

文章编号: 1007-7294(2024)10-1570-18

基于原型监测的悬链线式系泊系统可靠性评估方法

于思源¹, 程丛志¹, 武文华^{1,2}

(1. 大连理工大学 工业装备与结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315000)

摘要:系泊系统是浮式平台装备的关键结构,对保障平台的安全生产具有重要作用,及时了解 and 评估系泊系统的安全状态和风险等级具有重要意义。针对在平台现场作业环境下对系泊链实时在位检测的困难,本文提出一种基于现场监测信息的悬链线式系泊系统可靠性评估方法,相较于传统的蒙特卡洛模拟,本文方法可以大大提高计算效率,以满足可靠性实时评估的要求。首先,基于悬链线方程引入海流载荷的影响,开展系泊链受力行为的仿真分析;进而,提出基于改进蒙特卡洛(EMC, Enhanced Monte Carlo)方法的系泊强度可靠性与疲劳可靠性评估方法;最后,基于南海某半潜式平台的实测数据,对平台的系泊链可靠性进行评估,同时考虑腐蚀的影响。结果表明,本文所提出的系泊可靠性实时评估方法可以为悬链线式系泊系统的在位安全评估与维护提供指导。

关键词:悬链线式系泊系统;可靠性分析;原型监测;EMC方法

中图分类号: U653.2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.10.010

Reliability assessment model of catenary mooring system based on prototype monitoring

YU Si-yuan¹, CHENG Cong-zhi¹, WU Wen-hua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Structure Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology,

Dalian 116024, China; 2. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315000, China)

Abstract: The mooring system is the key structure of a floating platform, which plays an important role in ensuring the safe production of the platform. It is of profound significance to understand and evaluate the safety status and risk level of the mooring system in time. Aiming at the difficulties of real-time in-situ detection of mooring lines under the platform field operation states, a reliability assessment method of catenary mooring system based on prototype monitoring information is proposed in this paper. Compared with the conventional Monte Carlo simulation, the proposed reliability assessment model can improve the calculation efficiency to meet the requirements of real-time reliability analysis. Firstly, based on the catenary equation, a numerical simulation analysis of the forcing behavior of the mooring line was performed considering the influence of the current load. Then, a reliability assessment modelling method for strength analysis and fatigue analysis of mooring system was proposed based on Enhanced Monte Carlo (EMC) method. Finally, based on the proto-

收稿日期: 2024-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1906233);山东省联合基金资助项目(2019JZZY010801);深圳市自由探索类基础研究项目(2021Szvup021);高等学校基本科研业务费资助项目(DUT20ZD213)

作者简介: 于思源(1995-),男,博士研究生;

武文华(1973-),男,博士,教授,通讯作者, E-mail: lxuhua@dlut.edu.cn。

type monitoring data of a semi-submersible platform in the South China Sea, the reliability assessment of the mooring line was performed by taking into consideration the impact of the corrosion. The simulated results indicate that the present real-time reliability assessment method could provide a superior ability for the guidance of the safety assessment and maintenance of catenary mooring system.

Key words: catenary mooring system; reliability analysis; prototype monitoring;
Enhanced Monte Carlo method

0 引 言

随着海洋油气资源开发日益向深远海域发展,浮式平台成为海上作业的主力装备。系泊系统是浮式平台的关键安全系统,其通过系泊链将平台固定于海床。系泊链承受海流、波浪等环境荷载以及其腐蚀、磨损等长期作用,其失效将可能导致严重的生命财产损失和环境灾害。然而,由于系泊链较大的空间尺度和特殊的结构形态,采用潜水员或ROV(Remotely Operated Vehicle)对系泊系统进行在位检测存在困难^[1]。因此,对系泊系统的安全裕度进行实时可靠性评估,以保障系泊系统的安全服役十分重要。

系泊系统的主要失效模式是强度失效与疲劳失效。对于系泊强度可靠性分析问题,陈昌松等^[2]以某半潜式平台系泊系统为研究对象,基于耦合时域分析技术与结构可靠性理论分析了系泊系统在极限海况下的失效模式;王浩等^[3]通过对FPSO(Floating Production Storage and Offloading)及其系泊系统的水动力模拟,求得设计海况下系泊链最大张力的概率分布,并根据系泊链年腐蚀磨损量建立了系泊链承载能力随时间变化的概率模型,最终基于可靠性理论计算失效概率;Rendón和Heredia^[4]基于一阶可靠性方法(FORM, First Order Reliability Method)建立了针对悬链线式和张紧式系泊系统的理论分析模型,该模型考虑了最大动态张力和系泊链抗力计算中的不确定参数;Stanisic等^[5-6]针对浮式液化天然气储卸装置(FLNG, Floating Liquefied Natural Gas)进行了系泊可靠性分析,该研究对比分析了FLNG在北海海域和西澳大利亚海域系泊的长期可靠性。然而,在目前的强度可靠性分析研究中,常假设系泊张力服从某种分布形式,在简化可靠度计算的同时也引入了额外的不确定性。此外,现有的系泊可靠度分析工作通常基于短期海况的水动力学仿真结果,该方法适用于系泊系统的设计,但对于既有的系泊系统将进一步引入数值仿真的不确定性。

对于系泊疲劳可靠性分析问题,周鹏^[7]通过水动力学仿真结合T-N曲线与Miner线性累积损伤理论获得系缆在波浪载荷作用下的疲劳损伤,基于FORM和蒙特卡洛法分别进行了疲劳可靠性分析;梁辉^[8]对南海海域某通信平台分别设计悬链线式与张紧式系泊系统,基于数值仿真进行短期海况时域分析,计算两种系泊系统的疲劳寿命并分析张紧式系泊系统的疲劳可靠性;Hou等^[9-10]针对网箱系泊系统,考虑长期波况传播方向的发生概率,计算了网箱系泊系统中各系泊链的累积疲劳损伤,然后基于广义概率密度演化法(GPDEM, Generalized Probability Density Evolution Method)分析了疲劳损伤概率分布随荷载循环数的演化过程,并通过等效极值事件法评估了疲劳极限状态下系泊系统的可靠度;Du等^[11]提出了一种深水系泊系统可靠性分析的综合方法,该方法同时考虑了较大浮体漂移量、系泊链断裂和疲劳等失效模式,还引入了系泊链断裂强度与累积疲劳损伤之间的定量关系。然而,在疲劳可靠性分析研究中同样存在着假定系泊张力分布形式的问题,由于系泊张力主要克服浮式结构的慢漂运动,系泊张力与海况的相关性存在疑问,导致基于水动力学计算的疲劳可靠性分析难以指导既有系泊系统的寿命评估与安全保障工作。

FORM法、一次二阶矩法等经典可靠性分析方法需要显式且形式较简单的功能函数,而对于较为复杂的问题功能函数难以给出简单形式,假定中间变量的分布形式又将引入额外的不确定性。对于这种问题,蒙特卡洛法(MC, Monte Carlo)是一种行之有效的求解方法,其通过生成随机数获得失效频

率,可以有效地求出可靠度的数值解。蒙特卡洛法的主要缺陷是计算成本较高。为解决这一问题, Naess 等^[12]提出了一种改进的蒙特卡洛法(EMC, Enhanced Monte Carlo),并利用该方法计算了桁架桥等小型结构的可靠度,结果表明该方法具有较高的精度,同时可以显著降低计算工作量;随后该方法被应用于涉及大量极限状态函数和基本随机变量的复杂系统,进一步验证了该方法的准确性和高效性^[13]。近年来该方法已应用于建筑结构^[14-17]和海洋工程^[18-19]等领域。

悬链线式系泊系统具有出色的力学性能,是目前应用最为广泛的系泊形式之一。考虑到对系泊链的实时在位检测存在困难,本文提出一种基于原型监测系统的悬链线式系泊系统可靠性评估方法。首先采用悬链线方程描述系泊链几何与物理特征,以便基于平台运动响应计算系泊张力;然后基于实测海流数据获得海流载荷模型,并将海流引入悬链线方程以评估海流对系泊响应的影响;为处理复杂的系泊可靠性问题,引入EMC方法,通过数值算例检验其准确性和高效性,并进一步讨论EMC方法中的参数选取准则;基于悬链线方法和EMC方法,对平台系泊链强度与疲劳可靠性进行评估,并讨论腐蚀表征参数对可靠度的影响。本文所提出的方法可以直接为悬链线式系泊系统的在位安全评估与维护提供指导。

1 基于悬链线方程的系泊响应分析

1.1 多成分系泊系统悬链线控制方程

系泊系统的原型测量是研究系泊链动力响应、评估系泊可靠性的重要方法之一,目前已经开发了用于系泊监测的测量技术和传感器^[20]。然而,由于安装与维护存在的困难,诸多系泊系统仍没有考虑安装水下测量设备;同时,在研究中发现^[20],采用张力传感器测量系泊链张力的灵敏度较低,这将导致系泊可靠性特别是疲劳可靠性的分析结果明显偏于危险。因此,本文采用理论分析的方式进行悬链式系泊系统的响应分析。

悬链线式系泊的原理是重力系泊,即系泊系统提供的回复力来源于系泊链的重力而非张力^[21],使得系泊链具有较大自重且无需张紧,因此在系泊响应分析中可忽略流致振动等动力学影响。本文采用悬链线方程计算系泊响应,该方法编程求解方便,计算效率高,适用于对悬链线式系泊系统的响应求解。

不失一般性,本文以某四成分悬链线式系泊链为例,将系泊链的响应分析问题简化为二维悬链线问题,以系泊链所在平面与海床面交线为 X 轴,垂直海床面方向为 Z 轴,系泊链与海床端固定点为坐标原点 O ,坐标系和系泊链形态如图1所示。基于悬链线方程构建四成分系泊链的控制方程组^[22]:

$$\tan\theta_1 = (w_1 L_1 + w_2 L_2 + w_3 L_{3c})/Q, \quad \tan\theta_2 = (w_2 L_2 + w_3 L_{3c})/Q, \quad \tan\theta_3 = w_3 L_{3c}/Q, \quad \tan\theta_4 = 0 \quad (1)$$

$$S_k = \frac{Q}{w_k} \left[\sinh^{-1}(\tan\theta_k) - \sinh^{-1}(\tan\theta_{k+1}) \right], \quad k = 1, 2 \quad (2)$$

$$S_{3c} = \frac{Q}{w_3} \sinh^{-1}(\tan\theta_3)$$

$$H_k = \frac{Q}{w_k} (\sec\theta_k - \sec\theta_{k+1}), \quad k = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$H = H_1 + H_2 + H_3, \quad S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (4)$$

$$L_3 = L_{3c} + L_{3r}, \quad S_3 = S_{3c} + S_{3r}, \quad L_4 = S_4$$

$$T = \sqrt{Q^2 + (w_1 L_1 + w_2 L_2 + w_3 L_{3c})^2} \quad (5)$$

式中, $L_k(k=1, 2, 3, 3)$ 为各段系泊链的长度, L_{3c} 和 L_{3r} 分别为悬挂段和拖地段的系泊链长度; $\theta_k(k=1, 2, 3)$ 为各段系泊链顶端与 X 轴的夹角, $\theta_4=0^\circ$ 为系泊链触地点与 X 轴的夹角; S 和 H 分别为整个系泊链在水平方向和垂直方向的投影长度, S_k 和 $H_k(k=1, 2, 3c, 3r)$ 分别为各段系泊链在水平方向和垂直方向的

投影长度; $w_k(k=1, 2, 3, 3)$ 为各段系泊链的单位长度湿重; T 为系泊链顶张力, Q 为 T 的水平分量。

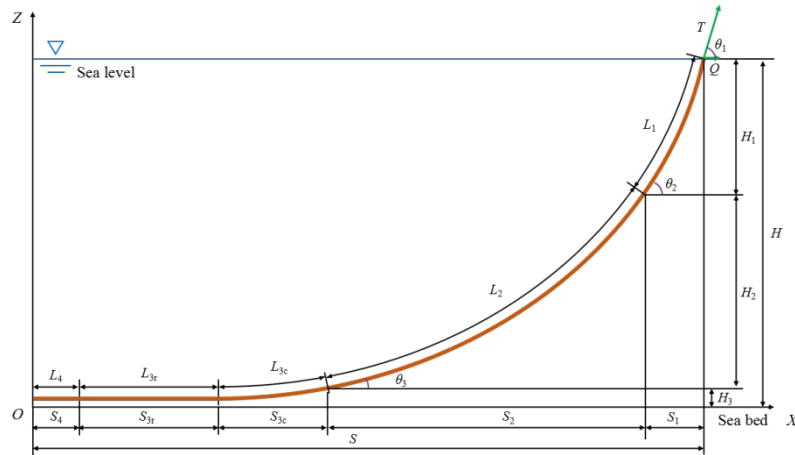


图1 四成分悬链线式系泊链示意图

Fig.1 Schematic diagram of a four-component catenary mooring line

1.2 系泊链位移边界条件与海流载荷作用模型

1.2.1 系泊链顶端位移边界条件

系泊系统的受力状态随平台的六自由度运动发生变化。本文通过将平台浮体六自由度响应作为系泊顶端的指定位移输入,更适用于对系泊系统作受力分析。平台浮体在海洋环境荷载作用下,将产生六自由度运动响应,包括三个平动自由度(横荡、纵荡、垂荡)和三个转动自由度(横摇、纵摇、艏摇)^[23]。为区别于1.1节所定义系泊系统坐标系,以大地坐标系为系泊顶端位移几何分析坐标系,即经度轴为 X' 轴,纬度轴为 Y' 轴,垂直于海平面方向为 Z' 轴。基于某时刻的平台位置和平台重心位置,可得该时刻平台重心坐标 (X_G, Y_G, Z_G) ;另设该时刻平台的横倾角、纵倾角和艏摇角为 (α, β, γ) 。由运动叠加原理引入平台各转动自由度运动对平台位置以及系泊链顶端位移的影响。

如假设平台绕重心横倾角度为 α ,如图2所示,图中黄色虚线与蓝色实线分别表示横倾前后的平台姿态。则系泊链顶点坐标为

$$X'_{Ci} = (X_{Ci}^0 - X_G) \cos\alpha - (Z_{Ci}^0 - Z_G) \sin\alpha + X_G \quad (6)$$

$$Y'_{Ci} = Y_{Ci}^0 \quad (7)$$

$$Z'_{Ci} = (X_{Ci}^0 - X_G) \sin\alpha + (Z_{Ci}^0 - Z_G) \cos\alpha + Z_G \quad (8)$$

式中, $(X_{Ci}^0, Y_{Ci}^0, Z_{Ci}^0)$ 为只考虑平台平动自由度时的第 i 根系泊链顶点坐标($i=1, 2, \dots, 11$), $(X'_{Ci}, Y'_{Ci}, Z'_{Ci})$ 为引入横摇角 α 后的第 i 根系泊链顶点坐标。

同理可继续引入纵摇角和艏摇角,可得第 i 根系泊链顶点坐标 (X_{Ci}, Y_{Ci}, Z_{Ci}) ,进而获得每根系泊链的水平投影与垂直投影长度。

1.2.2 海流荷载作用模型

海流荷载是海洋工程结构水下结构所承受的重要的环境荷载。对于系泊锚链等大长细比水下结构,海流将对其施加拖曳力作用,在系泊可靠性分析中需要考虑海流荷载的影响,以避免分析结果偏于危险。因此,需要基于实测海流数据给出海流荷载模型。

为保证海流模型的空间相关特征,采用经验正交函数(EOF, Empirical Orthogonal Function)分解方法重构数据。作为一种多元分析方法,EOF分解的本质是将原始时空数据矩阵表示成两个正交矩阵的乘积,得到原变量在新坐标系下的数学表示,实现时空数据的解耦。在实际计算中,EOF分解的一

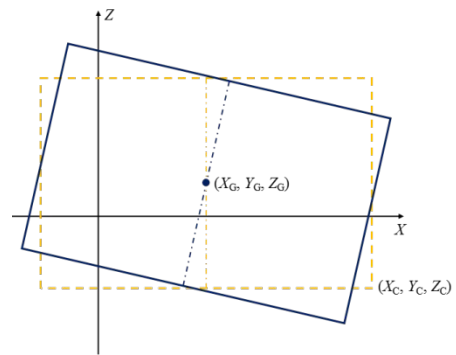


图2 平台横倾 α 角度示意图

Fig.2 Schematic diagram of the platform with a rolling angle α

种常用方法是利用矩阵的奇异值分解^[24]:

$$X = U\lambda V^T \tag{9}$$

式中, X 为原始数据矩阵, U 为 EOF 模态矩阵, λV^T 为主成分; 对角阵 λ 的对角线元素称为奇异值, 且 λ^2 与 XX^T 的特征根成倍数关系, 而 X 的方差大小可以用 XX^T 的特征根来表示, 故第 k 阶模态的方差贡献率可以表示为

$$\lambda_k^2 / \sum_{i=1}^K \lambda_i^2 \times 100\% \tag{10}$$

式中, K 为总模态阶数。选取前 m 阶 EOF 模态, 然后通过其线性组合重构数据, 可以达到降维效果。由于本文关注海流对系泊链的拖曳力, 可以忽略高阶模态的影响, 因此模型重构基于典型的 95% 模态贡献率准则^[25-26], 即选取保证 95% 累积贡献率的前 m 阶模态。重构海流剖面表示为

$$V = \sum_{i=1}^m EOF_i(z) \cdot \alpha_i \tag{11}$$

式中, EOF_i 和 α_i 分别为第 i 阶 EOF 模态和对应的权重参数。式(11)所确定的海流剖面在空间上是离散的, 可以在此基础上通过线性内插以及挪威船级社规范^[26]中的外推方法获得连续的海流剖面 $V_c(z)$ 。

1.3 系泊锚链张力计算

由于考虑海流等水平方向载荷的系泊链平衡微分方程难以求得显式解, 且悬链式系泊链通常较重而海流流速较低^[27], 在悬链线方程中忽略了海流作用。然而, 在系泊可靠性分析中, 仍应考虑海流载荷的影响以尽可能避免分析结果偏于危险。

为提高考虑海流情况下的系泊响应计算效率, 假设如下:

- (1) 海流载荷的施加不影响系泊链拖地段的长度, 即系泊链拖地段长度不随流速变化;
- (2) 每一系泊链微段的几何特征仍可用悬链线方程描述。

基于上述假设, 将系泊链的悬挂段(对应于图 1 中的 1、2 与 3c 段)划分为 N 个系泊链单元, 如图 3

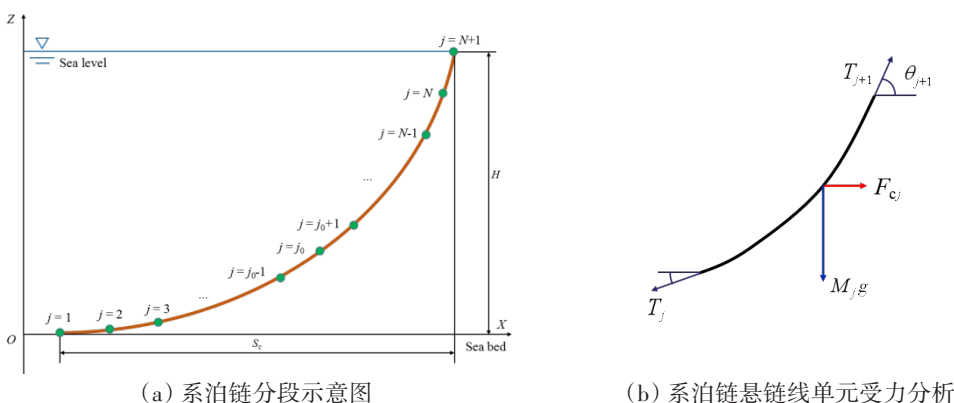


图 3 系泊链分段示意图及单元受力分析

Fig.3 Schematic diagram of mooring line segment division and force analysis

所示, 则对单元 $j(j=1, 2, \dots, N)$ 有以下方程:

$$T_{j+1} \cos \theta_{j+1} - T_j \cos \theta_j + F_{c_j} = 0 \tag{12}$$

$$T_{j+1} \sin \theta_{j+1} - T_j \sin \theta_j - M_j g = 0 \tag{13}$$

$$(z_{j+1} - z_j) \cdot \frac{\tan \theta_{j+1} - \tan \theta_j}{\sec \theta_{j+1} - \sec \theta_j} = L_j \tag{14}$$

式中, θ_j 和 θ_{j+1} 为单元两端节点的倾角, z_j 和 z_{j+1} 为单元两端节点的 Z 坐标, T_j 和 T_{j+1} 为单元两端节点的系泊张力, M_j 和 L_j 分别为单元 j 的质量和长度, F_{c_j} 为单元 j 所受海流拖曳力, 表示为

$$F_{c_j} = \frac{1}{2} \int_{z_j}^{z_{j+1}} \rho C_D D V_c |V_c| dz \tag{15}$$

式中, ρ 为海水密度; D 为系泊链特征直径; V_c 为流速剖面; C_D 为拖曳力系数, 对于锚链和钢缆分别取 2.6 和 1.8。式(12)~(14)共有 $3N$ 个方程和 $3N$ 个未知量, 可以直接求解获得承受海流荷载的系泊链响应。

1.4 考虑腐蚀影响的系泊锚链热点应力分析

由于悬链线式系泊系统的工作原理与结构特点, 系泊链顶端承受最大的张力值, 成为系泊强度可靠性分析的重点。悬链线式系泊系统的平台锚链通常采用钢制锚链, 以承受频繁的收放作业^[21]。锚链的形式较为复杂, 需要通过数值仿真构建系泊张力与锚链环热点应力间的关系。

由于锚链链节结构的对称性, 在有限元分析中只保留一个完整链节和左右各半个链节, 左、右各半个链节的截面上分别施加拉力载荷和固定约束, 如图 4(a) 所示。通过数值仿真获得锚链模型在张力作用下的应力响应如图 4(b) 所示, 可以发现链环接触位置(位置 1)和环冠位置(位置 2)具有显著的应力值。由于位置 1 处为链节之间接触导致的表面压应力, 不是锚链最常见的失效位置, 而位置 2 承受拉应力, 更易发生破断, 故在位置 2 处选取应力最大的节点为热点。

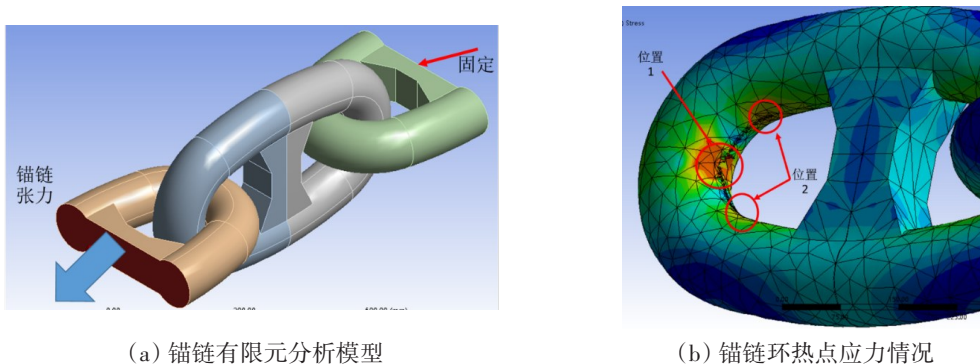


图4 锚链热点应力分析

Fig.4 Hot spot stress analysis of stud mooring chain

浮式平台系泊系统在海洋环境下长期服役, 其受到腐蚀作用而导致系泊承载能力下降。目前的海洋工程设计规范中通过给出腐蚀裕量的方式考虑系泊链几何尺寸的衰减, 如挪威船级社的系泊设计规范建议在系泊设计中考虑锚链直径的变化, 并给出了不同海洋环境下考虑腐蚀和磨损的锚链腐蚀裕量^[28]。腐蚀后的系泊链承载力为

$$\sigma_{c,corr} = \sigma_{c0} \cdot \left(D_{corr} / D_{new} \right)^2 \tag{16}$$

式中, σ_{c0} 为腐蚀前锚链的热点应力, D_{new} 和 D_{corr} 分别为腐蚀前后锚链的名义直径。此外, 腐蚀环境对系泊的影响也包括材料强度参数的变化, 如 Silva 等^[29]对海洋环境中的钢板随机腐蚀行为进行了研究, 发现材料强度的均值随时间降低, 而标准差随时间增加。因此, 本文将从考虑腐蚀裕量和材料强度参数两方面来分析腐蚀对系泊可靠性的影响。

综上所述, 本文基于悬链线方程构建了悬链式系泊链的控制方程, 采用平台六自由度响应和海流拖曳力作为系泊链的输入位移边界条件和载荷条件, 基于多段悬链线方法求解系泊链的系泊力。结合有限元仿真分析获得系泊链的热点应力, 并在后续的可靠性分析中考虑腐蚀作用对系泊可靠性的影响。

2 基于 EMC 的系泊系统可靠性分析方法

系泊系统是平台抵抗环境荷载的主要结构, 其可靠性直接关系到平台的安全生产。由于其结构特点与服役环境, 对系泊链的在位检测较难进行。为保守起见, 一些操船手册中要求平台每隔五年左右即对系泊链进行更换, 这种方式可能导致过高的时间和经济成本。基于环境载荷与平台响应的实测数据对系泊系统可靠性水平进行实时评估, 可以作为一种平台系泊链在位检测的补充或替代方法,

具有重要的工程价值。

基于前述系泊响应分析方法,可获得系泊链的热点应力时程,在此基础上可进行系泊可靠性分析。然而,由于计算过程中涉及悬链线方程,其具有较强非线性且无显式解,使得无法获得显式功能函数,难以应用一次二阶矩法等经典可靠度分析方法。蒙特卡洛法具有能够处理复杂问题和方便编程实现的优势,但存在计算成本较高的问题,Naess等^[12]提出了一种改进的蒙特卡洛法即EMC方法,近年来该方法已应用于建筑结构和海洋工程等领域,并显示出较高的计算效率和工程实用性。

考虑构件或系统的安全裕度方程 $M=R-S$,其中 R 和 S 分别为构件或系统的抗力与荷载,当 $M \leq 0$ 时构件或系统发生失效。设 M 的均值为 μ_M ,则安全裕度方程可以扩展为如下的参数化形式:

$$M(\lambda) = M - \mu_M(1 - \lambda), \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (17)$$

式中, λ 为安全裕度折减系数,当 $\lambda=1$ 时,式(17)退化为经典的安全裕度方程。

Naess等^[12]基于 R 与 S 为正态变量的情况,获得失效概率 P_f 与参数 λ 的函数关系,并将此表达式扩展到一般可靠性问题情况:

$$P_f(\lambda) \approx q(\lambda) \exp\{-a(\lambda - b)^c\}, \quad \lambda \rightarrow 1 \quad (18)$$

式中, $q(\lambda)$ 是一个随 λ 缓慢变化的函数,在实际计算中可将其视为常数。

式(18)事实上提供了一种外推方法,即可以通过选取一系列适当的 λ 值,获得折减结构的可靠度,再基于式(18)外推至 $\lambda=1$ 的情况,获得原构件或系统的可靠度。由于折减结构的失效概率显然高于原结构,所需的蒙特卡洛模拟次数将显著减少,从而提高计算效率。在实际应用中,采用式(18)的简化形式:

$$P_f(\lambda) \approx q \exp\{-a(\lambda - b)^c\}, \quad \lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_1 \quad (19)$$

与式(18)相比,式(19)中的 q 为常数,并通过尾部指标 λ_0 和 λ_1 确定了外推函数适用范围。显然,尾部指标的取值将影响可靠度外推结果,但Naess等^[12]认为在一定范围内,外推结果对 λ_0 的取值并不是很敏感。通过每一给定 λ 值及其对应的失效概率经验估计值,结合Levenberg-Marquardt最小二乘估计方法,即可获得上式中的待定参数。

EMC方法不仅可以预测结构的失效概率,而且可以给出预测结果的置信区间。假设对于每一给定的 λ 值进行 N 次蒙特卡洛模拟,获得每一 λ 值对应的失效频次为 $N_f(\lambda)$,则可得对应的失效概率经验估计值为

$$\hat{P}_f(\lambda) = N_f(\lambda)/N \quad (20)$$

失效概率统计量的变异系数为

$$\text{Cov}[\hat{P}_f(\lambda)] = \sqrt{\frac{1 - P_f(\lambda)}{P_f(\lambda)N}} \quad (21)$$

则失效概率统计量的95%置信区间上下界为

$$CI^*(\lambda) = \hat{P}_f(\lambda) \cdot \{1 \pm 1.96 \text{Cov}[\hat{P}_f(\lambda)]\} \quad (22)$$

基于所求得的失效概率置信区间,可以对Levenberg-Marquardt最小二乘估计的目标函数进行修正:

$$F(q, a, b, c) = \sum_{i=1}^M w_i \left[\lg \hat{P}_f(\lambda_i) - \lg q + a(\lambda_i - b)^c \right]^2 \quad (23)$$

式中, λ_i 与 $\hat{P}_f(\lambda_i)$ 分别为所选取的折减系数和对应的基于样本估计的失效概率, w_i 为通过置信区间定义的权重系数,本文取 $w_i = [\lg CI^+(\lambda_i) - \lg CI^-(\lambda_i)]^{-2}$ 。

强度失效与疲劳失效是系泊系统的主要失效模式。系泊强度可靠度对应于承载能力极限状态(ULS, ultimate limit state),即系泊链具有足够的强度,以承受极端环境条件下的载荷作用。传统的系

泊强度可靠性分析方法通常基于短期海况的水动力学仿真结果,并假设系泊张力服从某种分布形式,从而引入了额外的不确定性。本文将实测环境荷载信息与平台运动响应作为系泊链的力和位移边界条件,结合基于有限元的锚链热点应力分析,可以提供更适合既有系泊系统的强度可靠度估计。

本文将系泊链热点应力达到材料屈服极限视为强度失效,则系泊强度可靠性分析的安全裕度方程为

$$M = \sigma_s - \sigma_c \tag{24}$$

式中, σ_s 为系泊链材料的屈服强度, σ_c 为系泊链热点应力。

系泊疲劳可靠度对应于疲劳极限状态(FLS, fatigue limit state),即系泊链具有足够的承受循环载荷的能力。传统的系泊疲劳分析方法基于波浪散布图确定海况及其出现概率,然后通过每一短期海况的损伤量进行累加获得系泊的年损伤量和疲劳寿命。这种方法显然不适用于对既有系泊系统的疲劳可靠性实时评估。本文基于实测平台运动响应数据整理系泊链的热点应力时程,然后可结合雨流计数法和 Palmgren-Miner(P-M) 累积准则计算各系泊链的年损伤量。系泊链设计 S-N 曲线为

$$\lg N_c = \lg a_D - m \lg s \tag{25}$$

式中, N_c 为失效循环次数, s 为应力范围, a_D 和 m 分别为 S-N 曲线的截距和斜率。由于系泊链应力通常具有较大的应力均值,应力幅基于 Goodman 理论获得考虑平均应力的等效应力幅^[30]:

$$\sigma_a / \sigma_c + \sigma_m / \sigma_b = 1 \tag{26}$$

式中, σ_a 和 σ_m 分别为原应力循环的应力幅与应力均值, σ_b 为材料的极限强度, σ_c 为所求的等效应力幅。

本文将设计寿命期间系泊链总疲劳损伤量达到 P-M 累积损伤量视为疲劳失效,则系泊可靠性分析的安全裕度方程^[28]为

$$M = \Delta - T \cdot d_c \tag{27}$$

式中, d_c 为基于实测数据获得的年累积疲劳损伤; T 为设计疲劳寿命,单位为年(y); Δ 为 P-M 累积损伤量,通常认为服从对数正态分布,其中位数为 1,变异系数为 0.3^[31]。

与传统的基于水动力学仿真分析的系泊可靠性分析方法不同,本文所提出的方法主要基于海洋平台的实时空间位置坐标和姿态信息,结合平台与锚链的几何信息,即可获得锚链投影长度 S 及锚链顶端至海底的深度 H 的时间序列,进而实现系泊响应分析。该方法通过将平台六自由度响应作为载荷输入来考虑波浪等复杂载荷作用,避免了水动力学仿真的不确定性,更适用于对既有系泊系统的分析。EMC 方法的引入提升了所提出方法的计算效率,同时保证了工程上足够的计算精度。

本文所提出的系泊链可靠度实时评估方法流程如图 5 所示。首先通过原型监测系统获得平台的六自由度运动响应和海流荷载实测数据,通过统计分析获得响应分布和海流荷载模型,然后输入到悬

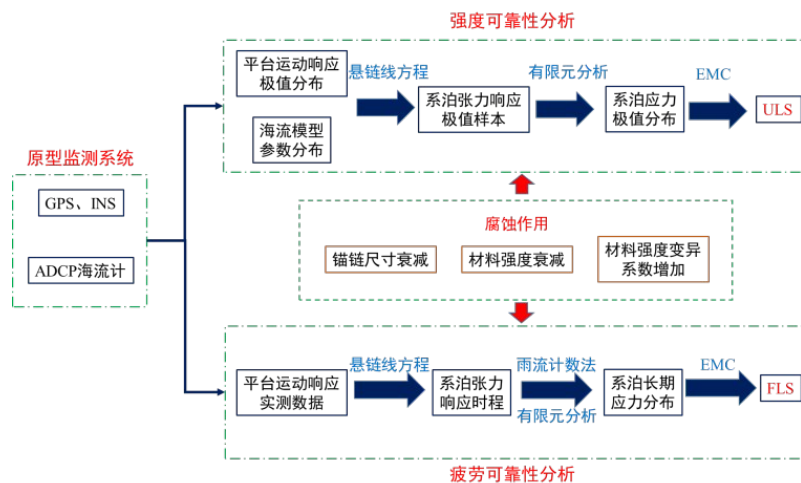


图 5 悬链线式系泊链在位实时可靠度评估流程图

Fig.5 Flow chart of real-time reliability assessment in situ of catenary mooring line

链线方程中计算系泊响应。对于强度可靠性分析,基于平台运动响应和海流载荷的分布特征获得系泊链的强度可靠度;对于疲劳可靠性分析,基于长期的平台运动响应监测数据获得系泊链的疲劳可靠度,并进行实时更新以更准确地捕捉系泊动力响应特征。进一步地,需要考虑腐蚀环境对系泊几何和物理特性的影响,并实时更新系泊链分析模型与可靠度分析结果,以便更准确地了解系泊链的实际状态。最后,建议通过可靠性分析结果评估系泊安全性,用户可基于设计规范或工程实践制定相应的安全评估准则和预警指标,实现对系泊系统维护的实时指导。

3 基于现场实测信息的半潜式平台系泊系统可靠性分析评估

3.1 半潜式平台现场监测数据

现场监测平台位于中国南海流花海域,工作水深为 260~305 m,是长期服役于此的一座半潜式钻井平台^[32],如图 6 所示。该平台的系泊系统为悬链线式系泊系统,采用 11 根系泊链非对称布置的多点系泊方式,如图 7 所示。



图 6 现场监测平台

Fig.6 In-situ monitoring platform

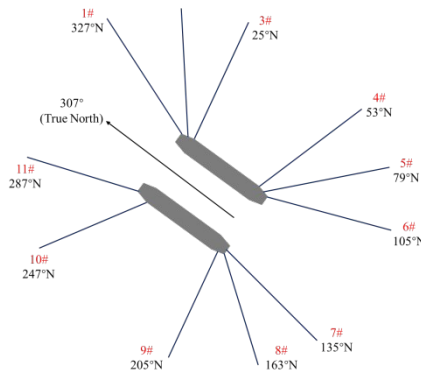


图 7 系泊系统布置示意图

Fig.7 Schematic diagram of mooring system layout

半潜式平台采用四成分系泊链,由平台至海床分别为平台锚链、悬挂钢缆、卧地锚链和锚端钢缆,各段的设计理论长度分别为 220.98 m、502.92 m、463.30~609.60 m 和 121.92 m,其中卧地锚链的长度如表 1 所示,系泊链各段重量参数如表 2 所示^[33]。需要注意的是,在实际工程应用中平台锚链不一定全部放出,各系泊链平台锚链段的实际长度应以现场情况为准。

表 1 各系泊链卧地锚链长度

Tab.1 Length of laid chain of each mooring line

系泊链序号	1, 3, 9, 11	2, 4, 6, 8, 10	5	7
卧地锚链长度/m	524.26	542.54	609.60	463.30

表 2 系泊链重量参数

Tab.2 Weight parameters of each mooring line

	平台锚链	悬挂钢缆	卧地锚链	锚端钢缆
干重/(10 ³ kg·m ⁻¹)	0.274 61	0.070 72	0.369 09	0.070 72
湿重/(10 ³ kg·m ⁻¹)	0.316 39	0.084 15	0.414 37	0.084 15

本文所采用的实测数据主要依托于课题组在平台上建立的原型监测系统^[32, 34]。平台监测系统采用声学多普勒流速剖面仪采集全剖面海流信息。海流计利用在水下浮筒上焊接的专用支架进行安装,从平台侧面的月池固定在水深 20~25 m 处^[32]。所获得的海流实测数据按水深分为 14 层,每层间隔 7 m,深度范围 30~121 m,采样间隔为 10 min。

本文所采用的海流实测数据采集周期为 2014.05.01~2015.06.30,经过数据整理与清洗操作后共获

得49 230个海流剖面,其中第1层流速流向分布情况如图8所示。对上述实测流速剖面进行EOF分解,各阶模态贡献率及累积模态贡献率如图9所示,可见前两阶模态的贡献率之和已达到95%,因此在重构海流模型(式(11))中只包括两个待定参数 α_1 和 α_2 。

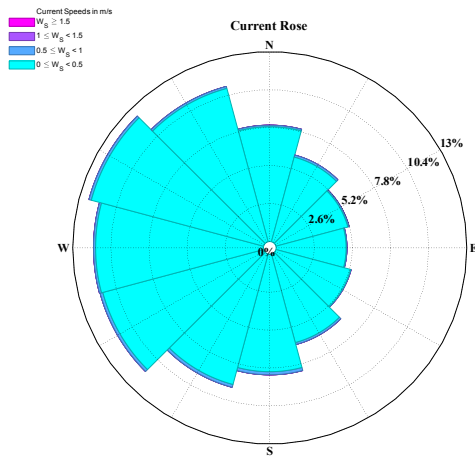


图8 实测第1层流速流向分布

Fig.8 Measured Layer 1 current speed and direction distribution

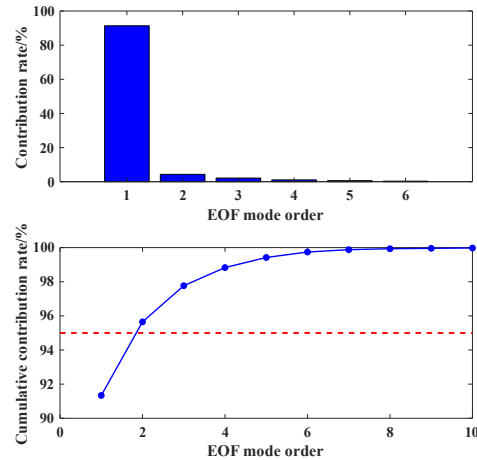


图9 各阶EOF模态的方差贡献率和累积贡献率

Fig.9 Variance contribution rate and cumulative contribution rate of each EOF mode

为在系泊可靠性分析中体现海流模型的分布情况,需构建模型参数的联合分布特征。由于 α_1 和 α_2 通常不是互相独立的,且不一定具有明显的线性关系,本文采用Drago等^[35]和Eckert-Gallup等^[36]提出的间接方法近似获得两参数的联合概率分布函数,其中模型参数 α_1 的分布特征采用Gumbel分布进行描述,条件概率密度函数 $f_{\alpha_2|\alpha_1}(\alpha_2)$ 采用正态分布,如图10和图11所示。

平台浮体结构的六自由度运动响应信息采用差分全球定位系统(DGPS, Differential Global Positioning System)和惯性导航系统(INS, Inertial Navigation System)进行监测,测量系统安装于平台船舶位置^[32]。所获得的DGPS数据包括经度、

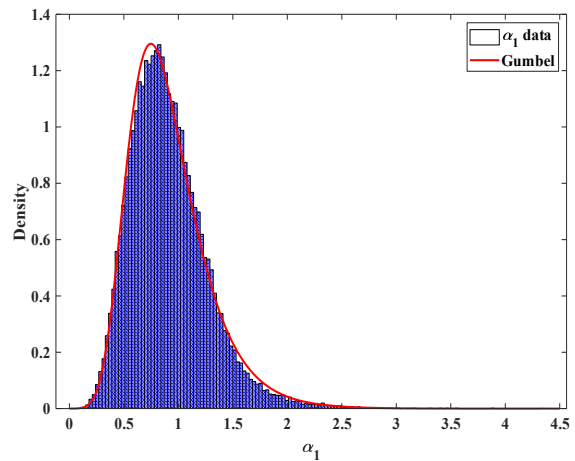
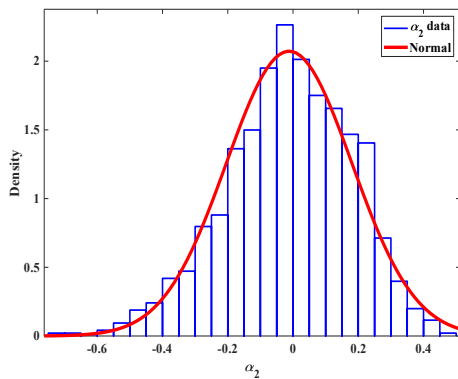
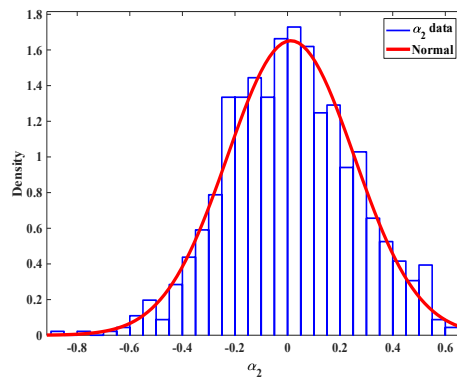


图10 参数 α_1 概率密度函数拟合

Fig.10 Probability density function fitting of α_1



(a) $\alpha_1=0.825$



(b) $\alpha_1=1.215$

图11 给定 α_1 时的参数 α_2 样本分布拟合情况

Fig.11 Fitting condition of the sample distribution of α_2 with given α_1

纬度和海拔高度,采样频率为1 Hz,基于椭球子午线弧长计算和坐标转换方法^[37-38]以及平台初始位置坐标和重心位置可获得三个平动自由度;INS数据包括横倾角、纵倾角和艏向角,采样频率为10 Hz,基于平台初始艏向角可获得三个转动自由度。

平台运动响应数据测量周期与海流相同。需要注意的是,挪威船级社规范^[26]指出不应将台风和日常海况的数据混合分析,因为台风与日常海况的载荷分布情况存在显著差异。因此,本文所整理的平台运动响应数据集不包含台风数据。在实际计算中,若监测到台风时期的数据,则应单独对其进行分析,而本文所提出的可靠性分析方法仍可适用于台风情况。为适应强度可靠性分析,将获得的六自由度数据按3 h时长划分为短期时程,对每一短期时程取其绝对值的极大值,得到各自由度极值样本。采用广义极值分布对平台各自由度响应极值进行拟合,其表达式为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp \left[- \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{k}} \right] \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1 - \frac{1}{k}} \quad (28)$$

式中, k 、 μ 和 σ 分别为形状参数、位置参数和尺度参数, $k=0$ 、 $k>0$ 和 $k<0$ 时该分布分别对应于Gumbel分布、Fréchet分布和Weibull分布。平台各转动自由度极值的分布拟合情况如图12所示,分布类型和多年一遇极值如表3所示,可以发现波频主导的自由度均服从Weibull分布,除艏摇外低频主导的自由度均服从Gumbel分布。所获得的多年一遇极值与作者所在课题组对其他年度相应的极值预测结果吻合^[39]。

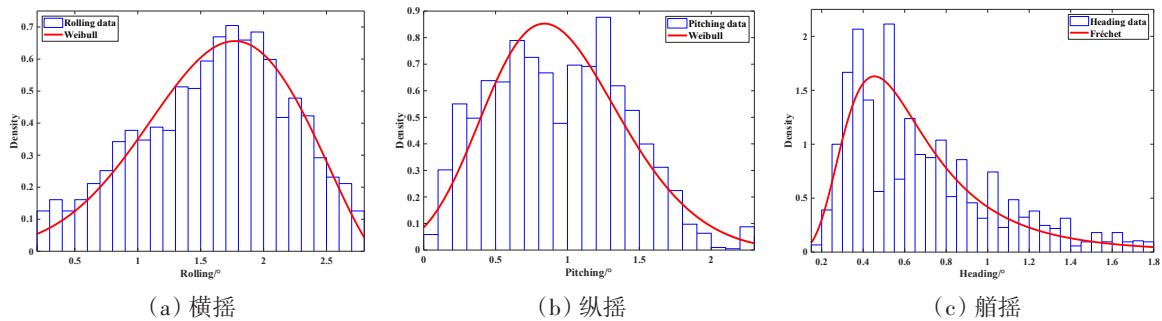


图12 平台运动响应极值分布拟合

Fig.12 Distribution fitting of extreme value of the platform motion response

表3 平台运动响应极值分布拟合结果

Tab.3 Distribution fitting results of the extreme value of the platform motion response

运动响应	分布类型	一年一遇极值	十年一遇极值	百年一遇极值
横摇	Weibull	2.84°	2.87°	2.88°
纵摇	Weibull	2.65°	2.86°	3.00°
艏摇	Fréchet	4.22°	6.58°	10.04°
正东向位移	Gumbel	5.45 m	6.76 m	8.10 m
正北向位移	Gumbel	5.40 m	6.82 m	8.30 m
垂荡	Weibull	1.74 m	1.86m	1.93 m

上述海流与平台运动响应传感器的测量精度如表4所示^[40]。综合表中的传感器信息与本文中所展示的海流与平台运动参数情况,本文假设测量不确定性不会显著影响系泊力乃至可靠度的计算结果。

表4 平台监测系统海流与运动响应传感器测量精度

Tab.4 Measurement accuracy of current and motion response sensors in platform monitoring system

测量系统	测量内容	量程	测量精度
环境荷载	流速	±10 m/s	0.1 m/s

续表 4

测量系统	测量内容	量程	测量精度
浮体系统	横荡	0~30 m	0.1 m
	纵荡	0~30 m	
	垂荡	0~3 m	
	横摇	±30°	0.01°
	纵摇	±30°	0.01°
	艏摇	0~360°	0.05°

3.2 基于实测信息的系泊结构强度可靠性评估

基于1.1节的悬链线方程,可对平台系泊链在平衡位置(顶端水平位移与垂直位移均为零)的顶张力进行计算,结果如表5所示。可以发现,1#系泊链的顶张力值显著高于其他系泊链,因此在后续的可靠性分析中重点分析该系泊链。

表5 系泊链平衡位置处顶张力

Tab.5 Top tension at the equilibrium position of the mooring line

系泊链	1#	2#	3#	4#	5#	6#
顶张力/kN	1400	1085	1150	921	844	764
系泊链	7#	8#	9#	10#	11#	
顶张力/kN	740	706	767	807	1108	

如前述系泊响应分析方法所示,海流载荷对系泊顶张力存在一定影响,但考虑海流载荷影响时需使用分段悬链线方程,将导致计算成本的显著增加。因此,需要针对实测海流数据评估其在系泊可靠性分析中的必要性。

由上述EOF分解结果可知,第一阶EOF模态的贡献率超过90%,对海流拖曳力起主导作用,所以此处可以只采用第一阶模态来表示海流剖面。海流模型参数 α_1 服从如图10所示的Gumbel分布,其对应的一年一遇和千年一遇极值分别为3.46和4.82。

不同 α_1 值对应的系泊顶张力计算结果如图13所示,其中顶张力值按照流速为零的张力值进行了归一化处理。可以发现,极端海流载荷工况将使得系泊链张力增加约3%。由于上述分析对海流和系泊链顶端位移进行了简化处理,为保守起见,在系泊强度可靠性分析中仍考虑海流载荷。而对于疲劳可靠性分析,由实测数据和参数 α_1 的分布函数均可以发现超过99.5%的 α_1 值低于2.5,此时海流载荷对系泊顶张力的影响比例低于1%,因此本文认为海流载荷对疲劳损伤的贡献可以忽略不计。此外,在后续的系泊强度可靠性分析中,为尽可能地保守,所施加的海流方向均使得系泊顶张力增加。

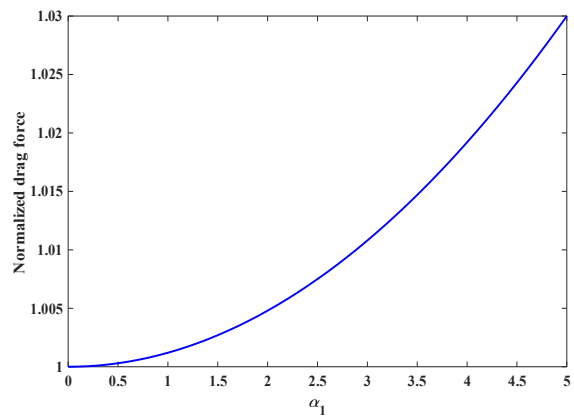


图13 α_1 值与系泊顶张力的关系

Fig.13 Relationship between α_1 and mooring top tension

表6 独立随机变量基本信息

Tab.6 Basic information of independent random variables

随机变量	均值	变异系数	分布类型
顶端水平位移 ΔS	2.866 m	0.671	Gumbel分布
顶端垂直位移 ΔH	1.577 m	0.813	Gumbel分布
材料屈服强度 σ_s	580 MPa	0.150	正态分布

为验证EMC方法求解系泊强度可靠性分析的可行性与准确性,考虑基于所研究的1#系泊链的数值算例,其几何参数与物理参数参见3.1节。该算例中的各独立随机变量信息如表6所示。

作为基准,采用经典MC方法进行了 10^8

次蒙特卡洛模拟,获得失效概率计算结果为 $P_f = 1.32 \times 10^{-5}$ 。上述经典MC方法在个人台式机上的总运行时间达到270 h。由于在实际工程应用中失效概率的绝对值通常较低,所估计的失效概率数值也并不需要特别精确,本文采用可靠指标 β 的计算误差来评估EMC方法的准确度。可靠指标 β 定义为

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \tag{29}$$

则采用经典MC方法的可靠指标计算结果为 $\beta=4.203$ 。

基于EMC方法进行了样本量为 10^5 的模拟,获得计算结果为 $\hat{P}_f = 1.64 \times 10^{-5}$,可靠指标 $\hat{\beta} = 4.153$,对应的95%置信区间为 $(0.70, 2.83) \times 10^{-5}$ 。可以发现此样本量显著低于经典MC方法的要求,使得EMC方法的计算效率大大提高,在个人台式机上的运行时间降低至12.5 min,即可获得满足工程要求的结果。图14展示了EMC方法的计算结果,图中黑点表示基于样本的经验失效概率估计,实线表示基于经验失效概率的外推函数(式(19)),两侧虚线为对应的95%置信区间,星号表示失效概率的最终预测结果。

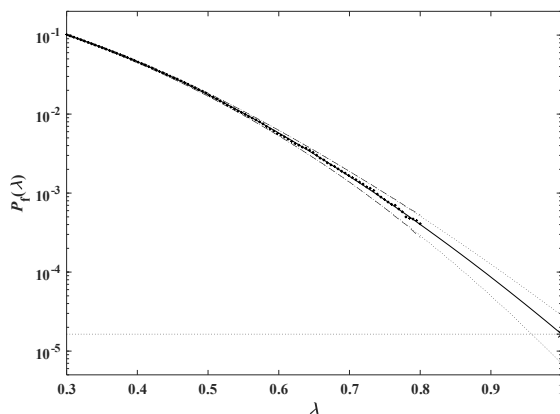


图14 基于EMC的系泊强度可靠性算例结果

Fig.14 Calculation example results of reliability of mooring strength based on EMC

平台系泊系统的锚链采用R4级锚链钢,由系泊链钢规范^[41]可知其屈服强度标准值为580 MPa。设材料屈服强度服从正态分布,均值为580 MPa。考虑锚链可能存在较大的残余应力,取屈服强度变异系数为0.125,基于EMC方法获得系泊强度可靠指标为4.7488。挪威船级社系泊设计规范^[28]中建议系泊强度失效概率不高于 10^{-5} ,对应可靠指标 $\beta_0=4.2649$ 。可见即使在较为严苛的材料强度分布情况下,系泊链的设计强度可靠度也满足规范要求。

为评估锚链腐蚀速率对系泊强度可靠度的长期影响,平台锚链的腐蚀速率取值范围设为0.3~1.0 mm/y。平台锚链的名义直径为120.65 mm^[42]。对系泊链在不同腐蚀速率下的年度可靠度计算结果如图15所示,图中红色虚线表示挪威船级社设计规范中的设计可靠指标基准值 β_0 。可以发现,腐蚀速率对系泊强度可靠性具有显著影响,年腐蚀速率在0.5 mm/a时系泊链已无法满足20年的设计服役年限要求,1.0 mm/y的情况下系泊安全服役年限甚至不到10年。

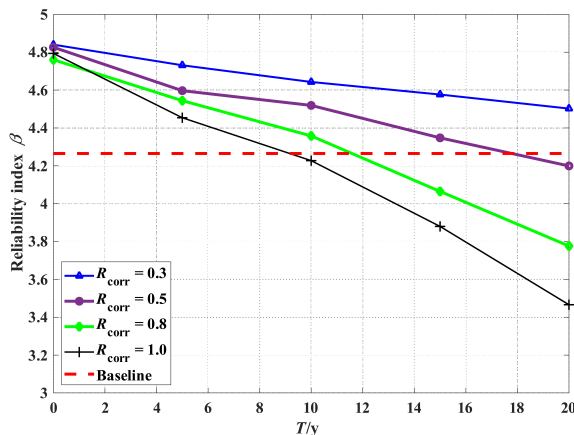


图15 考虑不同腐蚀速率的系泊链年度强度可靠指标

Fig.15 Annual strength reliable index of mooring chain considering different corrosion rates

系泊链应用于恶劣的深远海环境,其材料强度的均值将逐渐降低,而变异系数将逐渐增加。为探讨材料强度分布参数对系泊强度可靠度的影响,将材料屈服强度均值乘以一取值范围在0.9~1.0的折减系数,变异系数取值范围为0.12~0.135,以表征腐蚀影响。相应的可靠度计算结果如图16所示。可以发现,强度均值的衰减和变异系数的增加均显著影响系泊链的安全性,其中强度衰减至原强度的90%以及变异系数增至0.135均使得系泊链安全服役年限缩减一半。需要注意的是,在设计规范中仅考虑了锚链直径的变化,强度均值的变化可以折算为锚链腐蚀量,但材料强度变异系数的变化则无法考虑。上述分析结果表明,腐蚀环境对系泊链强度可靠性的影响显著,需要结合材料试验或模型试验获得强度均值与变异系数的演化情况,以更准确地评估系泊链的服役安全性。

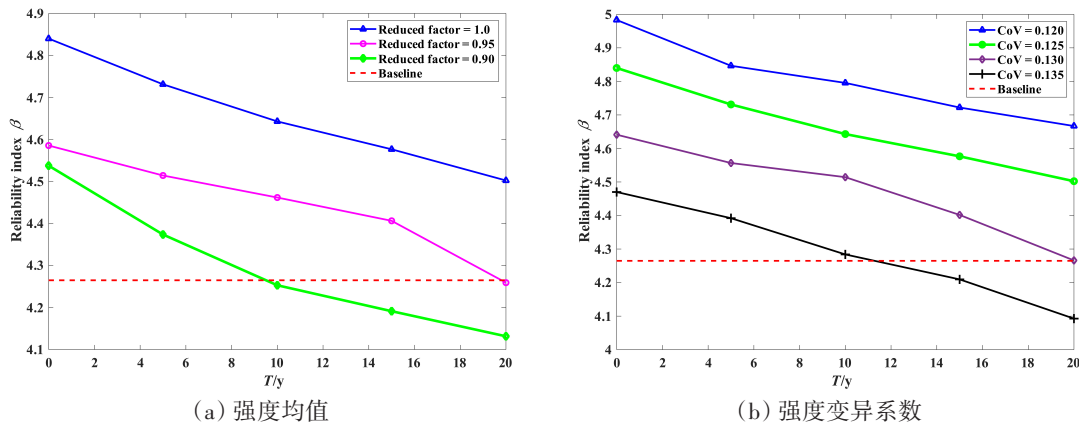


图 16 材料强度参数与系泊链强度可靠指标的关系

Fig.16 Relationship between material strength parameters and the strength reliability index of mooring chain

3.3 基于实测信息的系泊结构疲劳可靠性评估

本文基于前述实测平台运动响应数据整理了时长为一年的各系泊链的热点应力历程,然后结合雨流计数法和P-M 累积准则计算了各系泊链的年损伤量。经计算发现,1#系泊链具有最高的疲劳损伤量,年损伤量为0.0317,疲劳寿命为31.58年。

由系泊链钢规范[41]可知其R4级锚链钢的极限强度标准值为860 MPa。当锚链钢极限强度为定值时,系泊疲劳可靠性问题可获得解析解。为考虑腐蚀作用对系泊疲劳可靠性的影响,计算了1#系泊链在不同腐蚀速率下的可靠指标,如图17所示。挪威船级社系泊设计规范[28]中建议系泊疲劳失效概率不低于10^-3,对应可靠指标beta_0=3.0902。可以发现,相较于强度可靠度的情况,疲劳可靠度受设计疲劳寿命的影响更为显著,而受腐蚀速率的影响相对不明显。此外,可以发现系泊链达到目标可靠指标beta_0的安全服役寿命在10~15年之间,与强度可靠性分析结果接近。也就是说,在系泊设计符合规范要求的情况下,基于强度可靠性和疲劳可靠性所估计的平台系泊链的安全服役寿命没有明显差异,从而验证了平台锚链选型的合理性。

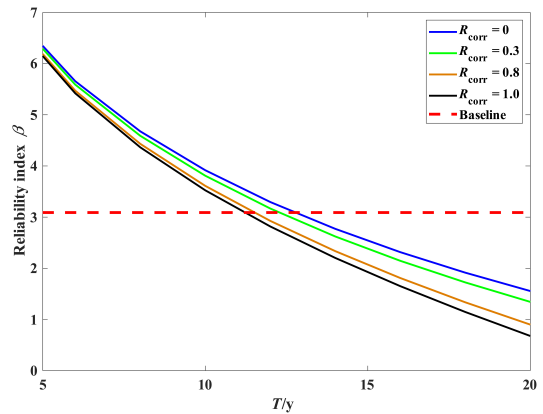


图 17 考虑不同腐蚀速率的系泊链年度疲劳可靠指标 Fig.17 Annual fatigue reliability index of mooring chain considering different corrosion rates

在实际工程应用中,由于制造工艺、材料缺陷等因素的影响,锚链钢极限强度应为随机变量,此时年累积疲劳损伤相应地也为随机变量。由于雨流计数法没有显式表达式,此时系泊疲劳可靠性问题没有解析解。为验证EMC方法求解系泊疲劳可靠性分析的可行性与准确性,考虑基于所研究的1#系泊链的数值算例,其几何参数与物理参数参见3.1节,设计寿命T=10。设极限强度服从正态分布,均值为860 MPa,变异系数为0.15。

作为基准,采用经典MC方法进行了样本量为10^5的蒙特卡洛模拟,获得失效概率计算结果为P_f = 3.07 x 10^-3,可靠指标计算结果为beta=2.740。上述经典MC方法在个人台式机上的总运行时间为87 h。

基于EMC方法进行了样本量为10^3的模拟,获得计算结果为P_hat_f = 3.20 x 10^-3,可靠指标beta_hat = 2.727,对应的95%置信区间为(1.60, 4.90)x10^-3,如图18所示。此样本量同样显著低于经典MC方法的要求,在个人台式机上的运行时间降低至43.5 min。

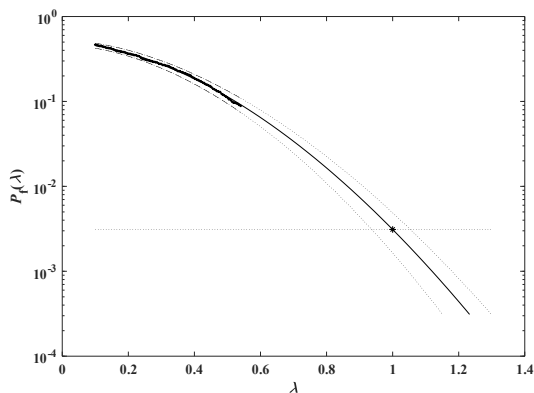


图18 基于EMC的系泊疲劳可靠性算例结果

Fig.18 Calculation example results of mooring fatigue reliability based on EMC

为探讨材料强度分布参数对系泊疲劳可靠度的影响,设极限强度服从正态分布,均值为860 MPa,变异系数取值为0.05和0.10,相应的可靠度计算结果如图19所示。可以发现,变异系数的增加同样影响系泊链的安全性,但相较于强度可靠性,腐蚀环境对系泊链疲劳可靠性的影响较小,通常使得安全服役寿命降低1~3年。

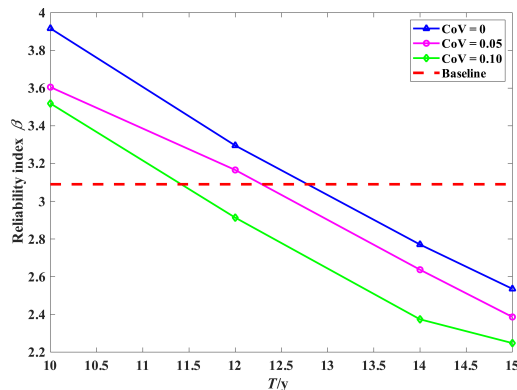


图19 材料强度变异系数与系泊链疲劳可靠指标的关系

Fig.19 Relationship between the material strength variation coefficient and the fatigue reliability index of the mooring chain

4 结 论

系泊系统是浮式平台的关键结构,对保障平台的安全生产具有重要作用,悬链线式系泊系统是目前应用最为广泛的系泊形式之一。为保证系泊系统的安全服役和避免频繁更换系泊链导致的时间和成本,有必要实时了解系泊链的可靠度水平。本文基于南海某半潜式平台的实测数据,提出了平台系泊链的可靠度评估方法,结论如下:

(1) 相较于传统的蒙特卡洛模拟方法,本文提出了一种基于EMC方法并结合现场实测信息的系泊结构可靠性实时评估方法,可以大大提高可靠度计算效率,同时保证了较高的计算精度;

(2) 所提出的方法适用于利用现场实测数据对在役系泊系统进行强度与疲劳可靠性评估,评估结果能够更好地反映系泊结构的实际力学响应,以更准确地评估极端海况的影响和累积疲劳损伤状况,为系泊系统的延寿和检修等提供支撑;

(3) 在强度可靠性分析中,所提出的方法通过 10^5 次模拟和12.5 min的计算时长,达到了 10^8 次经典MC方法计算270 h的准确度,在疲劳可靠性分析中,所提出方法的模拟次数和时间成本是经典MC模拟的百分之一的计算时长;

(4) 通过考虑系泊链材料强度衰减和变异系数升高,探究了腐蚀环境对系泊链可靠性的影响,结果表明腐蚀对系泊强度可靠性的影响显著,并从可靠度的角度验证了系泊链设计的合理性。

总之,本文讨论了基于原型监测系统对系泊强度与疲劳可靠性进行实时评估的方法,结合锚链的相关材料和模型试验,该方法可作为一种平台系泊链在位检测的补充和替代方法,并可应用于平台智能化数字孪生系统中,以实时显示系泊状态和指导系泊维护。

参 考 文 献:

- [1] Angulo Á, Edwards G, Souza S, et al. Mooring integrity management: Novel approaches towards in situ monitoring[J]. Structural Health Monitoring—Measurement Methods and Practical Applications, 2017: 87–108.

- [2] 陈昌松, 薛鸿祥, 唐文勇, 等. 深海平台系泊系统在灾害性海洋环境下可靠性评估[J]. 海洋工程, 2010, 28(4): 18-25.
Chen Changsong, Xue Hongxiang, Tang Wenyong, et al. Reliability assessment on mooring system of deepwater platform in catastrophic ocean environment[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(4): 18-25. (in Chinese)
- [3] 王浩, 何鑫, 唐友刚, 等. 基于风险的内转塔单点系泊线强度设计[J]. 海洋工程, 2018, 36(2): 30-37.
Wang Hao, He Xin, Tang Yougang, et al. A risk-based strength design of a turret single point mooring[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(2): 30-37. (in Chinese)
- [4] Rendón-Conde C, Heredia-Zavoni E. Reliability assessment of mooring lines for floating structures considering statistical parameter uncertainties[J]. Applied Ocean Research, 2015, 52: 295-308.
- [5] Stanisić D, Efthymiou M, White D J, et al. Reliability of mooring lines and piles for a permanently manned vessel in a tropical cyclone environment[J]. Applied Ocean Research, 2019, 82: 430-446.
- [6] Stanisić D, Efthymiou M, White D J, et al. Mooring system reliability in tropical cyclone and North Sea winter storm environments[J]. Applied Ocean Research, 2019, 88: 306-316.
- [7] 周鹏. 新型深水系泊系统疲劳可靠性分析[D]. 天津: 天津大学, 2011.
Zhou Peng. Fatigue reliability analysis of a new type deepwater mooring system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [8] 梁辉. 通信平台系泊系统的疲劳可靠性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Liang Hui. Fatigue reliability analysis of mooring system on communication platform[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [9] Hou Huimin, Dong Guohai, Xu Tiaojian, et al. Fatigue reliability analysis of mooring system for fish cage[J]. Applied Ocean Research, 2018, 71: 77-89.
- [10] Hou Huimin, Dong Guohai, Xu Tiaojian. Fatigue damage distribution and reliability assessment of grid mooring system for fish cage[J]. Marine Structures, 2019, 67: 102640.
- [11] Du Junfeng, Chang Anteng, Wang Shuqing, et al. Multi-mode reliability analysis of mooring system of deep-water floating structures[J]. Ocean Engineering, 2019, 19: 106517.
- [12] Naess A, Leira B J, Batsevych O. System reliability analysis by enhanced Monte Carlo simulation[J]. Structural Safety, 2009, 31(5): 349-355.
- [13] Naess A, Leira B J, Batsevych O. Reliability analysis of large structural systems[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2012, 28: 164-168.
- [14] Rocha J M, Henriques A A, Calçada R. Safety assessment of a small span high-speed railway bridge using an efficient probabilistic methodology[C]//The 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Hersonissos, Greece, 2015: 1720-1730.
- [15] Leira B J, Thöns S, Calçada R. System reliability of concrete structures subjected to chloride ingress[C]//Safety and Reliability—Theory and Applications—Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference, Portorož, Slovenia, 2017: 2305-2312.
- [16] Leira B J, Thöns S, Faber M H. Reliability assessment of a bridge structure subjected to chloride attack[J]. Structural Engineering International, 2018, 28(3): 318-324.
- [17] 蔡斌, 刘昕晖, 董心. 基于改进蒙特卡洛法的框架强柱弱梁可靠度分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(S1): 143-146.
Cai Bin, Liu Xinhui, Dong Xin. Reliability analysis for strong column weak beam design of frames based on improved Monte Carlo simulation method[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2012, 42(S1): 143-146. (in Chinese)
- [18] Gaspar B, Naess A, Leira B J, et al. System reliability analysis by Monte Carlo based method and finite element structural models[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136(3): 1-9.
- [19] Leira B J, Naess A, Naess O E B. Reliability analysis of corroding pipelines by enhanced Monte Carlo simulation[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 144: 11-17.
- [20] Du Yu, Wu Wenhua, Tang Da, et al. A novel underwater measurement method for mooring system using self-contained technique[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(5): 1-12.

- [21] 黄维平, 白兴兰. 深水油气开发装备与技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
Huang Weiping, Bai Xinglan. Deepwater oil and gas development equipment and technology[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016. (in Chinese)
- [22] Wu Wenhua, Feng Jiaguo, Xie Bin, et al. Development and sensing properties study of underwater assembled water depth-inclination sensors for a multi-component mooring system, using a self-contained technique[J]. *Sensors*, 2016, 16(11): 1925.
- [23] 苑双双. 浮式海洋平台原型测量与监测技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Yuan Shuangshuang. Prototype measurement and monitoring technology research of floating offshore platform[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [24] 徐德伦, 王莉萍. 海洋随机数据分析: 原理方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
Xu Delun, Wang Liping. Analysis of ocean random data: Principles, methods and applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [25] Forristall G Z, Cooper C K. Design current profiles using empirical orthogonal function (EOF) and inverse FORM methods [C]//Proceedings of the 29th Annual Offshore Technology Conference, Houston, USA, 1997: 11-21.
- [26] DNVGL-RP-C205. Environmental conditions and environmental loads[S]. DNV GL, 2017.
- [27] 王艳妮. 海洋工程锚泊系统的分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
Wang Yanni. Analysis and research on the mooring system of offshore engineering[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)
- [28] DNVGL-RP-E301. Position mooring[S]. DNV GL, 2018.
- [29] Silva J E, Garbatov Y, Guedes Soares C. Ultimate strength assessment of ageing steel plates subjected to random non-uniform corrosion wastage[J]. *Advances in Marine Structures*, 2011: 213-220.
- [30] Bader Q, Kadum E. Mean stress correction effects on the fatigue life behavior of steel alloys by using stress life approach theories[J]. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, 2014, 14(4): 50-58.
- [31] DNVGL-RP-C203. Fatigue design of offshore steel structures[S]. DNV GL, 2016.
- [32] 杜宇. 深水浮式平台原型测量方法与监测技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Du Yu. Full-scale testing method and prototype monitoring technology for deep-water floating platforms[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [33] 申辉, 朱为全, 王火平, 等. “南海挑战”号FPS系泊系统延寿强度性能评估[J]. *中国海洋平台*, 2020, 35(2): 66-73.
Shen Hui, Zhu Weiquan, Wang Huoping, et al. Strength assessment of mooring system life extension in FPS NanhaiTiaozhan [J]. *China Offshore Platform*, 2020, 35(2): 66-73. (in Chinese)
- [34] 杜宇, 武文华, 岳前进, 等. 深水浮式平台原型监测技术[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(3): 448-455.
Du Yu, Wu Wenhua, Yue Qianjin, et al. Prototype monitoring technique for deep water floating platform[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(3): 448-455. (in Chinese)
- [35] Drago M, Mattioli M, Quondamatteo F. Metocean design criteria for deep water offshore systems[C]//ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, St. John's, Canada, 2015.
- [36] Eckert-Gallup A C, Sallaberry C J, Dallman A R, et al. Application of principal component analysis (PCA) and improved joint probability distributions to the inverse first-order reliability method (I-FORM) for predicting extreme sea states[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 112: 307-319.
- [37] 李学逊. GPS测量结果的转换[J]. *铁路航测*, 1995(2): 29-35.
Li Xuexun. Conversion of GPS measurement results[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 1995(2): 29-35. (in Chinese)
- [38] 姜晨光, 阎桂峰. 椭球子午线弧长计算的新方法[J]. *测绘工程*, 1998(4): 38-42.
Jiang Chenguang, Yan Guifeng. A novel method for calculation of meridional arc length of ellipsoid[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 1998(4): 38-42. (in Chinese)
- [39] 孙刘璐, 于思源, 武文华, 等. 基于现场实测数据的半潜式平台运动响应分析和极值预测研究[J]. *海洋工程*, 2022, 40(1): 57-64.
Sun Liulu, Yu Siyuan, Wu Wenhua, et al. Motion analysis and extreme value prediction of semi-submersible platform based on prototype monitoring data[J]. *The Ocean Engineering*, 2022, 40(1): 57-64. (in Chinese)

-
- [40] 孙刘璐. 基于现场实测的半潜式平台响应分布和极值预测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Sun Liulu. Motion distribution analysis and extreme prediction of semi-submersible platform based on prototype monitoring data[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [41] GB/T 32969-2016. 系泊链钢[S]. 2016.
GB/T 32969-2016. Steel for offshore mooring chain cables[S]. 2016. (in Chinese)
- [42] 郭宝中. 流花11-1油田FPS扩展性系泊系统设计[J]. 中国海上油气(工程), 1996(2): 1-9+41-43.
Guo Baozhong. Design of FPS extending mooring system for Lihua 11-1 Oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 1996(2): 1-9+41-43. (in Chinese)