

高等学校“十三五”规划教材

嵌入式系统技术与应用

祁桂兰 主编



西北工业大学出版社

高等

QIANRUSHI

NGYONG

嵌入式系统技术与应用

祁桂兰 主编

祁桂兰 麻小娟 许 飞 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统介绍了嵌入式系统的基础知识,ARM 体系结构下的 Cortex-A9 多核处理器系统开发涉及的软、硬件基础知识。

以 Cortex-A9 多核处理器的 ARM Exynos 4412 四核处理器为例,具体描述了嵌入式处理器的组成、片内功能模块及功能模块的应用实现。介绍了 ARM Exynos 4412 开发板的软件技术,包括 Linux 操作系统的 Ubuntu 版本应用,开发板的 Android 应用,主机、虚拟机及目标板的开发平台搭建、交叉环境配置以及 Boot-Loader、内核移植基础知识。

本书可作为高等院校计算机科学与技术、软件工程、电子信息工程、通信工程、自动控制、电气自动化、物联网应用等专业的教材,也可以作为工程技术人员进行嵌入式系统开发与应用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统技术与应用/祁桂兰主编. —西安:西北工业大学出版社,2017.8

ISBN 978-7-5612-5459-2

I. ①嵌… II. ①祁… III. ①微型计算机—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 193014 号

策划编辑:雷 军

责任编辑:张 友

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号

邮编:710072

电 话:(029)88493844, 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西金德佳印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm

1/16

印 张:17.5

字 数:423 千字

版 次:2017 年 8 月第 1 版

2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价:42.00 元

前 言

本书系统地描述 FS4412 ARM Cortex - A9 四核处理器平台环境下的嵌入式系统开发涉及的软、硬件基础知识。内容力求理论与实践相结合,注重具体实际应用技术。书中主要内容已经在笔者的实际教学过程中得到使用。

全书共分 11 章。

第 1 章对嵌入式系统做概要性介绍。

第 2~6 章以 ARM Cortex - A9 四核处理器的 ARM Exynos 4412 为主,具体描述嵌入式处理器的组成、片内功能模块原理、应用及开发板的基本组成。针对功能模块的应用,书中给出驱动程序的汇编语言代码和 C 语言代码,这些代码大多数取自 Linux, Uboot 以及厂商的测试程序。

第 7~9 章具体描述基于 ARM Cortex - A9 四核处理器的应用软件技术,包括 Linux 操作系统的 Ubuntu 版本应用、开发板的 Android 操作系统的应用、Linux 操作系统的基本命令以及 Boot Loader、内核基础知识等。

第 10 章主要列举 ARM Cortex - A9 四核处理器在 Android 系统的应用实例;给出 Linux 主机调试环境搭建、主机与 FS4412 目标板的开发平台搭建、交叉环境配置的方法;描述 Android 版本的 Uboot 与 Linux 的 Uboot 版本转换技术。

第 11 章主要描述嵌入式系统开发应用中必须做的几个实验,从实验原理、实验步骤以及实验现象进行举例分析。给出相应的实验程序及 Uboot, Linux 源代码,实验程序均已调试通过。

建议在讲授计算机组成原理或微机原理及 Linux 操作系统后开设本课程,同时学生应该有一定的 C 语言基础。

本书第 1~5, 10, 11 章由祁桂兰编写,第 6 章由许飞编写,第 7~9 章由麻小娟编写。全书由祁桂兰统稿,由李伟华教授审稿。

在本书的编写过程中,李青对书中的 C 代码进行了校对,国家邮政局发展研究中心张辛对本书内容进行了排版和资料校对,并在统稿过程中提出了许多建议和修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,除了书后列出的参考文献外,还引用了华清远见公司的技术资料、随机资料和相关程序,在此向这些文献的作者及华清远见公司表示感谢。

鉴于水平有限,书中的疏漏和不当之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

编 者

2017 年 1 月

目 录

第 1 章 嵌入式系统基础知识	1
1.1 嵌入式系统简介	1
1.2 嵌入式系统硬件及软件组成	4
1.3 主流嵌入式微处理器	5
1.4 主流嵌入式操作系统	8
习题 1	10
第 2 章 ARM 体系结构	11
2.1 微处理器的体系结构基础	11
2.2 ARM 处理器体系结构	15
2.3 Cortex - A9 处理器体系结构	18
习题 2	22
第 3 章 ARM 程序员模型	23
3.1 数据类型和存储器格式	23
3.2 ARM 处理器工作模式	29
3.3 ARM 的寄存器组织	30
3.4 程序状态寄存器与指令计数器	34
3.5 ARM 体系异常处理	35
习题 3	41
第 4 章 ARM 指令系统	42
4.1 ARM 处理器的寻址方式	42
4.2 ARM 指令集介绍	49
4.3 Thumb 指令集介绍	72
习题 4	77
第 5 章 ARM 汇编语言程序设计基础	78
5.1 ARM 汇编语言的程序结构	78

5.2 ARM 汇编语言程序设计	87
5.3 C 语言与汇编语言混合编程	98
习题 5	107
第 6 章 嵌入式系统的存储器系统	108
6.1 嵌入式系统存储器的结构	108
6.2 NAND 型和 NOR 型 Flash	110
6.3 嵌入式系统存储芯片模型	112
6.4 嵌入式系统典型存储芯片的应用操作	117
习题 6	126
第 7 章 嵌入式操作系统介绍	127
7.1 操作系统简介	127
7.2 操作系统内核	129
7.3 嵌入式操作系统	136
习题 7	138
第 8 章 Linux 软件平台开发技术	139
8.1 Linux 体系结构	139
8.2 Linux 目录结构和文件	143
8.3 Linux 常用操作命令	147
8.4 Linux Shell 编程	165
8.5 GCC 编译	168
8.6 Makefile 文件编写	172
习题 8	176
第 9 章 ARM Boot Loader 简介	177
9.1 Boot Loader 概述	177
9.2 Uboot 引导程序分析	178
9.3 Uboot 启动举例	187
习题 9	190
第 10 章 嵌入式系统开发环境搭建	191
10.1 嵌入式系统硬件平台及常用接口	191
10.2 目标板的 Android 系统应用	196
10.3 嵌入式 Linux 开发环境搭建	202
10.4 嵌入式 Linux 调试环境搭建	209
10.5 交叉开发环境搭建	212
习题 10	225

第 11 章 基本实验编程举例及驱动程序分析	226
11.1 Boot Loader(Uboot)移植实验	226
11.2 Linux 系统移植实验	242
11.3 LED 驱动开发实验	250
习题 11	270
参考文献	271

第 1 章 嵌入式系统基础知识

本章介绍嵌入式系统开发的基础知识,从嵌入式系统的定义、嵌入式计算机的历史由来、嵌入式系统的基本特点、嵌入式系统应用、嵌入式处理器分类、嵌入式系统软、硬件各部分组成等方面进行介绍,涉及嵌入式系统开发的基本内容,使读者系统地建立起嵌入式系统的整体概念。

1.1 嵌入式系统简介

1.1.1 嵌入式系统的概念

1. 广义的概念

嵌入式系统(embedded system)目前被计算机界普遍认同的定义是: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、功耗等有严格要求的专用计算机系统。

由嵌入式系统的定义可以看出,嵌入式系统有以下明显特点:

- 嵌入式系统是一个专用计算机系统,有处理器,可编程;
- 嵌入式系统有明确的应用目的;
- 嵌入式系统作为机器或设备的组成部分被使用。

2. 狭义的概念

从狭义上说,嵌入式系统就是嵌入到对象体中的专用计算机系统。这里有三要素:嵌入、专用、计算机。由三要索引出嵌入式系统的特点:

- 嵌入性:嵌入到对象体系中,有对象环境要求;
- 专用性:软、硬件按照对象要求裁剪;
- 计算机:实现对象的智能化功能。

1.1.2 嵌入式系统的发展

嵌入式系统的发展与微处理器发展历程密切相关。

1971 年出现的 4 位集成电路微处理器 Intel 4004 是为嵌入到计算器设计的。通常可以将 Intel 4004 微处理器的出现看做是嵌入式系统发展的初级阶段。

20 世纪 70 年代后,大规模和超大规模集成电路技术迅速发展,出现了各式各样的微处理

器,微处理器位数从 8 位、16 位、32 位发展到 64 位,微处理器内部功能增强并集成了更多的功能模块,极大地提高了微处理器的计算能力、处理能力和实时控制能力,促进了嵌入式系统的发展。

最早的单片机是 Intel 公司的 8048,它出现在 1976 年。Motorola 同时推出了 68HC05, Zilog 公司推出了 Z80 系列。这些早期的单片机均含有 256B 的 RAM、4KB 的 ROM、4 个 8 位并口、1 个全双工串行口、2 个 16 位定时器。之后在 20 世纪 80 年代初,Intel 又进一步完善了 8048,在它的基础上研制成功了 8051,这在单片机的历史上是值得纪念的一页,迄今为止,51 系列的单片机仍然是最为成功的单片机芯片,在各种产品中有着非常广泛的应用。8 位单片机使用汇编语言或 C 语言编程,也可以称为无操作系统的嵌入式系统。

嵌入式操作系统伴随着嵌入式系统的发展经历了三个比较明显的阶段:

1. 无操作系统的嵌入算法阶段

无操作系统的嵌入算法阶段,系统通过汇编语言编程对系统进行直接控制,运行结束后清除内存。系统结构和功能都相对单一,处理效率较低,存储容量较小,几乎没有用户接口,比较适合于各类专用领域。

2. 简单监控式的实时操作系统阶段

简单监控式操作系统阶段,系统的特点是 CPU 种类繁多,通用性比较差;系统开销小,效率高;一般配备系统仿真器,具有一定的兼容性和扩展性;操作系统的用户界面不够友好;主要用来控制系统负载以及监控应用程序运行。

3. 通用的嵌入式实时操作系统阶段

以嵌入式操作系统为核心的嵌入式系统,能运行于各种类型的微处理器上,兼容性好、内核精小、效率高,具有高度的模块化和扩展性;具备文件和目录管理、设备支持、多任务、网络支持、图形窗口以及用户界面等功能;具有大量的应用程序接口 API;嵌入式应用软件丰富。

1.1.3 嵌入式系统的特点

嵌入式系统作为一个专用计算机系统,与通用计算机相比,有以下主要特点,在设计阶段需要给予更多的考虑。

1. 与应用密切相关

嵌入式系统作为机器或设备的组成部分,与具体的应用密切相关。

2. 实时性

实时性要求嵌入式系统必须在规定的时间内正确地完成规定的操作,例如在工业控制应用领域中,化工车间的控制对实时性要求非常严格。虽然在某些嵌入式系统中对实时性要求并不严格,但超时也会引起使用者的不满。

3. 复杂的算法

对不同的应用,嵌入式系统有不同的算法。例如,控制汽车发动机的嵌入式系统必须执行复杂的控制算法,以达到降低污染、减少油耗并且不降低发动机工作效率的目的。算法的复杂性还体现在,程序在解决某一问题时必须考虑运行时间的限制、运行环境以及干扰信号带来的影响等。

4. 制造成本

制造成本的高低决定了含有嵌入式系统的设备或产品能否在市场上成功地销售。微处理器、存储器、I/O 设备和嵌入式操作系统的价格对制造成本也有比较大的影响。

5. 功耗

许多嵌入式系统采用电池供电,因此对功耗有着严格的要求。在选择微处理器、存储器和接口芯片时,要充分考虑功耗。除此以外,还要考虑微处理器、操作系统是否支持多种节电模式。

6. 开发和调试

具备相应的开发环境、开发工具和调试工具,才能进行嵌入式系统的开发和调试。通常,在 PC 上运行系统开发工具包,输入、编译及链接系统运行的代码,然后将可执行程序下载到嵌入式开发板上,使其运行并对其进行调试。代码调试通过后,根据需要,设计并生产相应的电路板,焊接元器件,将程序固化或装入内存。

7. 可靠性

嵌入式系统应该能够可靠地运行。比如能长时间正确运行且不死机,或者死机后能由看门狗电路自动重新启动;能在规定的温度、湿度环境下连续运行;具有一定的抗干扰能力等。

8. 体积

嵌入式系统一般要求体积尽可能小。

1.1.4 嵌入式系统的应用

嵌入式系统应用非常广泛,以下一些设备或产品中就含有嵌入式系统。

- 家庭中的全自动洗衣机、空调机、微波炉、电饭煲、数字电视、机顶盒、屏幕电话、智能手机、上网终端、数字门锁、智能防盗系统。
 - 办公室中的传真机、复印机、扫描仪、绘图机等。
 - 手持设备,如 MP3、GPS 手持机、数码相机、数码摄像机、个人数字助理等。
 - 安全及金融领域中用到的身份认证识别、指纹识别、声音识别等。
 - 通信和网络使用的设备,如服务器、交换机、路由器、无线基站、3G/4G 移动电话、宽带调制解调器、下一代高性能手持式因特网设备等。
 - 医用电子设备,如电子血压计、心电图仪等。
 - 汽车电子产品中的时速、发动机转速和油量的信号采集与数字显示设备,行驶状态和故障记录的数字设备,电子地图、导航、车载 GPS、无线上网设备,刹车和安全气囊自动控制设备,汽车黑匣子、车载 MP3、车载 DVD、车载数字电视、车载信息系统等。
 - 军事、航空、航天领域中的设备,如我国的神舟飞船、长征运载火箭,美国的 F-16 战斗机、FA-18 战斗机、B-2 隐形轰炸机、爱国者导弹以及 1997 年火星表面登陆的火星探测器等。
 - 其他领域,如工业控制设备和仪器仪表、机器人、智能玩具等。
- 总之,在许多领域和设备中,都大量使用了嵌入式系统。

1.2 嵌入式系统硬件及软件组成

嵌入式系统由硬件和软件组成,如图 1-1 所示。

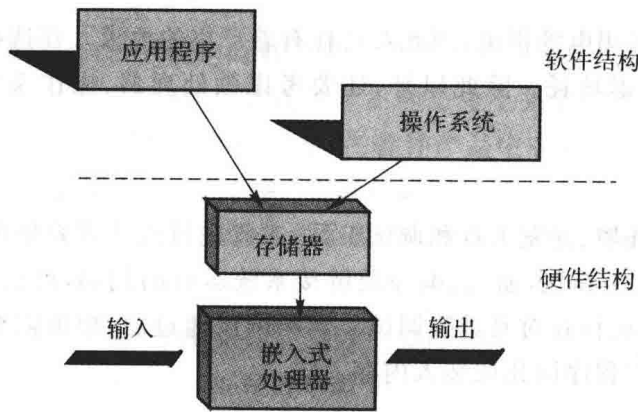


图 1-1 嵌入式系统组成

1.2.1 嵌入式系统硬件组成

嵌入式系统的硬件主要包括嵌入式处理芯片、嵌入式系统存储器、I/O 接口及常用的 I/O 设备、典型 ARM 处理芯片以及嵌入式互连通信接口。不同的嵌入式产品,硬件组成也不相同,共同点是有嵌入式处理器、存储器、输入和输出设备,如图 1-2 所示。

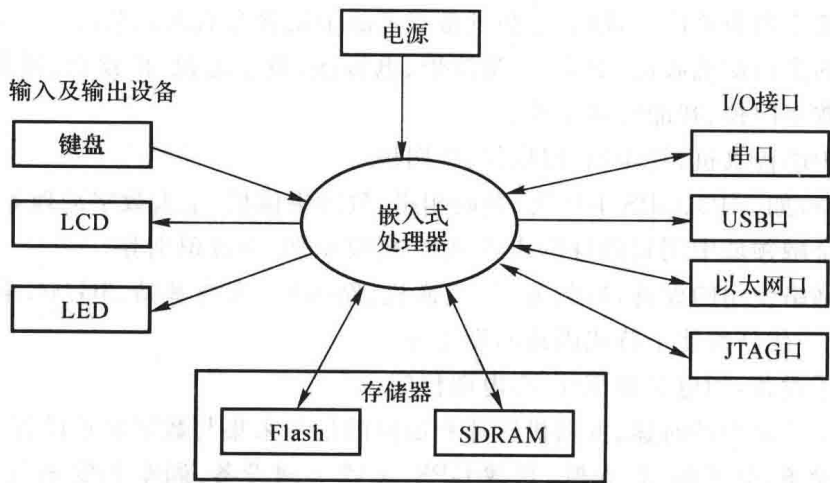


图 1-2 嵌入式系统硬件组成

1.2.2 嵌入式系统软件组成

嵌入式系统软件组成如图 1-3 所示。对于简单的应用,比如不使用操作系统或仅使用小型操作系统的嵌入式系统,软件组成也不尽相同。

图 1-3 中,板级支持包(Board Support Package, BSP)和硬件抽象层(Hardware Abstract

Layer, HAL)与 PC 的基本输入输出系统(Basic Input Output System, BIOS)相似。不同的嵌入式微处理器、不同的硬件平台或不同的操作系统, BSP/HAL 也不同。



图 1-3 嵌入式系统软件组成

1.3 主流嵌入式微处理器

1.3.1 嵌入式处理器分类

嵌入式系统硬件部分的核心是嵌入式处理器。嵌入式处理器分类方法比较多,比如按照处理器的字长或按照面世的时间顺序等来分类。本书按处理器的应用领域从广义上分为 4 类,即嵌入式微控制器、嵌入式微处理器、嵌入式数字信号处理器和嵌入式片上系统,如图 1-4 所示。

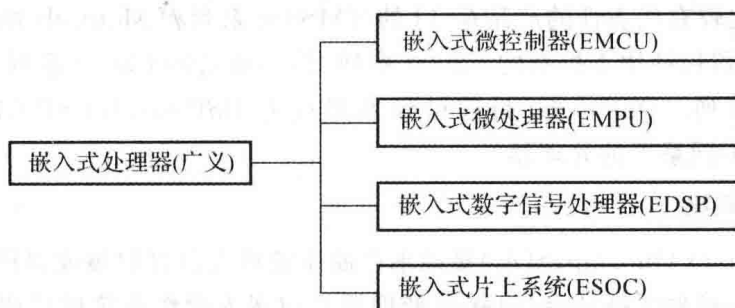


图 1-4 嵌入式微处理器分类

1. 嵌入式微控制器

微控制器(Micro Controller Unit, MCU)的典型代表是单片机,一般以某种微处理器内核为核心,根据某些典型的应用,在芯片内部集成了 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、看门狗、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、Flash ROM、EEPROM 等各种必要功能部件和外设。

为适应不同的应用需求,对功能的设置和外设的配置进行必要的修改和裁剪,使得一个系列的单片机具有多种衍生产品,每种衍生产品的处理器内核都相同,不同的是存储器和外设的配置及功能的设置。这样使单片机最大限度地与应用需求相匹配,从而减少整个系统的功耗

和成本。嵌入式微控制器目前的代表性产品有 8051, P51XA, MCS-251, MCS-96/196/296, MC68HC05/11/12/16 等。

与嵌入式微处理器相比,微控制器的单片化使应用系统的体积大大减小,从而使功耗和成本大幅度下降、可靠性提高。由于 MCU 目前在产品的品种和数量上是所有种类嵌入式处理器中最多的,加上上述诸多优点决定了微控制器是嵌入式系统应用的主流。

2. 嵌入式微处理器

微处理器(Micro Processor Unit, MPU)是由通用计算机中的 CPU 演变而来的。MPU 采用增强型通用微处理器。由于嵌入式系统通常应用于比较恶劣的环境中,因而嵌入式 MPU 在工作温度、电磁兼容性以及可靠性方面的要求较通用的标准微处理器高。但是,嵌入式 MPU 在功能方面与标准的微处理器基本上是一样的。根据实际嵌入式应用要求,将嵌入式 MPU 装配在专门设计的主板上,只保留和嵌入式应用有关的主板功能,这样可以大幅度减小系统的体积和功耗。

嵌入式微处理器目前主要有 ARM, MPIS, PowerPC, 386EX, SC-400, 68000 系列等。

3. 嵌入式数字信号处理器

数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)是专门用于信号处理方面的处理器,其在系统结构和指令算法方面进行了特殊设计,具有很高的编译效率和指令执行速度。在数字滤波、FFT、谱分析等各种仪器上 DSP 获得了大规模的应用。

另外,在智能领域的应用中,也需要嵌入式 DSP 处理器。例如各种带有智能逻辑的消费类产品、生物信息识别终端、带有加解密算法的键盘、ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line, 非对称数字用户线路)接入、实时语音解压、虚拟现实显示等。这类智能化算法一般运算量较大,特别是向量运算、指针线性寻址等较多。

嵌入式 DSP 比较有代表性的产品是 TI 的 TMS320 系列和 Motorola 的 DSP56000 系列。TMS320 系列处理器包括用于控制的 C2000 系列、移动通信的 C5000 系列,以及性能更高的 C6000 和 C8000 系列。DSP56000 目前已经发展成为 DSP56000, DSP56100, DSP56200 和 DSP56300 等几个不同系列的处理器。

4. 嵌入式片上系统

片上系统(System On Chip, SOC)是追求产品系统最大包容的集成器件。SOC 最大的特点是成功实现了软、硬件无缝结合,直接在处理器片内嵌入操作系统的代码模块。而且 SOC 具有极高的综合性,在一个硅片内部运用 VHDL 等硬件描述语言,实现一个复杂的系统。用户不需要再像传统的系统设计一样,绘制庞大复杂的电路板,一点点地连接焊制,只需要使用精确的语言,综合时序设计直接在器件库中调用各种通用处理器的标准,然后通过仿真之后就可以直接交付芯片厂商进行生产。由于绝大部分系统构件都是在系统内部,整个系统就特别简洁,不仅减小了系统的体积和功耗,而且提高了系统的可靠性,提高了设计生产效率。

比较典型的嵌入式 SOC 产品有 Philips 公司的 Smart XA、Siemens 公司的 TriCore、Motorola 公司的 M-Core 和某些 ARM 系列的产品。

1.3.2 主流嵌入式处理器简介

嵌入式处理器由处理器核和不同的功能模块组成。不同的处理器核具有多种不同的功

能,能够满足用户对速度、功耗的不同需求。有些芯片生产商将这些核和各种的功能模块,如DMAC、中断控制器、LCD 控制器、存储器控制器、A/D 转换器、USB 接口等,集成到同一个微处理器芯片中。

1. ARM

基于 ARM 系列 32 位的处理器占据了 75% 以上的市场份额,其已成为应用最广的处理器。

ARM(Acorn RISC Machine)成立于 1990 年,前身为英国剑桥的一个 Acorn 计算机公司,后来改名为 Advanced RISC Machine。主要设计 ARM 系列 RISC 处理器内核。ARM 既表示一个公司名称,也表示这个公司设计的处理器的体系结构。有时 ARM 可以认为是对微处理器的通称,还可以认为是一种技术的名字。

ARM 公司是全球领先的 16 位/32 位 RISC 微处理器知识产权(IP)设计供应商。ARM 公司本身不生产芯片,靠转让设计许可,由合作伙伴公司来生产各具特色的芯片。目前 ARM 的合作伙伴在全世界已经超过 100 个,许多著名半导体公司都与 ARM 公司有着合作关系,例如 Intel、TI、Sony、Apple、Freescale、Motorola、三星、飞利浦、富士通等,从而保证了大量的开发工具和丰富的第三方资源,它们共同保证了基于 ARM 处理器的设计可以很快投入到市场。

ARM 处理器已成为移动通信、手持设备、多媒体数字消费嵌入式解决方案的 RISC 标准。

2. MIPS

MIPS 是 Micorprocessor Without Interlocked Pipeline Stages 的缩写,其意为内部无互锁流水线微处理器。MIPS 也是一种处理器的内核标准。MIPS 体系结构具有良好的可扩展性,并且能够满足超低功耗微处理器的要求。

由美国斯坦福大学在 2007 年发布的 MIPS32 74KB 内核产品,是当时运行速度较快的处理器内核,主频频率为 1 GHz。

3. PowerPC

PowerPC 是 Performance Optimization With Enhanced RISC - Performance Computing 的缩写,有时简称 PPC,意为增强 RISC 性能优化-性能计算。PowerPC 是 1994 年由 Apple, IBM 和 Motorola 联合组成的 AIM 联盟所发展出的微处理器。

PowerPC 体系结构的特点是可延伸性好,方便灵活。PowerPC 处理器品种很多,既有通用的处理器,又有微控制器和内核。其应用范围非常广泛,从高端的工作站、服务器到桌面计算机系统,从消费类电子产品到大型通信设备,都有着广泛的应用。

4. 其他嵌入式微处理器

其他嵌入式微处理器包括 Intel 公司基于 x68 处理器核的嵌入式微处理器 Geode SPISC10, Motorola 公司的 68xxx, Compaq 公司的 Alpha, HP 公司的 PARISC, Sun 公司的 Sparc, Renesas Technology 公司的 M32R, Atmel 公司的 AVR32 以及 Hitachi 公司的 Super H(SH)等。

1.4 主流嵌入式操作系统

嵌入式操作系统(Embedded Operating System, EOS)是指用于嵌入式系统的操作系统。嵌入式操作系统是一种用途广泛的系统软件,通常包括与硬件相关的底层驱动软件、系统内核、设备驱动接口、通信协议、图形界面、标准化浏览器等。嵌入式操作系统负责嵌入式系统的全部软、硬件资源的分配、任务调度、控制、协调并发活动。嵌入式操作系统可充分体现其所在系统的特征,并通过装卸某些模块来达到系统所要求的功能。

早期的嵌入式系统应用较为简单。例如洗衣机和微波炉的控制,要处理的任务比较简单,只需要检测哪一个键按下并执行相应的程序即可。当时的微处理器为8位或16位,程序员可以在应用程序中管理微处理器的工作流程,很少用到嵌入式操作系统。当嵌入式系统应用变得越来越复杂以后,成熟而复杂的嵌入式操作系统应运而生,使得软件开发更容易,效率更高。

1.4.1 嵌入式操作系统的主要特点

1. 实时性

当嵌入式系统对实时要求并不高时,便可选择那些非实时性的操作系统。

事实上许多嵌入式系统的应用都有实时性要求,并具有实时性的技术指标,例如:

- 系统响应时间,指从系统发出处理要求到给出应答信号所花费的时间。
- 中断响应时间,指从中断请求到进入中断服务程序所花费的时间。
- 任务切换时间,指操作系统 CPU 的控制权从一个任务切换到另一个任务所花费的时间。

实时性要求嵌入式系统对确定的事件在系统事先规定的时间内能够响应并正确处理完毕。

2. 可移植性

嵌入式操作系统的开发一般先在某一种处理器上完成,然后向其他微处理器上移植。

不同的嵌入式操作系统使用不同的板级支持包(BSP)/硬件抽象层(HAL)。板级支持包内的程序与接口及外设等硬件密切相关。操作系统应该设计成尽可能与硬件无关,这样在不同的平台上移植操作系统时只要改变板级支持包就可以了。

3. 内核小型化

操作系统内核是指操作系统中靠近硬件并且享有最高运行优先权的代码。为了适应嵌入式系统存储空间小的限制,内核应尽量小型化。例如,嵌入式操作系统 VxWorks 内核最小可裁剪到 8KB, Nucleus Plus 内核在典型的 RISC 体系结构下占 40KB 左右的空间, QNX 内核约为 12KB, 国产的 Hopen 内核约 10KB。

4. 可裁剪

基于嵌入式应用的多样化,嵌入式操作系统必须有很强的适应能力,能够根据应用系统的特点和要求灵活配置,方便剪裁,伸缩自如。

除上述要求外,嵌入式操作系统还应该具有以下特点:操作系统可靠性高,能满足那些无人值守、长期连续运行环境的要求;操作系统是可配置的;操作系统的函数是可重入的等。

1.4.2 主流嵌入式操作系统简介

目前在嵌入式领域广泛使用的操作系统有嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 、嵌入式 Linux、Windows CE、VxWorks 等,以及应用在智能手机和平板电脑的 Android、iOS 等。

1. Linux

Linux 是一套免费的、开放源代码的、性能稳定的多用户嵌入式操作系统。Linux 操作系统诞生于 1991 年 10 月 5 日(这是第一次正式向外公布的时间)。Linux 存在着许多不同的版本,但都使用了 Linux 内核。Linux 可安装在各种计算机硬件设备中,比如手机、平板电脑、路由器、视频游戏控制台、台式计算机、大型机和超级计算机。Linux 的主要特点如下:

- 开放源代码;
- 内核小,功能强大,运行稳定,效率高;
- 易于制定裁剪;
- 支持 20 多个处理器体系结构(ARM 多个系列、Inter x86);
- 支持大量的外围硬件设备,驱动程序丰富;
- 有大量的开发工具和良好的开发环境;
- 沿用了 UNIX 的发展方式,遵循国际标准,众多第三方软硬件厂商支持;
- 对以太网、千兆以太网、无线网、令牌网、光纤网、卫星网等多种联网方式提供了全面支持;
- 在图像处理、文件管理及多任务支持等方面,Linux 也提供了较强的支持。

2. $\mu\text{C}/\text{OS}$

$\mu\text{C}/\text{OS}$ 是源码公开的实时嵌入式操作系统。 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 提供了嵌入式系统的基本功能,其核心代码短小精悍。 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 对于大型商用嵌入式系统而言还是有些简单。

$\mu\text{C}/\text{OS}$ 的主要特点包括源码公开、可移植性强(采用 ANSI C 编写)、可固化、可裁剪、占先式、多任务,稳定性和可靠性都很强。

$\mu\text{C}/\text{OS}$ 已经被移植到许多微处理器上运行,如 ARM 系列,Intel 公司的 8051、80x86 系列, Motorola 公司的 PowerPC 68xxx、68HC11 等系列。

3. Windows CE

Windows CE 操作系统是 Microsoft 公司于 1996 年发布的一种嵌入式操作系统,目前使用最多的是 Windows CE.NET4.2 和 Windows CE.6.0 版。在 PDA、Pocket PC、Smart Phone (智能手机)、工业控制和医疗设备方面用得较多。

Windows CE 是一个简洁、高效的多平台操作系统,不是桌面 Windows 系统的削减版本,而是从整体上为有限资源的平台设计的多线程、完全优先级、多任务的操作系统。操作系统内核占据最少 200KB ROM 空间。

近年来 Microsoft 公司又推出了针对移动设备应用的 Windows Mobile 操作系统,是微软进军移动设备领域的重大产品调整,包括 Pocket PC、Smart Phone 及 Media Centers 三大体系平台,面向个人移动电子消费市场。

4. Android

Android(安卓)是由 Google 公司推出的以 Linux Kernel 为核心的移动操作系统,由于开

放源码,能够按照需要对 Android 进行裁剪或扩展。

2011 年 10 月,Android 发布了 4.0 版本,其基于 Linux Kernel 3.0.1 版。

Android 是全球最受欢迎的智能手机操作系统,同时在平板电脑市场占有率也逐年上升。

采用 Android 系统的主要厂商包括中国台湾省的 HTC(第一代谷歌手机 Google Nexus One 由 HTC 代工),美国的摩托罗拉,韩国的三星,中国大陆的华为、中兴、联想等。另外国内众多嵌入式教学实验平台也配置了 Android 操作系统。

5. VxWorks

VxWorks 是美国 Wind River System 公司于 1983 年设计开发成功的一个实时操作系统(RTOS),目前已发展到 VxWorks V6.0 版。

VxWorks 既是一个操作系统,又是一个可以运行的最小基本程序;VxWorks 有 BSP(可以认为是一种低层驱动),可以减小驱动程序的编写过程;VxWorks 具有强大的调试能力,可以在没有仿真器的情况下,通过串口调试,并具有丰富的函数库;VxWorks 内核最小可裁剪到 8KB。

6. QNX

QNX 是加拿大 QNX 公司的产品,是在 x86 体系上成功开发的,然后移植到 Motorola 68xxx 等微处理器上。

QNX 是一个微内核实时操作系统,其核心仅提供 4 种服务:进程调度、进程间通信、底层网络通信和中断处理。其进程在独立的地址空间运行。QNX 内核小巧,大约为 12KB,运行速度极快。

7. Palm OS

Palm OS 是 3Com 公司的 Palm Computing 部开发的。与同步软件 HotSync 结合可使掌上电脑与 PC 上的信息实现同步,把台式机的功能扩展到了手掌上。

8. 其他操作系统

国外的 Tiny OS(美国伯克里大学)、OS-9(Microwave 公司)以及国内 Hopen OS(凯思集团)和 EEOS(中科院计算所)的嵌入式操作系统也较为知名。

习 题 1

1. 简述嵌入式系统的定义。
2. 说出几个你知道的使用了嵌入式系统的产品。
3. 嵌入式系统有哪些特点?
4. 简要说明嵌入式系统的硬件组成和软件组成。
5. 从狭义上讲,嵌入式处理器有哪些典型产品?
6. 简述 Linux 支持的 3 种常用处理器结构的名称。
7. 嵌入式操作系统有哪些主要特点?
8. 简述 Linux 操作系统的主要特点。