

Optimization Design of High Speed Precision Bearing Structure and Study on Friction and Wear Performance

Guangfu Wu

Wafangdian Bearing Group Co., Ltd., Wafangdian, Liaoning, 116300, China

Abstract

As the core component of high-end equipment, the friction and wear performance of high-speed precision bearings directly determines the operating accuracy and service life of the equipment. In response to the technical challenges of high friction loss and prominent wear failure of bearings under high-speed operating conditions, this study integrates friction and wear mechanisms with optimization design methods, focusing on structural improvement and performance experimental research of rolling elements, retainers, and groove shapes. By systematically analyzing the coupling relationship between structural parameters and friction and wear, an optimal design model is established. Through numerical simulation and experimental verification, the effectiveness of the optimization scheme in reducing friction coefficient and minimizing wear is elucidated. The research results provide theoretical support and technical reference for improving the service performance of high-speed precision bearings under extreme working conditions, and have important engineering value for promoting the development of high-end equipment manufacturing industry.

Keywords

high-speed precision bearings; Structural optimization; friction and wear

高速精密轴承结构优化设计与摩擦磨损性能研究

武广富

瓦房店轴承集团有限责任公司, 中国·辽宁 瓦房店 116300

摘要

高速精密轴承作为高端装备的核心零部件,其摩擦磨损性能直接决定设备运行精度与使用寿命。针对高转速工况下轴承摩擦损失大、磨损失效突出的技术难题,本研究融合摩擦磨损机理与优化设计方法,聚焦滚动体、保持架及沟道槽形开展结构改善与性能实验研究。通过系统分析结构参数与摩擦磨损的耦合关系,建立最优设计模型,经数值模拟与实验验证,阐明优化方案在降低摩擦系数、减小磨损量方面的作用效果。研究成果为提升高速精密轴承在极端工况下的服役性能提供理论支撑与技术参考,对推动高端装备制造业发展具有重要工程价值。

关键词

高速精密轴承; 结构优化; 摩擦磨损

1 引言

随着现代制造技术的持续升级,航空航天、精密机床等高端装备对核心零部件的性能要求日益严苛,高速精密轴承的性能瓶颈逐渐凸显。在高转速运行条件下,轴承内部接触应力集中与摩擦生热现象尤为显著,极易诱发摩擦破坏,导致设备加工质量下降、运行效率降低,甚至引发停机故障。因此,通过结构优化提升轴承抗摩擦磨损能力,成为突破其使用瓶颈的关键课题。已有研究虽兼顾了轴承结构设计与磨损特性分析,但对结构参量与摩擦磨损之间的耦合机制仍缺乏深入探究。基于此,本研究以摩擦磨损机理为理论基础,

通过系统性分析轴承内部结构缺陷,制定针对性优化方案,采用数值模拟与实验相结合的手段验证效能提升效果,为解决高速精密轴承服役难题开辟可行路径^[1]。

2 高速精密轴承结构设计与摩擦磨损理论基础

2.1 高速精密轴承结构组成与工作特性

高速精密轴承的典型类型包括角接触球轴承、圆柱滚子轴承等,核心组成部件涵盖内圈、外圈、滚动体、保持架及密封件。其中,滚动体的数目与尺度直接影响接触负荷分配,沟道曲率半径决定接触区域尺寸,保持架的构型则与系统运动稳定性密切相关。在高转速工况下,轴承将承受离心力与回转扭矩的协同作用,导致内部接触应力分布不均,同时伴随滚动体与沟道之间的相对滑移,进而产生附加摩擦损失。

【作者简介】武广富(1983-),男,中国黑龙江尚志人,硕士,高级工程师,从事轴承制造、轴承设计、盾构机、机床轴承研究。

2.2 摩擦磨损相关理论

本研究以赫兹接触理论为核心,揭示了弹性体接触力学特性与载荷、材料特征的内在关联,为滚动轴承表面疲劳损伤评估提供理论依据。弹性流体动压润滑理论研究表明,高转速条件下,润滑油膜的厚度与强度是决定摩擦形式的关键因素:油膜完整时呈现流体润滑状态,油膜破裂则转为边界润滑,进而加剧磨损现象。轴承的主要磨损形式包括粘着磨损、磨粒磨损与疲劳磨损,其产生机理与接触状态、工况参数密切相关。研究过程中重点关注摩擦系数、磨损量、表面粗糙度等关键指标,这些参数的演变规律可直接反映轴承服役状态,为优化设计方案的有效性评定奠定基础。这些理论并非孤立存在,而是能够相互支撑,最终形成完整、完善的联动逻辑框架,接触力学特性决定润滑膜形成条件,润滑状态又直接主导磨损形式的演变。关键指标的动态变化不仅能量化轴承服役损耗程度,还能反向推导结构参数与摩擦磨损的适配性,为后续针对性优化提供精准理论参考^[2]。

2.3 结构优化设计理论与方法

高速精密轴承结构优化以降低摩擦系数、减小磨损量为核心目标,同时需满足强度、刚度及空间限制等约束条件。常用优化算法包括响应面法、遗传算法与粒子群优化算法,其中响应面法可建立结构参数与性能指标的近似模型,简化优化计算过程;遗传算法与粒子群优化算法适用于复杂多维问题求解,能高效搜索最优参数组合。数值模拟技术为结构优化提供有力支撑,通过有限元分析可精准模拟轴承力学特性,多体动力学仿真能还原运动状态,润滑仿真可预测油膜性能。这些理论与方法的融合应用,实现了轴承结构优化从经验设计向科学设计的转变,为提升优化方案的可靠性提供保障。

3 高速精密轴承结构优化设计

3.1 现有轴承结构问题分析

针对现有高速精密轴承的受力特征与潜在摩擦磨损隐患,采用三维建模与数值模拟相结合的方法开展系统分析。结果表明,高速工况下该结构存在显著应力集中现象,滚动体与沟道接触区域的最大应力超过最优临界值,极易诱发表面材料疲劳。动力学模拟显示,传统保持架因结构刚度不足,在高速运行时会产生较大摆幅,导致滚动体运动路径偏移,进而增大滑动摩擦比例。摩擦特性分析发现,原始沟道曲率半径比设计不合理,造成接触面积过大,摩擦生热加剧;同时润滑通道布局不完善,导致润滑油供给不均,局部区域存在润滑失效隐患。基于模拟计算的隐患等级排序,确定滚动体几何参数、保持架结构刚度及沟道型面形状为核心优化靶点。

3.2 结构优化方案设计

以核心优化靶点为导向,构建多维度结构优化体系。滚动体优化采用“材质改善+结构调整”的思路,选用高

强度陶瓷基复合材料替代传统钢材,降低自身惯性力,同时将球形滚动体改为微鼓形结构,减小边缘接触应力。保持架优化聚焦构型与引导方式,通过拓扑优化剔除冗余材料,采用中空格栅结构提升刚度与轻量化水平,将外圈引导改为内圈引导,增强运动稳定性。沟道轮廓优化基于弹性流体动压润滑机理,将曲率半径比调整至最优范围,同时采用圆弧修形设计,消除表面应力集中。辅助结构方面,通过优化密封结构减少润滑泄漏,重新设计润滑通道使油液直达接触区域,形成稳定润滑膜,各优化环节相互协同,确保综合性能提升^[3]。

3.3 优化设计仿真分析

基于优化方案建立精细化数值模拟模型,几何建模阶段采用参数化设计保证尺寸精度,网格划分时对接触区域进行加密处理,提升计算准确性;边界条件设定贴合真实高速运行环境,分别施加不同梯度的载荷与转速。力学性能仿真结果显示,优化后轴承接触应力峰值降低23%,应力分布更均匀,结构刚度提升18%,振动幅值减小35%,力学性能显著改善。摩擦特性仿真表明,微鼓形滚动体与优化沟道的合理匹配,静摩擦系数稳定在0.008-0.012区间,较原始结构下降约40%;同时摩擦生热速率降低,热量传导路径优化,使轴承最高温度下降15℃。通过多组方案仿真对比,最终筛选出兼顾力学性能与摩擦磨损性能的最优结构参数组合。仿真不仅量化了各结构参数对性能的影响权重,还为后续实验方案的细化提供了精准数据支撑,明确了关键测试指标的监测重点。

4 高速精密轴承摩擦磨损性能试验研究

4.1 实验方案设计

实验样本制备严格遵循设计参数,分别加工优化前后轴承试件各3组,经材料性能检测显示,优化后滚动体材料硬度提升20%,弹性模量提高15%。实验设备选用高速摩擦磨损试验机,配套精度为0.01 μm的表面轮廓仪、扫描电子显微镜(SEM)及温度传感器,实现多参数同步监测。实验参数设定模拟真实工作工况,转速范围为5000-20000r/min,载荷分为100N、200N、300N三个梯度,采用聚α-烯烃合成润滑油作为润滑介质,每组实验时长均为2小时。数据采集方案明确每10分钟记录一次摩擦系数与温度数据,实验结束后采用重量法与轮廓仪法双重测量磨损量,通过SEM观察磨损表面微观形貌,确保测试数据的全面性与可靠性。

4.2 摩擦磨损性能测试

高速工况下摩擦系数动态监测结果显示,优化前轴承摩擦系数随转速升高呈明显上升趋势,在20000r/min时达到0.021;而优化后轴承摩擦系数始终稳定在0.01以内,波动幅度减少60%。磨损量测试表明,优化后轴承的重量磨损量平均为0.003g,较原始结构的0.008g下降62.5%,轮

廓仪测量显示磨损深度从 $8\mu\text{m}$ 降至 $2.5\mu\text{m}$ 。SEM 微观分析显示,原始轴承表面出现明显粘着磨损痕迹与磨粒划痕,且存在较大面积材料剥落;而优化后轴承表面仅存在轻微磨痕,材料剥落现象显著减少。精度保持性测试中,优化后轴承在 20000r/min 转速下运行 2 小时后,旋转精度误差为 0.002mm ,较原始结构的 0.006mm 提升 66.7%,振动幅值始终控制在 0.01mm 以内,运行稳定性大幅提升。

4.3 影响因素分析

结构参数对摩擦磨损性能的影响规律显著:滚动体微鼓度在 $0.01\text{—}0.03\text{mm}$ 范围内时,磨损量随微鼓度增大呈先降后升趋势,最优微鼓度为 0.02mm ;保持架镂空率超过 40% 后,结构刚度下降导致磨损量增加,因此确定 35% 为最优镂空率。工况参数中,转速对磨损机制影响突出, 15000r/min 以下以磨粒磨损为主,超过该转速后疲劳磨损占比逐渐提升,优化结构通过降低接触应力有效延缓了疲劳磨损的发生。载荷增加使接触面积扩大,磨损量呈线性增长,但优化结构因应力分布均匀,磨损量增长率仅为原始结构的 50%。润滑条件与材料特性存在显著耦合效应,陶瓷滚动体与合成润滑油的匹配性更优,形成的润滑膜稳定性提升 40%,进一步降低了摩擦磨损程度。

5 优化结构的性能验证与改进建议

5.1 优化结构与原始结构性能对比

相同工况下的性能对比结果显示,优化后轴承摩擦系数平均下降 45%,磨损量降低 60% 以上,表面粗糙度 R_a 值从 $0.8\mu\text{m}$ 降至 $0.2\mu\text{m}$,摩擦磨损核心指标得到显著改善。力学性能方面,优化结构的接触刚度提升 18%,抗冲击载荷能力增强 25%,高速运转时的振动响应幅值减少 35%,结构稳定性明显优于原始轴承。动力学特性对比表明,优化后轴承的临界转速提高 20%,在 20000r/min 高速工况下仍能保持稳定运行,而原始轴承在 16000r/min 时已出现明显振动异常。基于磨损速率推算,优化后轴承的理论使用寿命可达 12000 小时,较原始结构的 5000 小时延长 140%,综合性能提升效果显著。

5.2 优化设计的有效性与可靠性分析

仿真结果与实验数据的对比分析显示,摩擦系数、接

触应力等关键性能指标的误差均控制在合理范围内,验证了数值模拟模型的准确性与优化方案的有效性。极端工况测试中,将转速提升、载荷增加,优化后轴承仍能稳定运行 1 小时,磨损量仅为原始结构在常规工况下的 60%,体现出优异的性能稳定性。工程可行性评估从加工难度与成本角度展开,优化方案采用的陶瓷材料与拓扑结构虽使加工成本增加 15%,但结合使用寿命延长带来的综合效益,成本回收期缩短至 8 个月,具备良好的工程应用与推广前景。

5.3 进一步改进方向

现有优化方案尚未充分考虑温度、应力、润滑多场耦合作用,后续可构建多场耦合数值模拟模型,深入研究各物理场相互作用机制,实现更精准的结构优化设计。材料、结构、工艺一体化优化是重要发展趋势,需从材料成分调整、结构参数优化与加工工艺改进三个维度建立协同优化体系,进一步提升轴承综合性能。智能化技术融合具备较大潜力,可在轴承内部集成微型传感器,开发磨损在线监测系统,实现磨损状态实时感知与预警;结合智能润滑系统,根据磨损状态动态调整润滑策略,优化服役效果。此外,数字孪生技术的应用可构建轴承虚拟孪生体,实现全生命周期性能模拟与优化,为设备运维提供数据支撑。

6 结语

综上所述,本研究围绕高速精密轴承结构优化与摩擦磨损性能展开系统研究,聚焦滚动体、保持架及沟道槽形等核心结构,深入分析结构参数与摩擦磨损的耦合机制,提出多维度优化设计方案。通过数值模拟与实验验证相结合的方法,证实优化后轴承在摩擦系数、磨损量及使用寿命等关键指标上均实现大幅提升,为突破高转速工况下轴承的服役瓶颈提供了可行技术路径。研究成果进一步完善了高速精密轴承的结构设计理论,具有重要的学术价值与工程应用意义。

参考文献

- [1] 常振,周振宇,李兴林,陆水根,李雄,李斌,朴钟宇.高速精密机床主轴轴承动态性能演化行为分析[J].兵工学报,1-19.
- [2] 杨婷婷,兰清群.轨道车辆精密轴承压装装置机械结构设计与分析[J].九江学院学报(自然科学版),2023,38(03):32-37.
- [3] 董胤喆,宁仲,李建星,孙小波,席博伦.精密轴承用PEEK保持架结构及注塑工艺优化[J].轴承,2024,(04):36-39+47.