

COMPUTER

高等院校计算机技术



“十二五”规划教材

嵌入式系统设计与实践

— Linux 篇

◎ 主 编 刘加海 厉晓华
副主编 胡 珺 鲍福良



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

嵌入式系统设计与实践

—— Linux 篇

主 编 刘加海 厉晓华

副主编 胡 珺 鲍福良



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统设计与实践. Linux 篇 / 刘加海, 厉晓华
主编. —杭州: 浙江大学出版社, 2016. 7
ISBN 978-7-308-15775-9

I. ①嵌… II. ①刘… ②厉… III. ①微型计算机—
统计设计 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 086839 号

内容简介

本书内容包括在嵌入式系统概述中论述了嵌入式微处理器与嵌入式操作系统、嵌入式开发流程, 分析了嵌入式最小系统与 S3C2410 开发板、ARM 处理器指令、ARM9 的 S3C2410 主要部件及参数设置, 论述了嵌入式系统开发环境的构建、嵌入式 Linux 引导程序概述与移植、内核定制与根文件系统制作、嵌入式图形环境的设置与编程初步、嵌入式 Web 环境的设置、设备驱动程序设计基础、步进电机驱动的设计、数码驱动程序设计、LCD 驱动参数的配置与编译、SD 卡驱动参数的配置与编译、嵌入式系统设计分析, 最后给出了十四个 Linux 环境下嵌入式系统实验设计。

本书结构合理、概念清晰、重点突出、案例实用性强, 可以直接应用在项目设计中, 是一本技能型嵌入式系统设计教材, 适合于 Linux 环境下嵌入式工程技术人员、计算机专业、软件专业及理工类的本、专科生、研究生使用, 希望能够为本科生、研究生、嵌入式工程技术人员、Linux 程序设计师及 Linux 程序爱好者提供有效的帮助。

嵌入式系统设计与实践——Linux 篇

主 编 刘加海 厉晓华
副主编 胡 珺 鲍福良

责任编辑 周卫群
责任校对 王文舟 汪淑芳
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州中大图文设计有限公司
印 刷 杭州杭新印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 30.5
字 数 742 千
版 印 次 2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-15775-9
定 价 56.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式 (0571)88925591; <http://zjdxcsb.tmall.com>

前 言

嵌入式系统已经成为目前最热门的领域之一，已逐渐由原来仅限于工业用计算机拓展到所有的智能终端与智能应用中，例如物联网应用中的各种智能终端。嵌入式系统广泛应用于国防、工控、家用、商用、办公、医疗等领域。

嵌入式系统的开发环境有很多，但大多数采用 Linux 系统。Linux 操作系统从第一个内核诞生到现在，以其开放、安全、稳定的特性得到越来越多用户的认可。其应用领域逐步扩展，从最早的 Web、FTP、邮件服务开始，逐步扩展到诸如个人桌面应用、网络安全、电子商务、远程教育、集群运算、网格运算、嵌入式系统等各个领域。

嵌入式系统的学习一定要借助于具体的嵌入式开发设备，而不同的厂家在学习中不尽相同，很难有一本教材与哪个厂家的嵌入式开发板相匹配，这给初学者带来不少的困难。笔者多年前曾给浙江大学软件学院研究生、浙江大学计算机学院的学生、浙江大学城市学院的本科生及给全国部分高校的教师培训开设此类课程。在教学中希望并想像能有一本嵌入式系统的入门书，此书不太依赖某厂家的嵌入式开发设备，又能让读者基本掌握与领会基本的嵌入式开发的知识与技能。本教材的编写就是在这样情况下的一种探索。

本书内容包括二大部分，第一部分的主要内容为：

在嵌入式系统概述中论述了嵌入式微处理器与嵌入式操作系统、嵌入式开发流程，分析了嵌入式最小系统与 S3C2410 开发板、ARM 处理器指令、ARM9 的 S3C2410 主要部件及参数设置，论述了嵌入式系统开发环境的构建、嵌入式 Linux 引导程序、内核定制与根文件系统制作、嵌入式图形环境的设置与编程初步、嵌入式 Web 环境的设置、设备驱动程序设计基础、步进电机驱动的设计、数码驱动程序设计、LCD 驱动参数的配置与编译、SD 卡驱动参数的配置与编译、嵌入式系统设计分析。

第二部分主要安排了十四个 Linux 环境下嵌入式系统实验设计，这些实验大多不依赖于某个厂家的嵌入式开发板，具体的实验有：

- 实验 1 嵌入式 Linux 系统硬件环境的搭建
- 实验 2 ADS 安装与环境设置及 C 程序调试
- 实验 3 ARM 汇编程序及 C 程序混合调试
- 实验 4 嵌入式 GPIO 驱动程序设计
- 实验 5 嵌入式串口驱动程序设计



- 实验 6 基于虚拟机的 Linux 操作系统安装及常用命令操作
- 实验 7 Linux 环境下嵌入式软件环境的设置
- 实验 8 使用 Busybox 构造 cramfs 根文件系统
- 实验 9 Linux 内核定制与编译
- 实验 10 嵌入式图形环境 MiniGUI 的安装与设置
- 实验 11 嵌入式图形环境 QT 的设置
- 实验 12 基于 thttpd 嵌入式 Web 服务器设置
- 实验 13 驱动程序的加载与卸载
- 实验 14 LCD 驱动参数的配置与编译

本书由浙江大学刘加海教授、浙江大学信息中心厉晓华高级工程师主编，浙江外国语学院胡珺老师、浙江大学城市学院鲍福良老师为副主编，参与编写的有浙江大学软件学院赵斌、上海锐极电子有限公司李道流、浙江大学宁波理工学院唐云廷，浙江商业职业技术学院孔美云、张峰、王群华等。本书编写过程中参阅和借鉴了许多文献，这些成果对本书的形成功不可没，在此对这些文献的作者表示衷心的感谢！由于时间仓促及作者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。批评与建议请发邮件到 Liujh@zucc.edu.cn，以便及时修订。

目 录

CONTENTS

第 1 章 嵌入式系统概述	1
1.1 嵌入式系统概述	2
1.1.1 嵌入式系统定义	2
1.1.2 嵌入式系统的特点	2
1.2 嵌入式微处理器	3
1.2.1 嵌入式微处理器组成	3
1.2.2 嵌入式微处理器分类	4
1.2.3 嵌入式微处理器系统架构	5
1.3 嵌入式操作系统	6
1.3.1 DOS	6
1.3.2 Windows CE	7
1.3.3 Palm OS	7
1.3.4 EPOC	7
1.3.5 VxWorks	7
1.3.6 μ C/OS	7
1.3.7 ucLinux	7
1.3.8 Linux	8
1.4 嵌入式应用	9
1.4.1 消费电子	10
1.4.2 信息家电	10
1.4.3 汽车电子	10
1.4.4 工业控制	10
1.4.5 通信网络	11
1.4.6 医疗电子	11
1.4.7 商业金融	11



1.5 嵌入式设备的构成	12
1.5.1 嵌入式硬件系统	13
1.5.2 嵌入式软件系统	13
1.5.3 嵌入式外围设备	13
1.5.4 家庭安防系统	14
1.6 嵌入式系统的开发流程	15
1.6.1 建立开发环境	15
1.6.2 配置开发主机的参数	15
1.6.3 建立引导装载程序 BOOTLOADER	15
1.6.4 下载已经移植好的 Linux 操作系统内核	15
1.6.5 建立根文件系统	16
1.6.6 建立应用程序的 FLASH 磁盘分区	16
1.6.7 开发应用程序	16
1.6.8 烧写内核、根文件系统和应用程序, 发布产品	16
第 2 章 嵌入式最小系统与 S3C2410 开发板	19
2.1 嵌入式系统硬件模块分析	20
2.2 ARM 微处理器概述	23
2.2.1 ARM9 微处理器特点	25
2.2.2 ARM 选型原则	26
2.3 嵌入式最小系统	27
2.4 S3C2410 处理器概述	29
2.4.1 S3C2410 芯片的功能单元	30
2.4.2 S3C2410 芯片的系统管理	30
2.4.3 S3C2410 芯片的启动模式	31
2.4.4 S3C2410 系统结构	31
2.4.5 S3C2410 的引脚分布及信号描述	32
2.4.6 S3C2410 芯片与端口相关的寄存器	34
2.4.7 端口 A 引脚定义及功能设置	34
2.4.8 端口 B-H 引脚定义及功能设置	35
2.5 嵌入式开发板	40
2.6 嵌入式系统中常用硬件模块	41
第 3 章 ARM 处理器指令概述	58
3.1 ARM 微处理器的指令的分类与格式	59
3.2 ARM 指令的寻址方式	59
3.2.1 立即寻址	59



3.2.2	寄存器寻址	60
3.2.3	寄存器间接寻址	60
3.2.4	基址寻址	61
3.2.5	变址寻址	61
3.2.6	多寄存器寻址	62
3.2.7	相对寻址	62
3.2.8	堆栈寻址	62
3.3	常用 ARM 指令	63
3.3.1	内存访问指令	63
3.3.2	算术运算指令	63
3.3.3	逻辑运算指令	64
3.3.4	mov 指令	64
3.3.5	比较指令	64
3.3.6	跳转指令	64
3.3.7	条件执行指令	65
3.4	汇编语言的程序结构及在 ADS 环境下调试	66
3.4.1	汇编语言程序结构	66
3.4.2	汇编语言编辑、运行与调试	67
3.5	汇编语言与 C/C++ 的混合编程	73
3.5.1	C 语言程序调用汇编语言程序	74
3.5.2	汇编程序调用 C 语言程序	79
第 4 章	S3C2410 主要部件及参数设置	86
4.1	NAND FLASH 控制器	87
4.1.1	NOR FLASH 和 NAND FLASH 比较	87
4.1.2	S3C2410 NAND FLASH 控制器	87
4.1.3	NAND FLASH 启动过程	88
4.1.4	NAND FLASH 存储器接口	89
4.1.5	NAND FLASH 寄存器参数描述	90
4.2	中断控制器	94
4.3	系统定时器	98
4.4	异步串行口	106
4.5	IIC 总线接口	109
4.6	A/D 转换控制器	111
第 5 章	嵌入式系统开发环境构建	115
5.1	嵌入式 Linux 开发环境的硬件连接	116



5.1.1 嵌入式硬件系统	116
5.1.2 PC 宿主机与嵌入式硬件设备的连接	116
5.2 嵌入式 Linux 开发环境设置	117
5.2.1 嵌入式开发环境配置流程	118
5.2.2 关闭防火墙	119
5.2.3 minicom 端口配置及使用	119
5.2.4 TFTP 服务配置及使用	125
5.2.5 NFS 服务的配置	129
5.3 交叉编译器的安装	130
5.3.1 安装交叉编译器	131
5.3.2 用交叉编译器编译源程序	132
5.3.3 简单测试嵌入式程序	132
5.4 GDBServer 调试器	133
5.4.1 GDBServer 调试环境搭建	134
5.4.2 GDB 程序调试举例	135
5.5 make 工程管理器	139
5.5.1 Makefile 工程文件的编写	139
5.5.2 Makefile 变量的使用	144
5.5.3 Makefile 文件对其他 Makefile 文件的引用	148
5.5.4 Makefile 中的函数	148
5.5.5 运行 make	150
第 6 章 嵌入式 Linux 引导程序	154
6.1 BootLoader 概述	155
6.2 BootLoader 主要程序段分析	157
6.2.1 阶段 1——汇编代码分析	157
6.2.2 阶段 2——C 语言函数功能介绍	161
6.3 U-BOOT 的移植过程	162
第 7 章 内核定制与根文件系统制作	166
7.1 Linux 内核移植	167
7.1.1 内核移植的基本概念	167
7.1.2 内核移植的准备	167
7.1.3 内核移植的基本过程	168
7.1.4 内核移植的具体操作	169
7.2 Linux 根文件系统的制作	177
7.2.1 根文件系统概述	177



7.2.2 建立根文件系统	178
第 8 章 嵌入式图形环境的设置与编程初步	186
8.1 MiniGUI 图形环境的设置	188
8.1.1 MiniGUI 的特点	188
8.1.2 MiniGUI 开发环境	188
8.1.3 MiniGUI 的配置和交叉编译	188
8.1.4 实例程序的编译安装	189
8.1.5 板载 Linux 的图像显示环境配置	190
8.1.6 一个简单的 MiniGUI 程序	190
8.2 Qt 图形环境的设置	197
8.2.1 Qt 的特点	197
8.2.2 Qt 的开发环境	198
8.2.3 Qt 集成开发工具的使用	200
8.2.4 Qt 应用实例分析	205
第 9 章 嵌入式 Web 环境的设置	213
9.1 Linux 环境下 Web 服务器	214
9.1.1 CGI 通用网关接口技术	214
9.1.2 Web 动态服务的流程	215
9.2 Linux 环境下基于 thttpd 动态服务器的实现过程	215
9.3 Linux 环境下基于 Boa 的动态服务器实现	218
9.3.1 应用 Boa 软件实现动态 Web 服务器的方法	218
9.3.2 通过动态 Web 页面访问远程温度传感器的例子	222
9.4 用 DMF 实现 Linux 下的动态 Web 服务器	223
9.4.1 Web 服务器的配置	223
9.4.2 动态 Web 页面的访问	225
第 10 章 设备驱动程序设计基础	228
10.1 设备驱动程序的概念	229
10.2 驱动程序的设计流程	231
10.2.1 字符驱动程序设计流程	231
10.2.2 驱动程序流程设计举例	233
10.3 Linux 字符设备驱动程序设计	235
10.3.1 字符设备驱动程序数据结构	235
10.3.2 字符设备驱动程序的基本框架	240
10.4 字符设备驱动程序实例——虚拟字符设备	242



10.4.1	结构体设计	243
10.4.2	设备驱动读、写函数的设计	243
10.4.3	字符设备驱动程序设计步骤	245
10.4.4	字符设备驱动程序测试	248
10.5	字符设备驱动程序实例——GPIO 的驱动程序设计	249
10.5.1	S3C2410 可编程输入、输出 GPIO	249
10.5.2	S3C2410 的 GPIO 设置	250
第 11 章 步进电机驱动的设计		264
11.1	步进电机概述	265
11.2	嵌入式 Linux 步进电机驱动程序设计流程	266
11.3	步进电机驱动程序需求分析	267
11.4	步进电机驱动的设计	268
11.4.1	步进电机驱动程序设计过程	268
11.4.2	步进电机应用程序设计	271
11.4.3	步进电机驱动程序编译与调试	273
第 12 章 数码驱动程序设计		279
12.1	数码驱动原理	280
12.2	LED 数码管	281
12.2.1	LED 驱动电路相关器件的功能特性	281
12.2.2	驱动电路中显示模块	282
12.3	数码驱动程序设计实例	282
12.3.1	系统分析	282
12.3.2	系统硬件设计	284
12.3.3	系统软件设计	285
12.4	系统设计操作步骤	289
12.4.1	键盘驱动程序设计步骤	289
12.4.2	LED 驱动程序设计步骤	294
12.5	LED 数码显示测试程序设计	299
第 13 章 LCD 驱动参数的配置与编译		305
13.1	LCD 概述	306
13.1.1	液晶显示器原理	306
13.1.2	液晶显示器种类	306
13.2	S3C2410 内置 LCD 控制器	307
13.2.1	S3C2410 LCD 控制器特性	307



13.2.2 TFT 屏与 S3C2410 内部 LCD 控制器	307
13.3 LCD 驱动程序设置流程	309
第 14 章 SD 卡驱动参数的配置与编译	314
14.1 SD 卡概述	315
14.1.1 SD 卡应用	315
14.1.2 SD 卡的辨别	315
14.1.3 SD 卡的接口定义及管脚功能	316
14.1.4 SD 卡的寄存器	317
14.1.5 S3C2410 与 SD 卡的连接	318
14.2 SD 卡驱动参数的配置	319
14.2.1 SD 卡驱动参数的配置流程	319
14.2.2 SD 卡配置步骤	319
14.3 生成 cramfs 文件系统	324
14.4 SD 卡读写校验	326
第 15 章 嵌入式系统设计概述	328
15.1 嵌入式 Linux 下 IC 卡接口设计与驱动开发	329
15.1.1 IC 卡设备触点硬件电路介绍	329
15.1.2 IC 卡读卡电路简介	329
15.1.3 IC 卡设备驱动模块的实现详解	330
15.1.4 驱动模块开发的编译调试	333
15.1.5 驱动模块的静态编译进内核	333
15.2 嵌入式 GPS 导航系统的设计	334
15.2.1 与 GPS 相关的一些概念	334
15.2.2 嵌入式 GPS 导航系统	336
15.2.3 嵌入式 GPS 导航系统的硬件设计	337
15.2.4 嵌入式 GPS 导航系统的软件设计概述	338
15.2.5 嵌入式 GPS 导航系统的应用	339
15.3 嵌入式 Linux 系统中触摸屏控制的研究与实现	339
15.3.1 Linux 下的设备驱动	339
15.3.2 嵌入式 Linux 系统下的驱动程序	340
15.3.3 触摸屏的应用程序	341
15.4 嵌入式智能家居系统分析	343
15.4.1 智能家居系统概况	343
15.4.2 智能家居系统的实现技术与方式	344
15.4.3 中心控制系统	346



15.4.4 系统软件设计	346
15.4.5 客户端软件设计	347
15.5 数字视频监控终端在 linux 环境下的设计与实现	347
15.5.1 数字视频监控终端概况	348
15.5.2 视频监控系统解决方案	348
15.5.3 视频监控系统的研究热点	349
15.5.4 视频监控系统的研究方案	349
Linux 环境下嵌入式系统实验设计	352
附 录	468

第 1 章

嵌入式系统概述



本章重点

1. 嵌入式系统。
2. 嵌入式处理器。
3. 嵌入式操作系统。
4. 嵌入式应用。
5. 嵌入式设备的构成。
6. 嵌入式系统的开发流程。



本章导读

本章对嵌入式系统做了简单的论述，对嵌入式处理器做了较为全面的介绍，对嵌入式操作系统做了简要概述，论述了嵌入式硬件与外围电路的构成，请重点关注嵌入式软件系统的构成、嵌入式系统的开发流程，并对嵌入式系统的应用有所了解。



1.1 嵌入式系统概述

嵌入式系统的研究与应用已经成为最热门的领域之一，逐渐由原来仅限于工业用计算机自动控制领域扩展到家电领域及所有的智能终端。这类系统具有特定的功能、占用空间小、稳定性强、没有外接的零配件等特点。

1.1.1 嵌入式系统定义

嵌入式系统是以嵌入式计算机技术为核心，面向用户、面向产品、面向应用，软硬件可裁减，适用于对功能、可靠性、成本、体积、功耗等综合性能有严格要求的专用计算机系统。嵌入式系统有三个要素，首先是一个计算机系统，并具有嵌入性与专用性。

1.1.2 嵌入式系统的特点

1. 可裁剪性

通过裁剪的嵌入式系统内核小、专用性强、系统精简。嵌入式操作系统与功能软件集成于计算机硬件系统中，具有软件代码短、高效、高自动化，软件是嵌入式系统的主体。

2. 高可靠性

在恶劣的环境或突然断电的情况下，系统仍然能够正常工作。嵌入式系统与具体的应用紧密联系，要满足应用对象的最小硬/软件、高可靠性、低功耗等要求，它是一个专用的计算机系统。

3. 实时性

许多嵌入式应用要求实时性，这就要求嵌入式操作系统具有实时处理能力。

4. 专门的开发环境

嵌入式系统的开发需要有专门的开发工具和开发环境。通常情况下嵌入式开发环境由嵌入式开发板、嵌入式操作系统、交叉编译器等组成。

嵌入式系统和具体应用有机地结合在一起，它的升级换代也是和具体产品同步进行；嵌入式系统中的软件代码要求高质量、高可靠性，一般都固化在只读存储器中或闪存中，也就是说软件要求固态化存储，而不是存储在磁盘等载体中。

在新兴的嵌入式系统产品中，常见的有手机、PDA、GPS、机顶盒、嵌入式服务器（embedded server）及瘦客户机（thin client）等。全世界的厂商都看好这一块市场，并且



都投入大量人力、物力、财力进行研发。事实上，嵌入式系统的定义将会越来越模糊，但仍会一点一滴地融入人们的日常生活中。

随着芯片技术和电子产品智能化应用的飞速发展，嵌入式技术越来越受到人们的关注，应用领域遍及几乎所有的电子产品领域，如智能机器人、网络通信、军用设备、汽车导航、环境保护、智能仪器及多媒体处理等。

嵌入式系统与嵌入式设备是有区别的，如手机是嵌入式设备，在手机内部含有嵌入式系统。



1.2 嵌入式微处理器

嵌入式计算机技术的应用已影响到我们生活的方方面面，几乎无处不在，在移动电话、家用电器、汽车等无不有它的踪影。嵌入式技术将使日常使用的设备具有智能，变得聪明。在一些发达国家，人均占有 32 位嵌入式微控制器的数量已超过 15 个。

1.2.1 嵌入式微处理器组成

微处理器是整个系统的核心，通常由 3 大部分组成：控制单元、算术逻辑单元和寄存器，如图 1.1 所示。

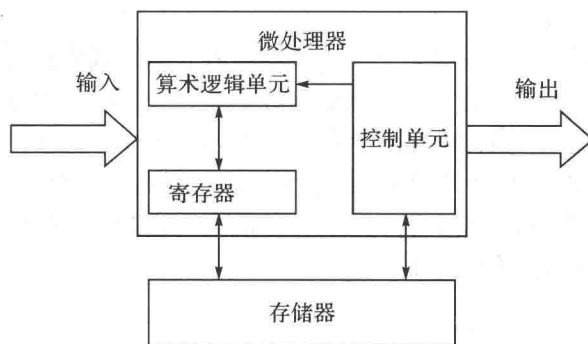


图 1.1 微处理器基本结构

1. 控制单元

主要负责取指、译码和取操作数等基本动作，并发送主要的控制指令。控制单元中包括两个重要的寄存器：程序计数器（PC）和指令寄存器（IR）。程序计数器用于记录下一条程序指令在内存中的位置，以便控制单元能到正确的内存位置取指；指令寄存器负责存放被控制单元所取的指令，通过译码，产生必要的控制信号送到算术逻辑单元进行相关的

数据处理工作。

2. 算术逻辑单元

算术逻辑单元分为两部分，一部分是算术运算单元，主要处理数值型的数据，进行数学运算，如加、减、乘、除或数值的比较；另一部分是逻辑运算单元，主要处理逻辑运算工作，如 AND、OR、XOR 或 NOT 等运算。

3. 寄存器

用于存储暂时性的数据。主要是将从存储器中所得到的数据送到算术逻辑单元中进行处理，然后将算术逻辑单元中处理好的数据再进行算术逻辑运行或存入到存储器中。

1.2.2 嵌入式微处理器分类

嵌入式系统的核心部件是各种类型的嵌入式处理器，据不完全统计，全世界嵌入式处理器的品种已达到至少 100 个系列 1200 多种机型，流行体系结构有 30 多个系列，其中 8051 体系的占有一半。根据其现状，嵌入式计算机技术的应用按照所使用处理器的不同可分为：

1. 嵌入式微处理器系统 EMPU

在应用中，将微处理器装配在专门设计的电路板上，只保留和嵌入式应用有关的母板功能，这样可以大幅度减小系统体积和功耗。为了满足嵌入式应用的要求，嵌入式微处理器和标准微处理器虽然在功能上基本一致，但在工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面有所增强。

2. 嵌入式微控制器系统 MCU

嵌入式微控制器又称单片机。一个系列的嵌入式微控制器具有多种衍生产品，每种衍生产品的处理器内核都是一样的，不同的是存储器和外设的配置及封装。这样可以使嵌入式微控制器最大限度地和应用需求相匹配，功能不多不少，从而减少功耗和成本。和嵌入式微处理器相比，微控制器的最大特点是单片化，从而使体积减小，功耗和成本下降，可靠性提高，片内资源一般比较丰富，只要外部配上适当的外围器件就可以构成各种控制系统及设备，是目前嵌入式系统工业的主流。

3. 嵌入式处理器系统 DSP

嵌入式 DSP 处理器对系统结构和指令进行了特殊设计，使其适合于执行 DSP 算法，编译效率较高，指令执行速度也较高。在数字滤波、FFT、谱分析等方面 DSP 算法正在大量进入嵌入式领域。

4. 嵌入式片上系统 SoC

随着 EDI 的推广和 VLSI 设计的普及化及半导体工艺的迅速发展，在一个硅片上实现一个更为复杂的系统的时代已来临，这就是 SoC。