

风电设备故障预警与诊断技术探析

曲鹏程

大唐（内蒙古）能源开发有限公司锡盟新能源事业部 内蒙古 锡林浩特 026000

摘要：风电设备故障预警与诊断技术通过实时监测设备状态，提前预测并精准诊断故障，旨在实现故障“早发现、早诊断、早处理”，提高设备可利用率、降低成本、保障安全。该技术体系涵盖状态监测、数据处理、预警诊断和决策支持等层面。关键技术包括状态监测、故障预警与诊断方法。然而，复杂工况、数据质量与样本不平衡、技术集成与成本控制等问题带来挑战。未来，该技术将向智能化、融合化、轻量化、边缘计算及标准化、产业化发展，数字孪生技术融合也将提升其应用价值。

关键词：风电设备；故障预警；诊断技术；状态监测；人工智能

引言：在风电产业蓬勃发展的当下，风电设备的高效稳定运行至关重要。然而，风电设备常面临复杂恶劣的运行环境，故障隐患难以避免，一旦发生故障，不仅会造成发电量损失、增加运维成本，还可能引发安全事故。在此背景下，风电设备故障预警与诊断技术应运而生，成为保障风电设备可靠运行的关键支撑。该技术通过实时监测设备状态、提前预警故障并精准诊断，为风电场的运维管理提供科学依据。本文将深入剖析风电设备故障预警与诊断技术的内涵目标、体系构成、关键技术，探讨其应用挑战，并展望智能化、轻量化、标准化等未来发展趋势，以期为该技术的进一步发展与应用提供参考。

1 风电设备故障预警与诊断技术概述

1.1 技术内涵与目标

风电设备故障预警与诊断技术是指通过对设备运行状态的实时监测，采集相关参数和信息，运用特定的方法和算法，对设备可能发生的故障进行提前预测，并在故障发生后准确判断故障类型、位置和原因的技术体系。其核心目标是实现故障的“早发现、早诊断、早处理”，通过预警避免故障发生或降低故障影响，通过诊断为维修提供精准指导，从而提高设备可用率、降低运维成本、保障运行安全。

1.2 技术体系构成

该技术体系主要由状态监测层、数据处理层、预警诊断层和决策支持层构成。状态监测层负责通过传感器等设备采集设备的振动、温度、压力、电流等运行参数；数据处理层对采集到的数据进行清洗、转换、存储和分析，提取有效特征信息；预警诊断层利用预警模型和诊断算法，对处理后的数据进行分析，判断设备是否存在故障风险及故障情况；决策支持层根据预警和诊断

结果，生成维修建议和决策方案，辅助管理人员进行运维决策。

1.3 应用价值

风电设备故障预警与诊断技术的应用具有显著价值。在经济方面，可减少非计划停机时间，提高发电量，降低维修成本（如减少盲目检修和备件库存）；在安全方面，能及时发现潜在故障，避免设备严重损坏或倒塌等安全事故；在管理方面，为风电场的状态检修提供依据，优化运维资源配置，提高管理效率；同时，技术应用积累的故障数据还能对风电设备的设计改进提供反馈，提升设备制造质量^[1]。

2 风电设备故障预警与诊断关键技术

2.1 状态监测技术

状态监测作为故障预警与诊断的基石，其技术核心聚焦于全面、精准且实时地捕获设备运行状态信息。

（1）传感器技术是状态监测的关键支撑。鉴于设备不同部件，如齿轮箱、发电机、叶片、轴承等具有独特特性，需针对性地选用适配的传感器。振动传感器可捕捉部件的振动特征，反映其运行平稳性；温度传感器能实时监测温度变化，预防过热故障；声传感器可收集设备运行声音，识别异常声响；油液传感器则通过对油液的分析，获取设备磨损等信息。（2）数据传输技术承担着将传感器采集的数据高效传送至处理中心的重任。常用技术涵盖有线传输的以太网，以及无线传输的 LoRa、NB-IoT 等。这些技术需充分考量风电环境的复杂性，确保在恶劣条件下具备高度的稳定性和抗干扰能力。（3）数据预处理技术是对原始数据进行优化的关键环节。通过滤波、降噪、归一化等处理手段，有效去除无效信息，提升数据质量，为后续的故障分析与诊断提供可靠、准确的输入。

2.2 故障预警方法

故障预警方法主要可划分为基于模型、基于数据和基于知识三大类别。(1) 基于模型的方法着重于构建设备的机理模型,像动力学模型可精准刻画设备运动过程中的力学特性,热传导模型能清晰呈现设备内部的热量传递规律。通过将模型计算得出的理论结果与实际监测数据进行细致比对,当偏差超出预设阈值时触发预警。此方法对于机理清晰明确的简单故障具有较好的适用性。(2) 基于数据的方法充分利用设备的历史运行数据以及故障数据,借助统计分析手段,如控制图能直观展现数据的变化趋势,回归分析可挖掘数据间的内在关系;同时运用机器学习算法,如支持向量机擅长处理小样本数据,神经网络和 LSTM 对复杂非线性系统有强大的建模能力,以此训练出高效的预警模型,实现对故障的精准预测。(3) 基于知识的方法主要依据专家丰富的经验和精心构建的故障规则库,通过模糊推理、故障树分析等逻辑推理方式实现故障预警,适用于那些难以建立精确数学模型的复杂场景^[2]。

2.3 故障诊断技术

故障诊断技术是一个系统且严谨的过程,主要涵盖信号处理、智能诊断算法和故障定位三个关键环节。(1) 信号处理技术是故障诊断的前端重要步骤,其核心目标是从复杂的监测信号中精准提取故障特征。例如,运用傅里叶变换可将时域信号转换为频域信号,清晰呈现信号的频率成分,从而识别出与故障相关的特定频率;小波变换则具有多尺度分析的能力,能更好地捕捉信号的瞬态特征,为故障分析提供更丰富的信息。(2) 智能诊断算法是故障诊断的核心驱动力。神经网络凭借其多层非线性映射能力,能够对故障模式进行高效分类;模糊逻辑擅长处理故障信息中的不确定性,提高诊断的鲁棒性;遗传算法可对诊断模型的参数进行优化,提升诊断的准确性,这些算法共同实现对复杂故障的精准识别。(3) 故障定位技术则结合设备的结构特点和监测数据的分布情况,精准确定故障发生的具体部件和位置。像通过多传感器数据融合技术,能快速定位齿轮箱中齿轮或轴承的故障,为后续的维修工作提供精确指引。

3 风电设备故障预警与诊断技术应用挑战

3.1 复杂工况的干扰

风电设备通常运行于极为恶劣且工况复杂多变的环境之中,这给故障预警与诊断工作带来了诸多严峻挑战。(1) 强风是常见的干扰因素之一,其引发的剧烈振动会直接作用于风电设备。这种振动会使监测信号中混入大量噪声,导致原本微弱的故障特征被掩盖,难以从

监测数据中准确提取有效的故障信息。(2) 温度的骤变同样不可忽视,它会引起设备各部件参数的波动。不同部件对温度变化的敏感度不同,参数的异常波动会干扰正常的监测数据,使得基于稳定工况建立的预警模型难以适应这种变化,进而导致预警模型的泛化能力大幅下降。(3) 电磁干扰也容易造成信号失真,影响数据质量。而极端天气状况,如暴雨、雷电等,不仅可能直接损坏监测设备,还会中断数据采集过程,破坏数据的连续性,使得故障预警和诊断工作因缺乏完整、准确的数据支持而陷入困境。

3.2 数据质量与样本不平衡

数据质量在风电设备故障预警与诊断中起着决定性作用,然而实际应用中却面临诸多棘手问题。数据缺失现象时有发生,可能是由于传感器故障、数据传输中断或存储失误等原因导致,这使得数据无法完整反映设备运行状态。异常值的大量存在也严重干扰数据分析,其可能源于测量误差、设备突发故障或外界干扰等,会误导模型训练方向。而且,部分故障特征在数据中表现不明显,增加了特征提取和识别的难度。此外,样本不平衡问题极为突出,故障样本数量远远少于正常样本。这导致基于数据驱动模型在训练过程中过度关注正常样本,对罕见故障的识别能力极弱,准确率大幅降低。同时,不同品牌、型号的风电设备在数据格式和特征上存在显著差异,难以构建统一规范的数据集用于模型训练,这不仅限制了模型的通用性,也极大地增加了故障预警与诊断技术的推广难度^[3]。

3.3 技术集成与成本控制

故障预警与诊断技术若要实现高效且可靠的应用,多技术的协同集成是必由之路。这涉及传感器精准采集数据、通信技术稳定传输数据、先进算法深度分析数据以及软件平台高效管理数据等多个环节的有机融合。然而,不同技术来自不同领域,在接口标准、数据格式、通信协议等方面存在显著差异,兼容性问题突出,导致集成过程中面临诸多技术障碍,集成难度较大,稍有不慎便可能影响整个系统的性能与稳定性。与此同时,技术应用成本居高不下也是一大难题。从传感器安装来看,老旧设备改造时,安装位置受限、布线复杂等问题增加了安装成本;数据传输网络建设需要投入大量资金购置设备和铺设线路;算法模型开发需专业团队长期研发调试;系统维护也需持续投入人力物力。对于资金相对有限的中小型风电场而言,如此高昂的成本带来了沉重的经济压力,极大地限制了故障预警与诊断技术的广泛普及应用。

4 风电设备故障预警与诊断技术发展趋势

4.1 智能化与融合化趋势

展望未来,风电设备故障预警与诊断领域将呈现出显著的智能化与融合化发展趋势。(1)在智能化方面,人工智能技术将占据主导地位。深度学习凭借其强大的特征提取和模式识别能力,能够自动从海量的监测数据中挖掘出潜在的故障特征;强化学习则可通过与环境的交互不断优化决策策略。借助这些技术构建端到端的智能模型,可实现从数据采集、特征提取、故障分析到最终决策的全流程自动化处理,极大提高预警的精度和诊断的效率,减少人工干预和主观误差。(2)在融合化方面,多源数据融合将成为关键。将振动、温度、油液、图像等多维度数据进行综合分析,能获取更全面、准确的设备状态信息,提升对复杂故障的识别能力。同时,跨设备协同诊断也将兴起,通过利用风电场内多台设备的关联数据进行分析,挖掘设备之间的潜在联系,进一步增强故障预警与诊断的可靠性和准确性。

4.2 轻量化与边缘计算应用

鉴于风电设备具有显著的分布式特征,且对实时性有着严苛要求,轻量化算法与边缘计算技术在未来将迎来广泛的应用契机。(1)边缘计算技术通过在风电设备端就近部署计算节点,能够对采集到的各类数据开展本地化处理与初步诊断。这一过程极大地减少了海量数据向云端传输的规模,有效缓解了云端的计算压力。同时,基于本地实时处理,可迅速实现故障的预警,达成快速响应,避免因数据传输延迟而错过故障处理的最佳时机,保障风电设备的稳定运行。(2)而轻量化模型,例如经过精心压缩的神经网络,在保持一定性能的前提下,显著降低了对硬件资源的占用。这使得其能够轻松部署在资源相对受限的风电设备上,克服了硬件条件对先进算法应用的限制,为风电设备故障预警与诊断的智能化、实时化发展提供了有力的技术支撑^[4]。

4.3 标准化与产业化发展

随着风电设备故障预警与诊断技术的持续成熟,行业标准化建设迫在眉睫。未来,将逐步构建统一的数据

标准,确保数据在采集、存储、传输和分析过程中的规范性与一致性;制定明确的接口规范,实现不同品牌设备和系统之间的无缝对接与互联互通;规范诊断流程,使故障预警与诊断工作有章可循、科学高效。与此同时,该技术将朝着产业化方向大步迈进,形成涵盖传感器研发、数据服务以及诊断解决方案提供的完整产业链。产业链各环节协同发展,能有效降低技术应用成本,为技术在风电场的规模化应用创造有利条件。此外,数字孪生技术与故障预警诊断的深度融合将成为一大亮点。通过构建设备的虚拟模型,可对设备全生命周期的运行状态进行精准模拟和实时监测,实现更全面、深入的故障管理,进一步提升故障预警与诊断技术的应用水平和实际价值。

结束语

风电设备故障预警与诊断技术对于保障风电产业稳定运行意义重大。当前,虽已在状态监测、预警诊断等方面取得关键成果,但复杂工况干扰、数据质量与样本不平衡、技术集成与成本控制等问题仍制约其发展。展望未来,智能化与融合化将提升预警诊断的精度与效率,轻量化与边缘计算能满足分布式与实时性需求,标准化与产业化将推动技术规模化应用,数字孪生技术更将实现全生命周期故障管理。随着这些趋势的推进,风电设备故障预警与诊断技术将不断完善,为风电产业的高质量发展提供坚实的技术保障,助力能源结构优化与可持续发展。

参考文献

- [1]吴怡,浦昊.变电运维设备故障的处置策略分析[J].集成电路应用,2024,41(08):338-339.
- [2]苏琨,党海琦.变电运维设备故障处理的方法研究[J].自动化应用,2024,65(S1):4-6.
- [3]宁志,李庆林,杨乘胜.新能源设备智能诊断模型在风电运维中的应用[J].电气开关,2022,60(04):77-79+84.
- [4]张敏.风电场智能运维设备中的传感器设计与优化分析[J].电子技术,2024,53(06):334-335.