



嵌入式系统基础教程

第2版



俞建新 王健 宋健建 编著
南京大学 东南大学 南京大学

*F*undamentals of Embedded Systems
Second Edition



附光盘



机械工业出版社
China Machine Press

面向CS2013计算机专业规划教材



嵌入式系统基础教程

第2版



俞建新 王健 宋健建 编著
南京大学 东南大学 南京大学

*F*undamentals of Embedded Systems
Second Edition



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统基础教程 / 俞建新, 王健, 宋健建编著. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2014.10
(面向 CS2013 计算机专业规划教材)

ISBN 978-7-111-47998-7

I. 嵌… II. ①俞… ②王… ③宋… 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(2014)第 216128 号

本书概括地介绍 32 位嵌入式系统的基础理论知识, 重点论述 ARM 处理器的 32 位嵌入式硬件平台。主要内容包括: 嵌入式系统的基本概念; 嵌入式微处理器硬件技术、嵌入式调试方法; ARM 处理器体系结构、ARM 寻址方式和指令集、ARM 汇编语言程序设计和 ARM 开发工具; 基于 ARM 嵌入式处理器的中断控制、DMA 控制和时间管理; 嵌入式存储器、嵌入式总线、嵌入式接口和嵌入式常用外部设备。

本书可以作为高等院校计算机专业、软件专业、嵌入式专业、电子专业和其他相关专业的本科生或者研究生的专业基础课教材, 也可以作为嵌入式开发技术人员的技术培训教材或者开发参考书。

出版发行: 机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 朱 劼 余 洁

责任校对: 董纪丽

印 刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版 次: 2015 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 19.25

书 号: ISBN 978-7-111-47998-7

定 价: 49.00 元(附光盘)

ISBN 978-7-89405-603-0(光盘)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

前 言

十几年以来，嵌入式系统技术和嵌入式产品发展势头迅猛，其应用涉及通信产品、消费电子、汽车工业、工业控制、信息家电、国防工业等各个领域。目前，嵌入式产品在 IT 产业以及电子工业的经济总额中所占的比重越来越大，对国民经济增长的贡献日益显著。随着手机、平板电脑、媒体播放器、上网本、数码相机和机顶盒等电子器材类嵌入式产品的普及，嵌入式系统知识在广大民众中间的传播也越来越广泛。现在，许多 IT 公司每年都投入可观的资金和科研力量研发嵌入式新产品，产业界每年都需要大量受过良好教育的嵌入式系统开发人才。出于对嵌入式高科技知识的追求，广大在校学生纷纷选修嵌入式系统课程，以提高嵌入式系统的理论知识和开发技能。教育界也纷纷开设各种嵌入式系统课程，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研发人才的需求持续增长的背景下，参加本书编写的三位作者均从 2002 年开始着手准备嵌入式系统的教学工作，并且于 2004 年在南京大学计算机系和软件学院以及东南大学计算机系正式开设并讲授嵌入式系统课程。截至 2014 年，作者们在嵌入式系统课程上已经培养了大约 2600 名修课学生。

2012 年春季，基于多年的教学实践和科研成果积累，大家经过讨论决定对 2008 年出版的《嵌入式系统基础教程》进行修订，并确立了第 2 版教材的基本编写原则。

1) 发挥第 1 版教材的优点和长处，排除第 1 版教材的冗余和不足，使新版教材的概念更加清晰、重点更加突出、案例更加简明易读。

2) 以硬件为基础，把可能涉及的大多数硬件知识讲深讲透，使读者掌握好底层嵌入式开发的技能，为将来进一步学习嵌入式技术打好基础。

3) 在知识传授方面，做到合理衔接、循序渐进，力求使其他课程讲授过的内容不再在本教材中简单地重复出现。

4) 对于其他前导课程与嵌入式系统基础课程中相重叠的知识点，通过对比和补足的方式加以讲解。例如，DMA 输入输出方式在“计算机组成原理”和“微机原理与接口技术”课程中分别从不同角度做了讲解，为此在嵌入式系统课程中，我们采取对比的方式简明扼要地介绍嵌入式系统中的 DMA 机制与使用方法，从而消除学生的重复感，使之学深学透。

5) 尽可能提高嵌入式理论知识的抽象度。例如，嵌入式处理器有多种体系结构，其中凌动处理器同 PC 的 IA32 处理器体系结构相同，但是多数嵌入式处理器的体系结构与 IA32 处理器的体系结构有所不同。我们将这些嵌入式处理器的共有特点抽象出来，利于读者举一反三，深入理解嵌入式处理器不同于通用处理器的主要方面。

6) 着重讲解 ARM 处理器的体系结构、流水线、指令集、IP 核、汇编语言程序设计、常用功能模块等，突出 ARM 处理器在嵌入式系统中的主导地位。

本书特点

- 本书阐述的知识点主要是在计算机组成原理和微机原理与接口技术这两门本科生课程之上的延续，突出了嵌入式产业硬件的新发展，涵盖了嵌入式系统技术领域的主要概

念和知识点，并在此基础上做了扩展，力求做到层次分明、结构清晰。

- 本书首先概述了嵌入式系统的定义、分类、硬件结构和软件结构，列举了近 20 个具体的嵌入式系统，并介绍了它们之间的规模区别和技术特点，使读者对嵌入式系统有一个全局概念。
- 本书第 9 章对闪存存储器单元构造的微电子学物理结构做了概括性的介绍，包括闪存存储器的存储单元原理和基本结构，避免读者对底层元器件工作机制认识的不足。
- 以 ARM 处理器为嵌入式硬件平台核心，兼顾其他体系结构的嵌入式处理器，全面系统地介绍嵌入式系统的硬件理论知识，包括常用嵌入式处理器、常用嵌入式存储器、常用嵌入式总线、常用嵌入式接口和常用嵌入式外部设备。
- 嵌入式硬件原理介绍、软硬件接口介绍、电路连接介绍和应用编程介绍并重。除了把每一个重要的概念讲解清楚之外，还力求做到理论与实践相结合，并给出相应的编程范例。这些范例都已调试通过，覆盖了很多典型的嵌入式程序设计范式。
- 相较上一版，内容有所取舍，重点突出。例如，删除了上一版关于知识产权核、低功耗的原理知识，以及实时操作系统的一般性原理，把内容重点放在 ARM 嵌入式处理器的硬件平台上。
- 有一部分内容是选修选讲内容，在标题上用 * 号标记。使用本教材的教师可以根据课时计划和学生的知识基础对这些内容加以取舍。
- 使用本教材授课时应该同时开展相应的实验/实践教学。

教学建议

- 1) 本教材主要用于本科生教学，硕士生教学可酌情使用。
- 2) 本科生课时数安排以 48 学时为宜，即每周安排 3 学时。按照这个教学计划，整个课程的总授课时间约 32 学时，另外安排 16 学时的实验。

教学资源

本书将为授课教师提供相关软件、实例程序、教学课件、习题解答等资源，教师可以从华章网站 (www.hzbook.com) 下载。

作者分工

本书由俞建新编制提纲，并撰写了第 2、3、4、5、6、8、9 章，王健撰写了第 1 章，宋健撰写了第 7 章。俞建新负责全书的统调工作。

致谢

南京大学计算机系李宣东主任、陶先平副主任、陈道蓄教授、陈立军教授和王崇骏副教授与作者讨论过本书的写作大纲，给出了建设性观点；南京大学计算机系张福炎教授、张天副教授为本书的编写提供了很好的指导性建议；南京大学计算机系杨献春教授和陆庆文副教授为本

书的实验范例编写提供了很好的实验环境。

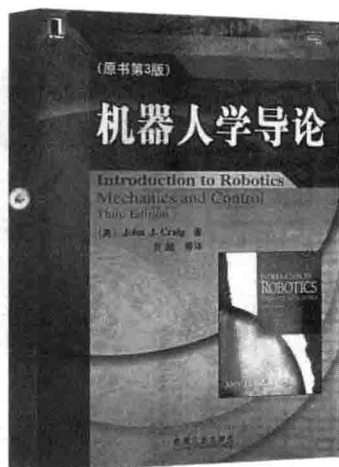
南京大学计算机系的黄滨、孙睿、吴亚琦、胡琰华、黄蓉、余进、欧建生、冯子陵、阮佳彬、戴平等硕士生参加了本书的部分范例程序的编写和调试工作，南京大学物理系和电子系的马小飞、邢向磊、范爱华、娄孝祥、赵凤英、赵伟明和赵红玉等同学参加了本书的编写、试读和校对工作。

在此一并对上述各位老师和学生的指导、协助与支持表示衷心的感谢。

编者

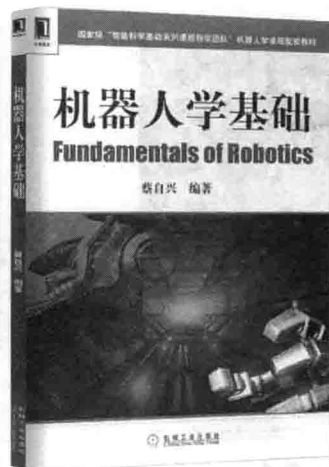
2014年7月10日于中国南京

推荐阅读



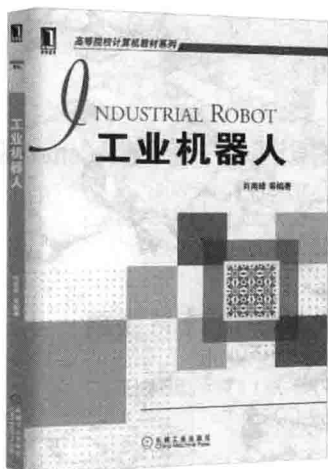
机器人学导论 (原书第3版)

作者: John J. Craig ISBN: 978-7-111-18681-8 定价: 42.00元



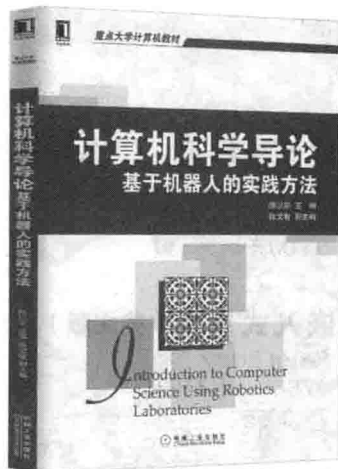
机器人学基础

作者: 蔡自兴 ISBN: 978-7-111-26770-6 定价: 23.00元



工业机器人

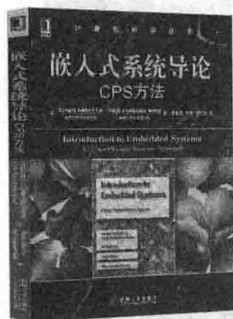
作者: 肖南峰等 ISBN: 978-7-111-35333-1 定价: 30.00元



计算机科学导论: 基于机器人的实践方法

作者: 陈以农等 ISBN: 978-7-111-43588-4 定价: 35.00元

推荐阅读



■ 嵌入式系统导论：CPS方法

作者：Edward Ashford Lee 等
ISBN：978-7-111-36021-6
定价：55.00元

■ 嵌入式软件设计基础——基于ARM Cortex-M3（原书第2版）

作者：Daniel W. Lewis
ISBN：978-7-111-44176-2
定价：45.00元

■ 现代嵌入式计算（英文版）

作者：Peter Barry 等
ISBN：978-7-111-41235-9
定价：79.00元

■ 嵌入式系统设计与实践

作者：Elecia White
ISBN：978-7-111-41584-8
定价：69.00元

■ 嵌入式系统软硬件协同设计实战指南：基于Xilinx Zynq

作者：陆佳华 等
ISBN：978-7-111-41107-9
定价：69.00元

■ STM32嵌入式系统开发实战指南：FreeRTOS与LwIP联合移植

作者：李志明 等
ISBN：978-7-111-41716-3
定价：69.00元

目 录

前言

第 1 章 嵌入式系统概论	1
1.1 概述	1
1.1.1 嵌入式系统的定义	1
1.1.2 后 PC 时代与无所不在的 计算时代	1
1.2 嵌入式系统发展简史	2
1.2.1 微处理器的发展	2
1.2.2 嵌入式系统的发展阶段	3
1.3 嵌入式系统的特点	4
1.4 嵌入式系统的基本分类	5
1.5 嵌入式系统举例	5
1.5.1 低端嵌入式系统	5
1.5.2 中端嵌入式系统	7
1.5.3 高端嵌入式系统	9
1.6 嵌入式系统的基本组成	11
1.6.1 嵌入式系统的硬件组成	12
1.6.2 嵌入式系统的软件组成	13
1.7 嵌入式系统的现状与发展趋势	14
1.7.1 嵌入式系统的现状及主要 制约因素	14
1.7.2 嵌入式系统的发展方向	15
1.8 嵌入式系统的相关研究领域	15
1.8.1 嵌入式系统的主干学科领域	15
1.8.2 与嵌入式系统密切关联的科学 技术领域	15
1.9 本章小结	18
1.10 习题和思考题	19
第 2 章 嵌入式微处理器技术	20
2.1 嵌入式处理器基本分类	20
2.1.1 通用型嵌入式微处理器	20
2.1.2 微控制器	22
2.1.3 嵌入式 DSP 处理器	23
2.1.4 可编程片上系统	23

2.1.5 嵌入式双核/多核处理器	24
2.1.6 可扩展处理平台	26
2.2 嵌入式微处理器的典型技术	27
2.2.1 I/O 端口统一编址与特殊功能 寄存器	27
2.2.2 哈佛结构	29
2.2.3 桶型移位器	31
2.2.4 正交指令集	32
2.2.5 双密度指令集	33
2.2.6 看门狗定时器	33
2.2.7 边界对准与端序	35
2.2.8 地址重映射	36
2.2.9 FIFO 缓冲寄存器	37
2.2.10 主存控制器	38
2.3 主流嵌入式微处理器	39
2.3.1 MIPS RISC 嵌入式微处理器	39
2.3.2 PowerPC 系列嵌入式微处理器	41
2.3.3 飞思卡尔公司的系列嵌入式 微控制器	42
2.3.4 凌动系列嵌入式微处理器	43
2.3.5 ARM 系列嵌入式微处理器	45
2.4 本章小结	46
2.5 习题和思考题	46
第 3 章 ARM 处理器体系结构	47
3.1 概述	47
3.1.1 ARM 体系结构的版本	47
3.1.2 ARM 体系结构版本的变种	48
3.1.3 ARM 体系结构版本的命名规则	48
3.1.4 ARM 处理器核系列	49
3.2 ARM 处理器的结构	52
3.2.1 ARM 处理器的 RISC 特征	52
3.2.2 流水线	53
3.2.3 ARM 的工作模式和工作状态	57
3.2.4 ARM 寄存器的组织	59
3.3 ARM Cortex 处理器	62
3.3.1 ARM Cortex-M3 内核	62

3.3.2	采用 Cortex-M3 核生产的 微控制器	66	4.2.1	ARMulator	98
3.3.3	ARM Cortex-A8 内核	66	4.2.2	SkyEye	98
3.3.4	ARM Cortex-A9 内核	67	4.3	片上调试技术	99
3.3.5	采用 Cortex-A9 内核生产的 应用处理器	69	4.3.1	背景调试模式	99
3.4	ARM 存储器的组织	70	4.3.2	边界扫描测试技术和 JTAG 接口	100
3.4.1	ARM 存储器的数据类型和 存储格式	70	4.3.3	ARM7TDMI 核中的 JTAG 扫描链	104
3.4.2	ARM 的存储体系	70	4.3.4	嵌入式 ICE-RT 模块	105
3.4.3	片内存储器的用法	71	4.3.5	JTAG 的断点设置原理	106
3.4.4	协处理器 CP15	71	4.3.6	Nexus 调试标准	107
3.4.5	存储管理单元	72	4.4	嵌入追踪宏单元 ETM	108
3.4.6	保护单元	78	4.5	基于 Angel 的调试方案	109
3.4.7	ARM 处理器的 Cache	80	4.5.1	Angel 调试系统的组成	109
3.4.8	快速上下文切换扩展	82	4.5.2	Angel 的两种版本	109
3.4.9	写缓存区	83	4.5.3	Angel 的调试处理流程和调试 操作步骤	110
3.5	ARM 处理器的片上总线规范 AMBA ..	84	4.6	半主机调试方式	110
3.5.1	AMBA 2.0 片上总线的特点	84	4.7	本章小结	112
3.5.2	AMBA 2.0 片上总线的主控单元 和从动单元	85	4.8	习题和思考题	112
3.5.3	AMBA 2.0 总线的时序	85	第 5 章	ARM 处理器指令集	113
3.5.4	AMBA 3.0——AXI 协议	86	5.1	ARM 处理器的指令系统	113
3.6	ARM 处理器核的典型范例: ARM7TDMI	86	5.1.1	ARM 处理器指令系统的 主要特征	113
3.6.1	复位	87	5.1.2	ARM 与 x86 指令系统的比较 ..	114
3.6.2	总线周期	87	5.2	ARM 指令集的编码格式和语法 ..	114
3.6.3	ARM7TDMI 处理器的总线 优先级	90	5.2.1	ARM 指令集的编码格式	114
3.7	ARM 的异常中断处理	90	5.2.2	ARM 指令的一般语法格式	114
3.7.1	ARM 的异常中断响应过程	90	5.2.3	ARM 指令的执行条件	114
3.7.2	从异常中断处理程序返回	92	5.2.4	第 2 操作数 <Operand2 > 说明	116
3.8	本章小结	94	5.3	ARM 处理器的寻址方式	117
3.9	习题和思考题	94	5.4	ARM 指令的分类说明	121
第 4 章	嵌入式系统调试技术	95	5.4.1	分支指令	122
4.1	嵌入式硬件调试结构和调试技术	95	5.4.2	Load/Store 指令	123
4.1.1	与通用计算机调试结构的比较 ..	96	5.4.3	数据处理指令	127
4.1.2	调试信道	96	5.4.4	乘法指令	128
4.1.3	ROM 仿真器	97	5.4.5	前导零计数指令	129
4.1.4	实时在线仿真	97	5.4.6	程序状态寄存器指令	129
4.2	指令集模拟器	97	5.4.7	协处理器指令	130
			5.4.8	异常中断指令	131

5.4.9 ARM 伪指令	131	6.6 ARM 内嵌汇编	166
5.5 本章小结	133	6.6.1 内嵌汇编的指令用法	167
5.6 习题和思考题	134	6.6.2 内嵌汇编器与 armasm 汇编器 的区别	167
第 6 章 ARM 汇编语言程序设计	135	6.7 C/C++ 与汇编程序的相互调用	168
6.1 概述	135	6.7.1 C/C++ 程序调用汇编程序	169
6.1.1 预定义寄存器名及内部 变量名	135	6.7.2 汇编程序调用 C 程序	169
6.1.2 ARM 汇编语言程序的语句 格式	136	6.7.3 汇编程序调用 C++ 程序	170
6.1.3 ARM 汇编语言程序编写规范	139	6.7.4 C 程序调用 C++ 程序	172
6.2 ARM 汇编语言指示符	139	6.8 软中断和半主机方式 ARM 汇编 程序设计	173
6.2.1 AREA	140	6.9 GNU 格式的 ARM 汇编语言程序 设计	177
6.2.2 ENTRY	141	6.9.1 GNU 格式 ARM 汇编语言程序 的设计要点	177
6.2.3 CODE16、CODE32、THUMB 和 ARM	141	6.9.2 GNU 格式 ARM 汇编语言程序 举例	178
6.2.4 EQU	142	6.10 本章小结	179
6.2.5 END	142	6.11 习题和思考题	179
6.2.6 ALIGN	142	第 7 章 嵌入式系统开发工具	181
6.2.7 DCB	143	7.1 概述	181
6.2.8 MAP	144	7.1.1 开发 ARM 嵌入式系统的 硬件结构	181
6.2.9 FIELD	144	7.1.2 开发工具的基本分类和 主要品种	181
6.2.10 SPACE	144	7.1.3 集成开发环境	183
6.2.11 DCD 和 DCUD	145	7.1.4 CodeWarrior 集成开发环境	184
6.2.12 GBLA、GBLL 及 GBLS	146	7.2 ARM 开发工具概述	185
6.2.13 LCLA、LCLL 及 LCLS	147	7.3 ARM 映像文件格式	186
6.2.14 SETA、SETL 及 SETS	147	7.3.1 ELF 文件格式	186
6.2.15 其他指示符的简单功能描述	147	7.3.2 ARM 映像文件的组成	188
6.3 ARM 汇编语言指示符的编程举例	149	7.4 ADS 的组成与使用	196
6.3.1 条件分支指示符	149	7.4.1 命令行开发工具	196
6.3.2 ASCII 字符串比较	149	7.4.2 GUI 开发工具	200
6.3.3 宏定义指示符	151	7.4.3 ADS 实用工具	202
6.4 ARM 过程调用标准 ATPCS 和 AAPCS	153	7.5 用 ADS 生成应用程序	203
6.4.1 寄存器的使用规则	153	7.5.1 生成简单应用程序 hello	203
6.4.2 堆栈使用规则	153	7.5.2 生成函数库 mathlib	206
6.4.3 参数传递规则	154	7.5.3 生成一个在目标板上运行的 定时器程序	207
6.5 典型 ARM 汇编语言程序举例	154	7.6 RVDS	209
6.5.1 入门范例	154		
6.5.2 基本结构	156		
6.5.3 典型的 ARM 汇编程序范例	159		
6.5.4 5 级流水线的互锁问题	165		

7.6.1	RVDS 的组件	210	8.5.3	实时时钟应用程序概要设计	
7.6.2	RVDS 使用概览	211		案例	241
7.6.3	开中断关中断的内嵌 ARM		8.5.4	S3C44B0X 的脉宽调制定时器	244
	汇编函数	212	8.6	本章小结	245
7.7	GNU 交叉工具链	214	8.7	习题和思考题	245
7.8	本章小结	214	第 9 章	嵌入式存储器和接口技术	247
7.9	习题和思考题	214	9.1	嵌入式系统常用的半导体存储器	247
第 8 章	嵌入式外设控制器	216	9.1.1	闪速存储器	247
8.1	嵌入式中断控制器	216	9.1.2	静态存储器和同步动态	
8.1.1	嵌入式中断控制器工作原理	216		存储器	258
8.1.2	ARM Cortex-M3 嵌套向量		9.2	常用的嵌入式系统总线	265
	中断控制器	222	9.2.1	I ² C 总线	266
8.2	向量中断与非向量中断的入口		9.2.2	SPI 总线接口	268
	程序编程示例	225	9.2.3	CAN 总线	269
8.3	嵌入式中断应用程序举例	228	9.3	常用的嵌入式系统接口	271
8.4	嵌入式 DMA 控制器	232	9.3.1	UART 接口	271
8.4.1	S3C44B0X 的 DMA 控制器	232	9.3.2	通用输入输出接口	277
8.4.2	S3C44B0X 的 DMAC 相关		9.3.3	以太网接口	278
	控制寄存器	234	9.4	嵌入式系统常用的外部设备	285
8.4.3	S3C44B0X 的 DMA 应用		9.4.1	键盘	285
	程序举例	235	9.4.2	液晶显示器	288
8.5	时钟电源管理器、实时时钟和		9.4.3	触摸屏	291
	脉宽调制定时器	237	9.5	本章小结	297
8.5.1	S3C44B0X 的时钟电源管理器	238	9.6	习题和思考题	297
8.5.2	S3C2410X 的实时时钟	240	参考文献		298

第 1 章 嵌入式系统概论

本章将主要介绍嵌入式系统的定义、发展简史、特点、基本分类和组成，例举若干典型的嵌入式产品和嵌入式系统，最后简要说明嵌入式系统的发展趋势及相关研究领域。

1.1 概述

嵌入式系统泛指嵌入在电子产品或者机电产品中的专用计算机系统。在日常生活方面常见的电子产品，诸如手机、PDA、机顶盒、数码相机、媒体播放器、游戏机等，都内含了嵌入式系统。嵌入式系统广泛应用的领域较多，例如汽车电子，其应用产品包括：牵引力控制、电子控制悬架、电子动力转向、自动雨刷、灯光控制系统、防抱死制动系统（ABS）等。同样，医疗器械也是嵌入式系统广泛应用的一个领域，其应用产品包括：B 型超声波诊断仪、全套血液生化指标检测仪、数字血糖仪等。

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，特别适合实时和多任务场合。从应用角度考察，目前相当一部分嵌入式产品都具有 3C 融合特征，即计算机（computer）、通信（communication）和消费电子（consume electronic）一体化。

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（个人计算机）更加小型化的计算机系统，只是它通常被嵌入于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，在典型嵌入式设备中几乎感觉不到计算机系统的存在，例如我们日常所见的 PDA、手机、微波炉等都属于嵌入式设备。

1.1.1 嵌入式系统的定义

迄今为止，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。

嵌入式技术（embedded technology）也是产业界和学术界常用的术语，它指的是嵌入式系统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。本教材也会使用“嵌入式”这个术语，读者应根据上下文予以理解。

1.1.2 后 PC 时代与无所不在的计算时代

21 世纪，人类进入了所谓的后 PC 时代（post PC era）。在这个时代，WinTel（Windows&Intel）联盟因垄断 PC 技术而占有 IT 产业大部分市场份额的长达 20 多年的格局将被改变。后 PC 时代

的基本特点是：计算装置无所不在，信息电器普及化和联网化，数据处理多媒体化。近年来，IT 工程师纷纷在科学研究、工程设计、消费电子以及军事技术等领域的产品创新设计方面采用灵活、高效和高性价比的嵌入式解决方案。嵌入式技术已经成为后 PC 时代 IT 领域的主流研发技术之一。

今天，嵌入式计算机在应用数量上远远超过了各种通用计算机。嵌入式系统正在逐步渗透到人类社会的各个领域，我们身边无所不在的嵌入式应用构成了所谓“无所不在的计算时代”。例如：一台通用计算机的外部设备中就包含了多个嵌入式微处理器，软驱、硬盘、显示器、调制解调器、打印机、扫描仪等均由嵌入式处理器控制。在制造工业、过程控制、通信、仪器、仪表、汽车、船舶、航空、航天、消费类电子产品、军事装备等产业领域，在产品中配套使用的嵌入式系统均占有举足轻重的产值份额。

下面，我们给出若干个典型嵌入式系统例子，参见表 1-1。

表 1-1 嵌入式产品和嵌入式系统举例

产品名称	嵌入式产品和嵌入式系统特征简介
智能电表	功能全、防窃电；芯片：MAXQ3180、ATmega64L 和 STM32F107；C 监控程序
道路信号灯控制器	路口信号灯多个相位控制信号；处理器：LPC2478；操作系统： μ C/OS- II
LED 大屏幕控制器	具有以太网通信功能的 LED 显示控制器；处理器：AX11015；C 监控程序
电梯控制器	CAN 总线，模糊控制；处理器：S3C2410A；操作系统：嵌入式 Linux
校园卡系统	采用双界面 CPU 卡和读卡器作为人机交互界面；系统包括：网络平台、管理服务平台、应用平台；与银行系统及与学校原有应用系统衔接
超市收款机	具备税控收款功能，以太网通信；处理器：W90P71；操作系统： μ CLinux
SOHO 路由器	具备网络地址转换功能；处理器：S3C2500；操作系统： μ CLinux
汽车行驶记录仪	记录刹车、主光灯、左右转向灯、机油压力、制动气压和手制动 8 个开关状态量以及水温 and 行驶速度 2 个模拟量，USB 数据转储；处理器：AT91RM9200；操作系统：Linux
机载雷达	具备大吞吐量雷达信号数据处理能力；芯片：PowerPC8548、XC5VLX330T、TS201；操作系统：VxWorks

从表 1-1 中读者可以观察到，为了简洁地描述一个嵌入式产品和与之配套的专用计算机系统，我们主要了解它的三个核心要素：功能和性能；处理器芯片；操作系统或者监控程序。

1.2 嵌入式系统发展简史

实际上，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。在早期工业控制领域，计算机就已经嵌入到应用对象中了。例如，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（stored program control system）。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出现开始算起。

1.2.1 微处理器的发展

从 20 世纪 70 年代起，VLSI 技术的运用使得我们可以将整个中央处理器集成在一个芯片上。1971 年，Intel 公司生产了世界上第一台 4 位微处理器 Intel4004，它本身就是为嵌入式应用（即计算器）而设计的。它仅提供基本的算术运算功能，因此不能算作通用计算机。翌年，

Intel公司又研制成功了8位微处理器 Intel8008。同4004一样,8008也是为专门用途而设计的嵌入式微处理器。它们都属于第一代微处理器,其典型应用是计算器、打字机、微波炉和交通灯控制等。

1974年,第二代8位微处理器 Intel8080 诞生。作为代替传统复杂电子逻辑电路的器件,8080成为诸如字处理机、导航系统以及巡航导弹这样具有可编程、体积小等特点的嵌入式应用的标准微处理器。同时期微处理器的代表性产品还有 Motorola 公司的 M6800、Zilog 公司的 Z80 以及 Intel 公司的 8085 等。

1978年出现了第三代16位微处理器,其典型代表为 Intel 公司的 8086、Zilog 公司的 Z8000 以及 Motorola 公司的 M68000。第三代微处理器的性能较第二代提高了近10倍,使得微处理器从专用目的微处理器发展成通用微计算机系统的中央处理器。1981年,IBM公司推出了基于8088(8086的变种产品,8位外部总线)的个人计算机系统 IBM-PC,使得计算机进入了PC时代。

1983年第四代32位微处理器问世,其典型代表为美国国家半导体公司的32032、Motorola公司的68020、Intel公司的80386和80486等。基于32位微处理器的微机系统在性能上可与20世纪70年代的大、中型计算机相媲美。

从20世纪80年代起,随着微电子技术的迅猛发展,半导体厂商致力于将微处理器、存储器件、I/O接口、A/D转换器、D/A转换器等集成在一个芯片上,这就是单片机或者称为微控制器(Micro Control Unit, MCU)。作为面向I/O设计的微控制器,单片机在过去的30多年间,被广泛应用于仪器仪表、智能控制、消费电子、军事电子等各种领域。即使在今天,它依然占据着普及型嵌入式应用的大部分市场份额。

但是,单片机应用只是嵌入式应用的初级阶段,其控制逻辑主要是循环查询的前后台监控程序。随着应用复杂性的提高,如网络、GUI和多媒体技术的广泛使用,迫切需要更高性能的微处理器以及操作系统的支持。于是,高性能的32位RISC微处理器、嵌入式操作系统、数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)以及片上系统(System on a Chip, SoC,有时也写成SOC,它是集成了微计算机的大多数功能模块的芯片,也叫做系统级芯片)等便成为高端嵌入式应用的主要组成部分。

1.2.2 嵌入式系统的发展阶段

真正意义上的嵌入式系统是从20世纪70年代随着微处理器的出现发展起来的。伴随着微处理器的发展,嵌入式系统至今已经有30多年的历史,它大致经历了以下5个发展阶段。

第一阶段是以4到8位单片机为核心的可编程控制器系统,同时具有检测、伺服、指示设备相配合的功能。这一阶段系统主要的特点是:结构和功能相对单一、效率较低、存储容量较小、几乎没有人机交互接口。应用范围主要局限于一些专业性极强的工业控制系统中,一般没有操作系统支持,通过汇编语言对系统进行直接控制。尽管这类系统使用简单方便、价格便宜,但是,对于需要大容量存储介质、友好的人机交互界面、远距离或无线通信的高性能现代化工业控制和后PC时代新兴的信息家电等领域而言,已远远不能满足要求。

第二阶段是以8到16位嵌入式中央处理器(CPU)为基础,以简单操作系统为核心的嵌入式系统。这一阶段系统的主要特点是:CPU种类繁多、通用性较差、系统开销小、操作系统的兼容性和扩展性较低、应用软件较为专业、用户界面不够友好以及网络功能较弱。这种嵌入式系统的主要任务是提高应用对象的智能化水平,如智能化仪器仪表、智能化家电等。

第三阶段是以32位RISC嵌入式中央处理器加嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统。这一

阶段系统的主要特点是：嵌入式操作系统能够运行于各种不同类型的处理器之上、操作系统内核精练小巧、效率高、模块化程度高、具有文件和目录管理、支持多任务处理、支持网络操作、具有图形窗口和用户界面等功能，具有大量的应用程序接口以及各种组件，开发程序简单、高效，能满足日益复杂的应用需求。这也是我们现在通常所说的典型嵌入式系统，然而，它在通用性、兼容性和扩展性方面仍有待改进。

第四阶段是以基于 Internet 接入为标志的嵌入式系统。这个阶段大约从 2000 年开始，到 2013 年，在技术方面接近成熟。目前越来越多的 IT 应用已经联网，如手机上网浏览、手机电子邮件、平板电脑万维网浏览，甚至洗衣机、电暖器、电冰箱等传统家电都能够联网，提供远程控制功能。

第五阶段是具有应用软件运行平台和/或开发平台的嵌入式系统。这一阶段的代表产品是智能手机，例如，苹果公司的 iPhone 手机和配备 Android 操作系统的各式手机（HTC、Gphone 等）。这一类手机一般都拥有 DSP 处理器和 ARM 体系结构的应用处理器，无线通信速率高达 20Mbps 以上，可以进行 2G/3G 制式以及 WiFi 制式的语音通信和数据通信。除了通信速度快、数据处理能力强之外，这一类手机的人机交互功能也十分完善，具有多点触摸屏输入法和高分辨率彩色 LCD 显示屏。例如，安装了 Windows Mobile 操作系统的智能手机可以运行 Word 软件，打开存储在 SD 卡上的 Word 文档进行阅读或者编辑。此外还可以下载并运行 Acrobat reader 软件，在手机上阅读 PDF 格式的文档。这种由手持设备用户自主决定应用软件使用与否的情况在传统手持设备上是不存在的。

智能手机操作系统往往还含有丰富的应用函数库，某种程度上能够充当通用移动计算的开发平台。目前专业软件开发者或业余软件开发者（许多是高中生或大学生），在 PC 上的手机软件集成开发环境下就能够高效率地开发普通消费者适用的手机应用软件，并且还可以在 PC 的模拟器上进行调试和试运行。

据了解，目前 iPhone 手机上可使用的商用应用软件已经达到 15 万件以上，而 Android 手机上的商用应用软件也达到 23 万件以上。

1.3 嵌入式系统的特点

如前所述，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：

- 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。
- 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，如军用电子、飞机控制、核电站控制等，如违反实时约束有可能会造成非常严重的后果。
- 嵌入式操作系统一般为硬的或软的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。
- 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（Watchdog, WDG）等。

- 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仔细设计以满足其功耗约束。
- 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、各种逻辑分析仪、混合信号示波器以及专门的软件开发和调试工具等。
- 系统资源紧缺：由于对成本、体积、功耗的严格要求，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、硬件都需仔细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三类：

- 1) 低端嵌入式系统，又称无操作系统控制的嵌入式系统（Non-OS control Embedded System, NOSES）。
- 2) 中端嵌入式系统，又称小型操作系统控制的嵌入式系统（Small OS control Embedded System, SOSES）。
- 3) 高端嵌入式系统，又称大型操作系统控制的嵌入式系统（Large OS control Embedded System, LOSES）。

2. 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的运行环境要求比较苛刻，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一些方面，如易于使用、易维护和标准化程度高。

1.5 嵌入式系统举例

下面给出几个常见的嵌入式系统实例，包括低端、中端和高端嵌入式系统。

1.5.1 低端嵌入式系统

所谓低端嵌入式系统，其特征是：硬件主体由专用 IC 芯片或 4 位/8 位单片机构成。通常这一类嵌入式系统的控制软件不含操作系统。下面给出两个低端嵌入式系统的例子。

【例 1-1】 数字血压计

适合家庭使用的数字式血压计的基本工作原理是：将捆绑在被测者胳膊上的充气袖带的气压数据发送给单片机，由单片机转变成血压信号并显示出来。

测试开始时，单片机启动气泵向袖带充气，当袖带内的气压达到 200mmHg 高之后停止充气，随后打开袖带的出气阀，让袖带内的气压慢慢以每秒约下降 3 ~ 5mmHg 的速度放气。在气压下降过程中，A/D 转换器采样袖带内的气压直流分量以取得收缩压和舒张压，之后送往 LCD