横摇工况下长柔叶片气弹耦合效应对风力机载荷特性影响研究

张险峰[1]，朱 张[2]，马 璐[1]，赵 雄[1]，沈 昕[2,3]
(1.中国长江三峡集团有限公司，湖北 武汉 430010；2.上海交通大学 机械与动力工程学院，上海 200240；3.上海非碳基能源转换与利用研究院，上海 200240)

摘 要：对于大型漂浮式风力机，叶片形变对风力机性能的影响不可忽略。文章以 IEA-15 MW 风力机为研究对象，基于升力线自由尾迹模型和几何精确梁模型研究了横摇工况下叶片气弹耦合效应对风力机载荷特性的影响。结果表明，浮台的横摇运动带来的附加速度会改变翼型截面处的入流特征，从而使风力机的载荷发生波动，且在考虑叶片柔性形变后风力机载荷会降低。相比于固定工况，在横摇工况下，风轮平面的载荷分布不对称性更为明显，导致风轮的偏航和俯仰力矩的波动幅值变大。此外，在横摇工况下，叶片形变量会发生周期性波动，形变量从叶根到叶尖逐渐增大，其中扭转形变使有效攻角减小；导致柔性叶片载荷低于刚性叶片的直接原因是同一翼型截面处柔性叶片的攻角小于刚性叶片。

关键词：浮式风力机；横摇运动；气弹特性；自由尾迹模型；几何精确梁模型
中图分类号：TK81 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)12-1630-08

0 引言

当前风力机发展呈现出风轮直径大型化和叶片结构柔性化趋势，大型风力机的叶片长度已经达到百米，叶片柔性形变对风力机载荷的影响不可忽略。海上漂浮式风力机由于浮台的六自由度运动会出现更为复杂的气弹耦合效应，因此开展 IEA-15 MW 风力机气弹耦合特性的研究对大型风力机的研发具有重要的参考意义。

目前，对风力机气动性能分析的方法主要包括 3 种，分别是经典的叶素动量理论[1,2]、计算结果精确但需耗费大量计算资源的 CFD 方法[3,4]和计算精度较为准确且计算效率高的涡流尾迹方法[5]。已有学者对漂浮式风力机气动问题和浮台运动与风力机气动载荷耦合的气弹问题进行了相关研究。Zhang Y C[6]采用流固耦合的方法研究了 15 MW 级风力机在纵荡工况和纵摇工况下的叶片受力特征。Liu Y[3]采用 CFD-MBD 模型分析了浮式风力机在纵荡工况下的气弹耦合效应，结果表明，在纵荡工况下，叶片的载荷和形变会发生显著的周期性波动。Shen X [7,8] 采用升力面自由尾迹方法对 NREL-5 MW 风力机在纵荡工况和纵摇工况下的气动稳定性进行了研究。王魁[9]采用弹性致动线模型研究了纵摇工况和纵荡工况下浮台运动对风力机叶片气弹特性的影响。研究发现，在纵摇工况下，叶片的变形会呈现出非对称性波动，从而导致叶片产生额外的气动载荷波动和结构响应。Dong J[10,11]基于涡环模型研究了风力机纵荡工况下的涡环状态，并用 NREL-5 MW 风力机进行了对比。黄亚振[12]采用升力线自由尾迹方法从入流速度的角度研究了周期艏摇运动对浮式风力机的气动影响。为解决百米级大柔性叶片的非线性气弹计算问题，钱晓航[13]采用基于 Legendre 谱有限元的几何精确梁理论，同时耦合叶素动量理论，建立了大尺寸风电叶片气动弹性分析方法，计算了 61.5 m 叶片和 117 m 叶片在稳态风和湍流风下的动态响应。

综上，已有研究虽然指出叶片形变对风力机性能的影响，但主要聚焦于叶片气动性能的研究。针对叶片长度突破百米级的 15 MW 风力机进行气弹耦合效应研究，对当前风力机大型化发展趋势及未来更大型风力机的设计与制造具有指导意义。因此，本文以 IEA-15 MW 风力机为研究对

收稿日期：2024-11-30。
基金项目：15 MW 级海上风电机组关键技术研究与应用——海上风电叶片结构建模与运动响应计算项目(202303070)；
国家重点研发计划项目(2023YFB4203100)。
通信作者：沈 昕(1982-)，男，博士，副教授，研究方向为风能高效利用技术。E-mail：shenxin@sjtu.edu.cn

象，研究了横摇工况下长柔叶片气弹耦合效应对风力机载荷特性的影响。

1　研究对象

海上漂浮式风力机由于安装在浮式平台上，会在海面上产生 6 个运动方向的自由度，分别为绕 3 个垂直坐标轴的平动和转动。其中，风力机在平行于风轮旋转平面的转动称为横摇运动。本文定义塔架为原点，风力机在风轮平面上绕原点的摇动为横摇运动，定义横摇运动为

$$\theta=\lambda\sin(\omega t) \tag{1}$$

式中：θ 为横摇运动的角度，(°)；λ 为横摇的幅值，m；ω 为角频率，rad/s；t 为时间，s；ωt 为横摇运动的相位角，(°)。

IEA-15 MW 风力机的基本参数如表 1 所示。为保证工况的真实性，选取真实海洋环境下的数据参数，确定横摇幅值为 2°，横摇频率为 0.15 Hz，并以此为基础工况开展气弹耦合效应研究。

表 1　IEA-15 MW 风力机基本参数

Table 1 Basic parameters of the IEA-15 MW wind turbine

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	15	叶片预弯/m	4
风轮朝向	上风向	设计尖速比	9.0
额定风速/m·s^{-1}	10.59	风轮锥角/(°)	−4
额定转速/r·min^{-1}	7.55	主轴倾角/(°)	6
轮毂高度/m	150	轮毂悬挑/m	11.35
叶片长度/m	117		

2　研究方法

本文采用升力线自由尾迹模型和几何精确梁模型求解气动力和结构形变。

2.1　升力线自由尾迹模型

升力线自由尾迹模型是将叶片沿着展向方向划分为若干段，在每一段设置位于各翼型截面距离叶片前缘 1/4 弦长处的附着涡段来代替叶片。各附着涡段的两端向叶片下游延伸，从而形成自由涡，在各涡段中心设置控制点，通过式(2)和式(3)迭代求解出各涡段的环量。

$$\vec{v}_j=\vec{V}_0-\vec{V}_{\text{elast}}+\vec{v}_{\omega,\text{free}}+\vec{v}_{\Gamma_{ll}} \tag{2}$$

$$\Gamma_{ll,j}=\frac{1}{2}C_{l,j}(\alpha_j)\frac{\left[\left(\vec{v}_j\cdot\vec{N}\right)^2+\left(\vec{v}_j\cdot\vec{T}\right)^2\right]^2\mathrm{d}A}{\sqrt{\left[\left(\vec{v}_j\cdot\overrightarrow{dl}\right)\cdot\vec{N}\right]^2+\left[\left(\vec{v}_j\cdot\overrightarrow{dl}\right)\cdot\vec{T}\right]^2}} \tag{3}$$

式中：$\vec{V}_0$，$\vec{V}_{\text{elast}}$，$\vec{v}_{\omega,\text{free}}$，$\vec{v}_{\Gamma_{ll}}$ 分别为控制点速度、风速、叶片形变速度、自由涡诱导速度和附着涡诱导速度，m/s；$\Gamma_{ll,j}$ 为环量强度；$C_{l,j}$ 为升力系数；α_j 为攻角，(°)；$\vec{N}$和$\vec{T}$分别为控制点处的法向量和切向量；A 为涡段面积，m^2；$\overrightarrow{dl}$为矢量线段，m。

此外，对于非定常来流工况，风力机的尾迹是动态发展的。基于无旋不可压假设简化涡丝运动的控制方程，并对叶片方位角和尾流寿命角进行离散化，可以求解风轮尾迹在不同时刻的形状。

$$\frac{\partial\mathbf{r}(\psi,\zeta)}{\partial\psi}+\frac{\partial\mathbf{r}(\psi,\zeta)}{\partial\zeta}=\frac{1}{\Omega}V[\mathbf{r}(\psi,\zeta),t] \tag{4}$$

式中：ψ 为叶片的方位角，(°)；ζ 为尾迹的寿命角，(°)；Ω 为风轮的转速，m/s；$\mathbf{r}$ 为尾迹控制点的位置向量。

2.2　几何精确梁模型

为了更精确计算 15 MW 级风力机叶片柔性形变对风力机载荷的影响，本文选择基于位移的几何精确梁模型作为结构动力学模型。该模型的控制方程包括应变-位移关系式[式(5)]、叶片截面所受到的力和力矩与截面应变及曲率的关系式[式(6)]，以及基于哈密顿原理所推导的动量守恒控制方程[式(7)]。

$$\begin{cases}\boldsymbol{\gamma}=\boldsymbol{r}'+\boldsymbol{u}'-\boldsymbol{C}^{\text{Bb}}\boldsymbol{C}^{\text{bI}}e_1\\ \boldsymbol{\kappa}=axial[(\boldsymbol{C}^{\text{Bb}}\boldsymbol{C}^{\text{bI}})'(\boldsymbol{C}^{\text{Bb}}\boldsymbol{C}^{\text{bI}})^{\text{T}}]\end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{pmatrix}F^*\\T^*\end{pmatrix}=\boldsymbol{C}^*\begin{pmatrix}\boldsymbol{\gamma}^*\\\boldsymbol{\kappa}^*\end{pmatrix} \tag{6}$$

$$\begin{cases}\dot{h}-F'=f_{\text{ext}}\\ \dot{g}+\tilde{u}h-T'+\left(\tilde{r}'+\tilde{u}'\right)F=m_{\text{ext}}\end{cases} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{u}$ 为位移矢量在惯性参考系下的坐标列阵；$\boldsymbol{r}$ 为叶片上点的位置矢量；$\boldsymbol{C}^{\text{Bb}}$ 和 $\boldsymbol{C}^{\text{bI}}$ 分别为形变引起的截面旋转张量和对应的矩阵元素；$\boldsymbol{\gamma}$ 和 $\boldsymbol{\kappa}$ 分别为平动和转动应变向量；F 为梁截面所受的合力，N；T 为梁截面所受的合力矩；$\boldsymbol{C}^*$为梁的截面刚度矩阵；h 为梁截面处的动量，kg·m/s；g 为角动量，kg·m^2/s；f_{ext} 为外力，N；m_{ext} 为外力矩，N·m。

为实现气动模型和结构模型的耦合，在计算过程的每一个时间步长中，首先进行气动模型的计算，得到气动载荷并提供给结构模型，由结构模

型计算得出叶片形变和速度，再将叶片结构响应信息传递给气动模型，从而更新计算网格来求解新的气动载荷。在完成气动模型和结构模型的数据交互后,进入下一个时间步长,如此迭代计算,最终实现完整的气动弹性耦合算法。研究方法如图 1 所示。

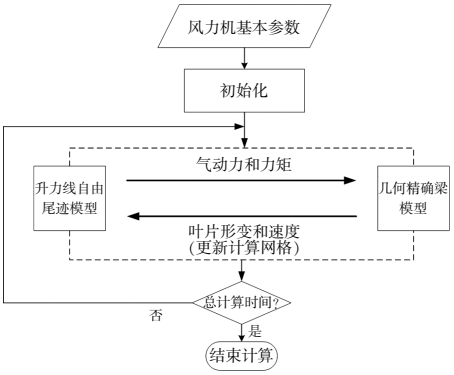


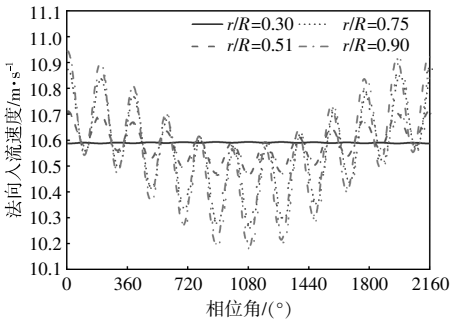
图 1　研究方法基本流程

Fig.1 Flowchart of the research methodology

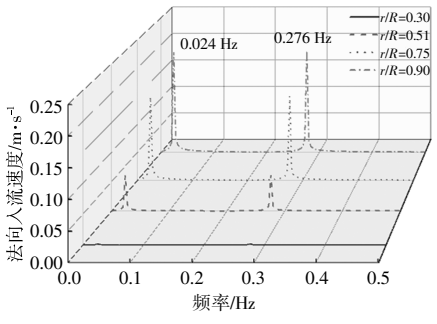
3　结果与讨论

3.1　横摇工况下叶片截面的入流特性

图 2 和图 3 分别给出了横摇工况下风力机的 4 个翼型截面处的法向入流速度和切向入流速度的时域和频域特性。图中,r 为当前翼型截面相对



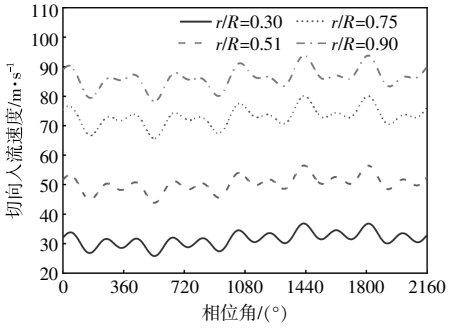
(a)时域



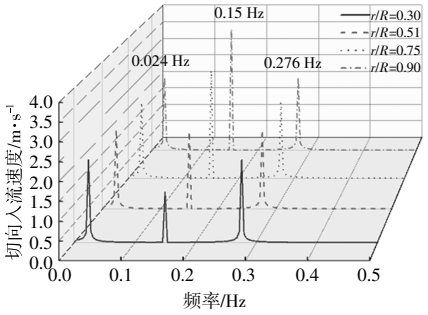
(b)频域

图 2　横摇工况下翼型截面法向入流变化情况

Fig.2 Normal inflow characteristics of the blade sections under roll condition



(a)时域



(b)频域

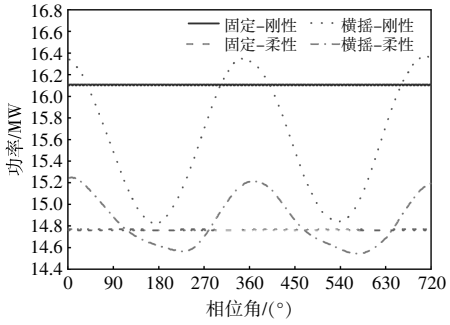
图 3　横摇工况下翼型截面切向入流变化情况

Fig.3 Tangential inflow characteristics of the blade sections under roll condition

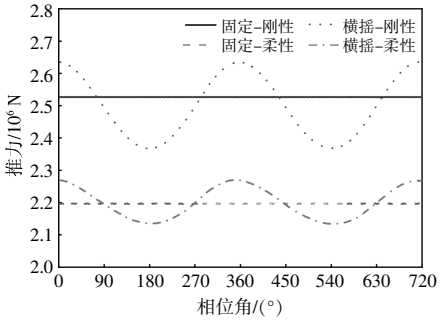
于轮毂的半径,R 为风力机叶片长度,r/R 代表当前翼型截面在风力机叶片展向方向的位置。由时域图可以看出，法向入流速度在靠近叶尖处的最小值和最大值分别为 10.18 m/s 和 10.95 m/s,而切向入流速度在靠近叶尖处的最小值和最大值分别为 78.23 m/s 和 94.17 m/s。由于横摇运动是平行于风轮平面的摇动，因此翼型截面处的切向入流速度的波动范围远大于法向入流速度。从频域图可以观察到 0.024,0.15,0.276 Hz 这 3 个频率分量,其中 0.024 Hz 和 0.276 Hz 是风轮旋转频率和横摇频率的干涉频率。在切向入流速度频域图中,最大的频率分量 0.15 Hz 为横摇频率，这表明横摇运动对切向入流速度的影响是最大的。

3.2　横摇工况下风力机的载荷特性

图 4 给出了 4 个不同工况下风力机的功率和推力的时域特性。由图 4 可以看出,浮台横摇运动导致叶片入流速度发生了显著的波动，因此横摇工况下风力机的功率和推力也出现了近似正弦形式的波动。在考虑叶片柔性后,风力机的功率和推力及其波动范围相比于刚性叶片均有所降低。这是因为叶片在旋转过程中发生形变时，会沿着低头方向扭转,减小了有效攻角,从而降低了风力机



(a)功率



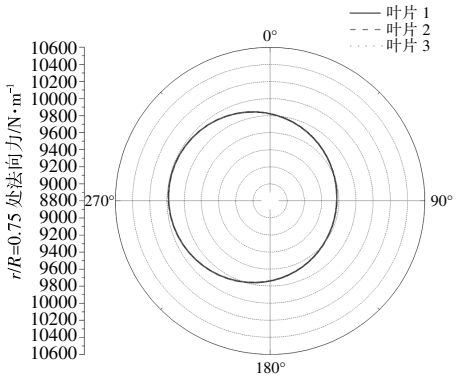
(b)推力

图 4　横摇工况下风力机功率和推力特性

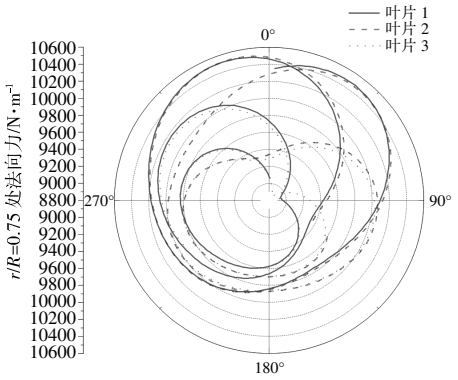
Fig.4 Power and thrust characteristics of the wind turbine under roll condition

的载荷。

图 5 给出了叶片为柔性时风轮旋转三周内，在 r/R=0.75 叶片截面处法向力随方位角的变化。图 6 给出了 4 个不同工况下，风力机的偏航力矩和俯仰力矩的时域特性。由图 5(a)可以看出，在固定工况下 3 根叶片在同一方位角处所受法向力相同，且叶片旋转一周过程中在风轮左右平面的载荷分布不对称。叶片在 180°~360°方位角所受的法向力大于叶片在 0°~180°方位角所受的法向力，因此在固定工况下，风轮存在负值的偏航力矩。叶片在上半平面所受的法向力略大于下半平面，故风轮存在很小的负值俯仰力矩。



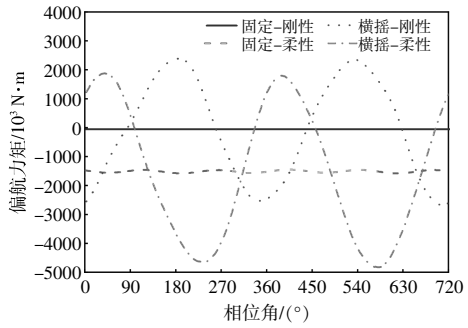
(a)固定工况



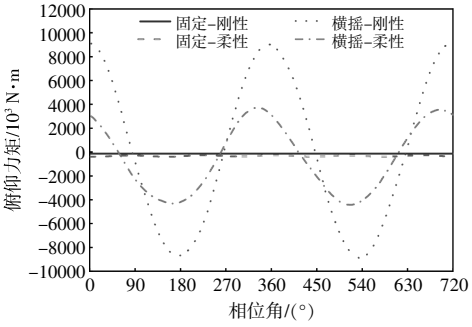
(b)横摇工况

图 5　各叶片 r/R=0.75 截面处法向力随方位角变化特性

Fig.5 Characteristics of normal thrust with azimuth angle at r/R=0.75 section of each blade



(a)偏航力矩



(b)俯仰力矩

图 6　风力机偏航力矩和俯仰力矩随相位角变化特性

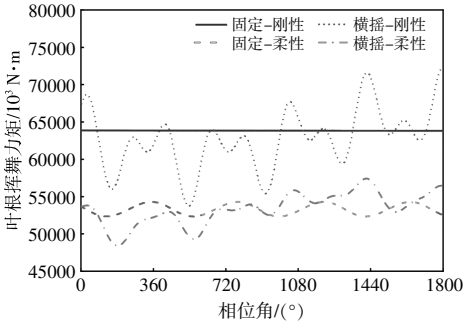
Fig.6 Characteristics of yaw and tilt moment of wind turbine with phase angle

由图 5(b)可以看出，在横摇工况下，由于浮台横摇频率和风轮旋转频率不同，因此在不同时刻，同一个叶片在相同方位角处所受的法向力存在显著差异，且 3 个叶片在同一个方位角处所受的法向力也存在显著差异。在叶片旋转一周过程中，风轮的左右平面所受的法向力不对称，且风轮的上下平面所受的法向力不对称性更为显著。

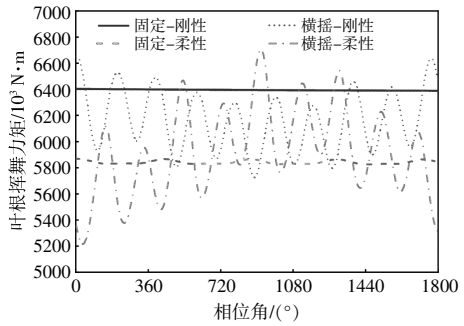
由图 6 可以看出，相比于固定工况，风力机在横摇工况下有着更大的偏航和俯仰力矩，且波动

的幅值更大。

图 7 给出了风力机的叶根挥舞力矩和摆振力矩的时域特性。由图 7 可以看出,在固定工况下,刚性叶片的挥舞和摆振力矩均不发生变化,而柔性叶片的挥舞和摆振力矩会发生一定波动。在横摇工况下,刚性叶片和柔性叶片的偏航和俯仰力矩均会发生显著的波动现象,且叶片的柔性形变会降低叶根挥舞力矩。由于横摇运动发生在风轮旋转平面,因此在横摇工况下,叶片形变会导致摆振力矩的增大。



(a)叶根挥舞力矩



(b)叶根摆振力矩

图 7 挥舞力矩和摆振力矩的时域特性

Fig.7 Time domain characteristics of blade flapwise and edgewise moment

图 8 给出了横摇工况下柔性叶片的法向力、切向力、偏航力矩和俯仰力矩的频域特性。从图 8 可以观察到风轮的旋转频率、浮台横摇频率和这两种频率的干涉频率。

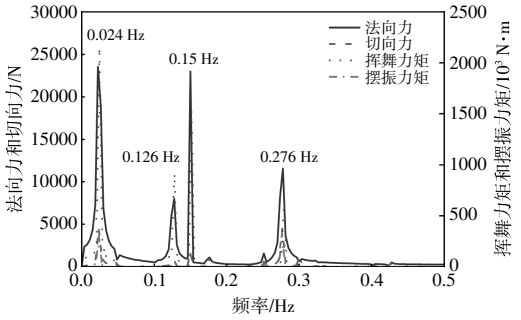
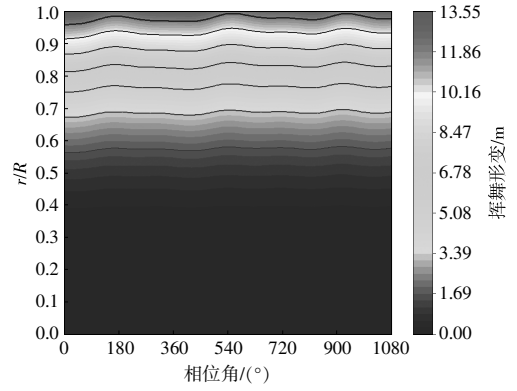


图 8 风力机载荷的频域特性

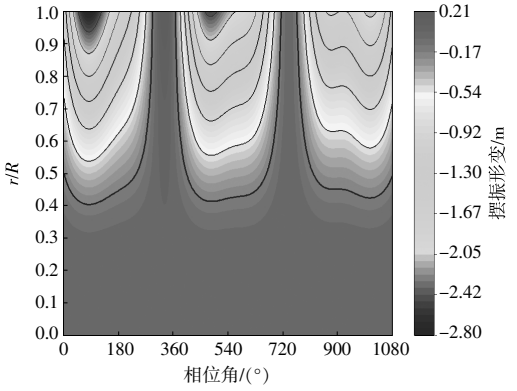
Fig.8 Frequency domain characteristics of wind turbine loads

3.3 横摇工况下叶片形变对载荷的影响

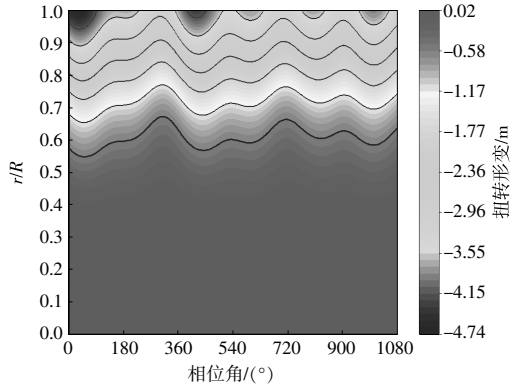
横摇工况下的风力机叶片,因旋转过程中所受载荷发生波动,导致出现不同的形变。叶片的形变可分为挥舞、摆振和扭转,这 3 种形变会反过来影响叶片的载荷,从而形成气弹耦合。图 9 给出了横摇工况下叶片的各展向节点的形变云图。由图 9 可以看出,3 种形变从叶根到叶尖均逐渐增大。



(a)挥舞形变



(b)摆振形变



(c)扭转形变

图 9 叶片形变云图

Fig.9 Cloud chart of blade deformation characteristics

挥舞形变和摆振形变主要影响入流速度，扭转形变则改变叶片的有效攻角，且负值的扭转形变表示叶片沿着降低攻角方向旋转。

图 10 给出了横摇工况下柔性叶片不同翼型截面处叶片扭转形变和叶片攻角的时域特性。图中:上半图 4 条正值曲线代表攻角,下半图 4 条负值曲线代表扭转形变。从图 10 可以看出,叶片的扭转形变从叶根到叶尖逐渐增大，攻角从叶根到叶尖逐渐减小，这说明在叶尖处扭转形变对攻角的影响更为显著。

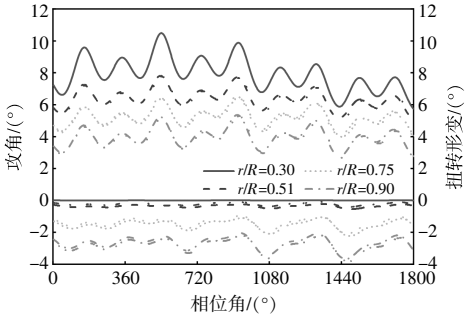


图 10　扭转形变对攻角的影响

Fig.10 Effect of blade torsion on angle of attack

图 11 给出了 r/R=0.75 翼型截面处的刚柔叶片攻角的时域特性。由图 11 可以看出,柔性叶片的攻角比刚性叶片的攻角小，阐明了前文讨论的柔性叶片载荷低于刚性叶片的原因。

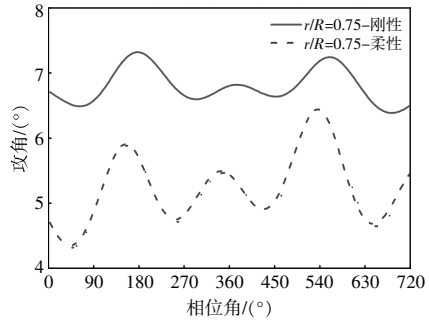
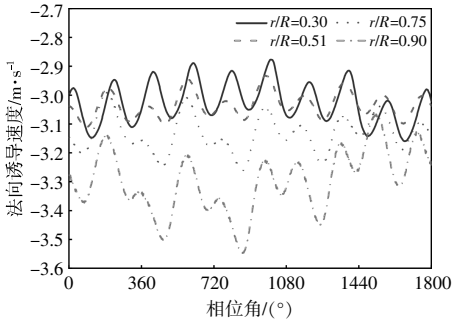


图 11　横摇工况下刚柔叶片攻角对比

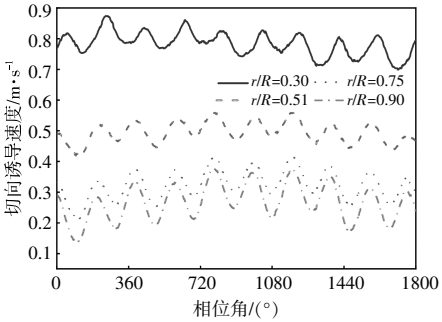
Fig.11 Comparison of angle of attack of rigid and flexible blade under roll condition

叶片形变除了会改变叶片攻角的形式，还会因改变叶片翼型截面处的诱导速度从而改变速度构成。

图 12 给出了横摇工况下柔性叶片的法向诱导速度和切向诱导速度的时域变化特性。从图 12 可以看出,在同一翼型截面处,切向诱导速度明显小于法向诱导速度。由于风轮旋转的线速度远大于切向诱导速度,因此二者叠加后,切向诱导速度



(a)法向诱导速度



(b)切向诱导速度

图 12　横摇工况下翼型截面处的诱导速度变化特性

Fig.12 Induced velocity variation characteristics at airfoil section under roll condition

的影响可忽略不计。法向诱导速度的绝对值从叶根到叶尖处逐渐增大，且法向诱导速度方向和来流速度方向相反,因此叶尖处的攻角小于叶根处。

4　结论

本文以 IEA-15 MW 风力机为研究对象,通过对横摇工况下漂浮式风力机的气弹耦合效应及其与浮台运动之间的相互影响进行研究，并对风力机的载荷特性进行分析,得出如下结论。

①横摇工况下叶片的截面入流特性会发生变化，且横摇运动所带来的附加速度对切向入流速度的影响大于法向入流速度。

②相比于固定工况，横摇工况下风力机的载荷会出现显著的波动，其原因在于浮台的运动导致叶片的入流速度发生变化，且在考虑叶片柔性形变后,风力机的功率和推力会明显降低,波动幅值也会下降。

③叶片旋转一周过程中，风轮的左右平面和上下平面的载荷分布不对称,相比于固定工况,在横摇工况下由于风轮旋转频率和横摇频率的不同,这种不对称现象更为显著。在同一时刻,三根叶片所受的法向力在横摇工况下的差异更为显著,从而导致风轮产生更大的偏航和俯仰力矩。

④浮台的横摇运动会导致叶片的形变量发生波动，且叶片的形变量和形变的波动幅值从叶根到叶尖逐渐增大。叶片的扭转形变为负值时,代表叶片沿着低头方向旋转,从而减小了有效攻角。在同一翼型截面处,柔性叶片的攻角小于刚性叶片,因此在考虑叶片柔性形变后风力机载荷会下降。

⑤在横摇工况下，叶片的柔性形变会影响翼型截面的入流速度。法向诱导速度大于切向诱导速度,因此切向诱导速度的影响可以忽略。诱导速度方向和来流速度方向相反，这将导致攻角的减小,从而导致风力机载荷下降。

参考文献:

[1] 陈安杰,王策,贾娅娅,等.基于 BEM 的风力机叶片气动性能计算分析[J].工程力学,2021,38(1):264-268.

[2] 刘利琴,肖昌水,郭颖.海上浮式水平轴风力机气动特性研究[J].太阳能学报,2021,42(1):294-301.

[3] Liu Y,Xiao Q,Incecik A,et al. Aeroelastic analysis of a floating offshore wind turbine in platform-induced surge motion using a fully coupled CFD-MBD method [J]. Wind Energy,2019,22(1):1-20.

[4] 李根,缪维跑,李春,等.垂直轴风力机气动特性与涡脱落模态分析[J].太阳能学报,2023,44(2):41-51.

[5] Su K,Bliss D. A novel hybrid free-wake model for wind turbine performance and wake evolution [J].Renewable Energy,2019,131:977-92.

[6] Zhang Y C,Song Y,Shen C,et al. Aerodynamic and structural analysis for blades of a 15 MW floating offshore wind turbine [J].Ocean Engineering,2023,287(1):115785.

[7] Shen X,Hu P,Chen J,et al. The unsteady aerodynamics of floating wind turbine under platform pitch motion [J]. Journal of Power and Energy,2018,232 (8):1019-1036.

[8] Shen X,Zhu X C,Du Z H. Load control and unsteady aerodynamics for floating wind turbines [J]. Journal of Power and Energy,2021,235(6):1501-1526.

[9] 王魁,赵伟文,万德成.平台运动对 15 MW 风机气弹性的影响研究[J].海洋工程,2024,42(5):21-35.

[10] Dong J,Viré A. Comparative analysis of different criteria for the prediction of vortex ring state of floating offshore wind turbines [J]. Renewable Energy,2021,163:882-909.

[11] Dong J, Viré A,Li ZR. Analysis the vortex ring state and propeller state of floating offshore wind turbines and verification of their prediction criteria by comparing with a CFD model [J].Renewable Energy,2022,184:15-25.

[12] 黄亚振,沈昕,吴亚东.周期艏摇运动对浮式风力机的气动影响[J].热能动力工程,2020,35(6):198-204.

[13] 钱晓航,郜志腾,王同光,等.百米级大柔性风电叶片非线性气弹响应分析 [J]. 空气动力学学报,2022,40(4):220-230.

Study on aerodynamic coupling effect of long flexible blades on load characteristics of large wind turbines under roll condition

Zhang Xianfeng[1], Zhu Zhang[2], Ma Lu[1], Zhao Xiong[1], Shen Xin[2,3]

(1.China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 2.School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3.Shanghai Non-carbon Energy Conversion and Utilization Institute, Shanghai 200240, China)

Abstract: For large floating wind turbines, the influence of blade deformation on wind turbine performance cannot be ignored. Based on the free wake model of lift line and the geometrically accurate beam model, the effects of aerodynamic coupling effects on the load characteristics of EI-15 MW wind turbine under rolling conditions are studied in this paper. The results show that the additional velocity brought by the rolling motion of the floating platform will change the inflow characteristics at the section of the airfoil, so that the wind turbine load will fluctuate, and the wind turbine load will decrease after considering the flexible deformation of the blade. Compared with the fixed condition, the asymmetry of the load distribution on the rotor plane is more obvious in the rolling condition, which leads to the fluctuation amplitude of the yaw and pitching moment of the rotor. In addition, the shape variable of the blade will fluctuate periodically under rolling conditions, and the shape variable gradually increases from blade root to blade tip. The effective Angle of attack decreases due to torsional deformation, and the Angle of attack of the flexible blade at the same profile section is smaller than that of the rigid blade, which is the direct reason why the load of the flexible blade is lower than that of the rigid blade.

Keywords: floating wind turbine; roll motion; aeroelastic performance; free vortex wake model; geometrically exact beam model