

# 第1章 单片机与嵌入式系统概述



本章阐述嵌入式系统的定义、组成、概念、特点和分类；介绍嵌入式处理器的分类和选择方法，嵌入式操作系统的特点与分类，基于单片机的嵌入式系统，常用的单片机系列。

## 1.1 现代计算机的技术发展史

### 1.1.1 始于微型计算机时代的嵌入式应用

电子数字计算机诞生于 1946 年，在其后漫长的历史进程中，计算机始终是供养在特殊机房中的、实现数值计算的大型昂贵设备。直到 20 世纪 70 年代微处理器的出现，计算机才发生了历史性的变化。以微处理器为核心的微型计算机（简称微型机）以其小型、价廉、高可靠性的特点，迅速走出机房。基于高速数值计算能力的微型机所表现出的智能化水平，引起了控制专业人士的兴趣，要求将微型机嵌入一个对象体系中，实现对象体系的智能化控制。例如，将微型计算机经电气加固、机械加固，并配置各种外围接口电路，安装到大型舰船中构成自动驾驶仪或轮机状态监测系统。这样一来，计算机便失去了原来的形态与通用的计算机功能。为了区别于原有的通用计算机系统，把嵌入到对象体系中、实现对象体系智能化控制的计算机，称为嵌入式计算机系统。因此，嵌入式系统诞生于微型计算机时代，嵌入式系统的嵌入性本质，是将一个计算机嵌入到一个对象体系中去，这些是理解嵌入式系统的基本出发点。

### 1.1.2 现代计算机技术的两大分支

由于嵌入式计算机系统要嵌入到对象体系中，实现的是对象的智能化控制，因此，它有着与通用计算机系统完全不同的技术要求与技术发展方向。**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。而**嵌入式计算机系统**的技术要求则是**对象的智能化控制能力**，技术发展方向是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**。

早期，人们勉为其难地将通用计算机系统进行改装，在大型设备中实现嵌入式应用。然而，由于众多的对象系统（如家用电器、仪器仪表、工控单元等）的物理环境（小型）和电气环境（可靠）的局限性，无法嵌入通用计算机系统，况且嵌入式系统与通用计算机系统的技术发展方向完全不同，因此，必须独立地发展通用计算机系统与嵌入式计算机系统，这就形成了现代计算机技术发展的两大分支。

如果说微型机的出现使计算机进入现代计算机发展阶段，那么嵌入式计算机系统的诞生，则标志了计算机进入了通用计算机系统与嵌入式计算机系统两大分支并行发展的时代，从而导致 20 世纪末计算机的高速发展时期。

### 1.1.3 两大分支发展的里程碑事件

通用计算机系统与嵌入式计算机系统的专业化分工发展，导致 20 世纪末、21 世纪初计算机技术的飞速发展。计算机专业领域集中精力发展通用计算机系统的软硬件技术，不必兼顾嵌入式应用要求，通用微处理器迅速从 286、386、486 发展到奔腾系列；操作系统则迅速从单用户、单任务、字符界面

操作系统(如 PC-DOS)发展到多用户、多任务、图形界面的视窗操作系统(如 Windows 2000、Windows XP)，使通用计算机系统进入尽善尽美阶段。

嵌入式计算机系统则走上了一条完全不同的道路，这条独立发展的道路就是单芯片化道路。它动员了原有的传统电子系统领域的厂家与专业人士，接过起源于计算机领域的嵌入式系统，承担起发展与普及嵌入式系统的历史任务，迅速地将传统的电子系统发展到智能化的现代电子系统时代。

因此，现代计算机技术发展的两大分支的里程碑意义在于：它不仅形成了计算机发展的专业化分工，而且将发展计算机技术的任务扩展到了传统的电子系统领域，使计算机成为进入人类社会全面智能化时代的有力工具。

## 1.2 嵌入式系统的定义与特点

### 1.2.1 嵌入式系统的定义

按照历史性、本质性、普遍性要求，嵌入式系统应定义为：“**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3个基本要素。对象系统则是指嵌入式系统所嵌入的宿主系统。

IEEE(美国电气和电子工程师协会)的定义是：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”(devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants)。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。

而目前国内最常见、最通用的一个定义是：**嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，并且软硬件可裁剪，适用于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统**。这个定义是从技术角度来进行定义的，更加全面。它不仅指明了嵌入式系统是一种专用计算机系统(非PC的智能计算机系统)，而且还说明了嵌入式系统的几个基本要素。嵌入式系统中的“**嵌入**”一词，即指其软硬件可裁剪性，也表示该系统通常是更大系统中的一个完整的部分。嵌入的系统中可以共存多个嵌入式系统。

另外，在理解**嵌入式系统的定义**时，不要与**嵌入式设备**相混淆。嵌入式设备是指内部有嵌入式系统的产品、设备和装置等，是指嵌入式系统所嵌入的宿主系统。例如，内含单片机系统的家用电器、仪器仪表、工控单元、机器人、手机、PDA、MP3/MP4、PLC等。

### 1.2.2 嵌入式系统组成

嵌入式系统是专用计算机应用系统，它具有一般计算机组成的共性，也是由硬件和软件组成的。图1.1完整地描述了嵌入式系统的软硬件各部分的组成结构。输入系统获取外界信息，传输给嵌入式处

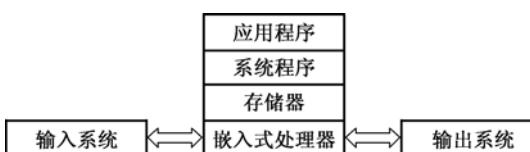


图 1.1 嵌入式系统组成

理器进行处理，处理后发出指令，输出系统接收到指令后进行动作。输入系统和输出系统可以很简单，如温控系统在感知温度变化后需要使用继电器动作；也可能很复杂，如机器人的手臂，输入系统有几十个传感器，输出系统则有近十个伺服电机，可以执行复杂的动作。

嵌入式系统硬件的组成可以简单地分为嵌入式处理器、存储器和输入/输出系统。实际上，由于超大规模集成电路的迅速发展，很多单片的嵌入式处理器中都含有丰富的资源。目前，一片嵌入式处理器加上电源电路、时钟电路和存储器电路，就构成了一个嵌入式核心控制模块。软件中的系统程序和应用程序都可以存放在存储器中。

### 1.2.3 嵌入式系统中的有关概念

#### 1. 嵌入式处理器

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

#### 2. 实时操作系统

实时操作系统（Real Time Operating System, RTOS）是嵌入式系统中最主要的组成部分。根据操作系统的工作特性，实时是指物理进程的真实时间。实时操作系统具有实时性，是能从硬件方面支持实时控制系统工作的操作系统。其中实时性是第一要求，需要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。

#### 3. 分时操作系统

对于分时操作系统，软件的执行在时间上的要求并不严格，时间上的错误一般不会造成灾难性的后果。目前分时系统的强项在于多任务的管理，而实时操作系统的重要特点是具有系统的可确定性，即系统能对运行情况的最好和最坏等情况做出精确的估计。

#### 4. 多任务操作系统

系统支持多任务管理和任务间的同步和通信，传统的单片机系统和DOS系统等对多任务支持的功能很弱，而目前的Windows是典型的多任务操作系统。在嵌入式应用领域中，多任务是一个普遍的要求。

#### 5. 实时操作系统中的重要概念

系统响应时间（System response time）：系统发出处理要求到系统给出应答信号的时间。

任务换道时间（Context-switching time）：任务之间切换所使用的时间。

中断延迟（Interrupt latency）：计算机接收到中断信号到操作系统做出响应，并转入中断服务程序的时间。

#### 6. 实时操作系统的工作状态

实时操作系统中的任务有4种状态：运行（Executing）、就绪（Ready）、挂起（Suspended）、休眠（Dormant）。

运行：获得CPU控制权。

就绪：进入任务等待队列，通过调度转为运行状态。

挂起：任务发生阻塞，移出任务等待队列，等待系统实时事件的发生而唤醒，从而转为就绪或运行。

休眠：任务完成或错误等原因被清除的任务，也可以认为是系统中不存在的任务。

任何时刻系统中只能有一个任务处于运行状态，各任务按级别通过时间片分别获得对CPU的访问权。

### 1.2.4 嵌入式系统的特点

嵌入式系统包括嵌入式硬件系统与嵌入式软件系统，是软硬件两者的综合体。

嵌入式系统的特点与定义不同，它是由定义中的3个基本要素衍生出来的。不同的嵌入式系统其特点会有所差异。

与“嵌入性”相关的特点：由于是嵌入到对象系统中的，因此必须满足对象系统的环境要求，如物理环境（小型）、电气环境（可靠）、成本（价廉）等要求。

与“专用性”相关的特点：软硬件的裁剪性；满足对象要求的最小软硬件配置等。

与“计算机系统”相关的特点：嵌入式系统必须是能满足对象系统控制要求的计算机系统。与上面两个特点相呼应，这样的计算机必须配置有与对象系统相适应的接口电路。

嵌入式系统是嵌入式硬件与嵌入式软件两者的综合体，其主要特点具体描述如下。

### 1. 嵌入式系统通常极其关注成本

嵌入式系统必须能根据特定应用的需求对软硬件进行裁剪，以满足应用系统对功能、可靠性、成本、体积等的要求。

在大多数情况下，需要注意的成本是系统成本。处理器成本固然是一个因素，但是如果采用高度集成的微控制器（Microcontroller Unit, MCU），而不是微处理器（Microprocessing Unit, MPU）和独立外设器件的组合，就能减小印制电路板的面积，减少所使用器件的个数，降低对电源输出功率的要求，这些都可降低器件的总成本、生产管理和装配成本、产品调试成本。同时也可提高产品的可靠性，降低产品的维护成本。

### 2. 嵌入式系统通常对实时性有要求

嵌入式系统一般对程序执行时间的要求都较高，故称之为实时系统。实时系统一般分为两类：软实时系统和硬实时系统。硬实时系统要求相关任务（时间关键性的任务）必须在某个时间间隔内完成，一旦响应时间不能满足，就可能会引起系统崩溃或致命的错误；而软实时系统的任务为时间敏感性任务，若响应时间不能满足，一般不会引起非常严重的后果。

### 3. 嵌入式系统一般采用 EOS 或 RTOS

为使程序能满足系统功能的要求，在必须保证程序逻辑正确性的同时，响应时间也必须达到系统的要求。对于功能较为复杂的嵌入式系统而言，控制响应时间是程序设计的关键。而这对程序员来说，往往很难驾驭或实现起来相当困难。因此，此类系统一般采用嵌入式操作系统（Embedded Operation System, EOS）来管理系统的硬件资源和时间资源。对于实时系统，应采用具有实时特性的嵌入式操作系统——实时操作系统（Real Time Operation System, RTOS）。另外，使用操作系统也可缩短产品的开发周期。

对于功能较简单的小型电子装置，可以不采用操作系统，而由应用软件来直接管理系统的硬件资源和时间资源。

### 4. 嵌入式系统软件故障造成的后果较通用计算机更为严重

嵌入式系统必须尽量减少软件的瞬时故障（软故障），嵌入式系统一般都采用一些保障机制，例如看门狗定时器（Watch Dog Timer, WDT），来提高系统的可靠性。

### 5. 嵌入式系统多为低功耗系统

许多嵌入式系统没有充足的电能供应（如采用电池供电），而且功耗越小，散热越容易、系统温升越低，系统的稳定性和可靠性越高。

### 6. 嵌入式系统经常在极端恶劣的环境下运行

极端恶劣的环境一般意味着严酷的温度与很高的湿度，特殊场合下使用的嵌入式系统必须还要考虑防震、防尘、防水、防电磁干扰等问题。集成电路芯片分为商业级、工业级和军品级，嵌入式系统一般应选工业级或军品级嵌入式处理器和外围电路。

### 7. 嵌入式系统的系统资源与通用计算机相比是非常少的

嵌入式系统一般没有系统软件和应用软件的明显区分，不要求其功能设计及实现上过于复杂。这样一方面利于控制系统成本，另一方面也利于实现系统安全。

嵌入式系统的个性化很强，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操作系统的移植，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。

针对不同的任务，往往需要对系统进行较大的更改，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。

### 8. 嵌入式系统通常在 ROM 中存放所有程序的目标代码

几乎所有的计算机系统都要在 ROM 中存放部分代码（如 PC 中的 BIOS 是存放在 FLASH ROM 中的），而多数嵌入式系统必须把所有的代码都存放在 ROM 中。这意味着对存放在 ROM 中的代码长度有极严格的限制。除此之外，由于 ROM 的读取速度比 RAM 的要低，有时为提高系统性能，将程序从 ROM 移至 RAM 运行。在设计系统硬件和软件时应考虑此问题。

### 9. 嵌入式系统可采用多种类型的处理器和处理器体系结构

系统所采用的处理器确定了系统的体系结构（包括系统硬件的组成和指令系统），可选择的处理器有微处理器、微控制器、数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）等，还可选择片上系统（System on Chip, SoC）。

### 10. 嵌入式系统需要专用开发工具和方法进行设计

嵌入式系统的开发工具通常由软件和硬件组成。软件包括交叉编译器、模拟器、调试器、集成开发环境（Integrated Development Environment, IDE）等；硬件包括 ROM 仿真器、在线仿真器（In-Circuit Emulator, ICE）、在线调试器（In-Circuit Debugger, ICD）、片上调试器（On-Chip Debugger, OCD）等。

### 11. 嵌入式处理器包含专用调试电路

当今，嵌入式处理器较过去的嵌入式处理器，其最大区别是在处理器中包含有专用调试电路，具有片上调试电路的嵌入式处理器很好地解决了嵌入式系统的调试问题。

## 1.2.5 嵌入式系统的种类与发展

按照上述嵌入式系统的定义，只要满足定义中三要素（**嵌入性、专用性与计算机系统**）的计算机系统，都可称为嵌入式系统。

嵌入式系统的种类按形态可分为**设备级**（工控机）、**板级**（单板、模块）、**芯片级**（MCU、SoC）。

嵌入式系统的种类按应用可分为工业应用和消费电子。

需要注意的是，嵌入式处理器不是嵌入式系统，嵌入式处理器只是嵌入式硬件系统中的 CPU 芯片，类似于 PC 主板上的 CPU。只有在将嵌入式处理器和外围硬件接口电路构成一个嵌入式硬件系统，并写入软件作为嵌入式应用时，这样的计算机系统才可称为嵌入式系统。

嵌入式系统与对象系统密切相关，其主要技术发展方向是满足嵌入式应用要求，不断扩展对象系统要求的外围电路（如 ADC、DAC、PWM、日历时钟、电源监测、程序运行监测电路等），形成满足对象系统要求的应用系统。因此，嵌入式系统作为一个专用计算机系统，要不断向计算机应用系统发展。因此，可以把嵌入式系统定义中的专用计算机系统引伸到满足对象系统要求的计算机应用系统。

## 1.3 嵌入式处理器

### 1.3.1 嵌入式处理器简介

#### 1. 嵌入式硬件系统

像通用计算机系统的组成一样，嵌入式系统由嵌入式硬件系统和嵌入式软件系统组成。嵌入式硬件系统，是以嵌入式处理器为中心，由存储器、I/O 设备以及电源等必要的辅助接口组成的，如图 1.2 所示。嵌

入式系统是量身定做的专用计算机应用系统，在实际应用中的嵌入式系统硬件配置非常精简，除了嵌入式处理器和基本的外围电路以外，其余的电路都可根据需要和成本进行裁剪、定制，非常经济、可靠。



图 1.2 嵌入式硬件系统

嵌入式硬件系统的核心是嵌入式处理器，有时为了提高系统的信息处理能力，常外接 DSP 和 DSP 协处理器，以完成高性能信号处理。

随着计算机技术、微电子技术、应用技术的不断发展，以及纳米芯片加工工艺技术的发展，很多单片的嵌入式处理器中都含有电源控制电路、复位电路、时钟电路、I/O 接口和存储器电路等资源。这种以微处理器为核心的、集成多种功能的单芯片级的 MCU，已成为嵌入式系统的核心。有的 MCU 甚至集成了大量的外围 USB、UART、以太网、AD/DA、IIS 等功能模块。在嵌入式系统设计中，要尽可能地选择满足系统功能接口的 MCU 芯片。

## 2. 嵌入式处理器简介

嵌入式处理器是指应用在嵌入式计算机系统中的处理器，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。其范围极其广阔，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 位、64 位嵌入式 CPU。

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发展趋势，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，价格也越来越低。目前嵌入式处理器的寻址空间可以从 64 KB 到 4 GB，处理速度最快可以达到 2000 MIPS，封装从 8 个引脚到 200 个引脚不等。

嵌入式系统硬件层的核心是嵌入式处理器，嵌入式处理器与通用 CPU 最大的不同，在于嵌入式处理器大多工作在为特定用户群所专门设计的系统中，它将通用 CPU 中许多由板卡完成的任务集成在芯片内部，从而有利于嵌入式系统在设计时趋于小型化，同时还具有很高的效率和可靠性。

嵌入式处理器的体系结构可以采用冯·诺依曼体系结构或哈佛体系结构；指令系统可以选用精简指令系统（Reduced Instruction Set Computer, RISC）和复杂指令系统（Complex Instruction Set Computer, CISC）。RISC 计算机在通道中只包含最有用的指令，确保数据通道快速执行每一条指令，从而提高了执行效率，并使 CPU 硬件结构设计变得更为简单。

嵌入式处理器有各种不同的体系，即使在同一体系中，也可能具有不同的时钟频率和数据总线宽度，或集成了不同的外设和接口。据不完全统计，目前全世界嵌入式处理器已经超过 1000 多种，体系结构有 30 多个系列，其中主流的体系有 80C51、AVR、ARM、MIPS、PowerPC、X86 和 SH 等。但与全球 PC 市场不同的是，没有一种嵌入式处理器可以主导市场，仅以 32 位的产品而言，就有 100 多种嵌入式处理器。嵌入式处理器的选择是根据具体的应用来决定的。

### 1.3.2 嵌入式处理器的分类

嵌入式处理器按字长宽度可分为 4 位、8 位、16 位、32 位和 64 位。国内一般把 16 位及以下的嵌入式处理器称为单片机或微控制器（MicroController Unit），而把 32 位及以上的嵌入式处理器称为微处理器。但按字长宽度划分微控制器和微处理器的界限并非绝对，许多内含 ARM 核的 32 位处理器芯片在其厂家数据手册中也称为微控制器。

如果按系统集成度划分，则可以分为两类：一种是微处理器内部仅包含单纯的中央处理器单元，称为一般用途型微处理器，另一种则是将 CPU、RAM、ROM 及 I/O 等部件集成在同一个芯片上，称为单片机或单芯片微控制器。

通常我们根据用途来分类，如下所述。

### 1. 嵌入式微处理器 MPU (Microprocessor Unit)

嵌入式微处理器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。但与通用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、PowerPC、68000、MIPS、ARM 系列等。

其中 Am186/88、386EX 是由通用计算机中的 CPU 演变而来的；PowerPC、68000、MIPS 处理器最初用于桌面计算机，目前则大量用于嵌入式计算机系统；而 ARM 则是专为嵌入式应用需要而开发的微处理器。

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

嵌入式微控制器的典型代表是 8 位单片机。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 位单片机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/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、E<sup>2</sup>PROM 等各种必要的功能和外设。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。

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 80C51、68K、PIC、AVR、ARM7 系列各类微处理器，并且有支持 I<sup>2</sup>C、SPI、CAN-BUS、LCD、USB 及众多专用 MCU 的兼容系列。目前 MCU 占嵌入式系统约 70% 的市场份额。

### 3. 嵌入式数字信号处理器 DSP (Digital Signal Processor)

DSP 处理器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，所以这种理论算法只能通过 MPU 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。

### 4. 嵌入式片上系统 SoC (System on Chip)

SoC 是在单芯片上集成了数字信号处理器、微控制器、存储器、数据转换器、接口电路等电路功能模块，可以直接实现信号采集、转换、存储、处理等功能，其中 IP 核 (Intellectual Property core, 知识产权核) 是 SoC 设计的基础。

IP 核是指具有知识产权的、功能具体的、接口规范的、可在多个集成电路设计中重复使用的功能模块，是实现系统级芯片（SoC）的基本构件。在十大 IP 供应商排行中，ARM、Rambus 和 MIPS 居前 3 位。

SoC 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/硬件的无缝结合，在一个硅片内部运用硬件描述语言 HDL（VHDL、Verilog HDL 等）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，一点一点地连接焊制，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 IP 核，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在系统内部，因而整个系统特别简洁，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。

### 1.3.3 几种嵌入式处理器之关系

微处理器（MPU）通常代表一个功能强大的 CPU，但不是为任何已有的特定计算目的而设计的芯片。这种芯片往往是个人计算机和高端工作站的核心 CPU。最常见的微处理器是 Motorola 的 68 K 系列和 Intel 的 X86 系列。早期的微控制器是将一个计算机集成到一个芯片中，实现嵌入式应用，故称为单片机（Single-Chip Microcomputer, SCM）。随后，为了更好地满足控制领域的嵌入式应用，单片机中不断扩展一些满足控制要求的电路单元。目前，单片机已广泛称为微控制器（MCU）。换一个说法，就是 MCU 集成了片上外围器件，MPU 不带外围器件，是高度集成的通用结构的处理器，是去除了集成外设的 MCU。

也有由微处理器发展的微控制器，例如，Intel 的 386EX 就是很成功的 80386 微处理器的微控制器版本。它与嵌入式应用的微处理器一样，也称为嵌入式微处理器。数字信号处理器（DSP）里的 CPU 是专门设计用来极快地进行离散时间信号处理计算的，比如那些需要进行音频和视频通信的场合。DSP 内含乘加器，能比其他处理器更快地进行这类运算。

在当今嵌入式技术领域，微处理器（MPU）和微控制器（MCU）形成了各具特色的两个分支。与微处理器（MPU）以运算性能和速度为特征的飞速发展不同，微控制器（MCU）则是以其控制功能的不断完善为发展标志的。它们互相区别，但又互相融合、互相促进。

值得注意的是，在嵌入式系统领域中的微处理器和微控制器的划分界限并非十分严格，MPU 内部也集成了具有控制功能的大量片上外围器件，同样 MCU 也不只局限于 8 位与 16 位的单片机，32 位和 64 位的高性能的单片机也不断推出。

### 1.3.4 如何选择嵌入式处理器

与全球 PC 市场不同，没有一种嵌入式微处理器可以主导嵌入式系统。那么在设计手持电话、传真机、机器人、打印机和网络路由器等应用产品时，应如何选择嵌入式微处理器呢？仅有一种答案，那就是选择是多样化的。因为嵌入式系统设计的差异性极大，这就是有众多嵌入式微处理器存在的原因。

嵌入式系统通常是为专门执行某项任务而设计和开发的，其功能范围狭窄。设计时需要进行高度优化，必须为这些设计选择适合的处理器。合理选择恰当的处理器是个复杂的工作，在某种情况下，性能极为重要，而在另一种情况下，低功耗又成为最关键的因素。另外，一些设计者会考虑支持软件、代码的大小以及多种渠道的资源和过去的经验。选择处理器的一般原则如下。

#### 1. 低成本和供货

对成本要求严格的项目一般选择畅销的、高度集成的部件。应选择能保证在足够长的时间段内持续不断地供应处理器产品并能提供工业级、军品级处理器的一家厂商。

#### 2. 低功耗

对于有功耗限制的嵌入式系统，必须限制使用过多的外扩器件（如 RAM、ROM、I/O 接口等）。应考虑选择低功耗、高集成度的处理器，如果处理器的时钟频率可程控，能进一步降低功耗。

从软件设计的观点来看，如果功耗成为压倒性的系统约束，那么会影响软件开发工具的选择，有可能要求用汇编语言来编写软件，以提高软件的运行效率。

### 3. 恰当的处理能力

处理器必须能在规定的时间内完成所有任务，不同的嵌入式系统对处理器的性能要求也不尽相同，从能处理单一的数字信号、处理数字/模拟信号到 DSP 应用等。

### 4. 支持合适的嵌入式操作系统

微处理器的选择还依赖于是否有合适的嵌入式操作系统支持。对于 8 位和 16 位微处理器，可以配置对资源要求不高的较小内核尺寸的嵌入式操作系统；对于 32 位微处理器，应该支持商业嵌入式操作系统。在商业嵌入式操作系统中调试实时软件时，一般需要使用与所采用的嵌入式操作系统兼容的开发工具，最好采用嵌入式操作系统开发商提供的集成解决方案。

### 5. 与原有产品的兼容

随着电子技术和计算机技术的发展，在同一系列的处理器中，性能较低的处理器会被性能较高的取代。新推出的处理器将会继续保持与旧代码、旧系统体系结构的兼容性。

在选择处理器时，主要决定因素不仅是要最高的性价比，而且要求可利用已有的软件、开发工具及在此系列上积累的丰富经验。

Intel 公司的 X86 系统是最好的例子。今天最高性能的奔腾处理器仍能执行在古老的 IBM PC 上使用的 8086 处理器的目标代码。

### 6. 编程语言的限制

编程语言的选择是非常重要的，但有时开发人员却别无选择，有些工业部门对特定编程语言有着强烈的偏好。

如果项目要求在原有程序的基础上进行再开发，要么继续使用原先的编程语言，要么使用支持与原有编程语言混合编程的编译器和连接器。

### 7. 上市时间

开发工程师一般会低估上市时间的重要性，认为只要设计性能出众、特性丰富，产品就会在市场上大获成功。事实上，上市时间是产品成败非常关键的因素。如果所选择的处理器致使上市时间延期，那么就是处理器选择失败。

对于嵌入式系统的设计者，更多更好的嵌入式微处理器/微控制器将不断出现。综合考虑系统的性能、功耗、价格、供货保证、开发工具的配备以及工程师过去对这种处理器的经验和软件的支持等因素，决定用户使用哪一种处理器。嵌入式处理器的选择不是一成不变的，伴随着技术的发展，速度快、价格低、功能强的嵌入式处理器不断涌现，给用户提供了更多的选择。**够用、成本和供货**是选择嵌入式处理器的 3 个主要考虑的因素。

## 1.4 嵌入式操作系统

### 1.4.1 嵌入式操作系统特点

嵌入式操作系统（Embedded Operation System, EOS）是一种用途广泛的系统软件，过去它主要应用于工业控制和国防系统领域。EOS 负责嵌入式系统的全部软硬件资源的分配、任务调度，控制、协调并发活动。它必须体现其所在系统的特征，能够通过装卸某些模块来达到系统所要求的功能。目

前，已推出一些应用比较成功的 EOS 产品系列。随着 Internet 技术的发展、信息家电的普及应用，以及 EOS 的微型化和专业化，EOS 开始从单一的弱功能向高专业化的强功能方向发展。嵌入式操作系统在系统实时高效性、硬件的相关依赖性、软件固化以及应用的专用性等方面具有较为突出的特点。EOS 是相对于一般操作系统而言的，它除具有了一般操作系统最基本的功能，如**任务调度、同步机制、中断处理、文件处理**等外，还有具有以下特点。

- ① 可装卸性：开放性、可伸缩性的体系结构。
- ② 强实时性：EOS 实时性一般较强，可用于各种设备控制当中。
- ③ 统一的接口：提供各种设备驱动接入。
- ④ 操作方便、简单、提供友好的图形界面（GUI），追求易学易用。
- ⑤ 提供强大的网络功能：支持 TCP/IP 协议及其他协议，提供 TCP/UDP/IP/PPP 协议支持及统一的 MAC 访问层接口，为各种移动计算设备预留接口。
- ⑥ 强稳定性，弱交互性：嵌入式系统一旦开始运行，就不需要用户过多的干预，这就要求负责系统管理的 EOS 具有较强的稳定性。嵌入式操作系统的用户接口一般不提供操作命令，它通过系统调用命令向用户程序提供服务。
- ⑦ 固化代码：在嵌入系统中，嵌入式操作系统和应用软件被固化在嵌入式系统计算机的 ROM 中。
- ⑧ 更好的硬件适应性：也就是良好的移植性。

## 1.4.2 嵌入式操作系统分类

目前的嵌入式操作系统一般可以分为两类：一类是面向控制、通信等领域的**实时操作系统**，如 μC/OS-II、VxWorks、Nucleus、QNX、pSOS 等；另一类是面向消费电子产品的**非实时操作系统**，如 WinCE、Linux 等。

## 1.4.3 使用嵌入式操作系统的优缺点

在嵌入式操作系统环境下开发应用程序，可以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，可以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。

但使用嵌入式操作系统需要占用嵌入式处理器的硬件资源和部分内存，另外还需支付操作系统内核费用。因此，是否在嵌入式系统中使用嵌入式操作系统，应视所开发的项目而定，对于一些简单的、低成本的项目来说，就没有必要使用嵌入式操作系统。

# 1.5 基于单片机的嵌入式系统

## 1.5.1 单片机开创了嵌入式系统独立发展道路

嵌入式系统虽然起源于微型计算机时代，然而，微型计算机的体积、价位、可靠性都无法满足广大对象系统的嵌入式应用要求，因此，嵌入式系统必须走独立发展道路。这条道路就是芯片化道路。将计算机做一个芯片上，从而开创了嵌入式系统独立发展的单片机时代。

在探索单片机的发展道路时，有过两种模式，即“Σ模式”与“创新模式”。“Σ模式”本质上是通用计算机直接芯片化的模式，它将通用计算机系统中的基本单元进行裁剪后，集成在一个芯片上，构成单片微型计算机；“创新模式”则完全按嵌入式应用要求设计全新的、满足嵌入式应用要求的体系

结构、微处理器、指令系统、总线方式、管理模式等。Intel 公司的 MCS-48、MCS-51 就是按照创新模式发展起来的单片形态的嵌入式处理器（单片微型计算机）。MCS-51 是在 MCS-48 探索基础上，进一步完善了的单片机处理器。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机嵌入式系统的典型结构体系。

## 1.5.2 单片机的技术发展史

单片机作为微型计算机的一个重要分支，应用面很广，发展很快。自单片机诞生至今，已发展为上百种系列的近千个机种。如果将 8 位单片机的推出作为起点，那么单片机的发展历史大致可分为以下几个阶段。

(1) 第一阶段 (1976—1978 年)：单片机的探索阶段。以 Intel 公司的 MCS-48 为代表。MCS-48 的推出是在工控领域的探索，参与这一探索的公司还有 Motorola、Zilog 等，都取得了满意的效果。这就是 SCM 的诞生年代，“单片机”一词即由此而来。

(2) 第二阶段 (1978—1982 年)：单片机的完善阶段。Intel 公司在 MCS-48 的基础上推出了完善的、典型的单片机系列 MCS-51。它在以下几个方面奠定了典型的通用总线型单片机体系结构：

① 完善的外部总线。MCS-51 设置了经典的 8 位单片机的总线结构，包括 8 位数据总线、16 位地址总线、控制总线及具有多机通信功能的串行通信接口。

② CPU 外围功能单元的集中管理模式。

③ 体现工控特性的位地址空间及位操作方式。

④ 指令系统趋于丰富和完善，并且增加了许多突出控制功能的指令。

(3) 第三阶段 (1982—1990 年)：8 位单片机的巩固发展及 16 位单片机的推出阶段，也是单片机向微控制器发展的阶段。Intel 公司推出的 MCS-96 系列单片机，TI 公司的 MSP430 Flash 系列单片机，将一些用于测控系统的 A/D 转换器、D/A 转换器、程序运行监视器、脉宽调制器等纳入片中，体现了单片机的微控制器特征。随着 MCS-51 系列的广泛应用，许多电气厂商竞相使用 80C51（兼容 MCS-51）为内核，将许多测控系统中使用的电路技术、接口技术、多通道 A/D 转换部件、可靠性技术等应用到单片机中，增强了外围电路的功能，强化了智能控制的特征。

(4) 第四阶段 (1990 年至今)：微控制器的全面发展阶段。随着单片机在各个领域全面深入的发展和应用，出现了高速、大寻址范围、强运算能力的 8 位/16 位/32 位通用型单片机，以及小型廉价的专业型单片机。

## 1.5.3 嵌入式系统应用的高低端

由于嵌入式系统走过很长的一段单片机的独立发展道路，大多是基于 8 位单片机的，实现最底层的嵌入式系统应用，带有明显的电子系统设计模式特点。因此，不少从事单片机应用的人，不了解单片机与嵌入式系统的关系，在谈到“嵌入式系统”领域时，往往理解成计算机专业领域的，基于 32 位嵌入式处理器的从事网络、通信、多媒体等的应用。这样，“单片机”与“嵌入式系统”形成了嵌入式系统中常见的两个独立的名词。但由于“单片机”是典型的、独立发展起来的嵌入式系统，从学科建设的角度出发，应该把它统一成“嵌入式系统”。考虑到原来单片机的电子系统底层应用特点，可以把嵌入式系统应用分成高端与低端，把原来的单片机应用理解成嵌入式系统的低端应用，含义为它的底层数字信号处理能力以及与对象系统的紧耦合。

### 1. 高端：基于 32/64 位微处理器的嵌入式硬件系统

由微处理器构成的嵌入式硬件系统必须在其外部添加 ROM、RAM、I/O 端口和定时器等，使得

系统完整可用。如图1.3所示，虽然添加 ROM、RAM、I/O 端口和定时器使得系统变得复杂，成本变得更高，但这种方式提供了更多的灵活性。可以选择 ROM 和 RAM 的容量大小，多少个 I/O 端口，以便适应所需的用途。

## 2. 低端：基于 8/16 位单片机的嵌入式硬件系统

单片机内部包含微处理器，还有固定数量的 ROM、RAM、I/O 端口和定时器等，都集成到一个芯片上，功耗更低，可靠性更高。只需要简单的外围电路即可组成系统，如图1.4所示。对于许多嵌入式应用，它们所占用的空间、所消耗的功率以及单位成本比起计算能力来说，都是更关键的考虑因素。单片机则是较好的选择。目前许多单片机片内除了有固定数量的 ROM、RAM、I/O 端口和定时器外，也提供外部扩展接口，使用更为灵活。

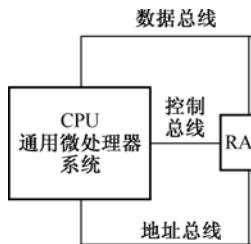


图 1.3 采用微处理器嵌入式系统硬件



图 1.4 采用单片机的嵌入式系统硬件

在嵌入式技术领域，这种高低端的划分并不是绝对的，基于微处理器的嵌入式系统以运算性能和速度为发展目标，基于单片机或微控制器的嵌入式系统则以其强大的控制功能为发展目标。它们互相区别，但又互相融合、互相促进。基于单片机的嵌入式系统 MCU 也不只局限于 8 位与 16 位的单片机，随着技术的进步与发展，32 位和 64 位的高性能的 MCU 也不断被推出。

### 1.5.4 单片机嵌入式系统的特点

单片机嵌入式系统除了具备体积小、价格低、性能强大、速度快、用途广、灵活性强、可靠性高等优点外，它与通用微型计算机系统相比，在硬件结构和指令设置上还具有以下独特之处。

① 存储器 ROM 和 RAM 是有严格分工的。ROM 用做程序存储器，只存放程序、常数和数据表格，而 RAM 用做数据存储器，存放临时数据和变量。这样的设计方案使单片机更适用于实时控制（也称为现场控制或过程控制）系统。配置较大程序存储空间的 ROM，将已调试好的程序固化（即对 ROM 编程，也称烧录或烧写），这样不仅掉电时程序不会丢失，还避免了程序被破坏，从而确保了程序的安全性。实时控制仅需容量较小的 RAM，用于存放少量随机数据，这样有利于提高单片机的操作速度。

② 采用面向控制的指令系统。在实时控制方面，尤其是在位操作方面，单片机有着不俗的表现。③ 输入/输出（I/O）端口引脚通常设计有多种功能。在设计时，究竟使用多功能引脚的哪一种功能，可以由用户编程确定。

④ 品种规格的系列化。属于同一个产品系列、不同型号的单片机，通常具有相同的内核、相同或兼容的指令系统，其主要的差别仅在于片内配置了一些不同种类或不同数量的功能部件，以适用于不同的被控对象。

⑤ 单片机的硬件功能具有广泛的通用性。同一种单片机可以用在不同的控制系统中，只是其中所配置的软件不同而已。换言之，给单片机固化上不同的软件，便可形成用途不同的专用智能芯片，有时将这种芯片称为固件（Firmware）。

## 1.6 单片机的分类和技术指标

### 1.6.1 单片机的分类

单片机作为计算机发展的一个重要领域，应有一个较科学的分类方法。根据目前的发展情况，从不同角度单片机大致可以分为通用型/专用型、总线型/非总线型、工控型/家电型。

#### 1. 通用型/专用型

这是按单片机的用途或适用范围来区分的。例如，80C51是通用型单片机，它不是为某种专用设计的；专用型单片机是针对一类产品甚至某一个产品设计生产的，如DVD控制器和数码摄像机控制器芯片等，在用量不大的情况下，设计和制造这样的专用芯片成本很高，而且设计和制造的周期也很长。我们通常所用的都是通用型单片机，通用型单片机把所有资源（如ROM、I/O等）全部提供给用户使用。

#### 2. 总线型/非总线型

这是按单片机是否提供并行总线来区分的。

总线型单片机普遍设置有并行地址总线、数据总线、控制总线，这些引脚用以扩展并行外围器件，都可通过并行口与单片机连接；非总线型单片机已把所需要的外围器件及外设接口集成一个芯片内，因此在许多情况下可以不要并行扩展总线，大大节省封装成本和芯片体积，这类单片机称为非总线型单片机。

#### 3. 工控型/家电型

这是按照单片机大致应用的领域进行区分的。一般而言，工控型寻址范围大，运算能力强；用于家电型的单片机多为专用型，通常是小封装，低价格，外围器件和外设接口集成度高。

### 1.6.2 单片机的技术指标

当今通用型单片机的生产厂家已不下几十家，种类有几百种之多。下面就从单片机的几个重要指标进行介绍。

**位数：**指单片机能够一次处理的数据的宽度，有4位机（如MSM64155A）、8位机（如MCS-51）、16位机（如MCS-96）、32位机（如含ARM核的微处理器/微控制器）。

**存储器：**包括程序存储器和数据存储器，程序存储器空间较大，字节数一般从几KB（ $1\text{ KB}=2^{10}\text{ B}=1024\text{ B}$ ）到几MB（ $1\text{ MB}=2^{20}\text{ B}$ ），另外还有不同的类型，如ROM、EPROM、E<sup>2</sup>PROM、Flash ROM和OTP ROM（详细解释参见2.3.4节）。数据存储器的字节数则通常为几十到几百KB之间。程序存储器的编程方式也是用户选择的一个重要因素，有的是串行编程，有的是并行编程，新一代的单片机有的还具有在系统编程（In-System-Programmable，ISP）或在应用再编程（In-Application re-Programmable，IAP）功能，有的还有专用的ISP编程接口JTAG。

**I/O口：**即输入/输出口，一般有几个到几十个，用户可以根据自己的需要进行选择。

**速度：**指的是CPU的处理速度，以每秒执行多少条指令衡量，常用单位是MIPS（百万条指令每秒），目前最快的单片机可达到100MIPS。单片机的速度通常是与系统时钟（相当于PC的主频）相联系的，但并不是频率高的处理速度就一定快，对于同一种型号的单片机来说，采用频率高的时钟一般比频率低的速度要快。

**工作电压:** 通常工作电压是 5 V, 范围是 $\pm 5\%$ 或 $\pm 10\%$ , 也有 3 V/3.3 V 电压的产品, 更低的可在 1.5 V 工作。现代单片机又出现了宽电压范围型, 即在 2.5~6.5 V 内都可以正常工作。

**功耗:** 低功耗是现代单片机所追求的一个目标, 目前低功耗单片机的静态电流可以低至 $\mu\text{A}$ (微安,  $10^{-6}\text{ A}$ ) 或 nA(纳安,  $10^{-9}\text{ A}$ ) 级。有的单片机还具有等待、关断、睡眠等多种工作模式, 以此来降低功耗。

**温度:** 单片机根据工作温度可分为民用级(商业级)、工业级和军用级三种。民用级的温度范围是 0°C~70°C, 工业级的温度范围是 -40°C~85°C, 军用级的温度范围是 -55°C~125°C(不同厂家的划分标准可能不同)。

**附加功能:** 有的单片机有更多的功能, 用户可根据自己的需要选择最适合自己的产品。比如有的单片机内部有 A/D、D/A、串口、LCD 驱动等, 使用这种单片机可以减少外部器件, 提高系统的可靠性。

## 1.7 常用的单片机系列

### 1. MCS-51 系列及与之兼容的 80C51 系列单片机

由于历史的原因, Intel 公司的 MCS-51 及与之兼容的 80C51 系列单片机(以下统称 80C51 系列单片机)是国内应用最为广泛的单片机, 也是最多地被电子设计工程师掌握的单片机。市场上关于单片机的书籍资料有很大一部分是基于 80C51 系列的, 各种 80C51 系列单片机的开发工具如汇编器、编译器、仿真器和编程器等也很容易找到。另外, 除了 Intel 公司, 还有 Atmel、Winbond、Philips、Temic、Issi 和 LG 等公司都生产兼容 80C51 的产品。因此用户在采购时具有广泛的选择余地, 而且由于激烈的竞争关系, 各兼容生产厂家不断推出性价比更高的产品, 选用该系列的用户就能获得更大的价值。大量熟练的用户群、充足的支持工具、充沛的货源, 是 80C51 兼容系列单片机的市场优势。所以自从 80C51 系列单片机推出以来, 虽然其他的公司也推出了许多新的单片机系列, 但是 80C51 系列单片机及其兼容产品仍然占据了国内市场的很大份额。

### 2. TI 公司的超低功耗 Flash 型 MSP430 系列单片机

关于超低功耗单片机, 有业界最佳“绿色微控制器”(Green MCUs)称号的 TI 公司的 MSP430 Flash 系列单片机, 是目前业界所有内部集成闪速存储器(Flash ROM)产品中功耗最低的, 消耗功率仅为其他闪速微控制器(Flash MCUs)的 1/5。在 3V 工作电压下其耗电电流低于  $350\mu\text{A}/\text{MHz}$ , 待机模式仅为  $1.5\mu\text{A}/\text{MHz}$ , 具有 5 种节能模式。该系列产品的工作温度范围为 -40°C~85°C, 可满足工业应用要求。MSP430 微控制器可广泛地应用于煤气表、水表、电子电度表、医疗仪器、火警智能探头、通信产品、家庭自动化产品、便携式监视器及其他低耗能产品。由于 MSP430 微控制器的功耗极低, 可设计出只需一块电池就可以使用长达 10 年的仪表应用产品。MSP430 Flash 系列的确是不可多得的高性价比单片机。

### 3. OKI 低电压、低功耗单片机

OKI 公司的高性价比 4 位机 MSM64K 系列也是低功耗低电压的微控制器, 其工作电压可低至 1.25 V, 使用 32 kHz 的工作频率, 典型工作电流可低至  $3\sim 5\mu\text{A}$ , HALT(关断)模式下小于  $1\mu\text{A}$ , 而其功能却并不逊色, 片内集成了 LCD(液晶显示器)驱动器, 可方便地与液晶显示器接口, 具有片内掩模(Mask)的程序存储器, 有些型号还带有串口、RC 振荡器、看门狗、ADC(模/数转换器)、PWM(脉宽调制)等, 几乎不需要外扩芯片即可满足应用, 工作温度范围可达 -40°C~85°C, 提供 PGA 封装和裸片。该系列微控制器应用广泛, 适用于使用 LCD 显示、电池供电的设备, 如掌上游戏机、便携式仪表(体温计、湿度计)、智能探头、定时器(时钟)等低成本、低功耗的产品。

#### 4. ST 公司的 ST62 系列单片机

美国 ST 微电子公司是一家独立的全球性公司，专门从事应用于半导体集成电路的设计、生产、制造和销售，以及生产各种微电子应用中的分立器件。应用领域涉及电子通信系统、计算机系统、消费类产品、汽车应用、工业自动化和控制系统等。ST 公司可提供满足各种场合的单片机或微控制器，其中，ST62 系列 8 位单片机以其简单、灵活、低价格等特点，特别适用于汽车、工业、消费领域的嵌入式微控制系统。ST62 系列提供多种不同规格的单片机以满足各种需要，存储器从 1 KB 到 8 KB，有 ROM、OTP、EPROM、E<sup>2</sup>PROM、Flash E<sup>2</sup>PROM，I/O 口从 9 个到 22 个，引脚从 16 个到 42 个，还有 ADC、LCD 驱动、看门狗、定时器、串行口、电压监控等部件。ST62 单片机采用独特的制造工艺和技术，大大提高了抗干扰能力，能适应于各种恶劣环境。

#### 5. AD 公司的带 A/D 与 D/A 转换器的单片机

ADμC812 是 AD 公司推出的全集成 12 位数据采集系统，片内集成了 8 路 12 位高性能的自校准 ADC、2 路 12 位 DAC 和与 80C51 指令兼容的 8 位 MCU。AD 公司最近又推出了 16 位和 24 位 ADC 的 ADμC816 和 ADμC824，其他性能特性与 ADμC812 的基本相同。

ADμC812 MCU 包括 8 KB 的 Flash 程序存储器、640 B 的 Flash 数据存储器、256 B 的 RAM 和与 80C51 兼容的内核，并且具有看门狗定时器、电源监视器及 ADC DMA 功能，32 个可编程 I/O 口、I<sup>2</sup>C/SPI 兼容和标准 UART 串行通信接口。芯片具有正常、空闲和掉电 3 种工作模式，非常适合低功耗应用的电源管理方案，如智能传感器、电池供电系统（可移动 PC、手持仪器、终端）、瞬时捕捉系统、DAS 和通信系统等。

#### 6. ATMEL 公司的 AVR 高速嵌入式单片机

ATMEL 公司是世界上著名的生产高性能、低功耗、非易失性存储器和各种数字模拟 IC 芯片的半导体制造公司。在单片微控制器方面，ATMEL 公司有基于 8051 内核、基于 AVR 内核和基于 ARM 内核的三大系列单片机产品。

ATMEL 公司的 AVR 是 8 位单片机中第一个真正的 RISC 结构的单片机。它采用了大型快速存取寄存器组、快速的单周期指令系统以及单级流水线等先进技术，使得 AVR 单片机具有高达 1 MIPS/MHz 的高速运行处理能力。

AVR 单片机内嵌高质量的 Flash ROM 程序存储器，擦写方便，支持 ISP 和 IAP，便于产品的调试、开发、生产、更新。内嵌的 E<sup>2</sup>PROM 可长期保存关键数据，避免断电丢失。片内大容量的 RAM 不仅能满足一般场合的使用，同时也更有效地支持使用高级语言开发系统程序，并可像 MCS-51 单片机需要大容量的 RAM 时那样只能在外部扩展。

AVR 单片机的 I/O 线全部带可设置的上拉电阻、可单独设定为输入/输出、可设定（初始）高阻输入、驱动能力强（可省去功率驱动器件）等特性，使得 I/O 口资源灵活、功能强大、可充分利用。AVR 单片机有自动上电复位电路、独立的看门狗电路、低电压检测电路 BOD，多个复位源（自动上下电复位、外部复位、看门狗复位、BOD 复位），可设置的启动后延时运行程序，增强了嵌入式系统的可靠性。

AVR 单片机具有多种省电休眠模式，且可宽电压运行（5~1.8 V），抗干扰能力强，可降低一般 8 位机中的软件抗干扰设计工作量和硬件的使用量。

AVR 单片机技术体现了单片机集多种器件（包括 Flash 程序存储器、看门狗、E<sup>2</sup>PROM、同/异步串行口、TWI、SPI、A/D 模数转换器、定时器/计数器等）和多种功能（增强可靠性的复位系统、降低功耗抗干扰的休眠模式、品种多门类全的中断系统、具输入捕获和比较匹配输出等多样化功能的定时器/计数器、具替换功能的 I/O 端口……）于一身，充分体现了单片机技术的从“片自为战”向“片上系统 SoC”过渡的发展方向。

ATMEL 公司在推出 8 位 AVR 单片机之后，又推出了性价比更高的 16 位和 32 位的 AVR 单片机供用户选用。

## 7. 基于 ARM 核的 32 位单片机

ARM (Advanced RISC Machine) 是一种通用的 32 位 RISC 处理器。32 位是指处理器的外部数据总线是 32 位的，与 8 位和 16 位的相同主频处理器相比，性能更强大。ARM 是一种功耗很低的高性能处理器，如 ARM7TDMI 具有每瓦产生 690 MIPS (百万条指令/秒) 的能力，已被证明在工业界处于领先水平。ARM 公司并不生产芯片，而是将 ARM 的技术授权其他公司生产。ARM 本质上并不是一种芯片，而是一种芯片结构技术，不涉及芯片生产工艺。授权生产 ARM 结构芯片的公司采用不同的半导体技术，面对不同的应用进行扩展和集成，标有不同的系列号。目前可以提供含 ARM 核 CPU 芯片的著名半导体公司有：英特尔、德州仪器、三星半导体、摩托罗拉、飞利浦半导体、意法半导体、亿恒半导体、科胜讯、ADI 公司、安捷伦、高通公司、Atmel、Intersil、Alcatel、Altera、Cirrus Logic、Linkup、Parthus、LSI Logic、Micronas、Silicon Wave、Virata、Portalplayer Inc.、NetSilicon、Parthus。ARM 的应用范围非常广泛，如嵌入式控制——汽车、电子设备、保安设备、大容量存储器、调制解调器、打印机，数字消费产品——数码相机、数字式电视机、游戏机、GPS、机顶盒，便携式产品——手提式计算机、移动电话、PDA、灵巧电话。

# 1.8 单片机嵌入式系统的应用领域

单片机嵌入式系统由于其体积小、功耗低、价格低廉，且具有逻辑判断、定时计数、程序控制等多种功能，因此广泛应用于仪器仪表、家用电器、医用设备、航空航天、专用设备的智能化管理及过程控制等领域。下面简单介绍一些典型的应用。

## 1. 单片机在智能仪表中的应用

单片机具有体积小、功耗低、控制功能强、扩展灵活、微型化和使用方便等优点，被广泛应用于仪器仪表中，结合不同类型的传感器，可实现诸如电压、功率、频率、湿度、温度、流量、速度、厚度、角度、长度、硬度、压力等物理量的测量。采用单片机控制使得仪器仪表数字化、智能化、微型化，且功能比起采用电子或数字电路更加强大，提高了其性能价格比，如精密的测量设备（功率计、示波器、各种分析仪）。

## 2. 单片机在机电一体化中的应用

机电一体化是机械工业发展的方向。机电一体化产品是指集机械技术、微电子技术、计算机技术、传感器技术于一体，具有智能化特征的机电产品，如微机控制的车床、钻床等。单片机作为产品中的控制器，能充分发挥其体积小、可靠性高、功能强等优点，可大大提高机器的自动化、智能化程度。可编程顺序控制器也是一个典型的机电控制器，其核心常常就是由一个单片机构成的。

## 3. 单片机在实时控制中的应用

单片机广泛地应用于各种实时控制系统中。例如，在工业测控、航空航天、尖端武器等各种实时控制系统中，都可以使用单片机作为控制器。单片机的实时数据处理能力和控制功能，能使系统保持在最佳工作状态，提高系统的工作效率和产品质量。再如机器人，每个关节或动作部位都是一个单片机实时控制系统。

## 4. 单片机在分布式多机系统中的应用

在比较复杂的系统中，常采用分布式多机系统。多机系统一般由若干功能各异的单片机嵌入式系

统组成，各自完成特定的任务，它们通过串行通信相互联系、协调工作。单片机在这种系统中往往作为一个终端机，安装在系统的某些节点上，对现场信息进行实时测量和控制。单片机的高可靠性和强抗干扰能力，使它可以被置于恶劣环境的前端工作。

## 5. 消费类电子产品控制

该应用主要反映在家电领域，如洗衣机、空调器、汽车电子与保安系统、电视机、录像机、DVD机、音响设备、电子秤、IC卡、手机、BP机等。在这些设备中使用单片机机芯之后，其控制功能和性能大大提高，并实现了智能化、最优化控制。

## 6. 终端及外部设备控制

在计算机网络终端设备〔如银行终端、商业 POS（自动收款机）、复印机等〕和计算机外部设备（如打印机、绘图机、传真机、键盘和通信终端等）中使用单片机，使其具有计算、存储、显示、输入等功能，具有和计算机连接的接口，使计算机的能力及应用范围大大提高，可以更好地发挥计算机的性能。

可以毫不夸张地说：凡是能想到的地方，单片机都可以用得上。全世界单片机的年产量数以亿计，应用范围之广，花样之多，一时难以详述。单片机应用的意义不仅在于它的广阔应用范围和所带来的经济效益，更重要的还在于从根本上改变了传统的控制系统设计思想和设计方法。从前，必须由模拟电路或数字电路实现的大部分控制功能，现在可以使用单片机通过软件方法实现。这种以软件取代硬件并能提高系统性能的控制技术称为微控制技术。微控制技术标识着一种全新概念，随着单片机应用的推广普及，微控制技术必将不断发展和日趋完善，而单片机的应用必将更加深入、更加广泛。

单片机与常用的 TTL、CMOS 数字集成电路相比，掌握起来不太容易，问题在于单片机具有智能化功能，不仅要学习其硬件的使用方法，还要学习其软件的使用方法，而软件设计需要有一定的创造性。这虽然给学习者带来了一定的难度，但这也正是它的迷人之处。一个普通的消毒碗柜配上装有专用软件的单片机，虽然成本增加了 10 余元，但市场售价可高出 300 余元。理由何在？原因在于它的技术含量高，其中的软件凝聚着开发者的聪明和智慧。

由此可见，单片机技术无疑将是 21 世纪最为活跃的新一代电子应用技术。随着微控制技术（以软件代替硬件的高性能控制技术）的发展，单片机的应用必将导致传统控制技术发生巨大变革。换言之，单片机的应用是对传统控制技术的一场革命。因此，学习单片机的原理，掌握单片机嵌入式系统设计技术，具有划时代的意义。

## 1.9 单片机嵌入式系统的发展趋势

**低功耗化：**目前生产的 CHMOS 电路已达到 LSTTL 的速度，传输延迟时间小于 2 ns，它的综合优势已优于 TTL 电路。采用 CHMOS 电路的微控制器的功耗已至 mA 级，甚至 1 μA 以下；使用电压在 3~6 V，完全适应电池工作。低功耗化的效应不仅是功耗低，而且带来了产品的高可靠性、高抗干扰能力以及产品的便携化。

**低电压化：**几乎所有的微控制器都有待机和休眠等省电运行方式。允许使用的电压范围越来越宽，一般在 3~6 V 范围内工作。低电压供电的单片机电源下限已达 1~2 V。目前 0.8 V 供电的单片机已经问世。

**低噪声与高可靠性：**为提高微控制器的抗电磁干扰能力，使产品能适应恶劣的工作环境，满足电磁兼容性方面更高标准的要求，各制造商在单片机内部电路中都采用了新的技术措施。

**大容量化：**以往单片机内的 ROM 为 1~4 KB，RAM 为 64~128 B。但在需要复杂控制的场合，

该存储容量是不够的，必须进行外接扩充。为了适应这种领域的要求，须运用新的工艺，使片内存储器大容量化。例如，80C51 单片机系列某些型号的单片机片内 ROM 最大可达 64 KB，RAM 最大为 4 KB。

**高性能化：**主要是指进一步改进 CPU 的性能，加快指令运算的速度和提高系统控制的可靠性。采用精简指令集（RISC）结构和流水线技术，可以大幅度提高运行速度。现指令速度最高者已达 100 MIPS（Million Instruction Per Seconds，兆指令每秒），并加强了位处理功能、中断和定时控制功能。这类单片机的运算速度比标准的单片机高出 10 倍以上。由于这类单片机有极高的指令速度，因此可以用软件模拟其 I/O 功能，由此引入了虚拟外设的新概念。

**小容量、低价格化：**与上述相反，以 4 位、8 位机为中心的小容量、低价格化也是发展动向之一。这类单片机的用途是把以往用数字逻辑集成电路组成的控制电路单片化，可广泛用于家电产品。

**外围电路内装化：**这也是单片机发展的主要方向。随着集成度的不断提高，有可能把众多的各种外围功能器件集成在片内。除了一般必须具有的 CPU、ROM、RAM、定时器/计数器等以外，片内集成的部件还有模/数转换器、DMA 控制器、声音发生器、监视定时器、液晶显示驱动器、彩色电视机和录像机用的锁相电路等。

**串行扩展技术：**在很长一段时间里，通用型单片机通过三总线结构扩展外围器件成为单片机应用的主流结构。随着低价位 OTP（One Time Programable）及各种类型片内程序存储器的发展，加之外围接口不断进入片内，推动了单片机“单片”应用结构的发展。特别是 I<sup>2</sup>C、SPI 等串行总线的引入，可以使单片机的引脚设计得更少，单片机系统结构更加简化及规范化。

## 本章小结

现代计算机技术发展的两大分支：通用计算机系统与嵌入式计算机系统。

嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，并且软硬件可裁剪，适用于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。

嵌入式系统是由嵌入式硬件和嵌入式软件组成的。

嵌入式系统的种类按形态可分为设备级（工控机）、板级（单板、模块）、芯片级（MCU、SoC）。嵌入式系统的种类按应用可分为工业应用和消费电子。

嵌入式处理器是指应用在嵌入式计算机系统中的处理器，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 位、64 位嵌入式 CPU。

嵌入式处理器根据用途可分为：嵌入式微处理器、嵌入式微控制器、嵌入式数字信号处理器、嵌入式片上系统。在嵌入式系统领域中的微处理器和微控制器的划分界限并非十分严格。

够用、成本和供货是选择嵌入式处理器的 3 个主要考虑的因素。

嵌入式操作系统负责嵌入式系统的全部软硬件资源的分配、任务调度，控制、协调并发活动。

嵌入式系统应用高端主要指基于 32/64 位微处理器的嵌入式硬件系统。嵌入式系统应用低端主要指基于 8/16 位单片机的嵌入式硬件系统。

单片机嵌入式系统具有体积小、价格低、性能强大、速度快、用途广、灵活性强、可靠性高等特点。

单片机嵌入式系统广泛应用于仪器仪表、家用电器、医用设备、航空航天、专用设备的智能化管理及过程控制等领域。

 习 题 1

1. 你是如何理解嵌入式系统的“嵌入性”的？
2. 通用计算机系统与嵌入式计算机系统各自的技术要求与技术发展方向有何不同？
3. 什么是嵌入式系统？从两个方面说明嵌入式系统的基本概念。
4. 简述嵌入式系统与嵌入式设备的关系。
5. 为何说嵌入式系统是专用计算机应用系统？嵌入式系统由哪些部分组成？
6. 简述 MCU、MPU、DSP 和 SoC 之间的区别和联系。
7. 嵌入式系统主要有哪些特点？
8. 嵌入式操作系统一般如何分类？
9. 说明使用嵌入式操作系统的优缺点。
10. 简述单片机的发展历史。
11. 你是如何理解嵌入式系统应用的高低端的？
12. 简述单片机嵌入式系统的特点。
13. 简述单片机的技术指标。
14. 通过查阅资料，谈谈单片机嵌入式系统产品开发和应用的发展趋势如何。
15. 举出几个嵌入式系统应用的例子，通过查资料和独立思考，分析这些嵌入式系统产品主要由哪几部分组成，每个组成部分分别完成什么功能（提示：数码相机、办公类产品、工业控制类产品的例子等）。