

轴承套圈裂纹高速漏磁检测系统

孟杰¹,李二龙¹,唐健¹,康宜华^{1,2}

(1. 华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室,武汉 430074;2. 武汉华宇一曰检测装备有限公司,武汉 430074)

摘要:为解决轴承套圈大批量、高速、高精的检测需求,将漏磁法运用于套圈的微细裂纹检测,提出了一种多轴承套圈内外壁双面同步高速漏磁检测方式,设计了多轴承套圈同步高速检测机构,同时使用磁屏蔽式仿形磁敏电阻阵列探头拾取微细裂纹产生的漏磁场并进行减少误判的信号处理,可满足多规格轴承套圈高速、高精的漏磁检测需求,每件检测速度仅需2 s,最小检出深度可达0.1 mm。

关键词:滚动轴承;套圈;漏磁检测;仿形探头;磁敏电阻

中图分类号:TH133.33;TG115.28⁺4 **文献标志码:**B **文章编号:**1000 - 3762(2018)08 - 0066 - 05

High Speed Magnetic Flux Leakage Detection System for Microcracks on Bearing Rings

MENG Jie¹, LI Erlong¹, TANG Jian¹, KANG Yihua^{1,2}

(1. State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment & Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Huayu - M Testing Equipment Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to solve massive, high speed and high precision detection requirements for bearing rings, the magnetic flux leakage method is applied for detection of microcracks on rings. The high speed magnetic flux leakage detection method is proposed, which can synchronously detect both sides of inner and outer walls of a large number of bearing rings, and the synchronous high speed detection mechanism is designed. At the same time, the magnetic flux leakage field generated by microcracks is collected by using magnetic shielded profiling magnetoresistor array probe, and the signal processing is carried out to reduce misjudgment. The high speed and high precision magnetic flux leakage detection requirements for bearing rings with various specifications are met. The detection speed per piece is 2 s, and the minimum detection depth reaches 0.1 mm.

Key words: rolling bearing; ring; magnetic flux leakage detection; profiling probe; magnetoresistor

据统计,由于轴承套圈损伤而引起的故障大约占旋转机械现场故障的30%,其中大约90%的故障源自套圈的裂纹^[1],因此提高轴承套圈的裂纹检测能力尤为重要。目前,轴承套圈探伤方法主要有手工检测、磁粉法、超声法以及机器视觉法等^[2-5]。手工检测效率低,容易产生误判和漏判;

磁粉法对检测人员的技术和经验要求高,检测速度慢,磁悬液后续处理麻烦;超声法检测速度慢、效率低,同时耦合剂若未及时处理,将影响后续加工工艺;机器视觉法主要针对轴承套圈表面缺陷的检测,无法进行内部缺陷检测。与以上检测方法相比,漏磁检测不仅工艺流程简单、灵敏度高、检测速度快,而且对内外表面的裂纹、腐蚀和凹坑等缺陷具有很好的检出能力^[5]。

因此,将漏磁法应用于轴承套圈的表面微细裂纹检测,采用内外壁双面漏磁检测方式,设计了多轴承套圈同步高速检测机构,同时使用磁屏蔽式仿形磁敏电阻阵列探头拾取微细裂纹产生的漏磁场并进行减少误判的信号处理,满足小直径轴承套圈高速、高精的漏磁检测需求。

收稿日期:2017 - 07 - 10; **修回日期:**2018 - 03 - 05

基金项目:国家自然科学基金项目(51275193)

作者简介:孟杰(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为数字化无损检测方法 with 仪器、机电系统设计与控制, E-mail: mengjie_10@163.com。

通信作者:李二龙(1989—),男,博士研究生,主要研究方向为电磁无损检测技术, E-mail: lierlg720@126.com。

1 轴承套圈高速漏磁检测方法

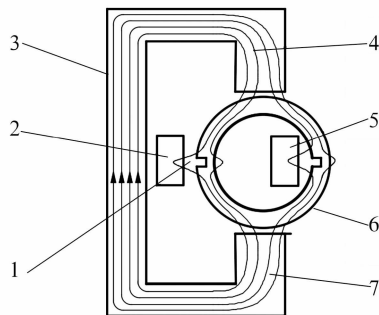
1.1 轴承套圈结构和缺陷特点

轴承套圈结构呈圆环形,且宽度较小。轴承套圈成形大多要经过锻造工序,由于原材料存在缺陷或是锻造工艺不当等原因,轴承套圈缺陷通常沿轧制方向呈直线分布,以表面裂纹、折叠裂纹等纵向缺陷的形式呈现^[6-7]。

1.2 轴承套圈微细裂纹漏磁检测方法

1.2.1 漏磁检测原理

漏磁检测是利用励磁源对被检工件进行局部磁化,使被检工件达到磁饱和状态,若被测工件表面光滑,内部没有缺陷,磁通将全部通过工件;若材料表面或近表面存在缺陷时,其附近的磁场发生泄漏,通过传感器检测到漏磁场。轴承套圈主要为纵向裂纹类缺陷,所以采用纵向漏磁内外检测方法,检测原理如图 1 所示。



1—漏磁场; 2—外检传感器; 3—磁轭; 4—极靴; 5—内检传感器; 6—检测工件; 7—磁力线

图 1 纵向漏磁检测原理示意图

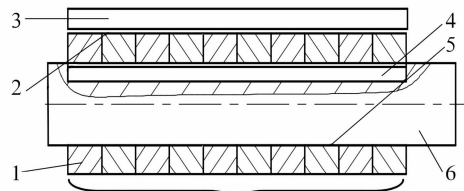
Fig. 1 Diagram of longitudinal magnetic flux leakage detection

1.2.2 检测方式选择

现有的轴承套圈自动检测系统大多采用单工位检测单工件的方式,即每次仅能检测 1 个套圈^[2-4,8],检测效率很低。因此,采用了一种新型多套圈同步高速检测机构,将多个套圈通过导杆穿在一起构成一个长筒形结构的多套圈组件,将该多套圈组件作为一个检测单位,从而提高检测速度。同时,为提高内外表面微细裂纹的检测精度,增强内外伤的区分能力,采用套圈内外壁双面漏磁检测方式,在套圈外壁布置外检探头并利用导杆将内检探头布置在套圈内部,检测方式如图 2 所示。

1.2.3 磁化机构

根据磁性检测原理,检测时外加磁场方向应最大限度与缺陷走向垂直,以激励出最大的漏磁



多轴承套圈组件

1—套圈; 2—外壁; 3—外检探头; 4—内检探头; 5—内壁; 6—导杆

图 2 检测方式示意图

Fig. 2 Diagram of detection method

场。因此检测纵向裂纹时需对套圈进行周向磁化,采用 U 形磁轭磁化方法形成周向磁化场实现工件的周向磁化。当改变轴承套圈规格时,对极靴进行微调,以保证工件的磁化效果,适应多规格轴承套圈的磁化。通过有限元法分析磁化机构磁化效果,线圈匝数为 1 000,通电电流为 6 A,套圈材料为 GCr15,其磁化曲线如图 3 所示,该材料饱和磁化强度约 1.3 T。磁化机构的磁场的分布云图如图 4 所示,磁化机构形成了良好的磁回路,多套圈组件外壁检测区域的磁感应强度达到了 1.0 T,内壁检测区域的磁感应强度达到了 1.2 T,满足磁化要求且磁化场比较均匀,磁化端部效应较小。另外,通过调整两端传感器的灵敏度即可保证信号的一致性。

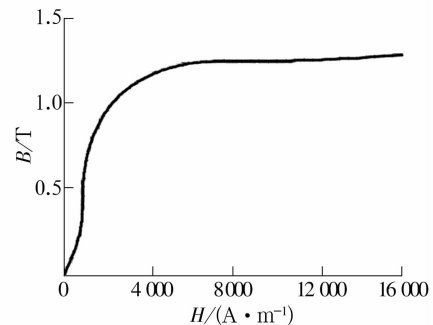


图 3 GCr15 的 B-H 曲线

Fig. 3 B-H curve of GCr15

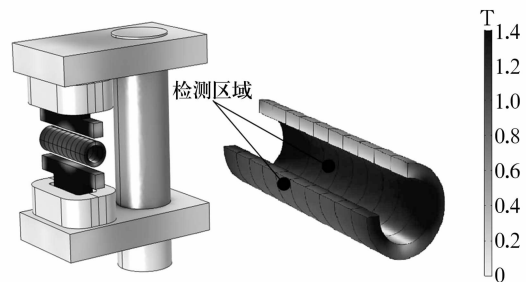
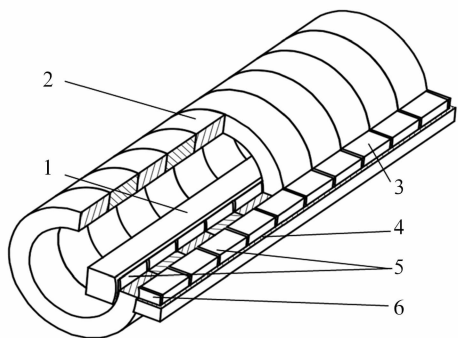


图 4 磁化机构及套圈磁场分布云图

Fig. 4 Magnetization mechanism and distribution nephogram of magnetic field on ring

1.2.4 磁屏蔽式仿形磁敏电阻阵列探头设计

探头的选择和设计应结合漏磁场的大小、工件形状等因素。漏磁场强度仅与裂纹的宽度、深度有关,即套圈微细裂纹产生的漏磁场将极为微弱,需使用高灵敏传感器,减小探头提高及背景磁场干扰等手段。同时,套圈检测前经过了磨削、清洗等处理,表面质量良好(表面粗糙度 Ra 值为 $0.8 \mu\text{m}$),可以忽略表面质量对检测的影响。针对以上问题,设计了一种磁屏蔽式仿形磁敏电阻阵列探头拾取微弱漏磁场,其结构如图 5 所示。



1—内检探头; 2—套圈; 3—外检探头; 4—屏蔽罩; 5—仿形磁敏电阻; 6—隔离片

图 5 磁屏蔽式仿形磁敏电阻阵列探头结构示意图
Fig. 5 Structure diagram of magnetic shielded profiling magneto-resistor array probe

常见的磁敏传感器主要使用线圈或霍尔元件。线圈的灵敏度较低且受工件运动状态影响较大;霍尔元件灵敏度较高,但达到饱和状态时需要添加偏置磁场稳定其基准电压,整体磁场和缺陷漏磁场同样会受到偏置磁场的影响而发生变化,影响检测结果。因此,选用差分式磁敏电阻作为检测元件^[11],其优势在于:1)抗外界干扰能力强,采用差分组合形式,能有效消除测量过程中振动、晃动以及电磁干扰的影响;2)灵敏度高,一般为霍尔元件的 5~20 倍;3)稳定性高,阻值随着磁场强度的增大而增大,受运动状态影响较小;4)探头形状易改变,如图 6 所示,磁敏电阻由 InSb 晶体和金属短路条串联组成,可根据工件形状进行仿形设计。

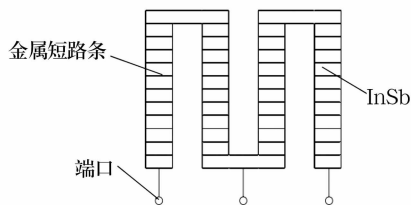


图 6 差分式磁敏电阻示意图
Fig. 6 Diagram of differential magneto-resistor

为保证微细裂纹精密检测的精度,必须保证探头能检测到足够大的漏磁场信号。如图 7 所示,小曲率半径的套圈和平底探头会形成较大的提高,使信号迅速衰减,检测精度降低^[12];因此,采用仿形探头结构,将内外检探头前端根据套圈内径和外径分别加工成外凸形和内凹形,减小提高从而增强检测信号强度,且在检测不同规格的套圈时更换对应规格探头即可。另外,考虑到探头使用寿命,在探头接触工件的部位添加 0.5 mm 厚的耐磨瓦片,同时采用跟踪装置保证上下料时探头收起,以避免工件的撞击。

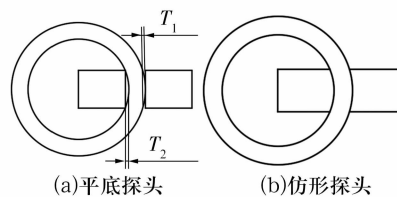


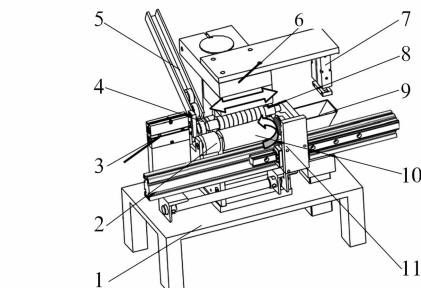
图 7 探头结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of probes

探头包括内检探头和外检探头,探头均由 10 个通道组成,每个套圈的内、外表面分别对应内外检探头的 1 个通道。其由 10 个通道组成,每个通道分别对应 1 个套圈。为保证被测套圈全覆盖检测,要求检测探头的有效检测范围应大于被检测套圈组件的长度。另外,采用屏蔽罩包覆探头形成磁屏障,有效消除或减少传统磁漏磁检测中强背景磁场引起的缺陷信息失真、磁噪声以及磁敏元件的饱和不工作现象^[13-14],同时在通道间添加隔离片进一步减少通道间的信号窜扰。

2 高速漏磁检测装置

高速漏磁检测装置如图 8 所示,主要包括检测运动系统、漏磁检测单机、运动控制系统以及计算机信号处理系统,实现轴承套圈从上料到产品检测、分选全过程的自动化。



1—机架; 2—上料滚筒; 3—上料气缸; 4—上料机构; 5—上料滑道; 6—漏磁检测单机; 7—挡料器; 8—导杆; 9—分选机构; 10—旋转机构; 11—推料机构

图 8 检测运动系统示意图
Fig. 8 Diagram of detection motion system

2.1 检测运动系统

检测运动系统主要包括上料机构、旋转机构以及分选装置。上料机构包括上料滑道、上料气缸以及上料滚筒。套圈通过上料滑道依次进入上料滚筒并由上料气缸推入导杆,导杆套满工件后由旋转机构驱动检测单机中的滚筒转动,从而实现多套圈组件的检测。通过控制电动机转速,保证套圈在2 s检测时间内旋转6圈,保证缺陷信号的重复次数。完成检测的套圈组件由推料机构带至分选机构,并通过挡料器将套圈依次挡入分选装置,分选机构通过漏磁检测单机和计算机信号处理系统的判断结果对轴承套圈进行自动分选。各个组件相互配合,装置可以精准控制检测速度,保证了漏磁检测的稳定性和可靠性。

2.2 运动控制系统

运动控制系统是实现自动化检测的重要环节,通过PLC进行控制,检测流程如图9所示。

2.3 信号处理系统

为进一步提高系统稳定性,降低外界电磁干扰、机械抖动等问题所产生干扰信号导致的误报现象,进行了减少误判的信号处理算法研究。某检测信号如图10所示,在2 s检测时间内,缺陷信号呈周期性分布,峰值近似等距出现6次且波形峰值等特征稳定,而干扰信号出现位置随机且出现频率低。基于以上信号特征,采用减少误判的信号处理方法,信号处理算法思路如下:

- 1) 完成2 s内所有检测数据样本 X 的采集;
- 2) 将 X 等分为6块并提取信号峰值 A_i 及其横坐标 a_i ($i=1,2,\dots,6$)。
- 3) 设定峰值门限 A ,若 $A_i < A$,进入合格区;若 $A_i \geq A$,则进入下一步。
- 4) 若 A_i 超过 A 的次数不大于2,则消除误判信号,进入合格区;否则,进入下一步。
- 5) 统计信号峰值满足 $A_i \approx A_{i+1} \approx A_{i+2}$ 且出现位置 $a_{i+1} - a_i \approx a_{i+2} - a_{i+1}$ 满足的次数 N ,若 $N < 1$ 则消除误判信号,进入合格区;若 $N \geq 1$ 则进入不合格区。

3 测试与应用

由于套圈采用内外壁双面检测,所以内外样伤的检测情况相近,下面仅测试外壁纵向分布微裂纹标准伤,长、宽、深分别为 (10 ± 0.5) mm, (0.2 ± 0.01) mm, (0.1 ± 0.01) mm。对刻有标准伤的样件进行检测,通过调整增益,使得标准伤信号峰值为2.5 V,

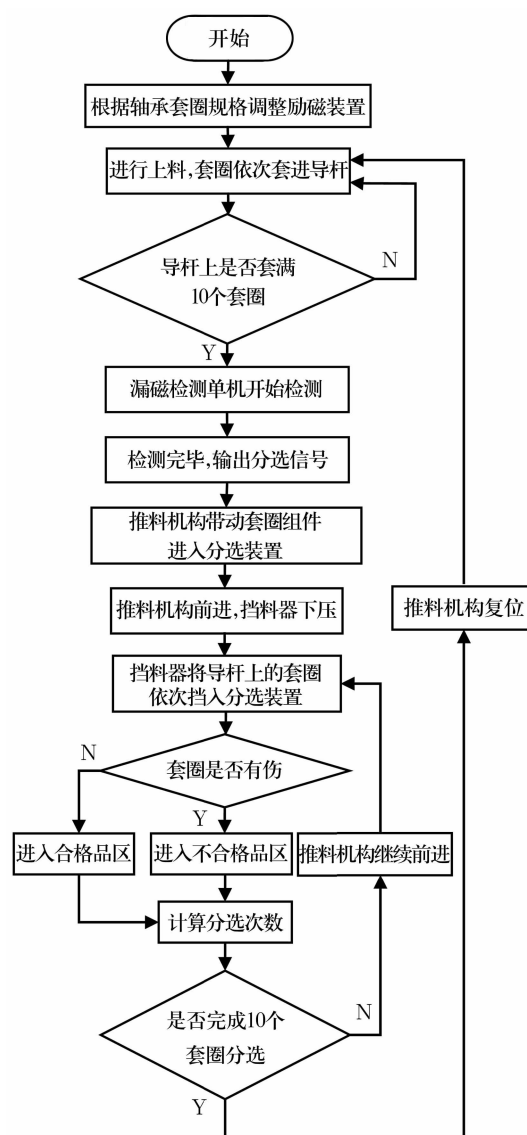


图9 套圈检测流程

Fig. 9 Detection process for ring

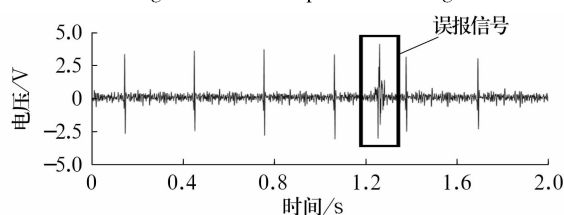


图10 误报信号情况

Fig. 10 False alarm signal condition

设定报警门限为2 V。将信号峰值高于报警门限的漏磁检测信号定为报警信号,结合减少误判的信号处理方法判定轴承套圈是否合格;若套圈检测信号始终低于报警门限则判定为合格品,缺陷及检测信号如图11所示。

对轴承套圈进行批量检测,选取轴承套圈50个,其中46个为合格产品,4个为带伤样件,循环进行10次试验,即累计检测数量为500。轴承套圈自

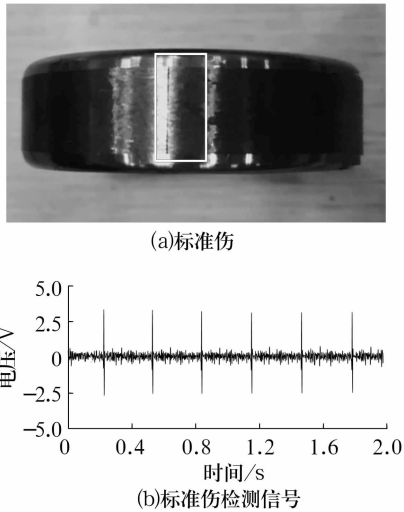


图 11 标准伤及检测信号

Fig. 11 Standard damage and detection signals

然缺陷及检测信号波形如图 12 所示。结果表明该系统可精准检测出轴承套圈上存在的自然伤及其信号,样伤件无漏报;由于信号扰动、设备抖动等原因导致误报,但误报率仅为 1%,在允许范围内。

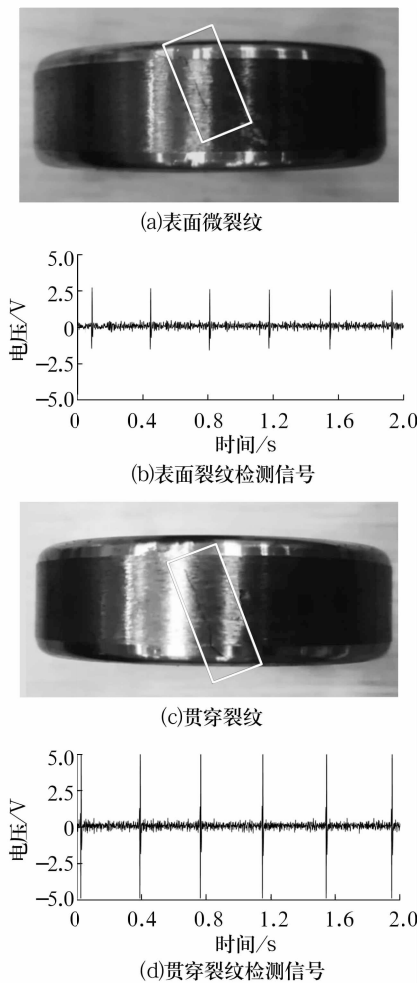


图 12 轴承套圈自然缺陷及检测信号

Fig. 12 Natural defects on bearing ring and detection signals

4 结束语

设计了用于轴承套圈无损探伤的漏磁检测装置,实现了轴承套圈上料、检测、分选的全程自动化。提出了一种多套圈内外壁双面同步高速漏磁检测装置,其采用的多套圈同步高速检测机构及控制系统显著提高了套圈检测速度以及稳定性;采用磁屏蔽式仿形磁敏电阻阵列探头拾取微细裂纹产生的漏磁场以及可以减少误判的信号处理系统则满足了高速、高精的漏磁检测需求。另外,检测过程可以实时控制,操作过程简单便捷。值得注意的是,该探伤方法可满足大部分轴承套圈的检测需求,但在实际实用中可考虑增加周向裂纹和端面裂纹进行复合检测,以进一步提高检测的可靠性。

参考文献:

- [1] 邹步. 基于图像处理的大型轴承套圈缺陷检测研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2012.
- [2] 卢满怀,范帅,汤绮婷. 基于机器视觉的轴承套圈检测系统[J]. 轴承,2017(5):39-44.
- [3] 葛泉江,孙慧广,苏伟强. 轴承套圈成品及锻件水浸超声检测技术应用[J]. 哈尔滨轴承,2015(3):23-26.
- [4] 王恒迪,尚振东,马伟. 轴承套圈磁粉探伤机的研制[J]. 轴承,2005(3):32-33.
- [5] 康宜华,武新军. 数字化磁性无损检测技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [6] 赵丽,马克强. 轴承套圈裂纹的识别、预防和挽救[J]. 轴承,2009(4):33-35.
- [7] 孙钦贺. 轴承套圈锻造过程缺陷分析[J]. 金属加工:热加工,2015(9):77-78.
- [8] 黄建龙,朱伟. 轴承内外套圈自动检测与分级设备的研究[J]. 微计算机信息,2007,23(28):122-123.
- [9] EDWARDS C, PALMER S B. The magnetic leakage field of surface - breaking cracks[J]. Journal of Physics D Applied Physics,2000,19(4):657-673.
- [10] 刘俊. 轴承套圈裂纹漏磁检测方法与系统[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [11] 程静. 冷拔管内表面漏磁检测装置与系统[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
- [12] JI F, WANG C, SUN S, et al. Application of 3 - D FEM in the simulation analysis for MFL signals[J]. Or Insight,2009,51(1):32-35.
- [13] SUN Y, KANG Y. A new MFL principle and method based on near - zero background magnetic field[J]. Ndt & E International,2010,43(4):348-353.
- [14] 孙燕华,康宜华. 一种基于磁真空泄漏原理的漏磁无损检测新方法[J]. 机械工程学报, 2010,46(14):18-23.

(编辑:张旭)