



普通高等学校  
电类规划教材

# ARM嵌入式系统 原理与应用

◎范山岗 王奇 刘启发 赵建立 余雪勇 编著

- 内容通俗易懂，脉络清晰明了
- 突出接口技术，采用代码示例
- 结合教学平台，重视实际应用



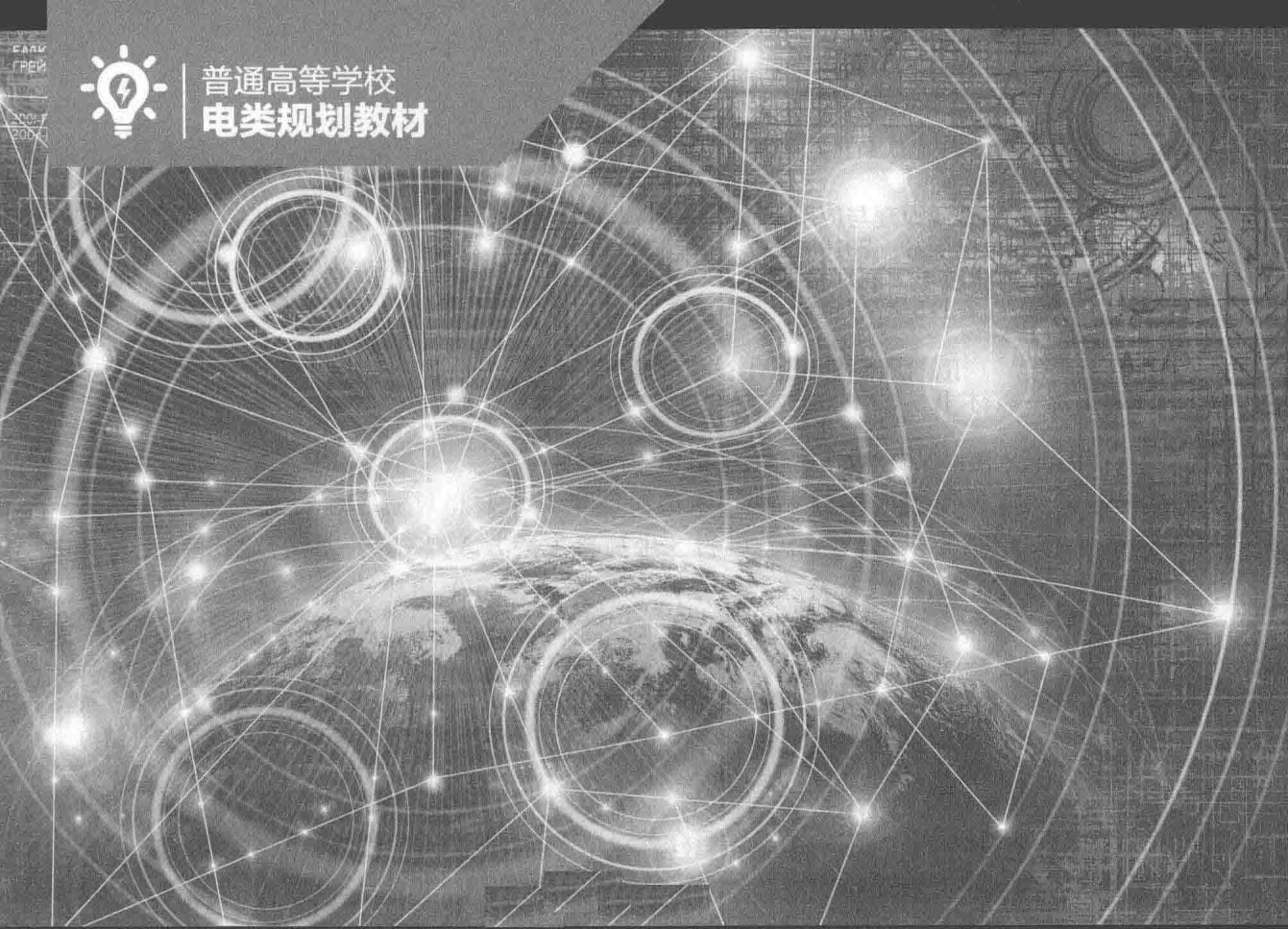
中国工信出版集团



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



普通高等学校  
电类规划教材



# ARM嵌入式系统 原理与应用



◎范山岗 王奇 刘启发 赵建立 余雪勇 编著

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

ARM嵌入式系统原理与应用 / 范山岗等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2018. 11  
普通高等学校电类规划教材  
ISBN 978-7-115-47471-1

I. ①A… II. ①范… III. ①微处理器—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP332

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第227986号

## 内 容 提 要

本书从实际应用的角度出发, 全面介绍嵌入式系统相关的概念、ARM 体系结构、ARM 指令系统、ARM 汇编语言及 C 语言程序设计基础、嵌入式系统硬件技术基础、基于 S3C2410 的硬件结构与接口编程、嵌入式 Linux 操作系统、嵌入式系统设计方法及开发实例。

本书重点突出, 层次分明, 注重理论与实践的联系, 不仅有详细的理论知识介绍, 还有相关的开发案例以供参考, 学习性和实用性较强。书中给出了大量实例, 引导读者理解相关原理, 掌握设计方法。此外, 为了方便开展课堂教学, 本书配套了授课电子课件。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、广播电视工程、软件工程、电气工程、自动化等相关专业的本科教材, 同时也可作为从事嵌入式系统应用与开发的工程技术人员学习参考用书。

---

◆ 编 著 范山岗 王 奇 刘启发 赵建立 余雪勇  
责任编辑 李 召  
责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 18.5 2018 年 11 月第 1 版  
字数: 452 千字 2018 年 11 月河北第 1 次印刷

---

定价: 56.00 元

读者服务热线: (010) 81055256 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

嵌入式系统是融合了计算机技术、半导体技术、电子技术和通信技术，与各行业的具体应用相结合后的产物。嵌入式技术自诞生之日起就被广泛应用于军事、航空航天、工业控制、仪器仪表、汽车电子、医疗仪器等众多领域。自 20 世纪 90 年代后，信息技术和网络技术飞速发展，消费电子、通信网络、信息家电等的巨大需求加速了嵌入式技术的发展。近年来，物联网和人工智能技术的发展进一步扩大了嵌入式技术的应用领域。

嵌入式技术应用的日益广泛，加大了社会对嵌入式人才的需求。在此背景下，对嵌入式技术的学习与研究成为持续的热点，很多高校开设了嵌入式技术的相关课程。

在众多嵌入式微处理器中，ARM 处理器以其合理的结构、优良的性能、丰富的产品线和颇具市场竞争力的价格等优点，成为嵌入式微处理器的主流产品。由于 ARM 处理器的广泛应用，也使得它成为高校开展嵌入式教学的最佳选择。

本书的编写，目的在于为嵌入式教学提供一本通俗易懂、脉络清晰的教材或参考书。本书以 ARM 处理器为例，从嵌入式系统硬件结构、到操作系统基础、再到系统设计案例，详细介绍了嵌入式系统的基本原理和开发方法。本书从应用出发，结合实验教学平台，给出了大量设计实例，为初学者提供了快速入门的学习途径。

本书共分 8 章。

第 1 章 嵌入式系统概述，介绍嵌入式系统的概念、发展历史、应用领域和发展趋势。

第 2 章 ARM 体系结构，介绍 ARM 处理器的体系结构。

第 3 章 ARM 指令系统，详细介绍 ARM 寻址方式和 ARM 指令系统。

第 4 章 ARM 汇编语言及 C 语言程序设计基础，介绍 ARM 汇编语言程序设计、C 语言程序设计、汇编语言与 C 语言混合程序设计方法。

第 5 章 嵌入式系统硬件技术基础，介绍嵌入式应用的硬件基础知识，包括总线、存储系统、通信与输入/输出等。

第 6 章 基于 S3C2410 的硬件结构与接口编程，以 S3C2410 处理器为例介绍 ARM 处理器常用片内外设的工作原理和接口编程方法。

第 7 章 嵌入式 Linux 操作系统，介绍嵌入式 Linux 操作系统的基础知识、Linux 交叉开发环境的建立方法以及 Linux 操作系统的引导过程等。

第 8 章 嵌入式系统设计方法及开发实例，结合嵌入式应用实例，介绍嵌入式系统的开发流程和开发方法。



本书由范山岗、王奇、刘启发、赵建立、余雪勇编著。本书在编写过程中得到了北京博创兴业科技有限公司的大力支持。该公司提供的 UP-NetARM2410-S 嵌入式系统实验教学平台，为本书的编著提供了测试环境。

由于编者的水平有限，加之时间仓促，书中难免存在疏漏与不足之处，欢迎读者批评指正。

编 者

2018 年 3 月

# 目 录

第1章 嵌入式系统概述	1	思考题与习题	62
1.1 嵌入式系统的概念	1	第4章 ARM汇编语言及C语言程序	
1.2 嵌入式系统的历史	2	设计基础	63
1.3 嵌入式系统的组成	4	4.1 ARM汇编语言的语句格式	63
1.3.1 嵌入式系统的组成结构	4	4.1.1 符号命名规则	63
1.3.2 嵌入式处理器	7	4.1.2 ARM汇编语言伪操作	63
1.3.3 典型的嵌入式操作系统	9	4.1.3 ARM汇编语言伪指令	64
1.4 嵌入式系统的特点	11	4.2 ARM汇编语言的程序结构	65
1.5 嵌入式系统的应用前景	12	4.3 ARM汇编语言程序设计举例	67
1.6 嵌入式系统的发展趋势	18	4.4 ARM C语言基础及混合编程	68
思考题与习题	20	4.4.1 APCS 概述	68
第2章 ARM体系结构	21	4.4.2 基本 APCS	69
2.1 ARM体系结构概述	21	4.4.3 ARM程序和Thumb程序的混合使用	71
2.1.1 ARM技术简介	21	4.4.4 C语言及汇编语言混合编程	71
2.1.2 ARM体系结构的版本	22	4.5 ARM汇编语言实验基础	76
2.1.3 ARM处理器内核系列	23	4.5.1 ADS软件组成	76
2.2 ARM体系架构分析	25	4.5.2 使用CodeWarrior IDE	80
2.2.1 复杂指令集和精简指令集	25	4.5.3 使用AXD IDE	87
2.2.2 普林斯顿结构和哈佛结构	26	思考题与习题	91
2.2.3 流水线技术	26	第5章 嵌入式系统硬件技术基础	92
2.3 ARM处理器模式与寄存器	29	5.1 总线	92
2.3.1 ARM处理器模式	29	5.1.1 并行总线	93
2.3.2 ARM内部寄存器	29	5.1.2 串行总线	94
2.4 ARM体系的异常处理	33	5.1.3 多总线结构	97
2.5 ARM体系的存储系统	35	5.1.4 直接存储器访问	97
思考题与习题	36	5.2 存储系统	98
第3章 ARM指令系统	37	5.2.1 存储器的基本概念及分类	99
3.1 指令集概述	37	5.2.2 随机存储器	99
3.2 ARM指令集	38	5.2.3 只读存储器	100
3.2.1 ARM指令格式	38	5.2.4 嵌入式系统的存储器组织	101
3.2.2 ARM指令寻址方式	39	5.2.5 存储器的选型	101
3.2.3 ARM指令分类	42	5.3 输入/输出设备及通信接口	102
3.3 Thumb指令集	51	5.3.1 输入/输出设备	102
3.3.1 Thumb状态寄存器组织	52	5.3.2 常用通信接口	102
3.3.2 Thumb指令	53	5.3.3 网络接口	105

5.4 嵌入式最小系统 .....	105	7.2 嵌入式 Linux 操作系统 .....	169
思考题与习题 .....	108	7.2.1 Linux 介绍 .....	169
<b>第 6 章 基于 S3C2410 的硬件结构与接口</b>		7.2.2 Linux 作为嵌入式操作系统的 优势 .....	171
<b>编程</b> .....	109	7.2.3 进程管理 .....	172
6.1 S3C2410 简介 .....	109	7.2.4 存储管理 .....	183
6.1.1 S3C2410X 的组成 .....	109	7.2.5 文件系统 .....	191
6.1.2 S3C2410X 的特点及主要片上 功能 .....	110	7.2.6 设备管理 .....	196
6.2 S3C2410X 的存储器及其控制 .....	114	7.3 嵌入式 Linux 操作系统的构建 .....	203
6.2.1 S3C2410X 的存储器控制器 .....	114	7.3.1 嵌入式 Linux 引导过程 .....	203
6.2.2 NAND Flash 控制器 .....	116	7.3.2 Linux 启动流程 .....	211
6.3 时钟和电源管理 .....	118	7.3.3 嵌入式 Linux 的移植 .....	212
6.3.1 S3C2410X 的时钟管理 .....	118	7.4 嵌入式 Linux 系统的软件开发 基础 .....	222
6.3.2 S3C2410X 的电源管理 .....	119	7.4.1 Linux 常用命令介绍 .....	222
6.4 通用 I/O 端口 .....	119	7.4.2 Linux 系统下的 vi 编辑器 .....	225
6.4.1 S3C2410X 通用 I/O 端口的工作 机制 .....	119	7.5 嵌入式 Linux 下交叉开发环境的 建立与软件开发过程 .....	226
6.4.2 S3C2410X 通用 I/O 端口编程实例 .....	123	7.5.1 嵌入式教学实验系统简介 .....	226
6.5 定时器 .....	125	7.5.2 嵌入式交叉开发环境的建立 .....	230
6.5.1 S3C2410X 定时器概述 .....	125	7.5.3 基于 Linux 的应用程序的开发 步骤 .....	237
6.5.2 S3C2410X 定时器的工作原理 .....	126	思考题与练习 .....	239
6.5.3 PWM 输出控制直流电动机应用 实例 .....	134	<b>第 8 章 嵌入式系统设计方法及开发</b> <b>实例</b> .....	240
6.6 异步串行通信接口 .....	137	8.1 引言 .....	240
6.6.1 S3C2410X 的异步串行口简介 .....	137	8.2 软件工程及嵌入式软件工程 .....	242
6.6.2 S3C2410X UART 工作原理 .....	138	8.2.1 概述 .....	243
6.6.3 S3C2410X UART 编程实例 .....	146	8.2.2 软件需求 .....	245
6.7 A/D 转换接口 .....	149	8.2.3 软件设计 .....	246
6.7.1 A/D 转换器简介 .....	149	8.2.4 统一建模语言 .....	247
6.7.2 A/D 转换的主要指标 .....	150	8.2.5 嵌入式软件编程 .....	251
6.7.3 S3C2410X A/D 转换接口 .....	151	8.3 基于嵌入式系统的雷达智能 停车位应用实例 .....	252
6.7.4 A/D 转换器应用实例 .....	153	8.3.1 背景及简介 .....	252
6.8 中断控制器 .....	155	8.3.2 设计目标 .....	253
6.8.1 S3C2410X 中断概述 .....	155	8.3.3 总体结构和原理 .....	254
6.8.2 中断控制相关寄存器 .....	158	8.3.4 系统前端及嵌入式信号处理 .....	255
6.8.3 S3C2410X 中断响应与返回 .....	163	8.3.5 无线通信模块开发 .....	262
6.8.4 中断编程举例 .....	164	8.4 基于 Android 操作系统平台的点餐 系统应用实例 .....	266
思考题与习题 .....	165	8.4.1 Android 简介 .....	266
<b>第 7 章 嵌入式 Linux 操作系统</b> .....	166		
7.1 操作系统简介 .....	166		
7.1.1 操作系统 .....	166		
7.1.2 嵌入式操作系统 .....	167		

8.4.2 Android 架构·····	267	附录 A GPIO 端口寄存器及引脚配置···	282
8.4.3 Android 未来及前景·····	268	附录 B 杂项控制寄存器·····	284
8.4.4 Android 应用程序基础·····	269	附录 C 外中断相关控制寄存器·····	285
8.4.5 Android 开发环境搭建·····	271	附录 D 通用状态寄存器·····	287
8.4.6 Android 工程目录结构·····	271	参考文献·····	288
8.4.7 点餐系统实现·····	272		
思考题与练习·····	281		



经过 40 多年的发展，嵌入式系统已经广泛应用在科学研究、工程设计、军事技术、各类产业、商业文化艺术、娱乐业、人们的日常生活等方方面面。随着数字信息技术和网络技术的飞速发展，计算机、通信、消费电子的一体化趋势日益明显，这必将培育出一个庞大的嵌入式应用市场。嵌入式系统技术也成为当前关注、学习、研究的热点。

## 1.1 嵌入式系统的概念

嵌入式系统是硬件和软件紧密结合的专用计算机系统。“嵌入式”反映了这些系统通常是更大系统中的一个组成部分。嵌入式系统本身是一个相对模糊的定义，不同的组织对其定义也略有不同，但大意是相同的，我们来看一下嵌入式系统的相关定义。

按照电气和电子工程师学会（IEEE）的定义，嵌入式系统是控制、监视或辅助机器和设备运行的装置。这个定义主要是从嵌入式系统的用途方面来进行定义的。更具一般性，也是在多数书籍资料中使用的关于嵌入式系统的定义：嵌入式系统是指以应用为中心，以计算机技术为基础，软件、硬件可剪裁，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积和功耗严格要求的专用计算机系统。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、I/O 端口、图形控制器等。软件包括操作系统软件（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。

由以上嵌入式系统的定义可知，嵌入式系统的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、调制解调器、网卡、声卡、打印机、扫描仪、摄像头、USB 集线器等均是由嵌入式处理器控制的。

嵌入式计算机系统同通用型计算机系统相比具有以下特点。

① 嵌入式系统通常是面向特定应用的嵌入式中央微处理器（CPU），与通用型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，执行的是带有特定要求的预先定义的任务，如实时性、安全性、可用性等。它通常具有低功耗、体积小、集成度高等特点，能够把通用 CPU 中许多由板卡完成的任务集成在芯片内部，从而有利于嵌入式系统设计趋于小型化，移动能力大大增强，跟网络的耦合也越来越紧密。

② 嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术、电子技术与各个行业的具体应用相结合的产物。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。

③ 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。由于嵌入式系统通常需要进行大量生产，所以单个成本的节约，能够随着产量进行成百上千的放大。

④ 嵌入式系统和具体应用有机地结合在一起，它的升级换代和具体产品同步进行，嵌入式系统产品一旦进入市场，具有较长的生命周期。

⑤ 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中或单片机内部，而不是存储于磁盘等载体中。

⑥ 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。

## 1.2 嵌入式系统的历史

### 1. 现代计算机技术的两大分支

电子数字计算机诞生于 1946 年，在其后漫长的历史进程中，计算机始终是存放在特殊的机房中实现数值计算的大型昂贵设备。

直到 20 世纪 70 年代，微处理器的出现，计算机才出现了历史性的变化。将微型机嵌入到一个对象体系中，实现对对象体系的智能化控制。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。

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，这是理解嵌入式系统的基本出发点。

由于嵌入式计算机系统要嵌入到对象体系中，实现的是对象的智能化控制，因此，它有着与通用计算机系统完全不同的技术要求与技术发展方向。

早期，人们勉为其难地将通用计算机系统进行改装，在大型设备中实现嵌入式应用。然而，对于众多的对象系统（如家用电器、仪器仪表、工控单元等），无法嵌入通用计算机系统，况且嵌入式系统与通用计算机系统的技术发展方向完全不同，必须独立地发展通用计算机系统与嵌入式计算机系统，这就形成了现代计算机技术发展的两大分支。嵌入式计算机系统的诞生，则标志了计算机进入了通用计算机系统与嵌入式计算机系统两大分支并行发展时代。通用计算机系统与嵌入式计算机系统的专业化分工发展，导致 20 世纪末、21 世纪初，计算机技术的飞速发展。这两大分支的技术要求和技術发展方向如图 1-1 所示。

	技术要求	技术发展方向
通用计算机系统	高速、海量的数值计算	总线速度的无限提升，存储容量的无限扩大
嵌入式计算机系统	对象的智能化控制能力	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

图 1-1 两类计算机系统的技术要求和技术发展方向对比

- 通用计算机系统

计算机专业领域集中精力发展通用计算机系统的软、硬件技术，不必兼顾嵌入式应用要求。通用微处理器迅速从 80286、80386、80486、奔腾到酷睿系列；操作系统也朝着提高资源利用率、增强计算机系统性能的方向迅速发展，使通用计算机系统进入到尽善尽美阶段。

- 嵌入式计算机系统

发展目标是单芯片化。它动员了原有的传统电子系统领域的厂家与专业人士，接过起源于计算机领域的嵌入式系统，承担起发展与普及嵌入式系统的历史任务，迅速地将传统的电子系统发展到智能化的现代电子系统时代。

因此，现代计算机技术发展的两大分支的意义在于：一是形成了计算机发展的专业化分工；二是将发展计算机技术的任务扩展到传统的电子系统领域；三是使计算机成为进入人类社会全面智能化时代的有力工具。

## 2. 始于微型机时代的嵌入式应用

嵌入式计算机的真正发展是在微处理器问世之后。1971年11月，Intel公司成功地把算术运算器和控制器电路集成在一起，推出了第一款微处理器 Intel 4004，其后各厂家陆续推出了许多 8 位、16 位的微处理器，包括 Intel 8080/8085、8086，Motorola 的 6800、68000，以及 Zilog 的 Z80、Z8000 等。以这些微处理器作为核心所构成的系统，广泛地应用于仪器仪表、医疗设备、机器人、家用电器等领域。微处理器的广泛应用形成了一个广阔的嵌入式应用市场，计算机厂家开始大量的以插件方式向用户提供 OEM 产品，再由用户根据自己的需要选择一套适合的 CPU 板、存储器板以及各式 I/O 插件板，从而构成专用的嵌入式计算机系统，并将其嵌入到自己的系统设备中。

从灵活兼容考虑，出现了系列化、模块化的单板机。流行的单板机有 Intel 公司的 iSBC 系列、Zilog 公司的 MCB 等。后来人们可以不必从选择芯片开始来设计一台专用的嵌入式计算机，只要选择各功能模块，就能够组建一台专用计算机系统。用户和开发者都希望从不同的厂家选购最适合的 OEM 产品，插入外购或自制的机箱中就形成新的系统，这样就希望插件是互相兼容的，也就导致了工业控制微机系统总线的诞生。1976 年 Intel 公司推出 Multibus，1983 年扩展为带宽达 40MB/s 的 Multibus II。1978 年由 Prolog 设计的简单 STD 总线广泛应用于小型嵌入式系统。

20 世纪 80 年代可以说是各种总线层出不穷、群雄并起的时代。随着微电子工艺水平的提高，集成电路制造商开始把嵌入式应用中所需要的微处理器、I/O 接口、A/D 转换、D/A 转换、串行接口以及 RAM、ROM 等部件统统集成到一个 VLSI 中，从而制造出面向 I/O 设计的微控制器，即单片机，成为嵌入式计算机系统异军突起的一支新秀。其后发展的 DSP 产品则进一步提升了嵌入式计算机系统的技术水平，并迅速地渗入到消费电子、医用电子、智能控制、通信电子、仪器仪表、交通运输等各种领域。

20 世纪 90 年代，在分布控制、柔性制造、数字化通信、信息家电等巨大需求的牵引下，嵌入式系统进一步加速发展。面向实时信号处理算法的 DSP 产品向着高速、高精度、低功耗方向发展。Texas 推出的第三代 DSP 芯片 TMS320C30，引导着微控制器向 32 位高速智能化发展。在应用方面，掌上电脑、便携式计算机、机顶盒技术相对成熟，发展也较为迅速。特别是掌上电脑，1997 年在美国市场上掌上电脑不过四五个品牌，而 1998 年年底，各式各样的掌上电脑如雨后春笋般纷纷涌现出来。此外，诺基亚 (Nokia) 推出了智能电话，西门子

(Siemens) 推出了机顶盒, 美国慧智 (Wyse) 推出了智能终端, 美国国家半导体公司 (NS) 推出了 WebPad。装载在汽车上的小型计算机, 不但可以控制汽车内的各种设备 (如音响等), 还可以与 GPS 连接, 从而自动操控汽车。21 世纪无疑是一个网络的时代, 使嵌入式计算机系统应用到各类网络中去也必然是嵌入式系统发展的重要方向。在发展潜力巨大的“信息家电”中, 嵌入式系统与人工智能、模式识别等技术的结合, 将开发出各种更具人性化、智能化的实际系统。伴随网络技术、网络计算的发展, 以嵌入式移动设备为中心的“无所不在的计算”将成为现实。

纵观嵌入式系统在过去发展的 40 多年中, 主要经历了以下 4 个阶段。

第 1 阶段是以单芯片为核心的可编程控制器形式的系统。嵌入式系统虽然起源于微型计算机时代, 然而微型计算机的体积、价位、可靠性都无法满足特定的嵌入式应用要求, 因此, 嵌入式系统必须走独立发展道路。这条道路就是芯片化道路, 将计算机做在一个芯片上, 从而开创了嵌入式系统独立发展的单片机时代。单片机就是一个最典型的嵌入式系统, 这类系统大部分应用于一些专业性强的工业控制系统中, 一般没有操作系统的支持, 软件通过汇编语言编写。这一阶段系统的主要特点是: 系统结构和功能相对单一, 处理效率较低, 存储容量较小, 几乎没有用户接口。由于这种嵌入式系统使用简单、价格低, 以前在国内工业领域应用较为普遍, 但是现在已经远不能适应高效的、需要大容量存储的现代工业控制和新兴信息家电等领域的需求。

第 2 阶段是以嵌入式 CPU 为基础、以简单操作系统为核心的嵌入式系统。其主要特点是: CPU 种类繁多, 通用性比较弱; 系统开销小, 效率高; 操作系统达到一定的兼容性和扩展性; 应用软件较专业化, 用户界面不够友好。

第 3 阶段是以嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统。其主要特点是: 嵌入式操作系统能运行于各种不同类型的微处理器上, 兼容性好; 操作系统内核小、效率高, 并且具有高度的模块化和扩展性; 具备文件和目录管理, 支持多任务, 支持网络应用, 具备图形窗口和用户界面; 具有大量的应用程序接口 API, 开发应用程序较简单; 嵌入式应用软件丰富。

第 4 阶段是以 Internet 为标志的嵌入式系统。这是一个正在迅速发展的阶段。目前, 大多数嵌入式系统还孤立于 Internet 之外, 但随着 Internet 的发展以及 Internet 技术与信息家电、工业控制技术结合日益密切, 嵌入式设备与 Internet 的结合将代表嵌入式系统的未来。

## 1.3 嵌入式系统的组成

### 1.3.1 嵌入式系统的组成结构

嵌入式系统的核心计算系统可以抽象出一个典型的组成模型: 硬件层、中间层、软件层和功能层, 如图 1-2 所示。

#### 1. 硬件层

硬件层中包含嵌入式微处理器、存储器 (如 SDRAM、ROM、Flash 等)、通用设备接口和 I/O 接口 (如 A/D、D/A、I/O 等)。在一片嵌入式处理器基础上添加电源电路、时钟电路和存储器电路, 就构成了一个嵌入式核心控制模块。其中, 操作系统和应用程序都可以固化在 ROM 中。

### (1) 嵌入式微处理器

嵌入式系统硬件层的核心是嵌入式微处理器，嵌入式微处理器与通用 CPU 最大的不同在于嵌入式微处理器大多工作在为特定用户群所专门设计的系统中，它将通用 CPU 许多由板卡完成的任务集成在芯片内部，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。



图 1-2 嵌入式系统的组成结构

嵌入式微处理器有各种不同的体系，即使在同一体系中也可能具有不同的时钟频率和数据总线宽度，或集成了不同的外设和接口。据不完全统计，目前全世界嵌入式微处理器已经超过 1 000 多种，体系结构有 30 多个系列，其中主流的体系有 ARM、MIPS (Microprocessor without Interlocked Piped Stages, 无互锁流水级的微处理器)、Power PC、X86、SH 等。

### (2) 存储器

嵌入式系统需要存储器来存放可执行代码和数据。嵌入式系统的存储器包含 Cache、内存和外存。

① Cache: Cache 是一种容量小、速度快的存储器阵列，它位于内存和嵌入式微处理器内核之间，存放的是最近一段时间微处理器使用最多的程序代码和数据。在嵌入式系统中，Cache 全部集成在嵌入式微处理器内，可分为数据 Cache、指令 Cache 和混合 Cache，Cache 的大小依不同处理器而定。

② 内存: 位于微处理器的内部，用来存放系统和用户的程序及数据。片内存储器容量小、速度快。

③ 外存: 外存用来存放大数据量的程序代码或信息，它的容量大，但读取速度与内存相比慢很多，用来长期保存用户的信息。

嵌入式系统中常用的外存有硬盘、NAND Flash、CF 卡、MMC、SD 卡等。

### (3) 通用设备接口和 I/O 接口

嵌入式系统和外界交互需要一定形式的通用设备接口，如 A/D、D/A、I/O 等，外设通过和片外其他设备或传感器的连接来实现微处理器的输入/输出功能。每个外设通常都只有单一的功能，它可以在芯片外也可以内置芯片中。外设的种类很多，可从一个简单的串行通信设备到非常复杂的 802.11 无线设备。

目前，嵌入式系统中常用的通用设备接口有 A/D (模/数转换接口)、D/A (数/模转换接口)，I/O 接口有 RS-232 接口 (串行通信接口)、Ethernet (以太网接口)、USB (通用串行总



线接口)、音频接口、VGA 视频输出接口、I2C (现场总线)、SPI (串行外围设备接口)、IrDA (红外线接口) 等。

## 2. 中间层

硬件层与软件层之间为中间层, 也称为硬件抽象层 (Hardware Abstract Layer, HAL) 或板级支持包 (Board Support Package, BSP), 它将系统上层软件与底层硬件分离开来, 使系统的底层驱动程序与硬件无关, 上层软件开发人员无须关心底层硬件的具体情况, 根据 BSP 层提供的接口即可进行开发。该层一般包含相关底层硬件的初始化、数据的输入/输出操作和硬件设备的配置功能。

实际上, BSP 是一个介于操作系统和底层硬件之间的软件层次, 包括了系统中大部分与硬件联系紧密的软件模块。设计一个完整的 BSP 需要完成两部分工作: 嵌入式系统的硬件初始化以及 BSP 功能, 设计硬件相关的设备驱动。

## 3. 软件层

软件层由嵌入式操作系统 (Embedded Operation System, EOS)、文件系统、图形用户接口 (Graphic User Interface, GUI)、网络系统及通用组件模块组成。EOS 是嵌入式应用软件的基础和开发平台。以下先介绍前三种。

### (1) 嵌入式操作系统

不同功能的嵌入式系统的复杂程度有很大不同。简单的嵌入式系统仅仅具有单一的功能, 存储器中的程序就是为了这一功能设计的, 其系统处理核心也是单一任务处理器。复杂的嵌入式系统不仅功能强大, 往往还配有嵌入式操作系统, 如功能强大的智能手机等, 几乎具有与微型计算机一样的功能。

嵌入式操作系统 (Embedded Operation System, EOS) 是一种用途广泛的系统软件, 过去它主要应用于工业控制和国防系统领域。EOS 负责嵌入系统的全部软、硬件资源的分配、任务调度, 控制、协调并发活动。它必须体现其所在系统的特征, 能够通过装卸某些模块来达到系统所要求的功能。目前, 已推出一些应用比较成功的 EOS 产品系列。随着 Internet 技术的发展、信息家电的普及应用及 EOS 的微型化和专业化, EOS 开始从单一的弱功能向高专业化的强功能方向发展。嵌入式操作系统在系统实时高效性、硬件的相关依赖性、软件固化、应用的专用性等方面具有较为突出的特点。

### (2) 文件系统

嵌入式文件系统比较简单, 主要提供文件存储、检索、更新等功能, 一般不提供保护、加密等安全机制。它以系统调用和命令方式提供文件的各种操作, 主要有设置、修改对文件和目录的存取权限, 提供建立、修改、改变和删除目录等服务, 提供创建、打开、读写、关闭和撤销文件等服务。

### (3) 图形用户接口

图形用户接口 (GUI) 的广泛应用是当今计算机发展的重大成就之一, 它极大地方便了非专业用户的使用, 人们从此不再需要死记硬背大量的命令, 取而代之的是通过窗口、菜单、按键等方式来方便地进行操作。而嵌入式 GUI 具有下面几个方面的基本要求: 轻型、占用资源少、高性能、高可靠性、便于移植、可配置等特点。

## 4. 功能层

功能层也称为应用软件层, 应用软件是由基于实时系统开发的应用程序组成, 运行在嵌入

式操作系统之上，一般情况下与操作系统是分开的。应用软件用来实现对被控对象的控制功能。功能层是要面对被控对象和用户，为方便用户操作，往往需要提供一个友好的人机界面。

### 1.3.2 嵌入式处理器

嵌入式处理器是嵌入式系统的核心，是控制、辅助系统运行的硬件单元。其产品范围极其广泛，从最初的4位处理器、目前仍在大规模应用的8位单片机，到最新的受到广泛青睐的32位、64位嵌入式CPU。

嵌入式系统至少包含一个主（master）处理器，作为中心控制设备，并且可能拥有额外的从（slave）处理器，在主处理器的控制下与主处理器协同工作。嵌入式电路板围绕着主处理器进行设计。主处理器的复杂性通常决定着将其归类为微处理器还是微控制器。

根据其现状，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 Micro Processor 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。图1-3是Intel公司出品的一款BGA（Ball Grid Array，球状引脚栅格阵列封装）封装的嵌入式微处理器实物图。

我们以市场上较为常见的嵌入式微处理器为例进行一些分析和对比。ARM、MIPS和Power PC在功能和层次上有较大差别，面向的领域不同。

ARM在消费电子领域的优势非常明显，其原因包括配套版权完备，拥有预先设计的电路模块架构，可用于制造完整的半导体组件、价格便宜和集成使用方便等。Power PC系列的芯片在嵌入式领域的应用属于中高端，不在消费电子领域，主要用于企业级以上的交换机、大机架上产品、网络处理器及Sony的游戏机等应用上。

MIPS的嵌入产品，既有面向高端的，如Cavium的MIPS多核处理器，携带2~4个1Gbit/s的以太控制器，也有消费类的，如基于MIPS 4K核的SOC。ARM和MIPS在消费领域存在着竞争，MIPS阵营的产品在功耗和面积上具有优势，但MIPS提供的开发工具不如ARM便捷。单纯从处理器体系结构的角度来讲，它们只有设计理念的差别，没有好坏的区别。

对于消费电子领域中份额越来越大的智能手机处理器来说，如高通骁龙410/615/810，苹果的A7、A8，英特尔Atom，华为海思的麒麟920，联发科的MT6795、MT6732、MT6752等方案，它们都已经达到了64位处理器的性能。

#### 2. 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器（Embedded Microcontroller Unit, MCU）的典型代表是单片机，从20世纪70年代末单片机出现到今天，虽然已经经过了40多年的历史，但这种8位的电子器件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、



图1-3 Intel公司的嵌入式微处理器

EEPROM 等各种必要功能和外设，与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，因此称为微控制器。

图 1-4 是 Intel 公司出品的 8051 单片机的管脚和内部架构示意图。目前，MCU 占嵌入式系统约 70% 的市场份额。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，势必推动单片机获得更快的发展。

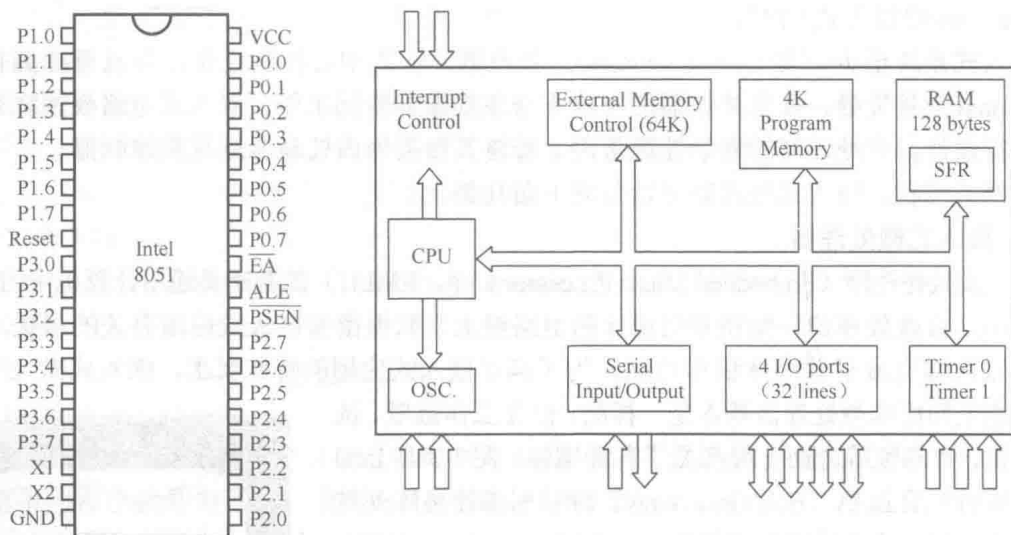


图 1-4 Intel 公司的 8051 单片机

### 3. 嵌入式 DSP 处理器

嵌入式 DSP 处理器 (Embedded Digital Signal Processor, EDSP) 是专门用于信号处理方面的处理器。DSP 处理器对系统结构和指令进行了特殊设计，其适合于执行 DSP 算法，编译效率较高，指令执行速度也较高。

DSP 的理论算法在 20 世纪 70 年代就已经出现，但是由于专门的 DSP 处理器还未出现，所以这种理论算法只能通过 MPU 等实现。当时的处理器速度较低，无法满足 DSP 的算法要求，其应用领域仅仅局限于一些尖端的高科技领域。随着大规模集成电路技术发展，1982 年世界上诞生了首枚 DSP 芯片。其运算速度比 MPU 快了几十倍，在语音合成和编码解码器中得到了广泛应用。80 年代中期，随着 CMOS 技术的进步与发展，第二代基于 CMOS 工艺的 DSP 芯片应运而生，其存储容量和运算速度都得到成倍提高，成为语音处理、图像硬件处理技术的基础。80 年代后期，DSP 的运算速度进一步提高，应用领域也从上述范围扩大到了通信和计算机方面。90 年代后，DSP 发展到了第五代产品，集成度更高，使用范围也更加广阔。随着信息、移动互联网和 4G 移动通信的飞速发展，作为最关键的核心器件的数字信号处理器，将会把人们带到更高速信息化的时代。DSP 需求增长的同时，也面临了前所未有的竞争压力，如何在处理速度、价格和功耗方面的优势取得大多数用户的信任，成为行业共同思考的问题。

### 4. SoC 片上系统

片上系统 (System on Chip, SoC) 从狭义角度讲，它是信息系统核心的芯片集成，是将系统关键部件集成在一块芯片上。除了 CPU 之外，系统级芯片还包括显卡、内存、USB 主控芯片、电源管理电路、无线芯片 (Wi-Fi, 3G, 4G LTE 等)。从广义角度讲，SoC 是一个微小型系统，

如果说中央处理器（CPU）是大脑，那么 SoC 就是包括大脑、心脏、眼睛和手的系统。国内外学术界一般倾向将 SoC 定义为将微处理器、模拟 IP 核、数字 IP 核和存储器（或片外存储控制接口）集成在单一芯片上，它通常是客户定制的，或是面向特定用途的标准产品。SoC 有两个显著的特点：一是硬件规模庞大，通常基于 IP 设计模式；二是软件比重大，需要进行软硬件协同设计。

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，可在一个硅片内部运用 VHDL 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。正是由于 SoC 芯片的高集成度以及较短的布线，它的功耗也相对低很多。而在移动领域，低功耗更是厂商所不懈追求的目标。同时把很多芯片都集成到一起，不需要单独配置更多芯片，这样能够更有效地降低生产成本，因此使用 SoC 方案成本更低。

SoC 最终将会完全取代 CPU。我们现在已经在 AMD 的 Llano 以及英特尔的 Ivy Brige 处理器上看到了端倪。这些芯片都在处理器内部集成了内存控制芯片，PCI-E 主控以及显卡核心。当然对于通用 CPU 市场，需求还是会很大，尤其是在服务器和超级计算机市场，功耗和空间都不是问题，性能才是决定性因素。

### 1.3.3 典型的嵌入式操作系统

嵌入式操作系统（Embedded Operating System, EOS）是一种用途广泛的系统软件，过去它主要应用于工业控制和国防系统领域。EOS 负责嵌入系统的全部软、硬件资源的分配、调度工作，控制协调并发活动；它必须体现其所在系统的特征，能够通过装卸某些模块来达到系统所要求的功能。目前，已推出一些应用比较成功的 EOS 产品系列。随着 Internet 技术的发展、信息家电的普及应用及 EOS 的微型化和专业化，EOS 开始从单一的弱功能向高专业化的强功能方向发展。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。

从 20 世纪 80 年代开始，市场上出现各种各样的商用嵌入式操作系统，这些操作系统大部分都是为专有系统开发的，从而逐步演化成了现在多种形式的商用嵌入式操作系统百家争鸣的局面。这些操作系统有 Linux、 $\mu$ C/OS、 $\mu$ Tenix、Windows Embedded “Quebec”、VxWorks、Free RTOS、苹果 iOS、Android 等。

#### 1. Linux

在所有的操作系统中，Linux 是发展最快、应用最广泛的系统之一。Linux 本身的种种特性使其成为嵌入式开发的首选。在进入市场的前两年中，嵌入式 Linux 的设计通过广泛应用而获得巨大的成功。随着嵌入式 Linux 技术的成熟，以其按应用要求可定制系统、支持多数硬件平台等特性，已由早期的试用阶段迈进到逐渐成为嵌入式市场的主流。根据 IDC 的报告，Linux 已经成为全球第二大操作系统。Linux 发展如此之快的另一个主要原因是产品的成本。在激烈的市场竞争中，只拥有先进的技术是远远不够的，如何减少产品的投入也是需要重点考虑的问题。免费的 Linux 为厂商节约了一大笔开支，特别是对于经济实力不强的公司来说。目前 Linux 内核的最新版本已经达到 2.6.xx。

#### 2. $\mu$ C/OS

$\mu$ C/OS 是一个典型的实时操作系统。该系统从 1992 年开始发展，目前流行的是第二个