

采用自主图像处理程序的非侵入式滚动轴承保持架运动轨迹提取方法

刘逸林, 张盼, 晁奔, 闫柯, 洪军

(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, 710049, 西安)

摘要: 现有保持架质心轨迹测量方法会侵入轴承原有结构,难以反映真实的轴承动态特性;现有的基于图像的方法虽然不会破坏轴承结构,却依赖于标记点标记精度与追踪精度,无法直接反映质心运动。针对这些问题,提出了一种基于自主图像处理程序的滚动轴承保持架运动轨迹提取方法,结合亚像素图像处理算法,在不改变轴承原有结构的基础上可以精确识别提取保持架质心轨迹。对两种不同引导方式的保持架开展了轨迹提取实验。实验结果表明,保持架轨迹受保持架与轴承内外圈结构的影响,呈现出不同形状;在实验转速区间内,保持架运动的稳定性随着转速的升高而增大。实验结果证明了所提出的轨迹提取方法的有效性,为轴承保持架动态特性的研究提供了一种便捷、准确的测试方法,能对轴承保持架质心轨迹进行有效的提取。

关键词: 滚动轴承;保持架轨迹;图像处理;轴承动态特性

中图分类号: TH133.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202403009 **文章编号:** 0253-987X(2024)03-0095-11

A Non-Intrusive Rolling Bearing Cage Trajectory Extraction Method Using Image Processing Program

LIU Yilin, ZHANG Pan, CHAO Ben, YAN Ke, HONG Jun

(Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Existing methods for measuring the centroid trajectory of bearing cages often require structural modifications to the bearing, which can distort the assessment of its dynamic characteristics. In contrast, image-based methods offer a non-invasive alternative but they depend on marker precision and tracking accuracy. This can make it challenging to obtain an accurate centroid motion representation. This paper proposes a method for extracting motion trajectories for rolling bearing cages using an image processing program with a subpixel edge detection algorithm. This method accurately identifies and extracts the cage centroid's trajectories without altering the bearing's structure. Experiments are conducted on bearing cages with different guidance modes. The results show that the cage's motion trajectory is influenced by the structures of the cage as well as the inner and outer rings of the bearing, resulting in varying shapes of the trajectory. Within the range of experimental speeds, the stability of cage motion improves with the increase of rotational speed. These results confirm the effectiveness of the

收稿日期: 2023-09-05。 作者简介: 刘逸林(1999—),男,硕士生;张盼(通信作者),女,博士,助理教授。 基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(52175250);工信部重点专项资助项目(TC220H05VHZ)。

网络出版时间: 2023-12-13

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231213.1004.002>

proposed trajectory extraction method. This paper presents a convenient and accurate testing method for investigating the dynamic characteristics of bearing cages, allowing for the effective extraction of the centroid trajectory of bearing cages.

Keywords: rolling bearing; cage trajectory; image processing; bearing dynamic characterization

滚动轴承是广泛应用于旋转机械装备中的精密零部件。保持架作为轴承的重要组成部分,与滚动体、套圈在接触过程中产生的摩擦力和碰撞力会对保持架以及轴承整体的运动特性产生较大影响,进而影响轴承的回转精度;此外,保持架作为轴承转子系统中的薄弱环节容易发生磨损、异形扭曲、断裂等故障,这些故障是航空发动机主轴承、直升机主轴承以及涡轮增压器轴承等的常见故障^[1]。因此,研究保持架动态特性对于提升轴承性能、识别轴承故障^[2-3]具有重要作用。

轴承实际运行过程中,保持架运动特性受外部载荷、钢球与保持架的相互作用力、润滑剂的黏性阻力以及保持架自身复杂结构等诸多因素影响,影响因素多且影响机理复杂,因此保持架运动行为具有不确定性。保持架质心轨迹能够直观反映轴承在高速运动下的动态特性,对于分析轴承动态性能、验证仿真模型准确性具有重要意义^[4]。由于滚动轴承的结构紧凑且测试时轴承处于高速运动状态,对保持架质心轨迹的测试存在较大难度。

Kingsbury 等^[5]早在 1994 年就针对保持架的不稳定性展开了研究,利用光纤传感器测量保持架在径向平面内的涡动轨迹,来证实所提出的轴承保持架涡动模型。Gputa 等^[6]采用电涡流传感器,在径向和轴向平面内同时对保持架的运动进行测量,获得保持架的三维质心轨迹,试验结果与建立的仿真模型预测结果吻合较好,但该测量方式对传感器的安装位置有严格要求,且无法测量高转速下的保持架轨迹。此外,还尝试将保持架覆盖上黑白条纹,采用光电传感器测量保持架转速,但由于润滑剂的存在使黑白条纹对比度差,因此无法准确测量高转速下保持架的转速。Sekiguchi 等^[7]采用电涡流传感器测试了圆锥滚子轴承、圆柱滚子轴承保持架的径向、轴向运动,获得了不同转速、轴向载荷条件下保持架质心运动及涡动半径变化规律,试验结果与仿真结果吻合。SKF 研究中心的 Stacke 等^[8]测试了不同转速、载荷条件下滚子轴承保持架的受力与运动,并与 Beast 软件的仿真结果进行对比。黄迪山和 Gu 等^[9-10]采用两个激光传感器,在径向平面内相互垂直的两个方向测试了微型轴承保持架的运动

信号,通过对信号进行滤波处理获得了时域、频域、质心轨迹等特征,检测结果验证了激光对微型轴承实体保持架运动轨迹进行精密测量的有效性。陈后清等^[11]在研制的轴承试验机上布置电涡流传感器,实现了保持架质心动态轨迹测量,同时也测得了轴承保持架的倾斜角等参数。

以上诸多研究中采用的传感器均为电涡流传感器或者激光位移传感器,这些传感器受其测量特点限制,仅能够在一维方向上测得位移变动量,获得保持架质心的二维涡动轨迹往往需要将多个传感器同时测得的数据进行合成,因此要求传感器为严格的相互垂直布置,且对于传感器采样的同步性要求较高。此外,受轴承内部空间尺寸限制,需要采取在保持架上固连圆筒体^[4]、改变保持架宽度^[6]或者将外圈加工出槽^[12]等处理方式。这些处理方式往往会破坏轴承自身结构,或者改变保持架的质量等性质,因此无法完全反映出轴承保持架在真实工况下的运行状态。针对这一问题,对轴承保持架运动的非接触测量方式逐渐得到研究者的关注。随着高速摄影技术的发展,能实现高分辨率、高帧率拍摄的高速相机价格不断下降,与之相关的图像处理算法和处理硬件不断发展,利用高速摄影技术实现对轴承保持架运动特性的测量技术逐渐成为可能。例如,Abele 等^[13-14]采用高速摄像机获取轴承保持架运动图像信息,对图像进行对比度标准化处理后,使用边缘检测算子对图像进行边缘检测,得到保持架的边缘图像,随后采用自行开发的算法对保持架质心进行识别。然而,在实际操作中,基于图像梯度的普通边缘检测算子所能够达到的精度十分有限,导致质心识别算法的输入图像中边缘信息的精度不足,进而影响保持架质心位置的识别精度。Yang 等^[15]研制了一种高精度的轴承保持架非线性动态特性分析仪器,该仪器采用空气静压主轴支承和驱动测试轴承。在轴承高速运转时,使用高速摄像机捕捉图像。利用三维轨迹跟踪软件 TEMA Motion 对保持架表面的标记点进行跟踪,通过绘制追踪点轨迹得到保持架在不同转速下的非可重复跳动,进而分析其动态特性。文献[15]试验所采用的高速摄影机在 $1\,280\times 800$ 像素分辨率下以 $3\,200$ 帧/s 的速度采

集图像,测量精度能够达到每像素 $32\text{ }\mu\text{m}$ 。上述基于高速摄影的保持架运动轨迹提取技术虽然不会改变轴承原有结构,但是仍然需要在保持架上打上标记点,实验操作复杂,且对保持架质心识别的精度很大程度上取决于标记点绘制的精度和商业软件对标记点的跟踪精度。

针对上述问题,本文提出了一种基于自主图像处理程序的非侵入式保持架运动轨迹测试提取技术。所采用的测试装置无需侵入轴承原有结构,因此不会干扰到保持架的原始运动,能够直接反映保持架的原始运动信息;所采用的自主图像处理程序应用亚像素边缘检测技术,在硬件分辨率有限的情况下实现了对保持架质心运动轨迹更高精度的提取。

1 方法原理

本文采用高速摄影机获取轴承保持架运动的连续影像对保持架的质心轨迹进行提取。保持架质心轨迹的提取核心在于获取高速影像中每一帧图像的轴承保持架的质心位置,进而在连续帧序列中得到高速运转下保持架的质心轨迹。实验中采集得到的保持架单帧图像如图 1 所示,测试装置采集得到的保持架单帧图像清晰,与轴承中其余组件对比明显,有利于后续的边缘检测。对单帧图像中保持架质心位置的提取与识别依赖于自主开发的图像处理程序,其处理流程如图 2 所示。首先对单帧图像进行裁剪处理,去除多余的背景部分。随后采用感兴趣区域(region of interest, ROI)选取,利用对图像中保持架位置与内外径大小的粗检测结果,将图像处理的目标区域限定在包含保持架信息的小区域内。随后采用亚像素边缘检测技术,获取轴承保持架内外径的亚像素级别的边缘点。通过圆检测算法,完成对保持架外径亚像素级别轮廓的提取。

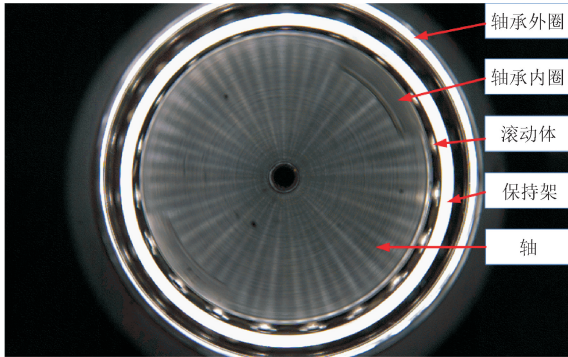


图 1 高速运动下保持架的单帧图像

Fig. 1 Single frame image of cage under high speed movement

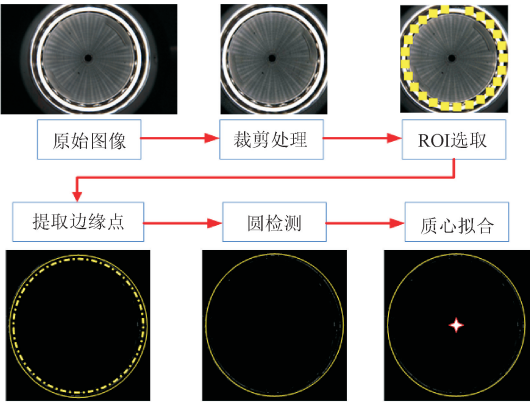


图 2 单帧图像质心识别流程

Fig. 2 Image centroid recognition process

1.1 基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法

对保持架质心位置的高精度识别,依赖于对保持架边缘信息的识别。文献[13]中使用的基于图像梯度的边缘检测算子所能够达到的精度十分有限,导致质心识别算法的输入图像中边缘信息的精度不足,进而影响到保持架质心位置的识别精度。使用更高分辨率的高速相机进行图像采集可以有效地提升精度:更高的分辨率在有限的视场内将保持架的轮廓信息分成了更多的栅格,从而能够直接提高保持架运动轨迹识别的精度。但是,由于高速摄影机受到数据传输带宽以及成像芯片制作工艺的限制,无法同时实现高速和高精度的图像采集。根据奈奎斯特采样定理,只有当对涡动轨迹的采样频率大于保持架涡动频率的 2 倍时,才能从采样得到的数据中提取到保持架的运动轨迹。硬件分辨率的提高会使得摄影机的最大帧率大幅下降,从而降低保持架运动轨迹的采样频率,限制了所能测量的轴承最大转速。综上所述,采用更高精度的图像处理算法,能够在不改变现有硬件、不降低采样频率的前提下,实现对保持架轨迹更高精度的识别。

亚像素边缘检测作为一种在不增加硬件分辨率的前提下提高边缘检测精度的方法,近年来在机器视觉检测中得到了广泛应用^[16-17]。亚像素边缘检测主要分为 3 类:基于拟合的方法、基于插值的方法以及基于矩的方法^[18]。一般认为基于拟合的方法定位精度比较高,但其算法复杂度高,并且容易受到噪声的干扰;基于插值的方法计算简单,算法复杂度低,但是其定位精度不高且容易受到噪声的干扰。矩方法基于积分运算,相比其他方法对噪声不敏感,检测结果较为稳定,检测精度高,一些矩方法的模板经过精心的设计,其特征提取能力更强。

数字图像可以被理解为分布在像素平面上离散的图像函数,在数字图像处理中,图像的矩可以被理解成一种二维函数的统计特征量,是原有的图像函数在新的坐标空间下的展开,在此坐标空间上,一个分段连续有界函数可以使用其矩族唯一的表示。基于矩的方法可以分为空间矩、灰度矩以及 Zernike 矩。文献[18]中针对这 3 种基于矩的方法进行了测试实验,发现基于 Zernike 矩的方法相对于其他两种方法的边缘定位精度高、检测速度快、抗噪声能力强,边缘检测效果比较好。因此,本文对保持架边缘轮廓的检测选择 Zernike 矩亚像素边缘检测方法^[19-21]。

对于连续图像 $f(x, y)$, 其 n 阶 m 次 Zernike 矩定义为

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{nm}^*(\rho, \theta) f(x, y) \rho d\rho d\theta \quad (1)$$

在离散的情况下, 数字图像的 n 阶 m 次 Zernike 矩定义为

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) \quad (2)$$

式中: (ρ, θ) 为像素点 (x, y) 的极坐标表达, $V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho) e^{jm\theta}$ 是 Zernike 矩的积分函数, V_{nm}^* 是 V_{nm} 的共轭复数, $R_{nm}(\rho)$ 是一个径向多项式, 其定义为

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! ((n+|m|)/2-s)! ((n-|m|)/2-s)!} \rho^{jm\theta} \quad (3)$$

使用 Zernike 矩进行亚像素边缘检测的关键在于根据 Zernike 矩的旋转不变性计算出边缘检测所需要的 4 个参数。理想边缘模型如图 3 所示, 单位圆内的理想边缘可以用 4 个参数描述, 包括背景灰度值 h 、灰度差 k 、以及边缘位置参数 d 与 φ 。将图 3 所示的单位圆内的边缘进行顺时针旋转, 旋转前的 n 阶 m 次 Zernike 矩为 Z_{nm} , 旋转后图像的 Zernike 矩为 Z_{nm}^* , 二者存在如下关系

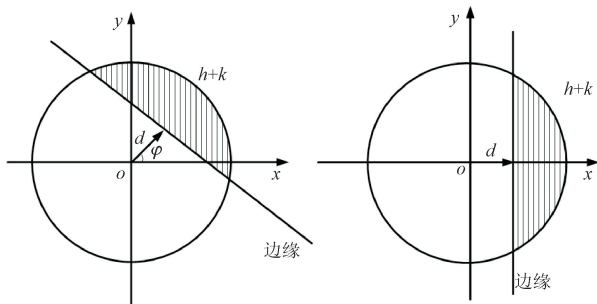


图3 理想边缘模型

Fig. 3 Ideal edge model

$$Z_{nm}^* = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta + \varphi) =$$

$$\frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x, y) R_{nm}(\rho) e^{jm\theta} e^{jm\varphi} = Z_{nm} e^{jm\varphi} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 图像的旋转导致 Zernike 矩相角发生了变化, 而模值保持不变, 即图像矩的旋转不变性。利用这一点可以简化边缘参数的求解。根据图像的对称性, 旋转后的连续图像 $f'(x, y)$ 满足

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x, y) y dx dy = 0 \quad (5)$$

图像的 1 阶 1 次矩的实部记为 $\text{Re}[Z_{11}]$, 虚部记为 $\text{Im}[Z_{11}]$ 。则有

$$Z_{11}^* = \text{Re}[Z_{11}] \cos \varphi + \text{Im}[Z_{11}] \sin \varphi + j \{ \text{Re}[Z_{11}] \sin \varphi - \text{Im}[Z_{11}] \cos \varphi \} \quad (6)$$

旋转后的理想边缘模型关于 y 轴对称, 代入式(6)可以得到边缘参数

$$\varphi = \arctan \frac{\text{Im}[Z_{11}]}{\text{Re}[Z_{11}]} \quad (7)$$

对旋转后的理想边缘模型进行积分, 得到其 1 阶 1 次 Zernike 矩和 2 阶 0 次 Zernike 矩与边缘参数的关系为

$$Z_{11}^* = \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x, y) (x - jy) dx dy = \frac{2h(1-d^2)^{3/2}}{3} \quad (8)$$

将 $Z_{11}^* = Z_{11} e^{j\theta}$ 和 $Z_{20}^* = Z_{20}$ 代入式(8)得到

$$\begin{cases} d = \frac{Z_{20}}{Z_{11}^*} \\ k = \frac{3Z_{11}^*}{2(1-d^2)^{3/2}} \\ h = \frac{1}{\pi} \left[Z_{00} - k \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin d + d \sqrt{1-d^2} \right) \right] \end{cases} \quad (9)$$

在式(9)中, Z_{11}^* 可以通过式(6)计算得到, Z_{00} 、 Z_{11} 、 Z_{20} 可以由式(2)计算得到, 在实际的操作中, 通过区域图像与 Zernike 模板的卷积实现。由此可以得到边缘的其他 3 个参数 d 、 k 、 h 。通过对参数 d 、 k 采用一定的阈值进行筛选, 可以有效识别出小区域内的边缘信息, 且具有亚像素级别的精度。

1.2 基于随机 Hough 变换的圆检测

圆检测是图像处理与模式识别领域的一个基础问题, 对边缘点集中包含的圆形进行检测, 能够有效剔除边缘点集中不属于保持架轮廓的干扰点, 大幅度减少干扰点对保持架质心位置识别的影响, 提高检测精度。

本文对圆的检测采用随机 Hough 变换方法^[22]。

随机 Hough 变换方法的基本思想是通过图像空间中随机采样非共线的 3 个边缘点映射到参数空间中进行累计,若有圆参数的累计值超出给定的阈值累计单元,则将此单元记录的参数作为候选圆形的参数,随后计算候选圆形上边缘点数,若边缘点集中的点在候选圆中达到了一定的比例,则确认一个圆已经被检测到,将边缘点集合中在该圆形上的点剔除,重复上述步骤直到所有的圆形被检测完毕,如图 4 所示。

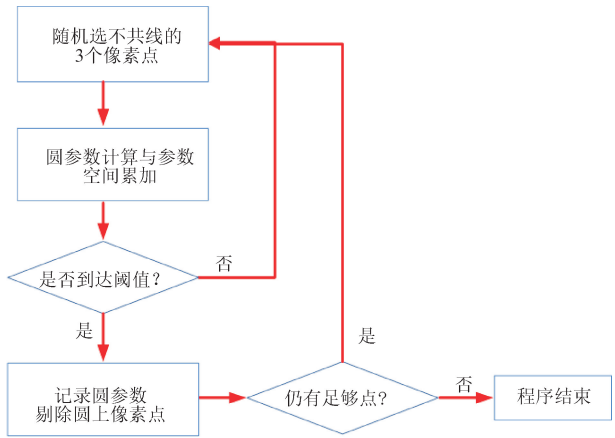


图 4 随机 Hough 方法检测圆
Fig. 4 Random Hough method detects circles

2 保持架质心轨迹测量实验

2.1 实验台搭建与图像采集

对保持架轨迹的提取,依赖于高速摄影机采集到的轴承高速运转中的图像。课题组自主搭建实验台采集获取保持架的运动影像,实验装置如图 5 所示。待测轴承与支撑轴承固定在轴系的两端,轴系由三相异步电机进行驱动。由于需要拍摄运动中的保持架,待测轴承安装在轴系的外侧,保持架裸露在外便于摄像机拍摄。环形光源的中心与轴系共线,

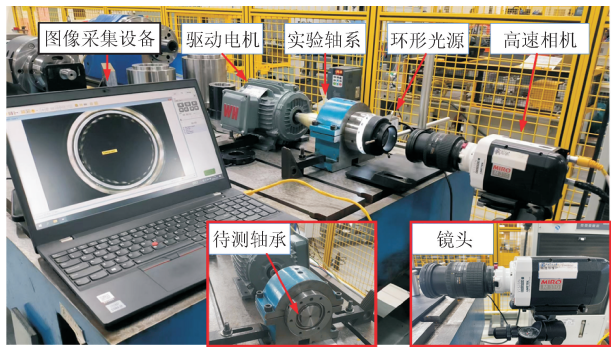
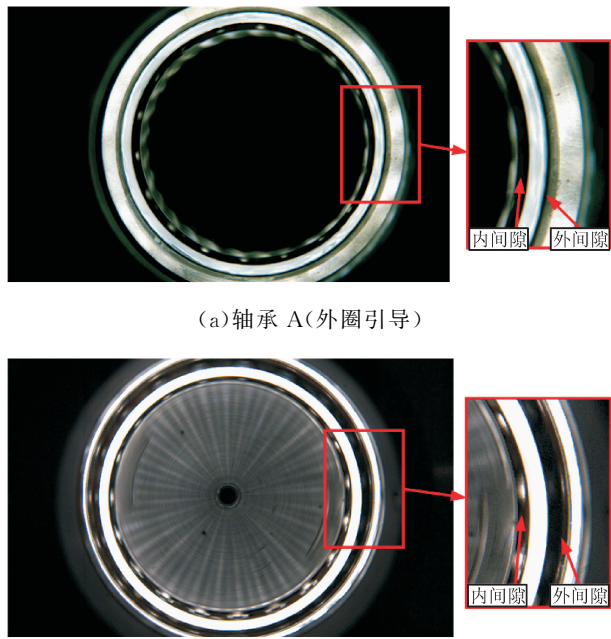


图 5 保持架运动图像采集实验台
Fig. 5 Cage motion image acquisition experimental platform

均匀照射在保持架端面。保持架的端面进行涂色处理,均匀的涂覆白色染料。高速摄影机放置在三脚架上,与地面保持水平,从而能够水平地拍摄到保持架的运动。高速摄影机型号为 Phantom Miro M310,分辨率为 $1\,280\times800$ 像素,选择以 1 000 帧/s 对保持架运动进行拍摄。采集到的保持架单帧图像如图 6 所示。可以看出,得到的单帧图像中保持架充分占据了相机视野,保持架的边缘清晰,与背景对比明显,适用于对保持架中心进行识别。



(a)轴承 A(外圈引导)
(b)轴承 B(球引导)
图 6 采集到的保持架图像

Fig. 6 Experimental cage images captured

选取两款 7008 滚动轴承进行实验,分别为外圈引导轴承(记作轴承 A)和球引导轴承(记作轴承 B)。两款轴承保持架分别为外圈引导和球引导,外圈引导保持架的外边缘与轴承外圈的内边缘存在较小间隙,保持架的运动受到外圈内侧的约束,而球引导保持架外径与轴承外圈内径间隙和保持架内径与轴承内圈外径间隙大致相等。因此,外圈引导的轴承保持架在运动中受到轴承外圈的约束作用,保持架质心轨迹范围会受到相应的限制;球引导的保持架在运动中不与轴承内外圈发生接触,质心轨迹范围会大于外圈引导轴承的保持架。表 1 给出了实验轴承 A 与实验轴承 B 的主要参数。从参数表 1 可以看出,轴承 A 保持架外间隙最小,为 0.24 mm,轴承 B 的保持架球间隙最小,为 0.22 mm。

表 1 实验轴承的主要参数
Table 1 Bearing main parameters

参数	轴承 A	轴承 B
保持架内径/mm	53	52.5
保持架外径/mm	57.76	56.38
保持架兜孔直径/mm	7.44	7.3
轴承内圈内径/mm	39.8	39.8
内圈外径/mm	49.78	49.54
轴承外径/mm	68	68
外圈内径/mm	58	57.96
滚动体直径/mm	6.8	7.08
保持架内间隙/mm	3.22	2.96
保持架外间隙/mm	0.24	1.58
保持架球间隙/mm	0.64	0.22
引导方式	外圈引导	球引导

2.2 图像处理程序

对所使用的相机进行标定。标定的目的是为了将像素坐标系下以像素为单位的位移量转化为实际的位移量,即在保持架平面内确定像素与实际尺寸的对 应关系。通常的标定方法结合相机成像模型,借助标定板等工具完成相机内外参的计算。有的测量系统采用较为简单的标定方式,先测量视野中某一工件的实际尺寸,使用该测量值作为标定参考,确定像素与实际尺寸的对 应关系。考虑到本文的测量对象较为单一,因此采用简单的测量标定。使用保持架内轮廓与内径进行标定,在保持架外轮廓与外径上进行验证。

使用图像法得到的保持架内径为 702.73 像素,根据表 1 中数据,轴承 B 保持架内径为 52.5 mm,据此计算得到保持架所在平面里,每像素对应实际尺寸为 0.074 7 mm。使用保持架外径来验证该标定结果的精度。使用图像法得到的保持架外径约为 760.9 像素,结合标定结果,图像法得到的保持架外径尺寸为 56.846 mm,与实际测量相比,误差约为 0.83%。标定误差满足精度要求。

由采集得到的单帧图像可以看出,除了保持架外,轴承内外圈以及滚动体均存在较为严重的反光,可能对边缘检测产生较大干扰。此外,直接对整幅图像进行边缘检测非常消耗计算资源,计算时间过多。针对这一问题,需要对图像进行 ROI 提取操作^[23],只对包含保持架的部分进行边缘检测操作。因此,需要先针对单帧图像进行粗检测,以确定图像处理的 ROI 区域。

图 7 给出了保持架边缘提取过程及效果,首先应用梯度边缘检测算子^[24],对图像进行边缘粗检测,适当调节检测算子的阈值,得到包含保持架的内径边缘与外径边缘的图像,如图 7(a)所示,从图 7(a)中可以看出,除了检测到保持架内外径边缘之外,轴承外圈、滚动体也有部分边缘被检测到。为剔除干扰以获取保持架在图像中的具体位置,对边缘粗检测结果进行 Hough 圆检测,得到其圆心坐标为 (391,402) 像素,内半径在图像中大约占据 351 像素,外径在图像中约占 380 像素。因此,ROI 区域选择为均匀分布在圆心为 (391,402) 像素、内外径分别为 340、400 像素的圆环区域内的若干矩形内,如图 7(b)所示。该方法将边缘检测限定在保持架外径附近进行,有效剔除了干扰,采用 ROI 区域检测的亚像素边缘检测结果如图 7(d)所示,与图 7(c)所示的全图亚像素边缘检测结果对比,使用 ROI 区域进行亚像素边缘检测能够有效地避免其他零件轮廓的干扰。此外,使用 ROI 区域进行亚像素边缘检测的速度可以达到 0.8 帧/s,远优于全局亚像素边缘检测的 12 帧/s 的运行速度。

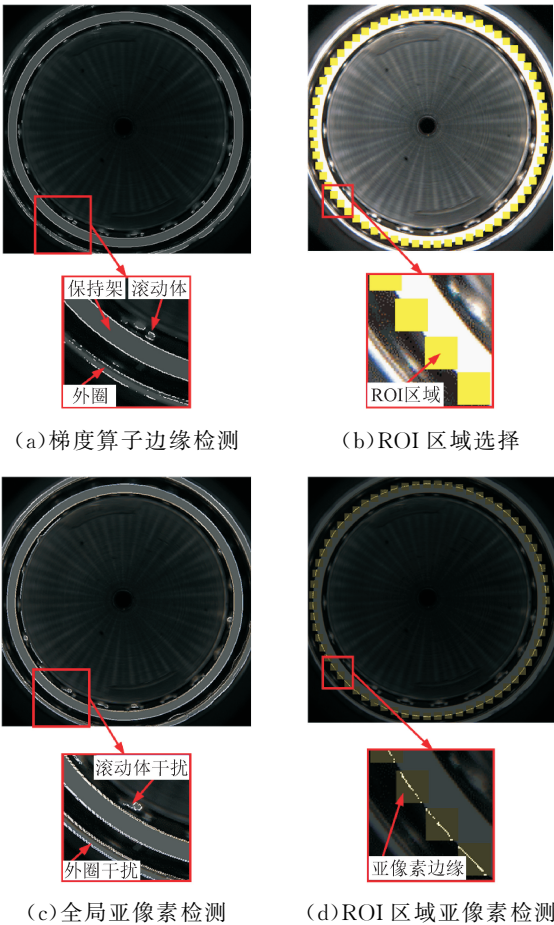


图 7 保持架边缘提取过程及效果

Fig. 7 Bearing cage edge extraction process and results

对图像中的每一帧采用上述处理,可以得到每一帧中保持架外径的边缘点,应用最小二乘法对这些边缘点进行拟合,即可得到每一帧中保持架质心的像素坐标。与粗检测使用的梯度检测算子不同,经过亚像素边缘检测的边缘点具有亚像素级别的精度,通过拟合得到的保持架质心坐标同样也具有亚像素级别的精度。将每一帧中拟合得到的质心坐标数据导出,即可得到保持架质心轨迹数据。

2.3 轨迹信号处理及结果

分别使用外圈引导的轴承 A 与球引导轴承 B 进行实验,其中轴承 A 运行转速为 1 500 r/min,轴承 B 转速为 1 800 r/min,采集到的轨迹信号如图 8 所示。从图 8 中可以看出:由于轴承 B 的保持架为球引导,保持架受到自身重力作用,在 Y 方向的运动

幅值明显大于 X 方向的幅值;而对于轴承 A 外圈引导的保持架,其在 Y 方向与 X 方向的运动幅值大致相等,这表明外圈引导的保持架受到外圈作用力的影响,限制了保持架在重力作用下沿 Y 方向的运动。

对上述原始数据进行傅里叶变换,得到频谱数据如图 9 所示。在 30 Hz 的轴承转频下,球引导的保持架在 X 方向上的频谱主要为保持架转频 12.195 1 Hz 及其倍频,而在 Y 方向上频谱较为复杂,除保持架转频以及其倍频外,还存在轴承转频 30 Hz 及其倍频。这是由于球引导的保持架在 Y 方向上的运动受到重力影响,导致质心表现出更加复杂的运动。外圈引导的保持架由于运动受到外圈限制,在 X、Y 方向上的频谱类似,均表现为保持架转频 10.731 7 Hz 及其倍频 21.951 2 Hz。

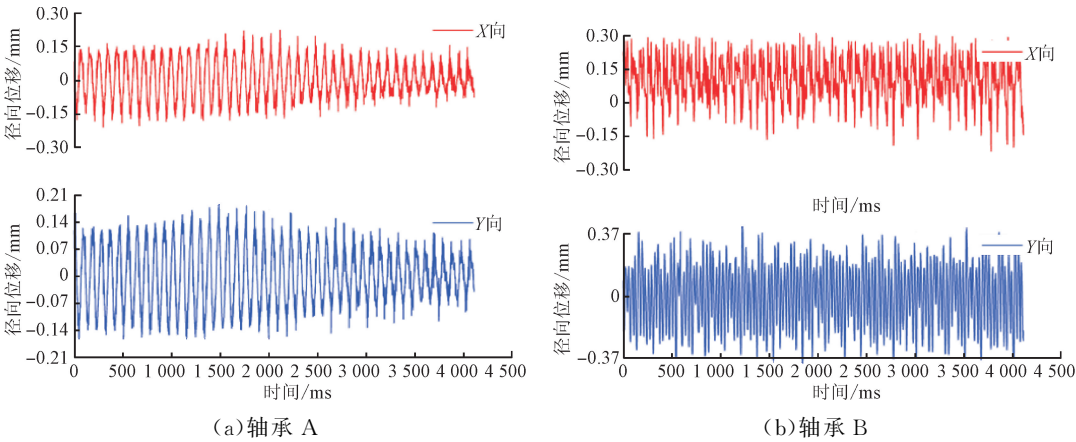


图 8 保持架质心轨迹径向位移

Fig. 8 Cage center radial displacement signal

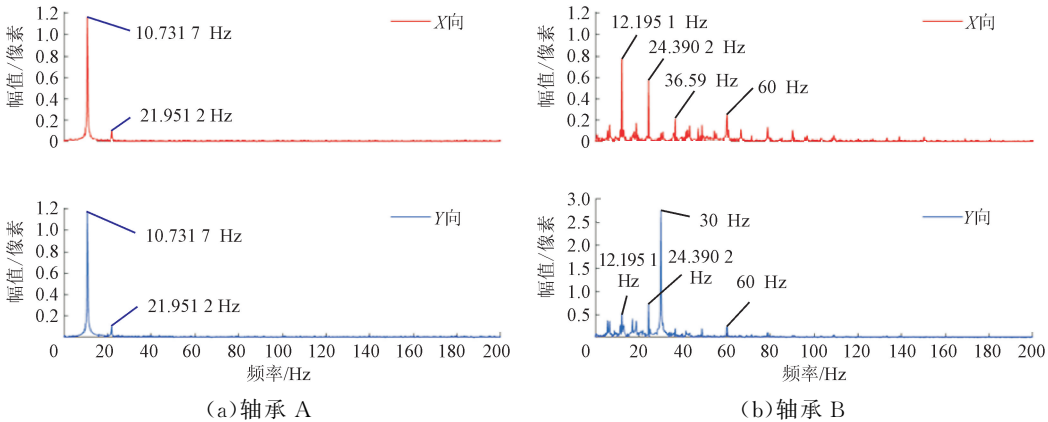


图 9 保持架质心轨迹频谱

Fig. 9 Cage center radial displacement spectrum

为得到平滑的保持架运动轨迹图像,对上述信号进行滤波处理,得到 1 800 r/min 转速下外圈引导与球引导轴承保持架的轨迹图像如图 10 所示。可

以看出:受到重力影响,球引导的保持架运动轨迹为椭圆,并且存在两种相对稳定的椭圆轨迹;外圈引导保持架运动轨迹为规则的圆形。文献[25]中分析了

轴承的不同安装方向导致保持架涡动轨迹形状的不同,指出保持架涡动轨迹形状是受到重力与离心力共同影响的结果。在本文中,外圈引导保持架的外间隙为 0.24 mm,小于其内间隙与球间隙,因此其在重力方向上的运动受到外圈的约束。球引导的保持架外间隙为 1.58 mm,大于外圈引导保持架的外间

隙。因此,球引导保持架运动受到外圈约束作用较小,重力对保持架的影响较大,因此能形成椭圆状轨迹。与之相对,外圈引导保持架受到外圈的约束作用,导致保持架在重力方向上的运动被外圈所约束,因此形成圆形轨迹。这一轨迹测量结果与保持架结构分析相吻合。

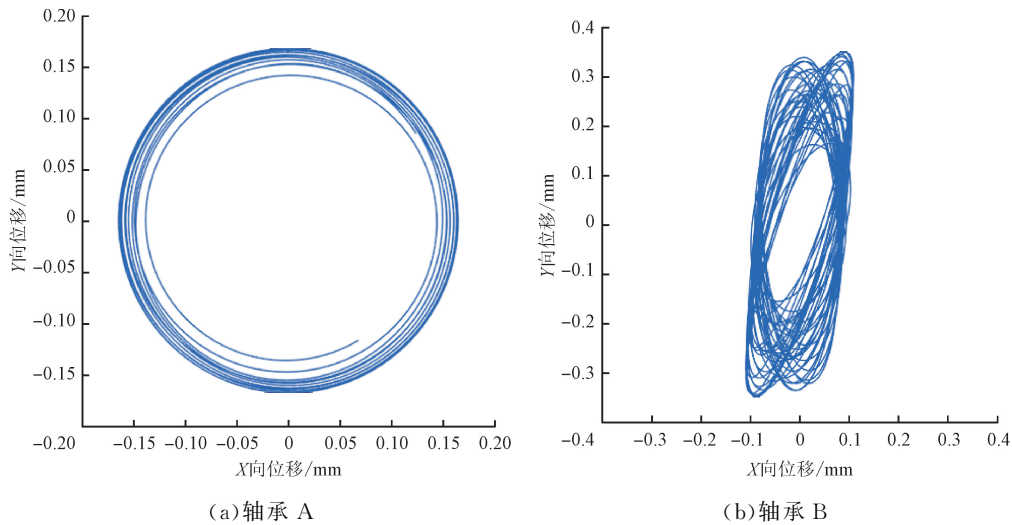


图 10 保持架质心轨迹信号
Fig. 10 Cage center motion trajectory

3 实验结果讨论

3.1 方法效果对比分析

文献[13]等在保持架上进行标记,使用图像处理软件对标记点轨迹进行追踪,获取每一帧中标记点的位置,通过标记点的运动轨迹反映保持架质心的运动情况。采用上述球引导保持架复现文献[15]中追踪标记点的工作。在保持架上均匀打上 5 个标记点,使用 Tracker 软件对标记点的轨迹进行追踪,追踪界面如图 11 所示。5 个标记点的轨迹分别以不同颜色区分,最终 Tracker 软件可以输出 5 个标记点的轨迹坐标。使用最小二乘法对标记点进行圆拟合,得到每一帧中圆心的位置信息,进而得到使用该方法获取的保持架轨迹信号如图 12 所示。与图 8 中球引导保持架的轨迹信号进行对比可以看出,轨迹追踪法获得的质心轨迹原始信号呈现出比较规则的正余弦曲线,且位移幅值远大于图 8 中的轨迹位移幅值。其频谱也表现出十分简洁的保持架转频。使用轨迹追踪方法获取的保持架质心运动轨迹如图 13 所示,与图 10 中球引导保持架表现出的双椭圆轨迹不同,使用轨迹追踪法得到的保持架轨迹呈现出圆形而非双椭圆,且其涡动半径远大于图 10 中的半径。究其原因

因,多个标记点所确定的标记点中心与保持架质心无法完全重合,且存在较大的偏心值(图 13),因此得到的轨迹是保持架质心点运动与偏心点运动二者共同作用的结果。追踪法测量轨迹的误差示意如图 14 所示,由于偏心距过大,相对于真实的质心轨迹,所得到的运动轨迹在尺度上会远大于真实的质心点轨迹,且过大的偏心距会覆盖质心点实际轨迹的形状信息。相反,本文采用的亚像素边缘检测方法是利用保持架边缘反映其质心位置信息,不受标记精度影响,因此能够反映真实的保持架质心轨迹信息。

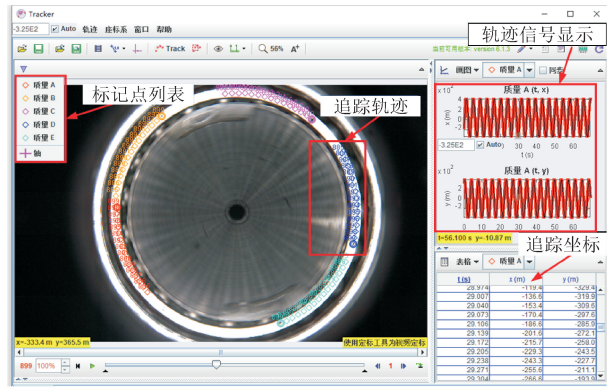


图 11 轨迹追踪法测量软件界面
Fig. 11 Trajectory tracking measurement software

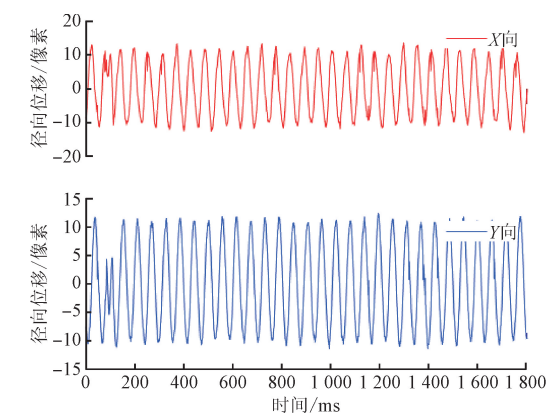


图 12 轴承 B 原始轨迹信号

Fig. 12 Cage center radial displacement signal using tracking method

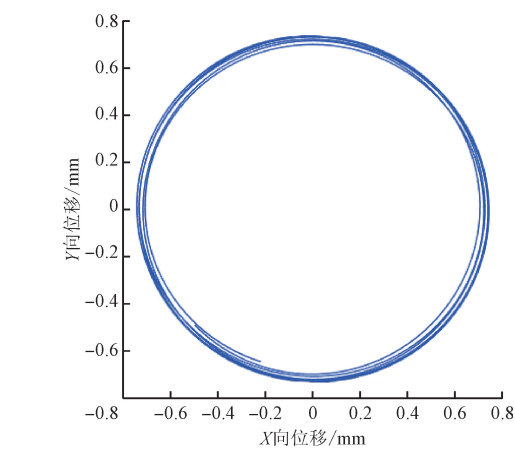


图 13 追踪法得到的保持架质心轨迹

Fig. 13 Cage center motion trajectory using tracking method

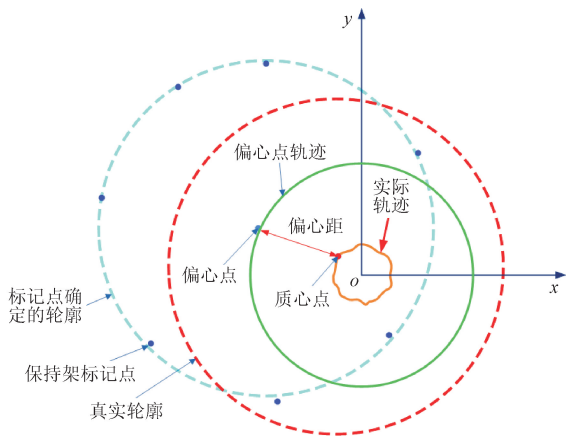


图 14 追踪法测量轨迹的误差示意

Fig. 14 Error indication of tracking method

3.2 转速对保持架轨迹的影响

使用外圈引导的轴承在 1 500、1 800、2 100、

2 400、2 700、3 000 r/min 转速下分别进行实验,研究转速与保持架轨迹之间的关系。如图 15 所示,对 X 与 Y 方向上原始轨迹信号的峰值点与谷值点取均值,将原始信号峰值点、谷值点的均值之差作为 X 向与 Y 向的运动幅值。对每种转速下原始轨迹信号进行上述处理,得到保持架涡动轨迹幅值与转速的关系,数据拟合得到保持架涡动尺度与转速的关系曲线如图 16 所示。结果表明,在 1 500~3 000 r/min 转速范围内,保持架涡动轨迹尺度随着转速的升高而减小,说明在实验条件的转速区间内,保持架的运动稳定性随着转速增高而增大。

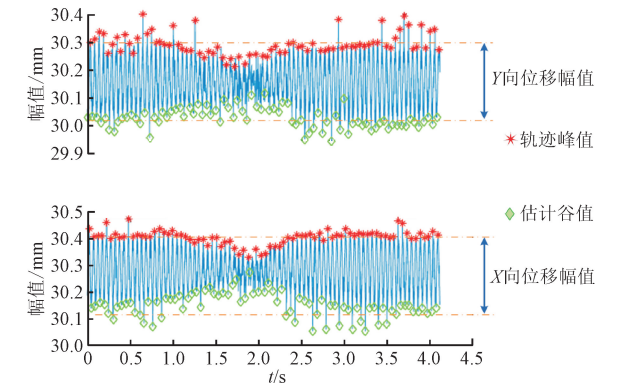


图 15 2 700 r/min 下原始信号峰值与谷值

Fig. 15 Original signal peak and valley values at 2 700 r/min

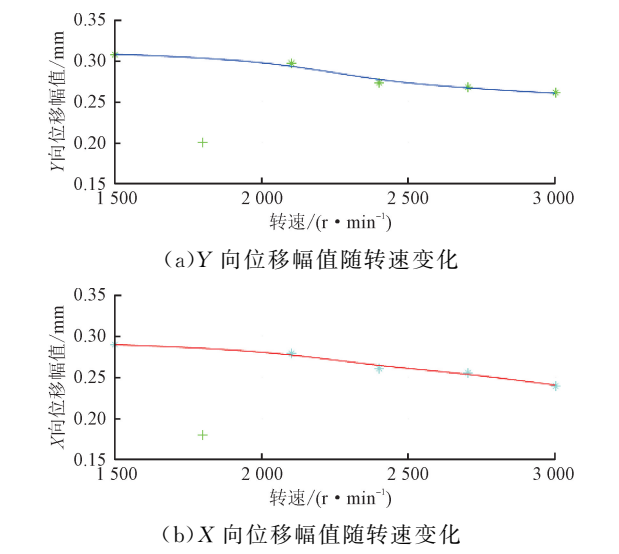


图 16 保持架质心位移幅值与转速关系

Fig. 16 The amplitude of cage centroid displacement varies with the rotational speed

4 结 论

本文针对滚动轴承保持架质心轨迹测量问题,提出了一种新型的非侵入式保持架轨迹测量方法,

该方法基于高速摄影机采集保持架高速运动影像,实验操作简便且不破坏轴承原有结构,能够客观反映轴承运转时保持架的动态特性。

(1)应用基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法与基于随机 Hough 变换的圆检测方法,成功识别出保持架的质心位置,相较于已有的轨迹追踪方法能够更加直观可靠地得到保持架质心轨迹。

(2)应用本文所提方法,针对两种保持架进行了轨迹测量实验,结果表明,本文方法能够有效地识别高速运动下保持架质心轨迹,并且区分出在不同方向上保持架的运动特点。

(3)针对保持架质心轨迹直径随转速的变化进行了研究,结果表明,在实验速度区间内质心轨迹随着转速的增高而减小,说明保持架运动稳定性随转速的升高而增加。

本文所提方法为当前针对保持架动态特性的研究提供了一种便捷、可靠的测试手段,能够识别到高速转动下保持架质心轨迹,可应用于进一步的保持架动态特性的实验和仿真研究中。

参考文献:

- [1] 陈聪慧. 航空发动机机械系统常见故障 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [2] 范然然, 姚廷强, 刘孝保, 等. 角接触球轴承保持架稳定性分析 [J]. 机械设计与研究, 2017, 33(4): 76-81.
FAN Ranran, YAO Tingqiang, LIU Xiaobao, et al. Stability analysis of angular contact ball bearing cage [J]. Machine Design & Research, 2017, 33(4): 76-81.
- [3] 曾光, 边强, 赵春江, 等. 变参数下角接触球轴承保持架的稳定性与振动特性分析 [J]. 工程设计学报, 2020, 27(6): 735-743.
ZENG Guang, BIAN Qiang, ZHAO Chunjiang, et al. Analysis of stability and vibration characteristics of angular contact ball bearing cage under variable parameters [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(6): 735-743.
- [4] 赵振旗. 滚动轴承保持架运动轨迹及测量技术研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015: 1-8.
- [5] KINGSBURY E, WALKER R. Motions of an unstable retainer in an instrument ball bearing [J]. Journal of Tribology, 1994, 116(2): 202-208.
- [6] GUPTA P K, DILL J F, BANDOW H E. Dynamics of rolling element: bearings experimental validation of the DREB and RAPIDREB computer programs [J]. Journal of Tribology, 1985, 107(1): 132-137.
- [7] SAKAGUCHI T, UENO K. Dynamic analysis of cage

behavior in a cylindrical roller bearing [J]. NTN Technical Review: Special Issue Special Supplement to Industrial Machines, 2004, 7: 9-17.

- [8] 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.
- [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] GU Jingjun, HUANG Dishan, LIU Pin, et al. Helicopter analysis for bearing cage behavior [J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(5): 2291-2301.
- [11] 陈后清, 王芳, 瞿庆春, 等. 保持架动态轨迹及滑动比测试试验机 [J]. 轴承, 2012(7): 36-42.
CHEN Houqing, WANG Fang, QU Qingchun, et al. Tester for measuring cage dynamic trajectory and sliding ratio [J]. Bearing, 2012(7): 36-42.
- [12] 刘品, 黄迪山, 傅慧燕, 等. 轴承保持架质心运动轨迹测量 [J]. 轴承, 2010(8): 43-45.
LIU Pin, HUANG Dishan, FU Huiyan, et al. Detection on mass center orbit of ball bearing cage [J]. Bearing, 2010(8): 43-45.
- [13] ABELE E, HOLLAND L, HÖNIG P. Image acquisition and image processing algorithm for movement analysis of bearings' rolling elements [J]. Journal of Tribology, 2018, 140(1): 011103.
- [14] ABELE E, HOLLAND L. Image-based movement analysis of bearing cages of cylindrical hybrid roller bearings [J]. Journal of Tribology, 2017, 139(6): 061101.
- [15] YANG Z, CHEN H, YU T, et al. A high-precision instrument for analyzing nonlinear dynamic behavior of bearing cage [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(8): 085105.
- [16] 张缓缓, 赵妍, 景军锋, 等. 基于亚像素边缘检测的纱线条干均匀度测量 [J]. 纺织学报, 2020, 41(5): 45-49.
ZHANG Huanhuan, ZHAO Yan, JING Junfeng, et al. Yarn evenness measurement based on sub-pixel edge detection [J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(5): 45-49.
- [17] 刘明佩, 朱维斌, 叶树亮. 基于改进 Zernike 矩的小模数齿轮亚像素边缘检测 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39

- (8): 259-267.
- LIU Mingpei, ZHU Weibin, YE Shuliang. Sub-pixel edge detection based on improved Zernike moment in the small modulus gear image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 259-267.
- [18] 张美静. 亚像素边缘检测技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013: 4-6.
- [19] 高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进 [J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1163-1168.
- GAO Shiyi, ZHAO Mingyang, ZHANG Lei, et al. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on Zernike orthogonal moments [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1163-1168.
- [20] 李金泉, 王建伟, 陈善本, 等. 一种改进的 Zernike 正交矩亚像素边缘检测算法 [J]. 光学技术, 2003, 29(4): 500-503.
- LI Jinquan, WANG Jianwei, CHEN Shanben, et al. Improved algorithm of subpixel edge detection using Zernike orthogonal moments [J]. Optical Technique, 2003, 29(4): 500-503.
- [21] 魏本征, 赵志敏, 华晋. 基于改进形态学梯度和 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 838-844.
- WEI Benzhen, ZHAO Zhimin, HUA Jin. Sub-pixel edge detection method based on improved morphological gradient and Zernike moment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 838-844.
- [22] 林金龙, 石青云. 用点 Hough 变换实现圆检测的方法 [J]. 计算机工程, 2003, 29(11): 17-18.
- LIN Jinlong, SHI Qingyun. Circle recognition through a point Hough transformation [J]. Computer Engineering, 2003, 29(11): 17-18.
- [23] 蔡敏, 吕娜, 钟继勇, 等. 基于 ROI 检测的铝合金熔池图像处理 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(增刊): 103-105.
- CAI Min, LÜ Na, ZHONG Jiyong, et al. Image process for aluminum alloy weld pool based on ROI detection [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(S): 103-105.
- [24] 马宇飞. 基于梯度算子的图像边缘检测算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 7-20.
- [25] 袁杜娟, 陈晓阳, 李清清, 等. 安装方向对角接触球轴承保持架动态特性的影响 [J]. 摩擦学学报, 2022, 42(4): 822-831.
- YUAN Dujuan, CHEN Xiaoyang, LI Qingqing, et al. Effects of installation directions on dynamic characteristics of cage to angular contact ball bearing [J]. Tribology, 2022, 42(4): 822-831.

(编辑 武红江)