

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412379

基于叶尖定时的风机叶片裂纹故障识别研究*

盛昌文¹, 姜永正¹, 黄磊², 曾立英², 苏邦伟²

(1. 湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室 湘潭 411201; 2. 湘潭市工矿电传动车辆
质量检验中心 湘潭 411201)

摘要: 风机叶片作为风电机组的关键部件,其裂纹故障尤为常见。裂纹的存在会导致叶片或机组出现损坏。为此,基于叶尖定时原理和分析方法,提出一种风机叶片裂纹故障的识别方法。首先,依据叶尖定时原理,分析叶片在载荷作用下裂纹对叶尖偏移的影响,建立叶尖偏移与叶尖偏移时间之间的数学模型。其次,通过仿真分析叶片在不同状态下叶尖偏移程度,结合不同工况参数与叶尖偏移时间之间的数学模型,识别裂纹特征信号。最后,利用风机模拟试验台实测叶尖信号,结果表明本文所提的识别方法对裂纹的特征信号的成功提取达到了92%以上,并且能够实时完成裂纹信号的提取和分析,说明此方法能够实现裂纹故障实时识别。

关键词: 风机叶片; 叶尖定时; 叶尖偏移; 裂纹故障; 裂纹识别

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480.6040

Research on fan blade crack fault identification based on tip timing

Sheng Changwen, Jiang Yongzheng, Huang Lei, Zeng Liying, Su Bangwei

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Xiangtan Industrial and Mining Electric Drive Vehicle Quality Inspection Center, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Fan blade is a key component of wind turbine, and its crack fault is particularly common. The presence of cracks can cause damage to the blade or unit. Therefore, based on the tip timing principle and analysis method, a method of fan blade crack fault identification is proposed. Firstly, according to the principle of tip timing, the influence of blade crack on tip offset under load is analyzed, and the mathematical model between tip offset and tip offset time is established. Secondly, through the simulation analysis of blade tip offset degree in different states, combined with the mathematical model between different working condition parameters and tip offset time, the crack characteristic signal is identified. Finally, the results show that the recognition method proposed in this paper can successfully extract more than 92% of the characteristic signal of the crack, and can complete the extraction and analysis of the crack signal in real time, indicating that this method can realize the real-time recognition of the crack fault.

Keywords: fan blade; tip timing; tip offset; crack fault; crack identification

0 引言

随着风能产业的快速发展,风机装机量普遍上升,但叶片故障概率也显著提高,研究数据表明,叶片裂纹故障已经占到大型风机叶轮机械故障的65%以上。叶片故障不仅易引发整个机组的报废,造成较大的经济

损失,而且风力机通常位于环境偏远交通不便地区,裂纹故障大大增加了风机的后期运维成本。因此,开展风机叶片裂纹故障的识别方法研究,尽早识别裂纹,对于叶片早期的维护,以及风机机组的安全稳定运行具有重要的工程意义。

近年来,我国风机叶片叶根断裂事故频发^[1],风电机组的稳定运行和安全维护受到了各国研究人员的共同关

收稿日期:2024-01-11 Received Date: 2024-01-11

* 基金项目:湖南省自然科学基金(2023JJ60548)项目资助

注,对此投入了大量精力进行风机叶片裂纹检测、诊断研究。近年来更是涌现了不少新的检测方法,如图像识别方法、振动分析法、声发射检测法、热成像检测法等^[2]。陈晨^[3]使用无人机安装的高清相机和激光测距仪,以此定位叶片表面裂纹,制定损坏分级标准,实现了叶片损坏问题的分级处理。乌建中等^[4]通过对风机叶片分别在健康和损伤状态下的自由衰减振动信号的时频特征等进行分析,LIU等^[5]设计了一种通过超声原理自动发送和获取超声波来检测风机叶根裂纹缺陷,周勃等^[6]针对风机叶片蒙皮裂纹难以识别的问题,提出一种对非平稳、非线性特性的卷积混合 AE 信号特征提取的方法。赵娟等^[7]利用深度学习建立风机叶片声学特征模型,分析叶片不同状态的频谱差异,提取声信号识别风机叶片状态。Galleguillos等^[8]通过实验证明,通过检测缺陷引起的温度的变化即可分析出风力机叶片内部缺陷,并在停机状态下使用配备红外摄像机的无人机检测到叶片的裂纹和分层。湖南大学 Yu等^[9]使用无人机定时拍摄叶片各部位图像,通过计算缩放参数缝合成全景红外图,借助热成像技术检测叶片内部缺陷。

然而上述风机叶片裂纹检测方法中图像识别法检测叶片成本高,精度受制于无人机稳定性、摄像头及图像识别算法的影响。超声振动检测法需要将传感器安装于叶片裂纹附近并随叶片旋转,对偏远和高处叶片维护较为困难。声检测法将声检测传感器贴于塔筒或固定部件上,进行识别叶片在不同状态下的声信号,但由于信号受轴承等部件干扰,衰减严重,适应性差。热成像检测法改善图像识别法对于缺陷定量难、内部缺陷识别率低等方面的问题,且需结合机器学习进行故障识别。但现存数据集不完善,机器学习对热成像的特征缺乏针对性等缺点,且对图像故障识别算法的要求较高^[10]。因此,急需一种适应复杂环境更为便捷的裂纹检测方法,是叶片裂纹检测领域研究的重点和挑战。

目前,随着非接触式测试技术的发展,叶尖定时技术成为航空发动机叶片监测的有效手段,通过将传感器安装于机匣上监测叶片实际到达时间,并与理论时间比较,结合叶片转速计算偏转位移,从而判断叶片状态^[11-12]。迄今,国内外很多科研机构对叶尖定时技术开展了大量的研究工作,并逐渐产品化。国内西安交通大学秦春燕等^[13]提出基于正则的 L_p 范稀疏叶尖定时振动参数辨识模型,实现了非接触式位移到应变的转换。2011年山东科技大学通风机技术研究所针对矿用通风机的实际工况,提出一种基于叶尖定时的带宽测量法,并通过实验验证^[14-15]。

在国外对此也做了很多研究,南非比勒陀利亚大学的 Diamond等^[16]针对瞬态过程中叶尖定时信号理想角

度与实际角度之间的差异,提出了一种状态空间模型方法并进行了验证。印度燃气涡轮研究所使用电涡流和光纤叶尖定时传感器,通过监测涡轮转子叶片固有频率衰减实现裂纹识别^[17]。

本文基于前人研究,创新性的提出了一种基于叶片变形反演叶片裂纹故障的识别方法,该方法具有以下创新性:1)通过理论分析建立了不同状态叶片在不同转速过程中由于叶片刚度变化引起的叶尖偏移模型,并基于识别原理建立叶尖时间间隔与叶片转速时间等参量之间的数学模型。2)通过有限元仿真验证了在不同转速不同风速下的叶片偏移量,并使用理论推导所建立的时间关系数学模型求解出不同状态叶片在不同风速不同转速下的时间间隔偏移量。3)搭建了风机模拟试验台,验证了该方法的可行性。该叶片裂纹故障检测的新方法,简单易行,通过简易的传感器设备,识别原理清晰明了,且识别稳定,实现了风机在运行过程中的裂纹故障的实时识别。

本文所提出的一种将叶片变形量转化为时间参量来反演叶片状态的识别方法,本方法采用简易的光学传感器或者脉冲传感器,采集叶片扫过传感器时的时间信号,计算时间间隔,从而分析出叶片故障,有效降低了对于检测设备和算法的要求。在理论分析的基础上建立了叶片不同状态下的时间参量模型,并通过有限元仿真验证,计算了不同状态下叶片的气动载荷,以及在不同风速下叶片的变形量,使仿真结果更加可靠,并使用理论推导出的时间参量模型,求解出不同状态下叶片在不同转速过程中的时间间隔值。搭建了试验台,验证了该方法的可行性,该方法将为风机叶片的裂纹的故障识别铺平道路,对解决风机叶片裂纹故障的实时识别具有重要意义。

1 识别原理和方法

叶片叶尖定时原理如图1所示,将叶尖、叶端定时传感器安装于风机塔筒上,将正对叶片根部的传感器作为标定传感器,其余传感器作为检测传感器,当叶片旋转经过塔筒时,标定传感器和其余检测传感器感知到叶片经过时所产生的脉冲信号,提取出叶片经过传感器的时间信号,通过比较标定传感器和检测传感器值所提取的时间信号,产生一个时间差 ΔT_{cb} ($T_{cb} = T_c - T_b$),叶片出现不同程度的故障导致叶片相对于旋转方向会出现向前或向后偏移,其时间差与叶片完好时扫过标定传感器与检测传感器的时间差存在差异。因此分析叶片在不同的状态下的时间差信号序列,即可识别到叶片的故障信息。

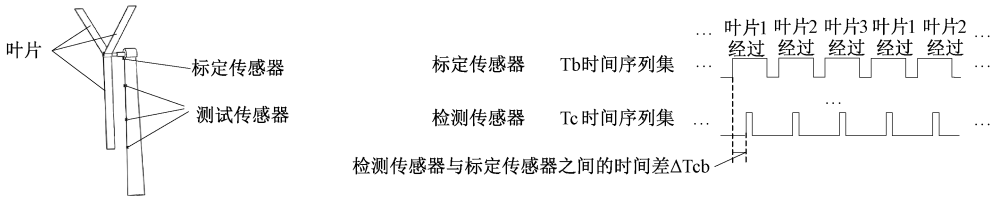


图 1 叶片叶尖定时原理
Fig. 1 Principle of blade tip timing

2 叶端、叶尖定时数学模型

2.1 叶片基本载荷理论分析

叶片在旋转过程中由于叶片所承受空气动力,离心力和重力等载荷的作用下将导致叶片出现不同程度的挠曲变化,将叶片等效为如图 2 所示悬臂梁模型,以叶根为坐标原点建立坐标系,沿着叶片弦展方向为 x 轴方向, y 轴与叶片旋转轴平行, z 轴沿着叶片的沿展方向, R 方向作为叶片的偏移标定方向,在叶片的旋转平面内且与 Z 轴垂直。基于识别原理本文重点分析叶片在 R 方向上的变形。

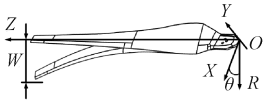


图 2 叶片变形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of blade deformation

1) 气动力载荷分析。风机叶片在旋转过程中所受载荷主要来自于空气动力载荷,气动力是在空气与叶片作相对运动的过程中,空气施加在叶片表面上的作用力。假设叶片处于稳定流速的空气流场中,且流场方向垂直于叶片的旋转平面叶片所受的气动力和气动力矩都是由叶片表面的压强分布和剪切应力引起。对此上表面压强记为 p_u ,下表面压强记为 p_d ,由气体的压力系数定义知,在气流速度为 V_∞ ,密度为 ρ_∞ 的稳定流速的空气流场中,叶片上下表面的压强,可以根据上下表面的压力系数定义:

$$\begin{aligned} p_u &= p_\infty + \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 \cdot C_{pu} \\ p_d &= p_\infty + \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 \cdot C_{pd} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: p_u 、 p_d 、 C_{pu} 、 C_{pd} 分别为叶片上、下表面的压强和压力系数,不同叶片的压力系数可以通过实验获得, p_∞ 为无穷远处大气的压强。由于叶片外形为不规则变化,根据元素理论,沿着叶片在 z_0 处截取一小段长为 dz 的微元叶片 ds ,如图 3 所示,由于此微元面积较小,此微元上叶片

的上下表面压力近似认为均布,由式(1),从而可以很容易求出在这段微元叶片上的气动力载荷 dY 为:

$$dY = \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 \cdot (C_{pd} - C_{pu}) ds \quad (2)$$

其中: $ds = C(z_0) \cdot dz$, $C(z_0)$ 表示在叶片延展 Z 方向上 z_0 处叶片弦长 C 。

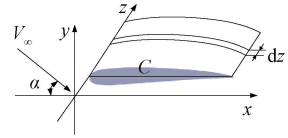


图 3 叶片微元示意图

Fig. 3 Schematic diagram of blade micro-element

2) 重力载荷。叶片在旋转的过程中,除过气动载荷的影响,还存在叶片重力的影响,重力是一直竖直向下的力,叶片在旋转过程中,叶片的重力载荷与叶片的旋转角成正弦关系,取叶片 z 处截面单位段分析,叶片在单位微元上所受重力大小为:

$$dG = \rho_z A(z) \cdot 1 \cdot g \sin \beta \quad (3)$$

其中, ρ_z 表示叶片在 z 截面处的密度, $A(z)$ 表示叶片在 z 坐标截面处的面积, β 表示叶片的旋转方位角。

3) 载荷合成。由以上对叶片在微元上所受气动载荷式(2)和重力载荷式(3)分析,取沿 z 轴坐标为 z 处微元处的重力和气动力载荷合成,并转化为合成载荷所引起的弯矩。

$$df = (dY + dG) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \int_0^z z \cdot f \cdot dz = M_1(z) & (0 < z < l_0) \\ \int_{l_0}^z z \cdot f \cdot dz = M_2(z) & (l_0 < z < L) \end{cases} \quad (5)$$

2.2 变形分析及故障识别

将叶片简化为一端固定的悬臂梁,如图 4 所示,叶片长度为 L 。

由以上对于叶片载荷的计算,根据材料力学中关于变截面梁挠度的近似微分方程。

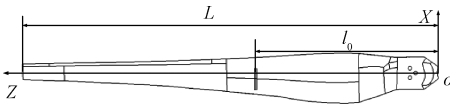


图4 含裂纹叶片简图

Fig. 4 Simple diagram of a blade with cracks

$$\frac{d^2 M(z)}{dz^2} = \frac{d^2}{dz^2} \left(EI \frac{d^2 w}{dz^2} \right) = f(z) \quad (6)$$

其中, EI 为截面抗弯刚度, w 为变形挠度, $M(z)$ 为叶片表面压力所转化的转矩, $f(z)$ 表示叶片表面的气动载荷和重力载荷。如图4所示, 在距离叶根 l_0 处存在深度为 d_0 的裂纹, 由于裂纹的存在使得叶片局部扭转柔度的增加, 因此将裂纹部位等效为无质量扭转弹簧, 在该截面上, 叶片厚度为 $h(z)$, 其叶片的扭转刚度 K_z 可以表示为:

$$K_z(z, d) = \frac{EI}{h(z)} \cdot \frac{0.9[(d_0/h(z)) - 1]^2}{(d_0/h(z))[2 - (d_0/h(z))]} \quad (7)$$

其中, 裂纹梁的等效抗弯刚度 k_ξ 为:

$$\frac{1}{k_\xi} = \frac{1}{EI} + \frac{1}{K_z} \quad (8)$$

由上述推导, 当叶片为完好叶片时叶片的抗弯刚度 $k_\xi = EI$, 当叶片存某一裂纹时, 裂纹变截面梁的微分平衡方程为:

$$\begin{cases} \frac{d^2 M}{dz^2} = \frac{d^2}{dz^2} \left(k_\xi \cdot \frac{d^2 w}{dz^2} \right) = f(z) \\ w_1|_{z=0} = 0, w_1'|_{z=0} = 0, w_2'|_{z=l_0} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

将上述条件式(4)~(8)带入平衡方程式(9), 求积分即可得任意位置含裂纹梁挠度与裂纹位置和风速以及裂纹深度之间的函数关系表达式:

$$\begin{cases} \theta_1(d, V_\infty, z) = w', & (0 < z < l_0) \\ w_{11}(d, V_\infty, z) = w_1 + \tan\theta_1 \cdot (L - l_0), & (0 < z < l_0) \\ w_{12}(d, V_\infty, z) = w_2, & (l_0 < z < L) \end{cases} \quad (10)$$

由式(10), 得到叶片在 R 方向上的总挠度计算公式:

$$\Delta w(d, V_\infty, z) = w_{11} + w_{12} = w_1 + \tan\theta_1 \cdot (L - l_0) + w_2 \quad (11)$$

以叶根 O 为参考点, 当 z 取叶片末端坐标 r 时, 可以的到叶片尖端在 y 方向相对于参考点的最大偏移量, 由式(11), 当 $z = r$ 时, $\Delta w(d, V_\infty, r)$ 。叶尖位置在 R 方向上为主要变形方向, 叶片的偏转角为 θ , 即叶尖相对于叶根 O 点在 R 方向的偏移量为 Δw_R ,

$$\Delta w_R = \Delta w(d, V_\infty, r) \cdot \cos\theta \quad (12)$$

在此基础上, 由式(12), 当叶片的转速 n 已知, 根据叶尖速度和叶尖偏移量计算出偏移时间:

$$\Delta T(d, V_\infty, z, n) = \Delta w_R / 2\pi r n \quad (13)$$

由此建立叶片在完整状态下叶片转速和叶片不同位置处与叶尖偏移时间的变化标定数据库, 以此作为识别叶片裂纹故障的标定数据库, 实时所检测到的叶尖数据与此数据库对比即可实现对叶片裂纹故障的实时识别。

3 叶片有限元仿真分析

为了分析在叶片在旋转过程中完好叶片和存在裂纹叶片之间的挠曲差异, 建立叶片长度为 0.89 m 的三维叶片模型, 叶片采用尼龙和玻璃纤维复合材料。将三维模型导入仿真软件中。设立圆形空气域, 采用自适应网格划分, 网格模型如图5所示。在 *fluent* 模块中, 分别计算风速在 4~6 m/s 下, 四种不同风速下叶片表面所受的压力情况。

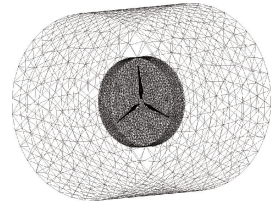


图5 流固耦合流体网格模型

Fig. 5 Fluid-solid coupling fluid mesh model

不同风速下叶片的压力云图如图6所示。

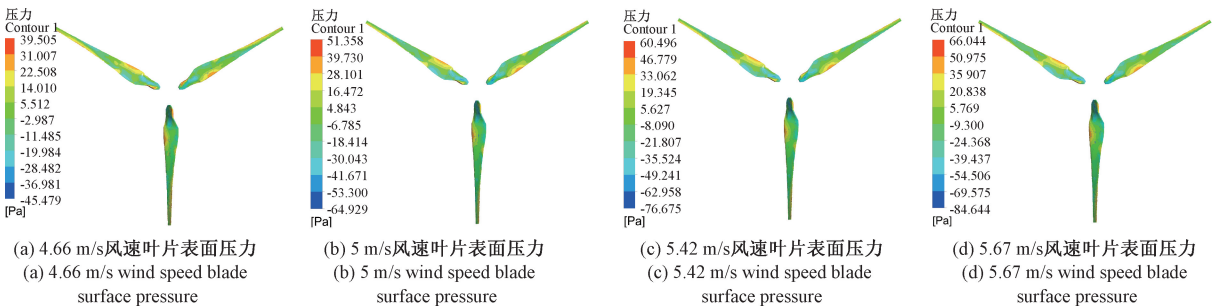


图6 不同风速状态下的压力云图

Fig. 6 Pressure cloud diagram under different wind speed conditions

根据图 6 在不同风速下, 叶片表面中部区域承受最大压力, 且随着风速的逐渐增大叶片转速增大, 同时叶片表面的极限压力也逐渐增大。这与实际情况相符合。

为分析叶片在相同风速、转速下, 完好叶片与含裂纹叶片不同的叶尖挠曲变化。分别对完整叶片和含裂纹叶片进行静力仿真分析, 建立长度为 0.89 m 的三维叶片仿真模型, 并在叶片表面绘制裂纹, 本文着重研究裂纹对叶片状态的影响, 并实现准确识别, 因此分别在叶片尖端、中部和根部 3 个不同位置区域设置裂纹, 如图 7 所示, 以分析不同位置裂纹对叶片变形的影响程度。

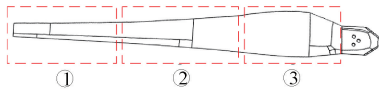


图 7 仿真裂纹区域示意图

Fig. 7 Schematic diagram of simulated crack region

设置叶片网格尺寸为 2 mm, 完好叶片和含裂纹叶片

网格模型如图 8 所示。并将叶片调和密度设置为 $\rho = 7.86 \text{ g/cm}^3$, 泊松比设置为 $\nu = 0.25$, 弹性模量设置为 $E = 206 \text{ GPa}$ 。

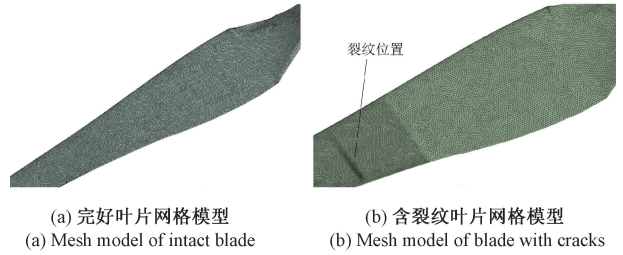


图 8 完好叶片和含裂纹叶片网格模型

Fig. 8 Mesh model of intact blade and blade with cracks

将上述所求, 在 5 m/s 风速下, 叶片表面压力作为载荷导入静力分析模块。叶片旋转轴方向为设置为 Z 方向。在稳定流场中对完好叶片和含裂纹叶片分别进行仿真, 叶片转速设为 60 rpm。分析裂纹在叶片尖端、中部和根部时的叶尖挠曲变化, 结果如图 9 所示。

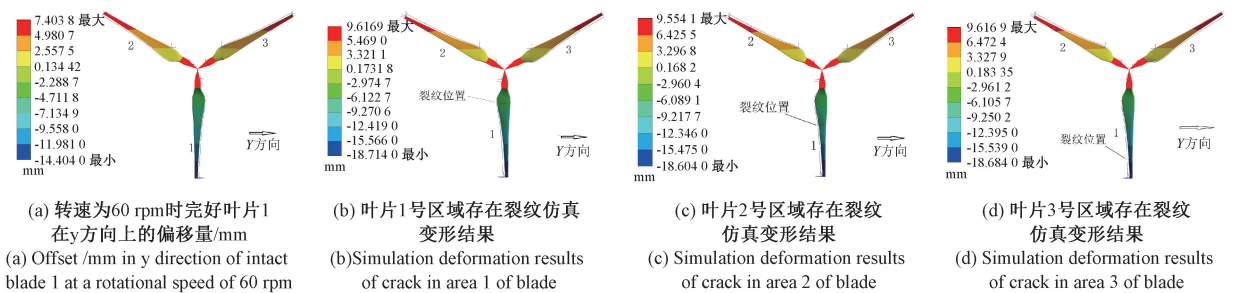


图 9 不同位置区域存在裂纹时叶片仿真变形结果云图

Fig. 9 Cloud image of blade simulation deformation results when cracks exist in different locations

在稳定流场和转速下, 仿真结果显示: 叶片 1 完好时在 y 方向叶尖偏移 15.302 mm; 叶片 1 在 1 号区域存在裂纹、2 号区域存在裂纹和 3 号区域裂纹时叶尖偏移量分别为: 18.714、18.604 和 18.684 mm, 叶尖偏移量均大于 18 mm, 含裂纹叶片叶尖偏移量明显大于完好叶片, 且裂纹位置不同时叶尖偏移量也不同。可利用叶尖定时将偏移转化为时间信号反演并判断裂纹是否存在及位置。

由上述不同裂纹位置均会使得叶尖出现不同程度的偏移, 研究数据表明, 在实际的工程中, 叶片裂纹多发生于根部和中部区域。由图 6 中叶片在不同风速下的压力云图可知, 叶片中部即叶片 2 号区域为承受风力载荷最大的区域, 因此本文主要以 2 号区域存在裂纹时为例, 分析叶片状态, 且在后续实验中以此参数在叶片上制作裂纹, 以便实验结果和理论模型的有效对比。将分析模型设置为和上述一致的网格和材料特性, 并分别将不同风

速下的压力作为载荷导入 2 号区域存在裂纹的仿真模型, 仿真求解得到叶片裂纹位置区域不变时, 叶片在不同工况写运行时的叶尖的挠曲偏移量, 仿真结果如图 10 所示。

由图 10 知, 当叶片产生裂纹时, 叶尖偏移量明显增大, 且随着风速和转速的增大, 偏移量进一步增大, 由以上仿真结果可得到叶尖随不同风速不同转速在 y 方向上的挠曲变形量和叶片根部某一点的挠曲变化。基于检测原理, 将相应风速下所求偏移量 w 及其对应转速 n 带入式(13), 即可求解出不同转速下的时间间隔量如图 11(a)所示。由此在空间位置上同一叶片扫过时, 测量叶尖和叶根处时间时间间隔, 也可以反映出叶片挠曲变形变化情况。因此通过感应叶片的空间位置在时间上的变化规律, 反演出叶片裂纹故障状态, 在不同速度下通过不同的叶尖偏移量所转化的时间间隔变化如图 11(b)所示。

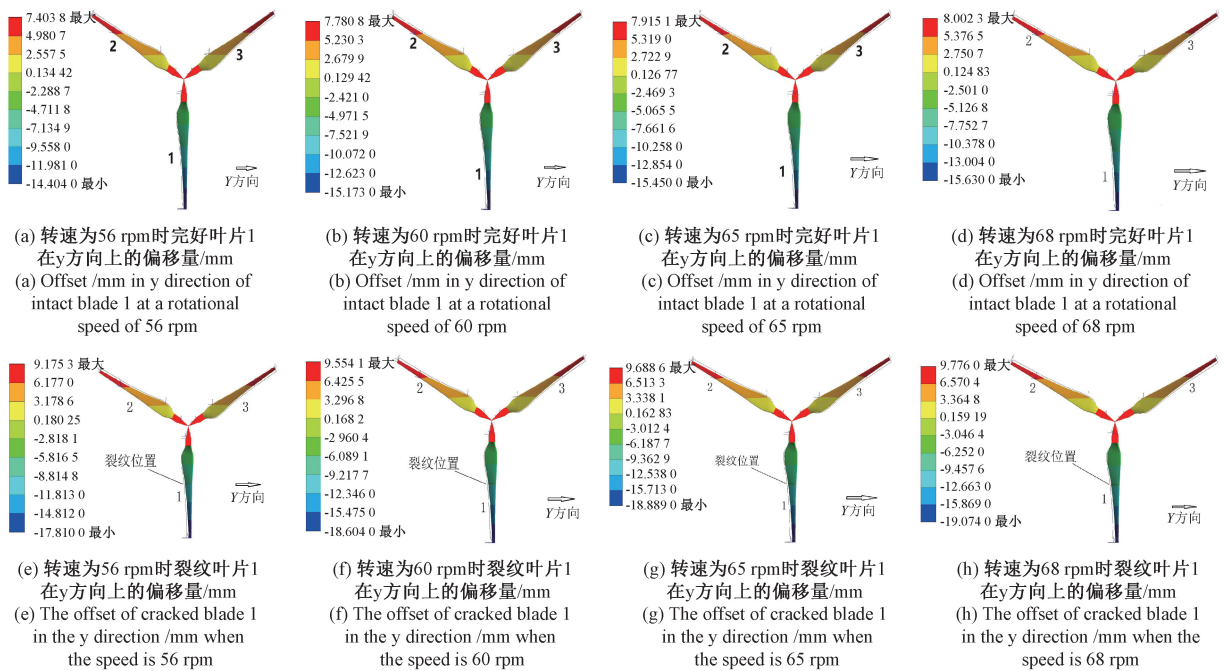


图10 叶片仿真变形结果云图

Fig. 10 Cloud diagram of blade simulation deformation results

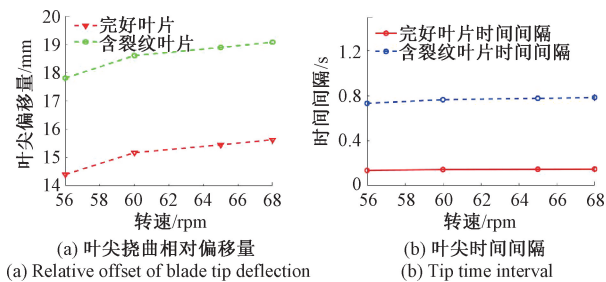


图11 不同状态叶片相对偏移量及其时间间隔

Fig. 11 Relative offsets of blades in different states and their time intervals

由图11知,对于完好叶片和含裂纹叶片,在风速、转速以及叶片大小一致时,完好叶片叶尖挠曲变化随转速不同存在差异。当叶片存在裂纹时,叶尖挠曲变化差异变大,且随着风速的增大差异越明显。在速度一定的情况下,当叶片出现裂纹时,由于旋转软化,叶尖偏移量发生变化,随着速度的增加,偏移量逐渐变大,叶尖时间间隔逐渐增大。

4 实验验证

4.1 实验方案

由上所述,为了进一步验证有限元分析结果的准确性,搭建叶片长度为0.89 m小型的风机模型试验台经行实验,如图12所示。通过伺服电机控制叶片的转速,模

拟叶片的旋转。在叶片在旋转过程中,采用两个激光传感器,分别正对叶片尖端和根部,其根部传感器作为标定传感器,当同一叶片分别经过根部标定传感器和尖端传感器时,传感器所监测到的时间信号会发生突变,提取传感器所测数据在发生突变的时间点,对叶尖传感器和叶根标定传感器所提取的时间点做时间差,当叶片出现裂纹故障时,时间差变大,即可以实时识别叶片的状态。

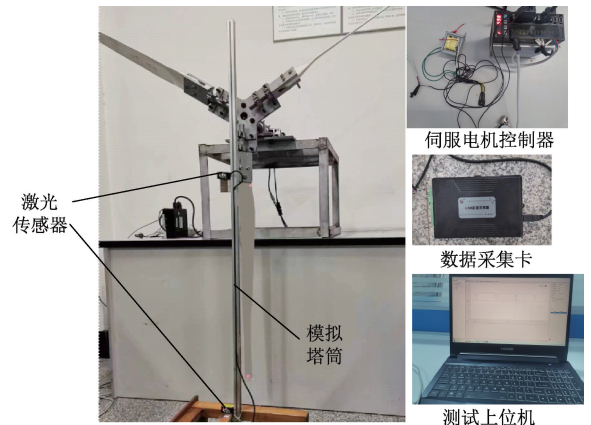


图12 简易风机实验台

Fig. 12 Simple fan experimental bench

4.2 实验和识别过程

在实验过程中,首先在风机模拟试验台正前方用一根标杆模拟塔筒用于安装激光传感器,激光传感器响应时间为1.5 ms,模拟塔筒距离叶片旋转平面40 cm,将两

个传感器分别正对着叶尖和叶根安装在标杆上,将正对叶尖的传感器记为测试传感器,正对叶根的传感器记为标定传感器,采用伺服电机控制叶片的转速,叶片的转速按照图 10 中叶片转速设置,并在叶片上制作裂纹,如图 13 所示。

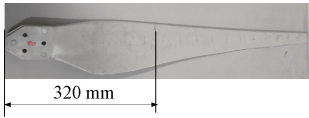


图 13 叶片裂纹位置

Fig. 13 Blade crack location

在叶片旋转过程中,当某一叶片到达叶根标定传感器和叶尖测试传感器上方,两传感器实时检测到叶片到达传感器上方的时间点,采用数据采集卡将测试传感器和标定传感器所测数据传至上位机,因为本模型有三个叶片,而叶片在旋转过程中所检测信号为连续的时间信号,因此使用 Matlab 编写程序,采用滑动窗口算法,对于所测数据进行比较遍历,提取各叶片经过传感器的时间点,以叶片到达标定传感器的时间点为基准,与测试传感器所测数据对应做差,即可得到对该叶片叶根传感器与叶尖传感器所测得的时间间隔,时间间隔变化随叶片的转动规律如图 14 所示。进一步提取每个叶片到达两传感器时的时间间隔,从上述所述的整个时间间隔信号数据中等值循环取样,将对应于 3 个叶片的时间间隔分别提取出来,并编号为 1、2、3 号叶片。

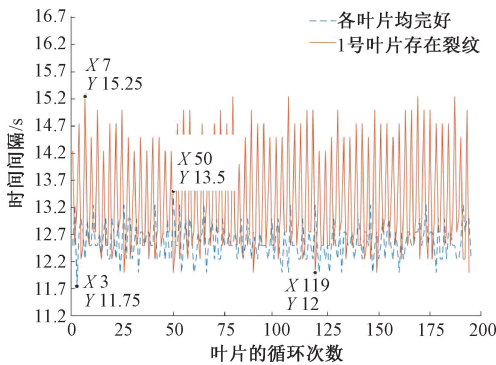


图 14 某一叶片存在裂纹与各叶片均完好时各叶片之间的时间间隔

Fig. 14 The time interval between when a certain blade has cracks and when all blades are intact

在此基础上,为分析各叶片的状态,将上述整个时间信号,按照叶片个数进行分解,此叶轮为 3 个叶片,将一号叶片作为含裂纹叶片,对此分别分解出 3 个叶片分别经过传感器 1、2 之间的时间间隔,如图 15 所示。

对于完整叶片和含裂纹缺陷叶片,从传感器所检测的数据中所提取的时间间隔,含裂纹的叶片所测时间间

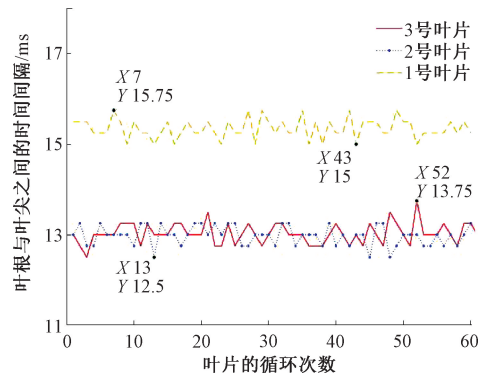


图 15 某叶片存在裂纹时各叶片叶尖与叶根之间的时间间隔
Fig. 15 The time interval between the tip and root of each blade when a certain blade has cracks

隔明显高于完好叶片,为进一步的实现故障叶片的识别,在此基础上,对比分析不同速度下所有叶片的时间间隔和单个叶片的时间间隔,为便于在后期对于叶片故障的识别更加精确,在传感器所测时间的基础上,通过理论计算出叶片在不同速度下的变形量,此时偏移量为在同速度下多次偏移后的平均值,随速度的变化规律如图 16(a) 所示,将以上所计算参量带入理论公式 13,即可求得在不同的转速下,不同状态叶片之间的叶尖时间间隔如图 16(b) 所示。

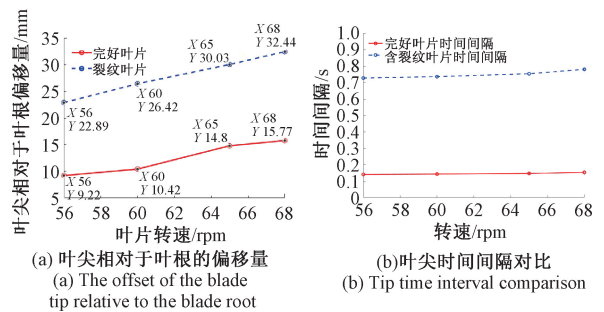


图 16 不同状态叶片偏移量及其时间间隔

Fig. 1 Blade offset and its time interval in different states

4.3 实验结果分析与讨论

由图 14 可知,叶片转速不变的情况下,在各叶片均为完好叶片时,所得时间间隔存在波动,这种不平稳的时间间隔波动主要是由于实验台稳定性以及检测过程中实验设备所导致的误差,其最小时间间隔为 11.75 ms,最大时间间隔为 13.5 ms,时间间隔波动相对较小。当某一叶片存在裂纹时,两传感器所检测到的时间间隔同样由于误差而存在波动,此时最小时间间隔为 12 ms,最大时间间隔为 15.25 ms,时间间隔波动相比完好叶片明显增大。如图 15 可知,对于完好的 2、3 号叶片,随着实验过程的进行,每次叶片到达两个传感器时的时间间隔也存在微

小的波动,但其最小的时间间隔为 12.5 ms,最大时间仅为 13.75 ms,而对存在裂纹的 1 号叶片,其最小的时间间隔为 15 ms,最大的时间间隔为 15.75 ms,明显大于完好叶片。由图 16(a)可知,在叶片完好时,叶片的平均偏移量随着速度的增大逐渐增大,在叶片转速 56r/min 时,叶尖平均偏移量为 9.22 mm,随着叶片转速的增大,叶片转速 68 r/min 时,叶尖平均偏移量达到 15.77 mm。当叶片存在裂纹时,叶片转速为 56r/min 时,叶尖平均偏移量就达到 22.89 mm,远大于叶片完好时的偏移量,并且随着叶片转速的增大,当叶片转速 68 r/min 时,叶尖平均偏移量达到 32.44 mm,由以上数据可知,当叶片存在裂纹时,叶尖偏移量明显大于完好叶片。由图 16(b)可知,完好叶片两传感器之间的时间间隔在 0.16 s 以内,而含裂纹叶片的时间间隔均大于 0.7 s,存在明显的区别,由于本实验所用叶片长度为 0.89 m,两传感器之间的距离较小,两传感器所检测完好叶片和含裂纹叶片之间的差异较小,但足以在叶片旋转过程中识别到明显差异。因此,通过对叶片叶尖和叶根处所测时间信号可以实现对裂纹故障叶片的准确识别。

5 结 论

为实现叶片裂纹故障的实时识别,提出了一种基于叶尖、叶端定时的叶片裂纹故障识别方法,主要结论如下:

1) 基于叶尖定时原理,通过对叶片载荷的理论分析推导,建立叶片在不同工况等参数下,识别叶片状态的理论模型。

2) 建立完好叶片和含裂纹叶片的流固耦合有限元模型,通过对不同工况下不同状态叶片的载荷分析,结果表明,两种状态下叶片叶尖相对于叶根处的偏移量存在显著差异,并结合叶片状态识别的理论模型,实现识别方法合理性的验证。

3) 搭建风机模拟实验台,通过实验验证了在叶片出现裂纹故障时,叶片挠曲与完好叶片的差异,并且经过多次实验,验证了在不同的转速下,完好叶片与含裂纹叶片始终存在差异,并且可以通过时间关系实现准确识别。

本文所提的定时方法,通过使用非接触传感器可以实时检测到叶片到达传感器的时间,通过对所检测到的时间信号的处理,区分出故障叶片和完好叶片,能够实现对于叶片故障裂纹的在线准确识别。

参考文献

[1] 张亚楠,周勃,俞方艾,等. 含缺陷风电叶片复合材料的失稳状态识别和预测[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9):318-325.
ZHANG Y N, ZHOU B, YU F AI, et al. Recognition

and prediction of instability state of wind turbine blade composites with defects[J]. Acta Solar-Energy Sinica, 2021, 42(9):318-325.

- [2] HEO G, JEON J, SON B. Crack automatic detection of CCTV video of sewer inspection with low resolution[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(3):1219-1227.
- [3] 陈晨. 风电场风机叶片无人机巡检技术应用研究[J]. 风力发电, 2017(5):5.
CHEN CH. Research on application of UAV inspection technology for wind farm fan blades[J]. Wind Power Generation, 2017(5):5.
- [4] 乌建中,陶益. 基于短时傅里叶变换的风机叶片裂纹损伤检测[J]. 中国工程机械学报, 2014, 12(2):180-183.
WU J ZH, TAO Y. Crack damage detection of fan blades based on short-time Fourier transform[J]. Journal of Chinese Engineering Machinery, 2014, 12(2):180-183.
- [5] LIU X Q, WANG H Z, LONG G S, et al. Research on automatic positioning system of ultrasonic testing of wind turbine blade flaws[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 93(1):012074-012074.
- [6] 周勃,张士伟,陈长征,等. 风力机叶片多裂纹扩展声发射信号的特征识别[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1):110-117.
ZHOU B, ZH SH W, CHEN CH ZH, et al. Wind turbine blade crack propagation characteristics of acoustic emission signals more recognition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1):110-117.
- [7] 赵娟,陈斌,李永战,等. 复杂背景噪声下风机叶片裂纹故障声学特征提取方法[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(5):117-122.
ZHAO J, CHEN B, LI Y ZH, et al. Acoustic feature extraction method of fan blade crack fault under complex background noise[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(5):117-122.
- [8] GALLEGUILLOS C, ZORRILLA A, JIMENEZ A, et al. Thermographic non-destructive inspection of wind turbine blades using unmanned aerial systems[J]. Plastics Rubber and Composites, 2015, 44(3):98-103.
- [9] YU J, HE Y, ZHANG F, et al. An infrared image stitching method for wind turbine blade using UAV flight data and U-Net[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23:8727-8736.
- [10] 何赞泽,李响,王洪金,等. 基于可见光和热成像的风机叶片全周期无损检测综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(6):32-45.

- HE Y Z, LI X, WANG H J, et al. Review of full cycle nondestructive testing of fan blades based on visible light and thermal imaging[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(6): 32-45.
- [11] AO C, QIAO B, CHEN L, et al. Blade dynamic strain non-intrusive measurement using L1/2-norm regularization and transmissibility [J]. Measurement, 2022, 190: 110677. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110677.
- [12] 许敬晖, 乔百杰, 滕光蓉, 等. 基于压缩感知的叶端定时信号参数辨识方法[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 220-230.
- XU J H, QIAO B J, TENG G R, et al. Leaf tip timing signal parameter identification method based on compressed sensing [J]. Journal of Aeronautics, 2021, 42(5): 220-230.
- [13] 敖春燕, 乔百杰, 刘美茹, 等. 基于非接触式测量的旋转叶片动应变重构方法[J]. 航空动力学报, 2020, 35(3): 569-580.
- AO CH Y, QIAO B J, LIU M R, et al. Dynamic strain reconstruction method of rotating blades based on non-contact measurement [J]. Journal of Aerodynamics, 2020, 35(3): 569-580.
- [14] 张永建, 张振东, 房菲, 等. 轴流式通风机叶尖定时时间的测定方法[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(9): 84-87.
- ZHANG Y J, ZHANG ZH D, FANG F, et al. Determination method of blade tip timing time of axial flow fan [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(9): 84-87.
- [15] 张振东. 轴流式通风机叶片振动的非接触式测量[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- ZHANG ZH D. Non-contact measurement of blade vibration of axial flow fan [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [16] DIAMOND D H, HEYNS P S, OBERHOLSTER A J. Improved blade tip timing measurements during transient conditions using a state space model [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2019, 122: 555-579. DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.12.033.

- [17] GURU S S, SHYLAJA S, KUMAR S, et al. Pre-emptive rotor blade damage identification by blade tip Timing method [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power: Transactions of the ASME, 2014, 136(7): 072503-1-072503-4.

作者简介



盛昌文, 2018年于湖北汽车工业学院获得学士学位, 现于湖南科技大学攻读硕士学位, 主要研究方向为工业自动化控制及故障监测诊断研究。

E-mail: 2303812967@qq.com

Sheng Changwen received his B. Sc. degree from Hubei University of Automotive Industry in 2018. Now he is a M. Sc. candidate in Hunan University of Science and Technology. His research interests include industrial automation control and fault monitoring and diagnosis.



黄磊, 2011年于西南大学获得学士学位, 2023年于湘潭大学获得硕士学位, 现为湘潭市工矿电传动车辆质量检验中心机械实验室主任, 主要研究方向机械故障诊断与分析。

E-mail: 470876630@qq.com

Huang Lei received his B. Sc. degree from Southwest University in 2011 and his M. Sc. degree from Xiangtan University in 2023. Now he is the director of the Mechanical Laboratory of Xiangtan Industrial and Mining Electric Drive Vehicle Quality Inspection Center. His main research interests include mechanical equipment fault diagnosis and analysis.



姜永正 (通信作者), 2007年于长春大学获得学士学位, 2010年于中南大学获得硕士学位, 2016年于中南大学获得博士学位, 现为湖南科技大学副教授, 主要研究方向为机械设计及其故障诊断。

E-mail: jiangyz186@126.com

Jiang Yongzheng (Corresponding author), received his B. Sc. degree from Changchun University in 2007, M. Sc. degree from Central South University in 2010 and Ph. D. degree from Central South University in 2016. Now he is an associate professor at Hunan University of Science and Technology. His research interests include mechanical design and fault diagnosis.