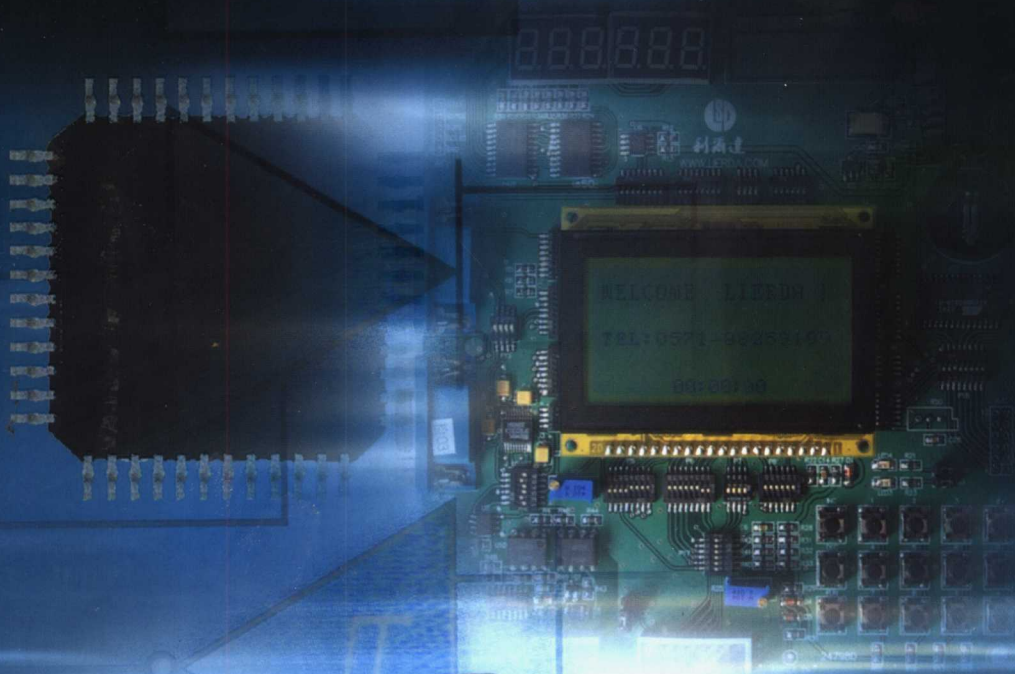


TI MSP430大学计划教材

MSP430 系列 16 位 超低功耗单片机原理与应用

利尔达 策划
沈建华 杨艳琴 翟晓曙 编著



清华大学出版社

TI MSP430 大学计划教材

MSP430 系列 16 位超低功耗单片机 原理与应用

利尔达 策划

沈建华 杨艳琴 翟骁曙 编著

清华大学出版社

北 京

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, 最后列举两个体现 MSP430 单片机特点的应用系统设计实例。

本书着重讲述 MSP430 单片机的基本原理和基本设计应用, 进一步的实践及应用系统设计可参考笔者所编著的《MSP430 系列 16 位超低功耗单片机实践与系统设计》一书。

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的工程技术人员作为学习、参考用书。

版权所有, 翻印必究。举报电话: 010-62782989 13901104297 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术, 用户可通过在图案表面涂抹清水, 图案消失, 水干后图案复现; 或将表面膜揭下, 放在白纸上用彩笔涂抹, 图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目 (CIP) 数据

MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用/沈建华, 杨艳琴, 翟晓曙编著. —北京: 清华大学出版社, 2004.11

ISBN 7-302-09912-X

I. M… II. ①沈…②杨…③翟… III. 单片微型计算机, MSP430 系列—高等学校—教材 IV. TP368.1
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 118207 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客 户 服 务: 010-62776969

组稿编辑: 曾 刚

文稿编辑: 陈韦凯

封面设计: 秦 铭

版式设计: 冯彩茹

印 刷 者: 北京牛山世兴印刷厂

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印 张: 28 插 页: 4 字 数: 620 千字

版 次: 2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-09912-X/TP·6816

印 数: 1~3000

定 价: 36.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770175-3103 或 (010)62795704

序 言

MSP430 系列单片机是美国德州仪器公司推出的 16 位超低功耗、高性能产品，它具有处理能力强、运行速度快、资源丰富、开发方便等优点，有很高的性价比，在世界各国已经得到了广泛的应用，在国内已经进入了飞速发展的阶段。

自 1999 年以来，利尔达单片机技术有限公司和美国德州仪器公司合作开展 MSP430 在中国的推广和销售。经过大家的努力，今天，MSP430 的独特性能和技术优点已经得到了单片机产品设计开发单位、电子工程技术人员和广大嵌入式系统爱好者的认可，并广泛的应用到各个行业、各种产品中。为了能够让更多的爱好者接触并学习 MSP430，同时配合 MSP430 大学计划在国内的推广，利尔达单片机技术有限公司与华东师范大学合作，由沈建华教授出版了这本能同时针对 MSP430 单片机教学、广大单片机爱好者学习、开发工程师设计参考的比较全面的中文教材。

本书一方面从 MSP430 单片机技术的发展历程和命名选型开始，逐步对 MSP430 的结构特点和内外功能模块等做了详细的论述，内容涉及到 MSP430 的时钟、低功耗、各种端口、定时器、LCD、硬件乘法器、AD 转换、DAC 转换等 MSP430 的多种功能模块；另一方面又大量充实了各个部分原理设计内容，针对各个模块的应用及部分接口设计列举了许多典型的实例。

MSP430 十六位超低功耗单片机除了本书介绍的 MSP430F1xx 和 MSP430F4xx 两大系列外，也在不断推出新的品种，包括电表专用的 MSP430FE42x 系列、测量转盘转动用于无磁水表、气表、热表的 MSP430FW42x 和具有运算放大器的 MSP430FG43x 等，MSP430 也会向着更高的运算速度、更多的模块功能发展，利尔达单片机技术有限公司承诺利尔达的技术团队将为广大读者提供 MSP430 学习、研发过程中的技术帮助与支持，热诚欢迎大家与我们联系。

利尔达单片机技术有限公司

董事长 陈贤兴

2004.07.03

前 言

单片机的应用在后 PC 时代得到了前所未有的发展，但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，而不像多年前以 MCS51/96 等处理器为中心，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，很多是用钮扣电池供电，要求系统功耗尽可能低，如手持式仪表、水表、玩具等。

（2）随着应用的复杂，对处理器的功能和性能要求不断提高。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，而不仅仅做一些简单的控制。

（3）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，增加开发费用。

（4）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，给人以耳目一新的感觉。加之 TI 优良的服务（全球免费快速网上样片申请、丰富的技术资料），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（1.8~3.6V，0.1~400 μ A，250 μ A/MIPS）和口线输入漏电流（最大 50nA）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 8MHz 晶振工作时，指令速度可达 8MIPS（注意：同样 8MIPS 的指令速度，在运算性能上 16 位处理器比 8 位处理器高不止两倍）。不久还将推出 25~30MIPS 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，其硬件仿真工具（仿真器）只是一个非常简单的并口转接器，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由著名的 IAR 公司提供，其最新版本（V2.10）已做得较为完善，实际使用效果不亚于其他成熟的集成开发环境。

在系统整合方面，MSP430 系列单片机结合 TI 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/IIC/UART）、LCD

驱动器、硬件乘法器、10/12 位 ADC、12 位 DAC、看门狗定时器 (WDT)、I/O 端口 (P0~P6)、DMA 控制器、2~10KB 的 RAM, 以及丰富的中断功能。使用户可以根据应用需求, 选择最合适的 MSP430 系列产品来实现。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。

笔者从事嵌入式系统开发和教学工作十多年, 设计开发了许多嵌入式应用系统及产品, 使用过 DSP、ARM、MCS51/96 系列、PIC、AVR、LPC 等多种微处理器和单片机。2000 年起开始使用 MSP430 系列单片机, 设计了电瓶车控制器、变频电源、USB 和以太网接口数据采集器等一些应用项目, 只是当时其软件开发环境版本较低 (FET300), 不太完善, 但整体感觉 MSP430 单片机很有特色, 综合优势明显, 代表着 MCU 的发展方向, 而且“戏”出名门, 不易淘汰。2002 年华东师范大学计算机系单片机课程教改时, 就决定把原来的 MCS51 系列单片机课程和实验改为 MSP430 系列。由于当时市场上还没有可供学生使用的实验板和合适的教材, 我们在 2002 年底到 2003 年初的寒假期间, 自己用 MSP430F449 设计制作了 30 套实验板, 并编写了讲义, 于 2003 年上半年开始正式对系里的本科生和专科生开设了“MSP430 系列单片机原理和应用”的课程。后来, 杭州利尔达公司上海办事处的平红光经理来我校了解情况, 获知我们在这方面做了很多工作, 就介绍了清华大学出版社, 要我们写一本 MSP430 系列单片机的教材。

在整理讲义、资料, 拟订书目的过程中, 我们发现 MSP430 系列单片机由于功能丰富、内容很多, 如果要在一本书中讲清原理, 同时包括学生实验和应用设计等内容, 书会很厚。经与清华大学出版社、利尔达公司协商, 决定分为两本书。一本为《MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用》, 主要详细、完整地介绍 MSP430 系列单片机的特点、结构、指令系统、程序设计、功能模块的原理和应用, 包括 2004 年初才推出的 MSP430F15X/16X 系列, 此书与实验平台无关, 可作为主教材或一般学习、参考用书。另一本为《MSP430 系列 16 位超低功耗单片机实践与系统设计》, 主要的内容包括 IAR Workbench V2.10、硬件开发环境、实验平台、基础实验、综合实验、应用系统设计, 其中包括 USB 接口、以太网接口、简单 Flash 文件系统等较高级的应用, 此书与实验平台部分相关, 可作为实验指导书或应用系统设计参考。这两本书既有一定联系, 又相互独立, 可以适合不同层次的需要。

本书融合了我们两年 4 次讲授“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、更新了很多最新的资料, 如 MSP430F16X 系列和 IAR Workbench V2.10 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之于我们的实际应用项目。实验板的资料和部分基础实验内容由利尔达公司提供, 部分系统设计摘自 TI 的应用笔记。第二本书附带的光盘上, 有全部 MSP430 系列单片机的数据手册、用户开发指南, IAR 集成开发环境的评估版 (4KB C 代码限制), 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、源代码等可以从我们的网站 (www.emLab.net) 下载。

在本书成稿过程中, 得到了利尔达单片机技术有限公司的段焕春副总经理、梁源技术总监、平红光经理, 以及清华大学出版社第六事业部工控与电子图书编辑部曾刚主任的大

力支持。同时，TI 亚洲区 MSP430 市场部经理 Vincent Chan 给予很多技术支持，TI 亚洲区大学计划部沈洁经理对本书给予了极大的关注，华东师范大学计算机系梁丹、吴红举做了很多代码验证、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，至交稿时我们仍觉得有些地方还不尽人意，若有错误和不当之处，恳请读者批评指正，以便我们及时修正。有关此书的信息，会及时公布在我们的网站上。

作 者

2004 年 4 月于华东师范大学

目 录

第 1 章 概述	1
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	3
1.2.1 MSP430 系列单片机的特点	3
1.2.2 MSP430 系列单片机的发展和应用	5
1.3 MSP430 系列单片机应用选型	6
1.3.1 MSP430 系列单片机的命名规则	6
1.3.2 MSP430 系列单片机的选型	7
本章小结	8
思考题与习题	9
第 2 章 MSP430 单片机结构	10
2.1 MSP430 结构概述	10
2.2 MSP430 系列产品	11
2.2.1 无 LCD 驱动系列产品	11
2.2.2 带 LCD 驱动系列产品	29
2.3 MSP430 CPU 结构和特点	41
2.4 MSP430 存储器结构和地址空间	44
2.4.1 数据存储器	45
2.4.2 程序存储器	46
2.4.3 外围模块寄存器	48
本章小结	50
思考题与习题	50
第 3 章 MSP430 指令系统与程序设计	52
3.1 指令系统概述	52
3.2 寻址方式	57
3.3 指令系统介绍	60
3.3.1 数据传送类指令	61

3.3.2	数据运算类指令	66
3.3.3	逻辑操作指令	75
3.3.4	位操作指令	81
3.3.5	跳转与程序流程的控制类指令	82
3.4	程序设计	86
3.4.1	程序设计基础	86
3.4.2	汇编语言程序设计	87
3.4.3	C 语言程序设计	98
	本章小结	112
	思考题与习题	113
第 4 章	MSP430 单片机片内外围模块	115
4.1	时钟模块	115
4.1.1	时钟模块设计要求	115
4.1.2	MSP430X1XX 系列时钟模块	116
4.1.3	低速晶体振荡器	117
4.1.4	高速晶体振荡器	118
4.1.5	DCO 振荡器	118
4.1.6	基础时钟模块应用举例	122
4.1.7	MSP430F4XX 系列时钟模块	123
4.2	低功耗结构	131
4.2.1	低功耗控制	131
4.2.2	系统工作模式	132
4.2.3	超低功耗事件驱动工作	134
4.2.4	低功耗应用原则	136
4.2.5	低功耗应用举例	137
4.3	MSP430 各种端口	138
4.3.1	MSP430 端口概述	138
4.3.2	端口 P1 和 P2	139
4.3.3	端口 P3、P4、P5 和 P6	142
4.3.4	端口 COM 和 S	142
4.4	定时器	142
4.4.1	MSP430 定时功能及其实现	142
4.4.2	看门狗定时器	144
4.4.3	基本定时器	148
4.4.4	16 位定时器 A	151
4.4.5	16 位定时器 B	173

4.5	MSP430 液晶驱动模块.....	175
4.5.1	液晶驱动模块概述	175
4.5.2	液晶驱动模块功能结构	177
4.5.3	液晶驱动模块应用举例	183
4.6	硬件乘法器.....	186
4.7	FLASH 存储器模块	189
4.7.1	FLASH 存储器结构.....	189
4.7.2	FLASH 存储器的寄存器及操作	191
4.7.3	FALSH 模块操作举例.....	197
4.8	比较器 A.....	198
4.8.1	比较器结构与操作	198
4.8.2	比较器 A 的寄存器	200
4.8.3	比较器 A 应用举例	202
4.9	DMA 控制器	203
4.9.1	MSP430 DMA 控制器结构与功能	204
4.9.2	DMA 控制器相关操作	205
4.9.3	DMA 寄存器	211
4.9.4	DMA 应用举例	215
4.10	MSP430 系列通用串行通信模块的异步模式	217
4.10.1	MSP430 串行通信概述	217
4.10.2	异步操作	218
4.10.3	异步通信寄存器	225
4.10.4	异步操作应用举例	229
4.11	MSP430 系列通用串行模块的同步模式	231
4.11.1	SPI 概述	231
4.11.2	同步操作	232
4.11.3	同步通信寄存器	235
4.11.4	同步操作应用举例	238
4.12	MSP430 系列通用串行模块的 I ² C 模式.....	242
4.12.1	I ² C 概述	242
4.12.2	I ² C 模式	244
4.12.3	I ² C 模块寄存器及相关操作	248
4.12.4	I ² C 应用举例	256
4.13	MSP430 模数转换模块	258
4.13.1	模数转换概述	258
4.13.2	ADC12 结构	259
4.13.3	ADC12 寄存器	261

4.13.4	ADC12 转换模式	267
4.13.5	ADC12 应用举例	273
4.14	MSP430 的数模转换模块	275
4.14.1	数模转换概述	275
4.14.2	DAC12 结构与功能	276
4.14.3	DAC12 寄存器	277
4.14.4	DAC12 操作	280
4.14.5	DAC12 应用举例	283
	本章小结	285
	思考题与习题	285
第 5 章	MSP430 单片机应用	290
5.1	MSP430 常用接口设计	290
5.1.1	键盘接口	290
5.1.2	LED 显示接口	298
5.1.3	液晶显示接口	301
5.1.4	常用 LED 驱动功率接口	310
5.1.5	继电器型驱动接口	313
5.2	MSP430 片内外围模块应用	315
5.2.1	定时器	315
5.2.2	比较器	320
5.2.3	SPI 同步操作	328
5.2.4	A/D、D/A 和 DMA	334
5.3	MSP430 单片机应用设计举例	337
5.3.1	自校准变频电源	337
5.3.2	超低功耗手持式电子斜度计/加速度计	340
	本章小结	352
	思考题与习题	352
附录 A	MSP430 模块空间分配	354
附录 B	编译内部错误信息	380
附录 C		397
参考文献		432

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，被广泛用于国防、工农业生产和商业管理等领域。特别是近年来微处理器的高速发展，使其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变革。

纵观微处理器的发展，可以明显地看出其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、电讯设备、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，单片机也称为微控制器（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

单片机具有如下特点：

- 小巧灵活、成本低、易于产品化，它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，因而能获得最佳性价比。

- 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。

著名的半导体厂商——美国德州仪器 (TI) 在 20 世纪 70 年代首先推出了 TMS1000 系列 4 位单片机。20 世纪 80 年代到 90 年代, 国内主要使用 Intel 的 MCS51 系列和 Motorola 的 68HC 系列 8 位单片机。目前主要的单片机厂商还有 Atmel、Microchip、Philips 等。

单片机由于应用面广, 生产批量大而使成本低廉 (目前最低价格为每片 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, 全世界去年销售量已达数亿片。

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中去。以下列出的都是单片机应用比较活跃

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。它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, 在通用工控中, 可用于各种机床控制、电机控制、工业机器人、各种生产线、各种过程控制、各种检测系统等; 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、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。
- 计算机网络与通信方面: 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 系列单片机是美国德州仪器 (TI) 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, 主要是由于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, 在短短几年时间里发展极为迅速, 应用也日趋广泛。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 1.8~3.6V 低电压, RAM 数据保持方式下耗电仅 $0.1\mu\text{A}$, 活动模式耗电 $250\mu\text{A}/\text{MIPS}$ (MIPS: 每秒百万条指令数), IO 输入端口的漏电流最大仅 50nA 。

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, 并且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。在系统中共有一种活动模式 (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, 支持十多个中断源, 并可以任意嵌套。用中断请求将 CPU 唤醒只要 $6\mu\text{s}$, 通过合理编程, 既以降低系统功耗, 又可以对外部事件请求作出快速响应。

在这里, 需要对低功耗问题作一些说明。

首先, 对一个处理器而言, 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/百万指令每秒) 来衡量处理器的功耗与性能关系的, 这种标称方法是合理的。MSP430 系列单片机在活动模式时耗电 $250\mu\text{A}/\text{MIPS}$, 这个指标是很高的 (传统的 MCS51 单片机约为 $10\sim 20\text{mA}/\text{MIPS}$)。

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 50nA , 远低于其他系列单片机 (一般为 $1\sim 10\mu\text{A}$)。

另外, 处理器的功耗还要看它内部功能模块是否可以关闭, 以及模块活动情况下的耗电, 比如低电压监测电路的耗电等。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,其应用系统可以做到用一枚电池使用 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,一个时钟周期可以执行一条指令(传统的 MCS51 单片机要 12 个时钟周期才可以执行一条指令),使 MSP430 在 8MHz 晶振工作时,指令速度可达 8MIPS(注意:同样 8MIPS 的指令速度,在运算性能上 16 位处理器比 8 位处理器高不止两倍)。TI 不久还将推出 25~30MIPS 的产品。

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)。这种结构在其他系列单片机中尚未使用。

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 的高性能模拟技术,各成员都集成了较丰富的片内外设。视型号不同可能组合有以下功能模块:看门狗(WDT),模拟比较器 A,定时器 A(Timer_A),定时器 B(Timer_B),串口 0,1(USART0、1),硬件乘法器,液晶驱动器,10 位/12/14 位 ADC,12 位 DAC,I²C 总线,直接数据存取(DMA),端口 0(P0),端口 1~6(P1~P6),基本定时器(Basic Timer)等。

其中,看门狗可以在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、同步和 I²C 串行通信,可方便地实现多机通信等应用;具有较多的 I/O 端口,最多达 6*8 条 I/O 口线,IO 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 25mA),保证系统安全;P0、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 200Kb/s,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。

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,以保证程序从正确的位置开始执行,保证晶体振荡器有足够的起振及稳定时间。然后软件可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 OTP 型、FLASH 型和 ROM 型 3 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 OTP 型和 ROM 型的器件是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,而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。目前较好的软件开发工具是 IAR Workbench V2.10。

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、实用等优点,在单片机开发中还较为少见。其他系列单片机的开发一般均需要专用的仿真器或编程器。

另外,2001 年 TI 公司又公布了 BOOTSTRAP 技术,利用它可在保密熔丝烧断以后,只要几根硬件连线,通过软件口令字(密码),就可更改并运行内部的程序,这为系统固件的升级提供了又一方便的手段。BOOTSTRAP 具有很高的保密性,口令字可达 32 个字节长度。

1.2.2 MSP430 系列单片机的发展和应用

TI 公司从 1996 年推出 MSP430 系列开始到 2000 年初,推出了 33X、32X、31X 等几个系列。MSP430 的 33X、32X、31X 等系列具有 LCD 驱动模块,对提高系统的集成度较有利。每一系列有 ROM 型(C)、OTP 型(P)和 EPROM 型(E)等芯片。EPROM 型的价格昂贵,运行环境温度范围窄,主要用于样机开发。这也表明了这几个系列的开发模式,即用户可以用 EPROM 型开发样机,用 OTP 型进行小批量生产,而 ROM 型适应大批量生产的产品。MSP430 的 3XX 系列,在国内几乎没有使用。

随着 FLASH 技术的迅速发展,TI 公司也将这一技术引入 MSP430 系列单片机中。2000 年推出了 F11X/11X1 系列,这个系列采用 20 脚封装,内存容量、片上功能和 I/O 引脚数比较少,但是价格比较低廉。在 2000 年 7 月推出了带 ADC 或硬件乘法器的 F13X/F14X 系列。在 2001 年 7 月到 2002 年又相继推出了带 LCD 控制器的 F41X、F43X、F44X。

TI 在 2003 到 2004 年期间推出了 F15X 和 F16X 系列产品。在这一新的系列中,有了两个方面的发展。一是增加了 RAM 的容量,如 F1611 的 RAM 容量增加到了 10KB,这样就可以引入实时操作系统(RTOS)或简单文件系统等。二是从外围模块来说,增加了 I²C、DMA、DAC12 和 SVS 等模块。

近两年,TI 公司针对某些特殊应用领域,利用 MSP430 的超低功耗特性,还推出了一些专用单片机,如专门用于电量计量的 MSP430FE42X,用于水表、气表、热表等具有无磁传感模块的 MSP430FW42X,以及用于人体医学监护(血糖、血压、脉搏等)的 MSP430FG42X 单片机。用这些单片机来设计相应的专用产品,不仅具有 MSP430 的超低功耗特性,还能大大简化系统设计。

根据 TI 在 MSP430 系列单片机上的发展计划,在今后将陆续推出性能更高、功能更强

的 F5XX 系列, 这一系列单片机运行速度可达 25~30MIPS, 并具有更大的 FLASH (128KB) 及更丰富的外设接口 (CAN、USB 等)。

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, 更适合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。

1.3 MSP430 系列单片机应用选型

1.3.1 MSP430 系列单片机的命名规则

MSP430 系列单片机种类繁多, 在介绍应用选型之前, 需要先了解 MSP430 系列单片机的命名规则, 如图 1-1 所示。

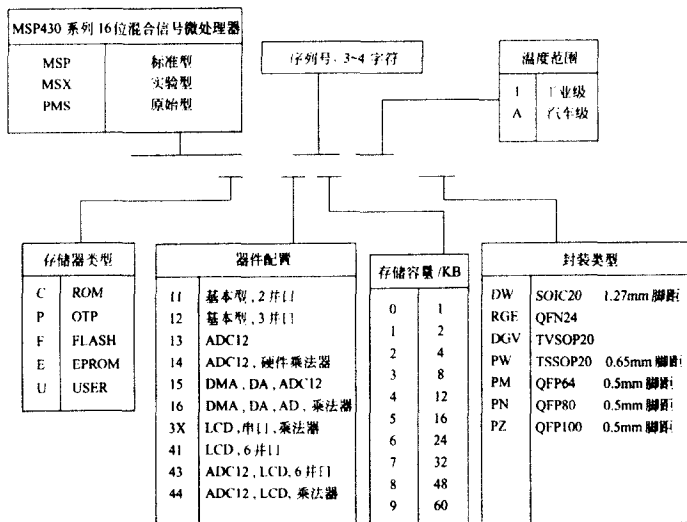


图 1-1 MSP430 系列单片机的命名规则

以 MSP430F449 为例, 其中 F 代表 FLASH 型, 44 代表片内具有 ADC12、LCD 和硬件乘法器等外围部件, 9 代表存储容量为 60KB。

其中各种类型存储器特性如表 1-1 所示。

表 1-1 存储器特性

类 型	名 称	特 性
C	ROM	只读存储器, 适合大批量生成
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