

德州仪器 (TI) 大学计划教材

高等院校电子信息科学与工程规划教材

华东师范大学精品教材建设专项基金资助项目

嵌入式系统原理与实践

沈建华 王 慈◎编著



清华大学出版社

高等院校电子信息科学与工程规划教材

嵌入式系统原理与实践

沈建华 王 慈◎编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统介绍了嵌入式系统的基本原理和基础知识,详细讲述了MCU应用相关的各种外设模块的工作原理和编程结构,包括ARM Cortex-M4内核、ARM v7指令系统、MCU系统控制、存储器、通用输入/输出(GPIO)、定时器、PWM、异步和同步通信接口(UART、SPI、I2C等)、模拟外设(ADC、DAC、比较器)等。同时,对嵌入式软件设计方法、嵌入式C语言基础、RTOS等作了简明阐述。最后还介绍了物联网应用、低功耗系统设计和电磁兼容性基础等。

本书以MSP432微控制器为例,每个章节都提供实验操作例程代码,并配有完整的教学资源,包括PPT课件、物联网口袋实验平台和实验指导书等。

本书可作为高等院校计算机、电子、自动化、仪器仪表等专业嵌入式系统、物联网、微机接口、单片机等课程的教材,也可作为广大从事MCU和物联网应用系统开发的工程技术人员的学习、参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统原理与实践/沈建华,王慈编著. —北京:清华大学出版社,2018
(高等院校电子信息科学与工程规划教材)
ISBN 978-7-302-51024-6

I. ①嵌… II. ①沈… ②王… III. ①微型计算机-高等学校-教材 IV. ①TP36

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第192037号

责任编辑:邓 艳
封面设计:刘 超
版式设计:楠竹文化
责任校对:马军令
责任印制:沈 露

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

印装者:三河市少明印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.5 字 数:542千字

版 次:2018年9月第1版 印 次:2018年9月第1次印刷

定 价:69.80元

产品编号:079898-01

序 言

目前很多高校都开设了嵌入式系统课程,有的学校还有嵌入式系统专业,关于嵌入式系统教学内容的讨论也随之而来。其实,嵌入式系统这个概念很大,计算机技术和计算机应用技术的每个方面,几乎都可以找到与嵌入式系统有关联的内容,如微处理器架构、硬件系统设计、软件设计与优化、算法与控制、接口与通信、操作系统、数字信号处理、单片机应用等。所以,完整的嵌入式系统教学内容,应该是一个课程体系、包括一系列的课程。对于一般学校的一门“嵌入式系统”类课程,则不必拘泥(或统一)于某一特定的内容,完全可以根据各自学校、专业的特点和培养方案,选定教学内容。为此,我们也查阅了美国一些高校(如哥伦比亚大学、德克萨斯大学、密西根大学、伯克利大学、华盛顿大学等)的嵌入式系统课程教学内容,发现各高校相似名称的课程,教学内容也相差很大,有的偏重于系统建模、有的偏重于系统控制、有的偏重于应用系统设计。总体而言,偏重于应用、控制方面的,选用微控制器(MCU)教学的较为普遍。

在国内成立嵌入式系统专业的学校,有条件可以开设一系列的嵌入式系统课程。对一般学校来说,涉及嵌入式系统相关教学内容的,可能也就是1~2门课。对于计算机专业而言,大多是原来的“微机原理与接口”“单片机原理与应用”这类课程教学内容的延续和更新。我们华东师范大学计算机系也是如此,目前“嵌入式系统原理与实践”这门课,就是原来“微机原理与接口”“嵌入式系统引论”的升级版。考虑到计算机专业软件课程(包括操作系统、编程语言等)已经很多,所以我们这门课的教学内容重点是嵌入式系统硬件接口方面的知识,以及具有嵌入式系统特点的软件设计方法,包括嵌入式处理器、存储器、I/O、RTOS、嵌入式应用编程等。

嵌入式系统是一种计算机应用系统。作为本科生专业基础课程,要抽象出一般嵌入式应用共性的知识和原理,这部分内容必须具有基础性、普适性,不依赖于某个具体的芯片。然后再选择某些有代表性的具体芯片作为实验载体,加强对原理的理解,掌握应用设计方法。平衡好这两个方面是嵌入式教学的一个难点,为此我们结合自己20多年嵌入式系统教学、科研项目开发经验,逐步抽象出符合本学科专业教学要求的嵌入式系统处理器、存储器、I/O等相关的基础知识和原理,并选择了基于ARM Cortex-M4的超低功耗微控制器MSP432作为硬件实验平台。现在各种MCU型号很多,选择MSP432主要考虑了以下因素。

(1) MSP432基于ARM Cortex-M4内核,采用ARM v7指令集,具有高性能、先进性,32位处理器已成主流,教学内容必须与时俱进。

(2) 低功耗是嵌入式系统的重要特性,MSP432既有一般ARM MCU的功能性,也有超低功耗特性,可满足更多教学、应用需求。

(3) MSP432 开发工具完善, 可支持多种主流嵌入式开发工具, 如 Keil MDK、IAR、Eclipse 等。

(4) 对于高校教学实验需求, 可向 TI 大学计划申请免费的 MSP432 LaunchPad。

嵌入式系统教学的另一个难点是动手实践。一方面, 受学校总课时限制, 每周 2 课时的实验只能让学生做一些肤浅的验证性实验, 无法做一些复杂、系统性的实验; 另一方面, 由于互联网应用的兴起, 现在 IT 学科的学生普遍喜欢软件类课程和互联网应用开发, 因为各种移动互联网应用, 如 Web、手机 App 应用开发更方便、有趣。为突破这个难题, 提高学生对嵌入式系统的学习兴趣, 同时结合物联网应用趋势, 把嵌入式系统和移动互联网结合起来, 我们和阿里巴巴、半导体芯片公司 TI 合作, 开发了基于阿里云 IoT 平台和 AliOS Things 的嵌入式物联网实验系统, 把手机 App 作为嵌入式系统的人机交互接口, 并可在 Internet 上实现互动。该实验系统的特色如下。

(1) 简单。硬件采用口袋板形式 (名片大小), 课程一开始就发给学生, 学生可在任何时间自行进行编程实验; 而在实验室规定的时间可以进行更复杂的实验, 大大增加了学生的实验时间、动手和创新能力。

(2) 丰富。实验内容丰富, 可做一般嵌入式系统课程要求的所有实验内容; 并带有 Arduino 扩展接口, 可进行创新实验、应用开发。

(3) 有趣。配接联网模块, 既可实现物联网应用方案, 也可用手机 App 进行远程操控。

(4) 真实。物联网实验方案采用阿里云 IoT 平台, 安全、稳定、有弹性, 可用于实际 IoT 产品和项目, 所学即所用。

(5) 完善。教材、课件 PPT、作业、答案等配套资源完善, 可零起点学习使用嵌入式和物联网开发。教师还可以在网查看、统计学生的学习、实验情况。

(6) 免费。对于高校教学, 可申请实验板卡、IoT 云系统使用全免费。

嵌入式应用几乎无所不在, 物联网给嵌入式系统发展带来巨大机遇。从某种角度上说, 物联网应用系统也可看作是嵌入式系统的网络应用, 因为物联网系统中的“物”, 基本上都是各种嵌入式设备。随着物联网应用的发展, 嵌入式软件日趋复杂, 需要针对应用趋势, 学习高效的嵌入式、物联网开发技术, 包括 RTOS、物联网 OS、IoT 云平台等。对于一般嵌入式开发, 本书介绍了 FreeRTOS。对于物联网应用开发, 本书简单介绍了 AliOS Things 和阿里云 IoT 平台, 并介绍了一个物联网应用实例。

考虑到教学内容的完整性、学生基础的差异性以及学习参考的便利, 本书的后面几章还补充了嵌入式软件设计方法、嵌入式 C 语言基础、软硬件开发环境以及低功耗设计和电磁兼容性方面的基础知识。

华东师范大学计算机系嵌入式系统实验室长期重视产学研结合, 与多家全球著名的半导体厂商 (如 TI、Microchip、ST 等) 和互联网企业 (如阿里云、微软 Azure 等) 合作, 在 MCU 和物联网系统开发、推广方面积累了丰富的经验。本书内容是结合了我们多年课程教学及 MCU 和物联网应用开发的经验编写整理而成的, 并经过了多届学生的试用, 反响良好。

参与本书编写和资料整理、硬件设计和代码验证等工作的，还有华东师范大学计算机系林雯、陶立清、常艳杰、王同乐、张韶、张红艳、陈子炎、周剑晟、郝立平，上海大学李晋等。在本书成稿过程中，得到了 TI 大学计划经理王承宁、潘亚涛、钟舒阳，阿里巴巴 IoT 事业部总经理库伟、巍骛、孟子，清华大学出版社邓艳的大力支持。在此向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促和水平所限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正，以便我们及时修正。

编 者

目 录

第 1 章 嵌入式系统与微控制器概述	1
1.1 嵌入式系统概述	1
1.1.1 嵌入式系统的发展	1
1.1.2 嵌入式系统的特点	3
1.1.3 嵌入式系统的组成	3
1.1.4 嵌入式系统的种类	5
1.1.5 嵌入式系统的调试方法	6
1.1.6 嵌入式系统的应用	12
1.2 嵌入式处理器	13
1.2.1 嵌入式处理器概述	13
1.2.2 嵌入式处理器的分类	13
1.2.3 MCU 的发展和特点	18
1.3 习题	23
第 2 章 ARM Cortex-M 处理器	24
2.1 ARM 处理器概述	24
2.2 ARM 处理器架构	24
2.2.1 ARM 体系结构版本	25
2.2.2 ARM 处理器	27
2.3 Cortex-M 处理器内核及功能介绍	29
2.4 ARM Cortex-M4 编程模型	34
2.4.1 处理器的工作模式和特权级别	34
2.4.2 ARM Cortex-M4 寄存器	35
2.4.3 ARM Cortex-M4 异常处理	38
2.5 习题	43

第3章 ARM 指令系统	44
3.1 指令格式	44
3.2 条件码	46
3.3 ARM 指令的寻址方式	47
3.4 ARM v7 架构指令集——Thumb-2 指令集	52
3.4.1 存储器访问指令	53
3.4.2 通用数据处理指令	57
3.4.3 乘法和除法指令	62
3.4.4 分支和分支控制指令	64
3.4.5 饱和运算指令 SSAT 和 USAT	66
3.4.6 位段操作指令	67
3.4.7 杂项指令	69
3.5 ARM 汇编程序设计	72
3.5.1 ARM 汇编语言格式规范	72
3.5.2 ARM 汇编语言编写格式示例	73
3.6 习题	73
第4章 系统控制	75
4.1 功能组件	75
4.1.1 复位控制	75
4.1.2 时钟控制	78
4.1.3 电源/功耗控制	82
4.1.4 嵌套向量中断控制器	83
4.1.5 DMA 控制器	89
4.2 初始化配置	95
4.3 操作实例	98
4.3.1 时钟例程	98
4.3.2 中断例程	104
4.4 本章小结	107

4.5 习题	107
第 5 章 存储器	109
5.1 存储器分类	109
5.1.1 RAM 存储器	109
5.1.2 ROM 存储器	118
5.1.3 Flash 存储器	121
5.1.4 铁电存储器 FRAM	126
5.1.5 存储器控制器	128
5.1.6 存储器性能指标	132
5.2 微控制器存储器系统	133
5.2.1 存储器地址映射	134
5.2.2 位带操作	136
5.2.3 存储格式	137
5.3 操作示例	140
5.3.1 变量地址观察例程	140
5.3.2 Flash 擦写例程	142
5.4 本章小结	146
5.5 习题	147
第 6 章 基本外设	148
6.1 通用输入/输出端口 (GPIO)	148
6.1.1 GPIO 简介	148
6.1.2 MSP432 中的 GPIO	151
6.1.3 初始化配置	152
6.1.4 操作实例	152
6.2 通用定时器/计数器	155
6.2.1 通用定时器简介	155
6.2.2 MSP432 中的定时器	157
6.2.3 初始化配置	159
6.2.4 操作实例	160

6.3	脉冲宽度调制 (PWM)	163
6.3.1	PWM 简介	163
6.3.2	MSP432 中的 PWM	165
6.3.3	操作实例	166
6.4	看门狗定时器 (WDT)	169
6.4.1	WDT 简介	170
6.4.2	MSP432 中的看门狗	170
6.4.3	操作实例	171
6.5	实时时钟 (RTC)	175
6.5.1	RTC 简介	175
6.5.2	MSP432 中的 RTC	175
6.5.3	操作实例	177
6.6	习题	181
第 7 章	模拟外设	182
7.1	模数转换器 (ADC)	182
7.1.1	ADC 简介	182
7.1.2	ADC 性能指标	185
7.1.3	ADC 类型	185
7.1.4	初始化配置	190
7.1.5	MSP432 中的 ADC	190
7.1.6	操作实例	192
7.2	比较器	196
7.2.1	比较器简介	196
7.2.2	初始化配置	199
7.2.3	操作实例	199
7.3	数模转换器 (DAC)	201
7.3.1	DAC 简介	201
7.3.2	DAC 类型	202
7.3.3	DAC 的技术指标	203
7.3.4	操作实例	203

7.4 习题	207
第 8 章 通信外设	209
8.1 数字通信系统概述	209
8.2 UART 接口	210
8.2.1 UART 简介	210
8.2.2 波特率	213
8.2.3 MSP432 中的 UART	213
8.2.4 初始化配置	215
8.2.5 操作实例	215
8.3 SPI 接口	219
8.3.1 SPI 简介	219
8.3.2 MSP432 中的 SPI	221
8.3.3 初始化配置	223
8.3.4 操作实例	224
8.4 I2C 接口	227
8.4.1 I2C 简介	227
8.4.2 MSP432 中的 I2C	232
8.4.3 初始化配置	233
8.4.4 操作实例	234
8.5 CAN 总线	238
8.6 USB 接口	240
8.7 习题	244
第 9 章 嵌入式软件设计	245
9.1 嵌入式系统软件组成	245
9.1.1 嵌入式系统软件架构	245
9.1.2 初始化引导程序 Bootloader	247
9.1.3 板级支持包 BSP	247
9.1.4 设备驱动程序	249

9.1.5	库函数	250
9.2	嵌入式系统软件设计方法	250
9.2.1	前后台系统	250
9.2.2	中断（事件）驱动系统	251
9.2.3	巡回服务系统	252
9.2.4	基于定时器的巡回服务系统	253
9.2.5	带操作系统的嵌入式软件开发（以 Linux 为例）	254
9.3	嵌入式 C 语言基础	257
9.3.1	嵌入式 C 语言程序设计	257
9.3.2	编程风格	259
9.3.3	数据类型及声明	267
9.3.4	操作符与表达式	273
9.3.5	代码调试	276
9.4	本章小结	281
9.5	习题	281
第 10 章	嵌入式操作系统	282
10.1	常用的嵌入式操作系统	282
10.2	RTOS 基础	284
10.2.1	RTOS 的基本概念	284
10.2.2	使用 RTOS 的优势	286
10.2.3	RTOS 的功能组成	287
10.3	FreeRTOS	292
10.3.1	FreeRTOS 的体系结构	292
10.3.2	FreeRTOS 的任务调度机制	293
10.3.3	FreeRTOS 的任务管理	296
10.3.4	FreeRTOS 任务通信机制	298
10.3.5	FreeRTOS 任务同步机制	298
10.3.6	FreeRTOS 移植到微控制器方法	299
10.3.7	Amazon FreeRTOS	299

10.4	FreeRTOS 操作示例	299
10.4.1	FreeRTOS 的任务创建及删除示例	299
10.4.2	FreeRTOS 的任务通信示例	303
10.4.3	FreeRTOS 的任务同步（二进制信号量）示例	309
10.4.4	基于 FreeRTOS MSP32 的闪灯示例	314
10.5	习题	318
第 11 章	嵌入式系统与物联网	319
11.1	物联网概述	319
11.1.1	技术及应用框架	320
11.1.2	相关技术	321
11.2	无线通信技术	322
11.2.1	NFC	323
11.2.2	ZigBee	323
11.2.3	BLE	324
11.2.4	Wi-Fi	325
11.2.5	LoRa	326
11.2.6	NB-IoT	327
11.2.7	无线通信技术比较	328
11.3	终端技术	329
11.3.1	Android 系统	329
11.3.2	iOS 系统	330
11.3.3	Web 技术	331
11.4	服务器和云计算	332
11.4.1	独立服务器和云主机	332
11.4.2	云计算	333
11.5	开发平台和操作系统	335
11.5.1	IoT 开发平台	335
11.5.2	IoT 操作系统	336
11.6	MQTT 概述	337
11.6.1	MQTT 特点	337

11.6.2	MQTT 协议原理	338
11.7	物联网应用示例	339
11.8	习题	343
第 12 章	低功耗与电磁兼容	344
12.1	低功耗设计方法	344
12.1.1	利用 I/O 引脚为外部器件供电	344
12.1.2	电源管理单元的设计	345
12.1.3	动态改变 CPU 的时钟频率	345
12.1.4	软件系统的低功耗设计	346
12.2	电源设计	348
12.2.1	电池的选择	349
12.2.2	超低静态电流 LDO	352
12.2.3	直流/直流转换器	353
12.3	电磁兼容性	354
12.3.1	电磁干扰的形成	354
12.3.2	电磁兼容常用元器件	356
12.3.3	电磁兼容常用技巧	357
12.4	习题	360
参考文献		361

第 1 章 嵌入式系统与微控制器概述

嵌入式系统作为计算机应用系统的一个分支,在后 PC 时代发展迅速,已经成为一个独立的研究与应用方向。本章将讲述嵌入式系统相关的一些基础知识,包括嵌入式系统的概念、发展、特点、组成、种类、开发调试方法及嵌入式处理器概述等。通过对本章的学习,读者可以对嵌入式系统,特别是嵌入式微控制器(MCU)的相关基础知识有基本的了解。

1.1 嵌入式系统概述

嵌入式系统是以应用为中心,以计算机技术为基础,软硬件可裁剪,满足对功能、可靠性、成本、体积、功耗等特定要求的专用计算机系统,它通常被包含在一些机械或电子系统中。嵌入式系统还是一种计算性能受限制的实时系统,它经常作为某一部件嵌入到一个完整设备中。如今,嵌入式系统控制着大量的设备,约有百分之九十八的微处理器用于各种嵌入式系统。

嵌入式系统是硬件和软件的集合体。其硬件包括嵌入式处理器、控制器、数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)、存储器、外设接口器件等。其软件包括引导程序、嵌入式操作系统和应用程序等。嵌入式操作系统控制着应用程序与硬件的交互,应用程序控制着系统的运作。嵌入式系统有时还包括一些机械部分,如机电一体化装置、微机电系统(Micro-Electro Mechanical System, MEMS)、光学系统等,这些机械部分是为完成某种特定的功能而设计的,所以嵌入式系统有时也被称为嵌入式设备。

1.1.1 嵌入式系统的发展

嵌入式系统是随着计算机技术、微处理器技术、电子技术、通信技术、集成电路技术的发展而发展起来的,现已成为计算机技术和计算机应用领域的一个重要组成部分。

20 世纪中叶,微电子技术处于发展初级阶段,集成电路属于中小规模发展时期,各种新材料新工艺尚未成熟,元件集成规模还比较小,工业控制系统基本使用继电器逻辑技术,还没有嵌入式系统的概念。直到 20 世纪 70 年代,微处理器的出现,计算机才出现了历史性的变化。以微处理器为核心的微型计算机以其小型、价廉、高可靠性特点,迅速走出机房。基于高速数值运算能力的微型机,表现出的智能化水平引起了控制专业人士的兴

趣,要求将微型机嵌入到一个对象体系中,实现对象体系的智能化控制。例如,将微型计算机经电气加固、机械加固,并配置各种外围接口电路,安装到大型舰船中构成自动驾驶仪或轮机状态监测系统。这样一来,计算机便失去了原来的形态和通用计算机功能。为了区别于原有的通用计算机系统,把嵌入到对象体系中,实现对象体系智能化控制的计算机,称作嵌入式计算机系统。

从 20 世纪 70 年代单片机的出现,到今天各式各样的嵌入式微处理器以及微控制器的大规模应用,嵌入式系统已经有了 40 多年的发展历史。

嵌入式系统的出现最初是基于单板机或单片机的。如有用 Zilog 公司 Z80 微处理器设计的单板机(控制板),以及后来 Intel 80386EX 单板机等。70 年代单片机的出现,使得汽车、家电、工业机器、通信装置以及其他电子产品,可以通过内嵌单片机,使系统获得更好的性能、更便于使用、也更便宜。随着嵌入式系统规模的不断发展,嵌入式芯片的工艺不断改进,成本逐步下降,性能得到提高,在各个方面都有了广泛的应用。从企业应用,到家庭、移动应用,嵌入式系统不断走进人们的生活,同时市场也在不断壮大。如图 1.1 所示,嵌入式系统的发展趋势以指数级上升。从 1991 年到 2013 年,ARM 架构的芯片总出货量达到了 500 亿颗,而 2013 年到 2017 年仅 4 年时间,ARM 架构的芯片总出货量就达到了 500 亿颗。根据 ARM 预测,从 2017 年到 2021 年,ARM 架构的芯片出货量将再翻一番,达到 1000 亿颗。

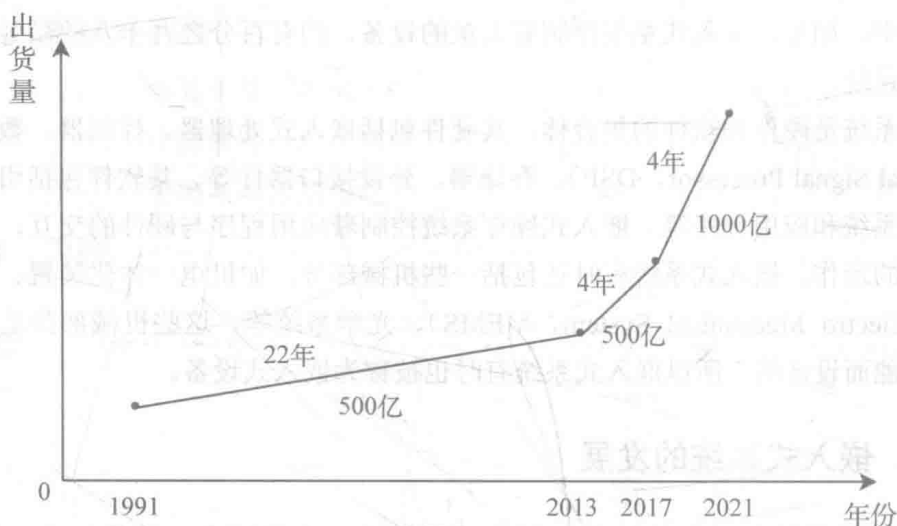


图 1.1 嵌入式系统发展趋势图

在嵌入式软件方面,从 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,这使得可以缩短开发周期、降低开发成本、并提高开发效率,“嵌入式系统”真正出现了。确切点说,这个时候的操作系统是一个实时内核,这个实时内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。

90 年代以后,随着对实时性要求的提高,软件规模不断上升,实时内核逐渐发展为

实时多任务操作系统 (RTOS), 并作为一种软件平台, 逐步成为嵌入式系统的主流。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。除了前面的几家老牌公司以外, 还出现了 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 、FreeRTOS、Palm OS、WinCE、VxWorks、嵌入式 Linux 等操作系统。

1.1.2 嵌入式系统的特点

嵌入式系统是一种满足特定应用需求的计算机应用系统, 其最主要的特点就是专用性。一个嵌入式系统的功能与非功能指标 (包括外形、体积等)、硬件与软件, 都是特定设计的, 冗余度很小。另外, 由于嵌入式系统应用面广、需求各异, 使得各种嵌入式系统的软硬件复杂度差异很大, 行业难以被垄断。

嵌入式系统的硬件核心是嵌入式微处理器。嵌入式微处理器一般具备以下几个特点。

(1) 性能、功能差异很大、覆盖面广。这是由于嵌入式系统应用特点决定的, 各种嵌入式应用对处理器的要求差异非常大, 需要有不同性能、功能的微处理器来满足。

(2) 对实时多任务有很好的支持, 能完成多任务并且有较短的中断响应时间, 从而使内部的代码和实时内核的执行时间减少到最低限度。

(3) 具有功能很强的存储区保护功能。对于多任务的应用, 由于嵌入式系统的软件已经模块化, 而为了避免在软件模块之间出现错误的交叉作用, 需要有存储区保护功能, 同时也有利于软件诊断。

(4) 可扩展的处理器结构, 工具链完善, 以快速开发出满足应用的、不同性能的嵌入式微处理器。在这方面, ARM 处理器有很大的优势。

(5) 低功耗。尤其是用于电池供电的便携式无线和移动设备中的嵌入式处理器, 如需要功耗只有 mW 甚至 μW 级。

一般地, 复杂的嵌入式系统的软件包括嵌入式操作系统和应用程序。对于小系统, 应用程序可以没有操作系统而直接在处理器上运行。对于大系统来说, 为了合理地调度和管理多任务、系统资源、系统函数, 以及与专家库函数接口, 用户需要选择与嵌入式系统相对应的开发平台, 这样才能保证程序执行的实时性、可靠性, 并减少开发时间, 保障软件质量。

1.1.3 嵌入式系统的组成

作为一个“专用计算机系统”的嵌入式系统, 同样也是由软件系统和硬件系统两大部分组成的。一般来说, 硬件包括处理器/微处理器、存储器、I/O 外设器件、图形控制器等。软件部分包括操作系统软件 (OS) (要求实时和多任务操作) 和应用软件。有时设计人员会把这两种软件组合在一起。嵌入式系统使用的操作系统可能是相同的, 但根据应用领域的不同, 应用程序 (应用软件) 却可以千差万别。应用软件控制着系统的运作和行为, 而操作系统则控制着应用程序与硬件的交互作用。