

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.022

极端环境下单锚与三锚系泊深水浮标动力 响应特性对比分析

陈航伟¹, 孙安琪², 吴 聪¹, 王咸智², 覃文鸿¹, 乔东生²

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局海口分局; 2. 大连理工大学海岸与海洋工程全国重点实验室)

摘要: 为提升海缆路由浮标在极端环境下的在位稳定性, 优化其运动响应与系泊张力, 以直径为 2.4 m 的全钢制深水浮标为研究对象, 分别开展了配置单锚系泊和三锚系泊浮标的运动响应与系泊张力对比分析; 在保证锚链总质量与初始预张力一致的前提下设计单点式和三点式系泊系统, 建立了浮标和系泊系统的时域耦合动力响应计算模型, 对比分析了规则波条件下不同波高、周期, 以及“威马逊”台风工况作用下的浮标运动响应和系泊张力。结果表明: 浮标运动响应幅度与系泊张力主要受波高影响, 周期对其影响较弱; 相比于单点式, 三点式系泊系统可以有效减小浮标运动响应幅度与系泊张力, 为现行常用单锚系泊浮标设计改进提供参考。

关键词: 深水浮标; 动力响应; 系泊系统; 系泊张力; 时域分析; 台风工况

中图分类号: P715

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2026)05-0190-09

Comparative analysis of dynamic response characteristics of deep-water buoys with single-point and three-point mooring systems in extreme environments

Chen Hangwei¹, Sun Anqi², Wu Cong¹, Wang Xianzhi², Qin Wenhong¹, Qiao Dongsheng²

(1. Haikou Sub-Bureau of Guangzhou Bureau, EHV Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd.;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology)

Abstract: To improve the on-site stability of navigational buoys for submarine cable routes under extreme environments and optimize their motion response and mooring tension, this study takes a 2.4 m-diameter all-steel deep-water buoy as the research object, and conducts a comparative analysis of the motion responses of the buoy and mooring tension under single-point mooring (SPM) and three-point mooring (TPM) systems. Under the premise of ensuring consistent total weight and initial pretension of the mooring chains, SPM and TPM systems were designed. A time-domain coupled dynamic response calculation model for the buoy and mooring systems was established, and the buoy's motion responses and mooring tensions were compared and analyzed under the action of different regular wave heights/periods and the extreme typhoon condition of "Rammasun". The results show that: the motion responses amplitudes of the buoy and mooring tension are mainly affected by wave height, while influence of wave period is weak; compared with SPM system, TPM system can effectively reduce the amplitude of the buoy's motion response and the mooring tension. TPM system layout method proposed in this study can provide a reference for the design improvement of the currently commonly used SPM buoys.

Key words: deep-water buoy; dynamic response; mooring system; mooring tension; time-domain analysis; typhoon condition

海上浮标既是海洋观测体系的关键设施,也是深度服务于航海导航、海洋资源开发、灾害预警、海底设施保护等领域的重要工具,在观测数据采集与各类海洋事务落地推进过程中均发挥着核心作用^[1]。其中导航浮标通过视觉或电子信号,向航海者提供精准定位、指引方向,是保障夜间及恶劣天气下航行安全的“海上灯塔”,助力海上交通管理高效运行,在海上交通领域意义重大^[2]。

浮标结构无固定式基础支撑,在极端环境风、浪、流联合作用下会产生复杂的六自由度运动响应^[3]。系泊系统的设计选型对浮标结构物的运动响应具有显著影响,直接决定浮标系统的稳定性和可靠性,同时影响现场布设施工效率及后期运营维护的可行性^[4]。王旭等^[5]对三锚式浮标数值模型进行了频域分析,研究了不同锚泊半径下浮标的运动响应以及系泊张力,结果表明,锚泊半径对锚链预张力及系泊张力影响显著,但

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(CGJKJXM20230136))

作者简介: 陈航伟(1986—),男,高级工程师,主要从事海缆运行维护研究。E-mail: qianchenchw@163.com

通信作者: 乔东生(1983—),男,教授,博士,主要从事海洋浮标结构物研究。E-mail: qiaods@dlut.edu.cn

对浮标纵荡、横荡及垂荡运动响应影响较小;廖泉明等^[6]基于三维势流理论,分析了 10 m 圆盘浮体的频域水动力特性,基于 Cummins 方程分析了极限海况下三锚浮标运动及锚链受力;Zhu 等^[7]构建了系泊球形浮标数值模型,以集中质量法离散系泊缆,针对单根与多根锚绳束缚的球形浮标开展了水动力特性研究,发现浮标的运动与系泊线的拉力和运动紧密相关;郑锡巧等^[8]基于 OrcaFlex 软件构建深海单点系泊浮标模型,分析了海洋动力环境参数对浮标动力响应的影响,结果表明,水深增大可降低系泊张力的最大值,波高增加会加剧张力与浮标横荡,波浪周期增加将适当增大系泊张力与浮标的横荡;高洋洋等^[9]针对三锚系泊大型浮标开展水动力响应研究,揭示了波流环境荷载作用下六自由度运动响应及系泊张力的变化规律;黎祖狄等^[10]基于 ANSYS AQWA 建立了三锚系泊浮标的运动响应计算模型,分析了不同环境荷载入射方向对系统动力响应的影响,发现各环境荷载同向作用时浮标纵荡、横荡最大,艏摇相应最小,系泊张力达到峰值。

南海海域作为“21 世纪海上丝绸之路”的重要航道,船舶活动密集,过往商船、作业渔船及工程船舶在此开展各类水下作业。为保障南海水域航海安全,海南联网系统琼州海峡海缆工程建设过程中,在海缆路由的东西两侧配备了 23 座基于 JT/T 760—2009《浮标通用技术条件》设计的直径为 2.4 m 的单锚系泊全钢制深水浮标(以下简称“HF2.4 深水浮标”),用作路由警示浮标,标示航线位置,引导过往船舶航行,提升海上运输效率。然而,南海海域台风频发、海流条件复杂^[11],浮标在风、浪、流联合作用下易拖动沉块产生移位。据统计,浮标移位事件已多次发生,对海上航行安全构成严重威胁。

为提升海上浮标的安全性与稳定性,针对初始的单点式系泊系统布置形式,本文在保证锚链总质量与初始预张力一致的前提下,提出三点悬链线式系泊系统布置改进方案,以期解决现役浮标运动响应及系泊张力过大的问题。

1 浮标-系泊时域耦合运动方程

基于三维势流理论^[12],假设流体为无旋、无黏、不可压缩的理想流体^[13],通过频域水动力计算得到浮标在波浪中所受的辐射力、波浪激振力与恢复力等。基于 Cummins 方程^[14],浮标-系泊系统时域耦合运动方程为:

$$\sum_{j=1}^6 \left[(m_{kj} + A_{kj}) \ddot{\xi}_j + \int_{-\infty}^t K_{kj}(t - \tau) \dot{\xi}_j(\tau) d\tau + B_{kj} \dot{\xi}_j + C_{kj} \xi_j \right] = F_{w,k} + F_{exc,k} + F_{c,k} + F_{m,k} \quad (1)$$

式中:下标 j 为运动自由度方向; k 为作用方向; kj 表示第 j 自由度运动在第 k 自由度产生的广义作用,取值均为 1、2、3、4、5、6,依次代表横荡、纵荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇; m_{kj} 为浮标质量; A_{kj} 为浮标等效附加质量系数; $K_{kj}(t - \tau)$ 为系统迟滞函数; τ 分别为当前时刻和历史积分时刻; B_{kj} 为附加黏性阻尼; C_{kj} 为静水恢复刚度; ξ_j 、 $\dot{\xi}_j$ 、 $\ddot{\xi}_j$ 为浮标 6 个自由度运动的位移、速度和加速度; $F_{w,k}$ 为风荷载; $F_{exc,k}$ 为波浪荷载; $F_{c,k}$ 为流荷载; $F_{m,k}$ 为系泊张力。

1.1 迟滞函数

通过频域水动力计算得到的辐射阻尼 b_{kj} 变换得到时域内的迟滞函数:

$$K_{kj}(t - \tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{kj}(\omega) \cos \omega t d\omega \quad (2)$$

式中: ω 为波浪频率。

1.2 附加质量

当依赖于频率的附加质量系数 $a_{kj}(\omega)$ 在某一频率的值 ω' 已知时,等效附加质量系数 A_{kj} 可通过频域水动力计算得到的附加质量系数 $a_{kj}(\omega')$ 表示:

$$A_{kj} = a_{kj}(\omega') + \frac{1}{\omega'} \int_0^{\infty} K_{kj}(t) \sin \omega' t dt \quad (3)$$

1.3 附加黏性阻尼

浮标垂荡、横摇和纵摇自由度方向上的附加黏性阻尼可通过临界阻尼与阻尼比进行计算。附加黏性阻尼表达式为:

$$B_{kj} = \mu B_{c,kj} \quad (4)$$

式中: $B_{c,kj}$ 为临界阻尼,对于垂荡 $B_{c,jj} = 2\sqrt{(m_{jj} + \Delta m_{jj})k_{jj}}$, j 取 3,对于横摇和纵摇 $B_{c,jj} = 2\sqrt{(I_{jj} + \Delta I_{jj})k_{jj}}$, j 取 4 或 5; Δm_{jj} 为固有频率、周期下的附加质量; I_{jj} 为质量惯性矩; ΔI_{jj} 为固有频率、周期下的附加质量惯性矩; k_{jj} 为刚度; μ 为阻尼比,取 5%~10%。

1.4 风、浪、流荷载

考虑到风压沿高度的变化、地面粗糙度、周边环境及构筑物的形状,风荷载 F_w 计算公式可简化为:

$$F_w = \frac{1}{2}\rho C_s C_h A_w v_0^2 \tag{5}$$

式中: ρ 为空气密度; C_s 、 C_h 分别为形状系数、高度系数,按 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》分别取 0.5、1; v_0 为设计的基本风速; A_w 为浮标结构的迎风面面积。

脉冲响应函数 $h_k(t)$ 可通过对频域水动力计算结果中单位波幅下的波浪激振力,即线性传递函数 $H_k(\omega)$ 变换得到:

$$h_k(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty H_k(\omega) e^{i\omega t} d\omega \tag{6}$$

因此,波浪荷载可通过卷积计算得到^[15]:

$$F_{exc,k} = \int_{-\infty}^t h_k(t - \tau) \eta(\tau) d\tau \tag{7}$$

式中: η 为波面高度。

作用于浮标水面以下部分的流荷载 F_c 计算公式为:

$$F_c = \frac{1}{2} C_d \rho_w A_c v_c^2 \tag{8}$$

式中: C_d 为流力系数,按 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》取 0.73; v_c 为海流速度; ρ_w 为海水密度; A_c 为浮标结构迎流面面积。

1.5 系泊张力

采用集中质量法建立锚链简化模型^[16],将锚链简化为多个质量点和无质量的弹簧,并分为 n 段,每段近似用弹簧代替,质量依次记作 m_0 、 m_1 、 $\cdots$ 、 m_n 。其中,第 1 段弹簧的下端与锚连接,第 n 段弹簧的上端与浮体连接。对于第 i 个节点,其运动控制方程可表达为:

$$m_i \ddot{x}_i + \frac{1}{2} e_i \ddot{x}_{iN|i} + \frac{1}{2} e_{i-1} \ddot{x}_{iN|i-1} = F_i \tag{9}$$

式中: $\ddot{x}_i$ 为第 i 个节点的加速度; e_{i-1} 、 e_i 分别为第 $i-1$ 、 i 个节点与第 i 、 $i+1$ 个节点之间的线缆附加质量; $\ddot{x}_{iN|i}$ 、 $\ddot{x}_{iN|i-1}$ 分别为加速度 a_i 在前后节点模型上的法向分量; F_i 为第 i 个节点的受力,主要由节点的重力、浮力、锚链拉力等组成。

建立一系列锚链质量点的运动控制方程,再设置边界条件及初始条件等方程,运用差分方法,求解上述运动控制方程。

2 浮标水动力性能分析

2.1 浮标和单点式、三点式系泊系统参数

HF2.4 深水浮标可简化为由 3 段圆柱结构组合而成,其中上部圆柱直径 2.4 m、高 2.3 m,中部圆柱直径 0.62 m、高 1.845 m,下部圆柱直径 0.97 m、高 0.655 m。浮标吃水 3 m,总质量 4 100 kg,重心高度 1.91 m,浮标绕 x 、 y 、 z 轴的质量惯性矩 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{zz} 分别为 13 020、13 020、2 343 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,其作业水深为 30 m,结构示意图如图 1(a)所示。建立描述浮标运动姿态的全局和局部两个坐标系,全局坐标系以浮标中心线与水面交点为原点,局部坐标系原点在浮标水线面中心点,静止时局部坐标系轴方向与全局坐标系轴方向一致。浮标的运动包括纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇^[17],其中浮体沿 x 、 y 、 z 轴方向的水平运动分别称为纵荡、横荡、垂荡;浮体绕 x 、 y 、 z 轴方向的转动分别称为横摇、纵摇、艏摇。模型坐标系及六自由度运动方向示意如图 1(b)所示,浮标水动力计算模型与网格示意分别如图 1(c)和(d)所示。

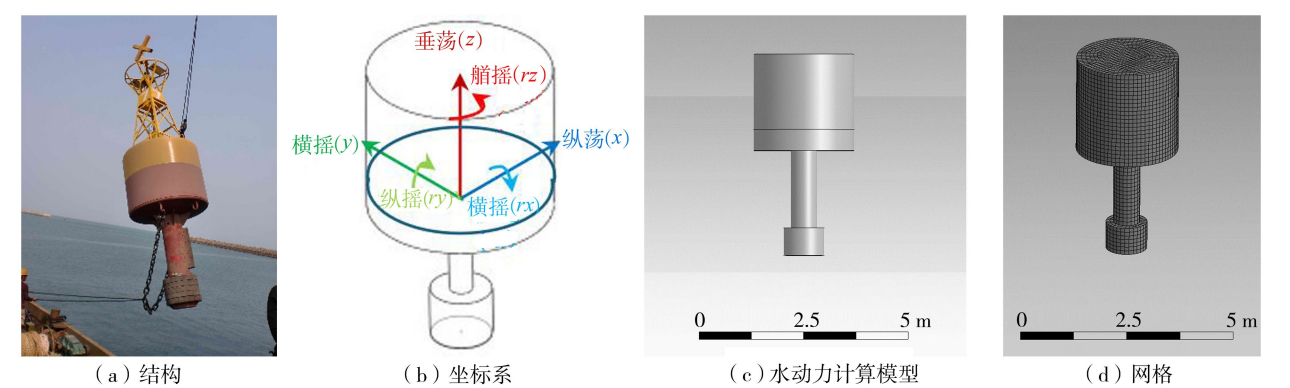


图 1 浮标示意图

Fig.1 Schematic diagram of buoy

系泊系统坐标示意如图 2 所示,保证单点式与三点式系泊系统总质量一致、初始预张力一致。根据浮标锚链设计规范,单点悬链线式系泊系统采用 1 条总长度为 82.5 m、直径为 34 mm、总质量为 1897.5 kg 的无档悬链线式锚链。鉴于锚链总重量一致条件,当三点式系泊系统也采用 3 条长度均为 82.5 m 的无档悬链线式锚链时,可推导出单链直径 D_1 与三链直径 D_2 满足 $D_1 = \sqrt{3} D_2$,从而确定三链锚链直径为 19.6 mm。3 条锚链之间呈 120°分布在浮标周围,系泊系统的主要性能参数如表 1 所示。通过调整锚点坐标,保证单点式与三点式系泊系统的总初始预张力相同,单点式系泊系统中海底锚固点距离浮标中心 56.2 m,三点式系泊系统海底锚固点距离浮标中心 66 m。两种系泊系统在纵荡方向上的静刚度曲线如图 3 所示。

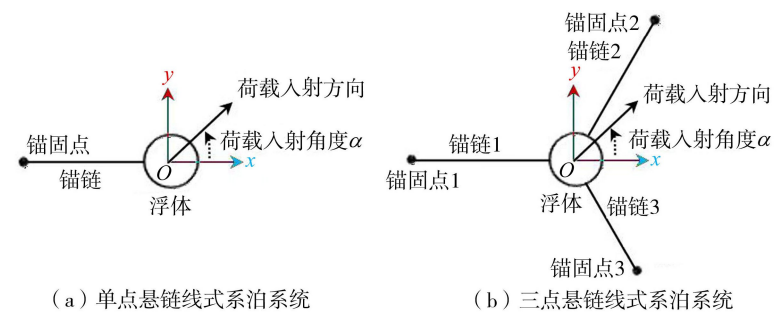


图 2 系泊系统坐标示意图

Fig.2 Schematic diagram of mooring system coordinates

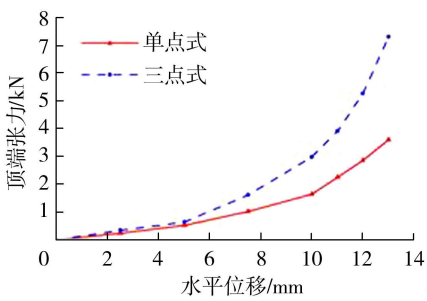


图 3 系泊系统静刚度曲线

Fig.3 Static stiffness curve of mooring system

表 1 系泊性能参数

Table 1 Mooring system performance parameters

系泊系统	单链直径/m	单链长度/m	单位长度湿质量/(kg/m)	单链系泊刚度/MN	单链破断强度/MN
单点式	0.034 0	82.5	23.000	98.770	0.600
三点式	0.019 6	82.5	7.645	32.810	0.187

2.2 水动力性能分析

采用频域分析方法^[6]计算浮标的水动力特性,并结合频域计算结果研究浮标水动力性能的变化规律。0°浪向条件下浮标频域水动力计算结果如图 4 所示。可以看出,由于结构对称,浮标在 0°浪向作用下横摇、横荡和艏摇的响应幅值算子(response amplitude operator,RAO)与单位波幅下的波浪激振力近似为零,浮标的横荡与纵荡、横摇与纵摇的辐射阻尼和附加质量曲线重合,艏摇的辐射阻尼与附加质量几乎为零。纵荡 RAO 随周期的增加而逐渐增大,垂荡 RAO 在周期为 2.5 s 时出现峰值后衰减,纵摇 RAO 则在周期为 4.75 s 时达到峰值后逐渐减小并趋于稳定。可以推断,本文浮标模型的垂荡固有周期约为 2.5 s,纵摇、横摇固有周期约为 4.75 s。横荡、纵荡、横摇和纵摇辐射阻尼在周期为 1.75 s 时达到峰值后衰减,垂荡辐射阻尼则在周期为 2.5 s 时达到峰值后逐渐减小并趋于稳定。纵荡、横荡附加质量在周期为 2.75 s 时达到峰值后衰减,垂荡附加质量呈先减小后增大并趋于稳定的趋势,横摇、纵摇附加质量在周期为 2.5 s 时达到峰值后衰减。纵荡和纵摇波浪力均在周期为 2.347 s 达到峰值后衰减;垂荡波浪力则随周期持续增长并趋于稳定。

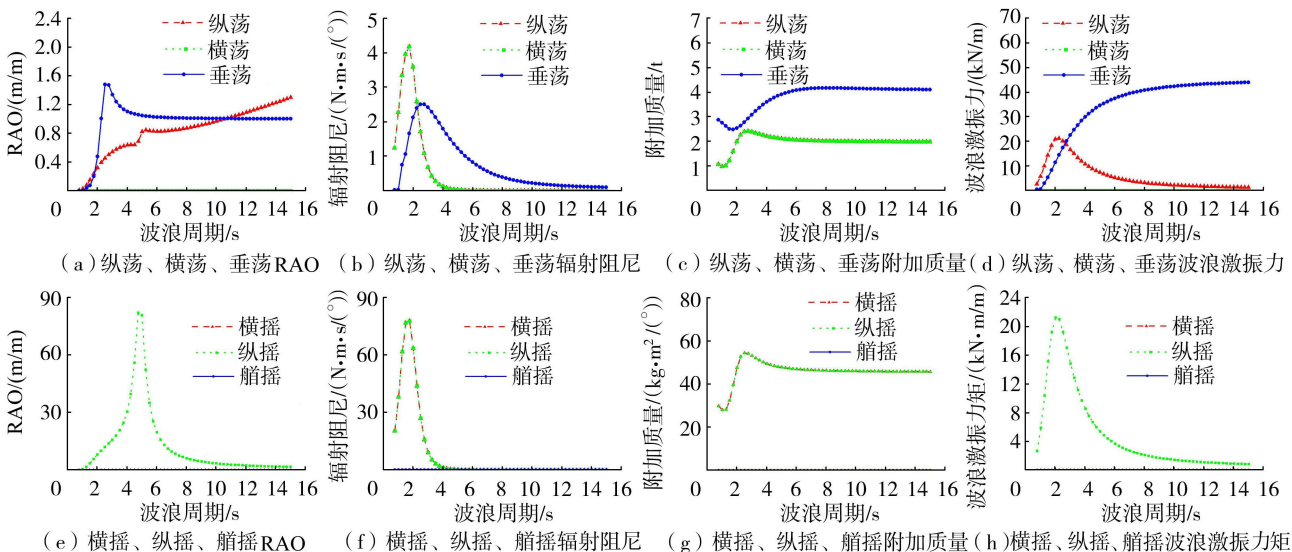


图 4 浮标频域水动力计算结果

Fig.4 Frequency-domain hydrodynamic calculation results of buoy

3 不同波浪要素下浮标运动响应与系泊张力特性

3.1 浮标运动响应特性

浮式结构物的多自由度运动响应往往受到入射波浪幅值或周期的控制^[18],因此探究不同波浪要素下浮标运动响应特性十分必要。风、浪、流均沿 $\alpha=0^\circ$ 入射,风速分布保持不变,流速按水深呈现一次函数分布,布放海域的具体海洋环境参数^[19]如表 2 所示,波高 H 范围为 8~12 m,周期 T 范围为 10~14 s。由于结构对称,在环境载荷沿 $\alpha=0^\circ$ 入射时仅分析纵摇、垂荡和纵荡 3 个自由度方向的运动响应。由图 5 可知,当波高从 8 m 增大到 12 m 时,浮标运动响应的最大值均逐渐增大,且三锚系泊浮标纵荡、垂荡、纵摇响应的最大值始终小于单锚系泊浮标。当波高为 12 m 时,单锚系泊和三锚系泊浮标纵荡方向上运动响应的最大值分别达 24.08、15.99 m,垂荡方向上运动响应的最大值分别达 5.25、5.24 m,纵摇方向上运动响应的最大值分别达 50.42°、42.78°。

表 2 海洋环境参数

Table 2 Ocean environmental parameters

海况编号	波高/m	周期/s	10 m 高处风速/(m/s)	表层流速/(m/s)	底层流速/(m/s)
1	8	10	55	3.5	2.5
2	9	10	55	3.5	2.5
3	10	10	55	3.5	2.5
4	11	10	55	3.5	2.5
5	12	10	55	3.5	2.5
6	12	11	55	3.5	2.5
7	12	12	55	3.5	2.5
8	12	13	55	3.5	2.5
9	12	14	55	3.5	2.5

不同周期波浪作用下浮标运动响应的最大值变化结果如图 6 所示。当周期从 10 s 增大到 14 s 时,三锚系泊浮标纵荡、垂荡、纵摇响应的最大值始终小于单锚系泊浮标,单锚系泊浮标纵荡响应的最大值基本保持在 24.10 m,三锚系泊浮标纵荡响应的最大值基本保持在 15.91 m。单锚系泊浮标垂荡响应的最大值基本保持在 5.25 m,三锚系泊浮标垂荡响应的最大值略有减少,从 10 s 时的 5.24 m 减小到 14 s 时的 5.12 m。单锚系泊浮标和三锚系泊浮标纵摇响应的最大值均逐渐减小,单锚系泊浮标纵摇响应从 10 s 时的 50.42°减小到 14 s 时的 46.78°,三锚系泊浮标纵摇响应从 10 s 时的 42.78°,减小到 14 s 时的 41.22°。结合浮标水动力性能分析结果可知,由于研究波浪周期范围与垂荡固有周期($T=2.5$ s)相差较大,未出现显著共振现象,因此垂荡响应对周期变化不敏感;而在纵摇方向,当波浪周期偏离固有周期($T=4.75$ s)并逐渐增大时,纵摇 RAO 和

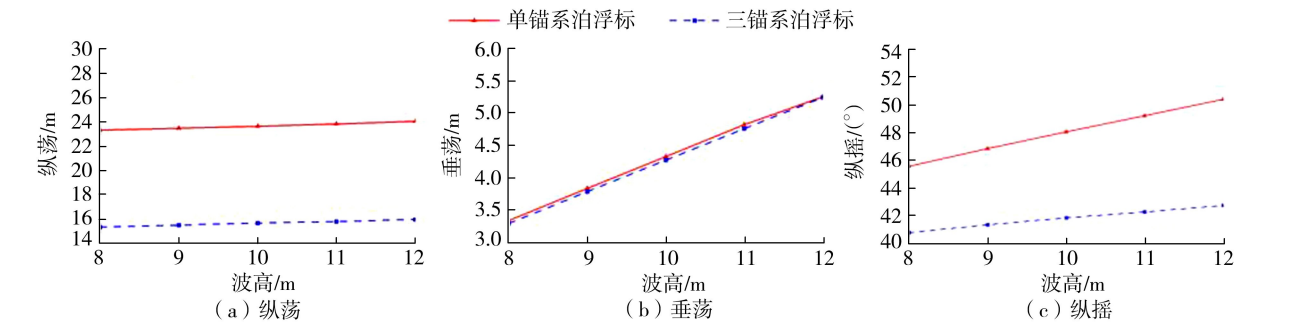


图 5 浮标运动响应最大值随波高变化曲线

Fig. 5 Variations of maximum values of buoy motion responses with wave heights

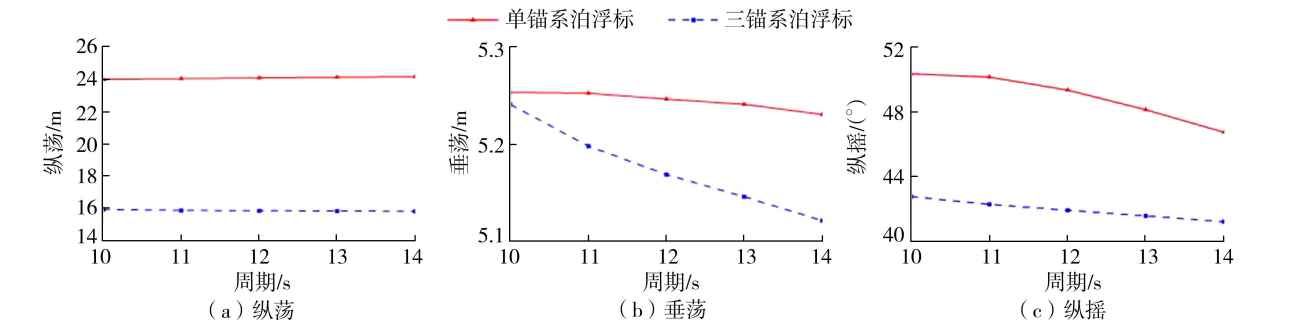


图 6 浮标运动响应最大值随波浪周期的变化曲线

Fig. 6 Variations of maximum values of buoy motion responses with wave periods

波浪激振力均呈下降趋势,从而导致纵摇响应幅值减小。

3.2 系泊张力特性

图 7(a) 为波浪周期为 10 s 时,锚点处系泊张力最大值随波高的变化曲线。可见,随着波高的增大,系泊张力的最大值逐渐增大,并且三点式系泊系统系泊张力最大值始终小于单点式系泊系统。当波高为 12 m 时,单点式系泊系统的系泊张力达 78.71 kN,三点式系泊系统的系泊张力达 75.00 kN。图 7(b) 为波高为 12 m 时,系泊张力最大值随波浪周期的变化曲线。可见,系泊张力最大值随波浪周期的增大而增大,并且三点式系泊系统系泊张力最大值始终小于单点式系泊系统。当波浪周期为 14 s 时,单点式系泊系统系泊张力的最大值达 80.88 kN,三点式系泊系统为 78.68 kN。

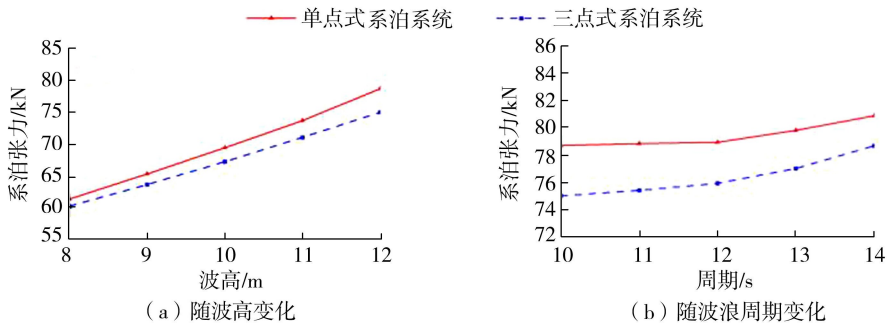


图 7 系泊张力最大值随波高与周期的变化曲线

Fig. 7 Variation of maximum mooring tension with different wave heights and periods

4 台风工况下浮标运动响应与系泊张力

4.1 单点式与三点式系泊系统对浮标运动响应的影响

极端海况下,系泊系统正常服役是浮式结构安全定位和生存的重要保障^[20]。因此,针对台风极端工况,对比分析单点式与三点式系泊系统对浮标运动响应的影响。作业水深为 30 m,工况采用“威马逊”台风期间最不利波浪和海流实测数据,作业水深取 30 m,有效波高 H_s 为 7.5 m,谱峰周期 T_p 为 10 s,表层流速为

3.5 m/s,底层流速为 2.5 m/s,风速为 55 m/s。其中波浪谱选用 JONSWAP 谱^[21],谱峰因子 γ 取 3.3,挪威船级社(DNV)相关经验与研究表明,当 $3.6 < T_p/\sqrt{H_s} < 5$ 时,该谱型能够较好地反映实际海况特征^[22]。环境荷载方向取最危险的同向工况,入射角度 $\alpha=0^\circ$ 。

图 8 为浮标在极端工况下单锚系泊浮标和三锚系泊浮标运动响应时程曲线,表 3 为单锚和三锚系泊浮标运动响应统计值,三锚系泊浮标纵荡、纵摇最大值分别为 16.62 m、60.85°,小于单锚系泊浮标的 23.93 m、65.57°,垂荡最大值约为 6.16 m,与单锚系泊浮标基本一致。将初始单点式系泊系统改进为三点式系泊系统后,浮标纵荡和纵摇运动最大值分别减小 30.55%、7.20%。图 9 为环境荷载沿同一方向不同角度入射时,单锚系泊浮标与三锚系泊浮标沿环境荷载作用方向的位移包络图,可以发现三点式系泊系统对浮标的约束效果更强。

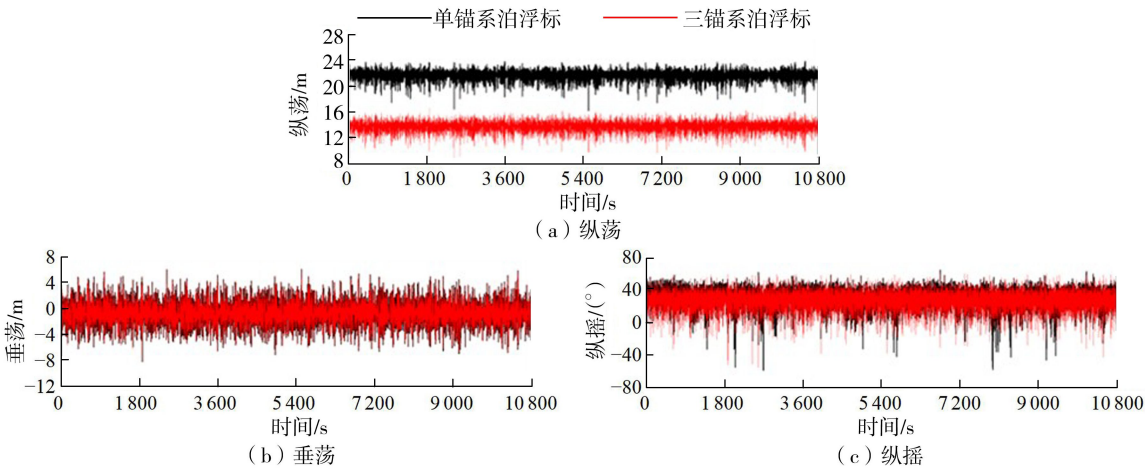


图 8 单锚与三锚系泊浮标运动响应时程曲线

Fig. 8 Time history curves of motion response of single-point and three-point mooring buoy

表 3 单锚与三锚系泊浮标运动响应统计

自由度方向		运动响应/m			
		最大值	最小值	平均值	标准差
纵荡	单锚系泊浮标	23.929	16.231	21.601	0.799
	三锚系泊浮标	16.623	8.812	13.691	0.880
垂荡	单锚系泊浮标	6.157	-8.214	-0.748	1.904
	三锚系泊浮标	6.156	-8.219	-0.721	1.917
纵摇	单锚系泊浮标	65.572	-59.438	28.613	12.948
	三锚系泊浮标	60.853	-55.813	25.644	12.187

4.2 单点式与三点式系泊系统对系泊张力的影响

表 4 为单点式与三点式系泊系统系泊张力统计值。当外荷载以 $\alpha=0^\circ$ 作用在浮标上时,锚链 1 与荷载处于同一平面,所以三点式系泊系统中锚链 1 上的系泊张力最大,定义为最不利锚链,锚链 2、3 上的系泊张力相对较小,故将单点式系泊系统系泊张力与三点式系泊系统中锚链 1 系泊张力进行比较,对比结果如图 10 所示。可见三点式系泊系统中锚链 1 的系泊张力平均值小于单点式系泊系统,系泊张力最大值减小约 90 kN。图 11 为环境荷载沿同一方向不同角度入射时,单点式与三点式系泊系统中最不利锚链的系泊张力包络图,可以发现,相比于单点式系泊系统,三点式系泊系统的系泊张力明显较低。

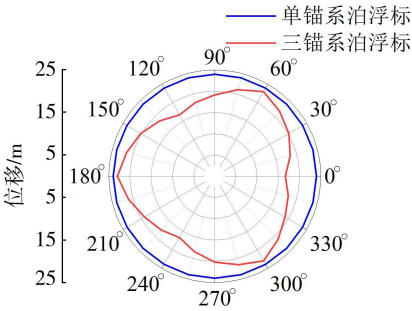


图 9 单锚与三锚系泊浮标位移包络图

Fig. 9 Displacement rose diagrams of single-point and three-point mooring buoy

表 4 单点式与三点式系泊系统系泊张力统计

Table 4 Statistical values of mooring tension of single-point and three-point mooring systems

系泊类型	锚链编号	系泊张力/N			
		最大值	最小值	平均值	标准差
单点式	锚链	215 192.00	602.90	35 750.54	13 330.74
	锚链 1	125 024.00	634.17	35 064.39	13 401.51
三点式	锚链 2	7 208.58	83.56	2 632.43	633.96
	锚链 3	6 855.23	83.56	2 632.39	633.79

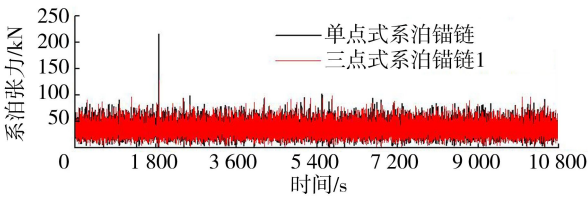


图 10 单点式与三点式系泊系统系泊张力时程曲线对比

Fig. 10 Comparison of mooring tension time-history curves between single-point and three-point mooring systems

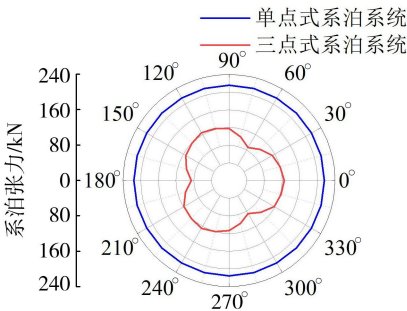


图 11 单点式与三点式系泊系统中最不利锚链的系泊张力包络图

Fig. 11 Mooring tension rose diagrams of the most unfavorable mooring-lines in single-point and three-point mooring systems

5 结 论

- a. 浮标运动响应对波高变化的敏感性显著高于波浪周期。随着波高的增大,浮标的运动响应及系泊张力最大值均显著增加;随着波浪周期增大,浮标纵摇最大值呈微弱减小,系泊张力最大值呈微弱增加,纵荡、垂荡最大值基本不变。
- b. 三锚系泊浮标运动响应均小于单锚系泊浮标,系泊张力最大值也小于单点式系泊系统,三点式系泊系统对浮标的约束效果更强,同时也能降低系泊系统张力。

参考文献:

[1] 王淇元,范健宇,陈江龙,等. 中心管式波能发电浮标的气动性能仿真分析[J]. 能源技术与管理,2024,49(3):8-13. (Wang Qiyuan,Fan Jianyu,Chen Jianglong,et al. Simulation analysis of aerodynamic performance of wave energy generation buoy with central pipe[J]. Energy Technology and Management,2024,49(3):8-13. (in Chinese))

[2] 赵春廷,张燕红. 一种自发电安全导航智能化夜视浮标设计方案[J]. 设备管理与维修,2024(22):55-57. (Zhao Chunting,Zhang Yanhong. Design scheme of a self-powered intelligent night-vision buoy for safe navigation [J]. Plant Maintenance Engineering,2024(22):55-57. (in Chinese))

[3] 张继生,王军磊,李浩然,等. 海上浮式风机纵摇及其抑制研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):103-110. (Zhang Jisheng,Wang Junlei,Li Haoran,et al. Research progress on pitching and its suppression of floating offshore wind turbines[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1):103-110. (in Chinese))

[4] 郭晨伟,高洋洋,国振,等. 新型激光雷达浮标运动响应特性数值研究[J]. 海洋工程,2021,39(4):46-61. (Guo Chenwei,Gao Yangyang,Guo Zhen,et al. Numerical investigation on the dynamic response of a novel FLiDAR buoy [J]. The Ocean

Engineering,2021,39(4):46-61. (in Chinese))

[5] 王旭,贾思洋,刘长华,等. 三锚式浮标综合观测平台不同系泊参数的响应分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(2):285-291. (Wang Xu,Ja Siyang,Liu Changhua,et al. Response analysis of different mooring parameters for a three-anchor buoy integrated observing platform[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2024,48(2):285-291. (in Chinese))

[6] 缪泉明,顾民,杨占明,等. 极限海况下浮标运动及锚链受力估算[J]. 船舶力学,2003,7(5):21-27. (Liao Quanming,Gu Min,Yang Zhanming,et al. Estimation of buoy motions and chain forces in extreme sea state[J]. Journal of Ship Mechanics,2003,7(5):21-27. (in Chinese))

[7] Zhu Xiangqian,Yoo W S. Dynamic analysis of a floating spherical buoy fastened by mooring cables[J]. Ocean Engineering,2016,121:462-471.

[8] 郑锡巧,朱克强,张大朋,等. 深水单点系泊海洋气象浮标的水动力分析[J]. 水道港口,2018,39(1):96-100. (Zheng Xiqiao,Zhu Keqiang,Zhang Dapeng,et al. Hydrodynamic analysis of the single point mooring metocean buoy in deep water[J]. Journal of Waterway and Harbor,2018,39(1):96-100. (in Chinese))

[9] 高洋洋,胡阳宁,王立忠,等. 三锚系大型浮标运动响应特性数值研究[J]. 海洋工程,2023,41(6):124-138. (Gao Yangyang,Hu Yangning,Wang Lizhong,et al. Numerical investigation on the dynamic responses of three-anchor large-scale buoy [J]. The Ocean Engineering,2023,41(6):124-138. (in Chinese))

[10] 黎祖狄,米智楠,李伟雄. 风浪流夹角变化对三锚浮标系统运动响应的影响[J]. 机电工程技术,2025,54(9):1-6. (Li Zudi,Mi Zhinan,Li Weixiong. Effects of wind-wave-current intersection angle change on motion response of three-anchor buoy system[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2025,54(9):1-6. (in Chinese))

[11] Zhang Baofeng,Li Xu,Wang Lizhong,et al. Numerical simulation of typhoon waves in an offshore wind farm area of the South China Sea[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2025,13(3):451.

[12] Liang Shuang,Lin Lin,Liang Fayun,et al. Numerical analysis of nonlinear hydrodynamic performance in an innovative composite monopile foundation for offshore wind turbines using a fully nonlinear potential flow model[J]. Sustainability,2025,17(11):4769.

[13] 梁冠辉,薛宇欢,孙宝楠,等. 海洋物性监测小型浮标稳性设计[J]. 海洋科学进展,2020,38(3):541-548. (Liang Guanhui,Xue Yuhuan,Sun Baonan,et al. Stability design of small buoy for marine physical property monitoring[J]. Advances in Marine Science,2020,38(3):541-548. (in Chinese))

[14] Cummins W E. The impulse response function and ship motions[R]. West Bethesda:David Taylor Model Basin,1962.

[15] Tao Wei,Sun Jinwei,Wang Shuqing,et al. Coupled dynamic analysis of moored floating structures by a hybrid laplace-time domain method[J]. Ocean Engineering,2025,317:120022.

[16] Xiong Lingzhi,Yang Jianmin,Zhao Wenhua. Dynamics of a taut mooring line accounting for the embedded anchor chains[J]. Ocean Engineering,2016,121:403-413.

[17] Cao Yu,Wang Kewen,Xi Chen,et al. Hydrodynamic performance characteristics of small-scale in-situ buoys with critical motion requirements[J]. Ocean Engineering,2024,313:119420.

[18] 李彬彬,欧进萍. Truss Spar 平台垂荡响应频域分析[J]. 海洋工程,2009,27(1):8-16. (Li Binbin,Ou Jinping. Heave response analysis of Truss Spar in frequency domain[J]. The Ocean Engineering,2009,27(1):8-16. (in Chinese))

[19] 黄必桂,胡琴,谢波涛,等. 1409 号“威马逊”台风对海上水文气象设计参数的影响研究[J]. 中国造船,2016,57(A01):532-538. (Huang Bigui,Hu Qin,Xie Botao,et al. Research on influence of No. 1409 typhoon Rammasun on meteorological and hydrological design parameters in open sea[J]. Ship Building of China,2016,57(A01):532-538. (in Chinese))

[20] 连宇顺,潘正虎,郑金海,等. 离岸系泊式海藻牧场的动力响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):107-116. (Lian Yushun,Pan Zhenghu,Zheng Jinhai,et al. Dynamic response analysis of offshore moored kelp farms[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):107-116. (in Chinese))

[21] Liu P C,Hawley N. Wave grouping characteristics in nearshore great lakes II [J]. Ocean Engineering,2002,29(11):1415-1425.

[22] DNV. Environmental conditions and environmental loads:DNV-RP-C205[S]. Oslo:Det Norske Veritas,2017.