

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306970

风机叶片内部缺陷日光激励动态热成像方法研究*

彭一誉¹ 何贇泽^{1,2} 虞俊锋¹ 孙高森¹ 李响¹ 王洪金¹ 周勃³ 王耀南¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082; 2. 湖南大学深圳研究院 深圳 518000;

3. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院 沈阳 110870)

摘要:针对在役风力发电机组叶片内部缺陷类型难以区分的问题,本文提出了基于自然日光激励的动态热成像检测理论与方法,并进行有限元仿真模拟与试件实验研析了自然日光激励下风机叶片不同内部缺陷的动态热成像规律。首先,建立风机叶片切片的有限元传热仿真模型,通过数值计算揭示脱粘、积水两类典型内部缺陷在日光激励热传导物理场下热特征的变化规律;其次,对叶片切片进行同质加工,并利用无人机搭载热成像载荷搭建了日光激励热成像检测平台;最后,在自然日光激励条件下进行全天不同时段下的日光激励热成像实验。仿真和实验结果表明,风机叶片内部脱粘、积水两类典型缺陷在日光激励下将导致表面温度场呈现不同的变化趋势,脱粘缺陷会导致风机叶片表面对应区域出现高温异常到低温异常的动态演化,积水则相反,上述规律将为在役风机叶片的智能运维提供新的方法论。

关键词: 风机叶片;内部缺陷;日光激励;动态热成像

中图分类号: TP391.4;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Study on the method of daylight-excited thermal imaging of internal defects in wind turbine blades

Peng Yiyu¹ He Yunze^{1,2} Yu Junfeng¹ Sun Gaosen¹ Li Xiang¹Wang Hongjin¹ Zhou Bo³ Wang Yaonan¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shenzhen Research Institute, Hunan University, Shenzhen 518000, China; 3. School of Architecture

and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In response to the challenging issue of distinguishing the types of internal defects of wind turbine blades in service, this paper proposes the theory and method of dynamic thermal imaging detection based on natural daylight excitation. Finite element simulation and experimental analyses are conducted to investigate the dynamic thermal imaging patterns of different internal defects of wind turbine blades under natural daylight excitation. Firstly, a finite element heat transfer simulation model of wind turbine blade slices is established, and the variation rule of thermal characteristics of two types of typical internal defects, namely, debonding and water, is revealed by numerical calculation under the daylight-excited heat conduction physical field. Secondly, blade slice is homogeneously processed, and a thermal imaging detection platform is constructed using unmanned aerial vehicles for daylight-induced thermal imaging. Finally, daylight-induced thermal imaging experiments are conducted during different times of day under natural daylight conditions. The simulation and experimental results indicate that the two types of typical defects of debonding and water inside the wind turbine blade will lead to different trends in the surface temperature field under daylight excitation, and debonding defects will lead to the dynamic evolution of high-temperature anomalies to low-temperature anomalies in the corresponding areas on the surface of the wind turbine blade, while water is the opposite, which will provide a new methodology for the intelligent operation and maintenance of in-service wind turbine blades.

收稿日期: 2023-10-17 Received Date: 2023-10-17

* 基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金海上风电联合基金项目(2022A1515240050)、湖南省科技创新领军人才项目(2023RC1039)、湖南省自然科学基金杰出青年基金项目(2022JJ10017)资助

Keywords: wind turbine blades; internal defects; daylight excitation; dynamic thermal imaging

0 引言

我国可开发利用的风能储量丰富^[1-2],陆海装机容量均已达到世界第一。近年来,风电机组损伤破坏事故时有发生^[3],且叶片损坏是最常见的事故类型^[4]。众多研究^[5-11]证明了热成像检测复合材料内部缺陷的可行性。对于在役风机叶片的热成像检测,目前已有一定程度的发展^[12-14],可与传统可见光检测结合应用^[15]、相互补充。Sheiati 等^[16]提出了一种基于红外热图像的检测模型,用于自动分割风机叶片图像的复杂动态背景;尹玉等^[17]提出一种基于红外热图像的风机叶片损伤识别、损伤定位和损伤大小计算的方法,对附有人工损伤的风机叶片热图像进行损伤特征提取与定位,最后通过几何光学透镜成像法计算损伤大小。但风机叶片内部缺陷种类复杂,包括脱粘、积水等,上述方法并未研究叶片不同缺陷类型与热成像特征之间的约束关系,无法确定内部缺陷的具体类型。因此研究风机叶片内部不同缺陷类型在日光激励下的热成像机理可为风机叶片缺陷检测提供理论支撑。

Worzewski 等^[18]在地面模拟了日光热成像对叶片进行检测的可行性,其研究表明表面污渍在日光热流量提升至 340 W/m^2 左右时十分明显,而在降温过程中污渍几乎不可见。王晨等^[19]在光照充足的室外条件下对损伤叶片进行自然激励,证明了日光激励热成像检测技术检测风机叶片损伤的方法在一定光照强度范围之内是可行的。康爽等^[20]提出一种基于主动式热成像与温度阈值特征的方法实现叶片典型缺陷识别并验证持续热激励理论在叶片探伤上的实用性,根据软件对温度数据进行分析处理并选出满足温度阈值的缺陷。目前国内外研究聚焦于实验室条件下已知缺陷的主动式热成像检测,但主动式激励设备难以应用在实际风机叶片的检测工作中,因此日光辐射成为了在役风机叶片红外检测的常见激励源,由于现有研究未能充分揭示日光作为激励源时风机叶片内部缺陷类型对表面温度场的影响规律,导致风机叶片内部缺陷难以区分。为此本文提出了基于自然日光激励的动态热成像理论与方法,并通过有限元仿真的数值计算与实际风机叶片的日光热成像实验进行了验证。

1 有限元传热仿真分析

为探究脱粘、积水缺陷对风机叶片表面温度场的影响规律,从而准确区分两类典型内部缺陷,本文使用

COMSOL6.1 软件建立风机叶片有限元传热仿真模型,本章将介绍物理场定义与边界条件设定,并对数值计算结果进行分析。

1.1 几何与物理场

本文对风机叶片的一段立方体切片进行图 1 所示几何建模:仅考虑风机叶片实体部分的核心材料玻璃纤维增强聚合物(GFRP),在 GFRP 材质的风机叶片立方体切片($1\ 000 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$)内部设置 6 个直径为 100 mm 、高度为 5 mm 圆柱形密闭实体域,圆柱域距表面的深度均匀分布在 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 之间。在圆柱域内填充空气或水进行两次仿真计算,从而实现脱粘缺陷与积水缺陷的辐射加热模拟。

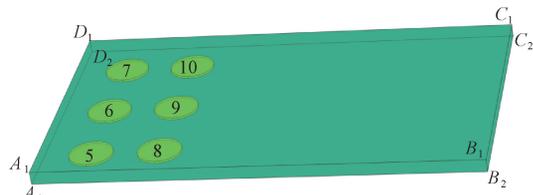


图 1 传热仿真几何模型

Fig. 1 Geometric modeling for heat transfer simulation

调用 COMSOL 内置材料库构造几何实体的空气域与液态水域,自定义 GFRP 材料构造风机叶片切片主体,其主要参数如表 1 所示。本文选用 COMSOL 传热模块的固体和流体传热接口作为主物理场,并耦合辐射接口的表面对表面辐射,使用边界热源对外部辐射源进行等效替代,辐射接口的域不透明度来自传热接口,仿真实验的环境参数(温度、气压、风速等)由 COMSOL 内置气象站(站:576870;坐标:28.109 5°N,112.788°E,120.0 m;2023 年 7 月 15 日)提供,完成上述物理场基本参数设置,下文将介绍各项边界条件。

表 1 核心材料参数列表

Table 1 List of core material parameters

参数类型	参数值
导热系数	$0.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
密度	$500 \text{ kg}/\text{m}^3$
表面发射率	0.8
恒压热容	$1\ 500 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
垂直壁高度	0.03 m
上下表面特征长度	0.1875 m

1.2 边界条件

在实际风电场的停机维护场景中,日光辐射主要被风机叶片的向阳面所接收,本文设定叶片有限元模型中的 $A_1B_1C_1D_1$ 面作为辐射接收面,并将侧面与背

阴面的日光辐射接收量置 0。下文将介绍各项边界条件。

为准确构造有限元仿真模型种的日光辐射函数,基于某地(28.5°N,112.5°E)典型夏季情形下的净短波辐射均值进行函数拟合,本文使用式(1)所示的二阶正弦和模型逼近,可视化结果如图 2 所示。

$$\begin{aligned}
 J(t) &= 585.3\sin(b_1t+c_1)+344.6\sin(b_2t+c_2) \\
 b_1 &= 12.078, c_1 = 0.003355, b_2 = 0.3946, c_2 = 2.995 \\
 R^2 &= 0.99919, RMSE = 6.9153, SSE = 430.39 \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中: t 的量纲为小时, $J(t)$ 为该地区 7 月净短波辐射均值的拟合函数, R^2 、 $RMSE$ 、 SSE 分别为该回归模型的决定系数、均方根误差、误差平方和。

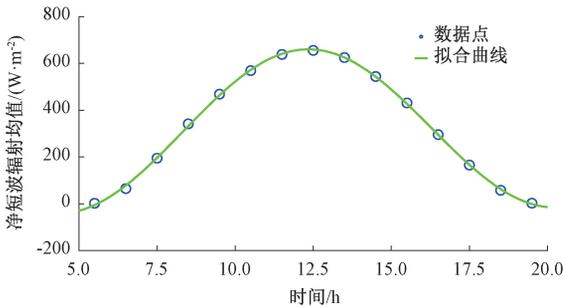


图 2 日均净短波辐射函数拟合

Fig. 2 Fitting of the average daily net shortwave radiation function

基于上述,使用热源边界等效代替 $A_1B_1C_1D_1$ 面的辐射边界,热源边界条件为:

$$\begin{aligned}
 Q_b &= 585.3\sin(\lambda b_1t + \lambda c_1) + 344.6\sin(\lambda b_2t + \lambda c_2) \\
 \lambda &= 0.000277778 \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中: Q_b 为广义边界热源, λ 为时间量纲修正因子,将 t 的量纲由 h 修正为 s 。

叶片外表面均参与和外部空气的自然对流,此外,因风导致的对流可等效替代为强制对流,外部各边界的对流满足基本约束:

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \quad (3)$$

式中: q_0 为向内热通量, T_{ext} 为外部环境温度, T 为边界温度, h 为对流传热系数。

考虑风导致的强制对流时,风速由共享属性的环境参数输入,各参与表面的强制对流换热系数 h_1 可由式(4)确认:

$$h_1 = \begin{cases} 2k \frac{0.3387Pr^{1/3}Re^{1/2}}{(1 + (0.0468/Pr)^{2/3})^{1/4}}, Re \leq 5 \times 10^5 \\ 2kPr^{1/3}(0.037Re^{4/5} - 871), Re > 5 \times 10^5 \end{cases} \quad (4)$$

式中: Pr 为外部空气普朗特数, Re 为外部空气雷诺数。

面 $A_1B_1C_1D_1$ 与面 $A_2B_2C_2D_2$ 参与的自然对流可等效

为水平平板的上下表面自然对流模型,其对流传热系数 h_2 由式(5)确定:

$$h_2 = \begin{cases} \frac{k}{L} 0.54Ra^{1/4}, T > T_{ext} \text{ 且 } 10^4 \leq Ra < 10^7 \\ \frac{k}{L} 0.15Ra^{1/4}, T > T_{ext} \text{ 且 } 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \\ \frac{k}{L} 0.27Ra^{1/4}, T \leq T_{ext} \text{ 且 } 10^5 \leq Ra \leq 10^{10} \end{cases} \quad (5)$$

式中: k 为外部空气的导热系数, L 为平板的特征长度(表面的面积周长比), Ra 外部空气的瑞利数。

4 个侧面参与的自然对流可等效为水平平板的垂直壁自然对流模型,传热系数 h_3 的经验公式为:

$$h_3 = \begin{cases} \frac{k}{H} \left(0.68 + \frac{0.67Ra^{1/4}}{f^{4/9}} \right), Ra \leq 10^9 \\ \frac{k}{H} \left(0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{f^{8/27}} \right)^2, Ra > 10^9 \end{cases} \quad (6)$$

$$f = 1 + \left(\frac{0.492k}{\mu C_p} \right)^{9/16}$$

式中: k 为外部空气的导热系数, H 为垂直壁高度, f 为中间变量, μ 为外部空气的动力粘度, C_p 为外部空气的比热容, Ra 为外部空气的瑞利数。

叶片内部流体微小流动导致的热通量调用对流增强热导率接口进行处理,热通量 q 满足约束:

$$\begin{aligned}
 q &= -0.069 \frac{\rho^2 g \alpha_p C_{pi}}{\mu'} \Delta TH'^3 Pr_H^{0.074} \nabla T \\
 \alpha_p &= -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中: ρ 为流体密度, g 为比热率, α_p 为等压压缩系数, C_{pi} 为恒压热容, μ' 为动力粘度, T 为温度, H' 为腔体高度, Pr_H 为普朗特数。

1.3 数值计算结果与分析

完成上述边界条件设定后,使用物理场控制网格方式进行网格构建,单元大小选择细化,贡献项为全体物理场。并对瞬态求解器参数如表 2 所示进行配置,进行瞬态求解。辐射接收面的表面温度场瞬态计算结果如图 3 所示,内部缺陷对表面温度场的影响规律呈现出动态特征,在日光辐射剧烈变化时内部缺陷对应的表面与正常表面区域产生明显温差;相较于正常表面,在温度上升阶段,脱粘缺陷对应表面形成高温异常,温度下降阶段则逐步演化为低温异常,积水缺陷的温度变化趋势与脱粘缺陷相反;此外,在临近辐射达到峰值的时间节点风机叶片表面会达到短暂的热平衡,该时间节点标志缺陷对应表面区域与正常区域温差反转的开始。

表 2 瞬态求解器配置

Table 2 Transient solver configuration

类型	设定值
输出时步	(0, 0.5 h, 10 h)
绝对容差	因子法, 0.1
求解方法	向后差分公式
一致初始化	后向欧拉法, (0.001, 20)

图 4(a) 和(b)分别绘制了脱粘缺陷表面、积水缺陷表面与正常表面的平均温度变化以及缺陷区域对正常区域的差分变化,差分曲线的正负变化直观体现了脱粘缺陷与积水缺陷对表面温度场恰好相反的影响规律,该结论可作为区分两类典型内部缺陷的重要理论依据。数值计算结果对简化几何模型、理想多物理场、简单边界条件下的风机叶片表面温度演化规律进行了揭示,为验证日

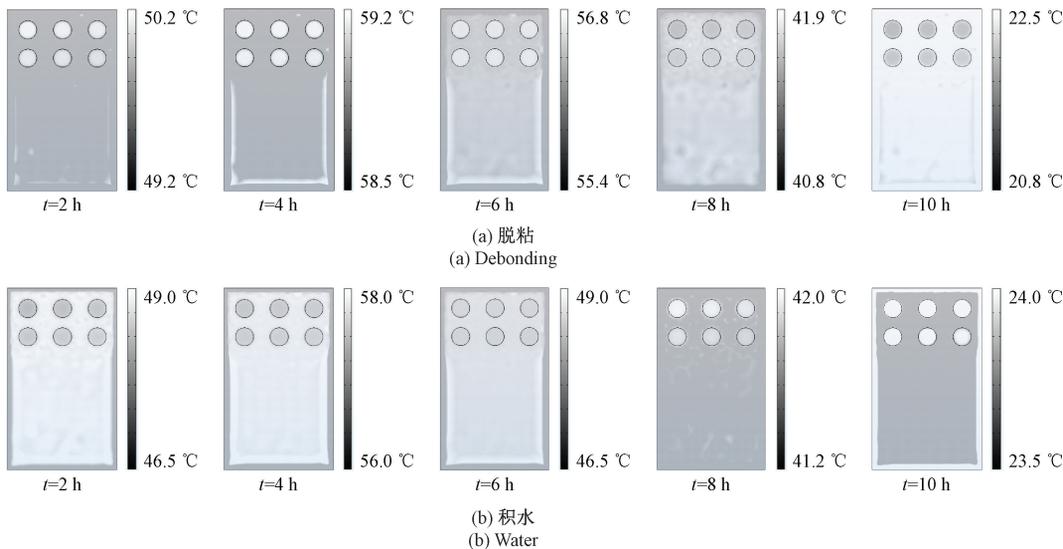


图 3 传热仿真计算结果

Fig. 3 Heat transfer simulation results

光激励下实际风机叶片内部缺陷导致的表面温度场动态特征,使用实际风机叶片主梁区域的切片进行全

天候的日光激励热成像实验,对数值计算结果进行验证与补充。

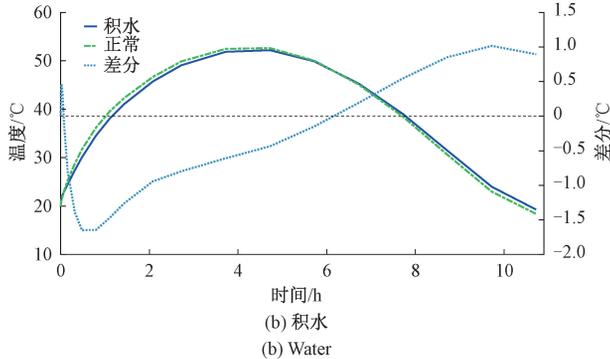
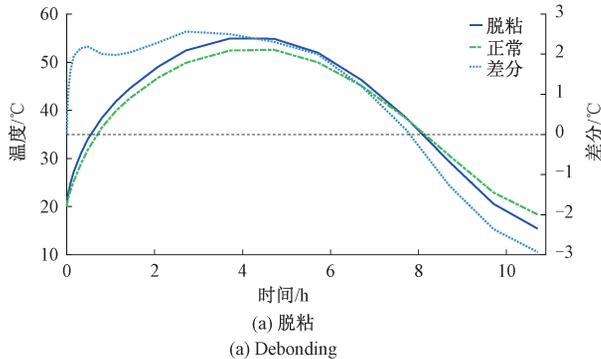


图 4 仿真实验温度曲线

Fig. 4 Simulation experiment temperature curve

2 日光激励热成像实验平台

日光激励热成像实验所用试件(以下称截断试件)由结束服役的实际叶片主梁部位的切片加工形成,截断试件具体细节如图 5 所示,截断试件在原风机叶片主梁切片基础上加工了 6 个直径均为 100 mm 的圆形平底孔,

各圆形平底孔距表面深度依次为 5~10 mm。此外,考虑到实际叶片在服役过程中易产生表面裂纹,在右下角加工了 3 道长度为 100 mm,深度分别为 10、15 及 20 mm 的裂纹作为典型表面缺陷与内部缺陷进行对比。为模拟叶片的内部缺陷,为每个平底孔均配备一个顶盖,使用 4 个 M6 螺丝固定,顶盖将内部缺陷的厚度控制在 5 mm。截断试件加盖的剖面与装配示意分别如图 5(d) 和(e)所

示。每个圆孔内部的 5 mm 厚度的空气间隙将模拟脱粘缺陷,在圆孔中注入一定体积的水可用于模拟积水缺陷,为尽可能避免在进行热成像检测积水缺陷实验时发生漏水情况对实验造成干扰,在顶盖与试件的各个平底孔之间增加厚度为 3 mm 的橡胶垫圈。

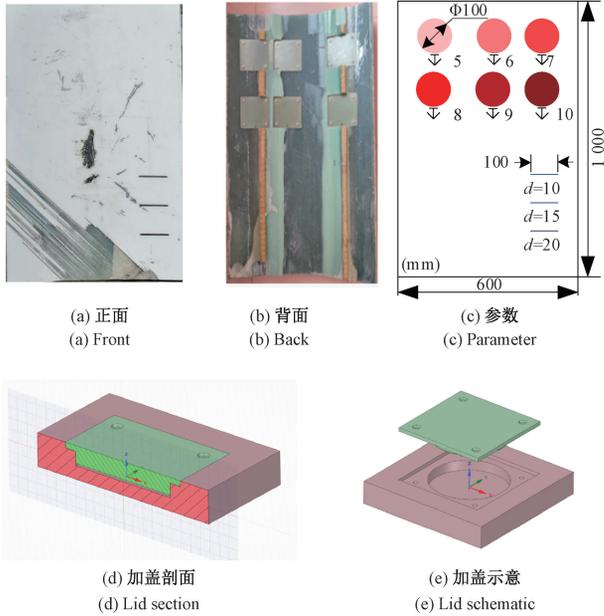


图 5 风机叶片截断试件

Fig. 5 Wind turbine blade cut-off specimen

日光激励热成像实验平台如图 6 所示,本实验所选用热像仪为 DJI M300 RTK 四旋翼无人机搭载的禅思 H20 T(工作波段:8~14 μm;灵敏度:≤50 mK@f1.0;分辨率:640×512),实验时间为上午 8 时~下午 6 时(或 7

时),采样间隔为 30 min,无人机相对参考平面的飞行高度为 3 m,热像仪物距保持为 6 m。

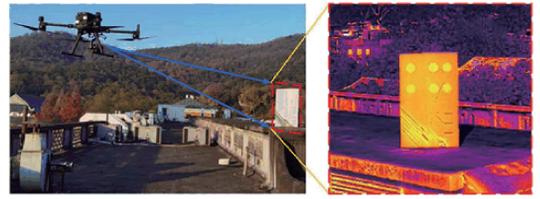


图 6 日光实验平台

Fig. 6 Daylight experiment platform

截断试件由实际风机叶片同质化加工而成,保留了风机叶片完整的传热学特征;实验期间采用全天候自然日光激励且不调整截断试件的朝向,还原了陆上风电机组停机巡检的一般情形。本平台可对有限元仿真得到的风机叶片动态热成像规律进行验证与补充,下文将进行日光激励热成像实验结果的量化分析,从而进一步完善动态热成像理论并提炼应用方法。

3 日光激励热成像实验

截断试件的脱粘与积水日光激励热成像实验结果分别如图 7 和 8 所示,脱粘缺陷的采样区间为 9:00~18:00,积水缺陷的采样区间为 9:00~19:00,采样间隔均为 30 min,两类内部缺陷的最佳检出时间均出现在温度急剧上升与急剧下降阶段,红外热图像随时间的变化规律与数值计算结果保持一致。值得一提的是,实验设置的 3 道表面裂纹呈现出与内部积水缺陷相同的动态规律,但可见光对表面裂纹缺陷具有高度的辨识力,基于双

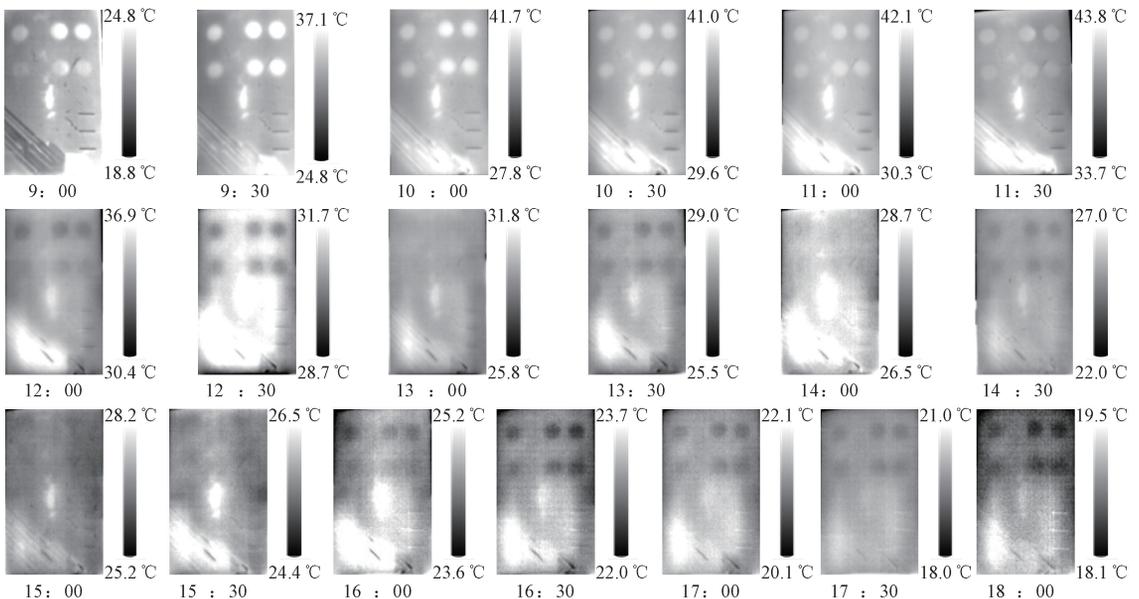


图 7 脱粘缺陷日光热成像实验结果

Fig. 7 Experimental results of daylight thermography of debonding

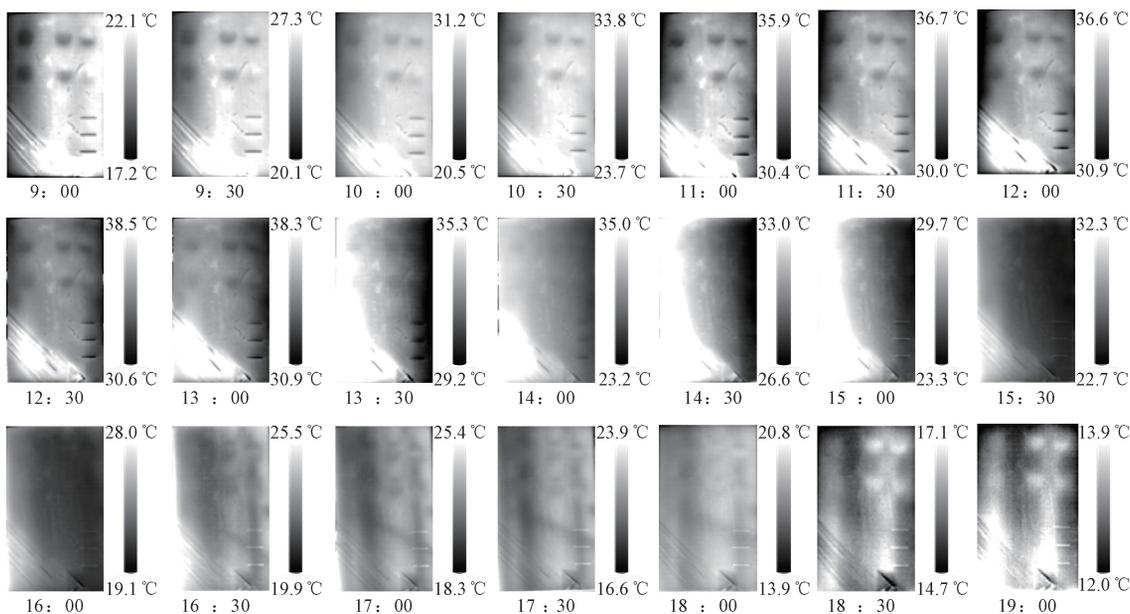


图 8 积水缺陷日光热成像实验结果

Fig. 8 Experimental results of daylight thermography of water

光信息进行融合决策,不会造成内部缺陷的误识别,后文提炼应用方法时将再做介绍。脱粘与积水日光激励热成像实验表面温度变化曲线以及缺陷区域对正常区域的差分曲线分别如图 9(a)和(b)所示,缺陷处表面温度取样于 6 个圆形异常温度区中心处的平均温度,正常区域温度取样于上述异常圆形温度区外接矩形各顶点处的温度

均值,日光激励热成像实验的表面温度曲线与有限元仿真的数值计算结果在总体规律上保持一致,实验中,脱粘区域对正常区域的温度差分随时间由正到负演变,该项数值在积水实验中则由负到正演变,上述实验结果进一步说明了有限元仿真的正确性。

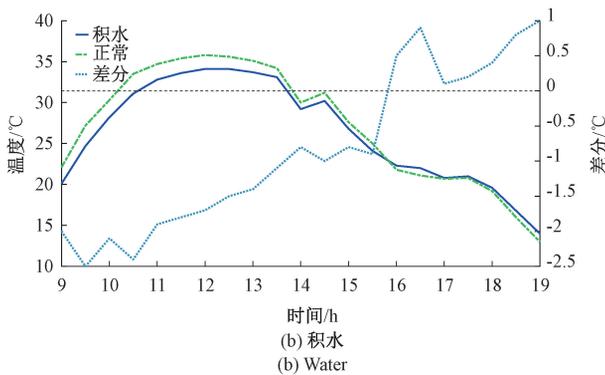
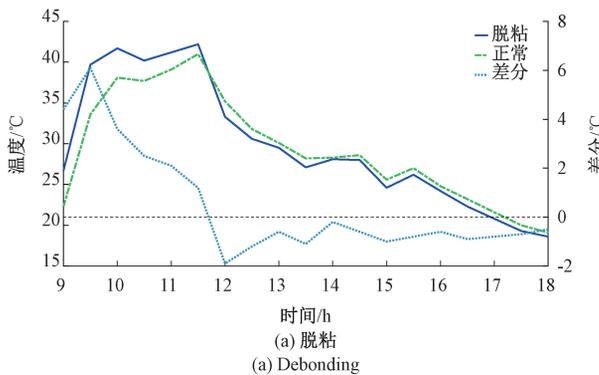


图 9 日光实验温度曲线

Fig. 9 Daylight experiment temperature curve

对比有限元仿真,实际日光实验存在如下差异:首先,脱粘与积水缺陷的检出难度不同,在日光激励热成像实验中,脱粘缺陷明显比积水缺陷更易检测,一方面,由于材料特性,脱粘缺陷导致的表面温差更大、热平衡持续时间更短,另一方面,受截断试件的密闭性等条件影响,积水缺陷会受到漏水、蒸发等无法避免的因素干扰;其次,实际日光实验在正午期间存在相较于有限元仿真中持续时间更长的热平衡阶段,该现象可能与实际实验中云层、不规则横风等多种有限元仿真中难以模拟的自然因素有关,需进一步探究,热平衡期间不适合开展风机叶

片的巡检工作;最后,日光实验中差分曲线有着明显的锯齿感,而有限元仿真中的差分曲线较为光滑,该现象可能与采样频率及多种自然因素干扰有关,后续将继续研究。但是,两类典型内部缺陷导致的风机叶片表面温度场整体动态变化规律并不会改变,基于动态温度场进行风机叶片内部缺陷辨别的方法具备可行性。

开展风机叶片巡检工作时,通过单一时刻的风机叶片热成像数据可初步检出缺陷并粗略判断缺陷类型,但考虑到实际条件下的多种扰动因素,必须综合升温与降温过程中多个时间点的数据进行动态温度场分析,并结

合可见光信息,从而确定风机叶片的内部缺陷的具体类型,本文基于数值计算结果与日光激励热成像实验结论得出在役风机叶片典型内部缺陷动态热成像应用方法如图 10 所示:筛查采集到的风机叶片红外时间序列,若出

现热异常则对该处进行动态热成像分析,满足脱粘或积水缺陷的动态温度场规律后综合可见光信息排除外部缺陷的干扰,从而最终确认内部缺陷类型,并制订相应维修计划。

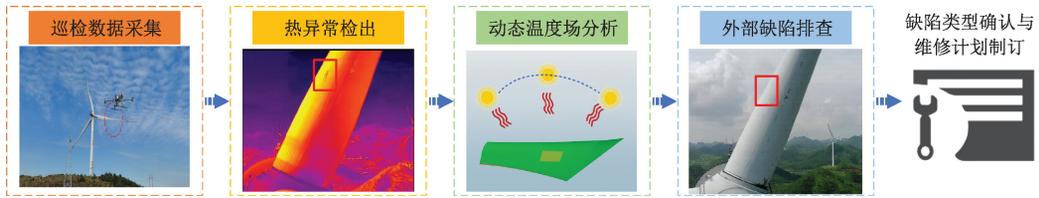


图 10 动态热成像应用方法

Fig. 10 Application methods for dynamic thermal imaging

4 结 论

本文针对现有技术手段难以对在役风机叶片内部缺陷进行准确区分这一问题,提出了基于自然日光激励的动态热成像方法,并通过以下工作验证了动态热成像方法的正确性:以日光辐射作为激励源,建立包含脱粘与积水缺陷的材料实体在多物理场及各项边界条件下的有限元传热仿真模型,结合日光与典型内部缺陷的特征进行数值计算;截取实际风机叶片的主梁部分,加工形成含脱粘、积水两类典型内部缺陷的截断试件,并设置外部缺陷进行对比,进行全天候日光激励热成像实验,对数值计算结果进一步验证并补充。数值计算结果与日光激励热成像实验结果表明,脱粘缺陷将导致风机叶片在日光辐射增强过程中出现缺陷对应表面区域的高温异常,在日光辐射减弱过程中则逐步演化为低温异常,积水缺陷导致的表面温度动态变化趋势与脱粘缺陷恰好相反,自然日光激励的动态热成像方法能够正确对脱粘与积水缺陷进行区分。本文提出的动态热成像理论为在役风机叶片智能运维领域提供了新的方法论,本文仅讨论了如何区分典型内部缺陷,以动态热成像理论为基础,区分更多非典型内部缺陷将是后续研究目标。

参考文献

[1] ZHUO C, JUNHONG G, WEI L, et al. Changes in wind energy potential over China using a regional climate model ensemble [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 159: 112219.

[2] 魏玮, 吕游, 齐欣宇, 等. 基于 CNN-LSTM-AM 动态集成模型的电站风机状态预测方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(4): 19-27.

WEI W, LYU Y, QI X Y, et al. State prediction method for power plant fans based on the CNN-LSTM-AM dynamic integrated model [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(4): 19-27.

[3] SUN X, WU W, WANG J, et al. Optimization design of negative pressure adsorption car for internal defect detection of wind turbine blades on UAV [J]. *AIP Advances*, 2023, 13(2): 025133.

[4] 何赞泽, 张帆, 刘昊, 等. 风机叶片无人机红外热图像拼接方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(7): 44-53.

HE Y Z, ZHANG F, LIU H, et al. Infrared image stitch method of wind turbine blade based on UAV [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(7): 44-53.

[5] 卜迟武, 刘涛, 赵博, 等. CFRP/Al 蜂窝结构缺陷红外热图特征的多结构形态学-PCNN 识别 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(9): 222-228.

BU CH W, LIU T, ZHAO B, et al. Recognition of defects in CFRP/Al honeycomb structure by multi-structure morphology-PCNN [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(9): 222-228.

[6] 周建民, 陈超, 涂文兵, 等. 红外热波技术, 有限元与 SVM 相结合的复合材料分层缺陷检测方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(3): 29-38.

ZHOU J M, CHEN CH, TU W B, et al. Composite layer defect detection method based on infrared heat wave technology, finite element and SVM [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3): 29-38.

[7] 张思祥, 胡雪迎, 竭霞, 等. 单体热电池装配缺陷的图像检测方法研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(2): 132-139.

ZHANG S X, HU X Y, JIE X, et al. Research on image detection method for assembly failure of monomer thermal battery [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(2): 132-139.

[8] 郑凯, 罗志涛, 张辉. 红外热成像技术在 FRP 复合材料/热障涂层无损检测应用中的研究现状与进展 [J]. *红外技术*, 2023, 45(10): 1008-1019.

- ZHENG K, LUO ZH T, ZHANG H. Research status of infrared thermography in NDT of FRP composites/thermal barrier coatings and its development [J]. *Infrared Technology*, 2023, 45(10): 1008-1019.
- [9] BALASUBRAMANIAM K, SIKDAR S, ZIAJA D, et al. A global-local damage localization and quantification approach in composite structures using ultrasonic guided waves and active infrared thermography [J]. *Smart Materials and Structures*, 2023, 32(3): 035016.
- [10] DAGHIGH V, NARAGHI M. Machine learning-based defect characterization in anisotropic materials with IR-thermography synthetic data [J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 233: 109882.
- [11] MISHRA S K, NANDINI K, AHAMMAD S H, et al. Machine learning based models for defect detection in composites inspected by Barker coded thermography: A qualitative analysis [J]. *Advances in Engineering Software*, 2023, 178: 103425.
- [12] 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. A review: Full-cycle nondestructive testing based on visible light and thermography of wind turbine blade [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(6): 32-45.
- [13] 周季峰, 石腾, 许波峰. 风电机组叶片损伤故障检测技术研究进展 [J]. *新能源进展*, 2023, 11(6): 556-563.
- ZHOU J F, SHI T, XU B F. Research progress of wind turbine blade damage fault detection technology [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2023, 11(6): 556-563.
- [14] LI X, HE Y, WANG H, et al. Thermal inspection of subsurface defects in wind turbine blade segments under the natural solar condition [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023: 1-10.
- [15] 陈广秋, 温奇璋, 尹文卿, 等. 用于红外与可见光图像融合的注意力残差密集融合网络 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(8): 182-193.
- CHEN G Q, WEN Q ZH, YIN W Q, et al. Attentional residual dense connection fusion network for infrared and visible image fusion [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(8): 182-193.
- [16] SHEIATI S, CHEN X. Deep learning-based fatigue damage segmentation of wind turbine blades under complex dynamic thermal backgrounds [J]. *Structural Health Monitoring*, 2023: 14759217231174377.
- [17] 尹玉, 张永, 王健, 等. 基于热红外图像的风力机叶片损伤识别方法研究 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(2): 492-497.
- YIN Y, ZHANG Y, WANG J, et al. Research on wind turbine blade damage identification method based on thermal infrared image [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(2): 492-497.
- [18] WORZEWSKI T, KRANKENHAGEN R, DOROSHTNASIR M. Thermographic inspection of wind turbine rotor blade segment utilizing natural conditions as excitation source, Part II: The effect of climatic conditions on thermographic inspections - A long term outdoor experiment [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 767-776.
- [19] 王晨, 顾永强. 小型风力发电机叶片的红外无损检测研究 [J]. *中国测试*, 2023, 49(7): 35-40.
- WANG CH, GU Y Q. Research on infrared nondestructive detection of small wind turbine blades [J]. *China Measurement & Test*, 2023, 49(7): 35-40.
- [20] 康爽, 陈长征, 周勃. 基于温度阈值风电叶片缺陷识别的红外检测研究 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(8): 337-341.
- KANG SH, CHEN CH ZH, ZHOU B. Infrared detection research on wind turbine blade defects identification based on temperature threshold [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(8): 337-341.

作者简介



彭一誉, 2022 年于湖南大学获得学士学位, 现为湖南大学硕士研究生, 主要研究方向为电子信息、无损检测。

E-mail: pyy22090807@hnu.edu.cn

Peng Yiyu received his B. Sc. degree in 2022 from Hunan University. Now he is a M. Sc. candidate in Hunan University. His main research interests include electronic information and non-destructive testing.



何赞泽 (通信作者), 2006 年于西安交通大学获得学士学位, 2008 年于国防科学技术大学获得硕士学位, 2012 年于国防科学技术大学获得博士学位, 现为湖南大学教授, 主要研究方向为嵌入式人工智能与边缘计算、红外热成像与机器视觉。

E-mail: yhe@vip.163.com

He Yunze (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2006, M. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2008, and Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2012, respectively. Now he is a professor of Hunan University. His main research interests include embedded artificial intelligence and edge computing, infrared thermal imaging and machine vision.