

大型风电机组主轴轴承的可靠性提升策略

龚 洪 马志辉

重庆海装风电工程技术有限公司 重庆 404100

摘要：本文聚焦大型风电机组主轴轴承可靠性提升。先分析其工作特性与失效机理，包括复杂严苛的工作环境、多向复合载荷，以及疲劳剥落、磨损等多种失效模式及多因素耦合的失效机理；接着提出核心策略，涵盖设计、制造装配、润滑密封、运维及极端工况适应性强化等方面；最后构建“设计-制造-运维-管理”全链条保障体系，并展望未来前沿技术融合、新材料与新工艺突破，以及大型化与智能化趋势下的可靠性技术升级方向。

关键词：大型风电机组；主轴轴承；可靠性提升

引言：在风力发电行业蓬勃发展的当下，大型风电机组成为能源领域的关键设备。主轴轴承作为其核心传动部件，其可靠性直接影响机组运行效率与稳定性。然而，主轴轴承工作环境复杂，承受多向复合载荷，面临诸多失效风险。提升其可靠性，不仅能降低运维成本、延长机组寿命，还能保障风电场的稳定发电，对推动风电行业可持续发展意义重大。因此，深入探究大型风电机组主轴轴承可靠性提升策略具有重要的现实意义。

1 大型风电机组主轴轴承的工作特性与失效机理

1.1 主轴轴承的工作环境及与载荷特性

大型风电机组主轴轴承作为核心传动部件，工作环境极具复杂性与严苛性。其多部署于野外、海上等开放场景，长期承受极端温度波动、湿度变化、风沙侵蚀及盐雾腐蚀，海上机组还需应对强腐蚀性介质与高频振动的双重影响。载荷特性方面，主轴轴承需承受多向复合载荷，包括叶片传递的轴向力、径向力及倾覆力矩，且载荷具有显著随机性与波动性——风速的瞬时变化会导致载荷急剧波动，启动与停机阶段还会产生冲击载荷^[1]。同时，主轴转速较低且运行周期长，年均运行时长通常超7000小时，长期处于低速重载工况，易引发接触应力集中、润滑失效等问题，对轴承结构强度与稳定性提出极高要求。

1.2 主轴轴承常见失效模式与特征

大型风电机组主轴轴承常见失效模式多样，且各模式具有典型特征。疲劳剥落是最普遍的失效形式，表现为轴承滚道或滚动体表面出现周期性剥落坑，伴随运行噪音增大、振动加剧，本质是循环接触应力作用下金属表层裂纹萌生、扩展的结果。磨损失效多由润滑不足、异物侵入导致，特征为接触面出现划痕、磨损量超标，严重时会造成配合间隙过大，引发冲击载荷放大。腐蚀失效在潮湿、盐雾环境中频发，表现为表面锈蚀、点

蚀，破坏金属表层完整性，加速疲劳裂纹产生。另外，还存在胶合失效，多因瞬时高温导致金属表面粘连，冷却后剥离形成损伤；保持架断裂失效则多由冲击载荷、装配偏差引发，会直接导致轴承卡死停运，各失效模式相互关联，往往一种失效发生后诱发其他失效，加剧故障严重性。

1.3 失效机理与关键影响因素分析

主轴轴承失效机理本质是多因素耦合作用下，结构性能逐渐劣化直至丧失功能的过程。疲劳失效机理为接触应力反复作用下，金属内部位错滑移形成疲劳源，裂纹沿最大剪应力方向扩展，最终导致表层剥落。磨损失效机理包括黏附磨损、磨粒磨损与腐蚀磨损，黏附磨损源于接触面金属原子吸附，磨粒磨损由异物划伤表面，腐蚀磨损则是腐蚀与磨损的协同作用。关键影响因素可分为四类：一是载荷因素，过载、冲击载荷及载荷分布不均会加速失效；二是润滑因素，润滑脂劣化、供油不足或污染会破坏润滑膜，增大摩擦磨损；三是环境因素，温度、湿度、腐蚀介质直接影响材料性能与润滑效果；四是制造装配因素，加工精度不足、表面粗糙度超标、装配偏差会导致应力集中，降低轴承承载能力。此外，材料性能、运行维护水平也对失效进程产生重要影响，多因素耦合作用下使失效机理更趋复杂。

2 大型风电机组主轴轴承可靠性提升的核心策略

2.1 设计阶段的可靠性优化

设计阶段作为提升主轴轴承可靠性的源头环节，必须紧密结合其实际工况特性展开多维度优化。在结构优化设计方面，运用先进的有限元分析技术，精准模拟主轴轴承在实际载荷作用下的应力分布情况。依据模拟结果，对滚道曲率半径进行细致调整，优化滚动体的尺寸与数量搭配，合理规划保持架的结构形式，以此提升轴承的抗冲击能力，确保载荷能够均匀分布。特别是针

对海上风电机组,考虑到其面临更为复杂恶劣的环境,要着重强化密封结构设计,防止海水、盐雾等侵蚀性介质进入轴承内部。材料选型优化也至关重要,挑选高强度、高韧性且耐腐蚀的轴承钢,像渗碳轴承钢、不锈钢等。通过精细的热处理工艺,进一步提升材料的硬度、耐磨性与疲劳强度。同时,对材料的金相组织进行优化,减少内部缺陷,从材料本质上保障轴承的可靠性^[2]。开展寿命预测与可靠性设计,基于详细的载荷谱以及环境参数,运用疲劳寿命计算公式精准预测轴承的使用寿命。引入冗余设计理念,预留一定的安全系数,避免因载荷波动引发失效。并且结合仿真技术对设计方案进行全面验证,从设计源头降低失效风险。

2.2 制造与装配过程的质量管控

制造与装配过程的质量管控,对主轴轴承的实际可靠性起着决定性作用,因此需要构建一套全流程的管控体系。在制造环节,严格把控原材料质量是关键。对轴承钢进行全面的成分检测与探伤检测,一旦发现不合格原料,立即剔除,从源头上杜绝质量隐患。优化加工工艺,采用高精度磨削、抛光技术,严格控制滚道与滚动体的表面粗糙度以及尺寸精度,最大程度减少加工误差。同时,加强热处理过程管控,精准控制温度、保温时间以及冷却速度,确保材料性能稳定可靠。装配环节同样不容忽视,搭建洁净的装配环境,防止异物侵入轴承内部。采用专用装配工具,精确控制装配力矩与配合间隙,保证轴承与主轴、机座的装配精度达到设计要求。装配完成后,进行空载试验、振动检测与密封性测试,及时发现并整改装配过程中存在的缺陷。建立完善的质量追溯体系,对每批次轴承的制造、装配数据进行详细记录,实现全生命周期质量可追溯,从过程层面为轴承可靠性提供坚实保障。

2.3 润滑与密封系统的可靠性提升

润滑与密封系统作为主轴轴承稳定运行的重要保障,需要有针对性地提升其可靠性。在润滑系统优化方面,要根据主轴轴承的具体工况,精心挑选适配的润滑脂或润滑油。优先选用具备耐高温、耐低温、抗老化、抗污染等特性的润滑介质,以适应复杂多变的工作环境。同时,优化润滑方式,采用自动定量润滑系统,能够精准控制润滑剂量与供油周期,有效避免润滑不足或过度润滑的情况发生。定期对润滑介质进行检测,一旦发现劣化、污染现象,及时更换,并清理润滑管路与油腔,确保润滑系统始终保持通畅。密封系统提升方面,采用复合密封结构,将迷宫密封、接触式密封与非接触式密封的优势有机结合,增强密封效果,有效抵御风

沙、雨水、盐雾等侵蚀性介质的侵入。优化密封件材料,选用耐磨损、耐腐蚀且弹性良好的材料,延长密封件的使用寿命。定期检查密封件状态,一旦发现老化、损坏,立即更换,并加强密封部位的防护,避免外力损伤。通过润滑与密封系统的协同优化,减少失效诱因,保障主轴轴承的稳定运行。

2.4 运维阶段的全生命周期管控

运维阶段的全生命周期管控是延长主轴轴承寿命、提升可靠性的关键。建立常态化监测体系,在轴承部位安装振动传感器、温度传感器,实时监测振动值、温度变化等关键参数,结合大数据分析技术,构建故障预警模型,及时识别早期失效征兆,实现预防性维护。制定科学的维护计划,定期开展润滑补充、密封检查、清洁保养等常规维护,根据机组运行时长与工况,合理安排轴承拆解检修,重点检查滚道、滚动体、保持架的状态,及时修复或更换受损部件。加强运维人员专业培训,提升其对故障的识别、判断与处理能力,规范运维操作流程,避免因人为操作失误导致轴承损伤。建立运维数据档案,记录监测数据、维护内容、故障处理情况,通过数据分析优化维护策略,实现从“事后维修”向“预防性维护”“全生命周期管控”的转变,最大化提升轴承可靠性。

2.5 极端工况的适应性强化

针对极端工况对主轴轴承的考验,需从结构、材料、防护等方面强化适应性。极端温度工况下,优化轴承散热结构,增设散热装置,选用耐高低温的材料与润滑介质,避免温度过高或过低导致轴承性能下降;强风冲击工况下,优化轴承缓冲结构,增设阻尼装置,吸收冲击能量,减少冲击载荷对轴承的影响,同时强化轴承与周边部件的连接强度^[3]。海上盐雾腐蚀工况下,采用防腐涂层技术,对轴承表面进行防腐处理,选用耐腐蚀材料制造轴承部件,优化密封结构,防止盐雾侵入;风沙工况下,强化密封防护,增设防尘装置,定期清理轴承周边风沙堆积物,避免磨粒磨损。另外,通过模拟极端工况开展试验,验证轴承的适应性,针对试验中暴露的问题优化设计与防护方案,提升轴承在极端工况下的运行稳定性与可靠性。

3 大型风电机组主轴轴承可靠性提升的保障体系与展望

3.1 保障体系构建

构建完善的保障体系是主轴轴承可靠性提升的重要支撑,需形成“设计-制造-运维-管理”全链条保障机制。建立技术保障体系,组建专业研发团队,依托高

校、科研院所开展产学研合作,攻克轴承设计、材料、制造等核心技术,完善技术标准与规范,为可靠性提升提供技术支撑。搭建质量保障体系,严格执行ISO质量标准,建立从原材料采购到产品出厂的全流程质量检测机制,强化制造、装配过程的质量管控,确保产品质量达标。构建运维保障体系,搭建区域化运维服务中心,配备专业运维设备与人员,建立远程监测与故障诊断平台,实现运维服务的高效化、精准化。建立管理保障体系,完善管理制度与考核机制,加强对技术研发、生产制造、运维服务等环节的管理,同时建立供应链协同机制,确保上下游企业的质量与技术同步,形成全方位、全链条的可靠性保障体系。

3.2 未来发展展望

3.2.1 前沿技术融合

未来,前沿技术与主轴轴承的深度融合将成为可靠性提升的重要方向。人工智能与大数据技术将广泛应用于轴承状态监测与故障诊断,通过深度学习算法精准识别复杂故障模式,实现故障的提前预判与智能决策;数字孪生技术将构建轴承虚拟仿真模型,实时映射物理轴承的运行状态,模拟不同工况下的性能变化,为设计优化、运维方案制定提供精准支撑。此外,物联网技术将实现轴承全生命周期数据的实时采集与传输,打通设计、制造、运维各环节的数据壁垒,实现数据驱动的全流程优化;5G技术的应用将提升远程监测与控制的实时性,助力大型风电场的智能化运维,通过多技术融合,推动轴承可靠性向智能化、精准化方向升级。

3.2.2 新材料与新工艺

新材料与新工艺的突破将为主轴轴承可靠性提升提供核心动力。材料方面,将重点研发高性能复合材料、陶瓷材料等新型轴承材料,这类材料具有更高的强度、耐磨性、耐腐蚀性与耐高温性,能显著提升轴承在极端工况下的使用寿命;同时,通过材料表面改性技术,如离子注入、激光熔覆等,进一步优化轴承表面性能,增强抗磨损、抗腐蚀能力^[4]。工艺方面,将发展高精度成型工艺、精密加工工艺与绿色制造工艺,提升轴承加工精度与一致性,减少加工缺陷;3D打印技术将用于轴承复

杂结构的制造,实现个性化设计与快速成型,同时降低制造成本,新材料与新工艺的结合将从根本上突破传统轴承的性能瓶颈。

3.2.3 大型化与智能化趋势下的可靠性技术升级方向

随着风电机组向大型化、智能化方向发展,主轴轴承可靠性技术需同步升级适配。大型化趋势下,轴承尺寸与载荷持续增大,需研发大尺寸、高强度轴承结构,优化载荷分布设计,提升抗冲击能力与承载稳定性,同时开发适配大型轴承的制造、装配与运维技术,解决大尺寸轴承的加工精度与运维难题。智能化趋势下,需推动轴承向智能自感知、自诊断、自调节方向发展,集成更多高精度传感器,实现运行状态的实时感知与数据采集;结合风电场智能化运维需求,开发轴承与机组的协同控制技术,实现基于轴承状态的机组运行参数优化。另外,需建立适配大型化、智能化机组的轴承可靠性评价体系,完善技术标准,推动可靠性技术与机组发展趋势同频共振,为大型智能风电机组的稳定运行提供保障。

结束语

大型风电机组主轴轴承可靠性提升是一项系统且长期的工作。通过从设计、制造装配、润滑密封、运维到极端工况适应性等多方面的策略实施,以及构建完善的保障体系,可有效提高轴承可靠性。展望未来,前沿技术融合、新材料与新工艺突破,以及适应大型化与智能化趋势的可靠性技术升级,将为主轴轴承可靠性提升带来新机遇。持续深入研究与实践,将推动风电行业朝着更高效、稳定、可持续发展的方向发展。

参考文献

- [1]秦子川.苏宏升.基于改进威布尔分布的风电机组关键部件可靠性评估[J].电测与仪表,2021,58(03):68-73.
- [2]张世福.李斐斐.何海涛.永磁技术在大型风力发电机组中的研究与应用[J].微特电机,2022,50(11):61-65.
- [3]王勇.刘颖明,张鹏.风电机组电气控制系统故障分析与诊断[J].电力自动化设备,2021,41(8):210-216.
- [4]李庆.赵斌.陈晓峰.海上风电机组变流器硬件可靠性优化设计[J].电工技术学报,2023,38(5):1201-1210.