



普通高等教育“十三五”创新型规划教材
理论+实践+数字资源一体化规划教材

ARM 嵌入式系统 原理与应用



主编 王晓峰 杨国雨 陈付龙

ARM 嵌入式系统原理与应用

王晓峰 杨国雨 陈付龙 主 编

 电子科技大学出版社

· 成都 ·

图书在版编目(CIP)数据

ARM 嵌入式系统原理与应用 / 王晓峰, 杨国雨, 陈付龙主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2019. 7
ISBN 978 - 7 - 5647 - 7220 - 8

I. ①A… II. ①王… ②杨… ③陈… III. ①微处理器 - 系统设计 IV. ①TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 142322 号

内容简介

《ARM 嵌入式系统原理与应用》作为嵌入式系统设计教程, 全面地阐述了嵌入式系统的软硬件技术及其应用设计的基本方法和过程。本书在全面介绍 Cortex-A8 处理器的体系结构、编程模型、指令系统及开发环境的同时, 基于 Cortex-A8 内核的处理器 S5PV210, 详细阐述了其结构和指令集、Linux 裁剪和移植技术、网络编程、驱动程序的编程技术和 Qt 应用编程技术, 并提供了在物联网中的应用工程案例。书中所涉及的技术领域均提供源代码, 便于读者了解和学习。

本书可作为高等院校电子类、通信类、自动化类和计算机类等各专业“嵌入式系统”课程的教材, 也可供从事嵌入式系统应用开发的工程技术人员参考。

ARM 嵌入式系统原理与应用

ARM QIANRUSHI XITONG YUANLI YU YINGYONG

王晓峰 杨国雨 陈付龙 主编

策划编辑 高小红
责任编辑 谭炜麟

出版发行 电子科技大学出版社
成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestep.com.cn
服务电话 028 - 83203399
邮购电话 028 - 83201495

印 刷 湖北鄂南新华印刷包装股份有限公司
成品尺寸 185mm × 260mm
印 张 18.5
字 数 458 千字
版 次 2019 年 7 月第一版
印 次 2019 年 7 月第一次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 5647 - 7220 - 8
定 价 52.80 元

版权所有, 侵权必究

前言

随着计算机技术近几十年的飞速发展，嵌入式系统已经在很大程度上改变了人们的工作、生活和娱乐方式。嵌入式系统在工业自动化、国防、交通和航空航天等很多产业中得到了广泛的应用。在日常生活中，嵌入式系统已经渗透到了方方面面。嵌入式系统由三层结构组成，分别为硬件层、系统层和应用层。其中，硬件层涉及 CPU 特性及板级电路的设计；系统层主要涉及操作系统的移植及驱动程序的设计，通过抽象过程完成硬件层与应用层的隔离；应用层建立在系统层之上，主要完成用户应用程序的编写和调试。

作为 ARM 的一个关键转型产品，Cortex-A8 备受瞩目，因其可在 Android、Linux 和 WinCE 系统之间切换，所以在手机、平板、工控三大领域得到了大量的应用。Cortex-A8 设计用来满足需要高性能、高功效、Web 连接的市场需求，其中包括智能手机、上网本、机顶盒、数字电视、家庭网络、存储网络 (NAS)、打印机，Cortex-A8 处理器还获得了主流 EDA 和操作系统的支持，紧跟社会需求。本书选择 ARM Cortex-A8 处理器进行深入的讲解。

本书以嵌入式系统设计为主干线，按照系统设计流程组织教材的结构。主要包含：嵌入式系统概述，ARM 处理器体系结构，ARM 指令集，S5PV210 微处理器与接口，嵌入式 Linux 程序设计基础，嵌入式 Linux 开发环境的建立与系统移植，Linux 文件处理及 I/O 编程，socket 编程，嵌入式设备驱动程序设计，QT 图形界面应用程序开发，嵌入式系统开发设计案例，全书共分 11 章。

本书可作为高等院校电子类、通信类、自动化类和计算机类等各专业“嵌入式系统”课程的教材，也可供从事嵌入式系统开发工程技术人员参考。

本书的主编有：王晓峰（山西大学）、杨国雨（天津理工大学中环信息学院）、陈付龙（安徽师范大学）。副主编有：胡双喜（天津理工大学中环信息学院）、蒋维（青海民族大学）、阳俊（湖南城市学院）、许琼方（衡阳师范学院）、王成义（山东农业大学）、王昆（山西大学）、贾丽娜（山西大学）、梁瑞（西安翻译学院）。

本书在编写过程中，得到各位参编老师的大力支持，才最终圆满完成本书的撰写工作。在此向所有关心和支持本书编写工作的人士表示衷心的感谢。

由于计算机技术的迅速发展，且作者的实际工作经验及水平有限，书中若有错漏，望广大读者批评指正。

王晓峰
2019 年 6 月

目 录

第 1 章 嵌入式系统概述	1
1.1 嵌入式系统简介	1
1.1.1 嵌入式系统的基本概念	1
1.1.2 嵌入式系统的体系结构	2
1.1.3 嵌入式系统的特点	6
1.2 嵌入式系统的发展和应用领域	7
1.2.1 嵌入式系统的发展历史	7
1.2.2 嵌入式系统的发展前景及趋势	7
1.3 嵌入式操作系统	9
1.3.1 嵌入式操作系统的发展	9
1.3.2 嵌入式操作系统的特点	10
1.3.3 几种有代表性的嵌入式操作系统	11
1.4 嵌入式系统的开发过程	15
1.4.1 嵌入式应用系统开发	15
1.4.2 嵌入式系统设计与开发流程	16
1.4.3 嵌入式系统软件的特征	19
1.4.4 嵌入式软件开发人才需求和要求	19
第 2 章 ARM 处理器体系结构	21
2.1 ARM 处理器概述	21
2.1.1 ARM 处理器简介	21
2.1.2 ARM 体系结构发展	22
2.1.3 ARM 处理器系列主要产品	24
2.2 Cortex-A8 处理器结构	26
2.3 Cortex-A8 处理器工作模式和状态	28
2.3.1 Cortex-A8 处理器工作模式	28
2.3.1 Cortex-A8 处理器状态	29
2.4 Cortex-A8 数据类型	29
2.4.1 ARM 的基本数据类型	29
2.4.2 浮点数据类型	29
2.4.3 大/小端存储模式	31

2.4.3	寄存器组	31
2.5	Cortex-A8 存储器管理	34
2.5.1	协处理器	35
2.5.2	存储管理单元	35
2.5.3	高速缓存存储器 Cache	36
2.6	Cortex-A8 异常处理	37
2.6.1	异常向量和优先级	37
2.6.2	异常响应过程	38
2.6.3	异常返回过程	38
第3章	ARM 指令集	40
3.1	ARM 指令集概述	40
3.1.1	指令格式	41
3.1.2	指令的条件码	41
3.2	ARM 指令的寻址方式	42
3.2.1	立即寻址	42
3.2.2	寄存器寻址	43
3.2.3	寄存器移位寻址	43
3.2.4	寄存器间接寻址	43
3.2.5	变址寻址	44
3.2.6	多寄存器寻址	44
3.2.7	堆栈寻址	44
3.2.8	块复制寻址	45
3.2.9	相对寻址	45
3.3	ARM 指令简介	45
3.3.1	跳转指令	45
3.3.2	数据处理指令	47
3.3.3	程序状态寄存器处理指令	50
3.3.4	加载/存储指令	51
3.3.5	协处理器指令	52
3.3.6	异常产生指令	53
3.4	Thumb 指令简介	53
3.5	ARM 汇编语言编程简介	54
3.5.1	伪操作	54
3.5.2	伪指令	55
3.5.3	汇编语句格式	57
3.5.4	汇编语言的程序结构	57

3.6	C 语言与汇编语言的混合编程	58
3.6.1	子程序调用的基本规则	58
3.6.2	C 程序中的内联汇编、嵌入汇编	59
3.6.3	汇编中访问 C 语言程序变量	63
3.6.4	ARM 中的汇编和 C 语言相互调用	63
第 4 章	S5PV210 微处理器与接口	65
4.1	基于 S5PV210 微处理器的硬件平台体系结构	65
4.1.1	S5PV210 处理器简介	65
4.1.2	S5PV210 内部各模块介绍	66
4.2	存储系统	69
4.2.1	S5PV210 的地址空间	69
4.2.2	S5PV210 启动流程	71
4.3	时钟系统	72
4.3.1	S5PV210 时钟概述	72
4.3.2	S5PV210 的时钟结构	73
4.4	GPIO 接口	75
4.4.1	GPIO 概述	75
4.4.2	GPIO 寄存器	76
4.4.3	GPIO 操作步骤	76
4.4.4	一个 LED 灯的例子	77
4.5	串行通信接口	81
4.5.1	串行通信方式	82
4.5.2	RS-232C 串行接口	83
4.5.3	S5PV210 的异步串行通信	84
4.5.4	S5PV210 的 UART 寄存器	85
4.5.5	UART 通信示例	86
4.6	A/D 转换器	91
第 5 章	嵌入式 Linux 程序设计基础	94
5.1	Linux 系统下的开发环境以及常用工具介绍	94
5.1.1	Linux 编程	94
5.2	嵌入式 Linux 编译器	95
5.2.1	Linux 下 C 语言编译过程	97
5.2.2	GCC 编译器	98
5.2.3	GDB 调试技术	98
5.3	Makefile 使用	100
5.3.1	Makefile 基本原理	100

5.3.2	Makefile 变量	101
5.3.3	Makefile 规则	102
5.3.4	Make 命令的使用	102
5.3.5	autoconf 和 automake 生成 Makefile	103
第 6 章	嵌入式 Linux 开发环境的建立与系统移植	105
6.1	嵌入式交叉编译环境的搭建	105
6.2	嵌入式主机通信环境的配置	106
6.2.1	配置超级终端	108
6.2.2	TFTP 服务的配置	109
6.2.3	NFS 服务的配置	110
6.3	编译嵌入式 Linux 系统内核	113
6.3.1	U-Boot 的编译	113
6.3.2	内核裁剪配置及编译	113
6.3.3	文件系统的制作及编译	114
6.4	Bootloader 的原理	115
6.5	U-Boot 的代码结构和移植	116
6.6	嵌入式系统开发板的烧写	118
第 7 章	Linux 文件处理及 I/O 编程	120
7.1	Linux 文件系统概述	120
7.1.1	文件和目录的概念	120
7.1.2	文件的结构	121
7.1.3	文件的类型	122
7.1.4	文件系统的目录结构	123
7.1.5	文件和目录的存取权限	124
7.1.6	文件系统管理	126
7.1.7	Linux 文件系统原理	127
7.2	嵌入式 Linux 的文件处理	128
7.2.1	文件描述符及文件处理	128
7.2.2	Linux 设备文件的打开和创建	129
7.2.3	Linux 设备文件的读写	133
7.3	Linux 串口通信编程	135
7.3.1	Linux 串口通信基础	135
7.3.2	Linux 串口工作原理	136
7.3.3	Linux 串口打开及初始化	137
7.3.4	Linux 串口发送及接收	145
第 8 章	socket 编程	149
8.1	TCP/IP 协议简介	149

8.1.1	网络协议层次模型	149
8.1.2	网络模型的作用	150
8.1.3	网络通信遵循的原则	151
8.2	网络通信三要素	151
8.2.1	IP 地址	151
8.2.2	MAC 地址	151
8.2.3	端口号	152
8.3	socket 编程接口	152
8.3.1	创建套接字函数	152
8.3.2	socket 地址	154
8.3.3	网络字节序	155
8.3.4	socket 与地址的绑定	155
8.3.5	侦听	156
8.3.6	接受连接请求	156
8.3.7	连接	157
8.3.8	数据发送与数据接收	157
8.3.9	关闭和切断连接	158
8.3.10	socket 缓冲区	158
8.3.11	阻塞与非阻塞操作	159
8.4	socket 编程实例	160
8.4.1	TCP 通信例程	160
8.4.2	UDP 通信例程	162
第 9 章	嵌入式设备驱动程序设计	166
9.1	嵌入式设备驱动程序基础	166
9.1.1	设备驱动程序概述	166
9.1.2	设备驱动程序的框架	168
9.1.3	设备驱动程序的加载过程	169
9.1.4	设备驱动程序的功能接口函数模块	172
9.1.5	设备驱动程序重要的数据结构体	174
9.2	字符设备驱动程序	176
9.2.1	字符设备的重要数据结构	176
9.2.2	字符设备驱动框架	179
9.2.3	字符设备驱动程序编写实例	181
9.3	GPIO 驱动程序设计	185
9.3.1	GPIO 重要数据结构	185
9.3.2	GPIO 的驱动框架	187
9.3.3	GPIO 驱动框架编写实例	189

第 10 章	QT 图形界面应用程序开发	195
10.1	Qt 简介	195
10.2	Qt 的安装与配置	195
10.2.1	QtOpenSource 的安装	196
10.2.2	嵌入式 Qt 工具链的安装	198
10.2.3	QtCreator 的安装	202
10.2.4	Qt 的配置	203
10.3	Qt 程序设计	204
10.3.1	编辑界面文件	204
10.3.2	源代码完善与解读	204
10.3.3	x86 Linux 编译、调试与发布	206
10.3.4	EmbeddedLinux 编译、发布与运行	207
10.4	嵌入式网络通信程序	211
10.4.1	网络通信概述	211
10.4.2	嵌入式服务器端程序开发	217
10.4.3	嵌入式客户端程序开发	222
第 11 章	嵌入式系统开发设计案例	229
11.1	嵌入式系统设计方法介绍	229
11.1.1	传统的嵌入式系统设计方法	229
11.1.2	“协同设计”概念的嵌入式系统设计方法	230
11.2	基于 ARM 的嵌入式 Web 服务器设计实例	231
11.2.1	系统环境搭建	231
11.2.2	Web 服务器原理	232
11.2.3	嵌入式 Web 服务器设计	233
11.3	基于 cortex-A8 的智能安全网关系统	238
11.3.1	密码算法	238
11.3.2	安全网关系统设计	238
11.3.3	智能安全网关硬件设计	239
11.3.4	智能安全网关软件设计	240
11.4	基于嵌入式 linux 的智能安防门禁管理系统	258
11.4.1	韦根协议	258
11.4.2	SQLite 数据库	258
11.4.3	门禁系统设计	259
11.4.4	门禁控制器硬件设计	260
11.4.5	门禁控制器软件设计	260
	参考文献	286

嵌入式系统是一类专用的计算机系统，嵌入到较大的机械或电气系统中，一般由实时操作系统编程和控制，具有专用功能，通常包括嵌入式硬件、嵌入式软件和机械、电子部件等。嵌入式系统控制着当今许多常用的设备，从便携式设备(如数字手表和 MP3 播放器)到大型固定设备(如交通灯、工厂控制器)以及基本复杂的系统(如混合动力汽车、磁共振成像和航空电子设备)。当前制造的所有微处理器中，90% 以上用于嵌入式系统。本章主要介绍嵌入式系统的概念、体系结构、特点，并分析其发展趋势，帮助读者了解嵌入式操作系统和嵌入系统的开发过程。

本章重点难点

重点：嵌入系统的概念和体系结构；嵌入式操作系统。

难点：嵌入系统的体系结构；嵌入式系统的开发过程。

1.1 嵌入式系统简介

1.1.1 嵌入式系统的基本概念

按照计算机分类来分，把计算机分成通用计算机和嵌入式计算机。嵌入式系统也称为嵌入式计算机，是一种非通用计算机系统。根据 IEEE(国际电气和电子工程师协会)的定义，嵌入式系统是“用于控制、监视或者辅助操作机器和设备的装置”。具体来说，嵌入式系统是以应用为中心、计算机技术为基础，软硬件可裁剪，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。可以这样认为，嵌入式系统是一种专用的计算机系统，作为装置或设备的一部分。通常，嵌入式系统是一个控制程序存储在 ROM 中的嵌入式处理器控制板。事实上，所有带有数字接口的设备，如手表、微波炉、录像机、汽车等，都使用嵌入式系统，有些嵌入式系统还包含操作系统，但大多数嵌入式系统都是由单个程序实现整个控制逻辑。表 1.1 对比了通用计算机系统与嵌入式系统。

表 1.1 通用计算机系统与嵌入式系统对比

参数	通用计算机系统	嵌入式系统	
硬件	处理器	Intel、AMD 等 X86 系列，冯·诺依曼体系结构	微控制器(MCU)、微处理器(MPU)、数字信号处理器(DSP)、片上系统(SOC)，多为哈佛体系结构
	外存储器	硬盘、光盘、磁带等大容量存储器	ROM、Flash 等小容量存储器
	内存储器	大容量 SDRAM	中小容量 SDRAM
	外设	显示器、键盘、鼠标、声卡、显卡、网卡等，尽可能把相应的外设都扩展出来供用户使用	LCD、简易键盘、传感器、AD/DA、扩展卡，通常根据需要来选择配置
软件	固件	主板中的 BIOS	部分处理器中有，例如引导代码
	板卡支持包(BSP)	GRUB、LILO	板级支持包、Bootloader
	操作系统	Windows、Unix、Linux 等，几乎将所有组件都安装在系统中，整个系统较大	RT-Linux、WinCE、Symian、Vxworks、Android、iOS 等，通常根据需要裁剪内核，不需要全部模块，有的嵌入式系统不含操作系统
	应用软件	根据需要安装相应的软件，一般都较大	根据用户需要定制所需要的软件

按微处理器位数划分，嵌入式系统有 4 位、8 位、16 位、32 位、64 位等类型；按应用类别划分，有信息家电、通信、汽车电子、航空航天、移动设备、工业控制、环境监控等；按系统实时性划分，有硬实时和软实时类型；按应用复杂度划分，有简单单处理器系统、可扩展单处理系统、复杂嵌入式系统、过程系统等。简单单处理器系统使用单片嵌入式微处理器，集成了存储器、I/O 设备、接口设备，例如，Philips 的 89LPCxxx 系列、Motorola 的 MC68HC05、08 系列等，附加简单的元件(电源、时钟)就可以工作，常见于小型设备中(温度传感器、烟雾和气体探测器、断路器等)。嵌入式处理器可扩展的系统可使用片上存储器(~64KB)，也可以使用可扩展存储器，常见于过程控制、信号放大器、位置传感器、阀门传感器。复杂的嵌入式系统的嵌入式处理器功能强大，一般为 16 或 32 位，例如 ARM 系列、Motorola 的 PowerPC 系统、Coldfire 系列等，需要扩展存储器(1MB 以上)，常见于开关装置、控制器、电话交换机、电梯、数据采集系统、医疗、监视系统、诊断及实时控制系统。在制造或过程控制中使用的计算机系统，使仪器、机械、设备与计算机相连，并接受计算机监视和控制，常见于自动仓储系统、自动发货系统。

1.1.2 嵌入式系统的体系结构

嵌入式系统包括嵌入式硬件系统和嵌入式软件系统，如图 1.1 所示。嵌入式硬件系统主要包括嵌入式处理器和嵌入式外围设备。嵌入式软件系统一般包括嵌入式驱动程序、嵌入式操作系统、嵌入式支撑软件和嵌入式应用软件。

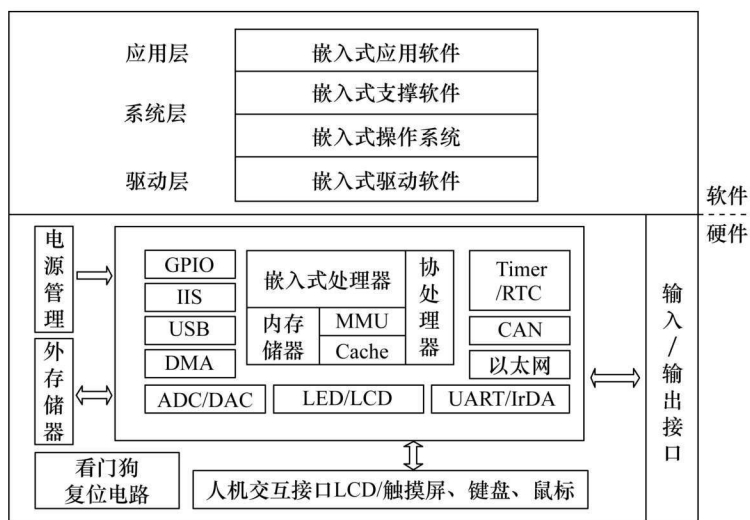


图 1.1 嵌入式系统构成

1. 嵌入式处理器

嵌入式处理器是嵌入式系统的核心部分，通常包括哈佛体系结构的微处理器、存储程序的 ROM、存储数据的 RAM 以及为微处理提供运算加速的协处理器等。按性能和用途不同，常见有嵌入式微处理器、嵌入式微控制器、嵌入式数字信号处理器、嵌入式片上系统等。

(1) 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器(Micro Processor Unit, MPU)是“最熟悉的陌生人”，一般是具有具有 16 和 32 位以上的处理器，具有较高的性能。但与通用计算机的处理器不同的是，在实际嵌入式应用中，只保留和嵌入式应用紧密相关的功能硬件，去除其他的冗余功能部分，一般运行嵌入式操作系统，这样就以最低的功耗和资源实现嵌入式应用的特殊要求。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。

全世界嵌入式微处理器品种总量已超过 1500 多种，流行的体系结构有 50 多个系列，目前主要的嵌入式微处理器有：AMD 公司的 Am186/88 和 Elan 系列，Intel 公司的 386EX 和 XScale，NS 公司的 Geode 系列，ST 公司的 STPC，Apple、IBM、Motorola 组成的 AIM 联盟的 Power PC，MIPS 公司的 MIPS 32 4Kc 和 MIPS 64 5Kc，ARM 公司的 ARM7、ARM9E、ARM10E、ARM11 和 Securcore 系列。多数为精简指令集计算机(Reduced Instruction Set Computer, RISC)。

MIPS 技术公司是一家设计制造高性能、高档次及嵌入式 32 位和 64 位处理器的厂商。MIPS 的意思是“无内部互锁流水级的微处理器(Microprocessor Without Interlocked Piped Stages)”。MIPS 系列微处理器是目前仅次于 ARM 的用得最多的处理器之一，其应用领域覆盖游戏机、路由器、激光打印机、掌上电脑等各个方面。

PowerPC 架构的特点是可伸缩性好，方便灵活，应用范围非常广泛。处理器芯片主要型号是 PowerPC750，采用先进的铜线技术，最高工作频率可达 500MHz。该处理器有许多

品种，以适合各种不同的系统，包括 IBM 小型机、苹果计算机和其他系统。

ARM 处理器以其极好的性能、极低的能耗以及能够根据市场需求进行功能的扩展的特点，主宰 32 位嵌入式处理器市场。ARM 公司设计先进的数字产品核心应用技术，提供广泛的产品，包括：16/32 位 RISC 微处理器、数据引擎、三维图形处理器、数字单元库、嵌入式存储器、外设、软件、开发工具以及模拟和高速连接产品，广泛用于汽车电子、消费娱乐产品、数字音频播放器、数字音乐板、游戏机、数字影像、工业控制、网络、安全、存储和无线产品。

(2) 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器(Microcontroller Unit, MCU)的典型代表是单片机，目前在嵌入式设备中仍然有着极其广泛的应用。单片机芯片内部集成 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、看门狗、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、Flash RAM、EEPROM 等各种必要功能和外设。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。MCU 比较有代表性的包括 8051、MCS-251、MCS-96/196/296、P51XA、C166/167、68K 系列以及 MCU 8XC930/931、C540、C541，并且有支持 I2C、CAN-Bus、LCD 及众多专用 MCU 和兼容系列。近来 Atmel 出产的 AVR 单片机由于其集成了 FPGA 等器件，所以具有很高的性价比，势必将推动单片机获得更高的发展。

(3) 嵌入式数字信号处理器

嵌入式数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)是专门用于信号处理方面的处理器，其在系统结构和指令算法方面进行了特殊设计，具有很高的编译效率和指令的执行速度。在数字滤波、FFT、谱分析等各种仪器上 DSP 获得了大规模的应用。目前最为广泛应用的是 TI 的 TMS320C2000/C5000 系列，另外如 Intel 的 MCS-296 和 Siemens 的 TriCore 也有各自的应用范围。

(4) 嵌入式片上系统

嵌入式片上系统(System On Chip, SoC)最大的特点是成功实现了软硬件无缝结合，直接在处理器片内嵌入操作系统的代码模块。而且 SoC 具有极高的综合性，在一个硅片内部运用 VHDL、Verilog 等硬件描述语言，实现一个复杂的系统。由于绝大部分系统构件都是在系统内部，整个系统就特别简洁，不仅减小了系统的体积和功耗，而且提高了系统的可靠性，提高了设计生产效率。由于 SoC 往往是专用的，所以大部分都不为用户所知，比较典型的 SoC 产品是 Xilinx 公司的 Zynq 和 Philips 的 Smart XAm，少数通用系列如 Siemens 的 TriCore、Motorola 的 M-Core、某些 ARM 系列器件、Echelon 和 Motorola 联合研制的 Neuron 芯片等。不久的将来，SoC 芯片也将在声音、图像、影视、网络及系统逻辑等应用领域中发挥重要作用。

2. 嵌入式外围设备

嵌入式外围设备种类较多，例如存储设备(如 RAM、SRAM、Flash 等)、通信设备(如 RS-232 接口、SPI 接口、以太网接口等)、显示设备(如显示屏等)、控制设备(如机械手、

舵机、滚轮、电机等)、传感设备(如温度传感器、超声波传感器、霍尔传感器、GPS等),与普通计算机硬件不同之处在于,可根据应用需要裁剪。

嵌入式系统内部外设与处理器集成在同一块芯片上,外部外设需通过接口电路与处理器连接。对于较简单的单片机,其芯片上的外设接口较少,连接外部设备需另行设计接口电路;而较复杂的处理器(如ARM系列)集成了丰富的外设接口单元,因此,使设计工作量大大减少。

3. 嵌入式驱动软件

嵌入式驱动软件包括嵌入式驱动程序、硬件抽象层(HAL)、板级支持包(BSP)等。嵌入式驱动程序一般指的是嵌入式设备驱动程序,是一种可以使嵌入式计算机和设备通信的特殊程序。相当于硬件的接口,操作系统只有通过这个接口,才能控制硬件设备的工作,假如某设备的驱动程序未能正确安装,便不能正常工作。HAL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。它隐藏了特定平台的硬件接口细节,为操作系统提供虚拟硬件平台,使其具有硬件无关性,可在多种平台上进行移植。从软硬件测试的角度来看,软硬件的测试工作都可分别基于硬件抽象层来完成,使得软硬件测试工作的并行进行成为可能。BSP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,通常包含了以基础支持代码来加载操作系统的引导程序以及主板上所有设备的驱动程序,使之能够更好地运行于硬件主板。BSP隔离了所支持的嵌入式操作系统与底层硬件平台之间的相关性,使嵌入式操作系统能够通用于BSP所支持的硬件平台,从而实现嵌入式操作系统的可移植性和跨平台性,以及嵌入式操作系统的通用性、复用性。

4. 嵌入式操作系统

操作系统(Operating System, OS)是管理电脑硬件与软件资源的程序,同时也是计算机系统的内核。操作系统是一个庞大的管理控制程序,大致包括五个方面的管理功能:进程与处理机管理、作业管理、存储管理、设备管理、文件管理。目前,微机上常见的操作系统有DOS、OS/2、UNIX、XENIX、Linux、Windows、Netware等。根据应用领域来划分,可分为桌面操作系统、服务器操作系统、主机操作系统、嵌入式操作系统。

早期的单片机由专用的监控程序控制,不含嵌入式操作系统。当前许多简单的单片机应用仍然使用监控程序作为控制软件,现在高端嵌入式系统软件都在嵌入式操作系统的支持下运行。嵌入式操作系统控制着应用程序与硬件的交互作用。一种嵌入式操作系统适合于一定的应用范围,如VRTX、pSOS、VxWorks、Windows CE、Linux、Palm、QNX、uC/OS-II等。不同的嵌入式操作系统具有完全不同的嵌入式应用软件。

嵌入式操作系统有非实时和实时之分,实时操作系统又有硬实时和软实时之分。实时是指能够对外部事件做出及时响应的系统,响应时间要有保证。对外部事件的响应包括:事件发生时要识别出来和在给定时间约束内必须输出结果。实时操作系统有多任务、线程优先级等、多种中断级别等特征。硬实时系统对系统响应时间有严格的要求,如果系统响

应时间不能满足就会引起系统崩溃或致命的错误。软实时系统对系统响应时间也有要求，但是如果系统响应时间不能满足，它并不会导致系统出现致命的错误或崩溃。

5. 嵌入式支撑软件

嵌入式支撑软件是用于帮助和支持嵌入式软件开发的软件，通常包括嵌入式数据库和开发工具。嵌入式数据库技术已得到广泛的应用，随着移动通信技术的进步，人们对移动数据处理提出了更高的要求，嵌入式数据库技术已经得到了学术、工业、军事、民用部门等各方面的重视。嵌入式移动数据库或简称为移动数据库(EMDBS)是支持移动计算或某种特定计算模式的数据库管理系统，数据库系统与操作系统、具体应用集成在一起，运行在各种智能型嵌入设备或移动设备上。其中，嵌入在移动设备上的数据库系统由于涉及数据库技术、分布式计算技术，以及移动通信技术等多个学科领域，目前已经成为一个十分活跃的研究和应用领域。国际上主要的嵌入式移动数据库系统有 Sybase、Oracle 等。我国嵌入式移动数据库系统以东软集团研究开发出了嵌入式数据库系统 OpenBASE Mini 为代表。嵌入式开发工具是支持嵌入式软件开发的工具软件。

6. 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，包括嵌入式应用程序及相关文档，控制着嵌入式系统的运作和行为。由于嵌入式系统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。目前我国市场上已经出现了各式各样的嵌入式应用软件，包括浏览器、Email 软件、文字处理软件、通信软件、多媒体软件、个人信息处理软件、智能人机交互软件、各种行业应用软件等。嵌入式系统中的应用软件是最活跃的力量，每种应用软件均有特定的应用背景，尽管规模较少，但专业性较强，所以嵌入式应用软件不像操作系统和支撑软件那样受制于国外产品垄断，是我国嵌入式软件的优势领域。

1.1.3 嵌入式系统的特点

(1) 系统内核小。由于嵌入式系统一般是应用于小型电子装置的，系统资源相对有限，所以操作系统内核较之传统的操作系统要小得多。

(2) 专用性强。嵌入式系统的个性化很强，其中的软件系统和硬件的结合非常紧密，一般要针对硬件进行系统的移植。即使在同一品牌、同一系列的产品中也需要根据系统硬件的变化和增减不断进行修改。

(3) 系统精简。嵌入式系统一般没有系统软件和应用软件的明显区分，不要求其功能设计及实现上过于复杂，这样一方面利于控制系统成本，同时也利于实现系统安全。

(4) 高实时性。这是嵌入式软件的基本要求，而且软件要求固化存储，以提高速度。软件代码要求高质量和高可靠性、实时性。

(5) 交叉开发。嵌入式系统开发需要开发工具和环境(交叉开发环境)。

1.2 嵌入式系统的发展和应用领域

1.2.1 嵌入式系统的发展历史

嵌入式系统的发展大致经历了嵌入式微控制器、嵌入式微处理器和嵌入式数字信号处理器、嵌入式片上系统和以 Internet 为标志的嵌入式系统等阶段。

第一阶段是嵌入式微控制器阶段，即单片机(单片微型计算机)时代。嵌入式系统的出现最初是基于单片机的，这一阶段的嵌入式系统硬件是单片机，软件停留在无操作系统阶段，采用汇编语言实现系统的功能。这阶段的主要特点是：系统结构和功能相对单一、处理效率低、存储容量也十分有限，几乎没有用户接口。1976年 Intel 公司推出了 8048 单片机，Motorola 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 256B 的 RAM、4KB 的 ROM、4 个 8 位并口、1 个全双工串行口、两个 16 位定时器。之后在 20 世纪 80 年代初，Intel 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一页，迄今为止，8051 系列的单片机仍然是最为成功的单片机芯片，在各种产品中有着非常广泛的应用。这些单片机使得汽车、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、更便宜。这些装置已经初步具备了嵌入式的应用特点，但是这时的应用只是使用 8 位的芯片，执行一些单线程的程序，还谈不上“系统”的概念。

第二阶段是嵌入式微处理器和嵌入式数字信号处理器阶段。1994 年英国 ARM 公司推出 ARM610 处理器，1998 年美国 TI 公司的 DSP 微处理器问世。主要的技术发展方向是：不断扩展对象系统要求的各种外围电路和接口电路，突显其对象的智能化控制能力。这一阶段主要以嵌入式微处理器或嵌入式数字信号处理器为基础、以简单操作系统为核心，主要特点是硬件使用嵌入式微处理器或嵌入式信号处理器，微处理器的种类繁多，通用性比较弱；系统开销小，效率高。

第三阶段是片上系统。主要特点是：嵌入式系统能够运行于各种不同类型的微处理器上，兼容性好，操作系统的内核小，效果好。

第四阶段是以 Internet 为标志的嵌入式系统。嵌入式网络化主要表现在两个方面，一方面是嵌入式处理器集成了网络接口，另一方面是嵌入式设备应用于网络环境中。

1.2.2 嵌入式系统的发展前景及趋势

消费类电子产品(如手机、MP3 和 MP4、PDA、玩具、数码相机、家电等)、各种电脑配件(如鼠标、键盘、U 盘、移动硬盘、打印机、扫描仪等)、各种网络设备(如路由器、集线器、交换机等)等、军事装备(导弹、雷达、坦克、潜艇、无人机、航天飞机等)等各类智能系统，无一不含有嵌入式系统。嵌入式系统目前已在军事装备、工业制造与过程控制、通信、机器人、仪器与仪表、汽车、船舶、交通管理、信息家电及家庭智能管理、消费类产品各领域普及应用，具有广阔的发展前景。