

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.008

基于振动时间序列和威布尔估计的轴承性能动态分析

卜德天¹, 陈龙¹, 刘红彬¹, 陈荣华², 张弘毅³

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 浙江斯菱汽车轴承股份有限公司, 浙江 新昌 312500;

3. 洛阳轴承研究所有限公司, 河南 洛阳 471039)

摘要: 威布尔估计常应用于分析轴承额定寿命和寿命离散程度; 轴承不同运行状态的振动时间序列为基于统计学原理的威布尔分布提供数据基础。以威布尔估计为理论基础, 分析试验中稳定区间内的振动时间子序列, 通过威布尔参数的变化实现轴承性能的动态分析。结果表明: 振动子序列威布尔参数先于振动加速发生变化, 证明传统的威布尔估计方法能应用于单个轴承性能演变分析。

关键词: 轴承; 威布尔估计; 振动; 形状参数; 尺度参数; 性能分析

中图分类号: TH133.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0035-04

Dynamic Prediction of Bearing Performance Based on Vibration Time Series and Weibull Estimation

BU Detian¹, CHEN Long¹, LIU Hongbin¹, CHEN Ronghua², ZHANG Hongyi³

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, China;

2. Zhejiang Sling Automobile Bearing Co., Ltd., Xinchang 312500, China;

3. Luoyang Bearing Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China)

Abstract: Weibull estimation is often used to analyze the rated life and life dispersion degree of batch bearings, and Vibration time series of bearing in different operating states provide data foundation for statistics-theory-based Weibull distribution. Based on Weibull estimation, this paper analyzes the vibration time subseries in the stability interval of the test, and realizes the dynamic prediction of bearing faults through the change of Weibull parameter. The results show that the Weibull parameters of vibration subsequence change before vibration acceleration, which proves that the traditional Weibull estimation method can be applied to the analysis of single bearing state evolution.

Keywords: bearing; weibull distribution; vibration; shape parameter; size parameter; dynamic prediction

0 引言

轴承作为机械装备传动和承载的重要零部件, 对机械装备的运行效果具有极大影响。如果能够实现监测轴承在使用过程中的退化状态和实时健康状况, 根据所得到的数据预报轴承故障, 这将大大降低因机械装备故障而造成的财力损失以及人员伤亡。

GUSTAFSSON 等^[1]于 1962 年首次提出采用加速度传感器采集轴承振动信号分析的方法。江叶峰等^[2]通过获取在旋转过程中所产生的振动信号以及轴承的温度信号, 分析判断高速电梯曳引机主轴或轴承是否失效。夏新涛等^[3]提出滚动轴承的振动性能直接影响工作主机的运行状况。

GEBRAEEL 等^[4]采用轴承全寿命振动数据提取轴承退化特征值, 并结合神经网络预测轴承寿命。陈旭涛^[5]提出相比于声信号、静电信号和定子电流等方法, 振动信号对轴承的性能退化十分敏感, 振动监测法不仅能形象直观地描述轴承性能, 还便于从振动信号中提取性能退化过程特征信息。振动监测获取的大量状态演变数据也为基于振动的轴承性能演变以及剩余寿命预测提供了充足的数据源。

机械系统的运行是一个实时的过程。一些学者依据振动数据测量时间先后关系, 采用振动时间序列方法开展对机械设备的运行状态的动态预测。夏新涛等^[6]提出轴承在失效前会显露许多可疑迹象, 例如振动性能变得异常, 预示轴承内部零

基金项目: 河南科技大学博士科研启动基金项目(13480075)

第一作者简介: 卜德天(1998—), 男, 安徽淮北人, 硕士研究生, 研究方向为轴承性能, 491421538@qq.com。

件的损伤或磨损恶化状态,随着观测样本的不断积累,可实现平均寿命的动态更新。常振等^[7]针对轴承性能时间序列概率信息求取及退化分析问题,对轴承振动性能时间序列进行了研究,提出了一种基于自助最大熵法的概率密度函数以及模糊等价关系的退化指标量化方案。

威布尔分布现于工程寿命试验中应用最多,它是由瑞典学家 WEIBULL^[8]在 1939 年提出的一种具有普遍适应性的概率分布函数。LUNDBERG 等^[9]基于 Hertz 接触理论和 Weibull 材料强度统计理论建立了滚动轴承疲劳寿命估计方法,这一方法被广泛接受并成为轴承行业的计算标准。但是基于威布尔分布的轴承寿命研究方法大多以批量轴承寿命为研究对象,难以实现单一轴承实时健康状态分析。

本文将单个试验轴承振动时间序列细分为多个子序列,再通过威布尔分布理论进行分析,实现轴承状态动态分析。

1 分析模型

为表征被测轴承试验中的状态演变,将整体振动加速度依据时间顺序划分成具有交叉项的子序列,从而达到动态计算的目的。分析振动加速度、形状参数、尺度参数之间的关系,可以实现轴承性能动态分析。

1.1 计算模型

不同区间的统计参数表征被测轴承在统计区间的性能状态,对于第 i 个子序列,威布尔分布的概率密度函数表征为

$$f(Q(j)) = k/c(Q(i)/c)^{(k-1)} \exp[-(Q(i)/c)^k] \quad (1)$$

式中: k 为威布尔分布的形状参数; c 为威布尔分布的尺度参数; j 为振动时间序列号。第 i 个子序列的威布尔分布的累积密度函数为

$$F(Q(j)) = 1 - \exp[-(Q(i)/c)^k] \quad (2)$$

式(2)可改写为

$$\frac{1}{1-F(Q(i))} = \exp\left(\frac{Q(i)}{c}\right)^k \quad (3)$$

等式两边同时取 2 次对数

$$\lg \lg \frac{1}{1-F(Q(i))} = \lg Q(i) - \lg c \quad (4)$$

令 $x = \lg Q(i)$, $y = \lg \lg 1/[1-F(Q(i))]$, 则式(4)变为

$$y = bx - \lg c \quad (5)$$

式中 b 为拟合后的斜率。

1.2 分组模型

假设记录的数据(轴承振动值)数据总量为 N , 则轴承振动的时间序列 Q 可表述为

$$Q = (q(1), \dots, q(s), \dots, q(N)); s = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中: q 为试验中记录的振动值; s 为数据序号。

郭永东^[10]利用移动平均值的方法,对多通道的数据采集信号进行了平滑处理,减小了偶然因素对结论的影响。其将振动加速度进行移动平均分组处理,可以消除偶然因素对结论的影响。学者通过威布尔估计研究轴承寿命时,选择样本容量为 10,得到了理想的结论。结合之前的轴承寿命预测经验,选择每个子序列包含 1 000 个振动数据。每个子序列序号为 Q_i , 子序列表示为

$$Q_i = (q(i), \dots, q(i+999)); i = 1, \dots, N-999 \quad (7)$$

2 试验

2.1 试验设备

试验通过轴承耐久试验机进行,设备实物如图 1 所示,试验机参数如表 1 所示。



图 1 设备实物图

表 1 试验机参数

| 参数名称 | 参数值 |
|--------------------|---------------|
| 最大轴向载荷/kN | ±20 |
| 轴向载荷精度 | 设定值的±1% |
| 轴向载荷加载或卸载速度/(kN/s) | 18.75 |
| 轴向位移传感器量程/mm | 100 |
| 最大径向载荷/kN | ±30 |
| 径向载荷精度 | 设定值的±1% |
| 径向载荷加载或卸载速度/(kN/s) | 18.75 |
| 径向位移传感器量程/mm | 100 |
| 转速范围/(r/min) | 50~2 000, 正反转 |
| 转速精度 | 设定值的±2% |
| 加减速转速/(r/min) | 500 |

具体实施过程为电机通过主轴带动轴承旋转,径向油缸和轴向油缸分别对轴承施加径向力和轴向力,通过加速度传感器获得振动时间序列。

2.2 试验工况

试验为定速定载加速寿命试验。径向载荷、轴向载荷、转速分别为 8.8 kN、5.4 kN、400 r/min。

2.3 试验结果

按照现有疲劳寿命试验经验,当振动加速度达到初始振动加速度的 2 倍时,认为轴承失效,此时关闭试验机。试验结束后轴承内圈滚道状态如图 2 所示。

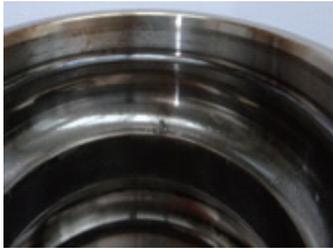


图 2 轴承内圈滚道状态

2.4 试验数据

当轴承发生故障时,其振动加速度将发生明显变化。定义振动加速度发生明显变化且高于轴承正常工作时最大值的点称为突变点。

轴承试验历时 184 h 42 min,试验过程中每 5 s 提取 1 个振动加速度,总计提取 132 998 个数据。初始振动加速度为 0.049 mm/s^2 ,当振动加速度达到 0.098 mm/s^2 (第 131 013 个加速度) 时认为轴承失效,第 129 130 个振动加速度突然增大为 0.076 mm/s^2 ,称为加速度突变点,轴承故障之前经历的时间为 179 h 20 min。

轴承的整个工作周期可以分为 3 个阶段,即正常阶段、故障阶段以及失效阶段。轴承故障分为早期故障和严重故障 2 个阶段。轴承振动时间序列如图 3 所示。

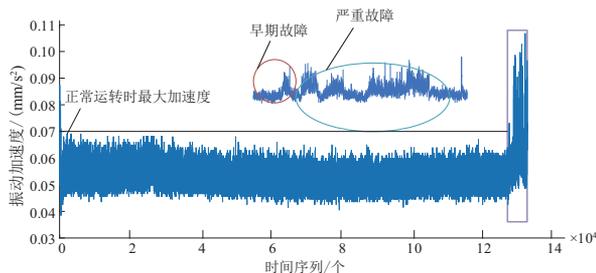


图 3 轴承振动时间序列

3 数据分析

将试验轴承全寿命周期振动数据通过式(6)和式(7)分成若干个子序列,通过威布尔分布模

型获得各子序列的形状参数和尺度参数。

3.1 数据提取

本文旨在研究轴承开始故障之前振动加速度与各子序列威布尔参数之间的关系,所以在分析数据时只提取发生故障之前的数据。轴承全寿命周期包含 132 998 个振动加速度数值,第 129 130 个加速度发生突变,所以只对 129 130 前个子序列的威布尔参数进行分析。

3.2 分析结果

将形状参数和尺度参数分别绘制成折线图如图 4、图 5 所示。

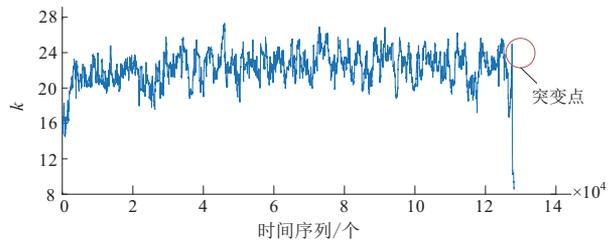


图 4 形状参数折线图

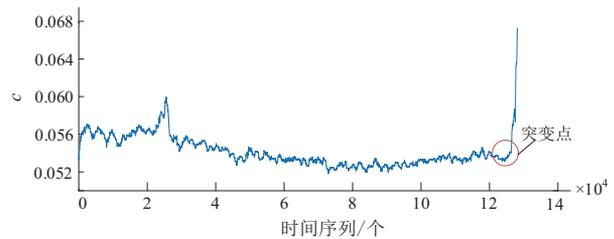


图 5 尺度参数折线图

由折线图图 5 和图 6 可知,随着时间的推移,形状参数和尺度参数变化趋势相同。轴承正常运行时两参数在某一范围内连续波动,直到开始故障前的较短时间段发生剧烈变化。

轴承故障之前经历的时间为 179 h 20 min,第 127 595 个子序列的形状参数开始骤降,尺度参数开始骤增,参数变化之前的总时间为 178 h 36 min,所以通过此种方法可以提前 44 min 预测轴承故障。

4 结语

1) 根据振动加速度、威布尔形状参数、威布尔尺度参数的变化规律可以说明威布尔参数的演变可以表征轴承状态的变化。

2) 比较轴承振动加速度与威布尔参数突变的时间,可以提前预报轴承失效,试验中轴承提前 44 min 预报轴承故障。

本文的研究尚在进行中,后续应在以下方面

作进一步研究。

1) 扩展振动时间序列数据源。本文分析的 3 组数据均为汽车轮毂轴承的试验数据,后续应验证其他类型或其他应用的轴承,以进一步验证本方法的通用性。

2) 判定标准的界定。本文采用先定性后定量的方法对轴承失效进行提前预报。但是并未确定合适的量化标准,后续应通过更多试验总结参数量化标准。

3) 融合多个性能退化指标。本文只针对振动加速度这一个性能退化指标预报轴承故障,后续应该融合更多的性能退化指标预报轴承故障。

参考文献:

- [1] GUSTAFSSON O G, TALLIAN T. Detection of damage in assembled rolling element bearings [J]. *A S L E Transactions*, 1962, 5(1): 197-209.
- [2] 江叶峰, 苏万斌, 易灿灿. 高速电梯曳引机主轴组件综合性能检测装置设计与分析[J]. *机械制造与自动化*, 2022, 51(4): 196-199.
- [3] 夏新涛, 叶亮, 常振, 等. 乏信息条件下滚动轴承振动性能可靠性变异过程预测[J]. *振动与冲击*, 2017,

36(8): 105-112, 143.

- [4] GEBRAEEL N, LAWLEY M, LIU R, et al. Residual life predictions from vibration-based degradation signals: a neural network approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(3): 694-700.
- [5] 陈旭涛. 滚动轴承可靠性评估与剩余寿命预测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [6] 夏新涛, 孟艳艳, 邱明. 用灰自助泊松方法预测滚动轴承振动性能可靠性的变异过程[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(9): 97-103.
- [7] 常振, 魏剑波, 平晓明, 等. 轴承性能时间序列的概率信息求取及退化分析[J]. *机电工程*, 2021, 38(1): 27-34.
- [8] WEIBULL W. A statistical theory of the strength of materials [J]. *Royal Swedish Institute for Engineering Research*. 1939, 151(15): 1-45.
- [9] LUNDBERG G, PALMGREN A. Dynamic capacity of rolling bearings [J]. *Acta Polytech*, 1947(3): 1-52.
- [10] 郭永东. 移动平均法在数据采集和分析中的应用[J]. *电子科技*, 2014, 27(9): 118-120.

收稿日期: 2023-05-24

(上接第 34 页)

1) 流场研究结果表明, 回流燃烧室冷态流场上下结构不对称, 文氏管喉道距旋流杯出口的距离增加, 燃烧室头部低速回流区范围有所扩大, 但流动结构基本不变。文氏管喉道直径缩小, 燃烧室头部下回流区范围增幅明显, 旋流杯形成的旋转气流出现贴壁现象, 流动结构变化明显。

2) 点火过程存在明显的阶段性变化, 初始火焰往上游传播对点火成功有重要作用。

3) 在燃烧室总压损失 3% 的条件下, 文氏管喉道距旋流杯出口的距离增加, 点火延迟时间有所增长, 但增幅不大; 文氏管喉道直径缩小, 点火延迟时间大大增加, 增幅超 118%。

参考文献:

- [1] 林宇震, 许全宏, 刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 冯剑寒. 不同头部间距下三头部燃烧室点火过程研究[J]. *机械制造与自动化*, 2021, 50(2): 210-212, 221.
- [3] MONGIA H. Engineering Aspects of Complex Gas Turbine Combustion Mixers Part IV: swirl cup [C]// *Proceedings of the 9th Annual International Energy Conversion Engineering Conference*. San Diego, California. Reston, Virginia: AIAA, 2011: 5526.

- [4] ZHANG J, YAN L J, YIN K W, et al. PIV measurement of flow characteristic in single-head combustor with triple-stage swirler [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1064: 012014.
- [5] 吴施志, 王志凯, 石小祥, 等. 文氏管出口张角对旋流杯性能的影响研究[J]. *推进技术*, 2020, 41(8): 1756-1764.
- [6] 郑耀, 张阳, 邹建锋. 文氏管喉部直径对燃烧室流场结构影响的数值模拟[J]. *燃烧科学与技术*, 2015, 21(2): 97-102.
- [7] CAO Z B, XIAO Y L, SONG W Y, et al. Experimental study on thermoacoustic instability and emission characteristics of premixed swirl flame in a longitudinal combustor [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 172: 107354.
- [8] YANG S H, ZHANG C, LIN Y Z, et al. Experimental investigation of the ignition process in a separated dual-swirl spray flame [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 219: 161-177.
- [9] READ R W, ROGERSON J W, HOCHGREB S. Flame imaging of gas-turbine relight [J]. *AIAA Journal*, 2010, 48(9): 1916-1927.

收稿日期: 2023-05-26