



普通高等教育“十三五”规划教材

卓越工程师培养计划系列教材

国家精品课程教学成果

精品资源共享课教学成果

# 嵌入式 系统及应用

| 罗蕾 李允 陈丽蓉 桂盛霖 编著



中国工信出版集团

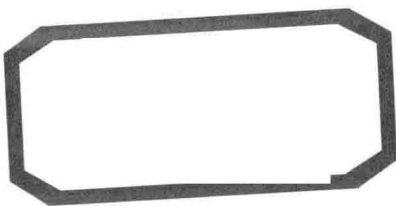


电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>



教学视频

普通高等教育“十三五”规划  
卓越工程师培养计划系列教材  
国家精品课程教学成果  
精品资源共享课教学成果



# 嵌入式系统及应用

罗 蕾 李 允 陈丽蓉 桂盛霖 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

嵌入式技术是 IT 领域中发展最快的内容,并将长期保持巨大的技术发展和商业应用机会。本书从嵌入式系统的软硬件内容入手,全面介绍嵌入式系统的硬件基础、嵌入式实时内核和虚拟化技术,以便掌握嵌入式系统方面的基本原理和开发方法。全书分为 8 章。第 1 章嵌入式系统导论;第 2 章嵌入式硬件系统;第 3 章 ARM 汇编程序设计;第 4 章嵌入式软件系统;第 5 章任务管理与调度;第 6 章同步、互斥与通信;第 7 章中断、时间、内存与 I/O 管理;第 8 章虚拟化技术。

本书提供了部分教学视频,读者可以通过扫描书中的二维码观看。

本书可作为高等院校计算机、信息安全、通信、电子、自动化、电气工程、仪器科学与技术等专业关于嵌入式系统课程的教材,也可供应用嵌入式系统的技术人员学习和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统及应用 / 罗蕾等编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.4

ISBN 978-7-121-28220-1

I. ①嵌… II. ①罗… III. ①微型计算机—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 039744 号

策划编辑: 章海涛

责任编辑: 郝黎明

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 19.75 字数: 556 千字

版 次: 2016 年 4 月第 1 版

印 次: 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: 192910558 (qq 群)。

# 前 言

从发展趋势来看,计算已经进入“后 PC”或是“无处不在的计算”时代,计算将逐渐弥漫在社会生活的方方面面,以实现任何时间、任何地点提供任何服务的理想目标。无处不在的计算将大量使用形式多样的嵌入式系统。实际上,嵌入式系统早已成为学术界和工业界共同关注的热点,信息世界与物理世界、信息化与工业化融合的趋势推动了嵌入式系统的持续发展。

随着信息技术的不断发展,舰船、航空、航天等武器装备,以及通信网络、交通、能源、医疗、金融等关键基础设施的智能化程度越来越高,软件规模越来越大,并逐渐发展成为复杂的网络系统。另外,目前正处于设备智能化、互联化发展的关键时期,智能家居、可穿戴设备、智能汽车、智能交通、移动医疗、智能电网、智能机器人、工厂自动化、工业控制、智能监控,甚至智慧城市都处于蓬勃发展的局面。据 IDC 预测,到 2020 年将有 2000 亿台智能设备连接至互联网。因此,嵌入式系统相关的应用与研究正面临着历史性的发展机遇。

嵌入式系统是计算机的应用系统,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。同时,嵌入式系统也是先进的计算机技术、半导体技术、电子技术和各个行业的具体应用相结合后的产物,属于技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成系统。嵌入式系统最早应用于国防和工业控制等领域,随后应用领域越来越广泛,包括了消费电子、工业控制、网络设备、航空航天和武器装备等众多领域,是现代社会智能化发展的基础内容。

嵌入式技术的发展以及对未来工业革命将产生的巨大影响已经引起世界各国的高度关注。欧洲目前在航空、汽车电子、工业、通信和消费电子方面的嵌入式技术占有领导位置,为了继续保持对美国和日本的竞争对手的领先优势,欧盟早在 2004 年就成立了 ARTEMIS (Advanced Research and Development on Embedded Intelligent Systems) 组织,在欧洲范围内整合资金和技术优势,把嵌入式技术上升到一个重要的战略高度进行发展。欧盟认为,嵌入式技术是 IT 领域中发展最快的内容,并将保持巨大的技术发展和商业应用机会,掌握嵌入式技术的领导位置,将具有强大的经济和政治利益。

目前,中国正在由世界的制造大国向制造强国转变。业界普遍认为,嵌入式系统就是这样一个符合中国国情的技术突破点。事实上,市场也急需专业化的嵌入式软件人才。为适应这种需求,国内高校大多已开设嵌入式系统相关的各种课程。电子科技大学自 1990 年以来开始从事嵌入式软件的研究、开发和教学工作,承担并完成了国家“863”、国防预研、电子发展基金、“核高基”重大专项等多项嵌入式软件系统方面的课题,开展了汽车电子、航空电子、舰船电子、智能手机等领域的产业化应用,并培养了大量嵌入式系统方面的专业化人才。以此为基础,我们开展了本教材的编写工作。

教材以嵌入式系统的核心——嵌入式实时操作系统为重点,以应用为目的,全面介绍嵌入式系统在硬件和软件方面的相关内容,使读者既能对嵌入式系统及开发方法有一个全景的把握,又能深入理解和使用嵌入式实时操作系统。

## 教材的内容

教材共分 8 章, 包括嵌入式系统软/硬件基础、嵌入式实时操作内核和虚拟化技术等三方面的内容。

**第 1 章 嵌入式系统导论**, 讲述嵌入式系统方面的基本概念, 介绍嵌入式系统的发展历程、嵌入式系统的特点、嵌入式系统的分类和应用领域、嵌入式实时系统的实时性和可靠性, 以及嵌入式系统的发展趋势等方面的内容。

**第 2 章 嵌入式硬件系统**, 介绍嵌入式系统的硬件组成情况, 包括嵌入式系统的处理器、总线 and 存储器等方面的内容。在处理器方面, 重点围绕 ARM 体系架构进行了阐述。

**第 3 章 ARM 汇编程序设计**, 介绍 ARM 处理器的指令集、汇编语言和程序设计。

**第 4 章 嵌入式软件系统**, 讲述嵌入式软件的特点和分类、嵌入式软件的体系结构、运行流程, 嵌入式操作系统结构、组成、功能、特点和发展趋势, 嵌入式软件开发工具的分类、交叉开发环境, 嵌入式软件实现阶段的开发过程及开发工具的发展趋势。

**第 5 章 任务管理与调度**, 讲述什么是任务、任务的分类、主要特性及内容, 任务管理机制, 嵌入式实时系统常见的几种调度算法, 优先级反转及解决方法, 基于多核的任务调度, 以及与任务有关的性能指标。

**第 6 章 同步、互斥与通信**, 讲述任务间、任务与中断处理程序间常见的同步、互斥与通信机制(信号量、邮箱、消息队列、事件和异步信号), 并对多核系统的同步、互斥与通信机制进行了介绍。

**第 7 章 中断、时间、内存与 I/O 管理**, 讲述中断分类、中断处理过程及中断管理机制等, 硬件时钟设备(实时时钟 RTC 和定时器/计数器)及与操作系统的关系, 时间管理机制, 嵌入式实时系统对存储管理的需求, 存储管理的具体方法, 以及嵌入式系统 I/O 管理的特点及机制。

**第 8 章 虚拟化技术**, 讲述虚拟化技术分类和微内核虚拟化技术, 并对主要的虚拟化产品进行介绍。

其中, 第 1 章~第 4 章由罗蕾编写, 第 5 章、第 7 章由李允编写, 第 2 章、第 3 章、第 6 章由陈丽蓉编写, 第 8 章由桂盛霖编写。全书由罗蕾统稿。由于编者水平有限, 加之时间仓促, 书中难免存在不妥与错漏之处, 敬请读者批评指正。您可通过以下方式同我们联系: lluo@uestc.edu.cn, lrchen@uestc.edu.cn, liyun@uestc.edu.cn。

本书提供了部分教学视频, 读者可以通过扫描封面或者文中相应位置的二维码来观看。

本书为任课教师提供配套的教学资源(包含电子教案), 需要者可登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>), 注册之后进行下载。

## 致谢

本书编写过程中得到了电子工业出版社的大力支持, 并得到了电子科技大学本科生、研究生课程建设等方面的支持, 在此表示感谢。

感谢电子科技大学嵌入式软件工程中心各位老师和研究生的支持。

作者

# 目 录

第 1 章 嵌入式系统导论	1
1.1 嵌入式系统概述	1
1.1.1 嵌入式系统的发展历程	2
1.1.2 嵌入式系统的特点	6
1.1.3 嵌入式系统的分类	7
1.2 嵌入式系统的应用领域	10
1.3 嵌入式系统的发展趋势	12
思考题 1	13
第 2 章 嵌入式硬件系统	15
2.1 嵌入式硬件系统的基本组成	15
2.2 嵌入式微处理器	17
2.2.1 嵌入式微处理器的特点	18
2.2.2 主流的嵌入式微处理器	21
2.2.3 ARM 指令集体系架构	28
2.2.4 典型 ARM CPU Core 体系结构	31
2.3 ARM 编程模型	33
2.3.1 基于 ARMv4 的编程模型	33
2.3.2 ARMv7-A&R 的应用级编程模型	49
2.3.3 ARMv7-A&R 系统级编程模型	55
2.3.4 处理器存储器子系统	60
2.3.5 存储器数据模式及 I/O 编址	69
2.4 嵌入式系统总线	71
2.4.1 AMBA 总线	71
2.4.2 PCI/CPCI 总线	75
2.4.3 USB 总线	77
2.5 嵌入式系统存储器	80
2.5.1 嵌入式系统的存储结构	80
2.5.2 NandFlash	81
思考题 2	83
第 3 章 ARM 汇编程序设计	85
3.1 ARM 嵌入式微处理器指令集	85
3.1.1 ARM 指令集	85
3.1.2 ARM v4T 架构指令体系	88
3.1.3 ARM v5TE 架构指令体系	95

3.1.4	ARMv6 架构指令体系	97
3.1.5	ARMv7-A&R 架构指令体系	101
3.1.6	Thumb 和 Thumb-2 指令集	108
3.2	ARM 汇编	114
3.2.1	汇编、汇编器和汇编语言程序	114
3.2.2	ARM 伪指令	115
3.2.3	ARM 宏与宏指令	122
3.2.4	汇编语句格式	124
3.2.5	ARM 汇编语言中的表达式及运算符	124
3.3	ARM 程序设计	127
3.3.1	ARM 工程	127
3.3.2	ARM 汇编语言程序设计	128
3.3.3	ARM 程序的框架结构	134
3.3.4	C 语言程序与汇编程序之间的函数调用	136
3.3.5	ARM 汇编与 C 语言的混合程序设计	142
	思考题 3	146
<b>第 4 章</b>	<b>嵌入式软件系统</b>	<b>149</b>
4.1	嵌入式软件系统分类和体系结构	149
4.1.1	嵌入式软件分类	150
4.1.2	嵌入式软件体系结构	151
4.1.3	嵌入式软件运行流程	152
4.2	嵌入式操作系统	153
4.2.1	体系结构	153
4.2.2	功能及特点	155
4.2.3	发展趋势	158
4.3	嵌入式软件开发工具	159
4.3.1	嵌入式软件开发工具的分类	159
4.3.2	嵌入式软件的交叉开发环境	161
4.3.3	嵌入式软件实现阶段的开发过程	161
4.3.4	嵌入式软件开发工具的发展趋势	168
	思考题 4	169
<b>第 5 章</b>	<b>任务管理与调度</b>	<b>170</b>
5.1	概述	170
5.2	任务	172
5.3	任务管理	174
5.3.1	任务状态与变迁	174
5.3.2	任务控制块	175
5.3.3	任务切换	175
5.3.4	任务队列	177
5.3.5	任务管理机制	181
5.4	任务调度	184
5.4.1	任务调度概述	184

5.4.2	基于优先级的可抢占调度	186
5.4.3	时间片轮转调度	186
5.4.4	静态调度	187
5.4.5	动态调度	190
5.4.6	静态调度与动态调度之间的比较	191
5.5	优先级反转	191
5.5.1	优先级反转概述	191
5.5.2	优先级继承协议	192
5.5.3	优先级天花板协议	193
5.6	基于多核的任务调度	199
5.6.1	局部调度	200
5.6.2	全局调度	201
5.6.3	混合调度	205
5.7	与任务有关的性能指标	206
5.7.1	任务上下文切换时间	206
5.7.2	任务响应时间	207
	思考题 5	208
<b>第 6 章</b>	<b>同步、互斥和通信</b>	<b>210</b>
6.1	概述	210
6.2	信号量	212
6.2.1	信号量的种类及用途	212
6.2.2	互斥信号量	212
6.2.3	二值信号量	215
6.2.4	计数信号量	215
6.2.5	信号量机制的主要数据结构	218
6.2.6	典型的信号量操作	219
6.2.7	与信号量有关的资源配置问题	221
6.3	邮箱和消息队列	221
6.3.1	嵌入式系统的通信	221
6.3.2	消息队列机制的主要数据结构	223
6.3.3	典型的消息队列操作	226
6.3.4	与消息队列有关的资源配置问题	228
6.3.5	消息队列的其他典型使用	228
6.4	事件	229
6.4.1	事件机制	229
6.4.2	事件机制的主要数据结构	230
6.4.3	典型的事件操作	232
6.4.4	与事件机制有关的资源配置问题	233
6.4.5	事件机制的典型应用	233
6.5	异步信号	234
6.5.1	异步信号机制	234
6.5.2	异步信号机制与中断机制的比较	235
6.5.3	异步信号机制与事件机制的比较	236



6.5.4	异步信号机制的主要数据结构 .....	236
6.5.5	典型的异步信号操作 .....	237
6.6	多核系统中的同步、互斥与通信 .....	238
6.6.1	多核系统的硬件基础 .....	238
6.6.2	多核系统的互斥机制 .....	239
6.6.3	核间通信 .....	245
6.6.4	核间同步 .....	250
	思考题 6 .....	252
<b>第 7 章</b>	<b>中断、时间、内存和 I/O 管理 .....</b>	<b>254</b>
7.1	中断管理 .....	254
7.1.1	实时内核的中断管理 .....	254
7.1.2	中断的分类 .....	255
7.1.3	中断处理的过程 .....	256
7.1.4	实时内核的中断管理 .....	258
7.1.5	用户中断服务程序 .....	260
7.1.6	中断相关的性能指标 .....	262
7.2	时间管理 .....	266
7.2.1	硬件时钟设备 .....	266
7.2.2	实时内核的时间管理 .....	267
7.3	内存管理 .....	270
7.3.1	内存管理概念 .....	270
7.3.2	内存管理机制 .....	271
7.4	I/O 管理 .....	278
7.4.1	I/O 管理的功能 .....	278
7.4.2	I/O 系统的实现考虑 .....	279
	思考题 7 .....	282
<b>第 8 章</b>	<b>虚拟化技术 .....</b>	<b>283</b>
8.1	概述 .....	283
8.2	虚拟化技术分类 .....	284
8.2.1	进程级虚拟机 .....	284
8.2.2	系统级虚拟机 .....	285
8.3	微内核虚拟化技术 .....	290
8.3.1	微内核的系统特征 .....	291
8.3.2	微内核技术的起源和发展 .....	291
8.3.3	L4 微内核技术 .....	293
8.3.4	微内核虚拟化架构 .....	303
8.4	虚拟化产品实例 .....	303
	思考题 8 .....	305
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>306</b>

# 第 1 章 嵌入式系统导论

## 1.1 嵌入式系统概述

计算机是 20 世纪人类社会最伟大的发明之一，也是 20 世纪科学技术发展的三大主题之一。从 1946 年第一台计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) 在美国宾夕法尼亚大学诞生到现在，计算机的发展经历了三大阶段。

第一阶段：大型机阶段，始于 20 世纪 50 年代，IBM、Burroughs 和 Honeywell 等公司率先研制出大型机。

第二阶段：个人计算机阶段，始于 20 世纪 70 年代。

第三阶段：进入 21 世纪，计算机迈入充满机遇的阶段——“后 PC 时代”或“无处不在的计算机”阶段。

施乐公司 Palo Alto 研究中心主任 Mark Weiser 认为：“从长远来看，PC 和计算机工作站将衰落，因为计算机变得无处不在，如在墙里、在手腕上、在手写电脑中（像手写纸一样）等，随用随取、唾手可得”。

目前，全世界的计算机科学家正在形成一种共识：计算机不会成为科幻电影中的那种贪婪的“怪物”，而将变得小巧玲珑、无处不在。它们藏身在任何地方，又消失在所有地方，功能强大，却无影无踪。人们将这种思想命名为“无处不在的计算机”。无处不在的计算机是指计算机彼此互连（见图 1-1），而且计算机与使用者的比率达到或超过 100 : 1 的阶段。无处不在的计算机包括通用计算机和嵌入式计算机系统，其中 95% 以上是嵌入式计算机系统，并非通用计算机。

嵌入式计算机系统在应用数量上远远超过各种通用计算机，一台通用计算机的外部设备包含了 5~10 个嵌入式微处理器，如键盘、鼠标、硬盘、显示卡、显示器、Modem、网卡、声卡、打印机、扫描仪等。

通用计算机（表 1-1）是具有通用计算平台和标准部件的“看得见”的计算机，如 PC、服务器、大型计算机等。其硬件一般包括主机、存储设备（硬盘、光驱、磁带机等）及标准的计算机外部设备等，如显示设备（CRT 显示器、LCD 等）、输入设备（键盘、鼠标等）和联网设备等。图 1-2 为通用计算机的典型硬件组成。通用计算机既可作为开发平台又可作为运行平台，且应用程序可按用户需要随时改变，即重新编制。

嵌入式计算机系统即“看不见”的计算机，一般只是运行平台，不能独立作为开发平台。不严格地说：嵌入式计算机系统是任意包含可编程计算机的设备，但这种设备不是作为通用计算机而设计的，如 PC 可以用于搭建嵌入式计算机系统，但 PC 不能称为嵌入式计算机系统。通常，将嵌入式计算机系统简称为嵌入式系统。

嵌入式系统已渗透到日常生活的各方面，其形式和名称各异，目前没有统一定义，除了上述定义外，常用的定义归纳如下。

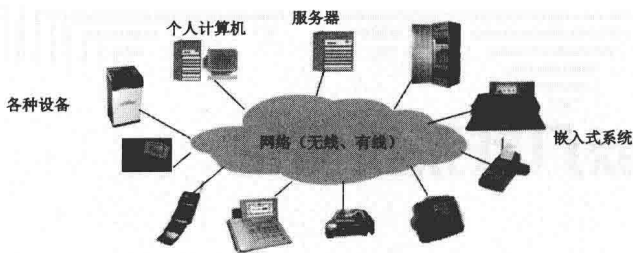


图 1-1 无处不在的计算机

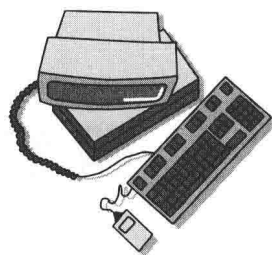


图 1-2 通用计算机硬件组成

表 1-1 通用计算机与嵌入式系统对比

特征	通用计算机	嵌入式系统
形式和类型	“看得见”的计算机 按其体系结构、运算速度和结构规模等因素，分为大、中、小型机和微机	“看不见”的计算机 形式多样，应用领域广泛，一般按应用分类
组成	通用处理器、标准总线 and 外设 软件和硬件相对独立	面向应用的嵌入式微处理器，总线和外部接口多集成在处理器内部 软件与硬件是紧密集成在一起的
开发方式	开发平台和运行平台都是通用计算机	采用交叉开发方式，开发平台一般是通用计算机，运行平台是嵌入式系统
二次开发性	应用程序可重新编制	大部分嵌入式系统不能再编程；部分嵌入式系统（如智能手机、Java 手机）已提供应用开发平台，可支持第三方应用程序
发展目标	变为功能计算机，普遍进入社会	变为专用计算机，实现“普及计算”

① 嵌入式系统是以应用为中心，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。

② IEEE（国际电气和电子工程师协会）定义：“Device used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants”。

③ 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行业的实际应用相结合后的产物。这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。

嵌入式系统一般由嵌入式硬件和软件组成，且软件与硬件是紧密集成在一起的。硬件以嵌入式微处理器为核心集成存储器和系统专用的输入/输出设备；软件包括初始化代码及驱动、嵌入式操作系统和应用程序等，这些软件有机地结合在一起，形成了系统特定的一体化软件。

### 1.1.1 嵌入式系统的发展历程

嵌入式计算机系统出现于 20 世纪 60 年代。几十年来，随着计算机技术、电子信息技术等的发展，嵌入式计算机的各项技术蓬勃发展，市场迅速扩大，嵌入式计算机已深入到生产、生活的每个角落。

#### 1. 嵌入式系统的出现和兴起（1960—1970 年）

第一代电子管计算机（1946—1957 年）是像 ENIAC 那样占地 170 m<sup>2</sup>、重达 30 t、耗电 140 kW·h 的“庞然大物”，无法满足嵌入式计算所提出的体积小、质量轻、耗电少、可靠性高、实时性强等一系列要求。20 世纪 60 年代，以晶体管、磁芯存储为基础的计算机开始用于航空等军用领域。第一台机载专用数字计算机是奥托内蒂克斯公司为美国海军舰载轰炸机“民团团员”号研制的多功能数字分析器，它由几个体积相当大的黑盒子组成，中央处理装置处理所有主要电子

系统传来的信号，开始有了数据总线的雏形。同时，嵌入式计算机开始应用于工业控制。1962年，美国的一个乙烯厂实现了工业装置中的第一个直接数字控制。

嵌入式系统的兴起是在1965至1970年，当时计算机已开始采用集成电路，即通常所说的第三代计算机。在军事和航空航天领域的需求推动下，计算机的硬件、软件技术达到了可以把人送上月球再返回地面的可靠性要求。

第一次使用机载数字计算机控制的是1965年发射的Gemini 3号，第一次通过容错来提高可靠性的是1968年的阿波罗4号、土星5号。阿波罗中的嵌入式计算机系统提供了人机交互功能，通过该系统和人的紧密结合来引导飞行。在该时期，计算机系统结构取得了许多重大发展，出现了并行控制、流水线、操作系统等新技术和影响广泛的IBM 360系列机。

1963年，DEC公司推出的第一台商用小型机由PDP8发展到PDP11系列。它的单总线结构、高速通用寄存器、强有力的中断系统、交叉存取技术，很好地适应了工业控制系统实时嵌入式应用的需求，成为工业生产集中控制的主力军。在军用领域中，为了满足可靠性、体积、质量的严格要求，还需为各武器系统设计各种专用的嵌入式计算机系统。

## 2. 嵌入式系统开始走向繁荣（1971—1989年）

### （1）微处理器问世

嵌入式系统的大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，推出了世界上第一片微处理器Intel 4004。它本来是专为袖珍计算器而设计的，由于体积小、质量轻、价格低廉和成功的设计促使Intel把它进一步通用化，推出了4位的4040、8位的8008。

1973至1977年间，各厂家推出了许多8位的微处理器，包括Intel 8080/8085、Motorola的6800/6802、Zilog的Z80和Rockwell的6502等。微处理器不但可以用来组成微型计算机，而且可以用来制造仪器仪表、医疗设备、机器人、家用电器等嵌入式系统。据统计，兼容8085微处理器的出货量超过了7亿，这些芯片大部分用于嵌入式工业控制。此时，人们再也不必为设计一台专用机而研制专用的电路、专用的运算器，只需以微处理器为基础进行设计。

微处理器的广泛应用形成了一个广阔的嵌入式应用市场，计算机厂家除了要继续以整机方式向用户提供工业控制计算机系统外，开始大量以插件方式向用户提供OEM产品，再由用户根据自己的需要构成专用的工业控制微型计算机，嵌入到自己的系统设备中。为了灵活兼容，形成了标准化、模块化的单板机系列。流行的单板计算机有Intel公司的iSBC系列、Zilog公司的MCB等。这样，人们不必从选择芯片开始来设计一台专用的嵌入式计算机，只要选择一套适合自己应用的CPU板、存储器板和各式I/O插件板，就可以组建一台专用计算机。用户和厂家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即可形成新的系统，即希望插件是互相兼容的，这导致工业控制微机系统总线的诞生。1976年，Intel推出了Multibus；1983年，将其扩展为带宽达40MBps的Multibus II；1978年，Prolog设计的简单STD总线广泛用于小型嵌入式系统；1981年，Motorola推出的VME\_Bus则与Multibus II瓜分了高端市场。

### （2）单片机、DSP出现

随着微电子工艺水平的提高，集成电路设计制造商开始把嵌入式应用所需要的微处理器、I/O接口、A/D转换、D/A转换、串行接口及RAM、ROM都集成到一个VLSI中，制造出了面向I/O设计的微控制器，即单片机。

最早的单片机 Intel 8048 出现在 1976 年。20 世纪 80 年代初, Intel 在 8048 的基础上开发出了著名的 8051, Motorola 推出了 68HC05, Zilog 公司则转向生产其 Z80 单片机。这些单片机包含 8 位微处理器、RAM、ROM、8 位并口、全双工串口及 2 个 16 位定时器的单片机, 迅速渗透到消费电子、医用电子、智能控制、通信、仪器仪表、交通运输等领域。根据不同的应用要求, 工艺不断改进, 运行速度不断提高, 功耗降低。不同的外设接口被配置到芯片内, 衍生了几十个品种。如果 8 位处理器处理速度太慢, 则可以选择 16 位的单片机。

此外, 为了高速、实时地处理数字信号, 1982 年诞生了首枚 DSP 芯片。DSP 是在模拟信号转换成数字信号以后进行高速实时处理的专用处理器, 其处理速度比当时最快的 CPU 快 10~50 倍。20 世纪 80 年代后期, 第三代 DSP 芯片问世, 运算速度进一步提高, 其应用范围逐步扩大到通信、控制及计算机等领域。

### (3) 软件技术的进步

20 世纪 80 年代后期, 嵌入式计算机的大发展要归功于软件技术的进步。最初的嵌入式计算机都是专用的, 软件也是专门用汇编语言甚至机器语言编制的。在微处理器出现的初期, 为了保障嵌入式软件的时间、空间效率, 软件也只能用汇编语言编写。这样, 嵌入式系统的开发只能由非常专业的计算机人才用原始的工具来完成, 效率低、周期长。由于微电子技术的进步, 对软件的时空效率的要求不再那么苛刻, 嵌入式计算机软件开始使用 PL/M、C 等高级语言。在军用领域, 为了改变各种武器系统使用不同的专用语言和软件使系统费用不断增加的状况, 美国推行了三军通用的 Ada 语言, 开发可重用的通用软件, 提高软件生产效率。

嵌入式系统大多是实时系统, 对于复杂的嵌入式系统来说, 除了需要高级语言开发工具外, 还需要嵌入式实时操作系统的支持。20 世纪 70 年代的小型计算机为了适应实时应用领域的需求, 由计算机生产厂家为自己的机器配置了实时操作系统。

20 世纪 80 年代初, 开始出现一批软件公司, 推出了商品化的嵌入式实时操作系统和各种开发工具, 如 Ready System 公司的 VRTX 和 XRAY、Integrated System Incorporation (ISI) 公司的 pSOS 和 PRISM+、WindRiver 公司的 VxWorks 和 Tornado、QNX 公司的 QNX 等。这些操作系统具有强实时、可剪裁、可配置、可扩充和可移植的特点, 支持主流的嵌入式微处理器。在开发工具方面, 这些操作系统提供了不同种类的面向软件、硬件开发的工具, 如硬件仿真器、源码级的交叉调试器等。商用嵌入式实时操作系统和开发工具的出现和推广应用, 使嵌入式系统的开发从作坊式向分工协作规模化的方向发展, 促使嵌入式应用扩展到更广阔的领域。

### 3. 嵌入式系统应用走向纵深 (1990 年至今)

进入 20 世纪 90 年代, 在分布控制、柔性制造、数字化通信和数字化家电等巨大需求的牵引下, 嵌入式系统的硬件、软件技术进一步发展, 应用领域进一步扩大。现在, 手机、数码相机、VCD、数字电视、路由器、交换机等都是嵌入式系统, 豪华轿车也拥有约 50 个嵌入式微处理器, 它们控制着从发动机火花塞、传动轴到避免由于关门时产生的压力而使司机耳朵胀痛的控制系统等众多部件。一架先进的飞机上可能有十几台嵌入式系统、上百个单片机。如果没有机载计算机, F-16 战斗机就不可能成为可靠的空中武器平台。当飞行员通过传统的控制系统控制飞机时, 机载计算机使飞机保持在空中飞行的前提下尽可能满足飞行员的各种要求。波音 777 客机上约有 1000 个微处理器。

4 位、8 位、16 位微处理器芯片已逐步让位于 32 位嵌入式微处理器芯片。面向不同应用领域, 功能强大、集成度高、种类繁多、价格低廉、低功耗的 32 位芯片已大量应用于各种各样的

军用和民用设备。DSP 一直在向高速、高精度、低功耗的方向发展。DSP 与通用嵌入式微处理器集成已成为现实，并已大量应用于嵌入式系统，如手机、IP 电话等。就通信设备而言，32 位芯片使得开发高度智能化的通信设备成为可能，如数字移动电话、宽带网交换机、路由器和卫星系统等。在工业控制领域，嵌入式计算机大量应用于嵌入式系统，PC104、CPCI (Compact PCI) 总线因其成本低、兼容性好也已被广泛应用。

随着微处理器性能的提高，嵌入式软件的规模也发生了指数型增长。32 位芯片能够执行由上百万行 C 语言代码构成的复杂程序，使得嵌入式应用具备高度复杂和智能化的功能。软件的实现从某种意义上决定了产品的功能，已成为新产品成功与否的关键因素，如图 1-3 所示。

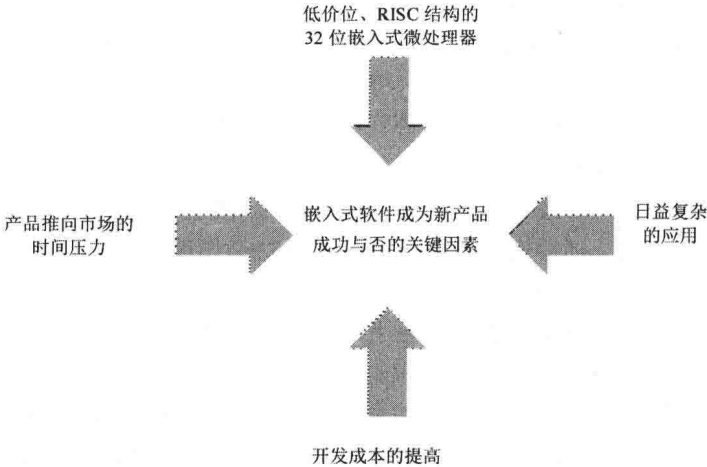


图 1-3 嵌入式软件的地位

为此，嵌入式系统已大量采用嵌入式操作系统。嵌入式操作系统的功能不断扩大和丰富，由 20 世纪 80 年代只有内核发展为包括内核、网络、文件、图形接口、嵌入式 Java、嵌入式 CORBA 及分布式处理等丰富功能的集合。嵌入式操作系统在嵌入式软件中的作用越来越大，所占的比例逐步提高，从最初的 10% 左右，到 20 世纪 90 年代初的 30% 左右，到 20 世纪 90 年代中期的 60% 左右，再到 20 世纪 90 年代后期的 80% 左右，如图 1-4 所示。

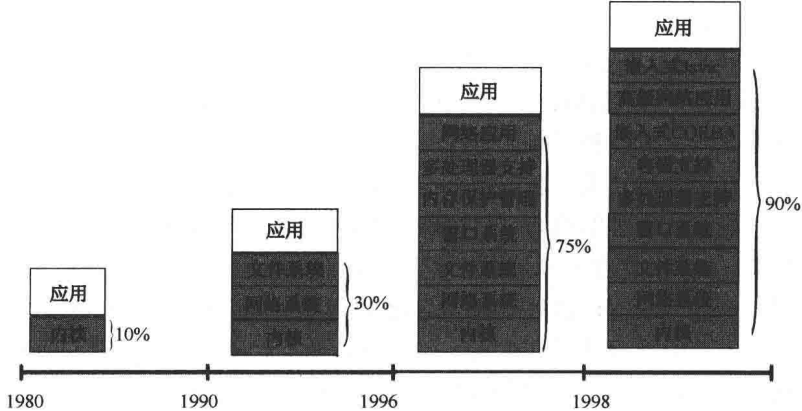


图 1-4 嵌入式操作系统的发展

此外，嵌入式开发工具更加丰富，其集成度和易用性不断提高，目前不同厂商已开发出不同

同类型的嵌入式开发工具，可以覆盖嵌入式软件开发过程的各个阶段，提高嵌入式软件的开发效率。

### 1.1.2 嵌入式系统的特点

(1) 嵌入式系统通常是形式多样、面向特定应用的软/硬件综合体

嵌入式系统一般用于特定的任务，其硬件和软件都必须高效运行，去除冗余，而通用计算机是一个通用的计算平台。

嵌入式微处理器与通用微处理器的最大不同是，嵌入式微处理器大多专用于某种或几种特定的应用，工作在为特定用户群设计的系统中。嵌入式微处理器通常都具有低功耗、体积小、集成度高等特点，能够把通用微处理器中许多由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，移动能力大大增强，与网络的耦合也越来越紧密。

嵌入式软件是应用程序和操作系统两种软件的一体化程序。对于通用计算机系统，操作系统等系统软件与应用软件之间界限分明。换句话说，在统一配置的操作系统环境下，应用程序是独立的运行软件，可以分别装入执行。但是，在嵌入式系统中，这一界限并不明显。这是因为应用系统配置差别较大，所需操作系统繁简不一，I/O 操作也不标准，这部分驱动软件常常由系统设计者完成。这就要求采用不同配置的操作系统和应用程序，链接装配成统一运行的软件系统。也就是说，在系统总体设计目标指导下，它们被综合考虑、设计与实现。

(2) 嵌入式系统得到多种处理器类型和体系结构的支持

通用计算机采用少数的处理器类型和体系结构，而且处理器掌握在少数大公司中。而嵌入式系统可采用多种类型的处理器和处理器体系结构。在嵌入式微处理器产业链上，IP 设计、面向应用的特定嵌入式微处理器的设计、芯片的制造已形成巨大的产业，它们分工协作，形成多赢模式。目前，有上千种嵌入式微处理器和几十种嵌入式微处理器体系结构可以选择，主流的体系有 ARM、MIPS、PowerPC、X86、SuperH 等。

(3) 嵌入式系统通常极其关注成本

嵌入式系统通常需要注意的成本是系统成本，特别是量大的消费类数字化产品，其成本是产品竞争的关键因素之一。嵌入式系统的系统成本包括：① 一次性的开发成本，即 NRE (Non-Recurring Engineering) 成本；② 每个产品的成本，即硬件物料清单 (Bill Of Material, BOM)、外壳包装成本和软件版税等。所以：

$$\text{批量产品的总体成本} = \text{NRE 成本} + \text{每个产品的成本} \times \text{产品总量}$$

$$\text{每个产品的最后成本} = \text{总体成本} / \text{产品总量} = \text{NRE 成本} / \text{产品总量} + \text{每个产品的成本}$$

(4) 嵌入式系统有实时性和可靠性的要求

嵌入式系统有实时性的要求，表现如下：一方面，大多数实时系统是嵌入式系统；另一方面，嵌入式系统多数有实时性的要求，且软件一般是固化运行或直接加载在内存中运行的，具有快速启动的特点。嵌入式系统对实时的强度要求各不一样，可分为硬实时系统和软实时系统。

嵌入式系统一般要求具有出错处理和自动复位功能，特别是对于一些在极端环境下运行的嵌入式系统而言，其可靠性设计尤其重要。在大多数嵌入式系统中，一般包括一些硬件和软件机制来保证系统的可靠性。例如，硬件的看门狗定时器，它在软件失去控制后使之重新正常运行；软件的可靠性机制包括内存保护、两态、可调度和监控等。

(5) 嵌入式系统使用的操作系统一般是适应多种类型处理器、可剪裁、轻量型、实时可靠、可固化的嵌入式操作系统

嵌入式操作系统像嵌入式微处理器一样，也是多种多样的：大多数商业嵌入式操作系统可同时支持不同种类的嵌入式微处理器；可根据应用的情况进行剪裁、配置；与通用计算机操作系统相比，其规模小，所需的资源有限，如内核规模为几十 MB；一般包括一个实时内核，调度算法一般采用基于优先级的可抢占的调度算法，一些操作系统提供了 HA (High Available) 机制；能与应用软件一起固化在 Nor Flash 中直接运行，或全部加载到 RAM 中运行。

#### (6) 嵌入式系统开发需要专门工具和特殊方法

多数嵌入式系统开发意味着软件与硬件的并行设计和开发，其开发过程一般分为几个阶段：产品定义 → 软件与硬件的设计与实现 → 软件与硬件集成 → 产品测试与发布 → 维护与升级。

嵌入式系统资源有限，一般不具备自主开发能力，产品发布后用户通常也不能对其中的软件进行修改，必须有一套专门的开发环境，提供专门的开发工具（包括设计、编译、调试、测试等工具），采用交叉开发的方式进行。交叉开发环境由宿主机和目标机组成，如图 1-5 所示。宿主机一般采用通用计算机系统，是主要的开发环境，完成开发工具的大部分工作；目标机就是嵌入式系统，是所开发应用的执行环境，并配合宿主机的开发工作。

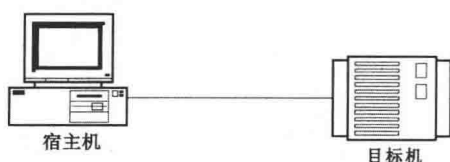


图 1-5 交叉开发环境

### 1.1.3 嵌入式系统的分类

嵌入式系统可按嵌入式处理器的位数、应用、实时性、软件结构等进行分类。

#### 1. 按位数来分类

按嵌入式处理器的位数来分，嵌入式系统可分为 4 位、8 位、16 位、32 位和 64 位。目前，32 位嵌入式系统正成为主流发展趋势，高度复杂的、高速的嵌入式系统已开始采用 64 位嵌入式处理器。

#### 2. 按应用来分类

目前，32 位的嵌入式处理器一般是面向特定领域应用而设计的，集成 CPU Core、面向特定领域应用的基本 I/O 和总线等，因此，嵌入式系统可分为信息家电类、移动终端类、通信类、汽车电子类、工业控制类等。

#### 3. 按实时性来分类

嵌入式系统可分为嵌入式实时系统和嵌入式非实时系统。根据实时性的强弱，嵌入式实时系统可进一步分为硬实时、软实时系统。

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，则会引起系统崩溃或致命的错误。如飞机的飞控系统，如果不能及时控制飞机的飞行，则可能造成致命的后果。

软实时系统对系统响应时间有要求，但是如果系统响应时间不能满足，不会导致系统出现致命的错误或崩溃。如一台喷墨打印机平均处理周期从 2 ms 延长到 6 ms，其后果不过是打印速度从 3 页/分钟下降到 1 页/分钟。

#### 4. 按软件结构来分类

从嵌入式系统的设计角度来看，嵌入式软件结构可以分为循环轮询系统、



视频



前后台系统、单处理器多任务系统、多处理器多任务系统等。

### (1) 循环轮询系统

最简单的软件结构是循环轮询 (Polling Loop)，程序依次检查系统的每个输入条件，一旦条件成立，就进行相应的处理，如图 1-6 和图 1-7 所示。

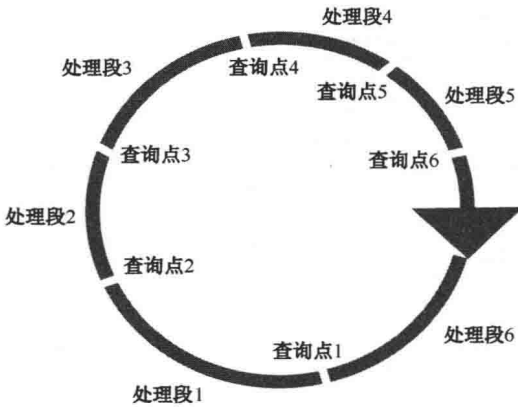


图 1-6 循环轮询系统运行方式

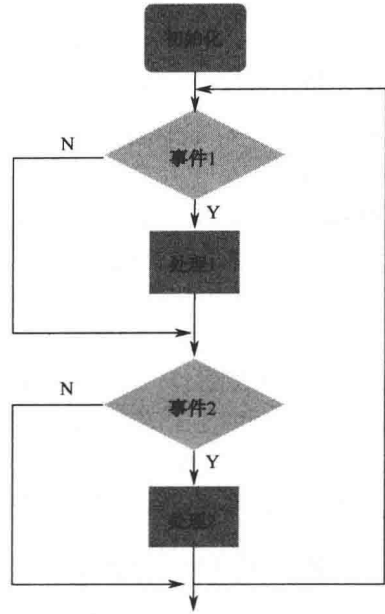


图 1-7 循环轮询系统程序流程

循环轮询系统通常的软件结构如下。

```
initialize()
while(true) {
    if (condition_1) action_1();
    if (condition_2) action_2();
    .....
    if (condition_n) action_n();
}
```

该结构的优点如下：① 对于简单的系统而言，便于编程和理解；② 没有中断的机制，程序运行良好，不会出现随机问题。其缺点如下：① 有限的应用领域（由于其具有不可确定性）；② 对于有大量 I/O 服务的应用不容易实现；③ 程序规模大，不便于调试。

由此看来，循环轮询系统适用于慢速和非常快速的简单系统。

### (2) 前后台系统

前后台 (Foreground/Background) 系统又称为中断驱动系统，后台是一个一直在运行的系统，前台是由一些中断处理过程组成的。当有一个前台事件（外部事件）发生时引起中断，中断后台运行，进行前台处理，处理完成后又回到后台（通常后台又称为主程序）。

前后台系统的一种极端情况如下：后台只是一个简单的循环，不做任何事情，所有其他工作都由中断处理程序完成。但大多数情况是中断只处理那些需要快速响应的事件，并且把 I/O 设备的数据放到内存的缓冲区中，再向后台发送信号，其他工作由后台来完成，如对这些数据



视频