

重点大学计算机教材



华章教育

嵌入式系统 基础教程

俞建新

南京大学

王健

东南大学

宋健建

南京大学

编著

为教师配有电子教案



机械工业出版社
China Machine Press

重点大学计算机教材

TP368.1/430

2008

嵌入式系统 基础教程

俞建新
南京大学

王健
东南大学

宋健建
南京大学

编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书全面介绍了 32 位嵌入式系统的基础理论和知识,教学重点是基于 ARM 处理器的 32 位嵌入式硬件平台。主要内容包括:嵌入式系统的基本概念、可编程逻辑器件(FPGA)和知识产权(IP)核基础、低功耗原理;嵌入式微处理器特色硬件技术、嵌入式调试方法;ARM 处理器体系结构、ARM 寻址方式和 ARM 指令集、ARM 汇编语言程序设计和 ARM 开发工具;嵌入式处理器的中断控制、DAM 控制和时间管理;嵌入式存储器、嵌入式总线、嵌入式接口和嵌入式常用外部设备;实时系统和实时操作系统、实时系统常用调度算法、嵌入式系统的引导加载程序、嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 。

本书可以作为高等院校计算机专业、嵌入式专业、电子专业以及其他相关专业的本科生或者研究生的嵌入式系统课程教材,也可以作为嵌入式开发技术人员的技术培训教材或者开发参考书。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统基础教程/俞建新等编著. —北京:机械工业出版社, 2008.1
(重点大学计算机教材)

ISBN 978-7-111-22944-5

I. 嵌… II. 俞… III. 微型计算机—系统设计—高等学校—教材 IV. TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 186616 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:朱 劼

三河市明辉印装有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 24.5 印张

标准书号: ISBN 978-7-111-22944-5

定价: 42.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

前言

近十年以来,嵌入式系统技术和嵌入式产品发展势头迅猛,其应用领域涉及通信产品、消费电子、汽车工业、工业控制、信息家电、国防工业等各个方面。目前,嵌入式产品在IT产业以及电子工业的经济总额中所占的比重越来越大,对国民经济增长的贡献日益显著。随着手机、媒体播放器、PDA、数码相机和机顶盒等嵌入式产品的普及,嵌入式系统的知识在广大民众中间的传播也越来越广泛。现在每年有许多IT公司投入大量科研力量研发嵌入式新产品,产业界每年都需要大量的受过良好教育的嵌入式系统开发人才。出于对嵌入式高科技知识的追求,广大在校学生纷纷选修嵌入式系统课程,以获得嵌入式系统的理论知识和开发技能。教育界也积极地推动嵌入式系统教学质量和水平的提高。

在整个社会对嵌入式系统研发人才需求大增的背景下,本书的三位作者均从2002年开始着手准备嵌入式系统的教学工作,并且于2004年在南京大学计算机系和软件学院及东南大学计算机系正式开设并讲授嵌入式系统课程。到2007年为止,作者们在嵌入式系统课程上已经培养出了大约2000名修课学生。

2006年春季,在几年的教学实践和科研成果的基础上,大家经过讨论决定编写一本面向本科生和硕士研究生的嵌入式系统基础教材,并确立了这本书的基本编写原则。

1)应当以硬件基础为主,把后继教材中的知识点所涉及的大多数硬件知识讲深讲透,以便读者掌握好底层嵌入式开发的技能,为将来进一步学习嵌入式技术打好基础。

2)在知识传授方面,做到合理衔接、循序渐进,力求做到其他课程讲授过的内容不再在这套教材中简单地重复出现。

3)对于其他已在前导课程讲授且与嵌入式系统基础课程相重叠的知识点,通过对比和补足的方式加以讲解。例如,DMA输入输出方式在计算机组成原理和微机原理与接口课程中都讲解过了,在嵌入式系统课程中,我们将通过对比的方式简明扼要地介绍嵌入式系统中的DMA机制与使用方法,从而消除学生的重复感,使之学深学透。

4)尽可能提高抽象度。例如,嵌入式处理器有多种体系结构,它们同PC机的x86处理器体系结构均有所不同。我们把这些嵌入式处理器的共有特点抽象出来,有利于读者举一反三,深入理解嵌入式处理器不同于通用处理器的主要方面。

本书的主要特点

- 本书中阐述的知识点主要是在计算机组成原理和微机原理与接口技术这两门本科生课程之上的延续,涵盖嵌入式系统技术领域的主要概念和知识点,力求做到阐明无误、表达清楚。
- 从微电子学开始对涉及嵌入式系统的知识点进行讲解,例如知识产权核、低功耗原理和Flash存储单元结构等。这使得本书的嵌入式系统知识基础扎根于底层电路之上。
- 以ARM处理器为嵌入式硬件平台核心,兼顾其他体系结构的嵌入式处理器,全面系统地介绍嵌入式系统硬件理论和知识,包括常用嵌入式处理器、常用嵌入式存储器、常用嵌入式总线、常用嵌入式接口和常用嵌入式外部设备。

- 原理介绍、软件硬件接口介绍、电路连接介绍和应用编程介绍并重。除了把每一个重要的概念讲解清楚之外，还力求做到理论与实践相结合，并给出大量的编程范例。这些范例都是经过调试通过的，覆盖了很多典型的嵌入式程序设计。
- 概括介绍嵌入式操作系统的基础知识，包括实时系统、嵌入式操作系统的基本特点、RTOS 调度算法、启动程序 Bootloader 和最小的实时嵌入式操作系统内核 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 。
- 有些内容是选修选讲内容，在标题上用 * 号标记。使用本书的教师可以根据课时计划和学生的知识基础对这些内容加以取舍。

教学建议

- 1) 本书主要用于本科生教学，硕士生教学可以酌情使用。
- 2) 第 2 章是微电子专业学生必修的章节，其他专业的学生可以选学。
- 3) 如果课时数大于 72 学时(授课课时 48，实验课时 24)，则可分为两个阶段讲授。第一阶段在课堂讲授第 1~5 章，第二阶段在课堂讲授第 6~9 章并与实验同步进行。如果课时数小于 54 小时(授课课时 36，实验课时 18)，则可以略去第 2、9 章不讲，并且在讲授第 6、7、8 章时同步进行实验。

本书的教学资源

本书的实例程序、教学课件、实验指导可以从华章网站(www.hzbook.com)下载。

作者分工

本书由俞建新编制提纲，并撰写了第 2、3、4、5、7、8、9 章，王健撰写了第 1 章，宋健撰写了第 6 章。俞建新负责全书的统调工作。

致谢

南京大学计算机系张福炎、陈道蓄、陈立军、周根林教授和王崇骏副教授为本书的编写提供了很好的指导性建议；南京大学计算机系杨献春教授和陆庆文副教授为本书的实验范例编写提供了良好的实验环境。南京大学的黄滨、孙睿、吴亚琦、胡琰华、黄蓉、邢向磊、范爱华、娄孝祥、赵凤英、赵伟明、张国斌、赵红玉和魏文宁等同学参加了本书的部分范例程序的编写、调试工作以及部分文稿校对工作。近几年来，ARM 中国公司总裁谭军先生和费浙平先生一直在为作者们开展嵌入式系统教学提供技术资料和业务指导。作者在此也向他们表示衷心的感谢。

编者

2007 年 12 月于中国·南京

目 录

前言

第 1 章 嵌入式系统概论	1	2.3.3 IP 核标准化基础	34
1.1 嵌入式系统概述	1	2.3.4 IP 核形态与优选原则	37
1.2 嵌入式系统发展简史	2	2.4 IP 核互连与片上总线	38
1.2.1 微处理器的发展	2	2.4.1 IP 核互连的拓扑结构	38
1.2.2 嵌入式系统的发展	3	2.4.2 片上总线	39
1.3 嵌入式系统的特点	3	2.4.3 片上总线 CoreConnect	40
1.4 嵌入式系统的基本分类	4	2.4.4 片上总线 Avalon	40
1.5 嵌入式系统的基本组成	5	2.4.5 五种片上总线的性能比较	41
1.6 嵌入式处理器	7	2.5 低功耗设计的基本原理	42
1.7 嵌入式系统的发展趋势	11	2.5.1 硬件低功耗设计	42
1.7.1 嵌入式系统的现状及主要制约因素	11	2.5.2 软件低功耗设计	43
1.7.2 嵌入式系统的发展方向	12	2.6 本章小结	44
1.8 嵌入式系统的相关研究领域	12	2.7 习题和思考题	44
1.8.1 嵌入式系统的主干学科领域	12	第 3 章 嵌入式微处理器技术基础	46
1.8.2 与嵌入式系统关系密切的技术领域	12	3.1 嵌入式微处理器的典型技术	46
1.9 本章小结	14	3.1.1 I/O 端口统一编址与特殊功能寄存器	46
1.10 习题和思考题	14	3.1.2 哈佛结构	48
第 2 章 可编程逻辑器件与 IP 核	16	3.1.3 桶型移位器	49
2.1 EDA 与可编程逻辑器件	16	3.1.4 正交指令集	51
2.1.1 EDA	16	3.1.5 双密度指令集	52
2.1.2 硬件描述语言	18	3.1.6 看门狗定时器	52
2.1.3 可编程逻辑器件	19	3.1.7 边界对准与端序	54
2.1.4 主流的 CPLD/FPGA 开发工具	22	3.1.8 地址重映射	55
2.1.5 可编程逻辑器件 CPLD/FPGA 的设计流程	23	3.1.9 FIFO 缓冲寄存器	56
2.2 FPGA 应用举例*	25	3.1.10 主存控制器	57
2.2.1 FPGA 应用举例一: 16 位 m 序列伪随机信号发生器	25	3.2 主流嵌入式微处理器	58
2.2.2 FPGA 应用举例二: 扩展的凯撒密码加密器	29	3.2.1 ARM 系列嵌入式微处理器	58
2.3 系统级芯片	33	3.2.2 MIPS RISC 嵌入式微处理器	61
2.3.1 硅知识产权和知识产权核	33	3.2.3 PowerPC 系列嵌入式微处理器	62
2.3.2 系统芯片	33	3.3 嵌入式系统调试技术	64
		3.3.1 指令集模拟器	64
		3.3.2 ROM 仿真器	66
		3.3.3 实时在线仿真	66
		3.3.4 片上调试技术与背景调试模式	67

3.3.5	基于 Angel 的调试方案	68
3.3.6	边界扫描测试技术和 JTAG 接口	70
3.3.7	Nexus 调试标准	77
3.3.8	半主机调试方式	78
3.4	本章小结	79
3.5	习题和思考题	79
第 4 章	ARM 处理器的体系结构和指令集	81
4.1	ARM 体系结构的版本及系列	81
4.1.1	ARM 处理器的体系结构	81
4.1.2	ARM 体系结构版本的变种	82
4.1.3	ARM 体系结构版本的命名规则	83
4.1.4	ARM 处理器核系列	83
4.2	ARM 处理器的结构	85
4.2.1	ARM 处理器的 RSIC 特征	86
4.2.2	流水线	86
4.2.3	ARM 的工作模式和工作状态	90
4.2.4	ARM 寄存器的组织	92
4.3	ARM 存储器的组织	95
4.3.1	ARM 存储器的数据类型和存储格式	95
4.3.2	ARM 的存储体系	96
4.3.3	片内存储器的用法	97
4.3.4	协处理器 CP15	97
4.3.5	存储管理单元	98
4.3.6	保护单元	105
4.3.7	ARM 处理器的 Cache	105
4.3.8	快速上下文切换扩展	107
4.3.9	写缓存区	109
4.4	ARM 处理器的片上总线标准	
	AMBA	109
4.4.1	AMBA 2.0 片上总线的特点	110
4.4.2	AMBA 2.0 片上总线的主控单元和从动单元	110
4.4.3	AMBA 2.0 总线的时序	111
4.4.4	AMBA 3.0——AXI 协议	111
4.5	ARM 处理器核的典型范例:	
	ARM7TDMI	112
4.5.1	复位	112
4.5.2	总线周期	113
4.5.3	ARM7TDMI 处理器的总线优先级	115
4.6	ARM 处理器的寻址方式和指令系统	115
4.6.1	ARM 处理器指令系统的主要特征	115
4.6.2	ARM 指令集的编码格式和语法	116
4.6.3	ARM 处理器的寻址方式	119
4.6.4	ARM 指令的分类说明	123
4.7	ARM 的异常中断处理	132
4.7.1	ARM 的异常中断响应过程	132
4.7.2	从异常中断处理程序返回	133
4.8	本章小结	135
4.9	习题与思考题	136
第 5 章	ARM 汇编语言程序设计	138
5.1	ARM 汇编语言程序的格式	138
5.1.1	预定义寄存器名及内部变量名	138
5.1.2	ARM 汇编语言程序的语句格式	139
5.1.3	ARM 汇编语言程序编写规范	141
5.1.4	ARM 汇编语言指示符	142
5.1.5	ARM 过程调用标准 ATPCS 和 AAPCS	149
5.2	典型 ARM 汇编语言程序举例	151
5.2.1	入门的范例	151
5.2.2	基本结构	153
5.2.3	典型的 ARM 汇编程序范例	157
5.3	ARM 汇编、C 和 C++ 混合编程	163
5.3.1	内嵌汇编	163
5.3.2	C/C++ 与汇编程序的相互调用	165
5.3.3	软中断和半主机方式 ARM 汇编程序设计	169

5.3.4	5 级流水线的互锁问题	173	7.3	时钟电源管理器、实时时钟和脉宽 调制定时器	231
5.4	GNU 格式的 ARM 汇编语言程序 设计	174	7.3.1	S3C44B0X 的时钟电源 管理器	231
5.4.1	GNU 格式的 ARM 汇编语言 程序的设计要点	174	7.3.2	S3C2410X 的实时时钟	233
5.4.2	GNU 格式 ARM 汇编语言 程序举例	176	7.3.3	实时时钟应用程序概要 设计案例	234
5.5	本章小结	177	7.3.4	S3C44B0X 的脉宽调制 定时器	238
5.6	习题与思考题	177	7.4	本章小结	239
第 6 章	ARM 开发工具	180	7.5	习题与思考题	239
6.1	ARM 开发工具概述	180	第 8 章	嵌入式存储器和接口技术	241
6.2	ARM 映像文件格式	180	8.1	嵌入式系统常用的半导体 存储器	241
6.2.1	ELF 文件格式	181	8.1.1	闪速存储器	241
6.2.2	ARM 映像文件的组成	183	8.1.2	静态存储器和同步动态 存储器	252
6.3	ADS 的组成与使用	191	8.2	常用的嵌入式系统总线	259
6.3.1	命令行开发工具	191	8.2.1	I ² C 总线	259
6.3.2	GUI 开发工具	196	8.2.2	SPI 总线接口	262
6.3.3	ADS 实用工具	198	8.2.3	CAN 总线	263
6.4	用 ADS 生成应用程序	199	8.2.4	工业以太网	267
6.4.1	生成简单应用程序 hello	199	8.2.5	PC-104 总线	269
6.4.2	生成函数库 mathlib	202	8.3	常用的嵌入式系统接口	269
6.4.3	生成一个在目标板上运行的 定时器程序	203	8.3.1	UART 接口	270
6.5	RVDS	206	8.3.2	通用输入输出接口	275
6.5.1	RVDS 的组件	206	8.3.3	USB	277
6.5.2	RVDS 使用概览	207	8.3.4	以太网接口	281
6.6	GNU 交叉工具链	208	8.4	嵌入式系统常用的外部设备	290
6.7	本章小结	209	8.4.1	键盘	291
6.8	习题与思考题	209	8.4.2	液晶显示器	293
第 7 章	中断、DMA 和时间控制	211	8.4.3	触摸屏	297
7.1	嵌入式中断控制器	211	8.4.4	无线接入技术	301
7.1.1	嵌入式中断控制器工作 原理	211	8.5	本章小结	308
7.1.2	向量中断与非向量中断的 入口程序编程示例	217	8.6	习题和思考题	308
7.1.3	嵌入式中断应用程序 举例	221	第 9 章	嵌入式操作系统概论	310
7.2	嵌入式 DMA 控制器	225	9.1	实时系统	310
7.2.1	S3C44B0X 的 DMA 控制器	226	9.1.1	什么是实时系统	310
7.2.2	S3C44B0X 的 DMAC 相关 控制寄存器	228	9.1.2	实时系统的属性和指标	311
7.2.3	S3C44B0X 的 DMA 应用程序 举例	228	9.1.3	实时系统的分类	312
			9.2	嵌入式操作系统的特点和分类	313
			9.2.1	嵌入式操作系统的特点	313
			9.2.2	嵌入式操作系统分类	320

9.3	RTOS 常用的调度算法	322	9.5.1	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的主要特点	341
9.3.1	基于优先级的调度算法 ...	322	9.5.2	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的层次	342
9.3.2	时钟驱动调度算法	327	9.5.3	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的代码结构	342
9.3.3	基于比例共享的调度 算法	327	9.5.4	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的内核	346
9.3.4	非周期性任务的调度	329	9.5.5	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的任务调度	350
9.3.5	临界资源和代码临界区 ...	330	9.5.6	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的任务切换	354
9.3.6	优先级反转和对策	330	9.5.7	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的中断处理	355
9.4	启动程序 Bootloader*	332	9.5.8	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的时间管理	356
9.4.1	嵌入式系统的启动方式 ...	333	9.5.9	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的任务间通信 ...	358
9.4.2	Bootloader 的程序结构与 调试	336	9.5.10	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的存储管理	365
9.4.3	Bootloader 人机交互接口 设计	339	9.5.11	$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的移植	366
9.4.4	常用 Bootloader 介绍	340	9.6	本章小结	374
9.5	嵌入式操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$	341	9.7	习题和思考题	374
			附录	术语和缩略语表	376
			参考文献		381

第 1 章 嵌入式系统概论

本章将主要介绍嵌入式系统的定义、特点、组成、分类和发展,对嵌入式系统的核心硬件——嵌入式处理器的分类、特点进行简单描述,并且简要说明嵌入式系统的相关研究领域。

1.1 嵌入式系统概述

1. 嵌入式系统的基本认识

手机、PDA、机顶盒、数码相机、媒体播放器等嵌入式系统产品已经广泛地应用在人们的日常生活和工作中。然而,当谈论到什么是嵌入式系统时,许多人在概念上还比较模糊,往往不能给出一个简明扼要的正确定义。从字面来看,嵌入式系统是计算机软件与计算机硬件集成在一起,并嵌入到应用对象内部的计算机系统。这种系统往往同应用对象技术,如通信技术、传感技术、信号处理技术、控制技术等结合在一起,成为嵌入式系统应用对象的控制中枢。

嵌入式系统具有芯片集成度高、硬件软件最小化、高度自动化、响应速度快以及性能可靠等基本特点,特别适合于要求实时和多任务的场合。从应用角度考察,目前相当一部分嵌入式产品都具有 3C 融合特征,即计算机(computer)、通信(communication)和消费电子(consume electronic)一体化。

从本质上来说,嵌入式系统和嵌入式设备是有区别的。嵌入式系统是一个比 PC 更加小型化的计算机系统,只是它通常被嵌入到应用设备或应用系统中成为一个专用的计算机系统;而嵌入式设备是指某一包含嵌入式系统的专用设备。通常,在典型的嵌入式设备中几乎感觉不到计算机系统的存在,我们日常所见的 PDA、手机、微波炉等都属于嵌入式设备。

2. 嵌入式系统的定义

迄今为止,关于嵌入式系统的定义有很多。例如,“嵌入到对象体系中的专用计算机系统”,它强调嵌入式系统的三个基本要素:嵌入性、专用性与计算机系统;又例如,“一种用于控制、监测或协助特定机器和设备正常运转的计算机”,它强调的是嵌入式计算机的功能。本书采用国内流行的较为完整和规范的定义:嵌入式系统是以应用为中心,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。

嵌入式技术(embedded technology)也是产业界和学术界常用的术语,它指的是嵌入式系统在研发和应用过程中使用的芯片技术、硬件技术和软件技术。由于嵌入式系统日益普及,人们往往还使用更为简洁的术语“嵌入式”,它是嵌入式系统、嵌入式技术或者嵌入式产品的简称,具体含义视场合而定。本书也会使用“嵌入式”这个术语,读者应根据上下文予以理解。

3. 后 PC 时代与无所不在的计算时代

21 世纪,人类进入了所谓的后 PC 时代(post PC era)。在这一时代,WinTel(Windows & Intel)联盟因垄断 PC 技术而占有 IT 产业大部分市场份额长达 20 多年的格局将被改变。后 PC 时代的基本特点是:计算装置无所不在,信息电器普及化和联网化,数据处理多媒体化。

近年来, IT 工程师纷纷在科学研究、工程设计、消费电子以及军事技术等领域的产品创新设计方面采用灵活、高效和高性价比的嵌入式解决方案。嵌入式技术已经成为后 PC 时代 IT 领域的主流研发技术之一。

今天, 嵌入式计算机在应用数量上远远超过了各种通用计算机。嵌入式系统正在逐步渗透到人类社会的各个领域, 我们身边无所不在的嵌入式应用构成了所谓“无所不在的计算时代”。例如, 一台通用计算机的外部设备中包含了多个嵌入式微处理器, 软驱、硬盘、显示器、调制解调器、打印机、扫描仪等均由嵌入式处理器控制。在制造工业、过程控制、通信、仪器、仪表、汽车、船舶、航空、航天、消费类电子产品、军事装备等产业领域, 在产品中配套使用的嵌入式系统均占有举足轻重的产值份额。

1.2 嵌入式系统发展简史

实际上, 嵌入式系统这一术语并不是近几年出现的新名词, 它已经存在了大约半个世纪之久。在早期的工业控制领域, 计算机就已经嵌入到应用对象中了。例如, 20 世纪 60 年代, 它被用于对电话交换进行控制, 当时被称为存储程序控制系统 (stored program control system)。但由于那时的计算机无论是体积、功耗还是价格都难以满足各种设备尤其是小型设备的需求, 因此, 严格意义上的嵌入式系统应该从微处理器出现开始算起。

1.2.1 微处理器的发展

从 20 世纪 70 年代起, VLSI 技术的运用使得我们可以将整个中央处理器集成在一个芯片上。1971 年, Intel 公司生产了世界上第一台 4 位微处理器 Intel4004, 它本身就是为嵌入式应用 (即计算器) 而设计的。它仅提供基本的算术运算功能, 因此不能算作通用计算机。翌年, Intel 公司又研制成功了 8 位微处理器 Intel8008。同 4004 一样, 8008 也是为专门用途而设计的嵌入式微处理器。它们都属于第一代微处理器, 其典型应用是计算器、打字机、微波炉和交通灯控制等。

1974 年, 第二代 8 位微处理器 Intel8080 诞生。作为代替传统复杂电子逻辑电路的器件, 8080 成为诸如字处理机、导航系统以及巡航导弹这样具有可编程、体积小等特点的嵌入式应用的标准微处理器。同时期微处理器的代表性产品还有 Motorola 公司的 M6800、Zilog 公司的 Z80 以及 Intel 公司的 8085 等。

1978 年出现了第三代 16 位微处理器, 其典型代表为 Intel 公司的 8086、Zilog 公司的 Z8000 以及 Motorola 公司的 M68000。第三代微处理器的性能较第二代提高了近 10 倍, 使得微处理器从专用目的微处理器发展成通用微计算机系统的中央处理器。1981 年, IBM 公司推出了基于 8088 (8086 的变种产品, 8 位外部总线) 的个人计算机系统 IBM-PC, 使得计算机进入了 PC 时代。

1983 年, 第四代 32 位微处理器问世, 其典型代表为美国国家半导体公司的 32032、Motorola 公司的 68020、Intel 公司的 80386、i486 等。基于 32 位微处理器的微机系统在性能上可与 20 世纪 70 年代的大、中型计算机相媲美。

从 20 世纪 80 年代起, 随着微电子技术的迅猛发展, 半导体厂商致力于将微处理器、存储器件、I/O 接口、A/D 转换器、D/A 转换器等集成在一个芯片上, 这就是单片机或者称为微控制器 (Micro-Controller Unit, MCU)。作为面向 I/O 设计的微控制器, 单片机在过去的 20 多年间, 被广泛应用于仪器仪表、智能控制、消费电子、军事电子等各种领域。即使在今

天,它依然占据着普及型嵌入式应用的大部分市场份额。

但是,单片机应用只是嵌入式应用的初级阶段,其控制逻辑主要是循环查询的前后台监控程序。随着应用复杂性的提高,如网络、GUI 和多媒体技术的广泛使用,迫切需要更高性能的微处理器以及操作系统的支持。于是,高性能的 32 位 RISC 微处理器、嵌入式操作系统、数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)以及片上系统(System on a Chip, SoC,有时也写成 SOC,它是集成了微计算机的大多数功能模块的芯片,也叫做系统级芯片)等便成为高端嵌入式应用的主要组成部分。

1.2.2 嵌入式系统的发展

真正意义上的嵌入式系统是从 20 世纪 70 年代随着微处理器的出现发展起来的。伴随着微处理器的发展,嵌入式系统至今已经有 30 多年的历史,它大致经历了以下 4 个发展阶段:

第一阶段是以 4 位到 8 位单片机为核心的可编程控制器系统,同时具有检测、伺服、指示设备相配合的功能。这一阶段系统主要的特点是:结构和功能相对单一、效率较低、存储容量较小、几乎没有人机交互接口,其应用范围主要局限于一些专业性极强的工业控制系统中,一般没有操作系统支持,通过汇编语言对系统进行直接控制。尽管这类系统使用简单方便、价格便宜,但是,对于需要大容量存储介质、友好的人机交互界面、远距离或无线通信的高性能现代化工业控制和后 PC 时代新兴的信息家电等领域而言,已远远不能满足要求。

第二阶段是以 8 位到 16 位嵌入式中央处理器(CPU)为基础,以简单操作系统为核心的嵌入式系统。这一阶段系统的主要特点是:CPU 种类繁多、通用性较弱、系统开销小、操作系统的兼容性和扩展性较低、应用软件较为专业、用户界面不够友好以及网络功能较弱。这种嵌入式系统的主要任务是提高应用对象的智能化水平,如智能化仪器仪表、智能化家电等。

第三阶段是以 32 位 RISC 嵌入式中央处理器加嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统。这一阶段系统的主要特点是:嵌入式操作系统能够运行于各种不同类型的处理器之上,操作系统内核精练小巧、效率高、模块化程度高,具有文件和目录管理,支持多任务处理,支持网络操作,具有图形窗口和用户界面等功能,具有大量的应用程序接口以及各种组件,开发程序简单、高效,能满足日益复杂的应用需求。这也是我们现在通常所说的典型嵌入式系统,然而,它在通用性、兼容性和扩展性方面仍有待改进。

第四阶段是以基于 Internet 接入为标志的嵌入式系统,这是一个正在迅速发展的阶段。随着网络在人们生活中的地位日益重要,越来越多的应用需要采用支持 Internet 接入功能的嵌入式系统,如手机、PDA,甚至电视机、电冰箱等传统家电都需要上网,所以在嵌入式系统中使用网络操作系统将成为今后的发展趋势。

1.3 嵌入式系统的特点

如前所述,嵌入式系统也是一个计算机系统,但与通用计算机系统相比,它具有以下一些特点:

- 与应用密切相关,执行特定功能:任何一个嵌入式系统都和特定应用相关,用途固定。嵌入式系统的硬件和软件都必须高效率地设计,要具备良好的软、硬件可裁剪性,力争在满足应用目标的前提下使系统最精简。
- 具有实时约束:嵌入式系统都是实时系统,都有时限要求。若违反实时约束则可能

使系统瘫痪或不可用。特别是对于一些强实时嵌入式系统,如军事电子、飞机控制、核电控制等,如违反实时约束有可能会造成非常严重的后果。

- 嵌入式操作系统一般为多任务实时操作系统(Real Time Operating System, RTOS)。由于嵌入式系统处理的外部事件通常有多个,而且具有分布和并发的特点,因此要求嵌入式操作系统必须是多任务实时操作系统。
- 系统可靠性要求高:嵌入式系统使用环境不定,甚至要在非常恶劣的环境下工作,但嵌入式系统对软件故障的容错能力比PC差很多,因此需要有相应的可靠性保障机制,如看门狗定时器(Watchdog, WDG)等。
- 具有功耗约束:很多嵌入式系统采用电池供电,因此对功耗有严格要求,从而使得嵌入式系统的硬件和软件必须仔细设计以满足其功耗约束。
- 需要交叉开发环境和调试工具:嵌入式系统本身不具备自举开发能力,即使在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和测试。这些工具和环境一般是基于通用计算机上的硬件设备、各种逻辑分析仪、混合信号示波器以及专门的软件开发和调试工具等。
- 系统资源紧缺:由于对成本、体积、功耗有严格要求,使得嵌入式系统的资源(如内存、I/O接口)都非常紧缺,因此软、硬件都需仔细设计以充分利用有限的系统资源。

1.4 嵌入式系统的基本分类

嵌入式系统广泛应用于人类社会的各个行业和领域,其数量大、品种多、规格复杂。科学地对嵌入式系统进行分类,有助于有效、简明地描述一个具体的嵌入式产品的属性和特征。为此,我们按照以下方式对嵌入式系统分类。

1. 按嵌入式系统的技术复杂度分类

根据控制技术的复杂度可以把嵌入式系统分为三类:

- 1) 无操作系统控制的嵌入式系统(Non-OS control Embedded System, NOSES)。
- 2) 小型操作系统控制的嵌入式系统(Small OS control Embedded System, SOSES)。
- 3) 大型操作系统控制的嵌入式系统(Large OS control Embedded System, LOSES)。

所谓无操作系统控制的嵌入式系统,一般认为其硬件主体由IC芯片,或者4位/8位单片机构成。这一类嵌入式系统的控制软件不含操作系统。

小型操作系统控制的嵌入式系统一般指的是硬件主体由8位/16位单片机或者32位处理器构成。其控制软件主要由一个小型嵌入式操作系统内核(例如,μC/OS-II或TinyOS)和一个小规模的应用程序组成。小型嵌入式操作系统内核的源代码一般不超过1万行。这类嵌入式系统的操作系统功能模块不齐全,并且无法为应用程序开发提供一个较为完备的应用程序编程接口。此外,它没有图形用户界面(GUI)或者图形用户界面功能较弱,数据处理和网络通信功能也比较弱。

大型操作系统控制的嵌入式系统的硬件主体通常由32位/64位处理器、32位软核处理器或者32位片上系统组成。控制软件通常包含一个功能齐全的嵌入式操作系统(例如,VxWorks、RTLinux、Symbian、Windows CE、ECOS等)以及封装良好的API,其实时性能较强,具备DSP处理能力,具备良好的图形用户界面和网络互联功能,可运行多种数据处理

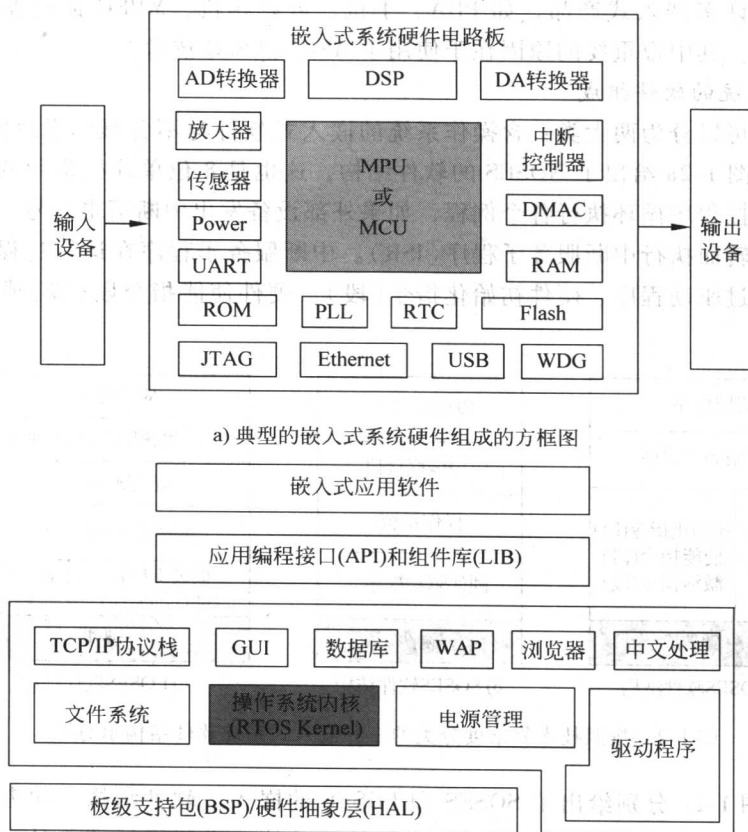
功能较强的应用程序。

2. 按嵌入式系统的用途分类

按照应用领域可以把嵌入式系统分为军用、工业用和民用三大类。其中，军用和工业用嵌入式系统对运行环境的要求比较苛刻，往往要求耐高温、耐湿、耐冲击、耐强电磁干扰、耐粉尘、耐腐蚀等。民用嵌入式系统的需求特点往往体现在另外一些方面，如易于使用、易维护和标准化程度高。

1.5 嵌入式系统的基本组成

嵌入式系统通常是由嵌入式硬件系统和嵌入式软件系统两部分组成的。图 1-1a 和图 1-1b 分别给出了嵌入式系统的硬件组成和软件结构图。由于嵌入式系统的应用相关性特点，不同嵌入式系统的具体硬件和软件构成具有一定的差异性。但从宏观上来看，一般嵌入式系统的软硬件组成具备一定的共性。



b) 典型的嵌入式系统软件结构示意图

图 1-1 嵌入式系统基本结构图

1. 嵌入式系统的硬件组成

嵌入式系统的硬件一般包括嵌入式微处理器(或嵌入式微控制器)、外围电路和外部设备。其中嵌入式微处理器是核心，有微处理器(Micro Processing Unit, MPU)、微控制器

(MCU)、数字信号处理器(DSP)等几种类型,其具体介绍参见1.6节。外围电路主要包括:各种I/O接口控制器电路(例如,中断控制器、DMA控制器、液晶屏控制器、JTAG调试接口、串口、以太网口、USB、A/D或D/A转换器等)、时钟电路、各式总线等。外部设备主要包括:RAM、ROM、闪存(Flash Memory)^①、键盘、发光二极管(LED)、液晶屏(LCD)、触摸屏、手写笔等。

随着半导体技术的迅猛发展,硬件设计越来越多地采用SoC技术和专用集成电路(Application-Specific Integrated Circuit, ASIC)技术来实现,或者采用具有知识产权(Intellectual Property, IP)的标准部件或半定制设计来实现,特别是市场容量大的产品更是如此。在许多嵌入式硬件设计中,一些专用控制逻辑越来越多地采用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)或复杂可编程逻辑器件(Complex Programmable Logic Device, CPLD)芯片来设计。一些专用功能,如加密、图像压缩、视频编解码,也采用基于SoC技术的芯片实现。从板级电路设计到处理器加ASIC或SoC已成为硬件设计的潮流和发展趋势。现在,许多嵌入式产品,如PDA、手机、数码相机、MPEG播放器等虽然体积小,但功能强大,其中很重要的原因在于使用了ASIC和SoC技术。

2. 嵌入式系统的软件组成

嵌入式软件可以分为两大类:含操作系统的嵌入式软件与不含操作系统的嵌入式软件。如图1-2所示,图1-2a给出了NOSES的软件结构,这也是8位单片机常用的软件结构。在这种结构中,监控程序循环执行各个例程,如果外部设备发出中断请求信号,则立即停止监控程序的运行,转而执行中断服务子程序(ISR)。中断服务子程序在运行过程中,如果需要访问硬件,则通过驱动程序、硬件初始化指令(段)、硬件使能指令段(段)或者硬件激活指令(段)进行。

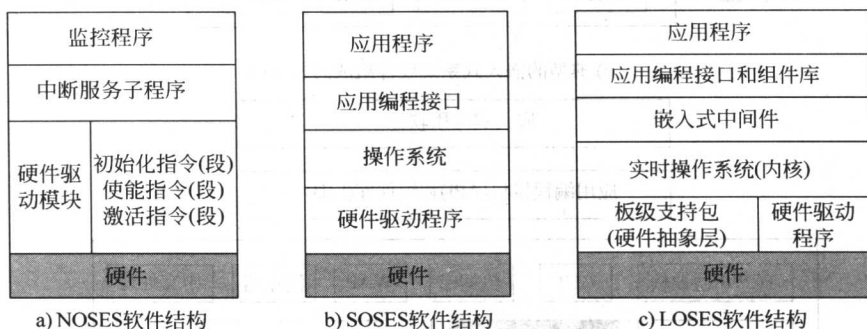


图 1-2 按照技术复杂度分类的三种嵌入式系统软件结构示意图

图1-2b和图1-2c分别给出了SOSES和LOSES的嵌入式软件结构。两者的共同点是都包含操作系统,但两者的不同点是LOSES对硬件驱动接口进行了标准化处理,在操作系统和硬件之间构成了一个硬件抽象层,例如Windows CE和VxWorks。而SOSES的硬件驱动通常没有标准化,其驱动程序与低端嵌入式系统的基本相同,例如 μ C/OS-II或TinyOS。

LOSES软件一般由板级支持包(Board Support Packet, BSP)、硬件驱动程序、嵌入式实时操作系统(Real Time Operating System, RTOS)、嵌入式中间件(embedded middleware)、应

① 闪存有时也使用Flash或flash来表示。

用程序编程接口 API、组件(构件)库以及嵌入式应用软件组成。其中, RTOS 是核心, 是嵌入式系统软件的基础和开发平台; BSP 和硬件驱动程序属于同一层。LOSES 软件体系结构可以分为 5 个层次:

- BSP: 是介于硬件和上层软件之间的底层软件开发包, 为各种嵌入式电路板上的硬件提供统一的软件接口。它将具体硬件设备和软件分离开来, 便于软件移植, 是一种硬件抽象层(Hardware Abstract Layer, HAL)。
- 硬件驱动程序: 不属于 BSP 和 HAL 的对硬件设备进行初始化配置、激活使能和运行控制的程序。有些嵌入式操作系统规定了符合本操作系统 I/O 接口规范的驱动程序设计标准。
- RTOS: 负责管理嵌入式系统的各种软硬件资源, 完成任务调度、存储分配、时钟、文件与中断管理等, 并提供文件、GUI、网络以及数据库等服务。
- 嵌入式中间件: 位于嵌入式操作系统、数据库与应用软件之间的一种软件, 使用嵌入式操作系统所提供的基本功能与服务, 并为上层的应用系统提供运行开发环境。
- API 及组件(构件): 为嵌入式系统应用软件提供各种编程接口库(LIB)以及第三方软件或 IP 构件。
- 应用系统(软件): 嵌入式系统的应用软件。

随着嵌入式系统应用的不断深入和产业化程度的不断提升, 新的应用环境和产业化需求对嵌入式系统软件提出了更加严格的要求。行业性开放系统正日趋流行。统一的行业标准具有开放、设计技术共享、软硬件重用、构件兼容、维护方便和合作生产的特点, 是增强行业性产品竞争能力的有效手段。在新需求的推动下, 嵌入式系统软件不仅需要具有微型化、高实时性等基本特征, 还将向高可信性、自适应性、构件组件化方向发展; 支撑开发环境将更加集成化、自动化、人性化; 并形成包括嵌入式操作系统、中间平台软件在内的嵌入式软件体系。硬件技术的进步, 推动了嵌入式系统软件向运行速度更快、支持功能更强、应用开发更便捷的方向不断发展。

1.6 嵌入式处理器

嵌入式系统的核心硬件部件是各种类型的嵌入式微处理器(本书中也简称为嵌入式处理器或者处理器), 目前使用的嵌入式微处理器的种类多达几百种。嵌入式处理器一般具备以下 4 个特点:

- 1) 对实时多任务有较强的支持能力, 能完成多任务处理, 并且中断响应速度快, 使得开发人员能够优化应用程序代码, 减少 RTOS 内核的任务执行开销。
- 2) 处理器结构可扩展, 以便迅速、高效地构建满足各种应用需求的嵌入式产品。
- 3) 内部集成了测试电路。
- 4) 低功耗。便携式手机以及 PDA 型嵌入式系统尤其要求低功耗。

嵌入式处理器按数据处理能力来分, 目前广泛使用的有 8 位、16 位和 32 位处理器。其中, 8 位、16 位处理器主要是广泛使用的单片机, 而嵌入式应用领域越来越多地采用 32 位 RISC 微处理器。

嵌入式处理器从设计目标、性能、功能以及应用方面可以分成以下 5 类:

(1) 通用型嵌入式微处理器

通用型嵌入式微处理器(General Purpose Embedded Micro Processor)也称为嵌入式微处理单元(Embedded Micro Processor Unit, EMPU), 它有两种类型。

一类是嵌入式系统中使用的通用处理器,这些处理器并不是专门为嵌入式系统设计的,但是却用于嵌入式系统。x86 处理器(从 80186、80386 到 Pentium M)就是这一类处理器的典型代表。例如,研扬科技公司在生产的 5 英寸嵌入式主板 PCM830 里使用了 Pentium M 处理器,该主板可以用在医疗器械和电力调度控制系统。再如,广州铜材厂在铜板轧机厚控系统的技改项目中使用了 Pentium III 作为嵌入式处理器。

另一类是专门为嵌入式系统设计的处理器,因为它们的运算器、寄存器和总线的位宽长、功耗低、含指令流水线等,凸现出强大的计算能力,所以兼有许多通用处理器“无所不能”的特点。这一类的通用型嵌入式微处理器的典型代表有 Am186/88、386EX、SC-400、Power PC、ColdFire、68000、MIPS、ARM 系列等。

无论如何,为满足嵌入式应用需要,使用通用型嵌入式微处理器时都要在工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面采取各种措施。

(2) 微控制器

微控制器(Micro Controller Unit, MCU)又称单片机(Single Chip Microcomputer, SCM)。它将整个计算机系统集成到一块芯片中,体积减小,功耗和成本下降,可靠性提高,速度更快,性能更好,电磁辐射更少。它通常以某种微处理器内核为核心,芯片内部集成 ROM、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、Flash RAM、EEPROM 等各种必要功能部件和外设。为最大限度匹配应用需求,市场上存在大量处理器内核相同而存储器和外设的配置及封装等不同的产品。现在,单片机品种和数量最多,占嵌入式系统约 70% 的市场份额。

有代表性的通用微控制器系列包括 8051、P51XA、MCS-251、MCS-96/196/296、C166/167、MC68HC05/11/12/16、68300 等。另外还有许多半通用系列的微控制器及众多专用 MCU 和兼容系列。

(3) 嵌入式 DSP 处理器

本书中讨论的嵌入式 DSP 处理器(Embedded Digital Signal Processor, EDSP)简称为 DSP 处理器,是专门用于嵌入式系统的数字信号处理器。它对 CPU 的系统结构和指令进行了特殊设计,使其更适合执行 DSP 算法,编译效率较高,指令执行速度也较快。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(电磁兼容)改造、增加片上外设而成为嵌入式 DSP 处理器;二是在通用单片机或 SOC 中增加 DSP 协处理器。

嵌入式 DSP 处理器可分为两大类:定点 DSP 和浮点 DSP。定点 DSP 发展迅速,品种多,处理速度为 20~2000MIPS;浮点 DSP 的处理速度为 40~1000MFOLPS。

嵌入式 DSP 处理器中比较有代表性的产品是德州仪器(TI)公司的 TMS320 系列和 Motorola 公司的 DSP56000 系列。

(4) 片上系统

近年来,电子设计自动化(EDA)技术和 VLSI 设计的推广与普及进展很快,半导体工艺水平也迅速提高,已经能够做到把一个或多个 CPU 单元以及功能部件集成在单个芯片上。这种芯片就是所谓的片上系统(SoC)。

用户可以在简易环境下研发专用的 SoC 芯片。此时用户需要先使用硬件描述语言(Hardware Description Language, HDL)定义出整个应用系统,然后用仿真工具进行仿真。常用的硬件描述语言包括 VHDL 或 Verilog。仿真通过后就可以将 SoC 的设计源代码或者版图交给半导体芯片代工公司制作样品。样品经过严格测试,就可以投入批量生产。这样除个别无法集成的器件以外,整个嵌入式系统的大部分硬件部件均可集成到一块或几块芯片中去。因