

海上浮式风力机二自由度动力学建模及 风波耦合激励特性分析

彭春江^{1,2}, 胡燕平², 程军圣¹, 沈意平³

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082; 2. 湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201;
3. 湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室, 湘潭 411201)

摘 要: 针对海上浮式风力机, 建立包括风轮旋转和浮式平台纵荡的二自由度动力学模型。基于该模型, 推导风轮推力和输出功率计算式, 分析风、波耦合激励特性。以 5 MW DeepCwind 半潜式浮式风力机为算例, 计算当风向和波向一致时, 在多种风、波联合激励下, 风轮推力、输出功率及浮式平台纵荡位移、速度及加速度的响应谱, 进行频响特性及风、波耦合特性分析。结果表明, 风力机性能指标响应谱中明显包含风频和波频成分; 平台纵荡运动指标响应谱中只明显包含波频成分, 风频对其影响不大。

关键词: 海上风力机; 浮式平台; 频率响应; 耦合激励; 动力学模型

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

为开发和利用丰富的深海风资源, 海上浮式风力机成为当今风能行业的研究热点之一。与基础固定的风力机相比, 浮式平台和复杂的海上服役环境使浮式风力机的风-结构-波耦合动力学行为非常复杂, 而浮式风力机的耦合动力学行为及其耦合机理是海上浮式风力机优化设计和减振控制的理论基础, 是当前海上浮式风力机重要的研究领域。目前, 对于海上浮式风力机耦合动力学行为, 国外已进行了较多研究, 包括试验模型测试分析^[1,2]和动力学模型仿真分析^[3-8]; 国内有少量的耦合动力学建模和分析文献^[9,10]。这些文献建立了复杂程度不同的耦合动力学模型, 对测试或计算结果进行描述和分析, 得到一些有意义的结论, 但从未根据动力学计算理论分析风-结构-波耦合激励特性。

动力学建模时考虑的自由度数越多, 模型越复杂, 自由度间的耦合关系也越复杂, 不易辨识耦合行为。本文目的不是得到包含多个自由度的复杂系统模型, 而在于用包含关键自由度的简化耦合动

力学模型深入分析和理解浮式风力机的气-结构-波耦合激励行为和机理, 为进一步分析复杂耦合激励行为提供基础。对于浮式风力机, 风轮旋转实现气动力的加载和能量的转化, 故风轮旋转是一个关键自由度; 当波向与风向一致时, 浮式平台纵荡响应最突出, 横荡、垂荡、纵摇、横摇及艏摇的响应相对较弱^[3], 故平台纵荡也是一个关键自由度。

对于复杂多体系统建模, 与牛顿法和拉格朗日法相比, 凯恩法避开了动力学函数的微分运算, 易于求解。故本文针对海上浮式风力机, 基于凯恩方法建立包含风轮旋转和平台纵荡的二自由度耦合动力学模型, 并以此为基础, 推导风力机性能指标计算表达式, 从理论上分析风-结构-波耦合激励特性。再以 5 MW DeepCwind 半潜式浮式风力机为算例, 计算风力机性能指标及浮式平台纵荡动态特性指标的响应谱, 根据响应谱分析风-结构-波耦合激励及响应特性。

1 建立二自由度耦合动力学模型

1.1 浮式风力机坐标系

把浮式风力机看成由浮式平台、塔架、机舱、轮

收稿日期: 2016-06-28

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAF32B03); 国家自然科学基金(51375152; 11572125)

通信作者: 彭春江(1977—), 女, 博士研究生、讲师, 主要从事风电机动力学建模及控制方面的研究。pcj2004@163.com

毂及叶素单元组成的多体系统,不考虑机舱偏航、风轮轴倾斜和叶片锥角,建立图 1 所示坐标系。惯性系 $x_i-y_i-z_i$, 原点 i , x_i 指向下风向, z_i 轴沿塔架中心线竖直向上, y_i 由右手定则确定。平台随体系 $x_p-y_p-z_p$, 原点 p 为塔架中心线与静水面的交点, 是平台计算参考点, 浮式风力机在无环境激励处于静止平衡时, 与惯性系重合。机舱系 $x_n-y_n-z_n$, 原点 n 为塔架中心线与风轮轴线的交点, 机舱系各轴与平台随体系各轴方向一致。轮毂系 $x_h-y_h-z_h$, 原点 h 为风轮旋转平面与风轮轴线的交点, 绕机舱系中 x_n 轴的正向旋转方位角 φ 得到, 轮毂系随风轮转动, 其 z_h 轴与叶片 1 方位角一致。叶片过渡系 $x_m-y_m-z_m$, 下标 m 指第 m 个叶片的过渡系, 原点与轮毂系原点 h 重合, 由轮毂系绕 x_h 轴的正向旋转 $2\pi(m-1)/B$ 弧度得到, B 为叶片数量。叶根系 $x_{b_{m0}}-y_{b_{m0}}-z_{b_{m0}}$, 坐标原点 b_{m0} 为叶片变桨轴线与叶根的交点, 由过渡系 $x_m-y_m-z_m$ 绕 z_m 轴的负向旋转桨矩角 α_p 得到。叶素局部系 $x_{b_{mr}}-y_{b_{mr}}-z_{b_{mr}}$, 原点 b_{mr} 在叶素单元节点处, 下标 mr 表示第 m 个叶片第 r 个叶素, 由叶根系 $x_{b_{m0}}-y_{b_{m0}}-z_{b_{m0}}$ 绕 $z_{b_{m0}}$ 轴的负向旋转结构扭角 α_t 得到。图 1 中只画了叶片 1 的过渡系和无桨矩角和结构扭角时的叶素局部系, 图 1 中的 d 、 t 、 s 及 e 分别为平台、塔架、机舱及轮毂的质心点。

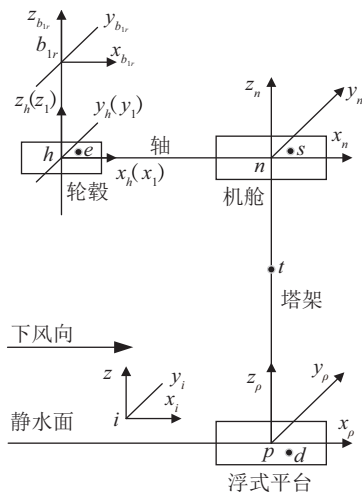


图 1 海上浮式风力机坐标系

Fig. 1 Coordinate systems of offshore floating wind turbine

约定用 \mathbf{i}_τ 、 \mathbf{j}_τ 、 \mathbf{k}_τ 表示各坐标系基矢量, 下标 τ 为坐标系原点指明是哪个坐标系。设惯性参考系

各轴的单位矢量 $\mathbf{i}_i=(1\ 0\ 0)$ 、 $\mathbf{j}_i=(0\ 1\ 0)$ 、 $\mathbf{k}_i=(0\ 0\ 1)$ 。

有 $\mathbf{i}_p=\mathbf{i}_n=\mathbf{i}_i$ 、 $\mathbf{j}_p=\mathbf{j}_n=\mathbf{j}_i$ 、 $\mathbf{k}_p=\mathbf{k}_n=\mathbf{k}_i$ 。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{i}_h \\ \mathbf{j}_h \\ \mathbf{k}_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_n \\ \mathbf{j}_n \\ \mathbf{k}_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{i}_m \\ \mathbf{j}_m \\ \mathbf{k}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \frac{2\pi(m-1)}{B} & \sin \frac{2\pi(m-1)}{B} \\ 0 & -\sin \frac{2\pi(m-1)}{B} & \cos \frac{2\pi(m-1)}{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_h \\ \mathbf{j}_h \\ \mathbf{k}_h \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{i}_{b_{m0}} \\ \mathbf{j}_{b_{m0}} \\ \mathbf{k}_{b_{m0}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \cos \alpha_p & -\sin \alpha_p \\ 0 & \sin \alpha_p & \cos \alpha_p \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_m \\ \mathbf{j}_m \\ \mathbf{k}_m \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{i}_{b_{mr}} \\ \mathbf{j}_{b_{mr}} \\ \mathbf{k}_{b_{mr}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \cos \alpha_t & -\sin \alpha_t \\ 0 & \sin \alpha_t & \cos \alpha_t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_{b_{m0}} \\ \mathbf{j}_{b_{m0}} \\ \mathbf{k}_{b_{m0}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

因方位角 φ 是时变的, 因此轮毂系、叶根系及叶片局部系的基矢量都是时变的。

1.2 二自由度耦合动力学建模

取广义坐标为平台参考点沿 x_i 方向的位移 x_p , 即平台纵荡位移, 和风轮角位移 φ 。取广义速率 $u_1=\dot{x}_p$ 、 $u_2=\dot{\varphi}$ 。根据以下步骤建模:

1) 求轮毂 H 、叶素 B_{mr} 、电机 G 的偏角速度 $\omega_r^{(s)}$ (r 指结构件 H 、 B_{mr} 、 G ; s 指对第 s 个自由度的偏角速度, $s=1,2$), 再用偏角速度表示它们的角速度 ω_r 和角加速度 ε_r 。

2) 求平台参考点 p 、轮毂质心 e 及叶素节点 b_{mr} 的偏速度 $\mathbf{v}_\tau^{(s)}$ (τ 指各参考点或质心点, s 同上), 再用偏速度表示它们的速度 \mathbf{v}_τ 和加速度 \mathbf{a}_τ 。 d 、 t 、 s 及 h 点偏速度、速度及加速度与平台 p 点相同。因在后续章节推导风轮推力计算表达式时要用到轮毂质心 e 和叶素节点 b_{mr} 的速度及加速度, 故在此给出它们的表达式, 为了简化计算, 假定轮毂质心 e 与轮毂参考点 h 重合, 则有:

$$\mathbf{a}_e = \ddot{x}_p \mathbf{v}_e^{(1)} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{b_{mr}} = \dot{x}_p \mathbf{v}_{b_{mr}}^{(1)} + \dot{\varphi} \mathbf{v}_{b_{mr}}^{(2)} \quad (6)$$

$$\mathbf{a}_{b_{mr}} = \ddot{x}_p \mathbf{v}_{b_{mr}}^{(1)} + \ddot{\varphi} \mathbf{v}_{b_{mr}}^{(2)} + \dot{\varphi} \mathbf{i}_h \times (\omega_H \times \overline{hb_{mr}}) \quad (7)$$

式中, \dot{x}_p 、 \ddot{x}_p ——平台参考点 p 处纵荡速度及加速度; $\dot{\varphi}$ 、 $\ddot{\varphi}$ ——风轮转动速度及转动加速度; $\overline{hb_{mr}}$ ——从轮毂系原点 h 到叶素节点 b_{mr} 的位置矢量。

3) 求广义惯性力 F_s^*

$$F_s^* = -m_p a_p \cdot v_p^{(s)} - m_t a_t \cdot v_t^{(s)} - m_s a_s \cdot v_s^{(s)} - m_e a_e \cdot v_e^{(s)} - \sum_m \sum_r m_{b_{mr}} a_{b_{mr}} \cdot v_{b_{mr}}^{(s)} - I_H \varepsilon_H \cdot \omega_H^{(s)} - I_G \varepsilon_G \cdot \omega_G^{(s)} \quad (8)$$

式中, F_s^* ——第 s 个自由度的广义惯性力, N; m_τ —— τ 点的质量 ($\tau = p, t, s, e, b_{mr}$), kg; I_τ ——结构件 τ 的转动惯量 ($\tau = H, G$), $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

4) 求广义主动力

$$F_s = F_s^G + L_s^T + F_s^A + L_s^A + F_s^P + L_s^P \quad (9)$$

式中, F_s ——第 s 个自由度的广义主动力, N; F_s^G ——重力项; L_s^T ——电机反转矩项; F_s^A 、 L_s^A ——气动力、力矩项; F_s^P 、 L_s^P ——平台水动力、力矩项。

5) 二自由度耦合动力学方程:

由 $F_s^* + F_s = 0$ 求得:

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{cases} m_{11} = m_p + m_t + m_s + m_e + \sum_m \sum_r m_{b_{mr}} + A_{11} \\ m_{12} = \sum_m \sum_r m_{b_{mr}} v_{b_{mr}}^{(2)} \cdot v_{b_{mr}}^{(1)} \\ m_{21} = \sum_m \sum_r m_{b_{mr}} v_{b_{mr}}^{(1)} \cdot v_{b_{mr}}^{(2)} \\ m_{22} = \sum_m \sum_r m_{b_{mr}} v_{b_{mr}}^{(2)} \cdot v_{b_{mr}}^{(2)} + I_H + \lambda^2 I_G \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} f_1 = -[m_{b_{mr}} \dot{\mathbf{i}}_h \times (\omega_H \times \overline{hb_{mr}}) \cdot v_{b_{mr}}^{(1)}] \dot{\varphi} + \sum_m \sum_r \mathbf{F}_{b_{mr}} \cdot v_{b_{mr}}^{(1)} + \mathbf{F}_p \cdot v_p^{(1)} \\ f_2 = -[m_{b_{mr}} \dot{\mathbf{i}}_h \times (\omega_H \times \overline{hb_{mr}}) \cdot v_{b_{mr}}^{(2)}] \dot{\varphi} - T_G - m_e g \mathbf{k}_i \cdot v_e^{(2)} - \sum_m \sum_r m_{b_{mr}} g \mathbf{k}_i \cdot v_{b_{mr}}^{(2)} + \sum_m \sum_r \mathbf{F}_{b_{mr}} \cdot v_{b_{mr}}^{(2)} + \sum_m \sum_r L_{b_{mr}} \cdot \omega_{B_{mr}}^{(2)} \end{cases} \quad (12)$$

式中, m_{11} 、 m_{12} 、 m_{21} 、 m_{22} ——广义质量, kg; f_1 、 f_2 ——广义力, N; A_{11} ——平台水动力纵荡附加质量, kg; λ ——齿轮传动比; $\mathbf{F}_{b_{mr}}$ ——叶素节点 b_{mr} 处的气动力, N; \mathbf{F}_p ——平台参考点 p 处的水动力, N; g ——重力加速度, m/s^2 ; $L_{b_{mr}}$ ——叶素节点 b_{mr} 处的气动力矩, Nm。

1.3 数值求解

本文建立的二自由度耦合动力学模型的数值求解流程见图 2。

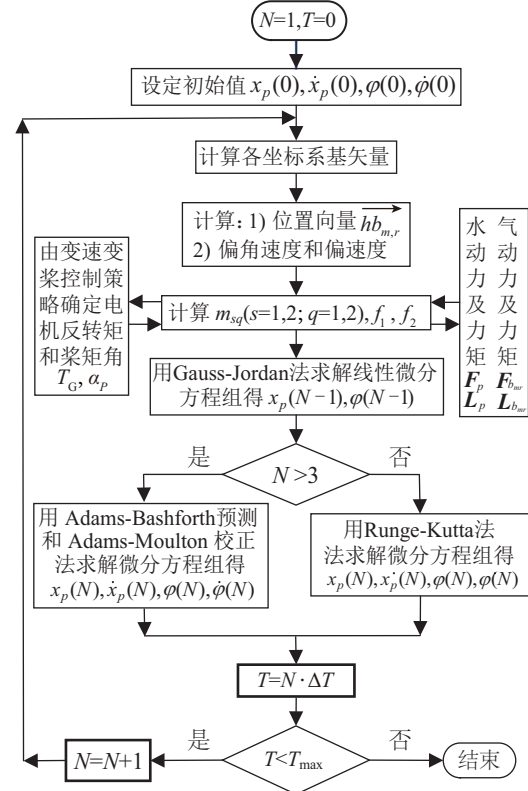


图2 二自由度耦合动力学模型数值求解流程

Fig. 2 Calculation flow chart of coupled dynamic model with two degrees of freedom

本文在数据求解过程中,用变速变桨控制策略确定电机反转矩和桨矩角;用 Gauss-Jordan 法求前一时刻的 $\ddot{x}_p(N-1)$ 和 $\ddot{\varphi}(N-1)$;用 4 阶 Runge-Kutta 法求前 3 步的 $x_p(N)$ 、 $\dot{x}_p(N)$ 、 $\varphi(N)$ 、 $\dot{\varphi}(N)$, $N=1,2,3$;用 4 步 4 阶 Adams-Bashforth 预测和 Adams-Moulton 校正法求其他时刻的计算值。图 2 中 N 为计算步数, ΔT 为时间步长, T_{\max} 为计算时长。

2 性能指标计算与耦合激励分析

对于海上浮式风力机从两个方面进行响应分析很重要,一是平台运动对风力机性能的影响,二是风力机对平台运动特性的影响。当风向和波向一致时,风轮推力和电机输出功率是具有代表性的风力机性能指标,平台纵荡位移、速度及加速度代表了平台运动特性指标。故本文围绕风轮推力、电机输出功率、平台纵荡位移、速度及加速度这 5 个指标进行频响及耦合激励分析。

2.1 性能指标计算表达式

基于本文建立的二自由度耦合动力学模型,平台纵荡位移 x_p 、速度 \dot{x}_p 及加速度 \ddot{x}_p 随数值求解过程直接得到。

风轮推力 F_T 是垂直于风轮平面的合力,计算参考点在轮毂系原点 h 处,表达式为:

$$F_T = \left[\sum_m \sum_r (F_{b_{mr}} - m_{b_{mr}} a_{b_{mr}} - m_{b_{mr}} g k_i) - m_e a_e \right] \cdot i_h \quad (13)$$

将式(5)、式(7)代入式(13),推导出表达式为:

$$F_T = \left[\sum_m \sum_r (F_{b_{mr}}^N - m_{b_{mr}} \ddot{x}_p) - m_e \ddot{x}_p \right] i_h \quad (14)$$

式中, $F_{b_{mr}}^N$ ——叶素节点 b_{mr} 处法向气动力, N。

由式(14)可知风轮推力由气动力、叶片惯性力及轮毂惯性力 3 项组成。

电机输出功率 P_G 为:

$$P_G = \eta \lambda T_G \dot{\phi} = \eta T_R \dot{\phi} \quad (15)$$

式中, η ——电机效率; T_G 、 T_R ——电机、风轮转矩, Nm。

风轮转矩是轮毂系原点的总转矩在 i_h 方向的分量,其表达式为:

$$T_R = \left\{ \sum_m \sum_r [\overline{hb_{mr}} \times (F_{b_{mr}}^N i_m + F_{b_{mr}}^T j_m - m_{b_{mr}} a_{b_{mr}} - m_{b_{mr}} g k_i) + L_{b_{mr}}] - I_H \varepsilon_H \right\} \cdot i_h \quad (16)$$

把式(7)代入式(16),且有 $\overline{hb_{mr}} = hb_{mr} k_m$, $\varepsilon_H = \ddot{\phi} i_h$, 整理后得:

$$T_R = \left[\sum_m \sum_r (F_{b_{mr}}^T hb_{mr} - \ddot{\phi} m_{b_{mr}} hb_{mr}^2) + I_H \ddot{\phi} \right] i_h \quad (17)$$

由式(17)可知风轮转矩由气动力转矩、叶片惯性力矩、轮毂惯性力矩 3 项组成。

2.2 风-结构-波频率耦合分析

风轮推力中的风-结构-波耦合关系如图 3a 所示。浮式平台在波激励下输出含有波频分量的纵荡位移、速度及加速度。从式(14)可知,因结构、平台纵荡加速度 \ddot{x}_p 耦合在风轮推力中。从式(6)可见,因结构、平台纵荡速度 \dot{x}_p 耦合在叶素节点 $b_{m,r}$ 的速度中。相对叶素来说,平台纵荡速度耦合到入流风速中(也即耦合到风轮气动力中),经结构、风轮气动力耦合在风轮推力中。由分析可知,波频通过浮式平台纵荡速度及加速度耦合到风轮推力中,风频经结构直接耦合到风轮推力中。含有风频和波频分量的风轮推力经结构反作用在浮式平台上,把

风频耦合到浮式平台纵荡位移、速度及加速度中,进而影响水动力计算。输出功率的风-结构-波耦合关系如图 3b 所示。

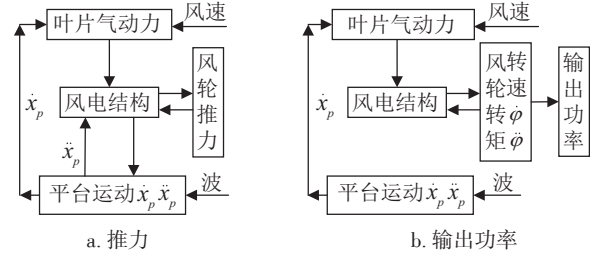


图 3 风-结构-波耦合关系

Fig. 3 Wind-structure-wave coupling relations

波频通过平台纵荡速度 \dot{x}_p 耦合到含风频的气动力中,风轮气动力和风轮结构相互作用产生风轮转矩、转速 $\dot{\phi}$ 及转动加速度 $\ddot{\phi}$,故这些量中都包含风频和波频分量。由式(15)可知,输出功率的频率分量由风轮转矩和风轮转速的乘积确定。由于风轮转矩和转速的均值相对于它们的脉动幅值很大,这样的 2 个量相乘得到的输出功率的频率分量即为这 2 个量的 1 倍频分量,高次谐波的幅值很小,可忽略。

3 算例与分析

3.1 算例参数

基于上述模型和计算方法,以美国可再生能源实验室(NREL) 5 MW DeepCwind 半潜式浮式风力机为算例,进行二自由度耦合动力学计算。5 MW DeepCwind 半潜式浮式风力机是把 5 MW 上风向 3 叶片水平轴基准风力机安装在 DeepCwind 半潜式浮式平台上得到,如图 4 所示。与本文二自由度耦合动力学计算有关的风力机结构属性参数^[11,12]和平台结构属性参数^[12,13]见表 1,文献[14]研究指出浮



图 4 DeepCwind 半潜式浮式风力机

Fig. 4 DeepCwind semi-submersible floating wind turbine

表1 DeepCwind半潜式浮式风力机属性参数

Table 1 Attribute parameters of DeepCwind semi-submersible floating wind turbine

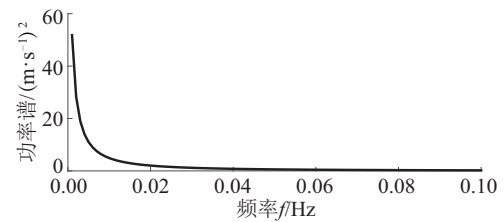
参数	数值
额定功率/MW	5
风轮、轮毂直径/m	126、3
静水面以上轮毂高度/m	90.0
切入、额定、切出风速/m/s	3、11.4、25
切入、额定风轮转速/r/min	6.9、12.1
齿轮箱传动比	97
发电机效率/%	94.4
轮毂质量/kg	56780
风轮质量/kg	110000
机舱质量/kg	240000
塔架质量/kg	249718
平台纵荡附加质量 A_{11} /kg	6504000
轮毂惯量/kg·m ²	115926
电机惯量/kg·m ²	534
吃水/m	20
静水面以上平台高度/m	10
压载水体积/m ³	9389.12
排水体积/m ³	13917
平台质量(包含压载水)/kg	13473000
平台质心坐标(平台参考系)/m	(0,0,13.46)

式风力机存在明显的非稳态流,故选用广义动态尾迹(GDW)模型结合B-L动态失速模型计算气动力,把每个叶片离散成17个叶素单元,详细计算公式参考文献[15]。浮式平台水动力和系泊力计算模型参考文献[12,13]。

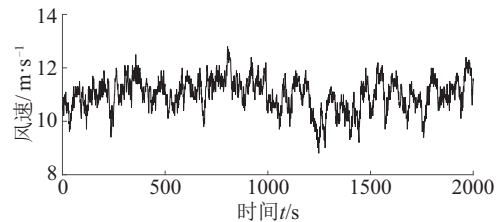
3.2 激励环境

本文计算水深200 m,因海流速度相对稳定,只影响浮式风力机的平衡位置,不产生脉动分量,对振荡耦合响应分析无影响,故计算中不考虑流速。如图1所示,下风向为惯性系 x_i 轴的正向,波向与风向一致。4种风、波联合激励情况分别为:1)稳态风与规则波;2)稳态风与不规则波;3)动态风与规则波;4)动态风与不规则波。激励1、激励3中规则波波高1.5 m,周期10 s。激励1、激励2中稳态风速9 m/s。激励3、激励4中动态风用NPD(Norwegian

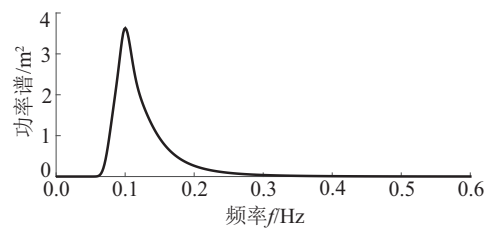
petroleum directorate)风谱计算脉动分量,风谱如图5a所示,主要激励风频范围在0.00~0.05 Hz,低频幅值大,随频率的增大快速衰减。设轮毂高度平均风速为11 m/s,基于AR(Autoregressive)模型根据NPD谱计算脉动分量,则轮毂中心点动态风速时程如图5b所示,最大风速13.3 m/s,最小风速8.8 m/s。激励2、激励4中不规则波选用JONSWAP(joint North Sea wave project)波谱,激励2中有效波高1.5 m,谱峰周期10 s,1阶激励波频范围在0.05~0.30 Hz。激励4中有效波高4.5 m,谱峰周期10 s,波谱如图5c所示,1阶激励波频范围在0.06~0.30 Hz。波高时程用Box-Muller法根据JONSWAP谱计算,激励4在平台参考点处波高时程如图5d所示。



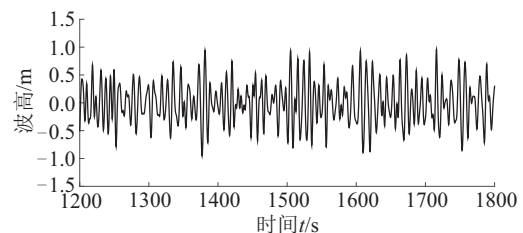
a. NPD风谱



b. NPD风速时程



c. JONSWAP波谱



d. JONSWAP波高时程

图5 风、波谱及风速、波高时程

Fig. 5 The wind, wave spectrum and the wind speed, wave elevation time histories

3.3 模型验证

FAST 是美国能源实验室开发的能对海上浮式风力机进行耦合动力学建模的计算软件,针对本文算例,在 FAST 中建立了 21 自由度耦合动力学模型,包括浮式平台自由度 6 个、塔架柔性自由度 4 个、低速轴转动及柔性自由度 2 个,叶片柔性自由度 9 个。图 6a 是激励 1 下两模型输出功率平均值随风速的变化曲线,两曲线几乎重合。图 6b 是激励 2 下两模型纵荡响应时程,两模型间只存在较小差异。两模型激励响应相似但不完全相同,正好验证了本文模型是正确的。两模型输出响应间存在较小差异,说明在本文研究条件下,浮式风力机指标的输出响应主要由风轮旋转和平台纵荡两自由度决定,其他自由度影响相对较小。故用两关键自由度模型分析风-结构-波耦合特性是可行的。

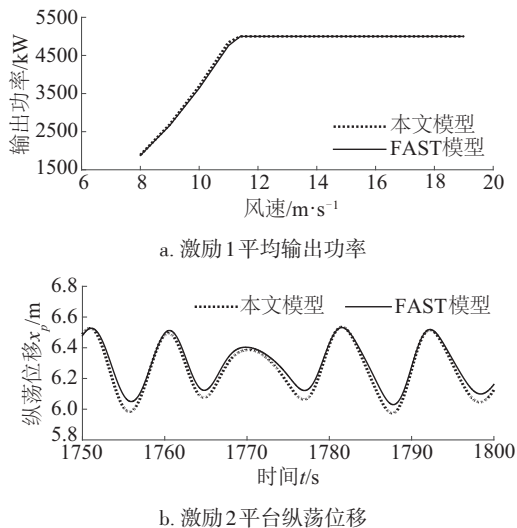


图6 本文模型和FAST模型响应对比

Fig. 6 Responses contrast between model in this paper and FAST model

3.4 激励1、激励2频响特性分析

图 7a 是激励 1、激励 2 的功率时程图。因时程图只反映指标值随时间的变化趋势,不能反映振荡频率特性,故根据各指标时程求出响应谱。图 7b 为激励 1、激励 2 的输出功率响应谱,激励 1 中的响应频率与规则波波频 0.1 Hz 相同,激励 2 中的主要响应频率范围在 0.05~0.25 Hz 内,与激励 2 中不规则波波频范围 0.05~0.30 Hz 一致。风轮推力、平台

纵荡位移、速度及加速度的响应谱与输出功率响应谱相似,故不再给出图。图 7c 是激励 1、激励 2 平台纵荡位移响应谱,激励 2 在 DeepCwind 半潜式平台纵荡固有频率 0.0093 Hz 附近激起了幅值较小的共振峰。不规则波在 1 阶波频范围以外的激励能量很小,但不等于零。很小的激励能就激起共振峰,说明 DeepCwind 半潜式浮式平台纵荡位移在固有频率处易产生共振响应。

由 2.2 节分析可知,在风、波联合激励下,风轮推力、输出功率、平台纵荡位移、速度及加速度响应谱一定包含风频和波频幅值,由于是稳态风,无风频,故这些指标的响应谱中只含有波频幅值,理论分析与频响结果一致。

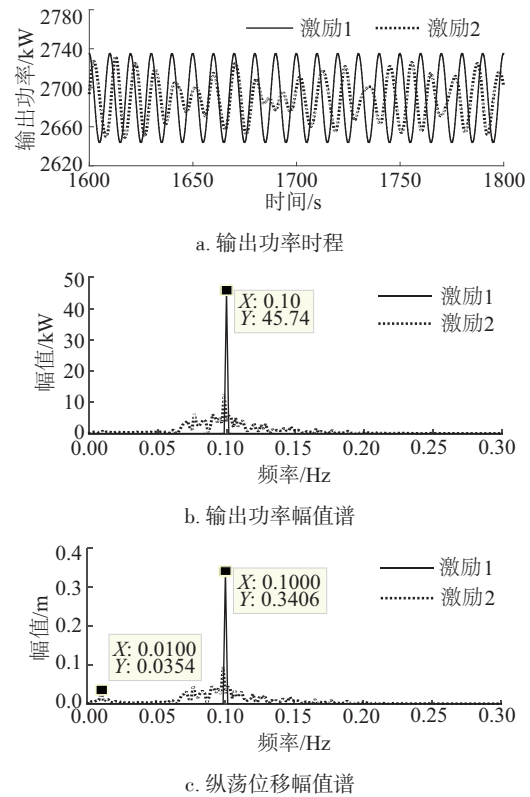


图7 激励1、激励2相关指标的时、频响应

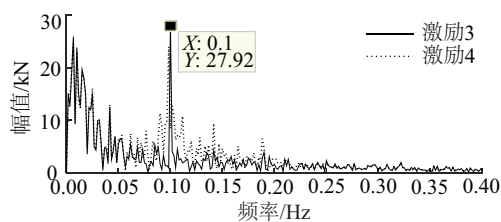
Fig. 7 The time, frequency responses of variables related to excitation 1 & excitation 2

3.5 激励3、激励4频响特性分析

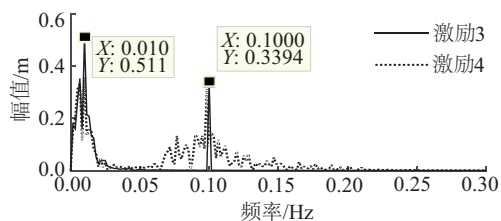
图 8a 为风轮推力响应谱,输出功率响应谱与图 8a 相似,故未给出图。对于激励 3,规则波和风在 0.1 Hz 处激起了明显的幅值。在 0.00~0.05 Hz 内有较大的频响幅值,在 0.05~0.40 Hz 内存在较小

的频响幅值,对应风频激励。对于激励 4,在 0.05~0.25 Hz 范围内叠加了波频激励幅值,在此范围以外与激励 3 的频响幅值相同,说明在 1 阶波频范围以外主要受风频激励。图 8b 为平台纵荡位移响应谱,从激励 3 可知,动态风在平台纵荡位移固有频率 0.0093 Hz 附近激起了幅值较大的共振峰,在其他频率范围对平台的纵荡位移无影响。对于激励 4,动态风和不规则波共同激起了共振峰,共振峰幅值与激励 3 的差不多,从图 7c 可知,不规则波只激起很小幅值的共振峰,故激励 4 中的共振峰主要由动态风激起。而在共振峰以外的其他频率范围,平台纵荡位移主要受波频激励。图 8c 为平台纵荡速度响应谱,对于激励 3、激励 4,动态风在平台纵荡固有频率 0.0093 Hz 附近激起了幅值较小的共振峰。在其他频率范围,主要是波频幅值。图 8d 为平台纵荡加速度响应谱,可知动态风对平台纵荡加速度的激励可忽略,主要受波频激励。

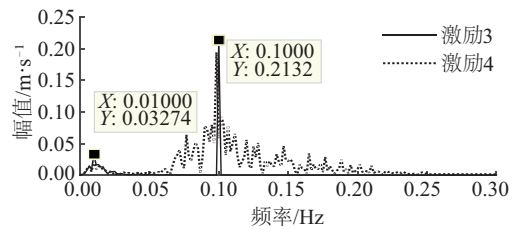
风轮推力和输出功率响应谱如理论分析,存在风频幅值,在波频范围存在风频幅值和波频幅值的叠加,从图 8a 可明显看出。但平台纵荡位移、速度及加速度响应谱未按理论分析存在风频幅值。这是因为 Deep Cwind 半潜式浮式平台的质量 $m_p=13473000$ kg,从图 8a 看出风轮推力的振荡幅值为几十 kN,在此以 50 kN 计算,产生加速度幅值为 0.0037 m/s^2 ,相比波激起的加速度幅值很小,



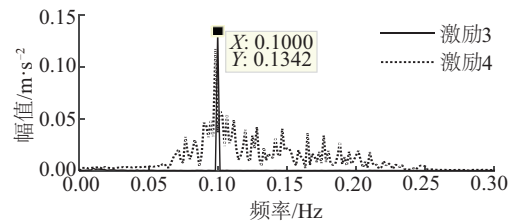
a. 风轮推力



b. 纵荡位移



c. 纵荡速度



d. 纵荡加速度

图 8 激励 3、激励 4 各指标幅值响应谱

Fig. 8 The frequency response of variables related to excitation 3 & excitation 4

平台纵荡位移和速度也是如此。故在平台纵荡位移、速度及加速度响应谱上几乎看不到风频响应。

4 结 论

基于本文建立的二自由度耦合动力学模型,以 5 MW DeepCwind 半潜式浮式风力机为算例,计算各种风、波联合激励下各指标的激励响应,通过耦合分析和响应谱分析得出以下结论:

- 1) 由于风-结构-波的耦合,风轮推力和输出功率的振荡特性主要由风频和波频特性共同决定。
- 2) 因 DeepCwind 半潜式浮式平台质量大,惯性大,故动态风对平台纵荡动态性能的影响很小。
- 3) 分析发现动态风和不规则波在 DeepCwind 半潜式浮式平台纵荡固有频率附近,易于激起纵荡位移共振响应。

前两条结论虽然是根据半潜式浮式风力机计算结果得出的,但也适用于其他类型的浮式风力机。

[参考文献]

- [1] Goupee A J, Koo B, Kimball R W, et al. Experimental comparison of three floating wind turbine concepts [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136(2): 467—476.

- [2] Koo B J, Goupee A J, Kimball R W, et al. Model tests for a floating wind turbine on three different floaters[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2014, 136(2): 455—465.
- [3] Ren Nianxin, Li Yugang, Ou Jinping. Coupled wind-wave time domain analysis of floating offshore wind turbine based on computational fluid dynamics method [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2014, 6(2): 53—86.
- [4] Karimirad M, Moan T. Wave- and wind- induced dynamic response of a spar-type offshore wind turbine [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2011, 138(1): 9—20.
- [5] Karimirad M. Modeling aspects of a floating wind turbine for coupled wave-wind- induced dynamic analyses [J]. *Renewable Energy*, 2013, 53: 299—305.
- [6] Wayman E, Sclavounos P, Butterfield S, et al. Coupled dynamic modeling of floating wind turbine systems (Preprint)[J]. *Wear*, 2006, 302:1583—1591.
- [7] Tran Thanh Toan, Kim Dong-Hyun. The coupled dynamic response computation for a semi-submersible platform of floating offshore wind turbine [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 147: 104—119.
- [8] Zhang Ruoyu, Tang Yougang, Hua Jun, et al. Dynamic response in frequency and time domains of a floating foundation for offshore wind turbines[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 60: 115—123.
- [9] 彭春江, 胡燕平, 程军圣, 等. 海上浮式风电机组刚柔耦合结构动力学建模与分析[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(4): 461—468.
- [9] Peng Chunjiang, Hu Yanping, Cheng Junsheng, et al. Modeling and analysis of the rigid-flexible coupled structural dynamics for offshore floating wind turbine [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27 (4) : 461—468.
- [10] 王 磊, 何玉林, 金 鑫, 等. 漂浮式海上风电机组动力学仿真分析[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(4): 1310—1314.
- [10] Wang Lei, He Yulin, Jin Xin, et al. Dynamic analysis of a wind turbine base on assumed mode method [J]. *Journal of Central South University: Natural Science Edition*, 2012, 43(4): 1310—1314.
- [11] Jonkman J M, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Task No. WER5.3301, 2009.
- [12] Robertson A, Jonkman J, Masciola M, et al. Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4[R]. Task No. WE14.5A01, 2012.
- [13] Coulling A J, Goupee A J, Robertson A N, et al. Validation of a FAST semi-submersible floating wind turbine numerical model with DeepCwind test data [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, 5 (2): 023116.
- [14] Sebastian T, Lackner M. Characterization of the unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines [J]. *Wind Energy*, 2013, 16(3): 339—352.
- [15] Jonkman J, Robertson A, Hayman G. AeroDyn theory manual[R]. Task No. WER4.3101, 2005.

TWO DEGREES OF FREEDOM DYNAMIC MODELING AND WIND-WAVE COUPLING EXCITATION CHARACTERISTICS ANAYSIS OF OFFSHORE FLOATING WIND TURBINE

Peng Chunjiang^{1,2}, Hu Yanping², Cheng Junsheng¹, Shen Yiping³

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of
Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The dynamic model with two degrees of freedom including rotor rotation and floating platform surge for offshore floating wind turbines is built. The calculation expression of rotor thrust and output power is derived, and wind-wave coupling excitation characteristics are analyzed based on this model. Taking 5 MW DeepCwind semi-submersible floating wind turbine as an illustrative example, the response spectrums of rotor thrust, output power, and surge displacement, surge speed and acceleration of the floating platform are calculated under several wind-wave coupling excitations with the same direction of wave and wind, the frequency response and wind and wave coupling characteristics are analyzed. The results show that the response spectrums of performance indices of wind turbine are dominated by wind frequency and wave frequency component. Furthermore, the response spectrums of the platform surge movement indices are dominated merely by wave frequency component and the influence of wind frequency on it is very small.

Keywords: offshore wind turbine; floating platfom; frequency response; coupling excitation; dynamic models