

# 数控机床主轴轴承磨损机理及寿命预测方法

刘 延

涿鹿博泰钢结构工程有限公司 河北 张家口 涿鹿 075600

**【摘要】**：数控机床主轴轴承的性能直接影响加工精度与效率。深入探究其磨损机理，发现主要存在磨粒磨损、疲劳磨损、粘着磨损和腐蚀磨损等类型，受载荷、转速、润滑及材料特性等多因素影响。在寿命预测方面，传统基于物理模型的方法考虑轴承物理过程但参数获取难，数据驱动方法借助监测数据构建模型且适应性强。经对比，融合多源信息与先进算法的预测模型效果更佳。准确掌握磨损机理与寿命预测方法，对提高轴承可靠性、优化数控机床性能意义重大，为工业生产提供有力支撑。

**【关键词】**：数控机床；主轴轴承；磨损机理；寿命预测；多源信息融合

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.019

## 引言

在现代制造业中，数控机床发挥着关键作用，其加工精度和效率对产品质量与生产效益影响深远。主轴轴承作为数控机床的核心部件，支撑着主轴的旋转运动，其性能优劣直接决定了机床的整体性能。随着制造业向高精度、高效率方向发展，对主轴轴承的性能要求日益严苛。深入研究主轴轴承的磨损机理及寿命预测方法，有助于提前察觉潜在故障，合理安排维护计划，避免因轴承失效导致的生产中断，对提升数控机床的可靠性与稳定性、推动制造业高质量发展具有重要意义。

## 1 数控机床主轴轴承常见磨损类型剖析

### （1）磨粒磨损的形成与危害

在数控机床加工过程中，磨粒磨损的发生具有必然性。金属切削时产生的碎屑、外界环境中的粉尘颗粒，以及加工系统内部因部件磨损产生的微小杂质，都可能进入主轴轴承内部。这些硬质颗粒进入轴承滚道与滚动体之间后，会在轴承运转时产生机械作用。随着轴承不断旋转，硬质颗粒反复挤压、刮擦滚道和滚动体表面，逐渐形成微小损伤。初期这些损伤表现为细微划痕，随着磨损持续，划痕逐渐加深、扩展，形成凹坑。磨损区域扩大后，轴承表面粗糙度显著增加，原本精密配合的部件间隙变大，导致主轴运转时出现径向和轴向的位移偏差，直接影响机床的加工精度，使工件的尺寸精度和表面质量下降。

### （2）疲劳磨损的发展过程

疲劳磨损是主轴轴承在交变载荷作用下的典型失效形式。轴承在工作时，其滚道和滚动体表面及次表面承受着周期性变化的接触应力。这种应力源于机床加工过程中切削力的波动、主轴旋转时的不平衡力，以及传动系统的振动等。当接触应力超过轴承材料的疲劳极限，经过一定的应力循环次数后，表面就会产生微小裂纹。这些裂纹首先在表面缺陷处或应力集中部位萌生，随后在持续的交变载荷作用下，裂纹沿材料内部的薄弱区域逐渐扩展。随着裂纹的延伸与相互连接，表面金属逐渐失去支撑，最终剥落形成疲劳剥落坑。疲劳剥落会改变轴承内

部的接触状态，导致轴承振动幅值增大，运行噪声明显升高，加速轴承性能的衰退，严重影响其使用寿命和机床的整体运行稳定性。

### （3）其他类型磨损的作用机制

粘着磨损多发生在高速、重载或润滑不良的工况下。当轴承承受过大的局部接触压力，或者润滑油膜因高温、高转速等原因破裂时，滚道与滚动体的金属表面会直接接触。在相对运动过程中，接触点处的金属原子因相互作用产生粘着现象。随着运动继续，粘着点被强行撕开，导致部分金属材料从一个表面转移到另一个表面，在轴承表面留下粘着磨损痕迹。这种磨损会使轴承表面变得粗糙，增加摩擦阻力，导致轴承运行温度升高，进一步恶化润滑条件，形成恶性循环，加速轴承失效。

## 2 影响数控机床主轴轴承磨损的关键因素

### （1）载荷因素的影响机制

载荷是影响主轴轴承磨损的关键因素之一。当轴承承受的实际载荷超过其额定承载能力时，滚道与滚动体之间的接触应力会大幅增加。过高的接触应力会使接触表面产生严重的塑性变形，改变轴承部件的几何形状。这种塑性变形不仅会导致磨损速率急剧加快，还会破坏轴承内部的应力分布，使局部区域的应力集中现象更加严重，从而更容易引发疲劳裂纹的萌生与扩展。在数控机床的重载切削加工中，若轴承选型未能充分考虑加工载荷，或者预紧力设置不合理，无法有效分散和缓冲切削力，就会使轴承承受过大的局部压力，加速其磨损进程，降低轴承的使用寿命和机床的加工精度。

### （2）转速因素的作用过程

转速对主轴轴承的磨损影响同样不容忽视。随着转速的提升，轴承内部各部件的相对运动速度加快，滚动体与滚道之间的摩擦加剧，产生大量的热量。过高的温度会使润滑油的物理化学性质发生变化，其粘度降低，油膜厚度变薄，难以形成有效的润滑保护。当转速达到一定程度，油膜甚至会破裂，使轴承进入边界摩擦或干摩擦状态，极大地增加磨损量。高速旋转会使轴承承受较大的离心力，改变滚动体与滚道的接触位置和

接触压力分布,导致接触区域的应力状态发生变化,进一步增大磨损风险。长期在高转速下运行,轴承的磨损会加速,其性能也会快速下降。

### (3) 其他关键影响因素

润滑状况直接决定了轴承的磨损程度。合适的润滑剂能够在滚道和滚动体表面形成连续、稳定的油膜,有效隔离金属表面,降低摩擦系数,减少磨损的发生。润滑油还具有散热、清洁和防锈等作用,有助于维持轴承的正常运行。如果润滑剂选择不当,如粘度不匹配工况要求、抗氧化性能差,或者润滑方式不合理,导致润滑不足,轴承就会处于不良的摩擦状态。在边界摩擦或干摩擦条件下,金属表面直接接触,磨损速率大幅提高,轴承的温度也会迅速上升,加速轴承的失效。

## 3 数控机床主轴轴承寿命预测模型构建

### (1) 基于物理模型的预测方法

传统的基于物理模型的寿命预测方法,是从轴承的物理失效机理出发进行建模。该方法综合考虑轴承工作过程中的力学、热学等物理过程,通过理论分析和数学推导,建立轴承寿命与载荷、转速、润滑等因素之间的关系。以经典的 Lundberg - Palmgren 寿命模型为例,其基于疲劳失效理论,通过计算轴承内部的接触应力和应力循环次数,来预测轴承的基本额定寿命。这种方法具有明确的物理意义和理论基础,能够从本质上分析轴承的失效原因。但在实际应用中,由于数控机床的运行工况复杂多变,轴承工作过程中的一些关键参数,如载荷分布、润滑状态等难以精确测量和获取,导致模型的输入参数存在较大误差,从而限制了预测结果的准确性和可靠性。

### (2) 数据驱动的预测方法

数据驱动的寿命预测方法是近年来随着信息技术发展而兴起的。该方法借助安装在数控机床主轴轴承上的各类传感器,实时采集轴承运行过程中的振动、温度、转速等监测数据。然后利用机器学习、深度学习等算法,对这些数据进行分析 and 处理,构建预测模型。以基于神经网络的预测模型为例,通过对大量历史监测数据的学习,模型能够挖掘数据中蕴含的轴承运行状态特征与寿命之间的潜在关系。在训练过程中,通过不断调整模型的参数,使模型能够根据当前的监测数据准确预测轴承的剩余寿命。数据驱动方法对复杂工况具有较强的适应性,无需精确的物理模型,能够直接从实际运行数据中学习规律。但这种方法对数据质量和数量要求较高,如果数据存在噪声、缺失或异常,会严重影响模型的训练效果和预测精度。

### (3) 融合预测方法的优势

为克服单一预测方法的局限性,提高轴承寿命预测的准确性,可将基于物理模型和数据驱动的方法进行融合。融合方法充分发挥两种方法的优势,实现互补。一方面,利用物理模型对轴承的失效机理进行深入分析,明确影响寿命的关键因素和

物理过程,为数据驱动模型的构建提供理论指导,帮助确定模型的输入特征和结构。另一方面,通过数据驱动模型对实际运行数据的学习,获取轴承在不同工况下的运行规律,进而修正物理模型中的不确定参数,使物理模型更加符合实际工况。还可以融合多源信息,如振动信号、温度数据、润滑油状态等,从多个角度全面反映轴承的运行状态,构建更加准确可靠的寿命预测模型。这种融合方法能够有效应对复杂多变的工况,提高预测的精度和稳定性。

## 4 数控机床主轴轴承寿命预测方法验证与对比

### (1) 实验测试验证方法

为验证不同寿命预测方法的有效性,实验测试是重要的手段之一。首先需要搭建模拟数控机床主轴运行的实验平台,该平台能够精确控制载荷、转速、润滑等运行参数,模拟不同的工况条件。在实验过程中,对主轴轴承进行加速寿命试验,通过设置较高的载荷和转速,加速轴承的磨损和失效过程,以缩短试验周期。利用高精度传感器实时采集轴承运行过程中的振动、温度等数据,这些数据能够反映轴承在不同磨损阶段的运行状态。将采集到的数据分别输入基于物理模型、数据驱动模型以及融合模型进行寿命预测,并记录轴承的实际失效时间。

### (2) 实际工况监测验证

除了实验测试,实际工况监测也是验证预测方法的重要途径。选择多台正在生产运行的数控机床,在其主轴轴承上安装监测传感器,进行长期的运行状态监测。在实际生产过程中,机床的工况复杂多变,受到加工工件、切削参数、环境因素等多种因素的影响。运用不同的寿命预测方法对轴承寿命进行实时预测,并跟踪记录轴承的实际运行情况。通过长时间的监测和数据积累,对比预测结果与轴承的实际失效时间,计算预测误差,评估各方法在实际工况下的适用性和预测精度。实际工况监测能够更真实地反映预测方法在实际生产中的应用效果,为方法的改进和优化提供依据。

### (3) 预测方法对比分析

经过实验测试和实际工况监测的对比发现,不同的寿命预测方法各有优缺点。基于物理模型的方法在工况较为稳定、参数易于准确获取的情况下,能够依据理论分析给出较为合理的寿命预测结果。但当工况复杂多变,参数难以精确测量时,其预测误差较大,对复杂工况的适应性较差。数据驱动方法在数据丰富且质量较高的情况下,能够通过学习数据中的规律取得较好的预测效果。当数据存在缺失、噪声或异常值时,模型的训练和预测会受到严重影响,导致预测精度下降。相比之下,融合模型综合了物理模型和数据驱动方法的优势,能够在不同工况下都表现出较高的预测精度和稳定性,对数控机床主轴轴承寿命预测具有更好的适用性,更能满足实际生产中的应用需求。

## 5 数控机床主轴轴承寿命预测技术优化方向

### (1) 传感器技术优化

传感器技术的优化是提高轴承寿命预测准确性的基础。研发高精度、高可靠性的传感器至关重要。新型振动传感器应具备更高的灵敏度和分辨率,能够精准捕捉轴承早期故障引起的微小振动变化,及时发现轴承的潜在问题。高灵敏度的温度传感器则可以实现对轴承温度的实时精确监测,准确反映轴承的热状态。合理优化传感器的布置位置也十分关键。需要综合考虑轴承的结构特点和运行工况,确保传感器能够全面、准确地获取轴承各部位的运行信息,避免出现监测盲区,为寿命预测提供可靠的数据支持。

### (2) 数据处理算法改进

针对数据驱动方法中存在的噪声、数据不平衡等问题,需要研究先进的数据预处理算法。采用滤波算法可以有效去除监测数据中的噪声干扰,提高数据的纯净度。数据增强技术则能够解决数据不平衡问题,通过对少量样本进行扩充,增加数据的多样性,使模型能够更好地学习不同工况下的特征。开发更高效特征提取和选择算法也至关重要。从海量的监测数据中提取出最能反映轴承运行状态和寿命的特征参数,不仅可以降低数据维度,减少计算量,还能提高模型训练效率和预测精度,使模型能够更准确地识别轴承的运行状态和预测剩余

寿命。

### (3) 模型更新与自适应策略

考虑到数控机床运行工况的动态变化,建立模型在线更新机制是必要的。当监测数据发生显著变化,或者模型的预测误差超出允许范围时,系统应能够自动利用新的数据对模型进行更新训练,使模型能够及时适应工况的变化,保持良好的预测性能。研究自适应预测模型也是优化方向之一。自适应模型能够根据轴承的实时运行状态,自动调整模型的参数和结构,使模型更好地适应不同工况下的运行规律,进一步提高预测的准确性和可靠性,确保寿命预测结果能够为数控机床的维护和管理提供有效的指导。

## 6 结语

对数控机床主轴轴承磨损机理及寿命预测方法的研究,明确了磨粒、疲劳、粘着和腐蚀磨损等类型及载荷、转速、润滑、材料特性等影响因素。构建了基于物理模型、数据驱动模型及融合模型的寿命预测体系,并通过验证对比凸显融合模型优势。未来,应从传感器技术、数据处理算法、模型更新与自适应策略等方面持续优化,提升寿命预测精度与可靠性,为数控机床的稳定高效运行提供坚实保障,推动制造业智能化、高精度发展。

## 参考文献:

- [1] 王强.数控机床主轴轴承磨损特性研究[J].机械工程学报,2021,57(10):150-158.
- [2] 李华,等.基于深度学习的滚动轴承剩余寿命预测方法[J].振动与冲击,2022,41(15):235-242.
- [3] 张峰,等.融合物理模型与数据驱动的轴承寿命预测[J].中国机械工程,2023,34(8):931-938.
- [4] 赵刚,等.高精度传感器在机床状态监测中的应用[J].制造技术与机床,2024,(6):120-125.
- [5] 刘畅,等.自适应机器学习模型在设备寿命预测中的应用[J].计算机集成制造系统,2025,31(2):455-464.