

# 嵌入式系统设计 与开发

黄友锐 凌六一 陈珍萍 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 嵌入式系统设计与开发

黄友锐 凌六一 陈珍萍 编著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

嵌入式系统设计与开发/黄友锐,凌六一,陈珍萍编著.  
—北京:国防工业出版社,2009.2  
ISBN 978-7-118-06042-3

I.嵌... II.①黄...②凌...③陈... III.①微型计算机-系统设计②微型计算机-系统开发 IV.TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 177773 号

※

**国防工业出版社** 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 11½ 字数 259 千字

2009 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 24.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

嵌入式系统是指以应用为核心、以计算机技术为基础、软硬件可裁剪,以及适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积和功耗严格要求的专用计算机系统。作为嵌入式系统的核心,嵌入式微处理器曾经采用 8 位或 16 位的微处理器,但这些微处理器在性能上与 32 位的微处理器相差甚远,而且价格成本与 32 位系统相比也没有太大优势,而且很难满足相对较复杂的嵌入式应用场合。因此,在可预见的未来,32 位系统必然在嵌入式微处理器中占据重要位置。

ARM 嵌入式处理器是一种高性能、低功耗的 RISC 芯片。ARM 公司自正式成立以来,一直以 IP 核提供者的身份向各大半导体制造商出售知识产权,而自己从不介入芯片的生产销售,加上其设计的芯片内核具有功耗低、成本低等显著优点,因此获得众多的半导体厂家和整机厂家的大力支持,在 32 位嵌入式应用领域获得了巨大的成功。从 2002 年 ARM 公司在中国正式设立办事机构到现在短短几年内,ARM 风暴席卷全国,从高校到企业,从学生到技术工程师,都在讨论 ARM、学习 ARM、使用 ARM。ARM 作为目前世界上市场占有率最大的 32 位 RISC 架构的嵌入式微处理器,已广泛应用于各种移动电话、通信设备、消费电子和工业控制产品中,ARM 也似乎成为嵌入式系统的代名词。与之相对应, $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  作为一种源代码公开的实时操作系统,其代码简练、注释清晰、易于学习的特点也已经被人们所认可,并成为国内广大嵌入式技术学习者和技术工程师学习嵌入式系统的入门教程。目前国内很多高校都将 ARM 和  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  作为嵌入式系统课程的主要内容来介绍。

本书以嵌入式系统在光纤着色机拉力控制中的应用为背景,系统地介绍了基于 ARM 和  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的嵌入式系统开发流程。本书共分 6 章:第 1 章主要介绍嵌入式系统的概念、分类、应用和发展趋势;第 2 章从应用角度介绍了 ARM 的体系结构和指令系统,以及 C 语言和汇编语言之间的嵌套调用;第 3 章主要介绍了 Philips 公司 LPC2000 系列 ARM7 的 32 位微控制器的硬件结构和功能部件;第 4 章详细介绍了如何将嵌入式实时操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  移植到 ARM7 上;第 5 章介绍了 ARM 开发工具的安装、设置和使用;第 6 章详细介绍了嵌入式系统硬件平台的设计和应用程序的设计。本书第 1 章和第 5 章的内容由黄友锐编写;第 2 章和第 6 章的内容由凌六一编写;第 3 章和第 4 章的内容由陈珍萍编写。

由于作者知识有限,书中不足之处在所难免,恳请各位专家和读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 嵌入式系统概述</b> .....	1
<b>1.1 嵌入式系统定义</b> .....	1
<b>1.2 嵌入式系统的分类</b> .....	2
1.2.1 嵌入式系统的硬件 .....	2
1.2.2 嵌入式操作系统 .....	4
<b>1.3 嵌入式系统的应用</b> .....	9
<b>1.4 嵌入式系统的发展趋势</b> .....	10
习题 .....	10
<b>第 2 章 ARM 体系结构及指令系统</b> .....	11
<b>2.1 ARM 处理器核结构</b> .....	11
<b>2.2 编程模式</b> .....	11
2.2.1 数据类型、处理器模式和处理器工作状态 .....	11
2.2.2 寄存器组 .....	13
2.2.3 异常 .....	16
2.2.4 存储器格式 .....	19
2.2.5 寻址方式 .....	20
<b>2.3 ARM 指令集</b> .....	23
2.3.1 数据处理指令 .....	23
2.3.2 程序状态寄存器访问指令 .....	26
2.3.3 装载/存储指令 .....	26
2.3.4 跳转指令 .....	30
2.3.5 异常中断指令 .....	31
2.3.6 协处理器指令 .....	32
<b>2.4 C 语言与汇编混合编程</b> .....	34
2.4.1 内嵌汇编 .....	34
2.4.2 汇编程序访问 C 变量 .....	35
2.4.3 C 与汇编程序相互调用 .....	36
习题 .....	39

<b>第 3 章</b>	<b>LPC2214 的硬件结构</b>	40
<b>3.1</b>	<b>芯片特性和引脚配置</b>	40
3.1.1	基本特性	40
3.1.2	结构框图	41
3.1.3	引脚封装及功能介绍	41
<b>3.2</b>	<b>存储器寻址</b>	50
3.2.1	存储器映射	50
3.2.2	存储器重映射	51
3.2.3	存储器映射控制	53
3.2.4	编程相关	54
<b>3.3</b>	<b>系统控制模块</b>	55
3.3.1	复位	55
3.3.2	系统时钟	57
3.3.3	其他功能	62
3.3.4	编程相关	62
<b>3.4</b>	<b>引脚连接模块</b>	62
3.4.1	引脚描述	63
3.4.2	寄存器相关	63
3.4.3	编程相关	66
<b>3.5</b>	<b>外部存储器控制器</b>	66
3.5.1	引脚描述	66
3.5.2	寻址范围	67
3.5.3	寄存器相关	67
3.5.4	典型总线时序	69
3.5.5	设计举例	69
3.5.6	编程相关	71
<b>3.6</b>	<b>通用 I/O 模块</b>	72
3.6.1	引脚描述	72
3.6.2	寄存器相关	72
3.6.3	编程相关	74
<b>3.7</b>	<b>向量中断控制器</b>	74
3.7.1	中断源	75
3.7.2	寄存器相关	77
3.7.3	编程相关	82
<b>3.8</b>	<b>定时器模块</b>	83
3.8.1	引脚描述	84

3.8.2	寄存器相关 .....	84
3.8.3	编程相关 .....	88
<b>3.9</b>	<b>A/D 转换模块 .....</b>	<b>91</b>
3.9.1	引脚描述 .....	91
3.9.2	寄存器相关 .....	91
3.9.3	编程相关 .....	93
<b>3.10</b>	<b>看门狗定时器 .....</b>	<b>93</b>
3.10.1	结构框图 .....	93
3.10.2	寄存器描述 .....	94
3.10.3	编程相关 .....	96
	习题 .....	96
<b>第 4 章</b>	<b>嵌入式操作系统 <math>\mu\text{C}/\text{OS- II}</math> .....</b>	<b>98</b>
<b>4.1</b>	<b>嵌入式操作系统基本概念 .....</b>	<b>98</b>
<b>4.2</b>	<b><math>\mu\text{C}/\text{OS- II}</math> 简介 .....</b>	<b>100</b>
4.2.1	$\mu\text{C}/\text{OS- II}$ 的特点 .....	101
4.2.2	$\mu\text{C}/\text{OS- II}$ 的内核结构 .....	101
<b>4.3</b>	<b><math>\mu\text{C}/\text{OS- II}</math> 的移植 .....</b>	<b>108</b>
4.3.1	OS_CPU.H .....	109
4.3.2	OS_CPU_C.C .....	110
4.3.3	OS_CPU_A.ASM .....	112
<b>4.4</b>	<b>操作系统的测试 .....</b>	<b>117</b>
4.4.1	启动代码的编写 .....	117
4.4.2	应用程序的实现 .....	119
	习题 .....	120
<b>第 5 章</b>	<b>ARM 开发工具 .....</b>	<b>121</b>
<b>5.1</b>	<b>ARM 开发工具综述 .....</b>	<b>121</b>
<b>5.2</b>	<b>ADS1.2 使用指南 .....</b>	<b>123</b>
5.2.1	ADS1.2 开发工具的组成 .....	123
5.2.2	ADS1.2 的软件安装 .....	124
5.2.3	CodeWarrior IDE 介绍 .....	126
5.2.4	AXD Debugger 介绍 .....	140
	习题 .....	142
<b>第 6 章</b>	<b>嵌入式系统开发实例 .....</b>	<b>143</b>
<b>6.1</b>	<b>硬件平台的设计与实现 .....</b>	<b>143</b>

6.1.1	LPC2214 最小系统	143
6.1.2	存储器扩展	147
6.1.3	键盘与显示接口	151
6.1.4	D/A 转换接口	162
<b>6.2</b>	<b>应用程序的设计与实现</b>	<b>165</b>
6.2.1	系统工作流程	165
6.2.2	主程序流程	166
6.2.3	任务划分与实现	166
	习题	173
	<b>参考文献</b>	<b>174</b>



# 第 1 章 嵌入式系统概述

嵌入式系统一般指非 PC 系统，它包括硬件和软件两部分。硬件包括微控制器/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(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行状态和行为；而操作系统控制着应用程序编程与硬件的交互作用。

嵌入式系统(Embedded System)在于结合微处理器或微控制器的系统电路与其专属的软件，来达到系统操作效率成本的最高比。今天的移动电话、电子游戏机、PDA、电视、冰箱等民用电子与通信产品，电动自行车乃至电动汽车等电动交通工具的控制核心，无不与嵌入式系统息息相关。而随着后 PC 时代的来临，家电、玩具、汽车、新一代手机、数码相机、先进的医疗仪器乃至即将到来的智能型房屋、智能型办公室与其他跟电有关的器材设备更是确实少不了嵌入式系统这个核心技术。

## 1.1 嵌入式系统定义

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 of plants*)。这主要是从应用上加以定义的，由此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。

嵌入式系统一般指非 PC 系统，有计算机功能但又不称之为计算机的设备或器材。它是以应用为中心，软、硬件可裁减的，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。简单地说，嵌入式系统集系统的应用软件与硬件于一体，类似于 PC 中 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。嵌入式系统主要由嵌入式处理器、相关支撑硬件、嵌入式操作系统及应用软件系统等组成，它是可独立工作的“器件”。

目前国内一个普遍被认同的嵌入式系统定义是：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。可以从以下几个方面来理解国内对嵌入式系统的定义：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。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、半导体技术和电子技术以及各个行业的具体应用相结合后的产物。③嵌入式系统必须能够根据应用需求对软、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。由于微内核的存在，使得这种扩展能够非常顺利地进行。

由于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控制系统都可以叫嵌入式系统，很难给它下一个准确的定义。因此，目前通常把嵌入式系统概念的重心放在“系统”(即操作系统)上，指能够运行操作系统的软、硬件综合体。总体上嵌入式系统可以划分成硬件和软件两部分，硬件一般由高性能的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成4个部分：处理器、存储器、输入/输出和软件(由于多数嵌入式设备的应用系统和操作系统都是紧密结合的,在这里对其不加区分,这也是嵌入式系统和 Windows 系统的最大区别)。

## 1.2 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硬件和软件进行划分。

### 1.2.1 嵌入式系统的硬件

#### 1. 嵌入式微处理器(Embedded Microprocessor Unit, EMPU)

嵌入式微处理器采用“增强型”通用微处理器。由于嵌入式系统通常应用于比较恶劣的环境中，因而嵌入式微处理器在工作温度、电磁兼容性以及可靠性方面的要求较通用的标准微处理器高。嵌入式微处理器在其他功能方面与标准的微处理器基本上是一样的。根据实际嵌入式应用要求，将嵌入式微处理器装配在专门设计的主板上，只保留和嵌入式应用有关的主板功能，这样可以大幅度减小系统的体积和功耗。和工业控制计算机相比，嵌入式微处理器组成的系统具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高的优点，但在其电路板上必须包括 ROM、RAM、总线接口、各种外设等器件，从而降低了系统的可靠性，技术保密性也较差。由嵌入式微处理器及其存储器、总线、外设等安装在一块电路主板上构成一个通常所说的单板机系统。嵌入式微处理器目前主要有 386EX、SC-400、Power PC、68000、MIPS 等。

#### 2. 嵌入式微控制器(Microcontroller Unit, MCU)

嵌入式微控制器又称单片机，它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，根据某些典型的应用，在芯片内部集成了 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 RAM、E<sup>2</sup>PROM 等各种必要功能部件和外设。为适应不同的应用需求，对功能的设置和外设的配置进行必要的修改和裁减定制，使得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相同，不同的是存储器和外设的配置及功能的设置。这样可以使单片机最大限度地和应用需求相匹配，从而减少整个系统的功耗和成本。和嵌入式微处理器相比，微控制器的单片化使应用系统的体积大大减小，从而使功耗和成本大幅度下降、可靠性提高。由于嵌入式微控制器目前在产品的品

种和数量上是所有嵌入式处理器中最多的，而且上述诸多优点决定了微控制器是嵌入式系统应用的主流。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。目前有许多款嵌入式微控制器，如 Intel 公司的 StrongARM、Xscale，ATMEL 的 AT91 系列，三星的 S3C4x 系列等，其中基于英国 ARM 公司的 ARM 内核的嵌入式微处理器是目前的主流。ARM 是典型的 32 位 RISC 芯片——不论是在 PDA、STB、DVD 等消费类电子产品中，还是在机电、GPS、航空、勘探、测量等军方产品中都得到了广泛的应用。越来越多的芯片厂商早已看好 ARM 的前景，如 Intel、NS、Ateml、Samsung、Philips、NEC、CirrusLogic 等全球著名公司都有相应的基于 ARM 处理器的产品。ARM 处理器的主要特点是：小体积、低功耗、低成本、高性能、16/32 位双指令集、全球众多的合作伙伴。事实上 ARM 已成为嵌入式解决方案的 RISC 标准，成为业界的龙头，支持 I<sup>2</sup>C、CAN 总线、LCD 等，目前约占嵌入式系统市场份额的 70%。

### 3. 嵌入式 DSP 处理器(Embedded Digital Signal Processor, EDSP)

在数字信号处理应用中，各种数字信号处理算法相当复杂，一般结构的处理器无法实时地完成这些运算。由于 DSP 处理器对系统结构和指令进行了特殊设计，使其适合于实时地进行数字信号处理。在数字滤波、FFT、谱分析等方面，DSP 算法正大量进入嵌入式领域，DSP 应用正从在通用单片机中以普通指令实现 DSP 功能，过渡到采用嵌入式 DSP 处理器。嵌入式 DSP 处理器有两类：①DSP 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；②在通用单片机或 SoC 中增加 DSP 协处理器，例如 Intel 的 MCS-296 和 Infineon(Siemens)的 TriCore。另外，在有关智能方面的应用中，也需要嵌入式 DSP 处理器，例如各种带有智能逻辑的消费类产品，生物信息识别终端，带有加解密算法的键盘，ADSL 接入、实时语音解压系统，虚拟现实显示等。这类智能化算法一般都是运算量较大，特别是向量运算、指针线性寻址等较多，而这些正是 DSP 处理器的优势所在。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、移动通信的 C5000 系列，以及性能更高的 C6000 和 C8000 系列。DSP56000 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 公司最近也推出了基于可重置嵌入式 DSP 结构，采用低成本、低功耗技术制造的 R. E. A. L DSP 处理器，其特点是具备双 Harvard 结构和双乘/累加单元，应用目标是大批量消费类产品。

### 4. 嵌入式片上系统(System on Chip, SoC)

随着 EDA 的推广和 VLSI 设计的普及化，以及半导体工艺的迅速发展，可以在一块硅片上实现一个更为复杂的系统，这就产生了 SoC 技术。各种通用处理器内核将作为 SoC 设计公司的标准库，和其他许多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、Verlog 等硬件语言描述，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。这样除某些无法集成的器件以外，整个嵌入式系统大部分均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单，对于减小整个应用系统体积和功耗、提高可靠性非常有利。SoC 可分为通用和专用两类：通用 SoC 如 Infineon(Siemens)的 TriCore、Motorola 的 M-Core，以及某些 ARM 系列器件，如 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，如 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 SoC，可用于互联网安全方面。

## 1.2.2 嵌入式操作系统

嵌入式操作系统是一种支持嵌入式系统应用的操作系统软件，它是嵌入式系统(包括硬、软件系统)极为重要的组成部分，通常包括与硬件相关的底层驱动软件、系统内核、设备驱动接口、通信协议、图形界面、标准化浏览器等。嵌入式操作系统具有通用操作系统的基本特点，如能够有效管理越来越复杂的系统资源；能够把硬件虚拟化，使得开发人员从繁忙的驱动程序移植和维护中解脱出来；能够提供库函数、驱动程序、工具集以及应用程序。与通用操作系统相比较，嵌入式操作系统在系统实时高效性、硬件的相关依赖性、软件固态化以及应用的专用性等方面具有较为突出的特点。

### 1. 嵌入式操作系统的种类

一般情况下，嵌入式操作系统可以分为两类：一类是面向控制、通信等领域的实时操作系统，如 WindRiver 公司的 VxWorks、ISI 的 pSOS、QNX 系统软件公司的 QNX、ATI 的 Nucleus 等；另一类是面向消费电子产品的非实时操作系统，这类产品包括个人数字助理(PDA)、移动电话、机顶盒、电子书、WebPhone 等。

#### 1) 非实时操作系统

早期的嵌入式系统中没有操作系统的概念，程序员编写嵌入式程序通常直接面对裸机及裸设备。在这种情况下，通常把嵌入式程序分成两部分，即前台程序和后台程序。前台程序通过中段来处理事件，其结构一般为无限循环；后台程序则掌管整个嵌入式系统软、硬件资源的分配、管理以及任务的调度，是一个系统管理调度程序。这就是通常所说的前后台系统。一般情况下，后台程序也叫任务级程序，前台程序也叫事件处理级程序。在程序运行时，后台程序检查每个任务是否具备运行条件，通过一定的调度算法来完成相应的操作。对于实时性要求特别严格的操作通常由中断来完成，仅在中断服务程序中标记事件的发生，不再做任何工作就退出中断，经过后台程序的调度，转由前台程序完成事件的处理，这样就不会造成在中断服务程序中处理费时的事件而影响后续和其他中断。

实际上，前后台系统的实时性比预计的要差。这是因为前后台系统认为所有的任务具有相同的优先级别，即是平等的，而且任务的执行又是通过 FIFO 队列排队，因而对那些实时性要求高的任务不可能立刻得到处理。另外，由于前台程序是一个无限循环的结构，一旦在这个循环体中正在处理的任务崩溃，使得整个任务队列中的其他任务得不到机会被处理，从而造成整个系统的崩溃。由于这类系统结构简单，几乎不需要 RAM/ROM 的额外开销，因而在简单的嵌入式应用被广泛使用。

#### 2) 实时操作系统

实时操作系统是指能在确定的时间内执行其功能并对外部的异步事件做出响应的计算机系统。其操作的正确性不仅依赖于逻辑设计的正确程度，而且与这些操作进行的时间有关。“在确定的时间内”是该定义的核心。也就是说，实时操作系统是对响应时间有严格要求的。

实时操作系统对逻辑和时序的要求非常严格，如果逻辑和时序出现偏差将会引起严重后果。实时操作系统有两种类型：软实时操作系统和硬实时操作系统。软实时操作系统仅要求事件响应是实时的，并不要求限定某一任务必须在多长时间内完成；而在硬实时操作系统中，不仅要求任务响应要实时，而且要求在规定的时间内完成事件的处理。通常，大多数实时操作系统是两者的结合。实时应用软件的设计一般比非实时应用软件的设计困难。实时操作系统的技术关键是如何保证系统的实时性。

实时多任务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。其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，重要特点是要满足对时间的限制和要求。实时操作系统具有如下功能：任务管理(多任务和基于优先级的任务调度)、任务间同步和通信(信号量和邮箱等)、存储器优化管理(含 ROM 的管理)、实时时钟服务、中断管理服务。实时操作系统具有如下特点：规模小，中断被屏蔽的时间很短，中断处理时间短，任务切换很快。

实时操作系统可分为可抢占型和不可抢占型两类。对于基于优先级的系统而言，可抢占型实时操作系统是指内核可以抢占正在运行任务的 CPU 使用权并将使用权交给进入就绪态的优先级更高的任务，是内核抢了 CPU 让别的任务运行。不可抢占型实时操作系统使用某种算法并决定让某个任务运行后，就把 CPU 的控制权完全交给了该任务，直到它主动将 CPU 控制权还回来。中断由中断服务程序来处理，可以激活一个休眠态的任务，使之进入就绪态；而这个进入就绪态的任务还不能运行，一直要等到当前运行的任务主动交出 CPU 的控制权。使用这种实时操作系统的实时性比不使用实时操作系统的系统性能好，其实时性取决于最长任务的执行时间。不可抢占型实时操作系统的缺点也恰恰是这一点，如果最长任务的执行时间不能确定，系统的实时性就不能确定。

可抢占型实时操作系统的实时性好，优先级高的任务只要具备了运行的条件，或者说进入了就绪态，就可以立即运行。也就是说，除了优先级最高的任务，其他任务在运行过程中都可能随时被比它优先级高的任务中断，让后者运行。通过这种方式的调度保证了系统的实时性，但是，如果任务之间抢占 CPU 控制权处理不好，会产生系统崩溃、死机等严重后果。

## 2. 嵌入式操作系统的发展

嵌入式操作系统伴随着嵌入式系统的发展经历了 4 个比较明显的阶段。

第一阶段是无操作系统的嵌入算法阶段，一般没有操作系统的支持，通过汇编语言编程对系统进行直接控制，运行结束后清除内存。这一阶段系统的主要特点是：系统结构和功能都相对单一，处理效率较低，存储容量较小，几乎没有用户接口。由于这种嵌入式系统使用简便、价格很低，以前在国内工业领域应用较为普遍，但是已经远远不能适应高效的、需要大容量存储介质的现代化工业控制和新兴的信息家电等领域的需求。

第二阶段是以嵌入式 CPU 为基础、以简单操作系统为核心的嵌入式系统。这一阶段系统的主要特点是：CPU 种类繁多，通用性比较差；系统开销小，效率高；一般配备系统仿真器，操作系统具有一定的兼容性和扩展性；应用软件较专业，用户界面不够友好；系统主要用来控制系统负载以及监控应用程序运行。

第三阶段是通用的嵌入式实时操作系统阶段，是以嵌入式操作系统为核心的嵌入式系统。这一阶段系统的主要特点是：嵌入式操作系统能运行于各种不同类型的微处理器

上,兼容性好;操作系统内核精小、效率高,并且具有高度的模块化和扩展性;具备文件和目录管理、设备支持、多任务、网络支持、图形窗口以及用户界面等功能;具有大量的应用程序接口(API),开发应用程序简单;嵌入式应用软件丰富。

第四阶段是以基于 Internet 为标志的嵌入式系统,这是一个正在迅速发展的阶段。目前大多数嵌入式系统还孤立于 Internet 之外,但随着 Internet 的发展以及 Internet 技术与信息家电、工业控制技术等结合日益密切,嵌入式设备与 Internet 的结合将代表着嵌入式技术的真正未来。

### 3. 使用实时操作系统的必要性

嵌入式实时操作系统在目前的嵌入式应用中用得越来越广泛,尤其在功能复杂、系统庞大的应用中显得越来越重要。

首先,嵌入式实时操作系统提高了系统的可靠性。在控制系统中,出于安全方面的考虑,要求系统起码不能崩溃,而且还要有自愈能力。不仅要求在硬件设计方面提高系统的可靠性和抗干扰性,而且也应在软件设计方面提高系统的抗干扰性,尽可能地减少安全漏洞和不可靠的隐患。长期以来的前后台系统软件设计在遇到强干扰时,使得运行的程序产生异常、出错、跑飞,甚至死循环,造成了系统的崩溃。而实时操作系统管理的系统,这种干扰可能只是引起若干进程中的一个被破坏,可以通过系统运行的系统监控进程对其进行修复。通常情况下,这个系统监视进程用来监视各进程运行状况,遇到异常情况时采取一些利于系统稳定的、可靠的措施,如把有问题的任务清除掉。

其次,提高了开发效率,缩短了开发周期。在嵌入式实时操作系统环境下,开发一个复杂的应用程序,通常可以按照软件工程中的解耦原则将整个程序分解为多个任务模块。每个任务模块的调试、修改几乎不影响其他模块。商业软件一般都提供了良好的多任务调试环境。

再次,嵌入式实时操作系统充分发挥了 32 位 CPU 的多任务潜力。32 位 CPU 比 8 位、16 位 CPU 快,另外它本来是为运行多用户、多任务操作系统而设计的,特别适于运行多任务实时系统。32 位 CPU 采用利于提高系统可靠性和稳定性的设计,使其更容易做到不崩溃。例如,CPU 运行状态分为系统态和用户态。将系统堆栈和用户堆栈分开,以及实时地给出 CPU 的运行状态等,允许用户在系统设计中从硬件和软件两方面对实时内核的运行实施保护。如果还是采用以前的前后台方式,则无法发挥 32 位 CPU 的优势。从某种意义上说,没有操作系统的计算机(裸机)是没有用的。在嵌入式应用中,只有把 CPU 嵌入到系统中,同时又把操作系统嵌入进去,才是真正的嵌入式应用。

### 4. 实时操作系统的优缺点

在嵌入式实时操作系统环境下开发实时应用程序使程序的设计和扩展变得容易,不需要大的改动就可以增加新的功能。通过将应用程序分割成若干独立的任务模块,使应用程序的设计过程大为简化;而且对实时性要求苛刻的事件都得到了快速、可靠的处理。通过有效的系统服务,嵌入式实时操作系统使得系统资源得到更好的利用。但是,使用嵌入式实时操作系统还需要额外的 ROM/RAM 开销,2%~5%的 CPU 额外负荷,以及内核的费用。

### 5. 常见的嵌入式操作系统

#### 1) Windows CE

Windows CE 是微软公司开发的一个开放、可升级的 32 位嵌入式操作系统。从操作系统内核的角度看,Windows CE 具有灵活的电源管理功能,包括睡眠/唤醒模式。在

Windows CE 中，还使用对象存储(Object Store)技术，包括文件系统、注册表及数据库。它还具有很多高性能、高效率的操作系统特性，包括按需换页、共享存储、交叉处理同步、支持大容量堆(Heap)等。Windows CE 拥有良好的通信能力。它广泛支持各种通信硬件，亦支持直接的局域网连接以及拨号连接，并提供与 PC、内部网以及 Internet 的连接，包括用于应用级数据传输的设备至设备间的连接。在提供各种基本的通信基础结构的同时，Windows CE 还提供与 Windows XP/NT 的最佳集成和通信。Windows CE 的图形用户界面相当出色。它拥有基于 Microsoft Internet Explorer 的 Internet 浏览器，此外，还支持 TrueType 字体。开发人员可以利用丰富灵活的控件库在 WindowsCE 环境下为嵌入式应用建立各种专门的图形用户界面。Windows CE 甚至还能支持诸如手写体和声音识别、动态影像、3D 图形等特殊应用。

Windows CE.NET 是 Windows CE3.0 的后继产品。Windows CE 为快速建立下一代智能移动和小内存占用的设备提供了一个健壮的实时操作系统。Windows CE.NET 具备完整的操作系统特性集和针对端对端开发的环境，它包括了定制设备所需要的一切，如联网能力、实时性和小内存占用以及多媒体和 Web 浏览功能。

实时能力是嵌入式操作系统在工业控制领域应用的一个重要指标。在实时能力上，Windows CE 显然与 VxWorks 等已经在这一领域称雄多年的嵌入式操作系统有差距，但是在实际的应用中，并不是所有的实时性应用要求都那么高，而 Windows CE 的设计目标可以满足 95% 的硬实时系统的要求。它 1ms 定时周期的误差约为 100 $\mu$ s，在 200MHz 的 X86 系统下可望达到 50 $\mu$ s。实时能力的另一个重要指标是中断延时，在 Windows CE 中，当采用在 ISR 中直接处理时，延时非常短，较长的延时通常发生在采用 IST 方式处理中断事务的情况，但即使是在这种情况下，系统仍能保证延时不超过 100 $\mu$ s。但由于 Windows 的传统优势，多数人都熟悉 Windows 系统，使操作人员更容易进入和使用 Windows CE 控制性产品；同时它也降低了产品生存周期中各个阶段的成本，缩短了产品投放市场的时间等。所以，Windows CE 正逐步渗透到工业控制领域，并成为实现工业自动控制的典型手段。

## 2) VxWorks

VxWorks 操作系统是美国 WindRiver 公司于 1983 年设计开发的一种嵌入式实时操作系统(RTOS)，是 Tornado 嵌入式开发环境的关键组成部分。良好的持续发展能力、高性能的内核以及友好的用户开发环境，是目前嵌入式系统领域中使用最广泛、市场占有率较高的系统。它支持多种处理器，如 x86、i960、Sun Sparc、Motorola MC68xxx、MIPS RX000、POWER PC 等。大多数的 VxWorks API 是专有的，采用 GNU 的编译和调试器。

VxWorks 具有可裁剪微内核结构；高效的任务管理；灵活的任务间通信；微秒级的中断处理；支持 POSIX 1003.1b 实时扩展标准；支持多种物理介质及标准的、完整的 TCP/IP 网络协议等。

由于操作系统本身以及开发环境都是专有的，价格一般都比较高，通常需花费不小的费用才能建起一个可用的开发环境，对每一个应用一般还要另外收取版权。一般不提供源代码，只提供二进制代码。由于它们都是专用操作系统，需要专门的技术人员掌握开发技术和维护，所以软件的开发和维护成本都非常高。

## 3) 嵌入式 Linux

嵌入式 Linux 最大的特点是源代码公开并且遵循 GPL 协议，在近近年来成为研究热

点。由于其源代码公开，人们可以任意修改，以满足自己的应用，并且查错也很容易。遵从 GPL，无须为每例应用交纳许可证费。有大量的应用软件可用，其中大部分都遵从 GPL，是开放源代码和免费的，可以稍加修改后应用于用户自己的系统。有大量免费优秀开发工具，且都遵从 GPL，是开放源代码的。有庞大的开发人员群体。无需专门的人才，只要懂 Unix/Linux 和 C 语言即可。随着 Linux 在中国的普及，这类人才越来越多。所以软件的开发和维护成本很低。优秀的网络功能，这在 Internet 时代尤其重要。稳定是 Linux 本身具备的一个很大优点，内核精悍，运行所需资源少，十分适合嵌入式应用。

嵌入式 Linux 支持的硬件数量庞大。嵌入式 Linux 和普通 Linux 并无本质区别，PC 上用到的硬件嵌入式 Linux 几乎都支持。而且各种硬件的驱动程序源代码都可以得到，为用户编写自己专有硬件的驱动程序带来很大方便。在嵌入式系统上运行 Linux 的一个缺点是 Linux 体系提供实时性能需要添加实时软件模块。而这些模块运行的内核空间正是操作系统实现调度策略、硬件中断异常和执行程序的部分。由于这些实时软件模块是在内核空间运行的，因此代码错误可能会破坏操作系统从而影响整个系统的可靠性，这对于实时应用将是一个非常严重的弱点。

#### 4) Palm OS

Palm OS 是著名的网络设备制造商 3COM 旗下的 Palm Computing 掌上电脑公司的产品，在 PDA 市场上占有很大的市场份额，它具有开放的操作系统应用程序接口(API)，开发商可以根据需要自行开发所需要的应用程序。

从全球范围来看，由于 Handspring 公司和 SONY 公司也被授权使用 Palm OS 操作系统，致使 Palm OS 的市场份额占到将近 90%。Palm OS 的优势在于可以让用户灵活方便地定制操作系统自己的习惯，而且其市场运作经验丰富，资本雄厚，目前也正在通过第三方软件商进行软件的中文化工作。

#### 5) $\mu$ C/OS-II

一个源码公开、可移植、可固化、可剪裁及占先式的实时多任务操作系统，其绝大部分源码是用 ANSIC 写的。 $\mu$ C/OS-II 通过了联邦航空局(FAA)商用航行器认证，符合 RTCA(航空无线电技术委员会)DO-178B 标准，该标准是为航空电子设备所使用软件的性能要求而制定的。自 1992 年问世以来， $\mu$ C/OS-II 已经被应用到数以百计的产品中。 $\mu$ C/OS-II 在高校教学使用是不需要申请许可证的，但若将  $\mu$ C/OS-II 的目标代码嵌入到产品中去，应当购买目标代码销售许可证。 $\mu$ C/OS-II 的特点如下：①提供源代码：购买《嵌入式实时操作系统  $\mu$ C/OS-II (第 2 版)》可以获得  $\mu$ C/OS-II V2.52 版本的所有源代码。②可移植性： $\mu$ C/OS-II 的源代码绝大部分是使用移植性很强的 ANSIC 编写，与处理器硬件相关的部分是使用汇编语言编写。汇编语言写的部分已经压缩到最低的限度，以使  $\mu$ C/OS-II 便于移植到其他处理器上。目前， $\mu$ C/OS-II 已经被移植到多种不同架构的处理器上。③可固化性：只要具备合适的软、硬件工具，就可以将  $\mu$ C/OS-II 嵌入到产品中成为产品的一部分。④可剪裁性： $\mu$ C/OS-II 使用条件编译实现可剪裁，用户程序可以只编译自己需要的  $\mu$ C/OS-II 功能，而不编译不需要的功能，以减少  $\mu$ C/OS-II 对代码空间和数据空间的占用。⑤可剥夺性： $\mu$ C/OS-II 是完全可剥夺型的实时内核， $\mu$ C/OS-II 总是运行就绪条件下优先级最高的任务。⑥多任务性： $\mu$ C/OS-II 可以管理 64 个任务，系统保留 8 个给  $\mu$ C/OS-II。这样，留给用户的应用程序最多可有 56 个任务。⑦可确定性：绝大多数  $\mu$ C/OS-



II的函数调用和服务的执行时间具有确定性,也就是说,用户总是能知道 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的函数调用和与服务执行了多长时间。⑧任务栈: $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的每个任务都有自己单独的栈,使用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的栈空间校验函数,可确定每个任务到的需要多少栈空间。⑨系统服务: $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 提供很多系统服务,例如信号量、互斥信号量、时间标志、信息邮箱、信息队列、块大小固定的内存的申请与释放及时间管理函数等。

## 1.3 嵌入式系统的应用

嵌入式系统主要用于各种信号处理与控制,目前已在国防、国民经济及社会生活各领域普及应用。

### 1. 军用

各种武器控制(火炮控制、导弹控制、智能炸弹制导引爆装置)、坦克、舰艇、轰炸机等陆海空各种军用电子装备,雷达、电子对抗军事通信装备,野战指挥作战用各种专用设备。

### 2. 家用

各种信息家电产品,如数字电视机、机顶盒,数码相机,VCD、DVD 音响设备,可视电话,家庭网络设备,洗衣机,电冰箱,智能玩具等,广泛采用嵌入式系统,嵌入式系统已用于社区对家用电、水、煤气表远程抄表、洗衣机遥控。

### 3. 工业用

各种智能测量仪表、数控装置、可编程控制器、控制机、分布式控制系统、现场总线仪表及控制系统、工业机器人、机电一体化机械设备、汽车电子设备等。

### 4. 商用

各类收款机、POS 系统、电子秤、条形码阅读机、商用终端、银行点钞机、IC 卡输入设备、取款机、自动柜员机、自动服务终端、防盗系统、各种银行专业外围设备。

### 5. 办公

复印机、打印机、传真机、扫描仪、激光照排系统、安全监控设备、手机、对讲机、个人数字助理(PDA)、变频空调设备、通信终端、程控交换机、网络设备、录音录像及电视会议设备、数字音频广播系统等。

### 6. 医用电子设备

各种医疗电子仪器,X 光机、超声诊断仪、计算机断层成像系统、心脏起搏器、监护仪、辅助诊断系统、专家系统等。

### 7. 交通管理

在车辆导航、流量控制、信息检测与汽车服务方面,嵌入式系统技术已经获得了广泛的应用,内嵌 GPS 模块、GSM 模块的移动定位终端已经在各种运输行业成功使用。目前 GPS 设备已经从尖端产品进入了普通百姓的家庭,可以随时随地找到你的位置。

### 8. 环境监测

环境监测包括水文资料实时监测、防洪体系及水土质量监测、堤坝安全、地震监测网、实时气象信息网、水源和空气污染检测等。在很多环境恶劣、地况复杂的地区,嵌入式系统将实现无人监测。