

二阶波浪力对半潜浮式风力机动力响应的 影响研究

曹淑刚^{1,2}, 李红有¹, 王 雨¹, 祝 亮¹, 卢洪超³

(1. 龙源(北京)新能源工程设计研究院有限公司, 北京 100034; 2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206;

3. 中国地质大学(武汉)海洋学院, 武汉 430074)

摘 要: 以“国能共享号”为例,研究二阶波浪力对半潜浮式风力机动力响应的影响,对比远场法和近场法计算二阶平均波浪力传递函数(QTFs)的差异,建立气动-水动-结构-伺服耦合时域模型,分析不考虑二阶波浪力、考虑二阶平均波浪力、考虑二阶差频波浪力、考虑二阶差频+和频波浪力4种情况下浮式风力机动力响应的结果。研究表明:当圆频率小于1.1 rad/s时远场法和近场法计算的QTFs曲线几乎一致,而随着圆频率的增大,远场法的计算结果在大部分频率下将大于近场法。二阶波浪力对半潜平台运动响应有重要影响,其中影响成分主要为二阶平均波浪力或二阶差频波浪力,而二阶和频波浪力几乎无影响。二阶差频波浪力和二阶和频波浪力对半潜平台加速度和塔筒顶部荷载影响显著,而二阶平均波浪力对两者无影响。二阶差频、二阶和频波浪力作用下塔筒顶部荷载的高频响应被激发,在计算时应予以考虑。二阶波浪力对锚链系泊张力和疲劳寿命影响显著,不仅会增大锚链的疲劳损伤,还会对最大疲劳损伤的发生位置产生影响。

关键词: 海上风电; 浮式风力机; 二阶波浪力; 动力响应; 二阶差频; 二阶和频

中图分类号: TK83; P751

文献标志码: A

0 引 言

随着海上风电技术的不断发展,近海海上风电已较成熟,而适用于深远海的漂浮式风电在理论研究及工程应用方面还存在诸多挑战^[1-2],特别是复杂海洋环境下浮式风力机的气动-水动-伺服-结构耦合动力响应一直是近年来研究的热点^[3-5]。浮式风力机一般采用大型浮体平台作为支撑结构,平台受到的水动力荷载通常采用势流理论进行计算,此时除考虑一阶波浪力外,往往还需考虑二阶波浪力的作用,二阶波浪力按产生机理一般包括二阶平均波浪力、二阶差频波浪力和二阶和频波浪力^[6]。诸多学者曾对半潜浮式风力机二阶波浪力作用效应进行研究,施伟等^[7]对3种半潜浮式风力机开展全耦合时域分析,研究发现二阶波浪水动力载荷对极端海况下的浮体运动和结构响应都起着重要作用,并建议在浅水时采用全域二次传递函数(quadratic transfer functions, QTFs)法进行二阶波浪力计算;王帅帅等^[8]对只考虑一阶波浪载荷和同时考虑一阶和二阶波浪载荷的半潜浮式风力机浮体结构所受荷载进行计算,得到在这两种情况下结构的横截面力和弯矩是不同的;阳杰等^[9]采用频域软件 WADAM 和时域软

件 FAST 对考虑二阶波浪荷载的新型低重心浮式风力机耦合动力响应进行计算,分析了二阶波浪力对半潜平台运动、塔底荷载以及系泊张力的影响,证明了二阶波力主要影响低频共振响应,而对波频响应影响较小;张之阳等^[10]分析了二阶波浪力对耦合波浪能的半潜浮式风力机动力响应的影响,得出二阶波浪力对耦合平台的纵荡和纵摇响应影响显著,忽略二阶波浪力将会大大低估锚链系泊张力。

然而,以往对于半潜浮式风力机二阶波浪力的研究更多的是关注二阶平均波浪力和二阶差频波浪力,而对二阶和频波浪力的作用效应研究还较少。当半潜浮式风力机处于浅水海域时,由于水深有限,锚链的悬链线效应将很难体现,这将会导致系泊系统往往具有较大的系泊刚度,此时二阶和频波浪力可能会影响半潜浮式风力机部分参量的响应,甚至会对风力机塔筒荷载产生影响,故有必要对其进行进一步研究。本文依托“国能共享号”半潜浮式风力机开展研究,建立气动-水动-伺服-结构耦合模型,分析浅水条件下二阶波浪力作用效应,并探讨二阶平均波浪力、二阶差频波浪力和二阶和频波浪力对浮体运动、塔筒顶部荷载、锚链系泊张力等的影响。

收稿日期: 2025-01-20

基金项目: 国家能源集团重点科技项目(GJNY-22-13); 国家自然科学基金(52371296; 42276028)

通信作者: 卢洪超(1988—), 男, 博士、教授, 主要从事海上风电动力响应与结构损伤识别方法研究。luhongchao@cug.edu.cn

1 半潜浮式风力机及其动力学方程

对于半潜浮式风力机,在浪流荷载和风力机荷载作用下平台六自由度动力响应的基本方程可表示为:

$$\sum_{j=1}^6 [(m_{ij} + \mu_{ij}(t))\ddot{x}(t) + \int_0^t c_{ij}(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau + (k_{ij}^1 + k_{ij}^2)x(t)] = F_i(t), \quad i=1,2,\dots,6 \quad (1)$$

式中: m_{ij} ——半潜浮式风力机整体的质量或转动惯量, kg 或 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; $\mu_{ij}(t)$ ——半潜浮式风力机平台的附加质量或附加转动惯量, kg 或 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; $\ddot{x}(t)$ ——半潜浮式风力机平台 6 自由度运动加速度, m/s^2 ; $c_{ij}(t)$ ——延迟函数, kg/s^2 或 $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$; $\dot{x}(t)$ ——半潜浮式风力机平台 6 自由度运动速度, m/s ; τ ——时间小量, s; k_{ij}^1 ——静水刚度, N/m 或 $(\text{N}\cdot\text{m})/\text{rad}$; k_{ij}^2 ——系泊刚度, N/m ; $x(t)$ ——半潜浮式风力机平台 6 自由度运动位移, m; $F_i(t)$ ——外荷载激励, N 或 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

式(1)中外荷载激励主要包括波浪荷载、海流荷载、风荷载和风力机荷载,其中波浪荷载一般包括一阶波浪力和二阶波浪力,二阶成分主要由二阶平均、二阶差频和二阶和频组成。根据文献[11]一阶波浪力和二阶波浪力可分别表示为:

$$F_{\text{wave1}}(t) = \text{Re} \left[\sum_m \zeta_m H^{(1)}(\omega_m) e^{i\omega_m t} \right] \quad (2)$$

$$F_{\text{wave2}}(t) = \text{Re} \left[\sum_m \sum_n \zeta_m \zeta_n^* H_{mn}^{(2-)} e^{i(\omega_m - \omega_n)t} + \sum_m \sum_n \zeta_m \zeta_n H_{mn}^{(2+)} e^{i(\omega_m + \omega_n)t} \right] \quad (3)$$

式中: $F_{\text{wave1}}(t)$ ——一阶波浪力, N ; $F_{\text{wave2}}(t)$ ——二阶波浪力, N ; ζ_m ——波高在频率 ω_m 的复傅里叶分量, m ; ζ_n^* ——波高在频率 ω_n 的复傅里叶分量的共轭, m ; $H_{mn}^{(2-)}$ ——二阶差频波浪力 QTFs; $H_{mn}^{(2+)}$ ——二阶和频波浪力 QTFs。

本文研究对象为一台与养殖网箱融合的新型半潜浮式风力机(“国能共享号”),其各部分组成及详细参数见文献[12-14]。研究采用 OrcaFlex 软件建立风力机-平台-锚泊-网衣一体化耦合分析模型,如图 1 所示。

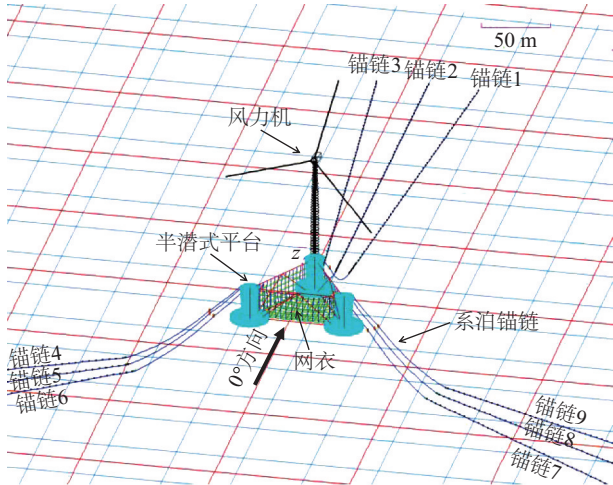


图1 风力机-平台-锚泊-网衣多体耦合模型

Fig. 1 Multi-body coupling model of wind turbine-platform-mooring-nets

该模型中风力机模型包含了伺服控制系统,网衣水动力计算采用莫里森模型法,其中网衣建模采用了网目群化的方法^[15],通过保证仿真模型与原型两者具有相同的密度,从而保证网衣的水动力荷载相同。本研究中所用坐标系包含大地坐标系、平台坐标系和机舱坐标系,其中平台坐标系的原点位于平均水平面的平台中心处, x 轴朝风力机所在首立柱方向, y 轴朝平台左侧, z 轴垂直向上,文中对于浮体动力响应的分析参考平台坐标系;而大地坐标系为固定坐标系,其原点及各坐标轴方向与初始静水状态时平台坐标系一致,文中对于环境条件的描述遵循大地坐标系;机舱坐标系原点位于塔筒中心线与机舱主轴轴线的交点处,其 x 轴指向下风向, z 轴垂直向上, y 轴遵循右手规则,对于风力机荷载的分析将遵循机舱随体坐标系。

2 二阶波浪力及传递函数

对于二阶平均波浪力常用的分析方法有基于质量-动量守恒的远场法和基于运动-压力速度积分的近场法,其中远场法只能计算水平面内 3 个自由度的平均波浪力,而近场法能够计算浮体六自由度上的平均波浪力以及二阶差频和二阶和频波浪力。本研究对远场法和近场法计算二阶平均波浪力的差异进行了对比,如图 2 所示,利用 WADAM 软件分别采用这两种方法计算得出的二阶波浪力 QTFs,选取 0° 、 90° 、 180° 这 3 个典型方向进行对比。可发现,两种方法计算的二阶平均波浪力 QTFs 随圆频率的变化趋势基本一致。当圆频率小于 1.1 rad/s 时远场法和近场法 QTFs 曲线几乎一致,而随着圆频率的增大,除个别点外,远场法计算的幅值在大部分情况下都大于近场法计算的结果,具体而言,对于纵荡方向, 0° 和 180° 方向时除 2 rad/s 频率点处近场法计算的二阶平均波浪力结果大于远场法外,在其余位置,远场法计算的结果要略大于近场法计算的结果;对于横荡方向, 90° 时的计算结果也具有类似的结论,而在艏摇自由度上,两种方法的计算结果差异较小。

如图 3 和图 4 所示,为以 0° 方向为例采用近场法计算得出的二阶差频波浪力和二阶和频波浪力 QTFs,将二阶波浪力 QTFs 导入 OrcaFlex 软件可开展二阶波浪力及其作用下浮式风力机系统动力响应的时域计算。根据 IEC 61400-3 标准^[16]选取极端运行发电工况(DLC 1.6)作为典型工况,此时计算波浪条件取 50 年一遇有效波高为 5.02 m ,采用 Jonswap 谱,谱峰周期为 10.92 s ,谱峰升高因子为 1.16 ;选取额定风速为 10.5 m/s 的定常风作为典型工况风条件;选取表层流速为 0.56 m/s ,流速随水深指数衰减,逐渐减小至海底 0 m/s ,衰减幂指数取 $1/7$ 。计算时风、浪、流同向并以 0° 方向入射,示范样机所在机位处水深为 35 m ,数值仿真时长为 1 h 。

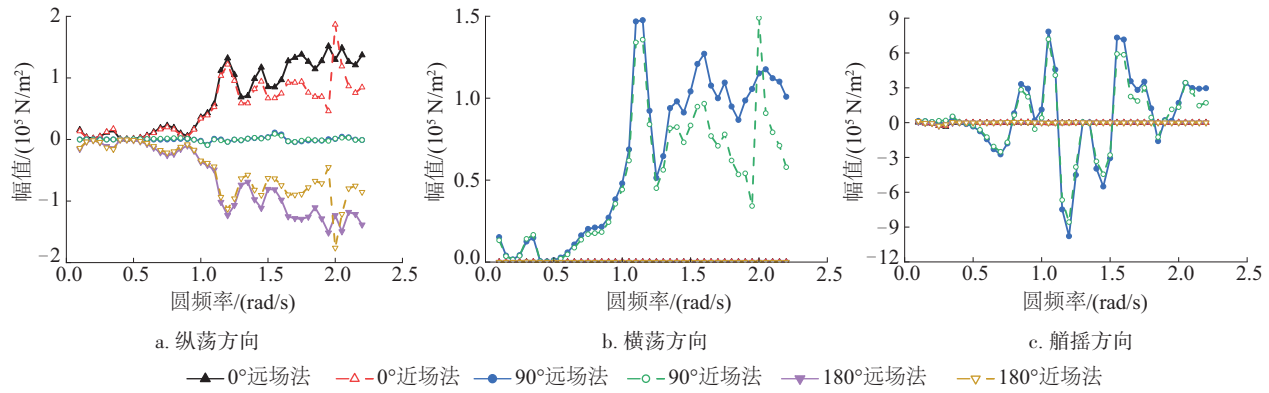


图2 远场法和近场法二阶平均波浪力 QTFs 对比

Fig. 2 Comparison of second-order mean wave force QTFs between far-field method and near-field method

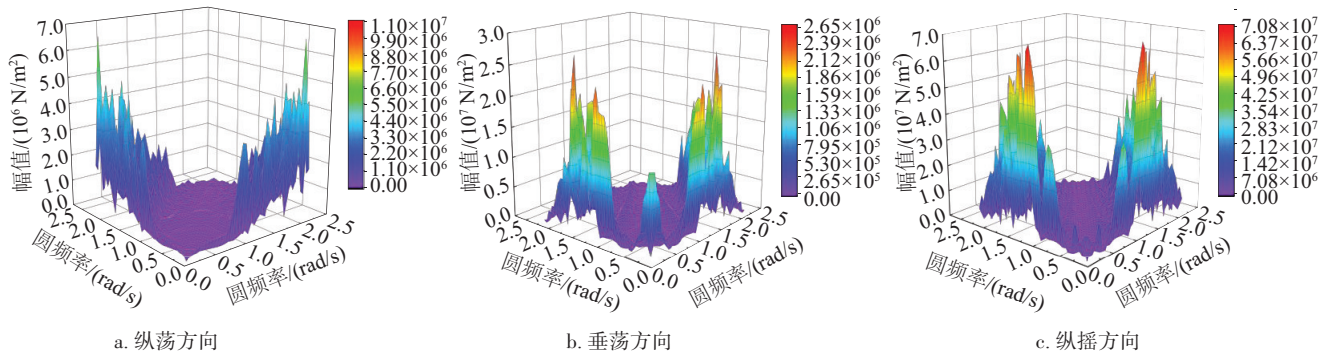


图3 二阶差频波浪力 QTFs

Fig. 3 Second order difference-frequency wave force QTFs

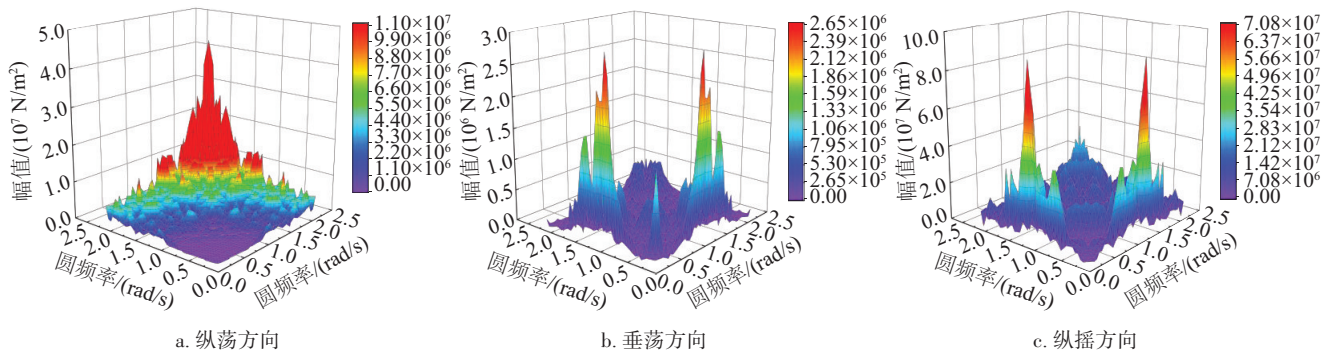


图4 二阶和频波浪力 QTFs

Fig. 4 Second order sum frequency wave force QTFs

图5给出了该半潜浮式风力机平台所受一阶波浪力、二阶平均波浪力、二阶差频及二阶和频波浪力计算结果统计值,本文中箱线图的箱体高度表示2倍的标准差,箱体范围定义为统计结果的有义值,而上下虚线范围表示统计的最小值-最大值的范围,箱体中线表示均值。从图中可看出平台所受一阶波浪力最大,其最大值约为13100 kN,均值为3822.5 kN;而平台所受的二阶波浪力要比一阶波浪力小很多,其中二阶平均波浪力最小,在整个时程范围内二阶平均波浪力的最大值仅603 kN,均值仅81.51 kN,远小于一阶波浪力;平台所受二阶差频和二阶和频波浪力稍大,其中二阶差频波浪力

最大值达到2070 kN,均值为762.44 kN,二阶和频波浪力最大值达到2470 kN,均值为613.54 kN,由于该浮式风力机所处水深较浅,仅35 m,远小于平台4倍的吃水,导致存在明显的浅水效应,使得平台受到的二阶差频和二阶和频波浪力稍大。对比不同阶次波浪力的分布特征可知,一阶波浪力作为线性波浪载荷的主要组成部分,在整体波浪载荷中占据主导地位,其均值与波动范围均显著高于各类二阶波浪力,二阶波浪力虽小于一阶波浪力,但在浅水环境下此类非线性效应更为突出,各类二阶波浪力均值之和占比达到27.6%,其影响不可忽略,特别是对于浮式风力机类高耸结构物,二阶波浪

力除引发平台低频慢漂运动与高频共振响应外还易引发塔筒的共振以及塔筒顶部荷载的增大。

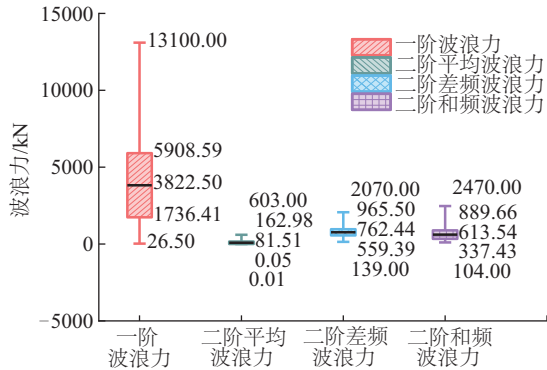


图5 波浪力统计值

Fig. 5 Wave force statistics

3 浮式风力机系统动力响应分析

3.1 半潜平台动力响应

选取工况 1~工况 4 这 4 种计算工况分别对考虑不同波浪力成分作用时该浮式风力机动力响应进行分析,其中工况 1 仅考虑一阶波浪力,工况 2 考虑一阶波浪力+二阶平均波浪力,工况 3 考虑一阶波浪力+二阶差频波浪力,工况 4 考虑一阶波浪力+二阶差频+二阶和频波浪力。对半潜平台的动力响应结果进行分析,分别选取对风力机运行影响较大的纵荡、垂荡、纵摇 3 个自由度。如图 6a 所示,为纵荡响应结果统计值,可看出当仅考虑一阶波浪力时平台纵荡响应的均值和最大值都比考虑二阶波浪力时要小,具体表现为当仅考虑一阶波浪力时纵荡响应均值为 3.25 m,最大值为 5.73 m;而当在此基础上考虑二阶平均波浪力时,纵荡响应均值为 3.43 m,最大值为 6.16 m,分别增大了 5.54% 和 7.50%;当在一阶波浪力基础上考虑二阶差频波浪力时,纵荡响应均值为 3.40 m,最大值为 6.14 m,增大比例分别为 4.62% 和 7.16%;当同时考虑二阶差频和二阶和频波浪力时,纵荡响应

均值为 3.42 m,最大值为 6.16 m,增大比例分别为 5.23% 和 7.50%。因此可得出二阶波浪力对浮式风力机平台纵荡响应有重要影响。同时,对比二阶波浪力各成分的计算结果还可发现,考虑二阶平均波浪力、考虑二阶差频波浪力、考虑二阶差频+二阶和频波浪力 3 种情况下该半潜平台纵荡响应的均值和极值都比较接近,这从侧面验证了对于半潜浮式风力机,工程设计时为节约计算时间和计算资源仅考虑二阶平均波浪力的做法具有一定的合理性和准确性。

图 6b 所示为垂荡响应统计值,其中仅考虑一阶波浪力时垂荡运动最大幅度(最小值~最大值范围)为 1.34 m,有义值范围(箱体范围)为 0.4 m;考虑二阶平均波浪力时垂荡运动最大幅度为 1.37 m,有义值范围为 0.42 m,与仅考虑一阶波浪力时相比略有增大,增大比例分别为 2.24% 和 5%;而考虑二阶差频时垂荡运动最大幅度为 1.59 m,有义值范围为 0.45 m,与仅考虑一阶波浪力时相比分别增大了 18.66% 和 12.5%;考虑二阶差频+和频波浪力时垂荡运动最大幅度为 1.58 m,有义值范围为 0.45 m,该结果与考虑二阶差频时的结果几乎一致。由对比结果可推测得出,总体来说二阶波浪力对半潜平台垂荡响应有一定影响,其中二阶差频成分对垂荡响应的影响稍大,二阶平均波浪力影响较小,而二阶和频成分几乎无影响。

类似的,图 6c 给出半潜平台纵摇响应统计值,其中仅考虑一阶波浪力时纵摇响应最大幅度为 3.85°,有义值范围为 1.09°;考虑二阶平均波浪力时纵摇响应最大幅度为 4.1°,有义值范围为 1.15°,与仅考虑一阶波浪力时相比纵摇幅度略有增大,增大比例分别为 6.49% 和 5.5%;考虑二阶差频时纵摇响应最大幅度为 4.69°,有义值范围为 1.22°,与仅考虑一阶波浪力时相比增大比例分别为 21.82% 和 11.93%;考虑二阶差频+和频波浪力时纵摇响应最大幅度为 4.66°,有义值范围为 1.22°,该结果与考虑二阶差频的结果几乎一致。由此同样可推测得出,二阶波浪力对该浮式风力机半潜平台纵摇响应有影响,但其中二阶平均波浪力影响较小,二阶差频成分影响较大,而二阶和频成分几乎无影响。

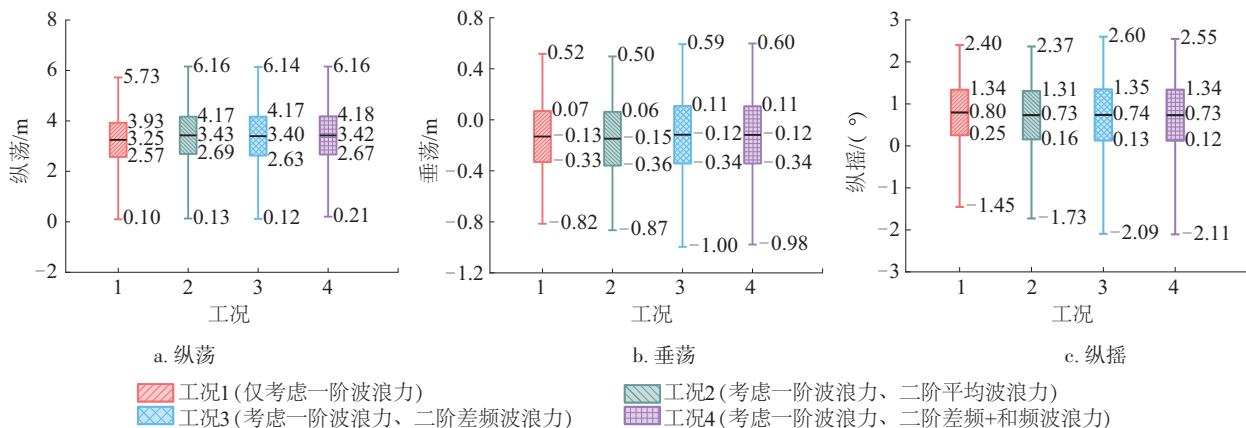


图6 半潜平台纵荡响应统计值

Fig. 6 Statistics of surge response of semi-submersible platform

对该浮式风力机半潜平台运动响应时历开展频谱分析,如图 7 所示,分别给出纵荡、垂荡、纵摇响应的频谱图,从图 7a 和图 7c 可看出,纵荡和纵摇响应有两个明显的峰值,一个为低频响应峰值,频率约为 0.02 Hz,另一个为波谱响应峰值,频率约为 0.08 Hz。而且可发现,考虑二阶波浪力后纵荡和纵摇的低频响应峰值明显增大,而波谱响应几乎无变化,这说明二阶波浪力主要影响纵荡和纵摇的低频响应,而对波谱响应几乎无影响,类似的,从图 7b 垂荡频谱图可发现二阶波浪力主要影响频率小于 0.1 Hz 时的频谱曲线能量大小,而对频率大于

0.1 Hz 的频谱曲线几乎无影响。同时,从图 7a 中对比发现考虑二阶波浪力后低频响应的能量明显大于波谱响应的能量,这说明低频响应在纵荡响应中占比较大。而从纵摇响应频谱图中可发现,低频处峰值对应频率与纵荡频率比较接近,这说明纵摇与纵荡运动之间存在耦合。此外,对比频谱图中二阶波浪力不同成分影响发现,考虑二阶差频后的频谱峰值会略大于考虑二阶平均波浪力的峰值,而考虑二阶差频+二阶和频后其频谱曲线与考虑二阶差频时几乎无变化,这进一步证明了二阶和频成分对半潜平台运动响应无影响。

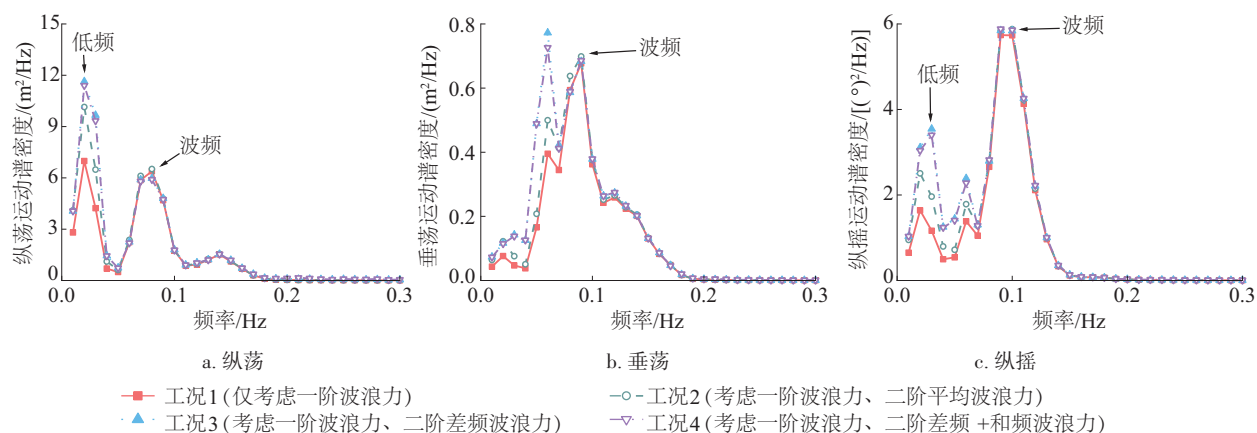


图 7 半潜平台纵荡响应功率谱密度

Fig. 7 Power spectral density of surge response of semi-submersible platform

对该半潜平台加速度响应进行分析,如图 8 所示,为 x 方向加速度响应统计值,其中仅考虑一阶波浪力时加速度响应最大值为 0.84 m/s^2 ,有义值为 0.23 m/s^2 ;考虑二阶平均波浪力后加速度最大值为 0.85 m/s^2 ,有义值仍为 0.23 m/s^2 ,故可认为二阶平均波浪力对平台加速度响应无影响。而考虑二阶差频后加速度最大值增大到 2.23 m/s^2 ,有义值增大到 0.4 m/s^2 ,相比只考虑一阶波浪力时增大比例分别为 165.48% 和 73.91%;类似的,考虑二阶差频+和频波浪力后加速度最大值为 2.64 m/s^2 ,有义值为 0.47 m/s^2 ,加速度响应再次

增大,相比只考虑一阶波浪力时增大比例分别为 214.29% 和 104.35%。由此可得出二阶平均波浪力对该浮式风力机半潜平台加速度响应无影响,而二阶差频和二阶和频波浪力都会使得平台加速度响应大幅增大,因此在计算该半潜平台加速度响应时应考虑二阶差频和二阶和频的影响。

对该半潜平台 x 方向加速度响应时历进行频谱分析,如图 9 所示。从图中也可明显看出考虑二阶平均波浪力时加速度响应频谱曲线与仅考虑一阶波浪力时几乎一致,而考虑二阶差频、考虑二阶差频+和频时频谱曲线在频率大于 0.2 Hz

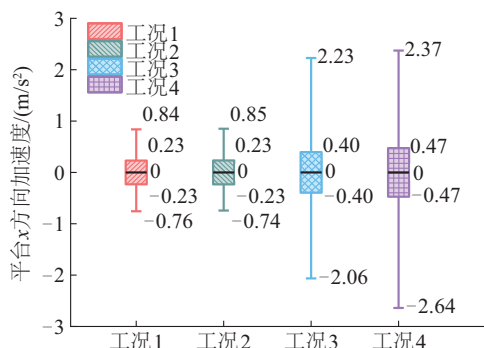


图 8 半潜平台 x 方向加速度响应统计值

Fig. 8 Statistics on acceleration response of semi-submersible platform in x direction

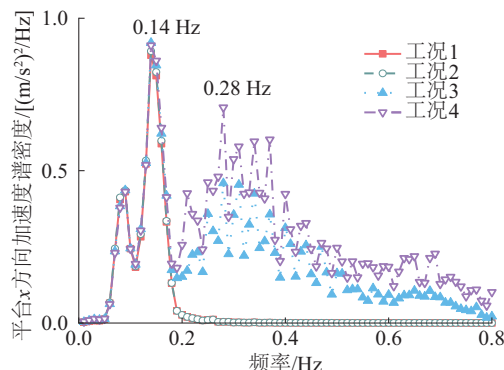


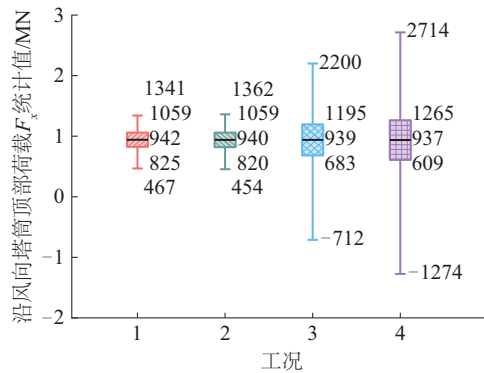
图 9 浮式风力机平台加速度响应频谱图

Fig. 9 Acceleration response spectrum of semi-submersible platform in x direction

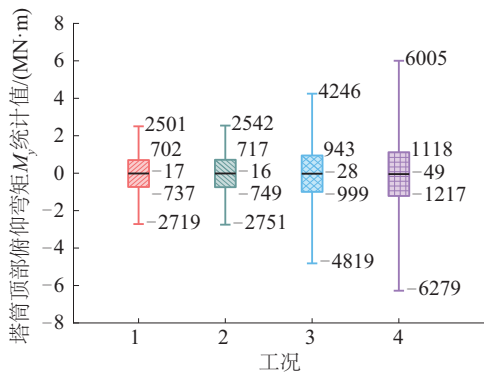
后会明显增大,且考虑二阶差频+和频时增大的更多,这与统计值的分析结论比较一致,即再次验证了二阶平均波浪力对该浮式风力机平台加速度响应无影响,而二阶差频波浪力和二阶和频波浪力都会使得该半潜平台加速度响应大幅增加。

3.2 塔筒顶部荷载响应

对塔筒顶部荷载响应进行分析,取沿风向塔筒顶部受力 F_x 和塔筒顶部俯仰弯矩 M_y 的响应结果进行统计,如图 10 所示。其中仅考虑一阶波浪力时塔筒顶部受力 F_x 均值为 942 kN,最大值为 1341 kN;考虑二阶平均波浪力时 F_x 均值为 940 kN,最大值为 1362 kN,对比可发现二阶平均波浪力对塔筒顶部荷载几乎无影响;而考虑二阶差频后塔筒顶部荷载均值为 939 kN,最大值为 2200 kN,均值与只考虑一阶波浪力时几乎不变,而最大值比只考虑一阶波浪力时明显增大,增大比例为 64.06%;考虑二阶差频+和频波浪力时塔筒顶部荷载均值为 937 kN,最大值为 2714 kN,相比只考虑一阶波浪力时也是均值几乎不变,最大值明显增大,增大比例为 102.39%。由此可得出二阶平均波浪力对该浮式风力机塔筒顶部荷载几乎无影响,而二阶差频波浪力和二阶和频波浪力对塔筒顶部荷载影响显著。从俯仰弯矩 M_y 的分析结果也可得出相同的结论,在此不再赘述。塔筒顶部荷载是浮式风力机塔筒



a. 沿风向受力 F_x



b. 俯仰弯矩 M_y

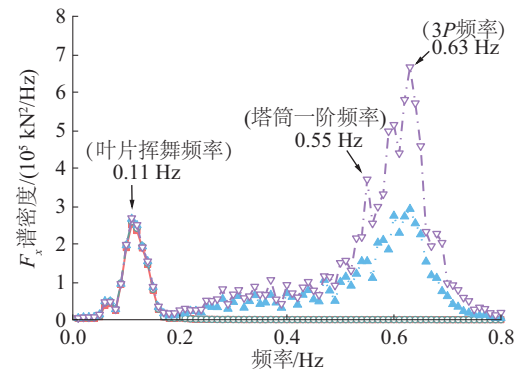
- 工况 1 (仅考虑一阶波浪力)
- 工况 2 (考虑一阶波浪力、二阶平均波浪力)
- 工况 3 (考虑一阶波浪力、二阶差频波浪力)
- 工况 4 (考虑一阶波浪力、二阶差频+和频波浪力)

图 10 浮式风力机塔筒顶部荷载统计值

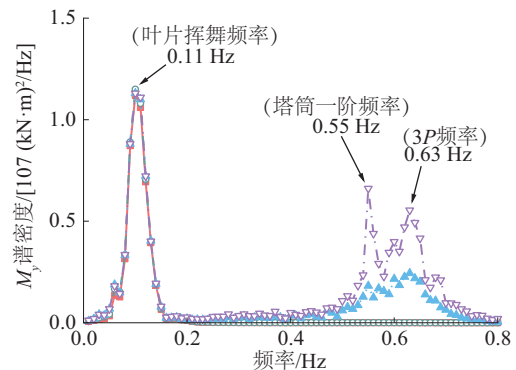
Fig. 10 Statistics of tower top load

设计、半潜平台结构强度计算和疲劳分析的重要输入,特别是对于目前浮式风电工程中大多采用风力机与半潜平台的分体式设计,此时在计算浮式风力机塔筒顶部荷载时考虑二阶差频和二阶和频波浪力的影响具有必要性。

如图 11 所示为塔筒顶部荷载频谱分析结果,从该频谱图中可明显看出在只考虑一阶波浪力和考虑二阶平均波浪力后频谱图中只有低频成分,且在两种情况下的频谱曲线几乎一致,而在考虑二阶差频、考虑二阶差频+和频后频谱图中出现较为显著的高频成分,且在含二阶和频的情况下高频峰值更大,这再次从频域角度证明了二阶平均波浪力对该浮式风力机塔筒顶部荷载无影响,而二阶差频波浪力和二阶和频波浪力对塔筒顶部荷载影响显著。且对比发现二阶差频、二阶和频波浪力仅对高频有影响,而对低频峰值无影响。此外,在 4 种情况下的频谱图中都捕捉到了 0.11 Hz 的谱峰频率,该频率与风力机叶片的挥舞频率一致,在考虑二阶差频和二阶差频+二阶和频的频谱图中都捕捉到 0.63 Hz 的频率,该频率与风力机运转的 3P 频率较接近,而在含二阶高频的频谱曲线中还捕捉到与塔筒俯仰方向一阶固有频率一致的 0.55 Hz 的频率峰值,这说明二阶和频波浪力激发了塔筒的自振。



a. 沿风向受力 F_x



b. 俯仰弯矩 M_y

- 工况 1 (仅考虑一阶波浪力)
- 工况 2 (考虑一阶波浪力、二阶平均波浪力)
- 工况 3 (考虑一阶波浪力、二阶差频波浪力)
- 工况 4 (考虑一阶波浪力、二阶差频+和频波浪力)

图 11 浮式风力机塔筒顶部荷载频谱图

Fig. 11 Spectrum diagram of tower top load

3.3 锚链系泊张力及疲劳

对系泊锚链的动力响应结果进行分析,考虑到环境入射方向为 0° ,此时该浮式风力机 9 根锚链中锚链 6 和锚链 7 受到的系泊张力最大,考虑到锚链 6 和锚链 7 对称布置,故在此仅选取锚链 6 作为代表性锚链进行张力分析。如图 12 所示为锚链 6 系泊张力响应结果统计值,可明显看出考虑二阶波浪力时锚链系泊张力明显增大,说明二阶波浪力对系泊张力有重要影响。具体分析 4 种情况响应结果发现,当仅考虑一阶波浪力时锚链系泊张力均值为 652 kN,最大值为 1498 kN;而考虑二阶平均波浪力后锚链系泊张力均值增大到 688 kN,最大值增大到 1715 kN,均值和最大值分别增大了 5.52% 和 14.49%;当考虑二阶差频波浪力后锚链系泊张力均值仍为 688 kN,最大值为 1676 kN,最大值相比只考虑一阶波浪力时增大了 11.88%;当考虑二阶差频+和频波浪力后锚链系泊张力均值仍为 688 kN,最大值为 1698 kN,最大值相比只考虑一阶波浪力时增大了 13.35%。通过对比考虑不同二阶波浪成分的计算结果可发现,考虑二阶平均波浪力、考虑二阶差频波浪力、考虑二阶差频+二阶和频波浪力 3 种情况下锚链系泊张力的均值相等,最大值也比较接近,且发现二阶和频波浪力对锚链系泊张力几乎无影响,该现象与平台纵荡响应的分析结论比较类似,这验证了在计算半潜浮式风力机锚链系泊张力时,为节约计算时间和计算资源可仅考虑二阶平均波浪力。

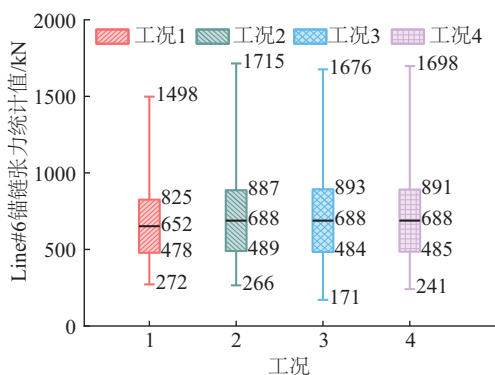


图 12 浮式风力机系泊锚链系泊张力统计值(锚链 6)

Fig. 12 Statistics of mooring tension (Mooring line 6)

对锚链 6 系泊张力响应时历进行频谱分析,结果如图 13 所示,可看出该频谱图中有两个明显的峰值频率,一个为低频响应,对应频率约为 0.02 Hz,一个为波谱响应,对应频率约为 0.08 Hz,这分别与半潜平台纵荡响应的低频峰值频率和波频峰值频率相对应。与纵荡响应频谱图不同的是,在锚链系泊张力频谱图中发现二阶波浪效应对系泊张力的低频响应和波频响应都有影响,考虑二阶波浪效应后低频峰值和波频峰值能量都有所增大,产生该现象主要是因为锚链一方面承受浮体运动产生的系泊张力,另一方面直接在海水中遭受波

浪荷载作用,二阶波浪成分会对其有所影响。而且从频谱图中也可看出,考虑二阶平均波浪力、考虑二阶差频波浪力、考虑二阶差频+和频波浪力三种情况的频谱曲线比较接近,这再次证明对于锚链系泊张力的计算可只考虑二阶平均波浪力。

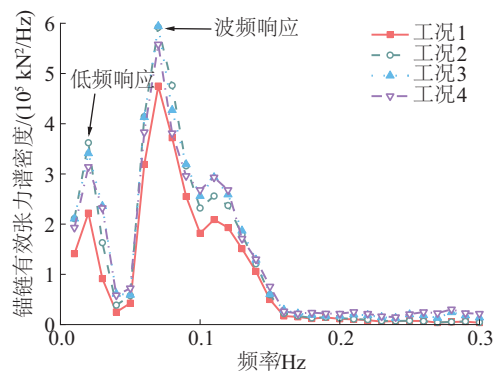


图 13 浮式风力机锚链系泊张力频谱图(锚链 6)

Fig. 13 Mooring tension spectrum diagram of anchor chain for floating wind turbines (Mooring line 6)

下面分析二阶波浪力对锚链疲劳损伤的影响,本研究疲劳计算时采用“国能共享号”南日海域波浪散布图结合风力机运行时的风速、风向、流速、流向联合概率统计进行了疲劳工况合并,最终确定了 21 组疲劳工况。疲劳损伤计算参考 API RP 2SK 规范^[17]推荐的 $T-N$ 曲线,锚链系泊张力循环荷载统计采用雨流计数法。通过之前对锚链系泊张力的分析结论可知,在考虑二阶波浪力时可仅计算二阶平均波浪力,因此只需对比工况 1 和工况 2 的计算结果即可。如图 14 所示,为 9 根锚链 25 a 服役期累积疲劳损伤计算结果。可看出考虑二阶波浪力后所有锚链的累积疲劳损伤在沿锚链长度的每个位置处均明显增大,这说明二阶波浪力对锚链疲劳影响较大,在疲劳分析时不可忽略。同时发现,在本研究中锚链 7 的累积疲劳损伤最大,将由其决定该浮式风力机系泊系统的疲劳寿命。

以锚链 7 为例对疲劳计算结果进行分析,发现在不考虑二阶波浪力时该锚链 25 a 服役期累积最大疲劳损伤为 0.0962,对应的疲劳寿命为 259.88 a,而当考虑二阶波浪力后锚链 25 a 累积最大疲劳损伤增大到 0.176,损伤值增大为原来的 1.83 倍,疲劳寿命降低为 142.05 a。根据 API RP 2SK 规范取安全系数为 5 进行疲劳校核,则得 $0.176 \times 5 = 0.88 < 1.0$,即考虑二阶波浪力后该浮式风力机系泊系统仍是安全的。除此之外,对比锚链 7 最大疲劳损伤发生位置发现在不考虑二阶波浪力时最大疲劳损伤发生在距离锚链上端 23 m 处,而在考虑二阶波浪力后最大疲劳损伤发生在距离锚链上端 15 m 处,这说明二阶波浪力不仅会增大锚链的疲劳损伤,还会对最大疲劳损伤的发生位置产生影响。

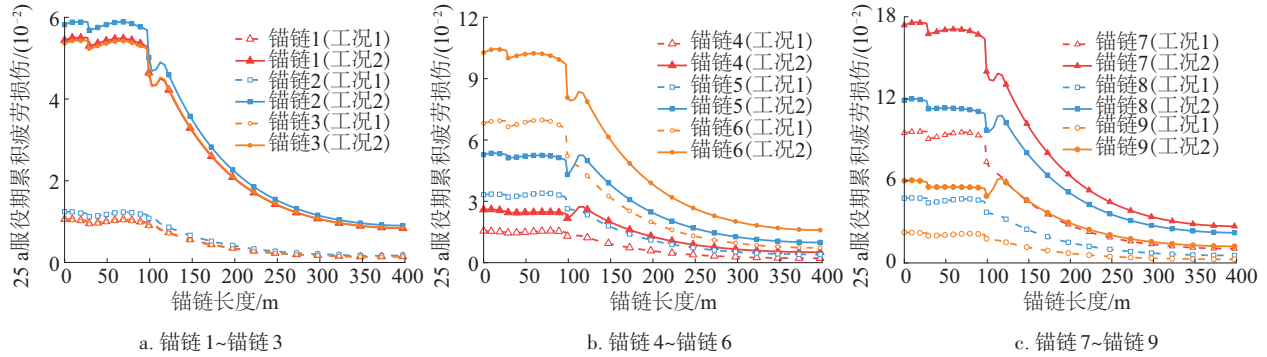


图14 二阶波浪力对系泊锚链疲劳损伤的影响

Fig. 14 Effect of second-order wave force on fatigue damage of mooring lines

4 结论

本文探究了二阶波浪力对半潜浮式风力机动力响应的影响,首先开展了频域计算,得到二阶波浪力 QTFs,并对比了远场法和近场法计算 QTFs 的差异,之后基于 OrcaFlex 软件建立气动-水动-结构-伺服耦合模型,通过时域方法计算了不考虑二阶波浪力、考虑二阶平均波浪力、考虑二阶差频波浪力、考虑二阶差频+和频波浪力情况下浮式风力机的动力响应,并对浮体运动、塔筒顶部荷载、锚链系泊张力及疲劳等的计算结果进行了分析,得出的主要结论如下:

1)远场法和近场法计算的二阶波浪平均波浪力 QTFs 随频率的变化趋势基本一致。当频率小于 1.1 rad/s 时远场法和近场法 QTFs 曲线几乎一致,而当频率大于 1.1 rad/s 时,除个别频率点外,远场法计算的幅值在大部分频率下大于近场法计算的结果。

2)二阶波浪力对半潜平台的运动响应有重要影响,其中主要是二阶平均波浪力和二阶差频波浪力产生影响,而二阶和频波浪力几乎无影响。二阶波浪力主要影响平台运动的低频响应,而对波频响应几乎无影响。对于纵荡响应,考虑二阶平均波浪力和考虑二阶差频波浪力的计算结果基本一致,而对于垂荡和纵摇响应,二阶差频波浪力的影响要大于二阶平均波浪力的影响。二阶平均波浪力对半潜平台加速度响应无影响,而二阶差频波浪力和二阶和频波浪力会造成平台加速度响应的大幅增加。

3)二阶平均波浪力对该浮式风力机塔筒顶部荷载几乎无影响,而二阶差频波浪力和二阶和频波浪力对塔筒顶部荷载影响显著。二阶差频、二阶和频波浪力作用下塔筒顶部荷载的高频响应被激发,在考虑二阶差频和二阶差频+二阶和频的频谱图中捕捉到了与风力机 3P 频率较接近的谱峰,而在含二阶高频的频谱曲线中更是捕捉到了与塔筒一阶固有频率一致的谱峰,这说明二阶和频波浪力激发了塔筒的自振。在浮式风力机塔筒顶部荷载计算时考虑二阶差频和二阶和频波浪力具有必要性。

4)二阶波浪力对锚链系泊张力和疲劳寿命影响显著,在

系泊分析时不可忽略。但其中的二阶和频成分对系泊张力几乎无影响,对于半潜浮式风力机,在计算系泊张力时为节约计算时间和计算资源可仅考虑二阶平均波浪力的作用。二阶波浪力不仅会增大锚链的疲劳损伤,还会对最大疲劳损伤的发生位置产生影响。

[参考文献]

- [1] DEVOY MCAULIFFE F, JUDGE F M, MURPHY J. Modelling the installation of next generation floating offshore wind farms [J]. Applied energy, 2024, 374: 124001.
- [2] 周乐, 马璐, 秦明, 等. 浮式风力机纵荡过程气动稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1): 60-70.
ZHOU L, MA L, QIN M, et al. Aerodynamic stability analysis of floating offshore wind turbines under surge condition [J]. Acta energiae solaris sinica, 2025, 46(1): 60-70.
- [3] WANG B, GAO X F, LI Y, et al. Dynamic response analysis of a semi-submersible floating wind turbine based on different coupling methods [J]. Ocean engineering, 2024, 297: 116948.
- [4] 曹淑刚, 程友良, 范晓旭. 考虑黏性效应的半潜浮式风力机动力特性研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 153-159.
CAO S G, CHENG Y L, FAN X X. Research on dynamic characteristics of semi-submersible floating wind turbine considering viscous effect [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(2): 153-159.
- [5] 曹林阳, 何林, 柴威, 等. 15 MW 半潜式风力机结构响应极值预报研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 534-542.
CAO L Y, HE L, CHAI W, et al. Extreme value estimation of structural response for 15 MW semi-submersible offshore wind turbine [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(9): 534-542.

- [6] ZHENG Z, LEI W, WANG R, et al. Motion analysis of a moored semi-submersible floating offshore wind turbine in focused waves by a consistent second-order hydrodynamic model [C]//ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2023: ISOPE-I-23-042.
- [7] SHI W, ZHANG L X, KARIMIRAD M, et al. Combined effects of aerodynamic and second-order hydrodynamic loads for floating wind turbines at different water depths [J]. *Applied ocean research*, 2023, 130: 103416.
- [8] WANG S S, MOAN T, GAO Z. Methodology for global structural load effect analysis of the semi-submersible hull of floating wind turbines under still water, wind, and wave loads[J]. *Marine structures*, 2023, 91: 103463.
- [9] YANG J, HE Y P, ZHAO Y S, et al. Coupled dynamic response analysis of multi-column floating offshore wind turbine with low center of gravity [J]. *Journal of ocean engineering and science*, 2024, 9(1): 25-39.
- [10] ZHANG Z Y, GUAN L, WU H T, et al. Effects of the second-order hydrodynamics on the dynamic behavior of the platform among the wind-wave hybrid systems [J]. *Journal of engineering research*, 2025, 13 (2): 1603-1616.
- [11] 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 an ultra-large semi-submersible floating wind turbine under second-order wave forces [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(1): 335-345.
- [12] CAO S G, CHENG Y L, DUAN J L, et al. Experimental investigation on the dynamic response of an innovative semi-submersible floating wind turbine with aquaculture cages[J]. *Renewable energy*, 2022, 200: 1393-1415.
- [13] CAO S G, CHENG Y L, DUAN J L, et al. Experimental study of a semi-submersible floating wind turbine with aquaculture cages under combined wind and irregular waves[J]. *Energy*, 2024, 306: 132527.
- [14] 段金龙, 曹淑刚, 常爽, 等. 畸形波作用下新型半潜浮式风力机动力响应特性[J]. *振动与冲击*, 2025, 44 (14): 11-19, 59.
- DUAN J L, CAO S G, CHANG S, et al. Dynamic responses characteristics of a novel semi-submersible floating wind turbine platform undergoing rogue waves [J]. *Journal of vibration and shock*, 2025, 44(14): 11-19, 59.
- [15] 田雨. 流作用下平面网衣水动力特性及变形研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- TIAN Y. The research of hydrodynamic characteristics and deformation of net panels under currents action [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [16] Wind energy generation systems-part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines: IEC 61400-3-2 Ed. 1.0 b: 2025 [S]. International Electrotechnical Commission(IEC), 2025.
- [17] API RP 2 SK, Design and analysis of station keeping systems for floating structures [S]. American: American Petroleum Institute, 2015.

RESEARCH ON INFLUENCE OF SECOND-ORDER WAVE FORCE ON DYNAMIC RESPONSE OF SEMI-SUBMERSIBLE FLOATING WIND TURBINES

Cao Shugang^{1,2}, Li Hongyou¹, Wang Yu¹, Zhu Liang¹, Lu Hongchao³

(1. Longyuan (Beijing) New Energy Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100034, China;

2. College of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. China University of Geosciences, College of Marine Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This study investigates the influence of second-order wave forces on the dynamic response of a semi-submersible floating wind turbines, using the "Guoneng Sharing" as a case study. A comparative analysis of the differences between far-field and near-field methods for calculating the second-order mean wave force transfer functions (QTFs) is presented. A coupled time-domain model of aerodynamic, hydrodynamic, structural, and servo dynamics was established to analyze the dynamic responses of the floating wind turbine under four scenarios: neglecting second-order wave forces, considering second-order mean wave forces, considering second-order difference wave forces, and considering both second-order difference and sum wave forces. The results indicate that the QTFs calculated by the far-field and near-field methods are nearly identical when the angular frequency is less than 1.1 rad/s. However, as the angular frequency increases, the far-field method generally yields larger values than that of the near-field method. The second-order wave forces significantly impact the motion response of the semi-submersible platform, with the primary contributing components being the second-order mean wave forces or second-order difference wave forces, while the second-order sum wave forces exhibit negligible influence. Notably, the second-order difference frequency and sum frequency wave forces significantly affect the acceleration of the semi-submersible platform and the load at the top of the tower, whereas the second-order mean wave forces have no discernible effect on either. The high-frequency response of the tower top load is excited under the influence of second-order difference and sum frequency wave forces and must be taken into account in calculations. Furthermore, second-order wave forces markedly affect the tension and fatigue life of the mooring anchor chains, not only increasing the fatigue damage but also influencing the location of maximum fatigue damage occurrence.

Keywords: offshore wind power; floating wind turbines; second-order wave force; dynamic response; second-order difference frequency; second-order sum frequency