

海上风电轴承关键技术研究及应用

洛阳轴研科技有限公司董事长 王子君

摘要：随着全球能源需求的增长与环境保护意识的提升，可再生能源的开发与利用成为国际社会关注的焦点。作为最具发展潜力的清洁能源之一，风能发电尤其是海上风电技术得到了迅速的发展。然而，海上风电装备的发展对核心部件轴承提出了更高的要求，需要同时满足长寿命、高承载、高可靠性、智能化、高效化运行的特点，其性能直接影响到整个风电机组的稳定性、故障率和维修成本。因此，针对海上风电轴承的技术研究具有重要的理论意义和实用价值。

1 海上风电轴承失效模式分析

海上风力电机在运行承受不定风力所产生的冲击载荷，启停频繁、间歇工作，同时极易受沙尘、水雾、冰冻等污染。其中，风电机组齿轮箱故障 80% 起源于轴承。海上风电轴承最常见的失效模式有疲劳剥落、微动磨损、电腐蚀、装配不当^[1-2]。

1.1 疲劳剥落

疲劳剥落通常发生在轴承滚动接触面，由于反复承受高负荷的压力，导致材料表面产生微小裂纹，这些裂纹逐渐扩展，最终形成片状或颗粒状的金属脱落^[3]。疲劳剥落不仅会降低设备的性能和效率，增加维护成本，还可能带来安全风险和经济损失。

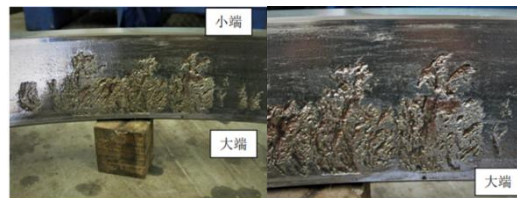


图 1 轴承偏载造成提前疲劳

1.2 微动磨损

微动磨损通常发生在两个接触面之间存在相对微小运动的情况下。这种微小的相对运动导致接触表面之间的保护膜破损，进而引起金属间的直接接

触，产生磨损。随着时间的推移，这些磨损逐渐积累，最终可能导致轴承性能下降，甚至完全失效。



图 2 轴承微动磨损引起的套圈损伤

1.3 电腐蚀

电腐蚀失效主要由于电流通过轴承内部而引发。当电流从一个轴承套圈流到另一个轴承套圈时，会在滚动体与滚道之间的接触点产生火花放电现象，这种放电可以局部熔化金属表面，形成凹坑或烧伤痕迹，从而破坏轴承的平滑表面，加速磨损过程，最终导致轴承失效^[4]。

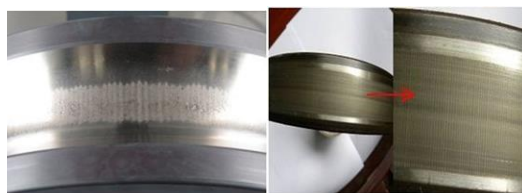


图 3 轴承因电腐蚀产生的“搓衣板”纹

1.4 装配不当

错误的安装方法或不合适的预紧力设置会导致轴承过早损坏。过紧的预紧力会使轴承内圈和外圈之间的接触压力增大，加速磨损；而过松则可能导致轴承在运转过程中产生松动，引起异常振动和噪音。此外，装配时的不干净环境也可能引入杂质，影响轴承的使用寿命。

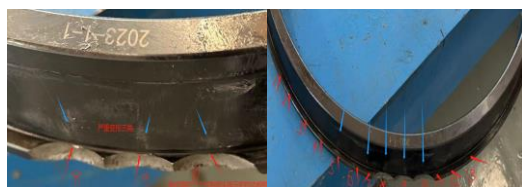


图 4 安装倾斜导致挡边崩裂

2 海上风电轴承自主化正向优化设计

2.1 海上工况大规模时间序列多维载荷数据的缩减处理

借助主机厂家全景监测系统，针对海上台风工况大规模时间序列多维载

荷数据，研究大规模载荷数据的分布规律；根据时间序列载荷作用的疲劳损伤累积的机理，开展时间序列载荷的缩减与合成，为风电轴承力学行为的研究和优化设计提供载荷输入。

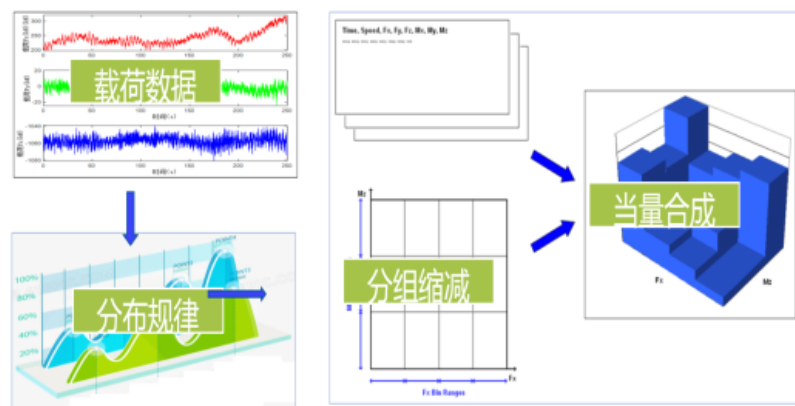


图 5 时间序列载荷缩减与合成

2.2 多工况耦合动、静态建模与精确仿真分析

针对海上风电轴承工况的强烈随机性和不确定性，建立多工况耦合动、静态仿真模型，研究滚子-滚道接触、润滑状态、摩擦打滑分布，研究主轴轴承的摩擦热生成机理和三维热传导分析方法^[5]。以轴承及其相关联的主机结构(轮毂、转子、定子和机架)作为整体进行建模，研究轴向负游隙、轴承温度分布、轴承安装配合等对轴承的应力分布和寿命的影响规律。

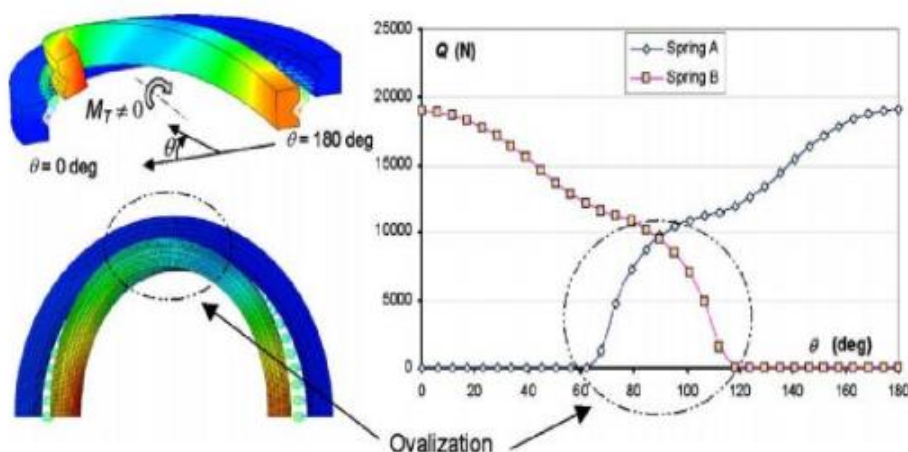


图 6 动、静态耦合仿真分析

2.3 关键参数优化及一体化设计协同软件开发

基于载荷谱和仿真分析，进行最佳载荷分布的接触面修型轮廓设计及长

寿命设计、基于极限结构的轻量化设计、滚子与挡边接触的低发热三凸设计、复杂工况下与主机的协同设计。

研究在复杂工况下一体化动力学分析的方法和协同设计技术，开发主轴轴承“参数化三维设计-力学分析-二维工程图生成”的一体化协同设计软件，实现风电主轴轴承的精准、高效的优化设计。

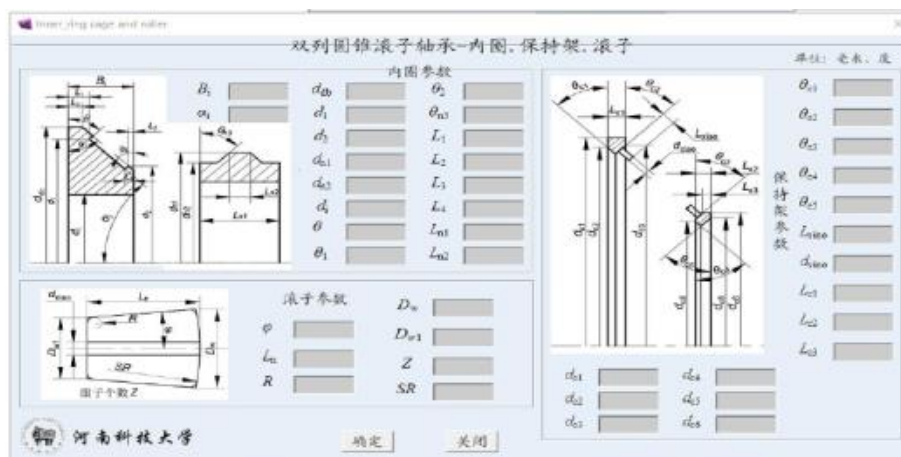


图 7 一体化设计协同软件

3 大尺寸轴承表面完整性抗疲劳制造技术

3.1 表面完整性模型及加工控制理论

表面完整性参数包括表面粗糙度、残余应力、微观结构和表面硬度等，这些参数的优劣直接关系到轴承的摩擦磨损特性、承载能力、运转效率以及使用寿命。通过合理选择和优化工艺参数，可以有效地调控轴承表面的完整性，进而提升其使用性能。

为了实现对轴承表面完整性的精准控制，建立基于表面完整性的“车-磨-抛”精密加工控制理论及制造模型，对每个环节的工艺参数进行科学计算和优化，确保从粗加工到精加工再到超精加工的每一步都符合预期的表面完整性要求。此外，该理论还结合了先进的检测技术和反馈机制，实现了对加工过程的实时监控与调整，从而保证了最终产品的高质量标准。

3.2 材料与热处理关键技术

结合热力学、材料科学、机械工程等多个学科的知识，通过计算机模拟

来精确预测材料在热处理过程中的行为，建立材料热处理过程多场耦合仿真模型。微量元素不仅直接影响到材料本身的性能，还能够通过影响材料的微观结构间接地改变轴承的工作性能。了解并掌握微量元素如何从材料层面影响到最终产品的性能传递，对于开发出更加高效、耐用的轴承产品至关重要。

针对不同的热处理工艺，建立相应的数学模型。这些模型需要能够准确地预测在整个热处理过程中材料的温度变化、化学成分分布、微观组织演变、内部应力状态及其对外部载荷的响应等。通过这样的建模工作，可以在实际生产前就对各种可能的工艺参数进行虚拟试验，选择最优方案，从而提高新材料开发的效率和成功率^[6]。

购置先进的加工和检测设备是进一步提升热处理技术应用水平的重要环节。采用高精度的热处理炉和硬度测试仪，可以确保材料在经过热处理后达到理想的硬度分布，避免出现软带现象。利用 X 射线衍射、扫描电子显微镜等高端检测设备，还可以对材料的微观结构进行深入分析，为后续的工艺改进和技术研发提供宝贵的数据支持。

3.3 轴承关键零部件的抗疲劳制造技术

大尺寸轴承的套圈滚道是承受负载的主要部分，其表面质量直接影响到轴承的承载能力和寿命。通过采用特殊的热处理技术，可以形成一层均匀的表面变质层，这层材料具有优异的抗疲劳性能，能够显著提升轴承的使用寿命。

三凸磨削是一种先进的加工方法，它能够实现挡边的精确成型，确保每个接触面都达到最佳的配合状态。这种工艺不仅提高了轴承的旋转精度，还增强了其在高负荷条件下的稳定性。通过优化磨削参数，可以有效控制加工过程中的热变形，保证挡边的几何形状和尺寸公差，进而提升整体性能。

在大尺寸复杂结构轴承的装配过程中，由于各组件之间存在复杂的相互作用，任何微小的误差都可能被放大，导致最终产品的性能下降。通过建立

精确的数学模型，模拟装配过程中的误差传递路径，可以预先识别潜在的问题点，并通过调整装配顺序、使用专用工具和夹具等方式来最小化累积误差，确保成品的一致性和可靠性，形成基于误差传递规律的大尺寸复杂结构轴承精密装配规范。

3.4 变工况风电机组轴承润滑及表面处理技术

变工况风电机组在运行过程中会面临复杂多变的工作条件，为了保证大尺寸低速重载轴承在恶劣工况下的可靠性和长寿命，轴承润滑脂不仅需要具有良好的润滑性能，还必须具备优异的抗氧化、抗水解和耐温性能，以适应风电机组在各种极端条件下的运行需求。

为改善轴承的润滑特性和延长其使用寿命，新型材料和技术的应用应运而生。DLC 涂层技术可以显著降低大尺寸滚动体的摩擦系数，提高其耐磨损能力^[7]。WC/C 技术通过在表面形成一层硬质碳化钨层来增强轴承的抗疲劳强度，减少磨损，从而延长了轴承的使用寿命。对齿轮箱轴承进行发黑处理，可以在轴承表面形成一层致密的氧化膜，这层膜不仅可以提高轴承的防腐蚀能力，还能有效吸收润滑油中的水分，防止水分侵蚀导致的锈蚀和早期失效

^[8]。

4 风电主轴轴承智能检测系统

风电主轴轴承智能检测系统能够更好地实现对风电主轴轴承运行状态的实时监测，满足现代风电机组对高效、精准维护的需求。监测系统主要解决三大问题：一是主轴轴承安装，可以通过系统的传感器检测轴承安装是否倾斜，目标游隙是否准确装配到位；二是对轴承的运行状态进行实时监控，监控项目包括温度、位移、振动、转速等关键指标并进行实时反馈，确保及时发现运行异常；三是通过寿命理论和状态感知，将数据导入计算模型，实时对轴承剩余寿命进行预测。

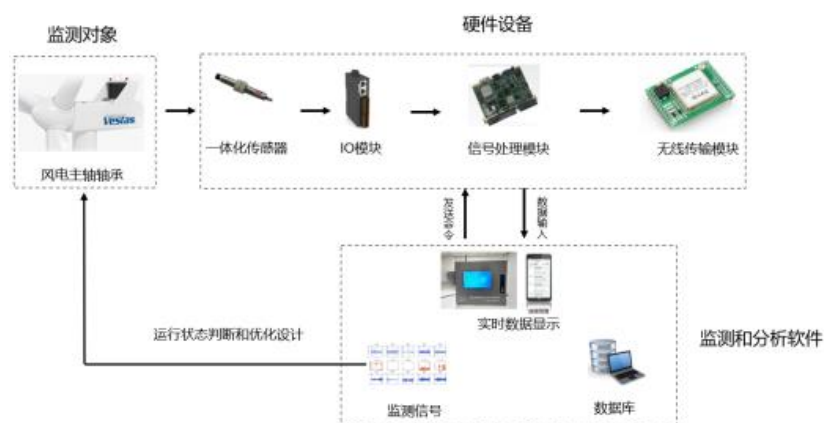


图 8 智能检测系统工作原理

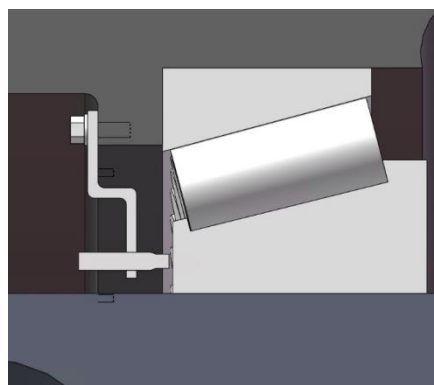


图 9 传感器支架及安装位置示意图

5 未来发展趋势

（1）高性能材料的应用。未来将更多采用耐腐蚀、抗氧化及高强度的新型合金材料和复合材料，提高轴承的耐用性和使用寿命。

（2）大尺寸化和高承载能力。随着风电机组功率的提升，轴承的尺寸和承载能力也会随之增加。设计更大尺寸、承载能力更强的轴承，将是未来发展的重要方向。

（3）智能化和自动监测技术。借助物联网和人工智能技术，未来的轴承将具备实时监测和自我诊断的能力，可以及时发现潜在故障，提高风电机组的运行可靠性和维护效率。

（4）更高的生产精度和质量控制。随着生产工艺的进步，未来的轴承制造将更加注重精度和质量控制，确保每个轴承都能在极端海洋环境中可靠运行。

(5) 环境友好型设计。随着全球对环境保护的重视,未来的轴承设计将更加注重环保,使用可再生材料以及环保工艺,减少对环境的影响。

(6) 全球化生产和供应链优化。随着海上风电市场的全球化,生产和供应链的优化将成为提高竞争力的重要因素,企业将优化资源配置,以降低成本和提升服务效率。

6 结论

本文系统的分析了海上风电轴承的失效模式、海上风电轴承自主化正向优化设计技术、大尺寸轴承表面完整性抗疲劳制造技术及风电主轴轴承智能检测系统,列举了海上风电轴承未来发展趋势,这些研究成果不仅为海上风电轴承的关键技术提供了理论支持,也为优化海上风电轴承的设计提供了科学指导。

参考文献:

[1]Li X , Lei X , Jiang L , et al.A New Strategy: Remaining Useful Life Pred-iction of Wind Power Bearings Based on Deep Learning under Data Missing Conditions[J].Mathematics, 2024, 12(13): 2119-2119.

[2]Torsvik J , Nejad R A , Pedersen E .Main bearings in large offshore wind turbines: development trends, design and analysis requirements[J].Journal of Physics: Conference Series , 2018 , 1037(4): 042020-042020.

[3]谢承辉,王星,肖发厚,等.轴承故障模式与故障诊断方法综述[J/OL].计算机测量与控制, 1-11[2024-10-28].

[4]Ke H C .Electro-erosion fault identifi-cation of motor bearing based on AS-MOTE-CFR[J].Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engine-ering, 2023, 4(2):47-57.

[5] 庞晓旭, 朱定康, 左旭, 等. 基于变载工况的海上风电机组主轴轴承刚柔耦合动态响应分析[J]. 轴承, 2024, (09): 52-62.

[6] 解连文, 戚顺银. 中国轴承热处理技术及装备的发展趋势[J]. 热处理技术与装备, 2024, 45 (03): 76-80.

[7] 杜广煜, 梁笑瑜, 万亿, 等. 不同温湿度下风电轴承表面防护 DLC 薄膜微动摩擦特性[J]. 轴承, 2023, (06): 89-95.

[8] Maria S .Study on Potential Causes of Defects Following Heat and Ther-mochemical (Carburising) Treatments of Linear Bearings[J].Acta Marisiensis. Seria Technologica, 2022, 19 (2): 1-5.