



普通高等教育“十一五”电子信息类规划教材

ARM嵌入式系统教程

张 石 主 编
张新宇 鲍喜荣 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”电子信息类规划教材

ARM 嵌入式系统教程

主 编 张 石

副主编 张新宇 鲍喜荣

参 编 佘黎煌 丁 山



机械工业出版社

本书首先引入嵌入式系统的基本概念,介绍了嵌入式系统中广泛使用的 ARM 技术,包括 ARM 处理器的体系结构、寻址方式、指令系统、汇编语言程序和 C 语言程序设计基础。之后介绍了基于 XScale 内核的 PXA270 处理器,以及基于 PXA270 处理器的实验教学系统。然后,以 PXA270 实验教学系统为硬件平台,介绍了嵌入式 Linux 应用程序和驱动程序的设计。最后介绍了三种基于 PXA270 处理器的应用实例的设计方案。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

本书内容全面,实例丰富,所列举的实例全部经过调试。本书可作为高等院校电子信息类专业高年级学生和研究生教材,也可作为嵌入式系统应用工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

ARM 嵌入式系统教程/张石主编. —北京:机械工业出版社, 2008.8
普通高等教育“十一五”电子信息类规划教材
ISBN 978-7-111-24553-7

I. A... II. 张... III. 微处理器, ARM—高等学校—教材 IV. TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 096789 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:王保家 版式设计:霍永明 责任校对:刘志文
封面设计:张静 责任印制:李妍

北京鑫海金澳胶印有限公司印刷

2008 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 19.75 印张 · 490 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-24553-7
定价: 33.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 88379727
封面防伪标均为盗版

前 言

本书以嵌入式系统的开发为主线,全面系统地讲述了嵌入式系统开发的基本知识、基本流程和基本方法。以 Intel 公司的 PXA270 处理器和深圳市亿道电子技术有限公司的 EELIOD 实验教学系统为硬件平台,介绍了嵌入式系统的软硬件开发过程。

本书力求实用,侧重于嵌入式系统的开发过程,力争能够指导学生进行一个完整的嵌入式系统开发。

本书在内容的组织上共分 9 章,各章的具体内容如下:

第 1 章介绍了嵌入式系统开发的基础知识。包括嵌入式系统的概念、特点、应用、组成,以及嵌入式处理器、嵌入式操作系统和嵌入式系统开发工具,全面介绍了嵌入式系统开发的基本知识和概念。

第 2 章介绍了 ARM 体系结构的发展和特征,详细介绍了处理器工作状态、寄存器的组织、异常处理、ARM 存储器映射和 ARM 内核技术等内容。

第 3 章详细讲述了 ARM 处理器的寻址方式、ARM 指令系统中的各种指令,以及指令的应用场合及方法。

第 4 章介绍了 ARM 汇编语言程序设计的基本方法,详细讲解了 ARM 伪操作、伪指令,ARM 汇编语言中的符号、表达式、程序格式,以及 ARM 汇编语言与 C 语言混合编程的方法。

第 5 章简要介绍了 XScale 内核,然后介绍了基于 XScale 内核的 PXA270 处理器的一些特性以及功能模块。

第 6 章介绍了 PXA270 实验教学系统的硬件资源,详细介绍了实验教学系统的硬件设计,包括电源和时钟系统、存储系统、LCD 及触摸屏人机接口系统以及多种通信接口的应用电路。另外,通过介绍三个程序设计实例,给读者提供了 PXA270 实验教学系统的软件设计的方法和步骤。

第 7 章系统地介绍了嵌入式 Linux 操作系统,以及如何在嵌入式 Linux 下开发各种应用程序和设备驱动程序。为了对所介绍的重点知识有更进一步的理解,每一小节都给出了具体的实例。

第 8 章详细介绍了 ARM 开发工具和 ADS 集成开发环境的使用方法,并且给出了一些实例,以便于更好地进行应用程序开发与调试。

第 9 章介绍了三种基于 PXA270 处理器的应用实例的设计方案,包括 3G 手机、基于 PXA270 处理器的嵌入式流媒体播放器以及车载多媒体远程监控服务系统。

本书的编写是在多轮教学实践的基础上完成的。部分内容取材于作者的嵌入式系统科研开发项目、作者指导本科生参加全国大学生电子设计竞赛——嵌入式系统专题竞赛的参赛作品,以及作者参加 ARM 应用技术论文大奖赛获奖论文。

本书内容充实,系统全面,重点突出。阐述循序渐进,由浅入深。各章均安排了丰富的例题、思考题和习题,便于学生自学和自测。

本书配备有配套的实验教程和电子课件, 便于高校开展嵌入式系统教学。

本书的编写得到了东北大学教务处和东北大学研究生院的教学立项支持。

本书的编写得到了机械工业出版社的大力支持和关心。本书的编写还得到了安谋咨询(上海)有限公司、深圳市亿道信息技术有限公司、英特尔(中国)有限公司的大力支持和帮助, 他们为作者提供了大量的技术资料和技术支持。本书在编写过程中, 还引用了参考文献所列论著的有关部分。在此向各公司和论著作者一并表示衷心的感谢。

本书的主编为张石教授, 副主编为张新宇、鲍喜荣, 参编人员有余黎煌、丁山。研究生董建威、赵善国、贾晓楠、冯瑜、尚帅、齐晓龙也参加部分工作。

本书由东北大学王永军教授主审, 东北大学李景华教授、辽宁大学牛斌教授、沈阳航空工业学院张芝贤教授、深圳市亿道信息技术有限公司何章龙工程师参与了本书的评审。在此表示衷心的感谢。

本书配有免费电子课件, 欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

由于作者水平有限, 加上时间仓促, 书中难免有一些错误和不足之处, 恳请各位专家和读者批评指正。

张 石

目 录

前言

第 1 章 嵌入式系统概述 1

- 1.1 嵌入式系统的概念 1
- 1.2 嵌入式系统的特点 2
- 1.3 嵌入式系统的应用 3
- 1.4 嵌入式系统的组成 4
- 1.5 嵌入式处理器 4
- 1.6 嵌入式操作系统 6
- 1.7 嵌入式系统开发工具 11
- 本章小结 13
- 思考题与习题 13

第 2 章 ARM 体系结构 14

- 2.1 RISC 技术和流水线技术 14
 - 2.1.1 计算机体系结构 14
 - 2.1.2 RISC 技术 15
 - 2.1.3 流水线技术 16
- 2.2 ARM 体系结构简介 17
 - 2.2.1 ARM 体系结构的演变 18
 - 2.2.2 ARM 体系结构的特征 19
 - 2.2.3 ARM 体系的变种 20
 - 2.2.4 ARM 系列 22
 - 2.2.5 ARM 存储数据类型 25
- 2.3 ARM 处理器工作状态 26
 - 2.3.1 两种工作状态 26
 - 2.3.2 工作状态的切换 26
- 2.4 ARM 处理器工作模式 26
- 2.5 ARM 处理器寄存器组织 27
 - 2.5.1 ARM 状态下的寄存器组织 27
 - 2.5.2 Thumb 状态下的寄存器组织 30
- 2.6 ARM 异常 31
 - 2.6.1 ARM 异常概述 32
 - 2.6.2 ARM 异常处理 32

- 2.6.3 ARM 异常向量表 37
 - 2.6.4 ARM 异常优先级 38
 - 2.6.5 ARM 异常中断使用的寄存器 38
 - 2.7 ARM 存储器和存储器映射 I/O 39
 - 2.7.1 ARM 体系的存储空间 39
 - 2.7.2 ARM 存储器格式 40
 - 2.7.3 非对齐存储访问操作 40
 - 2.7.4 存储器映射 I/O 41
 - 2.8 ARM 总线技术 41
 - 2.9 ARM 存储系统 42
 - 2.9.1 高速缓冲存储器 Cache 和紧耦合存储器 TCM 42
 - 2.9.2 存储管理 42
 - 2.10 基于 JTAG 的调试系统 43
 - 本章小结 45
 - 思考题与习题 45
- ## 第 3 章 ARM 指令系统 46
- 3.1 ARM 指令集概述 46
 - 3.1.1 指令分类和指令格式 46
 - 3.1.2 ARM 指令的条件码 47
 - 3.1.3 ARM 指令集编码 47
 - 3.2 ARM 指令寻址方式 48
 - 3.2.1 立即寻址 48
 - 3.2.2 寄存器寻址 49
 - 3.2.3 寄存器移位寻址 49
 - 3.2.4 寄存器间接寻址 50
 - 3.2.5 变址寻址 50
 - 3.2.6 多寄存器寻址 51
 - 3.2.7 堆栈寻址 51
 - 3.2.8 块复制寻址 52
 - 3.2.9 相对寻址 53
 - 3.3 ARM 指令 53
 - 3.3.1 跳转指令 53

3.3.2 数据处理指令	56	思考题与习题	133
3.3.3 程序状态寄存器传送指令	66	第 5 章 XScale 内核及 PXA270 处理器	
3.3.4 加载和存储指令	68	简介	135
3.3.5 协处理器指令	75	5.1 XScale 内核简介	135
3.3.6 异常产生指令	77	5.1.1 XScale 内核的特点	135
3.3.7 其他指令	78	5.1.2 XScale 内核与 StrongARM 的	
3.4 Thumb 指令	79	区别	137
本章小结	81	5.2 PXA270 结构及特点	137
思考题与习题	81	5.3 PXA270 存储管理单元	140
第 4 章 ARM 汇编程序设计	83	5.3.1 内存管理单元	140
4.1 ARM 汇编语言语句格式	83	5.3.2 系统存储控制单元	140
4.2 ARM 汇编伪操作	83	5.3.3 DMA 控制器	142
4.2.1 符号定义伪操作	83	5.4 PXA270 时钟及电源管理单元	143
4.2.2 数据定义伪操作	88	5.4.1 时钟管理单元	143
4.2.3 汇编控制伪操作	92	5.4.2 电源管理单元	146
4.2.4 数据帧描述伪操作	95	5.5 PXA270 中断控制器	147
4.2.5 信息报告伪操作	95	5.6 PXA270 I/O 模块	148
4.2.6 其他杂项伪操作	97	5.6.1 GPIO	148
4.3 ARM 汇编语言伪指令	103	5.6.2 专用键盘接口	148
4.4 ARM 汇编语言中的符号	106	5.7 PXA270 串行通信单元	149
4.5 ARM 汇编语言中的表达式	108	5.7.1 USB 主控制器	149
4.6 ARM 汇编语言程序结构	112	5.7.2 USB 设备控制器	149
4.6.1 ARM 映像文件的结构	112	5.7.3 UART 控制器	150
4.6.2 ARM 映像文件各组成部分的地址		5.7.4 快速红外接口	150
映射关系	113	5.7.5 SSP 通信控制器	151
4.6.3 scatter 文件的应用	114	5.7.6 I ² C 总线控制器	151
4.7 汇编语言子程序调用	117	5.8 PXA270 定时器单元	151
4.7.1 子程序调用	117	5.8.1 实时时钟单元	151
4.7.2 ATPCS 准则	118	5.8.2 OS 定时器单元	153
4.8 C 语言和汇编语言混合编程	120	5.8.3 脉冲宽度调制控制器	154
4.8.1 内嵌汇编	120	5.9 多媒体控制单元	155
4.8.2 C 语言和汇编语言互相		5.9.1 AC'97 控制器	155
调用	122	5.9.2 I ² S 控制器	156
4.8.3 ARM C 编译器的特定关		5.9.3 多媒体卡控制器	157
键字	123	5.9.4 记忆棒主机控制器	158
4.9 ARM 汇编语言设计实例	125	5.9.5 视频快速捕捉接口	159
4.9.1 分支结构	125	5.10 移动通信接口	160
4.9.2 循环结构	130	5.10.1 MSL 接口	160
本章小结	133	5.10.2 USIM 接口	161

5.11 LCD 控制器	162	7.3.2 设备驱动程序结构	216
本章小结	162	7.3.3 GPIO 驱动程序设计	219
思考题与习题	163	7.3.4 基于轮询的 UART 驱动程序 设计	225
第 6 章 PXA270 实验教学系统设计及应 用程序设计实例	164	7.3.5 基于中断的 UART 驱动程序 设计	231
6.1 EELIOD XScale PXA270 实验教学系 统资源概述	164	7.4 ARM Linux 下应用程序设计	238
6.2 EELIOD 系统硬件接口设计	166	7.4.1 UART 应用程序设计	238
6.2.1 电源系统设计	166	7.4.2 基于 SOCKET 的网络应用程序 设计	247
6.2.2 存储系统设计	166	7.4.3 USB 摄像头接口应用程序 设计	252
6.2.3 LCD 及触摸屏接口设计	170	7.4.4 Framebuffer 图片显示应用程序 设计	256
6.2.4 多媒体接口设计	173	7.5 嵌入式 GUI 简介	261
6.2.5 通信接口设计	175	本章小结	262
6.2.6 通用 I/O 接口设计	177	思考题与习题	263
6.3 EELIOD 系统程序设计实例	181	第 8 章 ARM ADS 集成开发环境 ..	264
6.3.1 系统引导程序分析	181	8.1 ARM 开发工具及开发环境简介	264
6.3.2 通用 I/O 程序设计实例	183	8.1.1 ARM 开发工具简介	264
6.3.3 LCD 程序设计实例	185	8.1.2 Banyan-U ARM JTAG 仿真 工具	265
本章小结	190	8.1.3 ARM ADS 集成开发环境	268
思考题与习题	190	8.2 工程创建、调试和程序固化	270
第 7 章 嵌入式 Linux	191	8.2.1 工程创建及参数设置	270
7.1 概述	191	8.2.2 使用 ARMulator 来调试简单 程序	281
7.1.1 Linux	191	8.2.3 使用 JTAG 仿真器来调试嵌 入式程序	288
7.1.2 嵌入式 Linux 系统交叉开发 环境	193	8.2.4 Semihosting 调试技术	290
7.1.3 开发工具 GNU 介绍	193	8.2.5 程序的固化	292
7.2 ARM Linux 在 EELIOD 系统上的 移植	197	本章小结	295
7.2.1 ARM Linux 开发环境的 建立	197	思考题与习题	295
7.2.2 ARM Linux 的交叉编译	199	第 9 章 ARM 应用实例	296
7.2.3 ARM Linux 启动代码的编译 及下载	203	9.1 3G 手机	296
7.2.4 ARM Linux 内核的配置与 编译	206	9.1.1 3G 手机简介	296
7.2.5 嵌入式 Linux 的文件 系统	212	9.1.2 3G 手机的功能	297
7.3 ARM Linux 的设备驱动	214	9.1.3 硬件方案	298
7.3.1 Linux 的设备管理	214	9.1.4 软件方案	298
		9.2 基于 PXA270 的嵌入式流媒体	

播放器	299
9.2.1 系统简介	299
9.2.2 嵌入式流媒体播放器的硬件 方案	299
9.2.3 嵌入式流媒体播放器的软件 方案	300
9.3 车载多媒体远程监控服务系统	302
7.4.1 UART 应用设计	378
7.4.2 基于 SOCKET 的网络应用程序 设计	393
7.4.3 基于 TCP 协议的接口应用程序 设计	423
7.4.4 基于 OpenGL 的图形应用程序 设计	428
7.5 嵌入式 GDI 简介	461
本章小结	463
思考题与习题	464
第 8 章 ARM A/D 转换开发环境	464
8.1 ARM 开发工具及开发环境简介	464
8.1.1 ARM 开发工具简介	464
8.1.2 Keil uVision 开发环境	464
8.1.3 ARM A/D 转换开发环境	464
8.2 工程创建、编译和链接	470
8.2.1 工程创建及参数设置	470
8.2.2 使用 ARMulator 来调试程序	481
8.2.3 使用 JTAG 仿真器来调试程序	488
8.2.4 使用 JTAG 仿真器来调试程序	490
8.2.5 程序的固化	492
本章小结	492
思考题与习题	492
第 9 章 ARM 应用实例	496
9.1 3G 手机	496
9.1.1 3G 手机简介	496
9.1.2 3G 手机的功能	497
9.1.3 硬件方案	498
9.1.4 软件方案	498
9.2 基于 PXA270 的嵌入式系统	498

9.3.1 系统简介	302
9.3.2 功能与指标	302
9.3.3 方案设计	303
本章小结	306
思考题与习题	306
参考文献	307
第 7 章 嵌入式 Linux	491
7.1 概述	491
7.1.1 Linux	491
7.1.2 嵌入式 Linux 系统开发	493
7.1.3 开发工具 GDB 介绍	493
7.2 ARM Linux 在 ELIOP 系统上的 移植	497
7.2.1 ARM Linux 开发环境的 建立	497
7.2.2 ARM Linux 的交叉编译	499
7.2.3 ARM Linux 启动代码的编译 及下载	503
7.2.4 ARM Linux 内核的配置	506
7.2.5 嵌入式 Linux 的文档	512
7.3 ARM Linux 的移植	514
7.3.1 Linux 的移植	514

第 1 章 嵌入式系统概述

本章首先从嵌入式系统的概念、特点、应用、组成等几个方面介绍嵌入式系统的基本知识,使学生对嵌入式系统建立起一个完整的概念。然后,介绍嵌入式处理器和嵌入式操作系统,列举了几种典型的嵌入式操作系统。最后对嵌入式系统开发工具进行了介绍,使学生了解如何选择开发工具进行嵌入式系统的开发。

1.1 嵌入式系统的概念

电子计算机诞生于 1946 年。20 世纪 70 年代,出现了微处理器,计算机才出现了历史性的变化。以微处理器为核心的微型计算机以其小型、价廉、高可靠性特点,迅速走出机房;基于高速数值解算能力的微型机,表现出的智能化水平引起了控制专业人士的兴趣,要求将微型机嵌入到一个对象体系中,实现对象体系的智能化控制。例如,将微型计算机经电气加固、机械加固,并配置各种外围接口电路,安装到大型舰船中构成自动驾驶仪或轮机状态监测系统。这样一来,计算机便失去了原来的形态与通用的计算机功能。为了区别于原有的通用计算机系统,把嵌入到对象体系中,实现对象体系智能化控制的计算机,称作嵌入式计算机系统。因此,嵌入式系统诞生于微型机时代,嵌入式系统的嵌入性本质是将一个计算机嵌入到一个对象体系中去。

以往按照计算机的体系结构、运算速度、结构规模、适用领域,将其分为大型计算机、中型机、小型机和微计算机,并以此来组织学科和产业分工,这种分类沿袭了约 40 年。近 10 年来,随着计算机技术的迅速发展,实际情况产生了根本性的变化,例如 20 世纪 70 年代末定义的微型机演变出来的个人计算机(PC),如今已经占据了全球计算机工业的 90% 市场,其处理速度也超过了当年大、中型计算机的定义。随着计算机技术和产品对其他行业的广泛渗透,以应用为中心的分类方法变得更为切合实际,也就是按计算机的嵌入式应用和非嵌入式应用将其分为嵌入式计算机和通用计算机。

通用计算机具有计算机的标准形态,通过装配不同的应用软件,以类同面目出现并应用在社会各个方面,其典型产品为 PC;而嵌入式计算机则是以嵌入式系统的形式隐藏在各种装置、产品和系统中。

根据 IEEE 对嵌入式系统的定义:嵌入式系统是“用于控制、监视或者辅助设备、机器和车间运行的装置”(原文为 devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants)。这主要是从应用对象上加以定义,涵盖了软、硬件及辅助机械设备。

目前,国内普遍认同的嵌入式系统(Embedded Systems)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。

嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术、电子技术和各个行业的具体应用相结

合后的产物，这一点就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。

1.2 嵌入式系统的特点

从某种意义上来说，通用计算机行业的技术是垄断的。占整个计算机行业 90% 的 PC 产业，80% 采用 Intel 的 80x86 体系结构，芯片基本上出自 Intel、AMD、Cyrix 等几家公司。在几乎每台计算机必备的操作系统和文字处理器方面，Microsoft 的 Windows 及 Word 占 80% ~ 90%，凭借操作系统还可以搭配其他应用程序。因此当代的通用计算机工业的基础被认为是由 Wintel（Microsoft 和 Intel 于 20 世纪 90 年代初建立的联盟）垄断的工业。

嵌入式系统则不同，它是一个分散的工业，充满了竞争、机遇与创新，没有哪一个系列的处理器和操作系统能够垄断全部市场。即便在体系结构上存在着主流，但各不相同的应用领域决定了不可能有少数公司、少数产品垄断全部市场。因此嵌入式系统领域的产品和技术，必然是高度分散的，留给各个行业的中小规模高技术公司的创新余地很大。另外，社会上的各个应用领域是在不断向前发展的，要求其中的嵌入式处理器核心也同步发展，这也构成了推动嵌入式工业发展的强大动力。嵌入式系统工业的基础是以应用为中心的“芯片”设计和面向应用的软件产品开发。与通用计算机系统相比，嵌入式系统具有以下几个显著特点：

1. 嵌入式系统是专用的计算机系统

嵌入式系统通常是面向特定任务的，而不同于一般通用 PC 计算平台，是“专用”的计算机系统。

嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的，如果独立于应用自行发展，则会失去市场。嵌入式处理器的功耗、体积、成本、可靠性、速度、处理能力、电磁兼容性等方面均受到应用要求的制约，这些也是各个半导体厂商之间竞争的热点。

和通用计算机不同，嵌入式系统的硬件和软件都必须高效率地设计，量体裁衣、去除冗余，力争在同样的硅片面积上实现更高的性能，这样才能在具体应用对处理器的选择面前更具有竞争力。嵌入式处理器要针对用户的具体需求，对芯片配置进行裁剪和添加才能达到理想的性能，但同时还受用户订货量的制约。因此不同的处理器面向的用户是不一样的，可能是一般用户、行业用户或单一用户。

2. 嵌入式系统的生命周期较长

嵌入式系统和具体应用有机地结合在一起，它的升级换代也是和具体产品同步进行的，因此嵌入式系统产品一旦进入市场，就会有较长的生命周期。嵌入式系统中的软件，一般都固化在只读存储器中，而不是以磁盘为载体，可以随意更换，所以嵌入式系统的应用软件生命周期也和嵌入式产品一样长。另外，各个行业的应用系统和产品，和通用计算机软件不同，很少发生突然性的跳跃，嵌入式系统中的软件也因此更强调可继承性和技术衔接性，发展比较稳定。

嵌入式处理器的发展也体现出稳定性，一个体系一般要存在 8 ~ 10 年的时间。一个体系结构及其相关的片上外设、开发工具、库函数、嵌入式应用产品是一套复杂的知识系统，用户和半导体厂商都不会轻易地放弃一种处理器。

3. 嵌入式系统对软件的要求较高

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也和通用计算机有所不同。

(1) 软件要求固化化存储

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) 软件代码要求高质量、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) 系统软件(OS)的高实时性是基本要求

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,单纯通过提高处理器速度是无法完成和没有效率的,这种任务调度只能由优化编写的系统软件来完成,因此系统软件的高实时性是基本要求。

4. 嵌入式系统需要实时操作系统和专用的开发工具。

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是不能对其中的程序功能进行修改的,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。

通用计算机具有完善的操作系统和应用程序接口(API),是计算机基本组成不可分离的一部分,应用程序的开发以及完成后的软件都在OS平台上运行,但一般不是实时的。嵌入式系统则不同,应用程序可以没有操作系统直接在芯片上运行;但是为了合理地调度多任务,利用系统资源、系统函数以及和专家库函数接口,用户必须自行选配RTOS开发平台,这样才能保证程序执行的实时性、可靠性,并减少开发时间,保障软件质量。

1.3 嵌入式系统的应用

嵌入式技术成为当前微电子技术 with 计算机技术中的一个重要分支。以嵌入式计算机为核心的嵌入式系统是继IT网络技术之后,又一个新的技术发展方向。也使得计算机的分类从以前的巨型机、大型机、小型机、微型机之分变为了通用计算机和嵌入式计算机两大分类。

嵌入式技术的应用更是涉及电信、网络、信息家电、医疗、工业控制、航天、军事等各个领域,并日益广泛。嵌入式技术将成为后PC时代的主宰。

嵌入式系统 在应用数量上远远超过了各种通用计算机,一台通用计算机的外部设备中就包含了5~10个嵌入式微处理器,键盘、鼠标、软驱、硬盘、显示卡、显示器、Modem、网卡、声卡、打印机、扫描仪、数码相机、USB集线器等均是由嵌入式处理器控制的。

品种繁多的电子产品使用嵌入式技术,如MP3、PDA、手机、智能玩具,网络家电、智能家电、车载电子设备等。

在工业和服务领域中,大量嵌入式技术也已经应用于工业控制、数控机床、智能工具、工业机器人、服务机器人等各个行业,正在逐渐改变着传统的工业生产和服务方式。

过去在工业过程控制、数控机床、电力系统、电网安全、电网设备监测、石油化工系统等方面,大部分低端设备主要采用是 8 位单片机。随着技术发展,目前许多设备除了进行实时控制,还须将设备状态、传感器的信息等在显示屏上实时显示,这为嵌入式技术的发展提供了广阔的技术前景。

信息家电将成为嵌入式系统最大的应用领域,只有按钮、开关的电器显然已经不能满足人们的日常需求。具有用户界面,能远程控制、智能管理的电器是未来的发展趋势,如冰箱、空调等的网络化、智能化等。

1.4 嵌入式系统的组成

嵌入式系统是“专用计算机系统”,它具有一般计算机组成的共性,也是由硬件和软件组成。

嵌入式系统的硬件是嵌入式系统软件环境运行的基础,它提供了嵌入式系统软件运行的物理平台和通信接口。嵌入式系统的硬件架构是以嵌入式处理器为中心,配置存储器、I/O 设备、通信模块以及电源等必要的辅助接口组成。

嵌入式系统是“量身定做”的“专用计算机应用系统”,又不同于普通计算机组成,在实际应用中,嵌入式系统硬件配置非常精简,除了微处理器和基本的外围电路以外,其余的电路都可以根据需要和成本进行“裁剪”、“定制化”(Customize),非常经济、可靠。

嵌入式系统硬件核心是嵌入式微处理器,有时为了提高系统的信息处理能力,常常外接 DSP 和 DSP 协处理器(也可内部集成)完成高性能信号处理。

随着计算机技术、微电子技术、应用技术的不断发展和纳米芯片加工工艺技术的发展,以微处理器为核心的集成多种功能的片上系统(SOC, System On Chip)已成为嵌入式系统的核心,在嵌入式系统设计中,要尽可能的选择能满足系统功能接口的 SOC,这些 SOC 集成了大量的外围 USB、UART、以太网、AD/DA、IIS 等功能模块。

嵌入式操作系统和嵌入式应用软件则是整个系统的控制核心,控制整个系统运行、提供人机交互的信息等。

对于功能简单、仅包括应用程序的嵌入式系统一般不使用操作系统,只有应用程序和设备驱动程序。但是当设计较复杂的程序时,可能就需要一个操作系统(OS)来管理、控制内存、多任务、周边资源等等。依据系统所提供的程序界面来编写应用程序,可以大大地减少应用程序员的负担。

对于使用操作系统的嵌入式系统来说,嵌入式系统软件结构一般包含四个层面:设备驱动层、实时操作系统(RTOS)、应用程序接口(API)层、实际应用程序层。由于硬件电路的可裁减性和嵌入式系统本身的特点,其软件部分也是可裁减的。

现代高性能嵌入式系统应用越来越广泛,使用操作系统成为必然的发展趋势。

1.5 嵌入式处理器

嵌入式系统的核心部件是各种类型的嵌入式处理器,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 多种,流行体系结构有 30 多个系列。嵌入式处理器可以分

成下面几类。

1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器 (Embedded Microprocessor Unit, EMPU) 的基础是通用计算机中的 CPU。在应用中, 将微处理器装配在专门设计的电路板上, 只保留和嵌入式应用有关的母板功能, 这样可以大幅度减小系统体积和功耗。为了满足嵌入式应用的特殊要求, 嵌入式微处理器虽然在功能上和标准微处理器基本是一样的, 但在工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面一般都做了各种增强。

和工业控制计算机相比, 嵌入式微处理器具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高的优点, 但是在电路板上必须包括 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。嵌入式微处理器及其存储器、总线、外设等安装在一块电路板上, 称为单板计算机, 如 PC104 等。

嵌入式处理器目前主要有 Aml86/88、386EX、Power PC、68000/ColdFire、MIPS、ARM 系列等。

本书的第 2 章将对 ARM 体系结构进行详细的介绍。

2. 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器 (Microcontroller Unit, MCU) 又称单片机, 顾名思义, 就是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一种微处理器内核为核心, 芯片内部集成 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、WatchDog、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、EEPROM 等各种必要功能和外设。为适应不同的应用需求, 一般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是一样的, 不同的是存储器和外设的配置及封装。这样可以使单片机最大限度地和应用需求相匹配, 功能不多不少, 从而减少功耗和成本。

和嵌入式微处理器相比, 微控制器的最大特点是单片化, 体积大大减小, 从而使功耗和成本下降、可靠性提高。微控制器是目前嵌入式系统工业的主流。微控制器的片上外设资源一般比较丰富, 适合于控制, 因此称微控制器。

嵌入式微控制器目前的品种和数量最多, 目前国内比较具有代表性的 8/16 位通用系列包括: Intel 公司的 8051/96 系列, Freescale 公司的 MC68HC08/12、MC9S08/12 系列, Microchip 公司的 PIC 系列, Atmel 公司的 AVR 系列, TI 公司的 MSP430 系列, Cygnal 公司的 C8051F 系列。目前 MCU 占嵌入式系统约 70% 的市场份额。

3. 嵌入式 DSP 处理器

DSP 处理器对系统结构和指令进行了特殊设计, 使其适合于执行 DSP 算法, 编译效率较高, 指令执行速度也较快。在数字滤波、FFT、谱分析等方面 DSP 算法正在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 (Embedded Digital Signal Processor, EDSP)。嵌入式 DSP 处理器有两个发展来源, 一是 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; 二是在通用单片机或 SoC 中增加 DSP 协处理器, 例如 Intel 的 MCS-296 和 Infineon (Siemens) 的 TriCore。

推动嵌入式 DSP 处理器发展的另一个因素是嵌入式系统的智能化, 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、实时语音解压

系统,虚拟现实显示等。这类智能化算法一般都是运算量较大,特别是向量运算、指针线性寻址等较多,而这些正是 DSP 处理器的长处所在。

嵌入式 DSP 处理器比较有代表性的产品是 TI 公司的 TMS320 系列,ADI 公司的 Blackfin、SHARC、TigerSHARC、ADSP-21xx 系列, Freescale 公司的 DSP56000 系列。TMS320 系列处理器包括用于控制的 C2000 系列,移动通信的 C5000 系列,以及性能更高的 C6000 系列。

4. 嵌入式片上系统

随着 EDA 的推广和 VLSI 设计的普及化,及半导体工艺的迅速发展,在一个硅片上实现一个更为复杂的系统的时代已来临,这就是片上系统(SOC)。各种通用处理器内核将作为 SOC 设计公司的标准库,和许多其他嵌入式系统外设一样,成为 VLSI 设计中一种标准的器件,用标准的 VHDL 等语言描述,存储在器件库中。用户只需定义出其整个应用系统,仿真通过后就可以将设计图交给半导体工厂制作样品。这样除个别无法集成的器件以外,整个嵌入式系统大部分均可集成到一块或几块芯片中去,应用系统电路板将变得很简洁,对于减小体积和功耗、提高可靠性非常有利。

1.6 嵌入式操作系统

嵌入式操作系统是随着嵌入式系统的发展而出现的,它的出现大大推动了嵌入式系统的发展。嵌入式操作系统是一种支持嵌入式系统应用的操作系统软件,是嵌入式系统(包括硬,软件系统)极为重要的组成部分。它具有通用操作系统的基本特点,包括与硬件相关的底层驱动软件、系统内核、设备驱动接口、通信协议、图形界面、标准化浏览器等,能够有效管理越来越复杂的系统资源;能够把硬件虚拟化,使得开发人员从繁忙的驱动程序移植和维护中解脱出来;能够提供库函数、驱动程序、工具集以及应用程序。但它又有别于通常意义上的操作系统,通常来说,嵌入式系统具有体积小、可裁减、可靠性高等特征,大多数具有实时性强的特点。与通用操作系统相比,嵌入式操作系统在系统实时高效性,硬件的相关依赖性,软件固态化以及应用的专用性等方面具有较为突出的特点。

嵌入式操作系统是嵌入式系统的灵魂,它的出现大大提高了嵌入式系统开发的效率,减少了系统开发的总工作量,而且提高了嵌入式应用软件的可移植性。

嵌入式操作系统是嵌入式应用软件的基础和开发平台,它是一段嵌入在目标代码中的软件,用户的其他应用程序都建立在操作系统之上。嵌入式操作系统是一个可靠性和可信度很高的实时内核,将 CPU 时间、中断、I/O、定时器等资源都包装起来,留给用户一个标准的 API,并根据各个任务的优先级,合理地在不同任务之间分配 CPU 时间。

实时操作系统(RTOS)是针对不同处理器优化设计的高效率实时多任务内核,优秀的、商品化的 RTOS 可以面对几十个系列的嵌入式处理器(MPU、MCU、DSP、SOC 等)提供类同的 API 接口,这是 RTOS 基于设备独立的应用程序开发基础。因此基于 RTOS 上的 C 语言程序具有极大的可移植性。据专家测算,优秀 RTOS 上跨处理器平台的程序移植只需要修改 1%~5% 的内容。在 RTOS 基础上可以编写出各种硬件驱动程序、专家库函数、行业库函数、产品库函数,和通用性的应用程序一起,可以作为产品销售,促进行业内的知识产权交流,因此 RTOS 又是一个软件开发平台。

大多数嵌入式系统应用在实时环境中,因此嵌入式操作系统跟 RTOS 系统密切联系在一起。

嵌入式系统一般具有实时特点。所谓实时系统,是指一个优先等级高的任务能够获得立即的、没有延迟的服务,它不需要等候任何其他任务,而且在得到 CPU 的使用权后,它可以一直执行到工作结束或是有更高等级的进程出现为止。

一般操作系统只注重平均性能,如对于整个系统来说,所有任务的平均响应时间是关键,而不关心单个任务的响应时间。与之相比,嵌入式实时操作系统最主要的特征是性能上的“实时性”,也就是说系统的正确性不仅依赖于计算的逻辑结果,也依赖于结果产生的时间。

为了满足嵌入式系统的需要,嵌入式操作系统必须包括操作系统的一些最基本的功能,如中断处理与进程调度,用户可以通过 API 来使用操作系统。

RTOS 可以根据实际应用环境的要求对内核进行剪裁和重新配置,组成可根据实际的不同应用领域而有所不同。但以下几个重要组成部分是不太变化的:实时内核、网络组件、文件系统和图形接口等。

嵌入式操作系统可以作为嵌入式系统的软件开发平台。它最关键的部分是实时多任务内核,它的基本功能包括任务管理、定时器管理、存储器管理、资源管理、事件管理、系统管理、消息管理、队列管理、旗语管理等,这些管理功能是通过内核服务函数形式交给用户调用的,也就是 RTOS 的 API。

RTOS 的引入,解决了嵌入式软件开发标准化的难题。随着嵌入式系统中软件比重不断上升、应用程序越来越大,对开发人员、应用程序接口、程序档案的组织管理成为一个大的课题。引入 RTOS 相当于引入了一种新的管理模式,对于开发单位和开发人员都是一个提高。

基于 RTOS 开发出的程序,具有较高的可移植性,实现 90% 以上设备独立,一些成熟的通用程序可以作为专家库函数产品推向社会。嵌入式软件的函数化、产品化能够促进行业交流以及社会分工专业化,减少重复劳动,提高知识创新的效率。

嵌入式工业的基础是以应用为中心的芯片设计和面向应用的软件开发。实时多任务操作系统进入嵌入式工业的意义不亚于历史上机械工业采用三视图的贡献,对嵌入式软件的标准化和加速知识创新是一个里程碑。

目前,商品化的 RTOS 可支持从 8 位的 8051 到 32 位的 ARM、PowerPC 及 DSP 等几十个系列的嵌入式处理器。

嵌入式操作系统的种类繁多,但大体上可分为两种:商用型和免费型。

目前商用型的嵌入式操作系统主要有 VxWorks、Windows CE、Psos、Palm OS、OS-9、LynxOS、QNX、LYNX 等。它们的优点是功能稳定、可靠,有完善的技术支持和售后服务,而且提供了如图形用户界面和网络支持等高端嵌入式系统要求的许多高级的功能。缺点是价格昂贵且源代码封闭性,这大大限制了开发者的积极性。

目前免费型的嵌入式操作系统主要有 Linux 和 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$,它们在价格方面具有很大的优势。比如嵌入式 Linux 操作系统以价格低廉、功能强大、易于移植而且程序源码全部公开等优点正在被广泛采用,成为新兴的力量。下面介绍几种典型的嵌入式操作系统。

1. 嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 是一个可裁减的、源码开放的、结构小巧、可剥夺型的实时多任务内核，主要面向中小型嵌入式系统，具有执行效率高、占用空间小、可移植性强、实时性能优良和可扩展性强等特点。

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 中最多可以支持 64 个任务，分别对应优先级 0~63，其中 0 为最高优先级。实时内核在任何时候都是运行就绪了的最高优先级的任务，是真正的实时操作系统。

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 最大程度上使用 ANSI C 语言开发，现已成功移植到近 40 多种处理器体系上。

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 结构小巧，最小内核可编译至 2KB（这样的内核没有太大实用性），即使包含全部功能如信号量、消息邮箱、消息队列及相关函数等，编译后的 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 内核也仅有 6~10KB，所以它比较适用于小型控制系统。

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 具有良好的扩展性能，比如系统本身不支持文件系统，但是如果需要的话也可自行加入文件系统的内容。

2. 嵌入式操作系统 Windows CE

Windows CE 是针对有限资源的平台而设计的多线程、完整优先权、多任务的操作系统，但它不是一个硬实时操作系统。

高度模块化是 Windows CE 的一个鲜为人知的特性，这一特性有利于它对掌上电脑到专用的工业控制器的用户电子设备进行定制。

Windows CE 操作系统的基本内核需要至少 200KB 的 ROM，它支持 Win32 API 子集、多种用户界面硬件、多种的串行和网络通信技术、COM/OLE 和其他的进程间通信的先进方法。Microsoft 公司为 Windows CE 提供了 Platform Builder 和 Embedded Visual Studio 开发工具。

Windows CE 有五个主要的模块：

- 内核模块：支持进程和线程处理及内存管理等基本服务；
- 内核系统调用接口模块：允许应用软件访问操作系统提供的服务；
- 文件系统模块：支持 DOS 等格式的文件系统；
- 图形窗口和事件子系统模块：控制图形显示，并提供 Windows GUI 界面；
- 通信模块：允许同其他的设备之间进行信息交换。

Windows CE 嵌入式操作系统最大的特点是能提供与 PC 类似的图形界面和主要的应用程序。

Windows CE 嵌入式操作系统的界面显示大多数在 Windows 里出现的标准部件，包括桌面、任务栏、窗口、图标和控件等。

这样，只要是对 PC 上的 Windows 比较熟悉的用户，可以很快地使用基于 Windows CE 嵌入式操作系统的嵌入式设备。

3. 嵌入式操作系统 Linux

Linux 类似于 UNIX，是一种免费的、源代码完全开放的、符合 POSIX 标准规范的操作系统。

Linux 能够自由传播并继承了 UNIX 内核，是对 UNIX 的简化和改进，它既保留了 UNIX 系统的高安全性，同时也使其操作更加简单方便，从而使单机用户也可以使用。UNIX 内核指的是操作系统底层的核心程序代码。

因为 Linux 本身脱胎于 UNIX 系统，所以 Linux 程序与 UNIX 程序是十分相似的。事实