

基于巨磁阻传感器的无损检测系统研究与设计

范晶晶^{1,2} 张晓娟¹ 王 辰^{1,2} 纪英才¹

(1. 中国科学院电子学研究所电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 针对现代工业与安全检测中对非铁磁性工件的表面及近表面缺陷检测需要, 基于涡流无损检测原理, 采用灵敏度、体积小、工作频率范围宽(0 Hz 到 MHz)的 GMR 传感器, 结合基于单片机 STM32 的直接数字频率合成(DDS)信号产生方法及锁相技术研制了一套涡流无损检测系统。实验结果表明该基于 GMR 传感器的无损检测系统能够较好的检测出铝板试件表面及表面下 2 mm 处缺陷的存在, 多道扫描结果可清晰判别出缺陷的位置和大小, 该系统可以准确完成对导电材料表面及近表面的无损检测。

关键词: 涡流检测; 巨磁阻传感器; 无损检测系统; 直接数字频率合成; 锁相技术

中图分类号: TM937 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design of giant magneto-resistive (GMR) sensor-based non-destructive testing system

Fan Jingjing^{1,2} Zhang Xiaojuan¹ Wang Chen^{1,2} Ji Yicai¹

(1. Key laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Institute of electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the need of modern industrial safety testing of surface and near-surface defect detection of non-ferromagnetic workpieces, based on the principle of eddy current testing and the giant magneto-resistive (GMR) sensors, Nondestructive Testing method is an effective eddy current testing technique which has a lot of advantages such as the high sensitivity, high resolution, wide operating frequency range (0 Hz to MHz), small sensor volume and simple signal processing circuit and easy integration. In this paper, one simple and excellent GMR-based eddy current system is designed. The GMR sensor with high sensitivity of 30 mV/Oe, the microcontroller STM32-based direct digital synthesis signal generation method and phase-lock technique are used in this system. The results show that the GMR-based eddy current system can detect the presence of the defective on the surface or under the aluminum plate surface 2 mm, the shape and location can be known by multi-channel scanning. The system can accurately perform non-destructive testing of surface or near-surface defect detection for nonmagnetic metals.

Keywords: Eddy current testing; Giant magneto-resistive (GMR) sensor; Non-destructive testing system; Direct digital synthesis; Phase-lock technique

1 引 言

涡流检测^[1](eddy current testing, ECT)是建立在电磁感应原理基础上的一种无损检测方法。当导体置于变化的磁场中或相对于磁场运动时,导体内部会产生感应电流,这个电流被称为涡流。涡流的强弱与媒质属性有密切关系,其存在也会引起空间磁场的变化,此时通过线圈、霍尔、巨磁阻(GMR)等磁场传感器检测空间磁场的变化,就可以获知媒质的各种信息,如电导率、磁导率、厚度以及媒质中腐蚀、裂纹等缺陷。该方法在不改变检测对象使用性能或工

作状态的前提下,能够较好的对被检试件完整性、连续性、实用性、安全可靠性及物理性能进行合理评估,是现代工业生产与安全检测中必不可少的一种无损检测方法。

目前,用于涡流无损检测的磁场传感器有很多,如线圈、AMR、霍尔等传感器^[2-4]。相比而言,GMR 传感器具有更为突出的优势^[5-7];GMR 传感器灵敏度高且不受频率影响、分辨率高、工作频率范围宽(0 Hz 到 MHz)、体积小、易集成、价格适中且使用方便。针对非铁磁性材料近表面缺陷检测需要,采用 GMR 传感器、基于单片机 STM32 的直接频率数字合成(DDS)信号产生方法及锁相技术研制了一

套能准确进行导电材料近表面或近表面的缺陷检测的涡流无损检测系统。

2 基于 GMR 传感器的涡流检测原理

2.1 GMR 传感器

巨磁阻 (GMR)效应^[8-9],是指某些磁性或合金材料的磁电阻在一定磁场作用下急剧减小,而磁阻变化率 $\Delta\rho/\rho$ 急剧增大的特性,利用这一效应制成的传感器称为 GMR 传感器,GMR 传感器的典型内部结构如图 1 所示,它由 4 个 GMR 单元组成惠斯登电桥。当存在外部磁场时, R_2 和 R_4 由于采用隔磁组件进行磁场屏蔽而使其阻值不随外部磁场变化, R_1 和 R_3 的阻值变化则将导致电桥电阻不平衡,此时当电桥中的某一对相对立的接头接稳压电源时,另一对接头会将磁场变化转换为电压变化信号而输出。由于两个感应电阻在空间上的共面布置以及导磁组件的存在,GMR 传感器只能检测到图 1 所示电桥平面中水平方向的磁场,对垂直方向的磁场不敏感,这使得 GMR 传感器的单一方向的磁敏感性很好,同时也减小了外界环境对传感器输出稳定性的影响,增加了传感器的灵敏度,且传感器的灵敏度只与外加磁场强度有关,与频率无关。

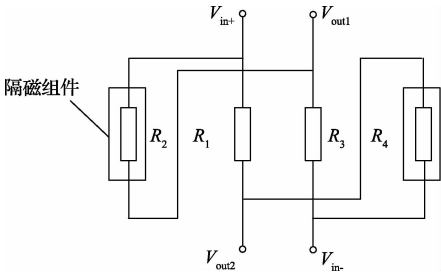


图 1 GMR 传感器典型内部结构

综合考虑性价比要求,选用了 NVE 公司的 AA002-02E 型号的 GMR 传感器,其输入输出特性曲线如图 2 所示。可看出,其线性范围大概为 0~10 Oe,灵敏度约为 30 mV/Oe。

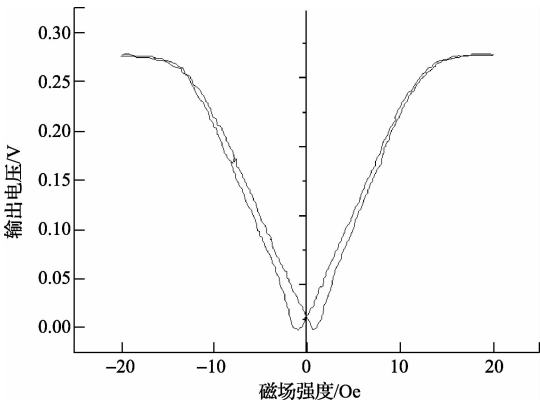


图 2 NVEAA002-02E 型 GMR 传感器输入输出特性曲线

2.2 基于 GMR 传感器的涡流检测

基于 GMR 的涡流检测原理如图 3(a)所示,对激励线圈施以一定功率的交流信号,由法拉第电磁感应定律可知,变化的电流产生变化的磁场,激励线圈中的交变电流将产生磁场 H_1 ,同时在激励线圈附近的导体中引起涡流。由涡流产生的二次场 H_2 ,方向与 H_1 相反,这样在垂直于导电体的方向有合成磁场 $H=H_1-H_2$ 。当 GMR 传感器的敏感方向在导电体的垂直方向时,由于合成磁场 H 的变化,导致 GMR 电阻变化,从而在传感器两端会输出变化的电压信号,通过检测电压信号的变化,可以推知磁场的变化。

当线圈下方的导电体有裂纹等缺陷时导电体中的涡流形状会发生异常,如图 3(b)所示,导致涡流引起的二次场 H_2 变化,使得与导电体垂直方向的合成磁场 H 发生变化。此时通过 GMR 传感器输出的电压信号,就可以提取电场变化信息并判断缺陷的存在。

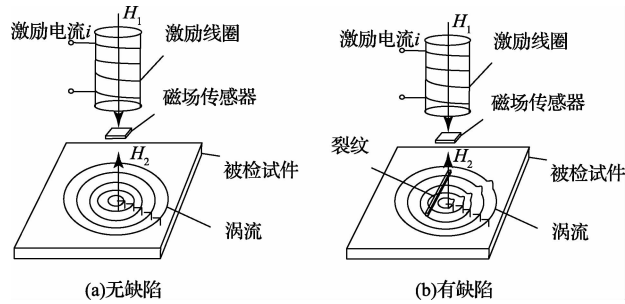


图 3 基于 GMR 的涡流检测原理示意

基于上述理论,在 Ansoft Maxwell 中建立了如图 4 所示的仿真模型,并进行了相应的仿真实验。模型中被检试件尺寸为长 300 mm×宽 210 mm×高 4 mm,激励线圈尺寸为内径 9 mm,外径 10 mm,高 40 mm,激励电流大小为 0.3 mA,分别对试件无缺陷和有缺陷(缺陷尺寸为长 100 mm×宽 2 mm×高 2 mm)2 种情况进行涡流分布仿真,结果如图 5 所示。对比看到,由于检测试件中缺陷的存在,涡流的形状发生明显变化,进而会引起空间磁场变化,与理论分析一致。

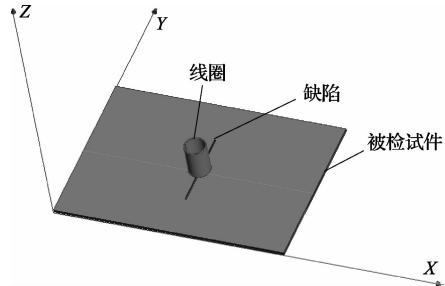


图 4 仿真模型

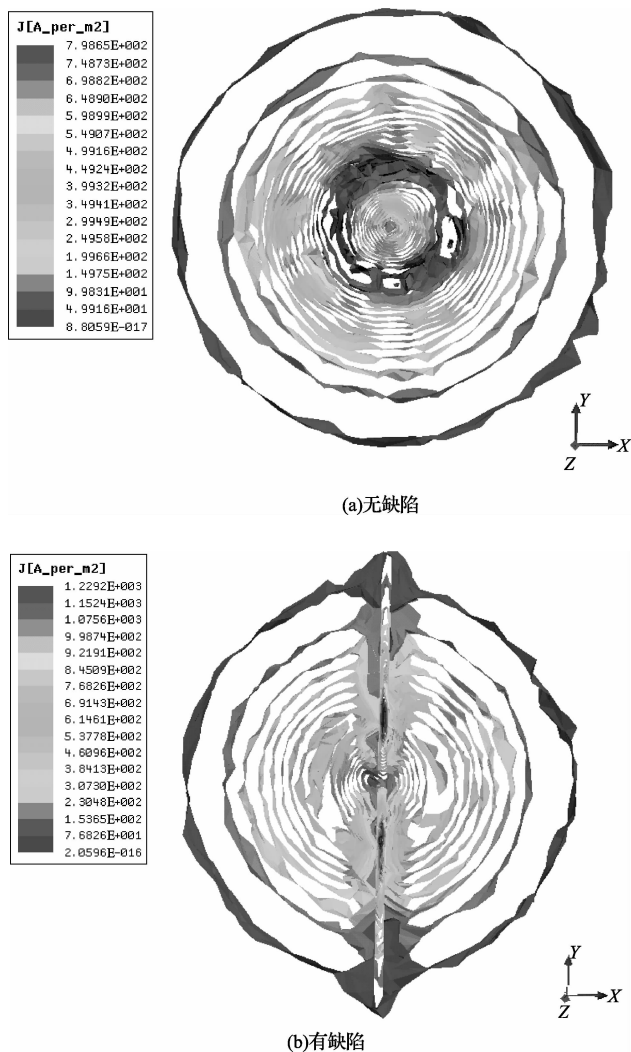


图5 试件中涡流分布仿真结果

3 基于 GMR 传感器的涡流检测系统

基于上述 GMR 传感器涡流检测原理,搭建了如图 6 所示的无损检测系统,主要包括电源模块、激励信号产生模块、接收信号处理模块和探头部分。系统首先产生一定频率的正弦波,经放大后施以激励线圈,在试件附件空间产生磁场,并由 GMR 传感器感应出空间磁场信息并转化为电压信号,电压信号经滤波、放大、锁相等处理后可提取出幅度信息,这一幅度信息的变化将反映出试件有无缺陷等信息。

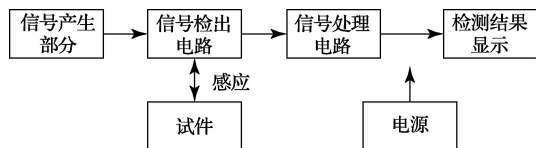


图6 基于 GMR 的涡流检测系统

3.1 激励信号产生模块设计

由于导体趋肤效应,导电体的趋肤深度 δ 为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中: f 为激励信号频率; μ 为导电体的磁导率; σ 为导电体的电导率。当试件材料确定时,涡流穿透深度与激励信号频率成反比关系。为了能够检测到较深层缺陷,需要合理确定激励信号的频率。在此设计中,检测试件为铝板,由式(1)可知,当采用频率为 500 Hz 的正弦波作为激励信号,最大穿透深度约为 3.8 mm。

直接数字合成(direct digital synthesis, DDS)技术^[10]是一种新的频率分辨率高、噪声低的频率合成技术和信号产生方法,基于固件库操作的单片机 STM32 使嵌入式开发脱离最底层的寄存器操作,开发工作更加简单快速。本文的激励信号产生模块如图 7 所示,采用单片机 (STM32F103VET6)向 DDS 芯片(AD9832)写入频率控制字产生一定频率的正弦波^[11]。然后通过高通滤波滤除高频杂波,低通滤波滤除直流分量,即得到平滑的初始相位为零的 500 Hz 正弦波。由于 DDS 产生的正弦波幅度较小,需要通过前置放大电路进行幅值放大,然后再进行功率放大以足以驱动激励线圈,经放大输入到激励线圈中的电流幅值约 0.25 A,频率为 500 Hz。

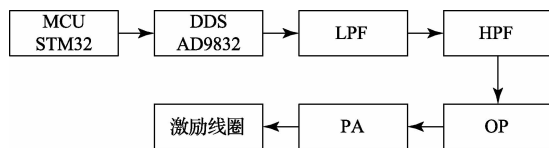


图7 激励信号产生模块

3.2 探头部分设计

根据涡流检测原理,探头部分包括激励线圈和磁场感应传感器,激励线圈通以交流电流在其周围和被检试件上形成电磁场,磁场感应传感器将在电磁场作用下的反映试件检测信息的磁场信号检测出来。目前,常用的磁场感应传感器是线圈,当检测深层缺陷时,由于趋肤效应需要降低激励频率,但线圈的检测灵敏度会随激励频率的降低而减小^[12],这样会大大影响检测性能。引入 GMR 磁场传感器,其有着较高的灵敏度,且灵敏度不会随激励频率变化,这样给无损检测系统带来很大的优势。

探头的结构对无损检测效果有一定影响,探头的形状、激励线圈匝数、激励线圈内外径等都会对检测结果有影响,对几种不同的线圈(如表 1 中所示)进行仿真分析以对上述影响因素进行初步探讨。

对 3 种不同的线圈施以同样的激励电流,对相同的试件相同的缺陷进行检测,得到的涡流仿真结果如图 8 所示。可看出,对不同的形状,方形线圈产生的涡流强度相对变化量远小于圆柱形线圈。对于相同形状的线圈,相同高度的情况下,内外径相差越大,线圈产生的涡流强度变化量越

大,缺陷引起的磁场变化越大,缺陷更易被检测出来。

表 1 几种不同的线圈结构

线圈编号	线圈 1	线圈 2	线圈 3
线圈形状	圆柱形	圆柱形	方形
内径/mm	9	2	9
外径/mm	10	8	10
高/mm	10	10	10

根据上述对探头结构的仿真分析结合不同尺寸探头加工制作的难易程度,本文采用的探头结构如图 9 所示,在一个内径为 5 mm,外径为 9 mm,高为 35 mm 的圆柱形非导电有机聚合物材料套筒上均匀缠绕 1 000 匝半径为 0.2 mm 的漆包线作为激励线圈,其能通过的最大电流为 3 A。实验中,为使 GMR 工作在线性范围,激励线圈产生的磁场不能过大,实验中激励线圈中电流约为 0.25 A。磁场感应传感器 GMR 传感器固定在感应线圈底端中心位置。



图 9 探头结构

3.3 接收信号处理模块设计

在信号接收处理部分,最关键的问题是如何从检测信号中提取出缺陷信息,缺陷信息主要包括幅值信息和相位信息,主要关注幅值信息在缺陷检测中的作用。

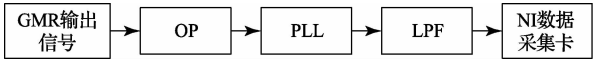


图 10 接收信号处理模块

接收信号处理模块设计如图 10 所示,GMR 输出信号通常为十几 mV,经差分放大处理(AD620)后再进行锁相放大(AD633)及低通滤波滤出直流分量即为与被检信号幅值相关的信息,这一信息能够反映被测试件的缺陷信息。设计中采用锁相放大技术提取检测信号幅值信息,其原理如图 11 所示。锁相放大器的核心部分是模拟乘法器,模拟放大器同时输入基准信号 e_1 和检测信号 e_2 ,设基准信号 $e_1 = E_1 \sin(2\pi f_1 + \theta_1)$,检测信号 $e_2 = E_2 \sin(2\pi f_2 + \theta_2)$,则经模拟乘法器后的输出信号 e_o 为:

$$e_o = E_1 E_2 \sin(2\pi f_1 + \theta_1) \sin(2\pi f_2 + \theta_2) = \frac{E_1 E_2}{2} \cos[2\pi(f_1 - f_2) + (\theta_1 - \theta_2)] - \frac{E_1 E_2}{2} \cos[2\pi(f_1 + f_2) + (\theta_1 + \theta_2)] \quad (2)$$

式(2)中当 $e_1 = e_2 = E \sin(2\pi f + \theta)$ 时,输出信号 e_o 为:

$$e_o = \frac{E^2}{2} - \frac{E^2}{2} \cos(2\pi f + 2\theta) \quad (3)$$

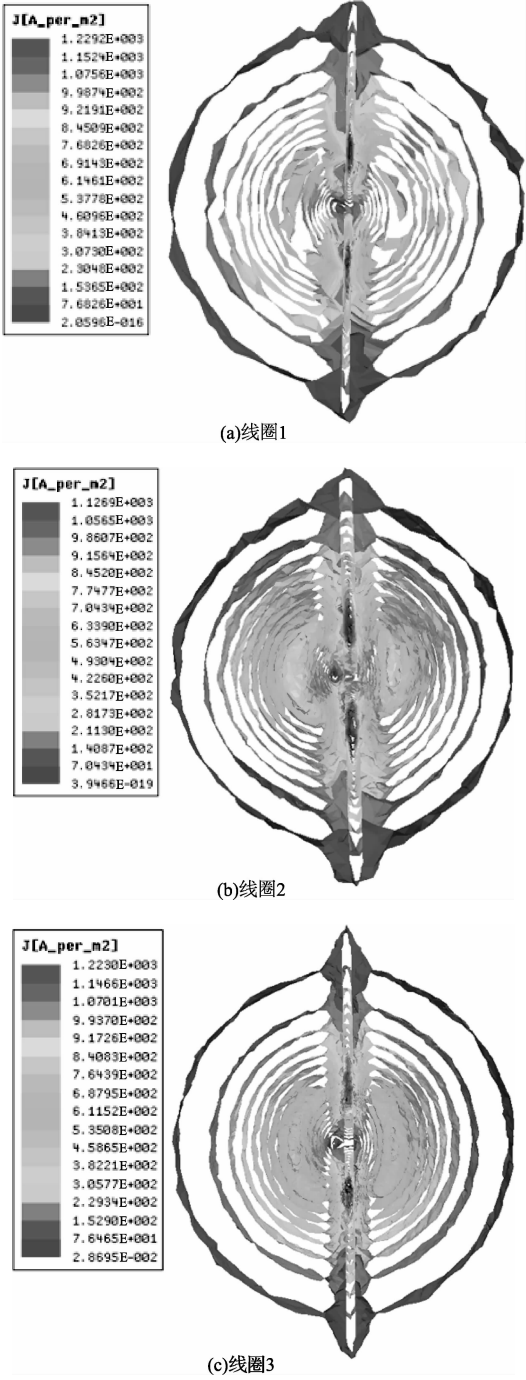


图 8 不同的线圈结构仿真结果

式(3)所表达的输出信号经低通滤波器滤除后2倍频量被滤除,最终输出信号中只含有与被检磁场幅度信息有关的量,通过观察输出信号的变化就可以反映出待测试件的缺陷问题。

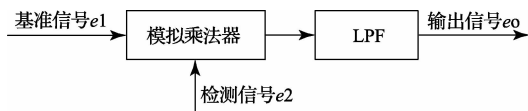


图 11 锁相放大提取幅值信息

4 实验结果

采用上述系统对如图 12 所示试件进行检测,试件是带有人工缺陷的长方体铝制板,尺寸为长 300 mm×宽 210 mm×高 4 mm,在试件一面开有长 100 mm×宽 2 mm×高 2 mm 的人工缺陷。测试场图如图 13 所示,其中电路部分如图 14 所示,将探头固定在运动平台上,试件固定在离探头一定距离的位置,探头随运动平台运动而相对试件匀速运动对试件进行扫描,通过设置运动平台参数可改变探头运动速度和探头离试件的距离。本实验中,探头运动速度设置为 20 cm/s,试件离探头距离约为 1 mm。由单片机控制的发射部分产生频率为 500 Hz 的正弦波供给激励线圈,激励线圈中电流幅值约为 0.25 A。GMR 传感器输出信号经接收部分处理后由 NI 数据采集卡采集,采样率为 5 000 Hz。

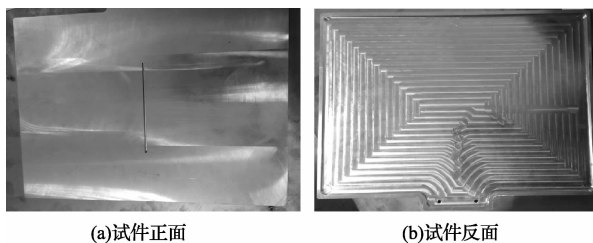


图 12 被检试件

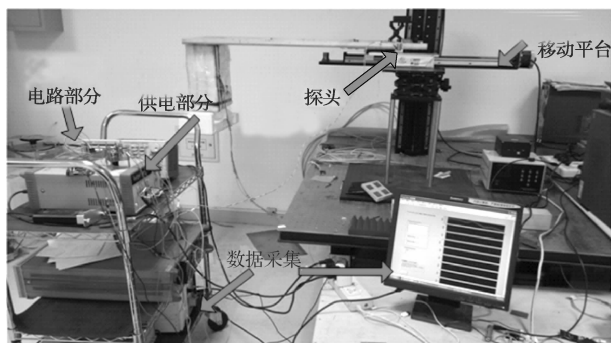


图 13 实验场景

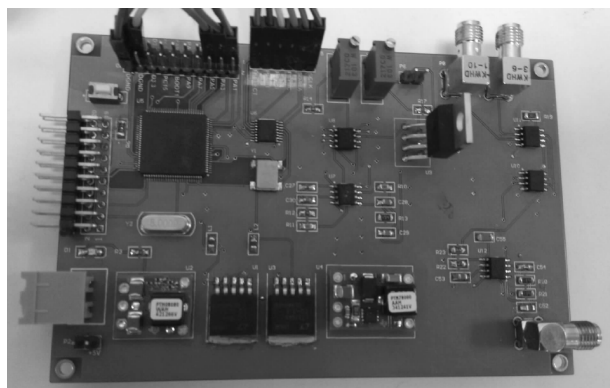


图 14 电路部分

分别对试件正面和反面进行了测试,也即对不同深度的缺陷,试件表面缺陷和距离表面 2 mm 的缺陷进行测试,采用基于汉明窗函数的低通滤波处理后的实验结果如图 16 所示。由实验结果可以看出,在不存在缺陷的部分,系统输出电压信号的幅值基本保持恒定,当有缺陷存在时,电压幅值发生明显突变,验证了基于 GMR 传感器进行无损检测的可行性。对试件反面缺陷检测结果如图 15 所示,可看出,信号幅值相对变化小于正面缺陷检测幅值变化且噪声明显增大,这是由于涡流随着穿透深度明显减小以及因穿过铝板引起更多噪声,但依然可以看出输出电压信号幅值存在明显突变部分,可以判断出缺陷的存在。

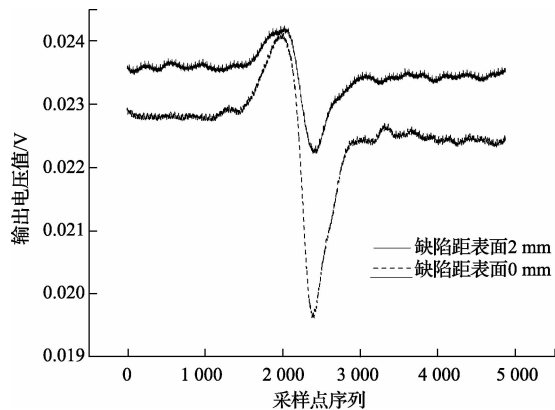


图 15 实验测试结果

对试件正面进行多道扫描,沿试件宽度方向依次移动探头直径大小距离对试件长度方向进行扫描,扫描处理结果如图 16 所示,在图中可以清晰的看到中间位置因裂纹存在引起的突变。由于数据采样时刻与探头运动时刻没有进行很好地同步设置,导致各次扫描结果中裂纹边缘位置有一定偏差,但依然可以判断裂纹存在及其大致位置。

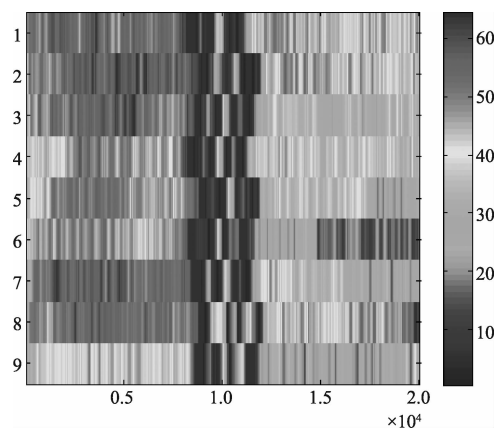


图 16 多道扫描处理结果

基于上述实验结果可以看出,这一基于 GMR 传感器的涡流检测系统是可行的,能够准确的检测出缺陷存在与否。

5 结 论

基于涡流检测原理与 GMR 传感器工作原理,研究了将 GMR 传感器应用于涡流检测的可行性,并采用灵敏度 30 mV/Oe 的 GMR 传感器、基于单片机 STM32 的直接数字频率合成(DDS)信号产生方法及锁相技术进行了系统设计与实验验证。结果表明:基于 GMR 传感器的涡流检测能够准确无误的对导电材料表面或近表面缺陷进行检测。由于 GMR 传感器灵敏度高且与频率无关、分辨率高、体积小易集成等特点,相对于其他涡流检测方法,基于 GMR 的涡流检测具有显著优势。

参考文献

- [1] GARCÍA-MARTÍN J, GÓMEZ-GIL J, VÁZQUEZ-SÁNCHEZ E. Non-destructive techniques based on eddy current testing[J]. Sensors, 2011, 11(3): 2525-2565.
- [2] 谢完成,戴瑜兴. 一种新的基于霍尔传感器的电流测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(8): 705-710.
- [3] XIE S, CHEN Z, TAKAGI T, et al. Development of a very fast simulator for pulsed eddy current testing signals of local wall thinning [J]. NDT & E International, 2012, 51: 45-50.

- [4] YANG G, TAMBURRINO A, UDPA L, et al. Pulsed eddy-current based giant magnetoresistive system for the inspection of aircraft structures[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2010, 46(3): 910-917.
- [5] 黄海鸿,张曦,刘儒军,等. 基于 GMR 效应的金属磁记忆检测方法与应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 241-246.
- [6] BERNIERI A, BETTA G, FERRIGNO L, et al. Multi-frequency Eddy Current Testing using a GMR based instrument [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 39(1): 355-362.
- [7] REIMUND V, PELKNER M, KREUTZBRUCK M, et al. Sensitivity analysis of the non-destructive evaluation of micro-cracks using GMR sensors[J]. NDT & E International, 2014, 64: 21-29.
- [8] BETTA G, FERRIGNO L, LARACCA M. GMR-based ECT instrument for detection and characterization of crack on a planar specimen: a hand-held solution [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(2): 505-512.
- [9] YANG X, XIE C, WANG Y, et al. Optimization Design of A Giant Magneto Resistive (GMR) Effect Based Current Sensor with a Magnetic Shielding[J]. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2013, 23(4):1-4.
- [10] 陈迪,刘旺锁,姚直象. 基于 DDS 的声呐信号发生器设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(5): 74-76.
- [11] 刘洋,韩鹏,乔占仙. 基于 ARM 的 DDS 信号发生器设计[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(7): 66-74.
- [12] 刘英沛,杨世锡,于保华. 基于 GMR 效应的非铁磁性金属裂纹涡流检测[J]. 振动. 测试与诊断, 2012, 31(6): 747-753.

作者简介

范晶晶,1989 年出生,硕士研究生。主要研究方向为传感器研究与应用。

张晓娟,博士生导师,研究员。主要研究方向有计算电磁学、微波遥感、天线等。