径选型对比研究[J].海洋技术学报,2020,39(5):100-104.
LIANG Kai, WANG Yaqiong, XU Wanhai, et al. Comparative study on the selection of anchor chain diameter for calm single point mooring system based on different rules[J]. Journal of Ocean Technology, 2020, 39(5): 100-104.
- [8] 罗慧明,王领,李艳贞.悬链式单点系泊锚链疲劳强度分析[J].中国海洋平台,2016,31(4):19-26.
LUO Huiming, WANG Ling, LI Yanzhen. Fatigue strength assessment of CLAM's anchor chain[J]. China Offshore Platform, 2016, 31(4): 19-26.
- [9] 姜季江.锚链分布方式对悬链式单点系泊浮筒系泊力的影响[J].机电设备,2019,36(6):1-7,18.
JIANG Jijiang. Effects of anchor chains' arrangement on mooring stress of single point mooring buoy of catenary anchor leg mooring system[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2019, 36(6): 1-7, 18.
- [10] 张志,刘其民,孔友南,等.悬链锚腿式单点系泊系统设计水深估算[J].水运工程,2022,(5):56-60.
ZHANG Zhi, LIU Qimin, KONG Younan, et al. Estimation method for design water depth of CALM single-point mooring system[J]. Port & Waterway Engineering, 2022, (5): 56-60.
- [11] MELIS C, JEAN P, VARGAS P. Out-of-plane bending testing of chain links[C]// Paper OMAE2005-67353 presented at 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Greece, June 12-16, 2005.
- [12] RAMPI L, VARGAS P. Fatigue testing of out-of-plane bending mechanism of chain links[C]// Paper OMAE2006-92488 presented at 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany, June 4-9, 2006.
- [13] TER BRAKE E, VAN DER CAMMEN J, UITTENBOGAARD R. Calculation methodology of out of plane bending of mooring chains [C]// Paper OMAE2007-29178 presented at 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, California, USA, June 10-15, 2007.
- [14] LASSEN T, STORVOLL E, BECH A. Fatigue life prediction of mooring chains subjected to tension and out of plane bending[C]// Paper OMAE2009-79253 presented at 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, USA, May 31 - June 6, 2009.
- [15] LASSEN T, AARSNES J, GLOMNES E. Fatigue design methodology for large mooring chains subjected to out-of-plane bending[C]// Paper OMAE2014-23308 presented at 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, California, USA, June 8-13, 2014.
- [16] XUE X, CHEN N Z, PU Y, et al. Fracture mechanics analysis for mooring chain links subjected to out-of-plane bending (OPB) [J]. Marine Structure, 2020, 71, 102740.
- [17] XUE X, CHEN N Z, PU Y. Mooring fatigue assessment evaluating chain twist and out-of-plane bending for a semi-submersible[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2020, 142, 061703.
- [18] Det Norske Veritas. Environmental conditions and environmental loads: DNV-RP-C205: 2019 [S]. Det Norske Veritas, 2019.
- [19] American Petroleum Institute. Design and analysis of station keeping systems for floating structures: API-RP-2SK: 2020[S]. Washington: API Publishing Services, 2020.
- [20] Det Norske Veritas. Position Mooring: offshore standards DNV-OS-E301: 2021[S]. Det Norske Veritas, 2021.

(编辑 尹淑容)