

# 风电齿轮箱滑动轴承失效分析

靳璇

金雷传动技术（苏州）有限公司天津分公司 天津 300110

**摘要：**风电齿轮箱滑动轴承在风力发电系统中起着关键作用，其失效会影响系统稳定运行。磨损失效、疲劳失效和腐蚀失效是常见的失效形式。材料因素、润滑因素以及运行工况因素是导致滑动轴承失效的主要原因。为预防失效，需优化材料选择与制造工艺，加强润滑管理，改善运行工况与维护管理。通过对失效的分析，能为提高风电齿轮箱滑动轴承的可靠性和使用寿命提供理论依据。

**关键词：**风电齿轮箱；滑动轴承；失效

## 引言

在风力发电产业蓬勃发展的当下，风电齿轮箱作为风力发电机组的关键部件，其性能对整个发电系统的稳定性和效率有着重要影响。风电齿轮箱中的滑动轴承，因其在传递动力，增强齿轮箱扭矩密度等方面的重要作用，成为保障齿轮箱正常运行的关键组件。然而，实际运行中，风电齿轮箱滑动轴承会出现磨损失效、疲劳失效和腐蚀失效等问题。本文将对其失效形式、原因进行深入分析，并提出相应的预防措施，以提升风电齿轮箱的可靠性。

## 1 风电齿轮箱滑动轴承概述

风电齿轮箱作为风力发电机组传动系统核心部件，其性能直接影响整机可靠性与效率，而滑动轴承在其中发挥关键承载与减摩作用。风电齿轮箱目前主要在行星级的行星销轴和行星齿轮内孔间应用。滑动轴承通过在轴承表面与行星轮内孔之间形成润滑油膜，实现摩擦副的分离，相比滚动轴承，具有承载能力大、运行平稳、噪声低等优势，尤其适用于重载、低速且对振动控制要求严苛的风电齿轮箱工况。风电齿轮箱中滑动轴承结构类型多样，常见的有径向滑动轴承和推力滑动轴承。径向滑动轴承主要承受齿轮啮合产生的径向力和斜齿轮轴向力产生的倾覆力矩，通常采用轴承套过盈在销轴的形式或激光熔覆合金等材料到销轴的设计，需精准匹配销轴和齿轮内孔尺寸、转速及载荷特性，轴承材料多选用具有良好减摩性、耐磨性及抗胶合性能的合金材料，如锡基、铅基轴承合金，或在钢背表面浇铸巴氏合金等复合材料。推力滑动轴承则用于承受轴向载荷，保障齿轮传动系统的轴向定位精度，其工作原理基于流体动压效应，通过润滑油的楔形流动建立承载油膜，在风电齿轮箱应用中，考虑齿轮箱行星级装配方式，推力轴承还可能承受行星轮等重力影响。滑动轴承的润滑系统对其性能

能发挥至关重要。采用压力循环润滑方式，润滑油经油泵加压后输送至轴承各润滑点，在润滑减摩的同时带走因摩擦产生的热量，维持轴承工作温度稳定。润滑油的选择需综合考虑工作温度、载荷大小、转速等因素，通常选用高粘度指数、良好抗氧化性和抗磨性能的专用齿轮油。滑动轴承的油膜厚度、压力分布及稳定性直接决定其承载能力与运行寿命，需借助流体力学计算、有限元分析等手段进行精确设计与优化，确保在复杂多变的风电运行工况下，滑动轴承能够可靠运行，降低齿轮箱故障率，提升风力发电机组整体效能。

## 2 风电齿轮箱滑动轴承常见失效形式

### 2.1 磨损失效

风电齿轮箱滑动轴承在运行过程中，轴颈与轴承表面间因相对运动产生摩擦，磨损失效是其常见的失效形式之一。在实际工况下，轴承表面承受着复杂的载荷，包括径向力、轴向力和交变应力，同时运行环境中的尘埃、金属碎屑等硬质颗粒会侵入轴承间隙，加剧磨损进程。滑动轴承与轴颈的接触表面微观上并非绝对光滑，存在无数微小的凸起和凹陷，这些微观不平度在相互运动时会发生切削和挤压，导致材料逐渐脱落。随着磨损的发展，轴承的原始尺寸和形状发生改变，配合间隙逐渐增大，使得轴承的承载能力下降，运转精度降低。磨损产生的碎屑又会作为磨粒进一步加剧磨损，形成恶性循环。对于风电齿轮箱这种长期处于高转速、重载荷的设备，磨损会导致轴承与轴颈之间的油膜厚度发生变化，当油膜无法有效隔离两摩擦表面时，金属直接接触产生的磨损会更加剧烈，最终可能引发轴承过热、振动加剧等问题，严重影响风电齿轮箱的正常运行和使用寿命<sup>[1]</sup>。

### 2.2 疲劳失效

风电齿轮箱工作时，滑动轴承承受着周期性变化的载荷，这种交变载荷会使轴承材料内部产生循环应力。

在循环应力的反复作用下,轴承材料内部的晶体结构逐渐发生变化,微观裂纹开始萌生。这些裂纹通常首先出现在材料表面或亚表面的应力集中区域,如加工刀痕、材料缺陷处等。随着运行时间的增加,裂纹在循环应力的持续作用下不断扩展,裂纹尖端区域的应力强度因子逐渐增大。当裂纹扩展到一定程度后,轴承的有效承载面积减小,剩余部分无法承受正常的工作载荷,最终导致轴承发生疲劳断裂。疲劳失效具有突发性,在失效前可能没有明显的征兆,但其失效过程是一个渐进的过程。风电齿轮箱运行过程中,轴承的工作温度波动、润滑油性能变化等因素也会影响疲劳裂纹的萌生和扩展速度。一旦滑动轴承发生疲劳失效,将直接导致风电齿轮箱无法正常运转,引发停机故障,甚至可能造成整个风力发电机组的重大损坏。

### 2.3 腐蚀失效

风电齿轮箱滑动轴承的腐蚀失效与运行环境和润滑油介质密切相关。在风力发电场的实际运行环境中,空气中的水分、氧气以及腐蚀性气体(如二氧化硫、硫化氢等)会侵入轴承系统。当轴承表面与这些腐蚀性介质接触时,金属材料会发生化学反应或电化学反应,导致材料腐蚀。润滑油在使用过程中也会发生氧化、分解等化学反应,产生酸性物质,这些酸性物质会加速轴承的腐蚀过程。滑动轴承材料的化学成分和组织结构对其耐腐蚀性有着重要影响。例如,某些金属材料在特定的腐蚀环境下更容易发生点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀现象。腐蚀会破坏轴承表面的完整性,降低材料的力学性能,使轴承表面出现麻点、凹坑等缺陷。随着腐蚀程度的加深,轴承的尺寸精度和表面质量受到严重影响,导致轴承与轴颈之间的配合性能下降,增加摩擦和磨损,进而影响风电齿轮箱的传动效率和稳定性,缩短轴承的使用寿命<sup>[2]</sup>。

## 3 风电齿轮箱滑动轴承失效原因分析

### 3.1 材料因素

风电齿轮箱滑动轴承的材料性能直接决定其服役寿命与可靠性。轴承合金的选择需兼顾强度、减摩性和抗疲劳性能,以应对复杂多变的载荷工况。传统锡基和铅基巴氏合金虽具备良好的减摩性和顺应性,但在高载荷、高转速工况下,其有限的屈服强度和硬度导致表面易发生塑性变形与粘着磨损,尤其在承受冲击载荷时,合金表层易出现微裂纹并迅速扩展,引发剥落失效。铜基合金凭借较高的强度和导热性,在高温环境下仍能保持稳定的力学性能,但其较低的减摩性能会加剧摩擦副间的磨损。材料的微观组织对失效机制有显著影响,若

铸造过程中存在气孔、夹杂物等缺陷,或热处理工艺不当导致晶粒粗大、成分偏析,将形成应力集中源,在循环载荷作用下加速疲劳裂纹萌生。当轴承材料与轴颈材料的匹配性不佳时,两者硬度差不合理,会使软质轴承材料过度磨损,或硬质颗粒嵌入轴承表面形成磨粒,进一步加剧磨损。

### 3.2 润滑因素

润滑状态是影响风电齿轮箱滑动轴承失效的关键因素。良好的润滑能够在轴承与轴颈表面形成稳定的润滑油膜,有效隔离金属接触,降低摩擦系数并减少磨损。在实际运行中,润滑油的性能和润滑条件易受多种因素干扰。润滑油的粘度是决定油膜形成能力的核心参数,粘度过低,难以承受高载荷,易导致油膜破裂,引发边界润滑或干摩擦;粘度过高,则会增加摩擦功耗,产生过多热量,导致油温升高、油膜稳定性下降。润滑油的抗氧化性能、抗磨性能和极压性能也至关重要,长期运行中,润滑油在高温、氧气和金属催化作用下会发生氧化变质,生成酸性物质和油泥,腐蚀轴承表面并堵塞润滑通道。若润滑油中抗磨添加剂耗尽,在高载荷区域无法形成有效的边界润滑膜,金属表面将直接接触,造成剧烈磨损。润滑方式和供油量同样影响润滑效果,供油不足或润滑系统故障会导致局部润滑不良,而润滑过度则可能造成油品浪费和污染<sup>[3]</sup>。

### 3.3 运行工况因素

风电齿轮箱滑动轴承的运行工况复杂多变,直接影响其失效进程。在不同风速和负载条件下,轴承承受的载荷大小和方向不断变化,形成周期性的交变载荷。低风速时,轴承可能因载荷不足导致润滑油膜难以充分形成,产生混合润滑状态;高风速时,瞬间冲击载荷会使油膜局部破裂,加剧磨损。转速波动也会对轴承性能产生影响,低速运行时,油膜厚度较薄,难以有效隔离摩擦副;高速运行则会增加润滑油的搅动阻力,导致油温升高,油膜粘度下降。温度和振动是运行工况中的重要影响因素,风电设备运行环境温度变化大,低温会使润滑油粘度增加,流动性变差;高温则会加速润滑油老化和油膜失效。设备运行过程中的振动,不仅会破坏润滑油膜的稳定性,还会在轴承内部产生附加应力,与交变载荷叠加,加速疲劳裂纹的形成与扩展。齿轮啮合产生的冲击振动,会通过轴系传递至滑动轴承,引发轴承座松动、配合面磨损等问题。

## 4 风电齿轮箱滑动轴承失效预防措施

### 4.1 优化材料选择与制造工艺

(1) 滑动轴承材料需具备良好的减摩性、耐磨性与

抗疲劳性能,针对风电齿轮箱复杂工况,应优先选用高纯度、低杂质的铜基合金或铝基合金材料,通过真空冶炼技术提升材料致密度,降低内部气孔与夹杂物对轴承性能的影响。采用粉末冶金工艺制备轴承材料时,严格控制粉末粒度与压制密度,经高温烧结处理形成均匀微观组织,增强材料的机械强度与韧性。(2)制造工艺的优化直接影响轴承的服役寿命,精密加工过程中,需严格控制滑动轴承与轴,轴承座或齿轮内孔的配合公差,采用高精度数控车床与磨床进行加工,保证工作表面粗糙度 $R_a$ 值处于 $0.4\text{--}0.8\mu\text{m}$ 之间,减少摩擦副间的表面接触应力。通过表面硬化处理技术,如离子氮化、化学气相沉积等,在轴承表面形成高硬度、低摩擦系数的硬化层,有效提升表面耐磨性与抗腐蚀能力。(3)装配过程对轴承性能同样关键,精确控制轴承与轴颈、轴承座或齿轮内孔的装配间隙,避免过盈或间隙过大导致的异常磨损与振动。采用热装或冷装工艺确保轴承安装精度,装配后进行动平衡测试,消除因装配误差引起的不平衡力,保障轴承在高速运转下的稳定性与可靠性。

#### 4.2 加强润滑管理

(1)合适的润滑剂是保障滑动轴承正常运行的关键,根据风电齿轮箱运行温度、载荷与转速等工况参数,选择具有高粘度指数、良好抗氧化性与抗磨性能的润滑油。针对低温环境,采用低倾点润滑油,确保在寒冷气候下仍能保持良好的流动性与润滑效果;对于高载荷工况,添加含硫、磷等极压抗磨添加剂,在摩擦表面形成坚固的润滑膜,降低磨损。(2)润滑系统的设计与维护直接影响润滑效果,优化润滑系统管路布局,减少油路弯折与阻力,确保润滑油能够均匀、稳定地输送至轴承各润滑点。安装高精度过滤器,过滤精度达到 $3\text{--}5\mu\text{m}$ ,有效去除润滑油中的金属碎屑、灰尘等杂质,防止颗粒磨损轴承表面。定期检测润滑油的理化性能,包括粘度、酸值、水分等指标,及时更换性能下降的润滑油。(3)智能润滑技术的应用可显著提升润滑管理水平,采用油气润滑或油雾润滑系统,精确控制润滑油的供给量与供给频率,避免过量润滑导致的油品浪费与轴承发热问题。通过安装温度、压力传感器,实时监测轴承润滑状态,当出现异常时及时报警并调整润滑参数,实现润滑系统的智能化、精准化管理。

#### 4.3 改善运行工况与维护管理

(1)合理控制风电齿轮箱的运行工况是预防滑动轴承失效的重要措施,避免齿轮箱长期在过载、超速或振动过大的工况下运行,通过优化风力发电机组的控制策略,使齿轮箱在额定工况附近稳定运行。实时监测齿轮箱的输入扭矩、转速与温度等关键参数,精准捕捉异常信号,当发现工况异常时,及时调整机组运行状态,降低轴承承受的异常载荷与应力。(2)完善的维护管理体系能够及时发现并处理轴承潜在故障,制定科学的维护计划,定期对齿轮箱进行解体检查,直观观察滑动轴承的磨损情况,测量轴承间隙与表面形貌变化。利用无损检测技术,如超声波探伤、红外热成像等,对轴承内部缺陷与发热部位进行检测,提前发现早期故障隐患。(3)故障诊断技术的应用可实现轴承状态的预测性维护,采用振动分析、油液分析等手段,对轴承运行状态进行实时监测与分析。通过建立轴承故障特征数据库,将监测数据与正常状态数据进行对比,运用机器学习算法对轴承剩余寿命进行预测,提前安排维护计划,避免因轴承失效导致的停机损失与设备损坏<sup>[4]</sup>。

#### 结语

综上所述,风电齿轮箱滑动轴承的失效形式多样,磨损失效、疲劳失效和腐蚀失效较为常见。材料、润滑和运行工况等因素是导致其失效的主要原因。通过优化材料选择与制造工艺、加强润滑管理以及改善运行工况与维护管理等预防措施,可有效降低滑动轴承的失效概率,提高其可靠性和使用寿命。对风电齿轮箱滑动轴承失效的研究和预防,对推动风力发电产业的健康发展具有重要意义,后续仍需持续关注并深入研究。

#### 参考文献

- [1]王洲,吴森杰,陶友瑞.风电齿轮箱滑动轴承润滑性能及可靠性分析[J].润滑与密封,2024,49(9):171-177.
- [2]朱雯慧,马孝育,倪艳光,等.考虑弹性变形的风电齿轮箱滑动轴承润滑性能分析[J].润滑与密封,2025,50(1):155-162.
- [3]熊永强,张先江.风电齿轮箱滑动轴承热弹流润滑分析[J].润滑与密封,2024,49(11):183-189,196.
- [4]郑宽,朱琦,吴晨晨,等.风电齿轮箱滑动轴承脱黏缺陷超声检测[J].轴承,2024(9):92-99.