

高等教育“十三五”规划教材

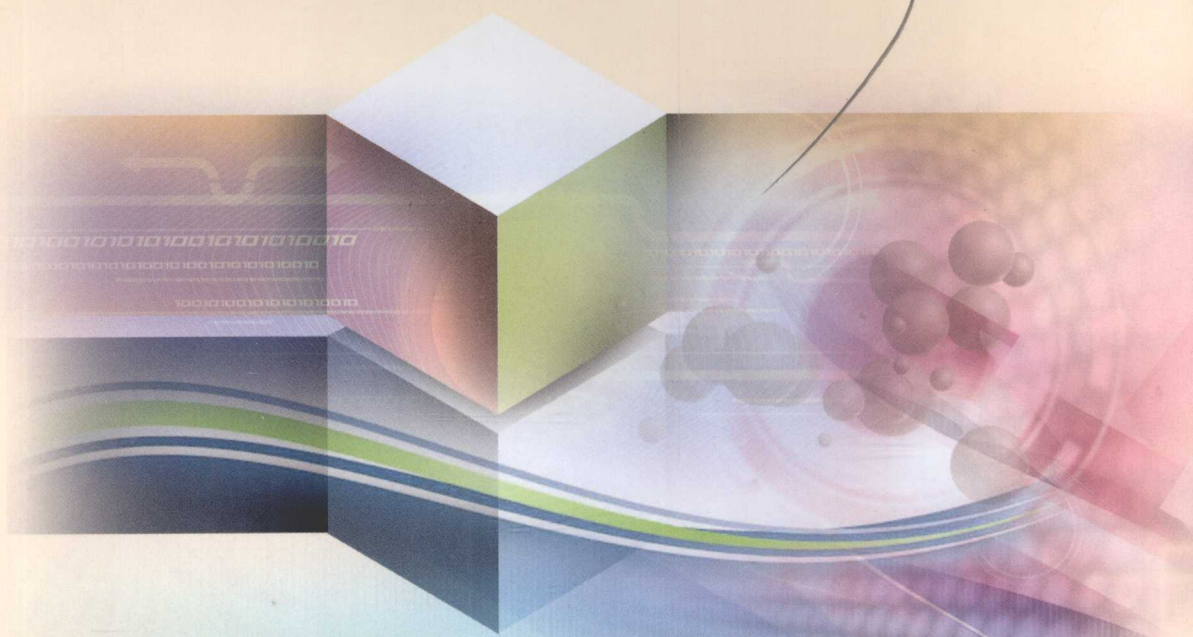


嵌入式 系统设计与开发

张会福 胡勇华 文宏 主编

Qianrushi Xitong Sheji Yu Kaifa

Qianrushi Xitong Sheji Yu Kaifa



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等教育“十三五”规划教材

嵌入式系统设计与开发

张会福 胡勇华 文 宏 主 编

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统设计与开发/张会福,胡勇华,文宏主

编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2016. 4

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3050 - 8

I. ①嵌… II. ①张… ②胡… ③文… 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(2016)第 050340 号

书 名 嵌入式系统设计与开发
主 编 张会福 胡勇华 文 宏
责任编辑 仓小金
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 14.75 字数 368 千字
版次印次 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

近年来,嵌入式系统技术和嵌入式产品发展势头迅猛,其应用领域涉及通信产品、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。嵌入式系统的开发占整个计算机系统开发的比重也越来越高。基于嵌入式系统应用的嵌入式处理器也取得了飞速的发展,在众多的嵌入式处理器中,尤以 ARM 处理器的市场占有率最大。ARM 处理器从早期的 ARM7 发展到现在的 Cortex,已经形成了系列产品。目前,已经有越来越多的开发人员开始从单片机系统开发渐渐地转向基于 ARM 处理器的嵌入式系统开发。

目前嵌入式开发的书籍种类繁多,这些书籍各具特色,侧重点各不相同。本书面向嵌入式初学者,力求由浅入深地介绍嵌入式系统开发的软件、硬件各部分知识,帮助初学者快速进入嵌入式开发领域,掌握嵌入式开发的基本知识。

本书首先介绍了嵌入式系统和 ARM 嵌入式处理器以及基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32 处理器的基础知识。基于 STM32-A 开发平台用实例讲解了嵌入式系统设计以及软件开发环境的建立过程。接着结合实验平台介绍了 STM32 的中断、定时、串口、LCD、485、CAN 等常用嵌入式外设的基本控制程序设计。最后介绍了 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 实时操作系统的移植与应用开发,并结合 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 给出实验平台的几个简单应用实例。通过这些内容的学习,帮助读者了解和掌握嵌入式处理器的应用和嵌入式系统开发的知识,为今后的工作打下扎实的理论和实践基础,并帮助提高分析问题和解决问题的能力。

本书由张会福、胡勇华、文宏等编写,编写过程中得到湖南大学徐成教授及研究生徐梓桑、曹婷、向佳等大力协助,在此一并向他们表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者
2016 年 1 月

目 录

第 1 章 嵌入式系统概述	1
1.1 嵌入式系统的定义	1
1.2 嵌入式系统的历史和发展	2
1.3 嵌入式系统的组成	4
1.4 嵌入式系统的应用及特点	10
1.5 嵌入式系统的发展趋势	12
1.6 习 题	13
1.7 参考文献	13
第 2 章 ARM Cortex-M3 微处理器基础	14
2.1 ARM 微处理器概述	14
2.2 ARM Cortex-M3 微控制器简介	17
2.3 ARM Cortex-3 处理器组件	18
2.4 总线结构与流水线	25
2.5 寄存器组织	26
2.6 指令系统	30
2.7 存储系统	34
2.8 异常及其处理	41
2.9 SysTick 定时器	49
2.10 STM32F103VBT6 处理器基础	50
2.11 STM32 的时钟源和时钟树	58
2.12 STM32F10 系列处理器的定时器和看门狗	62
2.13 STM32F10 系列处理器的 GPIO	64
2.14 编程模式	66
2.15 习 题	69
2.16 参考文献	70
第 3 章 嵌入式开发环境	71
3.1 嵌入式开发环境概述	71
3.2 开发环境安装配置	78
3.3 Keil μ Vision 简介	79

3.4	Keil μ Version 的使用	82
3.5	调 试	91
3.6	程序下载	100
3.7	习 题	102
3.8	参考文献	103
第 4 章	STM32-A 平台开发基础	104
4.1	通用端口控制	104
4.2	按键与中断	113
4.3	串行接口程序设计	125
4.4	TFT-LCD 应用	132
4.5	ADC 应用	136
4.6	IIC 设计与应用	146
4.7	定时器和看门狗	151
4.8	无线通信	164
4.9	485 通信应用	169
4.10	CAN 通信应用	173
4.11	习 题	183
4.12	参考文献	183
第 5 章	μC/OS- II 及应用开发	185
5.1	μ C/OS- II 操作系统	185
5.2	μ C/OS- II 的内核	191
5.3	μ C/OS- II 在 Cortex-M3 上的移植	202
5.4	μ C/OS- II 应用程序开发	210
5.5	STM32 平台 μ COS- II 移植开发实例	213
5.6	习 题	227
5.7	参考文献	227

第1章 嵌入式系统概述

自20世纪70年代初微处理器问世以来,嵌入式系统便进入了快速发展时期。迄今为止,嵌入式系统无疑已成为了最热门最有发展前途的IT应用领域之一。嵌入式系统存在于各种常见的电子设备中,如手机、平板电脑、电子字典、可视电话、VCD/DVD/MP3 Player、数字相机(DC)、数字摄像机(DV)、机顶盒(Set Top Box)、游戏机、智能玩具、交换机、路由器、数控设备或仪表、汽车电子、家电控制系统、医疗仪器等。近年来,随着移动互联网的迅猛发展,衍生了大量的基于移动互联网的嵌入式产品,如智能家电、各种可穿戴设备、手机APP等,极大地扩展了嵌入式系统的领域。随着全球不断加速的数字化、信息化、互联化过程,嵌入式系统将被越来越广泛地应用于军事、工农业、航空航天、商业、办公、医疗、家用电器等各个方面。

1.1 嵌入式系统的定义

嵌入式系统实质上也是一种计算机系统,但是由于其发展时间较短,发展速度很快且应用领域非常广泛,至今都缺乏一个业界广泛接受的权威性定义。很多国外的经典教材都不阐明其定义,而是讲述其特点,通过特点来认识何谓嵌入式系统。为了给读者一个比较明确的概念,我们在这里给出国内外对嵌入式系统的几种典型描述。

IEEE(国际电气和电子工程师协会)对嵌入式系统的定义是: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”(Device used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants.)。这个定义主要是从嵌入式系统的应用上着手对其进行描述,但这种描述过于宽泛,并未能反映嵌入式系统的基本特点。

国内对嵌入式系统的一个比较完善的定义是:嵌入式系统是以应用为中心、以计算机技术为基础、软件硬件可裁减、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。这个定义主要强调了嵌入式系统的本质是计算机系统,是一种满足应用系统特殊要求的特定的计算机系统。它强调了嵌入式系统的两个重要特点:① 以应用为中心:嵌入式系统不应该独立于应用。② 以计算机技术为基础:计算机系统由软件和硬件构成,嵌入式系统也不例外。

当然,嵌入式系统还有一些其他的定义,如:嵌入式系统是看不见的计算机,一般不能够被用户编程,它有一些专用的I/O设备,对用户的接口是专用的;嵌入式系统是任意包含至少一个可编程计算机的设备,但是这个设备不是作为通用计算机设计的等,这些定义都反映了嵌入式系统的某些特点。综上所述,嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术、电子技术与各行业的具体应用相结合的产物。这一点就决定了嵌入式系统必然是个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成系统。

1.2 嵌入式系统的历史和发展

跟通用计算机相似,嵌入式系统的发展实质上是与计算机的硬件发展紧密相关的,特别是处理器的发展决定了嵌入式系统的发展速度。随着硬件技术的飞速发展,处理器、系统总线速度越来越快,存储器容量越来越大,嵌入式系统的软件才有快速发展的空间。这两者的并行快速发展最终导致了当今嵌入式系统的繁荣。

1.2.1 嵌入式系统硬件发展历史

第一个被大家认可的现代嵌入式系统是麻省理工学院仪器研究室的查尔斯·斯塔克·德雷珀开发的阿波罗导航计算机。两次月球飞行中在太空驾驶舱和月球登陆舱都是用了这种惯性导航系统。第一款大批量生产的嵌入式系统是 1961 年发布的民兵 I 导弹上的 D-17 自动导航控制计算机。它是由独立的晶体管逻辑电路建造的,带有一个作为主内存的硬盘。当民兵 II 导弹在 1966 年开始生产的时候,D-17 被第一次使用大量集成电路的更新的计算机所替代。仅仅这个项目就将与非门集成电路模块的价格从每个 1 000 美元降低到了每个 3 美元,使集成电路的商用成为可能。民兵导弹的嵌入式计算机有一个重要的设计特性:它能够在项目后期对制导算法重新编程以获得更高的导弹精度,并且能够使用计算机测试导弹,从而减少测试用电缆和接头的重量。

20 世纪 60 年代早期这些应用使嵌入式系统得到长足发展,它的价格开始下降,同时处理能力和功能也获得了巨大的提高。但是,嵌入式系统真正大发展却是在微处理器问世之后。1971 年 11 月,Intel 公司成功地把算术运算器和控制器电路集成在一起,推出了世界上第一片微处理器 Intel 4004,其后各厂家推出了许多 8 位、16 位的微处理器,包括 Intel 8080/8085、8086, Motorola 的 6800、68000, Zilog 的 Z80、Z8000 等。以这些微处理器为核心构成的 OEM 嵌入式计算机系统,广泛用于制造仪器仪表、医疗设备、机器人、家用电器等。微处理器的广泛应用形成了一个广阔的嵌入式应用市场,计算机厂家开始大量地以插件方式向用户提供 OEM(Original Equipment Manufacture)产品,再由用户根据自己的需要选择一套适合自己应用的 CPU 板、存储器板和各式 I/O 插件板构成专用的嵌入式计算机系统,并嵌入到自己的系统设备中。与此同时,军方根据自己的需求,由工业部门研制生产了包括 CPU 板、存储器板、接口板、总线板、电源板、数模变换板等 OEM 产品的抗恶劣环境计算机系统,形成了完整系列的军用嵌入式计算机系统。

为了灵活兼容考虑,各大公司开始设计开发系列化、模块化的单板机。流行的单板计算机有 Intel 公司的 iSBC 系列、Zilog 公司的 MCB 等。这时人们可以不必从选择芯片开始来设计一台专用的嵌入式计算机了,只要选择各功能模块,就可以组建一台专用计算机系统。用户和厂家都希望从不同的厂家选购最适合的 OEM 产品,插入外购或自制的机箱中就形成新的系统,即希望插件是互相兼容的,这就导致了工业控制微机系统总线的诞生。1976 年 Intel 推出 Multibus,1983 年扩展为带宽达 40 MB/s 的 Multibus II;1978 年 Prolog 设计简单的 STD 总线广泛用于小型嵌入式系统;1981 年 Motorola 推出了 VME 总线,与 Multibus II 瓜分了军用市场。1981 年 IBM 推出的 VME_Bus 则和 Multibus II 瓜分高端市场。目前嵌入式 PC、PC104、CPCI(Compact PCI)等总线系统已经广泛应用在工业控制领域。

80 年代可以说是各种总线层出不穷、群雄并起的时代。随着微电子工艺水平的提高,

集成电路制造商开始把嵌入式应用所需要的微处理器、I/O 接口、A/D、D/A 转换、串行接口以及 RAM、ROM 等集成到一个 VLSI 中,制造出面向 I/O 设计的微控制器,就是俗称的单片机。成为嵌入式计算机系统异军突起的一支新秀,其后发展的 DSP 产品则更是提升了嵌入式计算机系统的技术水平,并且迅速地渗入到消费电子、医用电子、智能控制、通信电子、仪器仪表、交通运输等各种领域。90 年代之后,Texas 推出第三代 DSP 芯片 TMS320C30 引导着微控制器向 32 位高速智能化发展,如 Intel 公司发展的 PⅡ、PⅢ等。

进入 21 世纪,Acorn 计算机有限公司的 32 位 RISC 微处理器(ARM)逐步占据了主流嵌入式微处理器市场,ARM 处理器非常适用于移动通信领域,符合其主要设计目标为低成本、高性能、低功耗的特性。至 2009 年为止,ARM 架构处理器占据了市面上所有 32 位嵌入式 RISC 处理器的 90%,使它成为占全世界最多数的 32 位架构处理器之一。2011 年,ARM 的客户报告了 79 亿 ARM 处理器出货量,占有 95% 的智能手机、90% 的硬盘驱动器、40% 的数字电视和机顶盒、15% 的微控制器和 20% 的移动电脑。2012 年,微软与 ARM 科技生产了新的 Surface 平板电脑,AMD 宣布它将于 2014 年开始生产基于 ARM 核心的 64 位服务器芯片。

1.2.2 嵌入式系统软件发展历史

随着硬件性能特别是微处理器性能的提高,嵌入式软件的规模也随之呈指数级增长。在微处理器出现初期,为了保障嵌入式系统的时间、空间效率,软件只能使用汇编语言编写。由于微电子技术的进步,对于软件的时空效率要求不再那么苛刻,嵌入式计算机开始使用 PL/M、C 等高级语言。对于复杂的嵌入式系统,除了需要高级语言开发工具外,还需要嵌入式实时操作系统的支持。从早期的无操作系统阶段到现在的实时操作系统时代,嵌入式系统的软件发展可谓迅速异常。

(1) 无操作系统阶段

嵌入式系统最初的应用是基于单片机的,大多以可编程控制器的形式出现,具有监测、伺服、设备指示等功能,通常应用于各类工业控制和飞机、导弹等武器装备中,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。这些装置虽然已经初步具备了嵌入式的应用特点,但仅仅只是使用 8 位的 CPU 芯片来执行一些单线程的程序,因此严格地说还谈不上“系统”的概念。

这一阶段嵌入式系统的主要特点是: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。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,但却无法满足现今对执行效率、存储容量都有较高要求的信息家电等产品需要。

(2) 简单操作系统阶段

20 世纪 80 年代,随着微电子工艺水平的提高,IC 制造商开始把嵌入式应用中所需要的微处理器、I/O 接口、串行接口以及 RAM、ROM 等部件集成到一片 VLSI 中,制造出面向 I/O 设计的微控制器,并一举成为嵌入式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。

这一阶段的嵌入式系统的主要特点是:出现了大量高可靠、低功耗的嵌入式 CPU(如 Power PC 等),各种简单的嵌入式操作系统开始出现并得到迅速发展。此时的嵌入式操作

系统虽然还比较简单,但已经初步具有了一定的兼容性和可扩展性,内核精巧且效率高,主要用来控制系统负载以及监控应用程序的运行。

(3) 实时操作系统阶段

20 世纪 90 年代,在分布式控制、柔性制造、数字化通信和信息家电等巨大需求的牵引下,嵌入式系统进一步飞速发展,而面向实时信号处理算法的 DSP 产品则向着高速度、高精度、低功耗的方向发展。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。

这一阶段嵌入式系统的主要特点是:操作系统的实时性得到了很大改善,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) 面向 Internet 阶段

21 世纪无疑将是一个网络的时代,将嵌入式系统应用到各种网络环境中去的呼声自然也越来越高。目前大多数嵌入式系统还孤立于 Internet 之外,随着 Internet 的进一步发展以及 Internet 技术与信息家电、工业控制技术等的结合日益紧密,嵌入式设备与 Internet 的结合才是嵌入式技术的真正未来。

由于新的微处理器层出不穷,嵌入式操作系统自身结构的设计更加便于移植,能够在短时间内支持更多的微处理器。嵌入式系统的开发成了一项系统工程,开发厂商不仅要提供嵌入式软硬件系统本身,同时还要提供强大的硬件开发工具和软件支持包。通用计算机上使用的新技术、新观念开始逐步移植到嵌入式系统中,如嵌入式数据库、移动代理、实时 CORBA 等,嵌入式软件平台得到进一步完善。

各类嵌入式 Linux 操作系统迅速发展。由于 Linux 系统具有源代码开放、系统内核小、执行效率高、网络结构完整等特点,很适合信息家电等嵌入式系统的需要,目前已经形成了能与 Windows CE、Palm OS 等嵌入式操作系统进行有力竞争的局面。网络化、信息化的要求随着 Internet 技术的成熟和带宽的提高而日益突出,以往功能单一的设备如电话、手机、冰箱、微波炉等功能不再单一,结构变得更加复杂。在精简系统内核、优化关键算法,降低功耗和软硬件成本以及提供更加友好的多媒体人机交互界面的基础上,嵌入式系统的网络互联成为必然趋势。

1.3 嵌入式系统的组成

如图 1-1 所示,嵌入式系统一般由嵌入式硬件和软件组成。硬件以微处理器为核心,集成存储器和系统专用的输入输出设备。软件包括固件、嵌入式操作系统和应用程序等。这些软件有机地结合在一起,形成系统特定的一体化软件。

1.3.1 嵌入式硬件

嵌入式系统硬件主要指嵌入式微处理器和外围设备。其中嵌入式处理器是嵌入式系统的核心,一般只保留与用户需求紧密相关的功能部件,因此具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高等特点。而外围设备根据功能一般可分为以下三类:存储设备,通信设备和 I/O 设备。一个典型的嵌入式系统硬件组成如图 1-2 所示。

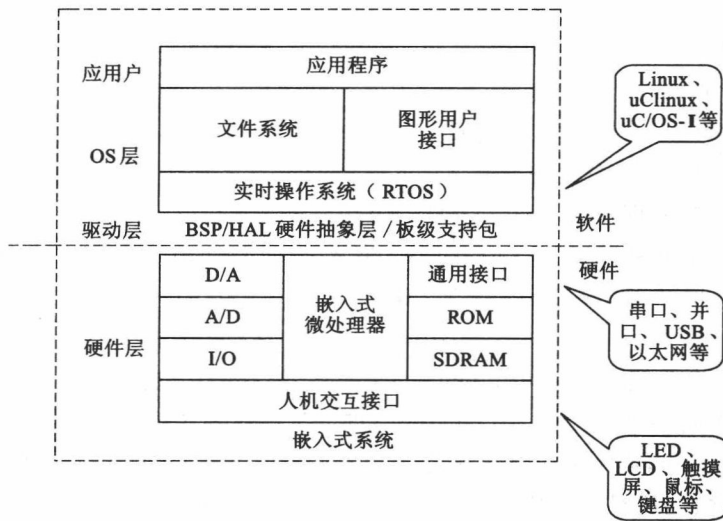


图 1-1 嵌入式系统组成

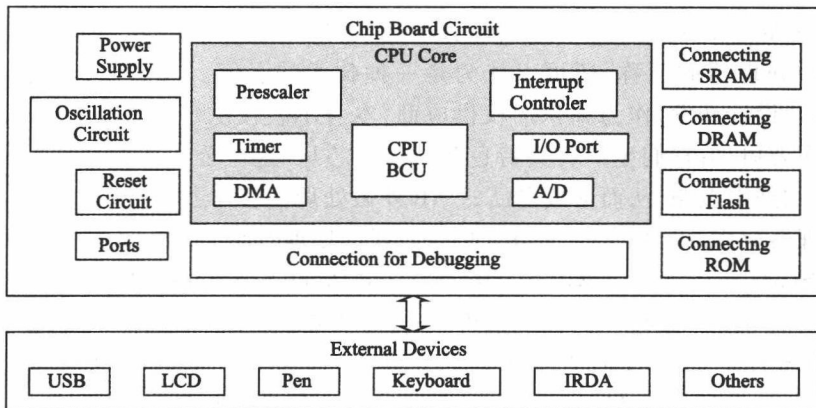


图 1-2 嵌入式系统硬件组成

(1) 嵌入式处理器

嵌入式系统的核心是各种类型的嵌入式处理器，嵌入式处理器与通用处理器最大的不同点在于，嵌入式 CPU 大多工作在为特定用户群所专门设计的系统中，它将通用 CPU 中许多由板卡完成的任务集成到芯片内部，从而有利于嵌入式系统在设计时趋于小型化，同时还具有很高的效率和可靠性。

嵌入式处理器的体系结构经历了从 CISC(复杂指令集)到 RISC(精简指令集)和 Compact RISC 的转变，位数则由 4 位、8 位、16 位、32 位逐步发展到 64 位。目前常用的嵌入式处理器可分为如下几种：

① 嵌入式微控制器(Micro Controller Unit, MCU):即单片机。早期比较流行的处理器，将整个计算机系统集成到一个芯片中，内部以某种微处理器为核心，并对 ROM、RAM、总线、总线逻辑、定时器/计数器、I/O、串行口、A/D 转换、D/A 转换等必要外设加以集成。

如 Intel 的 8051。

② 嵌入式微处理器(Embedded Micro Processor Unit, EMPU):一般基于通用微处理器,从 8 位、16 位直到 64 位,目前以 32 位为主。与通用微处理器相比,嵌入式微处理器体积小、重量轻、成本低、可靠性高、功耗低、工作温度、抗电磁干扰等方面有所增强。目前市场上最为广泛使用的嵌入式微处理器有 ARM 系列、MIPS 系列、X86 系列等。

③ 嵌入式 DSP 处理器(Embedded Digital Signal Processor, EDSP):专门用于高速实时信号处理,分为通用 DSP 和专用 DSP 两种。嵌入式 DSP 处理器对系统结构和指令进行特殊设计,使其适合于执行 DSP 算法,编译效率较高,指令执行速度也快。如 TI 的 TMS320C30。

④ 嵌入式片上系统(System on Chip, SoC):将微处理器、模拟 IP 核、数字 IP 核和存储器(或片外存储控制接口)集成在单一芯片上,进一步降低了功耗,减少了开发成本。它通常是客户定制的(CSIC),或是面向特定用途的标准产品(ASSP),如 Intel 的 PXA 255 等。

目前嵌入式微处理器是市场的主流,几乎每个半导体制造商都生产嵌入式微处理器,并且越来越多的公司开始拥有自主的处理器设计部门。据不完全统计,全世界嵌入式处理器已经超过 1 000 多种,流行的体系结构有 30 多个系列,其中以 ARM、PowerPC、MC 68000、MIPS 等使用得最为广泛。以下是几款最常用的嵌入式微处理器:

① ARM(Advanced RISC Machines):ARM 既可以认为是一个公司的名字,也可以认为是对一类微处理器的通称,还可以认为是一种技术的名字。ARM 公司专门从事基于 RISC 技术芯片设计开发,作为知识产权供应商,本身不直接从事芯片生产,而是转让其设计许可给合作公司,由它们生产各具特色的 ARM 芯片,这些公司根据各自不同的应用领域,加入适当的外围电路,从而形成自己的 ARM 微处理器芯片进入市场。当前,基于 ARM 技术的微处理器应用约占据了 32 位 RISC 嵌入式微处理器 90% 以上的市场份额。

② MIPS(Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages):MIPS 技术公司是一家设计制造高性能、高档次及嵌入式 32 位和 64 位处理器的厂商,在 RISC 处理器方面占有重要地位。MIPS 公司设计 RISC 处理器始于 80 年代初,此后公司的战略发生变化,把重点放在了嵌入式系统。1999 年,MIPS 公司发布 MIPS 32 和 MIPS 64 架构标准,为未来 MIPS 处理器的开发奠定了基础。

③ PowerPC:PowerPC 架构是 IBM, Motorola 和 Apple 共同合作的成果,继承了这三家公司的技术,尤其是 IBM 的 Performance Optimization With Enhanced RISC(POWER)架构。PowerPC 处理器品种很多,既有通用的处理器,又有嵌入式控制器和内核,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,无所不包。代表产品有 Motorola 推出的 MPC 系列,如 MPC8xx,和 IBM 推出的 PPC 系列,如 PPC4xx,等。

④ x86:x86 系列处理器是大家最熟悉的。它起源于 Intel 架构的 8080,再发展到 286、386、486,直到现在的 Pentium4、Athlon、AMD 和 Intel 的 64 位处理器。x86 对以前的处理器保持了很好的兼容性,不过这也限制了 CPU 性能的提高。486DX 是当时和 ARM、68000, MIPS 和 SuperH 齐名的五大嵌入式处理器之一。

⑤ Motorola 68000:是出现得比较早的一款嵌入式处理器,68000 采用的是 CISC 结构,与现在的 PC 指令集保持二进制兼容。目前基于该架构的嵌入式微处理器主要有 MCF

5272,它基于第二代 Cold Fire V2 核心。

(2) 嵌入式外围设备

在嵌入式硬件系统中,除了中心控制部件(MCU、DSP、EMPU、SOC)以外,用于完成存储、通信、调试、显示等辅助功能的其他部件,事实上都可以算作嵌入式外围设备。目前常用的嵌入式外围设备按功能可以分为存储设备、通信设备和显示设备三类。

① 存储设备主要用于各类数据的存储,常用的有静态易失型存储器(RAM、SRAM)、动态存储器(DRAM)和非易失型存储器(ROM、EPROM、EEPROM、FLASH)三种,其中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。

② 目前存在的绝大多数通信设备都可以直接在嵌入式系统中应用,包括 RS-232 接口(串行通信接口)、SPI(串行外围设备接口)、IrDA(红外线接口)、I2C(现场总线)、USB(通用串行总线接口)、Ethernet(以太网接口)等。

③ 由于嵌入式应用场合的特殊性,通常使用的是阴极射线管(CRT)、液晶显示器(LCD)、触摸板(Touch Panel)和键盘等外围 I/O 设备。

1.3.2 嵌入式软件

嵌入式软件可分为嵌入式操作系统和应用软件两大类,其核心是嵌入式操作系统。嵌入式操作系统是嵌入式系统中最基本的软件,它负责分配、回收、控制和协调全部软硬件资源的并发活动,并且提供应用程序的运行环境和接口,是应用程序运行的基础。嵌入式应用软件则是服务于某种专用应用领域,基于某一特定的嵌入式硬件平台,用来达到用户预期任务的计算机软件。由于嵌入式系统自身的特点,决定了嵌入式应用软件不仅要具备准确性、安全性和稳定性,而且还要尽可能进行代码优化,以减少对系统资源的消耗,降低硬件成本。图 1-3 显示了一个典型的以 VxWorks 嵌入式操作系统为核心的嵌入式软件体系结构,包括了 BSP(板级支持包)、各种驱动、文件系统、IO 系统、协议栈、VxWorks 内核、库文件以及工具软件和应用软件。

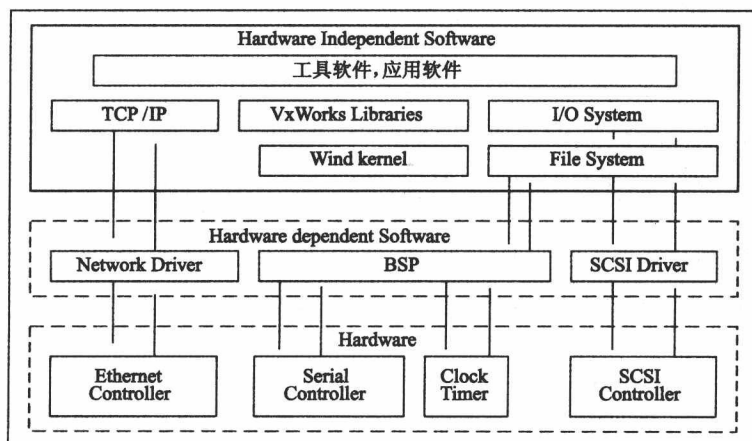


图 1-3 基于 VxWorks 的嵌入式软件结构

(1) 嵌入式操作系统

大部分嵌入式操作系统都是实时系统,而且多是实时多任务系统。它们采用全抢占调度方案,响应时间很短;采用微内核技术,设计追求灵活性,可配置、可裁剪、可扩充、可移植;具备强实时和高可靠性,有适应各种主流 CPU 的版本,非常适合嵌入式应用。商用嵌入式实时多任务操作系统把嵌入式系统的开发工作从小范围内解放出来,促使嵌入式应用扩展到更广阔的领域。目前最重要的 RTOS 主要包括:

① 传统的经典 RTOS:最主要的便是 VxWorks 操作系统,以及其 Tornado 开发平台。VxWorks 操作系统是美国 WindRiver 公司于 1987 年设计开发的一种嵌入式实时操作系统,是 Tornado II 嵌入式开发环境的关键组成部分。VxWorks 是 WindRiver 公司专门为实时嵌入式系统设计开发的操作系统软件,为程序员提供了高效的实时任务调度、中断管理,实时的系统资源以及实时的任务间通信。应用程序员可以将尽可能多的精力放在应用程序本身,而不必再去关心系统资源的管理。该系统主要应用在单板机、数据网络(以太网交换机、路由器)和通信等多方面。但 VxWorks 价格偏高,所以很多中小公司往往负担不起而转为使用嵌入式 Linux。当前 VxWorks 仍占据了较大的市场份额。与 VxWorks 类似的实时操作系统还有 pSOS、QNX、Nucleus 等。

② 嵌入式 Linux 操作系统:Linux 操作系统自诞生以来便以其免费、开源、支持软件多等特点被业界广泛研究与应用。Linux 本身不是一个为嵌入式设计的操作系统,不是微内核的,并且实时性不强。目前应用在嵌入式领域的 Linux 系统主要有两类:一类是专为嵌入式设计的已被裁减过的 Linux 系统,最常用的是 μ Clinux(不带 MMU 功能),目前占较大应用份额,可运行于 ARM7;另一类是在 ARM 9 上运行的,一般是将 Linux 2.4.18 内核移植在其上,可使用更多的 Linux 功能。很多业内专家预测,嵌入式 Linux 在不久的将来将占嵌入式操作系统的 50% 以上份额。目前 Intel、Philip 都基于 ARM+Linux 进行嵌入式开发,Fujitum 则是在自己的处理器上进行 Linux 开发。嵌入式 Linux 的缺点是熟悉 Linux 的开发人员太少,开发难度教大。目前在嵌入式 Linux 领域主要有几个方面的工作,一是能将 Linux 移植到某个新型号的开发板上;二是编写 Linux 驱动程序;三是对 Linux 内核进行裁减和优化。目前已经较为广泛使用的嵌入式 Linux 主要有 μ Clinux、RT-Linux、Embedix 以及 XLinux 等。

③ Android 系统:Android 是 Google 公司于 2007 年发布的一款基于 Linux 平台的开源手机操作系统,该平台由操作系统、中间件、用户界面和应用软件组成。它采用软件栈(Software Stack)的架构,主要分为三部分:底层以 Linux 内核为基础,用 C 语言开发,只提供基本功能;中间层包括函数库 Library 和虚拟机 Virtual Machine,用 C++ 开发;最上层是各种应用软件,包括通话程序,短信程序等,应用软件则由各公司自行开发。Android 不存在任何以往阻碍移动产业创新的专利障碍,是一个为移动终端构建的真正开放和完整的系统软件。2011 年第一季度,Android 在全球的市场份额首次超过塞班系统,跃居全球第一。2013 年的第四季度,Android 平台手机的全球市场份额已经达到 78.1%。据 Gartner 公布的最新报告显示,到 2015 年第三季度 Android 系统手机仍在全球市场上占据领导地位,份额高达 84.7%,出货量近 3 亿部。除了在智能手机上的广泛应用之外,Android 系统也逐渐扩展到平板电脑及其他领域上,如电视、数码相机、游戏机等。

④ Windows CE 嵌入式操作系统:Windows CE 是微软公司开发的一款嵌入式操作系统,它是一个开放的、可升级的 32 位嵌入式操作系统。其操作界面虽来源于 Windows 95/98,

但 Windows CE 是基于 WIN32 API 重新开发、新型的信息设备的平台。Windows CE 具有模块化、结构化和基于 Win32 应用程序接口和与处理器无关等特点。它不仅继承了传统的 Windows 图形界面,并且在 Windows CE 平台上可以使用 Windows 95/98 上的编程工具(如 Visual Basic、Visual C++等),使用同样的函数,使用同样的界面风格。绝大多数的应用软件只需简单的修改和移植就可以在 Windows CE 平台上继续使用,这使得 WinCE 开发难度远低于嵌入式 Linux。目前 Windows CE 已占据了较大市场份额,特别是在掌上电脑(PDA)、手机、显示仪表等界面要求较高或者要求快速开发的场合。2006 年 11 月,微软发布了 Windows CE 6.0,这个版本在核心部分有很大的进步,开发平台主要为 WinCE Platform Builder,有时也用 EVC 环境开发一些较上层的应用。WinCE 还有两个特殊版本,一个是 MS PocketPC 操作系统,专用于 PDA;另一个是 MS SmartPhone 操作系统,用于智能手机上(带 PDA 功能的手机),两者也都属于 WinCE 平台。目前最新的 Windows CE 为 Windows Embedded Compact 7,这个版本在内核部分有很大的进步:所有系统元件都由 exe 改为 dll,并移植到 kernel space 中。

⑤ μ C/OS-II 实时操作系统: μ C/OS-II 的前身是 μ C/OS。 μ C/OS-II 是一个微型的实时操作系统,包括了一个操作系统最基本的一些特性,如任务调度、任务通信、内存管理、中断管理等,而且这是一个代码完全开放的实时操作系统,简单明了的结构和严谨的代码风格,非常适合初涉嵌入式操作系统的人士学习。它可以让我们以最快的速度来了解操作系统的概念、结构和模块工作原理,并由浅入深逐步推广到商用操作系统上。同时对于那些对操作系统感兴趣的爱好者来说, μ C/OS-II 浅显易懂,给我们提供了一个很好的研究范本。虽然 μ C/OS-II 功能很不完整,比如缺少文件系统、设备管理、网络协议栈、图形用户接口,但正因为它的不完整,为 DIY 操作系统提供了机会,目前很多发烧友都把研读、增补 μ C/OS-II 功能作为个人的志向,使低端实时操作系统和嵌入式应用异常活跃。

(2) 嵌入式应用软件

与传统的通用计算机系统不同,嵌入式系统面向特定应用领域,根据应用需求定制开发,并随着智能化产品的普遍需求渗透到各行各业。随着硬件技术的不断革新,硬件平台的处理能力不断增强,硬件成本不断下降,嵌入式应用软件已成为产品的数字化改造、智能化增值的关键性、带动性技术。从功能性的角度分析,我们可以把嵌入式应用软件分为支撑软件 and 应用程序两大类。

① 嵌入式支撑软件:支撑软件是用于帮助和支持软件开发的软件,通常包括数据库和开发工具。嵌入式移动数据库简称为移动数据库(EMDBS),是支持移动计算或某种特定计算模式的数据库管理系统。数据库系统与操作系统、具体应用集成在一起,运行在各种智能型嵌入设备或移动设备上。随着市场需求的不断扩大和软件应用技术的不断发展,嵌入式开发工具更加丰富,集成度和易用性不断提高。目前各个厂商已经开发出不同类型的嵌入式开发工具,可以覆盖嵌入式软件开发过程的各个阶段,提高嵌入式软件开发效率。如:电路内部仿真器(ICE, in-circuit emulator);交叉编译(cross compile)平台;为数字信号处理开发软件的嵌入式程序员经常使用 MatchCad 或者 Mathematica 这样的数学工具进行数学仿真。

② 应用程序:嵌入式系统已经深入应用于各行各业,广泛配置到几乎所有的电子类产品中,因此其应用程序也是多种多样、千差万别。如数字图像压缩技术,这是嵌入式最重要

最热门的应用领域之一,主要是应掌握 MPEG 编解码算法和技术,如 DVD、MP3、PDA、高清电视、机顶盒等都涉及 MPEG 高速解码问题;通信协议及编程技术,这包括传统的 TCP/IP 协议和热门的无线通信协议;网络与信息安全技术,如加密技术,数字证书 CA 等。近年来,随着移动互联网的迅猛发展,一个值得我们高度重视的领域就是移动互联设备(以智能手机为主)的 APP(application 的缩写)开发。当前 APP 的开发主要基于三个平台:Android、苹果 iOS 和 Windows,其开发领域主要涉及手机安全、地图、浏览器、搜索、游戏、电子商务等各方面。同时,众多的互联网公司也为 APP 的开发提供了大量开发工具,如 Bizness Apps, App-Makr, AppsGeyser, Mobile Roadie, DevmyApp 等。在可以预见的将来,智能手机 APP 的开发将成为嵌入式应用软件的主要领域。

嵌入式系统是一个软硬件的综合体。在嵌入式系统的发展过程中,软硬件的划分、协同设计、协同验证以及综合始终贯穿其中。对于一个特定的嵌入式协同开发而言,并没有一个业界认同的开发标准,故而软硬件的划分带有一定的随意性和经验性。一个特定功能的完成,可以由硬件设计来达到目的,也可以用软件的方法来完成。所以嵌入式系统在对其进行组成划分的时候一定要特别注意这一点,不能简单将其与通用计算机一样考虑。

1.4 嵌入式系统的应用及特点

1.4.1 嵌入式系统的应用

嵌入式系统应用所涉及的领域极其广泛,包括国防、工业控制、信息家电、各种商用设备、办公自动化以及近年来发展迅速的移动终端设备等。

① 国防军事领域。各种武器控制(如火炮控制、导弹控制、智能炸弹制导引爆装置等)、坦克舰艇、军用飞机上的各种军用电子装备,雷达、电子对抗军事通信装备,野战指挥作战的各种专用设备。

② 工业控制领域。基于嵌入式芯片的工业自动化设备将获得长足的发展,目前已经有大量的 8、16、32 位嵌入式微控制器在投入使用,网络化的工业控制系统是提高生产效率和产品质量、减少人力资源的主要途径,如工业过程控制、数字机床、电力系统、电网安全、电网设备监测、石油化工系统。就传统的工业控制产品而言,低端型采用的往往是 8 位单片机。但是随着技术的发展,32 位、64 位的处理器逐渐成为工业控制设备的核心,在未来几年内必将获得长足的发展。

③ 交通管理领域。在车辆导航、流量控制、信息监测与汽车服务方面,嵌入式系统技术已经获得了广泛的应用,内嵌 GPS 模块或 GSM 模块的移动定位终端已经在各种运输行业获得了成功的应用。目前 GPS 设备已经从尖端产品进入了普通百姓的家庭,几乎所有智能手机、车载导航仪都可以随时随地进行准确定位。

④ 信息家电领域。这将成为嵌入式系统最大的应用领域之一,近年来提出的智能家居,强调将所有家电如冰箱、空调、电视、电饭煲、洗衣机等家电全部网络化、智能化,这将引领人们的生活步入一个崭新的空间。在这些设备中,嵌入式系统将大有用武之地。

⑤ 办公自动化领域。复印机、打印机、传真机、扫描仪、其他计算机外围设备、掌上电脑、激光照排系统、安全监控设备、通信终端、程控交换机、网络设备、网络工程、录音录像及电视会议设备、数字音频广播系统等。

⑥ POS 网络及电子商务领域。公共交通无接触智能卡(Contactless Smartcard, CSC)发行系统,公共电话卡发行系统,自动售货机,各种智能 ATM 终端等将全面走入人们的生活,到时手持一卡就可以行遍天下。

⑦ 医疗保健设备领域。各种医疗电子仪器、X 光机、超声诊断仪、计算机断层成像系统、心脏起搏器、监护仪、辅助诊断系统、远程医疗、专家系统等。

⑧ 环境工程与自然领域。水文资料实时监测,防洪体系及水土质量监测、堤坝安全,地震监测网,实时气象信息网,水源和空气污染监测。在很多环境恶劣、地况复杂的地区,嵌入式系统将实现无人监测。

⑨ 机器人领域。嵌入式芯片的发展将使机器人在微型化、高智能方面优势更加明显,同时会大幅度降低机器人的价格,使其在工业领域和服务领域获得更广泛的应用。

⑩ 移动终端设备领域。全球信息化的进程在最近十年来迅速加快,其典型代表就是移动互联网的迅猛发展,使人们得以摆脱网线的束缚,随时随地保持在线。这是足以改变人们工作、生活和娱乐方式的巨大技术革新,由此也掀起了市场潜力巨大的移动终端设备设计开发的浪潮,如智能手机及其 APP 开发、各种用途的可穿戴设备(智能眼镜、多功能手环、多功能儿童手表)以及智能电器等。嵌入式系统在这个全新的领域中的广泛应用值得期待。

1.4.2 嵌入式系统的特点

嵌入式系统有别于通用计算机系统的最大特殊之处就在于其应用的广泛性,可以说嵌入式系统是一种“无处不在的计算机系统”。与通用计算机系统相比,嵌入式系统有如下一些特点:

① 专用于特定任务。由于嵌入式系统通常是面向某个特定应用领域的,所以嵌入式系统的硬件和软件,尤其是软件,都是为特定用户群来设计的,具有某种专用性的特点。每种嵌入式微处理器大多专用于某个或几个特定的应用,工作在为特定用户群设计的系统中。

② 多类型处理器和处理器系统支持。通用计算机采用少数的几款处理器类型和体系结构,且掌握在少数大公司手中。嵌入式系统可以采用多种类型的处理器和体系结构。有上千种的嵌入式微处理器和几十种的嵌入式微处理器体系结构可供选择。在嵌入式系统产业链上,IP 设计、面向特殊应用的嵌入式微处理器设计、芯片制造已形成上下关联、分工合作的多赢局面。

③ 通常极其关注成本。这里所说的成本指的是系统成本,嵌入式系统的系统成本包括一次性的开发成本和生产成本(硬件 BOM、外壳包装、软件版税等)。对于大规模商业嵌入式应用来说,特别是消费类数字化产品,其成本是产品竞争的关键因素之一。

④ 一般是实时系统。目前,嵌入式系统广泛应用于生产过程控制、数据采集、传输通信等场合,主要用来对宿主对象进行控制,所以都对嵌入式系统有或多或少的实时性要求。例如,在武器装备中以及一些工业控制装置中的实时性要求就极高。但在某些领域,对实时性要求也并不是很高,例如近年来发展速度比较快的手持式计算机、掌上电脑等。但总体来说,实时性是对嵌入式系统的普遍要求,是设计者和用户重点考虑的一个重要指标。

⑤ 可裁剪性好。从嵌入式系统专用性的特点来看,作为嵌入式系统的供应者,理应提供各式各样的硬件和软件以备选用,但是,这样做势必会提高产品的成本。为了既不提高成本,又满足专用性的需要,嵌入式系统的供应者必须采取相应措施使产品在通用和专用之间达到某种平衡。目前的做法是,把嵌入式系统硬件和操作系统设计成可裁剪的,以便使嵌入