

MSP430 系列 16 位超低功耗单片机 原理与实践

沈建华 杨艳琴 编著



TP368.1/447D

2008

TI MSP430 中国大学计划教材

MSP430 系列 16 位 超低功耗单片机原理与实践

沈建华 杨艳琴 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以 TI 公司的 MSP430 系列 16 位超低功耗单片机为核心,介绍了 MSP430 单片机的特点和选型,详细讲述了 MSP430 单片机的结构和指令系统,对 MSP430 全系列单片机(包括最新的 F15X、F16X)所涉及的片内外围模块的功能、原理、应用作了详尽的描述。并介绍了 MSP430 单片机的开发环境、汇编语言、C 语言程序设计方法,以及单片机常用接口电路设计和软件编程。

本书融合了作者 6 年讲授“MSP430 单片机原理与应用”课程,以及多年单片机开发应用的经验和体会,内容上则补充、更新了很多新的资料和实验内容,特别是最新的无线传感器网络 ZigBee、模拟器件等。书中的所有源程序代码(汇编和 C)都经过实际验证和测试,应用举例和综合设计大多取材于实际应用项目,部分设计摘自 TI 公司的应用笔记。本书附带的光盘上,有 IAR 集成开发环境 EW430 评估版(4 KB C 代码限制),实验系统硬件资料,以及书中基础实验和许多实例的完整源代码(包括 USB 接口 USB430、网络接口 NET430 等)。

本书可作为高等院校计算机、电子、自动化类专业 MSP430 单片机课程的教材,也适合广大从事单片机应用系统开发工程技术人员作为学习、参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与实践/沈建华,
杨艳琴编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2008.7

ISBN 978-7-81124-367-3

I. M… II. 沈… III. 单片微型计算机 IV. TP 368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 083628 号

© 2008,北京航空航天大学出版社,版权所有。

未经本书出版者书面许可,任何单位和个人不得以任何形式或手段复制本书及其所附光盘内容。

侵权必究。

MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与实践

沈建华 杨艳琴 编著

责任编辑 张楠 王松

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(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

http://www.buaapress.com.cn E-mail:bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:28.75 字数:736 千字

2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 978-7-81124-367-3 定价:48.00 元(含光盘 1 张)

前言

单片机的应用日趋广泛,对处理器的综合性能要求也越来越高。综观单片机的发展,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。单片机系统作为嵌入式系统的一部分,主要集中在中、低端应用领域(嵌入式高端应用主要由 DSP、ARM、MIPS 等高性能处理器构成)。在这些应用中,目前也出现了一些新的趋势,主要体现在以下几个方面:

- 以电池供电的应用越来越多,而且由于产品体积的限制,很多是用纽扣电池供电,如无线传感器网络(WSN)、手持式仪表、玩具等。这就要求系统功耗尽可能低。
- 随着应用的复杂度的提高,对处理器的功能和性能要求不断提高,即既要外设丰富、功能灵活,又要有一定的运算能力,能做一些实时算法,而不仅仅做简单的控制。
- 产品更新速度快,开发时间短,希望开发工具简单、廉价、功能完善。特别是仿真工具要有延续性,能适应多种 MCU,以免重复投资,增加开发投入。
- 产品性能稳定,可靠性高,既能加密保护,又能方便升级。

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(Mixed Signal Processor),集多种领先技术于一体,以 16 位 RISC 处理器、超低功耗、高性能模拟技术及丰富的片内外设、JTAG 仿真调试定义了新一代单片机的概念,产品线也非常完整,给人以耳目一新的感觉。加之 TI 公司优良的服务(全球免费快速网上样片申请、丰富的技术资料,每年还有全球 430 Day 技术研讨会),充分体现了世界级著名 IC 厂商的实力和综合优势。

在超低功耗方面,其处理器功耗($1.8\sim 3.6\text{ V}$, $0.1\text{ }\mu\text{A/Power-down}$, $0.8\text{ }\mu\text{A/Standby}$, $250\text{ }\mu\text{A/MIPS}$)和口线输入漏电流(最大 50 nA)在业界都是最低的,远低于其他系列产品。

在运算性能上,其 16 位 RISC 结构,使 MSP430 单片机在 16 MHz 晶振工作时,指令速度可达 16 MIPS(注意:同样 16 MIPS 的指令速度,在运算性能上 16 位处理器比 8 位处理器高远不止 2 倍)。不久还将推出 $25\sim 30\text{ MIPS}$ 的产品。同

时,MSP430 单片机中采用了一般只有 DSP 中才有的 16 位多功能硬件乘法器、硬件乘-加(积之和)功能、DMA 等一系列先进的体系结构,大大增强了它的数据处理和运算能力,可以有效地实现一些数字信号处理的算法(如 FFT、DTMF 等)。

在开发工具上,MSP430 系列单片机支持先进的 JTAG 调试,简单的硬件仿真工具(仿真器)只是一个并口转接器,一般个人都可以自己制作,而且适用于所有 MSP430 系列单片机,既便于推广,又大大降低了用户的开发投入。其软件集成开发环境 EW430 由著名的 IAR 公司提供,其最新版本已比较完善。

在系统整合方面,MSP430 系列单片机结合 TI 公司独到的高性能模拟技术,根据其不同产品,集成了多种功能模块,包括定时器、模拟比较器、多功能串行接口(SPI/I²C/UART)、LCD 驱动器、硬件乘法器、10/12/14/16 位 ADC、12 位 DAC、看门狗定时器(WDT)、I/O 端口(P0~P6)、DMA 控制器、多达 120 KB 的 Flash 和 10 KB 的 RAM、SVS,以及丰富的中断功能。用户可以根据应用需求,选择最合适的 MSP430 系列产品。另外,大部分 MSP430 系列单片机采用 Flash 技术,支持在线编程,并有保密熔丝。其 BOOTSTRAP 技术为系统软件的升级提供了又一种方便的手段,BOOTSTRAP 有 32 个字节的口令字,具有很高的保密性。MSP430 系列单片机均为工业级产品,性能稳定,可靠性高,可用于各种民用、工业产品。

我们从 2000 年起开始使用 MSP430 系列单片机,2002 年华东师大计算机系单片机课程教改时,就把原来的 MCS-51 系列单片机课程和实验改为 MSP430 系列,并自主设计了实验系统,编写了讲义。在此基础上,2004 年我们编写出版了《MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用》和《MSP430 系列 16 位超低功耗单片机实践与系统设计》两本书,得到了许多读者的积极反馈。近几年,MSP430 系列单片机又有了很大的发展,特别是 MSP430F2xx 系列和 MSP430FG4xxx 系列,比原有的 MSP430F1xx/4xx 系列,在功耗、性能、外设等方面都有了许多改进。开发环境 EW430 也已经几次升级。原书的部分内容已不能适应目前的教学、科研需求。另外,TI 公司也加大了中国市场的 MSP430 推广力度,TI 大学计划部希望我们针对高校的特点,结合多年的教学、科研实践,重新推出一套完整的 MSP430 教学、科研实践平台。MSP430 软件集成调试环境厂商 IAR 也积极与我们配合,提供了 EW430 的大学计划特别版。在这些因素的推动下,结合我们原有的基础,我们从 2006 年 5 月开始整个计划,包括新的 MSP430 教材、配套的多媒体课件、实验系统等。考虑到实际教学情况,在这一本书中包含了全部 MSP430 的基本原理和实践内容。为控制篇幅、降低成本,很多内容放入了随书附带的光盘中,读者可以根据自己的需要查看。授课教师也可以根据不同的学科、专业、课时等具体情况,选择讲授其中的部分

内容。

本书融合了我们6年讲授“MSP430单片机原理与应用”课程,以及多年单片机开发应用的经验和体会,内容上则补充、更新了很多新的资料和实验内容,特别是最新的无线传感器网络 ZigBee、模拟器件等。书中的所有源程序代码(汇编和 C)都经过实际验证和测试,应用举例和综合设计大多取材于我们的实际应用项目,部分设计摘自 TI 公司的应用笔记。本书附带的光盘上,有 IAR 集成开发环境 EW430 评估版(4 KB C 代码限制),实验系统硬件资料,以及书中基础实验和许多实例的完整源代码(包括 USB 接口 USB430、网络接口 NET430 等)。最新的资料、代码等可以登录我们实验室网站(www.emlab.net)下载;实验系统、硬件模块、开发工具等,可以登录 www.mxchip.com 联系购买;多媒体课件(PPT)可以由授课老师发 E-mail 至 jhshen@cs.ecnu.edu.cn 免费索取。

在本书的编写过程中,得到了 TI 大学计划部经理沈洁、潘亚涛, IAR(中国)总经理 Tony Ye, 上海沁科信息技术有限公司(www.mxchip.com)总经理王永虹,以及北京航空航天大学出版社马广云、胡晓柏的大力支持。华东师范大学计算机系胡晓刚、姚海、黄文博、尤志坚、张敏、范皖勇、吴方锁、吴家平、黄国富、李吉、匡鑫、洪敦志和上海沁科信息技术有限公司的杨文博、杨蕾蕾、傅顺、项颖、朱海峰和徐峰等做了很多代码验证、资料整理工作。在此向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促和水平所限,错误之处在所难免,恳请读者批评指正,以便我们及时修正。有关此书的信息,会及时公布在我们实验室的网站上。

作者

2008 年 5 月于华东师范大学

目 录

第1章 概 述

1.1 单片微型计算机	1
1.1.1 单片机的概念	1
1.1.2 单片机的特点	1
1.1.3 单片机的应用	2
1.2 MSP430 系列单片机	2
1.2.1 MSP430 系列单片机产品概况	2
1.2.2 MSP430 系列单片机的特点	3
1.2.3 MSP430 系列单片机的发展和应用	6
1.3 小 结	7
1.4 思考题与习题	7

第2章 MSP430 系列单片机应用选型

2.1 MSP430X1XX 系列单片机	8
2.1.1 MSP430X11X 系列	8
2.1.2 MSP430F15X/F16(1)X 系列	10
2.2 MSP430F2XX 系列单片机	15
2.2.1 MSP430F20XX	15
2.2.2 MSP430X261X	19
2.3 MSP430X4XX 系列单片机	26
2.4 MSP430 系列单片机选型表	30
2.5 小 结	37
2.6 思考题与习题	37

第3章 MSP430 单片机结构

3.1 MSP430 结构概述	38
3.2 MSP430 CPU 的结构和特点	39
3.2.1 MSP430 CPU 的主要特征和功能	39
3.2.2 MSP430 CPU 的寄存器资源	40
3.3 MSP430 存储器的结构和地址空间	42
3.3.1 存储空间概述	42
3.3.2 数据存储器	43
3.3.3 程序存储器	43

3.3.4 外围模块寄存器	47
3.4 MSP430 的功耗管理模块	48
3.4.1 上电复位(POR)与上电清除(PUC)	48
3.4.2 掉电保护(BOR)	49
3.4.3 电源电压检测(SVS)	49
3.4.4 低功耗	50
3.5 小结	56
3.6 思考题与习题	56
第 4 章 MSP430 单片机指令系统与程序设计	
4.1 指令系统概况	57
4.1.1 指令系统的分类	57
4.1.2 指令书写格式	57
4.1.3 指令代码格式	58
4.1.4 指令系统中的符号说明	59
4.1.5 无需 ROM 补偿的仿真指令	59
4.1.6 MSP430 单片机指令速查表	61
4.2 寻址方式	62
4.3 指令系统介绍	66
4.3.1 数据传送类指令	66
4.3.2 数据运算类指令	71
4.3.3 逻辑操作指令	79
4.3.4 位操作指令	85
4.3.5 跳转与程序流程的控制类指令	87
4.4 程序设计	90
4.4.1 程序设计基础	90
4.4.2 汇编语言程序设计	91
4.4.3 C 语言程序设计	102
4.5 小结	123
4.6 思考题与习题	123
第 5 章 MSP430 单片机片内外围模块	
5.1 时钟模块	125
5.1.1 时钟模块设计要求	125
5.1.2 MSP430X1XX 系列时钟模块	126
5.1.3 MSP430X2XX 系列时钟模块	131
5.1.4 MSP430F4XX 系列时钟模块	135
5.1.5 时钟晶振失效的安全操作	141
5.1.6 时钟模块应用举例	142
5.2 电源电压监控 SVS	145
5.2.1 SVS 的特点与结构	145

5.2.2	SVS 的寄存器	146
5.2.3	SVS 的应用举例	146
5.3	MSP430 各种端口	147
5.3.1	MSP430 端口概述	147
5.3.2	端口 P1 和 P2	149
5.3.3	端口 P3~P8	152
5.3.4	端口 COM 和 S	152
5.4	定时器	152
5.4.1	MSP430 定时功能及其实现	152
5.4.2	看门狗定时器	153
5.4.3	16 位定时器 A	160
5.4.4	16 位定时器 B	180
5.4.5	基本定时器	183
5.4.6	实时时钟	186
5.5	MSP430 的 LCD 控制器	192
5.5.1	液晶驱动模块概述	192
5.5.2	液晶驱动模块功能结构	193
5.5.3	液晶驱动模块应用举例	199
5.6	LCD_A 控制器	203
5.6.1	LCD 控制器与 LCD_A 控制器的比较	203
5.6.2	LCD_A 控制器的操作	203
5.6.3	LCD_A 控制寄存器	208
5.7	FLASH 存储器模块	211
5.7.1	FLASH 存储器结构	211
5.7.2	FLASH 存储器寄存器及操作	213
5.7.3	FLASH 模块操作举例	219
5.8	USART 的异步模式	221
5.8.1	MSP430 串行通信概述	221
5.8.2	异步操作原理与操作	222
5.8.3	异步通信寄存器	228
5.8.4	异步操作应用举例	232
5.9	USART 的同步模式	234
5.9.1	SPI 概述	234
5.9.2	同步操作原理与操作	235
5.9.3	同步通信寄存器	239
5.9.4	同步操作应用举例	241
5.10	USART 的 I ² C 模式	245
5.10.1	I ² C 概述	245
5.10.2	I ² C 原理与操作	247

5.10.3	I ² C 模块寄存器及相关操作	251
5.10.4	I ² C 应用举例	259
5.11	USCI 模块	261
5.11.1	USCI 模块的结构	261
5.11.2	USCI 和 USART 的区别	263
5.12	比较器 A 及其增强模块	267
5.12.1	比较器的结构与操作	267
5.12.2	比较器 A 寄存器	269
5.12.3	比较器 A 应用举例	271
5.12.4	比较器 A 增强模块	272
5.13	MSP430 模/数转换模块	272
5.13.1	模/数转换概述	272
5.13.2	ADC12 的结构	274
5.13.3	ADC12 寄存器	276
5.13.4	ADC12 转换模式	281
5.13.5	ADC12 应用举例	288
5.14	SD16_A 模块	290
5.14.1	SD16_A 的特点与结构	290
5.14.2	SD16_A 模块的操作	292
5.14.3	SD16_A 寄存器	296
5.14.4	SD16_A 应用举例	300
5.15	MSP430 的数/模转换模块	302
5.15.1	数/模转换概述	302
5.15.2	DAC12 的结构与功能	302
5.15.3	DAC12 寄存器	304
5.15.4	DAC12 操作	306
5.15.5	DAC12 应用举例	309
5.16	硬件乘法器	310
5.17	DMA 控制器	313
5.17.1	MSP430 DMA 控制器的结构与功能	313
5.17.2	DMA 控制器的相关操作	315
5.17.3	DMA 寄存器	320
5.17.4	DMA 应用举例	323
5.18	OA 运算放大器	326
5.18.1	OA 模块概述	326
5.18.2	OA 的操作	326
5.18.3	OA 的模式配置	327
5.18.4	OA 寄存器	331
5.18.5	OA 应用举例	333

5.19 SCAF	334
5.20 小 结	335
第 6 章 MSP430 单片机应用基础	
6.1 MSP430 常用接口设计	336
6.1.1 键盘接口	336
6.1.2 LED 显示接口	343
6.1.3 液晶显示接口	346
6.1.4 常用的 LED 驱动功率接口	354
6.1.5 继电器型驱动接口	357
6.2 MSP430 片内外围模块的应用	359
6.2.1 定时器	359
6.2.2 比较器	363
6.2.3 SPI 同步操作	366
6.2.4 A/D、D/A 和 DMA	371
6.3 典型外围模拟器件简介	374
6.3.1 电源器件	374
6.3.2 高精度 ADC 器件	380
6.3.3 接口驱动器件	383
6.3.4 RF 通信器件	387
6.4 小 结	390
6.5 思考题与习题	391
第 7 章 MSP430 单片机实践	
7.1 MSP430 集成开发调试环境 IAR EW430	392
7.1.1 IAR Embedded Workbench 概述	392
7.1.2 IAR EW430 基本操作	393
7.1.3 C-SPY 硬件仿真调试	398
7.1.4 C-SPY 软件模拟调试	404
7.1.5 用户自定义库文件的使用	408
7.2 MSP430 集成开发调试环境 TI CCE	409
7.2.1 TI Code Composer Essentials 概述	409
7.2.2 TI CCE 的基本操作	409
7.3 MSP430-EXP-4XX 开发实验板	413
7.3.1 MSP430-EXP-4XX 开发实验板简介	413
7.3.2 MSP430-EXP-4XX 开发实验板结构	414
7.3.3 MSP430-EXP-4XX 开发实验板使用说明	417
7.4 基础实验	419
7.4.1 实验 1, I/O 与时钟	419
7.4.2 实验 2, 键盘与 LED	420
7.4.3 实验 3, 定时器	422

7.4.4 实验 4, 外围模块	423
7.4.5 实验 4, 使用口线模拟 I ² C	424
7.4.6 实验 6, 同步通信模块与扩展 FLASH	426
7.4.7 实验 7, ADC 与 LCD	430
7.4.8 实验 8, 图形点阵 LCD	431
7.4.9 实验 9, 超低功耗实验	434
7.5 拓展实验	435
7.5.1 实验 1, USART 与 M_Bus、RS485、RS232 通信	435
7.5.2 实验 2, 模拟定时时间与 RS485 通信	441
7.5.3 实验 3, SPI 接口扩展 RF/Zigbee 实验	443
7.6 小 结	445
参考文献	446

第1章

概述

1.1 单片微型计算机

1.1.1 单片机的概念

微型计算机(微机)具有体积小、价格低、使用方便、可靠性高等一系列优点,因此一问世就显示出强大的生命力,被广泛应用于国防、工农业生产和商业管理等领域。近年来微处理器高速发展,已渗透到人类生活的各个领域,给人类世界带来了难以估量的深刻变革。

纵观微处理器的发展,可以明显地看出正朝着两个方向进行:

一是朝着面向数据运算、信息处理等功能的系统机方向发展。系统机以速度快、功能强、存储量大、软件丰富、输入/输出设备齐全为主要特点,采用高级语言编程,适用于数据运算、文字信息处理、人工智能、网络通信等场合。

另一方面,在有些应用领域中,如智能化仪器仪表、通信设备、自动控制设备、汽车乃至家用电器等,要求的运算、控制功能相对并不很复杂,但对体积、成本、功耗等的要求却比较苛刻。为适应这方面的需求,产生了一种将中央处理器、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计算机,即所谓的单片微型计算机,简称单片机(Single Chip Microcomputer)。单片机在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,因此也称为微控制器(MCU)。

单片机分为通用型和专用型两大类,通常所说的单片机和本书介绍的 MSP430 系列单片机都是指通用型单片机。通用型单片机是把可开发的资源全部提供给使用者。专用型的单片机也叫专用微控制器,是针对某些应用专门设计的,例如频率合成调谐器、录音机机芯控制器、打印机控制器等。

1.1.2 单片机的特点

- 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,能针对性地解决从简单到复杂的各类控制任务,因而能获得最佳性能价格比。
- 抗干扰能力强,适应温度范围宽,在各种恶劣环境下都能可靠地工作,这是其他机型无法比拟的。

- 可以很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。

世界著名的半导体厂商 TI 公司在 20 世纪 70 年代首先推出了 TMS1000 系列 4 位单片机。在 20 世纪 80~90 年代,国内主要使用 Intel 的 MCS-51 系列和原 Motorola 的 68HC 系列 8 位单片机。目前主要的单片机厂商还有 Atmel、Microchip、NXP 等。

单片机应用面广、生产批量大、成本低廉(目前最低价格为 3~5 元人民币);系统结构简单而使可靠性增加;采用 CMOS 工艺大大降低了功耗。因此单片机问世之后很快成为微型计算机的一个重要分支,发展极为迅速。从 4 位、8 位、16 位到 32 位,单片机种类已有数百种,世界年销售量达几亿片。

1.1.3 单片机的应用

单片机可以应用到人类生活的各个领域。以下列出的是单片机应用比较活跃的领域:

- 工业控制:单片机的结构特点决定了它特别适用于各种控制系统,既可以作单机控制器,又可作为多级控制的前沿处理机用于控制系统,应用领域相当广泛。例如:用于各种机床控制、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、鱼类制导控制、智能武器装备、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、排气控制等。
- 智能化的仪器仪表:单片机用于包括温度、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:单片机可用于电子秤、录像机、录音机、彩电、洗衣机、高级电子玩具、冰箱、照相机、家用多功能报警器等。
- 计算机网络与通信:单片机可用 BIT BUS、CAN、以太网等构成分布式网络系统,还可以用于调制解调器、各种智能通信设备(例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:单片机可以用于温氏硬盘驱动器、微型打印机、图形终端、CRT 显示器等。

总之,单片机具有体积小、功能强、价格便宜等优点,是微机应用产品化的最佳选择。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,现在相当一部分可以用各种单片机(或叫做微控制器)予以取代。传统的逻辑设计方法正在演变成软件和硬件相结合的方法,许多电路设计问题将转化为程序设计问题。

1.2 MSP430 系列单片机

MSP430 系列单片机是 TI 公司 1996 年开始推向市场的一种 16 位超低功耗的混合信号处理器(Mixed Signal Processor)。称之为混合信号处理器,主要是其针对实际应用需求,把许多模拟电路、数字电路和微处理器集成在一个芯片上,以提供“单片”解决方案。

1.2.1 MSP430 系列单片机产品概况

MSP430 系列单片机种类繁多,在介绍系列产品之前,需要了解 MSP430 系列单片机的命名

规则。命名中包括以下几类信息:片内存储器的类型、系列号、子系列号、温度范围、封装类型等。其中,片内存储器类型有 ROM(C)、EPROM(E)、FLASH(F)、OTP(P)、USER(U)等。各类型存储器特性如表 1.1 所列。

表 1.1 存储器特性

类 型	名 称	特 性
C	ROM	只读存储器,适合大批量生产
P	OTP	单次可编程存储器,适合小批量生产
E	EPROM	可擦除只读存储器,适合开发样机
F	FLASH	闪存,具有 ROM 型的非易失性和 EPROM 的可擦除性

- 系列号码为存储器类型后面的一位数字,如 1、2、4 分别代表 MSP430 的 1、2、4 系列单片机。
- 子序列号码为包括系列号码在内的若干位数字,用来表示更加具体的芯片内部外围模块的配置和存储容量等信息。
- 封装类型表示方面,DW(SOIC20,1.27 mm 脚距)、RGE(QFN24)、DGV(TVSOP20)、PW(TSSOP20,0.65 mm 脚距)、PM(QFP64,0.5 mm 脚距)、PN(QFP80,0.5 mm 脚距)、PZ(QFP100,0.5 mm 脚距)。MSP430 系列单片机详细的封装类型请参见本书图 2.15。
- 温度范围:I(工业级),A(汽车级)。

以 MSP430F449 为例。F:FLASH 型;44:MSP430 的 4 系列中的 44 子系列,片内具有 ADC12、LCD 和硬件乘法器等外围部件;9:存储容量为 60K。MSP430F448 存储容量就为 48K。

TI 公司的 MSP430 系列单片机种类齐全,用户可以根据应用需求选择合适的芯片。例如,可选择 1~120 KB 的 ISP(串行在线可编程)Flash 存储器;RAM 最高可达 10 KB;14~100 引脚等。总的来说,MSP430 系列单片机可以分成两类:片内无段式 LCD 驱动的系列产品和片内有段式 LCD 驱动的系列产品。

片内无段式 LCD 驱动模块的产品主要是 MSP430X1XX 系列和 MSP430X2XX 系列,这些单片机构成应用系统时,性价比高,使用方式灵活,控制简单,而且是 TI 公司品种最多的系列,实际中应用很广。另外,MSP430X2XX 系列也是业界功耗最低的单片机。

片内具有段式 LCD 驱动模块的产品主要是 MSP430X3XX 系列和 MSP430X4XX 系列,其中 MSP430X3XX 系列单片机是 TI 最早推出的产品。该系列产品虽然片内外设丰富,但没有 FLASH 型,且价格较高,对于一般应用来说,性价比低于 MSP430X1XX 系列,已经逐渐淡出应用。而 MSP430X4XX 系列既具有某些 MSP430X1XX 系列具有的 FLASH 存储器,又增加了段式 LCD 驱动能力,片内/外设资源同 MSP430X3XX 系列一样丰富。所以 MSP430X4XX 在系统设计、开发调试及实际应用上都表现出明显的优势。

1.2.2 MSP430 系列单片机的特点

虽然 MSP430 系列单片机推出时间不是很长,但由于其卓越的性能,它在短短几年时间里发展极为迅速,应用也日趋广泛。从 TI 公司的 MSP430 网站(www.msp430.com)可以得到丰

富的学习资源,包括各种最新 MSP430 器件资料、MSP430 开发工具软件、下载各类文档、免费的仿真软件及免费的软件包等等。既有面向初学者的入门资料,也有供高级用户参考的设计信息。MSP430 系列单片机针对各种不同应用,包括一系列不同型号的器件,主要特点有:

1. 超低功耗

MSP430 系列单片机的电源电压采用 1.8~3.6 V,待机电流小于 1 μA ,在 RAM 数据保持方式时耗电仅 0.1 μA ,在活动模式时耗电 250 $\mu\text{A}/\text{MIPS}$ (MIPS:每秒百万条指令数),I/O 输入端口的漏电流最大为 50 nA。

MSP430 系列单片机有独特的时钟系统设计,包括两个不同的时钟系统:基本时钟系统和锁频环(FLL 和 FLL+)时钟系统或 DCO 数字振荡器时钟系统。由时钟系统产生 CPU 和各功能模块所需的时钟,这些时钟可以在指令的控制下打开或关闭,从而实现对总体功耗的控制。由于系统运行时使用的功能模块不同,即采用不同的工作模式,芯片的功耗有明显的差异。在系统中共有 1 种活动模式(AM)和 5 种低功耗模式(LPM0~LPM4)。

另外,MSP430 系列单片机采用矢量中断,支持多个中断源,并可以任意嵌套。用中断请求将 CPU 唤醒最短只要 1 μs ,通过合理编程,既可以降低系统功耗,又可以对外部事件请求做出快速响应。

在这里,需要对低功耗问题做一些说明。

首先,对处理器而言,活动模式时的功耗必须与其性能一起来考察、衡量,忽略性能来看功耗是片面的。在计算机体系结构中,是用 W/MIPS(瓦特/MIPS)来衡量处理器的功耗与性能关系的。因此,MSP430 系列单片机在活动模式时耗电 250 $\mu\text{A}/\text{MIPS}$,这种标称方法是合理的,这个指标也是很高的(传统的 MCS-51 单片机约为 10~20 mA/MIPS)。

其次,作为一个应用系统,功耗是整个系统的功耗,而不仅仅是处理器的功耗。比如,在一个有多个输入信号的应用系统中,处理器输入端口的漏电流对系统的耗电影响就较大了。MSP430 单片机输入端口的漏电流最大为 50 nA,远低于其他系列单片机(一般为 1~10 μA)。

另外,处理器的功耗还要看它内部功能模块是否可以关闭,以及模块活动时的耗电,比如低电压监测电路的耗电等。此外还要注意,有些单片机的某些参数指标中,虽然典型值可能很小,但最大值和典型值相差数十倍,而设计时要考虑到最坏情况,就应该关心参数标称的最大值,而不是典型值。总体而言,MSP430 系列单片机堪称目前世界上功耗最低的单片机之一,其应用系统可以做到一枚纽扣电池使用 10 年。

2. 强大的处理能力

MSP430 系列单片机是 16 位单片机,采用了目前流行的、颇受学术界好评的精简指令集(RISC)结构,1 个时钟周期可以执行 1 条指令(传统的 MCS51 单片机要 12 个时钟周期才可以执行 1 条指令),使 MSP430 在 8 MHz 晶振工作时,指令速度可达 8 MIPS(注意:同样 8 MIPS 的指令速度,在运算性能上 16 位处理器比 8 位处理器高远不止 2 倍)。TI 公司不久还将推出 25~30MIPS 的产品,目前,MSP430 的 2 系列的 CPU 时钟已经达到 16 MHz。

同时,MSP430 系列单片机中的某些型号,采用了一般只有 DSP 中才有的 16 位多功能硬件乘法器、硬件乘-加(积之和)功能、DMA 等一系列先进的体系结构,大大增强了其数据处理和运算能力,可以有效地实现一些数字信号处理的算法(如 FFT、DTMF 等)。这种结构在其他系列单片机中尚未发现。

3. 高性能模拟技术及丰富的片上外围模块

MSP430 系列单片机结合 TI 公司的高性能模拟技术,各成员都集成了较丰富的片内外设。根据型号分别组合了以下功能模块:10/12/16 位 ADC、12 位 DAC、比较器、LCD 驱动器(LCD 和 LCD_A)、电源电压监控(SVS)、串行通信(UART、I²C、SPI)、红外线控制器(IrDA)、硬件乘法器(MPY)、DMA 控制器(DMAC)、温度传感器、看门狗计时器(WDT)、定时器 A(Timer_A)、定时器 B(Timer_B)、端口 1~8(P1~P8)、基本定时器(Basic Timer)、实时时钟模块(RTC)、运算放大器(OA)以及扫描接口(Scan IF)等。

其中,看门狗可以使程序失控时迅速复位;模拟比较器进行模拟电压的比较,配合定时器可设计出高精度(10~11 位)的 A/D 转换器;16 位定时器(Timer_A 和 Timer_B)具有捕获/比较功能,大量的捕获/比较寄存器,可用于事件计数、时序发生、PWM 等;多功能串口(USART)可实现异步、同步(SPI)、I²C 串行通信,可方便地实现多机通信等应用,USCI 模块还包含红外控制部分;具有较多的 I/O 端口,最多达 10×8 条 I/O 口线,I/O 输出时,不管是灌电流还是拉电流,每个端口的输出晶体管都能够限制输出电流(最大约 25 mA),保证系统安全;P1、P2 端口能够接收外部上升沿或下降沿的中断输入;12 位 A/D 转换器有较高的转换速率,最高可达 200 KSPS,能够满足大多数数据采集应用;LCD 驱动模块能直接驱动液晶多达 160 段;F15X 和 F16X 系列有两路 12 位高速 DAC,可以实现直接数字波形合成等功能;硬件 I²C 串行总线接口可以扩展 I²C 接口器件;DMA 功能可以提高数据传输速度,减轻 CPU 的负荷;运算放大器(OA)可在模拟信号转换成数字信号前,支持前端模拟信号状态;扫描接口(Scan IF)能检测传感器,测量直线运动或者转动。

MSP430 系列单片机的丰富片内外设,在目前所有单片机系列产品中是非常突出的,为系统的单片解决方案提供了极大的方便。

4. 系统工作稳定

上电复位后,首先由 DCO_CLK 启动 CPU(数字控制振荡器 DCO 是 MSP430 系列单片机内置的),以保证程序从正确的位置开始执行,保证外接的晶体振荡器有足够的起振及稳定时间。然后通过软件设置适当的寄存器的控制位来确定最后的系统时钟频率。如果晶体振荡器在用做 CPU 时钟 MCLK 时发生故障,DCO 会自动启动,以保证系统正常工作。这种结构和运行机制,在目前各系列单片机中是绝无仅有的。另外,MSP430 系列单片机均为工业级器件,运行环境温度范围为-40~+85℃,运行稳定,可靠性高,所设计的产品适用于各种民用和工业环境。

5. 方便高效的开发环境

目前 MSP430 系列有 OPT 型、FLASH 型、ROM 型和 EPROM 型 4 种类型的器件,国内大量使用的是 FLASH 型。这些器件的开发手段不同,对于 OPT 型和 ROM 型的器件,使用专用仿真器开发成功之后再烧写或掩膜芯片。

对于 FLASH 型则有十分方便的开发调试环境,因为器件片内有 JTAG 调试接口,还有可电擦写的 FLASH 存储器,因此采用先通过 JTAG 接口下载程序到 FLASH 内,再由 JTAG 接口控制程序运行,读取片内 CPU 状态以及存储器内容等信息供设计者调试,整个开发(编译、调试)都可以在同一个软件集成环境中进行。这种方式只需要一台 PC 机和一个 JTAG 调试器,不需要专用仿真器和编程器。开发语言有汇编语言和 C 语言。目前较好的集成开发环境是 IAR 的 EW430 V3.42 和 TI 的 CCE,本书第 7 章将对它们的使用方式进行专门介绍。

这种以 Flash 技术、JTAG 调试、集成开发环境结合的开发方式,具有方便、廉价、实用等优