

# 风电机组齿轮传动系统高速级轴承动态特性

何宇哲 刘明 李强 李奇峰 周杨

华能新能源股份有限公司辽宁分公司 辽宁 沈阳 110000

**摘要:** 本文研究了风电机组齿轮传动系统高速级轴承的动态特性。分析了轴承动力学基础、动态特性参数,探讨了影响高速级轴承动态特性的内外部因素。介绍了时域、频域及非线性动力学分析方法,并阐述了轴承动态特性对系统稳定性、振动特性及轴承寿命的影响。提出了延长轴承寿命的方法与策略,为风电机组的设计与维护提供了理论支持。

**关键词:** 风电机组; 齿轮传动系统; 高速级轴承; 动态特性; 稳定性

引言: 风电机组作为可再生能源的重要利用方式,其齿轮传动系统的性能直接影响着风能的转换效率与机组的运行可靠性。高速级轴承作为齿轮传动系统的关键部件,其动态特性对系统的整体性能具有重要影响。深入研究高速级轴承的动态特性,对于提高风电机组的运行效率、降低维护成本,具有重要意义。

## 1 高速级轴承动态特性理论基础

### 1.1 轴承动力学基础

轴承,作为机械系统中支撑和传递运动的关键元件,其结构和工作原理是理解其动态特性的起点。高速级轴承通常由内圈、外圈、滚动体和保持架等部分组成。内圈与外圈之间通过滚动体实现相对运动,而保持架则用于均匀分布滚动体,确保其平稳运行。轴承动力学研究的是轴承在受力作用下的运动规律和响应特性。这涉及到轴承内部的接触力学、弹性力学以及摩擦学等多个学科的知识。为了描述轴承的动态行为,需要建立轴承动力学的基本方程。这些方程通常包括运动方程、力平衡方程以及接触变形方程等。求解轴承动力学方程是理解轴承动态特性的关键步骤。由于轴承内部的接触和摩擦非常复杂,因此方程的求解往往需要采用数值方法<sup>[1]</sup>。随着计算机技术的发展,各种数值求解方法如有限元法、有限差分法等被广泛应用于轴承动力学的求解中。这些方法能够模拟轴承在不同工况下的动态响应,为轴承的设计和 optimization 提供有力支持。

### 1.2 动态特性参数分析

在轴承动力学的研究中,动态特性参数是描述轴承动态行为的重要指标。这些参数包括轴承的刚度、阻尼等。刚度是轴承抵抗变形的能力,决定了轴承在受力作用下的变形程度。阻尼则是轴承在振动过程中能量耗散的特性,影响着轴承振动的衰减速度。高速级轴承的动态特性参数对其性能有着显著的影响。刚度的大小直

接影响着轴承的承载能力和稳定性。如果刚度不足,轴承在受力作用下容易发生过大的变形,导致系统的不稳定。而阻尼的大小则决定着轴承振动的衰减速度和幅值。适当的阻尼可以有效地抑制轴承的振动,提高系统的平稳性。除了刚度和阻尼外,还有其他一些动态特性参数也对轴承的性能产生重要影响。例如,轴承的固有频率是轴承在自由振动时的频率,它决定了轴承对外部激励的响应特性。如果外部激励的频率与轴承的固有频率相近,就容易引起轴承的共振现象,导致振动的加剧。在轴承的设计和选型过程中,需要充分考虑其动态特性参数。通过合理的结构设计和材料选择,可以调整轴承的刚度和阻尼等参数,使其满足系统的性能要求。还需要对轴承进行动态性能测试和评估,以确保其在实际工作中的可靠性和稳定性。

## 2 高速级轴承动态特性影响因素

### 2.1 内部因素

在探讨高速级轴承动态特性的影响因素时,内部因素是不可忽视的一环。其中,齿轮啮合刚度变化对轴承动态特性的影响尤为显著。齿轮啮合刚度是齿轮传动系统中一个关键的力学参数,它反映了齿轮在啮合过程中抵抗变形的能力。当齿轮啮合刚度发生变化时,这种变化会直接传递到轴承上,导致轴承所承受的动态载荷发生波动。齿轮啮合刚度的变化可能源于多种原因,如齿轮的制造误差、磨损、安装偏差以及齿轮间的间隙等。这些因素都会导致齿轮在啮合过程中产生不稳定的接触力,进而引发轴承的振动和冲击。特别是在高速运转条件下,齿轮啮合刚度的微小变化都可能对轴承的动态特性产生显著影响,甚至导致系统的失稳。除了齿轮啮合刚度外,轴承自身的结构参数也是影响其动态特性的重要因素。轴承的结构参数包括滚动体的数量、大小、形状,保持架的设计,以及内、外圈的几何尺寸等。这些参数共同决定了轴承内部的接触应

力分布、运动轨迹以及润滑状态,进而影响着轴承的刚度、阻尼和固有频率等动态特性。例如,滚动体的数量和大小会直接影响轴承的承载能力和刚度。增加滚动体的数量或增大其直径,可以提高轴承的承载能力,但可能增加轴承的内部摩擦和热量产生。而保持架的设计则关系到滚动体的均匀分布和稳定运动,对轴承的动态平衡性有着重要影响。

## 2.2 外部因素

除了内部因素外,外部条件也对高速级轴承的动态特性产生着重要影响。其中,风载变化是一个不可忽视的外部因素<sup>[2]</sup>。风电机组作为将风能转化为电能的装置,其运行状态直接受到风载的支配。风载的变化会导致风轮转速和扭矩的波动,这种波动通过齿轮传动系统传递到轴承上,使得轴承所承受的动态载荷发生剧烈变化。特别是在风速突变或湍流强度较大的情况下,风载的变化会更加剧烈和不可预测。这种剧烈的风载变化不仅会对轴承产生较大的冲击载荷,还可能导致轴承的振动加剧和疲劳寿命缩短。在设计风电机组齿轮传动系统时,需要充分考虑风载变化对轴承动态特性的影响,采取有效的措施来降低风载波动对轴承的冲击。发电机负载变化也是影响高速级轴承动态特性的重要外部因素。在风电机组的运行过程中,发电机的负载会随着风速和电网需求的变化而变化。这种负载的变化会导致齿轮传动系统的扭矩和转速的波动,进而对轴承的动态特性产生影响。当发电机负载突然增加时,轴承会受到较大的瞬时冲击载荷,这可能导致轴承的振动加剧和局部应力集中。长期下来,这种频繁的负载变化会加速轴承的磨损和疲劳破坏,降低其使用寿命。因此,在风电机组的设计和运行过程中,需要密切关注发电机负载的变化情况,并采取相应的措施来减轻负载变化对轴承的影响。

## 3 高速级轴承动态特性分析方法

### 3.1 时域分析

时域分析是轴承动态特性分析的基础,直接关注轴承振动信号随时间的变化情况。时域信号的获取是分析的第一步,通常通过传感器实时监测轴承的振动情况,并将振动信号转换为电信号进行记录。这些信号包含了轴承运行状态的丰富信息,是后续分析的基础。在获取时域信号后,需要对其进行处理,以提取有用的特征信息。处理过程可能包括信号的去噪、滤波和归一化等,以确保信号的准确性和可比性。随后通过时域特征参数的提取与分析,可以进一步了解轴承的动态特性。常见的时域特征参数包括均值、方差、峰值、峰峰值、峭度等,它们分别反映了信号的平均水平、波动程度、极值

情况、波动范围以及信号的冲击特性。时域分析的优势在于能够直观地展示轴承振动信号的时间历程,便于观察信号的异常变化和趋势。通过时域特征参数的提取,可以对轴承的运行状态进行初步评估,为后续的频域分析和非线性动力学分析提供基础数据和支持。

### 3.2 频域分析

频域分析是轴承动态特性分析的重要手段,通过将时域信号转换到频域,揭示信号中的频率成分和频谱结构。频域变换方法是频域分析的核心,其中傅里叶变换是最常用的变换方法之一。通过傅里叶变换,可以将时域信号分解为不同频率的正弦和余弦函数的叠加,从而得到信号的频谱图<sup>[3]</sup>。在频域图中,可以清晰地看到信号中各个频率成分的幅值和相位信息。通过频域特征参数的提取与分析,可以进一步了解轴承的动态特性。常见的频域特征参数包括频率成分、幅值谱、相位谱、功率谱密度等,它们分别反映了信号中的频率分布、幅值大小、相位关系以及能量分布情况。频域分析的优势在于能够揭示信号中的频率成分和频谱结构,便于观察信号的周期性和谐波特性。通过频域特征参数的提取,可以对轴承的振动源进行识别,判断轴承是否存在故障或异常,并为故障的诊断和预测提供有力支持。

### 3.3 非线性动力学分析

非线性动力学理论在轴承动态特性分析中发挥着重要作用。轴承作为一个复杂的非线性系统,其动态行为往往表现出非线性特征,如分岔、混沌等。非线性动力学分析通过建立轴承的非线性动力学模型,研究其在不同条件下的动态响应和演化规律。非线性特征的识别与分析是非线性动力学分析的关键。通过实验观测和数值模拟等手段,可以获取轴承的非线性振动信号,并提取其中的非线性特征参数。常见的非线性特征参数包括李雅普诺夫指数、分岔图、庞加莱截面等,它们分别反映了系统的混沌程度、分岔情况以及周期性行为。非线性动力学分析的优势在于能够揭示轴承动态行为中的非线性特征,为轴承的故障诊断和性能优化提供新的思路和方法。通过非线性特征的识别与分析,可以更深入地了解轴承的动态特性,为轴承的设计和制造提供理论指导和技术支持。

## 4 高速级轴承动态特性对系统性能的影响

### 4.1 轴承动态特性对齿轮传动系统稳定性的影响

轴承在齿轮传动系统中不仅承担着支撑和传递载荷的作用,其动态特性还直接影响着系统的稳定性。高速级轴承在运转过程中,由于内部因素(如制造误差、磨损、润滑状态等)和外部因素(如风载变化、发电机负

载变化等)的共同作用,会产生复杂的动态响应。当轴承的动态特性不佳时,如刚度不足、阻尼过小或存在非线性行为,都可能导致齿轮传动系统的失稳。例如,轴承刚度不足会引起齿轮啮合力的波动,进而导致系统振动加剧;阻尼过小则无法有效衰减系统的振动能量,使系统长时间处于振动状态;而非线性行为则可能引发系统的混沌运动,使系统的运动状态变得不可预测。轴承动态特性对齿轮传动系统稳定性的影响还体现在系统的共振现象上。当轴承的固有频率与系统的激励频率相近时,会发生共振,导致系统振动幅值急剧增大,甚至造成系统破坏。在设计和选择轴承时,需要充分考虑其动态特性,确保轴承的固有频率与系统的激励频率避开共振区。为了提高齿轮传动系统的稳定性,可以从改善轴承动态特性入手。一方面,可以通过优化轴承的结构设计、提高制造精度和改善润滑条件来增强轴承的刚度和阻尼;另一方面,可以采用主动控制技术,如安装主动减振器等,来实时调节系统的振动状态,提高系统的稳定性。

#### 4.2 轴承动态特性对系统振动特性的影响

轴承的动态特性直接决定了系统的振动特性。在齿轮传动系统中,轴承的振动是系统振动的主要来源之一。轴承的振动特性不仅影响着系统的噪声水平,还关系着系统的运行平稳性和可靠性。轴承的振动特性主要由其动态响应决定。当轴承受到外部激励时,会产生振动响应,这种响应包括振动幅值、频率成分和相位关系等<sup>[4]</sup>。轴承的振动幅值反映了系统振动的剧烈程度,频率成分则揭示了系统振动的频谱特性,而相位关系则体现了系统各部件之间的振动协调性。轴承动态特性的变化会直接导致系统振动特性的变化。例如,当轴承的刚度降低时,系统的振动幅值会增大,频率成分也会发生变化,可能出现新的振动频率;当轴承的阻尼减小时,系统的振动衰减时间会变长,振动能量难以迅速消散。为了改善系统的振动特性,需要对轴承的动态特性进行精确控制和优化。这包括选择合适的轴承类型、优化轴承的结构参数、改善轴承的润滑条件以及采用先进的振动

控制技术等。通过这些措施,可以有效降低系统的振动水平,提高系统的运行平稳性和可靠性。

#### 4.3 动态特性对轴承寿命的影响及延长寿命的方法与策略

轴承的动态特性还直接影响着其疲劳寿命。在高速运转条件下,轴承承受着复杂的动态载荷,这些载荷会导致轴承内部产生应力集中和微观损伤,进而加速轴承的疲劳破坏。轴承的动态特性对疲劳寿命的影响主要体现在振动和冲击方面。过大的振动幅值和频繁的冲击载荷都会加速轴承的磨损和疲劳破坏。在设计和使用时,需要充分考虑其动态特性,确保轴承能够承受预期的动态载荷。为了延长轴承的寿命,可以采取多种方法和策略。一方面,可以通过优化轴承的结构设计和材料选择来提高其抗疲劳性能;另一方面,可以改善轴承的润滑条件,降低摩擦和磨损;还可以采用先进的监测和诊断技术,及时发现并处理轴承的潜在故障,防止故障进一步恶化。

#### 结束语

本文通过对风电机组齿轮传动系统高速级轴承动态特性的研究,揭示了轴承动态特性对系统性能的重要影响。通过时域、频域及非线性动力学分析方法,可以更全面地了解轴承的动态行为,为轴承的设计与优化提供理论依据。未来,应进一步深入研究轴承动态特性的影响因素,探索更有效的延长轴承寿命的方法与策略,以推动风电机组技术的持续发展。

#### 参考文献

- [1]王剑,兰波,礼钦.风电机组传动系统的故障诊断技术分析[J].集成电路应用,2022,39(09):124-125.
- [2]王磊.风电机组传动系统维护与故障诊断[J].水电水利,2021,(4):86-88.
- [3]芮晓明,谢鲁冰,黄杨森.差动调速风电机组齿轮传动系统动态特性研究[J].热能动力工程,2020,35(1):238-246.
- [4]谭霖,张欣,陈仕祥.风电场风力发电机组运行故障及维护策略研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(09):108-110.