

轴承滚子微细裂纹的漏磁检测

刘伯承,段兆祺,姜春,唐健,康宜华

(华中科技大学机械科学与工程学院,武汉 430074)

摘要: 针对目前使用广泛的 GCr15 高碳铬轴承滚子,提出了微细裂纹漏磁检测方法。运用 COMSOL 有限元软件仿真分析滚子微细裂纹的漏磁场特性,研究了磁化参数、裂纹尺寸对信号的影响,选用隧道磁电阻传感器(TMR)拾取信号。由于 TMR 在强背景磁场下容易超量程饱和,提出了一种测点区域近零磁场调控的 TMR 测磁方法。设计了线圈电磁磁化的偏置检测探头,建立测点区域自适应近零磁场环境,通过试验对比分析了探头偏置前后检测信号的幅值、信噪比等特征参数,结果表明探头性能得到了优化。

关键词: 微裂纹;漏磁检测;近零磁场;自适应调控;TMR

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2022)11-0001-05

Magnetic flux leakage detection of bearing roller microcracks

LIU Bocheng, DUAN Zhaoqi, JIANG Chun, TANG Jian, KANG Yihua

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the widely used GCr15 high-carbon chromium bearing rollers, a micro-crack magnetic flux leakage detection method was proposed. COMSOL finite element software was used to simulate and analyze the leakage magnetic field characteristics of roller micro-cracks, and the influence of magnetization parameters and crack size on the signal was studied. Tunneling magnetoresistance sensor (TMR) was used to pick up the signal. Since TMR is prone to over-range saturation under strong background magnetic field, a TMR magnetometry method with near-zero magnetic field regulation in the measuring point region was proposed. The offset detection probe with electromagnetic magnetization of the coil was designed, and the self-adaptive near-zero magnetic field environment of the measuring point area was established. The amplitude and signal-to-noise ratio of the detection signal before and after the probe offset were compared and analyzed through experiments, which showed that the performance of the probe was optimized.

Key words: microcrack; flux leakage detection; near-zero magnetic field; adaptive regulation; TMR

随着工业不断发展,市场对轴承的质量要求越来越高。滚子作为轴承中的滚动零件,关系到轴承工作时的动态性能,因此滚子的加工工艺必须达到国家标准要求。滚子也是轴承中最薄弱的地方,如果滚子表面存在裂纹,当其工作于高速重载条件下时,不仅工作精度和使用寿命等会受到影响,裂纹还

会进一步扩大,而最终导致轴承失效,造成重大安全事故。因此,需要对滚子表面质量进行检测^[1-3]。

国内外研究学者对于轴承滚子的检测研究从接触式逐渐发展到非破坏性、非接触式的无损检测。无损检测是在保证不损伤检测工件的前提下,对检测对象进行质量评估以及缺陷检出定位等的技术^[4]。目前轴承滚子的主要检测方法有磁粉检测、涡流检测、光电检测、超声检测、机器视觉检测等^[5-8]。磁粉检测法适用于零件表面以及近表面裂纹检测,检测效率低,且存在污染;涡流法难以检测内部缺陷,同时受背景磁场影响较大;光电检测法精度要求较高,易受检测过程中的振动、抖动影响;超

收稿日期: 2022-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875226)

作者简介: 刘伯承(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为电磁无损检测新方法

通信作者: 康宜华, yihuakang@hust.edu.cn

声法检测效率低,存在表面检测盲区,且检测时需使用耦合剂,影响后续工艺流程;机器视觉法只能检测滚子的表面缺陷,同时滚子表面光滑、粗糙度低,易发生镜面反射导致成像质量差^[9-11]。

与以上检测方法相比,漏磁检测具有检测效率高、自动化程度高及无污染等特点,同时检测灵敏度高,能够有效检出裂纹、表面划伤、凹坑等缺陷^[12]。基于漏磁检测原理,提出了一种轴承滚子微细裂纹漏磁检测方法,可适用于不同规格及复杂检测工况下的轴承滚子检测。

1 漏磁检测方法

漏磁检测利用磁源对铁磁性工件进行磁化,磁场主要分布在工件内部;如果工件存在裂纹,部分磁通会泄露到工件表面的空间中,并在工件裂纹处激发形成漏磁场,检测时采用磁传感器来拾取漏磁场信号从而获得裂纹信息。轴承滚子漏磁检测原理如图 1 所示。

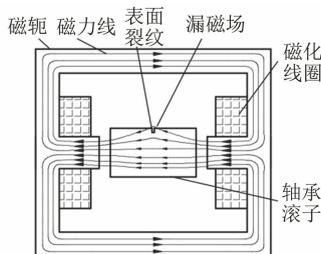


图 1 轴承滚子漏磁检测原理示意

根据该检测原理,提出了轴承滚子微细裂纹漏磁检测方法,设计了漏磁检测系统(见图 2)。该系统主要由磁化器、轴承滚子、检测探头、信号处理系统等 4 部分组成。检测时,磁化器将滚子磁化到近饱和状态,裂纹处磁场泄漏到空气中,探头拾取到漏磁场,将漏磁信号转化为电信号,传输到信号处理系统中进行放大、滤波等处理,最终得到裂纹信号,实现对轴承滚子表面裂纹的检测。

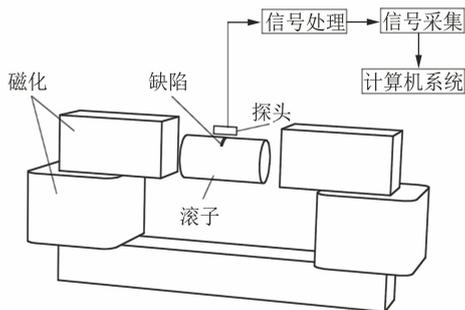


图 2 轴承滚子漏磁检测系统结构示意图

2 仿真分析

为了对该检测方法进行验证,建立如图 3 所示的仿真模型(Q 为内部测点, P 为外部测点),研究滚子表面的背景磁场及漏磁场特性。滚子直径(D)为 30 mm,裂纹深度(h)为 100 μm ,宽度(b)为 100 μm 。材料设置为 GCr15,磁化线圈匝数为 600 匝,通 5~10 A 的电流。内部测点 Q (距离滚子表面 0.4 mm)磁感应强度随电流强度的变化曲线如图 4 所示;在外部测点 P (距离滚子表面 0.4 mm)处测得背景磁场与裂纹的漏磁场强度(将裂纹处材料设置为 GCr15),计算得到无裂纹处背景磁场与电流大小的关系(见图 5);进而得到不同电流强度下裂纹的漏磁场信号(见图 6)。

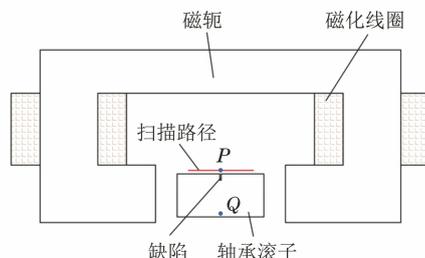


图 3 轴承滚子磁化仿真模型

对于同一尺寸的裂纹,磁化强度越大,滚子内部近表面的磁感应强度越大,裂纹产生的漏磁场强度越大,传感器越有可能拾取到裂纹信号。根据图 6 可以看出,随着电流强度的增大,滚子近表面的磁感应强度不断增大,当磁化电流为 9 A 时,外壁检测区域的磁感应强度为 1.6 T,接近饱和和磁化。因此,线圈通电电流选取为 9 A,此时滚子表面的背景磁场大小为 37 mT。

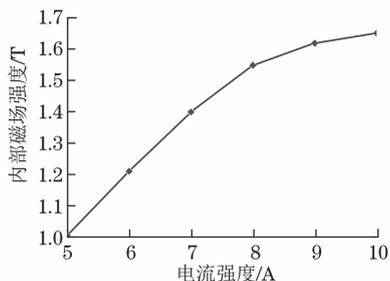


图 4 滚子内部磁场强度随电流强度的变化曲线

在滚子表面设置宽度为 100 μm ,深度分别为 15, 30, 50, 100, 150, 200 μm 的裂纹,磁化电流设置为 9 A,在滚子表面提高 0.4 mm 处,沿扫描路径提取不同深度下的切向漏磁感应强度分量(B_t), B_t 随裂纹深度的变化曲线如图 7 所示。

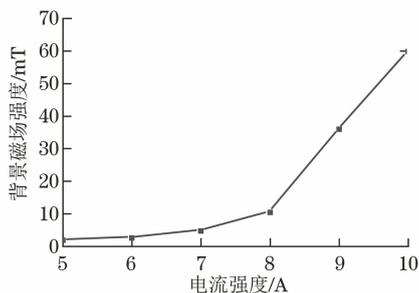


图5 无裂纹处背景磁场强度随电流强度的变化曲线

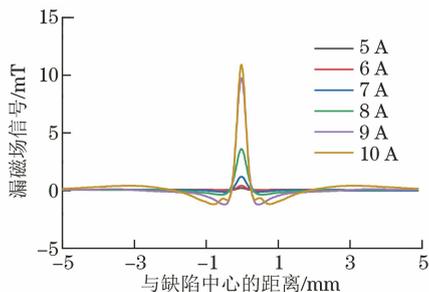


图6 不同电流强度下裂纹的漏磁场信号

由图7可知,磁场在光滑表面分布均匀,缺陷处波形出现一个单峰;在缺陷正上方,磁场磁感应强度达到最大,裂纹越深,磁感应强度越大,且信号幅值与裂纹深度呈线性关系。

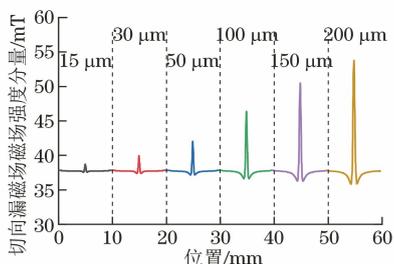


图7 切向漏磁场磁场强度分量随裂纹深度的变化曲线

3 基于测点区域近零磁场调控的 TMR 测磁方法

在漏磁检测过程中,对于不同规格的滚子,随着滚子直径的增加,所需磁化强度越来越大,而表面微细裂纹产生的漏磁场强度较小,检测要求更加严格。因此,利用漏磁检测方法对滚子进行微细裂纹检测时,存在漏磁场小,背景磁场大的检测问题。漏磁场的拾取主要依靠磁传感器,较大的背景磁场会导致传感器超量程饱和,出现灵敏度降低、信号失真甚至无法检测出信号等问题。常用的霍尔元件线性范围大,但灵敏度较低,TMR(隧道磁电阻)传感器相较于霍尔传感器、AMR(各向异性磁阻)以及GMR(巨磁阻),具有良好的温

度稳定性,同时检测灵敏度更高。基于以上问题,选择 TMR 传感器拾取信号,结合仿真得到的背景磁场磁感应强度,提出了基于测点区域近零磁场调控的 TMR 测磁方法。

对不同规格或不同工况的轴承滚子进行检测时,需要施加不同强度的磁化场,改变检测探头所处的背景磁场强度。因此,设计了线圈电磁磁化的偏置检测探头,建立基于线圈磁化回路的自适应测点近零磁场环境。基于线圈偏置的 TMR 传感器检测原理如图8所示,探头主要由 TMR 传感器、霍尔元件、磁轭、线圈组成,TMR 传感器选用多维 2001 型号;选用 0811 型霍尔元件测量 TMR 传感器所处位置背景磁场的大小;磁轭选用高磁导率、低损耗的硅钢片制作而成,用以聚磁、传导磁场;线圈采用直径为 1 mm 的漆包线制作,包裹在磁轭外,用以产生与背景磁场相反的偏置磁场,对 TMR 的背景磁场进行调控,使得其工作在高灵敏度区,并且具有较强的抗外界电磁干扰能力。在实际漏磁检测中,测点处测量得到的磁感应强度为线圈磁化后产生的漏磁场磁感应强度与施加的反向偏置磁场共同作用后的磁感应强度。

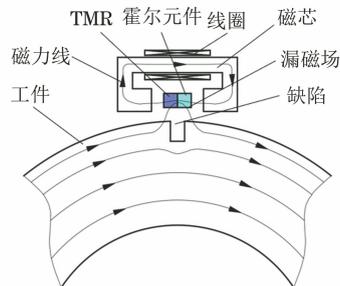


图8 基于线圈偏置的 TMR 传感器检测原理

建立直径为 30 mm 的轴承滚子模型,滚子表面设置宽度为 100 μm,深度为 100 μm 的刻槽,磁化线圈匝数为 600 匝,磁化电流为 10 A。传感器偏置磁场的磁感应强度设置为 35 mT,仿真得到加偏置磁场前后的裂纹漏磁场信号如图9所示,检测区域背景磁场下降至约 0 mT,根据仿真结果显示加偏置磁场前后裂纹处的漏磁场云图如图10所示,可见,反向的偏置磁场对滚子的磁化状态有一定影响,但影响较小,漏磁场强度峰峰值下降 15%左右,不影响信号检出。

为了保证偏置电流能够随背景磁场变化而相应改变,采用了电流反馈控制系统,主要包括 PLC(可编程逻辑控制器)控制模块、模拟量模块、可控硅电源调节模块。控制调节变压器初级线圈中可控硅的

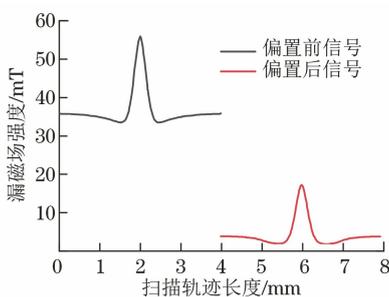


图9 加偏置磁场前后裂纹的漏磁信号

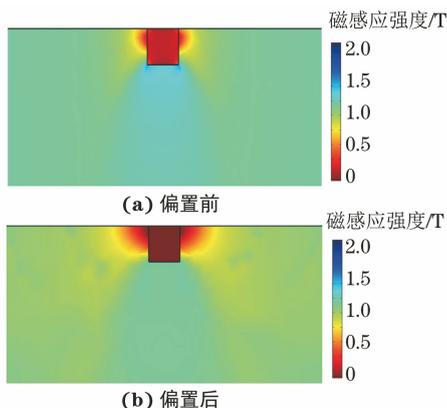


图10 加偏置磁场前后裂纹处的漏磁场云图

导通角,即可改变变压器初级线圈的电压幅值,从而改变变压器次级线圈的输出电压,达到控制偏置电流大小的目的。

根据设定值对 PLC 模拟量输出端给定一个初值,初始输出电流为 0 A,在输出初始电流后,再检测霍尔传感器的输出电压值,并将其作为输入端信号;比较霍尔元件在静态时输出的电压值与磁化后的输出电压值,然后根据比较结果进行增量电流调节,微调量(ΔI)取 0.1 A,形成一个闭环调节的反馈回路,使得输出电流满足要求。

4 检测试验

为了对该测磁方法进行验证,搭建如图 11 所示的试验平台,选取如图 12 所示,直径为 30 mm 的轴承滚子进行检测,工件表面刻有周向分布的标准伤,长度为 10 mm,宽度为 100 μm ,深度为 100 μm ,检测探头如图 13 所示。

未磁化时,霍尔元件输出电压为 0 mV;磁化线圈加载 10 A 激励电流,此时轴承滚子处于近饱和状态,滚子表面的背景磁场强度为 15 mT,霍尔元件输出电压为 50 mV;偏置线圈调节电流输入为 2.2 A 时,霍尔元件输出电压归于 0 mV。探头采集到 10 A 电流偏置前后的输出电压信号如图 14 所示。



图11 轴承滚子漏磁检测试验平台



图12 检测工件外观

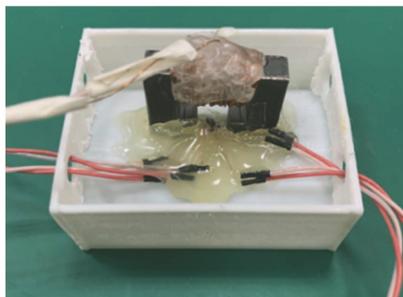


图13 检测探头外观

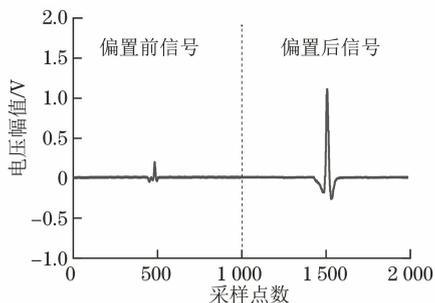


图14 10 A 电流偏置前后的输出电压信号

采用上述试验平台,检测工件上刻伤裂纹深度分别为 15,30,50,150,200 μm (其中 15,30 μm 深裂纹采用标准磁粉试片代替),得到偏置前与偏置后输出电压信号峰峰值与裂纹深度的关系曲线如图 15 所示。由图 15 可见,在一定条件下,随着裂纹深度的增加,输出信号峰峰值呈线性增加,偏置后的输出信号幅值相较于偏置前的信号幅值明显增大。

经过数据统计与计算,得到 10 A 电流激励下不

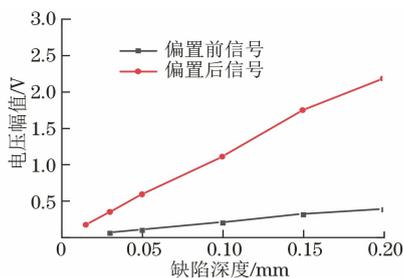


图 15 10 A 电流偏置前后输出电压信号峰峰值与裂纹深度的关系曲线

同深度裂纹的信噪比如表 1 所示,可见,偏置后裂纹漏磁信号的信噪比明显提升,对于 15 μm 深的裂

表 1 10 A 电流激励下不同深度裂纹的信噪比

项目	裂纹深度/μm					
	15	30	50	100	150	200
偏置前信噪比/dB	—	5.45	10.02	13.82	17.75	19.18
偏置后信噪比/dB	5.93	9.13	15.89	22.77	26.41	28.05

表 2 15 A 电流激励下不同深度裂纹的信噪比

项目	裂纹深度/μm					
	15	30	50	100	150	200
偏置前信噪比/dB	—	—	4.02	5.90	9.25	12.04
偏置后信噪比/dB	6.77	12.87	17.50	23.52	26.02	29.31

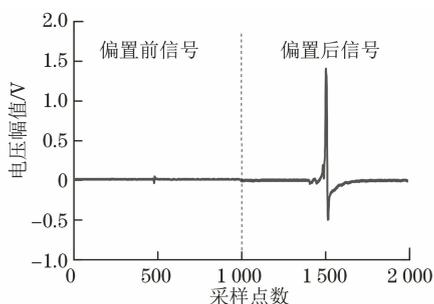


图 16 深为 100 μm 的裂纹 15 A 电流偏置前后的输出电压信号

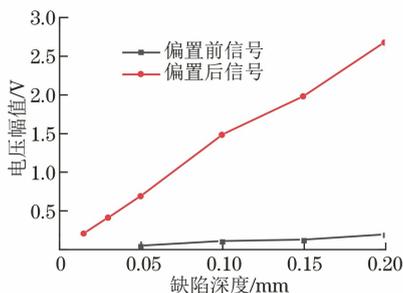


图 17 15 A 电流偏置前后输出电压与裂纹深度的关系

由表 2 可见,对于 15, 30 μm 深的裂纹,偏置前无信号,偏置后可检出信号,偏置后不同深度裂纹的检出率均有提升,且与近饱和和磁化状态下相比较,信号的信噪比略有提升,即,对于不同背景磁场强度下的漏磁检测,该偏置探头均可调节偏

纹,偏置前无信号,偏置后可检出信号。

激励电流为 15 A 时,轴承滚子处于磁过饱和状态,滚子表面的磁感应强度为 24 mT,霍尔元件输出电压为 85 mV。偏置线圈调节电流输入为 3.5 A 时,霍尔元件输出电压归于 0 mV。深为 100 μm 的裂纹 15 A 电流偏置前后的输出电压信号如图 16 所示,15 A 电流偏置前后输出电压与裂纹深度的关系如图 17 所示,可见,过磁饱和状态下,TMR 传感器拾取到的信号很小,调节偏置电流后,探头才能有效拾取到裂纹信号。15 A 电流激励下不同深度裂纹的信噪比如表 2 所示。

置电流的大小,建立良好的测点区域近零磁场环境。

5 结语

(1) 基于漏磁检测原理,提出了轴承滚子微细裂纹漏磁检测方法,并通过仿真分析了裂纹产生的漏磁场特性。

(2) 提出了测点区域近零磁场调控的 TMR 测磁方法,并设计了线圈电磁磁化的偏置检测探头,建立基于线圈磁化回路的自适应测点近零磁场环境,使得探头能够适用于不同工况下的漏磁检测。

参考文献:

- [1] 李洁,杨兴旺. 浅析我国轴承制造技术的现状及其发展趋势[J]. 广东蚕业,2018,52(4):45.
- [2] 刘桥方,严枫. 我国轴承制造技术的现状及其发展趋势[J]. 轴承,2005(6):42-45,11.
- [3] ODANOVIC Z, RISTIVOJEVIC M, MILOSEVIC-MITIC V. Investigation into the causes of fracture in railway freight car axle [J]. Engineering Failure Analysis,2015,55:169-181.
- [4] 吴小亮. 平直钢管磁性无损检测关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.

(下转第 50 页)

数在频厚积为 $2\ 200\sim 2\ 600\text{ kHz}\cdot\text{mm}$ 的范围内达到最大值且总是大于0.78,这表明 a_0 模式可以保证大部分能量以适当的方式传输到管道中;而 $T_{ds_0s_0}$ 的最大值和所对应的频厚积随着 T_p/T_s 的增大而增大,在频厚积约为 $1\ 600\text{ kHz}\cdot\text{mm}$ 时达到最大值(约为0.75。)

3 结语

频厚积约为 $2\ 200\sim 2\ 600\text{ kHz}\cdot\text{mm}$ 时,若取 a_0 模式兰姆波从套筒外的母材管道入射,可将约80%的能量通量传输到原管道中,且能量不会因焊缝形状和倾斜角的改变而发生显著变化,而 s_0 模式兰姆波通过角焊缝进入到原管道中的能量通量会随着管-套筒厚度比、焊脚以及盖面平缓程度的变化而发生改变,在频厚积为 $690\sim 1650\text{ kHz}\cdot\text{mm}$ 时,可获得最大传输能量。

参考文献:

[1] 洗国栋,杨锋平,魏国昌,等.在役 X80 级管道 B 型套筒等强设计程序和方法思考[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(1):110-112.
[2] 李荣光,张巍,赵振,等.高钢级管道环焊缝缺陷修复技术探讨[J].油气储运,2020,39(3):307-312,360.
[3] 李荣光,冯庆善,王学力,等.B型全封闭钢质套筒修复技术改进[J].油气储运,2010,29(10):755-758,717.
[4] 成志强,胡聪,段金伟,等.B型套筒角焊缝力学性能

模拟实验[J].西南石油大学学报,2021,43(6):111-118.

[5] MORI N, KUSAKA T. Reflection and transmission characteristics of Lamb waves at an adhesive lap joint of plates[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145(5):3075.
[6] AN Y K, KIM J H, YIM H J. Lamb wave line sensing for crack detection in a welded stiffener[J]. Sensors, 2014, 14(7):12871-12884.
[7] GALÁN J M, ABASCAL R. Lamb mode conversion at edges. A hybrid boundary element-finite-element solution[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(4):1777-1784.
[8] AL-NASSAR Y N, DATTA S K, SHAH A H. Scattering of lamb waves by a normal rectangular strip weldment [J]. Ultrasonics, 1991, 29 (2): 125-132.
[9] TAUPIN L, LHÉMERY A, BARONIAN V, et al. Hybrid safe/FE model for the scattering of guided waves in a stiffened multilayered anisotropic plate [J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1430(1): 134-141.
[10] FENG F L, SHEN J Z, LIN S Y. Scattering matrices of Lamb waves at irregular surface and void defects [J]. Ultrasonics, 2012, 52(6):760-766.
[11] FENG F L, SHEN J Z, DENG J J. The scattering matrices of Lamb waves at multiple delaminations and broken laminates [J]. NDT & E International, 2012, 49:64-70.



(上接第5页)

[5] ZBROWSKI A, MATECKI K. The use of computed tomography to analyse grinding smudges and subsurface defects in roller bearing rings[J]. Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2014, 60(11):709-715.
[6] 吴景.基于机器视觉的轴承滚子表面缺陷检测系统[D].杭州:浙江大学,2018.
[7] 李旭.轴承滚子表面缺陷涡流检测系统研究[D].长春:长春理工大学,2020.
[8] SI-CHAIB M O, DJELOUAH H, NOUR A. Study of shear ultrasonic waves propagating in materials under static uniaxial loadings: simulation, shear waves,

acoustoelasticity, mechanical stresses, materials [J]. Strain, 2011, 47:134-143.

[9] 张杰,王宇,陈亮.铁路车辆轴承圆柱滚子非相关磁痕形貌分析[J].哈尔滨轴承,2019,40(3):24-25,37.
[10] YI C, LIN J, ZHANG W, et al. Faults diagnostics of railway axle bearings based on IMF's confidence index algorithm for ensemble EMD [J]. Sensors, 2015, 15(5):10991-11011.
[11] 苏俊宏,刘胜利.圆柱型高精零件表面缺陷检测及形貌分析[J].激光与光电子学进展,2014,51(4):154-158.
[12] 冯搏,伍剑波,邱公喆,等.高速漏磁检测方法的发展[J].无损检测,2021,43(2):57-63.