

南昌航空大学

硕士学位论文

基于ARM嵌入式系统的智能涡流探伤仪的研制

姓名：刁海波

申请学位级别：硕士

专业：测试计量技术及仪器

指导教师：任吉林

20080501

摘 要

涡流检测技术是建立在电磁感应原理基础上的一种无损检测方法。涡流检测适用于导电材料，当载有交变电流的检测线圈靠近导电试件时，由于线圈磁场作用，试件会感应出涡流，而涡流的大小、相位及流动形式又会受到材料导电性能等的影响。检测时由于导体自身各种因素（导电率，磁导率，形状，尺寸，缺陷等）的变化导致感生电流变化，利用这种变化来判断导体性质、状态。在实际工程中利用涡流原理可以解决金属材料探伤、测厚、分选等问题，这种技术被广泛应用于航空、航天、机械、汽车、石化和锅炉压力容器等工业部门。

本文研究的主要内容为将 Linux 嵌入式系统引入涡流检测仪器的设计，设计出一款基于 AT91ARM9200 处理器的单频智能涡流检测仪，相比现有的小型智能涡流检测仪，可提高涡流检测数据处理速度，仪器的耗电量更小。在软件设计方面采用了 Mini GUI 图形界面支持系统，使得仪器操作更加的简单，直观。

论文首先阐述了涡流检测的基础理论，分析了影响涡流检测的因素。并进一步对涡流检测中检测线圈阻抗进行了分析，指出影响线圈阻抗变化的各种因素。对涡流检测过程中的提离效应抑制进行了分析，提出了利用相位转换抑制提离的方法。

论文接着分别对涡流检测仪整机的硬件，嵌入式系统的选择，软件的设计，整机组装调试进行了论述，详细的阐述了涡流检测仪研制的整个过程。

关键词：涡流检测， 嵌入式系统， ARM， Mini GUI， 检测仪

ABSTRACT

Eddy current testing technology is a non-destructive testing method which based on the principle of electromagnetic principle. Eddy Current Testing applied to conductive material. When coil that contains alternating current detection around conductive specimens, Specimen will be induced eddy by the magnetic field of the coil. The eddy current's strength、 phase and flow forms will be affected by the conductive properties of materials. The change of conductor's own factor (conductivity, magnetic conductivity, shape, size, flaw and so on) causes the induced current change when examined and that we can use it to judge the conductor character and the condition of conductor. We can use the eddy current testing principle in the actual project to resolve problem of metallic material detection, thickness and so on. This kind of technology is widely applied in astronautics, aviation, machinery, automobile, petrochemical and boiler pressure vessel industry sectors.

The partial content of this paper is to take the Linux embedded system into the eddy current testing and to design a single-frequency eddy current inspection instrument based on AT91ARM9200 processor. Compared with existing small eddy current inspection instrument, the new instrument has faster data processing speed and less power consumption. In the software design, MiniGUI graphical user interface is used for supporting system and making the instrument operation more simplicity and direct-viewing.

The basic theories of eddy current testing are expounded and the factors that influenced the eddy current testing are analyzed firstly in this dissertation. We analyzed the impedance of eddy current testing coil and point out the factors that influence the coil's impedance. The restrain of the lift-off effect in eddy current testing is analyzed and point out the method of use phase conversion to restrain the lift-off effect.

In the following dissertation, the hardware of eddy current inspection instrument, the selection of Embedded system and the design of software are separately dissertated, then the detailed entire process of eddy current testing in strumentation's development is expounded.

Keywords: eddy current testing, embedded system, ARM, MiniGUI, detector

南昌航空大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的硕士学位论文，是我个人在导师指导下，在南昌航空大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确地说明并表示了谢意。本声明的法律结果将完全由本人承担。

签名：_____日期：_____

南昌航空大学硕士学位论文使用授权书

本论文的研究成果归南昌航空大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解南昌航空大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权南昌航空大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

签名：_____导师签名：_____日期：_____

第一章 绪论

涡流无损检测是五大常规无损检测之一。本章阐述了涡流无损检测的发展史与发展趋势,介绍了国内外涡流检测仪的发展动态,以及我国近几年内在涡流检测仪上的发展状况。在此基础上,提出了本课题的意义和价值,最后给出了课题的目标、内容及论文安排。

1.1 涡流无损检测技术概况

无损检测技术 (Non-Destructive Testing, NDT) 是指在材料、工件、设备及结构物不被破坏的前提下,利用它们的物理特性因缺陷的存在而发生变化的事实,测定其变化量,从而检出其内部是否存在缺陷,和缺陷的形状、位置、大小、严重程度和发展趋向等相关问题的一项科学技术。涡流法是无损检测中常用的方法,它建立在电磁感应基础上,利用交变磁场作用下对不同材料有不同振幅和相位的涡流值来检测铁磁性和非铁磁性材料的物理性能、结构和冶金情况的差异性,从而发现裂缝、折叠、气孔、夹杂和划伤等缺陷^[1]。

涡流检测技术的应用可追溯到 1879 年。当时,英国人休斯利用感生涡流的方法对不同金属和合金进行了判断实验。但是,休斯以后很长时间内,涡流检测技术发展缓慢。直到二战后,才在少数国家的研究机构和大企业中开始应用涡流检测设备。究其原因是,影响工件内涡流场的因素较多,当时尚未从理论和设备研制找到抑制干扰的有效方法。

50 年代初,以德国福斯特为代表提出了利用阻抗分析方法来鉴别涡流试验中各种影响因素的新见解,为涡流检测机制的分析和设备研制提供了新的理论依据,涡流检测技术的发展得到实质性的突破,并步入实用化的阶段。

作为近代五大常规无损检测技术之一的涡流检测技术,与其他无损检测技术相比,其主要特点是^[1]:

①检测速度快,易于实现自动化。由于涡流检测的基本原理是电磁感应,涡流检测只适用于能产生涡流的导电材料。涡流检测线圈激励后所形成的电磁场实质是一种电磁波,具有波动性和粒子性,所以检测时传感器不需要接触工件,也不必在线圈与试件之间填充耦合剂,因此检测速度快,对管、棒材的探伤每分钟可检查几十米;对丝、线材的探伤每分钟可达几百米,甚至上千米,因此,易于实现自动化检测。

②表面、亚表面缺陷检出灵敏度高。由于感生涡流渗入被检试件的深度与试

验频率的平方根成反比，这个深度不大，因此，涡流检测通常被认为是一种检测表面或近表面质量的无损检测技术。常用试验频率的范围为几赫兹至几兆赫兹（特殊的可高达上百兆）。

③能在高温状态下进行检测。由于高温下的导电试件仍然具有导电性质，涡流检测不受材料温度的影响，因此，可在该状态下对导体进行检测，如热丝、热线、热管、热板。尤其重要的是当加热到居里点以上，钢材消除了磁导率的影响，可以像非磁性金属那样，用涡流法进行探伤、材质试验以及进行板厚、管壁厚或覆盖膜层厚度的测量。

④多用途的检测技术。对试件中涡流产生的影响因素主要有：金属物体的电导率和磁导率、试件的尺寸和形状、线圈和试件间隙的大小、试件内部的缺陷等。因此，涡流可以应用于多个不同的领域，除探伤外，还能测量工件的电导率、磁导率、晶粒尺寸、热处理状态和工件几何尺寸，涂层（或镀层）厚度。它适用于铁磁性、非铁磁性金属或金属工件的各种物理的、组织的冶金状态检测。

因此，涡流方法与其他无损检测方法相互补充，弥补了其他方法的不足，在航空航天、冶金、机械、化工、核能等领域具有广泛的应用。特别是随着电子技术，尤其是计算机和信息处理技术的发展，大大促进了涡流检测方法设备的不断更新和发展。将突破常规涡流仪使用中的某些局限，大大强化仪器的性能。

1.2 涡流检测仪国内外发展现状

从 1824 年加贝发现了涡流存在到现在，人们对涡流的研究已经进行了将近 200 年时间，但是真正将涡流检测应用到工业现场中还要归功于 20 世纪 50 年代福斯特的创造性工作，当时，德国的福斯特（FORSTER）发表了许多涡流论文，提出了阻抗分析理论和实验结果，开创了现代涡流检测和理论研究的新阶段，此后，经过理论和实践双方面的努力，涡流检测才真正从实验阶段发展到实用阶段，逐步被工业所接受，各种类型和用途的仪器相继问世。

我国 60 年代开始开展涡流检测的研究工作，并先后研制成功了一系列检测系统。从最初的 YY-11 型管材探伤仪，随着涡流检测技术的应用和推广，国内不少单位又相继研制成功了多种型号的管材涡流探伤设备，如 YY-17、YS-1、WTS-100、TC-1000、TC-2000、ED-251、T-5、NE-30、EEC 系列等^[5]。

在 80 年代，随着进一步对涡流的认识，许多国家在“阻抗分析法”的基础上进一步开展了涡流检测的研究工作，使涡流检测仪器的研制有一个飞跃。研制出的涡流检测仪器从一维显示发展到二维显示更加准确直观反映出检测的结果。但是，由于当时的数字芯片集成度不高，使检测仪器的成本很高，价格很昂贵，

这种技术的仪器只在部分非常重要的检测场合使用,使这类的仪器在市场上数量很小。在某种程度上阻碍涡流技术在实际工程中的应用。

随着对涡流技术的深入研究,各种新型的涡流技术被应用到实践中,如多频涡流技术,远场涡流技术,柔性阵列传感器技术,技术的进步进一步促进了仪器的发展,各种多频涡流检测仪,远场涡流仪也相继出现,计算机技术的进步也对涡流仪器的研究产生了很大的影响,集成电路技术、单片机技术也越来越多的使用到了涡流检测仪器中,大大提高了仪器的检测速度和可靠性^[6]。

到 90 年代和 21 世纪初,随着工业电脑的发展,很多涡流检测仪器采用该技术应用于开发“电脑式”的数字涡流检测仪器和其他用途的设备。在国内,以爱德森(厦门)电子有限公司为主导的集成度很高的数字化涡流检测仪器,如现在用途较为广泛的 EEC 系列的数字涡流检测设备。

在便携式仪器方面,我国自行研制与生产的早期便携式涡流探伤仪有 FQR-7505(厦门第二电子仪器厂)和 WT-3(空军第一研究所)等,这些仪器能检测铁与非铁磁性零件的表面缺陷,并具有手动提离补偿能力,性能与德国 DEFECTOMETER2.164 相当,为国际 20 世纪 70 年代水平,随后,空一所又研制成功 WT-10 型国内第一台便携式变频涡流探伤仪,性能达到国际同类产品(如美国 ZETEC 公司的 MIZ-10A)20 世纪 80 年代中期水平。为了进一步改进编写式涡流仪的提离补偿的调整,南昌航空工业学院研制的 ED-5 型涡流仪,成功的利用单片机进行控制,实现了提离效应的自动补偿和零点的自动调整,性能与德国 20 世纪 80 年代产品 DEFECTOMETER2.836 相当。近年来爱德森公司和空军第一研究所联合研制的 SMART-97 智能全数字涡流探伤仪,将先进的 DSP 技术与涡流检测技术相结合,成功的在涡流检测仪上实现了阻抗平面显示和时基扫描。

但是从国内总体研究来看,仪器的便携性与智能化方面并不十分理想,仪器体积偏大,不便于工业现场的携带。现代的便携式探伤仪大都采用单片机做控制处理,在编写程序方面比较简单而且成本低,但是对于编写复杂的系统,单片机有点困难,同时由于单片机大都为 8 位机,且处理速度一般不会高于 50MHZ,检测速度普遍不高,而且对于使用电池供电的便携式仪器来说功耗比较大,不利于便携式仪器的野外长时间使用。本课题研究采用 ARM 微处理器,在速度上,ARM 可以高达 200MHZ,数据字长 32 位,是单片机的四倍,在处理优势上为以后的进一步发展留于余量。在耗电量上 ARM 处理器内核采用 1.8V 供电,待机电流最低只有 3mA。外部资源包括齐全,如:以太网、音频、CF、USB、图形驱动等多媒体功能。采用高速 ARM 处理器与嵌入式系统相结合,真正实现仪器的智能化,小型化,人性化^[7、8、9]。

1.3 课题实现的意义与价值

涡流检测技术是建立在电磁感应原理基础上的一种无损检测方法,涡流检测适用于导电材料,当载有交变电流的检测线圈靠近导电试件时,由于线圈磁场作用,试件会感应出涡流,而涡流的大小、相位及流动形式又会受到材料导电性能等的影响。检测时由于导体自身各种因素(导电率,磁导率,形状,尺寸,缺陷等)的变化导致感生电流变化,利用这种变化来判断导体性质、状态。在实际工程中利用涡流原理可以解决金属材料探伤、测厚、分选等问题,使这种技术被广泛应用于航空、航天、机械、汽车、石化和锅炉压力容器等工业部门^[1,2]。

当前,涡流检测技术已成为五种常规无损检测技术中的一个重要组成部分,随着工业的发展,特别是航空,核工业等对涡流检测提出了更高的要求,同时,随着电子技术,尤其是计算机技术和信息处理技术的飞速发展,涡流检测方法和设备也在不断地改进和更新,涡流检测在准确性,可靠性和重复性方面都取得了快速的发展,涡流设备正朝着智能化和数字化的方向发展,仪器性能不断的稳定和完美。

嵌入式技术也是近些年来得到快速发展和应用的计算机技术,嵌入式技术是以应用为中心,以计算机技术为基础,软硬件可剪裁,适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等严格要求的专用计算机系统^[10]。由于嵌入式系统具的这些优点,近些年,嵌入式系统在军事国防,消费电子,信息家电,网络通信,工业控制等领域得到了广泛的应用。本课题将基于 ARM 的嵌入式系统引入涡流检测设备中,会使的检测方式更加的智能化,检测设备更加的小型化,检测过程更加的人性化。

1.4 课题目标、内容及论文安排

研制出一台掌上型全数字化涡流检测仪,具有检测速度快、体积小、功耗低、操作简单等特点。该检测仪拟具有以下指标:

- (1) 尺寸 (MM): 180×110×40;
- (2) 激励频率: 100Hz~5.5MHz (可调);
- (3) 增益: 1dB~40 dB (步进 0.5 dB);
- (4) 报警方式: 扇形、方框, 并且报警区域可调;
- (5) 显示方式: 时基扫描显示或阻抗平面显示;
- (6) 屏幕显示: 彩色 (320X240);
- (7) 可存储数据和图形、并可查看、回放;

(8) 电池采用大容量可充电锂电池供电;

(9) 工作温度范围: -20°C — 60°C ;

据此, 课题拟以下面几个方面来开展:

(1) 提离效应抑制方法研究与软硬件的实施;

(2) 涡流检测仪检测探头设计;

(3) 涡流检测仪硬件电路设计、制板、调试;

(4) Li nux 系统的移植、Mi ni GUI 图形界面支持系统的安装、涡流检测程序的编写与调试;

1.5 本章小结

本章综述了电涡流检测技术与应用的研究现状及发展趋势, 论述了涡流检测仪的发展过程及发展趋势, 阐述了涡流检测对于国家工业发展的重要意义, 介绍了嵌入式系统与新型 ARM 处理器在涡流检测仪的中使用, 结合课题项目给出了本论文的总体框架, 提出了本论文的主要研究内容。

第二章 涡流无损检测理论基础

2.1 涡流检测电磁场基础理论

由于电磁感应，当金属处在变化着的磁场中或相对于磁场运动时，金属体内会感生出漩涡状流动的电流，称为涡流。涡流检测是涡流效应的一项重要应用，其原理如图 2-1 所示。在图(a)中，线圈 1 接交流电源，线圈 2 接上负载 R2 构成回路。当线圈 1 中电流变化时，

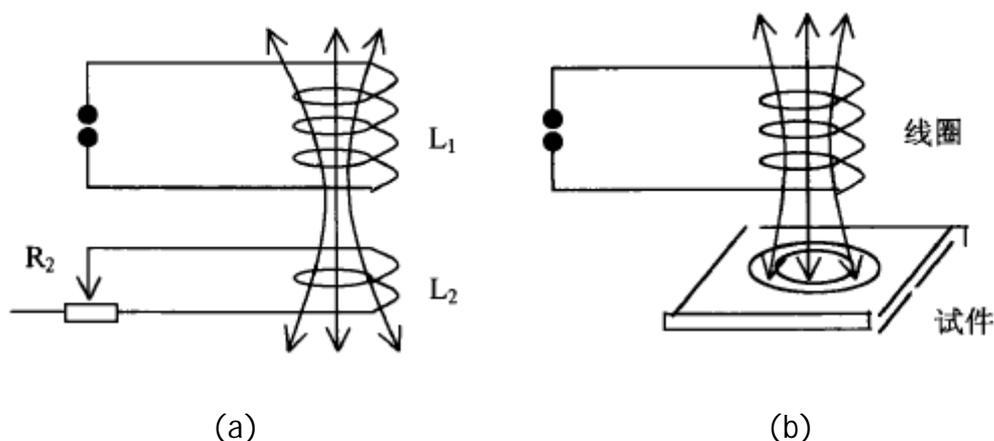


图 2-1 涡流检测的原理

由于互感，线圈 2 中产生变化的感生电动势和感生电流。又由于互感，线圈 2 中变化的感生电流又在线圈 1 中产生感生电动势，使线圈 1 中的电流发生变化。若改变线圈 2 中负载 R2，则线圈 1 中的电流会随着发生变化。根据欧姆定律，线圈 1 中的电流与电压关系为

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1} \quad (2-1)$$

式中 E_1 ----线圈 1 两端的电压；

I_1 ----线圈 1 中的电流；

Z_1 ----线圈 1 中的阻抗。

由上式可知，当电源电压 E_1 一定时，电流 I_1 随阻抗 Z_1 增大而减小。因此测出线圈 1 中电流 I_1 的变化，便可得知其阻抗 Z_1 的变化，进而探知线圈 2 中负载 R2 的变化。

若用金属块来代替线圈 2，如图(b)所示。当线圈中电流变化时，由于电磁感应，则会在金属试块中产生涡流。涡流的大小、分布、等与金属试块的状况有

关。当金属试块中存在缺陷或电导率、磁导率等物理性能发生变化时，试块中的涡流就会发生变化，而涡流产生的磁场反作用于线圈，使线圈阻抗发生变化。因此，测定线圈阻抗的变化，就可得知金属试块中缺陷或其他物理性能变化的情况。

2.2 阻抗平面分析法

涡流检测中，工件要检测的信号是来自检测线圈的阻抗或次级线圈感应电压的变化，由于影响阻抗和电压的因素很多，各因素的影响程度不同，因此，要从这诸多的因素中提取出有意义的检测信号，涡流检测设备必须具备对信号进行处理的功能，以达到消除干扰信号的目的。

在涡流检测的发展过程中，曾经提出过多种消除干扰因素的手段和方法，但直到阻抗分析法的引进，才使涡流检测技术得到了重大的突破和广泛应用。

阻抗分析法是以分析涡流效应引起线圈阻抗的变化及相位变化之间的密切关系为基础，从而鉴别各影响因素效应的一种分析方法。从电磁波传播的角度来看，这种方法实质上是根据信号有不同相位延迟的原理来区别工件中的不连续性。因为在电磁波的传播过程中，相位延迟是与电磁信号进入导体中的不同深度和折返来回所需的时间联系在一起。

到目前为止，阻抗分析法仍然是涡流检测中应用最广泛的一种方法。在阻抗分析法的发展过程中，由于福斯特的开拓工作和实用性资料的积累，在一般的实际应用中，以福斯特建立的阻抗分析法表述较为著称，下面依照该法进行讨论。

(一) 涡流简化模型

在实验中，采用的是空心放置式线圈（即放置在试件表面上进行涡流检测的线圈），又称点式线圈或探头。下面就针对这种线圈进行分析。

一般情况下，这种检测线圈即产生激励涡流的磁场又接受涡流的反磁场，它的主件是一只固定于框架上的扁平线圈，如图 2-2 所示。

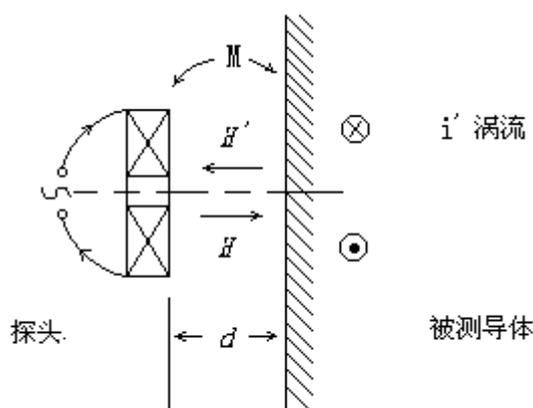


图 2-2 涡流传感器原理图

当检测线圈端平行的靠近被检测导体表面时，线圈中的激励电流 i 产生高频交变磁场 H ，在导体中就激发出涡流 i' 。若平面导体比线圈端面大得多，其中的涡流可看成无数个载流螺线圈，而每个螺线圈的涡流是不同的，且同一个螺线圈上涡流也是不同。这些涡流激发的反磁场 H' ，传递了有关被测导体的物理性质（电导率 σ ，磁导率 μ ）及导体表面处不连续性的信息，涡流的反磁场作用于检测线圈，使其阻抗发生变化，这个变化是由于涡流效应引起的，它包含了被测导体中的有关信息。

(二) 等效电路

当被测导体简化成一个涡流环后，则检测线圈与涡流环的等效电路如图 2-3 (b) 所示，这是人们熟悉的空心变压器的等效电路^[1]。

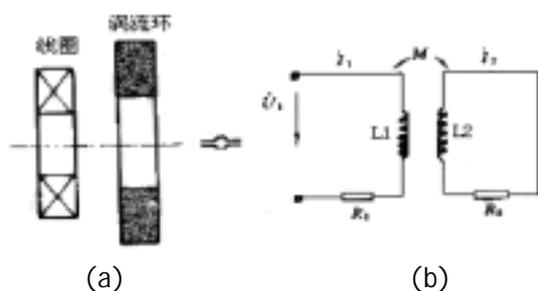


图 2-3 检测线圈与涡流环的等效电路

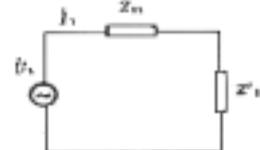


图 2-4 检测线圈等效电路

用相量表示电流、电压，在图 2-3 (b) 中，由回路电流法得

$$\left. \begin{aligned} (R_1 + j\omega L_1) \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 &= \dot{U}_1 \\ -j\omega M \dot{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2) \dot{I}_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

式中， R_1 、 L_1 分别是线圈空载状态（即不与导体耦合）时的线圈损耗电阻和线圈的自感， R_2 、 L_2 是涡流环的电阻和电感， M 是线圈与涡流环之间的互感。令： $Z_{11} = R_1 + j\omega L_1 = R_1 + jX_1$ -----检测线圈的自阻抗，即线圈空载阻抗， $X_1 = \omega L_1$ 为空载的感抗。

$Z_{22} = R_2 + j\omega L_2 = R_2 + jX_2$ -----涡流环的自阻抗， $X_2 = \omega L_2$ 为涡流环的感抗。 $Z_{12} = jX_M = j\omega M$ -----检测线圈与涡流环的耦合阻抗， $X_M = \omega M$ 称为耦合电抗。式 (2-2) 简化为

$$\begin{aligned} Z_{11} \dot{I}_1 - Z_{12} \dot{I}_2 &= \dot{U}_1 \\ -Z_{12} \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}_2 &= 0 \end{aligned}$$

解得

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{11} + \frac{X_M^2}{Z_{22}}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{11} + Z'_{11}} \quad (2-3)$$

由式 (2-3) 可以画出检测线圈的等效电路, 如图 2-4 所示。它是由检测线圈的自阻抗和因与涡流环耦合增加的阻抗 Z'_{11} 串联而成。 Z'_{11} 称为涡流环对检测线圈的反射阻抗, 它反映了被测导体上的涡流场对检测线圈的影响。引入了反射阻抗 Z'_{11} 以后, 我们就把检测线圈与涡环两个本来相连的耦合回路 (见图 2-3) 问题变成了单个等效检测线圈回路问题。

(三) 反射阻抗与视在阻抗

$$Z'_{11} = \frac{X_M^2}{Z_{22}} = \frac{X_M^2}{R_2 + jX_2} = R' + jX'$$

式中, R' 和 X' 称为涡流环对检测线圈反射电阻和反射电抗, 且有

$$R' = \frac{X_M^2}{R_2^2 + X_2^2} \cdot R_2 \quad (2-4)$$

$$X' = -\frac{X_M^2}{R_2^2 + X_2^2} \cdot X_2 \quad (2-5)$$

由式 (2-5) 可以看出, 反射电抗 $X' < 0$, 所以它是一个容抗, 也就是说, 涡流环反射到检测线圈的电抗, 总是起削弱检测线圈自身的感抗的作用。因为 R_2 、 X_2 、 X_M 与被测导体的电导率 σ 、磁导率 μ , 涡流实验频率 f 以及检测线圈与被测导体平面之间的距离 h 有关, 所以, 反射阻抗 Z'_{11} 也就随着 σ 、 μ 、 f 、 h 的变化而变化, 即反射阻抗是这些变量的函数, $Z'_{11} = F(\sigma, \mu, f, h)$ 。

由图 2-4 所示, 检测线圈的阻抗是自阻抗与反射阻抗之和, 这个阻抗称为检测线圈的视在阻抗, 用 Z 表示, 有

$$Z = Z_{11} + Z'_{11} = R + jX$$

R 称为视在电阻, X 称为视在电抗, (2-4) (2-5) 得

$$R = R_1 + R' = R_1 + \frac{X_M^2}{R_2^2 + X_2^2} R_2 \quad (2-6)$$

$$X = X_1 + X' = X_1 - \frac{X_M^2}{R_2^2 + X_2^2} X_2 \quad (2-7)$$

由式 (2-6) 可以看出, R' 在 R_2 由无穷大逐渐减小的过程中有个极值, 由

$$\frac{\partial}{\partial R_2} \left(\frac{X_M^2}{R_2^2 + X_2^2} R_2 \right) = 0$$

得

$$R_2 = X_2$$

就是说，当涡流环的电阻大小等于其电抗时，反射电阻 R' 达到最大值，且为

$$R'_{\max} = \frac{X_M^2}{2X_2^2} X_2 = \frac{(\omega M)^2}{2\omega L_2} = \frac{1}{2} X_1 K^2$$

式中， $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ 称为耦合系数，它表示检测线圈与涡流环的耦合程度， K 与频率 f 无关，只与两个耦合线圈自身电感及它们之间的互感有关。引入耦合系数 K 后，检测线圈中视在阻抗的变化规律为

$$R : R_1 \rightarrow R_1 + \frac{1}{2} X_1 K^2 \rightarrow R_1$$

$$X : X_1 \rightarrow X_1(1 - \frac{1}{2} K^2) \rightarrow X_1(1 - K^2)$$

可见，当 R_2 从无穷大减小到零时，检测线圈的视在电阻从 R_1 逐渐增大，经过极大点 $(R_1 + \frac{1}{2} X_1 K^2)$ 后，再逐渐减小到 R_1 ，而视在电抗则从 X_1 单调减小到 $X_1(1 - K^2)$ 。

(四) 阻抗图

将式 (2-6) 和式 (2-7) 两边平方相加，并消去 R_2 ，则得

$$(R - R_1)^2 + [X - X_1(1 - \frac{1}{2} K^2)]^2 = (\frac{1}{2} X_1 K^2)^2 \quad \text{公式 (2-8)}$$

这是一个圆方程，在视在电抗 X 为纵轴，视在电阻 R 为横轴的坐标系中，该圆的圆心坐标是 $[R_1, X_1(1 - \frac{1}{2} K^2)]$ ，

半径为 $\frac{1}{2} X_1 K^2$ ，这样，就得到了检测线圈的阻抗平面

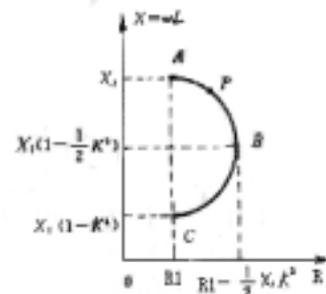


图 2-5 检测线圈的阻抗图

图，它是一半圆曲线，如图 2-5 所示。图 2-5 中 A 点表示检测线圈空载时的阻抗，即 $Z_{11} = R_1 + jX_1$ ，当检测线圈靠近被测导体平面某个位置时，其视在阻抗为 $Z = R + jX$ ，在图 2-5 中对应于 P 点，检测线圈在阻抗平面图上阻抗从 A 点变化到 P 点，是因为试件中涡流引起的，所以，可以通过检测线圈中阻抗的变化特性来分析判断试件的物理特性 (σ, μ) ，缺陷以及检测线圈与试件之间的间隔变化。

在图 2-5 中，把纵坐标轴向右移 R_1 ，然后，将新的坐标除以 ωL_1 ，则新的坐标轴的量分别为

$$\text{横轴: } \frac{R - R_1}{\omega L_1} \qquad \qquad \qquad \text{纵轴: } \frac{\omega L}{\omega L_1}$$

这样，图 2-6 中的半圆曲线的直径必然和新坐标的纵轴重合，且半圆的上端坐标 $(0, 1)$ ，下端坐标 $(0, 1 - K^2)$ ，半径为 $\frac{1}{2}K^2$ ，如图 2-6 所示。该图称为检测线圈的归一化阻抗平面图。在这个图上，半圆曲线的位置和大小只取决于耦合系数 K ，而曲线上点的位置只取决于参数 R_2 和 X_2 。或者说，耦合系数一定后，检测线圈的视在阻抗变化完全取决于试件中涡流环的自身阻抗的变化，这种变化是通过反射阻抗对检测线圈的阻抗起作用。

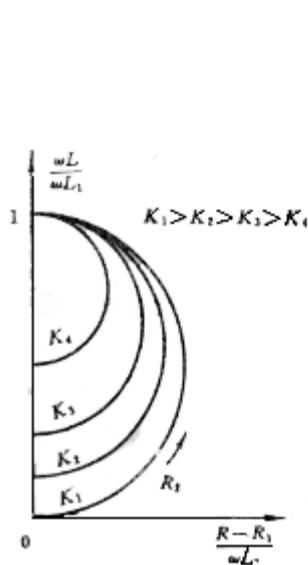


图 2*6 检测线圈的归一化阻抗

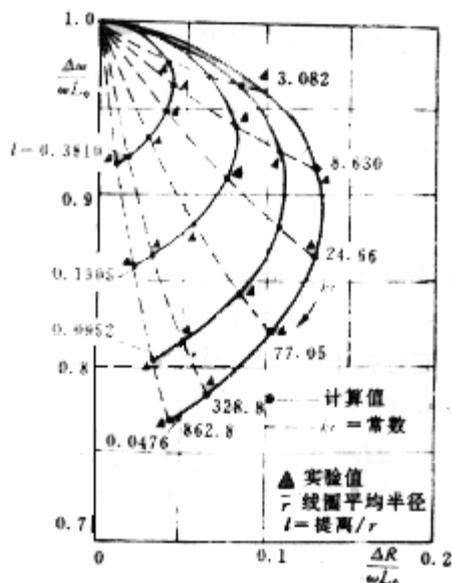


图 2-7 放置线圈的阻抗图

由于经过归一化处理后，图 2-6 中纵坐标及横坐标量都是无量纲的量，且都小于 1，因此，归一化阻抗平面图有广泛的通用性和可比性。图 2-7 是由矢势法作数值计算得出的阻抗图。图 2-7 中不同曲线表示检测线圈与试件之间的距离不同。这种检测线圈与试件之间距离变化引起检测线圈阻抗变化称为“提离效应”，线圈与试件之间的间隙称为“提离”。

2.3 影响涡流检测的因素

涡流检测能对试件性能的多种参数做出反应，是一种多用途的检测方法。同时，由于检测中对多种参数的敏感反应，工件的无关参数将形成多种干扰信号。因此有必要分析涡流检测时各种因素对其产生的影响。

线圈接近金属试样时的阻抗，由于因素复杂，准确地计算比较困难，也可由实验测得。影响线圈阻抗变化的因素主要由金属材料性质和线圈同金属试样的电磁耦合状况决定^[11]。

(1) 工件电导率 σ 对阻抗图的影响

将检测线圈放置于各种不同电导率材料上,在其它条件均相同的情况下,由于材料的电导率不同,获得的信号也是不同的,线圈阻抗变化如图 2-7 所示,随着电导率的增加,阻抗值沿着阻抗曲线向上移动。

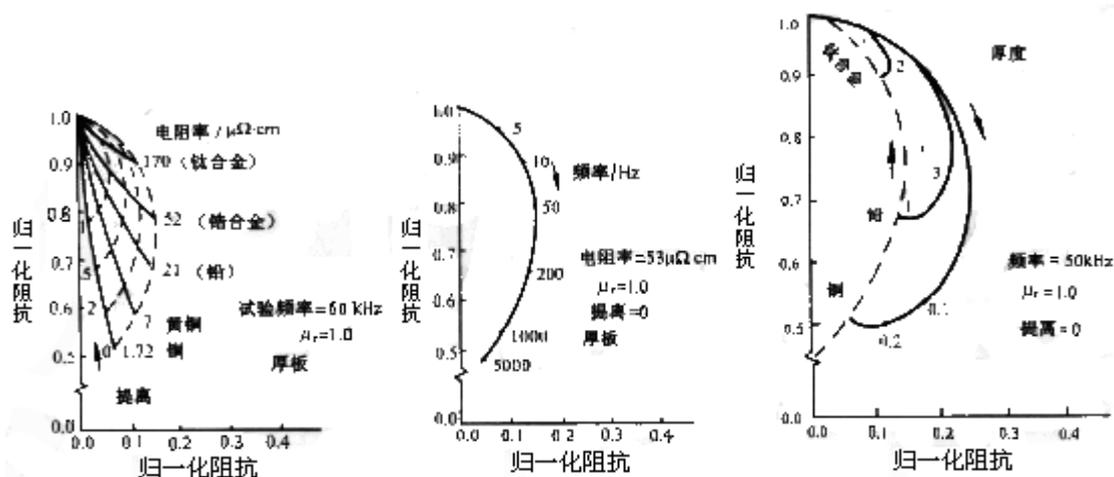


图 2-7 受电阻率影响的阻抗图 图 2-8 受频率影响的阻抗图 图 2-9 受厚度影响的阻抗

(2) 提离效应对阻抗图的影响

应用点式线圈检测时,线圈与工件之间的距离变化,会引起检测线圈阻抗变化,这种距离影响称为提离效应。一般地说,小的提离会产生大的阻抗变化,这是由于改变提离时,工件中的磁通密度改变很大,可以想象,小直径探头随着提离的变化比大直径探头还要大。涡流检测中提离效应影响很大,必须用适当的电子学方法予以抑制,但利用提离效应又可以测量金属表面所涂油漆或覆盖绝缘层的厚度。

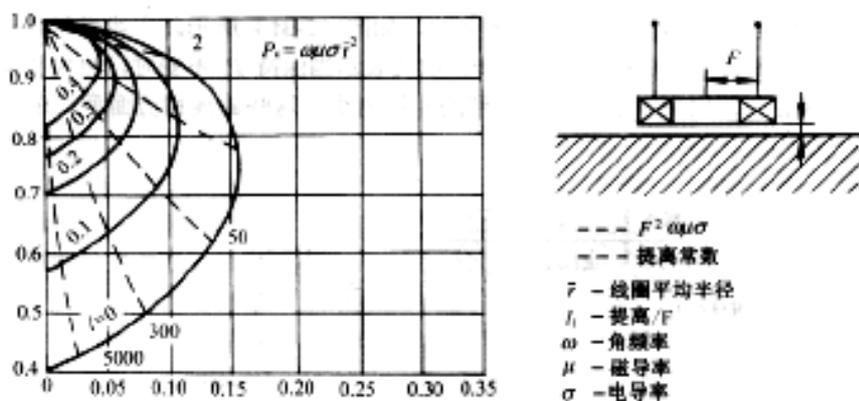


图 2-10 提离效应的归一化

非铁磁性材料相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ ，磁导率为一常数，因此不影响阻抗，但铁磁性材料的相对磁导率 μ_r 远大于 1，对阻抗影响显著，高磁导率材料检测时，磁导率不是常数，微小的磁导率变化都会引起很大的本底噪声，即使检测裂纹也困难，为了消除磁导率的影响，需用直流磁化将被检区磁化到饱和，从而使磁导率变小，达到某一常数，大大减小磁导率变化的影响。

(3) 磁导率对阻抗图的影响

非铁磁性材料相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ ，磁导率为一常数，因此不影响阻抗，但铁磁性材料的相对磁导率 μ_r 远大于 1，对阻抗影响显著，高磁导率材料检测时，磁导率不是常数，微小的磁导率变化都会引起很大的本底噪声，即使检测裂纹也困难，为了消除磁导率的影响，需用直流磁化将被检区磁化到饱和，从而使磁导率变小，达到某一常数，大大减小磁导率变化的影响。

(4) 实验频率对阻抗的影响

频率和电导率效应在阻抗图上的影响是一致的。一般地，阻抗图都是以频率 $\frac{f}{f_g}$ （这里， f 为实验频率； f_g 为特征频率，取决于工件尺寸和电磁性）为参数描绘出来。 $\frac{f}{f_g}$ 一般取下列范围： $10 < \frac{f}{f_g} < 40$ 。如果 $\frac{f}{f_g}$ 选得过小，则电导率变化方向与直径变化方向的夹角很小，采用相位分离法难以分离；但也不宜选择过高。图 2-8 显示了检测频率效应，频率增加，由于趋肤效应，涡流局限在表面薄层中流动；相反，当频率降低时，穿透深度增加，阻抗值沿曲线朝上移动，在检测中，常通过调节频率选择工作点。

在阻抗曲线的上端，涡流引起的阻抗主要由电阻组成，而电阻依赖于工件的温度和线圈的温度，即温度的变化会对检测带来影响，所以希望工作点选在图中 20~200kHz 拐点的范围内。

(5) 工件厚度对阻抗图的影响

图 2-9 显示了工件厚度从无穷大减小到零时, 探头阻抗变化的轨迹。当工件变薄时, 线圈阻抗分量增加, 电抗分量也增加, 阻抗值沿着曲线向上移动。这一点和电阻率增大的结果是类似的 (见图 2-7)。这意味着任何引起涡流流动电阻增加的因素, 如裂纹、变薄、合金成分增加和温度等将使得阻抗沿着阻抗曲线向上移动, 直到探头阻抗趋向于线圈在空气中的阻抗, 即 $\frac{X_L}{X_0} \rightarrow 1$ 。

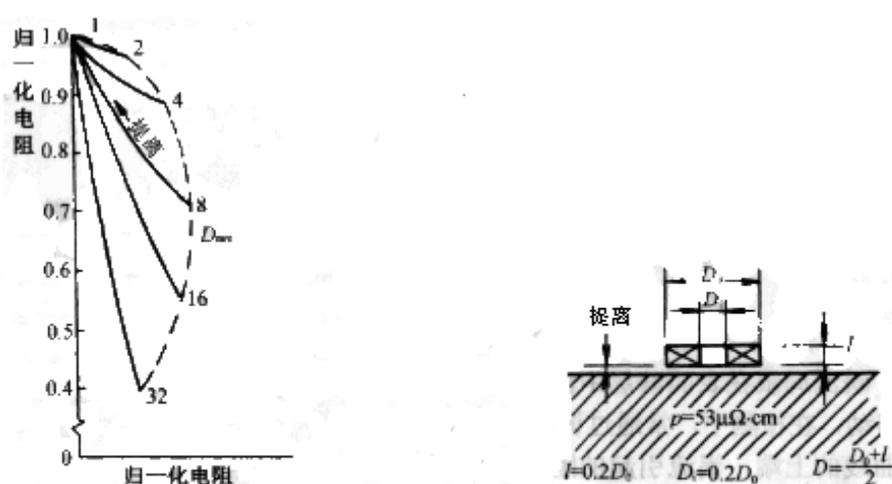


图 2-11 线圈直径对阻抗的影响

(6) 探头直径对阻抗图的影响

图 2-11 显示了线圈直径效应。线圈直径增加, 阻抗值沿着曲线向下移动, 类似于频率的增加。这是由于线圈直径增加, 增加了工件中的磁通密度, 也增大了涡流值, 这相当于电阻率的减小。

(7) 工件缺陷对阻抗的影响

当工件的表面和近表面存在缺陷时, 会影响涡流在工件内部的流动, 使涡流场的强度和分布发生变化, 进而使线圈的阻抗发生变化。但由于缺陷往往形状不规则、缺陷的深度和宽度也均不同, 其引起阻抗变化也不相同。

(8) 边缘效应对阻抗的影响

当检测线圈移动到板状试件的边缘、凹坑、或减薄处时, 涡流场便发生畸变, 这种现象在涡流检测技术中称之为“边缘效应”。若被测物体是棒状、丝状或线状以及管状, 这种现象便称之为“端头效应”或“端尾效应”。涡流的畸变可反映于阻抗平面图中, 图 2-9 为电导率相同而厚度不同的试样经涡流检测显示的阻

抗平面图。

在以上各种因素中，利用电导率对涡流阻抗的影响来测量工件的电导率；而提离效益、磁导率、缺陷、工件厚度和边缘效应均是测量电导率的干扰因素，需要在检测中给以抑制或补偿；而试验频率和探头直径是制作传感器来获得检测分辨率的理论依据。

2.4 提离效应的抑制

2.4.1 提离效应的有限元模拟^[12]

美国 ANSYS 公司研制开发的大型通用有限元软件 ANSYS 是一个适用于微机平台的大型有限元分析系统，功能强大，适用领域广泛。它具有强大的低频电磁场分析功能，能够进行自感、互感、磁通量密度、电场分布、磁力线分布、涡流、磁场分布、电流密度分布等分析。针对涡流检测中提离效应的变化，采用基于有限元法的 ANSYS 分析软件建立了涡流检测线圈（传感器）的二维模型，针对不同规格及类型的线圈，不同的检测材料，模拟提离效应对传感器阻抗的影响，得到针对不同材料不同提离下涡流检测线圈（传感器）的归一化阻抗平面图。这些应用数值分析法得出的阻抗图经实验验证基本吻合，为涡流检测的实际应用提供了有意义的分析方法和参考依据。为涡流检测中提离效应的抑制提供了数据支持。

应用 ANSYS 来分析电磁场，其基本原理是，首先将所处理的对象划分成有限个单元（包含若干节点），然后根据矢量磁势或标量电势求解一定边界条件和初始条件下每一节点处的磁势或电势，进而求解出其他相关量，如磁通量密度和电磁场储能等。计算完成后将结果读入，进行相应的参数分析。

实验利用 ANSYS 软件模拟分析不同线圈上的阻抗变化规律，得到线圈阻抗归一化平面图。模拟前，先定义模型几何尺寸及模拟参数，规定探头线圈的内径为 4.5mm，外径为 6.8mm，线圈高度为 5.5mm，线圈模型如图 2-12 所示，加载电压为 3V，频率为 5000Hz。提离间隙从 0.3mm 逐渐增加至 4mm。

在分析中，选择模型为一个加载交流电压的线圈放置在一块无缺陷金属平板上，为简化模型，设置当前的金属板为圆柱型，因此只需建立二维 1/2 轴对称模型即可，可大大节省计算量。当平板直径与线圈直径比例大于 5 且金属板厚度与集肤深度比例大于 4 时，可认为金属平板对线圈阻抗的影响与无穷大平板一致。

根据已知参数，定义单元以及材料参数，建立对应的模型，分配单元和材料

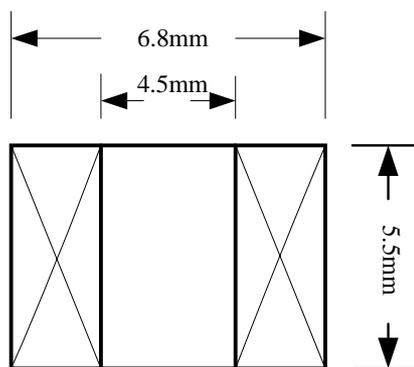


图 2-12 探头线圈模型

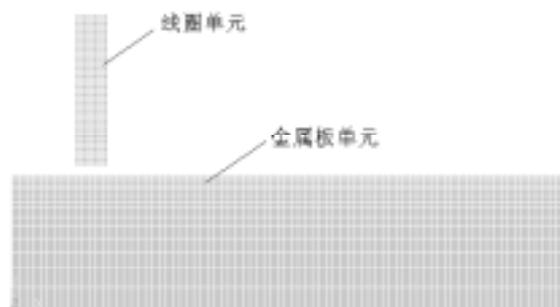


图 2-13 模型网格图

属性，对模型进行网格划分。图 2-13 为模型线圈与金属板网格划分图。划分网格后，根据定义的参数和模型属性对不同的单元进行参数耦合，设置边界条件、分析类型和加载激励，最后选择求解器进行求解。

针对不同电导率的非铁磁性金属进行 ANSYS 模拟，得到的一组阻抗图如图 2-14 所示：

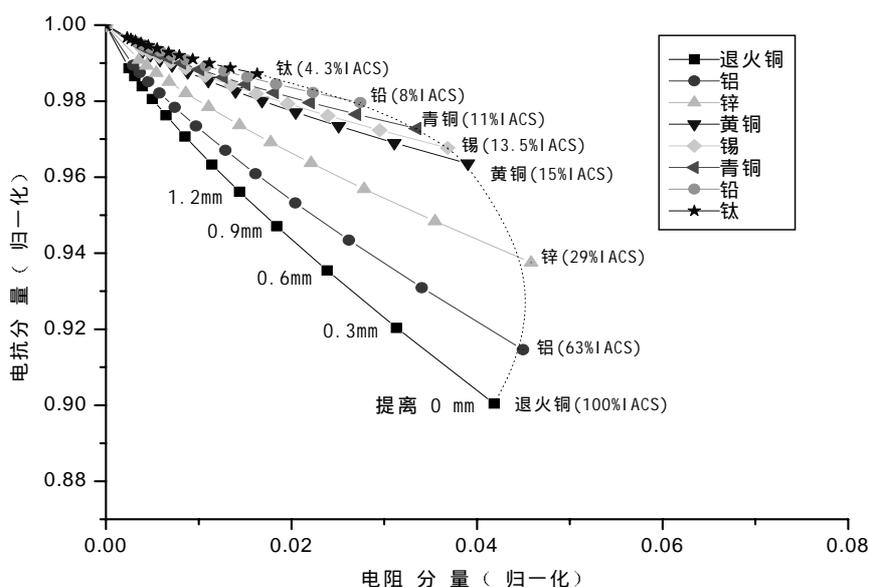


图 2-14 线圈在不同电导率非铁磁性金属下的归一化阻抗图

为了对比 ANSYS 数值模拟的结果，本实验进行了实际的实验验证，根据图 2-15 所示原理图，分别对不同规格线圈在不同激励下进行阻抗测量并归一化，同时对该规格线圈进行 ANSYS 建模，通过仿真计算得出阻抗变化的理论值，作实验和 ANSYS 理论分析得出的提高变化阻抗图，然后对比分析。表 2-1 为当被测金属为铝（电导率 63%IACS，相对磁导率 1）时，线圈（规格为 250 匝，高 5.5mm，

内径 4.5mm，外径 8.3mm)
 在激励频率为 10kHz 交流
 激励下得到的不同提离下的
 实验数据与使用 ANSYS
 模拟得出的模拟数据。图
 2-16 为线圈在 10kHz 激励

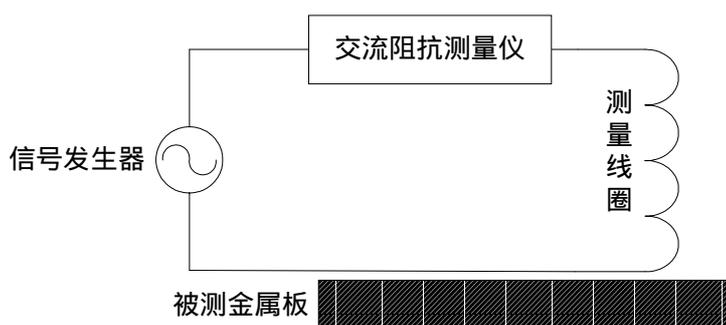


图 2-15 实验原理图

下分别在 ANSYS 模拟和实
 验中得到的归一化阻抗图。图 2-17 为线圈在 100kHz 激励下分别在 ANSYS 模拟和
 实验中得到的归一化阻抗图。由表中数据及两阻抗图看出，实验结果与模拟结果
 存在一定的误差，分析原因主要是受实验过程中的操作方法以及实验材料所影
 响，如被测金属板材质不均匀，被测金属板电导率与其标称值存在一定误差，绕
 制线圈与 ANSYS 仿真模型存在一定误差，提离垫片产生磨损引起的误差等，但从
 实验数据的整体性看，实验数据与仿真分析数据可以较好的吻合且实验数据很好的
 反映了理论规律。

表 2-1 10kHz 激励下线圈实验数据与模拟数据的比较

检测距离/mm	实验结果		模拟结果	
	阻抗实部/ Ω	阻抗虚部/ Ω	阻抗实部/ Ω	阻抗虚部/ Ω
0	4.116	12.821	4.066	12.454
0.3	4.013	13.127	3.911	12.826
0.6	3.904	13.360	3.798	13.114
0.8	3.881	13.592	3.714	13.339
1.2	3.811	13.758	3.651	13.517
1.6	3.725	13.952	3.601	13.659
2.0	3.701	14.142	3.555	13.808

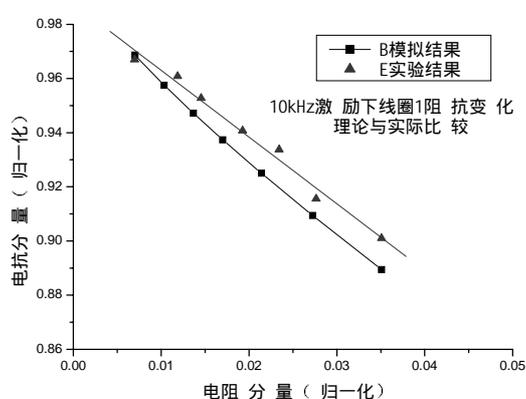


图 2-16 10kHz 激励下阻抗分析

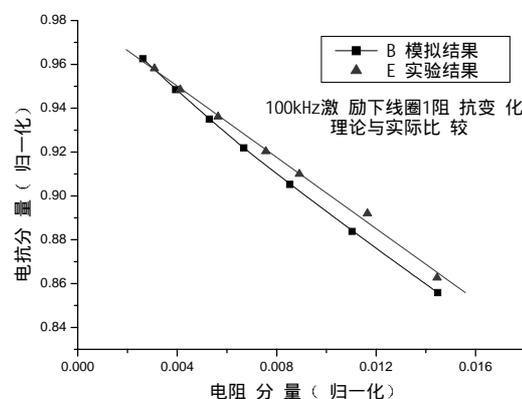


图 2-17 100kHz 激励下阻抗分析

通过对涡流检测线圈提离效应的 ANSYS 模拟可以得到以下结论: 对于非铁磁性金属板, 随着提离间隙的增大, 线圈阻抗增大, 反映到电阻和电抗上分别为: 电阻随着提离的增大而减小, 电抗随着提离的增大而增大。对于不同电导率的金属, 阻抗随提离变化的反映也有所不同, 在相同提离变化下, 随着金属板电导率的增加, 金属板上感生出的涡流变大, 涡流产生的反磁场也变大, 对阻抗的最终影响是使得阻抗的变化量增大。无论金属板电导率怎么变化, 提离的最终结果都是使阻抗值趋于线圈的空载值。

2.4.2 抑制提离效应的常用方法^[13、14、15]

从目前掌握的资料来看, 提离效应的抑制主要方法两大方法: 静态检测的提离效应和动态检测的提离效应。静态检测的提离效应的研究相对完善, 有谐振电路法、不平衡电桥法, 但是对动态提离效应的研究则正在发展中, 主要有探头机械跟踪法、测距跟踪法、旋转座标法等。本文主要介绍传统涡流仪使用的两种抑制提离的方法, 即谐振电路法与不平衡电桥法。

(1) 谐振电路法

图 2-18(a)表示由检测线圈 (其阻抗 $Z = R = j\omega L$) 和电容 C 串联组成的谐振电路。通过谐振电路的电流幅值为

$$I = \frac{U_i}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (2-9)$$

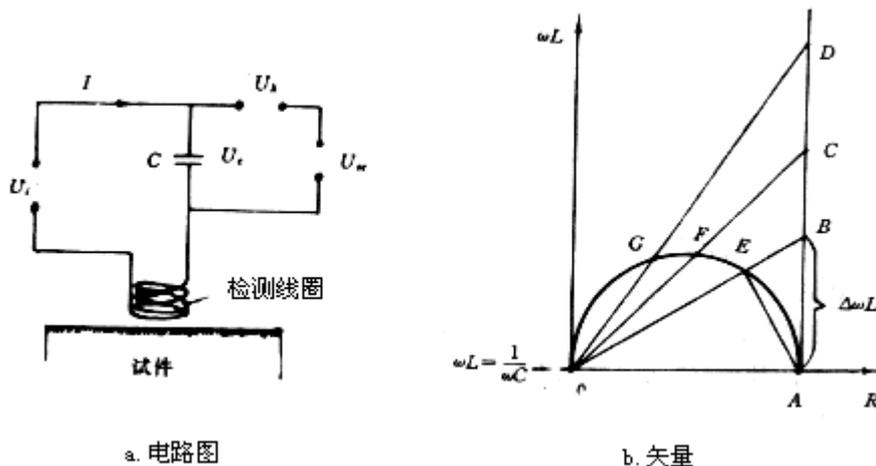


图 2-18 谐振电路法工作原理图

当 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时, 回路发生串联谐振, 其谐振电流为

$$I_{\max} = \frac{U_i}{R} \quad (2-10)$$

图 2-18 (b) 是谐振电路的阻抗矢量图。图中 OA 表示电阻 R ，并以 OA 为直径作半圆，坐标原点 O 是 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 的谐振点，如果由于检测线圈与试件表面之间提高变化引起电抗变化 $\Delta\omega L$ (在图中用 AB 表示 $\Delta\omega L$)，则回路失谐，其电流变化

$$I = \frac{U_i}{\sqrt{R^2 + (\Delta\omega L)^2}} \quad (2-11)$$

因为图中 $\triangle OBA$ 与 $\triangle OAE$ 相似，故有

$$\frac{OA}{OB} = \frac{OE}{OA}$$

即：
$$OB = \frac{OA^2}{OE} = \sqrt{R^2 + (\Delta\omega L)^2} \quad (2-12)$$

由式 (2-11)，(2-12) 可得

$$I = \frac{U_i}{OB} = \frac{U_i}{OA^2} \cdot OE = \frac{U_i}{R^2} OE \quad (2-13)$$

上式表明，回路中的电流 I 与 OE 成正比，就是说，当因提高变化引起回路电抗变化时，则回路中电流 I 的大小沿着以 OA 为直径的半圆变化。即电抗变化量 $\Delta\omega L = AB, AC, AD \dots$ 时，则电流正比于 OE 、 OF 、 $OG \dots$ 。

在图 2-19 中， AC 表示提高方向， AM 是裂缝效应方向， σ 方向是电导率效应方向。A 点表示检测线圈放在试件上的阻抗，为了抑制提高效应，过 A 点作一条直线 $O'A \perp AC$ ，该直线与纵轴交于 O' 点，以 O' 的 $\omega L'$ 值来调谐 (即使 $\omega L' = \frac{1}{\omega C}$)。当探头从试件上提高时，其阻抗沿着提高效应直线 ABC 变化，而回路电流的轨迹则沿着半径 $ADEGO'$ 移动。

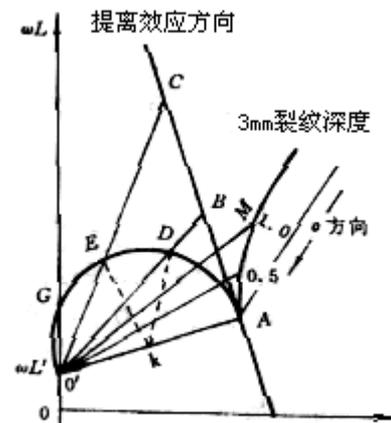


图 2-19 谐振电路补偿原理图

由图 2-19 可以看出，当提离较小时，阻抗变化很小，因此，输出电压的变化也很小，可以忽略，而在裂纹效应引起阻抗变化的方向 AM 上，阻抗变化较大，所以有较大的输出。为了抑制较大提离的影响，可在 2-18 (a) 中的谐振电路里电容器两端加补偿电压 U_k ，并使 U_k 的大小相当于图 2-19 中的 $O'K$ ，于是输出电压 U_{sc} 是以固定的振幅 (KA, KD, KE, \dots) 绕着 K 点旋转，因此，提离效应被完全抑制，而一旦线圈遇到试件的裂纹 (或者其他效应)，则涡流仪有明显的指示。

(2) 不平衡电桥法

图 2-20 (a) 是不平衡电桥法的电路图。在一个并联有电容 C 的探头式线圈上，提离变化引起电压变化近似于一圆弧，而缺陷引起的电压变化是另一个弧形，见图 2-20 (b)，若在桥路的一臂上取出电压 U_r ，置于提离变化圆弧的中心，这样输出电压 $U_{sk} = U - U_r$ 的幅值，在提离不大时，不随提离的变化而变化，但却受缺陷存在的影响，因此，提离效应引起的干扰信号被抑制，而输出的只是缺陷信号。

不平衡电压法在确定提离电压圆弧轨迹中心 U_r 时，一般是先固定某个 U_r 值，使 U 的轨迹变化，其方法一是改变线圈的并联电容 C ，二是改变工作频率 f 。

图 2-21 表示提离保持不变，而改变电容 C ，得到曲线 2；再改变提离及电容，可得到曲线 3。由图可以看出：如果电容取值 C_0 ，则提离虽有变化，但桥路输出并没有变化，这样就起到了抑制提离的作用。所以，在图 2-20 (a) 所示的桥路中，只要适当的选择电容值，就能在一定的范围内，使输出电压不随提离的变化而变化。

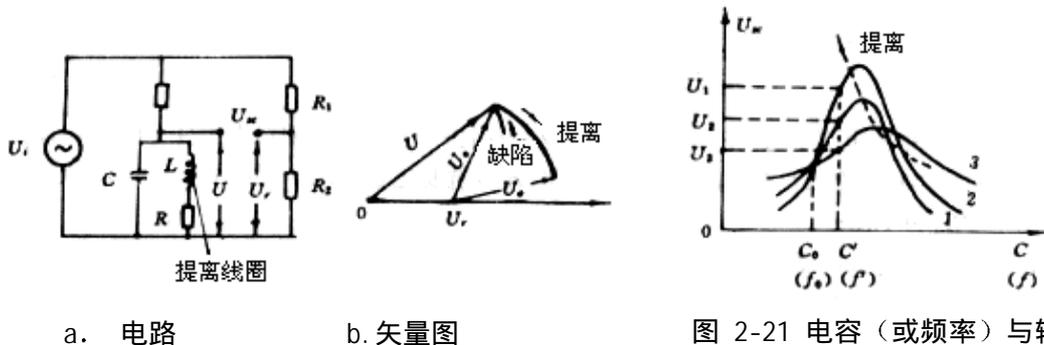


图 2-20 不平衡电桥法原理图

图 2-21 电容 (或频率) 与输出电压的关系曲线

固定电容值而改变工作频率 f ，同样能抑制提离效应，当改变工作频率时，

$R1$ 和 $R2$ 支路由于是纯电阻, 电压 U_r 不受频率变化的影响, 所以 U_r 仍然保持不变。但检测线圈的阻抗和电容 C 的容抗都是随频率变化而变化。因此, 当电容 C 保持不变, 改变频率也能使桥路的输出电压 U_{sc} 发生变化, 见 2-21 所示。在 $f = f_0$ 处, 提离的变化不会使桥路的输出电压 U_{sc} 变化, 这样, 提离就抑制了。

2.4.3 相位转换法抑制提离效应^[16、17]

由 2.4.2 节的有限元仿真模拟可以看出, 随着提离间隙的增大, 线圈阻抗随之发生变化, 但不管阻抗如何变化, 它总是近似直线并向空载线圈阻抗值趋近。对于不同电导率的金属, 阻抗随提离变化的反映虽有所不同, 但向空载线圈阻抗值趋近变化的趋势是相同的。因此依据这个规律提出新的抑制提离方法——相位转换法。其原理如图 2-22 所示。

相位转换法的原理图如图 2-22 所示。图 2-22 表示在阻抗平面上同一试件上进行测量时, A 点为没有提离的检测线圈归一化阻抗点, B 点为有提离的检测线圈归一化阻抗点。而且不论测量时存在多大的提离, 其测得的检测线圈的归一化阻抗点均在 AP 的近似直线上 (如 C 点)。

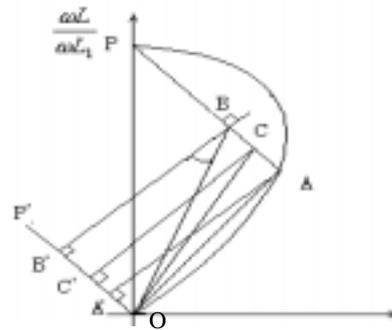


图 2-22 提离抑制原理图

依据相位分析法原理, 设从 O 作 AP 的平行线 OP , 分别从 A 、 B 、 C 点作 OP' 的垂直线, 可见, 虽然 $OA \neq OB \neq OC$, 但是 $AA' = BB' = CC'$ 。它说明, 由于提离效应的存在, 在测量时, 实际的检测线圈阻抗值 OA 发生了变化, 但通过适当的相位转换, 提取信号 AA' (BB' 、 CC'), 可用以反映 OA 信号的大小, 实现提离的抑制。

此外, 经过相位转换, 亦可以轻易地提取信号 AC 、 AB 。信号 AC 、 AB 完全反映了提离信息, 消除了反映各种试件材料本身的测试信号。这对于采用涡流方法测试膜层厚度, 无接触地测量各种形状地零件在工作时的位置、位移或间隙, 液位等都具有重要的参考价值。

因此, 涡流传感器检出电压的变化反映涡流传感器阻抗的变化。通过对涡流检出电压的测量 (包括幅值和相位的测量), 就可以获得涡流传感器阻抗的大小。那么, 涡流探伤仪系统的设计其核心内容就是设计涡流线圈检出信号的幅值和相位采样电路, 利用软件算法实现相位转换法的计算, 抑制提离信号, 从而判断试件是否有缺陷等有用的信息。

2.5 本章小结

本章研究了涡流检测的基本理论，包括涡流传感器阻抗计算理论，涡流阻抗平面分析法、检测频率的选择，影响检测的因素，提离效应的抑制等。为我们在涡流检测仪研制奠定了理论基础。其中阻抗分析原理是我们进行检测的基础，涡流无损检测系统就是建立在这种阻抗平面分析法的基础之上的。

第三章 硬件电路设计

3.1 系统硬件电路总体设计

涡流探伤仪是基于电磁感应原理（如图 3-1 所示），通过信号发生器产生交变电流供给检测线圈，线圈产生交变磁场并在工件中感生涡流，涡流受到工件性能的影响（如缺陷、电导率、磁导率、提离效应、厚度效应等）并反过来使线圈阻抗发生变化，然后通过检出电路线圈阻抗的变化，由于阻抗是一个向量，通过检波电路可以得到幅值和相位的信息，再利用“相位转换法”抑制提离效应，最后再通过阻抗变化的分析就能判断出材料是否有缺陷。

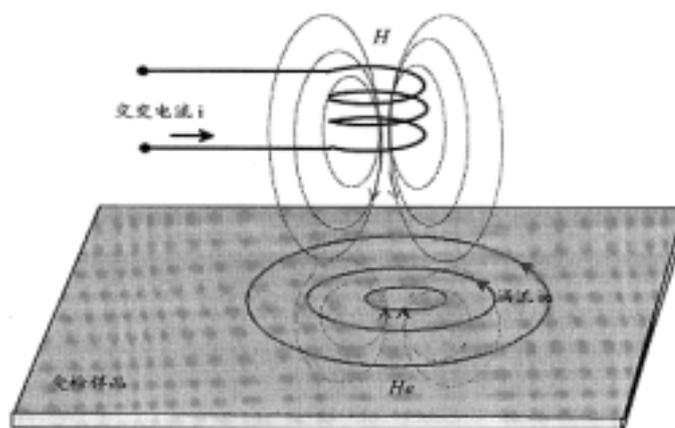


图 3-1 涡流原理图

本仪器采用相位转换法实现提离信号的抑制。相位转换法是基于复阻抗平面的一种分析方法。在复阻抗平面上采用相位转换法实现提离抑制的两个重要的参数是检测线圈空载和测量时的幅值和相位。所以，在检测时先测量涡流线圈空载时电桥检出的电压幅值和相位。然后将涡流线圈放置在试件上，测量涡流线圈检出电压的幅值和相位的测量信号。有了这两个参数就可以运用相位转换法，计算涡流测试信号在阻抗平面提离线的垂直线上的分量，从而判断被测量试件是否有缺陷或者裂纹。

在涡流检测理论的基础上，本章提出智能检测系统的总体构成，进行整个系

统的硬件电路设计。具体包括涡流检测测量电路、微处理器配置、人机接口与系统电源设计等。系统设计的总体框图如图 3-2 所示。

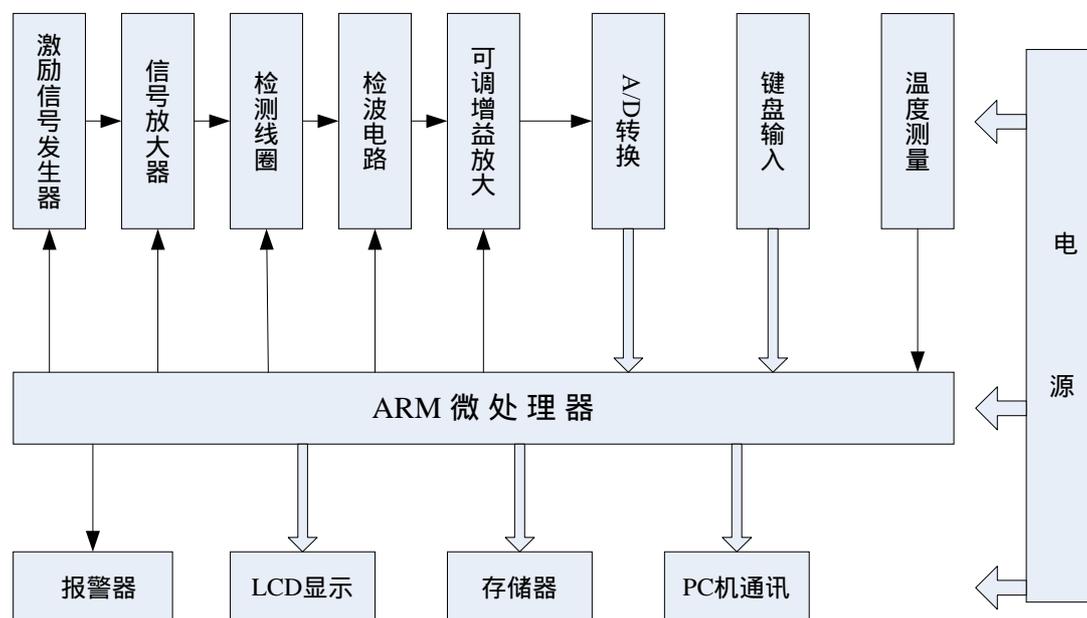


图 3-2 系统总体框图

在此，我们采用 AT91RM9200 处理器，它是系统进行控制、检测和数据处理的核单元。具体负责检测部分各处的控制、采集数据的处理和键盘、显示、报警及与 PC 通信等人机接口部分的控制管理。

另外，检测部分是设计整个系统的关键。如图 3-2 中所示，检测部分由信号发生、信号放大、驱动、检测探头、前置放大、相敏检波、增益调节和模数转换部分组成。信号发生部分为检测提供所需的正弦波激励信号，经放大电路放大和驱动后，加载到检测探头之上；检测探头拾取被测试件相关信息后，经过前置放大后，再通过相敏检波电路获取探头的阻抗信号的 2 个分量，分别进行增益调节后，经模数转换电路采集后送入处理器进行数据处理、分析和显示。检测部分的各单元都是由微处理控制实施的，因此为实现检测的自动化、智能化奠定了基础。

3.2 涡流检测仪的硬件电路

3.2.1 激励信号的产生与调理^[45]

激励信号采用目前集成度高的 DDS（直接数字频率合成器）结构，AD9834 是 ADI 公司生产的一款低功耗，可编程波形发生器，能够产生正弦波、三角波、

整个有源滤波器的传递函数（输入点 R29 到输出点 R37）为：

$$A_{BA}(S) = \frac{A_0 W_n^2}{s^2 + \frac{W_n}{Q} s + W_n^2} \quad (3-1)$$

其中 A_0 为有源滤波器通带增益； $W_n = 1/(R_{29} * C_{100})$ 为特征角频率，由此可以计算出滤波器截至频率约为 15MHz；而 Q 为等效品质因数，当其为 0.707 时幅频响应较平坦，当大于 0.707 时，将出现峰值，由 $Q = \frac{1}{3 - A_0}$ ，可知本电路选定 Q 值为 0.714 左右，幅频响应是可以接受的^[43]。

图 3-4 中电阻 R37 到 Pb 点为一反相放大电路，将激励信号进一步放大，放大增益为 $A_{CB} = -\frac{R_{36}}{R_{37}}$ ，其中 R_{40} 为放大电路的平衡电阻，减小运放的失调电压。构成有源滤波器和放大电路的运放要选用一定带宽积的运算放大器，在此选用 ADI 公司生产的 AD8056 双运放。

由于加载到探头上的激励信号不光要有一定的电压大小，还要有一定的驱动电流，而一般运放的电流驱动能力只有 20mA 左右，不能满足要求。在此设计了驱动电路如图 3-5 所示。

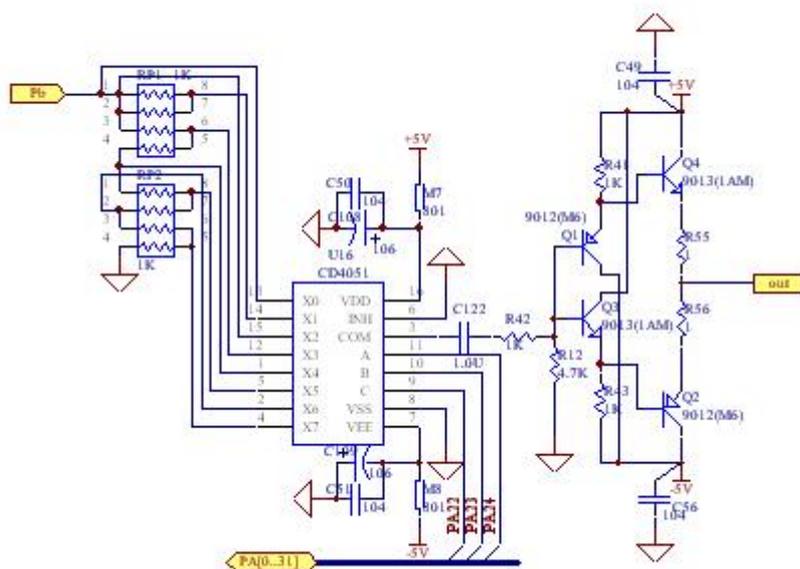


图 3-5 探头驱动电路

其中 R_{41} 和 R_{43} 为三极管 Q_1 和 Q_3 的导通提供偏置电压；当 V_D 正弦波正半波

时, Q_3 和 Q_2 导通; 当 V_D 为正弦波负半波时, Q_1 和 Q_4 导通; R_{55} 和 R_{56} 选取的越小, out 端可提供的驱动电流越大, 但要防止饱和输出。其中八选一模拟开关 CD4051 用来控制输出电流的大小, 共可产生八种不同大小驱动能力的电流。

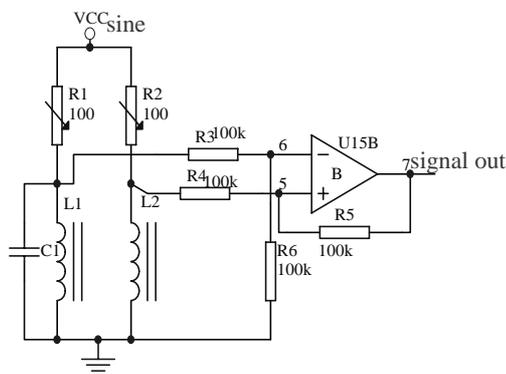
3.2.2 探头设计及信号拾取

涡流检测中的传感元件是检测线圈。它在整个检测系统中的作用包括两个方面: 一是在试件表面及近表面感生涡流, 建立一个交变磁场; 二是根据电磁感应原理获得被测试件的相关信息。因此, 线圈性能直接影响电导率测量的结果。

通常, 检测线圈的主要指标有: 灵敏度、几何尺寸、电阻抗、抗干扰能力、频率响应等, 为了获得一个高性能的检测线圈, 不仅要求选择最佳的性能参数, 还需综合考虑检测用途、测试条件和测试对象等多种因素。

涡流检测线圈常按线圈的使用方式分成: 绝对式、它比式和自比式。在本课题中我们依据上一章对涡流传感器阻抗计算的分析并结合实际研究, 分别定做了用于涡流检测的绝对式涡流传感器与自比式差动传感器。

检测线圈输出信号的拾取一般采用差动电路或电桥电路的型式实现。差动电路的灵敏度主要取决检测线圈的性能好坏, 而且, 对于用差动方式工作的检测线圈, 一般都要求有比较高的性能指标和工艺要求。因此, 在本系统中, 我们使用



电桥电路进行信号拾取。
图 3-6 信号拾取电路

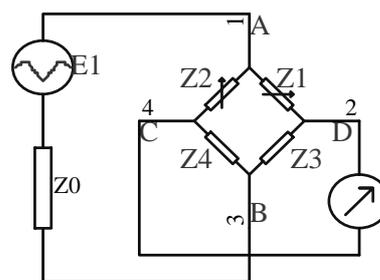


图 3-7 电桥等效示意图

拾取电路示意图如图 3-6 所示。电桥由两电位计、绝对式探头和 LC 构成的补偿器组成; 当探头 L2 放置到不同材质的试块之上, L2 的电感量发生变化, 打破电桥的平衡引起电桥输出, 该输出再经差动放大后, 取出涡流信号。

下面, 我们通过四臂电桥来分析电桥检出电路灵敏度, 如图 3-7 所示, 设电桥的四臂阻抗分别为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 , 其中, Z_3 为检测线圈的等效阻抗, 电源内阻为 Z_0 , 电动势为 E_1 。在理想状态下, 电源内阻 Z_0 趋近为 0, 电源加在 AB

两端的电压为:

$$U_{AB} = E_1$$

CD 间输出电压为

$$U_{CD} = E_1 \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_4} - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} \right) \quad (3-2)$$

若电桥平衡, 则 $U_{CD} = 0$

这时, 如果放置在被测金属试件之上, 将改变检测线圈的阻抗, 即使 Z_3 变成了 $Z_3 + \Delta Z_3$, 那么输出电压变为:

$$U_{CD}' = E_1 \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_4} - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3 + \Delta Z_3} \right) \quad (3-3)$$

输出电压的变化为:

$$\Delta U_{CD} = U_{CD}' - U_{CD} = E_1 \frac{Z_1 \Delta Z_3}{(Z_1 + Z_3 + \Delta Z_3)(Z_1 + Z_3)} \quad (3-4)$$

考虑到 $\Delta Z_3 \ll Z_3$, 上式可近似为:

$$\Delta U_{CD} \approx E_1 \frac{Z_1 \Delta Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2} = E_1 \frac{Z_1 / Z_3 * \Delta Z_3 / Z_3}{(1 + Z_1 / Z_3)^2} \quad (3-5)$$

设 $\delta Z_3 = \frac{\Delta Z_3}{Z_3}$ 为阻抗线圈变化率

$A = \frac{Z_1}{Z_3}$ 为桥臂比

$K = \frac{A}{(1 + A)^2}$ 为桥臂系数

可以得到

$$\Delta U_{CD} = \delta Z_3 * K * E_1 \quad (3-6)$$

公式 (3-6) 表明电桥电路的灵敏度与线圈阻抗变化率 δZ_3 , 桥臂系数 K 及激励电源电压 E_1 有关。理论上, 随着激励电源电压升高, 桥路的灵敏度会提高, 但实际上采用的电源电压要适中, 因为, 激励电源电压过高, 不仅调整困难而且容易使线圈发热产生许多干扰杂波, 甚至会使线圈内部磁芯磁饱和, 反而降低线圈的灵敏度^[2]。

线圈阻抗变化率的大小对桥路的灵敏度也有很大影响, 为了在检测中增大检测线圈阻抗的相对变化, 就要求检测线圈具有较高的灵敏度及抗干扰的能力。

最后来分析桥臂系数对灵敏度的影响，令

$$A = \frac{Z_1}{Z_3} = \frac{Z_1 e^{j\psi}}{Z_3 e^{j\psi}} = a e^{j\psi} = m + jn \quad (3-7)$$

$$\text{则 } K = \frac{A}{(1+A)^2} = K e^{j\psi} = \frac{m + jn}{1 + m + jn}$$

$$|K| = \left| \frac{m + jn}{(1 + m + jn)^2} \right| = \frac{\alpha}{(1+m)^2 + n^2} = \frac{a}{1 + 2a \cos \Psi + a^2} \quad (3-8)$$

式中 m 为 A 的实部

n 为 A 的虚部

$\Psi = \Psi_1 - \Psi_2$ 为 A 的相位角

由式 (3-8) 可以看出，要提高桥路的灵敏度，可增大桥臂系数 K 的幅值 $|K|$ ，而 $|K|$ 取决于 a 和 Ψ ，可见 $a=1$ 和 $\Psi=180^\circ$ 时， $|K|$ 有最大值。

因此，从理论上讲，若辅助桥臂采用与检测线圈阻抗发生电压谐振的电容元件， K 可获得最大值，桥路的灵敏度最高。但是，由于 Z_3 是包含试件反作用在内的线圈等效阻抗，调整时，在某一状态下谐振，而另一状态可能会失谐，以致桥路的灵敏度发生较大的变化。所以，在系统中，为了在一定范围获取较高的稳定度，没有选择谐振，而让桥路处于稍失谐的工作状态。这样在保证灵敏度的同时，提高了系统的稳定性。

3.2.3 相敏检波电路^[18]

从信号参量估计中的最大似然估计理论出发，要实现对噪声中的涡流信号的幅值和相位的测量，可用两个互相关器来实现。这两个互相关器的参考信号分别为两个正交的与涡流信号同频率的信号。

基于该理论分析，我们设计了正交分解器，它可同时输出被测信号的实部和虚部分量。其基本框图如图 3-8 所示。

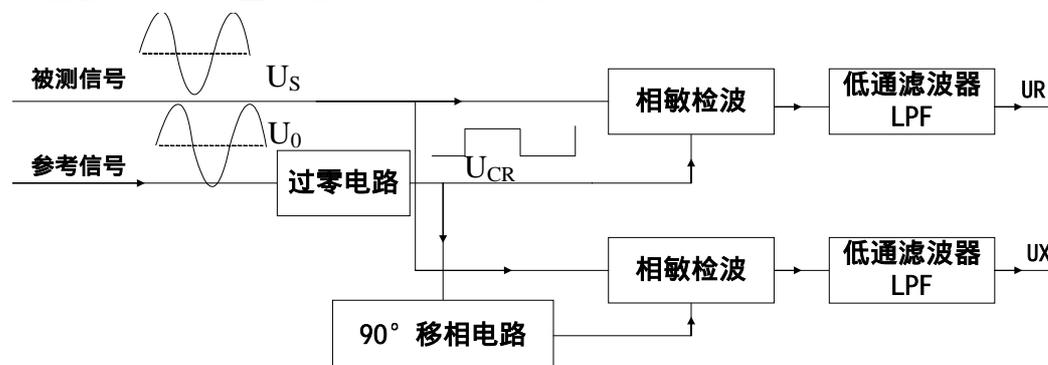


图 3-8 正交分解器框图

正交分解器的核心是互相关器，由相敏检波和低通滤波器构成，若

$$\text{假设激励信号: } U_0 = B \sin(\omega t) \quad (3-9)$$

$$\text{涡流信号: } U_s = A \sin(\omega t - \theta) \quad (3-10)$$

由(3-9)和(3-10)可以看出涡流信号相对于激励信号滞后 θ 大小的相角。图3-8中激励信号 U_0 经过零检测电路变换成幅值为1，占空比为50%的方波信号 U_{CR} ，该信号为同向相敏检波器控制信号； U_{CR} 再经过 90° 的相移，为垂直相敏检波器控制信号。其中相敏检波电路是一个乘法器，完成涡流信号与参考信号 U_{CR} 的相乘。后续的低通滤波器(LPF)相当于一个积分过程，因此其输出可看作是涡流信号 U_s 在参考信号半个周期内的积分，即：

$$U_R = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_s dt = \frac{A}{\pi} \cos\theta G_R \quad (3-11)$$

$$U_X = \frac{1}{2} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{T}{2} + \frac{\pi}{2}} U_s dt = \frac{A}{\pi} \sin\theta G_X \quad (3-12)$$

式中 G_R 和 G_X 一 两个通道的等效增益

T — 信号周期

当 G_R 和 G_X 相等时，由 U_R 和 U_X 可以计算出涡流信号的相位角和峰值分别为：

$$\theta = \arctg \frac{U_X}{U_R} \quad (3-13)$$

$$A = \frac{\pi}{G_R} \sqrt{U_R^2 + U_X^2} \quad (3-14)$$

正交检波器输出的 U_R 和 U_X 分量，经过A/D转换器同步采集后，再送处理器处理，依公式(3-13)、(3-14)求解涡流信号的相角和峰值。

下面我们来看一下正交检波器具体实现电路。

正交检波电路可由1对2通道模拟开关CD4053、低通滤波器和减法器组成，具体电路如图3-9所示。

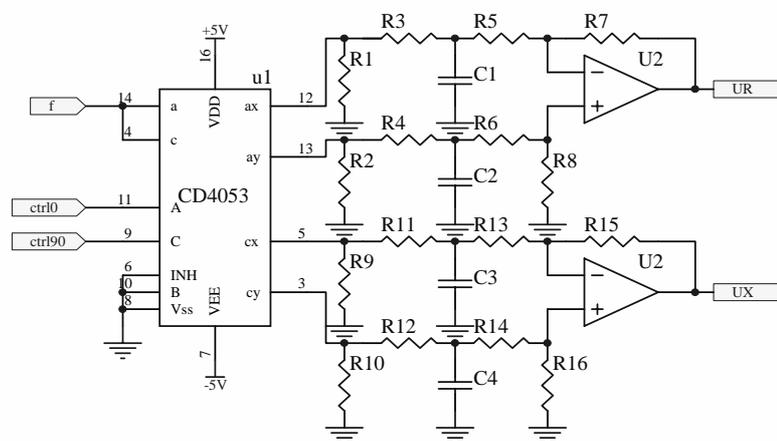


图 3-9 正交检波电路的实现

3.2.4 同步采集电路

为了获得涡流信号相角和峰值的准确性，在数据采集时必须做到同向分量和正交分量的同步采集和同步转换^[46]。采用多通道的同一 ADC 转换器是做不到，本课题中使用了 ADI 公司生产的 AD7863。它是一种双 ADC 14 位精度的转换器，每一个 ADC 具有 175KSPS 的采样能力且每一 ADC 提供了 2 路模拟输入，在实际应用中能做到真正的同步采集、同步转换而异步输出转换数据。AD7863 的接口电路如图 3-10 所示，其中 VA1、VB1 同属于一 ADC，VA2、VB2 同属于另一 ADC，A0 来控制是采集 VA1 和 VA2 模拟通道，还是 VB1 和 VB2 模拟通道，在课题中将 A0 接地，选择 VA1 和 VA2 作为同向分量 UR 和正交分量 UX 输入通道；BUSY 是转换未结束信号指示可接 ARM9 处理器的中断引脚；CONVST 为转换启动信号；CS 和 RD 分别为芯片的片选和读信号；DB0 到 DB13 为转换器输出的 14 位转换数据，RD 有效后先输出 VA1 数字量，再启动一次 RD 后输出 VA2 数字量，具体与 ARM9 处理器的接口示意图如图 3-11。AD7863 的同步采集模拟信号必须以一个固定的节拍进

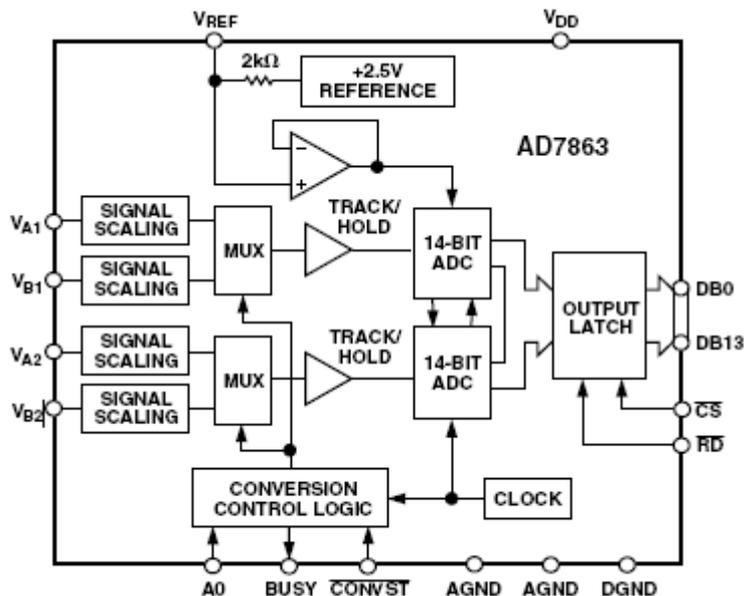


图 3-10 AD7863 内部结构图

行，这是因为经过正交检波后同向分量和正交分量是含有杂波的直流分量，在波形上表现为与被检信号同周期的一种缓变波动信号，若直接采集必将导致转换后的数据变换较大。课题中采用 74LS74 作为 ADC 启动转换的触发信号^[44]，具体电路如图 3-11 所示。其中 ctIr0 是激励信号过零变换后的方波信号，为触发器提供时钟信号接到 74LS74 的 CP 端；ARM9 处理器的 GPIO（通用 I/O 口）接至 74LS74 的置位端 SET，再经非门反向后接到数据输入端 D，Q 接到 D7863 的转换启动端

CONVST 上。当 ARM9 处理器的 GPIO 为高电平时，74LS74 处于正常工作状态，当 ctrl10 的上升沿到来时，CONVST 变成低电平，启动 AD7863 转换；

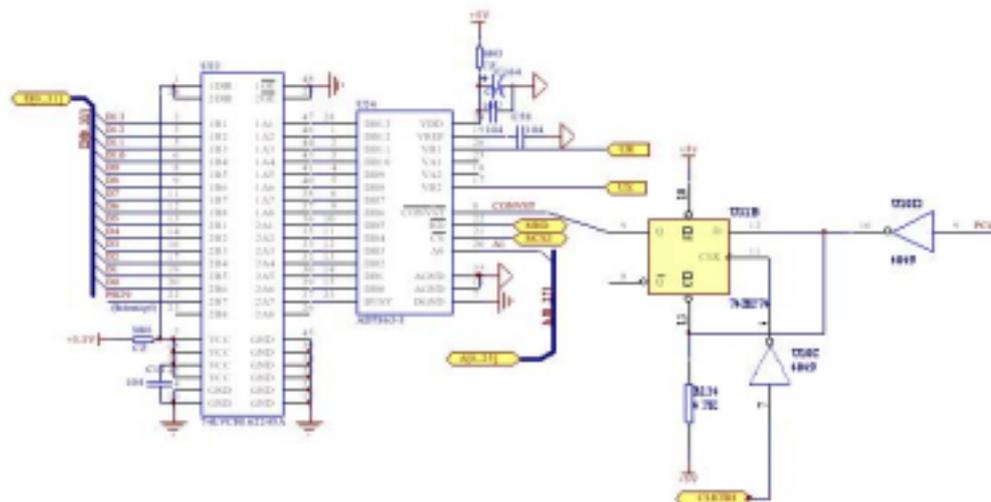


图 3-11 同步采集电路

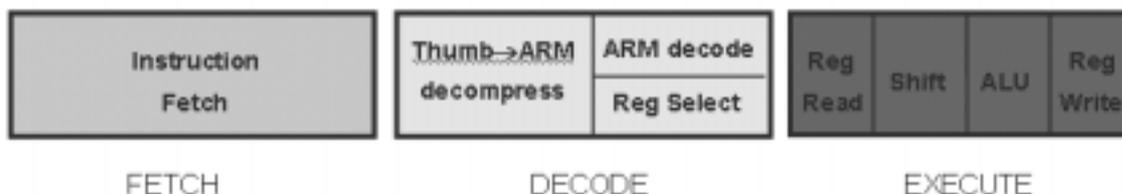
3.2.5 ARM 处理器的选择与配置

ARM(Advanced RISC Machines)，既可以认为是一个公司的名字，也可以认为是对一类微处理器的通称，还可以认为是一种技术的名字。1991 年 ARM 公司成立于英国剑桥，主要出售芯片设计技术的授权。在 32 位 RISC(Reduced Instruction Set Computer)CPU 开发领域不断取得突破，其结构已经从 V3 发展到 V6。由于 ARM 公司自成立以来，一直以 IP(Intelligence Property)提供者的身份向各大半导体制造商出售知识产权，而自己并不介入芯片的生产销售，加上其设计的芯核具有功耗低、成本低等显著优点，因此获得众多的半导体厂家和整机厂商的大力支持，在 32 位嵌入式应用领域获得了巨大的成功，目前已经占有 75% 以上的 32 位 RISC 嵌入式产品市场。在低功耗、低成本的嵌入式应用领域确立了市场领导地位。

目前比较流行的 ARM 核有 ARM7TDMI, StrongARM, ARM720T, ARM920TDMI, ARM922T, ARM940T, ARM946T, ARM966T, ARM10TDM1 等。自 V5 以后，ARM 公司提供 Piccolo DSP 的芯核给芯片设计者，用于设计 ARM+DSP 的 SOC(System On Chip)结构的芯片。此外，ARM 芯片还获得了许多实时操作系统(Real Time Operating System)供应商的支持，比较知名的有：Linux, WinCE, pSOS, VxWorks, Muclous, EPOC, uCOS, BeOS 等^[19]。

对嵌入式系统设计者来说，硬件通常是第一考虑的因素。针对处理器来说，流水线则是硬件差别的最明显标志，不同的流水线设计会产生一系列硬件差异。让我们来比较一下 ARM7 和 ARM9E 的流水线，如图 3-12。

ARM7的3级流水线



ARM9E的5级流水线

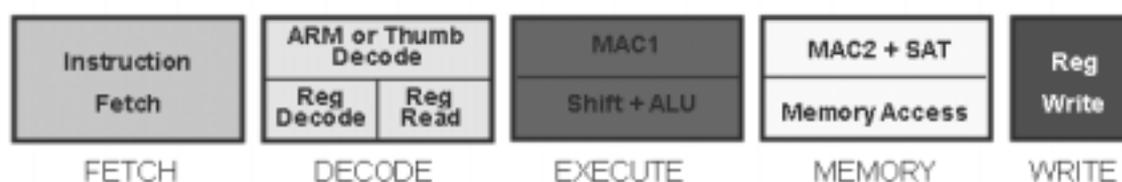


图 3-12 ARM7 的三级流水线与 ARM9E 的五级流水线

可以看到 ARM9E 从 ARM7 的 3 级流水线增加到了 5 级，ARM9E 的流水线中容纳了更多的逻辑操作，但是每一级的逻辑操作却变得更为简单。比如原来 ARM7 的第三级流水，需要先内部读取寄存器、然后进行相关的逻辑和算术运算，接着处理结果回写，完成的动作非常复杂；而在 ARM9E 的 5 级流水中，寄存器读取、逻辑运算、结果回写分散在不同的流水当中，使得每一级流水处理的动作非常简洁。这就使得处理器的主频可以大幅度地提高。因为每一级流水都对应 CPU 的一个时钟周期，如果一级流水中的逻辑过于复杂，使得执行时间居高不下，必然导致所需的时钟周期变长，造成 CPU 的主频不能提升。所以流水线的拉长，有利于 CPU 主频的提高。在常用的芯片生产工艺下，ARM7 一般运行在 100MHz 左右，而 ARM9E 则至少在 200MHz 以上。

AT91RM9200 是 ATMEL 公司开发的一款基于 ARM920T 内核的微处理器^[31]。它有丰富的系统与应用外设及标准的接口，从而为低功耗、低成本、高性能的计算机宽范围应用提供一个单片解决方案。它包括一个高速片上 SRAM 工作区及一个低等待时间的外部总线接口 (EBI)，以完成应用所要求的片外存储器和内部存储器映射外设备配置的无缝连接。EBI 有同步 DRAM (SDRAM)、Burst Flash 及静态存储器的控制器，并设计了专用电路以方便与 Smart Media、Compact Flash 及 NAND Flash 的连接。高级中断控制器 (AIC) 通过多向量，中断源优先级划分及缩短中断处理传输时间来提高 ARM920T 处理器的中断处理性能。外设数据控制器 (PDC) 向所有的串行外设提供 DMA 通道，使其与片内或片外存储器传输数据时不用经过处理

器，这就减少了传输连续数据流时处理器的开销。包含的双指针的PDC 控制器极大的简化了AT91RM9200的缓冲器链接。并行I/O (PIO) 控制器与作为通用数据的I/O 复用外设输入/ 输出口线，以最大程度上适应器件的配置。每条口线上包含有一个输入变化中断、开漏能力及可编程上拉电阻。电源管理控制器 (PMC) 通过软件控制有选择的使能/ 禁用处理器及各种外设来使系统的功耗保持最低。它用一个增强的时钟产生器来提供包括慢时钟(32 kHz) 在内的选定时钟信号，以随时优化功耗与性能。AT91RM9200集成了许多标准接口，包括USB 2.0 全速主机和设备端口及与多数外设和在网络层广泛使用的10/100 Base-T 以太网媒体访问控制器(MAC)。此外，它还提供一系列符合工业标准的外设，可在音频、电信、Flash 卡红外线及智能卡中使用。为完善性能，AT91RM9200集成了包括JTAG-ICE、专门UART 调试通道(DBGU)及嵌入式的实时追踪的一系列的调试功能。这些功能使得开发、调试所有的应用特别是受实时性限制的应用成为可能。

AT91RM9200主要有如下片上外设：

1. 10/100 Base-T 型以太网卡接口
 - 独立的媒体接口(MII)或简化的独立媒体接口(RMII)
 - 对于接收与发送有集成的28 字节FIFO及专用的DMA 通道
2. USB 2.0 全速(12 M比特/秒) 主机双端口
 - 双片上收发器(208引脚PQFP封装中仅为一个)
 - 集成的FIFO及专用的DMA 通道
3. USB 2.0 全速(12M比特/秒) 设备端口
 - 片上收发器， 2-K字节可配置的集成FIFO
4. 多媒体卡接口(MCI)
 - 自动协议控制及快速自动数据传输
 - 与MMC及SD存储器卡兼容，支持两个SD存储器
5. 3个同步串行控制器(SSC)
 - 每个接收器与发送器有独立的时钟及帧同步信号
 - 支持I²S模拟接口，时分复用
 - 32比特的高速数据流传输能力
6. 4个通用同步/异步接收/发送器(USART)
 - 支持ISO7816 T0/T1 智能卡
 - 硬软件握手
 - 支持RS485 及高达115Kbps的IrDA 总线
 - USART1为全调制解调控制线
7. 主机/从机串行外设接口(SPI)

- 8~16 位可编程数据长度，可连接4个外设
- 8. 两个 3 通道16 位定时/计数器(TC)
 - 3个外部时钟输入，每条通道有2个多功能I/O引脚
 - 双PWM 产生器，捕获/波形模式，上加/下减计数能力

AT91RM9200 片内只有 16K 字节的 SRAM 和 128K 字节的 ROM，不足以支持大容量程序运行和复杂的数学运算。但其片上提供了静态存储控制器 SMC 和动态存储控制器 SDRAMC，能分别方便扩展 8—16BIT 的 SRAM 或 FLASH 和 16—32BIT 的 SDRAM，提高芯片的存储能力^[32]。本课题拓展了 64M 字节的 SDRAM 和 16M 字节的 FLASH，以满足运行操作系统的需要。SDRAM 在此选用现代公司生产的 4 Bank×4M×16BIT 的 HY57V561620B，其最高运行频率可达 166MHZ。FLASH 在此选用 SST 公司生产的 4M×16 位单片多用途 FLASH SST39VF6401，其最高读取速度可达到 70ns，字编程时间为 7us，可重复擦除达 10 万次左右，并且具有极低的功耗，正常工作状态下为 9mA，保持状态下才为 3uA^[8]。图 3-13 为 ARM 与 FLASH 和 SDRAM 的连接电路图。

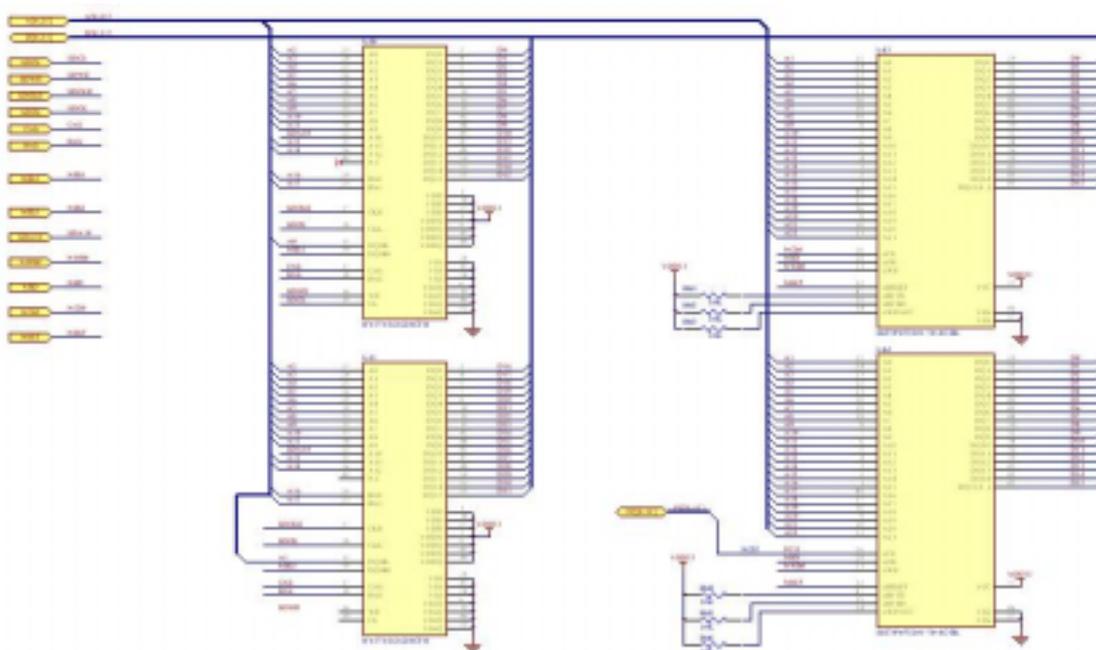


图 3-13 ARM 与 FLASH 和 SDRAM 的连接电路图

3.2.6 液晶屏显示电路的配置

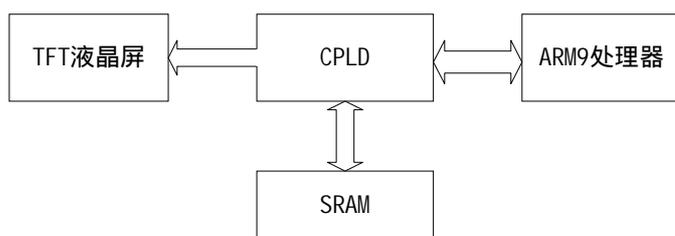


图 3-14 数据流控制框架图

本课题采用液晶屏为 SHARP LS037V7DD02 TFT 彩色液晶, 分辨率为 240*320 液晶屏显示部分主要包括可编程器件 CPLD^[20], 显示缓冲 SRAM 和 TFT 液晶屏,

从数据流流动控制框架图 3-14 可以看出 CPLD 是整个显示部分的控制核心, 它负责与 ARM9 处理器和 SRAM 交换数据, 并将每一点数据译成 RGB 送到液晶屏。具体工作原理为: 当 ARM9 处理器写数据时, CPLD 接受写数据并将转存到 SRAM 之中; 当 ARM9 处理器读数据时, CPLD 以当前地址读取 SRAM 相应地址空间所存值, 并送到 ARM9 处理器的外部总线上; 在此期间 CPLD 不断地依次把 SRAM 中的数据送到液晶屏之上, 完成所要显示的内容。图 3-15 为液晶屏显示电路图。

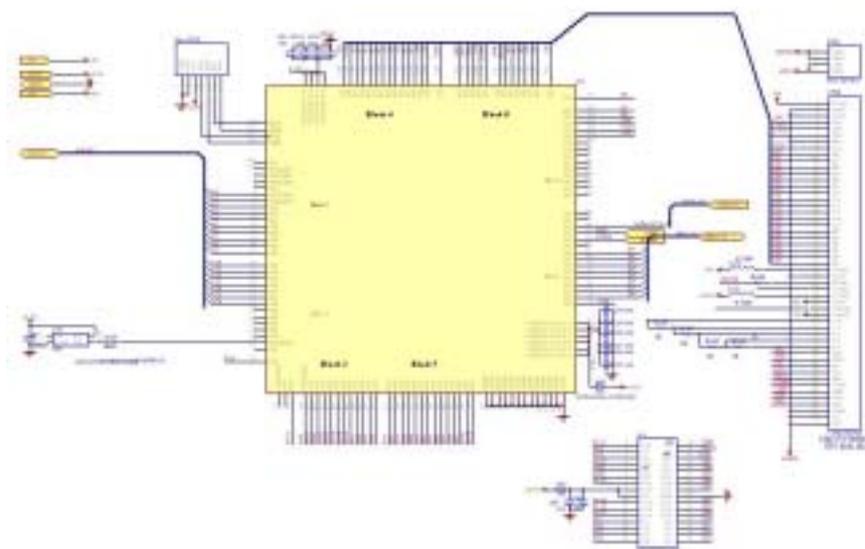


图 3-15 LCD 显示电路图

3.2.7 系统的电源模块设计

电源模块为系统提供电能管理, 其设计的好坏关系到电池的利用效率和整个系统的稳定性^[47]。设计该模块必须知道整个系统的功耗和各个不同供电电压所需电流的大小。本课题设计系统是混合电压系统, 需要+3.3V、±5V 和+1.2V 等电源电压。整个模块设计的示意图如图 3-16 所示, 包括充电模块、锂电池组、切换开关、系统上电开关、DC/DC 变换、LDO 和低电压检测单元。其中, 充电模块为 LI+ 电池组进行充电管理。切换开关为系统供电选择电源, 一般

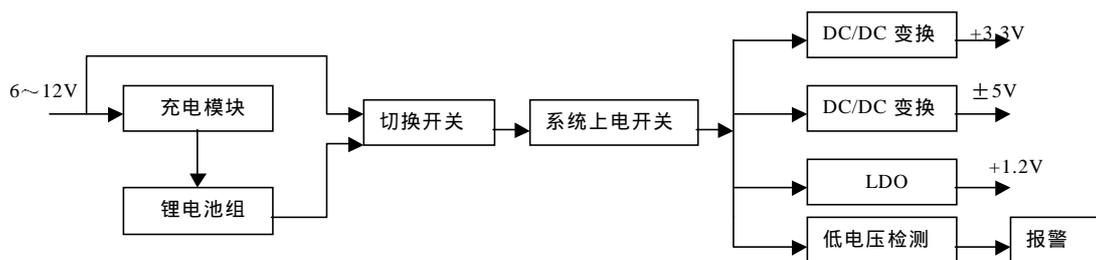


图 3-16 系统电源模块设计框图

情况下，Li+电池组为系统供电，当外电源接入系统，一方面为电池组充电，另一方面为系统供电。系统上电开关为整个系统工作与否而设计，采用软开关方式，设计时要注意防止元件的漏电，以免系统虽未上电，电池消耗其电能。二块 DC/DC 变换模块和 LDO 把锂电池组提供的电压或外电源的电压变换成系统需要电压大小，设计时需注意各 DC/DC 变换模块的带载能力、工作频率和正负电源负载平衡等问题。低电压检测单元检测电池电量消耗程度，当电池电量消耗到一定程度，启动报警单元。

3.3 本章小结

本章主要介绍了所研制的便携式涡流检测仪硬件电路构成。主要阐述了涡流激励信号的产生、滤波放大、驱动，涡流信号的拾取，相敏检波和同步数据采集；并介绍了基于 ARM920T 内核的处理器 AT91RM9200，分析了其如何拓展 SDRAM 和 FLASH；接着对 TFT 液晶显示模块作了说明，最后简单地介绍了系统的电源模块设计。

第四章 嵌入式操作系统的选择与配置

上一章我们介绍了便携式涡流导电仪的硬件电路,在此基础之上,本章将介绍涡流检测仪使用的嵌入式操作系统的选择与配置。

4.1 嵌入式系统概述^[21、22、23]

嵌入式系统(Embedded System)无疑是当今最热门的话题之一。国内对嵌入式系统的定义大多是这样的:嵌入式系统是以应用为中心,以计算机技术为基础,并且软硬件可裁减,适用于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专业计算机系统。电子电气工程师协会 IEEE(Institute for Electrical and Electronic Engine)对嵌入式系统的定义似乎更权威一些:嵌入式系统是用来控制或者监视机器、装置、工厂等大规模系统的设备。嵌入式系统在我们的日常生活中无处不在,从个人使用的移动电话、MP3,到家庭使用的洗衣机、微波炉,再到远程会议系统、车载 GPS 系统等等,都可以称为嵌入式系统产品。因此,嵌入式系统本身是一个相对模糊的定义。我们可以这样理解,凡是与产品结合在一起的具有嵌入式特点的控制系統都可以叫做嵌入式系统。

4.1.1 嵌入式系统分类^[24、25、26、27]

嵌入式系统可以大致分为如下类型。这种分类是依据系统是否必须作为独立单元工作或必须具有网络功能,是否必须执行实时操作等标准来划分的。

(1) 单机嵌入式系统

单机嵌入式系统以单机方式工作,获取输入并产生输出。输入可以是来自传感器的电信号,或者是来自人的命令,比如按下按钮。输出可以是驱动另一个系统的电信号,或者是为用户显示信息的 LED 或者 LCD 显示。在制造厂和汽车厂里很多用于过程控制的嵌入式系统可以被划入此类。在过程控制系统中,输入来自传感器,传感器将温度等物理信号转换为电信号,电信号成为能够控制阀门等设备的输出。在一些单机系统中,执行某项特定任务的时间限制并不十分严格,早几毫秒和晚几毫秒没有太大的关系,换句话说,响应时间不是至关重要的。

(2) 实时嵌入式系统

有些嵌入式系统被要求在指定的时间内完成特定的任务。这样的系统被称为

实时嵌入式系统。例如，例如当潮度超过特定阈值的时候，必须在 30 毫秒内打开阀门的系统。如果该任务未能在 30 毫秒内完成则可能产生严重的后果。这种必须严格符合实时约束条件的系统被称作“硬实时嵌入式系统”。当必须执行对时间要求很严格的任务时，在过程控制中也大量使用“硬实时嵌入式系统”。还有很多系统有实时要求，但是对实时的要求不强，例如语音通信系统，语音包的延迟只会造成短暂的静默，不会有什么严重的后果，类似的这种系统被成为“软实时嵌入式系统”。

(3) 网络设备

有些嵌入式系统与一个网络相连接，该网络通常是基于 TCP/IP 协议族的，比如 Internet 或者一个公司的企业内部互联网。这些系统能够监控某些参数（比如温度和压力）并将数据通过网络传送到中央系统实现在线监控。一个典型的例子就是对制造工厂的设备进行监控的系统。该系统通过 TCP/IP 网络将数据传送到中央管理系统，中央管理系统可以运行 Web 浏览器的 PC 机。另一个例子是具备网络功能的 Web 照相机，它能够在 Internet 上传输其视频输出。这些系统又被称为“Internet 信息设备”。

(4) 移动设备

随着能够支持极高速率的无线网络的出现，移动设备除语音服务外还能支持高速数据服务。这些设备需要运行功能强大的移动操作系统从网站下载信息。现场人员可以使用像手提电脑和掌上电脑这样的设备完成数据采集，所输入的数据保留在本地存储器中，随后上传到公司的数据库中。这些设备都要求有功能强大的处理器和操作系统以及较低的功耗。

4.1.2 嵌入式系统的组成

嵌入式系统是专用计算机应用系统，它具有一般计算机组成的共性，也是由硬件和软件组成的。嵌入式系统的硬件是嵌入式系统软件环境运行的基础，它提供嵌入式系统软件运行的物理平台和通信接口；嵌入式操作系统和嵌入式应用软件则是整个系统的控制核心，控制整个系统的运行，提供人机交互的信息等。虽然嵌入式系统一般没有系统软件和应用软件的明显区分，但是一般都把嵌入式系统的软件分为嵌入式操作系统和嵌入式应用软件两大部分。

(1) 嵌入式系统硬件

嵌入式系统的硬件组成部分是以嵌入式处理器为中心，由存储器、I/O 设备、通信模块以及电源等必要的辅助接口组成。嵌入式系统是量身定做的专用计算机应用系统，它不同于 PC 机的组成，在实际应用中的嵌入式系统硬件配置非常精

简,除了微控制器和基本的外围电路以外,其余的电路都可根据需求和成本进行裁减、定制。嵌入式系统硬件核心是嵌入式微处理器,有时为了提高系统的信息处理能力,常常外接 DSP(或者选用内部集成了 DSP 模块的微处理器),以完成高性能信号处理。随着计算机技术、微电子技术、应用技术的不断发展及纳米芯片加工工艺技术的发展,以微处理器为核心的集成多种功能的 SoC(System on Chip)系统芯片已经成为嵌入式系统的核心。这些 SoC 集成了大量的外围 USB、UART、以太网、AD/DA 等功能模块,能很好的满足各种系统的需要。以 SoC 为核心,用最少的外围部件和连接部件构成一个应用系统,满足系统的功能需求是嵌入式系统发展的一个方向。

(2) 嵌入式系统软件

在设计一个简单的应用程序时,可以不使用操作系统,但是在设计比较复杂的程序时,就需要一个操作系统来管理和控制内存、多任务、周边资源等。依据系统所提供的程序界面来编写应用程序,可以大大减少应用程序员的负担。对于使用操作系统的嵌入式系统来说,嵌入式系统软件结构一般包含 4 个层面:设备驱动层、实时操作系统、应用程序接口 API 层、实际应用程序层。对于功能简单,仅仅包括应用程序的嵌入式系统,一般不使用操作系统,仅有应用程序和设备驱动程序。驱动程序是嵌入式系统中不可或缺的重要部分,使用任何外部设备都需要有相应的驱动程序的支持,它为上层软件提供了设备的操作接口。上层软件不用考虑设备的具体内部操作,只需要调用驱动层程序提供的接口即可。驱动程序不仅要实现设备的基本功能函数,如初始化、中断响应、发送、接收等,使设备的基本功能能够实现,而且因为设备在使用过程中还会出现各种各样的差错,所以好的驱动程序还有完备的错误处理函数。驱动层程序一般包括硬件抽象层 HAL(Hardware Abstract Layer)、板级支持包 BSP(Board Support Package)和设备驱动程序。硬件抽象层 HAL 是位于操作系统内核与硬件电路之间的接口层,其目的在于将硬件抽象化。也就是说,可以通过程序来控制所有硬件电路如 CPU、I/O、Memory 等的操作。从软硬件测试的角度来看,软硬件的测试工作都可分别基于硬件抽象层来完成,使得软硬件测试工作的并行成为可能。板级支持包 BSP 是介于主板硬件和操作系统中的驱动层程序之间的一层,一般认为它属于操作系统的一部分,主要是实现对操作系统的支持,为上层的驱动程序提供访问硬件设备寄存器的函数包,使之能够更好地运行于硬件主板。BSP 是相对于操作系统而言的,不同的操作系统对应于不同定义形式的 BSP。系统中安装设备后,只有在安装响应的设备驱动程序之后才能使用,驱动程序为上层软件提供设备的操作接口。上层软件只需要调用驱动程序提供的接口,而不用理会设备的具体内部操作。驱动程序的好坏直接影响着系统的性能。如果嵌入式系统的功能比较复杂,需要

网络功能、存储器管理、进程/线程管理等，则通过嵌入式操作系统的帮助可以加快嵌入式系统软件的开发进度和可靠简单地嵌入操作系统就是支持嵌入式系统工作的操作系统。它在本质上和通用操作系统没有太大的区别，它一般用于比较复杂的嵌入式系统中。对于使用操作系统的嵌入式系统而言，操作系统一般以内核映像的形式下载到目标系统中。以 Linux 为例，在系统开发完成之后，将整个操作系统部分做成内核映像文件，与文件系统一起传送到目标系统中；然后通过 BootLoader 指定地址运行 Linux 内核，启动已经下载好的 Linux 系统；再通过操作系统解开文件系统，运行应用程序，整个嵌入式系统与通用操作系统类似，功能比不带有操作系统的嵌入式系统强大了很多。嵌入式系统一般具有实时特点，所谓实时系统是指在这种系统中，一个优先等级高的任务能够获得立即的、没有延迟的服务，不需要等候任何其他优先级低的任务，而且在它得到 CPU 使用权后，它可以一直执行到工作结束或是有更高等级的进程出现为止。目前常见的嵌入式实时操作系统有：Wind River Systems 公司的 VxWorks 和 pSOS、Microware 公司的 O/S9、Micotec 公司的 VRTX、QNX Software Systems 公司的 QNX、RedHat 公司的 eCOS 等。目前常见的嵌入式非实时操作系统有微软公司的 Windows CE、Embedded Windows XP、Palm 公司的 Palm OS、Symbian 公司的 EPOC，嵌入式 Linux 系统等。实际的嵌入式系统应用软件建立在系统的主要任务基础之上。用户应用程序主要通过调用系统的 API 函数对系统进行操作，以完成应用程序的开发。

4.2 Linux 操作系统特点^[28、29]

Linux 是一种类 UNIX 操作系统。兼容 POSIX 1003.1 标准，并包含了 UNIX System V 和 BSD 4.3 的大部分特征。它充分体现了操作系统的发展趋势，即开放、稳定、标准。Linux 具有如下的特征：

1. 真正的多用户、多任务操作系统。
2. 符合 POSIX（可移植操作系统接口）标准。
3. 采用页式存储管理。
4. 支持动态链接库。
5. 提供具有内置安全措施的分层文件系统。
6. 提供 Shell 命令解释程序和编程语言。
7. 提供强大的管理功能，包括远程管理功能。
8. 提供内核编程接口。
9. 具备图形用户接口。

10. 具备大量的实用程序和通信、联网工具。

11. 大量高级程序设计语言已经被移植到 Linux 系统上，因此它是理想的应用程序开发平台。

Linux 作为桌面操作系统的应用正在不断增长。而在服务器市场，Linux 已经可以同各种传统的商业操作系统分庭抗礼，占据了相当大的市场份额。同时，在嵌入式领域 Linux 的应用也得到的飞速的发展，这与 Linux 本身的优良特性密不可分：

- 开放源码，丰富的软件资源。Linux 遵循 GPL，保障用户可以免费获得内核源代码。由于嵌入式系统千差万别，往往需要针对具体应用修改和优化系统，此时能否获得源代码就至关重要。Linux 上的软件资源十分丰富。在 Linux 上开发应用程序可以借鉴已有的类似的自由软件，可以节省开发的工作量，缩短开发时间。功能强大的内核，性能高效、稳定、多任务。并且 Linux 的内核小巧灵活，易于裁减。使得 Linux 适合嵌入式系统的应用。
- 支持多种体系结构：X86、ARM、MIPS、SPARC 等。目前，Linux 已经被移植到数十种硬件平台之上。几乎所有流行的 CPU，Linux 都支持。
- 完善的网络通信、图形和文件管理机制。Linux 本身就是 Internet 的产物，网络是 Linux 的强项。另外，Linux 支持 ext2、fat16、fat32、romfs 等多种文件系统。在图形系统方面，Linux 上既有成熟的 XWindow，也有 Qt/Embedded、Mini GUI 等嵌入式图形系统。
- 支持大量的周边硬件设备，驱动程序资源丰富。Linux 上的驱动已经非常丰富，支持各种主流硬件设备和最新的硬件技术。并且随着 Linux 的广泛应用，许多芯片厂商已经开始提供针对 Linux 的驱动程序。
- 易于针对具体应用定制。Linux 内核与用户界面完全独立，各部分的可定制性都很强，能适合多种需求，特别是硬件资源有限的嵌入式系统。

目前，世界上许多大学、研究机构和知名公司都加入到嵌入式 Linux 的开发工作中，较成熟的嵌入式 Linux 版本不断涌现，如 RT-Linux、XLinux、uClinux 以及本研究中使用的、运行在 ARM 平台上的 ARM Linux。

4.3 Linux 操作系统的移植

4.3.1 建立交叉编译开发环境

嵌入式系统开发中也需要用到编译器、链接器、解释程序、集成开发环境以

及诸如此类的其他开发工具。然而，与通用计算机系统软件开发所使用的开发工具有所不同，嵌入式系统软件开发中执行应用程序的平台与用来建立应用程序的平台并不相同，嵌入式目标机是应用程序的运行平台，而开发平台通常是 PC 或工作站。因此，开发嵌入式系统软件所用到的这些工具常被称为跨平台开发工具或简称交叉开发工具^[30]。如图 4-1：

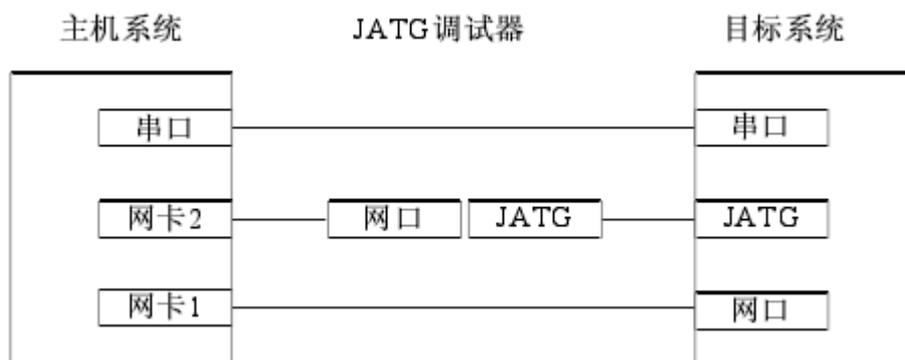


图 4-1 交叉编译环境的建立

自由软件基金组织 FSF 提供了一整套开源的开发工具，并集成到各 Linux 发行版中，GNU 开发工具与 Linux 内核一脉相承，作为开发 Linux 内核及应用软件的标准开发工具，因为其效率高、功能强大而被移植到多种平台之上，也是开发嵌入式 Linux 系统的首选开发工具。为嵌入式 Linux 开发而搭建的交叉开发环境所必须的组件包括^[31]：

- 1) Binutils: 二进制文件的处理工具。主要包含一些辅助开发工具，而这些工具在开发初期，尤其是移植调试操作系统时非常有用。
- 2) gcc: 用来编译内核代码的工具。使用它可以编译汇编语言和 C 语言的程序，生成嵌入式系统可执行代码。
- 3) glibc 和 glibc-linuxthreads: 链接和运行库，它的编译需要指定编译器为刚才做好的 ARM 交叉编译器；否则编译出的 glibc 代码将会是同时有 ARM 和 x86 代码的混和体。
- 4) gdb: 调试工具。

建立工具链的第一步就是选择将会使用的组件版本，这包括 binutils 的版本、gcc 的版本以及 glibc 的版本。因为这些组件的维护与发行完全是各自独立的，当与其他套件的不同版本组合在一起时，并非一个套件的所有版本都能顺利完成建立工作，必须试着找到适合主机和目标板的组合。经过测试对比，最终选择的组件为：二进制工具套件 binutils-2.10.1，编译器 gcc-2.95.3，C 库 glibc-2.2.3，C 线程库 glibc-linuxthreads-2.2.6 调试工具 gdb-6.4，以及包含制作过程中所需要的内核头文件的 Linux 内核 Linux-2.4.19。解压工具包并进

行安装之后，完成交叉编译环境的建立。

4.3.2 LINUX 内核的配置

在 ARM-Linux 的内核源代码路径下运行：`#make menuconfig` 进入图形化的内核配置界面。

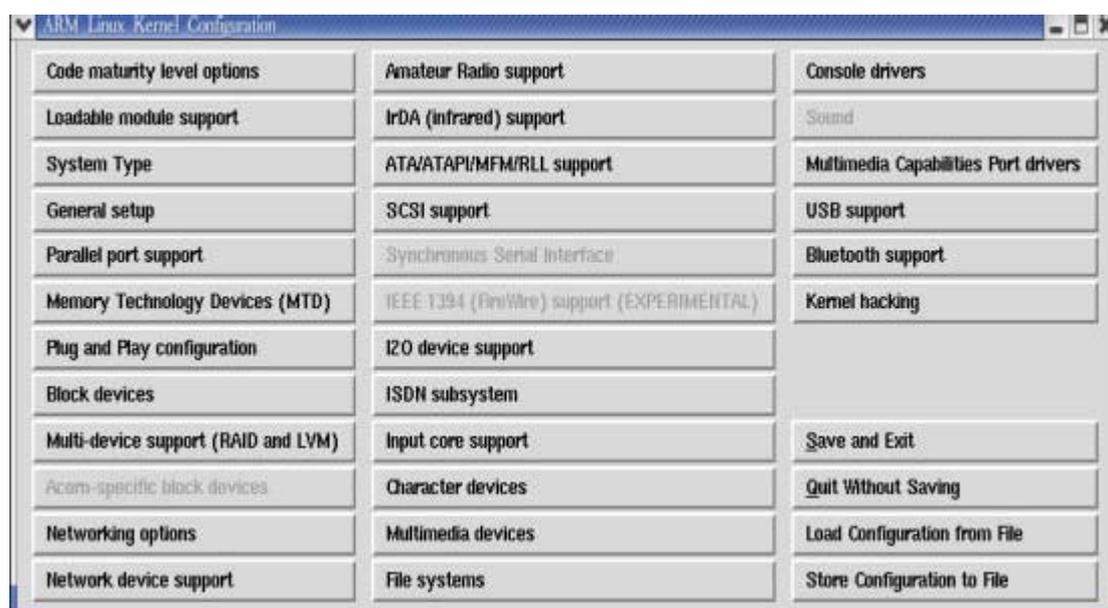


图 4-2 LINUX 内核配置界面

结合我们的目标板作出以下修改：

System Type: 在里面可以看到 at91arm9200 的选项。

General Setup---->Default kernel command string : 修改为 “Console=ttyS0,115200,mem=32M root=/dev/ram rw”，具体含义为控制串口为 AT91RM9200 的 Debug 串口，串口速率为 115200bps，内存大小为 32MB，将 /dev/ram 作为 Linux 的 Root 设备，这里主要根据自己的开发板或仪器的配置来设置。

Memory Technology Drivers----->RAM/ROM/FLASH Chip Drivers: 选择 FLASH 配置。由于目标板上没有 NandFlash 所以去掉 Kernel 中对 NandFlash 的支持：

Memory Technology Drivers: 去掉 Nand Flash Support device drivers。

修改内核支持的 Ramdisk 大小: Block Drivers---->Default Ramdisk size 修改为自己的 Ramdisk 创建时指定的大小。

配置完内核之后，内核仍然以源代码的方式存在，不能直接下载到嵌入式系统中运行，因此，必须对内核进行编译，生成最终在目标板上运行的可执行代码。编译内核分以下三步进行：

(1) 执行以下命令正确设置编译内核所需的附属文件，进行依赖性编译：

```
#make dep
```

(2)执行以下命令，删除原来的编译结果以及一些旧的数据文件：

```
#make clean
```

(3)执行以下命令，生成可执行内核映像文件：

```
#make zImage
```

完成上述命令之后会在/arch/arm/boot/下生成一个内核映像文件 zImage。然后通过 tftp 网络协议就可以下载内核到 SDRAM 中执行。

4.3.3 根文件系统的建立^[32]

文件系统是指在一个物理设备上的任何文件组织和目录，它构成了 Linux 系统上所有数据的基础，Linux 程序、库、系统文件和用户文件都驻留其中，因此，它是系统中庞大复杂且又是最为基本和重要的资源，对于一个嵌入式系统，仅包含内核是不够的，还必须有文件系统的支持。Linux 支持的文件系统有很多种，比如 ext2(LinuxExtended-2), minix 文件系统, msdos(最初的 FAT 文件系统), ntfs(WindowsNT 文件系统), nfs (网络文件系统), hpft (OS/2 高性能文件系统), ncpfs (NovellNetWare 文件系统) affsAmiga(快速文件系统)等等。通常在 Linux 下采用的文件系统构成如图 4-3 所示。

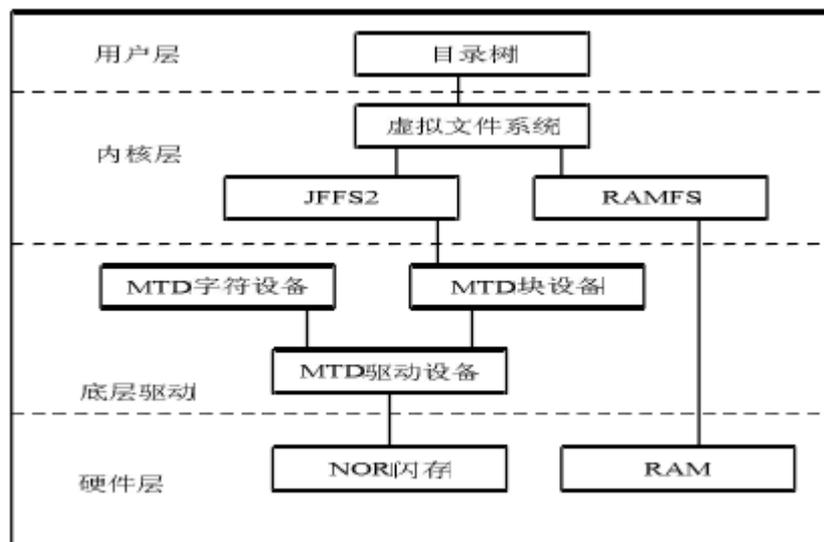


图 4-3 Linux 下常用文件系统结构

表 4-1 Linux 下目录的基本功能

目录	描述
bin	存放基本的命令
boot	Bootloader 的静态文件
dev	存放设备文件
etc	系统配置文件
lib	基本的共享库和内核文件
mnt	文件系统的临时挂载点
media	可移动存储设备的挂载点
opt	额外的应用程序软件包
sbin	基本的系统命令
tmp	临时文件
usr	次级文件系统架构
var	存放变动性的数据
root	Root 用户主目录 (可选)
home	用户主目录 (可选)
srv	系统提供的数据服务

Linux 文件系统有两条独立控制设备驱动的途径, 一是通过设备驱动的接口, 另一条是通过文件管理器接口。设备驱动的接口 API 都是从文件管理器 API 中继承下来的, 所以这些 API 都有 `open()`, `close()`, `read()`, `lseek()`, `ioctl()` 等与文件 API 类似的接口。Linux 引导启动时, 默认使用的文件系统是根文件系统。对于 PC 机来说, 根文件系统一般在本地磁盘中, 而对嵌入式系统来说, 一般以 RAMDISK 或其它形式存在。RAMDISK 就是指使用系统的一部分内存空间来模拟一个用户熟悉的磁盘分区, 用户在 RAMDISK 上进行的所有操作都与传统的磁盘文件操作一样。RAMDISK 有两种。一种可以格式化、加载, 但是大小固定, 这在 Linux 内核 2.0/2.2 就已经支持, 另一种是内核 2.4 才支持的, 通过 `Ramfs` 或者 `tmpfs` 实现, 它们不能被格式化, 但大小可以随所需的空间而增加或减少, 比较灵活。在嵌入式 Linux 中可以作为根文件的设备有很多, 除了上述 RAM 中的虚拟文件系统 RAMDISK, 还有 FLASH 上的只读文件系统 `Romfs`, 可以加载到本机的网络文件系统 NFS, 还有在 FLASH 上实现的可读写文件系统 `JFFS` 等等。根文件系统都至少包含以下几项:

- (1) 基本文件系统结构。
- (2) 至少包含目录 `/dec`、`/proc`、`/bin`、`/etc`、`/lib`、`/usr`、`/tmp` 等, 这些目录的功能如图所示。

- (3)一些基本的应用程序和命令支持,如 chmod、insmod、ls、mv、cp 等等。
- (4)最低限度的配置文件支持,如 rc、inittab、fstab 等。
- (5)最基本的设备支持,如 /dev/hd*、/dev/tty*、/dev/fd0 等。
- (6)程序运行所需的基本库函数。

对于嵌入式 Linux 来说,最常用的根文件系统是 RAMDISK,本文也采用 RAMDISK 作为根文件系统。如果从头开始制作 RAMDISK,需要建立根文件系统结构、准备链接库、使用 busybox 制作系统应用程序、准备所需的设备文件等等,过程比较繁琐。一般情况下可以从开发系统提供商那里获得一个已经做好的 RAMDISK,然后根据自身系统的实际要求对已有的 RAMDISK 进行增减。

移植一个新的 RAMDISK 的基本过程如下:

- (1)解压 ramdisk.gz

```
#gzip -d ramdisk.gz
```

- (2)将 RAMDISK 挂载到指定目录,比如:

```
#mkdir my_ramdisk
```

```
#mount -o loop ramdisk my_ramdisk
```

这样我们就能在 my_ramdisk 目录下看到 ramdisk 所包含的各个子系统了,比如/bin、/etc、/lib 等等。

- (3)往相应目录中复制或删减部分文件,得到自己所需要的配置,并对新的 RAMDISK 进行压缩。

- (4)写在目录 my_ramdisk 与 RAMDISK 的连接:

```
#umount /my_ramdisk
```

```
#gzip ramdisk
```

到此,得到了 Linux 内核和根文件系统,一个基本的嵌入式 Linux 系统就构建成功了。在 uboot 启动后,通过 uboot 相关命令将内核映像文件和根文件系统下载到目标板的 FLASH 中,就可以在目标板上运行嵌入式 Linux 操作系统了。

4.4 本章小结

本章主要介绍了嵌入式系统的选择与配置,包括常用的一些嵌入式操作系统的介绍,嵌入式系统的组成,LINUX 嵌入式操作系统的特点,及 LINUX 嵌入式操作系统的配置与移植。

第五章系统软件设计

前几章我们介绍了便携式涡流检测仪的硬件电路与嵌入式操作系统的移植，在此基础上，本章将分层次介绍基于嵌入式操作系统的软件设计，包括 MiniGUI 图形界面操作系统、驱动程序的编写、应用程序的设计等一系列软件设计。

5.1 GUI 与 MINIGUI 图形界面支持系统

5.1.1 GUI 与嵌入式系统^[33、34]

嵌入式系统的出现至今已经有 30 多年的历史了，嵌入式技术也历经了几个发展阶段。随着后 PC 时代的到来，嵌入式系统的应用要求越来越高，应用范围越来越普及。这样，字符界面和简单的图形界面不再能满足一些嵌入式系统的要求。而现在有些嵌入式系统已经具有类似于 PC 上的美观华丽的 GUI 界面。GUI 为 Graphics User Interface 的缩写，即图形用户界面。这是用于提高人机交互友好性、易操作性的计算机程序，它是建立在计算机图形学基础上的产物。图形用户界面是当今计算机技术的重大成就之一，它极大地方便了非专业用户的使用，人们不再需要死记硬背大量的命令，而可以通过窗口、菜单方便地进行操作计算机（或嵌入式产品）。目前较为流行的嵌入式 GUI 有 MicroWindows、QT/Embedded、Mini GUI 等。

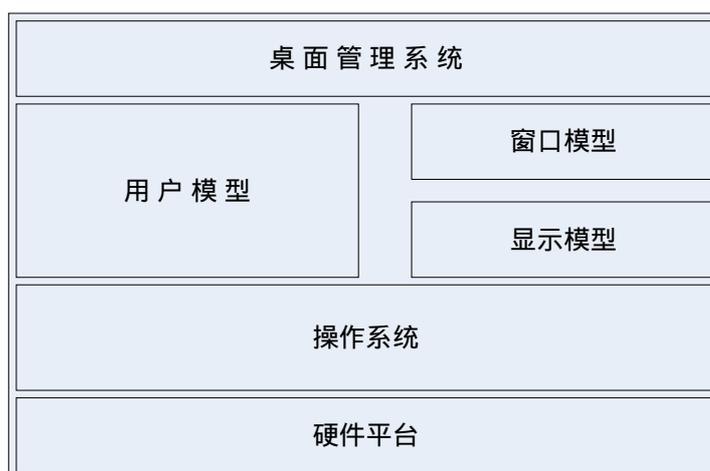


图 5-1 图形用户界面系统

一个图形用户界面系统通常由三个基本层次组成。它们是显示模型，窗口模型和用户模型。用户模型包含了显示和交互的主要特征，因此图形用户界面这一

术语有时也仅指用户模型。图 5-1 给出了图形用户界面系统的层次结构。

5.1.2 MINIGUI 图形界面支持系统简介^[35]

由北京飞漫软件技术有限公司开发的 Mini GUI，是国内为数不多的几大国际知名自由软件之一。Mini GUI 是面向实时(Real-Time)嵌入式系统的轻量级图形用户界面支持系统，1999 年初遵循 GPL 条款发布第一个版本以来，广泛应用于手持信息终端、机顶盒、工业控制系统及工业仪表、便携式多媒体播放机、查询终端等产品和领域。目前，Mini GUI 已成为跨操作系统的图形用户界面支持系统，可在 Linux/uClinux、eCos、uC/OS-II、VxworkS、pSOS、ThreadX 等操作系统以及 Win32 平台上运行；已验证的硬件平台包括 Intelx86、ARM(ARM7/AMR9/StrongARM/xScale)、PowerPC、MIPS、M68K(DragonBall/ColDFire) 等等。

几乎所有的 Mini GUI 代码都采用 C 语言开发，提供了完备的多窗口机制和消息传递机制以及众多控件和其它 GUI 元素，支持各种流行图像文件以及 windows 的资源文件。另外，比较其它的 GUI 系统，其引人瞩目的特性和技术创新主要有：

- (1)、Mini GUI 是一个轻量级的图形系统；
- (2)、完善的对中日韩文字、输入法的多体字和多字符集支持；
- (3)、提供图形抽象层(GAL)以及输入抽象层(AIL)，以适应嵌入式系统各种显示和输入设备；
- (4)、提供 Mini GUI-Threads、Mini GUI-Lite、Mini GUI-standalone 三种不同架构的版本以满足不同的嵌入式操作系统；
- (5)、提供了丰富的应用软件，其商业版本提供了手机、PAD 类产品、媒体及机顶盒类产品以及工业控制方面的诸多程序；

5.1.3 MINIGUI 系统架构^[36、37]

Mini GUI 为应用程序定义了一组轻量级的窗口和图形设备接口，利用这些接口，每个应用程序可以建立多个主窗口，然后在这些主窗口中创建按钮、编辑框等控制。Mini GUI 还为用户提供了丰富的图形功能，以显示各种格式的位图并在窗口中绘制复杂图形。Mini GUI 与嵌入式系统的关系如图 5-2 所示。

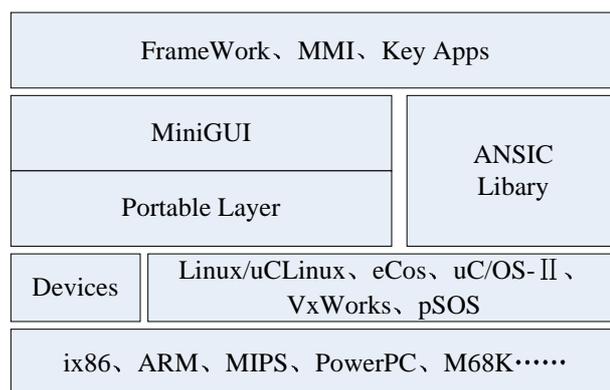


图 5-2 Mini GUI 与嵌入式系统的关系图

基于 Mini GUI 的应用程序一般通过 ANSIC 库以及 Mini GUI 自身提供的 API 来实现自己的功能; Mini GUI 中的“可移植层”可将特定操作系统及底层硬件的细节隐藏起来,而上层应用程序则无需关心底层的硬件平台输出和输入设备。另外, Mini GUI 特有的运行模式(进程、线程)概念,也为跨操作系统的支持提供了便利。与 Linux 这样的类 UNIX 操作系统相比,一般意义上的传统嵌入式操作系统具有一些特殊性。举例而言,诸如 uClinux、uc/OS-II、eCos、Vxworks 等操作系统,通常运行在没有 MMU(内存管理单元,用于提供虚拟内存支持)的 CPU 上;这时,往往就没有进程的概念,而只有线程或者任务的概念,这样, GUI 系统的运行环境也就大相径庭^[29]。因此,为了适合不同的操作系统环境,我们可将 Mini GUI 配置成三种运行模式:

(1)Mini GUI -Threads。运行在 Mini GUI -Threads 上的程序可以在不同的线程中建立多个窗口,但所有的窗口在一个进程或者地址空间中运行。这种运行模式非常适合于大多数传统意义上的嵌入式操作系统,比如, uc/OS-II、eCoS、VxworkS、pSOS 等等。当然,在 Linux 和 uClinux 上, Mini GUI 也能以 Mini GUI -Threads 的模式运行。

(2)Mini GUI -Li te。和 Mini GUI -Threads 相反, Mini GUI -Li te 上的每个程序是单独的进程,每个进程也可以建立多个窗口。Mini Gul -Li te 适合于具有完整 UNIX 特性的嵌入式操作系统,比如嵌入式 Linux。

(3)Mini GUI -Standal one。这种运行模式下, Mini GUI 可以以独立进程的方式运行,既不需要多线程也不需要多进程的支持,这种运行模式适合功能单一的应用场合。比如在一些使用 uClinux 的嵌入式产品中,因为各种原因而缺少线程库支持,或者线程库存在缺陷,这时,就可以使用 Mini GUI -Standal one 来开发应用软件。

但不论采用哪种运行模式, Mini GUI 为上层应用软件提供了最大程度上的致性,只有少数几个涉及初始化的接口在不同运行模式上有所不同。

5.2 整体软件层设计

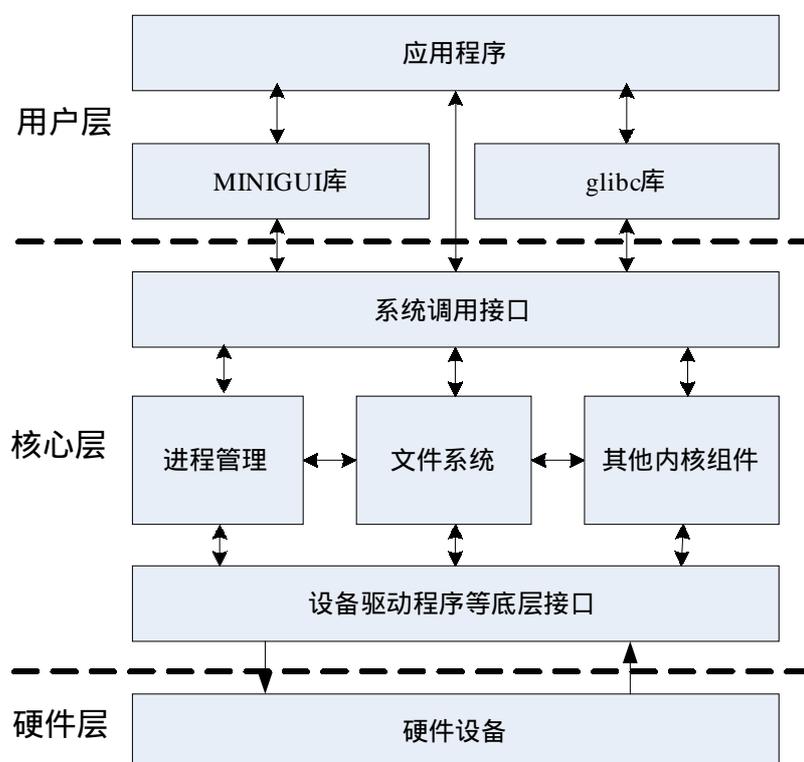


图 5-3 基于 Mini GUI 的系统软件结构

系统软件设计将以嵌入式 Linux 为核心系统，调用 MiniGUI 开发包设计图形用户界面，然后用 C 语言开发后端程序模块来实现涡流检测系统的信息传递、数据采集、文件传输、图形显示和设备控制等功能。系统结构如图 5-3 所示，该系统应用程序是建立在基于操作系统与 Mini GUI 图形界面支持系统之上的。其中直接与底层硬件接触的是设备驱动程序，包括键盘，显示屏，FLASH 等器件。

涡流检测仪的软件主要有两个部分组成，一个是建立在嵌入式操作系统之上的应用程序，它主要负责系统监控、人机界面的对话、对采样数据的滤波程序、对涡流采样值进行提离抑制、涡流检测图形显示及其他功能的控制等。另一个存在于操作系统内核中的底层驱动程序，包括 A/D、D/A 转换、键盘扫描、LCD 驱动和通讯接口驱动等设备驱动程序。嵌入式系统通过文件系统，进程管理，内存管理这些模块将这两部分联系起来，构成了涡流检测仪的整个检测系统。如图 5-4 所示为涡流检测仪系统软件结构图。

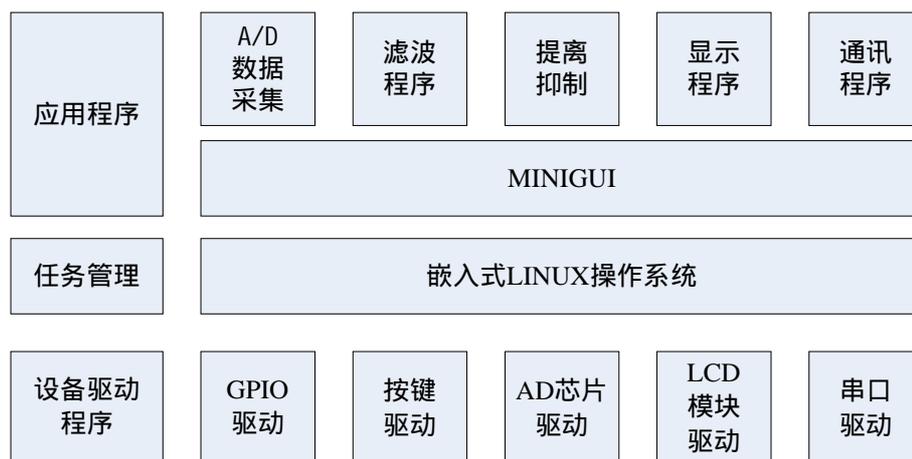


图 5-4 涡流检测仪系统软件结构图

5.3 设备驱动程序^[38、39、40]

5.3.1 设备驱动程序介绍

Linux 的设备管理（即输入输出子系统）是操作系统的重要组成部分。与进程管理、内存管理、和文件系统相比，设备管理相对来说要复杂一些。这主要是因为存在多种多样的输入输出设备，导致难以形成一个通用的解决方案。尽管如此，输入输出子系统的基本功能就是要提供一个统一而简单的输入输出系统调用接口。输入输出子系统可分为上下两部分：一部分是下层的、设备相关的，即所谓的设备驱动程序，它直接与相应设备打交道，并向上提供一组访问接口。另一部分是上层的、设备无关的，这部分根据输入输出请求，通过特定设备驱动提供的接口，与设备进行通信。虽然设备种类繁多，但是为了便于使用，输入输出子系统必须提供一个简单统一的设备使用接口。与其它UNIX 一样，LINUX 将各种设备都作为特殊文件来处理。也就是说，对设备可以进行read 和write 等操作。这些都是由输入输出子系统的设备无关部分来完成的。为LINUX 内核编写驱动程序，并不像其他操作系统那么复杂。实际上，我们所要做的只是为相应的设备编写几个基本函数并向VFS 注册即可。当上层应用要使用该设备时，VFS 就会调用相应的设备函数。LINUX 下设备驱动程序的编制和pSOS 下写BSP 类似，一般的工作方式都是在一个现成的驱动程序的基础上针对特殊的硬件设备做相应的改动，并不是要求从头编起，当然，还是要求对设备驱动程序有相当的了解。设备驱动多数是基于中断的（安装中断处理函数，即注册对应置中断向量表，使用LINUX 提供的注册函数request_irq）；但也有基于轮询方式的；有的甚至是在

运行时动态切换，如并口驱动。

在外设I/O空间编址方面，LINUX根据内存空间是否独立，可以将I/O空间的配置分为两种情况：一种是I/O空间与内存空间相互独立，这样I/O空间的访问需要使用专门的I/O语句如inb和outb等；另一种将I/O寄存器作为内存的一部分，这样使用普通的内存访问语句就可以读写I/O寄存器。AT91RM9200就采用后面这种体系结构。即其RAM，FLASH，外设I/O均参与统一编址。

设备驱动编程实际就是对LINUX内核编程，设备驱动都是以内核态在内核空间运行。若驱动代码编制不良，就会导致整个系统崩溃，所以必须正确理解有关设备驱动程序相关知识和器件的工作流程。

设备驱动程序通常可归类为以下三种类型^[37]：

(1) 字符设备 (char device)：

以字节为单位；只能按顺序访问连续的字符，可以在一次I/O操作中传送任意大小的数据；不用缓存。

(2) 块设备 (block device)：

以块为单位；允许随机访问块设备中存放的块；可以在一次I/O操作中传送固定大小的数据块；多用缓存技术。

(3) 网络接口设备 (net)：

有些I/O设备没有对应的设备文件，如网卡。因此应用程序和网络接口之间的数据通信不是基于标准的有关文件的系统调用，而是基于listen(), accept(), connect(), socket()和bind(),系统调用。

5.3.2 设备驱动程序接口

LINUX把每一个设备都当作一个特殊文件对待，存放在/dev/目录下。输入输出子系统向内核其它部分提供了一个统一的标准设备接口。这是通过数据结构file_operation(include/linux/fs.h)定义。

```
struct file_operations
{
int (*lseek)(struct inode *,struct file *,off_t,int);
int (*read) (struct inode *,struct file *,char *,int);
int (*write) (struct inode *,struct file *,const char *,int);
int (*readdir) (struct inode *,struct file *,void *,filldir_t);
int (*select) (struct inode *,struct file *,int,select_table);
int (*ioctl);
```

```

int (*mmap);
int (*open);
int (*release);
int (*fsync);
int (*fasync);
int (*check_media_change)(kdev_t dev);
int (*revalidate)(kdev_t dev);
};

```

File_operations结构是整个Linux内核的重要数据结构，表5-1分别说明结构中主要的成员：

表 5-1 接口函数主要功能表

Read	从设备中读取数据
Write	向字符设备中写入数据
Readdir	只用于文件系统，对设备无用
Ioctl	控制设备，除读写操作外的其他控制命令
Mmap	将设备内存映射到进程地址空间，通常只用于块设备
Open	打开设备并初始化设备
Flush	清除内容，一般只用于网络文件系统中
Release	关闭设备并释放资源
Fsync	实现内存与设备的同步，如将内存数据写入硬盘
Fasync	实现内存与设备之间的异步通讯
Lock	文件锁定，用于文件共享时的互斥访问
Readv	在进行读操作前要验证地址是否可读
Writev	在进行写操作前要验证地址是否可写。。

在嵌入式系统的开发中，我们一般仅仅实现其中几个接口函数：read、write、ioctl、open、release，就可以完成应用系统需要的功能。设备驱动程序源码都在linux/drivers/目录下的各个子目录中，例如：cdrom, scsi, pci, isdn, sbus, sound。所有的字符和块设备的驱动程序都支持文件操作的接口，因此用户对任何一个设备的存取都如同对文件操作一样，即把每一个设备都当作一个特殊文件对待。因为内核对设备的操作是通过文件接口的，因此只要特定设备的驱动程序支持这一抽象的文件接口即可。在内核中增加一种新的设备驱动程序是相对容易的。

5.3.3 系统各设备驱动程序分析

Linux将软件系统分为内核空间与用户空间，所有对于硬件的操作都需在内核空间完成，这样提高了整个系统的安全性，当然也增加了编码的复杂度。Linux下的硬件操作可分为上下两部分：一部分是下层的、设备相关的，即所谓的设备驱动程序，它直接与相应设备打交道，并向上提供一组访问接口。另一部分是上层的、设备无关的，这部分根据输入输出请求，通过特定设备驱动提供的接口，与设备进行通信。虽然设备种类繁多，但是为了便于使用，Linux必须提供一个简单统一的设备使用接口。如前所述，与其它UNIX一样，Linux将各种设备都作为特殊文件来处理。也就是说，对设备可以进行read和write等文件操作。这些都是由设备无关部分来完成的。

对于键盘扫描的驱动程序，其框图如图5-5所示。为了对按键功能做出准确的处理，需要由应用程序和驱动程序协同工作才能完成。

图5-5中可以看出Linux设备驱动与内核的接口DDI/DKI规范类似，可分为3部分：

(1) 与内核接口：通过file_operations结构体来完成。我们上一小节中已经介绍了该结构体函数，它向内核其他部分提供了统一的输入输出接口。

(2) 与系统启动代码的接口：对设备进行初使化。主要有下面两个函数：

```
int init_module(void);
void cleanup_module(void);
```

init_module()是设备驱动程序的入口点，相当于应用程序中的main()。在Linux（配置为不支持模块）启动过程中，将调用每一个设备驱动程序的init_module，我们一般在这个函数中实现硬件的检测、初始化等工作。cleanup_module()在卸

载设备驱动程序时被调用，一般用于释放被该驱动程序占用的资源，如地址空间、中断号等。

(3) 与设备的接口，即对设备的读写等操作。

对这部分编写时，依据不同的器件，有较大的差异。要根据器件与微处理器的接口方式，进行读写操作。

在对本系统各设备编写驱动程序时，第一二

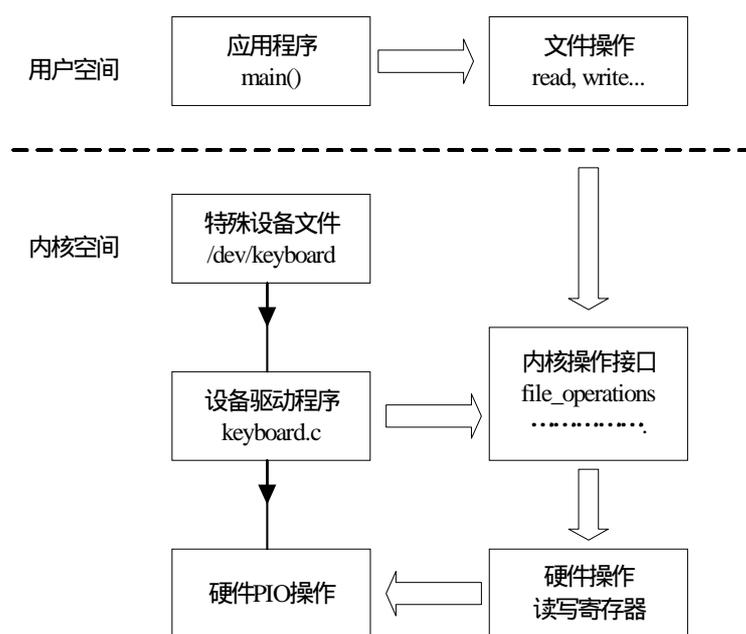


图 5-5 键盘扫描驱动程序框架

部分的编写形式上比较相同，只是注意其设备名称、设备号等方面的不同；而第三部分则依器件的工作流程而定，将我们在无操作系统编写的与硬件打交道的操作

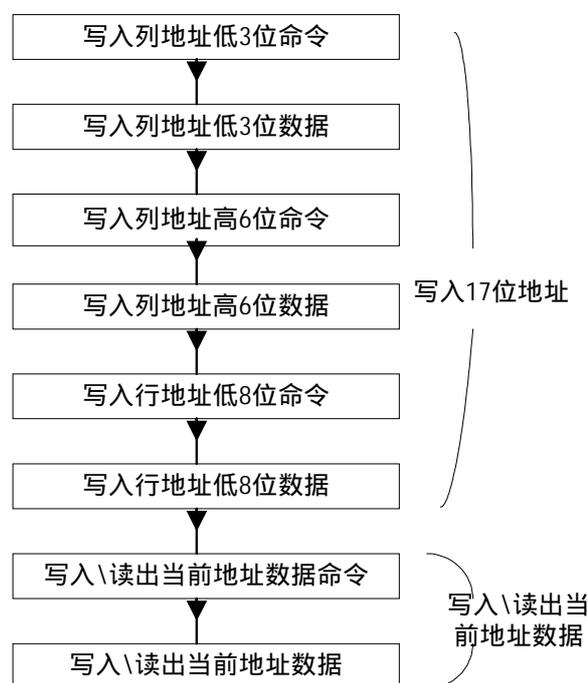


图 5-6 LCD 读写子程序框图

分别添入现在的读写子程序之中。对 A/D、D/A、USB 通讯均为对内部存储器操作，对键盘扫描为对 I/O 口的操作，这两个方面均比较简单。在此我们只介绍 LCD 的读写子程序。

LCD 读写子程序框图如图 5-6 所示，其中先写入 17 位地址，再写入或读出当前地址的数据。由于 ARM9 处理器只有 8 位数据总线与 LCD 显示相接，无地址总线，要靠 RS 信号来区分是命令还是数据，所以每送一个数据，不论是地址数据还是显示数据都要配合相应的命令，17 位地址数据的写入要分成 3 次来完成。

5.4 基于 MINIGUI 界面程序设计

5.4.1 环境的建立与 MINIGUI 库移植

1) 环境的建立

GUI: MiniGUI-1.6.8。

主机操作系统: REDHAT 9.0 版本 LINUX 操作系统，包含 TFTP 网络传输协议，LINUX 内核为 2.4.19。

目标平台: 复旦 AT91ARM9200 开发板，基于 AT91ARM9200 涡流检测仪核心模块。

交叉编译工具: 交叉编译环境下的交叉编译器 arm-linux-gcc 等。

popt 库，从网络上下载，文件名: popt-1.7.tar.gz。MiniGUI 的 demo 程序需要这个库。

QVFB 程序，可在 Red Hat Linux 上直接编译。使用该程序可在 X-Window 上运

行和调试 Mini GUI 应用程序。

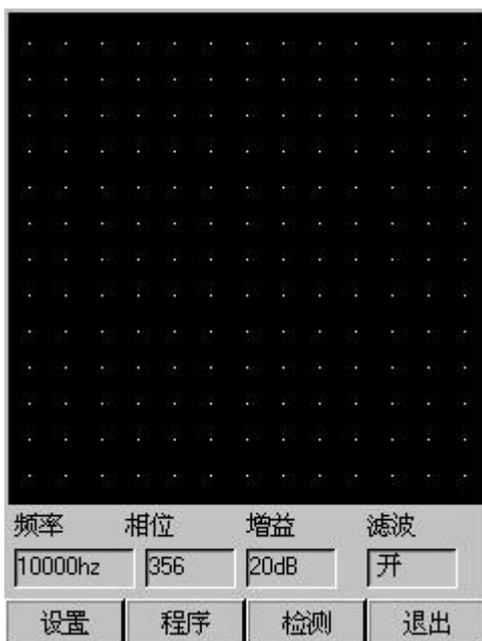
安装过程首先将 libminiGUI-1.6.8.tar.gz 拷贝到用户指定的目录下，用 tar-zxf libminiGUI-1.6.8.tar.gz 解压缩。进入到解开的文件夹中执行 ./configure 命令，然后运行 make 命令编译源代码，这个过程可能会和不同 Linux 中的不同编译工具的版本或种类而有所不同，甚至会出现编译错误。编译完成后，使用 make install 命令安装编译后的文件。接下来安装另一个资源文件 miniGUI-res-1.6.8.tar.gz，将文件拷贝到用户指定的系统路径后也同样用 tar-zxf 压缩文件名来解压缩文件。进入到解开的文件夹中，执行 make install 命令安装。完成文件安装后，我们可以看到开发库文件被安装到 /usr/local/lib/ 文件夹下面，通用头文件被安装到了 /usr/local/include/ 文件夹下面，配置文件被安装到了 /usr/local/etc/ 文件夹下面。在开发过程中所用到的所有有关 Mini GUI 控件的调用都要到这些目录下寻找响应的文件。为了保证在程序编译的过程中编译器可以快速准确地找到支持库文件，我们还要在系统文件 /etc/ld.so.conf 文件中指定 Mini GUI 的函数库文件的安装目录。完成以上步骤后，就可以在系统开发中使用 Mini GUI 函数库组件了。

5.4.2 涡流检测仪界面程序的开发

按照软件的应用层次和模块功能，本系统设计的 GUI 界面主要利用了 Mini GUI 的模版及控件技术开发完成。系统开发中利用 Mini GUI 的模版及控件技术不但可以快速高效的设计、修改、完善系统 GUI 界面而且还可以方便的管理系统中各类消息传递和控制。

涡流仪开发系统软件界面如图 5-7 所示：

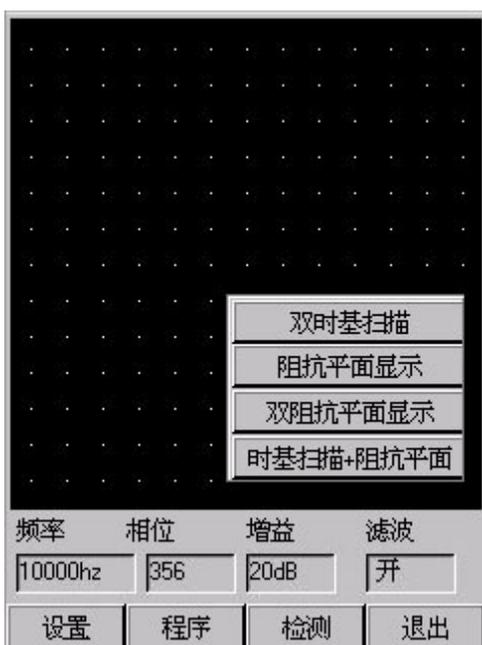
如图 5-7 所示，图 A 为仪器开机初始化完成后运行界面，图 B 为设置子菜单，图 C 为程序子菜单，图 D 为图 B 中参数设置子菜单，图 E 为参数设置子菜单 2，图 F 为图 B 中报警设置子菜单。



A 主界面



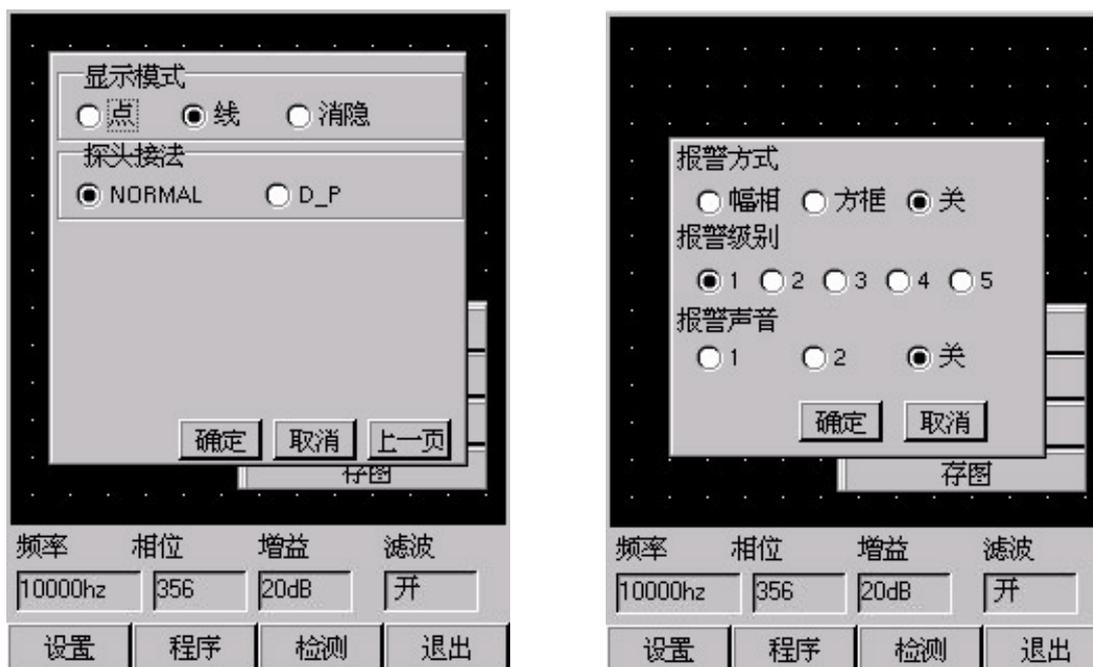
B 设置菜单



C 程序界面



D 参数设置菜单(1)



E 参数设置菜单(2)

F 参数设置菜单(3)

图 5-7 系统软件运行界面

5.5 涡流检测仪数字处理程序设计

5.5.1 AD 采集模块

其流程图如图 5-8 所示。用户首先使用 open 函数打开 AD 设备，AD 打开后就会获得一个全局的唯一的文件描述符，在以后的操作中就可以使用这个操作符直接对 AD 设备进行操作了。然后通过 ioctl 函数对 AD 进行设置，设置的主要参数包括 AD 的采样时间，AD 内部的 PGA 的放大倍数等等。AD 设置好了以后，就可以通过 read 和 write 函数进行模数转换了。在使用完 AD 设备以后，要用 close 函数关闭 AD 设备，系统会自动释放资源，注销 AD 设备。

程序的主要部分是驱动程序的使用，上一节已给出驱动程序的介绍。驱动程序采用静态编译模式，驱动编译到内核中，用户使用时只需要把 AD 作为 Linux 的标准设备就可以了。

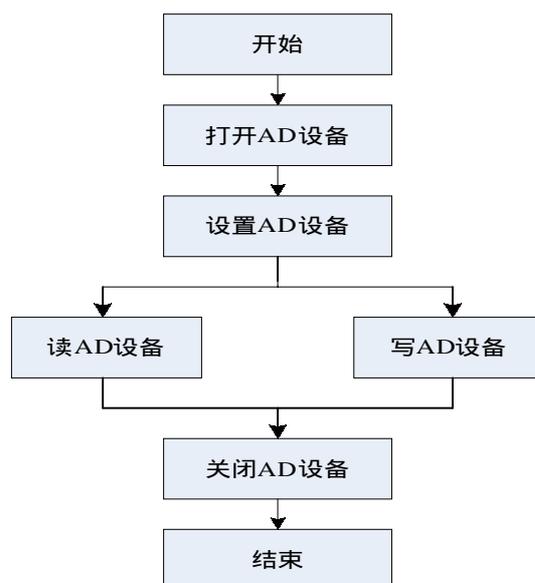


图 5-8 AD 操作流程图

5.5.2 滤波程序

在相敏检波器及后置放大输出中，除了与试件缺陷相关的涡流信号，还存在探头、放大器噪声和检波后高次谐波未完全吸收等干扰信号，这些干扰信号有时有可能将材质信号掩埋掉，给测量带来很大的影响。不过，从频谱观点来看，干扰信号的频率较高，而有用信号的较低，因此我们可以设计低通滤波器来取出有用信号。

经典的数字滤波器有IIR和FIR滤波器，在此选用FIR低通滤波器，因为它具有线性特性、任意幅度和性能稳定的优点^[33]。

设FIR滤波器的模拟参数为：

通带截止频率 $F_c=25\text{HZ}$ ；

阻带截止频率 $F_s=200\text{HZ}$ ；

采样频率 $F_k=1\text{KHZ}$ 。

由以上参数可求得相应的数字参数如图 5-9 所示。采用窗函数法设计该 FIR 滤波器，在此选用哈密窗，使阻带最小衰减-53dB,并且滤波器点数取为 21,则设计的低通滤波器传递函数为：

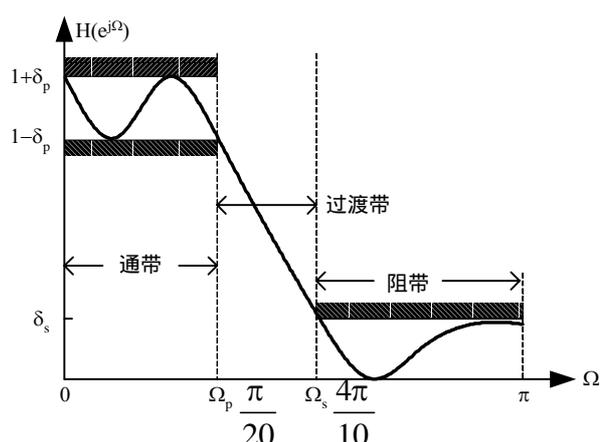


图 5-9 FIR 滤波器设计指标

$$H(Z) = \sum_{n=0}^9 h(n)[z^{-n} + z^{-(20-n)}] + h(10)z^{-10} \quad (5-1)$$

其中: $h(0)=0.002546$; $h(6)=0.031907$;
 $h(1)=0.003581$; $h(7)=0.039036$;
 $h(2)=0.006352$; $h(8)=0.044861$;
 $h(3)=0.010924$; $h(9)=0.048674$;
 $h(4)=0.017176$; $h(10)=0.50000$;
 $h(5)=0.031907$;

5.5.3 LCD 显示模块

LCD 的显示方式是直接操作帧存储器的内容, LCD 控制器会通过 DMA 从帧存储器中获取数据而不需要 CPU 的干预, 这个帧存储器是 LCD 控制器在 RAM 中开辟的一块缓冲区, 称作 FrameBuffer。下面以 16 BPP 显示模式为例, 讲述 LCD 显示的操作流程。由于 LCD 控制器端口与 GPIO 端口是复用的, 因此首先要将 GPIO 初始化为 LCD 端口; 再在 RAM 的不可 Cache 区申请 FrameBuffer, 大小为 $320 \times 240 \times 16/8$ 字节; 然后根据 LCD 屏的逻辑和时序初始化 LCD 控制寄存器, 包括设置 LCD 的时序参数、分辨率、显示模式、扫描频率以及 FrameBuffer 的大小和起始地址等; LCD 初始化以后就可以通过直接修改 FrameBuffer 的内容实现显示, 最直观的图形显示方式就是把 LCD 相应位置的颜色信息写入到该像素对应的 FrameBuffer 单元。字符显示就是将字库(ASCII 字库、汉字字库或者其他语言字库)中的点阵字模以图形方式显示在 LCD 上, 显示原理和图形显示完全相同。结合计算机图形学中的图形生成、区域填充、图形裁剪及几何变换等算法^[33], 就可以在 LCD 上进行各种各样的图形显示了, 包括字符、汉字、图片等的显示、旋转及直线、矩形、圆等各种几何图形。

针对本课题需要, 主要编写了如下的图形显示子函数:

```
void Clear_Screen(unsigned int color); //LCD 清屏
void Draw_Line(int x1,int y1,int x2,int y2,unsigned int color);
//绘制直线, 输入参数: 起点坐标(x1,y1)、终点坐标(x2,y2)、颜色
void Draw_Rectangle(int x1,int y1,int x2,int y2,unsigned int color); //画矩形
void Fill_Rectangle(int x1,int y1,int x2,int y2,unsigned int color);
//填充矩形, 输入参数: 左上点坐标(x1,y1)、右下点坐标(x2,y2)、颜色
void Draw_Circle(int x0,int y0,int r,unsigned int color);
//画圆(Bresenham 算法), 输入参数: 圆心坐标(x0,y0)、半径、颜色
```

```
void Fill_Circle(int x0,int y0,int r,unsigned int color);//填充圆
void Display_Ascii(char*s,int x,int y,unsigned int color);
//显示 ASCII 字符, 输入参数: 字符串指针、显示坐标(x, y)、颜色
void Display_Ascii_Clockwise90(char*s,int x,int y,unsigned int color);
//顺时针旋转 90 度显示 ASCII 字符, LCD 横屏显示
void Display_Chinese(char*mat,int matsize,int x,int y,unsigned int color);
//汉字显示, 输入参数: 字模指针、点阵大小、起始坐标(x,y)、颜色
void Display_Chinese_Rotation180(char*mat,int matsize,int x,int y, unsigned int
color);//旋转 180 度竖屏汉字显示
void Display_Chinese_Clockwise90(char*mat,int matsize,int x,int y, unsigned int
color);//顺时针旋转 90 度横屏汉字显示
void Display_Chinese_Counterclockwise90(char*mat,int matsize,int x,int y, unsigned
int color);//逆时针旋转 90 度横屏汉字显示
void Display_Picture(const unsigned char image[],int width,int height,int x,int y);
//图片显示, 输入参数: 图片像素数组(低 8 位在前, 高 8 位在后)、图片宽度、
图片高度、显示位置(x, y)。
```

5.6 本章小结

本章以嵌入式软件层次为阐述对象, 逐层介绍了系统软件的设计。其中, 最底层为设备驱动程序, 是操作系统调用硬件设备的纽带; 而后为操作系统层, MiniGUI 是建立在操作系统上的图形界面处理程序, 界面程序的开发就是基于 MiniGUI 之上, 再后为应用程序设计层, 该层简单介绍了 AD 数据采集, 数字滤波等程序及 LCD 显示程序的设计实现。

第六章 组装与调试

本章将从仪器制作的实际出发，介绍印制线路板的制作，和软件调试等一系列仪器制作过程。

6.1 线路板的制作与调试

印制线路板是电子设备功能实现的载体，设计的好坏关系到电子设备的实际性能。实践证明，即使电路原理图设计正确，印制电路板设计不当，也会对电子设备的可靠性产生不利影响。因此，在设计印制电路板的时候，应注意采用正确的方法。下面是在设计与制作时的一些总结：

- 1) 在实际布线时，要注意地址线、数据线尽量等长；其他信号线远离时钟线，且时钟背面尽量不要放置器件，一般时钟线可以让地线包围一周，以屏蔽时钟线向外辐射；电源线和地线尽可能粗，如果有条件可以给电源、地布一整层。
- 2) 在制作板子的时候尽量留出一些调节点，以方便在以后调试的时候可以分块调试。
- 3) 在 PCB 板上装配电子元器件时要注意极性电容、二极管的方向，芯

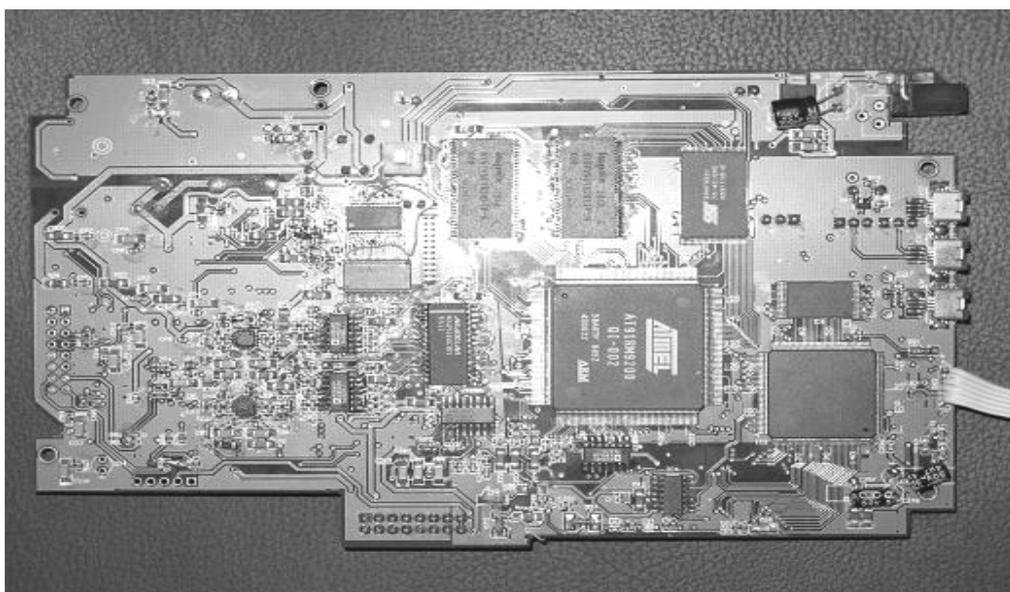


图 6-1 线路板实物正面视图

片第一脚的确定，以及晶振不要紧贴线路板焊接等问题。

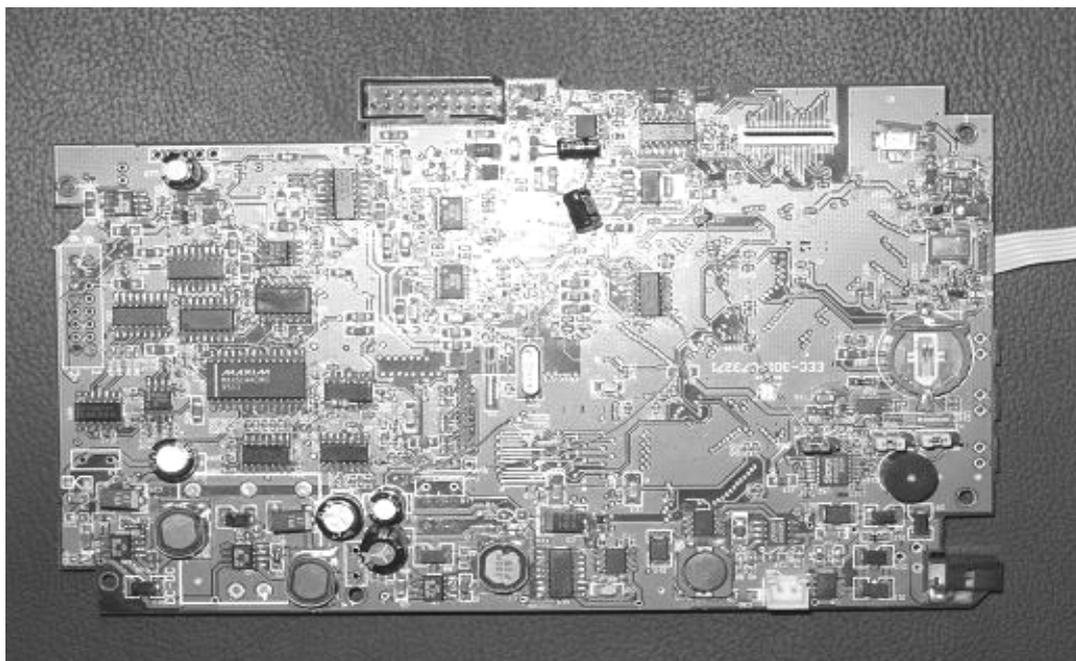


图 6-2 线路板实物背面视图

图 6-1，图 6-2 为涡流检测仪电路板实物图，

6.2 系统的移植与软件的调试

系统核心模块，包括 ARM9200，SDRAM，FLASH，周围网口，串口的设计均参考复旦 AT91ARM9200 开发板，系统的移植及软件的调试都是先在开发板上移植或调试成功后，再移植到涡流仪上。复旦 AT91ARM9200 开发板如图 6-3 所示：

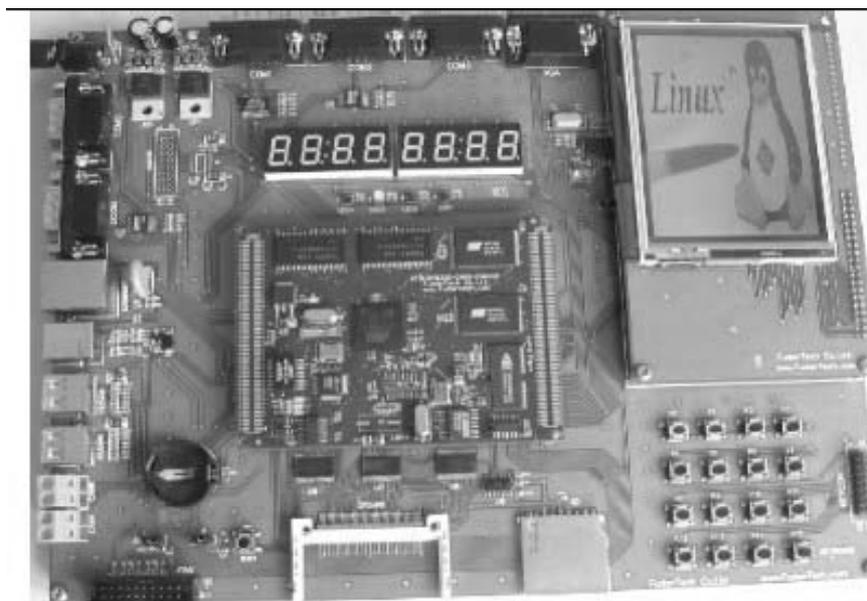


图 6-3 复旦 AT91ARM9200 开发板图

在涡流仪硬件上调试涡流仪系统软件时，首先要按照第四章讲的 LINUX 系统的移植方法将嵌入式系统移植到核心模块中，在移植前需要先将 MiniGUI 图形界面支持系统移植到 LINUX 中，关于 MiniGUI 图形界面支持系统的移植我们在第五章已经介绍，关键是将库文件移植进去，或者只在交叉编译环境下建立好 MiniGUI 库文件的移植，在应用程序编译时采用静态编译，这样就不需要将 MiniGUI 库文件移植到涡流仪上的嵌入式 LINUX 系统，节省了 FLASH 空间，对于小型的应用程序比较合适。

以下是针对标准缺陷试块的检测数据。

(1) 对一个表面预处理过的铜管材料，铜管的外径为 $\phi 25\text{mm}$ ，壁厚为 1mm ，人工设计了 1 个外表面平底孔、直径 $\phi 2\text{mm}$ 、深度为 0.2mm 的缺陷（如图 6-2 所示）。采用差动探头进行检测（对准人工缺陷位置），检测结果见图 6-5。对于管材的检测，

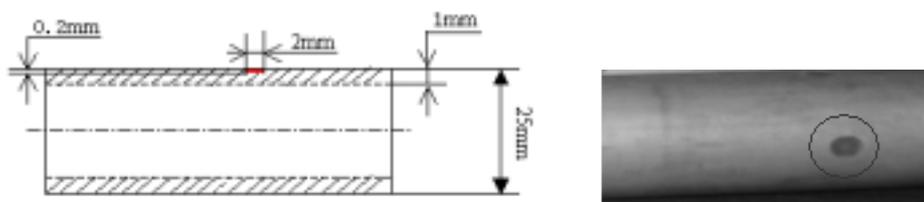


图 6-4 标准铜管缺陷工件图

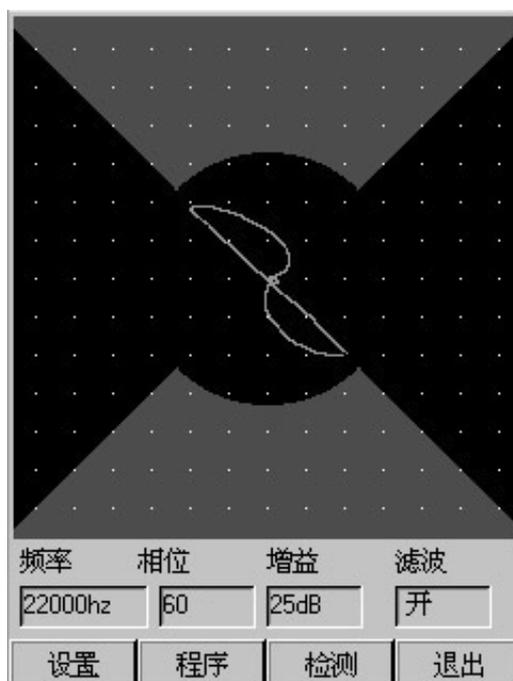


图 6-5 涡流仪采集铜管缺陷数据图

(2) 对一个表面预处理过的铝板材料，铝板厚 10mm ，人工设计了 3 个表面裂纹，

分别深度 0.8mm、1.5mm、2.0mm 的缺陷（如图 6-6 所示）。采用笔式绝对式探头进行检测（对准人工缺陷位置），检测结果见图 6-7 所示。

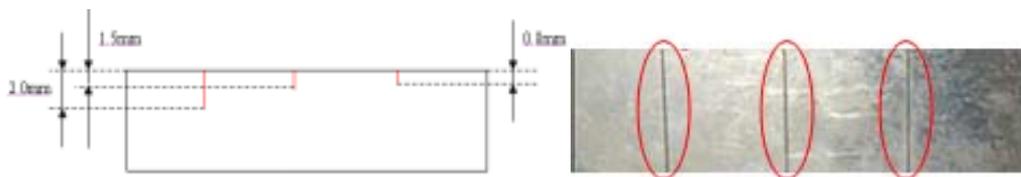


图 6-6 铝块标准裂纹缺陷工件图

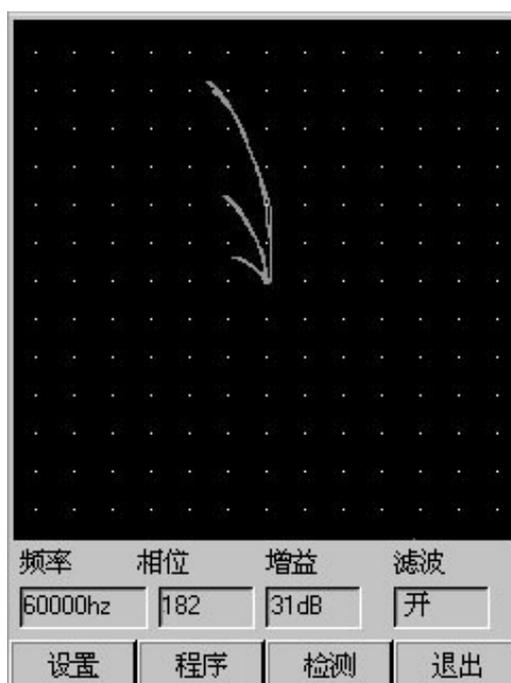


图 6-7 涡流仪采集标准裂纹缺陷图

6.3 本章小结

本章从仪器实际制作出发，介绍了绘制电路板及焊接器件时需要注意的一些问题，然后介绍了软件调试的一些注意事项，在仪器对标准缺陷试块进行检测时，达到了预期的效果，但尚需进一步的完善。

第七章 结论与展望

本文在研究涡流无损检测方法的基础上,利用阻抗平面分析技术研究并研制了基于 ARM 处理器与 LINUX 嵌入式系统的便携式智能涡流检测仪,在程序设计中采用了 Mini GUI 图形界面支持系统,取得了很好的工作效果。

1. 为了使仪器适用于不同材质金属材料的检测,在以前研究的基础上,从芯片选择及原理设计实现上对涡流探头、信号调理、相敏检波及激励信号的设计等多方面进行了带宽拓展,使仪器可以在 100Hz~6MHz 下进行检测。
2. 仪器的研制注重了便携式。在电路设计上,元器件全部直接采用了先进的集成电路,与由分立元件构成的电路相比,电路体积大大缩小,最后所设计的仪器体积大小仅为 $180 \times 110 \times 40$ (mm³),重量约 0.7 千克。与国内同类仪器相比,体积和重量均缩小了近一半以上。
3. 由于采用了嵌入式 LINUX 系统,仪器在资源与文件管理上实现了智能化。仪器的控制及处理部分直接采用了 AT91RM9200 高速微处理器,使仪器的处理速度更快,控制能力更强。且 ARM 功耗较小,除了一般智能化仪器的特点之外,首先在硬件上实现了激励信号频率、系统增益、滤波方式等的程控化;此外,利用微处理器的高性能,对 A/D 采样数据进行 FIR 实时滤波处理,提高了测量的精度。
4. 软件设计采用了 Mini GUI 图形界面支持系统,使得界面操作更加的简单化,直观化。

此外,仪器还采用 USB 技术与 PC 通讯,可将仪器上的数据传导到 PC 之上,实现更大容量的数据存储和分析。

由于实验条件和时间的限制,本系统尚有很多未完成的工作,如尚未进行双阻抗检测平面检测及阻抗+时基扫描程序设计等,且对本系统的测量准确度尚未进行大量实验验证。并且还存在着一些其他需要完善的地方,今后还需要完成这些工作。

参考文献

- [1] 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测. 机械工业出版社. 2000. 45~135
- [2] 张俊哲. 无损检测技术及应用. 科学出版社, 1993
- [3] 无损检测学会. 美国无损检测手册中文版. 世界图书出版社. 1994
- [4] 任吉林. 我国涡流检测技术的发展. 无损检测, 1994
- [5] 林俊明. 声脉冲 / 多频涡流检测仪的研制. 华北电力技术. 2000 No. 5 P. 23-2
- [6] 王广丰、钟海娜. 发展中的涡流无损检测技术. 煤矿机械. 2005 No. 7 P. 7-8
- [7] 杜春雷. ARM 系结构与编程. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] Atmel Corporation. AT91ARM9200datasheet, www.atmel.com, 2004.
- [9] 田泽 . 《嵌入式系统开发与应用教程》. 北京航空航天大学出版社. 2005. 3
- [10] 许海燕, 付炎. 嵌入式系统技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社. 2002.
- [11] 陶旺斌、周在杞. 电磁检测. 航空工业出版社, 1995
- [12] 任吉林、刁海波等. 基于 ANSYS 的涡流检测提离效应的数值模拟. 无损检测涡流专业会议 (武汉). 2006. 8
- [13] Ye ZM, Wu B. Induction motor mechanical fault online diagnosis with the application of artificial neural network[A]. IEEE Trans on Industry Application [C]. 2001
- [14] Hoshikawa, H、Koyama, K、Maeda, M. Signal phase indication of flaw depth by a lift-off noise free eddy current probe. Review in progress quantitative NDE. 21A, 430~437 (2002)
- [15] H. Hoshikawa、K. Koyama. A new eddy current surface probe for short flaws with minimal lift-off noise . Nihon university. Izumi cho Narashi no chi ba . 275~8575. Japan
- [16] 高春法、宋凯、唐继红. 流检测传感器提离效应的抑制. 无损检测. 2003. Vol 20 NO. 12 P. 606~608
- [17] 王秀杰、张畴先. 模拟集成电路应用. 西北工业大学出版社, 1994
- [18] 罗飞路、张屹. 涡流检测中X—R正交分解器的实现及误差分析. 无损检测. Vol 20 No 12 Dec 1998
- [19] 钟华锦. 基于 ARM 和 Linux 的嵌入式系统研究与应用. [硕士学位论文]. 武汉科技大学, 2006
- [20] 孙航 . Xilinx 可编程逻辑器件的高级应用与设计技巧. 电子工业出版社, 2004. 8
- [21] 罗蕾. 嵌入式实时操作系统及应用开发. 北京航空航天大学出版社. 2005
- [22] 张静. 叶梧. 基于 ARM 920T 的嵌入式 Linux 系统开发. 现代电子技术 2005(4): 22~24
- [23] 马忠梅、李善平、慷慨、叶楠. ARM & Linux 嵌入式系统教程. 北京航空航天大学出版社. 2004. 9.
- [24] 陈文智等. 嵌入式系统开发原理与实践. 清华大学出版社. 2005. 8
- [25] (美) Arnold Berger 著. 吕骏译. 嵌入式系统设计. 北京: 电子工业出版社. 2002

- [26] 周立功等. ARM 嵌入式系统基础教程. 北京航空航天大学出版社, 2005. 1
- [27] 马维华. 嵌入式系统原理及应用. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006
- [28] 刘峥嵘、张智超、许振山等. 嵌入式 Linux 应用开发详解. 机械工业出版社. 2005. 6
- [29] 陈建辉. Linux 操作系统. 北京. 机械工业出版社. 2002
- [30] David Seal. ARM Architecture Reference Manual .2 Addison Wesley. 2000
- [31] ATMEL. ARM920T Technical Reference Manual ARM. 2003
- [32] 陈文智等. 嵌入式系统开发原理与实践. 清华大学出版社. 2005. 8
- [33] 周立功、ARM 嵌入式 MiniGUI 初步与应用开发范例. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2006
- [34] 魏永明、钟书毅、潘为国. Linux/uClinux+MiniGUI: 嵌入式系统开发原理、工具及过程. 北京: 北京飞漫软件技术有限公司. 2005: 1~218
- [35] 北京飞漫软件技术有限公司. MiniGUI 技术白皮书. 2005: 1~21
- [36] 北京飞漫软件技术有限公司. MiniGUI 用户手册(MiniGUI Ver 1.6.8). 2005: 1~108
- [37] 玉波、朱自强、郭军 编著. Linux C 编程. 清华大学出版社. 2005. 9
- [38] 孙天泽、袁文菊、张海峰. 嵌入式设计及 Linux 驱动开发指南. 北京: 电子工业出版社. 2005
- [39] 董志国、李式巨. 嵌入式 Linux 设备驱动程序开发[J]. 计算机工程与设计, 2006. 20
- [40] 钱晨、徐荣华、王钦若. 基于 Linux 操作系统的设备驱动程序开发[J]. 微计算机信息. 2004/09
- [41] 张泽义. 便携式数字涡流导电仪的研制. [硕士学位论文]南昌航空工业学院. 2007. 6
- [42] 张友德、赵志英、涂时亮. 单片机微型机原理应用与实验. 复旦大学出版社. 1995
- [43] 谈文心、钱聪、宋云娴. 模拟集成电路原理及应用. 西安交通大学出版社. 1995
- [44] 周航慈. 单片机应用程序设计技术. 北京航空航天大学出版社. 1991
- [45] 孔有林. 集成运算放大器及应用. 人民邮电出版社. 1988
- [46] 王秀珍等. 微型计算机 A/D, D/A 转换接口技术及数据采集系统. 清华大学出版社. 1984
- [47] 康华光. 电子技术基础(第四版). 高等教育出版社. 1998. 8

致谢

首先感谢我的导师任吉林教授，在将近三年的时间里，任老师给予了我悉心的指导和无微不至的关怀，给我创造了良好的工作学习环境和参与实践的机会，导师渊博的知识、严谨的治学态度、诲人不倦的良师风范以及对本人的关心、鼓励、鞭策，使我在专业知识、科研方法、动手能力上受益匪浅。在此，我谨对导师任吉林教授致以最衷心的感谢！

课题研究期间，得到了爱德森（厦门）电子有限公司林俊明总经理、张开良高工、卓泳光高工、余兴增高工等的许多关心和帮助。此外，张泽义师兄、陈金贵师兄、俞佳师妹、赵磊师弟等也在仪器研制方面给予诸多建议和支持，作者在此对以上人员表示衷心感谢！

特别感谢我的家人，是您们无私的奉献和支持，我才得以在此学习，并顺利完成学业。

最后，感谢曾经教育和帮助过我的所有老师和同学，感谢所有给予我帮助、鼓励、关心的人，谢谢！

附录一 攻读硕士研究生期间发表的学术论文

- [1] 任吉林、刁海波、宋凯. 基于 ansys 的涡流检测提离效应的数值模拟[J]. 无损检测会议论文 2006.8
- [2] 任吉林、刁海波、唐继红、俞佳、宋凯. 涡流传感器提离效应的 ANSYS 模拟[J]. 传感技术学报 2008.6

基于ARM嵌入式系统的智能涡流探伤仪的研制

作者: [刁海波](#)
学位授予单位: [南昌航空大学](#)

相似文献(0条)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_D051761.aspx

下载时间: 2010年5月25日