

风力发电机组故障诊断与维护技术研究

霍东旭

华能新能源股份有限公司蒙东分公司，内蒙古 通辽 028000

摘 要： 本研究系统性地深入探讨了风力发电机组故障诊断与维护技术，详尽分析了机组结构及其运作机制，为故障诊断和维护奠定了坚实的理论基础。研究重点在于运用先进的信号处理和人工智能技术，包括时频分析、高频共振、模态识别以及机器学习等，显著提高了故障识别的精确度和智能化水平。通过精心设计的故障特征提取与模型优化策略，大幅提升了诊断的效率和准确性。此外，本研究综合分析了预防性维护和智能维护技术，并对维护效果进行了评估，确保了风力发电机组的稳定运行，为风电行业的持续技术创新和可持续发展贡献了关键的技术力量。

关 键 词： 风力发电机组；故障诊断；维护技术；信号处理；人工智能

Research on Fault Diagnosis and Maintenance Technology of Wind Turbine

Huo Dongxu

Mengdong Branch of Huaneng New Energy Co., Ltd. Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract： This study systematically and deeply discusses the fault diagnosis and maintenance technology of wind turbine, analyzes the structure and operation mechanism of wind turbine in detail, and lays a solid theoretical foundation for fault diagnosis and maintenance. The research focuses on the use of advanced signal processing and artificial intelligence technologies, including time-frequency analysis, high-frequency resonance, mode recognition and machine learning, which significantly improve the accuracy and intelligence of fault identification. Through carefully designed fault feature extraction and model optimization strategy, the efficiency and accuracy of diagnosis are greatly improved. In addition, this study comprehensively analyzes the preventive maintenance and intelligent maintenance technology, and evaluates the maintenance effect, ensuring the stable operation of wind turbines, and contributing key technical strength to the continuous technological innovation and sustainable development of the wind power industry.

Keywords： wind turbine; fault diagnosis; maintenance technology; signal processing; artificial intelligence

引言

随着全球能源结构的转型和可再生能源需求的不断增长，风力发电作为一种清洁、可再生的能源形式，受到了世界各国的广泛关注。风力发电机组作为风力发电的核心设备，其运行状态直接关系到发电效率和电力系统的稳定性。然而，由于风电机组工作环境恶劣、结构复杂，故障频发成为制约风力发电行业发展的关键因素。因此，开展风力发电机组故障诊断与维护技术研究，对于提高风电机组运行可靠性、降低运维成本具有重要意义。

一、风力发电机组故障诊断与维护技术理论基础

在深入探讨风力发电机组故障诊断与维护技术的应用之前，须确保对其理论基础有坚实的理解和掌握。以下部分将详细阐述风力发电机组的结构特性、工作机理，以及故障诊断与维护的基本概念和方法。

（一）风力发电机组结构及工作原理

风力发电机组主要是由机舱、叶轮、塔架、基础 4 个部分共同组成。现如今各大主机厂家主要生产的均为大兆瓦机组，主流的机组根据结构，可以分为双馈型、半直驱型、直驱型。叶轮是

传递风能的关键部件，由叶片、轮毂及变桨控制系统构成^[1]。每个部分均经过精心设计，旨在最大化风能捕获和电能输出。塔架作为支撑，确保了机组的稳定性；机舱内的叶轮，灵感来源于自然叶片，通过传动系统调节转速，与发电机协同工作，将风能转化为电能；而控制系统则如神经中枢般，实时监控并调整机组状态，保障了机组在多变风速下的高效与安全运行，体现了现代工程技术对可再生能源利用的精湛追求。

（二）故障诊断方法概述

风力发电机组故障诊断是一项跨学科的技术挑战，涉及信号处理、模式识别、人工智能等领域，旨在通过数据采集、特征提

取、故障模式识别和决策支持等步骤，实时监测并识别潜在故障，保障机组安全高效运行^[2]。传感器捕获的转速、温度、振动等物理参数，经预处理后提取关键特征，通过专家系统、机器学习等模型进行状态分类，最终由决策支持系统提供精准的故障定位与维修建议，展现了工程师在保障风力发电机组稳定运行中的深厚专业素养和创新能力。

（三）维护技术概述

风力发电机组维护技术是一项综合性的工程实践，融合了机械、电子、自动化和信息技术，旨在通过预防性、预测性和故障后维护策略，实现机组的高效、稳定运行^[3]。维护工作涉及精密监测、数据分析、及时干预，以预防磨损、腐蚀等导致的故障，保障组件性能。预测性维护利用振动分析、油液检测等技术，结合数据挖掘和机器学习，提前识别潜在问题，提高维护效率。故障诊断与修复则要求维护团队具备快速响应和精准定位能力，运用专业知识恢复机组正常运行。整体上，维护技术体现了对设备、资源、环境和安全的全面考量，是对可持续发展和绿色能源理念深刻理解下的技术实践。

（四）风力发电机组故障诊断与维护技术面临的挑战

风力发电机组故障诊断与维护技术，在推进绿色能源发展方面起着关键作用，但面临诸多挑战：恶劣环境对设备可靠性和维护作业的高要求，复杂系统结构对故障诊断精确性和鲁棒性的挑战，海量数据处理的难度，非线性、不确定性运行状态对预测性维护技术的考验，以及人力资源、专业技术限制和经济性考量。这些挑战促使相关技术创新不断，推动故障诊断与维护技术的深度和广度持续扩展。

二、风力发电机组故障诊断关键技术

在风力发电机组故障诊断领域，关键技术的深入研究是实现精准诊断和高效维护的核心。以下内容将详细探讨信号处理技术、人工智能诊断方法、故障特征提取与选择，以及故障诊断模型的建立与优化，旨在为风力发电机组故障诊断提供先进的技术路径。

（一）信号处理技术

在风力发电机组故障诊断领域，信号处理技术扮演着至关重要的角色，它通过解析设备运行中产生的信号，揭示潜在的故障信息^[4]。时频分析作为一种有效的信号处理手段，能够同时考虑信号在时域和频域的特性，通过将一维信号映射到二维时频平面，清晰地展示信号频率成分随时间的变化情况，从而为识别故障特征提供强有力的工具。高频共振技术则利用高频激励和共振响应来增强故障信号的检测能力，特别是在处理微弱故障信号时，能够显著提高故障诊断的灵敏度。而模态参数识别技术，则通过对系统动态特性的分析，识别出结构的自然频率、阻尼比等模态参数，这些参数的变化往往与设备故障状态密切相关，为故障诊断提供了重要的参考依据。

（二）人工智能诊断方法

在风力发电机组故障诊断的现代化进程中，人工智能诊断方

法的应用无疑代表了技术发展的前沿。机器学习作为一种使计算机能够从数据中学习的算法，通过构建模型对故障数据进行模式识别和预测，极大地提高了故障诊断的自动化和智能化水平^[5]。深度学习，作为机器学习的一个分支，通过其特有的神经网络结构，能够处理更为复杂的数据模式，其在特征学习方面的深度和广度，为识别隐蔽和微妙的故障特征提供了可能，从而在故障诊断的精确度上实现了质的飞跃。支持向量机则是一种基于统计学习理论的分类与回归分析方法，它通过寻找最优边界，将不同类别的数据有效分开，其强大的泛化能力和在处理高维数据时的优异表现，使其在风力发电机组故障诊断领域占有一席之地。这些人工智能诊断方法的融合与应用，不仅体现了故障诊断技术的创新性和先进性，也为风力发电机组的安全、高效运行提供了强有力的技术支持。

（三）故障特征提取与选择

在风力发电机组故障诊断的过程中，故障特征的提取与选择是决定诊断效果的关键环节。特征提取方法的核心在于从原始信号中提取出能够反映设备健康状况的信息，这些信息往往隐藏在复杂的信号中，需要通过一系列数学变换和信号处理技术来揭示^[6]。常用的特征提取方法包括时域统计分析、频域分析、小波变换、希尔伯特-黄变换等，它们各自针对信号的不同特性，提取出诸如均值、方差、频率成分、能量谱等具有诊断价值的特征。特征选择策略则是在提取出的众多特征中，筛选出对故障分类最有贡献的一组特征子集，以降低特征维度，提高诊断效率，减少计算复杂度。特征选择策略包括过滤式、包裹式和嵌入式等方法，它们通过相关性分析、信息增益、最小冗余最大相关性等准则，实现对特征的有效筛选。故障特征提取与选择的过程，不仅体现了诊断技术的高度专业性和精确性，也是故障诊断从理论走向实践的重要桥梁，对于提升风力发电机组故障诊断系统的性能和实用性具有不可替代的作用。

（四）故障诊断模型建立与优化

在风力发电机组故障诊断技术的深度开发中，故障诊断模型的建立与优化是确保诊断准确性、实时性和可靠性的核心所在^[7]。模型建立方法涉及从数据驱动到物理模型的多维度构建，其中数据驱动模型通过学习历史故障数据，构建出能够映射输入信号与故障状态之间复杂关系的数学模型，如神经网络、支持向量机等。而物理模型则基于设备的工作原理和故障机理，通过仿真和参数化手段，构建出能够描述设备正常与异常状态下的行为模型。这些模型的建立，不仅需要设备特性有深入的理解，还需要对诊断算法有精湛的掌握。

模型优化策略则是在模型建立的基础上，通过一系列算法和技巧来提升模型的性能。这包括但不限于参数调优、结构改进、正则化处理、交叉验证等手段^[8]。参数调优旨在寻找模型参数的最优组合，以最大化模型的诊断能力；结构改进则关注于模型的架构设计，如神经网络的层数、节点数等，以适应不同的诊断需求；正则化处理则用于防止模型过拟合，确保模型具有良好的泛化能力；交叉验证则通过不同的数据划分方法，评估模型的稳定性和准确性。模型优化策略的研究和应用，不仅体现了故障诊断

技术的精细化和智能化，也为风力发电机组的安全运行提供了坚实的理论基础和技术支撑。

三、风力发电机组维护技术研究

风力发电机组的维护技术是确保其长期稳定运行的关键因素，对于降低故障率、延长使用寿命具有重要意义。本部分将深入探讨预防性维护策略、智能化维护技术，以及维护实施与效果评估的全过程，旨在构建一套科学、高效的维护体系。

（一）预防性维护策略

风力发电机组的维护技术，尤其是预防性维护策略，对于保障机组持续稳定运行和降低运营成本至关重要。该策略的核心在于维护周期优化和维护资源配置，旨在通过科学方法确定最佳维护时机，平衡成本与性能^[9]。通过对机组运行数据的深度分析，结合可靠性理论和成本评估，利用条件监测和故障预测技术，实现维护活动的最优化，避免不适当的维护行为，确保机组性能最大化及寿命延长。同时，维护资源配置的优化涉及合理分配人力、物力、财力资源，改进维护流程，更新技术工具，以及维护团队的培训与管理，以提升维护效率。预防性维护的研究与应用，展现了维护技术的专业性和前瞻性，为风电行业的持续发展提供了坚实的技术支撑。

（二）智能化维护技术

智能化维护技术代表了风力发电机组维护领域的先进趋势，它融合了信息技术、人工智能和机械工程等多学科精华，提供了高效且智能的维护方案。该技术以专家系统、自适应维护策略和数据驱动的维护决策为支柱，形成了一个反应灵敏、适应性强的维护体系。专家系统通过模拟人类专家的判断逻辑，利用知识库和推理机进行智能诊断和建议，提升了维护的精确度和效率。自适应维护策略则通过实时监测和预测模型，动态调整维护计划，确保维护活动与机组状态同步。数据驱动的维护决策基于大数据

分析，从海量数据中提炼信息，指导维护决策，其客观性和准确性显著提高了维护的预见性和经济性^[10]。整体而言，智能化维护技术的应用，不仅体现了维护技术的专业深度，也为风力发电机组的高效运行和行业可持续发展注入了新的动力。

（三）维护实施与效果评估

在风力发电机组维护技术的应用中，维护实施与效果评估环节对于保障维护活动的有效性和推动持续改进至关重要。该环节以维护流程设计、维护效果评价指标体系构建和评估方法的应用为核心，展现了维护工作的专业性和系统性。维护流程设计统筹考虑机组特性、资源、安全标准和环境因素，确保维护作业的有序与高效，通过精细化设计提升标准化水平。维护效果评价指标体系则全面反映维护成效，结合传统与可持续发展指标，保障评价的全面性和准确性。维护效果评估方法通过定性与定量分析，深入评估维护活动的实际效果，运用多种分析工具为维护策略的优化提供数据支撑。总体而言，这一过程的专业性和系统性，为风力发电机组维护技术的提升和行业的发展提供了坚实的保障。

四、结束语

风力发电机组故障诊断与维护技术研究仍存在一定的局限性。在故障诊断方面，如何进一步提高诊断精度、实时性和自适应能力是未来研究的重点；在维护技术方面，如何实现预防性维护、智能化维护和数据驱动维护的有机结合，以降低维护成本、提高维护效率，仍需进一步探讨。

展望未来，风力发电机组故障诊断与维护技术研究将朝着以下几个方向发展：一是故障诊断算法将更加注重实时性、自适应性和鲁棒性；二是大数据、云计算和物联网等技术在故障诊断与维护中的应用将更加广泛；三是跨学科研究将不断深入，如将力学、材料学、控制理论等与故障诊断与维护技术相结合，以期为风力发电机组的安全、高效运行提供更为全面的技术保障。

参考文献

- [1] 谭周锋. 风力发电机组状态监测和故障诊断 [C] // 中国电力技术市场协会. 2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集（上册）. 华润风电（雷州）有限公司、广东省湛江雷州市龙门镇南兴风电场；, 2023:4.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.049649.
- [2] 姜金平. 风力发电机基础混凝土结构裂缝控制研究 [J]. 散装水泥, 2023, (05):134-136+139.
- [3] 范贵华, 黄文君, 赵红飞. 风力发电机组液压系统常见问题与维护策略 [J]. 河南科技, 2023, 42(20):49-52.DOI:10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2023.20.009.
- [4] 吴忠强, 侯林成. 基于 Hamilton 多智能体系统的风力发电机组协同控制 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27(10):193-202.DOI:10.15938/j.emc.2023.10.019.
- [5] 夏国俊, 刘勇, 李晓叶, 等. 风力发电机组主机架结构仿真优化方法 [J]. 能源工程, 2023, 43(04):10-17.DOI:10.16189/j.nygc.2023.04.002.
- [6] 曹宏宇. 漂浮式海上风力发电机组故障诊断方法 [J]. 光源与照明, 2023, (07):99-101.
- [7] 贾益军, 胡建新. 风力发电机组叶片维修及预防方法初探 [J]. 大众用电, 2023, 38(07):51-53.
- [8] 于娟, 邱利莎. 风力发电控制专利技术 [J]. 中国科技信息, 2023, (14):17-21.
- [9] 程丽敏, 王铁志, 吴剑剑, 等. 风力发电机组主体结构有限元分析与探究 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S1):338-342.DOI:10.19701/j.jzjg.23S1711.
- [10] 张新宇. 风力发电机组基础质量检测与运行风险评价研究 [D]. 石家庄铁道大学, 2023.DOI:10.27334/d.cnki.gstdy.2023.000708.