



分类号 \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号 G20000254

## 学 位 论 文

### 智能型金属探测器研究

### Development of A Novel Intelligent Metal Detector

刘 淑 琴

指导老师姓名: 项 安 副教授

南昌大学信息工程学院电气与自动化系

申请学位级别: 硕 士 专业名称: 电力电子与电力传动

论文提交日期: 2005 年 5 月 论文答辩日期: 2005 年 6 月 日

学位授予单位和日期: 南 昌 大 学 2005 年 7 月 日

答辩委员会主席: 熊震宇

评阅人: 熊震宇 王必成

2005 年 月 日

## 摘 要

金属探测器在现代社会生活中的应用越来越广泛。从最初应用在探雷和探测地下金属开始发展到现在的食品、成衣制品、橡胶、木材加工等方面的质量安全检测，它的作用越来越凸现，与此同时功能上的提高和完善也受到广大客户的关注。

本文提出了一种由数字信号处理器（DSP）、单片机、数字直接合成芯片（DDS）、滤波电路等构成的能够进行自学习的智能型金属探测器的实现方案。这种金属探测器广泛应用于食品、医药、纺织、服装、玩具等，能够检测并排除混入其中的金属颗粒，确保食品和人身安全。与当前用模拟线路实现的金属探测器相比，它的最大特点是采用数字信号处理器（DSP）和直接数字合成技术（DDS）产生一个频率、相位均可以通过数字调节的正弦波。该方案中采用了 TI 公司定点数字信号处理器（DSP）TMS320LF2407 完成信号采样、数据处理和判断及动作信号输出功能。根据铁和非铁金属的特性，提出了自学习方法的实现方案，大量实验证明该方案能达到自动辨识产品信号和金属杂质信号的效果。该探测器还采用了 ATMEL 公司的 AT89C55 单片机完成液晶显示和键盘修改参数的功能，变更后的参数存贮在 EEPROM 中，建立良好的人机对话界面。而两者之间的通信任务是由 MAXIM 公司的 RS485 串行通信芯片完成的。最后，按课题要求研制出一台样机，并对其进行了相应的产品实验。实验结果证明，这个系统方案可以达到预期的检测效果，产品参数存储多达 20 种，灵敏度检测值达到  $Fe \phi 1.0$   $SUS \phi 2.0$ 。与其他类型的金属探测器相比，它的灵敏度更高、稳定性更好，抗外界干扰性显著提高，能够得到稳定的控制效果。

关键词：数字信号处理 单片机 金属探测器 串行通信 自学习

## Abstract

Metal detector now comes into many aspects of our everyday life. It is widely used in detecting from landmine underground to rare metal mine embedded under the earth, from food safety to costume product, from rubber purity to lumber machining. It does work well in these fields and the improvement of its function is becoming to the main question customers care.

This paper offers a realizable scheme of a novel intelligent metal detector, composed of digital signal processing、microprocessor、direct digital synthesizer etc. Now many industries, such as food、medicine、costume manufacturer, apply it to detect and eliminate the metal impurity merging into products. Compared with analog-circuit metal detector, the distinct characteristic is its capacity of automatic parameter adjustment of digital sine wave created by DDS and DSP. DDS creates a sine wave whose phase and frequency parameters can be linearly and digitally modified. At the same time ,it has the advantage of high sensitivity 、good stability and convenient man-machine conversation. And the important point is its ability to automatically distinguish which are product effect or impurity signal and to storage correlative parameters. The metal detector adopts TMS320LF2407 and AT89C55 to compose the core controlling system. The function of digital data processing(DSP) is to implement sampling、data processing & judgment and parameter auto-setting. The function of microprocessor (MPU) is to control the LED display and the keyboard input. Maxim RS485 implements the communication between DSP and MPU. The sample machine has been made when the item ends. Many product experiments prove that this scheme could get the expected results. The highest value of Fe sensitivity is  $\phi 1.0$ , that of Sus is  $\phi 2.0$ . It can storage over 20 kinds of product parameter. The stability and anti-jamming ability could get better than before.

**Key words:** digital signal processing, microprocessor, metal detector, serial communication, auto-set

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 南昌大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名: 刘淑琴 签字日期: 2005 年 6 月 13 日

---

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 南昌大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 南昌大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名: 刘淑琴 导师签名: 刘安

签字日期: 2005 年 6 月 13 日 签字日期: 2005 年 6 月 13 日

学位论文作者毕业后去向:

工作单位:

电话:

通讯地址:

邮编:

## 第一章 绪论

### 1.1 前言

人们习惯上总是认为金属探测器是用来探测枪支和刀具的,它们的外形和基本功能相差无几。金属探测器是一种探测用的电子仪器,金属探测技术推广应用于各个领域。在军事上,可用金属探测器探测金属地雷;在公安部门,探测随身携带或隐藏的武器及作案工具;在考古方面,可发现埋藏金属物品的古墓,发现古墓中的金银财宝,金银首饰,各种硬币;在工程地质中,用于探测地下金属埋设物,管道,管线等;在矿产勘探中用来探测和发现自然金颗粒及金块;工业上可用于在线监测中,如去掉棉花,煤炭,和食品中的金属杂物等。

事实上,今天的金属探测器不但可从事的工作相当繁多,而且它们当中的一部分看起来根本就不像传统的金属探测器。它们可被制成诸如椅子等形状的物品,亦可被藏匿在门框上,它们重量极轻,可随身携带,运用自如。探测的物品不仅仅局限于标准的武器或刀具,还可以探测到小到计算机芯片之类的元件以及微量的黄金碎渣。据了解在我国中成药的生产中,对其成品药丸中混入直径 $10\mu\text{m}$ 以下、长 $2\sim 3\text{mm}$ 的铜丝都要进行探测;在香肠等食品行业的成品检测中,同样要求检测出大头针和订书针一半以下的金属物。

制造厂商正在开始为其最终用户研制具有各种特殊要求和性能的探测器,用来测量贵金属、刀片或手铐钥匙等物品。除此之外,他们还不断地为专业市场研制金属探测器,如总统卫队、监狱、学校等机构。尽管目前市场上通用型的金属探测器还具有一定的市场,但是众多的厂家已经将工作重心转向了更为专业的一面。

本文所阐述的智能型金属探测器就是为了适用于食品行业速冻食品、水产品等含水分较多的食品安全探测而设计的,达到通用性和专用性的统一结合。

马克思主义认为凡是存在的事物必有其存在的必然性,金属探测器的产生、发展都是和社会文明发展以及人们对事物的深入认识分不开的,同时也是人们改造世界的一个成果。

## 1.2 研究现状与发展

### 1.2.1 目前的技术现状

在课题开展的前期,做了大量的调研工作,对国内外的现状有所了解:

1、在中国专利文摘数据库输入关键词“金属探测”,对我国的现有在库的专利进行了检索,共查到 20 项专利。这些专利中对传感器大多数采用电感式、电容式、磁敏式、电磁场式、电涡流式,有自己特定的应用场合,检测的是较大的游离状的金属,测量精度不高,不能进行在线测量,也不能根据检测对象的不同修改相关的检测参数,功能较少,尤其是电容式在受现场干扰太大,测量结果失真,不适合于食品和纺织品中金属异物的测量。最早的申请的专利是 1987 年的高精度金属探测器,是一种识别非导电材料中是否混有金属物质的仪器。随后出现的金属探测器都和特定的应用场合相关,涉及地下金属探测、墙内电线断线点探测、轮胎中金属异物探测、带式运送散装物料中金属异物探测等方面,但有关纺织物、食品中金属异物颗粒的探测仪基本上没有,所以课题研究的可实施性是显而易见的。

2、对 1980—2003 年期刊光盘输入关键词“金属探测”,检索到十余篇相关论文,从中可以看出国内的金属探测器的技术比较落后,能在线检测的比较少,即使能在线检测,也都是和单片机相连,所处理的数据是有限的,因此总的检测精度不高,但是我们也借鉴了其中的几种抗干扰方法。特别是进入 21 世纪以来,随着嵌入式系统的软硬件日益完善和市场份额的增加,提出一种新的金属探测方案设计,是势在必行的。

3、在工程索引【EI】中输入关键词“Metal Detector”检索到 1990-2003 年 18 篇相关外国文献,国外的适合于本课题的金属探测器也很少,传感器大多采用电涡流、电磁场,超声波、图像扫描等方式。现在国外如日本、美国、英国和德国都有此类装置,但价格比较贵,一般需要 20—100 万 RMB,中小型工厂承受不起,而且产品的售后服务体系也不完善。我们设计生产的这种装置不但精度高,而且有很高的性价比。

金属探测器使用的元件从电子管、晶体管乃至集成电路,有了更新换代的发展,其应用范围几乎扩大到各个领域,对工业生产及人身安全起着重要的作用。

目前,金属探测器大致分为三种类型<sup>[1]</sup>:

1、安装在冶金、烧结、水泥、玻璃、造纸、化工、卷烟等工厂和矿山生产线的自动传送皮带上,用以检测矿石、烟草等原料中混入的废金属,保护破碎机不受损坏,此类称为“工业型金属探测器”。

2、随着交通、旅游、金融和娱乐事业的发展,在机场、银行、珠宝店和珠宝制造厂、贵金属矿、贵金属加工厂等,需要对过往人员进行检测,以使贵重物品不丢失及排除危险品、枪支等,此类称为“安全型金属探测器”。

3、同时,随着人们生活水平的提高,对于衣食住行的关注越来越多,在食品加工、食品包装、成衣制作、纺织制品、木材加工等,需要对其加工过程或者出厂产品进行检测,是否含有细微金属颗粒或金属碎屑,是否达到国际食品技术委员会 HACCP(危害分析及临界控制点)基本准则的相应要求,防止对人们的生命安全造成不必要的伤害,这种又称为“生活型金属探测器”。

### 1.2.2 发展趋势

金属探测器的历史很难追述,但金属探测技术与电子技术的发展密切相关。六十年代末和七十年代初,半导体电子学技术飞跃发展,才出现非常轻便的金属探测器,如公安部门用的搜身器,多采用拍频振荡器原理。七十年代中期以后,金属探测多采用感应平衡原理(文献[2]),电路中采用同步解调器,不仅仅能获得目标信号的振幅,而且还能得到目标信号的相位,提高了仪器分辨率和对目标信号的识别能力。早在 20 世纪 70 年代,国内就开始在食品安全检测方面使用金属探测器,使用的电子元件大多是电子管、晶体管,线路庞大,功耗大。随着电子器件大规模集成电路的出现和发展以及微处理芯片的出现及广泛应用,使金属探测器向自动化、智能化方向发展,出现了能自动进行 AGEB(自动大地效应平衡)操作的金属探测器,以及具有数据处理功能的金属探测器,使金属探测器处于更新换代时期,金属探测器的发展也产生了一个飞跃,从纯模拟线路转向模拟与数字线路相结合。从 8 位单片机发展到 16 位、32 位单片机,再到功能强大的 DSP(数字信号处理器),数字化产品的发展又逐步提高了金属探测器的性能,扩大了金属探测器的应用范围。

金属探测器的应用日益广泛,效益可观。几千元一台的金属探测器就可以保护价值数十万元的矿石破碎机,几万至几十万元买一套安全门式金属探测器,可以保护价值上千万元乃至上亿元的飞机及人身安全。因此对金属探测器的研究和

生产引起国内外专家的高度重视。我国在冶金、食品等行业中，先后引进日本、澳大利亚等国研制的金属探测器用于生产，在北京、上海、青岛、赣东北、本溪等地也相继开发出多种型号的金属探测器，并在生产中广泛应用。

现在，金属探测器除了应用在食品、纺织、服装、矿冶、寻宝、探雷等领域，还逐步扩大到木材、药品、玩具、安检等方面。另外，还出现了 X 光红外探测器系列，能够指示在食品中金属杂质所在的位置和大小，同时应用在安检领域也提高了检测的水平。目前，研究人员正研究利用电磁波谱的另外一部分：万亿赫兹辐射或称 T 射线。T 射线有可能改变诸如机场安全和医学成像等领域的现状，这样食品加工商能探测密封包装食品的含水量，以确保其新鲜度。TeraView 公司还致力于研发可置于码头的金属探测器，这种探测器可看到大衣口袋中的剃须刀以及口袋中塑料炸药。

随着科学技术的进步与生产的发展，为我们提供了广泛应用金属探测器的新领域，同时也提出了高灵敏度探测的要求。青岛电子一厂生产的 JTJ 型金属探测的最高灵敏度为 0.4mm 直径的铁球，南非生产的 GOLDFINGER 型金属探测器，它通过二维检测，在监视屏幕上标出被检测者身上携带金属物的位置，其灵敏度最高可检出 0.5g 的黄金，但这与实际生产应用的要求相差甚远，因此研制适用于各领域的高灵敏度金属探测器将是一个新的重要课题。

### 1.3 问题的提出

依据被检测产品的性质不同，在食品行业应用的金属探测设备有以下几种类型：水产品用探测器、速冻产品用探测器、干货用探测器、铝箔包装用探测器、稠状物探测器和液态物探测器等。目前在该公司的产品类别中，大多数方案是靠模拟电路实现的，探测灵敏度不高，稳定性较差，受外界干扰比较大，而且探测的产品对象比较固定，一台探测器不能适应探测多种产品对象，检测的金属种类也不多，只限于铁、不锈钢等。为了扩大探测器的探测对象范围，提高工作特性，上海某金属探测设备有限公司提出开发一款智能型金属探测器，它要实现的功能除了现有设备具备的外，还包括以下几点：

(1) 实现相位检测；(2) 能够自动设定产品参数，自动调整；(3) 实现两路检测，一路为铁杂质的信号，另一路为不锈钢杂质的信号；(4) 采用最新的 DSP 嵌入系统技术；(5) 使用液晶显示，采用菜单式画面、中文语言；(6) 增加键盘



修改参数界面；(7)要求铁的灵敏度达到 $\phi 1.0\text{mm}$ ，不锈钢的灵敏度达到 $\phi 2.0\text{mm}$ ，(8)具备良好的产品抑制效应。

在以上方案提出的要求中，需要注意的是第二点和第五点，也是我们重点要进行研究开发的方面。目前，能够实现自动设定产品参数并有良好效果的，有安立公司（Anritsu）生产的金属探测器。它首次采用“同时双频率磁场”的检测方式，可以自动设定适合于干、湿和铝箔包装的产品，而且它采用的是双 DSP 操作系统，其中液晶显示的菜单式界面是用 DSP 来实现的。下面图 1-1 是它的 KD8113AW 型号的金属探测器外形图。而图 1-2 是该公司的 GJ-VIII 的外形图。我们设计的金属探测器的外形采用类似的结构。

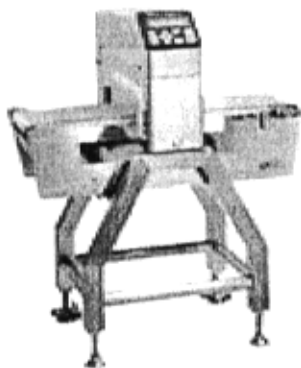


图 1-1 KD8113AW 型金属探测器

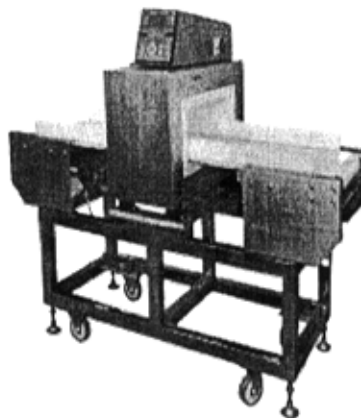


图 1-2 GJ-VIII 型金属探测器

## 1.4 本课题的主要研究内容与关键技术

### 1.4.1 主要研究内容

根据本课题工作的实际背景，研制食品纺织品中金属异物的在线检测装置，重点应研究和解决以下几个方面的问题：

#### 1、金属探测器传感器的设计

由上海某金属探测设备有限公司完成传感器外型的制作，传感器内的线圈根据平衡对称的方式设计，控制器的信号检测电路也是采用对称设计，使得系统的传感器有良好的互换性。

#### 2、硬件方案的设计

硬件方面涉及：DSP 的选择，需含有数据采集器、内置 A/D 转换；直接数字

频率合成器 (DDS); 并口 D/A 转换器; 数字电位调节器; 4K EEPROM 存储器; 模拟乘法器; 液晶尺寸和字符大小; 键盘按键选择和排列; 高速低功耗宽电压范围运放 (High Speed Lower Power Wide Supply Range Amplifier)。

### 3、软件方案的设计

软件系统要求完成检测参数输入系统模块、实时数据检测系统模块、自学习系统模块、信号数据处理模块、参数输出动作模块、液晶显示模块等设计。

如下图 1-3 所示, 表现了该课题的设计思路:

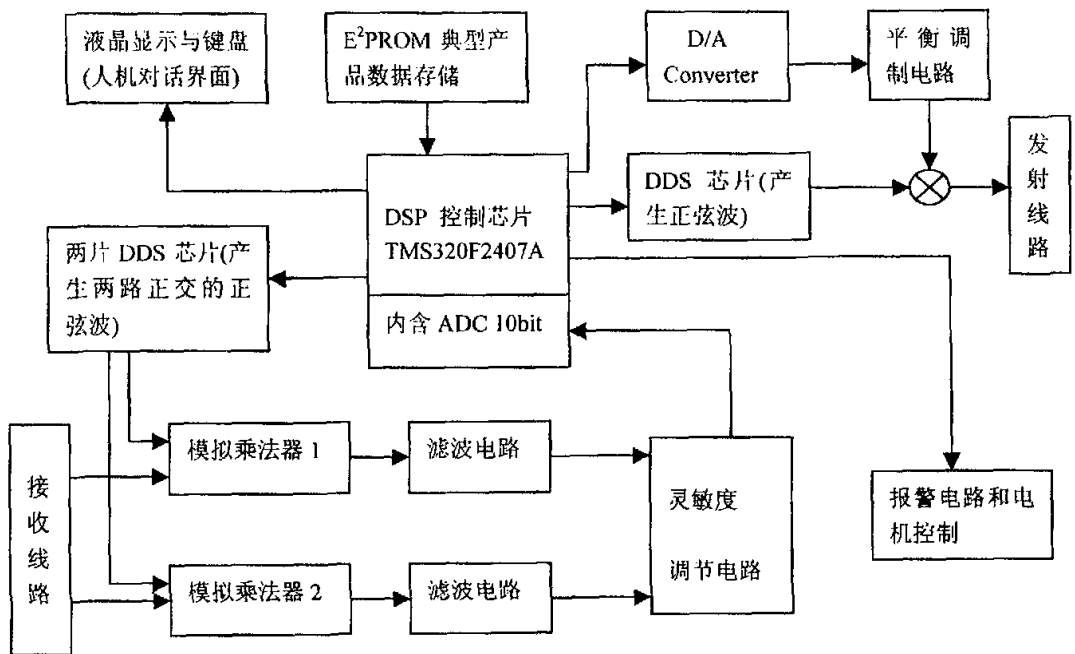


图 1-3 智能型金属探测器原理框图

### 1.4.2 关键技术

根据目前金属探测器的市场情况, 本课题主要是解决以下几项关键技术, 使该项产品可以达到国内先进水平:

1、金属探测器采用平衡式检测原理设计方案, 使用模拟乘法器调制解调信号, 得到良好的信噪比。而在大多数金属探测器产品中, 使用比较多的是差拍式、自激振荡式和耗能式(功率吸收式)检测线路, 在国外常用的是平衡感应式检测线

路。

2、使用可编程正弦波发生器产生一频率、相位可调的正弦波，根据经验值来确定被检测物料产品效应最小时对应的频率，提高检测灵敏度，同时用简单的实现电路替代了以往利用晶振产生方波经分频后谐振产生正弦波的繁杂的模拟电路，节约了成本，提高了效率。

3、人机界面的建立。通过液晶显示操作界面来指导工人使用机器，大大提高金属探测器的可操作性，并降低了对工人的要求，方便实用。

4、自学习系统的探讨。这是提高被测产品灵敏度的软件实现方法。根据不同的产品效应来自动改变检测信号的幅值和相位的大小，以适应不同的产品检测，而非单一产品的检测，提高了金属探测器检测对象的范围。这在硬件上可以通过数字电位调节器来实现，但是软件上调节的方向问题还是需要进一步探讨产品效应来确定的。这是一个难点。

从以上的分析可见，主要的关键技术还是在于发射和接收部分信号传输（即调制解调）、自学习系统模块的硬件和软件上实现方法的探讨。目前这两项是在金属探测器领域比较值得摸索的知识点，国内在该项技术上仍是一个空白。该课题涉及到传感器技术、通讯技术、自动化技术、DSP、单片机和 C 语言编程等，具有一定的综合性和复杂性。

## 第二章 金属探测器工作原理

### 2.1 基本原理框图及介绍

目前,国内感应式金属探测器根据基本原理和检测线路的不同,大致可分为三种类型,即差拍式、自激感应式、耗能式(功率吸收式)。而在国外的探测设备中采用更多的是平衡式,而且平衡式的结构更稳定可靠,性能更佳,能更好的结合现有的先进的控制技术。国内的厂家生产的设备几乎没有此类检测电路的,所以该课题研究具有一定的前沿性。从以下的分析,可以了解到这点。

#### (1) 差拍式检测电路

检测电路如下图 2-1 所示,其中它包括了两个振荡器频率,经过混频器对频率进行处理后,得到 $(f_1 + f_2)$ 和 $(f_2 - f_1)$ ,再经过高频滤波器滤波得到需要的差频信号,经放大器放大直接送给输出电路<sup>[3]</sup>。

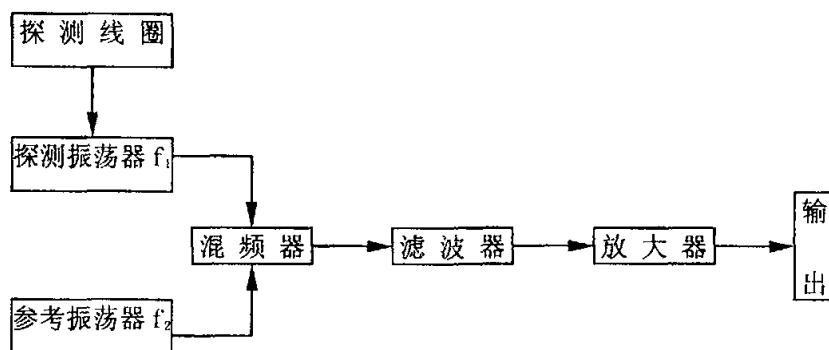


图 2-1 差拍式检测框图

探测振荡器的振荡频率  $f_1$ : 
$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

从上式看出,当振荡电路的参数确定以后,振荡频率 $f_1$ 与电感量 $L$ 和不变的电容 $C$ 有关,电感量的增减与被测物体的性质和大小有关。当被探测物体是铁磁性材料时,由于导磁率高,使探测线圈的总电感量增加,变成 $L + \Delta L_1$ ;当被检测物体是非磁性材料的金属,由于金属物体的涡流损耗,使探测线圈的电感量减少,变成 $L - \Delta L_2$ ,通常 $\Delta L_1 \neq \Delta L_2$ ,它们的大小取决于被探测物体的性质和形状。参考振荡器的振荡频率 $f_2$ 略大于 $f_1$ , $f_1$ 与 $f_2$ 在混频器中混频,可得到两

种频率，即 $(f_1 + f_2)$ 和 $(f_2 - f_1)$ 。再通过滤波器选取需要的差频信号（后者）送入放大器，经放大后输出，推动灯光显示或者报警。

### (2) 自激感应式检测电路

自激振荡式金属探测器<sup>[3]</sup>多数采用 LC 振荡器作为金属物体的探测电路，工厂或矿山应用较多。其检测电路框图如图 2-2 所示。

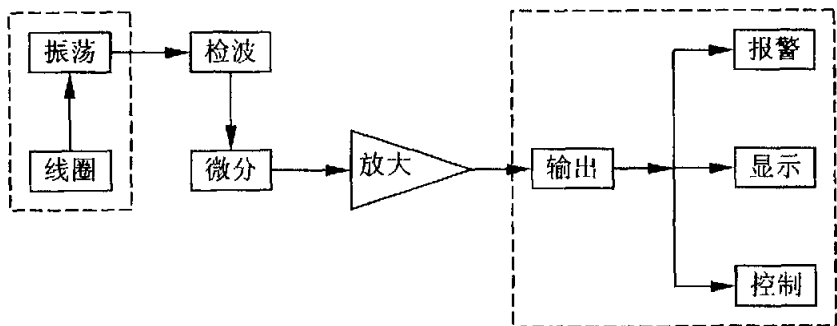


图 2-2 自激振荡式框图

探测线圈安装在输送矿石或其它物料的传送带上，作为振荡器振荡回路的电感。由于在冶金矿山中应用较多，所以要求此振荡器对磁性矿石的影响有一定的抑制作用，对于弱磁性的锰钢件具有一定的探测灵敏度。振荡器在正常情况下输出等幅的交流电压，检波后为不变的直流电压，因而输出微分信号为零。当金属物体经过线圈时，振荡器的振幅降低后又恢复，检波后的直流电压产生一个降低的波动，经微分电路微分后，将有脉冲信号输出。此脉冲信号经放大器放大后，推动继电器动作，输出接点信号控制金属物体取出装置，并进行显示或报警。

### (3) 耗能式(功率吸收式)检测电路<sup>[3]</sup>

门框式金属探测器属于此种类，它可分辨出金属的性质、大小，并可对监视对象实现连续监视，对预定物体发出预警。

与一般金属探测器不同，它为多频率的。图 2-3 为以双频率工作的金属探测器的原理框图。由四部分组成：激励电路、激励线圈、信号测量和处理电路、指示和报警电路。

图 2-3 中如果监视区 A 有某一物体通过，则由信号测量和处理电路测出对应 $f_1$ 和 $f_2$ 两种频率的同相分量 $B_x$ 和异相分量 $B_y$ 值，将 $B_x$ 分量送入比较电路 N 进行比较后输出值即为待测物体的 $\Delta P_A$ 与 $\Delta P_B$ ，将此值再送入比较电路 P 与给定

值（即是某一要报警物体的  $\Delta P_A$ 、 $\Delta P_B$  应具有的数值）进行比较，若两者相符，比较器 P 有输出。而所测得的异相分量  $B_y$  送入比较电路 M 与比较信号 B（即为某物体在固定频率时的异相值）进行比较。当两者相符合时比较器 M 有输出，若两比较器 P、M 同时有输出即表示 A 区通过的待测物体的有功分量和无功分量均符合要求，则门电路 B 有输出可推动报警电路发出报警。

耗能式金属探测器在安全检查方面有着很重要的作用，随着目前恐怖分子的不断制造恐怖活动比如人体炸弹，各个国家越来越重视它的应用。

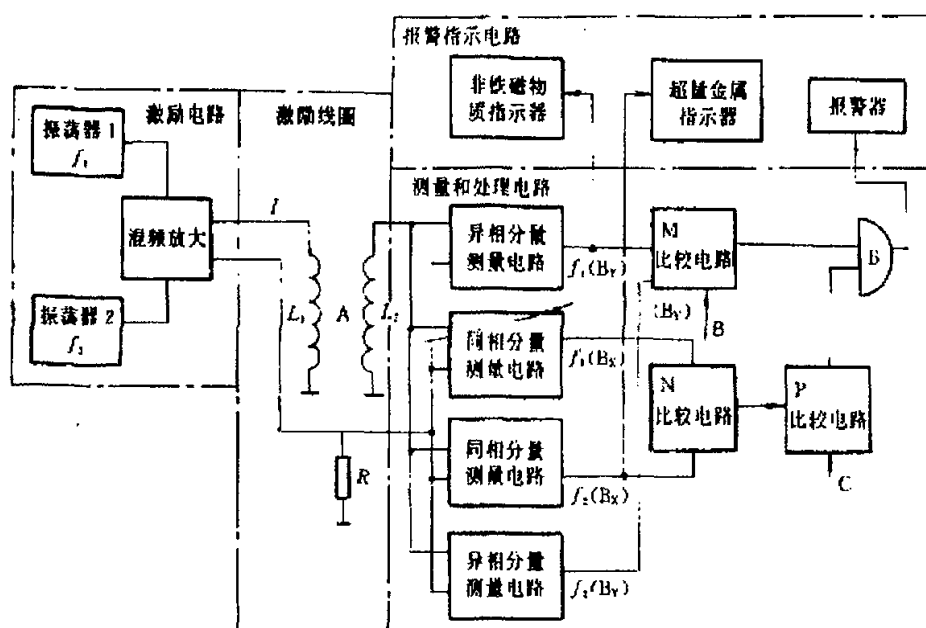


图 2-3 耗能式检测电路框图

#### (4) 平衡式检测电路

图 2-4 所示为这个课题中我们所采用的检测电路。从图中可以清晰地了解平衡式金属探测器的基本原理。根据电磁场理论，发射线圈产生的交变磁场在两个差动连接的接收线圈中分别产生一个同频、反相、等幅的感应电动势，两者相消即形成接收平衡。当含有金属杂质的产品通过传感器时，线圈周围的磁场由于产品的进入发生变化，在接收线圈处检测出这个磁场变化引起的电压差，通过滤波电路滤除高频干扰信号，放大所需的低频电压信号，送给相应的显示、报警电路

信号引起动作。平衡式探测器的另一个特点在于它的传感器部分比其他形式的传感器多采用了一个平衡补偿线圈。根据以往的设计经验可知，电子元件有一定的使用寿命和工作范围，当工作环境复杂时，很容易受到外界干扰，不能按正常特性工作。当传感器的接收信号由于外界干扰产生较大变化时，检波信号必然要受到影响。根据自动控制理论中的闭环负反馈控制原理，要保证输出信号受外界干扰减小的话，需要增加对自身输入信号的补偿，所以在这里增加一个补偿线圈。如下图 2-5 所示。补偿线圈的信号来源于我们的检波信号的直流分量，与接收线圈的信号形成一个负反馈的闭环系统。

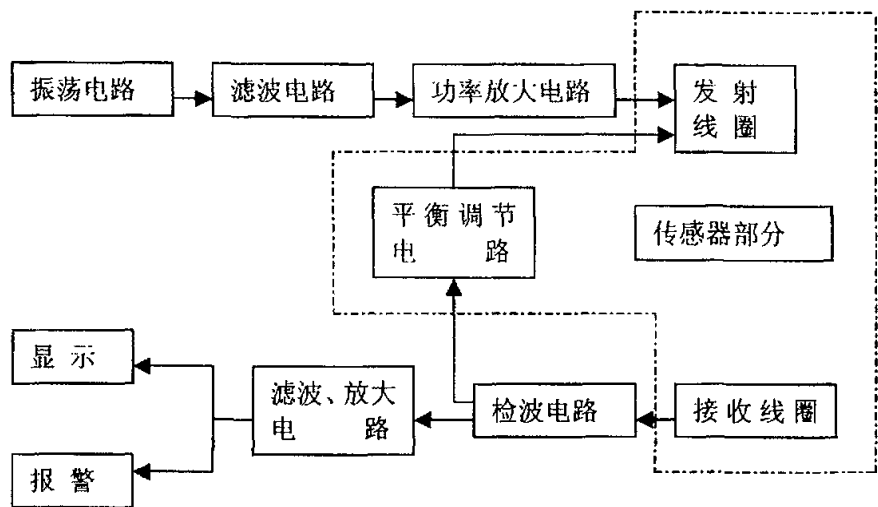


图 2-4 平衡式检测电路框图

如下图所示是接收线圈侧的结构示意图，它的优点在于接收线圈采用了两路，一路用来输出，另一路用来调节平衡。

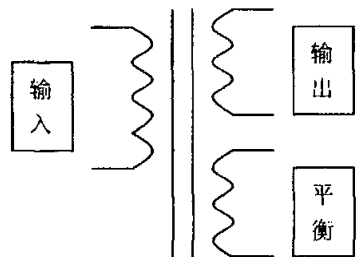


图 2-5 接收线圈一侧结构示意图

传感器的口径根据检测对象的不同和对灵敏度的要求有很大的区别，但是发

发射线圈和接收线圈的设置仍是相同的。从下图 2-6 可以看到发射线圈和接收线圈的示意图和安装外形图。

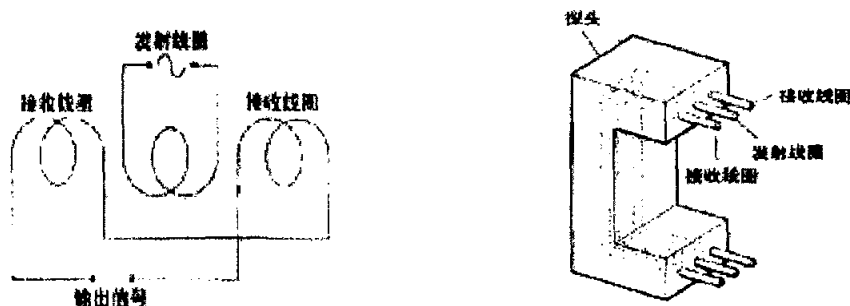


图 2-6 发射和接收线圈示意图及外形图

通过以上的分析可知，平衡式检测电路工作特性更稳定，并能有效的去除外界带来的电磁干扰或由于震动、冲撞引起的磁场变化带来的干扰。在这个方案中还有其他比较有特色的地方，在以后的硬件部分内容中进一步阐述。

## 2.2 传感器原理

随着现代科学实验手段的日趋现代化，人们获取实验数据的方法也趋于多样化。作为非电量的电测量系统的传感器在科研生产中有重要的应用。有的传感器往往只能测量被测件的单一信息，限制了测量的准确性和可靠性。而电涡流传感器能够通过输出的频率峰值反映被测件的材料、外形等多种信息，而且这类传感器具有结构简单、频响范围宽、灵敏度高、抗干扰能力强以及不受油污等介质的影响等优点。该类传感器可通过测量电路、接口电路和计算机相连，具有更高的测量准确性和可靠性，在现代科研生产中有重要的应用价值。目前这种传感器已广泛用来测量位移、振动、厚度、转速、温度、硬度等参数，以及用于无损探伤领域（文献【4】）。

### 一、电涡流式传感器的原理特性分析

#### 1、基本工作原理

当通过金属导体中的磁通发生变化时，就会在导体中感应电流，这种电流的流线在金属体内自行闭合，通常称之为电涡流。电涡流的产生必然要消耗一部分磁场能量，从而使产生磁场的线圈阻抗发生变化，电涡流传感器就是基于这种电涡流效应。

在图 2-7 中，当线圈中通以正弦交变电流时，线圈的周围就产生正弦交变



磁场  $H_1$ ，置于磁场中的金属板中产生感应电动势，形成电涡流，这个电涡流必然引起线圈阻抗的变化<sup>[5]</sup>。

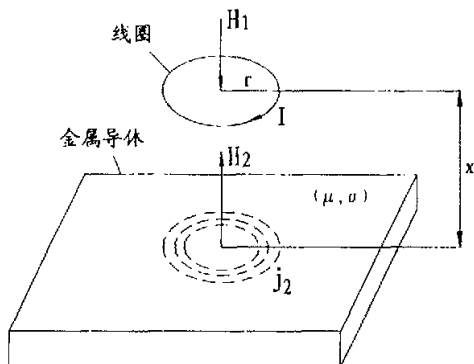


图 2-7 电涡流产生示意图

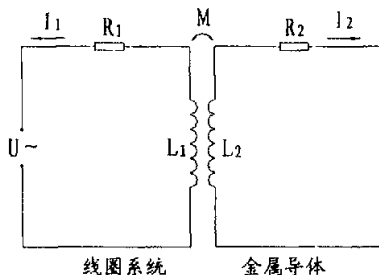


图 2-8 等效电路图

显然，线圈阻抗的变化既与电涡流有关，又与静磁学有关，也就是说，与金属导体的电导率、磁导率、几何形状、线圈的几何参数、激励电流频率以及线圈到金属导体的距离等参数有关。假定金属导体是均质的，其性能是线性和各向同性的，则线圈与金属导体系统的物理性质通常可由磁导率  $\mu$ 、电导率  $\sigma$ 、尺寸因子  $r$ 、 $t$  及  $X$ 、激励电流  $I$  和频率  $\omega$  等参数来描述。线圈的阻抗  $Z$  可用如下函数表示：

$$Z = F(\mu \cdot \sigma \cdot r \cdot X \cdot t \cdot I \cdot \omega) \quad (1)$$

如果控制上式中的某些参数恒定不变，而只改变其中的一个参数，这样阻抗就成为这个参数的单值函数，因此，电涡流传感器完整地应看作是一个载流线圈加上金属导体。

## 2、等效电路分析

我们把金属导体形象地理解为一个短路线圈，它与传感器线圈磁性相联，可得到图 2-8 所示的等效电路图。

假定传感器线圈原有电阻为  $R_1$ ，电感为  $L_1$ ，则其复阻抗为

$$Z_0 = R_1 + j\omega L_1 \quad (2)$$

在线圈与导体之间存在一个互感系数  $M$ ， $U$  为激励电压， $R_2$ 、 $L_2$  为导体的等效电阻和电感。由所示等效电路，根据克希荷夫定律，可以列出如下方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{U} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & -j\omega M \\ -j\omega M & R_2 + j\omega L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

求解上述方程组可得到  $\dot{I}_1$  及  $\dot{I}_2$ ，进而可以求得线圈在受到导体影响之后的等效阻抗为：

$$Z_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega[L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}] \quad (4)$$

同时可以得到线圈的等效电感为：

$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (5)$$

比较  $Z_0$  与  $Z_1$  两式可知，由于涡流的作用，使得阻抗的实部（电阻部分）增大，而虚数部分等效电感是增大还是减小，这主要由金属导体材料而定。当金属导体为非磁性材料时，由于  $L_1$  值不变，所以等效电感  $L$  就减小；当金属材料为磁性材料时，由于导体被磁化使  $L_1$  也增大，而增大得比  $L$  中的第二项增加得还多，因此等效电感  $L$  将增大。

由（4）式也可得到线圈的品质因素  $Q$  为

$$Q = Q_0 \frac{1 - \frac{L_2}{L_1} \left( \frac{\omega M}{Z_2} \right)^2}{1 + \frac{R_2}{R_1} \left( \frac{\omega M}{Z_2} \right)^2} \quad (6)$$

式中： $Q_0 = \omega L_1 / R_1$  为无导体影响时线圈的  $Q$  值；

$Z_2^2 = R_2^2 + (\omega L_2)^2$  为导体中产生的电涡流环流的阻抗。

### 3、电涡流的形成范围<sup>[6]</sup>

线圈在金属导体上形成的电涡流的分布并不均匀，其密度不仅是距离  $x$  的函数，而且电涡流只在导体表面薄层内形成，在径向也只限于有限范围内。

据分析，导体中电涡流的强度与线圈到导体的距离  $x$  间关系可用下式确定：

$$I_2 = I_1 \left[ 1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + r_1^2}} \right] \quad (7)$$

其中,  $x$  为线圈与导体间的距离,  $r_1$  为线圈的外半径。

电涡流密度的径向变化规律可用下式表示:

$$j_r = \begin{cases} j_0 v^4 e^{-4(1-v)} & 0 \leq r \leq r_1 \\ j_0 v^{14} e^{-14(1-v)} & r \geq r_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $v = \frac{r}{r_1}$ ,  $j_0$  为  $v=1$  处的最大电涡流密度。

电涡流密度在金属导体中沿轴向的分布规律可用下式表示:

$$j_x = j_0 e^{-x/t} \quad (9)$$

式中:  $j_x$  为金属导体中离表面距离为  $x$  处的电涡流密度;

$j_0$  为金属导体表面上的电涡流密度;

$t$  为电涡流的轴向贯穿深度。

由此可知, 电涡流受到影响最深的位置是在中心点, 当产品到达该位置时, 磁场变化引起的电压差是最大的。

电涡流传感器的灵敏度和线性范围主要受线圈产生的磁场分布情况影响, 线圈外径大时, 线圈的磁场轴向分布范围大, 但磁感应强度的变化梯度小; 而线圈外径小时, 磁感应强度轴向分布的范围小, 但磁感应强度的变化梯度大。这就是说, 电涡流传感器的线圈外径越大, 线性范围越大, 但灵敏度低; 与此相反, 线圈外径越小, 传感器的灵敏度将越高, 而线性范围越小。线圈内径的变化只是在靠近线圈处灵敏度稍有不同。同样, 线圈厚度的变化, 也仅在靠近线圈处对灵敏度稍有影响。从工作原理可知, 电涡流传感器是利用线圈与被测金属导体之间的磁性耦合程度的变化进行测量的, 被测体的物理性质、几何形状及尺寸都会在测量结果上有所反映。因此, 根据所需测定物体的几何形状、尺寸及物理性质可大致确定传感器的各参数。

## 2.3 智能型金属探测器的系统构成

### 一、系统的组成

如图 2-9 所示为本次设计所采用的金属探测器的系统组成框图。它由电涡流传感器、正弦波振荡器、滤波电路、检波电路、信号处理电路、LCD 显示电路、电源电路组成:

- 1、探测线圈由三根几何参数相同的平面线圈组成，它们分别构成两个 LC 正弦波振荡电路的电感部分，在电路中以平衡差动方式工作，用来检测当金属物出现时线圈电感参数的变化。线圈特性的好坏，对系统的分辨率、灵敏度和稳定性有重大影响。
- 2、检波线路是由模拟乘法器来完成检波的任务，采用 MOTOROLA 公司的 MC1496 模拟乘法器。它利用的原理是相敏原理，它的输出为两个正弦波正交分解的量。此时，电路分成两个对称的测量电路，分别经滤波电路后对所得的新的信号量进行处理。
- 3、信号处理电路是由多级放大和滤波电路组成的，它将电涡流传感器检测到的微小变化电压值多级放大，根据测量到的不同等级电压值判断检测金属含量或者颗粒大小。
- 4、LCD 显示和报警电路用来完成人机对话功能，可以方便地参看和修改参数，调节相应的检测灵敏度和精度，同时在检测到金属杂质时报警提醒工作人员。
- 5、电源电路提供以上各电路所需的工作电压。

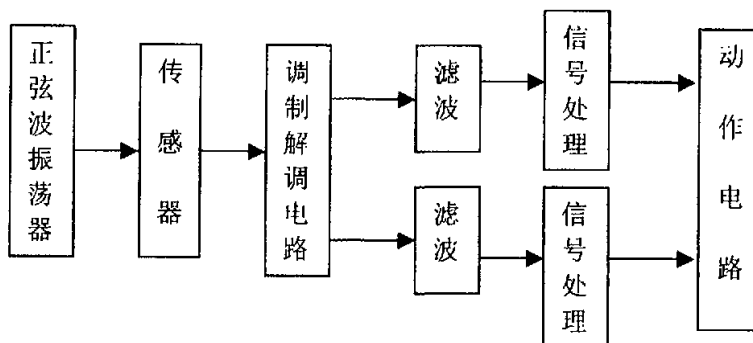


图 2-9 金属探测器系统组成框图

## 二、系统的特征

本金属探测器与现有金属探测器相比较有许多优点，现有的金属探测器主要由传感器、检测电路及比较电路等组成，利用探测仪内设置的固定参考频率与探头产生频率经混频器和滤波后进行比较，由于混频易产生高次谐波，差频信号难以取出，干扰大，电路不稳定，灵敏度低，且探头的互换性差。

研制本金属探测器的目的是在于提供一种采用对称设计的调频测量电路和

平衡式的相敏检测电路来实现金属探测，使探测头的互换性好，整机灵敏度高，稳定性好。

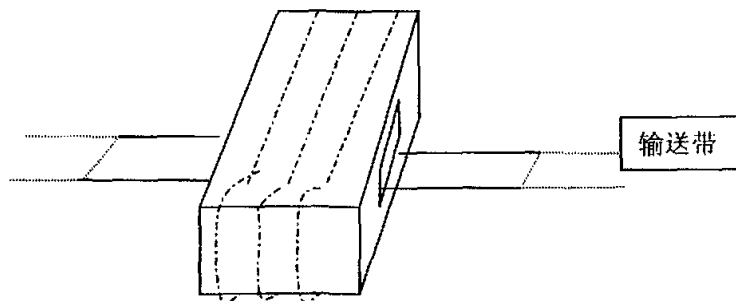


图 2-10 传感器线圈内部结构示意图

如上图 2-10 所示,本金属探测器的特征在于传感器线圈的设计采用了平衡对称式,中间的线圈是发射电路正弦波振荡器的电感部分,两边的线圈是接收电路的正弦波振荡器的电感部分,探头传感信号的输出由两个结构形式相同的整形电路和信号处理电路组成,通过模拟乘法器来完成检波的任务,它的输出接入信号处理电路。

模拟乘法器其实就是利用相敏原理来实现信号提取的器件<sup>[7]</sup>。相敏检测电路原理如下图 2-11 所示:

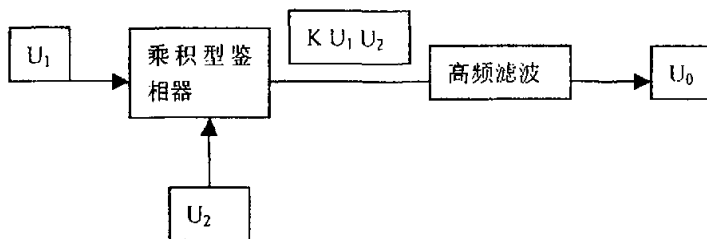


图 2-11 相敏检波原理示意图

$U_1$ 、 $U_2$  为乘积型鉴相器的两个输入，均为小信号，其中  $U_2$  是载波信号输入， $U_1$  是产品信号输入。两个信号输入后作乘法运算，输出结果为两者的乘积，再经高频滤波将倍频信号滤除，留下低频信号输出。可以用下面的公式来表示：

假设  $U_1$ 、 $U_2$  均为小信号， $U_2$  为参考信号，则  $\varphi_2(t) = 0$ 。

$$u_1 = u_{1m} \cos[\omega t + \varphi_1(t)], \quad u_2 = u_{2m} \sin[\omega t + \varphi_2(t)] = u_{2m} \sin \omega t$$

可以推导出:

$$\begin{aligned} i &= k_m u_1 u_2 = k_m u_{1m} \cos[\omega_c t + \varphi_1(t)] u_{2m} \sin \omega_c t \\ &= \frac{1}{2} k_m u_{1m} u_{2m} \sin[-\varphi_1(t)] + \frac{1}{2} k_m u_{1m} u_{2m} \sin[2\omega_c t + \varphi_1(t)] \end{aligned}$$

第 2 项经高频滤波消除后, 得到最后的输出  $u_0$ :

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{1}{2} k_m u_{1m} u_{2m} R_L \cdot \sin[-\varphi_1(t)] \\ &= \frac{1}{2} k_m u_{1m} u_{2m} R_L \cdot \sin \varphi_1(t) \end{aligned}$$

由上式可得出电压与相角之间的数值关系, 而且相角  $\varphi$  的范围为  $0 \sim 180$ 。

我们便是根据这个关系式得到采样电压与金属含量之间的数值算法。

以相角  $\varphi_1(t)$  作为变量, 求取函数  $U$  的跨导:  $s_\varphi = \left. \frac{du_\varphi}{d\varphi_e} \right|_{\varphi_e = 0}$ 。

图 2—12 为模拟乘法器 MC1496 检波时的解调输出信号, 即  $KU_1 U_2$ 。

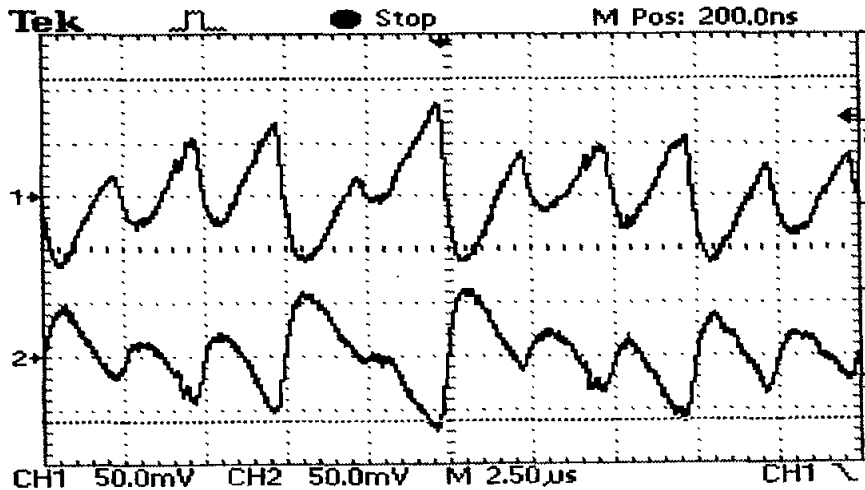


图 2—12 MC1496 解调输出信号波形图

由于铁和不锈钢在传感器中反应的金属信号不一样, 所以为了区分这两种金属杂质, 提出同时检测和显示两路金属信号的方案。具体实现是采用两个乘法器来完成相位检测, 其基本原理是: 假设接收线圈的输出为  $U_0 = A \sin(\omega t - \varphi)$ ,

调制电路的两个输入为同频率且相位正交的正弦波，分别为  $U_B = B \sin \omega t$  和  $U_C = B \sin(\omega t + 90^\circ)$ 。

信号通过乘法器后输出分别为：

$$U_R = U_0 \times U_S = A \sin(\omega t - \varphi) \times B \sin \omega t = -\frac{AB}{2} [\cos(2\omega t - \varphi) - \cos \varphi]$$

$$U_X = U_0 \times U_C = A \sin(\omega t - \varphi) \times B \sin(\omega t + 90^\circ) = -\frac{AB}{2} [\sin(2\omega t - \varphi) - \sin \varphi]$$

经过低通滤波器之后，第一项倍频信号被滤掉，最后输出为：

$$U_R = \frac{AB}{2} \cos \varphi$$

$$U_X = \frac{AB}{2} \sin \varphi$$

由于  $B$  为可控制常量，所以  $U_R$  和  $U_X$  的大小决定于相位  $\varphi$  和幅值  $A$ 。研究表明在正弦波频率不变的情况下，幅值与物体的大小相关，而物体所属的种类与相位相关。当物体随着传送带运动时将形成以  $U_R$ 、 $U_X$  为参考量相对传送带速度的曲线。通过对这个曲线的幅值和方向的检测可以判断物体的种类。

智能型金属探测器还有一个显著的特点就是具备自学习功能。根据以上分析，我们可以找到自学习方法研究的入口，根据相敏检波电路达到分离金属信号和产品信号的目标，同时满足有效抑制产品效应的要求。关于自学习方法实现和实验结果分析，将在第五章进行详细阐述。

### 第三章 检测装置的总体方案和硬件组成

本章首先根据上海某金属探测设备有限公司食品用金属探测器的总体要求提出了智能型金属探测装置的总体方案,并进行了相关的硬件系统设计和硬件电路调试,最后阐述了系统采取的抗干扰措施。

#### 3.1 检测装置的总体方案

智能型金属探测器在线检测装置的设计应该考虑到以下几个方面:

- 1、 必须具有足够高的灵敏度,能检测出满足精度要求的金属杂质;
- 2、 必须具有足够高的稳定度,能抵抗各种外界环境的干扰,维护方便;
- 3、 快速完成检测数据采集、处理、显示、存储、查询和标记等任务;
- 4、 有良好的人机对话界面,可以灵活的修改参数,有记忆功能;
- 5、 易于扩展,有较好的灵活性。

以 T1 公司开发生产的 DSP 仿真器为核心开发的智能型金属探测系统,开发过程如下:

- 1、 方案选择 根据课题的情况,综合考虑芯片数据处理速度、存储空间容量、扩充能力及其市场价格,采用以 T1 公司的 TMS320LF2407 为核心的控制方案,该芯片处理速度高达 30 MIPS (million instruction per second),稳定性好、精度高、可重复性好、抗干扰能力强,适合工作在电磁环境恶劣的工业环境。
- 2、 硬件配置 根据确定的方案,选择一定型号和参数的硬件:本系统以 DSP 为基础核心,采用迅特公司型号为 XDS-510PP 的 DSP 仿真器,将 CPU 和 PC 机通过 JTAG 口连接起来。完成与 DSP 交换各种数据的外部设备有: A/D 转换器, D/A 转换器, 静态存储器, 非易失性存储器 (EEPROM), 光电开关, LCD, MAX485, SCI 串口装置, 单片机系统等等;
- 3、 软件选择 根据要开发的系统软件,选择合适的开发工具,我们选择了 CC`C2000 和 Keil C 语言作为我们的开发工具,前者是 DSP 软件开发平台,后者用来为单片机提供语言环境;
- 4、 硬件安装和调试 熟悉系统各个组成硬件的技术要求、接口性质、连接方法,合理布置各个硬件的位置,将各个组成硬件连接在一起,使整个系



统结构紧凑，安全性、抗干扰性又好。硬件安装结束后，多次查线确定安装的正确性，随后检查各个接口、各个接点是否安装正确，电平配置是否有效等；

- 5、 系统配置 现场检测到的信号，经过DSP信号处理后，设置电机运行特性，设置新的检测参数存储在单片机系统中，完成相应的参数存储和报警判断功能，区分各种产品的检测参数，实现自动检测功能。
- 6、 系统软件开发 利用程序开发工具开发控制系统软件，完成检测参数输入、实时数据采集、数据处理、数据在线存储及数据输出、密码输入界面等功能。最后生成可执行文件交给用户使用。

### 3.2 检测装置的硬件组成

早在 20 世纪 70 年代，国内就开始在食品安全检测方面使用金属探测器，使用的电子元件大多是电子管、晶体管，线路庞大，功耗大。随着集成电路的发展乃至出现超大规模集成电路，金属探测器的发展也产生了一个飞跃，从纯模拟线路转向模拟与数字线路相结合。从 8 位单片机发展到 16 位、32 位单片机，再到功能强大的 DSP（数字信号处理器），数字化产品的发展又逐步提高了金属探测器的性能，扩大了金属探测器的应用范围。应用 DSP（数字信号处理）技术，已成为控制系统、智能仪表、数据采集等各个领域的发展主流。DSP 运算处理速度快，数据存储迅速可靠，输出灵活，可扩展性好。利用它的这些优势，本系统在构成上采用以 TMS320LF2407 为核心，配合相应的数据采集与处理电路和传感器等外围电路，充分利用 DSP 的灵活、高速、可编程能力强等特性，和单片机完成快速、便利的信息交换和数据处理<sup>[6]</sup>。

图 3-1 中示出了食品用智能型金属探测器在线检测装置系统结构图。

整个系统可分成三个部分：输入部分、控制部分、输出部分。

输入部分可分为金属探测器模拟量输入，光电开关量输入。

控制部分含有 TMS320LF2407，它的内部含有 10 位 A/D 转换器、SCI 串行通信口。

输出部分可分为 AT89C55WD 单片机、参数输入界面和电机控制系统。

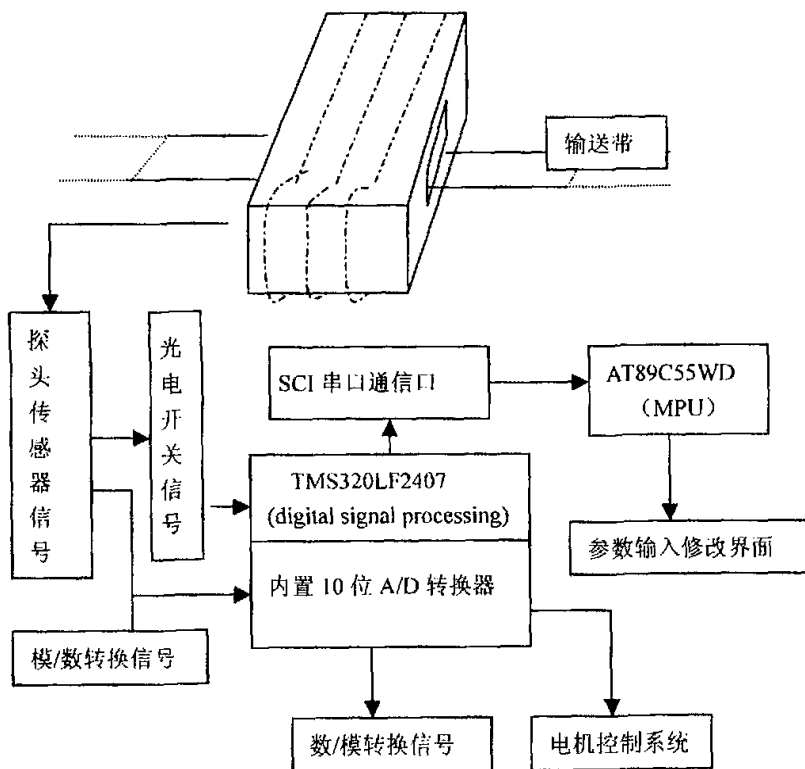


图 3-1 智能型金属探测器在线检测系统结构图

### (一) 输入部分

#### 1、 金属探测器

为了能够快速有效地检测出输送带上的产品是否含有金属杂质,同时和公司的其他探测设备外型一致,我们也采用外形有效宽度为 36cm 的探头来测试性能。按照图 3-1 所示的探头模型制作,分别用环氧树脂和其他填充物固定内部的线圈。和现有的金属探测器不同的是,频率源正弦波的产生是利用数字化的芯片 AD9832 来完成的,而不是用 RLC 串联或并联谐振电路实现,这样提高了波形产生的稳定性,并能方便有效地修改波形参数,比如频率值和初始角度。下面将介绍一下 AD9832 芯片的工作原理。

AD9832 是 AD 公司生产的一款完整的 DDS 芯片(直接数字频率合成器)。直接数字频率合成是一种新的频率合成技术和信号产生方法。直接数字频率合成器

(DDS)具有超高速的频率转换时间,极高的频率分辨率和较低的相位噪声,在频率改变与调频时,DDS器件能够保持相位的连续,因此很容易实现频率、相位和幅度调制。此外,该器件还具有可编程控制的突出优点。因此,直接数字频率合成器得到了越来越广泛的应用,成为当今电子系统及设备中频率源的首选器件。

AD9832 的最高时钟频率可达 25MHz,其内部的功能结构如图 3-2 所示。AD9832 主要由数控振荡器(NCO)和相位调制器、正弦查询表以及一个 10 位数模转换器(DAC)组成。其中数控振荡器和相位调制器部分包含两个 32 位的频率寄存器、一个 32 位的相位累加器和四个 12 位的相位寄存器。图中相位累加器可在每一个时钟周期来临时将频率控制码所决定的相位增量 $\Delta\text{phase}$ 累加一次,如果记数大于  $2N$ ,则自动溢出,而只保留后面的  $N$  位数字于累加器中。正弦查询表 ROM 用于实现从相位累加器输出的相位值到正弦幅度值的转换,并根据输入到正弦查询表 ROM 的相位值取出 ROM 中与其对应的数字量,然后送到 DAC 中将其转变为模拟量,最后通过滤波器输出一个很纯的正弦波信号。

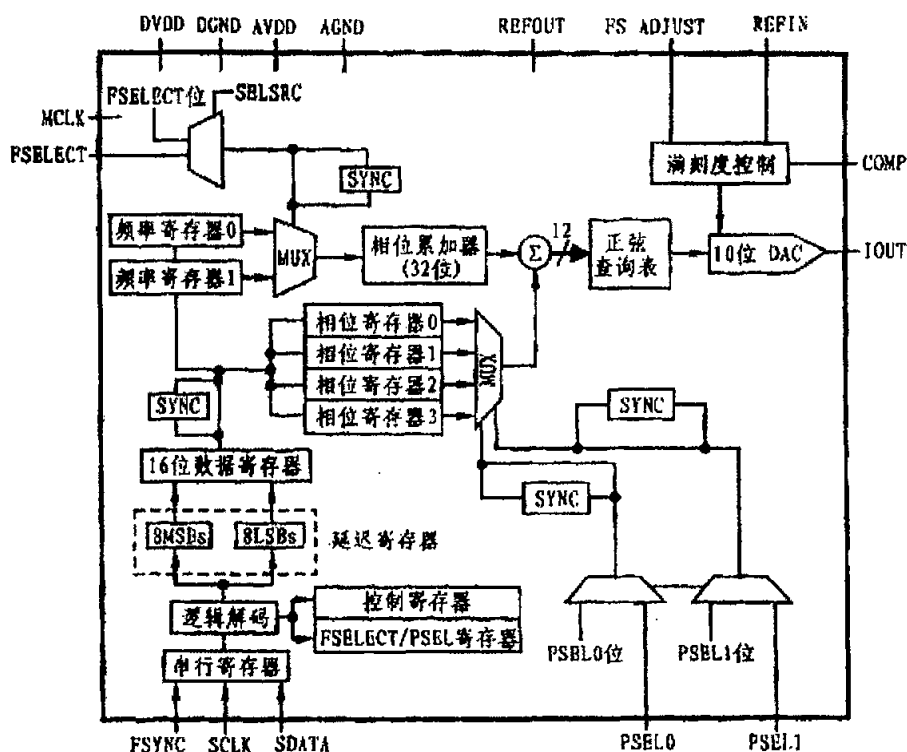


图 3-2 AD9832 内部功能结构图

其输出频率  $f_{out}$  与时钟  $f_{clk}$  及频率控制码决定的相位增量  $\Delta phase$  有关。可用下式算出：

$$f_{out} = (\Delta phase / 2N) \cdot f_{clk}$$

式中，N 是相位累加器的比特值。

根据奈奎斯特定理，DDS 的最高输出频率应小于  $f_{clk}/2$ ，而实际只能达到 40%  $f_{clk}$ 。

DDS 的最小频率分辨率可由下式给出： $\Delta f_{min} = f_{clk} / 2N$

因此，只要 N 足够大，即累加器的位数具有足够的长度，就能得以所需的频率分辨率。

根据食品用金属探测器在不同频率下测试产品时的不同反映，选取 100K 的正弦波频率作为工作频率，同时采用三组 AD9832 产生三路正弦波，一路是给发射电路作为 LC 振荡器的频率源，另外两路是参考波，两者的相位差为 90 度。如图 3-3 所示。

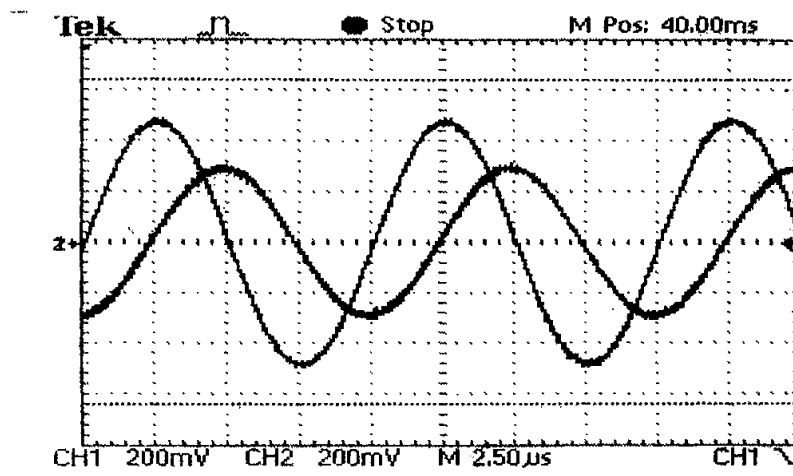


图 3-3 两路正交正弦波波形示意图

由于 AD9832 的可编程性，可以由 DSP 来控制它的频率和幅度值的改变，从而得到频率源正弦波的产生。当产品通过金属探测器的探头部分时，改变了探头内部的磁场密度分布，在传感器的输出端电压的幅值上反映出来，通过多级放大电路和滤波电路，由 TMS320LF2407 内部的 A/D 转换器采样然后对数据进行处理，把结果传送给单片机端。

## 2、 光电开关

### (1) 功能

为了准确地计算产品进入探头内部的时间,同时确定 DSP 的 A/D 采样周期和控制周期,采用光电开关信号来判断产品是否进入了探测区域。另外,光电开关还有可靠性好、性能稳定、体积小和使用方便的优点。因此,采用优质的光电开关通过对产品进入区域的时间判断来确定采样的起点和采样时间的控制无疑是很方便的。

### (2) 基本原理

光电开关根据工作方式分,有漫反射式、镜反射式和对射式等三种。我们采用的是镜反射式光电开关。

光电开关属于光电式传感器的一种应用器件(文献【9】)。光电式传感器是将光电信号转换成电信号的传感元件,只要将被测物理量的变化转换成光信号的变化,即可获得相应变化的电信号。光电式传感器广泛应用于自动检测中,它具有反应迅速、结构简单可靠、非接触测量等优点。光电效应是光电式传感器的物理基础,它通常分外光电效应和内光电效应两大类。应用光电效应原理研制成的光电式传感器常见的有光敏电阻、光敏二极管和光敏三极管、光耦合器件等。而光敏电阻是一种均质半导体光电器件。一般选用禁带宽度较大的半导体材料做成。在黑暗的环境下,它的电阻称为暗电阻。当它受到光线照射时,若光子能量大于该半导体材料的禁带宽度,价带中的电子吸收光子跃迁到禁带,激发出电子一空穴对,从而增强了导电性,使电阻值降低。照射的光线越强,阻值变得越低。当光照停止时,电子与空穴复合,电阻又恢复到原来的暗电阻值。光敏电阻具有很高的灵敏度,光谱响应的区域可以从紫外光区域到红外光区域。光敏电阻体积小,性能稳定,成本低。但是其光照特性是非线性的,只能用作开关量检测。

### (3) 光电开关的选择

系统要求能检测金属异物并能自动报警停机/剔除,因为被测产品是放在输送带上进行测试的,所以根据匀速运动的速率,可以计算出产品进入测试区域的时刻和通过的时间,而采样点的开始时刻就需要光电开关的信号作为判断。这样,能够准确地判断何时是采样的开始点并排除外界干扰带来的错误数据,达到优化采样数据质量的效果。

我们选用的光电开关是浙江洞头开关厂生产的 SE 系列超小型光电开关。由于该项目中选用的探头尺寸是 400 (mm) \*150 (mm) \*360 (mm)，所以光电管的检测距离可以控制在 1m。根据 SE 系列超小型光电开关三种工作方式的检测距离，即漫反射型 10cm、镜反射型 1m 和对射型 2m，我们选择镜反射型光电开关 SE2M-1K。它的电压范围是直流型 10-30VDC，我们选择 12 VDC 作为工作电压。接线方式如下图 3-4 所示。

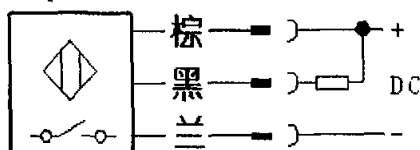


图 3-4 直流 NPN 型三线常开

棕色线和蓝色线是电源线，黑色线是信号线，占用 DSP 端口 PE 的一位 (PE0 位)。根据信号线的高低电平变化，来判断产品进入检测区域，并开始清零计时。

光电开关和反射镜分别安装在探头的两侧，两者的底部和探头通道口的底端同一水平线，保证准确快速地判断被测产品是否进入测试区域。

## (二) TMS320LF2407(Digital Signal Processing)

DSP 最早是指一种信号处理技术，直到八十年代初第一颗商用数字处理器问世，DSP 才逐步成为一种全新高速处理器的名称。最初 DSP 的应用在于专业数据通信和语音处理，各种专用调制解调器、声码器、数据加密机等初步获得市场。其后 DSP 应用扩展到广泛的民用产品，诸如硬盘驱动器、通用调制解调器、数字答录机、无线通信终端。九十年代中 DSP 在数字 GSM 手机应用和无线基站应用中都获得了巨大的成功。与此同时，DSP 开始全面拓展到新兴应用，并在宽带通信、数字控制、数字音频、数字视频等众多市场上捷报频传。在国内 DSP 为数字信息产品带来更为广阔的发展空间，并将支持通信、计算机和消费类电子产品的数字化融合。在无线领域，DSP 遍及无线交换设备、基站和手持终端；在网络领域，DSP 涵盖从骨干基础设施到宽带入户设备，包括 VoIP 网关和 IP 电话、DSL 和 Cable Modem 等。面向群体应用，DSP 在媒体网关、视频监控、专业音响、数字广播、激光打印等应用中表现出色；面向个人应用，DSP 在便携式数字音频和影像播放器、指纹识别和语音识别等应用中表现不俗。在自动控制领域，DSP 极大满足了工业界的需求，如数字变频电力电源设备、工业缝纫机、绣花机、

喷绘机等，同时 DSP 也极大地满足了消费者的需求，如变频空调、冰箱、洗衣机、代步器材等。

超凡的性能和功耗使德州仪器的 DSP 成为消费电子厂商的首选核心。基于性能和价格的考虑，在这里我们选择德州的 TMS320LF24x 系列的 2407 作为控制器。

TMS320LF240xDSP 有以下一些特点<sup>[10]</sup>：

- 采用高性能静态 CMOS 技术，使得供电电压降为 3.3V，减小了控制器的功耗；30MIPS 的执行速度使得指令周期缩短到 33ns (30MHz)，从而提高了控制器的实时控制能力。
- 基于 TMS320C2xx DSP 的 CPU 核，保证了 TMS320LF240x 系列 DSP 代码和 TMS320 系列 DSP 代码兼容。
- 片内有高达 32k 字的 FLASH 程序存储器，高达 1.5k 字的数据/程序 RAM，544 字双口 RAM (DARAM) 和 2k 字的单口 RAM (SARAM)。
- 两个事件管理器模块 EVA 和 EVB，每个包括：两个 16 位通用定时器；8 个 16 位的脉宽调制 (PWM) 通道。
- 可扩展的外部存储器 (LF2407) 总共 192k 字空间：64k 字程序存储器空间、64k 字数据存储器空间和 64k 字 I/O 寻址空间。
- 看门狗定时器模块 (WDT)。
- 10 位 A/D 转换器最小转换时间为 500ns，可选择由两个事件管理器来触发两个 8 通道输入 A/D 转换器或一个 16 位通道输入的 A/D 转换器。
- 控制器局域网络 (CAN) 2.0 B 模块。
- 串行通信接口 (SCI) 接口模块。
- 16 位的串行外设 (SPI) 接口模块。
- 基于锁相环的时钟发生器。
- 高达 40 个可单独编程或复用的通用输入/输出引脚 (GPIO)。
- 5 个外部中断 (两个电机驱动保护、复位和两个可屏蔽中断)。
- 电源管理包括 3 种低功耗模式，能独立地将外设器件转入低功耗工作模式。

考虑到如果液晶显示模块直接和 DSP 连接的话，占用的 I/O 端口资源太多，给以后的功能扩展和调整带来一定的困难。所以我们在方案设计的时候提出了利

用 SCI 串行通信接口模块完成 DSP 和液晶显示模块的连接问题。下面就对 TMS320LF2407 的 SCI 串行通信接口模块进行简单介绍。

SCI 模块支持 CPU 与其他使用标准格式的异步外设之间的数字通信。SCI 接收器和发送器是双缓冲的, 每一个都有它自己单独的使能和中断标志位。两者都可以独立工作, 或者在全双工的方式下同时工作。为了确保数据的完整性, SCI 对接收到的数据进行间断检测、奇偶性校验、超时和帧出错的检查。通过一个 16 位的波特率选择寄存器, 数据传输的速度可以被编程为 65535 多种不同的方式。

SCI 模块的特性包括<sup>[8]</sup>:

- 两个外部引脚
  - ✧ SCITXD: SCI 发送数据引脚;
  - ✧ SCIRXD: SCI 接收数据引脚;
 在不使用 SCI 时, 这两个引脚可用作通用 I/O 口。
- 通过一个 16 位的波特率选择寄存器, 可编程 64k 种不同速率的波特率; 在 40MHz 的 CPU 时钟方式下, 波特率范围从 76 bps 到 1875Kbps。
- 数据格式: 一个起始位; 1~8 位的可编程数据字长度; 可选择的奇/偶/无校验位; 一个或者两个停止位。
- 4 种错误检测标志位: 奇偶错、超时、帧出错或间断检测。
- 两种唤醒多处理器方式: 空闲线或地址位唤醒。
- 半双工或全双工操作。
- 双缓冲的接收和发送功能。
- 发送和接收的操作可以利用状态标志位通过中断驱动或查询算法来完成。
  - ✧ 发送器: TXRDY 标志 (发送缓冲寄存器准备接收另一个字符) 和 TXEMPTY 标志位 (发送移位寄存器空)
  - ✧ 接收器: RXRDY 标志 (接收缓冲寄存器准备接收另一个字符)、BRKDT 标志 (间断条件发生) 和 RXEERR 标志 (监视 4 个中断条件)
- 发送器和接收器的中断位可独立使能 (除 BRKDT 外)。
- 不返回零 (NRZ) 格式。
- SCI 模块的 10 个控制寄存器地址位于 7050h~705Fh 之间。



通过 SCI 串口通信模块，可以利用上位机的串行口与下位机进行 RS-485 通信，进行上位机与下位机之间的数据交换，实现 DSP 对生产现场的监测和控制。

AT89C55 系列单片机与 TMS320LF2407DSP 之间的 RS2-485 串行通信接口电路如下图所示。

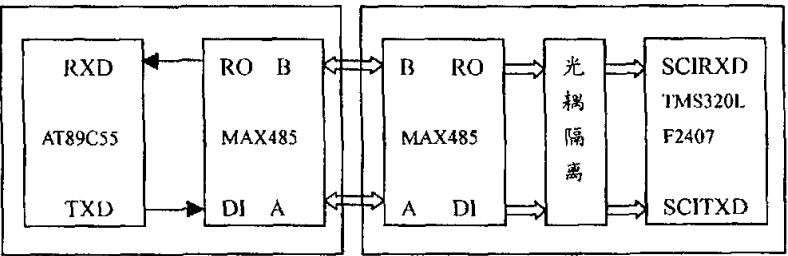


图 3-5 AT89C55 和 TMS320LF2407 之间的串行通信接口电路

为了简化通信机制和硬件电路结构，采用 2 条信号线和 1 条方向控制信号线的简单连接。整个通信系统主要由单片机部分、RS2-232/ RS2-485 接口转换部分和 DSP 部分组成。

### (三) 输出部分

#### 1、 AT89C55WD 单片机

ATMEL 公司推出的带有看门狗功能的单片机 AT89C55WD 带有 20K 的程序存储器，是一种低功耗、高性能、CMOS 型 8 位微处理器，是 8051 系列中一款较为先进的产品，其看门狗功能可以大大提高产品的稳定性，大容量的内部程序存储器可以容纳功能丰富的软件，与 MCS51 系列产品的指令和管脚兼容<sup>[11-12]</sup>。片内带有一个 20KB 的 Flash 可编程/可擦除/只读存储器，它采用了 CMOS 工艺和 ATMEL 公司的高密度非易失性存储器技术，而且其输出引脚和指令系统都与 MCS-51 兼容。同时器件采用了静态设计，可提供很宽的操作频率范围频率（可从 33MHz 降至 0）。可实现两个由软件选择的节电模式和掉电模式，冻结 CPU 但 RAM 定时器串口和中断系统仍然工作，掉电模式保存 RAM 的内容，但是冻结振荡器导致所有其它的片内功能停止工作。由于设计是静态的，时钟可停止而不会丢失用户数据，运行可从时钟停止处恢复。

AT89C55 的特性包括：

- 与 MCS-51 系列产品的兼容性良好;
- 20KB 可编程 FLASH 存储器;
- 可容许 1000 次反复擦写;
- 4V-5.5V 的工作电压范围;
- 全静态操作: 0Hz~33MHZ;
- 256x8-bit 内部 RAM;
- 32 条 I/O 口线;
- 3 个 16 位定时/计数器;
- 8 个中断源;
- 节电空闲模式和掉电模式;
- 掉电模式可通过外部中断唤醒;
- 看门狗定时器;
- 双数据指针;
- 掉电指示。

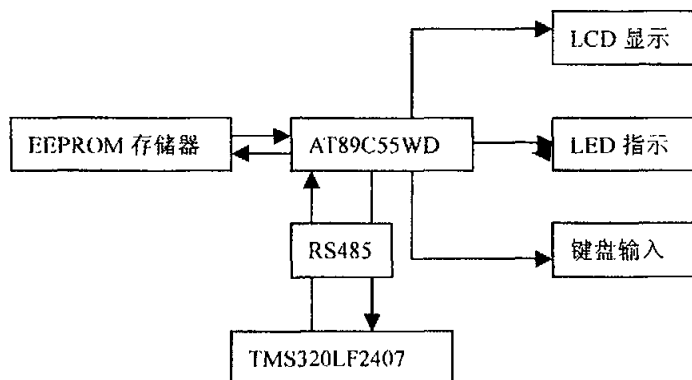


图 3-6 AT89C55WD 系统功能示意图

如上图 3-6 所示, 在这个方案里, 单片机 AT89C55WD 完成的功能是通过 RS-485 实现与 DSP 之间的串行通信, 将 DSP 处理结果传送给单片机, 控制键盘输入电路对检测参数的更改并保存在 EEPROM 中, 并用液晶显示和 LED 指示灯显示来实现良好的人机对话。

AT89C55 可以通过引脚 RXD (串行数据接收端) 和 TXD (串行数据发送端) 进行串行通信, 有两个物理上独立的接收、发送缓冲器 SBUF, 它们占用同一地

址 99H, 可以同时发送接收数据。这里使用 AT89C55 的定时器 T2 作为串行通信的波特率发送器, T2 的溢出率经 2 分频 (或不分频) 后又经 16 分频作为串行发送或接收的移位脉冲。移位脉冲的速率即是波特率。串行口的发送和接收都是以特殊功能寄存器 SBUF 的名义进行读或写的。当向 SBUF 执行 “SBUF = scitxbuf[i];” 指令时, 即是向发送缓冲器 SBUF 装载并开始由 TXD 引脚向外发送一帧数据, 发送完便使发送中断标志 TI 置位  $TI = 1$ 。在满足串行口接收中断标志位  $RI = 0$  的条件下, 置允许接收位  $REN = 1$  就会接收一帧数据进入移位寄存器, 并且装载到接收 SBUF 中, 同时使  $RI = 1$ 。当向 SBUF 执行 “scirxbuf[i] = SBUF;” 时, 便由接收缓冲器 SBUF 取出信息通过内部总线送 CPU。AT89C55 串行口是可编程接口, 对它初始化编程只用两个控制字分别写入特殊功能寄存器 SCON 和电源控制寄存器 PCON 中即可。

EEPROM 选用 ATMEL 公司的 AT93C66A, 它提供了 4KB 的字节容量, 是 three 根串口控制线的电可擦除只读存储器。这是根据系统方案中的参数容量来选择的。每个产品的参数含有产品标识符、产品序列号、标题、相位 0-360 度、两路灵敏度 0-99 倍和阈值 0-10V, 它们分别占用 2wb、2wb、4wb、1wb、1wb 和 1wb 共 11wb, 一共设置存储 12 种产品的参数共 132 个字。除此之外, 还有一些密码输入、自动设定和系统状态 (比如停止/运行状态) 等显示参数的存储, 所以我们选择了 AT93Cx6 系列的 AT93C66 (512 x 8 or 256 x 16)。

## 2、参数输入界面

参数输入界面是由图形点阵液晶和键盘输入电路来实现的。根据系统参数显示的字符多少, 我们选择了型号为 RCM12864D 的液晶。RCM12864D 是一种图形点阵液晶显示器, 它主要由行驱动器/列驱动器及 128×64 全点阵液晶显示器组成。可完成图形显示, 也可以显示 8×4 个 (16×16 点阵) 汉字。

主要技术参数和性能:

- 1、模块内自带 -10V 电压, 用于 LCD 的驱动电压;
- 2、电源 VDD: +5V;
- 3、显示内容: 128(列) × 64(行) 点;
- 4、全屏幕点阵;
- 5、十三种指令;

- 6、与 CPU 接口采用 8 位数据总线并行输入输出；
- 6、占空比 1/64；
- 7、工作温度：-10℃~+55℃，存储温度：-20℃~+70℃。

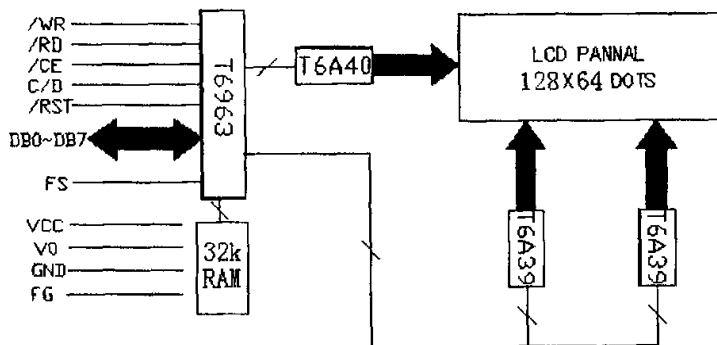


图 3-7 RCM12864D 模块内部硬件构成图

模块的内部硬件构成如图 3-7 所示。

T6963 是一款用于 LCD 大规模驱动电路和显示数据存储的控制器。它拥有 8-bit 并口总线和与微处理器进行读写的控制线。它可以直接和 TMPZ-80 连接，含有 128 字的字符发生器 ROM，可以控制外部最多 64kb 的显示随机存储器。可以方便的分配文字、图形和外部字符发生器 RAM 所占容量，同时改变分配的存储器空间达到改变图形显示的窗口大小。

液晶控制器和单片机的接口如下图 3-8 所示。

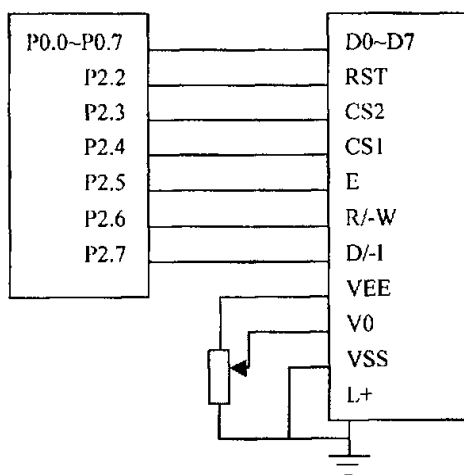


图 3-8 液晶控制器与单片的接口

键盘采用阵列式的控制方式, 根据按键的设计一共需要 10 个功能按键, 再多出 2 个作为预留, 一共 12 个按键, 这样就可以采用 3\*4 的矩阵。如图 3-9 所示。选取 AT89C55WD 的 P1 口作为键盘的判断控制线。其中, P1.0/P1.1/P1.2/P1.3 分别控制三个按键, 为避免繁杂无章, 图中只画出了 P1.4/P1.5/P1.6 的控制连接线。

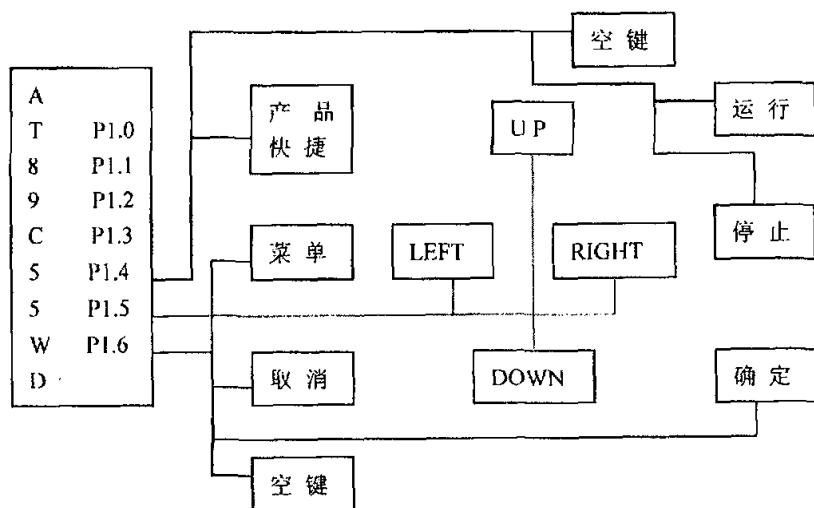


图 3-9 键盘和单片的接口示意图

### 3、电机控制系统

电机的 RUN/STOP 有两种情况, 一种是通过显示面板上的 RUN/STOP 按键来启动和停止电机转动, 另一种是由 DSP 来控制的, 当探测到被测产品含有一定量的金属杂质时, DSP 判断为不合格产品, 并自动报警、停止电机的运转。方案中选取 2407 I/O 口中的 PE.4 作为信号控制线, 控制继电器的开合来完成对电机的运行/停止 (RUN/STOP) 的控制。这里选用的电机是 220V 齿轮马达, 电机的控制电路如下图 3-10 所示。

当探测到被测产品含有一定量的金属杂质的同时, 根据含量的比例依次点亮相应的 LED 灯。由于 AT89C55 的 I/O 端口被 LCD 液晶口占用了, 而面板上设计安装 14 个 LED 双色灯, 在这里, 我们利用有限的端口资源采用串并口转换, 达到不同含量显示的亮灯个数不同的效果。飞利浦公司生产的 74HCT595 就是一个串口到并口转换的元件, 它的工作原理非常简单, 功能表如图 3-11 所示。

其中，Q0-Q7 是并口数据输出口，Q7 是串口数据输出口同时也可作为扩

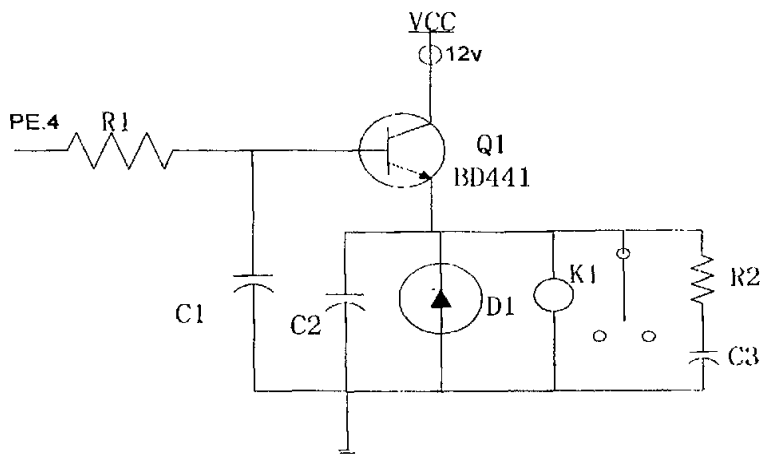


图 3-10 电机控制硬件电路图

展用。Pin 10 MR 是控制复位端，Pin 11 SH\_CP 是移位寄存器移位脉冲端，Pin 12 ST\_CP 是存储寄存器脉冲输入端，Pin 13 OE 是输出使能端，Pin 14 DS 是串行数据输入端。

面板上一共 16 个灯，其中 RUN、ALARM 各一分别用绿色和红色来表示，其他 14 个灯，前 8 个用绿色表示，如果金属含量超过预定值，则根据超标量点亮后面 6 个灯，用红色表示。

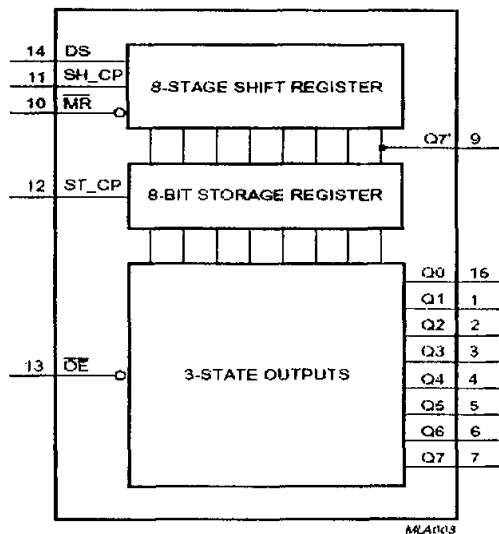


图 3-11 74HCT595 内部功能结构图

### 3.3 检测装置的控制方案

我们设计的控制系统是以 TMS320LF2407 为核心进行的自动控制，下面分成几个部分给大家介绍。

#### 一、工作过程

整个系统上电后 LCD 开始显示开机画面，按下 RUN 键开始运行，光电开关检测被测产品是否到达被测区域入口，确定后启动 A/D 转换器对模拟信号电压进行采样转换成数字信号，同时数据送给 TMS320LF2407 处理判断是否超出预定电压值，由此判断是否含有金属杂质，使自动报警显示电路立即动作，电机停止运转，同时点亮相应的 LED 灯数，液晶显示系统状态为“停止”。

#### 二、控制系统端口分配方案

根据厂家对智能金属探测器的要求，结合 DSP 的内部配置和外设性能，提出如下端口分配方案：

- (1) A/D 采样通道选用两路，分别是 ADCIN0 和 ADCIN8，是对两路信号采样；
- (2) 采用 PD 端口的 PD.0 位作为蜂鸣器发声信号的控制线，蜂鸣器是用在报警电路；
- (3) 采用二组 AD9832 产生三路正弦波，IOPC4 作为 SPICLK(DDS)，IOPC2 作为 SPISIMO(DDS)，IOPE3 作为 DDS\_FSYNC3，IOPE2 作为 DDS\_FSYNC2，IOPE1 作为 DDS\_FSYNC1，这三根为三片 AD9832 的片选线；
- (4) 采用 PE.4 作为电机控制回路的信号线，高电平电机运转，低电平电机停止运转。
- (5) 采用 RS485 串口通信，为了排除干扰，在 DSP 和 RS485 间增加一组光电耦合器，它们的通讯控制口是 Pin25 SCITXD、Pin26 SCIRXD 和 Pin83 IOPA3；
- (6) 由于 A/D 转换器的采样范围是 0~3.3V，而采样的信号最大幅值为 10V，所以需要经过一个运放电路将信号电压变化到合适的数值，同时需要将负电压抬升到正电压上来，这样就利用到 2.5V 的参考电压作如下转换：

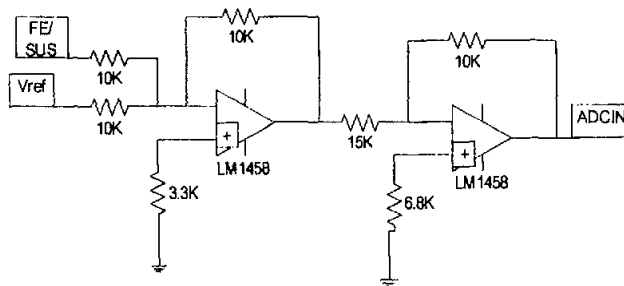


图 3-11 A/D 采样电压转换电路图

根据上图，可以得到如下转换公式：

$$V_{ADCIN} = \frac{10}{15}(V_{ref} + V_{sig}) = \frac{2}{3}(2.5 + V_{sig})$$

其中  $V_{sig}$  是 FE/SUS 两路采样信号电压 1/4 分比例缩小后的电压值，由于 A/D 转换器的  $V_{ADCIN}$  电压范围是 0~3.3V，所以  $V_{ref}$  取 2.5V，而 FE/SUS 两路的最大信号电压为  $\pm 10V$ ，经过 1/4 的比例电路后最大值为  $\pm 2.5V$ ，因此

$$V_{ADCIN} = \frac{2}{3}(2.5 \pm 2.5) = \frac{2}{3}(0 \sim 5V) \Rightarrow 0 \sim 3.3V$$

符合采样条件，而且在软件上也比较容易实现算法。

### 3.4 提高系统抗干扰性能的主要措施

本测试系统位于食品、纺织等生产线的中间环节，电磁环境复杂，噪音较大，车间比较潮湿，各种干扰源较多，为了提高检测系统的抗干扰能力，采取了以下一些主要措施<sup>[13-16]</sup>：

- 1、为了最大程度地提高系统运行可靠性和稳定性，部件配置选用了专用工业级的品牌产品，从而保证系统硬件运行的稳定性、可靠性和高抗干扰能力。
- 2、两台同工作频率的金属探测器摆放的距离尽量大于 2 米，以避免相互间工作时带来的干扰。
- 3、金属检测器的输出信号加硬件滤波电路，以消除高频干扰。
- 4、使用在线式 UPS 净化稳压电源来给金属探测器供电，抑制来自电源的干扰。
- 5、电源线使用电缆屏蔽线或者双绞线。
- 6、封闭检测系统的安装和使用空间。
- 7、检测系统单独设置接地线。



8、液晶显示面板和 AT89C55 间的数据连接线采用数据排线，同时在连接线上加一个含有磁芯的塑料外壳的屏蔽圆柱。

采取以上措施后，金属探测器的稳定性和抗干扰性明显提高，并能获得良好的信噪比。这些措施在其他机型上也得到推广应用。

## 第四章 检测装置软件的总体设计及接口软件的设计实现

本章首先根据检测系统的总体设计和软件功能的要求,规划了软件的结构及设计思想,之后介绍 EXPRESS DSP 及  $\mu$  Vision2 IDE 平台下检测软件的实现。

### 4.1 检测系统软件的总体设计

#### 一、检测系统软件主要功能

软件是检测控制系统的核心,整个系统的检测功能是否完备和实用主要看应用软件的设计水平。根据食品用金属探测器在线检测装置的要求,系统软件应具备以下主要功能:

##### 1、测量功能

测量的功能是对金属探测器的两路检测信号电压进行采样测量。

##### 2、动态显示检测结果

显示的主要内容是检测被测产品时设置的参数,包括相位、灵敏度和阈值等,还有就是产品名称和产品序列号。

##### 3、数据管理功能

针对每一种产品,对检测数据进行误差处理,然后将所有原始检测数据、手工键入修改的数据及计算出的最终检测结果,存入 EEPROM 中,共设置 20 个类别的产品存储空间。

##### 4、数据输出功能

如果在线检测到被测产品含有一定量的金属杂质,则输出相应的报警信号,可以根据厂家需要自由选择停车手动剔除和不停车自动剔除不合格产品两种方式来动作。

##### 5、自动存贮功能

检测的相关参数经过键盘修改后能够自动存贮其改变的值,使得每个产品序列的参数不产生混淆,能够方便调用。

##### 6、自动设定算法实现

系统能够根据采样数据进行判断,自动设置检测参数,使其达到检测指标,能够分辨铁、不锈钢信号。

#### 二、系统软件平台的选择

随着半导体工业的迅猛发展,微控制器开始在越来越多的领域得到应用,特

别是互联网的迅速普及,进一步使得嵌入式系统层出不穷。嵌入式系统指的是嵌入了微控制器的电子系统,所涉及行业涵盖了通讯、家电、智能设备、仪器仪表等领域,在电子系统蓬勃发展的今天,已深入到我们生活的各个方面,如:手机、PDA、数码相机、电视等。目前,嵌入式为控制器有三大类型,ARM、DSP 芯片和单片机。这三类微控制器具有各自的优势,适用于在不同的领域,即互相竞争,同时又互相补充,促进了嵌入式系统的迅速发展。

### 1、EXPRESS DSP 技术平台

DSP 芯片在嵌入式系统中占有极其重要的地位,它具有功能强、处理速度高、性能价格比好,以及速度功耗比高等特点,被广泛应用于具有高性能、高速要求的场合,特别是互联网的应用场合。DSP 技术的应用以每年 30%的速度迅猛发展,正在逐渐成为嵌入式领域的主角。

美国 Texas Instrument (TI) 公司在 DSP 芯片的发展过程中担当了非常重要的角色, TI 公司 DSP 芯片的发展代表了 DSP 芯片发展的历史和现状。1982 年 TI 公司推出第一颗 DSP—TMS32010, 处理速度仅为 10MIPS, 功耗较大, 价格较高。而目前 TI 公司的畅销 DSP—TMS320VC5402, 处理速度达 100MIPS, 功耗仅为 60mw, 价格仅为 US\$5, 而 TI 公司速度最高的 DSP, 处理速度可达 4800MIPS。目前 DSP 应用的主要领域是通讯领域, 我们日常使用的手机几乎都使用 DSP 来完成语音处理的功能, 在其它通讯产品和互联网产品中 DSP 芯片也被大量使用。但是, 随着 DSP 芯片价格的下降, 目前 DSP 开始在家电等消费品领域大量使用, 特别是对图像或语音处理要求高的场合, 如: 数码相机、HDTV、DVD 以及各种互联网终端等。在控制领域, 对于控制要求高、速度要求快的领域, DSP 也开始替代单片机, 被广泛使用。如: 变频控制、高速控制、电力控制等。总之, DSP 在消费品、工业、通讯以及互联网等领域被广泛使用。

由于硬件的高速发展, DSP 更加专用化, DSP 的软件也越来越复杂, 处理的任務也越来越多。因此 DSP 开发手段的好坏, 直接影响到 DSP 开发的进程。对于软件开发, DSP 的开发工具不仅应该支持 C/C++ 语言, 使用方便, 效率高, 实时性好, 还应该支持多任务调度, 对 DSP 资源动态监测, 而且应该具有标准的开发平台, 便于程序互相连接; 对于硬件开发, DSP 的开发工具应该具有使用方便, 投资适当, 学习容易, 兼容性好等特点。特别是 DSP 的运行速度较快,

外围接口电压不同为 3.3V 或 5V，要求开发工具可以适用于不同的 DSP 芯片，支持不同速度的 DSP 开发。

### (1)、DSP 的开发工具

DSP 的开发工具在 2000 年有较大的变化，以往的 DSP 开发工具功能简单，不能适应 DSP 开发的需要。TI 于 2000 年推出 DSP 的完整软件开发方案，推出了 EXPRESS DSP 实时软件开发技术。该技术以 DSP 开发软件 CCS(Code Composer Studio) 为基础，以 DSP BIOS 为核心，在标准的算法格式下，配合第三方的算法支持，为快速开发实时的 DSP 软件提供了可能。

首先，CCS 是 EXPRESS DSP 技术的基础，它是一个开发功能强大的实时软件开发工具。主要功能包括：集成的开发环境，高效率的编译工具，可视化的显示模式，实时数据交换，动态调试等功能。它功能强大，易于使用，是 DSP 开发的理想软件平台（见图 4-1）。TI 公司还在不断致力于 CCS 软件的功能升级，在 V2.0 的 CCS 中新增加的功能有：支持 C++，更便于开发多进程程序；支持 Visual Linker，使程序嵌入式开发更加容易；数据转换插件，使得软件开发人员更容易编制底层程序；提供芯片支持库，更便于芯片内部部件的编程；

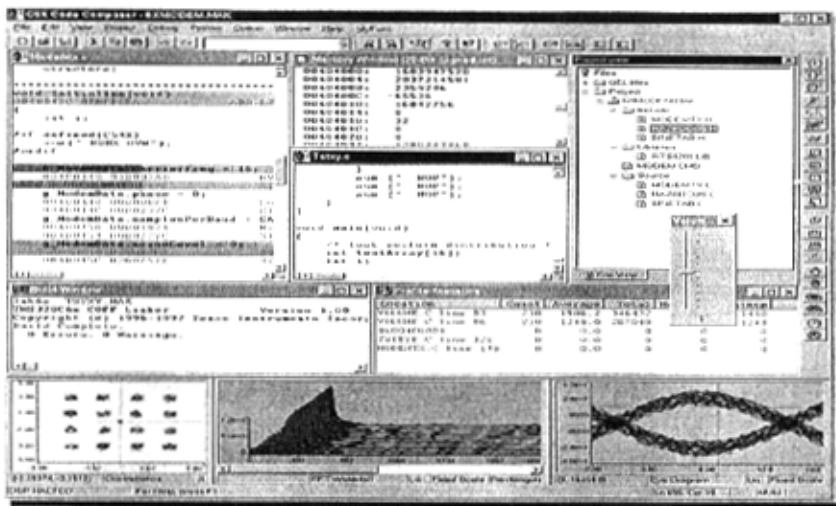


图 4-1 DSP 软件开发平台 CCS 界面

其次，CCS 还集成了 DSP BIOS。DSP BIOS 是实时操作系统的一种，它提供多任务调度，多进程管理，实时管理内核，实时分析，以及器件内核设置和管理。利用 DSP BIOS，可以方便地编写和调试 DSP 的实时多任务软件，处理实时

事件, 实时监测 DSP 的运行状态, 调度 DSP 的运行。

再者, EXPRESS DSP 利用一套标准的 DSP 算法来实现。TI 公司建立的这一套算法标准, 使得软件开发人员可以依照标准开发程序, 程序的接口标准化, 程序可以方便的互相连接, 硬件的资源也得以充分利用。

最后, 有许多第三方公司利用 CCS 和算法标准开发了各种 DSP 的算法, DSP 的客户可以非常方便的购买到这些程序, 因此可以大大加快 DSP 软件的开发, 使得 DSP 软件的开发与维护变得更加容易, 以缩短 DSP 产品的开发周期, 加快产品的更新换代。

由此可见, EXPRESS DSP 技术完全满足当前软件开发的要求, 是开发 DSP 的理想技术。

## (2)、DSP 的硬件开发工具

TMS320 的硬件开发工具, 包括 DSK (Develop Starter Kit)、EVM (Evaluate Module) 和硬件仿真系统 XDS-510。

首先, DSK 提供基本的硬件平台, 包括 DSP、内存、A/D、D/A 和标准并口, 同时提供 CCS 软件, 以及板上资源控制的示例程序。非常适合于学校教学使用, 或者用于初学者参考设计, 框图见图 4-2; EVM 同样包括硬件平台和 CCS 软件平台, 同 DSK 相当。DSK 提供了廉价的 DSP 开发平台, 客户可以利用 DSK 的硬件平台测试 DSP 的算法, 利用 CCS 软件编写和调试用户的程序, 学习 DSP 技术, 并且可以为客户的产品提供较好的参考设计。

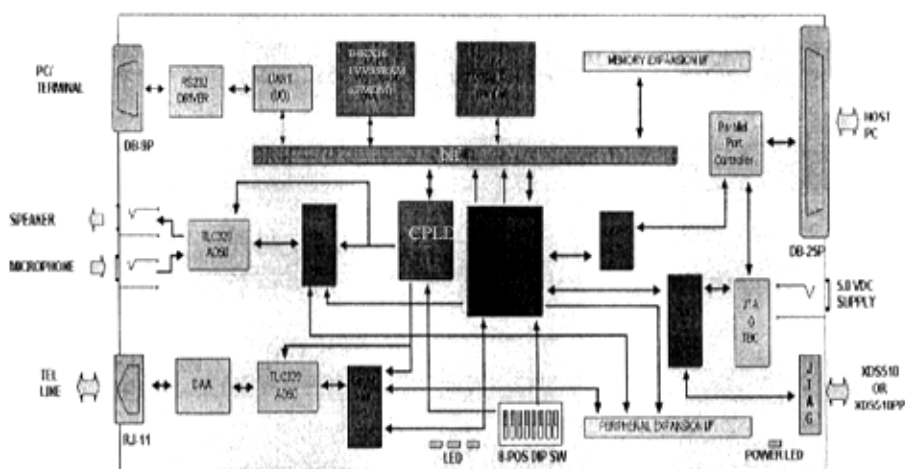


图 4-2 DSP 提供的硬件平台框图

XDS-510 用于 DSP 硬件的开发仿真，同一般的单片机不同，XDS-510 利用 IEEE 标准的 JTAG 接口，配合 CCS 软件完成对目标系统的调试和仿真。它的优点是不占用 DSP 的资源，真实时序，硬件通用等。目前的 TI 公司的硬件仿真器具有标准 ISA 总线或者标准并口，SEED 公司的硬件仿真器同 TI 公司的完全兼容，具有标准 ISA 总线、PCI 总线或者标准并口、USB 接口，给开发者提供了多种选择，连接框图见图 4-3。

由此，SEED 公司和 TI 公司为 DSP 开发者提供了多种功能强大的硬件开发工具，可以满足开发者开发不同速度的 DSP、不同接口电压的 DSP 和不同系列的 DSP。

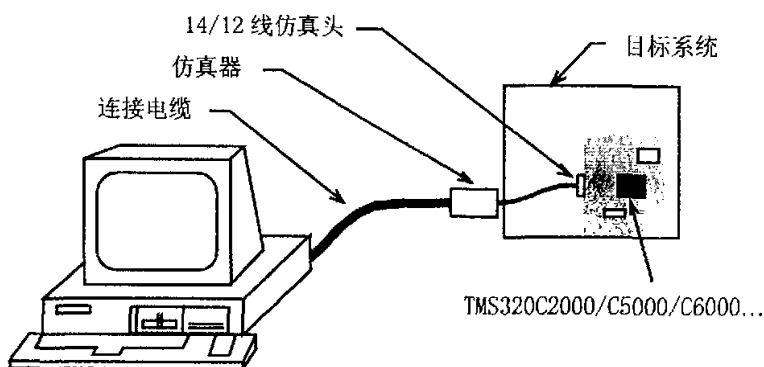


图 4-3 SEED 公司硬件仿真器与 PC 机连接框图

今后，DSP 还会向速度更高、功能更强的方面发展，应用范围也会日益扩大，多任务、实时、可视化将成为开发工具的发展方向，开发工具功能会更加强大，更加易用。同时 DSP 的开发也更加专业化，算法会趋向标准化，有专门的公司提供，硬件也可能由专门的公司设计，以加快 DSP 的开发进程，保证 DSP 产品的可靠性，以获得最优的性能价格比。总之，DSP 技术将带给我们高速、高性能、高品质的新产品。

## 2、Keil C51 技术平台

Keil C51 是美国 Keil Software 公司出品的 51 系列兼容单片机 C 语言软件开发系统， $\mu$  Vision2 IDE 是 Keil C51 基于 Windows 的开发平台，是用户开发和调试单片机 C 语言源代码的最理想的工具之一。KEIL C51 标准 C 编译器为 8051 微控制器的软件开发提供了 C 语言环境，同时保留了汇编代码高效、快速的特点。C51 编译器的功能不断增强，使你可以更加贴近 CPU 本身，及其它的衍生产品。

C51 已被完全集成到 uVision2 的集成开发环境中, 这个集成开发环境包含: 编译器, 汇编器, 实时操作系统, 项目管理器, 调试器。uVision2 IDE 可为它们提供单一而灵活的开发环境。

uVision2 集成开发环境具有如下优点:

- 1、简便易用的集成开发环境, 提供工具选项的快捷安装;
- 2、为大量 8051 衍生产品提供带驱动器的高速 CPU 和外置模拟器;
- 3、用 C 语言生成用户和符号功能;
- 4、综合性能分析和代码覆盖率;
- 5、可配置的目标监控接口;

uVision2 的强大功能资源有助于用户按期完工。这是因为它的集成源极浏览器利用符号数据库使用户可以快速浏览源文件, 用详细的符号信息来优化用户变数存储器; 文件寻找功能可以实现在特定文件中执行全局文件搜索; 工具菜单方便快捷, 允许在 V2 集成开发环境下启动用户功能; 可配置 SVCS 接口; 提供了对版本控制系统的入口; PC-LINT 接口对应用程序代码进行深层语法分析; 设有 Infineon 的 EasyCase 接口集成块产生集成代码; Infineon 的 DAVE 功能协助用户的 CPU 和外部程序的运行, DAVE 工程可被直接输入 uVision2。uVision2 编辑器包含了所有用户熟悉的特性。彩色语法显像和文件辨识都对 C 源代码进行了优化, 可以在编辑器内调试程序, 它能提供一种自然的调试环境, 使你更快速地检查和修改程序。uVision2 允许用户在编辑时设置程序断点 (甚至在源代码未经编译和汇编之前)。用户启动 V2 调试器之后, 断点即被激活。断点可设置为条件表达式、变量或存储器访问, 断点被触发后, 调试器命令或调试功能即可执行。在属性框(attributes column)中可以快速浏览断点设置情况和源程序行的位置。代码覆盖率信息可以让你区分程序中已执行和未执行的部分。uVision2 中, 可以编写或使用类似 C 的数据语言进行调试。用户可以在编辑器中选中变量来观察其取值。

KEIL C51 编译器在遵循 ANSI 标准的同时, 为 8051 微控制器系列特别设计。语言上的扩展能让用户使用应用中的所有资源。

#### (1) 存储器和特殊功能寄存器的存取

C51 编译器可以实现对 8051 系列所有资源的操作。SFR 的存取由 sfr 和 sbit

两个关键字来提供。变量可旋转到任一个地址空间。用关键字—at—还能把变量放入固定的存储器。存储模式（大，中，小）决定了变量的存储类型。连接定位器支持的代码区可达 32 个，这就允许用户在原有 64K ROM 的 8015 基础上扩展程序。在 V2 的编译器和许多高性能仿真器中，可以支持应用程序的调试。

### （2）中断功能

C51 允许用户使用 C 语言编写中断服务程序，快速进、出代码和寄存器区的转换功能使 C 语言中断功能更加高效。可再入功能是用关键字来定义的。多任务，中断或非中断的代码要求必须具备可再入功能。

### （3）灵活的指针

C51 提供了灵活高效的指针。通用指针用 3 个字节来存储存储器类型及目标地址，可以在 8051 的任意存储区内存取任何变量。特殊指针在声明的同时已指定了存储器类型，指向某一特定的存储区域。由于地址的存储只需 1—2 字节，因此，指针存取非常迅速。

在这个方案中，我们选择了 AT89C55 单片机，采用的是南京伟福公司的 H51 系列仿真器，它也是以 Keil C51 作为开发工具，开发系统平台为 uVision2。

南京伟福 H51 系列仿真器性能特点：

- 仿真 CPU 外置；
  - 直接位于用户板上方，降低噪声，提高稳定性和仿真频率；
  - 逻辑分析仪；
  - 8 通道、32K/通道、20M 采样频率。可以采集到电路上的实际波形，帮助设计人员迅速准确地查找到设计中的错误；
  - 跟踪器。32K 深度，最高跟踪速度高达 50ns。配合事件触发器，可以进行条件跟踪，以捕捉制定条件下程序执行的轨迹，了解程序动态执行的过程。
- 仪机器码、反汇编、源程序显示；
- 随机附带 POD-H8X5X 仿真头，支持低电压，直接仿真低电压用户系统，电压范围：2.7V-5.5V，支持更多 CPU，采用 Philips 公司授权的 HOOKS 技术，可以兼容更多 MCS51 CPU。



## 4.2 检测系统软件设计的实现

### 4.2.1 系统软件实现框图

下面是检测系统软件设计的手动运行程序流程实现：

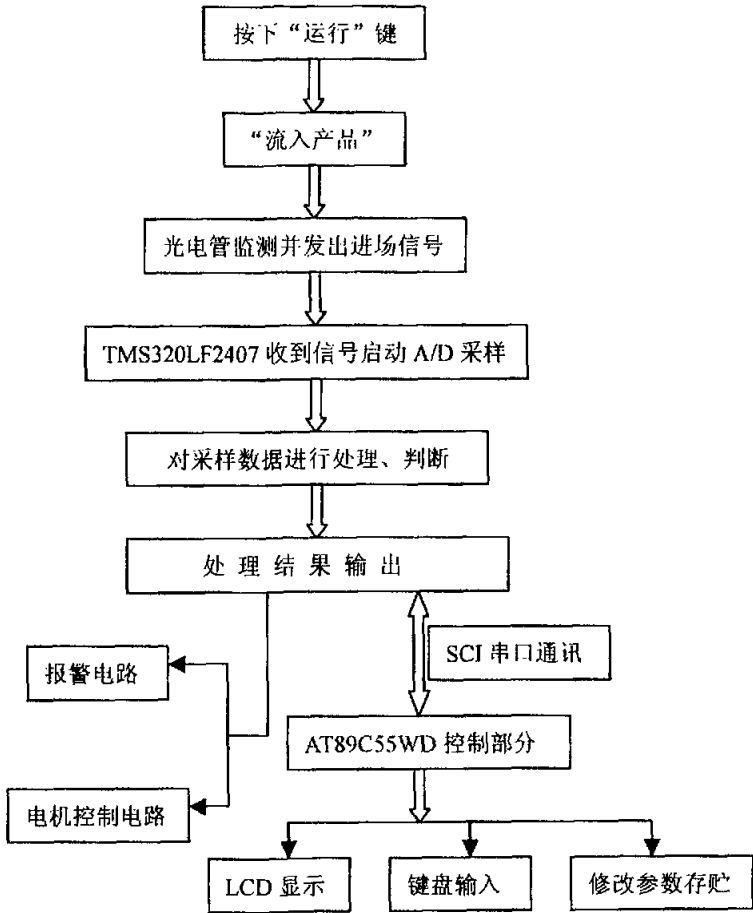


图 4-4 检测系统手动运行程序流程图

根据以上系统对软件功能的要求以及系统的硬件构成，将依次实现的模块设计分成如下两大部分：

#### 1、DSP 模块程序设计

采用 DSP TMS320LF2407 实现的功能有：AD9832 正弦波发生器控制、A/D 采样转换、采样数据处理、报警信号输出、电机控制信号输出、光电管信号输入、自学习算法编程、SCI 串口通讯等 8 种。

## 2、单片机模块程序设计

采用 AT89C51 系列的单片机 AT89C55WD 实现的功能有:EEPROM 参数存贮、LCD 液晶显示、键盘输入、LED 金属含量表示、SCI 串口通讯等 5 种。

这两个模块的软件设计的具体实现方案和特点在下面章节的内容中进行详细阐述。

## 4.2.2 系统软件设计的实现

### 1、DSP 模块程序设计

#### (1)、AD9832 正弦波发生器控制

方案中一共采用 3 片 AD9832 正弦波发生器,其中两片是作为检测铁、非铁(不锈钢等)信号电路的参考振荡波,另外一片是用作发射电路的频率源,相当于晶振。TMS320LF2407 确定这三片 AD9832 产生的正弦波之间的相位差、频率,并且使得三者的初始角是相同的。在 2407 和 AD9832 之间使用 SPI 串行外设接口模块。采用主动工作方式,串行外设接口时钟则由 DSP 串行外设接口产生并由 SPICLK 引脚(Pin 35)输出。关于 AD9832 的初始化程序如下:

```
void ddsinit(void)
{
    SCSR1 |= 0x0020; //首先对 SPI 模块时钟使能控制位置 1, 使能 SPI 时钟
    MCRB |= 0x0014; //置位 I/O 口复用控制寄存器,选择引脚功能为专用 I/O
    SPICCR &= 0xFF7F; //初始化串行外设接口操作标志位至复位条件
    SPICCR |= 0x000F; //将数据选择位设置为 16
    SPICTL |= 0x0006; //选择主工作方式, 并允许发送
    spibaudrate(120000); //设置了波特率, SPI 波特率的函数参看下面的介绍
    SPICCR |= 0x0080; //串行外设口准备发送
    MCRC &= 0xFFF1; //选择 MCRC.1~3 为一般 I/O 口, 即 IOPE0~3
    PEDATDIR |= 0x0E0E; //配置相应的引脚为输出方式且输出为高电平
}
```

SPI 波特率的函数定义为:

```
#define spibaudrate(i)    SPIBRR = (SYSCLK / (unsigned long)i) - 1
```

根据 SPI 波特率的计算, 对于 SPIBRR=3~127 时,

$$\text{SPI 波特率} = \text{SYSCLK} / (\text{SPIBRR} + 1)$$

$$\Rightarrow \text{SPIBRR} = (\text{SYSCLK} / \text{SPI 波特率}) - 1$$

所以,

当  $i=400000$ 、 $\text{SYSCLK}=40\text{MHz}$  时,  $\text{SPIBRR}=99$ 。而  $400\text{Kbps}$  ( $400000$ ) 则为 SPI 的波特率。

## (2) A/D 采样转换

2407 内置采样/保持 (S/H) 的 10 位模数转换模块 ADC, 提供了 16 个模拟输入通道 (ADCIN0~ADCIN15)。我们需要对两路信号进行采样, 分别采用通道 4、8 (ADCIN4、ADCIN8)。在对铁、非铁信号进行采样转换前, 需要对其进行一些变换。这已在第三章硬件部分阐述过, 这里只对采样后的数据处理进行描述。传感器的外形尺寸为  $400*150*360$  (mm), 其中  $400*150$  为探测口径,  $360\text{mm}$  为通道宽度。输送带的速度一般为  $28\text{m/min}$ , 从产品的一端进入传感器通道到另外一端完全通过通道的长度 (或称距离) 应该为通道长度加上产品长度。假设产品长度不超过  $100\text{mm}$ , 所以通过口径花费的时间可用以下公式计算:

$$t = s/v = \frac{(36+10)\text{cm}}{35(\text{m/min})} \approx 0.78857 = 78857\text{ms}$$

对结果取整, 选取  $800\text{ms}$  作为 A/D 采样周期。每  $4\text{ms}$  采样一次, 一个采样周期内完成 200 次采样。对每个采样点连续采样 8 次, 并将 8 次结果累加平均。

A/D 采样电压为  $0\sim 3.3\text{v}$ , 对应的数字信号范围为  $0\sim 1024$  ( $2^{10}$ )。下图 4-5 为从示波器看到的有产品通过传感器时的两路采样电压。

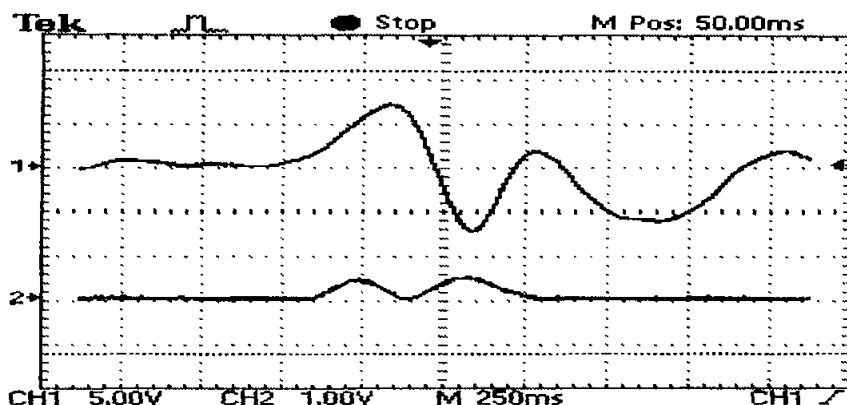


图 4-5 有产品通过时两路采样电压波形图

由于铁、非铁物质通过传感器时的波形正好相反，所以为了根据采样电压判断是电压正值是否先于电压负值出现来区分是何种金属，需要将 0~1024 转变为 -1024~+1024，只需将 A/D 采样转换后的数值作如下偏移：

```
// 计算结果对应的偏移值
unsigned adcoffset(unsigned data)
{
    data = data >= 4092 ? data - 4092 : 4092 - data;
    data = data + 2 >> 2;
    return data;
}
```

这样根据所处的范围判断产品中是否含有金属杂质，是根据采样电压的绝对值高于阈值的采样点数连续超过 10 时则认为该信号为不合格产品信号，将结果输出并报警停机。

### (3)SCI 串口通讯

本课题研究的串口通信要完成如下功能：

- 主机 负责启动异步串行通讯，发送指令及数据并接收从机的应答。
- 从机 负责监听主机发送的指令及数据，应答并回送状态和数据。

在主循环程序中，AT89C55 循环发送一组数据给 TMS320LF2407，同时 TMS320LF2407 接收这组数据执行相应的程序，并发给 AT89C55 一个校验码，确定数据是否正确，是否需要重发。DSP 与单片机双方都既是发送方又是接收方，主程序执行时双方的收、发分别是以查询方式、捕获单元（DSP 事件管理器模块中的一项功能）进行的。要想保证通信成功，通信双方除规定好字符格式和波特率外，还要有一系列的约定，即要定义好软件通信“协议”。例如作为发送方，必须知道什么时候发送信息，发什么，对方是否收到，收到的内容有没有错，要不要重发，怎样通知对方结束等；作为接收方，必须知道对方是否发送了信息，发的是什么，收到的信息是否有错，如果有错怎样通知重发，怎样判断结束等。即要求发送和接收之间密切“配合”。通信的目的是要把信息及时可靠地传送给对方。在数字通信系统中可靠与快速往往是一对矛盾。为了解决可靠性，通信系统都采用了差错控制。本系统的通讯协议中采用循环冗余校验 CRC (Cyclic Redundancy

Check) 的差错控制, 效果很好, 下面的第四点将作个简单介绍。

本通讯规约涉及系统的两个部分: **显示部分**和**测量部分**。

**显示部分:** 以 AT89C55 为核心, 包括非易失性存储器、按键组、液晶显示屏以及若干信号指示用 LED 等。该子系统用于人机对话。

**测量部分:** 以 TMS320LF2407A 为核心, 包括检测、计算、判断、执行等部件。

主机与从机之间的信息传递以数据块为基本单元。1 个数据块由 8 个基本帧组成。主机发送时应保证数据块之间有  $80\mu s$  的空闲时间。数据块以 38H 作为起始字符, 末尾附加 CRC-16 校验字。AT89C55WD 主程序通信子程序包括发送子程序 (如图 4-6 所示) 和接收程序。相应的, TMS320LF2407 的主程序通信子程序也包括接收子程序 (如图 4-7 所示) 和发送子程序。

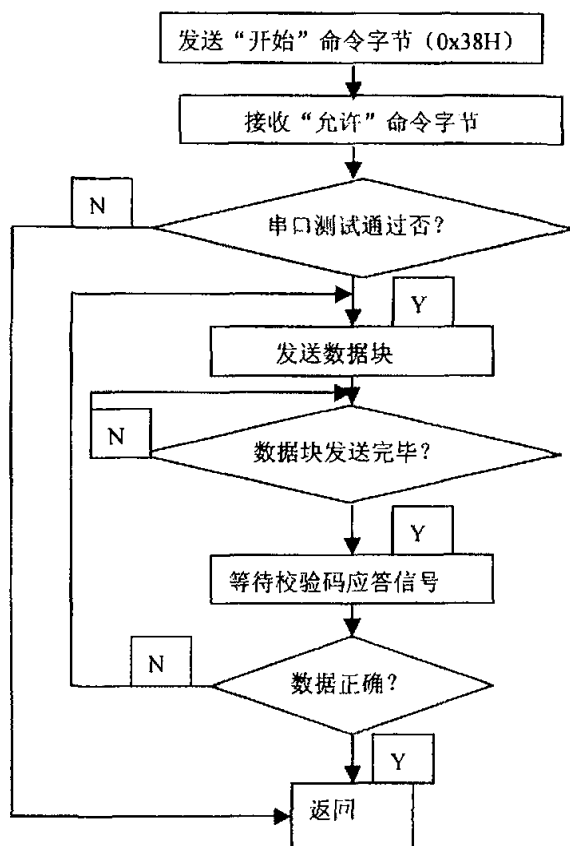


图 4-6 AT89C55WD 发送子程序流程图

下图 4-7 是 TMS320LF2407 通信接收子程序流程图。

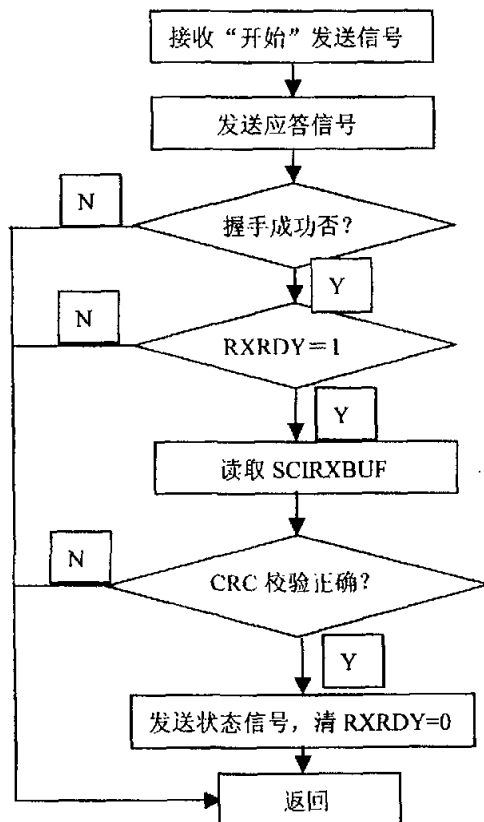


图4-7 TMS320LF2407通信接收子程序流程图

由于本系统中有多种参数需要改变并由主机传送给从机,所以在发送的数据块结果中,增加了自定义的状态码(或称指令码),如下表4-8、4-9所示。通过对这些数据的判断,可以方便的了解主从机正在执行的动作,从而有条不紊的完成通信工作。

表4-8 指令集

指令码	数据一	数据二	数据三	功能
00H	——	——	——	无操作
08H	测试数据一	测试数据二	测试数据三	应答测试
10H	——	——	——	查询从机上电状态
12H	——	——	——	查询平衡调整结果
14H	——	——	——	查询从机运行状态
16H	——	——	——	查询实时检测结果
20H	——	——	——	查询当前参数状态
21H	——	——	——	应用当前各参数
22H	相位		——	下载相位
23H	——	——	——	查询相位

24H	增益		——	下载增益
25H	——	——	——	查询增益
26H	阈值		——	下载阈值
27H	——	——	——	查询阈值
28H	杂项		——	下载杂项
29H	——	——	——	查询杂项
30H	——	——	——	启动检测
31H	——	——	——	启动自学习
38H	——	——	——	停机

表 4-9 状态集

Note: Data in parenthesis are NOT guaranteed and should NOT be used in future program.

状态码	数据一	数据二	数据三	功能
00H	——	——	——	空应答
08H	测试数据一	测试数据二	测试数据三	回送测试数据
10H	——		上电状态	上传从机上电状态
12H	——		平衡调整结果	上传平衡调整结果
14H	(实时检测结果)		运行状态	上传从机运行状态
16H	实时检测结果		(运行状态)	上传实时检测结果
20H	——		参数状态	上传当前参数状态
21H	——		参数应用情况	应答参数应用情况
22H	相位		(参数状态)	回送相位
23H	相位		(参数状态)	上传相位
24H	增益		(参数状态)	回送增益
25H	增益		(参数状态)	上传增益
26H	阈值		(参数状态)	回送阈值
27H	阈值		(参数状态)	上传阈值
28H	杂项		(参数状态)	回送杂项
29H	杂项		(参数状态)	上传杂项
30H	0		0	应答 0
31H	0		0	应答 0
38H	0		0	应答 0

#### (4) 循环冗余校验 CRC

在数字通信系统中,可靠与快速往往是一对矛盾<sup>[11][18]</sup>。若要求快速,则必然使得每个数据码元所占地时间缩短、波形变窄、能量减少,从而在受到干扰后产生错误的可能性增加,传送信息的可靠性下降。若是要求可靠,则使得传送消息地速率变慢。因此,如何合理地解决可靠性与速度这一对矛盾,是正确设计一个通信系统的关键问题之一。为保证传输过程的正确性,需要对通信过程进行差

错控制。差错控制最常用的方法是自动请求重发方式 (ARQ)、向前纠错方式 (FEC) 和混合纠错 (HEC)。在许多数字通信中, 广泛采用 ARQ 方式, 此时的差错控制只需要检错功能。实现检错功能的差错控制方法很多, 传统的有: 奇偶校验、校验和检测、重复码校验、恒比码校验、行列冗余码校验等, 这些方法都是增加数据的冗余量, 将校验码和数据一起发送到接受端, 接受端对接收到的数据进行相同校验, 再将得到的校验码和接受到的校验码比较, 如果二者一致则认为传输正确。但这些方法都有各自的缺点, 误判的概率比较高。

循环冗余校验 CRC (Cyclic Redundancy Check) 是由分组线性码的分支而来, 其主要应用是二数码组。编码简单且误判概率很低, 在通信系统中得到了广泛的应用。CRC 校验码的编码方法是用待发送的二进制数据  $t(x)$  (可以看作是一个  $n$  阶的二进制多项式) 除以生成多项式  $g(x)$ , 将最后的余数作为 CRC 校验码。其实现步骤如下:

(1) 设待发送的数据块是  $m$  位的二进制多项式  $t(x)$ , 生成多项式为  $r$  阶的  $g(x)$ 。在数据块的末尾添加  $r$  个 0, 数据块的长度增加到  $m+r$  位, 对应的二进制多项式为  $x^r t(x)$ 。

(2) 用生成多项式  $g(x)$  去除  $x^r t(x)$ , 求得余数为阶数为  $r-1$  的二进制多项式  $y(x)$ 。此二进制多项式  $y(x)$  就是  $t(x)$  经过生成多项式  $g(x)$  编码的 CRC 校验码。

(3) 用  $x^r t(x)$  以模 2 的方式减去  $y(x)$ , 得到二进制多项式  $x^r t'(x)$ 。 $x^r t'(x)$  就是包含了 CRC 校验码的待发送字符串。

从 CRC 的编码规则可以看出, CRC 编码实际上是将代发送的  $m$  位二进制多项式  $t(x)$  转换成了可以被  $g(x)$  除尽的  $m+r$  位二进制多项式  $x^r t'(x)$ , 所以解码时可以用接收到的数据去除  $g(x)$ , 如果余数位零, 则表示传输过程没有错误; 如果余数不为零, 则在传输过程中肯定存在错误。CRC 校验可以 100% 地检测出所有奇数个随机错误和长度小于等于  $k$  ( $k$  为  $g(x)$  的阶数) 的突发错误。所以 CRC 的生成多项式的阶数越高, 那么误判的概率就越小。

经试验证明, 使用循环冗余校验 CRC, 即使使用较高的波特率 (125000bps)



也可以正常良好的通信，这是本通讯协议的一大特点。

## 2、单片机模块程序设计

### (1) EEPROM 参数存贮

在自动设定程序中，需要存贮待检测产品的相关参数，而且为了更好的发挥一机多用的功能，尽可能存贮多种产品参数。根据课题的要求，初步设定存贮 20 个品种的参数。每个品种的相关参数有相位值、两路信号增益和电压阈值。它们在 EEPROM 内部存储结构的分配如下

偏移量	内容	尺寸
16(0x10)	各产品相位	1w x 20 = 20w
28(0x1C)	各产品增益	1w x 20 = 20w
40(0x28)	各产品阈值	1w x 20 = 20w
52(0x34)	各产品杂项	1w x 20 = 20w
64(0x40)	各产品标题	4w x 20 = 80w

在 0x10 之前的存储内容为产品标识符、产品序列号、系统状态字、用户配置字、语言选择、运行状态、登录状态、管理员密码、用户密码和 4 个保留空间等。

下面的这段小程序定义了 EEPROM 的片选、时钟和读/写数据线的端口。

```
sbit NVMCS = P3^6;
sbit NVMSK = P2^6;
sbit NVMDI = P2^7;
sbit NVMD0 = P3^3;
```

在读写数据时要注意上一个任务是否完成并查询 busy 线是否繁忙，以免造成冲突，读写无效。

### (2) LCD 液晶显示

目前，LCD 显示主要有段式和点阵式两种，点阵式用得较为广泛，分为文本型显示和图形型显示。图形显示较为灵活，可以依用户的需要来设计显示的图形，其中也包括汉字。在这里我们自己编写了一个字库文件 FON.C，将一个汉字显示在一个 16X16 的像素点阵列中。显示一个汉字要用 32 个字节的字模数据，这样，就可以把每个汉字的字模数据制作出来，按顺序存入一个存储区域，形成

一个汉字字库，然后将这些汉字按存储顺序编成代码，如 01H、02H、03H……。在程序中，可以利用这些代码，找到代表该汉字的 32 个字节的字模数据，然后将这些字模数据按规律写入显示 RAM 单元中，就可以将汉字显示出来。

在制作汉字字库时，每个汉字又分成 4 个部分的 8X8 的点阵，即左上、左下、右上、右下，并按这个顺序将字模数据存储起来，在写入显示 RAM 时，也得按这种顺序将每个字模数据写入对应的显示 RAM 单元中。对于汉字在液晶屏上位置的控制，可以将液晶屏按 32X32 为单元分成一个坐标系，再由该坐标系中的坐标定出字模数据在显示 RAM 中的位置。

汉字显示可以编成子程序的形式，T6963C 的初始化每调用一次显示一个汉字，每次调用只要给出入口参数（包括坐标与代码）即可，子程序流程图见图 4-10。

在编制好子程序后，要将一系列汉字显示在液晶屏上，只需不断调用该子程序，并在每次调用前给出字符代码和坐标即可。

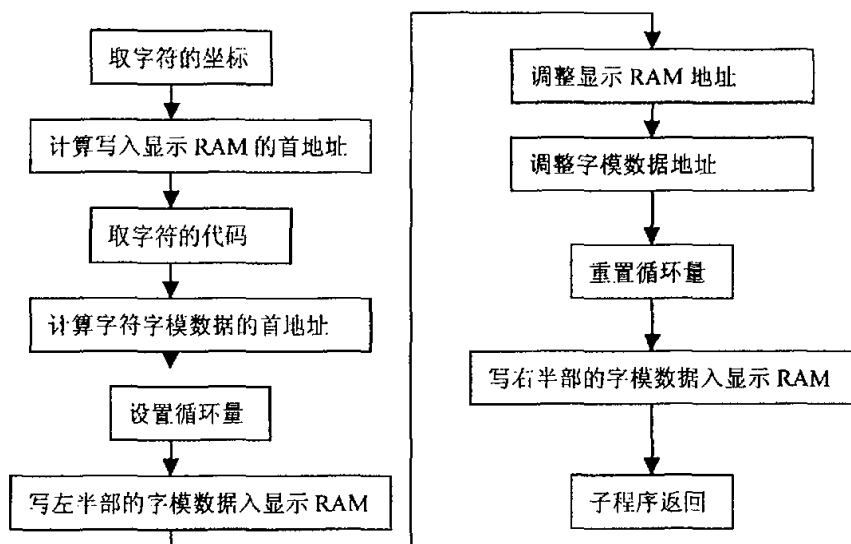


图 4-10 子程序流程图

### (3) 键盘输入接口

在单片机中所需按键较少时，多采用独立式键盘。此种键盘结构简单，每只按键接单片机的一条 I/O 线，通过查询即可识别出每只按键的状态来。但由于本系统按键较多，在这里采用矩阵式排列键盘，这样可以合理应用硬件资源，把

12 只按键排列成 3\*4 矩阵形式，用一个 7 位 I/O 口控制。把键盘上的行和列分别接在 P1.0~P1.2 和 P1.3~P1.6。

按照功能划分，一共需要 10 个键：启动、停止、产品快捷键、上移、下移、左移、下移、确定、返回、菜单键，还有两个键位是保留的。每次按下键，根据行列交叉点的键值来判断是哪个键按下。同时考虑按键去抖和上下左右键的重复按键，在软件上增加按键重复的延缓时间为  $80 \times 10\text{ms}$ ，每个按键重复周期为  $32 \times 10\text{ms}$ 。键值和按键状态值的数据存储均采用数据结构中的链式队列结构，它的工作原则是先进先出，判断队列满员的标准是看队首和队尾是否相一致。

键盘工作的软件流程图如下图 4-11 所示。

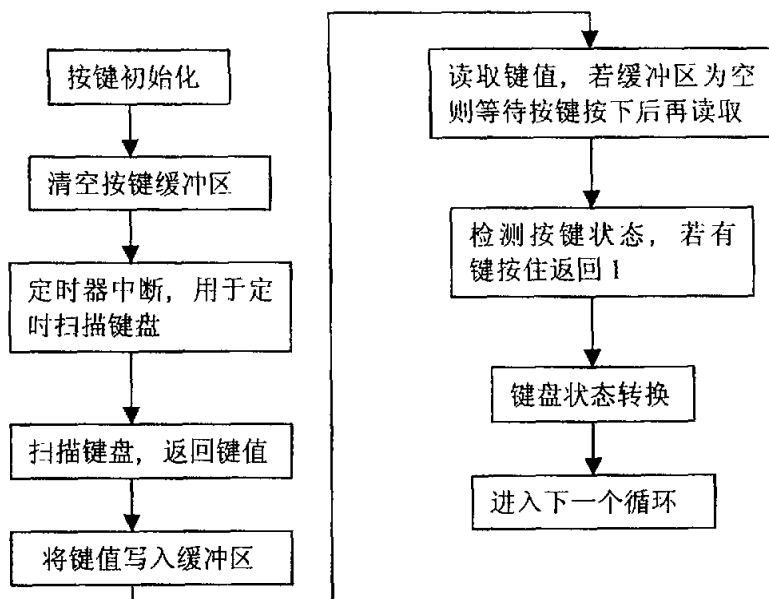


图 4-11 键盘软件部分流程图

#### (4) LED 金属含量显示

利用双色灯来表示产品中金属含量的大小，在硬件上减少了元件的使用，并且使用户对于正常值和非正常值的对比更清晰。面板上一共设计安装 16 个双色灯，其中前两个灯分别表示运行、报警信号，显示为绿色和红色，后面的 14 个灯表示相应的金属含量的大小。为了区分产品效应带来的信号和含有金属杂质的产品信号，我们在软件上设计前 8 个双色灯显示为绿色，后 6 个双色灯显示为红

色。阈值是可以由用户改变的参数，8 个绿灯全亮的话就表示已达到阈值。如果没有达到阈值的话，则根据采样电压与阈值的比例点亮相应的 LED 灯。如果产品中含有金属杂质，则采样电压肯定超出定义的阈值，这时后面的 6 个双色 LED 显示为红色，并根据超出阈值的电压信号与阈值的比例点亮相应的红色 LED 灯。面板上 LED 的设置如下图 4—12 所示。

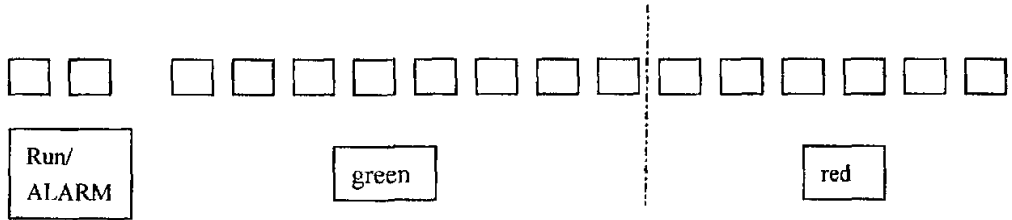


图 4—12 面板上 LED 位置分布及功能示意图

## 第五章 自学习方法研究及实验数据分析

### 5.1 自学习方法研究及其实现

金属探测器能够对被测产品自动设定检测参数并使得产品效应抑制最小、探测灵敏度达到最佳,我们称这项功能为自动设定功能或自学习功能。目前,在探测器领域,真正实现自学习功能的是日本安立公司生产的食品用探测器。它采用的是多频探测技术,并且在软件上成功研发出了一套自学习算法。所以,要实现自学习功能,需要硬件和软件的配合。

首先我们从硬件上分析金属探测器检测非铁金属和铁磁性金属目标的实现原理。

#### 1、金属目标的幅度和相位特性<sup>[20]</sup>

金属探测器利用低频电磁感应原理,采用接收平衡式探测方法。

根据电磁场理论,发射线圈产生的交变磁场在两个差动连接的接收线圈中分别产生一个同频、反相、等幅的感应电动势,两者相消即形成接收平衡。

在交变磁场中的金属由于涡流效应(与电导率 $\sigma$ 有关)或磁效应(与磁导率 $\mu$ 有关)将产生一个附加磁场,破坏一次场的磁力线分布,该附加磁场又称二次场。非铁磁性金属 $\mu_r \approx 1$ ( $\mu_r$ 为相对磁导率, $\mu_0$ 为真空磁导率), $\sigma$ 较大,它包括顺磁体(如锰、铬、钛等)和抗磁体(如金、银、铜、锡、铅等),可以认为是导电不导磁物质,主要产生涡流效应,磁效应忽略不计;铁磁性金属(如铁类、镍、钴等) $\mu_r$ 很大, $\sigma$ 也较大,可以认为是既导电又导磁物质,主要产生磁效应,同时又有涡流效应。

金属目标所产生的二次场会使发射线圈中电流的大小和相位发生变化,也就是发射线圈的等效阻抗发生变化,由于两个接收线圈差动连接形成平衡,故忽略二次场对接收线圈等效阻抗的影响,可用发射线圈等效阻抗的变化来反映被测金属的涡流效应和磁效应。

下面用等效阻抗法分析金属目标对电磁感应信号幅度和相位的影响。

#### (1) 非铁磁性金属目标

根据电磁感应原理,非铁磁性金属与发射线圈之间存在互感效应,其等效电路分析已在第二章详细阐述。

根据  $Z_1 = R_1 + \frac{R_2 \omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j\omega(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2})$  可知, 由于涡流的作用,

发射线圈的等效阻抗从原来  $Z_0 = R_1 + j\omega L_1$  变为  $Z_1$ , 比较  $Z_0$  和  $Z_1$  可知, 涡流影响的结果是使发射线圈阻抗的实部分量增加、虚部分量减少, 使接收信号电阻分量增加、电抗分量减少。

## (2) 铁磁性金属目标

根据电磁场理论, 发射线圈的电感  $L_1$  为:

$$L_1 = \frac{N_T \Phi_1}{I_1} = \frac{N_T B A_T}{I_1} = \frac{N_T \mu H A_T}{I_1} \quad (2)$$

又根据毕奥—萨伐尔定理可知:

$$H = \frac{N_T I_1 r^2}{2(r^2 + l^2)^{3/2}} \quad (3)$$

$$\text{所以} \quad L_1 = \frac{\mu_r \mu_0 N_T^2 \pi r^4}{2(r^2 + l^2)^{3/2}} \quad (4)$$

$N_T$  为发射线圈匝数;  $A_T$  为发射线圈面积;  $r$  为发射线圈半径;  $H$  为磁场强度;  $B$  为磁通密度;  $I_1$  为发射线圈电流;  $\Phi_1$  为磁通量;  $l$  为发射线圈轴线上某一点到线圈平面的距离。

由此可知, 当发射线圈有效探测范围内没有铁磁性物质时,  $\mu_r = 1$ ,  $L_1$  保持不变; 当发射线圈有效探测范围内出现铁磁性物质时,  $L_1$  随  $\mu_r$  的增加而增加, 随金属目标到探头的距离  $l$  的减少而非线性增大, 相当于在发射线圈上累加连接了一个线圈, 且两个线圈所产生的磁通  $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$  相助。

铁磁性金属既导电又导磁, 由 (4) 式可知, 发射线圈等效阻抗近似为:

$$Z_1 = R_1 + \frac{R_2 \omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j\omega(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + L_3) \quad (5)$$

其中,  $L_3$  为因磁效应而产生的等效电感。铁磁性金属主要产生磁效应, 同时又有涡流效应。故发射线圈等效阻抗的虚部分量增加。因此, 它使发射线圈阻抗的实部分量、虚部分量都增加, 使接收信号电阻分量增加、电抗分量也增加。

综上所述可知,电抗分量的增加或减少是区分铁磁性金属目标与非铁磁性金属目标的依据;幅度表征金属含量的大小或金属目标的远近;相位表征金属目标的特性即属性。

## 2、产品效应和方位效应

金属探测器的灵敏度高低取决于两个方面的因素:孔径的尺寸与工作频率。孔径的尺寸越小,探头的灵敏度就越高。例如,高度为 50mm 的孔径将能够探测到只有 0.5mm 的金属物。其次,频率越高,灵敏度则也越高。不过,提高频率并不自动意味着保证探测能力的提高,因为它可能会使食品本身对探测器产生一个很强的信号,也就是通常所说的“产品效应。因此,我们的目标是确定一个不致出现误动作的最高频率。这样,探测器既探测了污染物、又不会发出错误警报,从而避免了产品的浪费。为了得到最佳的结果,应该对每种待检验的产品确定特定的探测参数并自动予以记录和保留。

食品的分类有很多,按照存在状态分有干货、湿货、速冻产品、水产品,按照成分性质分有咸的、甜的、酸的。这些在通过金属探测器时产品效应都是不同的,而且重量的多少也会影响检测的效果。根据以上对非铁金属目标和铁磁性金属目标的分析可知,相位是表明金属性质的物理量。有些产品效应类似铁磁性金属目标产生的信号,而有些产品效应则类似非铁金属目标产生的信号。所以如果需要抑制产品效应到最佳状态,则可以通过改变相位的方法。而且,在试验中我们发现 0~360 度的相位中总是存在对非铁金属、铁磁性金属目标都不灵敏的点,所以自学习方法的一个重要因素就是找出这个不灵敏点,也就是中性点。

检验金属探测器性能的行业标准,是通过探测器检测到的各种金属球的尺寸。但事实上,污染物的形状可能是金属丝或金属片的碎屑(见图 5-1)。

以下表格为典型的金属探测器灵敏度。

开口高度	干燥产品			潮湿导电产品		
	铁质金属	非铁质金属	不锈钢	铁质金属	非铁质金属	不锈钢
可达 50mm	0.5mm	0.6mm	0.8mm	0.8mm	1.2mm	1.5mm
可达 125mm	0.8mm	1.0mm	1.2mm	1.2mm	1.6mm	2.0mm
可达 200mm	1.2mm	1.4mm	1.8mm	1.8mm	2.2mm	3.0mm

图 5-1 典型的金属探测器灵敏度数据表

它们依自己在探测器孔径位置的不同而对探测器会产生不同的信号,即通常所说的“方位效应”。

### 3、自学习方法的实现

依据上面对金属探测器影响检测的几个因素分析,要使探测器能够自动选择最佳检测参数,必须考虑相位、幅度、产品效应、频率和增益。目前,根据厂家在食品行业的经验值选定频率为 100 KHz,所以频率选择就不用考虑了。而由上面的分析可知,电抗分量的增加或减少是区分铁磁性金属目标与非铁磁性金属目标的依据,电抗分量与阻抗分量之间的比值为  $\tan \varphi$ , 直接影响了相位  $\varphi$  的大小。从采样信号上看,两路信号的波峰和波谷的位置是否相反或一致,也就是说相角  $\varphi$  所在的范围可能相差一个象限。如图 5-2 所示。图示是不锈钢  $\phi 1.3mm$  通过金属探测器时的采样信号。因为两路信号在检波时的参考正弦波的相角正好相差 90 度,所以当信号本身的相位处于第二象限时,经过叠加混频滤波后,出来的两路信号的相位就不一致了,表现在同一时刻时的幅值符号正好相反。

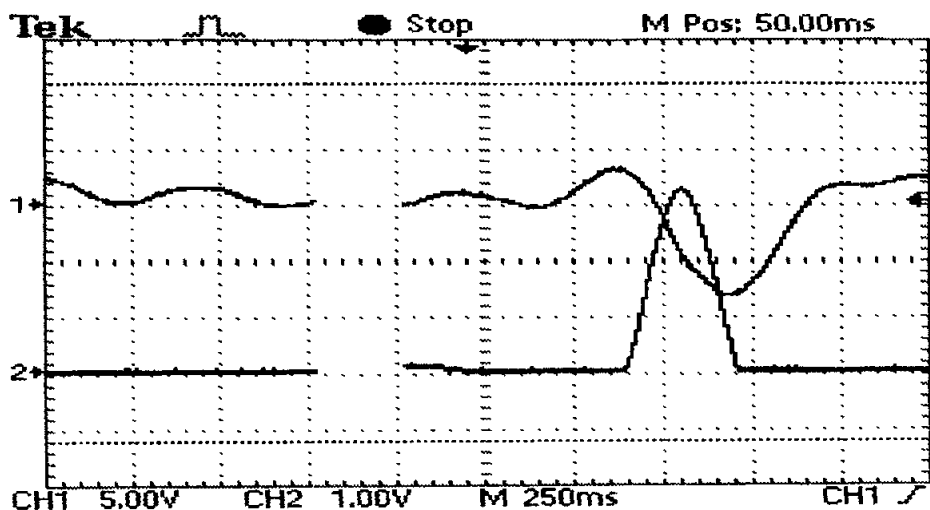


图 5-2 SUS  $\phi 1.3mm$  信号

根据合格产品通过检测器时的产品效应信号,判断产品性质属于铁磁性金属还是非铁金属,是根据波峰和波谷出现的一致性,其基本原理就是根据相位来判断是何种金属类别的相敏检波电路,这在第二章中已阐述。还有一点需要说明的是,关于中性点对应的相位确定。在这里,我们对于中性点的确定是不带任何产

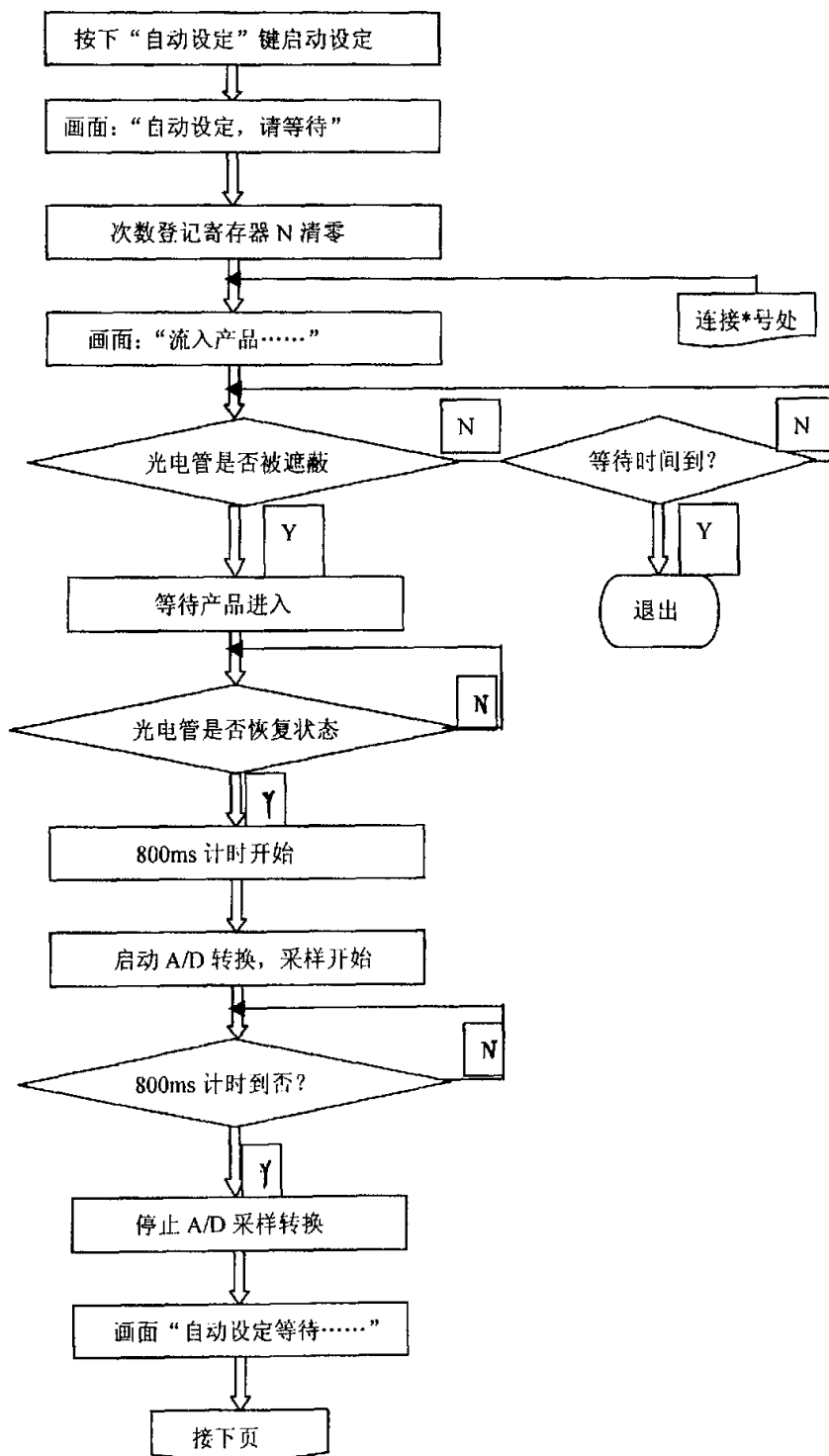


品时机器运行,对自身信号和噪声信号的对比和判断,以及对安立金属探测器的研究,大致确定自学习时的初始相位定为 108 度。根据采样信号作出判断后,将相角往相反的方向增加或减少一定比例的角度,然后再次采样判断改变是否有效,依此循环数次,便可得到相应的最佳抑制产品效应对应的相位。与此同时,还可以通过修改增益值来达到最佳点。增大增益,虽然可以将检测灵敏度提高,但是同时也使得产品效应信号增大,容易发生误报警事件;减小增益,可能使得探测器无法分辨产品效应信号和金属杂质信号,这样检测灵敏度就比较低。所以修改增益参数只是一个辅助的手段,限于在最佳点的很小范围内变化。

根据以上分析,对于自学习方法在软件上的实现可以按照如下的流程来完成。见图 5-3。

一开始时会有大概 4s 的等待时间,主要是为了避开上电启动时电源带来的抖动干扰。光电管电信号是用来控制 A/D 采样启动时间,以排除外界对探测器的电磁干扰。

在图中,我们可以看到分别对两路采样电压信号进行判断分析,并根据波峰与波谷出现的一致性来确定方向性,即同向还是反向,然后根据判断修改相应参数后的波形来确定是否调整成功,多次调整后,如果调整的效果不能达到所规定的数值范围,则判定该产品的产品效应太大,不能有效进行自学习操作,并在液晶显示面板上显示“设定失败”,否则,则判断自动设定参数成功,显示为“设定成功”。



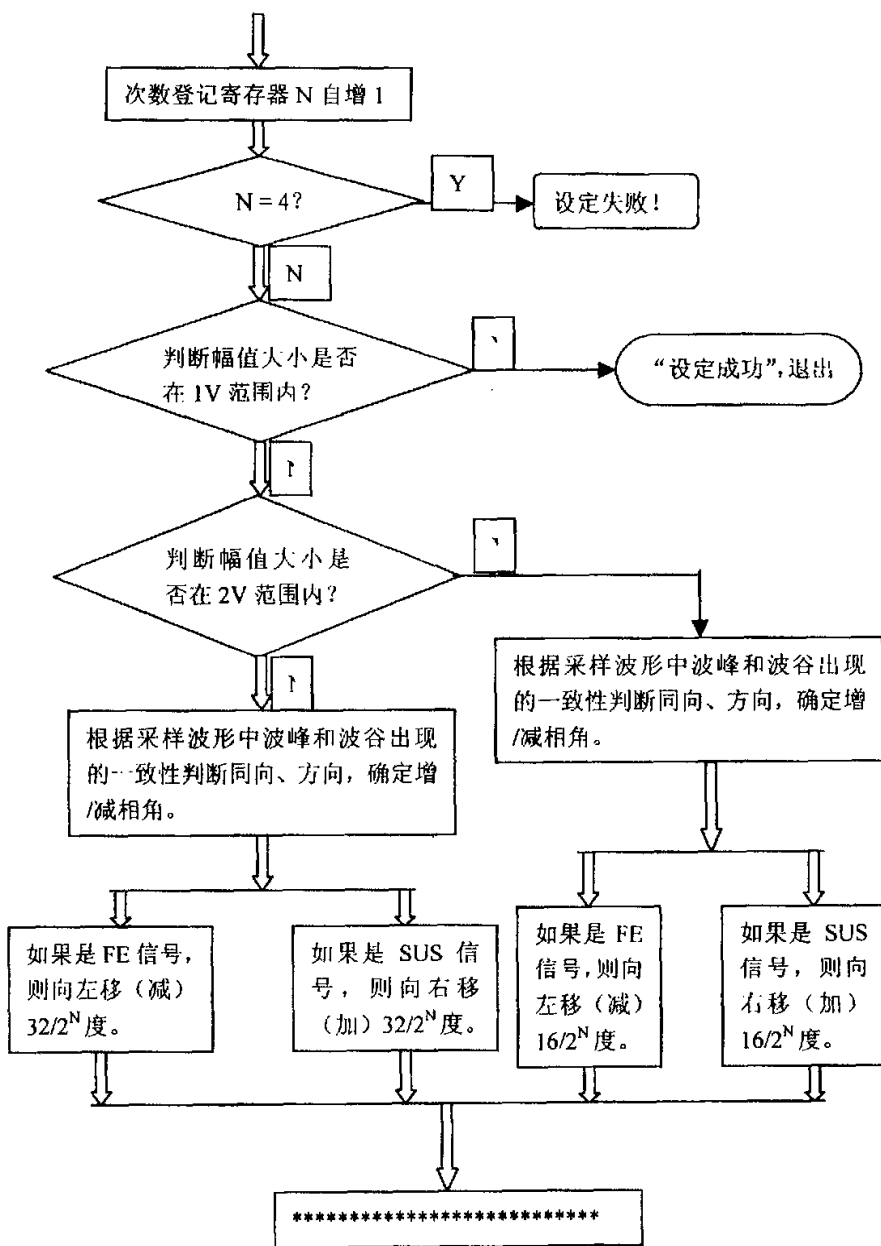


图 5—3 自学习软件流程图

### 5.2 实验数据分析

前期的调研、查找资料为后期的方案设计提供了可靠的依据，而具体方案的可行性和有效性又是在实验的基础上得到验证的。本章节针对一些实验数据进行分析，验证方案的可行性和实施有效性。

下图 5-4 与图 5-5 是产品自学习前后的产品信号图。

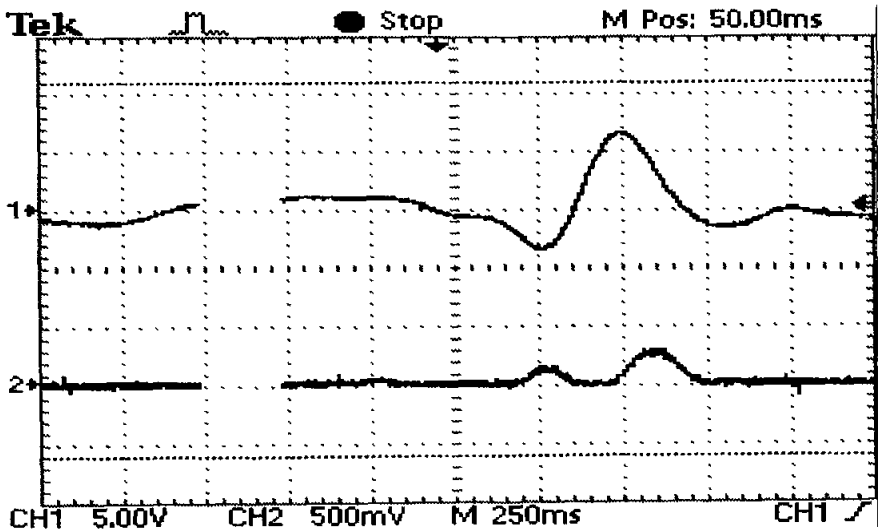


图 5-4 自学习前的产品信号

（说明：此图中的 CH1 对应下图的 CH2，CH2 正好与下图的 CH1 对应。当时测量时没有注意使用同一探针通道。）

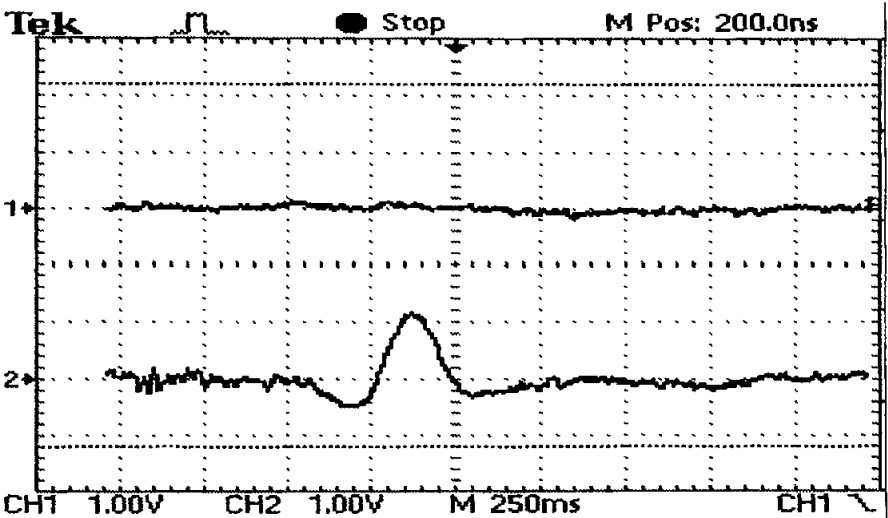


图 5-5 自学习后的产品信号

用来检测的产品是一种酥饼，含糖分较多，重量为 206g。从图 5-4 和图 5-5 可以看出产品效应得到很好的抑制。而且从图 5-4 可以看出它的产品特性时偏铁磁性金属特性的，两路信号的波峰波谷出现的顺序一致。

酥饼属于干货类，而且此次测量的重量也比较轻，所以产品信号通过更改相位参数得到有效的抑制。说明这种自学习的方法是有效的、可行的。

再看看对于水分较多的产品是否能够有效的抑制其产品效应。下面图 5-6 和图 5-7 是一袋重量为 192 g 湿米粉自学习前后的产品效应信号图。

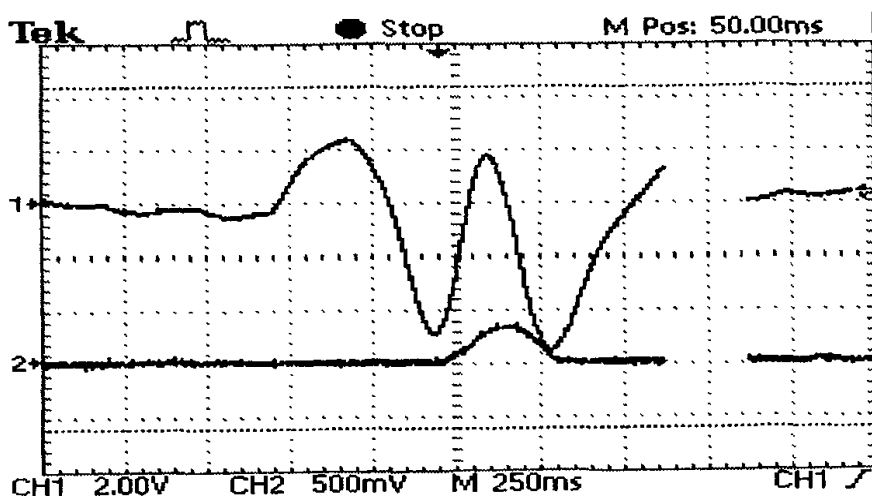


图 5-6 自学习前的产品信号

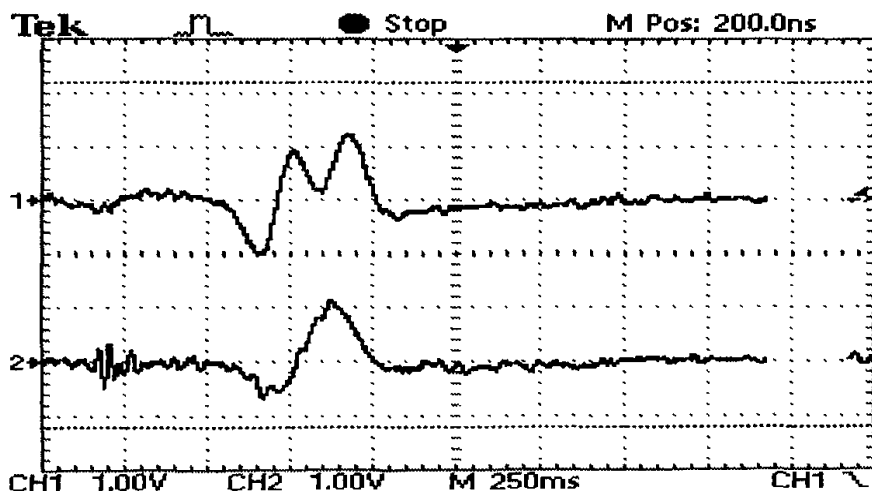


图 5-7 自学习后的产品信号

图 5-6 所示为米粉自学习前的产品信号，此时任意设定一相位 phase，假设 phase 设定为 142.1 度，两路增益均设定为 19.2、19.2，阈值定位为 3v。而运

行“自动设定”后,调整相应的参数设置,相位 phase 为 89.9,增益不变仍为 19.2,而阈值为 2v。从参数变化上可以看出米粉的产品效应是偏向铁的,根据自学习的流程图,如果对采样信号的波峰和波谷到达的一致性判断是同向还是反向,确定是增加还是减少相角,而起始角我们定义为 108 度,所以当相角设定为 89.9 度时说明当时的判断是认为此信号类似于 FE 的信号。

我们在抑制了产品效应的同时,应该保证良好的探测灵敏度。图 5-8、图 5-9、图 5-10 表示了在产品自学习后空机通过 FE 和 SUS 时的金属信号大小。

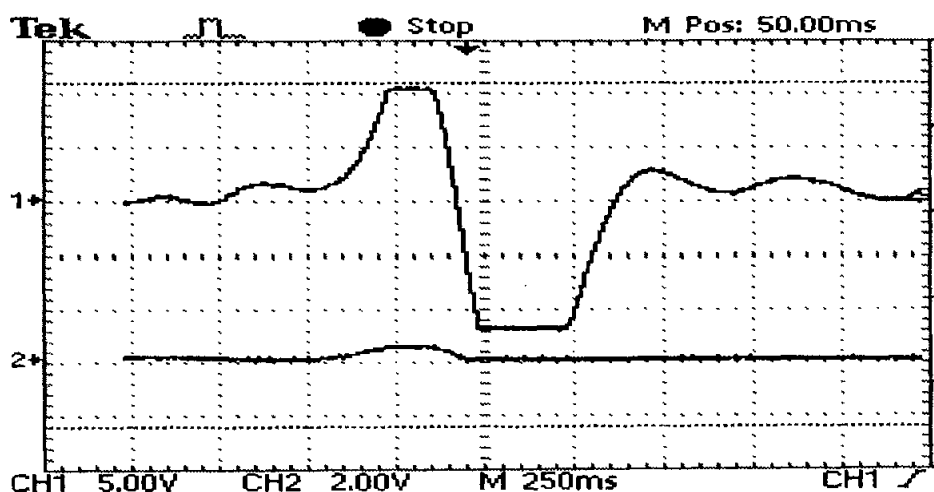


图 5-8 空机通过 FE $\phi$ 1.5 时的金属信号

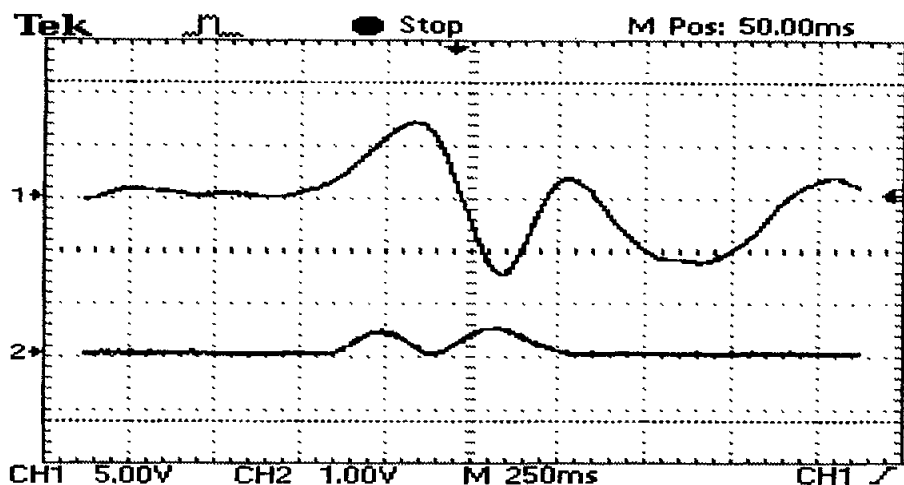


图 5-9 空机通过 FE $\phi$ 1.3 时的金属信号

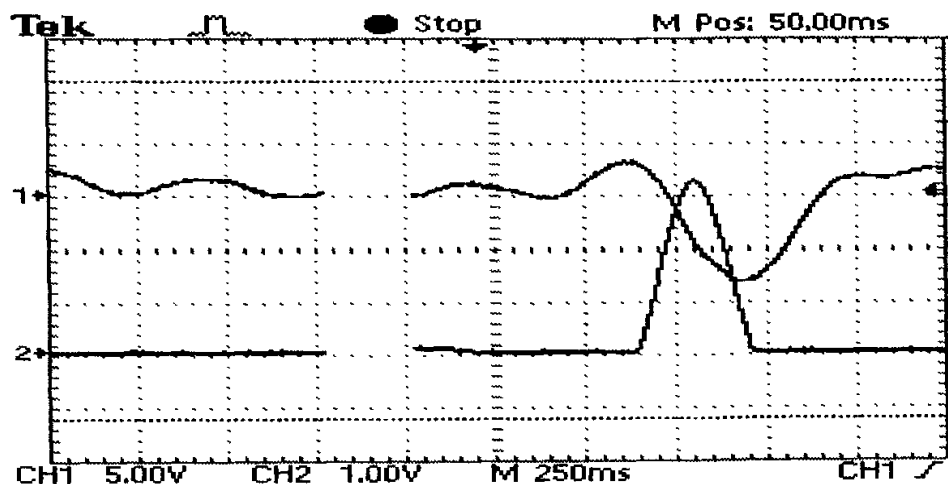


图 5-10 空机通过 SUS $\phi$ 3.0 时的金属信号

比较图 5-8 和图 5-9，不难看出，FE $\phi$ 1.5 的金属信号幅值比 $\phi$ 1.3 的幅值要大些，而且 FE $\phi$ 1.5 的信号幅值已经达到上限了，这说明金属的形状或者尺寸越大的话，信号越强，越容易被探测到。再和图 5-10 比较一下，也不难发现，该图的两路信号的波峰与波谷出现时正好是相反的、几乎对称的。这也验证了 FE 和 SUS 两种金属在探测器中反映的信号是恰好相反的，可以通过相位来分辨两者。

从以上产品检测实验结果来看，自学习方法的实现方案是切实可行的，它能够自动辨识产品信号与金属杂质信号，有效抑制产品效应，分离出金属杂质信号，并能很好的排除外界干扰带来的影响。

## 第六章 结论与展望

金属探测器的重要作用,是通过对有害的金属细小碎屑实施灵敏而可靠的探测来对产品提供可靠的保护。目前国际上对于食品安全的认证有 HACCP, 全称为危害分析与关键点控制管理体系,是专门用于食品安全检查认证的。金属探测器所检测的内容也与其认证体系内容相一致。

根据课题的要求和具体方案的实现,智能型金属探测器具有如下特点:

1、采用嵌入式系统 DSP 对检测信号进行数据采样和数据处理,进一步提高检测效果;

2、采用微处理机建立良好的人机对话界面。LCD 液晶显示,中文菜单式的画面,可以轻松地实现对话型的操作,特别是产品登录和自动设定,交互式操作可以避免误操作、漏操作,面板设置方便直观;

3、采用直接数字频率发生器产生一频率、相位和幅值均可调节的正弦波。改变了以往采用 RLC 振荡电路产生正弦波的模拟线路参数难以调节和配合的状况。

4、具有自学习功能。探测的物料范围扩大,能够检测冷冻食品(如水饺、冷冻鱼)、肉类、大米、盐制品等;

5、具有记忆功能,可存储 20 种产品的检测参数;

6、能够进行产品调节,有效抑制产品效应;

7、能够进行灵敏度调节,操作方便,运行可靠,检测灵敏度可达到的指标为不锈钢 SUS 达到  $\phi 2.5\text{ mm}$ 、铁 FE 达到  $\phi 1.0\text{ mm}$ ;

8、能够进行相位调节,手动设置检测参数,操作灵活;

9、选择光电管 ON/OFF 状态,对应的检测产品状态可为包装/散装,同时软件上的设置使得光电管起到良好的抗干扰作用。

10、符合 HACCP 认证,采用不锈钢外包装、防止灰尘聚集的开放式框架,充分考虑到卫生性和操作性,传送皮带可以煮沸消毒。

根据市场对产品性能和技术指标的要求,通过实验测试样机性能发现,智能型金属探测器的探测精度可以达到  $\text{FE} \geq \phi 1.0\text{ mm}$ 、 $\text{SUS} \geq \phi 2.5\text{ mm}$ ,检测产品参数存贮量可达 20 种。对是否使用光电开关的选择性,实现包装和散装两种状态



的同机联用，同时光电开关的开/闭状态的转换，可以提高对外界噪声的抗干扰性，这样机器的稳定性也得到较大的提高。

全球第一台金属探测器诞生于1960年，步入工业时代最初的金属探测器也主要应用于工矿业，是检查矿产纯度、提高效益的得力帮手<sup>[22-24]</sup>。在技术进步的前提下，今日的金属探测器有能力作比以前更多、更为复杂的工作。随着社会的发展，对自身生活质量和周围环境的关注，金属探测器的应用为人们打开了一扇扇门，同时也开创了新的领域。整体来讲，当今的金属探测器已经出现了两种最具特色的技术功能。

其中之一是金属探测器的网络化功能。具备了这种技术，人们可以在任何一个地方拨打该金属探测器，对仪器进行维修，分析所通过的人/产品流量。并可根据治安的好坏或威胁的范围，调整金属探测器的工作灵敏度。所有这一切都可以远距离进行操作。

金属探测器的另一个技术进步就是分段限时技术的出现，世界几大著名的金属探测器生产厂商，如EI Paso、Ceia USA、Ranger&Metorex等，均投入了相当的资金从事这项研究、开发工作。它利用探测器的侧面或另一仪表盘上的灯光来指示或显示出人体中金属物品的近似位置，可以用在诸如法庭以及其他不允许发出声音的地方，虽然关闭了探测器的音量，但它仍能显示并提醒操作人员何时何处有金属物品存在。

现代通信技术、计算机技术和微电子技术的发展，为金属探测系统提供了新的技术平台，这些技术的利用可以提高自动金属探测系统的可靠性，其应用前景会越来越广阔。当今的一代金属探测器，证明金属探测行业的创新为企业免受污染提供了安全保障。与此同时，物理学与工艺要求相比还存在差距，即使最灵敏的金属探测器也不能保证检测到通过它的每一个金属颗粒。然而，生产检测设备的厂商对于挑战所表现出的热情，预示着在今后几年内将见到其飞速发展。

## 致 谢

本论文设计是在导师项安副教授的悉心指导下完成的。在设计过程中，项安老师丰富的专业知识和严谨的治学作风，使我受益匪浅，对我的成长来说是一笔宝贵的财富，会在今后的学习和工作中激励我不断奋进，在此毕业来临之际，谨向项安老师表示最衷心的感谢。

本课题是与上海某探测设备有限公司合作完成的，感谢洪坚工程师对这个课题的支持，没有他的指导和有效配合，完成课题将会增加不少困难。

最后我要感谢我的父母，我的同学，感谢他们在这三年中对我的关心和帮助，没有他们就没有我今天的一切。

## 参考文献

- [1]刘国亭,余晋岳.金属探测器的原理与应用[J],电子技术,1984,10(2):25-29
- [2]叶青译,杨清风校,金属探测器[J],国外传感器技术,2002,12(6):222-224
- [3]刘慧娟,一种新型智能金属探测器[J],北方交通大学学报,2001,25(1):95-99
- [4]吴兴惠、王彩君编著,传感器与信号处理,北京:电子工业出版社,1998
- [5]周学才、李传芳,一种新型高稳定度金属探测器及保护系统[J],电测与仪表,1997,34(376):17-20
- [6]张宏康,食品中的异物检测方法[J],粮油食品科技,2001,9(5):41-44
- [7]谈文心、邓建国、张相臣著,高频电子线路,西安:交通大学出版社,1996
- [8]刘和平主编,TMS320LF240x DSP 结构、原理及应用,北京:航空航天大学出版社,2002
- [9]严钟豪、谭祖根著,非电量电测技术,北京:机械工业出版社,1983
- [10]刘和平主编,TMS320LF240x DSP C 语言开发应用,北京:航空航天大学出版社,2003
- [11]庄文斌、黄瑞莉、林颖,采用 C51 与插拔式 FLASH 闪存设计无纸记录仪,《今日电子》[J],2001,(12):19-20
- [12]孙育才编,MCS251 系列单片微型计算机及其应用(第三版),东南大学出版社,1997
- [13]戴琳、侯文编著,电磁学及应用,北京:中国电力出版社,1998
- [14]林国荣编著,电磁干扰及控制,北京:电子工业出版社,2003
- [15]李英顺,绝缘纸板金属异物在线检测装置研究,大连理工大学硕士学位论文[D],2000
- [16]徐从裕,金属检测机抗干扰检测方法研究,食品工业科技[J],1999,20(1):73-74
- [17]张明,英国 Safeline 金属探测器的抗电磁干扰[J],电工技术,2003,(5):54
- [18]瞿中、徐问之,单片机通信中的 CRC 算法[J],《微机发展》,2001,11(04):74-76
- [19]顾国华、陈钱等,一种基于电涡流传感器的数据采集系统[J],光电子技术,

1997, 17 (3): 170-176

[20]关大陆, 相敏检波在 GJT-400 型金属探测器中的应用[J], 本溪冶金高等专科学校学报, 2002, 4 (4): 32-34

[21]冯建平、张运生等, 差动变压器型放大仪器及测量系统[J], 仪表技术与传感器, 1997, (1): 21-24

[22]Maria Teresa Restivo, a case study of induced eddy current, Sensor and Actuation A 51, 1996: 203-210

[23]Daniel J. Sadler、Chong H. Ahn, On-chip eddy current sensor for proximity sensing and crack detection, Sensor and Actuation A 91, 2001

[24]Graham Miller, Patrick Gaydecki, Detection and imaging of surface corrosion on steel reinforcing bars using a phase-sensitive inductive sensor intended for use with concrete, NDT&E international 36(2003): 19-26

[25]申忠如、郭福田、丁晖编著, 电气测量技术, 北京: 科学出版社, 2003

[26]王君、凌振宝编, 传感器原理与检测技术, 吉林: 吉林大学出版社, 2003

[27]庞瑞帆、钟翔等, 双频金属探测器的研究[J], 解放军理工大学学报(自然科学版), 2001, 2 (2): 1-8

[28]王宏禹著, 数字信号处理专论, 北京: 国防工业出版社, 1995

[29]先锋工作室编著, 单片机程序设计实例, 北京: 清华大学出版社, 2003

[30]贾伯年、俞朴著, 传感器技术, 南京: 东南大学出版社, 1992

[31]高平、成立等, 一种新型自动金属探测系统的实现[J], 农机化研究, 2003, (4): 218-220

[32]宗孔德、胡广生著, 数字信号处理, 北京: 清华大学出版社, 1988

[33]黄绍平、秦祖泽, 智能化电器 RS2-485 通信设计[J], 《低压电器》, 2003, No. 3: 24-26

[34]王伟, 金属探测器原理及其应用[J], 矿冶, 1996, 5 (4): 78-84

[35]唐炜、顾金凤, 数字式涡流传感器的研究[J], 2001, 20 (8): 16-19

[36]吴步宁、于志洁, 微机控制高精度可调频调幅信号发生器[J], 工业仪表与自动化装置, 1998. 6

- [37]虞伟晨, 食品中异物的在线检测和控制[J], 食品工业, 2002, (5): 33-35
- [38]DTI-Link project: soft contaminant detection, Intermediate Report (1992)
- [39]张战良, 非磁性金属探测器及应用[J], 大氮肥, 1996.3
- [40]周泽存、刘馨媛主编, 检测技术, 北京: 机械工业出版社, 1993
- [41]康华光著, 电子技术基础(模拟部分第四版), 北京: 高等教育出版社, 1998.8

作者: [刘淑琴](#)  
学位授予单位: [南昌大学](#)  
被引用次数: 3次

## 参考文献(41条)

1. [刘国亭, 余晋岳](#) [金属探测器的原理与应用](#) 1984 (02)
2. [叶青, 杨清风](#) [金属探测器](#) 2002 (06)
3. [刘慧娟](#) [一种新型智能金属探测器](#) [期刊论文] - [北方交通大学学报](#) 2001 (1)
4. [吴兴惠, 王彩君](#) [传感器与信号处理](#) 1998
5. [周学才](#) [一种新型高稳定度金属探测及保护系统](#) [期刊论文] - [电测与仪表](#) 1997 (4)
6. [张宏康](#) [食品中的异物探测方法](#) [期刊论文] - [粮油食品科技](#) 2001 (5)
7. [谈文心, 邓建国, 张相臣](#) [高频电子线路](#) 1996
8. [刘和平, 严利平, 张学峰, 卓清锋](#) [TMS320LF240x DSP结构、原理及运用](#) 2002
9. [严钟豪, 谭祖根](#) [非电量电测技术](#) 1983
10. [刘和平, 严利平, 张学峰, 卓清锋](#) [TMS320LF240x DSP C语言开发运用](#) 2003
11. [庄文斌, 黄瑞莉, 林颖](#) [采用C51与插拔式FLASH内存设计无纸记录仪](#) [期刊论文] - [今日电子](#) 2001 (12)
12. [孙育才](#) [MCS251系列单片微型计算机及其应用](#) 1997
13. [戴琳, 侯文](#) [电磁学及应用](#) 1998
14. [林国荣](#) [电磁干扰及控制](#) 2003
15. [李英顺](#) [绝缘纸板金属异物在线检测装置研究](#) [学位论文] 硕士 2000
16. [徐从裕](#) [金属检测机抗干扰检测方法研究](#) [期刊论文] - [食品工业科技](#) 1999 (1)
17. [张明](#) [英国Safeline金属探测器的抗电磁干扰措施](#) [期刊论文] - [电工技术](#) 2003 (5)
18. [瞿中, 徐问之](#) [单片机通信中的CRC算法](#) [期刊论文] - [微机发展](#) 2001 (4)
19. [顾国华, 陈钱](#) [一种基于电涡流传感器的数据采集系统](#) 1997 (03)
20. [关大陆](#) [相敏检波在GJT-400型金属检测仪中的应用](#) [期刊论文] - [本溪冶金高等专科学校学报](#) 2002 (4)
21. [冯建平, 张运生](#) [差动变压器型放大仪器及测量系统](#) 1997 (01)
22. [Maria Teresa Restivo](#) [A case study of induced eddy current](#) 1996
23. [Daniel J Sadler, Chong H Ahn](#) [On-chip eddy current sensor for proximity sensing and crack detection](#) 2001
24. [Graham Miller, Patrick Gaydecki](#) [Detection and imaging of surface corrosion on steel reinforcing bars using a phase-sensitive inductive sensor intended for use with concrete](#) [外文期刊] 2003
25. [申忠如, 郭福田, 丁晖](#) [电气测量技术](#) 2003
26. [王君, 凌振宝](#) [传感器原理与检测技术](#) 2003
27. [庞瑞帆, 钟翔, 胡洸, 何云龙, 徐毅刚, 倪宏伟](#) [双频金属探测器的研究](#) [期刊论文] - [解放军理工大学学报\(自然科学版\)](#) 2001 (2)
28. [王宏禹](#) [数字信号处理专论](#) 1995
29. [先锋工作室](#) [单片机程序设计实例](#) 2003

30. 贾伯年, 俞朴 [传感器技术](#) 1992
31. 高平, 成立, 施卫东 [一种新型自动金属探测系统的实现](#)[期刊论文]-[农机化研究](#) 2003(4)
32. 宗孔德, 胡广书 [数字信号处理](#) 1988
33. 黄绍平, 秦祖泽 [智能化电器RS-485通信设计](#)[期刊论文]-[低压电器](#) 2003(3)
34. 王伟 [金属探测器原理及其应用](#)[期刊论文]-[矿冶](#) 1996(4)
35. 唐炜, 顾金凤 [数字式涡流传感器的研究](#)[期刊论文]-[传感器技术](#) 2001(8)
36. 吴步宁, 于志洁 [微机控制高精度可调频调幅信号发生器](#) 1998(06)
37. 虞伟晨, 蔡云升 [食品中异物的在线检测和控制](#)[期刊论文]-[食品工业](#) 2002(5)
38. [DTi-Link project:soft contaminant detection](#) 1992
39. 张战良 [非磁性金属探测器及应用](#) 1996(03)
40. 周泽存, 刘馨媛 [检测技术](#) 1993
41. 康华光, 陈大钦 [电子技术基础\(模拟部分\)](#) 1998

#### 本文读者也读过(10条)

1. 陈娟 [数字式金属探测器的研究](#)[学位论文]2007
2. 孙丽兵 [智能双频金属探测器的研究](#)[学位论文]2008
3. 张忠祥 [基于ATmega8515控制的金属探测器研究](#)[学位论文]2009
4. 王海鱼 [一种高灵敏度金属探测器的研究](#)[学位论文]2009
5. 张泉泉, 张贵宝, 杜道山, 李从心, ZHANG Quanquan, ZHANG Guibao, DU Daoshan, LI Congxin [基于频域分析的金属探测器设计与实现](#)[期刊论文]-[微计算机应用](#)2007, 28(4)
6. 王庆林 [基于平衡线圈技术的金属探测器设计](#)[学位论文]2010
7. 刘慧娟, 张奕黄 [一种数字式金属探测器的设计](#)[期刊论文]-[仪器仪表学报](#)2004, 25(z1)
8. 张泉泉, 张贵宝, 杜道山, 李从心, Zhang Quanquan, Zhang Guibao, Du Daoshan, Li Congxin [一种金属探测器设计与实现](#)[期刊论文]-[电子测量技术](#)2006, 29(3)
9. 张宇, 姜玲玲 [基于单片机的手持式金属探测器的研制与开发](#)[期刊论文]-[警察技术](#)2008(3)
10. 吴晶 [基于LPC2131的简易金属探测器](#)[期刊论文]-[工业控制计算机](#)2010, 23(1)

#### 引证文献(4条)

1. 李中帅 [金属检测器相关技术研究综述](#)[期刊论文]-[电子制作](#)

---

2013(18)

2. 金江涛, 张文文 [金属检测器在速冻禽肉制品中的应用](#)[期刊论文]-[肉类研究](#) 2011(3)
3. 金江涛, 张文文 [金属检测器在速冻禽肉制品中的应用](#)[期刊论文]-[肉类研究](#) 2011(3)
4. 刘淑琴 [智能型金属探测器研究](#)[学位论文]硕士 2005

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y790066.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y790066.aspx)