 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i8.7040

A Review of the Research on Key Technologies for Structural Health Monitoring Systems in Offshore Wind

Di Xu Dajiang Chen Qiang Zhang* Xiaofeng Fan Jixian Su

Zhejiang Huadong Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311100, China

Abstract

The global offshore wind power industry has experienced rapid development in recent years. However, its structures face severe challenges from the harsh marine environment (wind, waves, currents, corrosion), creating an urgent need for effective structural health monitoring systems to ensure safety and reduce operational and maintenance costs. This paper systematically reviews the core sensor technologies (vibration, acoustic emission, strain) and wireless transmission technologies (LoRa, NB-IoT, ZigBee, Wi-Fi) used in offshore wind structural health monitoring systems, providing a comparative analysis of their principles, characteristics, and applications. It also explores solutions for building multi-level monitoring and data transmission networks through technology fusion. This review offers crucial technical references and a theoretical basis for designing and optimizing SHM systems for offshore wind structures, holding significant importance for promoting the intelligent development and safe, reliable operation of the offshore wind power industry.

Keywords

offshore wind power; structural health monitoring; offshore wind power structure

海上风电结构健康监测系统关键技术研究综述

徐狄 陈大江 张强* 范肖峰 苏纪贤

浙江华东工程咨询有限公司，中国 · 浙江 杭州 311100

摘 要

近年来，全球海上风电产业迅猛发展，但其结构长期面临恶劣海洋环境（风、浪、流、腐蚀）的严峻挑战，亟需有效的结构健康监测系统来保障安全、降低运维成本。本文系统综述了海上风电结构健康监测系统中的核心传感器技术（振动、声发射、应变）与无线传输技术（LoRa、NB-IoT、ZigBee、Wi-Fi），对比分析了其原理、特点及适用范围，并探讨了通过多技术融合构建多层次监测与数据传输网络的解决方案。该综述为设计和优化海上风电结构健康监测系统提供了重要的技术参考和理论依据，对推动海上风电产业的智能化发展与安全可靠运行具有重要意义。

关键词

海上风电；结构健康监测；海上风电结构

1 引言

近几十年来，随着科学技术的快速发展，我国大力发展清洁能源，不断优化能源结构，能源绿色低碳转型取得显著成效。其中，以风能为主的清洁能源成为政策发力点和重要发展趋势，开发海上风电是我国推动可再生能源发展的重点领域[1]。我国东部沿海地区经济总量大、人口稠密，同时海上风资源丰富，大力发展海上风电产业是东部沿海地区加强能源自给和实现低碳转型的重要抓手，对缓解沿海地区电力供需紧张、实现能源供给转型有重要推动作用[2]。然而，海上风电常年承受风浪流等复杂循环荷载作用，海上风电在动态且常具挑战性的海洋环境中运行，面临着关键的安全挑战，包括叶片损伤、材料腐蚀、结构劣化、电气系统故障以及基础不稳等问题。这些问题不仅会造成海上风电的结构损伤，还有可能会造成重大的安全风险[3]。因此，实现海上风电的实时监测是提高OWT长期稳定性和性能的重要策略[4]。

传感技术的快速发展使结构健康监测系统（Structural Health Monitoring System, SHMS）成为海上风电长期可靠性的关键技术[5]。SHMS 通过更系统的运营管理方法，显著提高了海上风电的盈利能力、可靠性和可持续性。它在确保海

【基金项目】山东能源渤中海上风电项目（项目编号：HDY-SC33-20240028）。

【作者简介】徐狄（1986-），男，中国浙江杭州，本科，高级工程师，从事海上风电施工技术研究。

【通讯作者】张强（1989-），男，博士，高级工程师，从事海上风电施工技术研究。

上风电的完整性和安全性方面发挥着关键作用 [6]。该技术允许从现场结构中获取大量数据，包括结构响应和环境条件，便于有效的故障诊断和状态评估 [7]。SHMS 采用先进的传感器技术，持续监测结构响应和环境条件的实时数据，促进潜在故障的早期诊断并实现全面的状态评估 [8, 9]。此外，强大的数据传输系统是 SHMS 有效性不可或缺的一部分 [10]。LoRa、Wi-Fi、NB-IoT 和 Zigbee 等无线技术在恶劣的海洋环境中优于传统的有线方法，提供增强的可靠性和长距离传输能力，有助于提高 OWT 运营的安全性和成本效益 [11]。为了探明海上风电 SHMS 研究进展和面临挑战，本文将系统梳理海上风电 SHMS 在传感器技术以及数据传输技术的相关研究，为海上风电硬件监测设备的发展提供指导方向。

2 海上风电结构健康监测传感器技术

目前，多种传感器被用于海上风电结构健康监测。主要传感技术包括振动监测、声发射检测和应变测量 [12]。振动监测适合叶片和基础的综合监测，声发射检测在冲击检测和水下结构方面表现出色，而应变监测则是详细分析塔架应变和疲劳的理想选择。三种监测的技术对比如下表 1 所示。

表 1 海上风电结构健康监测传感器技术对比

监测维度	振动监测	声发射监测	应变监测
基本原理	通过加速度传感器等测量结构在运行中的振动响应，分析其频率、幅值等特征参数的变化。	监测材料在受力变形或产生裂纹时，内部迅速释放能量而产生的瞬态弹性波（声发射信号）。	通过应变片或光纤光栅传感器等，直接测量结构局部表面的微形变（应变），从而计算应力水平。
监测范围	整体状态和宏观缺陷	微观损伤和动态缺陷	载荷和疲劳
技术特点	• 被动式监测，依赖于外部激励（风、浪）或机组自身运行。 • 成熟度高，是状态监测的标配技术。 • 擅长检测旋转机械的故障。	• 主动式监测，监测的是损伤本身发出的信号。 • 高灵敏度，能发现早期、微观的损伤。 • 定位功能：可通过多个传感器对损伤源进行定位。	• 直接测量，结果直接反映结构受力情况。 • 既可测静态应变，也可测动态应变。 • 是评估结构完整性和寿命的直接依据。
主要适用范围	传动链系统、整体振动特性、机组运行状态	内部缺陷监测、焊缝和关键连接部位的裂纹监测、螺栓断裂的早期发现	已知应力集中区域的载荷与疲劳监测、基础结构的结构安全监测

2.1 振动监测

振动监测是海上风电结构健康监测最常用的方法之一。Kim 等人的研究对海上风力涡轮机进行了运行模态分析，为评估涡轮机安全性和确保结构设计和维护提供可靠的数据和技术支持 [13]。Zhou 建议在涡轮机的不同高度部署加速度计，以捕获振动数据。该技术利用加速度计和陀螺仪，测量由环境因素（如风和波浪）以及涡轮机的运行状态引起的振动 [14]。通过分析振动数据，工程师可以识别可能表明结构弱点、机械故障或疲劳的异常模式。例如，振动水平的突然增加可能表明涡轮机的齿轮箱或转子叶片即将发生故障 [15]。从振动传感器收集的数据可以使用先进的算法进行处理，以执行模态分析并识别结构动态行为随时间的变化。

2.2 声发射监测

声发射监测是海上风电结构健康监测的另一项有价值的技术。该方法可以识别海上风电结构的微观故障机制，包括监测内部裂纹的形成和摩擦或其他动态过程产生的高频应力波 [16]。声发射传感器对微小变化高度敏感，能够在故障升级为严重问题之前监测到正在发展的故障。此外，声发射作为一种非破坏性的传感技术，允许从远程位置进行实时监控，因此，声发射监测对于监测塔、叶片和基础等关键部件特别有用 [17]。Joosse 等人利用声发射技术检测与裂纹机制相关的声音，精确定位叶片开裂造成的受损区域 。Tziavos 等人使用声发射技术分析了海上风电机组灌浆连接件的损伤演化和失效机理，并计算了各种复杂应力状态下的潜在损伤。

2.3 应变监测

应变测量也是在结构健康监测中检测预定位置微尺度变化的关键技术，对于评估各种复杂载荷条件下风力涡轮机的结构完整性至关重要，包括风力涡轮机塔架和上部结构的重量，以及恶劣的波浪和风载荷 。在海上风电中，应变传感器用于评估关键部件（如塔架、转子叶片和基础）的性能。通常，电阻式或光学应变仪用于监测海上风力结构部件的局部变形，传感器安装在海上风电上发生显著变形的特定位置 。Yi 开发了一种 SHM 系统，该系统将应变计与加速度计和倾角计集成在一起，用于长期监测水下结构 。此外，研究表明，在 OWT 上安装应变传感器可以帮助工程师识别潜在的故障点并优化设计以提高性能，从而将运营和维护成本降低 10% 至 15% 。

3 海上风电结构健康监测无线传输技术

当使用传感器技术从有线电缆上采集到数据后，下一步就是将这些数据传输到中央监控系统。支持海上风电运行的 SHMS 正常运行的关键是实时、准确和安全的数据传输。这通过构建数据通信网络来实现，采用有线或无线传输方式，能够监控施工作业条件、及时检测结构损坏和评估建筑物安全性。通常，传统的光纤或铜缆连接由于其高可靠性而适合短距离数据传输；然而，其海上应用有限，安装和维护成本很高 。因此，目前应用于 SHM 的数据传输技术主要利用 LoRa、Wi-Fi、NB-IoT 和 Zigbee 等无线通信技术。表 2 为各

种常见无线数据传输方式的带宽和传输范围以及性能对比。

表 2 海上风电结构健康监测无线传输技术对比

无线传输技术	传输距离	网络延迟	传输速度	功耗
LoRa	＞ 10 km	待定	0.3~50 kbps	非常低
Wi-Fi	＜ 50 m	＜ 1 s	5G: 1~500 M	非常高
NB-IoT	＞ 10 km	6~10 s	160~250 kbps	非常低
ZigBee	10 ~100 m	＜ 1 s	250 kbps	低

3.1 Wi–Fi 和 ZigBee 技术

ZigBee 技术可用于传输结构健康监测数据，以促进海上风电的监测工作。已提出一套针对海上风电的综合实时在线监测平台，该平台通过振动传感器、采集节点和协调节点构建 ZigBee 无线局域网实现数据传输。Wi-Fi 是 SHMS 中另一种广泛使用的数据传输技术，可提供高数据传输速率，适用于需要实时监控和分析的应用。在海上风电场中，可以建立 Wi-Fi 网络将传感器和数据采集系统连接到本地服务器或云平台。虽然 Zigbee 和 Wi-Fi 在海上风结构健康监测方面具有优势，但支持更高带宽的数据传输或传输速度，但也存在传输距离短、功耗高等缺点，不便于在海上风电场单独使用，通常与其他长距离通信技术结合使用，以提高传输距离。

3.2 LoRa 和 NB–IoT 技术

LoRa 是一种低功耗、远距离无线通信技术，特别适用于海上风电场等偏远地区的 SHMS 。它可以在超过 10 公里的距离上传输数据，非常适合连接分布在整个风电场的多个传感器。LoRa 的主要优势之一是低功耗，允许传感器在电池电源下长时间工作。此外，LoRa 可以穿透障碍物，这意味着即使在恶劣的海洋环境中也可以传输数据。NB-IoT 是一种新的窄带蜂窝通信低功耗技术，专为低功耗，广域应用而设计。NB-IoT 可以直接部署在 GSM，UMTS 或 LTE 网络上，通过有线电缆将数据从 SHM 传感器传输到中央监控系统。NB-IoT 具有多个优势，包括扩大覆盖范围，提高在挑战性环境中的渗透力，降低成本和增强性能 。在海上风电场的结构健康监测中，需要综合考虑传输距离、带宽和抗干扰能力等因素，可采用 LoRa 或 NB-IoT 作为主要的长距离传输技术，以 ZigBee 或 Wi-Fi 作为短距离传输技术，构建多级无线传输网络。

4 结论

综上所述，海上风电结构健康监测系统依赖于多源传感器技术与多层次无线传输技术的有效结合，以实现对结构状态全面、实时和可靠的监控。在传感层面，振动监测、声发射检测和应变测量三者优势互补，分别从宏观振动特性、微观损伤演化与局部载荷疲劳等多个维度共同保障结构安全。振动监测适用于整体运行状态评估，声发射技术善于捕捉早期裂纹与动态缺陷，应变测量则为结构完整性评估提供直接依据。在数据传输方面，面对海上恶劣环境与远距离传输的挑战，无线通信技术显示出显著优势。短距高速传输（如 ZigBee、Wi-Fi ）与远距低功耗技术（如 LoRa、NB-IoT ）可构建多级通信网络，平衡带宽、距离与功耗需求，实现监测数据自传感器至监控中心的高效、稳定回传。未来，海上风电结构健康监测系统将进一步朝向智能化、集成化与标准化方向发展，通过多传感器数据融合与智能诊断算法提升状态评估的准确性，为海上风电设施的安全运行与运维决策提供坚实支撑。

参考文献

[1] 葛旭,徐业鹏,黄丹.基于进化策略的海上风电支撑结构多参数同步优化设计[J].可再生能源. 2020, 7.

[2] 张佳丽,李少彦.海上风电产业现状及未来发展趋势展望[J].风能. 2018, 10, 46-52.

[3] Seyr, H.; Muskulus, M. Safety indicators for the marine operations in the installation and operating phase of an offshore wind farm. Energy Procedia 2016, 94, 72-81.

[4] DeVoto, D.; McCluskey, P. Reliability Analysis of Wind Turbines. In Proceedings of the ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability collocated with the Heat Transfer and InterPACK09 Conferences, San Francisco, CA, USA, 19–23 July2009; pp. 1041-1045.

[5] Luengo, M.; Kolios, A. Failure Mode Identification and End of Life Scenarios of Offshore Wind Turbines: A Review. Energies 2015,8, 8339-8354.

[6] He, Q.; Zhao, J.; Jiang, G.; Xie, P. An Unsupervised Multiview Sparse Filtering Approach for Current-Based Wind Turbine Gearbox Fault Diagnosis. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2020, 69, 5569-5578.

[7] Chen, X.; Xu, W.; Liu, Y.; Islam, M.R. Bearing Corrosion Failure Diagnosis of Doubly Fed Induction Generator in Wind Turbines Based on Stator Current Analysis. IEEE Trans. Ind. Electron. 2020, 67, 3419-3430.

[8] Vilchis-Rodriguez, D.S.; Djurovi´c, S.; Smith, A.C. Wound rotor induction generator bearing fault modelling and detection using stator current analysis. IET Renew. Power Gener. 2013, 7, 330-340.

[9] Zhang, K.; Tang, B.; Deng, L.; Yu, X. Fault Detection of Wind Turbines by Subspace Reconstruction-Based Robust Kernel Principal Component Analysis. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2021, 70, 3515711.

[10] Wang, J.; Peng, Y.; Qiao, W.; Hudgins, J.L. Bearing Fault Diagnosis of Direct-Drive Wind Turbines Using Multiscale Filtering Spectrum. IEEE Trans. Ind. Appl. 2017, 53, 3029-3038.

[11] 孙肖菲,马东,苏冠瑜,等.海上风电大直径单桩基础固有频率影响因素的数值分析[J].船海工程. 2021, 1.

[12] Eom, S.H.; Kim, S.S.; Lee, J.B. Assessment of anti-corrosion performances of coating systems for corrosion prevention of offshore wind power steel structures. Coatings 2020, 10, 970.

[13] Kim, H.-C.; Kim, M.-H.; Choe, D.-E. Structural health monitoring of towers and blades for floating offshore wind turbines using operational modal analysis and modal properties with numerical-sensor signals. Ocean Eng. 2019, 188, 106226.

[14] Zhou, L.; Li, Y.; Liu, F.; Jiang, Z.; Yu, Q.; Liu, L. Investigation of dynamic characteristics of a monopile wind turbine based on sea test. Ocean Eng. 2019, 189, 106308.

[15] Gorostidi, N.; Pardo, D.; Nava, V. Diagnosis of the health status of mooring systems for floating offshore wind turbines using autoencoders. Ocean Eng. 2023, 287, 115862.

[16] Martinez-Luengo, M.; Kolios, A.; Wang, L. Structural health monitoring of offshore wind turbines: A review through the Statistical Pattern Recognition Paradigm. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 64, 91-105.

[17] Duthie, D.B.; Gabriels, F. Remote monitoring of offshore structures using acoustic emission. In Proceedings of the 11th European Conference on NDT 2014, Prague, Czech Republic.