

# 风电齿轮箱润滑油在线监测与故障诊断技术研究

宋来育 马龙 任继国 张子赫 李娜

甘肃华电玉门风力发电有限公司，甘肃省酒泉市，735000；

**摘要：**风电齿轮箱作为风力发电系统的核心部件之一，其润滑油的状态直接关系到设备的运行效率与可靠性。通过在线监测润滑油的理化性能、污染程度及磨损颗粒等参数，能够及时发现潜在故障隐患，实现早期诊断与精准维护。本文深入探讨风电齿轮箱润滑油在线监测的关键技术，包括传感器选型与布置、数据采集与传输，以及基于大数据分析的故障诊断模型构建。

**关键词：**风电齿轮箱；润滑油在线监测；故障诊断

**DOI：**10.69979/3029-2727.25.07.030

## 引言

随着风力发电技术的快速发展，风电设备的可靠性和运行效率成为影响风电产业竞争力的关键因素。风电齿轮箱作为动力传输的核心部件，其润滑系统的健康状况至关重要。润滑油不仅起到润滑作用，还能带走热量、清洁杂质并防止腐蚀。然而，风电齿轮箱通常处于复杂的运行环境，润滑油的性能会因时间、温度、机械负荷等因素逐渐劣化，进而引发故障。因此，开展风电齿轮箱润滑油在线监测与故障诊断技术研究，对于保障风电设备的稳定运行、降低运维成本具有重要意义。

## 1 风电齿轮箱润滑油在线监测技术

### 1.1 监测参数选择

润滑油作为风电齿轮箱运行中的关键介质，其物理和化学特性直接反映了设备的健康状态。在众多参数中，黏度、酸值、水分含量和污染度是监测的核心内容。黏度是润滑油流动性的关键指标，其变化可能暗示润滑油的氧化或添加剂消耗。酸值的升高通常与润滑油的氧化和分解有关，可能导致腐蚀性增强。水分含量的增加会降低润滑油的润滑性能，甚至引发电蚀现象。污染度则直接反映了润滑油中杂质的含量，这些杂质可能加速齿轮和轴承的磨损。通过对这些参数的实时监测，可以精准捕捉润滑油的劣化趋势和齿轮箱内部的潜在故障信号，为后续的故障诊断提供有力依据。

### 1.2 传感器技术与布置

针对风电齿轮箱润滑油的监测需求，选择合适的传感器是实现精准监测的关键。黏度传感器能够实时监测润滑油的黏度变化，通过高精度的测量技术，捕捉因温度、氧化等因素导致的黏度波动。颗粒计数传感器则专

注于检测润滑油中的固体颗粒杂质，这些颗粒往往是齿轮磨损的直接证据。传感器的布置位置对监测数据的准确性至关重要。在齿轮箱的油路循环中，润滑油经过齿轮啮合区、轴承等关键部位，传感器应布置在这些区域的下游，以确保采集到的数据能够真实反映润滑油的状态。同时，传感器的安装需考虑环境适应性，如温度、振动等因素，以保证其长期稳定运行。

### 1.3 数据采集与传输

在线监测系统的数据采集与传输模块是连接传感器与分析系统的桥梁。数据采集模块需具备高精度和高频率的采集能力，以确保能够捕捉到润滑油参数的微小变化。例如，黏度的微小波动可能预示着润滑油的早期劣化，而颗粒计数的瞬时变化可能暗示突发性磨损。数据传输则需采用可靠的通信协议，如工业以太网或无线通信技术，确保数据在传输过程中的完整性和实时性。在风电场的复杂环境中，数据传输的稳定性尤为重要，任何数据丢失或延迟都可能影响故障诊断的准确性。因此，数据采集与传输模块的设计需充分考虑风电齿轮箱的实际运行环境，以满足高精度、高可靠性的监测需求。

## 2 风电齿轮箱润滑油故障诊断技术

### 2.1 基于大数据分析的诊断模型构建

在风电齿轮箱润滑油故障诊断领域，大数据分析技术的引入为实现精准诊断开辟了新的路径。随着风电设备的持续运行，积累了海量的润滑油监测数据，这些数据蕴含着丰富的故障特征信息。通过对这些历史数据进行深度挖掘与分析，能够构建润滑油参数与齿轮箱故障模式之间的关联模型，从而为故障诊断提供坚实的数据基础。

在构建诊断模型的过程中,机器学习算法扮演了至关重要的角色。支持向量机(SVM)和神经网络(NN)是两种常用的机器学习算法,它们能够通过对历史数据的学习和训练,自动识别润滑油参数的异常变化,并将其与特定的故障模式相对应。SVM通过寻找最优分割超平面,将不同故障模式的数据点进行分类,从而实现对故障的有效识别。神经网络则通过模拟人脑神经元的连接方式,对输入的润滑油参数数据进行多层次的处理和分析,能够自动提取数据中的复杂特征和内在规律,进而实现对故障的自动分类和诊断。

在实际应用中,润滑油的黏度、酸值、水分含量和颗粒计数等参数是反映齿轮箱健康状态的关键指标。这些参数的变化不仅与润滑油的劣化程度密切相关,还可能暗示齿轮箱内部的潜在故障。通过对这些参数的长期监测和数据积累,结合机器学习算法的分析能力,可以实现对风电齿轮箱故障的早期预警和精准定位。例如,黏度的异常变化可能暗示润滑油的氧化或添加剂消耗,而颗粒计数的显著增加可能表明齿轮的磨损加剧。通过构建基于大数据的诊断模型,能够将这些参数的变化与具体的故障模式进行关联,从而为设备的预防性维护提供有力支持。

此外,大数据分析技术还能够处理复杂的非线性关系和高维数据,这使得诊断模型能够更全面地考虑各种因素对故障的影响。通过引入先进的数据预处理和特征提取技术,可以进一步提高诊断模型的准确性和可靠性。例如,通过主成分分析(PCA)等降维技术,可以去除冗余信息,保留关键特征,从而提高模型的运算效率和诊断精度。同时,结合模糊逻辑和概率统计方法,可以增强模型对不确定性和模糊性的处理能力,进一步提升诊断结果的可靠性。

## 2.2 故障诊断算法优化

故障诊断的准确性高度依赖于算法的性能,而风电齿轮箱润滑油监测数据的复杂性为诊断算法带来了诸多挑战。风电齿轮箱润滑油监测数据通常具有高维度、强噪声和非线性特征,这些特性使得传统的诊断算法难以有效处理。因此,对诊断算法进行优化是提高诊断精度的关键环节。在优化过程中,首先需要解决的是数据维度问题。风电齿轮箱润滑油监测数据往往包含大量的特征参数,这些参数中既有与故障诊断相关的有效信息,也有大量的冗余信息。采用特征提取与降维技术,如主成分分析(PCA)和线性判别分析(LDA),可以有效减

少数据维度,去除冗余信息,同时保留关键特征。主成分分析通过将原始数据投影到新的特征空间,提取出能够解释数据方差最大化的主成分,从而实现数据的降维。线性判别分析则通过寻找能够最大化类间距离和最小化类内距离的特征子空间,实现对数据的降维和分类。这两种技术的应用,不仅能够显著提高算法的运算效率,还能够增强算法对数据的处理能力,使其能够在高维度数据环境中更有效地识别故障特征。

除了数据维度问题,风电齿轮箱润滑油监测数据的不确定性和模糊性也是影响诊断算法性能的重要因素。润滑油参数的变化可能受到多种因素的影响,如环境温度、设备运行状态等,这些因素的不确定性使得润滑油参数的变化具有一定的模糊性。引入模糊逻辑与概率统计方法,能够增强算法对这些不确定性和模糊性的处理能力。模糊逻辑通过定义模糊集合和模糊规则,能够处理数据中的模糊性,将模糊的输入信息转化为明确的诊断结果。概率统计方法则通过建立概率模型,量化故障发生的概率,为诊断结果提供更可靠的依据。例如,贝叶斯网络是一种基于概率推理的模型,能够根据先验知识和观测数据,计算故障发生的后验概率,从而实现对故障的准确诊断。通过将模糊逻辑与概率统计方法相结合,诊断算法能够在复杂的工况下更准确地识别故障特征,提高故障诊断的准确性和可靠性。

在实际应用中,风电齿轮箱润滑油监测数据的复杂性还体现在数据的动态性和非线性特征上。风电设备的运行状态是动态变化的,润滑油参数也会随之发生变化。传统的诊断算法通常假设数据是静态的,难以适应数据的动态变化。因此,引入动态建模和非线性分析方法是优化诊断算法的另一个重要方向。动态建模方法,如隐马尔可夫模型(HMM),能够对数据的动态变化进行建模,捕捉数据中的时间序列特征。非线性分析方法,如支持向量机(SVM)和神经网络(NN),则能够处理数据中的非线性关系,提高诊断算法的适应性和准确性。通过这些优化措施,诊断算法不仅能够更准确地识别故障特征,还能够适应风电设备运行状态的动态变化,为风电齿轮箱的故障诊断提供更可靠的技术支持。

## 2.3 诊断结果评估与验证

诊断结果的可靠性是故障诊断技术的核心。为了确保诊断模型的有效性和实用性,必须对其进行全面的评估与验证。首先,通过与实际故障案例的对比分析,可

以直观地评估诊断模型的准确性、灵敏度和特异性。实际故障案例提供了真实的故障数据和背景信息,是验证诊断模型性能的重要依据。其次,采用交叉验证、留一法等统计方法,可以在不同的数据集和工况下对诊断模型进行验证。这些方法能够有效避免过拟合现象,确保诊断模型在实际应用中的稳定性和泛化能力。通过严格的评估与验证,可以确保诊断模型在风电齿轮箱润滑油故障诊断中的可靠性和有效性,为风电设备的智能化运维提供有力的技术支持。

### 3 案例分析与应用效果

#### 3.1 风电齿轮箱润滑油在线监测系统应用案例

在某大型风电场,成功部署了一套风电齿轮箱润滑油在线监测系统,该系统的设计思路基于对风电齿轮箱运行特性和润滑油关键参数的深入理解。系统的核心目标是通过实时监测润滑油的理化特性,实现对齿轮箱健康状态的精准评估和潜在故障的早期预警。

监测参数的选择经过严格筛选,最终确定以润滑油黏度、酸值、水分含量和颗粒计数为关键监测指标。黏度的变化能够反映润滑油的氧化程度和添加剂消耗情况;酸值的升高通常预示着润滑油的化学性质恶化,可能导致腐蚀风险;水分含量的增加会降低润滑油的润滑性能,并可能引发电蚀现象;颗粒计数则直接反映了润滑油中的杂质含量,这些杂质往往是齿轮磨损的直接证据。

传感器的布置方案充分考虑了齿轮箱的结构和油路循环路径。黏度传感器和酸值传感器安装在润滑油循环回路的关键节点,确保能够实时监测润滑油在循环过程中的状态变化。颗粒计数传感器则安装在润滑油过滤器的下游,以便准确捕捉经过过滤后的杂质含量。水分传感器则安装在油箱的底部,因为水分往往会沉积在油箱的低洼处。这种布置方式确保了监测数据的准确性和代表性。

通过实际运行数据的分析,该在线监测系统在实时监测润滑油状态和预警潜在故障方面表现出色。系统能够以秒级频率采集数据,并通过工业以太网实时传输至监控中心。在一次突发故障中,系统提前 24 小时检测到润滑油颗粒计数的异常增加,结合黏度的微小波动,成功预警了齿轮箱内部的轻微磨损故障。这一预警为风电场的运维团队争取了宝贵的维修时间,避免了故障的进一步扩大,显著降低了维修成本和停机时间。

#### 3.2 故障诊断技术的应用与效果评估

结合该风电场的实际案例,基于大数据分析的故障诊断模型在风电齿轮箱故障诊断中的应用效果得到了充分验证。该诊断模型利用历史监测数据,通过机器学习算法建立了润滑油参数与故障模式之间的复杂关联。模型能够自动识别润滑油参数的微小变化,并将其与可能的故障模式进行匹配。

与传统诊断方法相比,基于大数据分析的诊断模型在多个方面展现出显著优势。在故障诊断速度方面,传统方法依赖于人工分析和经验判断,通常需要数小时甚至数天才能得出结论。而大数据分析模型能够在数据采集后的几分钟内完成故障识别和预警,大大提高了诊断效率。在准确性方面,传统方法容易受到人为因素和数据不完整性的干扰,而大数据分析模型通过学习海量历史数据中的模式,能够更精准地识别故障特征。在误报率方面,传统方法由于缺乏对数据的深度挖掘,误报率较高。而大数据分析模型通过引入模糊逻辑和概率统计方法,能够有效降低误报率,提高诊断结果的可靠性。

### 4 结论

风电齿轮箱润滑油在线监测与故障诊断技术对于保障风电设备的稳定运行具有重要意义。通过深入研究监测技术、故障诊断模型构建及算法优化,结合实际案例验证,本文提出的技术方案能够有效实现风电齿轮箱润滑油状态的实时监测与故障的早期诊断。未来,随着技术的不断进步,该领域有望进一步提高风电设备的智能化运维水平,为风电行业的可持续发展提供有力支持。

#### 参考文献

- [1] 张柯挺,金其文,李承浩,林志明,吴学成,吴迎春. 数字全息测量风电齿轮箱润滑油中磨粒实验研究[J]. 新能源进展,2024,12(06):681-687.
- [2] 杨玉鹏. 风电齿轮箱润滑油图像监测关键技术研究[D]. 沈阳工业大学,2024.
- [3] 雷申,马子魁,栗心明,翟绍鹏,邓四二. 风电齿轮箱用润滑油流变特性试验研究[J]. 轴承,1-7.
- [4] 马明康,刘鹏涛,宋津科,刘豪. 风电齿轮箱润滑油旁路过滤装置[J]. 设备管理与维修,2019,(21):120-122.
- [5] 方志翔,唐芳宁. 风电齿轮箱润滑油应用研究[J]. 机械工程与自动化,2019,(02):188-190.