

普通高等教育规划教材

# 嵌入式 Linux 系统

## 开发与应用

◎ 康维新 主编

LINUX



普通高等教育规划教材

# 嵌入式Linux系统 开发与应用

主 编 康维新

副主编 张爱文 武 狄

参 编 宋海峰 李 杨

机械工业出版社

嵌入式系统是现代信息技术及物联网发展的重要技术平台，因此成为目前国内各高校信息类专业的必修课。考虑到国内本专科院校使用 ARM 实验开发设备和 Linux 嵌入式操作系统较多，因此本书主要围绕 ARM 硬件环境和 Linux 软件环境编写而成。

全书由 ARM 基本结构与开发环境、Linux 嵌入式操作系统基础与开发技术、嵌入式 Linux 综合设计项目实例 3 部分内容构成，共 7 章。重点阐述了基于 Linux 操作系统的 ARM 应用系统开发基础和技术应用，包括嵌入式系统开发与设计、系统主要设备的驱动、图形界面的设计。较完整地阐述了基于 Linux 嵌入式系统在网络、智能家居、消费电子等领域应用的成功案例，并提供了实用程序。

本书着眼于嵌入式系统开发，内容完整，案例具体、实用，可供本科生、研究生和工程技术人员的学习和参考。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 下载。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式 Linux 系统开发与应用/康维新主编. —北京: 机械工业出版社, 2011 4  
普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-33198-8

I. ①嵌… II. ①康… 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 (2011) 第 012757 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王小东 责任编辑: 王小东 罗子超 范成欣

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈立辉

封面设计: 张 静 责任印制: 李 妍

唐山丰电印务有限公司印刷

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 21 印张 · 516 千字

0 001-3000 册

标准书号 ISBN 978 7 111 33198 8

定价: 42.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

嵌入式系统是现代信息技术及物联网发展的重要技术平台。嵌入式系统在性能、功耗、体积以及可靠性等方面具有突出的优越性能，因此在国防、通信、网络、工业控制等领域以及各种智能终端设备上得到了广泛应用。

本书主要面向国内本专科院校使用较多的 ARM 实验开发设备和 Linux 嵌入式操作系统进行编写的。全书由 ARM 基本结构与开发环境、Linux 嵌入式操作系统基础与开发技术、嵌入式 Linux 综合设计项目实例三部分内容构成，全书共七章。重点阐述了基于 Linux 操作系统的 ARM 应用系统开发基础和技术应用，包括：系统开发与设计技术、主要设备的驱动、图形界面的设计。较完整地阐述了基于 Linux 嵌入式系统在网络、智能家居、消费电子等领域应用的成功案例，这些案例通过了实验验证，具有较好的实用性。

本书着眼于嵌入式系统教学和 Linux 系统开发，系统基础论述完整，应用案例具体、实用性强，可广泛用于本科生和研究生学习，也可作为工程技术和开发人员的参考。

全书共分 7 章。其中，第 1 章、第 4 章、第 5 章的 5.6~5.8 节由哈尔滨工程大学康维新编写，第 2 章、第 5 章的 5.1~5.5 节、第 7 章的 7.1 节由黑龙江工程学院张爱文编写，第 3 章、第 7 章的 7.2、7.4 节由黑龙江科技学院武狄编写，第 6 章、第 7 章的 7.3、7.5 节由黑龙江工程学院宋海峰编写，附录 A 及附录 B 由李杨编写，全书由康维新教授统稿。

本书的编写得到了哈尔滨工程大学、黑龙江工程学院、黑龙江科技学院等相关实验室的大力支持，在此一并表示感谢。由于作者知识所限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者和专家批评指正。

编 者

# 目 录

前言	
第 1 章 嵌入式系统概述 .....	1
1.1 嵌入式系统的定义 .....	1
1.1.1 嵌入式系统的组成和特点 .....	2
1.1.2 嵌入式系统的发展历程及趋势 .....	2
1.2 嵌入式系统的体系结构和分类 .....	4
1.2.1 嵌入式系统的体系结构 .....	4
1.2.2 嵌入式系统的分类 .....	5
1.3 嵌入式微处理器 .....	6
1.3.1 嵌入式微处理器的分类 .....	6
1.3.2 ARM 嵌入式处理器的内核和架构 ..	6
1.3.3 ARM 微处理器结构 .....	14
1.3.4 ARM 嵌入式处理器的特点 及应用领域 .....	15
1.3.5 嵌入式处理器的选型原则 .....	15
1.4 嵌入式操作系统 .....	16
1.4.1 操作系统的概念和分类 .....	16
1.4.2 嵌入式 Linux 操作系统 .....	16
1.4.3 Windows CE 操作系统 .....	17
1.4.4 $\mu$ C/OS-II 操作系统 .....	19
1.4.5 Symbian 操作系统 .....	20
1.4.6 VxWorks 操作系统 .....	22
1.5 嵌入式系统的设计与开发 .....	23
1.5.1 嵌入式系统的设计与开发流程 .....	23
1.5.2 嵌入式系统的模拟仿真与调试 .....	23
本章小结 .....	25
习题与思考题 .....	25
第 2 章 嵌入式 Linux 开发基础 .....	26
2.1 Linux 的基本操作 .....	26
2.1.1 用户系统相关命令 .....	26
2.1.2 文件目录相关命令 .....	29
2.1.3 压缩打包相关命令 .....	30
2.1.4 网络相关命令 .....	31
2.1.5 重定向与管道 .....	31
2.1.6 Linux 帮助系统 .....	32
2.2 Linux 下 C 语言程序设计基础 .....	32
2.2.1 VI 的使用 .....	33
2.2.2 GCC 编译器 .....	36
2.2.3 GDB 调试器的使用 .....	38
2.2.4 GNU make 和 makefile .....	42
2.3 Linux Shell 编程 .....	46
2.4 Linux 进程控制编程 .....	53
2.4.1 Linux 进程概述 .....	53
2.4.2 Linux 进程编程 .....	54
2.4.3 Linux 进程通信 .....	58
2.5 Linux 下的多线程编程 .....	74
2.5.1 线程概述 .....	74
2.5.2 线程的基本操作 .....	75
2.5.3 线程的访问控制 .....	78
2.5.4 “生产者—消费者”实验 .....	86
本章小结 .....	88
习题与思考题 .....	88
第 3 章 开发环境的建立 .....	89
3.1 基于 ARM9 的博创 2410s 开发 实验平台 .....	89
3.2 ARM 与宿主机的通信 .....	90
3.2.1 串口通信 .....	90
3.2.2 以太网接口 .....	91
3.2.3 USB 接口 .....	92
3.2.4 JTAG 接口 .....	92
3.3 交叉编译环境的建立 .....	92
3.3.1 宿主环境搭建 .....	93
3.3.2 交叉编译环境的建立 .....	97
3.4 Boot Loader 技术 .....	99
3.4.1 初识 Boot Loader 工作原理 .....	99
3.4.2 VIVI 的代码分析与移植 .....	103

3.4.3 U-Boot 的分析与移植 .....	106	5.4.3 LCD 驱动开发流程 .....	175
3.5 ARM-Linux 内核的编译与移植 .....	113	5.5 块设备驱动 .....	177
3.5.1 Linux 内核版本与特点 .....	113	5.5.1 块设备驱动程序简介 .....	177
3.5.2 Linux 内核移植 .....	115	5.5.2 块设备驱动程序工作原理 .....	177
3.6 根文件系统的建立与烧写 .....	121	5.5.3 块设备驱动主要数据结构 .....	178
3.6.1 嵌入式 Linux 常用的文件系统 .....	122	5.5.4 块设备驱动编写流程 .....	181
3.6.2 根文件系统的目录结构 .....	125	5.6 键盘驱动 .....	182
3.6.3 定制系统文件 .....	125	5.6.1 键盘的分类 .....	182
3.6.4 NFS 文件系统的建立与使用 .....	126	5.6.2 键盘工作原理 .....	183
3.6.5 Samba 服务的建立与使用 .....	128	5.6.3 键盘驱动程序的实现 .....	184
3.6.6 使用 BusyBox 构建根文件系统 .....	133	5.7 Linux 网络驱动程序 .....	187
3.7 建立嵌入式 Linux 应用程序 .....	136	5.7.1 网络设备概述 .....	187
本章小结 .....	139	5.7.2 网络设备的加载方法 .....	188
习题与思考题 .....	140	5.7.3 重要数据结构 .....	190
<b>第 4 章 嵌入式 Linux 网络编程</b> .....	<b>141</b>	5.7.4 网络设备的初始化 .....	192
4.1 TCP/IP 概述 .....	141	5.7.5 打开和关闭网络设备 .....	192
4.1.1 OSI 参考模型与 TCP/IP		5.7.6 发送过程的实现 .....	192
参考模型 .....	141	5.7.7 接收过程的实现 .....	193
4.1.2 TCP/IP 协议族 .....	142	5.7.8 中断控制 .....	194
4.1.3 TCP 和 UDP .....	143	5.7.9 NE2000 兼容网卡驱动	
4.2 网络编程基础 .....	145	程序的移植 .....	195
4.2.1 socket 概述 .....	145	5.8 触摸屏接口设计与 Linux 驱动编程 .....	198
4.2.2 socket 的基本函数 .....	150	5.8.1 触摸屏接口概述 .....	198
4.3 socket 应用程序设计 .....	154	5.8.2 触摸屏驱动的体系接口 .....	200
4.3.1 TCP 编程实例 .....	154	5.8.3 触摸屏的 Linux 驱动程序分析 .....	201
4.3.2 UDP 编程实现 .....	157	5.8.4 触摸屏的测试与校准 .....	207
本章小结 .....	159	本章小结 .....	210
习题与思考题 .....	159	习题与思考题 .....	210
<b>第 5 章 嵌入式设备驱动</b> .....	<b>160</b>	<b>第 6 章 Qt 图形编程</b> .....	<b>211</b>
5.1 Linux 下设备驱动概述 .....	160	6.1 嵌入式 GUI 简介 .....	211
5.1.1 设备的分类 .....	160	6.1.1 Qt/Embedded .....	211
5.1.2 设备文件 .....	161	6.1.2 MiniGUI .....	212
5.1.3 主设备号与次设备号 .....	161	6.1.3 Microwindows .....	212
5.1.4 设备文件系统与系统文件系统 .....	162	6.1.4 OpenGUI .....	213
5.2 设备驱动程序的结构 .....	163	6.1.5 常见 GUI 的参数比较 .....	213
5.3 字符设备驱动 .....	166	6.2 Qt/Embedded 开发基础 .....	214
5.4 LCD 设备驱动 .....	173	6.2.1 Qt/Embedded 介绍 .....	214
5.4.1 LCD 工作原理 .....	174	6.2.2 Qt/Embedded 的安装与	
5.4.2 FrameBuffer 机制简介 .....	174	环境变量设置 .....	216

6.2.3 Qt/Embedded 信号和插槽机制.....	217	7.2.3 硬件电路设计.....	246
6.2.4 QtDesigner 的使用.....	221	7.2.4 软件设计.....	248
6.2.5 Qt/Embedded 窗口实例.....	222	7.3 基于嵌入式平台的电梯监控系统.....	251
6.3 基于 Qt 技术的 Qtopia.....	225	7.3.1 系统概述.....	251
6.3.1 基于 Qt 技术的 Qtopia 系统 平台.....	226	7.3.2 系统设计.....	253
6.3.2 Qtopia 介绍及其开发环境的 建立.....	226	7.3.3 系统实现.....	256
6.3.3 Qt/Embedded 和 Qtopia 下 应用程序的实现.....	228	7.4 无线点菜系统.....	266
6.4 Qt 编程综合实验.....	231	7.4.1 设计思路分析.....	266
6.4.1 基于 PC 的“Hello World”程序.....	232	7.4.2 系统硬件设计.....	267
6.4.2 发布 Qt/Embedded 程序 到目标板.....	239	7.4.3 系统软件设计.....	267
本章小结.....	241	7.4.4 总结.....	278
习题与思考题.....	241	7.5 基于嵌入式与 Web Service 的 智能家居系统.....	278
<b>第 7 章 嵌入式 Linux 综合设计</b>		7.5.1 系统概述.....	278
<b>项目实例</b> .....	242	7.5.2 系统设计.....	280
7.1 网络视频监控系统的.....	242	7.5.3 系统实现.....	296
7.2 车载信息娱乐系统.....	244	<b>附录</b> .....	309
7.2.1 实例说明.....	244	附录 A S3C2410X 引脚及信号定义.....	309
7.2.2 设计思路分析.....	245	附录 B 国外高校嵌入式系统课程的 体系结构.....	323
		<b>参考文献</b> .....	327

# 第 1 章 嵌入式系统概述

随着互联网（Internet）及物联网（Internet of Things）技术的发展和普及，在工农业生产、国防装备以及日常生活等领域，嵌入式系统的应用无所不在。从各种手持电子产品到空间探测和卫星控制系统，从家用电器到工业生产设备，在工业、军事、通信、运输、金融、医疗、气象、农业等众多领域无不依赖于嵌入式计算机技术，嵌入式系统发挥了举足轻重的作用。嵌入式系统的应用领域，如图 1-1 所示。



图 1-1 嵌入式系统的应用领域

21 世纪的今天，嵌入式系统的迅猛发展验证了比尔·盖茨的预言，即随着后 PC 时代的到来，PC 将无处不在。而今天的嵌入式系统带来的工业年产值已远远超过了 1 万亿美元。各种装置的智能化不再是奢侈需求，已经成为现代产品的基本功能。

## 1.1 嵌入式系统的定义

嵌入式系统是一个既笼统又比较宽泛的概念。目前，对嵌入式系统的定义有很多。微软公司曾在 2002 年对嵌入式系统的定义是：为完成某一特定功能，或是使用某一特定嵌入式应用程序的计算机或计算装置。其广义定义为任何一个非计算机的计算系统。根据 IEEE（电气和电子工程师协会）对嵌入式系统的定义，嵌入式系统是：控制、监视或辅助机器和设备运行的装置。目前，一种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，适用于应用系统，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生命力、才更具有优势。即：嵌入式系统是与应用紧密结合的，它具有很强的专用性，必须结合实际系统需求进行合理的剪裁利用。嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术和电子技术与各个行业的具体应用相结合后的产物，这一点决定了它必然是一个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成系统。



### 1.1.1 嵌入式系统的组成和特点

嵌入式系统由硬件和软件两部分组成。硬件部分包括嵌入式微处理器和外部设备接口电路与设备等；软件部分包括嵌入式操作系统和用户的应用程序。嵌入式系统硬件组成，如图 1-2 所示。

与通用的计算机相比，嵌入式系统具有以下特点：

1) 系统内核小。由于嵌入式系统主要用于小型电子设备或功能模块，系统资源相对有限，所以内核比通用的计算机系统要小很多。

2) 专用性强。嵌入式系统突出了个性化设计，其软件系统与硬件结合非常紧密。通常要针对硬件进行系统的移植，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剪裁不断进行修改。而针对不同的任务，往往需要对系统进行较大更改，程序的编译下载要和系统相结合，这种修改与通用软件的升级有较大的不同。

3) 系统精简。嵌入式系统一般没有系统软件和应用软件的明显区分，不要求其功能设计与实现上过于复杂。这一方面利于节约系统成本，保证系统的工作速度，同时也利于实现系统安全。

4) 实时性高。系统软件一般固化存储，以提高工作速度。软件代码要求高质量和高可靠性。

5) 具有多任务处理功能。现有嵌入式系统大都支持操作系统，利用系统资源、系统函数以及函数接口，实现多任务调度和执行。

6) 系统剪裁方便。嵌入式系统可以根据任务需要，在保证系统功能和性能的前提下合理剪裁系统硬件和系统软件，一方面节约硬件、减少硬件成本、降低系统功耗、减小几何尺寸；另一方面可以最大限度地提高系统工作速度和工作效率。

由于嵌入式系统具备上述突出的特点，才使其在生产、生活等诸多领域得到广泛应用。嵌入式系统是当今实现物联网及智慧地球的重要基础，使人类摆脱繁重的体力劳动，进而摆脱繁杂的脑力劳动，彻底改变人类的生活习惯及生活方式。

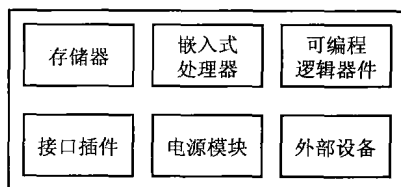


图 1-2 嵌入式系统硬件组成

### 1.1.2 嵌入式系统的发展历程及趋势

#### 1. 嵌入式系统的发展历程

嵌入式系统最早可以追溯到 20 世纪 70 年代，发展至今已有 40 年的历史。嵌入式系统的雏形是包括微处理器（MPU）、微控制器（MCU）等单片机构成的处理系统，发展到现在出现了具有各种功能单元并可以剪裁的系列嵌入式处理器，以及嵌入式片上系统（SoC）。

最早进入市场的单片机是 1976 年 Intel 公司推出的 8 位 8048 单片机。8048 只有 CPU 和简单的接口，需要外扩 ROM 和 RAM 后构成小系统，因此严格来讲 8048 不算一款标准的单片机。之后，Intel 公司推出了 51 系列、96 系列等多款单片机，其中具有典型内核和完善功能与稳定性能的 51 系列单片机应用至今，并成为国内多数高校单片机教学内容。

继 51 单片机问世之后, Zilog、Motorola、ATMEL 等公司相继推出了一系列单片机产品, 使 20 世纪 90 年代单片机机型出现了百花齐放的局面, 被广泛应用于各种家电、汽车、工业控制以及航空航天领域。

20 世纪 80 年代早期, 嵌入式系统开始应用操作系统, 程序员逐步用商业级的操作系统编写嵌入式应用软件, 这样可以获取更短的开发周期, 更少的开发资金和更高的开发效率, 嵌入式系统实现了真正意义上的功能。

最初的操作系统是一个实时核, 它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 Ready System 公司的 VRTX、Integrated System Incorporation (ISI) 的 PSOS、IMG 的 VxWorks、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点, 即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; 系统内核很小, 具有可裁剪、可扩充和可移植性, 可以移植到各种处理器上; 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 (RTOS) 的出现, 使得应用开发人员从小范围的开发中解放出来, 促使嵌入式有了更为广阔的应用空间。

20 世纪 90 年代以后, 随着对实时性要求的提高, 软件规模不断扩大, 实时核逐渐发展为实时多任务操作系统, 并作为一种软件平台逐步成为目前国际嵌入式系统的主流。此时, 更多的公司看到了嵌入式系统的广阔发展前景, 开始大力发展自己的嵌入式操作系统。除了上面的几家公司开发的嵌入式操作系统外, 还出现了 Palm OS、Windows CE, 嵌入式 Linux、Lynx、Nucleux, 以及国内的 Hopen、Delta OS 等嵌入式操作系统。

随着嵌入式系统技术的不断完善, ARM 等 32 位微处理器已开始在该系统中占主导地位, 嵌入式操作系统已经从简单走向成熟, 与互联网、物联网的结合日益密切。

## 2. 嵌入式系统的发展趋势

信息时代给嵌入式系统的发展创造了良好契机, 为嵌入式市场展现了美好的前景, 同时也对嵌入式生产厂商提出了新的挑战。

1) 嵌入式系统开发是一项系统工程, 因此要求嵌入式系统厂商不仅要提供嵌入式软、硬件系统本身, 同时还需要提供强大的硬件开发工具和软件包的支持。

目前, 很多厂商已经充分考虑到这一点, 在主推系统的同时, 将开发环境也作为重点推广。例如, 三星在推广 ARM7、ARM9 芯片的同时, 还提供开发板和板级支持包 (BSP), 而 Windows CE 在主推系统时也提供 Embedded VC++ 作为开发工具, 还有 VxWorks 的 Tornado 开发环境, Delta OS 的 Limda 编译环境等, 都是这一趋势的典型体现。

2) 随着网络化、信息化技术的成熟, 使得以往单一功能的设备 (如电话机、手机、冰箱等) 功能更加多样, 结构更加复杂。这就要求芯片设计厂商在芯片上集成更多的功能, 为了满足应用功能的升级, 设计师采用更强大的嵌入式处理器, 如 32 位、64 位 RISC 芯片或信号处理器 (DSP) 增强处理能力。同时, 增加功能接口, 如 USB; 扩展总线类型, 如 CAN BUS, 加强对多媒体、图形等的处理, 逐步实施片上系统 (SoC)。软件方面采用实时多任务编程技术和交叉开发工具技术来控制功能复杂性, 简化应用程序设计、保障软件质量和缩短开发周期。

3) 网络互联成为必然趋势。未来的嵌入式设备为了适应网络发展的要求, 必然要求硬件上提供各种网络通信接口。传统的单片机对于网络支持不足, 新一代的嵌入式处理器已经开始内嵌网络接口, 除了支持 TCP / IP 外, 有的还支持 IEEE1394、USB、CAN、Bluetooth

或 IrDA 通信接口中的一种或者几种。同时，也需要提供相应的通信组网协议软件和物理层驱动软件。在软件方面，系统内核支持网络模块，甚至可以在设备上嵌入 Web 浏览器，真正实现随时随地上网。

4) 精简系统内核、算法，降低功耗和软、硬件成本。未来的嵌入式产品是软、硬件紧密结合的设备，为了降低功耗和成本，需要设计者尽量精简系统内核，只保留和系统功能紧密相关的软、硬件，利用最低的资源实现最适当的功能。这就要求设计者选用最佳的编程模型和不断改进算法，优化编译器性能。因此，既需要软件人员有丰富的硬件知识，又需要发展先进嵌入式软件技术，如 Java、Web 和 WAP 等。

5) 提供友好的多媒体人机界面。嵌入式设备能与用户亲密接触，能提供非常友好的用户界面。手写文字输入、语音拨号上网、收发电子邮件以及彩色图形、图像都会使使用者获得自由的感受。目前，一些先进的掌上电脑（PDA）在显示屏幕上已实现汉字写入、短消息语音发布，但一般的嵌入式设备还未达到这个要求。

6) IP 核（Intellectual Property Core）。IP 产业是一个自 20 世纪 80 年代特别是 90 年代飞速发展的产业。从 20 世纪 90 年代中期开始，由于基于专用集成电路的板级系统设计已经不能满足系统产品的可靠性等要求，就出现了片上系统（System on Chip, SoC）的概念，并成为现代集成电路设计的发展方向。SoC 是指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 核设计是 SoC 设计的基础。

IP 核是指具有知识产权、功能具体、接口规范、可在多个集成电路设计中重复使用的功能模块，是实现系统芯片（SoC）的基本构件。IP 核在功能设计上考虑了可重用性，验证方法也非常明确。IP 核模块有行为（Behaviour）、结构（Structure）和物理（Physics）3 级不同程度的设计。对应描述功能行为的不同分为 3 类，即软核（Soft Core）、完成结构描述的固核（Firm IP Core）和基于物理描述并经过工艺验证的硬核（Hard Core）。

IP 核将一些在数字电路中常用但比较复杂的功能块，如 FIR 滤波器、SDRAM 控制器、PCI 接口等设计成可修改参数的模块。IP 核的重用是设计人员赢得迅速上市的主要策略。随着 CPLD/FPGA 的规模越来越大，设计越来越复杂，设计者的主要任务是在规定的周期内完成复杂的设计。调用 IP 核能避免重复劳动，大大减轻工程师的负担，因此使用 IP 核是目前的发展趋势。

## 1.2 嵌入式系统的体系结构和分类

### 1.2.1 嵌入式系统的体系结构

嵌入式系统早期主要应用于军事及航空航天等领域，后来逐步广泛地应用于工业控制、仪器仪表、汽车电子、通信和家用消费类等领域。随着 Internet 的发展，新型的嵌入式系统正朝着信息家电 IA（Information Appliance）和 3C 产品（Computer、Communication & Consumer Electronics）的方向发展。

嵌入式系统采用量体裁衣的方式把所需的功能嵌入到各种应用系统中。根据应用形式的不同，有 IP（Intellectual Property）级、芯片级和模块级三级不同体系架构。

IP 级的架构也就是系统级芯片 SoC 的形式。根据应用的要求把不同的 IP 单元集成在

一块芯片上,各种嵌入式软件也可以以 IP 的方式集成在芯片中。

芯片级架构是根据各种 IT 产品的要求,选用相应的处理器(MCU、DSP、RISC 型 MPU 等)芯片、RAM、ROM (EPROM/EEPROM/FLASH) 及 I/O 接口芯片等组成相应的嵌入式系统,相应的系统软件、应用软件也以固件形式固化在 ROM 中。这是目前嵌入式系统较常见的形式。

模块级架构是以 X86 处理器构成的计算机系统模块嵌入到应用系统中的。这样可以充分利用目前常用 PC 的通用性和便利性。该方式不但要缩小体积、增加可靠性,而且还要把操作系统改造为嵌入式操作系统,把应用软件固化在固态盘中。这种嵌入式系统较多地出现在工业控制和仪器仪表中。

嵌入式系统是由嵌入式处理器、嵌入式系统软件和嵌入式应用软件组成的。Intel 公司推出的个人互联用户架构 PCA 就是嵌入式系统的开发应用平台。在 PCA 的应用与通信子系统中的嵌入式处理器是基于 StrongARM/XScale 的处理器,PCA 可以配备 Windows CE、嵌入式 Linux 和 VxWorks 等各种嵌入式 OS。同时,为了便于开发各种应用软件,提供了各种组件及中间件。

## 1.2.2 嵌入式系统的分类

按系统的实时性划分,嵌入式系统可以分为硬实时系统和软实时系统。

按照系统对实时性的要求,硬实时系统对系统的响应时间有十分严格的约束。如果在规定的时间范围内,系统响应不能满足,将造成系统崩溃或带来致命灾难。例如,汽车的 ABS 和安全气囊系统、飞行控制系统、核电控制系统等,它们的失效会导致重大人员伤亡和经济损失。

软实时系统对系统的响应时间也有约束,在规定的响应时间范围内不能满足,相对而言只是造成局部功能失效,不会出现灾难性后果。例如,电视信号播放不能满足每秒 24 帧的频率,将导致马赛克等现象出现,也就是信号质量下降。证券交易终端不能及时处理客户请求,也就是对单个客户的交易造成一定危害,并不影响整个证券交易系统。

如果仅以处理速度的快慢来划分,可以将嵌入式系统分为强实时、普通实时和弱实时 3 类。强实时系统的响应时间一般在微秒量级,弱实时系统的响应时间多在秒级以上,中间的属于普通实时系统。

按工业应用的复杂程度,嵌入式系统可以分为以下 4 类:

1) 简单功能处理系统。系统只由单片嵌入式微处理器和辅助器件组成。其典型的应用是温度传感器、烟雾和气体探测器及断路器等小型设备。

2) 可扩展处理器系统。这类嵌入式系统除了微处理器芯片上集成的器件外,还需要增添一些简单的扩展芯片,如扩展存储器和外部设备接口。这类系统中,微处理器字长多为 8 位或 16 位。主要应用于过程控制、信号放大器、位置传感器及阀门传动器等设备。

3) 复杂嵌入式系统。这类嵌入式系统一般选用 16 位、32 位嵌入式微处理器,面向大规模的应用。虽然外部设备接口一般仍集成在微处理器外,但由于应用软件规模较大,必须扩展包括存储器在内的多种 IC 芯片,如 1MB 以上的扩展存储器、音视频处理芯片、加密解密芯片、显示芯片等。这类系统常用于控制器、电话交换机、电梯控制系统、数据采集系统、医药监视系统、诊断及实时控制系统、移动设备、机顶盒等。

4) 过程控制计算机系统。这类嵌入式系统与仪器、机械及设备相连来控制整个过程。嵌入式系统一般用于总体控制和监视,而不是对单个设备直接控制。在很多情况下,过程控制系统可与业务系统连接,两者可在一个主系统操作下协同运行。

## 1.3 嵌入式微处理器

### 1.3.1 嵌入式微处理器的分类

嵌入式微处理器是构成嵌入式系统的核心部分,按嵌入式系统所采用的微处理器位数,可以分为 4 位、8 位、16 位、32 位和 64 位系统。其中,4 位微处理器属于最初的嵌入式系统,现在已基本停用;8 位微处理器在 20 世纪 90 年代中期之前一直在嵌入式领域占统治地位;16 位微处理器,特别是 16 位的 DSP 微处理器广泛应用于数字信号处理领域;32 位微处理器正逐渐成为嵌入式应用的主流发展趋势,市场份额已达到 40%以上。此外,在一些高度复杂、高速的嵌入式系统中,已开始选用 64 位嵌入式微处理器。

任何微处理器(MPU)或微控制器(MCU)都可以作为嵌入式系统的核。对于新型的嵌入式系统的核,要求处理速度快、存储容量大、I/O 功能强、功率损耗低及实时响应快。

以 X86 微处理器架构作为嵌入式系统的核,具有开发方便和移植容易等优点,但是其体积大、功耗高和实时性差等不足也给它带来应用的局限。因此,采用该架构的嵌入式系统较多出现在对体积和功耗要求不高的工业控制和台式设备的应用领域。80186/188 是较早用于嵌入式系统的处理器,至今在网卡、终端设备和工业控制中还可以看到。80386EX 是较早 SoC 型的单片式 PC。它以 80386 微处理器为核,在一块芯片上集成了 PC 常用的 I/O、实时时钟 RTC、中断控制器、DMA 控制器、定时/计数器、并行/串行口以及 VGA 的 LCD 液晶驱动器等。现在仍有很多公司采用 486/586 微处理器为核,推出了面向 DVD、机顶盒和 Webpad 等应用的 SoC 芯片。

数字信号处理器(Digital Signal Processing, DSP)也常作嵌入式系统的核。DSP 数字信号处理能力强,特别适合于声音、图像等多媒体信息处理系统。但是,其具有常规处理能力不强、寻址范围有限、I/O 功能弱及开发平台差等不足,很少单独作为嵌入式系统的核,而是作为新型嵌入式处理系统的一个组成部分。

精简指令集计算机(Reduced Instruction Set Computer, RISC)型处理器具有结构简单、处理速度快和处理功能强等优点,新型的嵌入式系统大多数都采用 RISC 型处理器作为核。如 ARM 公司的 ARM、Hitachi 公司的 SH、MIPS/LSILogic/IDT/Aldeny/Toshiba 公司的 MIPS 和 Motorola 公司的 M-Core 等,都是新型嵌入式系统常用的 RISC 型处理器。其中,ARM 架构的 RISC 处理器使用量较大。

### 1.3.2 ARM 嵌入式处理器的内核和架构

ARM 公司成立于 1990 年,是嵌入式 RISC 处理器的知识产权(IP)供应商。它为 ARM 架构处理器提供了 ARM 处理器核(如 ARM710T/720T/740T、ARM920T/922T/940T、ARM926E/966E 及 ARM1020E 等)。目前,ARM 架构处理器已在高性能、低功耗、低成本的嵌入式应用领域占据领先地位。

由各 ARM 公司的合作半导体公司在上述的处理器内核或处理器核基础上进行再设计,嵌入各种外部设备和处理部件,形成各种嵌入式微处理器(MPU)或微控制器(MCU)。例如,ATMEL 公司采用 ARM7TDMI 内核设计生产的 AT91 系列 MCU;Cirros 公司采用 ARM720T 核设计生产的 EP 及 CL-PS 系列手持式产品中的 MPU;Hyundai 公司采用

ARM7TDMI 内核设计生产的 GMS30C7201 手持式产品中的 MPU；Intel 公司采用 StrongARM 核设计生产的 SA-1110 微处理器 MPU；Linkup Systems 公司采用 ARM720T 核设计生产的 L720 互联网处理器；OKI 公司采用 ARM7TDMI 内核设计生产的 ML67000 系列 MCU；Rohm 公司采用 ARM7TDMI 内核设计生产的 Bu6616K ISDN 处理器；Samsung 公司采用 ARM7TDMI 内核设计生产的 KS32/KS17 系列产品中的 MPU；Sharp 公司采用 ARM7TD 内核设计生产的 LH77790 手持式产品中的 MPU；Netsilicon 公司采用 ARM7DMI 内核设计生产的 NET+15/40/50 以太网的 MPU。

ARM 微处理器主要有 ARM7 系列、ARM9 系列、ARM9E 系列、ARM10E 系列、ARM11E 系列、Secur Core 系列、Inter 公司的 StrongARM 和 Xscale。其中，ARM7、ARM9、ARM9E、ARM10 和 ARM11E 是 5 个通用处理器系列，每一个系列提供一套相对独特的性能来满足不同应用领域的需求。Secur Core 系列专门为安全要求较高的应用而设计。下面详细介绍各种处理器的特点及应用领域。

### 1. ARM7 系列微处理器

ARM7 系列微处理器为低功耗的 32 位 RISC 处理器，最适合于对价位和功耗要求较高的消费类应用。其具有如下特点：

- 1) 具有嵌入式 ICE-RT 逻辑，调试开发方便。
- 2) 极低的功耗，适合对功耗要求较高的便携式产品应用。
- 3) 能够提供 0.9MHz 的三级流水线结构。
- 4) 代码密度高并兼容 16 位的 Thumb 指令集。
- 5) 对操作系统的支持广泛，包括 Windows CE、Linux、Palm OS 等。
- 6) 指令系统与 ARM9 系列、ARM9E 系列和 ARM10E 系列兼容，便于用户的产品升级换代。
- 7) 主频最高可达 130MHz，高速的运算处理能力能胜任绝大多数的复杂应用。

ARM7 系列微处理器主要应用于工业控制、Internet 设备、网络和调制解调器设备、移动电话等多种多媒体和嵌入式系统。该系列微处理器包括 ARM7TDMI、ARM7TDMI-S、ARM720T、ARM7EJ。其中，ARM7TDMI 是目前使用最广泛的 32 位嵌入式 RISC 处理器，属低端 ARM 处理器核。TDMI 的基本含义如下：

T：支持 16 位压缩指令集 Thumb。

D：支持片上 Debug。

M：内嵌硬件乘法器（Multiplier）。

I：嵌入式 ICE，支持片上断点和调试点。

### 2. ARM9 系列微处理器

ARM9 系列微处理器在高性能和低功耗特性方面提供最佳的性能。其具有以下特点：

- 1) 5 级整数流水线，指令执行效率更高。
- 2) 提供 1.1MHz 的哈佛结构。
- 3) 支持 32 位 ARM 指令集和 16 位 Thumb 指令集。
- 4) 支持 32 位的高速 AMBA 总线接口。
- 5) 全性能的 MMU，支持 Windows CE、Linux、Palm OS 等多种主流嵌入式操作系统。
- 6) MPU 支持实时操作系统。
- 7) 支持数据 Cache 和指令 Cache，具有更高的指令和数据处理能力。

ARM9 系列微处理器主要用于无线设备、仪器仪表、安全系统、机顶盒、高端打印机、数字照相机和数字摄像机等。该系列微处理器包括 ARM920T、ARM922T 和 ARM940T 3 种类型，以适用于不同的应用场合。

### 3. ARM9E 系列微处理器

ARM9E 系列微处理器为可综合处理器，使用单一的处理器内核提供了微控制器、DSP、Java 应用系统的解决方案，缩小了芯片的面积，降低了系统的复杂程度。ARM9E 系列微处理器提供了增强的 DSP 处理能力，适合于那些需要同时使用 DSP 和微控制器的应用场合。其具有如下特点：

- 1) 支持 DSP 指令集，适合于需要高速数字信号处理的场合。
- 2) 5 级整数流水线，指令执行效率更高。
- 3) 支持 32 位 ARM 指令集和 16 位 Thumb 指令集。
- 4) 支持 32 位的高速 AMBA 总线接口。
- 5) 支持 VFP9 浮点协处理器。
- 6) 全性能的 MMU，支持 Windows CE、Linux、Palm OS 等多种主流嵌入式操作系统。
- 7) MPU 支持实时操作系统。
- 8) 支持数据 Cache 和指令 Cache，具有更高的指令和数据处理能力。
- 9) 主频最高可达 300MIPS。

ARM9E 系列微处理器主要应用于现代无线设备、数字消费品、成像设备、工业控制、存储设备和网络设备等领域。该系列微处理器包括 ARM926EJ-S、ARM946E-S 和 ARM966E-S 这 3 种类型。

### 4. ARM10E 系列微处理器

ARM10E 系列微处理器具有高性能、低功耗的特点，由于采用了新的体系结构，与同等的 ARM9 器件相比较，在同样的时钟频率下，性能提高了近 50%。同时，ARM10E 系列微处理器采用了两种先进的节能方式，使其功耗极低。其具有如下特点：

- 1) 支持 DSP 指令集，适合于需要高速数字信号处理的场合。
- 2) 6 级整数流水线，指令执行效率更高。
- 3) 支持 32 位 ARM 指令集和 16 位 Thumb 指令集。
- 4) 支持 32 位的高速 AMBA 总线接口。
- 5) 支持 VFP10 浮点协处理器。
- 6) 全性能的 MMU，支持 Windows CE、Linux、Palm OS 等多种主流嵌入式操作系统。
- 7) 支持数据 Cache 和指令 Cache，具有更高的指令和数据处理能力。
- 8) 主频最高可达 400MHz。
- 9) 内嵌并行读/写操作部件。

ARM10E 系列微处理器主要应用于新一代无线设备、数字消费品、成像设备、工业控制、通信和信息系统等领域。该系列微处理器包括 ARM1020E、ARM1022E 和 ARM1026EJ-S 这 3 种类型。

### 5. ARM11E 系列微处理器

ARM11E 系列微处理器是 ARM 公司近年推出的新一代 RISC 处理器。它是由 ARM 新指令架构 ARMv6 的第一代设计实现的。该系列主要有 ARM1136J、ARM1156T2 和 ARM1176JZ 这 3 种内核型号，分别针对不同的应用领域。其具有如下特点：

1) 由8级流水线组成, 8条指令同时被执行, 比以前的ARM内核提高了至少40%的吞吐量。

2) 动态预测和静态预测的组合, 使ARM11E处理器能达到85%的预测正确性。对于每一个正确的预测, 给指令执行带来的是减少5个时钟周期的等待时间。

3) 增强存储器访问能力, 指令和数据可以被更长时间的保存在Cache中。

4) 具有流水线的并行机制, 尽管ARM11E是单指令发射处理器, 但是在流水线的后半部分允许了极大程度的并行性。一旦指令被解码, 将根据操作类型发射到不同的执行单元中。ARM11E的数据通路中包含多个处理单元, 允许ALU操作、乘法操作和存储器访问操作同时进行。

5) 内核和Cache及协处理器之间的数据通路是64位。

6) 浮点运算可供用户选择。

### 6. Secur Core 系列微处理器

Secur Core 系列微处理器专为安全需要而设计, 提供了完善的32位RISC技术的安全解决方案。因此, Secur Core 系列微处理器除了具有ARM体系结构的低功耗、高性能的特点外, 还具有其独特的优势, 即提供了对安全解决方案的支持。其在系统安全方面具有如下特点:

1) 带有灵活的保护单元, 以确保操作系统和应用数据的安全。

2) 采用软内核技术, 防止外部对其进行扫描探测。

3) 可集成用户自己的安全特性和其他协处理器。

Secur Core 系列微处理器主要应用于一些对安全性要求较高的应用产品及应用系统, 如电子商务、电子政务、电子银行业务、网络和认证系统等领域。该系列微处理器包括 Secur Core SC100、Secur Core SC110、Secur Core SC200 和 Secur Core SC210 这4种类型。

### 7. StrongARM 系列微处理器

Inter StrongARM SA-1100 处理器采用 ARM 体系结构高度集成的 32 位 RISC 微处理器。它融合了 Inter 公司的设计和处理技术以及 ARM 体系结构的电源效率, 采用在软件上兼容 ARMv4 的体系结构, 同时采用具有 Intel 技术优点的体系结构。Intel StrongARM 处理器是便携式通信产品和消费类电子产品的理想选择, 已成功应用于多家公司的掌上电脑系列产品。

### 8. Xscale 处理器

Xscale 处理器是基于 ARMv5TE 体系结构的解决方案, 是一款高性能、高性价比、低功耗的处理器。它支持 16 位的 Thumb 指令和 DSP 指令集, 已使用在数字移动电话、个人数字助理和网络产品等场合。

根据 ARM 架构的不同, 目前已定义了 7 种不同的版本, 具体介绍如下。

(1) V1 版架构 该版架构只在原型机 ARM1 上出现过。其基本性能有基本的数据处理指令(无乘法)和 LOAD/STORE 指令, 包括子程序调用及链接指令, 软件中断指令 64MB。

(2) V2 版架构 该版架构对 V1 版进行了扩展, 如 ARM2 与 ARM3 (V2a 版) 架构。增加了乘法和乘加指令, 支持协处理器操作指令、快速中断模式、SWP/SWPB 的最基本存储器与寄存器交换指令, 寻址空间 64MB。

(3) V3 版架构 V3 版架构对 ARM 体系结构进行了较大改动, 把寻址空间增至 32 位,



增加了当前程序状态寄存器 (Current Program Status Register, CPSR) 和程序状态保存寄存器 (Saved Program Status Register, SPSR), 以便增强对异常情况的处理。增加了中止 (Abort) 和未定义两种处理器模式。ARM6 采用的就是该版架构。

(4) V4 版架构 V4 版架构对 V3 版架构进行了进一步扩充, 引进了 16 位的 Thumb 指令集, 使 ARM 的使用更加灵活。ARM7、ARM8、ARM9 和 StrongARM 都采用该版架构。指令集中增加了以下功能:

- 1) 符号化和非符号化半字及符号化字节的存/取指令。
- 2) 16 位 Thumb 指令集。
- 3) SWI 指令的功能。
- 4) 处理器系统模式引进特权方式时, 使用用户寄存器操作。
- 5) 把一些未使用的指令空间捕获为未定义指令。

(5) V5 版架构 在 V4 版基础上增加了一些新的指令, ARM10 和 XScale 都采用该版架构。新增指令如下:

- 1) 带有链接和交换的转移 BLX 指令。
- 2) CLZ 指令。
- 3) BRK 中断指令。
- 4) V5TE 版增加了信号处理指令。
- 5) 为协处理器增加更多可选择的指令。

(6) V6 版架构 该版架构的特点如下:

1) 多媒体处理扩展使 MPEG4 编码/解码的速度加快了一倍, 音频处理的速度也加快了一倍。

2) 增强的 Cache 结构, 实地址 Cache4, 减少 Cache 的刷新和重载, 减少上下文切换的开销。

3) 增强了异常和中断处理, 使实时任务的处理更加迅速。

4) 支持 Unaligned 和 Mixed-endian 数据访问, 使数据共享、软件移植更简单, 也有利于节省存储器空间。

对绝大多数应用来说, ARM V6 保持了 100% 的二进制向下兼容, 使用户过去开发的程序可以进一步继承下去。ARM V6 保持了所有过去架构中的 T (Thumb 指令) 和 E (DSP 指令) 扩展, 使代码压缩和 DSP 特点得到延续。为加速 Java 代码执行速度的 ARM Jazalle 技术也继续在 ARM V6 架构中发挥重要作用。

(7) V7 版架构 全新的 ARM V7 架构是在 ARM V6 架构的基础上诞生的。ARM V7 架构采用了 Thumb-2 技术, 它是在 ARM 的 Thumb 代码压缩技术的基础上发展出来的, 并且保持了对已存 ARM 解决方案的完整的代码兼容性。Thumb-2 技术比纯 32 位代码少使用 31% 的内存, 降低了系统开销, 同时却能够提供比已有的基于 Thumb 技术的解决方案高出 38% 的性能表现。ARM V7 架构还采用了 NEON 技术, 将 DSP 和媒体处理能力提高了近 4 倍, 并支持改良的浮点运算, 满足下一代 3D 图形和游戏物理应用以及传统的嵌入式控制应用的需求。此外, ARM V7 还支持改良的运行环境, 来迎合不断增加的 JIT 和 DAC 技术的使用。各版本之间的区别及架构与内核的关系, 如表 1-1 所示。