



CD-ROM

光盘附赠本书实例
源代码文件

ARM与DSP 综合设计及应用

廖义奎 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

ARM与DSP 综合设计及应用

廖义奎 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书主要分为嵌入式系统硬件设计和软件设计两大部分进行介绍。第一部分为嵌入式系统硬件设计,详细而深入地讲解 ARM、DSP 和 FPGA 三种嵌入式处理器的硬件设计,内容包括嵌入式系统概要、S3C2440 硬件设计基础、嵌入式系统存储器电路设计、嵌入式系统通信接口设计、DSP 及 FPGA 嵌入式系统硬件设计;第二部分为嵌入式系统软件设计,详细而全面地介绍 DSP 软件设计、Windows CE 软件设计以及 Linux 软件设计,内容包括 DSP 嵌入式系统软件设计、Windows CE 的 VC++ 程序设计、Windows CE 的 GUI 库及设计模式、Linux 嵌入式系统开发平台、Linux 嵌入式系统驱动程序设计、Linux 嵌入式系统 QT 程序设计。另外,本书最后还剖析了嵌入式系统在自动测控系统中的应用实例。

本书适合于从事 ARM 与 DSP 开发人员作为参考手册,也适合于计算机、自动化和电气等相关专业的高校师生作为单片机与嵌入式系统课程的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

ARM与DSP综合设计及应用/廖义奎编著. —北京:中国电力出版社,2009

ISBN 978-7-5083-8913-4

I. A… II. 廖… III. ①微处理器 ②数字信号—信号处理
IV. TP332 TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第088267号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009年9月第一版 2009年9月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 30印张 758千字

印数0001—3000册 定价49.80元(含1CD)

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

一、ARM 与 DSP

ARM 与 DSP 是嵌入式系统应用最广泛的两类处理器,在这里,ARM 主要指采用 ARM 内核的各种嵌入式微处理器和微控制器,DSP 主要指具有针对高速运算而进行各种优化处理的数字信号处理器。本书除了主要讲解 ARM 处理器的设计之外,还兼顾分析了 DSP 的设计方法,对于初学者关心的 ARM 与 DSP 的区别、先学谁好、谁更有前途等问题,本书给出了一些回答,本书将让读者更容易理解两者之间在开发上的共性,两者并不矛盾,在开发上两者是一致的,只是面向的具体应用不同而已。

ARM 微处理器采用 RISC 架构,具有低成本、高性能的特点,支持 Thumb (16 位)/ARM (32 位)双指令集,在不影响执行效率的情况下又可以减少程序存储空间,ARM 目前主流的构架包括有 ARMv4、ARMv5、ARMv6 以及最新的 ARMv7 等,基于这 4 种架构的 ARM 微处理器又可分为 ARM7、ARM9、ARM9E、ARM10E、Xscale (Intel)以及 ARM11 等主流系列。

DSP 作为一种功能强大的特种微处理器,在数据、语音、视频、信号的高速数学运算和实时处理方面起着举足轻重的作用。广义上,DSP 即数字信号处理(Digital Signal Processing),其重点是利用各种理论与算法,对信号进行处理、分析、识别以及推理。狭义上,DSP 即数字信号处理器(Digital Signal Processor)。该类处理器在设计过程中,从结构上和硬件上专门为复杂数据运算进行了优化设计,并提供了数字式滤波、数据块移动等复杂数据处理指令。与普通的微处理器相比,具有更强的数据运算能力。

DSP 嵌入式系统面向的是信号的处理,而普通嵌入式系统面向的多是任务的流程与控制(例如人机交互),即前者面向的重点是“信号”,后者面向的重点是“任务”。DSP 嵌入式系统常用于代替模拟系统,实现以前模拟电路实现的诸如数字滤波、自适应滤波、快速傅里叶变换、希尔伯特变换、小波变换、相关运算、频谱分析、卷积、模式匹配、加窗、波形产生等功能。

DSP 嵌入式系统面向的是数据运算,而普通嵌入式系统面向的是数据流转(例如网络与现场总线通信)。数据运算非常广泛,例如调制解调、自适应均衡、数据加密、数据压缩、回波抵消、多路复用、传真、扩频通信、纠错编码、可视电话、个人通信系统、移动通信、个人数字助手(PDA)、X.25 分组交换开关等,以及在图形与图像处理方面,例如二维和三维图形处理、图像压缩与传输、图像增强、动画与数字地图、机器人视觉、模式识别、工作站等。

DSP 嵌入式系统面向的是高速控制,而普通嵌入式系统面向的低速控制。DSP 嵌入式系统常用于电动机变频控制、矢量控制、PID 控制等对实时性要求高的场合。

二、硬件与软件

硬件与软件是嵌入式系统两大组成部分,缺一不可。对于嵌入式系统的初学者和开发人员,尽管可以选择硬件或软件其中之一作为主要学习和研究方向,但由于嵌入式系统的特殊性,并不能像普通 PC 应用开发那样可以清楚地把硬件与软件开发完全独立开来。通常情况下,在嵌入式系统硬件设计时,不仅要考虑硬件系统自身的可行性,同时还需要考虑该硬件模块在嵌入式操作系统环境下的驱动程序开发 and 应用程序开发的可行性和难易程度。在嵌入式系统软件设计时,同时需要有嵌入式系统硬件的基础,特别是在进行驱动程序开发时,更

需要对嵌入式系统硬件了如指掌。

因此，本书不仅仅只介绍嵌入式系统的硬件或者软件，而是从一个嵌入式开发人员实际工作的角度出发，从硬件入手，讲解嵌入式系统硬件设计的方法和过程，在介绍硬件设计基础之后，再深入讲解软件设计，从而完成一个嵌入式系统从无到有，再从有到深入的学习过程。

三、Windows CE 与 Linux

嵌入式系统最重要的特征之一就是其应用软件都是基于嵌入式操作系统的，如果没有基于嵌入式操作系统，只有基于嵌入式系统硬件和直接运行于硬件上简单的单任务程序，那么这样的系统只能算是一个单片机系统，而不算真正意义上的嵌入式系统。

Windows CE 和 Linux 都是目前应用最广泛的嵌入式操作系统之一，它们具有非常多的相同或相似的特点，例如，市场应用广泛、开发人员众多、操作界面简洁美观、开发工具成熟易用、功能强大齐全、系统运行稳定可靠等。但是，两者之间同时又存在非常多的本质差别，例如开源与非开源、免费与收费、发行版本各具特色等，另外在开发环境、设计方式以及编程细节等方面也不尽相同。

Windows CE 和 Linux 两种嵌入式操作系统的学习与应用，对于开发人员，需要考虑的是对两者都要了解和掌握，而不是只能选择其中之一；对于开发企业，需要考虑的是商业定位与发展方向的问题，而不是宣扬谁和打压谁；对于初学者，需要考虑的是兴趣与爱好的问题和先学谁、后学谁的问题，而不是学哪一种有用哪一种无用的问题。

因此，本书同时讲解了 Windows CE 和 Linux 两种嵌入式操作系统程序设计的方法，向读者传递一种“不讨论 Windows CE 和 Linux 两者对立”的思路，作为一个嵌入式系统开发者，应该是对各种嵌入式操作系统都有所了解，然后再去掌握。

四、本书编写时的一些考虑

为了体现嵌入式系统中 ARM 与 DSP、硬件与软件、Windows CE 与 Linux 三个方面的知识体系，本书涵盖了这三个方面的开发介绍。由于本书内容所涉及的范围比较广，为了避免出现只浮于表面的现象，本书去掉了纯原理和理论的内容，也去掉了生僻的知识点和繁杂的例子，而是直接面向于可以马上动手设计、开发与应用的最简单的电路和程序实例，精选的例子尽管是很多同类实例中最简单的，但对例子的讲解和分析并不只停留在代码和表面上，而是通过这些最简单的实例来解析其底层原理和本质。

五、本书的读者对象

本书的读者需要有一定的 C、C++ 语言编程基础以及电子线路设计基础。本书适合于 ARM 与 DSP 开发人员及初学者作为参考资料，也适合于高校师生作为嵌入式系统、DSP 的学习、课程设计、毕业设计以及电子竞赛等的培训资料，以及部分本科专业作为嵌入式系统、DSP 课程的教材。

六、致谢

在本书的编写过程中，得到了韦卫星、陈积光、李智、许川佩四位教授的大力支持，在此表示衷心的感谢。在此还特别感谢陈钧为全书的内容修改、插图绘制以及代码验证做了大量而富有成效的工作。感谢韦方海、罗钦、黄成甲以及谭邓宏为本书提供了部分电路图以及源程序，感谢覃晓、苏金秀、陈业勤、覃启溪、刘振州、梁雪珍、李尚盛分别审阅了本书全部或部分章节。

限于作者水平，并且编写时间比较仓促，书中难免存在错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者

前 言

第 1 章 嵌入式系统概要	1
1.1 嵌入式系统发展及应用	1
1.2 嵌入式系统硬件	4
1.3 嵌入式系统软件	7
第 2 章 S3C2440 硬件设计基础	12
2.1 ARM 嵌入式系统硬件设计基础	12
2.2 S3C2440 微处理器特点	20
2.3 基于 S3C2440 的嵌入式系统结构	21
2.4 电源模块设计	22
2.5 JTAG 接口设计	24
2.6 GPIO 接口设计	25
2.7 LCD 控制器接口设计	30
2.8 CMOS 摄像头接口设计	37
2.9 复位电路设计	40
2.10 S3C2440 外部晶振接口设计和电源管理	42
第 3 章 嵌入式系统存储器电路设计	43
3.1 SDRAM 电路设计	43
3.2 Flash 电路设计	58
3.3 存储卡接口电路设计	68
3.4 铁电存储器 (F-RAM) 电路设计	71
第 4 章 嵌入式系统通信接口设计	76
4.1 以太网接口电路设计	76
4.2 RS-232 接口电路设计	87
4.3 USB 接口电路设计	92
第 5 章 DSP 与 FPGA 嵌入式系统硬件设计	96
5.1 DSP 嵌入式系统概述	96
5.2 TMS320C54X 嵌入式系统硬件设计	107
5.3 TMS320C54X 嵌入式系统硬件设计	128
5.4 FPGA 嵌入式系统硬件设计	141
第 6 章 DSP 嵌入式系统软件设计	152
6.1 DSP 集成开发平台 CCS 应用	152
6.2 DSP 软件设计基础	167

6.3 DSP 软件设计实例	188
第 7 章 Windows CE 的 VC++ 程序设计	197
7.1 Visual Studio 2005 对智能设备开发的支持	197
7.2 智能设备模拟器	202
7.3 智能设备的 MFC 程序开发	204
7.4 设备 MFC 8.0 体系结构	206
7.5 对话框设备项目	215
7.6 单文档设备项目	233
7.7 控件的应用	257
7.8 菜单与工具条的应用	302
第 8 章 Windows CE 的 GUI 库及设计模式	310
8.1 SmartWin++ 简介	310
8.2 设计模式与 SmartWin++ 系统结构	314
8.3 SmartWin++ 的控件	331
第 9 章 Linux 嵌入式系统开发平台	338
9.1 Linux 开发基础	338
9.2 Linux 嵌入式系统开发平台配置	353
9.3 Linux 程序设计	355
第 10 章 Linux 嵌入式系统驱动程序设计	362
10.1 Linux 设备驱动程序	362
10.2 Linux 经典 Hello world 驱动程序	374
10.3 Linux 字符设备驱动程序实例	379
10.4 Linux 嵌入式系统 GPIO 驱动程序	387
第 11 章 Linux 嵌入系统 Qt 程序设计	393
11.1 Linux 桌面 Qt 开发环境	393
11.2 Linux 嵌入式开发环境	398
11.3 Qt 信号与槽介绍	403
11.4 KDevelop 集成开发 Qt 程序设计	405
11.5 Qt 主应用程序的实现	409
11.6 qtopia 嵌入式应用程序	416
11.7 KDevDesigner 应用程序界面设计	417
11.8 Qt Designer 应用程序界面设计	422
第 12 章 嵌入式系统在自动测控系统中的应用	427
12.1 嵌入式系统三相交流电动机正反转控制	427
12.2 嵌入式系统步进电动机控制	442
12.3 嵌入式软 PLC 设计	448
参考文献	471

嵌入式系统概要



1.1 嵌入式系统发展及应用

1. 嵌入式系统简介

本书认为嵌入式系统(Embedded System)就是可以嵌入到其他系统中的微处理器应用系统。在构成上,嵌入式系统以微处理器及软件为核心部件,这两者缺一不可。在特征上,嵌入式系统具有方便、灵活地嵌入到其他应用系统的特征,即具有很强的可嵌入性。嵌入式系统本身是一个可独立执行的系统,但更重要的是它可作为一个部件嵌入到其他应用系统中。

嵌入式系统也还有其他的定义,根据 IEEE(国际电动机工程师协会)的定义,嵌入式系统是“控制、监视或者辅助装置、机器和设备运行的装置”(原文为 devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants)。这主要是从应用上加以定义的,从中可以看出嵌入式系统是软件和硬件的综合体,还可以涵盖机械等附属装置。

不过,IEEE 的定义并不能充分体现嵌入式系统的精髓,目前国内一个普遍被认同的定义是:以应用为中心,以计算机技术为基础,软件硬件可裁剪,适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。

按嵌入式微处理器类型划分,嵌入式系统可分为以单片机为核心组成的嵌入式单片机系统,以工业计算机板为核心组成的嵌入式计算机系统,以 DSP 为核心组成的嵌入式数字信号处理器系统,以 FPGA 及软 CPU(SOPC)为核心组成的嵌入式 SOPC 系统等。

由于嵌入式系统的内容很广,在含义上与传统的单片机系统和计算机系统有很多重叠部分。为了方便区分,在实际应用中通常给嵌入式系统加了一些不成文的限定:

(1)嵌入式系统的微处理器通常是由 32 位以及 32 位以上的 RISC 处理器组成,例如 ARM、MIPS 等。

(2)嵌入式系统的软件系统通常是以嵌入式操作系统为核心,外加用户应用程序。

(3)嵌入式系统在特征上具有明显的可嵌入性。

从狭义上说,嵌入式系统都应该具备上述三个特征。从广义上说,只要具备上述三个特征中的部分特征,也可以看做是嵌入式系统。

2. 嵌入式系统发展

(1)从单片机到嵌入式系统。嵌入式系统开始于 20 世纪 80 年代单片机的使用。单片机技术已经渗透到各个领域,且与人们的日常生活密不可分,给人们生活和工业生产带来极大方便。单片机的功能强大,从信号采集、处理到传输都能由单片机来完成。但是,随着网络时代的来临,许多电子设备需要联网和更智能化、更强的计算能力,比如音频、视频的数据



采集、处理和传输,丰富的图形界面等。单片机越来越不能满足应用对象的需求,开发工作也变得越来越大且复杂。随着微电子技术的进步,芯片的制造成本大大降低,而功能却大大增强,16位和32位的嵌入式微处理器逐渐成为嵌入式系统设计的主流。不过,只有嵌入式微处理器是不够的,OEM(原始设备制造商)还需要有一个运行于嵌入式微处理器上的操作系统。嵌入式操作系统要有良好的可移植性,能够用在根据应用要求选择的微处理器中;软件开发工作变得规范,容易测试,可实现模块化编程,同时由多个人共同完成1个任务;解决以往开发产品存在的诸多不安全隐患。很多软件厂商迎合嵌入式系统发展的需要,推出了多种不同特点的嵌入式操作系统。例如,Microsoft公司的Windows CE、3COM公司的Palm OS、Symbian公司的EPOC、中科院凯思集团的HOpen以及Linux等。

(2) 从芯片级设计到系统级设计。嵌入式控制系统需要具有能跨越传统硬件和软件设计界限的新型设计者,这是嵌入式系统技术与传统单片机和微处理器系统技术的重要区别。嵌入式系统具有系统级应用开发技术的基本特征,而以往的微处理器、单片机和DSP处理器应用设计,则属于器件或芯片级应用开发技术。以操作系统和硬件系统提供的接口作为应用系统设计的基础,其开发技术与PC的应用开发颇为相似。在嵌入式系统应用开发中,设计者不必了解很多底层知识和技术,只需要在操作系统之上完成应用系统设计即可。嵌入式系统随设计需要来选择,如成本、性能、功率、体积和灵活性等。

3. 嵌入式系统的应用

嵌入式系统技术具有非常广阔的应用前景,其应用领域介绍如下。

(1) 嵌入式系统在智能消费设备中的应用。目前,嵌入式系统最为成功的应用是在智能消费设备中得到应用,例如,智能手机、PDA、GPS导航仪以及多媒体播放器等。

智能手机的诞生,是由掌上电脑(Pocket PC)演变而来的。最早的掌上电脑不具备手机的通话功能,但是随着用户对于掌上电脑的个人信息处理方面功能依赖的提升,但又不习惯于随时都携带手机和PPC两个设备,所以厂商将掌上电脑的系统移植到了手机中,于是就有了智能手机这个概念。

从广义上说,智能手机除了具备手机的通话功能外,还具备了PDA的大部分功能,特别是个人信息管理以及基于无线数据通信的浏览器、GPS和电子邮件功能。智能手机为用户提供了足够的屏幕尺寸和带宽,既方便随身携带,又为软件运行和内容服务提供了广阔的舞台,很多增值业务可以就此展开,例如,股票、新闻、天气、交通、商品、应用程序下载、音乐和图片下载等。结合3G通信网络的支持,智能手机的发展趋势,势必将成为一个功能强大,集通话、短信、网络接入、影视娱乐为一体的综合性个人手持终端设备。

(2) 在工业控制中的应用。基于嵌入式芯片的工业自动化设备将获得长足的发展,目前已经有大量的8、16、32位嵌入式微控制器在应用中,网络化是提高生产效率和产品质量、减少人力资源主要途径,如工业过程控制、数字机床、电力系统、电网安全、电网设备监测、石油化工系统。就传统的工业控制产品而言,低端型采用的往往是8位单片机。但是随着技术的发展,32位、64位的处理器逐渐成为工业控制设备的核心,在未来几年内必将获得长足的发展。

传统的可编程逻辑控制器(Programmable Logic Control, PLC)经过十几年的发展,技术已经非常成熟,凭其高速度、高稳定性、高性能的特点在工业控制领域得到了广泛应用,与此同时,随着现代计算机技术和电子技术的发展,在工程方面逐渐表现出其缺点:传统的PLC厂商垄断市场,其产品互不兼容,缺乏统一性的标准,难以构建开放的硬件体系结构;



另外,各厂商产品的编程方法差别很大,技术专有性较强,工作人员培训时间过长,造成传统 PLC 应用成本居高难下,性价比增长很缓慢。

20 世纪 90 年代中期,计算机和微电子技术的迅猛发展以及 PLC 的国际标准 IEC61131 的制定,产生了软 PLC 技术。所谓“软 PLC 技术”,就是用 PC 机作为硬件支撑平台,利用软件实现标准硬件 PLC 的基本功能,也就是将 PLC 的控制功能封装在软件内,运行于 PC 机的环境中,以 PC 机为基础的系统,同时具备了传统 PLC 和 PC 机的双重功能和多重优点。

软 PLC 技术一般由开发系统和运行系统两个部分组成。开发系统运行在 PC 平台上,而运行系统则运行在嵌入式硬件平台上。一般而言,嵌入式硬件平台上都要运行某种嵌入式操作系统,比如 μ C/OSII、 μ Clinux、Windows CE 等。

现代开发系统的特点是:集成化开发环境、界面友好,并且易于使用。软 PLC 嵌入式系统是基于 IEC61131 国际标准的,有比较统一的支持语言(C、C++、汇编等)。在嵌入式硬件平台上运行的系统主要负责解释执行由开发系统编译、链接后产生的目标文件,运行系统一般由运行内核、通信接口和系统管理三大部分组成,其设计和实现精度很高,它的执行效率将直接影响到系统在现场控制中的反应速度。

随着工业系统复杂性的增加,传统 PLC 已经很难并且也不可能完成所有自动化任务。先进的自动化系统已经超越了 PLC 的功能范围,使得工业机器领域的工程师必须在自动化系统中集成更多更先进的 I/O 处理和控制策略。近几年来,随着嵌入式技术的飞速发展,高性能嵌入式微处理器技术和嵌入式操作系统技术逐渐进入工业控制系统,加速了可编程自动控制器(Programmable Automation Controller, PAC)的推广应用。自从 ARC Group 提出 PAC 这个概念以来,作为近年来自动化产业最为重要的发展趋势之一,PAC 受到了自动化业界及终端用户的广泛关注。

目前我国机电设备的主流控制器是 PLC,随着计算机技术的发展,嵌入式产品在这一领域迅速增长,并在一些特殊运用中取得优势地位,对小型 PLC 形成强大的竞争压力,在一些领域甚至出现取代 PLC 的趋势。嵌入式 PLC 是嵌入式系统和软 PLC 在工业控制中发展的必然产物。嵌入式 PLC 是当前开放式控制系统的发展趋势,克服了硬 PLC 的诸多缺点,凭借其执行速度快、可跨平台运行等优点必将在工业控制中得到广泛的应用。随着嵌入式 PLC 技术的进一步完善,它在工业控制的各个领域将具有更加广阔的发展前景,并且产生良好的社会效益和经济效益。

(3) 在航天与交通方面的应用。在宇航方面的应用,往往会成为民用的先导。例如执行火星探路者飞行任务的飞行器,和定居者登陆舱一样,都安装有嵌入式的 PowerPC,执行控制和其他运行功能。

基于嵌入式系统的 GPS 接收机(或导航仪)目前已经获得非常广泛的应用。例如,飞机、轮船、地面车辆以及步行者都可以利用 GPS 导航器进行导航。汽车导航系统是在全球定位系统 GPS 基础上发展起来的一门新型技术,由 GPS 导航、自律导航、微处理机、车速传感器、陀螺传感器、CD-ROM 驱动器、LCD 显示器组成。GPS 导航系统与电子地图、无线电通信网络、计算机车辆管理信息系统相结合,可以实现车辆跟踪和交通管理等许多功能。

嵌入式系统在交通运输方面目前也有非常好的应用潜力,例如,汽车内的多媒体播放系统、电子与电力系统、导航系统、无线上网系统等。另外,在汽车控制系统中,嵌入式系统也得到了广泛的应用。



(4) 信息家电及家庭智能管理系统。信息家电及家庭智能管理系统方面将是嵌入式系统未来最大的应用领域,例如冰箱、空调等的网络化、智能化将引领人们的生活步入一个崭新的空间,即使用户不在家,也可以通过电话线、网络进行远程控制。又例如水、电、煤气表的远程自动抄表,安全防火、防盗系统,其中嵌入式专用控制芯片将代替传统的人工检查,并实现更高、更准确和更安全的性能。目前在餐饮服务领域,例如远程点菜器等已经体现了嵌入式系统的优势。

(5) 在网络与通信系统中的应用。嵌入式系统将广泛用于网络与通信系统之中。例如,ARM 把针对移动互联市场的产品分为两类,一类是 Smartphone (智能手机),一类是笔记本电脑。Netbook (上网本)是介于笔记本和 Smartphone 中间的一个产品。ARM 过去在 PC 机上的业务很少,但现在市场对更低功耗的移动计算平台的需求带来了新的机会,因此 ARM 在不断推出性能更高的 CPU 来拓展市场。ARM 新推出的 Cortex-A8、Cortex-A9/MPCore 处理器可以用于高端 Smartphone,也可用于 Netbook。现在已经有很多半导体厂商在采用 ARM 的 Cortex-A8 和 Cortex-A9 开发产品并应用于 Netbook,今后市场上将可以买到很多基于 Cortex-A8 的 Netbook。以后 ARM 将会有多核 Cortex-A9 推出,冲击中高端移动便携 PC 市场。

又例如公共交通无接触智能卡 (Contactless Smartcard, CSC) 发行系统、公共电话卡发行系统和自动售货机,各种智能 ATM 终端将全面走入人们的生活,到时手持一卡就可以行遍天下。

(6) 环境工程与自然。例如,水文资料实时监测,防洪体系及水土质量监测、堤坝安全,地震监测网,实时气象信息网,水源和空气污染监测。在很多环境恶劣、地况复杂的地区,嵌入式系统将能够实现无人监测。

(7) 机器人。嵌入式芯片的发展将使机器人在微型化,高智能方面优势更加明显,同时会大幅度降低机器人的价格,使其在工业领域和服务领域获得更广泛的应用。



1.2 嵌入式系统硬件

嵌入式系统微处理器可以是单片机,也可以是普通的 CPU,还可以是 DSP、FPGA 等。下面分别介绍 4/8/16 位单片机、32 位 RISC 微处理器、PC 用 CISC 微处理器、DSP 以及 FPGA 等嵌入式系统微处理器的特点以及它们在嵌入式系统中的应用。

1. 4/8/16 位单片机

单片微型计算机 (Single-Chip Microcomputer), 简称单片机。就是将微处理器 (CPU)、存储器 (存放程序或数据的 ROM 和 RAM)、总线、定时器/计数器、输入/输出接口 (I/O 口) 和其他多种功能器件集成在一块芯片上的微型计算机。

早期的单片机主要是采用 CISC 结构,内置不可重写的 ROM 或外置程序存储器,带通用并口和通用串口 (通用的同步/异步收发器),例如 Intel 公司的 8031、8051 等 8 位 MCS-51 系列单片机。目前的单片机许多都采用了 RISC 结构,内置 Flash 程序存储器,例如 Atmel 公司的 AVR 系列单片机。

4/8/16 位单片机具有成本低、使用灵活等特点,其中 4 位单片机以低成本、少引脚等优点而在一些小家电及小玩具中得到广泛应用。但是,随着 8 位单片机成本的进一步降低,4 位单片的成本优势已不明显,因此目前 4 位单片机的市场占有率并不高。

8 位单片机目前依然是市场上低成本单片机的首选产品,也是学习单片机的入门级产品,



虽然它的部分市场份额已被 16 位/32 位单片机取代, 但 8 位单片机具有广泛的开发群体, 同时在一些新拓展的领域中也得到了应用, 因此目前还不会完全被 16 位/32 位单片机取代。8 位单片机种类繁多, 例如 Intel 公司的 MCS-51 系列单片机、Atmel 公司的 AT89/AT90/AVR 系列单片机、飞利浦公司的 80C51 系列单片机、义隆公司 (EMC) EM78 系列单片机 Microchip 公司的 PIC 单片机系列、Winbond (华邦) 的 W78 系列等。

16 位单片机凭借其比 8 位单片机功能强大、比 32 位单片机成本低的优点, 已在仪器仪表、复杂控制以及专用消费电子产品等领域得到了广泛的应用, 但由于低端受到 8 位单片机的挤压, 高端又受到 32 位单片机吞噬, 目前持续上升的 16 位单片机应用势头能保持多久还是个未知数。常见的 16 位单片机有凌阳公司的 SPCE061 单片机、TI 公司的 MSP430 系列 16 位单片机、亿恒公司的 C164CI 位单片机、飞思卡尔的 16 位单片机、Intel 公司的 MCS-196 系列 16 位单片机、Microchip 公司的 dsPIC 16 位单片机等。

2. 32/64 位 RISC 单片机

通常嵌入式系统的微处理器都是由 32 位单片机 (“32 位处理器”) 组成。常见的 32 位单片机有 ARM、MIPS、PowerPC 等。目前, 32 位单片机市场份额从高到低大致是 ARM、MIPS、MicroSPARC、PowerPC 以及其他。其中 ARM 的市场份额超过 80%。

MIPS 单片机即无内部互锁流水级的微处理器 (Microprocessor without interlocked piped stages), 也是一种 RISC 处理器。它最早于 20 世纪 80 年代初期由斯坦福 (Stanford) 大学 Hennessy 教授领导的研究小组研制出来的。1984 年, MIPS 计算机公司成立。1992 年, SGI 收购了 MIPS 计算机公司。1998 年, MIPS 脱离 SGI 成立 MIPS 技术公司, 成为主要设计制造高性能、高档次及嵌入式 32 位和 64 位处理器的厂商。1986 年推出 R2000 处理器。1988 年推出 R3000 处理器。1991 年推出第一款 64 位商用微处理器 R4000。1999 年 MIPS 公司发布 MIPS 32 和 MIPS 64 架构标准。2000 年 MIPS 公司发布了针对 MIPS 32 4Kc 的新版本以及未来 64 位 MIPS 64 20Kc 处理器内核。

中科院计算技术研究所 (ICT) 设计的龙芯与 MIPS64 架构兼容, 已获 MIPS 公司授权。龙芯处理器基于先进的 64 位超标量体系结构, 将与 MIPS 科技公司的 MIPS64 架构兼容。与 MIPS 兼容, 既可以充分利用 MIPS 的应用软件和品牌优势, 也可以获得 MIPS 在设计、验证等方面的全面技术支持。龙芯 2F 将实现 64 位 MIPSIII 指令系统兼容。

3. 32/64 位 CISC 微处理器

虽然 RISC 处理器优点众多、发展飞快, 但它并未能取代 CISC 微处理器, 并且 CISC 微处理器的发展也并未落后于 RISC 处理器, 在许多场合其运算速度以及成本更优于 RISC 处理器。因此, 在某些工控领域以及测量领域, 基于 CISC 微处理器的嵌入式工控板依然是高端应用的首选。

4. DSP 处理器

数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 处理器是针对快速及大量数据处理的专用处理器, 它内部采用程序和数据分开的哈佛结构, 具有专门的硬件乘法器, 广泛采用流水线操作, 提供特殊的 DSP 指令, 可以用来快速地实现各种数字信号处理算法。

DSP 是针对实时数字信号处理而设计的数字信号处理器, 由于它具有计算速度快、体积小、功耗低的突出优点, 非常适合应用于嵌入式实时系统。自从世界上第一片通用 DSP 芯片 TMS320C10 于 1982 年由美国 TI 公司推出以来, DSP 处理器便显示出强盛的生命力。短短二十多年, 世界上许多公司便开发出各种规格的 DSP 处理器, 并广泛应用在通信、自动控制、



雷达、气象、导航、机器人等许多嵌入式实时领域。

下面以 TMS320VC5402（以下简称 C5402）为例子介绍 DSP 处理器的一些特点。C5402 是德州仪器公司（TI）1999 年 10 月推出的性价比极高的定点数字信号处理器，特点如下：

- （1）操作速率达 100MIPS。
- （2）具有先进的多总线结构，三条 16 位数据存储器总线和一条程序存储器总线。
- （3）40 位算术逻辑单元（ALU），包括一个 40 位桶形移位器和两个 40 位累加器。
- （4）一个 17×17 乘法器和一个 40 位专用加法器，允许 16 位带 / 不带符号的乘法。
- （5）整合维特比加速器，用于提高维特比编译码的速度。
- （6）单周期正规化及指数译码。
- （7）8 个辅助寄存器及一个软件栈，允许使用业界最先进的定点 DSP C 语言编译器。
- （8）数据 / 程序寻址空间 16MB，内置 64KB ROM 和 256KB RAM。
- （9）内置可编程等待状态发生器、锁相环（PLL）时钟产生器、两个多通道缓冲串行口、一个 8 位并行与外部处理器通信的 HPI 口、2 个 16 位定时器以及 6 通道 DMA 控制器。
- （10）低功耗，工作电源有 3V 和 1.8V（内核），特别适合电池供电设备。

5. FPGA（SOPC，软核 CPU）

现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array, FPGA），最早由 Xilinx 公司推出，内部由许多陈列排列的 LE（Logic Element）组成，编程多为 SRAM 工艺，基于查找表（Look Up Table）结构，需要外挂配置用的 EPROM。现在也有内部编程采用 Flash 工艺的，掉电后不需重新烧录。

PLD（Programmable Logic Device）是可编程逻辑器件的总称，早期多采用 E^2 PROM 工艺以及基于乘积项（Product Term）结构。

SOPC（System On Programmable Chip）即可编程的片上系统，或者说是基于大规模 FPGA 的单片系统。SOPC 的设计技术是现代计算机辅助设计技术、EDA 技术和大规模集成电路技术高度发展的产物，是由美国 Altea 公司于 2000 年最早提出的，并同时推出了相应的开发软件 Quartus II。SOPC 是基于 FPGA 解决方案的 SOC，与 ASIC 的 SOC 解决方案相比，SOPC 系统及其开发技术具有更多的特色。

软核 CPU 即采用软件（软 IP 核）的方式发行 CPU，软 IP 核通常以可综合的 HDL 提供，因此具有较高的灵活性，并与具体的实现工艺无关，可以移植到不同的半导体工艺中去生产集成电路芯片。利用 IP 核设计电子系统，引用方便，能很容易修改基本元件的功能。其主要缺点是缺乏对时序、面积和功耗的可预见性。用户只需要拿到软 IP 核代码，在 FPGA 上通过配置的方式即可生成一个与硬件 CPU 完全相同 CPU。比较流行的软核 CPU 有 Altera 的 Nios II 以及 Xilinx 公司 MicroBlaze。

目前最有代表性的软核嵌入式系统处理器分别是 Altera 的 Nios 和 Nios II 核，以及 Xilinx 的 MicroBlaze 核。特别是前者，Nios CPU 系统为用户可随意配置和构建的 32 位/16 位总线（用户可选的）指令集和数据通道的嵌入式系统微处理器 IP 核。Altera 的 Nios 核由于其开发工具的简便与完善，以及 FPGA 成本的低廉，已经得到了广大用户的认可。

MicroBlaze 是基于 Xilinx 公司新一代 FPGA 器件的软处理器核，其功能强大，例如，指令加速支持（FSL 接口）、可配置大小指令和数据缓冲器以及多处理器实例等，与强大的外设产品 IP 相结合，使 MicroBlaze 平台的性能远远超出了传统处理架构。它的 FSL 总线是 FIFO 单向链路，可以实现用户自定义 IP 核与 MicroBlaze 内部通用寄存器的高速直连。



1.3 嵌入式系统软件

嵌入式操作系统 EOS (Embedded Operating System) 是一种操作系统, 与大家熟悉的 Windows 有共同的特点, 即这种软件系统具有负责全部软、硬件资源的分配、调度的能力, 控制与协调并发事务的活动, 完成任务调度、同步机制、中断处理、文件等功能。嵌入式特性一方面是指该类型的操作系统可以在嵌入式硬件开发平台上工作; 另一方面也指它具有很强的可拆卸性、很高的实时操作性、很广泛的环境适应性、很明显的专用性、足够的精简性以及很好的稳定性。下面是嵌入式操作系统的特点。

(1) 可拆卸性: 开放性、可伸缩性的体系结构。

(2) 实时操作性: EOS 实时性一般较强, 可用于各种设备控制当中。

(3) 环境适应性: 因为嵌入操作系统硬件平台种类繁多, 使用场合也各不相同, 因此要求嵌入式操作系统具有良好的可移植性和灵活性。

(4) 专用性: 嵌入操作系统一般比较小, 不可能包罗万象, 因此不同嵌入式操作系统有着不同的应用侧重点, 有比较明显的专用性。

(5) 精简性: 一般嵌入式硬件平台的程序存储器、动态存储器、运算速度等硬件资源都比较有限, 因此同时要求嵌入式操作系统要足够的精练。

(6) 稳定性: 嵌入式系统一旦开始运行就不需要用户过多的干预, 这就要负责系统管理的 EOS 具有较强的稳定性。嵌入式操作系统的用户接口一般不提供操作命令, 它通过系统调用命令向用户程序提供服务。

常见的嵌入式系统有: Linux、 μ Clinux、Windows CE、PalmOS、Symbian、eCos、 μ C/OSII、VxWorks、pSOS、Nucleus、ThreadX、Rtems、QNX、INTEGRITY、OSE 以及 C Executive 等。下面分别介绍部分典型的嵌入式操作系统。

1. Linux

嵌入式 Linux 操作系统是一个非常成功并且还具有很大发展潜力的嵌入式操作系统。它的成功来源于多个方面, 其中开放源代码、功能强大以及在 PC 机上应用的广泛是非常重要的原因。

(1) 开放源代码。Linux 操作系统最早于 1991 年由芬兰赫尔辛基大学生 Linus Torvalds 开发并于当年 10 月放在网上分发, 采取了开放源代码的方式, 随后在众多世界顶尖软件工程师的不断修改和完善下, 迅速壮大起来, 并得到了 GNU (自由软件基金会) 的支持。

Linux 内核以及相应的源代码任何人都可以得到, 核心代码的版权完全免费, 并且是在通用公共许可证 (General Public License, GPL) 的条件下由数百个贡献者共同编写的。GPL 允许任何人以任何方式免费分发完整的源码, 进行拷贝, 并且销售或分发它 (有少数例外)。GPL 连同 Linux 内核一起提供。由于嵌入式系统硬件平台繁多, 使用场合各不相同, 因此常需要对嵌入式操作系统进行定制, 这时获得源代码就变得至关重要。

(2) 功能强大。Linux 具有 Unix 的优点, 一方面具有稳定、可靠、安全的特点; 另一方面具有广泛的硬件支持和强大的网络功能。

在内核稳定、安全方面, 由于 Linux 内核通过了长期以及广泛的使用, 并且吸收了 Unix 的优点, 使得 Linux 的内核设计变得非常精巧, 并且安全可靠。在硬件支持方面, Linux 能够支持 x86、ARM、MIPS、ALPHA、PowerPC 等多种体系结构, 目前已经成功移植到数十种



硬件平台。

(3) PC 机上应用广泛。虽然 PC 机版本的 Linux 与嵌入式系统中用的 Linux 在功能上有很大的不同，但内核的差别并不大。PC 机上广泛的应用，使得 Linux 的软件资源十分丰富，每一种通用程序在 Linux 上几乎都可以找到，并且数量还在不断增加。在 Linux 上开发嵌入式应用软件一般不用从零做起，而是可以选择一个类似的自由软件作为原型，进行二次开发。

2. μ Clinux

μ Clinux (Micro-Control-Linux) 即“微型控制 Linux 系统”，主要是专门针对没有 MMU 的 CPU，并且为嵌入式系统做了许多小型化的工作。 μ Clinux 是一个源代码开放的操作系统，完全符合 GNU/GPL 公约的项目。它是 Linux 的一个变异，主要的区别在于两者的内存管理机制和进程调度管理机制，同时为了适应嵌入式应用的需求，它采用了 Romfs 文件系统，并对 Linux 上的 C 语言库 Glibc 做了简化。目前 μ Clinux 支持的硬件平台很多，例如 ARM 7TDMI、MC68EN302、ETRAX、Intel i960 以及 MC68360 等。

MMU (Memory Manage Unit) 即存储器管理单元。它通常由一套硬件来实现，最主要的功能是负责虚拟地址与物理地址的转换，提供硬件机制的内存访问授权。采用 MMU 的优点：一方面，MMU 可以提供对内存空间的保护；另一方面，提供一个物理地址到逻辑地址的转换。物理存储器页面通过映射可保持进程的线程堆栈，使得每个进程都拥有自己的地址空间，避免进程访问内存空间错位。

μ Clinux 系统的特点如下：

- (1) 对硬件平台的要求较低。
- (2) 内核较小、较精简。
- (3) 可在不带 MMU 单元的 CPU 上运行。
- (4) 具有 Linux 的稳定、移植性好、功能强大等优点。
- (5) 与很多 Linux 的应该程序兼容。

3. Windows CE

(1) Windows CE 就是基于掌上型电脑类的电子设备操作系统，其中 CE 中的 C 代表袖珍 (Compact)、消费 (Consumer)、通信能力 (Connectivity) 和伴侣 (Companion)；E 代表电子产品 (Electronics)。Windows CE 是微软开发的一个开放的、可升级的 32 位嵌入式操作系统，是基于掌上型电脑类的电子设备操作系统，可看成是精简的 Windows 95。

Windows CE 借助于桌面操作系统，以及服务器操作系统平台 Windows 的强大功能、人机交互好的优点，具有广泛的开发人员和用户，并且得益于微软公司强大的经济和技术实力，Windows CE 在智能手机、PDA 以及 GPS 等便携类消费产品中的应用潜力不可小视。因此，目前许多商家担心的已不是 Windows CE 是否有市场的问题，而是担心在便携消费产品中是否会再重演类似于 PC 机操作系统领域的垄断局面。

Windows CE 具有多线性、多任务、全优先级管理等功能，支持各种硬件外围设备、网络系统及其他设备，包括键盘、鼠标设备、触板、串行端口、以太网连接器、调制解调器、通用串行总线 (USB) 设备、音频设备、并行端口、打印设备及存储设备 (例如 PC 卡) 等。

Windows CE 是一种可自定义的嵌入式操作系统，适用于各种占用内存很少的设备。OEM 可以使用 Windows CE 设计平台和自定义应用程序，使用户可以获得各种设备的最佳体验，例如手持设备、瘦客户机、逻辑控制器以及各种高级消费类电子产品。

Windows CE 支持超过 1000 个公共 Microsoft Win32 API 和几种附加的编程接口，用户可



利用它们来开发应用程序。Windows CE 的开发平台主要为 Windows CE Platform Builder, 可采用 Microsoft Visual Studio 2005 中的 VC++、VC.NET、VB.NET 以及 C#.NET 等来开发 Windows CE 程序, 也可以采用以前的 EVC 环境或 Pocket PGCC 等来开发 Windows CE 程序。由于 Windows CE 开发大多是大家熟悉的 VC++ 环境以及可调用许多熟悉的 Windows API 函数来设计程序, 因此, Windows CE 的开发速度远快于 Linux 而开发的难度却远低于嵌入式 Linux。

目前, Windows CE 最新版本是 6.0 版本, 支持 ARM 的最新体系, 同时也支持 ExFAT 文件系统, 使 Windows CE 不再受传统 FAT 文件系统的 32GB 单一容量的限制。支持 802.11i、WAP2、802.11e (无线 QoS)、蓝牙 A2DP/AVRCP 的 AES 加密等通信协议, 为无线通信建立了一个稳定、安全以及可靠的应用环境。支持了最新的多媒体能力, 包括以下内容:

- 1) TIFF 编解码器的支持。
- 2) HD-DVD 的解码器支持。
- 3) MPEG-2 解码器。
- 4) 更多的影音编码与格式支持。
- 5) UDF 2.5 格式的支持。
- 6) 虚拟环绕声道的支持。
- 7) 多轨音效的支持。
- 8) 强化 DirectDraw, 可支持电视使用的交错显示模式。
- 9) USB OTG 功能加入, 可作为 USB 的控制端。

(2) Windows Mobile 是基于 Windows CE 内核构建的一种完善的软件平台。与 Windows CE 不同, Windows Mobile 操作系统专为要求特殊硬件配置的设备而设计, 在 Windows Mobile 5.0 之前的版本, Windows Mobile 又分为 Smartphone 和 Pocket PC 两种。

- Smartphone: Smartphone 主要是针对手持电话设备而设计。除了保持 Windows CE 所具有的功能强大、用户界面美观以及操作方便等优点之外, 还增加了许多电话通信、短消息处理等方面的功能, 同时针对电话设备做了优化。
- Pocket PC: Pocket PC 主要是作为一种小型个人计算机而设计, 在文件浏览、数据管理以及消息处理等方面具有很强的性能。另外, 也为某些 Pocket PC 设备提供了电话通信接口。

在 Windows Mobile 5.0 版本, 微软公司按照系统不同的用途分别发布了三个版本: Pocket PC Phone Edition (支持触控屏智能手机)、Smartphone Edition (非触控屏智能手机) 和 Pocket PC Edition (不具备手机功能手持设备)。

在 Windows Mobile 6.0 版本中, 命名方式上进行了重新定位, 采用了与 5.0 版本不同的命名方式: Professional (支持触摸屏智能手机)、Standard (非触控屏智能手机) 和 Classic (不具备手机功能的手持设备)。微软未来的目标是在掌上设备端消除 PPC 与 Smart Phone 的区别, 这一目标的实现由 Windows Mobile 6.0 版本进行过渡, 在这些新旧版本之间可能找到一些等价关系: Pocket PC 等价于 Windows Mobile Classic, Smartphone 等价于 Windows Mobile Standard, 而 Pocket PC Phone Edition 等价于 Windows Mobile Professional。

4. Palm OS

Palm OS 是一种 32 位的嵌入式操作系统, 用于掌上电脑。它的操作界面采用触控式, 几乎所有的控制选项都排列在屏幕上, 使用触控笔便可进行所有操作。Palm 操作系统本身所占



的内存极小, 基于 Palm 操作系统编写的应用程序所占的空间也很小, 通常只有几十千字节。

Palm OS 一度占领 PDA 操作系统 90% 以上市场份额的, 但在 Linux、Symbian、Windows Mobile 等操作系统的强势竞争下, Palm OS 的市场占有份额在不断减少。2005 年 9 月, 从 Palm 独立出来的掌上操作系统软件公司 PalmSource (Palm OS 的持有者), 被日本爱可信 (ACCESS) 公司收购。

5. VxWorks

VxWorks 操作系统是美国风河公司于 1983 年设计开发的一种嵌入式实时操作系统。它主要包括进程管理、存储管理、设备管理、文件系统管理、网络协议及系统应用等部分, 占用很小的存储空间, 支持高度裁减, 保证系统能以较高的效率运行。

VxWorks 操作系统的实时性做得非常好, 其系统本身的开销很小, 进程调度、进程间通信、中断处理等系统公用程序精练而有效, 它们造成的延迟很短。VxWorks 提供的多任务机制中对任务的控制采用了优先级抢占 (Preemptive Priority Scheduling) 和轮转调度 (Round-Robin Scheduling) 机制, 也充分保证了可靠的实时性, 使同样的硬件配置能满足更强的实时性要求, 为应用的开发留下更大的余地。

VxWorks 操作系统由一个体积很小的内核及一些可以根据需要进行定制的系统模块组成。VxWorks 内核最小为 8KB, 即便加上其他必要模块, 所占用的空间也很小, 且不失其实时、多任务的系统特征。由于它的高度灵活性, 用户可以很容易地对这一操作系统进行定制或做适当开发, 来满足自己的实际应用需要。VxWorks 操作系统支持的 CPU 包括: x86、ARM、MIPS、Power PC、Space、ColdFire、68K、R3000 以及 i960 等。

目前 VxWorks 操作系统的应用范围非常广泛, 例如, 通信、军事、航空、航天等对实时性要求极高的领域中。

6. μ C/OS

μ C/OSII 是一个源码公开、可移植、可固化、可裁剪、占先式的实时多任务操作系统。其绝大部分源码是用 ANSI C 写的, 使其可以方便地移植并支持大多数类型的处理器。 μ C/OSII 通过了联邦航空局 (FAA) 商用航行器认证。自 1992 年问世以来, μ C/OS II 已经被应用到数以百计的产品中, 占用很少的系统资源, 并且在高校教学中使用不需要申请许可证。

7. Symbian

Symbian 也被称作 EPOC 系统, 这是最早由 Psion 公司开发的一个专门应用于手机等移动设备的操作系统。1998 年 6 月, 诺基亚发起, 联合摩托罗拉、爱立信、西门子、Sony 和 Psion 等公司联合成立 Symbian OS 机构专门从事于无线操作系统的开发。Symbian OS 的三种产品分别为 Pearl、Quartz 和 Crystal, 依次应用于智能手机、笔式输入通信器和键盘输入通信器。

8. Android

Android 是 Google 开发的基于 Linux 平台的开源手机操作系统。它包括操作系统、用户界面和应用程序, 而且不存在任何以往阻碍移动产业创新的专有权障碍。Google 与开放手机联盟合作开发了 Android, 这个联盟由包括中国移动、摩托罗拉、高通、宏达和 T-Mobile 在内的 30 多家技术和无线应用的领军企业组成。

“开放手机联盟”表示, Android 平台可以促使移动设备的创新, 让用户体验到最优越的移动服务, 同时, 开发商也将得到一个新的开放级别, 更方便地进行协同合作, 从而保障新型移动设备的研发速度。

与 iPhone 相似, Android 采用 WebKit 浏览器引擎, 具备触摸屏、高级图形显示和上网功