

[状态监测]

基于光纤MEMS传感器的海上风电机组叶片状态监测

文/邓豪健 杨赠儒 李健平
广东粤电珠海海上风电有限公司

实时监测风电机组叶片状态，及时发现并处理潜在故障，对风电场的巡检工作具有重要意义。基于光纤传感器技术，对海上风电机组叶片的状态监测进行深入研究，提出一种基于光纤MEMS传感技术的叶片状态监测系统，实现对叶片应力和振动的实时监测，为叶片的故障预警和健康管理提供有力支持。

海上风电作为可再生能源的重要组成部分，近年来得到了快速发展。然而，海上风电机组运行环境复杂多变，叶片作为能量转换的关键部件，经常受到各种自然因素的侵蚀，导致故障频发。这些故障不仅影响风电场的发电效率，还增加了运维成本和安全风险。因此，对海上风电机组叶片进行状态监测，及时发现并处理潜在故障，对于提高风电场的整体效益具有重要意义。

目前，海上风电机组叶片状态监测技术主要包括应变监测、振动监测、声发射监测和无损检测等。然而，这些技术在实际应用中仍存在一些问題，如监测准确度不高，实时性差，成本高昂等。因此，需要寻找一种更加高效、准确和经济的叶片状态监测技术。

光纤传感器作为一种新型传感技术，具有不带电、体积小、质量轻、易弯曲、抗电磁干扰、无衰减、易部署、耐腐蚀和免维护等优点，同时智慧运维复杂度低，成本低。因此在结构健康监测领域得到了广泛应用。本文将光纤MEMS传感器技术应用干海上风电机组叶片的状态监测中，提出一种基于光纤MEMS传感技术的叶片状态监测系统，实现对叶片应力和振动的实时监测。

光纤传感器技术原理

光纤传感器是一种利用光纤作为传输媒介，通过测量光信号的变化来感知外界物理量的传感器。光纤传感器的原理主要基于光的干涉、散射和调制等现象。其中，光纤MEMS传感器是一种基于光的干涉原理的传感器，通过在光纤中刻制MEMS结构，当外界物理量（如应力、温度等）发生变化时，MEMS的周期和折射率会发生变化，导致光信号发生相位调制，通过测量光信号的相位变化，可以实现对外界物理量的测量。

主要应用

光纤传感器对风机叶片载荷监测系统的目的是对风机叶片的运行状态进行监测，包括风机叶片故障的早期预判，三个叶片不平衡状态的预警等。

（1）应力与应变监测

海上风电机组叶片在工作过程中会受到复杂的风载荷作用，导致叶片内部产生应力和应变。光纤传感器因其具有高灵敏度、高分辨率及抗电磁干扰等特点，非常适合用于叶片的应力与应变监测。通过将光纤MEMS传感器嵌入叶片的复合材料中，可以实时监测叶片在风载荷作用下的应力与应变

分布，为叶片的结构设计和健康状态评估提供重要依据。

(2) 温度监测

叶片在长时间运行过程中，由于阳光辐射、空气摩擦等因素，其表面温度会发生变化。温度的变化不仅会影响叶片材料性能，还可能引发热应力等问题。光纤温度传感器可以实时监测叶片的温度分布，为叶片的热管理提供数据支持。同时，通过温度监测还可以及时发现叶片表面的异常情况，如热斑、腐蚀等。

(3) 振动监测

叶片在风载荷作用下会产生振动，振动的强度和频率与叶片的健康状态密切相关。光纤振动传感器可以实时监测叶片的振动情况，通过分析振动的频谱特性，可以判断叶片是否存在裂纹、松动等损伤。此外，振动监测还可以用于评估叶片的疲劳寿命和预测潜在的故障。

(4) 裂纹监测

裂纹是叶片常见的损伤形式之一，对叶片的安全运行构成严重威胁。光纤裂纹传感器可以实时监测叶片表面的裂纹情况，当裂纹出现时，传感器会检测到光信号的异常变化，从而发出预警信号。通过裂纹监测，可以及时发现并处理叶片的裂纹损伤，避免发生事故。

基于光纤MEMS传感技术的叶片状态监测系统

(1) 系统架构

基于光纤MEMS传感技术的叶片状态监测系统主要由光纤MEMS传感器、数据采集模块、数据处理模块和故障预警模块组成，本研究所用的是上海拜安传感技术有限公司的光纤传感器，如图1所示。光纤MEMS传感器布置在叶片表面或内部，用于采集叶片的应力和振动信息；数据采集模块负责将传感器采集的光信号转换为电信号，并进行初步处理；数据处理模块对采集到的数据进行滤波、降噪和特征提取等操作，得到叶片的应力分布和振动特性；故障预警模块根据数据处理模块的结果，对叶片的故障进行预警和诊断。

(2) 传感器布置

光纤MEMS传感器的布置是叶片状态监测系统的关键之一。根据叶片的结构特点和受力情况，可

以在叶片的不同位置布置多个传感器，以获取全面的应力分布和振动信息，如图2所示。同时，传感器的布置还需要考虑叶片的制造工艺和安装难度等因素。在实际应用中，可以将光纤MEMS传感器嵌入叶片的复合材料中，或者粘贴在叶片表面。通过合理布置传感器，可以实现对叶片不同部位的实时监测，提高监测的准确性和可靠性。

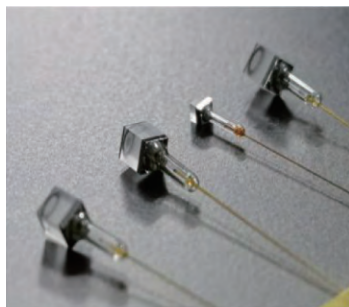


图1 光纤传感器



图2 光纤传感器安装现场

(3) 数据采集与处理

数据采集模块负责将传感器采集到的光信号转换为电信号，并对其进行初步处理。由于光纤MEMS传感器采集到的光信号非常微弱，因此需要采用高灵敏度的光电探测器进行转换。同时，还需要对采集到的电信号进行滤波和放大等操作，以提高信号的信噪比。数据处理模块对采集到的数据进行滤波、降噪和特征提取等操作。由于叶片的振动信号通常包含多个频率成分，因此需要采用时域分析和频域分析等方法对信号进行处理。通过提取叶片的振动特征（如频率、振幅等），可以实现对叶片状态的实时监测和故障预警。图3为数据采集与预

处理示意图。

(4) 故障预警与诊断

故障预警模块根据数据处理模块的结果，对叶片的故障进行预警和诊断。通过对叶片的应力分布和振动特性进行分析，可以判断叶片是否存在裂纹、分层等缺陷。同时，还可以根据故障的发展趋势和严重程度，制定相应的维护策略，以减少故障对风电场运行的影响。

实验验证与分析

为验证基于光纤MEMS传感技术的叶片状态监测系统的有效性，本文进行相关实验验证。实验对象为某型号海上风电机组的叶片，通过在叶片表面布置多个光纤MEMS传感器，采集叶片的应力和振动信息传回叶片状态监测系统，具体如图4所示。

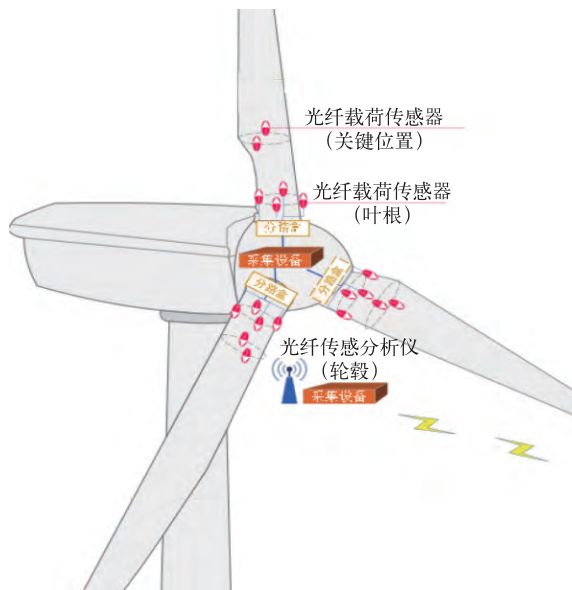


图3 数据采集与预处理示意图



图4 叶片状态监测系统的多截面振动监测

图5为叶片振动状态监测图，反映实时的振动幅值对比、各转速下的振动幅值统计对比及功率谱变化情况，联合识别叶片的安全状态。将叶片振动监测数据和叶片载荷监测数据两种物理量，联合诊断风机叶片的故障类型，例如气动不平衡、叶根过载、叶片疲劳、叶片开裂和叶根螺栓断裂等隐患。实验结果表明，通过实时监控叶片的应力和振动情况，可以准确识别叶片的故障类型和位置。同时，基于光纤MEMS传感技术的海上风电机组叶片状态监测系统，具有较高的灵敏度和准确性，能够及时

发现并处理潜在故障，为叶片的健康管理提供有力支持。

结束语

本文基于光纤传感器技术，提出一种基于光纤MEMS传感技术的海上风电机组叶片状态监测系统。该系统通过布置在叶片表面或内部的光纤MEMS传感器，实现对叶片应力和振动的实时监控。实验结果表明，该系统具有较高的灵敏度和准确性，能够及时发现并处理潜在故障，为叶片的健



图5 叶片振动幅值统计对比及功率谱变化情况

健康管理提供有力支持。然而，目前该系统仍存在一些不足之处，如传感器的布置和安装难度较大、成本较高。未来将进一步优化传感器的布置方案，降低系统成本，提高系统的实用性和可靠性。同时，还将探索将其他先进的传感技术和数据处理方法应用于叶片状态监测中，以提高监测的准确性和可靠性。EA

(收稿日期：2025-01-06)

参考文献

[1] 韩小地, 徐荣鹏, 李伟, 等. 基于风机叶片远程听诊的状态监测系统[J]. 电力设备管理, 2020(7): 110-112.
[2] 陈钦. 风机叶片应力监测系统的应用[J]. 中国

新技术新产品, 2021(23): 33-35.
[3] 胡蓓, 吴永康, 郭子君, 等. 风力发电叶片裂缝监测技术综述[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 93-99.
[4] 王冰佳, 韩毅, 童博, 等. 海上风力机叶片状态监测技术应用现状与展望[C]//第八届中国海上风电大会暨产业发展国际峰会论文集. 2022: 1-5.
[5] 刘瑞刚. 基于振动的风机叶片故障监测方法研究[J]. 中国新技术新产品, 2022(9): 69-71.
[6] 余建国, 欧阳丁杰. 风力机叶片健康状态监测及预警研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(2): 74-77.

