



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

嵌入式系统 原理与应用

第二版

吴旭光 牛云 何军红 编著



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

嵌入式系统原理与应用

第二版

吴旭光 牛云 何军红 编著



化学工业出版社

·北京·

本书以嵌入式系统的开发为核心,以 80C51 单片机及 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 嵌入式实时操作系统为重点讲解了嵌入式技术中的处理器及外设、嵌入式实时操作系统的一般原理及使用方法。并且考虑到嵌入式系统开发的特点,强调讲练结合,重要概念之后都有相应的应用指导和典型应用练习。使读者既能够深入地学习嵌入式系统的核心概念,也能对系统开发有一个比较全面的学习和理解。

本书的主要内容:嵌入式系统概述、MCS-51 单片机体系结构及特点、MCS-51 单片机指令系统、MCS-51 汇编程序设计及 C51 程序设计基础、80C51 单片机基本功能单元及其操作原理、单片机并行/串行扩展技术、嵌入式操作系统概述、嵌入式实时操作系统内核、 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 在 80C51 单片机上的移植、Proteus7.4 软件及 Keil 集成开发环境在单片机系统仿真中的应用入门、实验指导书。

本书可以作为高等理工院校自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、电子科学与技术等相关专业学生的教材,也可供从事嵌入式系统开发、系统控制的科研人员和工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统原理与应用 / 吴旭光, 牛云, 何军红编著.
2 版. —北京: 化学工业出版社, 2012.6
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-14059-3

I. 嵌… II. ①吴… ②牛… ③何… III. 微型计算机-系统设计-教材 IV. TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 072845 号

责任编辑: 唐旭华 郝英华
责任校对: 徐贞珍

文字编辑: 薛 维
装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16½ 字数 414 千字 2012 年 8 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

嵌入式系统技术是目前电子产品设计领域最为热门的技术之一，也是后 PC 时代的典型，目前在消费电子、网络通信、工业控制、机器人以及航空、航天、航海等领域都扮演着重要的角色，其影响不可低估。学习嵌入式操作系统、应用嵌入式技术已经成为计算机、电子和自动化、机电一体化等领域的学生和工程师比较感兴趣的课程和技术。

自从 2003 年下半年开始，国内许多高等院校都开始筹建“嵌入式系统”实验室，并在高年级本科生和研究生中开设课程。西北工业大学航海学院作为国防科工委重点建设项目之一，也已建设完成了学校第一个“嵌入式系统实验室”，作者本人也是该建设项目的负责人之一。本书第一版《嵌入式操作系统原理与应用》主要以 VxWorks 为讲授对象介绍嵌入式系统基础、操作系统内核、任务和任务间的通信与调度、嵌入式操作系统移植和嵌入式系统应用软件设计等内容。但是根据给学生授课的实际体会，在某些方面还存在着不足之处。硬件方面，ARM 处理器虽然功能强大但是体系结构过于复杂，由于学生之前没有嵌入式系统相关知识储备，因此在有限的课时下，并不能使学生对嵌入式处理器的基本原理理解得足够深刻；软件方面，由于 VxWorks 代码不公开，学生并不能完全理解嵌入式操作系统的实现原理、移植过程等知识要点，且 VxWorks 系统实验成本较高，不利于学生开展实验。因此，根据自动化专业教学改革要求，针对第一版的不足及读者的反馈意见，对原书进行了系统的调整。

硬件部分，加入单片机相关内容，力求通过简单但经典的处理器体系结构使学生理解嵌入式系统硬件基本组成原理，建立嵌入式系统处理器的基本概念和基本应用方法。为今后深入学习其他各种复杂嵌入式处理器打下坚实基础。软件方面，改以源代码公开的嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 为主要实例，讲授嵌入式操作系统相关知识，力求使学生不但会使用操作系统基本功能而且能明白其实现原理。另外，本书还增加了附录 A、B。附录 A 介绍了一种嵌入式系统仿真软件 Proteus 的使用，该软件可以仿真本书中出现的单片机、ARM 处理器或其他常用嵌入式处理器及其常用外围设备，使学生只要拥有一台 PC 就可以完成大量的嵌入式实验，进一步降低了嵌入式实验的门槛；附录 B 提供了与本书内容紧密结合的若干实验例程及实验指导书，根据嵌入式系统开发过程的实际工程应用，将授课的理论和实验教学相结合，形成从简单到复杂、从理论到实践的相对完整的课程体系。

全书共分 9 章和两个附录。主要内容如下。

第 1 章 嵌入式系统概述。主要介绍嵌入式系统的定义、特点、组成、发展及开发、调试的一般方法和步骤，为本书后续章节的理解打下基础。

第 2 章 MCS-51 单片机体系结构及特点。以 80C51 单片机为主，介绍嵌入式处理器的基本结构与工作原理，包括 CPU 结构、存储器配置、外部特性等内容。

第 3 章 MCS-51 单片机指令系统。主要介绍单片机的寻址方式，分类研究各种指令及其用法。

第 4 章 MCS-51 汇编程序设计及 C51 程序设计基础。分为两部分，第 1 部分为汇编程序设计，主要介绍 MCS-51 系列单片机的汇编语句结构、伪指令，在此基础上介绍汇编程序顺序、分支、循环以及查表等基本结构的实现方法，最后作为汇编语言应用实例，介绍分离

BCD 码转换、多字节乘除法等常用运算的实现方法。第 2 部分介绍单片机高级语言 C51 程序设计基础,着重介绍 C51 根据 MCS-51 结构特点而特有的数据类型、存储空间访问方法、中断服务函数定义方法和汇编与 C51 的混合编程方法及相关应用实例。

第 5 章 80C51 单片机基本功能单元及其操作原理。主要介绍单片机片内资源的工作机制及应用方法,包括中断系统、定时器、串行通信接口等。

第 6 章 单片机并行/串行扩展技术。单片机的片内资源有限,在复杂应用时,需要系统扩展。本章分为并行扩展和串行扩展两个部分。并行扩展部分主要研究利用总线扩展方式和 I/O 扩展方式对片外存储器、ADC、DAC、键盘、LED 显示器等进行扩展的软、硬件设计方法。串行扩展部分主要研究利用 UART 进行串行扩展的软、硬件设计方法。上述方法具有共性,可用于其他外设的扩展过程。

第 7 章 嵌入式操作系统概述。本章的内容包括操作系统的概念和结构、嵌入式系统的原理和结构、嵌入式系统软件开发设计、商用嵌入式操作系统等。为读者建立嵌入式操作系统打下基础,并建立设计嵌入式操作系统的基本概念。

第 8 章 嵌入式实时操作系统(RTOS)内核。本章介绍 RTOS 的结构和功能,包括内核、任务、任务的调度、任务间的同步和通信等。另外以 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的实时内核和任务编程接口为实例,介绍如何利用 RTOS 系统调用对资源进行分配和管理,并实现系统功能。

第 9 章 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 在 80C51 单片机上的移植。主要讲述了 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的可移植条件、移植步骤、移植时需要注意的问题等,本章需要根据文本叙述,仔细分析大量汇编代码,难度较大,对本章的学习有助于读者加深对单片机各种资源及实时操作系统的更深层次理解。

附录 A 主要介绍了嵌入式系统仿真、开发软件 Proteus 和常用集成开发环境 Keil 的基本使用方法和技巧。

附录 B 实验指导书。所列的实验,均是书中正文相关章节内容的应用实例,请读者注意配套学习。

书中的仿真实验程序包配有直接可以使用的 Proteus 工程和 Keil 工程,读者可以直接观察到实验结果。教师也可以基于这些基本实验设计自己的课堂演示实验,丰富课堂教学。

本书配套的电子课件和仿真实验程序包可通过 cipedu@163.com 索取。

在本书的编写和使用过程中,西北工业大学教务处和化学工业出版社的许多领导和同志都给予了关怀和指导,在此我们表示深深的谢意。课题组的许多老师都给予了极大的帮助,许多与作者有过合作的研究所的工程师也提出过许多具体和中肯意见。尤其是作者的研究生郝伟伟、马琰、苏冉、杨跃斌等也都参与了本书的编写或实验程序设计、调试,在此虽不能一一列举他们的名字,但我们向他们表示衷心的感谢。许多使用过本书的学生也曾经提出过许多宝贵的意见,我们向他们也表示深深的谢意。

由于编者水平有限,经验不足,疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者给予批评指正。

编著者
2012 年 6 月
西北工业大学

目 录

第 1 章 嵌入式系统概述1	2.3 单片机的中央处理器(CPU)结构..... 21
1.1 嵌入式系统概念..... 1	2.3.1 运算器..... 21
1.1.1 嵌入式系统的定义..... 1	2.3.2 总线逻辑控制部件..... 21
1.1.2 嵌入式系统的特点..... 1	2.4 单片机存储空间配置..... 21
1.1.3 嵌入式系统的种类..... 2	2.4.1 数据存储器及其操作..... 22
1.2 嵌入式系统的组成..... 3	2.4.2 程序存储器及其操作..... 27
1.2.1 嵌入式处理器..... 3	2.5 单片机外部特性..... 28
1.2.2 存储器..... 4	2.5.1 单片机的引脚及功能描述..... 28
1.2.3 外设..... 5	2.5.2 单片机的引脚应用特性..... 30
1.3 嵌入式系统的应用..... 5	2.5.3 单片机并行 I/O 端口及应用特性..... 31
1.4 嵌入式系统的发展..... 6	2.6 小结..... 33
1.4.1 硬件的发展..... 6	思考题..... 33
1.4.2 嵌入式软件的发展..... 7	第 3 章 MCS-51 单片机指令系统 34
1.4.3 系统的发展..... 8	3.1 指令系统基础..... 34
1.5 嵌入式系统的调试方法概述..... 9	3.1.1 指令格式与符号约定..... 34
1.5.1 基于主机的调试..... 9	3.1.2 CPU 指令时序与指令操作..... 35
1.5.2 远程调试器与调试内核..... 10	3.2 指令系统寻址方式..... 37
1.5.3 ROM 仿真器..... 10	3.3 指令系统分类介绍..... 39
1.5.4 在线仿真 ICE..... 12	3.3.1 数据传送指令..... 39
1.5.5 JTAG..... 13	3.3.2 算术运算类指令..... 41
1.6 小结..... 14	3.3.3 逻辑运算类指令..... 43
思考题..... 14	3.3.4 控制转移类指令..... 44
第 2 章 MCS-51 单片机体系结构	3.3.5 位操作指令..... 46
及特点 15	3.4 小结..... 47
2.1 单片机概述..... 15	思考题..... 50
2.1.1 单片机的概念..... 15	第 4 章 MCS-51 汇编程序设计及 C51 程
2.1.2 单片机的特点及应用领域..... 15	序设计基础 52
2.1.3 单片机技术的历史及发展方向..... 16	4.1 汇编语言设计基础..... 52
2.1.4 常用 MCS-51 单片机及兼容机..... 17	4.1.1 汇编语言格式..... 52
2.1.5 单片机应用系统开发过程..... 18	4.1.2 常用 MCS-51 的汇编伪指令..... 52
2.2 MCS-51 系列单片机基本结构与	4.1.3 汇编语言源程序的汇编..... 54
工作原理..... 19	4.1.4 汇编语言程序的设计过程..... 54
2.2.1 单片机的典型硬件结构..... 19	4.2 汇编源程序的设计..... 55
2.2.2 单片机结构特点..... 20	4.2.1 汇编语言程序的过程框架..... 55

4.2.3 几种常用运算及操作的汇编语言实例	62	5.3.3 RS232 串行通信标准	97
4.3 单片机高级语言 C51 程序的设计基础	69	5.3.4 80C51 的串行口	98
4.3.1 MCS-51 与 C 语言	69	5.3.5 80C51 的串行口的基本应用	102
4.3.2 C51 与标准 C 兼容的数据类型及存储方式	70	5.4 小结	104
4.3.3 C51 特有 (与标准 C 不兼容) 数据类型及存储方式	72	思考题	104
4.3.4 C51 数据的存储类型与 MCS-51 的存储关系	75	第 6 章 单片机并行/串行扩展技术	105
4.3.5 C51 的指针数据类型	76	6.1 单片机并行扩展方式	105
4.3.6 C51 对存储器绝对地址和外部扩展 I/O 口的访问	77	6.1.1 并行 I/O 口与并行扩展总线	105
4.3.7 C51 中断服务函数的定义方法	78	6.1.2 总线方式扩展特性	106
4.3.8 MCS-51 汇编语言与 C51 的混合编程	79	6.1.3 I/O 扩展方式特性	106
4.3.9 C51 编程实例	81	6.1.4 系统总线的扩展	106
4.4 小结	83	6.1.5 外部存储器的扩展	109
思考题	83	6.1.6 I/O 口并行扩展非总线型外设接口	114
第 5 章 80C51 单片机基本功能单元及其操作原理	84	6.1.7 并行数模 D/A、模数 A/D 转换器的扩展	122
5.1 80C51 中断系统	84	6.2 单片机的串行扩展方式	131
5.1.1 中断系统基本概念	84	6.2.1 串行的扩展总线与串行扩展接口	131
5.1.2 80C51 中断系统基本结构	84	6.2.2 基于移位寄存器的 80C51 UART 扩展技术	134
5.1.3 80C51 中断系统相关 SFR	85	6.3 小结	137
5.1.4 80C51 单片机中断自动处理过程	87	思考题	137
5.1.5 80C51 单片机外部中断触发方式的说明	88	第 7 章 嵌入式操作系统概述	138
5.1.6 80C51 单片机中断系统应用注意事项及实例	88	7.1 操作系统的概念	138
5.2 80C51 的定时/计数器	89	7.2 操作系统的功能和主要特征	139
5.2.1 80C51 定时/计数器的结构和工作原理	89	7.2.1 操作系统的功能	139
5.2.2 80C51 定时/计数器的控制	90	7.2.2 操作系统的主要特征	142
5.2.3 80C51 定时/计数器的工作方式	91	7.3 操作系统的结构	143
5.2.4 80C51 单片机定时/计数器应用注意事项及实例	93	7.3.1 操纵系统的内核	143
5.3 80C51 的串行口及其应用	94	7.3.2 传统的操作系统结构模式	144
5.3.1 计算机通信基础	94	7.3.3 现代的操作系统结构模式	146
5.3.2 串行通信基本概念	95	7.4 嵌入式实时操作系统	148
		7.4.1 嵌入式实时操作系统的特点	148
		7.4.2 嵌入式实时操作系统的发展	149
		7.4.3 嵌入式实时系统的分类	151
		7.5 商用嵌入式实时操作系统	154
		7.6 小结	155
		思考题	156

第 8 章 嵌入式实时操作系统内核	157	第 9 章 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 在 80C51 单片机上的移植	196
8.1 嵌入式实时内核的结构和功能	157	9.1 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的可移植条件	196
8.1.1 嵌入式实时内核的结构	157	9.2 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的一般移植过程	196
8.1.2 嵌入式实时内核的功能	159	9.3 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 在 80C51 上的移植步骤	197
8.2 嵌入式实时内核的任务管理	166	9.4 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 在 80C51 上的移植时需注意的问题	200
8.2.1 多任务机制	167	9.5 小结	201
8.2.2 任务状态和状态转变	168	附录 A PRoteus7.4 软件及 Keil 集成开发环境在单片机系统仿真中的应用入门	202
8.2.3 任务调度策略	169	A.1 Proteus ISIS	202
8.3 嵌入式实时内核的共享代码和重入	170	A.2 Keil 集成开发环境的使用快速入门	210
8.4 实时内核任务间同步、互斥及通信机制	173	A.3 小结	222
8.4.1 任务之间的关系	173	附录 B 实验指导书	223
8.4.2 共享内存	174	B.1 实验一 外部中断基础实验	223
8.4.3 互斥访问	174	B.2 实验二 定时器应用基础实验	225
8.4.4 信号量	175	B.3 实验三 数字频率计实验	229
8.4.5 消息队列	179	B.4 实验四 串行口点对点通信实验	232
8.4.6 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 下的事件内部数据结构	184	B.5 实验五 存储器扩展实验	235
8.5 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 常用 API 用法简介及应用实例	184	B.6 实验六 行列式键盘、4 位 LED 显示器综合实验	237
8.5.1 任务管理类 API	185	B.7 实验七 D/A 转换器应用实验	239
8.5.2 信号量类 API	186	B.8 实验八 温度报警器仿真实验	243
8.5.3 时间管理类 API	188	B.9 实验九 串行扩展 7 段 LED 数码管	246
8.5.4 消息队列管理 API	190	B.10 实验十 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 在 80C51 上的移植及应用实验	249
8.5.5 内存管理 API	193	参考文献	253
8.5.6 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 常用 API 使用实例	194		
8.6 小结	194		
思考题	195		

第 1 章 嵌入式系统概述

嵌入式系统又称为嵌入式计算机系统，是专用的计算机系统。嵌入式系统应用于与人们的工作、生活息息相关的几乎所有电器设备，且可以预计，随着技术的发展，人类将进入“后 PC”时代，即“普适计算”时代，嵌入式系统将无处不在。

本章内容主要介绍嵌入式系统的概念、特点、应用领域、发展趋势、组成结构及常用开发调试方法。

1.1 嵌入式系统概念

1.1.1 嵌入式系统的定义

根据 IEEE（国际电机工程师协会）的定义，嵌入式系统是“控制、监视或者辅助机器或设备运行的装置”（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。目前国内一个普遍被认同的定义是：以应用为中心，以计算机技术为基础，软件硬件可裁剪，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。

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实际应用价值。因此，大多数嵌入式系统不仅仅是由计算机专业的人才来开发，而是由各相关领域人才共同参与完成。

实际上，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，而且有时很难以给它下一个准确的定义。现在人们讲嵌入式系统时，某种程度上是指近些年比较热的具有操作系统的嵌入式系统，本书正是沿用这一观点组织内容的。

1.1.2 嵌入式系统的特点

（1）专用性强

嵌入式系统通常是面向特定应用的，嵌入式系统的硬件和软件，都是为特定用户群来设计的，通常都具有某种专用性的特点。软件系统和硬件结合非常紧密，一般要针对硬件进行系统的移植。

（2）高实时性

目前，广泛应用嵌入式系统的生产过程控制、数据采集、传输通信等场合，都对嵌入式系统有或多或少的实时性要求。例如，对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。因此，在硬件上嵌入式系统极少使用存取速度慢的设备，在软件上更是加以精心设计，从而可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，例如近年来发展速度比较快的手持式计算机、掌上电脑等。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) 系统可裁剪性好

系统的通用可以有效地降低成本,而由于嵌入式系统的专用性,嵌入式系统的供应商就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,以便使系统开发人员能够根据实际应用的需要来量体裁衣,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、国家机密等重大事务,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,例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、人迹罕至的气象检测系统中等,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) 专门的开发工具和环境

嵌入式系统开发需要专门的开发工具和环境。由于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功能进行修改,因此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以及各种逻辑分析仪、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。

(6) 微内核

由于嵌入式系统的系统资源相对于桌面系统是有限的,所以内核较之传统的操作系统要小得多。比如 VxWorks 实时操作系统,内核只有 8KB,而 Windows 的内核则要大多得多。

嵌入式系统的特点决定了其开发往往需要行业人员和计算机专业人员协作完成,例如开发数字医疗设备,需要医学人才、生物医学工程领域的人才和计算机方面的人才协作完成。

1.1.3 嵌入式系统的种类

根据不同的分类标准,嵌入式系统有不同的分类方法,根据嵌入式系统的复杂程度,可以将嵌入式系统分为以下 3 类。

(1) 单个微处理器

这类系统一般由单片嵌入式处理器组成,嵌入式处理器上集成了存储器、I/O 设备、接口设备(如 A/D 转化器)等,嵌入式处理器加上简单的元件如电源、时钟元件等就可以工作。这样的系统可以在小型设备(如温度传感器、烟雾和气体探测器及断路器)中找到。常用的嵌入式处理器如 Philips 的 89LPCxxx 系列、Motorola 的 MC68HC05、08 系列等。

(2) 嵌入式处理器可扩展的系统

系统使用的处理器根据需要,可以扩展存储器,也可以使用片上的存储器,处理器容量一般在 64KB 左右,字宽为 8 位或 16 位。可以在处理器上扩展少量的存储器和外部接口,以构成嵌入式系统。这类系统可在过程控制、信号放大器、位置传感器及阀门传动器等中找到。

(3) 复杂的嵌入式系统

组成这样的嵌入式系统的嵌入式处理器一般是 16 位、32 位等,用于大规模的应用,由于软件量大,因此需要扩展存储器。扩展存储器一般在 1MB 以上,外部设备接口一般仍然集成在处理器上,常用的嵌入式处理器有 ARM 系列、Motorola 公司的 PowerPC 系统、Coldfire 系列等。

这类系统可见于开关装置、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。

1.2 嵌入式系统的组成

嵌入式系统分为如下 3 个部分。

(1) 嵌入式系统的硬件

嵌入式系统的硬件包括嵌入式核心芯片、存储器系统及外部接口。

① 嵌入式核心芯片指 EMPU——嵌入式微处理器、EMCU——嵌入式微控制器、EDSP——嵌入式数字信号处理器、Eso——嵌入式片上系统、EPSoC——嵌入式可编程片上系统。

② 嵌入式系统的存储器系统，包括程序存储器（ROM、EPROM、Flash）、数据存储单元（随机存储器）、参数存储器（目前一般使用 EEPROM）和 NVRAM 等。

③ 嵌入式系统的外部接口。一般嵌入式处理器上已集成了接口，但是外设需要外接。例如大多数的嵌入式通信控制器集成了以太网接口，但是收发器需要外部电路。

(2) 嵌入式系统的软件

嵌入式系统的软件主要包括两大部分：嵌入式操作系统和应用软件。

嵌入式操作系统具有一定的通用性，虽然目前使用的嵌入式操作系统有几十种，但是常用的不过几种，一种操作系统适应一定的应用范围。嵌入式操作系统如 VRTX、pSOS、μCOS-II/III、VxWorks、Windows CE、EPOC、Linux、PALM、OS9、Java CHORUSOS、QNX、NAVIO 等。

嵌入式应用软件种类非常多，不同的嵌入式系统具有完全不同的嵌入式应用软件。

(3) 嵌入式系统的开发工具和开发系统

嵌入式系统的硬件和软件位于嵌入式系统产品本身，开发工具则独立于嵌入式系统产品之外。开发工具一般用于开发主机，包括语言编译器、连接定位器、调试器等，这些工具一起构成了嵌入式系统的开发系统和开发工具。

嵌入式开发中还经常使用汇编语言，汇编语言的使用有以下 3 种情况。

① 当开发小的系统时，例如 4 位微处理器和部分 8 位微处理器，存储器的空间有限，汇编语言可以有效地减少代码存储空间。

② 用于系统的初始化与硬件有关的代码，例如大部分的操作系统的板级支持包的开发使用汇编语言。

③ 由于汇编语言的效率高，对于一些时间要求苛刻的应用，常使用汇编语言。例如开发基于 DSP 数据处理的嵌入式系统。

1.2.1 嵌入式处理器

在嵌入式系统中，处理器通常都是彼此相关的芯片家族的成员。最典型的例子就是 Intel 的 80x86 家族，它从最开始的 8086 一直发展到现在的奔腾系列。正如上面所列出的，嵌入式系统中的处理器通常有 3 种芯片，即微处理器、微控制器和数字信号处理器（DSP）。

微处理器是指功能较强大的 CPU，它不是为任何特定的计算目标而设计的。因此这种芯片通常用于个人计算机与服务器上。微处理器最常见的例子就是 80x86 家族，以及 Motorola 的 68K 系列、PowerPC 系列等。

微控制器与微处理器类似，只不过微控制器是针对嵌入式系统而设计的，它将 CPU、存储器以及其他外设都集成在同一片电路板上。最典型的微控制器为 8051。

数字信号处理器 (DSP) 中的 CPU 是针对快速离散时间信号处理计算的。因此, DSP 非常适用于音频及视频通信, 例如 TI 公司、Motorola 公司、ADI 公司等的产品。

现代的芯片生产工艺已经允许将重要处理器的内核和各种外围的芯片器件整合在一起, 以进一步降低功耗, 达到专用的需求, 这时, 便出现了 SoC。各种通用处理器的 CORE 作为 SoC 设计公司的“库”, 以 IP (Intellectual Property) 的方式开发芯片电路的产权。这样可以使得嵌入式系统的设计和开发厂商大大减少产品的开发周期, 提高产品的竞争力。以 IP 形式开发的处理器 CORE 可以用标准的 VHDL 等语言描述来存储在器件库中。用户将处理器和其他外设定义在一起, 在软件仿真通过之后就可以直接让工厂生产出样品。这样, 几乎可以将整个嵌入式系统集成到一块或者几块芯片中去, 使得系统电路板变得简洁, 既有利于提高系统的效率和可靠性, 又可以减少系统的功耗。目前比较流行的 IP 有: ARM 公司的 ARM CORE, MIPS 公司的 MIP32 RISC CORE、MIPS64 RISC CORE 等。流行的 SoC 有: Cirrus Logic 公司采用 ARM CORE 的 Maverick 系列——EP7312 和 EP9312, Motorola 公司采用 ARM CORE 的 MC9328MXI, Intel 公司的 Strong ARM, TI 的 OMAP 等。

1.2.2 存储器

在嵌入式系统电路板上还有其他硬件成分, 处理器与这些硬件成分相互通信, 共同实现嵌入式系统的各项功能。这些硬件成分有两种基本类型, 即存储器与外设。

存储器用于存储数据和代码。外设用于系统外部完成 I/O 操作, 或者实现特定的硬件功能。

通常, 将存储器分为两种类型, 即随机存取的 RAM 与只读的 ROM。在 RAM 设备中, 存储在存储器中的数据可读且可写, 而在 ROM 设备中的数据可以任意地读取, 但不可以写入。还有一种存储器称为混合存储器, 它介于两种存储器之间。

RAM 家族中有两种存储设备, 即 SRAM (静态 RAM) 与 DRAM (动态 RAM), SRAM 中的数据只有在断电时才会丢失, 而 DRAM 中的数据寿命很短, 大约只有 0.25s。在选择这两种存储设备时, 从时间与成本的角度考虑, SRAM 的速度较 DRAM 快得多, 但 DRAM 的价格要低得多。因此通常关键数据通道上设有一小块的 SRAM, 而其他相对次要的地方有大块的 DRAM。此外, DRAM 控制器是位于处理器与存储器之间的一个硬件, 嵌入式软件需要对 DRAM 控制器进行适当的初始化操作。

ROM 家族中的存储设备按照发展顺序可分为: 只读 ROM、可编程 ROM 以及可擦写可编程 ROM。只读 ROM 包含一组事先编排的数据或指令, ROM 中的数据或指令在芯片生产前就指定好了, 故又被称为掩膜 ROM。它的成本很低, 适合于大批量的生产。

在掩膜 ROM 的基础上, 又出现了 PROM, 即一次可编程 ROM。刚购买到的 PROM 未被编程, 此时数据的所有位均为 1。通过编程器把数据写入 PROM 中, 写入数据之后, PROM 中的内容就不能再改变了。因此, PROM 也被称为一次性可编程设备。

在 PROM 之后出现的就是 EPROM, 即可擦写可编程 ROM。它的编程方式与 PROM 完全一样, 但通过紫外线照射 EPROM 可以擦除, 可以多次编程。

混合存储设备既可以随意读写, 又可以在断电后保持设备中的数据不变。混合存储设备可分为 3 种: EEPROM、闪存与 NVRAM。其中, EEPROM 是电可擦写可编程存储设备, 它与 EPROM 类似, 可进行多次编程, 不同的是 EEPROM 是通过电力来实现数据的清除, 而 EPROM 是通过紫外线照射实现的。

Flash（闪速存储器）具有高密度、低价格、非易失性及电气可编程等特性，但一次对一个扇区进行擦除操作，而不是一次一个字节地擦除。

NVRAM 是带有后备电池的 SRAM。

1.2.3 外设

除了上述的处理器和存储器，嵌入式系统硬件中还包含了一些相关的硬件设备，称为外设。外设可分为两种类型，即内部外设与外部外设。内部外设与处理器都在同一块芯片上，而外部外设与处理器不在同一块芯片上。

1.3 嵌入式系统的应用

嵌入式系统广泛应用在人们生活、工作中的各个方面。随着能够连接网络特别是 Internet 设备的出现，嵌入式系统在多个方面的应用不断增长。下面从市场领域划分，对嵌入式系统的应用进行说明。

(1) 消费类电子产品

消费类嵌入式产品如电动玩具、空调、冰箱、微波炉、CD 播放器、MP3、MP4 播放器、数码照相机、摄像机、智能手机（如 iPhone）、个人掌上电脑（PDA）、电视机、机顶盒、具备网络功能的电视机等消费类电子产品都是具有不同处理能力和存储器需求的嵌入式系统，这些产品都使用了不同的嵌入式处理器。

(2) 办公自动化产品

像激光打印机、传真机、扫描仪、复印机和 LCD 投影仪这些产品都属于办公自动化产品的类型。大部分系统嵌入了处理器，有的系统嵌入了多个处理器，成为复杂的嵌入式系统设备，具有网络功能的办公自动化产品嵌入了通信协议栈（典型 TCP/IP）实现了网络功能，如网络打印机和 Internet 打印机等。

(3) 控制系统与工业自动化

目前，在工业控制和自动化行业（包括连续的流程工业和离散的制造业）中使用嵌入式系统非常普遍，例如智能控制设备、智能仪表、现场总线设备、数控机床、机器人等。特别地，机器人是很复杂的嵌入式设备，甚至配备多个嵌入式处理器，各个处理器通过网络进行连接。

(4) 生物医学系统

在医学保健行业中取得的很多进步都应归功于嵌入式系统的发展与应用。医院里到处都是嵌入式系统，包括各种检验设备如 X 光机的控制部件、EEG 和 ECG 设备、CT、超声检测设备、核磁共振设备等，以及其他用于诊断检查的设备，比如结肠镜和内窥镜。现在，基于计算机的 EEG 和 ECG 设备也投入了使用，它们属于另一种类型的嵌入式系统。这些系统使用了计算机附加卡，附加卡采取 ECG 信号并对信号进行处理；计算机监视器用于显示，计算机的外存储设备用于存储 ECG 记录。这些计算机附加卡包含处理信号的处理器和相关电路，这些卡插在计算机主板提供的插槽中。插槽可以基于 EISA 或 PCI 体系结构。

除此之外，嵌入式医疗设备和保健设备也在不断地发展，如家用的心电监测设备，随着医用传感器技术的发展，用于家庭远程诊断的嵌入式设备将不断地被开发出来。

(5) 现场仪器

现场仪器包括以下几种。

① 一般的测量仪器如测量温度、湿度、电压、电流、功率、频率、频谱等。

② 测量音频和视频这类信号参数的仪器，使用基于 DSP 的设备。

③ 各种协议分析器，用于分析网络协议或用于协议分析与测试应用中。

④ 虚拟仪器通过计算机附加数据采集卡就可用于完成测量工作，而计算机的资源用于脱机分析以及显示和保存结果。测量语音信号参数、视频信号参数和类似参数的仪器属于此种类型。

⑤ 传统的测量仪器也嵌入了微处理器，发展成智能仪器，如传统的示波器发展成数字示波器，具有了信号分析等功能。

(6) 网络通信设备

Internet 已成为嵌入式系统的催化剂。连接两台计算机(用户计算机和属于 ISP 的计算机)的调制解调器是一种嵌入式系统。随着用户对访问 Internet 速度的要求不断提高，现在，速度高达 8Mbps 的先进的调制解调器(如 ADSL)已投入使用。

网络通信设备包括调制解调器、数据通信基础设备、IP 网上的多媒体设备、协议转换器(网关、路由器等)、加密解密设备、GPS(全球定位系统)设备/接收机、交换机、网络接入盒等。

(7) 电信基础设备

电信基础设备的组成部分包括网络部件，比如电话交换机、传送回路、ISDN 网络终端、终端适配器 TA、ATM 交换机、帧中继和无线寻呼基站。移动通信的组成部分包括手机、基站、移动交换中心，以及地面站控制器、星载处理元件、遥测和遥感系统这样的卫星通信设备、PBX 控制单元和有线电视基础设施的网络元件。

1.4 嵌入式系统的发展

嵌入式系统的发展包括软件、硬件和系统的发展。

1.4.1 硬件的发展

据不完全统计，目前全世界嵌入式处理器的品种总量已经超过 1000 种，流行的体系结构有 30 多个系列。其中 8051 体系结构占多半，生产这种单片机的半导体厂家有 20 多个，共 350 多种衍生产品，仅 Philips 公司就有近 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 64KB 到 16MB，处理速度为 0.1~2000MIPS (MIPS，每秒执行多少百万次指令)，常用封装 8~144 个引脚。

嵌入式系统从产生到现在，经历了嵌入式计算机时代、单板机时代、单片机时代，而未来将沿着以下几个方向发展。

(1) 单片机

单片机面向小的控制系统应用，如家用电器(如微波炉、热水器)的控制等，整个控制系统包括 CPU、程序存储器、数据存储器、EEPROM、外围接口集成在一个单芯片上，为了减少系统的复杂性和成本，一般程序存储器不可以扩展，代码量比较小。随着半导体技术的发展，单片机的存储器容量也在扩展，如 ATMEL 的 AT91 系列单片嵌入式处理器 Flash 容量已达到 2MB。

(2) 各种微处理器

越来越复杂的测控任务不仅要求有完善的计算机体系结构、大容量的数据、程序存储空间,还要有许多应用于测控对象的接口电路,如模数转换器(ADC)、数模转换器(DAC)、高速通用 I/O 接口、捕获单元、保证程序可靠运行的看门狗(Watchdog)电路、串行总线接口(如 SPI、SCI、I²C 总线)、CAN 总线接口等。这一时期的单片机就是增强此部分功能,同时进一步提高集成度。现在,微控制器(MCU)已经成为国际上对单片机的标准称呼。几乎所有大规模的电气厂商、半导体厂商都介入了微控制器的开发,如 Microchip 公司的 PIC 系列微控制器,Philips 公司的 LPC 系列微控制器,Motorola 公司的 PowerPC 系列,Atmel 公司的 AVR 系列,Inter 公司的 MC196 系列 16 位微处理器等。

(3) 片上系统

一般地,嵌入式系统由嵌入式处理器、存储器、外部接口设备组成,其中外部接口设备集成在处理器上。除此之外,处理器的电路板上可能需要一些逻辑电路、时序电路、数据处理电路等,这些电路的功能可以由处理器或 PLD 器件等完成,这样做的缺点是电路板的面积大,处理速度有限。目前出现了“片上系统(SoC)”的概念,把除了处理器、存储器之外的部分使用单芯片 PLD 器件完成,这样的嵌入式系统包括嵌入式处理器、存储器、PLD。而且,有的 PLD 器件内部设计了 CPU,进一步提高了集成度和功能。

目前 PLD 器件实现的功能有 DSP、嵌入式处理器、逻辑和时序电路、数字信号处理电路如数字滤波器等。通俗地说,片上系统把原来的一个电路板设计到了一个 PLD 器件上。

SoC 可分为通用和专用两类:通用 SoC 如 Infineon(Siemens)公司的 Tricore, Motorola 公司的 M.Core, 以及某些 ARM 系列器件如 Echelon 和 Motorola 公司联合研制的 Neuron 芯片等;专用 SoC 一般专用于某个或某类系统中,如 Philips 公司的 SmartXA,它将 XA 单片机内核和支持超过 2048 位复杂 RSA 算法的功能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 Internet 安全方面。

1.4.2 嵌入式软件的发展

从国际上看,嵌入式软件市场约占整个软件市场的 10%左右。国际上许多大型跨国企业,已经瞄准了嵌入式系统这个巨大的市场,如 Mentor 公司连续收购了著名的嵌入式系统软件开发商 Microtec 公司、ATI 公司等,进入我国的嵌入式系统软件商有十几个,如常见的 WindRiver (VxWorks) 公司,Microsoft (Windows CE) 公司、QNX 公司、ATI (Nucleus) 公司等。虽然我国目前的嵌入式软件市场刚刚起步,但巨大的国内软件产品需求和极具发展潜力的国际软件市场,将给我国软件产业的跨越式发展带来重大机遇。考虑到未来数字化产品的快速普及会促使嵌入式软件需求进一步增大,有理由相信嵌入式软件市场的增长率将超过软件市场的平均增长率。

近几年,随着 Linux 技术的兴起,越来越多的企业和科研机构把目光转向嵌入式 Linux 的开发和研究上。对于不少国内嵌入式操作系统开发商来说,以 Linux 作为突破口似乎是很自然的一种选择, Linux 所具备的稳定、高效、易定制、易裁剪、硬件支持广泛等特点,结合其所独具的免费、开放源代码等特征,使得 Linux 在近两年内迅速成为嵌入式领域的“一匹黑马”。目前,国内的嵌入式 Linux 厂商的队伍正在逐渐壮大,掀起了国内嵌入式软件市场的新一轮热潮。

国内的嵌入式 Linux 厂商主要有中软、红旗、博利思、蓝点、网虎科技和共创软件联盟

等，它们均有自己的发展特点和技术特色。如：中软股份公司开发的中软嵌入式 Linux 操作系统，具有微妙级的强实时功能，已经在数控领域得到很好的应用；中科红旗的嵌入式 Linux 在机顶盒、彩票机等产品的开发上也做了不少工作；网虎科技公司已经推出完整的嵌入式 Linux 解决方案——XLinux，并应用在多种国际上主流的信息家电所应用的芯片上面，从而可以轻松实现网上浏览、语音输入、录音录像、字典、MP3 以及各种多媒体播放功能。

除了嵌入式 Linux 以外，开放源码的嵌入式操作系统还有 μ C/OS II 等，这些系统在国内也有大量的应用，特别是在高等学校。此外，研究开放源码的嵌入式操作系统及其应用的单位也很多。

嵌入式软件除了嵌入式操作系统之外，还有嵌入式协议栈、嵌入式人机界面、嵌入式软件组件化等。

嵌入式系统发展的目标是适合各种应用的专用电脑，实现“普遍化计算”，因此可以称嵌入式系统是构成未来世界的基本节点。

1.4.3 系统的发展

就系统的发展而言，表现在如下几方面。

(1) 开发平台的完备化

嵌入式系统的开发是一项系统工程，涉及软件、硬件、系统集成等诸多方面，有的嵌入式系统部件厂商不仅提供嵌入式处理器等，还提供开发工具。其开发工具包括软件开发工具和硬件开发工具。

除了嵌入式处理器的制造商提供开发工具外，目前还有许多开发工具的提供商，致力于开发工具的研发，如仿真器、软件开发工具（编译器、连接定位器、集成开发环境）。一些处理器的制造商也提供硬件的参考设计、板级支持包软件等。通过这些完备的开发工具，嵌入式系统的开发者需要把精力放在解决实际问题上，而不需要考虑一些开发平台方面的问题。

(2) 嵌入式系统的网络化

网络化表现在两个方面，一方面是嵌入式处理器集成了网络接口，另一方面是嵌入式设备应用于网络环境中。

现在许多嵌入式处理器集成了基本的网络功能，如串行接口是必备的，此外，还有 HDLC 接口、以太网接口、CAN 总线接口等。基于这样的趋势，用户开发基于特定应用的嵌入式系统时，一般不需要外接网络芯片，而选择具有符合功能要求的嵌入式处理器即可，所需要安装的只是物理层的收发器。

随着网络技术特别是 Internet 技术的发展，未来的嵌入式系统很多要求具有网络功能，成为网络式计算的一个节点。具有网络功能的嵌入式系统设备将成为市场的一个卖点，如支持 TCP/IP 协议、IEEE 1394 协议、USB 接口、无线接口（Bluetooth、IRDA 等），以及支持嵌入式 Web 服务器和嵌入式浏览器。通过网络技术的集成，嵌入式设备可以随时随地与网络进行连接，实现资源共享。

(3) 系统集成度的提高和性能指标的提高

未来的嵌入式系统是软、硬件高度集成的产品，为了提高系统的可靠性和降低系统的功耗，需要设计者尽量精简系统的内核（包括软件内核和硬件内核），降低成本，提高可靠性，降低系统的功耗。除了芯片提供商以外，要求软件开发者在操作使用方面对操作系统进行裁剪，开发应用软件使用高效率的算法。

(4) 友好的人机界面

提供友好的人机界面是嵌入式系统的基本要求,大多数嵌入式系统都与人进行交互。目前提供图形化的人机界面是基本的配置要求,大多数图形界面采用与 Windows 类似的界面,以方便用户的使用。随着嵌入式技术的发展,新的人机界面不断被开发出来,如手写输入技术、语音输入/输出技术、图像输出技术等。

1.5 嵌入式系统的调试方法概述

调试是嵌入式系统开发过程中必不可少的重要环节,通用计算机应用与嵌入式系统的调试环境存在明显的差异。在通常的桌面操作系统中,调试器与被调试的程序常常位于同一台计算机上,操作系统也相同,如在 Windows 平台上利用 Visual C++ 语言等开发应用,调试器进程通过操作系统提供的调用接口来控制被调试的过程。而在嵌入式操作系统中,开发主机和目标机处于不同的机器中,程序在开发主机上进行开发(编辑、交叉编译、连接定位等),然后下装到目标机(嵌入式系统中)进行运行和调试,即远程调试。也可以说,调试器程序运行于桌面操作系统,而被调试的程序运行于嵌入式操作系统之上。这就引出了如下问题,即位于不同操作系统之上的调试器与被调试程序如何通信,被调试程序倘若出现异常现象将如何告知调试器,调试器又如何控制以及访问被调试程序等。目前常用如下几种调试方式。

1.5.1 基于主机的调试

虽然嵌入式系统的最终调试需要桌面计算机和目标机的配合,但是实际开发嵌入式系统过程中,为了加快项目进度和减少开发工具的费用,也可以采取基于主机的调试方法。

虽然可以在计算机上做一些调试工作,但是除非嵌入式系统的目标机是计算机平台,如 PC104 等,开发和运行在同样的计算机上进行;否则,桌面系统硬件与目标系统硬件之间总是存在差别,这些差别决定了开发工程师必须把最终调试工作转移到目标系统上。

有一些程序模块完全可以在计算机上开发和调试,这是基于 C 语言的可移植性原理。如果使用 C 或 C++ 语言编写应用软件,应当能够在主机上调试算法程序(这些程序应该用标准 C 语言编写,而且应该与硬件无关)。

对于汇编语言代码部分,可以在桌面系统上使用指令集模拟器(Instruction Set Simulator, ISS, 指令集模拟器是一个软件)运行它们,这一过程一直持续到需要测试代码与目标系统特殊硬件之间的实时交互操作时为止。

在基于主机的调试中,除实际外设运行时造成的问题外,最大的问题来源于两种计算机体系结构特征——字长与字节排序。

字长兼容性可以通过定义可移植的数据类型来解决,关于字节排序问题,主要指的是大开端和小开端问题,如果桌面计算机不支持大、小开端的配置,那么需要在软件移植到目标系统上之后,调试大、小开端问题。

基于主机的调试方法的例子如 ATI 公司的 MNT, Nucleus Plus 是 ATI 公司的一个商品化的嵌入式实时多任务操作系统,支持众多的处理器。MNT 是一个仿真开发平台。利用 MNT,用户可以在基于 Windows 操作系统的计算机上,开发和调试基于 Nucleus Plus 的应用,等待目标硬件调试完成后,直接移植到目标机上运行。通过这种方法,嵌入式软件和硬件可以并行开发。