

风力机叶片动态特性与分形维数关系研究

李倩倩¹, 李 春^{1,2}, 叶柯华¹, 杨 阳¹, 丁勤卫¹

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘 要: 为探究风力机叶片动态特性与分形维数之间的关系, 基于湍流风谱模型 Von Karman 和 NWTcup 生成 2 种风场, 通过多体动力学软件 FAST 仿真出不同风速条件下的风力机叶片挥舞和摆振时域动态响应, 采用计盒维数法求解其分形维数。用发电机输出功率验证分形维数描述风力机叶片动态特性的可行性。结果表明: 挥舞时域动态响应的分形维数随风速的增大逐渐减小, 而摆振则相反, 当达到额定功率时挥舞和摆振的分形维数变化都较小; 相同风速下不同湍流风谱模型的功率虽几乎相同, 但其对应的分形维数却不同, 表明不同的湍流风谱模型有其特定的分形维数。

关键词: 风力机; 叶片; 分形维数; 挥舞; 摆振; 功率

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

叶片是风力机发电机组中受力最复杂的部件之一。叶片处于气动力、惯性力和弹性力耦合作用之中, 若产生共振, 会在结构中引起极大的内应力。内应力是影响风力机正常运行重要因素之一, 甚至会造成叶片及整机破坏^[1], 故研究叶片的挥舞、摆振和扭转动态特性十分重要。

目前研究叶片动态特性最常用的方法为实验分析法和数值分析法^[2-4]。实验分析法是将叶片无约束悬挂或固定端支撑并对其施加激励信号。然后通过测量输入信号与输出响应, 用参数识别法分析, 得出叶片在非运行状态下的动力学特性参数, 进而分析叶片的动态特性。文献[5]提出一种单点加载方法, 用于检验叶片结构设计的合理性, 获得定常载荷作用下叶片集中载荷截面, 为改进叶片设计提供了实验数据。文献[6]应用 DAS 数据信号采集系统对水平轴风力机叶片进行实验模态研究, 通过测量分析叶片振动信号获取叶片的模态, 作为选择以及修正风力机叶片和整机模态的算法提供理论依据。实验分析方法结果可靠, 但由于风力机叶

片直径较大, 例如 NREL 5 MW 风力机叶片直径为 123 m, 与波音 777 翼展近似^[7], 基于实验设备的局限性和经济性考虑, 以及叶片在旋转过程中固有频率和特性有所改变而产生的问题未能解决, 所以目前尚未出现成熟可靠的实验方法对运行状态下的叶片进行动态特性分析^[8]。

风力机叶片经典数值分析方法是耦合的运动方程进行数值积分求解, 一般需对其运动方程进行简化求解, 这类经典计算方法工作量大, 高阶情况很难求解^[9]。文献[10]采用标量化的叶片挥舞和扭转自由度耦合的振动模型, 基于 Floquet 理论分析旋转叶片动态失速气弹的稳定性, 揭示了挥舞扭转固有频率和结构阻尼对颤振边界的影响。目前, 普遍使用有限元法, 将结构耦合的运动方程通过模态变换解耦成相互独立方程。通过求解每个独立方程得到各模态的特性参数, 进而预测和分析系统的动态特性。文献[11]采用有限元和实验结合的方法, 针对风力机整机多体系统的动态特性进行研究, 结果表明叶片正常工作时动力刚化因素对叶片自然频率的影响较小, 叶片在额定转速范围内不会发生共振, 通过单向层铺层角度的改变能显著调整

收稿日期: 2016-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51176129); 上海市科委项目(13DZ2260900)

通信作者: 李 春(1963—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事叶轮机械优化设计、三维粘性流动数值模拟和风能利用等方面的研究。lichun8778@163.com

叶片固有频率。文献[12]采用有限元法,得到的计算结果与实验测量结果基本一致。文献[13]应用有限元方法对 NREL 风力机叶片进行 6 阶振型实验研究,得到的计算结果与实验值相近。有限元方法也存在缺点计算量大、紊流模型选取困难和数值计算的稳定性与动静匹配难等问题。

分形学是一门新的数学分支,其应用领域十分广泛。分形(Fractal)由美国 IBM 公司研究中心物理部研究员哈佛大学数学系数教授曼德勃罗于 1975 年提出,其原义是随机、非整数、凌乱的物体^[14]。分形理论得到广泛应用的重要原因是其能揭示不同尺度下要素的分布特征及复杂程度^[15]。分形是一种数学方法,用于度量某些无法清晰定义的特性,比如粗糙度、破损程度和不规则程度等。通过分形学理论计算非线性系统分形维数,从而对随机、无规律的非线性系统进行量化分析^[16]。自相似性原则和迭代生成原则是分形理论的重要原则,其表征分形在几何变换下具有不变性。分形具有精细结构,当风力机叶片挥舞和摆振位移图形比例不断缩小或放大时有任意小的细节。无论从局部还是整体,所研究的位移时间图像都非常不规则并且无法用传统的几何语言描述。分形结构在大小尺度上存在某种自相似形式,因此分形理论具有很强的描述稳定性,不受仪器分辨率和取样长度的影响。

基于以上优点,用分形学研究风力机叶片挥舞和摆振位移时间序列能精确地分析时间序列的变化趋势,进而更准确地研究风力机叶片的动态特性。基于 Von Karman 和 NWTcup 这 2 种湍流风谱模型生成风场,采用 FAST 计算不同风速下风力机叶片挥舞和摆振时域动态响应,将挥舞和摆振位移作为时间序列参数,分析其分形维数。首先验证挥舞和摆振时间序列是否具有分形特征,进而计算其分形维数,分析其作为风力机叶片动态特性参数的可行性。最后分析分形维数与风力机输出功率间的关系,验证分形维数能否作为判断风力机处于额定功率时的参数。

1 风谱模型及叶片动态特性

1.1 湍流风谱模型

1.1.1 Von Karman 模型

Von Karman 模型大气为中性稳定条件,各分量

($K=x,y,z$)风谱模型均为:

$$S_K(f) = \frac{4\sigma_K^2 L_K / u_{hub}}{[1 + 71(fL_K / u_{hub})^2]^{5/6}} \quad (1)$$

修正后为:

$$S_K(f) = \frac{2\sigma_K^2 L_K / u_{hub}}{[1 + 71(fL_K / u_{hub})^2]^{11/6}} \cdot [1 + 189(fL_K / u_{hub})^2] \quad (2)$$

式中, f ——频率; L_K ——整体尺寸参数; u_{hub} ——轮毂高度处平均风速; σ_K ——标准偏差。

1.1.2 NWTcup 模型

NWTcup 模型是美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)基于实测风场数据和 SMOOTH^[17]湍流风谱模型,通过比例缩放 SMOOTH 湍流风谱模型功率谱密度函数求得,缩放系数根据实测数据总结得出。对于非稳定流动功率谱为高低频 SMOOTH 湍流风谱模型的线性组合,其公式表示为^[18]:

$$S_{K,NWTcup}(f) = P_{1,K} S_{K,low}(F_{1,K} \cdot f) + P_{2,K} S_{K,high}(F_{2,K} \cdot f) \quad (3)$$

式中, $P_{i,K}$ 、 $F_{i,K}$ ——缩放系数,由测量数据总结的关于 Ri 数(Richardson number)的经验函数确定, $i=1,2$; Ri ——量纲数,表示浮力项与流梯度项的比值。

1.2 计算模型与参数

FAST 作为风力机专用结构动力学响应计算程序,主要研究两叶片或三叶片水平轴风力机^[19]。本文以 NREL 5 MW 风力机为研究对象,其主要参数^[20]如表 1 所示。

表 1 NREL 5 MW 风力机主要参数

Table 1 Configuration of NREL 5 MW class wind turbine

参数	数值	参数	数值
功率/MW	5.0	切入风速/ $m \cdot s^{-1}$	3
叶片数量	3	切出风速/ $m \cdot s^{-1}$	25
风轮直径/m	123	风轮质量/kg	1.1×10^4
轮毂直径/m	3.0	机舱质量/kg	2.4×10^5
轮毂高度/m	90	塔架质量/kg	3.47×10^5
仰角/(°)	5	锥角/(°)	2.5

风况计算网格叶片展向(径向) X 和塔高方向(离地高度) Z 方向各为 17 和 19 个节点(17×19),计算域为 $177 m \times 200 m$ 。图 1 为风场域网格划分。

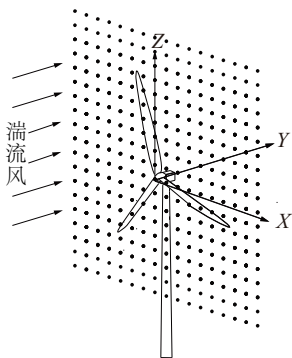


图1 风场域网格划分

Fig. 1 Wind field area and grid

1.3 挥舞、摆振以及发电机输出功率

如图2所示,风力机叶片沿风轮旋转轴线前后摆动,称为挥舞;风力机叶片沿风轮转速方向的弯曲,称为摆振;挥舞和摆振位移原点为 O 点。

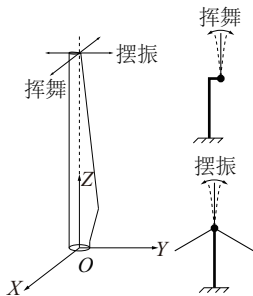


图2 挥舞与摆振

Fig. 2 Flapwise and edgewise

通过气动载荷和控制系统的选择,FAST可建立叶片、机舱、塔架和平台等风力机部件或整机的结构动力学响应,通过控制发电机启停、机舱偏航和风轮刹车等可模拟风力机不同工况。通过FAST可得到不同工况下发电机功率时域变化^[21]。图3为动力学仿真流程图。

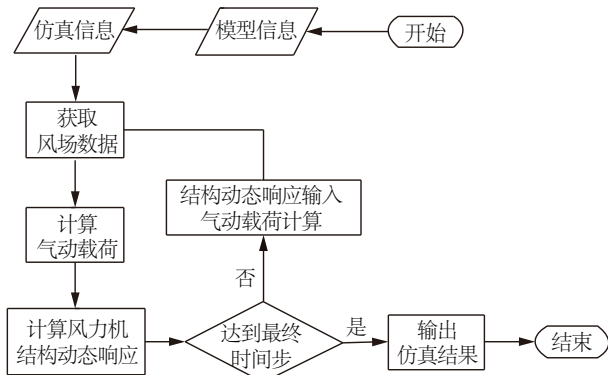


图3 动力学仿真流程图

Fig. 3 Flowchart of dynamic simulation

2 分形维数及计算

分形维数从几何特征分析被研究对象的信号波形,可定量分析波形的凌乱性、无规律性等通过分形提取被研究对象的复杂波形分形维数,它们的变化表征信号特征,求解出维数数值,从而使分析结果更加明显和直观^[22]。分形维数是分形理论中最为重要的信号度量参数,其打破了欧式几何维数的传统概念,使人们重新审视自然界中一般不规则形体的维数情况。分形维数是以数值的形式度量事物的分形特征,具有简洁直观的特点^[23]。在分形理论中,主要通过分形维数描述分形体的分形特征。

计盒维数法是计算分形维数方法之一,Hurst指数 H 是计盒维数法中重要参数,分形维数 D 与其关系可定义为^[24]:

$$D = 2 - H \quad (4)$$

式中, D ——分形维数; H ——Hurst指数。

指数 H 的计算方法为:

$$N(\Delta t) = \sum_{i=0}^{n-1} |f(t_i + \Delta t) - f(t_i)| \Delta t \quad (5)$$

式中, $N(\Delta t)$ ——矩形面积; $f(t_i)$ ——时间序列; n ——在 Δt 时间段内数据数量。

$$H = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\lg N(\Delta t)}{\lg \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left\{ \frac{\lg [N(\Delta t) / \Delta t^2]}{\lg (1 / \Delta t)} \right\} \quad (6)$$

$$D = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[2 - \frac{\lg N(\Delta t)}{\lg \Delta t} \right] = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left\{ \frac{\lg [N(\Delta t) / \Delta t^2]}{\lg (1 / \Delta t)} \right\} \quad (7)$$

3 叶片时域动态响应计算与分析

基于Von Karman模型和NWTcup模型生成湍流风场,分别在7、10、13、16 m/s条件下对风力机叶片挥舞摆振时域动态响应进行分析。风况条件为湍流,粗糙度为0.01 m。图4为2种湍流风谱模型下叶片挥舞时域动态响应。由图4可知,7和10 m/s风速时,随着风速的增大挥舞位移也随之增加,13和16 m/s风速时即风力机达到额定功率时挥舞位移整体较小。但16 m/s风速时的挥舞位移动态响应波动最大,在此风速下存在最小位移值。

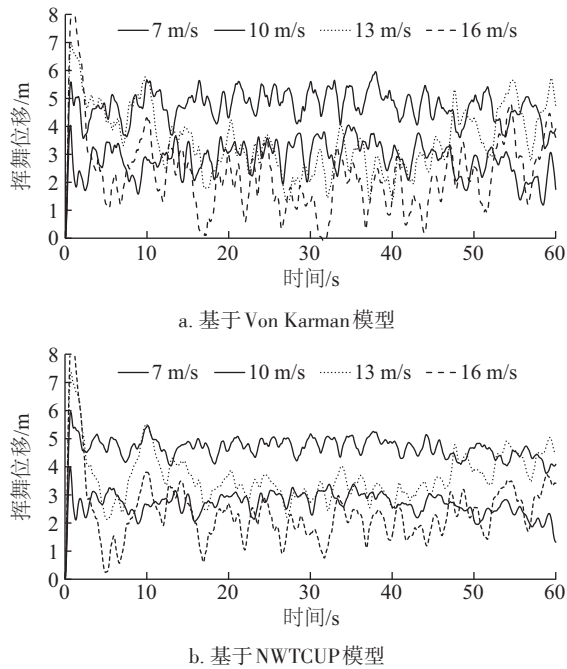


图4 不同风速时挥舞时域动态响应

Fig. 4 Flapwise dynamic response of different wind speed

图5为2种湍流风谱模型下叶片摆振时域动态响应。由图5可知,2种风谱下的摆振动态响应基本在 $-1\sim 0$ m之间波动。与相同条件下的挥舞相比,摆振的整体波动范围都较小。7 m/s时摆振动态响应波动最小,16 m/s时摆振动态响应波动最大。

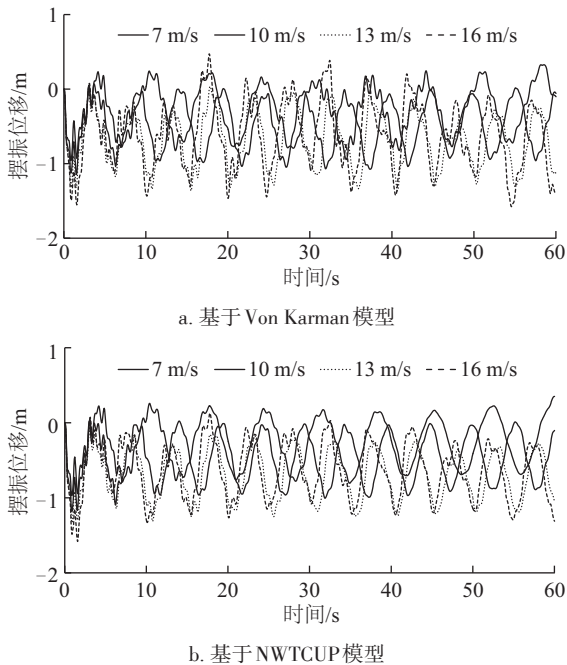


图5 不同风速时摆振时域动态响应

Fig. 5 Edgewise dynamic response of different wind speed

图6为电机输出功率。由图6可知,7和10 m/s风速时发电机输出功率未达到额定功率且其变化较大,13和16 m/s风速时,在2种风谱模型下发电机输出功率均达到额定功率且功率几乎保持在5 MW。

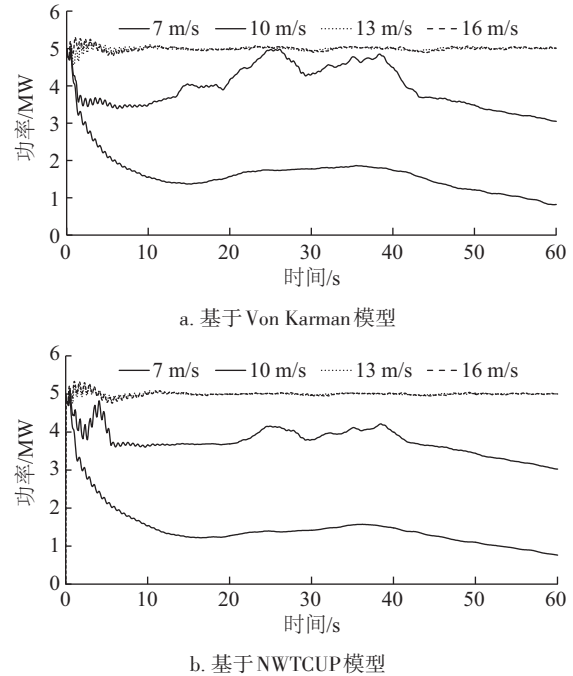


图6 不同风速时电机输出功率

Fig. 6 Power of different wind speed

由图4、图5可知,前3 s数据为程序模拟误差,进行分析时,应忽略前3 s数据。采用 Matlab 编程计算得出分形维数 D ,其值如表2所示。由表2数据可得到图7,图7分别为在不同湍流风谱模型下的挥舞和摆振的变化趋势。

由图6计算得出电机输出的平均功率,其值如表3所示。根据表3数据可得图8。由图7、图8可知,当达到额定功率时分形维数变化较小;摆振时域态响应的分形维数随风速的增大逐渐增大,当达到额定功率时分形维数变化较小。

由以上分析可知,风力机叶片的动态特性分形维数可描述风力机是否在额定功率下工作。由图8可知,在相同风速下不同湍流风谱模型的功率几乎相同,但其对应的分形维数却不同,表明不同的湍流风谱模型有其特定分形维数,验证了分形维数可作为参数描述风力机叶片的动态特性。

表2 分形维数			
Table 2 The fractal dimension			
模型	动态特性	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	D
Von Karman	挥舞	7	1.3327
		10	1.2874
		13	1.2664
		16	1.2682
	摆振	7	1.3161
		10	1.3120
		13	1.3458
		16	1.3498
NWTcup	挥舞	7	1.2897
		10	1.2761
		13	1.2264
		16	1.2209
	摆振	7	1.2744
		10	1.3006
		13	1.3581
		16	1.3557

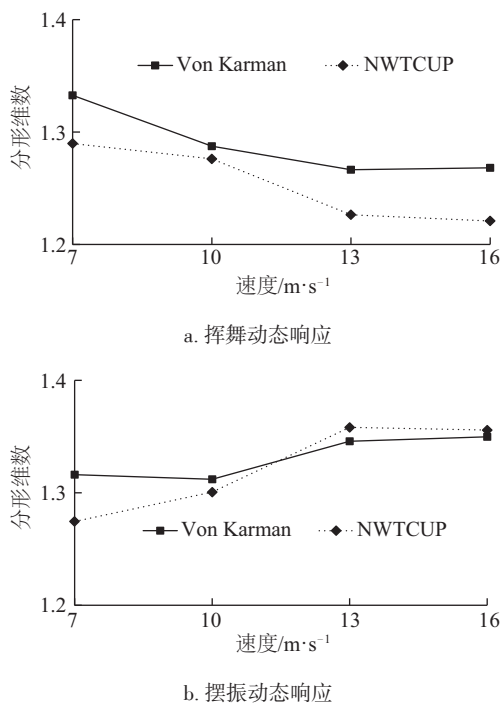


图7 挥舞动态响应和摆振动态响应的分形维数

Fig. 7 Fractal dimension of flapwise and edgewise dynamic response

表3 输出功率平均值		
Table 3 The average power output		
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	功率/MW	
	Von Karman 模型	NWTcup 模型
7	0.8179	0.7625
10	3.0480	3.0240
13	4.9960	4.9980
16	5.0050	4.9990

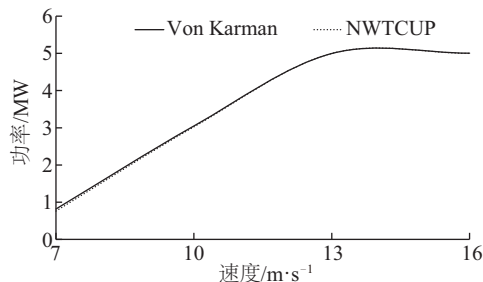


图8 不同风谱、不同风速下风力机功率

Fig. 8 Power output under different wind spectrum and different wind speed power

4 结 论

基于 Von Karman 和 NWTcup 这 2 种湍流风谱模型生成风场,采用 FAST 计算不同风速下风力机叶片挥舞和摆振时域动态响应,将挥舞和摆振位移作为时间序列参数,分析其分形维数,得出以下结论:

- 1)风力机在额定功率下工作时,分形维数趋于某一值。因此,可将分形维数作为探究风力机是否在额定功率时工作的依据。
- 2)相同条件下,挥舞随风速的增大而增加,摆振随风速的增大而减小。
- 3)在相同风速下不同湍流风谱模型的功率几乎相同,但其对应的分形维数却不同,表明不同的湍流风谱模型有其特定分形维数。

[参考文献]

- [1] 莫文威,李德源,夏鸿建,等.水平轴风力机柔性叶片多体动力学建模与动力特性分析[J].振动与冲击,2013,32(22):99—105.
- [1] Mo Wenwei, Li Deyuan, Xia Hongjian, et al. Multibody dynamic modeling and dynamic characteristics analysis of flexible blades for a horizontal axis wind turbine [J].

- Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 99—105.
- [2] Wood D H. Determination of the optimum tower height for a small wind turbine[J]. Int JREE, 2001, 3(2): 9—16.
- [3] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] He Deiqing. Wind engineering and industrial aerodynamics[M]. Beijing: National defense industry press, 2006.
- [4] Weisser D. A wind energy analysis of Grenda: An estimation using the Weibull density function[J]. Renewable Energy, 2003, 28(28): 1803—1812.
- [5] 曹人靖, 刘道兴. 水平轴风力机风轮静态结构特性研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 436—439.
- [5] Cao Renjing, Liu Daoxing. Experimental investigation on static structural characteristics of a horizontal axis wind turbine[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2001, 22(4): 436—439.
- [6] 叶枝全, 马 昊, 丁 康, 等. 水平轴风力机桨叶的实验模态分析[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 473—476.
- [6] Ye Zhiquan, Ma Hao, Ding Kang, et al. Experimental model analysis of the rotor blade of the horizontal axis wind turbine[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2001, 22(4): 473—476.
- [7] Vermeera L J, Sørensen J N, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39: 467—510.
- [8] 王 欣. 水平轴风力机气动性能与结构动力特性分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [8] Wang Xin. Analysis of aerodynamic performance and structural dynamic characteristics for horizontal wind turbine[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [9] 马昊旻. 水平轴风力机桨叶结构动力学特性研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2005.
- [9] Ma Haomin. Research on structure dynamic analysis of the rotor blade of horizontal axis wind turbine[D]. Shantou: Shantou University, 2005.
- [10] 李迺璐, 穆安乐, Balas M J, 等. 基于 Floquet 理论的旋转风力机叶片动力失速气弹稳定性研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(24): 82—88.
- [10] Li Nailu, Mu Anle, Balas M J, et al. Aeroelastic stability analysis on rotating stall blade of wind turbine based on floquet theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(24): 82—88.
- [11] 张 鑫. 基于柔性多体系统的大型风力机动力学特性研究与仿生机理探索[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [11] Zhan Xin. Large-scale wind turbine dynamics characteristics research based on flexible multi-body system and bionic mechanism explore[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [12] Luczak M, Manzato S, Peeters B, et al. Updating finite element model of a wind turbine blade section using experimental modal analysis results[J]. Shock and Vibration, 2014, 2014(1): 14—17.
- [13] Hsu Ming-Chen, Akkerman I, Bazilevs Y, et al. Finite element simulation of wind turbine aerodynamics: Validation study using NREL phase VI experiment[J]. Wind Energy, 2014, 17(3): 1—20.
- [14] Li Tien-Yien, Yorke J A. Period three implies chaos[J]. The American Mathematical Monthly, 1975, 82(10): 985—992.
- [15] 李斌斌, 李占斌, 宇 涛, 等. 基于归一化植被指数的流域植被覆盖分形维数研究[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 239—247.
- [15] Li Binbin, Li Zhanbin, Yu Tao, et al. Research on fractal dimension of vegetation cover based on normalized difference vegetation index in watershed scale [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 239—247.
- [16] 齐亚乌丁·萨达尔, 梅 静(译). 混沌学[M]. 北京: 当代中国出版社, 2014.
- [16] Chaos Sardar Z, [M]. Translat by Mei Jing. Beijing: Contemporary China Publishing House, 2014.
- [17] Højstrup J. Velocity spectra in the unstable planetary boundary layer[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1982, 39(10): 2239—2248.
- [18] Kelley N, Hand M, Larwood S, et al. The NREL large-scale turbine inflow and response experiment: Preliminary results[A]. ASME 2002 Wind Energy Symposium. American Society of Mechanical Engineers [C], Reno, Nevada, USA, 2002: 412—426.
- [19] Jonkman J. New developments for the NWTTC's fast aeroelastic HAWT simulator[J]. Aiaa Journal, 2004.
- [20] Lee S, Churchfield M, Moriarty P, et al. Atmospheric and wake turbulence impacts on wind turbine fatigue loading: preprint[J]. Boundary Layers, 2012, 135(3): 14—16.
- [21] 吴 攀, 李 春, 李志敏, 等. 风力机不同风况的动力学响应研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34

- (26): 4539—4545.
- [21] Wu Pan, Li Chun, Li Zhimin, et al. Research on dynamic characteristics simulation for wind turbine with different wind[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 334(26): 4539—4545.
- [22] 孙自强. 基于混沌分形理论的大型风电机械故障诊断研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [22] Sun Ziqiang. Study on mechanical fault diagnosis of Large-scale wind turbines based on chaos and fractal theory [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [23] 郝研. 分形维数特性分析及故障诊断分形方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [23] Hao Yan. Research on fractal dimension characteristics and methodology of fractal fault diagnosis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [24] Chang Tian-Pau, Ko Hong-Hsi, Liu Fengjiao. Fractal dimension of wind speed time series [J]. Applied Energy, 2012, 93(5): 742—749.

RESEARCH ON RELATIONSHIP BETWEEN DYNAMIC CHARACTERISTICS OF WIND TURBINE BLADES AND FRACTAL DIMENSION

Li Qianqian¹, Li Chun^{1,2}, Ye Kehua¹, Yang Yang¹, Ding Qinwei¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to explore the relationship between dynamic characteristics and the fractal dimension of wind turbine blades, the two kinds of wind field were generated based on Von Karman and NWTCUP turbulent wind spectrum models, the multi-body dynamics software FAST is used to simulate the dynamic response of wind turbine blade flapping and shimmy under different wind speed conditions, and the fractal dimension is solved by the box-counting dimension method. The generator output power was used to verify the feasibility using the fractal dimension to describe the dynamic characteristics of the wind turbine blade. The results show that the fractal dimension of the dynamic response of the waving time domain decreases with the increase of wind speed and the shimmy is opposite, As reaching rating power, the fractal dimension changes of waving and shimmy are smaller; Although the power of different turbulence wind spectrum models under the same wind speed is almost the same, but the corresponding fractal dimension is different, indicating that different turbulence wind spectrum models have their specific fractal dimension.

Keywords: wind turbine; blade; fractal dimension; flapwise; edgewise; power