文章编号：1007−7294(2026)08−1308−13

波谱特征对半潜式浮式风机动力响应的影响

高　翔，胡中波，蒋建红，蒋跃光，张　冲，周　欢，赵明仁
（中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，成都 610072）

摘要：基于 10 MW 半潜式浮式风机基础 OO-Star，本文分析了入射波波谱特征对浮式风机动力特性的影响。基于 ANSYS/AQWA 软件建立了漂浮式风机水动力分析模型，采用莫里森方程和势流理论计算水动力载荷。在保持入射波高和谱峰周期不变的条件下，分析了波谱特征对浮式平台水动力特性的影响。结果表明：浮式风机的纵荡和纵摇响应幅值随着波浪谱宽的增大而显著增加，最大响应幅值可增大 50% 以上；纵荡和纵摇运动分布在更大的位移区间，运动响应的变化范围也相应增大。浮体垂荡响应的各个统计值随谱变化不大，表明波浪谱宽变化对垂荡运动的影响较小。随着谱宽的增大，锚链张力显著增加且变化范围增大，可能加剧系泊系统的疲劳损伤。

关键词：海上风电；漂浮式风机；半潜式；波谱特征；动力响应
中图分类号：P751　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.3969/j.issn.1007−7294.2026.08.008

Effects of wave spectrum characteristics on the dynamic response of semi-submersible floating wind turbine

GAO Xiang, *HU Zhong−bo*, *JIANG Jian−hong*, *JIANG Yue−guang*,
ZHANG Chong, *ZHOU Huan*, *ZHAO Ming−ren*
(POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

Abstract: Based on the 10 MW semi-submersible floating wind turbine foundation OO-Star, this study investigates the influence of wave spectrum characteristics on the dynamic behavior of floating wind turbines. A hydrodynamic analysis model of the floating wind turbine is established in ANSYS/AQWA, and hydrodynamic loads are calculated using Morison's equation and potential-flow theory. Under identical incident wave height and peak period conditions, the effects of wave spectrum bandwidth on the hydrodynamic performance of the floating platform are analyzed. The surge and pitch responses of the turbine increase significantly with broader wave spectra, with peak amplitudes increasing by over 50%. Meanwhile, surge and pitch motions are distributed over a wider displacement range, indicating greater variability in motion response. Statistical values for heave response show little variation across different spectral bandwidths, suggesting a limited influence of spectrum width on heave motion. As spectral bandwidth increases, mooring line tension rises markedly and exhibits greater variation, potentially, exacerbating fatigue damage in the mooring system.

Key words: offshore wind power; floating wind turbine; semi-submersible; wave spectrum characteristics; dynamic response

收稿日期：2026−03−02
基金项目：中国电建集团成都院自立项目(P66525; P48521)
作者简介：高　翔(1995–)，男，博士，工程师，通讯作者，E-mail: Gaox95@126.com。

0 引　言

风能作为一种清洁、可再生且蕴藏量巨大的能源，在缓解能源危机和应对气候变化方面扮演着日益关键的角色。近年来，随着陆上风电资源开发逐渐趋于饱和，海上风电凭借其风速高、稳定性好等显著优势，成为风电产业发展的新方向。全球风能理事会（GWEC）统计数据显示，2024 年全球海上风电新增装机容量达到 8.0 GW，累计装机容量突破 83.2 GW，且这一增长趋势在未来仍将持续[1]。

当水深超过 60 m 时，漂浮式基础在经济和技术可行性方面逐渐显现优势[2]。全球范围内，约 80% 的海上风资源分布在超过 60 m 水深的深远海区域，这些区域风资源更为丰富且稳定，为大规模开发海上风电提供了广阔空间[3]。因此，发展深远海漂浮式风电成为必然趋势。目前，漂浮式海上风机基础主要分为立柱式、半潜式、驳船式和张力腿式四种类型[4]。在多种漂浮式风电平台类型中，半潜式漂浮式风电平台因其水深适用范围广、结构稳定性好和建造运输方便等独特优势受到广泛关注[5]。众多学者针对半潜式浮式风机平台的水动力特性开展了研究。最为典型的半潜式方案是由国际能源署（IEA）和 DeepCwind 联盟共同建立的适用于 5 MW 上部风机的海上漂浮风机基准模型 OC4-DeepCwind[6]，用于验证数值工具、支撑设计和控制策略。Bayati 等[7] 系统分析了不同水深对 OC4 半潜式风机势流解的影响，发现传统势流模型在浅水区会显著高估浮体的附加质量和阻尼，并基于此提出了一种基于水深修正的势流修正方法，提高了浮式风机耦合动力响应预测精度。基于对 OC4 半潜式浮式平台结构动力特性的研究，学者们陆续提出了多种新型半潜式浮式平台设计方案。刘志成等[8] 分析了三浮筒式 OC4 半潜式风机基础与四浮筒式浮式基础的水动力性能差异，认为四浮筒式浮式基础具有良好的水动力性能。Luan 等[9] 提出了一种针对 5 MW 风机的无斜撑半潜式浮式基础设计方案，显著降低结构的疲劳风险与建造复杂度，系统评估了其在极端海况下的运动响应、系泊张力与结构强度。

随着海上风电开发走向深远海，工程建设成本逐渐上升，风电机组大型化是降低开发成本的一个重要途径。海上风电机组大型化会对浮式平台结构设计产生诸多特殊影响，包括结构强度与稳定性要求更高，水动力性能优化需求增加，耦合效应更加显著等。挪威 Olav Olsen 公司基于 DTU10 MW 风机，研发了一款钢筋混凝土半潜式浮式风机基础 OO-Star[10]。施伟等[11] 建立了 OO-Star 半潜式浮式风机水动力−锚泊系统耦合数值模型，对平台和锚泊系统在正常和极限海况下的运动特性和动力学响应进行了对比分析，进而对平台的动力性能进行了评估。赵志新等[12] 采用 FAST 模型对 10 MW 风机在典型海况下进行了全耦合动力分析，发现在极端海况下，二阶波浪力对平台运动响应、结构荷载和疲劳破坏均产生显著影响。

波浪谱是一种从频域角度来描述波浪的重要方法[13]，尤其在台风等极端海洋环境条件下，波浪谱会发生显著变化[14−15]。然而现有研究少有将波谱特征作为半潜式浮式风机水动力特性研究的影响因素，这可能导致无法准确评估极端天气条件下波浪对浮式平台运动响应和系泊系统受力的影响。本研究以 OO-Star 半潜浮式风机基础作为研究对象，分析了不同波谱特征条件下的浮式平台的运动响应和系泊系统受力情况，揭示了半潜式风机在不同波谱特征条件下的动力特性规律，为极端环境条件下半潜式浮体结构设计和优化提供参考。

1 理论背景

1.1 莫里森方程

莫里森方程在海上工程小直径构件的水动力荷载计算中应用广泛[16]，其认为当构件直径 D 与波长 L 之比 $D/L \leqslant 0.15$ 时，结构的存在不会影响周围流场的变化。波浪对结构产生的波浪力主要由两部分组成，一部分为未受扰动的速度场产生的速度力 F_{d}（也称为拖曳力），当定常均匀流以流速 u 绕过圆柱体时，会在沿流动方向上产生作用在圆柱体上的力。对于高度为 ΔZ 上的速度力可由下式求得

$$F_{\mathrm{d}} = C_{\mathrm{d}}\frac{\rho}{2}Du|u|\Delta Z \tag{1}$$

其中,ρ 为水体密度,u 为水质点速度,C_{d} 为拖曳力系数。

另一部分为波浪加速度场引起的加速度力 F_i。由于流场中柱体的存在,柱体所占空间的水体必须由原处于运动中的波浪变为静止不动,进而产生作用于柱体上的惯性力。该惯性力等于该部分水体质量与加速度的乘积。另外,由于柱体运动带动附近部分水体也随之运动,该部分水体质量被称为附加质量。因此,柱体所受惯性力对应的有效质量等于柱体排开水的质量与附加质量之和。其产生的加速度力计算公式为

$$F_i = (1+C_{\mathrm{m}})\rho\Delta V\frac{\partial u}{\partial t} \tag{2}$$

其中,C_{m} 为附加质量系数,ΔV 为柱体体积。

对于海上漂浮式基础,还需要考虑浮体运动,由莫里森方程计算得到高度为 ΔZ 的柱体上总波浪力 F 为

$$F = F_i + F_{\mathrm{d}} = (1+C_{\mathrm{m}})\rho\frac{\pi D^2}{4}\frac{\partial u_{\mathrm{r}}}{\partial t}\Delta Z + C_{\mathrm{d}}\frac{\rho}{2}Du_{\mathrm{r}}|u_{\mathrm{r}}|\Delta Z + \rho\frac{\pi D^2}{4}\frac{\partial u_{\mathrm{w}}}{\partial t}\Delta Z \tag{3}$$

其中,u_{r} 为流体相对于浮式基础运动的速度,u_{w} 为水质点运动速度。C_{m} 和 C_{d} 是与雷诺数 Re 和无量纲常数 KC 数相关的经验系数。

1.2 势流理论

对于大直径构件,结构的存在会影响周围流场的变化,其波浪荷载的计算理论主要采用三维势流理论。势流理论假定水体为不可压缩、无黏、无旋的理想流体,波浪做有势运动,并采用线性化的自由水面边界条件进行求解。当浮式平台在静水中运动时,流场中一阶速度势$\phi(x,y,z,t)$满足拉普拉斯方程,表达式为

$$\nabla^2\phi(x,y,z,t) = 0 \tag{4}$$

边界条件为:自由表面边界条件,海底边界条件,物面边界条件和远场辐射条件。采用线性迭加原理,可将速度势分解为入射势ϕ^{i},绕射势ϕ^{d}和辐射势ϕ^{r},采用格林函数对上述速度势进行求解。进而可以计算得到作用在浮体上的一阶波浪激励力 F 为

$$F = F_{\mathrm{I}} + F_{\mathrm{D}} = \rho i\omega\iint_{S_0}\phi_i n_j \mathrm{d}S + \rho i\omega\iint_{S_0}\phi_{\mathrm{d}} n_j \mathrm{d}S \tag{5}$$

由表达式可知,一阶波浪激励力由两部分组成,其中第一部分为入射势产生的波浪荷载,称之为佛汝德−克雷洛夫力(F-K 力);第二部分为绕射势引起的波浪力,称为波浪绕射力。

1.3 波浪谱模型

海洋中的波浪虽在时域上表现复杂,但从频域来看,其波谱型式具有相对一致性。波浪频谱可以有效地给出波浪能量及其在频域中的分布情况,这对周期性波浪荷载的描述至关重要[17]。Hasselmann 等[18] 开展了“联合北海波浪计划”,根据测得的 2500 组实测波浪谱数据,提出了适用于成长阶段和充分成长阶段的 JONSWAP 谱,引入了谱型参数—谱峰升高因子 γ 和谱峰宽度参数 σ,用于修正谱峰形状,表达式为

$$S(f) = \beta_{\mathrm{J}}H_{\mathrm{s}}^2T_{\mathrm{p}}^{-4}G(f)f^{-5}\exp\left(-1.25T_{\mathrm{p}}^{-4}f^{-4}\right) \tag{6}$$

其中,系数β_{J}和谱峰升高项 $G(f)$的表达式为

$$\beta_{\mathrm{J}} = \frac{0.062\,38}{0.23+0.0336\gamma-0.185(1.9+\gamma)^{-1}}(1.094-0.019\,15\ln\gamma) \tag{7}$$

$$G(f) = \gamma^{\exp\left(-(T_{\mathrm{p}}f-1)^2/2\sigma^2\right)} \tag{8}$$

其中,γ 为谱峰升高因子,用于调节谱峰高度;σ 为峰形参数,当 $f<f_{\mathrm{p}}$ 时,σ = 0.07;当 $f>f_{\mathrm{p}}$ 时,σ = 0.09。

2 浮式基础参数

OO-Star 半潜浮式风机基础下部为星形浮桥，浮桥底部设有垂荡板，可有效抑制浮体的垂荡运动响应。浮桥上安装有一根中央立柱和三根外侧立柱。所有立柱的上部均为圆柱形，下部为锥形。主要材料为后张预应力混凝土，相比于钢结构，能够有效降低生产与安装成本。浮式平台结构整体和主尺度参数如图 1 所示，浮式风机系统整体(包含上部风电机组、塔筒和浮体平台)的动力特征参数见表 1。

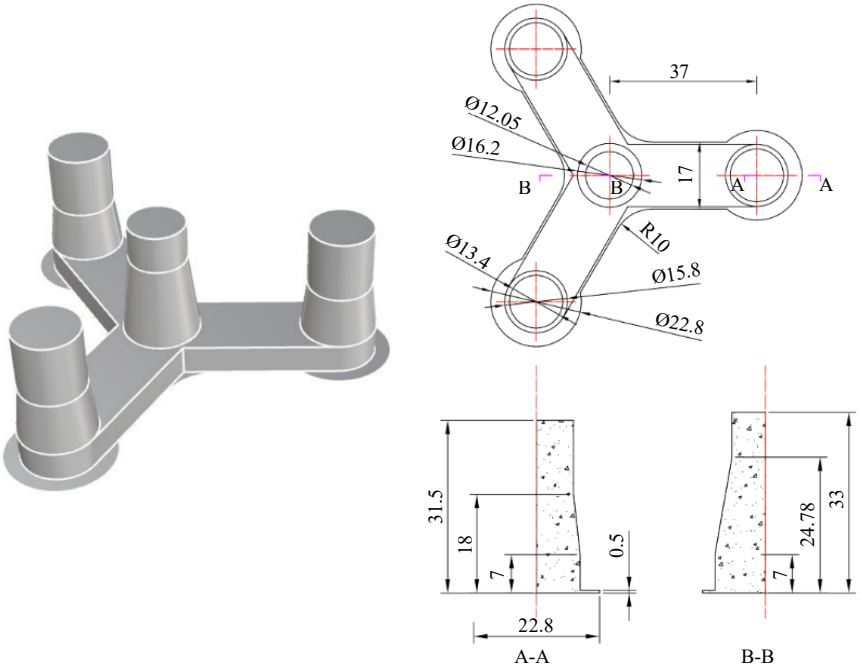


图 1 OO-Star 半潜式浮式平台结构与主要尺度参数

Fig.1 Sketch and main parameters of OO-Star semisubmersible floating platform

表 1 OO-Star 浮式风机系统整体动力特征参数

Tab.1 Dynamic characteristic parameters of OO-Star floating system

参数	数值	参数	数值
吃水/m	22.0	系统浮心高度坐标	(0, 0, −14.236)
浮筒角度/°	120	横摇转动惯量I_{xx}/kg·m^2	2.67×10^{10}
系统质量/kg	2.364×10^{7}	纵摇转动惯量I_{yy}/kg·m^2	2.66×10^{10}
排水体积/m^3	2.3509×10^{4}	艏摇转动惯量I_{zz}/kg·m^2	1.64×10^{10}
系统重心坐标/m	(−0.027, 0, −7.94)		

浮式平台环境水深为 130.0 m，采用 3 条锚链系泊。研究表明，对于悬链式系泊系统，在锚链上适当配置压载块有助于减小锚链张力[19]。在每根锚链上布置 1 个压载块，锚链及压载块参数如表 2 所示，系泊系统布置如图 2 所示。

3 浮式平台水动力特性

水动力特性能够反映浮体在波浪作用下的运动规律，分析浮式平台在不同频率和波向波浪作用下产生的运动响应情况，使浮体自振周期避开主要波浪周期范围，从而防止发生共振。采用 ANSYS/AQWA 软件建立风机浮式平台水动力分析模型，选择波浪频率范围为 0.01~0.4 Hz，波浪方向为−180°~180°，波向间隔为 30°，计算坐标和波浪方向如图 3 所示。

表 2 系泊系统及压载块参数

Tab.2 Mooring system properties and clump mass parameters

参数	数值
锚链数量/根	3
单位长度锚链质量/（$kg\cdot m^{-1}$）	375.38
轴向刚度EA/N	1.506×10^{9}
附加质量系数	0.8
拖曳力系数	2.0
锚链等效直径/m	0.246
上部锚链长度/m	118
下部锚链长度/m	585
系泊半径/m	691.0
导缆孔高度/m	9.5
压载块在水中的等效质量/kg	50 000

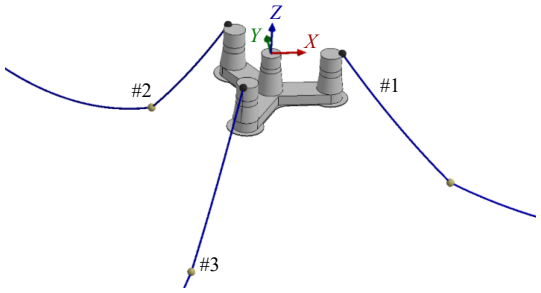


图 2 OO-Star 半潜式浮式平台系泊系统布置

Fig.2 Mooring system of OO-Star semisubmersible floating platform

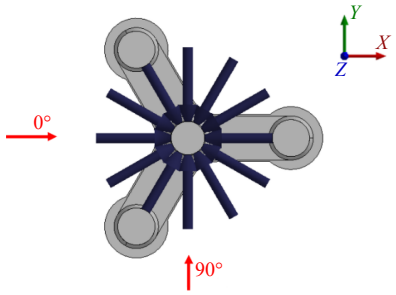
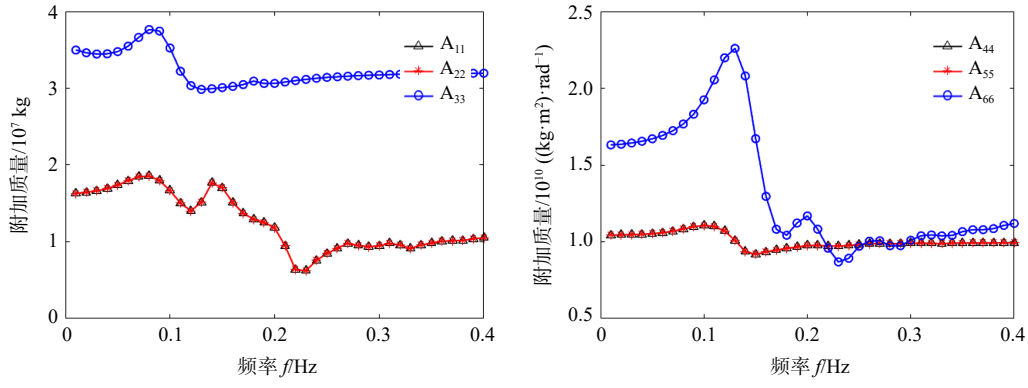


图 3 浮式平台坐标系和波浪方向设置

Fig.3 Coordinate system and wave direction settings of floating platform

3.1 频域水动力分析

浮体 6 个自由度运动的附加质量和辐射阻尼随频率的变化见图 4 和图 5。由图可知，横荡、纵荡、横摇和纵摇运动的附加质量和辐射阻尼均相同。对于附加质量，峰值出现在低频区域，浮式平台的摇摆运动对应的附加质量远大于平移运动，在同一种运动形式中，垂向运动的附加质量大于横向和纵向；对于辐射阻尼，在特定频率范围内呈现明显的峰值现象，平移运动的辐射阻尼为单峰，摇摆运动的辐射阻尼为双峰。



（a） （b）

图 4 OO-Star 浮式平台附加质量

Fig.4 Added mass of OO-Star floating platform

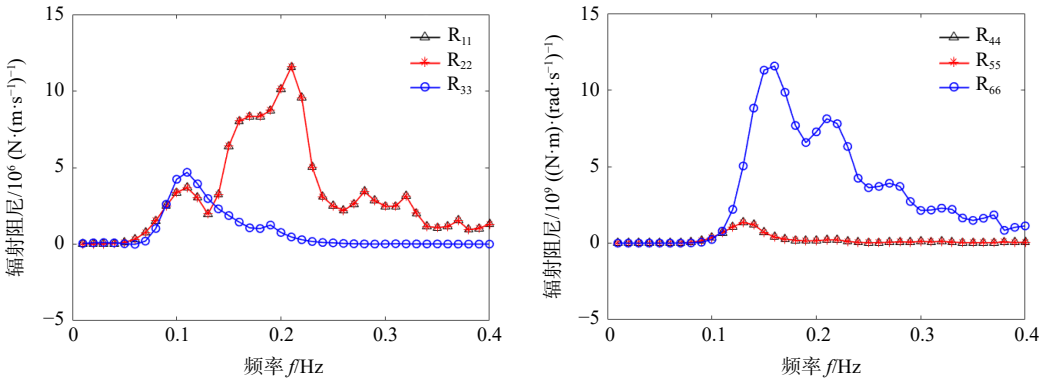


图 5　OO-Star 浮式平台辐射阻尼

Fig.5　Radiation damping of OO-Star floating platform

OO-Star 平台关于 *X*-*Z* 平面对称，故仅考虑角度为 0°、30°、60°和 90°的入射波浪。浮体各个自由度方向上受到的一阶波浪力随波浪频率的变化情况见图 6。在纵荡和横荡方向上，一阶波浪力呈现显著的双峰和多峰现象，表明在该两种方向上受到多种控制频率的影响；在垂荡方向上，受波浪入射角度的影响很小，不同于纵荡和横荡方向的受力特征，在波浪频率小于 0.05 Hz 的次重力波范围（0.004~0.04 Hz）内[20]，浮体的受力随着频率的减小迅速增大；横摇和纵摇方向的控制波向分别为 90°和 0°，与预期一致；在艏摇方向上，控制波向为 30°和 90°，为相对浮体而言的斜向入射波。

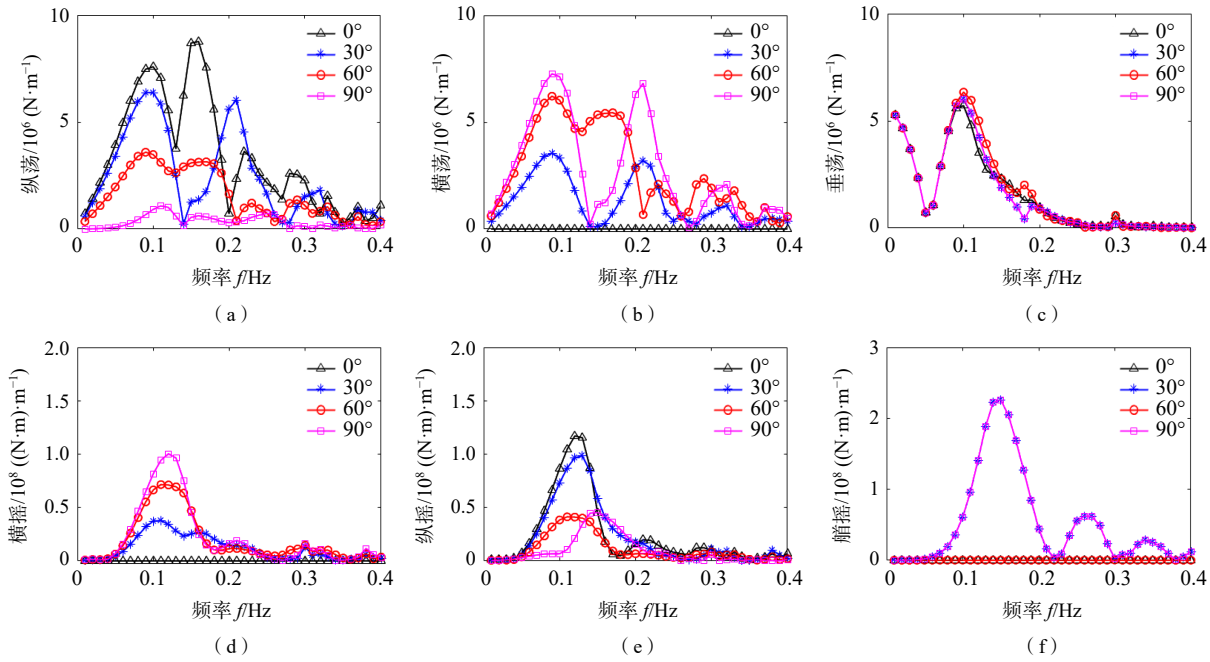


图 6　OO-Star 浮式平台一阶波浪力

Fig.6　First order wave excitation forces of OO-Star floating platform

幅值响应算子（Response Amplitude Operator, RAO）为单位波高入射时浮式风机平台所产生的运动幅值，代表了浮式平台抵抗外部波浪荷载的能力。由图 7 可知，在纵荡和横荡方向上，控制波向分别为 0°和 90°，随着频率减小而迅速增大；在垂荡方向上，浮体运动幅值与入射波浪角度无关，在波频为 0.05 Hz 处出现一个显著的峰值；在横摇和纵摇方向上，受波浪入射角度影响明显，在 0.06 Hz 和 0.12 Hz 处各出现一个峰值；在艏摇方向上，与一阶波浪力结果一致，相对浮体而言的斜向入射波（30°和 90°）为控制波向。

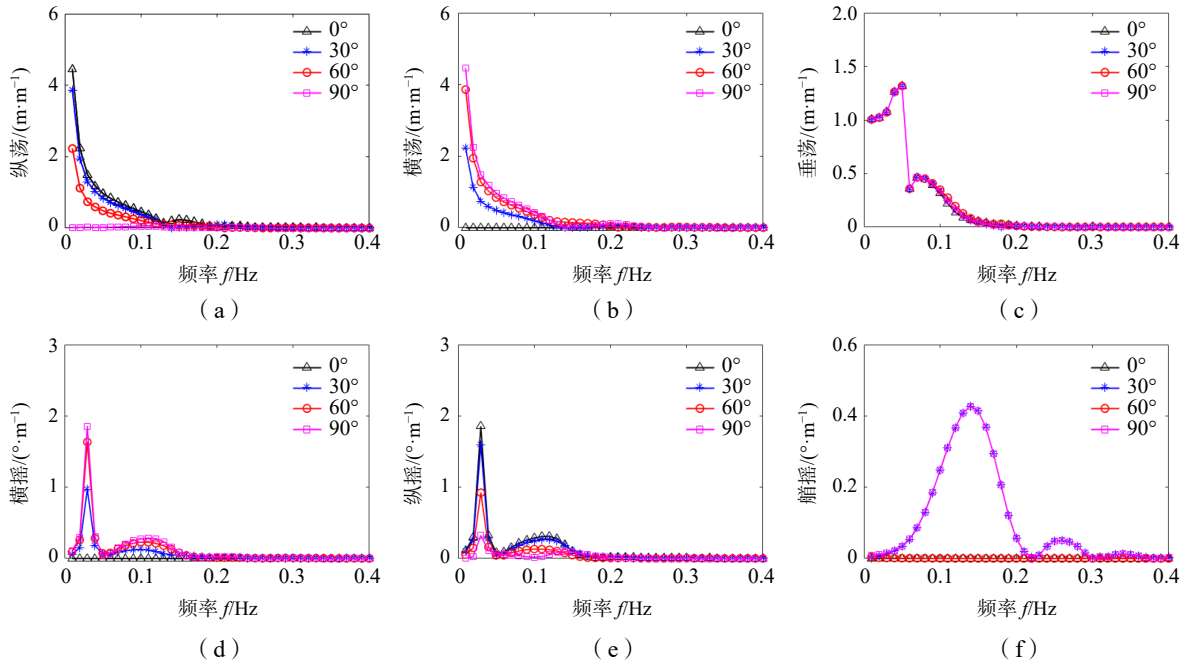


图 7 OO-Star 浮式平台幅值响应算子

Fig.7 Response amplitude operators (RAOs) of OO-Star floating platform

3.2 平台固有周期

在 ANSYS/AQWA 中进行了针对浮式风机平台包括锚泊系统在内的自由衰减模拟。选取自由衰减模拟时长 1800 s, 6 个自由度的自由衰减时程曲线和功率谱密度曲线见图 8 和图 9。浮式平台的固有周期及频率见表 3, 满足 DNV 规范对深水半潜式浮式基础固有周期取值的规定[21]。

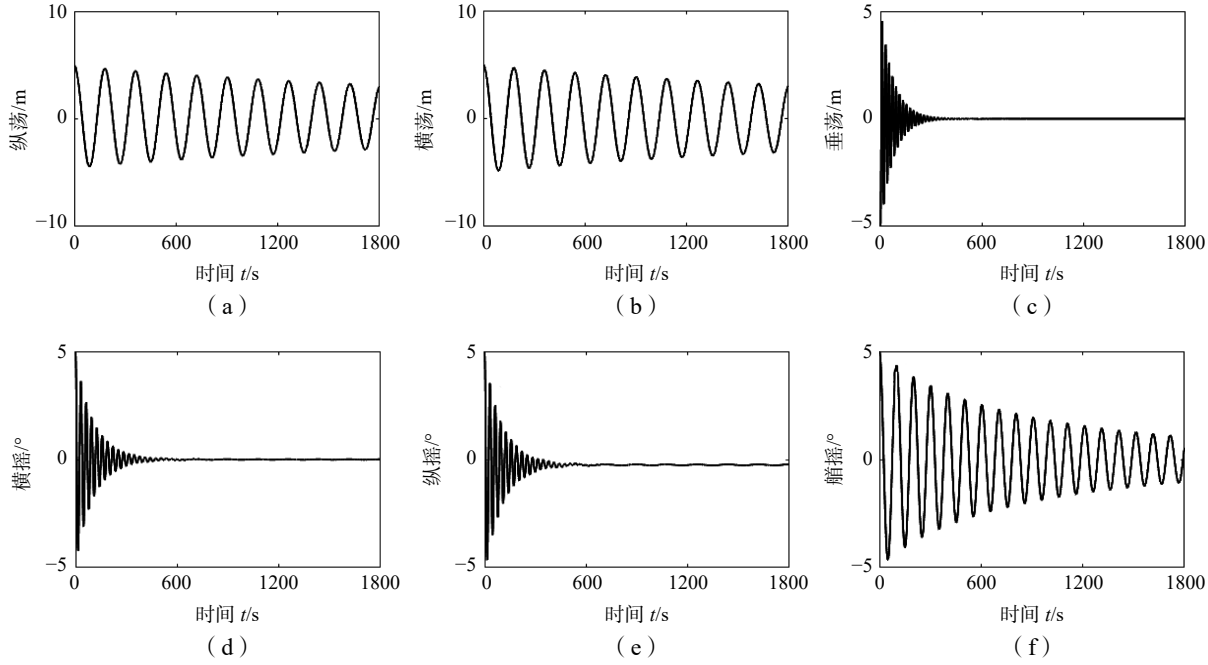


图 8 OO-Star 浮式平台自由衰减时程曲线

Fig.8 Free decay temporal curves of OO-Star floating platform

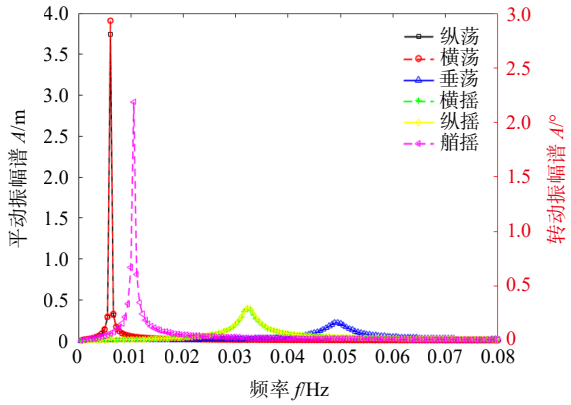


图 9　OO-Star 浮式平台自由衰减功率谱

Fig.9　Free decay power spectra of OO-Star floating platform

表 3　OO-Star 半潜式浮式平台固有周期

Tab.3　Natural period of OO-Star semisubmersible floating platform

自由度	固有周期/s	固有频率/Hz
纵荡	180.0	0.0056
横荡	180.0	0.0056
垂荡	20.5	0.0489
横摇	31.3	0.0319
纵摇	31.3	0.0319
艏摇	97.3	0.0103

4　波谱特征对平台动力响应影响分析

4.1 计算工况

为探究波谱特征对浮式平台运动特性的影响，对浮式平台在单独波浪作用下开展仿真模拟，未考虑风和海流荷载作用。选取 130 m 水深条件下的典型工况如表 4 所示，四种工况的有效波高均为 5.0 m，谱峰周期均为 10 s，谱峰升高因子 γ 为 JONSWAP 谱形状参数，根据实际波浪观测数据，其取值范围分布在 1.0~7.0 之间，能够控制波浪谱的形状和能量分布，各工况波浪的谱型对比结果见图 10。由图可知，随着谱峰升高因子 γ 的减小，波浪谱变得更加宽缓，谱宽增大，波浪能量分布在更宽的频率范围内。

表 4　设计波浪工况

Tab.4　Designed wave conditions

工况编号	有效波高 H_s/m	谱峰周期 T_p/s	谱峰升高因子 γ
J1	5	10	7.0
J2	5	10	5.0
J3	5	10	3.3
J4	5	10	1.0

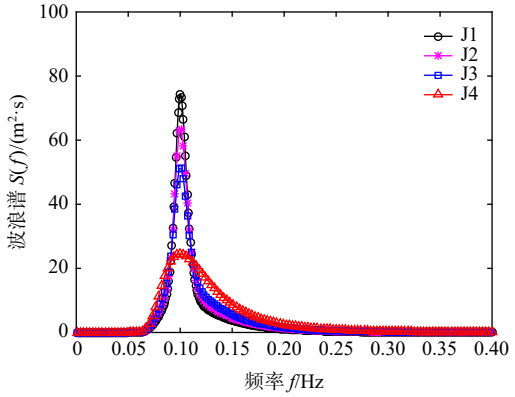


图 10　设计波浪工况波浪谱

Fig.10　Wave spectra of the designed wave conditions

波浪入射角度为 0°，不规则波模拟时长为 3600 s，每个工况设置三组随机波浪种子对模拟结果进行统计分析。为消除瞬态效应，在数据处理过程中去掉前 1000 s 的数据。

4.2 运动特性分析

以工况 J3 为例，波浪作用下浮式平台在纵荡、垂荡和纵摇等典型方向上的运动响应及频谱如图 11 所示。根据运动响应曲线可知，半潜式浮体平台在各个自由度上的运动响应反映了自身的固有周期特性，除了入射波频外，在自身固有周期附近同样出现了显著的运动响应。相同的入射波浪条件下，纵荡方向上的响应曲线振动周期要远大于垂荡和纵摇方向，因此需特别注意长周期波浪作用下浮体的纵荡和横荡运动，以避免引发共振。

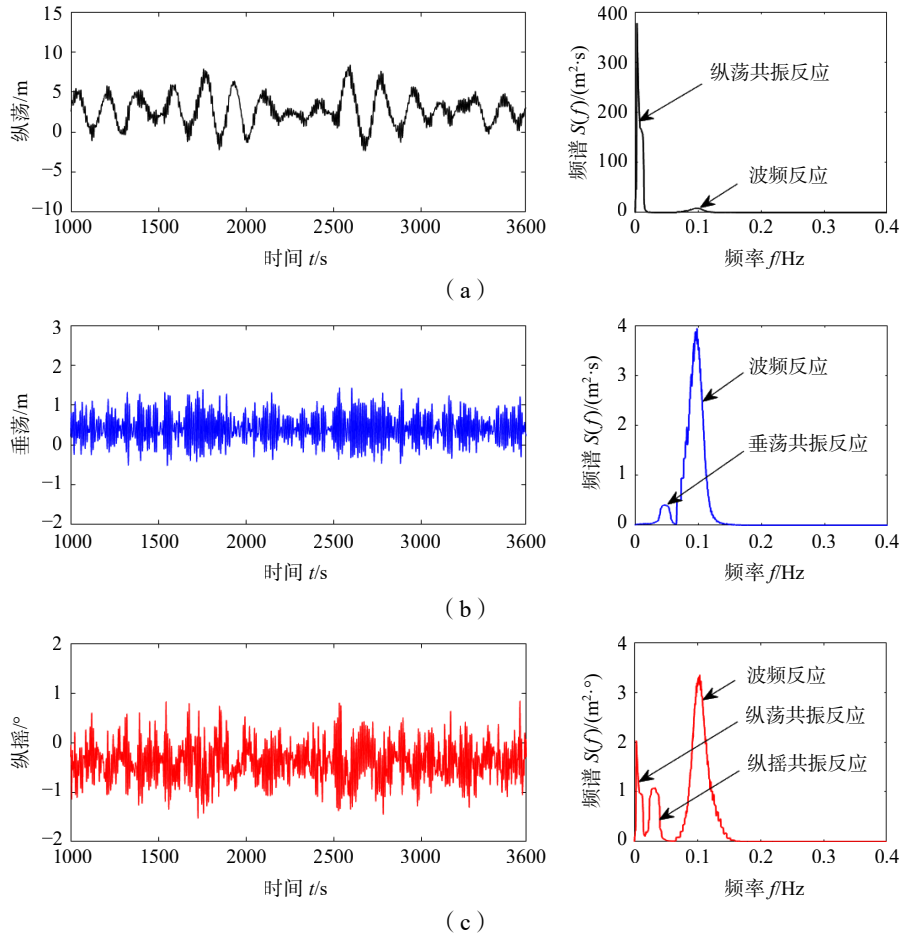
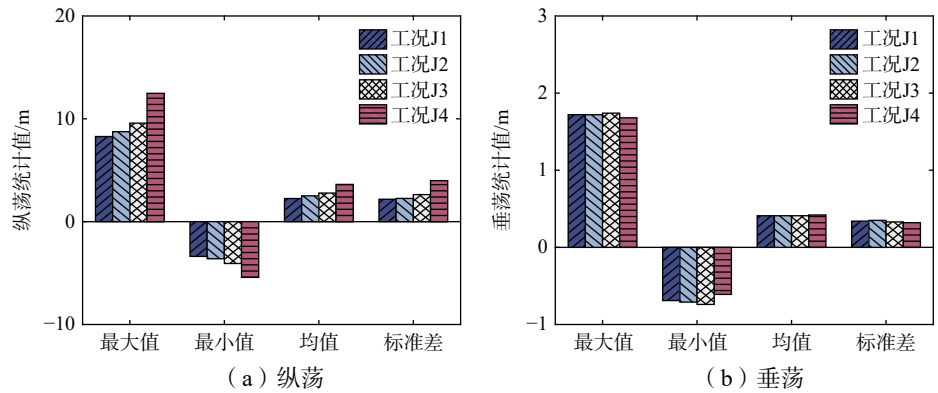
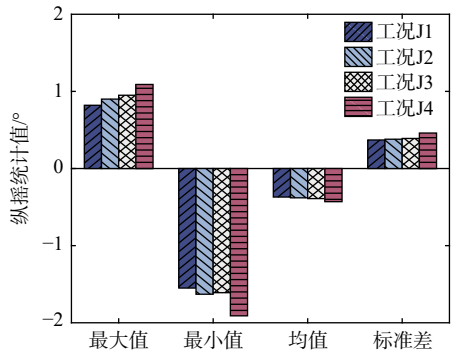


图 11 工况 J3 作用下，浮式平台在纵荡、垂荡和纵摇方向上的时域运动响应和频谱

Fig.11 Response and spectra of the floating platform of surge, heave and pitch under Condition J3

不同工况下的平台运动时域统计结果见图 12。根据统计结果可知，纵荡响应的最大值、最小值和平均值均随着谱宽的增大而显著增大，工况 J4 条件下浮体的纵荡最大值为 12.48 m，较工况 J1、J2、J3 分别增加了 50.72%、42.63% 和 30.27%，纵荡的标准差同样呈现增大的趋势，因此波浪谱宽增大使浮式风机的水平运动分布在更大的位移区间，响应变化幅度相应增大。垂荡响应的各个统计值变化不大，表明波浪谱宽变化对垂荡运动的影响较小；纵摇响应的变化趋势与纵荡一致，随着波浪谱宽的增加，最大值、最小值和平均值均显著增大。根据浮式平台在各个方向上的时域运动响应和频谱结果（图 11）可知，波浪作用下浮式平台垂荡方向上响应主要为波频响应，而纵荡和纵摇方向上则受到显著的差频共振响应。当波谱的谱宽特征发生变化时，并不改变波浪的主频，因此垂荡方向上的运动响应变化较小；然





（c）纵摇

图 12　不同工况作用下，浮式平台的运动响应特征统计结果

Fig.12　Statistics of motion response characteristics of floating platform under different wave conditions

而受到波浪非线性的影响，波谱谱宽变化将导致差频波浪显著增加，进而显著影响纵荡和纵摇方向上的运动响应。

4.3 锚链张力分析

工况 J3 波浪作用下，系泊系统荷载动力响应曲线及相应的频谱如图 13 所示。由图可知，在不规则波作用下，平台纵荡方向的平衡位置发生改变，使得平台锚泊系统产生的总荷载在 3 条锚链上重新分布，#2 锚链和#3 锚链所受张力较#1 锚链偏大。由频谱可知，浮式风机系泊系统主要受到浮式

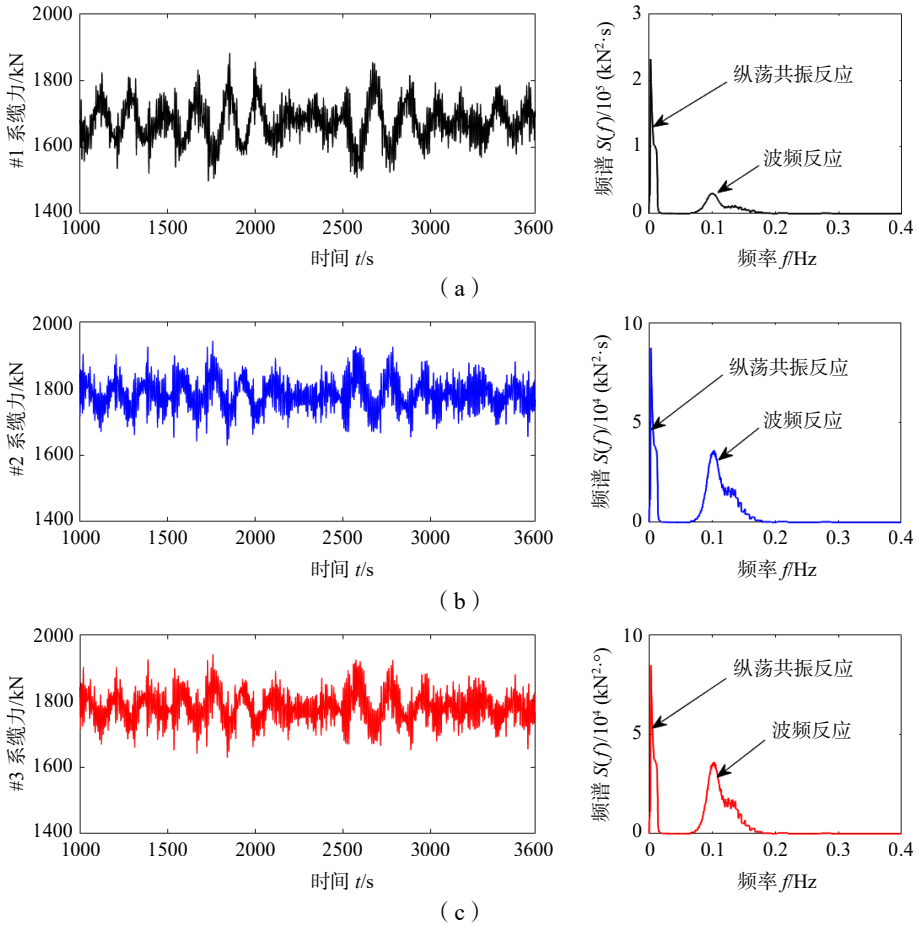
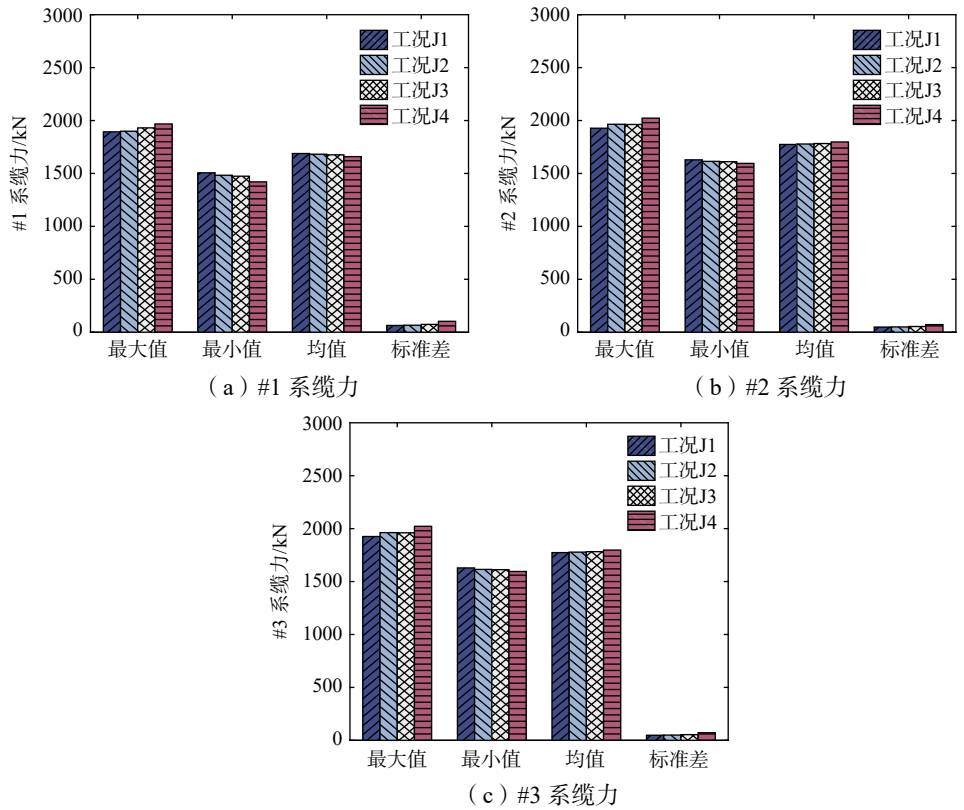


图 13　工况 J3 作用下，锚泊系统动力响应和频谱

Fig.13　Dynamic response and spectra of the mooring system under Condition J3

平台纵荡低频运动和波浪主频相关的激励作用，进一步表明浮式平台运动与锚链张力之间存在显著的耦合效应。

各个工况条件下，3根锚链张力的统计结果见图14。由图可知，工况J4作用下的锚链最大值大于其他工况，最小值小于其余工况，标准差呈现出逐渐增大的趋势，表明随着入射波浪谱宽的增大，锚链张力分布在更大的范围内，可能加剧系泊系统疲劳损伤。图15为锚泊系统张力功率谱密度曲线，由图可知，浮式风机在不规则波作用下，3根锚链的张力功率谱密度曲线均出现2个峰值，其中低频峰值位于平台纵荡固有频率（0.0056 Hz）附近，高频峰值位于波浪谱峰频率（0.1 Hz）附近。

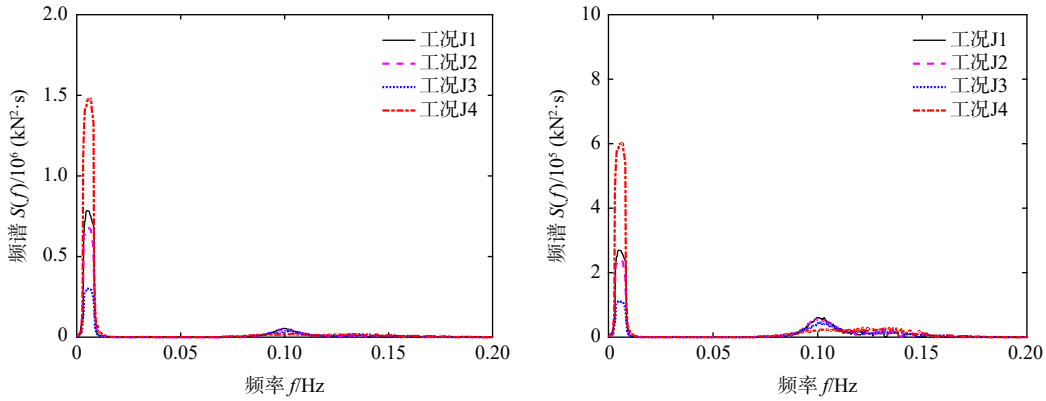


（a）#1 系缆力　（b）#2 系缆力

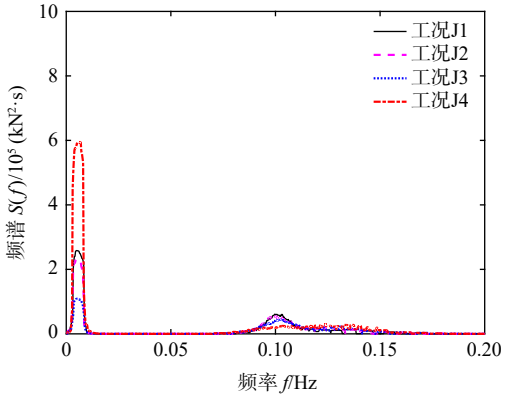
（c）#3 系缆力

图14 不同工况作用下，锚链张力统计结果

Fig.14 Statistics of mooring lines tension under different wave conditions



（a）#1 锚链　（b）#2 锚链



（c）#3 锚链

图 15　不同工况作用下，锚泊系统张力功率谱密度曲线

Fig.15　Mooring system tension spectral density under different wave conditions

5 结　论

本文采用数值模拟的方法研究了 10 MW 半潜式浮式风电平台的水动力响应，在相同的入射波高和谱峰周期的波浪条件下，分析了波谱特征对浮式平台水动力特性的影响，研究了平台的运动响应和锚链张力的变化规律，得到以下主要结论：

（1）随着谱峰升高因子 γ 的减小，谱宽逐渐增大，波浪能量分布在更大的频率范围内，且在波浪非线性影响下，差频波浪显著增加。因此浮式风机的纵荡和纵摇响应随波浪谱宽的增大而显著增加，最大响应幅值可增大 50% 以上；谱宽变化对浮体垂荡方向的响应影响较小。

（2）随着波浪谱宽的增大，锚链的最大张力呈现明显的增大趋势，张力变化分布在更大范围内，加剧了系泊系统疲劳损伤。

参　考　文　献：

[1] Williams R, Zhao F, Melkonyan N, et al. Global offshore wind report 2025[R]. Lisbon, Portugal: Global Wind Energy Council, 2025.

[2] Goupee A J, Koo B J, Kimball R W, et al. Experimental comparison of three floating wind turbine concepts[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136(2): 020906.1−020906.9.

[3] 温斌荣, 田新亮, 李占伟, 等. 大型漂浮式风电装备耦合动力学研究历史、进展与挑战[J]. 力学进展, 2022, 52(4): 731–808.
Wen B R, Tian X L, Li Z W, et al. Coupling dynamics of floating wind turbines: History, progress and challenges[J]. Advances in Mechanics, 2022, 52(4): 731–808. (in Chinese)

[4] 陈　宇, 祝　磊, 吴松熊. 新型漂浮式海上风电基础概念设计和初步动力响应分析[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 581–586.
Chen Y, Zhu L, Wu S X. Conceptual design and preliminary dynamic response analysis of novel floating offshore wind turbine foundation[J]. Acta Energiae Solaris Aris Sinica, 2024, 45(8): 581–586. (in Chinese)

[5] 程友良, 曹淑刚, 万声权. 浮式风力机若干特征动力学问题综述[J]. 海洋工程, 2024, 42(1): 165–186.
Cheng Y L, Cao S G, Wan S Q. An overview of several dynamic characteristics of floating wind turbines[J]. The Ocean Engineering, 2024, 42(1): 165–186. (in Chinese)

[6] Robertson A, Jonkman J, Masciola M, et al. Definition of the semisubmersible floating system for phase II OC4[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2014.

[7] Bayati I, Gueydon S, Belloli M. Study of the effect of water depth on potential flow solution of the OC4 semisubmersible floating offshore wind turbine[J]. Energy Procedia, 2015, 80: 168–176.

[8] 刘志成, 张建华, 孙　科, 等 四浮筒半潜式海上风机基础水动力性能分析[J]. 海洋工程, 2024, 42(3): 21−34.
Liu Z C, Zhang J H, Sun K, et al. Hydrodynamic performance analysis of semi-submersible offshore wind turbine foundations with four buoys [J]. The Ocean Engineering, 2024, 42(3): 21−34. (in Chinese)

[9] Luan C, Gao Z, Moan T. Design and analysis of a braceless steel 5 MW semisubmersible wind turbine[C]//ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2016.

[10] Antonio, Henrik, et al. State of the art model for the LIFES50+00-Star wind floater semi 10 MW floating wind trubin[J]. Journal of Physics, 2008, 1104: 012024.1−012024.18.

[11] 施　伟, 薛瑞宁, 侯晓彬, 等. 10MW 级半潜漂浮式风机的动力响应[J]. 船舶工程, 2021, 43(10): 1–10.
Shi W, Xue R N, Hou X B, et al. Dynamic response on 10 MW semisubmersible floating offshore wind turbine[J]. Ship Engineering, 2021, 43(10): 1–10. (in Chinese)

[12] 赵志新, 施　伟, 王文华, 等. 二阶波浪力下超大型半潜浮式风力机动态响应分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 335–345.
Zhao Z X, Shi W, Wang W H, et al. Dynamic response analysis of ultra-large semi-submersible floating wind turbine under second-order wave forces[J]. Acta Energiae Solaris Aris Sinica, 2023, 44(1): 335–345. (in Chinese)

[13] Ghazangian R, Shafieefar M, Panahi R, et al. An appropriate unidirectional wave spectrum model for the Strait of Hormuz[J]. Journal of Marine Science and Application, 2015, 14(3): 261–269.

[14] 朱冬琳, 徐福敏, 孙　建, 等. 台风期间北部湾近岸观测海浪特征研究[J]. 水道港口, 2024, 45(5): 675–684.
Zhu D L, Xu F M, Sun J, et al. Study of observed wave properties in the nearshore of Beibu Gulf under the influence of typhoon[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2024, 45(5): 675–684. (in Chinese)

[15] 郇彩云, 姜贞强, 许坤荻. 广东阳江海域实测台风浪特征分析[J]. 海洋科学, 2025, 45(5): 1–19.
Huan C Y, Jiang Z Q, Xu K D. Analysis of the characteristics of typhoon waves in the Yangjiang sea area, Guangdong[J]. Marine Sciences, 2025, 45(5): 1–19. (in Chinese)

[16] 刘贵杰, 王清扬, 田晓洁, 等. 海洋结构物小尺度桩柱的水动力系数研究与进展[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(1): 136–144.
Liu G J, Wang Q Y, Tian X J, et al. Recent research and progress on hydrodynamic coefficients of marine structures with small scale pile[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(1): 136–144. (in Chinese)

[17] Faltinsen O. Sea loads on ships and offshore structures[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

[18] Hasselmann K, Barnett T P, Bouws E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)[J]. Deutche Hydrological Institute Hamburg, Germany, Reiche A(81), 1973, 12(A8): 1–95.

[19] 黄小华, 王芳芳, 刘海阳, 等. 系泊和压载方式对半潜式渔场平台动力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 48–53.
Huang X H, Wang F F, Liu H Y, et al. Effects of mooring systems and ballast status on dynamic behaviors of semi-submersible offshore fish farm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(15): 48–53. (in Chinese)

[20] Bertin X, De Bakker A, Van Dongeren A, et al. Infragravity waves: From driving mechanisms to impacts[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 177: 774–799.

[21] DNV. DNV-RP-0286 Coupled analysis of floating wind turbines[S]. 2019.