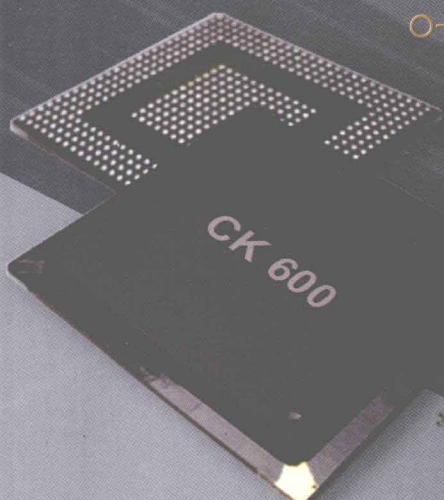


A black microcontroller chip with a gold-colored pin grid array (PGA) is shown at an angle. The text "CK 600" is printed in white on the chip's surface. The background is a dark, textured surface with faint, repeating geometric patterns.

潘赞 等 编著

CK-CPU

嵌入式系统。
开发教程



科学出版社

CK-CPU 嵌入式系统开发教程

潘 贇 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了基于国产自主知识产权 CK-CPU 处理器的嵌入式系统开发的各个方面。全书分三部分:①嵌入式系统概述、CK-CPU 体系结构、CK-CPU 指令系统、汇编语言和 C 语言编程等;②以 CK-CPU 为内核的 CK5A6 微控制器的硬件结构,包括引脚功能、地址空间、工作模式和外围接口,介绍了 CK5A6EVB 开发板的配置与使用;③介绍 Bootloader 的使用, Linux 2.6 与 eCos 嵌入式操作系统的移植和使用, CK-CPU 的软件集成开发环境。

本书配有电子课件、实验指导手册与程序源代码等电子资源。

本书可作为高等院校电子信息类、计算机类、自动控制类和机械电子类专业高年级本科生及研究生嵌入式系统课程的教材,也可供从事嵌入式系统设计的研发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

CK-CPU 嵌入式系统开发教程/潘赞等编著. —北京:科学出版社,2011.9
ISBN 978-7-03-032097-1

I. ①C… II. ①潘… III. ①微型计算机—系统开发—高等学校—教材 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 167071 号

责任编辑:巴建芬 刘鹏飞 雷 旻/责任校对:何艳萍
责任印制:张克忠/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 9 月第一次印刷 印张:25 3/4

印数:1—3 000 字数:640 000

定价:52.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

嵌入式系统已广泛应用于国民经济的方方面面,尤其在消费类电子、通信、工业控制、交通、医疗等领域应用甚广。目前,基于 ARM、MIPS 等国外 CPU 的嵌入式系统开发占据了市场主导地位,而我国自主研发的嵌入式 CPU 市场生态环境才刚刚起步。尤其在 32 位高端嵌入式 CPU 领域,国产嵌入式 CPU 正面临着国际上占据先发优势的厂商的不对称竞争。作为体现国家核心竞争力的高端嵌入式 CPU 技术,更需要自主创新。拥有自主知识产权的高端嵌入式 CPU,对促进我国自主知识产权系统芯片 SoC(system on chip)的设计与产业化具有重要战略意义,对进一步提高我国电子产品的核心竞争力、推进我国信息产业的发展具有深远的影响。

杭州中天微系统有限公司开发的 32 位高端嵌入式 C-SKY[®]系列嵌入式处理器(以下称 CK-CPU),是典型的由我国自主设计并研发的国产嵌入式 CPU,已获得国家科技重大专项——“核心电子器件、高端通用芯片及基础软件产品”专项的支持,具有自主知识产权。CK-CPU 系列处理器的研发与产业化工作已经走过了近 10 年,技术上成熟稳定可靠,在性能上已经接近或达到国外同档产品水平,现已形成三个系列(CK500、CK600、CK800)十多种 CPU 硬 IP 核,可满足频率为 50~1000MHz 的嵌入式系统应用需求,具有良好的产业化基础及用户接受度。CK-CPU 系列处理器及系统芯片产业化应用相关内容曾荣获 2009 年度国家科技进步二等奖、2008 年度中国电子学会信息科学技术奖一等奖等荣誉称号。

本书是我国首本全面介绍国产嵌入式 CK-CPU 系列处理器及其嵌入式系统开发的教程。全书共 7 章,各章的具体内容如下。

第 1 章嵌入式系统概述,主要介绍了嵌入式系统的基本概念、发展现状与趋势,目前国际常见 32 位嵌入式 CPU,具有自主知识产权的国产嵌入式 CK-CPU,以及嵌入式系统开发的主流操作系统。

第 2 章 CK-CPU 体系结构,详细介绍了 CK-CPU 的体系结构,从应用角度叙述了 CK-CPU 的内核结构、编程模型、异常中断、内存管理、总线协议、工作模式等内容。该章内容是用户上手使用 CK-CPU 的基础。

第 3 章 CK-CPU 指令集,介绍了 CK-CPU 的指令类型与寻址模式,并详细讲解了 CK-CPU 的各条常用指令,配合第 2 章的内容,用户可以更为全面地了解 CK-CPU 系列处理器。

第 4 章基于 CK-CPU 的嵌入式软件开发,介绍了基于 CK-CPU 的汇编语言与 C 语言程序设计,以及 CK-CPU 的软件开发工具包。

第 5 章基于 CK-CPU 的嵌入式系统应用开发,详细介绍了在 CK5A6 MCU 开发板 CK5A6EVB 上进行嵌入式系统的应用开发。CK5A6 MCU 是基于 CK-CPU 内核的通用型 32 位微控制器芯片,本章详细介绍了该款 MCU 的硬件组成结构。本章在前 4 章的基础上,带领用户进入到使用基于 CK-CPU 系列处理器进行嵌入式系统开发的实际环境中。

第 6 章嵌入式操作系统及开发,详细介绍了 CK-CPU 的 Bootloader 特点及使用方法,以及 Linux 2.6、eCos 等嵌入式操作系统及其在 CK5A6EVB 开发板上的移植与使用。

第7章 CK-CPU 集成开发环境,详细介绍了 CK-CPU 在 PC Windows 环境下的两套常用软件集成开发工具 CK-CPU Studio 与 CK-CPU Development Suite 的使用。

本书的编写得到了杭州中天微系统有限公司相关人员的大力支持和帮助,他们为本书提供了技术手册和开发文档,并在本书的编写过程中提供了技术支持,在此向他们表示衷心的感谢。

本书的编写离不开浙江大学超大规模集成电路设计研究所的各位领导与同事的帮助,如果没有他们的大力支持与帮助,本书是无法顺利完成的。作者衷心感谢浙江大学集成电路与基础软件研究院院长严晓浪教授的指导与帮助。研究所在读研究生程爱莲、万民永、全励、王一木、郑宁、曹晓阳、张渊、刘钧石、胡婧瑾、丁文、叶森、贾梦楠等参与了本书部分内容的编写,并且帮助校对和勘误;另外,实验室部分已毕业同学也参与了本书的编写、排版及校对工作,在此一并表示感谢。最后感谢科学出版社的大力支持,使本书得以顺利出版。

由于作者水平有限,书中难免有疏忽、不妥之处,恳请各位读者批评指正,并请读者将阅读中发现的问题发送至信箱 panyun@vlsi.zju.edu.cn,感谢广大读者的支持与反馈。

作 者

2011 年 7 月于浙江大学

目 录

前言

第1章 嵌入式系统概述	1
1.1 嵌入式系统	1
1.1.1 嵌入式系统的定义	1
1.1.2 嵌入式系统的特点	1
1.1.3 嵌入式系统的组成	2
1.1.4 嵌入式系统的发展现状和趋势	3
1.2 嵌入式处理器	5
1.2.1 嵌入式处理器的分类	6
1.2.2 嵌入式处理器的特点	7
1.2.3 嵌入式处理器的硬件组成	8
1.2.4 嵌入式处理器的发展现状	8
1.2.5 常见32位嵌入式处理器介绍	9
1.2.6 具有自主知识产权的国产嵌入式处理器 CK-CPU	14
1.3 嵌入式操作系统	17
1.3.1 嵌入式操作系统简介	17
1.3.2 常见嵌入式操作系统	18
思考题与习题	21
本章参考文献	21
第2章 CK-CPU 体系结构	23
2.1 CK-CPU 简介	23
2.2 CK-CPU 内核结构	23
2.3 CK-CPU 编程模型	25
2.3.1 普通用户编程模型	25
2.3.2 超级用户编程模型	26
2.4 CK-CPU 的异常中断	33
2.4.1 异常处理概述	33
2.4.2 异常类型	35
2.4.3 异常返回	39
2.5 CK-CPU 内存管理	39
2.5.1 MMU 索引寄存器(MIR)	41
2.5.2 MMU 随机寄存器(MRR)	41
2.5.3 MMU EntryLo0 和 EntryLo1 寄存器(MEL0&MEL1)	41
2.5.4 MMU EntryHi/Bad VPN 寄存器(MEH)	42

2.5.5	MMU 上下文寄存器(MCR)	42
2.5.6	MMU 页掩码寄存器(MPR)	42
2.5.7	MMU 圈连寄存器(MWR)	43
2.5.8	MMU 控制指令寄存器(MCIR)	43
2.5.9	jTLB 表项结构	44
2.6	CK-CPU 总线协议	44
2.6.1	CK-CPU 突发传输	46
2.6.2	总线异常	51
2.7	CK-CPU 工作模式转换	52
2.7.1	正常工作模式	52
2.7.2	低功耗模式	52
2.7.3	调试模式	53
	思考题与习题	53
	本章参考文献	53
第3章	CK-CPU 指令集	54
3.1	指令类型和寻址模式	54
3.1.1	寄存器操作指令	54
3.1.2	内存存取指令	56
3.1.3	跳转指令	57
3.2	指令流水线	58
3.3	CK-CPU 指令详细介绍	63
3.3.1	指令格式	63
3.3.2	条件码	63
3.3.3	存储器访问指令	63
3.3.4	数据处理指令	65
3.3.5	比较指令	68
3.3.6	跳转指令	68
3.3.7	低功耗模式指令	69
3.4	指令码表	69
	思考题与习题	73
	本章参考文献	74
第4章	基于CK-CPU的嵌入式软件开发	75
4.1	CK-CPU 汇编语言程序设计	75
4.1.1	汇编语言概述	75
4.1.2	汇编语言基本语法	78
4.1.3	汇编命令	80
4.1.4	伪指令	81
4.1.5	汇编程序流	83
4.1.6	二进制目标文件格式接口	88
4.1.7	低级运行时二进制接口	89

4.1.8 汇编程序样例	91
4.2 嵌入式 C 语言程序设计	92
4.2.1 C 语言概述	92
4.2.2 程序元素	94
4.2.3 嵌入式 C 语言程序设计	96
4.2.4 嵌入式 C 语言设计优化	99
4.3 内嵌汇编设计	100
4.3.1 概述	100
4.3.2 CK-CPU 内嵌汇编基本格式	100
4.3.3 CK-CPU 扩展内嵌汇编	101
4.3.4 样例	105
4.4 CK-CPU 工具包	107
4.4.1 工具汇总	107
4.4.2 Makefile	108
4.4.3 链接描述文件	110
思考题与习题	115
本章参考文献	115
第 5 章 基于 CK-CPU 的嵌入式系统应用开发	116
5.1 CK5A6EVB 开发板	116
5.1.1 主要特征	116
5.1.2 开发板配置	117
5.1.3 开发板 ICE 接口	119
5.2 CK5A6 MCU 芯片	119
5.2.1 MCU 总体架构和功能	120
5.2.2 MCU 工作模式	121
5.2.3 MCU 地址空间分配	122
5.2.4 MCU 引脚功能	124
5.2.5 MCU 系统功能模块	128
5.3 CK5A6 MCU 外围接口模块	179
5.3.1 存储器接口模块	179
5.3.2 高速接口模块	202
5.3.3 低速接口模块	256
思考题与习题	300
本章参考文献	300
第 6 章 嵌入式操作系统及开发	301
6.1 Bootloader 应用	301
6.1.1 Bootloader 简介	301
6.1.2 Bootloader 的启动过程	301
6.1.3 Bootloader 的操作模式	302
6.1.4 Bootloader 功能介绍	302

6.1.5	Bootloader 的使用说明	303
6.1.6	CK-CPU Bootloader 的功能扩展	308
6.2	Linux 2.6 操作系统内核概述	310
6.2.1	Linux 简介	310
6.2.2	Linux 2.6 的新特性	310
6.2.3	Linux 2.6 内核组成	310
6.2.4	板级支撑	312
6.2.5	Linux 2.6 内核编译	317
6.2.6	Linux 根文件系统	325
6.2.7	Linux 2.6 驱动程序开发	328
6.3	eCos 操作系统概述	333
6.3.1	eCos 简介	333
6.3.2	eCos 的体系结构	333
6.3.3	建立 Linux 平台下的 eCos 开发环境	335
6.3.4	eCos 系统的配置	335
6.3.5	建立应用程序映像	343
6.3.6	硬件相关的移植	345
	思考题与习题	349
	本章参考文献	349
第 7 章	CK-CPU 集成开发环境	350
7.1	C-Sky Studio 软件开发环境	350
7.1.1	C-Sky Studio 简介	350
7.1.2	C-Sky Studio 安装	350
7.1.3	C-Sky Studio 使用	354
7.2	C-Sky Development Suite 集成开发环境	370
7.2.1	C-Sky Development Suite 简介	370
7.2.2	CDS 安装	371
7.2.3	工程管理	374
7.2.4	调试器	378
7.2.5	目标(Target)模板管理	395
7.2.6	闪存(Flash)烧写	397
	思考题与习题	402
	本章参考文献	402

第1章 嵌入式系统概述

随着电子技术的快速发展,特别是超大规模集成电路的产生而出现的微型机,使现代科学研究得到了质的飞跃,而嵌入式微控制器技术的出现则为计算机产业革命引导的现代工业智能化注入了新的活力。嵌入式系统的出现成为了计算机发展史上的里程碑,计算机领域随之出现了通用计算与嵌入式计算两个不同的发展方向。通用计算机承担智力平台的革命,嵌入式系统承担智力嵌入的革命。通用计算机承担的任务是高速海量的数字计算,需要不断地提高处理速度和存储容量;嵌入式系统主要满足对象系统的全面智能化要求,发展方向是小型、低功耗、廉价、高可靠性和易耦合性。嵌入式系统经历几十年的发展给人们的工作、生活带来了翻天覆地的变化,引领人类全面步入后 PC 时代。

1.1 嵌入式系统

1.1.1 嵌入式系统的定义

嵌入式系统是嵌入应用对象并完成预定功能的信息系统,主要由嵌入式处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户应用程序等组成,具有诸如实时性、低功耗、低成本、高可靠性、可重构性等特征,以实现应用对象的自动化、数字化、网络化和智能化。

1.1.2 嵌入式系统的特点

嵌入式系统的核心任务是嵌入式计算,嵌入式系统的特点是嵌入式计算性能要求的体现。与通用计算相比,嵌入式计算不仅需要满足应用的计算吞吐率的需求,同时还需要满足其他量化目标,如实时性能、功耗和成本等因素。不同的计算需求将直接导致嵌入式计算平台在性能和功耗、硬件和软件等方面做出不同的权衡。嵌入式计算的需求主要包括性能、功耗、实时性、安全性、可靠性与开放性等方面。嵌入式计算在物联网方面的应用体现了其低成本以及低功耗的特点;在现代化武器装备方面的应用体现其实时性好及可靠性高的特点;在未来移动计算平台的二次开发方面体现了其开放性好的特点。

1. 体积小、功耗低

有很多嵌入式系统的应用对象都是一些小型应用系统,如移动电话、PDA、MP3、数码相机等手持移动设备,它们要求尺寸越小越好,并且不能配备大容量的电源,所以体积小、功耗低一直是嵌入式系统追求的目标。设计者将通用处理器中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设计趋于小型化,移动能力大大增强;嵌入式系统电压通常在 5V 以下,为低功耗设计提供了先决条件,同时在设计过程中进行多层次的低功耗优化可大大降低系统能量消耗,从而满足设计需求。软件方面,嵌入式系统中操作系统内核与通用处理器中操作系统(如 Windows)内核相比一般较小。整个软件系统十分精简,没有系统软件和应用软件的明显区分,不要求其功能设计及实现上过于复杂,这样既有利于控制系统成本,降低系统功耗,同时也利于实现系统安全。

2. 专用性强

嵌入式系统通常是面向某个特定应用的,系统中的软、硬件,尤其软件中应用程序都是为特定用户群来设计的,具有很大的专用性。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。相比之下,PC 则是通用的计算平台。

3. 可裁剪性好

为了降低成本,并且满足专用性的需要,嵌入式系统设计者必须考虑产品在通用性和专用性之间的平衡问题。目前,嵌入式系统硬件和操作系统通常被设计成可裁剪的,以便使嵌入式系统开发人员根据实际应用需要来量体裁衣,去除冗余,从而使系统在满足应用要求的前提下达到最精简的配置。可裁剪性大大地减小了嵌入式系统的设计周期,节约了设计成本。

4. 实时性好

目前,嵌入式系统广泛应用于工业控制、数据采集、通信等领域,主要用来对应用对象进行控制、监控,所以对嵌入式系统有或多或少实时性的要求。因此,硬件设计中设计者尽可能地提高系统时钟频率以满足实时性需求,同时极少使用存取速度慢的存储器;软件使用固态存储,以提高速度,并且需加以精心设计以保证实时性。当然,随着嵌入式系统应用的扩展,有些系统对实时性要求也并不是很高。总体来说,实时性是对嵌入式系统的普遍要求,是设计者和用户需要考虑的一个重要指标。

5. 可靠性高

由于部分嵌入式系统所承担的计算任务涉及产品质量、人身设备安全、国家机密等重大事务,加之某些嵌入式系统应用在无人值守的场合,如高危工业环境下、仪器仪表中等。所以与普通系统相比较,对嵌入式系统可靠性的要求极高。

1.1.3 嵌入式系统的组成

如图 1.1 所示,嵌入式系统作为一类特殊的计算机系统,主要包含有硬件和软件两个部分。硬件环境是整个嵌入式操作系统和应用程序运行的基础平台,不同的应用通常有不同的硬件环境。硬件环境主要包括嵌入式处理器、各种类型存储器、模拟电路及电源、接口控制电路等,其中嵌入式处理器是硬件环境的核心。嵌入式系统的应用环境通常要求硬件平台中嵌入式处理器实时性高,功耗低,存储器小,外围专用设备少,I/O 端口少。



图 1.1 嵌入式系统的组成

软件环境是嵌入式系统实现特定功能应用的上层平台,主要由嵌入式硬件抽象层(hardware

abstraction layer, HAL)、操作系统、文件系统、应用程序等组成。硬件抽象层或板级支持包(board support package, BSP)是一个介于硬件与软件之间的中间层次。硬件抽象层通过特定的上层接口与操作系统进行交互,支持操作系统向硬件的直接操作。硬件抽象层的引入大大推动了嵌入式操作系统的通用化,使嵌入式系统能够简洁有效地应用于各种不同的环境中。嵌入式操作系统完成嵌入式应用的任务调度和控制等核心功能,具有内核精简、相对不变性、可配置、与高层应用紧密关联等特点。嵌入式应用程序运行于操作系统之上,利用操作系统提供的机制完成特定功能的嵌入式应用。不同的系统需要设计不同的嵌入式应用程序。

1.1.4 嵌入式系统的发展现状和趋势

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位的嵌入式微处理器,包括Intel的8080/8085、8086, Motorola的6800、68000, Zilog的Z80、Z8000等。由这些微处理器为核心构成的嵌入式系统广泛用于仪器仪表、医疗设备、机器人、家用电器等。随后由于微电子工艺水平的不断提高,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通通集成到一个集成电路芯片当中,即所谓的嵌入式微控制器,成为嵌入式系统异军突起的一支新秀。20世纪90年代,在分布控制、数字通信和数字家电等市场需求的牵引下,嵌入式应用进一步加速发展。面向实时信号处理算法的DSP向高速、高精度、低功耗发展,如Texas推出的第三代单片DSP TMS320C30;嵌入式处理器向着32位高速智能化方向发展,如ARM、MIPS、PowerPC等。同时嵌入式操作系统也逐步成熟,如IRMX86、VRTX、PSOS、Vxworks、QNX、WinCE、UNIX等都得到广泛的应用。它们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。随后进入21世纪网络时代,将嵌入式系统应用于各类网络中是嵌入式产业的必然发展方向,数字网络监控系统的异军突起、3G网络广泛普及、物联网的蓄势待发都是最好的证明。

回顾嵌入式系统的历史,嵌入式系统的发展可以分成三个阶段:

(1)以单个专用芯片为核心的系统。这种嵌入式系统通常没有操作系统的支持,而是通过一些特殊的程序直接执行系统功能,一般具有监测和控制功能。大部分应用于工业控制系统中。其主要特点是结构和功能都相对简单,成本低。这种系统已经不能适应现代工业控制和信息家电等领域的需求,正在逐步退出应用领域。

(2)以嵌入式处理器为基础、嵌入式操作系统为核心的嵌入式系统。随着嵌入式处理器的发展,以及嵌入式操作系统的设计开发水平的提高,这个阶段的操作系统性能不断增强。嵌入式操作系统能运行于不同的微处理器上,具有内核小、效率高、高度模块化和扩展性等特点。

(3)基于Internet的嵌入式系统。随着信息时代的到来,Internet技术已进入人们日常生活的各个领域,嵌入式网络应运而生;人类在更好地利用Internet庞大的信息资源的同时,也实现了嵌入式系统功能上的一个飞跃。伴随着无线网络技术、传感技术、人工智能技术的发展,嵌入式系统和网络已经是一种不可分割的共同体,嵌入式系统正朝着智能化、网络化方向前进。

目前,嵌入式系统市场正处于快速增长时期,嵌入式系统的发展为几乎所有电子设备注入了新的活力,形成了一个广阔的应用领域,主要分布在消费类电子、通信、工业控制、交通、医疗、军事国防等领域,如图1.2所示。

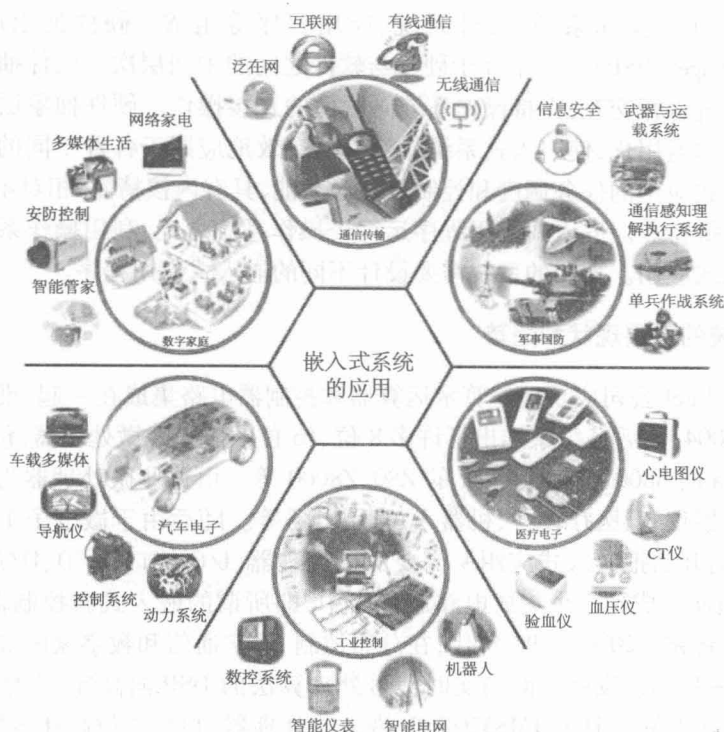


图 1.2 嵌入式系统的应用

(1)通信传输。随着网络与通信技术的发展,嵌入式系统在通信领域里发挥着举足轻重的作用。在信息时代,人们更加注重交流、沟通与信息的汇聚,有线网络传输的广泛应用、无线通信网络的大面积覆盖都说明着这一点。此外,互联网技术的日新月异推动着泛在网概念的出现,这个概念无论在学术界还是工业界都成为了研究的热点。

(2)数字家庭。嵌入式系统应用于数字家庭,融合了多媒体音视频、智能家居、家庭网络、安防控制等多种应用的全新概念,倡导家庭数字设备的智能化、人性化、网络化,大到电视、小到窗帘,甚至连马桶、浴缸都将应用到了嵌入式系统。

(3)工业控制。嵌入式系统已经在工业控制领域得到了广泛的应用,如工业过程控制、远程监控、智能仪器仪表、机器人控制器、数控系统、电力系统等。随着网络技术和通信技术的发展,工业控制现场的网络化已经成为发展趋势。由于嵌入式系统网络和人机交互的能力,使得它极有可能取代以往基于微控制器的控制方式。

(4)汽车电子。嵌入式系统应用于汽车电子领域,汽车电子是具有高技术含量和高水平要求的技术密集型行业,也是一种非常典型的嵌入式系统集合,在汽车动力系统、车身控制系统、娱乐和多媒体车载系统部分上均有着重要的作用。调查表明汽车电子占整车成本 50% 以上,处理器个数可达三位数。

(5)医疗电子。嵌入式系统应用于医疗电子领域,嵌入式技术不仅在医用医疗电子设备中起着举足轻重的作用,还推动着便携式医疗设备在家庭中的普及,目前的医疗电子发展方向是智能化与网络化。

(6)军事国防。嵌入式系统涵盖情报、指挥、作战、后勤等各个部门,重点支撑联合作战电子指挥通信网络、电子对抗和侦察系统中的核心运算部件、精确制导武器的运算控制部件、军事信息安全系统的核心处理部分、单兵便携信息系统、无线战场监视系统、智能化信号干扰设备等。

信息时代使得嵌入式产品获得了巨大的发展契机,为嵌入式市场展现了美好的前景,同时也对嵌入式生产厂商提出了新的挑战,从中我们可以看出未来嵌入式系统的几大发展趋势。

(1) 系统化。嵌入式开发是一项系统工程,因此要求嵌入式系统厂商不仅要提供嵌入式软、硬件系统本身,同时还需要提供强大的硬件开发工具和软件包支持,以使客户可以短期高效地进行系统开发。如三星在推广 ARM7 芯片、ARM9 芯片的同时还提供开发板和板级支持包,而 WinCE 在主推系统时也提供 Embedded VC++ 作为开发工具,还有 Vxworks 的 Tonado 开发环境, DeltaOS 的 Limda 编译环境等等都是这一趋势的典型体现。

(2) 复杂化。随着人们对工作、生活质量需求的不断提升,以往单一功能的设备如电话、手机、冰箱、微波炉等功能不再单一,结构更加复杂。这就要求芯片设计厂商在芯片上集成更多的功能,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芯片或信号处理器 DSP 增强处理能力,同时增加功能接口。例如,USB,扩展总线类型;CAN BUS,加强对多媒体、图形等的处理,逐步实施系统芯片(system on chip, SoC)的概念。软件方面采用实时多任务编程技术和交叉开发工具技术来控制复杂的功能,简化应用程序设计、保障软件质量和缩短开发周期。

(3) 网络化。网络互联是未来发展的必然趋势,嵌入式设备为了适应网络发展要求,需在硬件上提供各种网络通信接口。传统的采用单片机的嵌入式系统对于网络功能支持不足,新一代的嵌入式处理器已经开始内嵌网络接口,除了支持 TCP/IP 协议,还有的支持 IEEE1394、USB、CAN、Bluetooth 或 IrDA 通信接口中的一种或者几种,同时也需要提供相应的通信协议软件和物理层驱动软件。软件方面系统内核支持网络模块,甚至可以在设备上嵌入 Web 浏览器,真正实现随时随地用各种设备上网。

(4) 精简化。精简系统内核、算法,降低功耗和软硬件成本一直是嵌入式系统开发的关键问题。未来的嵌入式产品是软硬件紧密结合的设备,为了减低功耗和成本,需要设计者尽量精简系统内核,只保留和系统功能紧密相关的软硬件,利用最低的资源实现最适当的功能,这就要求设计者选用最佳的编程模型和不断改进算法,优化编译器性能。因此,既要软件人员有丰富的硬件知识,又需要发展先进嵌入式软件技术,如 Java、Web 和 WAP 等。

(5) 人性化。为嵌入式系统提供友好的多媒体人机界面是嵌入式系统产业化的必然趋势。嵌入式设备图形界面亲切,控制方式灵活,使得人们感觉它就像是一个熟悉的老朋友,只有这样的产品在市场上才有立足之地。这方面的要求使得嵌入式软件设计者要在多媒体、网络以及 MEMS 技术上痛下苦功。手写文字输入、语音拨号上网、收发电子邮件以及彩色图像、动感操作等都会使使用者获得自由的感受。

(6) 智能化。嵌入式处理器的广泛应用已迅速地将传统的电子系统发展到智能化的现代电子系统时代,如手机、洗衣机、冰箱等电气电子设备正逐步走向更高端的智能化。嵌入式设备能与各种传感器、摄像头等信号接收设备很好地对接,通过设计模型与算法对其信号进行处理,从而实现对象体系的动态控制,减小了传统设备使用中的人为操作失误与误差,同时也省去了人力资源的消耗,实现了嵌入式设备的自动化、智能化。

1.2 嵌入式处理器

嵌入式系统之所以能够广泛应用于多种多样的环境当中,源于嵌入式处理器提供的控制与计算的强大功能,因此嵌入式处理器是嵌入式系统的核心。近 50 年来,处理器一直是集成电路领域摩尔定律的忠实推动者,也是集成电路发展历程中最具代表性的产品之一。从 1971 年英特

尔公司的霍夫发明第一款商用微处理器 4004 至今,处理器经历了近 30 年的持续理论创新与技术革命,在工艺和性能等方面取得了举世瞩目的成就。时至今日,处理器已经成为电子产品中必不可少的核心处理部件,为集成电路的发展作出了非常卓越的贡献,并已成为提升国家综合国力,推进国民经济信息化的重要力量。2000 年以后,成本低廉、综合性能突出的嵌入式处理器在 SoC 中得到了更加广泛的应用。据统计,嵌入式处理器已占全球处理器销售总量的 90% 以上。作为 SoC 的核心部件,嵌入式处理器正伴随着面向不同应用领域的 SoC 渗透到国民经济的各个角落,悄悄地改变着我们的日常生活。嵌入式处理器技术的日新月异对于 SoC 芯片集成度的不断提高、产品功能的日益增强起到了十分积极的作用。嵌入式处理器已经成为集成电路产业中十分重要的基础性产品,支撑着整个电子信息产业的发展。

目前全世界嵌入式处理器的品种总量已经超过 1000 多种,流行体系结构也多达 30 多个系列。随着嵌入式技术的不断演变,现阶段嵌入式处理器主要包括嵌入式微处理器、嵌入式微控制器、DSP 处理器等,其中 32 位嵌入式微处理器已逐步成为了嵌入式处理器的主流,本书所讲的嵌入式处理器及其相关技术多指嵌入式微处理器。

1.2.1 嵌入式处理器的分类

1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器(micro processor unit, MPU)是由通用计算机处理器演变而来。它的特征是具有 32 位以上的处理器,具有较高的性能,当然其价格也相应较高。但与计算机处理器不同的是,在实际嵌入式应用中,一般是将微处理器装配在专门设计的电路板上,在母板上只保留和嵌入式相关的功能即可,或者集成在 SoC 芯片当中,这样可以满足嵌入式系统体积小和功耗低的要求。和通用计算机相比,嵌入式微处理器具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高的优点。目前主要的嵌入式处理器类型有 X86、PowerPC、Motorola 68000、ARM、MIPS 等。

2. 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器(micro controller unit, MCU)又俗称单片机,从 20 世纪 70 年代末出现到今天,虽然已经经过了 30 多年的历史,但嵌入式微控制器目前在嵌入式设备中仍然有着极其广泛的应用。其芯片内部集成 ROM/EPROM、RAM、总线、定时/计数器、看门狗、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、Flash、EEPROM 等各种必要功能和外设。同嵌入式微处理器相比,嵌入式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。嵌入式微控制器是目前嵌入式系统工业的主流。嵌入式微控制器的片上外设资源一般比较丰富,适合于控制,因此称为微控制器。

由于 MCU 低廉的价格、优良的功能,所以拥有的品种和数量最多,比较有代表性的包括 8051、MCS-251、MCS-96/196/296、P51XA、C166/167、68K 系列以及 MCU 8XC930/931、C540、C541,并且有支持 I2C、CAN-BUS、LCD 的众多专用 MCU 和兼容系列。目前 MCU 仍占嵌入式系统一半以上的市场份额。

3. DSP 处理器

DSP(digital signal processor, DSP)处理器是专门用于信号处理的处理器,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。DSP 已广泛用于数据通信、海量存储、语音处理、消费音视频产品等,特别是在蜂窝电话应用领域取得了巨大的成功。性能、价格、功耗永远是 DSP 追求的目标。在这个目标的驱动下,每隔十年 DSP 的性能、规模、工艺、价格等就会发生一个跃迁。DSP 的发展几乎以 2 倍于半导体工业的增长速度在成长。根据

行业分析机构 Farward Concepts 的预计,在未来 5 年时间里,DSP 市场将以 12% 的年复合增长率增长,DSP 技术在未来几年的发展将远远大于其在问世后 25 年之内的发展,并将使人类世界变得前所未有的安全、智能化和联网化。

回顾 DSP 高速发展的这些年,以 TI 为代表的跨国公司,主要从四个方面进行 DSP 技术的发展。一是工艺进步及专用工艺技术,以不断降低功耗和成本,并提升性能;二是体系结构的不断创新,改善存储管理的效率;三是软件生态环境,为客户提供界面友好的开发工具和特定算法等,缩短产品开发时间;四是系统集成能力,根据应用需求将多种接口集成在单片上,用于系统芯片或板级系统的设计。

1.2.2 嵌入式处理器的特点

1. 哈佛(Harvard)结构

传统的冯·诺依曼结构的计算机由 CPU 和存储器构成,其程序和数据共用一个存储空间,程序指令存储地址和数据存储地址指向同一个存储器的不同物理位置;采用单一的地址及数据总线,程序指令和数据的宽度相同。程序计数器(program counter, PC)是处理器内部指示指令和数据的存储位置的寄存器。

CPU 通过程序计数器提供的地址信息,对存储器进行寻址,找到所需要的指令或数据,然后对指令进行译码,最后执行指令规定的操作。处理器执行指令时,先从存储器中取出指令解码,再取操作数执行运算,即使单条指令也要耗费几个甚至几十个周期,在高速运算时,在传输通道上会出现瓶颈效应。

哈佛结构的主要特点是将程序和数据存储在不同的存储空间中,即程序存储器和数据存储器是两个相互独立的存储器,每个存储器独立编址、独立访问。系统中具有程序的数据总线与地址总线,数据的数据总线与地址总线。这种分离的程序总线和数据总线可允许在一个机器周期内同时获取指令字(来自程序存储器)和操作数(来自数据存储器),从而提高执行速度,提高数据的吞吐率。又由于程序和数据存储器在两个分开的物理空间中,因此取指和执行能完全并行操作,具有较高的执行效率。

2. 精简指令集

通用处理器大多采用复杂指令集计算机(complex instruction set computer, CISC)体系,如 Intel 公司的 X86 系列 CPU,从 8086 到 Pentium 系列。精简指令集计算机(reduced instruction set computer, RISC)体系结 20 世纪 80 年代提出来的。目前 IBM、DEC、Intel 和 Motorola 等公司都在研究和发展 RISC 技术,RISC 已经成为当前计算机发展不可逆转的趋势。

RISC 是在 CISC 的基础上产生并发展起来的,RISC 的着眼点不是简单地放在简化指令系统上,而是通过简化指令系统使计算机的结构更加简单合理,从而提高运算效率。在 RISC 中,优先选取使用频率最高的、很有用但不复杂的指令,避免使用复杂指令;固定指令长度,减少指令格式和寻址方式种类;指令之间各字段的划分比较一致,各字段的功能也比较规整;采用 Load/Store 指令访问存储器,其余指令的操作都在寄存器之间进行;增加 CPU 中通用寄存器数量,算术逻辑运算指令的操作数都在通用寄存器中存取;大部分指令控制在一个或小于一个机器周期内完成;以硬布线控制逻辑为主,不用或少用微码控制;采用高级语言编程,重视编译优化工作,以减少程序执行时间。

3. 流水线技术

流水线技术应用于计算机系统结构的各个方面,流水线技术的基本思想是将一个重复的时

序分解成若干个子过程,而每一个子过程都可有效地在其专用功能段上与其他子过程同时执行。

在流水线技术中,流水线要求可分成若干相互联系的子过程,实现子过程的功能所需时间尽可能相等。形成流水处理,需要一段准备时间。指令流发生不能顺序执行时,会使流水线过程中断,再形成流水线过程则需要时间。

指令流水线就是将一条指令分解成一连串执行的子过程,例如把指令的执行过程细分为取指令、指令译码、取操作数和执行四个子过程。在 CPU 中把一条指令的串行执行子过程变为若干条指令的子过程在 CPU 中重叠执行。如果能做到每条指令均分解为 m 个子过程,且每个子过程的执行时间都一样,则利用此条流水线可将一条指令的执行时间 T 由原来的 T 缩短为 T/m 。

1.2.3 嵌入式处理器的硬件组成

嵌入式处理器的核心功能单元主要包括:寄存器部件、算术逻辑单元、程序计数器、指令解码器和地址数据总线。嵌入式处理器从存储器或高速缓冲存储器中取出指令,放入指令寄存器,并对指令译码。它把指令分解成一系列的微操作,然后发出各种控制命令,执行微操作系列,从而完成一条指令的执行。指令是计算机规定执行操作的类型和操作数的基本命令。指令是由一个字节或者多个字节组成,其中包括操作码字段、一个或多个有关操作数地址的字段以及一些表征机器状态的状态字和特征码。

1. 寄存器

寄存器是嵌入式处理器内部的高速存储器,像内存一样可以存取数据,但比访问内存快得多。随后的几章详细介绍 x86 的寄存器 `eax`、`esp`、`eip` 等,有些寄存器只能用于某种特定的用途,如 `eip` 用作程序计数器,这称为特殊寄存器(special-purpose register, SPR),而另外一些寄存器可以用在各种运算和读写内存的指令中,如 `eax` 寄存器,这称为通用寄存器(general-purpose register, GPR)。

2. 程序计数器

程序计数器是一种特殊寄存器,保存着嵌入式处理器取下一条指令的地址,嵌入式处理器按程序计数器保存的地址去内存中取指令然后解释执行,这时程序计数器保存的地址会自动加上该指令的长度,指向内存中的下一条指令。

3. 指令译码器

嵌入式处理器取上来的指令由若干字节组成,这些字节中有些位表示内存地址,有些位表示寄存器编号,有些位表示这种指令做什么操作,是加减乘除还是读写内存,指令译码器负责解释这条指令的含义,然后调动相应的执行单元去执行它。

4. 算术逻辑单元

如果译码器将一条指令解释为运算指令,就调动算术逻辑单元去做运算,比如加减乘除、位运算、逻辑运算。指令中会指示运算结果保存到哪里,可能保存到寄存器中,也可能保存到内存中。

5. 地址和数据总线

嵌入式处理器和内存之间用地址总线、数据总线和控制线连接起来,指令和数据的读写都通过总线来实现。

1.2.4 嵌入式处理器的发展现状

嵌入式处理器是 SoC 的核心部件,是超大规模集成电路产品市场竞争力的重要基础。目前