

# 基于 ZYNQ 的阵列涡流无损检测系统

蒋青松, 张志杰

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 圆柱形金属试件的阵列涡流检测可以通过几个围绕试件布局的阵列线圈组成的探头来完成, 阵列涡流探头由完全相同的8个线圈组成并在一定的空间结构下完成对金属试件的探测。设计1个基于Zynq-7020的阵列涡流检测系统, 该系统借助激励通道的8个模拟开关可以对一个或多个线圈进行激励, 借助一个8选1模拟开关可以对8个阵列线圈进行分时采集, 通过数字相敏检波算法完成对信号的提取。试验结果表明, 此系统可以保存、传输、处理阵列探头的激励信号和感应信号, 并完成测量阵列探头灵敏度的试验任务。

**关键词:** Zynq-7020; 阵列涡流检测; 阵列涡流探头; 模拟开关

中图分类号: TP274

文献标志码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222952

中文引用格式: 蒋青松, 张志杰. 基于 ZYNQ 的阵列涡流无损检测系统[J]. 电子技术应用, 2023, 49(1): 52-57.

英文引用格式: Jiang Qingsong, Zhang Zhijie. Array eddy current nondestructive testing system based on ZYNQ[J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(1): 52-57.

## Array eddy current nondestructive testing system based on ZYNQ

Jiang Qingsong, Zhang Zhijie

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement Ministry of Education,  
North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The array eddy current detection of cylindrical metal specimen can be completed by several probes composed of array coils arranged around the specimen. The array eddy current probe is composed of exactly eight coils and completes the detection of metal specimen under a certain spatial structure. An array eddy current testing system based on Zynq-7020 is designed to excite one or more coils with the help of 8 analog switches of the excitation channel. With the help of an 1-in-8 analog switch, 8 array coils can be acquired in time. The signal is extracted by digital phase sensitive detection algorithm. The test results show that the system can save, transmit and process the excitation signal and induction signal of the array probe and complete the test task of measuring the sensitivity of the array probe.

**Key words:** Zynq-7020; array eddy current testing; array eddy current probe; analog switch

## 0 引言

阵列涡流检测技术作为一种新型的无损检测技术, 不但具有常规涡流检测技术的优点, 还克服了常规涡流传感器检测速度慢的缺点。随着计算机、传感器技术和信号处理技术的进步, 阵列涡流检测技术已趋于成熟<sup>[1-2]</sup>。阵列涡流技术的检测原理是将通入交变电流的激励线圈放置在导电部件上, 导体表面会产生涡流, 导体中的缺陷会干扰涡流路径, 这种干扰可以通过检测线圈来测量<sup>[3]</sup>。阵列涡流传感器探头结构灵活多变, 能适应复杂工况, 针对某些特殊结构工件的缺陷检测有着独特优势, 阵列探头的不同布置方案会对输出信号产生影响, 阵列探头会有多个线圈, 通过分时复用芯片进行通

道采集<sup>[4-6]</sup>。阵列涡流检测的一个重要应用是磁感应成像, 磁感应成像的原理是利用高频磁场在不接触被测组织的情况下测量组织的电导率, 从而重构组织内部电导率的分布情况以及检测电导率的变化情况<sup>[7-8]</sup>。阵列探头的信号可以利用可编程门阵列(FPGA)进行多路信号的采集和控制<sup>[9]</sup>。Zynq-7020 包含一片 FPGA 和双核 ARM Cortex-A9 处理器, 利用 ZYNQ 可以方便扩展系统的功能<sup>[10]</sup>。

## 1 硬件设计

硬件设计部分是为满足所设定的功能而搭建的底层硬件系统, 芯片的选用和 PCB 的设计是完成硬件设计的关键。

### 1.1 设计方案

设计一个基于ZYNQ的阵列涡流无损检测系统，系统拥有信号激励、多通道采集，信号处理等模块可以实现高负载信号发生器、阻抗分析仪、通道采集、无损检测等多功能集成的系统。此系统连接阵列涡流传感器可以采集包含试件电导率分布的电压信号，设计思路如图1所示。

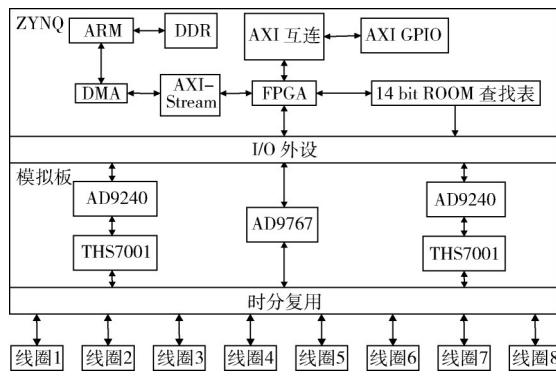


图1 系统总体设计

阵列探头8个线圈的激励会由FPGA利用直接数字式频率合成技术(DDS)生成数字量正弦波，数字量正弦波会通过AD9767数模转换芯片转换为模拟量并对激励线圈进行激励，感应线圈在周围磁场的影响下会感应出感应信号，系统采集模块会对8个线圈的电压信号进行采集并通过AD240模数转换芯片将模拟信号转换为数字信号，数据处理模块会将信号分解成复数和相位差，并通过DMA传输到DDR存储器中，便于数据的可视化及软件处理算法的实现。

### 1.2 分时复用模块

由于阵列涡流传感器有8个线圈，要将这8个线圈的电压信号采集到一片AD9240模数转换芯片中，对AD9240进行分时复用需要依靠ADG408模拟开关进行通道选取，ADG408的控制地址如表1所示。

通过状态机控制数字信号，可以达到对通道进行分时选取的功能。通过控制数字量A<sub>2</sub>、A<sub>1</sub>、A<sub>0</sub>分别打开通

表1 ADG408 模拟开关通道控制

A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>	EN	通道
x	x	x	0	无
0	0	0	1	1
0	0	1	1	2
0	1	0	1	3
0	1	1	1	4
1	0	0	1	5
1	0	1	1	6
1	1	0	1	7
1	1	1	1	8

道1、通道2、…、通道8，并不断循环上述操作。

ADG408模拟开关的控制信号在0.8 V以下默认为低电平，2.4 V以上默认为高电平，因此可以利用LVCMS3或3.3 V LVTTL作为ADG408模拟开关的驱动电压。

ADG408模拟开关的最大通道转换速度受t<sub>transition</sub>影响，t<sub>transition</sub>是A<sub>2</sub>、A<sub>1</sub>、A<sub>0</sub>数字量驱动电压达到标准值50%的时间点t<sub>address50%</sub>开始到通道的电压输出达到输入电压90%电平的时间点t<sub>output90%</sub>为止所消耗的时间。

$$t_{\text{transition}} = t_{\text{output90\%}} - t_{\text{address50\%}} \quad (1)$$

在±15 V电源供电下，ADG408模拟开关的t<sub>transition</sub>标准值为120 ns，t<sub>transition</sub>的最大值为250 ns。因此系统驱动ADG408模拟开关地址位的周期不应该小于250 ns。

如图2所示，通过编写case状态机，将每一个要考虑的因素都通过拟定的时钟进行输出，便于灵活控制通道的开关。

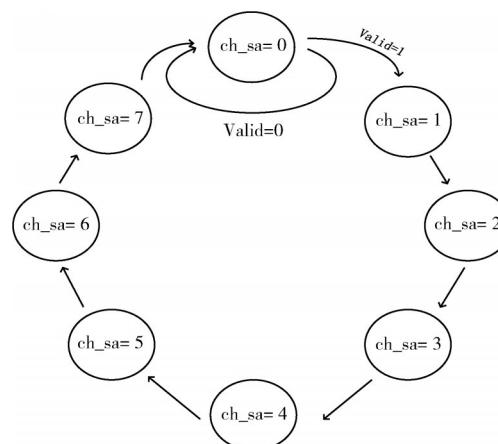


图2 ADG408状态机控制

每一个状态机状态的改变不应超过250 ns，即ADG408模拟开关的地址转换频率不应超过4 MHz。实际上，IC芯片和布线的存在会导致信号从模拟开关输出后到达FPGA引脚仍然具有极高时延t<sub>shiy</sub>，因此从FPGA输出ADG408地址控制信号到FPGA的输入寄存器IBUF(IBUF是FPGA接收外设I/O接口信号的输入缓冲器)接收到指定通道的信号是存在大量时延t<sub>zongshiy</sub>的。

$$t_{\text{zongshiy}} = t_{\text{transition}} + t_{\text{shiy}} \quad (2)$$

如果没有考虑IC芯片的信号延迟t<sub>shiy</sub>，只考虑t<sub>transition</sub>会对后续的算法模块产生影响，因为此时算法模块获得的是延时t<sub>shiy</sub>的信号，这增加了算法的误差。经过测试150 ns < t<sub>shiy</sub> < 400 ns，这个延时已经达到甚至超过了t<sub>transition</sub>，经过反复测试这个IC芯片的延时在一定范围内是固定的，由于IC芯片延时的事实无法更改，需要在程序设计上考虑IC延时，将FPGA的输入寄存器接收的通道滞后t<sub>shiy</sub>以抵消IC芯片延时对算法模块精度的影响。

对系统板进行8通道测试,将信号发生器输出一个正弦波接到仪表运放,其中ADG408模拟开关的地址位不变,图3表明此时FPGA的IBUF寄存器接收AD模数转换芯片的值与信号发生器的输出值是一致的。

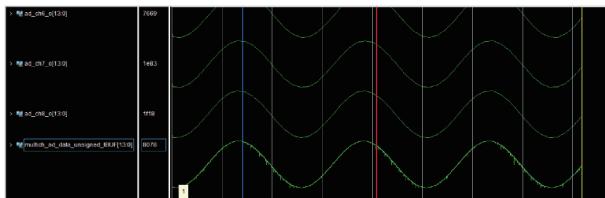


图3 模拟开关选定一个通道后寄存器的输入值

为验证系统板通道采集能力而做的区别实验如图3所示,multich\_ad\_data\_unsigned\_IBUF[13:0]是FPGA采集14位AD模数转换芯片的输入寄存器,ad\_ch6\_o[13:0]、ad\_ch7\_o[13:0]、ad\_ch8\_o[13:0]分别是6、7、8通道的寄存器。由于此时ADG408模拟开关的地址位没有发生变化,此时的状态机相当于把图2的地址ch\_sa保持在了一个值,模拟开关通道的选取和信号发生器接入系统板的通道是一致的,因此8个通道寄存器都会将IBUF的值赋给自己,且由于ADG408模拟开关的地址位没有进行更改,multich\_ad\_data\_unsigned\_IBUF[13:0]的值没有受到模拟开关的影响,其呈现为一条不含明显噪声的正弦波。

将2通道和3通道的仪表运放接信号发生器的正弦输出,ch\_sa的变换情况依照图4状态机从0~7循环变化,FPGA的IBUF输入寄存器和通道寄存器数值的变化情况如图4所示。

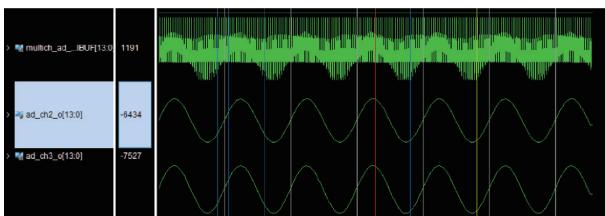


图4 模拟开关变换通道下寄存器的值

multich\_ad...IBUF[13:0]是FPGA保存14位AD模数转换芯片所输出14位数字量的寄存器,图3和图4的multich\_ad...IBUF[13:0]并不同,图4的IBUF值夹杂了大量噪声,这是ADG408模拟开关的地址改变所导致的通道关断带来的噪声和其他通道没有输入导致的数值不确定引起的噪声,ad\_ch2\_o[13:0]和ad\_ch3\_o[13:0]分别是2通道和3通道寄存器,从图4可以看出,程序所考量的系统时延 $t_{zongshiy}$ 是正确的,因此系统可以消除模拟开关不稳定和IC时延带来的影响从而可以正确读取相应通道的数据。

### 1.3 数字相敏检波算法

数字相敏检波算法在涡流检测里的应用是可以通过相位偏移,相乘和累加运算实现对特定信号的正交分解,实现原理如图5所示。

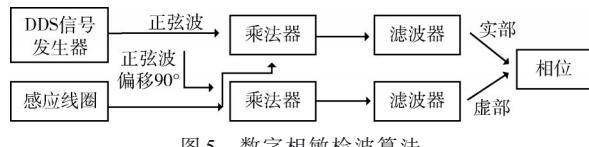


图5 数字相敏检波算法

系统板所采集感应线圈的电压信号会通过数字相敏检波算法与数字滤波器过滤后输出一个相对于激励电压信号的实部和虚部值。在这里数字相敏检波算法的基础是电磁感应信号的频率相等,因此信号可以转换为复数,复数的运算是极其方便的。数字相敏检波算法分解出的信号包含测量目标的电导率 $\sigma$ 信息,通过改变激励线圈通道数,并用阵列探头检测相位变化的数据信息,就可以搭建求解电磁场逆问题的算法体系,重构目标的电导率分布及变化情况。

### 2 阵列涡流传感器

阵列涡流传感器拥有8个线圈,线圈之间的关系等效于变压器,测量线圈之间互感是通过对激励线圈施加正弦激励并测量感应线圈的感应电压信号得出的。

阵列涡流传感器中的激励线圈和金属试件的电磁感应原理所等效的变压器电路如图6所示,激励线圈的正弦激励信号由功率运放驱动,这个功率运放是电压反馈型运放,只要功率运放的带负载能力足够强,此时可以将功率运放看成是电压源。

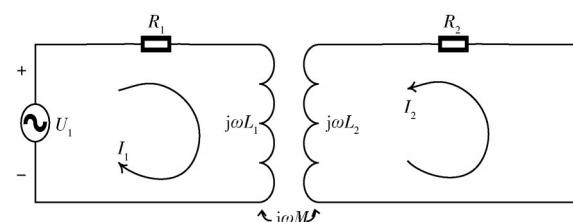


图6 激励线圈与金属试件之间的变压器等效电路

激励线圈作为输入端口,接入电压源后,激励线圈可以等效为电阻 $R_1$ 和电感 $L_1$ 的组合,金属试件作为输出端口所形成的电路可以等效为电阻 $R_2$ 和电感 $L_2$ 的组合, $M$ 为线圈之间的互感, $U_1$ 为电压源,在正弦稳态下,此等效电路的双网孔方程为:

$$(R_1 + j\omega L_1)I_1 + j\omega MI_2 = U_1 \quad (3)$$

$$j\omega MI_1 + (R_2 + j\omega L_2)I_2 = 0 \quad (4)$$

式(3)和式(4)为线圈与金属试件之间等效电路的公式。激励线圈的阻抗和金属试件的阻抗分别为:

$$Z_{11} = R_1 + j\omega L_1 \quad (5)$$

$$Z_{22} = R_2 + j\omega L_2 \quad (6)$$

将式(5)和式(6)带入式(3)和式(4)得式(7)和式(8):

$$Z_{11}I_1 + Z_M I_2 = U_1 \quad (7)$$

$$Z_M I_1 + Z_{22} I_2 = 0 \quad (8)$$

其中,  $Z_M$  为互感抗:

$$Z_M = j\omega M \quad (9)$$

从式(7)和式(8)可以得到激励端阻抗变化情况:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = Z_{11} + \frac{(\omega M)^2}{Z_{22}} \quad (10)$$

从式(10)可以得到激励线圈的阻抗增加了  $\frac{(\omega M)^2}{Z_{22}}$ ,

这也就意味着新增加的等效阻抗与金属试件的阻抗性质相反, 如果试件是感性的, 则激励线圈的阻抗性质向容性发展; 如果试件是容性的, 激励线圈的阻抗性质就会向感性发展。

由式(8)可以得出试件电流  $I_2$ :

$$I_2 = -\frac{Z_M}{Z_{22}} I_1 \quad (11)$$

很明显, 由式(11)可得出, 在一个真正的实验环境下当电压源的输出频率恒定时, 互感抗  $Z_M$  和试件的固有阻抗  $Z_{22}$  不变, 此时试件的电流  $I_2$  只与激励线圈的电流  $I_1$  有关, 激励线圈的电流  $I_1$  只和功率运放等效的电压源电压  $U_1$  有关, 此时试件的电流  $I_2$  也就只和电压源电压  $U_1$  有关。

设计的阵列涡流传感器由 8 个线圈组成, 8 个线圈的结构相等, 线圈的结构为圆柱体, 线圈绕制紧密, 无缝隙, 线圈直径为 4 cm, 如图 7 所示。

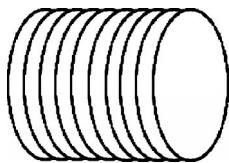


图 7 线圈绕制

线圈结构等效为圆柱体, 8 个等效圆柱体以正八边形进行布局, 图 8 为阵列线圈的布局结构。



图 8 阵列线圈的空间布局

8 个线圈组成的传感器阵列其工作方式有很多种, 其中一种工作方式是选择一个通道作为激励通道, 此时激励通道对应的线圈为激励线圈, 其他 7 个线圈为感应线圈。激励线圈会施加正弦激励, 此时激励线圈会产生交变电流, 交变电流会使得激励线圈周围产生交变磁

场, 交变磁场的存在会使其他线圈产生感应电压信号。

金属试件的外径为 4.2 cm, 内径为 3.1 cm, 高 3.5 cm, 样品如图 9 所示。在阵列传感器中心放置金属试件, 金属试件会产生涡流, 反过来又会影响其他感应线圈产生的感应电压信号, 实物图如图 10 所示。



图 9 金属试件测试样品

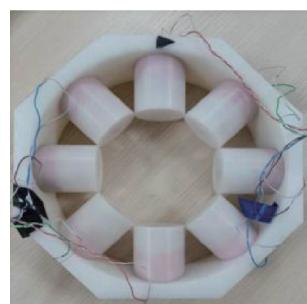


图 10 涡流阵列传感器实物图

线圈 1~8 的电压分别为  $U_1 \sim U_8$ , 线圈 1~8 的电流分别为  $I_1 \sim I_8$ , 试件的感应涡流为  $I_9$ ,  $M_{ij}$  是线圈  $i$  与线圈  $j$  之间的互感,  $M_{ij}$  与  $M_{ji}$  的数值是相等的。

$$U_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{19} I_9 + j\omega M_{12} I_2 + \cdots + j\omega M_{18} I_8 \quad (12)$$

$$U_2 = j\omega L_2 I_2 + j\omega M_{29} I_9 + j\omega M_{21} I_1 + \cdots + j\omega M_{28} I_8 \quad (13)$$

$$U_3 = j\omega L_3 I_3 + j\omega M_{39} I_9 + j\omega M_{31} I_1 + \cdots + j\omega M_{38} I_8 \quad (14)$$

$$U_4 = j\omega L_4 I_4 + j\omega M_{49} I_9 + j\omega M_{41} I_1 + \cdots + j\omega M_{48} I_8 \quad (15)$$

$$U_5 = j\omega L_5 I_5 + j\omega M_{59} I_9 + j\omega M_{51} I_1 + \cdots + j\omega M_{58} I_8 \quad (16)$$

$$U_6 = j\omega L_6 I_6 + j\omega M_{69} I_9 + j\omega M_{61} I_1 + \cdots + j\omega M_{68} I_8 \quad (17)$$

$$U_7 = j\omega L_7 I_7 + j\omega M_{79} I_9 + j\omega M_{71} I_1 + \cdots + j\omega M_{78} I_8 \quad (18)$$

$$U_8 = j\omega L_8 I_8 + j\omega M_{89} I_9 + j\omega M_{81} I_1 + \cdots + j\omega M_{87} I_7 \quad (19)$$

在电路设计部分, 把线圈的一端接地, 以便线圈在获得激励时线圈能形成回路产生电流, 当此线圈没有转换为激励线圈而是感应线圈时, 即便感应线圈有感应电压也是不存在电流的。假设线圈 1 为激励线圈, 则式(12)~式(18)可以更改为式(20)~式(27):

$$U_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{19} I_9 \quad (20)$$

$$U_2 = j\omega M_{29} I_9 + j\omega M_{21} I_1 \quad (21)$$

$$U_3 = j\omega M_{39} I_9 + j\omega M_{31} I_1 \quad (22)$$

$$U_4 = j\omega M_{49} I_9 + j\omega M_{41} I_1 \quad (23)$$

$$U_5 = j\omega M_{59} I_9 + j\omega M_{51} I_1 \quad (24)$$

$$U_6 = j\omega M_{69} I_9 + j\omega M_{61} I_1 \quad (25)$$

$$U_7 = j\omega M_{79} I_9 + j\omega M_{71} I_1 \quad (26)$$

$$U_8 = j\omega M_{89} I_9 + j\omega M_{81} I_1 \quad (27)$$

从式(20)~式(27)可以得出感应线圈的感应电压与激励线圈的电流和试件产生的涡流有关。

### 3 程序设计

Zynq-7020 集成 866 MHz 的双核 ARM Cortex-A9 和一片 Artix-7 FPGA，拥有 53 200 个 Look-Up Tables (LUTs)、106 400 个 Flip-Flops、4.9 Mb Total Block RAM 和 220 个 DSP Slices。

XILINX 公司的 Look-Up Tables (LUTs) 是 6 输入的，每一个 LUTs 可以配置为一个 6 输入 ( $2^6$  bit ROMs) 或两个 5 输入的 LUTs ( $2^5$  bit ROMs)，由于每一个 LUTs 输出都可以占用一个触发器，因此 FPGA 片内触发器 (Flip-Flops) 的数量一般都是 6 输入 LUTs 的 2 倍。

图 11 是一个 slice 的结构图包含 4 个 6 输入 LUTs 和 8 个触发器 Flip-Flops，再加上多路复用开关和算术携带逻辑组成了 FPGA 的 slice 单元。

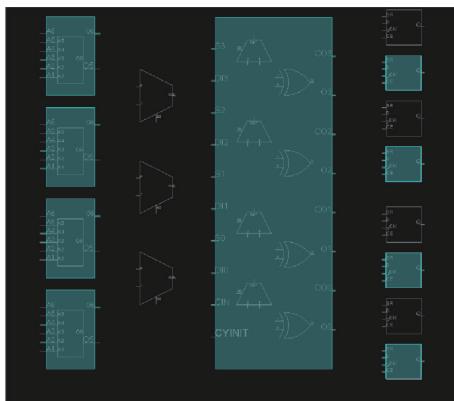


图 11 Artix-7 FPGA slice 的结构图

针对阵列涡流检测系统所设计的算法模块利用 VIVADO 软件综合、实现后的 Zynq-7020 片内资源使用情况如图 12 所示。

algorithm 模块主要负责对采集的信号进行数字信号处理，algorithm 模块消耗了 27 684 个 LUTs、29 215 个 Slice Registers、8 218 个 Slice 和 48 个 DSPs，所消耗 LUTs 的数量超过了 Zynq-7020 LUTs 的 50%，对算法进行优化可以减少 FPGA 的片内资源消耗以利于后续的滤波算法实现和功能扩展。

### 4 系统试验平台搭建

阵列涡流检测试验平台包括电源、示波器、ZYNQ 核

心板、采集激励模块、阵列涡流传感器等模块。阵列涡流检测系统检测原理是通过 FPGA 输出正弦波作为激励信号激励阵列涡流传感器的一个线圈，其他 7 个线圈的感应信号被采集模块接收并通过数字相敏检波算法分解得到相位差，验证阵列涡流检测系统检测传感器内部有无金属试件的能力。阵列涡流传感器通过网口与系统采集激励模块连接，阵列涡流传感器有 8 个线圈、16 个连接点，一个网口有 8 个连接点，用棕绿蓝红线分别连接 4 个线圈，用两个网口完成 8 线圈阵列涡流传感器与系统采集激励板的数据连接。

将激励线圈两端接示波器，激励线圈的激励信号是峰峰值电压为 4.875 V、频率为 10 kHz 的正弦波。

激励采集板有两片 AD9240 模数转换芯片，一片 AD9240 用来采集 AD9767 数模转换芯片的激励信号，另一片 AD9240 用来采集 8 个通道的电压信号，为了采集微小信号，程控增益运放调节的电压放大倍数比较高会让采集的激励信号直接截幅，因此需要另一片 AD9767 监控激励信号。

图 13 中的 IBUF 输入寄存器的值为第一片 AD9240 模数转换芯片采集的激励信号，这片 AD9240 在测量时引入了未知噪声，且未加低通滤波器，所以图 13 激励信号多了噪声，其余 ad\_chi\_o[13:0] 信号指的是  $i$  通道线圈电压信号，这些电压信号是第二片 AD9240 通过分时复用芯片采集的信号。图 4 测试表明，第二片 AD9240 采集的通道信号是在数据稳定后采集的，测试数据是不含明显噪声的，因此在激励信号作用下，图 13 的结果表明所采集的阵列线圈感应信号的噪声是传感器本身扰动引起的，并不是硬件电路窜入的噪声，因此阵列线圈的感应信号夹杂噪声，但是变化规律与激励信号是一致的，即感应信号可以看成是与激励信号频率相同的正弦波。在阵列探测线圈中心放置金属试件，感应线圈信号变化情况如表 2 所示。

表 2 表明，阵列线圈探头在激励线圈不变、激励频率和幅度恒定的情况下，感应线圈的信号在阵列线圈探头中心放置金属试件的情况下幅度会有增大的趋势。至于感应信号的实部和虚部，需要将信号滤波成一条平滑的正弦波或者滤波成一条有些许噪声的正弦波再通过数字相敏检波算法得出感应电压的实部、虚部等信息。

### 5 结论

本文介绍了基于 Zynq-7020 的阵列涡流无损检测系统的设计工作，利用 DDS 输出正弦信号以激励阵列探头

Name	$\Delta 1$	Slice LUTs (53200)	Slice Registers (106400)	F7 Muxes (26600)	F8 Muxes (13300)	Slice (1330 0)	LUT as Logic (53200)	LUT as Memory (17400)	LUT Flip-Flop Pairs (53200)	Block RAM Tile (140)	DSP S (220 )
>  algorithm (algorithm)		27684	29215	0	0	8218	27660	24	26057	12	48

图 12 algorithm 模块所消耗的逻辑资源

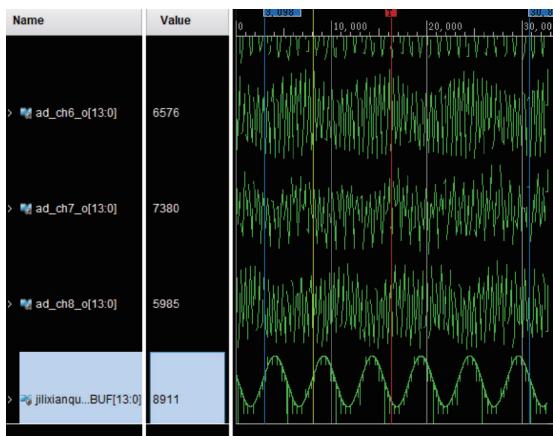


图 13 阵列探头采集信号

表 2 阵列涡流检测系统试验结果

感应线圈	幅值改变数字量
线圈 2	84
线圈 3	396
线圈 4	93
线圈 5	49
线圈 6	51
线圈 7	-95
线圈 8	11

并采集阵列探头的感应信号。结果表明,研制的系统满足对阵列探头的适配工作,搭配 MATLAB 对数据进行频谱分析和滤波,以确定感应信号与激励信号的关系,进一步验证了阵列涡流探头的感应输出和系统各模块正常工作的能力,为后续硬件实现数字相敏检波算法奠定基础。

## 参考文献

- [1] 吕程,杨宾峰,冯建民,等.矩形阵列涡流传感器的设计与实现[J].科学技术与工程,2018,18(25):148-153.
- [2] 孙鹏远,邱胜闻,李文斌,等.钛合金换热管的阵列涡流检测[J].无损检测,2022,44(3):22-26.
- [3] 胡健,张子健,沈建民,等.基于阵列涡流和全聚焦相控阵技术的承压设备应力腐蚀开裂检测[J].无损检测,2021,43(5):12-15.
- [4] 刘少伟,郭奇.基于线圈互感的阵列涡流传感器优化设计[J].传感器与微系统,2015,34(1):107-109,119.
- [5] 辛佳兴,陈金忠,李晓龙,等.基于阵列涡流技术的管道变形检测数值分析[J].石油机械,2022,50(2):115-122.
- [6] 周建平,安海春,白小宝,等.阵列涡流成像技术数值仿真及应用[J].无损检测,2014,36(12):42-45.
- [7] 吕轶.磁感应成像的若干关键技术研究[D].沈阳:东北大学,2012.
- [8] 李烨.多通道磁感应电阻抗断层成像数据采集系统基础研究[D].西安:第四军医大学,2006.
- [9] 王凌伟,王永国,秦冲,等.微处理器和FPGA的多通道振动信号采集系统设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2020,20(7):72-75.
- [10] 杨振雷,刘承敏,青先国,等.基于Zynq-7000的千兆以太网传输系统设计与实现[J].核技术,2021,44(2):35-42.

(收稿日期:2022-05-09)

## 作者简介:

蒋青松(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:涡流无损检测系统与FPGA算法设计。

张志杰(1965-),通信作者,男,博士,教授,主要研究方向:仪器与测量技术、动态测量与校准等,E-mail:zhangzhijie@nuc.edu.cn。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所