

风波作用下新型铰接式平台动态响应研究

李蜀军¹, 岳敏楠¹, 王 博¹, 李 春^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘 要: 风波作用下, 漂浮式风力机平台的浮动特性会直接影响上部风力机正常运行。为提高平台稳定性, 设计一种新型铰接式平台。基于辐射/绕射与有限元方法, 结合叶素动量理论, 对比分析了风波作用下新平台与立柱式 (Spar) 平台时频响应特性。结果表明: 在纵荡、垂荡及纵摇自由度上, 新平台幅值响应算子随波浪频率增大变化趋势与 Spar 平台基本一致, 但峰值明显减小; 新平台附加质量较原平台增大, 且垂荡自由度上附加质量增加最明显; 时域分析中, 新平台 3 个自由度响应幅值较原平台分别减小约 83.9%、61.9% 及 75.5%, 标准差减小约 76.4%、60% 及 77.1%, 表现出良好的稳定性; 功率谱分析中, 新平台响应峰值始终小于原平台, 且无响应集中现象, 波频性能更优。

关 键 词: 风波作用; 新型铰接式平台; Spar 平台; 动态响应

中图分类号: TK83 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.03.023

[引用本文格式] 李蜀军, 岳敏楠, 王 博, 等. 风波作用下新型铰接式平台动态响应研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(3): 160-167. LI Shu-jun, YUE Min-nan, WANG Bo, et al. Dynamic response of a new type articulated platform under the action of wind and wave [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 160-167.

Dynamic Response of a New Type Articulated Platform under the Action of Wind and Wave

LI Shu-jun¹, YUE Min-nan¹, WANG Bo¹, LI Chun^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: Under the action of wind and wave, the floating characteristics of offshore wind turbine platform will affect the normal operation of the upper wind turbine. In order to improve the stability of the platform, a new type articulated platform was designed. Based on radiation/diffraction and finite element method, combined with blade element momentum theory, the time-frequency response characteristics of the new platform and Spar platform under the action of wind and wave were compared and analyzed. The results show that, the response amplitude of the new platform has the same trend with the increase of wave frequency as that of the Spar platform in the degree of freedom of surge, heave and pitch, but the peak value decreases obviously. The additional mass of the new platform increases compared with that of the original platform, and the new platform has the most significant increase in its additional mass in the degree of freedom of heave. Compared with the original platform, the response amplitude of the new platform decreases by about 83.9%, 61.9% and 75.5% respectively in the three degrees of freedom, and the standard deviation decreases by about 76.4%, 60% and 77.1% respectively in the time domain analysis. The new

收稿日期: 2021-05-17; 修订日期: 2021-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(52006148, 51976131); 上海“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目(19060502200)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(52006148, 51976131); Shanghai University Science and Technology Innovation Action Plan Local University Capacity Building Project(19060502200)

作者简介: 李蜀军(1995-), 男, 四川巴中人, 上海理工大学硕士研究生。

通讯作者: 李 春(1963-), 男, 北京人, 上海理工大学教授。

platform shows good stability. In the power spectrum analysis, the response peak value of the new platform is always smaller than that of the original platform, and there is no response concentration phenomenon, and the wave frequency performance is better.

Key words: action of wind and wave, new type articulated platform, Spar platform, dynamic response

引言

近海浅水区,风电开发多采用固定桩基础,对于海深更大、海底环境更复杂的深海区,漂浮式风力机更具经济优势和竞争性。我国 10 m 高处近海风能资源约 750 GW,而深海风能储量可达 1 740 GW^[1]。为应对日益增长的能耗需求,保障能源安全,深海风能开发极具价值,因此对漂浮式风力机的研究尤为必要。

如今,对海上风力机平台的研究多基于张力腿式(Tension Leg Platform, TLP)、驳船式(Barge)、半潜式(Semi-Submersible, S-S)及立柱式(Spar)4种平台^[2]。其中, Spar 平台通过底部压载舱降低重心,其立柱结构较其它平台受到波浪激励力更小,其各自由度固有周期远离波浪频率,具有良好的运动特性,在深海风能开发中应用广泛^[3]。1991 英国首先开发出 Spar 平台 FLOAT,首个 Spar 型全尺寸漂浮式风力机于 2009 年成功安装并完成调试^[4]。对其研究表明, Spar 平台在多种海况中均表现出良好稳定性。在海上风电发展迅猛的今天, Spar 平台漂浮式风力机发展前景愈发广阔^[5]。

较之固定式基础, Spar 平台漂浮式风力机因其基础不固定,在海洋环境中会产生较大的摇荡运动,降低平台上部风力机发电效率并威胁其结构安全。因此,对 Spar 平台漂浮式风力机动态响应进行研究并寻求提高其抗风波能力方法对风力机正常工作具有重要意义。迄今,针对上述问题已有许多学者进行了研究。文献[6]中分别建立了有无螺旋侧板的 Spar 平台漂浮式风力机整机模型,进而分析了螺旋侧板数、高度及螺距比对平台动态响应影响;文献[7]通过时域和频域响应分析,讨论了附加螺旋侧板和平板对 Spar 平台水动力性能的提升作用;文献[8]基于风压模型与三维辐射/绕射方法求解风波载荷,模拟了附加不同数目和厚度垂荡板的 Spar 平

台漂浮式风力机的动态响应。Mitra 等人^[9]提出一种改进的 Spar-torus 的组合结构,通过弹簧、阻尼器与 Spar 平台相连,并研究了其对 Spar 平台运动的减震效果;Oikonomou 等人^[10]通过系泊连接多个 Spar 平台组成阵列,并基于此分析了 3 个 Spar 平台连接下平台阵列的动态响应;Manikandan 等人^[11]提出一种 LABVIEW 环境下的比例积分算法,将其用于 Spar 平台桨距控制,研究了该算法对运行风速下风力机功率控制以及恶劣海况下对平台纵摇响应抑制效果。

上述方法对降低平台动态响应有一定效果,但均存在一定不足:如通过添加螺旋侧板、附加平板、垂荡板及组合结构均会增加平台结构复杂度,提高造价,降低平台经济性;阵列平台极大依赖系泊系统,当系泊损伤或失效时平台会因受力不均产生大幅运动;变桨控制只在风力机工作时有效,当入流风速大于切出风速时变桨调节失去作用。此外, Spar 平台为长立柱结构,运输不便。对此本文基于 Spar 平台提出一种新型铰接式平台,即将 Spar 平台部分长度与主体分离,通过铰接与主体相连。较之原平台,新平台下部结构与主体分离后平台重心下降,平台初稳性高增大;越靠近海底水流越平缓,下部结构较主体平台运动小,在平台运动时会阻碍其运动。基于此,新平台运动被抑制,稳定性好。为研究新型铰接式平台抗风波能力,基于辐射/绕射理论与叶素动量理论,模拟其在风波作用下动态响应,并将其与原平台动态响应进行对比。

1 研究对象

研究对象为新型铰接式平台,为便于阐述其动态响应特性,并与原 Spar 平台进行对比,两平台均承载 NREL 5 MW 风力机^[12],风力机与两平台参数分别见表 1 与表 2^[13],基于两平台的漂浮式风力机整机模型如图 1 所示。

表 1 NREL 5 MW 风力机参数

Tab.1 Parameters of NREL 5 MW wind turbine

参数	数值
额定功率/MW	5
风轮直径/m	126
叶片数目/n	3
额定转速/r · min ⁻¹	12.1
额定叶尖速度/ m · s ⁻¹	80
轮毂高度/m	90
切入风速/m · s ⁻¹	3
额定风速/m · s ⁻¹	11.4
切出风速/m · s ⁻¹	25
轮毂质量/kg	110 000
机舱质量/kg	240 000
塔架质量/kg	347 500

表 2 平台参数

Tab.2 Parameters of floating wind turbine platforms

参数	原平台	新平台
直径/m	6.8 ~ 9.4	6.8 ~ 9.4
吃水/m	120	124
排水体积/m ³	8 029	8 029
质量/kg	7.466 × 10 ⁶	7.466 × 10 ⁶
重心/m	-89.92	-91.64
横摇转动惯量/kg · m ²	4.229 × 10 ⁹	4.293 × 10 ⁹
纵摇转动惯量/kg · m ²	4.229 × 10 ⁹	4.293 × 10 ⁹
艏摇转动惯量/kg · m ²	1.642 × 10 ⁸	1.861 × 10 ⁸
系泊数量	3	3
锚点/导缆孔深度/m	70/320	70/320
锚点至平台中点距离/m	5.2	5.2
导缆孔至平台中点距离/m	853.9	853.9
系泊未拉伸长度/m	902.2	902.2
系泊线密度/kg · m ⁻¹	77.71	77.71
系泊直径/m	0.09	0.09
系泊拉伸刚度/N	3.842 × 10 ⁸	3.842 × 10 ⁸

2 理论基础与环境载荷

2.1 理论基础

分析漂浮式风力机受力特性及运动响应时,可将其看作一个完整的系统^[14]。在役海况下,漂浮式风力机系统 6 个自由度运动控制方程可表示为:

[M + A(ω)]ẍ + C(ω)ẋ + Df(ẋ) + K(x)x =

q(t,x,ẋ) (1)

式中: M 一质量和惯性矩阵; A 一附加质量矩阵; C 一辐射阻尼矩阵; D 一非线性阻尼矩阵; f—x 的向量函数; K 一恢复矩阵; x, ẋ, ẍ 一物体位移、速度与加速度; q 一激振力(包括波浪载荷、系泊线提供的非线性恢复力和风轮上的气动载荷)。

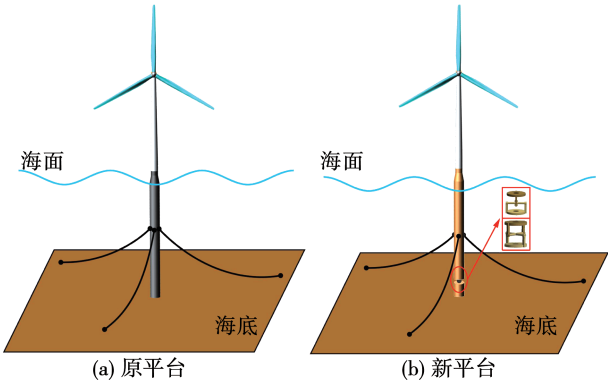


图 1 漂浮式风力机平台模型

Fig.1 Model of floating wind turbine platforms

2.2 湍流风载荷

因风切变、热效应及空气流动等原因,实际海洋环境中风场为具有一定湍流强度的湍流风,风载荷计算时通常采用湍流风场湍流特性。基于 IEC 中定义的 Kaimal 湍流风谱模型生成风场,其功率密度谱可表示为^[15]:

S(f) = (4σ²Lᵢ/ū_hub) / (1 + 6fLᵢ/ū_hub)⁵/³ (2)

式中: i 一湍流风在 x、y、z 方向上分量, m/s; L 一湍流尺寸参数,随机舱高度变化; σ 一风速标准差; ū_hub 一风力机轮毂处平均风速, m/s; f 一频率, Hz。

基于 Kaimal 风谱,以 NREL 5 MW 风力机轮毂中心为参考点,平均风速 28 m/s,湍流风场中 600 s 风速时域变化如图 2 所示。

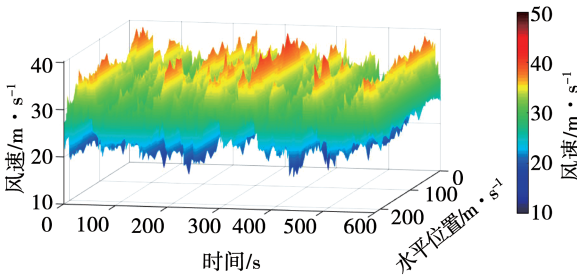


图 2 湍流风场

Fig.2 Turbulent wind field

风载荷的求解基于叶素动量理论,其求解过程简单高效,可满足漂浮式风力机平台动态响应分析时的瞬时载荷需求,且该方法准确性已有学者通过模型试验及模拟证明^[16]。叶素动量理论中,将风力机叶片分为若干相互独立的叶素,先分别求解各叶素上诱导因子和诱导速度,再求出叶素上各气动参数,进而求出风载荷。

2.3 波浪载荷

在海洋工程数值计算中,多用波浪谱描述波浪特征,即通过波浪谱描述振幅、频率及相位不规则波叠加表示波浪模型^[17]。不规则波的生成基于 P-M 谱,谱函数 $S(\omega)$ 与波高 $\eta(t)$ 可表示为:

$$S(\omega) = 4\pi^3 \frac{H_s^2}{T_z^4} \frac{1}{\omega^5} \exp\left(-\frac{16\pi^3}{T_z^4} \frac{1}{\omega^4}\right) \quad (3)$$

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k t + \varepsilon_k) \quad (4)$$

式中: H_s —有义波高, m; T_z —跨零周期, s; ω —相位角, rad; A_k —第 k 个波的波幅, m; ε_k —初相, rad; t —时间, s。

当有义波高为 7.3 m, 跨零周期 7.8 s 时, 波高时历曲线及其频谱特性曲线如图 3 所示。

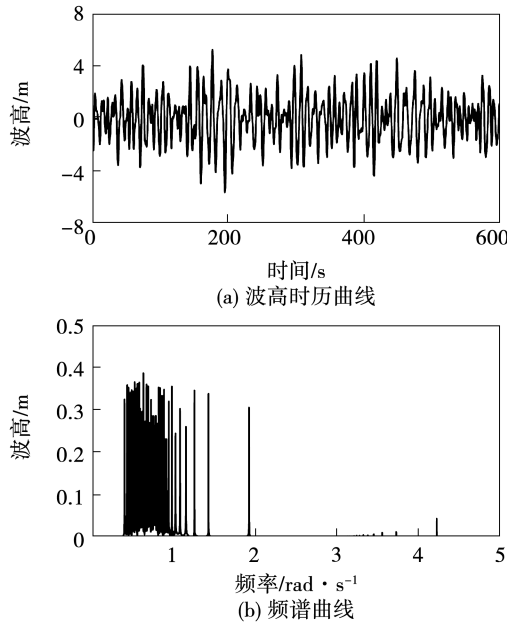


图3 波高时历与频谱特性曲线

Fig. 3 Wave height-time and frequency spectrum characteristic curves

因漂浮式平台为大尺度海洋工程结构,其对入射波浪场产生的影响不可忽略,故本文波浪载荷计

算基于辐射/绕射理论。载荷计算中,将漂浮式平台所处流域划分为海底、波浪自由表面及漂浮式平台湿表面,并假定流体为不可压无黏势流,通过各边界条件表示出速度势函数 ϕ ,进而解出平台所受波浪载荷。

3 平台运动自由度

风波作用下,漂浮式风力机平台在海上运动主要有 6 个自由度,包括沿着各轴的平动位移(纵荡、横荡及垂荡)与绕着各轴的转动偏转角(横摇、纵摇及艏摇),如图 4 所示。

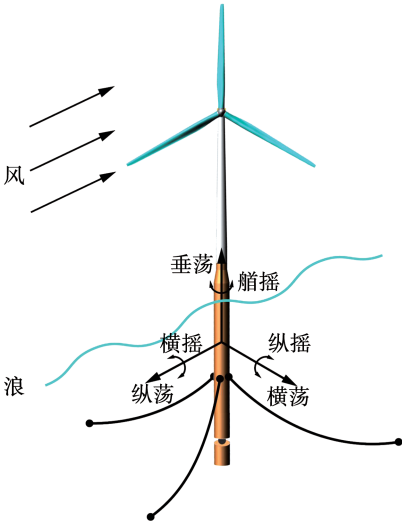


图4 平台运动自由度

Fig. 4 Degree of freedom of platform motion

4 结果与分析

4.1 频域分析

4.1.1 RAO 频域响应

幅值响应算子 (Response Amplitude Operator, RAO) 是平台在单位波幅规则波作用下,各位置参数的传递函数,可直观表示平台在不同周期波浪作用下响应^[18],可表示为:

$$RAO = \eta_i / \xi \quad (5)$$

式中: η_i —第 i 个自由度上平台的运动幅值, m; ξ —对应波浪频率下波高幅值, m。

在单位波幅规则波作用下,原平台与新平台在纵荡、垂荡及纵摇自由度上随波浪作用频率增大 RAO 响应如图 5 所示。为验证结果准确性,将原平台模拟结果与文献[19]中实验值对比。实验中通

过控制造波板运动来生成波浪,并保持计算中海面条件、系泊约束与实验一致,二者结果对比如图 5 所示。

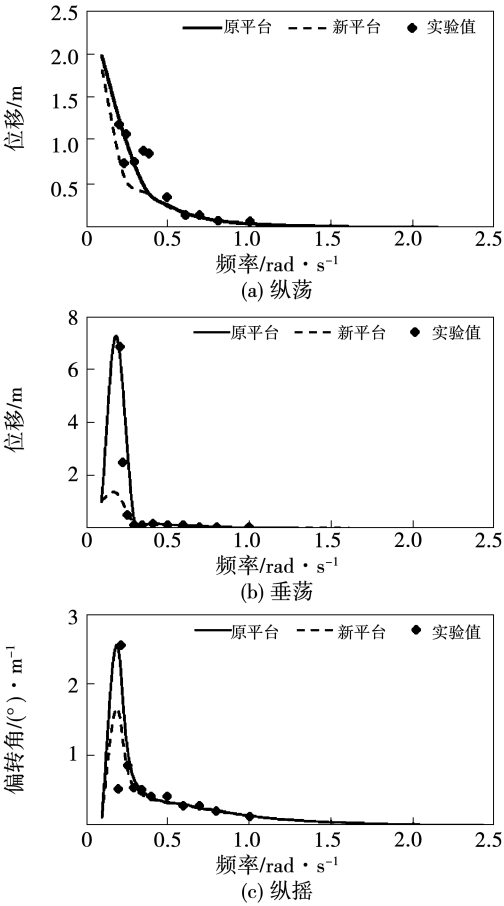


图 5 平台频域 RAO

Fig.5 Platform RAO in frequency domain

由图 5 可知,随波浪频率增大,原平台在纵荡、垂荡及纵摇自由度上响应变化趋势与实验值趋于一致,且大小基本吻合,这证实了本次计算结果准确可靠。由原平台与新平台对比可知,单位波幅波浪激励下,新平台 RAO 响应变化趋势与原平台相似,除纵荡一直随波浪频率增大而降低外均先增加后减小,最终趋于 0,响应主要集中于 $f < 2.5$ rad/s 区域。其中,两平台纵荡 RAO 相近,仅在 $f < 0.5$ rad/s 区域新平台较原平台 RAO 略小;在垂荡与纵摇自由度上,新平台较原平台 RAO 明显减小。两平台在波浪频率 0.19 rad/s 处有垂荡与纵摇 RAO 峰值 7.3 m、2.6° 和 1.4 m、1.7°,新平台较原平台 RAO 分别降低了 80.1% 与 34.6%。

4.1.2 附加质量

与海上固定结构不同,因漂浮式平台在海中始终处于变加速运动状态,而运动中的物体在加速或减速运动时因使附近流体动能改变会受到附加惯性力的作用^[20]。在平台运动过程中,附加惯性力有阻碍平台运动,减小平台运动响应的作用,其大小与平台附加质量成正比^[21]。附加质量越大,表示平台运动受到附加惯性力的阻力越大,在波浪作用下运动越小,即平台抗风浪能力越强。原平台与新平台在纵荡、垂荡及纵摇 3 个自由度上附加质量曲线如图 6 所示。

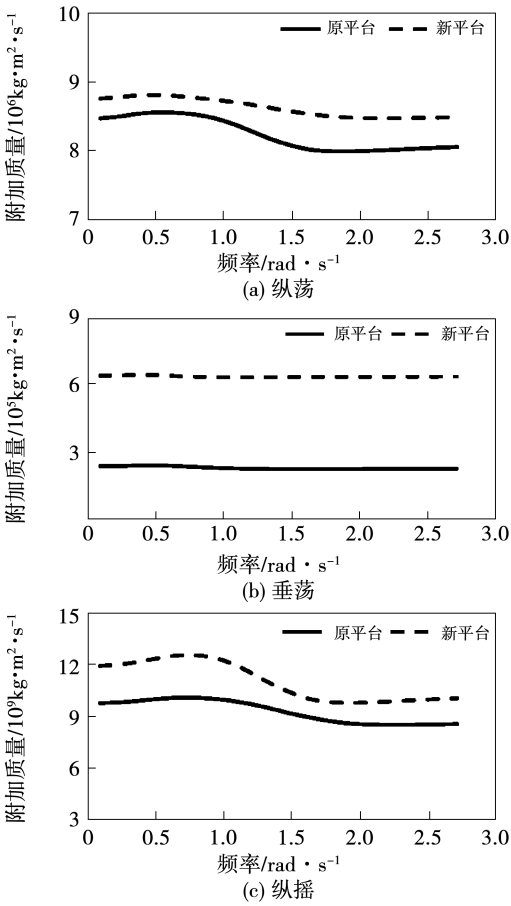


图 6 平台附加质量

Fig.6 Added mass of platform

由图 6 可知,除垂荡附加质量几乎不受波浪频率影响外,纵荡与纵摇附加质量随频率增加先增大再减小,最终趋于稳定。其中,平台纵摇附加质量明显高于纵荡和垂荡,这是因为漂浮式平台的转动附加质量会远远大于其平动附加质量,一般相差一个数量级以上。两种平台附加质量对比可知,新平台纵荡、垂荡及纵摇附加质量均明显增加,较原平台分

别平均增大了4.6%、174.7%及18.6%。附加质量增大表明新平台会比原平台受到更大的附加惯性力,即环境载荷作用下平台运动时受到阻碍更强,有更优的抗风波能力。

4.2 时域分析

正常工作中,风力机在偏航控制下一般正面对来流风以实现最大风能利用率。为验证新平台在恶劣海况下抗风波能力,设置风波同向垂直于风轮平面入射。设置仿真时间为6 000 s,时间步长0.1 s。此外,因风力机启动过程平台会产生较大的、不稳定的响应,不能用于后续分析,故去除前1 000 s平台运动数据,截取1 000~6 000 s时间内平台动态响应数据进行分析。风波同向入射时,漂浮式平台在纵荡、垂荡及纵摇自由度上响应较大,故对平台响应分析主要从这3个自由度进行。图7为风波作用下平台响应时历曲线,图8为其响应统计值。

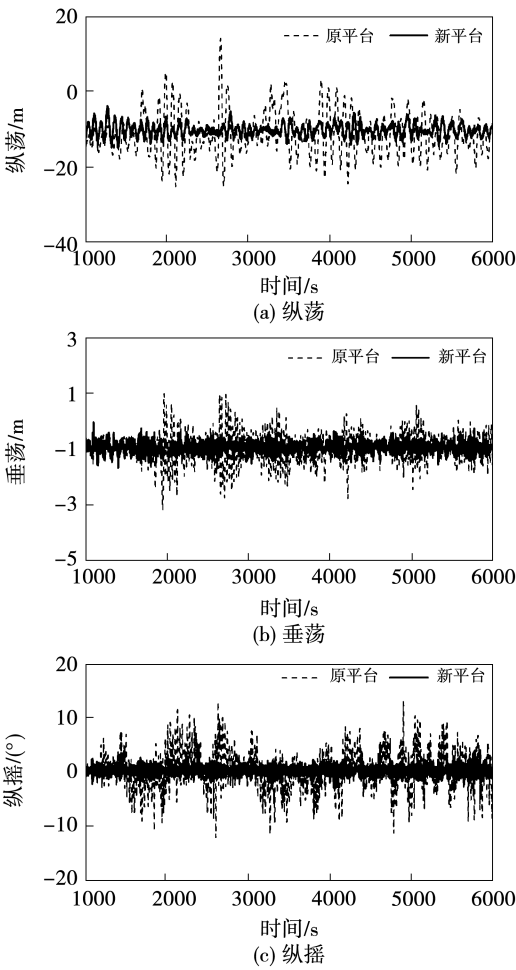


图7 平台时域响应

Fig. 7 Platform response in time domain

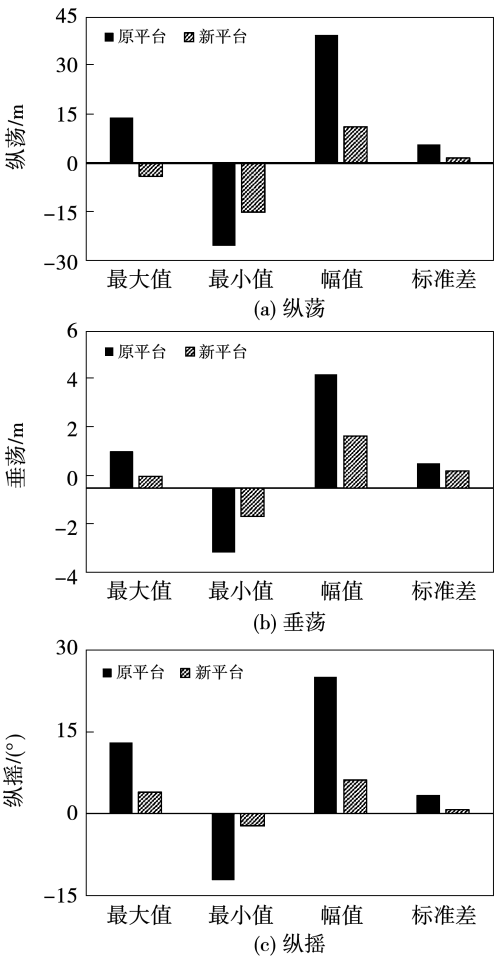


图8 平台时域响应统计值

Fig. 8 Statistics of platform response in time domain

平台纵向运动产生的纵荡位移会加剧漂浮式风力机风轮入流风速变化,致使风力机功率和叶片载荷波动增大。在纵荡位移长时间作用下易产生叶片疲劳和结构损伤;纵摇则会直接导致风轮有效受风面积减小,降低风力机发电功率;因垂荡与纵摇间存在耦合,大幅垂荡运动会因初稳性高改变而加剧纵摇响应,引起 Mathieu 失稳问题,严重时会导致平台发生倾覆^[22-23]。由图7和图8中原平台与新平台在纵荡、垂荡及纵摇3个自由度上时历曲线与对比图可知,新平台较原平台稳定性明显提升,响应减小。在纵荡自由度上,新平台响应始终小于原平台,其最大响应幅值与标准差为11.0 m、1.7 m,较原平台(39.2 m、5.8 m)减小了71.9%与70.7%;在垂荡自由度上,新平台在1 000~2 000 s间较原平台响应略大,在2 000~6 000 s明显减小。且由图7(b)可看出,新平台除响应较原平台小外,其幅值随时间变化波动也更小。较之原平台最大响应幅值(4.2 m)与标准差(0.5 m),新平台最大响应幅值(1.6 m)与标准

差(0.2 m)分别降低了 61.9% 与 60%;在纵摇自由度上,新平台响应始终小于原平台,且波动幅度也更小。新平台最大响应幅值(6.1°)与标准差(0.8°)较之原平台(24.9° 、 3.5°)分别降低了 75.5% 与 77.1%。综上,虽新平台在垂荡响应开始阶段略大,但随平台运动稳定后新平台在纵荡、垂荡及纵摇自由度上较原平台均表现出更好的稳定性。

4.3 功率谱分析

为进一步分析平台动态响应,对平台在纵荡、垂荡及纵摇 3 个自由度上时域数据处理得其在各自由度功率谱响应,以研究不同频率分量对平台响应的贡献。平台响应谱如图 9 所示。

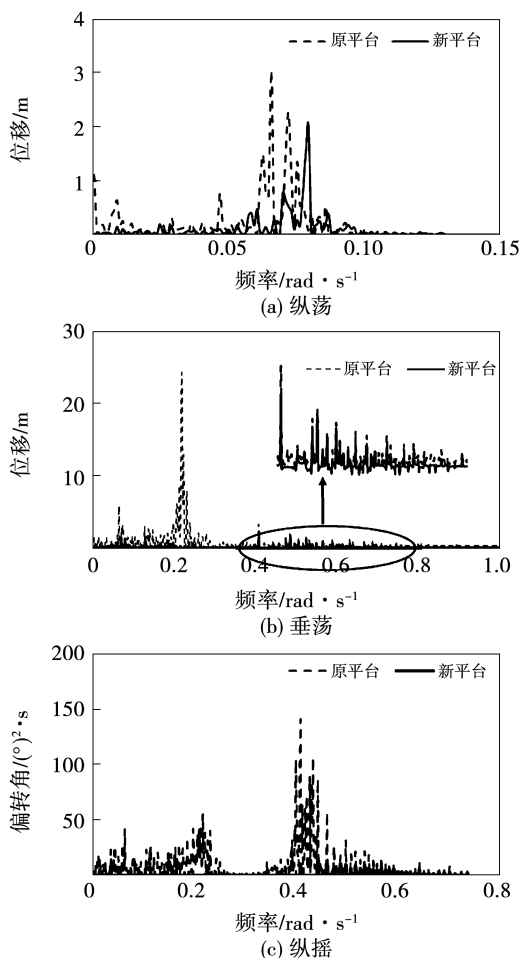


图9 平台响应谱

Fig.9 Platform response spectrum

由图 9 可知,Spar 平台与新平台响应谱主要集中于 $0 \sim 1.00$ rad/s 频段,且垂荡响应频段最广,纵摇次之,纵荡最小(主要集中于 0.15 rad/s 以内)。通过新平台与原平台对比可知,在纵荡自由度上,当频率小于 0.08 rad/s 时,新平台响应始终小于原平台。在 $0.08 \sim 0.085$ rad/s 区间新平台较原平台响

应略大,响应峰值为 $2\,017.41\text{ m}^2/\text{s}$ 。之后新平台响应迅速降低,始终小于原平台。总的来说,新平台较原平台纵荡响应明显减小,且响应分布更均匀。此外,新平台响应剧烈频段较原平台明显更窄,波浪激励下更不易产生较大响应;在垂荡自由度上,原平台响应主要集中于 $0.20 \sim 0.25$ rad/s,响应峰值为 $24.30\text{ m}^2/\text{s}$ 。新平台响应较分散,无明显集中现象,响应主要集中于 $0.40 \sim 0.80$ rad/s 间,且始终小于原平台。在纵摇自由度上,原平台响应在 0.20 rad/s 与 0.40 rad/s 附近存在两处集中区,响应峰值分别为 $55.20\text{ (}^\circ)^2/\text{s}$ 与 $139.50\text{ (}^\circ)^2/\text{s}$ 。新平台响应无明显集中现象,仅在大于 0.40 rad/s 之后响应较明显,且始终小于原平台。此外,新平台与原平台响应均存在宽频与散频,这主要是由于波浪载荷与湍流风载荷主要作用频率不同,宽频主要是风载荷作用下的低频响应引起的,散频主要由波浪载荷作用下的波频响应引起。综上可知,环境载荷作用下新平台在纵荡、垂荡及纵摇 3 个自由度上较原平台功率谱响应更小,稳定性更优。

5 结 论

提出一种新型铰接式平台,基于叶素动量理论与辐射绕射方法,对比分析了新平台与 Spar 平台在风波联合作用下时频响应特性,得出结论如下:

(1) 频域 RAO 分析中,新平台、原平台及实验值均集中于 $f < 2.50$ rad/s 区域,且纵荡、垂荡及纵摇响应随波浪入射频率增大变化趋势基本一致,但新平台响应均较小。

(2) 附加质量分析表明,新平台较原平台在纵荡、垂荡及纵摇自由度上附加质量增大,新平台抑制摇荡能力更佳。

(3) 时域分析中,新平台在纵荡、垂荡及纵摇自由度上响应较原平台均明显降低,有更小的响应幅值与标准差,反映出新平台较原平台更优的摇荡稳定性。

(4) 功率谱分析中,新平台与原平台纵荡响应主要集中于 $0.05 \sim 0.10$ rad/s,且新平台响应在整个频段上分布更均匀;在垂荡与纵摇自由度上,新平台无原平台的响应集中现象,对波浪频率变化更不敏感;此外,新平台响应谱峰值与原平台相比均较小,有更优越的波频性能。

参考文献:

[1] ZHANG L,WEI S,MADJID K,et al. Second-order hydrodynamic

- effects on the response of three semisubmersible floating offshore wind turbines[J]. *Ocean Engineering*,2020,207: 107371.
- [2] 王 博,丁勤卫,李 春,等. 极限海况下 Spar 平台漂浮式风电场平台动态响应研究[J]. *热能动力工程*,2019,34(9): 164–172.
- WANG Bo, DING Qin-wei, LI Chun, et al. Dynamic response of floating wind farm platform of Spar-type offshore platform under extreme sea conditions[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*,2019,34(9): 164–172.
- [3] 王 博,丁勤卫,李 春,等. 漂浮式风力机 Spar 平台抑制摇荡运动研究[J]. *热能动力工程*,2020,35(8): 111–119.
- WANG Bo, DING Qin-wei, LI Chun, et al. Research on suppressing swinging motion of Spar platform floating wind turbine[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*,2020,35(8): 111–119.
- [4] 张 亮,吴海涛,荆丰梅,等. 海上漂浮式风力机研究进展及发展趋势[J]. *海洋技术*,2010,29(4): 122–126.
- ZHANG Liang, WU Hai-tao, JIN Feng-mei, et al. Research progress and development trend of offshore floating wind turbine[J]. *Ocean Technology*,2010,29(4): 122–126.
- [5] DRISCOLL F, JONKMAN J, ROBERTSON A, et al. Validation of a FAST model of the statoil-hywind demo floating wind turbine[J]. *Energy Procedia*,2016,94: 3–19.
- [6] 丁勤卫,李 春,王东华,等. 螺旋侧板对漂浮式风力机平台动态响应的影响[J]. *动力工程学报*,2016,36(8): 629–637.
- DING Qin-wei, LI Chun, WANG Dong-hua, et al. Effects of helical strake on dynamic response of the platform for floating wind turbines[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*,2016,36(8): 629–637.
- [7] 叶 舟,成 欣,周国龙,等. 漂浮式风力机平台动态响应的优化方法探讨[J]. *振动与冲击*,2016,35(3): 20–26.
- YE Zhou, CHENG Xin, ZHOU Guo-long, et al. Optimization method for dynamic responses of floating offshore wind turbines[J]. *Journal of Vibration and Shock*,2016,35(3): 20–26.
- [8] 周红杰,李 春,丁勤卫,等. 垂荡板对浮式风力机 Spar 平台的动态响应的影响[J]. *能源工程*,2017,4(5): 23–29,37.
- ZHOU Hong-jie, LI Chun, DING Qin-wei, et al. Influence of heave plate on hydrodynamic characteristics of floating wind turbine Spar platform[J]. *Energy Engineering*,2017,4(5): 23–29,37.
- [9] MITRA A, SARKAR S, CHAKRABORTY A, et al. Sway vibration control of floating horizontal axis wind turbine by modified spar-torus combination[J]. *Ocean Engineering*,2021,219: 108232.
- [10] OIKONOMOU C L G, GOMES R P F, GATO L M C, et al. On the dynamics of an array of spar-buoy oscillating water column devices with inter-body mooring connections[J]. *Renewable Energy*,2020,148: 309–325.
- [11] MANIKANDAN R, NILANJAN S. Modeling and PI control of spar offshore floating wind turbine[J]. *IFAC Papers Online*,2016,49(1): 783–788.
- [12] JONKMAN J, MATHA D. Quantitative comparison of the responses of three floating platforms[J]. *Australian Historical Studies*,2010,32(3): 351–355.
- [13] JONKMAN J, MATHA. Dynamics of offshore floating wind turbines-analysis of three concepts[J]. *Wind Energy*,2011,14(4): 557–569.
- [14] LI Y, ZHU Q, LIU L, et al. Transient response of a Spar-type floating offshore wind turbine with fractured mooring lines[J]. *Renewable Energy*,2018,122: 576–588.
- [15] 袁全勇,李 春,杨 阳,等. 基于分形学的湍流风谱特性对比研究[J]. *热能动力工程*,2017,32(5): 118–124.
- YUAN Quan-yong, LI Chun, YANG Yang, et al. A comparative study of turbulent wind spectrum characteristics based on fractal theory[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*,2017,32(5): 118–124.
- [16] LI L, HU Z, WANG J, et al. Development and validation of an aero-hydro simulation code for offshore floating wind turbine[J]. *Journal of Ocean Wind Energy*,2015,2(1): 1–11.
- [17] 丁勤卫,李 春,王东华,等. 漂浮式风力机的结构动力学响应[J]. *水资源与水工程学报*,2015,26(4): 169–176.
- DING Qin-wei, LI Chun, WANG Dong-hua, et al. Response of structural dynamics of floating wind turbine[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*,2015,26(4): 169–176.
- [18] 黄致谦,丁勤卫,李 春. 新型垂荡板对漂浮式风力机半潜式平台垂荡运动的抑制效果研究[J]. *动力工程学报*,2019,39(5): 402–408.
- HUANG Zhi-qian, DING Qin-wei, LI Chun. Research on heave motion inhibition for the semi-submersible platform of floating wind turbines with new heave plates[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*,2019,39(5): 402–408.
- [19] KORDI. Concept design and analysis of floating wind turbine platforms (SHI-KORDI joint research) [R]. Absan, Korea; Korea Ocean Research and Development Institute.
- [20] 夏国泽. 船舶流体力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社,2003.
- XIA Guo-ze. *Ship hydrodynamics* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press,2003.
- [21] 黄致谦,丁勤卫,李 春,等. 新型漂浮式风力机半潜平台抑制摇荡运动设计研究[J]. *中国电机工程学报*,2018,38(24): 185–193,346.
- HUANG Zhi-qian, DING Qin-wei, LI Chun, et al. Design and research on suppression swaying motion of the new semi-submersible platform of floating wind turbine [J]. *Proceedings of the CSEE*,2018,38(24): 185–193,346.
- [22] 赵晶瑞,唐友刚,王文杰. 传统 Spar 平台参数激励 Mathieu 不稳定性的研究[J]. *工程力学*,2010,27(3): 222–227.
- ZHAO Jin-rui, TANG You-gang, WANG Wen-jie. Study on the parametrically excited Mathieu instability of a classic Spar platform[J]. *Engineering Mechanics*,2010,27(3): 222–227.
- [23] 吴京泰. 10 MW 浮式风机气动性能的 CFD 流固耦合模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2019.
- WU Jing-tai. CFD simulation with fluid-structure interaction for aerodynamic performance of a 10 MW floating off-shore wind turbine [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2019.