

# 预应力装配式叶片连接单元状态监测

许斌<sup>1,2</sup>, 王宇婧<sup>1</sup>, 韩继龙<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**提出了一种基于压电陶瓷激励与传感技术的预应力装配式风电叶片连接单元的状态监测方法。通过逐级施加螺栓预拉力对连接单元进行安装, 再对连接段施加轴心拉力直至试件破坏, 将压电陶瓷片粘贴在连接单元两侧分别作为驱动端和接收端, 对受力全过程进行监测。比较不同激励信号下各阶段测量信号基于小波包分析的健康指标的变化, 发现在连接界面脱开时信号出现明显衰减。该方法可实现装配式风力发电机叶片连接段状态的有效监测。

**关键词:**装配式风力发电机叶片; 预应力连接; 压电传感器; 无损检测; 应力波

中图分类号: TN384 文献标识码: A

## Condition Monitoring for a Prefabricated Sectional Wind Turbine Blade With Prestressed Connection Specimen Based on PZT

XU Bin<sup>1, 2</sup>, WANG Yujing<sup>1</sup>, HAN Jilong<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Lab. of Civil Engineering Structure Damage Detection, Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In this study, a condition monitoring approach for the prefabricated sectional wind turbine blade with prestressed connection based on PZT is proposed and validated experimentally. The PZT actuator and sensor are mounted on the surface of the connection member to monitor the condition of the connection member which is firstly fabricated with prestressed bolts and then applied with incremental axial tensile force. A health index defined with the wavelet packet analysis on the PZT measurement is employed to monitor the connection condition. The results show that the index is related to the connection condition and changes obvious due to the separation of the connection under axial force. The proposed method is effective in condition monitoring for the prefabricated sectional wind turbine blade with prestressed connection.

**Key words:** prefabricated wind turbine blade; prestressed connection; piezoelectric lead zirconate titanate (PZT) sensors; non-destructive detection; stress wave

### 0 引言

面对日益严重的能源短缺和环境污染问题, 对可再生清洁能源风能的开发受到极大重视。为增加捕风能力, 风电机组叶片不断加长<sup>[1-2]</sup>。国外 Vestas 公司生产的 3.0 MW 风电机组叶片达到了 55 m<sup>[3]</sup>。在我国南方山区风场的建设中, 整体式叶片的运输不仅困难且风险较大, 其运输道路的建设也带来额外投资的增长。基于高强预应力螺栓连接的装配式风电叶片通过将长叶片分段制造并现场组装<sup>[4-5]</sup>, 可有效解决运输难的问题, 并降低对道路建设的要求和投资。研究开发针对预应力装配式叶片连接状态的监测方法对保障风机叶片运行安全具有重要意

义, 国外对装配式风电叶片的状态监测研究较少<sup>[6]</sup>。

近年来, 基于压电陶瓷的结构健康监测技术应用日益广泛<sup>[7-12]</sup>, 利用压电陶瓷反应迅速, 响应频带宽, 兼备驱动器和传感器的功能等优势, 本文提出一种基于波动法的预应力装配式风机叶片连接段状态检测方法。对预应力高强螺栓连接的叶片连接单元进行预应力施加及拉伸过程的状态监测。

### 1 基于应力波测量的主动监测原理

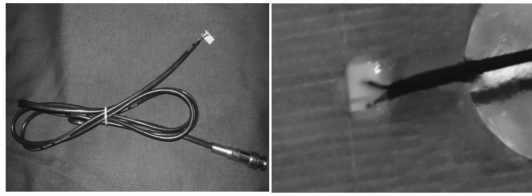
#### 1.1 粘贴式压电传感器

粘贴式压电传感器可直接粘贴在被测结构的表面, 通过屏蔽导线与尼尔-康塞曼卡口接头 (BNC) 相连, 传感器及其在结构上的粘帖状况如图 1 所示。

收稿日期: 2016-04-06

基金项目: 湖南省科技计划重点基金资助项目 (2013FJ2010); 国际科技合作与交流专项基金资助项目 (2014DFE70230)

作者简介: 许斌 (1972-), 男, 湖北孝感人, 教授, 博士, 主要从事大型复杂结构的损伤监测、结构分析工作。E-mail: binxu@hqu.edu.cn.



(a) 粘贴式压电传感器 (b) 压电传感器的粘贴

图1 传感器的布置

### 1.2 基于应力波传播的状态监测原理

本文提出的基于应力波传播测量的装配式风力发电机分段叶片连接单元状态监测的基本原理为：利用预先粘贴于分段叶片连接段两侧的压电片分别作为驱动端和接收端。用交流电信号激励驱动端使其产生应力波在叶片内部传播，应力波穿过分段截面的接触界面传播抵达接收端，输出电信号。两连接段界面的接触状况会影响测量信号的变化。通过分析接收信号变化进行连接段不同状态的监测。基本原理如图2所示。

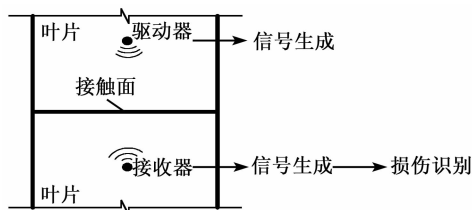


图2 基于波动法的结构监测原理

### 1.3 时域信号的小波包分析

小波包变换是在正交小波分析的基础上发展而来。其优势是能自适应地提高对不同频段信号的分辨率，且能对信号的高频部分进行相同层数的分解。某传感器  $m$  的原始采样信号  $S_m$  经过  $N$  层小波包分解后得到  $2^N$  个等带宽的不同频带的子信号  $s_{m,i}$ ，即

$$S_m = s_{m,1} + \dots + s_{m,i} + \dots + s_{m,2^{N-1}} + s_{m,2^N} \quad (1)$$

小波包分解后所得末层信号中各频带子信号能量向量为<sup>[13]</sup>

$$\mathbf{E}_m = [e_{m,1}, \dots, e_{m,i}, \dots, e_{m,2^{N-1}}, e_{m,2^N}] \quad (2)$$

式中  $e_{m,i}$  为末层频带  $i$  子信号的能量，定义为

$$e_{m,i} = \sum_{k=1}^n |x_{m,i,k}|^2 \quad (3)$$

式中： $n$  为原始信号采样点数； $x_{m,i,k}$  为  $S_m$  分解重构后末层频带  $i$  信号中的  $k$  数信号。

信号  $S_m$  的小波包能量定义为经小波包分解重构后所得能量为

$$WPE_m = \sum_{i=1}^{2^N} e_{m,i} \quad (4)$$

## 2 连接段单元试样状态监测试验

### 2.1 玻璃钢连接段单元比例模型

以某装配式风力发电机叶片为原型设计了本文连接段比例模型试件<sup>[5]</sup>。试件由以螺栓连接的两段玻璃钢组成，如图3所示。两连接段尺寸分别为  $430 \text{ mm} \times 115 \text{ mm} \times 37 \text{ mm}$  和  $330 \text{ mm} \times 115 \text{ mm} \times 37 \text{ mm}$ ，材料为高强三轴玻璃钢。螺栓则采用 10.9 级高强螺栓，螺杆直径为  $\varnothing 22 \text{ mm}$ ，长度为  $286 \text{ mm}$ 。圆连接件为直径  $\varnothing 70 \text{ mm}$ 、高  $70 \text{ mm}$  的圆柱体。半圆连接件为直径  $\varnothing 70 \text{ mm}$ 、高  $70 \text{ mm}$  的半圆柱体。

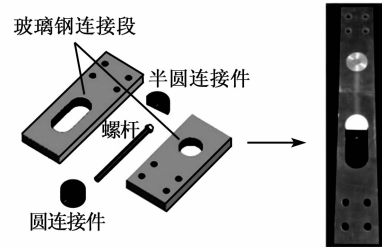


图3 T形螺栓连接件组装图

### 2.2 压电陶瓷片的布置

本试验压电陶瓷片外贴于叶片连接段表面，其布置图如图4所示，编号为  $P_1 \sim P_4$ 。在试验中施加每一级荷载后，依次采用以某单一压电陶瓷片作为信号发射端，而其他3个PZT作为信号接收端的一发多收模式进行监测。图4中， $P_1$  作为驱动端， $P_2 \sim P_4$  作为传感端。

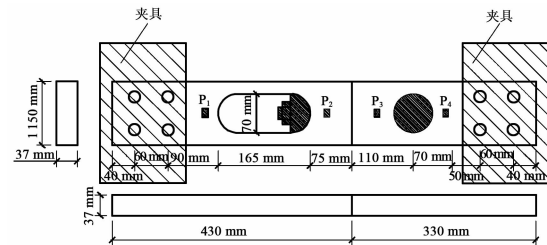


图4 外贴式压电陶瓷片布置图

### 2.3 试件加载制度

试验首先从玻璃钢连接段的装配开始，运用扭矩扳手给高强螺栓施加预拉力  $120 \text{ kN}$ 。根据《钢结构高强度螺栓连接设计、施工及验收规程》中的规定，确定高强螺栓的施工扭矩。

$$T = k \times P \times d =$$

$$0.15 \times 120 \times 0.02 =$$

$$360 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

(5)

式中  $k=0.15$  为高强度螺栓连接副的扭矩系数平均值； $P$  为高强度螺栓施工预拉力； $d$  为高强度螺栓螺杆直径。

本试验选用量程为  $700 \text{ N} \cdot \text{m}$  的手动扭矩扳手

对螺栓逐级施加 0-60 kN-120 kN 的预拉力, 每级预拉力完成后进行一轮信号采集。随后使用夹具对试件进行固定, 并在试件连接段两侧位置布一对百分表用来测量分段截面间相对位移。使用 50 t 电液伺服作动器及控制系统对连接件两端施加轴向拉力, 如图 5 所示。作动器采用位移控制加载, 加载过程的荷载-位移曲线如图 6 所示。在加载级为 2.5 mm、5 mm、5.5 mm、6 mm、6.5 mm、7 mm、7.5 mm、10 mm 时, 暂停作动器对连接件进行信号采集以及百分表读数。

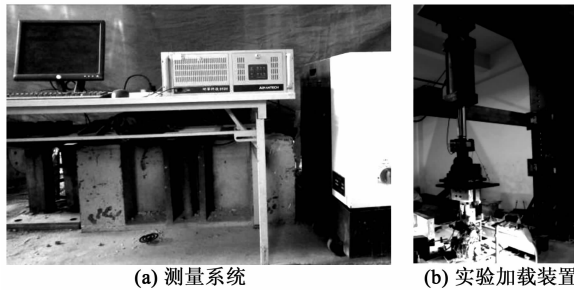


图 5 实验测量系统和电液伺服加载系统

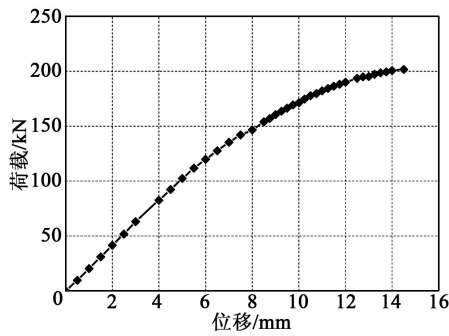


图 6 荷载-位移曲线

### 2.4 试验监测系统

试验仪器采用 AFG3000 系列任意波形/函数发生器生成激励信号, 动态数据采集系统采集 PZT 传感器输出信号, 采样频率为 102 400 Hz。激励信号是幅值为 6 V 的正弦扫频电压信号, 扫频范围分别取 1~20 kHz、5~20 kHz, 扫频时间为 5.12 s。

### 3 叶片连接段连接状态监测试验结果

#### 3.1 基于信号小波包能量的结果分析

图 7 为  $P_2$  在扫频范围 1~20 kHz 的信号激励下发射, 由  $P_3$  接收到的带通滤波器滤波后的时域信号波形图。对比可发现信号差异, 即当螺栓预紧力为 120 kN 时,  $P_3$  接收信号幅值比未施加螺栓预紧力及作动器位移为 7.5 mm 时大, 说明信号受分段截面处接触程度的影响。选取 Daubechies 族函数中的 ‘db9’ 对测得的离散时域信号进行 3 层小波包分解并计算相应能量值。

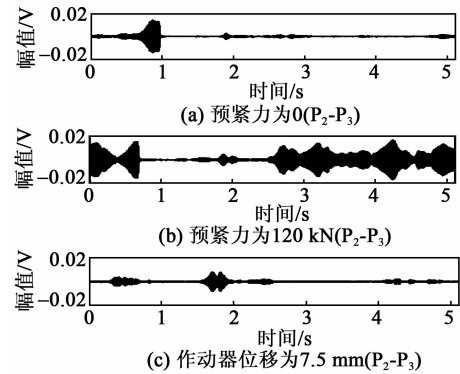


图 7 压电接收器接收的信号时域图

定义基于小波包能量的某一传感器的连接状态指标为

$$H_m = \frac{WPE_m}{WPE_0} \quad (6)$$

式中:  $WPE_m$  为某一 PZT 传感器  $m$  在某一工况下接收信号的小波包能量值;  $WPE_0$  为该传感器驱动器在试验最开始连接段接触状态而螺栓预紧力为 0 工况下接收信号的小波包能量值。本文工况包括预紧力为 0、60 kN、120 kN 和作动器位移为 2.5 mm、5 mm、5.5 mm、6 mm、6.5 mm、7 mm、7.5 mm、10 mm 共 11 种工况。通过对比分析以上指标随着荷载的变化来判断截面连接状况。

为了将连接件施加预应力的阶段和施加轴向拉力的阶段相结合, 以进行更直观的说明, 采用螺杆所承受的总拉力为横坐标作图表示状态指标的变化。以  $P_2$ - $P_3$  (1~20 kHz) 曲线 (见图 8) 为例说明, 随着螺栓预紧力从 0 加到 120 kN, 连接件连接截面处接触加强, 指标呈现出线性增大趋势, 当预紧力达到 120 kN 时指标值最大。随着作动器逐级加载, 连接截面处接触程度降低, 指标随之逐级减小。当作动器加载达到 7.5 mm 时, 百分表读数显示连接截面已脱开, 此时指标数值降至 1 左右。监测结果与实验监测结果吻合, 准确判断连接件失效。将  $P_3$  作为激励器, 而  $P_2$  作为传感器, 得到相近的结果。此外,

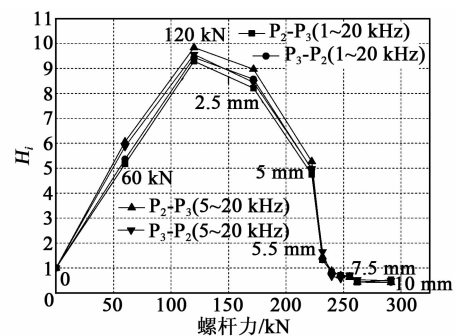


图 8  $P_2$ - $P_3$  小波包能量归一化指标变化图

将5~20 kHz频段的结果均表示在图8中可发现,将驱动器和传感器互换使用在两个不同的扫频范围内,监测结果接近。所提出的方法可对连接段状态进行有效监测。

图9为在 $P_1$ - $P_3$ 、 $P_2$ - $P_4$ 的发射-接收组合方案下指标计算结果与受力的关系曲线图。由图可看出与图8所示曲线类似。考虑到驱动端和传感端的间距的增大将会导致信号显著衰减,小波包能量值也大幅减小。

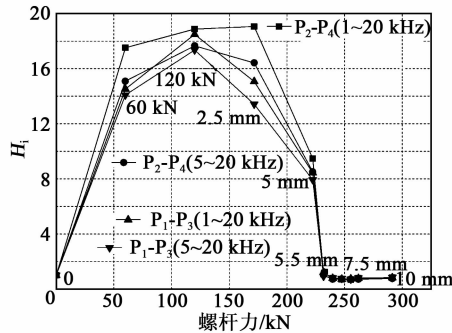


图9  $P_1$ - $P_3$ 、 $P_2$ - $P_4$ 小波包能量归一化指标变化图

#### 4 结论

本文提出了一种基于外贴压电陶瓷片应力波传播与测量的预应力装配式风机叶片连接段的连接状态监测新方法。通过分析不同受力工况下测量信号的小波包能量值的差异,提出一种连接状态指标,实现了叶片连接段连接状态监测。本试验研究得出的主要结论如下:

1) 基于小波包能量的连接状态指标值与通过螺栓预紧力连接的风机叶片接触程度明显相关。在叶片装配阶段,指标伴随螺栓预紧力增大,而在轴向拉力荷载作用下,则出现逐级衰减。

2) 基于小波包能量的连接状态指标值能准确提示预应力连接单元是否失效。当接收端压电陶瓷片对应指标值接近或者小于1时则表明分段处截面已脱开。

3) 比较不同编号下监测组合的小波包能量的连接状态指标值发现,连接段接触面两侧的压电陶瓷片作为驱动端和接收端时对接状态的监测能力最佳,且信号发射端和接收端互换时,结果接近。且在两个不同频段下的指标计算结果也接近。本试验中所选择的扫频范围以及对应的损伤指标值范围可供工程实际应用参考。

#### 参考文献:

[1] YU X, QU H. Wind power in China-opportunity goes with challenge[J]. Renewable and Sustainable Energy

Reviews, 2010, 14(8):2232-2237.

- [2] FRIED L, SAWYER S, SHUKLA S, et al. Global wind report-annual market update [J]. Global Wind Energy Council, 2012, 10(2):30-33.
- [3] HOPWOOD D. Generation innovation [J]. Renewable Energy Focus, 2011, 12(2):36-41.
- [4] HAHN F, KENSCHKE C W, PAYNTER R J H, et al. Design, fatigue test and NDE of a sectional wind turbine rotor blade [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002, 15(3):267-277.
- [5] 许斌, 韩继龙. 预应力装配式风机叶片连接段结构模拟分析[J]. 工程力学, 2016, 33(2):209-215.
- XU B, HAN J L. Numerical simulation on a joint segment of a prestressed prefabricated sectional wind turbine blade model [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2):209-215.
- [6] RAIŠUTIS R, JASIŪNIENĖ E, ŠLITERIS R, et al. The review of non-destructive testing techniques suitable for inspection of the wind turbine blades[J]. Ultragarasas, 2008, 63(1):26-30.
- [7] 赵晓燕. 基于压电陶瓷的结构健康监测和损伤识别诊断[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- [8] 孙威. 利用压电陶瓷的智能混凝土结构健康监测技术[D]. 大连:大连理工大学, 2009.
- [9] XU B, ZHANG T, SONG G B, et al. Active interface debonding detection of a concrete-filled steel tube with piezoelectric technologies using wavelet packet analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(1):7-17.
- [10] 许斌, 陈梦琦, 王海东, 等. 基于压电阻抗的钢管砼柱横隔板剥离缺陷检测[J]. 压电与声光, 2015, 37(1):172-175.
- XU B, CHEN M Q, WANG H D. Interface debonding detection of diaphragm for large scale irregular CFST column based on electro mechanical impedance of PZT [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(1):172-175.
- [11] 许斌, 蔡萍, 周宇, 等. 基于嵌入压电技术的钢管核心混凝土缺陷检测[J]. 压电与声光, 2015, 37(3):489-492.
- XU B, CAI P, ZHOU Y, et al. Experimental study on defect detection of concrete core of concrete filled steel tubular with embedded PZT[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(3):489-492.
- [12] 蔡萍, 许斌, 周宇. 基于外贴压电材料的钢管混凝土界面缺陷检测[J]. 压电与声光, 2015, 37(2):337-341.
- CAI P, XU B, ZHOU Y. Experimental study on interface debonding detection of concrete filled steel tubular using surface mounted PZT [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(2):337-341.
- [13] SAMUEL P D, PINES D J. Classifying helicopter gearbox faults using a normalized energy metric[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(1):145-153.