

基于 TMR 的轴承滚子微细裂纹漏磁检测方法

刘伯承, 唐健, 王荣彪, 叶文超, 康宜华

(华中科技大学, 制造装备数字化国家工程研究中心, 湖北武汉 430074)

摘要: 轴承滚子表面质量直接影响轴承的精度、性能以及使用寿命。为了实现滚子的高速、高精数字化无损检测, 提出一种基于隧道磁阻(TMR) 传感的滚子裂纹漏磁检测方法。利用有限元仿真分析了最佳的磁化电流以及不同裂纹深度对应的漏磁场大小。为了解决高灵敏度 TMR 传感器在强背景磁场下的量程不足、信号失真、磁噪声增大等问题, 设计了基于偏置磁场调节的 TMR 阵列差分探头, 实验验证了该探头检测微细裂纹漏磁场的有效性。

关键词: 轴承; 滚子; 微细裂纹; 周向磁化; 漏磁检测; 磁场偏置; TMR

中图分类号: TH133 文献标识码: A 文章编号: 1002-1841(2021)12-0111-04

Magnetic Flux Leakage Testing Method of Bearing Roller Micro-cracks Based on TMR

LIU Bo-cheng, TANG Jian, WANG Rong-biao, YE Wen-chao, KANG Yi-hua

(Huazhong University of Science and Technology, National Engineering Research Center for Digital Manufacturing Equipment, Wuhan 430074, China)

Abstract: The surface quality of the bearing roller directly affects the accuracy, performance and service life of the bearing. In order to realize the high-speed and high-precision digital non-destructive testing of rollers, a method of magnetic flux leakage detection for roller cracks based on tunnel magnetoresistance (TMR) sensing was proposed. Finite element simulation analyzed the optimal magnetizing current and the magnitude of the leakage magnetic field corresponding to different crack depths. In order to solve the problems of insufficient range, signal distortion, and increased magnetic noise of high-sensitivity TMR sensors under strong background magnetic fields, a TMR array differential probe based on bias magnetic field adjustment was designed and the experiment verifies the effectiveness of the probe to detect the magnetic field leakage of micro-cracks.

Keywords: bearing; roller; micro-crack; circumferential magnetization; magnetic flux leakage testing; magnetic bias; TMR

0 引言

滚子是滚子轴承运转时承受负荷的主要元件, 同时也是轴承中最薄弱的零件, 其表面质量直接影响轴承的精度、性能以及使用寿命。在轴承滚子生产过程中, 由于加工工艺、工人操作等因素, 使得滚子表面可能存在裂纹、划痕等缺陷, 会对轴承造成严重损害, 因此有必要对轴承滚子进行 100% 缺陷检测^[1-2]。

目前轴承滚子的主要检测方法有人工检测法、磁粉法、涡流法、超声法、机器视觉法等^[3-7]。人工目检法检测效率低、强度大, 极易造成误检和漏检; 磁粉法对检测人员的操作、技术要求高, 检测效率低, 后续处理流程复杂, 有污染; 涡流法对检测装置精度要求高, 难以检测内部缺陷; 超声法检测速度慢、效率低, 存在

表面检测盲区, 且检测时需要耦合剂, 若耦合剂处理不及时, 会影响后续工艺进程; 机器视觉法对检测环境要求高, 滚子表面光滑, 易发生镜面反射导致成像质量差, 且无法检测内部缺陷。与以上检测方法相比, 漏磁检测具有检测效率高、工艺流程简单、灵敏度高、高等特性, 能够有效地检出裂纹、表面划伤、凹坑等缺陷^[8-10]。

本文将漏磁法应用于轴承滚子的表面微细裂纹检测, 通过磁轭式线圈施加周向磁化, 检测滚子轴向裂纹, 提出了一种基于 TMR 传感的轴承滚子微细裂纹漏磁检测方法, 实现不同直径轴承滚子的高速、高精自动化无损检测。

1 轴承滚子轴向裂纹的漏磁检测方法

1.1 滚子结构缺陷特点

轴承滚子结构如图 1 所示, 呈圆柱形, 且曲率半径小、壁厚。常用材料为 GCr15 轴承钢, 其 B-H 曲线如

基金项目: 2018 年国家重点研发计划新能源汽车重点专项项目 (2018YFB0106000)

收稿日期: 2021-06-09

图 2 所示。实际生产资料显示,轴承滚子缺陷大多是锻造轧制过程中产生的表面折叠裂纹或冷拉过程中形成的表面划伤等,通常为 μm 级的微细裂纹,且多数裂纹沿轴向延展^[11],为此,本文主要研究轴向微细裂纹的检测问题。

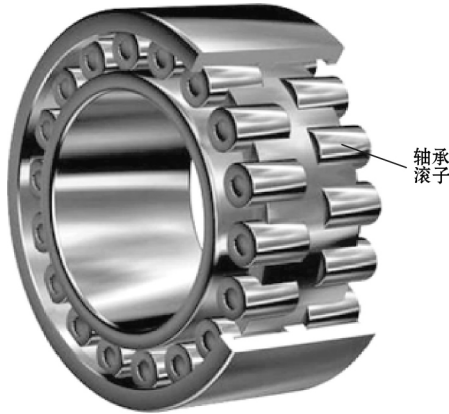


图 1 轴承图

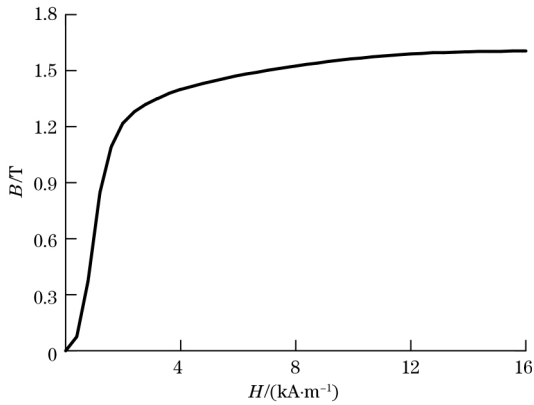


图 2 GCr15 的 B-H 曲线

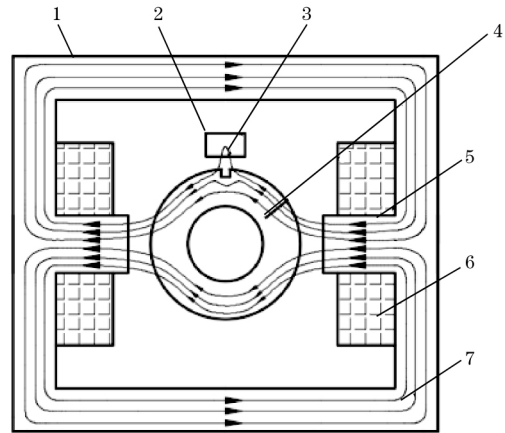
1.2 滚子轴向裂纹漏磁检测方法

根据漏磁检测原理,滚子轴向裂纹的检测需要周向磁场磁化,为此,采用如图 3 所示的磁化器磁化滚子,磁极与滚子外侧保持 10 mm 间隙。

对于不同规格的滚子,曲率半径越小时,“磁短路”现象^[12]越严重,导致外表层的磁化强度变弱,外表层裂纹产生的漏磁场越小^[13]。为了获得足够强的裂纹漏磁场,需要增强磁化器的磁场强度,因此,在磁化器空腔内放置的磁敏感元件将工作在很强的背景磁场中。

1.3 最优的磁化电流

使用 CMOSOL 有限元仿真软件对滚子的磁化效果进行仿真分析。对内径 d 为 20 mm、外径 D 为 52 mm 的滚子建立计算模型,材料为 GCr15,磁化线圈匝数为 600 匝。得到 6~12 A 磁化电流下滚子内磁场模分布云图如图 4 所示。在检测点 P (距离滚子外表



1—磁轭; 2—传感器; 3—漏磁场; 4—检测工件; 5—磁极; 6—磁化线圈; 7—磁力线

图 3 轴承滚子漏磁检测原理图

面 0.1 mm) 的磁感应强度随电流值变化如图 5 所示。

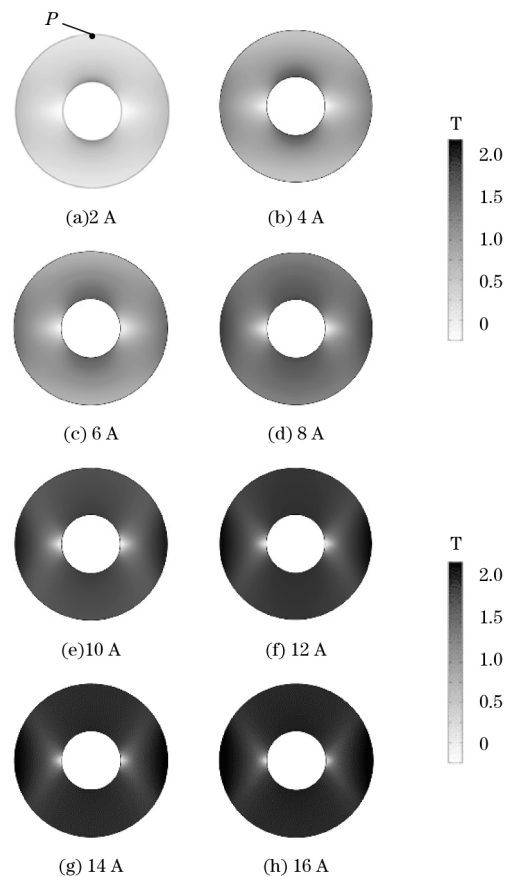


图 4 滚子内磁场随磁化电流的变化

从图 5 可以看出,滚子近表层的磁感应强度随磁化电流增加而增大,到 12 A 后接近饱和磁化。一般取最优的磁化电流大于 12 A。

在滚子表面设置宽度 b 为 20 μm 、深度分别为 15、30、60、100 μm 的刻槽,在磁化电流为 12 A 时,在滚子表面提高 0.1 mm 的面上,提取不同深度下的切向漏磁感应强度分量 B_t 如图 6 所示。

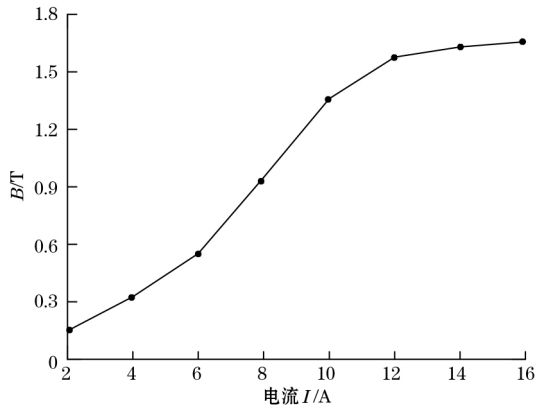


图 5 滚子近表磁感应强度随电流值的变化

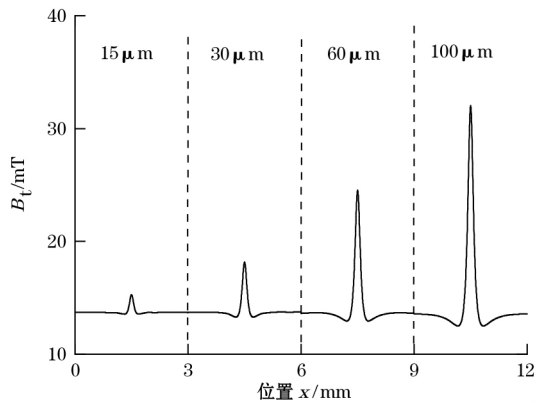


图 6 随刻槽深度的变化

2 基于 TMR 的漏磁场测量方法

滚子表面微细裂纹产生的漏磁场极其微小,需要高灵敏度传感器拾取。比较各种磁敏传感器,TMR 传感器的灵敏度以及线性检测范围较为合适^[14]。在此,选用 TMR2001,封装体积为 3 mm×3 mm×1.5 mm,线性量程在±5 mT 范围内。

2.1 偏置磁场调节 TMR 测磁工作点

在 12 A 的磁化电流下,测点位置的背景磁场已有 14 mT,超出 TMR2001 测量的量程。为此,提出了一种施加偏置磁场的测量方法,如图 7 所示。在 TMR 传感器测点附近施加一个与背景磁场反向的恒定磁场,使得测点上的合成磁场在 TMR 量程范围内变动。

图 8 为施加了 14 mT 偏置磁场前后测点上的 30 μm 深裂纹漏磁场沿圆周上的分布。偏置磁铁采用永久磁铁,确保偏置磁场的稳定性。其在测点位置提供的磁场强度由磁铁与磁轭在主磁通路上的接触面积决定,可以采用机械方式人工或数控调整。

2.2 差分测磁阵列探头

TMR2001 传感器体积微小。为了实现轴承滚子的全覆盖检测,探头的有效检测范围应大于滚子长度。设计了与被测外圆对应的仿形阵列差分探头,以

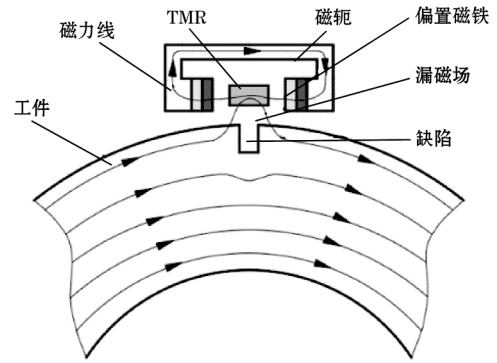


图 7 基于磁场偏置的 TMR 传感器检测原理图

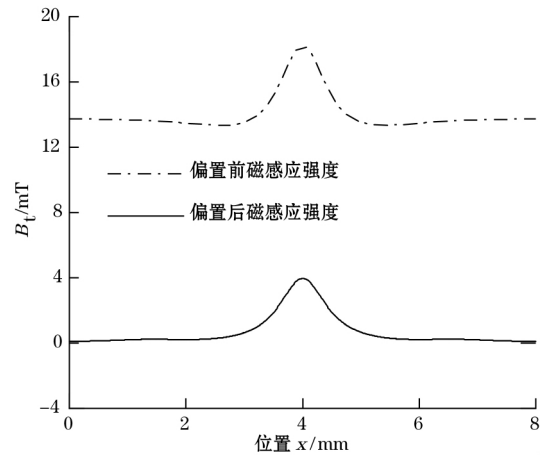


图 8 基于磁场偏置的缺陷漏磁信号

满足高精、全覆盖的检测需求。仿形阵列差分探头可采用气浮技术实现非接触、近零脱离的检测。沿圆周相邻两个 TMR 传感器差分输出一个检测通道,结构如图 9 所示。采用差分组合形式,能有效消除测量过程中的共模噪声,提高测量的稳定性、信噪比和抗干扰能力。单个 TMR2001 的检测范围为 5 mm,采用 40 只 TMR2001 构成两排线阵探头,有效检测轴向长度为 100 mm。

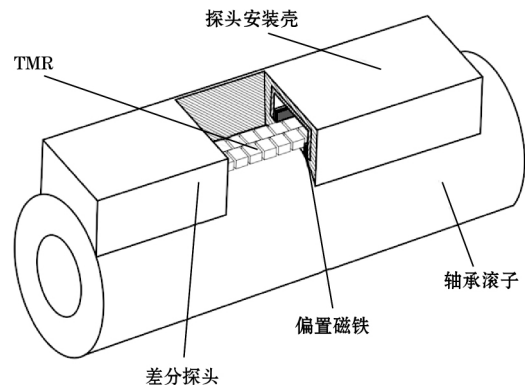


图 9 TMR 双线阵差分探头示意图

3 实验

对内径为 20 mm、外径为 52 mm 的滚子进行实验测试,样件如图 10 所示。沿轴向的人工刻伤长度为

10 mm、宽度为 20 μm、深度为 30 μm。

实验台如图 11 所示。磁化线圈匝数为 600 匝、通电电流为 12 A。采用特斯拉计测得滚子表面的磁感应强度为 14.5 mT。此时 TMR2001 工作在图 12 中 B 点的非线性区域。调节永磁偏置磁化器与 TMR 之间的相对位置, TMR2001 工作于图 12 中 A 点。在此状态下测得上述人工刻伤的信号如图 13 所示, 图中: ΔB 为漏磁感应强度峰值; ΔU_1 为施加了偏置磁场后的电压峰峰值; ΔU_2 为未加偏置磁场的电压峰峰值。

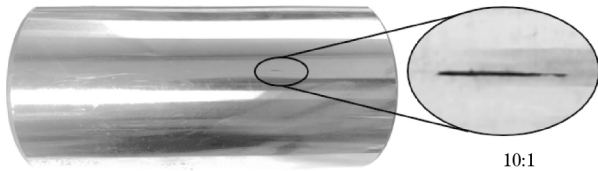


图 10 检测工件示意图

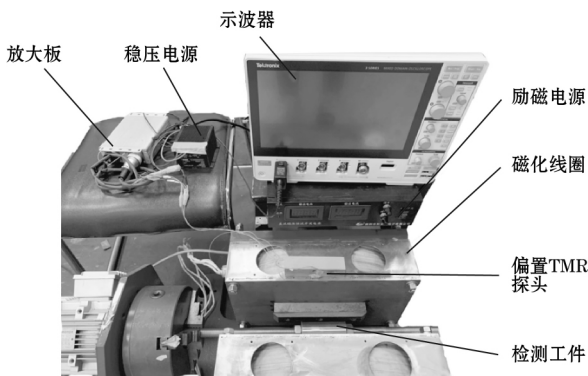


图 11 实验平台

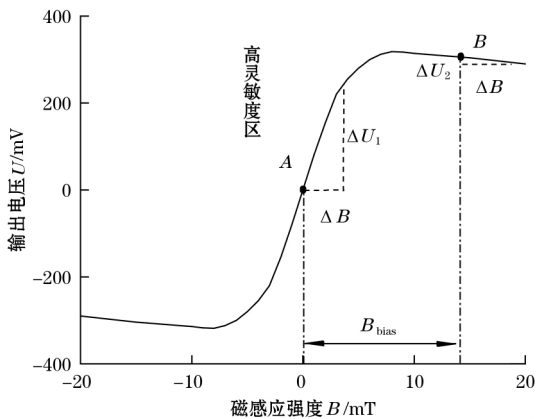


图 12 TMR2001 的响应曲线

对于一定深度的裂纹 施加偏置磁场后 裂纹的检测信号峰峰值基本不变, TMR2001 工作在高灵敏度区域时, 与饱和区相比 裂纹检测信号峰峰值增大大约 8.5 倍。

保持上述实验条件不变, 对深度分别为 15、60、100 μm 的刻伤进行实验。偏置前与偏置后的裂纹信号峰峰值如图 14 所示。输出信号峰峰值随裂纹深度呈线性增加, 施加磁场偏置后的输出信号幅值明显增强。

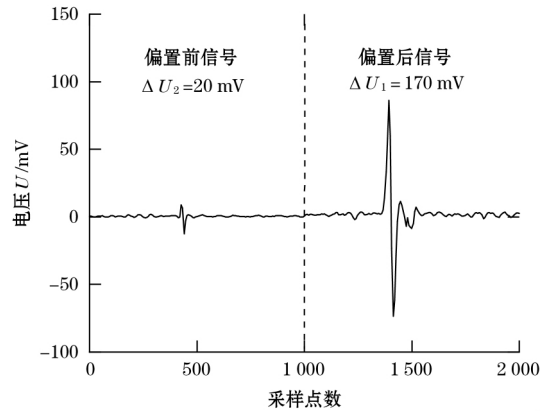


图 13 30 深裂纹漏磁场检测信号

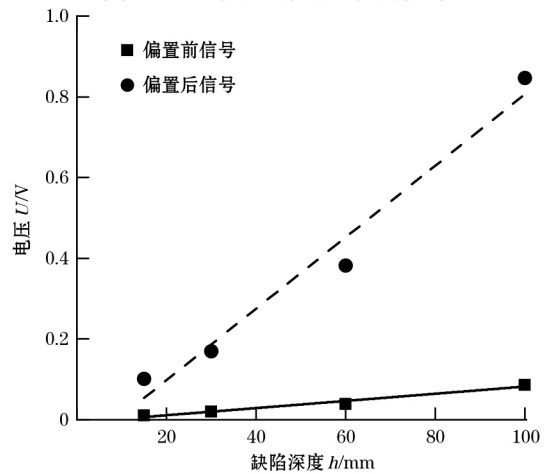


图 14 裂纹信号峰峰值随深度的变化

4 结束语

(1) 轴承滚子微细裂纹采用漏磁检测方法具有可行性。

(2) 施加偏置磁场调节后可以有效提升高灵敏度 TMR 传感器的检测性能。

参考文献:

- [1] 陈贤, 夏建春. 轴承滚子表面缺陷检测技术的研究[J]. 科技创新导报, 2018, 15(28): 88-89.
- [2] 吴文龙. 轴承滚子表面疵病检测方法的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [3] 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.
- [4] ZBROWSKI A, MATECKI K. The use of computed tomography to analyse grinding smudges and subsurface defects in roller bearing rings[J]. Strojnicki vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2014, 60(11): 709-715.
- [5] 牧野一成, 彭惠民, 蔡千华. 用超声波检测车轴轴承滚道面下的夹杂物[J]. 国外机车车辆工艺, 2011(6): 37-42.
- [6] PELKNER M, REIMUND V, ERTHNER T, et al. Size adapted GMR arrays for the automated inspection of surface breaking cracks in roller bearings[C]//International Symposium on Applied Electromagnetics & Mechanics, 2014.

(下转第 118 页)

的方法,即在每两个相邻不同幅值点之间用线性内插函数计算得中间点的修正倍率。所有测试设备应预热 2 h。测试内容包括示值误差和分辨力,选择不同频率点进行示值误差测试,在 200 μV 点做分辨力测试,结果如表 5 所示。测试结果表明,低噪声交流低电压放大电路的最高分辨力为 10 nV。

表 5 分辨力测试结果

标准交流低电压/ μV	频率/kHz	放大倍率	测量值/ μV
200.00	5	10^4	199.990
200.01	5	10^4	199.996
200.02	5	10^4	200.006
200.03	5	10^4	200.022
200.04	5	10^4	200.028
200.05	5	10^4	200.039

6 结束语

低噪声低电压交流放大电路的创新点在于:根据低噪声设计原则,详细分析了放大电路各级噪声影响量,采用前级无源放大和复合型同相放大技术等方法,实现了 20 μV ~2 mV 交流低电压信号放大测量功能,频率范围为 10 Hz~100 kHz,最高分辨力达到 10 nV,最优不确定度为 0.03%,放大电路整体性能稳定

可靠,顺利通过国防计量科研项目验收,项目成果应用于交直流低电压检定装置。

参考文献:

- [1] 彭先洪,张磊,刘彬.低频纳伏电压标准装置溯源方法研究[J].计量技术,2012(2):52-55.
- [2] 曹敏,李波,肖元强,等.一种交流溯源直流方法的研究与应用[J].测试技术学报,2013,27(5):399-405.
- [3] 潘仙林,宋莹,靳振宇,等.基于电压比例技术实现毫伏级交流电压的量值溯源[J].电测与仪表,2017,54(7):81-83.
- [4] 姜利英,岳保磊,梁茂,等.一种改进型微弱电流低噪声放大应用电路[J].郑州轻工业学院学报(自然科学版),2015,30(Z1):118-122.
- [5] 张金利,景占荣,梁亮,等.微弱信号的调理电路设计和噪声分析[J].电子测量技术,2007(11):40-42.
- [6] 高晋占.微弱信号检测[M].2版.北京:清华大学出版社,2011.
- [7] 吉时利.低电平测量手册[M].崔建平,译.北京:美国吉时利仪器公司,2005.

作者简:严明(1979—),高级工程师,硕士,主要从事电学计量测试技术研究工作。E-mail: yanm918@sina.com
魏巍(1981—),高级工程师,硕士,主要从事无线电计量测试技术研究工作。E-mail: berryweiwei@163.com

(上接第 114 页)

- [7] 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.
- [8] 冯搏,伍剑波,杨芸,等.钢管纵向伤高速高精漏磁探伤磁化方法[J].中国机械工程,2014,25(6):736-740.
- [9] 耿浩.高速漏磁检测技术中若干关键问题研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [10] KIM J W, PARK S. Magnetic flux leakage sensing and artificial neural network pattern recognition-based automated damage detection and quantification for wire rope non-destructive evaluation[J]. Sensors, 2018, 18(2): 109.
- [11] 梁存良,薛蕴鹏,王凯,等.燃气轮机主轴滚子表面裂纹分析[J].轴承,2019(7):43-45.

- [12] 杨芸.表面粗糙度和曲率半径对轴承钢管漏磁检测的影响机制[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [13] HUANG X, WU J, SUN Y, et al. 3D magnetic dipole models of magnetic flux leakage for 'concave' and 'bump' defects[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59(4): 1305-1312.
- [14] 孟杰,李二龙,唐健,等.轴承套圈裂纹高速漏磁检测系统[J].轴承,2018(8):66-70.

作者简介:刘伯承(1997—),硕士研究生,主要研究方向为电磁无损检测方法与仪器。
E-mail: liubc_1027@hust.edu.cn
通信作者:唐健(1993—),博士研究生,主要研究方向为数字化无损检测方法与仪器、机电一体化。
E-mail: tangj@hust.edu.cn