

山东大学

硕士学位论文

基于ATmega8515控制的金属探测器研究

姓名：张忠祥

申请学位级别：硕士

专业：电机与电器

指导教师：刘志珍

20090428

摘要

金属探测器是一种金属检出设备，它利用电磁、射线等物理原理，对混合物品或人体中的金属物质（如铁、铜、不锈钢等）产生感应信号，已达到剔除或报警作用。随着生活水平的日益提高，人们对食品、医药及纺织品等的安全要求也在提高。在上述产品中，金属含量是其质量的重要指标。因此，在这些产品出厂前，有必要进行金属检测，以将不合格产品检出。目前，由于技术所限，高精度金属探测器主要依赖进口，虽然性能较高，但是价格昂贵。随着现代工业生产向着高精度、高品质发展，以及顾客对产品质量的要求日益增加，高精度的金属探测器市场将会十分广阔。因此，研发一种高精度且成本相对较低的金属探测器产品，具有非常可观的经济效益。此外，实现核心技术的自主化，还能摆脱对国外产品的依赖，具有相当的社会效益。

本文介绍了金属探测器的研究现状，对于目前国际国内主流的开发原理及其优缺点进行了阐述。结合对磁场的分析以及对不同金属处于交变磁场中的电磁特性的分析，本文设计了一种金属探测器的完整方案，并提出了若干改进措施，相信能够在节约成本的同时，达到有效检测的目的。

本文着重介绍了金属探测器的软硬件设计方案。硬件部分是本课题设计的关键，尤其是信号的产生和检测，从根本上决定了检测精度。经过频率整定、滤波、放大等环节，生成的正弦波信号应具备频率稳定，波形好，功率较大的特点；经过滤波、放大、信号调理、峰值保持、AD转换等环节，所获得的信号应能够准确反应接收信号的特征参数，稳定性好，并能排除干扰。本文对上述环节的电路原理及注意事项等进行了详细说明，并给出了相关的原理图和部分参数。软件部分主要实现了检测数据的分析、参数的设定和存储、显示部分的控制以及报警信号的产生，而其数字滤波部分，则是对硬件部分的有益补充。本文给出了上述各个模块的实现过程及其流程图，以及整个系统的流程图。作为一个完整的项目，本文对于一些细节也进行了阐述，包括电源部分和传动部分的设计等。

通过实验展示了本课题研制的金属探测器的检测效果和功能特点，并提出了部分改进措施。最后，展望了金属探测器的两大发展趋势，即网络化和分段限时技术。

关键词： 金属探测器 单片机 电磁感应

ABSTRACT

Metal detector is a kind of equipment for metal detection. It makes use of physical principles of electromagnetism and radial and gets induction signal for metal objects (iron, copper, stainless steel and so on) in mixture and body to effect an elimination and alarm. With the improvement of living standard, people are more concerned about the security of food, medication and dry-goods. Metal content is an important quality target over the above-mentioned products. So it is necessary that metal is detected for these products to examine the defective ones before delivery. At present high-precision metal detectors are mostly imported because of technical limitation which is powerful but expensive. With the development of modern industry towards high-precision and high-quality and customer's requirements on product quality, high-precision metal detectors will have a very broad market. Therefore, there are very considerable economic benefits to develop a high accuracy but relatively low cost metal detector. In addition, there are very considerable social benefits to make the core technology independent and get rid of dependence on foreign products.

This paper introduces the status quo of metal detectors and describes mainstream development elements and merits and drawbacks at home and abroad. Combined with the analysis of the magnetic field as well as the electromagnetic characteristics of different metals at alternating magnetic field, this paper designs a complete program of a metal detector and makes a number of improvements, which can achieve an effective detection and reduce the cost at the same time.

This paper focuses on the hardware and software design of metal detector and the hardware design is the key issue, especially the generation and detection of signals which determine the detection accuracy fundamentally. The sine signal through the frequency adjustment, filter and amplification should have a stable frequency, a good waveform and a higher power. After the filter, amplification, signal adjustment, peak maintain, and AD conversion, the signal acquired should be stable and can be able to reflect the

characteristics of received signal parameters and have anti-jamming ability. In this paper, the circuit theory and attention of the above-mentioned aspect are described in detail and the relevant schematic diagrams and part of parameters are given. Meanwhile, the analysis of testing data, the settings and the storage of parameters, the control of display part and the production of alarm signals are realized in software part, while the digital filter is a useful complement for the hardware part. In this paper, the implementation processes and flow charts of the various modules are given as well as the flow charts of the entire system. As a complete subject, some details are also described in the paper, including the design of the power supply part and the transmission part.

The testing effect and function of this metal detector are shown through experiment in the subject, and some improvements are made. Finally, this paper prospects the two trends of metal detectors, that is, network and sub-limit technology.

Key words: Metal detector, Single chip, Electromagnetic induction

符号说明

B :	磁感应强度	B_m :	磁感应强度幅值
H :	磁场强度	μ :	介质磁导率
μ_0 :	真空磁导率	μ_r :	相对磁导率
σ :	介质电导率	D :	圆形线圈直径
I_m :	电流信号幅值	ω :	信号角频率
L :	线圈电感	N :	线圈匝数
Φ :	单匝线圈磁通量	P_c :	涡流损耗
W_x :	涡流损耗因子	f_m :	磁场交变频率
U_s :	激磁电压	I_1 :	激磁电流
R_1 :	发射线圈电阻	L_1 :	发射线圈电感
Φ_1 :	激磁磁通	I_2 :	感应电流
R_2 :	金属物体等效电阻	L_2 :	金属物体等效电感
Φ_2 :	感应磁通	A_T :	发射线圈面积
N_T :	发射线圈匝数	r_T :	发射线圈半径
L_3 :	因磁效应而产生的等效电感		
Z_1 :	线圈与金属物体系统的等效阻抗		
l_T :	发射线圈轴线上一点到线圈平面的距离		

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 张忠祥 日 期： 09.4.28

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本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、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名： 张忠祥 导师签名： 2013.2.8 日 期： 09.4.28

第1章 绪论

1.1 前言

谈起金属探测器，人们就会联想到探雷器，工兵用它来探测掩埋的地雷。事实上金属探测器是一种探测用的电子仪器，可应用于各个领域。在军事上，可用金属探测器探测金属地雷^[2]；在公安部门，探测随身携带或隐藏的武器及作案工具^[3-5]；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^[6, 7]；在工程中，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^[8, 9]；工业上可用于在线监测，如去掉棉花，煤炭，和食品中的金属杂物等^[10-12]。此外，金属探测器还可以作为开展青少年国防教育和科普活动的用具^[13]。

1.1.1 金属探测器的历史

全球第一台金属探测器诞生于1960年，最初的金属探测器主要应用于工矿企业，其为检查矿产纯度和提高效益的得力帮手。随后于1970年，随着社会的不断发展，金属探测器被引入一个新的应用领域——安全检查，其广泛运用于民航、公安、缉私和边防等领域，也就是今天我们所使用的金属探测器的雏形，它的出现意味着人类对安全的认知已步入了一个新的时代，一个产品的出现带动了一个行业的发展，于是安检这个既陌生又熟悉的行业开始进入市场。随着国内安全防护行业的蓬勃发展，在安检领域，国内出现了多个金属探测器生产厂商，但在国内市场占有率上来看国外品牌占有80%的市场份额，民航市场也一直是国内金属探测器的禁区^[14, 15]。究其原因，大部分是因为产品质量不过关导致相关质量认证书拿不到。其实，国内金属探测器产品的研发、生产和推广，近几年已获得较大进步。但是，犹如其他电子类产品一样，金属探测器同样出现了电路仿制、功能趋同、华而不实的现象。某些所谓生产厂商这种投入小、研发周期短的商业行为势必导致产品的一致性差，可靠性低以及安检产品社会信誉度降低，根本无法保证安检要求。

在70年代，随着航空业迅速发展，劫机和危险事件的发生使航空及机场安全逐渐受到重视，于是在机场众多设备中金属探测门扮演着排查违禁物品的重要角色。同样在70年代，由于金属探测门在机场安检中的崭露头角，大型运动会（如

奥运会)、展览会及政府重要部门的安全保卫工作中金属探测门成为必不可少的安检仪器。

发展到80年代,监狱暴力案件呈直线上升趋势,如何及早有效预防并阻止暴力案件发生成了监狱管理工作中的重中之重,在依靠警员对囚犯加强管理的同时,金属探测门再次成为了美国、英国、法国、日本等发达国家监狱管理机构必备的安检设备,平均每300个囚犯便使用一台金属探测门应用于安全检查;与此同时西方兴起的“寻宝热”,也使手持式、便携式金属探测器得到长足的发展^[16]。

进入90年代,迅速升温的电子制造业发展规模越来越大,大型的电子公司为了减少产品流失、结束员工与公司之间的尴尬局面,陆续采用金属探测门和手持式金属探测器作为管理员工行为、减少产品流失的工具。于是金属探测器又有了它新的角色——产品防盗。

40多年过去了,金属探测器经历了几代探测技术的变革,从最初的信号模拟技术到连续波技术直到今天所使用的数字脉冲技术,金属探测器简单的磁场切割原理被引入多种科学技术成果。无论是灵敏度、分辨率、探测精确度还是工作性能上都有了质的飞跃。应用领域也随着产品质量的提高延伸到了多个行业^[17]。

1.1.2 金属探测器的应用

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,能够指示出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^[18]。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,进行金属探测。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,并可使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。Tera View公司还致力于研发可置于码头的金属探测器,这种探测器可探测到大衣口袋中的剃须刀以及口袋中的塑料炸药。

食品是人们日常生活中不可或缺的物质资源,其质量的好坏将直接影响人们的生活质量与身体健康。在食品生产过程中,金属探测器的应用是质量控制的有效手段之一。目前,食品行业普遍实行国际食品技术委员会HACCP(危害分析及临界控制点)质量体系认证^[19,20],为食品的安全提供强有力的保障。在实施

HACCP过程中,金属检测常被确定为关键控制点而受到严格的把关。病从口入,人类的生活离不开食品,食品的安全直接关系到人们的身体健康。近年来,由于口蹄疫、疯牛病、禽流感、三聚氰胺等事件不断出现,使食品安全问题成为当今社会的一个敏感话题。人们对食品的安全性尤其是食源性疾病更加关注,然而由食品中混入异物所造成的食品安全隐患则往往被人们所忽视。在食品加工过程中,经常会遇到各种各样的异物混入,如金属,玻璃,塑料,昆虫,毛发,木屑,沙石等等。异物可以分为两类:一类是可对人体造成明显危害的(如金属、玻璃),混入食品中的这种异物如果被消费者吃进体内,就可能造成一定的身体伤害,属于一类较为危险的异物;另一类是具有潜在危害的(如头发、木屑、塑料等),这类异物一般情况下是不会给消费者造成身体伤害的。但也不是说无所谓,因为无论什么样的异物,都会给消费者带来不安全感。因此,加强食品中异物检测与控制的措施,越来越为人们所重视。在生产过程中,凡是直接接触金属表面的工序,都有可能引入金属杂质。而金属探测器在生产线中的摆放位置是否合理,决定了食品生产的质量以及生产成本的高低。如果放置于生产线前几道工序,将会漏掉以后几道工序的金属检测;如果放置于生产线最后几道工序,势必会造成返工以及包装材料的浪费。通过对食品企业的考察和分析,发现在食品生产过程中,可能引入铁、铜、铝、钢、等多种金属杂质,为了有效地将其去除,需要有针对性地选择金属探测器的型号以及样式^[21]。

1.2 研究现状

1.2.1 金属探测器的发展趋势

在技术进步的前提下,现在的金属探测器有能力做比以前更多、更为复杂的工作。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:精细化和网络化。所谓精细化,是指探测灵敏度的进一步提高,以使金属探测器可以应用于更为严格的质量控制。同时,这种金属探测器又应当保持灵敏度的连续可调,保证其广泛的应用场合^[22];而网络化则是指探测器个体之间及其与控制台之间由网络连接,可以实现远程控制和信息及时汇总。

1.2.2 金属探测器的研究现状

目前,在实践中得到应用的金属探测技术主要有:

- 巨磁电阻传感器检测技术
- 平衡线圈检测技术
- LC谐振检测技术

(1) 巨磁电阻(GMR)传感器是上世纪九十年代中期引入到金属探测中的一种新技术,是各种传统霍尔及磁阻元件的换代产品,1994年,美国的NVE公司首先实现巨磁电阻效应的产业化,并销售巨磁电阻磁场传感器。其生产的AA002传感器芯片,采用AD620作为放大元件,通过采集输出电压变化来检测周围磁场发生的微弱变化,在管道探伤等方面已得到应用。基于GMR效应的磁传感器具有体积小、灵敏度高、线性范围宽、响应频率高、温度特性好的特点。目前国内有学者正在探讨巨磁电阻传感器用于金属探测的可能性。

中国石油大学的陈晓辉在“基于GMR传感器芯片的弱磁探伤电路”中,介绍了NVE公司的AA系列GMR芯片的工作原理,并设计制作了实物,可以成功探测周围磁场的变化,对金属管道进行检测和探伤。做出的成品具有体积小,成本低廉,灵敏度高的优点。算得上为磁传感器在金属探测领域的应用提供了借鉴^[23]。

山东交通学院的贺桂芳在“一种新型智能金属探测仪的设计”中,介绍了一种基于金属体内电涡流效应的新型高灵敏度金属探测仪设计。传感器探头由激励线圈和巨磁电阻传感器芯片构成,在线圈中通入方波脉冲使周围产生交变磁场,当靠近金属物体时,金属内产生涡流,使原线圈的磁场发生变化,位于线圈中央的巨磁阻传感器将其转变成电信号,在单片机的控制下进行处理和显示。该方案与传统的方案比较,无需复杂的硬件电路,以单片机为控制核心,大大提高了系统的可靠性和抗干扰能力。采用检测微弱磁场变化的巨磁阻传感器为磁敏元件,检测灵敏度高,可探测的距离远。以 $4.5\text{cm} \times 4.5\text{cm}$ 截面积的金属物计,探测有效距离可达50cm以上^[24]。

内蒙古大学的范丽珍等在“基于单片机的智能型金属探测器的设计”中,介绍了一种基于AT89S52单片机控制的智能型金属探测器的硬件组成、软件设计、工作原理及主要功能。该金属探测器以AT89S52单片机为核心,采用线性霍尔元件UGN3503作为传感器来感应金属涡流效应引起的通电线圈周围磁场的变化,并将磁场变化转化为电压的变化。单片机将测得电压值与试验测定的基准电压值相比较,以确定是否探测到金属。在软件设计中,采用了数字滤波技术消除干

扰。提高了探测器的抗干扰能力，确保了系统的准确性。也可算是磁传感器的一种应用方案。

(2) 平衡线圈技术在国外许多高精度金属探测器产品已经得到应用，但在国内未见有相关的应用报道。该技术以三个同样大小、同轴放置的线圈为探头，待检物料从线圈中穿过^[25, 26]。中间为发射线圈，通有1MHz正弦波电流，在周围空间产生一个正弦交变磁场；两侧对称放置两个接收线圈，同时接入一个差分放大器的输入端。当线圈中没有金属物体穿过时，两侧接收线圈感应电动势等大反向，差分输出为零。当有金属物体穿过线圈时，处于交变磁场中的金属物体就会感生涡流，而涡流磁场又进一步影响两侧接收线圈的感应电动势，由于不平衡，在差分放大器中就会有相应的信号产生。这种技术的探测精度非常高，如ERIEZ公司的E-Z Tec 9100系列产品，在27mm孔径下，探测精度可达0.3mm。Sadao Yamazaki等人详细分析了平衡线圈技术原理，并且给出了以金属小球为例从平衡线圈轴线上穿过时的相关计算公式^[27, 28]。

在一个典型的金属探测器中，发射线圈在中间，两个接收线圈对称安排在两旁，所有的线圈同轴放置。接收线圈与一个微分放大器相连，如图 1-1所示。当间隙中没有金属物体时，两个接收线圈中的输出电压相同，而微分放大器中的输出为零。当外部干扰同时作用于两个接收线圈时，差分输出仍为零，因为两个线圈的感应输出信号相互抵消。当有金属物体存在于三个线圈之间，由于发射线圈中的磁场，金属片中便会产生涡流。由于涡流而产生的磁场会在两个接收线圈中产生电压差，这个电压差主要取决于金属物体和每个线圈之间的不同距离，从而得到一个微分输出电压。使用此方法检测金属物体，利用了每个发射线圈回路及微分放大器之间输出电压的幅值及相位的差别。振荡器输出电压经过一个高阻抗缓冲放大器送入一个相位比较器。类似地，微分放大器的输出电压也被送入相位比较器。从微分放大器输出电压幅值和相位的变化以及三个线圈位置的影响，可以检测出金属物体的电磁特性及尺寸。通过增加对金属物体的这些特性的检测，可以进一步提高金属探测器的灵敏度^[29, 30]。

Sadao Yamazaki等在“Basic Analysis of a Metal Detector”中，详细分析了平衡线圈技术的基本原理，并对金属物质通过平衡线圈时的磁场进行了精确的推导和计算，得出了矢量电势的表达式，最后，作者给出了不同形状、大小和性质的金属物质通过时，信号的幅值和相位变化规律的实验曲线，是关于平衡线圈技术基本理论的重要参考文献^[27]。

Sadao Yamazaki 等在 “ Simultaneous Measurement of Electric and Magnetic Properties of a Spherical Sample ” 中，对金属小球在线圈中的磁场分布做了非常深入、详细的推导，给出了球形金属电、磁特性与磁场分布的具体关系^[26]。

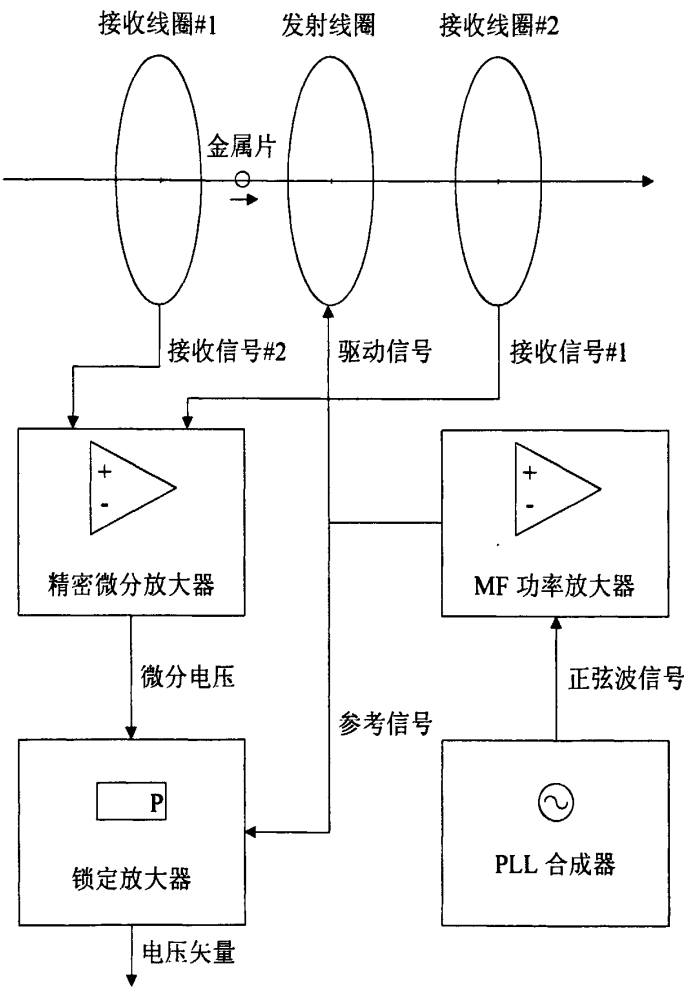


图 1-1 平衡线圈技术原理图

（3） LC谐振检测技术是利用金属物体靠近LC谐振电路时会使电路失谐的特点来检测金属的。适当选择LC谐振电路的频率和L、C参数，使电路处于谐振状态。当有金属物体接近时，便处在一个交变电磁场中，感生涡流。而涡流磁场

又会引起L参数变化,使得电路失谐,电量发生变化。LC谐振的具体检测原理如下所述。

当磁性金属、非磁性金属以及磁性物料出现在探测线圈平面附近时,依据电磁感应^[31]的原理,将发生如下的现象和效应:

1) 线圈介质条件的变化:当磁性金属或磁性物料接近线圈时,将使其周围的磁场发生变化。对于圆形电感线圈,当其中通过交变电流 $i = I_m \cos \omega t$ 时,中心磁感应强度为

$$B = (\mu/D)I_m \cos \omega t \quad (1-1)$$

式中: μ 为介质磁导率, D 为线圈直径。对于紧密缠绕 N 匝的线圈,其等效电感为

$$L = N\Phi/i \quad (1-2)$$

式中: Φ 为单匝线圈的磁通量。

当磁性金属或物料穿过线圈时,由于其磁导率较大,引起磁感应强度变大,因此等效电感会有所增大。

2) 涡流效应和磁滞效应:电磁感应在金属中产生涡流,涡流又产生涡流磁场(与原磁场方向相反),涡流磁场削弱线圈原磁场的变化,从而使线圈的等效电感有减小的趋势。此外,磁性金属还产生磁滞效应。

3) 涡流损耗和磁滞损耗:涡流在金属(磁性或非磁性)中流过必然产生损耗,其表达式如下

$$P_c = W_x f_m^2 B_m^2 \quad (1-3)$$

式中: W_x 为涡流损耗因子, f_m 为磁场交变频率, B_m 为磁感应强度的幅值。由于涡流效应和磁性金属的磁滞效应都将引起功率损耗,这将使线圈的等效电阻增大。

综上所述,磁性金属、非磁性金属以及磁性物料在接近探测线圈时,线圈的等效电感和电阻都会发生变化。

LC谐振检测技术是目前为止应用最为广泛的一项金属检测技术,以此为基础进行的金属探测器研究项目甚多:

黑龙江工程学院的赵树军等在“对两种基本金属探测仪的分析”中,针对LC谐振检测技术提出了两种最为典型方案并做了基本的理论分析,提供了理论参考[32]。

北京交通大学的刘慧娟等在“一种基于电压和频率的金属探测方法”中,在能耗式检测电路基础上,提出一种利用检测线圈中电压和频率的变化来探测金属的原理,继而分析了不同属性金属和物料对检测电路中电压和频率变化的影响及这种变化的规律,最后,提出利用这种变化规律在不同应用中的检测方案,实验结果表明了理论分析的正确性和实用性。该方法对金属物质按照磁导率和电导率差异,进行了较为详细的分类,并总结了每一类金属的信号变化规律,灵活性很高,缺点是精度做不到很高[33]。

1.3 本课题的主要研究工作

本课题拟综合运用LC谐振检测技术和平衡线圈检测技术,结合单片机的数字化控制功能,进行一种高精度及高稳定度的金属探测器方案设计。该方案包括金属物体通过线圈磁场时的模型建立及求解、探头设计、信号发生及放大电路设计、信号接收及处理电路设计,控制器软硬件设计,处理方案设计等。

第2章 磁场分析

2.1 通电线圈系统空间电磁场的建立

按照麦克斯韦提出的位移电流假说,任何随时间变化的电场都要在临近空间激发磁场;按照涡旋电场的假说,任何随时间变化的磁场都要在临近空间激发涡旋电场。变化的电磁场总是互相制约、互相联系着的。所不同的是,电场增大时,激发的磁场是右旋的,而磁场增大时,所激发的电场是左旋的。一般说来,变化的电场激发变化的磁场,充满变化磁场的空间同时充满变化的电场。这两种变化的场——电场和磁场永远互相联系着,形成电磁场^[34]。

给一个线圈通以交变电流时,就会在其周围空间形成这样一种交变的电磁场。

设位于 XOY 平面、半径为 ρ 、载流为 I 的圆形线圈,其 ρ 、 $d\alpha$ 单元电流在 $(l,0,h)$ 点产生的磁场为 dH ,其分量为 dH_x , dH_y , dH_z , 线段 b 在 XOY 平面内,与 $d\alpha$ 处的半径平行,单元电流处圆的切线与 b 的交点与 $(l,0,h)$ 点的连线为 a 。如图 2-1 所示:

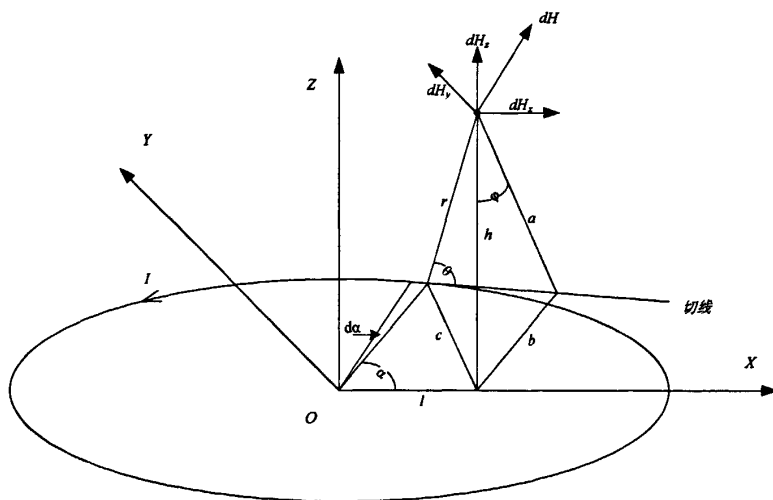


图 2-1 圆形线圈磁场分布示意图

根据麦克斯韦方程组和恰当的数学方法,可以求得 dH_x , dH_y , dH_z 的表达式(其中, dH_h 为水平分量 dH_x 和 dH_y 的合成):

$$dH = \frac{I\rho d\alpha}{4\pi r^2} \sin\theta = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\rho d\alpha (h^2 + \rho^2 + l^2 \cos^2 \alpha - 2\rho l \cos \alpha)^{1/2}}{(h^2 + \rho^2 + l^2 - 2\rho l \cos \alpha)^{3/2}} \quad (2-1)$$

$$dH_z = dH \frac{b}{a} = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\rho(\rho - l \cos \alpha) d\alpha}{(h^2 + \rho^2 + l^2 - 2\rho l \cos \alpha)^{3/2}} \quad (2-2)$$

$$dH_h = dH \frac{h}{a} = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\rho h d\alpha}{(h^2 + \rho^2 + l^2 - 2\rho l \cos \alpha)^{3/2}} \quad (2-3)$$

$$dH_x = dH_h \cos \alpha = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\rho h \cos \alpha d\alpha}{(h^2 + \rho^2 + l^2 - 2\rho l \cos \alpha)^{3/2}} \quad (2-4)$$

$$dH_y = dH_h \sin \alpha = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\rho h \sin \alpha d\alpha}{(h^2 + \rho^2 + l^2 - 2\rho l \cos \alpha)^{3/2}} \quad (2-5)$$

设直线段载流体在 $P(\angle\varphi, l, h)$ 点的磁场分布如图 2-2所示:

图中在 $(x, \rho, 0)$ 点的电流单元 $I dx$ 在 P 点产生磁场 dH ，其分量为 dH_y ， dH_z 。同理可求得 dH_y ， dH_z 的表达式如下:

$$dH_x = 0 \quad (2-6)$$

$$dH = \frac{I dx}{4\pi r^2} \sin\theta = \frac{I dx}{4\pi r^3} \quad (2-7)$$

$$dH_y = dH \cos\varphi = dH \frac{h}{a} = \frac{I h dx}{4\pi r^3} \quad (2-8)$$

$$dH_z = dH \sin\varphi = dH \frac{b}{a} = \frac{I b dx}{4\pi r^3} \quad (2-9)$$

所得表达式均为复杂的微分表达式，不易求解。要进行具体的计算，需要在计算机上采用数字积分法，对于每一个计算点，都要把线圈细分为若干段，计算每段电流在该点磁场强度的三个分量，然后将线圈全部各细分段产生的各磁场分量累加，即可得到该点的磁场的三个分量。有了X、Y、Z三个磁场分量，该点总

的磁场强度和磁场的方向均可轻易求出，各个计算点可按一定的规律排列，并按序移动，以得到全部磁场强度的分布，在此不再赘述^[35]。

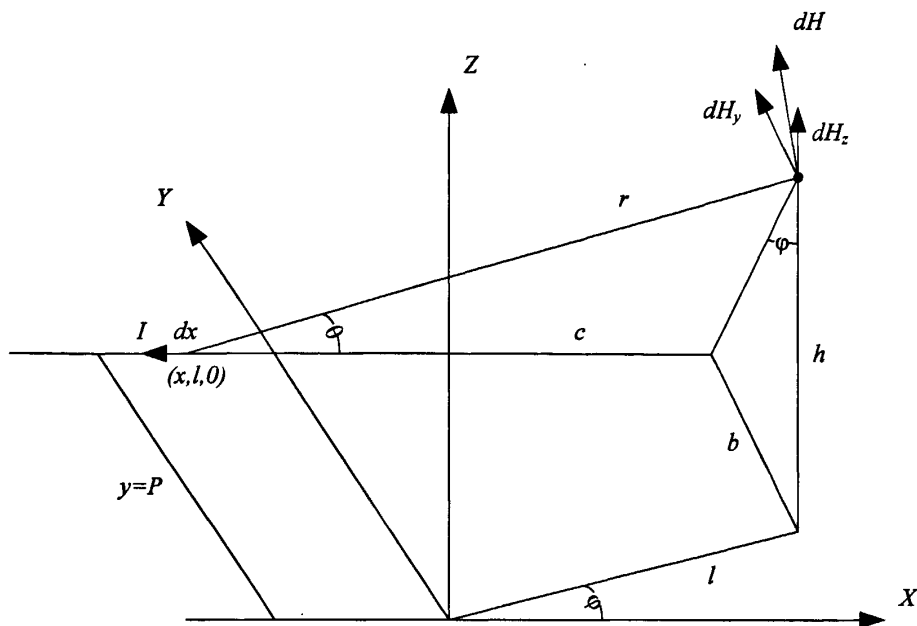


图 2-2 矩形线圈磁场分布示意图

对于双线圈系统（两线圈平行排列），只需将另一线圈在场点上的感应磁场与第一线圈累加即可。

2.2 不同种类金属在磁场中的感应特点

在交变磁场中的金属由于涡流效应（与电导率 σ 有关）或磁效应（与磁导率 μ 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 $\mu_r \approx 1$ （ μ_r 为相对磁导率， μ_0 为真空磁导率）， σ 较大，它包括顺磁体（如锰、铬、钛等）和抗磁体（如金、银、铜、锡、铅、铋等），可以认为是导电不导磁物质，主要产生涡流效应，磁效应可以忽略不计；铁磁性金属（如铁类、镍、钴等） μ_r 很大， σ 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^[36] 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

非铁磁性金属与发射线圈之间形成互感，根据电磁感应原理，其等效电路如图 2-3所示。

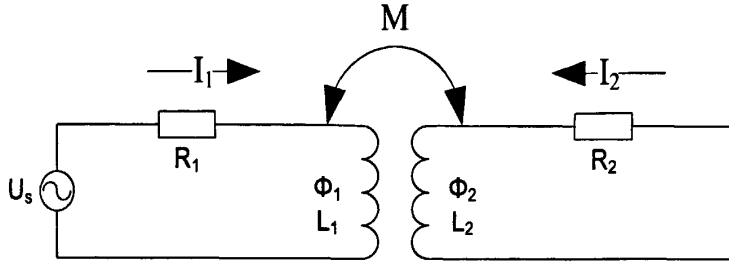


图 2-3 非铁磁性金属等效电路

图中 U_s 为激励电压， I_1 为激励电流， R_1 和 L_1 为发射线圈的电阻和电感， Φ_1 为激励磁通； I_2 为感应电流， Φ_2 为感应磁通， R_2 和 L_2 为非铁磁性金属的电阻和电感， M 为非铁磁性金属与发射线圈间的互感系数。 M 随金属目标到探头的距离的减小而呈非线性地增大。由电磁感应原理可知， Φ_1 、 Φ_2 相消，根据基尔霍夫定律，可写出电压平衡方程式

$$I_1 R_1 + I_1 j\omega L_1 - L_2 j\omega M = U_s \quad (2-10)$$

$$-I_1 j\omega M + I_2 R_2 + I_2 j\omega L_2 = 0 \quad (2-11)$$

又据 $U_s = I_1 Z_1$ (Z_1 为等效阻抗)，解上列方程组可得到：

$$Z_1 = R_1 + \frac{R_2 \omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j\omega \left(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right) \quad (2-12)$$

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

$$L_1 = \frac{N_T \Phi_1}{I_1} = \frac{N_T \mu H A_T}{I_1} \quad (2-13)$$

又根据毕奥-萨伐尔定律可知

$$H = \frac{N_T I_1 r_T^2}{2(r_T^2 + l_T^2)^{3/2}} \quad (2-14)$$

所以

$$L_1 = \frac{\mu_0 \mu_r N_T^2 \pi r_T^4}{2(r_T^2 + l_T^2)^{3/2}} \quad (2-15)$$

N_T 为发射线圈匝数； A_T 为发射线圈面积； r_T 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； Φ_1 为发射线圈磁通量； l_T 为发射线圈轴线上某一点到线圈平面的距离^[37]。

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 μ_r 的增加而增加，随金属目标到探头的距离 l 的减小而非线性增大，相当于在发射线圈上附加连接了一个线圈，且两个线圈所产生的磁通 Φ_1 、 Φ_2 相助。

铁磁性金属既导电又导磁，由式(2-12)可知，发射线圈等效阻抗近似为

$$Z_1 = R_1 + \frac{R_2 \omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j\omega(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + L_3) \quad (2-16)$$

其中， L_3 为因磁效应而产生的等效电感^[38]。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,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。

2.3 本章小结

本章介绍了圆形和矩形载流线圈通有交流信号时周围空间电磁场的分布情况和解析求解方法,并应用等效阻抗法分析了不同性质的金属物体对于由该金属物体与线圈所组成的系统的等效阻抗的作用方式,从而为金属探测器检测方法的提出和检测策略的制定提供了理论指导。

第3章 系统结构及工作原理

3.1 系统结构

3.1.1 系统框图

整个金属探测器的系统结构如图 3-1所示：

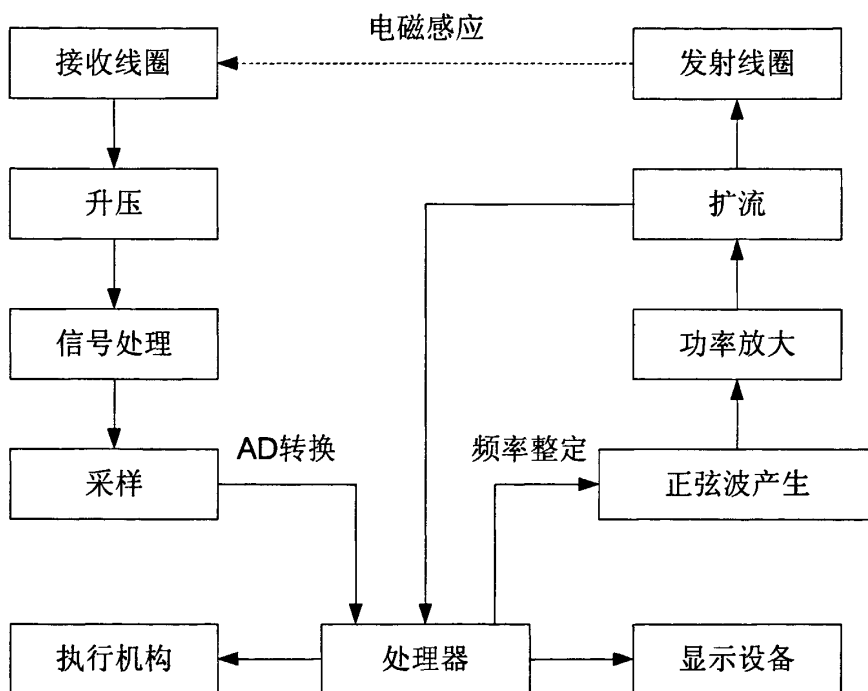


图 3-1 系统结构

利用处理器或者晶振及分频电路，产生特定频率的方波信号，激励正弦波产生电路产生相应频率的正弦波信号。经过功率放大及扩流电路的处理后，通入发射线圈，即可在其周围建立起交变磁场。接收线圈处在该磁场中，由于电磁感应定律，产生感应电动势。由图 3-2可知，接收线圈的绕法较为特殊，两匝线圈反向缠绕，并且完全对称，由于发射线圈本身为轴对称结构，其产生的磁场也是轴对称的，这样与发射线圈同轴放置的接收线圈中感生的电动势等大反向，相互抵消，理想情况下线圈中无电动势输出。当有金属物体从线圈之间经过，除非处于接收线圈几何中心垂直轴线的正上方，否则由于金属物体自身在交变磁场中的涡

流和磁滞效应，必将破坏接收线圈的电势平衡。而实际上，金属物体是运动的，且通常是不规则、不均匀的，所以通过检测接收线圈的感应电势，是可以判断金属物体的存在的。通过理论分析或者实验方法，可以得出金属物体的尺寸、种类（电磁特性）与感应信号之间的内在联系，从而进行精确检测。接收线圈的处理过程如下：将接收线圈的信号经过一级变压器，升压的同时进行滤波，然后将信号进行精密放大、采样，经过AD转换之后送入处理器进行分析处理。处理器由程序控制，针对不同的信号特点，发出相应的控制信号驱动显示和控制模块。

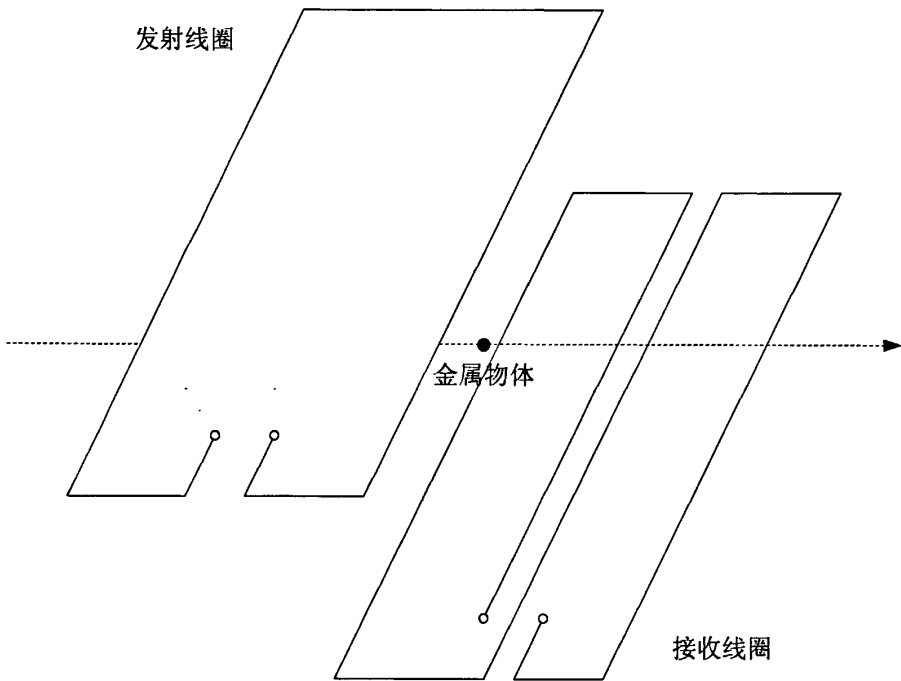


图 3-2 探头示意图

3.1.2 控制器简介

本课题采用的是Atmel公司的AVR系列单片机ATmega8515。

单片机又称单片微控制器，它不是完成某一个逻辑功能的芯片，而是把一个计算机系统集成到一个芯片上。概括的讲：一块芯片就成了一台计算机。它的体积小、质量轻、价格便宜、为学习、应用和开发提供了便利条件。尽管其大部分功能集成在一块小芯片上，但是它具有一个完整计算机所需要的大部分部件：CPU、内存、内部和外部总线系统，目前大部分还具有外存。同时集成诸如通讯

接口、定时器，实时时钟等外围设备。而现在最强大的单片机系统甚至可以将声音、图像、网络、复杂的输入输出系统集成在一块芯片上。它是一种在线式实时控制计算机，在线式就是现场控制，需要的是有较强的抗干扰能力，较低的成本，这也是和离线式计算机的（比如家用PC）的主要区别。

单片机是靠程序驱动的，并且可以修改。通过不同的程序实现不同的功能，尤其是一些独特的功能，这是别的器件需要费很大力气才能做到的，有些则是花再大力气也很难做到的。并且单片机通过编写程序实现的功能不仅可以实现高智能，高效率，而且可靠性也很高。

单片机比专用处理器更适合应用于嵌入式系统，因此它得到了最多的应用，几乎很难找到哪个领域没有单片机的踪迹。导弹的导航装置，飞机上各种仪表的控制，计算机的网络通讯与数据传输，工业自动化过程的实时控制和数据处理，广泛使用的各种智能IC卡，民用豪华轿车的安全保障系统，录像机、摄像机、全自动洗衣机的控制，以及程控玩具、电子宠物等等，这些都离不开单片机，更不用说自动控制领域的机器人、智能仪表、医疗器械了。事实上单片机是世界上数量最多的计算机。现代人类生活中所用的几乎每件电子和机械产品中都会集成有单片机。手机、电话、计算器、家用电器、电子玩具、掌上电脑以及鼠标等电脑配件中都配有1-2部单片机。而个人电脑中也会有为数不少的单片机在工作。汽车上一般配备40多部单片机，复杂的工业控制系统上甚至可能有数百台单片机在同时工作。单片机的数量不仅远超过PC机和其他计算机的总和，甚至比人类的数量还要多。因此，单片机的学习、开发与应用将造就一批计算机应用与智能化控制的科学家、工程师。

单片机广泛应用于仪器仪表、家用电器、医用设备、航空航天、专用设备的智能化管理及过程控制等领域，大致可分如下几个范畴：

（1）在智能仪器仪表上的应用

单片机具有体积小、功耗低、控制功能强、扩展灵活、微型化和使用方便等优点，广泛应用于仪器仪表中，结合不同类型的传感器，可实现诸如电压、功率、频率、湿度、温度、流量、速度、厚度、角度、长度、硬度、元素、压力等物理量的测量。采用单片机控制使得仪器仪表数字化、智能化、微型化，且功能比起采用电子或数字电路更加强大。例如精密的测量设备（功率计，示波器，各种分析仪）。

（2）在工业控制中的应用

用单片机可以构成形式多样的控制系统、数据采集系统。例如工厂流水线的智能化管理，电梯智能化控制、各种报警系统，与计算机联网构成二级控制系统等。

（3）在家用电器中的应用

可以这样说，现在的家用电器基本上都采用了单片机控制，从电饭褒、洗衣机、电冰箱、空调机、彩电、其他音响视频器材、再到电子秤量设备，无所不在。

（4）在计算机网络和通信领域中的应用

现代的单片机普遍具备通信接口，可以很方便地与计算机进行数据通信，为在计算机网络和通信设备间的应用提供了极好的物质条件，现在的通信设备基本上都实现了单片机智能控制，从手机，电话机、小型程控交换机、楼宇自动通信呼叫系统、列车无线通信、再到日常工作中随处可见的移动电话，集群移动通信，无线电对讲机等。

（5）单片机在医用设备领域中的应用

单片机在医用设备中的用途亦相当广泛，例如医用呼吸机，各种分析仪，监护仪，超声诊断设备及病床呼叫系统等等。

（6）在各种大型电器中的模块化应用

某些专用单片机设计用于实现特定功能，从而在各种电路中进行模块化应用，而不要求使用人员了解其内部结构。如音乐集成单片机，看似简单的功能，微缩在纯电子芯片中（有别于磁带机的原理），就需要复杂的类似于计算机的原理。如：音乐信号以数字的形式存于存储器中（类似于ROM），由微控制器读出，转化为模拟音乐电信号（类似于声卡）。

在大型电路中，这种模块化应用极大地缩小了体积，简化了电路，降低了损坏、错误率，也便于更换。

(7) 此外,单片机在工商,金融,科研、教育,国防航空航天等领域都有着十分广泛的用途。

相较于其它型号的单片机,ATMEL公司新推出的90系列单片机内含高速闪存FLASH,是基于增强精简指令RISC(Reduced Instruction Set CPU)结构的单片机,简称AVR单片机,该系列单片机在吸收PIC及8051单片机的优点的基础上,做出了重大的改进。

AVR单片机的特点

(1) 速度快

AVR是高速单片机,其硬件应用哈佛(Harvard)结构,具有预取指令功能,即在执行一条指令时,预先把下一条指令取进来,使得指令可以在一个时钟周期内执行。

AVR单片机采用了大型快速存取寄存器文件和快速单周期指令。其快速存取RISC寄存器文件由32个通用工作寄存器组成。AVR用32个通用寄存器代替累加器,避免了传统的累加器与存储器之间的数据传送,可在一个时钟周期内执行一条指令来访问两个独立的寄存器,代码效率比常规CISC微控制器快数倍。AVR单片机是用一个时钟周期执行一条指令的,即在执行前一条指令时就取出下一条指令,然后以一个周期执行指令(与DSP类似),是8位单片机中第一种真正的RISC单片机。

(2) 性能价格比高

AVR单片机中既有引脚少的器件(8脚),也有存储容量较大、引脚较多的器件,给用户以充分的选择余地。

AVR单片机采用Harvard结构,程序存储器和数据存储器是分开的,可以直接访问8M字节程序存储器和8M的数据存储器。

AVR单片机片内资源丰富。包括:1K-128K字节可下载的FLASH存储器、64-4K字节EEPROM、128-4K字节RAM、5-32条通用的I/O线,32个通用工作寄存器、模拟比较器、定时器/计数、可编程异步串行口、内部及外部中断、带内

部晶振的可编程看门狗定时器、为下载程序而设计的SPI串行口、10位AD转换器、以及闲置模式和掉电模式2个可选择的省电模式等。

AVR单片机具有高度保密性。程序存储器FLASH具有多重密码保护锁死（LOCK）功能，绝不可能解密。

（3）在系统编程（ISP In System Programming）功能

AVR单片机片内可下载FLASH存储器，可以通过SPI串行接口或一般的编程器进行在系统编程，给新产品的开发、老产品的升级和维护带来极大的方便。

（4）工作电压范围宽（2.7-6V）、抗干扰能力强

总之，AVR单片机在一个芯片内将增强性能的RISC 8位CPU与可下载的FLASH相结合使其成为适合于许多要求、具有高度灵活性和低成本的嵌入式高效微控制器。

根据对系统资源需求的分析及AVR单片机选型手册，我们选择了ATmega8515作为本课题的主控制芯片。ATmega8515的引脚分布如图 3-3所示。

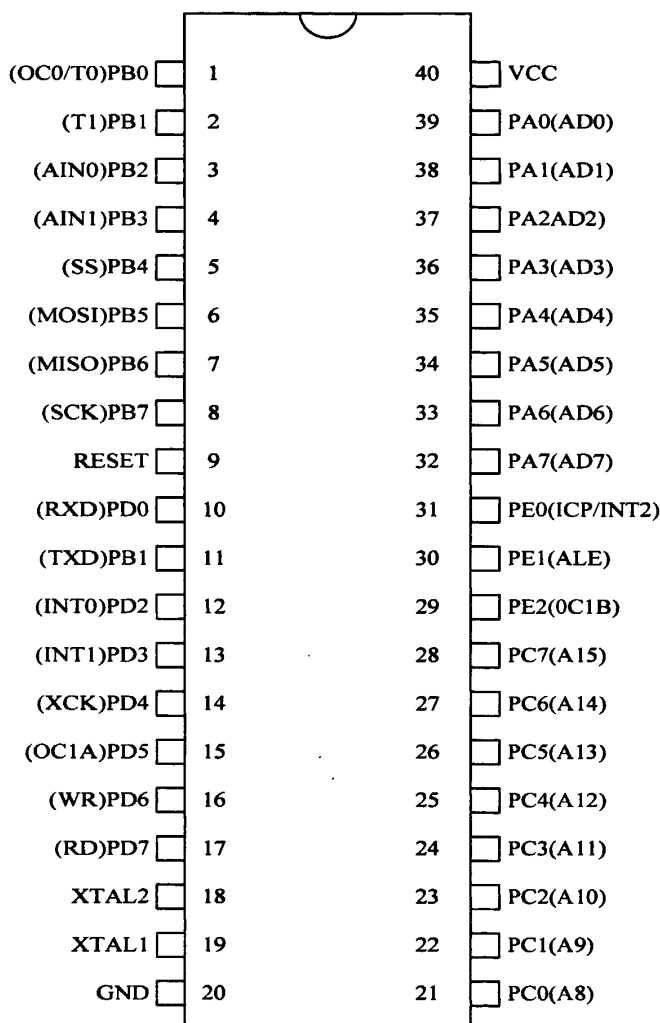


图 3-3 ATmega8515 单片机引脚图

ATmega8515具有如下特性：

(1) 高性能、低功耗的8位AVR微处理器

(2) RISC结构

- 130条指令 - 大多数指令执行时间为单个时钟周期
- 32个8位通用工作寄存器
- 全静态工作
- 工作于16MHz时性能高达16MIPS
- 只需两个时钟周期的硬件乘法器

(3) 非易失性程序和数据存储器

- 8K字节的系统内可编程FLASH，擦写寿命不少于10,000次
- 具有独立锁定位的可选Boot代码区，通过片上Boot程序实现系统内编程
- 真正的同时读写操作
- 512字节的EEPROM，擦写寿命不少于：100,000次
- 512字节的片内SRAM
- 64K字节的可选外部存储器空间
- 可以对锁定位进行编程以实现用户程序的加密

(4) 外设特点

- 具有独立预分频器和比较器功能的8位定时器/计数器
- 一个具有预分频器、比较功能和捕捉功能的16位定时器/计数器
- 三通道PWM
- 可编程的串行USART
- 可工作于主机/从机模式的SPI串行接口
- 具有独立片内振荡器的可编程看门狗定时器
- 片内模拟比较器

(5) 处理器特点

- 上电复位以及可编程的掉电检测
- 片内经过标定的RC振荡器
- 片内/片外中断源
- 三种睡眠模式：空闲模式、掉电模式及Standby模式

(6) I/O和封装

- 35个可编程的I/O口
- 40引脚PDIP封装，44引脚TQFP封装，44引脚PLCC封装与44引脚MLF封装

(7) 工作电压：

- ATmega8515L: 2.7-5.5V
- ATmega8515: 4.5-5.5V

(8) 速度等级

- ATmega8515L: 0-8MHz
- ATmega8515: 0-16MHz

3.2 工作过程描述

具体工作过程如下：开机后，控制器部分进行上电初始化，其状态由液晶模块进行显示。准备就绪后，进入参数设定环节，根据液晶模块的画面提示，设定系统运行所需的各个参数，略过这一步则按照默认参数运行。按下“运行”按钮，启动电机，带动皮带从探头穿过。将检测对象置于运行的皮带上，若其中有金属杂质，在经过探头的时候会触发控制器，触发后的动作分为两种：Ⅰ单次运行模式：停止电机运行，由操作人员手动剔除杂质后，再继续运行；Ⅱ连续运行模式：电机并不停转，应用自动装置将含有杂质的检测目标分离。同时，将杂质的信息和相关操作提示用过液晶模块显示。

各组成部分的作用表述如下：

(1) 振荡电路：包括晶振、分频、滤波、放大等部分，发出稳定的且具有较大功率的正弦波信号。

(2) 信号处理：包括放大、滤波、整流等部分，将正弦信号的相关特征值完整、准确地送入控制器。

(3) 控制器：对输入信号进行AD转换、数字滤波、计算分析，并根据预设的程序算法判别是否有金属杂质信号。若有，则输出特定信号进行声光报警并驱动执行机构进行相关动作。

(4) 执行机构：使用继电器等设备，控制电机的启/停及排斥功能。

3.3 本章小结

本章概括介绍了金属探测器的系统组成及各部分之间的连接方式，对金属探测器的工作原理和工作过程作了详细陈述，给读者一个总体的概念，并为金属探测器的系统软硬件的设计提供指导。

第4章 金属探测器硬件设计

4.1 正弦信号的产生

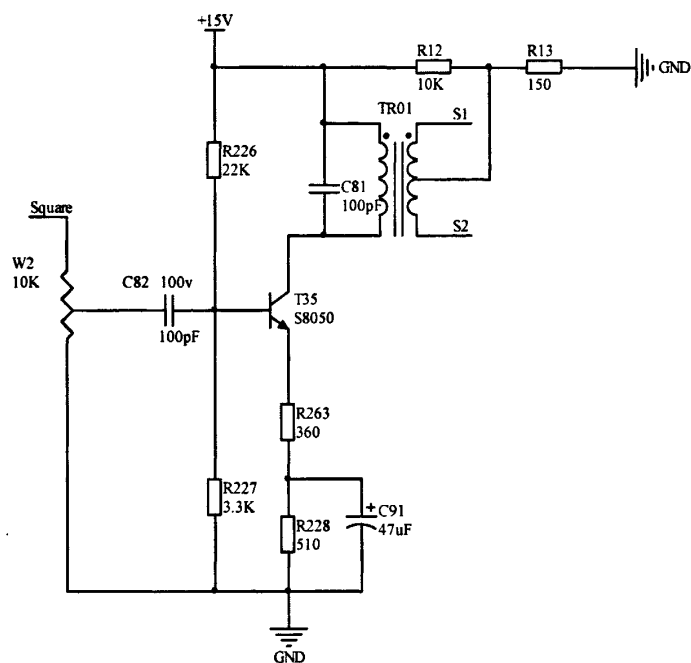


图 4-1 正弦波发生电路

将方波信号经过如图 4-1所示共射放大电路进行变换^[39]，经由电容及变压器滤波，可以获得波形较好的正弦波，其频率由方波信号的频率决定。方波信号可由两种途径获得：

- (1) 利用AVR单片机的定时计数器通过编程获得
- (2) 利用晶振和分频电路获得

在实验室阶段，可以由前者产生，此时的频率值可由编程确定及调整，可以用来测试不同频率的效果。到了实际生产阶段，频率值已经固定，宜采用后者，在节省控制器资源的同时，也利于信号的稳定性。

通过实验，我们最终确定使用的频率为15.625KHz，属于中频，在该频段下，可以获得良好的灵敏度特性，又不会对其它元器件的选择产生额外的条件^[40]。至于具体数值，是按照市面上标准晶振的规格选取的。通过计算可知，该频率可由4MHz的晶振经2⁸分频获得。具体采用的电路如图 4-2所示：

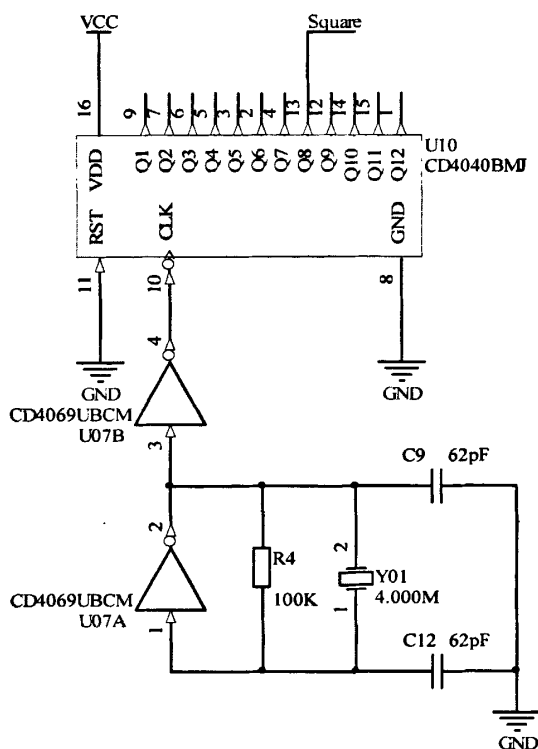


图 4-2 方波发生电路

晶振输出信号经集成非门电路CD4069整形后再由二进制串行计数分频器CD4040进行28分频，即可得到稳定的、频率符合要求的方波信号。

4.2 信号的功率放大

由于整个系统采用正电平，无法获得关于横轴对称的波形（没有负压），因此我们在信号产生之后采用了二次侧带中心抽头的变压器，将正弦信号分解为两个半正弦信号，并分别进行放大，将放大后的信号通入一个一次侧带中心抽头的变压器进行信号的还原，该变压器的作用是滤波和升压。为了保证信号的稳定，我们加入了负反馈电路^[41]。这一部分的电路如图 4-3所示：

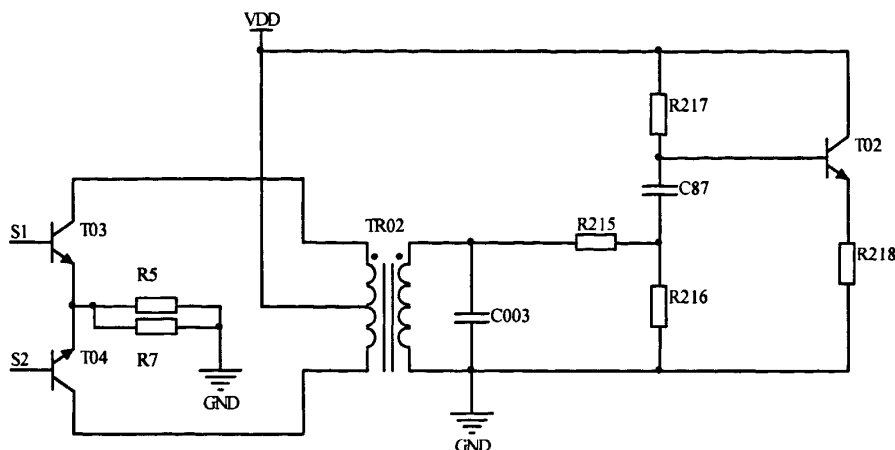


图 4-3 功率放大电路

4.3 扩流电路

为了获得较强的磁场强度，需要想办法增大发射线圈的电流。为此，我们在功率放大之后，通过一级降压变压器将信号送入发射线圈。由于变压器前后级功率保持不变，因此可以有效的提高信号的电流大小。此电路仅为简单的变压器电路，不再给出电路图。需要说明的是，通过这一级之后，信号电压将变低，而且后续不再有滤波电路，因此要特别注意防止干扰，在实际电路中，我们用屏蔽线将之与机壳相连^[22, 42]。

4.4 放大电路

此放大电路是信号从接收线圈出来之后通过的放大级，由于接收线圈所获得的信号比较微弱，因此这一级的设计合理与否，与整个系统的检测精度密切相关。我们首先将信号经过放大器升压，同理，该变压器也应采取严格的屏蔽措施。同时，变压器还具有滤波作用。考虑到接收信号十分微弱，在选择放大电路的时候，首要考虑输入输出阻抗，即输入阻抗要足够大，输出阻抗要足够小，最大限度的减小信号衰减。其次，按照频率选择适当的电阻、电容参数。第三，应用负反馈电路以保持信号的稳定性。图 4-4所示为信号放大电路，其中使用了四级放大，包括三级基本放大电路和一级变压器放大电路。最后一级放大之后设有二极管进行整流，获得信号的正半周。

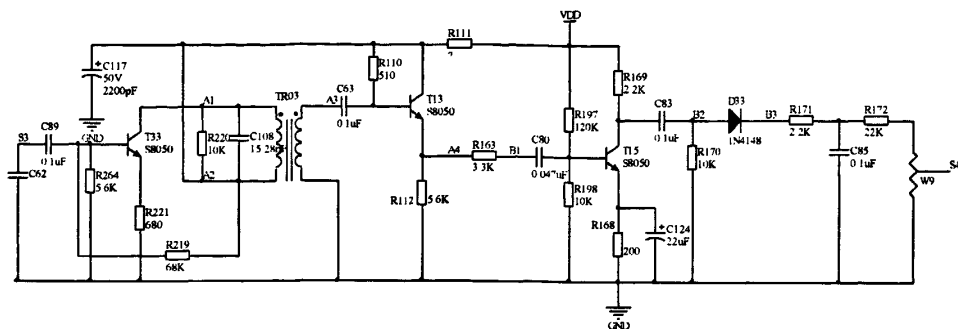


图 4-4 信号放大电路

4.5 峰值保持电路

为了检测接收信号的幅值，我们设计了峰值保持电路，该电路采用了前后两级电压跟随器，以保证峰值保持的准确度和稳定性。具体电路如图 4-5所示。

由于二极管的存在，使得电路只能单向导通，在不触发放电信号的情况下，电容只能充电不能放电，在经历过若干个周期之后，电容上的电压即为正弦信号的峰值电压。选择充电电容，既不能太大，太大导致充电速度慢；也不能太小，太小导致捕获的电压不稳定。设置放电按钮，一是为了实验方便，二是为设备的重新整定提供便利。

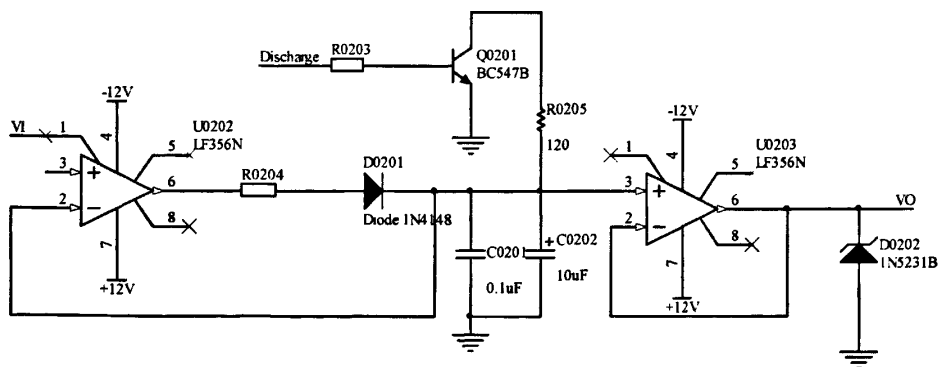


图 4-5 峰值保持电路

4.6 信号调理

经历过放大和峰值保持，信号的大小仍然只有毫伏级，若直接通过AD转换送入单片机，对于一些微小的信号变化，仍无法区分。为此，我们使用了高精度仪表用信号调理器AD620，对信号进行进一步的处理。

在一般信号放大应用中，通常只要使用差动放大电路即可满足需求，然而基本的差动放大电路精密度较差，而且差动放大电路变更放大增益时，必须调整两个电阻，影响整个信号放大电路精度的原因就更加复杂。而AD620作为仪表用放大器，则无上述缺点。

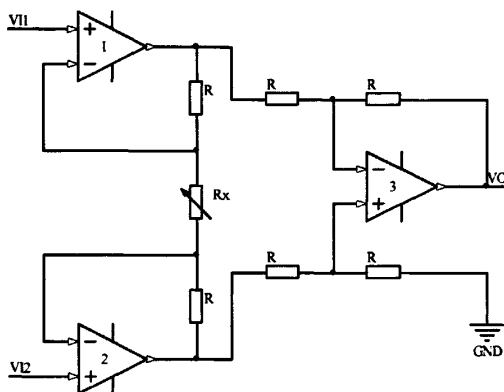


图 4-6 AD620内部结构

仪表用放大器AD620是由三个放大器所共同组成，如图 4-6所示，其中电阻 R 与 R_x 需在放大器的电阻适用范围内，根据固定电阻 R ，可以调整 R_x 来调整放大器的增益。通过分析计算可知，放大器增益与 R 和 R_x 的关系式为

$$V_o = (1 + \frac{2R}{R_x})(V_1 - V_2) \quad (4-1)$$

使用过程中，只要注意避免每个放大器的饱和即可。AD620的电路接法如图 4-7所示。

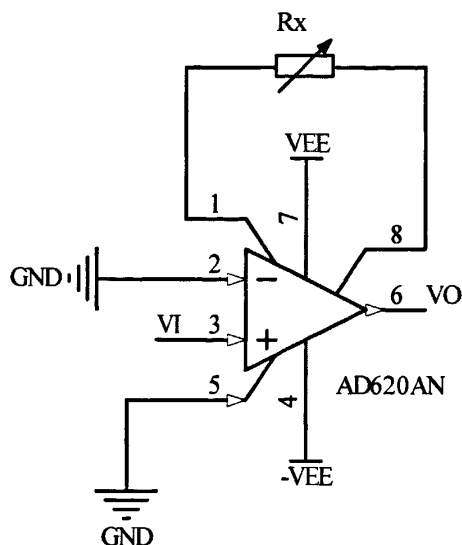


图 4-7 AD620信号调理电路

4.7 AD转换

经过调理的信号基本可以满足单片机处理的要求了，将模拟量转化为单片机可以处理的数字量，最多采用的途径是AD转换。为了提高检测精度，需要将数字量的位数尽量提高，而单片机自带的AD转换通道只有八位，因此，我们考虑采用外置的AD转换模块MAX187。

MAX187串行12位模数转换器可以在5V电源下工作，接受0-5V的模拟输入。MAX187为逐次逼近式ADC，快速采样/保持（1.5 μ S），片内时钟，高速3线串行接口。MAX187转换速度为75Ksps。通过一个外部时钟从内部读取数据，并可省却外部硬件而与绝大多数的数字信号处理器或微控制器通讯。接口与SPI，QSPI及Micro wire兼容。MAX187具有内部基准，采用节约空间的8脚DIP封装。电源消耗为7.5mW，在关断模式下可以减小至10 μ W。在实践中MAX187已被广泛应用于移动式数据处理，远程数字信号处理，隔离数据获取和高精度处理控制等领域。图 4-8所示为MAX187的引脚分布及应用电路。

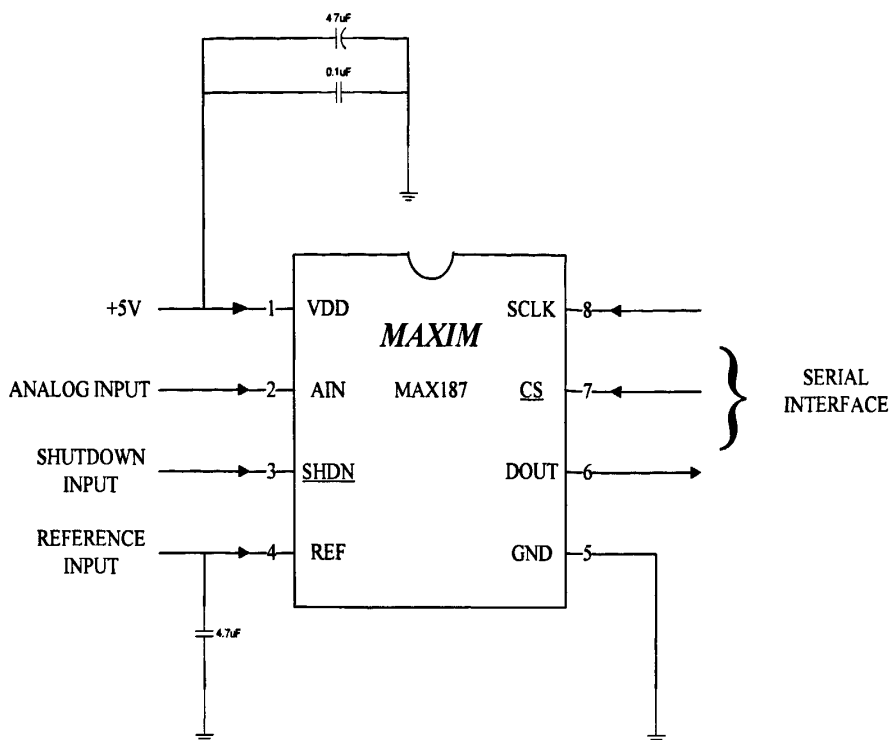


图 4-8 MAX187 引脚分布及应用电路图

其中，1为电源引脚；2为模拟信号输入引脚；3为关断信号输入，低电平时器件关断，高电平时器件工作；4为参考电压输入引脚，当3被拉高时，选择内部基准（4.096V），3被悬空时，选择外部基准；5为接地引脚；6为数字量输出引脚；7为转换开始信号输入引脚；8为时钟信号输入引脚；6、7、8共同构成与控制器的串行通信接口。

下面对MAX187的工作过程和串行通信作简单介绍。

当电源加上，它使4.7uF的基准旁路电容全部放电20ms，以为特殊精度提供合适的电荷。如果SHDN不拉低，MAX187就准备好进行转换。

开始一个转换周期，首先把CS拉低。在CS的下降沿，采样保持器（T/H）进入保持模式，转换初始化完成。在一个内部计时为8.5us的转换周期后，转换完成由拉高DOUT引脚来指示。这时数据就可以在外时钟的作用下串行移出。时钟占空比要求不是很严格，只要每个时钟相位在100ns以上即可。在转换过程中，不要运行时钟。

转换结束标志（EOC）由DOUT引脚拉高来指示。DOUT的上升沿可以被用作一个帧信号。SCLK在转换结束后的任何时间把数据从寄存器内移出。DOUT在SCLK的下降沿进行数据传送。接下来的时钟的下降沿在DOUT上产生最高位MSB，接下去的为余下的位。由于有12个数据位和一个起始的高电平，所以为了把所有的位移出就需要13个下降沿时钟脉冲。转换结果全部移除后，由于CS已经拉高，再输入额外的时钟脉冲只会在DOUT上移出无效的0，对转换操作并无影响。单片机与MAX187的连接方式如图 4-9所示。

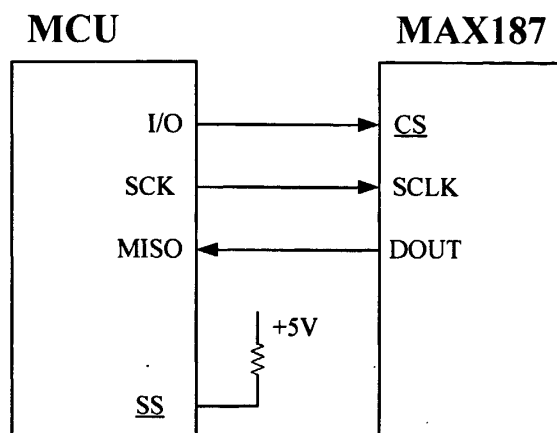


图 4-9 单片机与 MAX187 的接线方法

单片机的控制策略如下（SPI通信，把CPU的串行接口设置成主模式，由CPU产生穿行时钟）：

- （1） 使用CPU的通用I/O口线把CS拉低，保持SCLK低电平。
- （2） 在发出有效脉冲前等待最大的转换时间。另外，可以通过查询DOUT的上升沿来判定转换结束。
- （3） 有效的SCLK最小为13个时钟周期。第一个下降沿时钟边缘在DOUT上产生MSB，DOUT引脚在SCLK的下降沿输出数据，并为高位在前的格式。
- （4） 在第13个或以后下降沿边缘把CS拉高。如果CS保持低，在LSB传出后再传送出的全部为0。

(5) 若CS为高,等待最小时间,在进行一个新的转换之前拉低CS。如果一个转换通过拉高CS在转换完之前终止掉,在重新开始一个转换前,等待最小获取时间。

数据可以以1字节的块输出或者连续输出。字节除了转换结果外还包含一个起始位1,如果CS拉低后SCLK仍有效的话就会移出连续的0。

4.8 单片机外围电路设计

(1) ATmega8515单片机最小系统

所谓最小系统,即为可使单片机正常运行但不包括实现一些非基本功能的电路系统。最小系统主要包括电源系统、晶振系统(使用外部晶振)、复位系统及基准电压系统等。电源系统将在下文专门陈述;由于本课题使用独立的ADC模块,故无需配置基准电压系统。

电源(VCC)采用5V供电,复位电路如图 4-10左上角所示。二极管1N4148的作用有两个,一是将复位输入的最高电压钳在VCC+0.5V左右,另一作用是系统断电时,将R(10K)电阻短路,让C(0.1uF)快速放电,让下一次来电时,能产生有效的复位。当AVR在工作时,按下S开关时,复位引脚变成低电平,触发AVR芯片复位。

使用外接晶振可以提供精度很高的系统时钟频率。ATmega8515外接晶振电路如图 4-10左下角所示,所使用的电容应当与晶振频率相匹配。例如,振荡频率为4MHz的晶振,其对应的电容为20-30pF。

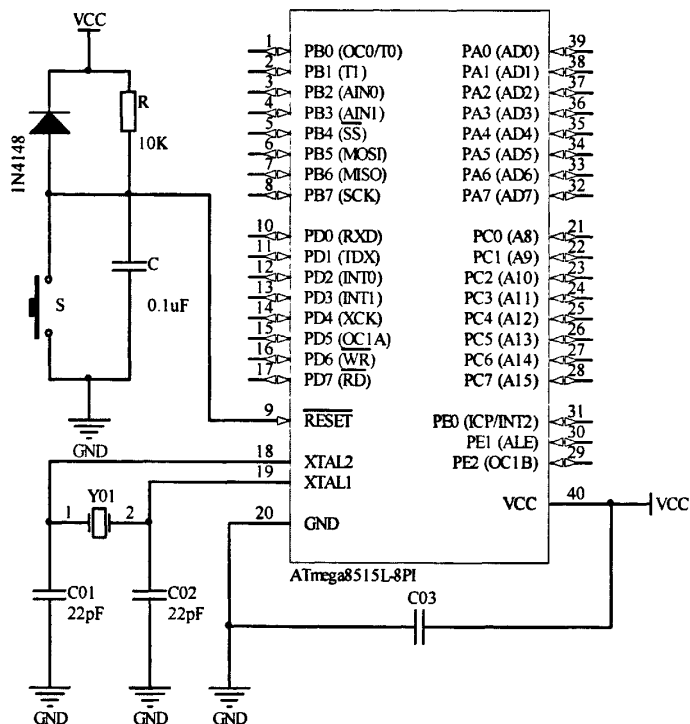


图 4-10 ATmega8515单片机最小系统

(2) 按键电路

在单片机系统中，当按键数量较少时，可以直接将按键与I/O口相连，每个I/O口负责识别一个按键的信息；当按键数量较多时，为了减少I/O口的占用，常常将按键排列成矩阵形式，如图 4-11所示，一个八位的I/O口，最多可识别16个按键。

矩阵式结构的键盘比直接接法要复杂一些，识别也要复杂一些。上图中，列线通过电阻接正电源，并将行线所接的单片机I/O口作为输出端，而列线所接的I/O口则作为输入。这样，当按钮没有按下时，所有的输出端都是高电平，代表无按键按下，行线输出是低电平。一旦有按键按下，则输入线就会被拉低，这样，通过读输入线的状态就可得知是否有键按下了。具体实现方法如下所述（又称逐行扫描法）：

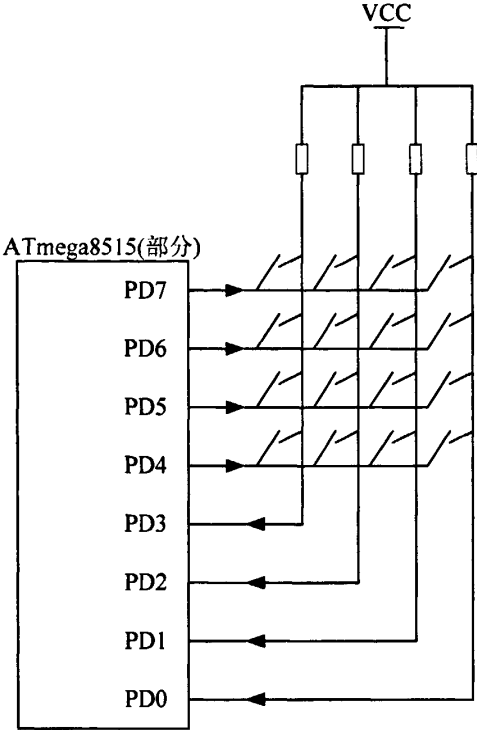


图 4-11 按键电路连接图

I 判断键盘中有无按键按下

将全部行线置低电平，然后检测列线的状态。只要有一列的电平为低，则表示键盘中有按键被按下，而且闭合的按键位于低电平列线与四根行线相交叉的四个按键之中。若所有列线均为高电平，则键盘中无按键按下。

II 判断闭合按键所在位置

在确认有键按下后，依次将行线置为低电平（其他线为高电平），再逐行检测各列线的电平状态。若某列为低，则该列线与置为低电平的行线的交叉处的按键即为闭合的按键。

需要注意的是，在用单片机对键盘处理的时候涉及到了一个重要的过程，那就是键盘的去抖动。这里说的抖动是机械的抖动，是当键盘在未按到按下的临界区产生的电平不稳定现象，这是一种正常现象，并不是我们在按键时通过注意可以避免的。这种抖动一般在10-200ms之间，这种不稳定电平的抖动时间对于人来说太快了，而对于时钟是微秒级的单片机而言则是漫长的。为了提高系统的稳

定，我们必须去除或避开它。目前的技术有硬件去抖动和软件去抖动，硬件去抖动就是用部分电路对抖动部分加之处处理，但是实现的难度较大又会提高了成本。软件去抖动不是去掉抖动，而是避开抖动部分的时间，等键盘稳定了再对其处理。这里我们只研究软件去抖动，实现方法是先查寻按键当有低电平出现时立即延时10-200ms以避开抖动（经典值为20ms），延时结束后再读一次I/O口的值，这一次的读数如果为1表示低电平的时间不到10-200ms，视为干扰信号。当读出的值是0时则表示有按键按下，调用相应的处理程序。

按键检测部分的流程如图 4-12所示：

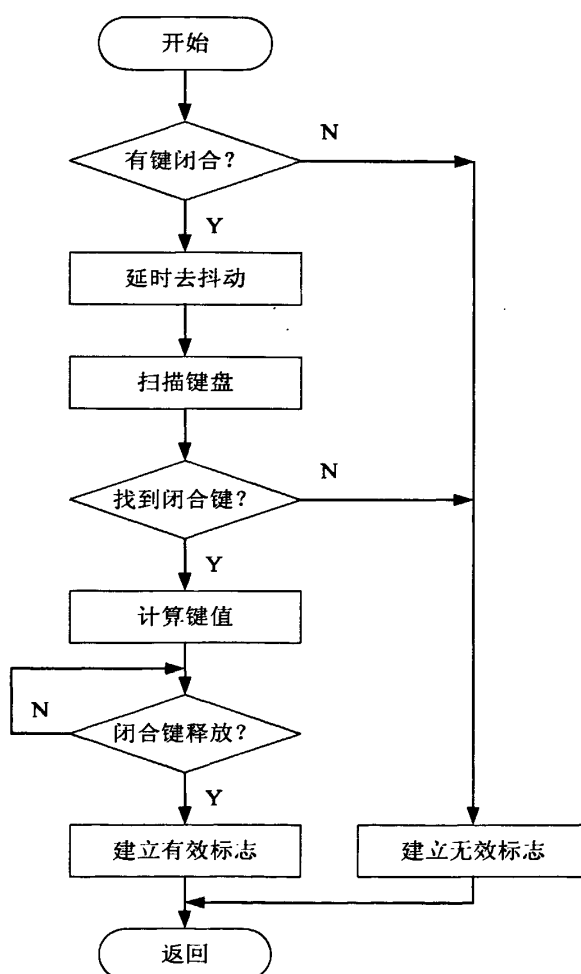


图 4-12 按键扫描流程图

本课题所需按键数量并不够16个，余下的按键可以用作功能扩展。添加新的功能时，只要在程序中对这些按键加以定义，即可使用。

(3) 读取AD转换值电路

AD转换芯片MAX187的工作原理已在前文做过介绍，电路如图所示。图4-13所示为读取MAX187内的AD转换值的流程图。

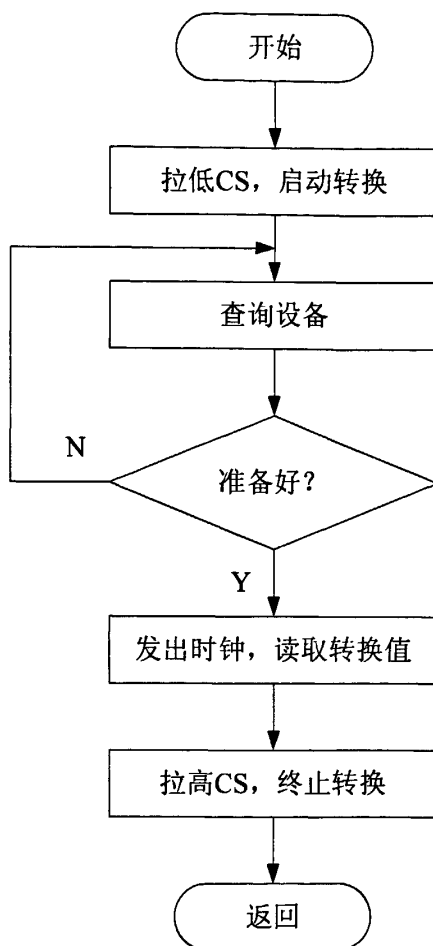


图 4-13 读取 AD 转换值流程图

4.9 液晶显示模块驱动

由于液晶显示器具有体积小，功耗低，质量轻等特点，因此广泛应用于各种智能型仪器和低功耗电子产品中。许多电子公司相继推出各种型号各种系列的液晶显示模块，例如金鹏电子有限公司的C系列中文液晶模块可以显示字母、数字符号、中文字型及图形，具有绘图及文字画面混合显示功能。提供三种控制接口，

分别是8位微处理器接口，4位微处理器接口及串行接口（OCMJ4X16A/B无串行接口）。所有的功能，包含显示RAM，字型产生器，都包含在一个芯片里面，只要一个最小的微处理系统，就可以方便操作模块。内置2M-位中文字型ROM（CGROM）总共提供8192个中文字型（16×16点阵），16K-位半宽字型ROM（HCGROM）总共提供126个符号字型（16×8点阵），64×16-位字型产生RAM（CGRAM），另外绘图显示画面提供一个64×256点的绘图区域（GDRAM），可以和文字画面混和显示。提供多功能指令：画面清除（Display clear）、光标归位（Return home）、显示打开/关闭（Display on/off）、光标显示/隐藏（Cursor on/off）、显示字符闪烁（Display character blink）、光标移位（Cursor shift）、显示移位（Display shift）、垂直画面卷动（Vertical line scroll）、反白显示（Byline reverse display）、待命模式（Standby mode）。

本课题采用OCM12864系列液晶模块，该模块是128×64点阵型液晶显示模块，可显示各种字符及图形，可与CPU直接连接，具有8位标准数据总线、6条控制线及电源线。采用KS0108控制IC。其接口说明如表 4-1所示：

表 4-1 OCM12864-1的接口说明

管脚号	管脚	方向	说明
1	VSS	-	逻辑电源地
2	VDD	-	逻辑电源+5V
3	V0	I	LCD 调整电压，应用时接 10K 电位计可调端
4	RS	I	数据/指令选择：高电平：数据 D0-D7 将送入显示 RAM；低电平：数据 D0-D7 将送入指令寄存器
5	R/W	I	读/写选择：高电平：读数据；低电平：写数据
6	E	I	读写使能：高电平有效，下降沿锁定数据
7	DB0	I/O	数据输入输出引脚
8	DB1	I/O	数据输入输出引脚
9	DB2	I/O	数据输入输出引脚
10	DB3	I/O	数据输入输出引脚
11	DB4	I/O	数据输入输出引脚
12	DB5	I/O	数据输入输出引脚
13	DB6	I/O	数据输入输出引脚
14	DB7	I/O	数据输入输出引脚
15	CS1	I	片选信号，高电平时选择左半屏
16	CS2	I	片选信号，高电平时选择右半屏
17	RSTB	I	复位信号，低电平有效
18	COUT	O	LCD 驱动，负电压输出，对地接 10K 电位计
19	BLA	-	背光电源，LED+（5V）
20	BLK	-	背光电源，LED-（0V）

液晶模块的驱动占用单片机口线较多，其中包括8位数据线（DB0-DB7）、两位屏选线（CS1/CS2）以及使能位（E）、读写标志位（R/W）、数据/指令标志位（RS）、和复位端子（RSTB）等共十四个I/O口线。在系统资源不充足的情况下，可以考虑使用串行转并行的移位寄存器（如74LS164等）。本课题选用的ATmega8515具有足够的I/O口线，因此采取直接驱动的方式，以提高系统的稳定性。液晶模块与单片机的连接方法如图 4-14所示。

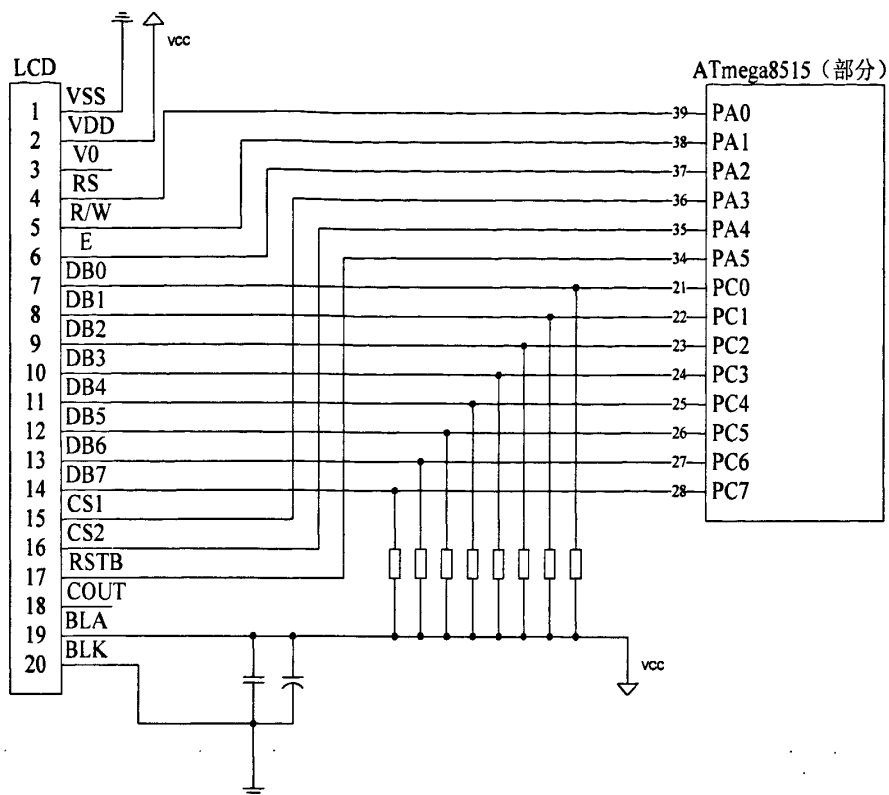


图 4-14 液晶模块与单片机连接电路图

液晶模块的驱动程序流程图如图 4-15所示。

需要指出的是，液晶模块的初始化仅在开机的时候进行，而在设备运行期间，只需要检测液晶忙信号，然后在其空闲时写入数据，而不必要每次刷新显示都进行液晶初始化和RAM操作。

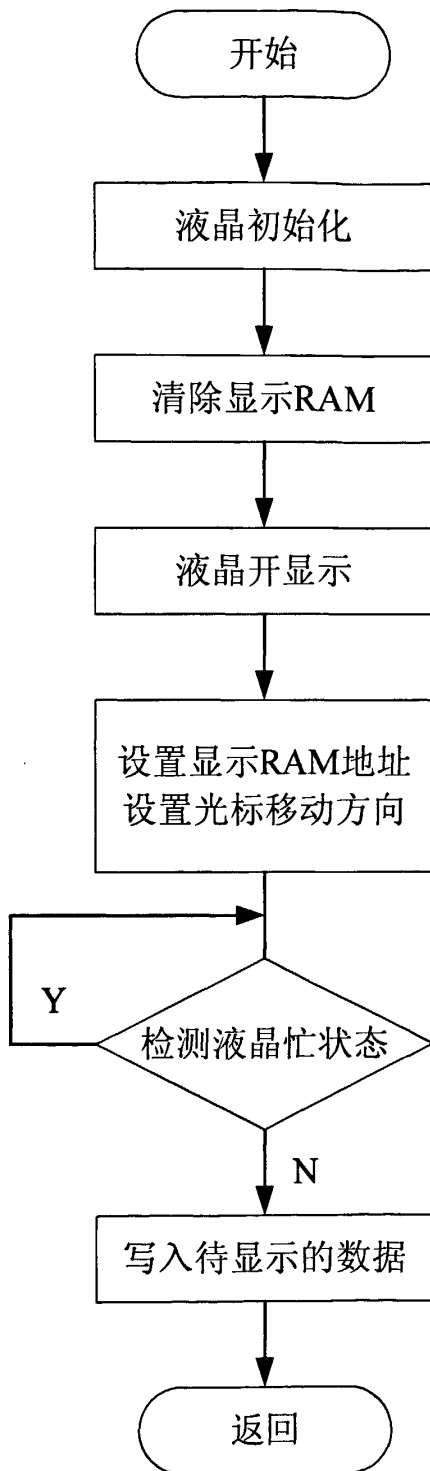


图 4-15 液晶模块驱动程序流程图

4.10 电源和接地系统设计

整个系统用到的电源包括以下种类：

- 三相0.4KV动力电，用于动力系统供电
- 直流+24V，用于功率放大电路供电
- 直流+15V、+12V、+5V，用于单片机及其他IC芯片供电

系统供电部分电路如图 4-16和图 4-17所示。

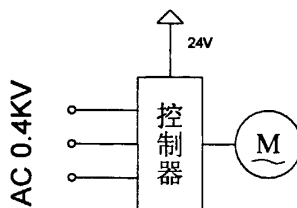


图 4-16 动力系统供电图

控制器采用继电器对电机进行启/停控制，引入有单片机产生的报警信号、运行状态信号及启动和停止按钮信号。其中启动、停止两回路设有自保持结构和互锁结构，可以准确、快速的控制电机运行。具体的设计方法将在后文详细介绍。

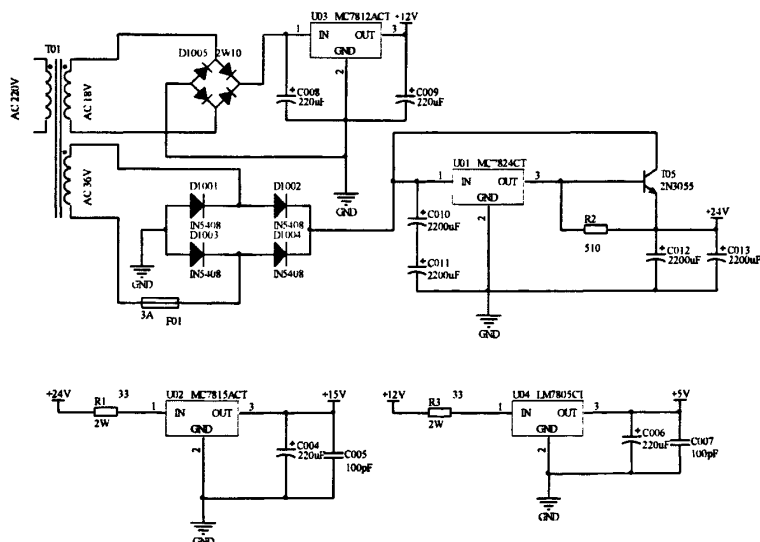


图 4-17 控制系统供电图

控制系统所用直流电源，可由交流相电压经电桥整流、电容滤波及稳压块稳压后获得。由于+24V电源负载较重，故该部分加上了熔丝保护及扩流电路。

完成了电路设计，需要将电路原理图转化成PCB（印刷电路板）。PCB是电子产品的核心部分，内部有许多辐射源、噪声源、耦合路径，必须认真解决电磁干扰与抗电磁干扰设计。

以下为PCB设计中需要注意的几点：

（1） PCB总体设计主要考虑电磁兼容性^[42]，应满足：

I 模拟电路与数字电路分开布置，以降低数字噪声对敏感的模拟电路的耦合；功率驱动电路噪声能量大，应与模拟电路与数字电路分开。

II 留好足够的地线空间，且地线空间通常在决定集成电路和元器件布局前考虑。

III 集成电路与元器件的位置安排应满足最短距离连线要求，尽量缩短高频信号的布线距离与区域。

（2） PCB的电源、地线设计原则：

I 地线：最小的阻抗、最小的回路面积和最小的公共阻抗。对于双层的PCB，可以设置地线网格或者在空余空间进行敷铜，达到类似地线层的效果。

II 电源：模拟电路和数字电路独立供电，尽可能将电源线靠近地线。

（3） PCB可靠设计的布线规则：

I 相邻层信号线应相互垂直布线，以防信号线的相互干扰。

II 电源线与地线尽可能粗些，不用的空间都可设计成地线平面。

III 数字系统的每条信号线尽可能靠近地线，以减少噪声阻抗。

IV 按最短距离原则布线，区分不同性质的线，对噪声敏感的线应远离干扰源。

V 对于高频线迹，走线应尽量短，且在它的两边平行安排地线。

VI 时钟电路应紧凑安放且有接地平面，因为时钟系统是单片机系统的主要辐射源^[43]。

4.11 传动系统设计

传动系统设计主要是指电动机的运行控制，由继电器实现。继电器是具有隔离功能的自动开关元件，是现代工业中最重要的控制元件之一。当输入量(如电压、电流、温度等)达到规定值时，使被控制的输出电路导通或断开的电器。继电器可分为电气量(如电流、电压、频率、功率等)继电器及非电气量(如温度、压力、速度等)继电器两大类，具有动作快、工作稳定、使用寿命长、体积小等优点，广泛应用于电力系统保护、自动化、运动、遥控、测量机电一体化、电力电子设备和通讯等装置中^[48]。

本课题传动系统设计需要达到以下要求：

I 设有手动按钮START和STOP，分别控制电机的“启动”和“停止”，这两个按钮不受控制器的约束，能够独立控制电机，具有最高的优先级。

II 当系统处于“单次运行”模式，报警信号可使电机停转；而在“连续运行”模式下，报警信号对电机的控制失效。

传动系统设计电路图如图 4-18所示。

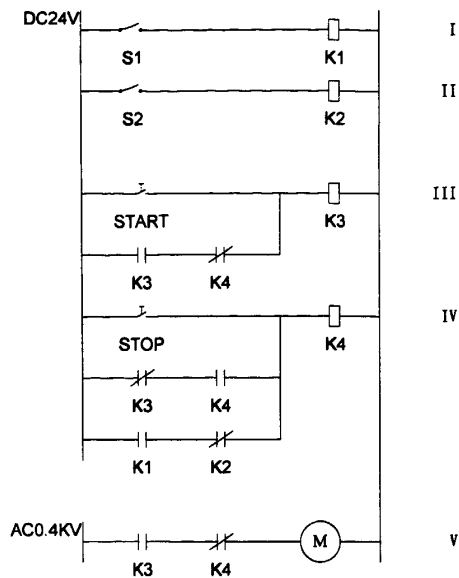


图 4-18 传动系统控制电路

其中，S1、S2分别为报警信号和运行模式信号所对应的控制开关，它们由控制器的电平信号配合相应的电子开关电路组成。S1闭合，代表有报警信号发出；S2闭合代表“连续运行”式，而打开时表示“单次运行”模式。

B1和B2分别为START按钮和STOP按钮，与继电器K3和K4的线圈串联，控制电机的启动和停止。

回路V为电机控制主回路，串联一个K3的常开触点和K4的常闭触点。

系统运行过程如下：

- (1) 系统上电时，S1、S2、B1、B2均打开，继电器线圈K1、K2、K3和K4未通电，K3的常开触点断开，电机未启动。
- (2) 按下B1，K3线圈通电，其常开触点闭合，这样在回路III中，第二支路与K3线圈形成K3继电器的自保持回路，即使B1松开，仍能保证K3线圈通电；在回路V中，由于K3的常开触点闭合，电机启动。
- (3) 按下B2，K4线圈通电，回路III中的K4常闭触点断开，K3线圈失去自保持而掉电，回路IV中的K3常闭触点闭合，与K4的常开触点（此时闭合）一同，

构成K4继电器的自保持回路；此时回路V中K3断开而K4也断开，因此电机停止；由于相互在对方回路中设有常闭触点，回路III和IV形成互锁电路^[49]。

（4）回路IV中的第三支路，K2常闭触点形成对S1信号的约束，当S2开关闭合，K2线圈通电，K2常闭触点打开，S1信号失效；当S2开关打开，K2线圈断电，K2常闭触点闭合，则S1信号具有同B2按钮相同的效果。

4.12 本章小结

本章介绍了本课题研制的金属探测器的硬件部分组成，对其各部分模块的工作原理和功能特点进行了详细的描述。

第5章 金属探测器的软件设计

5.1 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，如检测精度、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；每个产品种类的参数分别存放而不混淆，能够方便调用。

(4) 信号输出功能

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，可以根据需要由用户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工作方式。

(5) 实现分类检测

根据用户设置，能够分别检测铁、不锈钢杂质。

5.2 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,已经深入到了我们生活的各个方面,如手机、PDA、数码相机、电视等。目前,嵌入式控制器有三大类型,ARM、DSP和单片机。这三类微控制器具有各自的优势,适用于不同的领域,既相互竞争,又相互补充,促进了嵌入式系统的迅速发展。

关于嵌入式系统编程,一直存在汇编语言和C语言之争。简单来说,C语言对汇编语言进行了抽象,具有如下优点:

- 更符合人类思维习惯,开发效率高、时间短
- 模块化
- 可移植性好
- 提供数学函数并支持浮点运算
- 程序可读性和可维护性强

C语言当然也有缺点,比如实时性通常要比汇编差。在编写汇编的时候可以清楚的知道每一条指令究竟要多少个机器周期,但是在C中掌控准确的时间稍微困难一些。本课题的软件系统并没有精确定时要求,而且控制逻辑相对比较复杂,为了提高编程效率,我们采用了C语言作为开发语言。

AVR单片机的C语言编译器有许多,如ICCAVR, IAR, Code Vision AVR等。我们选用ICCAVR作为本课题的AVR单片机C语言开发编译器。

ICCAVR是一种使用符合ANSI标准的C语言来开发微控制器MCU程序的一个工具,它具有以下几个主要特点^[45, 46]:

(1) ICCAVR是一个综合了编辑器和工程管理器的集成工作环境IDE,其可在WINDOWS9X/NT/XP下工作。

(2) 源文件全部被组织到工程之中,文件的编辑和工程的构筑也在这个环境中完成。编译错误显示在状态窗口中,并且当你用鼠标单击编译错误时光标会自动跳转到编辑窗口中引起错误的那一行。这个工程管理器还能直接产生您希望得到的、可以直接使用的INTEL HEX格式文件。INTEL HEX格式文件可被大多数的编程器所支持,用于下载程序到芯片中去。

(3) ICCAVR是一个32位的程序，支持长文件名。

5.3 数字滤波模块

在单片机应用中经常需要对输入的信号进行处理，当由于存在随机干扰使被测信号中混入了无用的成分时，可以采用滤波器滤掉信号中的无用成分，从而提高信号质量。模拟滤波器在其低频和甚低频时实现是比较困难的，而数字滤波器是不存在这些问题的。它具有精度高、高可靠性和高稳定性的特点，因此在单片机应用系统中被广泛用于克服随机误差。采用数字滤波算法克服随机误差主要有如下优点：

(1) 数字滤波是由软件程序实现的，不需要硬件，因此不存在阻抗匹配的问题。

(2) 对于多路信号输入通道，可以共用一个软件“滤波器”，从而降低仪表的设计成本。

(3) 只要适当改变滤波器程序或原始参数，就能方便的改变滤波特性，这对于低频脉冲干扰和随机噪声的克服特别有效。

常用的数字滤波算法有下列几种：

(1) 一阶滞后滤波法

硬件滤波电路中最常用的是一阶惯性RC模拟低通滤波器，当采用这种模拟滤波器来抑制低频干扰时，要求滤波器有较大的时间常数和高精度的RC网络，增大时间常数有求增大R值，其漏电流也随之增大，从而降低了滤波效果。而采用数字滤波算法来实现动态的RC滤波，则能很好的克服上述模拟滤波器的缺点。在模拟常数要求较大的场合这种方法显得更为实用，一阶惯性滤波算法对于周期干扰具有良好的抑制作用，其不足之处是带来了相位滞后，导致灵敏度低。同时它不能滤除频率高于采样频率二分之一（称为奈奎斯特频率）的干扰信号^[43]。

(2) 限幅滤波法

由于单片机系统中可能存在随机脉冲干扰,或由于变送器不可靠而将脉冲干扰引入输入端,从而造成测量信号的严重失真。对于这种随机干扰,限幅滤波是一种有效的方法。其基本方法是比较相邻(n 和 $n-1$ 时刻的两个采样值 y_n 和 y_{n-1})。然后根据经验确定两次采样允许的最大偏差。如果两次采样值 y_n 和 y_{n-1} 的差值超过了所允许的最大偏差范围,则可认为发生了随机干扰,并认为后一次采样值 y_n 为非法值,应予删除,删除 y_n 后,可用 y_{n-1} 代替 y_n 。若未超过所允许的最大偏差范围,则认为本次采样值有效。

(3) 中位值滤波法

中位值滤波法是对某一被测参数连续采样 n 次(一般 n 取奇数),然后再把采样值按大小排列,取中间值为本次采样值。中位值滤波法能有效克服偶然因素引起的波动或采样不稳定引起的误码等脉冲干扰。对温度、液位等缓慢变化的被测参数用此法能收到良好的滤波效果,但是对于流量、压力等快速变化的参数一般不宜采用中位值滤波法。

(4) 算术平均滤波法

算术平均滤波法适用于对一般的具有随机干扰的信号进行滤波。这种信号的特点是信号本身在某一数值范围附近上下波动,如测量流量、液位时经常遇到这种情况。

算术平均滤波法是要按输入的 N 个采样数据,寻找这样一个 Y ,使得 Y 与各个采样值之间的偏差的平方和最小。

在编写算术平均滤波法程序时严格注意两点:一是对于定时测量,为了减小数据的存储容量,可对测得的值直接进行计算,但由于某些应用场合,为了加快数据测量的速度,可采用先测量数据,并存放在存储器中,测完 N 点后,再对 N 个数据进行平均值计算。二是选取适当的数据格式,也就是说采用定点数还是采用浮点数。采用浮点数计算比较方便,但计算时间较长,采用定点数可加快计算速度,但必须考虑累加时是否产生溢出。例如数据为14位二进制定点数时,采用双字节运算,当 $N > 4$ 时,就可能产生溢出。

(5) 递推平均滤波法(又称滑动平均值滤波法)

上面介绍的算术平均值滤波，每计算一次数据，需要测量 N 次。对于测量速度较慢或要求计算速度较高的实时系统，该方法是无法使用的。例如某ADC芯片的转换速率为每秒钟10次，而要求每秒输入4次数据时，则不能大于2。而滑动平均值滤波法，只需要进行一次测量，就能得到一个新的算术平均值。滑动平均值滤波法采用队列作为测量数据存储器，设队列的长度为 N ，每进行一次测量，把测量结果放于队尾，而扔掉原来队首的一个数据，这样在队列中始终就有 N 个最新的数据。当计算平均值时，只要把队列中的 N 个数据进行算数平均，就可得到新的算数平均值。这样每进行一次测量，就可得到一个新的算术平均值。

滑动平均值滤波法中的队列一般采用循环队列来实现。

（6） 加权滑动平均滤波法

在算术平均滤波和滑动平均滤波法中， N 次采样值在输出结果中的比重是均等的，即 $1/N$ ，用这样的滤波算法，对于时变信号会引入滞后， N 越大，滞后越严重。为了增加新的采样数据在滑动平均滤波法中的比重，以提高系统对当前采样值中多受干扰的灵敏度，可以采用加权滑动平均滤波法。实质上它是前面介绍的滑动平均滤波算法一种改进，即对不同时刻的数据加以不同的权，通常越接近现在时刻的数据，权重取得越大。加权滑动平均滤波算法适用于由较大纯滞后时间常数的对象和采样周期较短的系统，而对于纯滞后时间常数较小，采样周期较长，变化缓慢的信号，则不能迅速反映系统当前所受干扰的严重程度，滤波效果较差。

（7） 复合滤波法

单片机系统在实际应用中，所受到的随机干扰往往不是单一的，又是既要消除脉冲干扰的影响，又要做数据平滑处理。因此，在实际应用中常常把前面介绍的两种以上的方法结合起来使用，形成所谓的复合滤波。

考虑到本课题的特点，结合实验效果，我们采用了防脉冲扰动平均值滤波算法。这种算法的特点是用中位值滤波算法滤掉采样值中的脉冲干扰，然后把剩下的各个采样值再进行滑动平均滤波。由于这种滤波算法兼容了中位值平均滤波算法和滑动平均滤波算法的优点，所以无论是对缓慢变化的过程变量还是对快速变化的过程变量都能起到较好的滤波效果^[44]。

一般来说,信号检测电路里,输入级通常是先滤波再放大;在信号不失真的前提下,可以先放大再滤波,这在一定程度上能提高信噪比;也可以先粗略滤波,然后放大,然后再精确滤波。

5.4 系统软件流程图

在基于ATmega8515单片机的金属探测器性设计中,系统软件的可靠性设计最主要的任务是保证在过程空间中,应用程序按照给定的顺序有序运行。在高可靠性的硬件系统基础上,软件设计的可靠性保障了最少的软件错误以及在软件出错后仍能保证系统正常运行或安全运行^[47]。

(1) 本质可靠性的软件设计

软件的本质可靠性是指依靠软件附加,最大限度减少自身错误及缺陷,并且要有足够的时序裕度。单片机系统在CPU的控制下实现分时操作,程序完全依靠时序调度、切换控制。程序运行的可控不仅要求时序准确,而且要有足够的时序余度。

I 系统复位时序。多个器件复位的时序要求是主要问题,应保证MCU对外围可编程器件的初始化在该器件复位后进行。软件设计时,可以在系统上电复位后,MCU延迟片刻,确保外围器件复位后,再对其初始化。

II 外围器件工作时序。对外围器件的工作时序必须分析清楚,MCU的操作必须保证时序信号的衔接控制和时序信号的时序余度。

III 应用系统的状态转换时序。应用系统中的状态转换有MCU运行状态转换、外围器件运行状态转换和电源系统供电状态转换等。在程序设计中,必须考虑状态转换时过渡期对程序运行的影响,精心设计时序控制。通常,MCU本身的状态转换,都有自动监视、自动运行管理功能,程序设计只需按MCU数据手册及指令系统的操作要求进行即可。对于有较长过渡期的外围状态转换,可采取足够的延时或设置提前转换状态的办法。

IV 总线时序。单片机应用系统中有并行总线和串行总线,这些总线在规范化操作时,其时序数据通信协议保证。在虚拟总线方式时,虚拟总线运行的可靠性在于时序的准确模拟。并行总线要保证读、写操作指令运行下的读写时序;同

步串行总线要保证时钟线控制下的同步时序；串行异步时序则要考虑波特率对数据传送的影响。

(2) 可靠性控制的软件设计

单片机应用系统中可靠性控制的软件设计是专门用于提高系统可靠性的软件设计技术。

I 程序失控的回复技术

程序失控是指系统受到某种干扰后，PC值偏离了设计的唯一变化过程，导致程序运行偏离正常的运行路径。程序失控导致的非正常运行会造成多种损害，多数情况下程序会进入死循环或导致死机。通常采用的回复技术有：

第一，设置软件陷阱，引导失控程序进入指定的指令操作，最终回复到系统程序的入口处。软件陷阱指令为LJMP 0000H，常设置在程序的空隙处、插在转移指令之后，或设置在程序存储器的空白区。

第二，使用WDT (Watch Dog Timer, 看门狗定时器)。根据大于程序正常循环路径运行时间，设定WDT的定时时间。在程序正常循环路径上设置清除信号输出指令，保证正常情况下MCU不断对WDT清零，使WDT溢出端没有溢出信号。当程序失控时，程序无法对WDT清零，WDT溢出，其溢出信号使MCU复位。

II 程序自检

在实际的单片机应用系统的程序设计中，应充分利用其智能化的特点，设置各种自检程序提高其可靠性和安全性。常用的自检程序有：

第一，程序的自诊断，即开机后对系统的例行检查。自诊断的内容与系统的配置有关，主要对系统硬件资源的检查，如CPU的情况、存储器各单元能否正常读写、外围电路工作是否正常等。

第二，程序失控回复后的检查。程序失控回复后要检查系统资源的破坏情况，检查的重点是数据区、I/O状态、SFR状态、以及外围电路的状态。

第三，程序运行中的查验。在程序中设置查验程序可以及时发现运行中的非正常响应，及时发现失误，消除失误带来的影响。涉及：有界限查验，即按设定的正常数据边界对相关数据进行界限判别；冗余性查验，即多次读取输入输出的数据进行比较，一致则数据正确，反之数据出错；逻辑性查验，即根据数据间的逻辑关系判别数据是否有误。

整个金属探测器系统的软件流程如图 5-1所示。

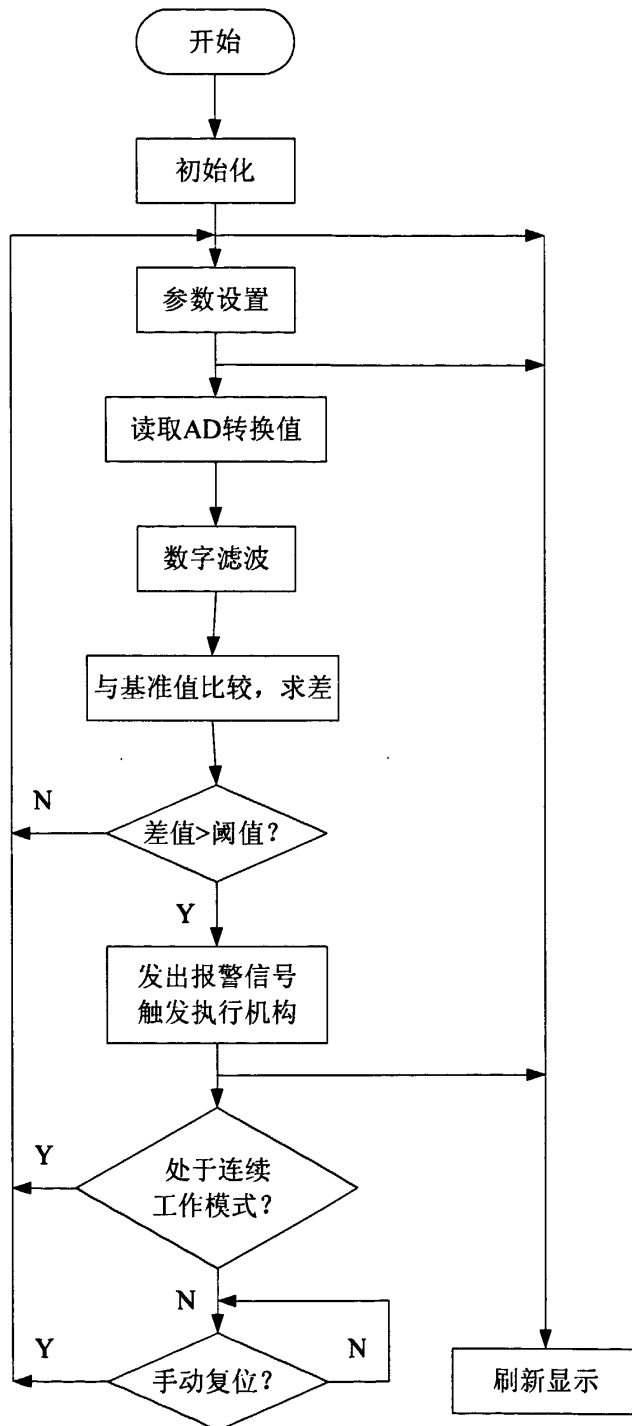


图 5-1 系统软件流程图

5.5 本章小结

本章介绍了金属探测器的软件设计的总体目标和所选用的系统平台,采用了综合防脉冲扰动和滑动平均值的复合数字滤波模块进行抗干扰设计,并利用程序的自检和看门狗定时器进行了程序的可靠性设计,最后,给出了本课题软件的总体流程图。

第6章 实验和分析

6.1 设备制作

6.1.1 探头和支架

探头和支架的制作主要是机械加工与安装的工作，得到了潍坊华特磁电设备有限公司的大力支持。

探头部分由两个水平放置的同轴线圈组成，分别为发射线圈和接收线圈。综合载流能力和加工制作的便利性，我们采用横截面为 $4\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的铜导线来绕制线圈。线圈的平面图及尺寸如图 6-1和图 6-2所示（单位：cm）。

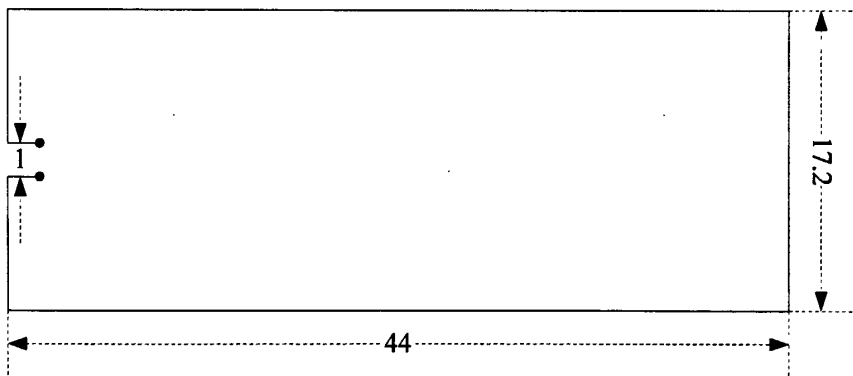


图 6-1 发射线圈示意图

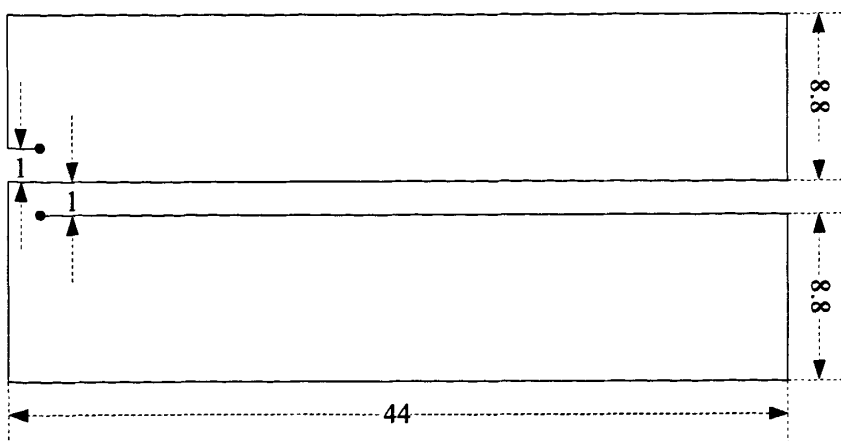


图 6-2 接收线圈示意图

前文提到，接收线圈采用两匝反绕，目的是抵消空机情况下的感生电动势。除此之外，采取这种绕法还能减少寄生电容的杂散电流^[36]。由

$$Q = CU = CN_R \frac{d\Phi}{dt} \quad (6-1)$$

式中： Q 是电荷量， C 是分布式寄生电容， U 是感应电动势， N_R 是接收线圈匝数。可知，寄生电容的杂散电流为

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt} \quad (6-2)$$

如果两个线圈采用传统的连接方式，会在每个接收线圈中感应出较高的感应电动势，使分布式寄生电容引起较大的杂散电流，产生损耗。频率越高，这种情况就越明显。而采用8字形绕法两个线圈逆向缠绕，使得感应电动势相互抵消，大大削弱了杂散电流。

支架部分主要包括支撑结构和传送带。支架、传送带和探头如图所示。

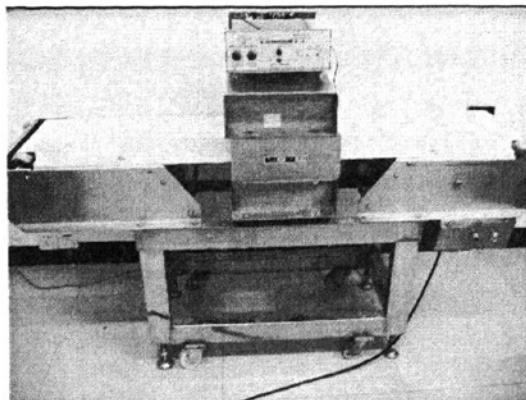


图 6-3 金属探测器整体结构外观

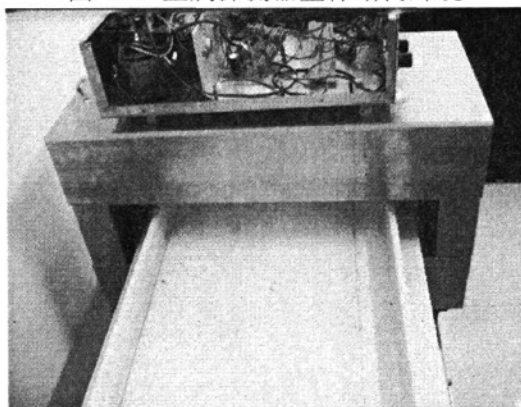


图 6-4 传送带和探头外观

6.1.2 控制电路

按照前述控制器硬件设计的相关内容，笔者对各部分电路分别进行了实验，并进行了联合调试，验证了其可行性。然后，使用Altium Designer软件由原理图设计了PCB，并焊接组装，制作成了本课题的硬件控制电路。相应的程序经编译后下载至ATmega8515单片机。由于硬件电路需要对微弱信号进行处理，因此，需要采取有效的抗干扰措施，本课题采取的措施是大面积敷铜接地和加装金属罩，同时，强电和弱电隔离，也能大大减小信号干扰。

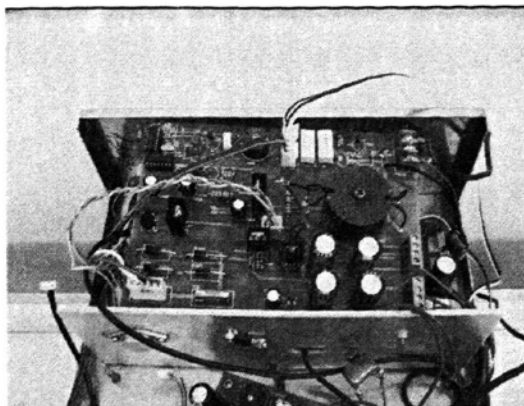


图 6-5 部分硬件电路外观

6.2 需注意的问题

在设备安装及实验过程中,有许多会对探测精度产生影响的步骤,需要注意:

(1) 线圈的安放。线圈是发射磁场和感应磁场变化的关键部分,理论计算中都是认为线圈是绝对规则 and 对称的,因此,线圈一定要绕制的非常规则,具体表现在边要平直、拐角成 90° 、形状对称等。此外,线圈须水平摆放,上下两个线圈的几何中心应位于同一垂直线上,相应的边应平行。

(2) 传输线的屏蔽。探头线圈和控制电路已分别进行了屏蔽,但是两者之间并未靠紧,其间使用信号传输线进行连接。为此,我们采用了带有金属网屏蔽的传输线,金属网与系统的地相连,可以有效屏蔽干扰。

(3) 机械振动。实验表明,机械振动会在接收信号中产生严重的干扰,必须加以避免,例如,支架需要保证平整,各部分之间须紧密结合,不能留有缝隙,必要时可以加装缓冲垫。

此外,由于系统中采用了许多电容、电感元件以及功率元件,其电气参数会随着时间的推移或温度的变化(尤其是功率元件)而变化,从而影响检测精度。所以,开机后,应先预热十分钟左右,再进行实验。

6.3 试验结果及其分析

6.3.1 发射信号的波形

图 6-6所示为图 4-2中“Square”信号的波形和图 4-3中“Sine”信号的波形，方波和正弦波的幅值分别为15V和120V。由此可见，本课题所采用的方波和正弦波发生电路，所产生的波形较好。另外，旋动图 4-1中电位计“W2”时，可以方便的调节输出正弦波的幅值，使其在0~150V之间变化，为调节设备的灵敏度提供了方便。

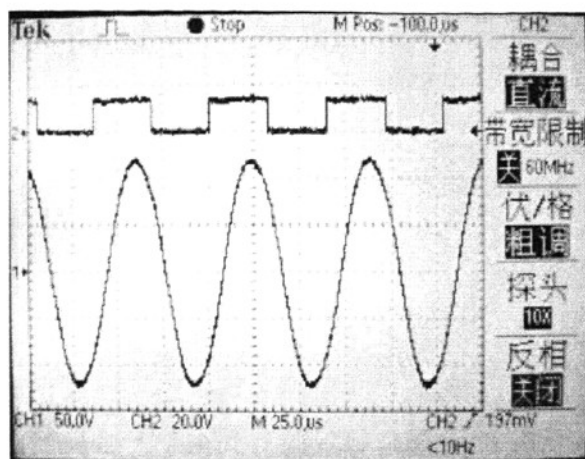
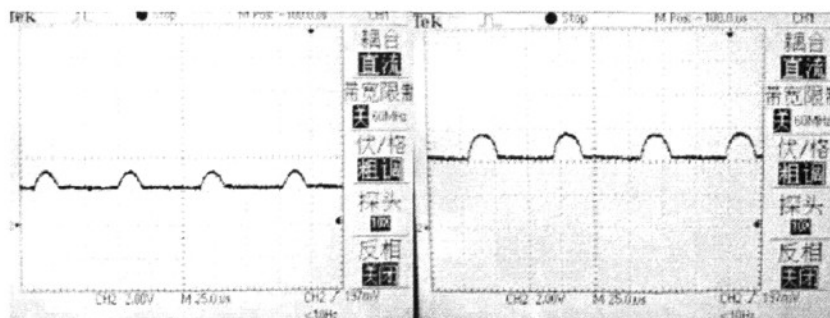


图 6-6 信号发生电路波形

6.3.2 检测信号的波形

图 6-7所示(a)和(b)分别为金属样品通过探测器前、后图 4-4中B3点的信号波形。由图可见，接收信号经放大电路放大后，可以从幅值和相位两个方面反映金属物体的存在。



(a) 金属进入前

(b) 金属进入后

图 6-7 金属样品引起的检测信号变化

而上述信号经过峰值保持和信号调理后，可以进一步放大，从而达到更高的检测精度。总体而言，探测精度主要与探头高度和发射信号强度有关，通过实验，得出不同直径金属样品所对应的检测信号幅值如下：

表 6-1 金属样品直径：5mm

探头高度 (mm)	发射信号 幅值 (V)	检测信号幅值 (V)		
		空载	负载	变化量
70	100	1.44	1.90	0.46
	120	1.72	2.52	0.80
	140	2.04	2.64	0.60
90	100	1.95	1.50	0.45
	120	2.71	2.09	0.62
	140	2.94	2.40	0.54
110	100	1.48	1.04	0.44
	120	1.87	1.30	0.57
	140	2.27	1.76	0.51

表 6-2 金属样品直径：3mm

探头高度 (mm)	发射信号 幅值 (V)	检测信号幅值 (V)		
		空载	负载	变化量
70	100	1.44	1.88	0.44
	120	1.72	2.49	0.77
	140	2.04	2.60	0.56
90	100	1.95	1.53	0.42
	120	2.71	2.12	0.59
	140	2.94	2.44	0.50
110	100	1.48	1.06	0.42
	120	1.87	1.33	0.54
	140	2.27	1.79	0.48

表 6-3 金属样品直径：1.5mm

探头高度 (mm)	发射信号 幅值 (V)	检测信号幅值 (V)		
		空载	负载	变化量
70	100	1.44	1.79	0.35
	120	1.72	2.39	0.67
	140	2.04	2.53	0.49
90	100	1.95	1.60	0.35
	120	2.71	2.21	0.50
	140	2.94	2.51	0.43
110	100	1.48	1.11	0.37
	120	1.87	1.38	0.49
	140	2.27	1.86	0.41

可见,随着探头高度增加,即线圈之间距离增大,检测信号的空载幅值及变化量呈递减趋势,也就是线圈距离越大,检测精度越低;而发射信号幅值的影响并不是线性的,在所选取的三个电压点(100V、120V、140V)中,120V时对应的检测信号幅值变化量最大,而电压升高或降低时,检测精度均下降。当然,120V只是一个相对较好的幅值,具体的最佳幅值可以通过反复试验进行确定;随着金属样品直径的减小,检测信号幅值变化量有明显的下降;个别数据不符合上述规律,可能是实验过程中的干扰所致。

经过峰值保持和信号调理后,会丢失相位信息。这就为本课题提出了新的改进措施:不再进行峰值保持,而是使用高速处理器(如DSP等)对接收信号进行全波放大和信号调理,保留其全部信息,这样,不但可以通过幅值和相位的变化检测金属,而且可以通过分析不同金属物体所对应的接收信号的波形特征进行辅助检测,以进一步提高检测精度。

6.4 本章小结

本章介绍了样机的制作过程以及实验条件的设定,通过在不同条件、不同参数下对不同直径的样品进行实验,得出了较为详细和可信的实验数据,并通过数据分析了金属探测器的性能特点,给出了相应的改进措施。

第7章 总结与展望

7.1 本文总结

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为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) 采用微处理器建立良好的人机对话界面,LCD液晶显示,方便直观,可以轻松地实现对话型的操作。

(3) 探测的物料范围扩大,能够检测冷冻食品(如水饺、冻鱼)、肉类、大米、盐制品等。

(4) 具有记忆功能,可存储20种产品的检测参数。

(5) 能够进行灵敏度调节,操作方便,运行可靠。

(6) 能够手动设置检测参数,操作灵活。

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,智能金属探测器的探测精度可以达到 $\Phi_{SUS} \geq 2.5mm$, $\Phi_{Fe} \geq 1.0mm$;软件中的数字滤波模块能够有效抑制干扰,确保检测精度,同时使机器的稳定性得到较大的提高。

7.2 前景展望

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应用于工矿企业,是检查矿产纯度、提高效益的得力帮手。在技术进步的前提下,现代的金属探测器有能力比以前做更多、更为复杂的工作。随着社会的发展,人

们对自身生活质量和周围环境的关注，为金属探测器的广泛应用奠定了基础，同时也开创了新的领域。整体来讲，现代的金属探测器已经出现了两种特色的技术功能：

其中之一是金属探测器的网络化功能。具备了这种技术，人们可以在任何地方控制该金属探测器，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。所有这一切都进行远距离集中操作。

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商，如El Paso, CEIA USA, Metorex等，均投入了大量的人力和财力从事这项技术的研究、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。

参考文献

- [1] 毛斐. 来自地下的威胁——地雷与排雷[J]. 小哥白尼(趣味科学画报). 2002(12).
- [2] 陈桂香. 国外最新防爆安检探测设备概览[J]. 警察技术. 2007(06).
- [3] 春秋. 谁为展览安全买单[J]. 中国会展. 2003(05).
- [4] 高勇. 防爆安检期待标准的春天[J]. 中国安防. 2008(08).
- [5] 李玲玲. 探测黄金的电子仪器[J]. 黄金. 2003(03).
- [6] 王军胜. 高灵敏地下金属探测器[J]. 现代营销(创富信息版). 2004(12).
- [7] M B 梅, 张兴仁, 肖力子. 联合使用电磁探测器和双能源X射线透射探测器自动拣选废金属[J]. 国外金属矿选矿. 2008(03).
- [8] 曹青松, 周继惠. 基于电涡流的金属种类识别技术的理论与实验研究[J]. 仪器仪表学报. 2007(09).
- [9] 戴明远. 高灵敏度武器探测器[J]. 现代科学仪器. 2003(04).
- [10] 范丽珍, 李树华. 基于单片机的智能型金属探测器的设计[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版). 2006(02).
- [11] 张学勇, 赵群, 李义宝, et al. 一种金属探测器的设计[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版). 2007(03).
- [12] 司德平. 漫谈金属探测器[J]. 现代物理知识. 2006(04).
- [13] 最具创新性的十类安全和防御技术[J]. 发明与创新. 2004(04).
- [14] 陈桂香. 安检探测设备及其应用技术发展概况[J]. 警察技术. 2007(06).
- [15] 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[J]. 警察技术. 2008(03).
- [16] 韩增晋. 自适应控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [17] 范辉, 陆雨田. 一种改进型金属-半导体-金属光电探测器数学模型[J]. 中国激光. 2007(08).

- [18] 胡阶明. 防止食品加工中污染物的有效方法[J]. 工业设计. 2008(11).
- [19] 聂大任, 白卫东. HACCP在变性淀粉生产中的应用研究[J]. 农产品加工(学刊). 2007(11).
- [20] 张国进, 崔文森. 金属目标信号特性分析[J]. 工兵装备研究. 1993, 1: 22-30.
- [21] 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(2): 17-20.
- [22] 陈晓晖. 基于GMR磁传感器芯片的弱磁探伤电路[J]. 科技资讯. 2006(20).
- [23] 贺桂芳. 一种新型智能金属探测仪的设计[J]. 仪表技术与传感器. 2006(01).
- [24] Smuthe W R. Static and Dynamic Electricity[M]. New York: McGraw Hill, 1950.
- [25] Yamazaki S, Negishi T, Nakane H, et al. Simultaneous measurement of electric and magnetic properties of a spherical sample[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1996, 45: 473-477.
- [26] Yamazaki S, Nakane H, Member S, et al. Basic Analysis of a Metal Detector[J]. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT. 2002, 51(4): 810-814.
- [27] Nakane H. A method for simultaneously measuring resistivity and permeability with a multilayer solenoid coil[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1990, 39: 32-37.
- [28] Nakane H. Measuring the thickness of a thin film conductor using solenoid coil[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1991, 40(429-432).
- [29] Nonaka Y. Simultaneous measurement of the resistivity and permeability of a film sample with a double coil: IEEE Inst. and Meas. Tech. Conf. [Z]. Hamamatsu, Japan: 1994.
- [30] 夏思淝, 刘裕勤. 大学物理[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2001.
- [31] 赵树军, 林桐, 姜伟. 对两种基本金属探测仪的分析[J]. 交通科技与经济. 2006(01).
- [32] 刘慧娟, 李志刚. 一种基于电压和频率的金属探测方法[J]. 仪器仪表学

- 报. 2006, 27(07).
- [33] 孟昭敦. 电磁场导论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [34] 王琴. 导电线圈磁场计算理论及方法研究[J]. 太原师范学院学报(自然科学版). 2006(02).
- [35] 庞瑞帆, 钟翔, 胡泂, et al. 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.
- [36] 长春邮电学校. 电工基础[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1979.
- [37] 福田务. 图解电与磁[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [38] 姜立冬, 姜雪松. Protel DXP原理图与PCB设计[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
- [39] 张泉泉, 张贵宝, 杜道山, et al. 基于频域分析的金属探测器设计与实现[J]. 微计算机应用. 2007(04).
- [40] 朗道 I D, 富冢诚. 适应控制系统理论与实际[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1990.
- [41] 张明. 英国Safeline金属探测器的抗电磁干扰措施[J]. 电工技术. 2003(05).
- [42] 张家桂. 乃奎斯特(Nyquist)稳定性判据新公式及其应用[J]. 济南大学学报(自然科学版). 1993(02).
- [43] 朱恒军, 王发智, 姚仲敏. 基于单片机的数字滤波算法分析与实现[J]. 齐齐哈尔大学学报. 2008(06).
- [44] 金春林, 邱慧芳, 张皆喜. AVR系列单片机C语言编程与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [45] 周兴华. AVR单片机C语言高级程序设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [46] 蔡川. 单片机应用系统的可靠性设计[J]. SCIENCE & TECHNOLOGY INFORMATION. 2008(31).
- [47] 徐绍坤. PLC在原矿自动除铁控制系统中的应用[J]. 红河学院学报. 2008(05).

[48] 向晓汉. 电气控制与PLC技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 248.

致谢

本论文是在导师刘志珍教授的悉心指导下完成的。导师高尚的人格、渊博的知识、严谨的治学作风、对科学事业执着的追求和无私的奉献精神以及独到的思维方式和工作方法给了我深刻有益的影响。攻读硕士学位期间，刘老师在学习和工作上给了我很大的帮助，为我的论文工作倾注了大量的心血。借此论文完成之际，谨向辛勤培养和教育我的导师致以衷心的感谢。

本课题的顺利完成还得益于潍坊华特磁电设备有限公司的大力协助，尤其是技术副总刘凤亮工程师，在装置的整个设计、制作、调试和实验过程中都给予了我很多指导和帮助，在此特向他表示最诚挚的谢意！

另外，在三年研究生的学习期间，侯延进、芦灯、卜晨晨、徐天锡、聂小涛、王庆林、宋朋、田娜、张敏、张连明等同学在学习和生活上也给予了我莫大的帮助，在此也向他们表示感谢！

感谢所有曾给予我关心、支持、帮助和鼓励的老师 and 朋友们！感谢我的家人在物质和精神上给予我的巨大支持！在即将完成学业之际，还要衷心感谢母校山东大学对我的培养！

作者: [张忠祥](#)
学位授予单位: [山东大学](#)

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. [王海鱼](#) [一种高灵敏度金属探测器的研究](#)[学位论文]2009
3. [刘淑琴](#) [智能型金属探测器研究](#)[学位论文]2005
4. [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)
5. [范丽珍](#), [李树华](#), [FAN Li-zhen](#), [LI Shu-hua](#) [基于单片机的智能型金属探测器的设计](#)[期刊论文]-[内蒙古大学学报\(自然科学版\)](#) 2006, 37(2)
6. [孙丽兵](#) [智能双频金属探测器的研究](#)[学位论文]2008
7. [禹平](#) [简易金属探测器](#)[期刊论文]-[科技与生活](#)2010(18)
8. [卢超](#), [LU Chao](#) [基于AT89S52的安检金属探测仪](#)[期刊论文]-[仪表技术与传感器](#)2010(12)
9. [殷建国](#), [YIN Jianguo](#) [单片机金属检测器系统研究](#)[期刊论文]-[现代电子技术](#)2010, 33(4)
10. [曾炼成](#), [彭佳红](#), [解志坚](#) [基于MSP430的金属探测器设计与实现](#)[期刊论文]-[安防科技](#)2007(11)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1564876.aspx