

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106854

# 电解质溶液中微小金属检测算法实现

余程龙 李丕丁

(上海理工大学 医疗器械与食品学院 上海 200093)

**摘要:** 能够准确检测出电解质溶液中存在的金属颗粒,对于食品、药品安全具有重要意义。在食品、药品领域,金属检测技术主要基于电磁感应原理。应用电磁法进行金属检测时,自由导电离子在金属检测系统下的输出与金属颗粒类似。当金属颗粒处于电解质溶液中时,自由导电离子会对金属颗粒的检测产生巨大的影响。本文针对处于电解质溶液中微小金属颗粒的检测问题进行研究,采用平衡式双线圈金属检测结构,研制了一种用于食品、药品生产过程中微小金属颗粒检测的金属检测系统,并利用该系统进行了电解质溶液环境下标准金属试样检测实验。通过实验发现了:“在电解质溶液与金属颗粒同时通过检测系统后输出信号的相位分量波形中,金属颗粒对相位分量波形的影响明显且稳定,但该影响的强弱随金属颗粒尺寸的减小而逐渐变小,并与金属颗粒在电解质溶液中的位置有关;依据相位分量波形的变化,存在由电解质溶液中区分出金属颗粒的可能性”。由于相位分量波形形状相对复杂,且微小体积金属的影响较弱,因此采用了曲线长度积分法和双侧累计面积法等实时检测算法对相位分量中金属颗粒的影响进行检测,并在上述金属检测系统上实现。

**关键词:** 金属检测;电解质溶液;曲线长度积分法;双侧累计面积积分法

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

## Implementation of algorithm for detection of tiny metal in electrolyte solution

Yu Chenglong Li Piding

(School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The ability to accurately detect metal particles in the electrolyte solution is of great significance to food and drug safety. In the field of food and medicine, metal detection technology is mainly based on the principle of electromagnetic induction. When the electromagnetic method is used for metal detection, the output of free conductive ions under the metal detection system is similar to that of metal particles. When metal particles are in an electrolyte solution, free conductive ions will have a huge impact on the detection of metal particles. This paper studies the detection of tiny metal particles in the electrolyte solution. Using a balanced double-coil metal detection structure, a metal detection system for the detection of tiny metal particles in the production of food and medicine is developed, and the system is used. The standard metal sample detection experiment under the electrolyte solution environment was carried out. Through experiments, it is found that: "In the phase component waveform of the output signal after the electrolyte solution and metal particles pass through the detection system at the same time, the effect of the metal particles on the phase component waveform is obvious and stable, but the strength of the effect decreases with the size of the metal particles. The gradual decrease is related to the position of the metal particles in the electrolyte solution. According to the change of the phase component waveform, there is the possibility of distinguishing the metal particles from the electrolyte solution". Due to the relatively complex waveform shape of the phase component and the weaker influence of small volume metals, real-time detection algorithms such as the curve length integral method and the double-sided cumulative area method are used to detect the influence of metal particles in the phase component, and the above-mentioned metal detection is realized on the system.

**Keywords:** metal detection; electrolyte solution; curve length integral method; double-sided cumulative area integral method

## 0 引言

金属检测技术因其功能的实用性和应用范围的广泛性

而备受国内外科研人员的重视,相关技术日新月异,相关行业蓬勃发展。

在检测原理方面,Siddiqui<sup>[1]</sup>提出了一种基于高色散洛

收稿日期:2021-06-03

伦兹谐振器的灵敏金属检测新方法,该谐振器具有明显的相位特征。并证实了在安全、食品和其他金属检测应用中,高度分散的微带金属传感器由于其紧凑型、高灵敏度和微波电路可集成性,可以替代传统的基于线圈的传感器。南京理工大学的于畅畅等<sup>[2]</sup>将毫米波成像技术应用于金属探测领域,可以检测出浅埋于地下的金属,主要用于地雷探测、墓地及地道探测和道路检测等方面。

在检测技术方面,Svato 等<sup>[3]</sup>指出使用多个接收传感器,形成传感器阵列,可以增加空间分辨率,提高金属检测系统的灵敏度。Svatos 等<sup>[4]</sup>提出一种使用 sinc 多谐激励信号的方式,通过多频方式提高系统对于不同金属的分辨能力。

在信号处理算法方面,山东大学白树忠等<sup>[5]</sup>提出了基于幅值和相位的双通道数字检测算法,采用自适应数字滤波器实现信号滤波,并利用产品学习和聚类实现金属信号和产品效应信号的分离,以提高金属检测的准确率。合肥工业大学的徐从裕等<sup>[6]</sup>针对使用幅值探测的金属检测器容易出现误报的问题,提出了一种基于相位识别的方法,通过分析激励线圈与接收线圈的相位差值来判断是否有金属的存在。

根据实际调研发现,电解质溶液下金属检测的灵敏度在食品、药品用金属检器行业属于重要指标之一<sup>[7]</sup>。然而,目前为止尚未有产品可以完美解决上述问题,因此相关产品的性能指标中并未标注电解质溶液下金属检测的灵敏度。而在文献中仅有 Haimovich 等<sup>[8]</sup>对于含有高水平水分(如面包、果酱、奶酪)、含铁元素(如可可)或导电包装(铝箔)的产品对金属检测系统的影响进行过研究。

### 1 系统总体方案设计

基于平衡式双线圈原理<sup>[9]</sup>的金属探测系统总体方案设计如图 1 所示。主控芯片为可编程逻辑器件 FPGA,其输出的数字激励信号由 D/A 模块转换为模拟激励信号,滤波处理后进行功率放大,传到发射线圈。金属经过传感器时引起的磁场变化由接收线圈接收,经过差分放大、模拟解调后,转化为数字信号传入 FPGA,之后将信号数据进行采集,以便进行之后的研究和分析。人机交互模块的主要作用是将激励信号的参数数据传入 FPGA。

### 2 系统检测方案设计

#### 2.1 检测器结构设计

平衡式金属检测系统的探测器由 3 个同轴、等距、平行放置的 3 个线圈组成,如图 2 所示。根据电磁场理论,发射线圈通有一定功率的交变电流时,两个差分连接的接收线圈会感应出两个同频、等幅且反相的交变电动势,两者相互抵消形成接收平衡。当金属物质进入到探测器的有效探测范围时,金属物质的电涡流效应以及铁磁性金属物质的磁效应会打破两个接收线圈之间的平衡状态,造成接收信号幅值与相位上的变化<sup>[10]</sup>。

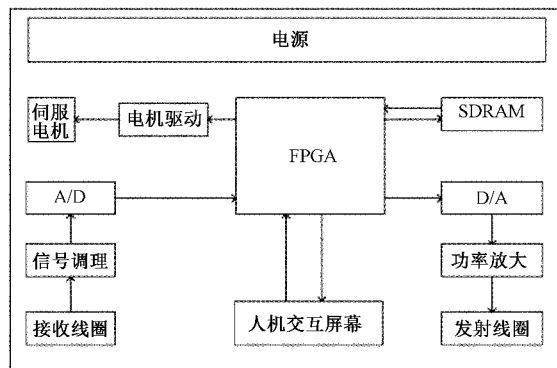


图 1 电磁检测系统总体方案设计

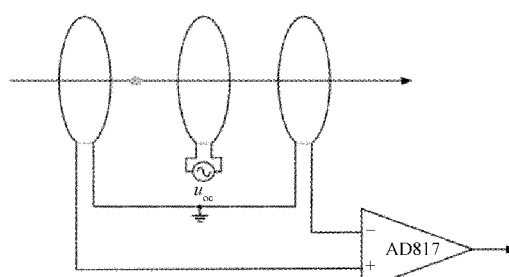


图 2 平衡式金属检测器原理框图

#### 2.2 信号解调方案的设计

平衡式金属检测器输出的信号为调制信号,其数学形式为  $Af(t)\cos(\omega_0 t + \varphi)$ , 其中  $f(t)$  是携带金属信息信号的幅值随时间变化的函数,  $\omega$  为激励信号的角频率,  $\varphi$  为携带金属信息的相位。因此取出携带有金属信息的信号的关键在于对于接收线圈输出信号的解调<sup>[11]</sup>。本文系统设计的主要目的之一就是研究自由电解质溶液中金属导电离子对金属检测系统输出信号幅值、相位的影响,所以要求同时去除幅值、相位两路信息。本系统采用正交解调方案对信号进行解调,解调过程如图 3 所示。

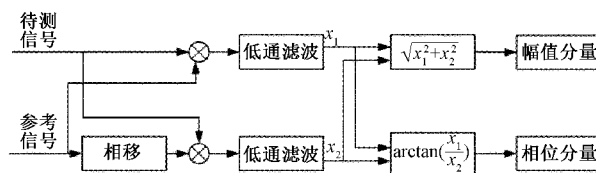


图 3 正交解调框图

待解调信号为:

$$AX(t)\cos(\omega_0 t + \varphi) \tag{1}$$

其中  $X(t) = \cos(2\pi ft)$ ;  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;  $f$  为调制信号频率;  $f_0$  为载波信号频率;  $A$  是调值信号幅值。待测信号分别与正弦信号、余弦信号相乘,得到的结果如下:

$$r_i(t) = \frac{A}{2}x(t)\cos\varphi + \frac{A}{2}x(t)\cos(2\omega_0 t + \varphi) \tag{2}$$

$$r_q(t) = -\frac{A}{2}x(t)\sin\varphi + \frac{A}{2}x(t)\sin(\omega_0 t + \varphi) \tag{3}$$

经过低通滤波器滤除高频分量后,做如下幅值、相位的计算:

$$x(t) = 2\sqrt{h_i^2(t) + h_q^2(t)} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan \frac{h_q(t)}{h_i(t)} \quad (5)$$

### 3 电解质溶液环境下金属检测算法设计

#### 3.1 信号特征分析

通过从相位的角度出发,可以更容易也更准确的在电解质溶液中检测出微小金属颗粒<sup>[12]</sup>。图 4 为 13%NaCl 溶液和  $\varnothing 2.5 \text{ mm Fe}$  同时经过系统后输出信号的幅值分量与 13%NaCl 溶液单独经过系统后输出信号相位分量的对比图。从图中箭头处可以明显看出红色波形区别于蓝色波形微小的凸起,并且该凸起受金属尺寸和金属在电解质溶液中相对位置的影响。所以通过检测系统输出信号相位分量中是否存在该凸起,即可判断电解质溶液中是否存在金属。

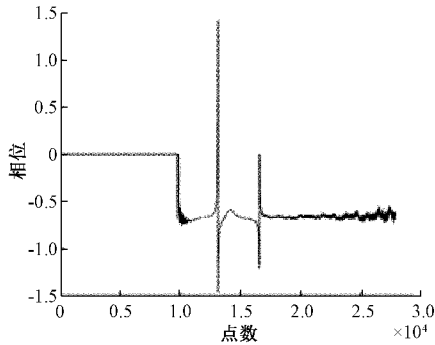


图 4 13%NaCl 溶液+ $\varnothing 2.5 \text{ mm Fe}$  相位检测图

通过对信号的仔细观察可以发现,突变部分总是出现在凸起信号之前,且突变部分的结束位置刚好是凸起信号的起始位置。突变部分信号既然难以消除,并且该部分信号相对于凸起信号更加容易检测,则可将其作为定位标志,定位至突变信号结束后再利用其它方法对凸起小信号进行检测。

如图 5 所示,将检测系统输出的相位分量与心电信号进行对比发现,突变信号与心电信号中的 QRS 波群十分类似,而凸起的小信号与 P 波、T 波也十分相似,并且心电信号中 P 波和 T 波的检测也是先利用 QRS 波群定位,再用相关的算法对二者进行检测,应用场景相似<sup>[13]</sup>。

值得注意,金属尺寸的增加会导致相位分量突变的位置变宽,而心电信号中 QRS 波群的宽度是固定的<sup>[14]</sup>,所以在算法选择中需要将金属尺寸这一因素考虑在内。

#### 3.2 曲线长度积分法

第 1 步先定位到信号突变的部分,这里选用一种用于心电监护中进行 R 波实时定位的算法—曲线长度积分法。

如图 6(a)所示,图曲线所在的区间被分割为若干个长度相等的小区间,每个小区间的长度为无穷小,因此两点之间的纵坐标的差值可以约等于该区间内的曲线长度,将这

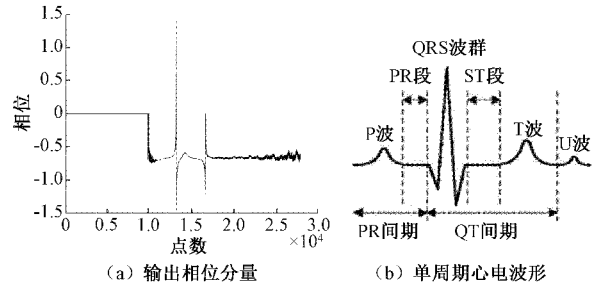


图 5 相位分量与心电波形对比图

些区间内纵坐标的差进行求和即可求出曲线的长度。在数字信号中,采样过程即可看作将曲线的分割过程,采样点即为分割线,曲线长度即为相邻采样点差值的积分。

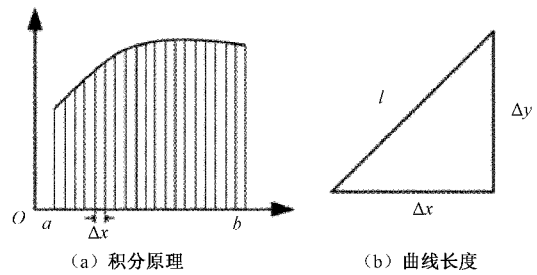


图 6 曲线长度积分原理

因为信号不是绝对的平滑,带有微小的噪声,所以曲线长度积分并不是简单的对信号相邻两点的差求积分,而是对差的平方求积分。平方是会使得较小的变化被抑制,而突变部分被放大,从而达到精确定位到信号鞋带金属信息的目的。

曲线长度积分实现公式如下:

$$\begin{cases} CL(0) = \sum_{j=2}^N (F_j - F_{j-2})^2 \\ CL(i) = CL(i-1) + (F_{i+N} - F_{i+N-2})^2 - (F_i - F_{i+2})^2 \end{cases} \quad (6)$$

第  $i$  段信号的曲线长度为第  $i-1$  段信号的曲线长度加上后半段的值  $(F_{i+N} - F_{i+N-2})^2$ ,再减去前半段的值  $(F_i - F_{i+2})^2$ 。其中, $N$  为其滑动时间窗口的宽度, $i$  为第  $i$  个滑动窗口。

图 7 所示为曲线长度积分法对 13% NaCl 溶液和  $\varnothing 2.5 \text{ mm Fe}$  试样经过系统后输出的相位信号处理前后的对比图。图中红色的定位信号精准地找出了相位信号的两个突变部分且并未受到信号的其他部分的影响。

#### 3.3 双侧累计面积法

金属小凸起位置太过于微小,如果采用阈值法进行检测,阈值难以确定,且容易发生漏检和误检。因为在实际生产过程中,每一个产品的溶质浓度都并非完全相同,所以经过系统后输出信号相位分量的值难免有差异。所以,先采用无金属时的电解质溶液经过系统输出信号的相位分量作为背景,将二者的差别作为判别依据,会因为背景信号与实

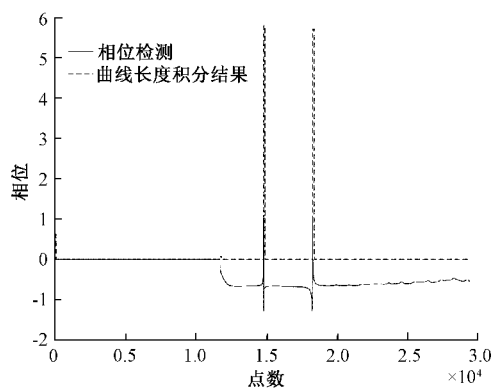


图7 曲线积分法处理结果

际信号不匹配而发生误检、漏检等问题。并且随着电解质溶液中金属尺寸逐渐增加,在引起相位信号波形凸起的同时,其使得相位信号中跳变部分的宽度增加,所以跳变信号定位后的位置也有微小变化。

为避免上述问题,同时满足系统的实时性要求,使用双侧累计面积法对于金属小凸起的小信号进行处理。双侧累计面积法是一种用于心电信号中P波的实时检测的算法,P波也是一个向上微凸的小信号,应用场景类似,而且双侧累计面积算法简单,实时性高<sup>[15]</sup>。

双侧累计面积的原理如下,设信号  $s(t)$ , 在任意时刻  $t$  的双侧累计面积为  $A(t)$ , 其表达式为:

$$A(t) = \int_{t-w}^{t+w} [s(t) - s(\tau)] d\tau \quad (7)$$

其中,  $w$  为滑动时间窗口长度。双侧累计面积  $A(t)$  可以理解为在滑动时间窗口  $[t-w, t+w]$  内的信号曲线与经过  $s(t)$  的水平线之间的面积,以曲线向上的面积为正,向下的面积为负,如图8所示。

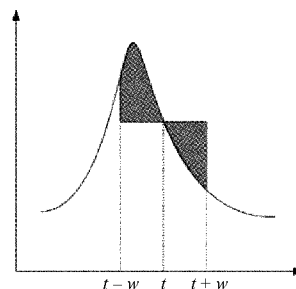


图8 双侧累计面积原理

电解质溶液中的金属检测流程如图9所示,相位数据输入后,第一步先用曲线长度积分算法计算出曲线的长度。因为相位信号计算的曲线长度有一个上升和下降的过程,所以设置两个阈值 UP\_LIMIT 和 DOWN\_LIMIT。用于判断信号中突变信号的起始和结束,防止定位发生错误。成功定位到金属引起的凸起波形位置后,之后输入的相位数据用于计算双侧累计面积。由于相位波形末尾还有一个跳变信号会对双侧累计面积的计算产生影响,所以要限制用于计算双侧累计面积的数据个数,如果在这个计算范围内计算出累计面积的值,小于阈值 PHASE\_LIMIT,则表示电解质溶液中存在金属异物,否则没有金属异物。

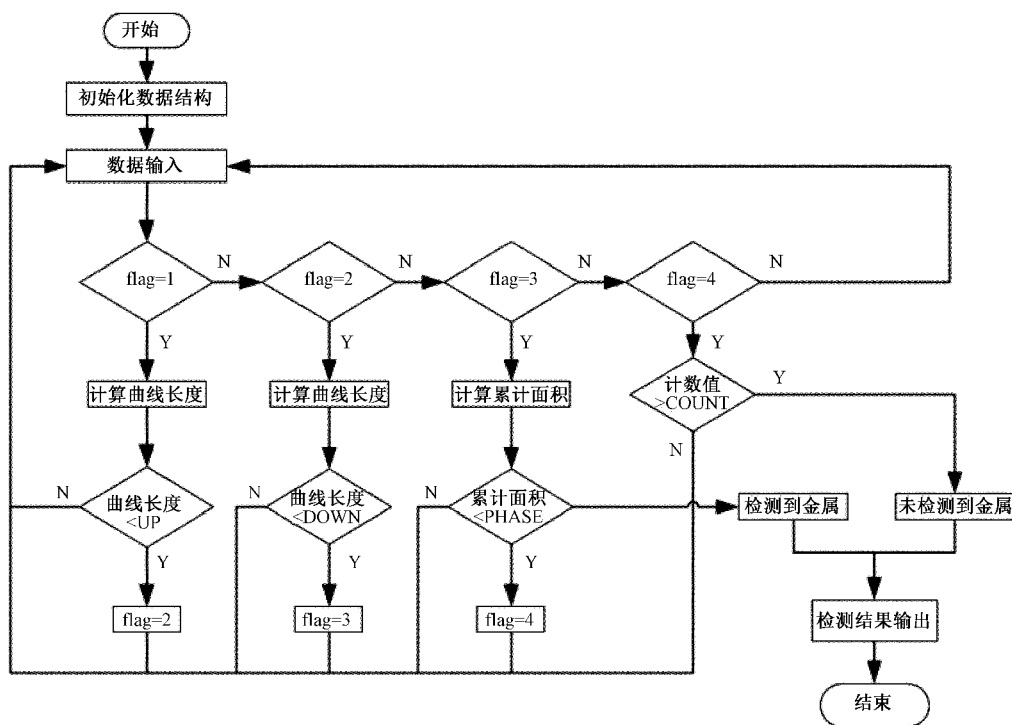


图9 电解质溶液汇总金属检测流程

图 10 为 13% 浓度的 NaCl 溶液与不同尺寸金属通过系统后输出信号的相位波形以及相位波形经过检测算法输出的检测波形, 其中图 10(a) 为 0.8 mm 铁珠与 13% NaCl 溶液的相位波形与检测波形, 图 10(b) 为 2.5 mm Fe 试样与 13% NaCl 溶液的相位波形与检测波形。从图中可以看出, 检测算法准确定位至突变信号的结束位置, 并将金属引起的凸起信号部分进行了放大, 同时将凸起信号拉至同一基准线上进行比较。对检测算法处理后的信号直接使用阈值法即可判断电解质溶液中是否存在金属物质。

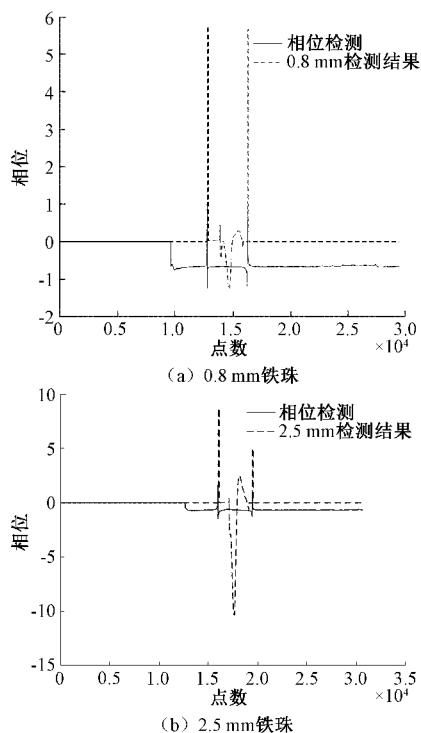


图 10 13% NaCl 溶液中金属相位波形与检测波形

#### 4 系统性能测试

系统性能测试主要包括干燥环境下金属的测试以及电解质溶液环境下金属的测试两个方面。

根据国标 GB/T 25345-2010 中的测试要求: 将标准试样依次通过检测位置, 标准试样每次通过检测位置的间隔时间为  $10 \pm 2$  s, 以每次均能可靠检出的最小直径标准试样直径作为检测器的灵敏度参数。本系统采用平衡式金属检测结构, 线圈是根据国标 GB/T 25345-2010 规定的标准尺寸设计的宽度为 450 mm、高度为 200 mm 的矩形线圈, 其中传送带从线圈中间位置穿过。测试时, 将待测样品放置于传送带上, 以匀速依次通过接收线圈 1、发射线圈和接收线圈 2, 速度为 24 m/min。

在进行灵敏度测试之前, 需要选取合适的待测金属样品。金属物体大致可以分为 3 类: 铁磁性、非铁磁性和不锈钢。理论上, 铁磁性金属既导电也导磁, 最容检测, 而不

锈钢导磁性不一, 导电性也不完全一致, 检测相对较困难<sup>[1]</sup>。结合国标 GB/T 25345-2010 中的规定测试样品种类, 这里选用不同尺寸的铁 Fe、不锈钢 SUS 以及不含铁元素的合金 NOFe。以上测试样品均为标准金属试样, 电解质溶液实验样品使用食品和药品中常见的 NaCl 溶液, 为了体现区分度, 实验中使用高浓度的 NaCl 溶液进行实验。如图 11、12 所示。

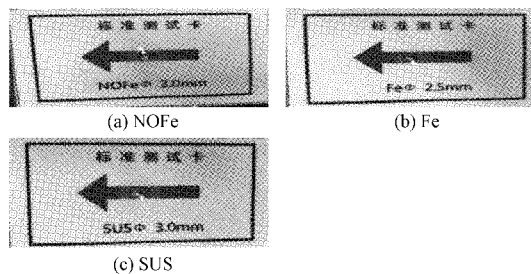


图 11 标准金属试样

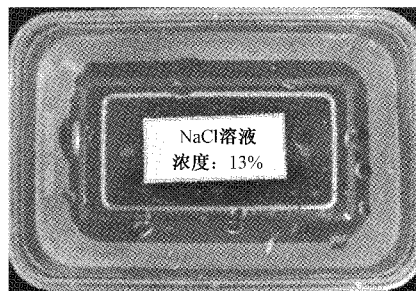


图 12 测试用 NaCl 溶液

如图 13 所示。实验样品刚进入传送带区域开始到完全通过传送带区域结束, 为一次完整的样品检测实验, 两次样品检测实验的间隔为 10 s。标准金属试样 + NaCl 溶液的检测实验是将标准金属试样与 NaCl 溶液同时经过检测系统, 本部分实验不但需要考虑金属的种类、尺寸和溶液的浓度等自身因素对检测系统输出的影响, 还需要考虑两者之间相对位置对系统输出的影响。的标准试样通过传送带依次经过检测系统, 传送带速度固定为 24 m/min, 定义如图 14 所示的 3 种相对位置。图中前进方向为电解质溶液和金属通过检测系统的运动方向。相同种类、相同尺寸的金属和相同浓度的 NaCl 溶液在同一种相对位置下, 都需要进行 10 次检测实验。本部分实验的目的是找出金属与电解质溶液对于金属检测系统影响的差异, 实现电解质溶液环境下的金属检测。

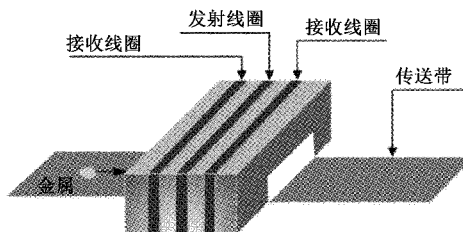


图 13 实验测试示意图

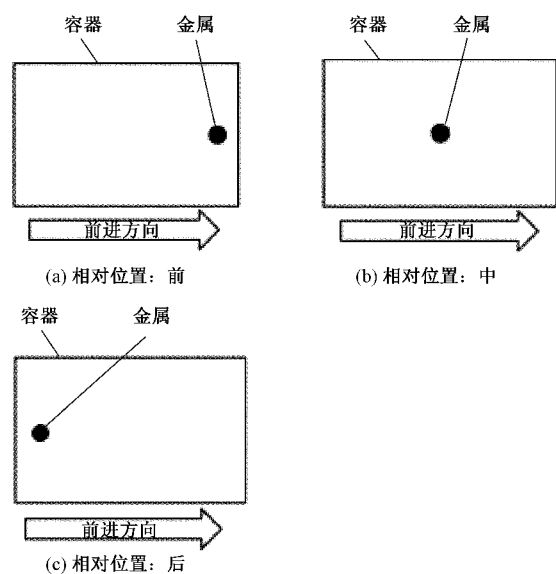


图14 电解质溶液与金属的相对位置

经过实际调研发现,腌制食品中 NaCl 的浓度大多为 2%~3%左右,加上其他导电离子,溶质浓度最多不超过 5%,而在药品中最常用的溶剂为生理盐水,即 0.9%的 NaCl 溶液。为贴合实际,以 5.6%浓度 NaCl 溶液中的测试结果作为最终测试结果,同时使用 13%浓度的 NaCl 溶液进行试验以作为对比。试验过程中将标准金属试样放置于盛有 NaCl 溶液的塑料盒上方,然后将二者同时通过检测系统为一次检测试验。同一种类、同一尺寸金属试样在图 15 所示的 3 个相对位置上(只展示中间位置)各测试 20 次,并对单独的 NaCl 溶液测试 20 次,其结果作为误检次数。测试结果如表 1、2 所示。

表 1 5.6%浓度 NaCl 溶液下金属检测结果

种类	尺寸/ mm	成功 次数	漏检 次数	误检 次数	检测率/ %
Fe	0.6	0	20	0	0
	0.8	7	13	0	35
	1.0	19	1	0	95
	1.2	19	1	0	95
	1.5	20	0	0	100
SUS	1.0	0	20	0	0
	1.2	2	18	0	10
	1.5	9	11	0	45
	2.0	20	0	0	100
	2.5	20	0	0	100
NOFe	1.0	1	19	0	5
	1.2	0	20	0	0
	1.5	11	9	0	55
	2.0	15	5	0	75
	2.5	20	0	0	100

表 2 13%浓度 NaCl 溶液下金属检测结果

种类	尺寸/ mm	成功 次数	漏检 次数	误检 次数	检测率/ %
Fe	0.6	0	20	0	0
	0.8	8	12	0	40
	1.0	12	8	0	60
	1.2	18	2	0	90
	1.5	20	0	0	100
SUS	1.0	0	20	0	0
	1.2	0	20	0	0
	1.5	5	25	0	25
	2.0	20	0	0	100
NOFe	1.0	0	20	0	0
	1.2	0	20	0	0
	1.5	0	20	0	0
	2.0	7	13	0	35
	2.5	19	1	0	95
	3.0	20	0	0	100

在表 1 中,金属 Fe 直径在 1.5 mm 以上时、不锈钢 SUS 直径在 2.0 mm 以上时、不含铁元素合金 NOFe 直径在 2.5 mm 以上时,它们在浓度为 5.6%的 NaCl 溶液中检测的成功率为 100%,根据国标 GB/T 25345-2010 中对于检测灵敏度的定义,该系统在 5.6%浓度的 NaCl 溶液中铁磁性金属的检测灵敏度为  $\varnothing 1.5$  mm,非铁磁性金属的检测灵敏度  $\varnothing 2.5$  mm。

另外可以看出,随着金属尺寸的增加,在电解质溶液中检测出金属的准确率也会随之升高,并且金属 Fe 在同尺寸同位置的检测准确率要高于其他两种金属。同时发现相同尺寸、相同种类的金属的检测准确率与其在电解质溶液中的位置有关,金属处于电解质溶液前方时检测的准确率最高,处于电解质溶液中间和后方时检测的准确率则相对较低且二者准确率相同,但在根据表 1 的实验结果发现,金属处于电解质溶液后方位置时其检测准确率略高于处于电解质溶液中间位置时。

在表 2 中,Fe、SUS 和 NOFe 在 3 个位置检测的准确率均为 100%时要求的最低金属尺寸分别为  $\varnothing 1.5$  mm、 $\varnothing 2.0$  mm、 $\varnothing 3.0$  mm,因此在 13%浓度的电解质溶液环境下,本系统的铁磁性金属的灵敏度为 1.5 mm,非铁磁性金属的灵敏度为 3.0 mm。

结合上述性能测试结果,将各浓度 NaCl 溶液环境下不同种类金属的检测灵敏度进行统计,如表 3 所示,其中 7.6%和 10%浓度下的检测灵敏度测试内容与上述相同。

综上所述,本文所设计的金属检测系统与金属检测算法成功实现了在电解质溶液环境中金属物质的检测,国标中并未规定电解质溶液中金属检测的灵敏度,因此没有标准对本系统检测性能进行评判。若只以 GB/T 25345-2010

表3 各浓度 NaCl 溶液环境下金属检测灵敏度

浓度/%	Fc	SUS	NOFc
5.6	1.5	2	2.5
7.6	1.2	2	2.5
10.0	1.5	2	3.0
13.0	1.5	2	3.0

中的灵敏度标准来看,本金属检测系统在 5.6% 浓度和 13% 浓度的 NaCl 溶液中铁磁性金属的检测灵敏度均达到要求,非铁磁性金属检测灵敏度只在 5.6% 浓度和 7.6% 浓度的 NaCl 溶液中达到要求。

根据实际调研发现,国标中虽然未对电解质溶液下金属检测的灵敏度进行相关规定,但其在食品、药品用金属检测器行业属于重要指标之一。然而,目前为止尚未有产品可以完美解决上述问题,因此相关产品的性能指标中并未标注电解质溶液下金属检测的灵敏度。所以本系统无法同类型产品进行横向比较,难以确定系统性能是否达到实际生产的应用需求,但可以肯定的是,随着技术的发展,可以电解质溶液检测出的金属的尺寸会越来越小、准确率越来越高。

## 5 结 论

本文课题基于上述实际生产需求,采用平衡式双线圈金属检测结构,研制了一种用于食品、药品生产过程中微小金属颗粒检测的金属检测系统,并利用该系统进行了相关检测实验。通过实验发现了:“在电解质溶液与金属同时通过检测系统后输出信号的相位分量波形中,金属颗粒对相位分量波形的影响明显且稳定,但该影响的强弱随金属尺寸的减小而逐渐变小,并与位置有关;依据相位分量波形的变化,存在由电解质溶液中区分出金属颗粒的可能性”。由于相位分量波形形状相对复杂,且微小体积金属的影响较弱,因此采用了曲线长度积分法和双侧累计面积法等实时检测算法对相位分量中金属的影响进行检测,并在上述金属检测系统上实现。本课题在电解质溶液中能够准确检测金属微粒,对于食品、药品安全具有重要意义。

## 参考文献

- [1] SIDDIQI O. Metal detector based on lorentz dispersion[J]. IEEE Sensors Journal, DOI: 10.1109/JSEN.2020.3022609.
- [2] 于畅畅,张光锋,王虹,等. 基于毫米波辐射成像的浅埋金属探测[J]. 电光与控制,2020,27(1):94-97.
- [3] SVATO J, VEDRAL J, OVEK P. Metal object detection and discrimination using sinc signal [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 13(4): 3-5.
- [4] SVATOS J, VEDRAL J, NOVACEK P. Metal object detection and discrimination using sinc signal [C]. Electronics Conference (BEC), 2012 13th Biennial Baltic, 2012.
- [5] 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.
- [6] 徐从裕,王沁喆,胡宗久,等. 基于相位辨识的金属探测方法[J]. 电子测量技术,2019,42(14):80-84.
- [7] 周意和. 食品生产过程中金属异物检测系统设计[D]. 包头:内蒙古科技大学,2014.
- [8] 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, DOI: 10.1109/ICIT45562.2020.9067312.
- [9] 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.
- [10] 潘文龙. 基于闭合式矩形线圈系统金属探测仪传感器的研究[D]. 合肥:安徽大学,2018.
- [11] 王涛,张洗玉. 基于 STM32 的金属探测仪的设计与实现[J]. 中国仪器仪表,2018(7):50-54.
- [12] 周翔,吕幼新. 正交通道中 I/Q 不平衡估计与补偿研究[J]. 雷达科学与技术,2017,15(1):8-12.
- [13] 郭爽. 心电信号消噪及特征识别算法的研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [14] 吴建,李康,庞宇,等. 基于斜率突变的 QRS 波检测[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2015,27(2):241-244.
- [15] 陈日清,吴剑,韩永贵. 基于双侧累计面积的心电信号 P 波检测[J]. 中国医药导刊,2015,17(S1):36-39.

## 作者简介

余程龙,硕士研究生,主要研究方向为医学电子与信息工程技术工程。

E-mail:1570081960@qq.com

李丕丁,讲师,主要研究方向为生物医学信号处理、医用电子仪器等。

E-mail:Lipiding\_usst@qq.com