

激光与光电子学进展

基于修正热弹性应力分析的风机叶片热红外温度检测

张朋¹, 张玉^{1*}, 崔锐¹, 马佳星², 梅嵩²¹中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249;²中海油能源发展股份有限公司清洁能源分公司, 天津 300450

摘要 随着海上风电的持续发展, 风机的安全运维越来越重要。传统的停机检测方法代价较高, 基于修正的热弹性应力分析(TSA), 提出一种风机叶片热红外检测技术。经典 TSA 的应用条件是绝热(即高频率循环载荷), 但风机叶片等结构承受的循环载荷达不到高频。为了提高热红外在低频率载荷下的检测精度, 对经典 TSA 理论进行修正, 并通过疲劳实验对修正模型进行验证。其次, 利用 BLADED 风机仿真软件对叶片的推力进行分析, 计算叶片 3 个方向的推力及推力变化频率。通过修正的 TSA 模型对低频率载荷下风机叶片的表面温度进行分析, 进而通过 TSA 理论对叶片表面进行应力及损伤检测。

关键词 热红外; 热弹性应力分析; 低频率; 修正模型; 风机叶片; 温度变化

中图分类号 TB303 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231086

Inspection of Wind Turbine Blades Based on Modified Thermoelastic Stress Analysis Using Thermal Detection of Infrared Radiation

Zhang Peng¹, Zhang Yu^{1*}, Cui Kun¹, Ma Jiaying², Mei Song²¹College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;²CNOOC Clean Energy Branch of Energy Development Co., Ltd., Tianjin 300450, China

Abstract As power generated using offshore wind turbines continues to increase, maintaining safe operating conditions with respect to the wind turbines becomes increasingly important. The traditional downtime inspection method is costly. This study proposes a novel method for inspecting wind-turbine blades based on thermoelastic stress analysis (TSA) that employs thermal detection of infrared radiation. The necessary condition for TSA is to achieve adiabatic conditions (high-frequency cyclic loadings). However, wind-turbine blades are subjected to cyclic loadings that do not attain high frequencies. To improve the accuracy of the thermal detection of infrared radiation under low-frequency loadings, the classical TSA theory was modified and the correctness of the modified model was verified via fatigue tests. The BLADED wind turbine simulation software was used to analyze the blade thrust, and the thrust force and thrust variation frequency of the blade in the three directions were calculated. The surface temperatures of the wind-turbine blade under low-frequency loadings were analyzed using the modified TSA model. The proposed model can be used to detect stress and damage related to the blade surfaces.

Key words infrared; thermoelastic stress analysis; low-frequency loading; modified model; wind turbine blade; temperature change

1 引言

近年来, 可再生风能在世界范围内得到了快速发展^[1]。2020年, 我国提出“碳中和”“碳达峰”的发展目标后, 海上风电作为一种绿色能源迅速发展^[2]。相较于陆地, 海上风能资源更加丰富且稳定。此外, 海上

风机可以有更大的发电机组^[3]。在风机的正常作业过程中, 为了保持最佳性能需要对风机进行维护, 海上风机维护成本约为安装成本的 25%^[4]。为减小风机维护带来的停机成本, 一种可远程、无损的检测技术就显得尤为重要。热弹性应力分析(TSA)^[5]是一种成熟的非接触实验技术, 可通过检测结构表面温度的变化获取

收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-05-09; 录用日期: 2023-05-19; 网络首发日期: 2023-05-29

基金项目: 国家优秀青年科学基金(52222111)

通信作者: *zhangyu@cup.edu.cn

结构表面的应力分布。通过检测风机叶片表面的温度变化可以计算得到叶片表面的应力场数据,进而对风机叶片的实时工作状态进行分析,确定是否需要停机维护。

目前已经有很多学者利用 TSA 和热红外技术对结构的应力分布及损伤进行了研究。张萍等^[6]利用热红外技术对柴油机缸盖内部裂纹进行了检测,由缸盖表层温度直接判断内部热缺陷。朱达荣等^[7]利用红外热像技术检测金属疲劳损伤状况,在热像检测的基础上融入偏振探测技术,可以有效提升红外热像对金属构件疲劳损伤的检测能力。此外,李泉良等^[8]、王嘉怡^[9]等也利用红外热像对结构的缺陷进行了检测。Dulieu-Barton 等^[10]提供了一种解耦应力场和温度场的方法,证明了温度校正方法可消除实验程序引起的材料表面温度变化的影响,并通过复合材料样件进行了验证。Jiménez-Fortunato 等^[11]利用 TSA 对复合材料进行分析,发现在碳纤维层压板中,只有在较高频率下正交各向异性表面层产生响应的才满足绝热条件。TSA 的目的在于从结构的表面温度得到结构的应力分布,如 Krstulovic-Opara 等^[12]利用 TSA 对复合材料结构进行分析,得到结构表面的应力分布并用于损伤分析。李永胜等^[13]应用锁相红外热成像技术结合 TSA 对复合材料结构应力测量的可行性进行了研究,结果发现红外热成像技术可以有效得到复合材料结构的全场应力。雷庆等^[14]利用脉冲涡流热成像对钢结构进行了应力检测,结果发现热成像能够有效定量检测单向拉伸载荷下钢结构的表面应力。

上述研究表明 TSA 可以利用结构承受循环载荷时表面的温度信息对结构的应力进行评估,采用这种方法的前提条件是获取准确的温度信息。但上述分析都基于绝热条件,而实现绝热条件的前提是较高的加载频率。为了准确检测风机叶片低频率载荷下的表面温度,本文基于 TSA 提出一种风机叶片热红外检测技术:首先,从 TSA 的一般形式出发分析影响 TSA 应用的因素,并对经典 TSA 理论进行修正;其次,进行疲劳实验,验证修正模型的正确性;最后,应用 BLADED 风机仿真软件对固定风速下的风机进行分析,计算风机叶片 3 个方向的推力及推力变化频率,并基于修正的 TSA 理论对风机叶片表面温度进行分析。

2 低频率下 TSA 理论的修正模型

2.1 经典 TSA 模型

基于 TSA 的应力分析通过测量固体材料的温度变化来表征材料或部件的应力分布。在弹性范围内,固体材料在载荷作用下会变形,其温度将因固体材料体积的膨胀和收缩而改变。相反,固体材料在载荷作用下产生的温度变化也可以表征材料的应力变化,从而实现材料的应力分析^[15]。温度变化和应变存在如下联系:

$$k\nabla^2 T = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\alpha T_0 E}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: k 为导热系数; ρ 为密度; C_v 为等体积比热容; α 为线膨胀系数; T_0 为环境温度; E 为弹性模量; ν 为泊松比; ϵ_{ij} 为应变。可以看出,式(1)是包含热传导的热弹性方程。该热弹性方程由热弹性效应引起的有效热源和热传导项组成。等压比热容可以用等容比热容表示:

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_v} + \frac{\rho(1-2\nu)}{3E\alpha^2 T_0}, \quad (2)$$

式中: C_p 为等压比热容。

因此,TSA^[16-17]用应力可以表示为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\rho C_p} \left[\alpha T_0 \frac{\partial \sigma_{kk}}{\partial t} - k \nabla^2 T \right], \quad (3)$$

式中: $k\nabla^2 T$ 为热传导项。

由式(3)可知,在材料密度和比热容确定的情况下,温度变化取决于 3 个量:1)温度梯度($\nabla^2 T$);2)材料热导率(k);3)载荷加载频率($\frac{\partial \sigma_{kk}}{\partial t}$)。要实现绝热条件,即 1)、2)项为 0。但材料或结构受到循环载荷加载过程中,内部温度会随着载荷的变化而变化,即相当于材料内部存在一个内热源,此时 1)项不为 0,无法获得绝热条件;其次,2)项为材料的导热系数,导热系数是材料本身的参数,导热系数不会为 0。因此若想实现绝热条件,则需要减少测量时间增量,即增加加载频率,获得伪绝热条件。即典型的 TSA 形式为

$$\Delta T = -\frac{1}{\rho C_p} \alpha T_0 \Delta \sigma_{kk}. \quad (4)$$

式(4)即为绝热条件下 TSA 的表达式。如材料为复合材料,热弹性理论上可以表示为

$$\Delta T = -\frac{T_0}{\rho C_p} (\alpha_1 \Delta \sigma_{11} + \alpha_2 \Delta \sigma_{22} + \alpha_3 \Delta \sigma_{33}). \quad (5)$$

2.2 修正模型

低加载频率下的温度耗散主要由热传导引起^[16],本研究在考虑热传导的情况下对 TSA 模型进行修正。

三维热传导方程可以表示为

$$k\nabla^2 T = k \frac{1}{\Delta x} \frac{\partial T}{\partial x} = k(T - T_0) \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right), \quad (6)$$

式中: Δx 、 Δy 、 Δz 分别为 3 个方向上的传导距离。材料中温度的传导距离可以用热扩散长度^[18]表示

$$\mu = \sqrt{2\alpha/\omega}, \quad (7)$$

式中: μ 为热扩散长度; ω 为角频率。式(3)为 TSA 理论的一般形式,将式(6)、式(7)代入式(3)可以得到修正的 TSA 模型。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\rho C_p} \left[\alpha T_0 \frac{\partial \sigma_{kk}}{\partial t} - \frac{3k(T - T_0)\omega}{2\alpha} \right]. \quad (8)$$

如材料为复合材料,修正的 TSA 可以表示为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\rho C_p} \left[\alpha T_0 \frac{\partial \sigma_{kk}}{\partial t} - (T - T_0) \omega \left(\frac{k_x}{2\alpha_x} + \frac{k_y}{2\alpha_y} + \frac{k_z}{2\alpha_z} \right) \right], \quad (9)$$

式中: k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 方向的导热系数; $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 分别为 x, y, z 方向的线膨胀系数。

3 实验验证

风机叶片由碳纤维复合材料、环氧树脂等材料组成。例如:梁帽、主梁等由复合材料组成;主梁与叶片、叶片边缘等由环氧树脂粘接^[19]。采用环氧树脂材料样件进行疲劳实验,验证修正模型的正确性。

3.1 实验设置

实验的总体方案如图 1 所示。实验装置主要包括疲劳试验机、FLIR 红外热像仪 (FLIR T530)^[20]、温度分析软件 and 数据处理系统。红外热像仪的工作波段为 $7.5 \sim 14.0 \mu\text{m}$,分辨率为 $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$,热灵敏度小于 $0.03 \text{ }^\circ\text{C}$,测量温度范围为 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$,测量精度为 $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 或者 $\pm 2\%$ 。

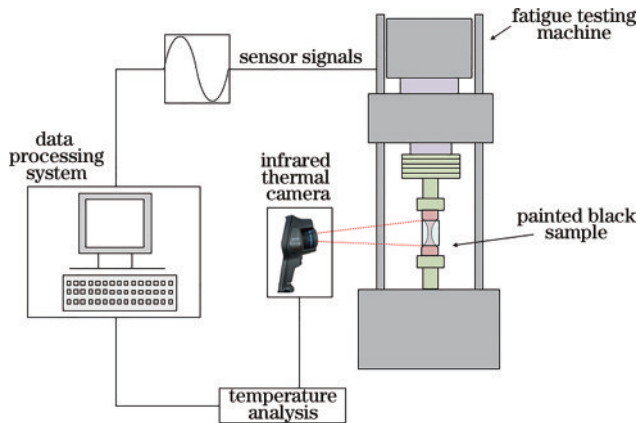


图 1 实验总体方案

Fig. 1 Overall scheme of the experiment

环氧树脂试样尺寸如图 2 所示。环氧树脂样件按照 GB/T 2567^[21] 制作。测试前,需要对样品进行抛光处理,去除不平整的边缘。

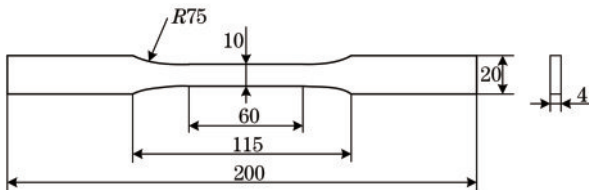


图 2 样件尺寸

Fig. 2 Sample size

环氧树脂的材料参数如表 1 所示,这些数据由制造商提供。

环氧树脂固化后呈半透明状,为了增强试样表面

表 1 环氧树脂基本参数

Table 1 Basic parameters of epoxy resin

Parameter	Value
Elastic modulus /GPa	2.75
Density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.1
Poisson's ratio	0.38
Specific heat capacity /($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	220
Expansion coefficient / $^\circ\text{C}^{-1}$	50×10^{-6}
Thermal conductivity /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	0.2

发射率,在试样表面涂上哑光黑漆,该步骤可提高红外热像仪的采集精度。实验装置如图 3 所示。

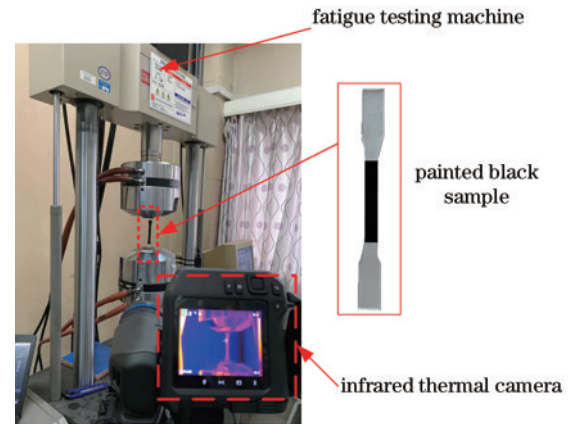


图 3 实验装置图

Fig. 3 Diagram of experimental setup

实验前将实验室门窗关闭,提前 0.5 h 将疲劳试验机和红外热像仪开机预热。实验前对试样的红外辐射率、环境温度、环境湿度等进行标定,确保测量温度的准确性。实验目的在于评估低频率下修正 TSA 理论的正确性,因此所有实验均在 1 Hz 的加载频率(非绝热条件)下进行。试样施加的载荷为单轴拉伸载荷(载荷幅值为 1.8 kN),载荷以正弦变化。

3.2 结果分析

由 TSA 理论可知,当加载频率较高达到绝热条件时,可以用温度变化直接对结构的应力进行求解。根据采用的环氧树脂样件尺寸及施加载荷,可以求得环氧树脂样件的应力为 45 MPa。若达到绝热条件,则可由 TSA 求得对应绝热条件下的温度变化 $\Delta T = 0.1934 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同时根据红外热像仪和疲劳实验可以获得环氧树脂样件在疲劳加载过程中的温度变化(非绝热条件)。选取样件中心点为监测点,温度变化如图 4 所示。

通过 TSA 的理论公式可以看出,温度变化与施加应力的变化是一致的,如图 4 所示,监测点的温度在一个周期内基本呈正弦形式变化。材料的真实温度变化包括应力引起的温度变化和热传导引起的温度耗散,应力引起的温度变化由 TSA 计算得到,热传导引起的温度耗散由热传导理论计算得到。由图 4 也可以

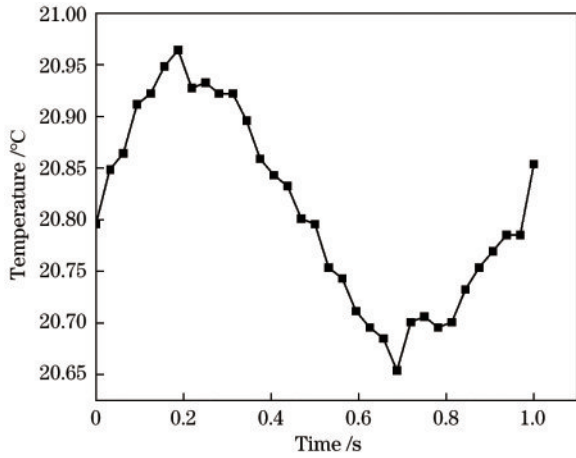


图 4 1 Hz 频率下样件监测点温度变化

Fig. 4 Temperature change of sample monitoring point under 1 Hz frequency

看出,在一个周期内监测点的最大温度变化为 0.1642 °C。由图 5 可以看出,实验条件下(非绝热)的温度差为 0.1642 °C,若直接利用经典 TSA 理论进行计算,求解得到的应力为 38.21 MPa,与实际应力误差为 15.1%。修正后的温度差为 0.1867 °C,修正后求解得到的应力为 43.44 MPa,与实际应力误差为 3.5%。结果验证了修正模型的有效性,也表明了修正的 TSA 模型可以有效修正低频率下热红外的检测温度。红外热像仪的测温精度为 ±2 °C 或者 ±2%,测量的温度会有误差,利用修正的 TSA 模型进行计算时需要测量对象的真实温度,精确校准红外特性对修正 TSA 模型的计算精度十分重要。

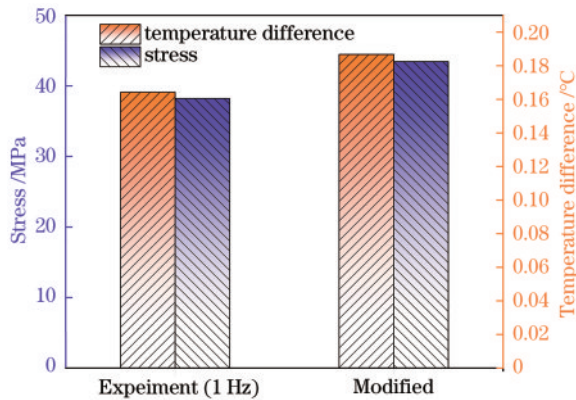


图 5 实验和修正的温差及应力对比

Fig. 5 Comparison of temperature difference and stress between experiment and modified model

为进一步验证修正 TSA 模型在其他材料上的准确性,使用反应堆压力容器(RPV)钢对修正模型进行验证。RPV 钢的相关材料常数如下: $\rho=7.8 \text{ g/cm}^3$, $C_p=0.48 \text{ J}\cdot\text{g}\cdot^\circ\text{C}$, $\alpha=1.1\times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $k=50 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ [22]。

利用文献中的温度曲线,采用修正 TSA 模型计算 RPV 钢的应力,结果为 628.12 MPa,文献中实验的应

力为 640 MPa,预测精度为 98.2%,如图 6 所示,该结果进一步验证了修正模型的准确性。

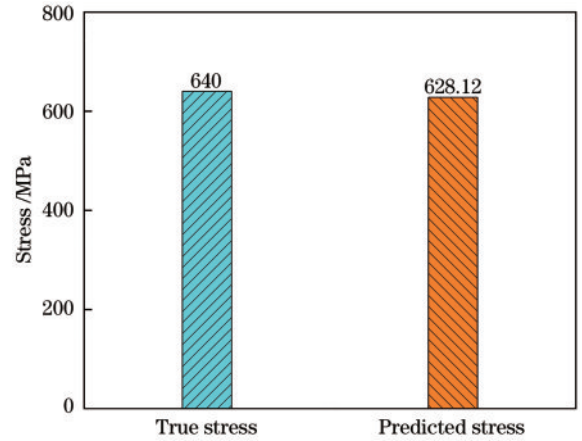


图 6 修正模型计算结果与文献结果比较

Fig. 6 Comparison of modified model results with reference results

4 基于修正 TSA 理论的风机叶片温度分析

4.1 BLADED 叶片模型

采用额定功率为 5 MW 的海上风机叶片作为研究对象,三桩式基础在环境荷载下的动力特性表现更为优越[23],因此选用三桩式作为风机支撑结构。风机叶轮直径为 119 m,轮毂高度为 92 m。风机叶片的基础参数如表 2 所示。基于 BLADED 软件建立的风机叶片模型如图 7 所示。

表 2 风机叶片的基础参数

Table 2 Basic parameters of wind turbine blades

Cross-sectional points	Distance from root /m	Chord length /m	Twist angle /($^\circ$)	Relative thickness /%
1	0	2.69	13	100
2	1.61	2.69	13	100
3	3.23	2.94	13	86.4
4	4.84	3.48	13	66.8
5	6.45	4.04	13	52.5
6	8.6	4.44	12.9	39.7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
19	57	0.04	4	11

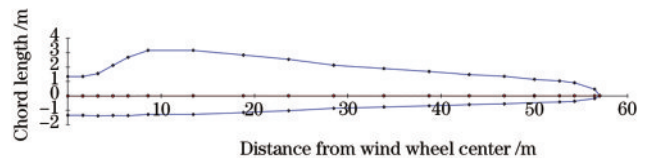


图 7 基于 BLADED 的风机叶片模型

Fig. 7 Wind turbine blade model based on BLADE

风机发电机组的基本参数如表 3 所示。建立的 BLADED 风机模型如图 8 所示,水平面为风机的 X-Y 平面,竖直方向为风机的 Z 方向。

表 3 风机基本参数

Table 3 Basic parameters of wind turbine

Parameter	Value
Wind speed / (m/s)	5, 10, 15, 20, 25
Power rating / MW	5
Wind turbine diameter / m	119
Number of blades	3
Hub height / m	92
Blade mounting angle / (°)	-3
Taper angle / (°)	0
Elevation angle / (°)	4
Rated wind speed / (m/s)	11.4

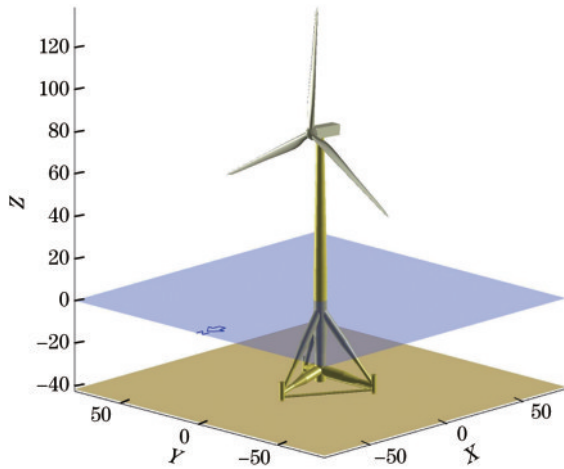


图 8 BLADED 风机模型

Fig. 8 BLADED wind turbine model

4.2 固定风速下叶片推力分析

风机风场设置为固定风,风速为 11.4 m/s,与额定风速保持一致。对此风速下风机叶片各个方向的推力进行分析,结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,11.4 m/s 风速下风机叶片 3 个方向的推力均以简谐形式变化,且 Z 方向最大推力为 7489 kN, Y 方向推力最大为 143 kN, X 方向最大推力为 245 kN。3 个方向中 Z 方向推力最大, Y 方向推力最小, X 方向推力介于 Y、Z 方向推力之间。同时从图 9 可以看出,3 个方向上推力的变化周期为 4 s 左右,转化为频率可以得到风机叶片在 3 个方向上推力的频率,为 0.25 Hz。

4.3 基于修正 TSA 理论的风机叶片温度分析

风机叶片热弹性应力分析中叶片模型与前节中的

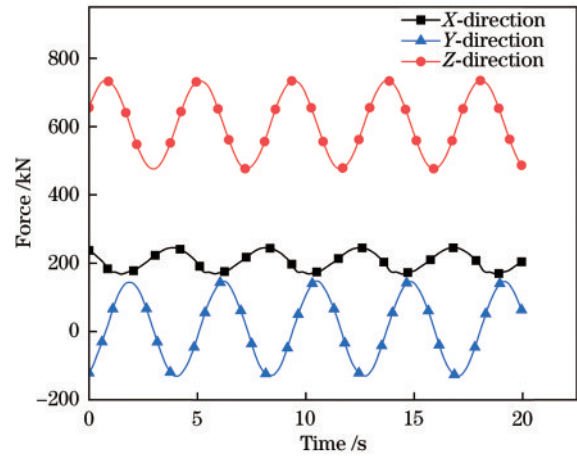


图 9 额定风速下叶片推力

Fig. 9 Blade thrust at rated wind speed

叶片模型保持一致。叶片的最外部是碳纤维复合材料 (CFRP),具有 10 层,每层厚度为 0.28 mm,铺层角度 $[-45/0/90/45/0]_{2s}$ 。与碳纤维相接的第二种铺层材料为玻璃纤维复合材料 (GFRP),设置的铺层层数为 40 层,每层厚度为 0.28 mm,铺层角度 $[0/-45/45/90]_s$ 。依次铺设。CFRP 和 GFRP 的材料参数如表 4 所示。

表 4 材料属性

Table 4 Material properties

Property	CFRP	GFRP
E_1 / GPa	164.54	41
E_2, E_3 / GPa	10.15	9
G_{12}, G_{13} / GPa	4.98	4.1
G_{23} / GPa	3.89	4.1
X_T / MPa	1860.24	40.9
X_c / MPa	1038.65	69.1
Y_T / MPa	65.49	33.5
Y_c / MPa	132.58	85.7
S_{12} / MPa	90.85	51.6
S_{13}, S_{23} / MPa	90.85	51.6
μ_{12}, μ_{13}	0.306	0.3
μ_{23}	0.3	0.3
Density / (kg/m ³)	1560	1890

建立的风机叶片有限元模型如图 10 所示。在叶片表面建立参考点,将叶片迎风面与参考点耦合。由图 9 可以得到叶片 3 个方向上的推力及推力的变化频率,将载荷施加到参考点上,载荷加载频率为 0.25 Hz,同时在叶片根部添加固定约束。风机叶片初始温度设置为 25 °C。

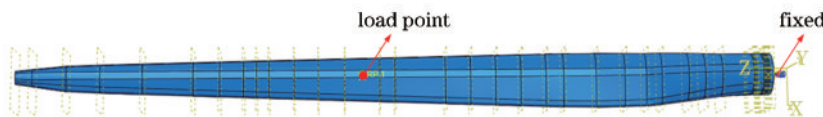


图 10 风机叶片有限元模型

Fig. 10 Finite element model of wind turbine blade

风机叶片施加 X、Y、Z 3 个方向推力后的应力云图如图 11 所示。图中 UVARM4 为叶片的主应力之

和,由图 11 可以看出,施加 3 个方向的推力后叶片的主应力之和最大为 150 MPa,出现在叶片叶缘处。

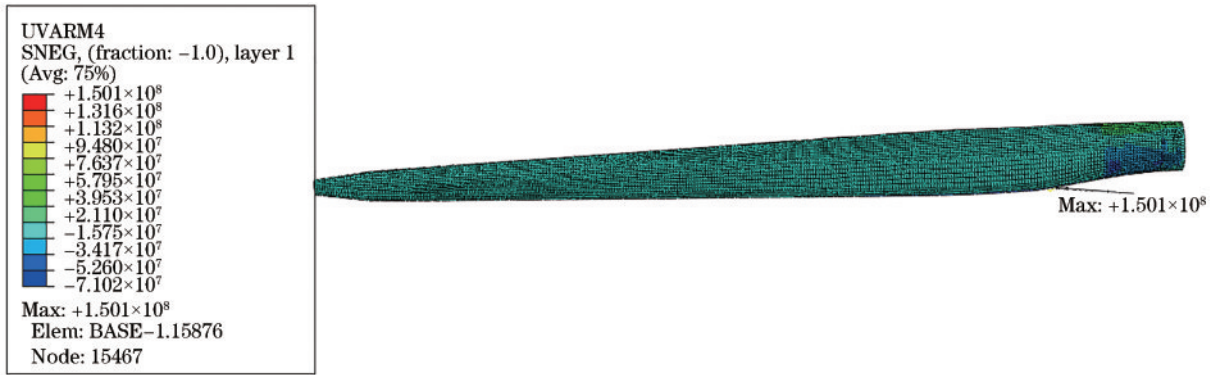


图 11 叶片应力云图

Fig. 11 Diagram of blade stress

叶片的主应力之和的变化如图 12 所示。由图可知,叶片主应力以简谐形式变化。利用式(5)可以利用主应力对未修正的叶片温度进行求解。同理,结合式(9)可以对低频率载荷下的叶片温度进行修正,结果如图 13 所示。由图 13 可知,未修正与修正的叶片温度

变化趋势相同,未修正的叶片温度幅值为 25.11 °C,此温度是热红外直接检测到的温度,修正后的温度为 25.25 °C。若忽略叶片初始温度仅考虑应力引起的温度变化,修正后的叶片温度幅值为 0.25 °C,与未修正的叶片温度 0.11 °C 相比增加了 0.14 °C。叶片温度分析结果表明,低频率载荷下直接利用热红外对风机叶片进行检测,检测到的温度偏低,这是由于低频率时存在温度耗散。修正模型考虑了温度耗散,因此可以有效提高低频率下热红外的检测精度。实际应用中,由热红外检测叶片的表面温度,并采用修正模型对热红外检测的温度进行修正得到叶片表面的真实温度,最后通过 TSA 理论求解叶片的真实应力。通过有限元方法计算叶片温度,实际现场应用中需要注意环境噪声、太阳光辐射、环境温度及红外辐射率等带来的影响,且使用该模型时需要对叶片的真实温度进行测量。

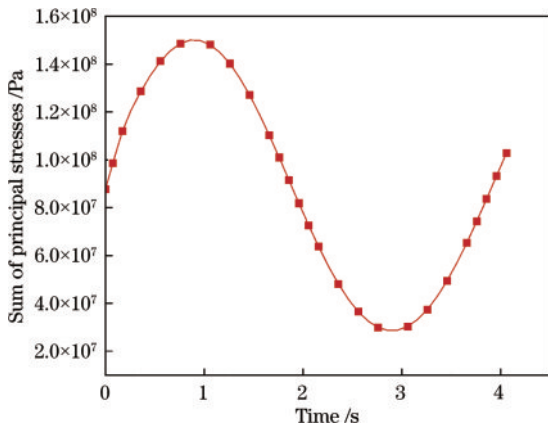


图 12 叶片主应力之和

Fig. 12 Sum of principal stresses of wind turbine blade

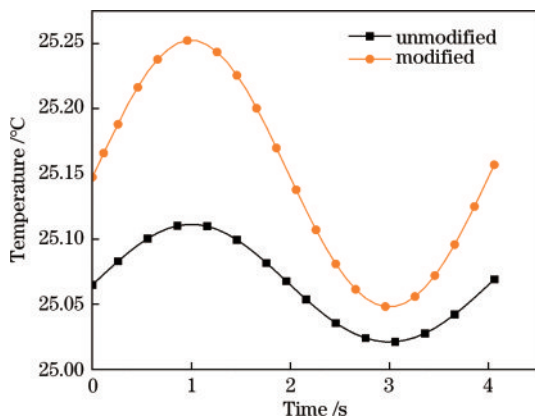


图 13 叶片温度

Fig. 13 Temperature of wind turbine blade

5 结 论

基于修正的 TSA 模型提出一种风机叶片热红外检测技术,该技术可以用于准确检测叶片低频率载荷下的表面温度,进而对叶片表面应力及损伤进行检测。

经典 TSA 理论在低频率载荷下具有局限性。从 TSA 的一般形式出发,考虑材料在低频下的温度耗散,利用热传导定律对低频下的温度耗散进行分析,在此基础上对经典 TSA 理论进行修正,得到低频率下 TSA 的修正模型。

通过环氧树脂材料样件进行低频率载荷下的疲劳实验,采用红外热像仪检测样件表面的温度变化。实验结果表明,当加载频率较低时热红外测量温度幅值为 0.1642 °C,由经典 TSA 计算得到的应力值小于真实应力值,误差为 15.1%。利用修正模型修正后的温度幅值为 0.1867 °C,求解得到的应力与实际应力误差为 3.5%。结果表明,建立的修正模型可以有效提高

低频率载荷下热红外检测的精度。

采用 BLADED 仿真软件建立风机模型,分析得出额定风速下叶片各个方向的推力。 Z 方向最大推力为 7489 kN, Y 方向推力最大为 143 kN, X 方向最大推力为 245 kN,同时可以得出风机叶片在 3 个方向上推力的频率为 0.25 Hz。风机叶片温度分析结果表明,经典 TSA 理论计算出的叶片温度幅值为 25.11 °C,修正 TSA 理论计算出的叶片温度幅值为 25.25 °C。若忽略叶片初始温度仅考虑应力引起的温度变化,修正后的叶片温度幅值为 0.25 °C,与未修正的叶片温度相比增加了 0.14 °C。

参 考 文 献

- [1] Chuang Z J, Li C Z, Liu S W, et al. Numerical analysis of blade icing influence on the dynamic response of an integrated offshore wind turbine[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 257: 111593.
- [2] 张玉, 邓欣, 张飞凡, 等. 碳纤维在海洋结构与装备中的应用与挑战[J]. *力学与实践*, 2022, 44(2): 249-257.
Zhang Y, Deng X, Zhang F F, et al. Application and challenges of carbon fiber in marine structures and equipment[J]. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(2): 249-257.
- [3] Bergström L, Kautsky L, Malm T, et al. Effects of offshore wind farms on marine wildlife: a generalized impact assessment[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(3): 034012.
- [4] Stetco A, Dinmohammadi F, Zhao X Y, et al. Machine learning methods for wind turbine condition monitoring: a review[J]. *Renewable Energy*, 2019, 133: 620-635.
- [5] Dulieu-Barton J M, Stanley P. Development and applications of thermoelastic stress analysis[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1998, 33(2): 93-104.
- [6] 张萍, 童亚拉, 欧阳光耀, 等. 基于红外成像技术的缸盖热裂纹探测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 111103.
Zhang P, Tong Y L, Ouyang G Y, et al. Detecting thermal flaw inner cylinder head based on infrared thermograph technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 111103.
- [7] 朱达荣, 杨善骥, 汪方斌, 等. 疲劳损伤过程金属表面偏振热像纹理特征实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 0424001.
Zhu D R, Yang S J, Wang F B, et al. Texture characteristics of polarized thermal images on metal surfaces in fatigue damage process[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 0424001.
- [8] 李泉良, 王肖霞, 杨风暴. 基于多尺度影像融合的气缸盖内壁热疲劳损伤检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(6): 0612002.
Li Q L, Wang X X, Yang F B. Multiscale image fusion-based thermal fatigue damage detection method for cylinder head inner wall[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(6): 0612002.
- [9] 王嘉怡, 段中兴. 建筑外墙外保温层表面裂缝的红外热成像检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(22): 2204001.
Wang J Y, Duan Z X. Infrared thermal imaging detection of surface cracks in external insulation layer of building external wall[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(22): 2204001.
- [10] Dulieu-Barton J M, Emery T R, Quinn S, et al. A temperature correction methodology for quantitative thermoelastic stress analysis and damage assessment[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(6): 1627-1637.
- [11] Jiménez-Fortunato I, Bull D J, Thomsen O T, et al. On the source of the thermoelastic response from orthotropic fibre reinforced composite laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 149: 106515.
- [12] Krstulovic-Opara L, Klarin B, Neves P, et al. Thermal imaging and Thermoelastic Stress Analysis of impact damage of composite materials[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(2): 713-719.
- [13] 李永胜, 吴健, 王纬波, 等. 锁相红外热成像技术应用于复合材料连接接头全场应力测量研究[J]. *船舶力学*, 2015, 19(9): 1097-1115.
Li Y S, Wu J, Wang W B, et al. Measuring stress distributions of composite joints by lock-In infrared thermography technique[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2015, 19(9): 1097-1115.
- [14] 雷庆, 黎玄, 王亚辉. 钢结构应力的脉冲涡流热成像检测方法[J]. *机械设计与研究*, 2017, 33(4): 103-107.
Lei Q, Li X, Wang Y H. Research on detection method of metal structural stress based on eddy current thermography[J]. *Machine Design & Research*, 2017, 33(4): 103-107.
- [15] Thomson W. On the dynamical theory of heat [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1853(20): 261-283.
- [16] Wang W J, Dulieu-Barton J M, Li Q. Assessment of non-adiabatic behaviour in thermoelastic stress analysis of small scale components[J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50(4): 449-461.
- [17] Greene R J, Patterson E A, Rowlands R E. Thermoelastic stress analysis[M]//Sharpe W N. *Springer handbook of experimental solid mechanics*. Springer handbooks. Boston: Springer, 2008: 743-768.
- [18] Costa A, Salerno A. Investigation on the thermoelastic constant of carbon fibre composites[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(9): 1597-1605.
- [19] Bank L C, Arias F R. Assessment of present/future decommissioned wind blade fiber-reinforced composite material in the United States[J]. *Independent Study*, Dept. of Civil Engineering, City College of New York, United States, 2016.

- [20] FLIR manual[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.flir.com/support/products/t530/>.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 树脂浇铸体性能试验方法: GB/T 2567—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for properties of resin casting body: GB/T 2567—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [22] Yang B, Liaw P K, Wang H, et al. Thermographic investigation of the fatigue behavior of reactor pressure vessel steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 314(1/2): 131-139.
- [23] 李益. 三桩基础海上风力发电结构的自振特性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Li Y. Natural vibration characteristic analysis of triple-piles based offshore wind power structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.