

机械装备可靠性评估与剩余寿命预测方法研究

赵 颜¹ 郑攀东^(通讯作者)² 荆辉³

1. 沈阳泰星机械设备有限公司 辽宁省 沈阳市 110143

2. 安可捷检查(常州)有限公司 江苏省 常州市 213300

3. 鞍山冶金集团工业有限公司鞍山三炼钢分公司 辽宁省 鞍山市 114044

【摘 要】:以 A 机械加工车间 10 台数控车床主轴轴承为研究对象,采集 12 个月振动、温度、主轴转速、切削负载率及维修记录数据,构建面向机械装备可靠性评估与剩余寿命预测的分析流程。研究基于 18 次失效维修记录建立 Weibull 可靠性函数,并融合振动均方根值、峭度、峰值因子、温升速率及负载特征形成健康指标。结果表明,累计运行 1000 h、2000 h 和 3000 h 时整体可靠度分别约为 0.94、0.86 和 0.73,重载工况下可靠度下降更快。5 台设备剩余寿命预测误差为 15 h 至 40 h,平均绝对误差约为 26 h,平均相对误差约为 6.8%。该方法能够为主轴轴承状态识别、维修窗口安排和备件管理提供量化依据。

【关键词】: 数控车床; 主轴轴承; 可靠性评估; 健康指标; 剩余寿命预测

0 引言:

数控车床主轴轴承长期处于高速旋转、交变载荷和热积累环境中,其性能退化会直接影响加工精度、设备稳定性和生产连续性。传统定期维修方式难以及时反映实际健康状态,容易造成过度维修或突发停机。随着车间状态监测数据不断积累,将失效统计信息与振动、温度及工况特征结合,可提升机械装备寿命评估的准确性和维修决策的主动性。因此,开展主轴轴承可靠性评估与剩余寿命预测研究具有重要工程意义。

1 机械装备可靠性评估与剩余寿命预测的研究对象及数据基础

A 机械加工车间 10 台数控车床主轴轴承被选作同一研究案例,其对象属于高速旋转类机械装备关键部件。数据采集周期为 12 个月,采样内容囊括振动加速度均方根值、温度、主轴转速、切削负载率以及维修记录,形成正常样本约 7200 组、轻度退化样本约 1800 组、明显退化样本约 600 组,失效维修记录共 18 次。鉴于加工节拍以及负载波动对状态特征存在干扰,数据预处理环节需开展缺失项校核、时间戳对齐以及异常点剔除工作,并且把主轴转速以及切削负载率当作工况分层依据来使用。进一步结合振动与温升变化构建健康指标,形成面向可靠性函数建模以及剩余寿命预测的统一输入流程,见图 1。

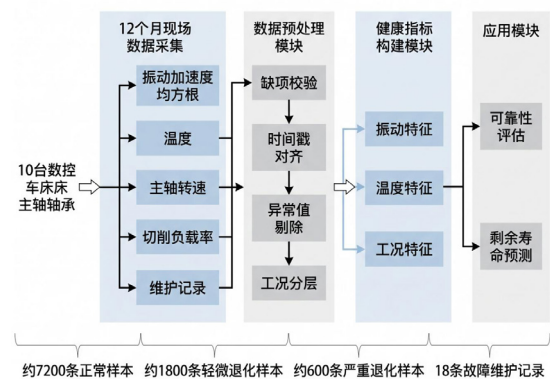


图1 数控车床主轴轴承可靠性评估与剩余寿命预测流程图

2 机械装备可靠性评估与剩余寿命预测模型构建

2.1 基于失效数据的可靠性函数建模

针对 A 机械加工车间 10 台数控车床主轴轴承的 18 次失效维修记录,可靠性函数建模把累计运行小时作为寿命度量变量,并且把轻载、中载以及重载工况纳入寿命数据分层过程。主轴轴承处于高速旋转以及周期性切削载荷共同作用下,其失效并非完全随机事件,磨损扩展、润滑衰减以及热积累会使失效率随运行时间发生变化。鉴于这一退化机理,本文选用 Weibull 分布描述轴承寿命分布特性,可靠度函数可表示为:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right]$$

其中, $R(t)$ 表示主轴轴承运行至 t h 时仍保持功能状态

的可靠度, t 为累计运行时间, η 为尺度参数, 用于表征寿命水平, β 为形状参数, 用于反映失效率随时间变化的趋势。

模型参数可借助极大似然法开展估计, 也可在失效样本数量有限且工程计算需求较强的情境下选用最小二乘法进行拟合。进一步把平均无故障时间作为群体可靠性评价指标, 可对10台主轴轴承在不同工况下的寿命差异进行刻画, 为后续健康指标阈值设定以及维修窗口安排提供统计依据。

2.2 基于多源状态特征的健康指标提取

主轴轴承退化过程会同时反映在振动响应、热状态以及工况波动之中, 单一变量难以完整描述其性能衰退轨迹。本文把振动加速度均方根值、峭度以及峰值因子当作振动特征来使用, 其中均方根值反映能量水平, 峭度对早期冲击敏感, 峰值因子能够表征局部缺陷引起的尖峰响应。温度特征选取温升速率以及稳定运行温度, 用于刻画润滑状态变化以及摩擦热积累。工况特征则囊括主轴转速波动率以及切削负载率, 以削弱加工节拍变化对退化判定的干扰。

在特征融合前, 需要对不同量纲的变量开展归一化处理, 使振动、温度以及工况变量进入同一数值尺度。权重设置可结合故障敏感性以及工况稳定性进行确定, 振动类特征通常赋予较高权重, 温度类特征用于修正热退化影响, 工况类特征用于进行状态解释。结合案例数据, 健康状态分级把振动均方根值低于1.8 mm/s 定义为健康状态, 1.8 mm/s 至3.5 mm/s 定义为轻度退化, 3.5 mm/s 至5.0 mm/s 定义为明显退化, 超过5.0 mm/s 判定为高风险状态。融合后的健康指标随退化程度单调上升, 适宜作为剩余寿命预测的统一输入。

2.3 融合退化趋势的剩余寿命预测方法

在可靠性函数提供寿命统计先验的基础上, 剩余寿命预测还需要吸收在线状态监测信息。本文把融合健康指标随运行时间的变化轨迹作为预测依据, 并且设置失效阈值为1.00, 健康初始值约为0.15。当健康指标进入0.70至0.85的预警区间时, 模型不直接给出单点寿命判断, 而是依靠近邻运行片段估计退化斜率, 形成剩余可运行时间区间。滑动窗口长度按照维修管理需求进行设定, 预测结果每运行100 h更新一次, 使新采集

的振动、温度以及负载信息能够及时参与寿命修正。

鉴于退化过程在短时间内可近似看作单调增长趋势, 基于阈值外推的剩余寿命估计可表示为:

$$\hat{T}_{RUL}(t_k) = \frac{H_f - H(t_k)}{\hat{a}_k}$$

其中, $\hat{T}_{RUL}(t_k)$ 表示在 t_k 时刻估计得到的剩余寿命, H_f 为失效阈值, $H(t_k)$ 为当前健康指标, $\hat{a}_k$ 为滑动窗口内估计得到的退化斜率。

该方法把统计可靠性模型以及状态退化模型联系起来, 既避免对复杂深度学习模型的过度依赖, 也保留了工程现场可解释、可更新以及便于嵌入维修决策流程的特性。

3 案例验证与应用效果分析

3.1 数控车床主轴轴承可靠性评估结果

围绕A机械加工车间10台数控车床主轴轴承的失效维修记录开展参数拟合后, Weibull 可靠性曲线能够较好反映该类高速旋转部件随累计运行时间增长而逐步劣化的规律。结合轻载、中载以及重载工况分层结果来看, 轴承早期运行阶段可靠度下降幅度较缓, 累计运行1000 h时整体可靠度保持在0.94左右, 说明润滑状态以及接触疲劳尚未形成显著累积效应。运行至2000 h时, 整体可靠度下降至约0.86, 轻度退化样本占比开始增加, 振动均方根值以及温升波动对寿命分布的解释作用逐渐增强。累计运行3000 h后, 整体可靠度降至约0.73, 重载工况下可靠度下降斜率明显高于轻载工况, 主要缘由在于切削负载率升高会加剧滚动接触区应力集中以及摩擦热积累。由此可见, 可靠性评估结果能够把高负载、长运行时间以及异常温升叠加的设备识别为高风险对象, 并且为维修计划中检修窗口前移、备件储备以及停机顺序安排提供量化依据。

3.2 剩余寿命预测效果与维修决策分析

鉴于剩余寿命预测需要服务于车间维修排程, 本研究选取5台具有代表性的数控车床主轴轴承进行对比分析, 样本覆盖轻度退化向明显退化过渡以及高风险临界状态。表1给出了预测剩余寿命、实际维修前剩余运行时间以及误差情况。可以看出, 5台设备的预测误差保持在15 h至40 h范围内, 平均绝对误差约为26 h, 平均相对误差约为6.8%, 说明融合健康指



标的阈值外推方法能够在工程维护尺度上提供可用的寿命区间判断。

表1 可靠性评估与剩余寿命预测结果表

设备编号	当前健康指标	预测RUL/h	实际RUL/h	绝对误差/h	维修决策建议
1号设备	0.76	420	450	30	纳入重点监测
2号设备	0.82	310	295	15	纳入重点监测
3号设备	0.68	680	720	40	维持常规巡检
4号设备	0.88	190	175	15	安排停机检修
5号设备	0.71	540	510	30	维持常规巡检

从维修决策角度来看，4号设备预测RUL低于200 h，且健康指标已接近高风险区间，应安排停机检修并同步检查润滑油以及轴承游隙。1号设备以及2号设备处于200 h至500 h区间，宜提高振动以及温升采样频率，并把备件准备纳入维修计划。3号设备以及5号设备预测RUL超过500 h，维持常规巡检即可，但仍需在每运行100 h后更新健康指标，以避免工况突变造成寿命判断滞后。

4 结语

参考文献

[1] 盖小刚, 许佳伟, 杨亮, 张驰, 郝思佳. 压力容器设备可靠性评估与剩余寿命预测[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(03):113-118.

[2] 梁雅琴, 白洁, 石慧, 李丽君, 李哲昊. 基于贝叶斯框架的时变漂移核滤波剩余寿命预测[J]. 振动与冲击, 2025, 44(12):249-258+289.

[3] 邵智超, 刘海啸, 涂建华, 谭项林, 张春霆. 剩余寿命预测的装备电路故障程度分级方法[J]. 陆军工程大学学报, 2024, 3(06):62-68.

[4] 白晏年, 李小波, 杨志豪, 刘心怡, 史尚贤. 基于变点处数据处理的剩余寿命预测[J]. 电子测量技术, 2025, 48(02):108-114.

[5] 郭鑫. 基于数据驱动的滚动轴承剩余寿命预测研究[D]. 导师: 刘杰; 曲天德. 沈阳工业大学, 2024.

[6] 王昊. Weibull分布下二乘N取K系统的剩余寿命预测研究[J]. 安全、健康和环境, 2024, 24(12):21-26.

[7] 李小波, 汪翔, 吴浩. 基于Box-Cox变换与Wiener过程的产品剩余寿命预测方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(04):87-97.

[8] 刘汝迪, 唐向红, 陆见光, 刘方杰, 柳鹏飞. 云边协同下双数据源融合的轴承剩余寿命预测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023, (11):89-94.

[9] 王一帆, 侯刚. 船用电气设备电力变压器剩余寿命预测的建模研究[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(19):140-144.

作者简介: 赵颜 (1985—), 男, 汉族, 本科, 研究方向为机械制造/机械设计。