

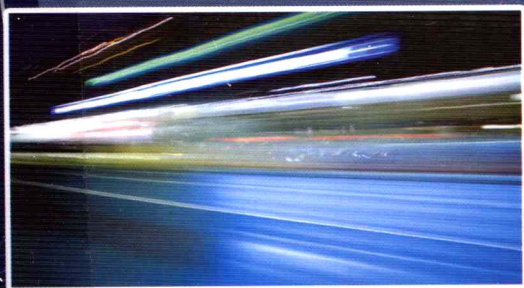


普通高等教育“十二五”规划教材
电子信息科学与工程类专业规划教材

单片机原理与 嵌入式系统设计

——原理、应用、Proteus仿真、实验设计

张 齐 朱宁西 毕 盛 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材

电子信息科学与工程类专业规划教材

单片机原理与 嵌入式系统设计

——原理、应用、Proteus 仿真、实验设计

张 齐 朱宁西 毕 盛 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍基于单片机的嵌入式系统的基本原理和应用技术,共 10 章,主要内容包括单片机与嵌入式系统概述、嵌入式系统基础知识、单片机嵌入式系统的开发环境、80C51 系列单片机硬件基础及编程语言、80C51 单片机内嵌外设和外部扩展应用、多任务实时操作系统 RTX-51 及应用实例、教学实验和课程设计等。本书实例丰富,以 C51 高级语言作为编程教学语言,实用性较强。提供电子课件、大部分程序的源代码和 Keil μ Vision2 IDE 调试配合的 Proteus 单片机仿真电路。

本书可作为高等学校电子、计算机、机械等专业嵌入式系统和单片机等课程的教材,也可作为相关领域应用工程师和业余爱好者的参考书。

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

单片机原理与嵌入式系统设计:原理、应用、Proteus 仿真、实验设计/张齐,朱宁西,毕盛编著.

—北京:电子工业出版社,2011.8

电子信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-14083-9

I. 单… II. ①张…②朱…③毕… III. ①单片微型计算机—高等学校—教材 ②单片微型计算机—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP368.1 ②TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 136849 号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:王羽佳 特约编辑:王 崧

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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

开 本:787×1092 1/16 印张:21.25 字数:602.7 千字

印 次:2011 年 8 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

2003年,国内单片机教学以8位机和16位机为主,80C51单片机是其中的主流机型,尽管当时许多使用80C51单片机开发产品的工程师已开始使用C51高级语言开发软件,但在高校里,许多老师仍以汇编语言作为教学语言,许多大学生感到单片机的开发抽象且难以理解,从此放弃进入此行业。为了在高校推广单片机高级语言教学,笔者在广泛收集材料的基础上,于2004年在电子工业出版社出版了《单片机应用系统设计技术——基于C语言编程》,前后印刷4次,被不少学校、培训单位选为教材。

2008年秋季学期,因课程调整,遂产生对教材进行修订的想法,第1版教材到2008年已过去4年,国内外单片机系统软硬件开发技术也得到了很大发展,如在我国香港地区乃至国外单片机开发中,非常普遍地应用了Proteus虚拟仿真技术。Proteus提供了一种可视化仿真开发环境,很好地解决了单片机及其外围电路的设计和协同仿真问题,可以在没有实际单片机系统硬件的条件下,利用PC进行虚拟仿真,实现单片机系统的软硬件协同设计。在原理图设计阶段即可对系统性能进行评估,验证所设计的电路是否达到了功能和性能要求,使设计过程变得简单容易。修订教材的想法在电子工业出版社的大力支持下很快变为现实,《单片机应用系统设计技术——基于C51的Proteus仿真(第2版)》于2009年与读者见面,随后又出版了配套的仿真实验教材《单片机原理与应用系统设计——基于C51的Proteus仿真实验与解题指导》。至2011年1月底已重印4次,被国内30多所高校选为教材,得到读者的广泛好评。

笔者长期从事与嵌入式系统有关的科研与教学工作,近年来一直有这样的愿望,即编写一部嵌入式系统课程方面的教材,内容包括嵌入式系统基础、8位单片机原理与应用、32位单片机原理与应用。大量的实践经验表明,只有学习完单片机和C语言,并已经很好地掌握了其中的知识点,才有可能进一步学习ARM、Linux等高级嵌入式课程。我们最终决定将上述内容分为两个不同层次编写:本书为第一层次是基于8位单片机的嵌入式计算机系统,这个层次是面向目前最广泛的中低端应用,带有明显的电子系统设计特点。第二个层次则是基于32位单片机的嵌入式计算机系统,这个层次主要是面向中高端应用,如移动信息设备、网络产品等。从8位AVR或51单片机,到32位ARM、Linux和Windows Embedded等高端嵌入式系统,使读者可以从一个没有任何基础的初学者,循序渐进地成长为可以进行复杂嵌入式系统设计和开发的工程师。教学计划上,建议两个层次安排在不同学期,前者为嵌入式系统的入门教材,作为必修课,后者为嵌入式系统的高级教程,作为高年级选修课或作为研究生课程。

许多公司推出了1T规格的80C51单片机,即1个时钟周期为1个机器周期,与标准的80C51相比,指令执行速度提高了约12倍;同时进一步增强了单片机的SoC功能,如片内集成大容量存储器、A/D转换器、PWM、DataFlash、多种串行通信接口等外设;并直接使用标准的异步串口下载程序。基于这些特性,第一层次的机型仍选用80C51单片机。

全书包含理论知识、教学实验和课程设计,共10章。

第1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。

第2章阐述与计算机有关的数学知识及嵌入式计算机系统中最基本的单元电路。

第3章从实用的角度介绍单片机化产品的研制步骤和软硬件开发环境,着重介绍Keil C51的集成开发环境 μ Vision2 IDE和支持微处理芯片仿真的Proteus VSM软件。

第4章阐述 80C51 单片机中的 CPU 结构、存储器结构及 I/O 端口的功能。

第5章阐述单片机指令系统和程序设计语言。

第6章阐述 80C51 单片机的内嵌外设：中断系统、定时器/计数器、串行口的工作原理与应用编程。

第7章阐述 80C51 单片机系统扩展与应用编程。

第8章以电梯控制器为设计实例，介绍 80C51 单片机嵌入式系统硬件电路设计和软件编程方法。

第9章阐述多任务实时操作系统 RTX-51，并以 Proteus 交通信号灯控制器仿真电路为实例，介绍 RTX-51 TINY 实时操作系统的应用。

第10章为教学实验和课程设计内容，共包含 11 个教学实验和 3 个课程设计。

本书大部分程序均配有与此程序相对应的 Proteus 格式的电路原理图，打开原理图文件，单击“运行”按钮可以看到该示例程序的仿真运行情况。Keil μ Vision2 IDE 调试配合 Proteus 单片机仿真电路，解决了以往单片机课堂教学无法现场演示的问题。

为了方便教师备课和读者学习，本书除提供 PPT 格式的教学课件外，还包括各章的 Proteus 仿真电路、相应的源程序及工程文件，单击 PPT 课件中的 CAI 图标，即可打开相应的仿真电路。

本书由张齐、朱宁西和毕盛编著。在成书过程中，莫锦辉、李蕾、赵峙岳、曾令华、李大新、张英彬、胡佳、劳炽元、李攀登、杨琴波、何俊伟、王京林、甘义成等参与了部分内容的编写、仿真电路设计和程序调试等工作，限于幅面，封面和扉页上无法一一署名。

本书得以顺利出版与电子工业出版社的大力支持和帮助是分不开的，王羽佳编辑对本书的出版做了大量细致的工作。本书部分程序示例来自于互联网，许多网友只是用昵称或符号表示，无法署名，在此一并表示衷心的感谢。

本书配套电子课件和大部分程序的源代码以及 Keil μ Vision2 IDE 调试配合的 Proteus 单片机仿真电路，请登录华信教育资源网 <http://www.hxedu.com.cn/>，免费注册后，即可直接下载。或与电子工业出版社的王羽佳编辑联系（wylj@phei.com.cn）。

由于作者水平有限，本书一定还有不完善之处，殷切地期望读者给予批评指正。

作者

2011年7月

目 录

第 1 章 单片机与嵌入式系统概述	(1)	第 2 章 嵌入式系统基础知识	(20)
1.1 现代计算机的技术发展史	(1)	2.1 数制与编码	(20)
1.1.1 始于微型计算机时代的嵌入式应用	(1)	2.1.1 进位计数制	(20)
1.1.2 现代计算机技术的两大分支	(1)	2.1.2 进位计数制的相互转换	(21)
1.1.3 两大分支发展的里程碑事件	(1)	2.1.3 数码和字符的代码表示	(22)
1.2 嵌入式系统的定义与特点	(2)	2.2 数字集成电路	(24)
1.2.1 嵌入式系统的定义	(2)	2.2.1 常用的逻辑门电路	(24)
1.2.2 嵌入式系统组成	(2)	2.2.2 集电极开路门输出电路	(26)
1.2.3 嵌入式系统中的有关概念	(3)	2.2.3 常用组合逻辑电路	(28)
1.2.4 嵌入式系统的特点	(3)	2.2.4 常用时序逻辑电路	(32)
1.2.5 嵌入式系统的种类与发展	(5)	2.3 存储器电路	(34)
1.3 嵌入式处理器	(5)	2.3.1 存储器概述	(34)
1.3.1 嵌入式处理器简介	(5)	2.3.2 存储器有关概念	(34)
1.3.2 嵌入式处理器的分类	(6)	2.3.3 RAM 存储器	(35)
1.3.3 几种嵌入式处理器之关系	(8)	2.3.4 ROM 存储器	(39)
1.3.4 如何选择嵌入式处理器	(8)	2.3.5 闪速存储器	(41)
1.4 嵌入式操作系统	(9)	2.4 电源电路	(42)
1.4.1 嵌入式操作系统特点	(9)	2.5 时钟与复位电路	(45)
1.4.2 嵌入式操作系统分类	(10)	2.5.1 时钟电路	(45)
1.4.3 使用嵌入式操作系统的优缺点	(10)	2.5.2 复位电路简介	(46)
1.5 基于单片机的嵌入式系统	(10)	2.5.3 简单复位电路	(46)
1.5.1 单片机开创了嵌入式系统独立发展道路	(10)	本章小结	(49)
1.5.2 单片机的技术发展史	(11)	习题 2	(49)
1.5.3 嵌入式系统应用的高低端	(11)	第 3 章 单片机嵌入式系统的开发环境	(51)
1.5.4 单片机嵌入式系统的特点	(12)	3.1 单片机嵌入式系统的研制步骤和方法	(51)
1.6 单片机的分类和技术指标	(13)	3.1.1 总体设计	(51)
1.6.1 单片机的分类	(13)	3.1.2 硬件系统	(52)
1.6.2 单片机的技术指标	(13)	3.1.3 软件系统	(53)
1.7 常用的单片机系列	(14)	3.2 单片机嵌入式系统开发的软硬件环境	(54)
1.8 单片机嵌入式系统的应用领域	(16)	3.2.1 单片机嵌入式系统开发的软硬件环境构成	(54)
1.9 单片机嵌入式系统的发展趋势	(17)	3.2.2 单片机嵌入式系统开发工具选择原则	(55)
本章小结	(18)		
习题 1	(19)		

3.2.3 使用 JTAG 界面单片机仿真开发环境.....	(56)	第 5 章 80C51 单片机软件基础知识	(113)
3.2.4 单片机的在线编程.....	(56)	5.1 80C51 单片机指令系统概述.....	(113)
3.3 Keil C51 高级语言集成开发环境 —— μ Vision2 IDE.....	(57)	5.1.1 指令的概念.....	(113)
3.3.1 μ Vision2 IDE 主要特性.....	(57)	5.1.2 指令系统说明.....	(114)
3.3.2 μ Vision2 IDE 集成开发环境.....	(58)	5.1.3 80C51 指令系统助记符.....	(115)
3.3.3 μ Vision2 IDE 的使用.....	(61)	5.1.4 指令系统中的特殊符号.....	(116)
3.3.4 Keil C51 中 printf 库函数.....	(70)	5.2 80C51 单片机寻址方式	(117)
3.4 基于 Proteus 的单片机系统仿真	(70)	5.2.1 寄存器寻址方式.....	(117)
3.4.1 Proteus 7 Professional 界面介绍.....	(71)	5.2.2 直接寻址方式.....	(117)
3.4.2 绘制电路原理图.....	(73)	5.2.3 寄存器间接寻址方式.....	(117)
3.4.3 Proteus VSM 与 μ Vision2 的联调.....	(77)	5.2.4 立即寻址方式.....	(119)
3.4.4 Proteus VSM 中的电源、复位与时钟.....	(80)	5.2.5 变址间接寻址方式.....	(119)
本章小结.....	(80)	5.2.6 相对寻址方式.....	(119)
习题 3.....	(81)	5.2.7 位寻址方式.....	(119)
第 4 章 80C51 单片机硬件基础知识	(82)	5.3 80C51 单片机指令系统	(121)
4.1 MCS-51 系列及 80C51 系列单片机简介	(82)	5.3.1 数据传送类指令.....	(121)
4.1.1 MCS-51 系列和 80C51 系列单片机.....	(82)	5.3.2 算术运算类指令.....	(125)
4.1.2 80C51 系列单片机的三次技术飞跃.....	(83)	5.3.3 逻辑运算类指令.....	(127)
4.1.3 高性能 80C51 单片机的特点.....	(84)	5.3.4 控制转移类指令.....	(130)
4.2 80C51 系列单片机外引脚功能	(84)	5.3.5 位操作指令.....	(132)
4.3 80C51 单片机内部结构	(88)	5.4 80C51 汇编语言程序设计	(136)
4.3.1 中央处理器 (CPU).....	(88)	5.4.1 伪指令.....	(136)
4.3.2 存储器组织.....	(90)	5.4.2 汇编语言程序设计举例.....	(137)
4.3.3 并行输入/输出端口结构.....	(99)	5.5 80C51 单片机 C51 程序设计语言	(138)
4.3.4 时钟电路.....	(104)	5.5.1 C51 的标识符和关键字.....	(140)
4.3.5 复位电路.....	(106)	5.5.2 C51 编译器能识别的数据类型.....	(141)
4.4 低功耗运行方式	(108)	5.5.3 变量的存储种类和存储器类型.....	(144)
4.4.1 电源控制寄存器 PCON.....	(108)	5.5.4 绝对地址的访问.....	(149)
4.4.2 待机方式.....	(109)	5.5.5 中断服务程序.....	(151)
4.4.3 掉电方式.....	(109)	5.6 C51 的运算符和表达式	(152)
4.5 80C51 单片机最小系统	(110)	5.6.1 赋值运算符.....	(152)
本章小结.....	(111)	5.6.2 算术运算符.....	(152)
习题 4.....	(111)	5.6.3 关系运算符.....	(153)
		5.6.4 逻辑运算符.....	(153)
		5.6.5 位运算符.....	(153)
		5.6.6 复合运算符.....	(154)
		5.6.7 指针和地址运算符.....	(154)
		5.7 C51 的库函数	(155)
		5.7.1 本征库函数和非本征库函数.....	(155)
		5.7.2 几类重要的库函数.....	(155)

5.8 C51 的应用技巧	(159)	7.4 单片机系统中的键盘接口技术	(228)
本章小结	(162)	7.4.1 键盘工作原理及抖动	(228)
习题 5	(164)	7.4.2 独立式键盘与工作原理	(229)
第 6 章 80C51 单片机内嵌外设及应用	(166)	7.4.3 行列式键盘与工作原理	(230)
6.1 中断系统和外中断	(166)	7.4.4 键盘扫描的控制程序	(231)
6.1.1 中断技术概述	(166)	7.5 单片机系统中的 LED 数码 显示器	(232)
6.1.2 80C51 单片机中断系统	(168)	7.5.1 LED 显示器的结构与原理	(232)
6.1.3 C51 中断服务函数	(173)	7.5.2 LED 静态显示接口	(233)
6.1.4 外部中断的应用实例	(176)	7.5.3 LED 动态扫描显示接口	(234)
6.2 定时器/计数器	(178)	7.6 单片机系统中的 LCD 液晶 显示器	(236)
6.2.1 定时器/计数器 0、1 的结构及 工作原理	(179)	7.6.1 字符型液晶显示模块的组成和 基本特点	(236)
6.2.2 定时器/计数器 0、1 的四种 工作方式	(180)	7.6.2 LCD1602 模块接口引脚功能	(237)
6.2.3 定时器/计数器对输入信号的 要求	(187)	7.6.3 LCD1602 模块的操作命令	(238)
6.2.4 定时器/计数器 0、1 的编程和应用 实例	(187)	7.6.4 LCD1602 与 89C52 单片机接口 与编程	(241)
6.2.5 定时器/计数器 2	(192)	7.6.5 点阵式图形 LCD 显示器的 组成和基本特点	(242)
6.3 串行通信	(194)	7.7 日历时钟接口芯片及应用	(247)
6.3.1 串行通信基础知识	(194)	7.7.1 并行接口日历时钟芯片 DS12887	(247)
6.3.2 80C51 串行接口	(197)	7.7.2 串行接口日历时钟芯片 DS1302	(250)
6.3.3 应用实例	(205)	7.8 单片机数据采集系统	(253)
本章小结	(210)	7.8.1 并行 A/D 转换器 ADC0809	(253)
习题 6	(212)	7.8.2 串行 A/D 转换器 TLC2543	(256)
第 7 章 单片机外部扩展资源及应用	(214)	7.9 I ² C 总线接口电路 E ² PROM 及应用	(258)
7.1 单片机外部扩展资源和扩展 编址技术概述	(214)	7.9.1 串行 E ² PROM 电路 CAT24WCXX 概述	(258)
7.1.1 单片机外部扩展资源分类	(214)	7.9.2 串行 E ² PROM 芯片的操作	(259)
7.1.2 单片机系统扩展结构与编址 技术	(215)	7.9.3 串行 E ² PROM 芯片与 89C52 的 接口与编程	(261)
7.1.3 单片机系统存储器扩展方法	(217)	7.10 RS-232C 和 RS-485/422 通信 接口	(262)
7.2 并行 I/O 口扩展	(218)	7.10.1 RS-232C 接口的物理结构、电气 特性、信号内容	(262)
7.2.1 8255 可编程并行 I/O 接口芯片	(218)	7.10.2 RS-485/422 接口	(268)
7.2.2 用 74HC 系列芯片扩展 I/O 接口	(223)	本章小结	(269)
7.3 大容量闪速存储器 Flash 的扩展	(225)	习题 7	(270)
7.3.1 Super Flash 39SF040 简介	(225)		
7.3.2 89C52 单片机和 39SF040 接口 方法	(227)		

第 8 章 单片机嵌入式系统设计实例	(272)	9.4 RTX-51 TINY 提供的系统函数	..... (292)
8.1 设计要求	..... (272)	9.5 RTX-51 TINY 的配置	..... (298)
8.2 总体方案	..... (272)	9.5.1 配置	..... (298)
8.3 硬件电路设计	..... (273)	9.5.2 库文件	..... (299)
8.4 软件设计	..... (275)	9.5.3 优化	..... (300)
8.4.1 主程序模块	..... (275)	9.6 基于 Proteus 的 RTX-51 应用	
8.4.2 每到一层的状态控制	..... (277)	实例——交通信号灯控制器	..... (300)
8.4.3 内部按键扫描	..... (277)	9.6.1 交通信号灯控制器设计要求	..... (300)
8.4.4 外部按键扫描	..... (277)	9.6.2 总体方案	..... (301)
8.5 仿真测试	..... (278)	9.6.3 硬件电路	..... (301)
8.5.1 测试正常功能	..... (278)	9.6.4 软件设计	..... (303)
8.5.2 测试异常功能	..... (279)	9.6.5 功能使用说明	..... (304)
本章小结	..... (279)	9.6.6 程序运行与测试	..... (305)
第 9 章 多任务实时操作系统 RTX-51	(280)	本章小结	..... (306)
9.1 RTX-51 实时多任务操作系统		习题 9	..... (307)
简介	..... (280)	第 10 章 教学实验和课程设计	(308)
9.1.1 单任务程序与多任务程序的		实验 1 单片机 I/O 口——流水灯	..... (308)
比较	..... (280)	实验 2 单片机 I/O 口——汽车灯光	
9.1.2 使用 RTX-51 TINY 的软硬件		控制器	..... (309)
要求	..... (282)	实验 3 外部中断	..... (311)
9.1.3 使用 RTX-51 TINY 的注意事项	..... (283)	实验 4 定时器	..... (312)
9.2 RTX-51 TINY 的任务管理	..... (284)	实验 5 计数器	..... (314)
9.2.1 定时器滴答中断	..... (284)	实验 6 单片机和 PC 通信	..... (315)
9.2.2 任务	..... (284)	实验 7 外部数据存储器的扩展	..... (318)
9.2.3 任务状态	..... (284)	实验 8 键盘与显示	..... (319)
9.2.4 事件	..... (285)	实验 9 串行日历时钟与字符 LCD	
9.2.5 任务调度	..... (285)	显示器	..... (321)
9.2.6 任务切换	..... (285)	实验 10 串行接口 A/D 转换器	..... (322)
9.3 如何使用 RTX-51 TINY	..... (288)	实验 11 RTX-51 TINY 计算机自动	
9.3.1 编写程序	..... (288)	打铃器	..... (324)
9.3.2 编译和连接	..... (289)	附录 A 指令速查表	(327)
9.3.3 调试	..... (289)	参考文献	(331)
9.3.4 实例——os_wait 函数的使用	..... (290)		

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了改装，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，则标志着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。

而目前在国内最常见、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

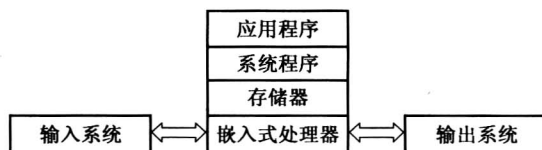


图 1.1 嵌入式系统组成

处理器进行处理,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 and 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

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。

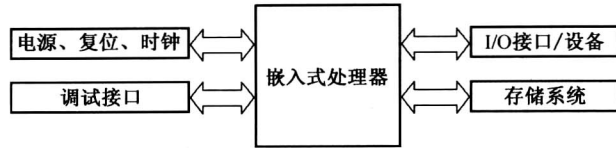


图 1.2 嵌入式硬件系统

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、E²PROM 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 I²C、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。

嵌入式系统通常是专门为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 and 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编程，能进一步降低功耗。