



“十一五”重点规划教材
高等学校计算机及其应用系列

嵌入式软件技术

主 编 / 刘利强 刑向明 刘 广

主 审 / 周卫东



 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



“十一五”重点规划教材
高等学校计算机及其应用系列

嵌入式软件技术

主 编 / 刘利强 刑向明 刘 厂

主 审 / 周卫东



内 容 简 介

本书主要介绍了嵌入式系统软件的分析、设计与测试方法,以及基于 VxWorks 系统的嵌入式软件的开发。全书注重理论联系实际,将设计开发理论与实际应用相结合。在讨论基于 VxWorks 系统的嵌入式软件开发方法时,引入大量实例程序,方便读者理解所讨论的内容。

本书可作为自动控制专业、计算机专业等与嵌入式软件开发相关的高年级本科生与硕士研究生的教材,也可作为从事嵌入式系统软件开发和研究的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式软件技术/刘利强,邢向明,刘厂主编. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2009.7
ISBN 978-7-81133-508-8

I. 嵌… II. ①刘…②邢…③刘… III. 软件开发
IV. TP311.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 132856 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 787mm×1 092mm 1/16
印 张 15.75
字 数 382 千字
版 次 2009 年 8 月第 1 版
印 次 2009 年 8 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前言

目前,嵌入式系统已经成为人们生活中必不可少的组成部分,被广泛地应用于工业控制系统、信息家电、通信设备、医疗仪器、智能仪器仪表等众多领域。从随处可见的洗衣机、电视机、电冰箱等家用电器到复杂的航天飞船控制系统,从民用领域到军工科技,从基础的农业生产到高新科技产业,无处不见嵌入式系统的身影。

嵌入式技术已经成为新的技术热点,市场对嵌入式系统的需求在飞速增长。然而,对嵌入式系统开发的理论与方法的研究却严重滞后。

嵌入式系统设计开发的方法、技术、过程以及工具与通用计算机系统的开发设计有很大的不同。由于市场对嵌入式系统开发人员的大量需求,自 2005 年以来,许多院校开始设置嵌入式专业。随着嵌入式系统功能越来越复杂,目前对嵌入式软件开发人员的需求远远大于对硬件系统开发人员的需求,嵌入式软件已成为实现嵌入式系统功能的核心部分,是嵌入式系统设计创新和增值的关键因素。

随着嵌入式软件技术的快速发展,为了适应教学和科研的需求,编者根据多年的教学和科研工作经验,编写了《嵌入式软件技术》一书。将嵌入式系统软件的设计方法与应用开发相结合,全书由两大部分组成,共分为 8 章。其中,第 1 章、第 2 章和第 3 章主要介绍了嵌入式软件设计的相关知识,包括嵌入式系统基础知识、嵌入式系统软件的分析与设计方法、嵌入式系统软件的测试方法。第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章和第 8 章结合嵌入式操作系统 VxWorks,深入而系统地讨论了在 VxWorks 操作系统下进行嵌入式软件开发的核心内容,对开发工具使用与开发环境建立、任务与任务间通信机制、中断/信号与定时机制、I/O 子系统、网络通信编程等内容进行了详细的介绍,并结合编者在科研实践过程中的一些案例,介绍了基于 VxWorks 操作系统嵌入式软件的开发方法和实用编程技巧。

本书的第 1 章、第 2 章和第 3 章由刘厂编写,第 4 章和第 7 章由邢向明编写,第 5 章、第 6 章和第 8 章由刘利强编写。哈尔滨工程大学周卫东教授为本书主审,他提出了许多宝贵的意见和建议。哈尔滨工程大学自动化学院 407 教研室的秦金彪、贾瑞才、任海娇、张红伟等研究生为本书做了校对工作。本书在编写过程中还得到了哈尔滨工程大学郝燕玲教授、袁赣南教授的大力支持。在此对各位老师和同学表示感谢。本书的一些内容引用并参考了相关文献及网友的文

章,在此一并表示衷心感谢!

在编写过程中,我们力求精益求精,但由于时间仓促、水平有限,加之嵌入式技术更新很快,书中难免有错误和疏漏之处,敬请广大读者提出批评指正。在使用过程中,如有任何意见或发现问题,请发信至 liuliqiang@hrbeu.edu.cn。

编 者

2009 年 1 月

目 录

第1章 嵌入式系统基础知识	1
1.1 嵌入式系统概述	1
1.2 嵌入式处理器	10
1.3 嵌入式操作系统	12
第2章 嵌入式系统软件分析与设计	19
2.1 嵌入式软件需求分析	19
2.2 嵌入式软件设计	25
2.3 嵌入式软件可靠性设计	34
第3章 嵌入式软件测试	41
3.1 软件测试基础	41
3.2 嵌入式软件的基本测试策略	45
3.3 嵌入式软件测试环境及测试工具的使用	47
3.4 程序实例	52
第4章 VxWorks 系统及其开发工具	67
4.1 VxWorks 系统简介	67
4.2 Tornado 工具及其使用方法	68
4.3 开发环境的建立	80
第5章 任务与任务间通信	89
5.1 VxWorks 任务	89
5.2 任务间通信机制	97
第6章 中断、信号与定时机制	133
6.1 中断服务	133
6.2 信号	136
6.3 时钟	146
6.4 定时	151
第7章 I/O 系统	173
7.1 I/O 系统概述	173
7.2 I/O 操作	174
7.3 I/O 复用	179
7.4 I/O 系统的内部结构及使用	188
第8章 网络通信	194
8.1 TCP/IP 协议栈	194
8.2 VxWorks 网络基础	199
8.3 Socket 编程接口	202
8.4 VxWorks 网络编程	219
参考文献	245



第1章 嵌入式系统基础知识

随着信息技术和网络技术的迅速发展,20世纪末计算机技术已经进入了后PC机时代,以计算机技术、芯片技术、硬件电路设计和软件技术为核心的嵌入式系统(Embedded System, ES)作为最热门的计算机系统之一,已经广泛应用到科学研究、工程设计、航空航天、舰船设备、家用电器、办公设备、交通工具等众多领域。可以说,在现代生活中,嵌入式系统无处不在。

本章主要介绍嵌入式系统的基础知识,首先是嵌入式系统概述,包括嵌入式系统的定义、组成、发展历程、分类、特点、应用领域等,然后简单介绍一下硬件基础,最后介绍一下常用的嵌入式操作系统。通过本章的学习,可以帮助读者了解嵌入式系统的概况。

1.1 嵌入式系统概述

1.1.1 嵌入式系统的定义

经过三十多年的发展,嵌入式系统作为计算机领域的一个重要组成部分,已经发展壮大成为目前数量最多、使用范围最广的电子信息系统。嵌入式系统完整的英文表达是 Embedded Computer System,人们习惯把嵌入式系统的英文简化翻译为 Embedded System。关于嵌入式系统的定义有如下几个版本。

国际电气和电子工程师协会(IEEE)对嵌入式系统的定义为“用于控制、监视或者辅助操作机器、设备和工厂的装置(Device Used to Control, Monitor or Assist Operation of Equipment, Machinery or Plants)”。

一些专家从计算机的分类给出了嵌入式系统定义:计算机分为两大类,即通用计算机和嵌入式计算机,嵌入式计算机也称为嵌入式系统,因此嵌入式系统也被定义为非通用计算机系统。

目前被国内普遍认同的定义为嵌入式系统是以应用为中心,以计算机技术为基础,软硬件可裁减,满足应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等严格要求的专用计算机系统。该定义说明嵌入式系统首先是一个计算机系统,和通用计算机不同的是其功能是特定的,根据具体应用,嵌入式系统对可靠性、成本、体积、功耗等方面有严格的要求。

嵌入式系统已经成为人们生活中必不可少的组成部分,从随处可见的洗衣机、电视机、电冰箱等家用电器到复杂的航天飞船控制系统,从民用领域到军工科技,从基础的农业生产到高新科技产业,无不属于嵌入式系统的应用领域。

嵌入式系统的种类和数量已经远远超出了通用的计算机系统。即使一台通用的计算机,也包括多个嵌入式系统。例如键盘、鼠标、网卡、硬盘、光驱、打印机、扫描仪等都是由嵌入式系统控制的。正是由于嵌入式系统的应用十分广泛,嵌入式产品有着巨大的市场空间,世界上许多大大小小的公司都在分享这块蛋糕。和通用计算机行业不同的是,嵌入式行业



的需求十分多样,即使在体系结构上存在着主流,但各不相同的应用领域决定了没有哪一个大公司能够垄断嵌入式系统的全部市场。另外,嵌入式系统是面向用户、面向应用的,如果独立于应用自行发展,则会失去市场。因此,大多数嵌入式系统的开发者不仅是计算机专业的人才,还是各个行业的技术人员。嵌入式系统领域的产品和技术是高度分散的,留给开发者的创新余地很大,学习和从事嵌入式系统相关领域的设计和开发的人员必将大有作为。

1.1.2 嵌入式系统的发展历程

虽然嵌入式系统是最近几年才开始真正风靡世界,但嵌入式这个概念很早就已经存在了。20世纪60年代,以晶体管、磁芯存储器为基础的计算机已经开始应用于航空、航天、工业控制、通信等领域,可以看作是嵌入式系统的雏形。这个时期计算机一词并不普遍,还没有出现操作系统的概念,对每一个应用都需要提供整个计算机的完整设计。嵌入式系统的概念是在20世纪70年代出现的,当时大部分软件都是由汇编语言完成的,而且只能用于某一种固定的微处理器;大部分嵌入式系统还没有使用操作系统,它们通常是为了实现某个控制功能,仅使用一个简单的循环控制来处理外界的控制请求。但是当系统越来越复杂,没有操作系统就成为嵌入式系统的一个不可容忍的缺点。C语言的出现使操作系统的开发变得更为简单,直接影响了近几十年计算机的发展,对开发嵌入式系统来说,在效率和速度上都提高了许多。从20世纪80年代开始,嵌入式操作系统进入快速发展的时期,出现了各种各样的嵌入式操作系统,这些操作系统大都是为专用系统开发的,从而形成了现在商用嵌入式系统百家争鸣的局面。20世纪90年代末开始,随着网络的广泛应用,嵌入式系统能够使用网络已经成为其基本要求,以网络化和Internet为标志的嵌入式系统将代表嵌入式系统的未来。纵观嵌入式系统的发展过程,其出现至今已经有40多年的历史,大致分为以下几个阶段。

1. 萌芽阶段

该阶段大致在20世纪70年代以前,该时期的嵌入式系统是以基于单片机的可编程控制器形式出现的,具有监测、伺服、设备指示等功能。这类系统大多应用在专业性很强的工业控制和武器系统当中。该类嵌入式系统一般没有操作系统,只能通过汇编语言对系统进行直接控制。这一时期系统的主要特点是系统结构和功能相对简单、单一,处理效率较低,存储容量较小,没有或者只有很少的用户接口。由于这种嵌入式系统使用简单、价格低,以前在国内外工业领域应用非常广泛,现在虽然在一些低成本、简单的嵌入式领域依然使用,但已经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和工业控制等领域的需求。

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,出现了把微处理器、I/O接口、RAM、ROM等部件集成在一起的微控制器,并一举成为嵌入式系统领域中异军突起的新秀。与此同时,出现了一些简单的嵌入式操作系统。嵌入式微处理器和嵌入式操作系统的出现,大大缩短了嵌入式系统的开发周期,提高了开发效率。这一阶段是嵌入式应用开始普及的阶段,主要特点是嵌入式操作系统开始出现并进入迅速发展阶段,内核精巧、效率高,虽然比较简单,但是已经具有一定的兼容性和扩展性。出现了大量可靠性高、低功耗的嵌入式微处理器。应用软件较专业化,用户界面不够友好。

3. 实时操作系统阶段

20世纪80年代末到20世纪90年代后期,在巨大需求的牵引下,嵌入式系统应用开始普及并进入了高速发展的时期。随着硬件实时性要求的提高,嵌入式系统的软件规模不断



扩大,逐渐形成了实时多任务操作系统,并开始成为嵌入式系统的主流。该阶段的主要特点是嵌入式操作系统内核小、效率高,具有高度的模块化和可扩展性,实时性得到很大的改善,可以运行在各种不同类型的微处理器上;具备文件管理、设备管理、多任务、网络支持、图形用户界面等功能;可以提供大量的应用程序接口和集成开发环境,大大简化了应用软件的开发难度。

4. 网络化阶段

20 世纪 90 年代末开始,以网络化和 Internet 为标志的嵌入式系统开始出现,嵌入式系统的发展进入网络化阶段。信息时代和数字时代的到来,为嵌入式系统的发展带来了巨大的机遇,同时也对嵌入式系统厂商提出了巨大的挑战。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、航空航天、舰船设备等技术结合的日益紧密,嵌入式设备与 Internet 的结合必将代表着嵌入式技术的真正未来。

综上所述,嵌入式系统技术正在日益完善,嵌入式操作系统已经从简单走向成熟,与网络、Internet 的结合日益紧密,嵌入式系统的应用将日益广泛。

1.1.3 嵌入式系统的发展趋势

以信息家电为代表的互联网时代嵌入式产品,不仅为嵌入式市场展现了美好前景,注入了新的生命,同时也对嵌入式系统技术,特别是软件技术提出了新的挑战。这主要包括支持日趋增长的功能密度、灵活的网络连接、轻便的移动应用和多媒体的信息处理,此外,还需对付更加激烈的市场竞争。

1. 嵌入式应用软件的开发需要强大的开发工具和操作系统的支持

随着因特网技术的成熟、带宽的提高,ICP 和 ASP 在网上提供的信息内容日趋丰富、应用项目多种多样,像手机、固定电话及电冰箱、微波炉等嵌入式电子设备的功能不再单一,电气结构也更为复杂。为了满足应用功能的升级,设计师们一方面采用更强大的嵌入式处理器(如 32 位、64 位 RISC 芯片)或信号处理器 DSP 增强处理能力,同时还采用实时多任务编程技术和交叉开发工具技术来控制功能复杂性,简化应用程序设计、保障软件质量和缩短开发周期。

目前,国外商品化的嵌入式实时操作系统已进入我国市场的有 Wind River, Microsoft, Qnx 和 Nuclear 等产品。我国自主开发的嵌入式系统软件产品如科银(CoreTek)公司的嵌入式软件开发平台 Delta System,它不仅包括 Delta Core 嵌入式实时操作系统,而且还包括 Lamda Tools 交叉开发工具套件、测试工具、应用组件等。此外,中科院也推出了 Hopen 嵌入式操作系统。

2. 联网成为必然趋势

为适应嵌入式分布处理结构和应用上网需求,面向 21 世纪的嵌入式系统要求配备标准的一种或多种网络通信接口。针对外部联网要求,嵌入式设备必须配有通信接口,相应需要 TCP/IP 协议簇软件支持;由于家用电器相互关联(如防盗报警、灯光能源控制、影视设备和信息终端交换信息)及实验现场仪器的协调工作等要求,新一代嵌入式设备还需具备 IEEE1394, USB, CAN, Bluetooth 或 IrDA 通信接口,同时也需要提供相应的通信组网协议软件和物理层驱动软件。为了支持应用软件的特定编程模式,如 Web 或无线 Web 编程模式,还需要相应的浏览器,如 HTML, WML 等。



3. 支持小型电子设备实现小尺寸、低功耗和低成本

为满足这种特性,要求嵌入式产品设计者相应降低处理器的性能,限制内存容量和复用接口芯片。这就相应提高了对嵌入式软件设计技术要求。如选用最佳的编程模型和不断改进算法,采用 Java 编程模式,优化编译器性能。因此,既要软件人员有丰富经验,又需要发展先进嵌入式软件技术,如 Java、Web 和 WAP 等。

4. 提供精巧的多媒体人机界面

嵌入式设备之所以为亿万用户接受,一个重要因素是它们与使用者之间的亲和力,自然的人机交互界面。人们与信息终端交互要求以 GUI 屏幕为中心的多媒体界面,手写文字输入、语音拨号上网、收发电子邮件以及彩色图形、图像已取得初步成效。目前一些先进的 PDA 在显示屏幕上已实现汉字写入、短消息语音发布,但离掌式语言同声翻译还有很大距离。随着多媒体技术的发展,视频、音频信息的处理水平越来越高,为嵌入式系统的多媒体化创造了良好的条件,嵌入式系统的多媒体化将变成现实。

5. Java 虚拟机与嵌入式 Java

开发嵌入式系统希望有一个方便的、跨平台的语言与工具,Java 正是用 Java 虚拟机实现 Java 程序独立于各机种的平台。经过努力,一个支持嵌入式系统开发的、足够小、足够快、又有足够确定性的嵌入式 Java 程序包已经出现,Java 虚拟机与嵌入式 Java 将成为开发嵌入式系统的有力工具。

1.1.4 嵌入式系统的组成

与普通的计算机系统一样,嵌入式系统也是由硬件和软件两大部分组成的。硬件主要是由嵌入式核心芯片、存储器系统以及外围的接口电路组成,是整个系统的物理基础,主要提供软件运行平台和通信接口;软件主要包括嵌入式操作系统和应用软件两大部分,主要用来实际控制系统的运行。嵌入式操作系统主要负责向上提供应用程序编程接口,向下屏蔽具体的硬件特性、合理调度系统硬件资源,但并不是所有的嵌入式系统都具有操作系统。应用软件则利用操作系统提供的应用程序编程接口实现系统特定的功能。在没有操作系统的嵌入式系统中,系统的软件要直接面向系统硬件进行应用程序的开发。图 1.1 完整地描述了嵌入式系统的软硬件各部分的组成结构。

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 1.1 下半部分所示,是以嵌入式处理器为中心,由存储器、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,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,其余的电路都可根据需要和成本进行裁剪、定制,非常经济、可靠。

嵌入式系统的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,常外接 DSP 和 DSP 协处理器(也可内部集成),以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及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系统级芯片(System on Chip, 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,要尽可能地满足系统功能接口的 SoC 芯片。这些 SoC 集成了大量的外围 USB、UART、以太网、AD/DA、IIS 等功能模块。

可编程片上系统 SOPC(System on Programmable Chip)结合了 SoC、PLD 和 FPGA 各自的技术优点,使得系统具有可编程的功能,是可编程逻辑器件在嵌入式应用中的完美体现,极

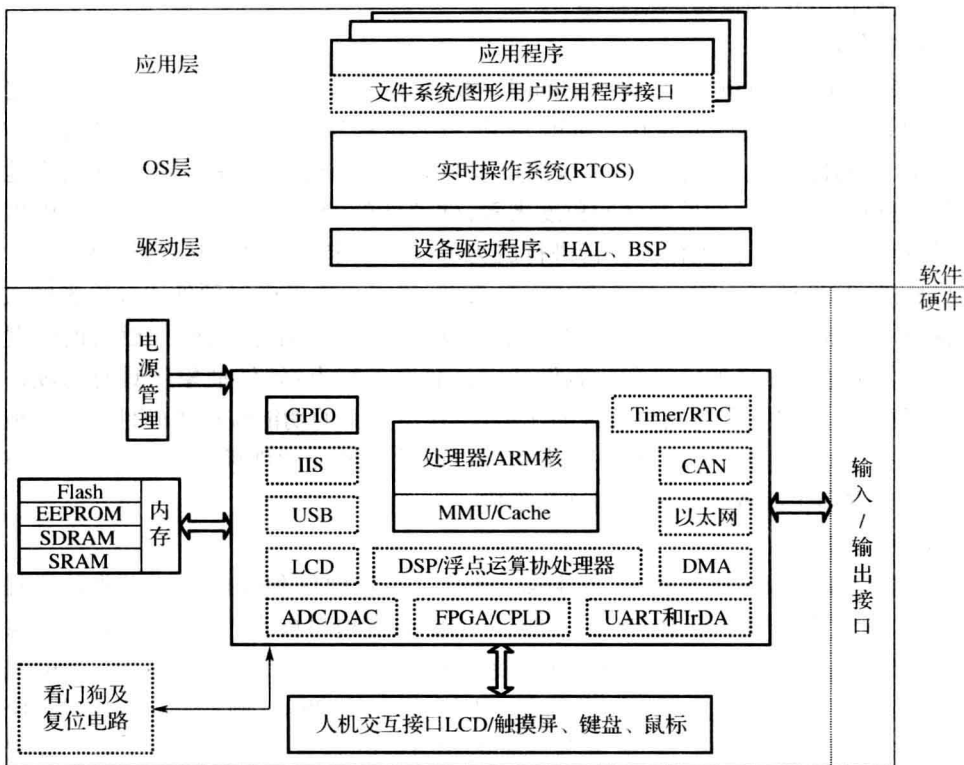


图 1.1 典型的嵌入式系统组成

大地提高了系统的在线升级、换代能力。

以 SoC/SOPC 为核心,用最少的外围部件和连接部件构成一个应用系统,满足系统的功能需求,这也是嵌入式系统发展的一个方向。

因此,现代嵌入式设计是以处理器/SoC/SOPC 为核心来完成系统设计的,其外围接口包括存储设备、通信扩展设备、扩展设备接口和辅助的机电设备(电源、连接器、传感器等)。

2. 嵌入式系统软件的层次结构

在设计一个简单的应用程序时,可以不使用操作系统,但在设计较复杂的程序时,可能就需要一个操作系统(OS)来管理和控制内存、多任务、周边资源等。依据操作系统所提供的程序界面来编写应用程序,可大大减少应用程序员的负担。对于使用操作系统的嵌入式系统来说,嵌入式系统软件结构一般包含设备驱动层和实时操作系统 RTOS、应用程序接口 API 层和实际应用程序层。有些书籍将应用程序接口 API 归属于 OS 层,如图 1.1 上半部分所示的嵌入式系统的软件结构是按三层划分的。由于硬件电路的可裁剪性和嵌入式系统本身的特点,其软件部分也是可裁剪的。

对于功能简单,仅包括应用程序的嵌入式系统,一般不使用操作系统,仅有应用程序和设备驱动程序。现代高性能嵌入式系统的应用越来越广泛,操作系统的使用成为必然发展趋势。本小节主要讲述的是具有操作系统的嵌入式软件层次。

驱动层程序是嵌入式系统中不可缺少的重要部分,使用任何的外部设备都需要有相应的驱动层程序的支持,它为上层软件提供了设备的操作接口。上层软件不会理会设备的具体内部操作,只需调用驱动层程序提供的接口即可。驱动层程序一般包含硬件抽象层



HAL、板级支持包 BSP 和设备驱动程序。

(1) 硬件抽象层

硬件抽象层 HAL (Hardware Abstraction Layer) 是位于操作系统内核与硬件电路之间的接口层,其目的在于将硬件抽象化。也就是说,可通过程序来控制所有硬件电路,如 CPU, I/O, Memory 等的操作。这样就使得系统的设备驱动程序与硬件设备无关,从而大大地提高了系统的可移植性。从软硬件测试的角度来看,软硬件的测试工作都可分别基于硬件抽象层来完成,使得软硬件测试工作的并行进行成为可能。在定义抽象层时,需要规定统一的软硬件接口标准,其设计工作需要基于系统需求来做,代码工作可由对硬件比较熟悉的人员来完成。抽象层一般应包含相关硬件的初始化、数据的输入/输出操作、硬件设备的配置操作等功能。硬件抽象层接口的定义和代码设计应具有以下特点:硬件抽象层具有与硬件的密切相关性;硬件抽象层具有与操作系统的无关性;接口定义的功能应包含硬件与系统所需硬件支持的所有功能;接口定义简单明了,太多接口函数会增加软件模拟的复杂性;具有可测性的接口设计有利于系统的软硬件测试和集成。

(2) 板级支持包

板级支持包 BSP (Board Support Package) 是介于主板硬件和操作系统中驱动层程序之间的一层,一般认为它属于操作系统的一部分,主要是实现对操作系统的支持,为上层的驱动程序提供访问硬件设备寄存器的函数包,使之能够更好地运行于硬件主板。BSP 是相对于操作系统而言的,不同的操作系统对应于不同定义的 BSP。例如, VxWorks 的 BSP 和 Linux 的 BSP 相对于某一 CPU 来说,尽管实现的功能可以完全一样,但写法和接口定义却完全不同,因此, BSP 一定要按照该系统的 BSP 的定义形式来写 (BSP 的编程过程大多数是在某一个成型的 BSP 模板上进行修改),才能与上层 OS 保持正确的接口,良好地支持上层 OS。板级支持包实现的功能大体有以下两个方面。

①系统启动时,完成对硬件的初始化。例如,对系统内存、寄存器以及设备的中断进行设置。这是比较系统化的工作,它要根据嵌入式开发所选的 CPU 类型、硬件以及嵌入式操作系统的初始化等多方面决定 BSP 应实现什么功能。

②为驱动程序提供访问硬件的手段。驱动程序经常要访问设备的寄存器,对设备的寄存器进行操作。如果整个系统为统一编址,则开发人员可直接在驱动程序中用 C 语言的函数访问设备寄存器。但是,如果系统为单独编址,则 C 语言就不能直接访问设备中的寄存器,只有汇编语言编写的函数才能进行对外围设备寄存器的访问。BSP 就是为上层的驱动程序提供访问硬件设备寄存器的函数包。

与通用计算机系统不同的是,嵌入式系统通常不具有自开发能力,需要交叉开发工具。嵌入式系统的硬件和软件位于嵌入式系统产品本身,而开发工具则独立于嵌入式系统产品之外。开发工具一般由编译器、连接器、调试器等组成。嵌入式系统的开发语言使用最多的是 C 语言,目前出现了嵌入式 C++ 语言,除此之外,Java 和汇编语言也经常使用。

1.1.5 嵌入式系统的分类

根据不同的分类标准,嵌入式系统有不同的分类方法。比较常用的有以下几种分类方式。

1. 按应用类别划分

嵌入式系统是以应用为中心的计算机系统,其功能应用是特定的。考虑到日常活动中



所涉及的特定领域情况,嵌入式系统可以简单地分为信息家电、通信、汽车电子、航空航天、移动设备、军用电子、工业控制、环境监控等类型。

2. 按嵌入方式划分

根据嵌入方式可分为整机式嵌入、部件式嵌入和芯片式嵌入三种类型。整机嵌入是将一个带有接口的计算机系统嵌入到另一个系统中,使其成为这个系统的核心部分。这种计算机功能完整性比较强,用来完成系统中的关键工作,且有完善的人机界面和外部设备。部件式嵌入是将嵌入系统以部件的方式嵌入到设备中,用以实现某一功能。这种方式使计算机与其他硬件耦合得更加紧密。芯片式嵌入是将一个具有完整计算功能的芯片嵌入到设备中,这种芯片具有存储器和完整的输入/输出接口,能实现专门的功能。

3. 按嵌入式软件类型划分

根据嵌入式软件类型可分为单线程程序嵌入式系统和事件驱动程序嵌入式系统。前者没有主控程序,程序比较简单,执行效率高,但是一旦出现故障,系统无法自动控制和恢复,安全性较差。后者含中断驱动系统和多任务系统两种方式,往往有嵌入式操作系统的参与。

4. 按系统的实时性划分

实时系统必须在规定的时间范围内正确地响应外部物理过程的变化。嵌入式系统基本可以看成是一个实时系统,按照系统对实时性要求的程度,可以分为硬实时系统和软实时系统两类。硬实时系统对系统的响应时间有十分苛刻的约束,如果在规定的时间内系统响应不能满足,则将带来灾难性的后果。软实时系统对系统的响应时间也有约束,但一般如果在规定的响应时间范围内不能满足,只是造成局部功能失效,不会出现灾难性后果。

5. 按系统的复杂程度和实现方式划分

根据嵌入式系统应用的复杂程度,可以将嵌入式系统分为以下三类。

(1) 单个微处理器

这类系统一般由单片嵌入式处理器组成,嵌入式处理器上集成了存储器、I/O 设备、接口设备(如 A/D 转换器)等,再加上电源、时钟等简单元件就可以工作了。比较常见的应用有温度传感器、烟雾和气体探测器以及断路器等。

(2) 可扩展嵌入式系统

这类嵌入式系统除使用处理器芯片上集成的器件外,还需要增加一些简单的扩展芯片,如扩展存储器和外部接口。处理器芯片集成的存储器容量一般在 64 KB 左右,基于处理器扩展少量的存储器和外部接口即可构成嵌入式系统。这种系统的功能和性能较强,处理器字宽一般是 8 位或者 16 位。它们主要用于过程控制、信号放大器、位置传感器等设备。

(3) 复杂嵌入式系统

复杂嵌入式系统一般面向大规模应用,所使用的嵌入式处理器的字宽一般是 16 位或者 32 位。虽然外设接口一般仍集成在微处理器上,但由于软件规模较大,扩展存储器一般在 1 MB 以上。这类系统常见于开关控制、控制器、电梯、数据采集系统、医药监视系统、移动设备等。除了作为独立系统外,也可能是一个大系统的局部部件。

1.1.6 嵌入式系统的特点

与通用计算机系统能够完成多任务不同,嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的,如果独立于应用自行发展,则会失去市场。在实际应用中,一些嵌入式系统可能需要具有实时性、安全性和可用性;另一些系统可能淡化这些性能要求,更着重于可靠性和可配置



性;还有一些系统对性能要求不高,但对功耗和成本限制严格。总体来看,相对于通用计算机系统,嵌入式系统具有以下几个特点。

1. 嵌入式系统是面向特定应用的

嵌入式系统与通用计算机系统的本质区别就是嵌入式系统是面向具体应用的,因而它的功能也是特定的。嵌入式系统一般都用在特定的场合,这就要求嵌入式处理器也都是面向具体应用而定制的,它通常具有功耗低、体积小、集成度高等特点,能够把通用处理器中许多板卡完成的任务集成在芯片内部,从而有利于嵌入式系统设计趋于小型化,提高可靠性,移动能力大大增强。

2. 嵌入式系统大都精简紧凑,关注成本

对于大多数嵌入式系统而言,由于其资源比较有限,因此成本的计算也就比较“斤斤计较”。嵌入式系统通常需要注意的成本是系统成本,特别是消费类数字化电子产品,由于其数量很大,所以其成本是产品竞争的关键要素之一。

3. 嵌入式系统通常有实时性的要求

高实时性的操作系统软件是嵌入式软件的基本要求,而且软件要求固态存储,以提高系统的运行速度。在多任务嵌入式系统中,对重要性各不相同的任务进行统筹兼顾的合理调度是保证每个任务及时执行的关键,单纯通过提高处理器速度是无法完成和没有效率的,因此系统软件的高实时性是基本要求。当然,系统的实时性是相对的,对于不同的嵌入式系统,针对不同的应用,实时性的要求也是不一样的,无论时限要求如何,系统的设计者必须考虑如何在规定的时间内作出反应。

4. 嵌入式系统对软硬件可靠性要求较高

嵌入式系统应用在各个行业,其工作环境复杂多样,一个小小的失误可能会造成整个系统灾难性的后果。因此嵌入式系统一般要求具有出错处理和自动复位的能力,特别是在一些极端环境下工作的嵌入式系统而言,其可靠性设计尤为重要。在大多数嵌入式系统中一般都包含一些硬件和软件机制来保证系统的可靠性。另外,嵌入式系统的软件大都采用固态化存储,软件的修改比较麻烦,如果产品出厂后发现软件有问题,很难采用通用计算机中流行的软件升级或者补丁来弥补。

5. 嵌入式系统行业是不可垄断的

从某种意义上来讲,通用计算机行业的技术是垄断的。占整个通用计算机行业 90% 的 PC 机产业,80% 采用 Intel 公司的 x86 体系结构,芯片基本上出自几家大型公司。在几乎每台计算机必备的操作系统和办公软件方面,Microsoft 公司的 Windows 和 Office 占 80% 到 90%。因此,当代的通用计算机工业是当之无愧的垄断行业。而嵌入式系统则不同,它是一个分散的工业,充满了竞争、机遇和创新,没有哪一个系列的微处理器和操作系统能够垄断全部市场。即使在体系结构上存在着主流,但是各不相同的应用领域决定了不可能有少数公司、少数产品垄断全部市场。

6. 嵌入式系统需要专门的开发环境和开发工具

由于嵌入式系统本身资源有限,不具备自主开发能力,因此即使产品发布以后,用户通常也不能对其中的程序功能进行修改,必须有一套开发工具和环境才能进行开发。开发过程主要是由通用计算机上的软硬件设备模拟开发,并通过调试工具仿真调试,最终在目标设备上运行。用于程序开发的通用计算机称为主机,程序最终运行的目标设备称为目标机。



1.1.7 嵌入式系统的应用

嵌入式系统技术具有非常广阔的应用前景,其应用领域可以包括以下几个方面。

1. 工业控制

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应用中,网络化是提高生产效率和产品质量、减少人力资源的主要途径,是工业嵌入式系统的发展趋势。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。

2. 交通管理

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、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使用。目前 GPS 设备已经从尖端产品进入了普通百姓的家庭,只需要几千元,就可以随时随地找到你的位置。

3. 信息家电

这将成为嵌入式系统最大的应用领域,冰箱、空调等的网络化、智能化将引领人们的生活步入一个崭新的空间。即使你不在家里,也可以通过电话线、网络进行远程控制。在这些设备中,嵌入式系统将大有用武之地。

4. 家庭智能管理系统

水、电、煤气表的远程自动抄表,安全防火、防盗系统,其中嵌有的专用控制芯片将代替传统的人工检查,并实现更高、更准确和更安全的性能。目前在服务领域,如远程点菜器等已经体现了嵌入式系统的优势。

5. POS 网络及电子商务

公共交通无接触智能卡(Contactless Smart Card, CSC)发行系统,公共电话卡发行系统,自动售货机,各种智能 ATM 终端将全面走入人们的生活,到时手持一卡就可以行遍天下。

6. 环境工程与自然

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。

7. 机器人

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地应用。

以上这些应用着重于在控制方面的应用。就远程家电控制而言,除了开发出支持 TCP/IP 的嵌入式系统之外,家电产品控制协议也需要制订和统一,这需要家电生产厂家来做。同样的道理,所有基于网络的远程控制器件都需要与嵌入式系统之间实现接口,然后再由嵌入式系统来控制并通过网络实现控制。所以,开发和探讨嵌入式系统有着十分重要的意义。



1.2 嵌入式处理器

1.2.1 嵌入式处理器的特点

嵌入式处理器是嵌入式系统硬件的核心部件。嵌入式处理器与通用处理器最大的不同在于,嵌入式处理器大多工作在为特定应用所专门设计的系统中,它将通用处理器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。嵌入式处理器的种类非常多,无论哪种嵌入式处理器,归纳起来,一般具有以下几个特点。

(1)对实时操作系统具有很强的支持能力。

(2)能够实现多任务,并且具有较短的中断响应时间。

(3)具有功能很强的存储区保护功能。这是由于嵌入式软件结构已经模块化,为了避免在软件模块之间出现错误的交叉作用,需要设计强大的存储区保护功能,同时有利于软件诊断。

(4)可扩展的结构,能最迅速地开发出满足应用的最高性能的嵌入式处理器。

(5)低功耗。尤其对于使用在便携式无线设备、移动通信设备等功耗要求很低的设备中的嵌入式系统。

1.2.2 嵌入式处理器的分类

嵌入式处理器可以分成嵌入式微处理器(Embedded Micro-processor Unit, EMPU),嵌入式微控制器(Microcontroller Unit, MCU),嵌入式DSP处理器(Embedded Digital Signal Processor, EDSP),嵌入式片上系统(System On Chip, SoC)。

1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器的基础是通用计算机中的CPU。在实际嵌入式应用中,将微处理器装配在专门设计的电路板上,只保留和嵌入式应用紧密相关的功能硬件,去除其他的冗余功能部分,这样就以最低的功耗和资源实现嵌入式应用的特殊要求。和工业控制计算机相比,嵌入式微处理器具有体积小、质量轻、成本低、可靠性高的优点,但是在电路板上必须包括ROM、RAM、总线接口、各种外设等器件,从而降低了系统的可靠性,技术保密性也较差。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。如STD-BUS、PC104等。近年来,德国、日本的一些公司又开发出了类似“火柴盒”式名片大小的嵌入式计算机系列OEM产品。嵌入式处理器目前主要有Am186/88,386EX,SC-400,Power PC,68000,MIPS,ARM系列等。

2. 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器的典型代表是单片机,从20世纪70年代末单片机出现到今天,虽然已经经过了20多年的历史,但这种8位的电子器件目前在嵌入式设备中仍然有着极其广泛的应用。单片机芯片内部集成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 RAM、EEPROM等各种必要功能和外设。为适应不同的应用需求,一般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



都是一样的,不同的是存储器和外设的配置及封装。这样可以使单片机最大限度地和应用需求相匹配,功能不多不少,从而减少功耗和成本。和嵌入式微处理器相比,微控制器的最大特点是单片化,体积大大减小,从而使功耗和成本下降、可靠性提高。微控制器是目前嵌入式系统工业的主流。微控制器的片上外设资源一般比较丰富,适合于控制,因此称微控制器。

嵌入式微控制器目前的品种和数量最多,比较有代表性的通用系列包括 8051, P51XA, MCS-251, MCS-96/196/296, C166/167, MC68HC05/11/12/16, 68300 等。另外还有许多半通用系列,如支持 USB 接口的 MCU 8XC930/931, C540, C541; 支持 I2C, CAN-Bus, LCD 及众多专用的 MCU 和兼容系列。目前 MCU 占嵌入式系统约 70% 的市场份额。特别值得注意的是近年来提供 X86 微处理器的著名厂商 AMD 公司,将 Am186CC/CH/CU 等嵌入式处理器称之为 Microcontroller, Motorola 公司把以 Power PC 为基础的 PPC505 和 PPC555 亦列入单片机行列。TI 公司亦将其 TMS320C2XXX 系列 DSP 作为 MCU 进行推广。

3. DSP 处理器

DSP 处理器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的执行速度。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。

DSP 的理论算法在 20 世纪 70 年代就已经出现,但是由于专门的 DSP 处理器还未出现,所以这种理论算法只能通过 MPU 等由分立元件实现。MPU 较低的处理速度无法满足 DSP 的算法要求,其应用领域仅仅局限于一些尖端的高科技领域。随着大规模集成电路技术发展,1982 年世界上诞生了首枚 DSP 芯片。其运算速度比 MPU 快了几十倍,在语音合成和编码解码器中得到了广泛应用。至 20 世纪 80 年代中期,随着 CMOS 技术的进步与发展,第二代基于 CMOS 工艺的 DSP 芯片应运而生,其存储容量和运算速度都得到成倍提高,成为语音处理、图像硬件处理技术的基础。到 20 世纪 80 年代后期,DSP 的运算速度进一步提高,应用领域也从上述范围扩大到了通信和计算机方面。20 世纪 90 年代后,DSP 发展到了第五代产品,集成度更高,使用范围也更加广阔。

DSP 处理器对系统结构和指令进行了特殊设计,使其适合于执行 DSP 算法。DSP 应用正从通用单片机中以普通指令实现 DSP 功能,过渡到采用嵌入式 DSP 处理器。嵌入式 DSP 处理器有两个发展来源,一是 DSP 处理器经过单片化、EMC 改造、增加片上外设成为嵌入式 DSP 处理器,TI 的 TMS320C2000/C5000 等属于此范畴;二是在通用单片机或 SoC 中增加 DSP 协处理器,例如 Intel 的 MCS-296 和 Siemens 的 TriCore。推动嵌入式 DSP 处理器发展的另一个因素是嵌入式系统的智能化,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 接入、实时语音解压系统,虚拟现实显示等。这类智能化算法一般都是运算量较大,特别是向量运算、指针线性寻址等较多,而这些正是 DSP 处理器的长处所在。

比较有代表性的嵌入式 DSP 处理器是 Texas Instruments 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。另外 Philips 公司也推出了基于可重构嵌入式 DSP 结构,用低成本、低功耗技术制造的 R. E. A. L DSP 处理器,特点是具备双 Harvard 结构和双乘/累加单元,应用目标是大批量消费类产品。