

文章编号:0254-0096(2018)10-2918-05

300 W 风力机木芯叶片模态特性实验研究

韩巧丽¹, 乌云达来², 王英涛², 李汪灏²

(1. 内蒙古农业大学能源与交通工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 300 W 风力机叶片采用以樟松木为芯, 外铺3层玻璃纤维的方式构成。对此樟松进行顺纹方向压缩实验, 得到其破坏载荷 7.32 kN, 断裂强度 62 MPa; 对3层玻璃纤维进行拉伸实验, 得到其破坏载荷 1.3 kN, 断裂强度 4 MPa。将此叶片近似看作悬臂梁, 采用锤击法, 用加速度传感器和力传感器结合软件对信号进行采集和分析, 得到所需要的固有频率、振型及阻尼比。实验结果表明, 该铺层方式下木芯叶片的1阶固有频率为 23.30 Hz、1阶阻尼比为 5.29%, 并获得1阶挥舞振型, 通过与木芯叶片风轮的转动频率 20.01 Hz 相比较, 证明此木芯叶片发生共振几率较大, 可为后续优化研究提供依据。

关键词: 风力机; 模态分析; 复合材料铺层; 松木; 叶片

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引言

叶片在风力机中主要作用是将风能转化为机械能。叶片作为一个柔性体, 风载荷作用会引起叶片的振动, 为避免叶片发生共振, 这对叶片的强度和刚度有了更高的要求^[1]。对叶片刚度、强度影响较大的是叶片的铺层方式, 不同的铺层方式形成不同的固有频率、阻尼比和振型^[2,3]。因此, 叶片的铺层方式对叶片结构性能有较大影响^[4,5], 直接影响风力发电装置的性能、功率和成本。

针对叶片铺层方式对叶片模态特性产生的影响, 国内外已开展了相关研究。Aziz 等^[6]指出叶片材料、铺层和结构等是叶片弯曲耦合特性的重要影响因素。Jureczko 等^[7]研究了叶片固有频率受材料参数影响的变化趋势。廖猜猜等^[8]研究以主梁帽的铺层厚度及位置为优化设计变量, 以得到最大1阶挥舞频率。上述研究均说明叶片结构类型、材料参数以及铺层方式会对模态特性产生影响。因此, 本文以樟松木为芯, 外包玻璃纤维的叶片为研究对象, 对其进行实验模态分析, 得到较精确的模态参数, 利用此铺层方式下固有频率与旋转频率相比较, 既可对木芯叶片的结构类型和铺

层起到验证的作用, 又可为后续木芯叶片铺层优化^[9]提供依据。

1 理论基础

模态分析^[10]是把输入信号和响应信号进行识别, 得到固有频率、阻尼比和振型, 而模态实验就是通过对结构的实验数据进行处理和分析, 求得其“模态参数”。

进行实验时, 叶片上的激励点上的 F_j , 响应点上的 X_i 和任意 2 个点之间的脉冲响应函数 h_{ij} 的关系如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & h_{n2} & \dots & h_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ F_j \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

而频响函数 FRF 是所测物体的响应信号和激励信号之比, 即 $h_{ij} = \frac{X_i}{F_j}$ 。

复频响应函数 $h(w)$:

$$h(w) = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_i \phi_i^T}{K_{pi} - \omega^2 M_{pi} + i\omega C_{pi}} \quad (2)$$

收稿日期: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(61563042)

通信作者: 韩巧丽(1976—), 女, 博士、副教授, 主要从事风力发电技术方面的研究。nmgtynxh@hotmail.com

式中, M_p 、 C_p 、 K_p ——经过解耦变换之后的主质量矩阵、主阻尼矩阵和主刚度矩阵; ϕ_i ——第 i 个振型向量^[11]。复频响应函数 $h(w)$ 的实部和虚部就独立包含了系统的模态参数, 而叶片铺层的厚度会对主质量矩阵 M_p 产生影响, 叶片铺层的角度、顺序会对主刚度矩阵 K_p 产生影响^[12], 质量和刚度的变化进而会影响叶片的固有频率、阻尼比和振型, 当叶片的固有频率与其转动频率重合时会产生共振, 为避免共振, 叶片铺层方式的选择就很重要。

2 实验模态分析系统

2.1 实验对象

300 W 风力机所用叶片是以樟松木为芯, 外包玻璃纤维, 其中玻璃纤维共包 3 层, 内部缎纹玻璃纤维 2 层, 外部平纹玻璃纤维 1 层^[13]。对木芯叶片外部 3 层玻璃纤维进行显微硬度测试, 通过 HX-1000 TM 显微硬度计得出其显微硬度 $HD=13$, 并对木芯叶片的玻璃纤维厚度从 0.5~0.9 mm 过渡部分进行拉伸实验, 通过 SDJF-30KN 电子式万能实验机得到其破坏载荷为 1.3 kN, 断裂强度为 4 MPa。对樟松木进行顺纹方向压缩实验, 得到其破坏载荷为 7.32 kN, 断裂强度为 62 MPa。风轮直径长度为 2.30 m, 风力机发电机额定转速为 400 r/min, 叶片设计的截面共 17 个, 截面的序号从木芯叶片的根部开始, 从中选取 7 个截面作为测试截面, 如表 1 所示。

表 1 叶片测试截面参数

Table 1 Blade test section parameters

截面	编号	叶根距离/mm
SN3	1	90
SN5	2	230
SN6	3	300
SN9	4	500
SN12	5	700
SN15	6	900
SN17	7	1000

将相应测点布置在所选取的 7 个截面上, 每个截面上选取 3 个点作为测点, 分别在木芯叶片两端轮廓、1/3 几何弦长处。图 1 显示了木芯叶片的几何外形, 21 个激励点的分布。实验过程中根部由台

钳固定, 为充分激励起木芯叶片的模态, 响应点选在木芯叶片的第 21 号点处。

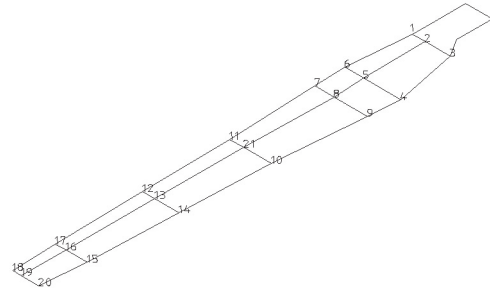


图 1 叶片形状与测点分布

Fig. 1 Blade shape and distribution of measuring point

2.2 实验内容

通过夹具固定木芯叶片, 使其模拟为正常工作状态, 故将整个木芯叶片近似悬臂梁的形式。采用锤击法, 并采用单点响应, 多点激励的测试方法, 用加速度传感器和力传感器对信号进行收集, 通过软件对所得信号进行分析处理, 得到所需要的固有频率、振型以及阻尼比。

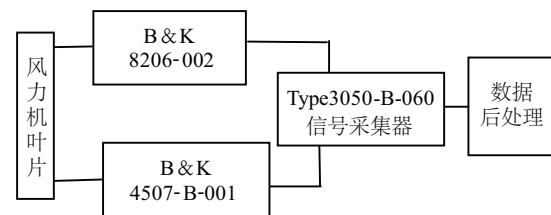


图 2 叶片模态实验系统框图

Fig. 2 Block diagram of blade modal experiment system

在实验中, 为保证所测数据的准确性, 要注意以下问题。首先, 木芯叶片通过台钳固定, 迎风面向上放置, 让其表现工作状态。其次, 力锤的敲击力度要合适, 且要避免发生连击。因为实验中单点响应, 多点激励的方式进行信号的输入与输出, 所以在实验中需对木芯叶片进行多次的敲击, 每次敲击时都要注意保证敲击方向垂直 XY 轴, 使其受力方向在 Z 轴上, 同时需避免激励点和响应点都在节点位置上。

在得到测试信号并对其处理时, 采用 B & K 公司的 PULSE Reflex 系统, 在数据进行处理后, 检查频响函数时候存在明显的共振峰, 且峰值处的相干函数值读数在 0.9~1.0 之间^[14], 检查数据确认合理之后, 通过分析得其各阶模态参数。

3 实验结果与分析

实验得到在锤击下响应点与激励点的数据,在 PULSE Reflex 系统下分析得出木芯叶片的模态特性。通过分析在较为关心的 20~400 Hz^[15]部分得到 4 阶模态,其各阶模态参数于表 2 中列出,图 3 分别显示木芯叶片各阶模态的振型图。

表 2 叶片各阶模态参数

Table 2 Blade modal parameters

模态	固有频率/Hz	阻尼比/%
1	23.30	5.29
2	90.72	2.30
3	197.92	1.42
4	370.42	1.37

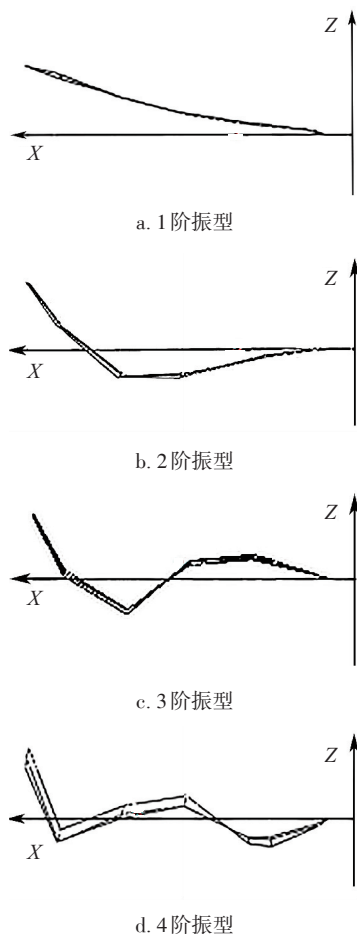


图 3 叶片振型

Fig. 3 Blade vibration mode

从实验结果中可看出,在低频阶段此木芯叶片主要的振动形式是挥舞振动。因为 300 W 风力机

的运行环境主要是受低阶激振力,高阶成分对木芯叶片的影响很小,对 300 W 风力机木芯叶片的主要影响是低频阶段的挥舞振动,且固有频率与风轮的转动频率接近,有较大几率发生共振。

4 结 论

通过 B & K 公司的设备与系统,对 300 W 风力机木芯叶片进行实验模态分析,得出以下结论:

1) 所用叶片以樟松木为芯,外铺 3 层玻璃纤维,其中内部 2 层缎纹玻璃纤维,外部 1 层平纹玻璃纤维。通过 HX-1000TM 显微硬度仪得出,所铺的 3 层玻璃纤维显微硬度 $HD=13$,通过 SDJF-30KN 电子式万能实验机进行拉伸实验得破坏载荷为 1.3 kN,断裂强度为 4 MPa,对樟松木进行顺纹方向压缩实验,得到其破坏载荷为 7.32 kN,断裂强度为 62 MPa。

2) 实验模态分析所采用设备出自 B & K 公司,从振型图可知,挥舞振动是对风力机产生影响的主要振动形式,且从各阶振型图可看出最大位移均发生在木芯叶片的叶尖部分。

3) 该 300 W 叶片铺层方式的木芯叶片保证了叶片对刚度的要求,可适当缓解振动引起的叶片变形,但木芯叶片的 1 阶固有频率与转动频率接近,发生共振的几率较大,为后续实验研究提供改进依据。

[参考文献]

- [1] 刘有亮. 大型复合材料风力机叶片铺层及模态分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- [1] Liu Youliang. Lamination and modal analysis of large composite wind turbine blades [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [2] 陈文朴, 李 春, 阳 君, 等. 对比分析不同材料及铺层对叶片力学性能的影响[J]. 能源工程, 2015, (5): 15—19.
- [2] Chen Wenpu, Li Chun, Yang Jun, et al. Comparative analysis of different materials and layer on the mechanical behavior of blades [J]. Energy Engineering, 2015, (5): 15—19.
- [3] 马静敏, 任勇生. 风力机叶片的自由振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(17): 105—110.
- [3] Ma Jingmin, Ren Yongsheng. Free vibration characteristics of wind turbine blades [J]. Journal of

- Vibration and Shock, 2015, 34(17): 105—110.
- [4] Kang Byong- Yun, Han Jeong- Young, Hong Cheol- Hyun, et al. Dynamic analysis of hybrid wind power composite blades according to stacking properties method [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2012, 13 (7): 1161—1166.
- [5] 孙鹏文, 邢哲健, 王慧敏, 等. 复合纤维风力机叶片结构铺层优化设计研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36 (6): 1410—1417.
- [5] Sun Pengwen, Xing Zhejian, Wang Huimin, et al. Study on optimization design of wind turbine blade with composite fiber lamination structure [J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2015, 36(6): 1410—1417.
- [6] Aziz S B, Gale J, Ebrahimpour A, et al. Passive control of a wind turbine blade using composite materials [D]. Idaho: Idaho State University, 2001.
- [7] Jureczko M, Pawlak M, Mezyk A. Optimisation of wind turbine blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2): 463—471.
- [8] 廖猜猜, 赵晓路, 王建礼, 等. 基于风力机叶片铺层的频率优化设计[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(8): 1311—1314.
- [8] Liao Caicai, Zhao Xiaolu, Wang Jianli, et al. Optimization of design of the frequency based on wind turbine blade layers[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(8): 1311—1314.
- [9] 杨俊, 武美萍, 王称心. 风力机叶片结构分析与铺层优化[J]. 新技术新工艺, 2015, (3): 75—78.
- [9] Yang Jun, Wu Meiping, Wang Chengxin. Structural analysis and layer optimization of wind turbine blades [J]. New Technology & New Process, 2015, (3): 75—78.
- [10] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [10] Fu Zhifang, Hua Hongxing. Theory and application of modal analysis[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000.
- [11] 黄小华, 李德源. 风力机叶片动力特性测试分析方法研究[J]. 长江大学学报: 自然版-理工卷, 2007, 4 (2): 92—94.
- [11] Huang Xiaohua, Li Deyuan. Study on dynamic characteristics of wind turbine blades [J]. Journal of Yangtze University: Nat Sei Edit-Sci & Eng, 2007, 4(2): 92—94.
- [12] 李仁年, 刘有亮. 大型风力机叶片铺层及模态分析[J]. 太阳能学报, 2015, 36(1): 49—53.
- [12] Li Rennian, Liu Youliang. Ply and modal analysis for the large wind turbine blade [J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2015, 36(1): 49—53.
- [13] 冯消冰, 黄海, 王伟. 大型风机复合材料叶片铺层优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013, (3): 3—7.
- [13] Feng Xiaobing, Huang Hai, Wang Wei. Ply optimization of composite materials for the blade in wind turbine [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013, (3): 3—7.
- [14] 蒋维. 大型风力机叶片模态测试与分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(11): 95—99.
- [14] Jiang Wei. Modal experiment and analysis of large- scale wind turbine blade [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(11): 95—99.
- [15] 叶枝全, 马昊旻, 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.
- [15] Ye Zhiquan, Ma Haomin, Ding Kang, et al. Experimental model analysis of the rotor blade of the horizontal axis wind turbine [J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2001, 22(4): 473—476.

EXPERIMENTAL STUDY ON MODAL ANALYSIS OF 300 W WIND TURBINE BLADE WITH INTERNAL WOOD

Han Qiaoli¹, Wuyun Dalai², Wang Yingtao², Li Wanghao²

(1. College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The core of 300 W wind turbine blades is made of camphor pine, and is laid out 3 layers of glass fiber mode. Through compression test, it is obtained that breaking power is 7.32 kN and fracture strength is 62 MPa. By tensile experiments for 3 layers of glass fiber, it is obtained that the breaking power is 1.3 kN, and fracture strength is 4 MPa. The blade is approximately considered as a cantilever beam, using hammering method and the signal is collected and analyzed by using an acceleration sensor and a force sensor in combination with software and the required natural frequency, vibration mode and damping ratio are obtained. The experimental results show that the first order natural frequency of the laminated wood core blade is 23.30 Hz, the first order damping ratio is 5.29%, through comparing with the rotation frequency of 20.01 Hz of wood core blade, it is proved that the wood core blade has larger probability of resonance, which can provide a basis for subsequent research.

Keywords: wind turbines; modal analysis; laminated composites; pine wood; blades