

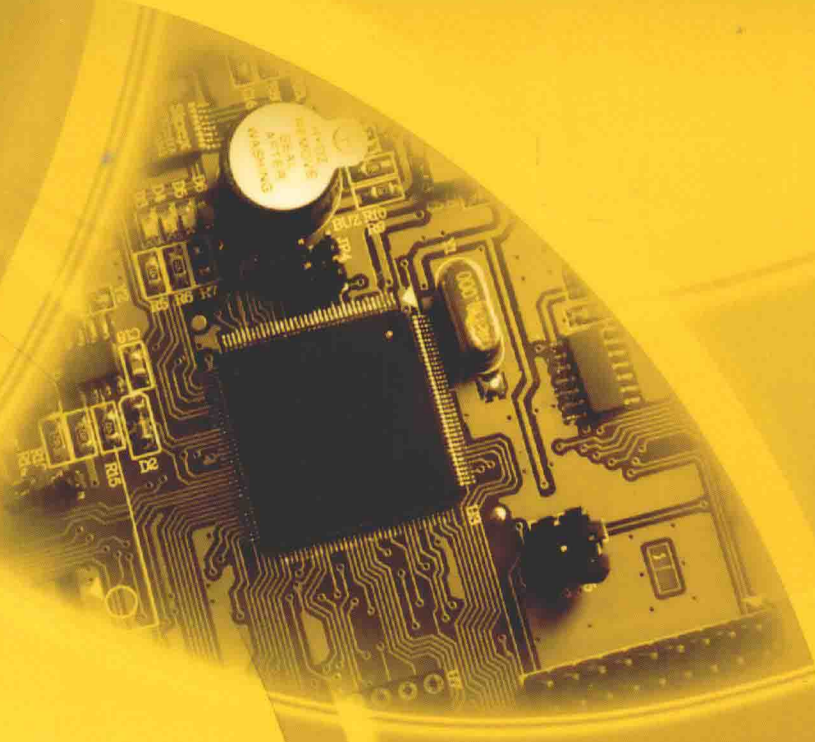


工业和信息化部“十二五”规划教材

嵌入式系统原理 及应用实例

Qianrushixitong Yuanli Ji Yingyong Shili

蒋建春 曾素华 陈家佳 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划教材

嵌入式系统原理及应用实例

蒋建春 曾素华 陈家佳 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书根据嵌入式系统的特点,对嵌入式系统的基础知识、工作原理与典型的应用设计等方面进行了介绍。作者根据长期的嵌入式系统开发经验,从嵌入式系统研发人员的角度,分析嵌入式系统设计需要掌握的理论知识、设计方法及步骤,介绍了嵌入式系统的基本组成,从底层到应用层各个典型模块的设计,将理论知识和实际对象充分结合起来,形成了一个完整的嵌入式系统。其主要内容包括:嵌入式系统软硬件基础知识、嵌入式系统开发基础、ARM Cortex-M3 内核体系结构、基于 STM32F103VET6 的典型的外设模块硬件/驱动程序设计、嵌入式操作系统基础、 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统的应用及移植等部分。

本书既可以作为高等院校计算机、电子类、自动化及控制类大学本科高年级学生的教材,也可以作为非计算机类硕士研究生与嵌入式系统设计工程技术人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统原理及应用实例 / 蒋建春, 曾素华, 陈家佳编著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015. 6
ISBN 978-7-5124-1803-5

I. ①嵌… II. ①蒋… ②曾… ③陈… III. ①微型计算机—系统设计 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 127653 号

版权所有,侵权必究。

嵌入式系统原理及应用实例

蒋建春 曾素华 陈家佳 编著
责任编辑 刘晓明 苏永芝

*

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(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:23.25 字数:595千字

2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-5124-1803-5 定价:48.00元



前 言

嵌入式系统在工业生产控制、智能仪表、信息家电、网络通信、医疗仪器、国防科技、智能机器人等领域中都有着广泛的应用。社会对嵌入式系统设计方面人才的需求量也越来越大。许多高校开设了嵌入式系统设计的相关课程,社会上也有许多嵌入式系统设计方面的培训班。但是关于嵌入式系统设计的参考书大多针对某一型号的处理器的操作系统进行详细讲解,而没有讲解相应的嵌入式系统基础知识,就像产品说明书,读者只知道怎么用,而不知道为什么这样用;或者是只针对嵌入式理论知识进行说明、分析,而没有一个具体的对象,让读者感觉像空中楼阁。这些参考书对于初学者来说,很难真正系统掌握嵌入式系统方面的知识;在设计时,难以设计出一个优秀的嵌入式系统产品,从而也限制了行业的发展。

针对这一情况,作者根据多年从事嵌入式系统设计方面的科研及教学经验,结合嵌入式系统理论知识,编著了本书。本书主要针对非计算机专业学生进行设计,在内容的选择上,采用理论与具体对象相结合的原则,采用嵌入式控制领域应用广泛的 Cortex-M3 处理器 STM32 和典型的接口及总线作为硬件对象,分析讲解 Cortex-M3 处理器的结构、工作模式、中断处理、系统启动等原理及过程;然后针对控制领域对操作系统的应用需求,选择编程简单但功能齐全的 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统作为主要内容,系统分析介绍了该操作系统的工作原理、应用及移植。本书系统讲解了嵌入式系统理论知识及硬件设计、系统启动与中断处理、底层驱动编程、操作系统概念及应用等知识,让读者能将理论知识和具体对象结合起来,真正系统理解和掌握嵌入式系统的软/硬件知识;以“从总体到具体”、“从底层到上层”的顺序进行内容安排,更符合人的思维习惯。因此,本书可以作为高校有关专业本科高年级嵌入式系统设计相关课程的教材,也可作为嵌入式系统设计工程师的重要参考书。

本书共 9 章,第 1 章主要介绍嵌入式系统的概念、应用与发展。第 2 章主要介绍嵌入式系统构架、组成、硬件/软件基础知识以及嵌入式系统设计方法等内容。第 3 章主要讲解嵌入式系统的开发基础,主要分析了嵌入式系统的基本组成,常见的微处理器和操作系统的特点及应用领域,嵌入式软件开发调试方法,以及嵌入式系统平台构建的注意事项等。第 4 章重点讲述 ARM Cortex 系列处理器的结构、工作模式、指令、开发环境等内容。第 5 章重点分析 STM32F103 处理器的引脚与接口配置,然后对 STM32F103 处理器的中断、系统启动、常用接口及外设工作原理、接口电路及驱动程序编写进行讲解。第 6 章对嵌入式操作系统的概



念、内核结构和功能进行讲解,重点讲解嵌入式操作系统任务、调度、通信与同步的工作原理。第7章对 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统的内核构架进行分析,重点分析该操作系统的内核任务管理、通信与同步机制和API函数。第8章是 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的应用举例,主要对通信、同步、互斥、事件标志组、软件定时器等应用进行实例设计分析,然后讲述如何在STM32F103上移植 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统。第9章以智能家居系统为例,采用STM32F103处理器和 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统进行智能家居控制器设计。该章系统介绍整个嵌入式系统的开发过程。

本书第1、2、3、4章由曾素华负责完成,第5、6、7、8章由蒋建春负责完成,第9章由陈家佳负责完成,全书由蒋建春负责统稿。参与编写的人员还有岑明、李勇、吕霞付、谢昊飞等,在这里对他们表示感谢。同时还要感谢邓露和王开龙、陈慧玲、景艳梅、蒋丽等同学为本书的付出。感谢胡向东教授和余成波教授对本书的评阅和提出的宝贵意见。

同时,本书的应用实例都是采用典型的应用进行编排说明,并把每章应用实例完整的工程文件通过邮箱:goodtextbook@126.com提供给读者,便于读者进行验证学习。当然,任何一本书都不可能囊括所有内容,本书力争做到合理安排内容与顺序,引导读者进入嵌入式系统领域,让读者能循序渐进地系统掌握嵌入式系统的相关知识,同时也注重实例的典型性和实用性。希望本书对读者的嵌入式系统开发能有所帮助。

本书中也引用了参考文献中的一些信息,正是这些优秀的作品为作者提供了丰富的知识,从而使本书内容更加充实。在此对这些作者表示感谢!由于时间仓促,加之水平有限,书中难免会有一些错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2015年5月

目 录

第 1 章 嵌入式系统概论	1
1.1 嵌入式系统简介	1
1.1.1 嵌入式系统的历史	1
1.1.2 嵌入式系统的定义	2
1.1.3 嵌入式系统的特点	4
1.2 嵌入式系统的分类	5
1.2.1 嵌入式系统的实时性分类	5
1.2.2 嵌入式系统的应用领域分类	6
1.3 嵌入式系统的发展现状和发展趋势	9
1.3.1 嵌入式系统的发展现状	9
1.3.2 嵌入式系统的发展趋势	10
习题 1	12
第 2 章 嵌入式系统的基础知识	13
2.1 嵌入式系统的基本结构	13
2.1.1 硬件层	14
2.1.2 中间层	14
2.1.3 软件层	15
2.1.4 应用层	16
2.2 嵌入式系统硬件基础	17
2.2.1 嵌入式微处理器基本知识	17
2.2.2 存储器系统	26
2.2.3 输入/输出接口	30
2.3 嵌入式系统软件基础	31
2.3.1 嵌入式软件分类及特点	31
2.3.2 嵌入式软件体系结构	32
2.4 嵌入式系统中断与系统启动	38
2.4.1 中断基础知识	38
2.4.2 Boot Loader 基础	47
习题 2	51
第 3 章 嵌入式系统开发基础	52
3.1 嵌入式系统硬件平台	52
3.1.1 嵌入式处理器分类	53



3.1.2 常见的嵌入式处理器	55
3.2 嵌入式软件平台	62
3.2.1 常用嵌入式操作系统	62
3.2.2 嵌入式文件系统	66
3.2.3 嵌入式图形用户接口	69
3.3 嵌入式系统开发技术	71
3.3.1 嵌入式系统的设计流程	71
3.3.2 嵌入式系统的硬件/软件协同设计技术	72
3.3.3 嵌入式系统的可重构设计技术	74
3.3.4 嵌入式中间件技术	76
3.4 嵌入式系统开发与调试基础	79
3.4.1 嵌入式代码生成流程	79
3.4.2 嵌入式软件代码结构分析	81
3.4.3 嵌入式软件调试方法	85
习题 3	92
第 4 章 ARM Cortex - M3 处理器体系结构	93
4.1 ARM 处理器的发展历程	93
4.2 Cortex - M3 处理器体系结构	97
4.2.1 Cortex - M3 体系结构简介	97
4.2.2 Cortex - M3 异常管理	103
4.2.3 Cortex - M3 复位异常	112
习题 4	119
第 5 章 嵌入式系统常用外设驱动编程实例	120
5.1 STM32F103VET6 简介	120
5.1.1 STM32F103VET6 概述	120
5.1.2 引脚概述	121
5.2 GPIO 应用实例——LED 模块设计	122
5.2.1 GPIO 简介	122
5.2.2 GPIO 寄存器描述	124
5.2.3 基于 GPIO 的 LED 灯控制	127
5.3 STM32 外部中断及键盘应用实例	133
5.3.1 STM32 外部中断简介	133
5.3.2 嵌入式键盘工作原理	139
5.3.3 基于中断的键盘应用实例	141
5.4 STM32 UART 串口应用实例	147
5.4.1 异步串行通信概述	147
5.4.2 STM32 UART 串口简介	149



5.4.3	STM32 UART 应用实例	152
5.5	DMA 及 A/D 转换器应用实例	158
5.5.1	DMA 工作原理	158
5.5.2	STM32 的 DMA 控制器	159
5.5.3	A/D 转换器原理	162
5.5.4	STM32 A/D 转换器介绍	165
5.5.5	STM32 A/D 转换器应用实例	170
5.6	LCD 应用实例	174
5.6.1	LCD 工作原理	174
5.6.2	TFT 型 LCD 显示屏及接口简介	177
5.6.3	TFT 型 LCD 应用实例	181
5.7	SPI 总线及触摸屏应用实例	193
5.7.1	触摸屏原理及有关技术	193
5.7.2	触摸屏驱动芯片 ADS7843 简介	196
5.7.3	SPI 总线工作原理	198
5.7.4	STM32 SPI 简介	200
5.7.5	触摸屏应用实例	204
	习题 5	209
第 6 章	嵌入式操作系统基础知识	210
6.1	操作系统基础知识	210
6.1.1	操作系统的基本概念	210
6.1.2	操作系统的主要功能	211
6.1.3	操作系统的分类	213
6.2	嵌入式操作系统	215
6.2.1	嵌入式操作系统的特点	215
6.2.2	实时操作系统的基本概念	217
6.3	任务间互斥、同步与通信	228
6.3.1	任务的互斥	228
6.3.2	任务的同步	230
6.3.3	任务间的通信	232
	习题 6	234
第 7 章	嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$	236
7.1	$\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 内核结构	236
7.1.1	$\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 组成及功能	237
7.1.2	$\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 内核结构概述	239
7.2	$\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 任务管理	257
7.2.1	$\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 系统任务管理	257



7.2.2	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 用户任务管理	260
7.3	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 时间管理	265
7.3.1	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 时钟节拍管理	265
7.3.2	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 软件定时器管理	268
7.4	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 任务同步	273
7.4.1	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 信号量	273
7.4.2	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 事件标志组	277
7.5	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 任务通信	284
7.5.1	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 消息邮箱	284
7.5.2	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 消息队列	288
7.6	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 任务互斥	294
7.6.1	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 互斥原理	294
7.6.2	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 互斥信号量	295
	习题 7	298
第 8 章	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统的应用及移植	299
8.1	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 应用基础	299
8.1.1	任务划分	299
8.1.2	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 任务堆栈的设置	300
8.1.3	任务的执行分类及优先级设置	302
8.2	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 应用编程举例	305
8.2.1	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 同步信号量应用实例	305
8.2.2	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 消息邮箱通信应用实例	308
8.2.3	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 互斥信号量应用实例	311
8.2.4	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 事件标志组应用实例	314
8.2.5	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 定时器应用实例	318
8.3	操作系统移植	322
8.3.1	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 移植基础知识	322
8.3.2	$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 在 STM32F103 上的移植实现	330
	习题 8	339
第 9 章	智能家居监测控制系统实例	340
9.1	需求分析	340
9.2	总体设计	341
9.3	系统硬件设计	342
9.3.1	家居控制器最小系统设计	342
9.3.2	电源电路设计	343
9.3.3	通信电路设计	344
9.3.4	显示模块电路	344



9.3.5 数据采集模块电路	345
9.4 系统软件设计	347
9.4.1 主程序设计	349
9.4.2 报警任务	351
9.4.3 GSM 短信查询控制任务	353
9.4.4 信息采集任务	355
9.4.5 其他函数说明	358
9.5 系统验证	359
习题 9	361
参考文献	362

第 1 章 嵌入式系统概论

通过本章的学习,读者可以了解嵌入式系统的基本概念、特点、应用领域,以及嵌入式系统的现状和发展趋势。

1.1 嵌入式系统简介

“嵌入式系统”一般指非 PC 系统、有计算机功能但又不称之为通用计算机的设备或器材。它是应用为中心,软硬件可缩扩的,适应应用系统对功能、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,主要由嵌入式处理器、相关支撑硬件、嵌入式操作系统及应用软件系统等组成。

与通用型计算机系统相比,嵌入式系统功耗低、可靠性高;功能强大、性能价格比高;实时性强,支持多任务;占用空间小,效率高;面向特定应用,可根据应用要求灵活定制。

嵌入式系统应用非常广泛,几乎包括了生活中的所有电器设备,如掌上 PDA、移动计算设备、电视机顶盒、智能手机、智能电视、多媒体、汽车电子、数码相机、智能家居系统、电梯、安全系统、自动售货机、消费电子设备、工业自动化仪表与医疗仪器等。

1.1.1 嵌入式系统的历史

从 20 世纪 70 年代单片机的出现到今天各式各样的嵌入式微处理器、微控制器的大规模应用,嵌入式系统已经有了近 40 年的发展历史。特别是近年来微电子技术和软件技术的发展使得硬件成本大大降低,软件的开发效率大大提高,嵌入式系统得到了广泛应用。

作为一个系统,往往是在硬件和软件交替发展的双螺旋的支撑下逐渐趋于稳定和成熟,嵌入式系统也不例外。嵌入式系统的出现最初是基于单片机的。20 世纪 70 年代单片机的出现,使得汽车、家电、工业机器、通信装置以及成千上万种产品可以通过内嵌电子装置来获得更佳的使用性能:更容易使用、更快捷、更便宜。这些装置已经初步具备了嵌入式的应用特点,但是当时只是使用 8 位的芯片,执行一些单线程的程序,还谈不上“系统”的概念。

最早的单片机是 Intel 公司的 8048,它出现在 1976 年。Motorola 公司同时推出了 68HC05,Zilog 公司推出了 Z80 系列。这些早期的单片机均含有 256 字节的 RAM、4 KB 的 ROM、4 个 8 位并口、1 个全双工串行口、2 个 16 位定时器。80 年代初,Intel 公司又进一步完善了 8048,在它的基础上研制成功了 8051,这在单片机的历史上是值得纪念的。迄今为止,51 系列的单片机仍然是最为成功的单片机芯片之一,在各种产品中有着非常广泛的应用。随着微电子技术和嵌入式系统功能的新的需求,8 位的单片机已无法满足新应用的需要,16 位、32 位及多核微处理器逐步取代了 8 位单片机。以 ARM 系列处理器最为典型,从 ARM7 到 ARM11,从 Cortex - M、Cortex - R 到 Cortex - A 系列,ARM 公司设计出不同的处理器结构和功能来满足不同应用的需要。

自 20 世纪 80 年代早期,嵌入式系统的程序员开始用商业级的“操作系统”编写嵌入式应用软件,这样可以获取更短的开发周期、更少的开发资金和更高的开发效率,“嵌入式系统”真



正出现了。确切地说,这个时候的操作系统是一个实时核,这个实时核包含了许多传统操作系统的特征,包括任务管理、任务间通信、同步与相互排斥、中断支持、内存管理等功能。比较著名的有雷迪系统公司(注:Ready System 已被 Mentor Graphics 公司收购)的 VRTX(Versatile Real-Time Executive,多工即时执行系统)、综合系统公司(Integrated System Incorporation)的 PSOS、风河(注:Wind River 现已被 Intel 收购)的 VxWorks、QNX 公司的 QNX 等。这些嵌入式操作系统都具有嵌入式的典型特点:它们均采用占先式的调度,响应的时间很短,任务执行的时间可以确定;系统内核很小,具有可裁剪、可扩充和可移植性,可以移植到各种处理器上;具有较强的实时和可靠性,适合嵌入式应用。这些嵌入式实时多任务操作系统的出现,使得应用开发人员得以从小范围的开发解放出来,同时也促使嵌入式系统有了更为广阔的应用空间。

90 年代以后,随着对实时性要求的提高,软件规模不断上升,实时内核逐渐发展为实时操作系统,并作为一种软件平台逐步成为目前国际嵌入式系统的主流。这时候更多的公司看到了嵌入式系统的广阔发展前景,开始大力发展自己的嵌入式操作系统。除了上面的几家老牌公司以外,还出现了 Palm OS、WinCE、嵌入式 Linux、Lynx、Nucleus,以及国内的 Hopen、Delta OS 等嵌入式操作系统。随着嵌入式技术的发展前景日益广阔,相信会有更多的嵌入式操作系统软件出现。

1.1.2 嵌入式系统的定义

根据 IEEE(国际电气和电子工程师协会)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。

不过上述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。

在这个定义上,可从几方面来理解嵌入式系统:

① 嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的,它必须与具体应用相结合才会具有生命力,才更具有优势。因此可以这样理解上述三个面向的含义,即嵌入式系统是与应用紧密结合的,它具有很强的专用性,必须结合实际系统需求进行合理的裁剪利用。

② 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。所以,介入嵌入式系统行业,必须有一个正确的定位。例如 Android OS 之所以在智能手机领域占有 70% 以上的市场份额,就是因为其立足于移动电子设备,着重发展丰富的图形界面和系统功能,提供完善的技术支持,提供开放性和免费服务,是一个对第三方软件完全开放的平台,开发者在为其开发程序时拥有更大的自由度。而 Wind River 公司的 VxWorks 之所以在火星车上得以应用,则是因为其高实时性和高可靠性,以及完善的开发平台。

③ 嵌入式系统必须根据应用需求对软硬件进行裁剪,满足应用系统的功能、可靠性、成本、体积等要求。所以,如果能建立相对通用的软硬件基础,然后在其上开发出适应各种需要的系统,则是一个比较好的发展模式。目前的实时嵌入式系统的核心往往是一个只有几 KB



到几十 KB 的微内核,需要根据实际的使用进行功能扩展或者裁剪。正是由于微内核的存在,使得这种扩展能够非常顺利地进行。

实际上,嵌入式系统本身是一个外延极广的名词,凡是与产品结合在一起的具有嵌入式特点的系统都可以叫嵌入式系统,而且有时很难给它下一个准确的定义。现在人们讲嵌入式系统时,某种程度上指近些年比较热的具有操作系统的嵌入式系统,本书在进行分析和展望时,也沿用这一观点。

嵌入式系统一般指非 PC 系统,它包括硬件和软件两部分。硬件包括处理器/微处理器、存储器及外设器件和 I/O 端口、图形控制器等。软件包括操作系统(OS)(要求实时和多任务操作)和应用程序编程。有时设计人员把这两种软件组合在一起。应用程序控制着系统的运作和行为;而操作系统控制着应用程序编程与硬件的交互作用。

总的说来,嵌入式系统是以应用为中心,以计算机技术为基础,并且软硬件可定制,适用于各种应用场合,对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。它一般由嵌入式微处理器及外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户的应用程序等部分组成,用于实现对其他设备的控制、监视或管理等功能。

嵌入式系统的核心是嵌入式微处理器和嵌入式操作系统。而嵌入式微处理器一般具备以下 4 个特点:

① 具有较强的操作系统支持能力。能提供操作系统运行的硬件环境,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内核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,而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 可扩展的处理器结构。嵌入式处理器一般具有丰富的外设接口,通过这些接口可以快速地设计和扩展系统功能,以满足不同应用的需要。

④ 嵌入式微处理器必须功耗很低。嵌入式设备主要用于非电源直接供电的场合,对功耗的要求较高。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,其需要的功耗只有 mW 甚至 μ W 级。

嵌入式操作系统与其他类型的操作系统相比,具有以下一些特点:

① 代码精简。嵌入式系统有别于一般的计算机处理系统,它不具备像硬盘那样大容量的存储介质,而大多使用闪存(Flash Memory)作为存储介质。这就要求嵌入式操作系统只能运行在有限的内存中,不能使用虚拟内存;中断的使用也受到限制。因此,嵌入式操作系统必须结构紧凑,体积微小。

② 实时性高。大多数嵌入式系统都是实时系统,而且多是强实时多任务系统,要求相应的嵌入式操作系统也必须是实时操作系统(RTOS)。实时操作系统作为操作系统的一个重要分支,已成为研究的一个热点,主要探讨实时多任务调度算法和可调度性、死锁解除等问题。

③ 特殊的开发调试环境。提供完整的集成开发环境是每一个嵌入式系统开发人员所期待的。一个完整的嵌入式系统的集成开发环境,一般需要提供的工具是编译/链接器、内核调试/跟踪器和集成图形界面开发平台。其中的集成图形界面开发平台包括编辑器、调试器、软件仿真器和监视器等。



1.1.3 嵌入式系统的特点

嵌入式系统是微电子、计算机科学、电子学、对象学 4 个学科的交叉和融合。微电子学将电子材料、工艺、集成电路以及芯片支持用于嵌入式产品的制造；嵌入式计算机学和电子学是核心，计算机科学为嵌入式系统提供了计算机工程方法、基础软件、集成开发环境，电子学为嵌入式系统提供了系统设计方法、电路理论等；对象学科是各个应用对象所涉及学科的综合，是与嵌入式产品最终应用相关的学科，例如汽车、消费电子、医疗、军事和航天等。

嵌入式系统的应用越来越广泛。这是因为嵌入式系统具有功能特定、规模可变、扩展灵活、有一定的实时性和稳定性、系统内核比较小等特点。

1. 功能特定性

嵌入式系统的个性化很强，软件和硬件的结合紧密，一般都针对硬件进行系统的移植；同时，针对不同的任务，系统软件也需要更改一定程序，程序的编译下载要和系统相结合。

应该说，基本上所有的嵌入式系统都具有一些特定的功能。如一个 IP 转串口的小型嵌入式设备，其主要功能就是把 IP(TCP/UDP)数据转成 RS232 数据，或者把 RS232 数据转成 TCP/UDP 数据。正是基于这样特定和单一的功能，才能把这类嵌入式设备做得体积小并且价格低廉。

应用于专业领域的嵌入式系统通常都具有执行特定功能的特性。这个特性要求设计者在实际设计嵌入式系统的时候一定要做详尽的需求分析，把系统的功能定义清晰，真正地了解客户的需求是做好设计的前提。如果在系统中增加一些不必要的功能，则不仅是开发时间上与经费上的浪费，也带来了系统整体性价比的降低，同样也会带来系统成本的增加。

2. 规模可变性

嵌入式系统主要是以微处理器与周边器件构成核心的，其规模可以变化。嵌入式处理器可以从 8 位到 16 位、到 32 位甚至到 64 位的都有。基于这个特点，推荐嵌入式系统开发工程师在实际的开发过程中，先设计与调试系统中基本不会变的那个部分——通常都是指嵌入式处理器核心电路部分，也就是本书中提到的核心板部分，然后再根据实际的应用扩展其外围接口。当然，这里的规模可变也和具体应用有很大的关系。由于嵌入式处理器内部集成的外围接口丰富，所以也使得一般的嵌入式系统都具有很强的规模可伸缩性。

嵌入式系统的这个特点给开发人员在系统设计过程中带来了很大的灵活性。当需求发生变化时，可以快速地进行扩展来适应需求。比如系统内存的增加、系统外围接口的扩展等，都是很容易实现的，但前提是在系统设计的时候已经考虑到了这部分的扩展冗余。也就是说，设计师在设计系统的时候，要适当地考虑一下系统以后的扩展性。最方便的就是通过增加一些跳线等方法做一些简单扩展等。

早期的嵌入式系统，系统软件和应用软件没有明显的区分，不要求其功能的设计过于复杂，这在一定程度上带来了开发上的不方便。也就是说，如果不把系统软件和上层应用软件分开的话，每一次修改软件，都要把系统软件和上层软件一起编译调试，会带来开发时间上的浪费。

3. 实时性与稳定性

嵌入式系统因其应用情况通常会对实时性和稳定性有一定的要求，因此出现了实时嵌入



式系统等更深层次的系统。

高实时性的操作系统软件是嵌入式软件的基本要求,软件一般都要求固化和存储。通常嵌入式系统中的软件都是存储在 Flash 中的。上电之后,才把这些软件中的部分调入 RAM 区运行。嵌入式软件逐渐走向标准化,所以一般都使用多任务的操作系统。嵌入式系统的应用程序可以没有操作系统而在芯片上直接运行,但是为了合理地调度多个任务,充分利用系统资源、系统函数等,推荐选用 RTOS 开发平台。

常见的实时嵌入式系统有 RT Linux、Nucleus、VxWorks 等。大家所熟知的火星探测器上使用的操作系统其实就是一个实时性很强的嵌入式系统,是美国风河系统公司的 VxWorks 操作系统。现在发展越来越快的 GPS 车辆实时监控系统中同样也对实时性和稳定性有一定的需求。车辆移动端的控制器要根据 GPS 的秒信号与整个系统做时钟同步,从而实现移动端数据的分时按时间片向数据中心上报。在工控领域中应用的嵌入式系统对实时性和稳定性的要求更高,这样的设备通常是系统不间断地运行,需要面对较为恶劣的温度和湿度环境。

4. 操作系统内核小

嵌入式系统一般都应用于小型电子装置中,系统资源相对有限,使得嵌入式系统在实时性、功耗、体积、存储空间上都有所限制,要求嵌入式系统操作内核比传统的操作系统小很多,小的有几千字节,大的也不过几十兆字节。嵌入式操作系统内核比较小的有 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 、Nucleus 以及基于 OSEK/VDX 规范的实时操作系统等,相对较大的 WinCE、Linux 等操作系统,其内核也可以裁剪到只有几十兆,比 PC 机上运行的其他操作系统规模小得多。

5. 具有专门的开发工具和开发环境

嵌入式系统本身不具备自主开发能力,必须有一套开发工具和开发环境才能进行开发,这些工具和开发环境一般是基于通用计算机上的软、硬件设备,以及各种仪器仪表等。开发时一般分为主机(HOST)和目标机(TARGET)两个概念,主机用于程序开发,目标机作为最后的执行机。通常都是在主机上建立基于目标机的编译环境,编译目标机要运行的代码,然后把编译出来的可执行二进制代码通过主机和目标机之间的某种通信接口与协议传输到目标机上进行烧录和运行。

1.2 嵌入式系统的分类

嵌入式系统种类繁多,分布在生活中的各个方面。如手机、DVD 播放器、ADSL 上网终端、无线路由器和 DVB 机顶盒等都是嵌入式系统。按照不同的方法,嵌入式系统可以进行不同的分类。

按照处理器的不同,可以分为 8 位、16 位、32 位、64 位及多核嵌入式系统;按照实时性不同,可分为软实时和硬实时两种类型;按照应用领域不同,可分为消费类、控制类、国防类、仪器仪表类、汽车电子类等。下面对嵌入式系统分类进行简单说明。

1.2.1 嵌入式系统的实时性分类

根据嵌入式系统的定义可知,嵌入式系统对实时性存在要求。不同的应用对嵌入式系统的实时性要求存在差别,按照实时性的不同,可将嵌入式系统分为软实时系统和硬实时系统



两类。

1. 软实时系统

软实时系统的任务时限是一种柔性灵活的、可以容忍偶然的超时错误的实时系统。失败造成的后果并不严重,仅仅是降低了系统的吞吐量。明确地说,软实时系统就是那些从统计的角度来说,一个任务能够得到确保的处理时间,到达系统的事件也能够在截止期限前得到处理。但违反截止期限并不会带来致命的错误,像实时多媒体系统就是一种软实时系统。基于 Linux 操作系统的嵌入式系统是一个典型的软实时系统,尽管在 RTLinux 里面对系统的调度机制做了很大的提高,使得实时性能也提高了很多,但是 RTLinux 还是一个软实时系统。基于 WinCE 的嵌入式系统也是软实时系统。

2. 硬实时系统

硬实时系统是指系统要确保在最坏情况下的服务时间,即对于事件响应时间的截止期限必须得到满足。比如航天中宇宙飞船的控制等就是这样的系统。硬实时系统要求系统运行有一个刚性的,严格可控的时间限制,它不允许任何超出时限的错误发生。超时错误会带来损害甚至导致系统失败,或者导致系统不能实现它的预期目标。基于 VxWorks、 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 、eCOS、Nuclues、QNX 等操作系统的嵌入式系统是硬实时系统。

1.2.2 嵌入式系统的应用领域分类

嵌入式系统技术具有非常广阔的应用前景,可应用在消费类电子产品、智能仪表、家庭智能管理、国防工业、工业控制和汽车电子等方面。

1. 消费类嵌入式产品

嵌入式系统在消费类电子产品应用领域的发展最为迅速,而且在这个领域中的嵌入式处理器的需求量也最大。智能嵌入式电子设备进入人们的生活、工作中,不断丰富人们的生活,给人们带来便利,构成的消费类电子产品已经成为现实生活中必不可少的一部分。大家最熟悉的莫过于智能手机、PDA、电子词典、数码相机、MP3/MP4 等,如图 1-1 所示。可以说离开了这些产品生活会失去很多的色彩,也许不久的将来,如果没有了这些消费类电子产品,生活就像以前没有电一样很不方便。

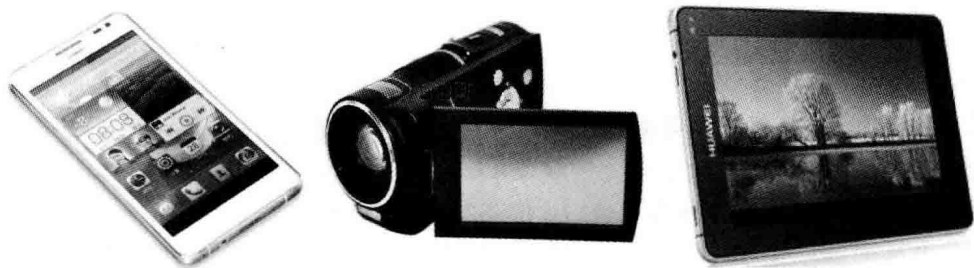


图 1-1 常用消费类嵌入式产品

这些消费类电子产品中的嵌入式系统一样含有一个嵌入式应用处理器、一些外围接口及一套基于应用的软件系统等。就拿数码相机来说,其镜头后面就是一个 CCD 图像传感器,然后会有一个 A/D 器件把模拟图像数据变成数字信号,送到嵌入式应用处理器进行适当的处



理,再通过应用处理器的管理实现图像在 LCD 上的显示、在 SD 卡或 MMC 卡上的存储等功能。

2. 智能仪器、仪表类嵌入式产品

这类产品可能离日常生活有点距离,但是对于开发人员来说却是实验室里的必备工具,比如智能手表、智能检测仪、网络分析仪、热成像仪等,如图 1-2 所示。通常这些嵌入式设备中都有一个应用处理器和一个运算处理器,可以完成一定的数据采集、分析、存储、打印、显示等功能。这些设备对于开发人员的帮助很大,大大地提高了开发人员的开发效率,可以说是开发人员的“助手”。



图 1-2 智能仪表类嵌入式产品

3. 家庭智能管理嵌入式产品

随着嵌入式技术的发展,嵌入式产品越来越与人们的生活紧密联系。在未来的生活中,我们会逐渐接触一些智能的家电设备,主要包括智能电视、智能冰箱、智能开关、智能电灯以及控制家电的一些智能设备。通常在一个典型的智能家居系统中,嵌入式系统会扮演不同的角色,主要包括智能家居集中控制器、红外转发设备、蓝牙转发设备、无线路由器等,这些设备主要负责信号的接收与转发,具有通用性。还有组成家庭智能控制系统的终端设备,如电视、冰箱、摄像头、电动窗帘、烟雾检查报警器、智能开关等。由这些信号接收转发设备和终端设备共同组成智能家居控制系统,而这些设备都具有嵌入式系统的特征。图 1-3 是一个典型的智能家居控制系统。

4. 国防武器装备嵌入式产品

国防武器装备是应用嵌入式系统设备较多的领域之一,如雷达识别、军用数传电台、电子对抗设备等,如图 1-4 所示。在国防军用领域使用嵌入式系统最成功的案例莫过于美军在海湾战争中采用的一套 Adhoc 自组网作战系统了。利用嵌入式系统设计开发了 Adhoc 设备安装在直升机、坦克、移动步兵身上构成一个自愈合自维护的作战梯队。这项技术现在发展成为 Mesh 技术,同样依托于嵌入式系统的发展,已经广泛应用于民用领域,比如消防救火、应急指挥等应用中。

5. 生物微电子嵌入式产品

指纹识别、声纹识别、人脸识别、生物传感器数据采集等应用中也广泛采用嵌入式系统设计,如图 1-5 所示。现在环境监测已经成为人类突出要面对的问题,可以想象,随着技术的发展,将来的空气中、河流中都可能存在着很多的微生物传感器在实时地检测环境状况,而且还在实时地把这些数据送到环境监测中心,以达到检测整个生活环境避免发生更深层次的环境污染问题。这也许就是将来围绕在我们生存环境周围的一个无线环境监测传感器网。对于已