

基于线激光轮廓扫描的方法 测量滚动轴承保持架质心轨迹

西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室

闫柯，马帅军，赫高波，朱永生，洪军

【摘要】质心轨迹是评价保持架运动稳定性的一个重要判据。为了准确获取保持架质心运动轨迹，本文提出了一种用线激光轮廓扫描的测量方法，通过对保持架与内圈在径向平面内两个相互垂直方向上间隙长度变化量的动态监测，将间隙长度随时间的变化量等效为保持架质心的径向位移，对位移信号滤波处理后合成保持架质心运动轨迹。该方法无需改变轴承结构，不受驱动转速和加载装置空间上的限制，能够实现不同工况下的轨迹测量。不同转速工况下的轨迹测量结果验证了轮廓扫描方法的有效性，结果表明，内圈转速从 1000r/min 增加到 3000r/min，保持架质心运动轨迹趋于平稳。

【关键词】轮廓扫描；信号滤波；保持架质心轨迹；

滚动轴承作为关键基础零部件广泛应用于旋转机械设备中^[1]，其性能与稳定性是保障设备正常运行的重要因素。保持架作为轴承自由度最大、最为薄弱的组件之一，其运转状态直接影响着轴承的动态性能^[2]。研究表明：保持架不稳定引起的摩擦力矩波动或保持架断裂是高速轴承主要的失效形式之一^[3]。在轴承实际运行过程中，由于外部载荷、钢球与保持架的相互作用力、润滑剂的粘性阻力以及保持架自身复杂结构等的影响，保持架运动行为具有不确定性。质心运动轨迹作为直观描述保持架动态稳定性的重要判据，对分析轴承动态特性、验证仿真模型具有重要意义。然而，由于保持架自身旋转以及质心分布于体外的特点，导致保持架质心运动轨迹的监测受到很大限制。

国内外许多研究者对保持架质心轨迹测量方法做了大量的探究工作。Kingsbury 把两个光纤探针沿轴向相隔 90 度布置，保证保持架边缘在探测区域内，保持器边缘的径向运动调制反射光使得光电二极管产生电压信号，通过电压信号的变化反映保持架的稳定性，验证了其提出的保持架涡动模型^[4-5]。

光纤探头输出的电压信号可以在一定程度上反映出保持架的运动稳定性，但由于没有保持架位移信息，难以形成完整的保持架质心轨迹。随着传感器技术的发展，许多学者开始用电涡流或者激光位移传感器测量保持架质心轨迹，并基于此分析保持架的运动稳定性。Sakaguchi 在轴向方向上垂直于轴承径向平面均匀布置四个涡流位移传感器，测量圆锥滚子轴承保持架质心运动轨迹。结果表明，保持架涡动幅度随着内圈转速和轴向载荷的增加而增加^[6-7]。黄迪山等用两个激光位移传感器采集保持架在轴承径向平面两个相互垂直方向上的振动位移信号，进而获取保持架质心运动轨迹^[8-9]。赵振旗用同样的方法测量保持架质心运动轨迹，并进一步实现了保持架质心轨迹的三维重构和动态显示^[10-11]。陈后清将电涡流位移传感器集成在试验机上，完成了同载不同速和同速不同载两种工况下保持架质心轨迹的测量^[12]。Stacke 布置三个轴向位移传感器和四个径向位移传感器测量保持架质心运动轨迹，测量结果表明重力会对保持架的涡动半径和质心位置产生影响^[13]。Cui 在轴承径向平面相互垂直的两个方向布置两个涡流位移传感器测得圆柱滚子轴承保持架质心运动轨迹，滚子动不平衡量越大，保持架质心轨迹越复杂^[14]。然而，上述基于电涡流位移传感器的保持架轨迹测试研究中，传感器输出的电压-位移特性曲线易受保持架材质的干扰，导致位移信号测试不准。而利用激光位移传感器测量是通常需要将保持架加宽或在塑料保持架上套薄壁金属环或对外圈开槽，此类方式改变了轴承结构，容易影响保持架自身运动，增加了真实轨迹测量的难度。

随着高速摄影技术和图像处理技术不断进步，学者们通过在保持架上做标记，用高速相机结合图像处理获取保持架质心轨迹。Yang 用高速摄像技术测得了不同转速下的保持架质心轨迹，并通过保持架的非重复跳动量(NRRO)分析了保持架的非线性动态行为，结果表明，保持架的 NRRO 值随转速增加而

增大^[15-16]。Gao 通过高速摄影技术获得了多孔含油聚酰亚胺保持架质心运动轨迹，研究了含油率、内圈转速和轴向力对保持架质心运动轨迹、振动水平以及打滑率的影响规律。结果表明：转速 5000 r/min 时保持架涡动半径的幅值约为转速 1000 r/min 时的保持架涡动半径幅值的 3 倍^[17]。Eberhard 通过高速图像处理得到保持架质心运动轨迹，分析了圆柱滚子轴承在恒定转速和不同加速度下的保持架质心运动行为^[18-19]。但随着轴承尺寸越大，保持架转速越大，对相机分辨率的要求越高；而且在轴向加载的工况下，相机无法获取完整的保持架轮廓。

为了实现针对运行工况下轴承保持架质心轨迹的准确测量，本文提出了一种基于轮廓扫描的测量方法，以四点接触球轴承为研究对象，采用线激光轮廓测量仪实现对其保持架质心轨迹的动态测量。该方法不受轴承尺寸、加载装置空间和保持架转速限制，也无需改变轴承结构。为滚动轴承保持架动态特性研究提供了一种新的实验手段。

1、测量原理

轴承运行时，外圈固定，保持架随着内圈旋转。若保持架始终与外圈保持接触，则保持架的质心轨迹理论上是一个以引导间隙大小为半径的圆^[20]。虽然无法直接跟踪保持架的质心位置，但是保持架与内外圈之间的间隙变化却可以间接地反映出保持架质心的位置变化。通过测试获得不同时刻的质心位置坐标，便可以形成保持架质心的运动轨迹。图 1 描述了确定某一时刻质心位置的原理，每一时刻由保持架在两个径向方向的位移量确定保持架质心的位置坐标，下一时刻确定新的质心坐标，根据两个径向方向位移，最后形成保持架质心运动轨迹。

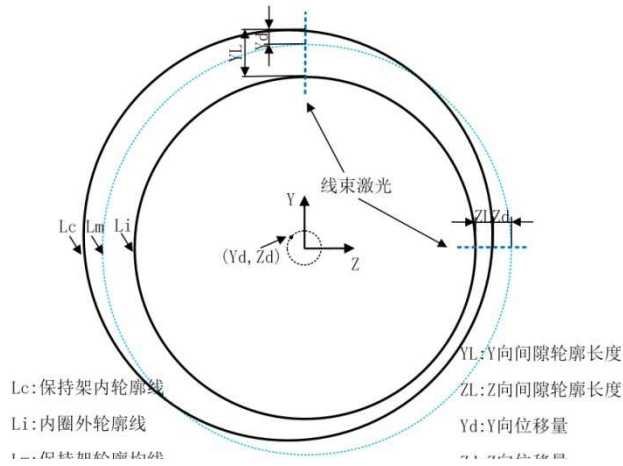


图 1 保持架质心轨迹测量原理

Fig. 1 Cage center of mass trajectory measurement principle

某一时刻保持架内轮廓与内圈外轮廓扫描结果如图 2 所示，保持架与内圈间隙处线激光扫描的轮廓高度值为 0，该时刻下保持架内轮廓线和内圈外轮廓线对应的激光点数分别在 1500 点和 2500 点附近。

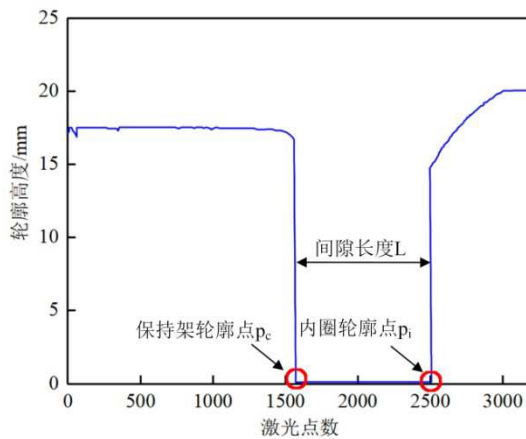


图 2 原始轮廓曲线

Fig. 2 Original profile curve

在径向两个相互垂直的方向上监测保持架内轮廓与内圈外轮廓之间的间隙长度 L ，间隙处被线束激光覆盖，确定保持架内轮廓点与内圈外轮廓点的差值便可求出间隙长度值，计算公式为：

$$L = (p_i - p_c) \Delta l / 1000 \quad (1)$$

式中： L 为保持架与内圈轮廓间隙长度 mm； p_i 为内圈外轮廓线所对应的激光点数； p_c 为保持架内轮廓所对应的激光点数； Δl 为激光点之间的间隔 μm 。

轮廓扫描结束后得到测量时间内的所有保持架与内圈在径向方向上的间隙长度值 YL 和 ZL 。由于在实际测量中发现内圈外轮廓的位置变动量远远小于保持架外轮廓的位置变动量，因此取间隙长度变化的均值作为保持架的动态均线，间隙长度均值计算公式为：

$$Lm = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N L(t) \quad (2)$$

式中： Lm 为保持架与内圈轮廓间隙长度均值 mm； N 为总采样点个数； t 为轮廓扫描时间； $L(t)$ 为 t 时刻的间隙长度。

保持架内轮廓线相对于保持架动态均线的位置变动量近似为保持架质心在两个径向方向上的位移 Yd 和 Zd ，保持架质心径向位移计算公式为：

$$d(t) = L(t) - Lm \quad (3)$$

式中： d 为保持架质心的径向位移。

最后经位移信号滤波去噪后，形成质心运动轨迹，滚动轴承保持架质心运动轨迹获取流程如图 3 所示。

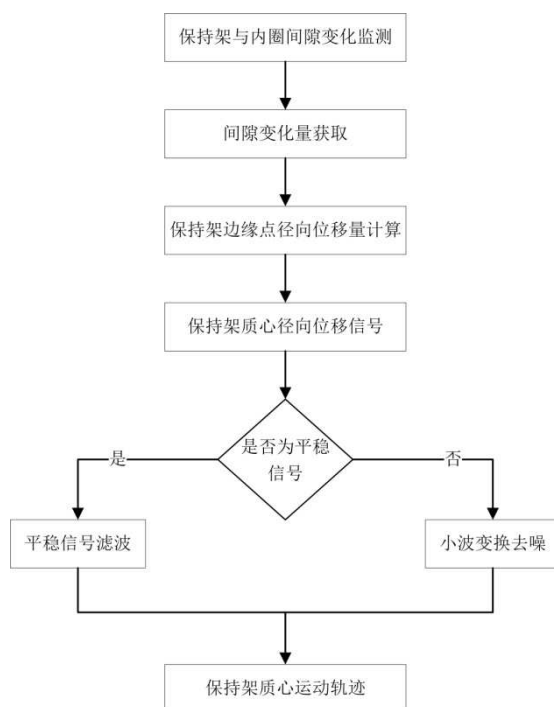


图 3 保持架质心轨迹获取流程

Fig. 3 Cage center of mass trajectory acquisition process

2、保持架质心轨迹测量平台

滚动轴承保持架质心轨迹试验台主要有电主轴、支撑轴、试验轴承、位置调节平台和加载装置五个部分组成，如图 4 所示。电主轴控制着轴承的内圈驱动转速，模拟不同的转速工况；采用电动推缸加载装置实现对试验轴承的轴向和径向加载；位置调节平台把轮廓测量仪固定在准确的位置上，并减少试验台振动对测量结果的影响。

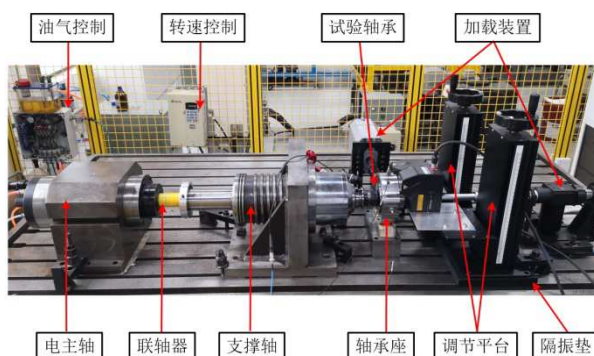


图 4 滚动轴承保持架质心轨迹测量试验台

Fig. 4 Rolling bearing cage center of mass trajectory measurement test bench

试验台主要用于实现滚动轴承在运行过程中的保持架质心运动轨迹测量、保持架转速测量和外圈振动加速度测量。

如图 5 所示，轨迹测量系统通过线激光轮廓测量仪完成轮廓扫描，由感测头 (LJ-X8020)，控制器 (LJ-X8000A)，直流 24V 电源，外部触发开关，信号集线器和软件 (LJ-X Navigator) 组成。LJ-X8020 型号的线激光轮廓测量仪可测轮廓宽度 8mm，距被测物体的参考距离 $20 \pm 2\text{mm}$ ，最高采样频率 1kHz，线激光轮廓数据量 3200 点，测量精度 (即激光点间的间隔) 为 $2.5 \mu\text{m}$ 。

线激光轮廓测量仪、激光转速传感器和振动加速度传感器的布置如图 6 所示。两个线激光轮廓测量仪在径向方向上呈 90 度分布，分别固定在 1 号和 2 号位置上，其中 1 号位置的传感器测量的是轴承径向方向 Y 向的信息，2 号位置的传感器测量的是轴承径向方向上 Z 向的信息。

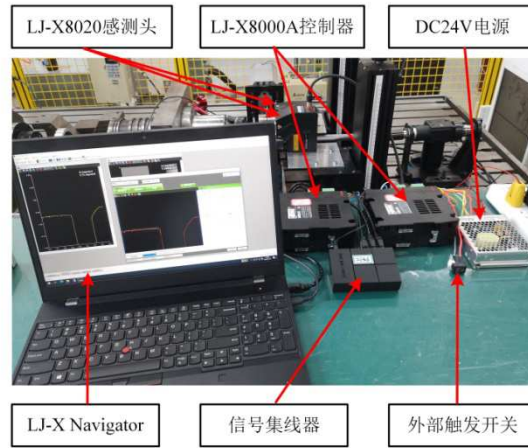


图 5 保持架质心轨迹测量系统
Fig. 5 Cage center of mass trajectory measurement system

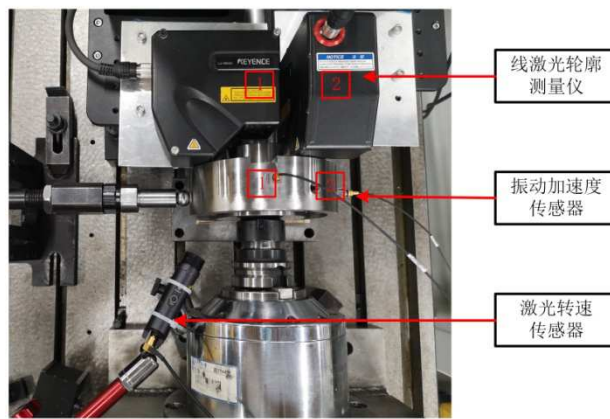


图 6 传感器布置
Fig. 6 Sensors arrangement

3、保持架质心轨迹测量实验

3.1 保持架质心径向位移获取

表 1 给出了试验轴承的主要参数，引导间隙为 0.2mm。

表 1 轴承参数
Table 1 bearing parameters

参数	数值
内径 d /mm	75
外径 D /mm	130
节圆直径 d_m /mm	102.5
滚动体直径 D_w /mm	17.462

滚动体个数 $Z/\text{个}$	15
轴承宽度 B/mm	25
接触角 $\alpha/^\circ$	35

试验轴承的运行工况：内圈转速 1000r/min(转频 $f_i=16.67\text{Hz}$)，轴向载荷 1000N，无径向载荷，脂润滑，测得的保持架转速为 428r/min(转频 $f_c=7.13\text{Hz}$)。轮廓测量仪扫描频率为 1kHz，采样时间 9s，共有 9k 个采样点。从图 7 可以看出保持架径向方向上间隙长度的变化幅度有差别，Y 向的平均间隙长度小于 Z 向的平均间隙长度，相差约 0.16mm。由于黄铜保持架的质量较大，受重力影响，保持架整体有沿重力方向 (Y 负方向) 压紧的趋势，造成传感器监测位置处的保持架与内圈之间径向间隙 Y 向间隙长度略小于 Z 向间隙长度，因此保持架重力的影响在仿真研究中是不可忽略的因素。

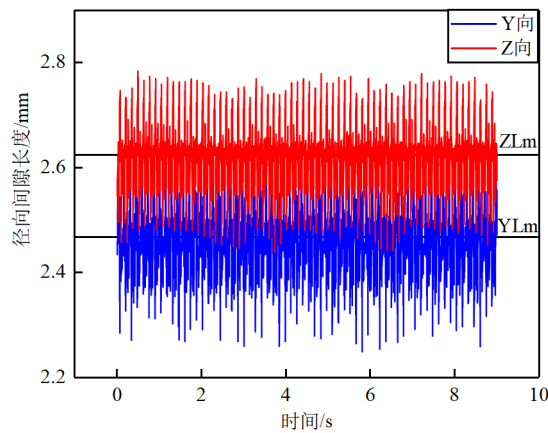


图 7 径向间隙长度变化
Fig. 7 Radial gap length variation

根据式 2 分别计算出 Y 向和 Z 向的间隙长度均值，以此作为每一时刻保持架和内圈间隙变化的参照，由式 3 计算出每个采样点处的位移量，进而得到保持架质心在径向两个方向上的位移，如图 8。

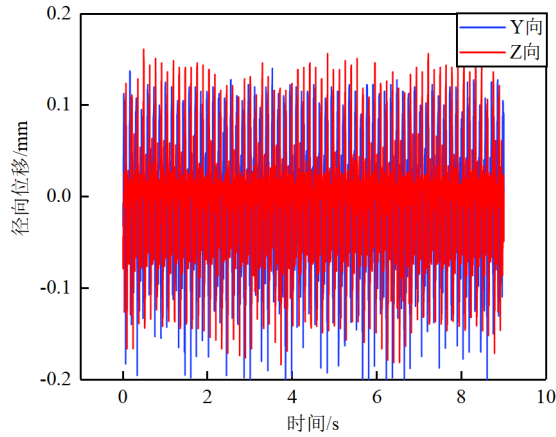


图 8 保持架质心径向位移曲线
Fig. 8 Cage center of mass radial displacement curve

对径向位移信号进行 FFT 变换，从图 9 的频谱可以看出，保持架的转频是主要的频率成分，位移信号中的噪声主要来源于内圈转频和保持架转频的倍频。

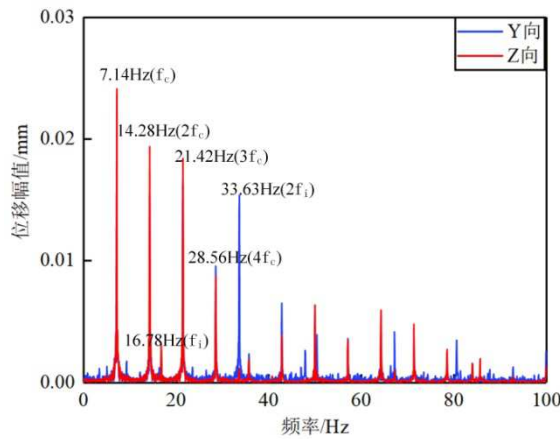


图 9 保持架质心径向位移频谱
Fig. 9 Cage center of mass radial displacement spectrum

由于保持架转频的倍频信号干扰，根据式 3 得出的保持架质心两个径向方向的位移不能直接合成质心运动轨迹。需要进一步对位移信号做滤波处理。只保留保持架转频的基频信息，滤波后的位移如图 10，由 2.2s 附近的位移曲线局部放大图可知，Y 向位移在时间上先于 Z 向位移约 1/4 周期，这一结果验证了 Kingsbury 的保持架涡动模型。

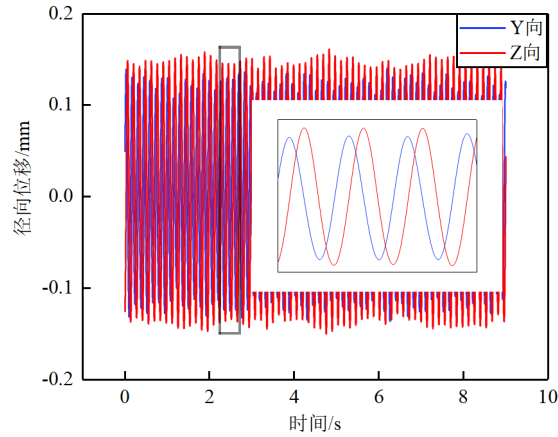


图 10 滤波后保持架质心径向位移
Fig. 10 Cage center of mass radial displacement spectrum

3.2 测量结果

保持架质心运动轨迹由 Y、Z 两个径向方向滤波后的位移信号合成，如结果如图 11 所示，在内圈转速 1000r/min，轴向载荷 1000N 工况下，保持架质心运动轨迹近似呈圆形，涡动半径变化范围较小，说明保持架处于相对稳定的运动状态。

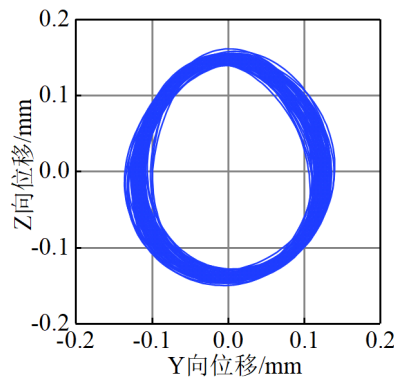


图 11 保持架质心运动轨迹
Fig. 11 Cage center of mass motion trajectory

3.3 结果分析

外部载荷工况条件不变，分别测量内圈转速为 2000r/min、2500r/min、3000r/min 三种工况下的保持架质心运动轨迹，测量结果如图 12 所示。随着内圈转速增加，轨迹更接近规则的圆形，说明保持架运动逐渐趋于稳定。由于保持架受自身重力影响，在低转速运行时保持架质心 Z 向位移幅值略大于

Y 向位移幅值，导致轨迹在 Z 轴方向的变化量较大；随着内圈转速增加，重力影响减弱，两径向方向的位移变化幅值更接近，轨迹更平稳。

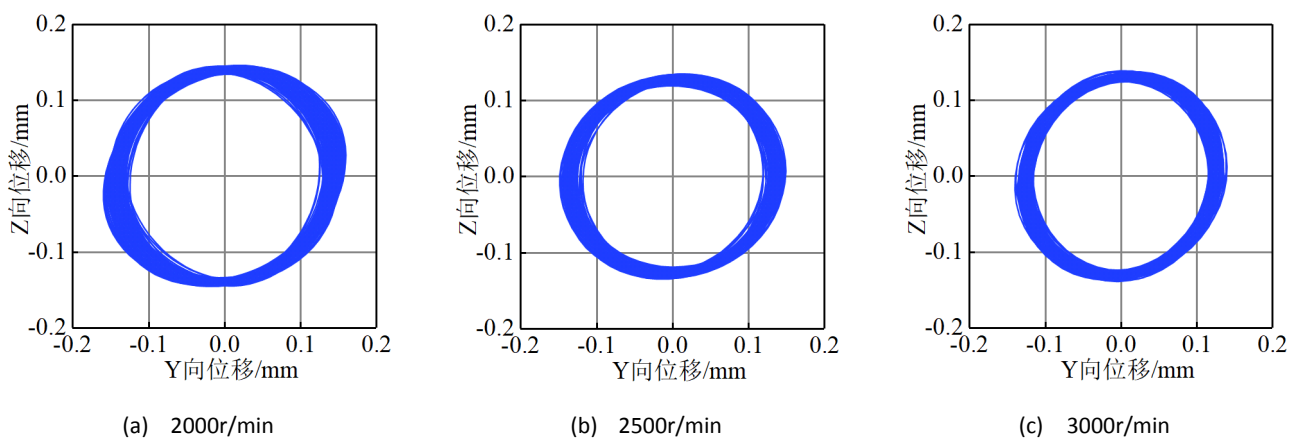


图 12 不同转速下保持架质心轨迹变化过程
Fig.12 Variation process of cage mass center trajectory at different rotational speeds

4、结论

本文将线激光轮廓扫描技术应用到滚动轴承保持架质心运动轨迹测量方法中，该方法无需改变轴承结构，不受驱动转速和加载装置空间上的限制，能够实现真实运行环境下的轴承保持架质心轨迹测量。为滚动轴承保持架动态特性研究提供了一种新的实验手段。

【参考文献】

- [1] 马帅军,闫柯,张晓红,王明凯,朱永生,洪军.滚动轴承运动-接触精确建模与二次开发[J].西安交通大学学报,2021,55(08):33-41.
MA Shuaijun, YAN Ke, ZHANG Xiaohong, et al. An accurate modeling method and secondary development of bearing contact-motion [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(08): 33-41.
- [2] 陈书恒,李猛,刘恒,梅凯路,贺凤祥.采用频谱细化的超声法在线测量滚动轴承保持架转速[J].西安交通大学学报,2020, 54(07): 139-145.
CHEN Shuheng, LI Meng, LIU Heng, et al. On-line rotational speed measurement of rolling bearing cage based on ultrasonic measurement with spectrum refinement [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(07): 139-145.
- [3] 张涛,陈晓阳,顾家铭,李清清.高速角接触球轴承保持架稳定性研究进展[J].航空学报,2018,39(07):32-44.
ZHANG Tao, CHEN Xiao yang, GU Jia ming, et al. Progress of research on cage stability of high-speed angular contact ball bearings [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2018, 39(07): 32-44.
- [4] KINGSBURY E P. Ball Motion in Angular Contact Bearings [J]. Wear, 1968, 01(11): 41-50.
- [5] KINGSBURY E P, WALKER R. Motions of an unstable retainer in an instrument ball bearing [J].Journal of Tribology. Transaction of the ASME, 1994, 116(2): 202-208.
- [6] SAKAGUCHI T, UENO K. Dynamic analysis of cage behavior in a cylindrical roller bearing [J]. NTN. Technical Review, 2004, 71: 8-17.
- [7] SAKAGUCHI T, HARADA K. Dynamic analysis of cage behavior in a tapered roller bearing [J]. ASME. J. Tribol, 2006, 128(3): 604-611.
- [8] 刘品,黄迪山,傅慧燕,莫远珍,张婕.轴承保持架质心运动轨迹测量[J].轴承,2010(08):43-45.
LIU Pin, HUANG Dishan, FU Huiyan, et al. Detection on mass center orbit of ball bearing cage [J]. Bearing, 2010 (08): 43-45.
- [9] 黄迪山.微型轴承保持架质心轨迹检测与特性分析[J].中国机械工程,2012,23(15):1779-1784.
HUANG Dishan. Detection and characteristic analysis for mass center orbit of bearing cage [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(15): 1779-1784.
- [10]赵振旗. 滚动轴承保持架运动轨迹及测量技术研究[D].河南科技大学,2015.
ZHAO Zhenqi. Research on trajectory and measurement technology of rolling bearing cage [D]. Henan University of Science and Technology, 2015.
- [11] 赵振旗,李济顺,隋新,马伟,薛玉君.实现保持架运动轨迹动态可视化的方法[J].轴承,2015(07):31-33.
ZHAO Zhenqi, LI Jishun, SUI Xin, et al. Implementary method for dynamic visualization about motion trajectory for cages [J]. Bearing, 2015 (07): 31-33.
- [12] 陈后清,王芳,瞿庆春,李靳东,何峰涛.保持架动态轨迹及滑动比测试试验机[J].轴承,2012(07):36-42+46.

CHEN Houqing, WANG Fang, QU Qingchun, et al. Tester for measuring cage dynamic trajectory and sliding ratio [J]. *Bearing*, 2012 (07): 36-42+46.

[13] STACKE L E, FRITZSON D. Dynamic behaviour of rolling bearings: simulations and experiments [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2001, 215(6): 499-508.

[14] CUI Yongcun, DENG Sier, NIU Rongjun, et al. Vibration effect analysis of roller dynamic unbalance on the cage of high-speed cylindrical roller bearing[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 434: 314-335.

[15] YANG Zhaohui, CHEN Hui, YU Tianxiang, et al. A high-precision instrument for analyzing nonlinear dynamic behavior of bearing cage [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(8): 85-105.

[16] YANG Zhaohui, HONG Jun, ZHANG Jinhua, et al. Nano-level instrumentation for analyzing the dynamic accuracy of a rolling element bearing [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12): 125-103.

[17] GAO Shuai, HAN Qinkai, ZHOU Ningning, et al. Stability and skidding behavior of spacecraft porous oil-containing polyimide cages based on high-speed photography technology [J]. *Tribology International*, 2022, 165: 107294.

[18] ABELE E, HOLLAND L, NEHRBASS A. Image acquisition and image processing algorithms for movement analysis of bearing cages [J]. *Journal of Tribology*, 2016, 138 (2): 021105.

[19] ABELE E, HOLLAND L, HONIG P. Image Acquisition and Image Processing Algorithm for Movement Analysis of Bearings' Rolling Elements. *Journal of Tribology*, 2018, 140(1): 011103.

[20] 刘秀海,邓四二,滕弘飞.高速圆柱滚子轴承保持架运动分析[J].*航空发动机*,2013,39(02):31-38.

LIU Xiuhai, DENG Sier, TENG Hongfei. Kinematics analysis of cages in high-speed cylindrical roller bearings [J]. *Aeroengine*, 2013, 39(02): 31-3