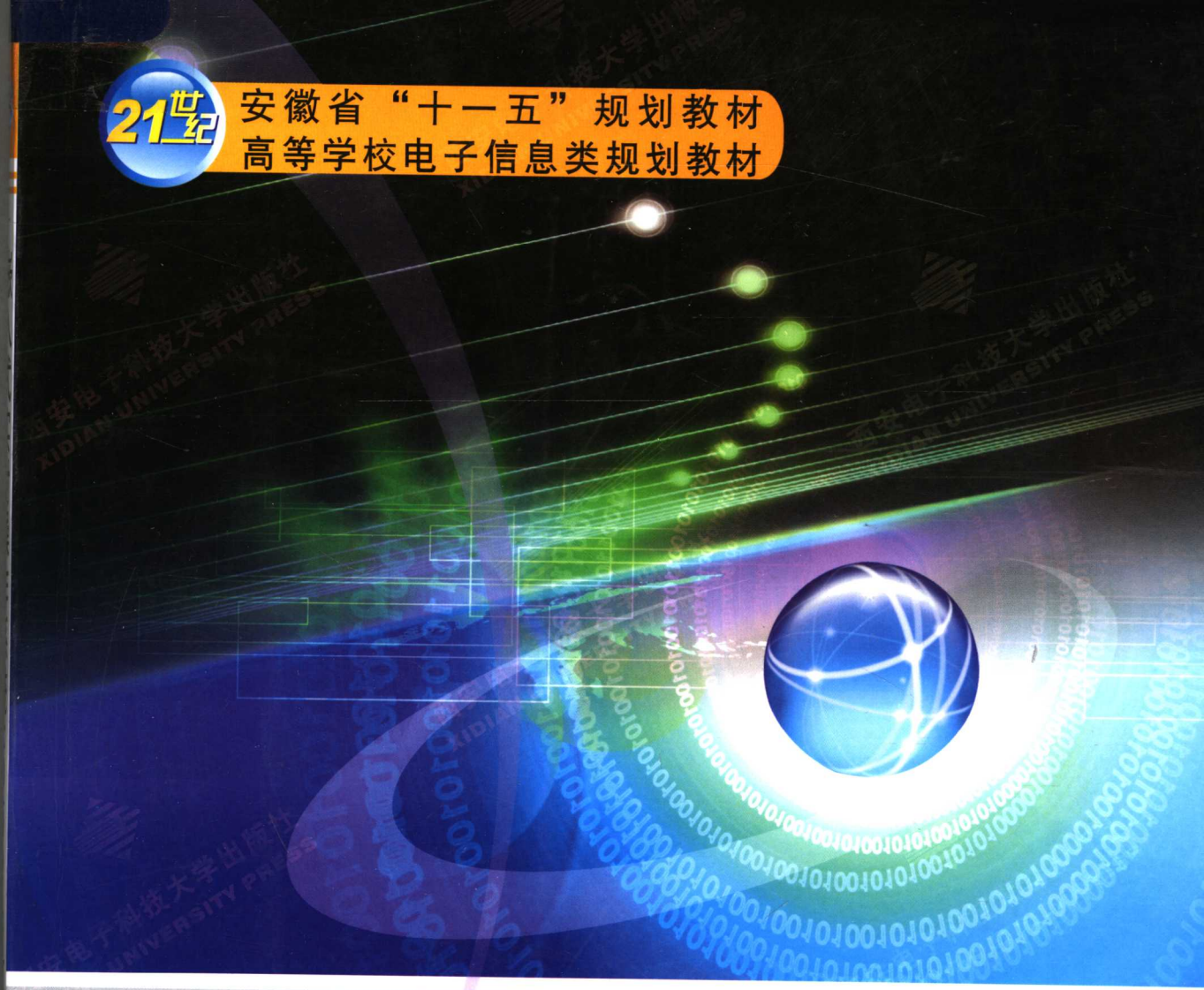


嵌入式实时操作系统μC/OS-Ⅱ教程

吴永忠　程文娟　郑淑丽　徐海卫　编著

西安电子科技大学出版社
http://www.xduph.com

安徽省“十一五”规划教材

21世纪高等学校电子信息类规划教材

嵌入式实时操作系统 μC/OS-II教程

吴永忠　程文娟　郑淑丽　徐海卫　编著

西安电子科技大学出版社

2007

内 容 简 介

本书第 1 章内容包括嵌入式系统概述、嵌入式系统的组成结构和基本设计方法以及嵌入式操作系统概述和 μC/OS-Ⅱ操作系统概述。第 2 章叙述了嵌入式操作系统中的部分基本概念。从第 3 章开始全面地叙述了 μC/OS-Ⅱ的任务管理、中断处理与时间管理、事件控制块、消息、信号量与互斥信号量、事件标志组、内存管理、移植与应用以及几个版本的区别。本书中的全部源代码、范例和应用实例都可在 PC 上运行。

本书内容精练、概念明确、注重应用，可作为高等院校嵌入式实时操作系统课程的教材，也可作为工程师培训教材或供从事嵌入式系统开发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式实时操作系统 μC/OS-Ⅱ教程/吴永忠等编著. —西安：西安电子科技大学出版社，2007.12

21 世纪高等学校电子信息类规划教材

ISBN 978-7-5606-2005-3

Ⅰ. 嵌… Ⅱ. 吴… Ⅲ. 实时操作系统—高等学校—教材 Ⅳ. TP316.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 021635 号

策　　划　张　媛

责任编辑　张　梁　张　媛

出版发行　西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电　　话　(029)88242885　88201467　　邮　编　710071

http: //www.xduph.comE-mail: xdupfxb001@163.com

经　　销　新华书店

印刷单位　陕西华沐印刷科技有限责任公司

版　　次　2007 年 12 月第 1 版　2007 年 12 月第 1 次印刷

开　　本　787 毫米×1092 毫米　1/16　印　张　18.25

字　　数　430 千字

印　　数　1～4000 册

定　　价　28.00 元

ISBN 978-7-5606-2005-3/TN • 0414

XDUP 2297001-1

前　言

嵌入式系统自通用计算机系统中分离出来，走上独立发展的道路以后，无疑已成为当今最热门和最有发展前途的IT应用领域之一。其应用范围小到小家电、小仪器、手机、PDA，大到汽车、飞机、坦克、导弹和航天器，几乎涉及到所有的电子设备。

嵌入式系统主要由两个要素组成：一是硬件，二是软件。其中软件主要由应用程序、各种协议栈、设备驱动和操作系统等部分组成。采用嵌入式操作系统的优点在于：可用并行程序设计方法取代前后台系统模式下的串行编程方法。有了嵌入式操作系统的支持，编程者就再也用不着为程序的结构以及各程序模块之间的通信和控制伤精劳神了，而且程序结构变得简单易读，线程之间的通信和控制变得十分容易，从而大大地提高了编程效率和系统的整体性能。过去许多嵌入式系统受资源的限制，不得不采用前后台系统模式，而如今随着超大规模集成电路成本的极大降低和广泛应用，程序规模也越来越大，嵌入式操作系统的应用随之风行，以至于工程技术领域对掌握嵌入式操作系统的人才有十分迫切的需求。大量的工程实践表明，编程者一旦掌握了嵌入式操作系统，就再也不愿意回到前后台模式下去编程了。

μC/OS-Ⅱ是著名的且源代码公开的嵌入式实时操作系统。它专门为嵌入式系统的应用而设计，主体代码采用ANSI C语言编写，十分易于应用和移植。目前，它已经被成功地移植到了四十多种CPU上，涵盖8位、16位、32位和64位等多种机型，其中还包括了部分DSP 芯片。相比其它嵌入式实时操作系统，μC/OS-Ⅱ的特点在于源代码小且完全公开，有详尽的解释，科研和教学可免费使用。正因为其小，才便于学习、研究、理解和掌握，也因为其小，更便于广大的低端用户和小系统使用。

本书以μC/OS-Ⅱ V2.52版为蓝本，结合作者多年的教学科研经验编写而成。

全书共有11章和1个附录，其中第1～4、6、10章由吴永忠编写，第5章和附录由郑淑丽编写，第7、8章由程文娟编写，第9、11章由徐海卫编写。

为了便于读者更深刻地理解嵌入式操作系统，本书在叙述μC/OS-Ⅱ之前，引入了嵌入式系统这一重要概念，并系统地讨论了嵌入式操作系统中的主要基本概念。文中绝大多数系统服务函数都有应用范例，十分适用于以应用为主的读者学习。本书同时对服务函数也给出了详尽的注释，可供更深层次的读者学习和研究。

由于编写时间仓促，加之自身水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

编　者

2007年8月

目　录

第 1 章　嵌入式系统导论

本章主要内容包括嵌入式系统概述、嵌入式系统的组成结构、嵌入式系统的基本设计方法、嵌入式操作系统概述以及 μC/OS-Ⅱ操作系统概述。

1.1　嵌入式系统概述

1.1.1　嵌入式系统的发展概况[1]

1. 嵌入式应用的起源

从历史的角度来看，计算机的发展主要经历了机械计算机(1614—1937)、继电器计算机(1937—1946)、电子管计算机(1946—1959)、晶体管计算机(1959—1964)、集成电路计算机(1964—1971)、大规模和超大集成电路计算机(1971—今)等六个阶段，具有明显的时代特征。每一次重大的技术革命都催生了一类新的计算技术；反之，计算技术的每一次重大飞跃都极大地促进了技术领域更加持久、深刻的变革。

早在 1614 年，苏格兰人 John Napier 就发表论文公布他发明了一种可以进行四则运算和方根运算的精巧装置。1848 年，英国数学家 George Boole 创立二进制代数学，为现代二进制计算技术的发展铺平了道路。1937 年，Bell 试验室的 George Stibitz 展示了用继电器表示二进制的装置，尽管它是个展品，但却是世界上的第一台二进制电子计算机。1946 年 2 月 15 日，名为 ENIAC 的计算机在美国诞生了，这是第一台现代意义上的数字计算机，它的诞生具有划时代的意义，表明了现代数字计算机时代的到来。在随后的近三十年里，计算机一直为少数精英所掌握，主要用于实验室里的数值求解。直到 1971 年 Intel 公司推出了第一颗商用集成电路微处理器 Intel 4004 以后，许多厂商纷纷推出 8 位、16 位微处理器。以微处理器为核心的微型计算机以其体积小、价格低、性能可靠等特点，迅速走出机房，广泛地应用于仪器仪表、家用电器、医疗设备等领域。这个时期也被人们称为 PC 时代。

随着计算机运算速度的飞速提高，微型机所表现出来的智能能力引起了控制领域工程人员的广泛关注。将微型机嵌入到应用系统中，实现应用系统的智能化控制的设想和实践应运而生。计算机厂家开始大量地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、存储器板以及各种 I/O 插件板，并将它们嵌入到自己的系统设备中，从而导致了嵌入式计算机系统的诞生。例如，将微机配置好专用软件、外部接口电路，并经机械、电气加固后，安装到飞机、大型舰船、大型电话交换机中，构成自动控制系统或状态监测系统等。

出于兼容性和灵活性的考虑，系列化、模块化的单板机也问世了，其典型代表是 Intel 公司的 iSBC 系列单板机、Zilog 公司的 MCB 单板机等。从此人们可以不必从选择芯片开始，而是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能形成新的系统，这就要求插件是互相兼容的，从而导致了工业控制微机系统总线的诞生。1976 年 Intel 公司推出了 Multibus，1983 年扩展为带宽达 40 Mb/s 的 Multibus II。1978 年，由 Prolog 设计出了简单 STD 总线并被广泛应用。

20 世纪 90 年代，在分布控制、柔性制造、数字化通信和信息家电等巨大需求的牵引下，嵌入式应用进一步加速发展。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、手持 PC 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 年在美国市场上不过四五个品牌，而 1998 年底，各式各样的掌上电脑如雨后春笋般纷纷涌现出来。随着人类进入网络时代，将嵌入式计算机系统应用到各类网络中已成为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，人们非常关注的网络电话设备，即 IP 电话，就是一个代表。

计算机被嵌入到应用系统中后，原来通用计算机的标准形态便不再复现了，人机交互模式、处理模式、功耗模式也各不相同。为了把实现嵌入式应用的计算机与通用计算机系统区别开来，就把这种以嵌入为手段、以控制为目的的专用计算机称做嵌入式计算机系统。因此，嵌入式系统起源于微型机时代，嵌入式系统的嵌入性是它的一个根本特点，其本质是将计算机嵌入到应用系统中去。

2. 计算机技术的分化

从产生的背景来看，嵌入式计算机系统与通用计算机系统有着完全不同的技术要求、技术发展方向和应用目标。通用计算机系统的技术要求是高速、海量的数值计算；技术发展方向是总线速度的无限提升，存储容量的无限扩大；应用目标是多样化，通过软件的配置完成多种计算。而嵌入式计算机系统的技术要求是可靠、可裁减，能满足应用对其体积、功耗等的严格要求；技术发展方向是追求与应用系统密切相关的嵌入性、专用性、智能性和可靠性的提升；应用目标是实现应用系统的智能化控制。

在早期，由于嵌入式应用范围比较狭窄，大多用于工业控制领域，人们还可以勉强将通用计算机通过改装、加固、定制专业软件等方法，嵌入到大型系统中去实现嵌入式应用。但随着经济、技术的高速发展，嵌入式应用越来越广泛，已经深入到我们生活中的方方面面，小到彩电、空调、洗衣机、手机，大到飞机、导弹、汽车等，嵌入式应用对计算机的功能、体积、功耗、价格、重量、可靠性等方面的要求也越来越苛刻，通过改造通用计算机的传统方法已远远不能胜任。因此，嵌入式计算机不得不脱离通用计算机系统，走上独立发展的道路。这就形成了现代计算机两大分支并行发展的时期。

3. 两大分支的发展方向

由于嵌入式计算机系统与通用计算机系统的专业分工和独立发展，导致了当今计算机技术的飞速发展。通用计算机领域致力于发展其专用的软、硬件技术，不必兼顾嵌入式应用的要求。CPU 已经从单核发展到双核、四核，微机的处理速度已经远远超过了当年的小

中型计算机，超级计算机 1 秒钟已经能运算几百万亿条指令。操作系统的发展使计算机在具备了高速处理海量数据能力的同时，应用也越来越方便。

嵌入式计算机系统则走上了另一条发展之路——单芯片化。如果说微机开创了嵌入式计算机系统的应用，那么单片机则开创了嵌入式计算机系统独立发展的道路。

在单片机的发展道路上，曾出现过两种探索模式，即 Σ 模式和创新模式。Σ 模式本质上是将通用计算机系统中的基本单元进行裁剪后，直接芯片化，构成单片微型计算机；创新模式则完全按嵌入式应用的要求，以全新的方式设计能满足嵌入式应用要求的体系结构、指令系统、总线方式、管理模式、外设接口等的单片微型计算机。1976 年 Intel 公司开发的 MCS-48 和随后开发的 MCS-51 就是按照创新模式发展起来的单片形态嵌入式系统。历史证明，创新模式是嵌入式系统独立发展的正确道路，MCS-51 的体系结构也因此成为单片嵌入式系统的典型体系结构。

1.1.2　嵌入式系统的定义

嵌入式计算机系统简称嵌入式系统，它的应用发源于微机，发展于单片机。那么，究竟什么是嵌入式系统呢？嵌入式系统的定义是怎样的呢？

依据 IEEE(国际电气和电子工程师协会)的定义：“Device used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants”，即嵌入式系统为控制、监视或辅助设备、机器甚至工厂运作的装置。它是一种计算机软件和硬件的综合体，特别强调“量身定制”的原则，也就是基于某种特殊的用途，设计者就会根据这些用途设计出一种截然不同的系统来。

Wayne Wolf 在其所著的嵌入式系统设计教科书上对嵌入式系统的定义是：“Loosely defined, it is any device that includes a programmable computer but is not itself a general-purpose computer”，即不严格地定义，嵌入式系统是包含可编程计算机的任意设备，而它本身并不是被作为通用计算机而设计的。书中他还说：“一台个人电脑不能称之为嵌入式计算系统，尽管它常常被用于搭建嵌入式系统。”

我国微机学会的定义是：嵌入式系统是以嵌入式应用为目的的计算机系统。并且还将其分为系统级、板级和片级。系统级包括各类工控设备、PC104 模块等；板级包括各类 CPU 主板和 OEM 产品；片级包括各种以单片机、DSP、微处理器为核心的设备。

目前在我国流行得比较广泛的定义是：嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，软硬件可裁减，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积和功耗等严格要求的专用计算机系统。

也有人认为以上观点不确切，致使嵌入式系统的定义没有脱离计算机系统范畴，认为嵌入式系统首先是非 PC，否则仍然是计算机系统，所以将嵌入式系统描述为下列公式：

ES=3C(Computer+Communication+ Consumerelectronics)+ Internet + WAP
+ GBS + UPS + Sensors + IP + Other→ESOC(嵌入式片上系统)

由上述公式表达的嵌入式系统定义可概括如下：嵌入式系统是现代科学多学科互相融合，以应用技术产品为核心，以计算机技术为基础，以通信技术为载体，以消费类产品为对象，引入各类传感器，进入 Internet 网络技术连接，适应应用环境的产品。嵌入式系统是无多余软件，并且以固化态出现，硬件亦无多余存储器，可靠性高、成本低、体积小、功

耗少的非计算机系统。因此它包含了十分广泛的、各种不同类型的设备。嵌入式系统又是知识密集，投资规模大，产品更新换代快，且具有不断创新才能不断发展的系统。系统中采用片上系统(SOC，亦称系统芯片)将是其发展趋势。

人们从不同的角度出发，得出了不同的嵌入式系统定义，但是如果从嵌入式系统的起源、发展、本质等方面出发来探讨嵌入式系统的定义的话，本书认为如下定义更准确、更具普遍性，即嵌入式系统是嵌入到对象体系中的专用计算机系统。嵌入性、专用性与计算机系统是嵌入式系统的三个基本要素，对象体系则是指所嵌入的应用系统。

按照定义，只要满足嵌入式系统三要素的，都可以称为嵌入式系统。因此，嵌入式系统根据其形态和规模的不同可分为：

(1) 系统级，包括工控机、嵌入到应用系统中的通用计算机等；

(2) 板级，包括各种 CPU 主板；

(3) 芯片级，如 CPU、MCU、SOC、DSP、MPU 等。

在理解嵌入式系统的定义的时候，要分清嵌入式系统与嵌入式应用系统的区别。嵌入式应用系统是指内部含有嵌入式系统的设备、装置或者系统，例如手机、数字彩电、空调、工控单元、PDA、汽车、导弹等。这种区别就好像我们常说的单片机系统与单片机应用系统的区别一样。尽管人们常常在不严格的场合将单片机系统和单片机应用系统混称，但是概念上的差别是很明显的。

1.1.3 嵌入式系统的特点

嵌入式系统的本质是专用的计算机系统，与通用计算机系统相比，不同的嵌入式系统的特点会有所差异，但基本特点是一样的，其主要表现如下：

(1) 系统内核小、实时高效。嵌入式系统大多应用于小型电子设备，系统资源有限。例如，一般 MCS-51 系列单片机只有几 KB 的内部 RAM、几十 KB 的 ROM，经扩展后也不过 64 KB，要在这样有限的资源上运行实时内核，就对内核的尺寸提出了严格的限制，大的通用操作系统肯定是无法运行起来的，一般只能运行嵌入式操作系统，如 μC/OS-Ⅱ的内核最小可裁剪到 2 KB。嵌入式系统往往应用于各种实时场合，例如导弹控制、机载设备、工业测控、安全气囊等，这就要求嵌入式系统具有与之相应的实时性和可靠性，否则后果严重。

(2) 专用性强。嵌入式系统与通用计算机系统的最大不同就是嵌入式系统大多是为特定用户群设计的，产品的个性化很强。它通常都具有低功耗、体积小、集成度高等特点，软件和硬件的结合非常紧密，即使在同一品牌、同一系列的产品中也需要根据应用的需求变化，对系统软件和硬件的配置作较大的更改。同时，程序的编译下载也要和系统相结合。

(3) 系统精简。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，不要求其功能设计及实现上过于复杂，力争在同样的硅片面积上实现更高的性能。这样一方面利于控制系统成本，同时也利于实现系统安全，使产品更具竞争力。

(4) 软件固化。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或单片机本身中，而不是存储于磁盘等载体中。软件固化是嵌入式软件的基本要求，同时要求软件代码具有高质量、高可靠性和高实时性。

(5) 开发工具和环境。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和电路进行修改，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通用计算机、专用的嵌入式开发系统以及各种逻辑分析仪、示波器、信号源等。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。

1.2　嵌入式系统的组成结构

嵌入式系统是一种特殊的专用计算机系统，早期嵌入式系统自底向上主要由硬件环境、嵌入式操作系统和应用程序等三层组成。硬件环境层是整个嵌入式操作系统和应用程序运行的基础，通常，不同的应用对应不同的硬件环境。为了便于操作系统在不同结构的硬件上移植，微软提出了将操作系统底层与硬件相关的部分单独抽象出来，设计成单独的硬件抽象层(Hardware Abstraction Layer，HAL)的思想。它通过硬件抽象层接口设计，向操作系统及应用程序提供对硬件进行抽象后的服务。硬件抽象层这个中间层的引入，屏蔽了底层硬件的多样性，操作系统不再直接面对具体的硬件环境，而是面向由这个中间层次所代表的、逻辑上的硬件环境，实现嵌入式操作系统的可移植性和跨平台性。目前，在嵌入式领域中，HAL 通常是以板级支持包(Board Support Package，BSP)的形式实现的。这样，原先嵌入式系统的三层结构逐步演化为如图 1.1 所示的四层结构。然而，目前 BSP 形式的硬件抽象层还不能解决大多数操作系统移植和跨平台问题。

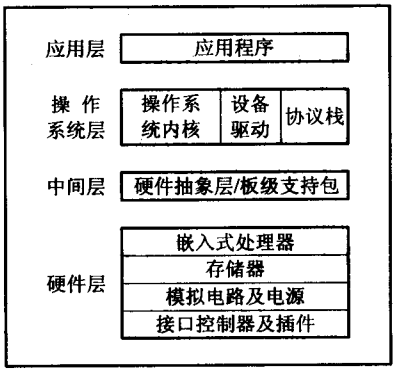


图 1.1　嵌入式系统组成结构图

1.2.1　硬件层

嵌入式系统的硬件层结构如图 1.2 所示，它主要包括嵌入式处理器、存储器、模拟电路及电源、接口控制器及插件等。

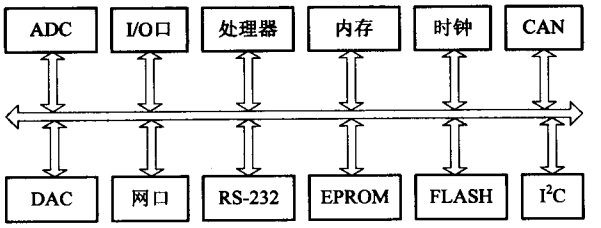


图 1.2　嵌入式系统硬件层结构图

1. 嵌入式处理器

嵌入式处理器是嵌入式系统的核心，其品种总量已经超过 1000 种，流行的体系结构有

30 多个系列，其中 8051 系列占多半。生产 8051 单片机的半导体厂家有 20 多个，共 350 多个衍生产品，仅 Philips 就有近 100 种。现在几乎每个半导体制造商都生产嵌入式处理器，越来越多的公司有自己的处理器设计部门。

嵌入式处理器的寻址空间一般从 64 KB 到 16 MB，处理速度从 0.1 MIPS 到 2000 MIPS，常用封装从 8 个引脚到 144 个引脚。嵌入式微处理器一般具备以下四个特点：

(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。

(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) 可扩展的处理器结构，可以满足快速开发最高性能的嵌入式系统的要求。

(4) 嵌入式微处理器的功耗很低，很多产品的功耗只在毫瓦甚至微瓦级。

嵌入式处理器的分类一般有两种。一是按功能特点分类，可分为嵌入式微控制器(MicroController Unit，MCU)、嵌入式微处理器(Embedded MicroProcessor Unit，EMPU)、嵌入式 DSP 处理器(Embedded Digital Signal Processor，EDSP)和嵌入式片上系统(System On Chip，SOC)；二是按数据总线的位数分类，可分为 4 位机、8 位机、16 位机、32 位机和 64 位机。

1) 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器又称单片机，顾名思义，就是将整个计算机系统集成到一块芯片中。嵌入式微控制器一般以某种微处理器内核为核心，芯片内部集成 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、WatchDog、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、Flash 等各种必要的功能和外设。为适应不同的应用需求，一般一个系列的单片机具有多种衍生产品，每种衍生产品的处理器内核都是一样的，不同的是存储器和外设的配置及封装。这样可以使单片机最大限度地和应用需求相匹配，从而减少功耗和成本。和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。微控制器的片上外设资源一般比较丰富，适合于控制。微控制器是目前嵌入式系统工业的主流。

嵌入式微控制器目前的品种和数量最多，比较有代表性的通用系列包括 8051、P51XA、MCS-251、MCS-96/196/296、C166/167、MC68HC05/11/12/16、68300 等。另外还有许多半通用系列，如支持 USB 接口的 MCU 8XC930/931、C540、C541，支持 I^2C、CAN-Bus、LCD 及众多的专用 MCU 和兼容系列。目前 MCU 占嵌入式系统约 70%的市场份额。

值得注意的是，近年来提供 X86 微处理器的著名厂商 AMD 公司将 Am186CC/CH/CU 等嵌入式处理器称之为 MicroController；Motorola 公司把以 Power PC 为基础的 PPC505 和 PPC555 也列入单片机行列；TI 公司亦将其 TMS320C2XXX 系列 DSP 作为 MCU 进行推广。

2) 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器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的体积和功耗。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一样，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。

和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、可靠性高等优点，而且在电路板上必须包括 ROM、RAM、总线接口、各种外设等器件，从而提高了系统的可靠性和技术保密性。嵌入式微处理器及其存储器、总线、外设等安装在一块电路板上，称为单板计算机，如 STD-BUS、PC104 等。近年来，德国、日本的一些公司又开发出了类似“火柴盒”式名片大小的嵌入式计算机系列 OEM 产品。

目前，嵌入式处理器主要有 Am186/88、386EX、SC-400、Power PC、Motorola 68000、MIPS、ARM 系列等。在 32 位嵌入式处理器市场主要有 Motorola、ARM、MIPS、TI、Hitachi 等公司。有些生产通用微处理器的公司，像 Intel、Sun 和 IBM 等，也生产嵌入式微处理器。

3) 嵌入式 DSP 处理器

EDSP 处理器对系统结构和指令进行了特殊设计，使其适合于执行 DSP 算法，编译效率较高，指令执行速度也较高。在数字滤波、FFT、频谱分析等领域，DSP 应用正由用通用单片机以普通指令实现 DSP 功能，过渡到采用嵌入式 DSP 处理器。嵌入式 DSP 处理器有两个发展来源：一是 DSP 处理器经过单片化、EMC 改造、增加片上外设成为嵌入式 DSP 处理器，TI 的 TMS320C2000/C5000 等属于此范畴；二是在通用单片机或 SOC 中增加 DSP 处理器，例如 Intel 的 MCS-296 和 Infineon(Siemens)的 TriCore。

嵌入式 DSP 处理器比较有代表性的产品是 TI 的 TMS320 系列和 Motorola 的 DSP56000 系列。TMS320 系列处理器包括用于控制的 C2000 系列，用于移动通信的 C5000 系列，以及性能更高的 C6000 和 C8000 系列。DSP56000 系列目前已经发展成为 DSP56000、DSP56100、DSP56200 和 DSP56300 等几个不同系列的处理器。另外 Philips 公司也推出了一些新型的嵌入式 DSP 处理器。

4) 嵌入式片上系统

随着 EDA 的推广、VLSI 设计的普及和半导体工艺的迅速发展，在一个硅片上实现一个更为复杂系统的时代已来临，这就是嵌入式片上系统。各种通用处理器内核将作为 SOC 设计的标准库，和许多其它嵌入式系统外设一样，成为 VLSI 设计中一种标准的器件，用标准的 VHDL 等语言描述，存储在器件库中。用户只需定义出其整个应用系统，仿真通过后就可以将设计图交给半导体工厂制作样品。这样除个别无法集成的器件以外，整个嵌入式系统大部分都可集成到一块或几块芯片中去，应用系统电路板将变得很简洁，对于减小体积和功耗、提高可靠性非常有利。

SOC 可以分为通用和专用两类。通用系列包括 Infineon 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。专用 SOC 一般专用于某个或某类系统中，不为一般用户所知。一个有代表性的产品是 Philips 的 Smart XA，它将 XA 单片机内核和支持超过 2048 位复杂 RSA 算法的 CCU 单元制作在一块硅片上，形成一个可加载 Java 或 C 语言的专用的 SOC，可用于公众互联网如 Internet 安全方面。

2. 存储器

存储器是嵌入式系统中的重要组成部件，用于存放程序和数据。嵌入式应用系统是否“聪明”不仅取决于 CPU 的性能，而且在很大程度上还取决于嵌入式系统的存储容量。一般而言，存储容量越大，嵌入式系统的性能就越好，反之亦然。

目前的存储器主要有半导体材料、磁性材料和光介质材料三种。存储器中最小的存储

单位就是一个双稳态半导体电路或一个CMOS晶体管(也可为磁性材料或光介质)的存储元，它可存储一位二进制代码。由若干个存储元组成一个存储单元，然后再由许多存储单元组成一个存储器。

嵌入式系统中以半导体存储器为多。半导体存储器种类很多，从存、取功能上可以分为只读存储器(Read-Only Memory，ROM)、随机存储器(Random Access Memory，RAM)、可编程存储器(Programmable Read-Only Memory，PROM)、可擦除的可编程ROM(Erasable Programmable Read-Only Memory，EPROM)、闪存(Flash Memory)、铁电存储器(FRAM)等几种不同类型。

3. 常用的接口总线

嵌入式系统中常用的总线主要可分为两大类，即并行总线和串行总线。常用的并行总线如下：

① CPU 并行总线；
② 工业标准结构(Industry Standard Architecture，ISA)总线；
③ 外部设备互连(Peripheral Component Interconnect，PCI)总线。

常用的串行总线较多，主要有如下几种：

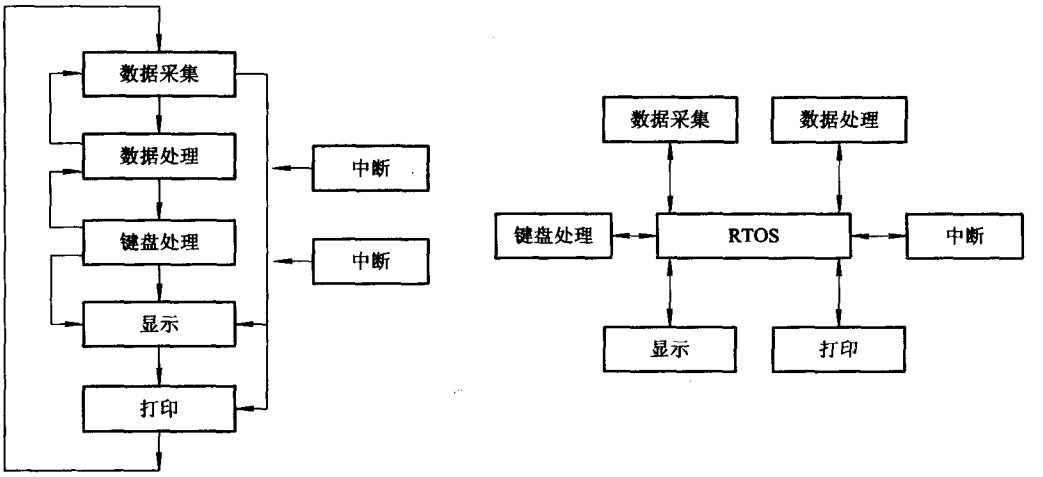
① 通用异步接收与传输(Uiversal Asynchronous Receiver/Transmitter，UART)总线；
② 串行通信接口(Serial Communication Interface，SCI)总线；
③ 串行外设接口(Serial Peripheral Interface，SPI)总线；
④ 内部集成电路(Inter-IC，I^2C)总线；
⑤ IEEE 1394 总线、USB 总线；
⑥ RS-232 总线、RS-485 总线；
⑦ 控制器区域网(Controller Area Network，CAN)总线；
⑧ 单总线(1-Wire)和局域互连网络(Local Interconnect Network，LIN)总线。

这些总线在速度、物理接口要求和通信方法上都有所不同。串行总线与并行总线相比，最大的优点在于总线线数少，这有利于减小系统的复杂性。

1.2.2 软件结构

嵌入式系统的软件结构可以分为两种：一是无操作系统支持的程序结构；二是基于RTOS 的程序结构。以一个数据采集系统为例，假设要求完成数据采集、数据处理、键盘输入、LCD 显示、打印等功能的软件工作。

无操作系统支持的系统一般称之为“前后台”系统，这种系统的程序结构一般可以抽象为如图 1.3(a)所示结构。前台程序通常是中断服务子程序，而后台通常是一个无限循环程序，程序中各功能模块之间的交叉、耦合比较紧密，分解起来比较困难，程序结构很复杂。这种模式的程序设计常常是串行的，开发周期很长，不利于软件的工程化设计，但有需求系统资源少、适合小程序设计等优点。基于 RTOS 支持的系统，其程序结构通常如图 1.3(b)所示，程序中的各功能模块可以很容易地分解为各自独立的任务，任务与任务之间的通信与控制可以通过操作系统来实现，程序结构十分简单。程序设计可以采用并行开发模式，非常适合于大规模、工程化的程序设计。缺点是操作系统需要占用一部分资源。



(a) 无操作系统支持的程序结构　　(b) 基于RTOS的程序结构

图 1.3　嵌入式系统的两种程序结构

1.2.3　硬件抽象层

硬件抽象层隐藏特定平台的硬件接口细节，为操作系统提供虚拟硬件平台，使其具有硬件无关性，可在多种平台上进行移植。

在嵌入式系统中，硬件抽象层多以 BSP(Board Support Package，板级支持包)的形式实现，它完成系统上电后最初的硬件和软件初始化，并对底层硬件进行封装，使得操作系统不再面对具体的操作。BSP 包括了系统中大部分与硬件联系紧密的软件模块，如相关底层硬件的初始化与配置、数据的输入/输出操作等功能。

关于 BSP 还存在几种不同的理解：

(1) BSP 是操作系统的驱动程序。最著名例子就是风河系统公司，它倾向于这种理解。

(2) 一些嵌入式系统的供应商提供的驱动程序也常称为 BSP。

(3) BSP 是板级开发工具，因为在某些 BSP 中往往还包括了程序编辑器、编译连接器、嵌入式操作系统、底层支持库等。

一般嵌入式操作系统的开发者常常将 BSP 理解为 HAL，本书采用这样的理解。

在绝大多数的嵌入式系统中，BSP 是一个不可或缺的组成部分，操作系统启动以前的初始化工作主要由 BSP 完成。尽管目前没有统一的定义，但其主要功能一般可以归纳为初始化和设备驱动，包括如下内容。

(1) 片级初始化。片级初始化主要对 CPU 进行初始化，包括设置 CPU 的存储器地址范围、堆栈指针、程序指针、数据寄存器、控制寄存器、端口输入/输出模式、时钟频率设置、设置中断等。片级初始化的过程就是把 CPU 从上电时的默认状态逐步设置成系统所要求的工作状态。这个过程只包含对硬件的初始化。

(2) 板级初始化。板级初始化主要对 CPU 外部其它硬件设备进行初始化，为随后的操作系统初始化和应用程序的运行建立条件，如配置程序的数据结构和参数等。这个过程包含对硬件和软件的初始化。