

第1章 概述

本章主要从嵌入式系统的概念、特点、分类、组成、应用等几个方面介绍嵌入式系统的基本知识，使读者对嵌入式系统建立一个完整的概念。

本章主要内容有：

- 嵌入式系统的概念、特点及分类
- 嵌入式系统的组成
- 嵌入式系统的应用领域
- 嵌入式处理器
- 嵌入式操作系统及开发

1.1 嵌入式系统

1.1.1 嵌入式系统的概念

嵌入式系统（Embedded System）实际上是一个专用的嵌入式计算机系统，国内一般定义为：以应用为中心，计算机技术为基础，软/硬件可裁剪，以适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。嵌入式计算机系统是相对于通用计算机系统而言的，通用计算机系统要求满足各种不同的应用需求，因而要求有丰富的硬件资源、网络操作系统、高速的运算、海量的存储，其技术方向是面向总线速度的无限提升，存储容量的无限扩大。而嵌入式计算机系统则面向具体应用，要有针对具体应用的“量体裁衣”的软/硬件，操作系统一般采用实时操作系统，其技术方向是面向与对象系统密切相关的嵌入性能、控制能力与控制的可靠性。

1.1.2 嵌入式系统的特点

由于嵌入式系统是应用于特定环境下，针对特定用途来设计的系统，所以不同于通用计算机系统。同样是计算机系统，嵌入式系统是针对具体应用设计的“专用系统”。与通用的计算机系统相比，它具有以下显著特点。

1. 专用性强

由于嵌入式系统通常是面向某个特定应用的，所以嵌入式系统的硬件和软件，尤其是软件，都是为特定用户群来设计的，它通常都具有某种专用性的特点。

2. 实时性好

目前，嵌入式系统广泛应用于生产过程控制、数据采集、传输通信等场合，主要用来对宿主对象进行控制，所以都对嵌入式系统有或多或少的实时性要求。例如，对嵌入在武器装备中的嵌入式系统，在火箭中的嵌入式系统，一些工业控制装置中的控制系统等应用中的实时性要求就极高。也正因为这种要求，在硬件上嵌入式系统极少使用存取速度慢的磁盘等存储器，在软件上更是加以精心设计，从而使嵌入式系统快速地响应外部事件。当然，随着嵌入式系统应用的扩展，有些系统对实时性要求也并不是很高，如近年来发展速度比较快的手持式计算机、掌上计算机等。但总体来说，实时性是对嵌入式系统的普遍要求，是设计者和用户重点考虑的一个重要指标。

3. 可裁剪性好

从嵌入式系统专用性的特点来看，作为嵌入式系统的供应者，理应提供各式各样的硬件和软件以备选用。但是，这样做势必会提高产品的成本。为了既不提高成本，又满足专用性的需要，嵌入式系统的供应者必须采取相应措施使产品在通用和专用之间进行某种平衡。目前的做法是把嵌入式

系统硬件和操作系统设计成可裁剪的，以便使嵌入式系统开发人员根据实际应用需要来量体裁衣，去除冗余，从而使系统在满足应用要求的前提下达到最精简的配置。

4. 可靠性高

由于有些嵌入式系统所承担的计算任务涉及产品质量、人身设备安全、国家机密等重大事项，加之有些嵌入式系统的宿主对象要工作在无人值守的场合，如危险性高的工业环境中，内嵌有嵌入式系统的仪器仪表中，在人际罕至的气象检测系统中及为侦察敌方行动的小型智能装置中等。所以与普通系统相比较，对嵌入式系统可靠性的要求极高。

5. 功耗低

很多嵌入式系统的宿主对象都是一些小型应用系统，如移动电话、PDA、MP3、飞机、舰船、数码相机等，这些设备不可能配有容量较大的电源，因此低功耗一直是嵌入式系统追求的目标。当然也是为了降低系统的功耗，嵌入式系统中的软件一般不存储于磁盘等载体中，而都固化在存储器芯片或单片系统的存储器之中。

6. 嵌入式系统开发需要开发工具和环境

由于其本身不具备自主开发能力，即使设计完成以后用户通常也是不能对其中的程序功能进行修改的，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/硬件设备及各种逻辑分析仪、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。

1.1.3 嵌入式系统的分类

根据不同的分类标准嵌入式系统有不同的分类方法，这里根据嵌入式系统的复杂程度，可以将嵌入式系统分为以下四类。

1. 单个微处理器

单个微处理器系统可以在小型设备中（如温度传感器、烟雾和气体探测器及断路器）找到。这类设备是供应商根据设备的用途来设计的。这类设备受 Y2K 影响的可能性不大。

2. 不带计时功能的微处理器装置

不带计时功能的微处理器装置可在过程控制、信号放大器、位置传感器及阀门传动器等中找到。这类设备也不太可能受到 Y2K 的影响。但是，如果它依赖于一个内部操作时钟，那么这个时钟可能受 Y2K 问题的影响。

3. 带计时功能的组件

带计时功能的组件可见于开关装置、控制器、电话交换机、电梯、数据采集系统、医药监视系统、诊断及实时控制系统等。它们是一个大系统的局部组件，由它们的传感器收集数据并传递给该系统。这种组体可同 PC 一起操作，并可包括某种数据库（如事件数据库）。

4. 在制造或过程控制中使用的计算机系统

在制造或过程控制中使用的计算机系统，可通过计算机与仪器、机械及设备相连来控制这些装置的工作。这类系统包括自动仓储系统和自动发货系统。在这些系统中，计算机用于总体控制和监视，而不是对单个设备直接控制。过程控制系统可与业务系统连接（如根据销售额和库存量来决定订单或产品量）。

1.2 嵌入式系统的组成

1.2.1 嵌入式系统的组成结构

嵌入式系统由硬件和软件组成，两类不同的嵌入式系统结构模型如图 1.1 所示。硬件是整个嵌入式操作系统和应用程序运行的平台，不同的应用通常有不同的硬件环境。嵌入式系统的硬件部分包括处理器/微处理器、存储器、I/O 接口及输入/输出设备。嵌入式系统的软件由嵌入式操作系统

和应用程序组成。嵌入式操作系统完成嵌入式应用的任务调度和控制等核心功能，嵌入式应用程序运行于操作系统之上，对于一些简单的嵌入式应用系统，应用程序可不需要操作系统的支持，直接运行在底层，如图 1.1 (a) 所示，利用操作系统提供的机制完成特定功能的嵌入式应用。

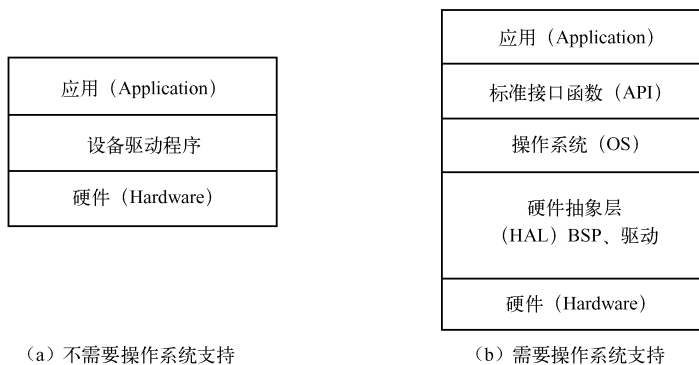


图 1.1 两类不同的嵌入式系统结构模型

硬件平台是整个系统的基础，针对于不同的应用有着不同的硬件平台。其中主芯片、外围器件都与应用紧密相关。硬件平台的多样性是嵌入式系统的一个主要特点。

嵌入式操作系统与硬件接口起到把操作系统与硬件平台相连接的作用。这是整个系统软件的底层部分，其中包括初始化整个系统软件的执行环境、操作系统的启动等。

嵌入式操作系统是整个系统的核心部分，起到承上启下的作用。它完成嵌入式应用任务的调度和控制等核心功能。其中还包括大量的设备驱动程序，通过这些设备驱动程序来和硬件平台打交道。嵌入式操作系统具有可精简、可配置、与上层应用紧密相连等特点。

应用程序与操作系统的接口主要是一些系统所提供的库函数，可供应用程序直接使用。例如，网络的套接字 (socket)、应用编程接口 (Application Programming Interface, API) 函数等。嵌入式应用程序是在操作系统的基础上进行开发的，因此相对于没有操作系统的系统而言，开发量小，系统运行更加稳定和可靠。

1.2.2 嵌入式系统的硬件特点

嵌入式系统的核心硬件是各种类型的嵌入式处理器。嵌入式处理器一般具备以下 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限度。

(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，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通信设备中靠电池供电的嵌入式系统更是如此，需要功耗只有 mW 甚至 μW 级。

1.2.3 嵌入式系统的软件介绍

在嵌入式系统中，嵌入式操作系统是嵌入式系统应用的核心。嵌入式操作系统是嵌入式系统软件/硬件资源的控制中心，它以尽量合理有效的方法组织多个用户共享嵌入式系统的各种资源。其中用户指的是系统程序之上的所有软件。所谓合理有效的方法，指的就是操作系统如何协调并充分利用硬件资源来实现多任务。嵌入式操作系统还有一个特点就是针对不同的平台，系统不是直接可用的，一般需要经过针对专门平台的移植操作系统才能正常工作。

嵌入式系统的软件平台包括系统软件与应用软件，它是实现嵌入式系统功能的关键，与通用计算机不同，嵌入式软件主要有以下特点。

1. 软件要求固态化存储

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嵌入式微控制器本身之中，而不是存储于磁盘等载体中。

2. 软件代码要求高质量、高可靠性

尽管半导体技术的发展使处理器速度不断提高、片上存储器容量不断增加，但在大多数应用中，存储空间仍然是宝贵的，还存在实时性的要求。为此要求程序编写和编译工具的质量要高，以减小程序二进制代码长度，提高执行速度。

3. 系统软件需要实时多任务操作系统

在多任务嵌入式系统中，对重要性各不相同的任务进行统筹兼顾的合理调度是保证每个任务及时执行的关键，单纯通过提高处理器速度是无法完成和没有效率的，这种任务调度只能由优化编写的系统软件来完成。为了合理地调度多任务，利用系统资源，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。

4. 嵌入式系统软件开发过程中，可采用汇编语言或 C 语言

对于嵌入式程序开发设计，可以采用 ARM 汇编语言或 C 语言去完成这一工作。

1.3 嵌入式系统的应用领域

由于嵌入式系统具有体积小、性能好、功耗低、可靠性高以及面向行业应用的突出特征，目前已广泛地应用于军事国防、消费电子、信息家电、网络通信、工业控制等领域。其应用领域包括如下几个方面。

1. 工业控制

基于嵌入式芯片的工业自动化设备将获得长足的发展，目前已经有大量的 8/16/32 位嵌入式微控制器在应用中，网络化是提高生产效率和产品质量、减少人力资源主要途径，如工业过程控制、数字机床、电力系统、电网安全、电网设备监测、石油化工系统。就传统的工业控制产品而言，低端型采用的往往是 8 位单片机。但是随着技术的发展，32/64 位的处理器逐渐成为工业控制设备的核心，在未来几年内必将获得长足的发展。

2. 交通管理

在车辆导航、流量控制、信息监测与汽车服务方面，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获得了成功的使用。目前 GPS 设备已经从尖端产品进入了普通百姓的家庭，只需要几千元，就可以随时随地确定位置。

3. 信息家电

信息家电将被作为嵌入式系统最大的应用领域，其中冰箱、空调等的网络化、智能化将引领人们的生活步入一个崭新的空间。即使你不在家里，也可以通过电话线、网络进行远程控制。在这些设备中，嵌入式系统将大有用武之地。

4. 家庭智能管理系统

水、电、煤气表的远程自动抄表，安全防火、防盗系统，其中嵌有的专用控制芯片将代替传统的人工检查，并实现更高、更准确和更安全的性能。目前在服务领域，如远程点菜器等已经体现了嵌入式系统的优势。

5. POS 网络及电子商务

公共交通无接触智能卡（Contactless Smartcard, CSC）发行系统，公共电话卡发行系统，自动售货机，各种智能 ATM 终端将全面走入人们的生活，到时手持一卡就可以行遍天下。

6. 环境工程与自然

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，水源和空气污染监测。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。

7. 机器人

嵌入式芯片的发展将使机器人在微型化、高智能方面优势更加明显,同时会大幅度降低机器人的价格,使其在工业领域和服务领域获得更广泛的应用。

这些应用中,可以着重投入控制方面的应用。就远程家电控制而言,除了开发出支持 TCP/IP 的嵌入式系统之外,家电产品控制协议也需要制订和统一,这需要家电生产厂家来做。同理,所有基于网络的远程控制器件都需要与嵌入式系统之间实现接口,然后再由嵌入式系统来控制并通过网络实现控制。所以,开发和探讨嵌入式系统有着十分重要的意义。

1.4 嵌入式处理器

嵌入式处理器是嵌入式系统的核心,是控制、辅助系统运行的硬件单元。范围极其广阔,从最初的 4 位处理器,目前仍在大规模应用的 8 位单片机,到最新的受到广泛青睐的 32/64 位嵌入式 CPU。

而目前世界上具有嵌入式功能特点的处理器已经超过 1000 种,流行体系结构包括 MCU、MPU 等 30 多个系列。鉴于嵌入式系统广阔的发展前景,很多半导体制造商都大规模生产嵌入式处理器,并且公司自主设计处理器也已经成为未来嵌入式领域的一大趋势,其中从单片机、DSP 到 FPGA 有着各式各样的品种,速度越来越快,性能越来越强,价格也越低。目前嵌入式处理器的寻址空间可以从 64KB 到 16MB,处理速度最快可以达到 2000 MIPS,封装从 8 个引脚到 144 个引脚不等。

根据其现状,嵌入式处理器可以分成下面几类。

1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器 (Micro Processor Unit, MPU) 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,只保留和嵌入式应用紧密相关的功能硬件,去除其他的冗余功能部分,这样就以最低的功耗和资源实现嵌入式应用的特殊要求。和工业控制计算机相比,嵌入式微处理器具有体积小、质量轻、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。

2. 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器 (Microcontroller Unit, MCU) 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 30 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 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、EEPROM 等各种必要功能和外部设备 (简称外设)。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,因此称微控制器。

由于 MCU 低廉的价格,优良的功能,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-96/196/296、P51XA、C166/167、68K 系列以及 MCU 8XC930/931、C540、C541,并且支持 I2C、CAN-Bus、LCD 及众多专用 MCU 和兼容系列。目前 MCU 约占嵌入式系统 70% 的市场份额。近来 Atmel 出产的 Avr 单片机由于其集成了 FPGA 等器件,所以具有很高的性价比,势必将推动单片机获得更大的发展。

3. 嵌入式 DSP

嵌入式 DSP (Embedded Digital Signal Processor, EDSP) 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的执行速度。在数字滤波、FFT、谱分析等各种仪器上 DSP 获得了大规模的应用。

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

种理论算法也只能通过 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。至 20 世纪 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成倍提高，成为语音处理、图像硬件处理技术的基础。到 20 世纪 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。20 世纪 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。

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

4. 片上系统

片上系统 (System on Chip, SoC) 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，然后通过仿真之后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，整个系统就特别简洁，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。

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。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 芯片也将在语音、图像、影视、网络及系统逻辑等应用领域中发挥重要作用。

1.5 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、软件固态化及应用的专用性等方面具有较为突出的特点。

1.5.1 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中被广泛使用。

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，实时系统是对响应时间有严格要求的。

实时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。实时系统有两种类型：软实时系统和硬实时系统。软实时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 控制权让别的任务运行。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。

1.5.2 几种典型的嵌入式操作系统介绍

嵌入式操作系统种类繁多，但大体上可分为商用型和免费性两种。目前商用型的操作系统主要有 VxWorks、Windows CE、Palm OS、QNS 和 LYNX 等。它们的优点是功能稳定、可靠，有完善的技术支持和售后服务，而且提供了如图形用户界面和网络支持等高端嵌入式系统要求的许多高级的功能；缺点是价格昂贵且源代码封闭，这就大大影响了开发者的积极性。目前免费性的操作系统主要有 Linux 和 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ ，它们在价格方面具有很大的优势。比如嵌入式 Linux 操作系统以价格低廉、

功能强大、易于移植而且程序源代码全部公开等优点正在被广泛采用。

当前国家大力支持对自主操作系统的研究开发，特别是嵌入式系统需要的高度简练、界面友善、质量可靠、应用广泛、易开发、多任务并且价格低廉的操作系统。下面介绍几种常用的嵌入式操作系统。

1. 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、高性能的内核及友好的用户开发环境，在嵌入式实时操作系统领域逐渐占据一席之地。

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。然而其价格昂贵。由于操作系统本身及开发环境都是专有的，价格一般都比较贵，通常需花费 10 万元人民币以上才能建起一个可用的开发环境，对每个应用一般还要另外收取版权费。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，支持的硬件数量有限。

2. Windows CE

Windows CE 与 Windows 系列有较好的兼容性，无疑是 Windows CE 推广的一大优势。其中 Win CE 3.0 是一种针对小容量、移动式、智能化、32 位且了解设备的模块化实时嵌入式操作系统。为建立针对掌上设备、无线设备的动态应用程序和服务提供了一种功能丰富的操作系统平台，它能在多种处理器体系结构上运行，并且通常适用于那些对内存占用空间具有一定限制的设备。它是从整体上为有限资源的平台设计的多线程、完整优先权、多任务的操作系统。它的模块化设计允许它对从掌上计算机到专用的工业控制器的用户电子设备进行定制。操作系统的基本内核需要至少 200KB 的 ROM。由于嵌入式产品的体积、成本等方面有较严格的要求，所以处理器部分占用空间应尽可能小。系统的可用内存和外存数量也要受到限制，而嵌入式操作系统就运行在有限的内存（一般在 ROM 或快闪存储器）中，因此就对操作系统的规模、效率等提出了较高的要求。从技术角度上讲，Windows CE 作为嵌入式操作系统有很多的缺陷，如没有开放源代码，使应用开发人员很难实现产品的定制；在效率、功耗方面的表现并不出色，而且和 Windows 一样占用过多的系统内存，运用程序庞大；版权许可费也是厂商不得不考虑的因素。

3. μ C/OS-II

μ C/OS-II 是著名的源代码公开的实时内核，是专为嵌入式应用设计的，可用于 8/16/32 位单片机或数字信号处理器 (DSP)。它是在原版本 μ C/OS 的基础上做了重大改进与升级，并有了近 10 年的使用实践，有许多成功应用于该实时内核的实例。它具有的特点是：公开源代码，很容易就能把操作系统移植到各个不同的硬件平台上；可移植性，绝大部分源代码是用 C 语言写的，便于移植到其他微处理器上；可固化；可裁剪性，有选择地使用需要的系统服务，以减少所需的存储空间；完全是占先式的实时内核，即总是运行就绪条件下优先级最高的任务；多任务，可管理 64 个任务，任务的优先级必须是不同的，不支持时间片轮转调度法；可确定性，函数调用与服务的执行时间具有其可确定性，不依赖于任务的多少；实用性和可靠性，成功应用该实时内核的实例，是其实用性和可靠性的最好证据。

由于 μ C/OS-II 仅是一个实时内核，这就意味着它不像其他实时存在系统那样提供给用户的只是一些 API 函数接口，还有很多工作需要用户自己去完成。

4. 嵌入式 Linux

嵌入式 Linux 是嵌入式操作系统的一个新成员，其最大的特点是源代码公开并且遵循 GPL 协议，近年来已成为研究热点，据 IDG 预测嵌入式 Linux 将占未来几年的嵌入式操作系统份额的 50%。

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，源代码开放并且免费，可以稍加修改后应用于用户自己的系统。有大量免费的优秀开发工具，且都遵从 GPL，也是源代码开放的，有庞大的开发人员群体。无须专门的人才，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——这是 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。

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。

1.6 嵌入式系统的开发

嵌入式系统是一个复杂而专用的系统，在进行系统开发之前，必须明确定义系统的外部功能和内部软/硬件结构；然后进行系统的设计分割，分别实现硬件规划与设计，应用软件规划与设计以及操作系统的裁剪；在操作系统裁剪和应用软件编码完成后，通常还将它们先移植到同系统结构的 CPU 的硬件平台上进行远程调试、功能模拟；完整无误后，最后才将操作系统和应用软件移植到自己开发的专用硬件平台上，完成系统的集成。其开发流程如图 1.2 所示。

完成系统设计分割后，软件和硬件开发可以并行进行，也可以在完成硬件后再实现操作系统和应用软件的开发。

在以上流程中，操作系统的裁剪和应用软件的编码都是在通用的台式机或工作站上完成的，称这样的台式机为宿主机（其操作系统大多为 Windows 系列、Linux 或 Solaris 等），而待开发的硬件平台通常被称为目标机。这种在宿主机上完成软件功能，然后通过串口或者以太网将交叉编译生成的目标代码传输并装载到目标机上，并在监控程序或者操作系统的支持下利用交叉调试器进行分析和调试，最后目标机在特定环境下脱离宿主机单独运行的系统开发模式，称之为宿主机-目标机（Host-Target）模式，它是嵌入式系统常采用的一种典型开发模式。简图如图 1.3 所示。



图 1.3 宿主机-目标机开发模式

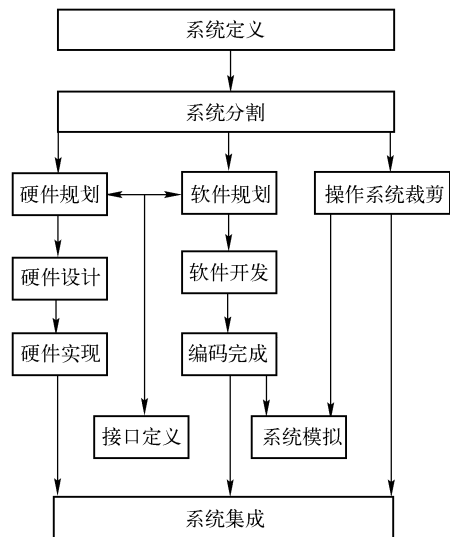


图 1.2 嵌入式系统开发流程

在宿主机-目标机开发模式中，交叉编译和远程调试是系统开发的重要特征。

1. 交叉编译

宿主机上的 CPU 结构体系和目标机上的 CPU 结构体系是不同的，为了实现裁剪后的嵌入式操作系统和应用软件能在目标机上“跑”起来，移植它们之前，必须在宿主机上建立新的编译环境，进行和目标机 CPU 相匹配的编译，这种编译

方式称为交叉编译。新建立的编译环境称之为交叉编译环境。交叉编译环境下的编译工具在宿主机上配置编译实现，必须是针对目标机 CPU 体系的编译工具。只有这样，才能形成源代码编译生成的可执行映像，才会被目标机的 CPU 识别。

2. 远程调试

远程调试是一种允许调试器以某种方式控制目标机上被调试进程的运行方式，并具有查看和修改目标机上内存单元、寄存器，以及被调试进程中变量值等各种调试功能的调试方式。调试器是一个单独运行着的进程。在嵌入式系统中，调试器运行在宿主机的通用操作系统之上，被调试的进程运行在目标机的嵌入式操作系统中，调试器和被调试进程通过串口或者网络进行通信，调试器可以控制、访问被调试进程，读取被调试进程的当前状态，并能够改变被调试进程的运行状态。

嵌入式系统的交叉调试可分为硬件调试和软件调试两种。硬件调试需要使用仿真调试器协助调试过程，硬件调试器是通过仿真硬件的执行过程，让开发者在调试时可以随时了解到系统的当前执行情况。目前嵌入式系统开发中最常用到的硬件调试器是 ROM Monitor、ROM Emulator、In-Circuit Emulator 和 In-Circuit Debugger。而软件调试则使用软件调试器完成调试过程。通常要在不同的层次上进行，有时需要对嵌入式操作系统的内核进行调试，而有时可能仅仅只需要调试嵌入式应用程序就可以了。

在目标机上，嵌入式操作系统、应用程序代码构成可执行映像。可以在宿主机上生成上述的完整映像，再移植到目标机上；也可以把应用程序做成可加载模块，在目标机操作系统启动后，从宿主主机向目标机加载应用程序模块。

交叉开发集成环境（IDE）是嵌入式系统开发的利器，可以有效地缩短开发周期。最著名的如美国风河（Wind River）系统公司的 Tornado II。它是一个拥有强大的开发和调试能力的图形界面开发工具，包括 C 和 C++ 远程源码级调试器，目标和工具管理器，系统目标跟踪及内存使用分析和自动配置。所有内部工具能方便地同时运行，很容易实现交互开发。但大多交叉开发集成环境需要和嵌入式开发套件配套销售，且只支持有限的嵌入式 CPU 体系，价格不菲。

采用宿主主机-目标机开发模式进行嵌入式系统开发，具有整体思路清晰，便于系统分工，容易同步开发的特点，是嵌入式开发人员较理想的开发方式。

1.7 本章小结

本章主要介绍了嵌入式系统开发的基础知识，包括嵌入式系统的概念、特点、分类、组成、应用领域、嵌入式处理器，以及嵌入式操作系统及开发，内容涉及嵌入式系统开发的基本知识和概念。通过本章的学习，可使读者系统地建立起嵌入式系统开发的整体框架和知识体系。

思考与练习

1. 什么是嵌入式系统？它由哪几个部分组成？
2. 嵌入式系统的三要素是什么？
3. 嵌入式处理器按实时性要求分（软件范畴）可分哪几类？
4. 什么是嵌入式微控制器？
5. 简述嵌入式 DSP 处理器。
6. 列出 5 种以上的嵌入式实时操作系统。
7. 嵌入式系统一般由几层组成，简介其作用。
8. 与通用计算机相比，嵌入式系统有哪些特点？
9. 根据嵌入式的复杂程度，嵌入式系统可分为哪 4 类？
10. 举例介绍嵌入式处理器有哪几类？
11. 从硬件系统来看，嵌入式系统由哪几个部分组成，并画出简图。