

15 MW 风力机停机状态下叶片失速颤振分析

陈雪轲¹, 连波¹, 竺晓程^{1,2}, 沈昕^{1,2}, 欧阳华^{1,2}, 杜朝辉¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海非碳基能源转换与利用研究院, 上海 200240)

摘要: 为了保证大型风力机组在停机工况下安全稳定运行, 通过 OpenFAST 对 IEA 15 MW 风力机叶片在停机工况下的失速颤振问题开展了数值研究, 对比了不同叶片结构阻尼和湍流强度对叶片中速颤振的影响。结果表明: 45 m/s 均匀风速下, 具有实际结构阻尼的叶片在 -60° ~ -17° 和 10° ~ 78° 偏航风向范围内会发生大振幅的失速颤振; 针对 50° 和 -35° 两个典型颤振风向进行分析, 发现风向为 50° 时存在大小为 31 m/s 的临界风速使叶片振幅突增, 而风向为 -35° 时叶片振幅随风速增大呈对数增加, 不存在突增过程, 表明在正负偏航风向下叶片呈现出不同的振动失稳过程; 湍流风下, 湍流强度对正风向的影响大于负风向, 增大来流湍流强度会使风向 50° 时叶片颤振临界风速减小。

关键词: 失速颤振; 停机; 偏航; 摆振; 挥舞

中图分类号: TK83 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2025.05.017

[引用本文格式] 陈雪轲, 连波, 竺晓程, 等. 15 MW 风力机停机状态下叶片失速颤振分析[J]. 热能动力工程, 2025, 40(5): 150-156. CHEN Xueke, LIAN Bo, ZHU Xiaocheng, et al. Analysis of stall-induced flutter of 15 MW wind turbine blade under parked conditions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(5): 150-156.

Analysis of Stall-Induced Flutter of 15 MW Wind Turbine Blade under Parked Conditions

CHEN Xueke¹, LIAN Bo¹, ZHU Xiaocheng^{1,2}, SHEN Xin^{1,2}, OUYANG Ha^{1,2}, DU Zhaohui¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240;

2. Shanghai Non-carbon Energy Conversion and Utilization Institute, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: In order to ensure the safe and stable operation of large-scale wind turbines under shutdown conditions, a numerical study on the stall flutter problem of IEA 15 MW wind turbine blades under shutdown conditions by using OpenFAST was carried out. The effects of different blade structure damping and turbulence intensity on medium speed flutter of blades were compared. The results show that the stall flutter with large amplitude occurs in -60° - -17° and 10° - 78° yaw wind directions for the blade with actual structural damping at 45 m/s uniform wind speed. Two typical flutter wind directions of 50° and -35° are analysed, and it is found that there is a critical wind speed of 31 m/s in the 50° wind direction that causes a sudden increase in the blade vibration amplitude, whereas the blade vibration amplitude increases logarithmically with the increase in wind speed in the -35° wind direction, and there is no sudden increase, indicating that the blades show different vibration destabilisation processes in positive and

收稿日期: 2024-10-09; 修订日期: 2025-01-17

基金项目: 上海市IV类高峰学科-能源科学与技术-上海非碳基能源转换与利用研究院建设项目

Fund-supported Project: Acknowledges the Non-carbon Energy Conversion and Utilization Institute under the Shanghai Class IV Peak Disciplinary Development Program

作者简介: 陈雪轲(2001-), 女, 上海交通大学硕士研究生.

通信作者: 竺晓程(1975-), 男, 上海交通大学副教授.

negative yawing wind directions. Under turbulent wind, the effect of turbulence intensity on the positive wind direction is greater than that on the negative wind direction, and increasing the turbulence intensity of the incoming flow will reduce the critical wind speed of blade flutter in 50° wind direction.

Key words: stall flutter, parked, yaw, edgewise, flapwise

引 言

近年来,随着双碳战略的提出,风电装机容量持续增长。为降低风电成本,现代风力机正不断向着长叶片大型化方向发展,然而随着叶片长度的增加,其气动弹性问题也越来越严峻^[1-2]。失速颤振是造成风力机气动弹性失稳的关键因素之一,当风力机叶片展向出现大面积中等失速时,会发生这种现象。Hansen 等人^[3]、柯世堂等人^[4]、高荣臻等人^[5]和 Chen 等人^[6]在风力机模型叶片的风洞实验和现场怠速风力机叶片上都测量得到过。在叶片吊装、故障待修、运维期间误操作以及电网故障等场景下,机组处于特定的限制姿态(无法偏航对风,部分场景需锁定风轮),叶片极易处于失速状态,从而发生失速颤振。

为了保证大型风力机组在停机工况下的安全稳定,国内外学者纷纷对停机工况下风力机叶片的气弹稳定性开展研究。其中,任年鑫等人^[7]采用数值计算的方法研究了停机工况下不同台风入射风向及不同叶片停机桨距角对 NREL 5 MW 风力机叶片气动载荷的影响特征,揭示了最不利叶片停机姿态及对应风载系数。华中科技大学王凯^[8]研究了 2、5 和 10 MW 3 种不同额定功率风力机在刹车与怠速工况下气弹特性,通过特征值法和气动力做功法两种稳定性判定方法得到了 0、15 和 30° 3 种风偏航角下叶片发生不稳定振动时翼型所处的攻角范围以及叶片所在方位角。Santhitnam 等人^[9]基于代理模型,研究了风速、偏航角、垂直风切变、风偏转和大气温度对 IEA 10 MW 涡轮机叶片失速颤振的影响,发现偏航角是引发叶片失速颤振的主要因素。Gaunaa 等人^[10]采用 EllipSys3D 软件对 DTU 10 MW 风力机叶片在停机和安装时不同偏航角和桨距角下的叶片上的气动力矩进行了数值分析,得到了 0、±30 和 ±60° 偏航角下 -180 ~ 180° 桨距角内叶片的气动阻力矩。此外,也有部分学者研究了叶片颤振风速的影响因素,戴丽萍等人^[11]采用 FAST 软件对 NREL

5 MW 风力机在刹车和怠速时的颤振临界风速进行了预测,发现当质心位置前移以及扭转刚度、结构阻尼、桨距角增大时,颤振风速增大,反之则减少。华中科技大学孙皓^[12]采用风洞实验和数值模拟的方法对 NACA64-418 风力机翼型的失速振荡特性进行研究,分析了翼型在极限环振荡状态下的气动特性,发现来流动压和初始攻角越大,翼型越容易进入极限环振荡状态,且俯仰振荡幅值越大。Zhou 等人^[13]发现考虑非线性弯扭耦合的 5 MW 风力机叶片颤振极限比线性分析预测下的结果低 23% 左右。Baran^[14]采用 PHATAS 与 Focus6 相结合,从动态响应的时域变化得到了某风力机的颤振风速,给出了颤振时的响应特征,并进一步对刚度和桨距角对颤振风速的影响进行了分析。Wang 等人^[15]研究了 11% 湍流强度来流下 DTU 10 MW 风力机在怠速运行时叶根弯矩和叶尖攻角的变化情况。唐新姿等人^[16]对典型旋转工况风速为 11.4 m/s、风向角为 0° 和典型停机工况风速为 30 m/s、风向角为 25° 下 NREL 5 MW 风力机叶片各主要振动模态的气动阻尼进行了相关性分析。Loubeyres 等人^[1]研究了 IEA 15 MW 风力机在停机和偏航状态下的失速颤振特性,得到了引发叶片发生失速颤振的来流角度区间,但没有对不同风速不同风向下的叶片失速颤振开展研究。

综上所述,目前对处在停机工况下的风力机叶片失速颤振问题的研究还非常有限,且研究对象多为小型风力机。针对该问题,本文将通过 OpenFAST 对 15 MW 大型风力机在停机下的振动情况进行模拟,探究不同来流风向以及风速下叶片的振动特性,并对比不同叶片结构阻尼和湍流强度对叶片失速颤振的影响。

1 研究对象及研究方法

1.1 研究对象

本研究以 IEA 15 MW 风力机为研究对象,该风力机为上风向水平轴风力机,叶片数为 3,其具体参数如表 1 所示^[17]。

表 1 IEA 15 MW 风力机基本参数

Tab. 1 Basic parameters of IEA 15 MW wind turbine

参 数	数 值
额定功率/MW	15
叶片数	3
切入风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3
额定风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	10.59
切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	25
额定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	7.56
风轮直径/m	240
叶片质量/kg	65 000
轮毂高度/m	150

当风力机处在停机工况时,为了减小作用在叶片上的风载荷,风力机叶片一般为顺桨状态,叶片桨距角为 90° ,电机的制动刹车系统可以将叶片锁死在一个固定位置,风轮静止不动。根据文献[1]可知,当来流风为均匀风时,若忽略重力影响,风力机的 3 个叶片近似等效,为了简化模型,本研究只考虑一个孤立叶片,叶根锁死在固定位置。图 1 给出了绝对坐标系下叶片截面示意图,其中 x 轴垂直风轮旋转平面, y 轴平行风轮旋转平面, z 轴垂直水平面指向正上方。定义来流与 x 轴正方向的夹角 γ 为风向,弦长与来流夹角为翼型攻角 α 。弦长与 y 轴负方向的夹角 θ 即为叶片的桨距角,选取 67.8% 叶高处的翼型作为参考位置,该位置翼型桨距角为 90° 。

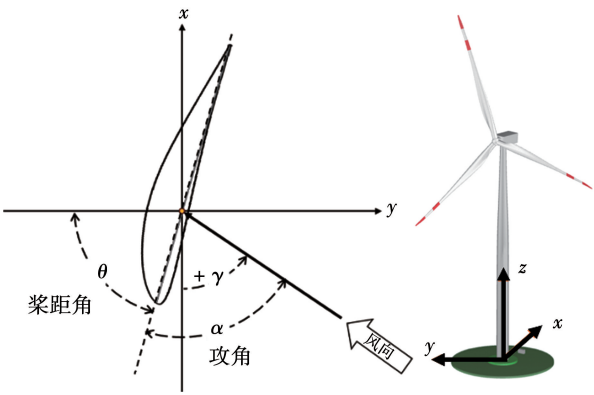


图 1 IEA 15 MW 风力机叶片翼型剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of IEA 15 MW wind turbine blade airfoil profile

1.2 研究方法

采用 OpenFAST 软件,对停机工况下 IEA Wind 15 MW 风力机叶片的振动特性进行数值模拟,时间步长为 0.005 s ,总计算时间为 $2\,000\text{ s}$,采用 ElastoDyn

模块和 BeamDyn 模块相结合的弹性计算模型,风力机叶片方位角设置为 0° (叶尖指向正上方),风倾斜角为 0° ,机舱倾角为 0° ,转速为 0 r/min 。

文献[1]中没有考虑动态失速模型,这是因为,虽然动态失速模型对失速颤振具有很大的影响,但如果没有可用的实验数据动态失速模型涉及参数的调整,很难确定。因此本研究不考虑动态失速。

1.3 湍流风场的建立

1.3.1 湍流强度定义

湍流强度反映了脉动风速的相对强度,是描述湍流运动特性的重要物理量之一,其定义为脉动风速均方差和平均风速之比,如式(1)所示^[18]。

$$I = \frac{\sqrt{(u'^2 + v'^2 + w'^2)/3}}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} = \frac{\sqrt{(u'^2 + v'^2 + w'^2)/3}}{\bar{V}} \tag{1}$$

式中: u 、 v 、 w —纵向(与平均风速方向平行)、横向和竖向 3 个正交方向上的瞬时速度分量, m/s ; u' 、 v' 、 w' —3 个脉动风速分量, m/s ; $\bar{V}$ —平均风速, m/s 。

1.3.2 TurbSim 风场的生成

TurbSim 是随机全场域湍流风时序模拟软件,是通过统计模型对二维垂直矩阵网格中点处的风速矢量(u, v, w)时间序列进行控制。OpenFAST 的 InflowWind 模块耦合 Turbsim 软件生成时域的风数据作为风电场的来流风进行气弹仿真。本研究中湍流谱为 IEC Kaimal,二维风电场网格节点设置为 21×21 ,其余湍流风参数如表 2 所示。

表 2 湍流风仿真参数

Tab. 2 Parameters of turbulent wind farm simulation

参 数	数 值
时间步长/s	0.05
有效仿真时长/s	1 000
参考高度/m	150
参考高度处平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	15.30
湍流强度/%	5.10
风向/ $^\circ$	-35.50
网格高度/m	270
网格宽度/m	360
湍流积分尺度/m	340.2

1.4 模型验证

为了验证计算方法的准确性和可重复性,本研

究参考文献[1]中计算的设置,模拟了均匀风风速为 45 m/s,结构阻尼系数为 0.001 的工况时,来流风向在 $-90\sim 90^\circ$ 范围内叶尖的振动情况,结果如图 2 所示。图中 $|\xi^{\text{tip}}|$ 表示叶尖振动的最大位移, $|\xi^{\text{tip}}|$ 的定义如式(2)所示:

$$|\xi^{\text{tip}}| = \sqrt{(\xi_x^{\text{tip}})^2 + (\xi_y^{\text{tip}})^2 + (\xi_z^{\text{tip}})^2} \quad (2)$$

式中: ξ_x^{tip} 、 ξ_y^{tip} 、 ξ_z^{tip} —同一时刻叶尖在 x 、 y 、 z 3 个方向上的位移, m。

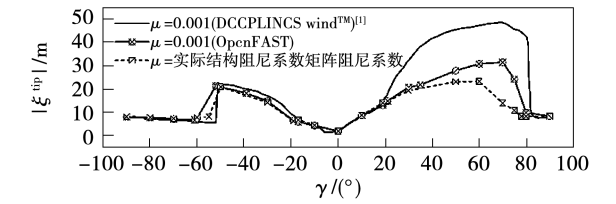


图 2 不同偏航风下叶尖最大位移

Fig. 2 The maximum displacement of blade tip under different yaw winds

由图 2 可知,当结构阻尼系数 $\mu=0.001$ 时,引发叶片发生大幅振动的风向范围为 $-60\sim -17^\circ$ 和 $10\sim 80^\circ$,与文献[1]得到的不稳定风向范围 $-52\sim -16^\circ$ 和 $10\sim 83^\circ$ 基本相符。且当 $\gamma < 0$ 时,本研究计算得到的 $|\xi^{\text{tip}}|$ 与文献[1]的研究结果较为接近;当 $\gamma > 0$ 时,虽然本研究得到的 $|\xi^{\text{tip}}|$ 偏小,但总体趋势和参考文献[1]一致。

为更真实地模拟叶片的振动情况,本研究将叶片的结构阻尼设置成实际值。IEA 15 MW 风力机叶片的实际结构阻尼系数 μ 由公式(3)给出,在 BeamDyn 模块它由一个 6×6 矩阵定义^[17]。不同风向下具有实际结构阻尼的 $|\xi^{\text{tip}}|$ 变化如图 2 所示。从图中可知,在实际结构阻尼下 $|\xi^{\text{tip}}|$ 略微减小,但其最大值仍可高达 23.37m。与结构阻尼系数为 0.001 的计算结果相比,叶片不稳定风向范围略微缩小至 $-60\sim -17^\circ$ 和 $10\sim 78^\circ$,且正负风向下 $|\xi^{\text{tip}}|$ 的差距减小。

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.0030 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0022 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0008 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0022 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0030 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0008 \end{bmatrix} \quad (3)$$

综上所述,OpenFAST 可以对停机状态下叶片的失速颤振进行模拟,本研究将以此为基础,探究不同风向下来流风速以及湍流强度对叶片失速颤振的影响。

2 模拟结果分析

2.1 临界风速分析

为探究风速对 IEA 15 MW 风力机叶片振动特性的影响,选取 50° 和 -35° 两个水平风向,研究了不同风速下叶片在 x 、 y 两个方向的振幅以及 z 轴方向最大扭角的变化情况,如图 3 所示。

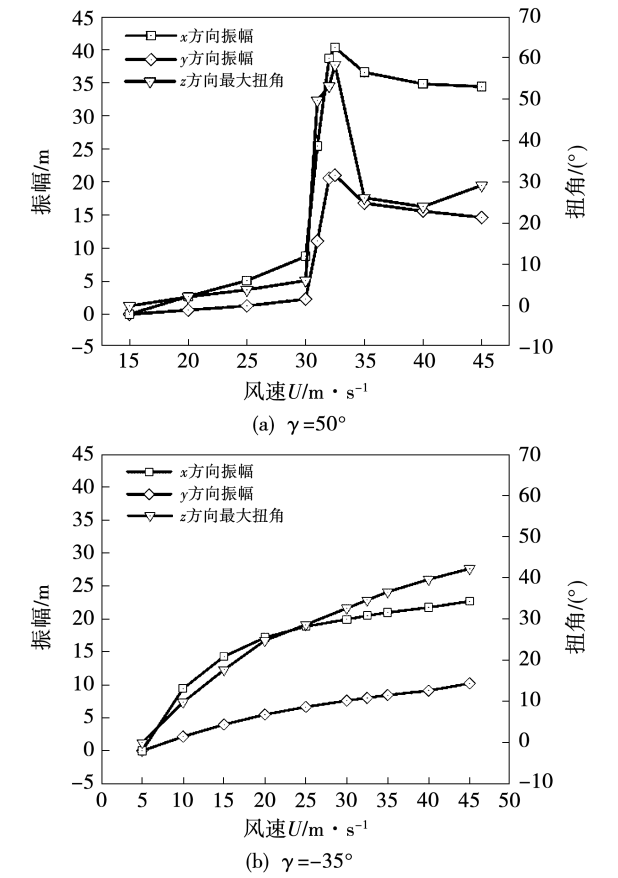


图 3 50° 和 -35° 风向下叶片振幅与扭角随风速的变化情况

Fig. 3 Variations of vibration magnitude of blade tip and torsional angle with wind speed in 50° and -35° wind direction

由图 3 可知,两个风向下随着风速 U 的增大,叶片振幅在 x 、 y 两个方向上分量的变化趋势是一致的,且沿 x 轴方向的振幅比沿 y 轴方向的振幅大。 50° 风向下,当 $U < 25$ m/s 时,叶片振幅小于 5.2 m,扭角小于 30° 。而当 U 增加至 31 m/s 时,叶片振幅

急剧增大至 27.7 m,相应的,叶片扭角也在临界风速处突增至 50°。随着风速的继续增大,叶片振幅呈先增大后减小的变化趋势,叶片扭角呈先增大后减小而后再增大的变化趋势,叶片最大振幅和扭角分别为 45.6 m 和 58°。需要说明的是,虽然在 $U > 32.5$ m/s 后继续增大风速叶片振幅会减小,但此时振幅依旧大于 37.5 m。由此可见,当来流风向为 50°时,存在明显的临界风速使得叶片振幅发生突变,该风速约为 31 m/s。

在 -35°风向下,随着风速的增大,叶片振幅和扭角持续增大。与 50°风向下不同的是,叶片振幅和扭角在低风速下增速较快,在高风速下增速较慢,在 5 m/s 风速后随风速增大呈对数增加,并没有出现明显的突变。在 $U = 15$ m/s 时,叶片振幅已高达 14.9 m,此时叶片最大扭角为 18°。由此可知,当风向为负时不存在明显的临界风速,在相对较小的风速下,叶片已出现大振幅。

为了更清楚地研究叶片的失速颤振发展过程,分别对 50°风向下 25 和 32 m/s 以及 -35°风向下 10 和 20 m/s 下叶片振动的发展过程进行对比分析,图 4 为上述 4 种工况下叶片 x 和 y 轴方向位移以及 z 轴方向扭角的时域变化曲线图。

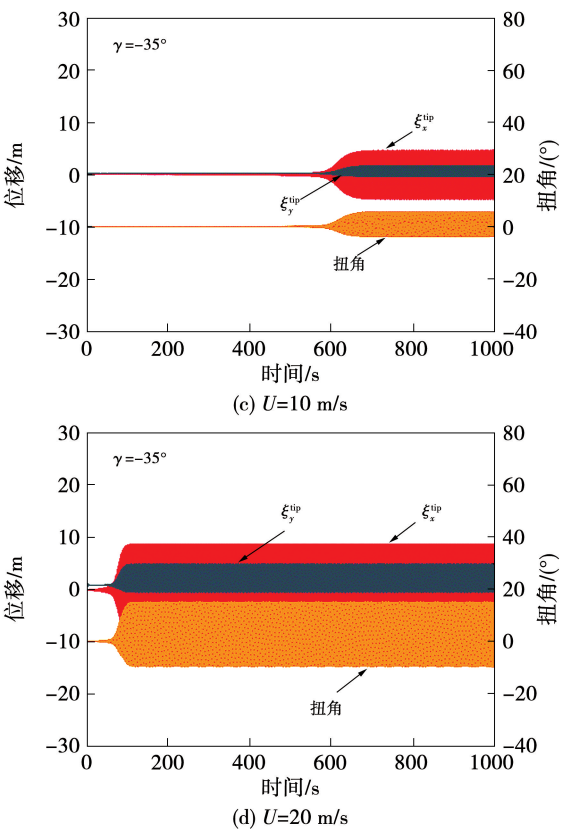
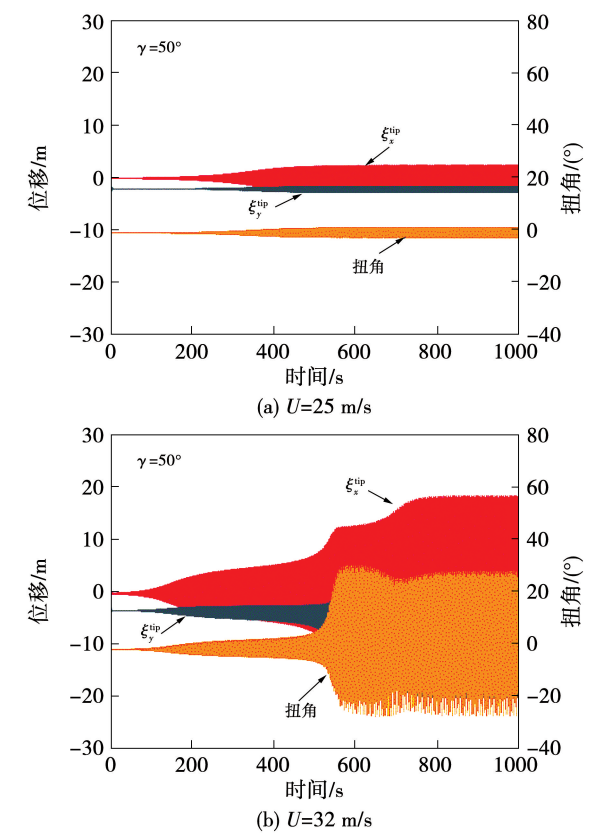


图 4 不同工况下叶尖位移和扭角的
时域变化图

Fig. 4 Time-domain variation curves of vibration magnitude of blade tip and torsional angle under different working conditions

当风向为 50°时,对比图 4(a) 和 4(b) 可知,临界风速前后,叶片的振幅和扭角变化差异显著,当风速 U 大于临界风速时,叶片振幅和扭角大幅增大,叶片开始振动的时刻也明显提前;而对比图 4(c) 和 4(d) 可知,随着风速的增大振幅变大,但叶片振幅变化趋势基本类似。

由图 3 和图 4 可知,高风速下,叶片会发生大幅扭转,为了进一步了解叶片振动,图 5 给出了来流速度 $U = 45$ m/s、 $\gamma = 50^\circ$ 工况下,叶高 z/R 为 0.300, 0.677 和 0.875 三个位置处的翼型截面的攻角变化曲线。由图 5 可知,整个叶片的攻角均大于 40°,叶尖处的攻角可达 120°,处于深度失速区。

为进一步直观地给出叶片振动特征,图 6 给出了上述 4 种工况下叶尖的振动轨迹,从图中可知,叶尖沿着环形进行振动,风速越大,环形面积越大,环形中心也随之不断偏离原点。

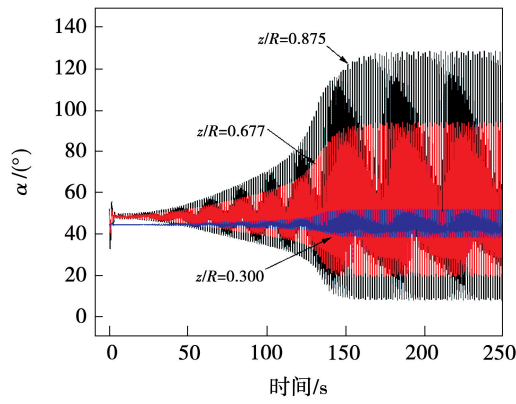


图5 不同叶高处叶片的攻角变化
Fig.5 Variation of angle of attack of blade at different blade heights

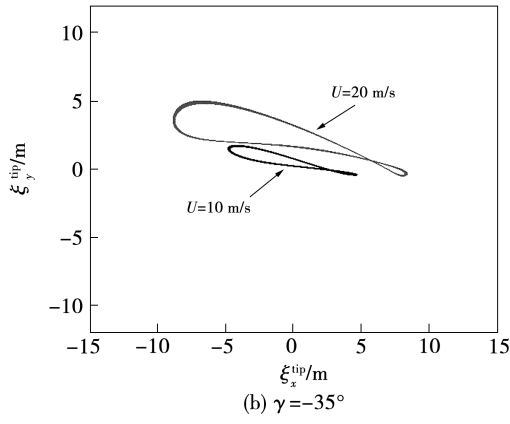
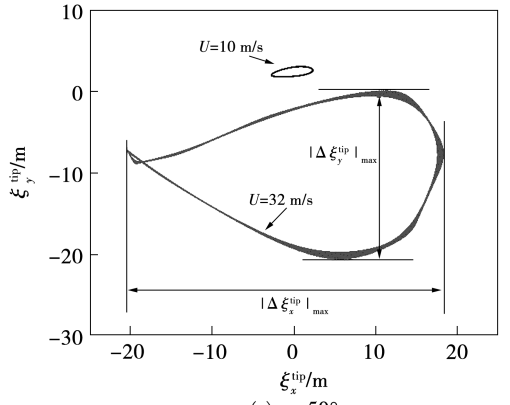


图6 不同工况下叶尖振动轨迹图
Fig.6 Vibration trajectories of blade tip under different working conditions

由图6(a)可知,当风向为 50° 时,叶尖振动轨迹近似“椭圆形”,在 $U=32\text{ m/s}$ 时,轨迹在 y 方向的位移增大,轨迹更接近“圆形”;由图6(b)可知,在风向为 -35° 时,叶尖振动轨迹近似“8”,且随着风速的增大,轨迹形状基本不变。

2.2 湍流强度对叶片振动特性的影响

在自然环境中,来流风通常具有一定的湍流强度,为进一步探究了不同湍流强度对叶片振动特性的影响,以 $U=30\text{ m/s}$ 、 $\gamma=50^{\circ}$ 和 $U=15\text{ m/s}$ 、 $\gamma=-35^{\circ}$ 为例,对比了均匀风和湍流强度分别为5%、10%的湍流风作用下叶片振动的差异,如图7所示。

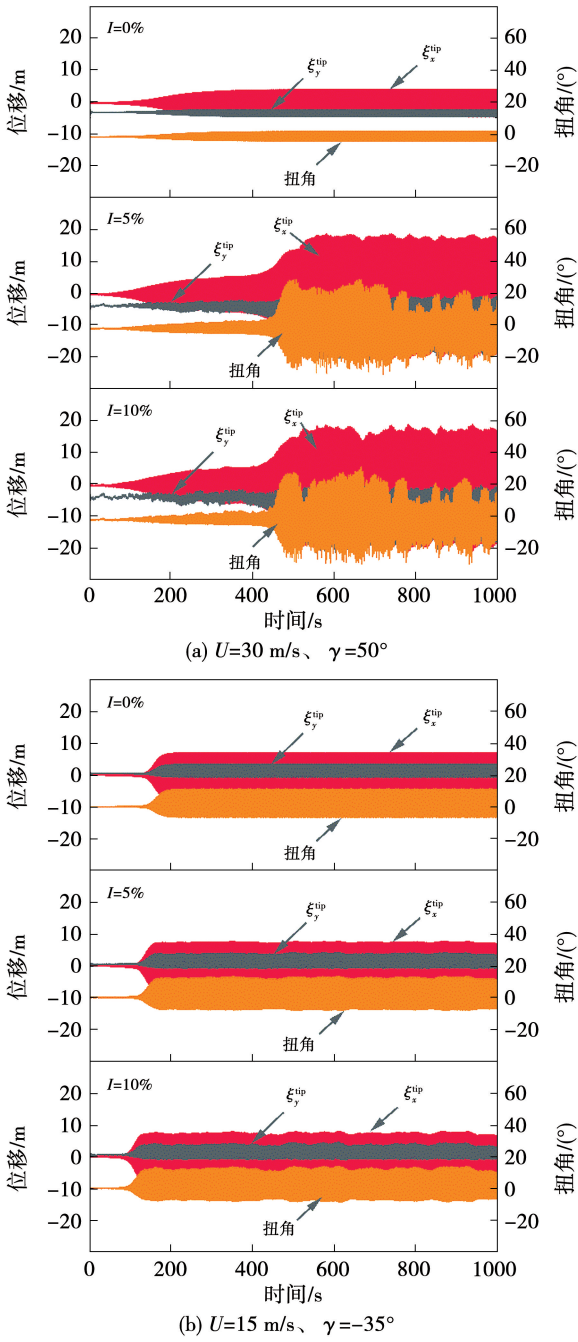


图7 不同湍流强度对叶片振幅和扭角的影响
Fig.7 Effects of different turbulence intensities on blade vibration amplitude and torsional angle

由2.1节可知,当 $\gamma=50^{\circ}$ 时,存在临界风速

31 m/s 使叶片振幅大幅增大,因此在图 7(a)中,湍流风下的叶片振幅明显大于均匀风下的叶片振幅,导致大振幅的失速颤振区。在图 7(b)中,当 $\gamma = -35^\circ$ 时,没有明显的临界风速。湍流平均风速 15 m/s 下的叶片振幅与均匀风下的相近。此外,对比湍流强度为 5% 和 10% 工况下叶片的振动情况可知,增大湍流强度会增大叶片振动的紊乱度。

3 结 论

本文针对大型风力机叶片在停机工况下的失速颤振问题开展了数值研究,通过 OpenFAST 对具有实际结构阻尼的 IEA 15 MW 风力机叶片振动特性进行了不同风向不同风速下的数值模拟,得到了如下主要结论:

(1) 均匀风情况下,具有实际结构阻尼的单个静止叶片在顺桨、方位角为 0° 、45 m/s 风速下的不稳定水平风向范围为 $-60^\circ \sim -17^\circ$ 和 $10^\circ \sim 78^\circ$ 。与文献[1]计算结果基本吻合。

(2) 风向为 50° 时,存在大小约为 31 m/s 的临界风速使叶片振幅发生突变,叶片处在略大于临界风速时叶片振动最剧烈;风向为 -35° 时,不存在明显的临界风速,但 5 m/s 风速后随风速发生对数增加。

(3) 在湍流风下,风向为 50° 时增大湍流强度会增大叶片的不稳定性,主要体现在叶片的振幅和扭角增大,临界风速减小。而对 -35° 时,影响不明显。

本文仅考虑了停机刹车状态下单个叶片的气弹不稳定性,后续将对整机在实际停机工况的刹车和怠速状态下的振动特性开展进一步研究。值得注意的是,本文是基于文献[1]数值研究工作的拓展,计算的适用性还需要进一步验证。

参考文献:

[1] 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 [C]//Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2022, 2265 (3): 032019.

[2] 冯俊鑫, 赵振宙, 陈 明, 等. 叶片挥舞运动对风力机气动特性的影响[J]. 太阳能学报, 2023, 44 (7): 478 - 485.

FENG Junxin, ZHAO Zhenzhou, CHEN Ming, et al. Research on influence of blade flapping motion on aerodynamic characteristics of wind turbine [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44 (7): 478 - 485.

[3] HANSEN M O L, SØRENSEN J N, VOUTSINAS S, et al. State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2006, 42 (4): 285 - 330.

[4] 柯世堂, 陆曼曼, 吴鸿鑫, 等. 基于风洞试验 15 MW 风力机叶片颤振后形态与能量图谱研究 [J]. 空气动力学学报, 2022, 40 (4): 169 - 180, 168.

KE Shitang, LU Manman, WU Hongxin, et al. Experimental study on the post-flutter morphological characteristics and energy dissipation of a 15 MW wind turbine blade [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40 (4): 169 - 180, 168.

[5] 高荣臻. 柔性风力机叶片气弹响应试验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2023.

GAO Rongzhen. Experimental study on aeroelastic response of flexible wind turbine blades [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.

[6] CHEN C, ZHOU J W, LI F, et al. Stall-induced vibrations analysis and mitigation of a wind turbine rotor at idling state; Theory and experiment [J]. Renewable Energy, 2022, 187: 710 - 727.

[7] 任年鑫, 徐世铮, 马 哲, 等. 极端台风下停机姿态对海上风力机叶片气动载荷影响 [J]. 太阳能学报, 2020, 41 (9): 287 - 292.

REN Nianxin, XU Shizheng, MA Zhe, et al. Effect of parking attitude on aerodynamic loads of offshore wind turbine blades during extreme typhoon [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41 (9): 287 - 292.

[8] 王 凯. 停摆与空转工况下风力发电机整机气动弹性稳定性分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

WANG Kai. Aeroelastic instability analysis of full-scale wind turbines in parked and idling conditions [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

[9] SANTHANAM C, RIVA R, KNUDSEN T. A study of stall-induced vibrations using surrogate-based optimization [J]. Renewable Energy, 2023, 214: 201 - 215.

[10] GAUNAA M, HEINZ J, SKRZYPINSKI W. Toward an engineering model for the aerodynamic forces acting on wind turbine blades in quasisteady standstill and blade installation situations [C]//Journal of physics: conference series, IOP Publishing, 2016, 753 (2): 022007.

[11] 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 Liping, BAI Xuefeng, WANG Xiaodong, et al. Prediction and analysis of blade flutter boundary of large wind turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43 (9): 2357 - 2362.

[12] 孙 皓. 风力机翼型失速颤振的实验与数值模拟研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

SUN Hao. Experimental investigation and numerical simulation on stall flutter of an oscillating wind turbine airfoil [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.