

基于OC4浮式基础的海上漂浮式光伏平台的运动响应特性研究

吕欣欣¹, 赵汉杰², 徐 鹏¹, 张兆德³, 蒙古彬³

(1. 浙江海洋大学船舶与海运学院, 舟山 316022; 2. 舟山中天重工有限公司, 舟山 316011;

3. 北部湾大学机械与船舶海洋工程学院, 钦州 535011)

摘 要: 以OC4半潜式风力机平台为概念基础,设计一种适用于深远海环境的漂浮式光伏平台,并运用势流理论对其水动力特性展开深入分析。研究聚焦于该单体漂浮式光伏平台在正常工况与极端工况下的表现,探讨单根系泊断裂后平台的运动响应及系泊性能变化。结果显示,在正常与极端工况中,迎浪侧系泊缆断裂对平台运动影响最为突出;而在极端工况下,新设计的海上漂浮式光伏平台系泊系统仍符合安全系数标准,可安全运行。

关键词: 漂浮式光伏平台; 系泊系统; 动力响应; 数值模拟; 波浪载荷; 系泊缆失效

中图分类号: P752; TM615

文献标志码: A

0 引 言

海上漂浮式光伏(floating photovoltaic, FPV)作为一种光伏发电解决方案,相较于传统陆上光伏,展现出诸多独特优势。它将发电空间拓展至海洋,突破了陆地局限^[1],此外,借助海上气候提升发电效率还能抑制藻类生长、维护水体生态。这些显著优点使得FPV在近年来备受关注,迅速成为光伏领域研究与应用的热点,吸引了众多科研人员和企业的投入与探索,展现出广阔的发展前景。

近年来,海洋浮式光伏平台技术研究取得了系列进展。Choi等^[2]采用有限元仿真手段开展浮式平台结构强度与安全性能研究,最终构建了适用于近海环境的漂浮式光伏系统力学模型;王丽君等^[3]利用STAR-CCM+流体计算工具对大型浮体模块在风浪耦合作用下的稳定性进行了数值模拟,揭示了不同波浪环境下的运动响应特性;Alberto等^[4]基于兰佩杜萨岛海域特征开发了新型浮式光伏平台构型,并通过数值模拟验证了其工程适用性;陈魁啸等^[5]通过对比固定式与漂浮式阵列的发电性能指标,发现漂浮式系统在能量损耗与功率波动特征方面表现更优,证实了其具备应对常规海浪扰动的稳定运行能力。需强调的是,现有成果多聚焦于浅水区域光伏平台性能分析,对深水区及恶劣海况下的平台性能研究仍存在不足。

目前,FPV的设计与安装仍处于试验阶段,尚未大规模商业化^[6]。由于缺乏设计标准,海上FPV平台主要参考挪威船级社(Det Norske Veritas, DNV)^[7]的推荐做法及海洋工程经

验。因此,在海上FPV项目的初始阶段,开发合理的概念设计显得尤为迫切。尽管近年来Bassam等^[8]、Alberti等^[9]以及蒋致禹等^[10]均提出一些FPV设计,但它们主要以小尺度尺寸为特征,在垂直方向上极易受到大浪的威胁。而波浪载荷是光伏浮体结构强度设计的关键控制荷载,能否抵御波浪冲击是设计的主要挑战之一^[11]。近期,一种基于张力腿平台(tension-leg platform, TLP)新概念设计的海上光伏平台成功通过了模型试验并验证了其可行性^[12],这表明参考成熟的海洋结构物设计理念对于海上FPV平台开发具有有效性和合理性。

综上,当前海上FPV平台的研究主要集中在浅水环境下的生存能力方面,针对深水环境的研究则相对匮乏,尤其是在极端环境条件下的相关研究更是鲜有报道。此外,现有研究大多以小尺度模型为研究对象,这在一定程度上限制了研究成果向实际工程应用的转化。尽管已有文献表明成熟的海洋工程技术在FPV平台的设计与优化中发挥了关键作用,但该领域的研究仍处于起步阶段,亟待进一步深化与拓展。因此,鉴于当前海上FPV平台在深水及极端环境研究方面的不足,本文提出一种新型海上FPV平台设计方案。该方案借鉴OC4半潜式风力机平台的设计理念及其成熟的系泊系统,并采用大尺度尺寸设计,使单个模块具备较高的发电功率和良好的深水适配性。本文重点分析该单体FPV平台在正常与极端工况下的运动响应特性,尤其是单根系泊缆断裂失效后对平台运动响应的影响,以期为深水环境下漂浮式光伏平台的工程应用提供理论依据与技术支撑。

收稿日期: 2025-01-21

基金项目: 广西科技重大专项(桂科AA22068105)

通信作者: 徐 鹏(1989—),男,博士、副教授,主要从事海洋可再生能源开发利用技术方面的研究。xupeng@zjou.edu.cn

1 数值计算理论

1.1 势流理论

采用势流理论方法对漂浮式光伏平台进行波浪载荷计算,假设浮体是刚性的,忽略水弹性;流体无黏性、不可压缩、无旋转;不考虑空气和水的耦合效应^[13]。流体的总速度势主要由入射波速度势、绕射势和辐射势叠加而成,即:

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_I(x, y, z, t) + \Phi_R(x, y, z, t) + \Phi_D(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中: Φ_I ——入射势; Φ_R ——辐射势; Φ_D ——绕射势。

对于速度势的求解,首先求解线性规则波的入射势,不规则波可认为是无限线性规则波的叠加。利用格林函数求解辐射势与绕射势场,结合速度势函数与伯努利方程建立流场压力分布模型,最终通过压力积分法计算浮体水动力载荷。

1.2 波浪理论

选用 JONSWAP 三参数谱描述目标海域的波浪,其谱型为^[14]:

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{\beta g^2}{\omega^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right] \gamma_J \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2} \right] \quad (2)$$

$$\begin{cases} \omega \leq \omega_m, \sigma = 0.07 \\ \omega > \omega_m, \sigma = 0.09 \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha_J = 0.076 \tilde{x}^{-0.22} = 0.076 \left(\frac{gx}{U^2} \right)^{-0.22} \quad (4)$$

式中: $S_{\eta}(\omega)$ ——波面高度单边功率谱密度, $m^2 \cdot s$; β ——JONSWAP 谱全局能量尺度系数; g ——重力加速度, m/s^2 ; ω ——波浪角频率, rad/s , $\omega = 2\pi f$, 其中 f 为波浪普通频率; γ_J ——谱峰升高因子,观测值为 1.5~6.0,平均值为 3.3; σ ——峰形系数; α_J ——无因次风区的函数; x ——风区长度, m ; U ——海面以上 10 m 高度处的风速, m/s 。

谱峰频率为:

$$\omega = 22 \frac{g}{U} \tilde{x}^{-0.33} \quad (5)$$

1.3 浮体运动的基本方程

浮体在运行工况下会受到波浪、风、流等环境载荷的作用。基于牛顿第二定律,全面考虑惯性力、阻尼力、恢复力及外部激励力,浮体的运动基本方程表达为:

$$(\mathbf{M} + \boldsymbol{\mu}) \ddot{\mathbf{z}} + \boldsymbol{\lambda} \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{k} \mathbf{z} = \mathbf{F}_z \quad (6)$$

式中: $\mathbf{M}$ ——浮体质量矩阵; $\boldsymbol{\mu}$ ——附加质量矩阵; $\boldsymbol{\lambda}$ ——阻尼矩阵; $\mathbf{k}$ ——静水恢复力矩阵; $\mathbf{z}$ ——运动响应振幅算子; $\mathbf{F}_z$ ——主要考虑风、浪、流的外部载荷, kN 。

2 模型的建立与计算

2.1 FPV 平台参数

新型 FPV 平台的设计灵感来源于 OC4 半潜式风力机平

台。然而,原始 OC4 平台的甲板面积仅为 $900 m^2$,仅能安装最大发电量为 130 kW 的太阳电池,难以满足大规模发电的需求。因此,本文对其进行扩展和优化,重点通过增加甲板面积来提升装机容量。改进后的 FPV 平台仍保留了半潜式设计,由 4 个圆柱形浮筒、3 块垂荡板和 1 个钢桁架组成,结构布局合理且稳定。平台的主视图和俯视图分别如图 1 所示。浮筒和垂荡板的设计沿袭 OC4 配置,但甲板扩展为边长为 40.87 m 的六边形结构。具体参数详见表 1。光伏组件(尺寸为 $2279 mm \times 1134 mm \times 35 mm$)安装在浮桥上方的钢桁架上,倾斜角度设定为 15° ,这一设计旨在提高发电效率,减少风力对光伏组件影响。经计算,单个模块需 1248 块光伏组件,至少能提供 624 kW 的发电量,是原 OC4 平台发电量的 4.8 倍,显著提升了发电效率。

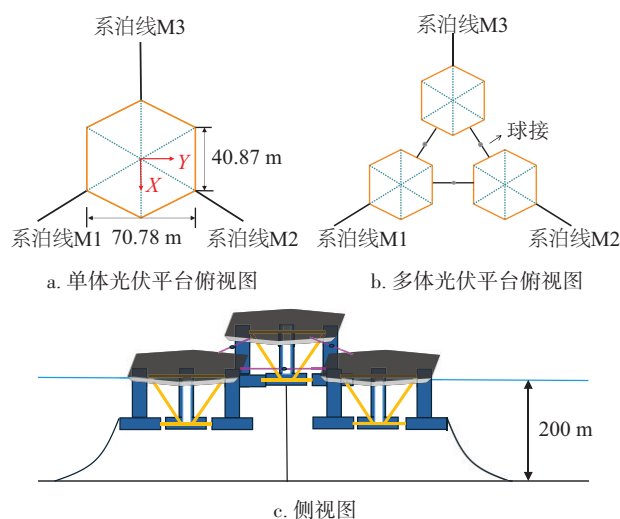


图 1 FPV 模型

Fig. 1 FPV model

表 1 光伏平台的主要参数

Table 1 Main parameters of PV system

参数名称	数值
甲板(长×宽)/(m×m)	81.74×70.78
底柱(高×直径)/(m×m)	6×24
浮筒(高×直径)/(m×m)	26×12
中间柱(高×直径)/(m×m)	30.0×6.5
水深/m	200
重心/m	13.13
总质量/t	1.36×10^4
排水量/ m^3	13.18×10^3

此外,该 FPV 平台的设计还展现了极高的灵活性,它既可作为独立的模块进行安装,也可通过铰接的方式组装

多个模块,以满足特定的发电量需求。如图 1 所示,这种巧妙的设计不仅有效避免了连接处在波浪作用下因应力集中而断裂的风险,还可管理和控制模块间的相对运动,保持整个结构的稳定性和持久性。

2.2 系泊系统参数

合适的系泊系统能增加平台的整体刚度,减少 FPV 平台的动态响应。模型借鉴了 OC4 半潜式风力机平台,并基于目前海上 FPV 平台缺乏统一规范现状,沿用 OC4 平台的系泊设计,具体系泊参数见表 2。平台采用 3 根悬链线系泊系统,相邻系泊线之间的夹角为 120° 。系泊布局的详细示意图可参考图 1。当浪向角为 0° 时,波浪的行进方向与 M3 系泊线平行,这种布局有助于提高平台的稳定性,优化平台在波浪作用下的整体表现。

表 2 系泊设置主要参数^[15]

Table 2 Main parameters of the mooring line^[15]

参数	数值
系泊缆数量	3
相邻直线间的夹角/($^\circ$)	120
未拉伸系泊长度/m	835.5
系泊缆直径/m	0.08
等效系泊缆质量密度/(kg/m)	113.35
水中等效系泊缆质量/(kg/m)	108.63
等效系泊缆拉伸刚度/MN	735.6
系泊缆绳的水动力阻力系数	1.1
系泊缆的海床阻力系数	1
系泊缆结构阻尼/%	2

2.3 环境工况

本文主要考虑两种满足 JONSWAP 谱(乔纳波谱)的不规则波浪。表 3 中详细呈现了这些波浪的有义波高和峰值周期。需强调的是,由于研究的重点在于分析平台在波浪作用下的运动特性,因此本文未将风力的影响纳入考虑范围。波高时程及其对应的功率谱密度曲线如图 2 所示。

表 3 主要考虑的波浪条件

Table 3 Characteristics of considered wave condition

波况	类型	H_s/m	T_p/s	γ
正常	JONSWAP	4.03	8.99	1.82
极端		10.70	14.20	2.75

注: H_s —有效波高; T_p —谱峰周期。

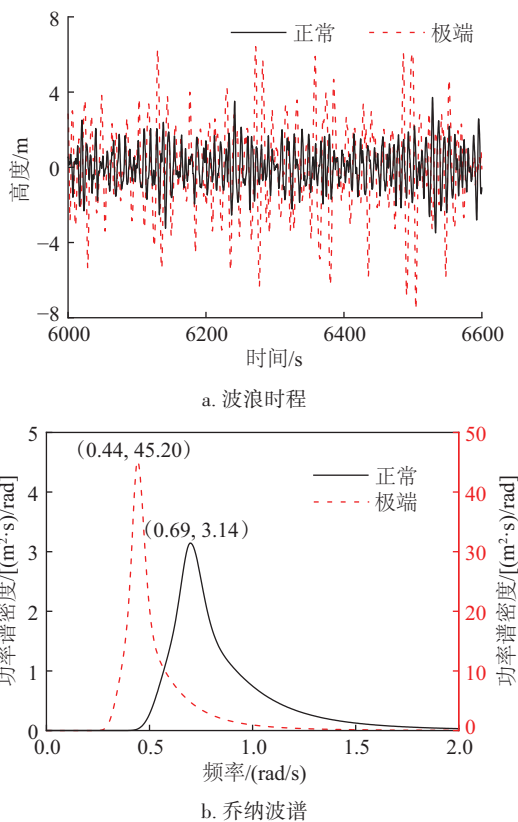


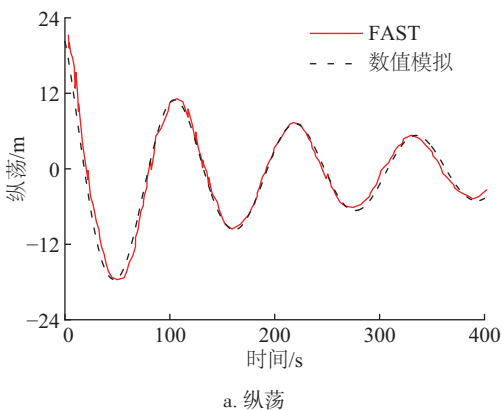
图 2 波况图

Fig. 2 Wave elevation cases

3 数值模拟方法验证

本节详细阐述 OC4 半潜式风力机平台的验证过程。该平台由 3 根主偏移柱、1 根中央柱以及若干支撑构件组成。为减少平台的垂荡运动,特别设计了基柱,以增加附加质量。中央柱直径为 6.5 m,长度为 30 m,而 3 根主偏移柱的直径和长度均分别为 12 m 和 26 m。基柱直径为 24 m,长度为 6 m,并通过直径为 1.6 m 横撑进行交叉连接。

在验证平台自由衰减运动时,主要集中在纵荡和纵摇运动上。图 3 展示了纵荡和纵摇运动的自由衰减曲线。由图 3 可知,模拟数据与 MARIN 数据^[16]之间具有高度的一致性。基于这些验证结果,采用相同的数值模拟方法对改造后的 FPV



a. 纵荡

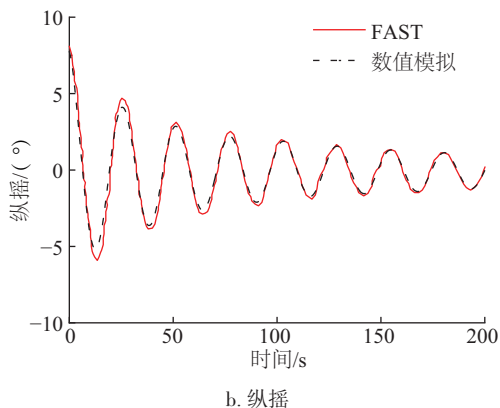


图3 OC4的平台自由衰减曲线

Fig. 3 Dynamic comparison of free-decay motions of OC4 platform

平台进行数值模拟,以确保数值模拟结果的准确性和可靠性。

4 结果与分析

4.1 FPV 平台在频域下的运动响应

本文采用 OrcaFlex 软件^[17]对 FPV 平台进行了详细的数值模拟,旨在深入探究该平台的水动力特性。在开展水动力分析时,假设上部的钢桁架及其与浮桥的连接部位具有足够的刚度且变形极小,同时假定不同浮筒之间的阻力系数相同。OrcaFlex 软件基于势流理论来估算波浪对浮动平台的作用力。在数值模拟过程中,本文通过线性阻尼矩阵和 Morison 方程计算浮动平台的黏性阻力。其中,黏滞阻尼系数的取值参考 OC4 半潜式风力机平台的相关经验。OC4 平台的黏滞阻尼系数是基于雷诺数、流动状态、构件特性以及应用尺度综合确定的,通过计算平均值来反映其在实际工况下的阻力特性^[15]。但由于实际黏性阻力的复杂性,计算结果与实际值之间仍可能存在一定偏差,这在一定程度上为数值模拟结果带来了许可范围内的误差。

为了了解浮体在其所处海洋环境中的动态响应,首先,通过 OrcaWave 对单个 FPV 平台进行包括运动响应振幅算子、附加质量系数和辐射阻尼系数在内的水力系数计算。数值模拟的波浪频率范围为 0.1~2.5 rad/s,航向设定为 0°,海水密度为 1025 kg/m³,水深设定为 200 m。严超君等^[18]结合海洋工程平台的概念设计了一种新的模块化设计的 FPV 平台,该平台也采用浮筒设计,浮筒之间间距相似,因此将这两个类似 FPV 平台的响应振幅算子曲线进行对比,结果如图 4 所示。可看出,无论是在低频范围还是在高频范围,本文中 FPV 平台的运动响应均较为稳定。此外,由于光伏平台的运动响应在低频范围内较为明显,这通常意味着该平台可避开大多数短周期波浪的影响。因此,该平台展现了优异的水动力性能,为其在海洋环境中的稳定运行提供了

有力保障。

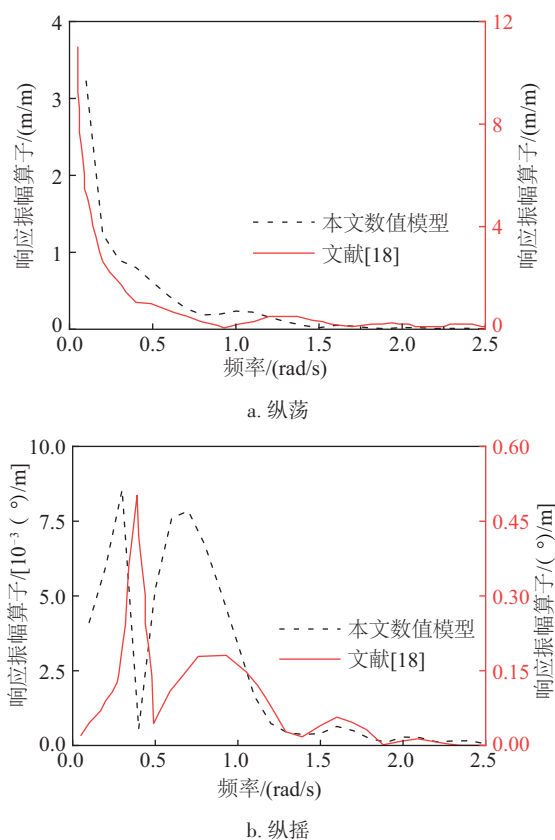


图4 漂浮式光伏平台的响应振幅算子

Fig. 4 Response amplitude operators for FPV

4.2 正常工况下系泊断裂对 FPV 平台运动响应的影响

通过 JONSWAP 谱生成的不规则波浪模拟正常海况,利用 OrcaFlex 软件进行数值模拟,在模拟过程中考虑系泊缆在完好和断裂状态下对平台运动响应的影响。系泊缆断裂失效模拟通过在特定时刻切断系泊缆与光伏平台的连接来实现,而系泊缆的张力通过集中质量法进行计算。模拟共持续 12500 s,在 2000 s 时系泊缆发生断裂。

在正常海况下,平台的运动响应时历曲线如图 5 所示,从图 5 可看出,当系泊缆发生断裂失效时,平台在纵荡、垂荡以及纵摇方向上的运动幅度均会增加,其中纵荡运动的增幅最为突出。此外,位于迎浪侧的系泊缆 M1 断裂失效对平台的影响,比顺浪侧的系泊缆 M2 和 M3 更为显著。具体而言,当 M2 断裂失效时,平台会向迎浪侧的正 Y 轴方向移动,而当 M3 断裂失效时,平台则会向顺浪侧的负 Y 轴方向移动。平台动态响应的分布特性指标如图 6 所示,在完好系泊状态下,平台的最大纵荡响应为 1.91 m。当 M1 断裂失效后,这一数值急剧增至 544 m。这是由于系泊缆断裂失效后,系泊系统的完整性受损,平台整体刚度降低,导致平台受波浪力的影响难以维持原有位置向波浪方向漂移。

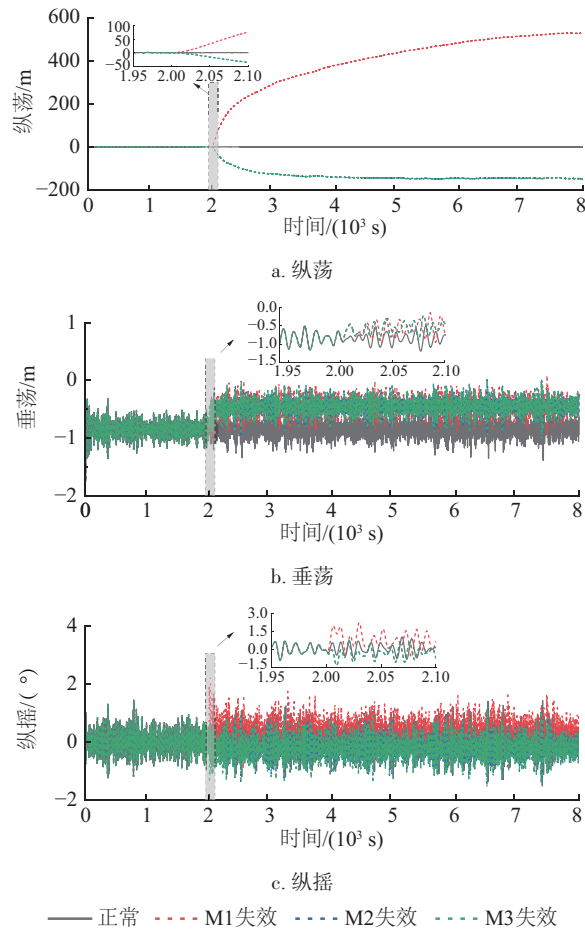


图5 正常工况下平台运动对比

Fig. 5 Comparison curves of platform movement under normal working conditions

进一步观察发现:与 M2 和 M3 断裂失效相比, M1 断裂失效时平台在纵荡、垂荡和纵摇方向上达到新的平衡位置的时间明显更长。具体而言, M1 断裂失效后, 平台的纵荡运动需约 2200 s 才能逐渐稳定至新的平衡位置。此外, 本文设置的安全阈值为 30 min。在此时间内, 若能及时启动人工干预或拖船操作, 可有效避免因平台位移导致的相邻模块碰撞, 从而防止设备损坏或发电效率损失。这一结论为海上漂浮式光伏平台的应急响应策略提供了重要参考。在完整系泊状态下, 平台垂荡运动的最大值为 -1.74 m, 但在 M1 断裂失效时, 这一数值显著变化至 0.08 m, 表明垂荡运动的平衡位置也发生偏移。这种变化是由于系泊缆断裂后整个系泊系统的张力仅由预张力维持, 导致平台垂荡运动的约束力减弱, 所以改变了平台垂荡运动的平衡位置。至于纵摇方向的运动, 由于平台纵摇的固有周期受重心高度影响, 虽然浮体的浮心高度保持不变, 但重心高度发生变化, 因此当垂荡运动的平衡位置发生变化时, 平台纵摇的平衡位置也会随之变化。

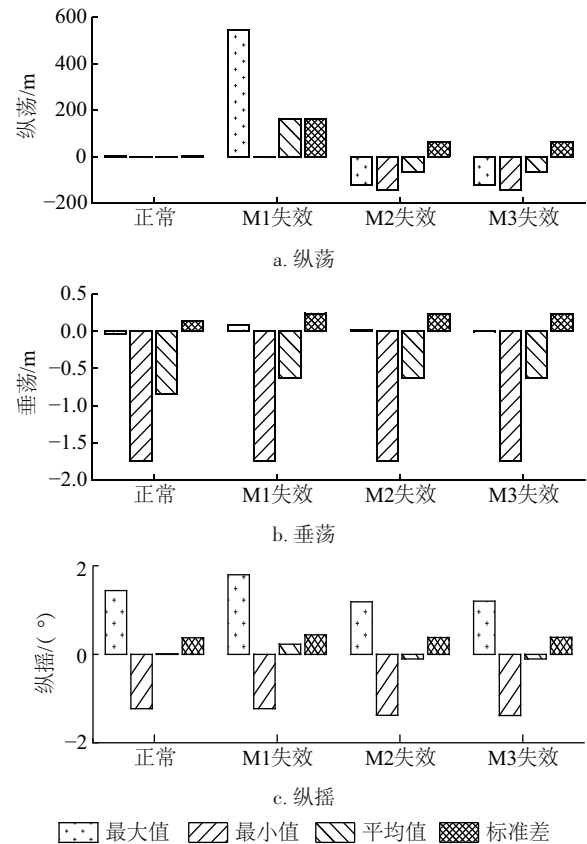


图6 正常工况下平台运动的统计图

Fig. 6 Statistical chart of platform movement under normal working conditions

4.3 极端工况下系泊断裂对 FVP 平台运动响应的影响

本文深入探讨了在极端工况下, FVP 平台在任意一条系泊缆发生断裂失效或完好情况下的运动响应。平台在极端工况下的运动响应时历曲线如图 7 所示。与正常海况相比, 极端海况下平台的运动更为剧烈。与正常工况相似, 系泊缆断裂失效时, 平台的运动响应显著增强, 尤其是在纵荡方向上。平台运动响应的统计参数如图 8 所示, 在完好系泊状态下, 平台的最大纵荡响应和最小纵荡响应分别为 8.05 m 和 -4.86 m, 而 M1 断裂失效后分别急剧变化为 610.07 m 和 -3.17 m。与正常工况相似, 在 M1 断裂失效过程中, 平均纵荡响应和最大纵荡响应均发生显著变化。平台在完整系泊状态下的最大最小垂荡响应分别为 2.73 m 和 -4.17 m, 而在系泊失效时, 变化至 3.04 m 和 -4.15 m, 数值变化较小。这是因为在极端工况下, 系泊缆的张力响应极值和幅值都更大, 平台的垂荡运动受到的约束力相对更大, 因此平台垂荡位置变化不大。在极端工况下, 完整系泊时, 平台的最大纵摇响应和最小纵摇响应分别为 3.8° 和 -4.6° , 而在 M1 断裂时会移动到 4.8° 和 4.07° , 但其平衡位置与完好系泊下相似。这主要是因为平台纵摇固有周期的稳定性主要受浮体重心高度影响。尽管浮体重心位置存在动态调整, 但其浮心高度与排水量维持恒定, 因此平台纵摇固有周期及平衡位置仍相对稳定。

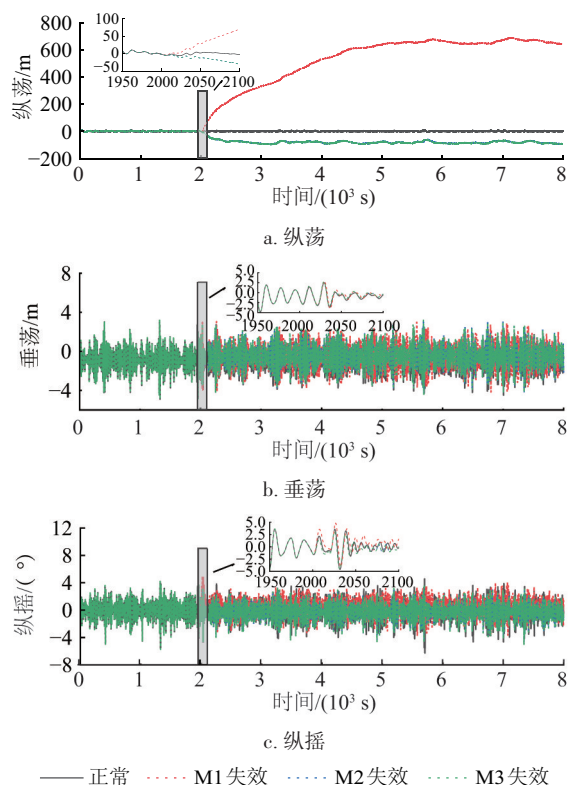


图7 极端工况下平台运动对比

Fig. 7 Comparison curves of platform motion under extreme working conditions

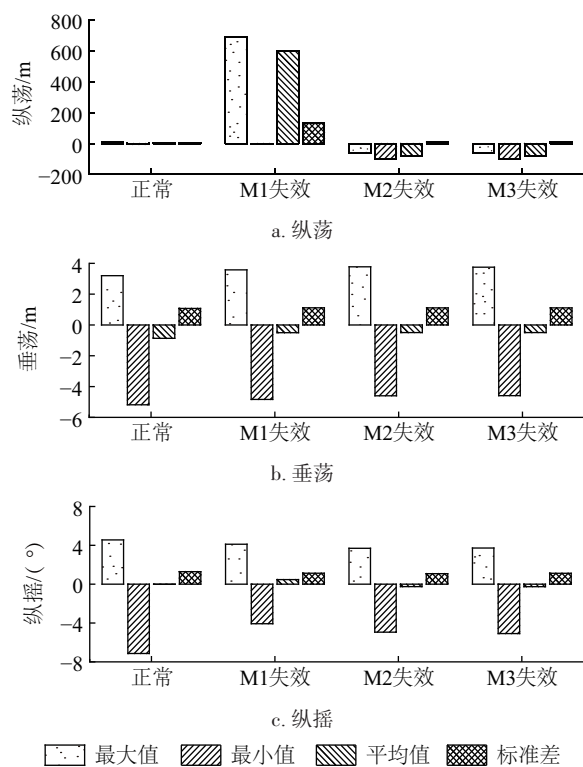


图8 极端工况下平台运动的统计

Fig. 8 Statistical chart of platform movement under extreme working conditions

4.4 极端工况下系泊缆受力分析

如果任意一根系泊缆失效,则剩余的系泊缆需承担起维持平台稳定性的重任,因此一旦系泊缆失效,检查剩余系泊缆的张力就变得至关重要。由于波浪的高度直接关系到其携带的能量大小,更高的波浪带来的动载荷更大,所以在极端海况下,系泊缆的受力显著高于正常海况。因此,接下来将重点分析极端工况下任意一根系泊缆发生断裂失效时剩余的系泊缆的受力情况。图9展示了3根系泊缆在不同工况下所受张力的变化情况,通过在2000 s时特定系泊缆的张力瞬间降为0来模拟系泊缆断裂失效瞬间的变化情况。由于M2和M3关于波浪方向对称,因此当M2或M3断裂时,其系泊受力大小相似。

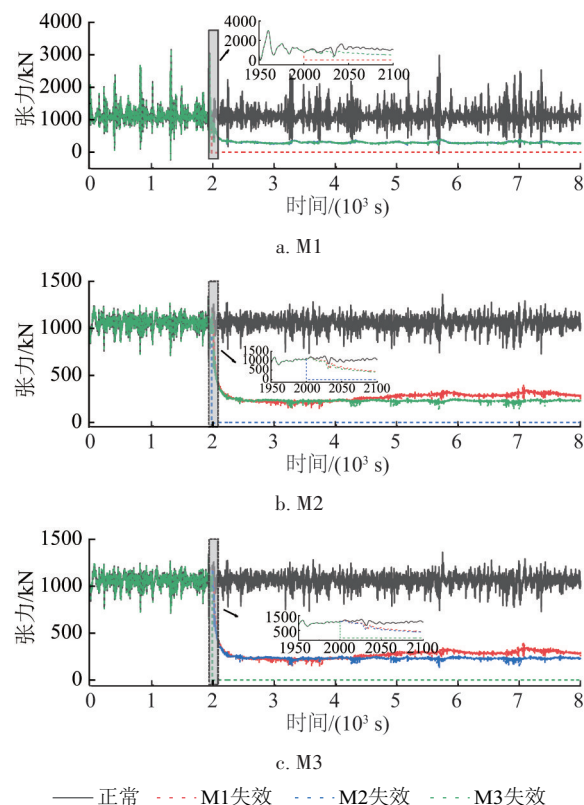


图9 极端工况下系泊受力对比曲线

Fig. 9 Comparison of mooring force curves for extreme operating conditions

当M1系泊缆断裂失效时,平台会在波浪作用下向顺浪方向移动,导致剩余的M2和M3系泊缆发生松弛。此时,锚与导缆器之间的距离减小,系泊缆张力瞬间急剧下降,随后逐渐上升并趋于稳定。在约5000 s时,剩余系泊缆张力达到峰值,此时M2和M3系泊缆将引导平台重新达到一个新的平衡位置。M2或M3系泊缆发生断裂失效时,平台的响应趋势与M1断裂失效时类似。在所有失效情况下,3根系泊缆导缆器张力的统计数据如图10所示。无论哪根系泊缆发生断裂失效,M1、M2和M3的张力均低于完整系泊状态下的张力水平。

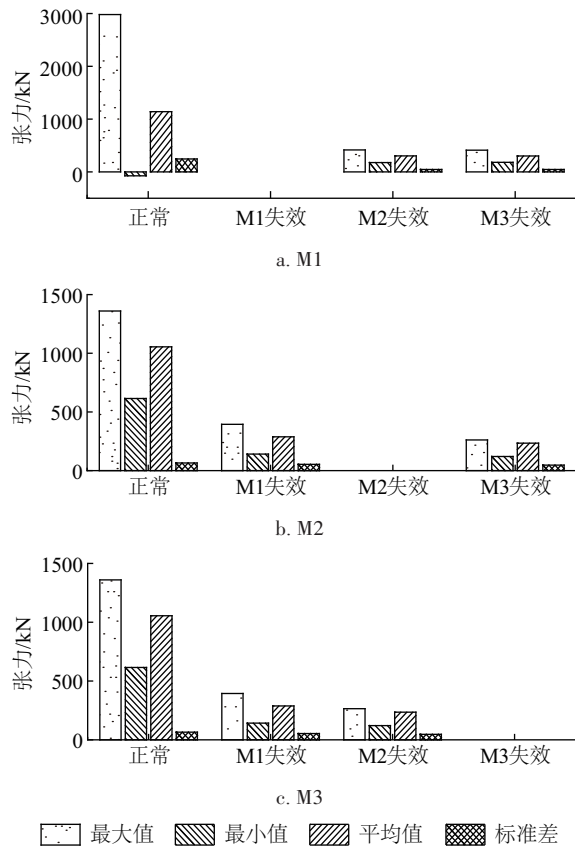


图10 极端工况下系泊受力的统计

Fig. 10 Statistical chart of mooring forces under extreme operating conditions

此外,还观察到系泊张力有时会瞬间降至零(或负值),这是由于FPV平台在波浪作用下远离其平衡位置,导致系泊缆拉伸张力增加。然而,在某些阶段,系泊缆的拉伸力可能不足以抵消平台运动的惯性力,所以张力值为零(或负值)。具体到各系泊缆,M1的最大张力为2980.85 kN,在M2断裂期间,M1的最大张力降至415.52 kN。M2的最大张力为1360.43 kN,在M1失效期间降至394.24 kN。所有系泊缆绳的最大张力值为2980.85 kN,远低于系泊缆绳断裂强度11304 kN,根据DNV标准要求^[19]系泊缆在完整工况下的安全系数为3.79,这表明即使在极端海况下,该系泊系统仍满足安全系数的要求。这为平台在面对系泊缆断裂时的安全性提供了有力的保障,进一步确保了平台在极端海况下的稳定性和可靠性。

5 结 论

本文针对FPV平台在正常和极端海况下系泊缆失效的情况进行了深入研究,旨在揭示系泊缆断裂对平台运动响应及系泊缆张力的影响。主要研究结论如下:

1)在正常和极端工况下,迎浪侧系泊缆断裂对平台的纵荡、垂荡和纵摇运动响应影响最为显著,尤其是对纵荡运动

的影响更为突出。

2)在完整系泊的极端海况下,平台的运动响应约为正常海况下的5~10倍,且在恶劣海况下,系泊缆的最大张力呈现出较高的峰值。

3)即使在极端条件下,该平台的系泊系统仍完全符合安全要求,其安全系数均超过行业标准,为平台在极端海况下的运行提供了坚实的安全保障。

[参考文献]

- [1] DNV. More than the sun: the solar outlook report [R]. DNV: Hovik, 2020.
- [2] CHOI Y, LEE J. Structural safety assessment of ocean-floating photovoltaic structure model [J]. Israel journal of chemistry, 2015, 55(10): 1081-1090.
- [3] WANG L J, KE S T, LI W J, et al. Effect of considering wave angles on the motion response of oversized floating bodies in offshore airports under irregular wind and wave loads [J]. Applied sciences (Switzerland), 2022, 12(15): 7651-7651.
- [4] ALBERTO G, EMILIO F, MASSIMO S, et al. Design and analysis of a floating photovoltaic system for offshore installation: the case study of Lampedusa [J]. Energies, 2022, 15(23): 8804-8804.
- [5] 陈魁啸, 赵树杰, 张鹏, 等. 随机波浪作用下漂浮式光伏阵列发电性能仿真分析 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 317-325.
- [6] CHEN K X, ZHAO S J, ZHANG P, et al. Simulation analysis of power generation performance of floating photovoltaic array under random wave action [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(9): 317-325.
- [7] 孟珣, 田会元, 李鑫. 基于动力特性的南海浮式风力机多准则评价 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 2062-2067.
- [8] MENG X, TIAN H Y, LI X. Multi-criteria-decision making of FOWT based on dynamic property [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(8): 2062-2067.
- [9] DNV-RP-0584, Design, development and operation of floating solar photovoltaic systems [S].
- [10] BASSAM A M, AMIN I, MOHAMED A, et al. Conceptual design of a novel partially floating photovoltaic integrated with smart energy storage and management system for Egyptian North Lakes [J]. Ocean engineering, 2023, 279: 114416.
- [11] ALBERTI E L, PALUDO R, PORTELLA K F, et al. New concept on 100.74 kWp floating solar photovoltaic plant and a real mechanical failures assessment: case of study at Santa Clara hydroelectric power plant reservoir in southern Brazil [J]. Sustainable energy technologies and assessments, 2023, 60: 103455.

- [10] JIANG Z Y, DAI J, SAETTON S, et al. Design and model test of a soft-connected lattice-structured floating solar photovoltaic concept for harsh offshore conditions[J]. *Marine structures*, 2023, 90, 103426.
- [11] 郭军, 陈作钢, 肖福勤, 等. 光伏电站漂浮方阵波浪载荷数值分析研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(1): 1-6.
GUO J, CHEN Z G, XIAO F Q, et al. Numerical research on wave loads of floating photovoltaic power station [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(1): 1-6.
- [12] CLAUS R, SOTO F, CEBADA A, et al. Experimental proof-of-concept of HelioSea: a novel marine floating photovoltaic device [J]. *Ocean engineering*, 2024: 299, 117184.
- [13] 朱绍宇, 张世富, 张冬梅, 等. 基于 AQWA 对一种小型浮动平台的动态响应研究[J]. *化工机械*, 2021, 48(6): 888-895.
ZHU S Y, ZHANG S F, ZHANG D M, et al. Dynamic response of a small floating platform based on AQWA [J]. *Chemical machinery*, 2021, 48(6): 888-895.
- [14] 王树青, 梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013: 37-46.
- WANG S Q, LIANG B C. Wave mechanics for ocean engineering[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2013: 37-46.
- [15] ROBERTSON A, JONKMAN J, MASCIOLA M, et al. Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4[Z]. National Renewable Energy Lab.(NREL), 2014.
- [16] COULLING A J, GOUPÉE A J, ROBERTSON A N, et al. Validation of a FAST semi-submersible floating wind turbine numerical model with DeepCwind test data [J]. *Journal of renewable and sustainable energy*, 2013, 5(2): 023116.
- [17] ORCINA L. OrcaFlex user manual: OrcaFlex version 10.2 C[R]. Daltongate Ulverston Cumbria, 2018.
- [18] YAN C J, SHI W, HAN X, et al. Assessing the dynamic behavior of multiconnected offshore floating photovoltaic systems under combined wave-wind loads: a comprehensive numerical analysis[J]. *Sustainable horizons*, 2023, 8, 100072.
- [19] DNV-OS-C101, Design of offshore steel structures, general-LRFD method[S].

STUDY ON MOTION RESPONSE CHARACTERISTICS OF OFFSHORE FLOATING PHOTOVOLTAIC PLATFORM BASED ON OC4 SEMI-SUBMERSIBLE FLOATING PLATFORM

Lyu Xinxin¹, Zhao Hanjie², Xu Peng¹, Zhang Zhaode³, Meng Zhanbin³

(1. School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Zhoushan Zhongtian Heavy Industry Co., Ltd., Zhoushan 316011, China;

3. College of Mechanical and Marine Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: In this study, a floating photovoltaic platform for deep-sea environments is designed based on the concept of OC4 semi-submersible wind turbine platform, and its hydrodynamic characteristics are thoroughly analyzed by applying the potential flow theory. The study focuses on the performance of the single floating photovoltaic platform under normal and extreme conditions, and investigates the motion response of the platform and the change of mooring performance after the breakage of a single mooring. The results show that under both normal and extreme conditions, the breakage of the mooring cable on the wave-facing side has the most significant effect on the platform motion, while the newly designed mooring system of the offshore floating photovoltaic platform still meets the safety factor standard under the extreme conditions. This study not only ensures the stable operation of the platform under complex sea conditions, but also provides technical reference and guidance for the design and practical application of offshore floating photovoltaic platforms.

Keywords: floating photovoltaic platform; mooring system; dynamic response; numerical simulation; wave loads; mooring line failure