

基于 NI 数据采集卡的 ACFM 无损检测样机设计^{*}

贾 登 周志雄 骆学理 金 艺

(中国石油集团钻井工程技术研究院 北京 102206)

摘 要:针对传统交流电磁场检测系统的稳定性弱和实行性差以及效率低下的问题,从工程实际需要设计了一种基于 NI-USB-6210 数据采集卡的 ACFM 无损检测样机。重点介绍了检测样机的硬件系统设计,并对 ACFM 无损检测系统软件使用进行简要说明。硬件系统主要包括正弦信号激励,功率放大集成电路,传感器检测模块,信号调理电路和数据采集模块。经过实验室和现场测试实验证实:该套样机在无损检测中实时性快,稳定性良好,可靠性强和检测效率高,具有良好的人机互动界面。

关键词:交流电磁场检测;数据采集;信号调理电路;传感器;无损检测

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Development of ACFM prototype based on NI data acquisition card

Jia Deng Zhou Zhixiong Luo Xueli Jin Yi

(CNPC Drilling Research Institute, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the defect of weak stability, poor real-time performance and low efficiency of traditional alternating current field measurement (ACFM) system, We design a new ACFM nondestructive testing prototype based on NI-USB-6210 data acquisition card from the engineering application. The hardware system design of the prototype is introduced, and the software of ACFM nondestructive testing system is explained briefly. The hardware system mainly includes sinusoidal signal excitation, power amplifier integrated circuit, sensor detection module, signal conditioning circuit and data acquisition module. The experimental results and filed test prove that the prototype has the advantages of fast real-time performance, good stability, sturdy reliability, high detection efficiency and a good human-computer interaction interface in nondestructive testing.

Keywords: alternating current field measurement; data acquisition; signal conditioning circuit; sensor; nondestructive testing

1 引 言

交流电磁场检测(alternating current field measurement, ACFM)是一种新兴的非接触式无损检测技术^[1],通过检测工件表面由缺陷引起的磁场变化完成对缺陷的评定,具有检测速度快,操作简单,携带方便,无须清理工件材料表面油漆和涂层,检测成本低等优点^[2]。ACFM检测的理论基础是电磁感应。在工件表面施加均匀的感应电流,当没有缺陷存在时,感应电流在工件表面均匀分布。

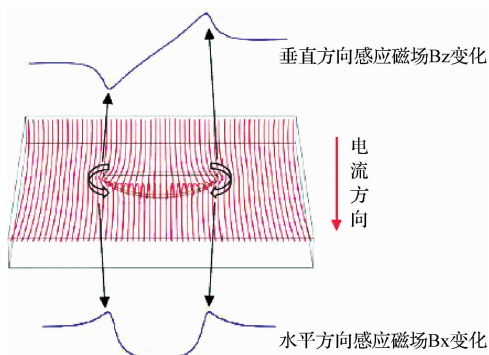
当工件表面存在如图1所示的缺陷时,感应电流会产生扰动。缺陷中部的电流从缺陷底部流过,电流线稀疏;

缺陷边缘的电流产生聚集,电流线密集。电流在缺陷边缘的聚集使电流产生了相对旋转的效果,进而引起缺陷周围空间的磁场发生变化,检出这个由缺陷引起的磁场畸变,即可获得缺陷相关信息。

英国 TSC(Technical Software Consultants Ltd.)公司开发的 TSC Inspection Systems 首次将交流电磁场无损检测技术引入到商业应用阶段^[2-3]。目前 ACFM 相关技术在海洋石油工程领域、化工设备领域、航空航天领域均有应用,且开始逐步在铁路、基建中推广,均采用进口的是 TSC 公司产品,价格昂贵。国内虽有多家研究机构在进行相关技术研究,但始终没有见到比较成熟的商品化交流电磁场检测设备。鉴于此,希望能开发一款性能可靠、

收稿日期:2017-02

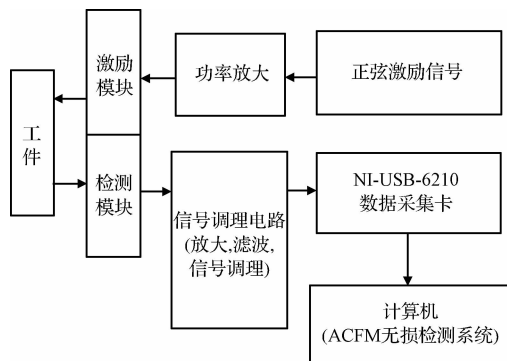
^{*} 基金项目:中国石油集团公司科学研究与技术开发项目(2016A-1007)资助



方便易用的 ACFM 检测设备,摆脱国内 ACFM 行业对进口设备的严重依赖^[4]。

2 系统组成

ACFM 无损检测样机由激励信号源发生器、功率放大模块、激励模块、检测模块、信号调理电路、NI-USB-6210 数据采集卡及计算机组成,系统组成如图 2 所示。激励信号源提供高频正弦激励信号,经过功率放大来驱动激励模块,再由检测模块将由于缺陷存在而产生的微弱磁场扰动量转化为电压信号,经过放大和滤波的信号调理电路后送入 NI-USB-6210 数据采集卡完成 A/D 转换,由计算机完成对采集数据进行的数字滤波、平滑图像和数据存储等处理。



3 硬件电路设计

ACFM 无损检测样机的硬件电路主要包括电压转换电路、正弦信号发生电路、功率放大电路、信号调理电路, NI-USB-6210 数据采集模块电路。由于要检测的磁场量很小信号相对较弱,所以在电路设计时必须考虑到高稳定性、高抗干扰性能等。

3.1 供电电源及电压转换电路设计

为适应现场检测便携性,选取电压 24 V 直流输出 500 mA 锂电池作为系统电源,工作时间超过 12 h。采用 3 块电压转换芯片 DC-DC 模块,24 V 电源经过一块 DC-DC 模块后得到纹波较小 ± 5 V 电压给 MAX038 芯片供电。

24 V 电源经过两块 DC-DC 模块后得到两路纹波较小 ± 15 V 电压, 其中一路 ± 15 V 电压给 INA2128 芯片和 TDA2030 供电, 另一路 $+15$ V 电压输出经过稳压器件 78L05 后得到 $+5$ V 电压给隧道磁电阻 TMR 传感器 MMLP57FD 供电^[5]。

3.2 正弦信号发生电路设计

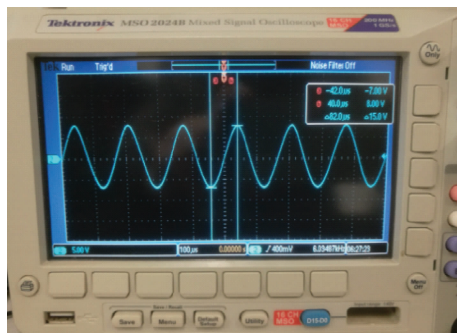
在 ACFM 无损检测样机中,激励信号频率,幅值以及稳定性对检测结果影响重大;设计采用新一代函数信号发生 MAX038 芯片,采用 $\pm 5\text{ V}$ 双电源供电,具有高频率、高精度、低输出电阻而且驱动能力强,产生 $0.1\text{ Hz}\sim 20\text{ MHz}$ 的正弦波,方波和三角波,而且频率和占空比独立调节,占空比最大调节范围是 $10\%\sim 90\%$ 。各种波形输出 $2\text{ V}_{\text{p-p}}$ (峰-峰值),波形失真度小^[6]。

为了提高裂纹检测灵敏度,文献[7]以 COMSOL 多物理场仿真分析软件为工具,建立 ACFM 检测过程中的电磁场分布数值模型,进行求解分析了 ACFM 检测中激励频率对不同深度裂纹的敏感性,提出了 ACFM 检测中对铁磁性金属检测的激励频率优选方法。鉴于此,设计正弦波发生电路时产生一个激励频率为 6 kHz, V_{p-p} 值为 2 V 精确稳定的正弦波。

3.3 功率放大集成电路设计

MAX038 输出电流为正负 20 mA, 输出阻抗典型值为 $0.1\ \Omega$, 可驱动 $100\ \Omega$ 的负载, 还不足以驱动阻值较大负载。本设计选用 TDA2030 功率放大芯片获得更大的驱动能力。

由 MAX038 生成的 6 kHz, 2V_{p-p} 正弦信号经过 TDA2030 芯片放大后, 将得到能驱动 ACFM 探头的频率 6 kHz, 15 V_{p-p} 波形稳定的正弦激励信号。如图 3 所示。电压转换电路和正弦信号发生电路实物如图 4 所示。



3.4 检测探头的 U 型激励磁芯设计

ACFM 样机检测探头由激励线圈, 传感器芯片和骨架两部分组成。检测探头的 U 型激励磁芯采用的材质是锰锌铁氧体, 使用直径为 0.21 mm 的铜丝缠绕 2 匝构成双层线圈。根据不同检测环境, ACFM 探头的外形设计也不同。在狭窄的空间工作时, ACFM 探头设计成笔形探头; 在宽大的空间工作时, ACFM 探头可以设计成手持探头^[8]。

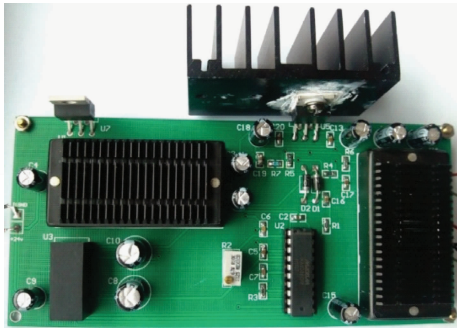


图4 电压转换电路和正弦信号发生电路实物

3.5 TMR 传感器信号调理电路设计

选用 MMLP57FD 芯片作为检测探头传感器芯片。TMR(隧道磁电阻)传感器灵敏度和磁场分辨率高,频率响应范围宽,磁敏元件尺寸非常小; ± 50 Gs 的检测范围完全满足交流电磁场检测的需要,而且可检测正负两个方向的磁场,非常适用于测量正负交变磁场。

由于 TMR 传感器采集到的磁场变化信号微弱并且伴随干扰噪声信号,所以必须对传感器信号进行调理^[9]。信号调理电路主要由一片 78L05 正电源电压调节器和两片 INA2128 双通道仪表放大器构成。采用两片 INA2128 就能在 X 方向和 Z 方向上同时接两个传感器,增大 ACFM 检测探头的扫描宽度。

INA2128 是低电压通用型双通道仪表放大器,它的宽电源电压范围在低电压电池供电系统中得到了广泛应用。适用于信号采集放大及多通道系统等,而且静态工作电流很小,具有低失调电压,低温漂和高共模抑制比。TMR 传感器信号调理电路实物如图 5 所示。

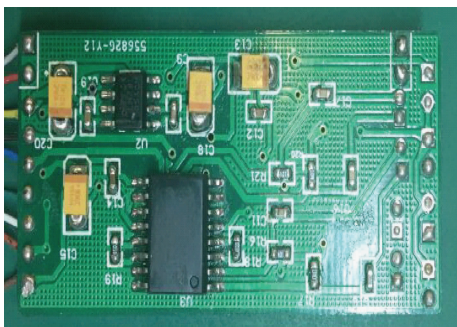


图5 TMR 传感器信号调理电路实物

3.6 NI-USB-6210 数据采集卡电路

要实现计算机对检测到的微弱信号的采集,就必须把传感器调理电路输出的模拟信号转换成计算机可以接受的数字信号,而 A/D 数据采集卡是完成这一功能的优良元件。

由于正弦激励信号频率为 6 kHz,设计每通道采样频率应在 30~60 kHz 之间,以保证信号准确还原,在仪器多通道检测能力试验时最少需设置 4 个独立采样通道,要求数据采集卡采样频率不低于 240 kHz。

在进行 A/D 数据采集时采用 NI-USB-6210 数据采集卡,该数据采集卡是一款 USB 总线供电多功能 DAQ 模块,在高采样率下也能保持高精度,不需提供多余的外部电源。该采集模块提供了 16 路模拟输入;250 kHz 单通道采样率;4 路数字输入线;4 路数字输出线;每通道有 4 个可编程输入范围($\pm 0.2 \sim \pm 10$ V);数字触发;2 个计数器/定时器,满足数据采集需求。

除了对模拟信号在高采样率下也能保持高精度转换,NI USB-6210 即插即用的安装最大程度地降低了配置和设置时间,能直接与螺丝端子相连,从而削减了成本并简化了信号的连接。USB 总线供电不再需要携带多余的外部电源。该模块还具有新的 NI 信号数据流技术,实现了 USB 总线上类似 DMA 的双向高速数据流操作。TMR 传感器调理信号输出分别接入 NI 采集卡的信号差分输入端口 A0, A1, A2, A3 和 GND 引脚进行 AD 转换。NI-USB-6210 数据采集卡如图 6 所示。

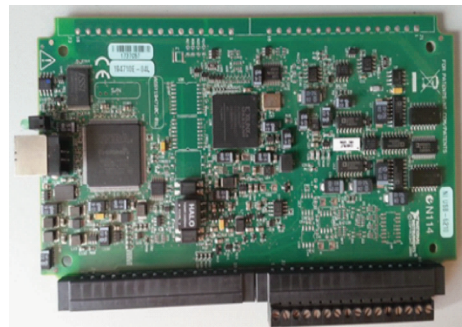


图6 NI-USB-6210 数据采集卡

3.7 基于 C# 的 ACFM 无损检测系统软件

ACFM 无损检测系统软件是 ACFM 无损检测样机的另一核心部分,主要由数据采集、检测系统界面、数据分析与处理 3 个部分组成。完成数据采集、特征量提取、实时图像显示、蝶形图、数据存盘、特征分析等功能,从而得出被测试件中有关缺陷的信息。ACFM 无损检测软件系统主要完成功能如下:

- 1) 实时采集并存储检测线圈上得到的感应电压信号;
- 2) 实时显示检测信号 B_z 、 B_x 的电压峰值波形。

检测显示界面如图 7 所示。

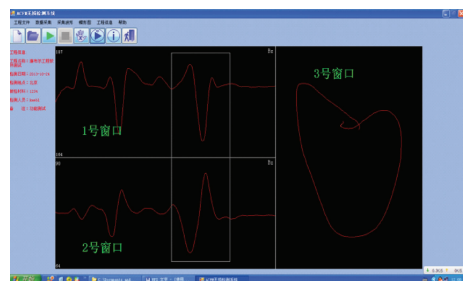


图7 ACFM 无损检测系统软件检测显示界面

1 号窗口为探头 X 方向磁场感应电压峰值显示窗口;2 号窗口为探头 Z 方向磁场感应电压峰值显示窗口;3 号

窗口为蝶形图显示窗口;通过1号窗口和2号窗口的显示图像再结合3号窗口的蝶形图来判断被测工件所测点是否有裂纹缺陷。

3.8 ACFM 无损检测样机

ACFM 无损检测样机系统主要由两部分组成:硬件系统和软件系统^[10]。开发的 ACFM 无损检测样机实物图如图 8 所示。

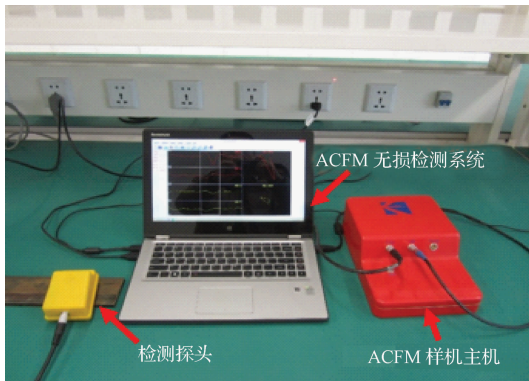


图 8 ACFM 无损检测样机实物

对于手持式探头,当激励矩形线圈的电流方向和工件表面的裂纹走向垂直检测的灵敏度最高,当电流流向和裂纹走向平行时,检测灵敏度非常低。另外,手持式探头扫描属于线扫描,一次扫描能提取该路径上的电磁场信息,路径宽度为 1.5 cm,这样会大大提高产品的可靠性。

4 ACFM 无损检测样机测试实验

为了测试 ACFM 无损检测样机的实际检测效果,笔者参照真实的检测环境加工了一些裂纹检测试件,钻井平台结构用钢种类繁多,但是总的电磁特性参数相差不大。这里为了便于同仿真结果进行对比,选择了电磁特性参数比较明确的 20# 优质碳素结构钢制作裂纹检测试件。在无缺陷的钢板对接焊缝上由电火花加工出的裂纹模型。实际裂纹有高度不规则的几何形状,难以在试件中做出可控形状的实际裂纹^[11]。因此,试件中选用最接近实际裂纹外形的半椭圆裂纹模型来代替实际裂纹。

图 9 为试件厚度 8~15 mm,包含了多个半椭圆形裂纹,具体尺寸如表 1 所示。

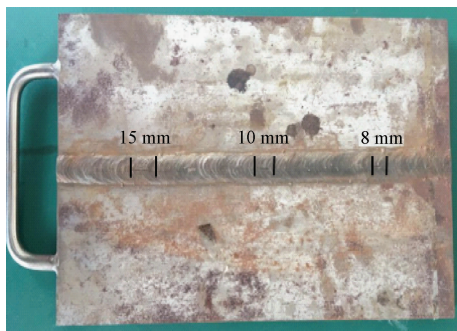


图 9 裂纹工件

表 1 半椭圆裂纹规格

序 号	长度/mm	深度/mm	宽度/mm
裂纹 1	15	4	0.2
裂纹 2	10	3	0.2
裂纹 3	8	2	0.2

用常规探头对工件进行扫掠式检测,具体操作:将探头放在工件上无缺陷位置,使检测探头的横向与裂纹平行,启动测试系统,进行采样,探头沿裂纹走向平行检测。随着探头在工件上匀速扫过缺陷,ACFM 无损检测系统软件实时绘制出磁通密度曲线 B_z (与检测面垂直的方向)和 B_x (检测面上与裂纹走向一致的方向)及蝶形图。

根据 B_x, B_z 特征信号的幅值变化及蝶形图判定扫描区域是否有缺陷存在,蝶形图将 B_x 幅值作为横坐标, B_z 幅值作为纵坐标。当有缺陷存在时,蝶形图绘制区域会描绘出一个完整的蝶形图。蝶形图变化方向和形状,可以帮助我们识别缺陷信号。经多次实验验证,这种根据特征信号幅值和相位变化信息设置的蝶形图辅助缺陷判断准确率非常高。

对 1 号平面裂纹检测试验如图 10 所示。

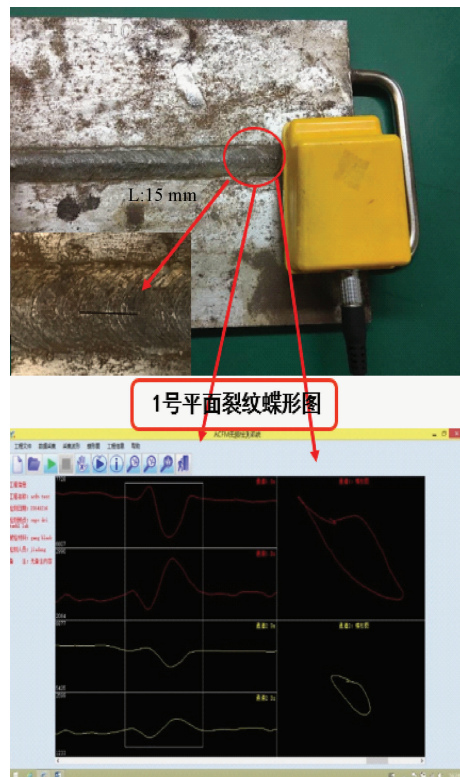


图 10 1 号平面焊缝检测

多次试验验证,ACFM 无损检测对平面焊缝有良好的检测效果。

为了进一步验证 ACFM 无损检测样机现场实用情况,与自升式钻井平台仿真分析中的高应力区相对应,使用该

样机对钻井平台的桩腿,主甲板,升桩桩腿等找到关键承载部位进行了 ACFM 检测。图 11 所示为现场实验图。



图 11 自升式钻井平台桩腿升桩室内桩腿焊缝检测

5 结 论

基于交流电磁场检测技术,根据工程实际需要,设计和实现了一种基于 NI-USB-6210 数据采集卡的 ACFM 无损检测样机,经过实验室和现场测试实验得出以下结论:

- 1)对检测探头进行了优选,采用 TMR 传感器提高了检测探头的分辨率。
- 2)硬件电路的优化设计,极大地提高了信号的抗干扰能力。
- 3)采用单通道采样频率 250 kHz,16 位模数转换精度的 NI-USB-6210 数据采集卡,在高采样率下能保持高精度 AD 转换,最大限度的降低了系统成本,增强了系统功能和灵活性。
- 4)开发出 ACFM 无损检测软件,通过绘制探头 B_x 、 B_z 磁场感应电压峰值波形图和蝶形图,让操作者能直观,清晰的分辨被测点是否有裂纹缺陷。

参 考 文 献

- [1] 冷建成,赵瑞金,周国强,等. ACFM 技术及其在钻修机械平台无损检测中的应用[J]. 无损检测,2013,35(5): 48-49.
- [2] 亓和平. 交流电磁场检测技术装备及应用[J]. 石油机械,2005,33(6):77-79.
- [3] 田贵云,高斌,高运来,等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8): 1766-1767.
- [4] 李文艳. ACFM 缺陷检测系统工业样机研究与开发[D]. 东营:中国石油大学(华东),2010,9-10.
- [5] 任尚昆,房坤,周瑞琪. 基于 TRM 传感器的 ACFM 检测系统设计与试验研究[J]. 无损检测,2014,38(1): 36-38.
- [6] 董亚男,马俊,周全,李金林. 基于单片机的智能信号发生器设计与仿真[J]. 电子测量技术,2014,37(1): 63-65.
- [7] 吴江,周志雄,贾登,等. 交流电磁场检测激励频率的有限元模拟优化[J]. 北京:中国石油集团钻井工程技术研究院,2016,38(7):1-5.
- [8] 李伟,张传荣,陈国明,等. U 型 ACFM 探头精准建模和实验测试[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(7): 658-661.
- [9] 李兵,任尚昆,周瑞琪. ACFM 检测系统的信号调理电路[J]. 仪表技术与传感器,2013(1):74-78.
- [10] 赵艳丽. 交流电磁场检测信号处理方法及应用研究[D]. 东营:中国石油大学(华东),2009,68-69.
- [11] 吴衍运,李伟,葛玖浩,等. 基于 ACFM 技术的阵列 TMR 探头及裂纹检测系统开发[J]. 无损检测,2016,38(10):32-33.

作 者 简 介

贾登,1988 年出生,工程师,主要从事无损检测技术和仪器研发。

E-mail:jiadeng123@qq.com

周志雄,1969 年出生,硕士,副高,主要研究方向为无损检测,振动测试,石油钻井装备研发等。