



“双一流”建设学科配套教材

嵌入式系统协同设计

Qianrushi Xitong
Xietong Sheji

苏曙光 编著



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



“双一流”建设学科配套教材

嵌入式系统协同设计

苏曙光 编 著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内容简介

本书全面介绍嵌入式系统协同设计的概念、硬件结构与设计、软件结构与设计、设备互联技术等内容,涵盖嵌入式系统的原理、设计、实现和应用等知识。全书内容分5部分,第一部分即第1章,介绍嵌入式系统的概念、协同设计的思想。第二部分即第2章至第5章,介绍嵌入式系统的硬件结构与设计,包括处理器、存储体系、接口和总线、电路设计等。第三部分即第6章和第7章,介绍嵌入式系统的操作系统、软件结构,以及开发与调试工具。第四部分即第8章,介绍嵌入式设备之间的互联技术。第五部分即第9章,通过典型案例介绍嵌入式系统的协同设计和实现过程。本书适合计算机应用、软件工程、电子工程、电气工程等专业高年级本科生或研究生作为“嵌入式系统原理与设计”“嵌入式系统协同设计”等课程的教材,也适合作为嵌入式技术从业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统协同设计/苏曙光编著. —武汉:华中科技大学出版社,2022.6
ISBN 978-7-5680-8179-5

I. ①嵌… II. ①苏… 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(2022)第 088469 号

嵌入式系统协同设计

苏曙光 编著

Qianrushu Xitong Xietong Sheji

策划编辑:谢燕群

责任编辑:谢燕群

封面设计:原色设计

责任校对:陈元玉

责任监印:周治超

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:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:17.75

字 数:458千字

版 次:2022年6月第1版第1次印刷

定 价:45.00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

嵌入式技术是一门涉及计算机、微电子、通信和电子材料等相关信息的综合技术,其应用范围极其广泛,涵盖航空航天电子、武器自动化、工业自动控制、智能仪器仪表、智能测控系统、网络设备、通信设备、医疗电子和消费娱乐电子等领域。可以毫不夸张地说,从生产到生活,从军用到民用,只要涉及“电”的机电设备,都或多或少地应用了某种嵌入式技术。嵌入式系统及其相关技术是目前信息技术中发展最快、最有活力、最有挑战性和最有创新力的领域之一,也一直吸引着众多大学生、研究人员、工程技术人员从事相关的理论研究和应用开发。因此,牢固掌握嵌入式系统的概念、原理、设计和应用技术是对每一位立志在该领域成就未来的大学生和研发人员的基本要求。

嵌入式系统是软件和硬件协同工作的系统,因此在嵌入式系统的设计过程中也同样充满了软件和硬件、前台和后台协同设计的思维。同样的功能,既可以由软件实现,也可以由硬件实现;既可以由前台实现,也可以由后台实现。协同设计既是技术问题,也是哲学问题。本书通过全面介绍嵌入式系统的硬件和软件的典型结构、技术特点,并通过大量案例,向读者系统介绍了协同设计时必须掌握的知识和技能。

本书具有以下三特点。

第一,语言通俗易懂,内容深入浅出,行文脉络清晰,特别适合课堂教学和研发人员参考。

第二,内容全面,覆盖嵌入式系统的硬件、软件、调试、设备网络互联等内容。本书不局限于特定的操作系统或 CPU,也不局限于特定的开发板,因此能更好地符合课堂大面积教学的特点,满足系统开发人员的需求。

第三,概念、理论和实践三者的比例适当,适合课堂教学和自学。嵌入式系统这门课程是一门跨学科的综合课程,其概念和理论繁杂,事实上还存在大量“生造且不规范”的名词术语,这些很容易挫伤初学者的兴趣。为了便于读者学习,本书在介绍概念和理论的同时充分结合实践和实例来介绍其应用,以帮助读者理解。

教学相长。编写本书的过程也是我重新学习嵌入式系统的过程。嵌入式系统的体系庞大,内容繁杂。每一个章节或模块倘若展开,都是值得深入研究的专题。书中的不少内容,本人以前也仅理解其基本概念和原理,并未做过深入研究或分析过源代码,可以说知之甚浅。在编写本书的过程中,我认真地探究其内部原理和分析相关的源代码,虽是管中窥豹,但也能再次感受到嵌入式系统的设计之美。

我乐意与读者朋友和选用本书的教师们交流学习心得和教学经验,也乐意为大家提供教辅资料或实验资料供参考。受限于本人的理论知识储备、项目实践经验、成书时间短,书中定会有不少疏漏和错误,请读者朋友们不吝赐教指正,我会虚心接受并更正。本人的联系邮箱:sushuguang@hust.edu.cn。

本人参考了大量已正式发表或出版的文献以及非正式出版的网络资源,由于篇幅所限和其他原因,书末仅列出了部分参考资料,无法一一注明全部参考资料的来源和作者的具体姓名,无论何种情况,在此一并向各位作者表示感谢!

苏曙光

2022年2月于华中科技大学

目 录

第 1 章 嵌入式系统概述	(1)
1.1 计算机的分类	(1)
1.2 嵌入式系统的概念	(1)
1.3 嵌入式系统的特点	(2)
1.4 嵌入式系统的应用	(3)
1.5 协同设计思维和方法	(5)
1.6 嵌入式系统的结构	(6)
1.7 嵌入式系统的嵌入形式	(10)
1.8 嵌入式系统的发展方向	(11)
习题	(12)
第 2 章 嵌入式处理器	(13)
2.1 嵌入式处理器概念	(13)
2.2 嵌入式处理器分类	(16)
2.3 嵌入式处理器选型	(19)
2.4 ARM 处理器	(23)
2.5 DSP 处理器	(32)
习题	(37)
第 3 章 嵌入式存储器	(38)
3.1 存储器概念	(38)
3.2 RAM 和 ROM	(41)
3.3 Flash 存储器	(43)
3.4 典型的 DRAM 芯片及其应用	(45)
3.5 典型的 SRAM 芯片及其应用	(49)
3.6 典型 NAND Flash 芯片及其应用	(51)
3.7 典型 NOR Flash 芯片及其应用	(55)
习题	(56)
第 4 章 接口和总线	(58)
4.1 接口	(58)
4.2 总线概述	(60)
4.3 SPI 总线	(61)
4.4 RS232C 总线及 RS485 总线	(64)
4.5 USB 总线	(66)
4.6 I ² C 总线	(71)
4.7 其他常用总线	(74)

4.8	LED	(75)
4.9	数码管	(75)
4.10	继电器	(77)
4.11	红外对射管	(78)
4.12	LCD 显示屏	(80)
4.13	编码器	(86)
4.14	ADC 和 DAC	(87)
4.15	WatchDog	(91)
4.16	压力传感器	(92)
4.17	气压传感器	(95)
	习题	(96)
第 5 章	嵌入式硬件设计及其方法	(97)
5.1	硬件设计概述	(97)
5.2	电路原理图设计	(99)
5.3	PCB 设计	(101)
5.4	CPLD/FPGA 芯片设计	(106)
5.5	典型电路设计工具	(111)
5.6	典型单元电路设计	(116)
	习题	(121)
第 6 章	嵌入式操作系统	(122)
6.1	嵌入式操作系统的概念	(122)
6.2	嵌入式操作系统的实时性	(124)
6.3	嵌入式 Linux	(130)
6.4	$\mu\text{C}/\text{OS}$	(137)
6.5	RT-Thread	(142)
6.6	其他典型嵌入式操作系统	(146)
	习题	(151)
第 7 章	嵌入式软件开发	(152)
7.1	交叉编译环境	(152)
7.2	嵌入式软件开发过程	(157)
7.3	嵌入式 Linux 软件开发	(161)
7.4	Linux 内核配置	(164)
7.5	BSP 开发	(169)
7.6	驱动开发	(170)
7.7	Linux 中断技术	(177)
7.8	BootLoader 开发	(182)
7.9	文件系统	(185)
7.10	图形用户界面 GUI	(194)
7.11	典型软件开发环境	(197)
7.12	嵌入式软件的调试和仿真	(206)

习题	(212)
第 8 章 嵌入式网络与互联	(213)
8.1 嵌入式设备的网络化	(213)
8.2 TCP/IP 网络	(213)
8.5 无线网络操作系统 Contiki	(223)
8.6 无线通信	(228)
8.7 无线传感器网络	(238)
8.8 Zigbee 无线网络	(241)
8.9 移动网络	(243)
习题	(251)
第 9 章 项目实例分析	(253)
9.1 LED 设备驱动开发	(253)
9.2 单片机温度控制系统	(255)
9.3 多路视频服务器	(259)
9.4 基于压力传感器的体重测量系统	(264)
9.5 基于超声波技术的身高测量系统	(266)
9.6 基于霍尔元件的自行车计速系统	(268)
9.7 电池供电管理单元	(269)
参考文献	(273)

第1章 嵌入式系统概述



本章介绍嵌入式系统定义、特点、应用领域、协同设计思想、硬件结构、软件体系、嵌入式形式和发展方向。重点掌握嵌入式系统的定义、特点和硬软件结构。

1.1 计算机的分类

计算机是指能够分析和执行指令/程序的电子设备,这类电子设备装有 CPU,能够完成用户预先指定的任务(用程序表达的任务)。随着电子技术的迅猛发展,计算机(俗称电脑)已经在生活中广泛应用。家庭娱乐或上网需要使用计算机,办公室处理文档和管理财务数据需要使用计算机,企业各类数据服务器也都需要使用计算机。这些计算机都是通用意义上的计算机,它们的外形、功能、结构及使用方法大同小异。本书所要介绍的“计算机”却不是这些普通的计算机,而是一类特殊的计算机。在讲述这类特殊计算机的概念和特点之前,先来讨论计算机的分类。

从应用目的、工作原理和组成结构等方面来考察,计算机可以分为图 1-1 所示的类型。使用普遍的微型机(包括 PC 机、便携式计算机及大多数 Web 服务器、数据库服务器)以及在科研院所或大型企业中使用的小型机、大型机、巨型机等都属于通用计算机类别。和通用计算机对应的类别是专用计算机,也即所谓的嵌入式计算机,更多时候也叫嵌入式系统。

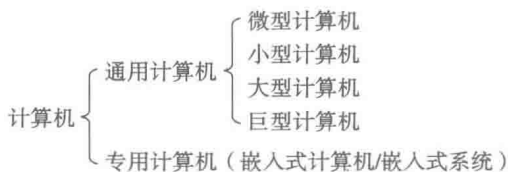


图 1-1 计算机的分类

1.2 嵌入式系统的概念

嵌入式计算机的真正发展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,推出了第一款微处理器 Intel 4004,其后各厂家陆续推出了 8 位、16 位微处理器,包括 Intel 的 8080、8085、8086, Motorola 的 6800、68000,以及 Zilog 的 Z80、Z8000 等。以这些微处理器为核心构成的系统广泛地应用于仪器仪表、医疗设备、机器人、家用电器等领域。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 产品,由用户根据自己的需要选择适合的 CPU 板、存储器板及各式 I/O 插件板,从而构成专用的嵌入式计算机系统,并将其嵌入自己的目标系统中。

嵌入式计算机比通用计算机使用得更加广泛,电视机、冰箱、洗衣机、微波炉等家用电器都是这一类“计算机”,因为它们内部都具有某种 CPU,能够接收用户的指令,完成用户指定的任务。在家用电器领域,嵌入式计算机更多的是侧重于对它们进行智能控制或自动控制。在工业控制领域,嵌入式计算机是医疗仪器、消费电子、网络通信、机器人等的内部组成部分。在航空航天等领域,嵌入式计算机更是应用广泛。工厂的产品传送系统、流水线控制系统,医院的彩色 B 超仪、核磁共振 MRI,通信领域的路由器、智能手机,工业现场的机器人、智能机械手,战场上的自动火炮、导弹、反导系统、GPS 定位仪等都是嵌入式计算机的应用。显然,这些“计算机”的功能、外形和使用方式完全不同,它们是专用的。

20 世纪 80 年代,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计算机应用中所需要的微处理器、I/O 接口、中断、定时器、A/D 转换器、D/A 转换器、串行接口,以及 RAM、ROM 等部件的全部或大部分集成到一个芯片中,制造出面向 I/O 设计的微控制器,即俗称的单片机。单片机成为嵌入式计算机中异军突起的一支新秀。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,嵌入式系统进一步快速发展。

嵌入式系统被定义为以应用为中心,以计算机技术为基础,软件、硬件可裁剪,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。嵌入式计算机在应用范围上和数量上都远远超过各种通用计算机。另外,通用计算机的有些外部设备本身也是嵌入式计算机,如打印机、扫描仪、交换机等,它们都是由嵌入式处理器控制的智能设备。嵌入式系统具有面向用户、面向产品、面向应用的特性。如果脱离特定的实际应用场景,嵌入式系统的计算功能和控制功能就毫无价值。嵌入式处理器的功耗、体积、成本、可靠性、速度、处理能力、电磁兼容性等方面均受到特定应用需求的制约,也是各个半导体厂商之间竞相优化和差异化的因素。与通用计算机不同,设计嵌入式系统的硬件和软件必须考虑其高效性,要量体裁衣,去除冗余,力争以尽可能廉价的成本和较小的体积/面积实现最佳的性能。

嵌入式系统通常作为智能处理模块被嵌入目标系统中以满足目标系统的智能控制和自动控制的需求,目标系统可能是空调、微波炉等简单的小家电,也可能是工业设备、生产线、机器人、环境监测等复杂的机电系统或测控系统。这也是嵌入式系统“嵌入”一词的由来。由于应用系统的差别,嵌入的形式可能很简单,也可能很复杂。

通用计算机系统往往追求高速和海量的数据处理,追求系统具有较高的通用性和普适性,嵌入式计算机系统主要要满足特定的目标系统智能化控制,通过把 CPU 嵌入目标系统内部实现智能化和自动化,这个过程一般需要借助电子、材料、人工智能等学科支持。

1.3 嵌入式系统的特点

嵌入式系统的硬件和软件必须根据具体的应用任务,以功耗、成本、体积、可靠性、处理能力等为指标来进行选择和优化。嵌入式系统的核心是系统软件和应用软件,由于存储空间有限,因而要求软件代码紧凑、可靠,且对实时性有严格要求。

从构成上看,嵌入式系统是集软硬件于一体的、可独立工作的计算机系统;从外观上看,嵌入式系统像是一个“可编程”的电子“器件”;从功能上看,它是对目标系统(宿主对象)进行控制,使其智能化的控制器。从用户和开发人员的角度看,与普通计算机相比较,嵌入式系统具有如下特点。

(1) 专用性强。由于嵌入式系统是面向某个特定应用开发的,所以嵌入式系统的硬件和软件,尤其是软件,都是为特定用户群设计的,通常具有某种专用性。

(2) 体积小。嵌入式计算机把通用计算机系统中许多由板卡完成的任务集成在芯片内部,从而有利于实现小型化,方便将嵌入式系统嵌入目标系统中。

(3) 实时性好。嵌入式系统应用于工业生产过程控制、军用智能武器、数据采集、传输通信等场合时,主要用来对宿主对象进行控制,所以对嵌入式系统有或多或少的实时性要求。例如,军用智能武器,工业控制系统等对实时性要求就极高。而民用领域的流媒体系统或通信系统对实时性要求就相对低一些。但总体来说,实时性是嵌入式系统的普遍要求,是设计者和用户应重点考虑的一个指标。

(4) 可裁剪性好。嵌入式系统的硬件和软件可根据应用的需求和约束来选择不同的架构、接口、芯片、器件、操作系统、软件组件等,或者对它们加以优化和调整,以便满足用户对功能、功耗、供电方式、应用方式、体积、重量等各方面的要求和约束。

(5) 可靠性高。由于有些嵌入式系统所承担的计算任务涉及被控产品的关键功能、人身安全,一旦嵌入式系统运行失败可能导致重大损失,甚至是安全事故,因此要求嵌入式系统必须工作可靠,具有较强的抗干扰能力和故障恢复能力。此外,有些嵌入式系统的宿主对象工作在无人值守的场合(如在危险性高的工业环境和恶劣的野外环境中工作的监控装置),与普通系统相比较,这些嵌入式系统也要求具有极高的可靠性。

(6) 功耗低。对于移动式或便携式的嵌入式系统,如智能手机、数码相机、便携式仪器仪表等,这些设备往往采用电池供电,设备的待机时长对用户体验影响很大,因此低功耗一直是很多嵌入式系统追求的目标。

(7) 嵌入式系统本身不具备自我开发能力,必须借助通用计算机平台来开发。嵌入式系统设计完成以后,普通用户通常没有办法对其中的程序或硬件结构进行修改,只有开发人员采用专门的开发工具才能对其进行维护和升级。

(8) 嵌入式系统通常采用“软硬件协同设计”的方法实现。在系统目标要求的指导下,通过综合分析系统软硬件功能及现有资源,协同设计软硬件体系结构,以最大限度地挖掘系统软硬件能力,避免由于独立设计软硬件体系结构而带来的种种弊病,得到高性能、低代价的优化设计方案。

1.4 嵌入式系统的应用

嵌入式系统的应用十分广泛,涉及工业控制、汽车电子、智能家居、智能交通、移动电子商务、仪器仪表、智慧环保、机器人、航空航天等多个领域。随着电子技术和计算机软件技术的发展,不仅在各个领域中的应用越来越深入,而且在其他传统的非信息领域中也逐渐显现出巨大的应用潜力。

1. 工业控制

工业控制是嵌入式应用的典型领域。工业控制包括过程控制、现场管理、设备控制、环境控制、人员管理、物料控制等。工业控制中往往大量采用传感器和执行机构以支持实时检测和控制。基于嵌入式技术的工业自动化获得了长足的发展,目前已经有大量的8位、16位、32位嵌入式控制系统在应用中。智能工业控制是提高生产效率、产品质量、减少人力和物理消耗的

主要途径,在生产流水线控制、数字机床、电网设备监测与安全管理等传统工业领域都有大量嵌入式产品存在。

2. 汽车电子

汽车上安装有大量的嵌入式产品,典型的有中控系统、燃油喷射系统、点火系统、安全气囊控制、多功能仪表控制系统、ABS系统(防抱死制动系统)、辅助驾驶系统、雷达泊车系统、电池管理系统、胎压检车系统、车辆定位导航系统等。汽车上集成有大量的传感器、执行器以及数十个大大小小的处理器,是嵌入式技术应用密集的综合产品。

3. 智能家居与信息家电

智能家居是以住宅为平台,利用嵌入式系统将综合布线技术、网络通信技术、安全防范技术、自动控制技术、音视频技术将与家居生活有关的设施集成,构建高效的住宅、家电、家具、设施与家务管理系统,提升家居安全性、便利性、舒适性、艺术性,并实现环保节能的居住环境。

信息家电是智能家居的重要部分,冰箱、空调、微波炉、电动窗帘等传统家电的网络化、智能化将引领人们的生活步入一个崭新的空间。即使不在家,也可以通过手机或网络对家电进行远程控制。在这些设备中,嵌入式系统为核心技术。智能家居系统还包括水表、电表、煤气表的远程自动抄表系统,基于烟雾传感器的防火报警系统,基于红外和视频的防盗系统。

4. 智能交通

智能交通是将信息技术、计算机技术、数据通信技术、传感器技术、电子控制技术、自动控制理论、运筹学、人工智能等相关技术综合运用于交通运输、服务控制和车辆制造,加强车辆、道路、使用者三者之间的联系,从而形成一种保障安全、提高效率、改善环境、节约能源的综合运输系统。智能交通的应用范围包括机场、车站客流疏导系统,城市交通智能调度系统,高速公路智能调度系统,运营车辆调度管理系统,交通违章自动监控系统,机动车自动控制系统等。智能交通系统通过人、车、路的和谐、密切配合提高交通运输效率,缓解交通阻塞,提高路网通过能力,减少交通事故,降低能源消耗,减轻环境污染。

5. 移动电子商务

移动电子商务利用手机、PDA、手持终端等无线终端进行的B2B、B2C或C2C的电子商务。它将因特网、移动通信技术、短距离通信技术及其他计算机信息处理技术结合,使用户可以在任何时间、任何地点进行各种商贸活动,实现随时随地、线上线下的购物与交易、在线支付以及各种交易活动、商务活动、金融活动和相关的综合服务活动等。移动电子商务是在无线传输技术高度发达的情况下产生的,比如4G/5G技术、WIFI技术、蓝牙技术、RFID技术等。安全灵活的移动支付系统、便捷高效的物流管理系统、无接触智能卡(Contactless Smart Card, CSC)发行系统、自动售货机等智能ATM终端已全面走进人们的生活,极大地提高了电子商务的效率和安全性。

6. 智慧环保

智慧环保借助物联网技术,把感应器和执行器嵌入环境监控对象中,通过无线网络或有线网络获得环境的实时数据,并通过集中计算或结合边缘计算分析环境状态,对环境实现更加精细和动态的管理和决策。例如,在很多环境恶劣、地况复杂的地区进行水文资料实时监测、水土质量监测、堤坝安全与地震监测、实时气象信息和空气污染监测时,嵌入式系统将帮助实现智能监测和远程监测。

7. 机器人

机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度的机器装置,它能自动执行工作,是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器。越来越多的工业机器人走进了工厂,很多企业出现了“机器换人”的场景。工业机器人可以接受人类指挥,也可以按照预先编排的程序运行。机器人技术是一种融合了机械、电子、计算机技术、传感技术、控制理论和人工智能等众多学科于一体的先进技术。机器人作为信息技术和先进制造业发展水平的典型代表,正在成为世界各国竞相发展的技术。嵌入式技术的发展将使机器人在微型化、高智能方面的优势更加明显,使其在工业领域和服务领域获得了广泛的应用。

1.5 协同设计思维和方法

狭义的协同设计主要是指以 FPGA(Field-Programmable Gate Array)等可编程器件为基础设计数字电路或片上系统(System on Chip, SOC)的开发方法,同一功能既可以选择在 FPGA 中实现也可以选择软件方法实现。作为一种可编程器件,FPGA 既解决了专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit,ASIC)的不足,又克服了原有可编程器件门电路数有限的缺点。FPGA 集成了触发器、查找表 LUT 和布线等大量的原始逻辑资源,并提供了可配置的 I/O 口及硬 IP(例如 Block RAM、PLL、通用接口等),支持工程师采用硬件描述语言(Hardware Description Language, HDL)进行编码,以实现特定的功能。譬如图像处理中像素插值算法,FPGA 可以采用硬件流水线的方式来实现。采用硬件流水线代替 CPU,不仅降低了系统的复杂程度,还提高了系统吞吐量和处理速度,简化了系统设计,降低了系统技术难度。面向 FPGA 的软硬件协同设计采用软硬件结合的方式,设计最优的软硬件接口,通常以有限状态机或数据处理流水线的方式实现部分软件流程的功能,提高了系统的性能,提高了系统的可靠性,降低了系统的复杂程度及技术实现难度,提高了产品的可靠性。此外,还可通过专用测试点或 JTAG 边界扫描测试提高系统的可测试性,缩短产品的开发周期。

广义上的软硬件协同设计是指设计嵌入式系统的硬件和软件过程中通过综合分析系统需求和现有软硬件资源,协同设计软硬件体系结构,最大限度地挖掘硬件和软件的能力,合理分配硬件和软件的功能,避免由于独立设计硬件和软件子系统而带来的种种弊端,得到高性价比的设计方案。本书讨论的协同设计主要指广义上的协同设计。软硬件协同设计是使软件设计和硬件设计作为一个有机的整体进行并行设计,实现软硬件的最佳结合,从而使系统获得高效的工作能力。软硬件协同设计的基本思路如图 1-2 所示。

软硬件协同设计最主要的优点是在设计过程中,硬件和软件设计是相互作用的,这种相互作用体现在设计过程的各个阶段和各个层次,设计过程充分实现了软硬件的协同性。在软硬件功能分配时就考虑了现有软硬件的资源,在软硬件功能设计和仿真评价过程中,软件和硬件是互相支持的。这就使得软硬件功能模块能够在设计开发的早期互相结合,从而及早发现和解决系统设计的问题,避免了在设计开发后期反复修改所带来的一系列问题,有利于充分挖掘系统潜能、缩小体积、降低成本、提高整体效能。

硬件一般能够提供更好的性能,而软件更容易开发和修改,成本相对较低。由于硬件模块的可配置性或可编程性(尤其是 FPGA),以及某些软件功能的硬件化、固件化,因此一些功能既能用软件实现,又能用硬件实现,软硬件的界限已经不十分明显。此外在进行软件和硬件功能划分时,既要考虑市场可以提供的资源状况,又要考虑系统成本、开发时间等诸多因素。因

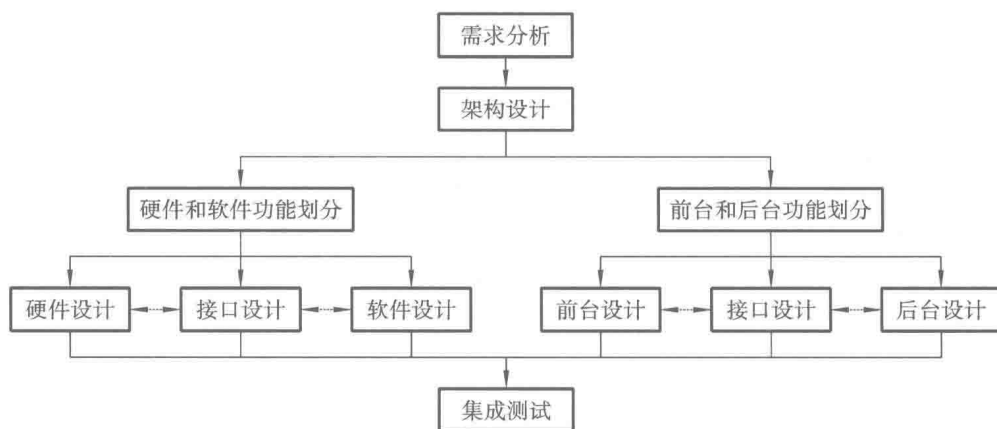


图 1-2 软硬件协同设计的基本思路

此,软硬件的功能划分是一个复杂而艰苦的过程,是整个任务流程最重要的环节。适合硬件实现的功能特点是计算密集,逻辑简单,一般属于周期性的操作或基本的 I/O 操作。而适合软件实现的功能特点是控制复杂,逻辑灵活多变,业务复杂。

硬件设计和软件设计是根据软硬件任务划分的结果,分别设计和选择硬件模块和软件模块以及其接口的具体实现方法。这一过程要确定系统将采用哪些硬件模块(如 MCU、DSP、FPGA、存储器、I/O 接口部件等)、软件模块(如操作系统、驱动程序、功能模块等)和软硬件模块之间的通信方法(如总线、共享存储器、数据通道等)以及这些模块的具体实现方法。

同一功能采用软件或硬件(专用硬件和可配置硬件)实现,它们在速度、费用和灵活性上面的优点和缺点如表 1-2 所示。

表 1-2 同一功能采用硬件或软件实现优缺点比较

	专用硬件	可配置硬件	软件
速度	最快	快	慢
费用	高	最高	低
灵活性	低	高	最高

有些嵌入式系统在工作过程中需要有 PC 机的支持(即半嵌入式形式,详见 1.8 节),对于这种嵌入式系统,系统的功能同时由 PC 机和嵌入式设备两个部分承担。因此,嵌入式系统的功能划分也可以按前端和后端来划分,同一功能可以由前端实现,也可以由后端实现。前端是指嵌入式设备,后端是指 PC 机或服务器。适合前端实现的功能主要有数据采集或执行目标设备的控制。适合后端实现的功能主要有数据分析、储存、可视化、复杂人机交互等。后端显然主要采用软件来实现,而前端则是硬件和软件(Firmware,固件)的结合,其中依然包括进一步的硬件和软件协同设计。

1.6 嵌入式系统的结构

嵌入式系统在宏观上由硬件部分和软件部分两层构成,如图 1-3 所示,硬件部分包括嵌入式处理器和外围硬件,软件部分包括嵌入式操作系统(可选)和用户应用软件。

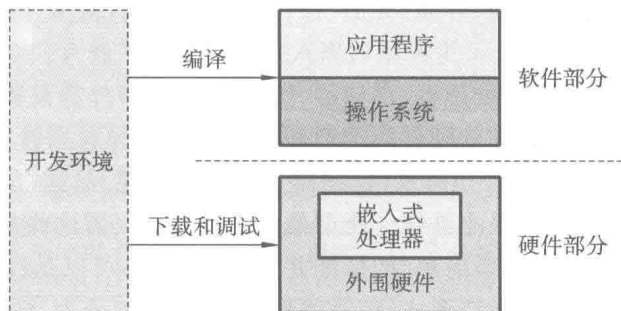


图 1-3 嵌入式系统构成

嵌入式系统一般嵌入在被控目标系统中。目标系统的功能、外观、机电结构可能各不相同,但是对于嵌入式系统来说,目标系统可以被理解为一系列的传感器和驱动器(也叫执行器),由嵌入式系统对传感器进行测量和对驱动器进行控制。

1.6.1 嵌入式系统的硬件结构

图 1-4 所示的是一个非接触式 IC 卡读/写装置,其基本功能包括:识别 IC 卡、读取卡中已存储的数据,写入和修改特定的数据。该系统通过扩展可以用于各种智能门禁系统,如楼宇门禁系统、停车场收费系统、校园一卡通系统等。

非接触式 IC 卡读写装置的 CPU 型号是 SST89C52,它是整个系统的核心部分;存储器部分采用的是 Flash 芯片,型号是 AT4503C,容量为 4 MB,用来存储 IC 卡的刷卡记录;IC 卡处理模块采用飞利浦 5100 芯片,其功能是感应近距离的 IC 卡并与其建立通信;串口通信模块主要用来和 PC 主机通信;电源模块为整个系统的正常工作提供电源;复位模块的功能是当系统死机或需要重启时通过复位按钮让整个系统重新开始运行。

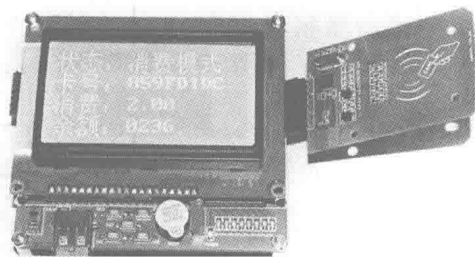


图 1-4 非接触式 IC 卡读/写装置

图 1-5 所示的是一个四通道视频服务器,基本功能和特点有:1~4 路模拟信号转网络信号,支持接入主流品牌的 BNC 接口摄像头,能显示 4 个独立通道画面,支持高清编码,编码分辨率高达 1080P,实时流畅;支持 H.265X 编码,兼容 H264;支持手机监控,只需输入设备序列号就可以实现手机监控;支持音视频对讲,实现视频会议功能;支持 RTSP 协议。

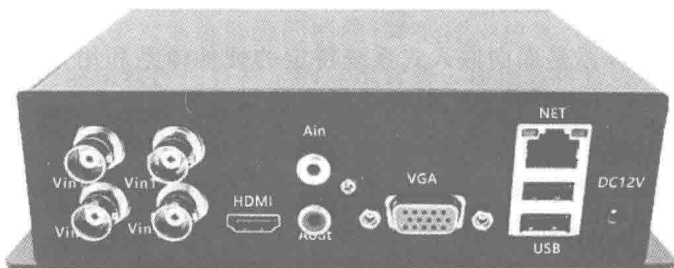


图 1-5 四通道视频服务器

尽管各种嵌入式系统的功能、外观、界面、操作等各不相同,甚至千差万别,但是基本的硬件结构却是大同小异。图 1-6 所示为典型的嵌入式硬件结构。嵌入式系统的硬件部分与通用计算机系统没有本质区别,也由处理器、存储器、I/O 接口、各种外部设备等组成。嵌入式系统应用上的特点致使嵌入式系统在软硬件的选型和实现形式上与通用计算机系统有较大区别。嵌入式系统硬件主要由以下五部分构成:处理器、存储器、电源/晶振/复位、I/O 接口、外部设备。其中前三者合起来又称为最小系统。所谓最小系统是指仅需这些基本硬件就可以下载和运行一个最简单的程序。当然“最简单”的标准并无定性标准,可以是仅对某个寄存器进行操作的程序。外部设备可以根据接口形式、信号类型、工作特点细分为:标准总线外设、简单 I/O 外设、特定总线外设、功率外设、模拟设备。标准总线外设是指外设的接口满足某种标准总线要求,譬如 RS232 串口外设、USB 外设、PCI 卡,都是满足相应标准总线的外设。简单 I/O 外设是能直接通过处理器的 I/O 引脚驱动的外设,譬如 LED 灯、蜂鸣器、开关等。特定总线外设是指没有采用标准总线的外设,该类型外设采用的接口是设备供应商自定义的。功率外设是指容性外设或感性外设,有时也指需要大电流驱动的外设,譬如电机、继电器。模拟设备是指信号形式是模拟信号的设备,这类设备需要使用 A/D 转换或 D/A 转换才能连接系统。

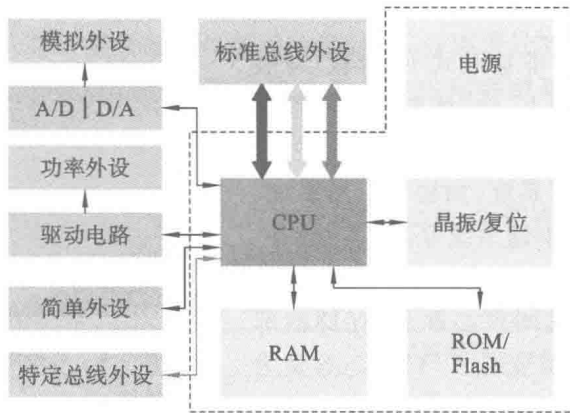


图 1-6 嵌入式系统的硬件结构

为满足嵌入式系统在功能、存储限制、速度、体积、功耗上的要求通常不使用磁盘这类具有大容量且速度较慢的存储介质,而多使用 SDRAM、SRAM 或闪存(Flash Memory)作为存储设备。在嵌入式系统中,A/D 或 D/A 模块主要用于数据采集和测控方面,这类外设 in 通用计算机中用得很少。

1.6.2 嵌入式系统的软件体系

嵌入式系统的软件体系是面向嵌入式系统特定的硬件体系和用户要求而设计的,是嵌入式系统的重要组成部分,是实现嵌入式系统功能的关键。嵌入式系统软件体系和通用计算机软件体系类似,分成驱动层、操作系统层、中间件层和应用层等四层。图 1-7 显示了嵌入式系统的软件结构。需要注意的是,并不是所有的嵌入式系统都具备上述四层软件,也不是每层的全部功能模块都要支持,应用可以根据需要对软件体系进行裁剪和精简。

1. 驱动层

驱动层是直接和硬件打交道的一层,它为操作系统和应用提供硬件驱动或底层核心支

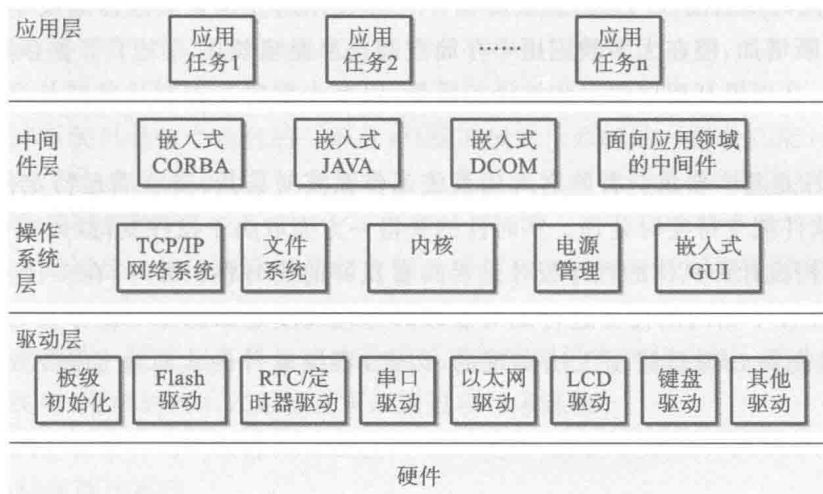


图 1-7 嵌入式软件结构

持。在嵌入式系统中,驱动程序有时也称为板级支持包(BSP)。BSP具有在嵌入式系统上电后初始化系统的基本硬件环境的功能。基本硬件往往包括微处理器、存储器、中断控制器、DMA、定时器等。驱动层一般有三种类型的程序:板级初始化程序、标准驱动程序和应用驱动程序。

2. 操作系统层

嵌入式系统中的操作系统具有一般操作系统的核心功能,负责嵌入式系统的全部软硬件资源的分配、调度工作,控制、协调并发活动。此外,嵌入式系统的操作系统它也具有嵌入式的特点,属于嵌入式操作系统(Embedded Operating System, EOS)。主流的嵌入式操作系统有Linux、VxWorks、ucOS、RT-Thread、HarmonyOS、Android、iOS、QNX、LynxOS等。有了嵌入式操作系统的支持,应用程序的编写就变得更简单和高效。

3. 中间件层

中间件是用于支持应用软件开发组件和库,通常包括数据库、网络协议、图形支持及一些具有特殊功能的库。例如,MySQL、TCP/IP、GUI等都属于这一类软件。

4. 应用层

嵌入式应用软件是针对特定应用实现用户预期功能的软件。譬如车载定位导航软件、IC卡门禁软件都是属于应用软件,用于支持用户完成特定的功能。嵌入式应用软件和普通应用软件有一定的区别,它不仅在准确性、安全性和稳定性等方面要求能够满足实际应用的需要,还要尽可能地进行优化以减少对系统资源的消耗,降低硬件成本。嵌入式系统中应用软件是差异化最大的部分,每种应用软件均有特定的应用背景。应用软件业务性较强,与行业关系密切,因此嵌入式应用软件不像操作系统和中间件那样容易受制于国外产品,是我国嵌入式软件的优势领域。

嵌入式软件与普通计算机软件相比具有如下一些特点。

(1) 软件要求固态存储。为了提高执行速度和系统可靠性,嵌入式系统中的软件一般都固化在存储芯片中,也有可能固化在处理器芯片的片内存储空间中,而不是像PC一样存储于磁盘等载体中。

(2) 软件代码质量高和可靠性高。尽管半导体技术的发展使处理器速度不断提高,片上存储器容量不断增加,但在大多数应用中存储空间仍然是宝贵的。为了节省存储空间和满足实时性的要求,必须提高程序编写和编译的质量,以减少程序二进制代码的长度,并提高执行效率。

(3) 实时性是基本要求。有些嵌入式系统工作在实时场景,需要满足特定任务的实时要求,这就要求软件能支持实时处理。实时性的获得一方面取决于硬件支持,另一方面也在于嵌入式软件的架构设计和具体的程序设计是否具有好的实时性。另外,在多任务的嵌入式系统中,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。这是单纯通过提高处理器速度无法实现的,因此,系统软件的实时性是嵌入式系统的基本要求。

1.7 嵌入式系统的嵌入形式

嵌入式系统是通过把 CPU 嵌入目标系统或被控系统中起作用的。在不同的嵌入式系统中,嵌入的形式和程度是各不相同的。根据嵌入式系统和通用计算机连接关系的密切程度,嵌入的形式可以分为全嵌入方式、半嵌入方式和非嵌入方式。通用计算机系统即采用非嵌入方式,这种方式主要侧重于软件开发,其开发技术和环境已经十分成熟,此处略去不作讨论。

1. 全嵌入方式

如果采用全嵌入方式,则嵌入式系统(或其核心功能)可以不依赖于通用计算机系统,即可单独工作,典型实例有手机、MP4、车载 GPS 导航系统等。采用全嵌入方式的嵌入式系统有如下特点。

(1) 具有独立的处理器系统,且具有完整的输入/输出系统,能独立完成系统的功能。

(2) 具有较高端的 CPU 且支持嵌入式操作系统,支持开发功能复杂的应用程序。

(3) 一般为便携式、手持式设备,其工作环境一般是无人值守、移动空间、高空或其他条件恶劣的环境。

(4) 交互方式简单。多数时候该类型的设备与用户的交互方式相对比较简单。

(5) 供电方式一般采用电池供电,有些情况下也可以直接采用市电 220 V 供电,由系统自行设计转换和稳压电路。较高端的设备往往会把两种供电方式结合起来,让用户使用起来更加灵活。

(6) 全嵌入方式适合任何不宜采用通用计算机的场合,如消费电子、家用电器、通信网络设备、工业控制、智能仪器、战场电子、航天航空武器等,其应用范围十分广泛。

(7) 生产成本相对较低。

2. 半嵌入方式

如果采用半嵌入方式,则嵌入式系统(或其核心功能)需要和通用计算机系统结合起来才能正常工作,典型实例有医用 B 超系统、基于 PCI 卡的数据采集系统等。采用半嵌入方式的嵌入式系统有如下特点。