

嵌入式系统设计丛书

STM32 单片机原理与工程实践

—— + 杨光祥 梁华 朱军 著



 武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

嵌入式系统设计丛书

STM32 单片机原理与工程实践

杨光祥 梁华 朱军 著

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了 STM32F10X 系列单片微型计算机的基础理论和工程应用,深入地介绍了 STM32F10X 与外部器件的接口设计与软件设计,比如 GPRS 模块、GPS 模块、液晶显示触摸屏、CAN、RS485 扩展、非接触式卡、射频模块、专用电能计量芯片、温度传感器、USB 键盘等。全书共分为 13 章,包括 ARM 家族介绍,Cortex-M3 体系结构,STM32F10X 电源、时钟及复位电路,STM32F10X 最小系统与开发环境,STM32F10X 功能与资源概述,基于 STM32 的 M1 非接触卡的读卡器设计,基于 STM32 的数字远程数据采集站,基于 STM32 的矿用安全监测数据转发器设计,基于 STM32 的多路无线温度采集系统,基于 STM32 的电力采集板设计,液晶触摸屏在 STM32F10X 上的移植,基于 STM32 的 USB 键盘设计,基于 STM32 的 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 嵌入式系统移植。

本书可以作为工程技术人员进行 STM32F10X 系列 32 位单片微型计算机应用设计与开发的参考书,适合具有初步经验的嵌入式系统开发者自学或研究生学习,也可以作为高等院校电子信息、计算机工程、自动化与测控、电气控制类专业学生课程设计、毕业设计的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

STM32 单片机原理与工程实践/杨光祥,梁华,朱军著. —武汉:武汉理工大学出版社,2013.3
ISBN 978-7-5629-3975-7

I. ①S… II. ①杨… ②梁… ③朱… III. ①单片微型计算机 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 047967 号

项目负责人:王兆国

责任编辑:夏冬琴

责任校对:向玉露

装帧设计:董君承

出版发行:武汉理工大学出版社

社 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.techbook.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉兴和彩色印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:20.75

字 数:585 千字

版 次:2013 年 3 月第 1 版

印 次:2013 年 6 月第 1 次印刷

定 价:49.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87785758 87381631 87165708(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

前 言

从 20 世纪 70 年代单片机的出现到今天各式各样的嵌入式微处理器、微控制器的大规模应用,单片机已经有了 40 多年的发展历史。嵌入式系统的出现最初就是基于单片机的。20 世纪 70 年代单片机的出现,使得汽车、家电、工业机器、通信装置以及成千上万种产品可以通过内嵌单片机和微控制器来获得更佳的使用性能。而现在,已经发展为 32 位甚至 64 位的嵌入式微处理器,并且,通过集成嵌入式操作系统,单片机等微处理器所构成的电子产品已经完全融入我们的日常生活中。

近年来,由于 STM32 的迅速发展和应用,一些大专院校的计算机、通信、网络、电子、测控、自动化等专业也开始开设此课程。很多企业在产品研发过程中也选择 STM32 作为微控制器,也因此培养了一大批相应的工程技术人员。因此,为了全面了解和掌握 STM32 单片机的基础理论与实际应用,为了更好地满足广大工程技术人员的技术交流学习需求,我们根据实际使用 STM32 单片机的研究和开发经验,编写了此书。

本书的特点是强调实践性和新颖性,深入浅出并力求全面客观地分析 STM32 单片机的基础理论,内部结构,并结合笔者的使用,将实际开发过程和经历融合到各个章节。在实践部分的每章都将对其应用进行深入分析和讨论,以便让读者更加深入了解 STM32 单片机的基础和更加全面掌握其应用开发技巧。

全书分为 13 章,1~5 章主要简单地介绍 STM32F10X 的基本理论,第 6~13 章则重点介绍 STM32F10X 在各个部分的工程应用设计。

本书第 1、2、3、4 章由重庆工商大学梁华编写;第 5、6、7 章由河南理工大学电气工程与自动化学院朱军编写;第 8、9、10、11、12、13 章由重庆工商大学杨光祥编写。全书由杨光祥统稿及修改。武汉理工大学朱宏辉教授和重庆大学苏玉刚教授认真审阅了本书的书稿;刘旭东高工、王永刚及姜继勋工程师对本书提出了宝贵意见并给予帮助。在此感谢以上专家和同行。由于计算机技术发展迅速,新技术新资料更新快,且笔者水平有限,书中难免出现疏漏和不当之处,敬请读者批评指正!

作 者

2013 年元月

目 录

第 1 章	ARM 家族介绍	(1)
1.1	单片微型计算机发展	(1)
1.2	嵌入式系统简介	(1)
1.3	Cortex-M3 简介	(4)
1.4	ARM 系列嵌入式系统处理器	(5)
第 2 章	Cortex-M3 体系结构	(8)
2.1	微处理器核结构	(8)
2.2	处理器的操作模式及状态	(9)
2.3	寄存器	(9)
2.4	总线矩阵	(10)
2.5	系统地址映射	(11)
2.6	指令集	(12)
2.7	流水线	(15)
2.8	异常和中断处理	(16)
第 3 章	STM32F10X 电源、时钟及复位电路	(18)
3.1	电源电路	(18)
3.2	时钟树结构	(19)
3.3	复位电路	(23)
3.4	启动设置	(24)
第 4 章	STM32F10X 最小系统与开发环境	(26)
4.1	STM32F10X 最小系统运行条件	(26)
4.2	STM32F10X 最小系统设计要点	(26)
4.3	STM32F10X 程序下载的几种方法	(28)
4.4	FWLib 固件库	(28)
4.5	开发环境	(28)
4.6	IAR EWARM 使用入门	(30)
4.7	STM32 入门之点亮流水灯	(41)
第 5 章	STM32F10X 功能与资源概述	(45)
5.1	电源控制	(45)
5.2	实时时钟 RTC	(46)
5.3	备份寄存器 BKP	(48)
5.4	独立看门狗 IWDG	(49)
5.5	GPIO	(50)
5.6	中断和事件	(53)

5.7	DMA 控制器	(55)
5.8	高级定时控制器 TIM1	(57)
5.9	通用定时控制器 TIMx	(60)
5.10	控制器局域网 bxCAN	(63)
5.11	I2C 接口	(67)
5.12	串行外设接口 SPI	(69)
5.13	USART 收发器	(73)
5.14	USB 全速设备接口	(78)
5.15	模拟/数字转换 ADC	(80)
5.16	调试支持 DBG	(83)
第 6 章	基于 STM32 的 M1 非接触卡的读卡器设计	(85)
6.1	概述	(85)
6.2	非接触卡的分类	(85)
6.3	M1 非接触卡读卡器系统设计	(85)
6.4	M1 非接触卡读卡器硬件设计	(86)
6.5	M1 非接触卡读卡器软件设计	(91)
6.6	总结	(103)
第 7 章	基于 STM32 的数字远程数据采集站	(105)
7.1	概述	(105)
7.2	数字远程数据采集站硬件设计	(105)
7.3	数字远程数据采集站软件设计	(114)
7.4	总结	(137)
第 8 章	基于 STM32 的矿用安全监测数据转发器设计	(138)
8.1	概述	(138)
8.2	数据转发器技术要求	(138)
8.3	RS485 总线基础	(139)
8.4	CANBUS 总线基础	(139)
8.5	STM32F10X 的 CAN 总线接口	(140)
8.6	数据转发器设计	(146)
8.7	PFC8563 的程序设计	(151)
8.8	RS485 收发电路设计	(158)
8.9	CAN 收发电路设计	(162)
8.10	自恢复看门狗设计	(166)
8.11	主程序设计	(166)
8.12	总结	(167)
第 9 章	基于 STM32 的多路无线温度采集系统	(170)
9.1	概述	(170)
9.2	多路无线温度采集板设计	(171)
9.3	数据接收显示设计	(208)
第 10 章	基于 STM32 的电力采集板设计	(214)
10.1	概述	(214)

10.2	电力采集板功能需求	(214)
10.3	ATT7022A 简介	(215)
10.4	ATT7022A 部分寄存器说明	(219)
10.5	采集板设计	(223)
10.6	系统程序设计分析	(228)
10.7	总结	(234)
第 11 章	液晶触摸屏在 STM32F10X 上的移植	(235)
11.1	概述	(235)
11.2	STM32 的 FSMC 简介	(235)
11.3	液晶显示模块设计	(238)
11.4	GPS 定位模块设计	(263)
11.5	总结	(274)
第 12 章	基于 STM32 的 USB 键盘设计	(275)
12.1	USB 概述	(275)
12.2	USB 的特点	(275)
12.3	基于 STM32 的 USB 键盘设计要求	(277)
12.4	STM32F10X 的 USB 功能简介	(277)
12.5	USB 键盘硬件设计	(284)
12.6	USB 键盘程序设计及分析	(286)
12.7	总结	(303)
第 13 章	基于 STM32 的 μC/OS-II 嵌入式系统移植	(305)
13.1	嵌入式系统简介	(305)
13.2	μ C/OS-II 操作系统简介	(306)
13.3	μ C/OS-II 操作系统任务管理	(307)
13.4	μ C/OS-II 操作系统时间管理	(310)
13.5	μ C/OS-II 操作系统任务间通信	(311)
13.6	μ C/OS-II 操作系统在 STM32 上的移植	(316)
13.7	μ C/OS-II 操作系统步骤	(316)
13.8	总结	(323)
参考文献		(324)

第 1 章 ARM 家族介绍

1.1 单片微型计算机发展

单片微型计算机,简称“单片机”(Single Chip Microcomputer),也叫“MCU”(Micro Controller Unit,微控制器),是一块集成电路芯片。单片机是采用超大规模集成电路把中央处理器 CPU、随机存储器 RAM、只读存储器 ROM、中断系统、定时器/计数器、AD 转换器、通信接口和普通 I/O 口等集成到一块硅片上,构成的一个微型的、完整的计算机系统。单片机的 CPU 相当于 PC 机的 CPU,单片机的数据存储器 RAM 相当于 PC 机的内存,单片机的程序存储器 ROM 相当于 PC 机的硬盘,单片机的 I/O 口相当于 PC 机的显卡、网卡、扩展卡等的插槽等。可见,麻雀虽小五脏俱全。

单片机的 CPU(Central Processing Unit,中央处理器)是单片机的核心部件,由控制单元、算术逻辑单元和寄存器单元等部分组成,实现逻辑运算。根据数据总线的宽度和一次可处理的数据字节长度可分为 8 位 CPU、16 位 CPU 和 32 位 CPU 等。单片机的位数是根据单片机内部的 CPU 的位数决定的,如 8 位单片机使用的是 8 位 CPU,16 位单片机使用的是 16 位 CPU,以此类推。笔者看到有些书把单片机称作微处理器是不准确的,微处理器只是计算机系统里的一个核心部件而已。而单片机是一个完整的计算机系统,把它称为微控制器更准确些。

单片机自诞生以来,以其性能稳定、低电压低功耗、经久耐用、体积小、性价比高、控制能力强、易于扩展等优点,广泛应用于各个领域。先后出现了 4 位单片机、8 位单片机、16 位单片机、32 位单片机。在这几类单片机里最受追捧的是 8 位单片机,是相当一段时间里单片机应用的主流。目前仍然和 32 位单片机一样占据着重要的市场份额。随着电子技术的迅速发展,单片机的功能也越来越强大。

1.2 嵌入式系统简介

虽然嵌入式系统是近十几年才风靡起来的,但是从 20 世纪 70 年代单片机的出现到今天各式各样的嵌入式微处理器、微控制器的大规模应用,嵌入式系统已经有了近 30 年的发展历史。作为一个系统,往往是在硬件和软件交替发展的双螺旋的支撑下逐渐趋于稳定和成熟,嵌入式系统也不例外。

根据 IEEE(国际电机工程师协会)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”(原文为 devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants)。这主要是从应用上加以定义的,从中可以看出嵌入式系统是软件和硬件的综合体,还可以涵盖机械等附属装置。不过上述定义并不能充分体现出嵌入式系统的精髓,目前国内一个普遍被认同的定义是:以应用为中心,以计算机技术为基础,软件硬件可裁剪,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。

根据其定义,嵌入式系统包含了以下几个方面含义:

(1)嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的,它必须与具体应用相结合才会具有生命力、才会更具有优势。因此,可以这样理解上述三个面向的含义,即嵌入式系统是与应用紧密结合的,它具有很强的专用性,必须结合实际系统需求进行合理的裁剪利用。

(2)嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术和电子技术与各个行业的具体应用相结合后的产物,这一点就决定了它必然是一个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成系统。所以,介入嵌入式系统行业,必须有一个正确的定位。例如 Palm 之所以在 PDA 领域占有 70% 以上的市场,就是因为其立足于个人电子消费品,着重发展图形界面和多任务管理;而风河的 Vxworks 之所以在火星车上得以应用,则是因为其高实时性和高可靠性。

(3)嵌入式系统必须根据应用需求对软硬件进行裁剪,满足应用系统的功能、可靠性、成本、体积等要求。所以,如果能建立相对通用的软硬件基础,然后在其上开发出适应各种需要的系统,是一个比较好的发展模式。目前的嵌入式系统的核心往往是一个只有几 KB 到几十 KB 的微内核,需要根据实际的使用进行功能扩展或者裁减,由于微内核的存在,使得这种扩展能够非常顺利地

进行。

实际上,嵌入式系统本身是一个外延极广的名词,凡是与产品结合在一起的具有嵌入式特点的控制

系统都可以叫嵌入式系统,而且有时很难给它下一个准确的定义。现在人们讲嵌入式系统时,某种程度上指近些年比较热门的具有操作系统的嵌入式系统。

一般而言,嵌入式系统的构架可以分成四个部分:处理器、存储器、输入输出(I/O)和软件(由于多数嵌入式设备的应用软件和操作系统都是紧密结合的,在这里我们对其不加区分,这也是嵌入式系统和 Windows 系统的最大区别)。

从硬件方面来讲,嵌入式处理器是嵌入式系统硬件中最核心的部分。根据其现状,嵌入式处理器可以分成下面几类:

(1)嵌入式微处理器(Micro Processor Unit,MPU)

嵌入式微处理器是由通用计算机中的 CPU 演变而来的。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,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、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 Am186/88、386EX、SC-400、Power PC、68000、MIPS、ARM/ StrongARM 系列等。

(2)嵌入式微控制器(Micro Controller Unit,MCU)

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 40 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、定时器/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。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。

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 MCS-51、MCS-96/196/296、P51XA、AVR 系列、C166/167、68K 系列以及 MCU 8XC930/931、C540、C541,并且有支持 I2C、CAN-Bus、LCD 及众多专用 MCU 和兼容系列。目前 MCU 占嵌入式系统

比较高的市场份额。

(3) 嵌入式 DSP 处理器(Embedded Digital Signal Processor, EDSP)

DSP 处理器是专门用于信号处理方面的处理器,它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 等分离元件实现。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的发展,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。

目前广泛应用的有 TI 的 TMS320C2000/C5000 系列、Intel 的 MCS-296、Siemens 的 TriCore 等。

(4) 嵌入式片上系统(System on Chip, SoC)

SoC 追求产品系统最大包容的集成器件,是目前嵌入式应用领域的热门话题之一。SoC 最大的特点是成功实现了软硬件无缝结合,直接在处理器片内嵌入操作系统的代码模块。而且 SoC 具有极高的综合性,在一个硅片内部运用 VHDL 等硬件描述语言,实现一个复杂的系统。用户不需要再像传统的系统设计一样,绘制庞大复杂的电路板,一点点地连接焊制,只需要使用精确的语言,综合时序设计直接在器件库中调用各种通用处理器的标准,然后通过仿真之后就可以直接交付芯片厂商进行生产。由于绝大部分系统构件都是在系统内部,整个系统就特别简洁,不仅减小了系统的体积和功耗,而且提高了系统的可靠性,提高了设计生产效率。

从软件方面,主要可以依据操作系统的类型来划分。目前嵌入式系统的软件主要有两大类:实时系统和分时系统。其中实时系统又分为两类:硬实时系统和软实时系统。

实时系统是为执行特定功能而设计的,可以严格地按时序执行功能。其最大的特征就是程序的执行具有确定性。在实时系统中,如果系统在指定的时间内未能实现某个确定的任务,会导致系统的全面失败,则系统被称为硬实时系统。而在软实时系统中,虽然响应时间同样重要,但是超时却不会导致致命错误。一个硬实时系统往往在硬件上需要添加专门用于时间和优先级管理的控制芯片,而软实时系统则主要在软件方面通过编程实现时限的管理。比如 Windows CE 就是一个多任务分时系统,而 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 则是典型的实时操作系统。

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:

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、减少人力资源浪费的主要途径,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。

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,只需要几百元,就可以随时随地找到目标的位置。

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。

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。

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。

环境工程与自然:包括水文资料实时监测,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。

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的应用。

1.3 Cortex-M3 简介

ARM Cortex-M3 处理器是一个低能耗处理器,特点是门数低、中断延迟短且调试成本低。它专用于要求快速中断响应的深层嵌入式应用程序,包括微控制器、汽车和工业控制系统。

单片机市场的规模空前巨大,使得世界各地的器件供应商纷纷亮出自己的得意之作,他们提供的器件和架构也是各具特色。业界内部可谓百花齐放,热闹非凡,好戏不断。各行各业对单片机能力的要求也越来越高,处理器在相同主频和功耗的条件下能够提供更加强大的功能,这就意味着必须在片上添加设计更多的外设。软件方面的情况也如出一辙,要求更高的运算速度,更硬的实时能力,更多的功能模块,更炫的图形界面,等等。在这个大环境下,ARM Cortex-M3 处理器诞生了。由于采用了最新的设计技术,它的门数更低,性能却更强。许多曾经只能求助于高级 32 位处理器或 DSP 的软件设计,都能在 CM3 上得到同等的效率。嵌入式处理器市场中 32 位处理器渐渐成为主流,CM3 就像当年 8051 推动整个业界一样,正在发挥更大的作用。

CM3 的主要特点包括:

- (1)性能强劲。在相同的主频下能处理更多的任务。
- (2)功耗低。延长了电池的寿命——这简直就是便携式设备的命门(如无线网络应用)。
- (3)实时性好。采用了全新的设计理念,使它能迅速地响应中断,而且响应中断所需的周期数是确定的。
- (4)代码密度得到很大改善。不论是针对大型应用程序还是低成本设计都能游刃有余。
- (5)使用更方便。现在 32 位处理器渐渐成为主流,更简单的编程模型和易操作的调试系统,为用户大大减负。
- (6)低成本的整体解决方案。让 32 位系统比 8 位/16 位的还便宜,低端的 Cortex-M3 单片机售价甚至还不到 1 美元。
- (7)大众化的开发工具。

基于 Cortex-M3 内核的处理器已经在研发和工程中得到了非常广泛的应用,而且性能比较高。Cortex-M3 内核设计人员在设计上在不断降低成本,同时很多组织也在尝试实现“器件聚合”(device aggregation),使一个单一的小型芯片可以抵得上以前三四块传统的单片机。

基础代码在所有系统中都可以重用而且方便移植,是 Cortex-M3 的另一个重要特点。CM3 的内核架构非常精细,能够与 C 语言无缝配合。C 程序代码可以很容易移植并重用。这些新特性使得 CM3 得到了广大工程研究人员的青睐和在嵌入式行业的广泛应用。

1.4 ARM 系列嵌入式系统处理器

ARM 是 32 位嵌入式微处理器的行业提供商,已推出各种各样基于通用架构的处理器,这些处理器具有高性能和行业领先的功效,而且系统成本也有所降低。与业界最广泛的体系(拥有超过 900 个可提供硅、工具和软件的合作伙伴)相结合,已推出的一系列 20 多种处理器,可以解决每个应用挑战。迄今为止,ARM 已生产超过 250 亿个处理器,每天的销量超过 1600 万,是真正意义上的 The Architecture for the Digital World(数字世界的架构)。

1.4.1 ARM 处理器分类

ARM 处理器可以分为以下几大类,如图 1-1 所示。

- ARM Cortex 应用处理器
- ARM Cortex 嵌入式处理器
- 经典 ARM 处理器
- ARM 专业处理器

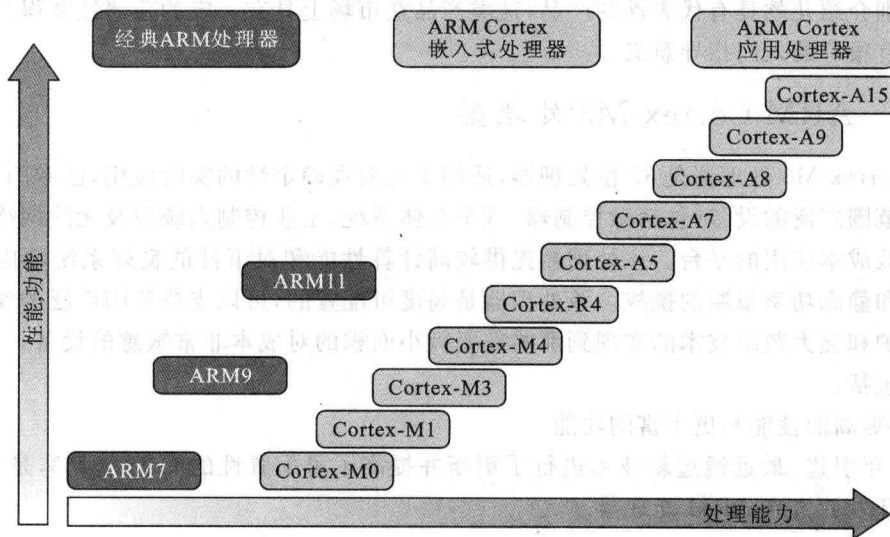


图 1-1 ARM 系列处理器

ARM Cortex 应用处理器主要指 Cortex-A 系列处理器,是一款开放式操作系统的高性能处理器。ARM Cortex 应用处理器在先进工艺节点中可实现高达 2GHz+ 标准频率的性能,可支持下一代的移动 Internet 设备。这些处理器具有单核和多核种类,最多提供四个具有可选 NEON 多媒体处理模块和先进浮点执行单元的处理单元。应用包括:智能手机、智能本和上网本、电子书阅读器、数字电视、家用网关、各种其他产品。

ARM Cortex 嵌入式处理器包括 Cortex-R 系列和 Cortex-M 系列。Cortex-R 系列是一款面向实时应用的处理器;Cortex-M 系列则是面向具有确定性的微控制器应用的成本敏感型解决方案。ARM Cortex 嵌入式处理器旨在为各种不同的市场提供服务。Cortex-M 系列处理器主要是针对

微控制器领域开发的,在该领域中,既需进行快速且具有高确定性的中断管理,又需将门数和可能功耗控制在最低。而 Cortex-R 系列处理器的开发则面向深层嵌入式实时应用,对低功耗、要求良好的中断行为、高性能以及与现有平台的高兼容性这些需求进行了平衡考虑。Cortex-R 系列应用包括汽车制动系统、动力传动解决方案、大容量存储控制器、网络和打印。Cortex-M 系列微控制器应用包括混合信号设备、智能传感器、汽车电子和气囊。

经典 ARM 处理器包括 ARM11 系列、ARM9 系列和 ARM7 系列。ARM11 系列是基于 ARMv6 架构的高性能处理器;ARM9 系列是基于 ARMv5 架构的常用处理器;而 ARM7 系列则是面向通用应用的经典处理器。

经典 ARM 处理器适用于那些希望在新应用中使用经过市场验证的技术的组织。这些处理器提供了功能多、能效高和范围广的操作性能,适用于成本敏感型解决方案。这些处理器每年都有数十亿的发货量,可保证设计者获得广泛的系统和资源,从而最大限度地减少集成过程中出现的问题并缩短上市时间。

ARM 专业处理器包括 SecurCore 和 FPGA Cores。其中 SecurCore 是面向高安全性应用的处理器,而 FPGA Cores 是面向 FPGA 的处理器。ARM 专业处理器设计目的在于满足特定市场的苛刻需求。SecurCore 处理器在安全市场中用于手机 SIM 卡和证件应用,集成了多种既可为用户提供卓越性能,又能检测和避免安全攻击的技术。ARM 开发面向 FPGA 构造的处理器,在保持与传统 ARM 设备兼容的同时,使用户产品快速上市。此外,这些处理器具有独立于构造的特性,因此开发人员可以根据应用选择相应的目标设备,而不会被绑定于特定供应商。

下面分别介绍几款具有代表性的产品,这类产品在市场上具有一定的普遍性并得到广泛应用,对初学者具有很好的入门指导意义。

1.4.2 ARM Cortex-M3 处理器

ARM Cortex-M3 处理器是 32 位处理器,适用于具有高确定性的实时应用,已专门开发为允许合作伙伴为范围广泛的设备(包括微控制器、汽车车体系统、工业控制系统以及无线网络和传感器)开发高性能低成本应用的平台。该处理器提供较高计算性能和对事件的良好系统响应,同时可以应对低动态和静态功率限制的挑战。该处理器是高度可配置的,可以支持范围广泛的实现(从那些需要内存保护和强大跟踪技术的实现到那些需要极小面积的对成本非常敏感的设备)。

其特点包括:

(1) 提供更高的性能和更丰富的功能

于 2004 年引进、最近通过新技术进行了更新并提高了可配置性的 Cortex-M3,是专门针对微控制器应用开发的主流 ARM 处理器。

(2) 性能和能效

具有高性能和低动态能耗,Cortex-M3 处理器在 90nm G 基础上为 12.5DMIPS/mW。将集成的睡眠模式与可选的状态保留功能相结合,Cortex-M3 处理器提供低能耗和高性能。

(3) 全功能

该处理器执行包括硬件除法、单周期乘法和位字段操作在内的 Thumb-2 指令集以获取最佳性能和代码大小。Cortex-M3 NVIC 在设计时是高度可配置的,最多可提供 240 个具有单独优先级、动态重设优先级功能和集成系统时钟的系统中断。

(4) 丰富的连接

功能和性能的组合使基于 Cortex-M3 的设备可以有效处理多个 I/O 通道和协议标准,如 USB OTG (On-The-Go)。

1.4.3 ARM Cortex-A8 处理器

ARM Cortex-A8 处理器基于 ARMv7 体系结构,能够将速度从 600MHz 提高到 1GHz 以上。Cortex-A8 处理器可以满足需要在 300mW 以下运行的移动设备的功率优化要求;以及需要 2000 Dhrystone MIPS 的消费类应用领域的性能优化要求。

Cortex-A8 高性能处理器在如今的终端设备中得到了应用。从高端特色手机到上网本、DTV、打印机和汽车信息娱乐,Cortex-A8 处理器都提供了可靠的高性能解决方案,每年发货数百万台。该处理器特别适合高性能应用领域。特点包括:频率从 600MHz 到 1GHz 及以上;高性能、超标量微体系结构;用于多媒体和 SIMD 处理的 NEON™ 技术;与 ARM926、ARM1136 和 ARM1176 处理器的二进制兼容性。

Cortex-A8 设计用来满足需要高性能、高功效、经常集成 Web 连接的市场需求,其中包括:智能手机,运行全功能移动操作系统的应用处理器;上网本,运行桌面操作系统的高功效主处理器;机顶盒,用于管理丰富操作系统、多格式 A/V 和 UI 的主处理器;数字电视,用于管理丰富操作系统、UI 和浏览器的处理器;家庭网络,系统管理的控制处理器;存储网络(HDD、SSD)用于管理通信流的控制处理器;打印机,高性能集成处理器。

1.4.4 ARM Cortex-R4 处理器

Cortex-R4 处理器是第一个基于 ARMv7-R 体系结构的深层嵌入式实时处理器。它专用于大容量深层嵌入式片上系统应用,如硬盘驱动器控制器、无线基带处理器、消费性产品和汽车系统的电子控制单元。

Cortex-R4 提供的性能、实时响应性大大高于同类中的其他处理器,它提供的功能也远远多于同类中的其他处理器。此处理器为 ASIC、ASSP 和 MCU 嵌入式应用提供出色的能效和成本效益。并且,可以在合成时配置 Cortex-R4 处理器以优化其功能集以便精确匹配应用需求。

Cortex-R4 是成熟的处理器,于 2006 年 5 月投放市场,如今已在数百万的 ASIC、ASSP 和 MCU 设备中使用。它是高性能实时 SoC 的标准,取代了许多基于 ARM9 和 ARM11 处理器的设计。

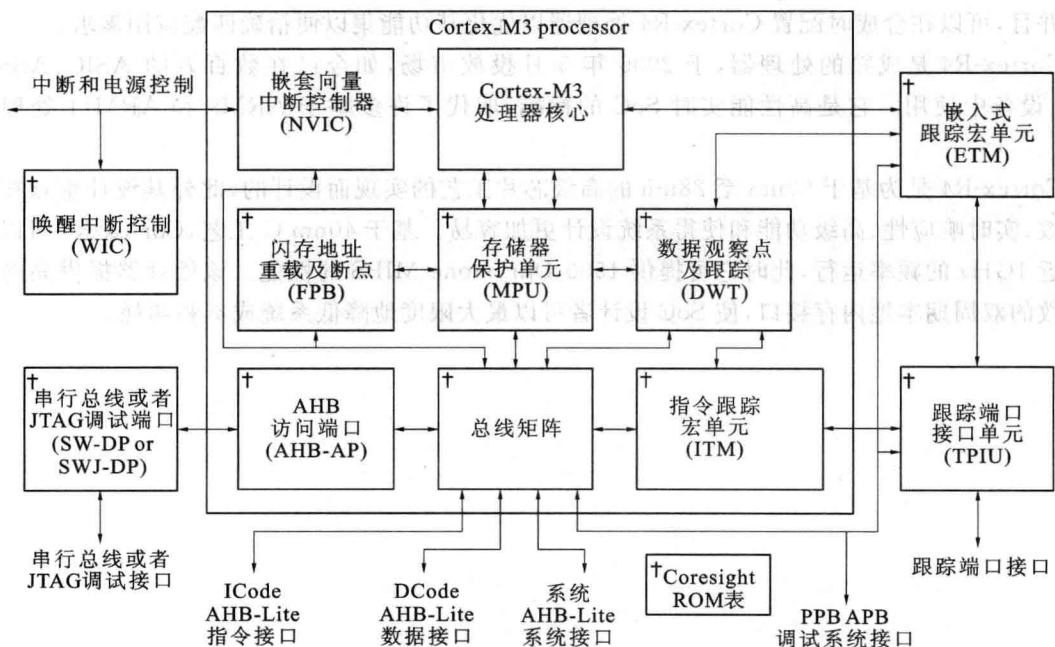
Cortex-R4 是为基于 90nm 至 28nm 的高级芯片工艺的实现而设计的,此外其设计重点在于提升能效、实时响应性、高级功能和使得系统设计更加容易。基于 40nm G 工艺,Cortex-R4 可以实现以将近 1GHz 的频率运行,此时它可提供 1500 Dhrystone MIPS 的性能。该处理器提供高度灵活且有效的双周期本地内存接口,使 SoC 设计者可以最大限度地降低系统成本和功耗。

第 2 章 Cortex-M3 体系结构

2.1 微处理器核结构

ARM Cortex-M3 是一款低功耗处理器,具有低门数、小中断延迟、低成本调试特性。主要应用于需要优秀的中断响应特性的深度嵌入式应用。Cortex-M3 是一个 32 位处理器内核。内部的数据路径、寄存器、存储器接口都是 32 位的。CM3 采用了哈佛结构,拥有独立的指令总线和数据总线,可以让取指与数据访问并行不冲突。这样一来数据访问不再占用指令总线,从而提升了性能。为实现这个特性,CM3 内部包含好几条总线接口,每条都为自己的应用场合优化过,并且它们可以并行工作。但是另一方面,指令总线和数据总线共享同一个存储器空间(一个统一的存储器系统)。

ARM Cortex-M3 包括一个处理器核、嵌套向量中断控制器 NVIC(Nested Vectored Interrupt Controller)、多个高性能总线接口和一个可选的存储器保护单元 MPU(Memory Protection Unit)。其内部结构如图 2-1 所示。



† Optional component

图 2-1 Cortex-M3 内部结构块图

处理器内核是 ARMv7-M 架构的, Cortex-M3 内核是建立在一个高性能哈佛结构的三级流水线基础上的, 可满足事件驱动的应用需求。通过广泛采用时钟选通等技术, 改进了每个时钟周期的性能, 包括单周期的 32×32 乘法和硬件除法, 获得了优异的能效比。另外, 通过一个基于堆栈的异常模式的实现, 显著地缩小了内核的物理尺寸。Cortex-M3 内核实现了 Thumb-2 指令集——传统 Thumb 指令集的一个超集, 既获得了传统 32 位代码的性能, 又具有 16 位的高代码密度。

2.2 处理器的操作模式及状态

处理器有两种操作模式: 线程模式(Thread mode)和处理者模式(Handler mode)。

处理器在复位状态下默认进入线程模式, 或返回异常的情况下也会进入线程模式, 特权级(privileged)或者非特权级(unprivileged)代码都可以在线程模式下运行。

处理器会在异常情况下进入处理者模式, 该模式下所有代码都是运行在特权级。

处理器可以工作在以下两种操作状态:

Thumb 状态: 这是一个常规的执行状态, 运行 16 位和 32 位半字节对齐 Thumb 指令。

Debug 状态: 这个状态是处理器在停机调试的状态。

处理器的访问模式: 特权访问和用户访问。

代码可以在特权级或者非特权级条件下执行。非特权级下执行限制或者排除了对某些资源的访问。特权级下执行可有权访问所有资源。处理者模式总是在特权级下的, 而线程模式可以是在特权级下或者在非特权级下。

2.3 寄存器

Cortex-M3 具有如下 32 位寄存器:

■ 13 个 32 位的通用寄存器, R0~R12;

■ 链接寄存器 LR, Link Register; R14;

■ 程序计数器 PC, Program Counter; R15;

■ 程序状态寄存器 xPSR, Special-purpose Program Status Registers;

■ 2 个分段堆栈指针寄存器: 堆栈指针 Stack Pointer(SP), 即 R13, 包含两个堆栈指针: 进程堆栈指针 SP_{process} 和主堆栈指针 SP_{main}。

图 2-2 表示了处理器寄存器集。

通用寄存器 R0~R12 没有特殊体系结构定义的用途。绝大多数指令都可以指定通用寄存器 R0~R12。

低寄存器: R0~R7 可以当作通用寄存器被所有指令访问。

高寄存器: R8~R12 可以当作通用寄存器被所有 32 位指令访问。因此, R8~R12 不能够被任何 16 位指令访问。

寄存器 R13、R14、R15 具有如下特殊功能:

堆栈指针(Stack Pointer): 寄存器 R13 用作堆栈指针 SP。由于 SP 忽略写入位[1:0], 它按照四个字节边界自动对齐一个字。

处理者模式总是使用 SP_{main}, 但是可以配置线程模式使用 SP_{main} 或者 SP_{process}。

链接寄存器: 寄存器 R14 是子程序链接寄存器(LR)。

当分支和链接(BL)指令或分支和链接交换(BLX)指令执行时, LR 接收来自 PC 的返回地址。

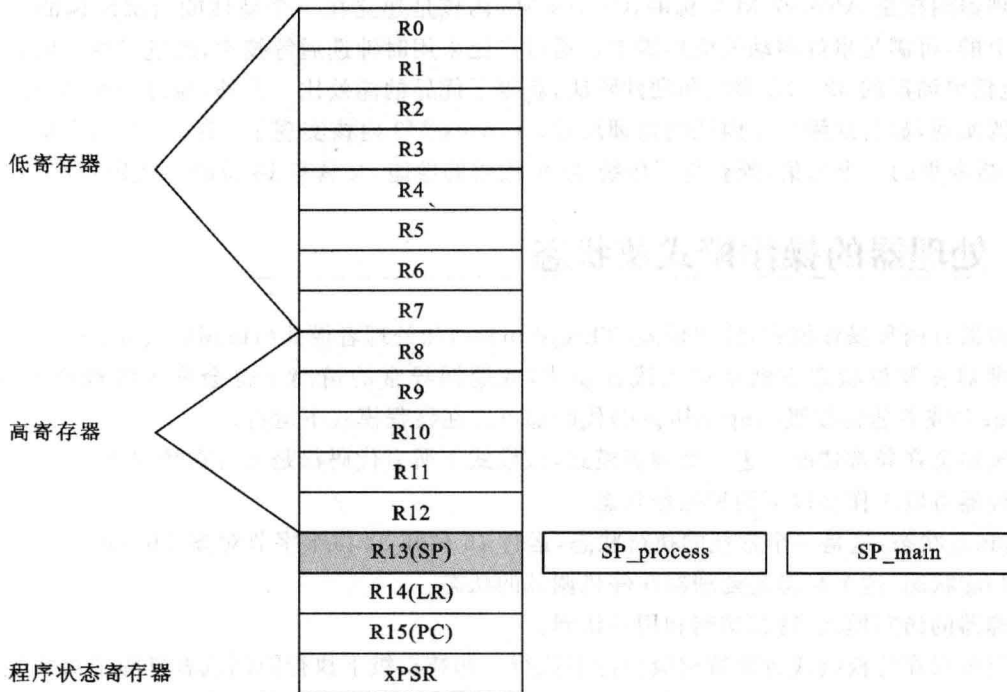


图 2-2 处理器寄存器集

LR 也可用于异常返回。

在其他情况下,可以把 R14 当作通用寄存器使用。

程序计数器:寄存器 R15 是程序计数器(PC)。

位[0]始终为 0,因此指令始终是按照字边界或半字边界对齐。

2.4 总线矩阵

ARM Cortex-M3 处理器集成了一个 AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture) AHB(Advanced High-performance Bus)-Lite 总线来连接系统外设,并降低系统集成的复杂性。总线矩阵支持不对齐的数据访问,使不同的数据类型可以在存储器中紧密衔接(不因为数据需要对齐而留出空隙),可显著降低 SRAM 的需求和系统成本。

总线矩阵将处理器、调试接口连接到外部总线。总线矩阵连接到以下外部总线:

- (1) ICode 总线。这是一条 32 位的 AHB-Lite 总线,主要用于从指令空间中取指和取向量;
- (2) DCode 总线。这是一条 32 位的 AHB-Lite 总线,主要用于对指令空间的数据读写和调试访问;
- (3) 系统总线。这是一条 32 位的 AHB-Lite 总线,主要用于从系统空间中取指、取向量,并进行数据读写和调试访问;
- (4) PPB (Private Peripheral Bus)。这是一条 32 位的 APB (v2.0) 总线,主要用于对 PPB 空间的数据读写和调试访问。

总线矩阵还控制:

- (1) 不对齐访问。总线矩阵把不对齐的处理器访问转化成对齐的访问。
- (2) 位绑定 (bit banding)。总线矩阵把位绑定的别名 (alias) 访问转换成位绑定的区域访问。完