

基于风电场风力发电机组在线声纹识别技术与声振一体检测技术研究

杨晓林

中电(甘肃)能源投资有限公司, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年6月5日; 录用日期: 2025年7月15日; 发布日期: 2025年7月23日

摘要

本文针对风力发电机组基于声纹识别技术与声振一体检测技术, 研究了一整套风机叶片综合监测系统。分别针对叶片内部缺陷、外部缺陷、机舱设备异常声音、轮毂设备异常声音展开综合监测诊断, 实现早期缺陷的及时感知, 及时预警, 指导运维消缺。该系统可有效预防灾难性事故的发生, 延长叶片使用寿命, 降低人工维护工作量, 进而降低风电场综合运维成本, 提高风电场综合收益。

关键词

声纹识别技术, 声振一体检测技术, 风机叶片综合监测系统

Research on Online Voiceprint Recognition Technology and Sound-Vibration Integrated Detection Technology of Wind Turbines Based on Wind Farms

Xiaolin Yang

China Power (Gansu) Energy Investment Limited, Lanzhou Gansu

Received: Jun. 5th, 2025; accepted: Jul. 15th, 2025; published: Jul. 23rd, 2025

Abstract

In this paper, a complete set of comprehensive monitoring system for wind turbine blades based on

文章引用: 杨晓林. 基于风电场风力发电机组在线声纹识别技术与声振一体检测技术研究[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(4): 708-714. DOI: 10.12677/jsta.2025.134068

voiceprint recognition technology and acoustic vibration integrated detection technology is studied. Comprehensive monitoring and diagnosis is carried out for internal defects of blades, external defects, abnormal sounds of engine room equipment, and abnormal sounds of hub equipment, so as to realize timely perception of early defects, timely warning, and guidance for operation and maintenance to eliminate defects. The system can effectively prevent the occurrence of catastrophic accidents, prolong the service life of blades, reduce the workload of manual maintenance, and then reduce the comprehensive operation and maintenance cost of wind farms and improve the comprehensive income of wind farms.

Keywords

Voiceprint Recognition Technology, Acoustic and Vibration Integrated Detection Technology, Integrated Monitoring System for Wind Turbine Blades

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源结构的调整和清洁能源技术的飞速发展，风电场作为可再生能源的重要组成部分，其智能化、高效化、安全化的要求日益凸显。风电机组运维成本也呈现出增加趋势，陆上风电机组运行维护成本占发电成本的5%~10%，海上甚至占25%~30%。风电机组的安全、稳定、无故障运转是整个产业链创产创效、健康发展的关键环节。其中，风电叶片(WTB)作为风电机组的关键部件，随着其尺寸的不断增大，对安全、稳定、可持续运行环境的要求越来越高，直接影响着整体发电效率。叶片全天候工作在高空复杂条件下，不仅常年受无规律交变风力载荷，同时经常受到沙尘、雷电、暴雨、冰雪等侵袭，容易造成叶片损伤。而传统依靠人工巡检的方式不仅费时费力、效率低下，还不能精准及时发现叶片潜在的隐患和缺陷异常，对风电机组运维工作产生巨大影响。因此，降低运行维护成本和对风机叶片进行状态监测是重要和必要的。

预测性维护是一种最新的维护模式，是以状态监测与故障诊断技术为基础，根据设备的实际状况定制备件，制定维修计划，相对于其他维护模式可以有效节约维护成本，减少停机时间。尤其适用于风力发电机关键部件，而安装在线监测系统是实现风机预测维护的基础[1]。

设备智能诊断分析系统可实现远程监测诊断，能有效解决风电场机械工程师短缺等问题。有助于风电场从初级管理模式逐步过渡到少人值守，甚至无人值守的数字化风电场，是风场管理模式的发展趋势。

2. 设计原理

2.1. 设计构成

2.1.1. 基本构成

风力发电机组在线监测系统架构采用“云边端”协同架构设计，云端集中统计展示、边缘侧数据处理分析、端侧智能感知。该系统在边缘端集成了故障诊断模型，其关键技术：一是对风机叶片产生的声信号机理进行分析，掌握风机叶片声信号的各类噪声类型，以及它们的特征；二是采用特征提取技术对采集上来的声纹信号进行降噪、特征提取、特征降维，实现叶片运行状态关键特征量的提取；三是开发

基于声纹信息的缺陷诊断模型，将特征信息输入到缺陷识别模型中迭代训练，完成风机叶片内部/外部、机舱、轮毂场景的缺陷识别，实现早期缺陷的及时感知，及时预警，指导运维班组消缺。

2.1.2. 叶片内部缺陷监测

基于对风机叶片缺陷产生机理的研究，我们发现导致叶片断裂的严重缺陷往往是先从内部开始的，多数由腹板支撑结构失效引发，叶片断裂通常发生在叶根向叶尖 1/3 段内，并且从出现结构损伤和内部裂纹开始到叶片断裂的过程往往时间较短。因此需要在出现叶片断裂之前，发现早期叶片内部缺陷，前兆性地发出预警，才能有效避免叶片断裂的发生。

针对风机叶片的内部缺陷，将声振一体传感器安装在叶片内部由叶根向叶尖 1/3 处的关键位置，采集的叶片内部的声振信号，通过降噪处理，传感器集成数据采集处理模块和无线通信模块，实现信号数据在端测的预处理，数据经无线 AP 网关与边缘计算终端通信。边缘计算终端部署叶片缺陷识别算法模型，对数据进行分析处理，智能识别叶片结构损伤、裂纹等早期缺陷，并及时触发预警，监测结果及预警信息由边缘计算终端通过有线或无线通信的方式传输给用户。这实现了叶片内部缺陷提早发现、及时预警的目标，从而解决了叶片断裂的隐患问题。

2.1.3. 叶片外部缺陷监测

风机叶片外部缺陷如叶片外表面裂纹、覆冰、雷击等经常发生在叶片叶尖部位(叶尖向叶根 1/3 段)，叶片外部缺陷影响叶片的运行安全，需要对叶片外表面的缺陷进行监测，达到早期发现，早期消缺的目的。

针对叶片外部缺陷，采用非接触式声纹传感器采集叶片叶尖的运行声音信号，传感器自带采集模块，将采集数据传输至系统分析后台，叶片外部缺陷识别模型部署于系统分析后台，实现风机叶片外表面缺陷智能识别，及时预警。

2.1.4. 轮毂、机舱设备异常声振信号监测

变桨系统、液压系统、传动系统是安装在风电机组轮毂内的核心系统，针对上述系统设备故障的检修存在故障排查困难、作业环境恶劣，检修难度大的特点，并且设备故障、缺陷的前兆信息难以获取。

为了实现轮毂内设备缺陷提前发现、及时预警的目标，可以运用声振监测技术，在轮毂安装声振一体传感器，监测轮毂内设备运行的异常声振信号。通过对声振信号的特征提取以及高维特征信号成分分解分析，达到获取故障前兆信息的目的，有利于早期发现轮毂内设备缺陷，及时预警。

主轴承、齿轮箱、发电机等重要设备安装于机舱内，在机舱内部安装声振传感器，通过对异常声振信号的及时感知，可以实现机舱内部设备整体运行工况监测，发现早期设备缺陷，及时预警。

2.1.5. 在线监测分析后台

监测后台是数据和分析诊断的核心，集成了广泛应用的预测维修技术，可完成建立机器测点数据库、现场采集数据传回到后台机中、分析及诊断设备状态和故障，既提供设备监测诊断全面的方法和手段，又可为管理和决策人员提供全厂设备状态的信息。

监测平台基于 B/S 构架，用户在局域网内通过浏览器即可访问平台服务，浏览历史及实时数据，进行设备状态的监控及故障诊断分析，为现场状态监测工程师提供强有力的技术支持。

系统可通过在风机正常运行状态下，采集大量声音数据，建立正常声纹模型[2]。同时，模拟常见故障情况，采集故障声音数据，建立相应的故障声纹模型。将实时采集的声纹特征与模型进行比对，计算相似度。当相似度低于设定阈值时，判断为异常状态。根据不同故障对应的声纹特征差异，进一步判断故障类型，如轴承磨损、叶片故障等。

2.2. 原理介绍

2.2.1. 风机叶片声信号机理分析

风机叶片在运行过程中,由于各种原因(如风力变化、机械磨损、材料疲劳等)可能会产生振动,进而产生特定的声纹信号。这些声纹信号中蕴含着丰富的信息[3],包括风机的运行状态、叶片的健康状况等。风力发电机叶片声信号主要由三部分组成:机械噪声、气动噪声和环境背景声。

2.2.2. 风机叶片声纹信号的特征提取技术

风机叶片声信号主要由机械噪声、气动噪声和环境噪声组成。这些噪声信号中蕴含着丰富的信息,包括叶片的健康状况、运行状态等。通过对风机叶片声纹信号进行特征提取,可以识别出与故障相关的特定信号特征,如频率变化、振幅变化等,进而获取到关于叶片健康状况的准确信息,从而实现对叶片缺陷的远程在线监测和故障预警。风机叶片实际运行过程中,原始声信号转化为有意义特征的变换过程,包括声纹信号降噪、特征提取以及特征选择等。

2.2.3. 基于声纹信息的缺陷识别模型

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)可用于高维模式的识别,即分类问题研究。其基本思想是,基于在数据集里找到支持向量,在特征空间上找到最佳分离超平面使得训练集上的不同样本间隔最大。如图 1 所示。

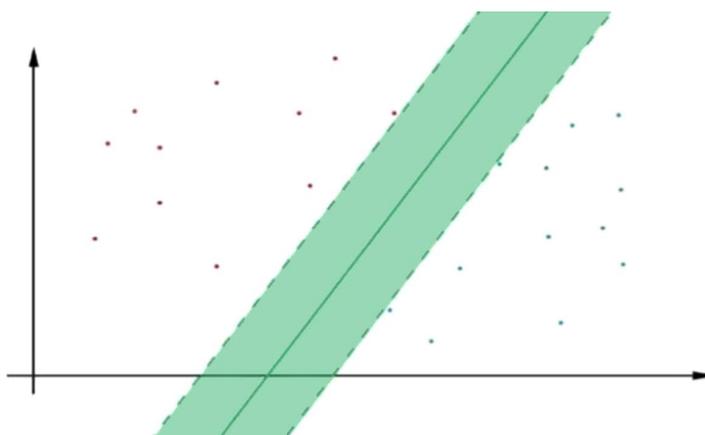


Figure 1. Schematic diagram of the best classification hyperplane

图 1. 最佳分类超平面示意图

基于 SVM 的风机叶片缺陷识别模型是一种有效的故障诊断方法(如图 2),具体实现步骤如下:将提取的叶片声信号特征量划分为训练集和测试集。训练集用于训练 SVM 模型,测试集用于评估模型的性能。使用训练集数据对 SVM 模型进行训练。训练过程中, SVM 算法会找到一个最优的超平面(或在非线性情况下是一个最优的超曲面),将不同类别的样本分开。通过交叉验证等方法对 SVM 模型的参数进行优化,以提高模型的分类型性能和泛化能力。使用测试集数据对训练好的 SVM 模型进行性能评估,根据性能评估结果,对 SVM 模型进行优化,确保模型的准确性和可靠性[4]。

裂纹发展阶段的声信号将逐渐集中在某个特定的频率段内,这有助于更准确地识别裂纹类型。随着叶片裂纹的不断发展,其声发射信号的波动性将逐渐提高。通过监测声纹图谱中信号的变化情况,可以实现对叶片裂纹扩展的实时监测。当信号逐渐增强并集中在某个频率段内时,表明裂纹正在不断发展。

图 3 展示了叶片裂纹缺陷识别声纹图谱的发展趋势。



Figure 2. Implementation steps of wind turbine blade defect identification model based on SVM
图 2. 基于 SVM 的风机叶片缺陷识别模型实现步骤

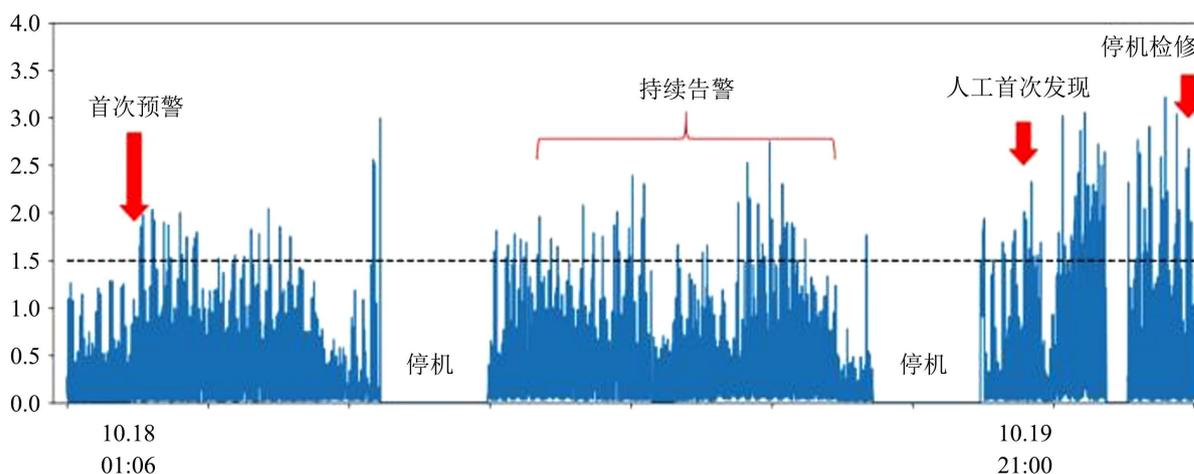


Figure 3. Blade crack defect identification voiceprint spectrum trend chart
图 3. 叶片裂纹缺陷识别声纹图谱趋势图

3. 设备安装

3.1. 整体布置图

安装整体网络布置如图 4 所示，分别为端部传感器、边缘计算、风机在线监测平台(布置于场站侧)、集控网络 III 区。

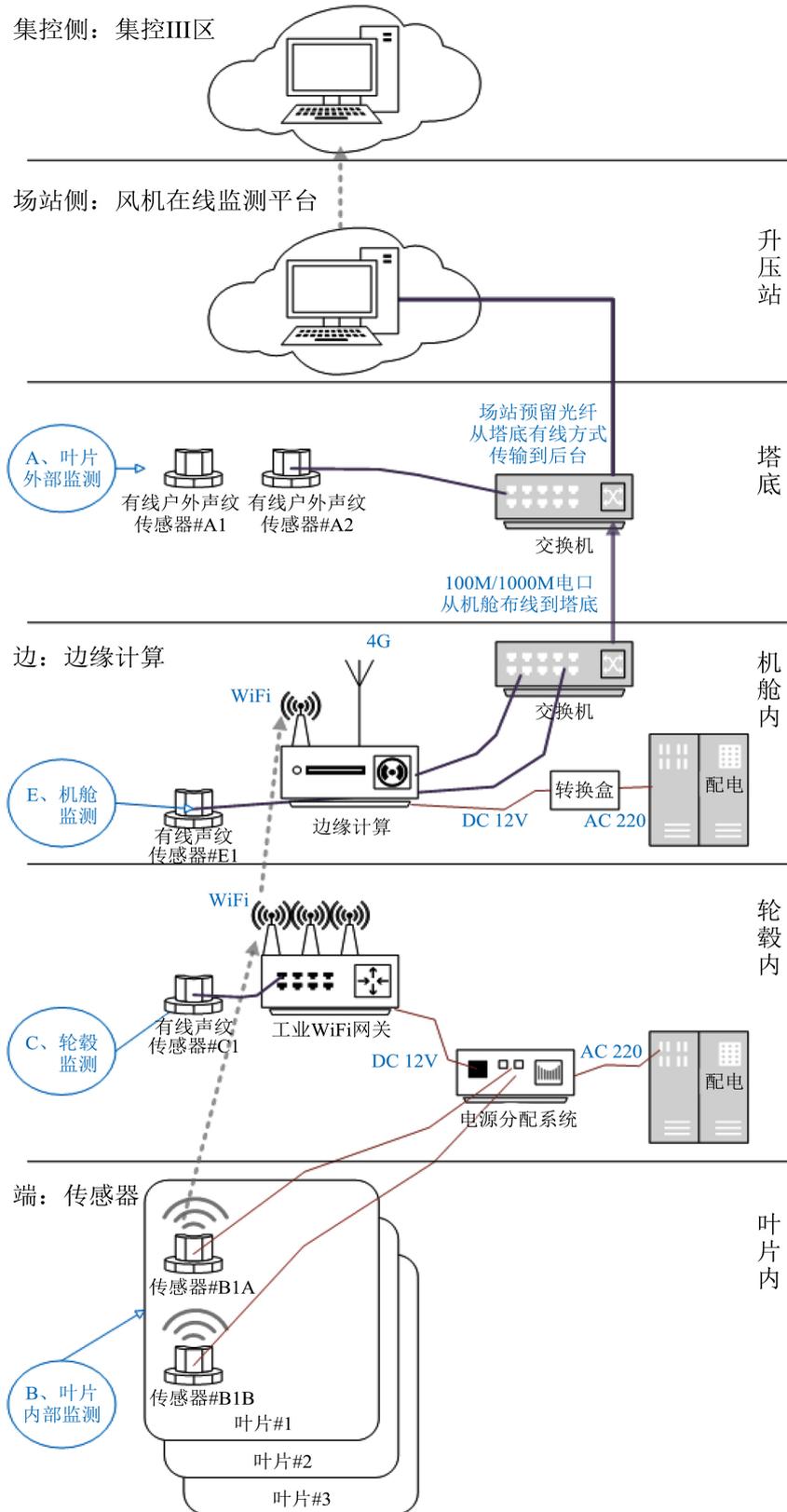


Figure 4. Network topology diagram of overall layout
图 4. 整体布置网络拓扑图

3.2. 传感器布点位置

如图 5 所示, 两个声振传感器布置于后缘距离叶根 15 m 处和叶片根部。风机轮毂内安装无线 AP 装置, 轮毂内配电柜取电, 传感器和无线 AP 实现无线通信。机舱声振传感器和边缘计算终端安装于机舱内部, 为了避免绞线等问题, 边缘计算终端与轮毂内的无线 AP 装置通过 WIFI 进行无线通信, 并于机舱内配电柜取电。

非接触式声纹传感器布置安装在塔筒底部[5], 塔筒底部的非接触式声纹传感器朝向叶片方向, 塔筒底部布置 2 个非接触式声纹传感器。

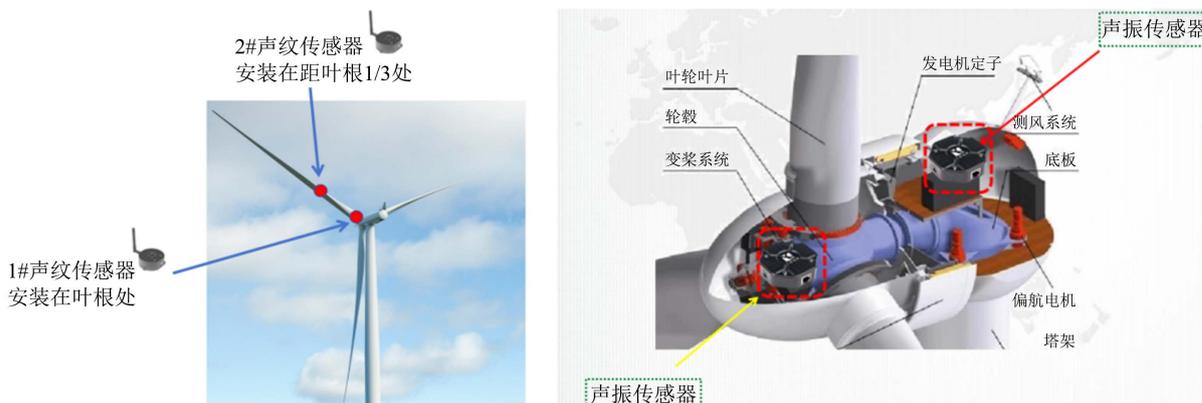


Figure 5. Schematic diagram of the location of the monitoring sensors (left: blade; right: engine room)

图 5. 监测传感器布点位置示意图(左图: 叶片; 右图: 机舱)

4. 总结

风力发电机组在线声纹识别技术与声振一体检测技术系统解决了叶片内部缺陷无法发现的行业难题, 测点数据库的建立与分析能够实现设备状态全方位分析, 变化趋势及时掌控, 解决了机舱轮毂内设备早期缺陷无法感知的问题。丰富的声纹样本库给叶片外表面缺陷的识别提供了强有力支撑。同时, 该系统可实现抗干扰能力强、传感器成本低、体积小且安装方便等特点。从根本上解决了风机叶片监测的核心问题, 即及时发现设备缺陷前兆信息, 及时预警。

参考文献

- [1] 闫浩伟. 基于人工智能的风机叶片故障自动化监测系统[J]. 电子设计工程, 2025, 33(8): 87-91.
- [2] 范恩齐, 吴昱锋, 孙昊, 沈金荣, 申云乔. 基于声纹识别的海上风机叶片在线监测系统研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2024(12): 257-261.
- [3] 王满晨, 唐亮, 张磊. 风电机组叶片音视频监测系统应用研究[J]. 电气技术与经济, 2024(3): 119-122.
- [4] 刘启栋, 芦彪, 宋首先, 孙志远, 李霖. 风力发电叶片裂缝监测技术原理和应用[J]. 电力设备管理, 2024(4): 89-91.
- [5] 董礼, 王宁, 王雁冰, 欧阳跃, 杨健, 王恩路, 程庆阳, 王东利, 郭晓亮. 风电机组叶片损伤的声学检测技术[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(1): 133-142.