文章编号：1007−7294(2026)08−1344−21

深水半潜式平台碳纤维复合材料系泊系统动力响应探究

刘迎节[1]，邬德宇[2]，蔡红勇[1]，蒋玉峰[1]，张德庆[1]，杜君峰[1]
（1. 中国海洋大学 工程学院，山东 青岛 266100；2. 中交天津航道局有限公司，天津 300042）

摘要：深水系泊系统是半潜式平台结构基础设施，直接影响其作业安全及稳定运行。传统钢链式系泊系统因其自重大、易腐蚀等局限，难以适应深水/超深水海洋资源开发的迫切需求。碳纤维复合材料（CFRP）兼具质量轻、强度高、耐高温、耐腐蚀、抗疲劳及耐久性等优异性能，为深水半潜式平台系泊系统选型设计及工程应用提供了全新解决方案。本文以南海某深水半潜式平台为对象，提出了一种钢链−CFRP 缆−钢链三段式新型系泊方案，构建了钢链−CFRP 缆−钢链与钢链−聚酯缆−钢链两种三段式系泊系统，建立了大型浮体−系泊系统耦合水动力分析模型，通过数值仿真对比分析了两种系泊下系泊张力、疲劳损伤及平台运动等动力响应特性。结果表明：相较于聚酯缆系泊方案，CFRP 缆方案下整体刚度更高，平台纵荡、横荡、横摇、纵摇及艏摇方向固有周期更低，极限波浪条件下约束效果更优、平台稳定性与作业可靠性更高。此外，CFRP 缆疲劳损伤量远低于聚酯缆，但会增大两端钢链疲劳损伤，尤其是底部钢链。上述研究结论初步证实了 CFRP 缆在深水半潜式平台系泊系统中的可行性及优异性，为其创新方案设计及工程应用提供了重要的数据支撑与参考价值。

关键词：碳纤维复合材料；系泊系统；系泊张力；疲劳损伤；运动响应
中图分类号：U674.38 **文献标识码：**A **doi:** 10.3969/j.issn.1007−7294.2026.08.011

Dynamic response investigation of carbon fiber reinforced polymer mooring system for deepwater semi-submersible platforms

LIU Ying−jie[1], *WU De−yu*[2], *CAI Hong−yong*[1], *JIANG Yu−feng*[1], *ZHANG De−qing*[1], *DU Jun−feng*[1]
(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300042, China)

Abstract: Deepwater mooring systems are critical infrastructure for semi-submersible platforms, directly influencing their operational safety and stable operation. Traditional steel-chain mooring systems are increasingly inadequate for meeting the urgent demands of deepwater and ultra-deepwater marine resource development, primarily due to their inherent limitations such as high self-weight and susceptibility to corrosion. Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites, which possess exceptional properties including light weight, high strength, high-temperature resistance, corrosion resistance, fatigue resistance and durability, provide a new solution for the configuration design and engineering application of mooring systems for deepwater semi-submersible platforms. Taking a deepwater semi-submersible platform in the

收稿日期：2026−02−26
基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFB3711500）；国家自然科学基金基础科学中心项目（52088102）；中央高校基本科研业务费专项（202561068）
作者简介：刘迎节（2001–），男，硕士；蒋玉峰（1992–），男，副教授，通讯作者，E-mail：jiangyufeng@ouc.edu.cn。

South China Sea as the research object, this study proposes a novel three-segment mooring configuration consisting of steel chain–CFRP cable–steel chain, and further constructs two three-segment mooring systems, namely steel chain–CFRP cable–steel chain and steel chain–polyester cable–steel chain. A coupled hydrodynamic analysis model of the large floating platform–mooring system was established, and the dynamic response characteristics of the two mooring configurations including mooring tension, fatigue damage and platform motions were comparatively investigated through numerical simulations. The results indicate that compared with the polyester cable mooring configuration, the CFRP cable mooring configuration exhibits higher overall stiffness and lower natural periods in surge, sway, roll, pitch, and yaw. Under extreme wave conditions, it shows better performance in restraining platform motions, thereby leading to higher platform stability and operational reliability. Notably, the fatigue damage of the CFRP mooring cable is much lower than that of the polyester cable; however, the use of CFRP cable increases the fatigue damage of the steel chains at both ends, especially that of the bottom steel chain. These findings reveal the dynamic response characteristics of a deepwater semi-submersible platform under a CFRP mooring system, preliminarily verify the feasibility and superior performance of CFRP cables in deepwater semi-submersible platform mooring systems, and provide important data support and reference for innovative mooring scheme design and engineering applications.

Key words: carbon fiber reinforced polymer (CFRP); mooring system; mooring tension; fatigue damage; motion response

0 引　言

随着深海科技快速发展及深海探索的不断深入，海洋资源开发需求日益多元化，浮式结构物凭借其灵活性强、环境适应性强及作业范围广等显著特点，已在深海油气开发[1]、深海采矿[2]、海上风电[3]和海洋养殖[4]等领域得到广泛工程应用。作为浮式结构物的关键基础设施，系泊系统的核心功能是维持浮式结构物的稳定定位并限制其最大偏移，从而确保其安全性与稳定性。然而，浮式结构物长期在恶劣的海洋环境中作业，其系泊系统易受到疲劳、腐蚀、磨损等多种因素耦合影响，从而导致结构失效甚至破坏，进而引发浮式结构物漂移、倾覆或沉没等安全事故，造成严重的经济损失和环境污染。确保系泊系统的安全稳定运行已成为浮式结构物设计分析及运行管控中不可忽视的关键环节。

传统的系泊缆材料主要包括锚链、钢缆、合成纤维缆等，其中合成纤维缆主要使用尼龙、高模量聚乙烯和聚酯三种人工合成材料。谷圣厅等[5]基于时域分析方法对超大型 FPSO 多点系泊系统进行了研究，结果表明锚链自重过大导致 FPSO 偏移超出安全范围，从而引发立管断裂、碰撞或生产中断等安全问题。姜润喜等[6]通过海洋环境加速老化试验对钢缆材料性能开展分析，指出其应力腐蚀敏感性会导致服役寿命缩短与运维成本增加，显著影响系泊系统的长期可靠性。肖元等[7]基于频域和时域分析方法对浮式风机系泊系统的钢链与尼龙缆动力响应特性进行了对比研究，发现将中间段系泊缆替换为尼龙缆后，系泊张力虽有所减少，但尼龙材料显著的蠕变效应导致平台水平位移增大。相较传统的钢链，聚酯纤维缆表现出轻质、优异的耐腐蚀性能和极低的蠕变率等机械特性，故聚酯缆可有望成为深海系泊系统中理想的材料选择。袁梦等[8]基于时域有限元法对 Spar 平台系泊系统聚酯、聚丙烯及尼龙缆的动态响应进行对比分析，发现在相同平台偏移量下聚酯缆具有最大的水平恢复力，表现出最佳的系泊性能。尽管聚酯材料展现出优异的服役性能，但其固有的局限性不容忽视：赵晶瑞等[9]依据 ABS 规范推荐做法对深水半潜式平台聚酯缆系泊系统进行了研究，发现其对极端温度条件具有显著的敏感性，导致材料耐久性降低，进而缩短服役寿命。综上所述，亟需探究新型高性能系泊材料，以保证系泊系统在极端海洋环境中的安全性和稳定性。

碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)具有质量轻、强度高、耐高温、耐腐蚀、抗疲劳和耐久性等优异性能,在工程结构轻量化与绿色可持续发展需求的推动下,其已在交通运输、航空航天、桥梁工程等国民经济关键工程领域得到了广泛应用,成为推动相关产业技术升级和性能提升的核心材料支撑。王少强[10]对CFRP板材的耐腐蚀性能进行了短期测试,发现其在水、强酸溶液和强碱溶液的浸泡下对自身拉伸模量的影响较小,展现出良好的耐腐蚀性能。吕志林等[11]基于有限元分析和钢板疲劳裂纹修复试验,对修复钢板的应力分布和不同修复方法下的结构疲劳性能进行了研究,发现采用CFRP修复对裂纹再扩展寿命具有显著的增强效果,表明CFRP具有优良的抗疲劳性能。CFRP筋复合材料经70 ℃ NaCl溶液浸渍90天后,发现其层间剪切强度与弯曲强度均能保持较高水平,说明其在水或盐溶液侵蚀环境下仍具有良好的耐久性[12]。麻省理工学院团队采用基于过程的成本模型对碳纤维复合材料构件进行成本与能耗仿真分析,结果表明,该材料在波音787机型中的应用可在全生命周期内显著降低燃油消耗与碳排放,展现出显著的经济效益和环境效益[27]。尽管已有研究验证了CFRP材料的性能优势,且其已初步得到小规模示范应用。然而CFRP在海洋工程领域的研究仍相对匮乏,尚未形成成熟的工程应用体系。尤其是针对CFRP系泊系统下浮式结构物动力响应特性的研究尚不充分,故碳纤维复合材料系泊缆索在深水系泊系统中的可行性有待深入探究。

为探究CFRP缆在深水半潜式平台系泊系统中的应用可行性,本文创新性提出了钢链−碳纤维复合材料缆−钢链三段式新型系泊方案。通过建立大型浮体−系泊系统耦合水动力分析数值模型,从系泊安全性与功能性两个角度,对比分析了钢链−CFRP缆−钢链与钢链−聚酯缆−钢链两种系泊系统下的系泊张力、疲劳损伤及平台运动等动力响应特性,以探究并明晰碳纤维复合材料缆在深水半潜式平台系泊系统中应用的有效性及可靠性,为极端复杂海况下新型系泊系统的创新方案设计分析提供重要依据。

1 基础理论

1.1 三维势流理论

现有试验验证及数值研究表明,势流理论适用于半潜式网箱结构[13]、圆筒型FDPSO结构[14]、方箱形多浮体结构[15]等海洋结构物的水动力计算。因此,本文基于三维势流理论模拟浮式结构物受到的波浪荷载,该理论基本假定流体是无粘性、无旋、且不可压缩的,整个流场的速度势满足拉普拉斯方程。对于单位振幅的规则波,速度势可分解为

$$\Phi(\boldsymbol{X},t)=\mathrm{Re}\left[\phi(\boldsymbol{X})\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}\right]=\mathrm{Re}\left\{\left[\phi_0(\boldsymbol{X})+\phi_7(\boldsymbol{X})+\sum_{j=1}^{N}\eta_j\phi_j(\boldsymbol{X})\right]\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}\right\} \tag{1}$$

式中: Φ为总速度势; $\boldsymbol{X}=(x,y,z)$为流场中点的位置矢量; t为时间; ω为入射波频率; $\eta_j(j=1,2,\cdots,6)$为平台第j个自由度的运动幅值(η_1: 纵荡; η_2: 横荡; η_3: 垂荡; η_4: 横摇; η_5: 纵摇; η_6: 艏摇); ϕ_0为入射速度势; ϕ_7为绕射速度势; ϕ_j为平台第j个自由度方向单位幅值运动产生的辐射势。

在给定ω和入射波方向β下, ϕ_0可根据下式进行求解

$$\phi_0=\frac{\mathrm{i}gA\cosh[k(z+h)]}{\omega\cos(kh)}\mathrm{e}^{-k(x\cos\beta+y\sin\beta)} \tag{2}$$

式中: h为水深; A为波幅; k为波数; g为重力加速度。

ϕ_7可通过求解以下边值问题获得

$$\nabla^2\phi_7=0 \tag{3}$$

$$\left(-\omega^2\phi_7+g\frac{\partial\phi_7}{\partial z}\right)\Bigg|_{z=0}=0 \tag{4}$$

$$\left.\frac{\partial\phi_7}{\partial z}\right|_{z=-h}=0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial \phi_7}{\partial \boldsymbol{n}} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial \boldsymbol{n}}\bigg|_{S_\mathrm{m}} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{n}$是物体表面的广义法向量；S_m为物体平均湿表面面积。

类似地，ϕ_j可通过以下边值问题求解

$$\nabla^2 \phi_j = 0, j = 1,2,\cdots 6 \tag{7}$$

$$\left(-\frac{\omega^2}{g}\phi_j + \frac{\partial \phi_j}{\partial z}\right)\bigg|_{z=0} = 0, j = 1,2,\cdots \tag{8}$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z}\bigg|_{z=-h} = 0, j = 1,2,\cdots 6 \tag{9}$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial \boldsymbol{n}} = -i\,\omega n_j\big|_{S_\mathrm{m}}, j = 1,2,\cdots 6 \tag{10}$$

此外，为了求解ϕ_j，必须在控制面上应用 Sommerfeld 辐射条件。

基于边界元法[16]可分别求得上述速度势，然后对物体表面的压力分布进行积分，获得作用于浮式结构物上的波浪荷载。

1.2 集中质量法

获取浮式结构物的波浪荷载后，下一步是探究波浪荷载作用下系泊缆的动力响应。主流方案是采用集中质量法进行系泊缆动力学分析[17]，因此本文采用该方法对系泊缆进行建模分析，如图 1 所示。将系泊缆离散为多个由无质量弹簧单元与质量节点组成的分段，其所受外力（如重力、浮力、波浪力等）均作用在各质量节点上。其中，系泊缆上端（A 点）连接到平台导缆孔处，而下端（B 点）锚固在海床。

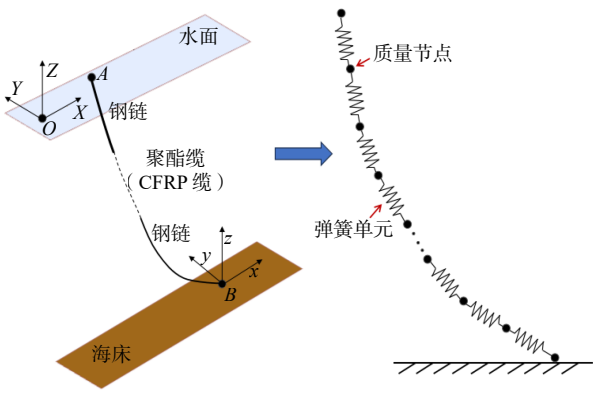


图 1　系泊缆的集中质量模型示意图

Fig.1　Schematic diagram of the lumped mass model for a mooring cable

节点P的运动方程为

$$m_p \boldsymbol{a}_p = \boldsymbol{T}_{p+1} + \boldsymbol{T}_p + \boldsymbol{B}_p + \boldsymbol{G}_p + \boldsymbol{f}_p \tag{11}$$

式中：m_p是集中在第P个节点上的质量；$\boldsymbol{a}_p$是第P个节点的加速度；$\boldsymbol{T}_p$和$\boldsymbol{T}_{p+1}$分别是第P个与第$P+1$个分段的张力；$\boldsymbol{B}_p$、$\boldsymbol{G}_p$和$\boldsymbol{f}_p$分别为作用在第P个节点处的浮力、重力和流体力；$\boldsymbol{f}_p$可通过 Morsion 方程计算

$$\boldsymbol{f}_p = C_\mathrm{m}\rho V_P \boldsymbol{a}_P - C_\mathrm{a}\rho V_P \boldsymbol{a}_{rP} + \frac{1}{2}\rho C_\mathrm{D} A_P |\boldsymbol{v}_{rP}| \boldsymbol{v}_{rP} \tag{12}$$

式中：C_m、C_a和C_D分别第P个分段的惯性力系数、附加质量系数和拖曳力系数。V_P和A_P分别是第P个分段的排水体积和阻力作用面积；$\boldsymbol{v}_{rP}$和$\boldsymbol{a}_{rP}$分别为流体在第P个节点上的速度和加速度。具体的分段张力阐述见文献[18]。

1.3 系泊疲劳损伤计算理论

由于系泊系统长期处于复杂恶劣的海洋环境中，高循环非线性荷载的持续作用易引发疲劳损伤，严重影响浮式结构物作业安全及稳定运行，故本文拟开展系泊疲劳损伤分析。具体采用的系泊疲劳损伤计算方法为线性疲劳累计理论结合 *S-N*/*T-N* 曲线法[19]。

S-N 曲线是指材料或构件达到疲劳破坏时所需荷载的循环次数N与应力范围S之间的关系，其计算公式为

$$\lg N = \lg a - M \lg S \tag{13}$$

式中：M和$\lg a$为材料 *S-N* 曲线的参数。

T-N 曲线反映了系泊张力与N之间的关系，即只考虑系泊张力产生的疲劳，而不考虑扭矩等因素，其计算公式为

$$\lg N=\lg K-M\lg R \tag{14}$$

式中: R为张力范围与缆绳最小破断荷载的比值; M和K为材料 T-N 曲线的参数。

Miner 线性累计损伤理论假定构件或材料在各应力范围下的疲劳损伤是独立不相关的, 因此其总损伤可视为各个应力范围所产生损伤的线性叠加, 其计算公式为

$$D=\sum_{i=1}^{n}D_i=\sum_{i=1}^{n}\frac{n_i}{N_i} \tag{15}$$

式中: D为累积疲劳损伤, 当$D=1$时, 结构发生疲劳破坏; D_i为各应力范围下的疲劳损伤; n_i为该应力范围下荷载循环次数。

由上述公式整理得到, 在短期海况j下系泊缆一年内的疲劳损伤D_j的计算公式为

$$D_j=p_j\frac{3.15576\times10^7}{T_j}\sum_i\frac{n_{ji}}{N_i} \tag{16}$$

式中: p_j为一年中短期海况j发生的概率; T_j为在短期海况j下的张力时间历程。

钢链的 T-N 曲线建议取$M=3$, $K=316$[20]。聚酯缆的 T-N 曲线建议取$M=9$, $K=7.5$[21]。CFRP 的 S-N 曲线建议取$M=19.57$, $\lg a=125.94$[22]。

2 半潜式平台及系泊系统参数

2.1 半潜式平台的建立与验证

本文以某深水半潜式平台为例, 分析 CFRP 缆在深水系泊系统中的可行性。其主要由三部分组成: 四组对称浮筒、周向对称分布的四根垂直支撑立柱和上层甲板, 结构关于平台的中横剖面和中纵剖面均对称。半潜式平台的型宽为 91.5 m, 工作水深为 1422.1 m, 设计吃水为 37 m, 水面和甲板之间的距离为 22 m。基于 SESAM 软件建立平台的水动力模型, 如图 2 所示。平台的主要参数见表 1。

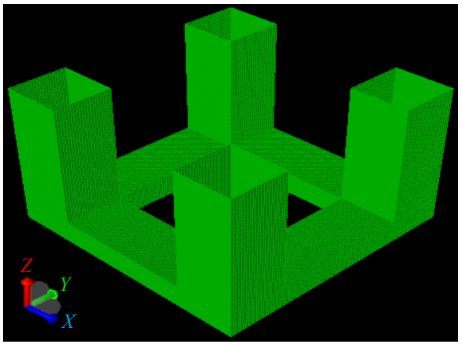


图 2 半潜式平台的水动力模型

Fig.2 Hydrodynamic model of the semi-submersible platform

表 1 半潜式平台的主要参数

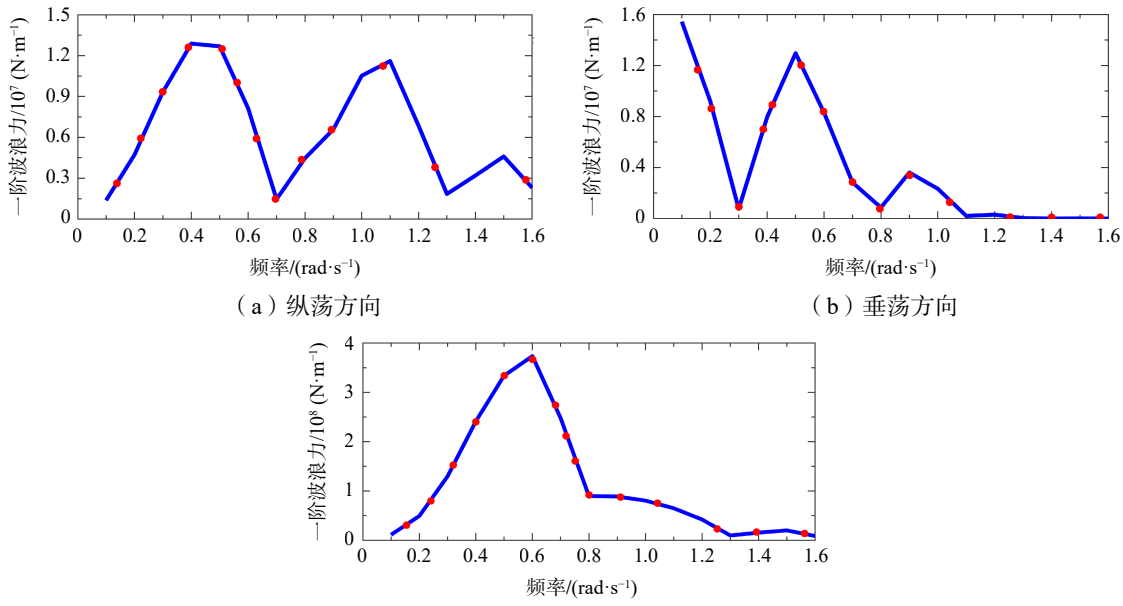
Tab.1 Main parameters of semi-submersible platform

参数	数值	参数	数值
立柱尺寸（长×宽×高）/m	21×21×59	排水量/t	105 000
立柱中心间距/m	70.5	横向回转半径/m	41.1
浮筒尺寸（长×宽×高）/m	49.5×21×9	纵向回转半径/m	42.5
吃水/m	37	垂向回转半径/m	44.4
重心高度/m	31.8		

基于半潜式平台的对称性, 本文选取 0°、15°、30°和 45°四种入射波浪方向, 其中 0°入射方向与 X 轴正方向同向。本节利用 SESAM-HydroD 软件进行频域水动力分析, 将计算得到的水动力参数与已公开发表的代表性研究成果[23] 进行了对比验证。平台纵荡、垂荡及横摇方向一阶波浪力对比结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 本文的数值计算结果在变化趋势及具体离散数值上与已有研究成果高度一致, 从而验证了本文建立模型及本节数值仿真的准确性。

2.2 钢链−聚酯缆−钢缆系泊系统参数

半潜式平台采用 4 组 16 点式系泊系统, 每组系泊缆包含 4 根系泊缆, 具体布置形式如图 4 所示。系泊系统可分为三部分: 顶部和底部采用无档钢链, 中间部分采用聚酯缆或 CFRP 缆。钢链−聚酯缆−钢链系泊系统的主要参数如表 2 所示。



（a）纵荡方向　　（b）垂荡方向

（c）纵摇方向

图 3　半潜式平台的一阶波浪力对比图（波浪 45°入射）

Fig.3　Comparison of first-order wave forces on semi-submersible platform （45° wave incidence）

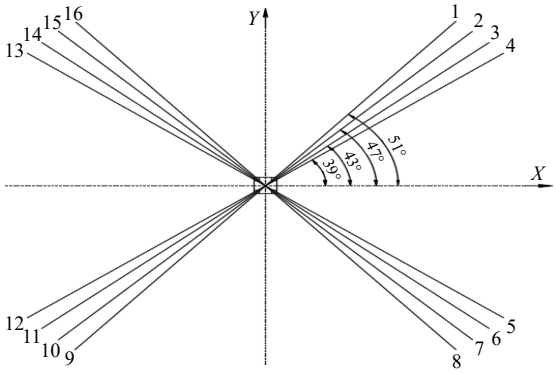


图 4　深水半潜式平台系泊系统布置示意图

Fig.4　Schematic diagram of mooring system arrangement for deepwater semi-submersible platform

表 2　钢链−聚酯缆−钢链系泊系统的主要参数

Tab.2　Main parameters of steel chain-polyester rope-steel chain mooring system

材料	长度/m	等效直径/mm	干重/（kg·m^{-1}）	轴向刚度/MN	破断强度/kN
钢链	150	282.84	493.0	1960	20 709
聚酯缆	2003	204.90	45.1	506.6	21 437
钢链	259	282.84	493.0	1960	20 709

2.3 CFRP 缆的迭代设计流程

本节聚焦于分析钢链−聚酯缆−钢链与钢链−CFRP 缆−钢链两种不同系泊方案下的深水半潜式平台整体动力响应特性。鉴于系泊缆在轴向方向上承受较大拉力，最可能发生的失效模式为轴向破断，因此本文在确保两种系泊系统的抗拉安全系数相近、系泊长度相同的前提下，开展了系泊系统的性能对比研究。该设计准则通过统一最大荷载条件建立一致的评估标准，从而确保系泊系统的安全性和功能性具有合理的对比基础。为保证两种系泊设计的安全系数在同一水平上，采用图 5 所示的迭代设计流程来计算 CFRP 缆的等效直径：

1）固定中间段聚酯缆的参数设置，依据聚酯缆的最小破断荷载计算 CFRP 缆的等效直径，作为模拟的初始参数，并进行水动力响应分析；

2）根据水动力响应分析结果，分别计算 CFRP 缆和聚酯缆的安全系数FS_{CFRP}和FS_{Poly}，进而判断两者的安全系数相对误差是否小于 1%；

3）若安全系数相对误差小于 1%，迭代中止，进一步分析系泊系统的安全性和功能性，评估 CFRP

缆的优劣;

4)若安全系数相对误差不小于1%,则按照计算结果调整CFRP缆的等效直径;如果FS_{CFRP}太低,则增加直径以提高承载能力;如果FS_{CFRP}过高,则减小直径以优化材料使用和成本效益,同时保证满足安全性要求。上述直径的调整可采取如直径的1%等较小步长,然后返回步骤2),直至相对误差小于1%,迭代中止。

为开展时域耦合动力响应分析,本文选取了该半潜式平台作业海域百年一遇的极端海况。极端海况采用JONSWAP谱,$H_{\mathrm{S}}=14.6$ m,$T_p=12.6$ s,$\gamma=2.4$,并作为迭代设计流程中的目标工况,迭代计算结果如表3所示。

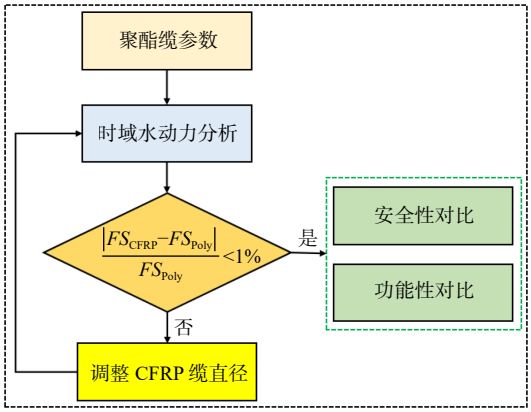


图5 工况设计流程图

Fig.5 Design workflow of operating conditions

表3 迭代计算结果表

Tab.3 Iterative calculation results

迭代次数	CFRP缆的等效直径/m	安全系数相对差
1	0.097 01	5.79%
2	0.097 98	4.13%
3	0.098 96	2.51%
4	0.099 93	0.92%

经过4次迭代,CFRP缆和聚酯缆的安全系数相对误差为0.92%,满足图5设定的收敛标准。迭代结束得到CFRP缆的主要参数如表4所示。CFRP缆系泊系统中顶部及底部钢链与表2一致,中部采用迭代计算的等效直径,并以此作为后续对比分析的基准。

表4 CFRP缆的主要参数

Tab.4 Main parameters of CFRP cable

长度/m	等效直径/mm	干重/(kg·m^{-1})	轴向刚度/MN	破断强度/kN
2003	99.93	14.1	1254.8	22 743

3 数值结果分析

基于自由衰减实验及系泊安全性与功能性分析,对比分析了半潜式平台在CFRP缆系泊系统与聚酯缆系泊系统下的动力响应特性,进而评估CFRP缆在浮式结构物系泊系统中的适用性。

3.1 自由衰减结果分析

表5展示了CFRP缆和聚酯缆系泊方案下平台的固有周期。相较于钢链−聚酯缆−钢链系泊系统,选用钢链−CFRP缆−钢链系泊系统时半潜式平台垂荡方向固有周期几乎一致,纵荡、横荡、横摇、纵摇及艏摇方向的固有周期更低,这是由于采用CFRP缆替换聚酯缆增大系统的整体刚度。两种系泊方案下的平台固有周期均超过了20 s,避开了波浪主能量的周期范围,可满足设计规范要求[24]。

3.2 系泊安全性分析

本节对不同系泊方案下的深水半潜式平台系泊安全性进行分析,主要包括张力分析与疲劳损伤对比。其中,张力分析中FS决定系泊缆的破断风险,张力平均值和标准差则直接影响疲劳寿命;疲劳评估

依据累积损伤理论，结合张力时程统计与 *S-N* 或 *T-N* 曲线评估疲劳性能。

表 5　平台固有周期

Tab.5　Natural period of platform

运动方向	固有周期/s	
	聚酯缆系泊	CFRP缆系泊
纵荡	165.12	130.16
横荡	166.26	131.89
垂荡	22.64	22.68
横摇	43.44	42.74
纵摇	45.31	44.91
艏摇	90.40	86.25

3.2.1 完整系泊工况下系泊张力分析

图 6 展示了不同波浪入射方向下 CFRP 缆与聚酯缆的张力最大值数据。结果表明：在所有浪向下 CFRP 缆的最大张力均大于聚酯缆，其中在迎浪侧差异尤为明显。

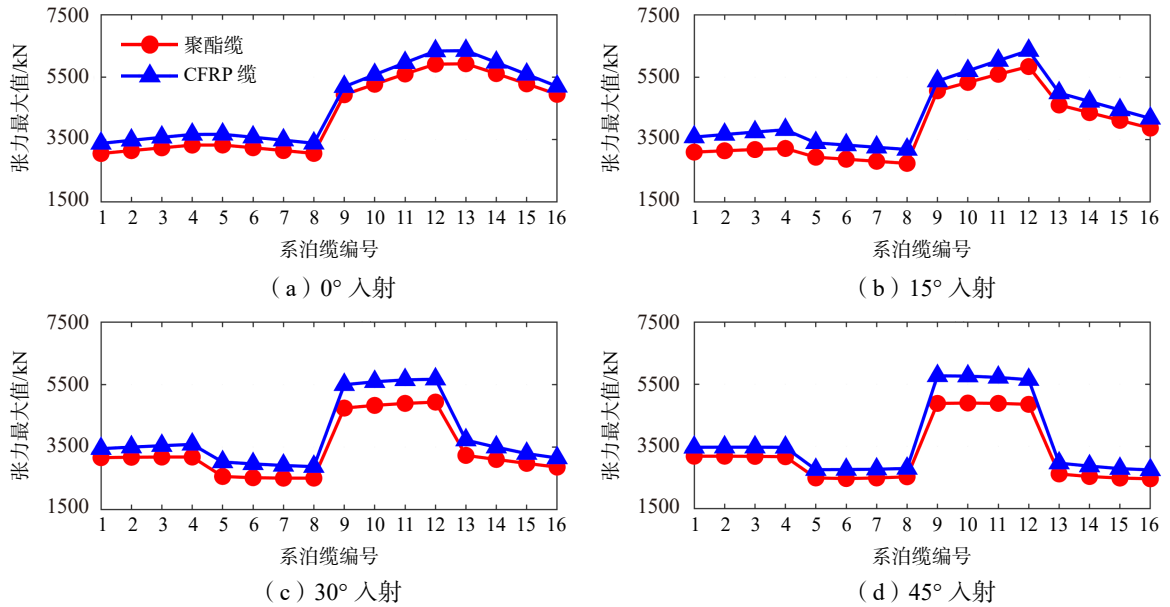


图 6　完整系泊工况下 CFRP 缆和聚酯缆的张力最大值

Fig.6　Maximum tension of CFRP and polyester ropes under the intact mooring condition

图 7 和图 8 分别展示了不同波浪入射方向下顶部钢链和底部钢链的张力最大值。表 6 展示了完整系泊工况下最大系泊张力所对应的系泊缆及其 *FS*。在所有浪向下，CFRP 缆系泊下两端钢链的最大张力均大于聚酯缆系泊，从而导致其两端钢链的 *FS* 有所降低。主要归因于 CFRP 缆相较于聚酯缆具有更高的轴向刚度，使系泊–平台系统的整体刚度增大，从而在波浪荷载作用下系统对外部激励的响应更为迅速，进而产生更大的系泊张力。表 6 显示：所有工况下 *FS* 最小值为 3.08，高于设计规范值 1.67[25]，表明完整系泊工况下两种系泊系统均能保证平台安全运行。

图 9 和图 10 分别展示了不同浪向下 CFRP 缆与聚酯缆的张力平均值及标准差。不同浪向下两种缆绳张力平均值的变化趋势基本一致，但 CFRP 缆的张力平均值始终高于聚酯缆。此外，CFRP 缆的张力标准差较大，尤其是迎浪侧差异，表明 CFRP 缆承受更大的交变荷载，面临更大的疲劳损伤风险。虽然 CFRP 材料自身具备优异的抗疲劳性能，但仍需通过系泊疲劳损伤的定量分析来评估两者安全性能的优劣。

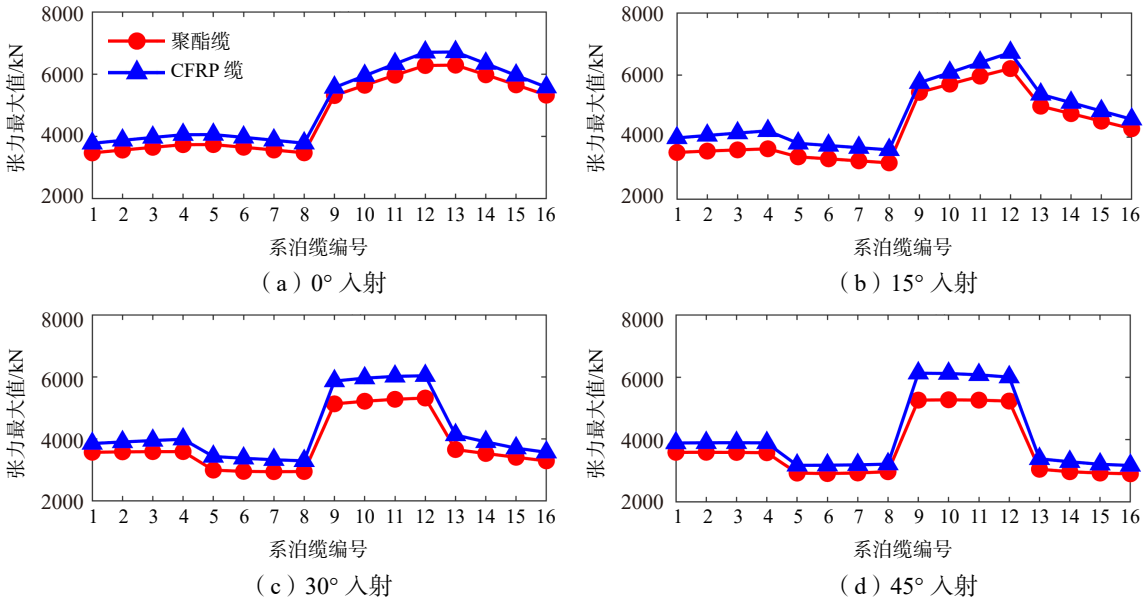


图 7 完整系泊工况下顶部钢链的张力最大值

Fig.7 Maximum tension of top steel chain under the intact mooring condition

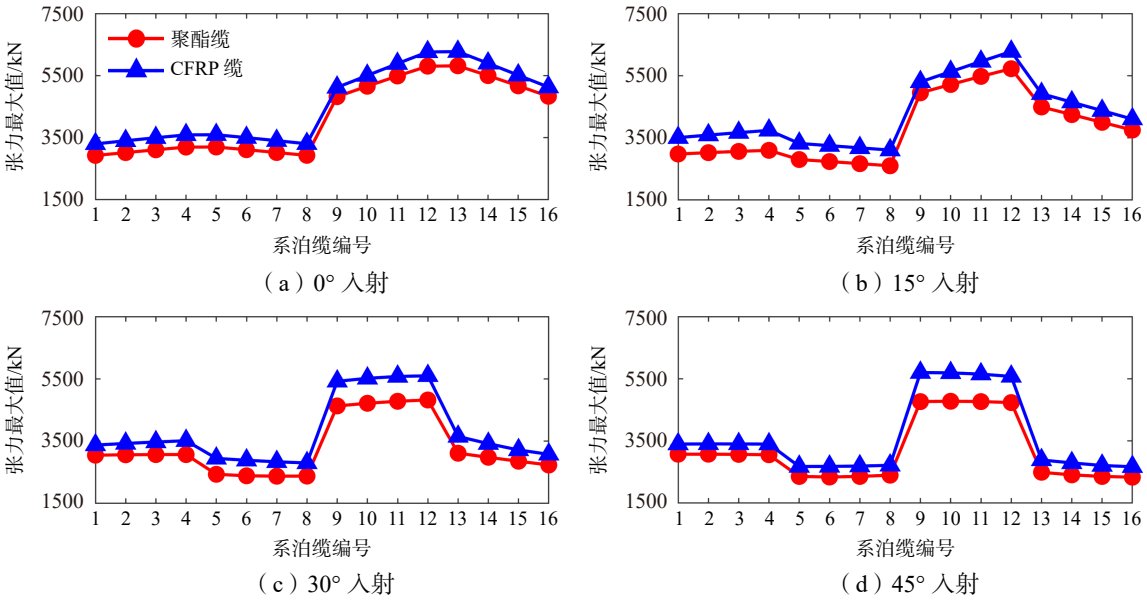


图 8 完整系泊工况下底部钢链的张力最大值

Fig.8 Maximum tension of bottom steel chain under the intact mooring condition

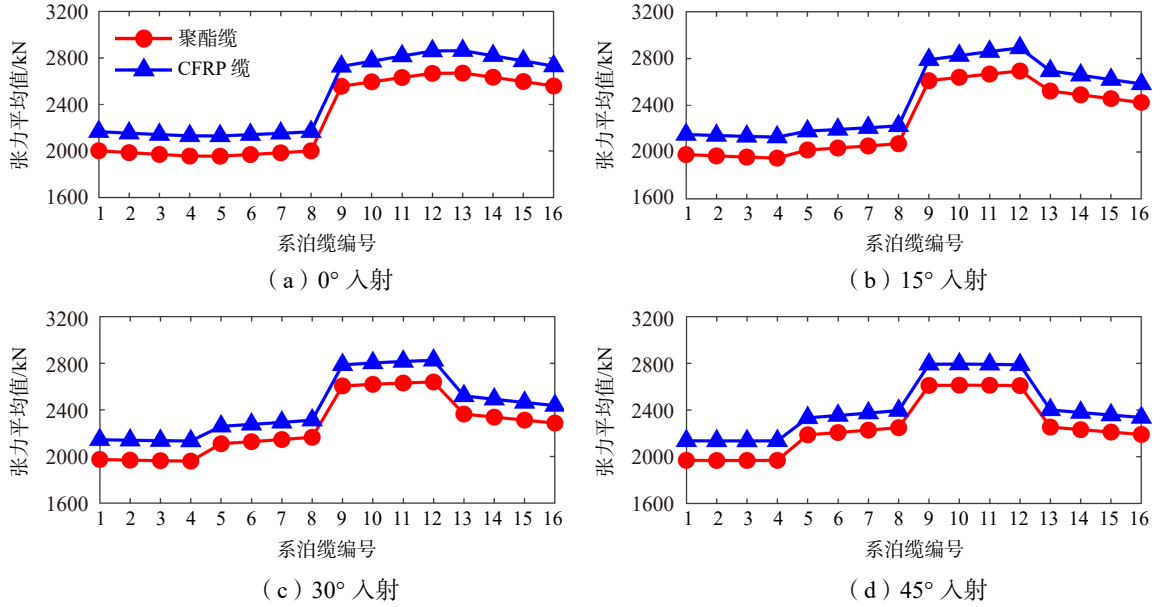
表 6 完整系泊工况下系泊缆的张力最大值和 *FS*

Tab.6 Maximum tension and *FS* of mooring lines under the intact mooring condition

浪向/°	系泊缆编号	聚酯缆系泊方案	张力最大值/kN	*FS*	系泊缆编号	CFRP缆系泊方案	张力最大值/kN	*FS*
0	13	顶部钢链	6290	3.29	13	顶部钢链	6712	3.09
		聚酯缆	5927	3.62		CFRP缆	6346	3.58
		底部钢链	5815	3.56		底部钢链	6273	3.30
15	12	顶部钢链	6208	3.34	12	顶部钢链	6721	3.08
		聚酯缆	5840	3.67		CFRP缆	6352	3.58
		底部钢链	5724	3.62		底部钢链	6278	3.30

续表 6

浪向/°	系泊缆编号	聚酯缆系泊方案	张力最大值/kN	*FS*	系泊缆编号	CFRP缆系泊方案	张力最大值/kN	*FS*
30	12	顶部钢链	5319	3.89	12	顶部钢链	6038	3.43
		聚酯缆	4940	4.34		CFRP缆	5672	4.01
		底部钢链	4822	4.30		底部钢链	5599	3.70
45	10	顶部钢链	5276	3.92	9	顶部钢链	6130	3.38
		聚酯缆	4896	4.38		CFRP缆	5770	3.94
		底部钢链	4776	4.34		底部钢链	5698	3.63

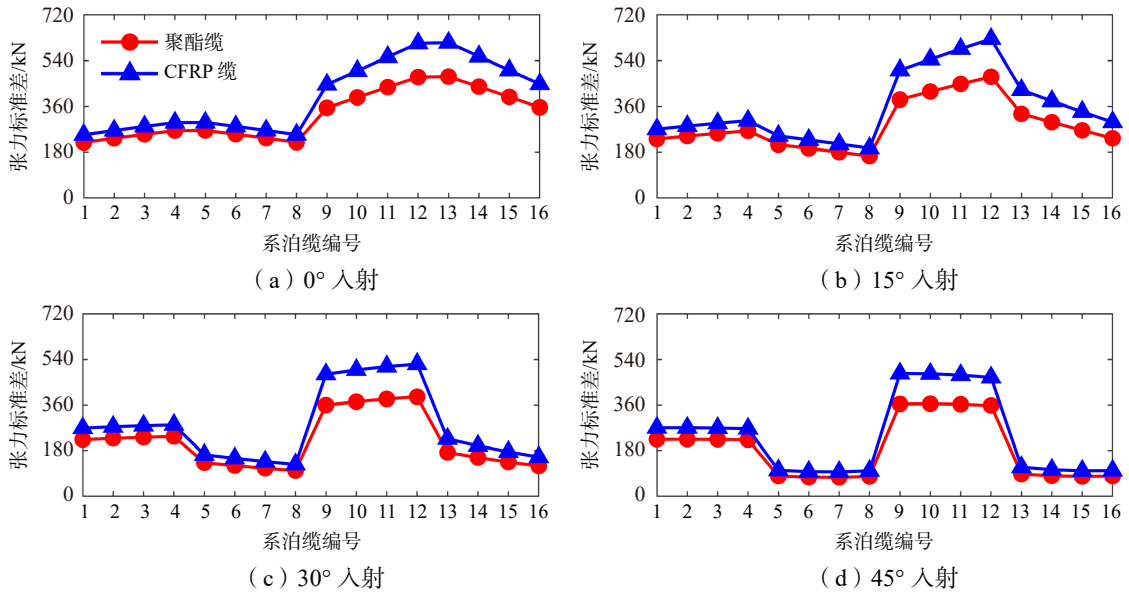


（a）0° 入射　（b）15° 入射

（c）30° 入射　（d）45° 入射

图 9 完整系泊工况下 CFRP 缆与聚酯缆的张力平均值

Fig.9 Mean tension of CFRP and polyester ropes under the intact mooring condition



（a）0° 入射　（b）15° 入射

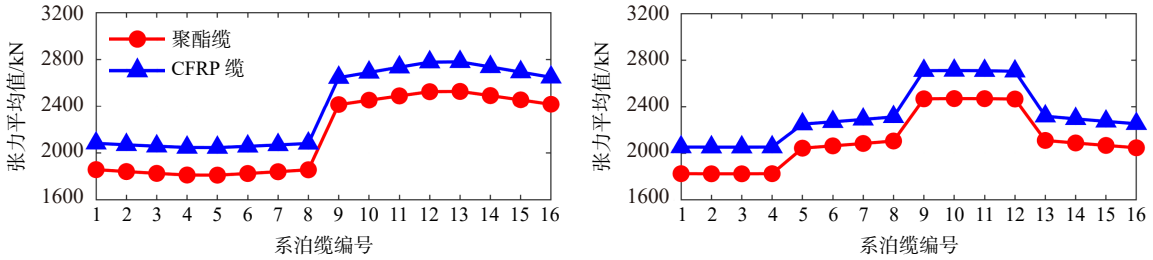
（c）30° 入射　（d）45° 入射

图 10 完整系泊工况下 CFRP 缆与聚酯缆的张力标准差

Fig.10 Standard deviation of tension for CFRP and polyester ropes under the intact mooring condition

图 11 和图 12 分别展示了不同浪向下顶部钢链和底部钢链的张力平均值，图 13 和图 14 分别展示了不同浪向下顶部钢链和底部钢链的张力标准差。两种系泊系统中钢链部分的张力平均值及标准差的

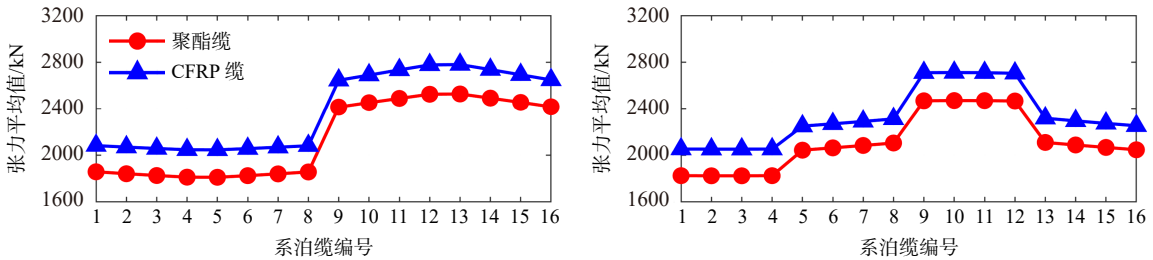
变化趋势基本一致，但 CFRP 缆系泊下顶部钢链和底部钢链的平均值及标准差均高于聚酯缆系泊。若用 CFRP 缆替换聚酯缆，将增大钢链部分的张力平均值和标准差，进而加剧钢链的疲劳损伤风险。故需进一步开展系泊系统的疲劳损伤量化分析，综合评定两种系泊系统的安全性能优劣。



（a）0° 入射　　（b）45° 入射

图 11 完整系泊工况下顶部钢链的张力平均值

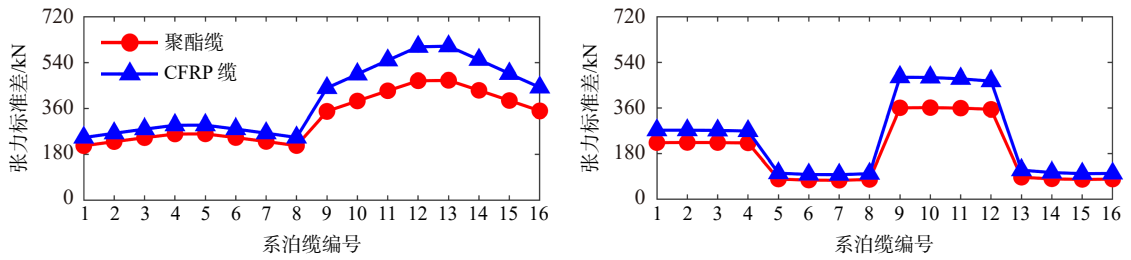
Fig.11 Mean tension of top steel chain under the intact mooring condition



（a）0° 入射　　（b）45° 入射

图 12 完整系泊工况下底部钢链的张力平均值

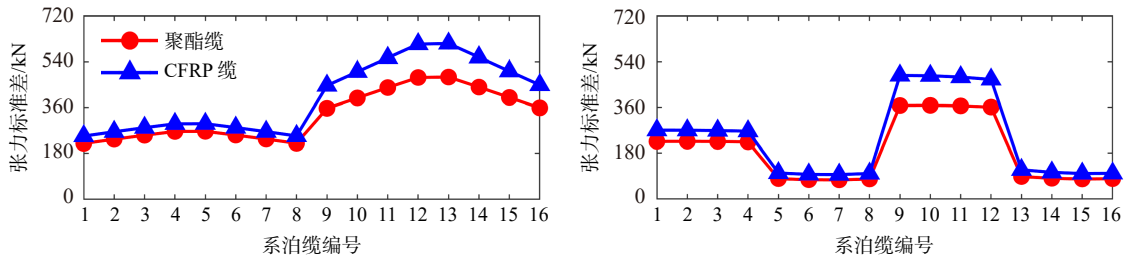
Fig.12 Mean tension of bottom steel chain under the intact mooring condition



（a）0° 入射　　（b）45° 入射

图 13 完整系泊工况下顶部钢链的张力标准差

Fig.13 Standard deviation of tension for top steel chain under the intact mooring condition



（a）0° 入射　　（b）45° 入射

图 14 完整系泊工况下底部钢链的张力标准差

Fig.14 Standard deviation of tension for bottom steel chain under the intact mooring condition

3.2.2 单缆破断工况下系泊张力分析

上述分析结果表明：15°和 30°浪向下两种系泊系统中 12 号系泊缆所承受的张力最大；0°和 45°浪

向下 12 号系泊缆所承受的最大张力均处于峰值区域。故本节选取 12 号系泊缆作为单缆破断工况，研究断缆工况下系泊张力的响应特性。图 15 ~ 17 分别展示了断缆工况下中间段系泊缆、顶部钢链及底部钢链的张力最大值。表 7 展示了断缆工况下最大系泊张力所对应的系泊缆及其*FS*。断缆工况下 CFRP 缆的张力最大值均高于聚酯缆；相较于聚酯缆系泊系统，CFRP 系泊系统中两端钢链的张力最大值均较大，从而使其*FS*明显降低。然而两种系泊系统在断缆工况下的*FS*均大于 1.25，表明二者均满足系泊系统在单缆破断状态下的设计规范要求。

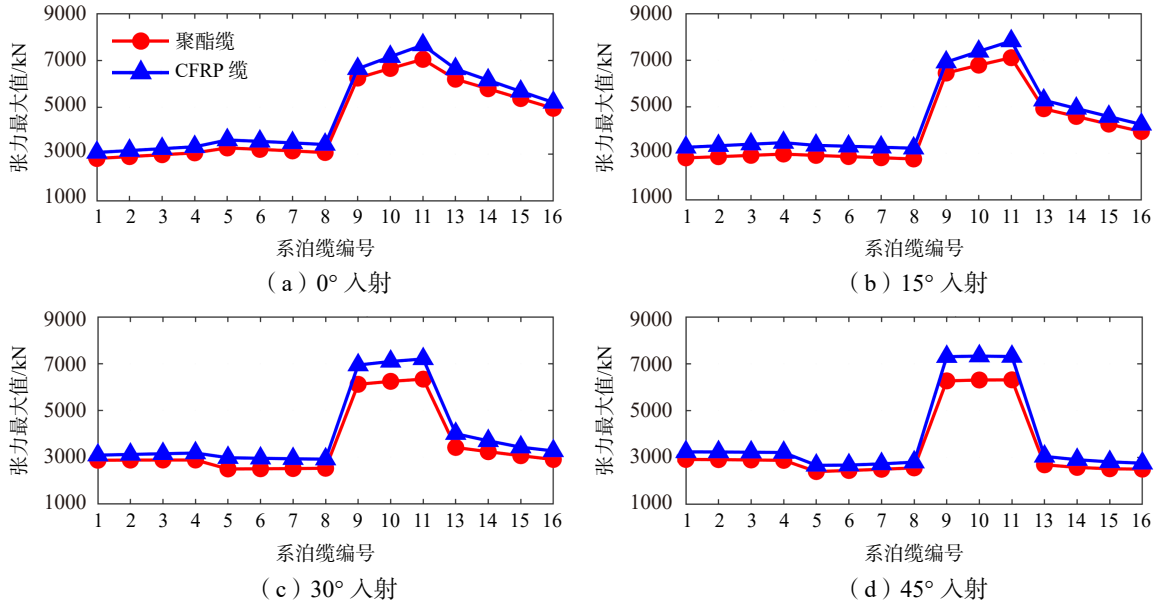


图 15　断缆工况下 CFRP 缆和聚酯缆的张力最大值

Fig.15　Maximum tension of CFRP and polyester ropes under a mooring line failure condition

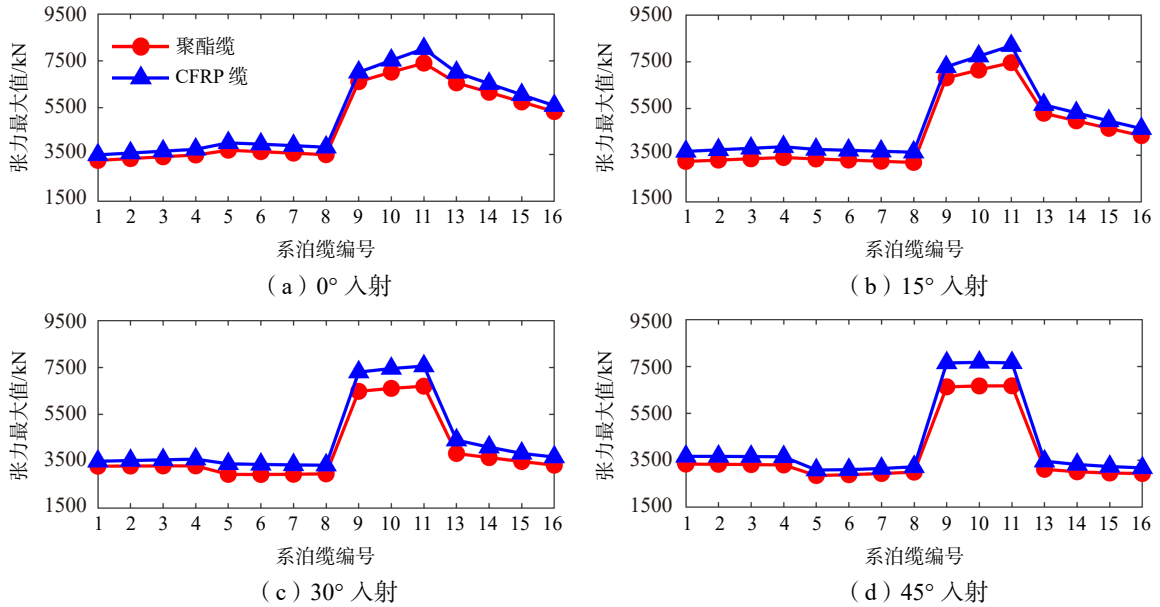
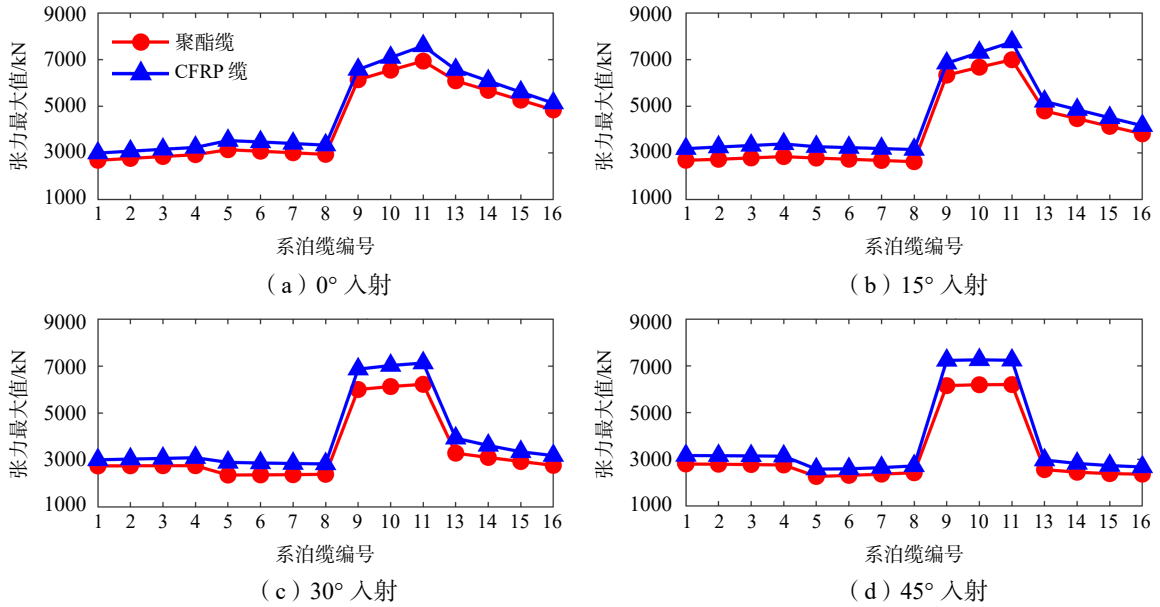


图 16　断缆工况下顶部钢链的张力最大值

Fig.16　Maximum tension of top steel chain under a mooring line failure condition

图 18 ~ 20 分别展示了两种系泊系统中中间段系泊缆、顶部钢链及底部钢链的张力平均值，图 21 ~ 23 分别展示了上述系泊缆的张力标准差。由图可知，相较于聚酯缆系泊系统，断缆工况下 CFRP 缆系泊系统中系泊缆的张力平均值及标准差均较大，在迎浪侧差异更为明显。上述结果表明，相

较于聚酯缆系泊系统，断缆工况下 CFRP 系泊系统整体的受力水平及波动幅值均显著增大，进一步凸显了对系泊缆疲劳损伤进行量化分析的必要性。



（a）0° 入射　（b）15° 入射

（c）30° 入射　（d）45° 入射

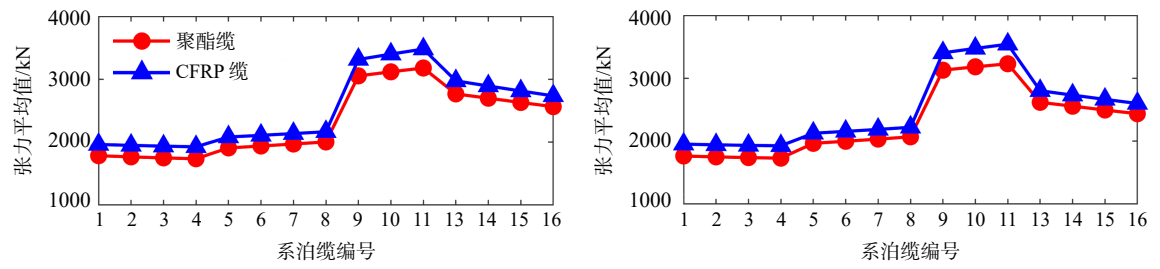
图 17 断缆工况下底部钢链的张力最大值

Fig.17 Maximum tension of bottom steel chain under a mooring line failure condition

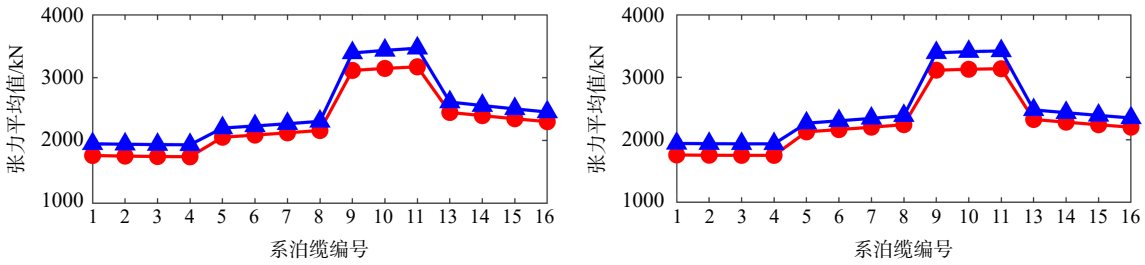
表 7 断缆工况下系泊缆的张力最大值和 *FS*

Tab.7 Maximum tension and *FS* of mooring lines under a mooring line failure condition

浪向/°	系泊缆编号	聚酯缆系泊方案	张力最大值/kN	*FS*	系泊缆编号	CFRP缆系泊方案	张力最大值/kN	*FS*
		顶部钢链	7402	2.80		顶部钢链	8017	2.58
0	11	聚酯缆	7048	3.04	11	CFRP缆	7658	2.97
		底部钢链	6936	2.99		底部钢链	7585	2.73
		顶部钢链	7461	2.78		顶部钢链	8185	2.53
15	11	聚酯缆	7107	3.02	11	CFRP缆	7825	2.91
		底部钢链	6993	2.96		底部钢链	7752	2.67
		顶部钢链	6700	3.09		顶部钢链	7558	2.74
30	11	聚酯缆	6340	3.38	11	CFRP缆	7203	3.16
		底部钢链	6224	3.33		底部钢链	7130	2.90
		顶部钢链	6674	3.10		顶部钢链	7674	2.70
45	11	聚酯缆	6314	3.40	10	CFRP缆	7328	3.10
		底部钢链	6197	3.34		底部钢链	7257	2.85



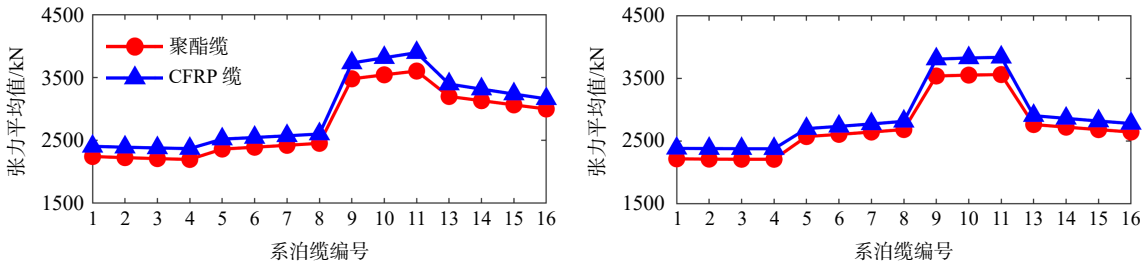
（a）0° 入射　（b）15° 入射



（c）30° 入射　　（d）45° 入射

图 18 断缆工况下 CFRP 缆与聚酯缆的张力平均值

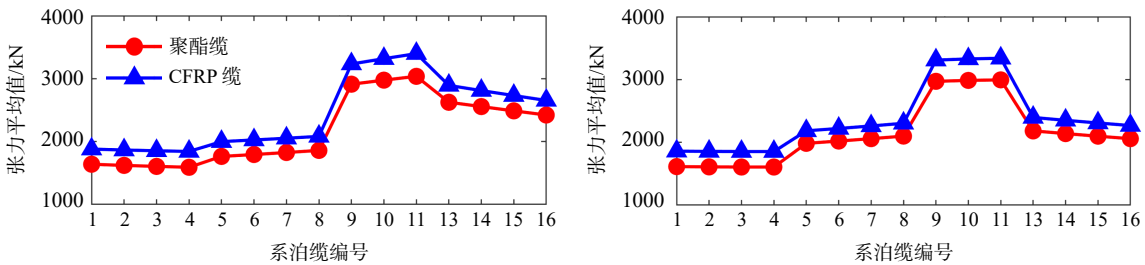
Fig.18 Mean tension of CFRP and polyester ropes under a mooring line failure condition



（a）0° 入射　　（b）45° 入射

图 19 断缆工况下顶部钢链的张力平均值

Fig.19 Mean tension of top steel chain under a mooring line failure condition



（a）0° 入射　　（b）45° 入射

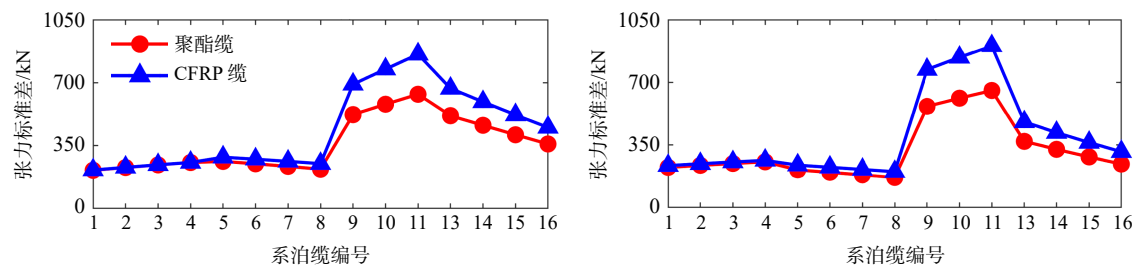
图 20 断缆工况下底部钢链的张力平均值

Fig.20 Mean tension of bottom steel chain under a mooring line failure condition

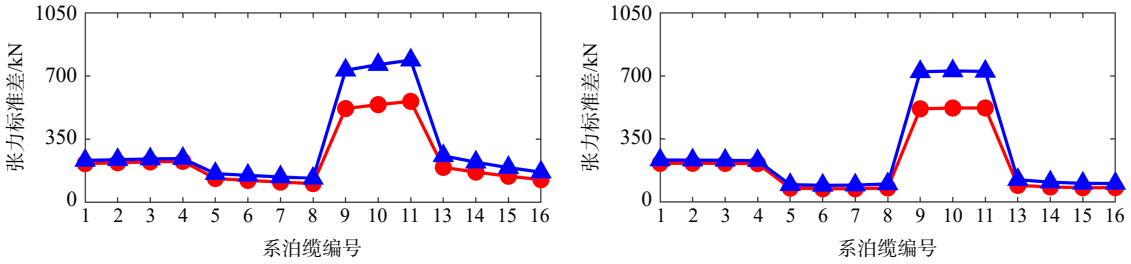
3.2.3 系泊缆疲劳分析

本节以 0°和 15°波浪入射方向为例，提取各短期海况不同入射方向下 12 号系泊缆的张力时程曲线，并基于此估算其在一年内的总疲劳损伤（按(16)式计算）。

海洋波浪的长期状态通常是看作由许多短期海况的序列组成，根据南海某海域一年的波浪散布图[26]，选取海况条件如表 8 所示，其中波浪谱采用 JONSWAP 谱，$\gamma=2.0$，T_z为平均跨零周期，P为各短期海况的年出现概率。



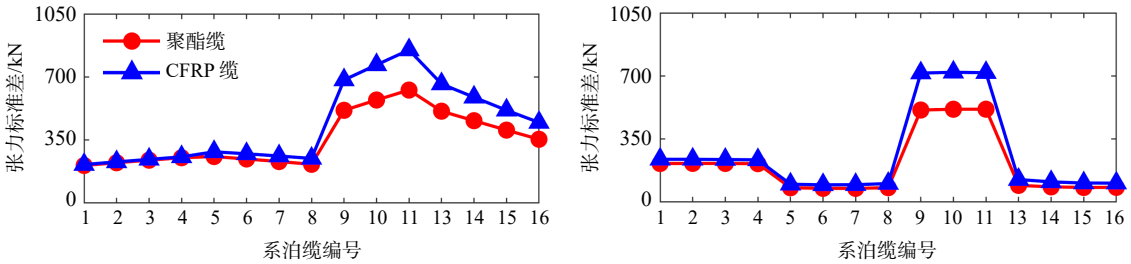
（a）0° 入射　　（b）15° 入射



（c）30° 入射　　（d）45° 入射

图 21 断缆工况下 CFRP 缆与聚酯缆的张力标准差

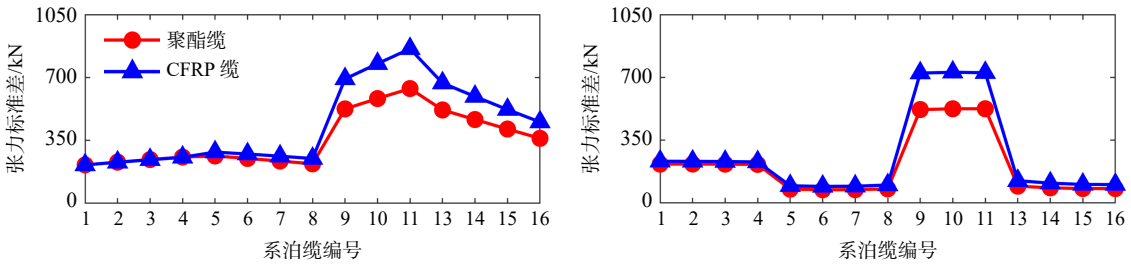
Fig.21 Standard deviation of tension for CFRP and polyester ropes under a mooring line failure condition



（a）0° 入射　　（b）45° 入射

图 22 断缆工况下顶部钢链的张力标准差

Fig.22 Standard deviation of tension for top steel chain under a mooring line failure condition



（a）0° 入射　　（b）45° 入射

图 23 断缆工况下底部钢链的张力标准差

Fig.23 Standard deviation of tension for bottom steel chain under a mooring line failure condition

表 8 各短期海况参数

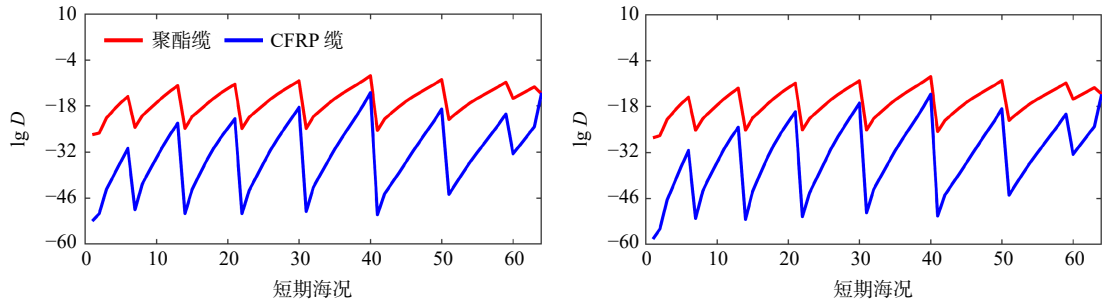
Tab.8 Parameters of short-term sea state

海况	H_S/m	T_z/s	P/%	海况	H_S/m	T_z/s	P/%
1	0.250	3.5	0.1	33	1.050	8	1.3
2	0.250	4	1.0	34	1.550	8	2.5
3	0.675	4	0.8	35	2.175	8	3.0
4	1.050	4	0.7	36	2.875	8	3.1
5	1.550	4	0.5	37	3.625	8	2.2
6	2.175	4	0.2	38	4.500	8	1.7
7	0.250	5	2.9	39	5.500	8	0.6
8	0.675	5	3.1	40	6.750	8	0.2
9	1.050	5	3.4	41	0.250	9	0.1
10	1.550	5	3.7	42	0.675	9	0.2
11	2.175	5	1.9	43	1.050	9	0.4

续表 8

海况	H_S/m	T_z/s	P/%	海况	H_S/m	T_z/s	P/%
12	2.875	5	0.7	44	1.550	9	0.8
13	3.625	5	0.1	45	2.175	9	1.0
14	0.250	6	2.9	46	2.875	9	1.2
15	0.675	6	3.7	47	3.625	9	1.0
16	1.050	6	5.0	48	4.500	9	1.0
17	1.550	6	7.2	49	5.500	9	0.6
18	2.175	6	5.5	50	6.750	9	0.4
19	2.875	6	3.2	51	0.675	10	0.1
20	3.625	6	1.1	52	1.050	10	0.1
21	4.500	6	0.2	53	1.550	10	0.2
22	0.250	7	1.5	54	2.175	10	0.2
23	0.675	7	2.1	55	2.875	10	0.3
24	1.050	7	3.3	56	3.625	10	0.3
25	1.550	7	5.7	57	4.500	10	0.3
26	2.175	7	5.7	58	5.500	10	0.2
27	2.875	7	4.6	59	6.750	10	0.3
28	3.625	7	2.4	60	2.875	11	0.1
29	4.500	7	1.3	61	3.625	11	0.1
30	5.500	7	0.3	62	4.500	11	0.1
31	0.250	8	0.5	63	5.500	11	0.2
32	0.675	8	0.8	64	3.625	12	0.1

分别计算了 0°和 15°波浪入射方向下两种系泊缆在各短期海况下的疲劳损伤及总损伤，结果如图 24 ~ 26 所示。由图 24 可知，当波浪 0°入射时，CFRP 缆在多数短期海况下的疲劳损伤比聚酯缆低 5 个数量级，两者的总损伤结果分别为 1.88×10^{-9} 和 2.30×10^{-14}；当波浪 15°入射时，两者的总损伤结果则分别达到 1.55×10^{-9} 和 1.16×10^{-14}。若采用 CFRP 缆替换聚酯缆构建新型的系泊系统，其疲劳损伤显著降低，体现出 CFRP 缆更优越的抗疲劳性能。



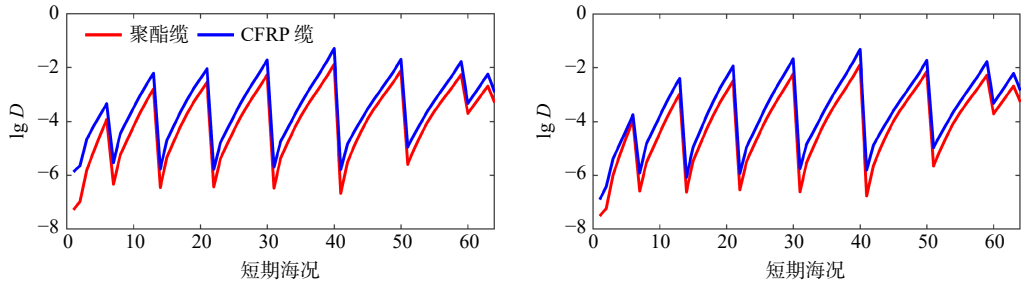
（a）0° 入射　　（b）15° 入射

图 24　不同浪向下聚酯缆和 CFRP 缆疲劳损伤

Fig.24　Fatigue damage of polyester and CFRP ropes under different wave directions

由图 25 可知，当波浪 0°入射时，相较于 CFRP 缆系泊，聚酯缆系泊下顶部钢链在各短期海况下的疲劳损伤均较低，两者的总损伤结果分别为 6.59×10^{-2} 和 2.12×10^{-1}；当波浪 15°入射时，相较于 CFRP 缆系泊，聚酯缆系泊下顶部钢链在各短期海况下的疲劳损伤较低，两者的总损伤结果分别为 6.39×10^{-2} 和 2.07×10^{-1}。由图 26 可知，底部钢链疲劳损伤分析结果显示可得到相同的结论。若采用 CFRP 缆替换聚酯缆，钢链部分的疲劳损伤变大，尤其是与海床接触的底部钢链，其疲劳损伤的增加程度更加显著。采

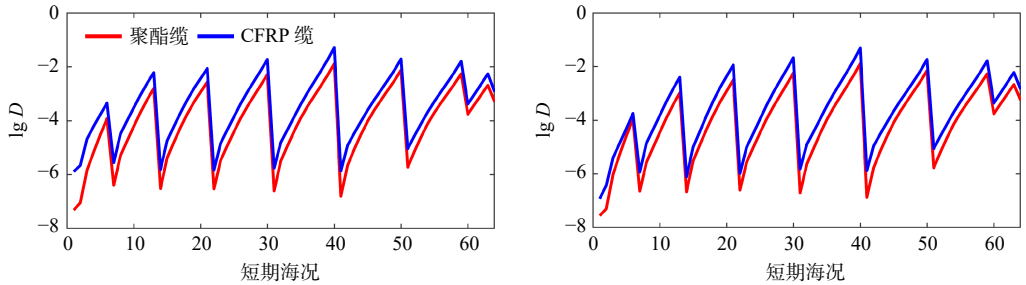
用 CFRP 缆具有更好的抗疲劳特性，但同时也会增加钢链部分的疲劳损伤，因此需对钢链部分进行适当的加强，在设计系泊系统的过程中需重点考虑两者间的平衡点。



（a）0° 入射　　（b）15° 入射

图 25 不同浪向下顶部钢链疲劳损伤

Fig.25 Fatigue damage of top steel chain under different wave directions



（a）0° 入射　　（b）15° 入射

图 26 不同浪向下底部钢链疲劳损伤

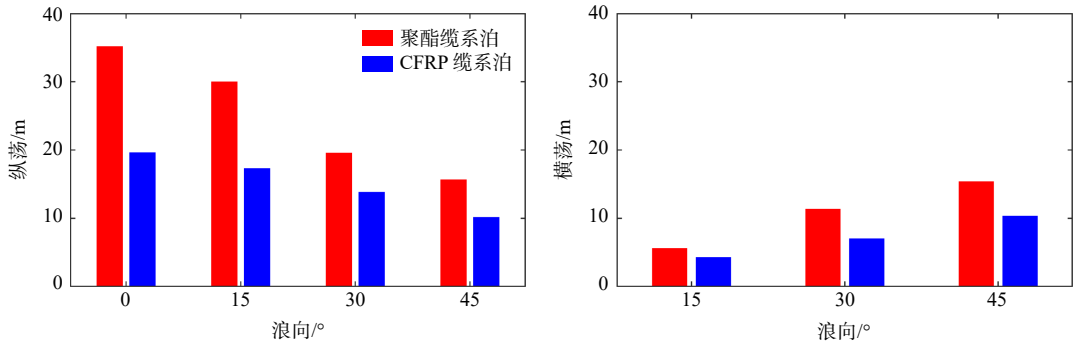
Fig.26 Fatigue damage of bottom steel chain under different wave directions

综上所述，两种系泊缆的疲劳损伤主要发生在钢链部分，聚酯缆和 CFRP 缆的疲劳损伤相对较小，顶部钢链的疲劳损伤均大于底部钢链。

3.3 系泊功能性分析

基于深水半潜式平台的六自由度运动响应对系泊功能性进行分析。运动最大值用于界定运动的安全范围，标准差反映运动的波动程度，故综合考虑两者影响来评估结构的安全性和设备操作性能。

图 27 和图 28 分别展示了不同浪向下平台运动响应的最大值和标准差。极端海况下 CFRP 缆系泊下平台纵荡与横荡运动响应最大值及标准差均小于聚酯缆系泊，而两种系泊方案下垂荡、横摇、纵摇和艏摇运动响应最大值及标准差几乎相同。这是因为 CFRP 缆比聚酯缆的轴向刚度更大，在波浪激励下其轴向伸长量更小，从而有效抑制平台在水平面内的平移运动。



（a）　　（b）

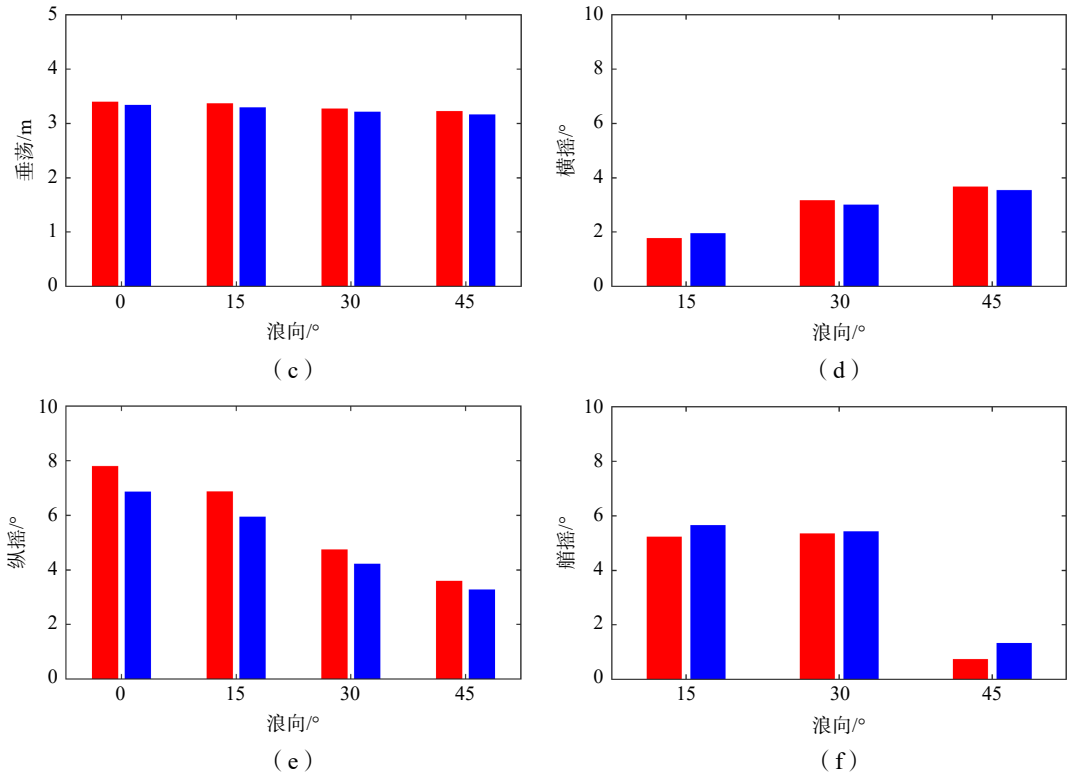
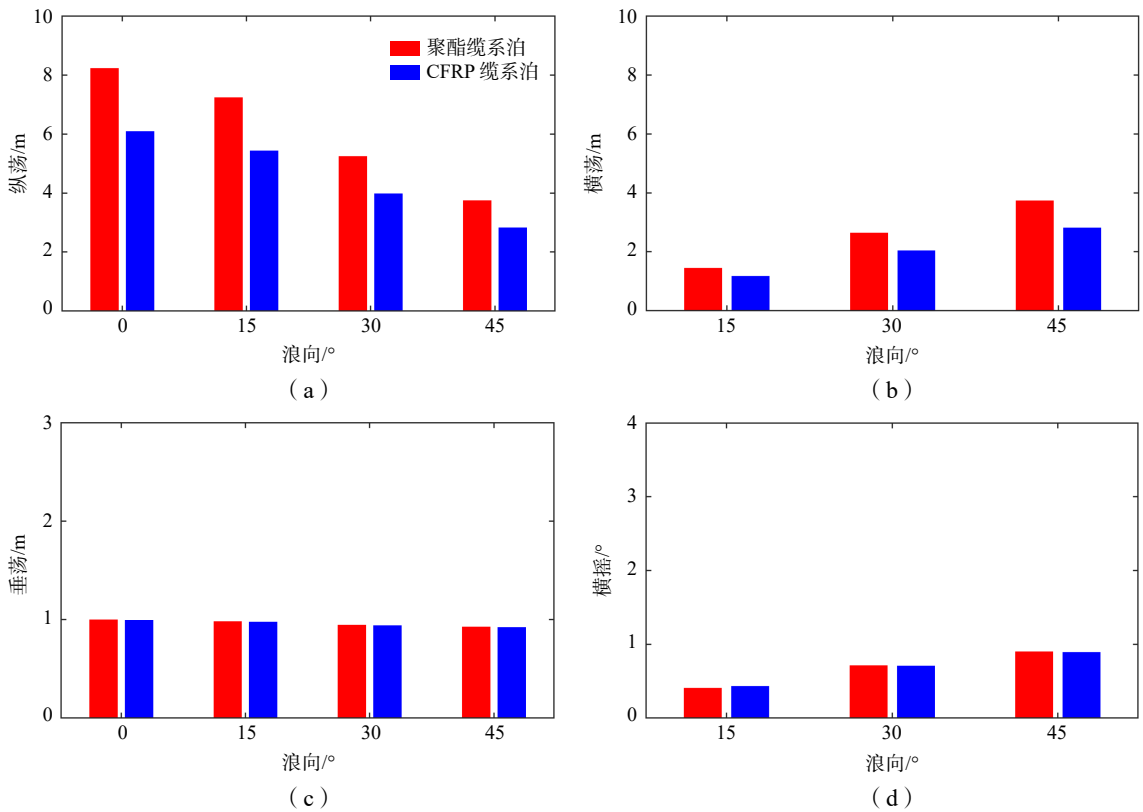


图 27　不同浪向下平台运动响应的最大值

Fig.27　Maximum values of platform motion response under different wave directions



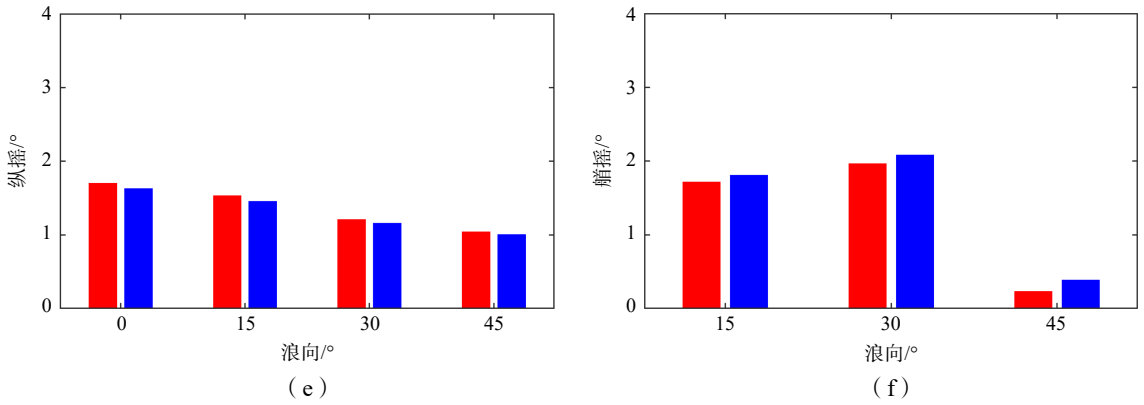


图 28 不同浪向下平台运动响应的标准差

Fig.28 Standard deviation of platform motion response under different wave directions

4 结 论

为评估 CFRP 缆在深水半潜式平台系泊系统方案设计及工程应用的可行性，本文提出了一种新型 CFRP 缆系泊方案，并对配置钢链−CFRP 缆−钢链与钢链−聚酯缆−钢链两种不同系泊系统的半潜式平台动力响应特性进行了对比分析。本文通过数值仿真分析从安全性与功能性两个角度揭示了 CFRP 系泊系统下半潜式平台的动力响应特征，初步验证了 CFRP 缆在深水系泊系统中的可靠性及优异性。得出主要研究结论为：

（1）在两种系泊设计抗拉安全系数相近的前提下，完整系泊与单缆破断工况下 CFRP 缆的张力最大值、平均值和标准差均大于聚酯缆；在钢链−CFRP 缆−钢链系泊系统中，两端钢链的张力最大值、平均值和标准差均较大，致使钢链的安全系数有所降低，但仍满足设计规范的要求。这是因为 CFRP 缆轴向刚度高于聚酯缆，增大了系泊−深水半潜式平台系统的整体刚度，波浪荷载下其响应更快，从而产生了更大的系泊张力。

（2）两种系泊系统的疲劳损伤主要发生在钢链部分，而中部缆索（聚酯缆和 CFRP 缆）疲劳损伤相对要小很多；顶部钢链的疲劳损伤均大于底部钢链；相较于钢链−聚酯缆−钢链系泊系统，钢链−CFRP 缆−钢链系泊系统中两端钢链的疲劳损伤相差较小。

（3）在钢链−聚酯缆−钢链与钢链−CFRP 缆−钢链系泊系统对比分析中，CFRP 缆的总损伤程度远小于聚酯缆，短期海况下疲劳损伤差距达多个数量级，表明 CFRP 缆具备更优的抗疲劳性能；但 CFRP 缆的引入会增大钢链部分的疲劳损伤，尤其是底部钢链。

（4）相较于聚酯缆系泊方案，极端海况下 CFRP 缆系泊方案可较好地控制深水半潜式平台的运动响应，显著降低了平台纵荡与横荡运动响应峰值及波动幅度，有效限制了深水半潜式平台的运动范围，使其更易维持在设计允许的安全区间内，增强了结构运行稳定性与作业可靠性。

参 考 文 献：

[1] 李 芬, 邹早建. 浮式海洋结构物研究现状及发展趋势[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2003, 27(5): 682–686.

Li F, Zou Z J. Research status and development trends of floating marine structures[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2003, 27(5): 682–686. (in Chinese)

[2] 唐首祺, 康美泽, 王 梓, 等. 深海采矿水面支持系统总体方案设计研究[J]. 船舶, 2024, 35(6): 47–59.

Tang S Q, Kang M Z, Wang Z, et al. Overall design of surface support system for deep-sea mining[J]. Ship & Boat, 2024,

35(6): 47–59. (in Chinese)

[3] 唐　耀. Spar 型浮式风机平台动力响应分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
Tang Y. Dynamic response analysis of Spar-type floating wind turbine platform[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)

[4] 徐　皓, 刘　晃, 徐琰斐. 我国深远海养殖发展现状与展望[J]. 中国水产, 2021, 547(6): 36–39.
Xu H, Liu H, Xu Y F. Current status and prospects of deep-sea aquaculture in China[J]. China Fisheries, 2021, 547(6): 36–39. (in Chinese)

[5] 谷圣厅, 白　杨. 超大型 FPSO 多点系泊系统设计优化[J]. 船海工程, 2023, 52(4): 52–55+60.
Gu S T, Bai Y. Design optimization of mooring system for ultra-large FPSO[J]. Ship & Ocean Engineering, 2023, 52(4): 52–55+60. (in Chinese)

[6] 姜润喜, 石建高, 陈　晋. 海洋用绳网材料与产品的应用现状与发展趋势[J]. 纺织导报, 2023(5): 24–33.
Jiang R X, Shi J G, Chen J. Application status and development trends of marine rope-net materials and products[J]. Textile Guide, 2023(5): 24–33. (in Chinese)

[7] 肖　元, 傅　强, 邓燕飞, 等. 浮式风机系泊系统动力响应特性研究[J]. 中国造船, 2019, 60(4): 53–65.
Xiao Y, Fu Q, Deng Y F, et al. Dynamic response characteristics of mooring system for floating wind turbines[J]. Shipbuilding of China, 2019, 60(4): 53–65. (in Chinese)

[8] 袁　梦, 范　菊, 缪国平, 等. 非线弹性系泊缆系泊性能[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(6): 820–827.
Yuan M, Fan J, Miao G P, et al. Mooring performance of nonlinear elastic mooring cables[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2010, 44(6): 820–827. (in Chinese)

[9] 赵晶瑞, 谢　彬, 梁文洲, 等. 深水半潜式平台聚酯纤维系泊方案分析[J]. 中国海上油气, 2018, 30(4): 203–210.
Zhao J R, Xie B, Liang W Z, et al. Analysis of polyester fiber mooring scheme for deepwater semi-submersible platform[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(4): 203–210. (in Chinese)

[10] 王少强. 腐蚀环境下碳纤维复合材料板材的性能演化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Wang S Q. Performance evolution of carbon fiber composite plates in corrosive environments[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)

[11] 吕志林, 姜　旭, 强旭红, 等. 高弹模 CFRP 粘贴法修复钢桥板疲劳裂纹[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(5): 92–100.
Lyu Z L, Jiang X, Qiang X H, et al. Fatigue crack repair in steel bridge decks using high-elastic-modulus CFRP bonding[J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(5): 92–100. (in Chinese)

[12] 王青沙. 海洋环境用 CFRP 筋的力学性能和耐久性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(9): 107–110.
Wang Q S. Mechanical and durability properties of CFRP bars in marine environments[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(9): 107–110. (in Chinese)

[13] 吴　皓, 周　松, 刘　强, 等. 半潜式网箱系泊系统数值计算研究[J]. 船舶力学, 2025, 29(2): 200–208.
Wu H, Zhou S, Liu Q, et al. Numerical study on mooring system of semi-submersible net cage[J]. Journal of Ship Mechanics, 2025, 29(2): 200–208. (in Chinese)

[14] 王　浩, 杜　度, 李　焱, 等. 阻尼板锥角对圆筒型 FDPSO 运动的影响[J]. 中国海洋平台, 2024, 39(6): 55–61.
Wang H, Du D, Li Y, et al. Influence of damping plate cone angle on motion of cylindrical FDPSO[J]. China Offshore Platform, 2024, 39(6): 55–61. (in Chinese)

[15] Cai H Y, Zhang Q D, Du J F, et al. Safety analysis of floating multi-module systems under connector failure[J]. Engineering Structures, 2026, 349: 121916.

[16] Zhang D Q , Yuan Z M, Du J F, et al. Hydrodynamic modelling of large arrays of modularized floating structures with independent oscillations[J]. Applied Ocean Research, 2022, 129: 103371.

[17] 王玺华, 李明智, 李文松, 等. 海洋牧场环境监测平台设计与应用试验[J]. 渔业现代化, 2025, 52(1): 50–63.
Wang X H, Li M Z, Li W S, et al. Design and application testing of marine pasture environmental monitoring platform[J]. Fishery Modernization, 2025, 52(1): 50–63. (in Chinese)

[18] Jiang X, Gan J, Teng S. Simulation of anchor chain based on lumped mass method[J]. Theoretical & Applied Mechanics Letters, 2023, 13(4): 311–319.

[19] 苏一鸣, 曹诗卉, 汪雪良, 等. 浮式风机系泊缆疲劳裂纹扩展分析与寿命预测研究[J]. 船舶力学, 2025, 29(2):

251–265.

Su Y M, Cao S H, Wang X L, et al. Research on fatigue crack propagation and life prediction for mooring lines of floating wind turbines[J]. Journal of Ship Mechanics, 2025, 29(2): 251–265. (in Chinese)

[20] 乔东生, 欧进萍. 半潜式平台两种锚泊系统的疲劳损伤比较计算[J]. 振动与冲击, 2014, 33(13): 1–5+25.

Qiao D S, Ou J P. Comparative calculation of fatigue damage for two mooring systems of semi-submersible platforms[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(13): 1–5+25. (in Chinese)

[21] 霍家明. 深水张紧式系泊系统疲劳分析[D]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2023.

Huo J M. Fatigue analysis of deepwater tension mooring system[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023. (in Chinese)

[22] Wu P, Xu L, Luo J, et al. Influences of long-term immersion of water and alkaline solution on the fatigue performances of unidirectional pultruded CFRP plate[J]. Construction and Building Materials, 2019, 205: 344–356.

[23] 高率群. 半潜式平台张紧式系泊分析和深水脐带缆铺设分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.

Gao L Q. Analysis of tension mooring for semi-submersible platforms and deepwater umbilical cable installation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022. (in Chinese)

[24] 修衍彬, 栾富豪, 涂智圣, 等. 偏心型半潜式风机运动响应对比研究[J]. 船舶力学, 2025, 29(3): 420–435.

Xiu Y B, Luan F H, Tu Z S, et al. Comparative study on motion response of eccentric semi-submersible wind turbines[J]. Journal of Ship Mechanics, 2025, 29(3): 420–435. (in Chinese)

[25] 潘伟宸, 刘　健, 沈　勇, 等. 基于 AQWA 的新型 10 MW 浮式平台运动响应分析[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(7): 93–97.

Pan W C, Liu J, Shen Y, et al. Motion response analysis of a novel 10 MW floating platform based on AQWA[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(7): 93–97. (in Chinese)

[26] 侣朝旭. 不同荷载模式作用下基于断裂力学的系泊锚链疲劳评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.

Si C X. Fatigue assessment of mooring chains based on fracture mechanics under different loading patterns[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023. (in Chinese)

[27] Grootel V A, Chang J, Wardle L B, et al. Manufacturing variability drives significant environmental and economic impact: The case of carbon fiber reinforced polymer composites in the aerospace industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121087.