



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

柯世堂 陆曼曼 吴鸿鑫 高沐恩 田文鑫 王浩 王硕

Experimental study on the post-flutter morphological characteristics and energy dissipation of a 15 MW wind turbine blade

KE Shitang, LU Manman, WU Hongxin, GAO Muen, TIAN Wenxin, WANG Hao, WANG Shuo

引用本文:

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. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0417

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. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0417

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0417>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

飞行器气动弹性风洞试验技术综述

A survey of aeroelastic wind tunnel test technology of flight vehicles

空气动力学学报. 2018, 36(6): 995–1008 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0039>

风力机叶片旋转平面内弯曲对动力学响应的影响

Dynamic response of the wind turbine blade bending in the rotational plane

空气动力学学报. 2017, 35(5): 659–664 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2016.0119>

基于能量等效原理的颤振机理及颤振导数识别

Study on flutter mechanism and identification of flutter derivatives based on energy equivalence

空气动力学学报. 2020, 38(2): 224–231 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0118>

台风过境全过程大型风力机风荷载特性

Wind loads characteristic of large wind turbine considering typhoon transit process

空气动力学学报. 2020, 38(5): 915–923 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2019.0108>

直线翼垂直轴风力机气动特性研究综述

A review on aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbine

空气动力学学报. 2017, 35(3): 368–382 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2016.0189>

大展弦比机翼跨声速静气动弹性风洞试验

Wind tunnel test on transonic static aeroelasticity of high-aspect-ratio wing

空气动力学学报. 2017, 35(6): 841–845 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2015.0075>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463375

Email: kqdlxxb@163.com

网址: <http://kqdlxxb.xml-journal.net/>



关注微信公众号
获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2022)04-0169-12

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

柯世堂^{1,2,*}, 陆曼曼¹, 吴鸿鑫^{1,2}, 高沐恩¹, 田文鑫¹, 王浩³, 王硕¹

(1. 南京航空航天大学 土木与机场工程系, 南京 211106;

2. 南京航空航天大学 江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 南京 210016;

3. 河海大学 力学与材料学院, 南京 211100)

摘要: 现有风力机叶片颤振分析大多关注颤振临界状态预测, 忽略了非线性更为显著的颤振后形态和能量耗散。本文基于变分渐进梁截面法设计了新型超长柔性叶片气动-刚度-质量映射一体化三维弹性模型, 采用高速摄像技术和高频六分量天平进行了同步测振、测力风洞试验, 分析了风力机叶片颤振敏感风向区间与临界风速组合规律, 最后基于叶尖风振响应、气动阻尼和能量, 系统研究了风振敏感工况风振响应下风力机叶片能量演变规律和颤振临界风速后的形态特性, 揭示了风力机叶片颤振后能量耗散机制。研究表明: 提出的风力机叶片弹性模型设计和试验方法能有效模拟结构动力性能与颤振行为; 风力机叶片的桨距角 $93^{\circ}\sim 96^{\circ}$ 和 $284^{\circ}\sim 286^{\circ}$ 区间属于风振敏感区间, 在该区间内超过临界风速即可发生大幅锁频振动; 存在能量积累突变界线, 超过该界线对应风速后的能量积累尤为显著, 表现出风致振动能量随时间呈现显著的非平稳特性; 颤振后气动负阻尼是结构系统发散的主要原因。

关键词: 15 MW 风力机叶片; 风洞试验; 颤振后形态; 能量图谱; 气动阻尼

中图分类号: TK83 文献标识码: A doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0417

Experimental study on the post-flutter morphological characteristics and energy dissipation of a 15 MW wind turbine blade

KE Shitang^{1,2,*}, LU Manman¹, WU Hongxin^{1,2}, GAO Muen¹, TIAN Wenxin¹, WANG Hao³, WANG Shuo¹

(1. Department of Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Most existing flutter analyses of wind turbine blades focus on predicting critical flutter states. While the post-flutter morphological evolution and the associated energy dissipation, well-known for the prominent non-linear effect, are usually ignored. To characterize this non-linear phenomenon, a three-dimensional aeroelastic model of ultra-long flexible blades is proposed using the variational progressive beam section method. And synchronous measurements of vibration and force are carried out in a wind tunnel using high-speed cameras and a high-frequency six-component balance. The flutter sensitivity of wind turbine blades to the wind direction and speed is firstly analyzed. Later, the post-flutter morphological characteristics and the energy dissipation of wind turbine blades subjected to wind-induced vibration are systematically studied. Results indicate that the proposed aeroelastic model and the experimental method can effectively capture the post-flutter

收稿日期: 2021-11-22; 修订日期: 2022-02-19; 录用日期: 2022-03-14; 网络出版时间: 2022-04-15

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFE0132000, 2019YFB1503701); 国家自然科学基金项目(51761165022, 52078251); 江苏省杰出青年科学基金项目(BK20211518)

作者简介: 陆曼曼(1994-), 男, 内蒙古人, 硕士研究生, 研究方向: 建筑结构抗风抗震. E-mail: lumanmen@163.com

通信作者: 柯世堂*(1982-), 男, 安徽池州人, 教授, 博导, 研究方向: 建筑结构抗风抗震. E-mail: keshitang@163.com

引用格式: 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.

KE S T, LU M M, WU H X, 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(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0417

dynamic process. The pitch angles of wind turbine blades prone to the wind-induced vibration fall in two ranges, namely $93^\circ \sim 96^\circ$ and $284^\circ \sim 286^\circ$, in which high-frequency locking vibrations can occur beyond the critical wind speed. At the same time, the energy accumulation becomes particularly significant at higher wind speeds, indicating that the wind-induced vibrations are non-stationary. The negative post-flutter aerodynamic damping is the main reason for the divergence of structural systems.

Keywords: 15 MW wind turbine blade; aeroelastic wind tunnel test; post flutter shape; energy map; aerodynamic damping

0 引言

随着超大功率风电机组的发展,风力机叶片愈发趋向超长柔细化演变,由此带来的气动/结构双重非线性导致风力机叶片振动问题突出^[1-3],尤其是失稳性颤振问题亟需解决。近年来,在强台风等恶劣天气条件下,大型风力机叶片颤振风毁事故^[4-6]频发,如2003年台风“杜鹃”和2006年台风“桑美”导致的风电场大面积风力机组受损事件等。并且,大型风力机叶片颤振后的非线性行为更为显著。传统的风力机叶片颤振分析方法(如:多参数法^[7]、模态分析法^[8]、特征值法^[9]等),多为针对风力机叶片颤振临界状态的研究,无法解释在颤振临界点后发生的稳定振幅振动现象。因此,超长柔性叶片颤振后形态与能量耗散机制的研究具有重要理论意义。

颤振后形态,一般是指颤振临界风速后的振动形态及结构力学性能,极限环振动现象是最为常见的颤振后非线性振动现象^[10]。现有关于颤振后形态的研究聚焦于壁板^[11]、机翼^[12]和桥梁^[13]等结构,大多是基于风洞试验方法建立数学模型,以考虑各种非线性因素在颤振后状态中所产生的影响^[14]。风洞试验是研究强非线性运动机理及能量集聚特性的最有效手段之一,但是由于风力机叶片翼型不规则,其截面、刚度、剪心等沿展长不规则分布使弹性模型设计难度大,大缩尺比带来测点布置难、采集干扰性强、测量精度低等试验困难,导致国内外较少开展超长柔性叶片三维颤振弹性模型试验研究。试验中一般采用二维翼型进行测压、测力试验^[15-18],试验验证了二维翼型测压、测力结果的一致性,为后期振荡翼型的风洞试验研究提供了新方法,但二维翼型的研究结果无法完整反应三维超长柔性叶片的气弹失稳性能。在数值模拟方面,Yu等^[19]基于CFD-CSD耦合方法,发现叶片气动扭转变形对非定常载荷影响显著,但松耦合精度较低,滞后效应明显;黄俊东等^[8,20]采用“超级单元”并考虑了刚柔耦合及非定常气弹耦合效应,发现颤振失稳时振型由单向振动演变为多方向振动。

本文以NREL-15 MW超长柔性风力机叶片为对

象,基于运动等效提出了风力机超长柔性叶片合理简化相似准则,并结合变分渐进梁截面法(VABS)^[21],完成了叶片气动-刚度-质量分布缩放映射的弹性模型设计,然后通过非接触高速摄像进行了风力机叶片同步测振、测力风洞试验。系统讨论了不同风向角与风速作用下的叶片风振特性,提炼出了风力机叶片风振敏感风向区间与临界风速组合规律,基于模态分析法研究了其颤振稳定性能,并提出了一种基于能量演变效应的风力机叶片颤振后研究方法。

1 超长柔性叶片弹性模型设计

1.1 叶片参数

以美国可再生能源实验室研发的15 MW风力机超长柔性叶片作为风洞试验的弹性模型研究对象。模型质量65.252 t,模型轮毂高度150 m,直径7.94 m,风轮直径240 m。叶片采用DTU FFA-W3系列翼型。叶片全长117 m,叶根直径5.2 m,叶尖预弯4 m,最大弦长(5.77 m)出现在23.3%展长(27.2 m)处,质心位于22.9%展长(26.8 m)处。风力机叶片几何参数见表1。

1.2 气弹试验模型设计方法

结构动力学相似和气动外形相似是弹性模型设计的基本原则^[22]。超长柔性风力机叶片气动弹性模型的设计和制作须满足空气动力几何相似、结构固有模态相似和阻尼特性相同,需模拟的相似参数有:雷诺数(Re)、柯西数(Ca)、弗洛德数(Fr)、密度比以及阻尼比等。风力机叶片所在流场为低速、牛顿黏性流、不可压流场,流体运动方程与结构运动方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\left[-\omega^2 M + (1 + ig)K - \frac{1}{2} \rho V^2 b A \right] q = 0 \quad (2)$$

式中: u 为流体运动广义速度; f 为流体广义外力; ρ 为空气密度; P 为压强; ν 为空气运动黏度, $\nu = \mu/\rho$; ω 为锁频风振频率; M 为广义质量; K 为广义刚度; g 为阻尼系数; ρ 为大气密度; V 为流场速度矩阵; b 为参考长度; A 为广义空气动力系数; q 为广义坐标。

表 1 15 MW 级风力机叶片几何参数列表

Table 1 List of geometrical parameters of a 15 MW wind turbine blade							
展长位置, r/R	弦长/m	扭角/rad	桨距轴, x/c	展长/m	预弯/m	叶片翼型号	结构示意图
1.00	0.50	-0.02	0.37	117.00	4.00	FFA-W3-211	
0.95	1.99	-0.03	0.35	111.15	3.43	FFA-W3-211	
0.77	2.90	-0.30	0.31	90.29	1.71	FFA-W3-211	
0.64	3.50	0	0.29	74.67	0.73	FFA-W3-241	
0.54	3.96	0.02	0.29	62.91	-0.18	FFA-W3-270 blend	
0.44	4.48	0.04	0.30	51.38	-0.12	FFA-W3-301	
0.33	5.15	0.08	0.31	38.47	-0.24	FFA-W3-330 blend	
0.25	5.68	0.12	0.32	29.30	-0.25	FFA-W3-360	
0.15	5.65	0.19	0.38	17.55	-0.21	SNL-FFA-W3-500	
0.02	5.21	0.27	0.49	2.34	-0.02	circular	
0	5.20	0.27	0.50	0	0	circular	

实际缩尺模型试验中的雷诺数相似很难满足, 现有研究^[23]发现因流场的“自模性”特征, 当气动弹性试验的雷诺数大于 4×10^5 后, 流场的湍流度和流速分布不再随雷诺数的增加而变化, 可以满足雷诺数效应等效。基于简化相似准则的弹性模型设计仅需要满足外形几何参数、质量、刚度及阻尼比的相似, 考虑阻塞比对试验结果的影响, 因此模型几何缩比选为 1:70, 其余无量纲参数由相似准则推算而得, 具体风力机叶片弹性模型相似参数见表 2。

综合考虑相似参数模拟与模型加工难度, 采用 VABS 理论提出的等效梁截面法进行风力机叶片弹性模型的设计。为了准确模拟原型风力机叶片的刚度沿展长变化规律, 并同时实现缩尺模型三向(挥舞、摆动和扭转)刚度的分别对应, 等效刚度梁截面采用异形变截面十字形。由于风力机叶尖缩尺模型尺寸极小, 等效刚度梁截面在满足尺寸要求时不足以提供相对刚度, 故在风力机叶片相对展长 80% 的位置不再设置等效刚度梁截面, 刚度由加强肋提供。风力机叶片弹性模型结构理论刚度与实际刚度对比及等效

刚度梁截面形状如图 1 所示。

图 2 给出了三维超长柔性叶片弹性模型结构制作示意图。模型整体采用“主梁+锥形框段”的结构形式, 承载能力由聚酰胺纤维主梁(变截面异形梁)提供。框段和主梁采用单点联接, 整体打印三维框架, 相邻框段间设置 3 mm 间隙, 分段缝隙填充高密度泡沫来进行阻尼补偿并防止振动过程碰撞导致附加刚度增加。模型外部采用轻质木片填充分段前

表 2 模型相似比

Table 2 Similarity ratios			
	相似比	原型	模型
几何外形	1:70	$L = 117\text{ m}$	$L = 1.671\text{ m}$
风速	$1:70^{0.5}$	72.8 m/s	8.7 m/s
时间	$1:70^{0.5}$	8.37 s	1 s
频率	$70^{0.5}:1$	0.555 Hz, 0.642 Hz	4.682 Hz, 5.882 Hz
质量	$1:70^3$	65 252 kg	369.27 g
刚度	$1:70^5$	$4.65496\times10^7\text{ Pa}$	0.0277 Pa
阻尼	1:1	0.3%	0.21%

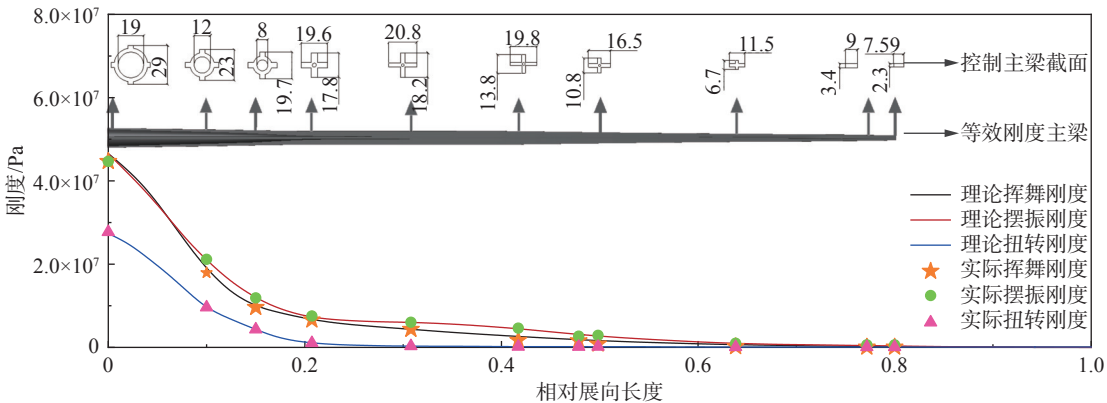


图 1 叶片弹性模型主梁理论与实际刚度对比

Fig. 1 Comparison of theoretical and actual stiffness of the blade girder

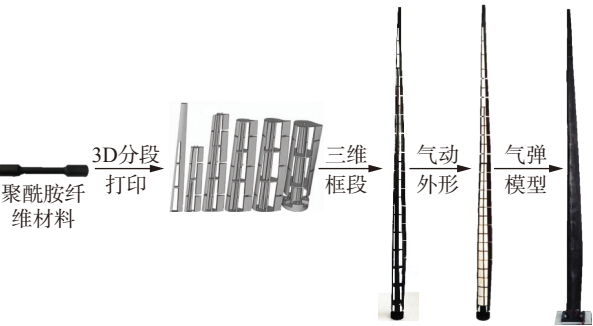


图 2 叶片弹性模型整体制作示意图
Fig. 2 Sketch of the manufacture process

缘、后缘与檩条,保证气动外形,通过质量块调整配重使模型的质心和转动惯量模拟满足设计要求。

1.3 结构模态分析

为验证叶片弹性模型与原型结构运动相似性,

基于锤击法测量模型的固有频率,并采用随机减量法^[24]识别结构模态参数。表 3 为模型振型图,表 4 为模型与原型结构动力特性对比表。NREL-15 MW 风力机预研报告^[25]仅给出了前两阶模态频率,本文基于锤击法有效识别了前四阶模态,其余阶理论模态采用有限元模态分析获得。分析发现,原型与有限元模型、弹性模型的各阶模态固有频率基本吻合,基阶模态误差仅为 1.8%,前四阶模态最大误差为 9.5%,有效保证了弹性模型颤振特性与原型之间的相似精度。

2 风洞试验与结果分析

2.1 工况设置与测量系统

风洞为中国国电环境保护研究院回流式风洞,其

表 3 模型阵型图
Table 3 Model vibration mode

	原型振型	有限元模型振型	风洞模型振型
1阶			
2阶			
3阶			
4阶			

表 4 弹性模型与原型结构动力特性
Table 4 Natural frequencies of the full-scale blade, aeroelastic model and scaled blade

	原型频率/Hz	有限元模型缩尺频率(全尺频率)/Hz	误差/%	风洞模型缩尺频率(全尺频率)/Hz	误差/%
1阶	0.555	4.724(0.565)	1.80	4.682(0.559)	0.70
2阶	0.642	5.835(0.697)	8.57	5.882(0.703)	9.50
3阶	1.598	14.349(1.715)	7.32	14.048(1.679)	5.07
4阶	1.925	17.587(2.102)	9.19	16.608(1.985)	3.12

试验段长 20 m、宽 2.5 m、高 2 m，最大试验风速为 50 m/s。弹性模型风洞试验方案如图 3 所示。因风力机在正常工作风速区间内不会发生颤振失稳问题，故选取停机状态下最不利的竖直叶片工况进行研究。定义垂直叶片预弯方向为来流风 0°方向，顺时针旋转为角度正方向。共取 36 个风向角，每个风向角测量 7 个风速工况。

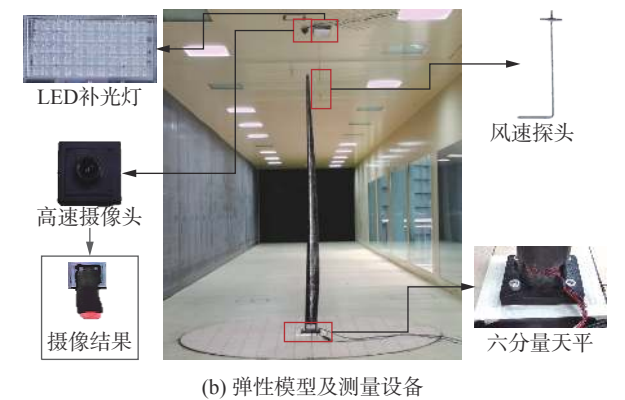
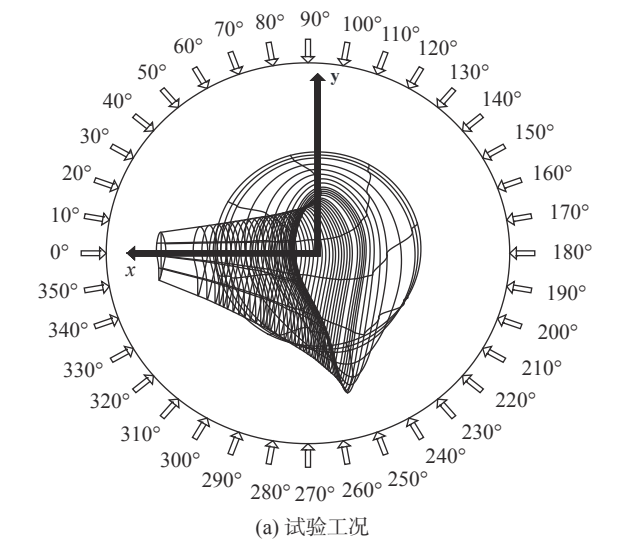


图 3 叶片弹性模型风洞试验方案
Fig. 3 Experimental setup in a wind tunnel

2.2 风场模拟有效性验证

图 4 给出了机舱以上竖直叶片剪切风场模拟结果。由图中平均风剖面、湍流强度剖面和脉动风谱结果可见，剪切风场吻合度较好，仅在叶根区域受限于风洞壁面影响存在微小误差，风洞脉动风谱与 Karman 谱吻合良好。

2.3 颤振区间确定

图 5 给出了风洞风速 7.1 m/s 和 8.7 m/s(实际风速为 59.4 m/s 和 72.8 m/s，根据气弹模型的相似准则可知风速比为 1:70^{0.5}，即实际风速应为风洞风速的 70^{0.5} 倍)时不同桨距角下叶尖挥舞、摆振位移均方根变化曲线。由图可知，当桨距角位于 93°~96°及

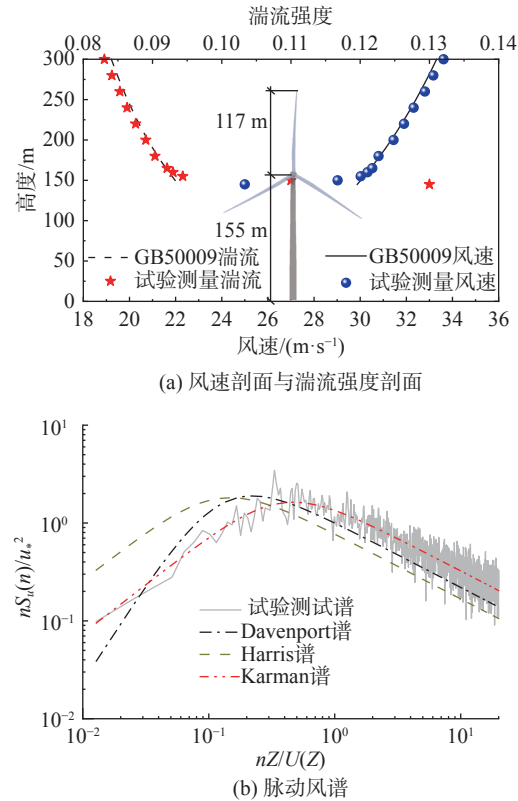


图 4 初始风场定义有效性示意图
Fig. 4 Effectiveness diagram of initial wind field definition

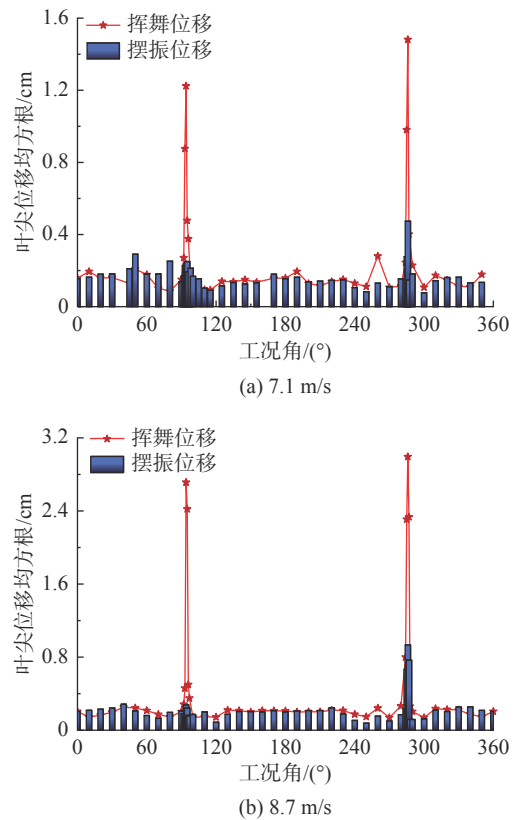


图 5 不同桨距角叶尖挥舞、摆振位移均方根变化曲线
Fig. 5 Variations of root-mean-square values of the blade flapwise and edgewise tip deflections with pitch angle

284°~287°区间时，叶尖位移均方根突增，挥舞均方根最大值分别出现在桨距角 94°和 286°；其他桨距角叶

尖位移均方根在 $0 \sim 0.2$ cm 幅值附近波动,无明显激变,表明桨距角 $93^\circ \sim 96^\circ$ 及 $284^\circ \sim 287^\circ$ 区间内发生颤振。

3 颤振后形态及能量图谱研究

颤振后形态是指颤振临界风速后的振动形态及结构力学性能,颤振临界风速是评价颤振后形态的结构性能的关键指标,能量图谱亦可描述结构振幅与特定风速内风致振动的能量特性。因此,本文着重开展了叶尖风振响应、颤振临界风速、气动阻尼比随风速变化特性研究,以及颤振后风致振动做功效应的能量图谱演变研究。

3.1 颤振后形态

图6和图7分别为桨距角 286° 叶尖摆振和挥舞位移振动幅值时程曲线及不同阶段位移功率谱。由图可知,发生颤振时,叶尖位移随时间共经历三个阶段:第一阶段为短时蓄振阶段,风力机叶片积累能量,表现为无规则抖振;当风力机叶片积累一定能量后进入发展阶段,叶尖位移随时间呈现发散趋势;第三阶段为稳定阶段,当叶尖位移发散进入一定值附近后,表现为简谐振动的“软颤振”^[26]。风力机叶片在发生颤振的三个阶段过程中,功率谱主导频率幅值随阶段演变逐渐变大,而主导频率随阶段演变逐渐变小并

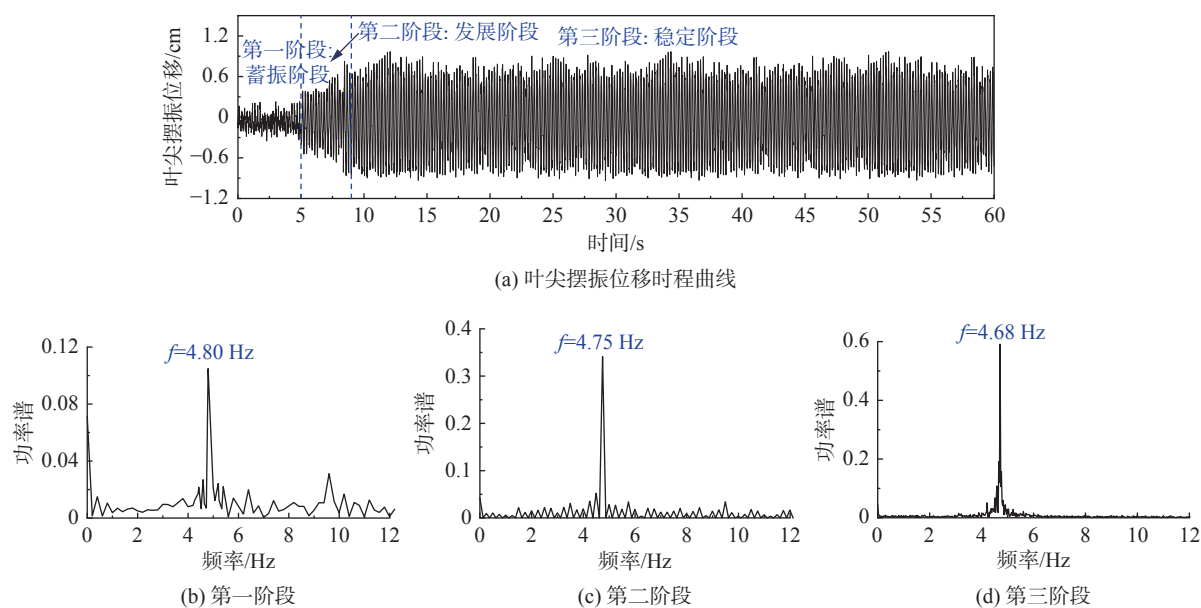


图6 叶尖摆振位移三阶段时程及其功率谱曲线

Fig. 6 Time histories and frequency spectra of the blade tip edgewise deflection at three stages

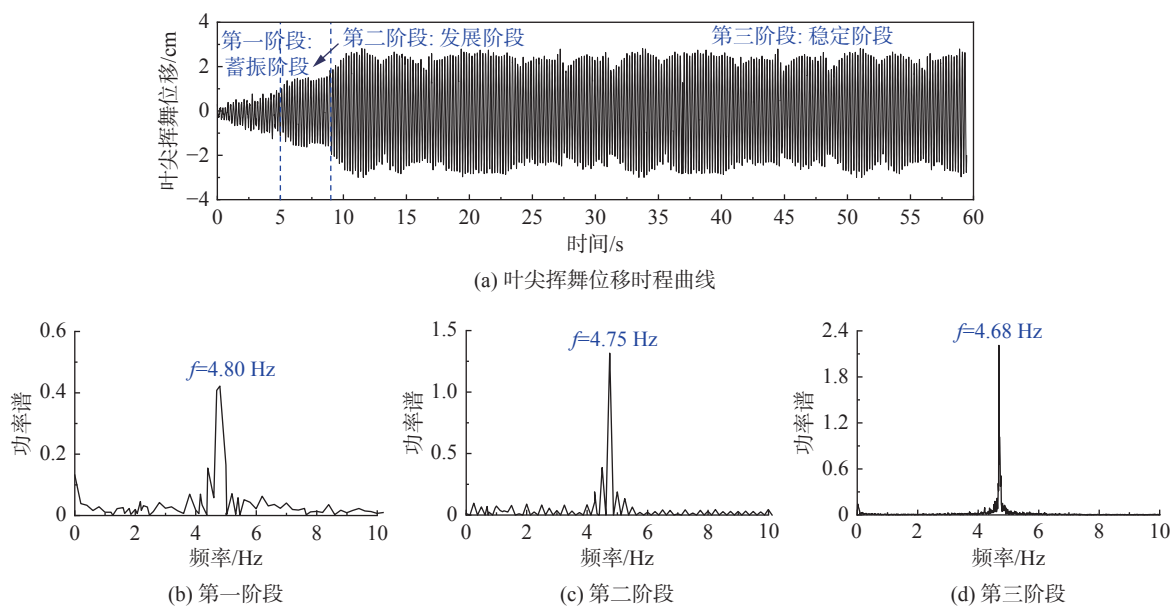


图7 叶尖挥舞位移三阶段时程及其功率谱曲线

Fig. 7 Time histories and frequency spectra of blade tip flapwise deflection at three stages

在稳定阶段达到最小,并且主导频率逐渐趋近于结构固有频率 4.68 Hz。对比分析可发现,挥舞位移振幅明显大于摆振位移振幅,表明风力机叶片颤振失稳主要在挥舞方向。

相比传统的“硬颤振”现象,“软颤振”没有明显的颤振发散临界点。考虑“软颤振”振动形态,选用风力机叶片 3 s 时距的叶根反力相对标准差斜率最大值指标 δ ,并定义其在高速风区间叶根反力颤振指标 δ 小于 2% 为临界点。因此,综合考虑叶尖位移均方差、叶根反力颤振指标 δ 对临界风速进行判定。图 8 给出了不同风速下颤振区间(桨距角 $93^{\circ}\sim 96^{\circ}$ 、 $284^{\circ}\sim 286^{\circ}$)与抖振工况(桨距角 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)下的超长柔性风力机叶片 δ - v (v 为风洞风速)变化曲线。由图可见:所有桨距角下叶根反力颤振指标 δ 均随风速增大而逐渐变大;颤振工况(桨距角 $93^{\circ}\sim 96^{\circ}$ 、 $284^{\circ}\sim$

286°)下的叶根反力颤振指标 δ 在颤振临界风速处存在突增的现象,且 δ 随风速变化呈非线性关系;对于抖振工况(桨距角 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$),叶根反力颤振指标 δ 随风速增加近似为一阶线性关系;当桨距角区间为 $93^{\circ}\sim 96^{\circ}$ 、 $284^{\circ}\sim 286^{\circ}$ 且风洞风速分别低于 5.4 m/s、6.0 m/s 时,该区间桨距角下的叶根反力颤振指标 δ 均小于 2%。

图 9 给出了由叶尖位移求得的不同桨距角区间内风力机叶片颤振临界风速。由图可知:颤振区间内的临界风速随桨距角的增大呈先减小后增大的趋势,在桨距角 94° 和 286° 时达到最小,对应的风洞临界风速为 5.4 m/s 和 6.0 m/s(实际临界风速为 45.2 m/s 和 50.2 m/s),颤振临界风速与拟合曲线吻合较好。因风力机叶片翼型的不对称,颤振区间呈 190° 反对称分布。

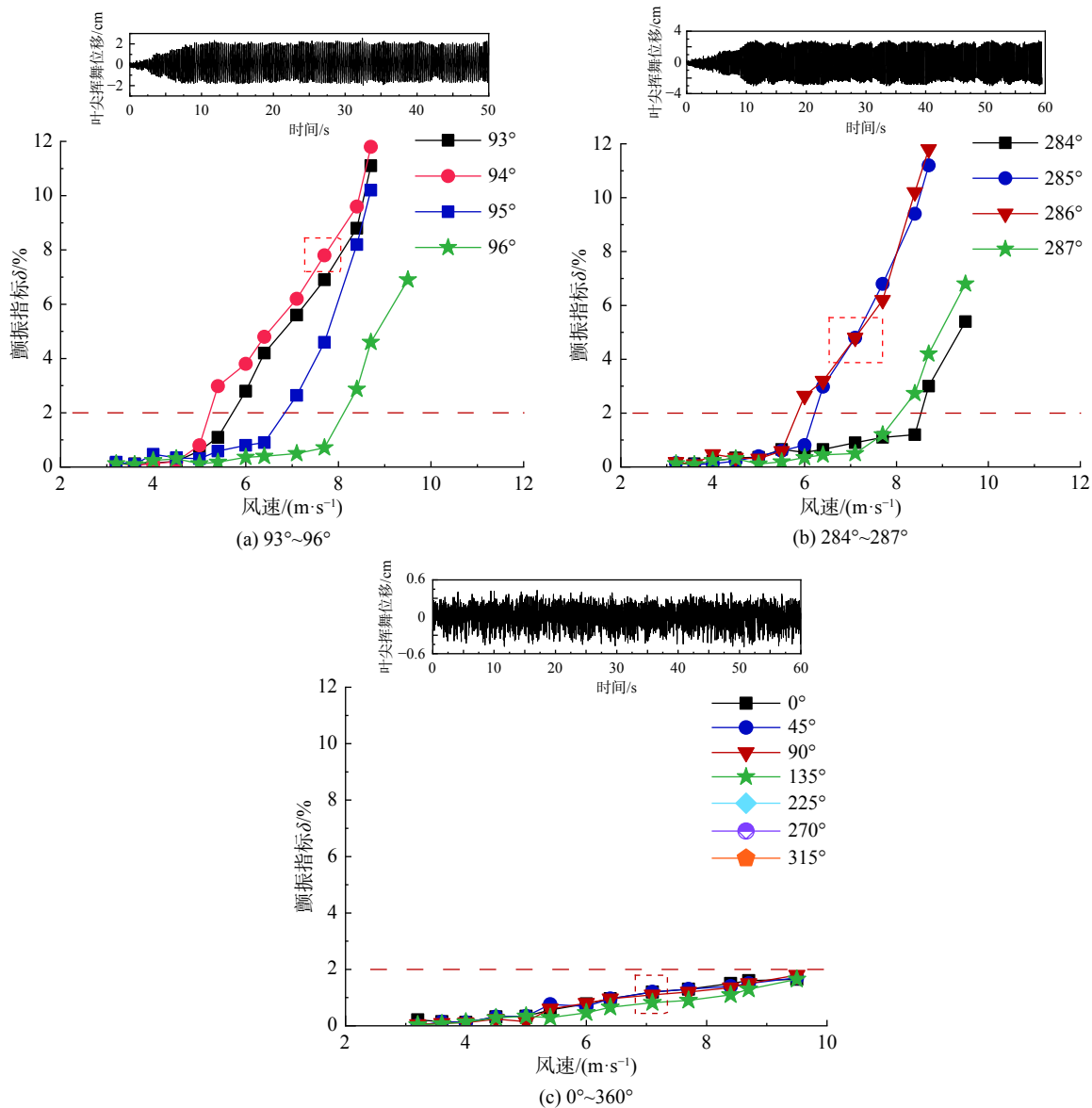


图 8 不同桨距角区间下 δ - v 变化曲线
Fig. 8 Relations between δ and v in three ranges of pitch angle

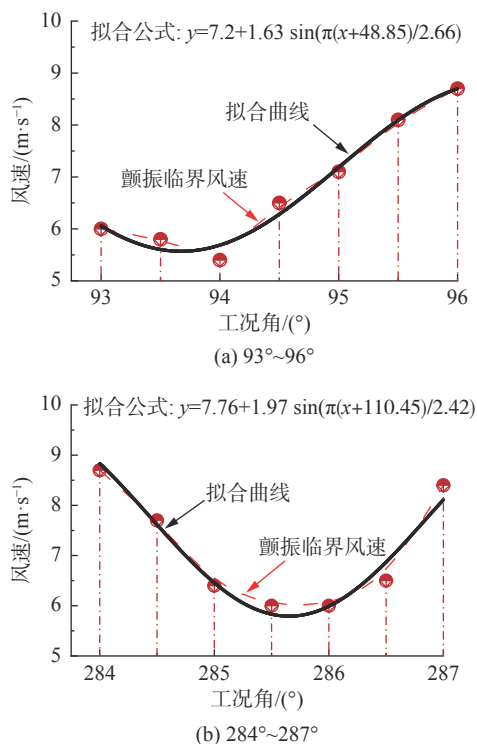


图9 不同桨距角区间风力机叶片颤振临界风速

Fig. 9 Critical flutter wind speeds at different pitch angles

3.2 气动阻尼演化

叶片气弹失稳表现为某一阶或几阶气动阻尼提供的能量大于结构阻尼所能吸收的能量,导致叶片发生自激振动。风剪切作用下风力机叶片呈简谐振动,基于能量损失法,将每个转动周期内气动阻尼力所做的功等效为一个振动周期消耗的能量,通过一个振动周期内流体与叶片的做功关系对颤振是否发生进行评估——若在一个振动周期内流体对叶片做正功,系统不稳定,颤振发生;在一个周期内流体对叶片做负功,则系统稳定,颤振不发生。

$$W_{aero} = \frac{1}{N} \int_0^{Nt} \int_S (p\mathbf{m}\mathbf{v}) dS dt \quad (3)$$

式中, W_{aero} 为一个振动周期内流体对叶片做的功, $\mathbf{n}$ 为风力机叶片表面法向向量, $\mathbf{v}$ 为风洞风速。颤振计算时常用无量纲量气动阻尼 ξ 评估系统是否稳定,气动阻尼与气动作功关系如式(4)所示:

$$\xi_{aero} = -\frac{W_{aero}}{2\pi m \omega^2 A_{max}^2} \quad (4)$$

式中: ξ 为风力机叶片气动阻尼, ω 为振动角频率, A_{max} 为叶尖最大位移, m 为风力机叶片质量。

结构系统总阻尼比 ξ_{tot} , 由气动阻尼比 ξ_{aero} 和结构阻尼比 ξ_{strut} 组成, 即:

$$\xi_{tot} = \xi_{strut} + \xi_{aero} \quad (5)$$

图10给出模型阻尼比随振幅的变化与模型阻尼

比拟合曲线示意图。分析可知, 试验模型阻尼比呈现随振幅增大而增大的特性, 其中基于20个周期振动时程计算所得的阻尼比为0.23%, 满足弹性模型设计要求。

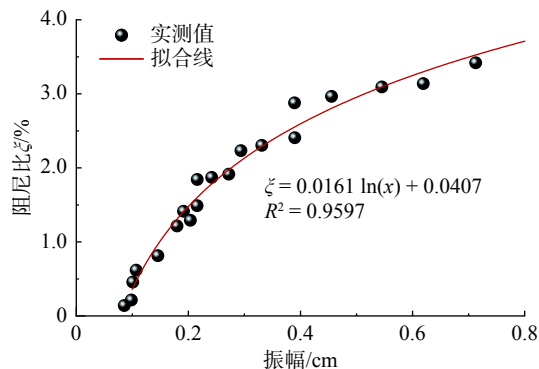


图10 模型阻尼比随振幅的变化示意图

Fig. 10 Variation of damping ratio with amplitude

图11和图12分别给出了不同桨距角下风力机叶片系统总阻尼比和气动阻尼比随风速变化规律。从图中可以看出, 风力机叶片在89°~92°桨距角下未发生颤振, 系统总阻尼比低风速下趋于0, 且随风速增大系统总阻尼比整体呈增大趋势, 而气动阻尼比变化规律与系统总阻尼比变化规律相同。颤振区间93°~96°、284°~286°内, 叶片系统总阻尼比和气动阻尼比在低风速下趋于0, 随后随风速的增大而增大, 在达到峰值后又迅速减小并变为负值, 逐渐抵消系统总阻尼比并驱动系统发散; 当气动阻尼与结构阻尼比之和等于0时, 系统趋于发散, 此时(此处取桨距角94°和286°为例)风速分别为5.1 m/s和5.9 m/s, 比试验颤振临界风速分别低了3.8%和6.3%, 表明进入“软颤振”时, 在系统总阻尼比趋于0的过程中, 大振幅激励会逐渐衰减到稳定振幅, 这说明颤振后气动阻尼作用明显。分析颤振区间气动阻尼变化规律可以发现, 高风速下的气动负阻尼是驱动系统发散的主要原因, 且风速越大气动负阻尼表现越明显, 结构发生颤振越剧烈。

3.3 能量图谱

临界状态下风力机叶片的运动接近于单频的正弦运动, 其挥舞及摆振运动位移和内力方程如下:

$$l_{flap,edg}(t) = A_{flap,edg} \sin(\omega_{flap,edg}t + \varphi_{flap,edg}) \quad (6)$$

$$F_{flap,edg}(t) = B_{flap,edg} \sin(\theta_{flap,edg}t + \psi_{flap,edg}) \quad (7)$$

式中: $A_{flap,edg}$ 为风力机叶片挥舞和摆振运动的振幅, $\omega_{flap,edg}$ 为风力机叶片挥舞和摆振运动的频率, $\varphi_{flap,edg}$ 为风力机叶片挥舞和摆振运动初相位, $B_{flap,edg}$ 为风力机叶片挥舞和摆振内力的幅值,

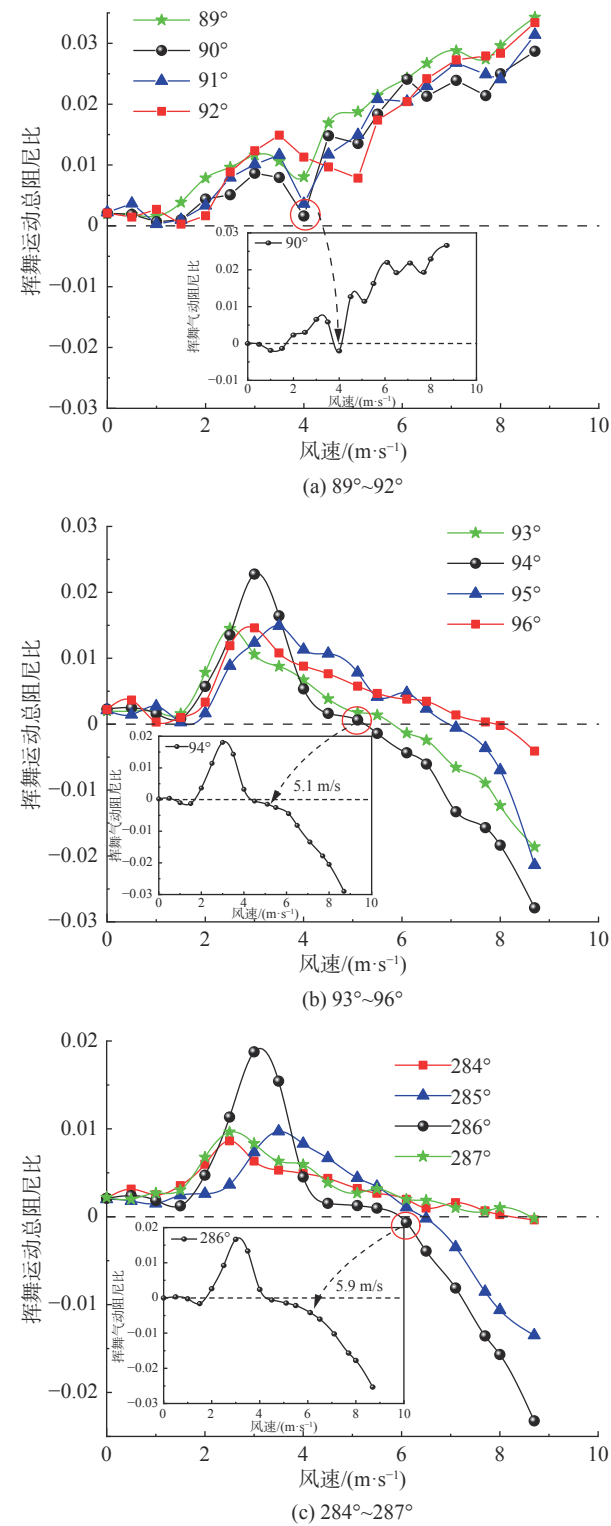


图 11 不同桨距角下风力机叶片总阻尼变化规律

Fig. 11 Variation of total damping of wind turbine blade with pitch angle

$\theta_{\text{flap,edg}}$ 分别为风力机叶片挥舞和摆振内力的频率,
 $\psi_{\text{flap,edg}}$ 为风力机叶片挥舞和摆振内力初相位。

风力机叶片挥舞振动周期内力对挥舞运动做功的表达式为:

$$W_L = \int_0^T F(t)dl$$

(8)

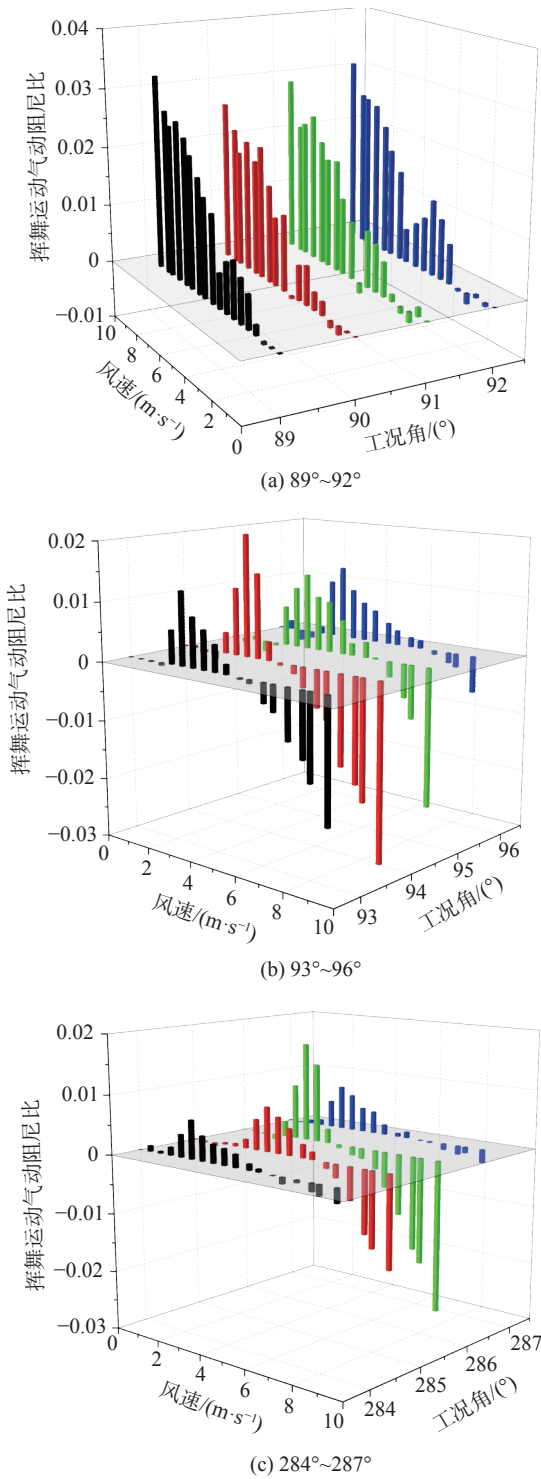


图 12 不同桨距角下风力机叶片气动阻尼变化规律

Fig. 12 Variation of aerodynamic damping of wind turbine blades with pitch angle

式中, T 为风力机叶片挥舞、摆振振动周期, $T = 2\pi/\omega$ 。

对大量不同桨距角和风速下的风洞试验数据进行分析(工况见 图 3), 并基于式(8)得到风致振动函数做功与桨距角和风速关系的等值曲线图, 即为表征风致振动做功效应的潜在能量演变图谱。图 13 给出了不同桨距角下风致振动潜在能量演变三维图谱, 其能量演变二维图谱如图 14 所示。由图可知: 非颤振

工况下风致振动的能量分散,其值随风速的增大而增大,各桨距角在同一风速下能量无明显波动,当风速足够大时其能量积累增大,但明显低于颤振工况能量的积累;在颤振区间 $93^\circ \sim 96^\circ$ 、 $284^\circ \sim 286^\circ$ 桨距角下,存在能量积累突变界线,能量积累突变界线对应的风速随桨距角的增大呈先减小后增大的趋势,对比界线拟合公式,其变化趋势与颤振临界风速一致;超过能量积累突变界线后的能量积累现象显著,表明风致振动能量随时间呈现显著的非平稳特性。

图 15 给出了能量随风速变化曲线。由图可知,颤振区间与非颤振区间的振动能量随风速的变化趋势相同,风速越大能量越分散,其均值分别随风速呈指数增长。相较于非颤振区间(能量最大值为 0.025 J),

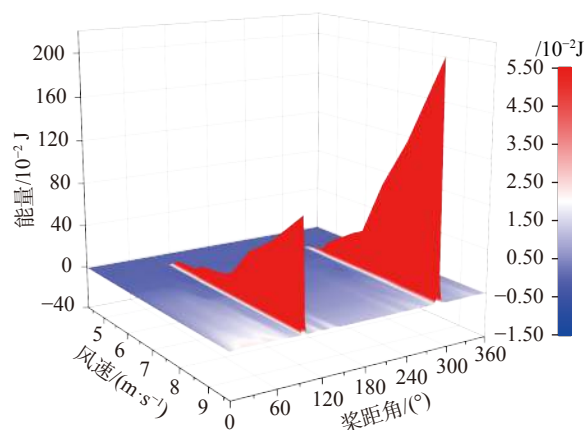


图 13 不同桨距角下风致振动潜在能量演变三维图谱

Fig. 13 Three-dimensional map of potential wind-induced vibration energy

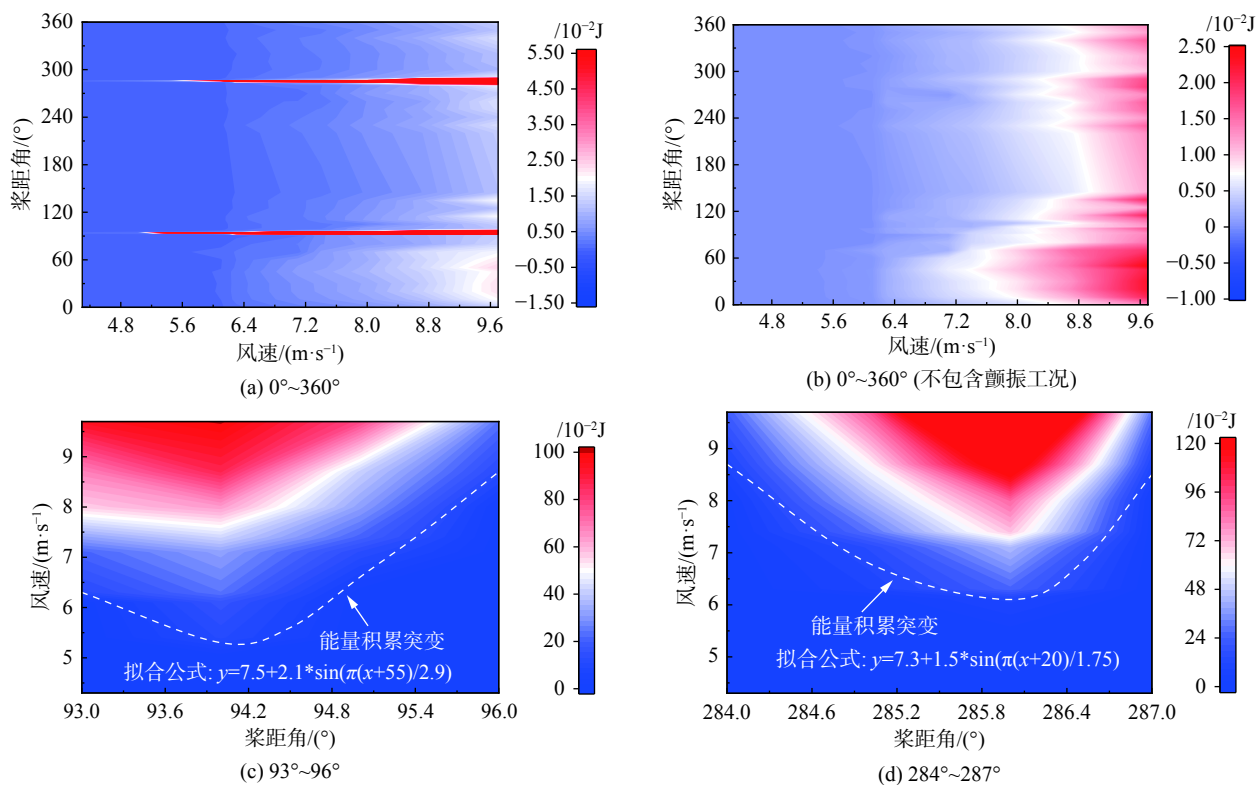


图 14 不同桨距角下风致振动潜在能量演变图谱

Fig. 14 Potential wind-induced vibration energy evolution at different pitch angle

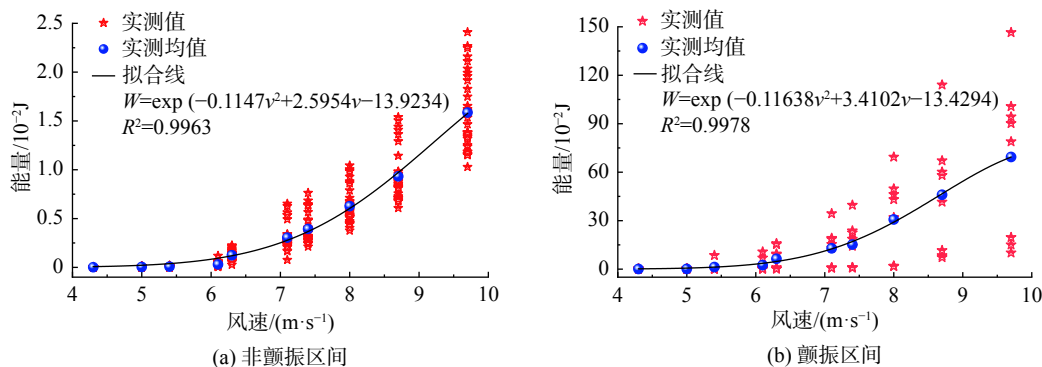


图 15 能量随风速变化曲线及拟合公式示意图

Fig. 15 Variation of energy with wind speed

颤振区间内的能量在达到颤振临界风速后积累显著, 最大值可达 1.5 J, 是非颤振能量的 60 倍, 表现出风力机叶片弹性模型风致振动能量随桨距角变化呈现显著的非平稳特性。

4 结 论

本文系统研究了 15 MW 风力机超长柔性叶片颤振后形态特性与作用机理, 尤其在风力机叶片三维弹性模型设计、气动阻尼演化、能量图谱建立三个方面取得了原始创新。得到的具体结论如下:

1) 提出一种基于主梁刚度等效原则的新型超长柔性风力机叶片气动-刚度-质量缩尺映射一体化三维弹性模型设计方法; 采用高速摄像技术和高频六分量天平进行同步测振、测力风洞试验; 验证了本文提出的弹性模型设计和试验方法能够精确有效地模拟风力机叶片动力性能与颤振行为。

2) 风力机叶片在桨距角 $93^{\circ}\sim 96^{\circ}$ 和 $284^{\circ}\sim 286^{\circ}$ 区间属于风振敏感区间, 在该区间叶片超过临界风速即可发生大幅锁频振动, 而其余工况下呈现小幅随机振动状态; 风力机叶片大幅锁频振动时程呈现三阶段非平稳振动, 振幅随时间呈现先增大后平稳的趋势, 表征为极限环振动。

3) 在桨距角 $93^{\circ}\sim 96^{\circ}$ 、 $284^{\circ}\sim 286^{\circ}$ 下, 气动阻尼比随风速达到峰值后又迅速减小, 随后转负, 逐渐抵消系统总阻尼比, 并驱动系统发散; 当气动阻尼与结构阻尼比之和等于 0 时系统趋于发散, 此时桨距角 94° 、 286° 对应的风速分别为 5.1 m/s、5.9 m/s, 比试验风速分别低 3.8% 和 6.3%, 表明在颤振临界风速时系统总阻尼比趋于 0, 大振幅激励下会逐渐衰减到稳定振幅; 进入颤振后状态, 气动负阻尼是驱动系统发散的主要原因, 且风速越大, 气动负阻尼表现越明显, 结构发生颤振越剧烈。

4) 基于能量图谱分析方法, 可分析颤振临界状态能量分散情况: 非颤振工况下风致振动能量分散, 能量积累明显低于颤振工况; 颤振区间 $93^{\circ}\sim 96^{\circ}$ 、 $284^{\circ}\sim 286^{\circ}$ 下存在能量积累突变界线, 能量积累突变界线对应的风速随桨距角的增大呈先减小后增大的趋势; 超过能量积累突变界线的能量积累显著, 表现出风致振动能量随时间和桨距角呈现显著的非平稳特性。

参 考 文 献:

[1] 柯世堂, 王晓海, 王同光, 等. 考虑叶片桨距角和干扰效应的大型风力机体系风致效应研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 280-288.
KE S T, WANG X H, WANG T G, et al. Study on wind-induced effects of large wind turbine system considering blade pitch angle and interference effect[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(6):

280-288 (in Chinese).
[2] 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.
doi: 10.1016/j.rser.2016.06.007
[3] KE S T, YU W L, WANG T G, et al. Aerodynamic performance and wind-induced effect of large-scale wind turbine system under yaw and wind-rain combination action[J]. Renewable Energy, 2019, 136: 235-253.
doi: 10.1016/j.renene.2018.12.123
[4] CHEN X, XU J Z. Structural failure analysis of wind turbines impacted by super typhoon Usagi[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 60: 391-404.
doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.028
[5] 陈斌, 王凯, 刘健, 等. 0608 号台风“桑美”过境前后对长江口外海域环境的影响[J]. 地球科学, 2016, 41(8): 1402-1412.
CHEN B, WANG K, LIU J, et al. The impact of super typhoon Saomai(0608) on the offshore environment near the Yangtze Estuary[J]. Earth Science, 2016, 41(8): 1402-1412 (in Chinese).
[6] 王力雨, 许移庆. 台风对风电场破坏及台风特性初探[J]. 风能, 2012(5): 74-79.
[7] 周盛, 等. 叶轮机气动弹性力学引论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 202-231.
[8] 黄俊东, 夏鸿建, 李德源, 等. 大型风力机柔性叶片非线性气弹模态分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 180-187.
HUANG J D, XIA H J, LI D Y, et al. Nonlinear aeroelastic modal analysis of large wind turbine flexible blades[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 180-187 (in Chinese).
doi: 10.3901/JME.2020.14.180
[9] VATNE S R. Aeroelastic instability and flutter for a 10MW wind turbine[D]. Norwegian: Norwegian University of Science and Technology, 2011.
[10] 赵林, 胡传新, 周志勇, 等. H型桥梁断面颤振后能量图谱[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(5): 505-516.
ZHAO L, HU C X, ZHOU Z Y, et al. Post flutter energy map for H-shaped bridge girder[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2021, 51(5): 505-516 (in Chinese).
doi: 10.1360/SST-2020-0373
[11] 李永乐, 朱佳琪, 唐浩俊. 基于CFD和CSD耦合的涡激振和颤振气弹模拟[J]. 振动与冲击, 2015, 34(12): 85-89, 114.
LI Y L, ZHU J Q, TANG H J. Aeroelastic simulation of vortex-induced vibration and flutter based on CFD/CSD coupling solution[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(12): 85-89, 114 (in Chinese).
[12] 杨超, 杨澜, 谢长川. 大展弦比柔性机翼气动弹性分析中的气动力方法研究进展[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(6): 1009-1018, 983.
YANG C, YANG L, XIE C C. Development of aerodynamic methods in aeroelastic analysis for high aspect ratio flexible wings[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(6): 1009-1018, 983 (in Chinese).
doi: 10.7638/kqdlxxb-2018.0237
[13] XU F Y, YANG J, ZHANG M J, et al. Experimental investigations on post-flutter performance of a bridge deck sectional model using a novel testing device[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 217: 104752.
doi: 10.1016/j.jweia.2021.104752
[14] 胡传新. 典型桥梁断面颤振迟滞效应和气动力演变机理[D]. 上海: 同济大学, 2020.
[15] 汤瑞源, 赵明亮, 吴永健. 测力法在翼型动态失速试验研究中的应用[J]. 气动实验与测量控制, 1995(2): 16-20.
TANG R Y, ZHAO M L, WU Y J. The application of the force measurement method on experimental study of airfoil dynamic stall[J].

- Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1995 (2): 16–20 (in Chinese).
- [16] 焦予秦, 张彬乾, 金承信, 等. 翼型气动力直接测量风洞试验技术探索[J]. *实验流体力学*, 2005, 19 (2): 40–44.
- JIAO Y Q, ZHANG B Q, JIN C X, et al. Experimental technique on direct measuring of aerodynamics performance of airfoil[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, 19 (2): 40–44 (in Chinese).
doi: [10.3969/j.issn.1672-9897.2005.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9897.2005.02.008)
- [17] 于静梅, 陈诚, 孟凡丹, 等. 垂直轴风力机桨叶气膜加热的数值研究[J]. *空气动力学学报*, 2016, 34 (4): 524–529.
- YU J M, CHEN C, MENG F D, et al. Numerical studies of wind turbine blade gas film heating[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2016, 34 (4): 524–529 (in Chinese).
- [18] 孙皓. 风力机翼型失速颤振的试验与数值模拟研[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [19] YU D O, KWON O J. Predicting wind turbine blade loads and aeroelastic response using a coupled CFD-CSD method[J]. *Renewable Energy*, 2014, 70: 184–196.
doi: [10.1016/j.renene.2014.03.033](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.033)
- [20] 黄俊东. 基于特征值分析的后掠叶片的气弹阻尼分析方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [21] YU W B, HODGES D H, VOLOVOI V, et al. On Timoshenko-like modeling of initially curved and twisted composite beams[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39 (19): 5101–5121.
doi: [10.1016/S0020-7683\(02\)00399-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00399-2)
- [22] SUATEAN B, GALETUSE S, COLIDIUC A, et al. Aeroelastic problems of wind turbine blades[C]//AIP Conference Proceedings, Rhodes (Greece). AIP, 2010, 1281(1).
doi: [10.1063/1.3498270](https://doi.org/10.1063/1.3498270)
- [23] BISPLINGHOFF R L, ASHLEY H, HALFMAN R L. Aeroelasticity[M]. Cambridge: Addison-Wesley publishing Company Incorporated, 1955.
- [24] 李德葆, 陆秋海. 工程振动试验分析[M]. 清华大学出版社, 2004.
- LI D B, LU Q H. Test analysis of experiments in engineering vibration[M]. Tsinghua University Press, 2004.
- [25] EVAN G, JENNIFER R, LATHA S, et al. IEA Wind TCP Task 37: Definition of the IEA 15-megawatt offshore reference wind turbine[R]. National Renewable Energy Laboratory, Golden CO, USA, 2020. NREL/TP-5000-75698.
<https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf>
doi: [10.2172/1603478](https://doi.org/10.2172/1603478)
- [26] 朱乐东, 高广中. 典型桥梁断面软颤振现象及影响因素[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43 (9): 1289–1294, 1382.
- ZHU L D, GAO G Z. Influential factors of soft flutter phenomenon for typical bridge deck sections[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43 (9): 1289–1294, 1382 (in Chinese).
doi: [10.11908/j.issn.0253-374x.2015.09.001](https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.2015.09.001)

(本文责编: 王颖 英文编审: 董思卫)