

QIANRUSHI WEICHULI QIYUAN LIYUYINGYONG



应用型本科信息大类专业“十三五”规划教材

# 嵌入式微处理器 原理与应用

赵志鹏 韩桂明 王颖 © 主编



 华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

应用型本科信息大类专业“十三五”规划教材

# 嵌入式微处理器 原理与应用

主 编 赵志鹏 韩桂明 王 颖  
副主编 欧少敏 梁文斌 张玉伽



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书从初学者的需求出发,配合高校应用型人才的培养目标,培养嵌入式专业的学生掌握微处理器技术方面的基础知识,以及解决专业领域实际问题的能力,同时本书注重教材的可读性和实用性,以理论讲解结合案例分析和编程实例的方式组织内容,循序渐进,符合读者的认知过程。本书内容全面细致,构架清晰完整,实用性强,特别适合 ARM 的初学者,可作为大中专嵌入式相关专业的教材或供初学者作为参考资料使用。

本书可作为高等院校电子信息、计算机、软件、自动化、通信等专业相关课程的教材,还可供从事嵌入式系统研发的工程技术人员参考。

为了方便教学,本书还配有电子课件等教学资源包,任课教师和学生可以登录“我们爱读书”网([www.ibook4us.com](http://www.ibook4us.com))注册并浏览,任课教师还可以发邮件至 [hustpeiit@163.com](mailto:hustpeiit@163.com) 索取。

### 图书在版编目(CIP)数据

嵌入式微处理器原理与应用/赵志鹏,韩桂明,王颖主编. —武汉:华中科技大学出版社,2019.2

应用型本科信息大类专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5680-4710-4

I. ①嵌… II. ①赵… ②韩… ③王… III. ①微处理器-高等学校-教材 IV. ①TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 033596 号

### 嵌入式微处理器原理与应用

Qianrushi Weichuliqi Yuanli yu Yingyong

赵志鹏 韩桂明 王 颖 主编

策划编辑:康 序

责任编辑:狄宝珠

封面设计:抱 子

责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:湖北大合印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:13.75

字 数:350千字

版 次:2019年2月第1版第1次印刷

定 价:38.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前言

## P R E F A C E

嵌入式系统的应用从 20 世纪 90 年代初期到现在,经历了多个发展阶段,其应用领域越来越广泛,已日益渗透到生产生活的方方面面。嵌入式专业无疑是当前最热门的专业方向之一,许多高校相继开设了相关的课程。在教学和科研过程中,我们深刻体会到,无论是硬件板卡电路的设计,或者是应用程序开发,还是驱动程序的开发,都离不开嵌入式微处理器的相关知识,特别是需要从应用角度出发,以某种具体的嵌入式微处理器为教学实例,理论和实践应用相结合的嵌入式微处理器方面的书籍资料,在此背景下,我们编写了这本专门讲述嵌入式微处理器技术的教材。

本书从初学者的需求出发,配合高校应用型人才的培养目标,培养嵌入式专业的学生掌握微处理器技术方面的基础知识,以及解决专业领域实际问题的能力,同时本书注重教材的可读性和实用性,以理论讲解结合案例分析和编程实例的方式组织内容,循序渐进,符合读者的认知过程。本书内容全面细致,构架清晰完整,实用性强,特别适合 ARM 的初学者,可作为大中专嵌入式相关专业的教材或供初学者作为参考资料使用。

ARM 既是一家研发嵌入式处理器的公司的名字,也是一系列嵌入式微处理器内核的名称,其中 ARM9 是 ARM 系列一种应用比较广泛的内核,是 ARM 家族具有典型特性的代表,比较适合有一定计算机基础的初学者学习嵌入式技术。本书以 ARM9 为核心介绍嵌入式微处理器的结构及其典型应用,处理器是基于该内核的 S3C2440,书中涉及的所有实验及程序均可在相应实验平台上进行验证。

全书共 15 章,各章节主要内容如下。

第 1 章:嵌入式系统导论,主要介绍嵌入式系统基本知识。

第 2 章:ARM 微处理器技术,主要介绍了 ARM 体系结构的特点和结构特性,以及常用的 ARM 处理器、微处理器的结构特性,包括微处理器接口。

第 3 章:ARM 微处理器指令系统,介绍 ARM 指令集、Thumb 指令集,以及各类指令对应的寻址方式。

第 4 章:GNU 汇编伪指令集,详细介绍 GNU 汇编器平台所支持各类伪



指令。

第 5 章:ARM 集成开发环境搭建,介绍 ARM 集成开发环境 MDK 的使用。

第 6 章:GPIO 编程,主要介绍 GPIO 相关寄存器功能及其编程应用。

第 7 章:ARM 系统时钟及编程,主要介绍处理器系统时钟的相关知识。

第 8 章:ARM 异常处理及编程,介绍处理器的异常处理及相应编程。

第 9 章:串行通信接口,介绍串行通信相关知识及其收发程序实例。

第 10 章:PWM 定时器,介绍 PWM 定时器和看门狗定时器的用法及其编程。

第 11 章:A/D 转换器,介绍 A/D 转换的方法原理及 S3C2440 A/D 相关寄存器功能及编程实例。

第 12 章:实时时钟 RTC,介绍 2440 实时时钟的基本原理及其寄存器的用法。

第 13 章:I<sup>2</sup>C 总线,介绍 I<sup>2</sup>C 总线的相关知识,2440 I<sup>2</sup>C 总线寄存器及其编程应用。

第 14 章:存储器接口,介绍存储器的基本知识及 S3C2440 存储器相关寄存器及编程知识。

第 15 章:SPI 总线,介绍 SPI 接口协议、2440SPI 接口控制寄存器及其应用编程。

本书由桂林电子科技大学信息科技学院赵志鹏和韩桂明、哈尔滨远东理工学院王颖担任主编,由桂林电子科技大学信息科技学院欧少敏和梁文斌、哈尔滨远东理工学院张玉伽担任副主编。其中第 1~3 章由韩桂明编写,第 4~6 章由欧少敏编写,第 7 章由王颖编写,第 8~10 章由梁文斌编写,第 11~14 章由赵志鹏编写,第 15 章由张玉伽编写。在编写过程中还得到了许多专家和同事的指导帮助,在此表示衷心的感谢!

为了方便教学,本书还配有电子课件等教学资源包,任课教师和学生可以登录“我们爱读书”网([www.ibook4us.com](http://www.ibook4us.com))注册并浏览,任课教师还可以发邮件至 [hustpeiit@163.com](mailto:hustpeiit@163.com) 索取。

由于时间仓促,编者水平有限,书中难免存在不足及疏漏,欢迎读者批评指正,提出宝贵的意见。

编 者

2018 年 12 月

# 目录

## CONTENTS

<b>第 1 章 嵌入式系统导论</b> .....	1
1.1 嵌入式系统概述 .....	1
1.2 嵌入式系统的组成与结构 .....	5
1.3 嵌入式操作系统举例 .....	7
思考与练习 .....	9
<b>第 2 章 ARM 微处理器技术</b> .....	10
2.1 ARM 体系结构的特点及发展简介 .....	10
2.2 ARM 微处理器结构 .....	13
2.3 ARM 微处理器结构特点 .....	24
2.4 ARM 和 Thumb 工作状态 .....	25
2.5 流水线技术 .....	28
思考与练习 .....	28
<b>第 3 章 ARM 微处理器指令系统</b> .....	29
3.1 ARM 指令的基本寻址方式 .....	29
3.2 ARM 指令集 .....	31
3.3 Thumb 指令集 .....	49
思考与练习 .....	50
<b>第 4 章 GNU 汇编伪指令集</b> .....	51
4.1 GNU 汇编器的平台无关伪指令 .....	51
4.2 GNU 汇编器支持的 ARM 伪指令 .....	59
4.3 ARM 汇编语言的程序结构 .....	61
4.4 汇编语言与 C 语言的混合编程 .....	62
思考与练习 .....	67

**第 5 章 ARM 集成开发环境搭建** ..... 68

5.1 开发环境搭建 ..... 68

5.2 MDK 工程的建立 ..... 69

5.3 调试工程 ..... 73

思考与练习 ..... 74

**第 6 章 GPIO 编程** ..... 75

6.1 GPIO 控制器 ..... 75

6.2 GPIO 实例 ..... 86

思考与练习 ..... 87

**第 7 章 ARM 系统时钟及编程** ..... 88

7.1 S3C2440A 时钟的产生过程 ..... 88

7.2 时钟源的选择 ..... 90

7.3 时钟的配置 ..... 90

7.4 S3C2440A 时钟配置寄存器描述 ..... 92

7.5 S3C2440A 时钟源配置实例 ..... 93

思考与练习 ..... 94

**第 8 章 ARM 异常处理及编程** ..... 95

8.1 ARM 中断异常处理概述 ..... 95

8.2 ARM 体系异常种类 ..... 96

8.3 ARM 异常的优先级 ..... 100

8.4 ARM 处理器模式和异常 ..... 101

8.5 ARM 异常响应和处理程序返回 ..... 101

8.6 ARM 的 SWI 异常中断处理程序设计 ..... 104

8.7 FIQ 和 IRQ 中断 ..... 105

思考与练习 ..... 112

**第 9 章 串行通信接口** ..... 113

9.1 串行通信 ..... 113

9.2 S3C2440 异步串行通信 ..... 116

9.3 接口电路与程序设计 ..... 121

思考与练习 ..... 123

**第 10 章 PWM 定时器** ..... 124

10.1 S3C2440PWM 定时器 ..... 124

10.2 S5PC100 看门狗定时器 ..... 129

思考与练习 ..... 133

**第 11 章 A/D 转换器** ..... 134

11.1 A/D 转换方法及原理 ..... 134

11.2	A/D 转换器的主要指标	136
11.3	S3C2440A 的 A/D 转换器	137
11.4	S3C2440A 的 A/D 接口编程实例	140
	思考与练习	141
<b>第 12 章</b>	<b>实时时钟 RTC</b>	142
12.1	RTC 基本知识	142
12.2	RTC 实时时钟控制器	143
12.3	RTC 控制器寄存器	144
12.4	RTC 控制器寄存器应用实例	150
	思考与练习	155
<b>第 13 章</b>	<b>I<sup>2</sup>C 总线</b>	156
13.1	I <sup>2</sup> C 总线概述	156
13.2	S3C2440A 的 I <sup>2</sup> C 总线接口及寄存器	163
13.3	S3C2440A 的 I <sup>2</sup> C 接口应用实例	166
	思考与练习	172
<b>第 14 章</b>	<b>存储器接口</b>	173
14.1	存储器基本知识概述	173
14.2	Flash ROM	175
14.3	S3C2440A 的存储控制器	177
14.4	NOR Flash 操作	180
14.5	NAND Flash 操作	186
	思考与练习	196
<b>第 15 章</b>	<b>SPI 总线</b>	197
15.1	SPI 接口协议理论	197
15.2	S3C2440A 的 SPI 接口控制器	201
15.3	S3C2440A 的 SPI 接口编程应用实例	207
	思考与练习	212



嵌入式系统已成为当前最为热门的领域之一,受到了全世界各个方面的广泛关注,越来越多的人开始学习嵌入式系统技术及相应的开发技术。本章将向读者介绍嵌入式系统的基本知识。

本章的主要内容:

- 嵌入式系统的概述。
- 嵌入式系统的主要组成与结构。
- 常见的操作系统举例。
- 嵌入式系统开发方法概述。



## 1.1 嵌入式系统概述

### 1.1.1 什么是嵌入式系统

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

嵌入式系统的出现最初是基于单片机的。20世纪70年代单片机的出现,使得汽车、家电、工业机器、通信装置以及成千上万种产品可以通过内嵌电子装置来获得更佳的使用性能:更容易使用、更快、更便宜。这些装置已经初步具备了嵌入式的应用特点,但是这时的应用只是使用8位的芯片,执行一些单线程的程序,还谈不上“系统”的概念。

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256字节的RAM、4K的ROM、4个8位并口、1个全双工串行口、两个16位定时器。之后在20世纪80年代初,Intel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。

从20世纪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,这使得可以获取更短的开发周期,更低的开发资金和更高的开发效率,“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核,这个实时核包含了许多传统操作系统的特征,包括任务管理、任务间通讯、同步与相互排斥、中断支持、内存管理等功能。其中比较著名的有Ready System公司的VRTX、Integrated System Incorporation (ISI)的PSOS和IMG的VxWorks、QNX公司的QNX等。这些嵌入式操作系统都具有嵌入式的典型特点:它们均采用占先式的调度,响应的时间很短,任务执行的时间可以确定;系统内核很小,具有可裁剪,可扩充和可移植性,可以移植到各种处理器上;较强的实时和可靠性,适合嵌入式应用。这些嵌入式实时多任务操作系统的出现,使得应用开发人员得以从小范围的开发解放出来,同时促使嵌入式有了更为广阔的应用空间。

经过30多年的发展,嵌入式系统已经广泛地渗透到人们的学习、工作、生活中,嵌入式系统技术已被应用到科学研究、工程设计、军事技术、通信技术等。表1-1列举了嵌入式系统应用到的部分领域。嵌入式系统技术已成为了当前关注、学习研究的热点之一。什么是嵌入式系统技术呢?这个问题将困惑着大家!嵌入式系统技术本身就是一个相对模糊的定

义,不同的组织对其定义也略有不同,但主要意思还是相同的。下面给大家介绍一下常见的嵌入式系统的相关定义。

表 1-1 嵌入式系统应用领域举例

领 域	应 用
消费电子	信息家电、智能玩具、通信设备、视频监控
医疗电子	病房呼叫系统、检测系统、透视系统
工业控制	工控设备、智能仪表、汽车电子、电子农业
网络	网络设备、电子商务、无线传感器
国防科技	军事电子
航天航空	各类飞行设备、卫星等

IEEE(国际电气和电子工程师协会)对嵌入式系统的定义:“用于控制、监视或者辅助操作机器和设备的装置”(原文为:devices used to control,monitor or assist the operation of equipment,machinery or plants)。这主要是从应用对象上加以定义,从中可以看出嵌入式系统是软件和硬件的综合体,还可以涵盖机械等附属装置。

嵌入式系统(embedded system),是一种“完全嵌入受控器件内部,为特定应用而设计的专用计算机系统”。根据英国电气工程师协会(U. K. institution of electrical engineer)的定义,嵌入式系统为控制、监视或辅助设备、机器或用于工厂运作的设备。与个人计算机这样的通用计算机系统不同,嵌入式系统通常执行的是带有特定要求的预先定义的任务。由于嵌入式系统只针对一项特殊的任务,设计人员能够对它进行优化,减小尺寸降低成本。嵌入式系统通常进行大量生产,所以单个的成本节约,能够随着产量进行成百上千的放大。

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、功耗等严格要求的专用计算机系统。

可以这样认为,嵌入式系统是一种专用的计算机系统,作为装置或设备的一部分。通常,嵌入式系统是一个控制程序存储在 ROM 中的嵌入式处理器控制板。事实上,所有带有数字接口的设备,如手表、微波炉、录像机、汽车等,都使用嵌入式系统,有些嵌入式系统还包含操作系统,但大多数嵌入式系统都是由单个程序实现整个控制逻辑。

### 1.1.2 嵌入式系统的特点

按照嵌入式系统的定义,嵌入式系统有 6 个基本特点。

#### 1. 系统内核小

由于嵌入式系统一般是应用于小型电子装置,系统资源相对有限,所以内核较之传统的操作系统要小得多。比如 ENEA 公司的 OSE 分布式系统,内核只有 5KB 而 Windows 的内核则要庞大得多。

#### 2. 专用性强

嵌入式系统的个性化很强,其中的软件系统和硬件的结合非常紧密,一般要针对硬件进行系统的移植,即使在同一品牌、同一系列的产品中也需要根据系统硬件的变化和增减不断进行修改。同时,针对不同的任务,往往需要对系统进行较大更改;程序的编译下载要和系统相结合。这种修改和通用软件的“升级”是完全不同的概念。

### 3. 系统精简

嵌入式系统一般没有系统软件和应用软件的明显区分,不要求其功能的设计及实现过于复杂。这样一方面利于控制系统成本,同时利于实现系统安全。

### 4. 高实时性

高实时性的操作系统软件是嵌入式软件的基本要求,且软件要求固化存储,以提高速度。软件代码要求高质量和高可靠性。

### 5. 多任务的操作系统

嵌入式软件开发要想走向标准化,就必须使用多任务的操作系统。嵌入式系统的应用程序可以没有操作系统而直接在芯片上运行;但是为了合理地调度多任务,利用系统资源、系统函数以及专家库函数接口,用户必须自行选配 RTOS(real time operating system)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。

### 6. 专门的开发工具和环境

嵌入式系统开发需要专门的开发工具和环境。由于嵌入式系统本身不具备自主开发能力,即使设计完成以后,用户通常也不能对其中的程序功能进行修改,因此必须有一套开发工具和环境才能进行开发。这些工具和环境一般是基于通用计算机上的软硬件设备以及各种逻辑分析仪、混合信号示波器等。开发时往往有主机和目标机的概念,主机用于程序的开发,目标机作为最后的执行机,开发时需要交替结合进行。

## 1.1.3 嵌入式系统的发展

### 1. 嵌入式系统的发展阶段

嵌入式系统的出现至今已经有 30 多年的历史。近几年来,计算机、通信、消费电子的一体化趋势日益明显,嵌入式技术已成为一个研究热点。纵观嵌入式技术的发展过程,大致经历四个阶段。

第一阶段是以单芯片为核心的可编程控制器形式的系统,具有与监测、伺服、指示设备相配合的功能。这类系统大部分应用于一些专业性强的工业控制系统中,一般没有操作系统的支持,通过汇编语言编程对系统进行直接控制。这一阶段系统的主要特点是: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。

第二阶段是以嵌入式 CPU 为基础、以简单操作系统为核心的嵌入式系统。主要特点是:CPU 种类繁多,通用性比较弱;系统开销小,效率高;操作系统达到一定的兼容性和扩展性;应用软件较专业化,用户界面不够友好。

第三阶段是以嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统。主要特点是:嵌入式操作系统能运行于各种不同类型的微处理器上,兼容性好;操作系统内核小、效率高,并且具有高度的模块化和扩展性;具备文件和目录管理、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,开发应用程序较简单;嵌入式应用软件丰富。

第四阶段是以 Internet 为标志的嵌入式系统。这是一个正在迅速发展的阶段。目前大多数嵌入式系统孤立于 Internet 之外,随着 Internet 的发展以及 Internet 技术与信息家电、工业控制技术结合日益密切,嵌入式设备与 Internet 的结合将代表嵌入式系统的未来。

### 2. 嵌入式系统的发展趋势

(1) 小型化、智能化、网络化、可视化。

随着技术水平的提高和人们生活的需要,嵌入式设备(尤其是消费类产品)正朝着小型

化便携式和智能化的方向发展。如果携带笔记本电脑外出办事,肯定希望它轻薄小巧,甚至可能希望有一种更便携的设备来替代它。目前的上网本、MID(移动互联网设备)、便携投影仪等都是因类似的需求而出现的。对嵌入式而言,已经进入了嵌入式互联网时代(有线网、无线网、广域网、局域网的组合),嵌入式设备和互联网的紧密结合,更为我们的日常生活带来了极大的方便和无限的想象空间。嵌入式设备功能越来越强大,未来冰箱、洗衣机等家用电器都将实现网上控制;异地通讯、协同工作、无人操控场所、安全监控场所等的可视化也已经成为现实,随着网络运载能力的提升,可视化将得到进一步完善。人工智能、模式识别技术也将在嵌入式系统中得到应用,使得嵌入式系统更具人性化、智能化。

#### (2) 多核技术的应用。

人们需要处理的信息越来越多,这就要求嵌入式设备运算能力更强,因此需要设计出更强大的嵌入式处理器,多核技术处理器在嵌入式中的应用将更为普遍。

#### (3) 低功耗(节能)、绿色环保。

在嵌入式系统的硬件和软件设计中都在追求更低的功耗,以求嵌入式系统能获得更长的可靠工作时间。如:手机的通话和待机时间,MP3听音乐的时间等。同时,绿色环保型嵌入式产品将更受人们青睐,在嵌入式系统设计中也会更多地考虑如:辐射和静电等问题。

#### (4) 云计算、可重构、虚拟化等技术被进一步应用到嵌入式系统中。

简单讲,云计算是将计算分布在大量的分布式计算机上,这样只需要一个终端,就可以通过网络服务来实现我们需要的计算任务,甚至是超级计算任务。云计算(cloud computing)是分布式处理(distributed computing)、并行处理(parallel computing)和网格计算(grid computing)的发展,或者说是这些计算机科学概念的商业实现。在未来几年里,云计算将得到进一步发展与应用。

可重构性是指在一个系统中,其硬件模块或(和)软件模块均能根据变化的数据流或控制流对系统结构和算法进行重新配置(或重新设置)。可重构系统最突出的优点就是能够根据不同的应用需求,改变自身的体系结构,以便与具体的应用需求相匹配。

虚拟化是指计算机软件在一个虚拟的平台上而不是真实的硬件上运行。虚拟化技术可以简化软件的重新配置过程,易于实现软件标准化。其中CPU的虚拟化可以单CPU模拟多CPU并行运行,允许一个平台同时运行多个操作系统,并且都可以在相互独立的空间内运行而互不影响,从而提高工作效率和安全性,虚拟化技术是降低多内核处理器系统开发成本的关键。虚拟化技术是未来几年最值得期待和关注的关键技术之一。

随着各种技术的成熟与在嵌入式系统中的应用,将不断为嵌入式系统增添新的魅力和发展空间。

(5) 嵌入式软件开发平台化、标准化、系统可升级,代码可复用将更受重视嵌入式操作系统将进一步走向开放、开源、标准化,组件化。

嵌入式软件开发平台化也将是今后的一个趋势,越来越多的嵌入式软硬件行业标准将出现,最终的目标是使嵌入式软件开发简单化,这也是一个必然规律。同时随着系统复杂度的提高,系统可升级和代码复用技术在嵌入式系统中得到更多的应用。另外,因为嵌入式系统采用的微处理器种类多,不够标准,所以在嵌入式软件开发中将更多的使用跨平台的软件开发语言与工具。目前,Java语言正在被越来越多的使用到嵌入式软件开发中。

#### (6) 嵌入式系统软件将逐渐PC化。

需求和网络技术的发展是嵌入式系统发展的一个源动力,随着移动互联网的发展,将进一步促进嵌入式系统软件PC化。如前所述,结合跨平台开发语言的广泛应用,那么未来嵌

入式软件开发的观念将被逐渐淡化,也就是嵌入式软件开发和非嵌入式软件开发的区别将逐渐减小。

#### (7) 融合趋势。

嵌入式系统软硬件融合、产品功能融合、嵌入式设备和互联网的融合趋势加剧。嵌入式系统设计中软硬件结合将更加紧密,软件将是其核心。消费类产品将在运算能力和便携方面进一步融合。传感器网络将迅速发展,其将极大地促进嵌入式技术和互联网技术的融合。

#### (8) 安全性。

随着嵌入式技术和互联网技术的结合发展,嵌入式系统的信息安全问题日益凸显,保证信息安全成为嵌入式系统开发的重点和难点。

## 1.2 嵌入式系统的组成与结构

一个嵌入式系统装置一般都由嵌入式计算机系统和执行装置组成。嵌入式计算机系统是整个嵌入式系统的核心,由硬件层、中间层、系统软件层和应用软件层组成。执行装置也称为被控对象,它可以接受嵌入式计算机系统发出的控制命令,执行所规定的操作或任务。执行装置可以很简单,如手机上的一个微小型的电机,当手机处于震动接收状态时打开;也可以很复杂,如 SONY 智能机器狗,上面集成了多个微小型控制电机和多种传感器,从而可以执行各种复杂的动作和感受各种状态信息。

### 1.2.1 嵌入式系统的硬件组成与结构

一个嵌入式系统装置一般都由嵌入式计算机系统和执行装置组成。嵌入式计算机系统是整个嵌入式系统的核心,由硬件层、中间层、系统软件层和应用软件层组成。执行装置也称被控对象,它可以接受嵌入式计算机系统发出的控制命令,执行所规定的操作或任务。执行装置可以很简单,如手机上的一个微小型的电机,当手机处于震动接收状态时打开;也可以很复杂,如 SONY 智能机器狗,上面集成了多个微小型控制电机和多种传感器,从而可以执行各种复杂的动作和感受各种状态信息。

#### 1. 硬件层

硬件层中包含嵌入式微处理器、存储器(SDRAM、ROM、Flash 等)、通用设备接口和I/O接口(A/D、D/A、I/O 等)。在一片嵌入式处理器基础上添加电源电路、时钟电路和存储器电路,就构成了一个嵌入式核心控制模块。其中操作系统和应用程序都可以固化在 ROM 中。

##### 1) 嵌入式微处理器

嵌入式系统硬件层的核心是嵌入式微处理器,嵌入式微处理器与通用 CPU 最大的不同在于嵌入式微处理器大多工作在为特定用户群所专用设计的系统中。它将通用 CPU 许多由板卡完成的任务集成在芯片内部,从而有利于嵌入式系统在设计时趋于小型化,同时具有很高的效率和可靠性。

嵌入式微处理器的体系结构可以采用冯·诺依曼体系或哈佛体系结构;指令系统可以选用精简指令系统(reduced instruction set computer, RISC)和复杂指令系统 CISC(complex instruction set computer, CISC)。RISC 计算机在通道中只包含最有用的指令,确保数据通道快速执行每一条指令,从而提高了执行效率并使 CPU 硬件结构设计变得更为简单。

嵌入式微处理器有各种不同的体系,即使在同一体系中也具有不同的时钟频率和数据总线宽度,或集成了不同的外设和接口。据不完全统计,全世界嵌入式微处理器已经超过 1000 多种,体系结构有 30 多个系列,其中主流的体系有 ARM、MIPS、PowerPC、X86 和

SH 等。但与全球 PC 市场不同的是,没有一种嵌入式微处理器可以主导市场,仅以 32 位的产品而言,就有 100 种以上的嵌入式微处理器。嵌入式微处理器的选择是根据具体的应用而决定的。

## 2) 存储器

嵌入式系统需要存储器来存放和执行代码。嵌入式系统的存储器包含 Cache、主存和辅助存储器。其存储结构如图 1-1 所示。

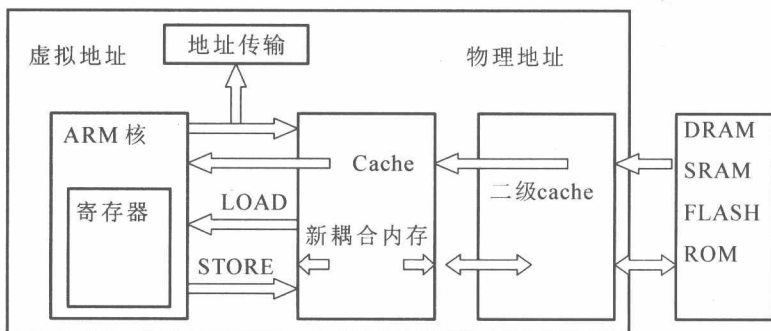


图 1-1 存储结构

### (1) Cache。

Cache 是一种容量小、速度快的存储器阵列。它位于主存和嵌入式微处理器内核之间,存放的是一段时期微处理器使用最多的程序代码和数据。在需要进行数据读取操作时,微处理器尽可能地从 Cache 中读取数据,而不是从主存中读取,这样就大大改善了系统的性能,提高了微处理器和主存之间的数据传输速率。Cache 的主要目标就是:减小存储器(如主存和辅助存储器)给微处理器内核造成的存储器访问瓶颈,使处理速度更快,实时性更强。

在嵌入式系统中 Cache 全部集成在嵌入式微处理器内,可分为数据 Cache、指令 Cache 或混合 Cache,Cache 的大小依不同处理器而定。一般中高档的嵌入式微处理器才会把 Cache 集成进去。

### (2) 主存。

主存是嵌入式微处理器能直接访问的寄存器,用来存放系统和用户的程序及数据。它可以位于微处理器的内部或外部,其容量为 256 KB~1 GB,根据具体的应用而定,一般片内存储器容量小,速度快,片外存储器容量大。

常用作主存的存储器有:

- ① ROM 类 NOR Flash、EPROM 和 PROM 等;
- ② RAM 类 SRAM、DRAM 和 SDRAM 等。

其中,NOR Flash 凭借其可擦写次数多、存储速度快、存储容量大、价格便宜等优点,在嵌入式领域内得到了广泛应用。

### (3) 辅助存储器。

辅助存储器用来存放大数据量的程序代码或信息。它的容量大、但读取速度与主存相比就慢的很多,用来长期保存用户的信息。

嵌入式系统中常用的外存有:硬盘、NAND Flash、CF 卡、MMC 和 SD 卡等。

## 3) 通用设备接口和 I/O 接口

嵌入式系统和外界交互需要一定形式的通用设备接口,如 A/D、D/A、I/O 等。外设通过和片外其他设备的或传感器的连接来实现微处理器的输入/输出功能。每个外设通常都

只有单一的功能。它可以在芯片外也可以内置芯片中。外设的种类很多,可从一个简单的串行通信设备到非常复杂的 802.11 无线设备。

嵌入式系统中常用的通用设备接口有 A/D(模/数转换接口)、D/A(数/模转换接口), I/O接口有 RS-232 接口(串行通信接口)、Ethernet(以太网接口)、USB(通用串行总线接口)、音频接口、VGA 视频输出接口、I<sup>2</sup>C(现场总线)、SPI(串行外围设备接口)和 IrDA(红外线接口)等。

## 2. 中间层

硬件层与软件层之间为中间层,也称为硬件抽象层(hardware abstract layer, HAL)或板级支持包(board support package, BSP)。它将系统上层软件与底层硬件分离开来,使系统的底层驱动程序与硬件无关,上层软件开发人员无须关心底层硬件的具体情况,根据 BSP 层提供的接口即可进行开发。该层一般包含相关底层硬件的初始化、数据的输入/输出操作和硬件设备的配置功能。

BSP 具有以下两个特点。

**硬件相关性:**因为嵌入式实时系统的硬件环境具有应用相关性,而作为上层软件与硬件平台之间的接口,BSP 需要为操作系统提供操作和控制具体硬件的方法。

**操作系统相关性:**不同的操作系统具有各自的软件层次结构,因此,不同的操作系统具有特定的硬件接口形式。

实际上,BSP 是一个介于操作系统和底层硬件之间的软件层次,包括系统中大部分与硬件联系紧密的软件模块。设计一个完整的 BSP 需要完成两部分工作:嵌入式系统的硬件初始化以及 BSP 功能,设计硬件相关的设备驱动。

### 1.2.2 嵌入式系统的软件组成与结构

在嵌入式系统的不同应用领域和不同的发展阶段,嵌入式系统的软件组成也不完全相同。最基本的结构如图 1-2 所示。

应用软件是针对特定应用领域,基于某一个固定的硬件平台,用来达到用户预期目标的计算机软件。嵌入式系统自身的特点,决定了嵌入式应用软件不仅要求达到准确性、安全性和稳定性等方面的要求,而且还要尽可能地代码优化,以减少对系统资源的消耗,降低硬件成本。

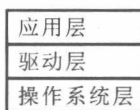


图 1-2 嵌入式系统软件组成图

## 1.3 嵌入式操作系统举例

嵌入式操作系统主要有商业版和开源版两个阵营,从长远看,嵌入式系统开源开发将是嵌入式发展趋势。

### 1.3.1 商业版嵌入式操作系统

常见的商业嵌入式操作系统有 VxWorks、windows CE 和 PalmOS 操作系统。

#### 1. VxWorks

VxWorks 操作系统是美国 WindRiver 公司于 1983 年设计开发的一种嵌入式实时操作系统(RTOS),是嵌入式开发环境的关键组成部分。良好的持续发展能力、高性能的内核以及友好的用户开发环境,在嵌入式实时操作系统领域占据一席之地。它以其良好的可靠性和卓越的实时性被广泛地应用在通信、军事、航空、航天等高精尖技术及实时性要求极高的领域中,如卫星通信、军事演习、弹道制导、飞机导航等。在美国的 F-16、FA-18 战斗机、B-2

隐形轰炸机和爱国者导弹上,甚至连 1997 年 4 月在火星表面登陆的火星探测器、2008 年 5 月登陆的凤凰号,和 2012 年 8 月登陆的好奇号也都使用到了 VxWorks 上。VxWorks 的系统结构是一个相当小的微内核的层次结构。内核仅提供多任务环境、进程间通信和同步功能。这些功能模块足够支持 VxWorks 在较高层次所提供的丰富的性能要求。

## 2. Windows CE

Windows CE 操作系统是 Windows 家族中的成员,为专门设计给掌上电脑(HPCs)以及嵌入式设备所使用的系统环境。这样的操作系统可使完整的可移动技术与现有的 Windows 桌面技术整合工作。Windows CE 被设计成针对小型设备(它是典型的拥有有限内存的无磁盘系统)的通用操作系统,Windows CE 可以通过设计一层位于内核和硬件之间代码用来设定硬件平台。这即是众所周知的硬件抽象层(HAL)(在以前解释时,这被称为 OEMC(原始设备制造)适应层,即 OAL;内核压缩层,即 KAL。以免与微软的 Windows NT 操作系统的 HAL 混淆)。与其他的微软 Windows 操作系统不同,Windows CE 并不是代表一个采用相同标准的对所有平台都适用的软件。为了足够灵活以达到适应广泛产品需求,Windows CE 可采用不同的标准模式。这就意味着,它能够从一系列软件模式中做出选择,从而使产品得到定制。另外,一些可利用模式也可作为其组成部分,这意味着这些模式能够通过从一套可利用的组分做出选择,从而成为标准模式。通过选择,Windows CE 能够达到系统要求的最小模式,从而减少存储脚本和操作系统的运行。

## 3. Palm OS

Palm OS 是早期由 U. S. Robotics(其后被 3Com 收购,再独立改名为 Palm 公司)研制的专门用于其掌上电脑产品 Palm 的操作系统。由于此操作系统完全为 Palm 产品设计和研发,而其产品由推出时就超过了苹果公司的 Newton 而获得了极大的成功,所以 Palm OS 也因此声名大噪。其后曾被 IBM、Sony、Handspring 等厂商取得授权,使用在旗下产品中。Palm OS 操作系统以简单易用为大前提,运作需求的内存与处理器资源较小,速度也很快;但不支援多线程,长远发展受到限制。Palm OS 版权现时由 PalmSource 公司拥有,并由 PalmSource 开发及维护。2005 年 9 月 9 日,PalmSource 被日本软件开发商爱可信收购,之后改以 Access Linux Platform 为名继续开发。新出产的 Palm 类产品中的 Palm OS 版本大部分为 5.0 甚至更高,但市场上仍然未有采用 Palm OS 6 的产品。

### 1.3.2 开源版嵌入式操作系统

开源的嵌入式操作系统(简称嵌入式 OS)之前,先把开源软件搞清楚。“开源软件”目前并没有明确定义,也没有标准许可证。许多公司采用开放源代码一词,大概有这样两种情况。第一,开源软件的许可条款是一个组合条款,并不都是 GPL。比如 Android 里面就有多种许可证(GPL、Apache 和 BSD)。Linux 内核是采用 GPL,用户任何修改必须开源给社区。Android 的许可可以让用户为自己的应用制作专用软件(遵循 Apache 和 BSD 许可)。第二,一些商业软件称自己是开源软件,其实它们只是开放源代码给用户或者大众,让大家免费评估和试用,如果你真正的使用在商业项目了,需要技术服务了,那对不起,他们要收费了。

#### 1. Linux

由 Linus Torvalds 在 1991 年发表的 Linux 开放操作系统,是由在互联网上的志愿者开发的,吸引了许许多多忠实的追随者,自 1999 年稳定的 2.2 版本发布以来,Linux 早已经在服务器和台式机上取得了巨大的成功,正在嵌入式系统中大放异彩。许多人认为 Linux 可以获得在嵌入式市场上的认可,真正的关键的原因是得益于 Linux 高质量和其生命力,当然可以给 Linux 开发人员提供了灵活性和开放源码选择,不收取运行时许可使用费也是开发



者选择 Linux 的理由。与商业软件授权方式不同的是,开发者可以自由修改的 Linux,以满足他们的应用需要。在技术上,因为基于 UNIX 技术, Linux 提供广泛的功能强大的操作系统功能,包括内存保护、进程和线程,以及丰富的网络协议, Linux 与 POSIX 标准兼容,从而提高了应用的可移植性。 Linux 支持多种微处理器,总线架构和设备,通常情况下,芯片公司的驱动程序,应用相关的中间件,工具和应用程序都是先为 Linux 开发的,后来移植到其他 OS 平台。这些特性都非常适合于嵌入式系统应用。

## 2. Red Hat 的 eCos

eCos 全称是 embedded configurable operating system。它出现于 1997 年,可以说是嵌入式领域的一个后来者。相对其他的系统来说,它非常年轻,在设计理念上面是比较新颖的,eCos 绝大多数代码使用 C++ 写作完成。 eCos 最早是 Cygnus 公司开发(该公司成立于 1989 年),1999 年被 RedHat 收购,2002 年 RedHat 因为财务上的原因放弃了 RedHat 项目,解雇了 eCos 的开发人员,2004 年在 eCos 开发者的呼吁下,RedHat 同意把 eCos 版权转给开源软件基金会。之后,eCos 主要开发人员组建了一个新的 eCosCentric 公司,继续进行 eCos 的开发和技术支持。

eCos 最大的特点是模块化,内核可配置。如果说嵌入式 Linux 太庞大了,那么 eCos 可能就能够满足你的要求。它是一个针对 16/32/64 位处理器的可移植开放源代码的嵌入式 RTOS。和 Linux 不同,它是由专门设计嵌入式系统的工程师设计的。 eCos 提供的 Linux 兼容的 API 能让开发人员轻松地将 Linux 应用移植到 eCos。 eCos 的核心具备一般 OS 功能,如驱动和内存管理、异常和中断处理、线程的支持,还具备 RTOS 的特点,如可抢占、最小中断延迟、线程同步等。 eCos 支持大量外设、通信协议和中间件,比如以太网、USB、IPv4/IPv6、SNMP、HTTP 等。

## 3. Android

Android 是谷歌公司开发的针对高端智能手机的一个操作系统(OS)。其实 Android 不仅仅是一个 OS,也是一个软件平台,可以应用在更加广泛的设备中。在实际应用中,Android 是一个在 Linux 上的应用架构,优势是能够帮助开发者快速地布置应用软件。 Android 成功的关键是它的授权方式,它是一个开源软件,主要的源代码的授权方式是 Apache,该授权允许使用者在 Android 源代码上增加自主知识产权,而不一定要公开源代码。

直到今天,Android 的开发主要还是集中在移动终端上,这是谷歌的主要目标市场,相关软件 IP 和开发工具也都是针对这个市场设计和配置的,在这个市场上 Android 已经成为智能手机市场占有率最大的 OS。在其他的市场上 Android 也的潜力巨大,一般来说,任何有复杂的软件需求的地方,一个封装好的有连接和用户界面的设备,比如车载信息系统(IVT),智能电视,Android 都会有用武之地。消费电子,通信,汽车电子,医疗仪器和智能家居应用都是 Android 潜在的应用目标,但是 Android 要从移动终端应用真正走出来,确实很有挑战性,目前我们看到的是在平板电脑和智能电视上 Android 有不错的表现,基于 Android 照相机、智能手表和电视盒已经出现,更多的应用也在开发之中。

## 思考与练习

1. 什么是嵌入式系统? 列举出几个熟悉的嵌入式系统产品。
2. 嵌入式系统由哪几部分组成?
3. 简述嵌入式系统的特点。