

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.015

# 基于微磁特性的球化质量电磁无损检测\*

朱胜峰

(杭州世宝汽车方向机有限公司, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对传统转向节球化质量检测法存在时间长、效率低和操作复杂等问题,对基于初始磁导率法的球化质量无损检测系统进行了研究;通过对铁磁性材料微磁特性的分析,提出了一种基于初始磁导率的电磁无损检测方法;基于电磁场理论和基本方程组,建立了输出感应电压与激励源及磁路参数的数学方程,揭示了输出量与输入量之间的内在关联性;设计出了一套球化质量无损检测系统,对检测系统的电磁传感器、硬件电路及软件系统进行了分析,并将该检测系统应用于灰铸铁和球墨铸铁的实验测试。研究表明,灰铸铁测试值约为球墨铸铁测试值的 70%;该方法能准确判断转向节是否合格,可实现转向节球化质量在线无损检测。

**关键词:**初始磁导率;电磁传感器;无损检测;球化质量

中图分类号:TH878, TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1368-04

## Electromagnetic non-destructive testing of spheroidization quality based on micromagnetic property

ZHU Sheng-feng

(Hangzhou Shibao Auto Steering Gear Co., Ltd, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problems of taking much time, low efficiency and operating process complex in the detection of spheroidization quality of steering knuckle, a non-destructive detection system of spheroidization quality based on initial magnetic permeability was researched. Through analysed micromagnetic property of ferromagnetic material, an electromagnetic non-destructive detection method based on initial magnetic permeability was put forward. Based on the electromagnetic field theory and basic equations, a mathematical equation among the output induced voltage and the exciting source, parameters of magnetic circuit was established, which was revealed the internal relationship between output quantity and input quantity. A set of detection system of spheroidization quality was designed, and an electromagnetic transducer, a hardware circuit and a software system were analysed, and then the detection system was applied to experimental measurement of the gray cast iron and spheroidal graphite cast iron. The experimental results indicate that the measured value of gray cast iron is about 70% of the measured value of spheroidal graphite cast iron. The method can accurately judge the steering knuckle whether is qualified or not, which can realize on-line nondestructive testing for the spheroidization quality of steering knuckle.

**Key words:** initial magnetic permeability; electromagnetic transducer; non-destructive testing; spheroidization quality

## 0 引言

转向节是汽车转向桥上的重要机件,它连接轮毂和悬架控制臂,支承并带动前轮绕主销转动而使汽车转向,确保汽车稳定行驶并灵敏传递方向<sup>[1]</sup>。因此需要较大的刚度和足够的强度,同时为提高其抗交变载荷能力,在制造过程中需要加入适量的球化剂,以形成

球墨铸铁。球墨铸铁质量的重要考核指标之一就是其球化质量<sup>[2-3]</sup>。为确保产品品质,需要对生产的汽车转向节球化质量进行百分之百检测,因此只能依赖于无损检测技术。

近年来,国内外研究学者在球化质量的无损检测研究方面,主要集中于金相法、音频法、振动法和超声法等<sup>[4-7]</sup>。由于这些方法不仅存在操作时间长、效率低

收稿日期:2016-06-06

基金项目:浙江省科技计划项目(2015C31058)

作者简介:朱胜峰(1980-),男,浙江义乌人,主要从事汽车零部件质量控制方面的研究。E-mail:NDT\_ZSF\_2016@163.com

的问题,而且不易在操作流水线上实现自动化检测。由于灰铸铁转向节和球墨铸铁转向节这两种材料的微磁特性存在差异,可利用初始磁导率这一不同磁特征进行区分<sup>[8]</sup>。

基于此原理,本研究构建一套汽车转向节球化质量无损在线检测系统,实现转向节球化质量在线无损检测。

## 1 微磁特性

铁磁性物质在磁场的作用下能被磁化,其原因是物质内部有磁畴,磁化是通过畴磁中磁矩的转动和畴壁的移动来完成的<sup>[9]</sup>,其初始磁化曲线如图 1 所示。

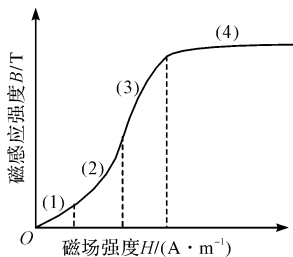


图 1 初始磁化回线

整个磁化过程可分为 4 个阶段:①可逆阶段;②不可逆阶段;③趋近饱和阶段;④饱和阶段。当施加弱磁场强度且处于磁化的可逆阶段,可反映材料的初始磁导率。对于汽车转向节而言,其材料主要成分为石墨,当石墨以片状形式存在时,即为灰铸铁,对应的初始磁导率小;当片状石墨析出为球状石墨时,即为球墨铸铁,对应的初始磁导率大<sup>[10]</sup>。基于被检测对象材料的不同磁学特性,采用初始磁导率法可快速实现检测的目的,同时又不至于产生剩磁。

## 2 初始磁导率无损检测原理

为了获取检测对象的初始磁导率,需要外部对检测对象施加一个弱磁场强度的激励源以及对应的检测线圈,本研究构建的 U 型电磁传感器与检测试样的闭合磁路如图 2 所示。

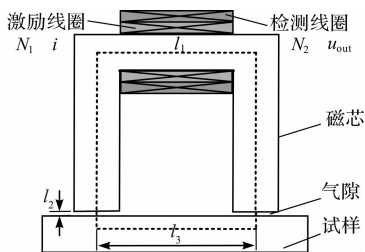


图 2 电磁传感器与试样的闭合磁路

其中电磁传感器包括激励线圈、U 型磁芯及检测线圈。

为了得到检测量与激励源和其他磁路参数之间的关系,由安培环路定理和磁路欧姆定律可得<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \oint_l H \cdot dl = \sum i \\ F = \sum \varphi R \end{cases} \quad (1)$$

式中: $H$ —磁场强度, $l$ —闭合磁路等效长度, $i$ —闭合磁路激励电流, $R$ —闭合磁路磁阻, $\varphi$ —闭合磁路磁通量, $F$ —闭合磁路磁动势。

假设 U 型磁芯的磁路等效长度为  $l_1$ ,磁芯与试样的提高距离为  $l_2$ ,试样等效长度为  $l_3$ ;假设闭合磁路中各处等效磁路截面积相等,根据磁通量  $\varphi = Bs$  和磁感应强度  $B = \mu H$  的关系,进一步可求得磁回路中磁通量  $\varphi$  的表达式为:

$$\varphi = \frac{N_1 i}{\frac{l_1}{\mu_1 s} + \frac{2l_2}{\mu_2 s} + \frac{l_3}{\mu_3 s}} \quad (2)$$

式中: $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ —U 型磁芯、气隙、试样的磁导率; $N_1$ —激励线圈的匝数。

引入麦克斯韦第二方程,基于感应电动势与磁通量的关系,得输出检测电压信号为:

$$u_{out} = \frac{N_1 N_2}{\frac{l_1}{\mu_1 s} + \frac{2l_2}{\mu_2 s} + \frac{l_3}{\mu_3 s}} \cdot \frac{di}{dt} \quad (3)$$

式中: $N_2$ —检测线圈的匝数。

从式(3)中可以看出,输出检测电压信号与激励线圈、检测线圈、U 型磁芯、气隙和被测试样均有关,而当电磁传感器制作完成后以及提高距离确定时,输出信号的变化量仅与被测试样有关,可以认为输出电压信号与被测试样的磁导率存在单值关系,因此可根据输出电压信号的强弱区分不同磁导率的试样。

## 3 球化质量电磁无损检测系统

### 3.1 系统总体设计

汽车转向节球化质量检测系统原理图如图 3 所示。

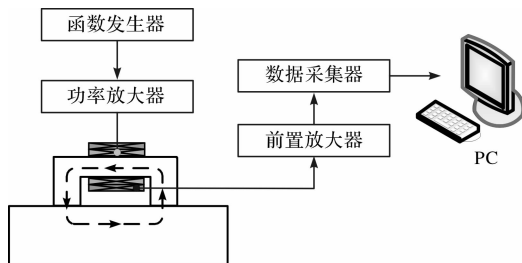


图 3 球化质量检测系统原理图

电磁传感器放置于试样表面上,其中函数发生器用以产生任意指定频率的正弦激励信号,由于信号源的幅值较低,不足以驱动电磁传感器的激励线圈,中间需要功率放大器对信号进行放大,功率放大器与激励线圈相连为电磁传感器的磁路提供磁动势;前置放大器与检测线圈相连,对检测信号进行放大和滤波处理,然后数据采集器把检测信号转换成数据信号输送到 PC 中进行后期数据处理。

### 3.2 电磁传感器有限元仿真

传感器是检测系统中的最重要组成部分,它的结构和形状很大程度上取决于被测对象。传感器的灵敏度与激励线圈和检测线圈的形状、大小、匝比、线径、相互位置及周围媒质有关,实际绕制的 U 型电磁传感器线径为 0.12 mm 的圆形漆包线,激励线圈为 30 匝,检测线圈为 30 匝。基于 COMSOL 有限元软件<sup>[12]</sup>,本研究采用瞬态场对 U 型电磁传感器检测试样进行有限元仿真。

该模型采用参数化建模,通过修改模型参数,可以方便实现被测试样灰铸铁和球墨铸铁参数设置,从而实现检测线圈感应电压信号随被测试样材料磁导率变化而变化。本研究采用相同的传感器对灰铸铁和球墨铸铁试样进行检测,两种不同工况下闭合磁路的检测数据进一步处理可得到检测线圈两端感应电压波形如图 4 所示。

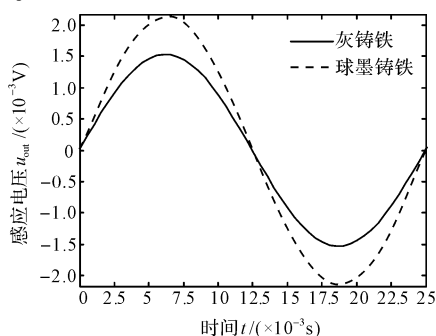


图 4 两种不同试样检测线圈测得感应电压

从图 4 中可以看出,灰铸铁试样传感器测得的感应电压值为球墨铸铁的 72%,从仿真角度验证该检测方法能根据检测电压信号的大小判别被测对象是灰铸铁还是球墨铸铁,从而实现汽车转向节球化质量的检测。

### 3.3 硬件电路设计

本研究为实现对 U 型传感器的激励以及获取检测线圈感应电压,设计相应的激励和检测电路。

为保持激励信号固定不变,避免随被测试样或检测工况变化而变化,激励电路采用交流恒流源,主要包括正弦波发生电路和基于电流反馈的功率放大电路,其中正弦波发生电路采用直接数字频率合成器(direct digital synthesizer, DDS)输出任意频率的正弦波,选择

Analog 公司的 AD9850 芯片作为信号发生源,该芯片具有 32 位相位累加器,取  $f_{\text{sys}} = 125$  MHz 有源晶振,其频率分辨率  $\Delta f$  可以高达 0.029 Hz。

由于该检测方法是基于初始磁导率原理,激励信号输入正弦电流幅值最大值仅为 0.05 A,在检测线圈上感应出的电压信号幅值也较小,检测电路需要先放大然后 AD 采样,以期得到高质量的检测信号。信号检测电路由 3 部分组成:滤波模块、放大电路和 AD 采样电路,其中滤波模块用以提高检测信号抗干扰能力;放大电路把检测信号进行放大,使信号更容易处理;由于 AD 模块采样电压在  $0 \sim V_{\text{ref}}$ ,而处理后的检测信号则是从  $-V_{\text{rm}} \sim +V_{\text{rm}}$ ,故需要对其进行偏置,然后再使用 AD 进行采样。本研究选用 TI 公司生产的 12 位开关电容型逐次逼近模数转换器 ADS7841,采样速度可以高达 200 kSps,功耗只有 1.8 mW。

要实现汽车转向节球化质量检测系统激励信号的产生和检测信号的采集,不仅要求 MCU 具有丰富的 I/O 口,而且还要等间隔的快速采集检测信号,以准确计算检测信号的有效值。因此本研究采用 Atmega128 作为该检测系统的 MCU,该处理器在 5 V 供电时最大可以使用 16 MHz 外部晶振,可以满足高速处理需求,128 K 可编程 Flash,可以存储大量程序和数据。

### 3.4 软件系统设计

软件部分是整个检测系统的灵魂,主程序的工作流程:系统上电以后,先对硬件电路进行初始化,使其稳定工作,然后等待检测试样;当试样到达之后,然后控制部分控制 DDS 产生特定频率的激励信号,然后进行延时,等待数据稳定,开始进行 AD 采样;系统对采样信号进行处理,得到试样判断结果进行输出,并且等待下一轮采样。

## 4 实验及结果分析

为了验证球化质量检测系统装置的可行性,本研究分别对未加球化剂的灰铸铁和加入球化剂的球墨铸铁试样分别进行测试,灰铸铁和球墨铸铁试样分别如图 5 所示。

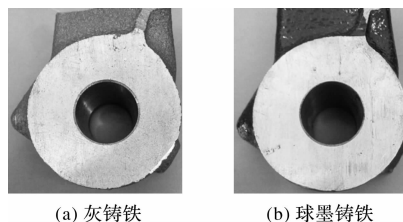


图 5 灰铸铁和球墨铸铁试样

为了实现测试数据的可比性,输出检测值为输出电压与激励电流的比值,结果如表 1 所示。

表 1 灰铸铁和球墨铸铁试样测试值

名称	测试值/(mV·A <sup>-1</sup> )				
	1	2	3	4	5
灰铸铁	799	809	796	790	816
球墨铸铁	1 302	1 311	1 286	1 295	1 315

从表 1 中可以看出,灰铸铁的测试值基本稳定在 800 mV/A 左右,而球墨铸铁的测试值基本稳定在 1 300 mV/A 左右,灰铸铁测试值约为球墨铸铁测试值的 70%。

本研究应用上述方法,对球墨铸铁转向节进行了大量重复安装测试,测试结果如图 6 所示。

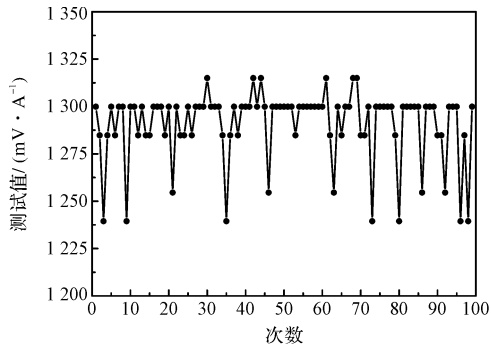


图 6 重复安装测试值分布

从图 6 中可以看出,重复安装测试值的极差约为 7%。说明该检测装置重复测试值稳定,根据两者之间存在 30% 的差值,能区分灰铸铁和球墨铸铁转向节。将实验验证后的系统装置进行自动化改造,并嵌入到汽车转向节压套机中,对系统软件参数进行设置和数据实时采集和显示,可实现汽车转向节球化质量在线无损检测。

球化质量在线检测系统如图 7 所示。

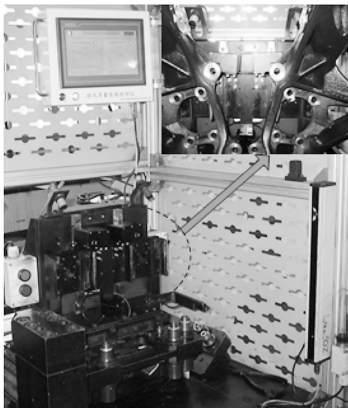


图 7 球化质量在线检测系统

## 5 结束语

本研究介绍了一种基于初始磁导率法的球化质量

电磁无损检测系统,基于安培环路定理和磁路欧姆定律,建立了检测感应电压信号与激励源及磁路参数的数学模型,通过理论分析和实验证明了基于初始磁导率法的转向节球化质量检测系统方案可行。实验结果表明,灰铸铁测试值约为球墨铸铁测试值的 70%,利用测试值的差异能准确判断转向节是否球化,实现转向节球化质量在线无损检测的目的。

该检测系统具有操作简单、检测精度高、速度快等优点,对产品进行 100% 全检,有利于实现自动化无损检测,推动无损检测技术的发展和應用。

## 参考文献 (References):

- [1] 兰凤崇,张浩锴,王家豪,等. 汽车转向节拓扑优化方法研究及应用[J]. 汽车工程,2014,36(4):464-468,490.
- [2] 杨洪硕,周秉文,张兴国,等. 球墨铸铁曲轴部分奥氏体化工艺[J]. 钢铁研究学报,2016,28(4):47-52.
- [3] 田代才,陈铁群. 球墨铸铁铸造质量的无损检测综合评价方法[J]. 无损检测,2006,30(1):42-45.
- [4] 杨苍禄,朱传敏,刘素,等. 汽车转向节疲劳寿命分析和试验研究[J]. 机电工程,2015,32(7):950-953.
- [5] 赵明超,徐益民,刘彦斌,等. 超声波探伤在球墨铸铁检测中的应用[J]. 无损检测,2014,36(9):72-74.
- [6] HIREMATH, P. S. SADASHIVAPPA, A. PATTAN. P. Microstructure Image Analysis for Estimating Mechanical Properties of Ductile Cast Iron[J]. **International Journal of Computer Applications**,2014,107(17):32-38.
- [7] MALAGE, A. REGE, P. P. RATHOD. M. J. Automatic quantitative analysis of microstructure of ductile cast iron [J]. **Metallurgical and Materials Engineering**,2015,21(3):155-165.
- [8] 徐浩. 基于初始磁导率的铁氧体工件裂纹检测[D]. 杭州:中国计量学院机电工程学院,2014.
- [9] 金汉民. 磁性物理[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [10] 彭光俊,贾健生,陈礼光. 球墨铸铁电磁性能研究[J]. 武汉汽车工业大学学报,1996,18(1):58-61.
- [11] GIERAS, J. F. WANG, R. J. KAMPER. M. J.,. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines [M]. New York: NY,2008.
- [12] 范吉志,吴运新,石文泽,等. 电磁超声换能器线圈设计与提高换能效率研究[J]. 传感技术学报,2016,29(1):29-34.

[编辑:张豪]

## 本文引用格式:

朱胜峰. 基于微磁特性的球化质量电磁无损检测[J]. 机电工程,2016,33(11):1368-1371.

ZHU Sheng-feng. Electromagnetic non-destructive testing of spheroidization quality based on micromagnetic property[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(11):1368-1371.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>