高等学校计算机应用规划教材

嵌入式Linux系统开发教程(第2版)

- 嵌入式系统基础
- Linux基础
- ARM体系结构
- 嵌入式编程
- 软硬件开发环境
- 交叉编译工具
- Bootloader详解及移植
- 定制内核移植
- 嵌入式Linux文件系统
- 驱动程序开发基础
- 嵌入式Linux图形设计
- 视频监视系统开发实例

贺丹丹　编著

清华大学出版社

高等学校计算机应用规划教材

嵌入式 Linux 系统开发教程

(第 2 版)

贺丹丹　编著

清华大学出版社

北　京

内 容 简 介

本书系统论述了在 Linux 环境下开发嵌入式系统的设计思想、设计方法及开发流程，通过实例与设计项目，帮助读者尽快掌握嵌入式系统的基本概念，提高嵌入式设计技能。本书共 12 章，内容包括嵌入式基础知识、Linux 概述、ARM 体系架构、嵌入式编程、交叉工具链、Bootloader、定制内核、文件系统、驱动程序开发基础、嵌入式图形设计等。本书的最后给出了一个综合实例，帮助读者理解嵌入式 Linux 的开发方法和技巧。

本书可作为高校计算机、通信、电子专业相关课程的教材，也可供广大嵌入式开发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式 Linux 系统开发教程 / 贺丹丹 编著. —2 版。 —北京：清华大学出版社，2014
(高等学校计算机应用规划教材)

ISBN 978-7-302-36504-4

Ⅰ. ①嵌… Ⅱ. ①贺… Ⅲ. ①Linux 操作系统－程序设计－高等学校－教材 Ⅳ. ①TP316.89

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 102883 号

责任编辑：刘金喜
装帧设计：孔祥峰
责任校对：成凤进
责任印制：何　芊

出版发行：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦 A 座　　邮　　编：100084
社 总 机：010-62770175　　邮　　购：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
课 件 下 载：http://www.tup.com.cn，010-62794504

印 刷 者：北京富博印刷有限公司
装 订 者：北京市密云县京文制本装订厂
经　　销：全国新华书店
开　　本：185mm×260mm　　**印　　张**：22.5　　**字　　数**：562 千字
版　　次：2010 年 5 月第 1 版　2014 年 7 月第 2 版　　**印　　次**：2014 年 7 月第1 次印刷
印　　数：1～4000
定　　价：36.00 元

产品编号：056524-01

前　言

嵌入式 Linux 系统由于具有开源、网络功能强大、内核稳定、高效等特性，在产品开发周期、产品的功能可扩充性、开发时的人力投入等方面都具有显著的优势，因此广泛应用于高、中、低端智能电子设备中。而它与 ARM 的结合，更是一种主流的解决方案。嵌入式 Linux+ARM 已经广泛应用于机顶盒、智能手机、平板电脑、MPC(多媒体个人计算机)、网络设备、工业控制等领域，并且具有良好的市场前景。

嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，采用可裁剪软硬件，适用于对功能、可靠性、成本、体积、功耗等要求严格的专用计算机系统。

在新兴的嵌入式系统产品中，常见的有 MP3、智能手机、平板电脑、数字播放器、GPS、机顶盒、嵌入式服务器、家庭游戏网关、VoIP、PDA、数字视讯录像机及瘦客户机等。嵌入式系统是未来生活的一个基础平台，将会大大影响人们的生活方式。

本书将系统地讲解嵌入式 Linux 开发流程中的各个步骤，详细解析各个流程中的疑点、难点。本书分 3 个部分，共 12 章。各部分内容如下：

第一部分为基础知识篇，主要讲解嵌入式系统与 Linux 相关的基础知识，其中第 1 章为嵌入式系统基础，主要讲解嵌入式相关的概念、历史、应用及前景；第 2 章为 Linux 概论，主要是与 Linux 基础相关的知识，如 Linux 桌面系统、Linux 常用软件的使用及 Linux 常见命令等；第 3 章为 ARM 体系架构，主要介绍 ARM 架构的相关知识，如 ARM 指令集、ARM 处理器基本原理等；第 4 章为嵌入式编程，将简要介绍嵌入式汇编语言及 C 语言的编程基础。

第二部分为开发入门篇，主要介绍嵌入式开发的基本方法，这部分是本书的重点，也是嵌入式 Linux 学习的难点，读者要认真学习。这部分共 5 章，其中第 5 章介绍了嵌入式开发的软硬件环境，如工具的驱动程序安装、Ubuntu 的安装、DNW 的使用、NFS 的配置和使用，以及 Telnet、ftp 等的配置使用；第 6 章主要讲解交叉编译环境的概念以及工具链的编译、获取；第 7 章介绍了 Bootloader 及典型引导程序的制作，如 Vivi；第 8 章讲解内核的定制；第 9 章介绍了嵌入式 Linux 文件系统，这部分内容较多，希望读者重点掌握。

第三部分是提高篇，主要包括第 10 章驱动程序的开发；第 11 章嵌入式 Linux 的图形设计；第 12 章将给出一个开发实例，使读者能系统地了解嵌入式 Linux 的开发过程。

本课程总学时为 54 学时，各章学时分配见下表(供参考)：

学时分配建议表

课 程 内 容	学 时 数			
	合　计	讲　授	实　验	机　动
第 1 章 嵌入式系统基础	1	1		
第 2 章 Linux 基础	3	2	1	
第 3 章 ARM 体系架构	2	2		
第 4 章 嵌入式编程	4	3	1	
第 5 章 软硬件开发环境	4	3	1	
第 6 章 交叉编译工具	3	2	1	
第 7 章 Bootloader 详解及移植	5	3	2	
第 8 章 定制内核移植	3	2	1	
第 9 章　嵌入式 Linux 文件系统	7	4	3	
第 10 章　嵌入式 Linux 驱动程序开发基础	9	6	3	
第 11 章　嵌入式 Linux 图形设计	8	5	3	
第 12 章　嵌入式视频监视系统开发实例	6	4	2	
合　计	54	37	18	

本书内容丰富，实例典型，有很强的针对性。书中各章不仅详细介绍了实例的具体操作步骤，而且还配有一定数量的练习题供读者学习使用。读者只需按照书中介绍的步骤一步步地实际操作，就能完全掌握本书的内容。

尽管本书只讨论如何在嵌入式系统中使用Linux，但是对想要在嵌入式系统中使用BSD(伯克利软件发行中心)的开发者来说也会有一些帮助，但本书所作的许多说明都必须依据BSD与Linux间的差异重新诠释。

本书可作为高等学校计算机、通信、电子等专业嵌入式设计课程的教材，也可供嵌入式开发技术人员参考。

本书 PPT 教学课件可以通过 http://www.tupwk.com.cn/downpage 下载。

本书由贺丹丹编著，此外，马建红、许小荣、张泽、刘荣、张璐、王统、王东、周艳丽、刘波、苏静等也参与了本书的编写，在此，同样致以诚挚的谢意！

由于时间仓促及作者水平所限，本书难免有纰漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编　者

2013 年 12 月

目　录

第1章　嵌入式系统基础

嵌入式系统是近年来随着电子芯片技术的发展而迅速普及的，现已广泛应用到工业、军事、通信、运输、金融、农业、医疗、气象等众多领域。在我们日常生活中，嵌入式系统的应用也是随处可见：汽车里的控制器、电梯、MP3/MP4、智能手机、平板电脑等。当前，嵌入式系统开发领域聚集着无数IT领域的精英，正是他们在嵌入式领域开展的大量艰辛工作，嵌入式系统才会不断向前发展。作为本书的开篇，本章将主要介绍有关嵌入式系统的基础知识。本章从嵌入式系统的基本概念开始，介绍其组成、发展以及应用前景。接着介绍嵌入式处理器，它涵盖了嵌入式微控制器、嵌入式微处理器、嵌入式DSP处理器以及嵌入式片上系统(System On Chip)。之后简要介绍常见的嵌入式操作系统Linux、VxWorks、Windows CE、RT-Linux、Android(安卓)、iOS(iPhone/iPad Operating System)、WP(Windows Phone)、Windows RT等。最后介绍嵌入式系统开发流程、嵌入式系统开发方法等知识。

本章重点：

- 嵌入式系统的概念及发展
- 嵌入式处理器
- 嵌入式操作系统
- 嵌入式系统的应用

1.1　嵌入式系统

嵌入式系统主要融合了计算机软硬件技术、通信技术和微电子技术，它将计算机直接嵌入到应用系统中，利用计算机的高速处理能力以实现某些特定的功能。随着半导体技术和微电子技术的发展，超大规模集成电路制造工艺已经十分成熟，使得系统芯片的集成度大大提高，从而可以实现高性能的系统芯片，最终推动嵌入式系统向更高级的方向发展，进而促使嵌入式系统得到更广泛、更深入的应用。近几年来，嵌入式系统的快速发展，一方面使其成为计算机技术和微电子技术的一个重要研究方向，另一方面也使计算机类别的划分从以前的巨型机、大型机、小型机、微型机变为通用计算机(General Computer)和嵌入式计算机(Embedded Computer)。

1.1.1　嵌入式系统的概念

首先介绍通用计算机，通用计算机就是日常所说的PC机，它由CPU、硬盘、显卡、内存、键盘、鼠标、显示器等组成。它的作用就是为人们提供一台可编程、会计算、能处理数据的机器。人们可以用它作为科学计算的工具，也可以用它作为企业管理的工具。所以，人们把

这样的计算机系统称为“通用”计算机系统。

有些系统并不是这样的。例如，医用的CT扫描仪也是一个系统，里面有计算机，但是这种计算机(或处理器)是某个专用系统中的一个部件。像这样“嵌入”到更大的、专用的系统中的计算机系统，就被称为“嵌入式计算机”、“嵌入式计算机系统”或“嵌入式系统”。在不致引起混淆的情况下，一般把这三者用作同义词，并且一般总是指系统中的核心部分，即嵌入在系统中的计算机。从字面上讲，后者似乎比前者更为广义，因为系统中常常还包括一些机电、光电、热电或者电化的执行部件；有时前者也包含后者，例如一台通用计算机的外部设备中就包含5～10个嵌入式微处理器，键盘、鼠标、软驱、硬盘、显示卡、显示器、Modem、网卡、声卡、打印机、扫描仪、数码相机和USB集线器等均是由嵌入式处理器进行控制的，但是实际上却往往不作严格的区分。

目前嵌入式系统已经渗透到我们生活的每一个角落：工业控制、服务行业、消费电子、教育等，正是由于嵌入式系统的应用范围如此之大，“嵌入式系统”的概念才更加难以定义。举个简单的例子来说：一个消费级的数码相机是否可以叫做嵌入式系统呢？答案是肯定的，它本质上就是一个复杂的嵌入式系统，其实不光是数码相机，我们日常生活中经常用的智能手机、MP3/MP4、PSP、平板电脑也都是嵌入式系统，如图1-1所示。除了这些日常消费品之外，你认为一个PC104的微型工业控制计算机是嵌入式系统吗？当然也是，工业控制是嵌入式系统技术的一个典型应用领域。然而对两者进行比较，你也许会发现两者几乎完全不同，但其中都嵌入有微处理器，由此可以看出所有的嵌入式系统都具有一些共同的特性。

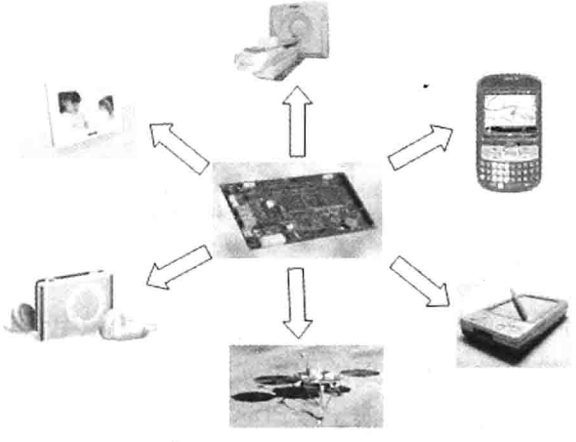

图1-1　嵌入式系统的应用

根据国际电机工程师协会(IEEE)的定义，嵌入式系统是“控制、监视或者辅助装置、机器和运行的装置”，这主要是从应用层次上来定义的，从中可以看出嵌入式系统包括硬件和软件两个载体，另外还可以涵盖机械等附属装置。为了充分体现嵌入式系统的精髓，目前国内普遍认同的一个定义是：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、功耗严格要求的专用计算机系统。关于这个定义，可以从以下几个方面来理解。

- 嵌入式系统是面向产品、面向用户、面向应用的。它必须结合实际的应用场合才能发挥其优势。对于三个面向的理解，可以认为嵌入式系统具有很强的专业性，必须结合实际系统需求在软硬件方面进行合理的裁剪。

- 嵌入式系统是一个技术密集、集成度高、需要不断创新的集成系统。嵌入式系统结合了计算机技术、半导体技术、微电子技术以及各个行业的具体专业应用知识，所以，嵌入式系统在设计之前必须有一个正确的定位。例如iOS和Android就是因为其立足于个人电子消费品市场，而在平板电脑领域占有绝对优势的市场份额；而VxWorks之所以在火星探测器上得到应用，则是因为其高实时性和高可靠性。
- 嵌入式系统必须根据应用场合对软硬件进行必要的裁剪来实现需要的功能。对于不同的应用场合，系统的硬件和软件需求一般都是不同的。设计开发需要的软硬件，去除不需要的资源也是使系统满足功能、可靠性、体积、成本所要求的。所以，在相对通用的软硬件基础上，对其开发出适用于不同应用场合的系统，是嵌入式系统的一般发展模式。

1.1.2　嵌入式系统的组成

嵌入式系统一般由嵌入式计算机和执行部件组成，如图1-2所示。其中嵌入式计算机是整个嵌入式系统的核心，主要包括硬件层、中间层、系统软件层以及应用软件层；执行部件则接收嵌入式计算机系统发出的控制指令，执行规定的操作，也被称做被控对象。比较简单的执行部件比如电机、显示屏、扬声器等，比较复杂的如SONY智能机器狗，上面集成多个微型控制电机和传感器，从而可以执行不同的操作和感知各种状态信息。下面主要对嵌入式计算机部分的组成做主要介绍。

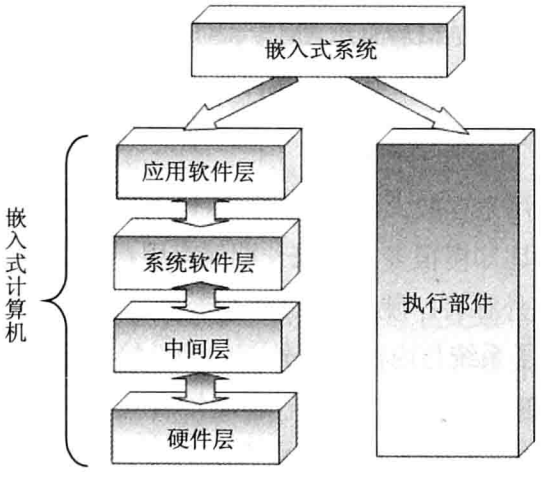

图1-2　嵌入式系统组成

1. 硬件层

硬件层主要包含了嵌入式系统中必要的硬件设备：嵌入式微处理器和协处理器、存储器(SDRAM、ROM等)、设备IO接口等。

- 嵌入式微处理器是嵌入式系统硬件层的核心，主要负责对信息的运算处理，相当于通用计算机中的中央处理器，在后面会有更详细的介绍。
- 存储器则用来存储数据和代码。嵌入式系统的存储器一般包括微处理器、Cache、主存储器和辅助处理器，存储器结构如图1-3所示。

♦ Cache是一种容量小、速度快的存储器阵列，它位于主存储器和微处理器内核之间，存放的是最近一段时间微处理器使用最多的程序代码和数据。在需要进行数据读取操作时，微处理器尽可能地从Cache中读取数据，而不是从主存储器中读取，这样就大大改善了系统的性能，提高了微处理器和主存储器之间的数据传输速率。

在嵌入式系统中，Cache全部集成在嵌入式微处理器内，可分为数据Cache、指令Cache和混合Cache，Cache的大小依不同处理器而定。

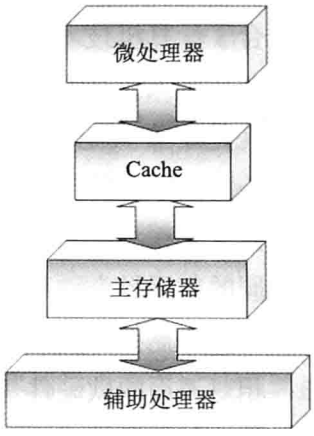

图1-3　嵌入式系统存储器结构

♦ 主存储器是嵌入式微处理器能直接访问的寄存器，用来存放系统和用户的程序及数据。它可以位于微处理器的内部或外部，其容量为256KB～4GB，根据具体的应用而定。一般片内存储器容量小，速度快，片外存储器容量大。

注意：

常用作主存的存储器有如下几类。

- ROM类：NOR Flash、EPROM和PROM等。
- RAM类：SRAM、DRAM和SDRAM等。

其中NOR Flash凭借其可擦写次数多、存储速度快、存储容量大、价格便宜等优点，在嵌入式领域内得到了广泛应用。

♦ 辅助处理器用来存放大数据量的程序代码或信息，它的容量大，但读取速度与主存储器相比却慢很多，用来长期保存用户的信息。

嵌入式系统中常用的外存有：硬盘、NAND Flash、CF卡、MMC和SD卡等。

- 设备IO接口提供了系统与内部或者外部的硬件接口，如通过IO实现内部A/D转换，或者通过IO与外部的存储器连接进行存储扩展。

除此之外，有的嵌入式控制模块中还集成有电源电路、时钟电路、定时器等以实现更高级的功能。

2. 中间层

中间层为硬件层与系统软件层之间的部分，有时也称为硬件抽象层(Hardware Abstract Layer，HAL)或者板级支持包(Board Support Package，BSP)。对于上层的软件(比如操作系统)，中间层提供了操作和控制硬件的方法和规则。而对于底层的硬件，中间层主要负责相关硬件设备的驱动等。中间层将系统上层软件与底层硬件分离开来，使系统的底层驱动程序与硬件无关，上层软件开发人员无需关心底层硬件的具体情况，根据中间层提供的接口即可进行开发。

中间层主要包含以下操作：底层硬件初始化、硬件设备配置以及相关的设备驱动。

- 底层硬件初始化操作按照自底而上、从硬件到软件的次序分为三个环节，依次是：

片级初始化、板级初始化和系统级初始化。

- 硬件设备配置对相关系统的硬件参数进行合理的控制以达到正常工作。另一个主要功能是硬件相关的设备驱动。
- 硬件相关的设备驱动程序的初始化通常是一个从高到低的过程。尽管中间层中包含硬件相关的设备驱动程序，但是这些设备驱动程序通常不直接由中间层使用，而是在系统初始化过程中由中间层将它们与操作系统中通用的设备驱动程序关联起来，并在随后的应用中由通用的设备驱动程序调用，实现对硬件设备的操作。

3. 系统软件层

系统软件层由实时多任务操作系统(Real-time Operation System，RTOS)、文件系统、图形用户界面接口(Graphic User Interface，GUI)、网络系统及通用组件模块组成。其中实时多任务操作系统(RTOS)是整个嵌入式系统开发的软件基础和平台。

4. 应用软件层

应用软件层则是开发设计人员在系统软件层的基础之上，根据需要实现的功能，结合系统的硬件环境所开发的软件。它是嵌入式系统开发过程中最重要的环节之一。

1.1.3　嵌入式系统的发展

虽然嵌入式系统是最近几年才流行起来的，但是嵌入式系统这个概念却早在20世纪70年代就开始出现。嵌入式系统的硬件雏形可以归结为单片机。从当时第一个单片机的问世到今天成百上千种嵌入式处理器的出现，嵌入式系统已经有了超过40年的发展历史。一个刚问世的处理系统，一般要在基于硬件与软件双螺旋的支撑下才能逐渐趋于稳定和成熟，嵌入式系统也不例外。

1. 20世纪70年代

1976年，计算机硬件厂商Intel公司发布8048处理器，它是最早的单片机处理芯片。随后Motorola公司推出了68HC05，Zilog公司推出了Z80等一系列的单片机，这些早期单片机系统的出现，使得汽车、家电、工业机器、通信装置以及成千上万种产品可以通过内嵌电子装置来获得更佳的使用性能、更容易使用、处理速度更快、价格更便宜。正是由于电子装置是“内嵌式的”，使得“嵌入式系统”这个初级概念深入人心。今天看来，当时这些装置已经初步具备了嵌入式的应用特点，但是这时的应用只是使用8位的芯片，硬件技术相对落后，比如说只能执行一些单线程的程序，还谈不上“多核”的概念。但是它却标志着“嵌入式系统”出现了硬件雏形。在开创嵌入式系统独立发展的道路上，Intel公司功不可没。在寻求最佳形态嵌入式系统的体系结构中，奠定了单片微型计算机(Sing Chip Microcomputer，SCM)与通用计算机完全不同的发展道路。

不过，人们当时还没有“嵌入式操作系统”这个概念。他们当时做的只是基于8048或者Z80结合实际应用的需要，在DOS或者其他的“操作系统”下进行开发设计工作。不像今天硬件系统的多平台开发，当时针对硬件芯片，可能只有一种系统可以开发，而且系统的稳定

性、兼容性也十分差。

2. 20世纪80年代

在20世纪80年代初，通过几年的设计实践，Intel进一步完善了8048，推出了在它的基础上研制成功的8051。这在单片机的历史上是重要的一款，具有划时代的意义。另一方面，硬件技术的逐步发展也推动了整个嵌入式系统的进步。如图1-4和图1-5所示，在各种嵌入式产品中有被广泛使用的Motorola Z80和Intel 51芯片。

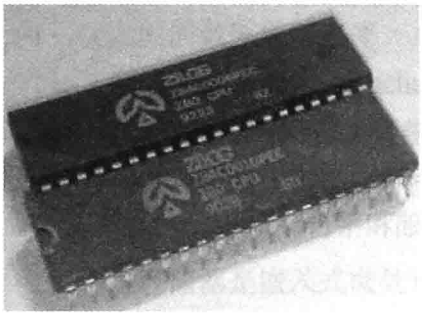

图1-4　Z80系列单片机

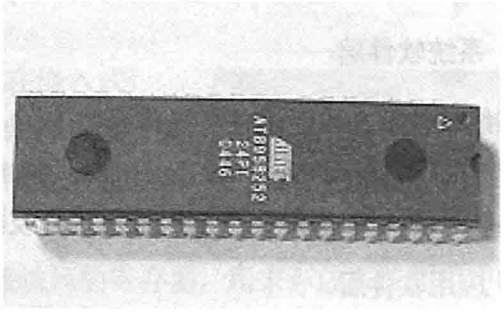

图1-5　51系列单片机

在此基础上，各大电子厂商不断扩展满足嵌入式应用，如对系统要求的各种外围电路和接口电路，以突显其智能化控制能力。因此，发展微控制器(Micro Control Unit，MCU)的重任不可避免地落在电气、电子技术厂家，比如知名的Philips公司。

在软件方面，从20世纪80年代早期开始，嵌入式系统的程序员开始用商业级的“操作系统”编写嵌入式应用软件，这使得可以获得更短的开发周期、更低的开发资金和更高的开发效率，“嵌入式系统”真正出现了。确切地说，这个时候的操作系统是一个实时核，这个实时核包含了许多传统操作系统的特征，包括任务管理、任务间通信、同步与相互排斥、中断支持、内存管理等功能。其中比较著名的有Integrated System Incorporation(ISI)的PSOS、Ready System公司的VRTX、IMG的VxWorks和QNX公司的QNX等。这些嵌入式操作系统都具有嵌入式的典型特征。

- 它们的系统内核很小，具有可裁剪、可扩充和可移植性，可以移植到各种各样的处理器芯片上。
- 它们均采用占先式的调度，响应的时间很短，任务执行的时间可以确定。
- 较强的实时和可靠性，适合嵌入式应用。
- 这些嵌入式实时多任务操作系统的出现，使得应用开发人员得以从小范围的开发解放出来，同时也促使嵌入式有了更为广阔的应用空间。

3. 20世纪90年代

Philips公司以其在嵌入式应用方面的巨大优势，将51系列单片微型计算机迅速发展到微控制器。总的来说，单片机是嵌入式系统的独立发展之路，也是向MCU(微控制器)阶段发展的重要因素。嵌入式系统微控制器的设计过程主要是寻求应用系统在芯片上的最大化解决。

因此，专用单片机的发展自然形成了片上系统(System-on-Chip，SoC)化趋势。随着微电子技术、IC设计、EDA工具的发展，基于SoC的单片机应用系统设计会有较大的发展，如图

1-6所示。据不完全统计，全世界嵌入式处理器的品种总量已经达到1000多种，主流的有ARM、MCU、DSP、FPGA等。嵌入式开发设计过程也细分为多个具体的技术：电源技术、传感技术、信号处理与转换、控制技术、显示驱动、无线网络、音视频技术和接口等。

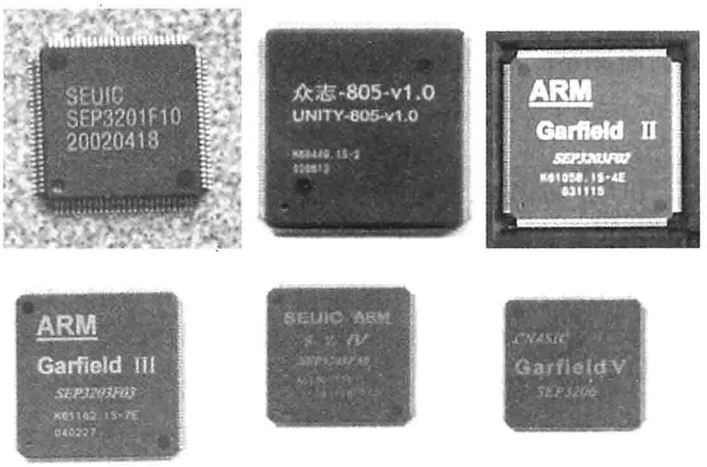

图1-6　32位嵌入式微处理器SoC芯片系列

嵌入式操作系统的发展已进入成熟时期，此时出现了众多嵌入式操作系统，它们大多具有跨平台的移植技术，并且在同一个系统之下也可以通过选择开发工具使用Java、C或者汇编语言等开发者熟悉的语言来开发，该阶段比较常用的有WinCE、WM、Linux、VxWorks、μC/OS-II、Symbian等。

4. 21世纪到现在

进入21世纪之后，随着相关电子工业技术的发展，嵌入式处理器的相关技术得到了突飞猛进的发展，出现了64位的嵌入式处理器(例如Cortex-A50系列)，其处理器内核也已经实现了8核(目前正计划实现16核)。

到目前为止，嵌入式处理器可以分为三个大类：以MTK、高通、三星为代表支持的ARM架构处理器、以Intel为代表支持的x86架构处理器以及其他以FPGA为代表的特殊/专用处理器，如图1-7所示。

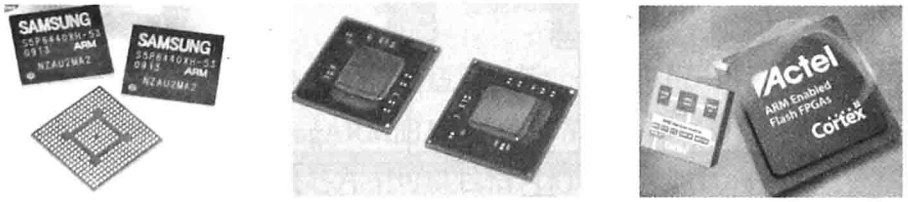

图1-7　进入21世纪之后的嵌入式处理器

随着嵌入式处理器的发展，嵌入式系统的硬件性能得到了极大的提升，此时嵌入式操作系统也开始出现一些新的面孔，Android和iOS则是其中的典型代表，它们从2007年开始(Android于2007年11月正式发布，iOS则是在2007年1月正式发布)就风卷残云般地占领了绝大多数嵌入式消费电子产品(主要是平板电脑、手机和数字播放器)的市场；而微软公司不甘落后，从2010年开始连续发布了WP(Windows Phone)和Windows RT(Run Time)操作系统用于抢