



唐继贤 杨 扬 编著

MSP430超低功耗 16位单片机 开发实例



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

MSP430 超低功耗 16 位 单片机开发实例

唐继贤 杨 扬 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书全面讲解了用C语言编程MSP430系列单片机的方法和实例、两种常用的C语言集成开发环境、开发需要的编程工具和几种自制编程工具的方法。实例包括MSP430单片机内部资源串口、I2C、SPI接口、定时/计数器、看门狗、中断、ADC、LCD驱动等的编程,矩阵键盘输入、温度传感器、红外遥控解码、SD存储卡读写、LED和LCD显示器等外部应用电路的编程。另外还有单片机通过RS-232C、RS-485、USB接口和上位机通信的编程实例。最后介绍了智能无线测温网络和FM收音机两个综合实例。每一个实例都有相关的硬件电路原理图及程序源码。

本书适合在校大学生作为学习MSP430单片机的实习教材。书中的实例涉及电子工程应用的许多方面,也是单片机应用开发工程技术人员一本不可多得的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

MSP430 超低功耗 16 位单片机开发实例 / 唐继贤, 杨扬
编著. --北京: 北京航空航天大学出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-5124-1275-0

I. ①M… II. ①唐 ②杨 III. ①单片微型计算机—
系统开发 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第236495号

版权所有, 侵权必究。

MSP430 超低功耗 16 位单片机开发实例

唐继贤 杨 扬 编著

责任编辑 卫晓娜

*

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@gmail.com 邮购电话:(010)82316524

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:20.25 字数:432千字

2014年4月第1版 2014年4月第1次印刷 印数:4 000册

ISBN 978-7-5124-1275-0 定价:49.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前言

此前写了两本 51 单片机的书,已分别由北京航空航天大学出版社和上海科技出版社出版,得到了读者的好评,特别是在校大学生读者的喜爱,有很多同学同时购买了配套的实验板用作单片机课程的实习作业,还有大学老师来信说,想要把书和实验板作为他们专业学习单片机的实验教材。有很多读者通过 QQ、电子邮件或者直接打电话给我,交流学习单片机的体会,询问看书过程中遇到的一些疑难问题,也听到不少读者的赞扬溢美之词,这些对我都是极大的鼓励。虽然写书是一件很费力的事情,但是作者依然想把自己学习的体会和收获写出来与读者一起分享。

MSP430 系列单片机是德州仪器公司推出的一款 16 位超低功耗系列单片机,最大特点是低功耗,我用此单片机配套该公司的低功耗温度传感器,开发了一套无线温度监测系统,其中无线温度采集单元的一枚纽扣电池可以连续使用几年,充分显示了 MSP430 系列单片机超低功耗的优越性,因此我想再把这款性能卓越的单片机介绍给广大读者。本书依然秉承了之前已经出版的两本书的特点,那就是:

- 软硬件结合,在讲清楚硬件电路原理的基础上,再讲解软件编程的方法。
- 介绍和单片机系统相关的电子技术知识。
- 自己动手做(Do it yourself,DIY)。设计了一块可供读者使用的实验板。

全书共分 10 章,第 1 章首先介绍了 MSP430 系列单片机的性能特点及其主要的产品系列。和 51 系列单片机相比,MSP430 系列单片机是 16 位,这使它具有更宽的数据通道和更快的速度;超低功耗是 MSP430 单片机的第二个特点,非常适合用于电池供电的手持设备。第 2 章介绍了 MSP430 单片机常用的两种软件开发平台。第 3 章介绍了 MSP430 单片机的编程工具,罗列了目前市面上可见的几乎所有的编程工具,从串口、并口到 USB 接口都有。书中提供了自制的 BSL 串口编程器和并口编程器的详细资料,这两种编程器结构简单、取材容易,适合读者自己动手制作。并口编程器工作稳定、结实耐用,BSL 编程器功能强大,为读者学习 MSP430 单片机编程提供了有力工具。作者自制的 USB 接口编程器也获得了成功。

从第 4 章~第 10 章是本书的编程实例部分。这些实例全部经过作者调试通过,

需要强调的是为了试验这些程序,需要制作一些相应的实验电路板,这是程序示例实验的基础,建议读者能够自己动手制作这些实验电路板,这是一个合格的工程技术人员必不可少的技能。第4章介绍了单片机常用的扩展总线,重点是串行扩展总线,其中有 DALLAS 的单总线、Philips 的 I2C 总线、SPI 和 USB 等,这些都是目前单片机外设芯片广泛使用的通信总线,掌握这些总线的编程方法是读者使用这些 IC 芯片的基础。第5章是 MSP430 单片机内部资源的编程,这是本书的重点。和 51 单片机相比,MSP430 单片机内部资源更加强大,编程也更加复杂,因此本章详细介绍了这些内部资源的编程方法,包括看门狗、中断、USART、SPI、I2C、定时/计数器、ADC、LCD 驱动等。每一种资源都有编程实例。

第6章是单片机输入和输出显示设备的编程,包括键盘、红外遥控解码、LED 和 LCD 显示器。第7章介绍了 SD 闪存卡的编程和 LED 照明灯的调光。这两个实例进一步深化了使用 MSP430 单片机内部资源编程的方法,前者是 USART 的 SPI 模式编程,后者是定时器 A 输出 PWM 的编程。

第8章介绍了单片机和上位机通信的硬件设备接口和编程方法,除了常用的 RS-232-C 接口之外,也介绍了在工控领域常用的 RS-485 总线。鉴于现在很多笔记本电脑已经淘汰了 RS-232-C 接口,因此还介绍了 USB 转换器 TUSB3410,该芯片能用一个电脑 USB 接口模拟 RS-232-C 串口。这个实例也为读者自制 USB 接口编程器奠定了基础。

第9章和第10章是两个综合性的实例。第9章 FM 收音机,围绕 Philips 的单芯片调频收音机集成电路,比较系统地介绍了有关调频广播的知识,包括调频信号的原理、调频信号产生的方法和调频收音机的原理。最后给出了用单片机控制 FM 收音模块实现自动搜索收音机的编程实例。第10章智能无线测温网络利用低功耗无线数传模块 RFM12B、TMP102 低功耗温度传感器和 MSP430 单片机构建了一个多点无线测温网络系统,可以实现一个区域的无线温度监控。本系统的最大特点是超低功耗,一枚纽扣电池可以维持无线温度传感器工作几年。编程方面充分运用了 SPI 和 I2C 总线接口器件的编程方法,使读者对这些广泛使用的智能器件得以更深入的了解。

本书内容丰富、取材广泛,除了单片机本身之外,涉及电子工程应用的许多方面,包括模拟电路、无线数据通信、高频信号接收、SD 闪存、传感器、红外遥控等,具有较高的实用价值和广阔的应用范围,有利于开拓读者的知识面,适合应用系统开发的各类工程技术人员借鉴,更是在校大学生学习单片机技术很有用的辅助教材。本书实例中的所有程序源代码均可在 www.buaapress.com.cn 的“下载专区”下载,方便读者直接使用。

感谢许多同事和朋友们为本书付出的辛勤和努力。

还要感谢 TI 公司免费提供的 MSP430_LaunchPad 仿真器和部分实验用芯片,这些东西方便本书能更全面地把 TI 的产品介绍给广大读者。

最后要感谢广大的读者,在《51 单片机工程应用实例》和《51 单片机应用系统开

发实例精解》两本书出版之后,他们热情的来信给了我很大的鼓励和支持,和读者的交流也让我看到了自己的一些不足,因此再次写作时,类似的问题就会减少。但是由于本人水平有限,书中仍然难免还会有一些瑕疵,欢迎各位专家和读者批评指正。我的 QQ:1785872803,电子邮箱:tang_jx@163.com。

唐继贤

2014 年 1 月

目 录

第 1 章 MSP430 系列超低功耗 16 位单片机	1
1.1 MSP430 系列单片机的性能特点	2
1.1.1 超低功耗性能	3
1.1.2 高集成度的模块和智能外设	3
1.1.3 200 多种不同功能的型号	7
1.1.4 完整的开发环境方便用户开发设计	7
1.1.5 无线应用	8
1.2 MSP430 单片机的主要产品系列	8
1.2.1 MSP430x1xx 系列	8
1.2.2 MSP430F2xx 系列	9
1.2.3 MSP430G2xx 系列	9
1.2.4 MSP430x4xx 系列	10
1.2.5 CC430 RF SoC 系列	11
1.3 MSP430 系列单片机的应用范围	11
1.4 MSP430F15x/16x/161x 系列简介	12
1.4.1 MSP430F161x 单片机的引脚封装	14
1.4.2 MSP430F161x 单片机的内部结构	17
1.4.3 MSP430F161x 单片机的特殊功能寄存器	20
第 2 章 MSP430 单片机软件开发工具	21
2.1 MSP430 单片机 C 程序设计	21
2.1.1 C 语言的数据类型和运算	22
2.1.2 C 语言的语句和程序结构	24
2.1.3 C 语言函数	27
2.1.4 C 语言的构造数据类型	29

目 录

2.2 IAR 嵌入式工作平台	33
2.2.1 IAR 使用说明	33
2.2.2 应用程序实例	41
2.3 Code Composer Studio	43
2.3.1 Code Composer Studio 的下载和安装	43
2.3.2 Code Composer Studio 的使用	44
第 3 章 MSP430 单片机编程方法和工具	49
3.1 通过 BSL 接口编程 MSP430 单片机	50
3.1.1 BSL 接口软件原理	51
3.1.2 BSL 接口编程器硬件电路原理	51
3.1.3 自制串口 BSL 接口编程器	53
3.2 通过 JTAG 接口编程 MSP430 单片机	56
3.2.1 MSP430 系列单片机的 JTAG 接口	56
3.2.2 自制并口 JTAG 接口下载线	57
3.2.3 并口 JTAG 接口下载线的使用	58
3.2.4 MSP - FET430UIF USB 接口仿真器	59
3.2.5 MSP430F1x 系列单片机代码下载和调试	60
3.3 EZ430 - F2013 仿真器	60
3.3.1 EZ430 - F2013 仿真器的硬件组成	60
3.3.2 SPY - BI - WIRE 二线制编程接口	61
3.3.3 EZ430 - F2013 仿真器驱动程序的安装	61
3.3.4 用 EZ430 - F2013 编程 MSP430F2xx 系列单片机	62
3.4 MSP430_LaunchPad 仿真实验板	63
3.4.1 MSP430_LaunchPad 的硬件组成	63
3.4.2 MSP430_LaunchPad 软件和驱动	65
3.4.3 MSP430G2231 单片机简介	65
3.4.4 MSP430_LaunchPad 编程示例	66
3.5 eZ430 - RF2500 - SHE 太阳能无线应用开发套件	67
第 4 章 单片机扩展总线及其编程	69
4.1 SPI 总线	69
4.1.1 SPI 总线的接口信号	70
4.1.2 SPI 总线的工作原理	70
4.1.3 SPI 总线在 MSP430 单片机系统中的应用	70
4.1.4 用普通 I/O 引脚通过软件模拟 SPI 接口	71

4.1.5 软件模拟 SPI 接口程序示例	73
4.2 I2C 总线	76
4.2.1 I2C 总线数据传输的原理	77
4.2.2 I2C 总线多器件控制的工作原理	78
4.2.3 MSP430 单片机模拟 I2C 总线	80
4.2.4 I2C 总线的编程示例	85
4.3 Dallas 公司的单总线	93
4.3.1 DS18B20 数字温度传感器简介	93
4.3.2 单总线的工作原理	96
4.3.3 单总线通信协议	99
4.3.4 单总线的初始化和读写函数	101
4.3.5 单总线编程示例	103
4.4 USB 总线	108
4.4.1 USB 系统的硬件	109
4.4.2 单片机用的 USB 控制器和转换器	110
第 5 章 MSP430 单片机内部资源编程	111
5.1 系统复位、中断和工作模式	111
5.1.1 系统复位	111
5.1.2 中 断	112
5.1.3 工作模式	115
5.2 基本时钟模块	116
5.2.1 基本时钟模块的构成	117
5.2.2 基本时钟模块寄存器	117
5.2.3 基本时钟模块初始化	120
5.3 看门狗定时器	121
5.3.1 看门狗定时器的寄存器	121
5.3.2 看门狗定时器的使用	122
5.3.3 看门狗定时器编程示例	123
5.4 数字 I/O 端口	124
5.4.1 数字 I/O 端口的寄存器	124
5.4.2 数字 I/O 端口的初始化	124
5.4.3 数字 I/O 端口编程示例	125
5.5 通用同步/异步接收/发送器(USART)的 UART 异步模式	126
5.5.1 USART 的初始化和复位	126
5.5.2 USART 的控制和状态寄存器	127

目 录

5.5.3	USART 在 UART 异步模式时的编程示例	133
5.6	通用同步/异步接收/发送器(USART)的 SPI 同步模式	135
5.6.1	USART SPI 同步模式的原理	135
5.6.2	USART SPI 同步模式使用的寄存器	136
5.6.3	USART SPI 同步模式的初始化和使用	138
5.6.4	USART SPI 同步模式编程示例	139
5.7	通用同步/异步接收/发送器(USART)的 I2C 模式	141
5.7.1	USART 在 I2C 模式使用的寄存器	142
5.7.2	USART 在 I2C 模式时的初始化	145
5.7.3	TMP102 低功耗温度传感器	146
5.7.4	USART 在 I2C 模式时的编程示例	152
5.8	定时器 A	157
5.8.1	定时器 A 的寄存器	157
5.8.2	定时器 A 的使用	160
5.8.3	定时器 A 的编程示例	161
5.9	模数转换器 ADC12	162
5.9.1	ADC12 的寄存器	162
5.9.2	ADC12 的内部温度传感器	167
5.9.3	ADC12 的编程示例	168
5.10	具有 LCD 驱动器的 MSP430 单片机的使用	171
5.10.1	MSP430FE425 单片机简介	171
5.10.2	和 LCD 驱动器有关的寄存器	171
5.10.3	LCD 驱动器应用实例	173
第 6 章	输入和显示电路	176
6.1	LED 数码管显示器	176
6.1.1	LED 数码管	176
6.1.2	LED 数码管的静态显示	177
6.1.3	LED 数码管的动态显示	178
6.2	按钮开关输入	181
6.2.1	一般按钮开关输入	181
6.2.2	矩阵键盘输入	182
6.3	LCD 液晶显示器	185
6.3.1	LCD1602 液晶显示器	186
6.3.2	LCD1602 的引脚功能	186
6.3.3	LCD1602 和单片机的连接	188

目 录

6.3.4	LCD1602 的指令集	188
6.3.5	LCD1602 的应用编程	190
6.4	红外线遥控信号的接收	195
6.4.1	单片机系统红外线信号接收电路	195
6.4.2	红外遥控信号编码	196
6.4.3	红外遥控信号解码和编程实例	196
第 7 章	单片机外部设备的控制	201
7.1	SD 存储卡	201
7.1.1	SD 卡的硬件结构和 SPI 接口	203
7.1.2	SD 卡的命令和应答	206
7.1.3	SD 卡初始化	210
7.1.4	SD 卡的读写	212
7.1.5	SD 卡程序实例	218
7.2	定时器 PWM 脉冲控制 LED 灯亮度	220
7.2.1	PWM 脉冲宽度调制的原理	220
7.2.2	在 MSP430 单片机中获得 PWM 脉冲	221
7.2.3	用 PWM 脉冲控制 LED 灯光亮度	222
第 8 章	单片机和上位机通信	224
8.1	RS-232C 串口和单片机通信	224
8.1.1	RS-232-C 标准	224
8.1.2	系统编程综述	226
8.1.3	SerialPort 组件简介	226
8.1.4	RS-232-C 接口 C# 编程示例	228
8.2	RS-485 接口和单片机通信	233
8.2.1	RS-485 接口在单片机系统中的使用	234
8.2.2	RS-485 接口上位机编程	234
8.3	USB 接口和单片机通信	235
8.3.1	USB 转换芯片 TUSB3410	235
8.3.2	TUSB3410 在 MSP430 单片机中的应用	236
8.3.3	TUSB3410 和上位机通信编程示例	237
第 9 章	FM 收音机	241
9.1	FM 广播系统的基础知识	241
9.1.1	调频广播系统	241

目 录

9.1.2 调频广播收音机的原理	243
9.2 TEA5767HN 单片 FM 调谐器	245
9.2.1 TEA5767HN 的性能	245
9.2.2 TEA5768HN 的引脚和封装	246
9.2.3 TEA5767 的内部结构和功能	248
9.2.4 TEA5767 的总线接口和控制寄存器	250
9.2.5 TEA5767 的典型应用电路	256
9.3 FM 收音模块	258
9.4 用 MSP430 单片机和 FM 收音模块做的收音机	259
9.4.1 收音机硬件电路的说明	259
9.4.2 收音机的编程	261
第 10 章 智能无线测温网络	273
10.1 无线数传模块 RFM12B	274
10.1.1 RFM12B 的封装引脚	275
10.1.2 RFM12B 内部寄存器和 SPI 接口	276
10.1.3 RFM12B 的工作原理	278
10.1.4 RFM12B 的控制命令	279
10.1.5 RFM12B 发送模式编程	283
10.2 无线测温模块	285
10.2.1 无线测温模块的电原理图	285
10.2.2 无线测温模块编程	286
10.3 区域无线数据接收机	294
10.3.1 接收机的硬件电路	295
10.3.2 接收机编程要点	295
10.3.3 接收机编程示例	298
10.4 上位机编程	305
10.4.1 新建一个 Visual C# 应用项目	305
10.4.2 智能无线测温网络的使用	307
10.4.3 上位机源代码	307
英文缩写对照	310
参考文献	312

第 1 章

MSP430 系列超低功耗 16 位单片机

MSP430 是美国德州仪器公司于 1996 年推出的 16 位超低功耗混合信号微控制器。它的优势在于易于学习, C 编译器友好, 16 位 CPU, 灵活的低功耗模式和智能化, 以及大量的低功耗外设。它的多功能性使它可以用于多种不同的终端设备, 包括医疗仪器、电力计量和家用电器, 如烟雾探测器、恒温器等, 几乎任何一种应用都可能

有 MSP430 的身影。其外形图如图 1.1 所示。



图 1.1 MSP430 系列超低功耗 16 位单片机

MSP430 系列单片机具有 16 位总线, 带 Flash 存储器。由于其性价比和集成度高, 受到广大技术开发人员的青睐。它采用 16 位的总线, 外设和内存统一编址, 寻址范围可达 64 KB, 还可以外扩存储器。具有统一的中断管理, 丰富的片上外围模块, 片内有精密硬件乘法器、两个 16 位定时器、一个 14 路的 12 位模数转换器、一个看门狗、6 路 I/O 端口、两路 USART 通信端口、一个比较器、一个 DCO 内部振荡器和两个外部时钟, 支持 8 MHz 的时钟。Flash 型程序存储器可以在线对单片机进行调试和下载, JTAG 接口直接和闪存模拟工具 FET(Flash Emulation Tool)相连, 无需另外的仿真工具, 方便实用。MSP430 系列单片机最大的特点是超低功耗, 具有多种超低功耗工作模式, 特别适合使用电池供电的手持式自动控制设备。对环境 and 人体的辐射小, 可靠性好, 在强电干扰下程序运行不受影响, 适应工业级的运行环境, MSP430 系列单片机在工程技术领域和各类民用电子设备中得到广泛的应用, 受到越来越多人的喜爱。MSP430 系列单片机的主要性能指标如下:

(1) 超低功耗:

第 1 章 MSP430 系列超低功耗 16 位单片机

- 1.8~3.6 V 范围供电电压;
- 200 μA @ 1 MHz, 2.2 V, 活动模式;
- 0.7 μA 备用模式;
- 0.1 μA 保持 RAM 数据;
- 6 μs 从等待模式唤醒。

(2) 强大的 CPU 内核:

- 16 bit RISC 结构;
- 125 ns 指令周期 @ 8 MHz。

(3) 灵活多样的外围模块:

- 10/12 bit A/D(8 + 4 通道, 转换 $< 10\mu\text{s}$);
- 16 bit Timer_A 带有 3 个捕获/比较寄存器;
- 16 bit Timer_B 带有 7 个捕获/比较寄存器;
- 一个或者两个 USART 接口;
- 硬件乘法器;
- 模拟信号比较器;
- 基本时钟模块:

- 由可编程内部电阻控制频率;
- 由单一外部电阻控制频率;
- 32 kHz 晶振产生低频;
- 高频晶振产生高频;
- 可选择外部时钟源。

(4) Flash 型存储器。

(5) 超低功耗 Flash 内核。

(6) 100 000 次写/擦周期。

(7) 程序存储器分段: 512 B。

(8) 信息存储器分段: 128 B。

(9) 可以分段擦除或整体擦除。

(10) 编程和擦除电压由内部产生。

(11) 有代码读出保护。

1.1 MSP430 系列单片机的性能特点

MSP430 系列单片机是基于 RISC 的 16 位混合信号处理器, 其将智能外设、易用性、低成本以及低功耗等优异特性完美结合在一起, 能满足数以千计应用的要求。和其他单片机相比, 它具有许多独特和引人注目的优点。

1.1.1 超低功耗性能

MSP430 单片机专为超低功耗(ULP)应用而精心设计。其高度灵活的时钟系统、多种低功耗模式、即时唤醒以及智能的全自动外设(Intelligent Autonomous Peripheral) 不仅可实现真正的超低功耗优化,同时还能显著延长电池使用寿命。它在几种典型工作模式时的耗电指标如下:

- 0.1 μA RAM;
- 保持模式: $<1 \mu\text{A}$;
- RTC 模式: $<230 \mu\text{A}/\text{MHz}$;
- 闪存: $<110 \mu\text{A}/\text{MHz}$ (RAM)。

MSP430 系列单片机如此低的功耗是由于它采用了以下技术:

(1) 灵活的时钟系统——MSP430 系列单片机的时钟系统能启用和禁用各种不同的时钟和振荡器,从而使器件能够进入不同的低功耗模式(LPM)。这种高度灵活的时钟系统可确保仅在适当的时候启用所需时钟,从而能够显著优化总体能耗。

- 主系统时钟(MCLK)——CPU 源,可由内部数控振荡器(DCO)驱动(频率最高达 25 MHz),也可采用外部晶振驱动。
- 辅助时钟(ACLK)——用于各个外设模块的时钟源,可由内部低功耗振荡器或外部晶振驱动。
- 子系统时钟(SMCLK)——用于各个较快速外设模块的时钟源,可由内部 DCO 驱动(频率最高达 25 MHz),也可采用外部晶振驱动。

(2) 即时唤醒——MSP430 系列单片机可由低功耗模式(LPM) 即时唤醒。这种超高速唤醒功能得益于 MSP430 的内部数控振荡器(DCO),可以实现高达 25 MHz 的时钟频率,而且能在 $1 \mu\text{s}$ 的时间内激活并实现稳定工作。即时唤醒功能对超低功耗应用来说非常重要,因为它能使微处理器在极高效的突发任务中充分发挥 CPU 的作用,并能较长时间处于 LPM 模式。

(3) 零功耗掉电复位(BOR)——MSP430 的 BOR 能够在所有操作模式下始终保持启用与工作状态,这不仅能确保它实现最可靠的性能,同时还可保持超低功耗运行。BOR 电路可对欠压情况进行检测,并在提供或者断开电源时对器件进行复位。该功能对电池供电的应用尤其重要。

(4) 超快速的 $1 \mu\text{s}$ DCO 启动使基于 MSP430 的系统能够尽量长时间地保持低功耗模式,从而延长电池使用寿命。DCO 可全面实现用户编程。

1.1.2 高集成度的模块和智能外设

MSP430 系列单片机拥有卓越的高集成度,集成各种智能外设,各种高性能的模拟与数字外设可大幅减少 CPU 的工作量。

第1章 MSP430 系列超低功耗 16 位单片机

1. 智能外设

MSP430 系列单片机的外设确保实现最强大的功能,并以最低功耗提供系统级中断、复位和总线判优。许多外设都能自动工作,因而最大限度减少了 CPU 处于工作模式的时间。

2. 高性能集成

超过 200 种 MSP430 器件都具备高性能集成优势,完美结合了 USB、RF、LCD 控制器以及 16 位 Δ - Σ ADC 等。这种可扩展的产品系列使设计人员能够为众多低功耗应用选择适当的 MSP430 器件。此外,MSP430 单片机的高集成度还能支持物理尺寸较小的解决方案,进而最大限度降低整机的物料成本。

3. 集成外设

(1) 模拟部分

- ADC10/ADC10_A、ADC12/ADC12_A——ADC 模块可支持速率高达 200 kbps 的快速 10 位或 12 位模数转换。该模块采用 SAR 内核,具备 5、8、12 或 16 组输入通道、采样选择控制、1.5 V/2.5 V 参考信号发生器以及内部温度传感器等。ADC10 具备数据传输控制器(DTC),而 ADC12 则具备 16 字转换与控制缓冲器,这些新增特性使采样能够在无需 CPU 干预的情况下进行转换与存储。ADC10_A 与 ADC12_A 可在较低功耗下实现更高的分辨率。
- Analog Pool 模拟池——Analog Pool (A-POOL)模块可配置为 ADC、DAC、比较器、SVS(电源电压监控器,Supply Voltage Supervisor)或温度传感器,使用户仅需一次性设置就能灵活地对一系列模拟功能进行编程。
- Comparator_A、Comparator_A+——Comparator_A /A+ 模块可支持精确的斜率模数转换、电压监控以及外部模拟信号监控等,能够实现准确的电压与电阻值测量。该模块具有可选的低功耗模式与可编程的参考电压发生器。Comparator_A+ 可提供 8 组输入和一个输入多路复用器。
- DAC12——DAC12 模块是一种 12 位电压输出 DAC,具有内部或外部参考电压选项,可实现最低功耗的可编程建立时间,同时还能够配置为 8 或 12 位工作模式。当存在多组 DAC12 模块并行工作时,可以将其编成一组,实现同步更新工作。
- OpAmp——MSP430 集成运算放大器具有单电源、低电流工作模式,轨至轨输出以及可编程建立时间等优异特性。可编程的内部反馈电阻以及多个运算放大器之间的相互连接能够实现各种软件可选择的配置选项,如:单位增益模式、比较器模式、反向 PGA、非反向 PGA、差分以及仪表放大器等。
- SD16/SD16_A——SD16/SD16_A 模块具备多达 7 个内部参考电压为 1.2 V 的 16 位 Δ - Σ A/D 转换器。每个转换器拥有 8 个全差分复用的输

入,如内置温度传感器。该转换器为过采样比率可选的二阶过采样 $\Delta-\Sigma$ 调制器,SD16_A 的过采样比率最大为 1 024,SD16 为 256。

(2) 定时器

- 基本定时器(BT)—— BT 拥有两个可串联形成 16 位定时器/计数器的独立 8 位定时器。两个定时器均可用软件进行读写。可将 BT 进行扩展以实现集成型 RTC(实时钟控制器)。内部日历系统能针对天数不足 31 天的月份进行调整补偿,而且可支持闰年的自动纠正。
- 实时时钟(RTC_A、RTC_B)—— RTC_A/B 均为 32 位硬件计数器模块,可为时钟计数器提供日历功能、灵活的可编程闹钟以及校准功能。RTC_B 集成了可转换的电池备份系统,使 RTC 能够在主系统电源出故障的情况下继续工作。
- Timer_A/Timer_B/Timer_D—— Timer_A、Timer_B 与 Timer_D 均为异步 16 位定时器/计数器,具备多达 7 个捕获/比较寄存器以及各种运行模式。该定时器可支持多种捕获/比较模式、PWM(脉冲宽度调制)输出与间隔定时,同时还具备广泛的中断能力。Timer_B 可提供可编程定时器长度(8、10、12 或 16 位)等更丰富特性,而 Timer_D 则支持高分辨率模式(4 ns 分辨率)。
- Watchdog+ (看门狗定时器 WDT+)—— WDT+ 在发生软件问题后可执行受控系统重启。如果达到设定的时间间隔,将生成系统复位。如果应用不需要看门狗监控功能,则模块可配置为间隔定时器,并在设定的时间间隔产生中断。

(3) 系统

- 高级加密标准(AES)—— AES 加速器(CC430 器件)模块可根据高级加密标准通过硬件用 128 位密钥执行 128 位数据的加密和解密,此外也可通过用户软件进行配置。
- 掉电复位(BOR)—— BOR 电路可对低电压情况进行检测,同时复位电路能够在提供或者断开电源时通过触发上电复位(POR)信号对器件进行复位。MSP430 单片机的零功耗 BOR 电路能够在所有低功耗模式下均保持工作状态。
- 直接存储器存取(DMA)控制器—— DMA 控制器能够在无需 CPU 干预的情况下在整个地址段上将数据从一个地址传输至另一个地址。DMA 不仅可显著增加外设模块的吞吐量,而且还能大幅降低系统功耗。该模块具有多达 3 个独立的传输通道。
- 电子数据交换(EDI)—— EDI 可通过正常的闪存存储器控制器提供更丰富的功能,如提高闪存内容的可靠性和整体系统完整性等。这对需要数据完整性且条件较恶劣的工作环境和应用领域尤其重要,如医疗应用等。通过