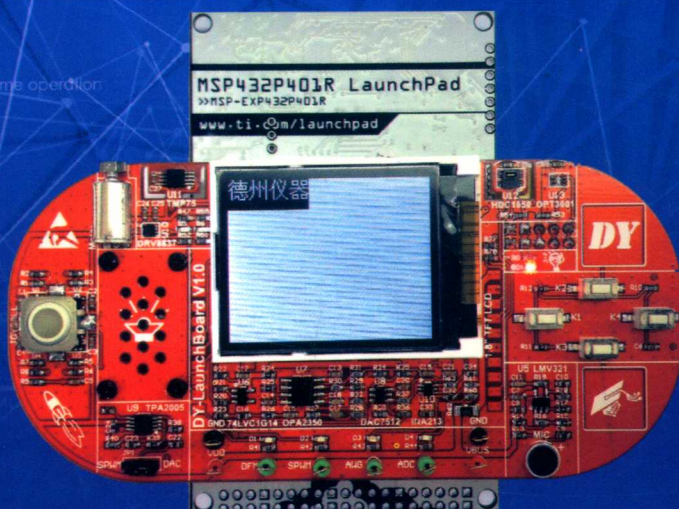




Technology by

TEXAS

INSTRUMENTS 中国大学计划教材



MSP432系列超低功耗 ARM Cortex-M4微控制器 原理与实践

沈建华 张超 李晋 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

MSP432 系列超低功耗 ARM Cortex-M4 微控制器原理与实践

沈建华 张 超 李 晋 编著



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

TI 公司的 MSP432 系列微控制器集合了 MSP430 系列的超低功耗特性和 ARM Cortex-M4F 内核的高处理性能,以及品种丰富、配置灵活的多种外设。本书介绍了 MSP432 微控制器的主要特点,详细讲述了 MSP432 的内核和系统结构,对 MSP432 的系统外设、应用外设的功能、原理、基本使用进行了详细的描述,并介绍了 MSP432 的软硬件开发环境、嵌入式程序设计,设计了 10 多个单元的功能实验和综合实验。

本书既可作为高等院校计算机、物联网、电子、自动化类专业嵌入式系统、微机原理与接口、单片机应用等课程的教材,也可作为从事单片机应用系统开发的工程技术人员的学习、参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

MSP432 系列超低功耗 ARM Cortex-M4 微控制器原理与实践 / 沈建华, 张超, 李晋编著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5124-2507-1

I. ①M… II. ①沈… ②张… ③李… III. ①微控制器—研究 IV. ①TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 224217 号

版权所有,侵权必究。

MSP432 系列超低功耗 ARM Cortex-M4 微控制器原理与实践

沈建华 张超 李晋 编著

责任编辑 杨昕

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:20.5 字数:437 千字

2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2507-1 定价:49.00 元

前言

随着物联网时代的到来,微控制器(MCU、单片机)的应用迎来了更广阔的发展空间,但同时对单片机综合性能的要求也越来越高。纵观单片机的发展,以应用需求为目标,市场越来越细化,充分突出以“单片”解决问题,而不像以前以处理器为中心,外扩各种接口构成各种应用系统。单片机系统作为嵌入式系统的重要组成部分,主要集中在相对简单的应用领域(复杂嵌入式应用主要由 DSP、MPU 等高性能处理器完成)。在这些应用中,目前也出现了一些新的需求,主要体现在以下几个方面:

① 以电池供电的应用越来越多,而且由于产品体积的限制,很多是用小型电池供电的,要求系统功耗尽可能低。

② 随着应用复杂性的提高,对处理器功能和性能的要求也不断提高,既要求外设丰富、功能灵活,又要求有一定的运算能力,能做一些实时算法和协议处理,而不仅仅是做一些简单的控制。

③ 产品更新速度快,开发时间短,软件开发测试成本越来越高,希望开发工具简单、廉价,软件重用性高,便于移植。

美国德州仪器(TI)公司最新推出的 MSP432 系列 32 位混合信号处理器(Mixed Signal Processor),集成了 32 位高性能 ARM Cortex-M4F 处理器和丰富的片内外设,结合 TI 公司原有的 MSP430 超低功耗和高性能模拟技术,并具有 ARM MCU 良好的软件重用性,可满足更多的嵌入式、物联网应用需求。加之 TI 公司的优良服务(全球免费快速网上样片申请、丰富的技术资料 and 开发者社区),充分体现了世界级著名 IC 厂商的实力和综合优势。

20 多年来,华东师范大学计算机系嵌入式系统实验室与多家全球著名的半导体厂商合作,在 MCU 的应用开发、推广、教学方面积累了丰富的经验。特别是与 TI 公司大学计划部,从 2002 年合作至今,TI 公司在合作项目、开发板卡、芯片样片等方面都给予了我们很大的支持,提升了我们的教学和科研水平。我们先后编写了《MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用》《嵌入式系统教程——基于 Tiva ARM Cortex-M 系列微控制器》《CC3200 嵌入式 Wi-Fi SoC 原理与应用》等教材和专业书籍,并设计开发了配套的实验系统和板卡。编写此书也是延续我们和 TI 公司大学计划的合作,把 TI 公司最新的 MCU 技术和产品应用到项目开发和教学实践中,希望可以缩短学以致用的时间和路径。

上海大学机电工程自动化学院工程训练中心的李晋老师、无锡科技职业学院物

联网与软件技术学院移动互联系的张超老师参与了本书部分章节的编写。此外,参与本书编写和资料整理、硬件设计和代码验证等工作的,还有华东师范大学计算机系的孙乐晨、洪明杰、张熠、张红艳、林雯、陶立清、郝立平等。在本书策划、编写过程中,还得到了 TI 公司大学计划部沈洁、王承宁、潘亚涛、崔萌、钟舒阳、王沁,上海德研电子科技有限公司陈宫、姜哲,北京航空航天大学出版社胡晓柏的大力支持。在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中的错误与不妥之处在所难免,恳请读者批评指正,以便我们及时修正。

作者

2017 年 7 月于华东师范大学

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 微控制器 MCU	1
1.1.1 MCU 的概念	1
1.1.2 MCU 的基本组成和特点	2
1.1.3 MCU 的发展与应用	3
1.1.4 TI 公司主要单片机系列	4
1.2 MSP432 系列单片机	5
1.2.1 MSP432 系列单片机的特点	7
1.2.2 MSP43x 系列单片机的发展和应用	8
1.2.3 MSP432 系列单片机选型	10
1.3 本章小结	11
1.4 思考题	12
第 2 章 MSP432 的结构和系统外设	13
2.1 Cortex-M4F 内核	13
2.1.1 Cortex-M4F 内核概述	13
2.1.2 Cortex-M4F 内核结构	14
2.2 内部存储器	15
2.2.1 内部存储器概述	15
2.2.2 Flash 闪存	16
2.2.3 SRAM	17
2.2.4 ROM	17
2.3 系统时钟模块	18
2.3.1 系统时钟模块简介	18
2.3.2 寄存器与库函数	20

2.4 电源系统	24
2.4.1 供电系统	24
2.4.2 电源控制系统	25
2.4.3 各种功耗模式	26
2.4.4 供电系统 PSS 寄存器与库函数	27
2.4.5 电源控制系统 PCM 寄存器和库函数	29
2.5 直接内存访问控制器	32
2.5.1 DMA 工作原理	32
2.5.2 DMA 内部工作模块	32
2.5.3 DMA 主要特性	34
2.5.4 数据传输模式	37
2.5.5 DMA 模块寄存器与库函数	38
2.6 本章小结	42
2.7 思考题	43
第 3 章 MSP432 应用外设	44
3.1 通用输入/输出(GPIO)	44
3.1.1 GPIO 概述	44
3.1.2 GPIO 模块结构	45
3.1.3 GPIO 端口配置	45
3.1.4 GPIO 寄存器与库函数	46
3.2 端口映射控制器(PMAP)	49
3.2.1 PMAP 的主要特性	49
3.2.2 PMAP 的操作方式	49
3.2.3 PMAP 寄存器与库函数	50
3.3 定时器	52
3.3.1 Timer32	52
3.3.2 TimerA	55
3.3.3 看门狗定时器	63
3.4 通用异步串行通信(UART)	65
3.4.1 UART 协议概述	65
3.4.2 UART 内部工作模块与外部接口	67
3.4.3 异步多机通信模式	69
3.4.4 检测机制	72
3.4.5 UART 波特率生成与设置	73
3.4.6 USCI 中断操作及中断向量	79

3.4.7	UART 寄存器与库函数	80
3.5	串行外设接口(SPI)协议通信	83
3.5.1	SPI 协议通信概述	84
3.5.2	SPI 操作方式	85
3.5.3	SPI 工作模式选择	87
3.5.4	SPI 中断操作	89
3.5.5	SPI 寄存器与库函数	89
3.6	内部集成电路协议 I ² C	95
3.6.1	I ² C 协议概述	95
3.6.2	I ² C 操作方式	97
3.6.3	I ² C 工作模式选择	99
3.6.4	I ² C 中断操作	108
3.6.5	I ² C 寄存器与库函数	110
3.7	ADC	116
3.7.1	ADC 模块概述	117
3.7.2	采 样	117
3.7.3	保 持	119
3.7.4	转 换	119
3.7.5	窗口比较器	120
3.7.6	寄存器和库函数	120
3.8	比较器	124
3.8.1	比较器概述	124
3.8.2	基准电压发生器	124
3.8.3	比较器中断	126
3.8.4	基准模块 REF_A	126
3.8.5	比较器寄存器和库函数	127
3.8.6	REF_A 寄存器和库函数	130
3.9	本章小结	131
3.10	思考题	132
第 4 章	MSP432 软硬件开发环境	133
4.1	IAR Embedded Workbench 嵌入式开发工具	133
4.1.1	IAR 概述	133
4.1.2	IAR 的安装	133
4.1.3	IAR 工程开发	136
4.2	CCSv6 软件开发环境	143

4.2.1	CCSv6 概述	143
4.2.2	CCSv6 的安装	144
4.2.3	CCSv6 工程开发	148
4.3	嵌入式 C 语言程序设计	151
4.3.1	概 述	152
4.3.2	编程风格	153
4.3.3	数据类型及声明	164
4.3.4	操作符与表达式	169
4.4	外设驱动库	172
4.4.1	DriverLib 综述与使用方法	172
4.4.2	DriverLib 的其他特性	173
4.5	MSP432 硬件开发工具	175
4.5.1	MSP432P401R(LaunchPad)实验开发板简介	175
4.5.2	DY-LaunchBoard 通用口袋实验板简介	181
4.6	本章小结	195
4.7	思考题	195
第 5 章	MSP432 单元功能实验	196
5.1	GPIO 应用实验	196
5.1.1	GPIO 点亮 LED	196
5.1.2	GPIO 按键控制	200
5.2	定时器实验	205
5.2.1	Timer32 控制 LED 灯闪烁	206
5.2.2	TimerA 实现呼吸灯	216
5.2.3	TimerA 直接输出实现呼吸灯	225
5.2.4	PWM 转换输出 SPWM	228
5.2.5	TimerA 捕获测量频率	233
5.3	ADC 控制电位器输出实验	237
5.4	基于 SPI 的通信操作实验	244
5.4.1	DAC7512 操作	245
5.4.2	ST3375 LCD 液晶输出字符	256
5.5	简单的 UART 通信实验	277
5.6	基于 I ² C 通信的温度传感器测温实验	284
5.7	本章小结	293
5.8	思考题	294

第 6 章 综合实验	295
6.1 温度记录仪实验	295
6.2 麦克风音频信号录放实验	300
6.3 简单的信号发生器实验	305
6.4 物联网系统应用实验	309
6.5 本章小结	313
6.6 思考题	313
参考文献	314

第 1 章

概 述

嵌入式系统是一种具有专属功能的计算机系统,通常要求具有实时计算性能。被嵌入的系统通常是包含硬件和机械部件的完整设备。

现代嵌入式系统通常是基于嵌入式处理器的、具有特定功能的计算机应用系统。嵌入式处理器一般包含微处理器(MPU)、微控制器(MCU,俗称单片机)、数字信号处理器(DSP),以及具有特定计算能力的现场可编程门阵列(FPGA)等。嵌入式系统的关键特性是专用于处理特定的任务,通常应用于消费类电子、工业、自动化、医疗、商业及军事等领域。

本章将介绍嵌入式微控制器(MCU)的基本概念及特点,并引入美国德州仪器半导体(TI)公司的基于 ARM Cortex-M4 的最新 MSP432 系列低功耗 MCU。

1.1 微控制器 MCU

1.1.1 MCU 的概念

1974 年,美国德州仪器(TI)在开发 4 位单片机 TMS1000 时,首次提出可编程 SoC 的概念,当时是计算器、烤箱等应用的理想选择。随着这类处理器广泛应用于各种控制系统,单片机也被称做微控制器(MCU)。MCU 现已是许多硬件系统的核心,具有更高的集成度和更低的功耗。

MCU 也称为单片微型计算机(Single Chip Microcomputer),俗称单片机。它是一种将中央处理器、存储器、I/O 接口电路以及连接它们的总线都集成在一块芯片上的微型计算机,设计上主要突出了控制功能,调整了接口配置,在单一芯片上制成了结构完整的计算机。其被广泛用于消费类电子、工业生产和控制、商业设备、现代物联网等领域。特别是近年来 MCU 性能大幅提高,伴随着物联网的应用普及和迅猛发展,MCU 的应用将会给世界带来巨大的变革。

MCU 分为通用型和专用型两大类。通常所说的单片机,包括本书介绍的 MSP432 系列单片机都属于通用型单片机。通用型单片机把可开发的资源全部提供给使用者。专用型单片机也称专用微控制器,是针对某些应用专门设计的,例如频率合成调谐器、MP3 播放器、打印机控制器等。

微控制器、微处理器、数字信号处理器是目前最常用的3种可编程嵌入式处理器,它们根据确定的程序执行相应的指令。微控制器具有有限的输入和输出,能够嵌入到完整系统中,目前中等规模的微控制器的性能,比首次执行太空任务的计算机还高几个数量级。

1.1.2 MCU 的基本组成和特点

单片机的结构特征是将组成计算机的基本部件集成在一块芯片上,构成一台功能独特的、完整的单片微型计算机,如图1.1所示。

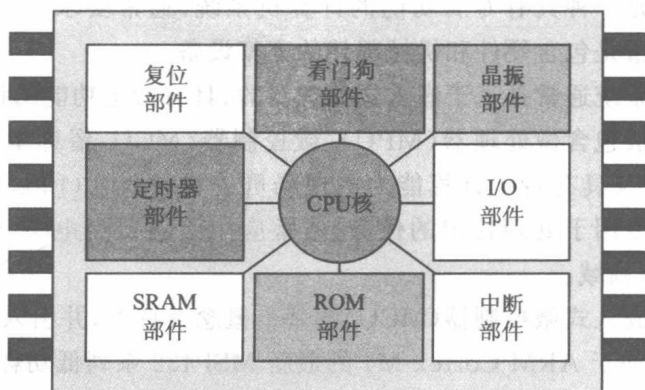


图 1.1 MCU 硬件组成

MCU 的基本组成部分如下:

(1) 中央处理器 CPU

单片机的中央处理器 CPU 和通用微处理器基本相同,由运算器和控制器组成,另外增设了“面向控制”的处理功能,如位处理、查表、跳转、乘除法运算、状态检测、中断处理等,增强了使用性。

(2) 存储器

单片机的存储器包括存放代码指令的 ROM(或 Flash),以及存放变量、数据的 SRAM。存储空间有两种基本结构:冯·诺依曼结构和哈佛结构。

① 冯·诺依曼结构是将程序指令存储器和数据存储器合并在一起的存储器结构,该结构实现简单,生产成本低,统一编址可以最大限度地利用资源,被广泛使用,如本书介绍的 TI MSP432 单片机。但该结构也存在弊端,由于指令执行需要遵循串行处理方式,当高速运算时,在传输通道上会出现总线访问瓶颈问题。

② 哈佛(Harvard)结构是将指令存储和数据存储分开,使用不同总线分别寻址的结构,是一种并行体系结构。使用该结构的处理器具有较高的执行效率。目前在进行高速、大量数据处理的处理器中大多采用该结构,如 DSP。但该结构设计复杂、不易实现,生产成本低。

(3) 通用 I/O 口

单片机为了突出控制的功能,提供了一定数量、功能强大、实用灵活的通用 I/O 口(GPIO),不仅可以灵活地选择输入或输出,还可以作为系统总线或控制信号线,从而为扩展外部存储器和 I/O 接口提供了方便。

一般 MCU 还可以提供全双工串行 I/O(如 UART),因而能和某些终端设备进行串行通信,或者和一些特殊功能的器件相连接。

(4) 定时器/计数器

在实际应用中单片机往往需要精确定时,或者对外部事件进行计数,因而在单片机内部设置定时器/计数器电路,通过中断机制实现定时器/计数器的自动处理。

单片机独特的结构决定了它具有如下的特点:

- 小巧灵活、成本低、易于产品化,能方便地组装成各种智能式控制设备以及各种智能仪器仪表。
- 面向控制,能针对性地完成从简单到复杂的各类控制任务,从而获得最佳性能价格比。
- 抗干扰能力强,适应温度范围宽,能在各种恶劣环境下可靠工作。
- 可以方便地实现多机和分布式控制,使整个系统的效率和可靠性大为提高。

单片机由于应用面广、生产批量大,成本/价格越来越低,目前可低至人民币 1 元左右。单片机系统结构简单而使可靠性增加;体系结构的改进,以及采用 CMOS 工艺,极大地降低了单片机的功耗。单片机问世之后就成为微型计算机的重要分支,发展迅速,从 4 位、8 位、16 位到 32 位单片机种类已有数百种,世界年销售量达数十亿片。在 20 世纪 80 年代到 90 年代,国内广泛使用 Intel 的 MCS51 系列和 Motorola 的 68HC 系列 8 位单片机。目前,除了 TI 的 MSP432 系列单片机外,还有 Atmel 的 AVR 系列、Microchip 的 PIC16/32 系列以及 NXP、ST 的 ARM 系列等单片机。

1.1.3 MCU 的发展与应用

单片机具有体积小、价格低、使用方便、可靠性高等一系列优点。纵观单片机的发展历程,可以明显地看出其正朝着两个方向深入发展。一是朝着具有复杂数据运算、高速通信、信息处理等功能的高性能计算机系统方向发展。这类系统以速度快、功能强、存储量大、软件丰富、输入/输出设备齐全为主要特点,采用高级语言、应用语言编程,适用于数据运算、文字信息处理、人工智能、网络通信等应用。二是朝着对运算、控制功能的要求相对不高,但对体积、成本、功耗等的要求却比较苛刻的应用领域发展,如智能化仪器仪表、电信设备、自动控制设备、汽车、物联网等领域。

由于单片机功能的飞速发展和应用领域的日益广泛,其已远远超出了传统计算机科学的范畴。小到信用卡、智能玩具、智能家电,大到航天器、机器人,从实现数据采集、过程控制、模糊控制、移动终端等智能系统到人类的日常生活,到处都有单片机的身影,其主要的应用领域如下。

- 工业控制领域:单片机的结构特点决定了它特别适用于控制系统。它既可作为单机控制器,也可作为多机控制系统的预处理设备,应用非常广泛。例如各种机床控制、电机控制、工业机器人、生产线、过程控制、检测系统等。在军事工业中可用于导弹控制、鱼雷制导控制、智能武器装置、航天导航系统等。在汽车工业中可用于点火控制、变速器控制、防滑刹车控制、排气控制等。
- 智能化的仪器仪表领域:单片机用于温度、湿度、流量、流速、电压、频率、功率、厚度、角度、长度、硬度、元素测定等各类仪器仪表中,使仪器仪表数字化、智能化、微型化,功能大大提高。
- 日常生活中的电器产品领域:单片机可用于电子秤、录像机、录音机、MP3 播放器、彩电、洗衣机、智能玩具、冰箱、照相机、家用多功能报警器等。
- 计算机网络与通信领域:单片机可用于 BIT BUS、CAN、以太网等成分布式网络系统,还可用于调制解调器、各种智能通信设备(如小型背负式通信机、列车无线通信等)、无线遥控系统等。
- 计算机外部设备领域:单片机可用于温氏硬盘驱动器、微型打印机、图形终端、CRT 显示器等。
- 物联网应用领域:嵌入式技术是物联网技术的最为关键的底层技术,物联网的兴起,给单片机技术提供了一个更为宽广的舞台,同时也给单片机技术发展提供了新的方向。

单片机的出现也改变了传统的电路设计方法,过去经常采用模拟电路、脉冲电路、组合逻辑实现的电路系统,现在许多部分都可以用单片机予以取代。传统的逻辑设计方法正在演变为软件和硬件相结合的设计方法,许多电路设计问题都转化为程序设计问题。

1.1.4 TI 公司主要单片机系列

美国德州仪器(TI)是世界著名的半导体公司,人类第一个商用的晶体管、第一片集成电路、第一颗单片机都出自 TI。TI 也是目前生产芯片种类最多的半导体公司,其产品包括模拟芯片、数字芯片、传感器、显示技术等,几乎涵盖所有应用领域。模拟电路芯片包括电源、放大器、无线射频、ADC、DAC 等,数字电路芯片包括逻辑、处理器(MCU、MPU、DSP)、接口电路等。

经过 40 多年的不断优化和改进,目前 TI 的微控制器产品主要系列如下:

(1) MSP430 超低功耗 MCU 系列

MSP430 系列单片机是 TI 1996 年开始推向市场的一种 16 位超低功耗,具有精简指令集(RISC)的混合信号处理器(Mixed Signal Processor)。它具有超低的功耗,强大的处理能力,高性能模拟技术及丰富的片内外模块,系统工作稳定,方便高效的开发环境等特点。MSP430 系列单片机不仅可以应用于许多传统的单片机应用领域,如仪器仪表、自动控制,以及消费品领域,更适用于一些电池供电的低功耗产品,

如能量表(水表、电表、气表等)、手持式设备、智能传感器等,以及需要较高运算性能的智能仪器设备。

(2) MSP432 低功耗高性能 MCU 系列

MSP432 MCU 产品将 TI MSP430 所具有的卓越特性引入到了 ARM 处理器领域中,通过与 Cortex-M0+相似的功耗来实现 Cortex-M4F 的全部性能,同时拥有了 ARM Cortex-M4F 内核的性能以及 MSP430 MCU 所具有的低功耗优势。TI MSP432 的功耗在工作状态下只有 $95\ \mu\text{A}/\text{MHz}$,而在支持实时时钟(RTC)情况下的待机状态功耗也仅为 $850\ \text{nA}$,功耗非常低,非常适合嵌入式移动应用或者便携式设备。MSP432 系列是最新的、主频更高和外设更丰富的通用微控制器产品。

(3) 高性能实时控制 MCU 系列

TI 的 C2000 实时控制微控制器系列,具有高性能内核和经过应用调优的外设,是专为实时控制应用而设计的基于 C28x DSP 的 32 位微控制器。其数学优化型内核可为设计人员提供能够提高系统效率、可靠性以及灵活性的方法。C2000 32 位微控制器快速且准确的传感控制可最大限度地提高系统响应能力和性能;专业化处理可最大限度地减小复杂闭环控制算法的延迟;精确的可配置驱动提供了实现具有最佳性能的高级控制方案所需的灵活性。C2000 32 位微控制器非常适合电机控制、数字电源、工业驱动、太阳能逆变器等闭环控制应用。功能强大的集成外设使这些实时器件成为适合各种应用的完美单芯片控制解决方案。

(4) 无线 MCU 系列

TI 的 SimpleLink 无线 MCU 系列,支持多种无线技术,包括基于标准的 6LoWPAN、蓝牙低功耗(CC2540、CC2650)、Wi-Fi(CC3200)、ZigBee(CC2530),以及专有 Sub-1 GHz(CC1300)和专有 2.4 GHz。SimpleLink 提供嵌入式无线微控制器(MCU)或集成 MCU、射频收发器等片上系统(SoC),帮助用户最大限度地减少射频开发工作量,让用户能够将精力集中于物联网设计,可为各种基于 MCU 的数据采集和控制无线应用提供完整的解决方案。

1.2 MSP432 系列单片机

MSP432 系列单片机属于低功耗、高性能的微控制器。MSP43x 系列产品属于 TI 的低功耗微控制器系列,具有精简指令集的混合信号处理器,包括 16 位的 MSP430 和 32 位的 MSP432。之所以称它为混合信号处理器,主要是因其针对实际应用需求,将多个不同功能的模拟电路、数字电路模块和微处理器集成在一个芯片上,以提供“单片”解决方案。MSP432 系列是最新的、基于 Cortex-M4 的更高主频和更丰富外设的通用微控制器产品。MSP432 微控制器结构如图 1.2 所示。

图中部分外设与传统的 MSP430 中的外设相同,这对于想要将代码从 16 位 MSP430 器件移植到 32 位 MSP432 器件的用户而言十分重要。部分外设则是

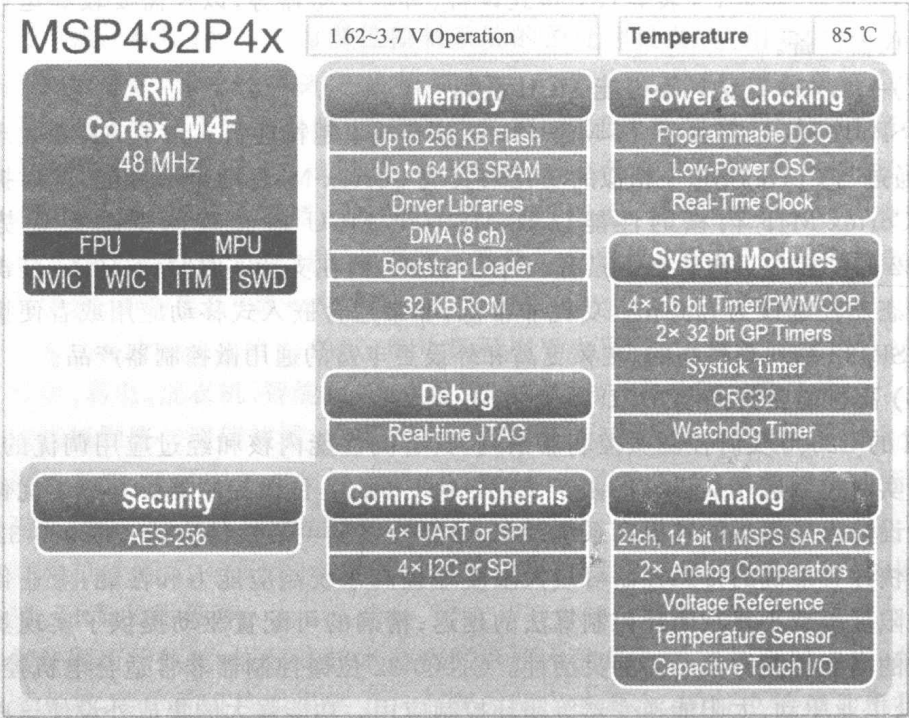


图 1.2 MSP432 微控制器的框图

MSP432 中新增或者功能增强的外设部分。MSP430 与 MSP432 结构关系如图 1.3 所示。

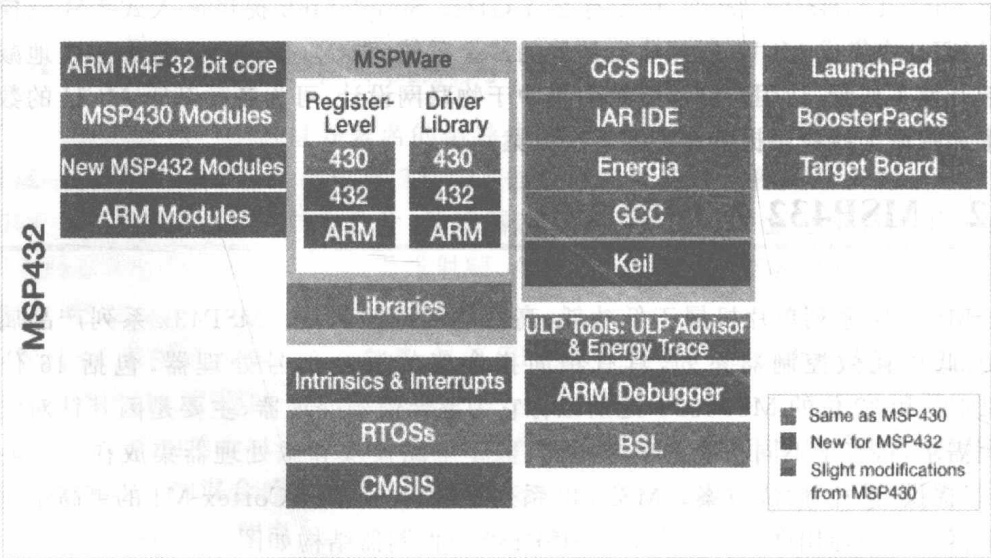


图 1.3 最新的 TI MSP 平台

图 1.3 中显示的是最新的 TI MSP 平台,包括产品、软件、硬件和开发套件。MSP430 的部分组成与 MSP432 中的相同。唯一不能进行移植的是内核,这是因为 MSP432 采用了 32 位的 ARM Cortex-M4F 内核。同时,MSP432 采用了一些新的组件。开发者可以使用寄存器级的软件库或使用驱动程序库进行编程。ARM 用户则有机会利用 CMSIS 风格的编码,并且可以使用一些新的 IDE。

1.2.1 MSP432 系列单片机的特点

MSP432 使用 32 位的 Cortex-M4F 内核。该内核具有 32 位的数据总线、32 位的寄存器组和 32 位的存储器接口。内核采用 Harvard 架构,这意味着它拥有独立的指令总线和数据总线。对指令和数据的访问可以同时进行,数据访问的过程不会影响或干扰指令的流水线,因此可以提升处理器的性能。此特性使得整个 Cortex-M4F 内核中有多个总线和接口,每个总线和接口均可同时使用,以实现最佳的利用率。数据总线和指令总线共享同一存储空间,此空间称为统一的存储系统。此外,MSP432 选择的 Cortex-M4F 内核,还包含一个可嵌套的中断向量控制器(又称嵌套中断向量控制器),简称 NVIC;还包含一个浮点单元(FPU)以及随 Cortex-M4 内核一起提供的增强型 DSP 指令集。从调试器的角度来看,内核中拥有一个标准化的 Cortex-M 调试器模块、一个 COI 调试模块以及 ITM 跟踪模块支持。Cortex-M 内核继承了大量来自 Cortex 和 ARM 产品的外设,其中包括 μ DMA、SysTick 和中断管理器。MSP432 选择 Cortex-M4F 内核,是因为 Cortex-M4F 在增加了更多性能和功能的同时,仅增加了极少的功耗。MSP432 系列 MCU 主要有以下特点。

1. 超低功耗

MSP432 凭借 32 位的 48 MHz Cortex-M4F 处理器可提供更高的性能,是 M3 内核性能的两倍,而同时功耗只有其一半。大家应该知道低功耗的概念根植于 MSP 家族产品的基因中。我们已将此 MSP432 器件设计成超低功耗的通用 Cortex-M 微控制器。在工作模式下功耗仅为 $95\ \mu\text{A}/\text{MHz}$,而待机功耗仅为 $850\ \text{nA}$,其中包括了 RTC 的功耗。同时,我们希望用户能充分利用 MSP430 的工具链,以及 ARM 的工具链,以获得最佳的高性能和低功耗。现在,由于 MSP430 平台的延伸,用户可以在 16 位内核产品和 32 位内核产品之间自由选择,所有这些产品之间均具有无缝移植的功能。

2. 强大的处理能力

处理性能是 MSP432 的一个关键指标,因此选择了性能最高的 Cortex-M4F 内核。Cortex-M4F 内核包含了对完整 ARM 指令集的访问权限,此外还包含了 DSP 扩展指令和一个浮点 FPU 模块。

3. 高性能外设和功能模块

MSP432 MCU 提供了最低功耗的 ARM Cortex-M4F 器件,同时还集成了经过