

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108084

基于FPGA和磁传感器阵列的磁场扫描系统*

马凯^{1,2} 王习东^{1,2} 冯文杰^{1,2} 王国鹏^{1,2} 张浩³ 王保昌³

(1.三峡大学电子与通信研究所 宜昌 443002; 2.三峡大学计算机与信息学院 宜昌 443002; 3.三峡大学理学院 宜昌 443002)

摘要:为实现铁磁性物体的无损检测,设计了一种基于FPGA和磁传感器阵列的磁场扫描系统。本系统采用了FPGA作为主控器,其中包含了AD配置模块、AD接口模块和数据缓存模块,FPGA控制传动装置进行扫描,通过磁传感器阵列扫描将磁场转换为对应的电压信号,通过以AD7768为核心的模数转换模块将电压信号传送给FPGA,实现8路并行高速磁场数据采集,然后在FPGA中通过双线性插值和伪彩色转换算法的处理,把采集的磁场数据转换成磁场分布的图像,存储在SD卡中并在LCD中实时显示。实验中,使用磁场扫描系统对环型磁铁、磁化后的铁丝、内嵌于木板中的铁钉、剥线钳和尖嘴钳进行了磁场扫描,采用基于磁通量与天津法为基础的程序处理,对物体进行定位与识别,定位的均方根误差平均值为3 mm,测量的长度接近实际物体的长度,能够辨别磁性物体的位置和方向,能够通过物体的特征磁场识别磁性物体,达到对铁磁性目标的无损检测和识别的目的。本系统采用了以FPGA ZYNQ7010、AD7768、HMC1001为主的电路采集磁场数据,具有采集速率高、扩展方便、功耗低,能获取磁场空间分布图像等优点,可以应用于铁磁性目标的定位和识别等领域,如安全检测、地下水下的磁性目标探测等。

关键词:弱磁探测;磁传感器阵列;FPGA;磁场扫描系统;无损检测

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Magnetic field scanning system based on FPGA and magnetic sensor array

Ma Kai^{1,2} Wang Xidong^{1,2} Feng Wenjie^{1,2} Wang Guopeng^{1,2} Zhang Hao³ Wang Baochang³

(1. Electronic and Communication Institute, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. College of Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to realize nondestructive testing of ferromagnetic objects, a magnetic field scanning system based on FPGA and magnetic sensor array is designed. FPGA is the main controller of this system that includes AD configuration module, AD interface module and data cache module. FPGA controls the transmission device to scan, and the magnetic field is converted to the corresponding voltage signal by the magnetic sensor array and the circuits. The voltage signal is transmitted to FPGA through the analog-to-digital conversion module with the core of AD7768, and high-speed magnetic field data acquisition system with eight parallel channels is realized. Then, through bilinear interpolation and pseudo-color conversion algorithm in FPGA, the collected magnetic field data are converted to the image of magnetic field distribution, which is stored in SD card and displayed in LCD in real time. In the experiment, the magnetic field scanning system is used to carry out magnetic field scanning for the ring magnet, magnetized wire, iron nails embedded in the wood plate, wire stripping pliers and needle-nose pliers. The program, based on magnetic flux and OTSU method, is used to locate and identify the object. The average root mean square error of positioning is 3 mm, and the measured length is close to the length of the actual object. The position and direction of the magnetic object could be identified, and the magnetic object could be identified by the characteristic magnetic field of the object, so as to achieve the purpose of nondestructive detection and identification of ferromagnetic objects. FPGA ZYNQ7010, AD7768, HMC1001 are used to collect magnetic field data in the system. It has the advantages of high acquisition rate, convenient expansion, low power consumption, and can obtain magnetic field image with spatial distribution. It can be applied to the location and recognition of ferromagnetic targets, such as safety detection, magnetic target detection of underground and underwater.

Keywords: weak magnetic field detection; magnetic sensor array; FPGA; magnetic field scanning system; nondestructive detection

0 引 言

在航空航天、桥梁建筑、地下管网、舰船等行业中,常需

要在无损的情况下,检测出关键目标的位置、形状与状态^[1-2]。因此,常需要利用无损检测技术进行识别与定位。无损检测技术是在不破坏物体的状态和物理性质的前提

收稿日期:2021-10-13

* 基金项目:湖北省自然科学基金面上项目(2018CKB914)资助

下,通过检测技术来得到被检测物体内部的成分或缺陷等物理、化学性质的具体情况。无损检测技术主要包括超声检测技术^[3]、红外热成像技术^[4]、探地雷达检测技术^[5-6]和涡流检测技术^[7-8]等。

弱磁探测也是一种无损检测技术,该技术是利用灵敏的磁传感器来探测铁磁性物质所产生的局部空间磁场微小变化。该探测技术已广泛用于军事领域,例如未爆弹探测^[9]、航空磁探^[10]等。近年来,弱磁检测在民事方面的应用与研究逐渐深入,Liu 等^[11]设计了一种安全检测系统,采用 4 组传感器阵列采集磁场数据,PC 端上编写数据处理程序实现对刀具等危险物品的检测识别,但该系统是利用采集的磁场数据波形的突变来识别金属物体,只能分辨是否有金属物体,不能反映物体形状和位置。陈凯等^[12]采用单片机 STM32 芯片作为主控芯片,基于 HMC1001 芯片采集一路的磁场数据来探测磁性金属,但由于单片机引脚资源有限,不能方便扩展为采集多路磁传感器。同时由于单片机的程序是顺序执行,当采集多路数据时,采集速率会有所下降。

对于地下管网检测的无损检测目前通常使用探地雷达^[13]的方式,利用介质分层处电磁波的反射来探测地下或水下电缆的位置和走向,但探地雷达需要主动发射高频宽带电磁波,仅主机功耗达到 25 W,系统整体功耗和成本较高,不能确认目标的材料属性。地下管网和水下目标一般都含有铁磁性物质,探测识别也可以通过检测目标周围磁场分布来实现,因此弱磁检测方法可以适用这些应用领域。据查阅文献可知,目前基于磁场扫描图像对地下管网检测、水下目标识别等应用的研究方案比较少。

基于上述原因,本文设计一种基于 FPGA 和磁传感器阵列的磁场扫描系统,实现了铁磁性物质的定位与反演,具有采集速率高、扩展方便、功耗低、直观等优点。该系统设计包含磁传感器阵列、超声传感器、模数转换模块、FPGA、LCD 显示模块、SD 卡存储模块和传动装置,采用 FPGA 和 AD7768 芯片实现 8 路并行高速磁场数据采集,通过双线性插值算法和伪彩色转换算法,把采集的磁场数值转换成图像数据,并实现磁场图像在 LCD 液晶显示屏的显示。实验结果验证了本扫描系统检测磁性物质的可行性,提供了针对环形磁铁和条形铁磁性物体的识别方法,目标的位置和长度识别精度较高,进而可以用来识别磁性物质的位置、形状和大小,达到无损检测和识别的目的。

1 系统总体方案设计

本文所设计的磁场扫描系统主要由 FPGA、磁传感器阵列、超声传感器、传动装置、模数转换模块、LCD 显示模块和 SD 卡存储模块 7 部分构成,系统结构原理如图 1 所示,实际搭建的系统如图 2 所示。FPGA 负责控制传动装置带动磁传感器阵列和超声传感器运动从而达到扫描的目的。磁传感器阵列与传感器驱动电路一起配合检测磁场,

将检测到的磁场数值转换为对应的电压值,传输给模数转换模块。模数转换模块是使用 AD7768 芯片,把磁阵列传感器得到的电压值转换成数字量传输给 FPGA;超声传感器用来探测待测目标与磁传感器阵列之间的距离,把数据传输给 FPGA。FPGA 接收处理磁场数据和超声传感器数据;然后控制 LCD 显示模块显示磁场图像,同时把数据传输到 SD 卡存储模块中保存。

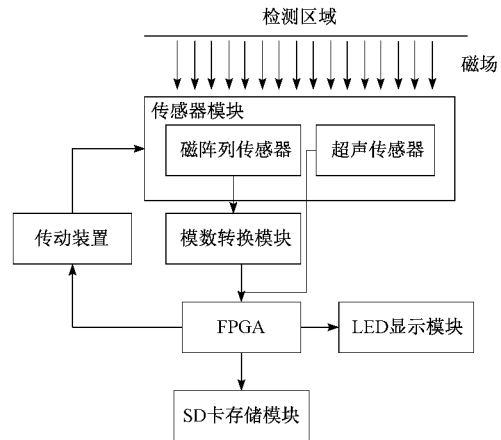


图 1 系统结构原理

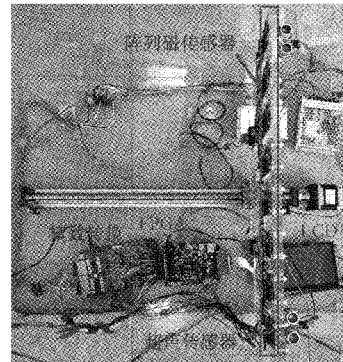


图 2 实际系统示意图

整个系统的扫描运行过程如下:当启动扫描时,首先 FPGA 发送命令配置 AD7768,然后启动电机,通过该系统的机械结构带动着传感器模块开始运行扫描,为了降低随机误差的干扰,将高速采集的多组数据进行了均值滤波算法处理,同时 FPGA 采集 AD7768 传输的代表磁场的电压数据并存储到 DDR 中。当运行到扫描区域的尽头时停止采集,由于使用 8 个磁传感器,所以整个扫描区域采集到 8 行 1 024 列的数据阵列,对采集的数据进行双线性插值拟合运算,然后对该数据进行伪彩色编码并在 LCD 上显示,实现磁场图像显示,并从颜色上识别磁场的方向和大小。

2 系统硬件设计

2.1 磁传感器的驱动电路设计

磁传感器阵列是由 8 个磁传感器并排组成一字型线性阵列,相邻磁传感器之间的间隔为 6 cm。每个磁传感器是

基于 HMC1001 芯片设计对应的驱动电路实现的。HMC1001 芯片由内置 4 个磁阻组成惠斯顿电桥^[14]，如图 3 所示。

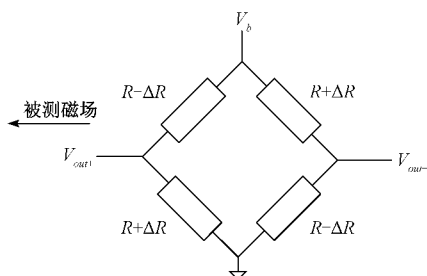


图 3 惠斯顿电桥图

整个电桥由电压为 V_b 电源来供电，芯片置于磁场中，磁场会导致磁阻阻值发生变化，从而使整个电桥的输出电压产生相应的变化。整个电桥的输出电压 V_{out} 的计算如式(1)所示。

$$V_{out} = (V_{out+} - V_{out-}) = \frac{\Delta R}{R} \times V_b \quad (1)$$

由此可知，输出电压正比于被测磁场 B ，即 $V_{out} \propto B$ ，通过检测传感器输出的电压，从而可以得到该点的磁场信息。

根据磁传感器工作的要求，驱动电路的原理如图 4 所示，HMC1001 芯片将磁场转换成电压信号，然后经过放大电路把输出的微弱电压信号放大，再经过同步检波 PSD 和积分电路得到一个积分电压，该积分电压经过反馈调节电路来反馈给 HMC1001，最后经过滤波电路滤波后输出。

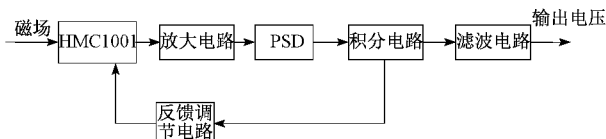


图 4 磁传感器驱动电路工作原理

2.2 磁场数据采集架构设计

磁传感器将磁场转为模拟电压信号输出，数据采集负责采集 8 个磁传感器模块输出的模拟信号并转换为数字信号，并把这 8 路磁场数据高速并行传输到 DDR 中进行存储。该磁场数据采集主要是由模数转换模块和 FPGA 构成。

FPGA 采用的是 Xilinx 公司生产的 ZYNQ7010 芯片，该芯片是一款全可编程片上系统 (APSoC)，采用的是 FPGA+ARM 的架构。处理系统 (PS) 是由一个双核 ARM Cortex-A9 构成，主频为 666 MHz。可编程逻辑 (PL) 是由 FPGA 构成，该芯片资源丰富，有 17 600 个查找表 (LUT)，35 200 个触发器，80 个乘法器，240 kb 的 block ram，94 个 IO 口。PS 与 PL 之间是通过 AXI 总线协议来实现数据交换的。这样的架构提供了较高的系统性能，灵活性和可扩展性更好，同时发挥了 FPGA 的并行处理优势^[15]，适合图

像处理和高速数据采集等方面，同时该芯片的资源完全满足于实现本磁场扫描系统要求。

模数转换模块选用的是 AD7768，该芯片是 ADI 公司生产的 24 位 $\Sigma-\Delta$ 型 ADC 芯片，具有 8 个差分同步采样输入接口和 8 个同步输出接口，满足系统同步采集的要求，每个通道的采样速率高达 256KSPS，总采样速率高达 2 MSPS，满足本系统的高速采集要求。

磁场数据采集的 FPGA 架构设计如图 5 所示，FPGA 的 PL 端部分设计了 AD 接口模块、AD 配置模块、数据缓存模块和 DMA 模块。AD 配置模块配置 AD7768 内部寄存器；AD 接口模块接收 AD7768 数字信号，转换成 8 路并行数据传输到数据缓存模块；数据缓存模块中的数据通过 DMA 直接传输到 DDR 中，根据数据处理的需求，PS 端将直接从 DDR 中提取数据来进行运算处理。PS 端软件部分控制整个采集系统的运行和对数据的算法处理，将处理的结果通过 LCD 显示并存储到 TF 卡中。

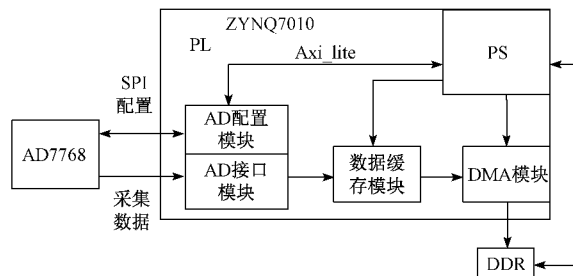


图 5 数据采集架构图

3 磁场数据采集 FPGA 设计

3.1 AD 配置模块的设计

根据 AD7768 芯片手册的说明，AD7768 的采集模式选择是通过配置该芯片内部的寄存器数据值来实现的，该配置采用的是 SPI 接口方式^[16]来实现，使用的是帧外协议，即第 1 帧为命令，第 2 帧为响应，波形如图 6 所示。本系统通过在 PL 端设计 AD 配置模块的 FPGA 硬件电路来实现该 SPI 波形，进而实现与 AD7768 的交互。在 PS 端通过 Axi_lite 总线协议向该 AD 配置模块发送指令 CMD1 和 CMD2，从而实现了通过软件来设置 AD7768 采集模式。

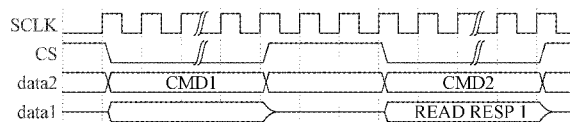


图 6 AD7768 配置波形

3.2 AD 接口模块的设计

AD7768 有两种数据转换输出的工作模式，分别为标准转换工作模式和单次转换工作模式。为了使传输高速且稳定，FPGA 通过 SPI 设置 AD7768 为标准转换工作模式，AD7768 为主机，FPGA 为从机，AD7768 向 FPGA 提供数据时钟 (DCLK)、下降沿帧使能信号 (DRDY) 和数据信号

(DOUT), DOUT有8个数据输出通道,在工作时这8个通道输出磁场数据是并行同步的。在标准转换工作模式下,AD7768连续转换并输出采集的数据,每次当AD7768采集转换完成后,DRDY就会拉高一个数据时钟周期,表示已经准备好了下一个采集的数据。在DRDY下降沿时,每个数据DOUT通道开始输出采集转换的数据,输出的每个数据是32位宽的,前8位为标头状态位,后24位为ADC转换的磁场数据。传输的波形时序图如图7所示。

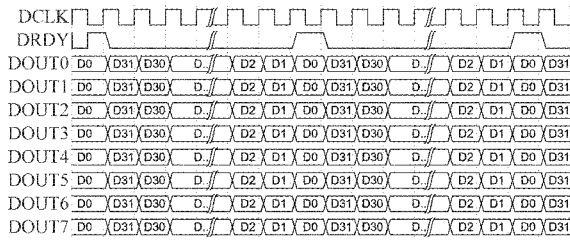


图7 AD7768数据输出接口时序图

根据AD7768向FPGA输出数据的时序波形,在ZYNQ7010的PL端使用Verilog语言设计了数据转换接口模块,实现了接收AD7768输出的数字信号,再转换成8路并行数据输送到数据缓存模块。

3.3 数据缓存模块设计

AD7768输出数据信号使用的时钟是AD7768提供的,设置为8.192 MHz,而ZYNQ7010的PL端使用的时钟为50 MHz,这就需要跨时钟域传输数据。数据缓存模块通过内部嵌入异步FIFO的方式实现AD7768数据与PL端快速、安全传输数据。

用Verilog语言编程在PL端实现数据缓存模块的功能,该数据缓存模块内部使用的是参数化异步FIFO,ZYNQ7010的PS端通过AXI总线向该模块发送配置和启动指令。数据缓存模块通过DMA与DDR进行高速数据

传输,由于DMA采用AXI_Stream协议方式来接收数据,设计的数据缓存模块采集AD7768输出的数据,以缓存的方式存储到FIFO中,然后从FIFO中读出并转换为AXI-Stream流数据。

4 实验与讨论

4.1 实验平台设计

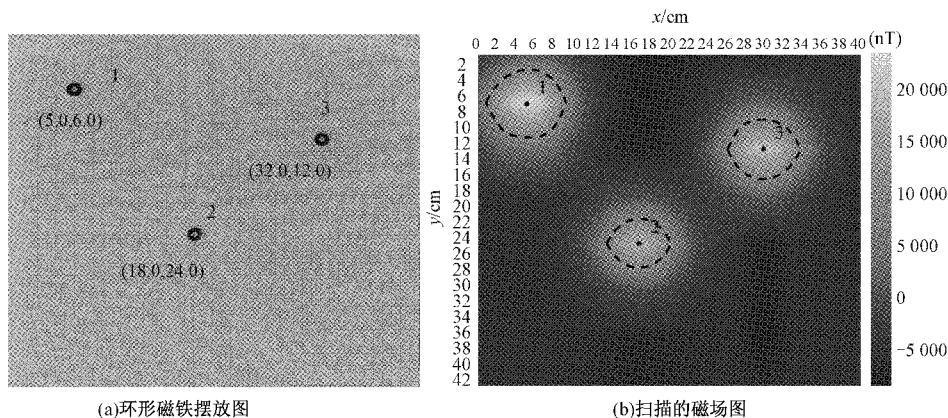
为了验证该磁场扫描系统的性能,设置了一个42 cm×42 cm的矩形扫描区域,8个磁传感器阵列横向排列,相邻磁传感器间距为6 cm,扫描范围为42 cm;纵向扫描范围42 cm,每移动4.1 mm采集100次磁场数据,取平均值作为该点的磁场值,共采集1 024个点,扫描完整个区域得到1 024×8的磁场点阵,通过线性插值拟合的方式将点阵转换为1 024×1 024的磁场图像。FPGA将磁场图像原始数值和转换后的磁场图像数值存于SD卡中,将磁场图像进行伪彩色编码并在LCD上显示,实时查看扫描的磁场分布,从颜色上识别磁场的方向和大小。

扫描得到不同磁性物质在该区域内的磁场分布,扫描区域和像素之间形成对应关系,扫描得到的磁场图像反映出物体的磁场分布。由于地磁场和其它磁性物质的影响,扫描区域有一定的背景磁场,每次测试的实验数据减去背景磁场,得到物体的实际磁场分布,提高了磁场数据的准确性,通过MATLAB算法设计进一步确定物体的位置和形状,达到磁性目标识别的目的,使磁场扫描系统达到实用的程度。

4.2 实验测试

实验中,选择了强磁性的环形磁铁、磁化后的铁丝、内嵌铁钉的木板、剥线钳、尖嘴钳,实验情况如下。

1)单点磁源定位的环形磁铁磁场扫描实验中,图8(a)为实际环形磁铁摆放图,图8(b)为扫描的磁场图。



(a)环形磁铁摆放图

(b)扫描的磁场图

图8 环形磁铁及磁场图

在扫描区域中放置3个环形磁铁,位置关系如图8(a)所示,扫描得到的磁场图如图8(b)所示,3个磁异常的区域对应3个环形磁铁,每个磁异常区域中心磁场最强,向外逐渐衰减,符合环形磁铁的磁场分布特点。图8(b)中使

用大津法(OTSU)算法得到磁异常区域并用虚线圈出,对每个磁异常区域计算形心位置并用黑点标注,以此作为识别的环形磁铁的中心点位置。

为定量分析定位精度,引入均方根误差作为评价指

标,如式(2)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{2}((X_i - x_i)^2 + (Y_i - y_i)^2)} \quad (2)$$

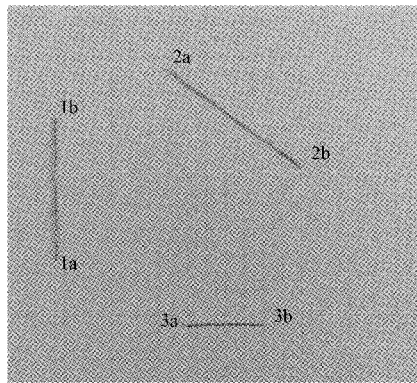
式中: X_i 和 Y_i 分别为环形磁铁实际放置位置的 X 和 Y 轴坐标值, x_i 和 y_i 分别为实验结果的 X 和 Y 轴坐标值。

实验中,环形磁铁和目标磁场中心坐标如表 1 所示,位置坐标的均方根误差平均值为 3 mm,识别磁性物质的坐标位置精度较高,可满足一些目标识别的要求。

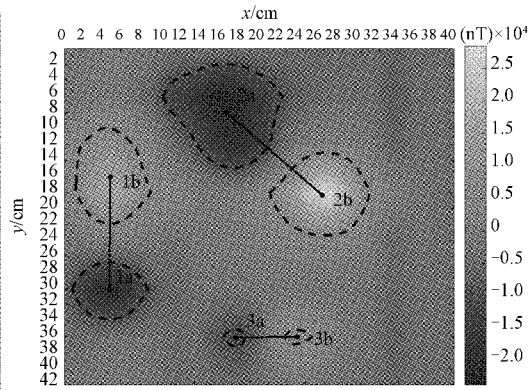
表 1 环形磁铁和目标磁场中心位置

参数	磁铁 1	磁铁 2	磁铁 3
环形磁铁坐标/cm	(5.0, 6.0)	(18.0, 24.0)	(32.0, 12.0)
目标磁场坐标/cm	(5.3, 6.2)	(17.7, 23.9)	(31.4, 11.9)
均方根误差/cm	0.25	0.22	0.43

2)具有一定长度的磁性目标实验中,为了验证磁性目标物体的定位与识别,选用 3 根不同长度的铁丝进行实验。3 根铁丝的长度分别为 18.5、16.5 和 8.0 cm。铁丝摆



(a)实际铁丝摆放图



(b)扫描的磁场图

图 9 铁丝及磁场图

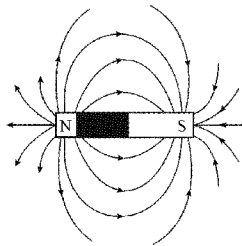


图 10 条形磁铁磁场分布图

通过扫描识别的磁性物质的长度采用长度误差来表示,长度的相对误差 e_L 计算如式(4)所示。

$$e_L = \left| \frac{L_r - L_s}{L_r} \right| \quad (4)$$

式中: L_r 为实际铁丝测量长度, L_s 为扫描长度。

通过磁场扫描系统扫描不同长度、不同方向放置的铁丝,采用基于磁通量和 OTSU 为基础的算法,经过识别,发现了铁丝 1、铁丝 2、铁丝 3 的两端,一端为 a,另一端为 b,

放置位置如图 9(a)所示,扫描结果图如图 9(b)所示。

条形铁丝与条形磁铁的磁场分布是类似的,磁场分布如图 10 所示。在物理中用磁通量来表示磁场分布情况,磁通量的计算如式(3)所示。

$$\Phi = \iint_S B dS \quad (3)$$

式中: Φ 为磁通量, S 为曲面区域, B 为通过曲面区域的磁感应强度。

由铁丝的磁场分布和磁通量定义可知,铁丝的两端产生的磁场会导致在扫描区域对应位置会有极性相反,磁通量绝对值相同的磁异常区域。故铁丝的识别方法为:在 OTSU 算法得到磁异常区域的基础上,对每个磁异常区域计算磁通量,当两个磁异常区域的磁通量绝对值相近,极性相反,就认为这两个磁异常区域就是同一根铁丝两端产生的磁场形成的。两个磁异常区域的形心点位置就对应于铁丝两端顶点的位置,两个形心点的距离就是铁丝的长度。根据上述识别方法,在图 9(b)中用实线表示铁丝,用虚线圈出每个磁异常区域。

并视为直线型磁性物体,两端的坐标位置和长度如表 2 所示,长度相对误差的平均值为 16.4%,在只有 8 个磁传感器阵列的情况下,依然可以得到较高精度的位置和长度信息。该实验表明可通过扫描的磁场图定位磁性目标,并粗略反演出磁性目标的长度。

3)内嵌铁钉的木板扫描实验中,木板长为 34.2 cm,宽为 23.0 cm,厚度为 1.7 cm。木板内部嵌入 4 枚铁钉,如图 11(a)所示,虚线框表示铁钉分布位置,一枚竖着(1a1b)、两枚横着(2a2b、3a3b)、一枚垂直(4)钉入木板。扫描磁场图如图 11(b)所示,运用上述定位识别方法,对木板内部铁钉进行检测,矩形实线框表示木板外框。虚线圈的区域表示磁异常区域,识别的铁钉位置如图中短实线和点所示,短实线所表示的铁钉是平行于木板放置的,点表示铁钉垂直于木板的,具体的坐标位置、长度和误差信息如表 3 所示,位置坐标的均方根误差平均值为 1.2 cm,长度相对误差平均值为 9.3%。

表2 扫描铁丝实验结果

参数	铁丝1	铁丝2	铁丝3
a实际坐标/cm	(4.0, 28.5)	(16.0, 6.4)	(18.0, 36.0)
b实际坐标/cm	(4.0, 12.0)	(30.0, 18.0)	(26.0, 36.0)
实际长度/cm	16.5	18.1	8.0
a扫描坐标/cm	(4.8, 30.2)	(17.4, 7.9)	(18.4, 36.1)
b扫描坐标/cm	(4.9, 16.0)	(27.8, 18.3)	(25.1, 35.9)
a磁通量值/Wb	-5.1747×10^{-8}	-1.5683×10^{-7}	-3.2414×10^{-9}
b磁通量值/Wb	8.3084×10^{-8}	1.2294×10^{-7}	3.2485×10^{-9}
扫描长度/cm	14.2	14.7	6.7
长度相对误差/%	13.9	19.1	16.2

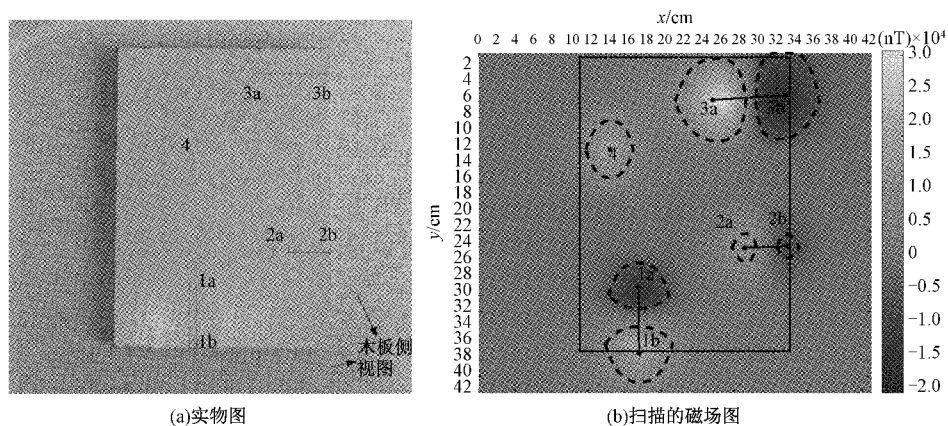


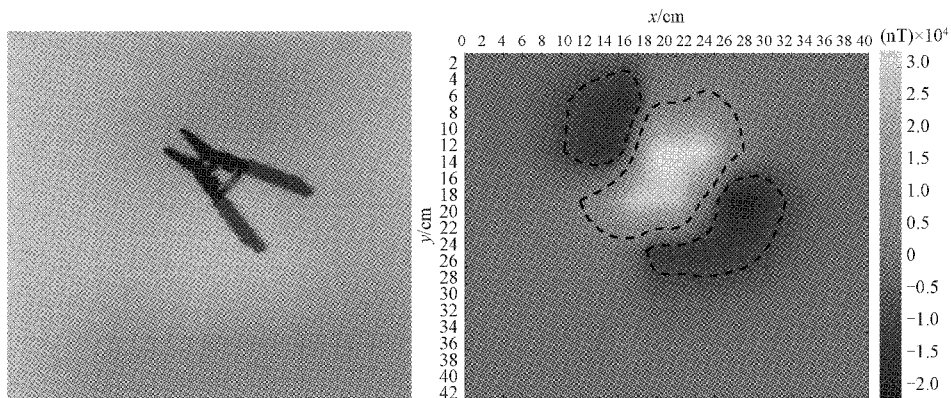
图11 检测木板内铁钉分布实验

表3 检测木板内铁钉分布实验定位结果

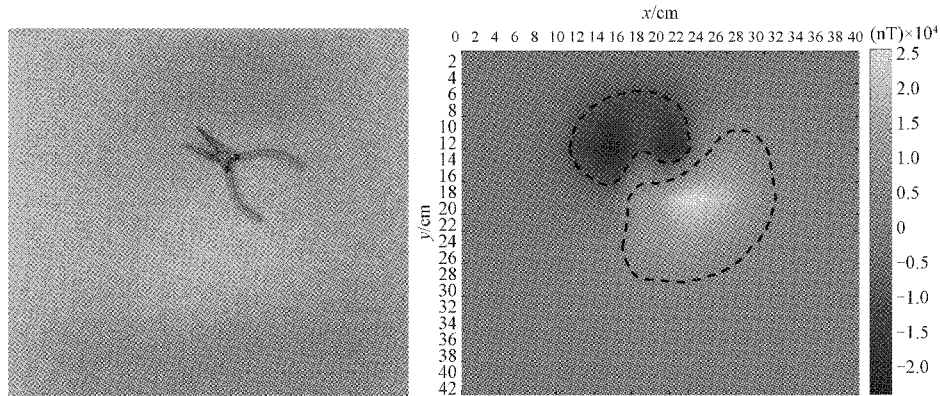
参数	铁钉1	铁钉2	铁钉3
实际坐标 a/cm	(18.5, 37.0)	(28.5, 25.5)	(26.5, 5.1)
实际坐标 b/cm	(18.5, 30.0)	(33.5, 25.5)	(33.5, 5.1)
实际长度/cm	7.0	5.0	7.0
扫描坐标 a/cm	(16.5, 36.9)	(27.9, 24.0)	(24.6, 5.8)
扫描坐标 b/cm	(16.5, 29.1)	(32.5, 23.9)	(32.3, 5.5)
扫描长度/cm	7.8	4.6	7.6
a均方根误差/cm	1.35	1.08	1.40
b均方根误差/cm	1.49	1.31	0.85
长度相对误差/%	12	7	9

该实验表明,可根据扫描的磁场图识别出物体内部磁性目标的位置、长度和放置方向,该系统可用于在未知的环境中,对物体内部铁磁性物质进行检测和识别。

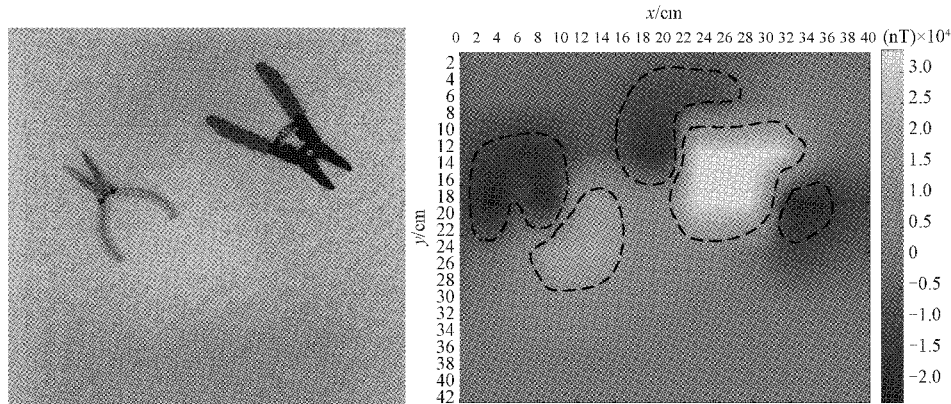
4)根据物体的特征磁场图来识别物体。首先分别采集了剥线钳和尖嘴钳的磁场数据,实物和磁场分布如图12(a)和(b)所示,图12(a)中剥线钳的中间和两端的磁场极性相反,手柄部分的磁场图呈月牙形,钳头部分的磁场图呈近似椭圆形,中间部分磁场区域较大,呈斧形。图12(b)中尖嘴钳磁场有两个不同极性,钳头部分磁场图如月牙形,手柄部分磁场图为近似椭圆形,这即是剥线钳和尖嘴钳的特征磁场分布。



(a)剥线钳和磁场图



(b) 尖嘴钳和磁场图



(c) 剥线钳、尖嘴钳和磁场图

图 12 剥线钳和尖嘴钳的扫描识别

将剥线钳和尖嘴钳放在磁场扫描区域中,实物和扫描得到的磁场图如图 12(c)所示,根据两个物体的特征磁场,可以明显分辨出这两个物体的位置和方向。实验结果表明该系统可以用于识别不同磁性目标,并获得该物体的位置和方向。

通过以上实验可知,磁场扫描系统可以用于确定磁性物体的位置、长度、形状和物体类别,从而达到无损检测和识别的目的。

5 结 论

本文设计了一种基于 FPGA 和磁传感器阵列的磁场扫描系统,通过磁传感器阵列扫描磁场实现对铁磁性物体的无损检测,ZYNQ7010 芯片作为主控器,结合 AD7768 模数转换电路实现 8 路并行高速数据采集,由于 ZYNQ7010 芯片资源丰富,可以并行同步采集 10 片 AD7768 输出数据,即并行高速采集 80 路磁传感器信号,提高磁场的空间分辨率。采集的磁场数据经过双线性插值和伪彩色编码处理转换成磁场分布图像显示,更加清楚直观显示铁磁性物体大致位置与形状。实验验证了对环型磁铁、磁化后的铁丝、内嵌于木板中的铁钉和不规则铁磁性物体的定位识别,实验结果表明,在误差容许的范围内,对铁磁性物体定位精度高达 3 mm,磁场扫描系统具有

较高的应用的价值。

本文设计的基于 FPGA 和磁传感器阵列的磁场扫描系统可以用于不同环境下的磁性目标的检测和识别,如地下管网检测、水下目标检测、石油管道缺陷的检测。此外,该系统的 3 大优势:1)该系统采用可编程逻辑器件作为系统主控器,相较于其他采用单片机作为主控器的方式,本扫描系统可以实现更加高速、更大规模的数据采集,可以进一步扩充传感器阵列的数量,进一步提升空间分辨率,从而提升识别的能力。2)检测可视化,易于实现实时动态监测,存储的磁场图像数据便于后续分析处理,实现铁磁性目标的探测。3)基于弱磁探测的检测方式是一种被动检测方式,系统功耗仅为 5 W,能有效解决基于探地雷达系统的功率高、成本高等问题,有利于便携化和野外作业,具有较广阔的应用前景。

参考文献

- [1] YE C, WANG Y, TAO Y. High-density large-scale TMR sensor array for magnetic field imaging [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(7): 2594-2601.
- [2] ZHANG N, YE C, PENG L, et al. Novel array eddy current sensor with three-phase excitation [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(18): 7896-7905.

- [3] 张梁,张艳花,杨录. 基于超声导波技术的柱面接触研究[J]. 电子测量技术, 2020,43(12):46-50.
- [4] 范春利,沈立华,李孟良,等. 船用输热管道及保温层的红外热像无损检测研究[J]. 电子器件, 2006(4):1367-1371.
- [5] DE DOMENICO D, CAMPO D, TERAMO A. FDTD modelling in high-resolution 2D and 3D GPR surveys on a reinforced concrete column in a double wall of hollow bricks[J]. Near Surface Geophysics, 2013,11(1):29-40.
- [6] 赵迪,叶盛波,周斌. 基于 Grad-CAM 的探地雷达公路地下目标检测算法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(10):113-118.
- [7] LIU L, CHEN D, PAN M, et al. Planar eddy current sensor array with null-offset [J]. IEEE Sensors Journal, 2019,19(12):4647-4651.
- [8] 李超,张志杰,陈昊洋,等. 基于 ZYNQ 的涡流无损检测系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2021:1-12.
- [9] 葛健,陆承达,董浩斌,等. 基于 Overhauser 传感器的近地表 UXO 磁梯度法探测技术[J]. 仪器仪表学报, 2015,36(5):961-974.
- [10] 孟庆奎,周德文,高维,等. 国内外航磁补偿技术历史与展望[J]. 物探与化探, 2017,41(4):694-699.
- [11] LIU H, WANG X, BIN J, et al. Magnetic gradient full-tensor fingerprints for metallic objects detection of a security system based on anisotropic magnetoresistance sensor arrays[J]. AIP Advances, 2020,10(1):15329.
- [12] 陈凯,秦会斌. 基于 HMC1001 的铁磁金属检测系统设计[J]. 传感器与微系统, 2018,37(4):92-93.
- [13] 杨珍,程琛,张俊杰,等. 探地雷达地下管网检测[J]. 甘肃科技, 2021,37(5):66-69.
- [14] 陈国栋,王祥,王建红,等. 磁阻传感器在六臂井径测井仪中的应用[J]. 传感器与微系统, 2016,35(7):150-153.
- [15] 邓澈,颜哈,华波,等. 基于 FPGA 的叶尖间隙信号高速采集与处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018,32(3):104-110.
- [16] 贾伟,邵左文,张玉猛. 基于 SPI 总线的高速串行数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2007(4):37-40.

作者简介

马凯,硕士研究生,主要研究方向为弱磁检测技术、FPGA 应用开发。

E-mail: 978162543@qq.com

王习东(通信作者),工学博士,讲师,主要研究方向为光电检测技术及系统、弱磁检测、FPGA 应用开发等。

E-mail: xdwang@ctgu.edu.cn