



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

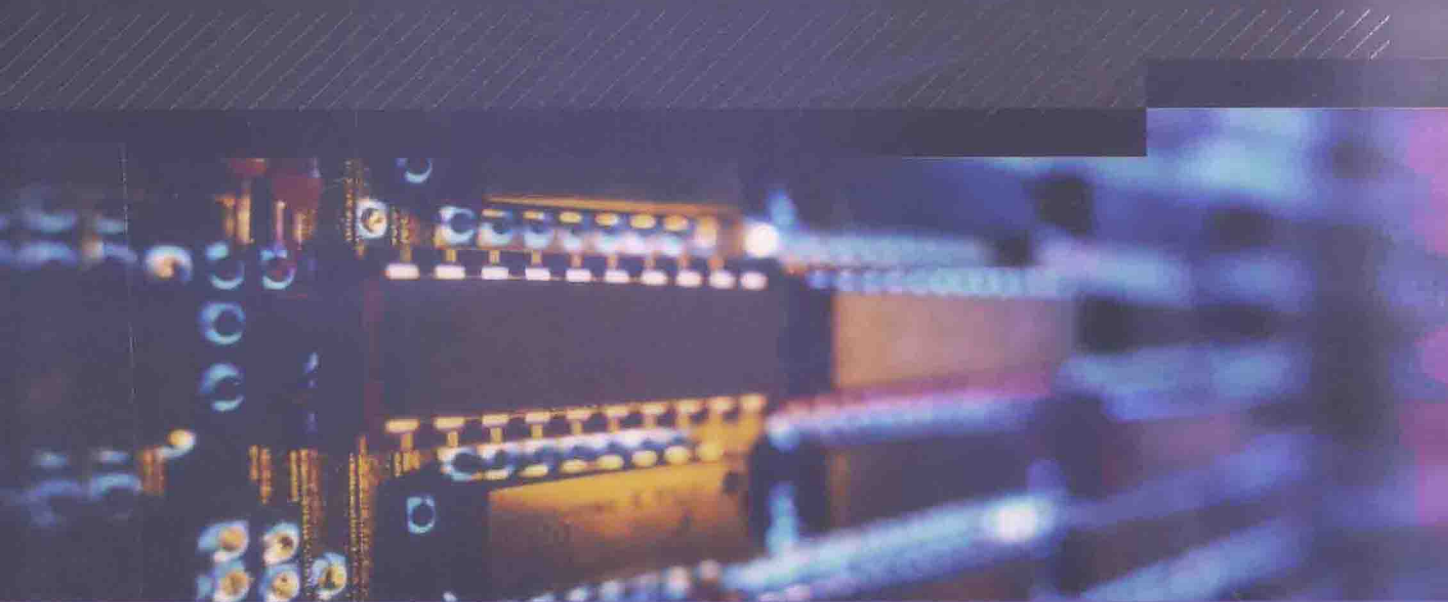


The Principle and Application of 16 Bit
Microcontroller Based on MSP430

16 位单片机原理 及应用——基于 MSP430

王文庆 主编

亢红波 杨春杰 副主编



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

**The Principle and Application of 16 Bit
Microcontroller Based on MSP430**

16 位单片机原理 及应用——基于 MSP430

王文庆 主编

亢红波 杨春杰 副主编

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

16位单片机原理及应用：基于MSP430 / 王文庆主编

— 北京：人民邮电出版社，2014.10

21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

ISBN 978-7-115-36587-3

I. ①1… II. ①王… III. ①单片微型计算机—高等学校—教材 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第190653号

内 容 提 要

单片机是高等院校工科类专业的重要专业基础课，传统教学以 C51 等 8 位单片机为主。随着单片机技术的发展，16 位/32 位单片机已成主流，因此，有必要选择一款难易适中的单片机作为教学对象。本书以近年来应用广泛的 MSP430 单片机为例，系统地讲解了 16 位单片机的原理及应用。全书共有 12 章，分章节介绍单片机的组成和结构、片上外设的工作原理、应用及设计，每章配有摘要、正文、基础实例和综合实例，并安排了丰富的课后习题。同时，本书还有针对性地安排了基于 MSP430 的小型项目的设计，并提供源代码。

本书适合高等学校工科类学生的单片机课程的教学，也可以作为培训或技术人员自学的参考书。



-
- ◆ 主 编 王文庆
 - 副 主 编 亢红波 杨春杰
 - 责任编辑 张孟玮
 - 执行编辑 税梦玲
 - 责任印制 彭志环 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本：787×1092 1/16
 - 印张：19 2014 年 10 月第 1 版
 - 字数：465 千字 2014 年 10 月河北第 1 次印刷

定价：42.00 元

读者服务热线：(010)81055256 印装质量热线：(010)81055316
反盗版热线：(010)81055315

本书适合普通高校自动化、测控仪器与技术、计算机等相关专业的本科教学，以 16 位超低功耗单片机 MSP430 为对象，讲述 16 位单片机的基本结构、基本理论、开发应用等，同时引入单片机技术的新应用。全书内容丰富、结构紧凑、系统性强。与传统的同类书相比，本书具有以下特点。

(1) 具有较强的基础性、实践性与实用性。本书继承了原有单片机教材基础性强的优势，清楚地阐述了单片机各功能模块的结构、工作原理，易于学生掌握。同时，本书引入了实用性较强的实例，以提高学生的应用能力。

(2) 与实际应用结合紧密，突出新技术。本书实例不但紧密联系理论，同时还引入单片机当前的实际应用技术，如新型传感器、小型无线网络等。

(3) 提倡低功耗设计。本书从原理讲述到实例设计，都将低功耗设计理念贯穿其中，以适应单片机在工业控制、嵌入式、物联网等领域的应用趋势。

本书由编写组老师将近几年积累的设计实例、课程讲稿、设计笔记等资料整理后编写而成，同时也参考了大量的官方资料。出于知识全面性考虑，本书选取在实际应用较广泛的 MSP430F169 为主要介绍对象。MSP430F169X 系列单片机片上资源丰富，具有定时器、ADC12 模块、同步的双 12 位 D/A 转换器、DMA 模块、供电电压管理器/监视器和欠电压检测器等片上资源，是 MSP430 单片机中具有代表性的一款，且 MSP430F169X 复杂度适中，易于掌握。通过学习，读者可以触类旁通，对学习其他的 16 位单片机起到举一反三的效果。

为方便读者学习，书中每章节都配有摘要，以总体介绍本章内容。为突出单片机组成原理，每章节都详细介绍了本章模块的结构、工作原理以及相关寄存器。在每章节最后，给出了应用实例，实例一般分为两个部分，一部分为普通应用实例，一部分为综合实例，这些实例可以使读者更好地掌握该章内容。此外，本书的第 11 章和第 12 章以近年来编写组老师所指导的竞赛为题材，描述 MSP430 的实际应用，增加了本书的实用性。

本书由教学经验丰富的教师和学科竞赛小组的师生共同编写。王文庆老师任主编，并编写第 1 章~第 4 章；第 5 章、第 7 章、第 9 章由杨春杰老师编写；第 6 章、第 8 章、第 10 章~第 12 章由亢红波老师编写。本书具体内容分配如下。

第 1 章为 MSP430 单片机概述。介绍 MSP430 的发展、特点、类型等背景知识。

第 2 章介绍 MSP430 单片机内部资源。以 MSP430F169 为对象，介绍 CPU 结构、系统复位和工作模式、存储器结构、时钟模块及电源检测等内容。

第 3 章介绍 MSP430 指令系统与开发环境。包括汇编指令、C 语言开发以及 MSP430 开发环境。

第 4 章~第 10 章介绍 MSP430 片上资源。分章节介绍 MSP430 的片上资源，包括 I/O 端口、定时器、USART、比较器、ADC12、DAC12、DMA 等内容。每章配有基础实例和综合实例，方便教学与学习。

第 11 章介绍液晶显示系统。介绍了常用的三种液晶显示系统的开发。

第 12 章为综合应用实例。以近年来电子设计大赛题目和挑战杯题目为例，详细介绍了基于 MSP430 单片机的开发应用。

本书建议学时为 48~64 学时，其中实验学时为 14~18 学时，第 11 章和第 12 章不做学时要求，其他章节学时分配如下。

	第 1 章	第 2 章	第 3 章	第 4 章	第 5 章	第 6 章	第 7 章	第 8 章	第 9 章	第 10 章	总计
理论	2	3~5	5	3	5~8	5~7	2~4	5~7	2~3	2	
实验	0	0	2	2	2~4	2~4	2	2	2	0	
小计 1	2	3	7	5	7	7	4	7	4	2	48
小计 2	2	5	7	5	12	11	6	9	5	2	64

本书编写过程中得到了徐苍博、李信息、倪云飞、王家俊、李佩等的帮助，在此表示感谢。由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，恳切希望广大读者批评指正。

编者
2014 年 5 月

第 1 章 MSP430 系列单片机概述 1

- 1.1 超低功耗单片机 1
- 1.2 超低功耗单片机的发展及应用 2
- 1.3 超低功耗单片机系统的设计原则 3
 - 1.3.1 硬件设计原则 3
 - 1.3.2 软件设计原则 3
- 1.4 MSP430 系列单片机简介 4
 - 1.4.1 MSP430 系列单片机的发展 4
 - 1.4.2 MSP430 系列单片机的特点 5
 - 1.4.3 MSP430 系列单片机的主要结构 6
 - 1.4.4 MSP430 各系列单片机介绍 8
- 1.5 MSP430 系列单片机选型 10
- 思考练习题 13

第 2 章 MSP430F169 单片机内部资源 14

- 2.1 MSP430F169 单片机结构 14
 - 2.1.1 MSP430F169 内部结构 14
 - 2.1.2 MSP430F169 封装及引脚定义 15
- 2.2 MSP430F169 的中央处理单元 17
 - 2.2.1 中央处理单元的组成 17
 - 2.2.2 MSP430F169CPU 的寄存器资源 18
- 2.3 系统复位和工作模式 20
 - 2.3.1 系统复位和初始化 20
 - 2.3.2 工作模式及功耗 22
- 2.4 MSP430 存储器组织与 Flash 操作 24
 - 2.4.1 存储器组织结构 24
 - 2.4.2 MSP430 的 Flash 存储器 26

- 2.4.3 Flash 操作 28
- 2.5 MSP430 的基础时钟模块 35
 - 2.5.1 各基础时钟模块介绍 36
 - 2.5.2 时钟模块的寄存器 39
 - 2.5.3 时钟应用举例 41
- 2.6 MSP430 的中断和特殊功能寄存器 41
 - 2.6.1 中断的结构和类型特点 41
 - 2.6.2 中断响应过程 43
 - 2.6.3 中断的嵌套 43
 - 2.6.4 中断向量和特殊功能寄存器 43
- 2.7 电源监测模块 SVS 45
 - 2.7.1 电源监测模块概述 45
 - 2.7.2 电源管理系统寄存器 47
 - 2.7.3 SVS 应用实例 48
- 思考练习题 48

第 3 章 MSP430 指令系统与开发环境 49

- 3.1 MSP430 指令系统概述 49
 - 3.1.1 汇编语言语句格式 49
 - 3.1.2 无须 ROM 补偿的仿真指令 50
 - 3.1.3 指令的时钟周期与指令长度 51
- 3.2 寻址模式 53
 - 3.2.1 寄存器寻址 53
 - 3.2.2 变址寻址 53
 - 3.2.3 符号寻址 53
 - 3.2.4 绝对寻址 54
 - 3.2.5 寄存器间接寻址 54
 - 3.2.6 间接增量寻址 54
 - 3.2.7 立即寻址 55
- 3.3 指令系统介绍 55
 - 3.3.1 数据传送类指令 55

3.3.2 数据运算类指令	58	5.2.3 定时器 A 的中断管理	110
3.3.3 逻辑操作类指令	63	5.3 定时器 B 模块	111
3.3.4 位操作类指令	66	5.4 应用实例	113
3.3.5 跳转与程序流程控制类指令 ..	68	5.5 看门狗定时/计数器 WDT	117
3.3.6 堆栈指针寻址	72	5.5.1 WDT 工作原理	117
3.4 汇编语言程序设计	72	5.5.2 看门狗定时器寄存器	119
3.4.1 应用程序设计基础知识	73	5.5.3 看门狗定时器应用举例	120
3.4.2 汇编语言伪指令	73	思考练习题	121
3.4.3 常用的汇编程序设计方法	75	第 6 章 通用同步/异步收发器 USART ..	122
3.5 MSP430 单片机 C 语言程序设计		6.1 通用异步串行接口	122
基础	77	6.1.1 串行接口初始化/重配置的	
3.5.1 IAR C430 语言基础	77	基本步骤	123
3.5.2 IAR C430 编译器支持的		6.1.2 通用异步串行接口的数据	
数据类型	78	格式	124
3.5.3 IAR C430 程序结构	80	6.1.3 异步通信模式	124
3.5.4 IAR C430 的函数	81	6.1.4 串行操作自动错误检测	125
3.6 MSP430 的开发环境	82	6.1.5 UART 的波特率	125
3.6.1 IAR Embedded Workbench		6.1.6 异步模式下的寄存器	126
概述	82	6.1.7 UART 的设计举例	132
3.6.2 IAR Embedded Workbench		6.2 SPI 接口	134
使用	83	6.2.1 MSP430F169 的同步操作	134
思考练习题	88	6.2.2 SPI 初始化或重新配置	
第 4 章 I/O 端口操作	89	流程	135
4.1 I/O 端口特点及结构	89	6.2.3 SPI 模式引脚	135
4.2 I/O 端口相关寄存器	93	6.2.4 SPI 操作方式	135
4.3 I/O 端口操作流程	95	6.2.5 SPI 使能	137
4.4 I/O 端口操作实例	96	6.2.6 SPI 中断	138
4.4.1 I/O 基本输入输出操作	96	6.2.7 同步模式的寄存器	139
4.4.2 I/O 中断操作	96	6.2.8 应用举例	142
4.4.3 I/O 端口的第二功能操作	97	6.3 I ² C 模块	143
4.4.4 综合应用实例	97	6.3.1 I ² C 模块简介	144
思考练习题	101	6.3.2 I ² C 模块的操作	145
第 5 章 定时器模块	102	6.3.3 I ² C 模块的寄存器	150
5.1 定时器概述	102	6.3.4 综合应用实例	158
5.2 定时器 A	102	思考练习题	165
5.2.1 定时器 A 的结构	102	第 7 章 比较器 A	166
5.2.2 定时器 A 的主要寄存器	107	7.1 比较器 A 简介	166

7.2 比较器 A 工作原理和操作流程 .. 167	9.2.2 DAC12 的端口选择199
7.2.1 比较器 A 工作原理 167	9.2.3 DAC12 的参考电压199
7.2.2 比较器 A 基本操作流程 167	9.2.4 更新 DAC12 的输出电压199
7.2.3 模拟输入信号选择 167	9.2.5 DAC12_xDAT 的数据格式199
7.2.4 输出滤波器选择 168	9.2.6 DAC12 输出的偏移校准200
7.2.5 电压基准的产生和选择 168	9.2.7 DAC12 中断200
7.2.6 比较器端口禁止寄存器 CAPD 168	9.2.8 组合多个 DAC12 模块201
7.2.7 比较器 A 的中断 169	9.3 DAC12 的寄存器201
7.2.8 用比较器 A 测量电阻元件 ... 169	9.4 DAC12 应用实例204
7.3 比较器 A 的寄存器说明 171	思考练习题205
7.4 程序设计举例 173	
思考练习题 175	
第 8 章 ADC12 模块 176	第 10 章 DMA 模块 206
8.1 ADC12 模块简介 176	10.1 DMA 控制器模块简介206
8.1.1 ADC12 模块的主要特点 176	10.1.1 DMA 模块的特点206
8.1.2 ADC12 模块的组成 177	10.1.2 DMA 控制器的结构207
8.2 ADC12 模块的操作流程 179	10.2 DMA 模块的操作208
8.2.1 ADC12 模块的采样与转换... 179	10.2.1 DMA 控制器的寻址模式208
8.2.2 ADC12 模块的采样保持触发 信号 179	10.2.2 DMA 控制器的传输模式209
8.2.3 ADC12 模块的采样模式 180	10.2.3 DMA 触发方式209
8.3 ADC12 转换模式 181	10.2.4 关闭 DMA 传输211
8.3.1 单通道单次转换 181	10.2.5 DMA 通道优先权211
8.3.2 序列通道单次转换 182	10.2.6 DMA 传输周期212
8.3.3 单通道多次转换 183	10.2.7 DMA 与系统中断212
8.3.4 序列通道多次转换 184	10.2.8 DMA 控制器的中断212
8.4 ADC12 寄存器说明 185	10.2.9 DMA 方式下的 I ² C 的使用213
8.5 ADC12 应用实例 190	10.2.10 使用 DMA 控制器的 ADC12213
8.5.1 ADC12 操作流程及简单 应用 190	10.2.11 使用 DMA 控制器的 DAC12213
8.5.2 综合应用实例 193	10.3 DMA 寄存器213
思考练习题 196	10.4 DMA 应用实例217
第 9 章 DAC12 模块 197	思考练习题219
9.1 DAC12 简介 197	第 11 章 基于 MSP430 的液晶显示系统
9.2 DAC12 的操作 198	控制 220
9.2.1 DAC12 内核 198	11.1 RT1602C 模块介绍221
	11.1.1 RT1602C 模块的引脚说明221

- 11.1.2 RT1602C 模块组件内部结构 222
- 11.1.3 RT1602C 模块的操作时序 222
- 11.1.4 RT1602C 模块操作指令 224
- 11.1.5 RT1602C 模块初始化过程 226
- 11.1.6 RT1602C 模块使用实例 226
- 11.2 ST7920 (12864) 模块介绍 228
 - 11.2.1 ST7920 (12864) 模块引脚说明 229
 - 11.2.2 ST7920 (12864) 内部模块 230
 - 11.2.3 ST7920 (12864) 模块操作时序 230
 - 11.2.4 ST7920 (12864) 模块操作指令 232
 - 11.2.5 ST7920 (12864) 模块初始化过程 235
 - 11.2.6 ST7920 (12864) 模块应用实例 235
- 11.3 汉字图形点阵液晶模块开发 251
 - 11.3.1 NOKIA5110 模块引脚说明 251
 - 11.3.2 NOKIA5110 内部模块介绍 252

- 11.3.3 NOKIA5110 模块操作时序 252
- 11.3.4 NOKIA 5110 模块操作指令 253
- 11.3.5 NOKIA5110 模块初始化过程 254
- 11.3.6 NOKIA5110 模块应用实例 255
- 思考练习题 260
- 第 12 章 综合应用实例 261
 - 12.1 随动系统设计 261
 - 12.1.1 系统分析 262
 - 12.1.2 随动系统硬件电路设计 262
 - 12.1.3 随动系统软件设计 267
 - 12.2 小型跟踪器的设计 276
 - 12.2.1 跟踪系统功能分析 276
 - 12.2.2 跟踪器硬件电路设计 277
 - 12.2.3 跟踪器软件设计 285
 - 12.2.4 上位机软件设计 288
 - 12.2.5 系统调试与结果 289
 - 思考练习题 295
 - 参考文献 296

摘要：本章对 MSP430 系列超低功耗单片机进行简要介绍，包括其产品介绍、选型特点及发展等内容。MSP430 系列单片机是德州仪器（TI）公司生产的超低功耗 16 位 RISC 混合信号处理器。由于降低了电源电压和灵活可控的时钟运行，MSP430 系列单片机的功耗超低，开拓了 16 位单片机应用领域，为便携式控制测量应用提供了良好的解决方案。MSP430 典型应用包括实用便携式数字仪表、计量检测设备、智能传感器及其他相关消费类电子产品。了解本章内容会帮助读者学习后续内容。

1.1 超低功耗单片机

单片微控制器（Single Chip Microcontroller）是将计算机的基本元件微型化并集成到一块芯片上的微型计算机。典型的单片机包括 CPU、RAM、ROM、多种 I/O 接口和中断系统、定时器/计数器等模块，还可集成其他的功能模块，如 A/D 转换器、D/A 转换器、液晶驱动等。随着电子器件及工艺的发展，其处理功能日益丰富和强大。

随着电子市场应用需求的多元化发展，电子产品的低功耗设计越来越受到重视，低功耗与超低功耗成为微控制器技术发展的又一个分支方向。各个著名的单片机厂商都推出了自己的低功耗产品，如 Microchip 公司的超低功耗 XLP 系列 8 位单片机、TI 公司的 MSP430 系列 16 位单片机、基于 ARM Cortex-M3 内核的超低功耗 32 位单片机等。

相对于普通单片机，超低功耗单片机在电源管理、工作模式、时钟电路方面都进行了改进，普通的单片机通常的工作电压是 4.5 ~ 5V，而低功耗单片机一般的工作电压为 3 ~ 6V，工作电流也降到了微安级。超低功耗单片机是在低功耗单片机的基础上，面向超低功耗应用而设计的，其功耗非常小，工作电流一般在零点几微安到几百微安，同时存在多种节能工作模式，可以在较低频率下工作。例如 MSP430 系列单片机的电源电压采用的 1.8 ~ 3.6V 电压，在 1MHz 的时钟条件下运行时，芯片的电流会在 200 ~ 400 μ A，时钟关断模式的最低电流只有 0.1 μ A。

超低功耗单片机功耗低、工作稳定、易于产品化、成本低，是便携式电子设备、智能传感设备、智能仪表等产品的控制核心，其特点可以大概归纳为以下几点。

（1）超低功耗设计。超低功耗单片机工作电流非常小，一般在微安级，工作电压和工作电流均较低。

(2) 多时钟源设计。系统运行频率与功率密切相关,运行频率越高则功耗越大。为了更好地降低功耗,超低功耗单片机采用频率不同的时钟源。如在 MSP430 中,同时存在高频主时钟、低频时钟及 DOC 片内时钟。在满足功能的情况下可分频降低 MCU 主时钟频率,以降低功耗。在不需要高速运行的情况下可选用辅助时钟低速运行,进一步降低功耗。

(3) 高度集成化。超低功耗单片机将很多外围模块集成到 MCU 芯片中。这样的系统不仅功能强,性能可靠,而且成本低,便于产品设计进一步微型化和便携化。

(4) 内部电路的可选择性。可以通过配置特殊寄存器选择超低功耗单片机内各功能模块的使用方式,对于不使用的模块使其停止工作,减少无效功耗。

(5) 具有多种节能工作模式。超低功耗单片机具有多种节能模式,可为不同的工作条件提供有效功耗管理。

1.2 超低功耗单片机的发展及应用

以 MSP430 单片机为代表的超低功耗单片机以其卓越的性能和较高的性价比,在越来越多的行业与领域中得到了应用。目前,其主要应用范围集中在以下几个方面。

(1) 工业控制领域。单片机以其控制的实时性和准确性等特点,在工业控制中应用广泛,如基于单片机可以构成一个小型数据采集或控制系统;作为大型控制系统的前级或外围处理控制核心;与其他电子器件一起构成协同处理器,又如工业现场采集终端、工厂流水线的智能化控制、各种报警系统等。

(2) 计算机网络和通信领域。单片机基本都具有通信模块,有的甚至配备了 UART、SPI、I²C、CAN 等多种流行的通信接口,为计算机网络和通信设备间的应用提供物理条件。目前通信设备大都实现了单片机智能控制,如移动手机通信设备、远程控制计算机网络等。

(3) 智能仪器仪表领域。单片机技术在智能仪表的发展中起到了重要作用。采用单片机控制使得仪器仪表更为智能小巧,且易于扩展。MSP430 系列单片机具有体积小、功耗低、控制功能强、扩展灵活、微型化和使用方便等优点,特别适合嵌入到仪器仪表中,结合不同类型的传感器,可实现诸如电压、温度、湿度、速度、压力、频率、角度等物理参数的测量。

(4) 家用电器领域。智能家电的兴起为单片机提供了更广的发展空间。目前市场的家用电器基本上都基于单片机进行控制,从较大型家电(如彩电、洗衣机、电冰箱、空调机、壁挂炉)到小型电子设备(如电子秤、面包机等),所涉及范围极其广泛。MSP430 系列单片机更因为其优点显著,成为家电设计者和厂商优先的首选。

(5) 医疗设备领域。医疗领域为一个特殊领域,其对单片机有着特殊的要求。单片机在医用设备中的使用范围不断扩大,如各种监护仪、体征分析仪、医用呼吸机、临床诊断设备及病床呼叫系统等。近年来,TI 公司针对行业应用特点,推出了基于人体医学监护的 MSP430FG42X 单片机,推动了电子医疗器件的推陈出新。

(6) 大型电器模块化领域。模块化领域需要专用功能的单片机。专用单片机一般设计用于实现特定功能,是单片机发展中一个重要分支,它摒弃了许多通用功能模块,却集成了其他一些外围数字器件(如存储器、放大器、解码器等),专注于实现某个功能模块,设计者不需要了解其内部结构,只需根据功能需求进行模块设计即可。例如,在音乐集成单片机中,音乐信号以数字的形式存于存储器中,由微控制器读出,转化为模拟音乐电信号。

MSP430 的应用体现了较高性的性价比及可靠性,在上述领域都取得了不俗的成绩。目前,MSP430 主要用于用户需要对模拟信号进行数字控制的领域及相关的纯数字领域。

1.3 超低功耗单片机系统的设计原则

在设计超低功耗系统时,一般遵循“电源低、时钟慢、系统静”的原则,即电源在满足需求的条件下尽量取低电压供电,且工作中能关断的时候尽量关断;时钟频率选取宜慢不宜快;系统静态工作比动态工作功耗低,因此尽量采取静态工作。

对于以单片机为核心的嵌入式应用,系统功耗的最小化需要从软件、硬件两方面入手。

1.3.1 硬件设计原则

在设计超低功耗单片机系统硬件时,应遵循以下设计原则。

(1) MCU 的选择。单片机选择以“够用”为原则,即尽量选择能够完成功能的简单的单片机,而不能盲目追求高性能。性能高、模块复杂的单片机集成度高、功能强,但片内晶体管数目多,总漏电电流偏大,而简单的内核不仅功耗低,同时意味着较低的成本。

(2) IC 器件的选择。系统功耗包含了单片机和外部 IC 功耗。设计电路时,在满足要求的情况下尽量选择与单片机工作电源相匹配的低电源器件或者超低功耗系统设计专用器件,如超低功耗电源、A/D 与 D/A 转换器、专用放大器、低功耗液晶显示器等。

(3) 电源管理系统设计。降低单片机的供电电压可以有效地降低其功耗。从发展趋势来看,单片机工作一直呈降低趋势,即从与 TTL 兼容的 5V 供电降低到 3.3V、3V、2V 乃至 1.8V 供电,相应外围器件的供电电压也在降低。低电压供电可以大大降低系统的工作电流,虽然由于晶体管的尺寸不断减小,晶体管的漏电电流有增大的趋势,这不利于降低功耗但总的来说,但低压供电系统的功耗还是大大降低了。

(4) 单片机运行管理模式选择。合理利用单片机的低功耗模式,通常低功耗模式指的是系统的等待(睡眠)和停止模式。处于这类模式下的单片机功耗将远小于运行模式下的功耗。等待模式下,CPU 停止工作但系统时钟并没有停止,单片机的外围 I/O 模块也不停止工作,系统功耗降低有限,一般为工作模式的 50%~70%。停止模式下,系统时钟也将停止工作,当外部事件发生时,外部中断将重启系统时钟,进而唤醒 CPU 继续工作,因此 CPU 耗电可以降至微安级。

(5) 时钟方案的选择。在满足功能设计的前提下,系统总线频率应该尽量低。单片机电流消耗包括运行电流(单片机运行引起)和漏电电流两部分。理想 CMOS 开关电路在保持输出状态不变时消耗功率几乎为零,而运行电流是与单片机的时钟频率成正比的。因此,可以通过降低系统时钟的运行频率来有效降低系统功耗。目前单片机一般采用锁相环技术,在使用低频外部晶振时获得频率可控、稳定、噪声小的频率信号,但是锁相环电路本身也会带来额外的功率消耗。

1.3.2 软件设计原则

合理的软件也能在很大程度上降低功率消耗。在软件设计时,应遵循以下几个原则。

(1) 中断代替查询。当中断未发生时,单片机 CPU 处于等待模式或者停止模式,没有相应的接口操作,而在查询方式下,CPU 必须不断访问相关寄存器,从而导致电路增加额外的功耗,故可用中断代替查询。但是,也要注意,中断容易受干扰,所以在中断程序中要对相关状态位

进行再确认。

(2) 减少 CPU 运算量。合理设计算法, 优化程序, 减少运算量。例如, 用查表的方法替代实时计算; 将一些运算的结果预先算好放在 Flash 中, 通过查表得到结果, 从而省略了计算带来的功耗; 对于实时计算, 满足精度避免“过度”计算; 尽量使用短的数据类型; 尽量避免浮点数运算等。

(3) 用宏代替子程序。对于带有 Flash 且容量较大的单片机, 可以采用“宏”代替“子程序”。调用子程序, 会频繁地涉及堆栈 (RAM) 操作, 使用宏在编译时展开, CPU 只是顺序执行, 避免了子程序的调用, 降低功耗。

(4) I/O 模块工作管理。I/O 模块只是部分使用或者间歇使用, I/O 模块在未使用时应及时关闭, 降低功耗。

1.4 MSP430 系列单片机简介

1.4.1 MSP430 系列单片机的发展

MSP430 系列单片机是美国德州仪器公司 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。MSP 即混合信号处理器 (Mixed Signal Processor), 它把模拟电路、数字电路和微处理器集成在一个芯片上, 为用户提供更好的应用设计。MSP430 的发展分为以下几个阶段。

1. 起步阶段

TI 公司在 1996 年至 2000 年初, 先后推出有 33X、32X、31X 等 MSP430 系列。MSP430 的 33X、32X、31X 等系列集成 LCD 驱动模块。每一系列可分为以下类型。

- ① ROM 型 (C) ——适合大批量生产的产品。
- ② OTP 型 (P) ——适合小批量生产。
- ③ EPROM 型 (E) 芯片——用于产品的样机开发。

2. 发展初期阶段

随着 Flash 技术的迅速发展, MSP430 单片机将其引入设计中。2000 年年初, TI 公司推出了经济型 11X、11X1 系列。这个系列单片机具有内存容量小、片上资源少、I/O 引脚数少 (采用 20 脚封装) 等特点, 但是价格比较低廉。随后推出了带 ADC 或硬件乘法器的 MSP430F13X/MSP430F14X 系列, 这一系列单片机受到市场欢迎。2001 年 7 月到 2002 年又相继推出了改进性能的带 LCD 控制器的 F41X、F43X 和 F44X 单片机。

在发展初期阶段, 针对 MSP430 的调试开发技术不完善。TI 公司推出开发工具 MSP-FET430X110, 将 JTAG 边界扫描技术和 Flash 在线编程技术引入 MSP430, 该开发工具方便、廉价、实用, 给用户提供了一个较为理想的开发调试方式。随后, TI 公司推出 BootStrap Loader 技术, BootStrap (BootStrapLoader, 简称 BSL) 可与 Flash 仿真工具 JTAG 控制器配合使用。进入产品级开发阶段, 为了保护用户代码, 烧断 Flash 的保护熔丝以后就无法再通过 JTAG 口访问单片机, 这时用户利用 BootStrap 技术就可实现对 Flash 中的程序再进行检查或更新, 即在固件不变的情况下, 可通过程序设计进一步改变与拓展其功能。BootStrap 提供了 32 字节 256 位的密码保护, 以确保代码的安全性。

3. 快速发展阶段

随着产品的成熟和技术的推广，TI 公司在 2003—2004 年间推出了 MSP430F15X 和 MSP430F16X 系列产品，此系列产品中取得了两个突破改性的进展。首先是增加了 RAM 容量，如 F1611 的 RAM 容量增加到了 10KB，这样实时操作系统（RTOS）和简单文件系统的引入就成为现实，因为操作系统及文件系统运行需要大的 RAM 支持。其次是集成了更多的外围功能模块，如 I²C、DAM、SVS 和 DAC12 等模块，丰富了其开发资源，功能与通信接口进一步完善，从时间及器件上为用户的开发节约了成本。

此外，TI 公司在 2004 年下半年推出了 MSP430X2XX 系列产品，该系列是对 MSP430X1XX 片内外设的进一步精简，价格低廉、小型、快速、灵活，是业界功耗最低的产品，可以快速地开发超低功耗医疗、工业和消费类嵌入式系统。

近年来，TI 公司又相继推出 MSP430X5XX、MSP430X4XX 系列低功耗单片机。MSP430X5XX 单片机具有灵活的正交式时钟系统，集成了 USB、RF、LCD、AD/DC 等片上外设，可高达 256KB 的 Flash 存储器，该系列单片机开发方便，可以适用在嵌入式设备、各种仪表测量等场合。MSP430X4XX 系列低功耗单片机具有广泛的应用，并且具有一定的行业应用特点。如 MSP430F47X 的 MCU，就是应对当前计量行业的电子仪表读取技术，该 MCU 集成了 4 个 16 位 ADC、32 位的硬件乘法器、温度传感器等片上资源，可满足单相和多相计量的技术要求。

2013 年，TI 推出最新 MSP430 Value Line 微控制器产品 G2XX4 与 G2 XX 5 器件，推动其低成本产品系列发展，其具有如下特点。

- ① 存储器闪存容量从 16KB 扩展到 56KB，将静态随机存储器（SRAM）扩展到 4KB。
- ② 可帮助客户移植现有解决方案，支持无线 MBUS 及近场通信（NFC）等连接协议。
- ③ 整合了更高的存储器资源和集成型电容式触摸 IO，开发人员可应用更多高级电容式触控功能。
- ④ 具有高频率晶体输入功能，这是 MSP430 Value Line 的首创，开发人员可以借此设计添加高可靠、高比特率串行通信功能。
- ⑤ 提供更多的 GPIO、定时器以及串行端口。

在研发与推出新产品的过程中，MSP430 系列单片机始终坚持把低功耗的应用放在首位，并针对不同行业有相应的专用型单片机，随着这些专用单片机的推出，极大地扩大了 MSP430 的应用领域。

1.4.2 MSP430 系列单片机的特点

MSP430 系列自推入市场后，产品不断更新，应用范围不断扩大，其主要特点如下。

1. 超低功耗

MSP430 单片机为典型的超低功耗单片机，在电源管理、时钟系统、工作模式上都有具有独特的设计。

在电源设计方面，MSP430 系列单片机采用 1.8~3.6V 电源电压。当单片机在 1MHz 时钟条件下运行时，芯片的工作电流为 200~400 μ A。如单片机处于停止模式，即时钟关断时其最低功耗只有 0.1 μ A。

MSP430 引入了“时钟系统”的概念，即由系统时钟产生 CPU 和各功能模块所需的时

钟,可灵活切换时钟源,更改 CPU 运行速度。这些时钟程序可控,因此可以协调功耗与性能的关系。

MSP430 单片机根据功耗不同,设置了 5~7 种工作模式,不同的模式使用的模块不同,其对应功耗不同。在等待方式下,耗电为 $0.7\mu\text{A}$,在掉电方式下,最低可达 $0.1\mu\text{A}$ 。

2. 强大的处理能力

MSP430 系列单片机是 16 位精简指令集 (RISC) 单片机,具有丰富的寻址方式,简洁的 27 条内核指令以及大量的模拟指令,高效的查表处理指令,并且大量的寄存器和片内数据存储器都可参加多种运算。

MSP430 运算速度快。MSP430 系列单片机能在 25MHz 晶体的驱动下,实现 40ns 的指令周期。MSP430 系列单片机中的某些系列集成了硬件乘法器 (16 位或 32 位,该结构一般存在于 DSP 设计中)、DAM 等模块,大大增强了数据处理和运算能力,可在控制基础上实现某些数字信号处理算法 (如 FFT、DTMF 等)。

3. 模拟技术及丰富的片内资源

MSP430 作为“混合信号处理器”的典型代表,由于针对实际应用需求,集成了丰富的模拟、数字模块,大大简化了设计人员工作。MSP430 系列单片机所集成的片内外设:AD/DA、看门狗、模拟比较器、温度传感、定时器、串行通信模块、硬件乘法器、液晶驱动器、直接寻址模块、USB 模块等,向用户提供丰富的 I/O 端口资源,配置灵活。

MSP430 系列单片机丰富的片内外设极大地节约了用户的开发成本,缩短了开发流程,真正为用户提供了“单片机”应用解决方案。

4. 系统工作稳定

MSP430 系列单片机均符合工业级产品标准,其工作温度为 $-40\sim+85^{\circ}\text{C}$,运行稳定,可靠性高。单片机在时钟设计、电源管理、看门狗设计方面都做了改进,以保证其稳定工作。

时钟设计方面,上电复位后,由 DCO (数控振荡器) 启动 CPU,保证晶体振荡器的起振和稳定时间,随后软件可设置相关寄存器,以确定最后的系统时钟频率。若晶体振荡器在用作 CPU 时钟 MCLK 时发生故障,DCO 会自动启动,以保证系统正常工作。若程序“跑飞”,看门狗可将其复位。

在电源管理方面,不同系列的单片机具有掉电保护模块 (避免单片机在电源电压不稳定时程序混乱甚至死机)、电压检测模块 (监控单片机电源电压和外部电压,当这些电压降低至用户设置的值以下时产生相应的信号)。

5. 开发环境良好

MSP430 系列单片机基于不同工艺,有 OPT 型、Flash 型、ROM 型和 EPROM 型四种类型。类型不同对其开发手段也不同。OPT 型和 ROM 型单片机在程序定型后直接烧写或掩膜芯片;Flash 型为主流开发器件,由于引进了 Flash 型程序存储器和 JTAG 技术,不仅可以实现在线编程和仿真,而且使开发工具变得简单方便。

1.4.3 MSP430 系列单片机的主要结构

MSP430 系列单片机结构简图如图 1.1 所示。

1.4.4 MSP430 各系列单片机介绍

1. MSP430F1XX

MSP430X1XX 为基于 Flash/ROM 的 MCU, CPU 的主频最高可达 8MIPS, 高达 60KB 的 Flash。此系列提供具有比较器的简单低功耗控制器的各种功能, 完善了包含高性能数据转换器、接口和乘法器在内的片上系统。其基本特征如下。

- ① 工作电压: 1.8 ~ 3.6V。
- ② 超低功耗。
 - 掉电模式 (RAM 保持): 0.1 μ A。
 - 待机模式: 0.7 ~ 1.6 μ A。
 - 活动模式: 160 ~ 280 μ A (1MHz, 2.2V)。
- ③ 用于精确测量的高性能片上模拟外设。
 - 12 位或 10 位 ADC: 大于 200ksps 的转换速率。
 - 双 12 位 DAC 同步转换。
 - 片内比较器。
 - 具有可编程电平检测的供电电压管理/监视器。
- ④ 丰富的片上数字外设。
 - 内置 3 通道 DMA。
 - 串行通信 USART0 (UART 和 SPI、I²C) 接口、USART1 (UART 和 SPI) 接口。
 - 16 位定时器定时器 A、定时器 B。
- ⑤ 5 种省电模式。
- ⑥ 16 位 RISC 结构, 125ns 指令周期。
- ⑦ 从待机模式唤醒时间小于 6 μ s。
- ⑧ Bootstrap Loader。
- ⑨ 串行在线编程, 无须外部编程电压, 可编程的保密熔丝代码保护。
- ⑩ 封装类型: 20 引脚 Plastic Small – Outline Wide Body 封装, 20 引脚 Plastic Small – Outline Thin 封装, 20 引脚 TVSOP 封装, 24 引脚 QFN 封装, 64 引脚 QFP 封装。



以上列举了 MSP430X1XX 系列单片机的主要参数, 具体型号可能会有差别, 具体可参考 TI 公司的用户手册。

2. MSP430F2XX

超低功耗 MSP430F2XX 系列的性能得到提升, 比 MSP430F1XX 功耗更低, 增强性能包括集成的 $\pm 1\%$ 片上极低功耗振荡器、软件可选的内部上拉/下拉电阻, 模拟输入数目增加, 主频最高可达 16MIPS, Flash 最高可达 120KB, RAM 最高可达 8KB, 其基本特征如下。

- ① 工作电压: 1.8 ~ 3.6V。
- ② Flash 编程电压最低 2.2V, 时间每字节 17 μ s, 块删除 20ms。
- ③ 具有零功耗的掉电复位 (BOR)。
- ④ 5 种省电模式。
- ⑤ 从待机模式唤醒时间小于 6 μ s。