

# 风电齿轮箱复合故障诊断方法研究

邓雁敏

中车福伊特传动技术(北京)有限公司 北京 102202

**摘要:** 风电齿轮箱是风能发电机的关键部分,随着风电的发展,风电齿轮箱也获得了良好的发展前景。因此,本文旨在探讨风电齿轮箱在风力发电机组中的复合故障诊断方法。通过分析风电齿轮箱的重要性及常见故障类型,特别是复合故障的特性,提出了基于故障信号采集、预处理、特征提取、模式识别以及时域和频域分析的综合诊断方法。为提升风电设备的可靠性和运维效率提供了有力支持。

**关键词:** 风电齿轮箱;复合故障诊断;方法研究

引言:随着风力发电技术的快速发展,风电齿轮箱作为风力发电机组中的关键传动部件,其运行稳定性和可靠性直接影响到整个风电系统的发电效率和安全性。然而,由于风电齿轮箱工作环境恶劣,长期承受高负荷、快转速的工作状态,易发生多种故障,且这些故障往往相互关联,形成复合故障,增加了故障诊断的难度。因此,研究风电齿轮箱复合故障诊断方法具有重要的现实意义。

## 1 风电齿轮箱在风力发电机组中的重要性

风电齿轮箱在风力发电机组中占据着举足轻重的地位,是连接风轮与发电机之间的关键传动部件。其重要性主要体现在以下几个方面:第一,风电齿轮箱是能量转换的核心环节。风力发电机组通过风轮捕获风能,并转化为机械能,而风电齿轮箱则负责将风轮的低速旋转运动转换为发电机所需的高速旋转运动。这一转换过程直接关系到发电机能否高效、稳定地输出电能,是风力发电系统高效运行的基础。第二,风电齿轮箱的设计和制造质量直接影响风力发电机组的性能和寿命。由于风电机组通常安装在环境恶劣的地区,如沿海、高山、荒漠等,因此齿轮箱必须具备足够的刚性和强度,以承受复杂多变的工况和强大的载荷。同时,齿轮箱内部的齿轮、轴承等部件需要精密配合,以确保传动效率和平稳性。这些因素都对齿轮箱的设计、制造和安装提出了极高的要求。第三,风电齿轮箱的故障将直接影响风力发电机组的运行稳定性和可靠性。一旦齿轮箱出现故障,如齿轮磨损、轴承损坏等,不仅会导致发电效率下降,还可能引发整个机组的停机,给风电场带来巨大的经济损失。因此,对风电齿轮箱进行定期的维护和故障监测至关重要,以确保其始终处于良好的工作状态<sup>[1]</sup>。

## 2 风电机组常见故障分析

### 2.1 齿轮箱故障分析

齿轮箱作为风力发电机组中的关键传动元件,其性能的优劣直接影响到电能的转换效率和系统的长期稳定运行。在极端天气条件和连续高负荷运行下,齿轮箱内部的齿轮、轴承等关键部件承受着巨大的压力和磨损,极易出现各类故障。除了上述提到的齿轮断裂、轴承损坏和轴断裂等典型故障外,齿轮箱还可能因润滑不良导致摩擦加剧,进而引发过热和失效;或由于密封失效,外部杂质进入箱内,加速部件磨损和腐蚀。因此,对齿轮箱进行定期的专业检查与维护,包括润滑油的更换、密封件的检查以及关键部件的磨损评估,是预防故障、保障风电机组高效运行的重要手段。同时,采用先进的监测技术,如振动分析、温度监测等,可以实现对齿轮箱运行状态的实时监控,提前预警潜在故障,为风电场的运维管理提供有力支持。

### 2.2 复合故障特性分析

复合故障在风电齿轮箱中指的是同时或相继发生的多种故障模式,这些故障可能相互关联、相互影响,导致系统性能显著下降。其定义涵盖了齿轮箱内部多种故障类型(如齿轮断齿与轴承疲劳剥落并存)的同时存在或相继发生。复合故障的表现形式复杂多样,可能表现为振动信号的异常叠加、频率成分的复杂化以及信号的非线性增强等。这些表现形式使得复合故障的诊断比单一故障更为困难,需要更高级的信号处理技术和故障诊断方法。复合故障对振动信号的影响尤为显著。不同故障源产生的振动信号在时域、频域及时域频域上相互交织,导致振动信号的特征变得模糊和难以区分。此外,复合故障还可能引起振动信号的突变、调制谐波增强等现象,进一步增加了故障诊断的难度<sup>[2]</sup>。

### 2.3 叶片故障分析

风力发电机的灵魂就是其效率转换机制,其叶片可以成为捕捉风力的“先锋”,其效能直接关乎着整个系

统的发电质量和安全性。叶片在复杂多变的大气环境中连续工作,不但会经受极端气候如大风、闪电的直接影响,而且遭遇到温湿度变动、气温变化等的侵害,上述各种因素共同增加了叶片的疲劳磨损和衰老进程。叶片破碎、移位或扭曲的问题,不仅意味着巨大的养护支出,更可能因失去平衡而引发机组整体振动加剧,甚至导致停机事故,对电网安全构成威胁。鉴于叶片故障的严重性与复杂性,探索先进的监测技术显得尤为重要。光纤光栅传感器技术以其高精度、长寿命及抗电磁干扰等优势,为叶片健康监测提供了新思路。通过在叶片内部或表面合理布置传感器网络,实现对叶片应力状态的实时监测与数据分析,能够提前预警潜在故障,为运维人员提供决策支持,有效延长叶片使用寿命,保障风电场的安全稳定运行。这一技术的应用,无疑将推动风电行业向更加智能化、高效化的方向发展。

#### 2.4 偏航系统和变桨系统故障分析

偏航系统与变桨系统作为风力发电机组的核心控制系统,其稳定性和可靠性对于保障风电机组的安全运行及优化发电效率至关重要。偏航系统负责使风电机组能够自动对准风向,以最大化捕获风能,其复杂的机械结构和精确的传感器系统使得故障检测与维护成为一项挑战。除了常规的技术问题和位移、位置传感器故障外,环境因素如极端天气、沙尘暴等也可能对偏航系统的运行造成影响,导致轴承磨损加速、滑垫损坏等问题。因此,采用多种传感器融合技术,结合振动、电流、压力等多维度监测手段,能够更全面地评估偏航系统的健康状况,及时发现并处理潜在故障。变桨系统则是调节风电机组输出功率的关键,通过精确控制叶片的倾角,既能在强风时限制风轮转速,保护机组免受损害,又能在低风速时优化叶片角度,提高发电效率。然而,变桨系统的复杂性也带来了多种故障模式,如电机失效、轴承润滑问题、螺钉松动等,这些故障不仅会影响发电效率,还可能对机组安全构成威胁。为此,定期检查和维修变桨系统,包括检查电机运行状况、润滑轴承、紧固螺钉等,是确保风电机组稳定运行的重要措施<sup>[3]</sup>。

### 3 风电齿轮箱复合故障诊断方法研究

#### 3.1 故障信号采集与预处理

在风电齿轮箱的故障信号采集与预处理阶段,合理的传感器选择与布置、科学的信号采集方案以及有效的预处理技术是确保故障诊断准确性的关键。第一,反映齿轮箱内部机械状态的变化而常被选用。同时,考虑到温度、噪声等参数也可能与故障相关,因此可能还需要温度传感器和声级计等辅助传感器。在选择传感器

时,需确保其精度、灵敏度和可靠性满足要求,以准确捕捉故障信号。第二,传感器的布置也是至关重要的。应根据齿轮箱的结构特点和故障易发部位,合理确定传感器的安装位置和数量。例如,在齿轮、轴承等关键部件附近布置振动传感器,以捕捉其振动特性;在润滑油路或冷却系统中布置温度传感器,以监测油温或油温变化。第三,信号采集方案应确保数据的完整性、准确性和实时性。需制定详细的采集计划,包括采集频率、采样点数、数据存储格式等,以确保采集到的信号能够全面反映齿轮箱的运行状态。第四,在预处理阶段,降噪和滤波是常用的技术手段。降噪可以通过数字信号处理技术去除信号中的随机噪声和周期性干扰;滤波系统则可以通过设计适当的滤波条件来保持电路中的有益成份,并抑制无用的高频或低频成份。另外,还将要求实现对数据的平滑处理、趋势分类等操作,以改善信息的效率和可读性。

#### 3.2 故障特征提取

时域分析通过对观测信号的波形变换,并利用计算统计参数(如均值、方差、峰峰值等)来初步地评价信号特征,对确定突发性的故障冲击十分有用。第一,在频率区域分析中则利用傅里叶变换把信息的时域特征转移至频率区域,从而发现了信息的频率特征。针对周期性,如齿轮的局部失效所造成的周期性问题,利用傅里叶变换就可以很清晰的揭示故障频率的谐波成分。而包络解调技术则进一步提取调制在高频载波上的低频包络信号,适用于轴承故障的检测,由于轴承故障一般体现为将高频振动调制到滚动轴承的通过频率上。第二,时频分析融合了时域与频率区域的特性,从而可以实时显示信号的时频特征。短时傅里叶变换利用在信道上的滑动窗口并逐段完成傅里叶变换,以进行信号的时频局部变化研究。而小波变换则利用伸缩和平移的小波函数对信道进行多尺度细化研究,对于突变信号和非稳定信号都具备了很强的研究功能。Hilbert-Huang变换法则采用经验模态分析技术(EMD)将复杂信号分解为一系列本征模态函数(IMF),然后对一个IMF通过Hilbert变换可以获得瞬时速率变化的幅度,应用于对非线性非均匀信息的研究。第三,对于复合故障特征的提取,SVD(奇异值分解)降噪能有效去除信号中的噪声成分,提高信号质量。EMD/LMD(局部均值分解)分解则将信号分解为若干个单分量信号,便于后续的特征提取。模糊熵等非线性特征提取方法则能进一步挖掘信号中的复杂性和不确定性,为复合故障诊断提供更多有效信息<sup>[4]</sup>。

#### 3.3 故障模式识别

故障模式识别是风电齿轮箱健康管理中的核心环节,它旨在通过分析采集到的故障信号,准确地判断齿轮箱所处的故障状态或类型。(1)在故障模式识别中,首先需要运用信号处理技术对采集到的原始数据进行预处理,如降噪、滤波、特征提取等,以突出故障特征,降低数据维度,提高后续识别的效率和准确性。然后,通过选取适当的机器学习算法或深度学习模型,对处理过的数据进行训练与学习,从而形成了故障模型和数据之间的反馈机制。(2)常用的机器学习算法包括支持向量机(SVM)、随机森林、决策树等,它们通过构建分类器或回归模型,对故障特征进行分类或预测,实现故障模式的识别。而深度学习算法,如卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)等,则能够自动从原始数据中提取层次化的特征表示,进一步提高了故障识别的精度和鲁棒性。(3)在风电齿轮箱的故障模式识别中,还需要考虑多种故障可能同时发生或相互影响的复合故障情况。因此,研究复合故障的特征提取和模式识别方法,制定有效的复合故障诊断策略,也是当前领域内的热点和难点问题。

#### 3.4 时域和频域分析的方法

它们相互补充,共同提升了故障识别的精度与效率。时域分析直观展示了信号随时间的变化规律,通过观察信号的波形、幅值等特征,可以初步判断机组是否存在异常振动、冲击等现象。然而,时域分析往往难以直接揭示故障的具体原因和频率特性,这时就需要借助频域分析来进一步深入。频域分析,特别是傅里叶变换(FFT)及其衍生的包络分析技术,将信号从时间域转换到频率域,使得我们可以清晰地看到信号在不同频率上的能量分布。通过对比正常状态与故障状态下的频谱图,可以准确地识别出故障特征频率,进而判断故障类型和位置。对于非平稳或短时调制信号,直接进行FFT可

能效果不佳,此时可采用包络解调技术,它能够有效提取并增强高频瞬态畸变等微弱信号,提高故障检测的灵敏度。此外,小波分析作为一种新兴的时频分析方法,以其多分辨率特性在风电机组故障诊断中展现出独特优势。通过选取合适的小波基和分解层数,小波分析能够同时保留信号在时域和频域的信息,对于捕捉瞬态、非平稳信号中的故障特征尤为有效<sup>[5]</sup>。

#### 结束语

风电齿轮箱作为风力发电机组的核心部件,其故障诊断方法的深入研究对于保障风电系统的稳定运行具有重要意义。通过结合振动分析法、油液分析法、声发射分析法等多种技术手段,我们能够对风电齿轮箱进行更为全面、准确的故障诊断。未来,随着人工智能、大数据等技术的不断发展,风电齿轮箱复合故障诊断方法将更加智能化、精准化,为风电行业的可持续发展提供有力支持。让我们共同期待,风电齿轮箱故障诊断技术的不断创新与突破,为构建绿色、低碳的能源体系贡献力量。

#### 参考文献

- [1]徐进,丁显,程浩,等.基于一维密集连接卷积网络的风电齿轮箱智能故障分类[J].可再生能源,2020.56-67
- [2]杨保俊,洪荣晶,潘裕斌.基于CEEMDAN-EFICA去噪的风电齿轮箱故障诊断[J].组合机床与自动化加工技术,2020(2).46-49
- [3]周福成,唐贵基,何玉灵.基于改进VMD的风电齿轮箱不平衡故障特征提取[J].振动与冲击,2020(5):170-176.
- [4]任国春,赵永东,冯辅周,等.基于自适应EEMD样本熵的行星齿轮箱特征提取方法[J].装甲兵工程学院学报,2019(6):49-55.
- [5]胡葛庆,陈徽鹏,程哲,等.基于经验模态分解和深度卷积神经网络的行星齿轮箱故障诊断方法[J].机械工程学报,2019(7):9-18.