

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211243

基于FPGA的金属异物检测系统设计

彭浩杰 李丕丁

(上海理工大学健康科学与工程学院 上海 200093)

摘要: 针对现有检测设备在产品效应影响下灵敏度低、误报率高等问题,设计研制了基于FPGA的金属异物检测系统。文章分析了平衡线圈传感器的原理,提出平衡补偿算法实现传感器自动平衡,使用高频激励对金属信号进行调制,在FPGA中实现锁定放大器来对接收信号进行解调,提高了信噪比。采用互相关算法对传感器输出信号进行处理,拟合产品学习数据得到产品的特征相位,分辨产品信号和金属信号。试验结果表明系统具有较高的灵敏度,在强产品效应下能有效检测金属异物。

关键词: 金属检测;平衡线圈;FPGA;产品效应

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design of digital metal detection system based on FPGA

Peng Haojie Li Piding

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A metal contaminants detection system based on FPGA is proposed. The system solves the problem of low sensitivity and high false positive rate under the influence of product effects. In this paper, the principle of the balanced coil sensor is analyzed, and a balanced compensation algorithm is proposed to achieve the automatic balancing of the sensor. The metal signal is modulated by high-frequency excitation, and a lock amplifier is implemented in the FPGA to demodulate the received signal, which improves the signal-to-noise ratio. The output signal of the sensor is processed by cross-correlation algorithm, the characteristic phase of the product is obtained by fitting the product learning data, and the product signal and metal signal are distinguished. The test results show that the system has high sensitivity and can detect metal contaminants effectively under strong product effects.

Keywords: metal detection; balance coil; FPGA; product effects

0 引言

金属异物检测在安防、纺织、军事、食品、药品等领域应用非常广泛,如机场车站的安检门、纺织行业的检针机、军事领域的探雷器、食品行业的金检机等。常见的金属异物检测方法包括X射线检测和电磁检测两类^[1]。

在检测原理方面,熊秀芳等^[2]等提出了基于电阻抗成像的食品异物检测方法。邓阿琴等^[3]提出了基于改进卷积神经网络的食品异物自动识别方法。虞子雷等^[4]设计了微流控谐振芯片应用于金属颗粒检测。周若臣等^[5]设计了双频电磁金属检测系统。另外还有大量学者研究了单频电磁检测技术^[6-8]。由于食品加工过程中破损设备脱落的金属碎屑是食品异物的主要来源,以及电磁检测技术具有灵敏度高、无辐射、低成本等优势,食品行业应用电磁检测技术较为广泛^[9]。

在电磁检测技术方面,Svatos等^[10]提出一种基于sinc多调谐信号的检测方法,通过多个检测频率得到更多的信息,能够更准确的识别检测对象。Najafi等^[11]针对地雷探测应用,提出了一种使用多级啁啾(multilevel chirp,MLC)信号的新型感应平衡式金属探测器,增加了检测深度,同时还能区分金属种类。Haimovich等^[12]开发了一种通过识别检测信号的时域波形来提高强产品效应下检测灵敏度的算法。

在检测设备方面,国外的金属检测设备比较先进,日本安立公司的设备采用双频检测技术,同时提高了导磁性金属和非磁性金属的检测精度;英国梅特勒-托利多公司研发了多频同步技术,增强了金属检测设备对产品效应的抑制能力;美国赛默飞世尔公司的设备提供线圈实时自动平衡功能。目前国内的检测设备主要采用单频调谐技术,使用全通滤波器实现双相位锁定放大,线圈平衡需要进行机械

收稿日期:2022-09-01

调整,温度稳定性和长期稳定性较差;软件算法主要对幅度信息进行处理,对产品效应的抑制能力较差,整体性能和国外有很大差距。

鉴于国内检测设备存在的缺陷,研究提出基于FPGA的金属异物检测系统,采用数字方法进行信号处理,同时设计了软件算法来准确判别金属信号。

1 系统总体方案

传统的金属检测设备均采用模拟电路进行信号处理,模拟元器件对温度、电磁干扰比较敏感,导致系统在工业环境中长期运行的效果不佳。因此本系统除了必要的信号放大电路之外,解调、滤波等其他部分均在FPGA和软件中实现。数据处理算法方面,采用区域判决算法和产品信号抑制算法充分利用解调输出的两路信息,在强产品效应影响下也达到较高的检测灵敏度。金属异物检测系统的总体方案如图1所示,包括平衡线圈传感器、参考信号源、数字锁定放大器、平衡补偿模块、上位机等部分。系统的主控芯片为xc7z030ffg676系列FPGA,D/A和A/D转换器位数均为14位。激励传感器的方波信号和参考信号同步保证相位锁定。FPGA采集传感器的输出信号,经过锁定放大器正交解调后得到检测信号的同相(in-phase,I)分量和正交(quadrature,Q)分量^[13],并由串口实时传输至上位机。金属异物通过输送带穿过传感器时会打破两个接收线圈的平衡状态,使传感器输出信号的幅度和相位发生变化,经过解调表现为I、Q信号幅度的变化,通过系统软件算法处理和分析后完成金属异物的检测。

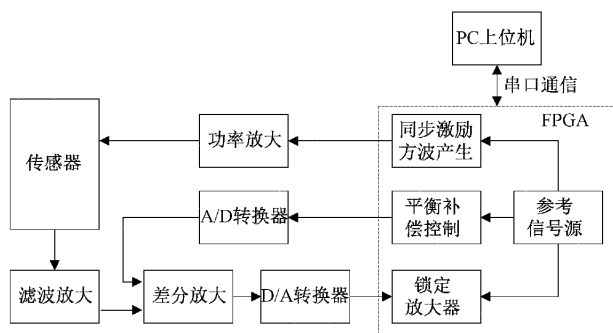


图1 金属异物检测系统总体方案

2 系统检测方案设计

2.1 平衡线圈传感器

平衡线圈传感器由三个完全相同的单匝矩形线圈组成,它们同轴、等间距且平行的绕制在骨架上,位于中间的线圈是发射线圈,两侧对称的线圈为接收线圈,如图2所示。两个接收线圈采用反向并联的连接方式,抵消变压器效应产生的感应电动势,形成接收平衡。通常情况下两个接收线圈存在一定程度差异,造成无金属时传感器有激励感应信号输出,需要采取平衡补偿措施。

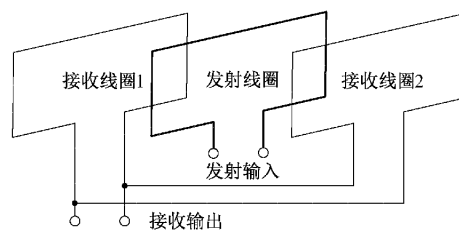


图2 平衡线圈传感器

金属物体在传感器的交变磁场中由于磁效应和涡流效应的影响将产生一个二次磁场抵消线圈的原磁场,并在接收线圈形成感应电动势,使输出信号的幅度和相位发生变化。这一过程本质上是金属物质中产生涡流损耗 P_{loss} ,其计算公式如下:

$$P_{loss} = \rho f^2 B_m V \tag{1}$$

其中, ρ 为金属的电阻率, f 为激励频率, B_m 为原磁场的磁感应强度峰值, V 为金属的体积。对于非磁性金属,涡流损耗随着 f 增大而增大,接收线圈输出电压相应增大。对于导磁性金属,磁效应起主导作用但方向与涡流效应产生的磁场相反,线圈输出电压随着 f 增大而减小。因此低频激励信号适合检测导磁性金属物,高频激励信号适合检测非磁性金属。

2.2 数字锁定放大器设计

锁定放大器利用互相关原理来测量微弱低频信号,具有结构简单、噪声抑制能力强的特点。模拟锁定放大器使用乘法器(或模拟开关)以及积分器组成解调电路,从而测量出非常微弱的信号。乘法器和模拟开关都存在非线性失真,温漂大,低通滤波器性能受模拟器件影响,使得系统受到很大的限制。数字锁定放大器^[14]通过数学运算实现信号的解调,克服了上述缺陷,其性能取决于模数转换器的信噪比以及数学运算的精度。

电涡流传感器输出信号经过滤波放大和平衡补偿后由A/D转换器数字化,然后传输到FPGA中由数字锁定放大器解调。如图3所示,数字锁定放大器包含两个信号处理通道,分别使用同相参考信号和正交参考信号与输入信号进行混频,然后经过低通滤波后得到I、Q分量。

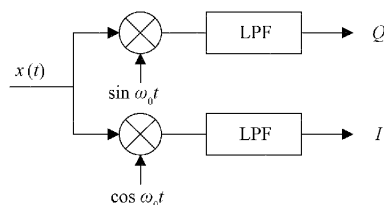


图3 锁定放大器结构框图

数字锁定放大器两个通道除了参考信号相差90°外,其余部分完全相同。以同相通道为例进行分析,平衡线圈式电涡流传感器的输出噪声主要包括无金属时的激励感应信号、激励信号的高次谐波。假设锁定放大器的参考信号频率为 ω_0 ,幅度 $V_r = 1$;输入信号 $x(t)$ 的幅度为 V_s ,与参考

信号的相位差为 θ ; 无金属感应信号 $x_b(t)$ 的幅度为 V_b , 相位差为 β ; 谐波噪声频率为 ω_n , 幅度为 V_n , 初相位为 α , 即:

$$x(t) = V_s \cos(\omega_0 t + \theta) + V_b \cos(\omega_0 t + \beta) + V_n \cos(\omega_n t + \alpha)$$

$$r(t) = \cos \omega_0 t \tag{2}$$

混频器将 $x(t)$ 和 $r(t)$ 相乘, 结果为:

$$u_p(t) = x(t)r(t) = 0.5V_s \cos \theta + 0.5V_s \cos(2\omega_0 t + \theta) + 0.5V_b \cos \beta + 0.5V_b \cos(2\omega_0 t + \beta) + 0.5V_n \cos[(\omega_n + \omega_0)t + \alpha] + 0.5V_n \cos[(\omega_n - \omega_0)t + \alpha] \tag{3}$$

混频信号经过 LPF 后, 上式中的 3 个和频项被滤除, 无金属感应信号在输出中表现为直流偏移, 最后一项中频率 ω_n 满足 $|\omega_n - \omega_0| < B_L$ (LPF 的等效噪声带宽) 的谐波也会被解调到直流。由于 LPF 的等效噪声带宽远小于调制频率, 因此传感器输出噪声中的高次谐波对信噪比基本没有影响, LPF 后的信号 $u_o(t)$ 为:

$$u_o(t) = 0.5V_s \cos \theta + 0.5V_b \cos \beta \tag{4}$$

锁定放大器的改善信噪比主要由低通滤波器实现, 低通滤波器的通频带越窄, 抑制噪声能力越强。混频器输出速率较高, 实现较窄通频带的 FIR 类型 LPF 带需要使用大量 DSP 单元。级联积分梳状 (cascaded integrator comb, CIC) 滤波器可以仅通过加法器和延迟单元实现, 能够高效的实现抽取和内插, 因此采用 CIC 抽取滤波器作为混频之后的低通滤波器。CIC 抽取滤波器的结构框图如图 4 所示, N 级 CIC 系统主要由 N 级积分器、N 级梳状器以及倍数为 R 的抽取器构成。

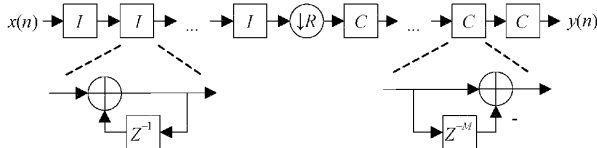


图 4 CIC 抽取滤波器结构框图

N 级 CIC 系统的传递函数如下:

$$H(z) = \frac{(1 - z^{-R \cdot M})^N}{(1 - z^{-1})^N} \tag{5}$$

其中, R 是抽取率, M 是梳状器的差分延迟。

CIC 抽取器采用 XILINX 的 CIC 核。CIC 的级数 N 和差分延迟 M 分别配置为 4 和 1。由于传送带速度不同, 锁定放大器输出信号的带宽不同, 系统中可由抽取率 R 来动态配置低通滤波器的截止频率, R 取值范围为 32 ~ 1 024。当抽取率 $R = 32$ 时, CIC 抽取滤波器频率响应如图 5 所示。

2.3 平衡补偿模块

传感器无金属时输出激励感应信号可能会占据前置放大器的绝大部分动态范围, 降低系统的增益, 因此需要对感应信号进行补偿抑制。由式(4)可知, 感应信号经过锁定放大器正交解调后表现为直流偏置, 因此可以表示为:

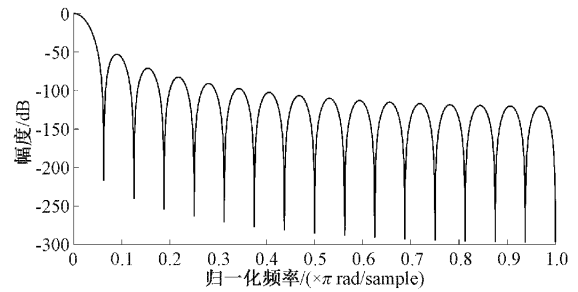


图 5 CIC 抽取滤波器幅频响应

$$V_{ib} = 0.5V_b \cos \beta$$

$$V_{qb} = 0.5V_b \sin \beta \tag{6}$$

补偿系统中除了抵消器外其他环节都以数字方式实现, 因此时间变量用取样序列号 k 来表示。无金属时的感应信号 $x_b(k)$ 可以表示为:

$$x_b(k) = V_b \cos(\omega_0 k + \beta) = V_b \cos \omega_0 k \cos \beta - V_b \sin \omega_0 k \sin \beta \tag{7}$$

由式(7), 补偿信号可以通过两路相互正交的参考信号分别乘以增益系数 h_i 和 h_q 后相加得到^[15]。

平衡补偿的原理框图如图 6 所示, 输入信号和经过 D/A 转换的补偿信号经过抵消器差分放大后输入锁定放大器, 线圈的平衡误差反映为锁定放大器输出信号的直流偏置, 平衡补偿控制算法根据此直流偏置对补偿信号进行负反馈控制, 实现平衡补偿。

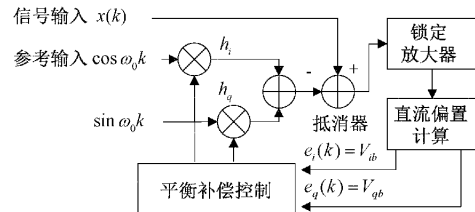


图 6 平衡补偿原理框图

由于感应信号幅度随温度缓慢变化, 输出直流偏置表现为低频缓变信号, 因此通过对误差进行积分来调整增益系数进而调整补偿信号的相位和幅度。

增益系数更新公式为:

$$h_i(k+1) = h_i(k) + \mu e_i(k)$$

$$h_q(k+1) = h_q(k) + \mu e_q(k) \tag{8}$$

当感应信号和补偿信号基本抵消时, 锁定放大输出信号的直流偏置 $e_i(k)$ 和 $e_q(k)$ 近似为零, 积分达到稳定状态, 实现平衡补偿。

3 金属异物检测算法设计

常规检测方法通过判断信号的幅度是否超过某个阈值来确定有无金属异物, 无法有效区分产品信号和金属信号。本系统基于产品的时域波形特征和相位特征提出产品信号抑制算法和区域检测算法, 强产品效应下的检测灵敏度有了较大的提高。检测算法的流程如图 7 所示。

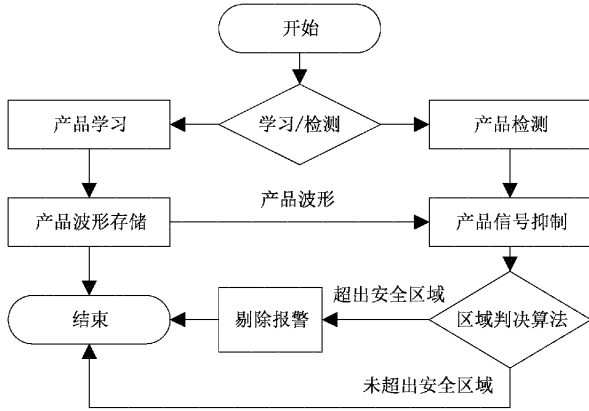


图7 检测算法流程图

3.1 区域判决算法

FPGA通过串口输出解调数据的速率为500 Hz,单件产品通过传感器窗口的时间约为1.4 s,因此检测过程中每次采集700点数据。每个采样点包含I通道电压 V_i 和Q通道电压 V_q ,定义每次采集的数据为 \mathbf{X} ,其中序号为 k 的采样点为 $x_k = [V_i, V_q]$ 。

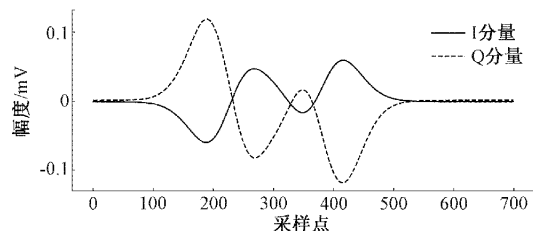
图8(a)和(b)分别是干净产品信号和被金属异物污染的产品信号,从幅度上很难对两者进行区分。图8(c)是将每个采样点 x_k 绘制到二维平面形成的散点图,从图中可以看出干净产品信号分布在一条直线附近,即产品信号具有明显的特征相位。对干净产品数据进行最小二乘拟合得到直线 $y = c_1x + c_0$ 。计算出产品特征相位为:

$$\theta_p = \arctan(c_1) \quad (9)$$

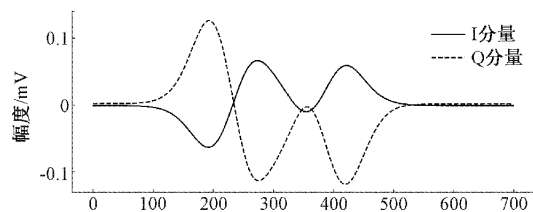
获得特征相位后根据相位对学习数据进行坐标旋转,使数据点位于I轴附近。定义旋转矩阵为:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos\theta_p & -\sin\theta_p \\ \sin\theta_p & \cos\theta_p \end{pmatrix} \quad (10)$$

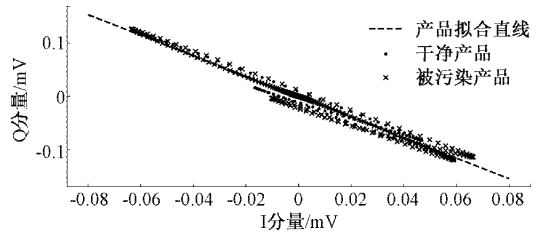
则坐标旋转后的数据为 $\mathbf{X}_r = \mathbf{XT}$ 。坐标旋转后的干净产品数据和被污染的产品数据如图9所示。分别求坐标



(a) 酸豇豆产品信号



(b) 酸豇豆+φ=2.0 mm Fe信号



(c) 酸豇豆数据拟合图

图8 干净产品和被污染产品的检测信号

旋转后数据I、Q分量的最大值,得到刚好包围产品学习数据的水平矩形框,如图9中的虚线所示。由于产品信号存在一定程度的波动,把此区域适当扩大后作为实际的检测区域,如图9中的实线框所示。检测过程中,使用产品学习得到特征相位对采集数据进行坐标旋转。如果金属信号的特征相位和产品信号有明显差异并且幅度足够大,就会超出安全区域,判决为金属存在。

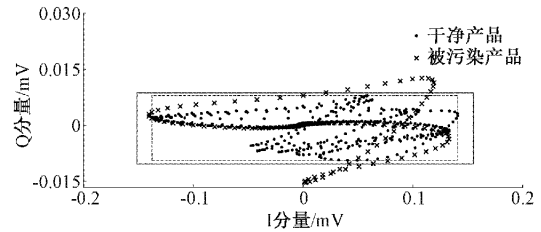


图9 坐标旋转后的检测信号及矩形检测区域

3.2 产品信号抑制算法

产品效应较强时,区域判决算法所确定的矩形区域较大,检测灵敏度低。在学习产品相位特征的同时存储产品的时域波形数据,定义存储的产品时域波形学习数据为 \mathbf{S} ,检测过程中将采集数据 \mathbf{X} 与学习数据 \mathbf{S} 相减,可消除采集数据中的大部分产品信号。

采集数据和学习数据必须对齐才能达到较好的抑制效果,使用光电开关触发数据采集能确保每次采集的数据基本对齐。定义采集数据和学习数据的I分量分别为 \mathbf{a} 和 \mathbf{v} ,长度均为 N 。 \mathbf{a} 和 \mathbf{v} 互相关运算后得到总长度为 $2N-1$ 的序列 \mathbf{R} ,该序列的第 k 个分量:

$$R_k = \sum_{j=0}^{N-1} v_j a_{j+k+N}, k = 0, 1, 2, \dots, 2N-2 \quad (11)$$

其中,超出序列 \mathbf{a} 范围的数据取0。

\mathbf{a} 和 \mathbf{v} 对齐前的信号如图10(a)所示,两个信号存在一定程度的延迟。互相关运算结果如图10(b)所示,可以看到非常明显的峰值点。根据峰值点位置确定 \mathbf{a} 和 \mathbf{v} 之前的延迟为 D , \mathbf{a} 和 \mathbf{v} 对齐后的信号如图10(c)所示。

根据延迟量 D 将采集数据 \mathbf{X} 对齐到学习数据 \mathbf{S} ,定义对齐后的采集数据为 \mathbf{X}_l 。然后使用学习数据抵消采集数据中的产品信号,定义产品信号抑制过后的数据为:

$$\mathbf{X}_s = \mathbf{X}_l - \mathbf{S} \quad (12)$$

产品效应抑制后的信号如图11所示,图中分别显示了

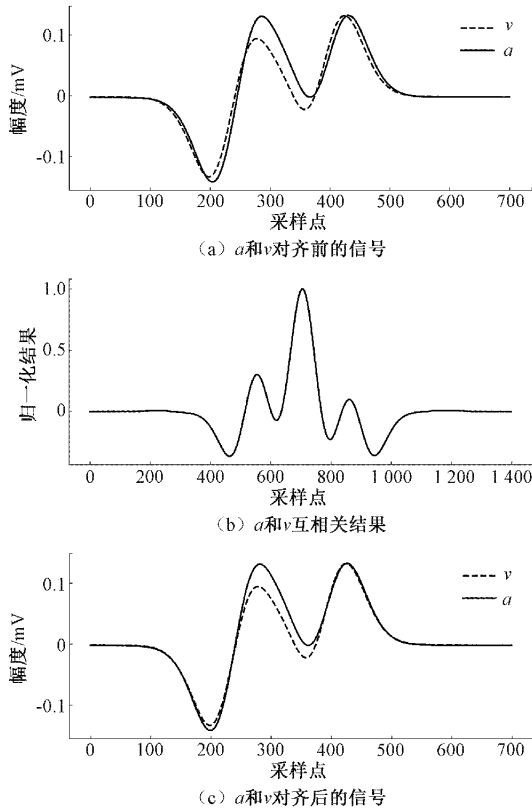


图 10 互相关法对齐学习数据和采集数据

干净产品和被污染产品的散点图,和图 8(c)相比,产品信号的幅度明显减小。同时可以看出产品信号抑制算法并没有破坏数据的相位特征,干净产品的数据依然分布在一条直线附近,因此可以继续使用区域判决算法处理产品效应抑制后的数据。区域判决算法得出的检测矩形如图 12 所示,与图 9 相比检测矩形区域的面积大幅减小,提高了检测的灵敏度。

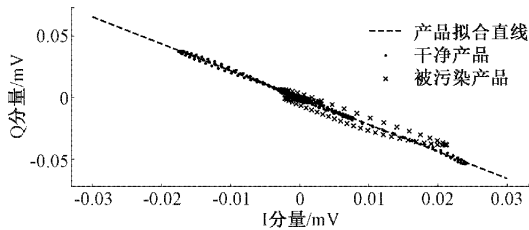


图 11 产品信号抑制后的检测信号

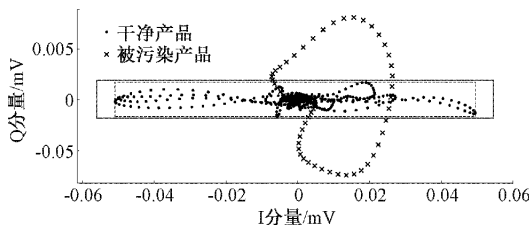


图 12 产品信号抑制后确定的矩形检测区域

4 系统试验分析

根据上述系统方案完成硬件电路设计,结合上海晶默电子科技有限公司的设备进行试验。传感器接发射线圈和收线圈的尺寸为 450 mm×200 mm(宽度×高度),激励信号频率设置为 300 kHz。测试样品放在输送带上匀速通过传感器,并在传感器前 40 cm 处放置反射式光电开关用于标记有效信号的开始位置,输送带速度为 24 m/min。测试过程中使用导轨来确保样品从传感器中轴线上(灵敏度最低的位置)通过。

试验用的金属测试卡封装了不同直径 316 不锈钢(Sus)颗粒、铁(Fe)颗粒以及不含铁元素的合金(No-Fe)颗粒,覆盖了食品加工过程常见的金属异物种类。使用金属测试卡分别在带产品和不带产品的情况下对系统的性能进行测试。

4.1 单独金属测试

单独金属测试反映在没有产品效应影响下系统的灵敏度,学习过程采集的是系统噪声。分别在输送带电机启动和关闭状态下测量系统噪声的大小,根据系统噪声来决定判决区域的大小。测试过程中采集不同材质、尺寸的金属测试卡通过检测系统的数据并计算信号的有效值。

使用检测信号和电机启动状态下的系统噪声的比值(S/N)来表示检测系统的灵敏度,以 I、Q 两路信号的 S/N 的最大值作为单项测试的 S/N,结果如表 1 所示。根据系统测试的经验,S/N 通常要大于 1.2 才能可靠的进行检测。由测试结果可知,电机启动状态下系统噪声会略微增加。在没有产品效应的情况下,系统能够可靠检测的 Fe、No-Fe、Sus 颗粒最小直径分别为 0.8、1.0、2.0 mm。

表 1 不带产品测试结果

测试项目	I 有效值/mV	Q 有效值/mV	S/N
空机-电机启动	0.15	0.12	—
空机-电机关闭	0.10	0.10	—
Φ0.6 mm Fe	0.15	0.12	1.0
Φ0.8 mm Fe	0.25	0.20	1.7
Φ1.5 mm Fe	0.70	0.85	7.1
Φ2.0 mm Fe	1.40	1.90	15.8
Φ2.5 mm Fe	2.30	3.60	30.0
Φ1.0 mm No-Fe	0.20	0.12	1.3
Φ1.5 mm No-Fe	0.35	0.12	2.3
Φ2.0 mm No-Fe	1.50	0.50	10.0
Φ2.5 mm No-Fe	2.70	0.50	18.0
Φ3.0 mm No-Fe	4.90	1.20	32.7
Φ1.5 mm Sus	0.15	0.12	1.0
Φ2.0 mm Sus	0.30	0.30	2.5
Φ2.5 mm Sus	0.90	0.65	6.0
Φ3.0 mm Sus	2.20	1.20	14.7

4.2 带产品测试

测试过程中,首先采集产品单独通过检测系统的信号得到产品学习数据,然后采集产品和金属测试卡同时通过的数据。产品选择了两种泡菜:含盐量为4.1%的酸豇豆和含盐量2.2%的小米辣,以对比不同强度产品效应下系统的S/N。分别使用单独的区域判决算法和提出的产品效应抑制算法对数据进行处理,影响检测的噪声包括系统噪声和产品效应,测试结果如表2和3所示。

表2 单区域判决算法测试结果

测试项目	I有效值/	Q有效值/	S/N
	mV	mV	
泡豇豆-噪声信号	140.1	9.4	—
Φ2.0 mm Fe+泡豇豆	140.1	10.3	1.1
Φ3.0 mm Fe+泡豇豆	140.1	12.6	1.3
Φ2.0 mm No-Fe+泡豇豆	136.6	10.1	1.1
Φ3.0 mm No-Fe+泡豇豆	137.2	11.4	1.2
Φ2.0 mm Sus+泡豇豆	136.1	9.5	1.0
Φ3.0 mm Sus+泡豇豆	141.3	10.1	1.1
小米辣-噪声信号	56.6	1.0	—
Φ2.0 mm Fe+小米辣	50.7	4.1	4.1
Φ3.0 mm Fe+小米辣	41.5	9.7	9.7
Φ2.0 mm No-Fe+小米辣	53.2	3.9	3.9
Φ3.0 mm No-Fe+小米辣	50.9	9.8	9.8
Φ2.0 mm Sus+小米辣	52.7	0.9	0.9
Φ3.0 mm Sus+小米辣	53.0	3.5	3.5

表3 产品信号抑制算法测试结果

测试项目	I有效值/	Q有效值/	S/N
	mV	mV	
泡豇豆-噪声信号	15.5	0.6	—
Φ2.0 mm Fe+泡豇豆	11.8	1.6	2.7
Φ3.0 mm Fe+泡豇豆	16.9	3.3	5.5
Φ2.0 mm No-Fe+泡豇豆	15.1	1.3	2.2
Φ3.0 mm No-Fe+泡豇豆	20.2	2.4	5
Φ2.0 mm Sus+泡豇豆	16.7	0.9	1.5
Φ3.0 mm Sus+泡豇豆	18.7	2.1	3.5
小米辣-噪声信号	6.6	0.3	—
Φ2.0 mm Fe+小米辣	11.8	1.8	6
Φ3.0 mm Fe+小米辣	10.0	4.2	14
Φ2.0 mm No-Fe+小米辣	7.6	1.6	5.3
Φ3.0 mm No-Fe+小米辣	7.2	4.2	14
Φ2.0 mm Sus+小米辣	7.5	1.2	4
Φ3.0 mm Sus+小米辣	7.5	1.8	6

从测试结果综合来看,酸豇豆由于含盐量更高,产品效应也更强。同一尺寸的Fe、No-Fe、Sus的S/N依次减小,

同种金属随着尺寸的减小S/N也相应减小,这与不带产品测试的结果一致。另外,相同材质相同尺寸的金属,在含盐量越高也就是产品效应越强的产品中,其S/N越小,检测难度越大。

对比表2和3可以看出产品信号抑制算法消除了绝大部分产品信号,I、Q两路的产品信号均大幅下降。与单独的区域判决算法相比,产品抑制算法对检测灵敏度的提升明显,在泡豇豆中,S/N平均提高了约2.8倍;在小米辣中,S/N平均提高了约2倍。

5 结 论

本文针对国内金属检测设备灵敏度低、误报率高的现状,设计了基于FPGA的金属异物检测系统。系统包括平衡线圈传感器、参考信号源、数字锁定放大器、平衡补偿模块、上位机等部分,实现了对金属异物信号的高精度检测。通过产品学习得到产品的波形数据和特征相位,产品信号抑制算法利用产品波形数据大幅降低了采集数据中的产品信号,区域判决算法根据产品特征相位构造检测区域,提高了对产品信号和金属信号的分辨能力。试验结果证明,在没有产品效应的情况下,系统能够可靠检测的Fe、No-Fe、Sus颗粒的最小直径分别为0.8、1.0、2.0 mm。检测产品效应较强的酸菜等产品时,产品信号抑制算法与单独的区域判决算法相比,检测灵敏度明显提高,具有较大的工程应用价值。

参考文献

- [1] 靳欣欣,潘立刚,王冬.食品中异物种类来源及检测技术评述[J].食品安全质量检测学报,2016,7(7):2803-2808.
- [2] 熊秀芳,杨光,张炜,等.基于电阻抗成像的食品中异物检测仿真研究[J].中国科技论文,2016,11(2):224-230.
- [3] 邓阿琴,胡平霞.基于改进卷积神经网络的食品异物自动识别方法[J].食品与机械,2022,38(7):133-137.
- [4] 虞子雷,张洪朋,曾霖,等.基于微流控谐振式芯片的金属颗粒检测[J].电子测量与仪器学报,2017,31(10):1627-1632.
- [5] 周若臣,洪然,孔笑荷.镀铝膜包装的食品金属检测技术[J].计量与测试技术,2021,48(2):46-50,54.
- [6] 任稷松.基于DSP的高精度金属探测器研究[D].济南:山东大学,2012.
- [7] 白树忠,董春阳.平衡线圈式高精度金属检测算法[J].山东大学学报(工学版),2017,47(4):83-88,95.
- [8] 邱松.感应平衡式金属检测系统设计及实现[D].成都:电子科技大学,2019.
- [9] 田昨非.针对涡流效应的信号检测及其在金属检测中

- 的应用[D]. 成都:电子科技大学, 2019.
- [10] SVATOS J, VEDRAL J, POSPISIL T. Advanced instrumentation for polyharmonic metal detectors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(5): 1-4.
- [11] NAJAFI E, HASANZADEH S, KHERADMANDAN K. Induction balance metal detector using multi-level chirp signal[C]. 2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), Tehran, Iran, 2022: 479-483.
- [12] HAIMOVICH H, MARELLI D, SARLINGA D. A signal processing method for metal detection sensitivity improvement in balance-coil metal detectors for food products[C]. 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Buenos Aires, Argentina, 2020: 645-651.
- [13] 吴云树, 汪浩. 基于 FPGA 的数字下变频技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(11): 113-118.
- [14] 李昌, 周松斌. 基于数字锁相放大器的电涡流位移传感器[J]. 电子器件, 2022, 45(2): 445-449.
- [15] 郭太平, 裘进浩, 程军, 等. 高频电磁涡流检测系统及实验研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 4-9,13.

作者简介

彭浩杰, 硕士研究生, 主要研究方向为微弱信号检测, FPGA 数字信号处理。

E-mail: haojie_peng@163.com

李丕丁, 博士, 讲师, 主要研究方向为生物医学信号处理, 医用电子仪器。

E-mail: Lipiding_usst@qq.com