

基于ARM和Linux的RFID阅读器设计

作者简介：熊永中，男，1985 年 10 月生，师从成都理工大学陈金鹰教授，2011 年 06 月毕业于成都理工大学信号与信息处理专业，获得工学硕士学位。

摘 要

随着信息技术的不断发展，物联网具有广阔的应用前景。RFID 技术作为物联网核心技术之一，也得到了很广泛的应用和发展。阅读器作为 RFID 系统重要组成部分，在系统中起着重要作用，具有很大的研究价值。本文通过对当前 RFID 阅读器的分析比较，提出了一种嵌入式阅读器设计方案。研究和实现基于 ARM 和 Linux 的 RFID 阅读器设计，旨在促进 RFID 阅读器功能的完善，提高 RFID 技术的发展水平，促进物联网的推广。本论文研究主要包括两大技术，一是 ARM 嵌入式技术，二是 RFID 技术。主要要解决的问题是引导加载程序和嵌入式操纵系统的移植，RFID 通信协议的研究及通信的实现，主要研究内容包括：

1. 首先进行了大量的基础研究，为设计做好准备。研究了嵌入式系统概念、特点、硬件与软件分析、比较以及选取等。通过比较当前 RFID 阅读器的特点，分析了选用 ARM 芯片作为控制器的优点。通过对常用的几种嵌入式系统的分析和比较，选择 uClinux 作为本设计所用嵌入式操作系统。研究了 RFID 技术发展现状，RFID 系统的组成、标准等。

2. 通过比较，选用价格低廉、功能丰富、可扩展性强的 ARM7 系列芯片 S3C44B0X，RFID 模块使用 CY1443A-C，该模块性能优良、接口简单、使用方便。通过对控制器与 RFID 模块之间接口的研究，完成硬件的设计和实现。

3. 研究了 RFID 模块的通信协议，包括发送、接收指令的研究，研究了电子标签的读取。运用嵌入式 C 语言和汇编语言混合编程，实现了 RFID 阅读器读取电子标签应用程序的编写。利用 S3C44B0X 的 JTAG 功能，实现应用程序的在线仿真和调试。

4. 研究了 U-Boot 和 uClinux 源代码，然后根据实际硬件对其进行修改，编译，移植。完成 uClinux 添加应用程序和移植，最终完成整个系统的移植工作。

上述研究内容和成果，对于 RFID 阅读器前端数据采集提供了一种很好的指导方案，对于 RFID 技术的发展和进步具有重要意义。本论文研究的 RFID 阅读

器使用简单、价格低廉、可扩展性强、通用性强，为用户继续研究和开发提供了极大的便利。

关键词：嵌入式系统 RFID 技术 ARM Linux

One RFID reader design based on ARM and Linux

Introduction of the author: Yongzhong Xiong, male, was born in October, 1985 whose tutor was Professor Chen Jinying. He graduated from Chengdu University of Technology in Singal and Information Processing major and was granted the Master Degree in June, 2011.

Abstract

With the continuous development of information technology, the internet of things has broad application prospects. RFID technology has also been a very wide range of applications and development as the core technology of the internet of things. RFID reader plays an important role in the RFID system as an important component of the system, and has a lot of research value. Based on the analysis and comparison of current RFID readers, one embedded reader design was put forward. The research and implementation of RFID reader design based on ARM and Linux was to improve the function of RFID reader, to improve the level of development of RFID technology, and to promote the promotion of the internet of things. In this study, two technologies were included, one was ARM embedded technology, the other one was RFID technology. The main problems to be solved were to transplant the bootloader and embedded operating system, to research RFID communication protocol and implement communication, the main research contents include:

Firstly, a great deal of basic research for the design was done. Status of the RFID technology, RFID system components and standards were researched. Researching the concept of features, hardware and software analysis, comparison, and selection of embedded system and so on was done. By comparing the characteristics of the current RFID readers, the advantages of selecting ARM chip as the controller were analyzed. By analyzing several commonly used embedded operating systems, uClinux embedded operating system was chosen.

By comparison, ARM7 chip S3C44B0X which has low cost, rich features, extensibility was chosen. RFID module used CY14443A-C, which has good performance, simple interface, and is easy to use. Through researching the interfaces

between controller module and RFID module, design and implementation of the hardware were done.

3.The communication protocols of RFID module including sending and receiving instruction, how to read tag were researched.Using the JTAG function of S3C44B0X, application online simulation and debugging.were achieved.

4.U-Boot and uClinux source code were researched,and then were modified according to the actual hardware,compiled and transplanted.Finally,applications were added to uClinux, then uClinux was transplanted.

The contents and results of the study provide a good mentoring to the RFID reader front-end data collection,and are important for the development and progress of RFID technology.In this study, the RFID reader has advantages of using simple, low cost, extensibility, versatility,provides a great convenience for the user to research and development it.

Keywords: RFID Technology Embedded System ARM uClinux

第 1 章 引 言

1.1 研究背景

21 世纪是信息化时代，信息技术已成为推动经济和社会发展的力量。物联网作为新一代信息技术，对于国民经济发展和进步有着重要的意义，得到了国家的高度重视和大力支持。RFID 技术作为物联网核心技术之一，已经成为了信息技术业界的研究热点，具有很大的研究价值，被视为信息技术业界的下一个“金矿”^[1]，具有非常广阔的前景。目前，已经有许多企业表现出了对 RFID 技术很大的兴趣，并投入大量研发经费，研制出了自己的软件或硬件产品及系统应用解决方案。

1.2 研究现状

1.2.1 RFID 技术国外研究现状

从全世界范围来看，作为电子信息强国的美国信息技术高度发达，在 RFID 标准建立和相关软硬件开发和应用都处于全球领先水平，其中美国政府起到了积极的推动作用。在 RFID 标准方面，欧洲跟随美国步伐、两者在封闭系统应用方面差不多处于同一个阶段。在 RFID 标准方面，日本提出了 UID 标准，但是支持它的主要是日本国内的公司，如果要成为国际标准还需要很大的努力。韩国虽然对 RFID 加强了重视，但是没有明确的 RFID 标准，显得模糊不清。目前，比较成熟且先进的 RFID 产品已经出现在了美国、德国、瑞士等国家^[2]。

1.2.2 RFID 技术国内研究现状

我国在 RFID 产业上的发展相对于欧美等发达国家或地区，还处于比较落后的状态。当前，我国已经有了不少的 RFID 企业，但是存在一个关键问题，那就是缺乏关键核心技术，在超高频 RFID 方面表现得尤为突出。在低高频 RFID 技术方面，由于技术门槛不是很高，发展比较早、技术比较成熟、产品应用比较广泛，目前的竞争相当激烈。由于门槛较高、我国在超高频 RFID 技术方面发展比较晚，技术相对来说比较欠缺。在国内，很少企业从事超高频 RFID 产品生产，具有自主知识产权的企业更加缺乏。目前，我国正处于 RFID 行业发展的成

长期, RFID 技术应用领域不断拓展, 产业规模迅速扩大。在这一过程中, 业内优势企业将以更高的速度成长, 为投资者提供良好的投资机会^[3]。

1.3 研究意义

现在市面上的 RFID 阅读器主要包括两大类, 一类是和计算机直接连接的固定式阅读器, 另一类是单片机控制的手持式阅读器。综合比较, 固定式阅读器具有计算机存储容量大、处理速度快、功能丰富等优点, 但是不能用于无法与计算机相连的环境。单片机控制的手持式阅读器具有使用方便、可以运用于恶劣环境等优点, 但是具有功能简单、处理速度较慢、可扩展性不强等缺点。ARM 控制器具有资源丰富、处理速度快、可扩展性强等优点, 本论文正是基于上述两类阅读器情况和 ARM 控制器所具有的优点, 研究设计了基于 ARM 和 Linux 的 RFID 阅读器, 实现了阅读器前端数据采集功能。该阅读器具有携带方便、适用范围广、功能丰富、可扩展性强等优点。该阅读器既克服了与计算机相连的固定式阅读器的使用不灵活等缺点, 又克服了单片机控制的阅读器功能简单等缺点, 同时, 该阅读器为用户用于继续开发提供了方便。

1.4 研究内容

RFID 阅读器实现功能主要包括前端数据采集和后端数据传输, 由于时间和精力原因, 本论文主要对 RFID 前端数据采集进行了研究和实现。设计分为硬件和软件两大部分, 硬件包括嵌入式控制器模块和 RFID 模块以及其它外围器件, 控制器采用三星公司的 ARM7 系列芯片 S3C44B0X, RFID 模块采用杭州灿宇科技有限公司的 CY14443A-C, 软件主要包括引导加载程序 U-Boot 和嵌入式操作系统 uClinux 以及应用程序。

本论文研究的 RFID 阅读主要包括两大技术, 一是 ARM 嵌入式技术, 二是 RFID 技术。设计主要框图如图 1-1 所示, 整个系统构架主要由 ARM 控制器和 RFID 通信模块两大部分组成, ARM 控制器外接有存储器模块, 包括 Flash ROM 和 SDRAM, 用于解决系统存储问题。阅读器工作过程为: 当开启阅读器电源或按下复位键后, U-Boot 开始运行, 之后启动 uClinux, uClinux 启动 RFID 阅读器应用程序, 实现电子标签读取等功能。读取功能实现过程如下: 通过 ARM 控制器控制 RFID 模块的收发。ARM 控制器外接按键, 通过按键控制控制器发送指令给 RFID 模块, RFID 模块收到指令后根据通信协议, 做出相应的响应。设有指示灯指示电子标签检测, 当 RFID 模块检测到电子标签时, LED 将点亮表示检

测到了电子标签。蜂鸣器响应可以根据需要进行设定，决定蜂鸣器开、关和响应次数。同时，ARM 控制器调用 LCD 显示程序显示相关读取信息。

本论文的主要研究内容：

1. 嵌入式技术和 RFID 技术基础研究，嵌入式设计硬件平台和软件平台选取，RFID 模块选取以及其他硬件器件选取。
2. RFID 模块通信协议研究，运用嵌入式 C 语言和汇编语言混合编程，实现 RFID 阅读器读取电子标签应用程序编写、仿真、调试。
3. 完成 U-Boot 和 uClinux 内核研究分析，修改，编译，移植，实现 uClinux 添加应用程序。

其中，RFID 通信协议和通信实现是本论文研究的重点和核心内容。

本设计主要采用了如下环境和工具：

1. 操作系统：Windows, Red hat9 Linux。
2. 电路图绘制软件：Altium Designer 6.9。
3. 开发语言：汇编语言、C 语言。
4. 集成开发环境：ADS1.2。
5. 仿真、调试和下载工具：J-Link 仿真器。
6. 串口调试工具：超级终端。

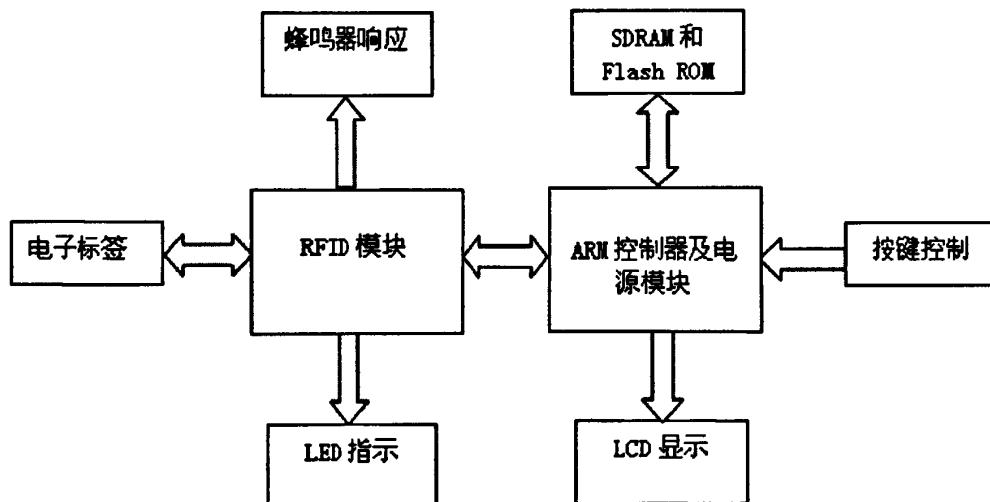


图 1-1 总体设计框图

第2章 嵌入式系统介绍

2.1 嵌入式系统概念

嵌入式系统是一种专用计算机系统，该系统以应用作为中心、以计算机技术作为基础，其软件和硬件是可以进行裁剪的，适合对可靠性、功能、成本、功耗、体积、要求严格的应用系统^[4]。从定义可得知，嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的，具有很强的专用性，其必须与具体应用紧密结合，才能更突出优势所在。一般情况，嵌入式系统由嵌入式硬件和软件两部分组成。其中，嵌入式硬件以微处理器为核心，集成存储器和系统所需外围器件等构成，初始化代码及驱动、嵌入式操作系统和应用程序等则构成嵌入式软件。在实际应用中，为了减小系统体积和功耗，通常在装有微处理器的电路板上，只保留和嵌入式应用有关的功能^[5]，嵌入式产品开发流程如图 2-1 所示。

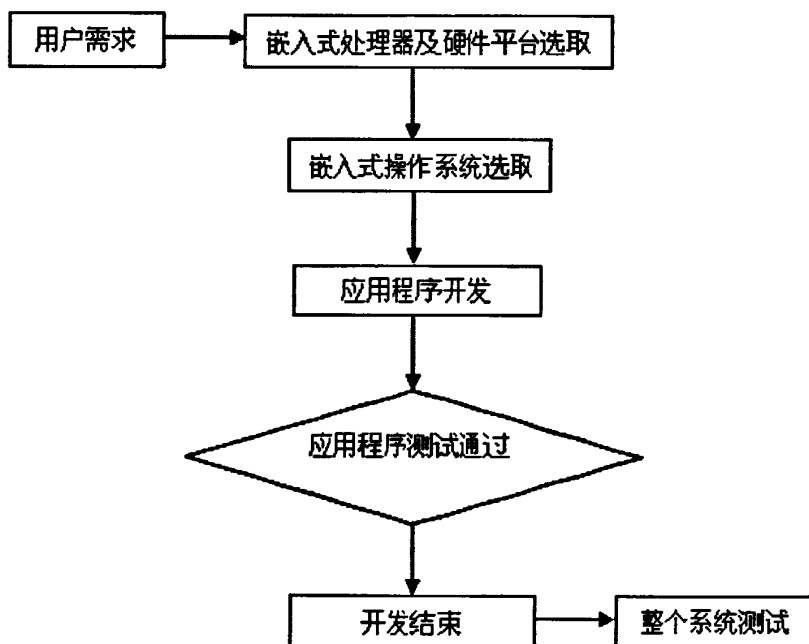


图 2-1 嵌入式产品开发流程

按照嵌入式系统的工程设计方法，嵌入式系统的设计可以分成三个阶段：分析阶段、设计阶段和实现阶段^[6]。分析阶段往往又被称为“需求阶段”，在此阶段需要明确要解决的问题和要完成的目标，之后面临很重要的任务就是要进行嵌入式硬件和软件的选择，通常硬件和软件的选择包括：处理器、硬件部

件、操作系统、编程语言、软件开发工具、硬件调试工具、软件组件等。在设计阶段中，要按照用户提出的要求、在给定的限定条件下完成任务。在实现阶段中，完成硬件和软件调试，实现硬件、软件系统协调运行。

2.2 嵌入式系统特点

从构成看，嵌入式系统集硬件和软件于一体，具有可独立工作的特点。从外观看，嵌入式系统可看做一个可编程的电子器件。从应用来看，与通用计算机系统比较，嵌入式系统具有以下优点^[7]：

1. 专用性强

作为面向特定应用的嵌入式系统，一般情况下，其硬件和软件，尤其是软件，都是根据特定用户群要求专门设计的，具有很强的专用性。

2. 实时性好

在实际应用中，许多嵌入式系统都有实时性要求^[8]，因此实时性成为多数嵌入式操作系统都要求的技术指标，例如：从系统发出处理指令到系统给出应答数据所花费的时间叫做系统响应时间，从中断请求到进入中断服务程序中所花费的时间叫做中断响应时间，操作系统将 CPU 控制权从一个任务切换至另一个任务所花费的时间叫做任务切换时间。实时性作为嵌入式系统的一个重要技术指标，要求系统在事先规定的时间内，能对确定的事件做出响应并正确完成处理工作。

3. 可裁剪性好

嵌入式系统要做到既不提高成本，又满足专用性的要求，必须取得通用性和专用性之间一定的平衡。把嵌入式系统硬件和操作系统设计成可裁剪的是目前通用的做法，开发人员根据实际应用需要进行裁剪，从而使系统用最精简的配置满足产品专用性要求，降低了系统成本。

4. 可靠性高

与通用计算机系统相比较，嵌入式系统对可靠性的要求极高。比如，嵌入式系统处理涉及产品质量、生命财产安全等任务时或处于环境恶劣需要无人值守的情况下，需要很高的可靠性。

5. 功耗低

许多嵌入式小型应用系统，比如移动电话、PDA、MP3 等由于其体积原因，不能配置较大容量的电源，追求低功耗是必然选择。一般情况，产品的软件固化于存储器芯片中，以降低功耗，延长产品使用寿命。

2.3 嵌入式硬件选取

2.3.1 硬件选取考虑因素

嵌入式系统硬件构成中，嵌入式处理器是核心部件。据不完全统计，目前全世界已经有超过 1000 多种的嵌入式处理器，其中，流行体系结构有 30 几个系列。但与全球 PC 机市场不同的是，到目前为止，还没有一种处理器可以主导嵌入式系统，全世界现在有 100 种以上的 32 位的嵌入式微处理器。嵌入式系统设计之间差别化很大，因此具有多样化的选择，在选择处理器时，设计者要考虑的主要因素^[6]有：

1. 技术指标

当前，许多嵌入式处理器都集成了外围设备的功能，芯片的数量大大减少，整个系统的开发费用大为降低。系统所要求的一些硬件连接到处理器上能否无需过多的胶合逻辑(GL, Glue Logic)是开发人员需要首先考虑的，该处理器的一些支持芯片，比如内存管理器、DMA 控制器，串行设备、时钟等的配套是开发人员其次需要考虑的^[9]。

2. 处理性能

处理器的性能主要由时钟频率、内部寄存器的大小等因素决定，许多嵌入式系统设计需要使用处理器时，往往最重要的目标在于选取能够完成目标任务的处理器和 I/O 子系统^[10]。

3. 功耗

目前，电子记事本、手机、GPS 导航器、手持设备等消费类电子产品在嵌入式微处理器市场上增长最快，高性能、低功耗成为其最主要的特点。这个领域已经吸引了许多企业进入，具有很广阔的市场前景。目前，在市场上可以买到像笔记本电脑中 Pentium 一样快的嵌入式处理器，不仅使用普通电池供电即可，而且价格十分便宜。

4. 软件支持工具

如果仅仅只有一个好的处理器，没有比较好的软件开发工具作为支持肯定是不行的。因此，选择一个比较合适的软件开发工具对于嵌入式系统的实现能够起到很好的作用^[10]。

5. 是否内置调试工具

如果处理器具有内置调试工具，利用内置调试工具辅助系统设计，调试周期将大大缩小，调试难度将大为降低，开发周期将大为缩短。

2.3.2 ARM 简介

ARM 的全称是 Advanced RISC Machines, 既可以作为一个公司的名字来使用, 又可以表示一类微处理器的通称, 还可以表示一种技术^[11]。ARM 公司于 1991 年在英国剑桥成立, 专门从事基于 RISC 技术芯片设计开发, 主要出售芯片的设计技术授权, 它本身是不直接从事芯片生产的。目前, 有许多处理器采用 ARM 技术知识产权 (IP) 核, 通常这种处理器为 ARM 微处理器。全球许多半导体生产商从 ARM 公司购买 ARM 处理器核, 按照不同的应用领域, 加上适当的外围电路, 从而形成了自己公司的 ARM 微处理器芯片, 比如三星公司的 ARM7 系列芯片 S3C44BOX 就是运用 ARM 微处理器内核设计的, 使用的范围很广。

2.3.3 ARM 应用领域

到目前为止, ARM 微处理器及技术的应用几乎已经深入到各个领域:

1. 工业控制领域

采用 ARM 核的微控制器芯片作为 32 位的 RISC 架构, 占据了高端微控制器市场的大部分份额, 向低端微控制器应用领域方面也有所扩展。ARM 微控制器拥有低功耗、高性价比优势, 传统的 8 位/16 位微控制器因此面临了极大的挑战^[12]。

2. 无线通讯领域

ARM 微处理器由于其高性能与低成本, 在无线通讯设备领域占有的比例超过了 85%, 并且在此领域的地位越来越巩固。

3. 网络应用

伴随着宽带技术的普及, 运用 ARM 技术的 ADSL 芯片的竞争优势越来越明显。还有, ARM 在语音及视频处理方面进行了优化, 并且获得了广泛的支持, 因此对 DSP 的应用领域提出了一定的挑战。

4. 消费类电子产品

在目前流行的数字音频播放器、游戏机和数字机顶盒中 ARM 微处理器得到了广泛的应用。

5. 成像和安全产品

现在, ARM 技术运用于绝大部分的流行数码相机和打印机中, 也应用于手机中的 32 位 SIM 智能卡。

除此以外, ARM 微处理器及技术还应用到许多不同的领域, 并会在将来取得更加广泛的应用。

2.3.4 ARM 微处理器的特点

采用 RISC 架构的 ARM 微处理器一般具有如下特点^[13]：

1. 功耗低、成本低、性能高、体积小。
2. 支持 Thumb（16 位）/ARM（32 位）双指令集，对 8 位/16 位器件有很好的兼容性。
3. 大量地使用寄存器，加快了指令执行速度。
4. 在寄存器中完成大多数数据操作。
5. 具有灵活简单的寻址方式，并且执行效率高。
6. 指令长度是固定不变的。

2.3.5 ARM7 系列处理器简介

目前，ARM 微处理器主要包括 ARM7 系列、ARM9 系列、ARM9R 系列、ARM10E 等，每个 ARM 体系结构的微处理器都拥有 ARM 体系结构的共同特点，同时又具有各自的特点和应用领域。在这些系列中，ARM7、ARM9、ARM9E 和 ARM10 是 4 个通用处理器系列，每一个系列提供一套相对独特的性能来满足不同应用领域的需求。ARM7 处理器性价比高、使用广泛，为低功耗的 32 位 RISC 处理器，最适合用于对价位和功耗要求较高的消费类应用^[14]。本设计采用三星公司的 ARM7 系列芯片 S3C44BOX，故下面主要介绍 ARM7 系列微处理器，ARM7 系列微处理器具有如下特点^[14]：

1. 具有嵌入式 ICE—RT 逻辑，使得调试开发更加方便。
2. 功耗极低，非常适合于功耗要求较高的应用领域，比如便携式产品。
3. 可以提供 0.9MIPS/MHz 的三级流水线结构。
4. 代码密度高并且能够兼容 16 位的 Thumb 指令集。
5. 对操作系统的支持非常广泛，支持 Linux、Windows CE、Palm OS 等。
6. 具有与 ARM9 系列、ARM9E 系列和 ARM10E 系列兼容的指令系统，使得用户升级产品更加方便。
7. 具有最高可达到 130MIPS 的主频，高速的运算处理能力可以胜任绝大多数的复杂应用。

ARM7 系列微处理器包括如下几种类型的核：ARM7TDMI、ARM7TDMI-S、ARM720T、ARM7EJ。其中，ARM7TMDI 作为目前使用最广泛的 32 位嵌入式 RISC 处理器，属于低端 ARM 处理器核。其中，TDMI 的基本含义为：T 表示支持 16 位压缩指令集 Thumb，D 表示支持片上 Debug，M 表示内嵌硬件乘法器（Multiplier），I 表示嵌入式 ICE，支持片上断点和调试点^{[15]、[16]}。

2.4 嵌入式软件选择

嵌入式软件的开发流程主要涉及到代码编程、交叉编译、交叉链接、下载到目标板和调试等几个步骤。下面介绍嵌入式操作系统的选择和编程语言的选择，首先对几种常见嵌入式操作系统进行比较^[17]：

1. VxWorks

VxWorks 是美国 WindRiver 公司的产品，由 400 多个相对独立、短小精悍的目标模块组成，实际应用中，可以根据实际需要进行适当的裁剪和配置。具有基于优先级的任务间同步与通信、任务调度、定时器和内存管理、中断处理等功能，内建的多处理器控制程序和内存管理符合 POSIX 规范。VxWorks 具有简明易懂的用户接口，目前在嵌入式领域中应用很广泛，占有比较高的市场占有率。

2. uC/OS-II

uC/OS-II 是在 uC-OS 的基础上用 C 语言编写的一个多任务实时内核，具有占用空间小、执行效率高、实时性优良与可扩展性强等特点。uC/OS-II 可以管理 64 个任务，并具有内存管理、时间管理和中断服务、任务调度与管理、任务间同步与通信等功能。

3. Windows CE

Windows CE 操作系统是微软公司于 1996 年发布的一种嵌入式系统，目前使用最多的是 Windows CE.NET4.2 版和 Windows CE.NET5.0 版，在 PDA、Pocket PC、Smart Phone（智能手机）、工业控制和医疗设备方面使用较为广泛。Windows CE 是一个简单、高效率的多平台操作系统，不是桌面 Windows 操作系统的削减版本，而是从整体上为有限资源的平台设计的多线程、完全优先级、多任务的操作系统^[18]。

4. Symbian OS

Symbian OS 又叫做 EPOC 系统，是一个专门用于手机等移动设备的操作系统。目前诺基亚、爱立信、松下等公司都支持 Symbian OS 系统，该系统占据了绝大部分智能手机市场份额。

5. uClinux

uClinux 表示 micro-Contral-Linux，是一种使用广泛的嵌入式 Linux 版本。同标准的 Linux 相比，uClinux 具有非常小的内核，但是它仍然具有 Linux 操作系统的主要特性，主要包括强大的网络功能、良好的移植性和稳定性、标准丰富的 API、出色的文件系统支持、以及 TCP/IP 网络协议等。

综合比较，uClinux 具有的优点为 RFID 阅读器的继续研究和开发提供了极大的便利，运用 uClinux 强大的网络功能可以使 RFID 阅读器后端数据传输高效、快捷，提高 RFID 系统工作效率。

编程语言的选择主要考虑以下因素^[6]：

1. 通用性

在不同种类的微处理器中，都有自己专用的汇编语言。这样，系统开发者就面临了一个巨大的障碍，系统编程变得更加困难，软件重用也无法实现。一般来说，高级语言和具体器件的硬件结构联系不多，同时得到了多数微处理器的支持，这样使得高级语言通用性较好，比如 C 语言。

2. 可移植性程度

汇编语言与具体的微处理器密切相关，为某种微处理器设计的程序无法直接移植到不同种类的微处理器上使用，可移植性差。然而，高级语言对不同微处理器具有通用性，这样，程序可以运行于不同的微处理器，可移植性较好。

3. 执行效率

一般情况，高级语言的编译器和开销较大、应用程序较大、较慢。但是，如果单纯依靠低级语言来进行应用程序的开发，编程复杂、开发周期长。因此，在开发与运行性能之间存在一个权衡问题，比如在实际嵌入式系统开发中，经常使用汇编语言和 C 语言混合编程，效率提高了，开发周期缩短了。

4. 可维护性

低级语言比如汇编语言可维护性低，而高级语言程序往往是通过模块化设计完成的，各个模块之间的接口是固定的。如果系统出现问题，可以将问题很快地定位到某个模块内，并且尽快解决。另外，采用模块化设计，系统功能的扩充和升级也方便了^[19]。

2.5 嵌入式设计一般方法

在嵌入式系统开发过程中包括宿主机开发和目标机开发两个过程，宿主机即计算机，其任务是执行编译、链接、定址。目标机是运行嵌入式软件的硬件平台^[20]。

首先，必须完成编译、链接、定址三个步骤，这一过程将应用程序转换成可以在目标机上运行的二进制代码。编译过程由交叉编译器实现，交叉编译器完成的任务就是在一个计算机平台上生成在另一个计算机平台上可以运行的代码，常见的交叉编译器有 GNUC/C++(gcc)等。把编译过程产生的全部目标文件链接成为一个目标文件的过程叫做链接过程。把物理存储器地址指定给目标文

件的每个相对偏移处定址的过程叫做定址过程，该过程生成的二进制文件就是可以在嵌入式平台上运行的文件^[19]。

调试目标机上的应用程序也是嵌入式开发过程中的一个重要的步骤^[21]。嵌入式调试需要交叉调试器，“宿主机—目标机”调试是一般采用的调试方式，宿主机和目标机之间由以太网线或串口线连接。交叉调试包括任务级、源码级和汇编级的调试，调试时需下载宿主机上的操作系统内核和应用程序到目标机的 RAM 中或者直接烧录到目标机的 Flash ROM 中。调试器对目标机上运行的应用程序进行控制的代理(Debugger Agent)叫做目标监控器，是事先被固化在目标机的 Flash ROM 中的。目标监控器在目标机上电后自动启动，并等待宿主机方调试器发来的命令，配合调试器完成应用程序的下载、运行和基本的调试功能，然后将调试信息返回给宿主机^[22]。

在应用嵌入式系统开发的过程中，由于对应于每一个处理器的硬件平台都是通用的、固定的、成熟的，因此，硬件系统错误的引入机会在开发过程中减少了^[23]。同时，由于底层硬件的许多复杂信息被屏蔽掉了，这样开发者完成大部分工作可以通过操作系统自身的 API 函数完成，开发过程大为简化了，系统的稳定性也提高了。

综上所述，嵌入式系统的开发使得开发者不用花费太多的精力在硬件设计上，从而可以把主要的精力放在编写特定的应用程序上，有利于缩短开发周期、提高开发效率、降低开发成本。

2.6 本章小结

首先对嵌入式系统的概念作了简单介绍，分析了嵌入式系统的特点。分析了嵌入式硬件选取考虑的因素，选用三星公司的 ARM7 系列芯片 S3C44B0X 作为控制器。接着对 ARM 技术、ARM 微处理器的应用领域和特点及系列作了简单介绍。分析比较了嵌入式操作系统及编程语言的比较，选用 uClinux 和嵌入式 C 语言和汇编语言完成了嵌入式软件选择。

第 3 章 RFID 技术介绍

RFID 技术是一种利用射频通信方法实现非接触式、快速、实时、准确地采集与处理信息的自动识别技术，它通过射频信号自动识别目标对象并获取相关数据，识别工作无须人工干预，可工作于各种环境之下。它是目前自动识别技术发展的趋势所在，更被誉为 21 世纪最重要的十大技术之一。当成本这一始终阻碍 RFID 得到全面发展的因素在发达国家政府政策的支持下得到解决后，RFID 得到了前所未有的广泛发展和应用^[24]。RFID 可以广泛应用于工业自动化、商业自动化、交通运输控制管理和身份认证等多个领域，而在仓储物流管理、生产过程制造管理、智能交通、网络家电控制等方面更是引起了众多厂商的关注，广泛地体现了 RFID 在应用中的感知和采集功能，是物联网的应用基础^[25]。完整的 RFID 系统由阅读器、电子标签、应用软件系统三大部分组成^[26]，其组成框图如图 3-1 所示，下面对电子标签、阅读器、天线进行介绍。

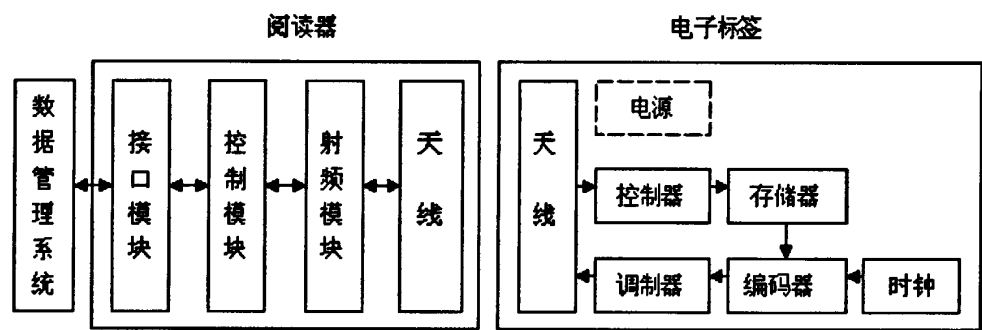


图 3-1 RFID 系统组成框图

3.1 电子标签

电子标签是由耦合元件及芯片组成的，每个标签具有唯一的 RFID 编码，可以附着在物体上标识目标对象，一般情况下，标签已经包含了标签天线。电子标签的分类有多种方式^[26]，比如按照工作频率分类、按照电能消耗分类、按照应用分类。

电子标签的工作频率是其最重要的特点之一。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实现的难易程度和设备的成本。工作在不同频段或频点上的电子标签具有不同的特点。射频识别应用占据的频段或频点在国际上有公认的划分，即位于 ISM 波段之中。典型的工作频率有：125KHz，133KHz，

13.56MHz, 27.12MHz, 433MHz, 902~928MHz, 2.45GHz, 5.8GHz 等。按工作频率分类, 可以将电子标签分为以下几类:

1. 低频段电子标签

简称为低频标签, 其工作频率范围为 30KHz~300KHz。典型工作频率有: 125KHz, 133KHz (也有接近的其他频率, 如 TI 使用 134.2KHz)。低频标签一般为无源标签, 其工作能量通过电感耦合方式从阅读器耦合线圈的辐射近场中获得。低频标签与阅读器之间传送数据时, 低频标签需位于阅读器天线辐射的近场区内。低频标签的阅读距离一般情况下小于 1 米。低频标签的典型应用有: 动物识别、容器识别、工具识别、电子闭锁防盗 (带有内置应答器的汽车钥匙) 等。与低频标签相关的国际标准有: ISO11784/11785 (用于动物识别)、ISO18000-2 (125-135KHz)。

2. 中高频段电子标签

高频电子标签一般也采用无源方式, 其工作能量同低频标签一样, 也是通过电感 (磁) 耦合方式从阅读器耦合线圈的辐射近场中获得。标签与阅读器进行数据交换时, 标签必须位于阅读器天线辐射的近场区内。中频标签的阅读距离一般情况下也小于 1 米 (最大读取距离为 1.5 米)。高频标签由于可方便地做成卡状, 典型应用包括: 电子车票、电子身份证、电子闭锁防盗 (电子遥控门锁控制器) 等。相关的国际标准有: ISO14443、ISO15693、ISO18000-3 (13.56MHz) 等。高频标准的基本特点与低频标准相似, 由于其工作频率的提高, 可以选用较高的数据传输速率。

3. 超高频与微波电子标签

超高频与微波频段的电子标签, 简称为微波电子标签, 其典型工作频率为: 433.92MHz, 862(902)~928MHz, 2.45GHz, 5.8GHz。微波电子标签可分为有源标签与无源标签两类。工作时, 电子标签位于阅读器天线辐射场的远区场内, 标签与阅读器之间的耦合方式为电磁耦合方式。阅读器天线辐射场为无源标签提供射频能量, 将有源标签唤醒。相应的射频识别系统阅读距离一般大于 1m, 典型情况为 4~7m, 最大可达 10m 以上。微波电子标签的典型应用包括: 移动车辆识别、电子身份证、仓储物流应用、电子闭锁防盗 (电子遥控门锁控制器) 等。相关的国际标准有: ISO10374, ISO18000-4 (2.45GHz)、ISO18000-5 (5.8GHz)、ISO18000-6 (860-930 MHz)、ISO18000-7 (433.92 MHz), ANSI NCITS256-1999 等。

在实际应用中, 必须给电子标签供电才能工作, 虽然它的电能消耗是非常低的。按照标签获取电能的方式不同, 可以把标签分成有源式标签与无源式标签。有源式电子标签内部自带电池对电子标签进行供电, 距离远, 工作可靠性高, 但是体积大、价格高。无源电子标签无需电池供电, 从 RFID 阅读器产生的

磁场中获得工作所需的能量，但是读取距离较近。现就这两类电子标签进行分析比较：

1. 有源式电子标签

有源式电子标签内部自带电池对电子标签进行供电，并且电能充足。有源式电子标签信号传送的距离远，工作可靠性高。此外，有源式电子标签的使用次数或使用时间可以通过设计不同的电池寿命来实现，非常适合用于使用数据有限制或者数据传输量有限的地方。有源式电子标签的主要缺点是体积大，价格高，并且标签的使用寿命有限制，随着标签内电池的电力不断消耗，数据传输距离也会越来越小，系统的正常工作会受到影响。

2. 无源式电子标签

无源式电子标签内部不带电池，工作时需要外界提供能量，天线与线圈是其产生电能的典型装置。当标签进入系统的工作区域，天线接收到特定的电磁波后，线圈将产生感应电流，再经过整流后对电容进行充电，经过稳压后的电容电压作为工作电压。无源式电子标签可以永久使用，支持长时间的数据传输和永久性的数据存储，非常适合用在标签信息需要频繁读写多次或每天读写的地方。无源式标签的主要缺点是数据传输的距离要短于有源式标签，因为无源式标签需要外部供电，电能比较弱，信号强度和数据传输距离受到限制，因此对信号接收器的敏感性提出了较高的要求。目前，由于无源式电子标签价格低，体积小，易用性强，因此它是电子标签的主流。

按应用分类，可以分为物流标签、图书标签、抗金属标签等。物流标签主要应用在物流运输、物流仓储管理及电子标签辅助拣货系统等。图书标签主要应用在图书馆管理、图书发行管理等方面。抗金属标签主要应用在办公设备管理，企业资产管理，生产管理等方面。其他标签还有服装标签、洗衣标签、牲畜管理标签、医疗标签、安防防盗标签、轮胎管理标签、超市零售标签等。

本设计采用的飞利浦公司的非接触式电子标签 S50卡，其容量为8KBit，为无源式电子标签，执行标准为 ISO14443A，工作频率为13.56MHZ，读写距离为2.5~10cm。具有防冲突、支持多卡操作等功能，广泛应用于公交储值卡、企业（校园）一卡通、停车场、高速公路收费、小区管理等。

3.2 阅读器

在无线射频识别系统中，阅读器是 RFID 的主要构成部分之一。阅读器作为读取或者写入标签信息的设备，可以单独完成对标签数据的读取、写入等操作，也可以和计算机或者其它系统联合运行，实现对电子标签的操作。典型的阅读器含有控制模块、射频模块、接口模块以及阅读器天线。此外，许多阅读

器还有附加接口(RS232、RS485、以太网接口等),用于从应用系统接收命令或者将获得的数据传给应用系统^[27]。阅读器按照按外形分类可以分为固定式阅读器和手持式阅读器,按照频率分类可以分为低频阅读器、高频阅读器和超高频阅读器。

近年来,随着微型集成电路技术的进步,RFID 阅读器得到了发展。RFID 阅读器也被广泛应用于多种领域,如:制造业、物流、港口、码头、车辆及人员管理等。RFID 阅读器具有以下优势:不需要光源;标签能在恶劣的环境下工作;读取距离远;可同时处理多个标签;可实时追踪人员、物品及仪器设备等。RFID 阅读器适用于快速、简便的系统集成,且性能可靠、功能齐全、安全性高^[28]。

RFID 阅读器可以简化为两个基本的功能模块:控制模块和射频模块。控制模块通过智能单元发出命令,处理从射频模块回收来的信号,存储单元用于存储结果。阅读器芯片及外围电路构成射频模块,包括发射器和接收器两部分。射频模块功能包括对发射信号进行调制、将数据传送给电子标签、接收并解调来自电子标签的高频信号。

本论文研究的阅读器可以广泛应用于 13.56MHZ 频率下的领域,能够完成读取卡号等功能,不仅具有普通阅读器的功能,而且带有嵌入式操作系统,可扩展性强。

3.3 天线

RFID 阅读器必须通过天线才能发送能量,形成电磁场,通过电磁场才能识别电子标签。因此,可以这样说,射频系统的可读区域是天线所形成的电磁场范围。在任意一个 RFID 系统中最少应包含一根天线,用以发射和接收 RF 信号,天线可以内置或外置。在一些 RFID 系统中,发射和接收信号是由一根天线同时完成的,而另外一些 RFID 系统中,发射和接收信号分别由一根天线完成^[29]。在电感式耦合射频识别系统中,阅读器天线用于磁通量的产生,而磁通量用于射频电子标签电源的提供,并在阅读器和标签之间传输信息^{[30], [31]}。阅读器天线的设计或者选择必须满足以下基本条件^[31]:

1. 天线线圈的电流最大,用以产生最大的磁通量。
2. 功率匹配,以最大限度地利用磁通量的可用能量。
3. 足够的带宽,用以保证载波信号的传输,这些信号是用数据信号调制而成的。

3.4 RFID 标准

目前, RFID 技术存在三个标准体系: ISO 标准体系、EPC Global 标准体系和 UID(Ubiquitous ID)标准体系^[32]。

1. ISO 标准体系

RFID 国际标准的主要制定机构包括国际标准化组织 (ISO) 和其他国际标准化机构如国际电信联盟 (ITU)、国际电工委员会 (IEC) 等。ISO (或与 IEC 联合组成) 的技术委员会 (TC) 或者分技术委员会 (SC) 制定了大部分 RFID 标准。RFID 标准可以按以下四大类进行分类:

- (1). 技术标准, 比如 IC 卡、射频识别技术标准。
- (2). 数据内容与编码标准, 如语法、编码格式标准。
- (3). 性能与一致性标准, 比如测试规范标准。
- (4). 应用标准, 比如船运标签、产品包装标准。

2. EPC Global 标准体系

EPC Global 是由美国统一代码协会 (UCC) 于 2003 年 9 月与国际物品编码协会 (EAN) 联合成立的非盈利性组织, 其前身是 1999 年 10 月 1 日成立于美国麻省理工学院的非盈利性组织 Auto-ID 中心, 其使命是创建“物联网” (Internet of Things)。为此, 该 Auto-ID 中心的目标是与众多成员企业一起制订一个统一的、和 Internet 类似的开放技术标准, 实现在现有计算机互联网的基础上完成信息的交换与共享。其旗下有沃尔玛集团、英国 Tesco 等 100 多家欧美的零售流通企业, 还有微软、IBM、飞利浦等公司提供技术支持和研究支持。

EPC Global 的目标是建立一个为全球电子标签用户提供标准化服务的 EPC Global 网络, 前提条件是遵循该公司制定的技术规范。现在, EPC global Network 技术规范 1.0 版给出了所有的系统定义和功能要求。加拿大、日本、中国等国已经建立了 EPC Global 分支机构, 专门负责 EPC 码段在这些国家的分配与管理、EPC 相关技术标准的制定、EPC 相关技术在本土的宣传普及以及推广应用等工作^[33]。

EPC Global 提出的“物联网”体系架构由 EPC 编码、EPC 标签及阅读器、EPC 中间件、ONS 服务器和 EPCIS 服务器等部分构成^[34]。EPC 是赋予物品的唯一的电子编码, 其位长通常为 64 位或 96 位, 也可扩展为 256 位。对不同的应用, 规定有不同的编码格式, 主要用于存放企业代码、商品代码和序列号等。采用最新的 GEN2 标准的 EPC 编码可兼容多种编码^[35]。读取到的 EPC 编码通过 EPC 中间件进行过滤和容错等处理后, 输入到企业的业务系统中。它通过定义与阅读器的通用接口 (API) 与不同制造商的阅读器实现兼容。ONS 服务器根据

EPC 编码及用户需求进行解析，以确定与 EPC 编码相关的信息存放在哪个 EPCIS 服务器上。与 EPC 相关的各种信息由 EPCIS 服务器存储并提供，其通常以 PML 的格式存储，也可以存放于关系数据库中^[36]。

3. UID 标准体系

UID(Ubiquitous ID) Center, 即泛在识别中心，事实上就是日本有关电子标签的标准化组织。该中心由日本政府的经济产业省牵头，主要由日本厂商组成，现在有信息企业和印刷公司、电子厂商等达 300 多家参与。

UID Center 的泛在识别技术体系架构主要由泛在识别码(unicode)、信息系统服务器、泛在通信器和 unicode 解析服务器四部分组成^[37]。unicode 是赋予现实世界中任何物理对象的唯一识别码，它具备了 128 位的充裕容量，并可以 128 位为单元进一步扩展至 256、384 或 512 位。unicode 的最大优势是能包容现有编码体系的元编码设计，可以兼容多种编码。unicode 标签具有多种形式，包括条码、射频标签、智能卡、有源芯片等。泛在识别中心把标签进行分类，设立了 9 个级别的不同认证标准。信息系统服务器存储并提供与 unicode 相关的各种信息。unicode 解析服务器确定与 unicode 相关的信息存放在哪个信息系统服务器上。unicode 解析服务器的通信协议为 unicodeRP 和 eTP，其中 eTP 是基于 eTron (PKI) 的密码认证通信协议。泛在通信器主要由 IC 标签、标签阅读器和无线广域通信设备等部分构成，用来把读到的 unicode 送至 unicode 解析服务器，并从信息系统服务器获得有关信息^{[34], [36]}。

3.5 本章小结

本章首先对 RFID 技术做了简单介绍，介绍了其组成部分。接着分别对 RFID 系统组成中的电子标签、阅读器、天线做了介绍，最后介绍了 RFID 标准，对全球三大 RFID 标准体系：ISO 标准体系、EPC Global 标准体系和 UID(Ubiquitous ID)标准体系分别做了介绍。

第 4 章 系统硬件设计

4.1 控制器设计

本论文研究的阅读器采用的三星公司 ARM7 系列芯片 S3C44B0X 是基于 ARM7TDMI 架构的, 具有低成本、低功耗、高性能的特点, 使用比较广泛。S3C44B0X 提供了很多内置功能部件, 大大缩短了工程应用的开发周期, 通过提供一系列完整的系统外围设备, S3C44B0X 大大减少了整个系统的成本。由于其出色、精简的全静态设计和低功耗、S3C44B0X 特别适用于对成本和功耗敏感的应用领域^[38]。S3C44B0X 资源丰富、可扩展性强, 其引脚定义图如图 4-1 所示, 配置如下^{[39], [40]}:

1. 2.5V ARM7TDMI 内核, 带有 8KB 高速缓存器 (SAMBA II 总线体系结构, 主频高至 66MHz)。
2. 外部存储控制器 (FP/EDO/SDRAM 控制、片选逻辑)。
3. LCD 控制器 (最大支持 256 色 STN), 带专用 DMA 的 LCD 控制器 (最大支持 256 色 DSTN)。
4. 两个通用的 DMA 通道, 两个带外部请求引脚的外围 DMA 通道。
5. 一个 SIO (IRDA1.0, 16 字节的 FIFO)/两个 UART。
6. 一个 I²S 总线控制器和一个多主控器的 IIC 总线控制器。
7. 一个内部定时器和 5 个 PWM 定时器。
8. 看门狗定时器。
9. 1 位的通用 I/O 接口/8 个外部中断源。
10. 电源控制: Normal, Slow, Idle 和 Stop 模式。
11. 8 通道的 10 位 ADC。
12. 具有日历功能的实时时钟 (RTC)。
13. 片上具有 PLL 的时钟发生器。

S3C44B0X 系统管理具有如下特点^[8]:

1. 支持大端/小端格式。
2. 存储器寻址空间支持每个 bank 大小为 32MB, 全部大小为 256MB。
3. 对每个 bank, 支持可编程的 8/16/32 位数据总线。
4. 在 8 个 banks 中, 有 1 个 bank 起址和 bank 大小可编程; 其余 7 个 bank 起址固定, bank 大小可编程。
5. 在 8 个 bank 中, 支持 6 个 bank 使用 ROM、SRAM 类型芯片, 支持两个 bank 使用 ROM/SRAM/DRAM (FP/EDO/SDRAM) 类型芯片。

6. 对全部存储器 banks，存取周期可编程。
7. 支持外部等待信号，可以扩展总线周期。
8. 在节电模式下，支持 DRAM/SDRAM 自我刷新方式。
9. 对 DRAM，支持对称/非对称地址方式，即动态存储器芯片行地址和列地址可以等长也可以不等长。
10. 支持存储器寻址空间与 I/O 寻址空间统一编址方式。

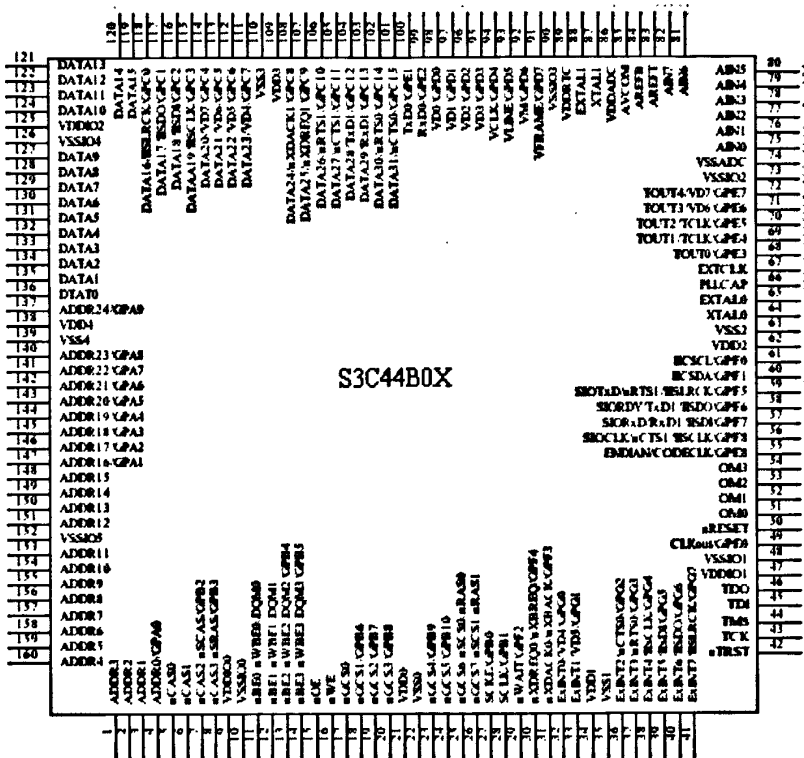


图 4-1 S3C44B0X 引脚定义图

针对 S3C44B0X 丰富的资源和具有的优点，本论文研究中用到了两个串口，一个用于与 RFID 模块进行通信，另一个用于测试和下载用，与 PC 相连。利用 S3C44B0X 的 LCD 控制器，控制外接 LCD 进行 RFID 相关信息显示。用于 S3C44B0X 自带的 JTAG 功能，外接 J-Link 仿真器进行在线调试和仿真。

4.2 电源设计

电源在嵌入式系统中起着至关重要的作用，关系着整个系统的稳定，因此，设计好电源模块显得很重要。本设计需要 3 种大小的电压，分别是 RFID 模块和 LCD 模块工作电压电压 VCC5.0，其值为 5V。5V 电压可以由 5V（2A）的开

关电源获得, 3.3V 和 2.5V 需要由电压转换芯片从 5V 转换而来, 所用芯片分别是 LM1117-33, LM1117-25。电源模块部分电路原理图如图 4-2 所示:

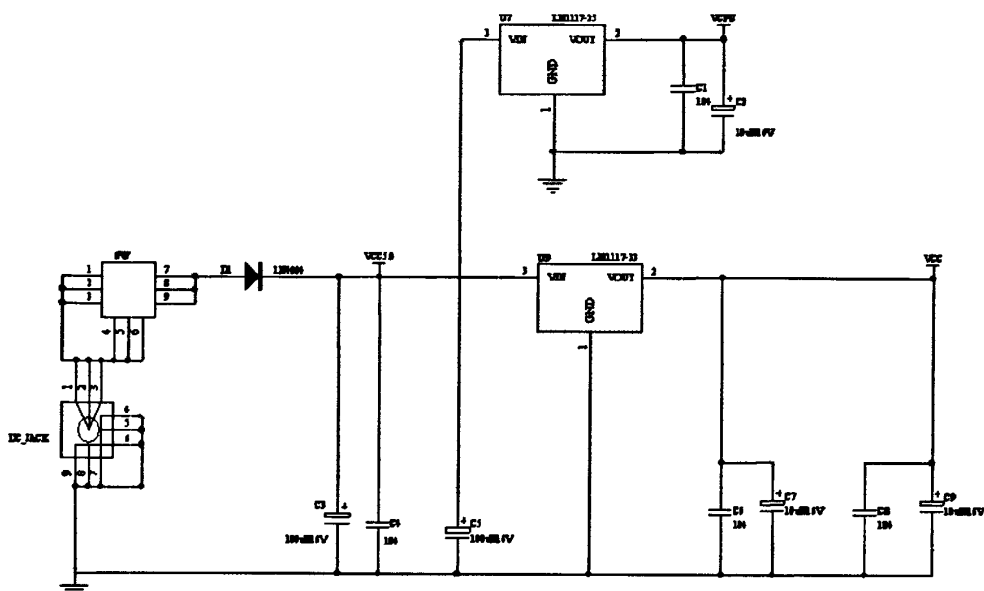


图 4-2 电源模块电路原理图

4.3 存储器设计

存储器是嵌入式系统的重要组成部分，在嵌入式开发中，存储器设计是重要的一步。S3C44B0X 的存储器控制器提供访问外部存储器所需要的存储器控制信号，便于扩展外部存储器^[38]。嵌入式系统中用到的 SDRAM 类似于 PC 的内存，主要用于程序执行时的程序存储、执行或计算，掉电后数据不保存，运行时需要动态刷新，但是读取速度快。Flash ROM 分为 nand flash 和 nor flash 两种，前者适合大容量数据存储，后者适合小容量的程序或数据存储。本设计运用的 SDRAM 是 Hynix 公司的 HY57V641620HG 芯片，Flash Rom 采用 SST 公司的 SST39VF160 芯片。

4.3.1 SDRAM 设计

SDRAM 是 Synchronous Dynamic Random Access Memory (同步动态随机存储器) 的简称, 是前几年普遍使用的内存形式。它采用 3.3V 工作电压, 带宽为 64 位, 通过一个相同的时钟将 CPU 与 RAM 锁在一起, 让 RAM 和 CPU 可以共享一个时钟周期, 用相同的速度同步工作, 在速度上能比 EDO 内存提高 50%。SDRAM 采用双存储体结构, 包含两个交错的存储阵列, 在 CPU 从一个阵列或存

储体访问数据时，另一个阵列或存储体就已为读写数据做好了准备。通过在这两个存储阵列之间进行紧密切换，SDRAM 的读取效率大大提高了^{[41], [42]}。SDRAM 不仅可用作主存，在显示卡上的显存方面也有广泛应用。

HY57V641620HG 是一个 8MB 的 CMOS 同步 DRAM，非常适合高带宽和大容量存储的存储场合。HY57V641620HG 分为 4 个 Bank，每个 Bank 大小为 2MB，所有的输入和输出是和时钟输入上升沿同步的，具有与 LVTTTL 相兼容的电平，其特性如下^[43]：采用单电源供电，电压范围为 3.0V~3.6V。封装为 54 引脚 TSOP II 封装，全部引脚与 LVTTTL 接口兼容，全部输入输出参考系统时钟。具有 LDQM 或 UDQM 数据屏蔽功能。脉冲宽度和脉冲类型可编程。具有自我刷新和自动刷新功能，64ms 内有 4096 个自动刷新周期。引脚定义图如图 4-3 所示，引脚描述如表 4-1 所示。

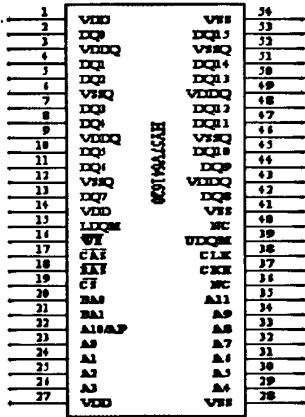


图 4-3 HY57V641620HG 引脚定义图

表 4-1 HY57V641620HG 引脚描述

引脚	引脚名	描述
CLK	时钟	系统时钟输入
CKE	时钟时能	内部时钟控制信号
$\overline{\text{CS}}$	片选	禁止/使能除 CLK、CKE 和 DQM 的所有输入
BA0、BA1	Bank 地址	选择某个 Bank，00~11 对应 Bank0~Bank1
$\overline{\text{RAS}}$	行地址选择	$\overline{\text{RAS}}$ 为行地址选择，当为低电平时行地址单元使能
$\overline{\text{CAS}}$	列地址选择	$\overline{\text{CAS}}$ 为行地址选择，当为低电平时行地址单元使能
$\overline{\text{WE}}$	写使能	$\overline{\text{WE}}$ 为低时，允许写操作
LDQM/UDQM	数据输入/输出屏蔽	控制 I/O 缓存的高地址和低地址，输入/输出屏蔽。在阅读模式中控制输出缓冲和在写入模式中处理输入数据。
DQ0~DQ15	数据输入/输出	输入和输出数据
VDD/VSS	电源/地	内部电路和输入缓冲电源供电
VDDQ/VSSQ	数据输出电源/地	输出缓冲电源供电
NC	未连接	不使用，悬空即可

SDRAM 的行地址和列地址是分时复用的，也就是地址线要分两次送出，先送出地址线，再送出列地址线。这样可进一步减少地址线的数量、提高器件的性能，但寻址过程变复杂了^[38]。

S3C44B0X 与存储器连接电路原理图如图 4-4 所示：

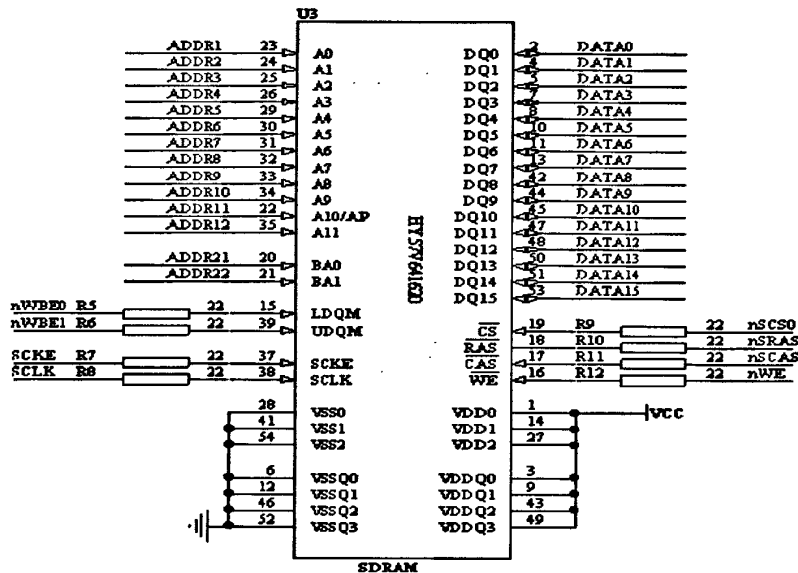


图 4-4 S3C44B0X 与存储器连接电路原理图

4.3.2 Flash ROM 设计

闪存（Flash Memory）是一种长寿命的非易失性（在断电情况下仍能保持所存储的数据信息）的存储器，不是以单个的字节为单位进行数据删除的，而是以固定的区块为单位进行数据删除的，一般情况，区块大小为 256KB 到 20MB。闪存作为电子可擦除只读存储器（EEPROM）的变种，与 EEPROM 不同的是，它进行删除和重写可以在在字节水平上进行，因此，闪存拥有比 EEPROM 更快的更新速度。由于闪存在断电时仍能保存数据，因此通常被用于保存设置信息。

SST39VF160 是一个 1M×16Bit 的 CMOS 多功能 Flash 器件，由 SST 特有的高性能 SuperFlash 技术制造而成。SST39VF160 的操作电压为 3.0~3.6V，具有高性能的字编程能力，字编程时间为 14μs。SST39VF160 的 10,000 个周期的耐用性和大于 100 年的数据保持时间，使其可广泛用于设计、制造和测试等应用中^[44]。SST39VF160 提供了 48 脚 TSOP 和 48 脚 TFBGA 两种封装形式，本设计采用 TSOP 封装，其引脚分布图如图 4-5 所示。

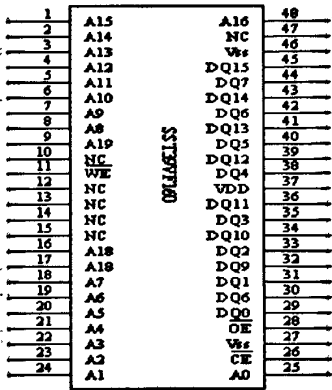


图 4-5 SST39VF160 引脚定义图

SST39VF160 尤其适用于要求程序、配置或数据存储器可方便和低成本更新的应用。对于所有的系统，使用 SST39VF160 用可明显增强系统的可靠性和性能，降低系统的功耗。SST39VF160 比其他技术制造的 Flash 器件消耗更少的能量用于擦除和编程操作^[45]。全部能量的消耗和应用的电压、电流以及操作时间有关。对于任何的电压范围，SuperFlash 技术消耗的电流都很小，使用的擦除时间都很短。因此，在程序、数据和配置存储器的低成本应用的灵活性方面，SST39VF160 也得到了增强。SuperFlash 技术提供的擦除和编程时间是固定的，与擦除/编程周期数无关，因此，SST39VF160 不需要对硬件或软件进行修改和变动，SST39VF160 引脚描述如表 4-2 所示。

表 4-2 SST39VF160 引脚描述

符号	引脚名称	功能
A19~A0	地址输入	提供存储器地址，在扇区中 A19~A11 地址线用来选择擦除哪一个扇区，在块擦除中 A19~A15 地址线用来选择擦除哪一块。
DQ15~DQ0	数据输入/数据输出端	在读周期输出数据，在写周期接收写入的数据，在写周期中，数据内部锁存。在 OE 或 CE 为高电平时，数据线输入为高阻态。
CE	片选使能	低电平有效的片选线
OE	输出使能	低电平有效的数据输出使能线
WE	写使能	控制写操作
VDD	电源输入端	为 SST39VF160 提供 2.7~3.6V 电源
VSS	地	
NC	无连接	不连接引脚

S3C44BOX 与 SST39VF160 连接电路原理图如图 4-6 所示。

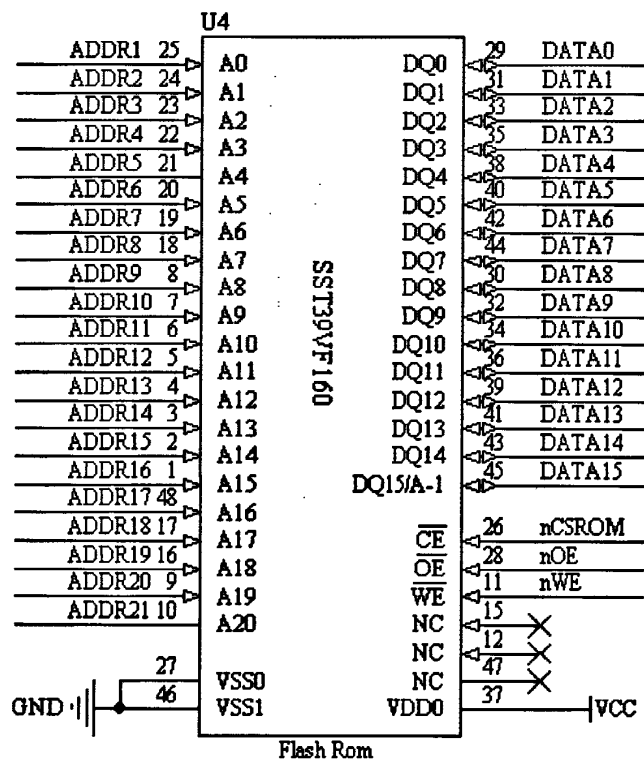


图 4-6 S3C44B0X 与 SST39VF160 连接电路原理图

4.4 串口通信设计

UART 是目前广泛使用的一种通用串行数据通信接口，具有两部分功能，既作为发送器，也作为接收器。UART 操作包含数据发送、数据接收、自动流控制（Auto Flow Control, AFC）、中断和 DMA 请求产生、错误状态 FIFO、波特率发生器、红外方式等内容^[38]。

本设计通信接口均采用 RS-232C 标准串口，包括控制器与 RFID 模块之间的通信以及控制器与 PC 机之间的通信。因为 ARM 处理器串口使用的是 TTL 电平，而 PC 机串口使用的是 RS232 电平，所以需要电平转换芯片转换电平以完成通信。RS-232C 标准是美国 EIA(电子工业联合会) 联合 BELL 等公司一起开发的通信协议，于 1969 年公布。RS-232C 标准对串行通信接口的有关问题，如电器特性、信号线功能都作了明确规定。目前，许多通信设备厂商生产的设备都与 RS-232C 制式兼容，因此，RS-232C 作为一种标准已经在微机通信接口中得到了广泛应用^[46]。本设计采用的电平转化芯片是美国美信生产的 MAX232 芯片，其引脚定义图如图 4-7 所示，引脚定义描述如表 4-3 所示。

4.5.2 LCD 分类

按物理结构分类 LCD 可以分为扭曲向列型 (TN—Twisted Nematic)、双层超扭曲向列型 (DSTN—Dual Scan Tortuosity Nomograph)、超扭曲向列型 (STN—Super TN)、薄膜晶体管型 (TFT—Thin Film Transistor)^[47]。前三种类型只是在名称上有细微差别, 它们在显示原理具有很多的共性。前三种类型的 LCD 不同之处在于液晶分子的扭曲角度不同, 其中, DSTN 构成的液晶显示器可视角度较小、对比度和亮度比较差、色彩欠丰富, 而价格低廉、结构简单, 因此还占有着一定市场。现在最为常用的 LCD 类型是薄膜晶体管型, TFT 是指液晶显示器上的每一液晶像素点都由集成在其后的薄膜晶体管来驱动。TFT 液晶显示器具有对比度好、亮度高、屏幕反应速度快、色彩丰富、可视角度大等特点, 成为现在液晶显示器的主流设备。

4.5.3 S3C44B0X LCD 控制器

LCD 控制器在 S3C44B0X 芯片中, 它把系统存储器中显示缓冲区的 LCD 图像数据传送到外部 LCD 驱动器, 并且产生相应的控制信号。

LCD 控制器支持单色、每像素两位 (4 级灰度) 或每像素 4 位 (16 级灰度) 方式以及每像素 8 位 (256 级彩色) 方式, 支持彩色 STN LCD 屏。

LCD 控制器能被编程支持不同的需求, 如不同的屏幕水平行数和垂直像素数、数据接口的数据线宽度、接口定时和刷新频率。

LCD 控制器特征^[8]:

1. 支持彩色/灰度/单色 LCD。
2. 支持三种类型 LCD: 4 位双扫描、4 位单扫描、8 位单扫描。
3. 支持多种虚拟显示屏 (支持硬件水平/垂直滚屏)
4. 系统存储器被用作显示存储器。
5. DMA 支持从系统存储器显示缓冲区获取图像数据。
6. 支持多种屏幕规格: 典型的 LCD 屏幕大小有 640×480 、 320×240 和 160×160 像素。最大的虚拟屏 (彩色方式) 有 4096×1024 、 2048×2048 、 1024×4096 等。
7. 支持节电模式 (SL_IDLE)。

4.5.4 LCD 显示设计

本设计 LCD 模块采用深圳市迪创电子科技有限公司生产的 SG12864J 系列模块, 其控制器采用 ST7920, 其引脚定义如表 4-4 所示:

表 4-4 ST7920 引脚描述

序号	符号	电平	功能描述
1	V _{SS}	0V	地
2	V _{DD}	+5V	电源
3	NC	—	悬空
4	RS	H/L	H: 数据, L: 指令
5	R/W	H/L	H: 读, L: 写
6	E	H, H→L	使能信号
7	DB0	H/L	数 据 总 线
8	DB1	H/L	
9	DB2	H/L	
10	DB3	H/L	
11	DB4	H/L	
12	DB5	H/L	
13	DB6	H/L	
14	DB7	H/L	
15	PSB	H/L	H: 并行模式, L: 串行模式
16	NC	—	悬空
17	$\overline{\text{RST}}$	L	复位信号, 低电平使能
18	NC	—	悬空
19	LEDA	+5V	背光电源
20	LEDK	0V	

ST7920 系列产品硬件特性如下:

1. 提供 8 位、4 位并行接口及串行接口可选。
2. 并行接口适配 M6800 时序。
3. 自动电源启动复位功能。
4. 内部自建振荡器。
5. 64×16 位的字符显示 RAM (DDRAM 最多 16 字符×4 行, LCD 显示范围 16×2 行)。
6. 2M 位的中文字型 ROM (CGROM), 总共提供 8192 个中文字型 (16×16 点阵)。
7. 64×16 位字符产生 RAM (CGRAM)。
8. 15×16 位的总共 240 点的 ICON RAM (ICONRAM)

ST7920 系列产品软件特性如下:

1. 休眠模式。
2. 显示开/关功能。
3. 画面清除功能。
4. 光标归位功能。
5. 反白显示功能。
6. 显示移位功能。

- 7. 垂直画面旋转功能。
- 8. 光标显示/隐藏功能。
- 9. 光标移位功能功能。
- 10. 显示字体闪烁功能。
- 11. 文字与图形混合显示功能。

LCD 与 S3C44BOX 的连接电路原理图如图 4-8 所示，

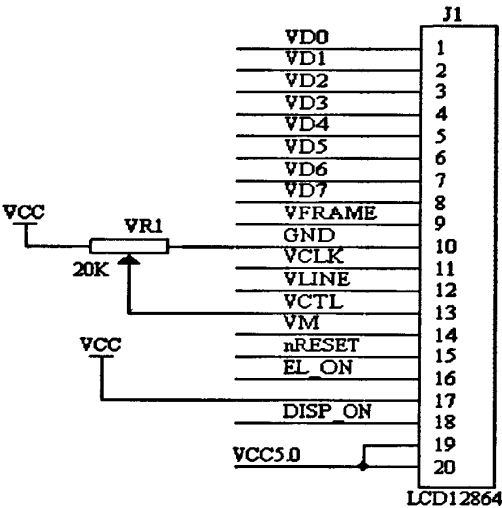


图 4-8 LCD 与 S3C44BOX 连接电路原理图

4.6 JTAG 调试接口设计

JTAG(Joint Test Action Group)是 1985 年制定的检测 PCB 和 IC 芯片的一个标准，1990 年被修改后成为 IEEE 的一个标准，即 IEEE1149.1-1990。JTAG 主要用于芯片内部测试和对系统进行仿真、调试，JTAG 技术作为一种嵌入式技术，将专门的电路测试访问口（TAP，全称为 Test Access Port）封装于芯片内部，对内部节点进行测试需要通过专用的 JTAG 测试工具。

目前，有许多复杂器件，如 DSP、FPGA、ARM 器件等，都支持 JTAG 协议。标准的 JTAG 接口是 4 线，TMS（测试模式选择）、TCK（测试时钟）、TDI（测试数据输入）、TDO（测试数据输出）。JTAG 接口还具有系统可编程功能（IN-System Programmable，简称 ISP），如对 Flash 器件进行编程。目前 JTAG 接口连接有两种标准：一种是 14 针接口，另外一种 20 针接口。本设计使用的是 14 针接口标准，14 针 JTAG 接口定义描述如表 4-5 所示，JTAG 接口原理图如图 4-9 所示。

表 4-5 JTAG 接口定义描述

引脚序号	名称	描述
1、13	VCC	接电源
3	nTRST	测试系统复位信号
5	TDI	测试数据串行输入
7	TMS	测试模式选择
9	TCK	测试时钟
11	TDO	测试数据串行输出
12	NC	未连接
其他	GND	接地

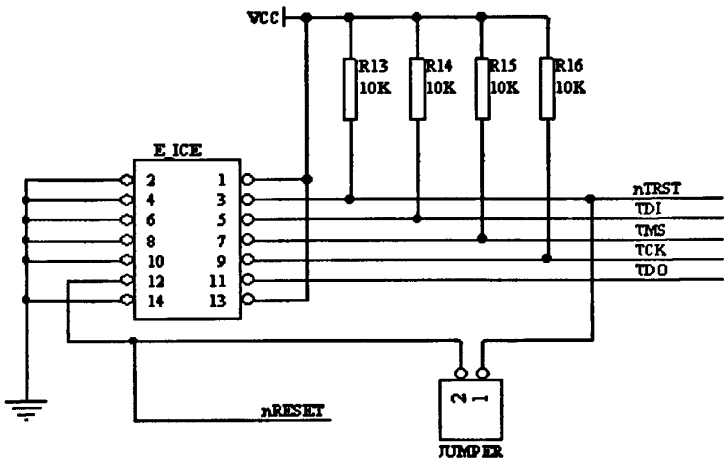


图 4-9 JTAG 接口电路原理图

4.7 RFID 通信设计

设计采用 CY14443A 系列射频读写模块 CY14443A-C^[48]，模块采用基于 ISO14443 标准的非接触卡读卡机专用芯片，该芯片采用 0.6 微米 CMOS E²PROM 工艺，支持 ISO14443 typeA 协议，支持 MIFARE 标准的加密算法。阅读器专用芯片内部高度集成了模拟调制解调电路，只需要少量的外围电路就可以工作，支持 UART 接口(-C)，I²C 接口(-U)，或者 SPI 接口(-P)，数字电路具有 TTL、CMOS 两种电压工作模式。特别适用于 ISO14443 标准下水、电、煤气表、自动售货机、门禁、电梯、饮水机、电话机等计费系统或身份识别系统的阅读器的应用。用户只需要简单地通过选定的 UART 或 I²C 或 SPI 接口发送命令就可以对卡片进行完全的操作，CY14443A 系列支持 Mifare One S50, S70, Ultra Light & Mifare Pro, FM11RF08 等兼容卡片。可以设定自动寻卡，默认情况下为自动寻卡。CY14443A 系列是低功耗宽电压功能模块，采用一体化模块可以大大减少 PCB 面积，增强应用性能，可以胜任各种应用场合^[48]。CY14443A-C 引脚定义描述如表 4-6 所示。

表 4-6 CY14443A-C 引脚定义描述

管脚	符号	I/O 类型	描述
J1-1	RXD	I/O	UART 接收端
J1-2	TXD	I/O	UART 发送端
J1-3	OUT1	0	输出
J1-4	OUT2	0	输出
J1-5	RST	I	模块复位端，低电平有效，也可以悬空
J1-6	BUZ	0	蜂鸣器输出端，高电平驱动
J1-7	SIG	0	中断输出端，0 表示有卡
J1-8	VCC	电压	电源正端
J1-9	GND	地	电源负端

设计使用的 RFID 射频模块 CY14443A-C 具有以下特点：

- 1、支持 UART 串行接口。
- 2、能自动感应到靠近天线区的卡片，并产生中断信号。
- 3、采用高集成 IS014443A 读卡芯片，支持 MIFARE 标准的加密算法。
- 4、具有 TTL/CMOS 两种电压工作模式，工作电压为 3~5.5V。
- 5、采用工业级高性能处理器，内置硬看门狗，具备高可靠性。
- 6、具有抗干扰处理，EMC 性能优良。
- 7、把复杂的底层读写卡操作简化为简单的几个命令。

RFID 射频模块 CY14443A-C 指令系统与通信协议如下：

- 1、通信波特率出厂默认为 19200，1 位起始位，8 位数据位，1 位停止位。
- 2、UART 工作在半双工方式，即模块接受指令后才会做出应答。
- 3、命令格式为：前导头+通信长度+命令字+数据域+校验码。
- 4、前导头为 0xAA0xBB 两个字节，若数据域中也包含 0xAA 那么紧随其后为数据 0，但是长度字不增加。
- 5、通信长度：去掉前导头之外的通信帧所有字节数(含通信长度字节本身)。
- 6、命令字：各种用户可用命令(详见通信指令表，通信指令表如表 4-7 所示)。
- 7、校验码：去掉前导头和校验码字节之外，所有通信帧所含字节的异或值。

CPU 发送命令帧之后，需要等待读取返回值，返回值的格式如下：前导头+通信长度+上次所发送的命令字+数据域+校验码（正确）；前导头+通信长度+上次所发送的命令字的取反+校验码（错误）。RFID 模块通信指令如表 4-7 所示，RFID 模块与 S3C44B0X 连接电路原理图如图 4-10 所示。

表 4-7 RFID 模块通信指令表

序号	命令解析	数据长度	命令字	指令说明
1	读头类型	2	0x01	正确返回数据域为 8 字节的模块型号
2	模块序号号	2	0x02	正确返回数据域为 4 字节的模块序号
3	模块掉电	2	0x03	正确返回数据域为空的帧，模块进入掉电模式
4	模块工作模式设定	3	0x11	正确返回数据域为空的帧，发送：数据域包含 1 字节控制信息，1：模块进入省电模式，0：退出省电
5	卡片进入省电模式	2	0x12	正确返回数据域为空的帧，卡片进入休眠模式，移开卡片后重新进入天线区域解除
6	设置自动寻卡	3	0x13	正确返回数据域为空的帧，发送数据域包含 1 字节控制信息，1：自动寻卡，0：关闭自动寻卡
7	蜂鸣器开关	3	0x14	正确返回数据域为空的帧，发送数据域包含 1 字节信息，0x1?：蜂鸣器响?次，0x0F：蜂鸣器关
8	蜂鸣器间隔	3	0x15	正确返回数据域为空的帧，发送数据域包含 1 字节信息：蜂鸣器响声间隔时间，单位秒
9	OUT1 控制	3	0x16	正确返回数据域为空的帧，发送数据域包含 1 字节信息：1：输出低电平；0：输出高电平
10	OUT2 控制	3	0x17	正确返回数据域为空的帧，发送数据域包含 1 字节信息：1：输出低电平；0：输出高电平
11	读卡的类型	2	0x19	正确返回数据域为 2 字节的帧，S50 卡：0x400，S70 卡：0x200，其他类型参考手册
12	读卡	2	0x20	正确返回数据域为 4 字节的卡序列号
13	读数据块	0x0A	0x21	正确返回数据域为 16 字节的块内容，发送：1 字节密钥标志+1 字节块号+6 字节密钥
14	写数据块	0x1A	0x22	正确返回数据域为空的帧发送：1 字节密钥标志+1 字节块号+6 字节密钥+16 字节数据
15	初始化钱包	0x0E	0x23	正确返回数据域为空的帧发送：1 字节密钥标志+1 字节块号+6 字节密钥+4 字节钱包初始化值
16	读钱包	0x0A	0x24	正确返回数据域为 4 字节的钱包值发送：1 字节密钥标志+1 字节块号+6 字节密钥
17	给钱包充值	0x0E	0x25	正确返回数据域为空的帧，发送：1 字节密钥标志+1 字节块号+6 字节密钥+4 字节钱包增加值
18	钱包扣款	0x0E	0x26	正确返回数据域为空的帧，发送：1 字节密钥标志+1 字节块号+6 字节密钥+4 字节钱包需扣款值
19	读 E2	0x05	0x30	正确返回数据域为若干长度值的帧发送：1 字节低地址+1 字节高地址+1 字节长度值
20	写 E2	n	0x31	正确返回数据域为空的帧，发送：1 字节低地址+1 字节高地址+n 字节写入的数据 (n≤16)

由以上叙述及上图可知，设计将 ARM 的串口 0 与 RFID 模块的串口连接进行收发通信，ARM 芯片使用 3.3V 电压，RFID 模块使用 5V 电压，采取默认自动寻卡方式（也可以通过指令禁止自动寻卡），接上电源后，Led 灯将被点亮，以

示有卡存在。ARM 通过设置好的程序发送命令给 RFID 模块，模块接收到命令后进行相应的响应，比如发送读头类型命令，则模块返回 8 字节的模块型号给 ARM，ARM 接收到数据后，进行相应的处理，然后调用 LCD 显示程序，显示 RFID 模块返回的相关信息，之后通过发送指令给 RFID 模块，使模块的蜂鸣器做出相应的响应，表示读取模块成功。阅读器读取标签序列号的设计过程如下：通过 ARM 处理器 S3C44B0X 发送指令“AABB022022”给 RFID 模块 CY14443A-C，CY14443A-C 接收指令后，如果没有在天线磁场范围内检测到有标签，则返回数据“AABB02DFDD”，同时调用 LCD 显示程序，显示读取标签失败；如果检测到标签，通过校验返回正确数据“AABB0620A44C3948BF”，同时在 LCD 上显示读取成功以及相应的序列号。

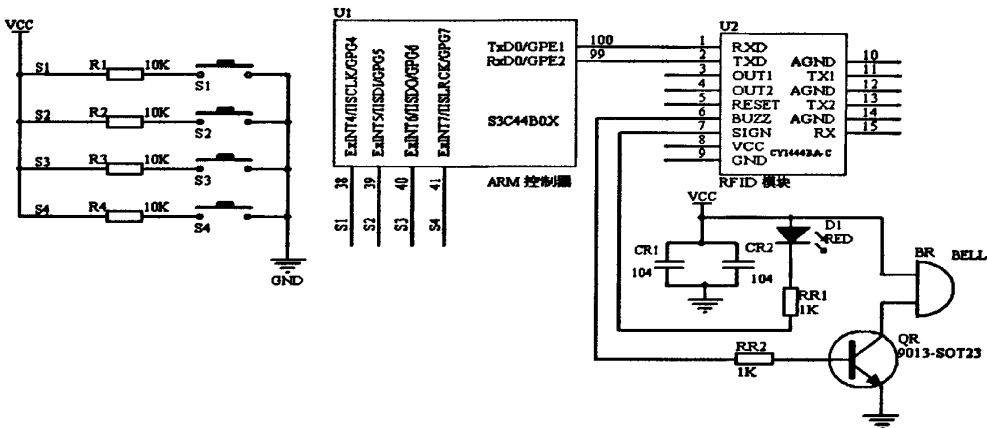


图 4-10 ARM 处理器与 RFID 模块电路连接

4.8 本章小结

首先对选定的 ARM7 芯片 S3C44B0X 芯片的特点作了一简单介绍，完成了电源设计，设计中用到了 3 种电压大小的电源，分别是芯片工作电源 VCC，其值大小为 3.3V，芯片 CPU 工作电压 Vcpu，其值大小为 2.5V，RFID 模块和 LCD 模块工作电源 V5.0，其值大小为 5V。存储器设计包括 Flash Rom 设计和 SDRAM 设计，给出了芯片介绍和连接电路原理图。串口设计包括串口 0 设计和串口 1 设计，其中涉及电平转换，运用了电平转换芯片 MAX232。完成了 LCD 显示和 RFID 通信设计。

第5章 系统软件设计

RFID 阅读器软件设计主要包括：引导加载程序 Bootloader 移植，uClinux 嵌入式操作系统移植，阅读器应用程序编写等。

5.1 应用程序实现

5.1.1 ADS 简介

ADS 是应用比较广泛的 ARM 开发工具之一，它是由 ARM 公司自己推出的 ARM 处理器专用开发工具^[49]。这个工具分为两个部分，一个是编辑、编译、链接工具 CodeWarrior for ADS(CodeWarrior for ARM Developer Suite)，另一个是仿真调试工具 AXD (ARM eXtended Debugger)。CodeWarrior for ADS 全称为 Metrowerks CodeWarrior for ARM Developer Suite，其中 Metrowerks CodeWarrior 是 Metrowerks 公司开发的集成开发环境，一般称为 CodeWarrior IDE。AXD 操作简单，包含一般调试器通用意义上的仿真调试功能，如设置断点、观察点、单步运行、检查和修改寄存器、存储器等。

ADS 中的代码生成工具 (Code Generation Tools) 集成了以下几种编译器^[49]：将 ANSI C 编写的程序编译成 32 位 ARM 指令代码的 ARM C 编译器 armcc。将 ANSI C 编写的程序编译成 16 位 ARM 指令代码的 Thumb C 编译器 tcc。将 ANSI C++或 EC++源代码编译成 32 位 ARM 指令代码的 ARM C++编译器 armcpp。将 ANSI C++或 EC++源代码编译成 16 位 Thumb 指令代码的 Thumb C++编译器 tcpp。将 ARM 汇编语言和 Thumb 汇编语言编写的源代码进行汇编的 ARM 和 Thumb 的汇编器 armasm。此外，该工具还集成了集成链接器 armlink。

5.1.2 应用程序编写

阅读器实现的主要功能为读和写电子标签，并且实现在 LCD 上显示相关信息，同时有 LED 指示灯点亮和蜂鸣器发生声响加以提示。RFID 模块默认为自动寻卡方式，需要控制器频繁发送寻卡指令，当电子标签进入到天线区后 RFID 模块在 SIG 引脚上出现低电平，LED 指示灯变亮。控制器可以直接通过读卡指令读取卡片序列号，通过写卡指令完成写电子标签等操作，阅读器的总体读写流程图如图 5-1 所示。

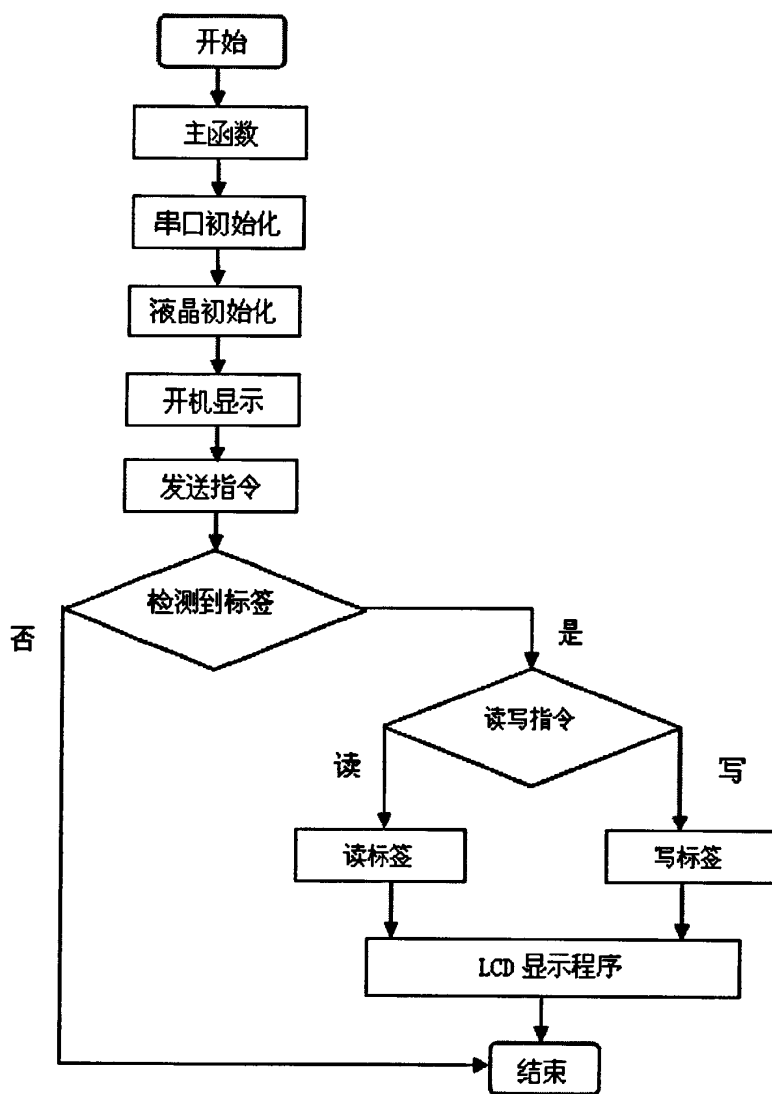


图 5-1 阅读器总体读写流程图

本设计用 RFID 模块的串口方式进行通信，将 RFID 模块的串口与 ARM 的串口 0 相连接，首先需要进行串口初始化，串口之间进行通信，必须保证两端通信协议相同，本设计采用的 RFID 模块串口通信协议是波特率为 19200bit/s, 无奇偶校验，8 位数据位，1 位停止位，波特率由一个专用的 UART 波特率分频器 (UBRDIVn) 控制，计算公式^[18]如 (4-1) 所示：

$$\text{UBRDIVn} = (\text{round_off})(\text{MCLK} / (\text{b/s} \times 16)) - 1 \quad (4-1)$$

其中，MCLK 是系统时钟，UBRDIVn 的值必须在 1~255 之间。

因此 ARM 芯片的串口 0 也要设置成与 RFID 模块串口同样的通信方式，这就需要进行串口设置，也即主程序中要执行的串口初始化程序，ARM 串口初始化程序如下：

```

void Uart_Init(int mclk,int baud) //主频和波特率设置
{
    int i;
    if(mclk==0)
        mclk=MCLK;
    rUFCON0=0x0;    //FIFO 禁用
    rUMCON0=0x0;
    rULCON0=0x3;    //设置串口 0 为无奇偶校验, 8 位数据位, 1 位停止
位
    rUCON0=0x245;
    rUBRDIV0=((int)(mclk/16/baud+0.5)-1);
    for(i=0;i<100;i++);
}

```

```
Uart_Init(0,19200);    //设置波特率为 19200bit/s
```

在使用液晶之前, 需要对液晶进行初始化, 完成初始设定和清屏等工作, 设置成 8BIT 控制界面, 基本指令集方式, 开启显示功能, 关闭光标显示和反白显示, 清除屏幕显示, 同时将 DDRAM 的地址计数器归零。

```

void clearsentence()
{
    SendLcd(0x30,1);    //功能设置——8BIT 控制界面, 基本指令集
    SendLcd(0x0c,1);    //显示打开, 光标关, 反白显示关
    SendLcd(0x01,1);    //清除屏幕显示, 将 DDRAM 的地址计数器归零
    DelayNS(2);
}

```

在检测标签之前, 设计开机显示程序, 增加人机交互内容, LCD 开机程序设置为第一行显示“RFID 阅读器设计”, 第二行显示“ARM 和 Linux 平台”, 第三行显示“检测标签中”, 第四行显示“请耐心等待”, 开机显示程序如下:

```

printsentence(0,"RFID 阅读器设计");
printsentence(1,"ARM 和 Linux 平台");
printsentence(2,"检测标签中");
printsentence(3,"请耐心等待");

```

模块工作在半双工方式, 必须接受指令后才会做出应答。因此, 在进行完串口初始化和液晶初始化后, 需要 ARM 向 RFID 模块发送指令, 以使 RFID 模块做出应答。在 ARM 向 RFID 发送读标签序列号指令“AABB022022”后, 如果检测到标签, 模块返回数据“AABB0620A44C3948BF”表示读取标签成功, 没有检测

到标签，则返回数据“AABB02DFDD”，表示读取标签失败。发送指令程序如下：

```
void Uart_Send(int data) //串口发送字节函数
{
    if(data=='\n')
    {
        while(!(rUTRSTAT0 & 0x2));
        Delay(10);
        WrUTXH0('\r');
    }
    while(!(rUTRSTAT0 & 0x2)); //等待发送缓冲器为空
    Delay(10);
    WrUTXH0(data);
}

Uart_send(0xAA); //发送前导头 0xAA
Uart_send(0xBB); //发送前导头 0xBB
Uart_send(0x02); //发送通讯长度 0x02
Uart_send(0x20); //发送指令字 0x20
Uart_send(0x22); //发送校验位 0x22
```

发送完指令后，调用 LCD 显示函数，如果读取标签成功，LCD 第一行显示“RFID 阅读器设计”，第二行显示“ARM 和 Linux 平台”，第三行显示“读取标签成功”，第四行显示“序列号：A44C3948”。如果读取标签成功，则 LCDLCD 第一行显示“RFID 阅读器设计”，第二行显示“ARM 和 Linux 平台”，第三行显示“读取标签失败”，第四行显示“很遗憾！”。

5.2 引导加载程序

简单地说，在操作系统内核运行之前需要运行一段小程序，这段小程序引导就叫做引导加载程序(Bootloader)^[50]。Bootloader 的主要任务是从硬盘上将内核映像读到 RAM 中，之后跳转到内核的入口点去运行，也即开始启动操作系统。Bootloader 是严重依赖于硬件而实现的，通常在嵌入式系统里建立一个通用的 Bootloader 几乎是不可能的，所以需要对 Bootloader 进行修改、编译和移植。本设计采用的 Bootloader 是 U-Boot，对其介绍如下：

5.2.1 U-Boot 简介

U-Boot (Universal Boot Loader) 是遵循 GPL 条款的开源项目, 是从 FADSR0M、8xxR0M、PPCB00T 逐步发展演化而来的^[61]。U-Boot 源码与 Linux 内核在目录、编译形式上很相似, 实际上, 不少 U-Boot 源就由相应的 Linux 内核源程序简化而来, 比如一些设备的驱动程序尤其明显。U-Boot 中 Universal 的第一层含义表示 U-Boot 不但支持嵌入式 Linux 系统的引导, 而且支持 VxWorks、NetBSD、RTEMS、QNX、LynxOS、ARTOS 嵌入式操作系统。U-Boot 中 Universal 的另外一层含义是 U-Boot 不仅仅支持 PowerPC 系列的处理器, 还支持 x86、MIPS、ARM、XScale、NIO5 等许多常用系列的处理器。支持尽可能多的嵌入式处理器和嵌入式操作系统正是 U-Boot 项目的开发目标, 就现在来看, U-Boot 对 PowerPC 系列处理器支持最为丰富, 对 Linux 的支持最完善。在 2002 年 11 月 PPCB00T 改名为 U-Boot 后, 其它系列的处理器和操作系统逐步使用 U-Boot。正是由于 U-Boot 具有开源等优点, 并且很好支持 ARM 系列处理器和嵌入式 Linux 系统, 本设计选用 U-Boot 作为引导加载程序完成对嵌入式操作系统的引导等功能。

5.2.2 U-Boot 移植

PC 机 CPU 与 ARM 系列处理器属于不同系列, 要使在 PC 机编译的程序能够在 ARM 处理器上运行, 必须建立交叉编译环境, 本设计运用的交叉编译工具是 arm-elf-tools。要完成 U-Boot 移植, 需要根据目标板来对源码就行修改、编译、下载等步骤, 下面介绍本设计中将已经修改好的 U-Boot 压缩包进行编译, 然后下载到 S3C44B0X 目标板的步骤:

1. 建立交叉编译环境

在 Linux 上安装交叉编译工具, 将“arm-elf-tools-20040427.sh”拷贝至硬盘 Linux 主机上, 然后执行命令“./arm-elf-tools-20040427.sh”, 系统将自动安装交叉编译工具。

2. 编译 U-Boot

将 U-Boot 的压缩包“U-boot-Xiong.gz”拷贝到 Linux 主机上, 然后通过下执行命令“tar zxvf U-boot-Xiong.gz”将压缩包进行解压, 这样会在当前的目录下面生成 u-boot-1.1.1 目录, 解压后结果如图 5-2 所示。

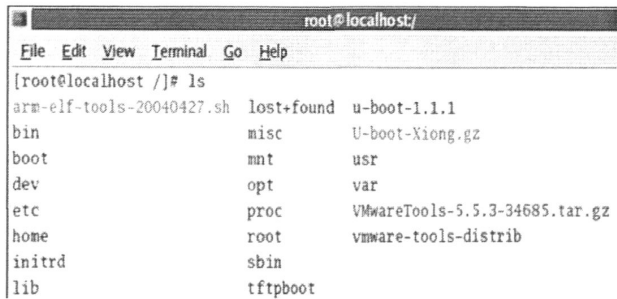


图 5-2 U-Boot 的压缩包解压后结果

进入 u-boot-1.1.1 目录，运行“make distclean”清除上一次编译的输出文件。输入“make my44b0_config”，产生一些编译配置文件（.mk 文件）和相应的一些头文件（.h 文件），运行 make，生成 3 个文件（u-boot，u-boot.srec，u-boot.bin），其中“u-boot.bin”是本设计中需要用 J-Link 烧写至目标板的二进制文件。

3. 配置 J-Link

本设计采用 J-Link 烧写 U-Boot，首先连接 J-Link 和目标板，然后配置 J-Link，点击 J-Link 快捷方式，进入“J-Flash ARM”界面，需要配置处理器和存储器。点击“Options”->“Project settings”，配置“CPU”：选上“Use target RAM (faster)”，并配置其地址值为“10000000”，配置界面如图 5-3 所示。

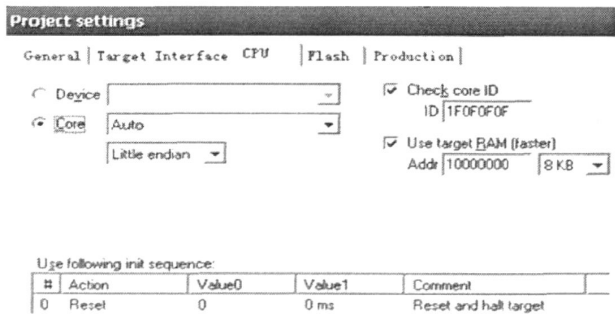


图 5-3 CPU 配置界面

配置“Flash”，将“Base Addr”中的地址改为：“00000000”，去掉“Automatically detect flash memory”前的钩，点击“Select flash device”，选择目标 Flash 型号为“SST39VF160”，然后点击“确定”，配置结束。

4. 烧写 U-Boot

目标板上电后，点击“Target”->“Connect”，此时“LOG”窗口会显示连接成功的信息，连接成功后，点击“File”->“open”，在计算机中找到“u-boot.bin”，确定后弹出相应界面如图 5-4 所示：将“Start address”配置为“0”（移植 uClinux 时，此处改为“50000”），完成起始地址配置。

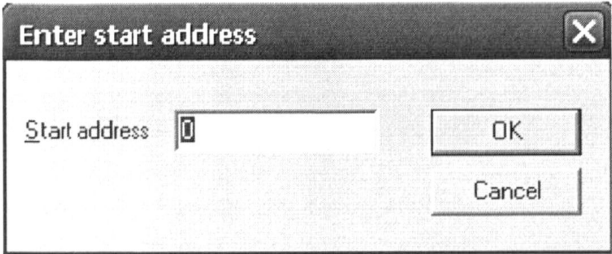


图 5-4 起始地址配置界面

点击“Target”->“Program”或直接按键盘上“F5”键进行烧写，出现如是否擦除芯片界面，点击“是（Y）”，擦除芯片，烧写成功后超级终端显示的信息如图 5-5 所示。

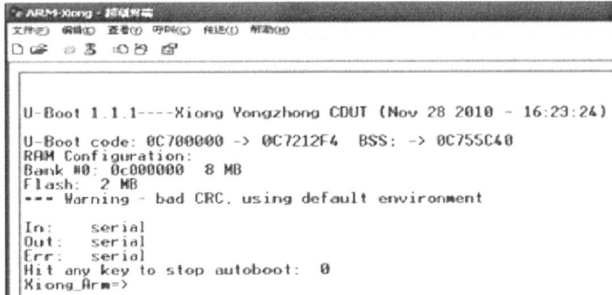


图 5-5 烧写成功后超级终端显示信息

5.3 嵌入式操作系统

5.3.1 uClinux 简介

uClinux 表示 micro-control linux，即“微控制器领域中的 Linux 系统”，是 Lineo 公司开放源码的嵌入式 Linux 作品^[52]。uClinux 主要是针对没有存储管理单元 MMU（Memory Management Unit）目标处理器的嵌入式系统而设计的。由于没有 MMU，uClinux 在实现多任务方面需要一定技巧。

uClinux 作为一种嵌入式 Linux 版本，具有标准 Linux 的特性，经过对各方面进行小型化改造，其具有高度优化、代码紧凑的特点。uClinux 保留了 Linux 的大多数的优点，比如稳定、良好的移植性、优秀的网络功能、对各种文件系统完备的支持和标准丰富的 API。uClinux 目前已支持多款 CPU，其编译后的目标文件可控制在几百 KB 数量级，并已经被成功地移植到很多平台上。

5.3.2 uClinux 移植

同前面 U-Boot 所述一样，uClinux 移植到目标板上一样需要建立交叉编译工具，运用 arm-elf-tools 交叉编译工具。uClinux 的移植需要对 uClinux 源码包根据实际应用进行裁剪，修改、编译、下载到目标板的过程^[53]。下面介绍本设计中根据实际硬件修改了的 uClinux 核进行编译（包含添加应用程序），然后下载到 S3C44B0X 目标板的步骤：

- 1. 建立交叉编译环境
在 Linux 上安装交叉编译工具，将“arm-elf-tools-20040427.sh”拷贝至硬盘 Linux 主机上，然后执行命令“./arm-elf-tools-20040427.sh”，系统将自动安装交叉编译工具。
- 2. 编译 uClinux
将 uClinux 的压缩包“uClinux-Xiong.tar.gz”拷贝到 Linux 主机上，然后通过命令“tar zxvf uClinux-Xiong.tar.gz”对压缩包进行解压，这样会在当前的目录下面生成 uClinux-dist 目录，解压后结果如图 5-6 所示。

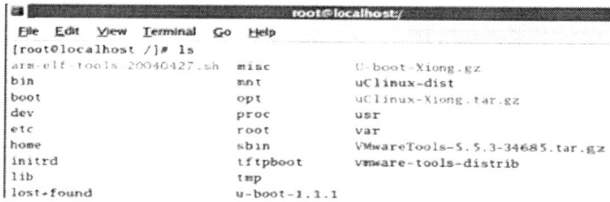


图 5-6 解压后结果

进入 uClinux-dist 目录分别执行 make mrproper, make menuconfig，在弹出的 uClinux 配置界面中，选择“Vendor/Product Selection--->”进入下级菜单，完成如下配置：厂家选择三星公司，芯片选择 44B0，配置结果如图 5-7 所示。

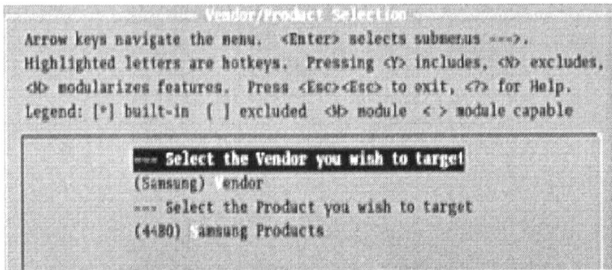


图 5-7 厂家及产品选择配置界面

选择“Exit”返回上级界面，然后选择“Kernel/Library/Defaults Selection--->”，本设计选择 linux 内核版本为 linux-2.4.x，Libc 版本选择 uClibc。然后选中“Customize Kernel Settings”和“Customize Vendor/User Settings(NEW)”进行更进一步的配置，配置界面如图 5-8 所示。

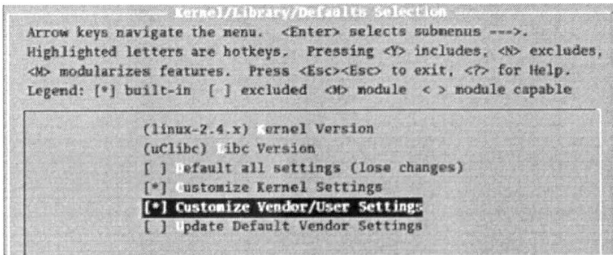


图 5-8 内核和用户设置配置界面

选择“Exit”退出，选择“Yes”保存配置信息，因为在上面配置的时候选择了“Customize Kernel Settings”和“Customize Vendor/User Settings(NEW)”选项，程序会自动进入 Kernel Settings 界面和 Vendor/User Settings 界面。在上述界面中进行相应设置，完成全部 uClinux 配置。接下来编译 uClinux。依次执行如下指令：make dep, make clean, make lib_only, make user_only, make romfs, make image, make。指令执行完成后会在 uClinux-dist\images\目录下生成 uclinux_rom.bin(二进制压缩文件)。此文件即是需要下载到目标板的文件，这里介绍采用 J-Link 下载的方法，uClinux 下载和 U-Boot 下载类似，只需将起始地址改为 50000 就行了。

3. 添加应用程序

- (1). 进入目录 uClinux-dist 中，进入 user 目录创建一个新目录 user/reader，用以存放源文件 rfid.c 文件。
- (2). 编辑文件 user/Makefile，添加以下代码：
dir_\$(CONFIG_USER_MYAPP_DEMO)+=reader。
- (3). 编辑文件 config/Configure.help，添加如下代码：

```
CONFIG_USER_SAMPLE_rfid
```

```
rfid reader
```

(4). 编辑文件 config/config.in, 添加如下代码:

```
bool 'rfid', CONFIG_USER_reader_rifd
```

(5). 创建合适的 user/sample/Makefile 文件:

```
RFID=rfid
```

```
OBJS = rfid.o
```

```
all: $(RFID)
```

```
$(RFID): $(OBJS)
```

```
$(CC) $(LDFLAGS) -o $$@ $(OBJS) $(LDLIBS)
```

```
romfs:$(ROMFSINST) /bin/$(RFID)
```

```
clean:-rm -f $(RFID) *.elf *.gdb *.o
```

(6). 重新编译生成 uclinux_rom.bin, 运行 make menuconfig 时选择生成 "RFID" 文件。

4. 烧写 uClinux

烧写 uClinux, 将起始地址改为 "50000", 烧写成功后, 启动目标板, 将电子标签靠近阅读器 RFID 模块侧, LCD 显示结果图 5-9 所示。

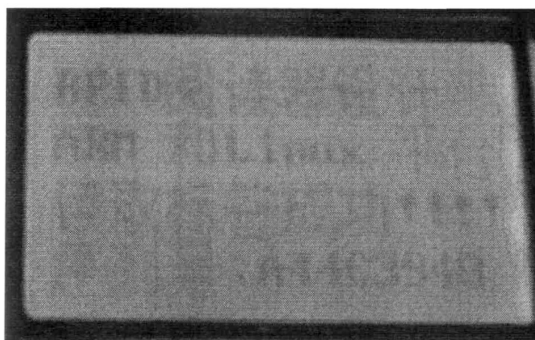


图 5-9 LCD 显示结果

5.4 本章小结

本章完成了系统软件设计, 包括应用程序的编写, 引导加载程序 U-Boot 和嵌入式操作系统 uClinux 的移植。首先根据 RFID 模块的通信协议, 分析、设计和实现了对电子标签的读取、显示功能。分析、修改、编译和下载 U-boot 和 uclinux 源代码, 实现移植工作, 然后添加 RFID 应用程序到 uClinux 内核中, 再完成移植工作, 最终完成整个设计。

第 6 章 设计测试

6.1 VB 测试界面设计

PC 机端测试界面采用 Visual Basic 编写, 通过使用 Visual Basic 中的通信控件 MSComm (Microsoft Communication Control), 可以在 Windows 环境下轻松实现串口数据交换, MSComm 是 Microsoft 提供的简化 Windows 下串行通信编程的 ActiveX 控件, 通过对此控件的属性和事件进行编程, 可以方便地发送和接收数据。MSComm 提供了两种通信处理方式: 一是事件驱动方式, 二是查询方式^{[54], [56]}。

1. 事件驱动方式

事件驱动通信是一种非常有效的处理串行端口交互作用的方法, 事件发生时很多情况需要得到通知。比如: Carrier Detect(CD) 或 Request To Send(RTS)线上有一个字符到达或一个变化发生或串口接收缓冲区中有字符时, 可以运用 MSComm 控件的 OnComm 事件来捕获并处理这些通讯事件。参阅 CommEvent 属性可以了解所有通讯错误和通讯事件的列表, 在编程过程中, 可以加入自己的处理代码在 OnComm 事件处理函数中。该方式的优点是可靠性高、程序响应及时, 每个 MSComm 控件有一个串行端口与之对应。如果应用程序需要对多个串行端口进行访问, 必须使用多个 MSComm 控件。

2. 查询方式

事实上, 查询方式实质上还是事件驱动方式, 但是在某些情况下, 查询方式显得更为方便和快捷。在程序的每个关键功能之后, 检测事件和通讯错误可以通过 CommEvent 属性的值判断来完成。如果应用程序较小且是自保持的, 查询方式可能是更可取的。比如, 如果编写一个简单的电话拨号程序, 事实上没有必要对每一个接收字符都产生事件, 调制解调器的“确定”响应是唯一等待接收的字符。

MSComm 控件进行串行通信的一般步骤为:

- (1). 设置通信对象、通信端口号和其它属性。
- (2). 设定通信协议。
- (3). 打开通信端口, 进行数据的传送。
- (4). 关闭通信端口。

RFID 阅读器测试界面测试 RFID 阅读器步骤如下: 首先连接 PC 机串口与阅读器 COM1 口, 将电子标签靠近 RFID 模块, 然后打开测试界面, 点击“打开串口”, 如果连接成功, 则界面显示“打开成功”, 然后点击“读取标签”发送

读取指令，如果阅读器检测到有标签并读取成功，界面显示“读取成功！”和“序列号：A44C3948”，如果未检测到标签，则显示“读取失败！”和“请耐心等待！”。

测试界面及测试结果如图 6-1 所示：

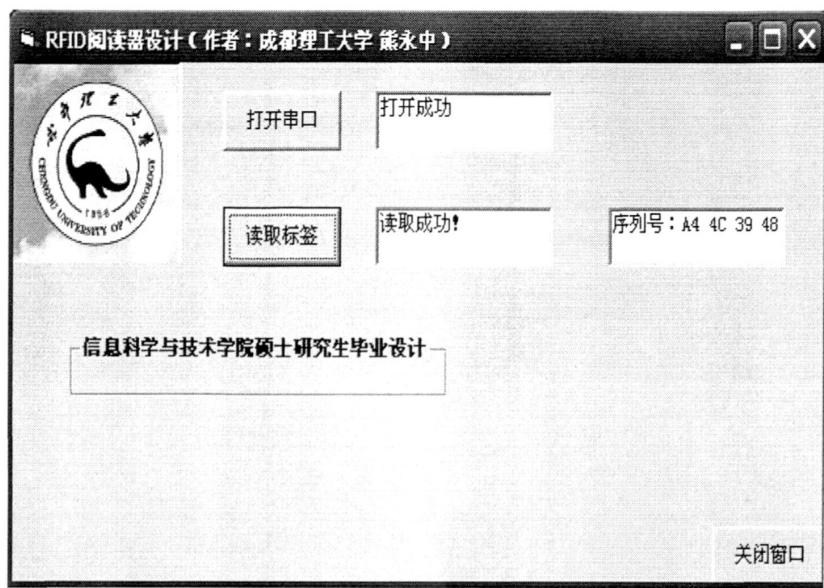


图 6-1 阅读器读取测试

6.2 本章小结

根据 RFID 阅读器实际情况，在 PC 机上用 VB 编写阅读器测试软件，可以快速地测试设计结果，很好地辅助了阅读器的设计与实现。

总 结

嵌入式系统作为以应用为中心,以计算机技术为基础的专用计算机系统,其软件和硬件是可以进行裁剪的,适合对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的应用系统。它一般由以下几部分组成:嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统、特定的应用程序。具有以下特点:应用的特定性和广泛性、技术和知识以及资金的密集性和高效性、较长的生命周期、高可靠性、软硬一体,软件为主。

RFID 技术是一种利用射频通信方法实现非接触式、快速、实时、准确地采集与处理信息的自动识别技术。它是目前自动识别技术发展的趋势所在,更被誉为 21 世纪最重要的十大技术之一。当成本这一始终阻碍 RFID 得到全面发展的问題在发达国家政府政策的支持下得到解决后,RFID 得到了前所未有的广泛发展和应用。

本文基于 ARM 嵌入式技术和 RFID 技术,研究设计了一套使用方便、功能丰富、可扩展性强、通用性强的 RFID 阅读器。该阅读器主要完成了 RFID 系统的前端数据采集和处理,为后续传输研究打下了基础,为用户继续研究和开发提供了便利。论文分为 6 章,第 1 章为引言,介绍了研究背景、研究现状、研究意义、研究内容。第 2 章对嵌入式系统进行了介绍,分别介绍了嵌入式系统的概念、嵌入式系统特点、嵌入式硬件选取、嵌入式软件选取、嵌入式系统设计一般方法。第 3 章介绍了 RFID 技术,分别介绍了电子标签、阅读器、天线和 RFID 技术标准。第 4 章为系统硬件设计,包括控制器设计、电源设计、存储器设计、串口通信设计、LCD 显示设计、JTAG 调试接口设计、RFID 通信设计。第 5 章为系统软件设计,主要包括应用程序编写、U-Boot 移植和 uClinux 移植。第 6 章为阅读器调试,简单介绍了 VB 串口通信设计,并给出了 PC 机端测试软件测试结果。

物联网方兴未艾,具有广阔的应用前景。RFID 技术作为物联网核心技术,获得了前所未有的关注和重视,得到了广泛的应用。本论文综合分析当前 RFID 阅读器,提出了基于 ARM 嵌入式技术和 RFID 技术的阅读器设计方案,研究实现了阅读器前端数据采集系统,具有很强的指导意义。该阅读器通用性强,为用户用于特定开发提供了方便。该阅读器可扩展性强,可以充分利用 S3C44B0X 丰富的资源在音频、网络等方面加以继续研究和开发。

致 谢

在即将完成硕士研究生学业之际，谨向我的导师陈金鹰教授表示由衷的感谢！在读研期间，他刻苦专研、严谨治学的作风给我留下了很深的印象，同时深深地影响了我，让我受益菲浅。陈老师知识渊博、专业扎实，具有极其丰富的工作经验尤其是实践经验，这为我们提供了很好的条件。在理论教学以及实验课程中，陈老师授课认真，要求严格，使我专业理论知识水平和动手能力大大提高。

感谢父母及亲友，是他们无私的付出和关怀，才成就了今天的我。在未来的日子里，我将更加努力，认真工作，踏实做人，努力成为对社会有用的优秀人才，以更好的成绩来回报父母及亲友的关爱。

同时，要非常感谢同门的张鹏、黄岩、阮围、丁安扬在我读研期间给予的帮助，大家在学习上互相鼓励、不时交流经验，在生活上互相帮助、互相支持。总之，同门三年，我们五个人个结下了深厚的友谊。在此，祝福他们毕业后工作顺利，事业有成。

感谢所有关心、帮助过我的人！

参考文献

- [1]. 吴永祥. 射频识别(RFID)技术研究现状及发展展望[J]. 微计算机信息. 2006, 11-2.
- [2]. 顾震宇. 国内外 RFID 技术研究现状与发展趋势[EB/OL].
<http://www.cessa.org.cn/cessa/web/listdetail.jsp?id=962>.
- [3]. 我国 RFID 产业发展与政策支持现状. [EB/OL].
<http://www.dzsc.com/news/html/2010-3-12/114199.html>.
- [4]. 宋蕊, 谢白玉. 嵌入式系统设计方法的分析比较[J]. 黄河水利职业技术学院学报. 2010, (04).
- [5]. 嵌入式系统[EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/6115.html>.
- [6]. 刘铤. Linux 嵌入式系统开发平台选型探讨[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 北京: 2004. 7.
- [7]. 嵌入式系统的特点[EB/OL].
<http://www.dzsc.com/data/html/2009-1-16/75783.html>.
- [8]. 刘彦文. 基于 ARM7TDMI 的 S3C44BOX 嵌入式微处理器技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009. 4.
- [9]. 李云燕. VoWLAN 终端硬件系统的设计与实现[D]. 重庆邮电大学硕士学位论文. 2007.
- [10]. 贺光辉. 基于 uClinux 的嵌入式 CIP-I Leg 控制器研究与设计[D]. 中南大学硕士学位论文. 2007.
- [11]. 韩山, 郭云, 付海艳. ARM 微处理器应用开发技术详解与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 7.
- [12]. 朱竹霞. 论 ARM 嵌入式系统及其信息产业化发展[J]. 现代商贸工业, 2008, (04).
- [13]. 史京浩. 基于 AT91RM9200 和 FPGA 技术的变电站测控装置[D]. 山东大学硕士学位论文. 2009.
- [14]. 王宁. 基于 ARM 与 μ C/OS-II 的数字伺服系统信号发生器的开发[D]. 南京理工大学硕士学位论文. 2005.
- [15]. ARM Limited. ARM7TDMI Technical Reference Manual. 2000.
- [16]. 李佳. ARM 系列处理器应用技术完全手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006. 12.
- [17]. 几种嵌入式实时操作系统的分析与比较[EB/OL].
<http://www.eefocus.com/article/10-03/1623741270031742.html>.
- [18]. 范书瑞, 赵燕飞, 高铁成. ARM 处理器与 C 语言开发应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008. 8.
- [19]. 朱靖宇. 嵌入式视频对象监控系统及其编码技术的研究[D]. 上海交通大学硕士学位论文. 2005.
- [20]. 黄磊. 单片机和嵌入式系统开发平台化的研究[D]. 南京航空航天大学硕士学位论文. 2004.
- [21]. 李启荣. 通信系统中的处理器及嵌入式开发[D]. 北京邮电大学硕士学位论文. 2004.
- [22]. 赵爱萍. 基于 ARM 的嵌入式系统开发及其在 GPS 接收机中的应用研究[D]. 中国科学院研究生院(国家授时中心)硕士学位论文. 2006.
- [23]. 陆竞晓. 嵌入式光纤布喇格光栅传感信号解调系统的研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文. 2005.
- [24]. 曾庆远. 基于 ARM 嵌入式平台的 RFID 阅读器设计[D]. 电子科技大学硕士学位论文. 2009.

- [25]. 宁焕生, 张彦. RFID 与物联网—射频、中间件、解析与服务[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 4.
- [26]. RFID 电子标签[EB/OL].<http://baike.baidu.com/view/2262727.htm>.
- [27]. 黄杰, 赵京音, 万常照. RFID 在农业中的应用与展望[J]. 农业网络信息, 2008. (09).
- [28]. rfid 阅读器[EB/OL].<http://baike.baidu.com/view/3279260.htm>.
- [29]. 卢修竹. 基于 MF RC500 的集成 RFID 阅读器设计与研究[D]. 天津科技大学硕士学位论文. 2007
- [30]. 汪建强. 基于 RFID 的城市道路车辆监控系统的设计研究[D]. 山东大学硕士学位论文. 2009.
- [31]. 张洪涛. 炼钢厂天车物流跟踪系统设计与实现[D]. 北京科技大学. 2009.
- [32]. 三大 RFID 技术标准简介[EB/OL].
<http://wenku.baidu.com/view/33f2c042336c1eb91a375d84.html>.
- [33]. 马启平. 无线射频识别(RFID)编码解析网络服务技术研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文. 2009.
- [34]. 李燕. 近场通信技术研究[D]. 重庆大学硕士学位论文. 2009.
- [35]. 胡益. 基于 EPC Class1 Gen2 的阅读器软件设计与实现[D]. 湖南大学硕士学位论文. 2008.
- [36]. 黎飞鸿. 远距离高频段 RFID 阅读器系统研究与设计实现[D]. 华东师范大学硕士学位论文. 2007.
- [37]. 黄锦亮. RFID 对象名称服务架构研究与原型开发[D]. 华中科技大学硕士学位论文. 2006.
- [38]. 丘铁. ARM 嵌入式系统结构与编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009. 3.
- [39]. 穆健. 基于嵌入式 linux 和 TCP/IP 协议分析的入侵检测系统研究[D]. 华中科技大学硕士学位论文. 2006.
- [40]. Samsung. Electronics. S3C44B0X Datasheet.
- [41]. 孙建东. 基于 FPGA 的数字图像信号模拟源设计[D]. 南京航空航天大学硕士学位论文. 2010.
- [42]. 李晓燕. 基于 uClinux+BF561 嵌入式播放器的设计与实现[D]. 西南科技大学硕士学位论文. 2008.
- [43]. Hyundai Electronics. HY57V641620HG Datasheet.
- [44]. Silicon Storage Technology, Inc. SST. SST39VF160 Datasheet.
- [45]. 薛国将. 基于 ARM 的数据采集系统的研究与开发[D]. 中国地质大学(武汉)硕士学位论文. 2007.
- [46]. 郭宏亮. 基于空气、水、冰电容差异的冰层厚度测量系统[D]. 太原理工大学硕士学位论文. 2007.
- [47]. 液晶显示器的特点及分类[EB/OL].
<http://www.yesky.com/Hardware/72624955006648320/20010616/185358.shtml>.
- [48]. 杭州灿宇科技有限公司. CY14443A-C 数据手册.
- [49]. 赵星寒, 周春来, 刘涛. ARM 开发工具 ADS 原理与应用[M] 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006. 7.
- [50]. 朱朝飞. 基于 ARM 的网络摄像机的设计与实现[D]. 成都理工大学硕士学位论文. 2010.
- [51]. 百度百科. U-Boot[EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/1348254.htm>.
- [52]. 百度百科. uClinux[EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/163694.htm>.
- [53]. 李全利, 张小丽. 基于 ARM 的嵌入式 uClinux 系统开发[J]. 长春理工大学学报(自然

科学版), 2009, (02).

[54]. 《电脑编程技巧与维护》杂志社. Visual Basic 编程技巧典型案例解析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[55]. MSComm 控件详细介绍[EB/OL].

<http://wenku.baidu.com/view/b2aa0921dd36a32d73758113.html>.

[56]. 李俊葶. 便携式 RFID 控制与显示系统设计[D]. 成都理工大学硕士论文. 2010.

攻读学位期间取得学术成果

一、发表论文

- [1] 熊永中, 陈金鹰, 阮围.传统无线技术在应急通信中应用讨论[C].2008年四川省通信学会年会论文集, 2008.
- [2] 熊永中, 王文剑, 陈金鹰, 唐良义.基于单片机和 PC 机的实时温度控制系统设计[J].自动化技术与应用, 2010, (03)
- [3] 王文剑, 熊永中, 唐良义.基于 ISE 和 Modelsim 的汉明码设计[J].自动化技术与应用, 2010, (03)

二、科研项目

- [1] 基于 RFID 的盲道识别系统设计, 四川省教育厅自然科学类重点项目基金 (082A102)
- [2] 基于单片机和 PC 机的实时温度控制系统设计, 导师科研项目
- [3] 基于 GPS 的定位系统设计, 导师科研项目