

基于FBGs的复合材料桨叶承载与损伤监测*

刘勇¹, 胡海晓^{2,3}, 夏俊康³, 曹东风², 李书欣^{2,3}

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院 武汉, 430070)

(2. 武汉理工大学材料复合新技术全国重点实验室 武汉, 430070)

(3. 武汉理工大学新材料力学理论与应用湖北省重点实验室 武汉, 430070)

摘要 针对复合材料桨叶在运行过程中的结构健康监测问题,提出了一种基于光纤光栅传感器(fiber Bragg grating sensor,简称FBGs)的桨叶实时监测方法。首先,采用内埋FBGs的方式对复合材料桨叶运转过程中的结构动态响应进行实时监测,分别采集不同叶偏角、转速以及测点位置的动态应变;然后,借助三维数字图像相关技术(digital image correlation,简称DIC-3D)对桨叶表面位移场进行同步监测;最后,在复合材料叶片内引入冲击损伤,对比完整结构和含损伤结构的FBGs监测信号,确定适用于复合材料桨叶结构的损伤指标。结果表明:FBGs监测的桨叶结构内部动态应变信号周期与DIC测得的表面位移场变化周期一致,且叶根处的FBGs动态应变信号的趋势量随着叶偏角和转速的增大而增大,验证了FBGs实时监测技术的可行性。对比不同实验工况下引入损伤前后监测信号的频率信息可知,叶根处的FBGs的第1阶主频是轴频,与转速对应;第2阶主频(叶频)所对应的振幅对桨叶的损伤较为敏感,可作为一种桨叶结构局部损伤的识别指标。

关键词 光纤光栅传感器;复合材料桨叶;实时监测;损伤识别;数字图像相关

中图分类号 TP212.9;TB332

引言

先进复合材料具有比强度高、比模量高、抗疲劳特性好以及可设计等优点^[1],广泛应用于旋转机械结构中。桨叶是旋转机械的核心部件,在复杂、严苛的服役工况下,复合材料桨叶结构的运行状态与损伤程度检测是保障装备安全运行的关键。

目前,复合材料桨叶的状态检测手段主要分为定期检测和实时监测。定期检测是通过各种无损检测技术对叶片的结构状态进行检查^[2],该方法需要在停机后进行检测,既增加了人力成本,也影响设备的使用效率。实时监测是通过在线监测的方法对桨叶的运转状态进行连续检测,通过数据分析及时发现桨叶状态的异常,并迅速通知工作人员,可有效降低结构的运维成本,是极具发展潜力的一种技术。然而,复合材料桨叶的外部运行环境恶劣,受力状态复杂,同时面临电磁干扰、外物冲击等挑战,这极大限制了常规电磁类传感器在叶片监测中的应用。

光纤光栅传感器(fiber Bragg grating sensor,简称FBGs)凭借其体积小、质量轻、耐腐蚀、抗电磁干

扰、埋入性好和复用能力强等优点,成为复合材料结构健康监测领域中最具发展前景的传感器之一^[3]。Schroeder等^[4]较早提出了采用FBGs进行风力机桨叶在线监测的想法,通过外贴FBGs的方式,探究了连续循环应变载荷对FBGs的应变传递的影响,验证了FBGs监测风力机桨叶的可行性。Hsu等^[5]提出了一种FBGs动态应变信号的局部柔度法,用于旋转风力涡轮机叶片的损伤检测。Nur等^[6]提出了一种基于光频域反射技术的复合材料叶片动态检测方法,该技术使用瑞利背散射信号将现有光纤转换为分布式光纤应变传感器,可用于复合材料桨叶的结构健康监测。

Park等^[7]面向风电叶片的实时监测需求,设计了一种光纤光栅传感系统,对监测信号进行时域和频域分析后,获得了不同运行状态下的结构响应,最后结合有限元方法对测试结果进行了验证。蒋熙馨^[8]使用FBGs对航空发动机的叶片开展了动应变测量以及振动分析。徐刚等^[9]采用外贴FBGs的形式对复合材料桨叶的固有频率和变形进行了监测。徐萍^[10]通过外贴FBGs监测了叶片表面应变分布变

* 先进能源科学与技术广东省实验室佛山分中心(佛山仙湖实验室)开放基金资助项目(XHT2020-002);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021ⅣA068,2020Ⅲ028GX,2021Ⅲ015JC)

收稿日期:2022-10-25;修回日期:2022-12-12

化,对比了叶片完好状态和含裂纹状态下的时域和频域信号差异。Sierra-Pérez 等^[11]采用内埋光纤传感器的方式对风机叶片进行了分布式实时传感,通过对不同传感器所测应变场进行分层非线性主成分分析,成功实现了叶片缺陷的实时监测。

笔者通过内埋FBGs的方式对复合材料桨叶的内部动态应变响应进行监测,利用三维数字图像相关技术(digital image correlation, 简称DIC-3D)验证FBGs监测复合材料桨叶动态响应特征的可行性。通过对比FBGs监测桨叶无损和有损2种状态下的动态响应信号的趋势量和波动量特征,寻找可用于复合材料桨叶结构健康监测的损伤指标。

1 实验设置

1.1 实验材料

试样由 T700 级单向碳纤维/环氧树脂预浸料 (EV201-35%-12KHF30F-U-200gsm-1000, 江苏恒神股份有限公司) 制作,采用手工铺贴+热压罐 (RG21, 西安龙德科技有限公司) 成型工艺进行制备,固化工艺曲线如图 1 所示。

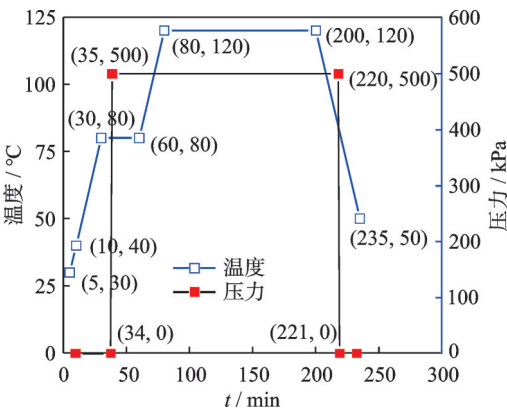


图1 固化工艺曲线
Fig.1 Curves of curing process

每个桨叶内部布置4个测点,通过熔接机熔接后以双光栅串的形式埋入桨叶中,FBGs参数见表1。各FBGs的布置位置及桨叶试样示意图如图2所示

表 1 FBGs 参数

Tab.1 Parameters of FBGs	
光栅参数	具体数值
中心波长/nm	光栅串 1:1 535(FBG ₁)+1 550(FBG ₃)
	光栅串 2:1 545(FBG ₂)+1 555 (FBG ₄)
反射率/%	38
栅区长度/mm	10
应变灵敏系数	1.1

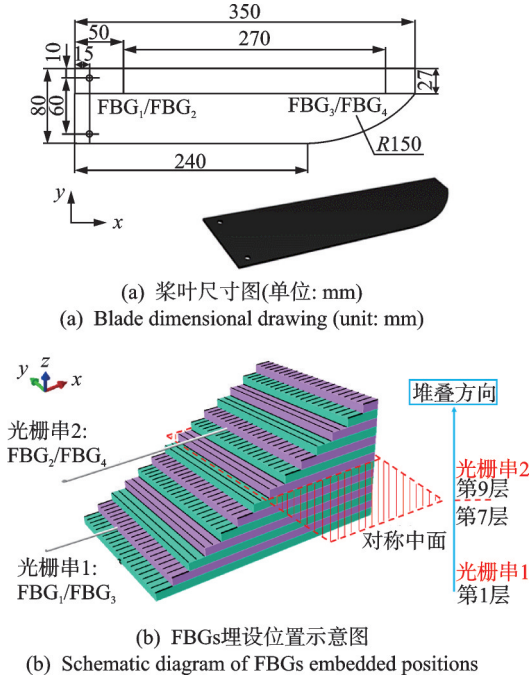


图2 桨叶试样示意图
Fig.2 Diagram of blade sample

示,具体的铺层设计与FBGs埋设的层间位置为 $[0^\circ/\text{FBGs}/0^\circ/90^\circ_2/0^\circ_2/90^\circ_2/0^\circ/\text{FBGs}/0^\circ/90^\circ_2/0^\circ_2]$ 。

1.2 实验装置

图3为实验装置图。复合材料桨叶通过螺栓与叶片夹持装置相连,并固定于空心轴的桨毂上。光纤从桨叶中引出并通过空心传动轴、空心轴步进电机和光纤滑环接入光纤解调仪。整个装置底部通过螺栓固定在隔振平台上,尽可能隔绝外界振动、噪声干扰。

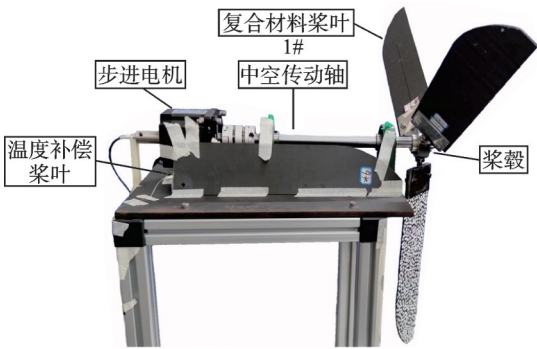


图3 实验装置图
Fig.3 Diagram of experimental device

整个测试系统采用3桨叶布置形式,选取其中某个复合材料桨叶(1#作为研究对象)进行检测。开展无损伤叶片监测时,先对复合材料桨叶进行无损检测,然后进行无损伤叶片的旋转过程监测。开展含损伤叶片监测时,先通过15 J能量的冲击引入局部分层损伤^[12-13],再进行损伤叶片旋转过程监测。

引入的损伤具体位置及投影面积大小通过水浸超声 C 扫描进行确定,图 4 为桨叶超声 C 扫描图。

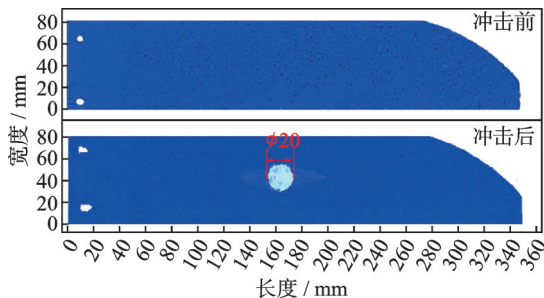


图 4 桨叶超声 C 扫描图
Fig.4 Diagram of blade ultrasonic C scanning

图 5 为叶偏角和转速示意图,实验中通过改变叶偏角 θ 和转速 ω ,针对无损伤和含损伤 2 种桨叶在不同旋转工作状态分别进行实时监测,实验分组信息如表 2 所示。

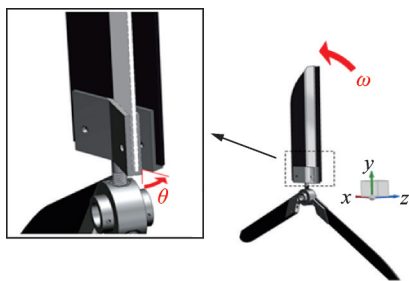


图 5 叶偏角和转速示意图
Fig.5 Diagram of blade deviation angle and rotational speed

表 2 实验分组信息		
Tab.2 Grouping information for tests		
转速/(r·s ⁻¹)	叶偏角/(°)	桨叶状态
0、1.25、2.5、3.75、5、6.25、7.5	15	无损伤
		含损伤
	30	无损伤
		含损伤
	45	无损伤
		含损伤

考虑到 FBGs 存在应变和温度的“交叉敏感”^[14-15]现象,通过在桨叶附近设置温度补偿桨叶(FBG₄)来剔除环境温度变化对监测信号的干扰,从而获得动态应变信息。

1.3 实验流程

在隔振云台上固定好实验装置后,检查整个光纤线路,确保通路后接入光纤解调仪(Femto Sensing Internationl I4-16 型,Faz Technology 公司),采

样频率为 2 kHz。按转速从小到大的顺序依次进行实验,实验过程中,待运转稳定后开始采集数据,采集时长 15 s,取前 10 s 内的数据进行处理分析。

测试过程中,采用 DIC-3D 动态高速图像检测设备(Vic-3D LS 型,Correlated Solutions Europe 公司)对桨叶表面叶根位置(b_0)、叶尖位置(b_1)的位移场变化进行监测,图 6 为 FBGs 和 DIC 测量点沿截面分布图。DIC 图像采集系统使用 2 台 102.4 万像素的 Phantom V1212 高速相机,搭配焦距 65 mm 的 Nikon 镜头,光圈为 $f/5.6$,帧率为 1 000 f/s,曝光时间为 10 μ s。

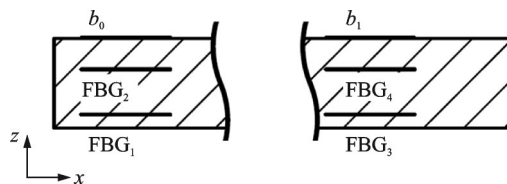


图 6 FBGs 和 DIC 测量点沿截面分布
Fig.6 Locations of FBGs and DIC measurement points at cross-section

2 实验数据处理

为提取 FBGs 监测信号特征,采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform,简称 FFT)对信号进行分析,具体的 FBGs 数据处理流程如图 7 所示。

将解调仪采集到的数据导入 Matlab 中,首先,对原始波长数据进行异常值去除等预处理,为剔除温度影响,基于式(1)对温度补偿桨叶采集到的波长数据按进行解耦,即

$$\frac{\Delta\lambda_{\epsilon}}{\lambda_B} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - \frac{\Delta\lambda_{tem}}{\lambda_B^{tem}} \quad (1)$$

其中: λ_B 为被测桨叶中各 FBGs 对应的初始中心波长; λ_B^{tem} 为温度补偿桨叶所对应的初始中心波长; $\Delta\lambda_{\epsilon}$ 为剔除温度后的波长变化量; $\Delta\lambda_B$ 为 FBGs 监测的波长变化量; $\Delta\lambda_{tem}$ 为温度补偿桨叶采集的波长变化量。

其次,将剔除温度影响后的波长信号按式(2)转变成动应变信号,即

$$\frac{\Delta\lambda_{\epsilon}}{\lambda_B} = K_{\epsilon}\Delta\epsilon \quad (2)$$

其中: $\Delta\lambda_{\epsilon}$ 为滤除温度干扰之后的波长变化量; K_{ϵ} 为 FBGs 的应变灵敏系数^[16]。

然后,对应变信号进行去趋势处理,将应变信号分解为“趋势量”和“波动量”,并对比无损状态和含损伤状态的差异。其中趋势量对应恒定面载及离心

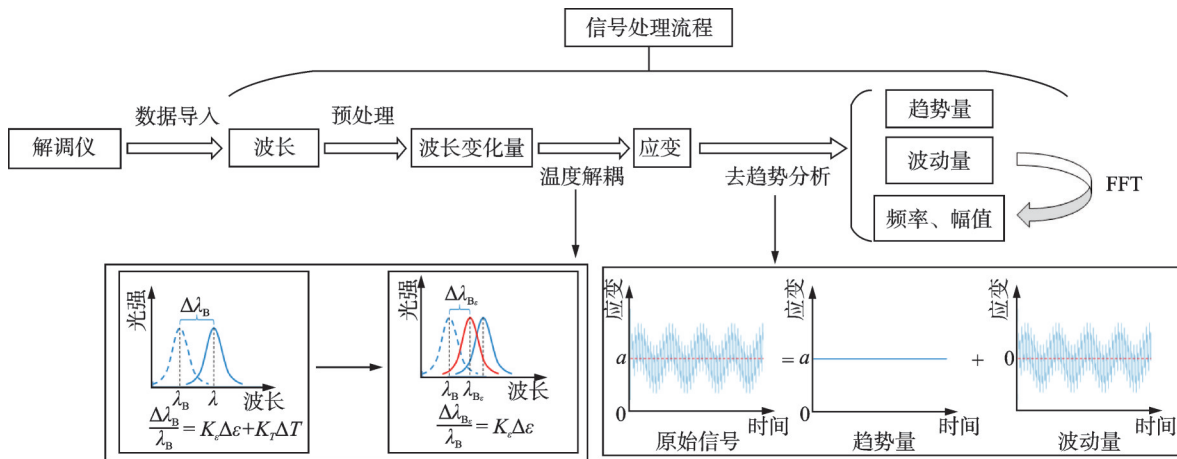


图 7 FBGs数据处理流程

Fig.7 The processing procedure of FBGs data

力产生的应变,波动量对应桨叶旋转过程中由叶片振动、气流扰动等带来的应变变化。

最后,对波动量进一步采用FFT进行频域分析,提取各FBGs信号的前5阶主频信息进行分析。

3 实验结果与分析

图8为FBGs的波长变化量信号,展示了对FBGs监测的原始信号剔除初始波长和温度干扰后得到的波长变化量信号。由图可知,不同转速下的波长信号呈现明显的周期性,且周期大小与转速相关。随着转速的增大,信号幅值增大,周期变小。

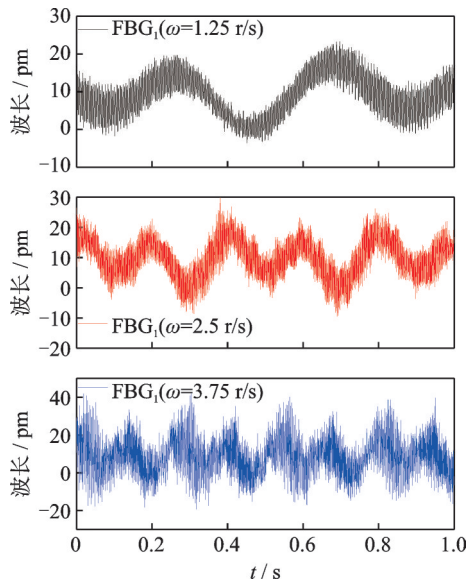


图 8 FBGs的波长变化量信号

Fig.8 Wavelength variation signal of FBGs

3.1 DIC 结果

为进一步验证FBGs测试信号的合理性,结合

DIC监测结果对信号变化进行分析。将DIC采集到的图像导入VIC-3D-9软件进行分析处理,计算完成后对结果文件进行坐标转换、去除刚体位移等处理,导出垂直于旋转平面的轴向位移数据,并对数据进行平滑处理。轴向位移-时间图结果如图9所示,展示了不同转速下叶根处(b_0)所对应的轴向位移变化。由图可知,轴向位移变化同样呈现周期性特征。

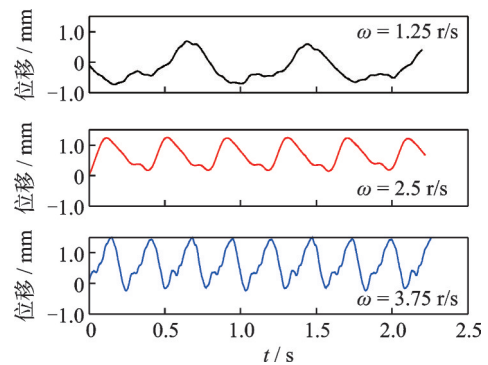


图 9 轴向位移-时间图

Fig.9 Diagram of axial displacement-time

图10为各转速下FBG₁监测应变的波动量,纵坐标微应变为无量纲,与图9对比可知,轴向位移的变化周期与FBGs采集到的应变信号的变化周期一致。这是由于旋转过程中叶片的变形模式主要为由风压引起的弯曲变形。图10中变化周期与图9中数据变化周期一致,验证了FBGs实时监测桨叶承载过程变形状态的可行性。

3.2 FBGs的趋势量

按照图7中流程对各FBGs进行处理,得到无损状态下各FBGs的趋势量,图11为无损试样下各FBGs信号的趋势量。从图中可以看出,随着转速

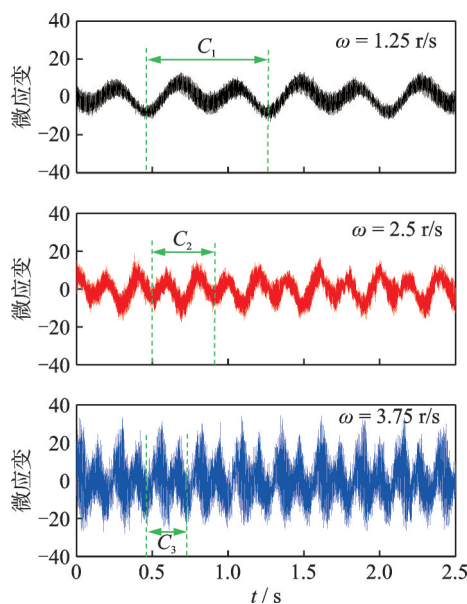


图10 各转速下FBG₁监测应变的波动量

Fig.10 Diagram of fluctuation quantity of strain obtained by FBG₁ for each speed

的增加,位于叶根处的FBG₁和FBG₂趋势应变值逐渐变大,且FBG₁为压应变,FBG₂为拉应变。此时的叶片既受向心力产生的拉应变,也受到由“单悬臂梁弯曲”带来的弯曲应变。由于FBG₁测点位于弯曲变形受压侧,FBG₂测点位于受拉侧,且FBG₁位置较FBG₂位置离中性层更远,FBG₁处的弯曲压应变较向心拉应变更大,因此FBG₁测点处呈受压状态,为负值,呈现压应变。FBG₂测点处,在向心拉应变和弯曲拉应变的共同作用下,呈拉应变,为正值。此外,随着桨叶角的变大,FBG₁的应变值和增长趋势更加明显,而FBG₂的变化相对较小。

FBG₃和FBG₄的变化趋势与FBG₁、FBG₂基本

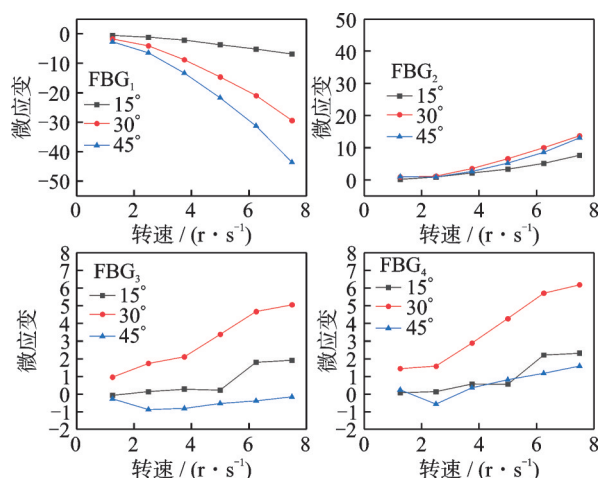


图11 无损试样下各FBGs信号的趋势量

Fig.11 Trending quantity of each FBGs signal for intact sample

一致,但趋势不够平滑。究其原因是叶尖处的受载情况相对于叶根处要更复杂,既有转动带来的复杂振动,又受到流场变化的影响,此部分将作为后期研究内容进行讨论。

3.3 FBGs的波动量

表3为各FBGs第1阶主频,列出了无损状态下各FBGs的第1阶主频及其对应幅值。从表中可以看出,FBG₁与FBG₂的第1阶频率为“轴频”,即叶根处的第1阶频率值与桨叶转速一致。FBG₃与FBG₄的第1阶频率为叶频,即轴频的“倍频”,且在第1阶频率下,FBG₁对应的幅值大于FBG₂,FBG₃对应的幅值大于FBG₄,这是由于各FBGs对应的层间位置不同导致的。其中,FBG₂、FBG₄相较于FBG₁和FBG₃更接近于中性层,受到的外界扰动更小。

表3 各FBGs第1阶主频

Tab.3 The first dominant frequency of each FBGs

桨叶状态	传感器	转速					
		1.25 r/s	2.50 r/s	3.75 r/s	5.00 r/s	6.25 r/s	7.50 r/s
无损伤-15° (频率,幅值)	FBG ₁	(1.3, 1.973)	(2.5, 2.789)	(3.8, 2.262)	(5.0, 2.860)	(6.1, 2.115)	(7.4, 3.508)
	FBG ₂	(1.3, 0.882)	(2.5, 1.004)	(3.8, 0.957)	(5.0, 0.993)	(6.1, 0.776)	(7.4, 1.139)
	FBG ₃	(2.5, 1.332)	(5.0, 1.401)	(7.5, 1.234)	(10.0, 1.212)	(12.3, 1.305)	(14.8, 1.361)
	FBG ₄	(2.5, 1.291)	(5.0, 1.218)	(7.5, 1.243)	(10.0, 1.237)	(12.3, 1.397)	(14.8, 1.423)
无损伤-30° (频率,幅值)	FBG ₁	(1.3, 4.697)	(2.5, 6.500)	(3.8, 5.179)	(5.0, 7.052)	(6.1, 6.062)	(7.4, 8.208)
	FBG ₂	(1.2, 1.343)	(2.5, 1.423)	(3.8, 1.670)	(5.0, 2.178)	(6.1, 1.761)	(7.4, 2.546)
	FBG ₃	(2.5, 2.541)	(5.0, 2.667)	(7.5, 2.356)	(10.0, 2.277)	(12.3, 2.509)	(14.8, 2.514)
	FBG ₄	(2.5, 1.230)	(5.0, 1.155)	(7.5, 1.218)	(10.0, 1.224)	(12.3, 1.373)	(14.8, 1.349)
无损伤-45° (频率,幅值)	FBG ₁	(1.3, 7.217)	(2.5, 9.808)	(3.8, 8.344)	(5.0, 11.518)	(6.1, 8.959)	(7.4, 15.100)
	FBG ₂	(1.3, 1.966)	(2.5, 2.603)	(3.8, 2.728)	(5.0, 3.491)	(6.1, 2.694)	(7.4, 4.555)
	FBG ₃	(2.5, 3.548)	(5.0, 3.029)	(7.5, 3.341)	(10.0, 3.574)	(12.3, 3.627)	(14.8, 3.613)
	FBG ₄	(2.5, 2.215)	(5.0, 1.730)	(7.5, 1.737)	(10.0, 1.800)	(12.3, 1.728)	(14.8, 1.637)

进一步对比完整和含损伤这2种结构在不同工况下的前5阶主频数值及其对应的幅值。统计后发

现各FBGs的第1、2阶主频为轴频或叶频。其余3阶频率值并不完全相同,会因桨叶结构中出现损伤而

产生差异。推测是由于叶片内部产生损伤后,桨叶的刚度发生改变,从而使结构振动特性产生差异。

提取出 FBG_1 前 5 阶主频及对应的幅值后,分别计算引入损伤前后的幅值变化率,计算式为

$$P = \frac{|A_{ij}^D - A_{ij}^I|}{A_{ij}^I} \times 100\% \quad (3)$$

其中: P 为幅值变化率; A_{ij}^D 为引入损伤后的幅值; A_{ij}^I 为引入损伤前的幅值; i 为幅值对应阶数,数值取 1、2、3、4、5; j 为桨叶转速。

图 12 为 FBG_1 前 5 阶主频对应的振幅变化率,给出了计算的 FBG_1 在不同叶偏角下引入损伤前后的幅值变化率。由图可知,不同转速下引入损伤前后的第 1 阶幅值变化率很小,这说明其第 1 阶振幅对损伤并不敏感;而第 2 阶振幅在实验设置的各个工况下的变化均比较显著,即 FBG_1 的第 2 阶主频对应的振幅对该工况下的损伤非常敏感。因此,可将其

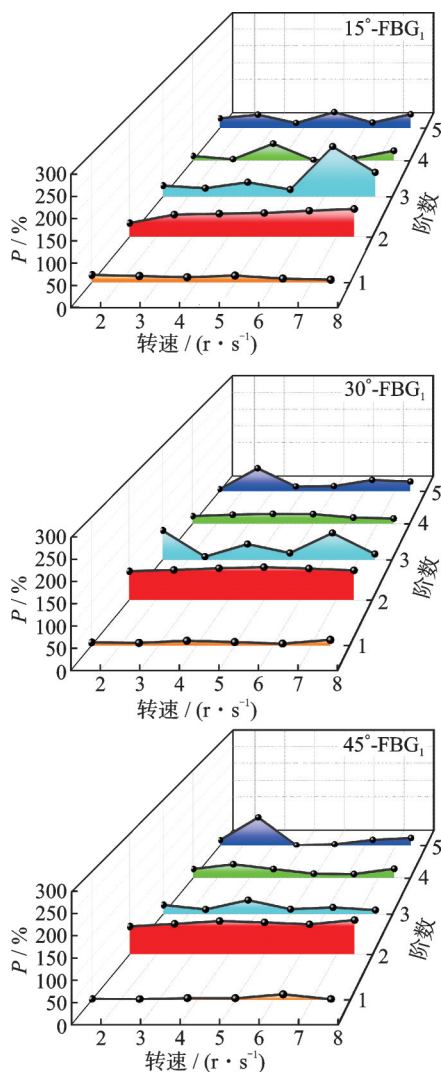


图 12 FBG_1 前 5 阶主频对应的振幅变化率
Fig.12 Amplitude variation rates corresponding to the first 5 natural frequencies of FBG_1

作为 FBGs 实时监测过程的一种损伤指标。

第 3、4、5 阶振幅仅在某个工况下(叶偏角、转速)变化较为明显。这是由于各 FBGs 的后 3 阶主频主要与结构的固有频率相关。在不同的转速下桨叶受到的气流振动激励可能不同,仅有少数固有频率的振动会被激发。笔者仅对某个转速下表现出的“固频”进行讨论。图 13 为复合材料桨叶的频域信息对比图,对比了转速为 1.25 r/s、叶偏角为 15° 时引入损伤前后 FBGs 监测应变的频域信息。

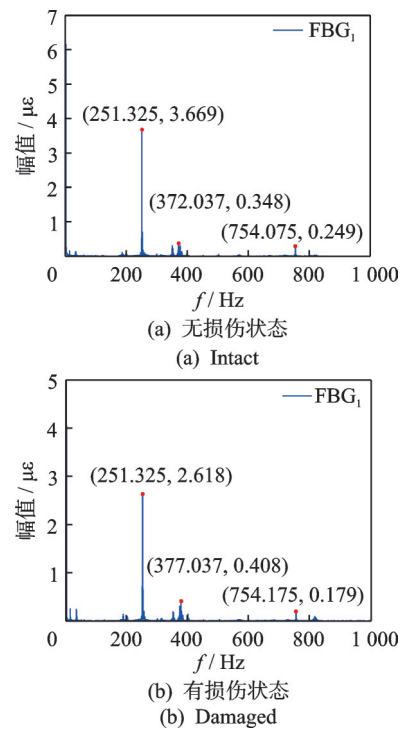


图 13 复合材料桨叶的频域信息对比图
Fig.13 Comparison of frequency domain information of composite blades

当结构中出现损伤时,第 3、4 阶固有频率及其对应的幅值均会发生变化,而频率的变化很小^[17-18],原因可能是本研究工况下的叶片内部引入的冲击损伤较小,局部损伤对叶片整体结构的刚度影响程度不高,固频的变化也较小。

4 结 论

1) 桨叶运转过程中,叶根处 FBGs 所测得的应变值随着转速变大而变大。当转速增大时,桨叶所受的离心力增大,结合 DIC 结果可知,桨叶的轴向位移也会随之增大,应变绝对值亦增加。

2) 借助 FBGs 可实现对旋转桨叶承载过程的监测。叶根处的应变随着叶偏角的增大而增大。当转

速恒定时,叶偏角增大,桨叶所受风载分量相应增加,径向位移随之增大,导致弯曲应变增加。

3) 叶根处FBGs的第1阶主频,即轴频,所对应的幅值对损伤不敏感;第2阶主频,即叶频,所对应的幅值对所测桨叶自身含损伤的敏感性较好,可作为FBGs的损伤指标对桨叶自身状态进行实时监测。

参 考 文 献

- [1] 沈观林. 复合材料力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [2] 贾辉, 张磊安, 王景华, 等. 基于声发射技术的风电叶片复合材料损伤模式识别[J]. 可再生能源, 2022, 40(1): 67-72.
JIA Hui, ZHANG Leian, WANG Jinghua, et al. Damage pattern recognition of wind turbine blade composite material based on acoustic emission technology[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(1): 67-72. (in Chinese)
- [3] 文晓艳. 光纤光栅传感器原理与技术研究[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2016: 62-77.
- [4] SCHROEDER K, ECKE W, APITZ J, et al. A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade[J]. Measurement Science & Technology, 2006, 17(5): 1167-1172.
- [5] HSU T Y, SHIAO S Y, LIAO W I. Damage detection of rotating wind turbine blades using local flexibility method and long-gauge fiber Bragg grating sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(1): 015108.
- [6] NUR A A R, KUTZ J J, MATTHEW M, et al. Dynamic monitoring of fan blade using high resolution, distributed fiber optic sensing[C]//45th ISTC. Wichita KS: ISTC, 2013: 15.
- [7] PARK S, PARK T, HAN K. Real-time monitoring of composite wind turbine blades using fiber Bragg grating sensors[J]. Advanced Composite Materials, 2011, 20(1): 39-51.
- [8] 蒋熙馨. 旋转叶片动应变FBG分布式检测及振动估计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [9] 徐刚, 王闵, 梁磊, 等. 基于光纤光栅的叶片状态在线监测研究[J]. 仪表技术与传感器, 2017(3): 64-67.
XU Gang, WANG Min, LIANG Lei, et al. Online monitoring system of blades based on fiber Bragg grating [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(3): 64-67. (in Chinese)
- [10] 徐萍. 风力机叶片损伤监测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [11] SIERRA-PÉREZ J, TORRES-ARREDONDO M A, GUEMES A. Damage and nonlinearities detection in wind turbine blades based on strain field pattern recognition. FBGs, OBR and strain gauges comparison [J]. Composite Structures, 2016, 135: 156-166.
- [12] ABISSET E, DAGHIA F, SUN X C, et al. Interaction of inter- and intra-laminar damage in scaled quasi-static indentation tests: part 1—Experiments[J]. Composite Structures, 2016, 136: 712-726.
- [13] 王遥. 含冲击损伤碳/环氧层合板螺栓修理的实验与数值研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [14] 白生宝, 肖迎春, 黄博, 等. FBG传感器应变标定方法[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(2): 321-324.
BAI Shengbao, XIAO Yingchun, HUANG Bo, et al. Strain calibration method for FBG sensors[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(2): 321-324. (in Chinese)
- [15] 田石柱, 赵雪峰, 欧进萍, 等. 结构健康监测用光纤 Bragg 光栅温度补偿研究[J]. 传感器技术, 2002, 21(12): 8-10.
TIAN Shizhu, ZHAO Xuefeng, OU Jinping, et al. Research on temperature compensation of fiber Bragg grating for structural health monitoring[J]. Journal of Transducer Technology, 2002, 21(12): 8-10. (in Chinese)
- [16] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 108-144.
- [17] 漆文凯, 程博, 刘磊. 含分层损伤复合材料层合板振动特性[J]. 航空动力学报, 2013, 28(4): 858-865.
QI Wenkai, CHENG Bo, LIU Lei. Vibration characteristics of composite laminates with delamination damage [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4): 858-865. (in Chinese)
- [18] 刘亚鑫. 基于振动模态分析复合材料分层损伤缺陷检测[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.



第一作者简介:刘勇,男,1998年8月生,博士生。主要研究方向为复合材料结构健康监测、复合材料结构设计。
E-mail: liuyong0824@whut.edu.cn

通信作者简介:胡海晓,男,1987年7月生,博士、副教授、博士生导师。主要研究方向为复合材料工艺与仿真、复合材料失效与损伤分析、复合材料结构健康监测技术。
E-mail: yiming9008@126.com