多传感器数据融合的风力机侧风状态评估

李勇博[1]，刘　珍[1,2,3]，汪建文[2,4]，郑梦楠[1]，刘鸿宇[1]
(1.内蒙古工业大学 机械工程学院，内蒙古 呼和浩特　010000；2.风能太阳能利用技术教育部重点实验室，内蒙古 呼和浩特　010000；3. 内蒙古自治区机器人与智能装备技术重点实验室，内蒙古 呼和浩特　010000；4.内蒙古工业大学 能源与动力工程学院，内蒙古 呼和浩特　010000)

摘　要：为了探索连续侧风过程中风力机叶片的应变特性，文章提出了一种多传感器数据融合的风力机侧风状态评估方法。该方法首先采用集合经验模态分解-复合多尺度排列熵-小波算法对风力机叶片应变信号进行联合降噪，再用核主成分分析(KPCA)对降噪后的多组应变信号进行融合，将平方预测误差(SPE)统计量作为评估指标，有效划分风力机侧风状态。结果表明，所提方法对于非平稳风力机叶片应变信号降噪效果明显，能够准确反映连续侧风状态下的应变变化规律。此外，文章将 KPCA 和 SPE 统计量结合，对风力机侧风运行状态进行分类，对不同影响因素下的风力机侧风运行状态进行了分析。

关键词：叶片应变；连续侧风过程；降噪处理；多传感器数据融合
中图分类号：TK81　**文献标志码**：A　**文章编号**：1671-5292(2026)01-0070-08

0　引言

随着“双碳”目标推动，中国风电产业快速发展，装机容量全球领先。风力机常运行于多变的复杂环境中，风速与风向变化直接影响风力机发电效率及安全。深入研究侧风条件下风力机应变规律，探究不同因素对风力机侧风状态的影响，对于保障风力机高效和稳定运行至关重要。

初期风力机研究聚焦于轴流工况下的叶片应变和力学特性。文献[1]分析了轴流状态下风力机叶片应变分布规律特性。文献[2]发现在轴流状态下，叶片位移随转速增加而递增，趋势由叶根向叶尖增大。文献[3]通过多种方法分析比较轴流状态下叶片攻角和诱导速度，发现中间部位结果较一致。

风力机在实际运行中常处于侧风状态，侧风状态增加了叶片受力的复杂性，学者们开始关注固定偏航角运行的风力机。文献[4]发现，偏航运行时，风轮特性在旋转周期内呈现 3P 波动特性。文献[5]发现，随着偏航角的增大，风力机尾流速度亏损变小，尾迹偏移变大。文献[6]指出，偏航对下游风力机性能波动有显著影响。文献[7]发现，偏航工况对风力机输出功率、叶片位移、叶根载荷及平台运动均有显著影响。

为更贴近实际运行情况，学者开始研究风向角连续变化对风力机的影响。文献[8]发现，在 0°~30°动态偏航过程中，风轮的性能波动较固定偏航角下更为剧烈。文献[9]指出，偏航角增大会增强风轮的旋转效应。文献[10]发现，动态偏航下叶片应力呈递减趋势。文献[11]发现，在极端变向阵风作用下，叶片柔韧性使叶尖的位移响应未受到显著影响。

目前，处理复杂的侧风工况时，对实时应变信号的处理和深入分析存在不足。本文采用集合经验模态分解-复合多尺度排列熵-小波降噪(EEMD-CMPE-WT)联合降噪方法预处理风力机应变信号，去除信号中的噪声干扰。结合核主成分分析（Kernel Principal Component Analysis，KPCA）和平方预测误差（Squared Prediction Error，SPE)统计量，对风力机侧风状态进行精细划分，并深入探究不同因素对风力机叶片应变变化规律的影响。

1　EEMD-CMPE-WT 联合降噪

在风力机运行过程中，实时采集的应变信号包含多种噪声干扰，单一方法难以有效去除噪声。本文采用联合降噪算法对信号进行处理，包括集合经验模态分解（EEMD)、复合多尺度排列熵(CMPE)和小波降噪(WT)。EEMD 是常用的针对非平稳信号的分析方法，可以将信号自适应分解

收稿日期：2024-09-02。
基金项目：省部级基本科研业务费项目(JY20220247)。
通信作者：刘　珍(1979-)，女，硕士生导师，副教授，研究方向为风能利用技术。E-mail：lz@imut.edu.cn

为多个基本模式分量和一个余项[12]。CMPE 降低了对原始时间序列长度的依懒，对各分量信号进行多尺度排列熵计算，并根据熵值对各分量进行筛选。采用 WT 对信号进行多层次分解，通过阈值对各层实现量化处理，再进行重构完成信号的降噪。

本文采用的 EEMD-CMPE-WT 联合降噪算法的具体流程如图 1 所示。

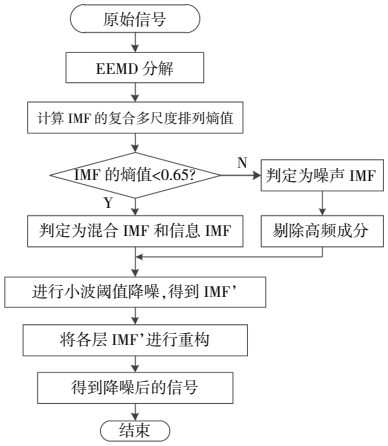


图 1　信号降噪流程图

Fig.1 Signal noise reduction flowchart

①对原始信号 $y(t)$ 进行 EEMD 分解，得到多个基本模式分量 $c_i(t)$ 和余项 $r_n(t)$。

$$y(t)=\sum_{i=1}^{n}[c_i(t)+r_n(t)] \tag{1}$$

②计算各模式分量的多尺度排列熵值，根据 IMF 熵值判断各层 IMF 分量种类。熵值大于 0.65 的分量归为噪声 IMF，熵值位于[0.55,0.65]的分量归为混合 IMF，熵值小于 0.55 的分量归为信息 IMF 分量[13]。

$$CMPE(T,\delta,m,\lambda)=\frac{1}{\delta}\sum_{k=1}^{\delta}PE\left(x_k^{(\delta)},m,\lambda\right) \tag{2}$$

式中：δ 为尺度因子；$x_k^{(\delta)}$ 为粗细化序列。

③若基本模式分量为噪声 IMF，则进行剔除，若为混合 IMF 和信息 IMF，对其进行小波阈值降噪，得到 IMF′。

$$W_x(a_0,b_0)=\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\,|a_0|^{\frac{1}{2}}\psi^*\left(\frac{t-b_0}{a_0}\right)\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：a_0 为尺度因子；b_0 为位移因子；$x(t)$ 为原函数；$\psi(t)$ 为母小波。

④将小波阈值降噪后的各层有用 IMF′ 信号进行重构，得到最终的重构信号。

2　核主成分分析

核主成分分析(KPCA)以线性方式将非线性样本空间映射到高维特征空间再进行线性降维，可以保留数据中的重要信息。本文采用 KPCA 和 SPE 统计量从多组应变信号中融合提取特征，并建立风力机侧风状态模型。

对于原始数据构成的矩阵，首先进行标准化得到新的样本集 $x_k(k=1,2,3,\cdots,m;x_k\in R_n)$，对样本进行非线性变换 $\phi(x_k)$，将其映射到高维特征空间 F，此时协方差矩阵为

$$\boldsymbol{C}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\phi(x_j)\phi(x_j)^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

矩阵的特征值 λ 和特征向量 $\boldsymbol{V}$ 需满足：

$$\lambda\boldsymbol{V}-\boldsymbol{C}\boldsymbol{V}=0 \tag{5}$$

引入的非线性函数 $\phi(x_k)$ 为

$$\lambda\phi(x_k)\boldsymbol{V}-\phi(x_k)\boldsymbol{C}\boldsymbol{V}=0 \tag{6}$$

特征向量 $\boldsymbol{V}$ 可以表示为

$$\boldsymbol{V}=\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{\alpha}_i\phi(x_i) \tag{7}$$

引入核函数 $K_{ij}=\boldsymbol{K}(x_i,x_j)=\phi(x_i,x_j)$ 后，可简化为

$$m\lambda\boldsymbol{\alpha}-K\boldsymbol{\alpha}=0 \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{\alpha}$ 为核矩阵 $\boldsymbol{K}$ 的特征向量。

样本在特征空间 F 中主元方向的投影 $\boldsymbol{V}\phi(x)$ 为

$$\boldsymbol{V}\phi(x)=\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{\alpha}_i\phi(x_i)\phi(x)=\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{\alpha}_i\boldsymbol{K}(x_i,x) \tag{9}$$

3　实验测试及数据采集

利用风能太阳能利用技术教育部重点实验室的风洞，对小型水平轴风力机进行了应变特性测试实验。

图 2(a)为实验风洞，该风洞开口实验段的直径 d 为 2.0 m，风洞全长 24.59 m，可提供 0~20 m/s 的均匀来流风。在风洞开口端固定如图 2(b)所示的小型水平轴风力机，风力机叶片采用 S 系列翼型，材料为木质，风轮直径 d 为 1.4 m。将风力机安装在如图 2(c)所示的动态偏航试验台上，实验时由偏航控制台带动风力机塔架旋转，模拟风力机侧风状态。

为了测量风力机运行过程中叶片不同位置的应变信号，将应变片均匀布置在风力机叶片的叶展方向，分别布置在气动中心线 0.20R，0.35R，0.50R，0.65R，0.80R 处，应变片布置如图 3 所示。



(a)风洞 (b)小型风力机 (c)偏航控制台

图 2 实验风洞和设备

Fig.2 The test wind tunnel and equipment

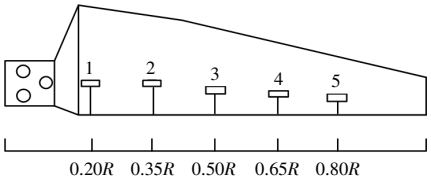


图 3 应变片测点位置

Fig.3 The location of the strain gauge measurement point

在实验过程中,通过叶片上应变传感器进行感知,并由 DH5953G 旋转信号采集仪对应变数据进行多通道实时采集,通过无线 AP 的方式将计算机与 DH5953G 连接,实现数据的采集和记录。为保证数据的精度和准确性,将应变采样频率设置为 500 Hz,在满足采样要求的同时,可以得到侧风状态的准确数据。应变特性测试流程如图 4 所示。

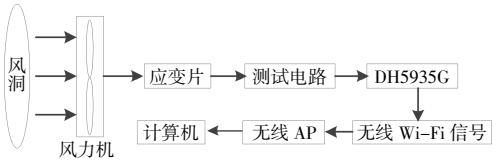


图 4 应变特性测试流程

Fig.4 Strain of characteristics test

在实验过程中,风力机运行分为两个阶段,前 10 s 风力机处于轴流阶段,在 10 s 之后,风力机开始匀速偏转,偏转过程中侧风角度为 0°~45°。

在实验过程中,变化的参数包括来流风速、尖速比和侧风角偏转速度。实验设置了 3 种来流风速 v(7,8,9 m/s),4 个尖速比 λ(4.5,5.0,5.5,6.0),3 个侧风角偏转速度 ω[1,2,3(°)/s]。采集了不同组合下的风力机叶片应变数据,具体实验工况如表 1 所示。

表 1 实验工况

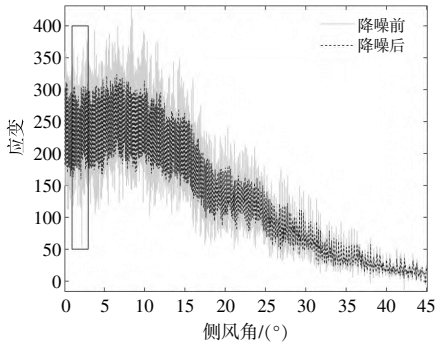
Table 1 Experimental condition

风速/(m·s^{-1})	侧风偏转角速度/[(°)·s^{-1}]	尖速比
7	1	4.5,5.0,5.5,6.0
	2	
	3	
8	1	
	2	
	3	
9	1	
	2	
	3	

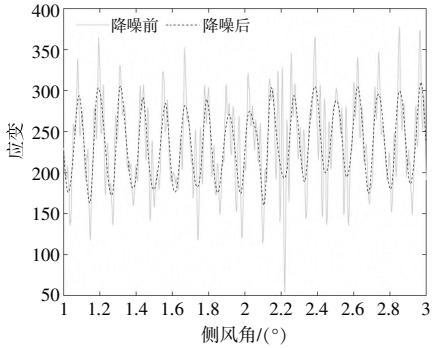
4 结果与分析

4.1 数据降噪处理

在侧风影响下,风力机叶片应变信号表现出典型的非平稳特性,简单的信号处理方法往往无法有效满足准确降噪的需求。为了有效清除这些干扰,本文采用 EEMD-CPME-WT 联合降噪方法对叶片的叶根位置应变信号进行降噪处理。图 5 为在 8-5-1 工况下[v=8 m/s,λ=5.0,ω=1(°)/s]风力



(a)整体降噪结果



(b)局部降噪结果

图 5　8–5–1 工况下应变数据降噪结果

Fig.5 8–5–1 strain data noise reduction results

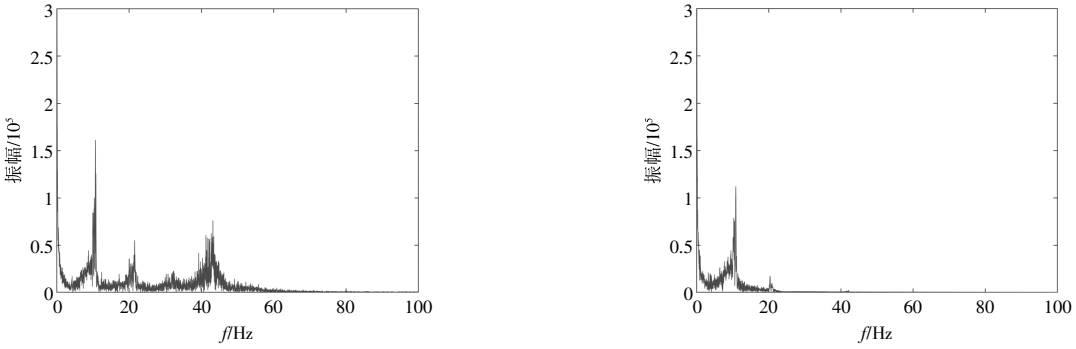
机叶片应变信号的降噪结果。

由图 5 和图 6 可以看出，对原始应变数据进行降噪处理后,取得明显的降噪效果。相较于原始信号，降噪后的信号更清晰地反映了叶片的应变变化,同时较好保留了信号的周期性变化规律。

风轮旋转频率 f 的计算式为

$$f=\frac{v\lambda}{d\pi} \tag{10}$$

根据式（10）可以求得风轮旋转频率为 9.1 Hz,根据文献[14]可知,40 Hz 附近为一阶振动频率。通过图 5 和图 6 的结果可知,降噪后的风力机



(a)原始信号频谱　　(b)降噪信号频谱

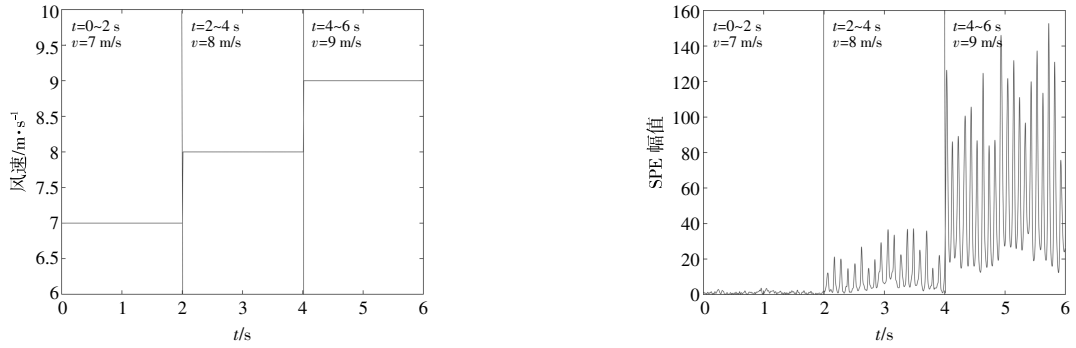
图 6　信号频谱

Fig.6 Signal spectrum diagram

叶片应变信号保留了风轮旋转频率信息，同时滤除了高频噪声干扰。

4.2　风力机侧风状态结果及分析

使风力机在轴流状态下运行，通过组合不同来流风速的轴流数据进行验证。训练数据选择 v=7 m/s,λ=5.0 时,风力机叶片上 5 个不同位置的轴流展向 3 000 个应变数据。测试数据选择 λ=5.0 时,0~2 s 时 v=7 m/s,2~4 s 时 v=8 m/s,4~6 s 时 v=9 m/s 的风力机叶片上 5 个不同位置的 3 000 个轴流展向应变数据，使用文中降噪方法分别对两组数据进行降噪处理。利用 KPCA 进行建模,通过 SPE 统计量监测应变特征变化,结果如图 7 所示。



(a)风速　　(b)SPE 统计量

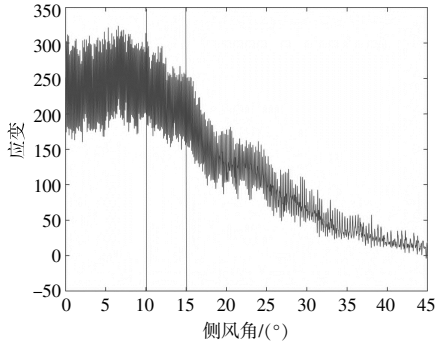
图 7　轴流变风速工况结果

Fig.7 Results of axial variable wind velocity conditions

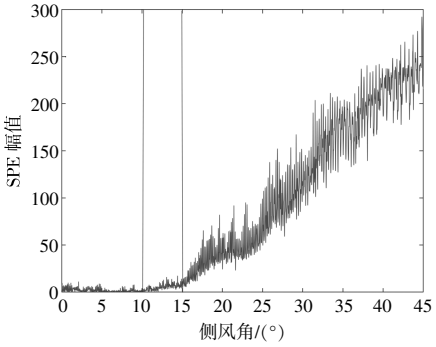
由图 7(b)可以看出,在 t=2,4 s 时,SPE 统计量的特征值变化明显，说明该方法对于叶片应变变化较为敏感，可以用于评估风力机叶片应变特征变化。

根据上述流程,将 8–5–1 工况的风力机叶片轴流数据作为训练数据，将叶片侧风运行数据作

为测试数据，利用 KPCA 对风力机叶片侧风运行过程进行建模，得到风力机叶片侧风运行过程的统计量值。



(a)风力机应变值



(b)SPE 统计量

图 8　8–5–1 侧风状态结果

Fig.8 8–5–1 side wind status results

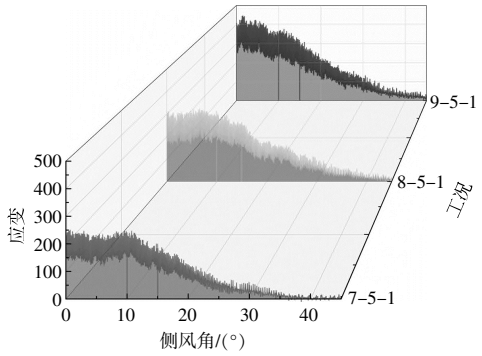
文献[15]发现,风力机叶片应变在侧风角为 0°~10°时下降缓慢,在 10°~45°时下降明显,在 10°~20°时快速下降。根据图 8 的结果,当侧风角为0°~10°时,风力机叶片应变和统计量值处于相对稳定状态；侧风角为 10°~15°时,SPE 统计量值开始小幅增加，对应的风力机叶片应变出现小幅下降；当侧风角为 15°~20°时,SPE 统计量快速增大,对应的风力机叶片应变快速下降;当侧风角为 20°~45°时,风力机叶片应变和统计量值均开始均匀变化。以上结果对比可以说明,SPE 统计量可以反映风力机叶片应变变化的趋势。

由图 8 可知,当侧风角为 0°~10°时,风力机应变处于相对稳定阶段,当侧风角为 10°~15°时,风力机应变处于缓慢下降阶段,当侧风角为 15°~45°时,风力机应变处于主要下降阶段。

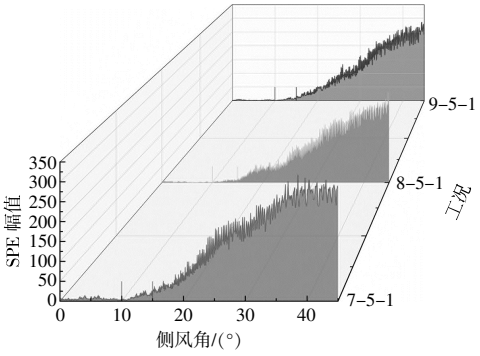
为探究风速、尖速比、侧风角变化速度对风力机叶片应变变化规律的影响,对不同工况下得到的风力机侧风运行状态结果分别进行分析。

4.2.1　来流风速对应变的影响

来流风速变化对风力机叶片应变变化规律的影响如图 9 所示。



(a)风力机应变值



(b)SPE 统计量

图 9　变来流风速侧风状态结果

Fig.9 Variable flow wind speed side wind condition results

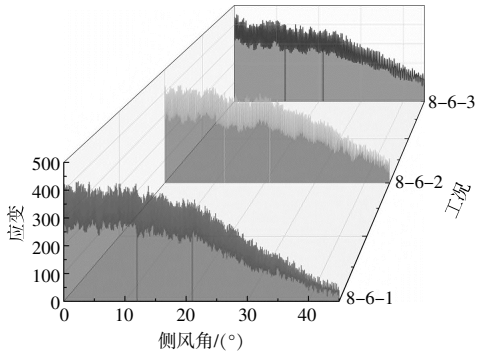
由图 9(a)可知,当风力机尖速比和侧风角偏转速度不变时，风力机叶片应变随着来流风速增大而增大，这主要是因为风速的增加导致叶片承受的气动力增大，从而增加了叶片的弯曲和扭转变形,进而引起应变的增加,最大增幅为 69%;由图 9(b)可知,随着来流风速增大,不同工况下风力机叶片整体变化趋势基本不变，风力机稳定运行的侧风角均在 0°~10°附近，在 10°~15°时风力机应变开始缓慢下降，侧风角为 15°~45°时是风力机应变下降的主要阶段。

侧风角在 0°~10°时能够保持相对稳定的运行状态，说明此时风力机的气动性能和结构稳定性较好,能够有效抵抗侧风的影响。侧风角为10°~45°时,风力机的气动特性发生了变化,导致叶片

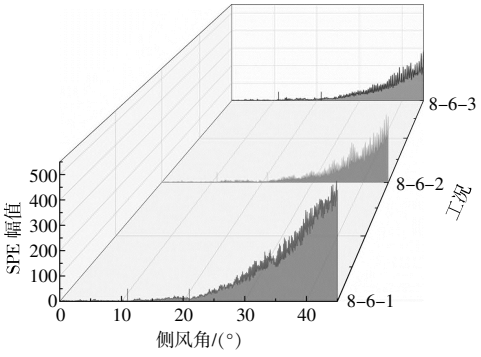
受到的侧风载荷减小,引起应变的下降,其中侧风角为 15°~45°时，风力机的气动性能可能受到较大影响,导致风力机应变下降加快。

4.2.2　侧风角速度对应变的影响

风向变化速度对风力机叶片应变变化规律的影响如图 10 所示。



(a)风力机应变值



(b)SPE 统计量

图 10　变侧风角速度侧风状态结果

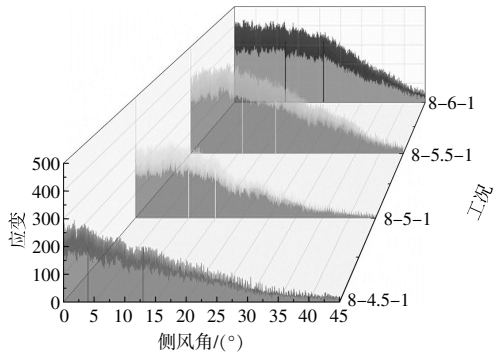
Fig.10 Variable sidewind angular velocity side wind state results

由图 10(a)可知,当来流风速和尖速比不变时,随着侧风角偏转速度的增大,风力机叶片应变幅值没有发生显著变化。在侧风角开始偏转时,应变变化最大幅值仅为 10%,这表明侧风角速度的变化对叶片应变幅值影响较小。由图 10(b)可知:随着侧风角速度的增大,不同工况下风力机叶片应变整体变化趋势基本不变,风力机稳定运行的侧风角均在 0°~12°附近,此时 SPE 统计量值较低且稳定;当侧风角为 12°~21°时,统计量值开始小幅增大，风力机叶片应变开始逐渐下降;当侧风角为 21°~45°时,侧风角偏转速度变化越慢,SPE 统计量值上升越快,风力机应变下降越迅速。其中,当侧风角偏转速度为 1(°)/s 时,在侧风角为21°~45°过程中应变幅值下降 88%,当侧风角偏转速度为 2(°)/s 时,应变幅值下降 75%,当侧风角偏转速度为 3(°)/s 时,应变幅值下降 69%。这主要是由于侧风角偏转速度变化越慢,风力机偏转时间越长,导致转动惯量释放越多,离心载荷产生的展向拉伸下降越快，使得应变下降越快。

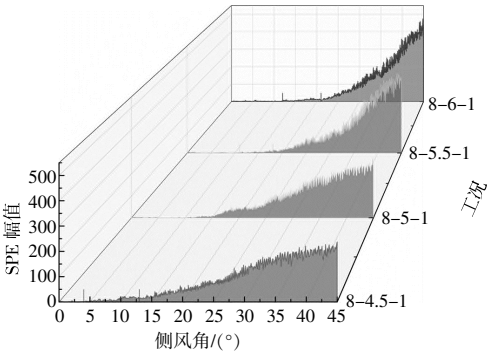
由以上结果可知，侧风角偏转速度对风力机在侧风状态下的整体运行趋势影响甚微，其主要作用体现为改变了风力机应变的下降速度。

4.2.3　尖速比对应变的影响

尖速比对风力机叶片应变变化规律的影响如图 11 所示。



(a)风力机应变值



(b)SPE 统计量

图 11　变尖速比侧风状态结果

Fig.11 Variable tip speed ratio side wind condition results

由图 11(a)可知,当来流风速和侧风角偏转速度不变时，风力机叶片应变随着尖速比的增加而逐渐增大，初始偏转阶段的最大增幅为 55%，表明尖速比对叶片应变有显著影响，其原因在于随着尖速比的增加,风轮转速加快,离心载荷产生的展向拉伸增大,导致风力机叶片应变增加。

由图 11(b)可知,随着尖速比的增大,风力机稳定运行的侧风角范围持续扩大。当尖速比为 4.5 时,风力机稳定运行的侧风角为 0°~4°。当尖速比为 5.0 时,风力机稳定运行的侧风角为 0°~10°,风力机稳定运行的侧风角范围扩大了 6°,这表明尖速比的增大有助于提升风力机在侧风条件下的稳定性。当尖速比为 6.0 时,风力机稳定运行的侧风角范围扩大了 1°。表明随着尖速比的进一步增大,其对风力机稳定运行范围的影响开始减弱,影响减弱的原因在于,随着尖速比的增加,风轮的惯性载荷增大,使得风力机受到侧风扰动时,其应变下降速度变慢。尖速比的增加能够扩大风力机稳定运行范围,但这种扩大效应不是线性的,而是随着尖速比的增大而逐渐减弱。

由表 2 的分析结果可见,当来流风速和侧风角偏转速度发生变化时,风力机叶片整体变化趋势保持相对稳定。其中:来流风速主要影响风力机叶片的整体应变幅值,对应变的变化速率影响较小;侧风角偏转速度主要对风力机叶片应变的下降速度产生影响,对应变幅值的影响相对较小;当尖速比增大时,风力机叶片的变化趋势会相应延迟,并对风力机叶片的整体应变幅值也产生影响。

表 2 工况分析结果

Table 2 Working condition analysis results

影响因素	工况	开始偏转最大增幅/%	相对稳定阶段/(°)	缓慢下降阶段/(°)	主要下降阶段/(°)
来流风速	7-5-1 8-5-1 9-5-1	69	0~10	10~15	15~45
偏转速度	8-6-1 8-6-2 8-6-3	10	0~12	12~21	21~45
尖速比	8-4.5-1	55	0~4	4~13	13~45
	8-5-1		0~10	10~15	15~45
	8-5.5-1		0~11	11~18	18~45
	8-6-1		0~12	12~21	21~45

综上所述,在风速、尖速比、侧风角偏转速度 3 种影响因素中,尖速比对风力机运行的影响最为显著。

5 结论

本文以连续侧风运行下的小型水平轴风力机为研究对象,通过对叶片非平稳应变信号进行降噪处理和侧风运行特性分析,得出以下结论。

①采用 EEMD-CMPE-WT 联合降噪方法对风力机叶片应变信号进行降噪处理,结果表明,该方法具有明显降噪效果,为建立风力机侧风状态模型提供了良好基础。

②基于 KPCA 方法对风力机侧风的运行状态进行分类,将风力机叶片各位置的应变信号进行融合分析,最后得到风力机侧风状态模型,对风力机侧风状态应变变化规律进行了准确划分。

③来流风速、尖速比以及侧风角偏转速度共同影响风力机的运行状态。具体而言,侧风角偏转速度主要影响应变的下降速度,来流风速主要影响风力机叶片的整体应变幅值,而尖速比主要影响应变变化的速度和趋势。

参考文献:

[1] 白叶飞,汪建文,赵元星,等.风力机叶片动态应变分布特征的研究[J].可再生能源,2014,32(3):306-311.

[2] 张建平,张开华,王明强,等.转速对风机叶片位移和应力的影响[J].机床与液压,2020,48(19):156-160.

[3] Rahimi H,Schepers JG,Shen WZ,et al.Evaluation of different methods for determining the angle of attack on wind turbine blades with cfd results under axial inflow conditions[J]. Renewable Energy,2018,125:866-876.

[4] 戴丽萍,周强,姚世刚,等.偏航工况下水平轴风力机气动性能数值分析[J].太阳能学报,2019,40(3):628-634.

[5] 张子瑜,黄鹏,曹曙阳.偏航风力机尾流特性和功率性能的大涡模拟研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(9):111-121.

[6] Zhao M H,Chen S Q, Wang K, et al. Effect of the yaw angle on the aerodynamics of two tandem wind turbines by considering a dual-rotor wind turbine in front[J]. Ocean Engineering,2023,283:114974.

[7] 白旭,杨翔宇,栗铭鑫.偏航工况对海上浮式风力机输出功率及叶片载荷影响的研究[J].中国造船,2022,63(1):140-152.

[8] 叶昭良,王晓东,尹佐明,等.偏航过程中风轮非定常尾流特性研究[J].可再生能源,2019,37(3):445-450.

[9] Zhu C Y, Qiu Y N, Feng Y H, et al. Rotational effects on the blade flow of a horizontal axis wind turbine under axial and yawed inflow conditions [J]. Ocean Engineering,2023,271:113764.

[10] 张建伟,汪建文,闫思佳,等.偏航速度对风力机功率及叶片应力的影响研究[J].太阳能学报,2022,43(9):273-279.

[11] Li C, Sun W L, Zhou J X, et al. Dynamic performance

analysis for wind turbine in complex conditions [J]. Journal of Vibroengineering,2020,22(1):209-224.
[12] 杨帆,丁常富,夏褚芮,等.风力发电机组轴承振动信号去噪方法分析研究[J].可再生能源,2014,32(12):1837-1843.
[13] 鲁铁定,谢建雄.EEMD-多尺度排列熵的 GPS 高程时间序列降噪方法[J].大地测量与地球动力学,2021,41(2):111-115,220.
[14] 马剑龙,汪建文,董波,等.S 型叶尖小翼对风轮振动频率影响的研究[J].振动与冲击,2013,32(24):110-116,121.
[15] 刘珍,王锦,汪建文,等.侧风角动态变化对风力机叶片应变影响的试验研究[J].排灌机械工程学报,2023,41(5):499-504.

Cross-wind state evaluation of wind turbine based on multi-sensor data fusion

Li Yongbo[1], Liu Zhen[1,2,3], Wang Jianwen[2,4], Zheng Mengnan[1], Liu Hongyu[1]
(1.Mechanical Engineering College, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010000, China; 2.Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy Utilization Technology, Huhhot 010000, China; 3.Inner Mongolia Key Laboratory of Robotics and Intelligent Equipment Technology, Huhhot 010000, China; 4Energy and Power Engineering College, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010000, China.)

Abstract: In order to explore the strain characteristics of wind turbine blades during continuous crosswind, a multi-sensor data fusion method for wind turbine crosswind state evaluation is proposed in this study. In this method, ensemble Empirical Mode Decomposition (EMD) and composite multi-scale permutation entropy-wavelet algorithm are used to jointly reduce the noise of wind turbine blade strain signals, and then Kernel Principal Component Analysis (KPCA) is used to integrate the multiple groups of strain signals after noise reduction. The Squared prediction error (SPE) statistic was used as the evaluation index to effectively divide the wind turbine crosswind process. The results show that the proposed method is effective in reducing the noise of non-stationary wind turbine blade strain signal, and can accurately reflect the strain variation law in continuous crosswind process. In addition, through the combination of KPCA and SPE statistics, the process of wind turbine crosswind is segmtioned, and the operating state of wind turbine crosswind under different influencing factors is analyzed.

Keywords: blade strain; continuous crosswind process; noise reduction processing; multi-sensor data fusion