

高等院校嵌入式人才培养规划教材

Gaodeng Yuanxiao Qianrushu Rencai Peiyang Guihua Jiaocai

# 嵌入式系统开发技术

常本超 夏宁 但唐仁 主编



## Embedded System Development Technology

课证融通，兼顾NCRE三级考试与院校课程  
体系完整，涉及嵌入式系统从软件到硬件各个方面  
介绍ARM处理器和嵌入式操作系统相关知识



中国工信出版集团

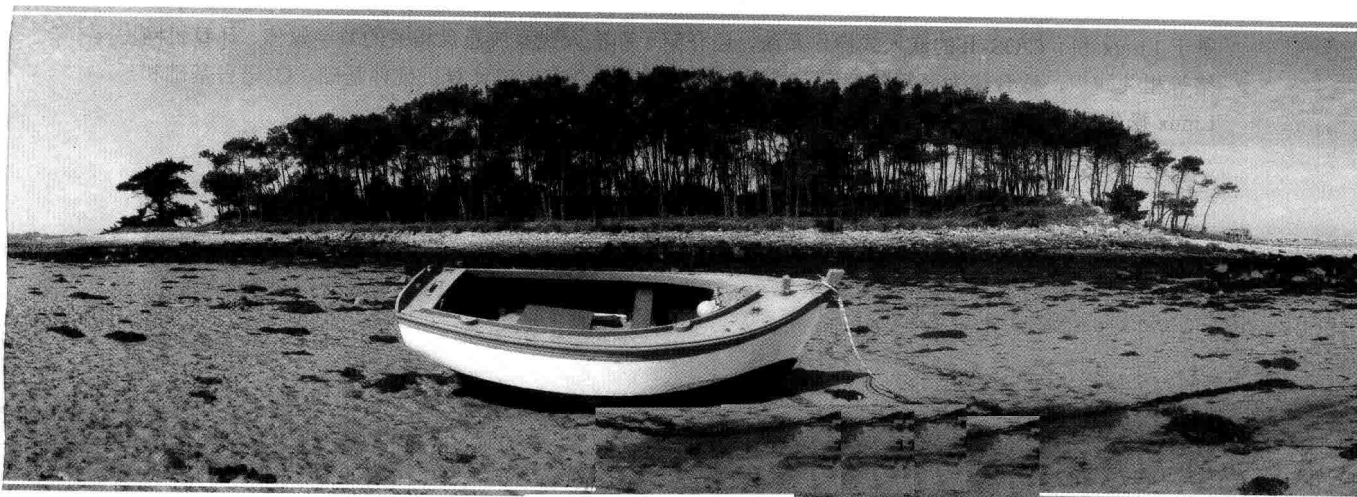


人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

高等院校嵌入式人才培养规划  
Gaodeng Yuanxiao Qianrushi Rencai Peiyang Guihua

# 嵌入式系统开发技术

常本超 夏宁 但唐仁 主编



Embedded System  
Development Technology

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式系统开发技术 / 常本超, 夏宁, 但唐仁主编

— 北京: 人民邮电出版社, 2015. 9

高等院校嵌入式人才培养规划教材

ISBN 978-7-115-39480-4

I. ①嵌… II. ①常… ②夏… ③但… III. ①微型计  
算机—系统开发—高等学校—教材 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第138163号

## 内 容 提 要

本书紧扣全国计算机等级考试 (National Computer Rank Examination, NCRE) 三级嵌入式系统开发技术考试大纲, 循序渐进, 由浅入深, 介绍了嵌入式系统从软件到硬件各个方面的知识。

本书既介绍了嵌入式系统的基础知识, 包括硬件结构、软件结构、基于 ARM 的嵌入式处理器、基于 Linux 和  $\mu$ C/OS-II 的嵌入式操作系统, 还介绍了和嵌入式系统息息相关的数字媒体、计算机网络等相关知识, 适合作为高等院校嵌入式课程教材, 也适合有一定计算机硬件基础、C 语言基础和 Linux 操作系统基础的工程师学习。



---

◆ 主 编 常本超 夏 宁 但唐仁

责任编辑 王 威

责任印制 杨林杰

◆ 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>

北京天宇星印刷厂印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 21

2015 年 9 月第 1 版

字数: 544 千字

2015 年 9 月北京第 1 次印刷

---

定价: 49.80 元

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

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号



## 行业背景

嵌入式系统是以应用为中心,以计算机技术为基础,采用可裁剪软硬件,对功能、可靠性、成本、体积、功耗等要求严格的专用计算机系统。随着 ARM 处理器的出现,嵌入式系统应用技术得到了长足的发展。

全国计算机等级考试(National Computer Rank Examination, NCRE),是经原国家教育委员会(现教育部)批准,由教育部考试中心主办,面向社会,用于考查应试人员计算机应用知识与技能的全国性计算机水平考试体系。

## 关于本书

本书以全国计算机等级考试三级嵌入式系统开发技术考试大纲为骨架,基于 ARM 处理器和 Linux 操作系统,介绍了嵌入式系统的基础以及开发知识。本书共 15 章,可以分为 5 个部分,分别是嵌入式系统的基础、嵌入式系统的处理器、嵌入式系统的硬件结构、嵌入式系统的软件和嵌入式系统的开发。

- 第 1 部分:包括第 1~3 章,介绍了嵌入式系统的基础,包括其起源和发展、嵌入式系统和数字媒体、嵌入式系统和计算机网络等相关知识。
- 第 2 部分:包括第 4~6 章,介绍了嵌入式系统的处理器等相关知识,重点介绍了 ARM 处理器的编程模型、指令系统和汇编语言程序设计等。
- 第 3 部分:包括第 7~11 章,介绍了嵌入式系统的硬件结构,包括外围设备、输入输出接口、远程通信接口、S3C2440 处理器等。
- 第 4 部分:包括第 12~14 章,介绍了嵌入式系统的软件等相关知识,包括软件体系结构、嵌入式操作系统、 $\mu$ C/OS-II 操作系统的应用和分析等。
- 第 5 部分:包括第 15 章,介绍了嵌入式系统开发的流程和工具等。

## 本书特色

- 紧扣全国计算机等级考试三级教程嵌入式系统开发技术大纲。
- 基础内容丰富,循序渐进,由浅入深,涉及了嵌入式系统从软件到硬件各个方面的知识,课程知识体系完整、应用性强,兼顾课堂教学与等级考试,做到了“课证融通”。
- 重点突出,详细介绍了目前嵌入式系统中使用最为广泛的 ARM 处理器(基于 S3C2440)和 Linux、 $\mu$ C/OS II 嵌入式操作系统的相关知识。



## 作者介绍

本书由常本超、夏宁、但唐仁编写。同时，参与本书编写工作的还有刘艳伟等。在此，对以上人员致以诚挚的谢意。由于学识水平所限，本书的疏漏之处在所难免，请广大读者给予批评指正。

编 者

2015 年夏





# 目 录

|                                              |  |
|----------------------------------------------|--|
| <b>第 1 章 嵌入式系统的基础</b> ..... 1                |  |
| 1.1 嵌入式系统的起源和发展..... 1                       |  |
| 1.2 嵌入式系统的构成..... 10                         |  |
| 1.3 嵌入式系统的一些相关术语..... 15                     |  |
| 1.4 本章小结..... 24                             |  |
| 1.5 真题解析和习题..... 24                          |  |
| <b>第 2 章 嵌入式系统和数字媒体</b> ..... 27             |  |
| 2.1 信息和数字媒体..... 27                          |  |
| 2.2 文本..... 28                               |  |
| 2.3 图像..... 34                               |  |
| 2.4 音频..... 37                               |  |
| 2.5 视频..... 40                               |  |
| 2.6 本章小结..... 42                             |  |
| 2.7 真题解析和习题..... 42                          |  |
| <b>第 3 章 数字通信及计算机网络</b> ..... 45             |  |
| 3.1 通信和通信系统..... 45                          |  |
| 3.2 计算机网络..... 50                            |  |
| 3.3 本章小结..... 59                             |  |
| 3.4 真题解析和习题..... 60                          |  |
| <b>第 4 章 嵌入式处理器的基础及 ARM</b> ..... 62         |  |
| 4.1 嵌入式系统处理器的结构..... 62                      |  |
| 4.2 常见嵌入式处理器内核..... 66                       |  |
| 4.3 ARM 处理器的基础..... 68                       |  |
| 4.4 ARM 处理器的分类和特点..... 72                    |  |
| 4.5 本章小结..... 81                             |  |
| 4.6 真题解析和习题..... 81                          |  |
| <b>第 5 章 ARM 处理器编程模型</b> ..... 83            |  |
| 5.1 ARM 处理器的工作状态..... 83                     |  |
| 5.2 ARM 处理器的工作模式..... 86                     |  |
| 5.3 ARM 处理器的寄存器组织..... 87                    |  |
| 5.4 ARM 处理器的异常处理..... 91                     |  |
| 5.5 ARM 处理器的数据类型和存储格式..... 94                |  |
| 5.6 ARM 处理器的存储器管理单元和存储器保护单元..... 96          |  |
| 5.7 本章小结..... 99                             |  |
| 5.8 真题解析和习题..... 100                         |  |
| <b>第 6 章 ARM 处理器的指令系统和汇编语言程序设计</b> ..... 102 |  |
| 6.1 ARM 处理器的指令分类和指令集..... 102                |  |
| 6.2 ARM 处理器的指令格式..... 107                    |  |
| 6.3 ARM 处理器的寻址方式..... 109                    |  |
| 6.4 ARM 处理器的伪指令..... 114                     |  |
| 6.5 ARM 处理器的汇编程序设计..... 117                  |  |
| 6.6 汇编语言和 C 语言混合设计..... 122                  |  |
| 6.7 本章小结..... 130                            |  |
| 6.8 真题解析和习题..... 130                         |  |
| <b>第 7 章 嵌入式系统的硬件结构</b> ..... 132            |  |
| 7.1 SoC 的片上总线..... 132                       |  |
| 7.2 ARM 嵌入式系统的核心结构..... 138                  |  |
| 7.3 常用 ARM 结构处理器及选择方案..... 147               |  |
| 7.4 嵌入式系统的存储器..... 148                       |  |
| 7.5 本章小结..... 160                            |  |
| 7.6 真题解析和习题..... 160                         |  |
| <b>第 8 章 嵌入式系统的外围设备</b> ..... 163            |  |
| 8.1 输入设备..... 163                            |  |



|                                      |            |                                                             |            |
|--------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------|------------|
| 8.2 显示设备.....                        | 167        | 12.4 常见的 Bootloader 和 U-Boot 的<br>使用方法.....                 | 253        |
| 8.3 传感器.....                         | 173        | 12.5 本章小结.....                                              | 259        |
| 8.4 本章小结.....                        | 179        | 12.6 真题解析和习题.....                                           | 259        |
| 8.5 真题解析和习题.....                     | 179        |                                                             |            |
| <b>第 9 章 嵌入式系统的输入输出<br/>接口.....</b>  | <b>182</b> | <b>第 13 章 嵌入式操作系统.....</b>                                  | <b>261</b> |
| 9.1 通用输入输出接口.....                    | 182        | 13.1 嵌入式操作系统的发展.....                                        | 261        |
| 9.2 UART 接口.....                     | 182        | 13.2 嵌入式操作系统的特点和<br>分类.....                                 | 263        |
| 9.3 I <sup>2</sup> C 总线接口.....       | 185        | 13.3 实时系统和实时操作系统.....                                       | 265        |
| 9.4 SPI 总线接口.....                    | 188        | 13.4 嵌入式操作系统的内核结构.....                                      | 267        |
| 9.5 1-wire 总线接口.....                 | 190        | 13.5 常见的嵌入式操作系统.....                                        | 268        |
| 9.6 USB 总线接口.....                    | 192        | 13.6 嵌入式 Linux 操作系统.....                                    | 271        |
| 9.7 视频接口.....                        | 194        | 13.7 本章小结.....                                              | 281        |
| 9.8 本章小结.....                        | 195        | 13.8 真题解析和习题.....                                           | 282        |
| 9.9 真题解析和习题.....                     | 196        |                                                             |            |
| <b>第 10 章 嵌入式系统的远程通信<br/>接口.....</b> | <b>198</b> | <b>第 14 章 <math>\mu</math>C/OS-II 嵌入式操作<br/>系统应用分析.....</b> | <b>284</b> |
| 10.1 RS-232/485/422 接口.....          | 198        | 14.1 $\mu$ C/OS-II 的特点和基础.....                              | 284        |
| 10.2 CAN 总线接口.....                   | 205        | 14.2 $\mu$ C/OS-II 操作系统解析.....                              | 291        |
| 10.3 以太网接口.....                      | 210        | 14.3 $\mu$ C/OS-II 的移植和程序设计.....                            | 302        |
| 10.4 无线通信接口.....                     | 211        | 14.4 $\mu$ C/OS-III 和 $\mu$ C/OS-II.....                    | 303        |
| 10.5 本章小结.....                       | 214        | 14.5 本章小结.....                                              | 304        |
| 10.6 真题解析和习题.....                    | 214        | 14.6 真题解析和习题.....                                           | 305        |
| <b>第 11 章 S3C2440 ARM 处理器.....</b>   | <b>216</b> | <b>第 15 章 嵌入式系统的开发.....</b>                                 | <b>307</b> |
| 11.1 S3C2440 的体系结构.....              | 216        | 15.1 嵌入式系统的开发基础.....                                        | 307        |
| 11.2 S3C2440 的外部引脚.....              | 217        | 15.2 嵌入式系统的软件开发方法.....                                      | 310        |
| 11.3 S3C2440 的硬件模块.....              | 218        | 15.3 MDK 和 RVDS 的特点和<br>使用.....                             | 312        |
| 11.4 本章小结.....                       | 242        | 15.4 交叉编译环境.....                                            | 318        |
| 11.5 真题解析和习题.....                    | 243        | 15.5 在 Linux 操作系统下进行<br>软件开发.....                           | 320        |
| <b>第 12 章 嵌入式系统软件的<br/>体系结构.....</b> | <b>245</b> | 15.6 嵌入式系统的调试方法和<br>工具.....                                 | 326        |
| 12.1 嵌入式系统的软件层次.....                 | 245        | 15.7 本章小结.....                                              | 328        |
| 12.2 嵌入式系统的中间驱动层.....                | 246        | 15.8 真题解析和习题.....                                           | 329        |
| 12.3 嵌入式系统的引导加载程序.....               | 250        |                                                             |            |

# 第1章

## 嵌入式系统的基础

本章将介绍嵌入式系统的相关基础知识，包括嵌入式系统的特点、发展历程、组成结构等，并且还会介绍一些和嵌入式系统相关的术语。本章的考核重点如下。

- 嵌入式系统的特点、分类、发展与应用。
- 嵌入式系统的组成与微电子技术（集成电路、EDA、SoC、IP 核等技术的作用和发展）。

### 1.1 嵌入式系统的起源和发展

嵌入式系统（Embedded System）目前已经完全融入到了社会的各个领域，无论是在工厂、矿山、高速铁路列车等生产场合，还是在手机、智能电饭煲、自动收货箱等生活场景，都能看到它的身影。

#### 1.1.1 什么是嵌入式系统

##### 1. 嵌入式系统的定义

根据英国电气工程师协会（U.K. Institution of Electrical Engineer）的定义，嵌入式系统是一种“完全嵌入受控器件内部，为特定应用而设计的专用计算机系统”。与大型机、台式机、笔记本通用计算机系统不同，嵌入式系统通常执行的是带有特定要求的预先定义的任务，是控制、监视或辅助设备、机器，或用于工厂运作的设备。

嵌入式系统更加一般的定义是以应用为中心和以计算机技术为基础的，并且软硬件是可裁减的，能满足应用系统对功能、可靠性、实时性、成本、体积、功耗等指标的严格要求的专用计算机系统。





嵌入式系统通常来说是和通用计算机系统相对而言的,表 1.1 给出了这两种系统的特点对比,表 1.2 则给出了它们的模块对比(包括软件和硬件)。

表 1.1 嵌入式系统和通用计算机系统的特点对比

| 特点    | 嵌入式系统                                                        | 通用计算机系统                                           |
|-------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 组成    | 采用 51 单片机、ARM 等集成了部分外部设备和总线的嵌入式处理器,或者使用定制的 SoC 芯片,硬件和软件耦合性较强 | 采用 Intel 或 AMD 的标准处理器,采用标准通用总线 and 外部设备,硬件和软件相对独立 |
| 外形特征  | 多“嵌入”到应用系统内部,用户不能直接观察到                                       | 用户可以直接观察和使用                                       |
| 开发方式  | 采用交叉开发方式,在通用计算机上开发,在嵌入式系统上运行                                 | 开发和运行都在通用计算机上进行                                   |
| 二次开发性 | 较高                                                           | 较差                                                |

表 1.2 嵌入式系统和通用计算机系统的模块对比

| 模块   | 嵌入式系统                         | 通用计算机系统            |
|------|-------------------------------|--------------------|
| 处理器  | ARM、SoC 芯片、单片机等               | Intel 或 AMD 的通用处理器 |
| 内存   | 集成固化的 DDR/SDRAM 芯片            | 可插拔的 DDR 芯片电路板     |
| 存储设备 | FLASH、SD 卡等                   | 通常采用硬盘             |
| 输入设备 | 按键、触摸屏等定制设备                   | 鼠标、键盘等通用设备         |
| 显示设备 | LED、数码管、定制液晶屏等                | 显示器                |
| 发声器件 | 音频芯片、蜂鸣器等                     | 声卡                 |
| 接口   | RS232、RS485、CAN 总线、USB 等      | 串口、USB 口等          |
| 其他   | 特定的驱动器件,如电机驱动芯片等              | 外部扩展卡,如 HDMI 等     |
| 引导代码 | 多为 Bootloader,如 U-boot        | 主板 BIOS 和硬盘引导区结合   |
| 操作系统 | μC-OS、Linux、Vxworks、Android 等 | Windows、Linux 等    |
| 驱动程序 | 根据硬件和操作系统自行裁剪                 | 操作系统或者厂商提供通用的      |
| 协议栈  | 根据需求自行定义                      | 操作系统或者第三方提供        |
| 开发环境 | 交叉编译环境                        | 本机调试               |
| 仿真环境 | 需要 JTAG 仿真器等                  | 直接本机调试             |

## 2. 嵌入式系统的特点

和普通的通用计算机系统相比,嵌入式系统集软硬件于一体,通常来说其具有如下几个特点。

- 专用性强:除了一些用于研发和教学的通用嵌入式系统(开发板),嵌入式系统通常都是面向某个特定应用进行定制的,所以其具有非常强的专用性。优点是可以非常契合面向的应用,缺点是很难转移到另外一个应用场合,如 ATM 机中使用的嵌入式系统就基本上不可能直接应用于汽车控制上。

- 实时性好:工业等场合的控制系统常常需要能对事件作出及时的响应,通用计算机系统由于功能较多所以很难达到合格的响应指标,而嵌入式系统由于其具有很强的专用性,而且系统负担较小,通常可以达到比较完美的实时性要求。例如,在一个高速实时风力测量系统中,需要



达到一公里范围内多个采集点每秒上万次的数据采集,使用普通的计算机很难满足这样的需求,而使用嵌入式系统则能比较容易地实现这个目标。

- 可裁剪性好:由于嵌入式系统是专用的定制型的系统,所以可以根据目标应用的实际需求来增加或者减少系统中的软硬件模块,达到量体裁衣,从而提高实时性和降低生产成本。

- 可靠性高:由于嵌入式系统可以去除不必要的软硬件模块以减少出错的几率,并且还可以在定制中使用冗余技术来保证系统在出问题之后继续运行,所以具有较高的可靠性,可以更好地应用于涉及产品质量、人身设备安全、国家机密等重大事务或工作在长时间无人值守的场合,如危险性高的工业环境中,内嵌有嵌入式系统的仪器、仪表中,在人际罕至的气象检测系统中以及用于侦察敌方行动的小型智能装置中等。

- 功耗低:嵌入式系统的硬件模块/器件通常功耗都很低,加上其具有良好的专用性和可裁剪性,可以去掉不必要的功耗模块,所以系统整体功耗非常低,非常适合应用于电池供电等对供电功率有要求的场合。

- 可集成度好:由于嵌入式系统的专用性,所以其通常可以集成在系统内部,隐蔽而不易被发现,如冰箱、POS机等应用中的嵌入式系统。

- 资源受限:由于嵌入式系统通常要求小型化、轻量化、低成本和功耗化,所以在设计中通常会量体裁衣,不会有太多软硬件资源富余。

### 3. 嵌入式系统的应用

随着电子技术的发展,嵌入式系统已经从最开始偏重于工业控制应用逐步向包括消费类电子产品在内的日常生活用品进行普及,可以说嵌入式系统的应用已经悄无声息地进入到了社会的各个方面,如图 1.1 所示。

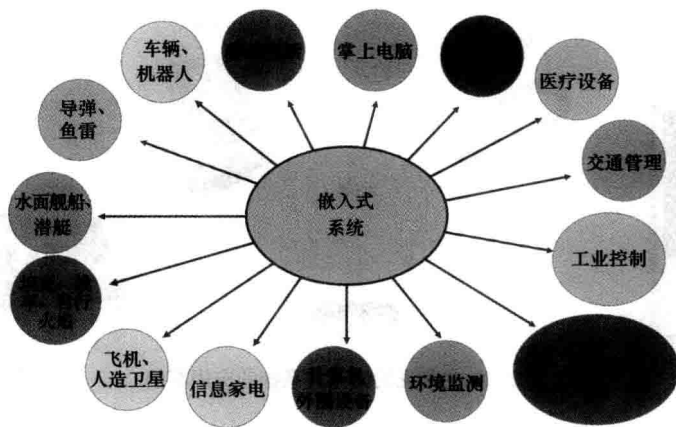


图 1.1 嵌入式系统的应用

整体来说,嵌入式系统的应用可以分为以下几个大类。

- 消费类电子产品:消费类电子产品是嵌入式系统和普通人最息息相关的应用,从空调、冰箱、微波炉等日用家电到智能手机、平板电脑、数码相机等随身数码产品,再到目前最流行的智能手表(Apple Watch、Moto360等)、智能手环(Jawbone up、Garmin Vivosmart等)和 Google Glass 等可穿戴设备,都离不开嵌入式系统的身影,其已经在很大程度上改变了我们的生活。

- 过程(工业)控制类产品:嵌入式系统还应用在厂矿企业中进行过程控制,如生产流水



线、数控机床、汽车电子、电梯控制等。在控制类产品中引入嵌入式系统可显著提高效率和精确性。

- 信息、通信类产品：随着数字信息技术的发展，使用通信网络进行数据交互和控制已经成为生活和生产的一部分，在其中嵌入式系统也得到了大规模的应用，如路由器、交换机、调制解调器、多媒体网关等。此外，很多与通信相关的信息终端也大量采用嵌入式技术，如 POS 机、ATM 自动取款机等。使用嵌入式技术的信息类产品还包括键盘、显示器、打印机、扫描仪等计算机外部设备。

- 智能仪器、仪表产品：嵌入式系统在智能仪器、仪表产品中大量应用，其不仅能显著提高仪器、仪表的性能，还可以将模拟设备数字化，加入传统设备所不具备的功能。例如，传统的模拟示波器能显示波形，通过刻度人为计算频率、幅度等参数，而基于嵌入式计算机技术设计的数字示波器，除能更稳定地显示波形外，还能自动测量频率和幅度，甚至可以将一段时间里的波形存储起来，供事后详细分析。

- 航空、航天设备与武器系统：航空、航天设备与武器系统一向是高精尖技术集中应用的领域，如飞机、宇宙飞船、卫星、军舰、坦克、火箭、雷达、导弹、智能炮弹等，嵌入式系统则是这些设备的核心，如我国在 2013 年年底登陆月球的“玉兔”号月球车。

如图 1.2 所示为一些嵌入式系统应用的具体实例。



图 1.2 一些常见的嵌入式系统的应用案例

表 1.3 给出了我们身边最常见的嵌入式系统的具体应用。

表 1.3 常见的嵌入式系统的应用

| 分类    | 实例                   |
|-------|----------------------|
| 银行业   | ATM 机、查询系统、POS 机     |
| 工业自动化 | 汽车流水线、PLCs 控制器       |
| 航空电子  | 惯性导航系统、飞行控制系统、导弹火控系统 |
| 网络设备  | 路由器、交换机、NAS（网络存储器）   |



续表

| 分类     | 实例                       |
|--------|--------------------------|
| 办公设备   | 打印机、复印机、传真机、一体机          |
| 汽车行业   | 发动机控制器、ABS（防抱死系统）、车身稳定系统 |
| 家用电器   | 微波炉、滚筒洗衣机、智能电视机、机顶盒      |
| 医疗设备   | X光机、核磁共振成像仪、电子血压计        |
| 测试设备   | 数字示波器、逻辑分析仪、频谱分析仪        |
| 可穿戴设备  | 智能手表、智能手环、Google glass   |
| 消费电子设备 | 智能手机、平板电脑、单反相机、游戏机       |

### 【应用实例 1.1】——嵌入式系统在汽车行业中的应用

中国的汽车工业作为国家的支柱产业，发展前景非常广阔。2009 年，中国已经成为世界第一汽车生产大国。而 2015 年，国内汽车销售有望超过美国，从而使中国成为世界第一大汽车消费市场。汽车工业的飞速发展也为嵌入式系统的应用带来了极大的推动力。嵌入式产品在整车价值中的比例已经提高到了 35% 以上，涉及的部件包括车身控制系统、驾驶员信息系统、动力传动系统等，如图 1.3 所示。

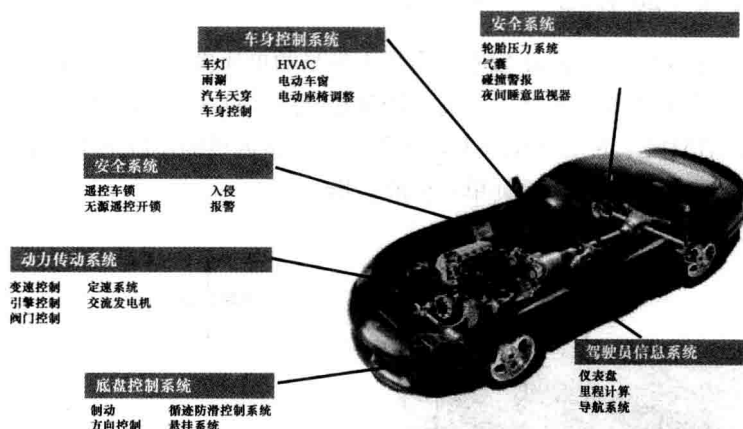


图 1.3 嵌入式产品在汽车中的应用

嵌入式系统有体积小、功耗低、集成度高、子系统间能通信融合的优点，这就决定了它非常适合应用于汽车工业领域，其经历了以下三个阶段。

- **SCM（单芯片）系统**：使用 4 位或者 8 位单片机对汽车的某个部件进行控制。典型实例是雨刷、车灯、仪表盘和电动门窗等。

- **MCU（微控制器）系统**：以 8 位或者 16 位处理器为核心，以各种通信总线进行联通，能够完成简单的实时任务，在当前汽车行业得到了最广泛的应用。典型实例是 ABS 系统、安全气囊和发动机管理系统等。

- **SoC（系统级芯片）系统**：以高性能的 32 位或 64 位嵌入式处理器为核心，辅以实时嵌入式操作系统，具有多任务处理能力，并且能更好地进行网络联通。典型实例是混合动力总成、定位导航系统、车辆状态记录和监控系统等。

目前，嵌入式系统在汽车行业中的应用向着集中控制方向发展，具有以下几个趋势。



- 将发动机管理系统和自动变速器控制系统集成为动力传动系统的综合控制 (PCM)。
- 将制动防抱死控制系统 (ABS)、牵引力控制系统 (TCS) 和驱动防滑控制系统 (ASR) 综合在一起进行制动控制。
- 通过中央底盘控制器, 将制动、悬架、转向、动力传动等控制系统用总线进行连接。控制器通过复杂的控制运算, 对各子系统进行协调, 将车辆行驶性能控制在最佳水平, 形成一体化底盘控制系统 (UCC)。

## 1.1.2 嵌入式系统的发展

20 世纪 60 年代初, 美国的两次阿波罗登月飞行所使用的惯性导航系统都使用了基于 Intel 8086/8088 处理器所设计的控制系统, 其可以看做是嵌入式系统的雏形。而在 20 世纪 60 年代中期, 美军大规模列装的民兵 II 型导弹的制导系统则是嵌入式系统的第一次批量生产。而真正意义上的嵌入式系统的发展是从 20 世纪 70 年代单片机的出现开始的, 至今已经迈过了 40 多个年头。随着电子和计算机技术的飞速发展, 嵌入式系统也逐步得到了极大的成熟, 总体来说, 其可以分为单片机时代、专用处理器时代和 ARM/SoC 时代三大阶段。

### 1. 单片机时代 (20 世纪 70—80 年代)

单片机时代起始于 1976 年 Intel 发布了世界上最早的单片机 8048; 随后, Motorola 推出了 68HC05, Zilog 推出了 Z80 等一系列单片机。随着电子技术的发展, Intel 发布了著名的 MCS51 单片机内核, 包括 ATMEL、NXP (前飞利浦) 等公司在该内核的基础上生产的几百款不同的单片机产品。图 1.4 所示是 Z80 和 51 系列单片机的实物。

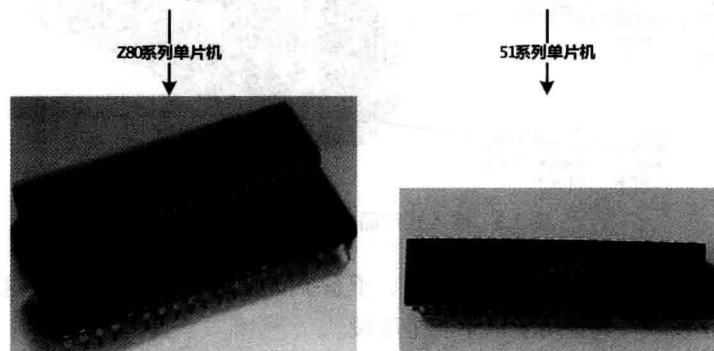


图 1.4 Z80 和 51 系列单片机实物

这些早期的单片机大多数都是 4~8 位的 (有少量 16 位的) 低端处理器, 但是它们的出现却使得汽车、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。这些产品更容易使用、处理速度更快、价格更便宜, 同时正是由于这些产品的核心模块是“内嵌式的”, 因此也就使得“嵌入式系统”这个初级概念深入人心。

从 20 世纪 80 年代早期开始, 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, 这使得开发周期更短、开发资金更低、开发效率更高, “嵌入式系统”真正地出现了。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，其中比较著名的有 Integrated System Incorporation (ISI) 的 PSOS、Ready System 公司的 VRTX、IMG 的 VxWorks 和 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征，具体如下。

- 它们的系统内核很小，具有可裁剪性、可扩充性和可移植性，可以移植到各种各样的处理器芯片上。

- 它们均采用占先式的调度，响应时间很短，任务执行的时间可以确定。

- 它们具有较强的实时性和可靠性，适合嵌入式的应用。

- 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中解放出来，同时也促使嵌入式有了更为广阔的应用空间。

但是，从整体来说，单片机时代的软件都具有“无操作系统”直接运行在处理器上、根据实际用途编写、相对简单和硬件耦合性极大不便于移植的特点。

## 2. 专用处理器时代（20 世纪 90—21 世纪）

进入 20 世纪 90 年代以后，随着计算机技术、微电子技术、IC 设计和 EDA 工具的发展，嵌入式处理器开始向片上系统（System on Chip, SoC）发展，出现了包括 51 单片机、AVR 单片机、MSP430 单片机、DSP 和 CPLD/FPGA 在内的一系列处理器，如图 1.5 所示。而 ARM 处理器也在此时初露头角。这个发展阶段的处理器大多数都是 8~16 位的。

此时出现的众多嵌入式操作系统大多具有跨平台的移植技术，并且在同一个系统之下也可以通过选择开发工具来使用 Java、C 或者汇编语言等开发者熟悉的语言来开发，该阶段比较常用的有 WinCE、Palm、WM、Linux、VxWorks、 $\mu$ C/OS-II、Symbian 等。

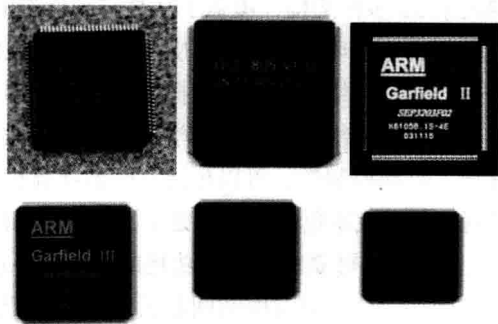


图 1.5 专用处理器时代的嵌入式处理器

## 3. ARM 时代（21 世纪—今）

进入 21 世纪之后，集成电路的加工进入超深亚微米乃至纳米级别时代，而 SoC 的出现使得以往需要一块复杂的电路板上多个元件才能完成的功能能在一块集成芯片上实现，嵌入式处理器的相关技术得到了突飞猛进的发展，出现了 64 位的嵌入式处理器（如 Cortex-A50 系列），其处理器内核也已经实现了 8 核（目前正计划实现 16 核）。

到目前为止，嵌入式处理器可以分为三个大类，即以 MTK、高通、三星为代表支持的 ARM 架构处理器、以 Intel 为代表支持的 X86 架构处理器以及其他以 FPGA 为代表的特殊/专用处理器，如图 1.6 所示。

随着嵌入式处理器的发展，嵌入式系统的硬件性能得到了极大的提升，此时嵌入式操作系统也开始出现一些新的面孔，Android 和 IOS 就是其中的典型代表。它们从 2007 年出现开始（Android 于 2007 年 11 月正式发布，IOS 则是在 2007 年 1 月正式发布）就风卷残云般地占领了绝大多数嵌入式消费类电子产品（主要是平板电脑、手机和数字播放器）的市场；而微软公司（Microsoft Corporation）不甘落后，从 2010 年开始连续发布了 WP（Windows Phone）和 Windows RT





(RunTime) 操作系统用于抢占消费类电子产品市场。而在工业控制等领域上, 嵌入式操作系统本着稳定可靠的原则, 依然是 Windows CE、VxWorks 和 Linux 当道。

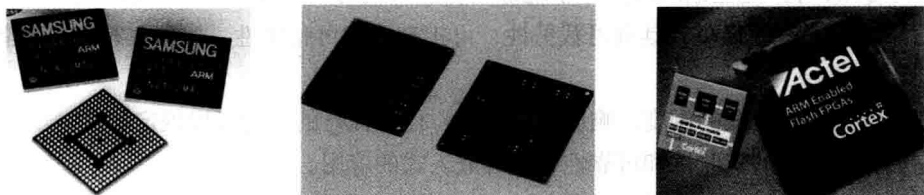


图 1.6 进入 21 世纪之后的嵌入式处理器

随着通信技术和网络技术的飞速发展, 目前嵌入式系统向着网络化方向在发展, “ARM/SoC 硬件系统+嵌入式操作系统+嵌入式 Web 服务器+无线网络模块”构成了可移动嵌入式系统的主流。

#### 4. 展望嵌入式系统的未来

目前, 嵌入式系统正处于一个蓬勃发展的阶段, 各种类型的嵌入式处理器型号有上千种, 分别属于 30 多种架构, 覆盖了从高端到低端的完整产品需求; 而嵌入式操作系统也有上百种之多, 各种集成开发环境也被普遍应用于嵌入式系统的应用软件开发; 此外, 为嵌入式系统专门设计的图形界面、网络协议栈和数据库系统也得到了广泛的使用。

嵌入式系统是一个交叉学科, 其涉及的核心学科包括微电子学、计算机科学与技术、电子工程学、自动控制学。可以预计, 随着计算机、电子等技术的发展, 嵌入式系统会向着性能更高、功耗更低、成本更低、体积更小、网络连通性更好的方向发展, 可能会出现以下几个方面的突破。

- 极高可靠性、极低功耗的嵌入式系统会应运而生, 配合电池容量的增大和快速充电技术的发展, 一个独立续航时间超长的嵌入式产品会出现。

- 嵌入式系统的联网已经成为必然, 包括物联网等在内的网络应用和包括分布式计算在内的科学应用都将成为主流。

- Java 虚拟机是目前最好的跨平台的解决方案, 目前, 一个支持嵌入式系统开发的足够小、足够快, 又有足够确定性的嵌入式 Java 程序包已经出现, 可以预计今后 Java 虚拟机与嵌入式 Java 将成为开发嵌入式系统的有力工具, 使用其嵌入式系统可支持动态加载和升级软件的二次开发。

- 随着多媒体技术的发展, 视频、音频信息的处理水平越来越高, 为嵌入式系统的多媒体化创造了良好的条件, 嵌入式系统的多媒体化将变成现实, 包括语音操控、手势操控等在内的自然人机交互和互动的、图形化的、多媒体的嵌入式人机界面都会逐渐在嵌入式系统中得到普及。

- 嵌入式系统的智能化嵌入式系统与人工智能、模式识别技术的结合, 将开发出各种更具人性化、智能化的嵌入式系统。

嵌入式系统也逐步在蚕食普通电脑的市场份额。从图 1.7 中可以看出, 随着嵌入式系统的发展, 越来越多的用户使用如智能手机、平板电脑等嵌入式系统设备来替代普通电脑。

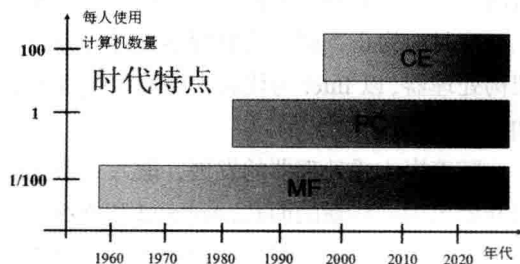


图 1.7 电脑使用占比



### 1.1.3 嵌入式系统的分类

对嵌入式系统进行分类是一个非常繁杂的工作，其可以按照多种形式进行分类，本小节将基于最常见的几种形式来介绍嵌入式系统的分类方法。

#### 1. 按用途分类

按照用途，可以将嵌入式系统分为军用系统、工业用系统和民用系统。

- 军用：军用嵌入式系统的运行环境非常苛刻，对可靠性要求非常高，对外形结构和价格不敏感，如导弹和火炮的制导系统等。
- 工业用：工业用嵌入式系统的运行环境相对较苛刻，对可靠性要求较高，对外形结构和价格相对不敏感，如数控机床、流水线机器人等。
- 民用：民用嵌入式系统的运行环境一般较好，对可靠性要求不算太高，反而对外形结构、性价比较为敏感，并且要求易于使用、易维护，如平板电脑、手持血糖仪等。

#### 2. 按实时性要求分类

按照实时性的要求，可以将嵌入式系统分为非实时系统、软实时系统和硬实时系统。实时系统（Real-time System, RTS）的正确性不仅仅和系统计算的逻辑结果相关，还依赖于产生这个结果的时间，如果系统的时间约束条件得不到满足即会出现错误。

- 非实时系统：对产生结果的时间完全无约束条件的系统，如智能手机等。
- 软实时系统：对产生的结果有一定的要求，但如果不满足仅仅出现错误但不会出现致命后果的系统，如高速风力采集系统等。
- 硬实时系统：对产生的结果有严格要求，如果不满足即会产生致命后果的系统，如自行火炮的火控系统。

#### 3. 按技术复杂度分类

按照嵌入式系统的复杂度，可以将其分为无操作系统控制的嵌入式系统（Non-OS control Embedded System, NOSES）、小型操作系统控制的嵌入式系统（Small OS control Embedded System, SOSES）和大型操作系统控制的嵌入式系统（Large OS control Embedded System, LOSES）。

- NOSES：嵌入式系统中没有操作系统，用户直接对处理器进行编码以实现控制目的，多用于简单的嵌入式处理器系统，如单片机等。其具有结构简单、开发容易、响应速度快、实时性好的优点，但也具有移植性和扩展性差的缺点。

- SOSES：嵌入式系统运行一个简单的轻量级操作系统，如  $\mu$ C-OS、 $\mu$ CLinux 等，用户在该操作系统上进行编程开发，其开发难度和实时性都比无操作系统的嵌入式系统要差，但移植性和扩展性略好。采用这类嵌入式系统通常是因为硬件缺陷（如处理器没有 MMU）或者其他特定原因。目前，这类嵌入式系统应用较少。

- LOSES：在嵌入式系统上运行一个大型操作系统，如 IOS、Android、Linux 等，用户在该操作系统上编写自己的应用软件，具有移植性和扩展性好的优点，但是相对来说其实时性较差，所以目前也以在高级语言编写的代码中嵌入汇编语言等方法来加快系统的响应速度。



## 1.2 嵌入式系统的构成

和普通的个人电脑（PC）类似，嵌入式系统也由软件和硬件两部分组成，其结构如图 1.8 所示。

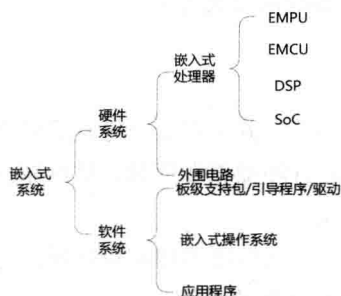


图 1.8 嵌入式系统的结构

### 1.2.1 嵌入式硬件系统

嵌入式系统的硬件系统以嵌入式处理器为核心，通过包括存储器（可能会内置在处理器中）在内的外部接口通道，又称为输入输出接口/通道（I/O 接口/通道），同外部进行数据、信号和动作的交互，一个典型的嵌入式系统的硬件结构如图 1.9 所示。

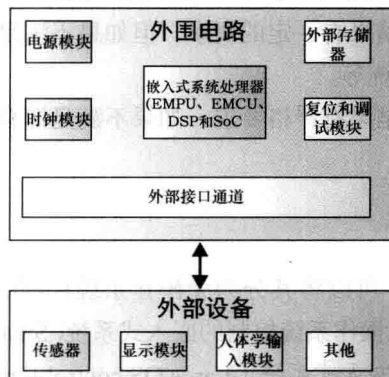


图 1.9 一个典型的嵌入式硬件系统

### 1.2.2 嵌入式处理器

#### 1. 嵌入式处理器的基础

嵌入式系统的核心就是各种类型的嵌入式处理器。目前，几乎每个半导体制造商都生产嵌入式处理器，越来越多的公司拥有自己的处理器设计部门。嵌入式微处理器的体系结构经历了从 CISC 到 RISC 和 Compact RISC 的转变；位数由 4 位、8 位、16 位、32 位发展到 64 位；寻址空