

风力发电机偏航轴承故障检测分析研究

孔登峰

神华（乐陵）新能源有限公司，山东 东营 257000

[摘要] 在全球能源转型的背景下，风力发电作为一种可持续的清洁能源，作为风力发电机组关键部件之一的偏航系统，负责确保机舱自动调整至最佳风向，以提升发电效率。在该系统中，偏航轴承起着至关重要的支撑作用，承载着机舱重量并传递负荷。由于风电机组常年在恶劣的环境下运行，偏航轴承受到极大的负荷，故障频发。随着设备故障频率的增加，如何有效监测偏航轴承的健康状况，成为了风电行业的重要议题。为提高机组的运行稳定性及延长其使用寿命，对偏航轴承进行实时监测及故障诊断显得尤为重要。文中探讨偏航轴承的工作原理、常见故障类型以及故障检测技术的现状，旨在为风电机组故障预防与管理提供理论支持，助力行业的可持续发展。

[关键词] 偏航轴承；故障检测；振动分析；时频分析；机器学习

DOI: 10.33142/hst.v8i2.15575

中图分类号: TM315

文献标识码: A

Research on Fault Detection and Analysis of Yaw Bearing in Wind Turbine Generator

KONG Dengfeng

Shenhua (Laoling) New Energy Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract: In the context of global energy transition, wind power generation, as a sustainable and clean energy source, is one of the key components of wind turbines. The yaw system is responsible for ensuring that the cabin automatically adjusts to the optimal wind direction to improve power generation efficiency. In this system, yaw bearings play a crucial supporting role, carrying the weight of the cabin and transmitting loads. Due to the long-term operation of wind turbines in harsh environments, the yaw axis is subjected to significant loads, resulting in frequent malfunctions. With the increasing frequency of equipment failures, how to effectively monitor the health status of yaw bearings has become an important issue in the wind power industry. Real time monitoring and fault diagnosis of yaw bearings are particularly important to improve the operational stability of the unit and extend its service life. The article explores the working principle, common types of faults, and current status of fault detection technology for yaw bearings, aiming to provide theoretical support for wind turbine fault prevention and management, and help the sustainable development of the industry.

Keywords: yaw bearing; fault detection; vibration analysis; time frequency analysis; machine learning

引言

风力发电作为一种环保、可再生的能源形式，正在全球范围内逐步取代传统能源，成为能源结构转型的关键部分。然而，风电机组常面临着恶劣的工作环境与长时间的高负荷运转，导致偏航轴承作为核心部件的故障问题日益突出。偏航轴承的损坏不仅会降低机组效率，甚至可能导致停机维修，增加运营成本。其故障原因多种多样，包括润滑不良、材料疲劳、磨损等，通常难以在早期发现。传统的故障检测方法较为单一，难以应对复杂的运行条件。近年来，随着振动分析、声发射检测和温度监测等技术的应用，风电机组的故障检测水平得到了一定提升。尽管如此，由于外部干扰及环境复杂性，如何提高检测精度仍然是研究中的难题。

1 偏航轴承的工作原理与故障特点

1.1 偏航轴承的结构与功能

偏航轴承在风力发电机组的偏航系统中起着至关重要的作用，主要用于支撑机舱，并实现风向的自动调整。它的结构由内圈、外圈、滚动体和隔离块组成，通常采用调质钢材料，以保证其具备所需的强度与耐磨性。偏航轴

承的核心任务是承受来自各个方向的复杂负载，同时高效地传递多轴力矩，从而保障风电机组在不同风速条件下依然能够稳定运行。此外，偏航轴承还需要具备较强的抗腐蚀性与抗冲击性，以适应复杂多变的外部环境。

1.2 偏航轴承的运行环境与常见故障类型

偏航轴承工作时所处的环境较为复杂，包括高湿、低温及强风等恶劣条件，这也导致了偏航轴承常见故障类型的多样性，主要包括以下几类：①材料疲劳：长期承受过载及震动的作用，滚道硬化层容易剥落，导致轴承表面发生塑性变形，进而影响其正常运行。②润滑不良：当密封出现失效或润滑油污染时，润滑不足会加剧轴承的磨损，导致故障发生。③磨损与腐蚀：润滑油中混入的金属颗粒会加剧轴承的磨损，而外部环境中的腐蚀因素则加速了轴承的老化^[1]。④隔离块破裂：外力冲击或磨粒侵蚀可能使隔离块破裂，从而影响偏航轴承的正常功能。

1.3 偏航轴承故障的影响因素分析

偏航轴承的故障受多方面因素的影响，主要的影响因素包括材料的成分、加工精度、润滑状态及载荷的分布等。

若材料中的铬(Cr)含量过低,可能导致硬度不足,进而降低轴承的耐磨性。润滑不足会加速轴承表面磨损,甚至引发疲劳剥落或隔离块破裂。风机的偏载、运行间隙超标等也是常见的故障诱因。为了确保轴承的长期稳定运行,必须在设计阶段充分考虑材料选择、加工精度、润滑条件以及负载的合理分配等关键因素。

2 故障检测技术综述

2.1 振动信号分析技术

振动信号分析技术通过采集偏航轴承运行过程中的振动信号,可以有效提取与故障相关的特征频率。常见的振动分析方法包括时域分析、频域分析和时频域分析。时域分析通过计算振动信号的均方根值等统计特性,反映出轴承的整体健康状况;频域分析则通过傅里叶变换将振动信号转化为不同频率的成分,从中提取出特征频率,用于判断故障类型;时频域分析则结合了时间与频率信息,能够有效处理非平稳信号,揭示出更为复杂的故障信息。

2.2 声发射技术

声发射技术是一种通过捕捉材料内部产生的高频弹性波信号来监测裂纹扩展、疲劳剥落等缺陷的方法。该技术在对微小缺陷的检测上具有较高的灵敏度,但它容易受到外部噪声的干扰,进而影响检测的准确性^[2]。为了提高检测精度,通常结合信号处理技术,如小波变换、噪声滤波等,来增强信号的可靠性,确保对故障的早期发现与诊断。

2.3 温度与电流监测技术

温度监测在偏航轴承故障检测中也占有重要地位。温度异常变化通常意味着润滑不足或过载等问题,因此监测轴承的温度变化可以有效反映其运行状态。另外,通过分析偏航电机的工作电流变化,也能间接评估偏航轴承的健康状态。当电流波动异常时,往往提示轴承存在潜在问题,需要进行进一步检查。

2.4 其他相关检测方法

除了常见的振动、声发射、温度与电流监测技术外,还有多种其他检测方法可用于偏航轴承故障诊断。这些方法包括磁记忆检测、红外热成像、油液分析等,每种方法都有其独特的优势。例如,磁记忆检测可以通过检测轴承表面磁场的变化,揭示潜在的裂纹;红外热成像则能捕捉轴承表面因故障引起的局部温度升高;油液分析通过分析润滑油中的金属颗粒含量,能够反映出轴承的磨损情况。在实际应用中,根据具体的故障类型与运行环境,通常会结合多种技术进行综合检测,以提高诊断的准确性与全面性。

3 偏航轴承故障检测的建模与方法

3.1 偏航轴承故障信号特征提取

偏航轴承故障检测的关键之一是故障信号特征的提取,这一过程的精确度直接关系到故障诊断的准确性。时域特征,如信号的均值、均方根值、偏度与峰值因子,能够有效反映振动幅度的变化趋势。通过对这些时域特征的分析,能够揭示出信号的整体波动性和细微变化,从而捕捉到潜在故障的早期迹象。与时域分析相比,频域分析侧

重于对信号频谱成分的深入研究。通过运用快速傅里叶变换(FFT),可以明确地提取出信号的主频、谐波成分及其幅值能量的分布,从而识别出轴承故障的频率特征。由于偏航轴承的故障信号往往表现出非平稳性和多频率特征,时频分析技术便显得尤为重要^[3]。小波变换等方法能够更细致地挖掘信号的局部特征,尤其是小波包变换,它通过分解信号中的不同频带,可以精准提取与故障类型相关的特定频段信息,从而有效提高故障诊断的灵敏度与准确性。

3.2 基于机器学习的故障分类模型

3.2.1 数据采集与预处理

数据采集是建立故障分类模型的基本前提。在实验过程中,通过多个传感器同步记录偏航轴承的振动、温度及声发射信号。然而,采集的数据常常受到噪声及其他干扰的影响,因此需要对数据进行预处理。常用的信号去噪技术包括高通或低通滤波器,这有助于消除环境噪声及传感器误差的干扰。此外,通过归一化处理信号,可以消除量纲差异对数据分析结果的影响,从而使得不同特征可以在相同尺度下进行有效比较。在信号预处理的过程中,分段平均法的运用有助于对时序数据进行合理的分割,使其具备较好的结构性,进而为后续的特征提取和模型训练提供可靠的数据支持。

3.2.2 特征选择与优化

特征选择是降维与提升分类效果的关键环节。常用的特征选择方法包括主成分分析(PCA)和递归特征消除(RFE)。通过PCA,计算特征变量之间的协方差矩阵,并提取出具有最大方差的主成分,从而实现数据维度的压缩,同时保留最为关键的信息。而RFE通过反复训练模型,逐步剔除那些权重较小的特征,从而优化特征集。优化后的特征集通常包含了时域、频域及时频域的关键特征,能够准确反映与故障类型密切相关的特性。经过优化的特征集涵盖了时域特征(如峰值因子、冲击度)、频域特征(如主频幅值)及时频域特征(如小波包能量),这些特征为后续的机器学习模型提供了有效的输入,确保分类结果的高效与准确。

3.2.3 模型训练与验证

在特征优化之后,机器学习模型的训练与验证成为关键步骤。支持向量机(SVM)与随机森林(RF)是两种常见的有效分类算法。SVM通过核函数映射处理小样本及非线性问题,能够精确划分复杂边界。随机森林则通过集成多棵决策树的优势,增强了模型的鲁棒性,减少了过拟合的风险。在完成模型训练后,其泛化能力通常通过交叉验证法来评估。通过对模型在验证集上的表现进行分析,结合分类准确率、混淆矩阵、精度、召回率及F1分数等指标,能够全面衡量模型的性能,以确保其在实际应用中的有效性与可靠性。

3.3 基于时频分析的故障检测方法

时频分析方法通过将信号同时在时域与频域中进行解构,能够全面揭示非平稳信号的特点。小波包变换与经验模态分解(EMD)是两种经典且有效的时频分析方法。小波包变换在分辨率分析的基础上,通过进一步细分高频与低频信号成分,能够有效提取轴承故障的多尺度特征。

而 EMD 则通过将信号分解为一系列本征模态函数 (IMF), 从而实现非线性非平稳信号的层次化分析。每一层的 IMF 都代表了信号中不同的频率成分, 特别适合用来分析复杂的故障信号。将小波包变换与 EMD 相结合, 可以全面提取故障信号的时频能量分布、瞬时频率及模态特征, 为故障类型的精确识别提供了坚实的理论依据。

4 实验与分析

4.1 实验方案设计

4.1.1 测试平台搭建

实验平台由振动传感器、数据采集系统与信号分析软件组成, 具备实时采集与处理多种信号的能力。平台配置了三轴振动传感器、工业计算机及信号处理模块, 能够全面监控偏航轴承的运行状态。在此基础上, 实验模拟了不同工况 (如正常运行、磨损、裂纹) 以及各种运行条件 (如载荷、转速), 从而生成了多样的工况信号数据。

4.1.2 实验条件与数据采集

实验中设置了多种故障类型 (如滚道剥落、隔离块破裂) 与不同的运行环境 (如温度、润滑条件)。在每种工况下, 振动传感器实时采集加速度信号, 同时同步记录轴承的温度、电流等状态参数。为确保信号质量, 采集频率被设置为 20kHz, 以捕捉高频信号。经过 Matlab 等软件的去噪与预处理, 获得了清晰的信号样本, 成为后续分析与模型训练的基础。

4.2 偏航轴承故障的实验信号分析

4.2.1 振动信号特征分析

对采集到的振动信号进行时域与频域的分析, 发现不同故障类型的信号在频率成分上存在显著差异。例如, 滚道剥落故障信号主要表现为低频成分的增加, 而隔离块破裂故障则表现为高频冲击成分的增强。这些频谱特征为后续的故障诊断提供了重要依据。

4.2.2 时频特征提取结果

通过小波包变换对信号进行多尺度分析, 能够提取出各个频段的时频能量特征。实验结果表明, 结合小波包能量熵的特征提取方法, 可以有效区分正常工况与故障工况, 从而为轴承故障的检测提供了有效支持。

4.3 检测方法的对比与评价

通过对比振动信号分析、声发射技术及多模态检测方法的性能, 发现多模态方法在故障识别精度上具有显著优势。尤其是在疲劳剥落故障的检测中, 振动信号分析表现较好, 而声发射技术对裂纹扩展则更加敏感。结合时频分析与机器学习的多模态方法能够综合多种信号特征, 识别精度超过 95%, 证明了该方法在实际应用中的良好适用性。

5 结果与讨论

5.1 检测方法的优缺点分析

基于振动信号的故障检测方法具有较强的适用性, 能够广泛应用于各类工业设备的实时监测。然而, 要求传感器具有较高的精度, 并且其安装位置也需要仔细选择。若传感器精度不足或安装不当, 采集到的信号可能无法准确

反映设备的真实状态, 从而导致故障诊断结果的偏差。尽管该方法对于识别诸如滚道剥落及裂纹等常见故障有显著效果, 但在处理复杂或微小故障时仍然面临一定的局限性。声发射技术在检测裂纹扩展等早期故障时表现出高灵敏度, 尤其适用于高频信号的响应^[4]。但噪声干扰会影响信号质量, 进而影响诊断结果的准确性。为了克服这一问题, 通常需要采用有效的噪声抑制方法来提高信号的信噪比。

5.2 故障诊断精度与可靠性讨论

结合机器学习的故障分类模型在故障诊断过程中能够达到较高的精度, 尤其是在常见故障模式的识别上, 分类准确率超过 90%。通过优化特征提取与数据集处理, 模型的准确性和鲁棒性得到了进一步提升。然而, 模型性能的表现与大规模训练数据的质量密切相关, 特别是在稀有或复杂故障的识别上, 训练数据的多样性尤为关键。为了确保模型在实际应用中的可靠性, 必须保证其训练数据能够涵盖各种故障类型与工况条件, 以提升其适应性。特征选择及降维技术在优化分类模型方面发挥了重要作用。例如, 主成分分析 (PCA) 能够有效地压缩特征维度, 去除冗余信息, 从而提高计算效率并增强分类准确度。尽管大多数情况下机器学习模型取得了显著成效, 但在处理某些不常见或新型故障时, 仍可能存在一定的挑战。因此, 未来的研究应集中在提升模型对不同故障场景的适应能力, 特别是在新类型故障的检测方面。

5.3 对实际应用的指导意义

本研究所提出的故障检测方法在实际应用中具有广泛的前景, 特别适用于风电场等大型设备的在线监测系统。作为风力发电机组的核心部件, 偏航轴承的状态直接影响设备的稳定性与发电效率。通过实时监测偏航轴承的运行状态及故障检测, 可以显著提高设备的可靠性, 并减少停机时间, 从而为风电场的运行提供有力的技术保障。结合振动信号与声发射信号的多模态检测方法, 能够为风电场提供更加全面的故障监测方案。在智能运维方面, 基于机器学习的故障分类模型能够实现偏航轴承的高效监控, 减少非计划停机, 并优化维护策略。通过此方法, 风电场的设备能够以更高的效率和稳定性运行, 从而降低维护成本并提升整体性能。

【参考文献】

- [1] 胡凌泉. 基于 CAE-XGBoost 的风电机组故障诊断研究 [D]. 陕西: 西安理工大学, 2023.
- [2] 杨鑫. 风力发电机组振动故障分析与运行性能评估研究 [D]. 河北: 华北电力大学 (北京), 2024.
- [3] 张笑华, 李建明, 冯欣, 等. 风力发电机组发电机轴承脂国产化实践 [J]. 润滑油, 2021, 36(1): 17-20.
- [4] 韩清凯, 温保岗, 郭玉飞, 等. 大功率风电轴承技术进展 [J]. 轴承, 2023(6): 1-13.

作者简介: 孔登峰 (1993.11—), 毕业院校: 中国石油大学胜利学院, 所学专业: 电气工程及其自动化, 当前就职单位: 神华 (乐陵) 新能源有限公司, 职务: 主值, 职称级别: 电气中级工程师。