

高速电主轴轴承寿命提升方案

李佳育 李艳玲

通用技术集团沈阳机床股份有限公司，辽宁省沈阳市，110142；

摘要：本文主要研究高速电主轴的核心部件轴承的服役周期延长问题。研究主要针对影响其长期稳定运行的根本因素展开识别与剖析，从材料的基本属性、润滑状态的有效控制、实际工作环境等多方面入手。在此基础上，提出了材料体系选择、润滑技术创新、运行工况控制、密封设计四个方面的综合寿命延长措施。本方案主要目的就是利用多技术途径的融合整合，对提高高速电主轴轴承的使用寿命、保证其运行可靠性给出一个既理论深度又实践可行的指导与参考。

关键词：高速电主轴；轴承耐久性；性能增强策略；运行条件管理

DOI：10.69979/3041-0673.26.03.007

在现代高速精密加工领域里，电主轴是机床的动力核心，电主轴的综合性能决定着最终产品加工精度和生产效率。轴承属于电主轴的枢纽支撑件，耐久性、可靠性直接影响整个主轴系统的工作效率和稳定性。目前制造业对高转速、高精度加工的需求越来越大，怎样提高轴承的服役寿命成为急需解决的重要技术难题。因此，深入探究高速电主轴轴承耐久性内在机理及外部条件，进而提出科学有效的性能提升途径，既有着重大的理论研究意义，又对推动高端装备制造技术发展有着重要的现实意义。本文主要从技术上分析提高轴承寿命的方法和措施。

1 高速电主轴轴承寿命的关键制约因素

1.1 材料性能的基础性制约

轴承材料本身的固有特性就是决定其耐久性的根本因素。硬度、韧性以及耐磨性等主要参数，都会影响轴承在高速、高压下抗疲劳、抗磨损的能力。广泛使用的常规高碳铬轴承钢，在一般条件下硬度、耐磨性都较好，但是在高速、高温等极端环境中，抗疲劳性能容易不足，容易导致早期表面剥落等失效。另外材料内部杂质多或者组织不均就会出现应力集中点，这会大大加快疲劳裂纹的形成和发展，进而影响到轴承的总体寿命。

1.2 润滑状态的核心影响力

润滑是保证高速轴承平稳运行、减少摩擦损耗的关键。合理的润滑可以减小摩擦系数，减少热量的积聚，还可以带走磨屑和热量。润滑方式及润滑介质的性能直接影响润滑效果，油雾润滑冷却效果还可以，但是均匀性难以控制，油气润滑可以精确供油，提高润滑效率，但是系统比较复杂。润滑油要具有合适的粘度、良好的抗氧化性和抗乳化性，才能适应不同的转速、负载、温

度^[1]。粘度过低容易造成油膜破裂，粘度过高会造成运行阻力增大、温升增大，影响轴承正常工作。

1.3 运行环境与载荷条件的综合效应

高速电主轴轴承寿命受转速、载荷、温度、环境清洁度等很多因素影响。高速运转时，离心力、陀螺力矩增大很多，对零件强度和运动稳定性提出更高的要求。过载会增大接触应力，使疲劳、磨损加剧；温升会降低材料性能，造成润滑剂性能下降，破坏润滑状态。另外环境中的杂质，比如灰尘，切削液等进入轴承内，也会导致磨损加快，腐蚀加重，轴承的使用寿命明显降低。

2 提升轴承服役寿命的综合技术途径

2.1 材料体系的优化与创新应用

使用高性能材料来延长服役寿命的基础途径。工程陶瓷氮化硅由于硬度高、密度低、热稳定性好，高速轴承中有广阔的应用前景。采用陶瓷滚动体和钢制套圈组合而成的混合轴承可以大大降低离心力，提高转速极限。对传统轴承钢采用真空熔炼提高材料纯净度，或者添加合金元素、改进热处理工艺（贝氏体淬火等）来提高其强韧性、耐磨性、抗疲劳性，实现材料性能的全面提高。

2.2 润滑技术的精细化与智能化改进

对于高速工况，润滑的优化是延长寿命的关键。油气润滑技术可以精确地输送微量润滑油，形成稳定的润滑膜，有效地降低摩擦和温度升高。润滑剂要按照工作温度和转速来选，高温工况合成酯类油由于其较好的热稳定性比高温工况下使用更合适。润滑参数要精细调节，可以采用根据实时监测的自适应控制系统，实现润滑状态的智能化管理，大大提高轴承的可靠性、耐久性^[2]。

2.3 运行工况的主动监控与精确管理

对实施运行工况实施主动的监控并加以精确的管理,是保证轴承稳定运转的有效手段。智能控制系统根据实时主轴转速和负载进行调节,可以避免过载以及工况剧烈变化给轴承带来的不良影响。集成温度、振动传感器所构成的实时监测系统,可以及时发现运行异常并采取预警或者干预措施。优化冷却系统的结构设计,保证冷却介质能充分带走热量,使轴承的工作温度一直处于合理的范围之内。这一系统的管理方式给轴承提供了一个可靠的运行保障,大大提高了轴承的使用寿命。

2.4 密封结构的效能强化与设计创新

高效密封是保证轴承寿命长的关键。材料上应选用氟橡胶等具有优良弹性、耐磨性以及和润滑剂相容性好的高性能聚合物^[3]。结构设计上推荐采用迷宫式和接触式、非接触式唇形密封相结合的复合方式,构建多道防线,阻止各种粒径的污染物进入。同时必须对密封唇口的几何型线、接触压力进行精细的调整,以达到密封效果最好、摩擦扭矩最小的目的,防止密封系统自身造成额外的能耗和发热。

3 方案的实施与效果评估流程

3.1 系统化的方案推进步骤

为了保证寿命提升策略的有效实施,必须遵照系统的推进路径。首先对用电主轴轴承进行全面的检测,采用振动分析、温度监测等方式找出性能缺陷及潜在的失效模式。根据诊断结果来制订有针对性的改进计划,确定材料升级、润滑系统改造等具体任务。实施过程要依照技术规范,新材料轴承要展开兼容性评价,新润滑系统管路须得洁净。最后用液压或者加热这些先进的工艺来做精密的安装和调试,然后验证各项性能指标是不是合格。

3.2 多维度的效果评估指标体系

建立起合理的综合评价体系才能检验方案是否有效。核心指标要全方位体现轴承寿命和运行状况,平均无故障工作时间是寿命的直接证据,振动速度/加速度有效值以及特征频率变化能评判运行平稳度,工作温度和温升速率表现热管理成效。同时可以借助主轴精度保持性、能耗的变化等进行辅助判断。根据方案实施前后的重要数据的变化情况,对改进效果做出客观量化的评价。

3.3 基于反馈的持续性优化机制

提高轴承寿命应该建立一个持续的、循环的、不断改善的机制。在初步方案实施之后,对于没有达到要求

的指标要进行根源分析,比如材料适配性、润滑参数合理性等。根据分析结果有目的地对方案进行修改,例如优化油气配比、改进冷却流程等。长期运行数据的积累有利于完善寿命预测模型,给以后的技术改进提供数据支持。这种依靠实践反馈不断改进的循环,是促使轴承技术不断发展的重要推力。

4 先进设计与协同管理策略

4.1 轴承结构的创新设计与精度保障

轴承自身结构设计和达到的精度等级对高速性能和寿命影响很大。保持架是引导和隔开滚动体的关键零件,其设计的优劣十分重要。高速下应选用引导方式稳定、整体质量小、兜孔间隙经过优化设计的保持架,如采用酚醛树脂等工程塑料或者特种轻质合金制造,减小高速下的惯性力的不利影响^[4]。轴承内几何精度,滚道的圆度、波纹度、滚动体尺寸一致性、表面粗糙度等都必须控制在非常高的标准内。任何一点的几何上的失误,在高速运转的时候都会被扩大,就有可能造成振动变大,噪声变大,局部应力集中等状况。采用先进的磨削、超精加工工艺,并配合严格的在线检测和质量控制,是保证轴承最终成品质量达到高速要求的环节。

4.2 预紧力的精确设定与动态调控技术

高速电主轴轴承一般要施加一定的预紧力来消除内部游隙,提高主轴系统的刚度和旋转精度。预紧力大小要经过精确计算和优化。预紧力不够会造成主轴刚度降低、运行不稳定;预紧力过大又会使得轴承的摩擦扭矩和发热量急剧上升,反而会大大缩短其使用寿命。传统的恒定预紧方式难以适应高速运转下因热膨胀引起的轴承内部应力状态变化。因此采用能够随主轴转速和温度变化自动调节的预紧机构(液压、气动或者弹簧驱动的智能预紧系统)更为理想。该类智能预紧技术可以保证启动阶段有足够的预紧力以保持刚度,在进入高速稳定运行阶段时适当减小预紧力以减少温升,从而在精度保持和寿命延长之间找到最佳的平衡点。

4.3 主轴系统的热管理策略

高速电主轴在工作时产生的热量以及由此引起的热变形,是决定加工精度和轴承工作状况的主要因素。对主轴系统进行精确的热特性分析,识别主要热源(电机损耗、轴承摩擦等),预测整个系统的温度场分布、热变形趋势,是进行针对性优化设计的前提^[5]。采用计算流体动力学或者有限元分析等工程方法,可以改进冷却流道的布局 and 结构,提高系统的散热效率。更为先进

的方法就是建立热误差模型,并实时进行补偿。在主轴的关键部位装设温度传感器,利用事先标定好的热误差模型,数控系统可以对由于热变形而引起的位移进行软件补偿,从而在热态下也能保持高精度的加工,间接减少了由于精度超差所导致的异常负载对轴承寿命的不利影响。

5 智能监测与预测性维护体系

5.1 基于多信息融合的状态监测系统

建立一个完善的轴承状态监测系统是进行预测性维护、防止突然发生故障、最大限度地发挥轴承寿命的重要手段。系统要融合多种传感器,不断地收集振动(宽频带加速度信号),温度(轴承外圈,回油口等关键点),声发射信号,驱动机电流等众多信息。对这些异构信号展开深入的分析并提取出特征,例如针对振动频谱里的特征频率成分及其变化情况执行分析,利用包络解调技术去识别早期的局部损伤等等,就能够更早、更加精确地察觉轴承出现的初期毛病,像是一些小小的疲劳剥落现象,润滑不够的情况,或者是轻微的磨损迹象之类。

5.2 预测性维护模型的构建与应用

在状态监测的基础上,采用历史运行数据、维护记录、失效案例等建立轴承寿命预测模型。人工智能发展以后,机器学习等算法能够对复杂的监测数据加以处理,学习轴承性能退化规律,从而更为精确地预测轴承的剩余使用寿命。根据预测结果可以采用预测性维护策略,即在轴承性能明显下降但还没有完全失效之前,提前安排维护或更换作业,避免非计划停机造成的生产中断和更大的潜在损失^[6]。该模式比传统的定期预防性维护或者事后维修更具经济性、可靠性。

5.3 维护保养的规范化与知识管理

轴承的长寿命除了和优良的设计制造有关外,也和装配、保养维护等使用过程有关。必须制定并执行标准化的装配作业规程,在清洁的环境中完成轴承的安装,保证正确的配合公差,采用合适的工具和方法(如液压螺母或者加热的方式)来达到精准安装到位的效果,防止敲击等不正确的操作造成损伤。还要制定定期的保养维修制度,定时检查密封件是否完好,定时更换或补充规定型号、牌号的润滑剂,定时清洗润滑系统管路和元件,定时检查冷却系统性能等。对操作人员和维护人员进行持续的专业培训,使其对主轴轴承的技术要求和使用注意事项有深刻的认识,是保证各项提升寿命的措施能够有效落实并长久发挥作用的重要保证。

6 结论与展望

6.1 结论

本文对提高高速电主轴轴承寿命的综合技术方案做了系统的研究。研究表明轴承耐久性不是单因素简单决定的,是材料基础性能、润滑、运行工况、密封、设计制造精度、系统集成控制、维护保养策略等众多因素复杂交互、综合影响的结果。采用性能优良的陶瓷材料或者优质的改性轴承钢、采用精确的油气润滑技术、加强运行工况的实时监控与热管理、创新密封设计、使用先进的制造工艺和动平衡工艺、使用多信息融合的智能状态监测和预测性维护系统,都可以提高轴承在高速、苛刻工作条件下运行的可靠性以及使用寿命。

6.2 展望

未来高速电主轴轴承技术将会向更高转速、更高精度、更长寿命、智能化方向发展。新材料(新型陶瓷复合材料、高性能表面涂层技术)的探索与应用、工业物联网和大数据智能健康管理及预测性维护技术的深度融合、自适应润滑、智能预紧等主动控制技术的进一步成熟与普及,将是未来主要的研究方向。依靠不断的学科交叉创新以及严格的工程实践改进,高速电主轴轴承性能极限会不断被突破,为高端装备制造业转型升级和持续发展提供更加坚实的技术基础。

参考文献

- [1] 罗良传,郭伟科,张华伟,等. 高速电主轴轴承接触特性仿真研究[J]. 机电工程技术,2024,53(08):215-219.
- [2] 孙学凯. 基于高速电主轴的轴承寿命特性分析[D]. 天津工业大学,2020.
- [3] 娄舜禹. 电主轴轴承预紧特性分析及其优化研究[D]. 西安理工大学,2019.
- [4] 熊文莉. 高速电主轴振动性能及轴承寿命计算方法的研究[D]. 华东理工大学,2019.
- [5] 张雪亮. 新型高速电主轴轴承-轴芯热场分布规律与实验研究[D]. 哈尔滨理工大学,2019.
- [6] 雷枝武. 高速电主轴球轴承力学特性分析及最佳预紧力研究[D]. 广东工业大学,2014.

作者简介:李佳育,出生年月:1996年4月,性别:女,民族:汉,籍贯:辽宁沈阳,学历:硕士研究生,职称:助理工程师,研究方向:数控机床技术研究。