



高等院校“十三五”规划教材

GAODENG YUANXIAO SHISANWU GUIHUA JIAOCAI

嵌入式系统 原理与应用

主 编 何尚平 陈 艳 万 彬 辜小花



重庆大学出版社



嵌入式系统 原理与应用

主 编 何尚平 陈 艳 万 彬 辜小花

重庆大学出版社

内容提要

本书以嵌入式系统的基本开发技术为主线,以国内外应用广泛的、经典的、适合学习型的基础 ARM7 核及 SAMSUNG 公司 S3C44B0X(基于 ARM7TDMI)嵌入式处理器芯片为硬件平台,系统地阐述了嵌入式系统的基本概念、开发与应用基本原理、ARM 技术概述、ARM 指令系统和基于 ARM 的嵌入式程序设计基础、基于 ARM 的应用开发实例、源码开放的嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 、Linux 的移植与应用开发等嵌入式系统开发与应用的基本知识、基本技术和基本方法,并结合嵌入式系统基础实验,给出了完整的嵌入式系统学习方案。

本书可作为高等院校计算机、电子信息、通信工程、物联网、自动化、电气工程及其自动化等专业的教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统原理与应用/何尚平等主编. —重庆:重庆大学出版社,2019.8
ISBN 978-7-5689-1579-3

I. ①嵌… II. ①何… III. ①微型计算机—系统设计 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 109398 号

嵌入式系统原理与应用

主 编 何尚平 陈 艳 万 彬 辜小花

策划编辑 曾显跃 鲁 黎

责任编辑:曾显跃 版式设计:曾显跃 鲁 黎

责任校对:万清菊 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆俊蒲印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:21.75 字数:531千

2019年8月第1版 2019年8月第1次印刷

印数:1—2 000

ISBN 978-7-5689-1579-3 定价:58.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

嵌入式系统是融合了计算机软硬件技术、半导体技术、电子技术和通信技术,与各行业的具体应用相结合后的产物。自 20 世纪 70 年代初嵌入式技术问世以来,嵌入式系统就被广泛应用于军事、航空航天、工业控制、机器人、物联网、仪器仪表、汽车电子、医疗仪器、消费类电子、智能家电、现代电气、智能电力、智慧电网、机电设备等众多领域,嵌入式系统以其高性能、低功耗、高性价比等特点高速发展,随着信息技术、网络技术、移动通信技术等相关技术的进一步发展,嵌入式技术必将与更多实际应用领域相结合,这必然会极大地拓展嵌入式应用的广度和深度,体现嵌入式系统与实际应用密切结合的价值。

嵌入式微处理器具有体积小、质量小、成本低、可靠性高的优点,是嵌入式系统的核心。目前比较有影响、使用广泛的 32 位嵌入式处理器有 ARM 公司的 ARM、Intel 公司的 Xscale、IBM 公司的 PowerPC、HP 公司的 PA-RISC、Compaq 公司的 Alpha、MIPS 公司的 MIPS 和 Sun 公司的 Sparc 等。而在众多嵌入式处理器中,ARM 处理器以其合理的结构、优良的性能、较低的功耗、颇具市场竞争力的价格等优势,成为嵌入式处理器的主流产品,并已成为高性能、低功耗嵌入式微处理器的代名词,是目前 32 位、64 位嵌入式处理器中应用最为广泛的一个系列。

ARM 微处理器得到了众多半导体厂家和整机厂商的大力支持,全球已有 100 多家 IT 公司在采用 ARM 技术,包括国外 TI、SAMSUNG、Philips、Intel 和国内华为等公司。优良的性能和准确的市场定位极大地丰富了 ARM 资源,加速了基于 ARM 核的、面向各种应用系统芯片的开发应用,使得 ARM 获得了更广泛的应用,确立了 ARM 技术的市场领先地位。ARM 在高性能嵌入式应用领域获得了巨大的成功,已在 32 位嵌入

式应用中稳居世界第一。早在 2002 年,基于 ARM 核的芯片占据了整个 32、64 位嵌入式微处理器市场的 79.5%,全世界已使用了几十亿个 ARM 核。如今,ARM 公司已经成为业界的领军者,“每个人口袋中都装着 ARM”已毫不夸张,因为绝大多数手机、移动设备、PDA 都是用基于 ARM 核的系统芯片开发的。为了顺应当今世界技术革新的潮流,了解、学习和掌握高性能嵌入式技术,就必然要学习以 32 位 ARM 微处理器为核心的嵌入式应用与开发技术。

随着嵌入式应用的深入,软件设计的复杂度越来越高,操作系统成为应用软件设计的基础和开发平台,在嵌入式系统中起到承上启下的作用。在众多的嵌入式操作系统中,嵌入式 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 、Linux 因其开源性和优良的性能得到广泛的应用。由于嵌入式目标系统的资源限制,无法建立复杂的开发平台,在嵌入式系统的开发过程中,一般采用交叉开发方式。

SAMSUNG 公司 S3C 系列芯片是国内市场占有率较高的基于 ARM 核的微处理器之一,其接口模块丰富、适用面广,比较适合教学实验。因此,本书以嵌入式系统的基本开发技术为主线,以国内外应用广泛的、典型的、基础的、适合学习型的 ARM7 处理器核及 SAMSUNG 公司 S3C44B0X (基于 ARM7TDMI)为硬件平台,系统介绍了嵌入式系统的基本原理和应用开发方法、ARM 技术概述、ARM 指令系统和基于 ARM 的嵌入式程序设计基础、基于 ARM 的开发实例、源代码开放的嵌入式操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 、Linux 移植与应用开发等嵌入式系统开发与应用的基本知识、基本流程和基本方法,以及以 ARM 微处理器为核心的嵌入式系统开发过程,通过实际综合应用案例,给出完整的嵌入式系统解决方案。

本书在介绍嵌入式系统基本原理的同时,从应用角度出发,结合了一些嵌入式系统基础实验,使读者能够系统、完整地掌握嵌入式系统开发与应用的基本概念和设计流程、基于 ARM 的嵌入式软件程序设计与开发技能、嵌入式实时操作系统移植的基本概念和应用开发的基础。为了提升目前嵌入式系统的教与学质量而又不脱离目前的教与学实际,在编写本教材过程中,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,提升嵌入式系统教学的实用性和工程性。

近年来,我国在嵌入式系统设计和应用开发方面也取得了长足进步,嵌入式领域日益增长的需求使得我们面临人才匮乏的尴尬局面,未来也广泛需要嵌入式行业人才。在此背

景下,嵌入式技术的学习与研究成为热点,很多高等院校开设了嵌入式技术的相关课程。本书包含大量软件和硬件设计资源,形式新颖、内容齐全、覆盖面广、实用性强,可作为计算机、电子信息、通信工程、物联网、自动化、电气工程及其自动化等专业进行嵌入式教学、实验及相关的培训参考教材,也可作为嵌入式初学者以及相关工程技术人员的实用参考书,并可根据理论教学、实验教学实际需要而进行适当地取舍和灵活安排。通过本书的学习,可使学生掌握 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嵌入式产品研发设计能力,符合社会对高素质、开拓型嵌入式人才的需求。

本书由南昌大学科学技术学院何尚平、陈艳和南昌职业大学万彬、重庆科技学院辜小花担任主编,江西现代职业技术学院张文涛、南昌航空大学科技学院王振、南昌大学科学技术学院吴静进担任副主编。全书共 9 章,具体编写分工:陈艳编写了第 1 章、第 2 章、第 3 章,万彬、辜小花编写了第 4 章,何尚平编写了第 5 章、第 8 章,张文涛编写了第 6 章,吴静进编写了第 7 章,王振编写了第 9 章。全书由何尚平负责统稿。

承蒙南昌大学信息工程学院万晓凤教授、博导对本书进行了主审,江西工业职业技术学院胡蓉、华东交通大学理工学院赵巍和南昌大学科学技术学院罗小青、陈巍、谢芳娟、黄灿英、许仙明、朱淑云、吴敏、谢风连、沈放、黄仁如、熊婷、梅毅等提出了许多宝贵的意见和建议,特此感谢。

由于编者水平有限,书中错漏和不妥之处在所难免,恳请专家、同行老师和读者批评指正。

编 者

2019 年 3 月

目 录

第 1 章 嵌入式系统概述	1
1.1 嵌入式系统基本概念	1
1.2 嵌入式系统处理器	5
1.3 嵌入式系统的组成	8
1.4 嵌入式操作系统	11
习 题	13
第 2 章 ARM 处理器的体系结构	15
2.1 体系结构和流水线技术	15
2.2 嵌入式处理器内核	18
2.3 ARM 体系结构的发展	20
2.4 Thumb 技术介绍	22
2.5 ARM 处理器工作状态	24
2.6 ARM 处理器工作模式	25
2.7 ARM 处理器寄存器组成	26
2.8 Thumb 状态下的寄存器组织	30
2.9 ARM 的异常中断	31
2.10 ARM 存储数据类型和存储格式	34
2.11 ARM 总线技术	36
2.12 ARM 协处理器	37
2.13 基于 JTAG 的调试系统	38
2.14 ARM7TDMI	41
习 题	45
第 3 章 ARM 指令系统	47
3.1 ARM 指令集概述	47
3.2 ARM 寻址方式	49
3.3 ARM 指令	55
习 题	79
第 4 章 Thumb 指令集	82
4.1 Thumb 指令集概述	82
4.2 Thumb 指令详细介绍	84
习 题	100
第 5 章 嵌入式系统程序设计基础	101
5.1 ARM 汇编器所支持的伪指令	101
5.2 ARM 汇编语言程序设计	117

5.3	嵌入式 C 语言程序设计基础	120
5.4	C 语言与汇编语言混合编程	129
	习 题	136
第 6 章	基于 S3C44B0X 嵌入式系统应用开发实例	137
6.1	S3C44B0X 处理器介绍	137
6.2	S3C44B0X I/O 端口功能及应用开发	146
6.3	S3C44B0X UART 接口功能及应用开发	157
6.4	S3C44B0X 中断控制器功能及应用开发	169
6.5	S3C44B0X PWM 定时器功能及应用开发	180
6.6	S3C44B0X A/D 转换器功能及应用开发	189
6.7	S3C44B0X RTC 功能及应用开发	194
6.8	S3C44B0X IIC 总线接口功能及应用开发	204
	习 题	211
第 7 章	嵌入式实时操作系统 μC/OS-II 应用与开发基础	212
7.1	嵌入式实时操作系统	213
7.2	嵌入式 μ C/OS-II 实时操作系统	215
7.3	μ C/OS-II 的内核	222
7.4	μ C/OS-II 应用程序开发	231
7.5	μ C/OS-II 在嵌入式处理上的移植	234
	习 题	240
第 8 章	嵌入式实时操作系统 Linux 应用与开发基础	242
8.1	嵌入式 Linux 概况	242
8.2	嵌入式 Linux 的开发环境	249
8.3	桌面 Linux 的安装	258
8.4	Linux 的使用	259
8.5	Linux 内核结构	278
8.6	Linux 目录结构	287
8.7	Linux 文件系统	290
8.8	构造嵌入式 Linux 系统	295
8.9	μ Clinux 应用程序开发	299
8.10	μ Clinux 在 S3C44B0X 上的移植	300
8.11	开发工具 GNU 的使用	302
8.12	建立 μ Clinux 开发环境	304
	习 题	304
第 9 章	嵌入式系统基础实验	306
9.1	嵌入式教学实验系统简介	306
9.2	ADS1.2 开发环境创建与简要介绍	308

9.3 基于 ARM7 的汇编语言程序设计简介	315
9.4 基于 ARM7 的 C 语言程序设计简介	319
9.5 μ C/OS- II 的内核在 ARM 处理器上的移植实验	322
9.6 μ Clinux 的移植、内核文件系统的生成与烧写	331
参考文献	338

第 1 章

嵌入式系统概述

1.1 嵌入式系统基本概念

嵌入式系统应用日益广泛,嵌入式系统的快速发展也极大地丰富、延伸了嵌入式系统的概念。本节通过将嵌入式系统和 PC 机进行对比,引出嵌入式计算机的概念及嵌入式系统的定义,并详细介绍嵌入式系统的特点、发展和应用。

1.1.1 嵌入式系统的定义

嵌入式系统是嵌入到对象体中的专用计算机系统,以嵌入式计算机为核心的嵌入式系统是继 IT 网络技术之后,又一个新的技术发展方向。IEEE(电气和电子工程师协会)对嵌入式系统的定义为:嵌入式系统是“用于控制、监视或者辅助操作机器和设备的装置”。这主要是从应用对象上加以定义,涵盖了软硬件及辅助机械设备。国内普遍认同的嵌入式系统定义为:以应用为中心、以计算机技术为基础、软硬件可裁剪、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。

相比较而言,国内的定义更全面一些,体现了嵌入式系统的“嵌入性”“专用性”和“计算机”这三个基本要素和特征。

嵌入式系统还可以从广义和狭义的角度定义。广义上讲,凡是带有微处理器的专用软硬件系统,都可称为嵌入式系统。如各类单片机、FPGA 和 DSP 系统,这些系统在完成较为单一的专业功能时具有简洁高效的特点。但由于它们没有操作系统,管理系统硬件和软件的能力有限,在实现复杂多任务功能时,往往困难重重,甚至无法实现。而从狭义上讲,更加强调那些使用嵌入式微处理器构成独立系统,具有自己的操作系统,具有特定功能,用于特定场合的嵌入式系统。这里所谓的“嵌入式系统”,是指狭义上的嵌入式系统。

1.1.2 嵌入式系统的特点

由于嵌入式系统是应用于特定环境下针对特定用途来设计的系统,所以不同于通用计算机系统。同样是计算机系统,嵌入式系统是针对具体应用设计的“专用系统”。它的硬件和软

件都必须高效率地设计、量体裁衣、去除冗余,力争在较少的资源上实现更高的性能。它与通用的计算机系统相比具有以下显著特点:

(1) 嵌入式系统通常是面向特定任务的专用计算机系统

不同于一般通用 PC 计算平台,嵌入式系统通常是面向特定任务的,是“专用”的计算机系统,嵌入式系统微处理器大多非常适合于为特定用户群所设计的系统中,称为“专用微处理器”,它专用于执行某个特定的任务,或者是很少几个任务。具体的应用需求决定着嵌入式处理器的性能选型和整个系统的设计。如果要更改其任务,就可能要废弃整个系统并重新进行设计。

(2) 嵌入式系统运行环境差异很大

嵌入式系统无所不在,但运行环境也差异很大,可运行在飞机上、冰天雪地的两极中、要求温湿度恒定的科学实验室等。特别是在恶劣的环境或突然断电的情况下,要求系统仍然能够正常工作,这些情况对设计人员来说意味着要同时考虑到硬件与软件。“严酷的环境”,一般意味着更高的温度与湿度。军用设备标准对嵌入式元器件的要求非常严格,并且在价格上与商用、民用差别很大。比如 Intel 公司的 8086,当它用在火箭上时,单价竟高达几百美元。

(3) 嵌入式系统比通用 PC 系统资源少得多

通用 PC 系统有数不胜数的系统资源,可以轻松完成各种工作。用户可以在自己的 PC 机上编写程序的同时播放 MP3、CD,以及下载资料等。因为个人 PC 系统现在至少拥有 512 MB 内存、80 GB 硬盘空间,并且在 SCSI 卡上连接着软驱和 CD-ROM 驱动器已是目前非常普遍的配置了。而面向特定任务的嵌入式系统,由于是专门用来执行很少的几个确定任务,它所能管理的资源比通用 PC 系统少得多。这主要是因为在设计时考虑到经济性,不能使用通用 CPU,这就意味着所选用的 CPU 只能管理很少的资源,它的成本更低、结构更简单。

(4) 嵌入式系统具有低功耗、体积小、集成度高、成本低等特点

嵌入式系统“嵌入”到对象的体系中,对于对象、环境和嵌入式系统自身有严格的要求,一般的嵌入式系统具有低功耗、体积小、集成度高、成本低等特点。

通用 PC 系统有足够大的内部空间提供良好的通风能力,但是系统中的 Intel 或 AMD 处理器均配备庞大的散热片和冷却风扇进行系统散热。而许多嵌入式系统就没有如此充足的电能供应,尤其是便携式嵌入式设备,即便是有足够的电源供应,散热设备的增加也往往是不方便的。因此,嵌入式系统设计时应尽可能地降低功耗。整个系统设计有严格的功耗预算,系统中的处理器大部分时间必须工作在降低功耗的“睡眠模式”下,只有在需要任务处理时它才会“醒来”。软件必须围绕这种特性进行设计,一般的外部事件通过中断驱动来唤醒系统工作。

功耗约束影响了系统设计决策的方方面面,包括处理器的选择、内存体系结构的设计等。系统要求的功耗约束很有可能决定软件是用汇编语言编写还是用 C 或 C++ 语言编写,这是由于必须在功耗预算内使系统达到最高性能。功耗需求由 CPU 时钟速度以及使用的其他部件(RAM、ROM、I/O 设备等)的数量决定。因此,从软件设计人员的观点看来,功耗约束可能成为压倒性的系统约束,它决定了软件工具的选择、内存的大小和性能的高低。

能够将通用 CPU 中许多由板卡完成的任务集成在高度集成的 SoC 系统芯片内部,而不是微处理器与分立外设的组合就能节省许多印制电路板、连接器等,使系统的体积、功耗、成本大大降低,也能提高移动性和便携性,从而使嵌入式系统的设计趋于小型化和专业化。

嵌入式系统的硬件和软件都必须高效率地设计,在保证稳定、安全、可靠的基础上量体裁衣,去除冗余,力争用较少的软硬件资源实现较高的性能。这样,才能最大限度地降低应用成本,从而在具体应用中更具有市场竞争力。

(5) 需建立完整的系统测试和可靠性评估体系

嵌入式应用的复杂性、多样性要求设计的代码应该是完全没有错误的,怎样才能科学、完整地测试全天候运行的嵌入式复杂软件呢?首先,需要有科学的测试方法,建立科学的系统测试和可靠性评估体系,尽可能避免因为系统的不可靠造成的巨大损失;其次,需引入多种嵌入式系统测试方法和可靠性评估体系。在大多数嵌入式系统中,一般都包括一些机制,比如看门狗定时器,它在软件失去控制后能使之重新开始正常运行。总之,嵌入式软件测试和评估体系是非常复杂的一门学科,建立完整的嵌入式系统的系统测试和可靠性评估体系,才能保证嵌入式系统高效、可靠、稳定地工作。

(6) 具有较长的生命周期

嵌入式系统是与实际具体应用有机结合的产物,它的升级换代也是与具体产品同步进行的。因此,一旦定性进入市场,一般具有较长的生命周期。

(7) 目标代码通常是固化在非易失性存储器中

嵌入式系统开机后,必须有代码对系统进行初始化,以便其余的代码能够正常运行,这就是建立运行时的环境。比如,初始化 RAM 放置变量、测试内存的完整性、测试 ROM 完整性以及其他初始化任务。为了系统的初始化,大多数的系统都要在非易失性存储器(比如 ROM、EPROM、EEPROM、FLASH,以及现在普遍使用 Flash)中存放部分代码(启动代码)。为了提高执行速度和系统可靠性,大多数嵌入式系统也常常将所有的代码(也常常使用所有代码的压缩代码)固化、存放在存储器芯片或处理器的内部存储器件中,不使用外部的磁盘等存储介质。

(8) 嵌入式系统一般使用实时操作系统(RTOS)

嵌入式系统往往对时间的要求非常严格,嵌入式操作系统一般是实时操作系统 RTOS (Real-Time Operating System)。嵌入式实时操作系统随时都要对正在运行的任务授予最高优先级。嵌入式任务是时间关键性约束,它必须在某个时间范围内完成,否则由其控制的功能就会失效。比如,控制飞行器稳定飞行的控制系统,如果因反馈速度不够,其控制算法就可能失效,飞行器在空中飞行就会出问题。

(9) 嵌入式系统需要专用开发工具和方法进行设计

从调试的观点看,代码在 ROM 中意味着调试器不能在 ROM 中设置断点。要设置断点,调试器必须能够用特殊指令取代用户指令,嵌入式调试已经发展出支持嵌入式系统开发过程的专用工具套件。

(10) 嵌入式微处理器通常包含专用调试电路

目前常用的嵌入式微处理器较过去相比,最大区别是芯片上都包含有专用调试电路。如 ARM 的 Embedded ICE,这一点似乎与反复强调的嵌入式系统经济性相矛盾,事实上大多数厂商发现,为所有芯片加入调试电路会更经济。嵌入式处理器发展到现在,厂商都认识到,具有片上调试电路是嵌入式应用产品广泛应用的必要条件之一,也就是说,他们的芯片必须能提供很好的嵌入式测试方案,解决嵌入式系统设计及调试问题,这样才会使开发者在考虑其嵌入式系统芯片时采纳这些厂商的芯片。

(11) 嵌入式系统是知识集成系统

嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体工艺、电子技术和通信网络技术与各领域的具体应用相结合的产物,这一特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。嵌入式系统的广泛应用前景和巨大的发展潜力已成为 21 世纪的 IT 技术发展的热点之一。

从某种意义上来说,通用计算机行业的技术是垄断的。占整个计算机行业 90% 的 PC 产业,80% 采用 Intel 的 8086 体系结构,芯片基本上出自 Intel、AMD 和 Cyrix 等几家公司。在几乎每台计算机必备的操作系统和办公软件方面,Microsoft 的 Windows 及 Office 占 80% ~ 90%,凭借操作系统还可以搭配其他办公等应用程序。因此,当代的通用计算机行业的基础已被认为是由 Wintel 联盟(Microsoft 和 Intel 20 世纪 90 年代初建立的联盟)垄断的行业。

嵌入式系统则不同,没有哪一个系列的处理器和操作系统能够垄断其全部市场。即便在体系结构上存在着主流,但各不相同的应用领域决定了不可能由少数公司、少数产品垄断全部市场。因此,嵌入式系统领域的产品和技术,必然是高度分散的,留给各个行业的中小规模高技术公司的创新余地很大。另外,社会上的各个应用领域是在不断向前发展的,要求其中的嵌入式处理器核心也同步发展,尽管高科技技术的发展起伏不定,但是嵌入式行业却一直保持持续强劲的发展态势,在复杂性、实用性和高效性等方面都达到了一个前所未有的高度。

1.1.3 嵌入式系统的发展

虽然嵌入式系统是近几年才开始真正风靡起来,但事实上“嵌入式”这个概念却很早就已经存在了;从 20 世纪 70 年代初单片机的出现到今天各种嵌入式处理器、微控制器的广泛应用,嵌入式已有 40 多年的历史,大致经历了四个阶段。

(1) 低级嵌入式系统(以单片机为核心)

嵌入式最初的应用是基于单片机的,一般没有操作系统的支持,只能通过汇编语言对系统进行直接控制,运行结束后再清除内存。这些装置虽然已经具备了嵌入式应用的特点,但仅仅只是由 8 位的 CPU 芯片来执行一些单线程的程序。

由于这种嵌入式系统使用简便、价格低廉,因而曾经在工业控制领域中得到了非常广泛的应用,但却无法满足现今执行效率、存储容量都有较高要求的信息产品、智能设备等场合的需要。

特点:系统结构和功能相对单一,处理效率较低,存储容量较小,几乎没有用户接口。

(2) 初级嵌入式系统(以嵌入式微处理器为基础)

20 世纪 80 年代,随着微电子工艺水平的提高,IC 制造商开始将嵌入式应用中所需的微处理器、I/O 接口、串行接口以及 RAM、ROM 等部件全部集成到一片 VLSI(Very Large Scale Intergration)中,制造出面向 I/O 设计的微处理器,并一举成为系统领域中异军突起的新秀。与此同时,嵌入式系统的程序员也开始基于一些简单的“操作系统”开发嵌入式应用软件,大大缩短了开发周期,提高了开发效率。

特点:出现了大量高可靠、低功耗的嵌入式 CPU;操作系统具有兼容性、扩展性,但用户界面简单。

(3) 中级嵌入式系统(以嵌入式操作系统为标志)

20 世纪 90 年代,在分布控制、柔性制造、数字化通信和信息家电等巨大需求的推动下,嵌

入式系统进一步飞速发展。随着硬件实时性要求的提高,嵌入式系统的软件规模也不断扩大,逐渐形成了实时多任务操作系统(RTOS),并开始成为嵌入式系统的主流。

特点:操作系统的实时性得到了很大的改善,已经能够运行在各种不同类型的微处理器上,具有高度的模块化和扩展性。此时的嵌入式操作系统已经具备了文件和目录管理、设备管理、多任务、网络、图形用户界面(GUI)等功能,并提供了大量的应用程序接口(API),从而使得应用软件的开发变得更加简单。

(4) 高级嵌入式系统(以移动互联网为标志)

今天是一个高度信息化的时代,将嵌入式系统应用到各种网络环境、通信环境中去成为必然趋势。随着互联网技术与信息产品、智能设备、现代工业控制技术等的结合日益紧密,嵌入式设备与移动互联网的结合才是嵌入式技术的真正未来。

1.1.4 嵌入式系统的应用范围

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应用的突出特征,目前已经广泛地应用于军事国防、消费电子、信息产品、智能设备、网络通信、工业控制等各个领域。嵌入式系统可以说是无所不在、无处不在,就生活用品而言,各种电子手表、电话、手机、PDA、洗衣机、电视机、电饭锅、微波炉、空调器都有嵌入式系统的存在。如果说人们生活在一个满是嵌入式的世界,是毫不夸张的。据统计,一般家用汽车的嵌入式计算机在24个以上,豪华汽车的嵌入式计算机在60个以上。嵌入式系统的应用前景是非常广阔的,人们将会无时无刻不接触到嵌入式产品。特别是近年来的嵌入式无线互联网的逐渐成熟和广泛实用化,无线互联网的应用可能会发展到无所不在。在家中、办公室、公共场所,人们可能会使用数十片甚至更多这样的嵌入式无线网络芯片,将一些电子信息设备甚至电气设备构成无线网络;在车上、旅途中,人们可以利用这样的嵌入式无线芯片实现远程办公、远程遥控,真正实现将网络随身携带。

随着嵌入式应用领域的日益扩展,要完整地定义“嵌入式”这个概念变得越来越困难。嵌入式领域内的许多应用对性能、价格、功耗等各项指标有着各种不同的需求。这些不同要求,直接驱动了各种应用的处理器以及紧密结合实际应用 SoC 技术的迅速发展。

1.2 嵌入式系统处理器

1.2.1 嵌入式处理器的种类

嵌入式处理器是嵌入式系统的核心,共分为四类:

- ①嵌入式微控制器(EMCU);
- ②嵌入式微处理器(EMPU);
- ③嵌入式数字信号处理器(EDSP);
- ④嵌入式片上系统(SoC)。

(1) 嵌入式微控制器(EMCU)

嵌入式微控制器又称单片机,已经历了40多年的发展历程,目前在嵌入式系统中仍然有

着极其广泛的应用。这种处理器内部集成 RAM、各种非易失性存储器、总线控制器、定时/计数器、看门狗、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A 等各种必要功能和外设。

其与嵌入式微处理器相比,微控制器的最大特点是将计算机最小系统所需要的部件及一些应用需要的控制器/外部设备集成在一个芯片上,实现单片化,使得芯片尺寸大大减小,从而使系统总功耗和成本下降、可靠性提高。微控制器的片上外设资源一般比较丰富,适合于控制,因而称微控制器。MCU 品种丰富、价格低廉,目前占嵌入式系统约 70% 以上的市场份额。

(2) 嵌入式微处理器 (EMPU)

嵌入式微处理器字长一般为 16 位或 32 位, Intel、AMD、Motorola、ARM 等公司提供很多这样的处理器产品。嵌入式微处理器通用性比较好、处理能力较强、可扩展性好、寻址范围大、支持各种灵活的设计,且不限于某个具体的应用领域。

在实践应用中,嵌入式微处理器需要在芯片外配置 RAM 和 ROM,根据应用要求往往要扩展一些外部接口设备,如网络接口、GPS、A/D 接口等。嵌入式微处理器及其存储器、总线、外设等安装在一块电路板上,称为单板计算机。

嵌入式微处理器在通用性上有点类似通用处理器,但前者在功能、价格、功耗、芯片封装、温度适应性、电磁兼容方面更适合嵌入式系统应用要求。嵌入式处理器有很多种类型,如 xScale、Geode、PowerPC、MIPS、ARM 等处理器系列。

(3) 嵌入式数字信号处理器 (EDSP)

在数字化时代数字信号处理是一门应用广泛的技术,如数字滤波、FFT、谱分析、语音编码、视频编码、数据编码、雷达目标提取等,传统微处理器在进行这类计算操作时的性能较低,专门的数字信号处理芯片——DSP 也就应运而生,DSP 的系统结构和指令系统针对数字信号处理进行了特殊设计,因而在执行相关操作时具有很高的效率。在应用中,DSP 总是完成某些特定的任务,硬件和软件需要为应用进行专门定制,因此,DSP 是一种嵌入式处理器。

(4) 嵌入式片上系统 (SoC)

在某一类特定的应用对嵌入式系统的性能、功能、接口有相似的要求,针对嵌入式系统的这个特点,利用大规模集成电路技术将某一类应用需要的大多数模块集成在一个芯片上,从而在芯片上实现一个嵌入式系统大部分核心功能,这种处理器就是 SoC。

SoC 将微处理器和特定应用中常用的模块集成在一个芯片上,应用时往往只需要在 SoC 外部扩充内存、接口驱动、一些分立元件及供电电路就可以构成一套实用的系统,极大地简化了系统设计的难度,同时还有利于缩小电路板面积、降低系统成本、提高系统可靠性。SoC 是嵌入式处理器的一个重要发展趋势。

嵌入式微控制器和 SoC 都具有高集成度的特点,将计算机小系统的全部或大部分集成在单个芯片中,有些文献将嵌入式微控制器归为 SoC。后续为了更清晰地描述,将内部集成了 RAM 和 ROM 存储器、主要用于控制的单片机称为微控制器。而所说的 SoC,则没有内置的存储器,以嵌入式微处理器为核心、集成各种应用需要的外部设备控制器,具有较强的计算性能。

另外,还有一种特殊的嵌入式系统 SOPC。SOPC 技术最早是由 Altera 公司提出来的,它是基于 FPGA 解决方案的 SoC 片上系统设计技术。它将处理器、I/O 口、存储器以及需要的功能模块集成到一片 FPGA 内,构成一个可编程的片上系统。SOPC 是现代计算机应用技术发

展的一个重要成果,也是现代处理器应用的一个重要的发展方向。SOPC 设计,包括以 32 位 Nios II 软核处理器为核心的嵌入式系统的硬件配置、硬件设计、硬件仿真、软件设计、软件调试等。SOPC 系统设计的基本工具包括 Quartus II (用于完成 Nios II 系统的综合、硬件优化、适配、编程下载和硬件系统测试)、SOPC Builder (Nios II 嵌入式处理器开发软件包,用于实现 NiosII 系统的配置、生成、Nios II 系统相关的监控和软件调试平台的生成)、ModelSim (用于对生成的 HDL 描述进行系统功能仿真)、Nios II IDE (软件编译和调试工具)。此外,还可借助 MATLAB/DSPBuilder 生成 NiosII 系统的硬件加速器,进而为其定制新的指令。

SOPC 是基于 FPGA 解决方案的 SoC,与 ASIC 的 SoC 解决方案相比,SOPC 系统及其开发技术具有更多的特色,构成 SOPC 的方案也有多种途径。SOPC 技术是一门全新的综合性电子设计技术,其目标就是尽可能大而完整的电子系统,包括嵌入式处理器系统、接口系统、硬件处理器或加速器系统、存储电路以及其他数字系统等。SOPC 被业界称为“半导体产业的未来”。

1.2.2 ARM 嵌入式微处理器

ARM 是 Advanced RISC Machines 的缩写,是公司的名称,专门致力于先进 RISC 体系结构内核的研发。ARM 不仅仅是公司的名字,还是一种处理器或一种技术,故可称为“ARM 公司”“ARM 微处理器”或“ARM 技术”。

(1) ARM 公司介绍

英国 ARM(Advanced RISC Machines)Limited 公司成立于 1990 年。目前,ARM 架构处理器已在高性能、低功耗、低成本应用领域中占据领先地位。ARM 公司是嵌入式 RISC 处理器的知识产权 IP 供应商。既不生产芯片,也不销售芯片,而是设计出高效的 IP 内核,授权给各半导体公司使用。ARM 公司的业务模型如图 1.1 所示。

半导体公司在 ARM 技术的基础上,根据自己公司的产品定位,添加自己的设计,嵌入各种外围和处理部件,推出芯片产品形成各种嵌入式微处理器 MPU 或微控制器 MCU。

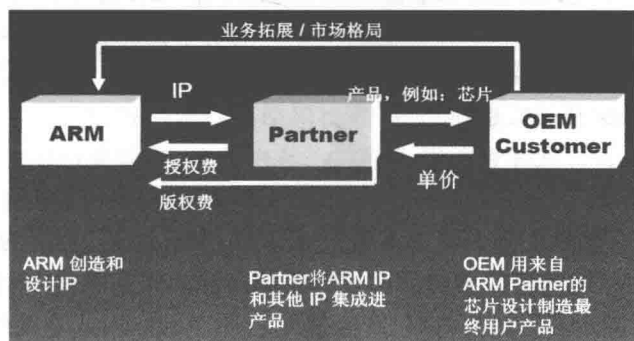


图 1.1 ARM 公司的业务模型

(2) ARM 嵌入式微处理器系列

ARM 微处理器主要系列包括 ARM7 系列、ARM9 系列、ARM9E 系列、ARM10E 系列、ARM11 系列、SecurCore 系列、OptimoDE 系列、StrongARM 系列以及 XScale 系列等。其中,ARM7、ARM9、ARM9E 和 ARM10 为 4 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。SecurCore 系列专门为安全要求较高的应用而设计;Strong-

ARM 系列是 Intel 公司生产的用于便携式通信产品和消费电子产品的理想嵌入式微处理器,应用于多家掌上电脑系列产品;XScale 系列是 Intel 公司推出的基于 ARMv5TE 体系结构的全性能、高性价比、低功耗的嵌入式微处理器,应用于数字移动电话、个人数字助理和网络产品等场合。

OptimoDE 嵌入式信号处理内核技术,高效地优化了特殊应用执行,数据引擎是快速发展的技术。今天,普通用途的 DSP 已不能满足消费应用的处理需求,这就需要向专用逻辑转换,但是,专用逻辑既耗时又价高且不灵活。OptimoDE 内核的技术解决方案——提供了前所未有的性能,但功耗超低且小规模设计。OptimoDE 数据引擎提供了专用逻辑级的性能和灵活的可编程步骤。

ARM 公司在经典处理器 ARM2 以后的产品改用 Cortex 命名,并分成 A、R 和 M 三类,旨在为各种不同的市场提供服务。Cortex-R 是专门面向实时系统的 Cortex 处理器核;Cortex-A 是面对复杂的尖端应用程序,用于运行开放式复杂操作系统环境的 Cortex 处理器核;Cortex-M 是面向成本控制和微控制器应用提供优化的 Cortex 处理器核。

由于 ARM 公司只对外提供 ARM 内核,各大厂商在授权付费使用 ARM 内核的基础上研发生产各自的芯片,形成了嵌入式 ARM CPU 的大家庭,提供这些内核芯片的厂商有 Atmel、TI、飞思卡尔、NXP、ST 和三星等。

1.3 嵌入式系统的组成

嵌入式系统是“专用计算机应用系统”,它具有一般计算机组成的共性,也是由硬件和软件组成。由于嵌入式系统是一个应用系统,因此还有应用中的执行机构,用于实现对其他设备的控制、监视或管理等功能。图 1.2 为基于控制领域的典型嵌入式系统,完整地描述了嵌入式系统的软硬件各部分的组成结构。

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;嵌入式操作系统和嵌入式应用软件则是整个系统的控制核心,控制整个系统运行,提供人机交互的信息等。

1.3.1 嵌入式系统的硬件基本结构

嵌入式系统的硬件架构如图 1.2 下半部分所示,是以嵌入式处理器为中心,配置存储器、I/O 设备、通信模块以及电源等必要的辅助接口组成。嵌入式系统是“量身定做”的“专用计算机应用系统”,又不同于普通计算机组成,在实际应用中的嵌入式系统硬件配置非常精简,除了微处理器和基本的外围电路以外,其余的电路都可以根据需求和成本进行“裁剪”“定制化”,非常经济、可靠。

嵌入式系统硬件核心是嵌入式微处理器,有时为了提高系统的信息处理能力,常常外接 DSP 和 DSP 协处理器(也可内部集成)完成高性能信号处理。

随着计算机技术、微电子技术、应用技术的不断发展和纳米芯片加工工艺技术的发展,以微处理器为核心的集成多种功能的 SoC 系统芯片已成为嵌入式系统的核心,在嵌入式系统设计中,要尽可能地选择能满足系统功能接口的 SoC 芯片,这些 SoC 集成了大量的外围 USB、