

# 风电机组齿轮箱高温故障预警与诊断研究

秦晓猛

国华（赤城）风电有限公司 河北张家口 075500

**【摘要】**伴随风电产业的迅猛发展，风电机组的可靠性与稳定性将面临严峻考验，随之而来的运行环境复杂性与设备老化问题将显著增加，这将使齿轮箱系统面临更高的温度挑战，从而导致其运行状态变得异常。本文首先探讨了特定工况下齿轮箱高温故障的成因、特征及其表现形式，随后阐述了温度监测技术与故障诊断方法的基本原理，最后提出风电机组齿轮箱高温预警系统的构建策略与诊断技术的应用效果。

**【关键词】**风电机组；齿轮箱；高温故障；预警诊断

Research on High Temperature Fault Warning and Diagnosis of Wind Turbine Gearbox

Qin Xiaomeng

Guohua (Chicheng) Wind Power Co., Ltd. Zhangjiakou, Hebei 075500

**【Abstract】** With the rapid development of the wind power industry, the reliability and stability of wind turbines will face severe tests, and the complexity of the operating environment and equipment aging problems will significantly increase. This will pose higher temperature challenges to the gearbox system, leading to abnormal operating conditions. This article first explores the causes, characteristics, and manifestations of high-temperature faults in gearboxes under specific operating conditions. Then, the basic principles of temperature monitoring technology and fault diagnosis methods are explained. Finally, the construction strategy of a high-temperature warning system for wind turbine gearboxes and the application effect of diagnostic technology are proposed.

**【Key words】** wind turbines; Gearbox; High temperature malfunction; Warning diagnosis

## 引言

伴随新能源技术进步、风电产业规模扩大的趋势，风电行业即将步入高质量发展新阶段，做好风电机组关键部件的故障预防工作至关重要。风电设备维护管理，应以保障电力供应安全稳定为目标，所有运维活动都应围绕设备可靠性展开，预防性维护和状态监测。在复杂多变的运行环境下设备故障风险增加，与传统发电方式相比风电设备具有特殊性，其运行条件，对运维工作提出了更高要求。风电场运维应当加强齿轮箱温度异常分析，研究环境因素、负载变化和运行参数对温度的影响，故障预警的及时性，充分识别温度异常与故障关联性和发展趋势，故障诊断的准确性。随后，在数据采集处理、特征提取和模型构建等方面开展深入研究，对故障类型从多角度进行识别判断，确定预警阈值，诊断准确率和响应速度均达到行业标准。通过采用多传感器融合以实现温度趋势预测、故障模式识别等技术的应用，从而确保预警及时性，有效提升故障诊断精度，这样才能使风电设备可靠性得到进一步的提升。

## 1 风电机组齿轮箱系统概述

### 1.1 齿轮箱结构与功能

风电运行环境中的齿轮箱是实现能量转换的关键机械装置，或风能转化为电能过程中的重要传动部件。在风力作用下，齿轮箱内部传动系统将低速高扭矩转化为高速低扭矩，建立合理、高效的传动链，确保电能输出的稳定性。因此，齿轮箱设计，在风电设备整体布局中，齿轮箱的核心功能就是扭矩转换和转速提升，亦即：①将输入轴作为动力接受体；②将输入端的低转速高扭矩从风轮和叶片转移到发电机和输出端上来；③在进行传输的过程中，以精准的齿轮啮合和轴承支持为保证系统正常工作的基础<sup>[1]</sup>。在设计过程中，还需要考虑材料强度，并将其与实际工况的载荷特性相结合，尤其是极端天气以及长期运行当中，需要全面评估风速变化、温度波动、湿度影响带来的挑战，以此构建可靠和高效的传动系统，保证运行稳定性，同时能够提升其使用寿命。

### 1.2 齿轮箱高温故障特征

随着风电技术的进步和应用，风电机组的性能和效率已显著提高，齿轮箱高温故障必须及时识别、准确诊断。在正常运行阶段，温度变化是平稳的，根据运行参数的合理范围温度处于正常区间；但当出现异常情况之后，要先监测温度变化趋势，再判断故障严重程度的等级。这不仅是设备安全的保障，更是效率和寿命的保证。可见，齿轮箱温度监测应建立动态预警机制，结合历史数据并进行趋势分析。按照不同工况下齿轮箱温度变化的规律和特点，现有温度监测系统

在风电设备运行状态评估中发挥着关键作用。故障诊断当中应用的特征提取以及模式识别技术,需要在数据处理流程当中优化及整合,只有这样才能与智能诊断系统相匹配,同时才能在复杂工况下,能够实现精准的诊断,也是故障预警系统的核心功能。

## 2 齿轮箱高温故障成因分析

### 2.1 机械结构因素

随着风电设备规模的扩大,齿轮箱故障将增多,温度异常成为主要的故障表现和具有代表性的故障特征。作为一个复杂的机械系统,其设计是在满足强度要求和运行稳定性的前提下,使系统的传动效率最优,为电能转换提供可靠保障。因此,齿轮箱结构设计,例如齿轮啮合精度、轴承配置、箱体结构,以及密封和润滑的性能或状态等,基本上由制造工艺决定,以材料性能和结构强度为前提,影响温度分布的结构因素、材料因素以运行工况的影响因素。从结构设计分析,对于温度异常需要建立完善的监测机制,如通过温度场分布对齿轮啮合状态、轴承运行等进行评估,这样才能对潜在故障进行早期识别,从而预防故障发生<sup>[2]</sup>。

### 2.2 运行环境因素

随着风电场规模的扩大,环境因素对齿轮箱的影响日益突出。风电机组运行环境,是指设备所处的自然条件,例如风速变化、温度波动、湿度变化等。但是,由于外部条件的多变,齿轮箱的温度异常表现为以下特点:①对局部温度,即对特定部位的过热现象;②对整体温度,即整体温升对设备性能的影响;③对温度变化速率;④对温度与其他参数的关联,即对传动效率和机械损耗的影响。而且,在复杂工况下,将温度监测数据与运行参数以实时方式与历史数据进行比对。因此,在考虑其对设备各方面影响的基础上,做好这些参数在不同工况下的相关性分析。

### 2.3 冷却系统因素

冷却效果差或冷却失效也是导致齿轮箱温度过高的一种常见原因,主要有:散热器堵塞;冷却风扇故障;油冷回路泄露或者油冷回路循环不良;冷却液老化或者冷却液量不够。这些因素都会造成齿轮箱内部热量不能有效排出而导致齿轮箱温度升高,引起持续升温或间断性升温。

## 3 高温故障预警与诊断方法

### 3.1 温度监测技术

随着传感技术的进步,在温度监测过程中,将实现数据采集的自动化,最终在数据处理和故障识别的环节中实现智能化,而数据存储和分析的环节则仍需人工的深度参与。这种智能化趋势使得温度监测将作为一个独立的、完整的监测体系,数据采集和分析处理的环节,向故障预警提供可靠、

及时和准确的数据支持,并实现早期预警,以提升其可靠性和故障预测的准确性。在实际应用中,监测系统也发生变革,更需要智能化升级,具备实时分析的能力与数据处理的技术,监测过程中,系统要确保数据完整性,同时要满足不同场景的需求,如极端天气、高负载等<sup>[3]</sup>。另外,数据分析、故障识别等智能技术的快速发展,作为监测系统需要加强数据处理的精准性与可靠性,这样才能提升监测效果。在监测中,传感器、数据分析等监测技术的运用是系统建设的重中之重,这样更能够为故障预警等应用提供支持。还应完善温度监测的精度和数据处理能力,数据采集可以自动化,但分析的准确性仍需保障。监测系统应建立完善机制,在对齿轮啮合、轴承运转、润滑状况、振动及环境温度、湿度、风速和气压等参数的综合分析,提升监测的精度和可靠性。还要关注数据对故障模式及其发展规律的反映,加强数据分析和诊断方面的能力建设。

### 3.2 故障预警模型构建

主要包括:(1)温度趋势预测模型。随着数据技术的发展,温度预测将向智能化,由于历史数据积累的不断丰富,预测模型的准确性也会提高,模型的预测能力,则预警效果也会有相应的提升。还包括环境因素和运行参数的相互影响的综合分析这是构建预警模型、提高精度、实现精准预警是必要的,它受到数据质量的影响和算法选择的制约。(2)异常检测算法优化。随着机器学习的应用,异常检测由人工设定根据数据驱动,算法的准确性往往决定预警效果,这对运维决策来说都是关键因素,给故障预防带来重要参考。(3)多源数据融合方法。包括温度传感器数据和振动信号的综合分析等。在分析过程中,系统从数据的可靠性出发,会考虑单一数据源的局限性,导致误报率的上升,系统也更复杂;并且,随着数据量增加,系统可以实现更精准的预测,预警模型的准确性也将不断提高,甚至能够预测潜在故障的发展趋势,这些都提升预警系统的有效性,原来的单一参数预警模型已不能满足需求。除了传统方法来提高预警精度外,也可以采用深度学习技术,以便实现更精准的故障预测。(4)阈值设定方法。例如:由于温度变化的动态特性导致预警阈值的设定是关键。(5)数据质量评估方法。系统中有些数据存在质量不佳的问题,而数据的质量往往是影响预警效果的关键因素,这样就会对预警模型的准确性和可靠性带来挑战。(6)模型自适应更新机制。环境变化的影响会给预警模型带来干扰,而这往往是难以避免的。

### 3.3 故障诊断方法

(1)温度法。趋势及阈值判断:根据齿轮箱内不同位置处的温度时间序列统计数据计算出其平均温度及变化率阈值作为参考标准,在实际运行过程中如果出现高于设定温度或者在短时间内温度上升较快,则判定为异常并做出预警处理;对比以往类似情况下的表现来辅助判断。温度场分析:使用多个温度检测装置获取的温度信号绘制出一个完整的

齿轮箱内部温度分布状态。热区定位。结合红外图象,对是否缺油、轴承损伤、齿面接触故障进行粗略判断。(2)数据分析综合诊断。温度-振动综合诊断:同时采集箱体振动以及温升数据并利用FFT或者包络谱分析等技术得到其特征频率(轴承故障特征频率、齿轮啮合频率)。并将其与温度的变化趋势联系起来以提高故障识别准确性。油液分析+温度:对润滑油温度、黏度以及磨损颗粒情况进行观察,在油温过高时根据油液情况来判定是否发生了磨损加重、润滑失效或者污染等情况。(3)故障诊断方法应从理论和实践两个维度进行分析,评估诊断方法的有效性和适用性。一方面,针对特定故障类型,提出针对性的诊断策略,例如以齿轮箱温度异常为背景,提出多参数融合的诊断方法,在考虑温度变化的同时,综合考虑振动特征和油液分析的结果。另一方面,在原有的诊断基础上引入新的分析手段,例如故障树分析,就是在系统故障分析基础上结合贝叶斯网络的诊断方法<sup>[4]</sup>。建立齿轮箱高温故障树,确定所有底层事件到顶层故障间的逻辑关系;结合贝叶斯网络进行不确定推理,实现故障概率动态更新及最优诊断路径。(4)故障预警与诊断系统集成。由于故障诊断的复杂性、多维度,因此在系统设计中还要考虑诊断模型的适应性。采用增量或者在线学习方式对诊断模型进行更新,在不断获取新的样本后,让诊断模型能适应不同的风场、季节及机组老化等因素的影响。

### 3.4 实际应用分析

随着风电技术的发展,在实际应用中温度监测系统也将不断完善,从而使监测的智能化程度提高为诊断提供支持,其技术演进是从传统监测向智能诊断,从单一参数向综合分析的转变,即温度监测与故障诊断的结合是其发展的主要方向。因此,系统的智能化和诊断的精准化。

(1) 预警系统应用。随着数据处理技术和算法优化的进展,使得预警能力方面显著提升,例如智能预警平台等,它们关注的是温度变化的规律,现在预警系统的准确性要求越来越高。系统的实时性,准确性越来越重要,例如某风电场智能预警在温度监测、故障识别和预警推送中的应用。系统的智能化水平和诊断的准确性得到提升。其中:预警准确率为系统识别故障的精确程度;诊断及时率为因故障被及时发现而避免损失的比例。

(2) 故障诊断技术应用。故障诊断是风电运维的核心,

是安全保障的重中之重。目前,故障诊断技术在风电行业应用都取得了进展,但仍有提升空间。为了提高诊断效果,需要关注以下方面:确定故障特征的提取方法及诊断模型的构建策略和参数;根据数据特征选择合适的诊断算法;对诊断结果的可靠性进行验证和评估;系统在实际运行中对故障进行识别,诊断系统的准确性应满足实际需求<sup>[5]</sup>。

(3) 温度控制策略实施。由于温度异常一般伴随多种因素,因此,当温度异常时,将触发相应的控制措施、维护计划和运行调整,系统的响应速度和处理能力。这就要求系统的预警机制进行针对性的优化。

(4) 多技术融合应用实例。例如,在某风电场应用中,温度监测的精度会受到干扰,因此诊断系统的构建时还必须考虑对环境因素的补偿。另外,可以在系统的监测基础上引入人工智能和大数据技术,例如某系统引入了深度学习对温度异常模式进行了分析,并得到了更精准的故障诊断结果。为了能够让预警诊断系统有良好的应用效果,可以采用数据融合、算法优化等技术,使得系统能够达到实时监测、精准诊断等目的,这样能够提升其应用价值。对于系统的优化还需要针对性的技术支持,尤其要在算法上进行创新。对于预警阈值,需要建立动态调整机制、如自适应阈值等都应整合到预警系统内,从而实现智能预警诊断,在此背景下,能够促进风电运维技术发展。

## 4 结语

风电行业和设备运维是相互依存,因此需要对故障预警的机制、方法及技术应用等方面持续优化,以适应风电发展的新要求。齿轮箱故障诊断的智能化将推动行业进步,风电运维的技术也需要持续创新。由温度监测到故障诊断的各个环节、流程、标准、方法和工具等都将不断完善,而且需要专业的技术支持。在智能运维下,风电设备管理已经进入新阶段,它更趋向于数字化的管理模式,在技术创新的引导下,风电运维能够实现精细化管理,更能提升故障预测能力,同时能够优化流程、提升的效率。在风电运维中需要关注数据、技术、人员等方面的能力建设,利用先进诊断技术和智能分析方法,保证风电设备安全可靠运行。

## 参考文献

- [1]赵万东.风电机组齿轮箱高温问题处理分析[J].电子技术, 2023, 52(10): 236-237.
- [2]马亮,任超,刘月文,等.基于KECA-PLS的风电机组健康状态评估[J].计算机测量与控制, 2025, 33(05): 351-360.
- [3]易子宸.基于联邦图网络的风电机组异常检测定位[D].燕山大学, 2024.
- [4]王鑫铭.风电机组齿轮箱润滑油磨粒及粘度监测技术研究[D].沈阳工业大学, 2024.
- [5]张威.基于聚类分析的齿轮箱智能故障诊断方法研究[D].昆明理工大学, 2024.