

## 摘要

声表面波（Surface Acoustic Wave, SAW）射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）技术是一种新型的 RFID，它以声表面波器件为核心，克服了传统以集成电路（Integrate Circuit, IC）芯片为核心的 RFID 设备在金属物体、液体、高温、强电磁干扰环境中不能正常工作等问题，并且具有无源、识别距离远，能识别高速运动的物体等特点。

本论文主要围绕天津市科技支撑计划重点项目，新型声表面波射频识别 RFID 及无线传输系统的研究等项目展开研究，在延迟线型声表面波传感原理的基础上，研究设计了声表面波无源电子标签；在无线通讯的相关技术的基础上，设计了基于超高频的射频识别的阅读器。其主要内容包括：

1. 分析了声表面波射频识别系统的工作原理，介绍了系统组成及其各部分功能。
2. 基于声表面波传感技术的理论基础，研究并设计了声表面波无源电子标签，包括叉指换能器、压电基片和反射栅。
3. 在对 RFID 系统的标准协议 EPC Class1 Generation2 进行研究的基础上，给出了一种基于零中频解调的超高频 RFID 阅读器的实现方案，设计了中心频率在 915MHz 的 RFID 阅读器硬件系统，包括射频收发模块和控制处理模块。
4. 阅读器硬件几乎只完成了射频收发的功能，其核心功能由软件实现。文中详细介绍了核心功能的实现，即功能处理软件。它是基于嵌入式 ARM 7 处理器 LPC2138 平台和  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  嵌入式实时操作系统实现的。

**关键词：**声表面波，射频识别，声表面波无源电子标签，阅读器， $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

## Abstract

Surface Acoustic Wave (SAW) Radio Frequency Identification (RFID) is a new kind of RFID which is based on SAW Devices. It overcomes the traditional IC (Integrate Circuit, IC) chip as the core of the RFID equipment which could not work properly in metal objects, liquids, high temperature, strong electromagnetic interference environment, and has following features: passive, distant range of identification, and to identify high-speed objects, etc.

In this dissertation, we research a SAW RFID Passive Tag on the principle of the delay line SAW sensor and design a UHF RFID Reader on the foundation of wireless communication technology. The main contents are listed as follows:

1. Analyze the working principle of SAW RFID system. Introduce the framework of SAW RFID system and the functionality of every part.
2. Analyze the basis theory of SAW. The principle of SAW sensor is explained. We analysis and design the SAW RFID Passive Tag, include the theoretical analysis and parameters design of the IDT, Piezoelectric substrate material and Reflection grating.
3. According to the International RFID standard protocol EPC Class1 Generation2, a hardware scheme of a zero-IF demodulator was present. We focus on the design of the RFID Reader whose operating frequency is 915MHz. Explain the Reader's haware system in detail which includes RF Transceiver Module and Control Processing Module.
4. The Reader's haware completes almost exclusively the function of RF transceiver. The core function completes by software. Introduce the realization of the core function in detail which is Function Processing Software. It lies on embedded platform ARM 7 processor LPC2138 and uses embedded real-time operating system  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ .

**Key words:** SAW, RFID, SAW RFID Passive Tag, Reader,  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

# 南开大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 南开大学学位论文使用授权书

根据《南开大学关于研究生学位论文收藏和利用管理办法》，我校的博士、硕士学位获得者均须向南开大学提交本人的学位论文纸质本及相应电子版。

本人完全了解南开大学有关研究生学位论文收藏和利用的管理规定。南开大学拥有在《著作权法》规定范围内的学位论文使用权，即：(1)学位获得者必须按规定提交学位论文(包括纸质印刷本及电子版)，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生学位论文，并编入《南开大学博硕士学位论文全文数据库》；(2)为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆等场所提供校内师生阅读，在校园网上提供论文目录检索、文摘以及论文全文浏览、下载等免费信息服务；(3)根据教育部有关规定，南开大学向教育部指定单位提交公开的学位论文；(4)学位论文作者授权学校向中国科技信息研究所和中国学术期刊(光盘)电子出版社提交规定范围的学位论文及其电子版并收入相应学位论文数据库，通过其相关网站对外进行信息服务。同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。

非公开学位论文，保密期限内不向外提交和提供服务，解密后提交和服务同公开论文。

论文电子版提交至校图书馆网站：<http://202.113.20.161:8001/index.htm>。

本人承诺：本人的学位论文是在南开大学学习期间创作完成的作品，并已通过论文答辩；提交的学位论文电子版与纸质本论文的内容一致，如因不同造成不良后果由本人自负。

本人同意遵守上述规定。本授权书签署一式两份，由研究生院和图书馆留存。

作者暨授权人签字：\_\_\_\_\_

20 年 月 日

### 南开大学研究生学位论文作者信息

论文题目					
姓名		学号		答辩日期	年 月 日
论文类别	博士 <input type="checkbox"/> 学历硕士 <input type="checkbox"/> 硕士专业学位 <input type="checkbox"/> 高校教师 <input type="checkbox"/> 同等学力硕士 <input type="checkbox"/>				
院 / 系 / 所			专 业		
联系电话			Email		
通信地址(邮编):					
备注:				是否批准为非公开论文	

注：本授权书适用我校授予的所有博士、硕士的学位论文。由作者填写(一式两份)签字后交校图书馆，非公开学位论文须附《南开大学研究生申请非公开学位论文审批表》。

## 第一章 绪论

### 第一节 RFID系统的组成

RFID技术是20世纪90年代开始兴起的一种自动识别技术，其基本原理是利用射频信号及其空间耦合传输特性，实现对被识别物体的自动识别<sup>[1]</sup>。RFID技术的基础主要是大规模集成电路技术，计算机软硬件技术，数据库技术以及无线电技术。

RFID系统最基本的由两个部分组成，即电子标签和阅读器<sup>[2]</sup>，如图1.1所示。

电子标签一般由标签天线和标签专用芯片组成，每个标签具有唯一的电子编码，附着在物体上标识目标对象，是射频识别系统真正的数据载体<sup>[3]</sup>。依据电子标签供电方式的不同，可以分为有源标签(Active tag)和无源标签(Passive tag)两种，有源标签内装有电池，无源标签没有内装电池。

阅读器是RFID系统信息控制和处理中心，用于当附着有电子标签的待识别物品通过其有效识别范围内时，自动以无接触的方式将电子标签中的约定识别信息取出，从而实现自动识别物品或自动收集物品标识信息的功能。

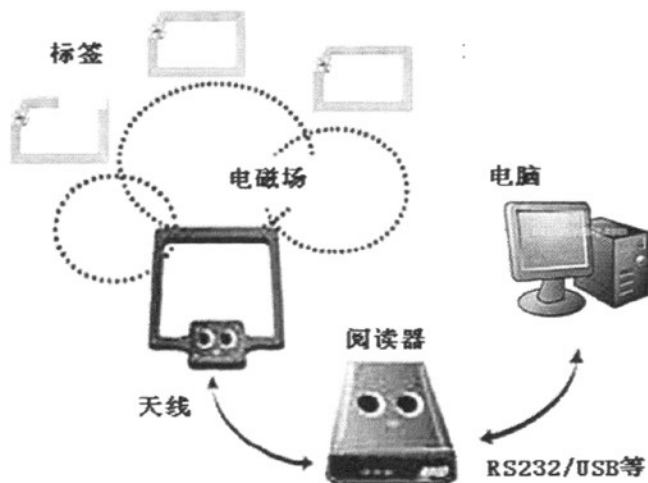


图1.1 RFID系统组成示意图

RFID系统的分类依其采用的频率不同可分为低频系统和高频系统两大类。

和收音机原理一样，射频电子标签和阅读器也要调制到相同的频率才能工作。电子标签的工作频率也就是射频识别系统的工作频率。LF，HF，UHF就对应着不同频率的射频。LF代表低频射频，在125KHz左右，HF代表高频射频，在13.54MHz左右，UHF代表超高频射频，在850~910MHz范围之内，还有2.4G的微波阅读器。电子标签的工作频率不仅决定着射频识别系统工作原理（电感耦合还是电磁耦合）、识别距离，还决定着电子标签及阅读器器实现的难易程度和设备的成本。

一般来说，中、低频工作的近距离射频识别系统采用电感耦合方式<sup>[4]</sup>，通过空间高频交变磁场实现耦合，依据的是电磁感应定律，如图1.2所示。工作时，标签位于阅读器天线辐射的近场区内，识别作用距离小于1m，典型作用距离为10cm~20cm。

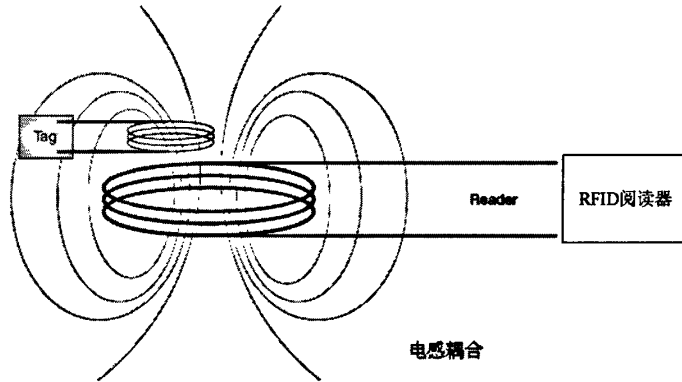


图1.2 电感耦合型的RFID系统

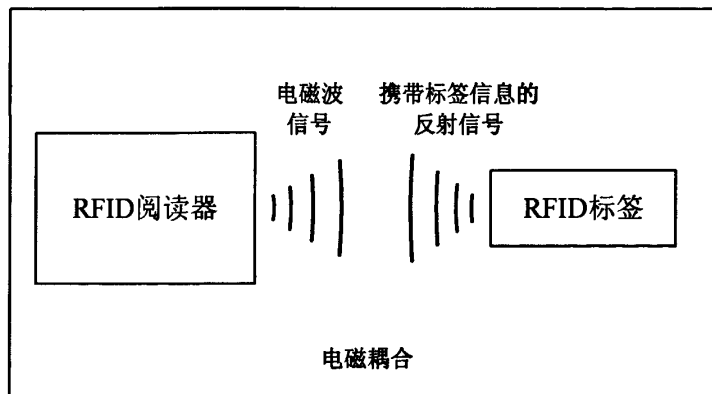


图1.3 电磁反向散射耦合型的RFID系统

高频、微波工作的远距离射频识别系统一般采用电磁反向散射耦合方式。其基础是雷达原理模型，发射出去的电磁波，碰到目标后反射，同时携带回目标信息，依据的是电磁波的空间传播规律，如图1.3所示。工作时，电子标签位于阅读器天线辐射场的远区场内，识别作用距离大于1m，典型作用距离为3m~10m<sup>[5]</sup>，典型的工作频率有：433MHz，868MHz，915MHz，2.45GHz，5.8GHz。

## 第二节 RFID技术的发展现状及标准

### 1.2.1 RFID技术的发展

RFID 技术的发展最早可以追溯至第二次世界大战时期，那时它被用来在空中作战行动中进行敌我识别。RFID直接继承了雷达的概念<sup>[6,7]</sup>，并由此发展出一种生机勃勃的新技术——RFID技术。1948年哈里斯托克曼发表的“利用反射功率的通讯”论文<sup>[8]</sup>奠定了射频识别RFID的理论基础。在20世纪中，无线电技术的理论与应用研究是科学技术发展最重要的成就之一，RFID技术的发展基本可按10年期划分为几个阶段<sup>[9]</sup>。

1941~1950年。雷达的改进和应用催生了RFID技术，1948年奠定了RFID技术的理论基础。

1951~1960年。早期RFID技术的探索阶段，主要处于实验室实验研究。

1961~1970年。RFID技术的理论得到了发展，开始了一些应用尝试。

1971~1980年。RFID技术与产品研发处于一个大发展时期，各种RFID技术测试得到加速。出现了一些最早的RFID应用。

1981~1990年。RFID技术及产品进入商业应用阶段，各种规模应用开始出现。

1991~2000年。RFID技术标准化问题日趋得到重视，RFID产品得到广泛采用，RFID产品逐渐成为人们生活中的一部分。

2001~至今。标准化问题日趋为人们所重视，RFID产品种类更加丰富，有源电子标签、无源电子标签及半无源电子标签均得到发展，电子标签成本不断降低，规模应用行业扩大。

RFID技术的理论得到丰富和完善。单芯片电子标签、多电子标签识读、无线可读可写、无源电子标签的远距离识别、适应高速移动物体的RFID正在成为

现实。

### 1.2.2 RFID技术国内外发展现状

RFID并不是一个崭新的技术。从分类上看13.56MHz以下的RFID 技术已相对成熟，目前业界最关注的是位于中高频段的RFID 技术，特别是860MHz~960MHz（UHF频段）的远距离RFID技术发展最快；而2.45GHz和5.8GHz频段由于产品拥挤，易受干扰，技术相对复杂，其相关的研究和应用仍处于探索阶段。

RFID技术在国外的发展较早也较快。尤其是在美国、英国、德国、瑞典、瑞士、日本、南非目前均有较为成熟且先进的RFID系统。其中，低频近距离RFID系统主要集中在125kHz、13.56MHz系统；高频远距离RFID系统主要集中在UHF频段（902MHz~928MHz）915MHz、2.45GHz、5.8GHz。UHF频段的远距离RFID系统在北美得到了很好的发展；欧洲的应用则以有源2.45GHz系统得到了较多的应用。5.8GHz系统在日本和欧洲均有较为成熟的有源RFID系统。

我国在RFID技术的研究方面也发展很快，目前已具有了自主开发低频、高频与微波RFID电子标签与读写器的技术能力及系统集成能力<sup>[10]</sup>。在上海、北京等重要城市，标准制定者、系统集成商、芯片制造商等在内的RFID产业链各环节都取得了一定发展，其中发展最快的环节应属系统集成。上海发展最快，从标准制定到应用开发，整个RFID产业链已经初步形成。

随着芯片技术的不断进步，标签成本的降低、读写距离的提高、存储容量的增大、处理时间的缩短将成为可能，射频识别产品的种类将越来越丰富，应用也越来越广泛，如供应链与物流管理、生产制造与过程控制、货物的跟踪与管理、身份识别与门禁系统、文档追踪与图书馆管理、交通管理与城市规划等方面。

### 1.2.3 RFID技术标准

在RFID技术发展的前10年中，有关RFID技术的国际标准的研讨空前热烈，到目前为止，还没有形成完善的关于RFID的国际和国内标准。除了ISO、EPC Global等欧美的标准化组织外，中国、日本、韩国也在积极研究、制定相关的RFID标准。中国负责RFID标准制定的主要组织是电子标签标准工作组，日本则主要是UID Center，韩国则主要是采用国际标准作为本国的标准。RFID标准争夺的核



心主要在RFID标签的数据内容编码标准这一领域，比较而言，EPC Global由于综合了美国和欧洲厂商，实力相对占上风<sup>[11]</sup>。

电子产品代码（Electronic Production Code, EPC）规范由AutoID中心及后来成立的EPC Global 负责制定。AutoID中心于1999年由美国麻省理工学院发起成立，其目标是创建全球“实物互联”网（internet of things）。2003年10月26日，成立了新的EPC Global组织接替以前AutoID中心的工作，管理和发展EPC规范。

EPC Class1 Generation2标准是EPC Global基于EPC和物联网概念推出的旨在为每件物品赋予唯一标识代码的电子标签和读写器之间的空中接口通信技术标准。2006年6月15日EPC C1G2正式进入ISO/IEC18000-6标准，成为ISO/IEC18000-6C，ISO/IEC 18000-6标准也得到一次全面的更新。

### 第三节 声表面波RFID技术的特点及应用前景

声表面波 RFID 技术是应用现代电子学、声学、半导体平面工艺技术和雷达及信号处理技术的新成就，它以声表面波器件为核心，克服了传统以集成电路（Integrate Circuit, IC）芯片为核心的射频识别设备在金属物体，液体、高温、强电磁干扰环境中不能正常工作等问题，并且具有无源，识别距离远，能识别高速运动的物体等特点，是一种新型非接触自动识别技术。

声表面波器件近几十年来发展十分迅速，现在已经成功地研制出声表面波带通滤波器、延迟线、振荡器和表面波卷积器等声表面波器件。究其原因，与声表面波技术的一些特点是分不开的<sup>[12]</sup>：

第一，声表面波具有极低的传播速度和极短的波长，声表面波器件的尺寸也是和信号的声波波长相比拟的。因此，声表面波器件的尺寸要比相应的电磁波器件的尺寸小很多，能够实现器件的超小型化。

第二，由于声表面波沿固体表面传播，速度也很慢，这使得时变信号可以在瞬时呈现在晶体基片表面上。这样当信号在器件的输入和输出端之间进行时，就容易对信号进行取样和变换。

第三，由于声表面波器件是在单晶材料上用半导体平面工艺制作的，所以它具有很好的一致性和重复性，便于大量生产。而且对某些材料声表面波器件具有极高的温度稳定性。

第四，声表面波器件的抗辐射能力强，动态范围很大。

声表面波无源电子标签的主要特点是：

1. 读取范围大且可靠，可达数十米；
2. 可使用在金属和液体产品上；
3. 标签芯片与天线匹配简单，制作工艺成本低；
4. 不仅能识别静止物体，而且能识别速度达 300 千米/小时的高速运动物体；
5. 可在高温差(-100℃~300℃)、强电磁干扰等恶劣环境下使用。

SAW电子标签技术应用领域非常广泛，包括物流管理、路桥收费、公共交通、门禁控制、防伪、农场的健康与安全监控识别、超市防盗和收费、航空行李分拣、邮包跟踪、工厂装配流水线控制和跟踪、设备和资产管理、体育竞赛等<sup>[13]</sup>。特别是，声表面波标签也有传感器功能，或与传感器结合，除完成身份识别外，还可同时对压力、应力、扭曲、加速度和温度等参数进行测量，如铁路红外轴温探测系统的热轴定位、轨道衡、超偏载检测系统、汽车轮胎压力等。

目前声表面波标签已有实际应用，并开始进入市场推广应用阶段，由于真正无源不需维护，且与现有IC 芯片标签性能互补，所以会有巨大的市场前景。德国的Baumer Ident GmbH公司生产的OIS-W声表面波标签、Siemens公司的SOFIS声表面波系统已成功用于挪威奥斯陆汽车过桥自动收费系统以及德国慕尼黑火车进站定位系统。在美国，Identronix、i-Ray、RF-SAW等公司也均生产商业化的SAW电子标签<sup>[14]</sup>。

中国电子科技集团公司第五十五研究所（下简称五十五所）是国家重点军工研究所，已有数十年研发高频微波器件部件的成熟经验。

目前五十五所已发展成为国内领先国际认可的高频声表面波器件研发与生产基地，具备制作0.5 μm (2GHz)高频声表面波器件的能力。ND系列高频声表面波器件批量生产的产品规范与国外同类产品的相当，经济运行态势良好，年增长率大于30%。

我国在研发SAW第二代无芯RFID器件与国外公司处于同一水平。

### 第四节 本论文主要内容及创新点

本论文主要围绕天津市科技支撑计划重点项目，新型声表面波射频识别RFID及无线传输系统的研究等项目展开研究。在延迟线型声表面波传感原理和

无线通讯的相关技术的基础上，设计了声表面波无源电子标签和基于射频识别的阅读器。其主要内容包括：

第一章：对射频识别系统进行了概述，介绍其组成、研究现状和发展，并介绍了声表面波射频识别技术的特点以及应用前景。

第二章：介绍了声表面波射频识别的理论基础，对声表面波传感器件原理进行了分析，并阐述了声表面波射频系统的组成及工作原理。

第三章：分析设计了一种声表面波无源电子标签，对压电基底材料的选取进行了分析，对叉指换能器和反射栅的性能和相关参数设计进行了讨论和分析，并根据设计参数制作了声表面波无源电子标签的样件。

第四章：基于EPC Class1 GEN2协议，设计实现了工作频率在902~928MHz频段的RFID阅读器。详细介绍了阅读器的硬件实现和软件处理模块。

本文的主要创新点如下：

1. 三指叉指换能器设计，有利于精确控制频率响应。
2. 阅读器双处理器设计，提高性能的同时降低了产品价格。
3. 软件替代硬件实现核心功能，有利于系统的升级更新或者功能改进。

## 第二章 声表面波RFID系统理论基础

### 第一节 声表面波相关理论

声表面波是一种沿弹性固体表面或交界面上传播的机械波。1885年英国物理学家瑞利发表了一篇题为《沿弹性体平滑表面传播的波》的论文<sup>[1]</sup>。他在理论上阐明了除了人们早已熟知的属体声波范畴的纵波和横波以外，还可能存在着另一种形式的波，这种波沿着半无限厚弹性体表面传播而且其能量集中于固体表面，这篇短小的论文成为后来广泛研究声表面波的起点。

在无限大各向同性固体媒质中，一般只有纵波和横波两种基本波型。纵波质点振动平行于传播方向，横波质点振动垂直于传播方向。纵波和横波的传播速度取决于材料的弹性模量和密度，横波一般比纵波传播速度慢<sup>[2]</sup>。

在无限大各向异性固体媒质中，一般沿每个方向上可有三种波：一种是近似于纵波的准纵波，另两种是近似于横波的准横波。这三种波的速度各异，准纵波最快。两个准横波中，速度最快的一个称准快横波，较慢的一个称为准慢横波。这三种波的波前法线方向，即波的相速度方向与波的能量方向不一致。这种现象称为“波速偏离”。只有在某些特殊的方向，才能得到纯纵波与纯横波，即波的能量方向与波的相速度方向（即波前法线方向）一致，这些方向称为纯波方向。

当在半无限固体的表面放置一个线振动源时，固体中将激发出三种模式的体声波，分别为纵波、垂直剪切波和横向剪切波。这三种波和电势通过不同的耦合方式，又可以形成瑞利波、纵向漏声表面波和横向剪切波型声表面波<sup>[3]</sup>。其中，在声表面波器件中研究最多、应用最广的波动模式是瑞利波，所以讨论瑞利波通常用“声表面波”一词来表示。

声表面波器件所使用的绝大多数都是压电材料，属于各向异性介质。

声波可以用质点离开平衡位置的位移 $\xi_i$  ( $i=1, 2, 3$ )描述，对于压电体，声的传播还伴有电场和电势，用电势变量 $\varphi$ 来描述，共有四个随空间坐标 $x_i$  ( $i=1, 2, 3$ )和时间 $t$ 而变的场量。

对于各向异性介质，在任意的切割、传播方向下，一般来说， $\xi_2$ 与瑞利波不解耦，也就是说，瑞利波的机械振动不限于传播方向和表面法线方向所组成

的平面内,  $\xi_3$  与瑞利波解耦只是特殊情形。由于基体的压电性, 表面波传播时还伴有电场, 即瑞利波有四个场分量: 振动的三个空间分量  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  和电势  $\varphi$ , 所以有四个部分满足波动方程组, 每种部分波的各个场分量的振动随着深度  $x_3$  的变化有自己的衰减系数  $\beta^\alpha$  ( $\alpha=1,2,3,4$ )。第  $\alpha$  个部分波的振动可以描述为<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} \xi_i^\alpha = A_i^\alpha \exp[j \frac{\omega}{v} (\beta^\alpha x_3 + x_1 - vt)] \\ \varphi^\alpha = A_4^\alpha \exp[j \frac{\omega}{v} (\beta^\alpha x_3 + x_1 - vt)] \end{cases} \quad (2.1)$$

其中,  $i=1,2,3$ 。

为了满足波动方程组, 各场量的振幅之间的比例  $B_i^\alpha = A_i^\alpha / A_4^\alpha$ , ( $i=1,2,3$ ) 以及衰减系数  $\beta^\alpha$  由波动方程确定, 瑞利波应是四种部分波的线性组合:

$$\begin{cases} \xi_i = \sum_{\alpha=1}^4 C_\alpha B_i^\alpha \exp[j \frac{\omega}{v} (\beta^\alpha x_3 + x_1 - vt)] \end{cases} \quad (2.2)$$

瑞利波解总是满足波动方程的, 由边界条件来决定速度  $v$  和各部分波的系数  $C_\alpha$  之间的比例。边界条件有力学边界条件和电学边界条件, 力学边界条件是表面上的法向应力为零; 电学边界条件取决于表面的电条件: 如是自由表面, 则表面上自由电荷  $\sigma$  为零; 如果表面上有一层接地金属薄膜, 则电学的边界条件为在表面上电势  $\varphi$  为零。这样, 三个力学边界条件和一个电学边界条件, 共可以列出四个方程。各部分波的系数  $C_\alpha$  四个量中只需定出它们之间的比例, 即可化为三个待定量, 再加上速度  $v$ , 共四个待定量。原则上说四个边界条件方程可以定出四个待定量。

在实际运算中, 一般采用求取数值解的方法。在晶体固有取向时, 晶体的弹性张量、压电张量、介电张量的数值和晶体的密度是已知的, 对于待求解的瑞利波的切割方向和传播方向, 建立新的正交坐标系  $X1, X2, X3$ , 利用坐标变换求出新坐标系下的弹性张量、压电张量和介电张量。即先假设一个速度  $v$  的初始值, 引入速度  $v$  的弹性张量  $c_{ij} = \rho v^2$ , 由它找出相应的衰减系数各场量的振幅比的数值, 再代入四个边界条件方程, 看是否能由三个待定量去同时满足四个方程, 如不满足, 则表明所设的速度值不是瑞利波的速度, 再根据最优化方法修正假设的速度值, 进行新的搜索, 直到找到合适的速度值, 能使四个边界条件方程同时得到满足, 这就是瑞利波的解。

材料具有压电性相当于弹性常数变大, 通常称为“压电变硬”, 定性地讲,

压电性的影响是使速度变快。压电材料上的瑞利波的电势在表面上最强，如表面电短路相当于去掉材料的压电性的相当大的一部分，故自由表面的瑞利波速度比金属化表面的速度大，材料的压电性越强，速度差越大。例如，Y切型LiNbO<sub>3</sub>表面沿Z轴传播的瑞利波，当表面为自由状态时，速度为3488m/s；而当表面为电短路(蒸镀一层导体)时，波速为3405m/s。

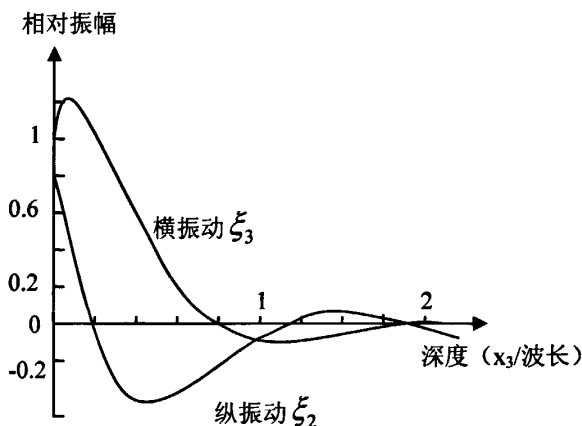


图2.1 各向异性固体中，瑞利波的纵振动与横振动分量随深度的变化

各向异性晶体中，瑞利波具有以下特点：(1)相速度与频率无关，其速度比同一方向上的体波速度要慢；(2)瑞利波的相速度依赖于传播方向，并且能量传播方向和波矢方向不一致，只有在某些特殊的被称为纯模的方向上两者才同向；(3)质点椭圆偏振平面不一定在弧矢平面(即传播方向与表面法线决定的平面)内。椭圆的主轴也不一定与传播方向或表面法线平行；(4)质点位移随深度的衰减呈阻尼振荡形式，如图2.1所示。

## 第二节 声表面波传感器的分类及工作原理

声表面波器件组成传感元件的研究是近年来才开展起来的，因为声表面波器件制造工艺主要是平面工艺，所以这种元件很容易和电路集成在一起形成智能传感器。目前，采用SAW技术来研制力、加速度、温度、湿度、气体及电压等一系列新型传感器的工作逐渐成为传感器研究的一个热点。

声表面波传感器的工作频率通常为数十MHz，甚至高达1~2GHz。典型的工

作频率有433MHz、915MHz、2.45GHz、5.8GHz。由于其本身具有高频率信号输出和低功耗等特点，因而非常适合于遥测信号的传感和传感器无源化的实现<sup>[5,6]</sup>，作用距离大于1m，典型作用距离为3~10m。

通常按照声表面波传感器的核心传感器件的结构，将声表面波传感器分为两类<sup>[7,8]</sup>：

### 1、谐振型SAW传感器

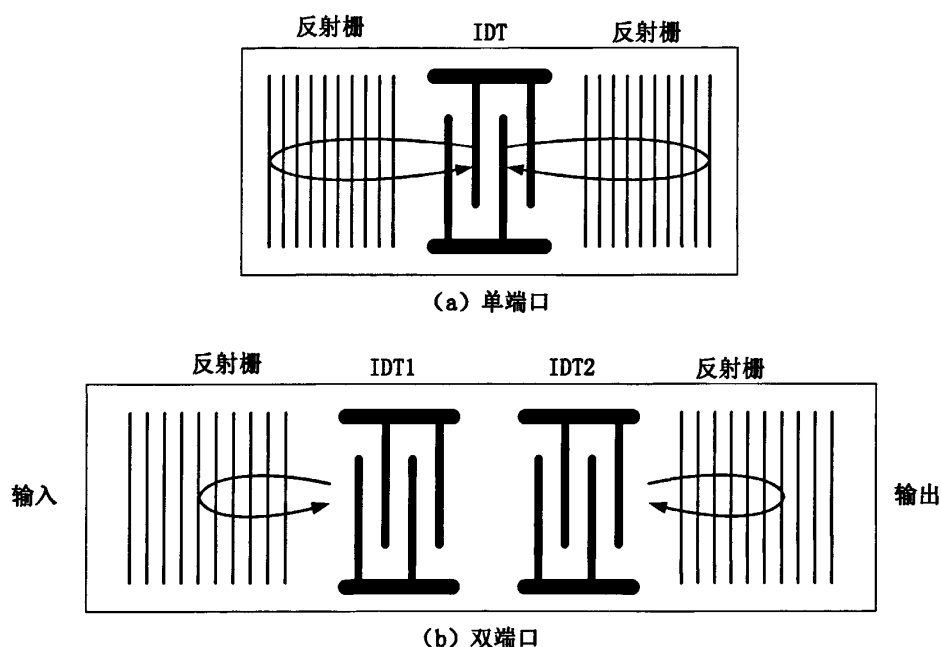


图2.2 谐振型SAW传感器

谐振型SAW传感器是将发射/接收叉指换能器 (Interdigital Transducer, IDT) 置于两个全反射的反射栅之间组成的，其中反射栅构成一个高Q值的声谐振腔，叉指换能器则将空间电磁能耦合进腔体，又从腔体耦合出电磁能。谐振器结构采用一个IDT时，称为单端对谐振器，谐振器结构采用两个IDT时，称为双端对谐振器<sup>[9]</sup>。

由于SAW谐振器对温度的漂移和随时间的老化较敏感，一般选用具有零温度系数的ST切型的石英材料作基片，而反射栅是实现谐振器的关键，一个声表面波谐振器的性能很大的程度上由反射器的特性来决定。一个高效率的反射栅通常由压电电场短路的金属指条或质量负载绝缘指条构成，由于传播方向相反

的声表面波中质点的水平和垂直位移相差 $\pi/2$ ，所以不能同时满足两个相反传播波的边界条件，不能采用通常体波的单个分离的高效的反射镜。而必须采用基于反射元阵列的声表面波反射镜，该反射器指条阵列分布不连续，引起许多小的反射，并使这些小的反射相干叠加，形成全反射；或限制所发生反射的带宽，以便去掉与产生声体波有关的频率<sup>[10-13]</sup>。目前，有几种反射栅阵列形式，每一带条宽和间隔距离皆为四分之一波长。一般选用金属反射条带阵列，其加工方法与IDT加工相同。

谐振型SAW传感器的工作原理是，在基片表面激发与电磁波同频的声表面波，此声波在两个反射栅之间来回多次反射，当IDT的指条周期节长度为反射栅周期节长度的2倍，各反射条的反射波同相相加引起相干反射并形成驻波，构成类似体波振子的谐振状态。其输出的谐振频率 $f$ 同表面波速度 $v_R$ ，及叉指电极周期长 $L$ 有关：

$$f = v_R / L \quad (2.5)$$

由于谐振的特点，该传感器仅仅响应与谐振器固有频率相同或接近的激励信号，因此，可利用声表面波谐振器良好的频率选择性直接测量反映器件固有频率的谐振频率，从而感知被测量量的大小。

## 2、延迟线型SAW传感器

自Marnes于1969年提出延迟线型振荡器结构后<sup>[14]</sup>，国外许多SAW传感测量系统采用该方法，无源无线声表面波传感器有着十分广泛的应用前景，在国内外有不少的应用实例<sup>[15-18]</sup>。

延迟线型SAW传感器结构上有许多形式，主要有编码延迟线（或扫频延迟线）和带反射栅的延迟线结构，如图2.3所示，前者的激励信号主要采用编码脉冲或扫频信号方式，而后者则多采用冲激脉冲或间歇脉冲激励。

延迟线型声表面波传感器仍然以压电材料作为基片，直接在压电基片上镀电极来激发声表面波，而其反射栅则与谐振器型声表面波器件的反射栅不同，反射栅阵不是等间距的，而是距离不等的单个反射栅，因此，反射的效率将远远小于谐振器型反射栅阵列。

延迟线型主要是利用激励信号与接收信号在时间上的时延或相位上的变化进行测量的。当外界被测量量发生变化时，将影响时延或相位。检测出该时延，就可感知被测量量的大小。常用的带反射栅的延迟线则利用反射栅位置的不同，



将延时信号构成不同的编码，当外界被检测量发生变化时，将影响时延或相位。检测出该时延，就可感知被测量的大小。信号的延迟时间 $\tau$ 取决于基片材料的表面波速度 $v_s$ 和IDT与第一个反射栅之间的距离 $l$ ，如公式(2.6)所示。

$$\tau = l/v_s \quad (2.6)$$

延迟线型声表面波传感器主要用在辨识标签领域中。

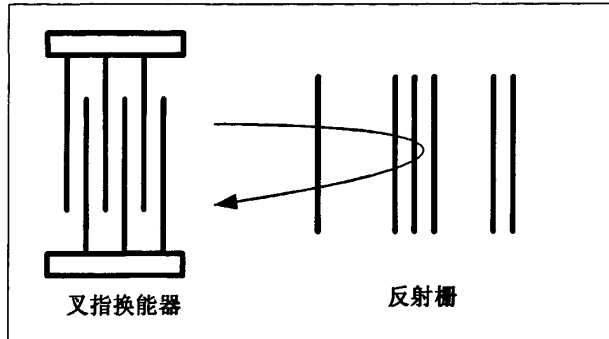


图2.3 用于识别和传感的无源声表面波延迟线传感器

### 第三节 声表面波RFID系统的工作原理

声表面波射频识别(SAW-RFID)系统主要由声表面波无源电子标签(声表面波标签传感器)和阅读器组成,其核心是SAW标签传感器,如图2.4所示。

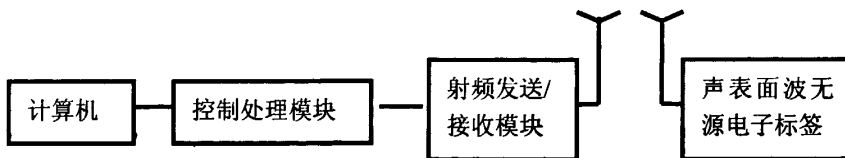


图2.4 SAW-RFID系统的基本组成结构

声表面波无源电子标签(SAW标签传感器)采用反向散射调制方式完成电子标签信息向阅读器的传送。阅读器用于高频询问脉冲的发送和标签响应信号的读取,以及翻译标签代码并组成向计算机输送的信息。

SAW标签传感器主要是由传感器天线、压电基片、叉指换能器和反射栅组成,叉指换能器的两条总线与电子标签的天线相连接<sup>[19-21]</sup>。用压电基片按照平

面电极结构制作叉指换能器和反射栅。为此，通常用 $\text{LiNbO}_3$ 或者 $\text{LiTaO}_3$ 作基片，电极结构是用光刻法完成的，如在微电子技术中生产集成电路时使用的方法一样。

阅读器主要由射频收发模块和控制处理模块组成，其分别由射频电路和数字电路实现。

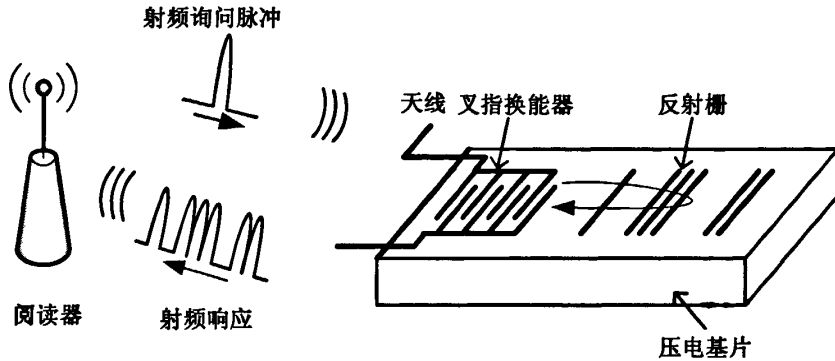


图2.5 SAW标签传感器结构

声表面波射频识别系统的工作原理<sup>[22]</sup>是，阅读器经天线周期地发送高频询问脉冲，声表面波标签传感器经天线接收至叉指换能器，叉指换能器通过逆压电效应将接收到的高频脉冲转换为声表面波，之后声表面波沿基片表面传播到反射栅。反射栅对入射的一小部分表面波进行反射，并返回到叉指换能器，叉指换能器又将反射声脉冲串转变成高频响应电脉冲串，并经标签的天线反射回去。SAW 标签传感器的响应就会传到阅读器的接收单元，接收到的脉冲数量与基片上的反射栅数量相符。同样，单个脉冲之间的时间间隔与基片上的反射栅的空间间隔相对应，从而通过反射栅的空间布局可以表示一个二进制的数字序列。如图 2.6 所示，接收到得的二进制序列为 10111011。

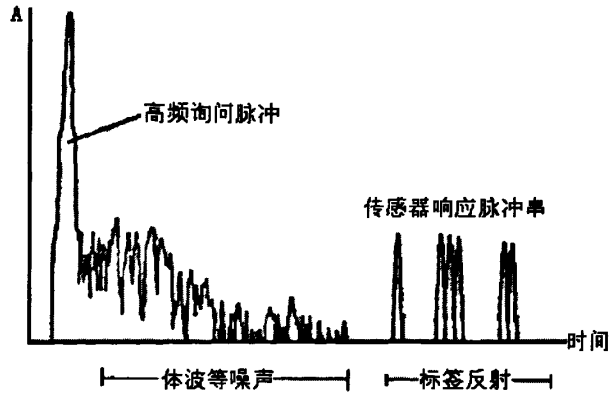


图2.6 用网络分析仪测量的发射和返回信号

由于声表面波传播速度低，比电磁波小  $10^{-5}$  倍，有效的反射脉冲串在经过几微秒的延迟时间后才回到阅读器，在此延迟期间，来自阅读器本身的串扰和周围数百米内物体的反射电磁波已衰减，不会对 SAW 标签传感器的有效信号产生干扰。这对脉冲的接收来说是很重要的优点。

## 第三章 声表面波无源电子标签的设计

声表面波无源电子标签即SAW标签传感器主要是由叉指换能器、压电基片、反射栅和传感器天线组成，其结构如图3.1所示。

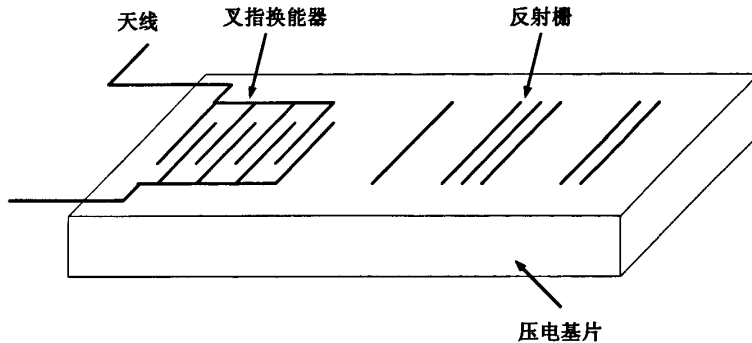


图3.1 SAW标签传感器结构

在设计 SAW 标签传感器时考虑的因素主要有：

1. 从工作频率、频带宽度及激发声波的效率等诸因素来设计叉指换能器的周期、指对数、叉指声孔径等参数。
2. 根据压电材料的性能合理地选择基片以及切向。
3. 从标签的编码容量、作用距离以及减小回波的多次反射，减小器件的插入损耗等方面设计反射栅的结构。

### 第一节 叉指换能器设计

声表面波叉指换能器是由沉积在压电基片上形如叉指状的金属图案构成<sup>[1]</sup>，功能是用来激励瑞利声表面波，属于电一声换能器。由于IDT电一声转换损耗低，设计灵活而且制作容易，因而得到广泛应用，成为各种声表面波器件重要组成部分<sup>[2]</sup>。

### 3.1.1 叉指换能器结构

叉指换能器的结构如图 3.2 所示，相互交叉的金属条称为叉指电极，又称指条。把许多指条连接起来的总线是电信号的引出电极，称为汇流条，用于输入或输出电信号。指条的宽度称为指宽  $a$ ，相邻两根指条的间隔称为指间  $b$ 。连接在不同汇流条上的相邻两根指条相互重叠部分的长度称为声孔径  $W$ 。声孔径决定了 SAW 波束的宽度，只有在声孔径的长度范围内才能产生 SAW。叉指换能器拥有的指条数记做  $n$ 。叉指换能器的周期长度记做  $L$ ，指对数记做  $N$ 。

在每个周期内每根汇流条上只有一个指条的叉指换能器称为单叉指换能器。此外还有裂指 IDT、三指 IDT、空心指 IDT 等换能器<sup>[3,4]</sup>，如图 3.3 所示。三指 IDT 的指条较窄(约  $\lambda/6$ )，这种结构可以有效抑制 SAW 谐振频率时的布拉格反射<sup>[5]</sup>。所以，在要求精确控制频率响应时常采用这种结构。

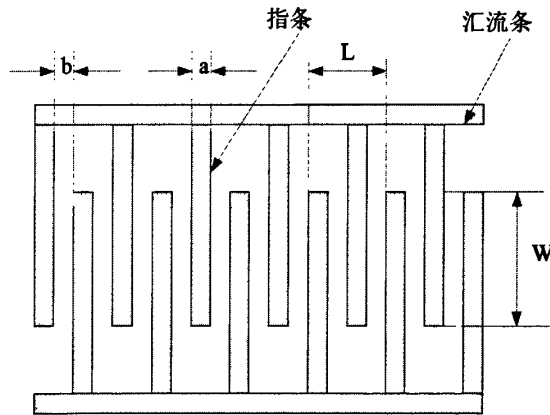


图3.2 IDT指条结构图

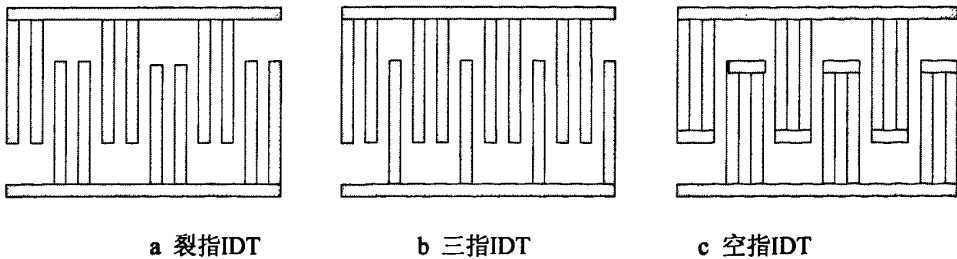


图3.3 三种IDT指条结构

指宽和指间相等即  $a=b$  的叉指换能器称为均匀叉指换能器。声孔径都一样长的均匀叉指换能器称为等叉指换能器。

### 3.1.2 等叉指换能器的基本特性

叉指换能器是激发和检测声表面波的一种声电换能器<sup>[6]</sup>。当交变电压加到器件的两个端子上时，在基片内就建立起交变电场。因为基片是压电体，此交变电场经过逆压电效应在基片内激发起相应的弹性振动，此弹性振动在基片内的传播就形成了弹性波。由于极性正负交替的叉指电极是周期排列的，各对电极激发的声表面波也将呈现周期性的分布，整个 IDT 激发的 SAW 等于每对电极激发的 SAW 的叠加。

设等叉指换能器具有  $(n+1)$  条长度的叉指电极。为简单起见，假定叉指换能器中的每一对叉指电极都激发一个等幅正弦声平面波，而且这些波在换能器下面的传播是无衰减的。因为换能器中的叉指电极是周期性排列的，所以相邻叉指电极对激发的声表面波相位差为<sup>[7]</sup>：

$$\Delta\theta = \omega\tau = \omega \frac{L}{2v_s} \quad (3.1)$$

式中， $L$  为叉指电极的周期， $v_s$  为声表面波的传播速度， $\omega$  为角频率。整个叉指换能器的总输出是全部叉指电极对输出的矢量和：

$$E_t = E_0 e^{j\omega t} \left[ 1 - e^{j\Delta\theta} + e^{j2\Delta\theta} - \dots (-1)^{n-1} e^{j(n-1)\Delta\theta} \right] \quad (3.2)$$

即有

$$E_t = N E_0 \frac{\sin\left(N\pi \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)}{N\pi \frac{\Delta\omega}{\omega_0}} e^{j\left(\omega t + N\pi \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)} \quad (3.3)$$

其中， $L$  为叉指电极的周期， $N = n/2$  为叉指换能器的指对数， $\omega_0 = 2\pi v_s / L$  称为声同步频率，也就是声表面波传感器的工作频率。

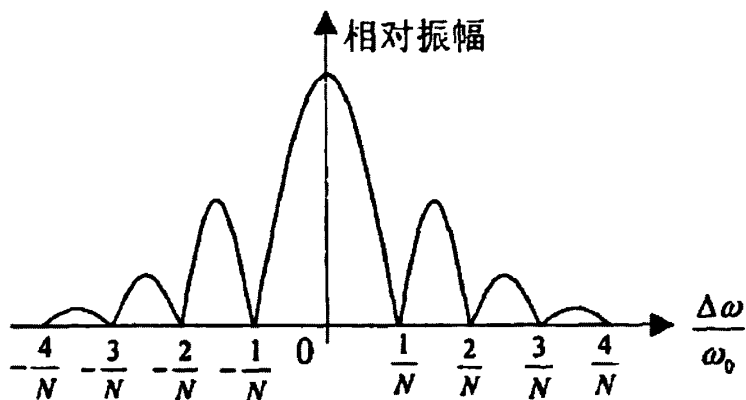


图3.4 等叉指换能器的幅频特性

由公式 (3.3) 可知：叉指换能器的基本特性与它的结构参数密切相关，叉指换能器的工作带宽取决于它所具有的叉指电极对数目  $N$ ，指条数越多频响越窄；同时，叉指换能器的工作频率取决于它的叉指电极排列周期  $L$ ，越短工作频率越高；叉指换能器激发 SAW 的强度与它包含的叉指电极周期段数  $N$  成正比， $N$  越大激发越强。

### 3.1.3 叉指换能器参数设计

本系统中，SAW 标签传感器采用延迟线型结构，IDT 采用三指 IDT 结构，即  $\lambda/6$  分裂指结构：指条和指宽的比例为 1:1，具体的设计参数如下：

中心频率：915MHZ

声表面波长  $\lambda$ ：4.2579 $\mu\text{m}$  ( $\lambda = v/f = 3896/(915 \cdot 10^6) = 4.2579\mu\text{m}$ )

IDT 指对数：12.5 对

指条宽：0.703 $\mu\text{m}$

声孔径：60  $\lambda$  ~ 253 $\mu\text{m}$

铝膜厚度：2000  $\text{\AA}$

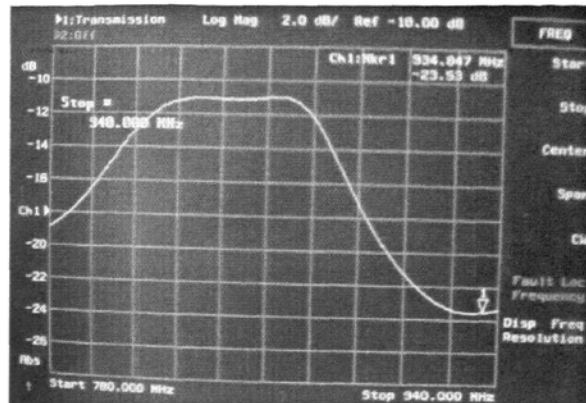


图3.5 网络分析仪测试的标签IDT频率响应图

## 第二节 压电基片材料选取

声表面波的激励是通过具有压电特性的材料表面上沉积金属叉指换能器来实现的，因此基底材料的性质对器件的性能有重要的影响，必须依据性能、经济性等要求综合选用合适的基底材料。

声表面波器件采用的压电材料，分为压电单晶体、压电陶瓷和压电薄膜<sup>[8]</sup>。

压电陶瓷耦合系数大、价格低，容易成形，可通过调节成分调整各种性能，但结构呈颗粒状，有孔隙，难以获得好的表面均匀度，高频衰减大，稳定性和一致性差，一般用于低频器件。

压电薄膜通常是在无压电性的底片上淀积一层压电薄膜，有与压电晶体同样优良的性能，而且价格低廉，但是效率低、质量难以保证。

压电单晶一般具有温度特性好、声波传播损耗小、重复性好、可靠性高等特点。目前SAW器件主要用单晶材料作压电基底，常用的压电单晶材料主要有：石英（SiO<sub>2</sub>）、铌酸锂（LiNbO<sub>3</sub>）、钽酸锂（LiTaO<sub>3</sub>）、锆酸铋（Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>）、铌酸钾（KNbO<sub>3</sub>）等。

用于SAW器件的基片材料和切向的总体选择原则应该是<sup>[9]</sup>：

1. 叉指电极平面具有很好的平整度。希望表面平整度最好在微米级以下。基片尺寸，包括基片大小和厚度，而且面积与厚度之比不能太大。
2. 较高的机电耦合系数，以提高电声转换效率，降低器件插损。 $K$ 值须在0.5%以上，最好是2%以上。



3. 温度系数小,防止温度对测量的影响;传播速度的温度系数要小,其变化幅度在 200ppm 以内。
4. 合适的介电常数,以便采用合理的叉指换能器的孔径长度将器件的输出阻抗匹配至  $50\Omega$ 。
5. 波束偏离小,体波抑制效果好,使能量较为集中在发射和接收叉指换能器之间传播。

通常材料的特性很难同时满足器件的要求,如耦合系数大的材料通常温度系数不好,而有的材料性能很好但是价钱太贵,因此有时不得不在这些性能上做适当的折中。表 3.1 给出了常用单晶材料的一些相关指标<sup>[10]</sup>。

表3.1 常用压电材料的相关指标

材料	切向	速度 (m/s)	机电耦合系数 (%)	温度系数 (ppm/°C)	传输损耗 (dB/cm)
石英	YX	3159	0.22	-24	0.82 (1GHz)
	ST-X	3158	0.16	0	0.95 (1GHz)
LiTaO <sub>3</sub>	YZ	3230	0.66	-35	0.35 (1GHz)
LiNbO <sub>3</sub>	YZ	3485	4.3	-85	0.31 (1GHz)
	128° YZ	3896	6.0	-75	-

从换能的角度看:压电基材的压电耦合系数要高,压电材料的压电耦合效果好,则它的能量转换效率高,能量损失少。另一个与传感器设计密切相关的参数是压电材料的温度系数。压电材料的温度系数小,频率的温漂小,消除了由于环境温度的变化而产生的测量误差。SAW 延迟线型所选用的压电基材应该尽可能地保持声表面波具有较高的频率稳定性,较高的换能效率及较低的能量损耗和较低的延迟温度系数。

表3.2 LiNbO<sub>3</sub>晶体的声表面波性能

切割方向	传播方向	声速V (m/s)	耦合系数 (%)	温度系数 (ppm/°C)	传播损耗 (dB/cm)
Y	Z	3485	4.5	-85	0.31
Z	X	3789	0.52	-78	—
64°Y	X	4742	11.3	-79	—
127.86°Y	X	3953	5.6	-78	1.05
131°Y	X	4000	5.5	-74	0.26
128°Y	Z	3896	6.0	-75	—

我们选择  $\text{LiNbO}_3$  作为基底材料，因为  $\text{LiNbO}_3$  单晶是机电耦合系数最大的材料。物理性质如下：熔点  $1253^\circ\text{C}$ ；居里温度  $1210^\circ\text{C}$ ；密度  $4.649/\text{cm}^3$ ；硬度  $530\sim 780$ ；结构 RC3 三角形；传播速度  $4000\sim 3400\text{m/s}$ ；机电耦合系数  $0\sim 6.0\%$ ；延迟温度系数  $71.1\sim 95.6\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。因为  $\text{LiNbO}_3$  单晶是各向异性材料，即  $\text{LiNbO}_3$  的声表面波特性随切向和传播方向不同而差异很大，其声表面波性能如表 3.2 所示。

综合以上各方面因素，我们选择  $128^\circ\text{Y}$  切 Z 方向传播的  $\text{LiNbO}_3$  基片，声表面波的传播速度是  $3896\text{m/s}$ ，机电耦合系数是  $6.0\%$ ，介电常数  $\epsilon_r = 56.68$ ，延迟温度系数是  $-75\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。该材料在声表面波传感器中已经被广泛应用，并有良好的效果。

### 第三节 标签反射栅设计

#### 3.3.1 反射栅分析

设有一束振幅为  $E_0$  的均匀平面波以  $\theta_i$  角入射于金属栅条，此时声波将发生反射现象，如图 3.6 所示。由声学理论知，声波从自由表面向金属化表面入射时，反射声压与入射声压之比为：

$$r_p = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \quad (3.4)$$

其中， $Z_m = \rho_m v_m / \cos \theta_t$ ， $Z_0 = \rho_0 v_0 / \cos \theta_i$ ， $\sin \theta_i / \sin \theta_t = v_0 / v_m$ ， $\theta_i$  为声波入射角， $\theta_t$  为透射角， $\rho_m$ 、 $v_m$ 、 $\rho_0$ 、 $v_0$  分别为金属化表面和自由表面的质量密度、声速。

对于薄金属膜，一般有  $\rho_0 = \rho_m$ ， $v_0 > v_m$ ，因此  $r_p < 0$ ，即声波从自由表面向金属化表面入射时，反射声波将有“半波损失”。

对于单根金属栅条来说，其反射率为：

$$r = |E_r / E_0|^2 = 4r_p \sin^2(k_0 L \cos \theta_i) \quad (3.5)$$

其中， $E_0$  为入射声波的振幅， $E_r$  为反射声波的振幅， $k_0$  为声波在自由表面

波矢,  $L$ 为金属线条宽度。

从公式 (3.5) 可以看出, 声强的反射率不但与金属栅条的宽度有关, 而且与入射角  $\theta_i$ 、声波矢  $k_0$  有关。当  $k_0 L \cos \theta_i = \pi/2$  时, 两个边界线产生的反射声波相位相差  $2\pi$ , 振幅相加, 使反射声强达极大。当  $k_0 L \cos \theta_i = \pi$  时, 两个边界线产生的反射声波相位相差  $\pi$ , 振幅相互抵消, 反射声强近似为零。

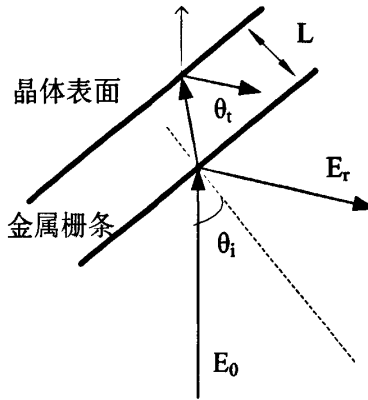


图3.6 晶体表面金属栅条对声表面波的反射

当入射波垂直入射时, 要使反射声强达到最大, 由  $k_0 L \cos \theta_i = \pi/2$  可得, 金属栅条的宽度  $L$  最小为  $\lambda/4$ 。

当标签的多个反射栅位于同一个通道上, 每个反射栅的反射系数不能太大, 以能透过足够的SAW能量到达下一个反射栅。此外, 后面的反射体受前面影响, 各回波脉冲幅度难以均匀。

每个反射栅提供一个有效回波脉冲分量。标签回波是一脉冲串, 其脉冲串各分量的幅度、位相和时延等参数反映了编码特征。

对频率  $f_0$  (圆频率  $\omega_0$ ) 的高频询问脉冲, 其回波的时域表示为:

$$h(t) = \sum_j A_j \cdot E(t - \tau_j) \cdot \sin[\omega_0 \cdot (t - \tau_j) + \theta] \quad (3.6)$$

其中  $A_j$ 、 $\theta_j$  和  $\tau_j$  为第  $j$  个反射回波脉冲分量的幅度、位相和时延,  $E(t)$  为单个回波脉冲分量的包络。由于反射栅间的多次反射, 回波脉冲数  $j$  要比反射栅的

数目 $m$ 大得多，多余部分形成干扰杂波，使有效编码信号幅度、相位改变，或直接形成时域上的虚假信号，造成编码间的幅度不一致，破坏了有、无反射栅间的幅度动态范围。

对竖排式反射栅，回波只由每个反射栅的一次反射回波分量组成，回波由许多不同路径多次反射的分量组成。采用竖排式，可以减小标签的长度却增大了标签的空间。

### 3.3.2 反射栅参数设计及布局

反射栅主要有开路反射栅条、短路反射栅条以及叉指三种。反射栅的种类、布置方式及反射栅的参数对反射回波都有影响。

对于叉指反射栅来说，其最大比特数（LNO）为：

$$I < 10^3 \cdot \frac{B_w}{f_0} \quad (3.7)$$

对于8根反射条，915MHz的中心频率，则输入信号的带宽必须大于234.24 MHz。

对于6根反射条，915MHz的中心频率，则输入信号的带宽必须大于64MHz。

对128°Y切的LiNbO<sub>3</sub>基底（表面波的传播速率为3896m/s），其叉指换能器的工作带宽约为其输入射频信号中心频率的5%。由（3.4）式可知， $I < 50$ 。因而，如果使用叉指反射栅，我们可以实现的最大编码位数为5位。

为了提高编码容量，采用（开）短路反射栅方式，设计了可编程SAW RFID 标签，通过将反射栅极跳线连接到地与否，可以确定这个通道上的反射栅编码。

当反射栅电路处于开路或为感性负载时，反射栅电路将对来自于叉指换能器产生的声表面波进行反射，而当相应反射栅电路短路或为容性负载时，反射极电路对声表面波的反射能力显著下降。因此当叉指反射栅开路时，反射回波幅值较高，表示编码“1”；当以尽量短的导线短接叉指反射栅时，反射回波幅值较低，表示编码“0”。图3.6，3.7是设计的标签的上下表面示意图。

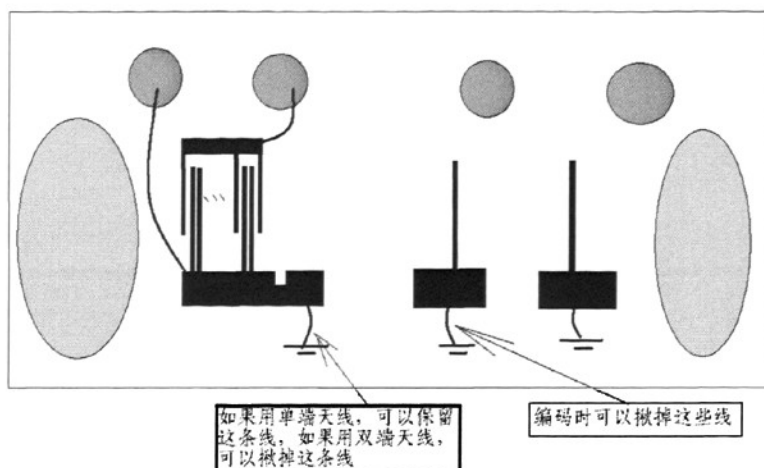


图3.6 标签上表面示意图

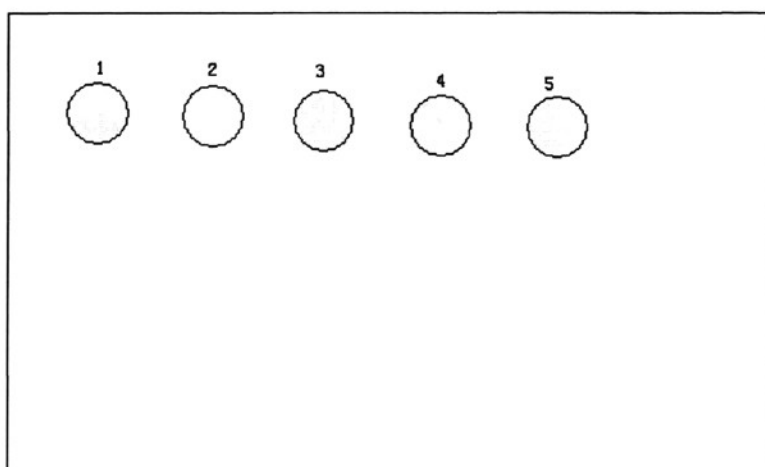


图3.7 标签的下表面的示意图

对 $128^\circ Y$ 切的 $\text{LiNbO}_3$ 基底（表面波的传播速率为 $3896\text{m/s}$ ），其叉指换能器的工作带宽约为其输入射频信号中心频率的5%。对于中心频率在 $915\text{MHz}$ 的射频信号输入源，则输入信号的带宽必须小于 $45\text{MHz}$ 。本设计采用带宽 $20\text{MHz}$ 的脉冲信号，即信号的脉冲宽度为 $50\text{ns}$ 。

设计的反射栅如下：

1. 叉指换能器接收到声表面波距第一个反射条回波信息所需要的时间 $t$ 为 $1200\text{ns}$ ，有第一个反射栅与换能器之间的距离为  $600\text{ns} * 3896\text{m/s} =$

2340  $\mu\text{m}$ 。

2. 反射栅之间的最小时间间隔为 1 个输入信号脉宽。则反射栅间隔为  $25\text{ns} * 3896 \text{ m/s} = 97.4 \mu\text{m}$ 。
3. 根据  $v = \lambda f$ ，得  $\lambda = v / f = 3896 / (915 * 10^6) = 4.2579 \mu\text{m}$ 。等间距均匀反射栅，其栅的宽度应为  $\lambda/4$ 。 $\lambda$  为声表面波的波长。反射栅的宽度为  $\lambda/4 = 1.06448 \mu\text{m}$ 。

我们设计的的反射栅结构如图3.8、3.9所示，分别设计了具有4根和8根反射栅的声表面波标签。

为了减小标签反射栅的多次反射回波信号的干扰，我们结合纵向排列和竖式排列，又设计了另一种反射栅结构，如图3.10所示。

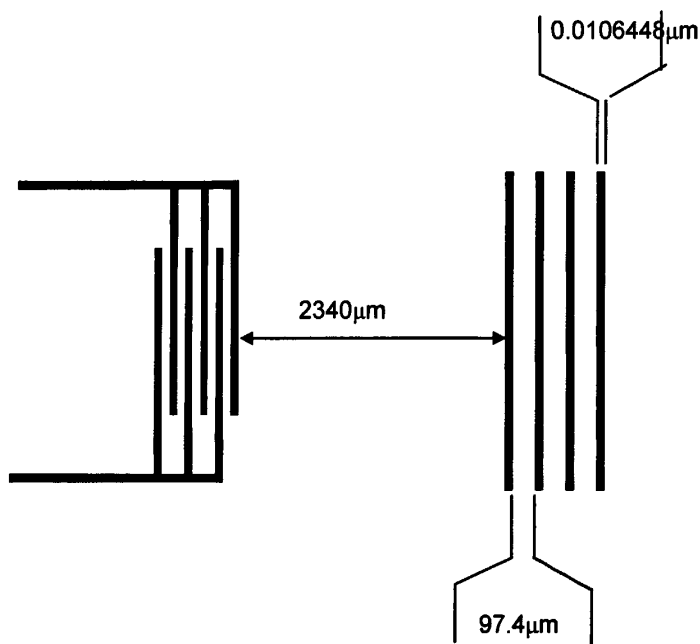


图3.8 四反射栅标签结构图

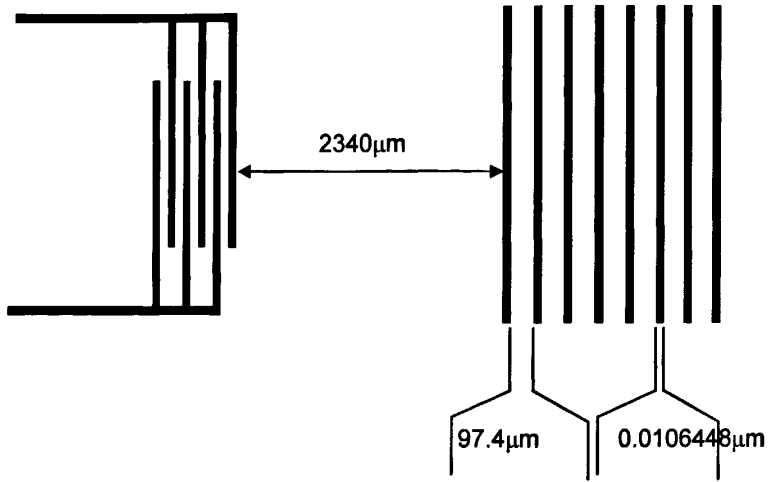


图3.9 八反射栅标签结构图

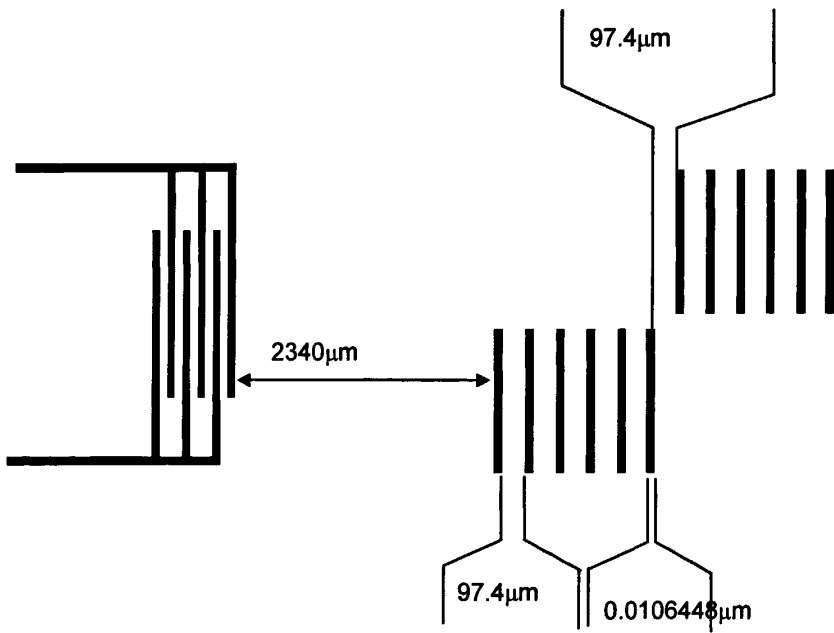


图3.10 多通道传感标签结构图

## 第四章 阅读器的设计与实现

本论文设计实现了一个基于普通射频识别的阅读器，主要由射频收发模块和控制处理模块组成<sup>[1]</sup>，其分别由射频电路和数字电路实现。其中，硬件几乎只完成射频信号接收和发射的功能，数字电路支撑软件实现，这有利于增强系统适用性。采用由软件替代硬件实现核心功能的方式，完成前向射频基带信号的输出、编码，反向标签信息的获取，有利于系统的升级更新或者功能改进。图 4.1 为阅读器的示意框图。

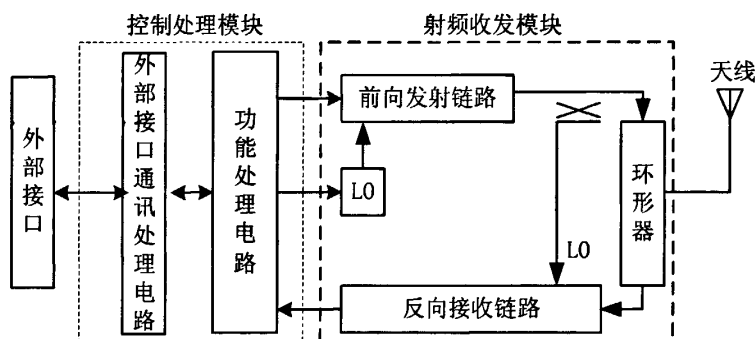


图4.1 阅读器示意框图

基本技术指标如下：

- 发射速率：80KHz
- 发射功率：30dBm
- 工作频率：915MHz
- 调制方式：ASK

### 第一节 阅读器的射频收发模块硬件设计<sup>[2-6]</sup>

整个 RF 电路由本振 LO，前向链路、反向链路几个部分构成。其描述如下：

- 前向链路：ARM——低通滤波——功率放大——环形器——天线；
- 反向链路：天线——环形器——检波——放大——比较——ARM；



## 4.1.1 本振LO

传统的锁相环由模拟电路实现，而全数字锁相环与传统的模拟电路实现的PLL相比，具有精度高且不受温度和电压影响、环路带宽和中心频率编程可调、易于构建高阶锁相环等优点，并且应用在数字系统中时，不需A/D及D/A转换。

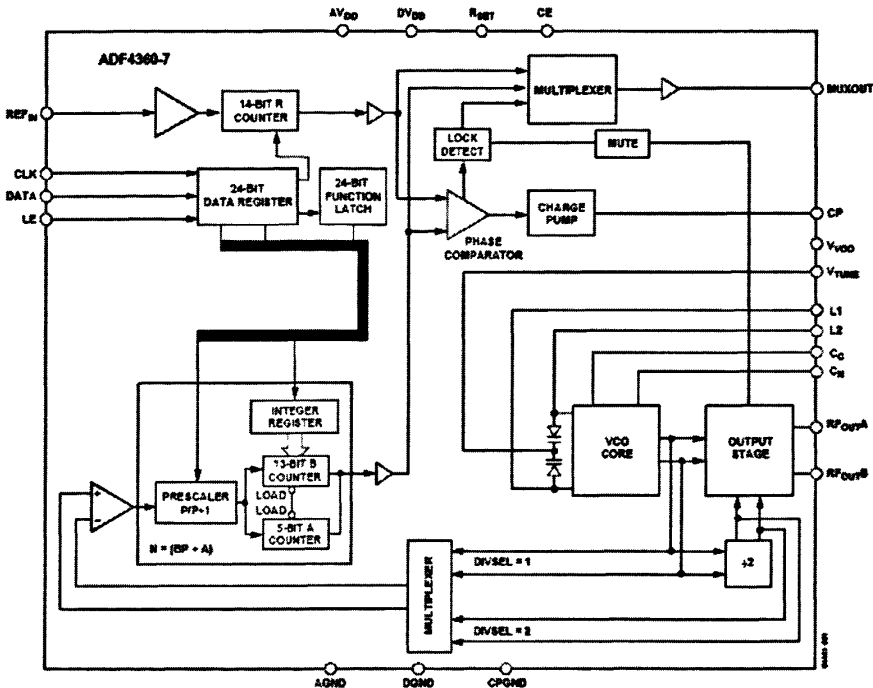


图4.2 ADF4360-7的功能框图

本系统的本振设计采用ADI公司的ADF4360-7，它集成了频率综合器和压控振荡器的功能，具有超宽的输出频率范围（350~1800MHz），芯片内部所有寄存器的配置采用一个简单的3线串行接口来控制，芯片工作在3.0~3.6V<sup>[7]</sup>。

该芯片主要由低噪声数字鉴相器，精确电荷泵，可编程参考分频器，可编程A、B计数器及双模前置分频器（P/P+1）等部件组成。数字鉴相器用来对R计数器和N计数器的输出相位进行比较，然后输出一个与二者相位误差成比例的误差电压。精确电荷泵采用可编程电流设置完成输出。可编程参考分频器实际上是一个14bit的R计数器，主要完成对外部恒温晶振进行分频得到参考频率。可编程A、B计数器及双模前置分频器（P/P+1）共同完成主分频比N（ $N = BP$

+ A) [8]。

VCO 频率  $f_{VCO}$  经过 A, B, P 计数器进行吞脉冲分频, 参考晶体振荡器频率  $f_{REFIN}$  经过 14 位计数器 R 分频, 二者经过鉴相器进行相位比较后输出 VCO 控制电压。

$f_{VCO}$  与  $f_{REFIN}$  关系如下:

$$f_{VCO} = [(P \times B) + A] \times f_{REFIN} / R \quad (4.1)$$

其中参考系数 A, B, R 和 P 的取值范围及其之间的关系如下:

$$1 \leq R \leq 16383$$

$$0 \leq A \leq 31$$

$$3 \leq B \leq 8191$$

$$P = 8, 16, 32, 64$$

$$B \geq A$$

$$N = BP + A$$

各参考系数计算公式如下:

$$R = \frac{\text{参考输入}}{\text{频道间隔}} \quad (4.2)$$

$$N = \frac{\text{输出频率}}{\text{频道间隔}} = B \times P + A \quad (4.3)$$

$$B = \text{取整} \left[ \frac{N}{P} \right] \quad (4.4)$$

$$A = N - B \times P \quad (4.5)$$

在本设计中选用 20MHz 的温度补偿晶体振荡器 (TCXO) 作为参考频率, 输出频率为 915MHz, 频道间隔为 200KHz, 取  $P=8$ , 计算结果如下:

$$R = \frac{20M}{200K} = 100, \text{ 满足 } 1 \leq 100 \leq 16383$$

$$N = \frac{915M}{200K} = 4575$$

$$\text{所以 } B = \text{取整} \left[ \frac{4575}{8} \right] = 571, \quad A = 4575 - 571 \times 8 = 7$$

满足  $0 \leq 31 \leq 31$ ,  $3 \leq 142 \leq 8191$ ,  $B \geq A$

锁相环的参考频率和输出频率的分频计数器均可由主控模块通过软件完成设置，如图 4.3 是主控模块与频率合成器通信的时序图。主机通过 3 线串口 SPI(CLOCK、DATA、LE)对 24 位数据移位寄存器编程，DATA 在每个 CLOCK 的上升沿有效，按照先高位后低位的原则。当 LE 上升沿到来的时候，根据寄存器控制位的值，将数据寄存器中的值放入不同的计数器中，从而完成每个计数器的设置。

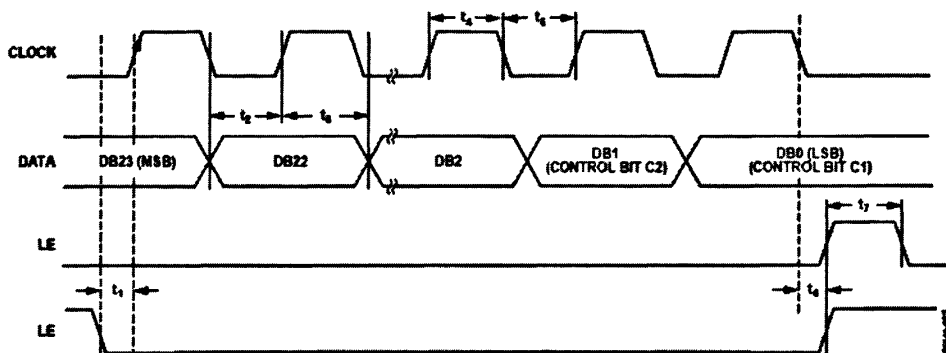


图4.3 PLL控制时序图

#### 4.1.2 发射模块

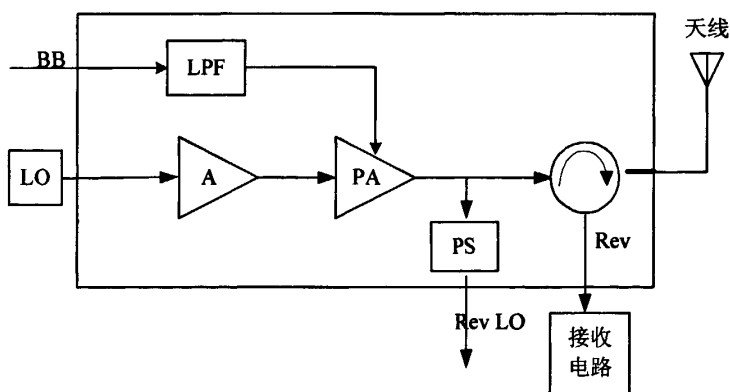


图4.4 幅度调制的发射电路架构

发射电路主要包括低通滤波器 (LPF)，功率放大器(PA)，放大器(A)，功率分配器 (PS) 以及环形器，如图 4.4 所示。其中 LPF 对前向基带信号 (BB) 进

行模拟低通滤波；PA 对 PLL 输出的本振信号进行功率放大以及提供 OOK 调制；A 用来驱动 PA； PS 对输出信号进行采样，作为接收解调电路的本振信号；环形器完成收发信号的隔离。

### 一、基带滤波

电路对 ARM 和 DAC 发送来的前向基带信号进行模拟滤波，以降低基带信号的频谱扩散，从而降低天线口发射频谱的杂散。滤波器的实现可采用两种方案，一是采用 LC 的方式；二是采用有源滤波的方式。

有源滤波器是由运算放大器和 RC 网络组成，它能够克服无源滤波器体积大、Q 值低、调试复杂的缺点。由于运算放大器增益高、输入阻抗高、输出阻抗低，因此由运放构成的有源滤波器能提供一定的信号增益和缓冲作用。除此之外，有源滤波器还具有设计简单，性能良好，体积和重量大大缩小等优点。因此优先选择有源滤波的方案。

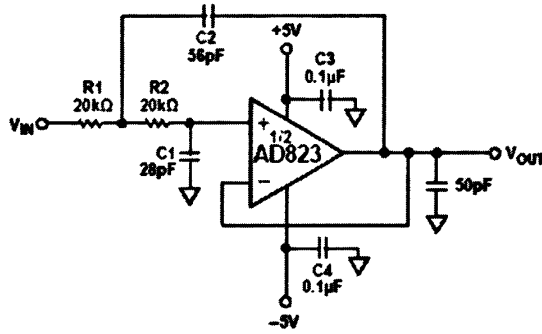


图4.5 二阶低通滤波器原理图

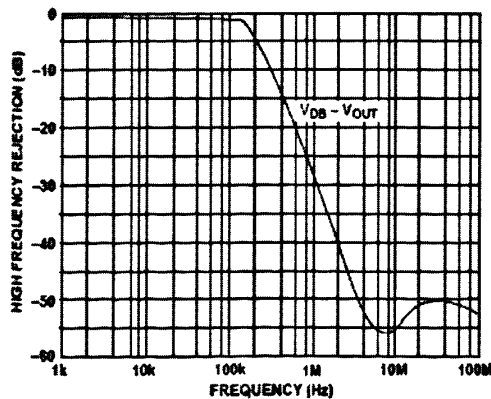


图4.6 二阶低通滤波器的频率响应特性

由于阅读器的前向数据率为 80KHz，因此滤波器也相应设计为固定带宽。考虑一定的过渡带，滤波器 3dB 带宽设计为 100KHz，本系统采用 ADI 公司的 AD823 设计二阶低通滤波器，原理图如图 4.5 所示，图 4.6 是其频率响应特性。

## 二、调制

阅读器的调制方式采用最简单的幅移键控<sup>[9]</sup>。在幅移键控中载波幅度是随着调制信号而变化的。最简单的 ASK 方式是当信号源要发送‘1’时，它就发送一个大幅值的载波，当需要发送‘0’时，它就发送一个低幅值的载波。通断键控(OOK)调制是这种方法的进一步简化版本，信号源在需要发送‘0’的时候不用发送载波。它的时域表达式为

$$S_{OOK}(t) = a_n \cdot A \cos \omega_o t \quad (4.2)$$

这里 A 为载波幅度， $\omega_o$  为载波频率， $a_n$  为二进制数字。

$$a_n = \begin{cases} 1, & \text{出现概率为 } P \\ 0, & \text{出现概率为 } 1-P \end{cases} \quad (4.3)$$

典型波形如图 4.7 所示。

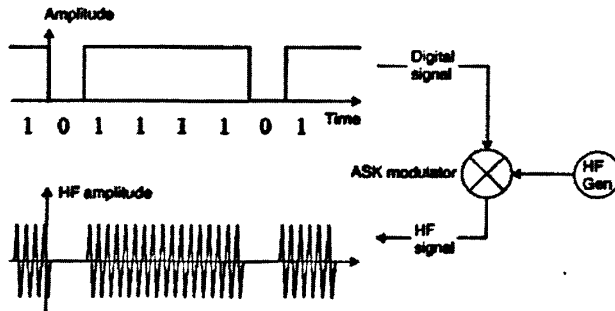


图4.7 二进制幅移键控(ASK)调制示意图

## 三、功率放大

PLL 电路提供的本振信号进入放大链路，提供 OOK 调制信号的载波；经滤波后的基带信号直接对 PA 的增益控制端进行控制，以控制 PA 的输出功率的同时完成 OOK 调制和功率放大。

高频功率放大器的工作特点是低电压、大电流<sup>[10]</sup>，主要技术指标是输出功率和转换效率。

市场上的 PA 芯片很多，表 4.1 给出了几家公司在 915MHz PA 芯片的性能比较。通过综合比较，由 RFMD 公司提供的 RF5110G 具有高增益、高功率、高效

率的特点，在同类芯片中处于领先地位，因此高增益功率放大电路将选用 RF5110G 作为 PA 主芯片。

表 4.1 几家公司高增益功率放大芯片的性能比较

型号	RF5110G	MAX2648	SDA3090A	AP601
最大输出功率	34.5dBm	26dBm	20dBm	35dBm
输出噪声功率	-72dBm	-50dBm	-68dBm	-45dBm
输入阻抗	50 Ω	50 Ω	50 Ω	50 Ω
输入驻波比	2.5:1	2.8:1	3.5:1	5.8:1
输出驻波比	8:1	6:1	12:1	10:1

RF5110G 具有三级功率放大，主要性能特性有<sup>[11]</sup>：

- 高功率、高效率，效率达到 57%；
- 输出功率为+36dBm；
- 增益高达 32dB；
- 工作电平：2.7V~4.8V；
- 频率范围：150MHz~950MHz；
- 工作环境：-40℃~85℃。图 4.8 为调制和功率放大电路的原理图。

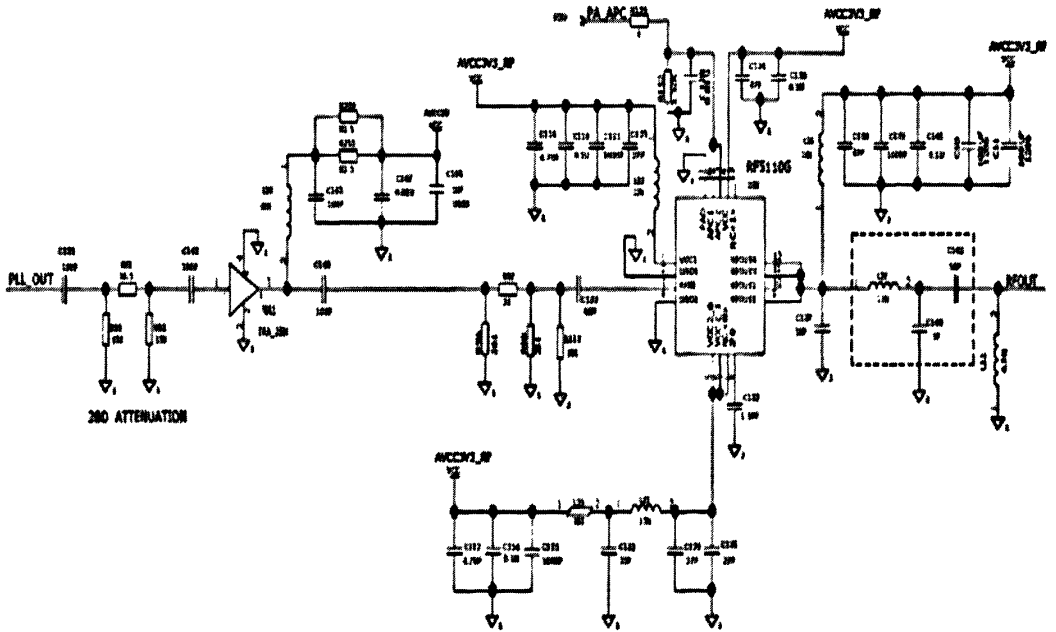


图4.8 调制和功率放大电路原理图

### 4.1.3 接收模块

在选择接收机电路方案的时候，设计复杂度、成本、功耗等是首先需要考虑的因素。常见的两种接收机设计原理包括超外差式和零中频式。

超外差接收机不仅电路复杂，成本也非常昂贵，相比之下，零中频接收机具有实现简单，成本低的优点，能直接完成由射频到基带的转换，该技术降低对 ADC/DAC 的速率要求，减小了链路的环节，从而降低因模拟电路带来的离散性。

本设计采用零中频接收机实现对射频信号的接收。接收到的射频信号经带通滤波器滤波以后，与同相的两路本振信号混频，分别产生同相和正交两路基带信号。两路同相的本振信号由功率分配器在发射电路的输出端得到，两路正交的射频接收信号由 3dB 定向耦合器得到。由于本振信号频率与射频信号频率相同，因此混频后直接产生基带信号，也就是零中频信号。混频之后对得到的基带信号进行低通滤波，滤除镜像频率，之后被数字化，经处理后得到标签的信息，如图 4.9 所示。

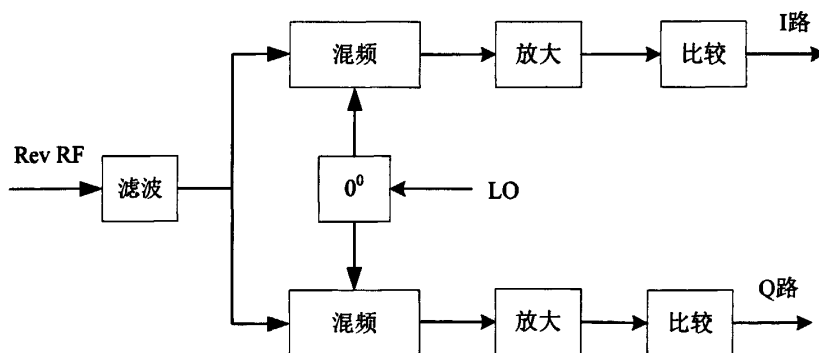


图4.9 接收电路的结构框图

零中频接收机后续的正交双通道 I、Q 路的处理是必须的，通过正交双通道的处理可以解决标签返回信号初始相位不确定而造成的单通道时信号时有时无的问题。理论与时间证明，正交双通道处理时，当一个通道无信号时正好是另一个通道信号最大的情况。因而通过对 I、Q 双路返回信号的分析判断，可做到不丢失信号。

#### 一、带通滤波

本设计采用 SAW 滤波器 SF2053E 对从天线接收的射频信号进行中频滤波。声表面波滤波器具有体积小，重量轻，中心频率可做得很高，相对带宽较宽，理想的矩形选频特性等特点。

## 二、混频

本设计采用单端结构的微带混频器实现信号的正交解调,如图 4.10 所示，利用 3dB 定向耦合器的特性分为 I、Q 两路，再使用二极管电容网络进行 ASK 检波，得到分离的 I、Q 两路解调信号，以消除盲点。

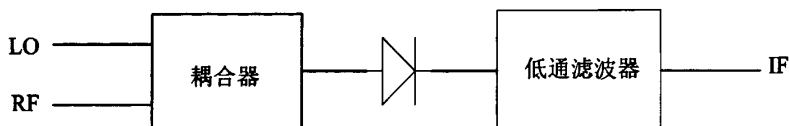


图4.10 单端混频器的原理结构

定向耦合器是微波与雷达馈线技术中广泛应用的元件之一，用于对相应传输方向的微波信号提取和功率定向分配，它是一种四端口器件。本设计采用安伦公司的 3dB 定向耦合器 XC0900E-03S，表 4.2 是其作为功率分配器的功能说明。

表 4.2 XC0900E-03S 作为功率分配器的功能说明

Configuration	Pin1	Pin2	Pin3	Pin4
Splitter	Input	Isolated	-3dB ∠θ-90	-3dB ∠θ
Splitter	Isolated	Input	-3dB ∠θ	-3dB ∠θ-90
Splitter	-3dB ∠θ-90	-3dB ∠θ	Input	Isolated
Splitter	-3dB ∠θ	-3dB ∠θ-90	Isolated	Input

如图 4.11 所示，I 路和 Q 路采用同样的解调方式，利用 3dB 定向耦合器的相位特性实现差分解调。本振由发射电路的输出端耦合得到，经过功率分配器等分，分别作为 I 路和 Q 路的本振信号，计算如下：

$$\text{设反向射频信号} \quad \text{Rev RF} = R(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.4)$$

$$\text{Rev LO} = \sin(\omega t) \quad (4.5)$$

则根据 3dB 定向耦合器的特性，有：

$$\text{Rev I} = 0.707 \cdot R(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.6)$$

$$\text{Rev Q} = 0.707 \cdot R(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi - 90) \quad (4.7)$$



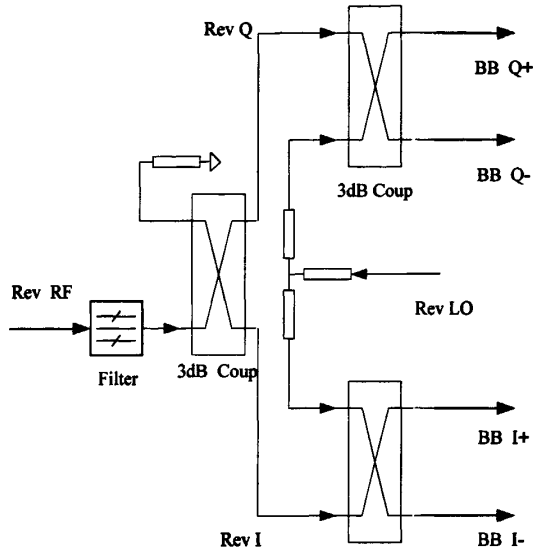


图4.11 3dB耦合器的电路示意框图

经过 3dB 定向耦合器后，进入 IQ 各路的信号如表 4.3，其中，由于 LO 的电平是可以由设计保证的，因此，不计入 LO 的幅度。

表 4.3 IQ 各路信号

	REV 信号	LO 信号
I-	$0.5 \cdot R(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi)$	$\sin(\omega t - 90)$
I+	$0.5 \cdot R(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi - 90)$	$\sin(\omega t)$
Q-	$0.5 \cdot R(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi - 180)$	$\sin(\omega t)$
Q+	$0.5 \cdot R(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi - 90)$	$\sin(\omega t - 90)$

这四路信号再经过二极管进行检波，选用 HSMS-285X 系列射频检波管，适用于 1.5GHz 以下输入功率小于 -20dBm 的小信号的设计和优化，它被广泛的使用在无源 RFID 和 RF 标签中，具有高的检波灵敏度 ( $>50\text{mV}/\mu\text{W}$  at 915MHz)，低的闪烁噪声 ( $-162\text{dBV}/\text{Hz}$  at 100Hz) 等。

检波后的结果如表 4.4。其中，A 为变频损耗，射频以及更高次项已经忽略。显然，I-与 I+的输出是一对差分信号 (I 路)，Q-与 Q+的输出也是一对差分信号 (Q 路)，它们之间是正交的。

表 4.4 IQ 各路检波结果

信号	检波结果
I-	$-0.5 * A * R(t) * \sin\varphi$
I+	$0.5 * A * R(t) * \sin\varphi$
Q-	$-0.5 * A * R(t) * \cos\varphi$
Q+	$0.5 * A * R(t) * \cos\varphi$

### 三、放大比较

由检波电路输出的信号一般只有 10mV 左右，必须经过适当的放大后才能被控制模块所识别。为降低噪声，每一路电路首先使用两级低噪声的运放，对检波电路输出的小信号进行高增益的放大（共约 1000 倍电压放大）。

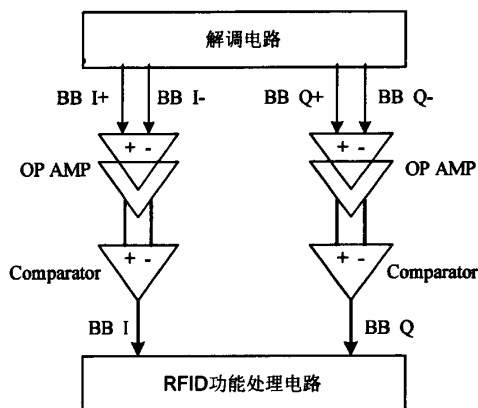


图4.12 放大比较电路示意框图

IQ 两路信号的电路形式完全相同。然后，利用比较器对信号进行整形，并输出标准的数字信号，送给 RFID 功能处理电路进行检测，具体是用 ARM 定时器的捕获功能采入比较器输出的信号。

考虑到对以后需求的扩展，需要进行 I、Q 两路处理。

当采用 I、Q 两路处理时，I、Q 两路接到 LPC2138 上的两个 CAP 引脚上。同时读取 I、Q 两路，将寄存器的结果存储在缓冲中，对 IQ 两路进行前导码匹配和解码。

如果有一路正确，另一路发生错误，则采用正确的一路丢弃错误的一路。如果两路解码都正确，则进行长度比较和校验等检查，丢弃错误的一路，

如果两路都正确，则采用检查后长度比较长的那一路。

#### 4.1.4 其它关键器件

##### 一、功率分配

在微波系统中，经常需要将一路传输功率分为几路，而且对于功率的分配比例要求也各不相同。定向耦合器、功率分配器及路桥元件都属于功率分配元件。

在射频输出端，采用功率分配器 PD09-73 对输出的射频信号进行采样，作为接收解调电路的本振信号。PD09-73 的两路输出为同相，具有较小的插入损耗（大约 0.4dB），较大的隔离度（大约 25dB），较小的相位不平衡（相位不平衡度为  $1.0^{\circ} \sim 3.0^{\circ}$ ）和幅度不平衡（幅度不平衡度为 0.1~0.3dB）。

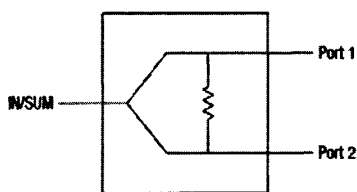


图4.12 功率分配器PD09-73的结构图

##### 二、收发隔离

在无源超高频射频识别系统中，为了给无源标签提供能量，需要不停地给标签发射没有调制的连续电磁波，这样，标签在返回数据的同时发射机需要不断地通过天线发射同频率的电磁波，也就是说，发射和接收必须同时同频的，而本系统的发射和接收共用一个天线，因此，射频收发链路必须进行隔离，这里选用了环形器完成收发信号的隔离。

环形器是一个多端口器件，它的典型结构有  $N$  ( $N$  大于等于 3) 个端口，顺着它环绕方向， $N$  端口之间的通路损耗很小，而反向通路之间的损耗很大<sup>[12]</sup>，我们则可以认为沿着环绕方向各口之间是连通的而反向各口相互隔离，因此其中电磁波的传播只能沿着单方向环形，反方向则是隔离的。图 4.13 是一种三端口 Y 结形环形器，它是最常见的一种结构形式，由环形器的特性可知，信号传输的方向是： $P1 \Rightarrow P2$ ， $P2 \Rightarrow P3$ ， $P3 \Rightarrow P1$ 。

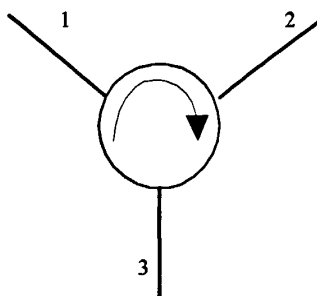


图4.13 Y结形环形器示意图

本系统选择了 Tyco Electronics 公司的单节点环形器 MAFRIN0370，工作频率为 860MHz~960MHz，其隔离度典型值为 29dB，插入损耗为 0.21dB。发射信号由环形器的 2 号脚进入，3 号脚输出，接收信号由环形器的 3 号脚进入，1 号脚输出。

## 第二节 阅读器的控制处理模块硬件设计

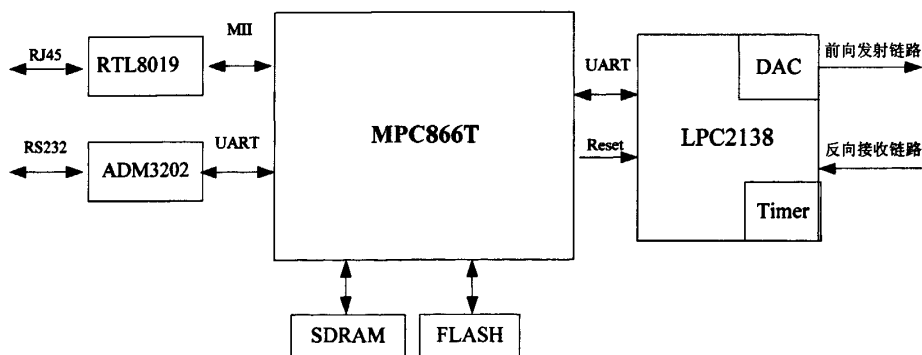


图4.12 数字电路示意框图

阅读器采用双处理器设计，如图 4.12 所示，一块 MPC866T 处理器，一块 LPC2138 处理器。其中 MPC866T 负责承载 linux 操作系统，负责提供对阅读器整体以及对外接口的管理；而 LPC2138 则负责完成处理前、反向射频链路的基带信号的输入和输出，前反向的编解码。

MPC866T 提供一个快速以太网接口,三个串口。其中一个串口用于调试，一个用于与 LPC2138 通信，一个用作对外的串口。LPC2138 则可以提供两个串口

设备。一个用于内部与 MPC866T 通信，一个用于调试。两块处理器之间就是通过 RS232 串口进行内部通信。根据用户手册，最大通信速率可以达到 115200bps。

#### 4.2.1 外部接口通讯处理电路

外部接口通讯处理电路主要完成系统对外接口的协议处理。系统选择 Freescale 公司的 PowerQUICC 系列嵌入式通信处理器 MPC866T，它是 MPC866 PowerQUICC 系列的一款嵌入式通信处理器，它采用双处理器结构，支持嵌入式 Linux 操作系统，具有非常优秀的性能。该芯片内部集成了 PowerPC 内核 RISC 处理器和一个 RISC 通讯处理器（CPM）；MPC866T 核具有高达 100MIPS 的处理能力，外部总线高达 66MIPS；支持 1.8V 的核电压，I/O 口支持 3.3V，具有 5V 兼容能力；提供 MMU 以支持 Linux 操作系统；支持一路 10/100M 网络接口、一路 SPI 接口和三路 UART 接口，其功能强大的通讯处理器具有灵活的串行通讯接口，可运行多种通讯协议规程，特别适合于网络和通讯协议的处理<sup>[13]</sup>。它为通信系统的低成本实现提供了更高的性价比，并且在通信方面的能力有所增强。

#### 4.2.2 存储部分的接口设计<sup>[14]</sup>

通讯处理电路的存储器件主要有 FLASH 和 SDRAM，他们的存储空间分配见表 4.5。

表 4.5 存储空间分配表

片选信号	地址范围	存储容量	总线宽度	用途分配
CS0	800,0000h~8FF,FFFFh	8MB	16Bit	FLASH
CS1	900,0000h~9FF,FFFFh	32MB	32Bit	SDRAM
CS2---CS7				备用片选信号

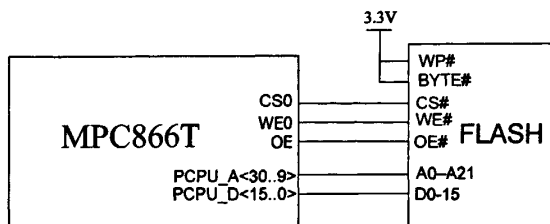


图 4.13 CPU 与 FLASH 连接示意框图

系统采用 8MB 容量的 Flash 芯片作为系统引导存储器和文件系统的非易失性存储介质,设计时选用了 SPANSION 公司 AM29PDL127H 芯片,该芯片为 16bit 数据位宽 64bit 容量 NOR 模式 Flash。电路设计时,由于 MPC866T 启动时默认采用第 0 块存储区间作为引导存储区,所以将片选 CS0 作为 Flash 芯片的选通信号。如图 4.13 所示。

由于系统要运行 Linux 操作系统,系统需要 32MB 的 SDRAM 作为内存,因此选用两片 Micron Technology 公司的 MT48LC8M16A2 芯片,该芯片单片容量为  $2M \times 16bit \times 4bank = 128Mbit = 16MB$ ,数据宽度为 16bit,因此采用两片 SDRAM 芯片组合成  $2M \times 32bit \times 4bank$  的 SDRAM 单元,数据线组合成 32bit 宽,容量 32MB,用 MPC866T 的第二块存储区间的 CS1 信号选通,如图 4.14 所示。

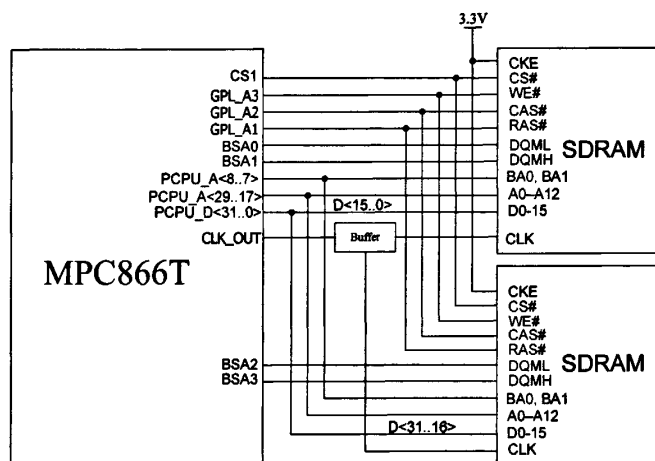


图4.14 CPU与SDRAM连接示意框图

### 4.2.3 信号处理电路的接口设计

MPC866T 与 LPC2138 的接口采用 UART 协议实现。接口示意图见图 4.15。该接口在系统中起到两个作用:处理双 CPU 之间的数据交换;提供系统的在线升级功能,由 MPC866T 通过 ISP 模式对功能处理 CPU 进行升级。

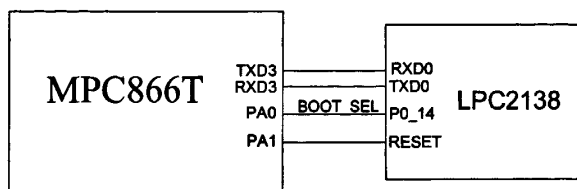


图4.15 MPC866T与LPC2138的连接示意框图

#### 4.2.4 功能处理电路设计

RFID 功能处理电路主要完成阅读器与标签的前反向数据的业务处理。系统选用 NXP 公司的 LPC2138。LPC2138 具有如下特性<sup>[15]</sup>:

- 小型 LQFP64 封装的 16/32 位 ARM7TDMI-S 微控制器。
- 8/16/32kB 片内静态 RAM。
- 片内 Boot 装载软件实现在系统/在应用中编程 (ISP/IAP)。扇区擦除或整片擦除的时间为 400ms, 1ms 可编程 256 字节。
- EmbeddedICE@RT 和嵌入式跟踪接口可实时调试(利用片内 RealMonitor 软件)和高速跟踪执行代码。
- 2 个 8 路 10 位 A/D 转换器共包含 16 个模拟输入, 每个通道的转换时间低至 2.44us。
- 1 个 10 D/A 转换器, 可提供不同的模拟输出。
- 2 个 32 位定时器/计数器(带 4 路捕获和 4 路比较通道)、PWM 单元(6 路输出)和看门狗。
- 实时时钟具有独立的电源和时钟源, 在节电模式下极大地降低了功耗。
- 多个串行接口, 包括 2 个 16C550 工业标准 UART、2 个高速 I2C 接口(400 kbit/s)、SPI 和 SSP(具有缓冲功能, 数据长度可变)。
- 向量中断控制器。可配置优先级和向量地址。
- 多达 47 个 5V 的通用 I/O 口(LQFP64 封装)。
- 9 个边沿或电平触发的外部中断引脚。
- 通过片内 PLL 可实现最大为 60MHz 的 CPU 操作频率, PLL 的稳定时间为 100us。
- 片内晶振频率范围: 1~30 MHz。
- 2 个低功耗模式: 空闲和掉电。

- 可通过个别使能/禁止外部功能和降低外部时钟来优化功耗。
- 通过外部中断将处理器从掉电模式中唤醒。
- 单个电源供电，含有上电复位（POR）和掉电检测（BOD）电路。CPU 操作电压范围：3.0~3.6 V (3.3 V $\pm$ 10%)，I/O 口可承受 5V 的最大电压。

在本系统中，前向基带信号的产生用 DAC 完成，反向则用 ARM 定时器的捕获功能采入比较器输出的信号。

以上一二两节介绍了阅读器的整体硬件设计，图 4.16 是阅读器的实物图。

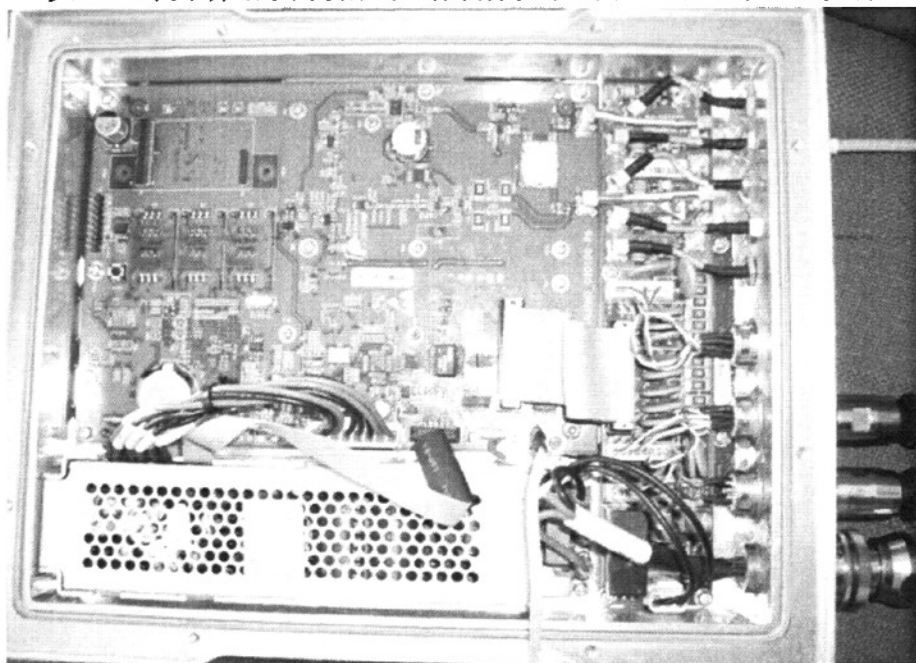


图4.16 阅读器实物图

### 第三节 阅读器的功能处理软件设计

阅读器的软件系统完成设备的管理、监控，以及完成标签信息获取、管理和上报。主要由两大块构成，分别是运行在 MPC866T 上的主控软件和运行在 LPC2138 上单片机软件。

阅读器的功能处理模块主要由 LPC2138 及其外围构成，并使用嵌入式实时操作系统。使用 RTOS 可以有效的对多个任务进行调度，对各任务赋予不同的优先级可以保证紧急任务得到及时响应。本系统采用由 Jean J.Labrosse 编写的开放



式实时操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 。

阅读器的功能电路模块如图 4.17 所示, RFID 功能电路软件实现了前向射频基带信号的输出、编码, 以及反向标签信号的解码。主要由三个层次构成, 分别为驱动层、调度层、应用层。驱动层提供对硬件的操作接口; 调度层是本功能处理模块的核心, 维护消息队列和定时器, 并根据消息类型, 调用不同模块完成相应功能; 应用层完成标签的访问识别。应用层对外提供函数调用接口, 供调度层进行调用。

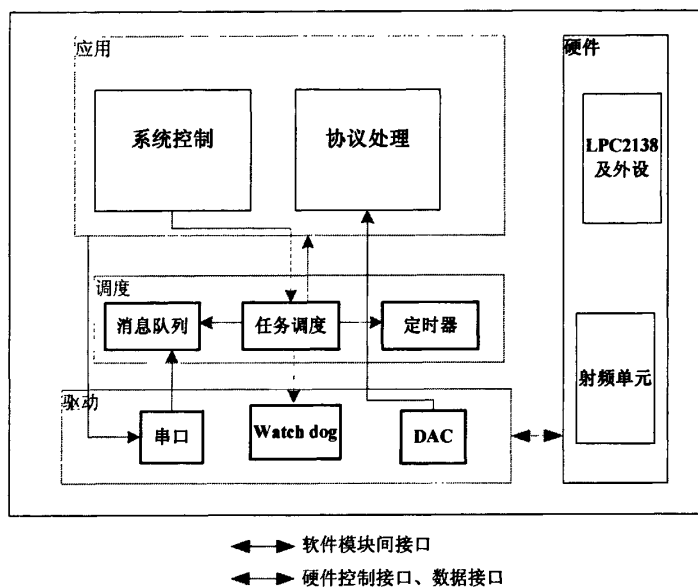


图4.17 RFID功能处理模块关系示意图

### 4.3.1 软件设计基础

#### 一、嵌入式 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 分析

采用  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  操作系统, 主要基于以下几点考虑: (1)它的内核是完全免费的, 用户不需支付任何费用, 有利于降低系统开发成本。(2)它的源代码是公开的, 并且仍在不断的升级, 增加新功能。另外, 用户可以添加自己的模块, 与原有系统内核兼容, 使得系统具有可扩展性。(3)系统内核实用性强、可靠性高。(4)操作系统内核对处理器以及 ROM、RAM 资源的要求不高。

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$  内核的执行机制主要包括以下 6 个方面<sup>[16]</sup>:

### 1. 任务调度

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的任务调度是完全基于优先级的抢占式调度，也就是高优先级任务一旦处于就绪状态，则立即抢占正在运行的低优先级任务的处理器资源。为了简化系统设计， $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  规定所有任务的优先级不同，因此任务的优先级也同时唯一的标识了任务本身。

任务调度将在以下情况时发生：

高优先级的任务因为需要某种临界资源，主动请求挂起，让出处理器，此时将调度就绪状态的低优先级任务执行。这种调度也称为任务级的上下文切换。

高优先级的任务因为时钟节拍到来，在时钟中断处理程序中，内核发现有高优先级的任务获得了执行条件（例如休眠的时间到）则在中断态直接切换到高优先级任务执行。这种调度也称为中断级的上下文切换。

这两种调度方式在  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  中非常普遍，一般来说前者大多发生在系统服务中（例如请求信号量），后者则都发生在时钟中断的服务程序中。

### 2. 任务管理

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$  最多可管理 64 个任务，系统保留了 4 个最高优先级的任务和 4 个最低优先级的任务，所以用户可用的任务数是 56 个。

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$  提供了任务管理的各种函数调用，包括创建任务、删除任务、改变任务优先级、任务挂起和恢复等。

系统初始化时会自动产生两个任务：一个是空闲任务，它的优先级最低，该任务仅仅给一个整型变量做累加运算；另一个是统计任务，它的优先级为次低，该任务负责统计 CPU 的利用率。

### 3. 时间管理

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的时间管理是通过中断来实现的。该定时中断一般每 10ms 或者 100ms 发生一次，实际的频率通过用户的硬件系统的定时器编程来决定，中断发生的时间间隔是固定不变的，该中断也成为固定的时钟节拍。 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  要求用户在定时中断的服务程序中，调用系统提供的时钟节拍相关的系统函数，例如中断级的任务切换、系统时间函数。

时间管理对于系统提供的时间功能函数至关重要，任务延迟一定的时间都是通过时钟节拍来提供的。

### 4. 任务间通信和同步

对于一个多任务的操作系统来说，任务间的通信和同步是必不可少的。在

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$  中提供了 4 种同步对象，分别是信号量、邮箱、消息队列和事件。还提供了互斥锁来解决优先级反转的问题。

所有这些同步对象都有创建、等待、发送、查询的接口用于实现任务间的通信和同步。这一部分也是多任务的操作系统必须提供的系统服务，否则任务间的同步和互斥就无法实现。

### 5. 内存管理

在 ANSI C 中可以使用 `malloc` 和 `free` 两个函数来动态分配和释放内存。但是在嵌入式实时操作系统中，多次这样的操作会导致内存碎片，而且由于内存管理算法的原因，`malloc` 和 `free` 的执行时间是不确定的。这对于嵌入式领域系统的应用非常不利。为了消除内存碎片和执行时间的不确定性，在  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  中把连续的大块内存按分区管理。每个分区中包含整个大小相同内存块，但不同分区间的内存块大小可以不同，用户需要动态分配内存时，系统就选择一个适当的分区，按块来分配内存。释放将按块放回到它以前所属的分区。这样就能有效地解决内存碎片的问题，同时执行时间也是固定的。

## 二、LPC2138 定时器

本设计中诸多实现是基于 LPC2138 的定时器实现的，下面先介绍一下 LPC2138 相关的定时器。

定时器对外设时钟 (PCLK) 周期进行计数，可选择产生中断或根据 4 个匹配寄存器的设定，在到达指定的定时值时执行其它动作。它还包括 4 个捕获输入，用于在输入信号发生跳变时捕获定时器值，并可选择产生中断。

LPC2138 本身提供两个定时计数器，TIMER0 和 TIMER1，每个定时器均包含如下的寄存器：

### 1) 定时器控制寄存器

(TCR: 定时器 0-T0TCR: 0xE0004004; 定时器 1-T1TCR: 0xE0008004)

定时器控制寄存器 TCR 用于控制定时器计数器的操作。

### 2) 定时器计数器

(TC: 定时器 0-T0TC: 0xE0004008; 定时器 1-T1TC: 0xE0008008)

当预分频计数器到达计数的上限时，32 位定时器计数器加 1。如果 TC 在到达计数上限之前没有被复位，它将一直计数到 0xFFFFFFFF 然后翻转到 0x00000000。该事件不会产生中断。如果需要，可用匹配寄存器检测溢出。

### 3) 预分频寄存器

(PR: 定时器 0-T0PR: 0xE000400C; 定时器 1-T1PR: 0xE000800C)

32 位预分频寄存器指到预分频计数器的最大值。

#### 4) 预分频计数器寄存器

(PC: 定时器 0-T0PC: 0xE0004010; 定时器 1-T1PC: 0xE0008010)

32 位预分频计数器在其应用于定时器计数器之前, 使用某个常量来控制 PCLK 的分频。这样可在定时器溢出之前实现控制定时器分辨率和最大时间之间的关系。预分频计数器每个 PCLK 周期加 1。当其到达预分频寄存器中保存的值时, 定时器计数器加 1, 预分频计数器在下个 PCLK 周期复位。这样, 当 PR=0 时, 定时器计数器每个 PCLK 周期加 1, 当 PR=1 时, 定时器计数器每 2 个 PCLK 周期加 1。

#### 5) 捕获寄存器 (CR0-CR3)

每个捕获寄存器都与一个器件管脚相关联。当管脚发生特定的事件时, 可将定时器计数值装入该寄存器。捕获控制寄存器的设定决定捕获功能是否使能以及捕获事件在管脚的上升沿、下降沿或是双边沿发生。

#### 6) 捕获控制寄存器

(CCR: 定时器 0-T0CCR: 0xE0004028; 定时器 1-T1CCR: 0xE0008028)

当发生捕获事件时, 捕获控制寄存器用于控制将定时器计数值是否装入 4 个捕获寄存器中的一个以及是否产生中断。同时设置上升沿和下降沿位也是有效的配置, 这样会在双边沿触发捕获事件。例如, 将 T0CCR 设置为 110000000000 0000 表示当 CAP0.0 引脚有跳变时, 将 TC 的值存入 CR0 寄存器中。

### 4.3.2 驱动层

驱动是功能电路的底层部分, 为上层应用屏蔽硬件多样性, 并提供统一的访问接口, 提供对各种硬件设备的操作管理功能。包括串口通信、DAC 驱动、看门狗 (watchdog) 等功能。

串口在物理上使用 RS-232 链路, 消息层使用 485 通讯协议。RFID 功能电路一共包括两个串口, 即 UART0 和 UART1。UART0 与 MPC866T 主控进行通讯, 通过串口接收、解析和派发来自 MPC866T 主控的命令消息; 在 RFID 功能电路处理完成请求的操作后, 将应答进行封装, 发送给 MPC866T 主控。UART1 与 PC 上的串口进行通讯, 主要供调试使用。

Watchdog 驱动提供对看门狗的操作，包括看门狗启用、禁用、复位等操作。Watchdog 是为了防止单板运行出现意外而添加的，实际上是提供了一种保护机制用于保证 CPU 软件发生异常时，能够复位模块。软件可以设定看门狗溢出时间，如果超过这个时间没有去清除时钟狗，时钟狗就会复位该单板。在具体实现中，由任务调度设置看门狗清除标志，当定时中断检测到该标志时，复位看门狗，并重置该标志，通过这种相互制约来保证软件运行正常。

### 4.3.3 调度层

调度是 RFID 功能电路的中心部分，包括消息队列、任务调度，以及定时器三部分。

#### 一、消息队列

接收串口消息，存入消息队列，并保证消息的先进先出。任务调度将扫描该消息队列，以获悉当前需要执行的操作。

消息队列包括两个缓冲区，一个缓冲区用于存储消息号+消息体+校验，另一个缓冲区存储所有消息的任务编号，源进程号等信息。使用的数据结构如下：

```
/* 消息队列的结构类型定义 */
typedef struct tagT_MessageQueue
{
    struct T_Message
    {
        unsigned char ucTaskId; /* 任务号,表示消息属于哪个任务 */
        unsigned char ucos485Sender; /* 源进程号 */
        unsigned short ucPoolId; /* 消息缓冲池中下标 */
        unsigned short ucLength; /* 消息体在缓冲池中长度 */
    } tMessage[USR_MSG_QUEUE_NUM];

    unsigned short ucHead; /* 消息队列的头指针 */
    unsigned short ucTail; /* 消息队列的尾指针 */
} T_MessageQueue;
```

```

/* 消息缓冲池的结构类型定义 */
typedef struct tagT_MessagePool
{
    unsigned char ucMsgPool[USR_MSG_POOL_SIZE]; /*消息缓冲池 */

    unsigned short ucHead;    /* 消息缓冲池的头指针 */
    unsigned short ucTail;    /* 消息缓冲池的尾指针 */
    unsigned short ucPoolTail; /* 消息缓冲池尾 */
} T_MessagePool;

```

## 二、定时器

RFID 功能电路使用 TIMER0 来进行时间管理。通过设置寄存器,使 TIMER0 每秒触发 100 次中断,相当于把每秒划分成 100 个时间片,每个时间片长度为 10ms,称为一个 tick。

定时器包括一个定时中断服务程序,在 TIMER0 中断例程中,维持一个全局计数器,记录 RFID 功能电路运行时间,并对定时任务进行维护,当定时任务间隔递减到 0 时,将相应定时任务存入定时任务队列。

系统维护一个定时任务表,对所有定时任务从 0 开始编号,在定时任务队列中,只需记录需要执行的定时任务编号即可,调度模块通过函数指针调用。

在 RFID 功能电路中,我们使用两个定时任务,一个扫描调试串口,另一个扫描与 MPC866T 主控相连的串口,定时器的任务表结构如下:

```

/* 定时器任务表结构 */
typedef struct tagT_TimerTask
{
    void (*ptTask)(void);    /* 任务指针 */
    unsigned short ucInterval; /* 时间间隔 */
    unsigned short ucCounter; /* 计数初值 */
    unsigned char fEnabled;    /* 定时器标志,若为真,
                                则当 ucInterval=0 时,则执行任务*/
} T_TimerTask;

```

### 三、任务调度

本系统包括两种类型的任务，即定时任务和普通任务，前者的优先级要高于后者的优先级。普通任务表的结构如下：

```

/*普通任务表的结构*/
typedef struct tagT_Task
{
    void (*ptTask)(BYTE *ucPara, BYTE ucMsgLen);/* 函数指针 */
    unsigned char ucPriority;    /* 任务优先级 */
} T_Task;

```

本系统一共提供三个普通任务：系统预留任务、调试任务，以及应用任务。每个任务分配一个或多个任务号，这就是消息发送方的目的进程号。系统预留任务留做扩展用；调试任务处理 UART1 的调试指令；应用任务处理来自 UART0（与主控通讯）的指令。普通任务表如下所示：

```

/* 任务表, 用户在使用本系统时需填写该表, 将需要系统调度的任务名填
到相应的位置, 其位置值与任务号一一对应 */
T_Task g_atTask[] = {
    /* 0 */ Task_System_CtrlTask,  USR_TASK_HIGH,
    /* 1 */ Task_Debug_CtrlTask,   USR_TASK_NORMAL,
    /* 2 */ Task_RFID_CtrlTask,    USR_TASK_NORMAL,
    /* 3 */ Task_RFID_CtrlTask,    USR_TASK_NORMAL,
    /* 4 */ Task_RFID_CtrlTask,    USR_TASK_NORMAL,
    /* 5 */ Task_RFID_CtrlTask,    USR_TASK_NORMAL,
    /* 6 */ Task_RFID_CtrlTask,    USR_TASK_NORMAL,
    /* 7 */ Task_RFID_CtrlTask,    USR_TASK_NORMAL,
};

```

在本系统中，扫描调试串口的定时时间间隔设置为 10 个 ticks，扫描与 MPC866T 主控相连的串口的时间间隔设置为 5 个 ticks。定时器的任务表及任务队列定义如下：

```
/*定时器的任务表*/
T_TimerTask g_atTimerTask[] = {
    /* 任务号, 时间间隔, 计数初值, 是否允许定时器工作 1: 允许 */
    /* 0 */ Task_DebugInputScan, 10, 10, 1,
    /* 1 */ Task_MasterInputScan, 5, 5, 1,
};
/* 定时器任务队列的定义 */
typedef struct tagT_TimerTaskQueue
{
    unsigned char ucTimerTaskQueue[USR_TIMER_QUEUE_SIZE];
    unsigned char ucHead;
    unsigned char ucTail;
} T_TimerTaskQueue;
```

调度流程如图 4.18 所示。软件启动之后, 首先执行上电流程, 之后切换到任务调度模块。每一次扫描, 完成一次喂狗操作, 调用一次任务(定时任务或普通任务)。

当任务调度检测到定时任务队列有新任务时, 调用相应定时任务, 扫描对应的缓冲区, 当缓冲区存在完整数据帧时, 将该数据帧剥离出来, 存入普通任务消息队列。当任务调度检测到普通任务消息队列有新消息时, 执行普通任务调度, 调用相应模块完成操作。

当有多个任务存储在缓冲区中时, 需要执行多次扫描, 这是为了防止看门狗溢出, 并使调度结构简化。



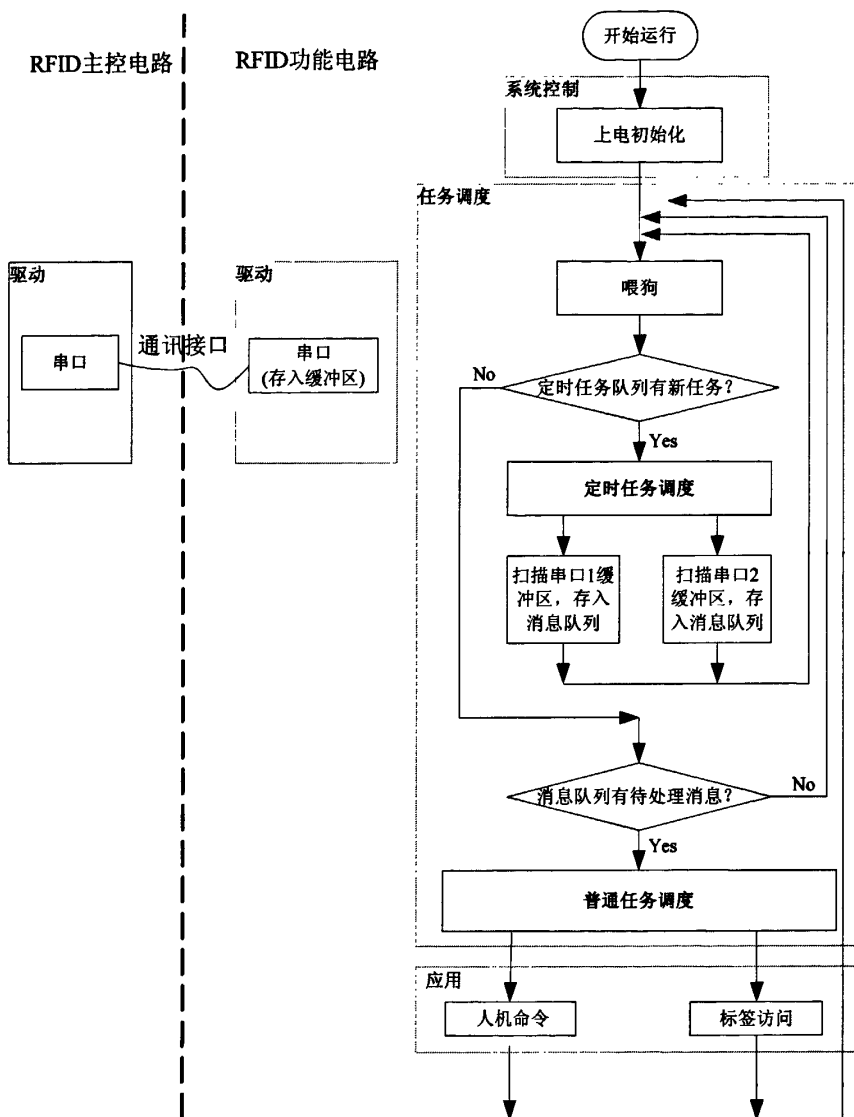


图4.18 任务调度流程

### 4.3.4 应用层

应用层实现 RFID 功能电路的业务操作，包括系统控制和协议处理。各模块提供函数调用入口，供任务调度进行调用。其中系统控制完成 RFID 功能电路主

控制流程,实现对整个系统的初始化,人机命令(对 RFID 功能电路的复位操作)。

初始化包括如下功能:

1. RFID 功能电路上电, CPU 内固化的 Bootloader 开始运行, Bootloader 初始化外设, Bootloader 切换控制权, 跳入版本区, 执行用户代码, 版本软件启动。
2. 系统控制的主控率先运行, 进行 SRAM 自检, 通过对 SRAM 进行读写, 判断 SRAM 是否正常。
3. 内核自身变量初始化, 初始化驱动层和任务调度模块使用的全局变量, 包括消息队列、计数器、串口收发标志等。
4. 全局用户变量初始化, 初始化应用层全局变量。
5. 初始化 CPU, 设置系统时钟。
6. 初始化外设, 初始化看门狗、IO 设备、定时器、串口、DAC。
7. 配置请求, 对任务队列进行初始化、排序等操作。
8. 启动任务调度。

协议处理<sup>[17]</sup>是本模块的核心, 完成与射频部分的交互, 实现前、反向射频链路的基带信号的输出和检测, 前反向的编解码。协议处理主要包括发送层和接收层。

#### 一、发送层

发送层用于将数据流发到标签, 涉及到 PIE 编码和前导码/帧同步插入。通过 DAC 输出调制脉冲宽度, 实现标签数据发送。流程如图 4.19 所示。

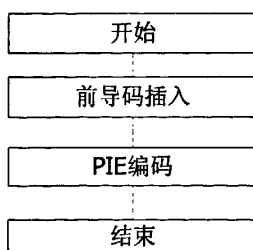


图4.19 发送处理流程图

阅读器到标签的链路使用 PIE 编码方式, 也就是通过脉冲时间间隔来进行编码。Tari 是阅读器到标签的信号的参考时间间隔, 是数据 0 的持续时间。高值对应发送连续的波形, 低值对应发送减弱的波形。脉冲调制深度、上升时间、下降时间和脉宽 (pulse width, PW) 对数据 0 和数据 1 应该一致。

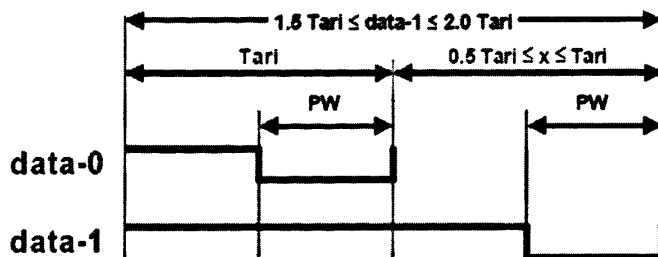


图4.20 PIE编码示意图

为了实现方便，本次实现只考虑 PW 是 Tari 的一半的这种情况，而数据 1 的长度正好是 2 倍 Tari 的情况。这样，“0”就可以编码为 10，“1”就可以编码为 1110，10 和 1110 中每一个 0 或 1 的占用的时间为一个 PW。

表 4.6 编码 0, 1 具体占用时间表

前向速率(kbps)	0(us)	1(us)	脉宽(us)
80	12.5	25	6.25

具体在 PIE 实现的时候，通过对 LPC2138 的 DAC 进行控制，进行高低电平输出。DAC 的实现是通过控制 DAC 寄存器的值，来进行模拟信号的输出。具体公式如下：

输出的电压 = 设置的寄存器的值 / 1024 \* 参考电压。

参考电压是硬件设置的，根据要输出的功率，对应一个输出电压，得出一个寄存器的值。本设计中，对于高电平的输出，设置输出功率为 30dBm (1W)，对应的输出的电压为 2294mV；对于低电平的输出，输出电压为 0mV。

DAC 驱动程序如下：

```

/*功能描述：输出到 DAC
* 输入参数：unsigned short wData: DAC 输出电压, 0~3300, 单位是 mV
* 输出参数：DACR: DAC 寄存器, 15: 6 位保存 DAC 转换值 */
void DACOutput(unsigned short wData)
{
    DACR = (unsigned short)(((wData << 10) / 3300) << 6);
}

```

本系统中 PCLK 被设置为  $60/4 = 15\text{Mhz}$ ，也就是说定时计数器的 1 代表脉宽

长度为  $1/15 \mu\text{s}$ 。两者比值:

表 4.7 时间和 PCLK 对应表

时间(us)	包含多少个 PCLK	
25	375	375
18.75	281.25	281
12.5	187.5	188
6.25	93.75	94

结合表 4.6, 4.7 可知, 如果对 1 进行编码, 则控制 DAC 前 T1 ( $6.25 \times 3 \text{ us} = 281$  个 PCLK) 脉宽的宽度发送高电平, 后脉宽的宽度发送低电平。如果对 0 进行编码, 则控制 DAC 前 T0 ( $6.25 \text{ us} = 94$  个 PCLK) 脉宽的宽度发送高电平, 后脉宽的宽度发送低电平。对 0, 1 编码的程序如下所示。

```

#define T1TC_DELAY(dwDelay)\
{\
    T1TC = 0;\
    while (T1TC < dwDelay){;}\
}
unsigned short wDACLow = 0;           /* DAC 低值 */
unsigned short wDACHigh = 3299;      /* DAC 高值 */
unsigned int dwlHigh = 281;
unsigned int dwPW = 94;
/* PIE 编码 1 的输出 */
void PIEOutput1 (void)
{ /* 控制 DAC 输出 1 - PW 的高电平 */
    DACOutput (wDACHigh);
    T1TC_DELAY (dwlHigh);
    /* 控制 DAC 输出 PW 的低电平 */
    DACOutput (wDACLow);
    T1TC_DELAY (dwPW);
}

```

```

/* PIE 编码 0 的输出 */
void PIEOutput0 (void)
{ /* 控制 DAC 输出 0 - PW 的高电平 */
    DACOutput(wDACHigh);
    T1TC_DELAY(dwPW);
    /* 控制 DAC 输出 PW 的低电平 */
    DACOutput(wDACLow);
    T1TC_DELAY(dwPW);
}

```

## 二、接收层

完成脉冲解调，前导码匹配，PIE 解码。在接收的时候，由 MPC866T 主控配置是否支持 I/Q 两路同时解调。当 MPC866T 主控配置 I/Q 同时解调时，接收层需要同时处理两路信号。在处理两路过程中，当只有一路收到正确响应时，对该路进行处理；当两路都正确时，只处理 I 路，抛弃 Q 路；其它情况与单路处理相同。这里的正确是指前导码匹配成功，且解码未出错。

具体实现时，将 I、Q 两路比较输出信号接到 LPC2138 上的两个 CAP (CAP1.0, CAP1.1) 引脚上，通过捕获寄存器 CR0 实现解码。当管脚的信号出现上升沿时，将定时器计数值装入寄存器 CR0。

本程序是对接收的信号进行 01 数据流生成，即 PIE 解码。

- 1) 不停的对 CR0 进行查询，当 CR0 改变时，记录 CR0 为 T1。
- 2) 不停的对 CR0 进行查询，当 CR0 改变时，记录 CR0 为 T2
- 3)  $T2 - T1 = t1$ ，根据  $t1$  判断生成的数据是 0 还是 1。参考表 4.6, 183~ $t1 \sim 193$ ，解析为 0; 370~ $t1 \sim 380$ ，解析为 1
- 4)  $T1 = T2$  返回步骤 2。

接收程序的初始化设置如下：

```

/* 反向链路捕获引脚 CAP0---(P0.10) */
PINSEL0 = (PINSEL0 & ~(3 << 20)) | (2 << 20);
/* 反向链路捕获引脚 2 CAP---(P0.11) */
PINSEL0 = (PINSEL0 & ~(3 << 22)) | (2 << 22);

```

```

/* TIMER1 初始化 */
    T1TC = 0;          /* 定时器初始值设置为 0 */
    T1PR = 0;         /* 时钟不分频 */
    T1MCR = 0x00;     /* 定时器除了计数，没有任何动作 */
    T1CCR = 0x19;     /* cap1 和 cap0 引脚上升沿时捕获 */
/* 打开定时器 1 */
    T1TCR = 0x01;
    
```

程序具体的流程图如图 4.21 所示。图 4.22 是用示波器观察的基于 EPC Class1 GEN2 协议的测试波形图。

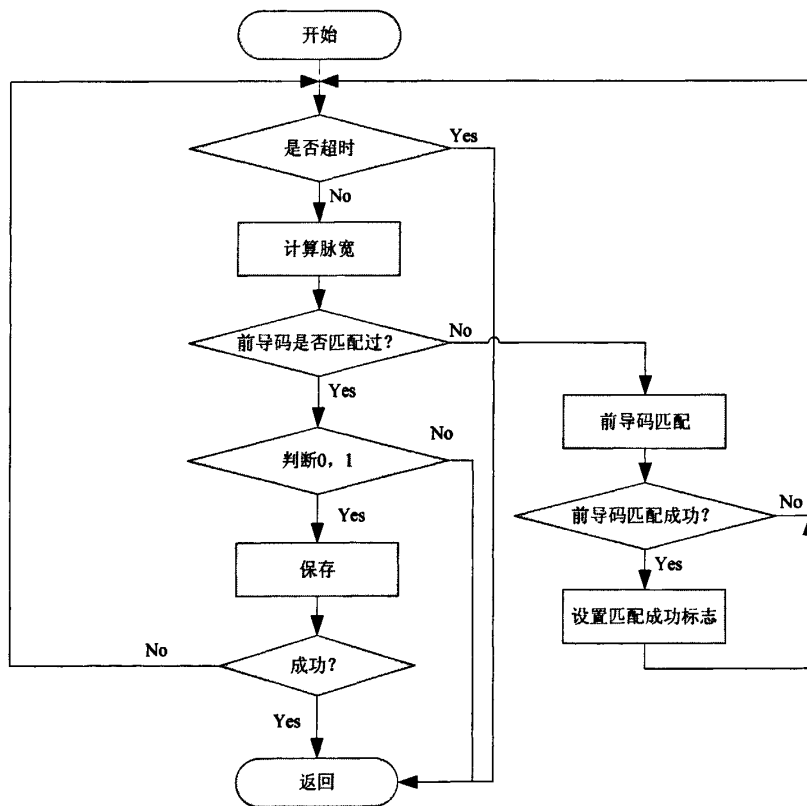


图4.21 接收流程图

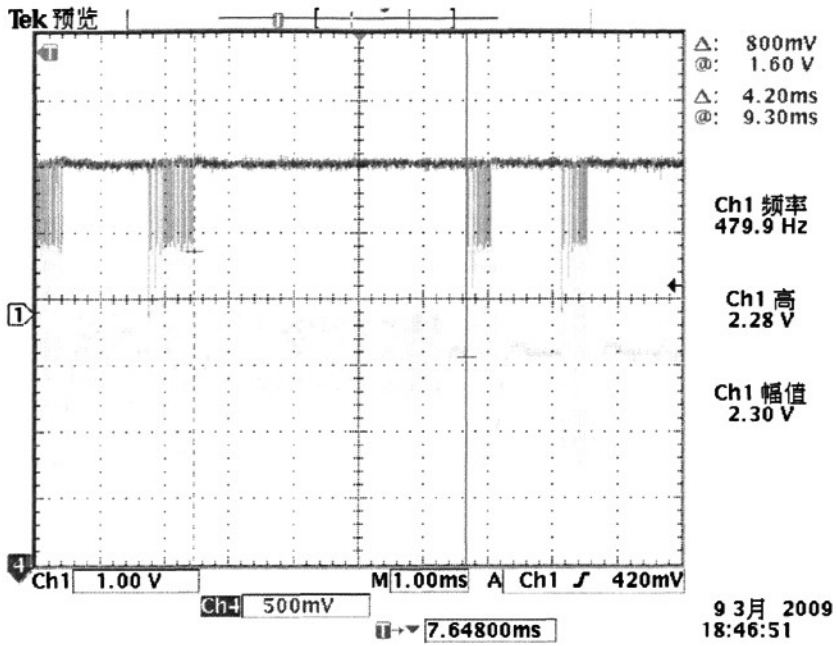


图 4.22 实验测试波形图

## 第五章 总结与展望

声表面波射频识别技术是应用现代电子学、声学、半导体平面工艺技术和雷达及信号处理技术的新成就,它是有别于IC 芯片识别的另一种新型非接触自动识别技术。利用声表面波技术的电子标签始于上世纪80年代末,近年来声表面波标签的研究成为一个热点。国内关于声表面波射频识别技术的研究还不深入,课题将多个学科有关技术综合,具有一定的学术意义和应用价值。

本论文在延迟线型声表面波传感原理和无线通讯的相关技术的基础上,提出了几种标签的设计方案,并设计了基于超高频射频识别的阅读器。总结如下:

1. 介绍了射频识别的组成、发展现状及行业标准。在此基础上分析了声表面波射频识别系统的工作原理,介绍了系统组成及其各部分功能。
2. 在声表面波传感器的基础上,选取了合适的压电基底材料,对叉指换能器和反射栅的相关参数进行了设计,分析讨论了几种标签的设计方案,并根据设计参数制作了声表面波无源电子标签的样件。
3. 基于 EPC Class1 GEN2 协议,设计实现了中心频率是 915MHz 的 RFID 阅读器。详细介绍了阅读器的硬件实现,包括射频收发模块和控制处理模块。射频收发模块采用幅移键控(ASK)、零中频解调的方式,控制处理模块采用双 CPU 的模式, MPC852 负责主控, LPC2138 负责功能处理电路。
4. 阅读器硬件几乎只完成了射频收发的功能,其核心功能由软件实现。本论文详细介绍了核心功能的实现,即功能处理软件。它架构了  $\mu$ C/OS-II 嵌入式系统,实现了前向链路基带信号的输出、编码,以及标签信息的获取。

由于本课题在国内尚处于应用研究阶段,声表面波无源电子标签以及基于声表面波的阅读器从实验室到产品化还需要许多研究工作。

1. 声表面波无源电子标签的设计关键是反射栅的设计,需要得到各种几何形状反射栅的反射系数和透射系数精确值,这点需要在理论以及实验上进一步研究。
2. 叉指换能器决定标签传感器频率响应的好坏,因此它在整个射频识别系



统中处于十分重要的地位，因此需要对叉指换能器的设计进行建模分析以及性能优化，还要考虑到工艺制作的问题，所以在今后也是个研究的重点。

3. 声表面波射频识别系统的射频询问脉冲和响应脉冲频率都较高，需要在现有的普通的射频识别的阅读器基础上进行改进，设计出基于声表面波射频识别的阅读器。
4. 声表面波电子标签的批量化生产目前是一个难题。目前需要解决的技术难题是如何利用现有工艺配置一些相对简单的辅助设备低成本解决声表面波电子标签的批量化生产。

由于声表面波电子标签能在高温、强电磁干扰等恶劣环境下可靠工作，特别是，声表面波标签也有传感器功能，或与传感器结合，除完成身份识别外，还可同时对压力、应力、扭曲、加速度和温度等参数进行测量。目前声表面波标签在国外已有一些实际应用，由于真正无源不需维护，且与现有IC 芯片标签性能互补，所以会有一定的市场前景。

## 参考文献

### 第一章

- [1] 郎为民. 射频识别(RFID)技术原理与应用. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] KlansFinkenzeller著, 陈大才译. 射频识别(RFID)技术. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [3] Jiang Bing, Fishkin K P, Roy S, et al.Unobtrusive long-range detection of passive RFID tag motion.Instrumentation and Measurement, 2006, 55(1): 187~196
- [4] <http://blog.donews.com/aoh/archive/2004/09/10/95076.aspx>. 《自动识别技术》
- [5] <http://www.autoid-china.com.cn/Article/html/20080129/1826.html>. 《RFID的工作原理》
- [6] M.I.Skolnik, Introduction to Radar System. New York: McGrew-Hill Book CO. Inc, 1980
- [7] M.I.Skolnik, Radar Handbook. New York: McGrew-Hill Book CO. Inc, 1990
- [8] H.Stockmay, "Communication by Means of Reflected Power", Proceedings of the IRE, 1948, Vol.30(10): 1196~1204
- [9] <http://www.hightonesys.com/rfid/12-rfid-develop.htm>. 《RFID发展历程》
- [10] 马庆容, 俞军, 张纲. 《国内RFID应用及产业研究》复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室
- [11] 张有光, 杜万, 张秀春, 杨子强. 全球三大RFID标准体系比较分析. 中国标准化, 2006, (03): 61~63
- [12] 王玉林,曹金荣等. 声表面波射频识别无源电子标签. 固体电子学研究进展, 2007, 27(1): 110~111
- [13] J.Enderlein, J.Schonberg, E.Chilla and H.J.Frohlich, "Integrable SAW Sensor With Identification Facility", Proc.IEEE Ultrason Symp, 1994: 491~494
- [14] <http://tech.rfidworld.com.cn/jswk/news/2005518105345.htm>. 《SAW射频识别无源电子标签技术及其应用》

### 第二章

- [1] I.A.Victorov. Rayleigh and Lamb Wave.New York Plenum, 1967: 56~58
- [2] Lord Rayleigh.On waves propagated along the plane surface of an elastic body, Proc. Math. Soc.London, 1885, Vol.17: 4
- [3] 胡冠山. 延迟线型声表面波气敏传感器的研究: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2005: 7
- [4] WP Mason, Physical Acoustics, Vol.VI, Academic Press, New York(1977).
- [5] 施文康, 刘艾. 延迟线型声表面波传感器的研究. 传感技术学报. 1999, 12(4): 337~340
- [6] 吕桂森. 无绳电话机原理与维修. 北京: 人民邮电出版社, 1998
- [7] Alfred Pohl. A Review of Wireless SAW sensors, IEEE Trans.Ultrason.Ferroelectr.Freq. Contr., 2000, Vol.47(2): 317~331

- [8] Leonhard Reindl, Gerd Scholl, Thomas Ostertag et al. Theory and Application of Passive SAW Radio Transponders as Sensors, IEEE Trans.Ultrason.Ferroelectr.Freq.Contr., 1998, Vol.45(5): 1281~1291
- [9] 戴思光. 基于SAW双端对谐振器的气体传感器. 传感技术学报, 1997: 8~10
- [10] Matthaei, George L., O'Shaughnessy, Brian P., Farshad Barman, Relations For Analysis And Design Of Surface-Wave Resonators, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1976, Vol.23(2): 99~107
- [11] Matthaei, George L., Wong, David Y., O'Shaughnessy, Brian P., Synthesis Of Two Classes Of Acoustic Surface-Wave Filter Tap Weights, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1976, Vol.24(1): 1~10
- [12] Colin K.Campbell, Conductance measurements on a leaky SAW harmonic one-port resonator, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2000, Vol.47(1): 111~116
- [13] Masao Takeuchi, et al. New types of SAW reflectors and resonators consisting of reflecting elements with positive and negative reflection coefficients, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 1986, Vol.33(4): 369~374
- [14] 袁小平. 国外声表面波传感器开发近况, 压电与声光, 1995 (8) : 63~76
- [15] Steindl R., Pohl A., Seifert F., Impedance loaded SAW sensors offer a wide range of measurement opportunities, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, Vol.47(12): 2625~2629
- [16] Steindl R., et al, SAW delay lines for wirelessly requested conventional sensors, Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1998, Vol.1: 351~354
- [17] Vijay K.Varadan, et al, Design and fabrication of wireless remotely readable MEMS Accelerometer, SPIE, 1997, Vol.3242: 36~45
- [18] T.M.Reeder, et al, Surface-Acoustic-Wave Pressure and Temperature Sensors, Proceedings of the IEEE, 1976, Vol.64(5): 754~756
- [19] Reindl L., Ruile W., Programmable reflectors for SAW-ID-tags, IEEE Ultrasonics Symposium, 1993, Vol.1: 125~130
- [20] Pohl, et al, Wireless sensing using oscillator circuits locked to remote high-Q SAW resonators, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 1988, Vol.45(5): 1161~1168
- [21] Alfred Pohl, A Review of Wireless SAW Sensors, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, Vol.47(2): 317~332
- [22] Schimena G., Dollinger F.and Waigel R., A wireless pressure measurement system using a SAW hybrid scnsoi. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, vol. 48(12): 2730~2735

### 第三章

- [1] 李小惠. 用于集成光学频谱分析器的铌酸锂共线声波导研究: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2004.

- [2] 文常保. 声表面波小波变换器件: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2004.
- [3] H.Engan, Excitation of Elastic Waves by Spatial Harmonics of Inter-digital Transducers, IEEE Trans.Electron.Device, ED-16, 1969: 1014~1017
- [4] H.Engan, Surface Acoustic Wave Multi-Electrode Transducers, IEEE Trans.Sonics and Ultrason., SU-22, 1975: 395~401
- [5] R.F.Milsom, N.H.C.Reilly and M.Redwood, Analysis of Generation and Detection of Surface and Bulk Acoustic Waves by Inter-digital Transducers, IEEE Trans.Sonics and Ultrason., SU-24, 1977: 147~166
- [6] 高长银. 压电石英晶片扭转效应研究及新型扭矩传感器的研制: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- [7] 武以立, 邓盛刚, 王永德. 声表面波原理及其在电子技术中的应用. 北京: 国防工业出版社, 1983
- [8] Fukuda. T., et al. Growth of new langasite single crystals for Piezoelectrcic applications, IEEE Ulrtasonics SymPosium, 1998: 315~319.
- [9] D.P.Morgan, History of SAW deviees.1998 IEEE Int.Freq.Cont.Symp
- [10] 陈明, 范东远, 李岁芳. 声表面波传感器. 西安: 西北工业大学出版社, 1997

#### 第四章

- [1] 朱兆优,王耀南,林刚勇. 非接触IC卡应用系统设计. 计算机自动测量与控制, 2001, (3): 15~17
- [2] Deelereq C et al.A global survey on short rage low power wireless data transmission architecture for ISM applications.Semiconductor conference, 2001.CAS 2001 Proceedings. International, Vol.1, 001: 117~126.
- [3] Rao K V S. An overview of backscattered radio frequency identification system(RFID), Microwave Conference, 1999 Asia Pacific, 1999, Vol.3: 746~749.
- [4] Ebina A et al.Ultra low-power CMOS IC using partially-depleted SOI technology, Custom Integrated Circuits Conference, 2000.CICC.Proceedings of the IEEE 2000, 57~60.
- [5] 张益强, 郑铭, 张其善. 远距离无源射频识别系统设计. 遥测遥控, 2004: 45~49.
- [6] Jeremy A., Landt, Los Alamos and N.Mex. Multichannel Homodyne Receiver. IEEE Trans. On Microwave Theory Rech, 1982, 27(7): 1024~1030.
- [7] ANALOG DEVICES, Inc.ADF4360\_0 datasheet, 2004
- [8] 张星, 周克生, 基于ADF4360\_7的频率合成系统. 世界电子元器件, 2007(2).
- [9] 同第一章[2].
- [10] 陈邦媛. 射频通信电路. 北京: 科学出版社, 2002
- [11] RFMD.RF5110M8G DataSheet-File Number 050606. 1999.
- [12] 电子标签检测仪研究报告. 远望谷信息技术有限公司, 2001.
- [13] 付雪华, 刘晔. 基于MPC866的虚拟多媒体控制板开发. 科技广场, 2007(05): 205~207
- [14] 武锋. PIC系列单片机的开发应用技术. 北京航空航天大学出版社, 1998

## 参考文献

---

- [15] 广州周立功单片机发展有限公司. LPC2131/2132/2138使用指南 datasheet, 2004: 1
- [16] Jean J.Labrosse著,邵贝贝译.  $\mu$ C/OS-II 源码公开的实时嵌入式操作系统. 北京: 中国电力出版社, 2001
- [17] EPCglobal Inc. EPC™ Radio-Frequency Identity Protocol Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz Version 1.0.8 datasheet, 2004

## 致 谢

本文的研究工作是在我的导师赵启大教授的悉心指导下完成的。赵老师知识渊博、治学态度严谨、待人宽忍。赵老师不仅在学习上对我严格要求，悉心教导，而且在生活上给予我莫大的支持和关怀。赵老师对我来说是导师，也是亲人，不仅教育了我严谨的治学态度、与人合作的技巧，而且他事必躬亲、平易近人的处事风格也深深的感动并激励着我。赵老师无论自己遇到什么事情，也不论我们做了什么事情，都能够以博大的胸怀来对待面前的人和事，都能够把我们的学业和发展放在首位。在此特向赵启大教授致以最崇高的敬意和最真诚的感谢。

在课题组三年的学习中，我还得到了许多老师的关心与帮助。首先要感谢董孝义、袁树忠、开桂云三位德高望重的教授为我们课题组创造的良好实验条件和学术氛围！同时要衷心感谢张伟刚教授、刘艳格教授、王志副教授，张昊老师在这几年的学习和生活中对我的热情帮助。

特别感谢刘波副教授在这几年中对我的关心和热情帮助，在电子、传感领域，在科研项目上的指点和支持。

感谢苗银萍师姐，廖同庆、吕俊峰师兄在理论和实验上的无私指导和全力帮助。

感谢黄桂岭、李淑红、董波给予很大的帮助以及三年同师的时光。

感谢廖继平、田爽、曾祥辉、赵军发、周金在项目中良好的合作和对我的支持和帮助。

感谢课题组的兄弟姐妹在学习和生活上的帮助以及在一起奋斗的难忘时光，祝愿大家有美好的未来。

感谢父母和亲人、朋友这些年对我的鼓励、理解、帮助，他们一直默默的关注着我，给予我精神和物质上的支持，使我能踏实地学习和工作，这也是我今后进一步发展的动力。

感谢现代光学研究所各位领导和全体老师对我的关心和帮助。向在生活和工作中帮助和关怀过我的每一位朋友表示由衷的谢意。

由于水平有限，论文中难免存在诸多不妥和错误之处，恳请指正。

王斐

2009年5月于南开园

## 个人简历 在学期间发表的学术论文与研究成果

王斐，女，生于1985年1月26日。于2006年6月获得南开大学电子科学与技术专业工学学士学位。硕士期间主要科研方向是声表面波传感器和嵌入式系统研究。

攻读硕士学位期间参加和完成的科研项目：

1. 国家自然科学基金资助项目(60572018) “新型多通道声表面波气体传感器研究”
2. 天津市科技发展计划项目(05YFGPGX04900) “多通道声表面波化学传感器的研制”
3. 天津市科技支撑计划重点项目 “新型声表面波射频识别RFID及无线传输系统的研究”