

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.010

一种面向高温油脂滚动轴承的振动分析方法

楼望建, 庄黎东, 马自翥

(宁波易荣机电科技有限公司, 浙江 宁波 315205)

摘要:在对高温环境下使用的油脂增稠剂的研究中发现,这类增稠剂在常温条件下呈现为蜷曲的颗粒状形态。但当装有这些增稠剂的轴承开始旋转时,这些颗粒状结构很容易被碾碎,产生巨大的爆破音,这对轴承的振动测试结果造成了干扰。为了克服这一问题,采用一种基于滚动轴承各部件在径向振动信号上的时域特征分析的方法。通过运用时频变换技术和包络谐波分析,成功地实现对振动峰值不大于 20 dB 的油脂爆破音的识别,并与正常轴承的振动信号进行了有效区分。这种技术的应用使得轴承振动信号分析更为精确,它有助于提高轴承使用寿命和可靠性,确保设备平稳运行。

关键词:滚动轴承;高温油脂;振动;时频分析;谐波分析

中图分类号:TH133.33 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0048-04

A Vibration Analysis Method for High Temperature Grease Rolling Bearings

LOU Wangjian, ZHUANG Lidong, MA Zizhu

(Ningbo Yirong Electromechanical Technology Co., Ltd., Ningbo 315205, China)

Abstract:In the study of grease thickeners used in high-temperature environments, it was found that these thickeners appeared as curled particle-like structures at room temperature. However, when the bearings with these thickeners are put into rotation, these particle structures are easily crushed and a loud explosion sound may be generated, which may interfere with the vibration test results of the finished bearings. To overcome this problem, this article adopts a method based on time-domain feature analysis of the radial vibration signals of each component of the rolling bearing. By using time-frequency transformation technology and envelope harmonic analysis, the research team successfully identifies the grease explosion sound with a vibration peak not greater than 20 dB and effectively distinguishes it from the vibration signal of normal bearings. The application of this technology makes the analysis of bearing vibration signals more accurate, helping to improve the service life and reliability of bearings, and ensure the smooth operation of equipment.

Keywords:rolling bearing;high temperature grease;vibration;time-frequency analysis; harmonic analysis

0 引言

随着工业发展,对滚动轴承的性能要求越来越高,特别在高温、高速、重载等极端工况下^[1]。高温油脂作为滚动轴承不可或缺的一部分,其性能直接影响到轴承的摩擦、磨损、振动和寿命^[2]。因此,针对高温油脂滚动轴承的振动分析成了研究热点。传统油脂增稠剂在高温下容易软化,导致油脂流动性增强,进而增加轴承的摩擦和磨损。为了改善这一问题,研究人员开始探索新型的高温油脂增稠剂,使它在高温下能够保持较好的稳定性。然而,这些增稠剂在轴承旋转过程中会产生爆破音,对振动测试造成干扰^[3]。

为了解高温油脂滚动轴承的振动特性,研究团队开展了实验和仿真分析,发现高温油脂的黏度、增稠剂的种类和浓度、轴承的结构、精度和安

装质量等因素都会对轴承振动产生影响^[4-5]。此外,随着人工智能和大数据技术的发展,通过对大量振动数据进行分析,研究人员可以建立轴承的振动模型^[6-9],预测其性能和寿命,并提前发现潜在的故障。

1 轴承振动及干扰因素

滚动轴承振动特性主要被归纳为以下几类:

1)圆度:内圈每旋转一周,产生 2 ~ 10 个波(低频)。

2)波纹度:每周产生 10 ~ 60 个波(中频),由磨削、超精研、砂轮花、磕碰等引起。

3)表面粗糙度:60 ~ 300 个波(高频),主要由材料缺陷、伤痕、杂质等引起。

4)保持器串动:主要存在于金属保持器,而尼龙保持器串动量一般很小^[10]。

第一作者简介:楼望建(1967—),男,浙江诸暨人,工程师,本科,研究方向为轴承动态性能测试技术研究,13808059105@163.com。

5) 缺滚子、混球等。

在轴承振动检测中,存在多种干扰因素,其中常见的包括:

a) 擦盖:球轴承防尘盖凸起,或因异物与测振仪芯轴端面发生接触并产生摩擦。

b) 打滑:芯轴未能充分驱动轴承以额定转速旋转,芯轴与轴承内圈之间有转速差^[11]。

c) 环境噪音:测试环境中的噪音通过空气传播至轴承表面,被振动传感器所捕获。

d) 油脂:在高温高速轴承油脂中添加的增稠剂聚合物会产生爆破,业内称之为“油脂音”。

在上述干扰因素中,油脂音对振动测量的影响最大^[12]。

2 油脂类相关分析方法

2.1 静音油脂

对于追求静音的轴承,通常会采用特定类型的静音油脂,如日本协同 SRL,这种油脂理论上能够确保无异常冲击^[13]。对于此类轴承的振动检测,我们主要关注其有效值、峰值或波峰因数,并增加一个“超精”指标,用于检测滚道因研磨不良而产生的振纹,超精与轴承能量集中度相关。轴承振动的能量并非均布于整个频谱范围内,常常会集中于某些特定的频率点。这种集中对旋转机械的性能产生不利影响,功率谱的最大值可作为衡量能量集中度的指标。

对型号 32007 的圆锥滚子轴承所做的试验结果显示,其时域波形呈现均匀稳定的特征,未观察到任何异常尖峰现象,在低、中、高频段的有效值和峰值均处于正常范围内。从频域分析的角度来看,能量过度集中于 800 Hz 附近这一特定频段。若将这一信号通过扬声器播放,将会听到类似口哨的声音。

2.2 高温油脂

聚氨酯被用于高温、高速和高载荷轴承的润滑脂中,它在较低温下会蜷曲成球状颗粒,确保了润滑脂的优良流动性^[14-15]。而在轴承振动测试中滚动体会碾碎这些颗粒,产生明显的爆破音(波峰因数不小于 21 dB),类似气泡破裂发出的“啵啵”声。

如图 1 所示是采用日本协同 Super-N 油脂的型号 6201 轴承,油脂受到冲击产生的振幅与轴承自身振动之间的差异相当显著,最大差异可超过 20 dB,而最小差异则不足 11 dB。若以峰值或波

峰因数作为评判标准,这类轴承可能被视为存在缺陷,至少也表明其清洁度不佳。

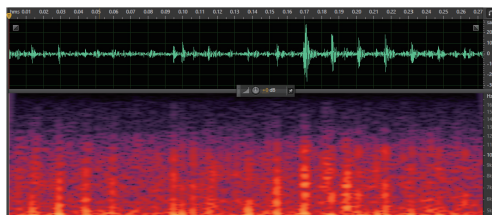


图 1 聚氨酯轴承振动时频分析

2.3 粘附和调制

若将观察尺度细化至极短的时间段内,油脂音可能与轴承固有缺陷的表征极为相似,油脂所引发的脉冲常呈现多次等间隔的重复特性,最多可能达到或超过 30 次。图 1 中,在 0.17~0.25 s 的时间段内出现的 6 个最大脉冲,基本等间隔分布,其间隔约为 15 ms,如图 2 所示,型号 6201 轴承存在微小外圈缺陷,经过短时傅里叶变换后的声谱图揭示出清晰的 17 条间隔为 15.25 ms 的等间距竖纹。我们推断,在图 1 中的 0.17~0.25 s 时间段内,有一颗油粒恰好粘附于外沟表面,经过 6 颗钢球的依次挤压,直至油粒被完全碾破或挤压至沟道边缘。在此过程中,传感器接收到的振动信号呈现出类似于外圈沟道存在凸起时的特征。

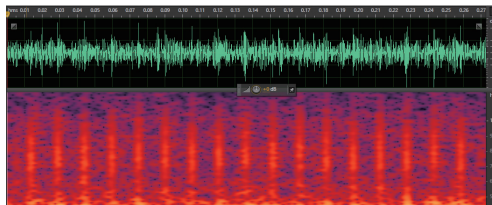


图 2 型号 6201 轴承 1 500 r/min 外沟缺陷图谱

然而轴承真正的缺陷表现通常为持续、稳定且可复现,这些特征往往需要经过较长时间尺度验证。例如,套圈上的拉痕,仅当传感器位于拉痕正上方,且恰好有一颗钢球同时处于拉痕之上,形成三点位置重合,才能产生微弱的径向振动。

如图 3 所示,在 0.15~0.40 s 和 0.65~0.85 s 之间存在明显的脉冲,声谱图进一步揭示其频率在 4 kHz 附近。每次脉冲的幅值呈现不同程度的变化,其中最大幅值仅为图 1 所示峰值的 1/4,即与图 1 中的油脂音相比,内沟道拉痕产生的振动强度要低 12 dB。此外,脉冲间隔约为 40 ms,这恰好对应于内圈在 1 500 r/min 转速下完成一次旋转的时间。然而,在同一次采样中,0.40~0.5 s 的

时间段内并未观察到明显的异常情况,这表明在此期间,拉痕、钢球和传感器未能形成有效的三点一线结构。在其它时间段内,虽然能够形成三点一线结构,但每次钢球经过拉痕时,与传感器之间的距离存在细微的波动。

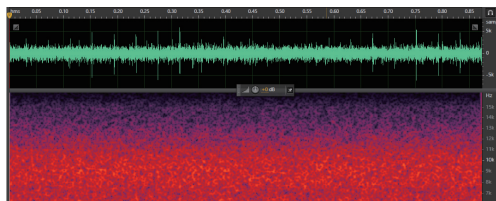


图3 内沟拉痕径向振动

以上调制效应在偶数颗球轴承上普遍存在,因为深沟球轴承如果接触角较小,且填球角度略大于 180° ,内圈特征频率接近主轴转频的整数倍^[16]

$$f_{ir} \approx f_s \left(\frac{N}{2} + 1 \right) \quad (1)$$

式中: f_{ir} 为内沟道任意一点的钢球通过节拍; f_s 为主轴旋转频率,1 500 r/min 时为 25 Hz; N 为钢球个数。

偶数球轴承内圈每旋转一圈,有近似 $N/2+1$ 颗钢球通过沟道上同一个点。若该点存在缺陷且恰好与传感器和某颗钢球在一起,当它旋转一圈后,仍会有另一颗钢球在其附近,直到多圈后才可能与钢球远离。反之,如果缺陷点运行到传感器正下方,恰好位于两颗钢球中间的位置,当它旋转一圈后仍然在两颗钢球之间,没有冲击产生。

“两球中间”(无冲击)与“三点一线”(有脉冲)两种状态之间的切换时间,由内圈特征节拍 f_{ir} 与主轴转频整数倍之间的接近程度所决定。调制周期可以用以下数学公式来描述

$$T = \frac{1\,000}{\left(\frac{N}{2} + 1 \right) \cdot f_s - f_{ir}} \quad (2)$$

式中 T 为调制周期,单位为 ms。内圈在沟道方向上的拉痕,若其特征节拍接近旋转频率的整数倍,将呈现一种间歇性的出现模式,最长可能需要经过 30 圈后方能再次观察到。

3 拉痕与划伤相关分析方法

我们称垂直于滚动体旋转方向的损伤为“划伤”,顺着滚动体旋转方向的损伤为“拉痕”。拉痕被碾压只能产生微弱并短促的径向振动,局限于滚子与外圈接触点附近,当传感器在附近时振

动才能被检测到。振动测试时,由于传感器和外圈一般固定不动,只有与传感器没有间隔其它滚动体的外滚道拉痕才可能被检测到^[17]。而外滚道划伤则允许与传感器相距更远,1 ~ 2 倍滚动体间距仍能检测到虽有衰减但特征明确的周期性脉冲。所有能被检测到的外滚道伤痕振动波形均类似图 2 所示的波形。

拉痕与划伤不仅存在于滚道表面,同样可能存在于滚子表面。分析某型号 30205 圆锥滚子轴承在 1 500 r/min 下的振动波形。其包络谱在滚子自转频率 72.5 Hz 及其所有谐波处均呈现出显著的尖峰,这指向其中一颗圆锥滚子表面存在轴向裂纹。每当轴承旋转一圈,裂纹与内滚道之间的碾压冲击均能有效地传递到传感器。

对同一个型号 30205 圆锥滚子轴承,将轴向裂纹的滚子替换为切向拉痕的滚子,其时域振动波形展现出强烈的周期性变化:每经过一个保持器的旋转周期,便会出现一到两次较大的脉冲。这是因为,当滚子拉痕与滚道面在某次接触时恰好位于传感器正下方,此时能够检测到一个显著的脉冲信号。而当滚子旋转半圈后再次与滚道面接触时,其位置已远离传感器,并且由于间隔了其他滚子,此时的冲击被显著衰减。随着滚子继续旋转并进一步远离传感器,脉冲信号逐渐减弱,直至经过一次公转,滚子再次接近传感器时,方可重新检测到明显的脉冲信号。当缺陷滚子运行至传感器下方时,无论其缺陷面对的是内滚道还是外滚道,均能对传感器产生冲击,且冲击幅值受碾压瞬间与传感器之间距离的影响,只要没有滚子间隔,均能观察到明显的脉冲。

在包络谱中,滚子拉痕的特征为在滚子自转频率的偶次谐波处有明显的尖峰,而 72.5 Hz 的基频和奇次谐波则相对不那么显著。主频及其各次谐波上均出现尖峰,同时保持器特征频率的各次谐波和滚动体特征频率的偶次谐波也表现出相应的波动。

4 油脂颗粒方向性相关分析

我们把油脂颗粒分为两类:1)轴向油粒,是一种垂直分布于滚道的蠕虫形油脂颗粒;2)周向油粒,是一种顺着滚道分布的蠕虫形油脂颗粒。对于轴承振动而言,油粒的方向性差异会引发不同的干扰效应。油粒沿着滚道方向被碾压,由于其流动性和易被推动的特性,往往仅产生短暂的脉冲干扰,随后被推移至沟道一侧。在包络谱分析

中,周向油粒表现为瞬间出现随即消失的滚动体偶次谐波,且不伴随保持器的波动^[18]。

若这些颗粒以垂直于滚道方向被碾压,由于难以被推离,它们将持续与轴承接触,产生类似于轴承固有缺陷的连续音,这种噪音在包络谱的内圈和滚动体各阶谐波中均可能有所体现。但是,这种特性表现为单次采样中仅在短时间内存在的波动,不同于划伤产生的持续稳定且可复现的波动^[19]。

5 结语

经过对前述章节的深入剖析,针对轴承诊断的判据总结如下:

1) 静音油脂不含有杂质,任何由杂质所产生的噪音都被视为不合格轴承。可以通过有效值、峰值或波峰因数等参数,结合频谱分析来判断轴承内滚道的质量好坏。采样时间不能短于拉痕的调制周期,这样才能确保检测结果的准确性。

2) 评判外滚道缺陷和钢球缺陷,需要在外圈不同的点位进行检测,测量点数不能少于“滚动体数/2”。

3) 对于高温油脂,可以使用包络分析来进一步评估轴承的状况。在包络谱中,外滚道伤痕在外圈特征频率或各阶谐波处有尖峰。如果采样时间足够长,轴向油粒的影响可能消失。

4) 对于内滚道的划伤,其包络谱在内圈特征频率各阶谐波和主轴基频处有明显的尖峰,可以以不短于主轴旋转周期的各时间段内的最小功率作为判断指标。

5) 内滚道的拉痕在主轴旋转频率及各阶谐波处有明显的尖峰,总采样时间不短于调制周期,可以选择最明显的一段作为判断标准。而周向油粒则不会产生类似的波形。

6) 滚动体的划伤在其自身特征频率及各阶谐波处有明显的尖峰,可以以最不明显的一段时间作为判断标准。

7) 滚子的拉痕在偶次谐波及保持器的各阶谐波处有明显的尖峰,我们可以以最明显的一段时间作为标志,周向油粒产生类似波形的几率较低。

8) 球伤在偶次谐波和保持器的基频之间呈现间歇性重复的特点,可以以不短于保持器周期的各时间段内的最小特征作为评判指标。

参考文献:

- [1] 杨晓蔚. 滚动轴承产品技术发展的现状与方向[J]. 轴承, 2020(8): 65-70.
- [2] 刘大军, 李阳, 姚立丹, 等. 润滑脂特性与轴承噪声关联研究进展[J]. 轴承, 2023(10): 1-6, 15.
- [3] 王庆日, 赵丽, 高宇航, 等. 稠化剂纤维结构对低噪声润滑脂降噪性能的影响[J]. 轴承, 2022(5): 51-55.
- [4] 王子彦, 王凯, 王成龙. 电机轴承高温润滑脂应用性能评估[J]. 电机技术, 2024(4): 50-54.
- [5] 赵改青, 张遂心, 王晓波, 等. 聚脲润滑脂稠化剂结构与其性能的关系[J]. 润滑与密封, 2012, 37(7): 5-9.
- [6] 邹松, 董绍江, 夏宗佑, 等. 基于特征解纠缠和联合域对齐的滚动轴承多源域迁移诊断方法[J]. 振动与冲击, 2025, 44(1): 113-120, 133.
- [7] 傅顺军, 罗强, 李江, 等. 基于 STFT 同步压缩变换和 ResNet 参数迁移的滚动轴承智能诊断[J]. 船舶工程, 2024, 46(12): 58-67, 74.
- [8] 韩春红, 伊洪彬, 薛涛, 等. 基于 LE-DBN 故障诊断模型的滚动轴承振动信号特征提取[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(3): 131-134.
- [9] 丁春嵘, 周雨轩, 胡浩, 等. 基于深度特征提取神经网络的滚动轴承故障诊断[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 106-112.
- [10] 邢峥嵘, 贺天成. 滚动轴承保持架缺陷振动特征分析[J]. 山西冶金, 2024, 47(4): 237-238.
- [11] 涂文兵, 高宏, 杨本梦, 等. 考虑打滑摩擦的滚动轴承的振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2025, 44(19): 31-39.
- [12] 张向英. 低噪音润滑脂展望[J]. 合成润滑材料, 2021, 48(1): 35-37.
- [13] 许丽莹. 低噪声润滑脂在轴承振动特性上的对比试验研究[J]. 哈尔滨轴承, 2023, 44(2): 28-31, 35.
- [14] 苏亚东, 王金阁, 杨培培, 等. 聚脲润滑脂静音性能影响因素探讨[J]. 合成润滑材料, 2023, 50(1): 37-40.
- [15] 郭峰, 栗心明, 姜文静, 等. 滚动轴承润滑研究中的几个问题[J]. 轴承, 2024(5): 1-20.
- [16] 倪文钧, 张长. 基于 ANSYS 和 VMD 的轴承复合故障特性研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(2): 364-375.
- [17] 谢鹏飞, 赵森, 王雅梦, 等. 影响精密轴承振动性能的主因素分析[J]. 智能制造, 2022(2): 115-119.
- [18] 姜程, 苏怀刚, 王超, 等. 基于 BeQuiet+ 试验机的精密轴承润滑脂噪声性能评价方法[J]. 润滑与密封, 2024, 49(2): 173-180.
- [19] 梁先发, 王义, 汤宝平, 等. 基于动力学建模的滚动轴承全寿命周期退化模型[J]. 振动与冲击, 2024, 43(23): 211-219.

收稿日期: 2025-02-21