doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2025.06.009

10 MW 浮式风机平台系泊系统优化设计

金 辉，杜伟娜，赵云鹤，闫术明

（中国石油天然气管道工程有限公司，天津 300457）

摘 要：本文针对中国石油管道局自主设计研发的适用于 10 MW 风机的浮式平台，利用势流软件 ANSYS-AQWA 的时域分析方法，研究不同浪向下平台的运动响应、系泊张力和预张力特性。并通过定量研究对不同导缆孔位置、不同系泊链夹角及不同系泊链长度分析，探究其影响系泊系统的一般规律，最终提供一套满足美国石油学会（American Petroleum Institute，API）规范要求的 10 MW 浮式风机平台系泊系统的优化方案。结果表明：系泊系统参数对平台响应具有显著影响。恰当配置这些参数，可显著优化平台的运动特性并改善系泊张力表现，从而有效增加平台的稳定性和安全性。

关键词：浮式风机平台；系泊系统；运动响应；优化设计

中图分类号：P752 **文献标识码：**A **文章编号：**1003-2029（2025）06-0086-12

风能作为一种可再生能源，资源丰富、绿色清洁且分布广泛[1]，是全球新能源发展中的关键方向之一。风电作为利用风能的主要手段，正逐步成为能源转型的重要组成部分。随着海上风电的迅速发展，风电场的建设逐渐从浅水区扩展到深水区，以充分利用更多的风力资源。在深水区域，半潜式平台成为风机主要的支撑结构型式。然而，这些平台需要高效的系泊系统来保持稳定性。当前，系泊系统的成本仍然较高，因此需要探索一种既能确保系统安全可靠运行，又能有效降低成本的解决方案，以推动海上风力发电的进一步发展。

浮式平台对系泊系统参数的变化表现出显著的响应敏感性。因此，审慎地选取系泊系统参数，能够有效提升平台的运动稳定性并优化系泊张力分布。高捷等[2]研究并给出了转塔式系泊系统的设计图谱，该系统适用于 100~600 m 水深，可配置 4 到 10 根系泊线，并支持全链或索链组合形式。研究发现，随着水深的增加，索链组合系统的优势愈发显著，尤其体现在悬垂长度变化不大的前提下，系统回复力能得到显著提升。CONNOLLY P 等[3]比较了不同系泊系统在 200 m、400 m、600 m 和 800 m 水深下的性能。YAN X 等[4]研究了不同水深和系泊参数对浅水区系泊性能和浮式风机平台运动非线性响应的影响。CAMPANILE A 等[5]对 Dutch 平台浮式风机在不同水深下的系泊配置进行了比较评估，涵盖锚链数量、平台位移限值、风机维护需求及锚固系统部署等方面。KIM H 等[6]引入了两个变量，即锚链索的长度和直径，并开发了一种优化的、具有成本效益的系泊系统设计。郑兴等[7]研究聚焦于浅水（40 m）环境下的半潜式平台系泊系统，其关键贡献在于系统地分析了系泊配件（浮筒和配重块）的作用，并对比了单独使用和组合使用两种情况下的优化效果。李辉等[8]通过时域耦合分析，系统地研究了缆索数量、预张力大小、倾角和夹角等参数对平台定位性能的影响，并提出了一套满足 API 规范的优化设计方案。孙香等[9]深入研究了系泊缆长度和配重块重量这两个关键参数对平台运动响应的影响规律。CHEN M 等[10]开发了一种考虑系泊材料

收稿日期：2025-06-01

作者简介：金辉（1993—），男，硕士，工程师，主要从事海洋工程结构设计研究。E-mail：jinhuiauh@163.com

通信作者：杜伟娜（1994—），女，硕士，工程师，主要从事海洋工程结构设计研究。E-mail：1689588172@qq.com

和几何非线性的实时模拟系泊应力响应的有限元模拟技术，并通过 5 种常见的系泊类型验证了模拟技术的可靠性。陈鹏[11]通过对深水半潜式平台系泊系统进行耦合动力分析，阐明了锚链流体动力系数、张力倾角、预张力、布置角度和锚链数量等关键参数对平台系泊性能的作用规律，其研究通过增加张力倾角和降低预张力实现了方案改进。Bureau Veritas 提供了设计浮动风力涡轮机系泊系统的指南和负载条件[12]。SMITH T M 等[13]比较了全链、全缆索和链索结合的锚泊系统，发现链索结合系统在提供相同回复力的情况下更轻，优于单一链或索系统。随着位移增大，夹角为 22.5°~67.5°的布置提供的回复力更稳定，而 40°~60°或 45°~60°的布置则受波浪方向影响较大。余龙等[14]针对多成分系泊线的组合优化难题，构建了一个深水多成分系泊线的优化设计模型。该模型综合考量了系泊线的重量、回复力及经济性。通过求解此多目标函数模型，他们确定了最优模型函数，并将其与图谱设计相结合，应用于实际工程设计。此外，王颢然等[15]将多目标优化算法与频域动态分析相结合，构建了一个自动化的锚泊系统优化设计流程。通过该方法，可以在大范围内自动寻优，平衡平台最大位移和缆索最大张力这两个相互矛盾的目标，最终得到一系列帕累托最优解。CHEN M S 等 [16]在南海设计了一个 15 MW 的浮式风机，考虑到该地区特有的环境负荷，并使用 AWQA 软件计算了时域系泊张力。针对美国国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Labo-ratory，NREL）5 MW 浮式风机基础，肖元等[17]评估了NREL 5 MW 浮式风机基础在悬链线、配重锚链、弹性索及尼龙缆等多种系泊配置下的运动与动力响应。研究表明，复合纤维缆系泊方案技术可行且经济效益显著。对于具有共享系泊电缆的浮式风机，LIANG G 等[18]通过数值自由衰减测试验证了自然周期和自然模式。同时，开展了敏感性研究，以调查系泊性能的影响。研究发现，浪涌和摆动模式下的自然周期对系泊特性的变化最敏感。

尽管浮式风机平台系泊系统已有初步研究，但其深度和应用实践仍显不足，特别是在深水领域，因实际工程案例有限，研究尚有巨大发展潜力。具体而言，现有研究多集中于国际通用基准模型，其结论对特定工程样机的指导性有限；同时，参数分析常显碎片化，未能系统性地揭示平台关键几何参数与系泊布局间的耦合效应。据此，本文针对中国石油管道局自主设计研发的 10 MW 级大型浮式平台，在 100 m 水深下的系泊系统进行优化，其创新性在于研究直接面向特定工程样机，具有鲜明的工程针对性；研究将平台的关键几何参数（导缆孔位置）与传统系泊布置参数（系泊链夹角、长度）纳入统一框架进行系统性的耦合分析。本文旨在通过严谨的时域动态分析，提出一套不仅揭示了内在规律，而且完全满足 API 和挪威船级社（DNV-DET NORSKE VERITAS，DNV）规范的综合优化方案，为我国大型浮式风机平台的自主化设计提供直接且可靠的工程依据。

1　基本理论

1.1　浮体运动方程

浮式风机平台的运动方程通常基于平台的六自由度运动（三个平移方向和三个旋转方向），结合浮力、重力、摩擦力、波浪作用及风力等外部载荷的影响建立。典型的运动方程可以通过拉格朗日方程或直接通过 Newton-Euler 方法来表示。浮式平台在三个平移方向上的运动方程通常表示如下[7-8]。

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{r}} + \boldsymbol{C}(\dot{r})\dot{r} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{r} = \boldsymbol{F}_{\text{ext}} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{M}$ 为平台的质量矩阵；$\boldsymbol{r} = [x, y, z]^{\mathrm{T}}$ 为平台的平移位移向量；$\ddot{r}$为平台的平移加速度；$\boldsymbol{C}(\dot{r})\dot{r}$ 为阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}$ 为平台刚度矩阵；$\boldsymbol{F}_{\text{ext}}$ 为外部作用力向量。

对于旋转运动，平台在三个旋转方向（横摇、纵摇和艏摇）上的运动方程通常表示如下。

$$\boldsymbol{I}\dot{\omega} + C(\omega)\boldsymbol{\omega} + N = M_{\text{ext}} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{I}$ 为平台惯性矩阵；$\boldsymbol{\omega} = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}]^{\mathrm{T}}$ 平台的旋转角速度向量；$\dot{\omega}$为平台角加速度；$C(\omega)\boldsymbol{\omega}$ 为由旋转引起的阻尼力矩；N 为内力矩；M_{ext} 为外部作用力矩。

波浪对浮式平台的影响通常通过波浪力计算。常见的计算方法为 Morison 方程（适用于小尺寸结构物）或基于势流理论的线性波浪理论。在实际应

用中，波浪力 F_{wave} 表示如下。

$$F_{\text{wave}} = \int_{\text{surface}} \rho(u \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} + (\nabla \phi) \cdot F) \mathrm{d}A \tag{3}$$

式中，ρ 为水的密度；ϕ 为流体势函数；u 为流体速度；F 为浮体与水面之间的力。

1.2 势流理论

在不可压缩理想流场中，势流理论是分析结构相互作用的基础性方法。该理论的核心在于，其速度势遵循拉普拉斯方程，具体表达式如下。

$$\Delta \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Z^2} = 0 \tag{4}$$

式中，φ 为流场的速度势。

在物体表面，流体质点沿其运动，故其法向速度分量需与物体表面法向速度保持一致，具体表达如下。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = v \cdot \boldsymbol{n} \tag{5}$$

式中，v 为运动速度；$\boldsymbol{n}$ 为法向单位向量。

对自由表面进行线性化处理可得式(6)。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} - k = 0 \tag{6}$$

式中，k 为波数，且满足 $k = \dfrac{\omega^2}{g}$；$z = 0$。

对于水深 h，入射波速度势表示如下。

$$\varphi_0 = \frac{iga_w}{\omega} \frac{\mathrm{ch}[k(z+h)]}{\mathrm{ch}(kh)} \mathrm{e}^{-ik(x\cos\beta + y\sin\beta)} \tag{7}$$

式中，a 为波幅；β 为入射波角度。

相应地，速度势 φ 可分解如下。

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_R + \varphi_D \tag{8}$$

$$\varphi_R = i\omega \sum_{j=1}^{6} x_j \varphi_j \tag{9}$$

式中，φ_D 为绕射势；φ_R 为辐射势；x_j 为结构运动 x 的第 j 个分量；φ_j 为单位幅值辐射势。

基于伯努利方程，可计算作用于结构物的波浪力，进而确定流体动压力。

$$p(x,y,z,t) = -\rho \frac{\partial \phi(X,t)}{\partial t} = \mathrm{Re}[iw\rho\varphi(X)\mathrm{e}^{-iwt}] \tag{10}$$

作用于结构物的波浪力，可通过对湿表面积分来确定。

$$F_k = \mathrm{Re}\left[\left(F_{0j} + F_{dj} + \sum_{k=1}^{6} F_{jk} x_k \right) \mathrm{e}^{-iwt} \right] \tag{11}$$

式中，F_{0j} 为入射波浪力，且 $F_{0j} = -iwt[\int_{S_0} \varphi_0(X) n_j \mathrm{d}S]\mathrm{e}^{-iwt}$；$F_{dj}$ 为绕射力，且 $F_{dj} = -iw\rho \int_{S_0} \varphi_d(X) n_j \mathrm{d}S$；$F_{kj}$ 为辐射力，且 $F_{kj} = -iw\rho \int_{S_0} \varphi_{rk}(X) n_j \mathrm{d}S$。

其中，辐射力还可以表示如下。

$$F_{kj} = w\rho \int_{S_0} \mathrm{Im}[\varphi_{rk}(X)] n_j \mathrm{d}S - iw\rho \int_{S_0} \mathrm{Re}[\varphi_{rk}(X)] n_j \mathrm{d}S \tag{12}$$

$$A_{rkj} = \frac{\rho}{w} \int_{S_0} \mathrm{Im}[\varphi_{rk}(X)] n_j \mathrm{d}S \tag{13}$$

$$B_{rkj} = -\rho \int_{S_0} \mathrm{Re}[\varphi_{rk}(X)] n_j \mathrm{d}S \tag{14}$$

式中，A_{rkj} 为附加质量；B_{rkj} 为辐射阻尼。

为计算结构物运动响应，需在大地坐标系中建立动力学方程。基于牛顿定律，并考虑附加质量与辐射阻尼，可推导如下结果。

$$[-\omega^2(M_S + M_a(\omega)) - i\omega C_{(\mathrm{rad})}(\omega) + K]x(\omega) = F(\omega) \tag{15}$$

式中，M_S 为结构质量；$M_a(\omega)$ 为附加质量；$C_{(\mathrm{rad})}(\omega)$ 为辐射阻尼；K 为刚度；$x(\omega)$ 为位移；$F(\omega)$ 为波浪力。

1.3 系泊张力

系泊链的动力学计算基于集中质量法进行分析。其原理是将系泊链等效为多自由度弹簧–质量系统，并运用有限差分法求解系泊动力学问题。如图 1 所示，在系泊张力分析中，系泊链被离散为由两节点和无质量直线段构成的有限单元。该方法的核心在于，系泊链的各项物理特性（如质量、浮力、附加质量、拖曳力等）及所受的力和位移，均被等效地集中并施加于其连接的节点上。

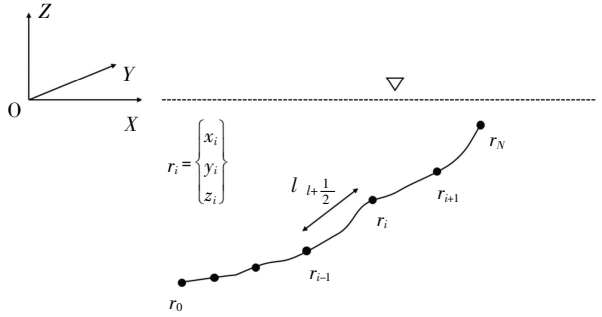


图 1 集中质量法示意图

节点 Pi 的运动方程可由牛顿第二定律得式(16)。

$$a_{in}|_{i+1} m_i a_i + 0.5 e_{i+1} a_{in}|_{i+1} + 0.5 e_i a_{in}|_i = F_i \tag{16}$$

式中，m_i 为系泊链单元质量；a_i 为单位加速度；e_i 和 e_{i+1} 分别为 r_i 和 r_{i+1} 之间的质量，$a_{in}|_{i+1}$ 和 $a_{in}|_i$ 为加速度 a_i 的法向量的分量；F_i 为节点周围两个单元中系泊链张力、流体阻力、系泊链单元重力与浮力的矢量和。

系泊链的运动方程可表示如下。

$$\begin{bmatrix} m_i & 0 & 0 \\ 0 & m_i & 0 \\ 0 & 0 & m_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + 0.5 e_{i+1} \begin{bmatrix} e_y^2 + e_z^2 & -e_x e_y & -e_x e_z \\ -e_x e_y & e_x^2 + e_z^2 & -e_y e_z \\ -e_x e_z & -e_y e_z & e_y^2 + e_x^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_y^2 + e_z^2 & -e_x e_y & -e_x e_z \\ -e_x e_y & e_x^2 + e_z^2 & -e_y e_z \\ -e_x e_z & -e_y e_z & e_y^2 + e_x^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \end{bmatrix} \tag{17}$$

系泊链的约束方程可表示如下。

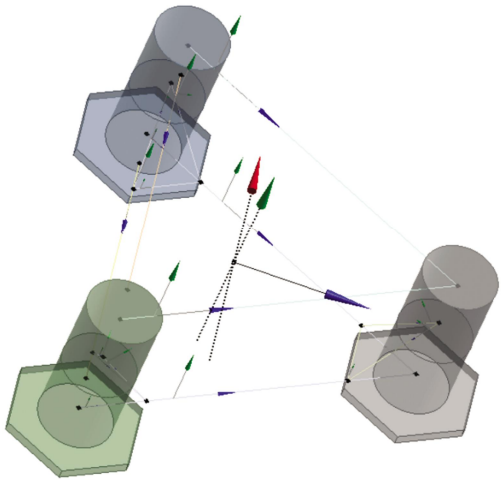
$$(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2 = l^2 \left(1 + \frac{T_i}{A_i E_i}\right)^2, \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{18}$$

式中，E_i 为弹性模量；A_i 为截面积；T_i 为张力。结合式(4)和式(5)即可得到系泊链的动态响应。

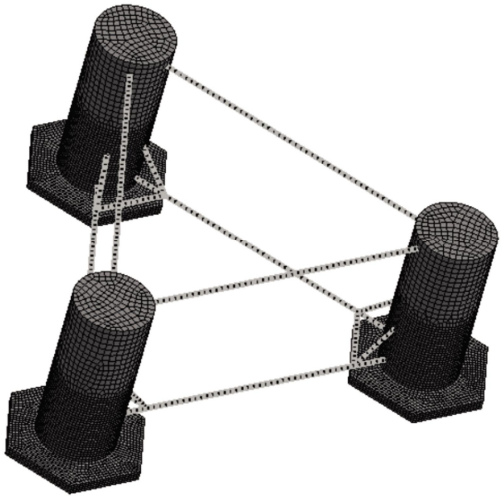
1.4　ANSYS-AQWA 数值建模方法

本节给出 10 MW 浮式风机平台在 ANSYS-AQWA 中的数值建模流程、单元选取、波浪模型，并说明其选用依据，以保证后续时域分析结果的工程可信度。首先采用 AQWA-Line 的三维面元法建立湿表面模型。三立柱半潜式平台在 Design Modeler 中生成实体如图 2(a)所示，对横撑部分进行莫里森单元建模，并以 0.6 m 的基准尺寸划分四边形面元，最终得到 19 086 个网格单元网格模型如图 2(b)所示。平台湿表面采用高阶面元离散，通过DIFFRACTION模块，计算得到平台的频域水动力系数附加质量、辐射阻尼和一阶波浪力传递函数。

针对波浪模型，频域分析依托线性势流理论，将复杂海况下的不规则波分解为一系列规则波的叠加，进而在 0.01~0.56 Hz 范围内以 0.02 Hz 步长计算平台在各频率与浪向下的水动力系数及单位幅值一阶波浪力，并以 JONSWAP 谱描述不规则波能量分布，其特征波高与谱峰周期按设计海况设定；同时引入二阶波浪力以捕捉低频慢漂运动，从而为系泊系统的优化设计奠定可靠的数值基础。



(a) Design Modeler 实体图



(b) 网格单元图

图 2　单元模型图

2　模型参数

2.1　浮式风机平台模型

计算分析选用中国石油管道局自主研发的浮式风机平台，其可搭载 10 MW 风电机组，工作水深 100 m。本平台为三立柱柱稳式平台，总体构型呈等边三角形布局，三个圆柱形立柱分别布置于等边三角形三个顶点，六边形垂荡板直接与三个顶点位

置处立柱下端相连，构成凸台式结构，三根立柱分别由相同的水平横撑直接进行连接，并在三根立柱下端做了加强处理。图 3 展示了该模型，其详细参数见表 1。

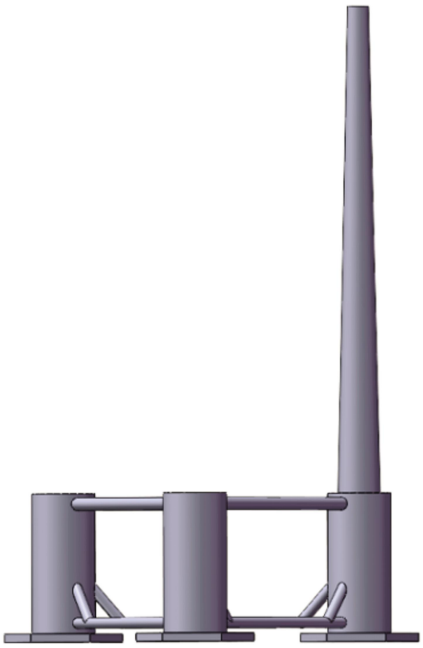


图 3 浮式风机平台模型

表 1 平台主要参数

参数	数值
总长/m	84.87
总宽/m	98.0
高度（基线到甲板）/m	35.0
立柱直径/m	15.5
立柱高度/m	35
垂荡板对角线/m	28
垂荡板高度/m	2.0
吃水/m	18
质量/kg	1.398×10^{7}
重心位置(x,y,z)/m	(0,0,−6.07)
横摇惯性矩/(kg·m^2)	1.445×10^{10}
纵摇惯性矩/(kg·m^2)	1.797×10^{10}
艏摇惯性矩/(kg·m^2)	2.874×10^{10}
排水体积/m^3	1.298×10^{4}

2.2 系泊系统布置

平台采用 2 × 3 系泊方案，每个立柱设两根系泊链，拟采用吸力锚桩设计方案将系泊链锚固于海底，每座风机设置 6 个吸力锚桩，单台吸力锚基础约 100 t，入土 11 m，承载能力在 12 000 kN 以上，以保障浮式平台在海上平稳运行。系泊链参数如表 2 所示。

表 2 系泊链参数

参数	系泊系统类型	系泊链断裂强度/kN	系泊链数量	锚深度/m	正常悬链线直径/m	悬链线线性密度/(kg·m^{-1})	拉伸刚度/MN
数值	悬链线式	10 510	6	100	0.152	200	3 270

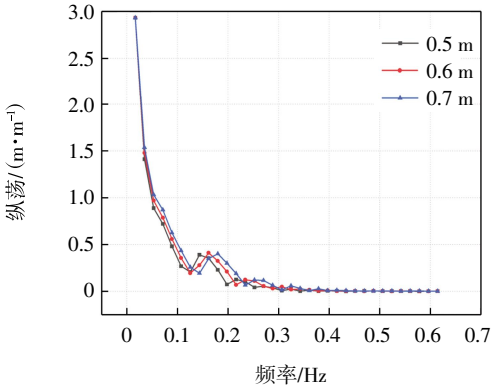
3 计算结果

本文采用 ANSYS-AQWA 进行时域计算，平台的设计作业平均水深为 100 m，规范要求考量不规则波浪的随机性与系泊链的非线性动态行为。据此，各工况单次模拟时长设为 4 000 s。在本文计算中，作业工况选取有义波高 2.44 m 平均周期 7.87 s 的不规则波；生存工况选取有义波高 13.3 m 平均周期 16.3 s 的不规则波。分别从导缆孔位置、系泊链夹角和系泊链长度三个方面进行研究，导缆孔位置为垂荡板边缘和立柱顶端边缘，同时为保证系泊系统的安全及足够的水平回复刚度，系泊链夹角为 10°、15°、20°、25°、30°，为防止预张力变化对平台安全性造成影响，系泊链长度为 497 m、498 m、499 m、500 m、501 m、502 m。本文聚焦于系泊参数对平台运动响应与系泊链张力的影响。后续章节将依次展示单一变量在不同浪向工况下的分析成果。

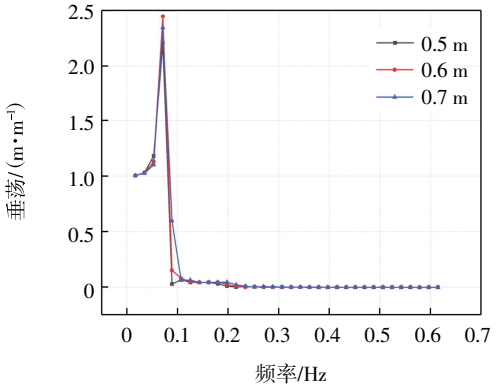
3.1 平台幅值响应算子

本文通过 ANSYS-AQWA 对浮式平台进行水动力特性分析。模拟设定水深 100 m，波浪入射角 15°间隔覆盖 360°。其中，浮式风机平台在纵荡、纵摇和垂荡方向的运动响应尤为突出，据此对三个自由度的结果进行网格无关性验证，网格选定为水上 1.2 m 尺寸的 4 节点四边形单元，水下分别选取尺寸为 0.5 m、0.6 m、0.7 m 的 4 节点四边形单元，对应的网格总数分别为 24 737、19 086、12 254，幅值响应算子（Response Amplitude Operator，RAO）对比结果如图 4 所示。由图 4 可知不同网格数量的 RAO 结果相差不大，且变化趋势也相同，仅在峰值处会有较小的误差，因此，兼顾计算效率和计算精

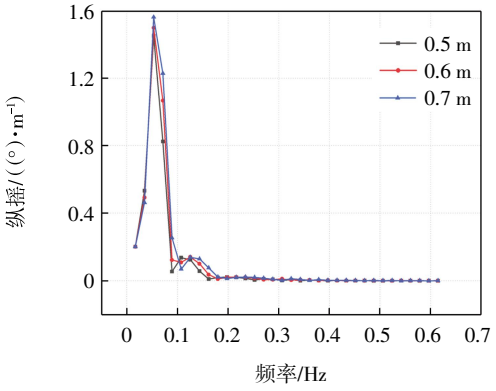
度最终选取水下网格尺寸为 0.6 m 的网格模型，并保证后面的计算均据此进行。



(a) 纵荡



(b) 垂荡

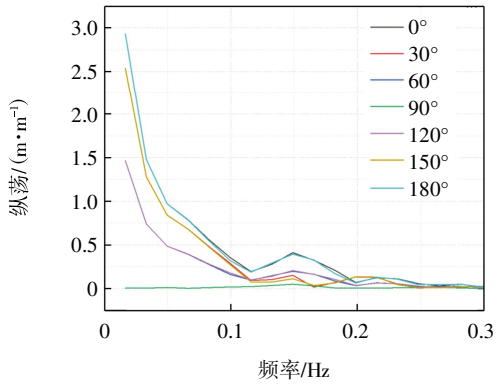


(c) 纵摇

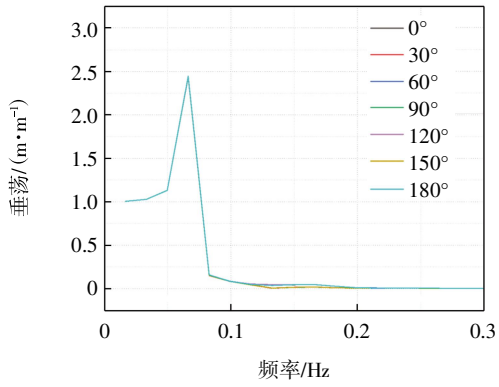
图 4　网格无关性验证

此外，在分析中还需进一步考量结构的对称性及其系泊布置的影响，选取 0°、30°、60°、90°、120°、150°和 180°浪向，平台六自由度方向的 RAO 计算结果如图 5 所示。

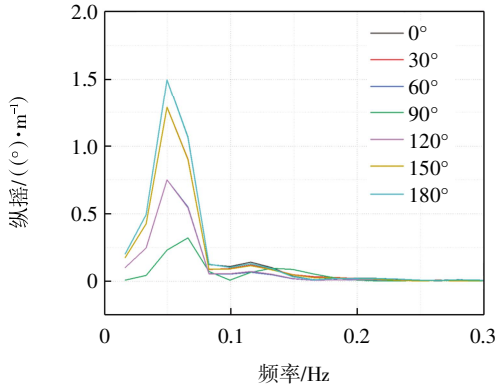
由图像分析可以得到：对于纵荡自由度，RAO 随着频率的增大而减小，之后变得相对平缓。在 0°和 180°浪向下，频率在 0.001 7 ~0.1 Hz 附近的 RAO



(a) 纵荡



(b) 垂荡



(c) 纵摇

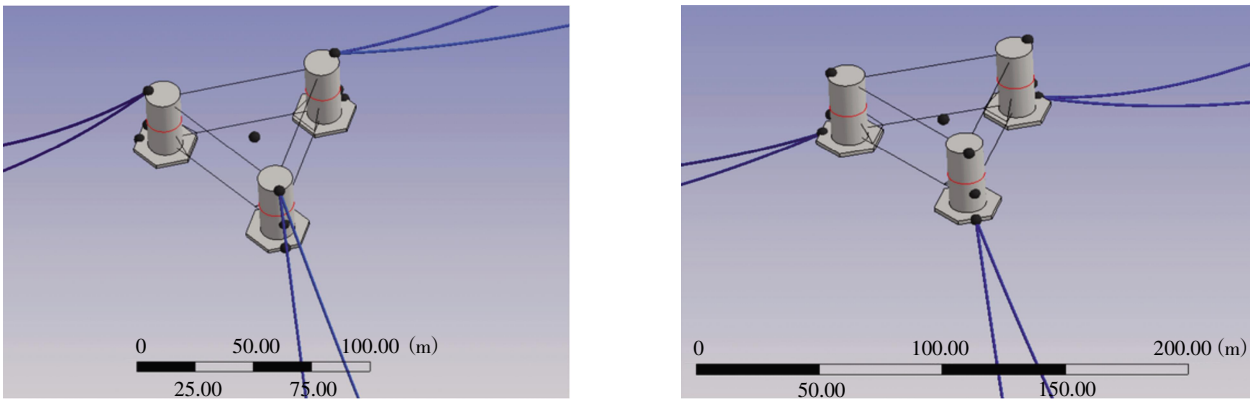
图 5　平台幅值响应算子

下降幅度较大。并且在不同入射浪向角下，RAO 纵荡随入射角的增大而减小；对于横荡，整体的变化趋势和峰值大小与纵荡十分相似；对于垂荡，在不同的浪向下，随着频率的增大 RAO 先是在 0.066 Hz 达到一个峰值，然后急剧减小，最后趋于平缓。对于横摇，RAO 大小随着频率增大先是增大到一个峰值（约在 0.06 Hz 处），随之又逐渐减小，而不同浪向的变化趋势也略有不同；对于纵摇，RAO 的整体趋势和垂荡相似，在 0.049 Hz 达到一个峰值，然后

急剧减小，略有上升趋势，最后趋于平缓；对于艏摇，90°和 150°的 RAO 峰值较大，其余浪向的 RAO 均趋于 0。除此之外，平台固有周期由 RAO 曲线的首个峰值频率确定。垂荡和纵摇的 RAO 曲线峰值显著，分别位于 0.066 Hz（固有周期 15.15 s）和 0.049 Hz（固有周期 20.41 s）。输入波浪谱的谱峰周期为 7.87 s，避开波浪荷载能量集中区，有效防止剧烈共振响应。

3.2 导缆孔位置的影响

本节分别研究系泊的导缆孔在立柱顶端边缘和垂荡板边缘时的平台运动响应及系泊张力，并比较不同浪向下平台运动响应的幅值及系泊张力的最大值。不同导缆孔系泊链布置如图 6 所示。



(a) 导缆孔位于柱顶　　(b) 导缆孔位于垂荡板

图 6 不同导缆孔位置系泊布置

图 7 为作业工况，不同导缆孔位置下平台进行运动响应及系泊张力的计算，由图可知导缆孔在立柱顶端时其垂荡相比之下较小，纵摇方向不仅小还表现出规律的变化，而纵荡方向虽然较大，但对于整个平台而言仍不明显。图 8 为生存工况下平台响应及系泊张力的计算结果，导缆孔在立柱顶时三个自由度均较在垂荡板处时小且变化更规则，导缆孔在柱顶时系泊张力会较在垂荡板处时偏大，但安全系数均在规范要求的范围内，由于对系泊系统影响较大的自由度为纵荡，浮式风机平台的纵荡运动主要取决于其所受的水平力，该力由波浪力与系泊系统水平分量共同作用形成。鉴于平台吃水深度固定，波浪力可被视为常量，故系泊系统是主要影响平台纵荡的因素，而生存工况比作业工况更具有说服力，从平台的响应、安装布置和减少建造安装成本角度而言，优选系泊链布置在立柱顶端边缘。

3.3 系泊链夹角的影响

平台采用 2 × 3 系泊方案，每个立柱设两根系泊链。因此，每相邻两根系泊链夹角也是系泊设计中的关键参数。在 3.2 的基础上最优布置方案为立柱顶端边缘，研究系泊链夹角为 10°、15°、20°、25°、30°时系泊的张力和平台的运动响应。

表 3 汇总了不同系泊链夹角下平台运动响应与系泊张力的统计数据，图 9 给出了在不同浪向下平台运动响应和系泊张力的峰值随系泊链夹角的变化。由图 9 可知，在各个浪向下，平台的水平位移随浪向增大而减小，在浪向为 0°时、系泊链夹角为 15°时最小；系泊张力的最大值随系泊链夹角的增大整体呈上升趋势。然而，系泊链夹角过小可能引发链体摩擦碰撞，增加海底布设难度，并削弱系统安全性。综合权衡，系泊链夹角设为 15°，能有效平衡各方面考量，从而使整体系统性能达到最优。

3.4 系泊链长度的影响

本节基于 3.2 和 3.3 节针对导缆孔位置在立柱顶端和系泊链夹角为 15°的最优方案，通过改变系泊链长度进行系泊链长度的影响研究。系泊系统呈典型非线性回复刚度，其初始刚度取决于预张力值，预张力值不仅影响平台偏移量，更直接制约运行时系泊张力。据此，分别研究了系泊链长度为 497 m、498 m、499 m、500 m、501 m 和 502 m 时平台的运动响应、系泊张力和预张力大小的影响。

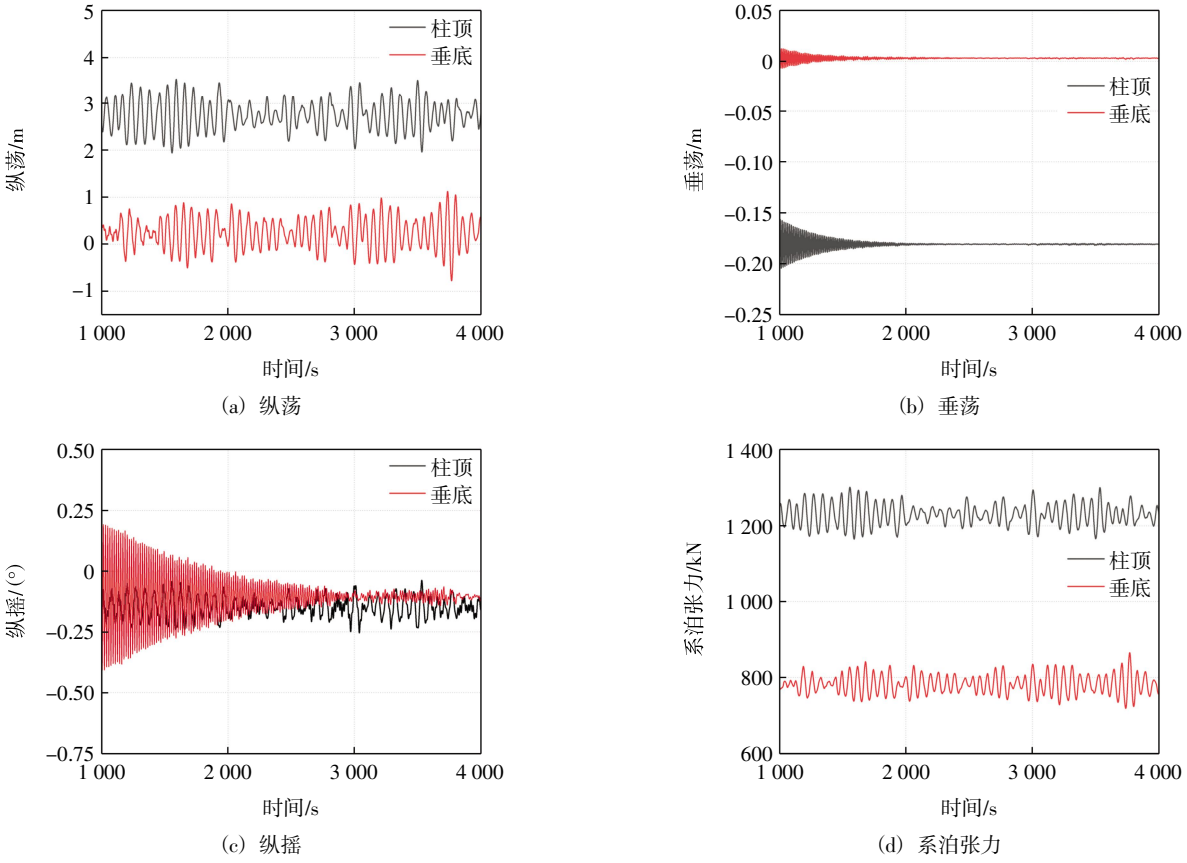


图 7　作业工况下不同导缆孔位置平台响应及系泊张力

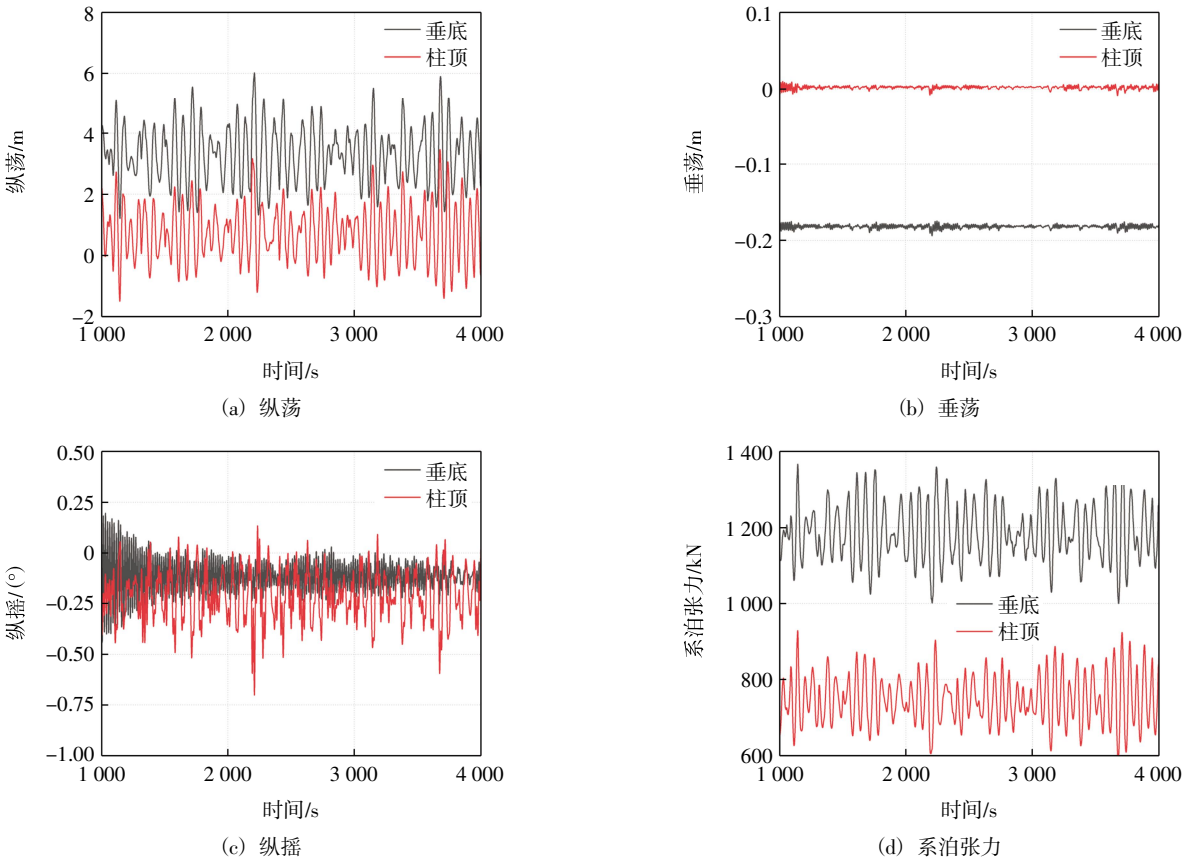
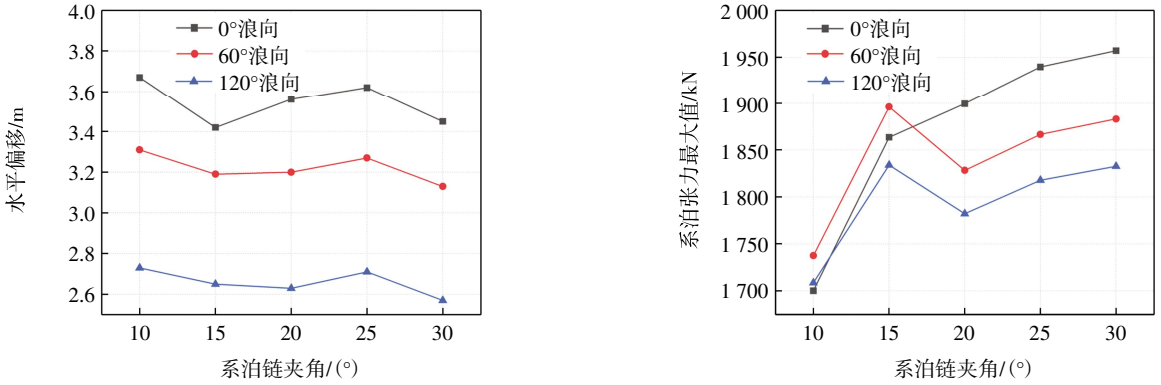


图 8　生存工况下不同导缆孔位置平台响应及系泊张力

表 3 生存工况下不同系泊链夹角的响应结果

系泊链夹角/(°)	浪向/(°)	水平位移/m		系泊链	
		最大值	最小值	张力最大值/kN	安全系数
10	0	3.67	−0.51	1 700.1	6.18
	60	3.31	−0.46	1 737.5	6.05
	120	2.73	−0.62	1 708.6	6.15
15	0	3.42	−0.68	1 863.7	5.64
	60	3.19	−0.46	1 896.3	5.54
	120	2.65	−0.99	1 834.1	5.73
20	0	3.56	−0.62	1 899.7	5.53
	60	3.20	−0.47	1 828.4	5.75
	120	2.63	−0.71	1 782.2	5.90
25	0	3.62	−0.54	1 939.8	5.42
	60	3.27	−0.46	1 866.7	5.63
	120	2.71	−0.62	1 817.9	5.78
30	0	3.45	−0.71	1 957.1	5.37
	60	3.13	−0.47	1 883.3	5.58
	120	2.57	−0.78	1 832.7	5.73



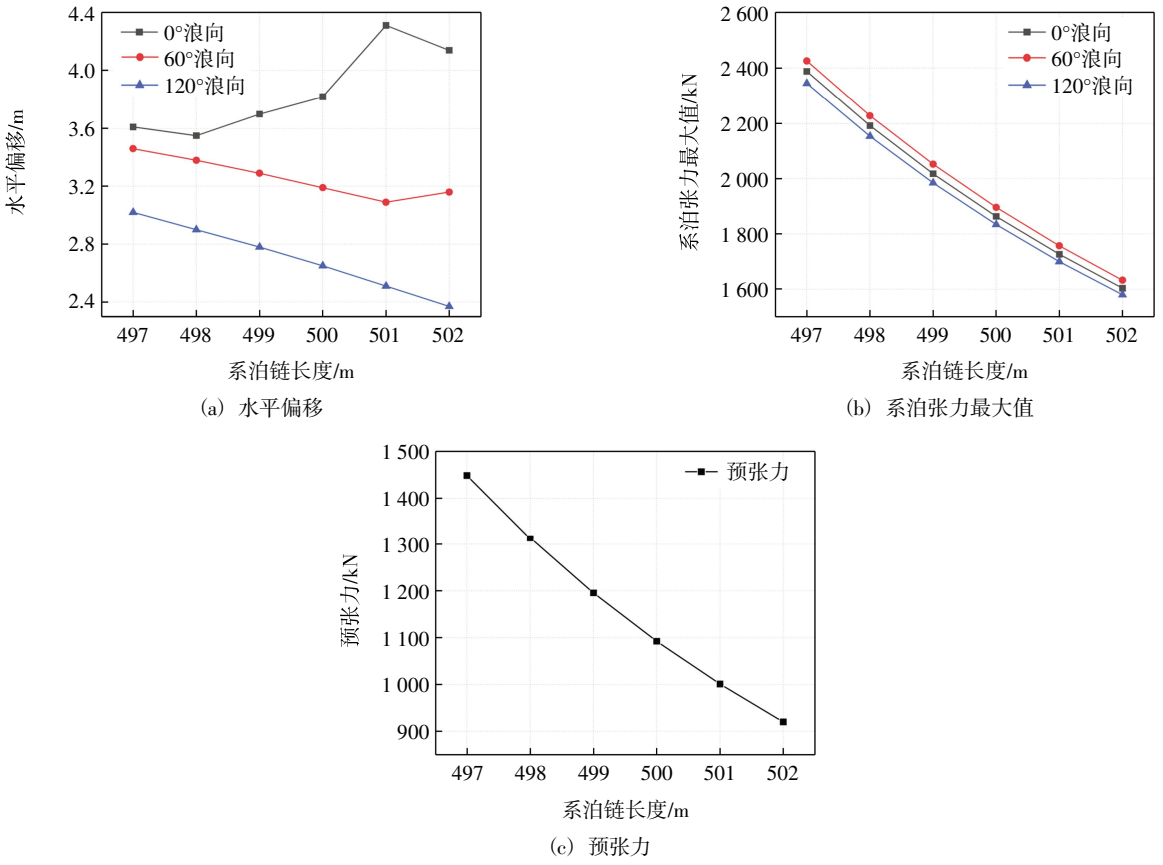
(a) 水平偏移 (b) 系泊张力最大值

图 9 系泊链夹角对响应最值的影响

表4 给出了不同系泊链长度下平台水平偏移和系泊张力最大值的统计结果，图 10 呈现了不同浪向下的响应曲线。分析显示，在不同浪向下，系泊链长度的增加导致预张力逐渐降低，导致给平台提供的竖向力减小，相较于最大预张力（497 m），最大值减小了约 24.1%；平台偏移量亦呈现显著降低，相较于最大平台偏移（497 m），60°浪向最大值降低了约 7.8%，120°浪向最大值降低了约 12.3%，这表明系泊链长度能有效约束其位移；同期，不同浪向下系泊张力的最大值随系泊链长度增加而减小，不同浪向下最大系泊张力减小的幅度相差不大，相较于最大系泊张力（497 m）约减小了22.1%。安全系数均满足规范[16]中要求的 1.67，然而，系泊链长度不足可能对张紧设备材料提出严苛要求。鉴于此，审慎选择系泊链长度对于有效控制平台的水平

表 4 生存工况下不同系泊链长度的响应结果

系泊链长度/m	浪向/(°)	水平位移/m		系泊链	
		最大值	最小值	张力最大值/kN	安全系数
497	0	3.61	−0.35	2 388.4	4.40
	60	3.46	−0.35	2 426.0	4.33
	120	3.02	−0.92	2 345.2	4.48
498	0	3.55	−0.50	2 191.8	4.79
	60	3.38	−0.38	2 227.9	4.72
	120	2.90	−0.88	2 153.7	4.88
499	0	3.70	−0.52	2 018.0	5.21
	60	3.29	−0.42	2 052.5	5.12
	120	2.78	−0.94	1 984.5	5.30
500	0	3.82	−0.68	1 863.7	5.64
	60	3.19	−0.46	1 896.3	5.54
	120	2.65	−0.99	1 834.1	5.73
501	0	4.31	−0.91	1 726.2	6.09
	60	3.09	−0.51	1 757.1	5.98
	120	2.51	−1.13	1 699.9	6.18
502	0	4.14	−0.99	1 603.5	6.55
	60	3.16	−0.55	1 632.7	6.44
	120	2.37	−1.05	1 580.0	6.65



(a) 水平偏移　(b) 系泊张力最大值　(c) 预张力

图 10　系泊链长度对响应最值的影响

位移及系泊链的峰值张力至关重要，但应避免由于过大的预张力导致系统疲劳寿命的大幅降低，最终选取的系泊链长度为 500 m。

综上所述，经过系泊参数的优选后，得到针对 10 MW 浮式风机平台的最优系泊方案如表 5 所示，最优系泊布置方式及波浪方向如图 11 所示。

表 5　最优系泊方案

导缆孔位置	导缆孔 Z 坐标/m	预张力/kN	系泊链夹角/(°)	系泊链长度/m
立柱顶端	17	1 448.3	15	500

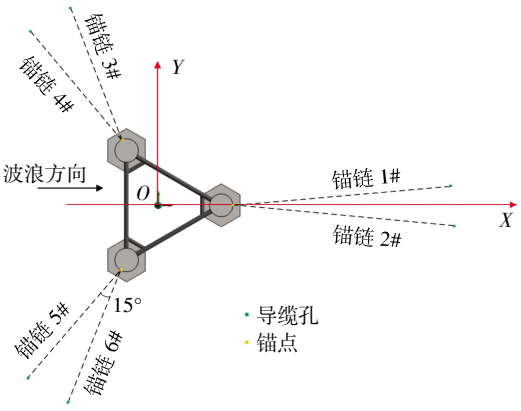


图 11　系泊布置图

3.5　破断工况的校核

对生存工况下系泊的破断校核主要在系泊张力响应中找到最大的系泊张力把这根系泊链断掉，并把此时刻的六自由度运动重新赋予平台进行时域响应计算。经比较平台的第一根系泊在 1 142.7 s 时受力最大，最大受力为 1 863.7 kN，与它相邻的第二根系泊的最大系泊张力为 2 043.7 kN，其系泊张力响应如图 12 所示，此时安全系数为 5.14 大于规范[19]中要求的 1.67，符合要求。

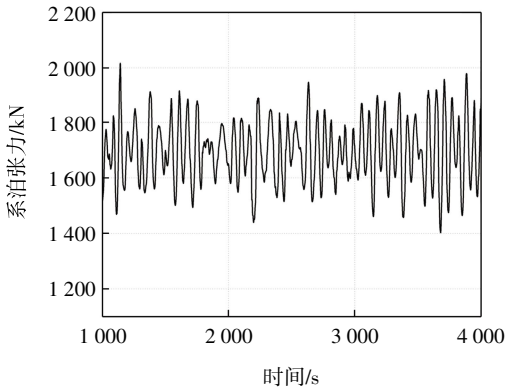


图 12　系泊张力

3.6 数值模型验证

海洋中风、浪、流的联合作用使浮式平台产生复杂的六自由度运动。为确保其稳定性，对浮式风机平台固有周期的设计至关重要。据此，本部分采用OpenFAST软件对浮式风机系统进行自由衰减试验，结果如表6所示，本设计的纵荡周期超过100 s，纵摇与垂荡周期均在20~30 s以上，这些数值满足DNV规范[20]的指导要求，证明了平台在设计上可有效规避共振风险，保障结构安全。

表6 平台固有周期和频率

自由度	固有周期/s	固有频率/(rad·s^{-1})
纵荡	114.42	0.055
横荡	121.50	0.052
垂荡	20.08	0.313
横摇	24.73	0.254
纵摇	25.27	0.249
艏摇	122.60	0.051

4 结 论

本文以10 MW浮式风机平台为对象，运用AQWA时域分析方法，对其设计方案进行了深入探究，针对所设计的浮式风机平台，研究不同导缆孔位置、系泊链夹角及系泊链长度下平台的运动响应、系泊张力及预张力的大小，旨在得到一套10 MW浮式风机平台的最优系泊方案，主要结论如下。

(1) 不同导缆孔位置、不同系泊链夹角及不同系泊链长度下平台的水平偏移和系泊张力均不同，且合理选择系泊参数可以明显改善系泊系统的定位性能，这为优化系泊系统提供选择依据。

(2) 不同浪向下平台的响应也大不相同，在完整工况下，平台运动特性表现为：迎浪时，纵荡与纵摇是主要响应模式；斜浪时，则以垂荡为主，而破损条件下六个自由度运动都较为显著。三个浪向下，0°时平台偏移量最大，120°时平台偏移量最小。不同浪向时，不同方向的系泊受力也不相同。

(3) 相较作业工况，生存工况下平台运动响应与系泊力均有所增强。若最大受力锚链断裂，相邻锚链张力将急剧攀升。

(4) 系泊参数优化显著提升平台稳定性。在最优系泊方案下，平台水平偏移量与系泊张力均符合API规范，确保平台稳定运行及安全生存。

参考文献：

[1] 胡志强. 浮式风机动力响应分析关键技术综述[J]. 船舶与海洋工程，2020，36(6)：1-13.

[2] 高捷，谭家华，陈小红. 转塔式锚泊系统初步设计图谱[J]. 海洋工程，1997，1：13-15，18.

[3] CONNOLLY P，HALL M. Comparison of pilot-scale floating offshore wind farms with shared moorings[J]. Ocean Engineering，2019，171(1)：172-180.

[4] YAN X，CHEN C，YIN G，et al. Numerical investigations on nonlinear effects of catenary mooring systems for a 10 MW FOWT in shallow water[J]. Ocean Engineering，2023，276：114207.

[5] CAMPANILE A，PISCOPO V，SCAMARDELLA A. Mooring design and selection for floating offshore wind turbines on intermediate and deep water depths[J]. Ocean Engineering，2018，148 (15)：349-360.

[6] KIM H，CHOUNG J，JEON G Y. Design of mooring lines of floating offshore wind turbine in Jeju offshore area[C]//ASME 2014 33rd International Conference on Ocean，Offshore and Arctic Engineering. San Francisco：American Society of Mechanical Engineers，2014.

[7] 郑兴，张天胤，胡振红，等. 小水深下浮式风机系泊系统配件特性研究[J]. 船舶力学，2024，28(7)：1051-1062.

[8] 李辉，刘春雷，张伟，等. 深水半潜式平台张紧式系泊系统优化设计[J]. 船舶工程，2018，S1：287-294.

[9] 孙香，田振亚，朱嵘华. 系泊长度及配重对浮式风机平台运动响应的影响研究[J]. 海洋工程装备与技术，2024，11(1)：59-64.

[10] CHEN M，LI C B，HAN Z，et al. A simulation technique for monitoring the real-time stress responses of various mooring configurations for offshore floating wind turbines[J]. Ocean Engineering，2023，278：114366.

[11] 陈鹏. 深水半潜式平台系泊系统耦合动力响应研究[D]. 大连：大连理工大学，2010.

[12] Bureau Veritas. Classification and certification of floating offshore wind turbines[R]. Neuilly sur Seine：Bureau Veritas，2015.

[13] SMITH T M，CHEN M C，RADWAN A M，et al. Systematic data for the preliminary design of mooring systems[J]. Proceedings of the fourth International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium，1985，1(1)：403-407.

[14] 余龙，谭家华. 深水多成分悬链线锚泊系统优化设计及应用研究[J]. 华东船舶工业学院学报（自然科学版），2004，18(5)：8-13.

[15] 王颢然，潘方豪，单铁兵，等. 深海半潜式平台锚泊定位系统优化设计[J]. 船舶力学，2020，24(7)：900-907.

[16] CHEN M S，JIANG J L，ZHANG W，et al. Study on mooring design of 15 mw floating wind turbines in south china sea[J]. Journal of Marine Science and Engineering，2023，12(1)：33.

[17] 肖元，傅强，邓燕飞，等. 浮式风机系泊系统动力响应特性研究[J]. 中国造船，2019，60(4)：13.

[18] LIANG G，JIANG Z，MERZ K. Mooring analysis of a dual-spar floating wind farm with a shared line[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering，2021(6)：143.

[19] 中国船级社. 海上浮式风机平台指南：GD29—2021[S]. 北京：中国船级社，2021：25-26.

[20] DNV. Coupled analysis of floating wind turbines：Recommended practice DNV-RP-0286[S]. Oslo：DNV，2021：21-31.

Optimized Design of Mooring System for 10 MW Floating Wind Turbine Platform

JIN Hui, DU Weina, ZHAO Yunhe, YAN Shuming

(China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Tianjin 300457, China)

Abstract: This paper focuses on the floating platform designed and developed independently by China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd. for 10 MW wind turbines. Using the time-domain analysis method of the potential flow software ANSYS-AQWA, the motion response, mooring tension, and pre tension characteristics of the platform under different waves are studied. Through quantitative research on different positions of cable guide holes, different angles of mooring lines, and different lengths of mooring lines, explore the general laws affecting the mooring system, and ultimately provide an optimized solution for the mooring system of a 10 MW floating wind turbine platform that meets API specifications. The results indicate that different mooring system parameters have a significant impact on the response of the platform. Appropriate configuration of these parameters can significantly optimize the platform's motion response and enhance its mooring tension performance, thereby substantially increasing the platform's stability and safety.

Keywords: floating wind turbine platform; mooring system; motion response; optimized design