

基于 ZYNQ 的涡流无损检测系统的设计

李超^{1,2}, 张志杰^{1,2}, 陈昊泽^{1,2}, 韩宁^{1,2}

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

2. 中北大学 仪器与电子学院, 太原 030051)

摘要: 涡流无损检测技术是以电磁理论为基础的非接触式的检测技术, 具有结构简单、不受介质影响、抗干扰能力强等优点; 根据涡流检测原理设计了一种基于 Zynq-7020 平台的可变频的检测系统; Zynq-7020 为片上系统, 该平台既能发挥 FPGA 并行运算的优势, 同时具备了处理系统的灵活性, 能够实现对数据的高速采集和实时处理; 通过上位机可以改变激励信号的频率, 适应不同厚度金属的检测; 该系统从数字信号处理角度实现阻抗分解, 能够显著地提取缺陷信号; 并通过实验验证了系统的可行性, 实验结果表明该系统可以检测 0.2 mm 大小的缺陷。

关键词: 涡流无损检测; Zynq-7020 平台; 阻抗分解; 数字信号处理

Design of Eddy Current Nondestructive Testing System Based on ZYNQ

LI Chao^{1,2}, ZHANG Zhijie^{1,2}, CHEN Haoze^{1,2}, HAN Ning^{1,2}

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (North University of China),

Ministry of Education, Taiyuan 030051, China;

2. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Eddy current nondestructive testing technology is a non-contact testing technology based on electromagnetic theory, which has the advantages of simple structure, no medium influence, strong anti-interference ability and so on. According to the principle of eddy current testing, a frequency conversion testing system based on zynq-7020 platform is designed. Zynq-7020 is a system on chip. The platform can not only give full play to the advantages of FPGA parallel computing, but also has the flexibility of processing system, which can realize high-speed data acquisition and real-time processing. The frequency of the excitation signal can be changed by the upper computer to adapt to the detection of metal with different thickness. The system realizes impedance decomposition from the perspective of digital signal processing, and can significantly extract the defect signal. The experimental results show that the system can detect 0.2 mm defects.

Keywords: eddy current nondestructive testing; Zynq-7020 platform; impedance decomposition; digital signal processing

0 引言

涡流检测是工业中使用最广泛的无损检测技术之一, 涡流检测的原理为涡流效应^[1]。根据被测物体电磁性能的变化, 来检测物体是否存在缺陷。目前大多数的涡流检测设备采用 DSP/FPGA+ARM+上位机的框架, DSP/FPGA 实现激励信号的输出、检测信号的采集和数据处理, ARM 作为实现上位机和采集系统的通信桥梁, 将处理后的数据传输到上位机, 同时根据上位机发送的控制信号对采集系统的参数做出调整。这种架构的缺点是底层硬件设计复杂, 并且 ARM 与 FPGA 之间数据传输慢、不稳定, 不适用于实时性要求高的场合。Zynq-7020 内部同时集成了双核的 ARM 和 FPGA, 降低了硬件的开发难度, 提高了数据传输的稳定性和实时性。

涡流检测技术的关键是缺陷特征信号的提取, 目前大多数涡流检测设备采用阻抗分解的方法实现缺陷信号的提

取^[2]。传统的计算方法是采用电路处理模拟信号, 而采用模拟相敏检波算法实现相敏检波主要是利用三极管的开关特性, 这样会引入其他噪声, 导致有用信号与无用信号分离不彻底^[3]。因此, 本系统从数字信号处理的角度实现相敏检波算法, 直接对 A/D 采集到的数字信号进行处理, 实现阻抗分解, 得到被测金属的缺陷特征信号, 可以在一定程度上减少其他噪声引入, 提高信噪比。

1 涡流检测技术理论基础

根据法拉第电磁感应定律, 在线圈中施加交变电流时线圈会在周围空间产生交变磁场, 处在交变磁场中的金属会在其内部感应出涡流。涡流技术^[4-6]原理如图 1 所示。线圈中产生的一次磁场会在金属板中感生出涡流, 涡流会产生二次磁场, 涡流产生的二次磁场反作用于线圈, 两个磁场叠加使原磁场发生变化, 进而使线圈阻抗产生变化。当金属板中存在缺陷时, 金属板中涡流的分布会发生变化,

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2021-01-15。

作者简介: 李超(1992-), 男, 河北保定人, 硕士, 主要从事测试计量技术及仪器、动态测试与校准技术方向的研究。

通讯作者: 张志杰(1965-), 男, 山西五台人, 教授, 博士生导师, 主要从事动态测试理论与信号处理、动态误差及不确定度等方向的研究。

引用格式: 李超, 张志杰, 陈昊泽, 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, 29(8): 56-61, 151.

如图 2 所示, 涡流分布的变化会导致二次磁场发生改变, 进而使线圈的阻抗再次发生变化^[7], 从而可以通过线圈阻抗变化情况得知金属板中是否存在缺陷^[8]。

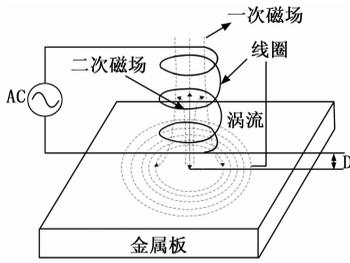


图 1 涡流效应示意图

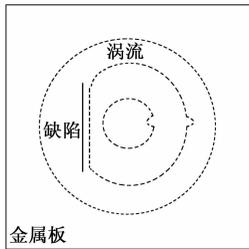


图 2 涡流变化示意图

Dodd 和 Deeds^[9]在 1968 年给出了给出了单个线圈位于导体上方的解析解, 并计算了感应电压。尹武良教授等^[10]进一步提出了两线圈间互感的闭式解^[11]:

$$\Delta L(\omega) = K \int_0^{\infty} \frac{\beta^2(\alpha)}{\alpha^6} A(\alpha) \varphi(\alpha) d\alpha \quad (1)$$

$$\varphi(\alpha) = \frac{(\alpha_1 + \mu\alpha)(\alpha_1 - \mu\alpha) - (\alpha_1 + \mu\alpha)(\alpha_1 - \mu\alpha)e^{2\alpha_1 c}}{-(\alpha_1 - \mu\alpha)(\alpha_1 - \mu\alpha) + (\alpha_1 + \mu\alpha)(\alpha_1 + \mu\alpha)e^{2\alpha_1 c}} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\sigma\mu_0} \quad (3)$$

$$K = \frac{\pi\mu_0 N^2}{(l_1 - l_2)^2 (r_1 - r_2)^2} \quad (4)$$

$$P(\alpha) = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} x J_1 dx \quad (5)$$

$$A(\alpha) = (e^{-\alpha l_1} - e^{-\alpha l_2})^2 \quad (6)$$

其中: α 为空间频率, ω 为激励信号的角频率, σ 为电导率, μ_0 为真空磁导率, c 为样品的厚度, $l_2 - l_1$ 为涡流传感器的高度, r_1 为铁氧体半径, r_2 涡流传感器半径, J_1 为第一类贝塞尔函数。电感值作为阻抗的虚部, 通过分析检测线圈电压的变化, 可以反映出金属板中是否存在缺陷。

2 传感器建模设计

2.1 激励频率对涡流渗透深度的影响

由于趋肤效应的存在, 金属板中的电流大多集中在表面, 在金属内部随着纵向深度的增加, 金属中电流密度迅速衰减。当金属内部电流密度是金属表面电流密度的 37% 时, 此时的深度可以称为标准深度, 也可以叫做趋肤深度。趋肤深度的公式为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (7)$$

由公式 (7) 可知, 当受检金属材料确定后, 受检件的磁导率 μ 和电导率 σ 确定, 涡流的趋肤深度 δ 只与激励线圈的激励频率 f 有关。创建一个长、宽、厚度为 200 mm、200 mm、20 mm 的铝板, 在线圈中通入 1 A 的正弦电流, 金属板中电流密度的分布随激励频率的变化如图 3 所示。图 4 为不同激励频率下金属中电流密度随金属纵向深度变化曲线, 可以看出激励频率越高金属表面电流密度越大, 电流密度随纵向深度衰减越快。其衰减呈指数形式。

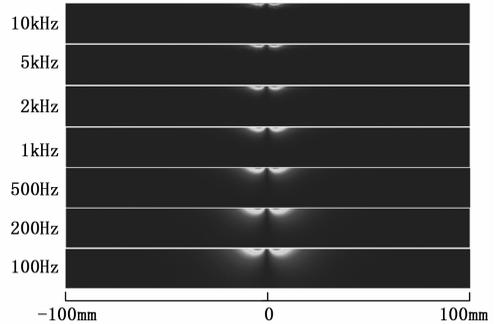


图 3 激励频率对渗透深度的影响

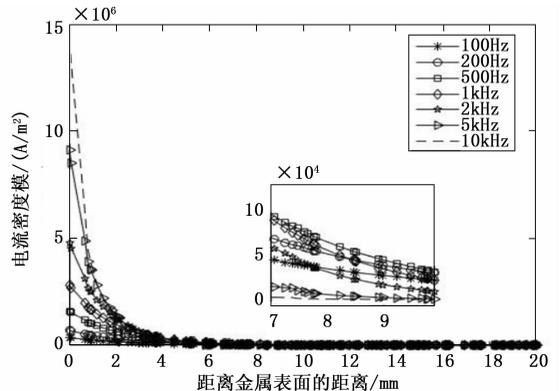


图 4 电流密度曲线

利用涡流效应对金属表面及亚表面进行检测时, 采用高频信号作为激励, 这样能量集中在金属表面及其亚表面, 灵敏度较高, 检测效果比较理想。当对金属内部进行检测时, 采用低频信号作为激励, 这样涡流能够渗透到金属内部, 能得到比较理想的检测信号。

2.2 动态扫描分析

利用 COMSOL Multiphysics 5.4 对传感器探头扫描金属板的过程进行建模分析。被测金属为铝板, 在铝板上方放置 2 个几何参数一致的线圈, 一个线圈中通入激励电流为扫描过程提供激励信号, 另一个线圈接收检测信号, 相关参数见表 1。

应用表 1 中的参数进行建模, 缺陷在激励线圈和接收线圈中间, 仿真建模如图 5 所示。传感器探头从右至左一次扫描, 每次扫描的步进长度为 5 mm。在激励线圈中加载频率为 1 000 Hz, 大小为 1 A 的正弦电流作为激励信号。在探头扫描的过程中, 当探头经过缺陷部位时, 因为缺陷部分的磁导率和电导率等参数发生变化, 会使涡流的分布产生变化,

电流密度的变化为从强到弱再变强，扫描结果如图 6。

表 1 传感器建模参数

| 参数 | 值 |
|---------------|---|
| 线圈 | |
| 外径(半径), r_o | 14.75 mm |
| 内径(半径), r_i | 9.75 mm |
| 高度, h | 56 mm |
| 提高高度 | 1 mm |
| 线圈间距, d | 22 mm |
| 匝数, N | 2 000 |
| 材料 | 铜 |
| 线圈导线直径, R | 0.4 mm |
| 铝板 | |
| 长×宽×厚 | $200 \times 200 \times 15$ (mm ³) |
| 电导率, σ | $3.774e7$ [S·m ⁻¹] |
| 相对磁导率 | 1 |
| 缺陷 | |
| 长×宽×高 | $22 \times 1 \times 5$ (mm ³) |

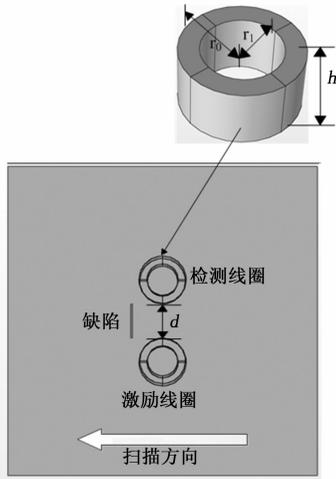


图 5 传感器仿真模型

在模型建立过程中检测线圈中通入的电流值为 0，即检测线圈处于开路状态。因为铝板中涡流密度的变化是从强到弱再变强，涡流产生的二次磁场的变化也是从强到弱再变强，对一次磁场的影响也是从强到弱在变强，因此检测线圈中感应电压的变化是从弱到强再变弱。接收线圈中感应电压变化是先增加再减小，当缺陷位于传感探头中心线正下方时，接收线圈中感应到的电压值最大，接收线圈中的电压变化曲线如图 7 所示。

涡流检测是利用在交变电流激励下，探头线圈与被测金属间的磁场能量耦合变化实现对被测量的检测^[12]。金属板中感应的电流密度不仅与传感器探头激励有关，还与线圈尺寸等其他因素有关^[13]，因此，当传感器探头的形状、提高距离等发生变化时，检测线圈的感应电压也会发生变化。当传感器线圈为圆柱形线圈且线圈的尺寸固定，此时检测线圈的电压变化只与线圈的提高距离有关。

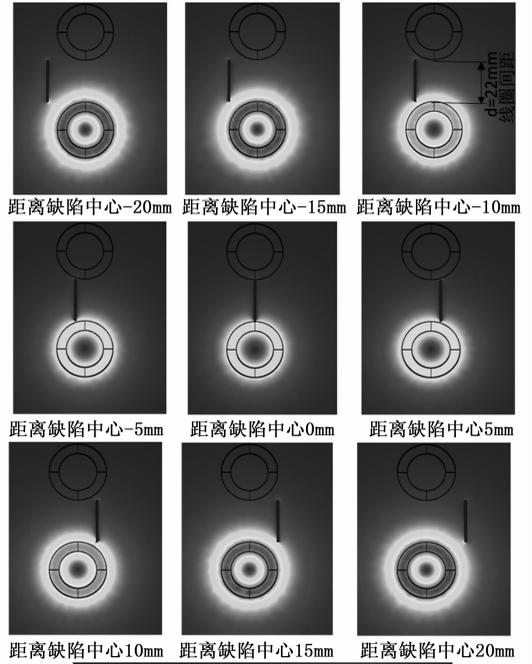


图 6 电流密度变化

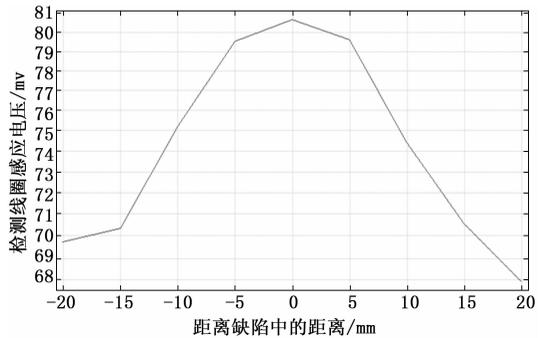


图 7 电压变化曲线

仿真模型中线圈匝数为 2 000，两个线圈之间的距离为 22 mm，传感器探头距离金属表面的高度为 0 mm，1 mm，3 mm 三组值，计算接收线圈的电压值，得到如图 8 所示的变化曲线。通过比较三组电压值可以得到接收线圈的感应电压随着提高距离的增加而减小。

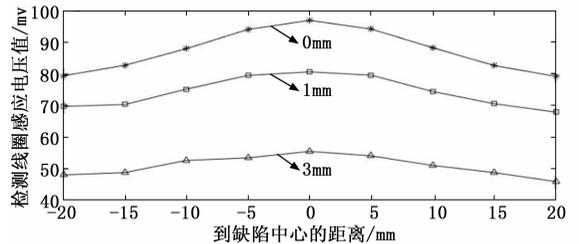


图 8 不同提高距离电压变化

3 检测系统的实现

3.1 ZYNQ 简介

ZYNQ 是 Xilinx 公司推出的一款可扩展处理器平台，其

特点是高性能、低功耗, 可同时进行软件编程、硬件编程、IO 编程。每片 ZYNQ 系列芯片都包含可编程逻辑 (Programmable Logic, PL) 和两个 ARM Cortex-A9 系列处理器系统 (Processor System, PS)^[14-16]。PS 端配有 AMBA 开放总线互联端口, 可以通过 AXI 片内高速总线互联和 PL 通信, 带宽速度高达 100 Gbps^[17]。

3.2 硬件设计

检测系统的硬件结构如图 9 所示, 主要包括: 1) 激励信号输出电路; 2) 检测信号采集电路; 3) 信号处理。激励信号输出电路用于提供正弦激励信号, 检测信号采集电路用于采集检测线圈感应到的电压, 信号处理部分的主要作用是提供 DDS 正弦激励信号以及对检测线圈接收到的信号进行阻抗分解处理, 并将处理后的信号传输到上位机。

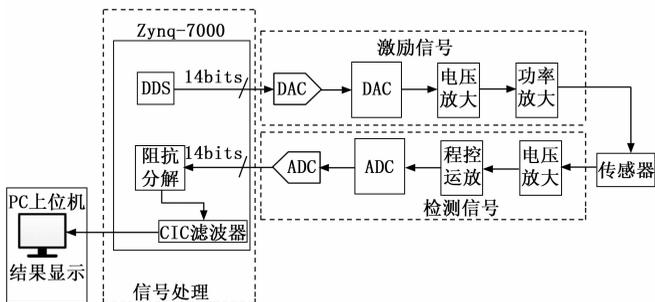


图 9 检测系统硬件结构

3.2.1 激励信号输出

检测系统的激励信号为正弦信号, 其结构如图 9 中激励信号部分电路所示, 由 Zynq-7020 提供正弦激励信号, 经数模转换将数字信号转换为模拟信号, 经过电压放大器和功率放大器后输出到激励线圈。

数模转换模块采用 ADI 公司的 AD9767 型 DAC 芯片, 该芯片是一款双通道、14 bit, 最高转换速率可达 125 MSPS 的高性能 DAC 芯片, 支持独立和主/从两种增益控制模式, 通过 GAINCTRL 引脚来选择, 本系统中将 GAINCTRL 引脚接地, 使用独立的增益控制模式。AD9767 输出信号为差分电流, 满量程范围可设置为 2~20 mA, 芯片本身自带 1.2 V 参考电压, 无需外部提供参考源。

AD9767 输出为电流型, 我们所需要的激励信号为电压信号, 因此需要将电流信号转化为电压信号, 如图 10 所示。AD9767 的每个通道有两个输出, I_{OUTA} 和 I_{OUTB} , 每个通道的输出电流由 14 bit 的并行接口控制, 实时输出的电流大小与数字编码值 DAC_CODE 及满量程输出 I_{OUT} 之间的关系为:

$$I_{OUTA1} = (DAC_CODE/16384) \times I_{OUT} \quad (8)$$

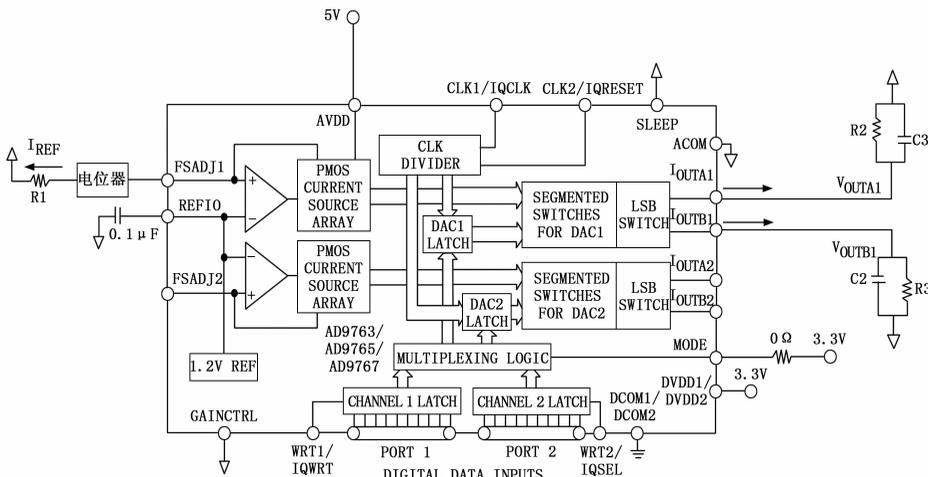


图 10 AD9767 单通道工作电路

$$I_{OUTB1} = ((16383 - DAC_CODE)/16384) \times I_{OUT} \quad (9)$$

由此可知, I_{OUTA1} 和 I_{OUTB1} 的差的绝对值恒等于 I_{OUT} 。 I_{OUT} 的值时参考电流 I_{REF} 的 32 倍, 参考电流 I_{REF} 由与引脚 FSADJ1 相连接的电阻来控制, 其关系为 $I_{REF} = 1.2 V / (R_1 + R_{电位器})$ 。由于 AD9767 为电流输出型芯片, 而我们需要的是电压信号, 因此需要将电流转化为电压, 电流与电压的对应关系如式 (10) 和式 (11) 所示:

$$V_{OUTA} = I_{OUTA1} \times R \quad (10)$$

$$V_{OUTB} = I_{OUTB1} \times R \quad (11)$$

$$V_{OUT} = V_{OUTA1} - V_{OUTB1} \quad (12)$$

电压放大部分采用 ADI 公司的 AD8066 作为前置放大电路, AD8066 是双放大器, 具有 5~24 V 宽电源电压范围, 其失调电压最大为 1.5 mV。AD8066 第一级运放完成电流到电压的转换, 并将差分信号转换为单端信号, 执行一定的放大, 第二级运放将放大后的信号经过抗混叠滤波输出到功率放大器, 抗混叠滤波电路如图 11 所示。图中抗混叠滤波器为低通滤波器, 其参数设置为 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 5.6 k\Omega$, $C_1 = C_2 = 22 pF$, 激励信号的频率最高为 1 MHz, 截止频率 $f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times R_1 \times C_1} = 1.29 MHz$, 放

大倍数 $A = 1 + \frac{R_3}{R_4} = 2$, 符合系统对于频率特性的要求。功率放大器选用 OPA544F, 该功率器件是一款高电压/大电流运算放大器, 具有相应速度快、线性度好、失真小等优点, 经过功率器件之后, 可以直接驱动激励线圈。

3.2.2 检测信号采集

检测信号采集电路结构如图 9 中信号检测部分所示, 检测线圈输入电压经过运放放大之后输出到程控运放器件, 由程控运放将电压调整到低于 ADC 模块参考电平, 经 ADC 模块采集后传输到 Zynq-7020 进行处理。

电压放大部分选用 ADI 公司的 AD8429, 该放大器为双电源供电, 其供电范围为 $\pm 4 \sim \pm 18 V$ 。AD8429 擅长测量小信号, 噪声输入可低至 $1n V/\sqrt{Hz}$, 是一款噪声超低的

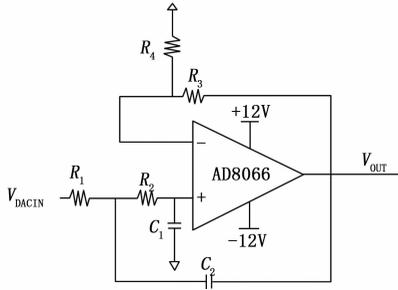


图 11 抗混叠滤波电路

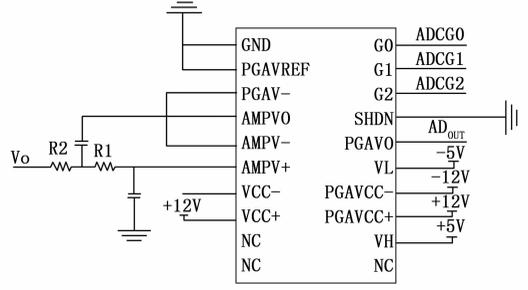


图 13 THS7001 原理图

仪表放大器。AD8429 具有高共模抑制比 (CMRR)，可以有效防止噪声破坏检测信号，且共模抑制比随着增益提高而提高。AD8429 原理如图 12 所示。其增益由电阻 R_c 控制，放大倍数 G 与 R_c 的关系为 $G = 1 + \frac{6 \text{ k}\Omega}{R_c}$ 。

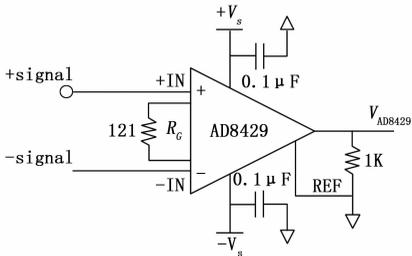


图 12 AD8429 原理图

可编程运算放大器选择 TI 公司的 THS7001，该放大器的带宽为 70 MHz，供电范围为 $\pm 4.5 \sim \pm 16 \text{ V}$ ，共有 8 级增益选项，可以提供 0.08~10.0 的增益范围，通过 G0~G2 进行编程控制，其对应关系如表 2 所示。

表 2 THS7001 增益控制

| G0 | G1 | G2 | 增益/dB | 增益/(V/V) |
|----|----|----|-------|----------|
| 0 | 0 | 0 | -22 | 0.08 |
| 0 | 0 | 1 | -16 | 0.16 |
| 0 | 1 | 0 | -10 | 0.32 |
| 0 | 1 | 1 | -4 | 0.63 |
| 1 | 0 | 0 | 2 | 1.26 |
| 1 | 0 | 1 | 8 | 2.52 |
| 1 | 1 | 0 | 14 | 5.01 |
| 1 | 1 | 1 | 20 | 10.0 |

THS7001 的原理如图 13 所示，前置放大器输出的电压信号 V_o 作为抗混叠滤波器的电压输入端，滤除高频噪声之后的信号输入到 PGA 端，经可编程增益处理后 AD_{OUT} 输出到 AD9240 电压输入端。

ADC 芯片采用 ADI 公司的 AD9240，该芯片是一款 14 bit，采样率为 10 msp/s 的模数转换器，采用 5 V 单电源进行供电，有溢出标志位，可以将信号输出到 ZYNQ 内部进行判断。AD9240 具有单端和差分直流或交流模拟信号输入方式，因为检测线圈输出的为交流正弦信号，因此 AD9240 采用单端交流工作模式，其电路如图 14 所示。

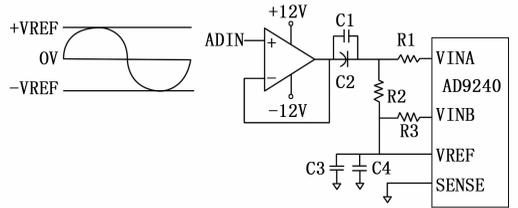


图 14 AD9240 单端交流工作模式

与传统的 A/D 芯片相比，AD9240 完全依靠时钟来控制采样，数据转换和输出，其时序如图 15 所示，在第一个时钟的上升沿进行采样和数据转换，第四个时钟的上升沿到来时才有数据输出，因此需要延时 3 个时钟周期才能读取 BIT14~BIT1 上的数据。

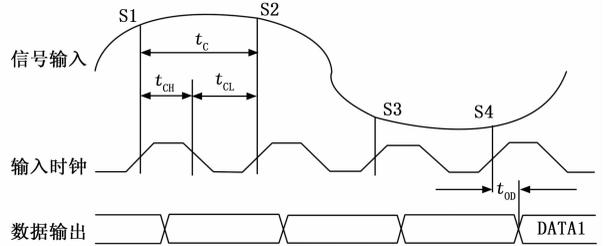


图 15 AD9240 时序图

3.2.3 信号处理

信号处理部分的主要作用是给传感器探头提供正弦激励信号，同时将 A/D 采集到的检测线圈的信号进行处理，并将处理后的结果传输到上位机。信号处理过程如图 16 所示。传感器所需的正弦激励信号由 ZYNQ 通过 DAC 模块来提供。其核心是调用 ZYNQ 的 ROM IP 核，在 ROM 核中加载包含正弦信号信息的 .coe 文件。ZYNQ 将正弦信号发送到 AD9767 的数据引脚，通过 DA 芯片把数字信号转换为模拟信号，经过放大滤波后加载到激励线圈。通过调整 ROM 核的时钟频率，可以改变正弦激励信号的频率。接收线圈中的模拟电压通过放大滤波后传输到 AD9240，A/D 芯片将模拟信号转换为数字信号，并将采集到的结果传输到 ZYNQ。通过 Vivado 设计自己所需要的 IP 核，在 IP 核中实现数字相敏检波算法。在 ZYNQ 中通过 DMA 将 PL 端处理后的数据传输到 PS 端。在 PS 端通过 UDP 协议将数据传输到上位机进行显示。

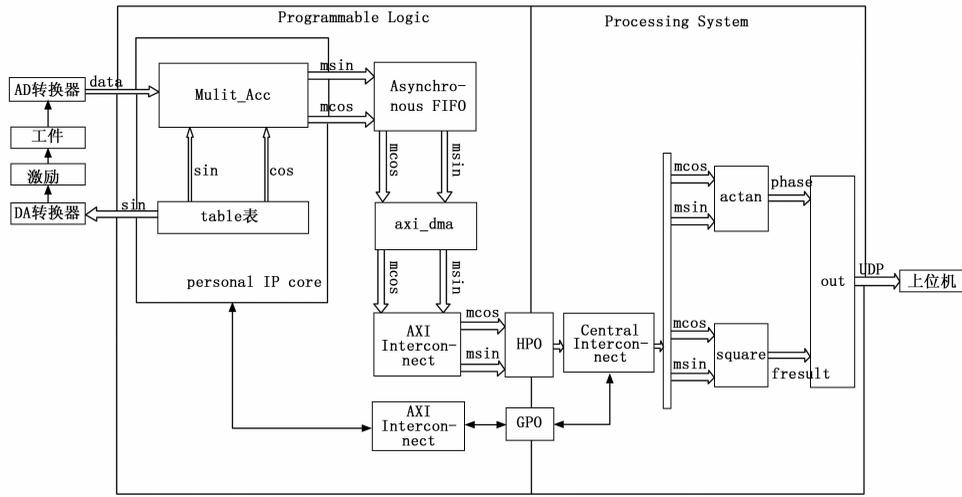


图 16 数据处理过程

目前大多数涡流检测仪器都是采用阻抗分解的方法来提取缺陷信号, 本系统采用数字相敏检波的方法得到检测信号的幅值和相位信息, 数字相敏检波的原理如图 17 所示。

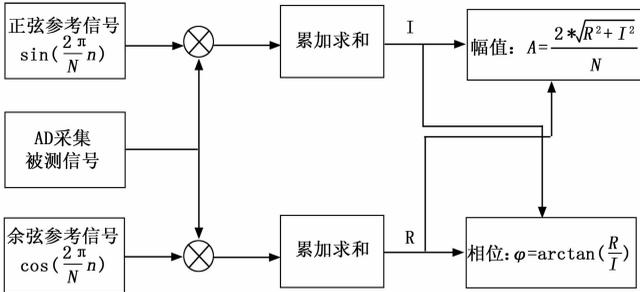


图 17 数字相敏检波

经 A/D 转换后采集到的检测线圈的信号如式 (13) 所示, 其中 $A\sin(\frac{2\pi}{N}n + \varphi)$ 是有效信号, A 为幅值, φ 为相位, $u(n)$ 是与被测信号不相关的随机噪声。

$$x(n) = A\sin\left(\frac{2\pi}{N}n + \varphi\right) + u(n) \quad (13)$$

同相参考信号为 $\sin\frac{2\pi}{N}n$, 正交参考信号为 $\cos\frac{2\pi}{N}n$, 参考信号 $s(n)$:

$$s(n) = \cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right) + j\sin\left(\frac{2\pi}{N}n\right) \quad (14)$$

其中: N 为采样点数, n 为 $0 \sim N-1$, 将式 (13) 与式 (14) 做互相关运算, 计算可得测量信号的实部和虚部, 如下所示:

$$U_{us} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N-1} x(n)s(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N-1} A\sin\left(\frac{2\pi}{N}n + \varphi\right)s(n) + \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N-1} u(n)s(n) = \frac{A}{2}N(\sin\varphi + j\cos\varphi) + U_{us} \quad (15)$$

随机噪声 $u(n)$ 与被测信号不相关, 所以 U_{us} 的值为 0,

将被测信号的实部与虚部进行反三角运算得到信号的相位, 进行开方运算得到幅值。

$$A = \frac{2}{N} \sqrt{R^2 + I^2} \quad (16)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{R}{I}\right) \quad (17)$$

本检测系统为变频系统, 激励信号的频率变化范围为 1 kHz ~ 1 MHz, 检测信号采集电路采样率是激励信号频率的 10 倍。

4 实验验证

经过前期对传感器探头的仿真和对电路的测试, 结合待测样品搭建实验平台, 实物连接如图 18 所示, 主要包括三维扫描台,

互感式探头, 试件实物, 上位机和数据采集系统。传感器探头采用直径为 0.1 mm 的铜线进行绕制, 探头结构为差分式, 与互感线圈相比采用差分线圈两个检测线圈形成互补, 检测效果更加理想, 线圈结构如图 19 所示, 中间线圈为激励线圈, 两侧线圈为检测线圈, 由于线圈尺寸较小在 3 个线圈中间都缠有铁氧体磁芯, 提高线圈的聚磁能力, 待检测金属为铝 6A02, 在金属板上有人工制造的缺陷。

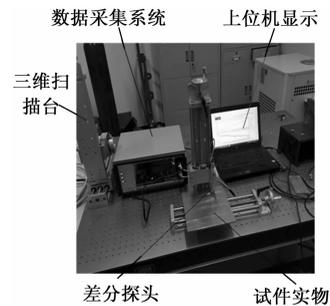


图 18 实物连接图

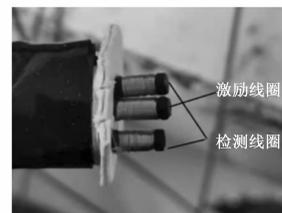


图 19 差分探头

控制金属板从传感器探头下扫过, 该自动扫描台最大扫描速度可达 100 mm/s, 行程长度为 200 mm, 分辨率为 0.2 μm , 为扫描小缺陷提供了良好的空间精度。数据如图 20 所示。

图 20 为差分探头扫过不同宽度缺陷的检测结果, 图中纵坐标为检测线圈电压值, 横坐标为 A/D 芯片的采样点数。

(下转第 151 页)