

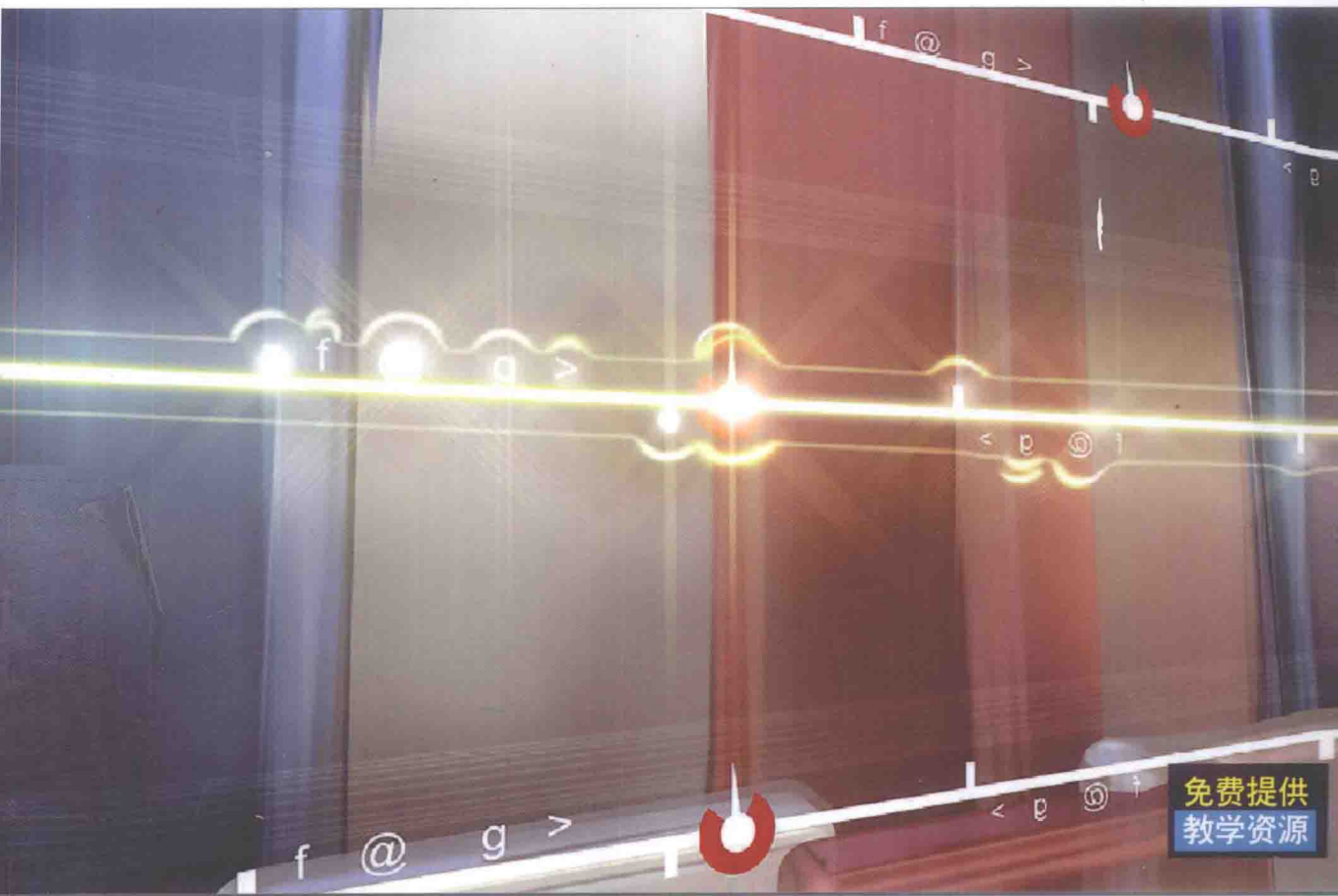


普通高等教育“十二五”规划教材

# 嵌入式系统设计与开发 (第二版)

## ——基于ARM和 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

主 编 马文华  
副主编 邓耀华 汤秀春



 科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

信息与电子技术类系列教材

---



# 嵌入式系统设计与开发

——基于 ARM 和  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

(第二版)

马文华 主编

邓耀华 汤秀春 副主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以目前流行的 ARM 处理器和易于学习的  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  操作系统为核心,系统介绍了嵌入式系统的概念、原理、基本开发流程和方法。其内容包括嵌入式系统概述、ARM 及其编程模型、ARM 指令集、嵌入式程序设计、嵌入式最小系统设计、嵌入式系统通用接口设计、 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  实时操作系统、基于  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的程序设计、ADS 集成开发环境使用等。读者可从中系统地学习嵌入式系统的有关知识,并通过实例完成嵌入式系统设计的基础训练。

本书可以作为高等学校嵌入式系统教学的教材,也可作为有关工程技术人员的学习参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统设计与开发/马文华主编. —2 版. —北京:科学出版社, 2011.6

ISBN 978-7-03-031125-2

I. ①嵌… II. ①马… III. ①程序设计 IV. ①TP311.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 091695 号

责任编辑:隽青龙/责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉/封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京路局票据印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011 年 6 月第 二 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 6 月第一次印刷 印张:22 3/4

印数:1—3 000 字数:525 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<路局票据>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62135517-2037

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 前 言

嵌入式计算机系统起源于微型机时代，其低端应用以 8 位 MCS-51 为代表，至今仍在大量使用。近几年，网络、通信、多媒体和计算控制技术的发展为嵌入式系统应用开辟了广阔的天地，使嵌入式系统成为继 PC、Internet 后 IT 界新的技术热点。但在这些高端应用中，8 位处理器已不能满足应用的需求，取而代之的是 32 位微处理器。目前，32 位的 ARM 处理器以其优良的性能，占据了低功耗、低成本和高性能的嵌入式系统应用领域的领先地位。ARM7TDMI 是 ARM 公司的经典内核，三星公司以此内核为基础生产的 SC344B0X 芯片得到了广泛应用，拥有许多的用户。对于用户来说，将该芯片作为嵌入式系统的入门是个很好的选择。32 位微处理器面向嵌入式系统的高端应用，由于其速度快、资源丰富等特点，加上应用本身的复杂性、可靠性等要求，软件的开发一般选择操作系统平台支持。常见的嵌入式操作系统有很多，如 VxWorks、Windows CE、嵌入式 Linux、QNX、Nucleus 和  $\mu$ C/OS-II 等，从中选择一个能体现操作系统机理、有实用价值而门槛又较低的操作系统是一项很重要的工作。 $\mu$ C/OS-II 是一个源代码公开的实时多任务操作系统，拥有很多产品的成功应用案例并且得到美国有关方面的认证，用户可以很容易地通过阅读源代码领会操作系统的精髓，使操作系统的学习不再如“空中楼阁”。

本书以 SC344B0X 和  $\mu$ C/OS-II 为平台来介绍嵌入式系统的设计和开发技术。由于 ARM 体系结构的一致性、外围电路的通用性及操作系统机理的一致性，本书对设计其他 ARM 内核芯片的应用系统具有很好的参考价值。其编写思路符合嵌入式系统注重实践的学习规律，力求通俗、易懂，适合作为电信类和计算机学科本科生及研究生教材，也可作为课程设计、毕业设计和从事嵌入式系统开发工程技术人员的参考资料。

嵌入式系统的应用几乎涉及现代生活的各个方面，如手机、电视机、DVD、数码照相机、游戏机、微波炉和汽车等，即使我们通用的个人计算机，其外围电路中也包含众多的嵌入式处理器。社会对嵌入式系统设计人才需求旺盛，目前，嵌入式系统方面高端人才严重缺乏。很多高校也在进行课程改革，并且增加嵌入式系统方面的课程，这将为社会培养专业人才、为我国在这一领域赶超世界先进水平打下坚实的人才基础。

本书各章节安排如下：

第 1 章介绍嵌入式系统的概念、发展历史、应用范围，嵌入式系统的硬件和软件组成及嵌入式系统开发的相关技术。

第 2 章介绍精简指令集计算机 RISC 和复杂指令集计算机 CISC，在此基础上，介绍了 ARM 体系结构版本及 ARM 的编程模型，为 ARM 体系结构的学习打下基础，对 ARM7TDMI 做了较详细的说明。

第3章详细介绍 ARM 体系的指令系统和寻址方式。Thumb 指令集是 ARM 指令集的子集，本章对 Thumb 指令集及其与 ARM 指令集的区别也做了简要介绍。

第4章介绍 ARM 的嵌入式程序设计，包括 ARM 汇编语言程序设计、嵌入式 C 语言程序设计以及 C 语言和汇编混合编程。

第5章介绍基于 S3C44B0X 最小系统的设计步骤和方法以及 BootLoader 的设计。在嵌入式系统中，BootLoader 是操作系统内核运行之前运行的一小段程序，通过 BootLoader 可以完成对系统板上的主要部件进行初始化，从而将系统的软硬件环境带到一个合适的状态。

第6章详细介绍 S3C44B0X 主要部件的工作原理与开发实例，内容包括通用 I/O 端口、串行通信接口、定时器、LCD 控制器。通过本章的学习，可以建立起基于 S3C44B0X 开发嵌入式系统硬件的基础。

第7章介绍嵌入式实时操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的内核结构、原理和特点， $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  操作系统的多任务机制、任务的管理以及对任务之间的通信与同步。

第8章介绍  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  嵌入式操作系统的移植、基于  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的应用程序设计和实例以及  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的扩展。由于  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  仅是一个实时多任务内核，移植  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  到处理器平台后，和实际应用还有一段距离，因此要建立一个实用的实时操作系统必须对  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  进行必要的扩展。

第9章介绍集成开发工具 ARM Developer Suite (ADS) 的组成、安装与使用说明。

全书由马文华任主编，邓耀华、汤秀春任副主编。其中，第1章~第4章由马文华编写；第5章~第8章由邓耀华编写；第9章由汤秀春编写。廖庆富参与第9章实例编写及测试，韩威参与第4~6章实验程序测试与排版，高世平参与第7、第8章实验测试与排版工作。

吴黎明教授、王桂棠教授对本书的编写提出许多建设性意见，并审阅了全书，在此表示衷心感谢。

在编写本书的过程中，得到深圳英蓓特信息技术公司、深圳旋极科技公司、ARM 公司上海办事处、上海祥佑数码科技公司的大力支持，在此谨向他们深表感谢。

由于作者水平有限及嵌入式系统领域的发展变化较快，书中难免存在不当之处，恳请读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 嵌入式系统 .....	1
1.1.1 嵌入式系统的定义 .....	1
1.1.2 嵌入式系统的发展历史 .....	1
1.1.3 嵌入式计算机系统与通用计算机系统 .....	2
1.2 嵌入式系统的组成 .....	3
1.2.1 嵌入式系统的硬件组成 .....	3
1.2.2 嵌入式系统的软件组成 .....	5
1.3 嵌入式系统的主要应用领域 .....	6
1.4 嵌入式处理器 .....	7
1.4.1 嵌入式处理器分类 .....	7
1.4.2 嵌入式处理器现状及发展趋势 .....	9
1.5 嵌入式操作系统 .....	11
1.5.1 嵌入式操作系统分类 .....	11
1.5.2 实时操作系统 .....	12
1.5.3 嵌入式操作系统的特点 .....	14
1.5.4 目前市场上流行的嵌入式操作系统 .....	15
1.6 嵌入式系统的开发 .....	18
1.6.1 嵌入式系统设计流程 .....	18
1.6.2 嵌入式系统开发中的一些问题 .....	20
本章要点 .....	28
习题 .....	28
<b>第 2 章 ARM 及其编程模型</b> .....	29
2.1 ARM 简介 .....	29
2.2 RISC 体系结构 .....	30
2.3 ARM 体系结构 .....	30
2.3.1 ARM 体系结构的版本 .....	30
2.3.2 ARM 体系结构的变种及版本命名格式 .....	32
2.3.3 ARM 处理器系列 .....	34
2.4 ARM 微处理器的编程模型 .....	38
2.4.1 ARM 处理器支持的数据类型 .....	38

2.4.2	ARM 处理器的工作状态 .....	39
2.4.3	ARM 处理器的工作模式 .....	40
2.4.4	ARM 状态下的寄存器组织 .....	40
2.5	ARM 的异常中断 .....	44
2.5.1	ARM 体系结构所支持的异常类型 .....	45
2.5.2	异常的响应及返回 .....	45
2.5.3	各类异常及返回 .....	47
2.6	ARM7TDMI 处理器内核简介 .....	50
2.6.1	ARM7TDMI 介绍 .....	51
2.6.2	ARM7TDMI 处理器核的硬件接口 .....	53
	本章要点 .....	57
	习题 .....	58
<b>第 3 章</b>	<b>ARM 指令集</b> .....	<b>59</b>
3.1	ARM 指令集概述 .....	59
3.1.1	ARM 指令的编码格式 .....	59
3.1.2	ARM 指令的条件码域 .....	60
3.1.3	指令流水线 .....	60
3.2	ARM 寻址方式 .....	61
3.3	ARM 指令分类介绍 .....	64
3.3.1	数据处理指令 .....	64
3.3.2	分支指令 .....	71
3.3.3	存储器访问指令 .....	73
3.3.4	程序状态寄存器与通用寄存器之间的传送指令 .....	78
3.3.5	协处理器指令 .....	79
3.3.6	异常中断产生指令 .....	81
3.4	Thumb 指令集 .....	82
3.4.1	Thumb 指令集概述 .....	82
3.4.2	Thumb 寄存器和 ARM 寄存器之间的关系 .....	83
3.4.3	Thumb 指令分类介绍 .....	84
	本章要点 .....	94
	习题 .....	94
<b>第 4 章</b>	<b>嵌入式程序设计</b> .....	<b>95</b>
4.1	汇编语言程序结构 .....	95
4.1.1	ARM 编译模式与开发环境 .....	95
4.1.2	ARM 汇编语言的伪操作、伪指令与宏指令 .....	98
4.1.3	CodeWarrior 编译器下的伪操作与伪指令 .....	99
4.2	ARM 汇编语言程序设计 .....	106
4.2.1	ARM 汇编中的文件格式 .....	106

4.2.2	ARM 汇编语法格式 .....	106
4.2.3	ARM 汇编程序设计 .....	110
4.2.4	ARM 与 Thumb 之间的状态转换及函数的互相调用 .....	118
4.3	C 语言与汇编语言混合编程 .....	120
4.3.1	C 程序与汇编程序的相互调用规则 .....	120
4.3.2	内嵌汇编程序设计 .....	123
4.3.3	C 语言函数和 ARM 汇编语言函数间互相调用 .....	127
	本章要点 .....	128
	习题 .....	128
<b>第 5 章</b>	<b>ARM7 嵌入式最小系统设计 .....</b>	<b>130</b>
5.1	系统设计概述 .....	130
5.2	S3C44B0X 嵌入式微处理器 .....	131
5.2.1	S3C44B0X 引脚及信号描述 .....	132
5.2.2	S3C44B0X 特性 .....	135
5.2.3	ARM7 嵌入式存储器体系 .....	139
5.2.4	S3C44B0X 的存储控制器 .....	141
5.3	S3C44B0X 嵌入式最小系统硬件电路 .....	148
5.3.1	电源、复位、时钟电路和 JTAG 接口 .....	148
5.3.2	Flash 存储器接口电路 .....	149
5.3.3	SDRAM 存储器接口电路 .....	150
5.4	S3C44B0X 的存储器接口设计 .....	151
5.4.1	Flash 存储器设计 .....	151
5.4.2	SDRAM 存储器设计 .....	157
5.5	S3C44B0X 的中断控制器介绍与设计 .....	162
5.5.1	中断控制器概述 .....	162
5.5.2	中断式键盘的软硬件设计 .....	169
5.5.3	中断式键盘的应用编程 .....	171
5.6	S3C44B0X 嵌入式系统的启动程序 .....	174
5.6.1	BootLoader 介绍 .....	174
5.6.2	启动程序设计实例 .....	175
	本章要点 .....	182
	习题 .....	182
<b>第 6 章</b>	<b>S3C44B0X 嵌入式系统通用接口设计 .....</b>	<b>183</b>
6.1	S3C44B0X 的通用 I/O 端口 .....	183
6.1.1	S3C44B0X 的 I/O 端口 .....	183
6.1.2	S3C44B0X 芯片与端口相关的寄存器 .....	185
6.1.3	应用实例 .....	186
6.2	串行通信接口 .....	188

6.2.1	概述 .....	188
6.2.2	S3C44B0X 的串行通信单元 .....	189
6.2.3	UART 操作 .....	189
6.2.4	UART 寄存器 .....	194
6.2.5	串行通信的应用与编程 .....	198
6.3	定时器 .....	200
6.3.1	概述 .....	200
6.3.2	S3C44B0X PWM 定时器 .....	201
6.3.3	PWM 定时器工作原理 .....	201
6.3.4	PWM 定时器操作 .....	202
6.3.5	PWM 定时器的特殊功能寄存器 .....	205
6.3.6	PWM 定时器的应用编程 .....	209
6.4	LCD 控制器 .....	210
6.4.1	概述 .....	210
6.4.2	液晶显示屏原理 .....	211
6.4.3	S3C44B0X LCD 控制器 .....	212
6.4.4	开发实例设计 .....	218
6.4.5	参考程序 .....	220
	本章要点 .....	223
	习题 .....	223
<b>第 7 章</b>	<b><math>\mu</math>C/OS-II 多任务操作系统与开发 .....</b>	<b>224</b>
7.1	$\mu$ C/OS-II 操作系统内核结构 .....	224
7.1.1	$\mu$ C/OS-II 操作系统主要特点 .....	224
7.1.2	$\mu$ C/OS-II 操作系统的任务与调度 .....	226
7.1.3	$\mu$ C/OS-II 初始化与启动 .....	238
7.2	$\mu$ C/OS-II 操作系统任务管理 .....	240
7.2.1	创建任务与任务堆栈 .....	240
7.2.2	任务的操作 .....	251
7.3	$\mu$ C/OS-II 操作系统任务间通信与同步 .....	256
7.3.1	任务间的通信与同步概述 .....	256
7.3.2	基于消息邮箱的任务间通信 .....	256
7.3.3	基于信号量任务间通信 .....	258
	本章要点 .....	263
	习题 .....	263
<b>第 8 章</b>	<b><math>\mu</math>C/OS-II 操作系统程序设计与移植 .....</b>	<b>265</b>
8.1	$\mu$ C/OS-II 操作系统程序设计方法 .....	265
8.1.1	$\mu$ C/OS-II 操作系统的数据类型 .....	265
8.1.2	$\mu$ C/OS-II 操作系统程序设计 .....	265

8.2	$\mu$ C/OS-II 操作系统扩展 .....	270
8.2.1	$\mu$ C/OS-II 操作系统内核扩展 .....	270
8.2.2	程序设计综合实例 .....	272
8.3	$\mu$ C/OS-II 操作系统的移植 .....	290
8.3.1	$\mu$ C/OS-II 操作系统移植规划 .....	290
8.3.2	$\mu$ C/OS-II 操作系统移植过程 .....	291
8.4	$\mu$ C/OS-II 操作系统移植测试 .....	297
	本章要点 .....	299
	习题 .....	299
<b>第 9 章</b>	<b>ADS 集成开发环境介绍与使用</b> .....	<b>300</b>
9.1	ARM Developer Suite .....	300
9.1.1	ADS 和 RVDS 介绍 .....	300
9.1.2	ARM 硬件仿真器 .....	302
9.2	ADS 集成开发环境使用说明 .....	303
9.2.1	ADS 的命令行与开发工具 .....	303
9.2.2	ADS 1.2 安装与系统配置 .....	312
9.2.3	ADS 工程项目管理 .....	325
9.2.4	代码编译与加载调试 .....	332
9.2.5	ADS 与实验平台的连接 .....	339
	本章要点 .....	339
	习题 .....	340
<b>附录 A</b>	<b>ARM 指令集和 Thumb 指令集速查表</b> .....	<b>341</b>
<b>附录 B</b>	<b>伪操作与伪指令</b> .....	<b>349</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>354</b>
<b>参考网站</b>	.....	<b>354</b>

# 第 1 章 概 述

## 1.1 嵌入式系统

### 1.1.1 嵌入式系统的定义

嵌入式系统是一个相对模糊的概念，国内一般定义为：以应用为中心，计算机技术为基础，软硬件可裁剪，以适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。

由此可以看出嵌入式系统实际上是嵌入式计算机系统，不过它是嵌入到更大的、专用的应用系统中的计算机系统，是实际应用系统的一个部件。因此，也有人把嵌入式系统定义为：嵌入到对象体系中的专用计算机系统。对象系统是指嵌入式系统所嵌入的宿主系统。

### 1.1.2 嵌入式系统的发展历史

嵌入式计算机系统起源于微型机时代，近几年网络、通信、多媒体技术的发展为嵌入式系统应用开辟了广阔的天地，使嵌入式系统成为继 PC 和 Internet 之后 IT 界新的技术热点。

20 世纪 70 年代发展起来的微型计算机，由于体积小、功耗低、结构简单、可靠性高、使用方便、性能价格比高等一系列优点，得到了广泛的应用和迅速的普及。这种微型计算机可以作为电子设备的一个部件，嵌入在设备中，成为整个系统工作的核心控制器件。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，称为嵌入式计算机系统。由此可见，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。

尽管嵌入式系统起源于微型机时代，但微型计算机的体积、价位和可靠性都无法满足广大对象系统的嵌入式应用要求，因此，将计算机做在一个芯片上，构成单片机系统是嵌入式应用的必然要求。1976 年，Intel 公司推出了 MCS-48 单片机，这个只有 1KB ROM 和 64B RAM 的简单芯片成为世界上第一个单片机，同时也开创了将微处理机系统的各种 CPU 外的资源（如 ROM、RAM、定时器、并行口、串行口及其他各种功能模块）集成到 CPU 硅片上的时代。1980 年，Intel 公司对 MCS-48 单片机进行了全面完善，推出了 8 位 MCS-51 单片机，并获得巨大成功，奠定了嵌入式系统的单片机应用模式。至今，MCS-51 单片机仍在大量使用。1984 年，Intel 公司又推出了 16 位 8096 系列并将其称之为嵌入式微控制器，这可能是“嵌入式”一词第一次在微处理机领域出现。

此外，为了高速、实时地处理数字信号，1982 年诞生了首枚数字信号处理芯片

(DSP), DSP 是模拟信号转换成数字信号以后进行高速实时处理的专业处理器, 其处理速度比当时最快的 CPU 还快 10~50 倍。随着集成电路技术的发展, DSP 芯片的性能不断提高, 目前已广泛用于通信、控制、计算机等领域。

在近 30 年的历史中, 各种改进的、面向具体应用的不同品牌单片机层出不穷, 得到了广泛应用, 但这些应用基本上是基于硬件底层的单线程程序。20 世纪 90 年代后, 伴随着网络时代的来临, 网络、通信、多媒体技术得以发展, 8/16 位单片机在速度和内存容量上已经很难满足这些领域的应用需求。而由于集成电路技术的发展, 32 位微处理器价格不断下降, 综合竞争能力已可以和 8/16 位单片机媲美。32 位微处理器面向嵌入式系统的高端应用, 由于速度快, 资源丰富, 加上应用本身的复杂性、可靠性要求等, 软件的开发一般会需要操作系统平台支持。近几年, 嵌入式设备 (内部有嵌入式系统的产品) 大量涌现, 如手机、PDA、MP3、微波炉、数码照相机、机顶盒、各种网络设备等。嵌入式系统开发应用需求越来越大, 使嵌入式系统成为继 PC 和 Internet 之后 IT 技术的最热点, 而构成嵌入式系统的主流趋势是 32 位嵌入式微处理器加实时多任务操作系统, 目前的嵌入式系统往往指的是包含这种资源的系统。

### 1.1.3 嵌入式计算机系统与通用计算机系统

嵌入式计算机系统是相对于通用计算机系统而言的。市面上的通用计算机 (PC 机), 从外观上看主要由主机 (箱)、显示器、键盘、鼠标等组成, 其中主机箱内包含主板 (含 CPU、芯片组、各种总线插槽等)、内存、显卡/声卡/网卡等扩展板、软驱、光驱、硬盘、电源等。它要求满足各种不同的应用需求, 因而要求有丰富的硬件资源、完善的操作系统、高速的运算和海量的存储, 技术发展方向是总线速度的无限提升以及存储容量的无限扩大。而嵌入式计算机系统则是面向具体应用, 要有针对具体应用的“量体裁衣”的软、硬件, 操作系统一般采用实时操作系统, 技术发展方向是与对象系统密切相关的嵌入性能、控制能力与控制的可靠性。嵌入式计算机系统同通用计算机系统相比具有以下特点:

- 嵌入式系统通常是面向特定应用的, 某种应用的目的和功能相对专一。应用的多样性决定了硬件平台的多样性。嵌入式 CPU 与通用型 CPU 的最大不同就是嵌入式 CPU 大多工作在为特定用户群设计的系统中, 它通常都具有低功耗、体积小、集成度高等特点, 能够把通用系统中许多由单独芯片或板卡完成的功能集成在芯片内部, 从而有利于嵌入式系统设计趋于小型化、低功耗, 移动能力大大增强, 跟网络的耦合也越来越紧密。
- 大多嵌入式系统都有实时性要求, 在高端应用中, 为满足应用需求、增强可靠性和便于开发, 往往要有实时多任务操作系统的支持。
- 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。
- 功耗、成本和可靠性对嵌入式系统有特别重要的意义。
- 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进入市场后具有较长的生命周期。

- 嵌入式系统本身不具备自主开发能力，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，必须有一套交叉开发工具和环境才能进行开发。
- 嵌入式系统工业是不可垄断的高度分散的工业，充满了竞争、机遇与创新，是一个可以大有作为的行业。

## 1.2 嵌入式系统的组成

嵌入式系统由硬件和软件组成，两类不同的嵌入式系统结构模型见图 1.1。硬件是整个嵌入式操作系统和应用程序运行的平台，不同的应用通常有不同的硬件环境。嵌入式系统的硬件部分包括处理器/微处理器、存储器、I/O 接口及输入/输出设备。嵌入式系统的软件由嵌入式操作系统和应用程序组成。嵌入式操作系统完成嵌入式应用的任务调度和控制等核心功能，嵌入式应用程序运行于操作系统之上（对于一些简单的嵌入式应用系统，应用程序可以不需要操作系统的支持，直接运行在底层，见图 1.1（a）），利用操作系统提供的机制完成特定功能的嵌入式应用。

由于嵌入式系统的灵活性和多样性，图 1.1 中各个层次之间缺乏统一的标准，几乎每一个独立的系统都不一样，这样就给上层的软件设计人员开发应用程序带来了极大的困难。

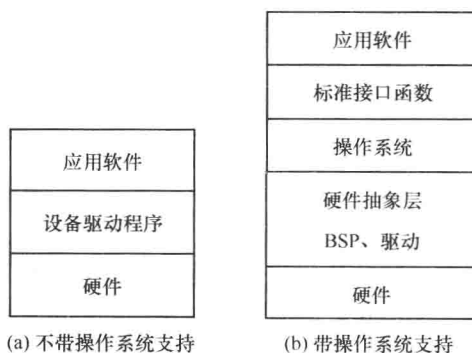


图 1.1 两类不同的嵌入式系统结构模型

### 1.2.1 嵌入式系统的硬件组成

嵌入式系统的硬件组成见图 1.2。

#### 1. 嵌入式处理器

嵌入式系统的核心是各种类型的嵌入式处理器，嵌入式处理器的体系结构经历了从 CISC（复杂指令集）到 RISC（精简指令集）和 Compact RISC 的转变，位数则由 4 位、8 位、16 位、32 位逐步发展到 64 位。现在常用的嵌入式处理器可分为低端的嵌入式微控制器（microcontroller unit, MCU）、中高端的嵌入式微处理器（embedded micro-

processor unit, EMPU)、嵌入式 DSP 处理器 (embedded digital signal processor, EDSP) 和高度集成的嵌入式片上系统 (system on a chip, SoC)。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。

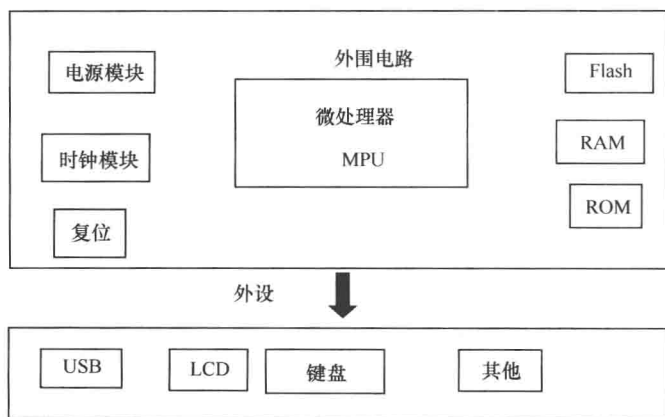


图 1.2 嵌入式系统的硬件组成

## 2. 存储器

嵌入式系统有别于一般的通用计算机系统, 它不具备像硬盘那样大容量的存储介质, 而用静态易失型存储器 (RAM、SRAM)、动态存储器 (DRAM) 和非易失型存储器 (ROM、EPROM、EEPROM、Flash) 作为存储介质, 其中 Flash 凭借其可擦写次数多、存储速度快、存储容量大、价格低廉等优点, 在嵌入式领域内得到了广泛应用。

## 3. I/O 接口

I/O 接口是处理器与 I/O 设备连接的桥梁, 与通用型 CPU 不同的是嵌入式处理器芯片将通用计算机中许多由单独芯片或板卡完成的接口功能集成到芯片内部, 从而有利于嵌入式系统在设计时趋于小型化, 同时还具有很高的效率和可靠性。

## 4. 输入/输出设备

为使嵌入式系统具有友好的界面, 方便人机交互, 嵌入式系统中需配置输入、输出设备, 常用的输入/输出设备有液晶显示器 (LCD)、触摸板、键盘等。

嵌入式系统开发的硬件平台选择主要是嵌入式处理器的选择。在具体应用中处理器的选择决定了其市场竞争力。在一个系统中使用什么样的嵌入式处理器主要取决于应用领域、用户的需求、成本、开发的难易程度等因素。在开发过程中, 选择最适用的硬件平台是一项很复杂的工作, 包括要考虑其他工程的影响以及缺乏完整或准确的信息等。

## 1.2.2 嵌入式系统的软件组成

### 1. 嵌入式操作系统

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，它是嵌入式系统（包括硬、软件系统）极为重要的组成部分，通常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。嵌入式操作系统具有通用操作系统的基本特点，如能够有效管理越来越复杂的系统资源；能够把硬件虚拟化、使得开发人员从烦琐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。与通用操作系统相比较，嵌入式操作系统在系统的实时高效性、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。

### 2. 嵌入式应用软件

嵌入式应用软件是针对特定应用领域，基于某一固定的硬件平台，用来达到用户预期目标的计算机软件。由于用户任务可能有时间和精度上的要求，因此有些嵌入式应用软件需要特定嵌入式操作系统的支持。嵌入式应用软件和普通应用软件有一定的区别，它不仅要求其准确性、安全性和稳定性等方面能够满足实际应用的需要，而且还要尽可能地优化，以减少对系统资源的消耗，降低硬件成本。

### 3. 硬件抽象层

硬件抽象层（hardware abstraction layer, HAL）是位于操作系统内核与硬件电路之间的接口层，其目的在于将硬件抽象化。也就是说，可通过程序来控制所有硬件电路，如 CPU、I/O、存储器等的操作。这样就使得系统的设备驱动程序与硬件设备无关，从而大大提高了系统的可移植性。

### 4. 板级支持包

板级支持包（board support package, BSP）是 HAL 的一种实现，是介于主板硬件和操作系统中驱动层程序之间的一层，一般认为它属于操作系统的一部分，主要是实现对操作系统的支持，为上层的驱动程序提供访问硬件设备寄存器的函数包，使之能够更好地运行于硬件主板。

### 5. 设备驱动程序

计算机系统中安装设备后，只有在安装相应的设备驱动程序之后才能使用，驱动程序为上层软件提供设备的操作接口。上层软件只需调用驱动程序提供的接口，而不用理会设备的具体内部操作。

### 6. 操作系统的应用程序接口

操作系统的应用程序接口（application programming interface, API）是一系列复

杂的函数、消息和结构的集合体。嵌入式操作系统下的 API 和一般操作系统下的 API 在功能、含义及知识体系上完全一致。

嵌入式应用软件是实现嵌入式系统功能的关键，对嵌入式系统软件和应用软件的要求也和通用计算机有所不同。嵌入式软件主要有以下一些特点。

- 软件要求固化存储。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嵌入式微处理器本身中，而不是存储于磁盘等载体中。
- 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，以减小程序二进制代码长度、提高执行速度。
- 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。
- 嵌入式系统软件需要实时多任务操作系统开发平台（RTOS）。为满足实时性应用需求、充分利用硬件资源、增强可靠性和便于开发，实时多任务操作系统成为嵌入式软件必需的系统软件。
- 在嵌入式系统的软件开发过程中，采用 C 语言将是最佳的选择。

### 1.3 嵌入式系统的主要应用领域

嵌入式系统目前已在国防、国民经济及社会生活各领域普及应用，用于企业、军队、办公室、实验室以及个人家庭等各种场所，见图 1.3。

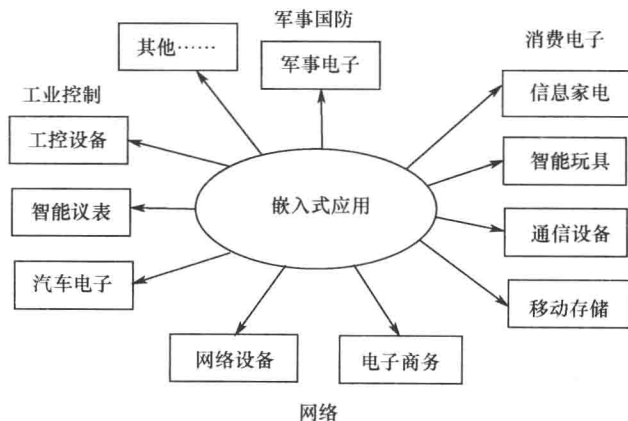


图 1.3 嵌入式系统的应用领域

- 军用。各种武器控制（火炮控制、导弹控制、智能炸弹制导引爆装置）、坦克、舰艇、轰炸机等陆海空各种军用电子装备，雷达、电子对抗军事通信装备，野

战指挥作战用各种专用设备。

- 消费电子。我国各种信息家电产品，如数字电视机、机顶盒、数码照相机、VCD、DVD、音响设备、可视电话、家庭网络设备、洗衣机、电冰箱、智能玩具等，广泛采用微处理器/微控制器及嵌入式软件。随着市场需求的拓展和技术进步，传统手机逐渐发展成为融合了 PDA、电子商务和娱乐等特性的智能手机，我国移动通信市场潜力巨大，发展前景看好。
- 工业控制。各种智能测量仪表、数控装置、可编程控制器、控制机、分布式控制系统、现场总线仪表及控制系统、工业机器人、机电一体化机械设备、汽车电子设备等，广泛采用微处理器/控制器芯片级、标准总线的模板级及系统嵌入式计算机。
- 网络应用。Internet 的发展，产生了大量网络基础设施、接入设备、终端设备的市场需求，这些设备中大量使用嵌入式系统。
- 其他。各类收款机、POS 系统、电子秤、条形码阅读机、商用终端、银行点钞机、IC 卡输入设备、取款机、自动柜员机、自动服务终端、防盗系统、各种银行专业外围设备以及各种医疗电子仪器，无一不用到嵌入式系统。嵌入式系统可以说无处不在，无所不在，有着广阔的发展前景，也充满了机遇和挑战。

## 1.4 嵌入式处理器

### 1.4.1 嵌入式处理器分类

嵌入式系统的硬件核心是嵌入式处理器。区分嵌入式处理器的一个重要指标就是“位数”，即处理器处理二进制数据的宽度。我们常说某处理器是 8 位或 16 位，指的就是这一参数。

嵌入式处理器已从最初的 4 位、8 位发展到了今天的 16 位、32 位以至 64 位。嵌入式系统的发展是如此迅猛，以致没有人能说清世界上到底有多少种嵌入式处理器。据不完全统计，全世界嵌入式处理器的品种总量已经超过 1000 种，仅流行的体系结构就有 30 种以上，其中包括大家熟悉的 8 位 MCS-51 系列和现在流行的 32 位 ARM 系列。

除了按位数来划分外，要对嵌入式处理器进行准确分类是一件困难的事情，很难找到公认的统一的标准。不管如何划分，总是存在争议，目前业界有关嵌入式处理器的分类主要有 MPU、MCU、DSP 和 SoC。

#### 1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器（microprocessor unit, MPU）由通用计算机的 CPU 演化而来。由于嵌入式系统通常应用于比较恶劣的环境中，因而嵌入式处理器在工作温度、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。为满足这些特殊要求，就需要对处理器进行“增强”处理。嵌入式微处理器具有体积小、质量轻、成本低、可靠性高的优点。嵌入式处理器目前主要有 Am186/88、386EX、SC-400、PowerPC、68000、MIPS 和 ARM 系列等。