



普通高等教育“十一五”电子信息类规划教材

# 嵌入式系统 原理与设计

蒋建春 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”电子信息类规划教材

# 嵌入式系统原理与设计

主 编 蒋建春

副主编 曾素华 李 勇

参 编 岑 明 吕霞付



机械工业出版社

本书综合讨论了典型嵌入式系统的设计及应用相关知识。作者根据长期的嵌入式系统开发经验,从嵌入式系统研发人员的角度,分析嵌入式系统设计需要掌握的理论知识、设计方法及步骤,然后介绍了嵌入式系统的基本组成及从底层到应用层各个典型模块的设计,将理论知识和实际对象充分结合起来,形成了一个完整的嵌入式系统。本书主要内容包括嵌入式系统软硬件基础知识、嵌入式系统平台的构建、基于 ARM 处理器的系统启动与中断处理、典型的外设模块硬件/驱动程序设计、嵌入式操作系统基础知识、 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统的应用和移植以及嵌入式软件测试基础等部分。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载或发邮件到 [wbj@cmpbook.com](mailto:wbj@cmpbook.com) 索取。

本书既可以作为高等院校计算机、电子、自动化等专业大学本科高年级学生的教材,也可作为嵌入式系统设计工程师的重要参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式系统原理与设计/蒋建春主编. —北京:机械工业出版社, 2010.1

普通高等教育“十一五”电子信息类规划教材  
ISBN 978-7-111-28800-8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 243305 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王保家 责任编辑:王保家 关晓飞

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷

2010年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.75印张·413千字

标准书号:ISBN 978-7-111-28800-8

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着计算机技术和微电子技术的发展，嵌入式系统得到了广泛的应用。电子设备的功能越来越复杂和完善，原来单片机的应用领域被嵌入式系统逐渐取代。嵌入式系统在工业生产控制、智能仪表、信息家电、网络通信等领域中都有着广泛的应用。特别是在最近几年，嵌入式系统取得了前所未有的发展，在多媒体手机、个人数字助理（PDA）、数字导航仪、MP3/MP4、网络路由器、汽车电子等方面，嵌入式系统无处不在。

针对嵌入式系统的应用，社会对嵌入式系统设计方面人才的需求量也越来越大。许多高校开设了嵌入式系统设计课程，社会上也有许多嵌入式系统培训班，以满足社会对嵌入式系统设计人才的需求。但是，关于嵌入式系统设计的参考书大多针对某一型号的处理器的操作系统进行详细讲解，没有提供相应的嵌入式系统基础知识，而成了一个产品说明书，从而使读者在面对新的处理器或操作系统时无从下手；或者是只针对嵌入式系统理论知识进行说明、分析，而没有一个具体的对象，让读者感觉像空中楼阁。因此，这些参考书对于嵌入式系统初学者来说，很难真正系统掌握嵌入式系统知识，在进行嵌入式系统设计时，难以设计出一个优秀的嵌入式系统产品，从而也限制了行业的发展。

针对这一情况，作者根据多年从事嵌入式系统科研及教学经验，结合嵌入式系统理论知识，编写了本书。在内容的选择上，采用理论与具体对象结合的原则，采用嵌入式领域应用最广的 ARM 处理器和典型的接口及总线作为硬件对象，以编程简单但功能齐全的  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  操作系统作为主要内容，系统讲解了嵌入式系统理论知识及硬件设计、底层驱动编程、系统启动与中断处理、操作系统概念及应用等知识，并在此基础上介绍了嵌入式软件测试等内容。本书通过对以上内容的介绍，让读者将理论知识和具体对象结合起来，真正系统理解和掌握嵌入式系统软硬件知识，更容易掌握嵌入式系统设计方法。同时，以“总体到具体”、“从底层到上层”顺序进行内容安排，也更符合人的思维习惯。因此，本书既可以作为本科高年级学生的教材，也可作为嵌入式系统设计工程师的重要参考书。

本书共分为 9 章，其中第 1、2、3 章由曾素华编写，第 4、5、8、9 章由蒋建春编写，李勇老师参与了第 6、7 章的编写，全书由蒋建春负责统稿。参与编写人员还有岑明、吕霞付老师，在这里对他们表示感谢。第 1 章，主要介绍嵌入式系统的概念、应用与发展。第 2 章主要介绍嵌入式系统的构架、组成、软硬件基础知识以及设计方法等内容。第 3 章主要讲解嵌入式系统平台构架，常用嵌入式处理器和嵌入式操作系统以及怎样来构建一个嵌入式系统平台。第 4 章介绍了 ARM 系列处理器的结构、中断、系统启动等原理及编程等内容。第 5 章详细讲解了 ARM 处理器的常用模块设计及驱动编程。第 6 章对嵌入式操作系统的概念、内核结构和功能进行了讲解。第 7 章对  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  操作系统的内核构架进行了分析，并对操作系统的应用举例和操作系统移植进行了详细讲解。第 8 章对嵌入式系统在智能家居系统中的一个具体应用设备进行分析和设计。第 9 章主要针对嵌入式软件测试技术基础进行介绍。

当然，任何一本书不可能囊括所有内容，本书力争做到合理安排内容与顺序，引导读者进入嵌入式系统领域，让读者能循序渐进且系统地掌握嵌入式系统知识，同时也注重实例的

典型性和实用性，希望本书对读者的嵌入式开发有所帮助。

本书参考了一些著作和论文，正是这些优秀的作品为作者提供了丰富的知识，从而促使本书内容更加丰满。在此对这些作者表示感谢。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载或发邮件到 [wbj@cmpbook.com](mailto:wbj@cmpbook.com) 索取。

嵌入式技术在不断发展，由于时间仓促，加之水平有限，书中难免会有一些错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言	
<b>第 1 章 嵌入式系统概论</b> .....	1
1.1 嵌入式系统简介 .....	1
1.1.1 嵌入式系统的历史 .....	1
1.1.2 嵌入式系统的定义 .....	2
1.1.3 嵌入式系统的特点 .....	3
1.1.4 嵌入式系统的分类 .....	5
1.2 嵌入式系统的应用领域 .....	6
1.3 嵌入式系统的现状和发展趋势 .....	8
1.3.1 嵌入式系统的现状 .....	8
1.3.2 嵌入式系统的发展趋势 .....	9
习题 1 .....	10
<b>第 2 章 嵌入式系统的基础知识</b> .....	11
2.1 嵌入式系统的总体结构 .....	11
2.1.1 硬件层 .....	12
2.1.2 中间层 .....	12
2.1.3 系统软件层 .....	13
2.1.4 功能层 .....	14
2.2 嵌入式系统硬件基础知识 .....	14
2.2.1 嵌入式微处理器的基础知识 .....	15
2.2.2 存储器系统 .....	22
2.2.3 输入/输出接口 .....	26
2.3 嵌入式系统软件基础知识 .....	26
2.3.1 嵌入式系统软件的特点 .....	26
2.3.2 嵌入式系统软件的体系结构 .....	27
2.4 嵌入式系统的设计方法 .....	32
2.4.1 嵌入式系统的设计流程 .....	32
2.4.2 嵌入式系统的硬件/软件协同设计 技术 .....	32
2.4.3 嵌入式系统的可重构设计技术 .....	34
习题 2 .....	36
大作业 1 .....	37
<b>第 3 章 嵌入式系统平台的构建</b> .....	38
3.1 嵌入式系统硬件平台 .....	38
3.1.1 嵌入式处理器的分类 .....	38
3.1.2 常见的嵌入式处理器 .....	41
3.2 嵌入式软件平台 .....	45
3.2.1 嵌入式文件系统 .....	45
3.2.2 嵌入式图形用户接口 .....	48
3.2.3 常用嵌入式操作系统 .....	50
3.3 基于 S3C44B0X + $\mu$ C/OS-II 的嵌入式 系统平台的构建 .....	54
3.3.1 软、硬件平台的选择 .....	54
3.3.2 硬件平台的结构 .....	56
习题 3 .....	58
<b>第 4 章 ARM 嵌入式处理器的体系结构</b> .....	59
4.1 ARM 处理器的体系结构 .....	59
4.1.1 ARM 处理器概述 .....	60
4.1.2 ARM 内核的种类 .....	60
4.2 ARM 处理器的工作模式 .....	63
4.2.1 ARM 和 Thumb 状态 .....	63
4.2.2 ARM 处理器模式 .....	64
4.2.3 ARM 寄存器介绍 .....	64
4.3 ARM 中断处理 .....	68
4.3.1 中断基础知识 .....	68
4.3.2 ARM 处理器的中断类型 .....	73
4.3.3 ARM 处理器对异常的响应 .....	74
4.3.4 ARM 系统的中断编程机制 .....	76
4.3.5 S3C44B0X 中断编程的应用实例 .....	77
4.4 ARM 系统的启动 .....	79
4.4.1 Boot Loader 的概念 .....	79
4.4.2 Boot Loader 的主要任务 .....	81
4.4.3 ARM 系统的启动过程 .....	82
4.4.4 ARM 系统启动代码分析 .....	85
4.5 S3C44B0X 简介 .....	88
习题 4 .....	92
大作业 2 .....	92
<b>第 5 章 嵌入式系统常用模块设计</b> .....	93
5.1 电源模块设计 .....	93
5.1.1 电源工作原理 .....	93
5.1.2 硬件电路设计 .....	95
5.2 复位电路 .....	98
5.2.1 复位原理 .....	98
5.2.2 复位电路设计 .....	99

5.3 异步串行通信接口模块设计 .....	101	6.3.2 事件 .....	166
5.3.1 异步串行通信概述 .....	101	6.3.3 邮箱 .....	167
5.3.2 S3C440BX UART 介绍 .....	102	6.3.4 消息队列 .....	167
5.3.3 串口硬件电路设计 .....	103	习题6 .....	168
5.3.4 串口驱动程序设计 .....	103	大作业3 .....	168
5.4 A/D 转换器 .....	106	<b>第7章 嵌入式实时操作系统</b>	
5.4.1 A/D 转换器原理 .....	106	<b><math>\mu</math>C/OS-II</b> .....	169
5.4.2 S3C440BX A/D 转换器介绍 .....	109	7.1 $\mu$ C/OS-II 的内核结构 .....	169
5.4.3 A/D 转换器驱动程序设计 .....	110	7.1.1 任务管理 .....	170
5.5 键盘模块设计 .....	111	7.1.2 任务间同步与通信 .....	174
5.5.1 常用键盘及其原理 .....	112	7.1.3 任务调度 .....	186
5.5.2 行列式键盘硬件电路设计 .....	113	7.1.4 中断和时间管理 .....	188
5.5.3 键盘驱动程序设计 .....	114	7.2 $\mu$ C/OS-II 应用程序举例 .....	192
5.6 触摸屏模块设计 .....	116	7.3 $\mu$ C/OS-II 在 S3C44B0X 上的移植 .....	194
5.6.1 触摸屏原理 .....	116	7.3.1 $\mu$ C/OS-II 移植的基础知识 .....	194
5.6.2 电阻触摸屏的相关技术 .....	117	7.3.2 $\mu$ C/OS-II 在 S3C44B0X 上移植的 实现 .....	200
5.6.3 触摸屏电路设计 .....	118	习题7 .....	209
5.6.4 触摸屏驱动程序设计 .....	120	<b>第8章 家庭安防远程监控系统设计</b> .....	210
5.7 LCD 模块设计 .....	125	8.1 功能需求分析及总体设计 .....	210
5.7.1 LCD 显示原理 .....	125	8.2 系统硬件设计 .....	211
5.7.2 LCD 电路设计 .....	128	8.2.1 振铃检测电路设计 .....	212
5.7.3 LCD 驱动程序设计 .....	131	8.2.2 摘挂机电路设计 .....	213
5.8 I <sup>2</sup> C 总线接口应用设计 .....	137	8.2.3 电话 DTMF 收发器电路设计 .....	213
5.8.1 I <sup>2</sup> C 总线及接口简介 .....	137	8.2.4 语音模块设计 .....	214
5.8.2 S3C44B0X 的 I <sup>2</sup> C 总线接口 .....	141	8.2.5 GSM 通信模块 .....	215
5.8.3 I <sup>2</sup> C 总线扩展 EEPROM 电路 设计 .....	144	8.3 系统软件设计 .....	216
5.8.4 EEPROM 驱动程序设计 .....	145	8.3.1 主程序设计 .....	218
5.9 PWM 直流电动机控制接口 .....	148	8.3.2 报警任务 .....	220
5.9.1 PWM 控制的基本原理 .....	148	8.3.3 GSM 短信查询控制任务 .....	222
5.9.2 S3C44B0X 直流电动机控制 .....	149	8.3.4 PSTN 电话查询控制任务 .....	224
习题5 .....	152	8.3.5 其他函数说明 .....	227
<b>第6章 嵌入式操作系统的基础知识</b> .....	153	习题8 .....	228
6.1 操作系统的基础知识 .....	153	<b>第9章 嵌入式软件测试基础知识</b> .....	229
6.1.1 操作系统的基本概念 .....	153	9.1 嵌入式软件的质量控制 .....	229
6.1.2 操作系统的主要功能 .....	154	9.1.1 嵌入式软件开发的质量问题 .....	229
6.1.3 操作系统的分类 .....	156	9.1.2 嵌入式软件的质量模型 .....	230
6.2 嵌入式操作系统及其特点 .....	158	9.1.3 软件缺陷 .....	230
6.2.1 嵌入式操作系统的特点 .....	158	9.1.4 提高嵌入式软件质量的方法 .....	232
6.2.2 嵌入式实时操作系统的一些基本 概念 .....	160	9.2 软件测试的基本概念 .....	233
6.3 常用的通信机制 .....	163	9.2.1 软件测试的定义 .....	233
6.3.1 信号量 .....	164	9.2.2 软件测试的目的和作用 .....	234

9.2.3 软件测试的分类和软件测试技术 .....	236	9.3.5 嵌入式软件测试和普通软件测试的区别 .....	241
9.3 嵌入式软件测试 .....	237	9.4 嵌入式软件测试技术 .....	243
9.3.1 嵌入式软件测试的特点 .....	237	9.4.1 软件静态测试 .....	244
9.3.2 嵌入式软件的统一测试模型 .....	238	9.4.2 软件系统测试 .....	248
9.3.3 嵌入式软件的目标机环境测试和 宿主机环境测试 .....	238	9.4.3 软件动态测试 .....	253
9.3.4 嵌入式软件的测试步骤概述 .....	239	习题 9 .....	259
		<b>参考文献</b> .....	<b>260</b>



# 第 1 章 嵌入式系统概论

通过本章的学习，读者可以了解嵌入式系统的基本概念、特点、应用领域，以及嵌入式系统的现状和发展趋势。

## 1.1 嵌入式系统简介

“嵌入式系统”一般指非 PC 系统，即有计算机功能但又不能称为计算机的设备或器材。它是以应用为中心的，软硬件可缩扩的，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等综合性严格要求的专用计算机系统。嵌入式系统主要由嵌入式处理器、相关支撑硬件、嵌入式操作系统（Embedded Operating System, EOS）及应用软件系统等组成。

与通用型计算机系统相比，嵌入式系统功耗低，可靠性高；功能强大，性能价格比高；实时性强，支持多任务；占用空间小，效率高；面向特定应用，可根据需要灵活定制。

嵌入式系统应用广泛，几乎包括了生活中的所有电器设备，如个人数字助理（PDA）、移动计算设备、电视机顶盒、数字电视、多媒体、汽车、微波炉、数码相机、家庭自动化系统、电梯、空调、安全系统、自动售货机、蜂窝式电话、消费电子设备、工业自动化仪表与医疗仪器等。

### 1.1.1 嵌入式系统的历史

虽然嵌入式系统是近几年才风靡起来的，但是这个概念并非新近才出现。从 20 世纪 70 年代单片机的出现到今天各式各样的嵌入式微处理器、微控制器的大规模应用，嵌入式系统已有近 40 年的发展历史。

作为一个系统，往往是在硬件和软件交替发展的双螺旋的支撑下逐渐趋于稳定和成熟的，嵌入式系统也不例外。

嵌入式系统的出现最初是基于单片机的。20 世纪 70 年代，单片机的出现使得汽车、家电、工业机器、通信装置以及成千上万种产品可以通过在内部嵌入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，还不能称其为“系统”。

最早的单片机是 Intel 公司的 8048，它出现在 1976 年。Motorola 公司同时推出了 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。在 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，51 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。

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

正出现了。确切点说,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 Ready System 公司的 VRTX、Integrated System Incorporation (ISI) 的 PSOS 和美国风河系统公司 (Wind River) 的 VxWorks、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点:它们均采用占先式的调度,响应的时间很短,任务执行的时间可以确定;系统内核很小,具有可裁剪、可扩充和可移植性,可以移植到各种处理器上;较强的实时性和可靠性,适合嵌入式应用。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解放出来,同时也促使嵌入式有了更为广阔的应用空间。

20 世纪 90 年代以后,随着对实时性要求的提高,软件规模不断上升,实时内核逐渐发展为实时多任务操作系统 (RTOS),并作为一种软件平台逐步成为目前国际嵌入式系统的主流。这时,更多的公司看到了嵌入式系统的广阔发展前景,开始大力发展自己的嵌入式操作系统。除了上面的几家老牌公司以外,还出现了 Palm OS、WinCE、嵌入式 Linux、Lynx、Nucleus、以及国内的 Hopen、Delta Os 等嵌入式操作系统。随着嵌入式技术的发展前景日益广阔,相信会有更多的嵌入式操作系统软件出现。

### 1.1.2 嵌入式系统的定义

根据 IEEE (国际电机工程师协会) 的定义,嵌入式系统是“控制、监视或者辅助装置、机器和设备运行的装置”(原文为 devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants)。这主要是从应用上加以定义的,从中可以看出嵌入式系统是软件和硬件的综合体,还可以涵盖机械等附属装置。

不过上述定义并不能充分体现嵌入式系统的精髓,目前国内一个普遍被认同的定义是: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。

根据这个定义,可从几方面来理解嵌入式系统:

1) 嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的,它必须与具体应用相结合才会具有生命力,才更具有优势。因此,可以这样理解上述三个面向的含义,即嵌入式系统是与应用紧密结合的,它具有很强的专用性,必须结合实际系统需求进行合理的裁剪利用。

2) 嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术、电子技术和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。所以,介入嵌入式系统行业,必须有一个正确的定位。例如 Palm 之所以在 PDA 领域占有 70% 以上的市场,就是因为其立足于个人电子消费品,着重发展图形界面和多任务管理;而 Wind River 公司的 VxWorks 之所以在火星车上得以应用,则是因为其高实时性和高可靠性。

3) 嵌入式系统必须根据应用需求对软硬件进行裁剪,满足应用系统的功能、可靠性、成本、体积等要求。所以,如果能建立相对通用的软硬件基础,然后在其上开发出适应各种需要的系统,是一个比较好的发展模式。目前的嵌入式系统的核心往往是一个只有几 KB 到几十 KB 的微内核,需要根据实际的使用进行功能扩展或者裁剪,但是由于微内核的存在,使得这种扩展能够非常顺利地进行。

实际上,嵌入式系统本身是一个外延极广的名词,凡是与产品结合在一起的具有嵌入式

特点的系统都可以叫嵌入式系统，而且有时很难以给它下一个准确的定义。现在人们讲嵌入式系统时，某种程度上指近些年比较流行的具有操作系统的嵌入式系统，本书在进行分析和展望时，也沿用这一观点。

嵌入式系统包括硬件和软件两部分。硬件包括处理器/微处理器、存储器及外设器件和I/O端口、图形控制器等。软件部分包括操作系统（OS）（要求实时和多任务操作）和应用程序。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与硬件的交互作用。

总的说来，嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，并且软硬件可定制，适用于各种应用场合，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。它一般由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户的应用程序等4个部分组成，用于实现对其他设备的控制、监视或管理等功能。

嵌入式系统的核心是嵌入式微处理器和嵌入式操作系统。嵌入式微处理器一般就具备以下4个特点：

1) 对实时多任务有很强的支持能力，能完成多任务并且有较短的中断响应时间，从而使内部的代码和实时内核的执行时间减少到最低。

2) 具有功能很强的存储区保护功能。这是由于嵌入式系统的软件结构已模块化，而为了避免在软件模块之间出现错误的交叉作用，需要设计强大的存储区保护功能，同时也有利于软件诊断。

3) 具有可扩展的处理器结构，以能最迅速地开发出满足应用的最高性能的嵌入式微处理器。

4) 嵌入式微处理器必须功耗很低，尤其是用于便携式的无线及移动的计算和通信设备中靠电池供电的嵌入式系统更是如此，如需要的功耗只有 mW 甚至  $\mu\text{W}$  级。

与其他类型的操作系统相比，嵌入式操作系统具有以下一些特点：

1) 体积小。嵌入式系统有别于一般的计算机处理系统，它不具备像硬盘那样大容量的存储介质，而大多使用闪存（Flash Memory）作为存储介质。这就要求嵌入式操作系统只能运行在有限的内存中，不能使用虚拟内存，中断的使用也受到限制。因此，嵌入式操作系统必须结构紧凑，体积微小。

2) 实时性。大多数嵌入式系统都是实时系统，而且多是强实时多任务系统，要求相应的嵌入式操作系统也必须是实时操作系统。实时操作系统作为操作系统的一个重要分支已成为研究的一个热点，主要探讨实时多任务调度算法和可调度性、死锁解除等问题。

3) 特殊的开发调试环境。提供完整的集成开发环境是每一个嵌入式系统开发人员所期待的。一个完整的嵌入式系统的集成开发环境一般需要提供的工具是编译/链接器、内核调试/跟踪器和集成图形界面开发平台。其中的集成图形界面开发平台包括编辑器、调试器、软件仿真器和监视器等。

### 1.1.3 嵌入式系统的特点

#### 1. 嵌入式系统特性

嵌入式系统的应用越来越广泛，这是因为嵌入式系统具有功能特定、规模可变、扩展灵活、有一定的实时性和稳定性、系统内核比较小等特点。

### (1) 功能特定性

应该说基本上所有的嵌入式系统都具有一些特定的功能。如一个 IP 转串口的小型嵌入式设备,其主要功能就是把 IP (TCP/UDP) 数据转成 RS232 数据,或者把 RS232 数据转成 TCP/UDP 数据。也正是基于这样特定和单一的功能,才能把这类嵌入式设备做得体积小巧并且价格低廉。应用于专业领域的嵌入式系统通常都具有执行特定功能的特性。

嵌入式系统的这个特性要求设计者在实际设计嵌入式系统的时候一定要作详尽的需求分析,把系统的功能定义清晰,真正地客户的需求是做好设计的前提。另外一点,如果在系统中增加一些不必要的功能不仅是开发时间上与经费上的浪费,也带来了系统整体性价比的降低,同样也会带来系统成本的增加。

### (2) 规模可变性

这里的规模可变主要指嵌入式系统主要是以微处理器与周边器件构成核心的,其规模可以变化。嵌入式处理器可以从 8 位到 16 位,到 32 位甚至到 64 位的都有。也正是基于这个特点,推荐嵌入式系统开发工程师在实际的开发过程中先设计与调试系统中基本不会变的那个部分,通常都是指嵌入式处理器核心电路部分,也就是本书中提到的核心板部分,然后再根据实际的应用扩展其外围接口。当然,这里的规模可变也和具体应用有很大的关系。由于嵌入式处理器内部集成的外围接口丰富,所以也使得一般的嵌入式系统都具有很强的规模可伸缩性。

嵌入式系统的这个特点给开发人员在系统设计过程中带来了很大的灵活性。在需要变化的时候,使系统的设计可以快速地进行扩展来适应需求。比如系统内存的增加、系统外围接口的扩展等,都是很容易实现的,但前提是在系统设计的时候已经考虑到了这部分的扩展冗余。也就是说,设计师在设计系统的时候,要适当地考虑一下系统以后的扩展性,最方便的就是通过一些跳线或者串联  $0\Omega$  电阻等方法作一些简单扩展等。

### (3) 实时性与稳定性

嵌入式系统因其应用情况通常会对时序和稳定性有一定的要求,也正是这样就出现了实时嵌入式系统等更深层次的系统。常见的实时嵌入式系统有 RT Linux、Nucleus、VxWorks 等。大家所熟知的火星探测器上使用的操作系统其实就是一个实时性很高的嵌入式系统,上面使用的操作系统就是美国风河系统公司的 VxWorks 操作系统。现在发展越来越快的 GPS 车辆实时监控系统中同样也对时序和稳定性有一定的需求。车辆移动端的控制器要根据 GPS 的秒信号与整个系统作时钟同步,从而实现移动端数据的分时按时间片向数据中心上报。在工控领域中应用的嵌入式系统对时序和稳定性的要求更高,此类设备的系统通常不间断地运行,需要面对较为恶劣的温度和湿度环境。

## 2. 嵌入式系统的其他特性

嵌入式系统除了具有以上几个特性外,还具有系统内核小、专用性强、系统小而精、使用多任务操作系统、有专门的开发配套工具等特点。

### (1) 系统内核小

因为嵌入式系统一般都是应用于小型电子装置,所以系统资源相对有限,其内核也比传统的操作系统小很多,小的有几 KB,大的也不过几十 KB。嵌入式操作系统内核比较小的有  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  和 Nucleus 等,相对较大就是 Microsoft 的 Windows Mobile 操作系统,其内核也只有几十 MB,比 PC 上运行的其他操作系统规模小得多。

## (2) 专用性强

嵌入式系统的个性化很强，软件和硬件的结合紧密，一般都针对硬件进行系统移植，同时针对不同的任务，系统软件也需要更改一定程序，程序的编译下载要和系统相结合。

## (3) 系统精简

早期的嵌入式系统，系统软件和应用软件没有明显的区分，不要求其功能的设计过于复杂。不过这也带来了开发上的不方便，也就是说如果不把系统软件和上层应用软件区分开的话，每一次修改软件，都要把系统软件和上层软件一起编译调试，会带来开发时间上的浪费。

## (4) 高实时性多任务操作系统

高实时性是嵌入式软件的基本要求，软件一般都要求是固化和存储的。通常嵌入式系统中的软件都是存储在闪存中的。上电之后，才把这些软件中的部分调入 RAM 区运行。嵌入式软件逐渐走向标准化，所以一般都使用多任务的操作系统。嵌入式系统的应用程序可以不需要操作系统在芯片上直接运行，但是为了合理地调度多个任务，充分利用系统资源、系统函数等，推荐选用实时操作系统开发平台。

## (5) 具有专门的开发工具和开发环境

由于嵌入式系统本身不具备自主开发能力，必须有一套开发工具和环境才能进行开发，这些工具和环境一般是基于通用计算机上的软件和硬件设备，以及各种仪器仪表等。开发时一般分为主机 (Host) 和目标机 (Target) 两个概念，主机用于程序开发，目标机作为最后的执行机。通常都是在主机上建立基于目标机的编译环境，编译目标机要运行的代码，然后把编译出来的可执行二进制代码通过主机和目标机之间的某种通信接口与协议传输到目标机上进行烧录和运行。

### 1.1.4 嵌入式系统的分类

嵌入式系统种类繁多，分布在生活中的各个方面，如手机、DVD 播放器、ADSL 上网终端、无线路由器和 DVB 机顶盒等都是嵌入式系统。下面从系统的实时性对嵌入式系统进行一下简单的分类。

根据对于实时性要求的不同，嵌入式系统可分为软实时和硬实时两种类型。

#### 1. 硬实时系统

硬实时系统是指系统要确保在最坏情况下的服务时间，即对于事件响应时间的截止期限必须得到满足，比如航天中宇宙飞船的控制系统等就是这样的系统。硬实时系统要求系统运行有一个刚性的、严格可控的时间限制，它不允许任何超出时限的错误发生。超时错误会带来损害甚至导致系统失败，或者导致系统不能实现它的预期目标。

#### 2. 软实时系统

软实时系统的时限是柔性灵活的，可以容忍偶然的超时错误，失败造成的后果并不严重，仅仅是降低了系统的吞吐量。从统计的角度来说，软实时系统中一个任务能够得到确保的处理时间，到达系统的事件 (Event) 也能够在此截止期限前得到处理。但违反截止期限并不会带来致命的错误，像实时多媒体系统就是一种软实时系统。基于 Linux 操作系统的嵌入式系统是一个典型的软实时系统，尽管在 RTLinux 里面对系统的调度机制做了很大的改进，使得实时性能也提高了很多，但是 RTLinux 还是一个软实时系统。

## 1.2 嵌入式系统的应用领域

嵌入式系统可应用在工业控制、交通管理、信息家电、家庭智能管理、网络及电子商务、环境监测和机器人等方面，如图 1-1 所示。目前，在绝大部分的无线设备（如手机等）中都采用了嵌入式系统。在 PDA 之类的无线设备中，嵌入式微处理器针对视频流进行了优化，并获得了广泛的支持；在数字音频播放器、数字机顶盒和游戏机等设备中，也得到了更广泛的应用。

在汽车领域，包括驾驶、安全和车载娱乐等各种功能在内的设备仅用五六个嵌入式微处理器就可将要求的功能统一实现。事实上，嵌入式技术无处不在，计算机技术也开始进入一个被称为后 PC 技术的春天。我们不仅拥有那种放在桌上处理文档、进行工作管理和生产控制的计算机“机器”，也可以拥有从大到小的各种使用嵌入式技术的电子产品，如 MP3、PDA、手机、智能玩具、电子病历、智能血压仪、无线收费设备、网络家电、车载安全检测装置等。嵌入式系统具有非常广阔的应用前景，其应用领域可以包括：

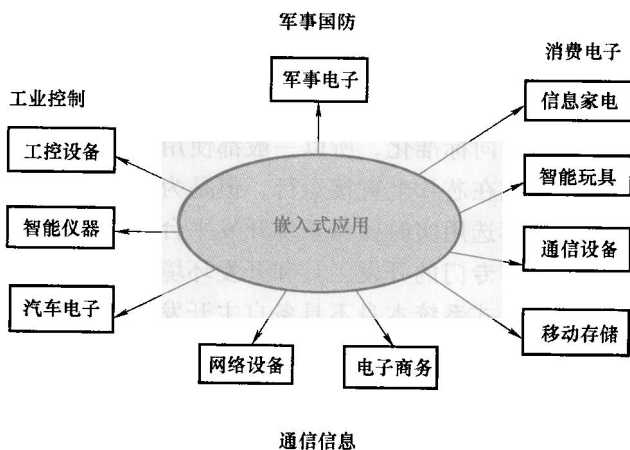


图 1-1 嵌入式系统的应用领域

### 1. 消费类电子产品应用

嵌入式系统在消费类电子产品应用领域的发展最为迅速，而且在这个领域中的嵌入式处理器的需求量也最大。由此可以清楚地理解“为什么从 2006 年开始以来中国台湾联发科公司的 MTK 多媒体应用处理器的全球出货量如此巨大”了，其 2007 年手机应用芯片的出货量将挑战 1 亿片。由嵌入式系统构成的消费类电子产品已经成为现实生活中必不可少的一部分，比如各式各样的信息家电产品，如智能冰箱、流媒体电视等。大家最熟悉的莫过于手机、PDA、电子辞典、数码相机、MP3/MP4 等，如图 1-2 所示。可以说离开了这些产品生活会失去很多的色彩。也许不久的将来，如果没有了这些消费类电子产品，生活就像以前没有电一样很不方便。

这些消费类电子产品中的嵌入式系统一样含有一个嵌入式应用处理器、一些外围接口及一套基于应用的软件系统等。就拿数码相机来说，其镜头后面就是一个 CCD 图像传感器，然后会有一个 A/D 器件把模拟图像数据变成数字信号，送到嵌入式应用处理器进行适当的处理，再通过应用处理器的管理实现图像在液晶显示器（LCD）上的显示、在 SD 卡或 MMC 卡上的存储等功能。

### 2. 智能仪器仪表类应用

这类产品可能离日常生活有点距离，但是对于开发人员来说却是实验室里的必备工具，比如网络分析仪、数字示波器、热成像仪等。通常这些嵌入式设备中都有一个应用处理器和

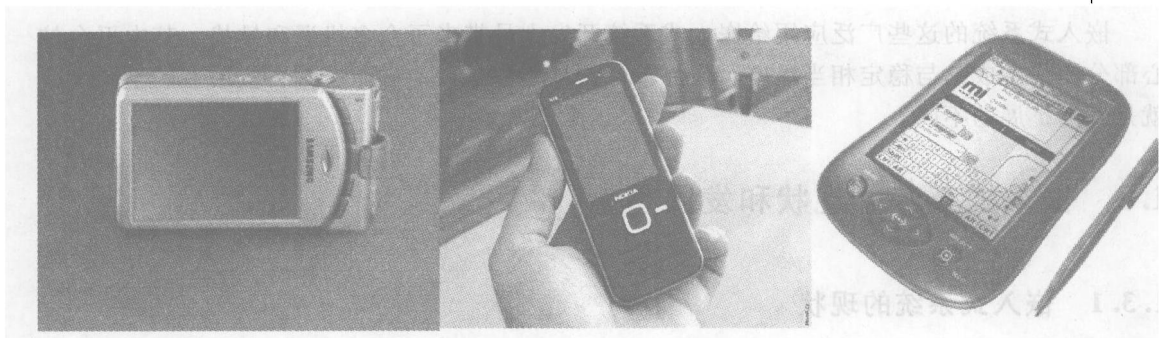


图 1-2 常用消费类嵌入式产品

一个运算处理器，可以完成一定的数据采集、分析、存储、打印、显示等功能。这些设备对于开发人员的帮助很大，大大提高了开发人员的开发效率，可以说是开发人员的“助手”。

### 3. 通信信息类产品应用

这些产品多数应用于通信机柜设备中，如路由器、交换机、家庭媒体网关等。在民用市场使用较多的莫过于路由器和交换机了。通常在一个典型的 VOIP 系统中，嵌入式系统会扮演不同的角色，有网关（Gateway）、关守（Gatekeeper）、计费系统、路由器、VOIP 终端等。基于网络应用的嵌入式系统也非常多，可能目前市场发展最快的就是远程监控系统等监控领域中应用的系统了。

### 4. 过程控制类应用

过程控制类应用主要指在工业控制领域中的应用，即对生产过程中各种动作流程的控制，如流水线检测、金属加工控制、汽车电子等。汽车工业在我国取得了飞速的发展，汽车电子也在这个大发展的前提下迅速成长。汽车发动机控制器（ECU）是汽车中最为复杂且功能最为强大的嵌入式系统，它包含电源、嵌入式处理器、通信链路、离散输入、频率输入、模拟输入、开关输出、PWM 输出和频率输出等各大模块。正在飞速发展的车载多媒体系统、车载 GPS 导航系统等也都是典型的嵌入式系统应用。美国 Segway 公司出品的两轮自平衡车，其内部就使用嵌入式系统来实现传感器数据采集、自平衡系统的控制、电机控制等。

### 5. 国防武器装备应用

嵌入式系统在国防武器装备中也有广泛应用，如雷达识别、军用数传电台、电子对抗设备等。在国防军用领域使用嵌入式系统最成功的案例莫过于美军在海湾战争中采用的一套 Adhoc 自组网作战系统了。利用嵌入式系统设计开发了 Adhoc 设备安装在直升机、坦克、移动步兵身上构成一个自愈自维护的作战梯队。这项技术现在发展成为 Mesh 技术，同样依托于嵌入式系统的发展，已经广泛应用于民用领域，比如消防、应急指挥等。

### 6. 生物微电子应用

指纹识别、生物传感器数据采集等应用中也广泛采用嵌入式系统。现在环境监测已经成为人类突出要面对的问题，可以想象随着技术的发展，将来的空气、河流中都可能存在着很多的微生物传感器在实时地检测环境状况，而且它们还会实时地把这些数据送到环境监测中心，以便检测整个生活环境避免发生更深层次的环境污染问题。这也许就是将来围绕在我们生存环境周围的一个无线环境监测传感器网。对于已经过去的 SARS 等重大流行性疾病，人类可以在嵌入式系统的协助下与之对抗。

嵌入式系统的这些广泛应用给嵌入式系统开发人员带来了众多机遇和挑战。其中平台核心技术部分的技术成熟与稳定相当重要，硬件平台的核心部分稳定可靠，其在应用上的不同无非就是外围扩展的不同。

## 1.3 嵌入式系统的现状和发展趋势

### 1.3.1 嵌入式系统的现状

随着信息化、智能化、网络化的发展，嵌入式系统也将获得广阔的发展空间。进入 20 世纪 90 年代，嵌入式技术全面展开，目前已成为通信和消费类产品的共同发展方向。在通信领域，数字技术正在全面取代模拟技术。在广播电视领域，模拟电视向数字电视转变，欧洲的 DVB（数字电视广播）技术已在全球大多数国家推广。数字音频广播（DAB）也已发展成熟。而软件、集成电路和新型元器件在产业发展中的作用日益重要。所有上述产品中，都离不开嵌入式系统。“维纳斯计划”生产的机顶盒，核心技术就是采用 32 位以上芯片级的嵌入式技术。在个人领域中，嵌入式产品将主要是个人商用，作为个人移动的数据处理和通信设备，如 3G 手机，不仅可以实现可视接听电话，还可以实现看电视、上网等功能。由于嵌入式设备具有自然的人机交互界面和以图形用户接口（GUI）为中心的多媒体界面，给人很大的亲和力。手写文字输入、语音拨号上网、收发电子邮件以及彩色图形、图像成为现实。

目前一些先进的 PDA 在显示屏幕上已实现汉字写入、短消息语音发布，应用范围也将日益广阔。对于企业专用解决方案，如物流管理、条码扫描、移动信息采集等，这种小型手持嵌入式系统将发挥巨大的作用。在自动控制领域，嵌入式系统不仅可以用于 ATM、自动售货机、工业控制等专用设备，和移动通信设备、GPS、娱乐相结合，同样可以发挥巨大的作用。长虹推出的 ADSL 产品，结合了网络、控制、信息等功能，这种智能化、网络化将是家电发展的新趋势。

从硬件方面讲，不仅有各大公司的微处理器芯片，还有用于学习和研发的各种配套开发包。目前，低层系统和硬件平台经过若干年的研究，已经相对比较成熟，实现各种功能的芯片应有尽有。

从软件方面讲，也有相当部分的成熟软件系统。国外商品化的嵌入式实时操作系统，已进入我国市场的有 Wind River、Microsoft、QNX 和 Nucleus 等公司的产品。我国自主开发的嵌入式系统软件产品如科银（CoreTek）公司的嵌入式软件开发平台 DeltaSystem，中科院推出的 Hopen 嵌入式操作系统。同时，由于是研究热点，所以可以在网上找到各种各样的免费资源，从各大厂商的开发文档，到各种驱动、程序源代码，甚至很多厂商还提供微处理器的样片。这对于我们从事这方面的研发，无疑是个资源宝库。对于软件设计来说，不管是上手还是进一步开发，都相对来说比较容易。这就使得很多生手能够比较快的进入研究状态，利于发挥大家的积极创造性。

今天，嵌入式系统带来的工业年产值已超过了 1 万亿美元。在国内，“维纳斯计划”和“女娲计划”一度闹得沸沸扬扬，机顶盒、信息家电这几年更成了 IT 热点，而实际上这些都是嵌入式系统在特定环境下的一个特定应用。据调查，目前国际上已有两百多种嵌入式操作



系统，而各种各样的开发工具、应用于嵌入式开发的仪器设备更是不可胜数。在国内，拥有众多嵌入式设备生产企业和广阔的应用市场，嵌入式系统技术发展的空间真是无比广大。

### 1.3.2 嵌入式系统的发展趋势

信息时代、数字时代使得嵌入式产品获得了巨大的发展契机，为嵌入式市场展现了美好的前景，同时也对嵌入式生产厂商提出了新的挑战，从中我们可以看出未来嵌入式系统的几大发展趋势：

1) 嵌入式开发是一项系统工程，因此要求嵌入式系统厂商不仅要提供嵌入式硬件系统本身，同时还需要提供强大的硬件开发工具和软件包支持。

目前，很多厂商已经充分考虑到这一点，在主推系统的同时，将开发环境也作为重点推广。比如三星在推广 ARM7、ARM9 芯片的同时，还提供开发板和板级支持包（BSP），而 WindowCE 在主推系统时也提供 Embedded VC++ 作为开发工具。还有 VxWorks 的 Tonado 开发环境，DeltaOS 的 Limda 编译环境等都是这一趋势的典型体现。当然，这也是市场竞争的结果。

2) 网络化、信息化的要求随着因特网技术的成熟、带宽的提高日益提高，使得以往单一功能的设备（如电话、手机、冰箱、微波炉等）功能不再单一，结构更加复杂。这就要求芯片设计厂商在芯片上集成更多的功能。为了满足应用功能的升级，设计师们一方面采用更强大的嵌入式处理器（如 32 位、64 位 RISC 芯片或信号处理器 DSP）增强处理能力，同时增加功能接口（如 USB），扩展总线类型（如 CAN Bus），加强对多媒体、图形等的处理，逐步实施片上系统（SoC）的概念。软件方面采用实时多任务编程技术和交叉开发工具技术来控制功能的复杂性，简化应用程序设计、保障软件质量和缩短开发周期。

3) 网络互联成为必然趋势。未来的嵌入式设备为了适应网络发展的要求，必然要求硬件上提供各种网络通信接口。传统的单片机对于网络支持不足，而新一代的嵌入式处理器已经开始内嵌网络接口，除了支持 TCP/IP 协议，有的还支持 IEEE1394、USB、CAN、Bluetooth 或 IrDA 通信接口中的一种或者几种，同时也需要提供相应的通信组网协议软件和物理层驱动软件。在软件方面，嵌入式系统内核支持网络模块，甚至可以在设备上嵌入 Web 浏览器，真正实现随时随地用各种设备上网。

4) 精简系统内核、算法，降低功耗和软硬件成本。未来的嵌入式产品是软硬件紧密结合的设备，为了降低功耗和成本，需要设计者尽量精简系统内核，只保留和系统功能紧密相关的软硬件，利用最低的资源实现最适当的功能。这就要求设计者选用最佳的编程模型和不断改进算法，优化编译器性能。因此，既要软件人员有丰富的硬件知识，又需要发展先进嵌入式软件技术，如 Java、Web 和 WAP 等。

5) 提供友好的多媒体人机界面。嵌入式设备能与用户亲密接触，最重要的因素就是它能提供非常友好的用户界面。图形界面和灵活的控制方式，使得人们感觉嵌入式设备就像一个熟悉的老朋友。这方面的要求使得嵌入式软件设计者要在图形界面、多媒体技术上痛下苦功。手写文字输入、语音拨号上网、收发电子邮件以及彩色图形、图像都会使使用者获得自由的感受。目前，一些先进的 PDA 在显示屏幕上已实现汉字写入、短消息语音发布，但一般的嵌入式设备距离这个要求还有很长的路要走。