



高等学校计算机专业“十一五”规划教材

# 嵌入式系统原理及应用

主编 刘卫光  
主审 任爱锋



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校计算机专业“十一五”规划教材

# 嵌入式系统原理及应用

主 编 刘卫光

副主编 任东陕 周元哲 赖海玲

主 审 任爱锋

西安电子科技大学出版社

2010

## 内 容 简 介

本书以嵌入式系统为核心,全面介绍了 32 位 ARM 嵌入式系统的基础理论知识,主要内容包括:嵌入式系统基本概念、ARM 体系结构与调试方法、软件与硬件开发技术、存储与接口技术、总线与外围设备、实时操作系统与调度算法、液晶触摸屏应用程序开发实例。本书在内容设计上,首先完整讲述了嵌入式系统的基础知识和 ARM 技术,然后结合基于 ARM 处理器的实际工程例程,讲述了嵌入式应用开发流程,形成了从易到难、相对完整、贴近实际工程应用的嵌入式理论教学体系。结合本书的实验内容,可使读者快速、全面地掌握嵌入式系统开发与应用技术。

本书可作为高等院校计算机、电类专业本科生或研究生嵌入式系统教学的教材,也可作为基于 ARM 核嵌入式系统开发的工程技术人员的参考资料。

★本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

### 图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统原理及应用 / 刘卫光主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2010.2  
高等学校计算机专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2351-1

I. 嵌… II. 刘… III. 微型计算机—系统设计—高等学校—教材 IV. TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第号

策 划 陈 婷

责任编辑 陈 婷

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 18.5

字 数 430 千字

印 数 1~3000 册

定 价 26.00 元

ISBN 978-7-5606-2351-1/TP·1189

**XDUP 2643001-1**

\*\*\*如有印装问题可调换\*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 高等学校计算机专业“十一五”规划教材

## 编审专家委员会

**主任:** 马建峰 (西安电子科技大学计算机学院院长, 教授)

**副主任:** 赵祥模 (长安大学信息工程学院院长, 教授)

余日泰 (杭州电子科技大学计算机学院副院长, 副教授)

**委员:** (按姓氏笔画排列)

王忠民 (西安邮电学院计算机系副主任, 教授)

王培东 (哈尔滨理工大学计算机与控制学院院长, 教授)

石美红 (西安工程大学计算机科学与技术系主任, 教授)

纪震 (深圳大学软件学院院长, 教授)

刘卫光 (中原工学院计算机学院副院长, 教授)

陈以 (桂林电子科技大学计算机与控制学院副院长, 副教授)

张尤赛 (江苏科技大学电子信息学院副院长, 教授)

邵定宏 (南京工业大学信息科学与工程学院副院长, 教授)

张秀虹 (青岛理工大学计算机工程学院副院长, 教授)

张焕君 (沈阳理工大学信息科学与工程学院副院长, 副教授)

张瑞林 (浙江理工大学信息电子学院副院长, 教授)

李敬兆 (安徽理工大学计算机科学与技术学院院长, 教授)

范勇 (西南科技大学计算机学院副院长, 副教授)

陈庆奎 (上海理工大学计算机学院副院长, 教授)

周维真 (北京信息科技大学计算机学院副院长, 教授)

徐苏 (南昌大学计算机系主任, 教授)

姚全珠 (西安理工大学计算机学院副院长, 教授)

徐国伟 (天津工业大学计算机技术与自动化学院副院长, 副教授)

容晓峰 (西安工业大学计算机学院副院长, 副教授)

龚尚福 (西安科技大学计算机系主任, 教授)

**策划:** 臧延新 云立实

杨璠 陈婷

# 前 言

随着嵌入式计算机技术的发展，嵌入式系统已经深入到社会生活与工作的方方面面，各种信息家电产品、信息高速公路(网络设备等)、汽车电子、国防军用等产品均包含有嵌入式系统。现在每年有许多 IT 公司投入大量科研力量研究开发新的嵌入式产品，产业界每年均需要大量的嵌入式系统的开发人才。出于对嵌入式高技术知识的追求，广大在校学生纷纷选修嵌入式系统课程，以获得嵌入式系统理论知识和开发技能。教育部门也积极推动嵌入式系统教学质量和水平的提高。

在整个社会对嵌入式系统需求背景下，本书作者在几年的教学实践与科研基础上，编写了这本面向本科生和研究生的嵌入式系统基础教材。

本书是基于 32 位 ARM 的嵌入式系统教学体系建设的理论教学部分。本书以嵌入式系统的基本开发技术为主线，以 ARM 处理器核及应用广泛的 SAMSUNG 公司的 S3C2410(ARM9)为主要硬件平台，系统讲述了嵌入式系统开发的基本知识、基本流程和基本方法及以 ARM 微处理器为核心的嵌入式系统开发过程。为了提高目前我国嵌入式系统的教学水平而又不脱离教学实际，在本课程的理论内容和实验内容的安排中，我们既强调嵌入式基础教育，打好嵌入式系统开发与应用的基础，又面向实际工程应用，加强嵌入式系统教学的实用性和工程性。

本书按内容分为 7 章，各章节具体内容如下。

第 1 章主要介绍了嵌入式系统开发的基础知识。内容包括：嵌入式系统基本概念、组成结构、硬件组成、操作系统、应用软件开发、开发流程和发展趋势。通过本章的学习，可使读者系统地建立起嵌入式系统开发的整体概念和知识体系。

第 2 章主要对 ARM 体系结构进行全面论述。本章首先讲解了 ARM 处理器的体系结构版本、处理器型号以及两者之间的关系；进而讲解了 ARM 处理器的三种应用类型、ARM 处理器结构、ARM 存储器和 AMBA 总线的内容，向读者揭示了 ARM 处理器的核心架构，归纳出嵌入式微处理器常用的典型技术；然后介绍了嵌入式系统的调试技术，分别是指令集模拟器、实时在线仿真、片上调试技术与背景调试模式、边界扫描测试技术和 JTAG 接口以及半主机调试方式等；通过介绍经典的 ARM7TDMI 核的总线周期和总线优先级，为读者理解 ARM 处理器核的基本运行机制提供了帮助。通过本章的学习，可使读者对 ARM 技术有一个全面的了解。

第 3 章主要讨论了 ARM 指令集与应用程序设计。首先介绍了伪操作、宏指令和伪指令等嵌入式汇编语言程序设计基础知识；然后讲述了 ARM 汇编语言程序设计，主要包括 ARM 和 Thumb 两种指令集的嵌入式编程基础；最后讲述如何运用前面学过的汇编指令并结合 C 语言来进行嵌入式程序设计。本章以实际的 C 语言例程讲述了嵌入式 C 语言程序设计基础，并在此基础上列举嵌入式 C 程序设计实例；对于嵌入式编程技巧和 C 语言与汇编语言混合编程技术也进行了简述。通过本章学习，可使读者掌握嵌入式程序设计的基本知识、基本方法和基本流程。

第 4 章主要讲解了嵌入式系统常用的存储器，包括 Nor Flash、Nand Flash 和 SDRAM。

前两种是构成固态硬盘的主要存储器件，后一种是构成内存存储器的主要器件，随后讲解了常用的嵌入式总线技术和接口技术，其中总线包括 I<sup>2</sup>C、SPI、现场总线、CAN 以及 PC104，接口包括 UART、GPIO、USB 和以太网。嵌入式系统的联网需求比较突出，我们还给出了串行接口以及以太网接口的软、硬件开发实例方案。本章最后介绍了嵌入式系统常用的外部设备，包括键盘、液晶显示器和触摸屏。

第 5 章主要讨论了嵌入式系统交叉开发环境。首先对组成 ARM 交叉开发环境的宿主机到目标机的调试通道进行分析，包括片上调试技术与背景调试模式 BDM、边界扫描电路 JTAG。首先，简要介绍了几种比较流行的 ARM 开发工具，包括 ARM SDT、ARM ADS 等集成开发环境以及 Multi-ICE 仿真器、ULINK 2.0 仿真器等，主要介绍了 RealView MDK  $\mu$ Vision 3 的具体使用技术；然后，通过一个基于 Embest IDE for ARM 与 MDK 开发环境下的嵌入式软件开发与调试实例讲述了嵌入式软件开发流程和开发工具的使用。

第 6 章介绍了嵌入式系统的操作系统基础知识，主要内容包括：嵌入式操作系统的基本特点和分类、实时系统和实时操作系统的概念、实时操作系统的调度算法、嵌入式系统的启动代码 Bootloader 和实时操作系统内核原理，使读者能够深入了解嵌入式系统的操作系统的构成与原理。

第 7 章介绍了嵌入式 Linux 的开发过程，主要对于嵌入式  $\mu$ CLinux 与 RTLinux 的基本知识进行讲述，在此基础上分别对基于 S3C2410 的移植及应用开发进行介绍。嵌入式 Linux 所开发出来的程序的运行目标环境是特定的嵌入式开发板或设备；然后以 S3C2410 为例，对嵌入式系统开发进行全面介绍，涉及片上基本功能模块及这些模块的应用开发；在此基础上还给出了触摸屏驱动程序的开发例子，并对启动程序开发进行了讲述。通过本章学习，可使读者对嵌入式系统软件的开发有个全面了解。本章内容可以作为嵌入式 Linux 开发的参考文献。

通过本书的学习，可使学生用较短的时间掌握 32 位嵌入式系统应用开发的基础理论知识，培养学生良好的实际操作能力和高端嵌入式产品研发设计能力，从而满足社会对高素质、开拓型嵌入式系统开发人才的需求。本书包含大量软件和硬件设计资源，可作为基于 ARM 核嵌入式系统开发的技术参考手册，也可作为计算机、电类专业本科生和研究生以及相关工程技术人员进行嵌入式系统培训的教材。

基于 ARM 的嵌入式系统教学体系建设刚刚开始，而嵌入式应用开发又涉及软、硬件及操作系统等复杂的知识，因此它的教学体系，尤其是面向实际开发应用的教学体系的建立，是一项复杂的系统工程。本书力求为该系统工程的建设做一些基础性工作，并真诚地欢迎读者就此提出宝贵的意见和建议。

西安邮电大学计算机系的任东陝、周元哲老师为本书的编写提供了很好的建议，并撰写了第 1、3 章；中原工学院软件学院的赖海玲老师为本书的实验范例提供了良好的实验环境，并进行部分文稿的录入工作；中原工学院的郭永锋、李娟、崔士儒、吴延明、杨起龙等同学参加了本书部分例程的编写、调试工作以及部分文稿的校对工作。深圳英倍特公司为作者开展嵌入式系统教学提供了技术资料和业务支持。作者在此向他们表示感谢。

编者

2009 年 2 月于郑州

# 目 录

<b>第 1 章 嵌入式系统概论</b> .....	1
1.1 嵌入式系统.....	1
1.1.1 嵌入式系统概述.....	1
1.1.2 嵌入式系统的定义.....	2
1.2 嵌入式系统的发展.....	2
1.3 嵌入式系统的特点.....	3
1.4 嵌入式系统的基本分类.....	4
1.5 嵌入式系统的组成结构.....	4
1.6 嵌入式处理器.....	9
1.7 嵌入式系统的发展趋势.....	11
1.7.1 嵌入式系统的现状.....	11
1.7.2 嵌入式系统的发展方向.....	12
1.8 嵌入式系统的相关研究领域.....	12
1.8.1 嵌入式系统的主干学科领域.....	12
1.8.2 与嵌入式系统关系密切的技术领域.....	13
本章小结.....	14
习题与思考题.....	14
<b>第 2 章 ARM 核及 ARM 处理器的体系结构</b> .....	15
2.1 ARM 的发展历史.....	15
2.2 ARM 系列处理器概述.....	15
2.2.1 ARM 处理器家族.....	15
2.2.2 ARM 核与体系结构版本.....	17
2.2.3 ARM 体系结构版本的变种.....	18
2.2.4 ARM 体系结构版本的命名规则.....	18
2.3 ARM 芯片选型.....	19
2.4 ARM 处理器的结构.....	21
2.4.1 ARM 处理器的 RSIC 特征.....	21
2.4.2 流水线.....	22
2.4.3 ARM 的工作模式和工作状态.....	25
2.4.4 ARM 寄存器的组织.....	26
2.5 ARM 存储器的组织.....	29
2.5.1 ARM 存储器的数据类型和存储格式.....	29
2.5.2 ARM 的存储体系.....	30

2.5.3	片内存储器的用法.....	31
2.5.4	协处理器 CP15.....	31
2.6	存储管理单元.....	31
2.7	ARM 处理器的 Cache.....	36
2.8	快速上下文切换扩展.....	37
2.9	写缓存区.....	37
2.10	哈佛结构.....	38
2.11	桶型移位器.....	39
2.12	看门狗定时器.....	39
2.13	边界对准与端序.....	40
2.14	地址重映射.....	41
2.15	ARM 处理器的片上总线标准 AMBA.....	42
2.16	AMBA 2.0 片上总线的主控单元和从动单元.....	43
2.17	AMBA 2.0 总线的时序.....	43
2.18	ARM7 处理器核的 S3C4510B.....	44
2.18.1	复位.....	45
2.18.2	总线周期.....	45
2.18.3	ARM7TDMI 处理器的总线优先级.....	47
2.19	I/O 端口统一编址与特殊功能寄存器.....	47
	本章小结.....	49
	习题与思考题.....	49
<b>第 3 章</b>	<b>ARM 指令集与程序设计</b> .....	<b>51</b>
3.1	ARM 体系结构指令集.....	51
3.2	ARM 处理器的寻址方式和指令系统.....	52
3.2.1	ARM 指令集的编码格式和语法.....	52
3.2.2	ARM 处理器的寻址方式.....	55
3.2.3	ARM 指令的分类说明.....	59
3.3	ARM 的异常中断处理.....	68
3.3.1	ARM 的异常中断响应过程.....	68
3.3.2	从异常中断处理程序返回.....	69
3.4	ARM 汇编语言程序设计.....	69
3.4.1	ARM 汇编语言程序的格式.....	70
3.4.2	ARM 汇编语言程序编写规范.....	74
3.4.3	ARM 汇编语言指示符.....	74
3.4.4	ARM 过程调用标准 APCS 和 AAPCS.....	81
3.5	典型 ARM 汇编语言程序举例.....	83
3.5.1	入门的范例.....	83
3.5.2	基本结构.....	84
3.6	ARM 汇编、C 和 C++混合编程.....	86



3.6.1	内嵌汇编.....	86
3.6.2	C/C++与汇编程序的相互调用.....	89
3.6.3	软中断和半主机方式 ARM 汇编程序设计.....	93
3.7	GNU 格式的 ARM 汇编语言程序设计.....	95
3.7.1	GNU 格式的 ARM 汇编语言程序的设计要点.....	95
3.7.2	GNU 格式 ARM 汇编语言程序举例.....	97
	本章小结.....	98
	习题与思考题.....	98
<b>第 4 章</b>	<b>嵌入式系统外部设备</b> .....	<b>100</b>
4.1	嵌入式系统的半导体存储器.....	100
4.1.1	静态存储器和同步动态存储器.....	100
4.1.2	嵌入式处理器上配接 SDRAM.....	102
4.2	闪速存储器.....	104
4.3	嵌入式系统总线.....	110
4.3.1	I <sup>2</sup> C 总线.....	110
4.3.2	SPI 总线接口.....	113
4.3.3	CAN 总线.....	114
4.3.4	PC104 总线.....	115
4.4	嵌入式系统接口.....	116
4.4.1	UART 接口.....	116
4.4.2	通用输入/输出接口.....	121
4.4.3	USB 接口.....	122
4.4.4	以太网接口.....	126
4.5	嵌入式系统的外部设备.....	130
4.5.1	键盘.....	131
4.5.2	液晶显示器.....	135
4.5.3	触摸屏.....	141
	本章小结.....	145
	习题与思考题.....	145
<b>第 5 章</b>	<b>嵌入式系统开发工具</b> .....	<b>146</b>
5.1	基于 ARM 的嵌入式开发工具概述.....	146
5.1.1	交叉开发.....	146
5.1.2	指令集模拟器.....	151
5.1.3	ROM 仿真器.....	151
5.1.4	片上调试技术与背景调试模式(BDM).....	151
5.1.5	半主机调试方式.....	152
5.1.6	评估电路板.....	153
5.2	各种 ARM 开发工具简介.....	154
5.2.1	ARM SDT.....	154

5.2.2	ARM ADS.....	155
5.2.3	RealView MDK .....	156
5.2.4	ARM 的 Multi-ICE 仿真器.....	156
5.2.5	ULINK 2.0 仿真器 .....	157
5.3	基于 ARM 的嵌入式系统开发方法 .....	158
5.4	Embtest ARM 实验教学系统.....	159
5.4.1	教学系统介绍.....	159
5.4.2	$\mu$ Vision IDE 集成开发环境 .....	159
5.4.3	ULINK USB-JTAG 仿真器 .....	162
5.4.4	Embtest Edukit-III 嵌入式教学实验平台 .....	163
5.4.5	教学系统的安装.....	163
5.5	集成开发环境使用说明.....	166
5.5.1	$\mu$ Vision IDE 主框架窗口 .....	166
5.5.2	工程管理.....	166
5.5.3	工程基本配置.....	170
5.5.4	工程的编译链接.....	178
5.5.5	加载调试.....	179
5.5.6	Flash 编程工具.....	185
	本章小结.....	186
<b>第 6 章</b>	<b>嵌入式操作系统概论 .....</b>	<b>187</b>
6.1	嵌入式操作系统概述.....	187
6.1.1	基本特点.....	187
6.1.2	抢占式内核.....	188
6.2	嵌入式操作系统分类.....	191
6.3	实时系统.....	194
6.3.1	概念.....	194
6.3.2	实时系统的属性和指标 .....	196
6.3.3	实时系统的分类.....	197
6.3.4	实时调度.....	198
6.4	嵌入式系统启动程序 BootLoader .....	207
6.4.1	嵌入式系统的启动方式 .....	207
6.4.2	BootLoader 的程序结构与调试 .....	209
6.4.3	BootLoader 人机交互接口设计 .....	212
6.5	嵌入式实时操作系统内核 .....	213
6.5.1	实时操作系统内核.....	213
6.5.2	网络支持.....	215
6.5.3	用户交互环境界面.....	215
6.6	嵌入式 Linux 系统.....	215
6.6.1	基于 Linux 的嵌入式系统.....	216

6.6.2	μCLinux .....	217
6.6.3	实时 RTLinux .....	222
6.6.4	嵌入式 RTLinux 的创建 .....	233
	本章小结 .....	235
<b>第 7 章</b>	<b>嵌入式 Linux 系统开发环境</b> .....	<b>236</b>
7.1	Linux 的历史和现状 .....	236
7.2	协同开发模式 .....	237
7.3	基于 Edukit-III 开发板的开发环境介绍 .....	240
7.3.1	交叉编译工具链的创建 .....	240
7.3.2	Linux 宿主机环境设置及项目空间建立 .....	243
7.3.3	Windows 工作机环境设置 .....	245
7.4	嵌入式系统移植 .....	246
7.4.1	系统移植概述 .....	246
7.4.2	基于 Edukit-III 开发板的 BootLoader 实现 .....	248
7.4.3	嵌入式 Linux 内核移植 .....	254
7.4.4	嵌入式根文件系统创建 .....	261
7.4.5	系统烧写过程 .....	268
7.4.6	系统测试结果 .....	270
7.5	触摸屏驱动程序设计 .....	271
7.5.1	嵌入式 Linux 驱动程序 .....	271
7.5.2	触摸屏硬件原理 .....	272
7.5.3	触摸屏驱动流程设计 .....	274
7.5.4	触摸屏驱动设计分析 .....	275
7.5.5	配置和编译驱动程序 .....	279
7.5.6	测试触摸屏驱动程序 .....	280
	本章小结 .....	281
	<b>参考文献</b> .....	<b>282</b>
	<b>参考网站</b> .....	<b>283</b>

## 第1章 嵌入式系统概论

### 1.1 嵌入式系统

#### 1.1.1 嵌入式系统概述

以嵌入式计算机为技术核心的嵌入式系统是继网络技术之后,又一个IT领域新的技术发展方向。由于嵌入式系统具有体积小、性能强、功耗低、可靠性高以及面向行业具体应用等突出特征,目前已经广泛地应用于军事国防、消费电子、信息家电、网络通信、工业控制等各个领域。嵌入式系统的广泛应用可以说是无所不在。就我们周围的日常生活用品而言,各种电子手表、电话、手机、个人数字助理(PDA)、洗衣机、电视机、电饭锅、微波炉、空调都有嵌入式系统的存在。可以毫不夸张地说我们生活在一个充满嵌入式系统的世界。据统计,一般家用汽车的嵌入式计算机在24个以上,豪华汽车在60个以上。美国福特汽车公司的高级经理也曾宣称,“福特出售的(汽车的)‘计算能力’已超过了IBM(计算机)”,由此可见嵌入式计算机的应用规模、应用深度和应用广度。

嵌入式系统的核心部件是各种类型的嵌入式处理器。随着嵌入式系统不断深入到人们生活中的各个领域,嵌入式处理器也进而得到前所未有的飞速发展。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1500多种,流行体系结构也有近百个系列,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。

嵌入式处理器技术的基础是通用计算机技术。现在许多嵌入式处理器也是从早期PC机的应用发展演化过来的,如早期PC机TRS-80、Apple II和所用的Z80和6502处理器,至今仍为低端的嵌入式应用。在应用中,嵌入式处理器具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高的优点。嵌入式处理器目前主要有386EX、SC-400、Power PC、68000、MIPS、ARM等系列。

嵌入式系统具有芯片集成度高、硬件软件最小化、高度自动化、响应速度快以及性能可靠等基本特点,特别适合于要求实时和多任务的场合。从应用角度考察,目前相当一部分嵌入式产品都具有计算机、通信和消费电子一体化融合的特征。从本质上来说,嵌入式系统和嵌入式设备是有区别的。嵌入式系统是一个比PC更加小型化的计算机系统,只是它通常被嵌入到应用设备或应用系统中成为一个专用的计算机系统;而嵌入式设备是指某一包含嵌入式系统的专用设备。通常,在典型的嵌入式设备中几乎感觉不到计算机系统的存在。我们日常所见的PDA、手机、微波炉等都属于嵌入式设备。

### 1.1.2 嵌入式系统的定义

嵌入式系统是指用于执行独立功能的专用计算机系统。它由微处理器、定时器、微控制器、存储器、传感器等一系列微电子芯片与器件，以及嵌入在存储器中的微型操作系统、控制应用软件组成，共同实现诸如实时控制、监视、管理、移动计算、数据处理等各种自动化处理任务。嵌入式系统以应用为中心，以微电子技术、控制技术、计算机技术和通信技术为基础，强调硬件、软件的协同性与整合性，软件与硬件可剪裁，以满足系统对功能、成本、体积和功耗等的要求。最简单的嵌入式系统仅有执行单一功能的控制能力，在唯一的 ROM 中仅有实现单一功能的控制程序，无微型操作系统。复杂的嵌入式系统，例如个人数字助理(PDA)、手持电脑(HPC)等，具有与 PC 几乎一样的功能。实质上其与 PC 的区别仅仅是将微型操作系统与应用软件嵌入在 ROM、RAM 或 Flash 存储器中，而不是存储于磁盘等载体中。很多复杂的嵌入式系统又是由若干个小型嵌入式系统组成的。

关于嵌入式系统的定义有很多。例如，“嵌入到对象体系中的专用计算机系统”，它强调嵌入式系统的三个基本要素：嵌入性、专用性与计算机系统；又例如，“一种用于控制、监测或协助特定机器和设备正常运转的计算机”，它强调的是嵌入式计算机的功能。本书采用国内流行的较为完整和规范的定义：嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，软件与硬件可剪裁，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。

嵌入式技术也是产业界和学术界常用的术语，它指的是嵌入式系统在研发和应用过程中使用的芯片技术、硬件技术和软件技术。由于嵌入式系统日益普及，人们往往还使用更为简洁的术语“嵌入式”，它是嵌入式系统、嵌入式技术或者嵌入式产品的简称，具体含义视场合而定。

## 1.2 嵌入式系统的发展

嵌入式系统这一术语并不是近几年出现的新名词，它已经存在了大约半个世纪之久。在早期的工业控制领域，计算机就已经嵌入到应用对象中了。在 20 世纪 60 年代，它被用于对电话交换进行控制，当时被称为存储程序控制系统。但由于那时的计算机无论是体积、功耗还是价格都难以满足各种设备尤其是小型设备的需求，因此，严格意义上的嵌入式系统应该从微处理器的出现开始算起。纵观嵌入式系统技术的发展，大致经历了以下四个阶段：

第一阶段是以 8 位单片机为核心的嵌入式系统低层次阶段。这些系统早已广泛应用于各个领域。其特点是以微控制器为核心，与一些简单的传感器、监测设备、伺服控制、指示、显示设备等配合，实现一定的测量、显示、信息处理及控制等功能。在一些工业控制、汽车电子和智能家居等多机应用中，有时为了实现多个微控制器构成的系统间的信息交流，通常利用 CAN(Controller Area Network, 控制器局域网)、RS-232、RS-485 等总线将微控制器组网。但这种网络的应用空间有限，相关的通信协议也比较单一。

第二阶段是以嵌入式微处理器和嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统。随着嵌入式设备与 Internet 的广泛结合，手机、PDA、路由器、调制解调器等复杂的高端应用对嵌入式处

理器的性能提出了更高的要求。虽然以 8 位单片机为核心的嵌入式技术不断发展,性能也不断提高,但由于其性能的局限性,已无法满足未来高性能嵌入式技术的发展要求。激烈的市场、技术的竞争要求不断提高嵌入式系统的性价比;同时,也要求缩短嵌入式系统的开发周期。自从 20 世纪 70 年代初出现嵌入式系统的概念以来,嵌入式系统大都不采用操作系统,它们只是为了实现某个控制功能,使用简单的循环控制来对外界的控制请求进行处理。随着嵌入式系统的快速发展,当应用系统越来越复杂、使用范围越来越广泛时,每增加一项新的应用功能,都可能需要从头开始设计软件,没有操作系统已成为其最大缺陷。但目前 8 位单片机上运行嵌入式操作系统尚有一定困难,因此,以 32 位微处理器作为高性能嵌入式系统开发的核心已是嵌入式系统技术发展的必然趋势。

第三阶段是 20 世纪 90 年代后,嵌入式系统设计从以嵌入式微处理器/DSP 为核心的 IC(Integrated Circuit)级设计,逐渐转向 IS(Integrated System)级设计,提出了系统芯片 SoC(System on Chip)的基本概念。这种设计是把各种通用处理器内核作为 SoC 设计公司的标准库,即和许多其他嵌入式系统外设一样,成为 VLSI(Very Large Scale Integration)设计中一种标准的器件,用标准的 VHDL(Very Hardware Description Language)等语言描述、存储在器件库中,用户只需定义出其整个应用系统,仿真通过后就可以将设计图交给半导体工厂制作样品。这样除个别无法集成的器件以外,整个嵌入式系统大部分均可集成到一块或几块芯片中去,应用系统电路板将变得很整洁。目前,嵌入式系统已进入以 SoC 为核心的设计阶段,并开始逐步实用化、规范化。

第四阶段是以基于 Internet 接入为标志的嵌入式系统,这是一个正在迅速发展的阶段。随着网络在人们生活中的地位日益重要,越来越多的应用需要采用支持 Internet 接入功能的嵌入式系统,如手机、PDA,甚至电视机、电冰箱等传统家电都需要上网,所以在嵌入式系统中使用网络操作系统将成为今后的发展趋势。

### 1.3 嵌入式系统的特点

嵌入式系统也是一个计算机系统,但与通用计算机系统相比,它具有以下一些特点:

(1) 与应用密切相关,执行特定功能。任何一个嵌入式系统都和特定应用相关,用途固定。嵌入式系统的硬件和软件都必须高效率地设计,要具备良好的软、硬件可裁剪性,力争在满足应用目标的前提下使系统最精简。

(2) 具有实时约束。嵌入式系统都是实时系统,都有时限要求。若违反实时约束则可能使系统瘫痪或不可用。特别是对于一些强实时嵌入式系统,如军事电子、飞机控制、核电控制等,如违反实时约束有可能会造成非常严重的后果。

(3) 嵌入式操作系统一般为多任务实时操作系统(Real Time Operating System, RTOS)。由于嵌入式系统处理的外部事件通常有多个,而且具有分布和并发的特点,因此要求嵌入式操作系统必须是多任务实时操作系统。

(4) 系统可靠性要求高。嵌入式系统使用环境不定,甚至要在非常恶劣的环境下工作,但嵌入式系统对软件故障的容错能力比 PC 差很多,因此需要有相应的可靠性保障机制,如看门狗定时器。

(5) 具有功耗约束。很多嵌入式系统采用电池供电, 因此对功耗有严格要求, 从而使得嵌入式系统的硬件和软件必须精心设计以满足其功耗约束。

(6) 需要交叉开发环境和调试工具。嵌入式系统本身不具备自举开发能力, 即使在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, 必须有一套开发工具和环境才能进行开发和测试。这些工具和环境一般是基于通用计算机上的硬件设备、逻辑分析仪、混合信号示波器以及专门的软件开发和调试工具等。

(7) 系统资源紧缺。由于对成本、体积、功耗有严格要求, 使得嵌入式系统的资源(如内存、I/O 接口)都非常紧缺, 因此软、硬件都需精心设计以充分利用有限的系统资源。

## 1.4 嵌入式系统的基本分类

嵌入式系统广泛应用于人类社会的各个行业和领域, 其数量大、品种多、规格复杂。科学地对嵌入式系统进行分类, 有助于有效、简明地描述一个具体的嵌入式产品的属性和特征。为此, 我们按照以下方式对嵌入式系统分类。

### 1. 按嵌入式系统的用途分类

按照应用领域可以把嵌入式系统分为军用、工业用和民用三大类。其中, 军用和工业用嵌入式系统对运行环境的要求比较苛刻, 往往要求耐高温、耐湿、耐冲击、耐强电磁干扰、耐粉尘、耐腐蚀等。民用嵌入式系统的需求特点往往体现在另外一些方面, 如易于使用、易维护和标准化程度高。

### 2. 按嵌入式系统的技术复杂度分类

根据控制技术的复杂度可以把嵌入式系统分为两类:

(1) 小型操作系统控制的嵌入式系统。

(2) 大型操作系统控制的嵌入式系统。

小型操作系统控制的嵌入式系统一般指的是硬件主体由 8 位/16 位单片机或者 32 位处理器构成, 其控制软件主要由一个小型嵌入式操作系统内核和一个小规模的应用程序组成。小型嵌入式操作系统内核的源代码一般不超过 1 万行。这类嵌入式系统的操作系统功能模块不齐全, 并且无法为应用程序开发提供一个较为完备的应用程序编程接口。此外, 它没有图形用户界面(GUI)或者图形用户界面功能较弱, 数据处理和联网通信功能也比较弱。

大型操作系统控制的嵌入式系统的硬件主体通常由 32 位/64 位处理器、32 位软核处理器或者 32 位片上系统组成, 控制软件通常包含一个功能齐全的嵌入式操作系统(例如 VxWorks、RTLinux、Symbian、Windows CE、ECOS 等)以及封装良好的 API, 其实时性能较强, 具备 DSP 处理能力, 具备良好的图形用户界面和网络互联功能, 可运行多种数据处理功能较强的应用程序。

## 1.5 嵌入式系统的组成结构

嵌入式系统是专用的计算机应用系统, 它具有一般计算机组成的共性, 也是由硬件和

软件组成的。嵌入式系统的硬件是嵌入式系统软件环境运行的基础，它提供了嵌入式系统软件运行的物理平台和通信接口；嵌入式系统软件是整个系统的控制核心，控制整个系统的运行，提供人机交互信息。总体来说，嵌入式系统通常由处理器、外围接口及设备、嵌入式操作系统和应用软件等几大部分组成。

### 1. 嵌入式处理器

嵌入式处理器是嵌入式系统的核心部件，它通常工作在为特定用户群设计的系统中。嵌入式处理器可分为3类：嵌入式微处理器(Micro Processor Unit, MPU)、嵌入式微控制器(Micro Controller Unit, MCU)和嵌入式DSP(Digital Signal Processor)。嵌入式微处理器就是与通用计算机的微处理器对应的CPU。嵌入式微控制器是将CPU、存储器(少量的RAM、ROM或两者都有)和其他外设封装在一片集成电路里。与嵌入式微处理器相比，微控制器的最大特点是单片化、体积小、功耗低和可靠性高。嵌入式DSP通常用于计算机通信领域，这种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。

目前，几乎每个IT硬件厂商都推出了自己的嵌入式处理器，现在市面上的嵌入式处理器芯片有1000多种，其中以ARM、PowerPC、MC68000、MIPS等的使用最为广泛。

ARM系列处理器核是英国先进RISC机器公司(Advanced RISC Machines, ARM)的产品。ARM公司自成立以来，一直以IP(Intelligence Property)提供者的身份向各大半导体制造商出售知识产权，而自己从不介入芯片的生产销售，它提供一些高性能、低功耗、低成本和高可靠性的RISC处理器核、外围部件和系统级芯片的应用解决方案。

ARM处理器核具有低功耗、低成本等卓越性能和显著优点，越来越多的芯片厂商早已看好ARM的前景。ARM处理器核得到了众多的半导体厂家和整机厂商的大力支持，在32位嵌入式应用领域获得了巨大的成功，如Intel、Motorola、IBM、NS、Atmel、Philips、NEC、OKI、SONY等世界上几乎所有的半导体公司已获得ARM授权，开发具有自己特色的基于ARM的嵌入式系统芯片。

目前非常流行的ARM芯核有ARM7TDMI、ARM720T、ARM9TDMI、ARM920T、ARM940T、ARM946T、ARM966T、XScale等。ARM公司2003年在美国公布了4个新的ARM11系列微处理器内核(ARM1156T2-S内核、ARM1156T2F-S内核、ARM1176JZ-S内核和ARM11JZF-S内核)。ARM公司日前发布最新的Cortex处理器，分为R、M、A三个系列，其中A系列与应用(Application)有关，如应用于高清电视、手机通用芯片等；R系列与实时嵌入系统(Realtime)有关；M系列与微控制器(MCU)有关。它将给消费和低功耗移动产品带来重大变革，使得最终用户可以享受到更高水准的娱乐和创新。此外，ARM芯片还获得了许多实时操作系统(Real Time Operating System)供应商的支持。

### 2. 嵌入式外围接口及设备

嵌入式外围设备是指在一个嵌入式硬件系统中，除了中心控制部件——嵌入式微处理器(或以嵌入式微处理器为核心的微控制器SoC)以外的各种存储器、输入/输出接口、人机接口的显示器/键盘、串行通信接口等。根据功能外围设备，可分为以下几类：

(1) 存储器。存储器是嵌入式系统中存储数据和程序的功能部件。常见的存储设备按使



用的存储器类型分为：静态易失性存储器(RAM、SRAM)；动态存储器(DRAM、SDRAM)；非易失性存储器 ROM(MASK ROM、EPROM、EEPROM、Flash)；硬盘、软盘、CD-ROM等。其中以 Flash 和 SDRAM 在嵌入式领域最为常见。

(2) 通信接口。目前存在的所有计算机通信接口在嵌入式领域中都有其广泛的应用。其中应用最广的接口设备包括 GPIO(General Programmable I/O, 通用可编程 I/O)接口、RS-232(串口 UART)接口、Ethernet(以太网)接口、USB(Universal Serial Bus, 通用串行总线)接口、I<sup>2</sup>C(Inter Integrated Circuit)总线接口、IRDA(Infra Red Data Association, 红外线数据协会)接口、SPI(Serial Peripheral Interface, 串行外围设备接口)、CAN 总线接口、Bluetooth(蓝牙)接口和 IEEE 1394(火线)接口。一般在嵌入式系统软件开发调试时, 常常通过 UART 来进行各种输入/输出操作。

(3) 输入/输出设备。CRT、LCD 和触摸屏等构成了嵌入式系统中最重要的信息输入/输出设备, 其应用十分广泛。触摸屏可方便地实现鼠标和键盘功能。

(4) 设备扩展接口。由于嵌入式系统功能越来越复杂, 系统板上的内存有时满足不了用户的需求, 因此一些高端的嵌入式系统都会预留可扩展存储设备接口, 以备有特殊需求时, 接入便携式扩展存储设备。常用的扩展卡有 PCMCIA(Personal Computer Memory Card International Association)卡、CF(Compact Flash)卡、SD(Secure Digital Memory Card)卡、Memory Stick 等。

(5) 电源及辅助设备。嵌入式系统力求外观小型化, 质量轻以及电源使用寿命长, 例如移动电话或 PDA 等。其中电源装置是整个系统成败的重要部件。

### 3. 嵌入式操作系统

操作系统是当前嵌入式系统的标志。它的引入大大提高了嵌入式系统的功能, 方便了嵌入式应用软件的设计。嵌入式操作系统与通用操作系统类似, 通常包含必需的部件, 如进程管理、进程间通信和内存管理, 其他部件如文件系统、驱动程序、网络协议等都可根据用户要求进行配置, 并以相关方式实现。比较知名的嵌入式操作系统有 Windows CE、uCLinux、pSOS、VxWorks、Nucleus、EPOC、uC/OS、BeOS、Palm OS、QNX 等。

### 4. 嵌入式应用软件

嵌入式应用软件是针对特定的实际专业领域的、基于相应的嵌入式硬件平台的、能完成用户预期任务的计算机软件。嵌入式应用软件和普通的应用软件有一定的区别。由于嵌入式应用对成本十分敏感, 因此为减少系统的成本, 除了精简每个硬件单元的成本之外, 尽可能地减少嵌入式应用软件的资源消耗也是不可忽视的重要因素。这就要求嵌入式应用软件不但能保证准确性、安全性、稳定性以满足应用要求, 还要尽可能地优化, 减少资源消耗。

另外, 启动程序也是整个结构中很重要的一部分, 它相当于 PC 机开机后初始化处理器、配置硬件等操作的 BIOS。在嵌入式系统中, 这样的程序称为 BootLoader。它是在系统加电后、操作系统或用户程序运行之前, 首先运行的一段代码。通过这段代码, 可以初始化硬件设备, 将系统的软、硬件环境设定在一个合适的状态, 以便引导操作系统内核。由于 BootLoader 高度依赖于硬件和应用环境, 而嵌入式系统的硬件差异性较大, 所以对 BootLoader 的开发或移植是嵌入式开发中重要的工作。