

• 全国大学生电子设计竞赛系列教材 •

最小微控制器系统 设计与应用

李玉柏 杨鍊 唐续 李玉柏 主 编
林静然 编 著

高等教育出版社

最小微控制器系统设计与应用

李玉柏 主 编

李玉柏 杨鍊 唐续 林静然 编 著



内容简介

本书属于全国大学生电子设计竞赛系列教材,是专门针对电子系统设计中最小微控制器系统的设计和应用而编写的一本教材。

本书第1章和第2章对微控制处理器最小系统设计的基础知识进行了介绍,重点介绍了微控制处理器的内涵发展、常用的微控制处理器系列以及最小系统硬件设计基础,尤其是便携式电子系统设计中低功耗设计与处理。随后本书的内容分成三个部分,以最具代表意义的三类微控制处理器为例,分别进行了具体的最小嵌入式系统的硬件设计,并结合具体应用进行了电路功能扩展和应用系统软件开发。这三类处理器分别是低功耗微控制器的代表MSP430F5系列、工业控制的DSP处理器代表TMS320C/F28系列以及基于Cortex-M4 ARM架构的嵌入式微控制器代表STM32F4系列。本书是新形态教材,每一类最小系统设计与应用开发的电路原理图、PCB图、核心算法程序和典型应用系统的系统软件,以数字资源形式(二维码)给出。

本书可作为全国大学生电子设计竞赛的培训教材,也可以作为高职高专学校电气、电子、计算机、机电类专业课程教材以及开展电子系统设计的相关人员的工程参考书。

图书在版编目(CIP)数据

最小微控制器系统设计与应用/李玉柏主编;李玉柏等编著. --北京:高等教育出版社,2018.3
ISBN 978-7-04-049340-5

I. ①最… II. ①李… III. ①微控制器-系统设计-高等学校-教材 IV. ①TP332.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第014130号

策划编辑	王楠	责任编辑	王楠	封面设计	王鹏	版式设计	马云
插图绘制	杜晓丹	责任校对	刘丽娴	责任印制	刘思涵		

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	河北鹏盛贤印刷有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	19		
字 数	410千字	版 次	2018年3月第1版
购书热线	010-58581118	印 次	2018年3月第1次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	36.50元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 49340-00

前言

微控制器系统已经渗透到生活的各个领域,不说我们离不开的手机、电脑、电视,就是日常生活中的方方面面,从智能家电到汽车电子,从道路红绿灯到电子警察,从银行的 ATM 机到自动贩卖机等,都是一系列不同形态的微控制器系统。全国大学生电子设计竞赛作为一个有着重大影响力的大学生科技竞赛平台,要求学生应用大学学习的电子技术知识,独立完成有实用性、有创意的微控制器系统设计,提升微控制器系统设计与创新能力。

在全国大学生电子设计竞赛中,微控制处理器的最小系统是竞赛作品设计与制作的基础,是所有嵌入式系统设计的基础,其设计方法、电路制作是学生赛前训练和竞赛设计最重要的内容之一。全国大学生电子竞赛中需要的最小系统已经超过了最初单片机最小系统的范畴:一方面是处理器本身从最基本的单片机 C51 发展为含义更广泛的微控制、嵌入式系统微处理器,甚至数字信号处理器 DSP;另一方面是最小系统的功能,也从仅包括扩展的显示系统、键控系统、ROM/RAM 存储系统、高频时钟系统、A/D 转换系统和 D/A 转换电路,扩展到包括复杂模拟电路、PWM 驱动电路、射频电路和基于 EDA 开发的 FPGA 或 CPLD 可编程高速数字电路等。

基于这样的背景,在 2011 年我们编写出版了《最小系统设计与应用》一书,用作我们学校——电子科技大学开设的公选课程“最小系统设计与应用”的教材。经过多年来的使用,尤其是针对实验实训所开发的最小系统板不断升级,实训项目不断完善,我们决定重新编写了这本《最小微控制器系统设计与应用》。

本书第 1 章和第 2 章对微控制处理器最小系统设计的基础知识进行介绍。首先介绍了微控制处理器的内涵发展、常用的微控制处理器的系列产品、产品型号和特点;其次给出了微控制处理器最小系统结构体系与软件系统开发环境;最后讨论了微控制处理器的最小系统硬件设计的思路与步骤,重点分析了最小系统的可靠性设计、便携式系统的电源设计以及应用系统的低功耗设计等相关内容。

在此基础上,本书后续内容进行了微控制器最小系统设计。共分为三个部分,以最具代表意义的三种微控制处理器为例,进行了具体系统设计和典型应用开发。这三种微控制处理器分别是低功耗微控制器的代表 MSP430F5 系列、工业控制的 DSP 处理器代表 TMS320F28 系列以及基于 Cortex-M4 ARM 架构的嵌入式微控制器代表 STM32F4 系列。

从第 3 章到第 6 章为微控制器最小系统设计的第一部分,以超低功耗微处理器 MSP430F5x 系列的最小系统设计为例,重点介绍了微处理器最小系统设计中芯片外围电路设计、片上外设的使用、软件开发环境,以及典型应用设计。MSP430F5x 系列

是美国德州仪器公司(TI)推出的MSP430系列超低功耗16位混合信号处理器,集多种领先技术于一体,在业界获得广泛的认可,引领微控制的应用技术。首先是MSP430F5x系列微处理器内部集成了大量的数字和模拟设备,包括多个16位定时器,多个通用串口USCI,高性能的ADC、比较器、硬件倍频器和DMA,具有报警功能的RTC模块,以及USB 2.0接口等外设设备。其次是MSP430F5x系列微处理器配置具有集成3.3V低压降稳压器LDO,能够实现在1.8~3.6V电压下工作,个别型号可以低电压工作到1V以下,因此可以根据需要选择多种低功耗模式,典型的工作电流为165 $\mu\text{A}/\text{MHz}$,最低的休眠电流为0~1 μA ,这种低功耗的表现是其他嵌入式微控制器所不可比拟的,特别适合使用电池供电或有低功耗、高性能需求的场合。

第3章介绍MSP430系列微处理器的基本特性,包括芯片基本功能说明、指令系统和程序设计;第4章讨论了MSP430系列微处理器最小系统设计,包括人机界面设计;第5章介绍了MSP430系列微处理器的软件开发工具;第6章讨论基于MSP430F5x系列微处理器所开发的最小系统应用情况,并给出了一些基本应用,包括ADC设计、DAC设计、相位比较器实验装置设计等。

从第7章到第10章为微控制器最小系统设计的第二部分,以TMS320F28系列微控制处理器的最小系统设计为例,重点介绍在工业控制领域的微控制处理器最小系统的开发思路、设计步骤和应用编程。TMS320F28x是一种DSP内核架构的微控制处理器,DSP内核是一种特殊的处理器,在设计上采用了哈佛结构,集成有硬件乘法器和多种寻找模式,使得需要进行大量数据处理的算法执行起来效率非常高,DSP处理器的应用范围很广,包括复杂数字计算、通信信号处理、图像视频流媒体处理以及数字工业控制等。TI公司推出的TMS320F28系列微控制处理器,具有良好的性能,在片上集成了一系列与数字工控相关的外设。片上的事件管理器EVM可产生脉宽调制PWM信号,其I/O特性可以驱动各种电动机。片上还带有看门狗定时器、串行外设接口(SPI)、串行通信接口(SCI)、CAN总线等外设模块。特别值得注意的是,TMS320F28系列片上Flash存储器的引入,使其能够快速设计原型机及升级,不使用片外的EPROM,既提高了速度,又降低了成本。

第7章介绍TMS320F28系列DSP的硬件与软件结构,包括其DSP核C28x的性能特点、其指令系统以及软件编程;第8章给出TMS320F28最小系统硬件设计方法,包括其芯片和外设的硬件设计以及各外设模块驱动程序的编写;第9章讨论TMS320F28的软件开发用到的各种工具,包括软件开发流程、常用的汇编伪指令及集成编译仿真环境,重点是CCS开发环境的使用;第10章给出了基于TMS320F28的应用设计与开发,包括片上外设的应用和在无人机飞控系统中的应用。

从第11章到第14章为微控制器最小系统设计的第三部分,以STM32F4系列微控制处理器的最小系统设计为例,重点介绍在嵌入式系统中ARM处理器的系统设计与应用开发。STM32F4是由意法半导体(ST)公司推出的一种高性能微控制处理器,采用32bit的ARMv7处理器,主要针对低功耗和高性能的工业应用。STM32F4系列微控制处理器具有突出的性能,具有较快的处理速度(相对于ARM7和ARM9),可达到1.25 DMIPS/MHz,拥有高效的三级哈佛流水线,只使用Thumb2指令而不支持ARM指令集,具有可选的单精度浮点单元FPU,支持高级调试方式,支持单周期的硬

件除法,具有多种睡眠模式从而有效降低功耗,能够高速地进行中断处理等。

第 11 章介绍了 STM32F4 系列微控制处理器的基础特性,包括芯片概述以及片上外设资源的说明及应用;第 12 章给出了基于 STM32F4 系列微控制处理的最小系统设计,包括基本的外围电路设计,以及 STM32F4 开发板的硬件设计;第 13 章介绍了 ARM Cortex-M4 软件开发,以 STM32F407 微控制处理器的软件开发为例,说明 Cortex-M4 的软件开发过程及常用开发工具的使用;第 14 章给出了基于 STM32F4 系列微控制处理器的具体应用设计,包括 80~100 MHz 频谱分析仪的设计和卫星导航接收机基带系统的设计。

参加该书编写工作的教师共 4 位,第 1 章和第 2 章由李玉柏编写;第 3 章到第 6 章由唐续编写;第 7 章到第 10 章由杨鍊编写;第 11 章到第 14 章由林静然编写。本书是从工程实践的角度出发,根据循序渐进的原则,指导电子技术领域大学生参加电子设计的基础教材。书中针对不同的微控制处理器给出了多个实际训练题目,可供学生进行实践动手能力的训练。书中涉及的三种微控制处理器都开发有相应的最小系统开发板,其原理图、PCB 图以及驱动软件和系统软件以数字资源形式(二维码)给出。

本书编写目的是引导电子技术爱好者和学生进行嵌入式系统开发入门,内容深入浅出,力求文字描述比较简洁,应用举例也力求简单,具有实用性。由于作者的水平有限,难免存在不少的问题和不足,敬请广大读者批评和指正。作者邮箱: ybli@uestc.edu.cn.

电子科技大学 李玉柏
2017 年 10 月 10 日于成都

目 录

第 1 章 微控制处理器基础	1	2.1 微控制器最小系统 的设计	20
1.1 微处理器、微控制器和嵌入式 系统	1	2.1.1 最小系统的硬件设计 方法与步骤	20
1.1.1 三种处理器	2	2.1.2 最小系统的设计举例	21
1.1.2 微控制器与嵌入式 系统	2	2.2 微控制器最小系统的 可靠性设计	28
1.2 微控制处理器的发展	4	2.2.1 可靠性复位技术	29
1.2.1 微控制处理器发展 经历的四个阶段	4	2.2.2 电压监测及掉电 保护技术	30
1.2.2 主要的微控制器厂商和其微 控制处理器系列	6	2.2.3 指令冗余技术	30
1.3 微控制处理器的体系结构	10	2.3 低功耗系统的电源设计	30
1.3.1 微控制器的基本组成	11	2.3.1 移动终端的电池选择	31
1.3.2 精简指令集微控制器和复杂 指令集微控制器	13	2.3.2 高效率低功耗稳压 电路设计	36
1.4 微控制处理器的软件 系统	17	2.4 最小系统中低功耗设计	43
第 2 章 最小系统设计基础	20	2.4.1 微控制处理器的选择	43
		2.4.2 外围芯片的选择	46
		2.4.3 软件超低功耗运行 管理策略	49

第一部分 MSP430F5 系列微处理器与最小系统设计

第 3 章 MSP430 微处理器 基础	55	3.1.3 存储器结构与 地址空间	57
3.1 MSP430 微处理器概述	55	3.2 MSP430 指令系统与程序 设计	59
3.1.1 MSP430 微处理器的结构 特点和主要功能	55	3.2.1 MSP430 微处理器的 指令系统	59
3.1.2 MSP430 微处理器系列 产品	57	3.2.2 MSP430 微处理器的 C 程序设计	60

第4章 基于MSP430F5529的最小系统设计	67
4.1 MSP430F5529最小系统	
硬件设计	67
4.1.1 MSP430F5系列微处理器	
最小系统组成	67
4.1.2 最小系统中电源设计	68
4.1.3 系统复位电路设计	68
4.1.4 系统时钟电路设计	71
4.1.5 MSP430功耗管理模块	74
4.2 MSP430F5529最小系统开发板	
设计与应用程序模块	76
4.2.1 键盘接口	76
4.2.2 数码管显示接口	77
4.2.3 液晶驱动接口	79
第5章 MSP430微处理器的软件开发工具	82
5.1 IAR Embedded Workbench	
概述	82
5.2 Embedded Workbench的使用	82
5.2.1 创建一个工程及编译链接	82
5.2.2 项目设置	87
5.2.3 应用调试	93
5.2.4 语言扩展与提高编程效率	98
第6章 MSP430最小系统应用	101
6.1 MSP430片内外围模块	
应用设计	101
6.1.1 定时器	101
6.1.2 模拟比较器应用	105
6.1.3 SPI接口应用	107
6.1.4 片上A/D、D/A和DMA的应用	110
6.2 基于MSP430微处理器的并行比较型ADC设计	113
6.3 基于MSP430的PWM进行DAC设计	116
6.3.1 原理分析	116
6.3.2 硬件设计	116
6.3.3 基于PWM的DAC设计的软件编程	117
6.4 低频数字式相位测量仪	118
6.4.1 任务与要求	119
6.4.2 题目分析	120
6.4.3 方案论证	120
6.4.4 相位测量仪详细设计	122
6.4.5 数字式移相信号发生器的设计	128
6.4.6 作品总评	131

第二部分 TMS320C28系列处理器与最小系统设计

第7章 TMS320F281x系列DSP	135
7.1 TMS320F281x概述	135
7.1.1 TMS320F281x的结构特点和主要性能	135
7.1.2 TMS320F281x系列DSP比较	138
7.1.3 存储器与地址空间	140
7.2 TMS320F281x的指令系统与程序设计	145
7.2.1 寻址方式与汇编指令	145
7.2.2 C程序设计	146
第8章 TMS320F281x最小系统设计	155
8.1 TMS320F2812系统硬件分析	156

8.1.1 TMS320F2812 最小系统组成	156	9.3.1 CCS 的安装与配置	178
8.1.2 最小系统电源与复位电路设计	156	9.3.2 CCS 基本仿真工具的使用	187
8.1.3 时钟电路设计	159	9.4 基于 C 语言编程的实例	194
8.1.4 看门狗设计	161		
8.1.5 芯片上重要引脚的处理	162	第 10 章 基于 TMS320F281x 最小系统的应用	199
8.1.6 JTAG 接口设计	165		
8.2 TMS320F2812 的开发系统介绍	166	10.1 TMS320F281x 的外设应用设计	199
第 9 章 TMS320F281x 软件开发工具	172	10.1.1 GP Timer 的使用	199
9.1 DSP 的软件开发	172	10.1.2 利用 EV 产生 PWM 波	201
9.1.1 DSP 的软件开发流程	172	10.1.3 SCI 的使用	206
9.1.2 代码生成工具	174	10.1.4 A/D 的使用	209
9.1.3 代码调试工具	175	10.2 基于 F281x 的无人机飞控设计	211
9.2 集成编译仿真环境 CCS 的概述	176	10.2.1 飞控子系统总体设计	211
9.3 CCS 的使用	178	10.2.2 各关键模块的说明	212
		10.2.3 飞控关键部分——PID 调节效果演示	214

第三部分 STM32F4 处理器与最小系统设计

第 11 章 ARM STM32F4 系列处理器基础	219	11.2.3 DMA 控制器	232
11.1 STM32F4 处理器概述	219	11.2.4 中断和异常	233
11.1.1 Cortex-M4 的组成及基本特点	219	11.2.5 模数转换器	239
11.1.2 STM32F4 的存储器	222	11.2.6 数模转换器	241
11.1.3 CRC 计算单元	227	11.2.7 定时器	242
11.1.4 电源控制器(PWR)	227	11.2.8 内部集成电路(I ² C)接口	243
11.1.5 系统配置控制器(SYSCFG)	228	11.2.9 串行外设接口(SPI)	245
11.2 STM32F4 外设和接口概述	228	11.2.10 通用同步异步收发器(USART)	248
11.2.1 嵌入式 Flash 接口	228	第 12 章 STM32F4 最小系统设计	251
11.2.2 通用 I/O	231	12.1 最小系统总体框图及资源介绍	251
		12.2 最小系统的硬件设计	251

12.2.1 时钟电路设计	251	第 14 章 基于 STM32F4 微控制	
12.2.2 系统节拍定时器		处理器的嵌入系统	
(SysTick)设计	254	应用实例	278
12.2.3 系统电源电路设计	257		
12.2.4 系统复位电路设计	260	14.1 基于 STM32F4 的 80~100 MHz	
12.2.5 JTAG/SWD 电路设计 ...	262	频谱分析仪设计与制作 ...	278
12.3 典型的 STM32F4 开发板 ...	264	14.1.1 设计任务	278
第 13 章 ARM Cortex-M4		14.1.2 总体方案论证与比较 ...	278
软件开发	266	14.1.3 系统设计方案论证	279
13.1 STM32F407 的软件		14.1.4 系统理论分析	280
开发	266	14.1.5 主要电路与程序设计 ...	281
13.1.1 编程语言的选择	266	14.1.6 系统程序的设计	283
13.1.2 编程模式的选择	267	14.1.7 测试方案与结果	285
13.1.3 选择开发环境和		14.2 基于 STM32F4 微控制处理器	
工具	267	的卫星导航接收机设计	286
13.2 RealView MDK 的基本		14.2.1 应用背景	286
使用	267	14.2.2 卫星定位导航	
13.2.1 MDK 的安装	268	基本原理	287
13.2.2 MDK 的注册	271	14.2.3 卫星导航接收机	
13.2.3 μ Vision IDE 主框架		总体方案	287
窗口	272	14.2.4 FPGA 部分的设计	
13.2.4 工程的创建	272	方案	288
13.2.5 加载调试	277	14.2.5 卫星导航接收机的	
		设计方案	290

第 1 章

微控制处理器基础

随着电子技术的迅速发展,计算机的应用已渗透到生产、生活的各个方面。由大规模集成电路组成的微型计算机,不但保持了计算机的所有特点,而且体积小、价格低、不需要严格的环境条件,从而促进了微型计算机的普及,微型计算机的一个重要分支就是单片机(SCM)。

单片机是将中央处理器(CPU)、随机存取存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、输入/输出端口(I/O)、定时器/计数器、中断系统等主要计算机功能部件集成在一块半导体芯片上的数字计算机,但其结构与指令功能是按照工业控制要求设计的,所以称为微控制器(MCU)。相对于微型计算机,微控制器的体积更小、质量更轻、价格更便宜,为学习、应用和开发提供了便利条件。

微控制器发展迅速、应用广泛,在工业控制、智能化仪器仪表系统等各个领域都有重要的作用。纵观现代生产、生活的各个方面,从导弹的导航装置,到飞机上各种仪表的控制;从计算机的网络通信与数据传输,到工业自动化过程的实时控制和数据处理,以及生活中广泛使用的各种智能 IC 卡、电子宠物等,都离不开微控制器。

本章将介绍微处理器、微控制器、嵌入式系统等基本概念,并重点阐述微控制处理器的发展、基本组成、典型产品型号和特点,以及微控制处理器最小系统组成与软件系统体系。

1.1 微处理器、微控制器和嵌入式系统

自从 1946 年第一台电子计算机诞生以来,计算机的发展非常迅猛,计算机及计算机应用已经成为人们生活的一部分,用途非常广泛,包括日常信息处理、科学计算、过程控制、通信等各个方面。

计算机的基本组成有五部分,包括控制器、运算器、存储器、输入设备和输出设备。控制器是整个计算机的中枢神经,其功能是对程序规定的控制信息进行解释,根据其要求进行控制,调度程序、数据、地址,协调计算机各部分工作及内存与外设的访问等。运算器的功能是对数据进行各种算术运算和逻辑运算,即对数据进行加工处理。存储器的功能是存储程序、数据和各种信号、命令等信息,并在需要时提供这些信息。

输入设备与输出设备合称为外部输入/输出设备,简称外设,输入设备的作用是将程序、原始数据、文字、字符、控制命令或现场采集的数据等信息输入计算机。常见的

输入设备有键盘、鼠标等。输出设备将计算机的中间结果或最后结果、机内的各种数据符号及文字或各种控制信号等信息输出出来。常用的输出设备有显示终端 CRT、打印机等。

计算机的核心是处理器,一般称为 CPU,它是完成计算机运算处理的功能单元。随着集成电路技术的发展,在一个芯片上可以集成的功能越来越多,计算机处理器的功能也就越来越强大,不仅将控制器、运算器等核心功能集成在 CPU 中,部分存储器、输入/输出端口也集成在处理器芯片上。对于通用个人计算机和进行科学计算的商用、小型、中型、大型计算机等,处理器的运算和管理能力不断增强。

与此同时,处理器的另外一个发展是计算机的微型化和嵌入式,即针对不同应用,处理器芯片上添加一些外设功能和控制功能,将一个微型计算机的功能全部集成到一个芯片上,从而诞生了单片微型计算机。

1.1.1 三种处理器

目前计算机的处理器芯片可以分为微处理器、微控制器和数字信号处理器三种类型。微处理器(MPU)通常代表一个功能强大的 CPU,但不是为任何已有的特定计算目的而设计的芯片。这种芯片往往是个人计算机和高端工作站的核心 CPU。最常见的微处理器是 Motorola 的 68K 系列和 Intel 的 X86 系列。

微控制器,针对智能控制和信息处理的小型化应用。早期的微控制器是将一个计算机集成在一个芯片中,实现一些普及型嵌入式应用,故称单片机(single chip micro-computer)。随后,为了更好地满足控制领域的嵌入式应用,单片机中不断扩展一些满足控制要求的电路单元。目前,针对基础嵌入式控制应用的单片机已被广泛称为微控制器(MCU)。

也有由微处理器发展而来的微控制器。比如,Intel 的 386EX 就是很成功的 80386 微处理器的微控制器版本。它与基础嵌入式应用的微控制器一样,也可以称为嵌入式微处理器,一般应用于高端嵌入式应用。这类微控制器包括:Advanced RISC Machines 公司的 ARM、Silicon Graphics 公司的 MIPS、IBM 和 Motorola 的 Power PC、Intel 的 X86 和 i960 芯片、AMD 的 Am386EM、Hitachi 的 SH RISC 芯片。

数字信号处理器(DSP)中的 CPU 是专门设计用来更快速地进行数字信号处理计算的,比如那些需要进行音频和视频通信的场合。DSP 内含乘加器,能比其他处理器更快地进行这类运算。最常见的是 TI 的 TMS320Cxx 系列和 Motorola 的 5600x 系列。

1.1.2 微控制器与嵌入式系统

典型的嵌入式微控制器(microcontroller unit)就是一个单片微型计算机,最早的设计理念是通过将大量外围设备和 CPU 集成在一个芯片中,使计算机系统更小,更容易集成在复杂的且对体积要求严格的控制设备中。Intel 的 Z80 是较早按照这种思想设计出的处理器,从此以后,微控制器和通用处理器(简称微处理器)的发展便分道扬镳。

早期的微控制器都是 8 位或 4 位的。其中最成功的是 Intel 的 8031, 因为简单可靠且性能不错获得了业界的广泛认同。此后, 在 8031 基础上发展出了 MCS-51 系列微控制器系统。基于这一系统的微控制器系统直到现在还在广泛使用。随着工业控制领域要求的提高, 开始出现了 16 位微控制器、32 位微控制器等。

微控制器比通用微处理器更适合应用于嵌入式系统, 因此它得到了最多的应用。事实上微控制器是世界上数量最多的计算机。现代人类生活中几乎每件电子和机械产品中都集成有微控制器。手机、电话、计算器、家用电器、电子玩具、掌上电脑以及鼠标等电脑配件中都配有 1~2 个微控制器, 高档汽车上一般配备 40 多个微控制器, 复杂的工业控制系统上甚至可能有数百台微控制器在同时工作。微控制器的数量不仅远超过 PC 和其他计算机的总和, 甚至比人类的数量还要多。

尽管微控制器特别适合应用于嵌入式系统, 但是微控制器不等同于一个嵌入式系统。根据 IEEE(电气和电子工程师协会)的定义, 嵌入式系统是“控制、监视或者辅助装置、机器和设备运行的装置”(devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants)。从中可以看出嵌入式系统是软件和硬件的综合体。它包括一个处理器, 这个处理器涉及对硬件的直接控制, 是为了嵌入到对象体系中完成某种特定的功能而设计的; 嵌入式系统还包括软件, 在软件的管理下完成应用功能。比如微波炉就是一个嵌入式系统的应用实例, 它用处理器和软件帮助人们做饭。

嵌入式系统的软件包括系统运行管理的操作系统和针对应用开发的软件。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。确切地说, 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功能: 任务管理、任务间通信、同步与相互排斥、中断支持、内存管理等。当时比较著名的嵌入式操作系统有 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: 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, 具有可裁剪性、可扩充性和可移植性, 可以移植到各种处理器上; 较强的实时性和可靠性, 适合嵌入式应用。这些嵌入式实时多任务操作系统的出现, 使得开发应用人员得以从小范围的开发解放出来, 同时也促使嵌入式有了更为广阔的应用空间。

20 世纪 90 年代以后, 随着对实时性要求的提高, 软件规模不断上升, 实时核逐渐发展为实时多任务操作系统 (RTOS), 并作为一种软件平台逐步成为国际嵌入式系统的主流。这时候更多的公司看到了嵌入式系统的广阔发展前景, 开始大力发展自己的嵌入式操作系统。除了上面几家老牌公司的嵌入式操作系统以外, 还出现了 Palm OS、WinCE、嵌入式 Linux、Lynx、Nucleux, 以及国内的 Hopen、Delta OS 等嵌入式操作系统。

随着嵌入式技术的发展前景日益广阔, 软件规模不断上升, 对嵌入式应用的处理器提出了更高的要求:

(1) 对实时任务有很强的支持能力, 能完成多任务并且有较短的中断响应时间, 从而使内部的代码和实时内核心的执行时间减少到最低限度。

(2) 具有功能很强的存储区保护功能。这是由于嵌入式系统的软件结构已模块化,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,同时也有利于软件诊断。

(3) 可扩展的处理器结构,能最迅速地开发出满足应用的、最高性能的、嵌入式应用的处理器。

(4) 嵌入式应用的处理器必须功耗很低,用于便携式的无线设备、移动的计算终端和通信设备中靠电池供电的嵌入式系统更是如此,这些嵌入式系统需要的功耗只有 mW 甚至 μW 级。

正因为这样,目前嵌入式系统的微控制器向高端发展,开始大量使用 32 位和 64 位的单片机。比如 ATMEEL 公司推出的 AT91SAM9261,是以 ARM926EJ-S ARM Thumb 处理器为核心的完全的片上系统,它扩展了 DSP 指令集和 Jazelle Java 加速器,在主时钟频率 190 MHz 时性能高达 210 MIPS;又比如东芝公司推出的 64 位微控制器 TX99 系列,它基于 MIPS 科技公司(美国)的 MIPS64 微架构,通过使用由 MIPS 公司和东芝公司联合开发的 64 位超标量架构,使得 MIPS64 具有极高的性能,可同时处理两个指令。这些高端的微控制器多应用于半导体产品和系统,特别是以成本和功耗为最重要要素的应用领域,比如汽车电子、数字视频、OA、家庭服务、数字信息应用和网络应用等。

从技术发展来看,嵌入式系统的微控制器向高端发展,集成度日益增高,包含了用于有限数字信号处理的功能模块和模拟电路。

本书将重点放在一般电子技术的基础普及上,因此以一般可编程通用集成电路设计的微控制器为主,即以普及型嵌入式应用的微控制器为主来编写。对于微处理器和专用数字信号处理器,也只针对应用于嵌入式系统的处理器进行介绍。为了描述方便,有时候在文献中可以统一使用微控制处理器,作为嵌入式系统的三类不同架构的处理器统称。作为主流的、能普遍应用的微控制处理器,一般片内带有一组相对标准的纯数字外设(比如串口、网口等通信口)以及定时器、片上 ADC 等。这些微控制处理器和几个简单的外部模拟电路和数字器件连接,就能实现一个嵌入式目标应用。

1.2 微控制处理器的发展

微控制器的概念出现在单片机概念以后,随着 Intel 公司开发了自己的单片机,为了突出其工业应用特点,取名为嵌入式微控制器(embedded microcontroller)。从此单片机的别名——微控制器就被人们广泛接受和采用了。

1.2.1 微控制处理器发展经历的四个阶段

微控制器的发展是随着应用的扩展不断升级,经历 4 位机、8 位机、16 位机到 32

位的发展。

1. 4 位单片机(微控制器)阶段

1971 年美国 Intel 公司首次推出 4 位 Intel 4004 单片机(微控制器),紧接着美国德州仪器(TI)公司也推出了 4 位单片机 TMS-1000。随后,各个计算机生产公司竞相推出 4 位单片机。例如,美国国家半导体公司(National Semiconductor)的 COP402 系列、日本电气公司(NEC)的 μ PD75xx 系列、美国洛克威尔公司(Rockwell)的 PPS/1 系列、日本松下公司(Panasonic)的 MN1400 系列、富士通公司(Fujitsu)的 MB88 系列等。

4 位单片机属于单片机(微控制器)发展的萌芽阶段。至今还有少数仍在使用的,主要应用在家用电器、电子玩具等领域。

2. 8 位微控制器阶段

1976 年 9 月,美国 Intel 公司首先推出了 MCS-48 系列 8 位微控制器以后,其他公司的 8 位微控制器系列也应运而生。例如,莫斯特克(Mostek)和仙童(Fairchild)公司合作生产的 3870(F8)系列、摩托罗拉(Motorola)公司的 6801 系列等,微控制器的发展进入了一个新的阶段。

在 1978 年以前,各厂家生产的 8 位微控制器,由于受集成度(几千只管/片)的限制,一般没有串行接口,并且寻址空间的范围小(小于 8 KB),从性能上看属于低档 8 位微控制器。

随着集成电路工艺水平的提高,在 1978 年至 1983 年期间集成度提高到几万只管/片、一些高性能的 8 位微控制器相继问世。例如,1978 年摩托罗拉公司的 MC6801 系列、齐洛格(ZiLog)公司的 Z8 系列、1979 年 NEC 公司的 μ PD78xx 系列、1980 年 Intel 公司的 MCS-51 系列。这类微控制器的寻址能力达到了 64 KB,片内 ROM 容量达到了 4~8 KB,片内除带有并行 I/O 口外,还有串行 I/O 口,甚至某些还有 A/D 转换器功能。因此,将这类微控制器称为高档 8 位微控制器。

20 世纪 80 年代中后期,在高档 8 位微控制器的基础上,微控制器功能进一步得到提高,推出了超 8 位微控制器。例如,Intel 公司的 8X252、UPI-45283C152, Zilog 公司的 Super 8, Motorola 公司的 MC68HC 等。它们不但进一步扩大了片内 ROM 和 RAM 的容量,同时还增加了通信功能、DMA 传输功能以及高速 I/O 功能。自 1985 年以来,各种高性能、大存储容量、多功能的超 8 位微控制器不断涌现,它们代表了微控制器的发展方向,在单片机应用领域发挥着越来越大的作用。

8 位微控制器由于其自身的特性,被广泛用于工业控制、智能接口、仪器仪表等各个领域。

3. 16 位微控制器阶段

1983 年以后,集成电路的集成度可达十几万只管/片,16 位微控制器逐渐问世。这一阶段的代表产品有 1983 年 Intel 公司推出的 MCS-96 系列、1987 年 Intel 公司推出的 80C96、美国国家半导体公司推出的 HPC16040 和 NEC 公司推出的 783xx 系列等。

16 位单片机将微控制器的功能又推向了一个新的阶段,如 MCS-96 系列的集成度为 12 万只管/片,片内含 16 位 CPU、8 KB ROM、232B RAM、5 个 8 位并行 I/O 口、4 个全双工串行口、4 个 16 位定时器/计数器、8 级中断处理系统。MCS-96 系列还具

有多种 I/O 功能,如高速输入/输出(HSIO)、脉冲宽度调制(PWM)输出、特殊用途的监视定时器(Watchdog)等。

16 位微控制器主要应用于高速复杂的控制系统,此时微控制的概念得到业界和生产厂家的广泛认同。

4. 32 位微控制处理器阶段

20 世纪 90 年代之后,集成电路技术高速发展,32 位的 MCU 应运而生。由于一般测量与控制领域对 32 位微控制器需求并不十分迫切,所以 32 位微控制器最初的应用主要集中在带音频、视频处理的嵌入式场合。

近年来,随着汽车电子和物联网(IoT)技术的快速发展,32 位 MCU 成为各个 MCU 厂商重点研发和推出的芯片。随着智能汽车发展,汽车电子系统——自动泊车、先进巡航控制、防撞系统等 ADAS 系统的智能化应用需要更高性能的 32 位 MCU。此外,在物联网应用领域,比如医疗电子用品(如智能血糖机、电子血压计等)、个人健康监测产品(如智能手环、智能手表、智能衣、心率带等),这些需要低功耗、长时间使用、无线通信的产品,也必须依赖 32 位 MCU 来实现。

比如瑞萨电子(Renesas)作为领先的汽车半导体供应商,不仅推出了针对汽车电子的采用 40 nm 工艺的 RH850 系列 32 位 MCU,同时也推出了专门应用于物联网领域新应用的 32 位系列 MCU。

需要提及的是,微控制器的发展虽然按先后顺序经历了 4 位、8 位、16 位和 32 位 4 个阶段,但从实际使用情况看,并没有出现推陈出新、以新代旧的局面。4 位、8 位、16 位微控制器仍各有应用领域。例如,4 位单片机(微控制器)在一些简单家用电器、高档玩具中仍有应用;8 位微控制器在中小规模应用场合仍占主流地位;16 位微控制器在比较复杂的控制系统中仍应用广泛。

1.2.2 主要的微控制器厂商和其微控制处理器系列

20 世纪 90 年代后随着消费电子产品大发展,微控制器得到了巨大提高,相继诞生了一批经过市场考验、获得良好口碑的制造厂商。物联网技术的发展又进一步催生了这些企业的兼并和整合,形成在全世界有巨大影响力的微控制器厂商。

1. 英特尔公司(Intel)

英特尔是美国一家主要研制 CPU 处理器的公司,作为全球最大的个人计算机零件和 CPU 制造商,是最早推出微处理器的公司,同样也是最早推出微控制器的公司。1971 年英特尔推出了全球第一个微处理器。继 1976 年推出 MCS-48 后,又于 1980 年推出了 MCS-51,为发展具有良好兼容性的新一代微控制器奠定了基础。在 8051 技术实现开放后,Philips、Atmel、Dallas 和 Siemens 等公司纷纷推出了基于 80C51 内核(8051 的 CMOS 版本)的微控制器。这些各具特色的产品能够满足大量嵌入式应用需求。

MCS-51 系列微控制器是超级经典的微控制器系列,是许多学生学习微控制器的入门芯片,设计参考资料丰富。MCS-51 系列中主要有 8031、8051、8751 三种型号,它们的指令系统与芯片引脚完全兼容,仅片内 ROM 有所不同。

近年来英特尔公司非常关注物联网技术,推出了基于 Quark SoC 的 SoC X1000 系列、MCU D1000 系列,试图重新进入嵌入式系统领域的处理器市场。

2. 恩智浦半导体(NXP Semiconductors)

恩智浦提供半导体、系统解决方案和软件,为手机、个人媒体播放器、电视、机顶盒、辨识应用、汽车以及其他广泛的电子设备提供更优质的感官体验,公司总部位于荷兰 Eindhoven。恩智浦公司早期的微控制器是基于 80C51 内核的,嵌入了掉电检测、模拟以及片内 RC 振荡器等功能,这使微控制器在高集成度、低成本、低功耗的应用设计中可以满足多方面的性能要求。近年来恩智浦的微控制处理器几乎都是采用 ARM Cortex-M 系列架构,典型的微控制处理器系列包括:Kinetis E 系列 MCU,采用 ARM Cortex-M0+/M4 内核;Kinetis K 系列 MCU,采用 ARM Cortex-M4 内核,属于中高性能的 MCU;Kinetis L 系列 MCU,采用 ARM Cortex-M0+内核,为超低功耗、超小规格 MCU;Kinetis V 系列 MCU,采用 ARM Cortex-M0+/M4/M7 内核,用于电机控制以及数字电源转换应用。

此外,还有 LPC MCU 系列用于通用嵌入式应用,涵盖从入门级到高性能和高集成度的产品,是许多嵌入式系统设计中 MCU 的重要选择之一。LPC MCU 系列采用 ARM 内核,利用超大规模集成电路技术将多种 I/O 口和中断系统、定时器/计数器等功能(可能还包括显示驱动电路、脉宽调制电路、模拟多路转换器、A/D 转换器等电路)集成到一块芯片内,在工业控制领域广泛应用。

2015 年 3 月恩智浦收购了飞思卡尔(Freescale)半导体有限公司全部股权。飞思卡尔半导体有限公司是摩托罗拉(Motorola)公司的半导体业务分离出来成立的公司。摩托罗拉公司是世界上最大和最早的微控制器生产厂家之一,品种较全。其中 8 位微控制器主要有 M68HC05、M68HC08 和 M68HC11 三个系列,16 位微控制器有 M68HC12 和 M68HC16 系列,32 位微控制器有 683xx 系列。M68HC05 系列微控制器是最基本的一个系列,具有功能全面、性价比高、系统电路与软件设计简单、使用方便、功耗低等特点,特别适用于家用电器、通信、仪器仪表、自动控制、汽车等领域。目前这些经典的 MCU 设计架构在恩智浦收购后依然在使用。

3. 瑞萨电子(Renesas)

瑞萨电子是 MCU 领域有较大影响力的企业,由瑞萨、NEC、三菱三家公司电子业务整合组成。瑞萨电子的 MCU 凭借其片上闪存产品,在世界范围内,占据微控制器和微处理器产品的较大的市场份额。瑞萨电子针对高端用户可提供 SuperH 和 V850 系列微控制器;针对中端用户可提供 RX 系列 MCU 微控制器;针对低端用户可提供结合 78K 和 R8C 基本设计架构的全新 RL78 系列微控制器。

78K0/Kx2-L 系列微控制器是瑞萨电子推出的高集成度、高性能、高可靠性、低功耗 8 位 MCU。该系列产品适用于电池供电系统及节能家电领域,例如测量仪表、感测接口、烟雾传感器、火灾报警器、电动牙刷、剃须刀等。

R8C 系列微控制器是具有高 ROM 效率、低噪音、低功耗和高处理性能的 16 位 CISC MCU。由于拥有丰富的定时器功能和多种串行通信功能等内置外围功能,R8C 系列适用于多个应用领域。

RX MCU 系列推动了嵌入式系统的飞跃发展,RX 系列装配了新一代的内核,可以