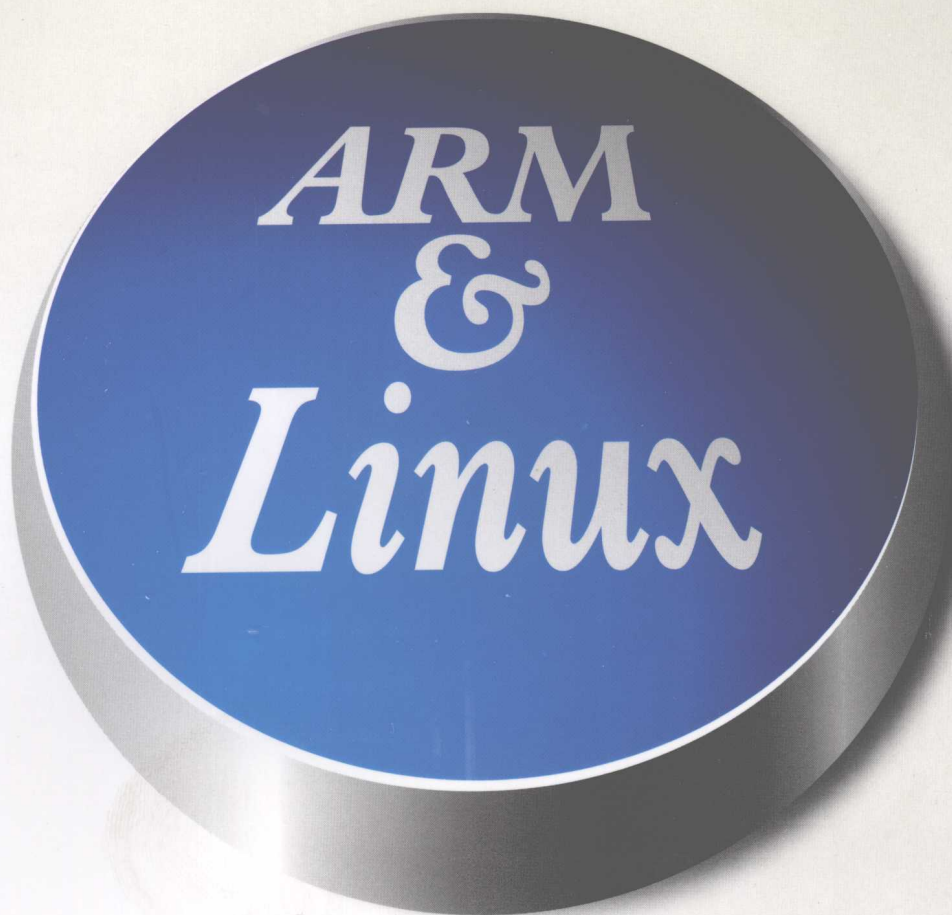


“十一五”高等院校规划教材



—ARM & Linux—
嵌入式系统开发详解

锐极电子科技有限公司 编著



北京航空航天大学出版社

“十一五”高等院校规划教材

ARM & Linux 嵌入式系统开发详解

锐极电子科技有限公司 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书分为基础篇和实验篇两大部分,主要是针对理论和实践相结合的嵌入式 Linux 开发的教材和培训用书。基础篇主要包括嵌入式系统基础、嵌入式系统开发过程、ARM 体系结构和嵌入式系统的 BootLoad 开发引导详解,为嵌入式系统初学者能快速入门提供了基础。实验篇详细讲解了如何创建嵌入式系统开发环境、如何在 ARM 平台上移植 Linux 系统,以及 Linux 设备驱动程序开发、USB 设备驱动程序开发、嵌入式 Linux 网络编程和图形用户接口开发等,每章都配有丰富的实验内容,使读者能够理论联系实际,边学边用,更快更好地掌握所学知识。

本书可作为高等院校计算机类、电子类、电气类、控制类专业高年级本科生、研究生教材,也可供广大工程技术人员参考使用,还可作为嵌入式培训教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

ARM&Linux 嵌入式系统开发详解/锐极电子科技有限公司编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2007.3

ISBN 978-7-81077-978-4

I. A… II. 锐… III. ①微处理器,ARM②Linux 操作系统 IV. TP332 TP316.89

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 019200 号

© 2007,北京航空航天大学出版社,版权所有。

未经本书出版者书面许可,任何单位和个人不得以任何形式或手段复制或传播本书内容。
侵权必究。

ARM&Linux 嵌入式系统开发详解

锐极电子科技有限公司 编著

责任编辑 杨 波

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:24.75 字数:554 千字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 978-7-81077-978-4 定价:33.00 元

前 言

如今,人类已经进入了后 PC 时代,伴随信息技术与网络技术的高速发展,嵌入式技术已被广泛应用于科学研究、工程设计、军事技术以及文艺、商业等方方面面,成为后 PC 时代的主力军。

嵌入式系统和 Linux 的有机结合,成为后 PC 时代计算机最普遍的应用形式。嵌入式 Linux 不仅继承了 Linux 源代码开放、内核稳定高效、软件丰富、强大的网络支持功能、优秀的开发工具等优势,而且还具备支持广泛的处理器结构和硬件平台占有空间小、成本低等特点。

嵌入式 Linux 技术在中国有巨大的发展潜力和市场需求。有数据显示,未来两年里,在计算机、消费电子、通信、汽车电子、工业控制、军事国防这六大主要应用领域,嵌入式 Linux 产品将达到 80 亿美元的市场规模。

本书的编写目的

嵌入式 Linux 属于一个交叉学科,涵盖了微电子技术、电子信息技术、计算机软件和硬件等多项技术领域的应用。另外嵌入式 Linux 需要相应的嵌入式开发板和软件,还需要有经验的人进行指导开发,目前国内大部分高校都很难达到这种要求,这也造成了目前国内嵌入式 Linux 开发人才极其缺乏的局面。

因此,上海锐极科技有限公司在自主研发的嵌入式 Linux 开发平台的基础上编写了此书,希望能帮助读者快速跨入嵌入式 Linux 开发的门槛。

本书的主要内容

本书主要分为两大部分,基础篇和实验篇。基础篇主要讲解了嵌入式系统基础知识、嵌入式系统开发过程、ARM 体系结构和嵌入式系统的 BootLoad 开发引导,为嵌入式系统初学者能快速入门提供了基础。

实验篇详细讲解了如何创建嵌入式系统开发环境、如何在 ARM 平台上移植 Linux 系统、Linux 设备驱动程序开发、USB 设备驱动程序开发、嵌入式 Linux 网络编程和图形用户接口开发等,每章都配有丰富的实验内容,使读者能够理论联系实际,边学边用,更快更好地掌握所学知识。



本书实验平台

本书所用的硬件平台是锐极 RJARM9-EDU 教学实验系统,所有的程序都是基于该平台下精心设计的实验,实验程序也可移植到其他 ARM 平台上。

本书由李道流编写第 1、6、10 章,王冬青编写第 3、8、9 章,陈猛编写第 4、7 章,季乐威编写第 2、5 章,全书由李道流统稿。

本书的阅读建议

本书以实践为特色,提供了大量的实验,若读者能自己动手操作本书提供的每一个实验,一定会取得很快的提高。

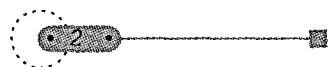
本书之外的内容

本书内容来自上海锐极电子科技有限公司的配套培训教材,有关本书的相关源代码和嵌入式 Linux 更多的资料,请参见 <http://www.ruijitek.com>。

致谢

本书编写参考了很多网友贡献的宝贵资料,没有你们无私的贡献,此书也无法完成,在此特向那些无名作者表示谢意。

鉴于作者水平有限,加之时间仓促,本书一定有不少缺点和错误,希望得到广大读者批评指正。我们将在吸取大家意见和建议的基础上,不断完善此书的内容,在下一次改版中进行订正。任何批评和建议请发到 lille_li@msn.com,以便共同提高。



目 录

第一篇 基础篇

第 1 章 嵌入式系统基础

1.1 嵌入式系统	3
1.1.1 嵌入式系统的概念	3
1.1.2 嵌入式系统的组成	3
1.1.3 嵌入式系统的特点	4
1.1.4 嵌入式系统的应用	5
1.1.5 实时操作系统	5
1.2 嵌入式处理器	6
1.2.1 嵌入式处理器简介	6
1.2.2 嵌入式处理器分类	6
1.3 嵌入式操作系统	8
1.3.1 操作系统简介	8
1.3.2 嵌入式操作系统基本概念	10
1.3.3 使用实时操作系统的必要性	11
1.3.4 实时操作系统的优缺点	11
1.4 ARM9 实验系统	12
1.4.1 ARM9 教学实验系统简介	12
1.4.2 ARM9 教学实验系统操作步骤	13

第 2 章 嵌入式系统开发过程

2.1 嵌入式软件开发的特点	17
----------------------	----



2.2 嵌入式软件的开发流程	18
2.3 嵌入式系统调试方法	19
2.3.1 ARM 仿真器	19
2.3.2 GDB 调试	20
2.4 嵌入式系统集成开发环境	23

第 3 章 ARM 体系结构

3.1 ARM 介绍	24
3.1.1 ARM 微处理器系列	25
3.1.2 ARM 体系结构	28
3.2 ARM 编程模型	32
3.2.1 工作状态及切换	32
3.2.2 存储器格式	32
3.2.3 存储器访问	33
3.2.4 体系结构直接支持的指令和数据类型	34
3.2.5 处理器模式	34
3.2.6 内部寄存器	35
3.2.7 异常	40

第 4 章 BootLoader

4.1 嵌入式系统的引导代码	45
4.2 vivi	45
4.3 U-Boot	58
4.4 PPCBoot	62
4.5 RJARM2410 平台 BootLoad 代码	65
4.5.1 启动分析	65
4.5.2 片选	69
4.6 ARMLinux 启动分析	72
4.6.1 概述	72
4.6.2 head.S 和 head-s3c2410.S 分析	73
4.6.3 head-armv.S 分析	86

第二篇 实验篇

第 5 章 创建嵌入式系统开发环境

5.1 嵌入式 Linux 的开发环境	99
5.2 Cygwin	100
5.3 交叉编译的预备知识	101
5.4 交叉编译	101
5.4.1 安装 Linux 的头文件	102
5.4.2 编译安装 binutils	105
5.4.3 编译安装 gcc 的 C 编译器	105
5.4.4 编译安装 glibc	106
5.4.5 编译安装 gcc 的 C, C++ 编译器	107
5.5 Makefile 解析	108
5.6 实验 1: 一个简单的应用程序——Hello world	110

第 6 章 Linux 系统在 ARM 平台的移植

6.1 移植的概念	115
6.2 Linux 内核结构	115
6.2.1 Linux 内核组成	115
6.2.2 子系统相互间的关系	116
6.2.3 系统数据结构	116
6.2.4 Linux 系统实现结构	117
6.2.5 Linux 内核源代码	117
6.3 Linux 操作系统移植	118
6.3.1 Linux 系统移植的两大部分	119
6.3.2 系统移植所必需的环境	119
6.4 编译 Linux 内核	122
6.5 文件系统简介	123
6.6 实验 2: RAMDISK 文件系统制作	126
6.7 实验 3: Linux 2.6 内核移植	131



第 7 章 Linux 设备驱动程序开发

7.1 设备驱动概述	144
7.2 设备驱动基础	151
7.3 设备驱动模块化编程	155
7.4 实验 4: 框架型驱动	161
7.5 实验 5: 小键盘+LED 驱动	171
7.6 实验 6: LCD 驱动	182
7.7 实验 7: IDE 硬盘接口	205
7.8 实验 8: 音频输入/输出	227

第 8 章 USB 设备驱动程序开发

8.1 USB 协议简介	259
8.2 USB 体系结构	261
8.3 USB 通信协议	263
8.4 USB 设备驱动程序设计	265
8.4.1 USB 系统编程框架	266
8.4.2 编写 USB 设备驱动程序	271
8.5 实验 9: USB 接口	277

第 9 章 嵌入式 Linux 网络编程

9.1 嵌入式 Linux 网络体系结构	280
9.2 嵌入式 Linux 环境下的 socket 编程	284
9.3 实验 10: 以太网 socket 通信	290

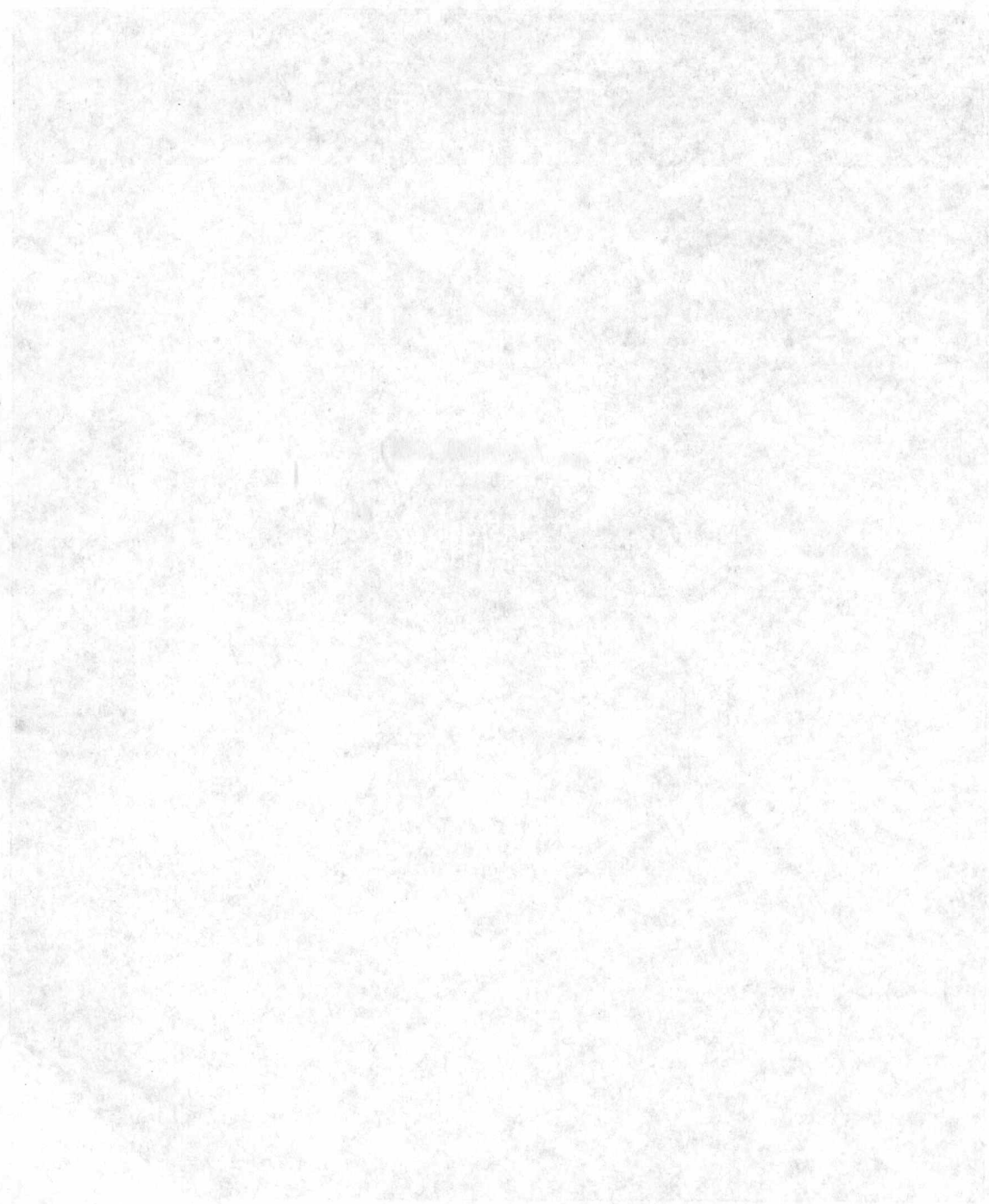
第 10 章 图形用户接口开发

10.1 嵌入式系统中的 GUI 简介	303
10.1.1 基于嵌入式 Linux 的 GUI 系统底层实现基础	303
10.1.2 3 种嵌入式 GUI 系统的分析与比较	304
10.2 MiniGUI 编程	305
10.2.1 概 述	305
10.2.2 窗 口	308
10.2.3 对话框、窗片和控件	313
10.2.4 消息及消息队列	313

10.2.5	图形设备接口	314
10.2.6	菜 单	321
10.2.7	定时器	322
10.2.8	鼠标光标	323
10.2.9	插入符	323
10.2.10	键盘和鼠标输入	324
10.2.11	键盘快捷键	324
10.3	初识 Qt/Embedded	324
10.4	Qt/Embedded 嵌入式图形开发基础	339
10.4.1	Qt 的资源	340
10.4.2	系统要求	341
10.4.3	架 构	342
10.4.4	窗口系统	342
10.4.5	字 体	343
10.4.6	输入设备	343
10.4.7	输入方法	343
10.4.8	屏幕加速	344
10.5	Qt/Embedded 实战演练	344
10.6	实验 11: 图形界面 GUI 实验	353
附录 A	Linux 下常用命令	373
参考文献		385

第一篇

基础篇



第 1 章

嵌入式系统基础

1.1 嵌入式系统

1.1.1 嵌入式系统的概念

面向 21 世纪科技发展,嵌入式系统(Embedded Systems)开始进入到 IT 时代,并且稳健发展,逐步形成一个主流。嵌入式没有统一的定义,但目前有个广泛而又认可的规范:将软件产品固化到硬件平台上、完成应有的功能即是嵌入式。简单明确,通俗易懂,也是发展的目标。嵌入式系统早期主要应用于军事及航空航天等领域,以后逐步广泛地应用于工业控制、仪器仪表、汽车电子、通信和家用消费类等领域。随着互联网的发展,嵌入式处理器类型多样化、处理能力空前提升,新型的嵌入式系统正朝着信息家电 IA (Information Appliance) 和 3C(Computer, Communication & Consumer) 产品方向发展。

1.1.2 嵌入式系统的组成

1. 硬件系统

处理器:

- ▶ x86、PC104:集成度低,成本 1000 元,功耗高,布板面积大,仿真器昂贵。
- ▶ 单片机:无操作系统(Operation System,简称 OS),无法实现多任务,难以支持 TCP/IP。
- ▶ 嵌入式集成处理器:也可称之为 SOC(System on Chip)片上系统。SOC 芯片系统集成度高,开发简单,价格低廉,大大降低了嵌入式软硬件开发的门槛,使得爱好者都有可能、有能力进入这个领域。

2. 软件系统

OS 选择:

- ▶ Vxworks/pSOS;
- ▶ WinCE;



- Linux;
- Symbian。

嵌入式系统是现代科学的多学科互相融合、以应用技术产品为核心、以计算机技术为基础,适用于特定应用环境的产品。嵌入式系统无多余软件,以固化态出现,硬件亦无多余部件,是可靠性高,成本低,体积小,功耗低的非 PC 系统。嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术和电子技术与各个行业的具体应用相结合的产物,这一点决定了它必然是一个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成系统。因此它包含了应用广泛的各种不同类型的设备。该系统采用片上系统(SOC,亦称系统芯片)将是其发展趋势。嵌入式系统将形成庞大的产业群,屹立于世界之林。

嵌入式系统软硬兼施、互利互惠、融为一体、成为产品。芯片加软件成为产品,不同的系统有其特定的开发工具。

1.1.3 嵌入式系统的特点

嵌入式处理器的应用软件是实现嵌入式系统功能的关键,对嵌入式处理器系统软件和应用软件的要求与通用计算机有所不同。

(1) 软件要求固态化存储

为了提高执行速度和系统可靠性,嵌入式系统中的软件一般都固化在存储器芯片或单片机本身中,而不是存储于磁盘等载体中。

(2) 软件代码高质量、高可靠性

尽管半导体技术的发展使处理器速度不断提高、片上存储器容量不断增加;但在大多数应用中,存储空间仍然是宝贵的,还存在实时性的要求,为此,要求程序编写和编译工具的质量要高,以减少程序二进制代码长度,提高执行速度。

(3) 嵌入式系统软件需要实时操作系统开发平台

实时操作系统(Real Time Operating System, RTOS)大多数嵌入式系统都有实时性的要求,同时,在多任务嵌入式系统中,对重要性各不相同的任务进行统筹兼顾的合理调度是保证每个任务及时执行的关键。这种任务调度应该由优化编写的系统软件来完成,通过提高处理器速度也可以在一定程度上予以弥补。

多任务实时操作系统是知识集成的平台和走向工业化道路的基础。

(4) 嵌入式系统开发需要特定的开发工具和环境

通用计算机具有完善的人机接口界面,在上面增加一些开发应用程序和环境即可进行对自身的开发。而嵌入式系统本身不具备自举开发能力,即使设计完成以后,用户通常也不能对其中的程序功能进行修改,必须有一套开发工具和环境才能进行开发。这些工具和环境一般是基于通用计算机上的软硬件设备以及各种逻辑分析仪、混合信号示波器等。

(5) 嵌入式系统开发人员以应用专家为主

通用计算机的开发人员一般是计算机科学或计算机工程方面的专业人士,而嵌入式系统则需和各个不同行业的应用相结合,要求更多的计算机以外的专业知识,其开发人员往往是各个应用领域的专家。因此,开发工具的易学、易用、可靠、高效是基本要求。

1.1.4 嵌入式系统的应用

嵌入式系统是以应用为中心,以计算技术为基础,软硬件可裁剪,适于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等综合性严格要求的专用计算机系统。它是一个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新,基于硅片的知识集成系统。今天的嵌入式系统已普遍应用于国防电子、数字家庭、工业自动化、汽车电子、医学科技、消费电子、无线通信、电力系统等国民经济的主要行业。随着嵌入式技术的发展,嵌入式系统将更广泛地应用于人类生活的方方面面,如:基于嵌入式 Internet 网络的电子皮肤、可以嵌入到牙齿上的手机都在研发之中。著名嵌入式系统专家沈绪榜院士认为,“计算机是认识世界的工具,而嵌入式系统则是改造世界的产物。”

与传统的通用计算机系统不同,嵌入式系统面向特定应用领域,根据应用需求定制开发,并随着智能化(数字化)产品的普遍需求渗透到各行各业,嵌入式软件已成为产品的数字化改造、智能化增值的关键性、带动性技术。

嵌入式软件业发展迅速,已成为软件行业的重要分支。嵌入式软件是包含于硬件之中的特殊产品形态,所以准确地划分和统计是比较困难的。下面仅提供赛迪顾问 2004 年 2 月对部分嵌入式系统软件产品市场的分析数据:2003 年全球嵌入式软件规模为 346 亿美元,中国市场规模约为 188 亿人民币(2004 年为 255 亿人民币),预计 2006 年中国嵌入式软件规模可突破 400 亿(2003~2006 年均复合增长率达 30%)。

随着 SOC 技术的出现,嵌入式产业将会再度发生专业化分工和观念的改变。IP 构件库技术正在造就一个新兴的嵌入式软件技术行业。以人为中心的普适计算技术正推动着新一轮的信息技术革命。嵌入式软件作为系统的灵魂,在很大程度上决定着产品的成败。市场对嵌入式软件的安全性、可靠性、可维护性和生命周期都提出了更加严格的要求。

作为改造世界的产物——嵌入式系统,在发展中技术将不断完善,但不会走向单一和垄断。嵌入式技术将与时俱进,不断创新!

1.1.5 实时操作系统

实时操作系统是指能对外部事件在限定的时间内完成及时响应的多任务操作系统。它是嵌入式计算机中的重要系统资源,与通用平台的操作系统不同,它往往嵌入到目标机硬件设备内部运行,一般用户无法看到它的运行界面,因而又被称为嵌入式操作系统。它往往采用微内核结构,具有实时性、可靠性和可裁剪性的特点,非常适合于嵌入式系统和要求实时处理的应用场合。



1.2 嵌入式处理器

1.2.1 嵌入式处理器简介

嵌入式系统的核心是嵌入式微处理器。嵌入式微处理器一般具备 4 个特点：① 对实时和多任务有很强的支持能力，能完成多任务并且有较短的中断响应时间，从而使内部的代码和实时操作系统的执行时间减少到最低限度；② 具有功能很强的存储区保护功能，这是由于嵌入式系统的软件结构已模块化，为了避免在软件模块之间出现错误的交叉作用，需要设计强大的存储区保护功能，同时也有利于软件诊断；③ 具有可扩展的处理器结构，以能迅速地扩展出满足应用的高性能的嵌入式微处理器；④ 嵌入式微处理器的功耗必须很低，尤其是用于便携式的无线及移动的计算和通信设备中靠电池供电的嵌入式系统更是如此，功耗只能为 mW 级，甚至 μ W 级。据不完全统计，目前全世界嵌入式处理器的品种总量已经超过 1000 种，流行的体系结构有 30 多个系列。其中，低端产品以 8051 体系占多半，生产这种单片机的半导体厂家有 20 多个，共 350 多种衍生产品，仅 Philips 产品就有近 100 种。嵌入式处理器的寻址空间一般从 64 KB~16 MB，处理速度为 0.1~2000 MIPS，常用封装为 8~144 个引脚。

目前几乎每个半导体制造商都生产嵌入式处理器，并且越来越多的公司开始拥有自主的处理器设计部门。据不完全统计，全世界嵌入式处理器已经超过 1000 多种，流行的体系结构有 30 多个系列，其中以 ARM、PowerPC、MC68000、MIPS 等使用得最为广泛。

1.2.2 嵌入式处理器分类

目前嵌入式系统的处理器可以分为下面几类：

- ▶ 嵌入式微处理器(Embedded MPU)；
- ▶ 嵌入式微控制器(Embedded MCU)；
- ▶ 嵌入式 DSP 处理器(Embedded DSP)；
- ▶ 嵌入式片上系统(Sytem on Chip, 简称 SOC)。

下面就让我们简单介绍一下各种类型的处理器：

嵌入式微处理器采用“增强型”通用微处理器。由于嵌入式系统通常应用于环境比较恶劣的环境中，因而嵌入式微处理器在工作温度、电磁兼容性以及可靠性方面的要求较通用的标准微处理器高。但是，嵌入式微处理器在功能方面与标准的微处理器基本上是一样的。根据实际嵌入式应用要求，将嵌入式微处理器装配在专门设计的主板上，只保留和嵌入式应用有关的主板功能，这样可以大幅度减小系统的体积和降低功耗。与工业控制计算机相比，嵌入式微处理器组成的系统具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高的优点，但在其电路板上必须包括 ROM、RAM、总线接口、各种外设等器件，从而降低了系统的可靠性，技术保密性也较差。把

嵌入式微处理器及其存储器、总线、外设等安装在一块电路主板上,可构成一个通常所说的单板机系统。嵌入式微处理器目前主要有 Am186/88、386EX、SC-400、PowerPC、68000、MIPS、ARM 系列等。

嵌入式微控制器又称单片机,它将整个计算机系统集成到一块芯片中。嵌入式微控制器一般以某种微处理器内核为核心,根据某些典型的应用,在芯片内部集成了 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、看门狗、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、Flash RAM、EEPROM 等各种必要功能部件和外设。为适应不同的应用需求,对功能的设置和外设的配置进行必要的修改和裁剪定制,使得一个系列的单片机具有多种衍生产品,每种衍生产品的处理器内核都相同,所不同的是存储器和外设的配置及功能的设置。这样可以使单片机最大限度地和应用需求相匹配,从而降低整个系统的功耗和成本。和嵌入式微处理器相比,微控制器的单片化使应用系统的体积大大减小,从而使功耗和成本大幅度下降,可靠性提高。由于嵌入式微控制器目前在产品的品种和数量上是所有种类嵌入式处理器中最多的,而且上述诸多优点决定了微控制器是嵌入式系统应用的主流。微控制器的片上外设资源一般比较丰富,适合于控制,因此称为微控制器。通常,嵌入式微控制器可分为通用和半通用两类,比较有代表性的通用系列包括 8051、P51XA、MCS-251、MCS-96/196/296、C166/167、68300 等;而比较有代表性的半通用系列包括支持 USB 接口的 MCU 8XC930/931、C540、C541,支持 I²C、CAN 总线、LCD 等的众多专用 MCU 和兼容系列等。目前 MCU 约占嵌入式系统市场份额的 70%。

嵌入式 DSP 处理器主要应用在数字信号处理应用中,各种数字信号处理算法相当复杂,这些算法的复杂度可能是 $O(nm)$ 的,甚至是 NP 的,一般结构的处理器无法实时地完成这些运算。由于 DSP 处理器对系统结构和指令进行了特殊设计,使其适合于实时地进行数字信号处理。在数字滤波、FFT、谱分析等方面,DSP 算法正大量进入嵌入式领域,DSP 应用正从在通用单片机中以普通指令实现 DSP 功能,过渡到采用嵌入式 DSP 处理器。嵌入式 DSP 处理器有 2 类:① DSP 处理器经过单片化、EMC 改造、增加片上外设成为嵌入式 DSP 处理器,TI 的 TMS320C2000/C5000 等属于此范畴;② 在通用单片机或 SOC 中增加 DSP 协处理器,例如 Intel 的 MCS-296 和 Infineon(Siemens)的 TriCore。另外,在有关智能方面的应用中,也需要嵌入式 DSP 处理器,例如各种带有智能逻辑的消费类产品,生物信息识别终端,带有加解密算法的键盘,ADSL 接入、实时语音压解系统,虚拟现实显示等。这类智能化算法一般都运算量较大,特别是向量运算、指针线性寻址等较多,而这些正是 DSP 处理器的优势所在。嵌入式 DSP 处理器比较有代表性的产品是 TI 的 TMS320 系列和 Motorola 的 DSP56000 系列。TMS320 系列处理器包括用于控制的 C2000 系列、用于移动通信的 C5000 系列,以及性能更高的 C6000 和 C8000 系列。DSP56000 目前已经发展成为 DSP56000、DSP56100、DSP56200 和 DSP56300 等几个不同系列的处理器。另外,Philips 公司最近也推出了基于可重置嵌入式 DSP 结构,采用低成本、低功耗技术制造的 R. E. A. L DSP 处理器,其特点是具备双 Harvard