

超大型风力机叶片弯扭耦合颤振研究

杨定华¹, 王 速², 张险峰¹, 马 璐¹, 沈 昕^{2,3}, 杜朝辉^{2,3}

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 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: 以 IEA 15 MW 风力机叶片为研究对象, 建立叶片气弹系统动力学模型, 对高尖速比下发生颤振时的气弹响应进行分析, 并对其中的多自由度耦合特性开展深入研究。结果显示, 在高尖速比下, 该风力机长柔叶片发生挥舞-扭转耦合的弯扭耦合颤振, 在三自由度上的振动均包含挥舞和扭转固有频率, 但颤振的维持由挥舞和扭转自由度上气动力做功维持, 挥舞、扭转的瞬时气动功率发展存在明显的耦合现象。摆振方向则基本无能量贡献, 在全过程中仅有微弱气动功率, 仅由于叶片结构耦合特性, 受挥舞和扭转激励发生受迫振动。

关键词: 风力机; 气动弹性; 弯扭耦合; 颤振; 叶素动量理论

中图分类号: TK89

文献标志码: A

0 引 言

随着风电机组向超大容量方向演进, 叶片几何尺寸的剧增导致结构柔性显著提升, 这使得气弹不稳定性——特别是颤振问题——成为制约机组安全运行的关键瓶颈。与早期刚性较强的短叶片不同^[1-2], 现代百米级长柔叶片的临界颤振边界已大幅内移。例如, 对比 NREL 5 MW (60 m 级) 叶片较高的颤振裕度, SNL 100-00 (百米级) 叶片在接近额定转速 (1.0~1.1 倍) 时即面临失稳风险^[3]。因此, 在设计阶段对颤振边界和振动响应进行预测和研究至关重要^[4]。

在对风力机叶片颤振特性的分析方面, 国内外学者已进行了大量研究工作。Li 等^[5]提出一种基于人工神经网络的替代模型-蒙特卡洛方法, 用于 NREL 5 MW 风力机叶片随机颤振分析, 结果表明该方法在保证预测精度的同时能显著提高计算效率; Caracoglia^[6]采用基于马尔可夫过程的降阶模型研究旋转采样湍流及气动弹性载荷不确定性对大型风力机叶片弯扭耦合颤振稳定性的影响, 结果表明这些随机扰动会降低系统的稳定性边界, 导致颤振提前发生; Griffith 等^[7]通过对 NREL 5 MW 及 SNL 100 m 系列叶片的研究发现, 叶片轻量化设计会显著降低颤振临界转速并改变模态特性, 且气动弹性稳定性对展向刚度分布极为敏感。

风力机在实际运行中可能遭遇飞车工况, 这也是研究风力机颤振问题时经常采用的一种模拟工况^[8-12], 在飞车工况下发生颤振时, 叶片处于高尖速比下。有许多研究在该工况下进行, 例如, Pirrung 等^[8]在 HAWC2 中引入近尾迹模型

研究拖曳涡旋对 NREL 5 MW 风力机飞车时颤振的影响, 发现该效应能提升颤振临界转速, 增大安全裕度; 高龙等^[9]对某型风力机近百米叶片的研究发现摆振负阻尼是 95 m 柔性叶片飞车颤振失稳主因, 且空气密度增加与偏航停机会降低稳定性, 而增大桨距角可有效提升阻尼; 夏煜盛^[10]对 IEA 15 MW 风力机在飞车状态下的气弹响应进行了数值模拟研究, 分析了叶片弹性中心位置、质量中心位置、叶片刚度等众多参数对气弹稳定性的影响。总的来说, 目前对于百米级以下风力机叶片在高尖速比下的颤振特性研究较为充足。

本文聚焦风力机百米级以上长柔叶片, 旨在通过数值模拟手段, 深入剖析其高尖速比下的气弹响应特性, 重点揭示挥舞、摆振与扭转自由度之间的能量交换与耦合规律。结果表明, 在高尖速比下, 该风力机长柔叶片表现出挥舞-扭转耦合颤振的失稳特征; 三向振动频谱均混叠挥舞和扭转固有频率, 但能量机制分析表明, 颤振的持续振荡主要由挥舞和扭转自由度的气动正功驱动, 二者在瞬时功率上呈现出显著的非定常耦合特性; 相比之下, 摆振方向未观测到明显的能量输入, 仅表现为因结构耦合诱发的受迫振动。

1 研究方法

本研究构建的叶片气弹分析框架基于非定常叶素动量理论及几何精确梁模型。数值模拟中仅将风力机叶片视为弹性结构, 忽略来流不均匀因素及塔影效应等对流场的影响, 并将变桨角始终固定为 0°。

收稿日期: 2024-12-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB4203100); 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)

通信作者: 沈 昕 (1982—), 男, 博士、副教授、博士生导师, 主要从事风力机气动与气弹等方面的研究。shenxin@sjtu.edu.cn

1.1 气动模型

为准确表征叶片周围的非定常流场,气动模型考虑了 Prandtl 叶尖/轮毂损失修正、尾迹修正以及 Beddoes-Leishman 动态失速模型。该半经验方法在保证计算效率的同时,能够有效捕捉大变形条件下的非线性气动特性^[13-14]。部分关键计算式可如式(1)~式(3)所示。

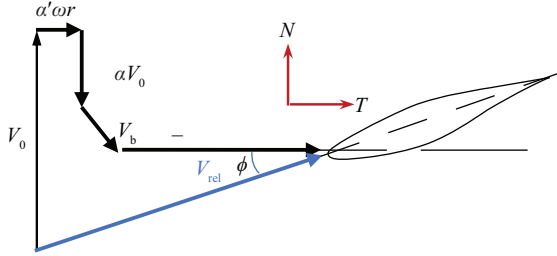


图1 风力机叶片截面翼型的速度三角形示意

Fig. 1 Velocity triangle diagram of airfoil section of a wind turbine

由图1的速度三角形所示, N 、 T 分别表示风轮轴向和切向, ϕ 为叶片截面的实际入流角,叶片截面速度 V_{rel} 的构成包含来流速度 V_0 、风轮截面旋转线速度 ωr 、诱导速度(以轴向、切向诱导因子 a 、 a' 表征)和叶片运动速度 V_b ,其中的关系可按式(1)给出:

$$\vec{V}_{rel} = (1-a)\vec{V}_0 + (1-a')(-r\vec{\omega}) + \vec{V}_b \quad (1)$$

虽然本研究仅考虑均匀来流工况,但柔性叶片气弹响应模拟需要考虑叶片振动引起的非定常流动影响,为此引入了动态入流模型^[15],该模型如式(2)、式(3)所示:

$$W_{int} + \tau_1 \frac{dW_{int}}{dt} = W_s + k \cdot \tau_1 \frac{dW_s}{dt} \quad (2)$$

$$W + \tau_2 \frac{dW}{dt} = W_{int} \quad (3)$$

式中: W_{int} 、 τ_1 、 τ_2 ——过程变量; W_s ——准定常计算下诱导风速; W ——实际诱导风速(考虑非定常效应)。

其余关键公式和模型详细讨论可参阅文献[16-17]。

1.2 结构模型

结构动力学部分的求解方法采用几何精确梁理论(geometrically exact beam theory, GEBT)。鉴于超大型叶片具有显著的几何非线性特征,GEBT能通过非线性应变度量,精确解析大位移与大旋转耦合下的力学行为。该模型具备耦合拉伸、剪切、弯曲及扭转变形的能力,从而完整描述叶片的六自由度运动。在 GEBT 框架下,梁的运动控制方程为:

$$\dot{h} - F' = f \quad (4)$$

$$\dot{g} + \dot{u}h - M' + (\tilde{x}'_0 + \tilde{u}')^T F = m \quad (5)$$

式中: h 、 g ——线性动量和角动量,单位分别为 $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ 和 $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$; F 、 M ——梁截面力和力矩,单位分别为 N 和 $\text{N} \cdot \text{m}$; u ——梁的参考线上某点的线性位移, m ; x_0 ——沿梁参考线点的位置矢量, m ; f 、 m ——施加在梁上的分布力和力矩,单位分别为 N 和 $\text{N} \cdot \text{m}$; 上标 $(\cdot)$ 、 $(')$ ——对时间的导数和

束轴 x_1 的导数;上标 $\sim$ ——与给定矢量对应的偏斜对称张量。

结合本构方程即可求解截面力与变形:

$$\begin{Bmatrix} h \\ g \end{Bmatrix} = \mathbf{M} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \omega \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix} = \mathbf{C} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ k \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ —— 6×6 截面质量和刚度矩阵,由叶几何与材料属性确定; ε 、 k ——一维应变和曲率; ω ——旋转张量 R 定义的角速度矢量。

参考文献[12,18]中可见几何精确梁模型的其余关键公式和具体推导过程。

2 研究对象

本研究选取 IEA 15 MW 参考风力机^[19]作为分析对象,旨在探究超大型机组在高尖速比下的气弹失稳机制。该机型叶片展长接近 120 m,其显著的几何非线性效应和长柔特性使其成为研究现代海上风力机颤振问题的理想载体。目前,学术界针对该机型的气弹耦合特性已开展了一定的数值模拟与验证工作^[20-24]。本文所采用的气弹模型参数及机组基本设计指标详见表1。

表1 IEA 15 MW 参考风力机部分关键设计参数

Table 1 Some key design parameters of IEA 15 MW reference wind turbine

参数	数值
额定功率/MW	15
额定风速/(m/s)	10.59
额定转速/(r/min)	7.55
额定尖速比	9.0
叶片长度/m	117

如图2所示,在气弹模型中,叶片的多自由度振动分解为了正交的扭转自由度(沿叶片中轴)、挥舞自由度(沿风轮轴向,下风向为正)、摆振自由度(沿风轮旋转方向为负)。

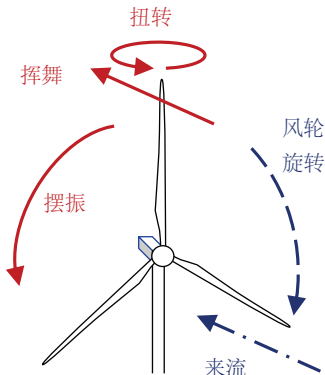


图2 风力机叶片结构动力学自由度定义示意

Fig. 2 Schematic illustration of structural dynamic degrees of freedom for wind turbine blades

为确保后续气弹响应分析的可靠性,本研究对静止状态无负载叶片(0 转速、无气动载荷)进行了固有模态求解。表 2 列出了 IEA 15 MW 叶片的前六阶模态频率计算结果。通过与文献[22-23]的公开数据进行交叉验证,可看出本文模型预测值与基准数据吻合良好。1 阶扭转模态存在约 9.9% 的最大偏差,其余模态及总体趋势均保持高度一致,这表明本文构建的几何精确梁模型能有效捕捉超大型叶片的结构动力学特征。

表 2 IEA 15 MW 风力机叶片模态频率

Table 2 Mode frequency of IEA 15 MW wind turbine

模态	本文	文献[22]	文献[23]
1 阶挥舞	0.523	0.512	0.521
1 阶摆振	0.665	0.692	0.619
2 阶挥舞	1.475	1.509	1.559
2 阶摆振	2.124	2.120	1.933
3 阶挥舞	2.906		
1 阶扭转	4.072	4.314	4.475

3 计算结果与分析

前文已提到,风力机叶片在实际运行时可能遭遇飞车工况,发生高尖速比运行下的颤振。因此,参考对 IEA 15 MW 风力机飞车时颤振模拟的已有研究^[24]中的工况,将尖速比固定为 22,进行一系列气弹响应模拟计算。

在数值模拟中进行定工况下的气弹响应计算,即在每个工况中,风力机在定转速、定风速下运行,桨距角同样固定为 0°。在模拟中,叶片在 0 时刻的初始形变为 0,之后在结构和气动载荷的共同作用下开始发生振动。

3.1 风力机气弹响应时域特性分析

尖速比 22(风轮转速 10.5 r/min、风速 6.0 m/s)下叶尖位移随时间的发展情况如图 3 所示,图 4 为与该工况尖速比相同、转速和风速均极为接近的另一工况。在图 4 所示工况下,三自由度振幅分别仅为 0.6 m、1.2 m、0.2°,此时叶片维持气弹稳定,仅由于叶片自重随转动发生小幅度周期性变形;但在图 3 所示工况下,叶片开始振动后振幅指数发散,最终响应稳定为混叠复杂频率成分的极限环振荡(limited cycle oscillation, LCO),三自由度振幅分别可达 3.6 m、1.8 m 和 16.6°。可见,发生颤振后,相较于气弹稳定时,挥舞和扭转振幅的增加分别可达到 600% 和 8300% 以上,对叶片结构的强度提出极大考验;摆振振幅则上升至约 150%,上升幅度相对较小。

图 5 展示了颤振发生时(风轮转速 10.5 r/min,尖速比 22)叶片展向攻角的分布特征。如图 5 所示,在主要工作段(10%~90% 叶高),截面平均攻角维持在-1°~0°,但 90% 叶高以上的叶尖范围则为-6°~-1°;波动范围基本在-15°~15°

内。其中,10%~50%、70%~100% 叶高段,叶片截面攻角在正攻角范围内的波动更强,但在 50%~70% 叶高段,叶片截面攻角则在负攻角范围内波动增强。这表明,虽然各叶片段平均攻角接近,但在振动过程中分别会进入更大的正攻角或负攻角下的流动状态,导致叶片表面的气动力展向分布和发展复杂。

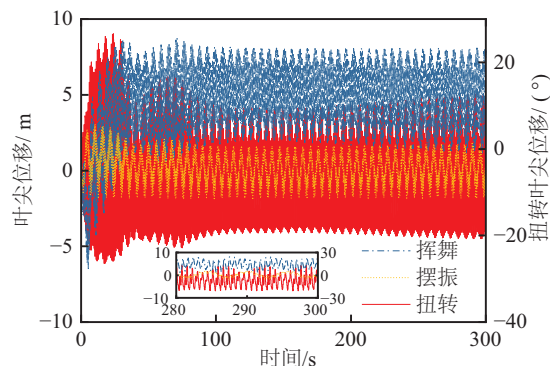


图 3 风速 6.0 m/s, 风轮转速 10.5 r/min 下的叶尖位移

Fig. 3 Blade tip displacement

(wind speed 6.0 m/s, rotor speed 10.5 r/min)

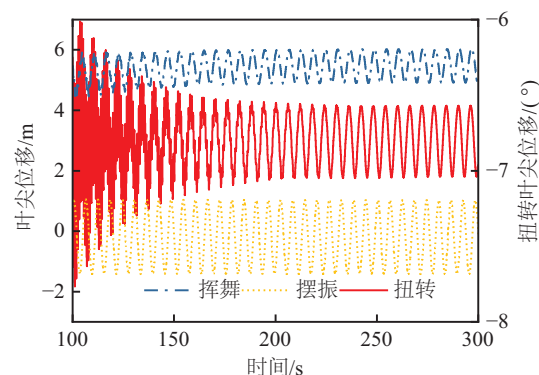


图 4 风速 5.7 m/s, 风轮转速 10.0 r/min 下的叶尖位移

Fig. 4 Blade tip displacement

(wind speed 5.7 m/s, rotor speed 10.0 r/min)

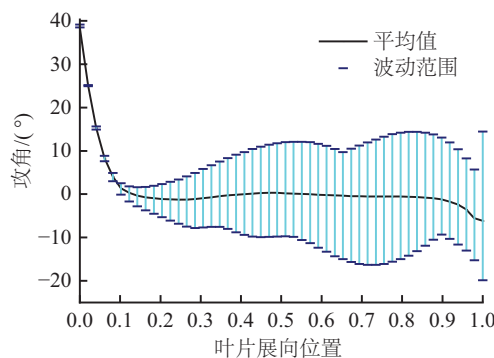


图 5 风速 6.0 m/s, 风轮转速 10.5 r/min 下的叶片展向攻角分布

Fig. 5 Spanwise distribution of angle of attack

(wind speed 6.0 m/s, rotor speed 10.5 r/min)

3.2 风力机气弹响应频域特性分析

图6为图3、图5所示工况下叶尖振动信号的频谱图。频谱中主峰为1.4 Hz, 对应于2阶挥舞频率。此外频谱中还混叠了明显的3阶挥舞、1阶扭转频率。

由于叶片自身结构动力学特征导致的各向耦合特性影响, 三自由度的振动均包含2阶、3阶挥舞和1阶扭转固有频率; 其中, 由于扭转自由度上1阶固有频率较高, 频谱中高频分量较强; 而摆振频谱相较挥舞频谱整体较弱, 频谱中又无摆振固有频率成分, 表明摆振方向的振动是由挥舞、扭转的大幅振动诱发产生。

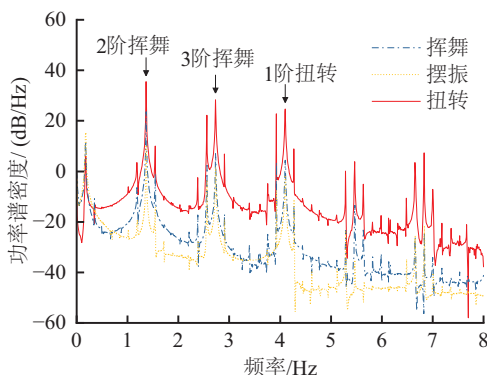


图6 风速6.0 m/s, 风轮转速10.5 r/min下的叶尖位移频谱

Fig. 6 Frequency spectrum of blade tip displacement
(wind speed 6.0 m/s, rotor speed 10.5 r/min)

3.3 气动力做功分析

在颤振工况下, 叶片振动响应稳定后, 每个叶素段上气动功率和单位振动周期内气动力做功可按式(8)、式(9)计算:

$$P_{\text{aero}} = \vec{F}_{\text{aero}} \cdot \vec{v} \quad (8)$$

$$W_{\text{cyc}} = \int_0^T P_{\text{aero}} dt \quad (9)$$

式中: P_{aero} ——瞬时气动功率, W; $\vec{F}_{\text{aero}}$ ——当地气动力, N; $\vec{v}$ ——当地振动速度, m/s; W_{cyc} ——单位振动周期内气动功, J; T ——振动周期, s; t ——时间, s。

基于颤振工况(风轮转速10.5 r/min, 尖速比22)下的气动功分布分析图7表明: 叶片能量交换机制呈现显著的展向分布不均特征。具体而言, 颤振维持的能量主要来源于叶尖区域(77%~100%叶高), 该区域通过挥舞方向气动力做功向结构系统注入能量; 而叶中段(32%~77%叶高)则主要表现为挥舞和扭转自由度上的气动负功, 起到耗散振动能量的作用。在整个叶片表面, 摆振自由度上的周期气动功均可忽略, 表明在全叶片上颤振能量的输入或耗散均与摆振自由度振动基本无关。进一步计算得知, 振动稳定时, 气动合力对叶片做的总功约为0, 使叶片维持LCO状态。

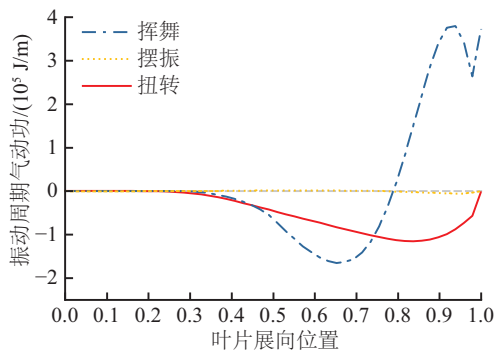
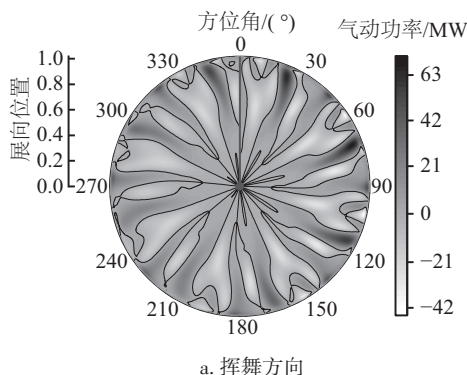


图7 极限环振荡状态下单位周期气动功沿展向的空间分布

Fig. 7 Distribution of cycle-averaged aerodynamic work along blade span

鉴于颤振频率远高于旋转频率(为叶片旋转周期的8倍以上), 旋转周期信号能够完整涵盖颤振的全部特征, 因此图8展示了叶片进入LCO状态后, 各自由度在一个完整旋转周期内的瞬时气动功率变化。可发现, 叶片表面的气动功分布具有强非定常特征, 且由气动非线性因素和结构非线性因素共同作用导致发展具有极强非线性。图中叶尖区域的瞬时功率波动幅度显著大于其余叶片段, 这一现象与图7中叶尖段较大的周期气动功分布高度吻合, 进一步证实了叶尖区域在颤振能量获取中的关键作用。深入分析发现, 挥舞自由度上的瞬时气动正功率集中区与扭转自由度上的瞬时气动负功率集中区分布强相关, 总是在扭转自由度上出现大的局部气动负功后, 例如图10中方位角18°、64°、111°、340°处, 相同叶片位置在挥舞自由度上紧随出现大的气动正功, 对振动输入能量, 例如图8a中方位角22°、70°、118°、345°处。这也阐明了该风力机叶片在该高尖速比下发生颤振时表现出的弯扭耦合特性背后的能量机理。

另外, 在摆振自由度上, 周期气动功极小的同时, 气动功率也始终仅为其余两自由度的10%以下, 摆振自由度在绝大部分展向位置的瞬时气动功率幅值均维持在极低水平。这一现象表明: 在整个振动过程中, 气动力始终未对该自由度形成有效的能量输入或耗散, 即其振动周期内的低气动功并非源于大幅值正负功率的周期性抵消。该特征进一步确证了摆振自由度在颤振能量耦合中处于非主导地位。



a. 挥舞方向

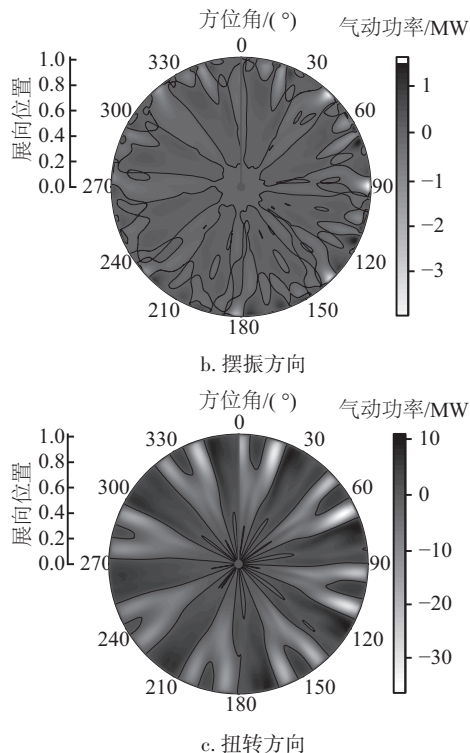


图 8 LCO 时扭转方向瞬时气动功率的时程演变规律
Fig. 8 Time-history evolution of instantaneous aerodynamic power direction during LCO

图 9~图 11 为叶片 65% 和 90% 展长截面的气动力相轨迹图。图中,挥舞方向位移和气动力的正方向均定义为向下游方向,摆振方向位移和气动力的正方向均定义为向风轮旋转反方向,扭转方向位移和气动力的正方向均定义为向攻角增大方向。由图 9~图 11 可知,在距叶根 65% 展长截面,在挥舞方向和扭转方向上,相轨迹均以逆时针环为主导,对应了负的振动周期气动功;摆振方向则由于重力作用,叶片平衡位置不断改变,总体上看环量大致为 0。在距叶根 90% 展长截面,在扭转方向仍以逆时针环为主导,但挥舞方向相轨迹转而以顺时针环为主导,对应了此处正的振动周期气动功。

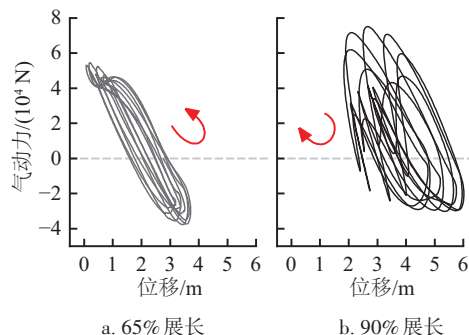


图 9 LCO 时叶片旋转周期内挥舞方向气动力相轨迹
Fig. 9 Phase trajectory of flapwise aerodynamic force per rotation period during LCO

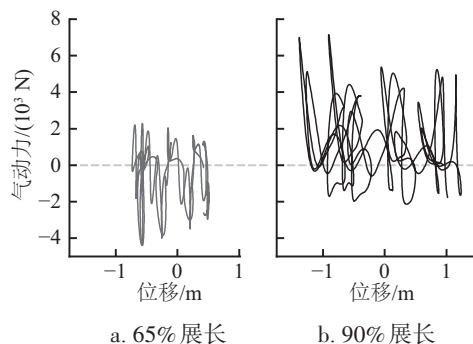


图 10 LCO 时,叶片旋转周期内摆振方向气动力相轨迹
Fig. 10 Phase trajectory of edgewise aerodynamic force per rotation period during LCO

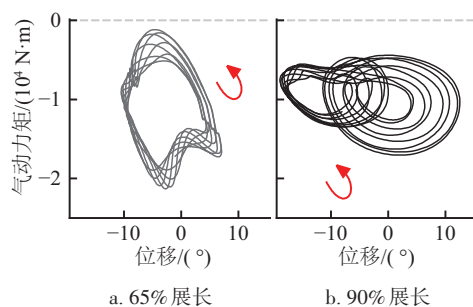


图 11 LCO 时,叶片旋转周期内扭转方向气动力矩相轨迹
Fig. 11 Phase trajectory of torsional aerodynamic moment per rotation period during LCO

4 结 论

本文基于非定常叶素动量理论与几何精确梁模型,对 IEA 15 MW 风力机在高尖速比下的颤振特性进行了数值模拟并开展分析。结果表明,在高尖速比下,该风力机长柔叶片发生挥舞-扭转耦合的弯扭耦合颤振,气弹响应特性和多自由度耦合现象具体为:

1) 该工况下叶片发生了典型的挥舞-扭转耦合颤振。由于结构耦合效应,三向振动频谱中均包含挥舞与扭转频率成分。

2) 颤振的维持依赖于叶尖区域气动力的正功输入。能量分析证实,系统通过叶尖气动正功与叶中段气动负功的动态平衡,维持了极限环振荡。

3) 瞬时气动功率的演化特征揭示了颤振能量交换的内在机理。挥舞与扭转自由度的气动功率在时序和叶片展向位置分布上均呈现出显著的同步性,表明二者在能量层面存在强耦合关系。摆振方向虽有显著位移响应,但其气动功全程保持极低水平,未参与气动主导的能量耦合过程,且频谱分析并未显示摆振固有频率成分,因此属于受迫振动。

[参考文献]

[1] HANSEN M H. Aeroelastic instability problems for wind

- turbines[J]. Wind energy, 2007, 10(6): 551-577.
- [2] POURAZARM P, MODARRES-SADEGHI Y, LACKNER M. A parametric study of coupled-mode flutter for MW-size wind turbine blades [J]. Wind energy, 2016, 19(3): 497-514.
- [3] REPORT S, GRIFFITH D T, ASHWILL T D. The Sandia 100-meter all-glass baseline wind turbine blade: SNL100-00 [R]. Springfield, VA: Sandia National Laboratories, 2011: 1-62.
- [4] WANG L, LIU X W, KOLIOS A. State of the art in the aeroelasticity of wind turbine blades: aeroelastic modelling [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 64: 195-210.
- [5] LI S, CARACOGLIA L. Stochastic Flutter Analysis of Wind Turbine Blades via Surrogate Models: Artificial Neural Networks vs. Stochastic Collocation [C]//6th American Association for Wind Engineering Workshop. Clemson University, 2021.
- [6] CARACOGLIA L. Higher-order moment stability of large wind turbine blades under stochastic perturbations [C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2024, 2647(11): 112001.
- [7] GRIFFITH D T, CHETAN M. Assessment of flutter prediction and trends in the design of large-scale wind turbine rotor blades [J]. Journal of physics: conference series, 2018, 1037(4): 042008.
- [8] PIRRUNG G R, MADSEN H A, KIM T. The influence of trailed vorticity on flutter speed estimations [J]. Journal of physics: conference series. 2014, 524(1): 012048.
- [9] 高龙, 林立辉, 杨宛生, 等. 大型柔性风电叶片气弹响应分析[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 572-580.
- GAO L, LIN L H, YANG W S, et al. Aeroelastic response analysis of large flexible wind turbine blades [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(8): 572-580.
- [10] 夏煜盛. 大型背风式风力机叶片预弯型线与降载优化研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
- XIA Y S. Load reduction and blade pre-bend optimization research of large downwind turbine [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.
- [11] ZHOU X D, HUANG K F, LI Z. Effects of bend-twist coupling on flutter limits of composite wind turbine blades [J]. Composite structures, 2018, 192: 317-326.
- [12] 戴丽萍, 白雪峰, 王晓东, 等. 大型风力机叶片颤振边界的预测分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(9): 2357-2362.
- DAI L P, BAI X F, WANG X D, et al. Prediction and analysis of blade flutter boundary of large wind turbine [J]. Journal of engineering thermophysics, 2022, 43(9): 2357-2362.
- [13] SESSAREGO M, RAMOS-GARCÍA N, SHEN W Z. Analysis of winglets and sweep on wind turbine blades using a lifting line vortex particle method in complex inflow conditions [J]. Journal of physics: conference series, 2018, 1037(2): 022021.
- [14] TRAN T T, KIM D H. The platform pitching motion of floating offshore wind turbine: a preliminary unsteady aerodynamic analysis [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2015, 142: 65-81.
- [15] SNEL H, SCHEPERS J. Joint investigation of dynamic inflow effects and implementation of an engineering method [R]. ECN-C-94-107, 1995.
- [16] BORTOLOTTI P, CHETAN M, BRANLARD E, et al. Wind turbine aeroelastic stability in OpenFAST [J]. Journal of physics: conference series, 2024, 2767(2): 022018.
- [17] 李义金, 王同光. 截面参考系对采用梁模型风力机叶片的动态性能影响分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(1): 16-22.
- LI Y J, WANG T G. Dynamic analysis of wind turbine blade based on different references [J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(1): 16-22.
- [18] WANG Q, SPRAGUE M A, JONKMAN J, et al. BeamDyn: a high-fidelity wind turbine blade solver in the FAST modular framework [J]. Wind energy, 2017, 20(8): 1439-1462.
- [19] GAERTNER E, RINKER J M, SETHURAMAN L, et al. IEA wind TCP task 37: definition of the IEA 15-megawatt offshore reference wind turbine [R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2020.
- [20] LOUBEYRES J, PFISTER J L, BLONDEL F, et al. Stall flutter instabilities on the IEA-15 reference wind turbine in idling conditions: code-to-code comparisons and physical analyses [J]. Journal of physics: conference series, 2022, 2265(3): 032019.
- [21] QIAN X H, ZHANG B X, GAO Z T, et al. Flutter limit optimization of offshore wind turbine blades considering different control and structural parameters [J]. Ocean engineering, 2024, 310: 118558.
- [22] LI B, TIAN D, WU X X, et al. The impact of bend-twist coupling on structural characteristics and flutter limit of ultra-long flexible wind turbine composite blades [J]. Energies, 2023, 16(15): 5829.
- [23] RINKER J, GAERTNER E, ZAHLE F, et al. Comparison of loads from HAWC2 and OpenFAST for the IEA wind 15 MW reference wind turbine [J]. Journal of physics: conference series, 2020, 1618(5): 052052.
- [24] 李贝, 田德, 唐世泽, 等. 超大型风电机组叶片颤振分析及参数灵敏度研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 295-301.

LI B, TIAN D, TANG S Z, et al. Flutter analysis and parameter sensitivity study of ultra-large wind turbine

blades [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44 (9) : 295-301.

RESEARCH ON BEND-TWIST COUPLING FLUTTER OF ULTRA-LARGE WIND TURBINE BLADES

Yang Dinghua¹, Wang Su², Zhang Xianfeng¹, Ma Lu¹, Shen Xin^{2,3}, Du Zhaohui^{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: This paper takes the IEA 15 MW wind turbine blade as the research object, establishes the dynamic model of the aeroelastic system for the blades, analyzes the aeroelastic response during flutter at high tip speed ratio, and conducts in-depth research on the multi-degree-of-freedom coupling characteristics therein. The results show that at high tip speed ratio, the long and flexible blade of this wind turbine undergoes a coupled bending-torsion flutter of pitch-torsion. The vibrations in the three degrees of freedom all contain the natural frequencies of pitch and torsion. However, the maintenance of flutter is sustained by the aerodynamic power work in the pitch and torsion degrees of freedom. There is an obvious coupling phenomenon in the development of the instantaneous aerodynamic power of pitch and torsion. In the direction of yaw, there is basically no energy contribution. There is only weak aerodynamic power throughout the process, and it only undergoes forced vibrations due to the excitation of pitch and torsion because of the coupling characteristics of the blade structure.

Keywords: wind turbines; aeroelasticity; bend-twist coupling; flutter; blade element momentum theory