

DSP应用丛书

# DSP实时多任务 操作系统设计与实现

邬可军 朱铭皓 曹建树 张 泽 编著 石水晶 审校

DSP 应用丛书

# DSP实时多任务操作系统 设计与实现

邬可军 朱铭锴 曹建树 张 泽 编著  
石水晶 审校

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书以目前流行的 TMS320C2000 系列数字处理器件和易于学习开发的 DSP RTOS 嵌入式操作系统为核心, 结合编者多年开发研制工作实践, 介绍基于 DSP 芯片的 DSP RTOS 操作系统的移植和应用实例。

本书共分 8 章, 前 3 章介绍嵌入式操作系统的基本概念、内核及管理。第 4、第 5 章介绍 TMS320C2000 系列原理、汇编语言、C 语言编程方法及汇编语言和 C 语言混合编程方法。第 6 章介绍北京飓风中天科技公司开发的 DSP 实验板。第 7、第 8 两章介绍基于 TMS320C2000 系列的 DSP RTOS 操作系统的移植和应用。

本书可以作为电机控制系统、工业控制、手持设备、智能玩具、医疗仪器、电子仪器、机器人制作等方面嵌入式系统和 DSP 开发与应用的参考书, 也可作为高等院校有关嵌入式操作系统与 DSP 应用的高年级本科生或研究生的教学用书。

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

DSP 实时多任务操作系统设计与实现 / 邬可军, 朱铭皓, 曹建树, 张泽编著. —北京: 电子工业出版社, 2005. 11

(DSP 应用丛书)

ISBN 7-121-01845-4

I. D… II. ①邬… ②朱… ③曹… ④张… III. 数字信号—信号处理—系统设计 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 118966 号

责任编辑: 沈艳波

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21.75 字数: 557 千字

印 次: 2005 年 11 月第 1 次印刷

印 数: 5000 册 定价: 32.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

# 前 言

随着计算机技术的飞速发展和互联网技术的广泛应用，从 PC 时代过渡到了以个人数字助理、手持个人电脑、信息家电为代表的 3C（计算机、通信、消费电子）和智能控制一体的后 PC 时代，后 PC 时代是嵌入式系统产品的时代。嵌入式系统是后 PC 时代的象征，它被广泛地应用于信息电器、移动设备、网络设备和工业控制等领域。

嵌入式系统（Embedded System）是由嵌入式硬件和嵌入式软件组成的。嵌入式硬件即由具有处理功能的微处理器（MPU）或具有控制功能的 MCU 及相关硬件组成，嵌入式硬件与过去的计算机硬件系统和微控制系统一样。嵌入式软件即嵌入式操作系统是嵌入式系统的核心，它是一个面向用户、面向产品、面向应用的系统，适用于对功能、可靠性、体积、成本等综合性能要求严格的软件产品。

伴随着计算机硬件技术的发展，速度和容量都已不再是软件的“瓶颈”。随着产品功能的日益复杂，过去传统的前/后台软件开发的思维已不能满足现代软件开发要求，嵌入式操作系统就是为了满足现代软件技术发展的要求而快速发展起来的。嵌入式操作系统采用了先进的编程思想，为软件开发人员提供了一个友好的开发平台，一般可以提供多任务调度、时间管理、任务间通信和同步，以及内存管理等重要服务，从而使开发应用程序易于设计、维护和扩展。采用嵌入式操作系统开发的产品将会更加可靠，开发周期更短。使用嵌入式操作系统开发嵌入式应用产品是当今最热门的技术之一，软件开发人员只有掌握嵌入式操作系统，才不会因落伍而被淘汰。

数字信号处理（Digital Signal Processing, DSP）是一门涉及多门学科而又有广泛应用的新兴学科。随着硬件技术的发展，DSP2000、DSP5000、DSP6000 系列产品相继生产，并成功地应用在生产控制、电机控制、语音处理、图像处理、生物工程、机器人等领域当中。然而，更多的软件开发人员的思维却仍然停留在传统的前/后台编程思想上，随着程序越来越大而越来越难以开发、难以管理、难以扩展。为了给软件开发人员提供一个良好的开发平台，我们经过艰辛研发，研制出基于 TMS320C2000 的嵌入操作系统（Operating System, OS），并且编写本书奉献给大家，希望本书为大家在开发产品过程中提供帮助并得以应用。

由于编者的水平有限，书中可能会存在不当之处，请读者批评指正。

编 者

2005 年 10 月于北京

# 目 录

<b>第 1 章 嵌入式操作系统和 DSP 概述</b> .....	(1)
1.1 嵌入式系统简介.....	(2)
1.1.1 什么是嵌入式系统.....	(2)
1.1.2 嵌入式系统的特点.....	(4)
1.1.3 嵌入式系统的分类.....	(5)
1.2 嵌入式系统的现状和发展趋势.....	(8)
1.2.1 嵌入式系统的现状.....	(8)
1.2.2 未来嵌入式系统的发展趋势.....	(9)
1.2.3 什么是 DSP 及 DSP 的特点.....	(11)
1.2.4 DSP 的应用和开发前景.....	(12)
1.3 嵌入式系统的应用领域.....	(15)
1.4 嵌入式系统在机电控制方面的应用.....	(17)
1.5 基于 DSP 的嵌入式操作系统的移植.....	(19)
<b>第 2 章 嵌入式操作系统的基本概念</b> .....	(20)
2.1 基本概念.....	(21)
2.2 内核.....	(22)
2.3 任务管理.....	(24)
2.4 中断管理.....	(34)
2.5 实时系统小结.....	(37)
2.5.1 对存储器的需求.....	(37)
2.5.2 使用实时内核的优、缺点.....	(37)
2.5.3 实时系统小结.....	(38)
<b>第 3 章 DSP RTOS 嵌入式操作系统</b> .....	(39)
3.1 DSP RTOS 嵌入式操作系统的特点.....	(39)
3.2 DSP RTOS 嵌入式操作系统的内核结构概述.....	(40)
3.2.1 临界段、OS_ENTER_CRITICAL()和 OS_EXIT_CRITICAL().....	(41)
3.2.2 任务.....	(41)
3.2.3 任务状态.....	(42)
3.2.4 任务控制块 (OS_TCB).....	(43)
3.2.5 就绪表.....	(51)
3.2.6 任务调度.....	(54)
3.2.7 任务级的任务切换, OS_TASK_SW().....	(55)

3.2.8	空闲任务	(58)
3.2.9	DSP RTOS 中的中断	(58)
3.2.10	时钟节拍	(62)
3.2.11	DSP RTOS 初始化	(64)
3.2.12	DSP RTOS 的启动	(66)
3.3	事件控制块和与事件相关的函数	(67)
3.3.1	事件控制块	(67)
3.3.2	将任务置于等待事件的任务列表	(70)
3.3.3	从等待事件的任务列表中使任务脱离等待状态	(71)
3.3.4	在等待事件的任务列表中查找优先级最高的任务	(71)
3.3.5	空余事件控制块链表	(73)
3.3.6	初始化一个事件控制块, OS_EventWaitListInit()	(73)
3.3.7	使一个任务进入就绪态, OS_EventTaskRdy()	(74)
3.3.8	使一个任务进入等待某事件发生状态, OS_EventTaskWait()	(76)
3.3.9	由于等待超时而将任务置为就绪态, OS_EventTO()	(76)
3.4	任务管理函数	(77)
3.5	时间管理函数	(79)
3.6	消息邮箱管理函数	(80)
3.6.1	建立一个邮箱, OSMboxCreate()	(81)
3.6.2	删除一个邮箱, OSMboxDel()	(83)
3.6.3	等待邮箱中的消息, OSMboxPend()	(85)
3.6.4	向邮箱发送一则消息, OSMboxPost()	(87)
3.6.5	向邮箱发送一则消息, OSMboxPostOpt()	(89)
3.6.6	无等待地从邮箱中得到一则消息, OSMboxAccept()	(90)
3.6.7	查询一个邮箱的状态, OSMboxQuery()	(91)
3.6.8	用邮箱作为二值信号量	(93)
3.6.9	用邮箱实现延迟, 而不使用 OSTimeDly()	(94)
3.7	消息队列管理函数	(95)
3.7.1	建立一个消息队列, OSQCreate()	(98)
3.7.2	删除一个消息队列, OSQDel()	(100)
3.7.3	等待消息队列中的消息, OSQPend()	(102)
3.7.4	向消息队列发送一则消息 (FIFO), OSQPost()	(105)
3.7.5	向消息队列发送一则消息 (LIFO), OSQPostFront()	(106)
3.7.6	向消息队列发送一则消息 (广播, FIFO 或 LIFO), OSQPostOpt()	(108)
3.7.7	无等待地从消息队列中获得消息, OSQAccept()	(110)
3.7.8	清空消息队列, OSQFlush()	(111)
3.7.9	获取消息队列的状态, OSQQuery()	(112)
3.7.10	使用消息队列读取模拟量的值	(114)
3.7.11	消息队列用做计数型信号量	(115)

3.8	信号量管理函数	(116)
3.8.1	建立一个信号量, OSSemCreate()	(117)
3.8.2	删除一个信号量, OSSemDel()	(119)
3.8.3	等待一个信号量, OSSemPend()	(121)
3.8.4	发出一个信号量, OSSemPost()	(123)
3.8.5	无等待地请求一个信号量, OSSemAccept()	(124)
3.8.6	查询一个信号量的当前状态, OSSemQuery()	(125)
<b>第4章</b>	<b>TMS320C2000 系列 DSP 介绍</b>	<b>(128)</b>
4.1	TMS320LF240x 芯片介绍	(128)
4.1.1	TMS320LF240XDSP CPU 控制器的体系结构和引脚	(129)
4.1.2	TMS320LF240x DSP 引脚功能介绍	(130)
4.1.3	TMS320LF240x DSP 存储器映射	(137)
4.1.4	TMS320LF240x DSP 外设存储器映射	(138)
4.2	中央处理单元 (CPU)	(139)
4.2.1	TMS320LF240x DSP 的 CPU 内部功能模块介绍	(140)
4.2.2	存储器和 I/O 空间	(148)
4.2.3	系统配置和中断	(151)
4.2.4	程序控制	(168)
4.3	TMS320LF24x 寻址方式和指令系统	(175)
4.3.1	寻址方式	(175)
4.3.2	指令集	(178)
4.3.3	典型指令说明	(188)
<b>第5章</b>	<b>程序设计和 CCS 编译器</b>	<b>(195)</b>
5.1	软件开发平台 Code Composer 及功能	(195)
5.1.1	Code Compose 的安装	(195)
5.1.2	主要菜单及功能介绍	(196)
5.1.3	工作窗口区	(197)
5.1.4	调试一个程序的步骤	(198)
5.2	汇编语言程序设计	(200)
5.2.1	几个常用的汇编伪指令介绍	(200)
5.2.2	4 种基本的文件	(202)
5.3	汇编语言编程实例	(214)
5.4	C 语言程序设计	(219)
5.4.1	C 语言函数库	(219)
5.4.2	函数调用规则	(248)
5.4.3	中断函数	(249)
5.4.4	4 个基本文件和 1 个库函数文件	(249)
5.4.5	利用 CCS 编译器开发应用程序的步骤	(264)
5.4.6	C 语言编程实例	(267)

5.4.7 C 语言和汇编语言的混合编程方法	(278)
<b>第 6 章 TMS320LF2407 实验板介绍</b>	<b>(281)</b>
6.1 CY-EVM2407EA 实验板	(281)
6.1.1 CY-EVM2407 特征和功能	(281)
6.1.2 CY-EVM2407 的操作	(282)
6.1.3 扩展总线和接口	(286)
6.1.4 各种跳线	(290)
6.1.5 配置	(295)
6.2 CY-IPM2407 电机控制开发套件概述	(296)
<b>第 7 章 DSP RTOS 在 TMS320C2000 系列上的移植</b>	<b>(300)</b>
7.1 DSP RTOS 移植的条件	(300)
7.2 开发工具	(302)
7.3 目录和文件	(303)
7.4 INCLUDES.h 头文件	(303)
7.5 OS_CPU.h 头文件	(303)
7.6 OS_CPU.C 文件	(304)
7.6.1 任务堆栈初始化函数 OSTaskStkInit()	(305)
7.6.2 OSTaskCreatHook()	(310)
7.6.3 OSTaskDelHook()	(310)
7.6.4 OSTaskSwHook()	(311)
7.6.5 OSTCBInitHook()	(311)
7.6.6 OS_CPU_C.C 文件小结	(311)
7.7 OS_CPU_A.ASM 文件	(312)
7.7.1 运行最高级任务函数 OSStartHighRdy()	(312)
7.7.2 任务级任务切换函数 OSCtxSw()	(313)
7.7.3 时钟中断服务程序 OSTickSR()	(315)
7.7.4 中断级任务调度函数 OSIntExit()	(317)
7.8 测试移植代码	(318)
7.8.1 确保 CCS 编译器正常工作	(318)
7.8.2 验证 OSTaskStkInit()和 OSStartHighRdy()函数	(318)
7.8.3 测试 OSCtxSw()函数	(321)
7.8.4 测试 OSTickISR()函数和 OSIntCtxSw()函数	(323)
<b>第 8 章 编程实例</b>	<b>(326)</b>
8.1 实例 1	(326)
8.2 实例 2	(330)
8.3 实例 3	(334)
<b>参考文献</b>	<b>(340)</b>



# 第 1 章 嵌入式操作系统和 DSP 概述

我们知道，嵌入式微处理器（embedded microprocessor）又称微控制器（MCU，Micro Controller Unit），是使用在除了计算机之外各种各样设备内的计算机芯片，常用于控制和监视领域。一般人是看不到嵌入式微处理器的，但它却几乎无处不在，且对我们生活的影响也日益增大。这种隐藏的芯片控制着难以数计的东西，从蜂窝电话、微波炉到巨型喷气客机和汽车防抱死制动系统等。

嵌入式微处理器的应用离不开嵌入式操作系统。

与一般 PC 操作系统不同的是，嵌入式操作系统由一个体积很小的内核及一些可以根据需要进行定制的系统模块组成，能够运行在各种不同的硬件平台上，提供最基本的程序运行环境和接口，成为应用软件运行的基础。虽然目前 PC、工作站和服务器所用的处理器备受人们关注，但是嵌入式微处理器却推动着整个嵌入式操作系统的发展。

在计算机技术日新月异的时代，计算机软件、硬件不断进行着新的突破。有人大胆预言，后 PC 时代将是计算机应用的年代，而嵌入式操作系统及其应用产品则是后 PC 时代的象征。如今嵌入式操作系统和 DSP 应用已经成为当今计算机应用领域中最热门的技术，是计算机应用软件、硬件开发人员的新课题。

与 PC 模式不同的是，PC 时代是一个由供应商统治的市场，而嵌入式系统的市场将会十分广阔。消费类电子产品（如手机和 PDA）的快速发展会推动嵌入式产品的飞速发展，预计在未来的几年内，我国将成为世界上最大的消费类电子产品的使用国，这也预示着消费类电子产品对于嵌入式操作系统来说有着巨大的商机。

市场情况也令人鼓舞。2005 年，中国的嵌入式操作系统市场处于快速增长时期。嵌入式操作系统的总体销售额将超过 6500 万元，相对于 2004 年，整个嵌入式操作系统市场保持了快速的增长。有专家认为：在未来的几年内，嵌入式系统的发展为几乎所有的电子设备注入了新的活力。由于迅速发展的 Internet 和非常廉价的微处理器的出现，嵌入式系统将在我们的日常生活里形成一个更大的应用领域。消费电子、交通运输/汽车、电信服务/网络工业都表现出对这个市场的关注，嵌入式操作系统将继续保持迅速增长的势头。

对于嵌入式系统的初步入门者而言，了解嵌入式操作系统和 DSP 的基础知识非常必要。因此，本章将要告诉你什么是嵌入式操作系统，它有哪些特点？什么是 DSP，它有哪些特点？

通过本章的学习，读者将会掌握以下内容：

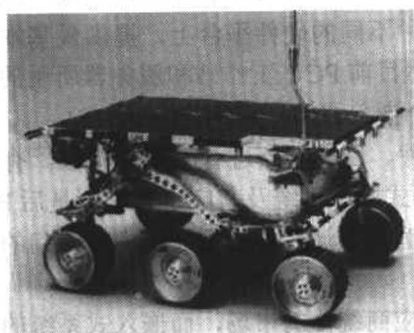
- 什么是嵌入式操作系统；
- 什么是 DSP；
- 嵌入式操作系统及 DSP 的应用领域；
- 嵌入式操作系统 DSP 的应用领域和未来发展情况。

## 1.1 嵌入式系统简介

### 1.1.1 什么是嵌入式系统

嵌入式系统本身是一个相对模糊的定义。由于目前嵌入式系统已经渗透到日常生活的各个方面，在工业、服务业、消费电子等领域的应用范围都不断扩大，因此难以给“嵌入式系统”下一个明确的定义。

一般来讲，嵌入式系统是指将操作系统和功能软件集成于计算机硬件系统之中。简单地说就是系统的应用软件与系统的硬件一体化，类似于 BIOS 的工作方式，具有软件代码小、高度自动化、响应速度快等特点，特别适合于要求实时和多任务的体系。图 1-1 就是两个嵌入式系统的典型应用。



(a) 火星车



(b) 可视电话

图 1-1 使用嵌入式系统的两种设备

如果和传统的 PC 系统比较，嵌入式系统一般指非 PC 系统，它包括硬件和软件两部分。硬件包括处理器 / 微处理器、存储器及外设器件和 I/O 端口、图形控制器等，软件部分包括操作系统软件 (OS) (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。

#### 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，嵌入式系统已经有了近 30 年的发展历史。

嵌入式系统最初的应用是基于单片机的。20 世纪 70 年代单片机的出现，使得汽车、家电、工业机器人、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，更易使用、速度更快、价格更低。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作为 8 位的芯片执行一些单线程的程序，还谈不上“系统”的概念。

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，这使得开发人员可以进一步缩短开发周期，降低开发成本并提高开发效率。

1981年, Ready System 开发出世界上第一个商业嵌入式实时内核 (VTRX32)。这个实时内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。此后一些公司也纷纷推出了自己的嵌入式操作系统, 如 Integrated System Incorporation (ISI) 的 pSOS、WindRiver 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点: 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; 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。

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, Real Time Operating System), 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、Windows CE、嵌入式 Linux、Lynx、Nucleus 以及国内的 Hopen、Delta OS 等嵌入式操作系统。

随着嵌入式技术发展前景的日益广阔, 相信会有更多的嵌入式操作系统软件出现。图 1-2 是几个比较有代表性的嵌入式操作系统。



(a) 预装了 Windows CE .net 的掌上电脑



(b) Mac OS X 截图

图 1-2 各种嵌入式操作系统

今天, RTOS 已经在全球形成了一个产业, 根据美国 EMF (电子市场分析) 报告, 1999 年全球 RTOS 市场产值达 3.6 亿美元, 而相关的整个嵌入式开发工具 (包括仿真器、逻辑分析仪、软件编译器和调试器) 则高达 9 亿美元。

## 2. 嵌入式系统的定义

根据 IEEE (国际电气和电子工程师协会) 的定义, 嵌入式系统是“控制、监视或者辅助设备、机器和车间运行的装置” (原文为 devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants)。可以看出, 嵌入式系统是软件和硬件的综合体, 可以涵盖机械等附属装置。

但这一概念依然令人费解, 因此, 国内有关专家给出了关于嵌入式系统的最通俗的定义: 以应用为中心、以计算机技术为基础, 软、硬件可裁剪, 适应应用系统对功能、可靠

性、成本、体积、功耗等严格要求的专用计算机系统。

嵌入式系统总体上可以划分为硬件和软件两部分，硬件一般由高性能的微处理器和外围的接口电路组成，软件一般由实时操作系统和其上运行的应用软件构成，软件和硬件之间由所谓的中间层（BSP 层，板级支持包）连接。

一般而言，嵌入式系统的构架可以分为 4 个部分：处理器、存储器、输入/输出（I/O）和软件。多数嵌入式设备的应用软件和操作系统都是紧密结合的，这也是嵌入式系统和 Windows 系统的最大区别。

### 1.1.2 嵌入式系统的特点

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以及各个行业的具体应用相结合后的产物，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。

从嵌入式系统的定义可以看出，嵌入式系统具有以下几个重要特征：

① 系统内核小。由于嵌入式系统一般应用于小型电子装置，系统资源相对有限，所以内核较之传统的操作系统要小得多。比如 ENEA 公司的 OSE 分布式系统，内核只有 5 KB，而 Windows 的内核则要大多得多。

② 专用性强。嵌入式系统的个性比较强，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。同时，针对不同的任务，往往需要对系统进行较大更改；程序的编译下载要和系统相结合，这种修改和通用软件的“升级”是完全不同的概念。

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，不要求其功能的设计及实现过于复杂，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 高实时性的操作系统软件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。

⑤ 嵌入式软件开发要想走向标准化，就必须使用多任务的操作系统。嵌入式系统的应用程序可以没有操作系统而直接在芯片上运行，但是为了合理地调度多任务，利用系统资源、系统函数以及专家库函数接口，用户必须自行选配 RTOS（Real Time Operating System）开发平台，这样才能保证程序执行的实时性、可靠性，并减少开发时间，保障软件质量。

⑥ 嵌入式系统开发需要专门的开发工具和环境。由于嵌入式系统本身不具备自主开发能力，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，因此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基于通用计算机上的软硬件设备以及各种逻辑分析仪、混合信号示波器等。开发时往往有主机和目标机的概念，主机用于程序的开发，目标机作为最后的执行机，开发时需要交替结合进行。也就是说，嵌入式系统是与应用紧密结合的，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。

嵌入式系统的自身特点也使它能够根据应用需求对软硬件进行裁剪，从而满足应用系统的功能、可靠性、成本、体积等方面的要求。目前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裁剪。由于微内核的存在，使得这种扩展能够非常顺利地进行。

所以，如果能建立相对通用的软硬件基础，并且在其上开发出适应各种需要的系统，是嵌入式系统一个比较好的发展模式。

### 1.1.3 嵌入式系统的分类

由于嵌入式系统由硬件和软件两大部分组成，所以其分类也可以从这两方面进行划分。

#### 1. 嵌入式系统的硬件

从硬件方面来讲，嵌入式系统的核心部件是嵌入式处理器。据不完全统计，全世界嵌入式处理器的品种数量已经超过 1000 种，流行体系结构有 30 多个，其中 8051 体系占大多数。生产 8051 单片机的半导体厂家有 20 多个，共 350 多种衍生产品，仅 Philips 就有近 100 种。目前嵌入式处理器的寻址空间可以从 64 KB 到 256 MB，处理速度从 0.1 MIPS（兆条指令 / 秒）到 2000 MIPS。

近年来嵌入式微处理器越来越向小体积、高性能、低功耗的方向发展，专业分工也越来越明显，出现了专业的 IPC（Intellectual Property Core，知识产权核）供应商，如 ARM、MIPS 等，他们通过提供优质、高性能的嵌入式微处理器内核，由各个半导体厂商生产面向各个应用领域的芯片。

根据市场上的应用情况，一般可以将嵌入式处理器分成 4 类，即嵌入式微控制器（MCU，MicroController Unit）、嵌入式 DSP 处理器（DSP，Digital Signal Processor）、嵌入式微处理器（MPU，MicroProcessor Unit）和嵌入式片上系统（SoC，System on Chip）。

##### 1) 嵌入式微控制器（MCU，MicroController Unit）

嵌入式微控制器（如图 1-3 所示）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 20 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了 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、EEPROM 等各种必要的功能和外设。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 1-3 VCON 推出首款 VCB 2000 MCU 产品

由于 MCU 价格低廉、功能优良，所以拥有的品种和数量最多。比较有代表性的包括 8051、MCS-251、MCS-96/196/196、P51XA、C166/167、68K 系列；MCU8XC930/931、C540、C541 系列；支持 12C、CAN-BUS、LCD 的众多专用 MCU 及其兼容系列。目前 MCU 占嵌入式系统约 70% 的市场份额。近来 Atmel 推出的 AVR 单片机由于集成了 FPGA 等器件的功能，所以具有很高的性价比，势必将推动单片机获得更快的发展。

##### 2) 嵌入式 DSP 处理器（DSP，Digital Signal Processor）

DSP 处理器（如图 1-4 所示）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执行速度。在数字滤波、FFT、频谱分析等仪器上，DSP 获得了大规模的应用。

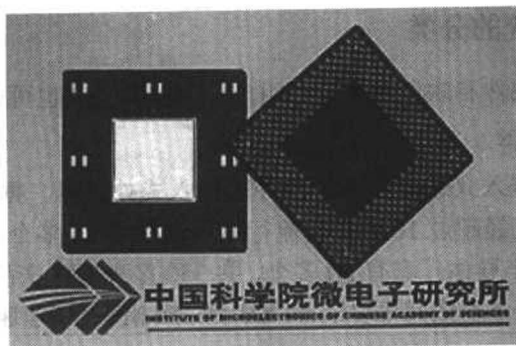


图 1-4 超高速型专用 DSP 芯片

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 等分立元件实现。MPU 较低的处理速度无法满足 DSP 的算法要求，其应用领域也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的发展，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。在 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了成倍提高，成为语音处理、图像硬件处理技术的基础。到 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。

目前应用最为广泛的是 TI 的 TMS320C2000/C5000/C6000 系列，另外如 Intel 的 MCS-296 和 Siemens 的 TriCore 也有各自的应用范围。

### 3) 嵌入式微处理器 (MPU, MicroProcessor Unit)

嵌入式微处理器 (如图 1-5 所示) 是由通用计算机中的 CPU 演变而来的。它的特征是具有 32 位以上的处理器，具有较高的性能，当然其价格也相应较高。但与计算机处理器不同的是，在实际嵌入式应用中，它只保留与嵌入式应用紧密相关的功能硬件，而去除了其他的冗余功能部分，这样就以最低的功耗和资源实现了嵌入式应用的特殊要求。与工业控制计算机相比，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。目前主要的嵌入式处理器类型有 Am186/88、386EX、SC-400、Power PC\68000\MIPS\ARM/StrongARM 系列等。



图 1-5 MPU

其中 ARMz/StrongARM 是专为手持设备开发的嵌入式微处理器，属于中档的价位。

#### 4) 嵌入式片上系统 (SoC, System on Chip)

片上系统 SoC (如图 1-6 所示) 是追求产品系统最大包容的集成器件，是目前嵌入式应用领域的热门话题之一。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 等硬件描述语言，实现一个复杂的系统。用户不需要再像传统的系统设计一样，绘制庞大复杂的电路板，一点点地连接焊制，只需要使用精确的语言，综合时序设计直接在器件库中调用各种通用处理器的标准，再通过仿真，就可以直接交付芯片厂商进行生产。由于绝大部分系统构件都是在系统内部，整个系统就特别简捷，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。



图 1-6 SoC

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 Philips 的 Smart XA，还有少数通用系列如 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。

预计不久的将来，一些大的芯片公司将通过推出成熟的、能占领多数市场的 SoC 芯片，一举击退竞争者。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. 嵌入式系统的软件

嵌入式系统的软件一般由嵌入式操作系统和应用软件组成。操作系统是连接计算机硬件与应用程序的系统程序。目前嵌入式系统的软件主要有两大类：实时系统和分时系统。其中实时系统又分为两类：硬实时系统和软实时系统，如图 1-7 所示。

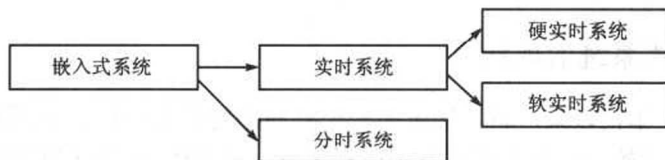


图 1-7 嵌入式系统分类

嵌入式实时操作系统是指具有实时性，能支持实时控制系统工作的操作系统。实时操作系统的首要任务是调度一切可利用的资源完成实时控制任务，其次才着眼于提高计算机系统的使用效率，通过任务调度来满足对重要事件在规定的时间内作出正确响应的要求。

实时系统又可以分为硬实时系统和软实时系统。硬实时和软实时的区别就在于对外界事件作出反应的时间。硬实时系统必须对事件作出及时的反应，绝对不能错过事件处理的时限，在硬实时系统中如果出现了这样的情况就意味着巨大的损失和灾难，比如说航天飞机的控制系统，如果出现故障，后果就不堪设想。

软实时系统是指如果在系统负荷较重的时候，允许有错过时限的情况发生，而且不会造成太大的危害，比如液晶屏刷新允许有短暂的延迟。

硬实时系统和软实时系统实现的区别主要在选择调度算法上。对于软实时系统，选择基于优先级调度的算法足以满足软实时系统的需求，而且可以提供高速的响应和大的系统吞吐量；而对硬实时系统来说，需要使用的算法就应该是调度方法简单，反应速度快的实时调度算法。

一个商业的 RTOS 必须具有以下两个评价指标：

- 中断响应时间，指从中断发生到相应的 ISR（中断服务程序）运行的时间间隔。中断响应时间与应用程序相匹配，而且是可预测的。如果同一时间有多个中断发生，则要增加中断响应时间的数量级。

- 临界情况执行时间（WCET，Worst Case Execution Time）表示每个系统调用的时间，它是可预测的，而且系统的每个任务都有独立的数据。

可以说，实时操作系统与分时操作系统有着明显的区别。具体地说，对于分时操作系统，软件的执行在时间上的要求并不严格，时间上的延误或者时序上的错误，一般不会造成灾难性的后果。而对于实时操作系统，主要任务是对事件进行实时的处理，虽然事件可能在无法预知的时刻到达，但是软件必须在事件随机发生时，在严格的时限内作出响应（系统的响应时间），即使是系统处在尖峰负荷下，也应如此。另外，实时操作系统的重要特点是具有系统的可确定性，即系统能对运行的最好和最坏情况作出精确的估计。

实时嵌入式系统是为执行特定功能而设计的，可以严格地按时序执行功能。其最大的特征就是程序的执行具有确定性。在实时系统中，如果系统在指定的时间内未能实现某个确定的任务从而导致系统的全面失败，则系统被称为硬实时系统。而在软实时系统中，虽然响应时间同样重要，但是超时却不会导致致命后果。一个硬实时系统往往在硬件上需要添加专门用于时间和优先级管理的控制芯片，而软实时系统则主要在软件方面通过编程实现时限的管理。比如 Windows CE2.0 就是一个多任务分时系统，而 DSP RTOS 则是典型的实时操作系统。

## 1.2 嵌入式系统的现状和发展趋势

### 1.2.1 嵌入式系统的现状

自 20 世纪 90 年代以来，科技领域的一个共同趋势是数字技术全面取代模拟技术。在通信领域，美国已开始由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）也已进入商品化试播阶段。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，都离不开嵌入式系统技术。因此，嵌入式技术得以全面展开，目前已成为通信和消费类产品的共同发展方向。

在个人领域中，嵌入式产品将成为主要的个人移动的数据处理和通信软件。在企业领域，企业专用解决方案，如物流管理、条码扫描、移动信息采集等小型手持嵌入式系统将发挥巨大的作用。在自动控制领域，不仅可以用于 ATM 机、自动售货机、工业控制等专用设备，与移动通信设备、GPS、娱乐相结合，嵌入式系统同样可以发挥巨大的作用。我国长虹推出的 ADSL 产品，就是把网络、控制、信息结合起来，这种智能化、网络化将是家电



发展的新趋势。

嵌入式设备之所以使亿万用户乐于接受，重要因素之一是它们与使用者之间的亲和力，自然的人机交互界面，如司机操纵高度自动化的汽车主要还是通过习惯的方向盘、脚踏板和操纵杆。人们与信息终端交互要求以 GUI 屏幕为中心的多媒体界面。手写文字输入、语音拨号上网、收发电子邮件以及彩色图形、图像已取得初步成效。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，但距离掌式语言同声翻译还有很大距离。

随着互联网技术的成熟、带宽的提高，ICP 和 ASP 在网上提供的信息内容日趋丰富、应用项目日趋多样。像电话手机、电话座机及电冰箱、微波炉等嵌入式电子设备的功能不再单一，电气结构也更为复杂。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；同时还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，缩短开发周期。

为适应嵌入式分布处理结构设备的上网应用需求，面向 21 世纪的嵌入式系统要求配备标准的一种或多种网络通信接口。针对外部连网要求，嵌入式设备必须配有通信接口和相应的 TCP/IP 协议族软件支持。由于家用电器相互关联（如防盗报警、灯光能源控制、影视设备和信息终端交换信息）及实验现场仪器的协调工作等要求，新一代嵌入式设备还需具备 IEEE1394、USB、CAN、Bluetooth 或 IrDA 通信接口，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。为了支持应用软件的特定编程模式，如 Web 或无线 Web 编程模式，还需要相应的浏览器，如 HTML、WML 等。

目前，国外商品化的嵌入式实时操作系统已进入我国市场的有 WindRiver、Microsoft、QNX 和 Nuclear 等产品。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，它不仅包括 DeltaCore 嵌入式实时操作系统，而且还包括 LamdaTools 交叉开发工具套件、测试工具、应用组件等；此外，中科院也推出了 Hopen 嵌入式操作系统。

今天，嵌入式系统带来的工业年产值已超过了 1 万亿美元。来自美国嵌入式系统大会（Embedded System Conference）的报告指出，未来 5 年仅基于嵌入式计算机系统的全数字电视产品，就将在美国产生一个每年 1500 亿美元的新市场。美国汽车大王福特公司的高级经理也曾宣称，“福特出售的‘计算能力’已超过了 IBM”。由此可以想像嵌入式计算机工业的规模和广度。

据调查，目前国际上已有 200 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，虽然嵌入式应用、开发很广，但该领域却几乎还是空白，只有两家公司和极少数人员在从事这方面的工作。

总之，随着信息化、智能化、网络化的发展，嵌入式系统技术将获得更广阔的发展空间。

### 1.2.2 未来嵌入式系统的发展趋势

如前所述，一代代的嵌入式系统技术人员已利用现行嵌入式软件和 PC 积累技术完成了一代又一代的嵌入式应用。我们也将看到，嵌入式技术将影响着未来若干新技术的发展，这些技术包括：软件编程接口 API 规范，无线网络操作系统、IP 构件库和嵌入式 JAVA 等。