

文章编号:1005-9865(2024)04-0035-09

大型漂浮式风机塔架系统固有频率快速评估方法

王 月¹,程正顺^{1,2},崔明浩^{1,2},杨 灿^{1,2},陈 鹏^{1,2}

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学 三亚崖州湾深海科技研究院, 海南 三亚 572000)

摘 要:漂浮式风机塔架为细长高耸柔性结构,受风、浪、风轮旋转等多源复杂激励作用,塔架固有频率和模态的准确评估是漂浮式风机系统设计的关键环节。针对当前漂浮式风机塔架的模态分析大多基于塔底固定假设,未考虑浮式基础和风机正常作业的影响。提出了一种准确高效的大型漂浮式风机塔架固有频率快速评估方法,分析了漂浮式风机塔架固有频率的变化特性及规律。结果表明:当风机处于停机状态时,塔底固定的简化模型得出的塔架固有频率存在约 10% 的偏差,塔架固有频率评估需考虑浮式基础的影响;当风机处于运转状态时,上部风轮气动附加质量效应导致塔架的固有频率略有减小。研究结果可为漂浮式风机塔架以及控制策略的设计提供参考。

关键词:漂浮式风机;塔架;固有频率;频域计算方法;气动附加质量

中图分类号:P751 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2024.04.004

A rapid assessment method of natural frequencies of large floating wind turbine tower systems

WANG Yue¹, CHENG Zhengshun^{1,2}, CUI Minghao^{1,2}, YANG Can^{1,2}, CHEN Peng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. SJTU Yazhou Bay Institute of Deepsea Sci-Tech, Sanya 572000, China)

Abstract: Tower of a floating wind turbine is a high-rise and slender flexible structure excited by wind, wave, turbine rotation and other complex excitation sources. A rapid evaluation of the natural frequency and mode of the tower is the key to the design of floating wind turbine system. In view of the current situation that the modal analysis of floating wind turbine tower is mostly based on the assumption of fixed tower bottom and does not consider the influence of floating foundation and operation of the wind turbine, an accurate and efficient evaluation method of natural frequency of large floating wind turbine towers is proposed. The variation characteristics and rules of natural frequency of floating wind turbine towers are studied. The results indicate that when the wind turbine is parked, there is a deviation of about 10% in the natural frequency of the tower obtained from the simplified model of the fixed bottom. The influence of floating foundation should be considered in the evaluation of the natural frequency of the tower. The natural frequency of tower slightly decreases when considering the effect of the upper rotor aerodynamic added mass when the wind turbine is in operation. The results can provide a reference for the design of floating wind turbine towers and control strategy.

Keywords: floating wind turbine; tower; natural frequency; frequency-domain analysis method; aerodynamic added mass

随着传统能源的匮乏和对可再生能源需求的不断增长,风力发电作为一种更加经济、环保的可再生能源技术,具有良好的发展前景。近年来,由于陆上风力发电场空间有限,海上风力发电机的数量显著增加。

收稿日期:2023-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42176210,52201330);海南省自然科学基金联合资助项目(2021JJLH0018)

作者简介:王 月(1999—),女,安徽滁州人,硕士研究生,主要从事海上风机技术研究。E-mail:wangyue78@sjtu.edu.cn

通信作者:程正顺,男,湖北武汉人,副教授,主要从事海上风机技术研究。E-mail:zhengshun.cheng@sjtu.edu.cn

与近海相比,深远海的风速更为稳定,风能储备更加丰富。考虑到安装建造的成本问题,对于深远海风电的开发来说,浮式基础将成为重要的支撑平台。

风力发电机塔架是一种特殊的大型细长高耸柔性结构,存在着复杂的多模态振动。作为风力发电机的主要支撑结构,塔架承载着大型转子-机舱组件,受到风机的重力、风荷载、波浪荷载以及风力发电机系统运行引起的各种载荷等多种激励作用,其可靠性决定了整个风力发电机系统的安全性、发电效率和结构的疲劳寿命。除了要确保塔架在各种复杂的工况下满足强度要求之外,塔架的动力学问题也是重要的关注点之一^[1]。研究表明,塔架振动的主要原因是叶片的旋转,若叶片的旋转频率或通过频率与塔架的固有频率一致,共振效应的影响可能会导致结构发生破坏。因此,在设计风力发电机塔架时需要考虑共振对塔架的影响,以确保结构的整体安全性。

曾梦伟等^[2]的研究表明,陆上风力发电机塔架的设计可以通过有限元软件的建模分析实现,并且在软件中可以进行不同设计方案的对比分析。海上漂浮式风机的上部风轮及塔架技术借鉴了传统的陆上风机,塔架的模态分析通常采用塔架底部刚性固定的假设,忽略了下部浮体的影响。Løken 和 Kaynia^[3]利用 FAST 软件,以单桩 NREL-5 MW 风机为研究对象,发现了浮式基础的弹性对塔架特征频率的显著影响。同时 Sizova 等^[4]运用了有限元建模方法和水动力计算软件分析了不同建模方式对 IEA-15 MW 风机塔架模态的影响,研究表明,采用将底部视为刚性固定的简化方法会使塔架的模态分析产生偏差,从而对结构的疲劳损伤产生不准确的估计。另外,漂浮式风机系统的模态分析一般不考虑不同作业工况的影响,风机始终处于停机状态。但 Souza 和 Bachynski^[5]的研究表明 OC4 半潜式风机在不同风况下,纵荡和纵摇方向的周期有所改变,风机的不同运转状态对漂浮式风机系统的模态存在一定影响。

随着漂浮式风机向大型化、深远海化发展,高耸柔性塔架的长度可达上百米,风、浪、浮体运动以及风轮旋转等多源激励引起的塔架振动愈加复杂。基于上述研究现状可知,利用水动力计算软件对漂浮式风机塔架进行模态分析,无疑耗时费力,在塔架的初步设计阶段不具备实际应用价值。因此文中提出了一种漂浮式风机塔架系统固有频率及模态的一体化频域评估方法,可考虑浮体运动、旋转风轮气动效应对塔架固有频率的影响,实现塔架固有频率及模态的快速评估。基于该方法,本文研究了不同的模型简化方式对于漂浮式风机塔架模态的影响,以及不同作业工况下塔架固有频率的变化规律,可为漂浮式风机塔架的实际工程设计提供参考。

1 漂浮式风机耦合动力学建模

漂浮式风机系统一般由风轮及机舱(RNA)、塔架、浮体和系泊系统等组成。针对漂浮式风机系统,提出了一种塔架固有频率及模态分析的频域评估方法,实现漂浮式风机塔架固有频率的高效准确评估。该方法基于塔架动力学方程建立,将 RNA 以及下部浮体均视为刚体,塔架模拟为欧拉伯努利梁。漂浮式风机的频域仿真简化模型如图 1 所示。

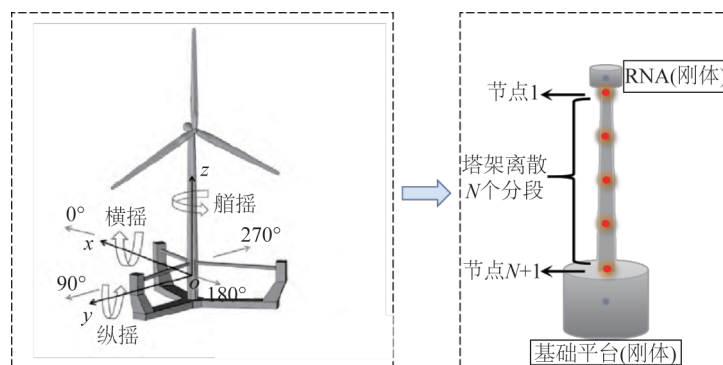


图 1 漂浮式风机的频域仿真简化模型

Fig. 1 Simplified model of a floating wind turbine in frequency domain

1.1 风轮动力学建模

漂浮式风机在环境荷载作用下会产生六自由度运动,其中纵荡和纵摇运动会导致上部风轮的前后运

动,导致气动推力产生周期性的振荡。周期性振荡的气动荷载可以分解为一个与振荡加速度成比例的惯性力项和一个与振荡速度成比例的阻力项:

$$T_{\text{OSC}} = -m_{\text{aer}} \ddot{x} - c_{\text{aer}} \dot{x} \quad (1)$$

式中: T_{OSC} 为周期性振荡的气动荷载; m_{aer} 为气动附加质量系数; c_{aer} 为气动阻尼系数; x 、 $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$ 分别表示风轮振荡的位移、速度和加速度。

根据给定的入流风速 v 和风轮前后往复运动频率等信息可以表示出扭矩控制调节区(GTR)和变桨调节区(BPR)的推力振荡项,进一步推导出气动附加质量系数和气动阻尼系数求解公式^[6]:

GTR区:

$$m_{\text{aer}} = \frac{T_{\Omega} Q_v}{\omega^2 I_d + (Q_{\Omega} - N_g \tau_{\Omega})^2 / I_d}, \quad c_{\text{aer}} = T_v - \frac{(Q_{\Omega} - N_g \tau_{\Omega}) T_{\Omega} Q_v}{(\omega I_d)^2 + (Q_{\Omega} - N_g \tau_{\Omega})^2} \quad (2)$$

BPR区:

$$m_{\text{aer}} = \frac{Q_v}{[Q_{\Omega} + K_p(\beta) Q_{\beta}]^2 + [\omega I_d + K_i(\beta) Q_{\beta} / \omega]^2} \left\{ \frac{K_i(\beta) T_{\beta} [Q_{\Omega} + K_p(\beta) Q_{\beta}]}{\omega^2} - \frac{[T_{\Omega} + K_p(\beta) T_{\beta}][\omega I_d + K_i(\beta) Q_{\beta} / \omega]}{\omega} \right\},$$

$$c_{\text{aer}} = T_v - \frac{Q_v}{[Q_{\Omega} + K_p(\beta) Q_{\beta}]^2 + [\omega I_d + K_i(\beta) Q_{\beta} / \omega]^2} \left\{ \frac{K_i(\beta) T_{\beta} [Q_{\Omega} + K_p(\beta) Q_{\beta} / \omega]}{\omega} - [T_{\Omega} + K_p(\beta) T_{\beta}][Q_{\Omega} + K_p(\beta) Q_{\beta}] \right\} \quad (3)$$

式中: ω 为振荡频率; β 为桨距角; N_g 为传动比; T_v 和 Q_v 分别为气动推力、转矩相对于入流风速的偏导数; τ_{Ω} 、 T_{Ω} 和 Q_{Ω} 分别为发电机转矩、气动推力和气动转矩相对于转子转速 Ω 的偏导数; T_{β} 和 Q_{β} 分别为气动推力、转矩相对于桨距角的偏导数; I_d 为相对于低速轴的惯量; K_p 和 K_i 分别为比例增益和积分增益。

因此针对 RNA, 可以给出其运动方程:

$$(\mathbf{M}_r + \mathbf{A}_r) \ddot{\phi} + \mathbf{C}_r \dot{\phi} = \mathbf{F}_{\text{wind}} - \mathbf{F}_{g2} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{M}_r$ 、 $\mathbf{A}_r$ 和 $\mathbf{C}_r$ 分别表示 RNA 的质量矩阵、气动附加质量矩阵和气动阻尼矩阵; ϕ 、 $\dot{\phi}$ 和 $\ddot{\phi}$ 分别表示 RNA 的位移、速度和加速度向量; $\mathbf{F}_{\text{wind}}$ 和 $\mathbf{F}_{g2}$ 分别表示作用于 RNA 上的气动荷载向量和整体坐标系下塔架对 RNA 的作用力向量。

1.2 柔性塔架动力学建模

塔架采用三维欧拉伯努利梁模拟,将塔架划分成 N 个单元,则塔架可视为一个由 N 个单元、 $N+1$ 个节点组成的结构系统,其运动方程可以写为:

$$\mathbf{M}_s \ddot{\delta} + \mathbf{C}_s \dot{\delta} + \mathbf{K}_s \delta = \mathbf{F}_{\text{ex, top}} + \mathbf{F}_{\text{ex, bottom}} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{M}_s$ 、 $\mathbf{C}_s$ 和 $\mathbf{K}_s$ 分别表示塔架系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; δ 、 $\dot{\delta}$ 和 $\ddot{\delta}$ 分别表示塔架节点的位移、速度和加速度向量; $\mathbf{F}_{\text{ex, top}}$ 和 $\mathbf{F}_{\text{ex, bottom}}$ 分别表示整体坐标系下施加于塔架上端和下端的外部荷载向量。

塔架在全局坐标系下的质量矩阵 $\mathbf{M}_s$ 和刚度矩阵 $\mathbf{K}_s$ 可以通过各单元质量、刚度矩阵在节点处组装得到^[7]。根据梁单元的节点数,可以将其单元质量矩阵、刚度矩阵分为 4 个子块,每个子块是一个 6×6 的矩阵。因此对于第 k 单元来说,其质量、刚度矩阵可表示为:

$$\mathbf{M}^k = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{k-1, k-1}^k & \mathbf{M}_{k-1, k}^k \\ \mathbf{M}_{k, k-1}^k & \mathbf{M}_{k, k}^k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}^k = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{k-1, k-1}^k & \mathbf{K}_{k-1, k}^k \\ \mathbf{K}_{k, k-1}^k & \mathbf{K}_{k, k}^k \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{M}_{i,j}^k$ 和 $\mathbf{K}_{i,j}^k$ 分别代表 k 单元上 j 节点的位移和加速度产生的作用在 i 节点上的力。

根据 Rayleigh 阻尼假设,结构的阻尼与结构质量矩阵和刚度矩阵有关,塔架整体结构阻尼矩阵 $\mathbf{C}_s$ 可以表示为:

$$\mathbf{C}_s = \alpha_1 \mathbf{M}_s + \alpha_2 \mathbf{K}_s \quad (7)$$

其中, α_1 、 α_2 是与阻尼比和频率有关的质量和刚度比例系数。

1.3 浮体动力学建模

水动力荷载是对海洋工程结构湿表面上压力场的积分。根据势流理论求解浮式基础的辐射和绕射问题,得到浮式基础的附加质量、势流阻尼、波浪激励力传递函数等水动力系数。因此,浮体的运动方程可以

表示为:

$$(\mathbf{M}_p + \mathbf{A}_h)\ddot{\xi} + \mathbf{C}_h\dot{\xi} + \mathbf{K}_h\xi = \mathbf{F}_{\text{wave}} - \mathbf{F}_{g1} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{M}_p$ 、 $\mathbf{A}_h$ 、 $\mathbf{C}_h$ 和 $\mathbf{K}_h$ 分别为浮体的质量矩阵、附加质量矩阵、势流阻尼矩阵和静水回复刚度系数矩阵; ξ 、 $\dot{\xi}$ 和 $\ddot{\xi}$ 分别表示浮体的位移、速度和加速度向量; $\mathbf{F}_{\text{wave}}$ 和 $\mathbf{F}_{g1}$ 分别表示作用于浮体上的波浪荷载向量和整体坐标系下塔架对浮体的作用力向量。

1.4 漂浮式风机系统结构动力学模型

假设塔架和浮体、塔架和 RNA 之间采用刚性连接, 塔架底部的位移与浮体的位移可以通过转换矩阵 $\mathbf{T}_1$ 来联系, 而塔架顶部的位移与 RNA 的位移可以通过转换矩阵 $\mathbf{T}_2$ 来联系, 转换关系为:

$$\xi = \mathbf{T}_1\delta, \quad \phi = \mathbf{T}_2\delta \quad (9)$$

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta z_i & -\Delta y_i \\ 0 & 1 & 0 & -\Delta z_i & 0 & \Delta x_i \\ 0 & 0 & 1 & \Delta y_i & -\Delta x_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}, \quad i=1,2 \quad (10)$$

式中: Δx_i 、 Δy_i 和 Δz_i 分别表示在浮体局部坐标系下塔架底部端点的坐标和在 RNA 局部坐标系下塔架顶部端点的坐标。

文中只考虑作用于 RNA 上的气动荷载和作用于浮体上的水动力荷载, 根据牛顿第三定律得:

$$\mathbf{F}_{g1} = \mathbf{F}_{\text{ex, bottom}}, \quad \mathbf{F}_{g2} = \mathbf{F}_{\text{ex, top}} \quad (11)$$

综合式(4)~(11), 可获得浮式风机系统的整体结构动力学模型:

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_r\mathbf{T}_2 + \mathbf{A}_r\mathbf{T}_2 + \mathbf{M}_p\mathbf{T}_1 + \mathbf{A}_h\mathbf{T}_1)\ddot{\delta} + (\mathbf{C}_s + \mathbf{C}_r\mathbf{T}_2 + \mathbf{C}_h\mathbf{T}_1)\dot{\delta} + (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_h\mathbf{T}_1)\delta = \mathbf{F}_{\text{wave}} + \mathbf{F}_{\text{wind}} \quad (12)$$

在式(12)中, 假定 δ 、 $\mathbf{F}_{\text{wave}}$ 和 $\mathbf{F}_{\text{wind}}$ 随频率 ω 呈周期性变化, 即:

$$\delta = \mathbf{u} \cdot e^{i\omega t} \quad (13)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{wave}} + \mathbf{F}_{\text{wind}} = (\mathbf{f}_{\text{wave}} + \mathbf{f}_{\text{wind}}) \cdot e^{i\omega t} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{f}_{\text{wave}}$ 和 $\mathbf{f}_{\text{wind}}$ 分别为与时间无关的位移 δ 、波浪激励力 $\mathbf{F}_{\text{wave}}$ 和推力 $\mathbf{F}_{\text{wind}}$ 的复振幅, 则系统运动方程式(12)在频域中可以表示为式(15)。 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{K}$ 为整个漂浮式风机系统的质量、阻尼和刚度矩阵:

$$(-\omega^2\mathbf{M} + i\omega\mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{u} = \mathbf{f}_{\text{wave}} + \mathbf{f}_{\text{wind}} \quad (15)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_s + \mathbf{M}_p\mathbf{T}_1 + \mathbf{A}_h\mathbf{T}_1 + \mathbf{M}_r\mathbf{T}_2 + \mathbf{A}_r\mathbf{T}_2 \quad (16)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_s + \mathbf{C}_h\mathbf{T}_1 + \mathbf{C}_r\mathbf{T}_2 \quad (17)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_s + \mathbf{K}_h\mathbf{T}_1 \quad (18)$$

2 漂浮式风机塔架系统固有频率评估方法

2.1 模态分析

频域中系统的运动方程式(15)忽略阻尼项时, 特征方程可以写为:

$$-\omega^2\mathbf{M} + \mathbf{K} = 0 \quad (19)$$

浮体的附加质量在振动频率趋于无穷时, 逐渐趋于稳定, 此时称该稳定值为无穷频率附加质量($\mathbf{A}_{\text{hinf}}$)。若考虑无穷频率附加质量, $\mathbf{M}$ 与频率无关, 特征值可以直接通过求解等式(19)获得, 其中 $\mathbf{M} = \mathbf{M}_s + \mathbf{M}_p\mathbf{T}_1 + \mathbf{A}_h\mathbf{T}_1 + \mathbf{M}_r\mathbf{T}_2 + \mathbf{A}_r\mathbf{T}_2$; 若考虑与频率有关的附加质量, 则特征值求解是一个非线性问题, 需要通过迭代方法来求解特征方程。漂浮式风机系统固有频率的迭代求解思路如图 2 所示, 首先令迭代初始频率为无穷频率, 即: $\omega_0 = \omega_{\text{hinf}}$, 此时浮体附加质量为对应 ω_0 时的附加质量, 代入特征方程求解出 ω_n , 判断 $|\omega_0 - \omega_n|$ 的误差是否满足精度要求。若满足, 则 ω_n 是所求的系统固有频率; 若不满足, 则更新 ω_0 的值为刚求解出的 ω_n , 即 $\omega_0 = \omega_n$, 再对特征方程进行求解, 重复这一步骤直至 $|\omega_0 - \omega_n|$ 满足精度要求。

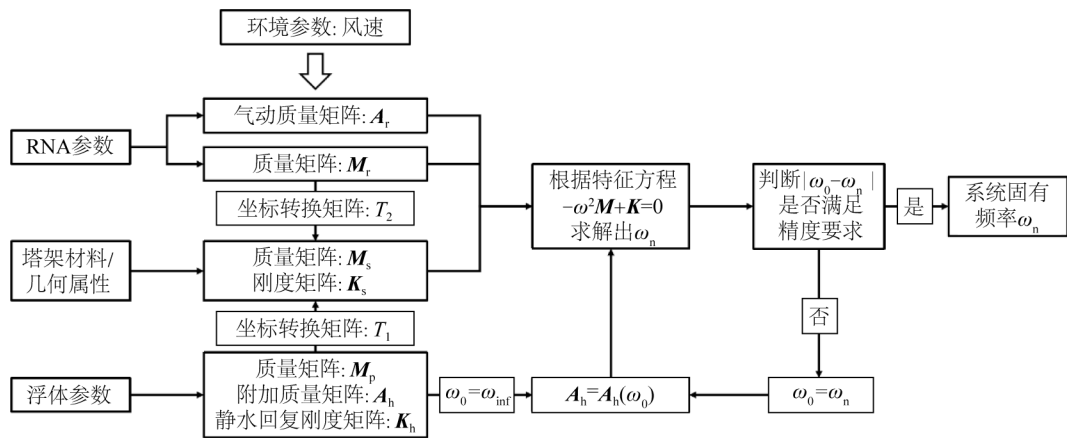


图 2 考虑与频率有关的附加质量求解系统固有频率流程

Fig. 2 The flowchart for solving the natural frequency of the system considering the frequency-dependent added mass

2.2 方法验证

在应用上述频域方法研究塔架的固有频率变化规律和影响因素之前,需要验证该方法的准确性。验证模型选用杨灿等^[8]提出的一种半潜式浮式基础搭载美国可再生能源实验室(NREL)研发的 5 MW 风机^[9],风机具体参数和塔架基本属性见表 1,漂浮式风机模型如图 1 左侧半潜式风机模型,浮式基础的具体构件参数如图 3 所示。

表 1 NREL-5 MW 风机及塔架基本参数

Tab. 1 Main properties of NREL-5 MW wind turbine and tower

参数	数值	参数	数值	参数	数值
叶片直径/m	126.0	塔筒质量/t	347.5	塔筒顶部壁厚/m	0.019
轮毂直径/m	3.0	塔架高度/m	87.6	塔筒底部壁厚/m	0.027
额定风速/(m·s ⁻¹)	11.4	塔架重心位置/m	38.23	塔筒杨氏模量/GPa	210
叶片质量/t	110.0	塔筒顶部直径/m	3.87	塔筒剪切模量/GPa	80.8
电机质量/t	240.0	塔筒底部直径/m	6.00	塔筒有效密度/(kg·m ⁻³)	8 500

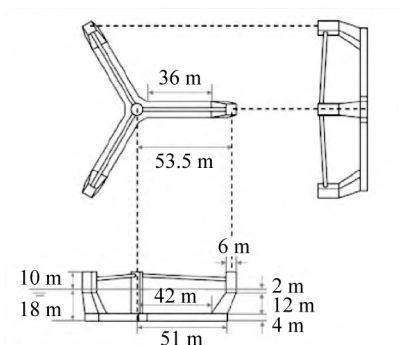


图 3 浮式基础主尺度^[8]

Fig. 3 Principal dimensions of the floating foundation^[8]

时域方法中塔架固有频率的获得方法为:在时域数值仿真软件 SIMA^[10]中,在塔架顶部施加一脉冲荷载,经过时域分析得到塔顶的位移时历,通过位移时历的谱分析结果提取出风机塔架的一阶固有频率。本文分别选取风机停机工况与作业工况(风速 20 m/s)2 种情况,时域仿真软件计算的结果与频域方法计算获得的结果对比见表 2,时域方法得到的风机停机状态塔顶位移时历以及谱分析结果如图 4、5 所示。

根据对比可知,在风机停机状态下,数值仿真软件中计算的塔架一阶固有频率为 2.684 rad/s,频域方法

计算结果为 2.723 rad/s,计算结果偏差为 1.453%;在风机运转状态下,数值仿真软件中计算的塔架一阶固有频率为 2.646 rad/s,频域方法计算结果为 2.715 rad/s,计算结果偏差为 2.608%。文中频域方法在保证计算精度的情况下可快速评估漂浮式风机塔架的固有频率,并且可考虑风机的不同运转情况,具有一定的实用性,可用该方法来探究漂浮式风机塔架模态的变化规律。

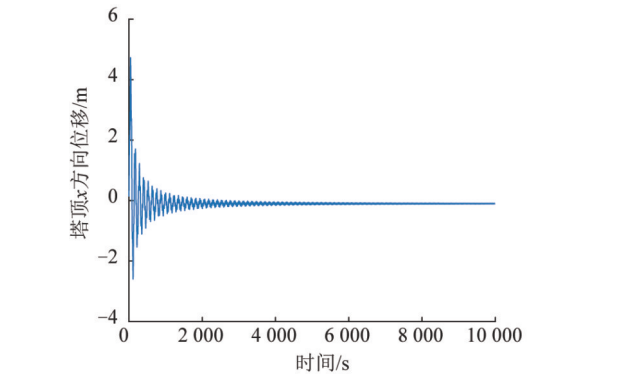


图 4 风机停机时塔顶位移时历
Fig. 4 Time history of tower top displacement when wind turbine is shutdown

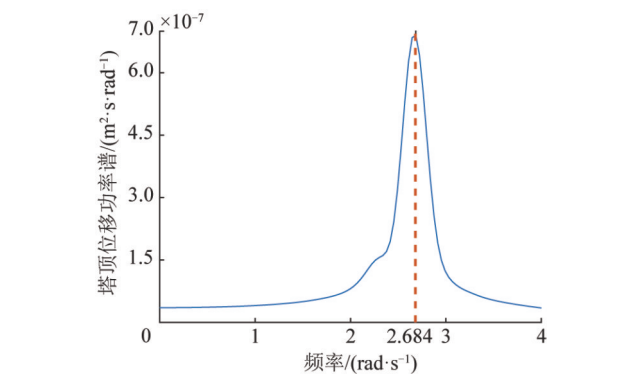


图 5 风机停机时塔顶位移能量谱
Fig. 5 Energy spectrum of tower top displacement under parking condition

表 2 NREL-5MW 漂浮式风机塔架-阶固有频率对比

Tab. 2 Comparison of first order natural frequency of NREL-5 MW floating wind turbine tower			
工况	时域方法/(rad·s ⁻¹)	频域方法/(rad·s ⁻¹)	偏差/%
停机工况	2.684	2.723	1.453
作业工况	2.646	2.715	2.608

3 漂浮式风机塔架固有频率的变化特性及规律

在风机塔架的设计中,若塔架的固有频率与叶轮的旋转频率(1P)或叶轮通过频率(3P)接近,会导致共振效应的产生,因此在设计时需要塔架的固有频率进行精确计算与调整。根据塔架的设计标准,塔架的一阶固有频率应避开 1P 和 3P 的±10%这两个区间。若塔架一阶固有频率小于 1P 的 10%,则称为“柔-柔”设计;若大于 3P 的 10%,则称为“硬-硬”设计;而同时大于 1P 的 10%且小于 3P 的 10%称为“柔-硬”设计^[11];如图 6 所示。一般来说,塔架的“硬-硬”设计是可以被接受的,但是在该设计范围区间内,塔架会过于刚性沉重,“柔-柔”设计的塔架结构强度偏弱,因此最佳的设计范围为“柔-硬”设计这一区间。

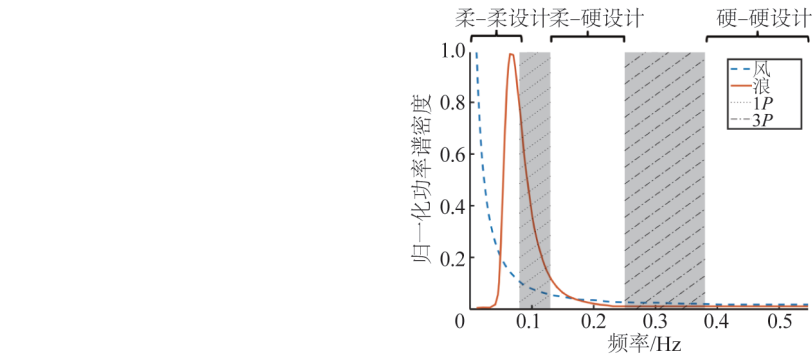


图 6 塔架固有频率-激励频率关系
Fig. 6 Relationship between tower natural frequencies and excitation frequencies

漂浮式风机塔架设计通常采用一系列的模型简化方法,同时不考虑风机的运转情况,这些简化方法的计算结果与实际模型存在一定的偏差,为了厘清不同简化方式对计算结果的影响,同时探究漂浮式风机塔架固有频率的变化规律,把 2.2 节选用的漂浮式风机系统作为研究对象,频域方法计算得出的漂浮式风机塔

架一阶固有频率作为基本对照组。

3.1 停机工况下塔架固有频率影响因素分析

在频域方法的基础上,评估在实际设计过程中,不同的简化方法对风机停机时的漂浮式风机塔架固有频率的影响,不同的模型简化方式考虑项如表 3 所示。

表 3 NREL-5 MW 漂浮式风机不同简化方式
Tab. 3 Various simplified methods of NREL-5 MW floating wind turbine

简化方式	底部边界条件	考虑浮体质量	考虑浮体无穷频率附加质量	考虑浮体与频率有关的附加质量	考虑静水回复刚度
对照组	自由	√	×	√	√
LC1	固定	×	×	×	×
LC2	自由	√	×	×	×
LC3	自由	√	√	×	×
LC4	自由	√	×	√	×

对漂浮式风机塔架进行模态分析时,塔架通常被建模为刚性固定于地面上的悬臂梁。为了探究浮式基础对塔架的影响,基于频域方法(通过改变塔架底部约束条件计算得到了文中选用的 NREL-5 MW 风机在底部刚性固定时的塔架固有频率)。图 7 为风机处于停机状态时考虑底部不同约束方式的机组振动坎贝尔图,图中阴影部分表示 NREL-5 MW 风机塔架的“柔-硬”设计范围,点线表示 1P 和 3P±10% 的激励力频率曲线。结果表明,若将选用的风机安装于刚性地面(LC1),塔架的一阶固有频率为 2.438 rad/s,同样配置的 NREL-5 MW 风机安装于浮式基础上塔架的固有频率比安装于刚性地面时要增大 11.570%,浮式基础的存在会使得塔架固有频率偏离最佳设计区间,在低于额定风速的工况下,安装于浮式基础之上的塔架固有频率处于 3P±10% 区域的概率更高。

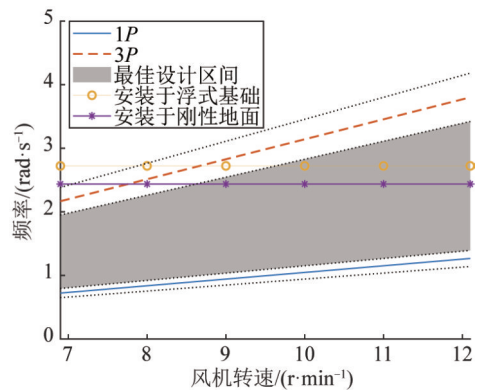


图 7 漂浮式风机与固定式风机机组振动坎贝尔图
Fig. 7 Campbell diagram of vibration of floating and fixed wind turbine

在对漂浮式风机塔架进行设计时,选择底部刚性固定的建模计算方法是最简化的。而从理论的角度来说,漂浮式风机系统是一个具有自由边界条件的整体,考虑到这一点,进一步从将塔架底部视为刚性固定改为塔架安装于空气中的自由基础之上(LC2),在频域方法中考虑基础质量的影响并设置底部自由边界条件,计算出的塔架固有频率为 2.853 rad/s,与对照组相差 4.890%。在此基础上,将简化方式拓展为塔架安装于考虑附加质量的自由基础之上,即在频域模型中除考虑基础的质量之外,增加一附加质量矩阵。当仅考虑无穷频率的附加质量时(LC3),计算出的塔架固有频率为 2.718 rad/s,与对照组的相对误差为 0.184%;若考虑与频率有关的附加质量(LC4),则需采用 2.1 节中的迭代方法,计算出的塔架固有频率为 2.721 rad/s,与对照组的相对误差为 0.073 4%。

不同的简化方式计算出的塔架固有频率对比如表 4、图 8(柱状图每条顶部数据表示与对照组的相对误

差),其中 LC4 相对于对照组来说,同时也可视为仅不考虑浮式基础静水回复刚度的情况。由对比可知,在风机停机状态下,若采用底部刚性固定的简化方法,塔架的固有频率更靠近最佳设计区间,使得对漂浮式风机塔架固有频率产生不准确的估计;若采用塔架安装于自由基础上的简化方式,计算结果在可接受的范围内,而在此基础之上增加对附加质量的考虑,可使结果十分接近实际值,在漂浮式风机塔架设计过程中可以采用这种简化方式;同时浮式基础的静水回复刚度对于塔架模态的影响远小于质量项对模态的影响,对漂浮式风机塔架的设计有一定的参考价值。

表 4 NREL-5 MW 漂浮式风机不同简化方式塔架一阶固有频率对比

Tab. 4 Comparison of first order natural frequencies of tower in various simplified methods of NREL-5 MW floating wind turbine

简化方式	一阶固有频率/(rad·s ⁻¹)	与对照组的相对误差/%
LC1	2.438	11.570
LC2	2.853	4.890
LC3	2.718	0.180
LC4	2.721	0.070

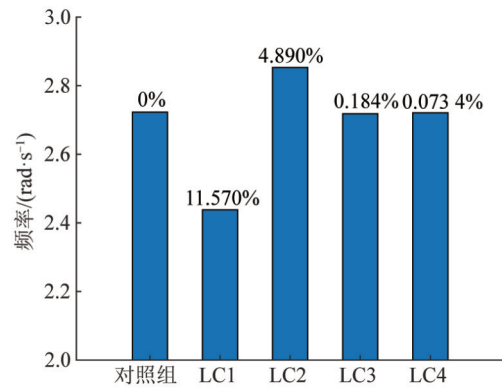


图 8 NREL-5 MW 漂浮式风机不同简化方式塔架一阶固有频率
Fig. 8 First order natural frequencies of NREL-5 MW wind turbine tower in various simplified methods

3.2 作业工况下塔架固有频率的变化规律

3.1 节中不同模型简化方式的计算前提是风机处于停机状态,而风机运转状态下所产生气动附加质量也会对结构的模态产生一定的影响,在塔架的设计阶段,这种影响是无法考虑的。为了研究不同风况下漂浮式风机塔架的固有频率变化规律,结合 Yang 等^[6]的研究,量化了 NREL-5 MW 风机不同风况不同频率下的气动附加质量,图 9 给出了文中研究选用的 NREL-5 MW 风机纵荡方向某一频率气动附加质量在不同风况下的变化曲线。

基于频域方法,对上部 RNA 质量项进行修正,而气动附加质量与浮体的附加质量类似,同样与频率有关,计算参照 2.1 节的迭代求解思路,获得塔架的固有频率,不同风况下塔架固有频率变化曲线如图 10 所示。研究可知:漂浮式风机塔架的固有频率受到不同风况的影响,气动附加质量的存在会使得漂浮式风机系统上部质量增大,塔架的一阶固有频率减小,在切出风速时达到最小值;结合图 7 风机机组振动坎贝尔图,由于 3P 产生的塔架共振发生于低风速段,气动附加质量的影响使得共振效应会在更低的转速下产生,对漂浮式风机塔架固有频率的关注应主要集中在低于额定风速的工况;相较于风机停机状态,风机旋转状态下 5 MW 的漂浮式风机塔架固有频率变化仅在 0.5% 左右,但随着风机装机容量的增大,15 MW 的漂浮式风机相较于 5 MW 的漂浮式风机,气动附加质量与系统总质量之比由 10% 增大到 40%^[6],气动附加质量对塔架固有频率的影响将更加显著,研究可为大尺度漂浮式风机的塔架设计提供一定的参考价值。

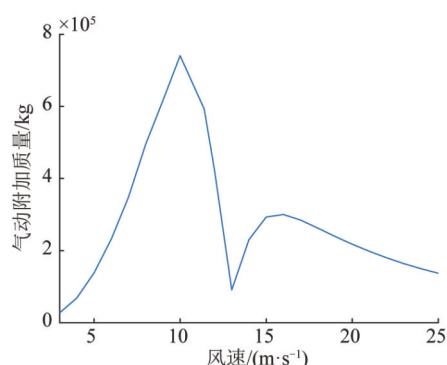


图9 不同风况下气动附加质量

Fig. 9 Aerodynamic added mass under different wind conditions

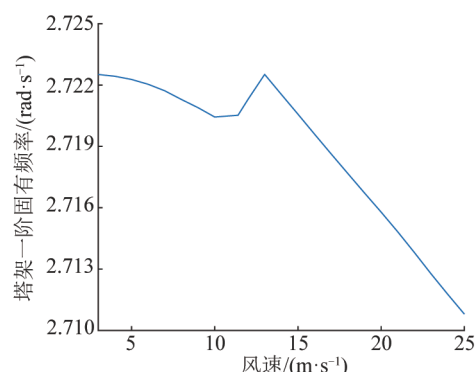


图10 NREL-5 MW 漂浮式风机不同风况下塔架一阶固有频率

Fig. 10 First order natural frequencies of the tower for NREL 5 MW floating wind turbine under different wind conditions

4 结 语

1) 构建了大型漂浮式风机风轮-塔架-浮式基础一体化耦合仿真频域模型,可考虑浮式基础及风轮旋转气动效应等影响,实现塔架固有频率及模态的快速准确评估,并通过时域仿真验证了方法的准确性。

2) 揭示了5 MW 漂浮式风机塔架系统固有频率的变化特性与规律。研究发现:采用塔底固定假设求解漂浮式风机塔架固有频率会造成约10%的误差,而静水回复刚度的影响在简化模型求解塔架固有频率时可以忽略;风机旋转状态下,上部风轮气动附加质量的影响使得塔架固有频率减小,大尺度漂浮式风机塔架共振问题需要结合气动附加质量加以考虑,对风机控制系统的设计具有一定的借鉴意义。

3) 在漂浮式风机塔架的设计阶段,基于频域方法可以快速评估多种设计方案,并且可以考虑风机的不同作业工况,这在塔架的初步设计阶段具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 李彦娥,李涛,彭驰,等. 支撑结构频率对海上风机动力响应的影响机理研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(4): 38-48. (LI Y E, LI T, PENG C, et al. Research on the influence mechanism of support structure frequency on the dynamic response of offshore wind turbine [J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(4): 38-48. (in Chinese))
- [2] 曾梦伟,魏克湘,李颖峰,等. 大型风力机塔架固有频率分析[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(4): 30-33. (ZENG M W, WEI K X, LI Y F, et al. Natural frequency analysis of a wind turbine tower[J]. Noise and Vibration Control, 2017, 37(4): 30-33. (in Chinese))
- [3] LØKEN I B, KAYNIA A M. Effect of foundation type and modelling on dynamic response and fatigue of offshore wind turbines [J]. Wind Energy, 2019, 22(12): 1667-1683.
- [4] SIZOVA S, MAILLOT E, MOREAU S, et al. Influence of the semi-submersible platform flexibility on the dynamic response of the wind turbine [C]//ASME. Proceedings of ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York, American: ASME, 2022: OMAE2022-79124.
- [5] SOUZA C E S, BACHYNSKI E E. Changes in surge and pitch decay periods of floating wind turbines for varying wind speed [J]. Ocean Engineering, 2019, 180: 223-237.
- [6] YANG C, CHEN P, CHENG Z S, et al. Aerodynamic damping of a semi-submersible floating wind turbine: an analytical, numerical and experimental study[J]. Ocean Engineering, 2023, 281: 114826.
- [7] WEI W, FU S X, MOAN T, et al. A discrete-modules-based frequency domain hydroelasticity method for floating structures in inhomogeneous sea conditions[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 74: 321-339.
- [8] 杨灿,肖龙飞,程正顺,等. 浅水半潜型浮式风机基础概念设计与模型试验研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(1): 128-140. (YANG C, XIAO L F, CHENG Z S, et al. Conceptual design and model testing for a semi-submersible floating wind turbine in shallow water[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(1): 128-140. (in Chinese))
- [9] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Golden, American: National Renewable Energy Lab (NREL), 2009.
- [10] SINTEF Ocean. RIFLEX 4.14.0 user guide[M]. Trondheim, Norway: SINTEF Ocean, 2018.
- [11] HUANG X G, LI B K, ZHOU X H, et al. Geometric optimisation analysis of Steel-Concrete hybrid wind turbine towers[J]. Structures, 2022, 35: 1125-1137.