

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.05.016

## 基于光纤光栅的风机叶片应变与振动监测技术

李明辉<sup>1</sup>, 黄鹏宇<sup>2</sup>, 陈诗<sup>2</sup>, 刘元凤<sup>2</sup>, 闫光<sup>2</sup>

(1. 北京京能清洁能源电力股份有限公司, 北京 100024; 2. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

**摘要:** 为满足某型塔架式风电机组叶片的监测需求, 提出了一种基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG) 传感网络的结构监测方法。建立叶片三维模型并进行有限元仿真, 获得其工作状态下的应变分布。设计 FBG 封装及布局方案, 实时监测各传感点应变数值及变化规律。通过快速傅里叶变换分析其振动特性, 探究温度、风速等环境因素对该监测系统可靠性的影响。结果表明, 基于 FBG 的应变-振动测试方法能有效监测叶片对风压的载荷响应及振动频率, 误差范围在 0.04 Hz 以内, 满足实际工程需求。

**关键词:** 风机叶片; 光纤光栅; 应变; 振动监测

**中图分类号:** TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)05-0898-07

## Strain and Vibration Monitoring Technology of Wind Turbine Blades Based on Fiber Optic Gratings

LI Minghui<sup>1</sup>, HUANG Pengyu<sup>2</sup>, CHEN Shi<sup>2</sup>, LIU Yuanfeng<sup>2</sup>, YAN Guang<sup>2</sup>

(1. Beijing Jingneng Clean Energy Co. Ltd., Beijing 100024, China; 2. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** To meet the monitoring requirements for a certain type of tower-mounted wind turbine blade, a structural monitoring method based on a fiber Bragg grating (FBG) sensing network is proposed. A three-dimensional model of the blade is established and finite element simulation is conducted to obtain the strain distribution under operational conditions. The design of FBG packaging and layout scheme enables real-time monitoring of strain values and their variations at each sensing point. Through fast Fourier transform analysis of the vibration characteristics, the influence of environmental factors such as temperature and wind speed on the reliability of the monitoring system is investigated. The results indicate that the strain-vibration testing method based on FBG can effectively monitor the blade's response to wind pressure and vibration frequency, with an error range within 0.04 Hz, thus meeting the requirements for practical engineering applications.

**Key words:** wind turbine blade; fiber Bragg grating; strain; vibration monitoring

随着社会的飞速发展, 能源需求日益增加, 现有的石油、煤炭等资源严重短缺, 制约着全球经济的进一步繁荣。此外, 在可持续发展的概念提出后, 传统的化石燃料带来的一系列环境污染问题也日渐受到更多关注<sup>[1]</sup>。因此, 推广环保且可再生的新型能源迫在眉睫。风能作为一种绿色、安全的清

洁能源, 极大地满足了人类的需求。当前, 风力发电主要依赖塔架式风电机组, 而叶片结构的性能直接关系到风力发电的安全性、稳定性及发电效率<sup>[2]</sup>。

以应变片为传感元件的振动模态分析法, 是国内外常见的在线监测方法之一<sup>[3]</sup>。但电阻应变片

**收稿日期:** 2022-07-27; **修订日期:** 2023-05-09

**通信作者:** 闫光, 男, 博士, 副教授, E-mail: 548304507@qq.com。

**引用格式:** 李明辉, 黄鹏宇, 陈诗, 等. 基于光纤光栅的风机叶片应变与振动监测技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(5): 898-904. LI Minghui, HUANG Pengyu, CHEN Shi, et al. Strain and vibration monitoring technology of wind turbine blades based on fiber optic gratings[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 898-904.

对于大应变有较大的非线性,且长期暴露于环境中时,容易受到电场、磁场的干扰<sup>[4-6]</sup>,构成应变片的材料和器件性能也会发生较大变化,不利于长期监测。

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)传感器因其体积小、重量轻、抗电磁干扰能力强<sup>[7]</sup>等特点,在风电机组的结构健康监测中展现出了极大的优势。Liu等<sup>[7]</sup>建立了一种基于复合材料封装的FBG应变传递效率及可靠性计算模型,通过有限元分析方法分析了不同负载条件下各项参数对传感器性能的影响程度。王炳楷等<sup>[8]</sup>将光纤光栅布置于风机叶片上,在叶片展向不同位置处进行静态加载,获得了载荷力对不同测点的应变影响曲线。Aihara等<sup>[9]</sup>使用风力涡轮机叶片的简单模型进行旋转实验,利用监测到的应变信息实时计算挠度。前述研究虽初步证实了FBG在风机叶片应变监测领域的可行性,但均停留在实验室环境下的地面载荷试验验证。大型风力发电机叶片的运行高度几乎均在100米以上,且一直处于旋转状态,对传感器的安装和监测提出了巨大挑战。因此,到目前为止,还没有对风力发电场中的叶片运行状态进行详细研究<sup>[10]</sup>。Fu等<sup>[11]</sup>提出了一种风力发电机组载荷测量方法,分别计算启动和停机状态下叶片挥舞及摆振方向的弯矩。但其监测过程较短,未进行长期性的补充验证。

针对上述问题,本文以某塔架式风电机组叶片为研究对象,提出一种带状封装FBG组网的监测方法,对运行状态下的叶片应变分布及振动信息进行长期实时监测,利用快速傅里叶变换法获取其频域响应,求解结构频率。最后,探究了自然环境下风速、温度等对该系统可靠性的影响,为后续的工程化应用提供了经验。

## 1 叶片工作状态仿真及FBG组网分析

### 1.1 三维模型建立及动态仿真

有限元仿真是一种被广泛应用于工程领域的数值分析方法,借助有限元法来模拟和求解。该方法通过将复杂的连续物体划分为有限个小的部分,即有限元,然后对这些有限元进行分析,以得到整个物体的行为和性能;其基本思想在于利用局部有限元模型来近似描述整体系统,并通过数值计算方法来求解得到全局行为。有限元仿真方法能够有效地预测和分析物体的行为和性能,在工程实践中具有重要的价值。使用有限元仿真得到风机桨叶应力集中分布位置,从而确立FBG的布点位置,可

大大提高监测效果的可靠性和稳定性。

风机的三电机组叶片属于三维超长曲面壳体结构<sup>[12]</sup>,几何构成复杂,常规的数值计算方法极为困难。因此,需要对叶片结构进行合理建模,通过有限元分析法求解叶片在工作状态下的应变响应,为后续试验的传感器组网形式提供参考依据。叶片材料属性定义为玻璃纤维增强复合材料(Glass fibre reinforced composite, GFRP),其具体性能参数如表1所示。在相同的工作状态下,叶片不同位置处所承受的载荷不同。风机叶片转动时,叶根处主要承受弯曲载荷,前、后缘处主要承受扭转载荷。因此,需要根据承受载荷类型的不同设计不同的铺层形式。

表1 叶片铺层材料力学性能参数

Table 1 Mechanical performance parameters of blade layup materials

材料名称	$E_1/\text{MPa}$	$E_2/\text{MPa}$	$\mu/\text{MPa}$	$G_1/\text{MPa}$	$G_2/\text{MPa}$	$G_3/\text{MPa}$
GFRP	59 862	17 700	0.22	3 570	3 570	3 570

为验证叶片模型的合理性,获取风力载荷下结构的响应,了解叶片在工作状态下的应力、应变分布情况,需对该有限元模型进行动态分析。求解前,需根据叶片的各项特性为其选择合适的单元类型及网格密度等。叶片为超长空腔壳体结构,因此选用四边形壳单元对叶片进行分析,网格划分情况如图1所示。

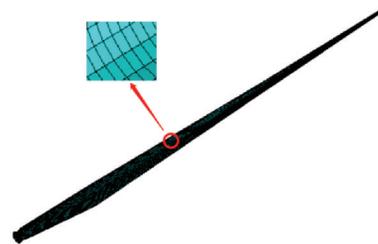


图1 叶片网格划分示意图

Fig.1 Schematic diagram of blade meshing

叶片与轮毂间通常采用螺栓连接,属于刚性连接。风力发电机工作时,叶片与轮毂间不产生相对位移,故设置二者为共节点状态。该叶片总长度为50 m,参考试验环境下自然状态的平均风速,设置叶片额定转速为6 r/min。6 r/min转速下的应力、应变云图如图2、3所示。

仿真结果显示,图中叶根处(传感器预设布点位置)的应变振幅峰值在188.95~205.69  $\mu\epsilon$  范围内。

### 1.2 仿真结果分析及FBG布局

以叶片根部与轮毂交接处为起点,沿叶片轴向

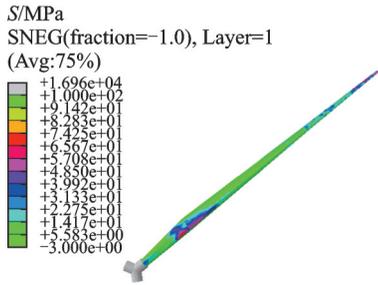


图2 6 r/min 转速下应力云图  
Fig.2 Stress cloud at 6 r/min speed

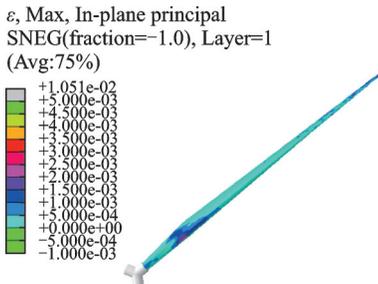


图3 6 r/min 转速下应变云图  
Fig.3 Strain cloud at 6 r/min speed

创建路径,提取该路径各结点处的应力值,输出该路径下的应力曲线,如图4所示。由上述应力分布云图及应力曲线显示,叶片在额定风速下匀速转动时,在一个旋转周期内,叶片根部及最大弦长处应力值较大。

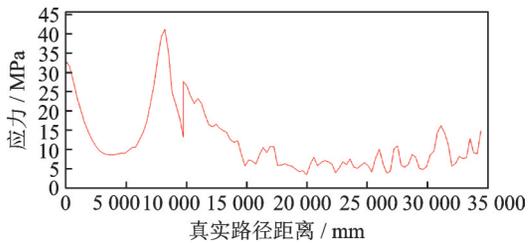


图4 叶片轴向应力分布曲线  
Fig.4 Axial stress distribution curve of the blade

以叶片主梁中部为起点创建路径,提取叶片最大弦长处截面应力曲线如图5所示。叶片前、后缘处应力较小,主梁部分应力较大。在实际工作中,风机叶片的根部易产生应力集中,从而发生疲劳断裂;叶片的中部区域为风动载荷的主要承力部位,与仿真结果一致。因此,叶根及最大弦长处应为布设FBG传感器进行监测的关键区域。

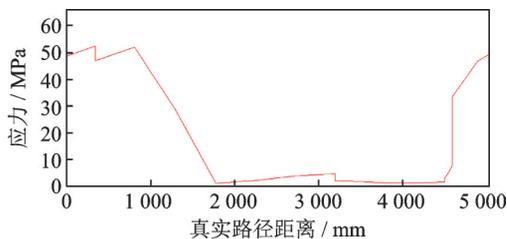


图5 叶片最大弦长处截面应力曲线  
Fig.5 Cross-sectional stress curve at the maximum chord length of the blade

由于叶片筒径较大,为准确监测内壁应变情况,FBG 布局设计示意图如图6所示。在距叶根1.5 m的横截面处设置4个FBG 传感器工装点,以叶片根部中心轴与安装处横截面的交点为圆心,每90°安装一个传感器,编号为1、3、5、7;同理,在距叶根10 m处布设4个传感器,编号为2、4、6、8。

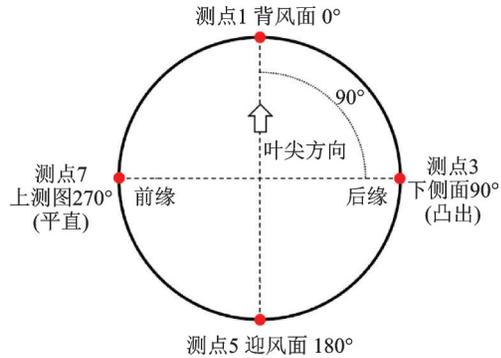


图6 FBG 布局截面示意图  
Fig.6 Schematic cross-section of FBG layout

## 2 叶片应变及振动监测系统

针对风机叶片的结构监测,裸光纤易受到外界环境干扰而发生弯折、断裂损伤。需设计合适的传感基底,对其进行封装保护。

试验中使用的FBG 应变传感器为带状封装。每个传感器内部封有一根光纤光栅,外层为叶片同种材料及工艺制作的玻璃纤维编织物。使用十字标记法在玻璃纤维基底上确立栅区固定位置,在其余位置处均匀涂抹胶粘剂;将裸光纤两端套入碳纤维黑色套管并夹持于封装台上,对其施加预紧力使栅区绷直;将光纤栅区对准基底标记处,使光纤于拉直状态下紧紧贴合于基底表面,再覆盖上另一片同样封装处理的基底,使用重物压平直至胶体固化。封装完成的FBG 应变传感器如图7所示,传感器尺寸为50 mm×10 mm×0.8 mm。这种封装既保留了FBG 传感器尺寸小、抗电磁干扰的优势,又弥补了裸纤脆弱易折的缺点,耐老化和耐腐蚀性能大大提升,且其长期零点稳定,温度漂移微小,可保护光纤不受外界环境干扰而损伤,提高FBG 应变监测的可靠性,满足工程现场的需求。

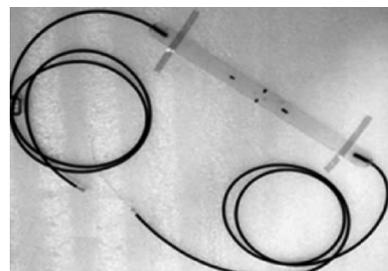


图7 带状封装FBG 应变传感器实物  
Fig.7 FBG strain sensor in ribbon package

将封装完成的FBG应变传感器按照拟定的布局方案工装于叶片上,在基底上涂抹胶粘剂并将其粘贴于指定位置,使用胶带辅助粘贴直至胶体固化。为进一步确保存活率,在固化完成的FBG传感器上加封黑色碳纤维保护盖,对其进行工装保护。记录FBG传感器的编号与位置信息后,将一侧尾纤整理固定于叶片内壁,另一侧穿出叶根盖板,与解调仪相连。FBG现场工装示意图如图8所示。

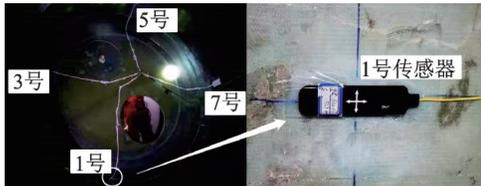


图8 FBG现场工装示意

Fig.8 FBG site tooling

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 叶片应变响应分析

该试验于2022年2月在某地室外自然环境下进行。搭载FBG应变传感器的风机叶片在风动载荷及电机控制下以6 r/min的转速正常工作,通过光纤光栅解调仪采集FBG应变传感器的反射光谱数据,利用二次插值数值微分的寻峰算法计算其中心波长。监测过程共持续4周,计算机可实时显示各个传感器的中心波长偏移量,对试验进行持续监控。解调仪的采样频率为56 Hz。其中,在叶片稳定工作状态下,解调仪采集到的6号传感器的实时波长数据及曲线如图9所示。

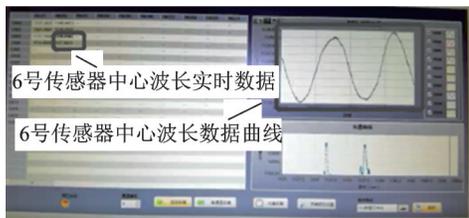


图9 6号传感器部分实测数据

Fig.9 Partial measured data of sensor No.6

试验成功采集到8个FBG传感器在叶片稳定工作状态下的中心波长数据。以6号传感器为例,其中心波长部分变化曲线如图10所示。由曲线显示,随着叶片的周期性转动,采集到的中心波长数据呈现出正弦变化趋势;其不同旋转周期内幅值存在一定差异,可能是受试验环境下瞬时风速变化的影响。

考虑到传感器信号在采集及传输过程中会引入噪声,首先对试验数据进行降噪处理。利用小波变换(Wavelet transform, WT)去除信号中的高斯白噪声。设包含噪声的原始信号为 $s(n)$ ,使用Matlab对 $s(n)$ 进行塔式分解,得到“低频近似”和

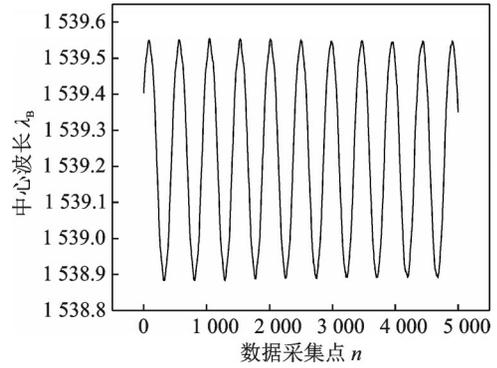


图10 6号传感器中心波长变化曲线

Fig.10 Wavelength change curve of sensor No.6 center

“高频细节”两个部分直至第5层,利用式(1)所示缺省阈值法确定各层分解信号的阈值。

$$K = \sqrt{2\sigma \lg n} \quad (1)$$

式中: $K$ 为阈值, $n$ 为信号的长度, $\sigma$ 为信号噪声强度。在确定各层阈值后,采用“软阈值”法将阈值作用于各层分解信号,以实现降低噪声分量的目的,表达式如下

$$d(k) = \begin{cases} k - K & k > K \\ k + K & k < -K \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

以6号传感器为例,部分原始波长数据曲线如图11(a)所示,经过降噪后如图11(b)所示。降噪后信号的信噪比相较于原始信号 $s(n)$ 提高2~3 dB。

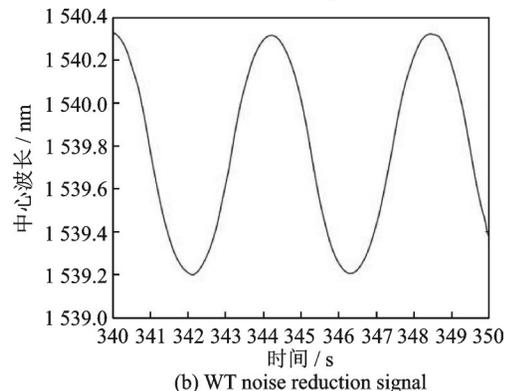
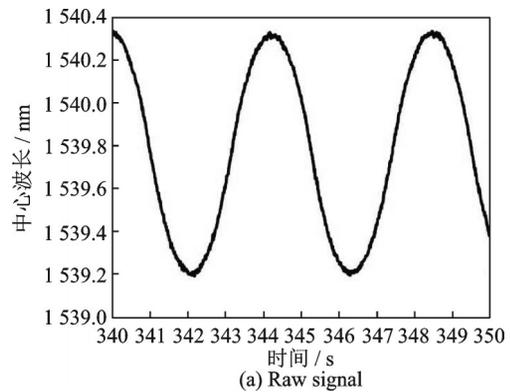


图11 传感信号降噪前后示意图

Fig.11 Schematic diagram before and after noise reduction of sensing signal

由于监测过程中叶片均在恒定转速下工作,故截取5 min稳定状态的试验数据进行进一步分析处理。试验中叶片转速为6 r/min,因此,为获得叶片转动过程中各个传感监测点的应变分布情况,根据FBG的应变灵敏度将其中心波长数据转化为应变数据,取每10 s内的绝对应变最大值绘制各个转动周期绝对应变峰值散点图,如图12所示。图中横线代表各传感点应变均值,具体应变数据统计如表2所示。

上述各传感测量点的应变散点图显示,在整个监测过程中,叶片在1号、3号、5号、7号4个传感测量点对应位置产生的绝对应变峰值为184.16  $\mu\epsilon$ ,2号、4号、6号、8号4个传感器对应测量点产生的绝对应变峰值为197.4  $\mu\epsilon$ 。在同一风载工作状态下,叶片中部传感测量点的绝对应变较其他位置处更大,整体上与仿真结果保持一致。奇数号传感器的转动周期内最大绝对应变均值与仿真结果误差为2.6%,偶数号传感器的误差为4.2%。

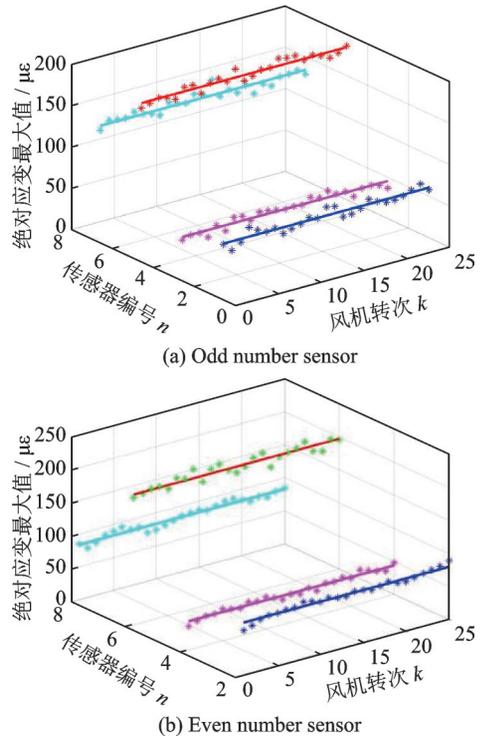


图12 各FBG最大绝对应变散点图

Fig.12 Maximum absolute strain scatter plot of each FBG

表2 各FBG应变数据统计表  
Table 2 Statistics of FBG strain data

传感器编号	1	2	3	4	5	6	7	8
应变均值/ $\mu\epsilon$	60.48	79.80	45.56	43.76	184.16	197.40	134.00	83.12
方差	33.51	26.97	19.50	53.67	20.01	35.08	15.44	26.19

### 3.2 结构频率求解及可靠性分析

为了监测叶片结构工作状态下的振动情况,对采集到的FBG应变数据使用快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)以分析各个测量点的频域特性。快速傅里叶变换是利用计算机计算离散傅里叶变换(Discrete Fourier transform, DFT)的高效、快速计算方法的统称。对于信号 $x(n)$ ,其离散傅里叶变换 $X(k)$ 计算公式为<sup>[13]</sup>

$$X(k) = \left\{ \begin{aligned} & \text{Re}[x(n)] \text{Re}[W_N^{nk}] - \\ & \text{Im}[x(n)] \text{Im}[W_N^{nk}] + \\ & j(\text{Re}[x(n)] \text{Im}[W_N^{nk}] + \\ & \text{Im}[x(n)] \text{Re}[W_N^{nk}]) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

以应变数据 $x(n)$ 作为输入,通过上述方法计算得到频谱 $X(k)$ 。将8个传感器的测量数据作为样本信号,分析叶片结构在自然风载下的频域响应。取某一日风机叶片以6 r/min转速稳定工作状态下采集到的数据(共10 h),截取一小时为样本时长,将样本中直流分量、因风机转动引入的周期性正弦信号等干扰排除后得到10段样本数据的频谱,如图13所示。

经统计,6号传感测量点采集到的1~10段样

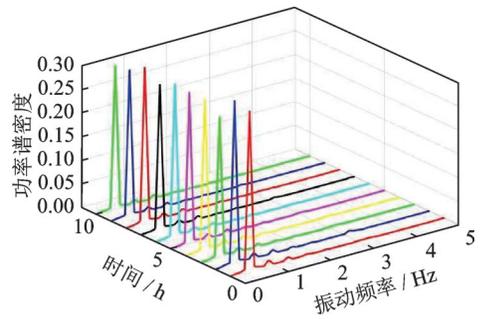


图13 6号传感数据功率谱图

Fig.13 Power spectrum of sensing data No.6

本数据频谱反映出叶片的振动频率在0.432~0.467 Hz之间,平均为0.441 Hz,样本方差为0.004。按照同样的方式可计算其他测量点处频谱数据。

此外,为考察叶片上监测位置的振动幅度,对相同的样本数据进行计算分析,得到其对应的应变振幅,结合各传感器数据的去直流频谱,统计得到叶片在转速为6 r/min的稳定工作状态下的振动情况,如表3所示。由表3可知,8个传感器所测叶片振动频率在0.439~0.442 Hz之间,平均值为0.440 Hz,试验结果初步证明了该基于FBG传感网络的应变-振动监测方法的可行性。

表 3 各传感测量点振频统计

Table 3 Vibration frequency statistics of each sensing measurement point

传感器编号	1	2	3	4	5	6	7	8
测量点平均振动频率/Hz	0.442	0.439	0.441	0.440	0.440	0.440	0.439	0.439

由于风电机组通常服役于偏远地区及近海区域,自然环境的变化往往是随机的。为了进一步验证方法的可靠性,实现利用该传感系统对结构振动进行长期稳定的监测,需分析结构频率随风速、温度变化的关系趋势。依据现场施工方提供的监测过程中风速信息绘制时程图如图 14 所示。

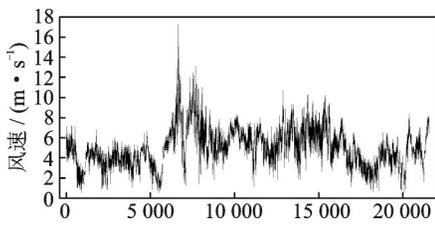


图 14 风速时程图

Fig.14 Wind speed time history diagram

对为期 4 周的试验中风机工作在 6 r/min 稳定转速下采集到的所有数据(第一周 52 h,第二周 47 h,第三周 64 h,第四周 38 h,共 201 h)进行分析,以 1 h 为单位,得到如图 15(a~d)所示现场监测环境下振动频率散点图。

由图 15 可以看出,自然环境中风速、温度改变时,通过该监测系统求解出的结构振动频率随之改变。为验证风速对结构振频的影响,以 6 号传感器为例,取同一温度不同风速下的数据进行处理,利用前述求解方法计算其频率均值,如表 4 所示。

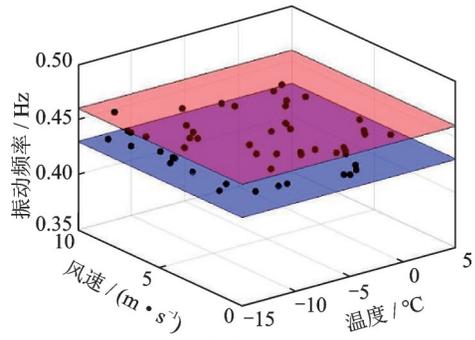
由表 4 中数据可以看出,在同一温度不同风速下,测量点处振动频率不同,标准差为 0.005 3。由相关性系数计算公式

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

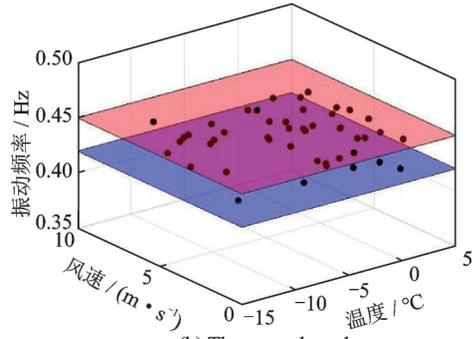
可得,风速与频率均值的相关系数为 0.34。

同理,可得同一风速不同温度下 6 号传感测量点处频率均值如表 5 所示。

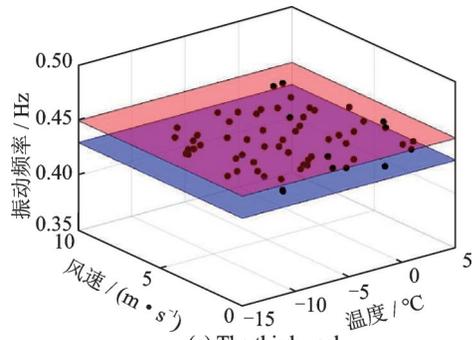
由表 5 中数据可以看出,在同一风速不同温度下,测量点处振动频率均值差距较小,标准差为 0.004 8,温度与频率均值的相关系数为 0.46。以零下 3.5 °C 时频率均值为基准,前后温差最大达到



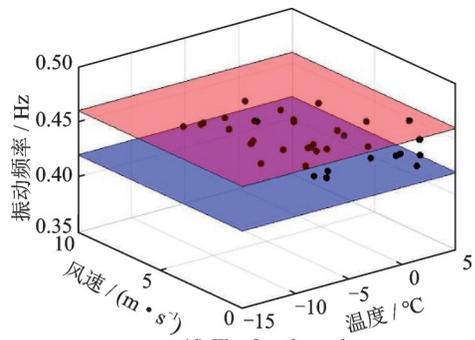
(a) The first week



(b) The second week



(c) The third week



(d) The fourth week

图 15 振动频率散点图

Fig.15 Vibration frequency scatter plot

8.9 °C 时,频率变化率为 2.28%。

由图 15 和表 4、5 可知,在同一风机转速下,为期一个月的桨叶振动频率监测结果绝对误差范围在 0.04 Hz 以内,具有较高的重复性,且振动频率大小仅

表 4 同一温度不同风速频率均值对比

Table 4 Comparison of mean values of frequency of different wind speeds at the same temperature

风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.99	3.23	3.77	5.49	6.75	7.77	8.85
测量点频率均值/Hz	0.445	0.437	0.448	0.451	0.439	0.436	0.441

表5 同一风速不同温度频率均值对比

Table 5 Comparison of mean values of frequency for different temperatures at the same wind speed

温度/°C	-3.5	-1.8	0.1	1.6	3.0	4.1	5.4
测量点频率 均值/Hz	0.439	0.443	0.451	0.432	0.447	0.453	0.449

与桨叶转速相关,不受外界自然风风速变化和温度变化的影响。综上,本文所提出的基于FBG传感网络的应变-振动监测方法能有效求解叶片结构在自然风载下的应变响应及振动频率,且可靠性高,可以为FBG在风机叶片结构监测领域的应用提供参考。

## 4 结 论

本文研究了FBG传感器在塔架式风机叶片结构振动监测中的应用,提出了一种基于FBG传感网络的应变-振动监测方法,将该方法搭载在某自然风载状态下工作的风机叶片上进行长期实时结构监测,以验证其可行性。对FBG采集到的近一个月(共计201 h)数据进行应变响应分析,通过快速傅里叶变换方法分析其工作状态下的频域响应,获取结构的振动频率,探究环境因素对系统可靠性的影响。结果显示,由该应变-振动监测方法测得的应变振幅与仿真结果趋势保持一致,满足实际的工程需求。此外,该方法能有效求解叶片结构频率,叶片振动频率监测结果绝对误差范围在0.04 Hz以内,具有较高的重复性,且振动频率大小仅与桨叶转速相关,不受外界自然风风速变化和温度变化的影响。本研究为FBG在风机叶片结构健康监测中的应用提供了参考,后续考虑在该研究的基础上对叶片结构的固有频率进行监测与求解。

### 参考文献:

[1] 肖建忠,施文雨,檀一帆. 可再生能源与传统化石燃料的替代性——基于超越对数生产函数的分析[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2021, 33(5): 382-390.  
XIAO Jianzhong, SHI Wenyu, TAN Yifan. Substitutability of renewable energy and traditional fossil fuel: Based on analysis of translog production function [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2021, 33(5): 382-390.

[2] JAMIESON P, PARKER M, GIVAKI K. Estimation of the power electronic converter lifetime in fully rated converter wind turbine for onshore and offshore wind farms[C]//Proceedings of the 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014). [S.l.]: IET, 2014.

[3] 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.

YANG S Y, XIANG D W, BRYANT A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2049377.

- [4] 曾捷, 王文娟, 王博, 等. 动静态载荷下光纤光栅传感器敏感特性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(3): 397-402.  
ZENG Jie, WANG Wenjuan, WANG Bo, et al. Sensitivity of optic FBG sensor under dynamic/static load [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(3): 397-402.
- [5] LYU Bing, ZHANG Wentao, HUANG Wenzhu, et al. Random Bragg-grating-based wavelength-tunable random fiber laser with a full-open cavity[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(9): 22-26.
- [6] ISOE G M, GIBBON T B. Real-time wavelength routing based on Bragg reflection with integrated forward Raman for long-reach networks[J]. Optoelectronics Letters, 2020, 16(1): 40-44.
- [7] LIU Z, LIU X, ZHU S P, et al. Reliability assessment of measurement accuracy for FBG sensors used in structural tests of the wind turbine blades based on strain transfer laws[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 112: 104506.
- [8] 王炳楷, 孙文磊, 王宏伟, 等. 风力机叶片表面应变的光纤光栅检测方法研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(11): 1741-1746.  
WANG Bingkai, SUN Wenlei, WANG Hongwei, et al. Study on detection method of blade surface strain wind turbine with fiber bragg grating[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(11): 1741-1746.
- [9] AIHARA A, KAWAGUCHI T, MIKI N, et al. A vibration estimation method for wind turbine blades [J]. Experimental Mechanics, 2017, 57: 1213-1224.
- [10] DAI J C, LI M M, CHEN H G, et al. Progress and challenges on blade load research of large-scale wind turbines[J]. Renewable Energy, 2022, 196: 482-496.
- [11] FU D Y, JIAO B, XUE Y, et al. Load measurement method of the mw class wind turbine[J]. Mechanics and Materials, 2013, 333/334/335: 146-151.
- [12] WANG L, LI J, HAO J, et al. Crack width estimate in reinforced concrete with FBG sensor: Experimental and numerical analysis[J]. Optoelectronics Letters, 2022, 18(1): 43-47.
- [13] 於玺. 快速傅里叶变换在信号处理中的应用[J]. 信息记录材料, 2021, 22(10): 184-186.  
YU Xi. Application of fast Fourier transform in signal processing[J]. Information Recording Materials, 2021, 22(10): 184-186.