

激光与光电子学进展

基于光频域反射技术的风机叶片损伤识别方法研究

董俊超^{1,2,3}, 罗明明^{1,2,3}, 刘剑飞^{1,2,3*}, 杨文荣⁴¹河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401;²河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401;³天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401;⁴河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300401

摘要 针对传统风机叶片损伤检测中存在的定位不精确且无法在风机运行状态下进行监测的问题,提出了一种新的风机叶片损伤检测方法。该方法采用光频域反射(OFDR)技术对不同风况下风机叶片表面的应变进行测量,对应变值进行快速傅里叶变换并取其基频幅值获得叶片表面的应变分布,据此计算出叶片损伤的位置、长度和宽度,再根据应变大小与损伤程度的关系拟合出损伤程度判断公式,并据此识别叶片损伤程度。设计了基于OFDR的悬臂梁损伤检测实验,模拟了悬臂梁振动时的瞬时状态,根据应变分布识别出损伤的位置,验证了所提损伤识别方法的可行性。

关键词 光纤光学; 光频域反射; 背向散射; 光纤传感器; 风机叶片; 损伤识别; 应变分布

中图分类号 TP212.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231432

Damage Detection Method for Wind Turbine Blade Based on Optical Frequency Domain Reflectometry

Dong Junchao^{1,2,3}, Luo Mingming^{1,2,3}, Liu Jianfei^{1,2,3*}, Yang Wenrong⁴¹School of Electricity and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;²Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China;³Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices, Tianjin 300401, China;⁴State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

Abstract A new wind turbine blade damage detection method is proposed to address the challenges surrounding imprecise positioning and the inability to monitor the turbine under operating conditions, which is a shortcoming of traditional wind turbine blade damage detection. The proposed method uses optical frequency domain reflectometry (OFDR) to measure the surface strain of the wind turbine blade. Subsequently, fast Fourier transform is taken for the strain value and its fundamental frequency amplitude is taken to obtain the blade surface strain distribution. On this basis, the position, length and width of the blade damage are calculated. According to the relationship between the strain and damage degree, the damage degree judgment formula is fitted, and the blade damage degree is identified. Based on OFDR, a cantilever beam damage detection experiment is designed to simulate the instantaneous state of the cantilever beam vibration, and the damage location is identified according to the strain distribution, which verifies the feasibility of the proposed damage identification method.

Key words fiber optics; optical frequency domain reflectometry; backscattering; optical fiber sensor; wind turbine blade; damage identification; strain distribution

1 引言

近年来随着可持续发展的不断推进和环保意识的

不断加强,各种清洁能源发展迅猛。其中,各国对于风力发电的研究越来越深入^[1]。风力发电机由于长期处于恶劣环境中^[2],不可避免地会出现一些损伤,且针对

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-06-27; 录用日期: 2023-07-12; 网络首发日期: 2023-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(6210031560)、河北省自然科学基金(F2021202054)、天津市自然科学基金(21JCQNJC00780)

通信作者: *jliu@hebut.edu.cn

风机叶片损伤的修复工作较难开展,增加了运行维护的成本^[3-5],也对风机机组安全运行构成很大威胁。因此,从降低风机运行风险及减少运行维护成本的角度来说,都必须重视对风机叶片损伤识别的研究工作。

传统风机叶片的检测方法主要有超声检测法^[6]、X射线检验法^[7]、热成像检测法^[8]、微波检测法^[9]等。但传统方法检测十分不便,需要提供用于检测的激励,不能应用于对工作状态下风机叶片损伤的实时监测。光纤传感器具有质量小、体积小、抗电磁干扰能力强等优势^[10-11],并且光纤可以很容易地嵌入或连接到风机叶片上,通过光纤旋转器可以使光纤跟随风机叶片旋转,光纤旋转器中的光学透镜将定子部分和转子部分的光路对应起来,保证了光信号的连续性。在光纤传感器中,光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有测试时间短、传感精度高等优势^[12],但光纤光栅解调仪会影响光纤光栅串联的个数,导致无法对风机叶片上的损伤位置进行精确的定位。光时域反射^[13](OTDR)技术适用于进行长距离应变和温度测量,而相位敏感的光时域反射^[14-16](φ -OTDR)技术是针对振动的传感测量。分布式光纤传感^[17](PPP-BODTA)技术应变测量的可靠性较低,传感效果不佳。由Eickhoff等^[18]提出的光频域反射(OFDR)技术测量距离一般在70 m以内^[19],和风机叶片的尺寸相匹配。OFDR空间分辨率能够达到mm量级^[20],应变传感精度为 $1\ \mu\epsilon$,能够更加准确地识别叶片的损伤信息。近年来,Guemes等^[13]通过分布式光纤系统记录层压板每次撞击后的残余应变,根据绘制出的残余应变图来得到损伤位置信息。Jothibasu等^[21]将单模光纤嵌入复合材料层间利用拉伸试验机和悬臂梁进行实验,通过OFDR测量复合材料的内部应变。Mills等^[22]通过分布式光纤温度测量系统对碳纤维增强聚合物的缺陷进行识别。根据聚合材料表面温度数据来确定缺陷的长度、宽度。Cazzulani等^[23]通过OFDR技术测量了风机叶片上的应变,从静态和动态两方面进行了实验,结果显示光纤传感技术正确识别了静态挠度振幅和动态振动模式,估算了施加在叶片

上的载荷。上述基于OFDR的损伤识别方法大多都只适用于静态测量,无法在风机叶片工作时进行检测。

本文基于OFDR技术对风机叶片损伤进行检测,测量了不同风速的工作状态下风机叶片的应变分布,并基于损伤区域的应变分布特征,提出了一种损伤识别方法。采用该方法能够实现对不同风速工作状态下的风机叶片进行损伤定位和损伤程度识别,从而保障运行状态下风机叶片的安全。

2 基于OFDR的风机叶片测量系统结构与原理

图1为OFDR测量系统结构图,传感系统结构包括可调谐激光源、干涉仪和光电探测器。分布式光纤通过黏接剂粘贴在风机叶片表面,传递叶片表面的应变值。采用S型的面式布设方案在风机叶片表面铺设9条光纤路径,每条光纤间隔13 mm,该布设工艺能够防止由光纤路径过近和光纤弯曲半径过小导致的光纤弯折,同时还能最大限度利用光纤分布式传感器的高空间分辨率、高数密度和大测点数目等优势来获取精确的应变数据。在传感系统中,扫频激光器发射一束光波进入光纤中,耦合器采用10:90的比例将光分为两路,分别进入参考臂和传感臂。参考臂光波经过固定光程后被反射镜反射回耦合器端,传感臂光纤中发生背向瑞利散射后产生背向散射光,两路光信号在返回耦合器后发生干涉并生成拍频光。由于拍频频率与传感光纤上的传感位置呈线性关系,所以根据拍频信号频率就可以实现光纤上的传感定位。OFDR通过互相关解调算法得到所传感的物理量变化,该方法分别将未施加应变与施加应变状态下的拍频信号通过傅里叶变换转换到距离域,然后将两组数据的距离域切割成多个滑动窗,滑动窗的长度即为空间分辨率,接着将滑动窗内数据通过逆傅里叶变换转换到波长域后进行互相关运算。互相关峰的偏移量与此处光纤的外部温度和应变的变化量成正比^[24],因此,测量出局部光谱的偏移量便可以完成对外界物理量的传感。

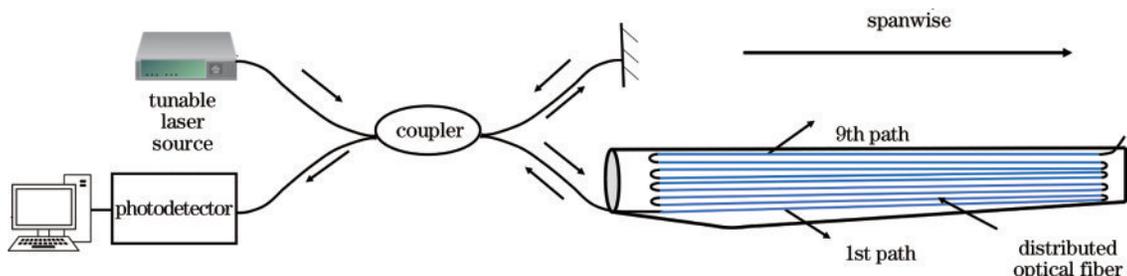


图1 OFDR系统结构图及光纤布设方案

Fig. 1 Structure diagram of OFDR system and optical fiber layout scheme

OFDR传感系统可以通过高扫频速率的可谐调激光器实现动态测量。在OFDR系统中,整条传感光纤的遍历是在激光器扫频周期内完成的,因此激光器的

扫频周期即为OFDR系统的采样周期,激光器扫频周期 T 为

$$T = \Delta\lambda/\gamma, \quad (1)$$

式中： $\Delta\lambda$ 和 γ 分别为激光器的扫频范围和扫频速率。由式(1)可知,选择合适的扫频范围和扫频速率能够使 OFDR 系统具有较高的采样率,实现动态测量。同时,OFDR 系统的空间分辨率 Δx 与扫频范围 $\Delta\lambda$ 相关,满足如下关系式^[25]

$$\Delta x = N \cdot \frac{\lambda^2}{2n_g \Delta\lambda}, \quad (2)$$

式中： N 为互相关运算中滑动窗内采样点的个数； λ 为可调谐激光器的中心波长； n_g 为传感光纤的折射率。由式(2)可知,空间分辨率 Δx 与扫频范围 $\Delta\lambda$ 呈反比关系,因此在选择扫频范围时不能牺牲 OFDR 系统的空间分辨率。

由式(1)和(2)可知,当选取中心波长为 1550 nm 的激光器,设置扫频范围为 10 nm、扫频速率为 1000 nm/s 时,OFDR 传感系统能够以 100 Hz 的采样率对外界参量传感,同时还可以保持 0.01 m 的高空间分辨率,满足动态应变的测量需求。目前市场中存在的高速扫频激光器的扫频速率能够达到监测要求,如 WSL-1000 扫频激光器的重复扫频频率最大能够达到 16 kHz,因此对于风机叶片动态监测是可行的。

3 运行状态的风机叶片仿真及结果分析

采用上述 OFDR 系统能够得到一组时域上的动态应变值。为便于分析风机叶片损伤情况,需要对不同风况下的动态应变数据进行分析 and 处理,从而得到叶片表面应变分布并据此识别叶片损伤信息。

3.1 动态应变数据分析

应用 ANSYS 软件对风机叶片进行有限元分析可以得到叶片表面动态应变数据。风机叶片采用 NACA4415 翼型,叶展长度为 2.8 m,叶轮直径为 5.8 m,材料是以环氧树脂为基体、玻璃纤维为增强

体的玻璃钢。将风机叶片模型导入 ANSYS 中,在叶片上 0.1~2.7 m 范围内设置 1 cm 等间隔的探针用来传感叶片表面应变数据。对运行状态下的风机叶片进行仿真需要联合流体 Fluent 模块和瞬态分析模块,Fluent 模块能够模拟风机叶片在不同风速载荷下的工作状态,从而得到叶片表面的压力数据。将压力数据导入瞬态分析后便能够对运行状态风机叶片进行仿真分析。Fluent 模块设置进口(inlet)区域和出口(outlet)区域实现控制风机正向通风和反向通风,通过设置“流体速度”参数来控制风速,在仿真实验中分别以 11、14、17、20、23 m/s 流速的风推动叶片旋转。

叶片模型网格划分的优劣会直接影响求解结果的准确性。网格过于稀疏会导致仿真结果错误;网格过于密集会使数据量剧增,导致求解的时间过长。在本例 ANSYS 仿真中将叶片表面网格单元尺寸调整为 0.05 cm,对载荷面网格加细处理为 0.01 cm。图 2 为风机叶片流体域模型及其网格划分。

通过有限元仿真求解得到叶片表面的应变数据,图 3 为 0.2~0.3 s 内风机叶片表面的应变值。当叶片处于振动状态时,每个时刻叶片表面应变值的变化较大,不能对工作状态下的叶片进行准确损伤定位和损伤程度识别。下面以叶根位置的传感点为例描述动态应变处理过程。图 4(a)为不同风速下叶根传感位置处 1 s 内的应变值,对其进行快速傅里叶变换得到的应变频域如图 4(b)所示。由图 4(b)可见,在不同风速下叶片应变在 7.143 Hz 处均出现了峰值,称该峰值为基频幅值。因此不同风速下叶片的应变基频频率是固定的,应变基频幅值随风速升高而增大,由于应变基频信息能够反映出该传感点在不同风速下的应变情况,因此提出以各传感位置动态应变的频域基频幅值构成叶片表面应变分布对损伤情况进行分析。

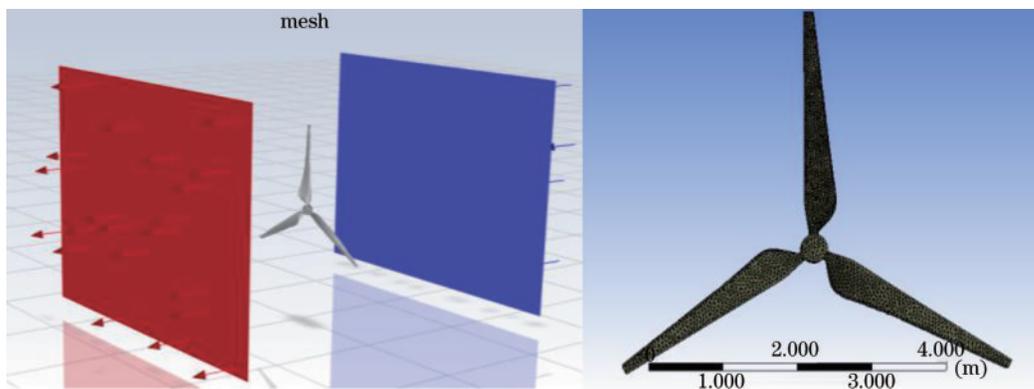


图 2 风机叶片流体域模型及其网格划分

Fig. 2 Wind turbine blade fluid domain model and its meshing

图 5 为 5 种风速下的无损伤叶片表面第 4 条光纤路径的应变分布。如图 5 所示,当风速越大时风机叶片受到的力也越大,同时应变也越大,应变分布图能够表明

在测量时间内动态叶片表面的应变情况。应变分布曲线具有降-升-降的分布规律,这是因为叶片表面传感点处的应变与该点处的截面面积和截面后叶片的重力有

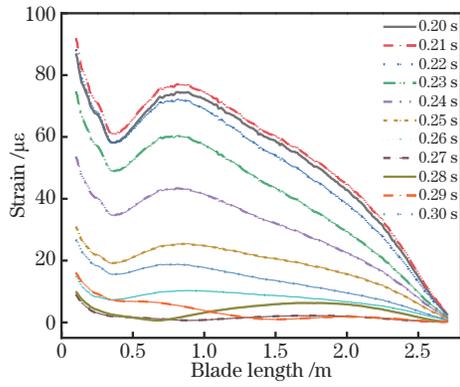


图 3 叶片不同时刻的应变分布

Fig. 3 Strain distribution of the blade at different moments

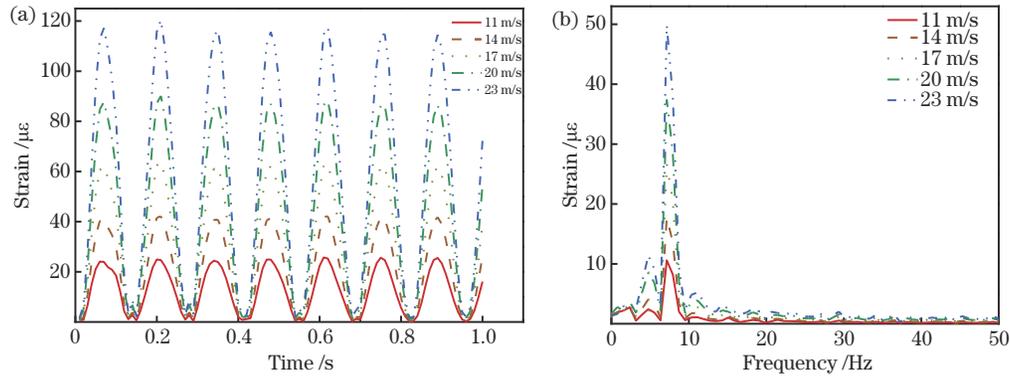


图 4 不同风速下叶根传感位置处应变。(a)时域图;(b)频域图

Fig. 4 Strain at the leaf root sensing location at different wind speeds. (a) Time domain diagram; (b) frequency domain diagram

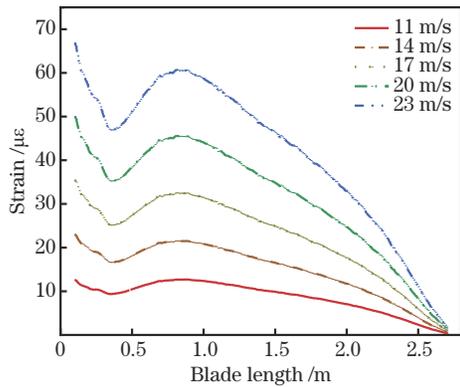


图 5 不同风速下叶片应变分布

Fig. 5 Blade strain distribution at different wind speeds

3.2 不同风况的风机叶片应变分析

风机叶片运行的风况可以分为风速和风向,为识别不同风况下的风机叶片损伤信息,对应变数据采用了归一化处理,避免了运行环境的差异对损伤识别造成影响。图 7(a)显示了对图 5 中 5 种风速下的应变分布进行归一化后的结果。11 m/s 和 14 m/s 风速的应变分布游离在其他高风速之外,这是因为风机叶片受到重力和离心力的作用。风速低时,风机叶片的离心力偏小,此时主要受到重力的影响;风速高时,风机叶片受到的离心力起到主导作用,风机叶片刚度增大,因此归一化后高风速下的应变

关。由胡克定理可知,叶片表面应变 ϵ 表达式^[26]为

$$\epsilon = \sigma / E, \quad (3)$$

式中: σ 为叶片的轴向应力; E 为叶片的弹性模量。轴向应力 $\sigma = F / A$ ^[27],代入式(3)可得

$$\epsilon = F / (EA), \quad (4)$$

式中: F 和 A 分别为叶片截面的载荷和截面面积。由式(4)可知,叶片的应变值与截面面积成反比。图 6 中点划线为风机叶片的截面面积分布。将 17 m/s 应变分布分别与各传感点处的截面面积相乘即为单位截面面积的应变分布,结果如图 6 虚线所示。单位截面面积的应变分布曲线呈递减趋势,这表明传感点处的应变同样与其截面后的叶片重力成正比,对式(4)进行了验证。

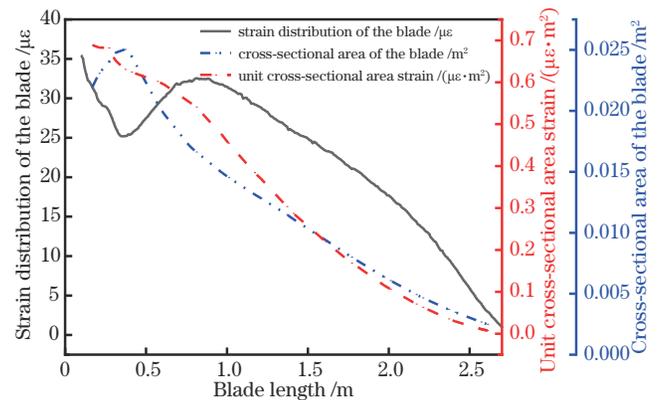


图 6 单位截面面积应变分布

Fig. 6 Strain distribution per unit cross-sectional area

分布重合在一起,而低风速的曲线则游离在外。

在叶片表面设置了 4 cm × 10 cm × 1 cm 的损伤块,为了便于后文引用将该尺寸的损伤称为标准损伤。通过降低损伤块的弹性模量模拟叶片损伤情况,其损伤程度可以表示为

$$D = (E - E') / E, \quad (5)$$

式中: E' 为损伤块的弹性模量。在叶片 1.2 m 处设置了损伤 40% 的标准损伤,并对该叶片施加不同风速下的正向风(面向叶片迎风面的一侧)载荷,得到风机叶片应变分布如图 7(b)所示,对不同风速应变归一化

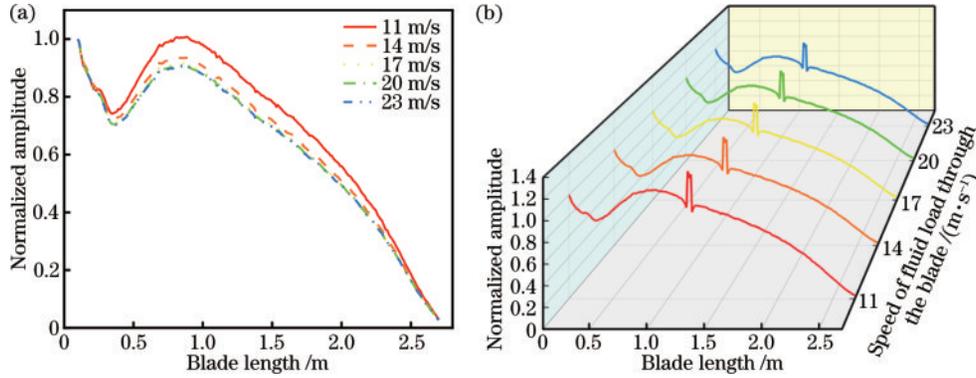


图 7 正向风时不同风速下叶片应变值。(a)无损叶片归一化应变分布;(b)损伤叶片归一化应变分布

Fig. 7 Blade strain values at different wind speeds in forward wind. (a) Normalized strain distribution of undamaged blade; (b) normalized strain distribution of damaged blade

后,损伤位置的应变变化幅度几乎相同,因此根据损伤部分的归一化应变幅值变化能够得到不同风速下的风机叶片损伤程度。

当风机叶片受到反方向风载荷的作用时,不同风速下叶片的损伤程度同样可以根据归一化的应变分布进行识别。由于风向为反方向,风机叶片表面发生压缩,因此对其测量出的应变值为负值。为了将反向风与正向风进行比较,对受反向风载荷的叶片表面动态

应变数据取绝对值,生成不同风速下的叶片应变分布,如图 8(a)所示。

在仿真中设置了与上文损伤位置与损伤程度相同的损伤块,计算出应变分布后对其进行归一化处理,不同风速下的损伤叶片归一化应变分布如图 8(b)所示,叶片受反向风时损伤位置处归一化应变集中幅值相同,因此归一化数据处理方法能够解决在不同风速下正向风与反向风的损伤程度识别问题。

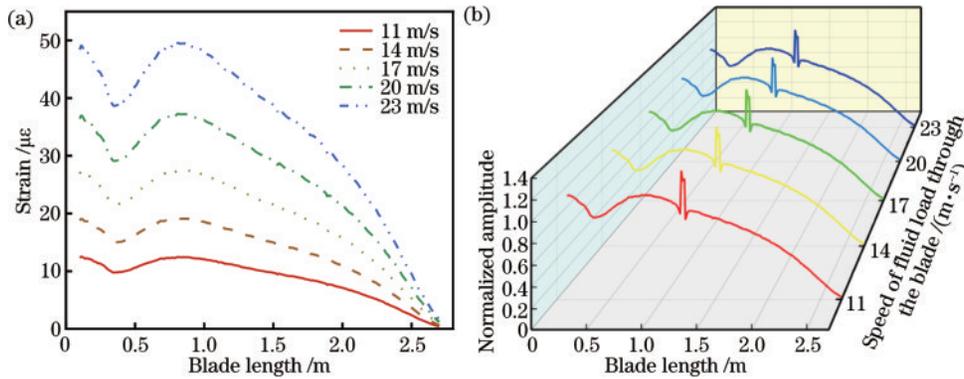


图 8 反向风时不同风速下叶片应变值。(a)无损叶片应变分布;(b)损伤叶片归一化应变分布

Fig. 8 Blade strain values at different wind speeds in reverse wind. (a) Undamaged blade strain distribution; (b) damaged blade normalized strain distribution

3.3 风机叶片应变分布分析

前述分析了不同风向与不同风速下叶片的应变分布,下面将风向与风速参量固定,通过对叶片单一损伤和多损伤情况的二维应变分布分析以识别损伤位置及其尺寸。

在叶片叶展方向上 1.78~1.82 m 处设置了 4 cm × 3 cm × 1 cm 的损伤块,损伤程度为 10%。第 3、4、5 条光纤路径经过损伤块,对其仿真得到了运行状态下叶片的二维应变分布,如图 9(a)所示。经过损伤块的光纤路径在 1.8 m 处出现了应变集中并且应变集中幅值相同;而其余路径的应变分布在 1.8 m 处虽有应变集中,但其变化量较小,且距损伤部分越远,应变变化越小直至消失。因此,通过叶片二维应变分布的应变集中信息得到经过

损伤块的光纤路径,根据垂直叶展方向的分辨率便可以识别出该方向的损伤长度信息。在图 9(a)中,3 条光纤路径应变集中较强,因此损伤宽度判断为 2.6 cm,实际损伤宽度为 3 cm,误差为 0.4 cm。

在叶片叶展方向上 0.98~1.02 m 和 2.18~2.22 m 处分别设置了宽度为 4 cm 和 2 cm 的损伤,其损伤程度为 50%,叶片表面的二维应变分布如图 9(b)所示。根据二维应变分布的应变集中可知,第 3~6 条路径经过 1.0 m 处的损伤,该位置损伤宽度判断为 3.9 cm。第 4~5 条路径经过 2.2 m 处的损伤,损伤宽度判断为 1.3 cm,误差分别为 0.1 cm 和 0.7 cm。因此叶片的二维应变分布能够识别在单一损伤和多损伤情况下的损伤位置、长度和宽度。

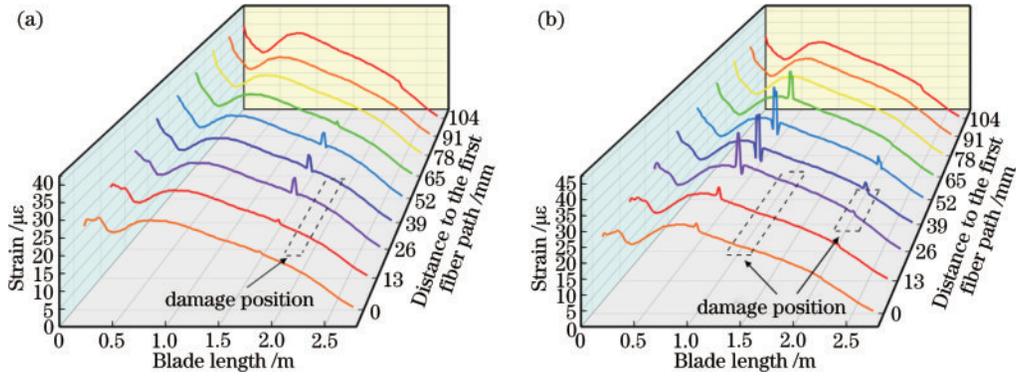


图 9 叶片二维应变分布。(a)单一损伤时;(b)多处损伤时

Fig. 9 Two-dimensional strain distribution of the blade. (a) Single damage; (b) multiple damages

3.4 风机叶片损伤位置识别方法

对叶片表面应变变化率分布分析能够识别应变集中的位置,完成损伤定位功能。但是当叶片损伤程度较低时,损伤处的应变集中并不明显,在识别损伤时就会容易引起误判。图 10(a)为 2.4 m 处损伤时损伤程度为 10% 的标准损伤叶片应变分布,如图 10(a)所示 2.4 m 处的应变集中幅值较小,极易与由测量误差引起的应变幅值波动相混淆,从而导致误判。因此本文通过应变变化率分布识别损伤位置。风机叶片表面各传感位置处的归一化应变变化率 k 为

$$k(i) = \frac{\varphi(i+1) - \varphi(i)}{\Delta l}, \quad (6)$$

式中: $k(i)$ 为第 i 处传感位置的归一化应变频域幅值变化率; $\varphi(i+1)$ 为第 $i+1$ 处传感位置的归一化应变频域幅值; Δl 为 OFDR 系统的空间分辨率。

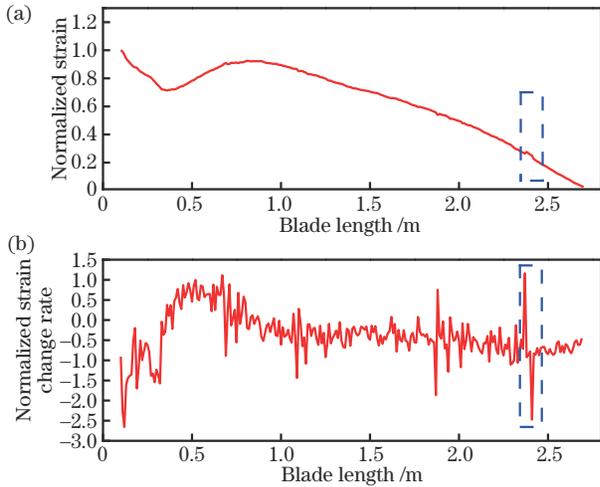


图 10 叶片 2.4 m 处 10% 损伤程度的应变。(a)归一化应变分布;(b)归一化应变变化率分布

Fig. 10 Strain with 10% damage degree at 2.4 m of the blade.

(a) Normalized strain distribution; (b) normalized strain change rate distribution

将图 10(a)的应变分布数据代入式(6)可得 2.4 m 处损伤程度为 10% 的归一化应变变化率分布,如图 10(b)所示。在 2.4 m 左右出现了一对正负峰值,峰

值的位置范围为 2.37~2.41 m。正峰值与负峰值的幅值绝对值的大小几乎相等,而叶片其他位置处的应变变化率具有随机性,峰值变化无规律,因此通过遍历风机叶片的归一化应变变化率分布,识别正负峰值的位置便可以实现损伤定位。

3.5 风机叶片损伤程度识别方法

损伤程度表示风机叶片亟待修复的紧急程度。若损伤程度过大,尽早修复风机叶片可以避免一场灾难性的事故。风机叶片损伤位置传感点处的应变 ϵ' 与损伤程度 D 的关系可以根据式(3)和式(5)求得,其表达式为

$$\epsilon' = \frac{\sigma' \epsilon}{(1 - D) \sigma}, \quad (7)$$

式中: σ 和 σ' 分别为损伤位置传感点处损伤前后的轴向应力; ϵ 为损伤前传感点处的应变值。图 11(a)为 1.0 m 处损伤时不同损伤程度下的风机叶片归一化应变分布图,其中损伤程度范围为 10%~90%。将损伤处的应变值投影至平面上,形成归一化应变与损伤程度关系曲线,该曲线趋势符合式(7)的函数关系。

由图 9(b)可知,叶片上两处损伤的损伤程度均为 50%,而 1.0 m 处的应变集中相较于 2.2 m 处更加明显,因此在同一损伤程度下不同损伤位置的应变集中幅值与其应变基数(无损伤情况下该位置的应变值)有关。为了实现对不同损伤位置判别损伤程度,将损伤处的应变值与其应变基数进行比值运算,将其称为应变系数 $\beta = \epsilon'/\epsilon$ 。根据表 1 的损伤位置数据,分别在 12 个损伤位置处设置了标准损伤,每个损伤位置设置了 10%~90% 共 9 种损伤程度,对 108 种不同的损伤情况进行仿真分析后得到不同损伤情况下的应变分布。分别求出各损伤情况下的 β 后能够得到其与损伤程度 D 的关系,如图 11(b)中的散点所示。对其进行曲线拟合后,可知 β 与 D 的关系式为

$$\beta = \frac{0.718}{1 - 0.9168D} + 0.299, \quad (8)$$

式(8)中应变系数 β 与损伤程度 D 是一一对应的,因此测量出待识别风机叶片损伤位置处的 β 后根据式(8)

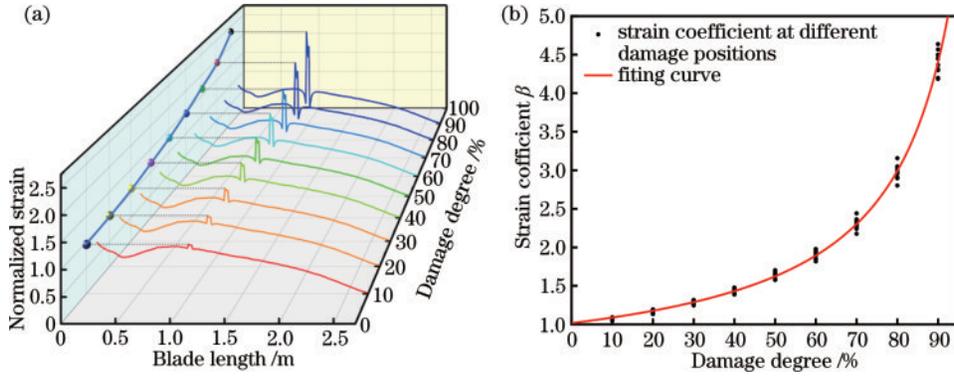


图 11 损伤叶片应变及损伤系数。(a)1.0 m 损伤处不同损伤程度的风机叶片归一化应变分布图;(b)不同损伤情况下损伤程度与损伤系数关系图

Fig. 11 Strain distribution and damage coefficient of the damaged blade. (a) Normalized strain distribution diagram of fan blades with different damage degrees at 1.0 m damage; (b) relationship between damage level and damage factor for different damage cases

表 1 损伤位置及范围信息

Table 1 Information on the location and extent of the injury

Damage center position /m	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
Damage range /m	0.18-0.22	0.38-0.42	0.58-0.62	0.78-0.82	0.98-1.02	1.18-1.22
Damage center position /m	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
Damage range /m	1.38-1.42	1.58-1.62	1.78-1.82	1.98-2.02	2.18-2.22	2.38-2.42

便可以得到该位置的损伤程度。对于不同风速下的损伤程度识别而言,由于不同风速下叶片损伤位置处的归一化应变增量是相同的,损伤处的应变基数 ϵ 与应变增量 $\Delta\epsilon$ 之和为损伤后的应变值 ϵ' ,将数据代入式(8)后便可得该风速下的损伤程度。

为了验证该损伤识别方法的正确性,在仿真中设

置了不同材料、风速、损伤位置和损伤程度样本,并将得到的叶片应变数据代入损伤识别方法,结果如表 2 和表 3 所示,其中验证样本损伤位置判断正确率为 100%,损伤程度判断误差最大为 3.90%,平均误差为 1.925%,结果表明该损伤识别方法具有一定的准确性和实用性。

表 2 单一损伤的验证样本信息及其判断结果

Table 2 Validation sample information of a single injury and its judgment result

Blade material	Wind speed / ($m \cdot s^{-1}$)	Damage position /m	Actual damage degree /%	Degree of damage identified /%	Identification error /%
FPR	15	1.20	62.50	62.10	0.40
FPR	17	0.27	25.00	28.60	3.60
FPR	17	1.20	45.00	46.80	1.80
FPR	21	1.20	35.00	37.70	2.70
Aluminum	17	1.60	50.00	50.80	0.80
Steel	17	1.60	50.00	46.10	3.90

表 3 多损伤的验证样本信息及其判断结果

Table 3 Validation sample information of multiple impairments and their judgment result

Blade material	Wind speed / ($m \cdot s^{-1}$)	Damage position /m	Actual damage degree /%	Degree of damage identified /%	Identification error /%
FPR	17	0.8	40.00	39.10	0.90
		1.2	70.00	68.30	1.70
FPR	17	0.6	10.00	7.70	2.30
		1.4	50.00	50.60	0.60
FPR	23	0.4	10.00	7.50	2.50
		2.2	75.00	76.90	1.90

4 损伤识别实验

由于风机叶片尺寸较大,不便于在实验室条件下

进行测量,因此用一段铝板悬臂梁代替叶片进行实验。由于激光器的扫频速度存在限制,实验中测量了静态悬臂梁表面的应变并对其进行了损伤识别。而动态测

量可以认为是多次静态测量的组合,因此测量静态悬臂梁表面应变分布同样能够识别损伤信息。

实验系统的基本结构如图 12 所示,整个系统包括附加辅助干涉仪和主干涉仪两部分,其中 TLS 为扫频激光器,PD 为光电探测器,FUT 为被测光纤,clock 为时钟触发信号。光耦合器 OC 1 将 10% 的扫频光引入辅助干涉仪,将其余 90% 的光引入主干涉仪。辅助干涉仪与 OC 1 之间连接着一个隔离器(Isolator),这样能够避免光纤中的背向光对激光器造成损伤。OC 3 是 50:50 的耦合器,两束光被法拉第旋转镜(FRM)反射回 OC 3 中生成了拍频光,其信号功率可以通过可变

光衰减器(VOA)进行调节,这束拍频光将作为外部时钟控制采集卡对主干涉仪信号进行采样。主干涉仪中的 OC 2 将 20% 的光引入传感路的环形器(circulator)中,将其余 80% 的光引入参考路中。进入环形器的光由 2 端口进入传感光纤,在其中发生背向散射后由 3 端口输出,并由偏振分束器 PBS 1 将传感光分为正交的两束光(S 光和 P 光)。参考路中的光经过一段延迟光纤后同样由 PBS 2 分为两束正交光。传感光与参考光中相同偏振状态的光分别在 OC 4 和 OC 5 中发生干涉,平衡光探测器(BPD)对干涉信号进行光电转换后由采集卡(DAQ)采集数据,最后由计算机进行数据处理。

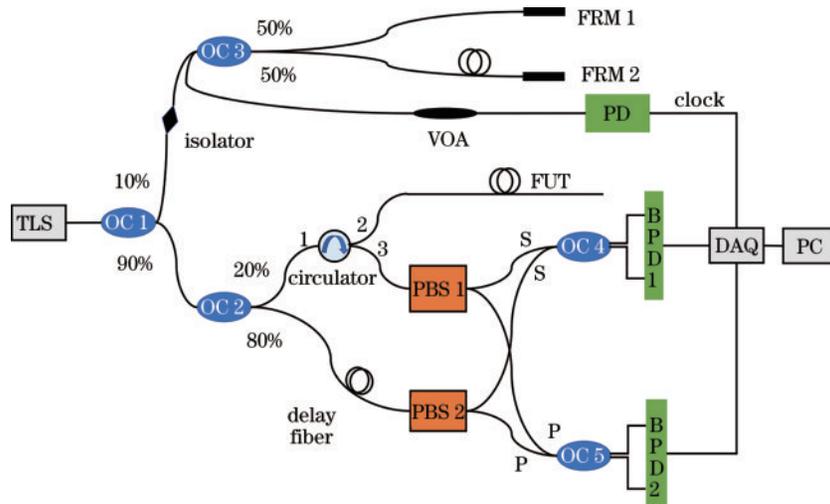


图 12 基于 OFDR 的光纤传感系统结构示意图

Fig. 12 Structure diagram of optical fiber sensing system based on OFDR

搭建完成的 OFDR 传感系统中可调谐激光器选择安捷伦 Keysight 81600B,设置扫频范围为 1540 ~ 1560 nm,扫频速度为 20 nm/s;光电探测器选择 Newport 2117-FC-M 型号,该探测器测量范围较宽且拥有多个增益档位可以选择使用;数据采集卡为 NIPCIe-6374 型号,其采样速率为 3.571 MSa/s。通过设置 OFDR 传感系统的采样点个数使空间分辨率达到 0.5 cm,使其满足被测试件的测试需求。

实验中截取了一块尺寸为 500 mm×50 mm×2 mm 的铝板,将其一端固定,使其呈现为悬臂梁结构。在铝板表面 230 mm 处切割了尺寸为 30 mm×25 mm×1 mm 的损伤块。传感光纤采用聚酰亚胺光纤,这种光纤对应变更加敏感。光纤在粘贴过程中应尽量处于不受力的状态,避免使光纤产生扭曲。为了防止传感光纤末端的菲涅耳反射过强,将光纤缠绕数圈形成一个光纤环,这样能使光纤末端的光信号强度衰减。在传感系统至铝板之间留出一段光纤,该部分光纤为不受力的状态,能够为整个实验提供温度补偿。经过损伤位置的光纤按照“直线—曲线—直线”的周期变化方式固定,只在直线部分涂胶固定,弯曲部分光纤处于放松状态,这是为了避免光纤中的应力传递。同时,在无损伤

的位置铺设一条完全由固化胶固定的光纤作为对照组,粘贴方式与粘贴后的测试件如图 13 所示。

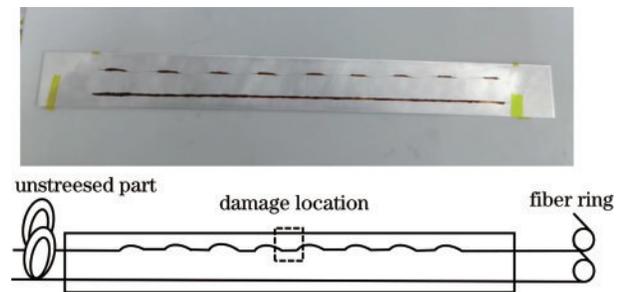


图 13 光纤粘贴方式与粘贴后的试件

Fig. 13 Fiber optic paste method and paste after the specimen

将传感光纤连接到 OFDR 系统中,在悬臂梁自由端施加载荷使其发生 2 cm 的位移,测量得到悬臂梁表面的应变如图 14(a)所示。

图 14(a)中曲线 1 和曲线 2 分别为经过损伤位置和无损伤位置光纤的应变值,为了便于观察将曲线 2 向左进行平移。曲线 1 和曲线 2 幅值与变化趋势相同,而曲线 1 中多处应变值出现回落,该位置即为弯曲光纤的位置,证明以直线和曲线交替固定的方式能够避免光纤上的应力传递。通过对未施加应变和施加应变

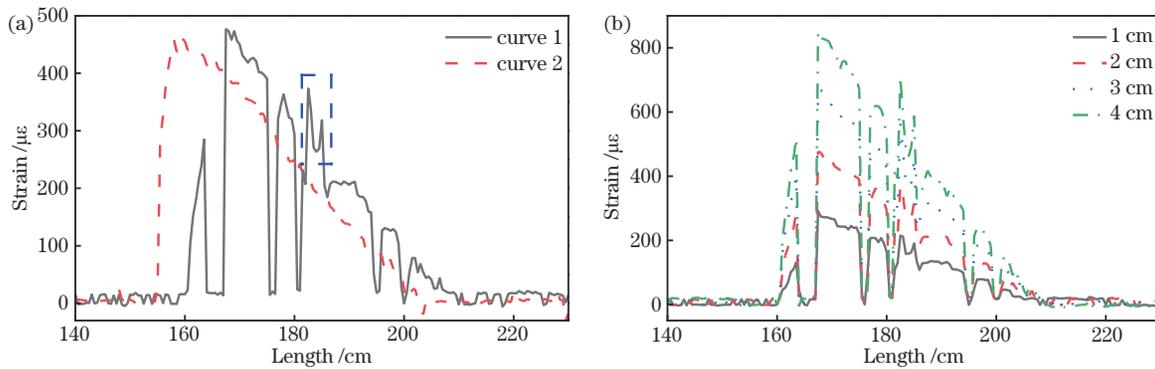


图 14 悬臂梁应变。(a)损伤与无损悬臂梁的应变分布;(b)损伤悬臂梁不同形变时的表面应变分布

Fig. 14 Strain of cantilever beams. (a) Strain distribution of damaged and undamaged cantilever beams; (b) strain distribution of damaged cantilever beams at different deformations

两组数据进行互相关处理,解调得到施加应变状态下的应变分布如曲线 1 所示。在该应变分布中 182.5~185.0 cm 处出现幅值为 373.35 $\mu\epsilon$ 的应变集中,如图 14(a)中虚线框所示。

对悬臂梁施加载荷使其发生不同程度的形变,这样能够模拟风机叶片振动的瞬时状态。分别使损伤悬臂梁发生 1、2、3、4 cm 的形变,由 OFDR 系统测量的应变分布如图 14(b)所示。在形变程度不同时,应变分布中全部出现了应变集中现象,并且该位置与悬臂梁损伤位置对应,因此通过 OFDR 传感系统能够检测出损伤情况,证明了所提损伤识别方法的可行性。

5 结 论

给出了一种基于 OFDR 技术的风机叶片损伤实时检测方法,分析了 OFDR 系统动态应变测量的可行性,并通过有限元仿真分析了不同风向及风速下的风机叶片表面应变分布,结果显示在单一损伤和多损伤情况下损伤位置处出现了应变集中现象且应变集中位置与损伤位置相叠加,应变集中的幅值与损伤位置、损伤程度都相关,因此对应变集中的位置和幅值进行分析,可判断损伤位置和损伤程度。当空间分辨率为 1 cm,应变采样频率为 100 Hz 时,运用这种损伤检测方法能够准确识别损伤的长度及位置,对于损伤程度识别的平均误差为 1.925%。搭建了 OFDR 传感系统进行了悬臂梁损伤识别实验,观察了悬臂梁表面的应变分布,结果表明在损伤位置处发生了应变集中,其幅值为 373.35 $\mu\epsilon$,该实验模拟了悬臂梁振动的瞬时状态,证明了所提损伤识别方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] Fang K, Zhou Y H, Wang S, et al. Assessing national renewable energy competitiveness of the G20: a revised Porter's Diamond Model[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 719-731.
- [2] Doliński L, Krawczuk M. Damage detection in turbine wind blades by vibration based methods[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 181: 012086.
- [3] Liu W Y, Tang B P, Han J G, et al. The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 466-472.
- [4] Márquez F P G, Tobias A M, Pérez J M P, et al. Condition monitoring of wind turbines: techniques and methods[J]. *Renewable Energy*, 2012, 46: 169-178.
- [5] Yang R Z, He Y Z, Zhang H. Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 1225-1250.
- [6] Gómez Muñoz C Q, García Marquez F P, Hernandez Crespo B, et al. Structural health monitoring for delamination detection and location in wind turbine blades employing guided waves[J]. *Wind Energy*, 2019, 22(5): 698-711.
- [7] Taraghi I, Lopato P, Paszkiewicz S, et al. X-ray and terahertz imaging as non-destructive techniques for defects detection in nanocomposites foam-core sandwich panels containing carbon nanotubes[J]. *Polymer Testing*, 2019, 79: 106084.
- [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] Park J W, Im K H, Yang I Y, et al. Terahertz radiation NDE of composite materials for wind turbine applications [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(6): 1247-1254.
- [10] Ciang C C, Lee J R, Bang H J. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(12): 122001.
- [11] Garg D P, Zikry M A, Anderson G L. Current and potential future research activities in adaptive structures: an ARO perspective[J]. *Smart Materials and Structures*, 2001, 10(4): 610-623.
- [12] 但丁谊, 丁克勤, 舒安庆. 回形结构光纤布拉格光栅应变传感器的优化与测试[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(17): 1728002.

- Dan D Y, Ding K Q, Shu A Q. Optimization and test of fiber Bragg grating strain sensor with circular structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(17): 1728002.
- [13] Guemes A, Fernández-López A, Díaz-Maroto P F. A permanent inspection system for damage detection at composite laminates, based on distributed fiber optics sensing[EB/OL]. [2023-03-02]. <https://www.ndt.net/article/aero2016/papers/AlfredoGuemes.pdf>.
- [14] 吴慧娟, 刘欣雨, 饶云江. 基于 Φ -OTDR 的光纤分布式传感信号处理及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306003.
- Wu H J, Liu X Y, Rao Y J. Processing and application of fiber optic distributed sensing signal based on Φ -OTDR[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306003.
- [15] 唐超, 林靖凯, 欧阳斌, 等. 基于 Φ -OTDR 的智能识别技术研究[J]. *光通信技术*, 2022, 46(3): 8-12.
- Tang C, Lin J K, Ouyang H, et al. Research on intelligent recognition technology based on Φ -OTDR[J]. *Optical Communication Technology*, 2022, 46(3): 8-12.
- [16] 赵丽娟, 魏迎健, 徐志钮. 基于 Φ -OTDR 的振动事件识别分类器研究进展[J]. *光通信技术*, 2023, 47(2): 1-5.
- Zhao L J, Wei Y J, Xu Z N. Research progress of vibration event recognition classifier based on Φ -OTDR[J]. *Optical Communication Technology*, 2023, 47(2): 1-5.
- [17] Naruse H, Tateda M, Ohno H, et al. Dependence of the Brillouin gain spectrum on linear strain distribution for optical time-domain reflectometer-type strain sensors[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(34): 7212-7217.
- [18] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 1981, 39(9): 693-695.
- [19] Güemes A, Fernández-López A, Díaz-Maroto P F, et al. Local and global approaches for damage detection in composite structures by fiber optic sensor[C]//*Structural Health Monitoring 2017*, September 12-14, 2017, Lancaster, PA. Lancaster: DEStech Publications, Inc., 2017.
- [20] 尹国路, 徐州, 蒋锐, 等. 基于光频域反射仪的光纤分布式三维形状传感技术[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0106002.
- Yin G L, Xu Z, Jiang R, et al. Optical fiber distributed three-dimensional shape sensing technology based on optical frequency-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0106002.
- [21] Jothibasu S, Du Y, Anandan S, et al. Spatially continuous strain monitoring using distributed fiber optic sensors embedded in carbon fiber composites[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(7): 072004.
- [22] Mills J A, Hamilton A W, Gillespie D I, et al. Identifying defects in aerospace composite sandwich panels using high-definition distributed optical fibre sensors[J]. *Sensors*, 2020, 20(23): 6746.
- [23] Cazzulani G, Cinquemani S, Benedetti L, et al. Load estimation and vibration monitoring of scale model wind turbine blades through optical fiber sensors[J]. *Engineering Research Express*, 2021, 3(2): 025036.
- [24] Yakuhina A, Kadochkin A, Svetukhin V, et al. Investigation of side wall roughness effect on optical losses in a multimode Si_3N_4 waveguide formed on a quartz substrate[J]. *Photonics*, 2020, 7(4): 104.
- [25] Venkatesh S, Sorin W V. Phase noise considerations in coherent optical FMCW reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(10): 1694-1700.
- [26] McGuigan A P, Briggs G A D, Burlakov V M, et al. An elastic-plastic shear lag model for fracture of layered coatings[J]. *Thin Solid Films*, 2003, 424(2): 219-223.
- [27] Hoffmann S, Östlund F, Michler J, et al. Fracture strength and Young's modulus of ZnO nanowires[J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(20): 205503.