

TI MSP430 大学计划教材

TEXAS  
INSTRUMENTS

沈建华 杨艳琴 © 编著

# MSP430

## 超低功耗单片机 原理与应用

( 第2版 )



清华大学出版社

# MSP430 超低功耗单片机原理与应用

## (第2版)

沈建华 杨艳琴 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 的结构和指令系统,对 MSP430 全系列(特别是最新的 F5xx、F6xx)所涉及的片内外围模块的功能、原理和应用作了详尽的描述。并介绍了 MSP430 的开发环境、汇编语言、库函数、C 语言程序设计方法,以及单片机低功耗设计、常用接口电路设计和嵌入式软件编程基础等。最后讲解一个体现 MSP430 单片机特点的血氧测量仪的设计实例。

本书配套 MSP430F6638-FFTB 全功能教学实验系统,读者可以到 [www.gotoTI.com](http://www.gotoTI.com) 网站下载完整的教学资源(包括课件、实验指导书)。

本书可作为高等院校计算机、电子、自动化、仪器仪表等专业单片机课程的教材,也可作为广大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。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

MSP430 超低功耗单片机原理与应用/沈建华,杨艳琴编著. —2 版. —北京:清华大学出版社,2013

ISBN 978-7-302-33407-1

I. ①M… II. ①沈… ②杨… III. ①单片微型计算机 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 180877 号

责任编辑:钟志芳

封面设计:刘超

版式设计:文森时代

责任校对:张兴旺 赵丽杰

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:24.25

字 数:560 千字

版 次:2004 年 11 月第 1 版

2013 年 9 月第 2 版

印 次:2013 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:42.00 元

---

产品编号:054471-01

# 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 MCS-51/96 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) 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。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，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，增加开发投入。

(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 仿真调试等定义了新一代超低功耗单片机。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、大学计划资源等），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 ( $1.8\sim 3.6\text{V}$ ,  $0.1\sim 400\mu\text{A}$ , 约  $100\mu\text{A/MIPS}$ ) 和口线输入漏电流 (最大  $50\text{nA}$ ) 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 在  $16\text{MHz}$  晶振工作时，指令速度可达  $16\text{MIPS}$  (注意：同样  $8\text{MIPS}$  的指令速度，16 位处理器在运算性能上比 8 位处理器高远不止 2 倍)。同时，MSP430 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有 IAR 的 EW430 和 TI 的 CCS。

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)、USB、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 ( $P0\sim P6$ )、DMA 控制器、 $2\text{KB}\sim 10\text{KB}$  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。

《MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用》一书出版已近 10 年，期间 MSP430 系列单片机在性能、功能方面有了很大的发展。为了满足新的教学要求、更好地推广最新 MSP430 技术和产品，在 TI 大学计划部和清华大学出版社的支持下，我们修订出版了此书。本书主要以 TI 最新、功能最完整的 MSP430F6xx 系列内容为基础，并增加了 MSP430 库函数、CCS 开发工具、嵌入式软件编程基础等。为了方便教学，我们还开发了完整的教学配套资源，包括 PPT 课件、MSP430F6638-FFTb 全功能教学实验系统和实验指导书等。

参与本书编写工作的还有上海师范大学郑振东，华东理工大学李振坡，华东师范大学计算机系方岑、林晓祥、王昕、徐敏、郑佳敏等。在本书成稿过程中，得到了德州仪器半导体技术（上海）有限公司大学计划部经理沈洁、黄争，上海德研电子科技有限公司总经理陈宫，智翔集团张立伟及清华大学出版社钟志芳等的大力支持，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如人意，疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正，以便我们及时修正。有关此书的信息和配套资源，会及时发布在网站上（[www.gotoTI.com](http://www.gotoTI.com)）。

作 者  
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 单片机的特点及主要系列 .....        | 2  |
| 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 系列单片机命名规则 .....   | 6  |
| 1.3.2 MSP430 系列单片机选型 .....     | 7  |
| 1.3.3 MSP430 芯片封装 .....        | 16 |
| 1.4 本章小结 .....                 | 18 |
| 1.5 思考题与习题 .....               | 18 |
| 第 2 章 MSP430 体系结构 .....        | 19 |
| 2.1 MSP430 微控制器架构 .....        | 19 |
| 2.2 地址空间 .....                 | 20 |
| 2.2.1 中断向量表 .....              | 21 |
| 2.2.2 Flash/ROM .....          | 22 |
| 2.2.3 信息内存 .....               | 23 |
| 2.2.4 引导内存 .....               | 23 |
| 2.2.5 RAM .....                | 23 |
| 2.2.6 外设模块 .....               | 23 |
| 2.2.7 特殊功能寄存器 .....            | 23 |
| 2.3 中央控制器 (MSP430 CPU) .....   | 24 |
| 2.3.1 算术逻辑单元 .....             | 25 |
| 2.3.2 MSP430 CPU 寄存器 .....     | 25 |
| 2.4 寻址模式 .....                 | 26 |
| 2.4.1 寄存器寻址模式 .....            | 27 |
| 2.4.2 变址寻址模式 .....             | 28 |
| 2.4.3 符号寻址模式 .....             | 28 |
| 2.4.4 绝对寻址模式 .....             | 29 |

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 2.4.5 | 寄存器间接寻址模式 .....     | 30  |
| 2.4.6 | 自增间接寻址模式 .....      | 30  |
| 2.4.7 | 立即数寻址模式 .....       | 31  |
| 2.5   | 指令系统 .....          | 31  |
| 2.5.1 | 双操作数指令 .....        | 32  |
| 2.5.2 | 单操作数指令 .....        | 33  |
| 2.5.3 | 程序流控制—跳转 .....      | 35  |
| 2.5.4 | 仿真指令 .....          | 35  |
| 2.6   | 本章小结 .....          | 38  |
| 2.7   | 思考题与习题 .....        | 38  |
| 第3章   | MSP430 基本外设 .....   | 40  |
| 3.1   | 系统时钟与控制 .....       | 40  |
| 3.1.1 | 系统复位 .....          | 40  |
| 3.1.2 | MSP430 基础时钟模块 ..... | 42  |
| 3.1.3 | 中断管理 .....          | 56  |
| 3.1.4 | 电压监控系统 SVS .....    | 58  |
| 3.1.5 | 应用举例 .....          | 60  |
| 3.2   | 低功耗模式 .....         | 61  |
| 3.2.1 | 低功耗工作模式 .....       | 62  |
| 3.2.2 | 进入和退出低功耗模式 .....    | 65  |
| 3.2.3 | 低功耗应用原则 .....       | 67  |
| 3.2.4 | 应用举例 .....          | 69  |
| 3.3   | 通用输入/输出端口 .....     | 70  |
| 3.3.1 | 通用输入/输出端口概述 .....   | 70  |
| 3.3.2 | 具有中断能力的端口 .....     | 72  |
| 3.3.3 | 不具有中断能力的端口 .....    | 74  |
| 3.3.4 | 端口 COM 和 S .....    | 74  |
| 3.3.5 | 应用举例 .....          | 74  |
| 3.4   | 定时器 .....           | 75  |
| 3.4.1 | 基本定时器 1 .....       | 76  |
| 3.4.2 | 定时器 A .....         | 80  |
| 3.4.3 | 定时器 B .....         | 98  |
| 3.4.4 | 定时器 D .....         | 100 |
| 3.4.5 | 看门狗定时器 .....        | 103 |
| 3.4.6 | 实时时钟 .....          | 108 |
| 3.4.7 | 应用举例 .....          | 112 |
| 3.5   | DMA 控制器 .....       | 117 |

|        |                        |     |
|--------|------------------------|-----|
| 3.5.1  | DMA 控制器的结构与特性.....     | 117 |
| 3.5.2  | DMA 控制器的配置和操作.....     | 119 |
| 3.5.3  | DMA 寄存器.....           | 125 |
| 3.5.4  | 应用举例.....              | 130 |
| 3.6    | 比较器 B.....             | 131 |
| 3.6.1  | 比较器 B 的结构.....         | 131 |
| 3.6.2  | 比较器 B 的应用.....         | 132 |
| 3.6.3  | 比较器 B 寄存器.....         | 134 |
| 3.6.4  | 比较器 A 和比较器 A 增强模块..... | 137 |
| 3.6.5  | 应用举例.....              | 138 |
| 3.7    | 模数转换器 (ADC).....       | 142 |
| 3.7.1  | ADC 性能指标.....          | 142 |
| 3.7.2  | ADC12_A 特点与结构.....     | 143 |
| 3.7.3  | ADC12_A 转换模式.....      | 146 |
| 3.7.4  | ADC 寄存器.....           | 150 |
| 3.7.5  | 应用举例.....              | 157 |
| 3.8    | 数模转换器 (DAC).....       | 160 |
| 3.8.1  | DAC 性能指标.....          | 160 |
| 3.8.2  | DAC12 结构与特性.....       | 161 |
| 3.8.3  | DAC12 操作.....          | 162 |
| 3.8.4  | DAC12 寄存器.....         | 166 |
| 3.8.5  | 应用举例.....              | 170 |
| 3.9    | LCD 液晶驱动模块.....        | 172 |
| 3.9.1  | LCD_B 的主要特点及结构.....    | 172 |
| 3.9.2  | LCD 控制器的使用.....        | 174 |
| 3.9.3  | 应用举例.....              | 178 |
| 3.10   | 硬件乘法器.....             | 182 |
| 3.10.1 | 硬件乘法器结构.....           | 182 |
| 3.10.2 | 硬件乘法器操作.....           | 183 |
| 3.10.3 | 应用举例.....              | 186 |
| 3.11   | Flash 编程.....          | 190 |
| 3.11.1 | Flash 存储器结构.....       | 190 |
| 3.11.2 | Flash 存储器操作.....       | 192 |
| 3.11.3 | Flash 存储器寄存器.....      | 196 |
| 3.11.4 | 应用举例.....              | 198 |
| 3.12   | 本章小结.....              | 199 |
| 3.13   | 思考题与习题.....            | 200 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 第4章 MSP430 通信接口 .....                  | 207 |
| 4.1 通信系统概述 .....                       | 207 |
| 4.1.1 通信系统模型 .....                     | 207 |
| 4.1.2 通信模式 .....                       | 207 |
| 4.1.3 MSP430 单片机的串行通信功能 .....          | 209 |
| 4.2 USCI 模块概述 .....                    | 210 |
| 4.2.1 初始化序列 .....                      | 210 |
| 4.2.2 波特率生成 .....                      | 211 |
| 4.3 通用异步通信协议 UART 模式 .....             | 212 |
| 4.3.1 异步通信字符格式 .....                   | 212 |
| 4.3.2 异步多机通信模式 .....                   | 213 |
| 4.3.3 USCI 模块中断 .....                  | 215 |
| 4.3.4 UART 模块寄存器 .....                 | 215 |
| 4.3.5 应用举例 .....                       | 221 |
| 4.4 串行外设接口协议 SPI 模式 .....              | 223 |
| 4.4.1 SPI 概述 .....                     | 223 |
| 4.4.2 SPI 模式操作 .....                   | 224 |
| 4.4.3 SPI 模块寄存器 .....                  | 227 |
| 4.4.4 应用举例 .....                       | 230 |
| 4.5 内部集成电路协议 I <sup>2</sup> C 模式 ..... | 232 |
| 4.5.1 I <sup>2</sup> C 概述 .....        | 232 |
| 4.5.2 I <sup>2</sup> C 模式操作 .....      | 234 |
| 4.5.3 I <sup>2</sup> C 模块寄存器 .....     | 239 |
| 4.5.4 应用举例 .....                       | 244 |
| 4.6 通用串行总线协议 USB 模块 .....              | 250 |
| 4.6.1 USB 总线协议 .....                   | 250 |
| 4.6.2 USB 传输类型 .....                   | 252 |
| 4.6.3 MSP430 USB 模块简介 .....            | 256 |
| 4.6.4 USB 模块操作 .....                   | 258 |
| 4.6.5 USB 模块寄存器 .....                  | 261 |
| 4.7 本章小结 .....                         | 261 |
| 4.8 思考题与习题 .....                       | 262 |
| 第5章 MSP430 软硬件开发环境 .....               | 265 |
| 5.1 CCSv5 软件开发环境 .....                 | 265 |
| 5.1.1 CCSv5 概述 .....                   | 265 |
| 5.1.2 CCSv5 的安装 .....                  | 265 |
| 5.1.3 CCSv5 工程开发 .....                 | 267 |

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 5.1.4 | CCSv5 资源管理器介绍及应用.....                | 273 |
| 5.2   | IAR Embedded Workbench 嵌入式开发工具 ..... | 277 |
| 5.2.1 | IAR EW 概述.....                       | 277 |
| 5.2.2 | IAR EW430 的安装.....                   | 277 |
| 5.2.3 | IAR EW430 工程开发.....                  | 278 |
| 5.3   | 其他 MSP430 开发集成环境.....                | 284 |
| 5.3.1 | Grace 软件技术 .....                     | 284 |
| 5.3.2 | MSPGCC.....                          | 287 |
| 5.3.3 | CrossWork.....                       | 287 |
| 5.4   | 嵌入式程序设计 .....                        | 288 |
| 5.4.1 | 嵌入式 C 程序设计简介 .....                   | 288 |
| 5.4.2 | 编程风格 .....                           | 289 |
| 5.4.3 | 数据类型及声明 .....                        | 299 |
| 5.4.4 | 操作符与表达式 .....                        | 303 |
| 5.5   | DriverLib 使用简介 .....                 | 307 |
| 5.5.1 | DriverLib 概述 .....                   | 307 |
| 5.5.2 | DriverLib 函数简介及应用举例 .....            | 308 |
| 5.6   | MSP430 硬件开发工具 .....                  | 320 |
| 5.6.1 | MSP-EXP430G2 (LaunchPad) 实验开发板 ..... | 321 |
| 5.6.2 | MSP-EXP430F5529 实验开发板 .....          | 323 |
| 5.6.3 | DY-FFTB6638 全功能实验开发板 .....           | 326 |
| 5.7   | 本章小结 .....                           | 331 |
| 5.8   | 思考题与习题 .....                         | 332 |
| 第 6 章 | MSP430 应用系统设计 .....                  | 333 |
| 6.1   | MSP430 电源与低功耗设计 .....                | 333 |
| 6.1.1 | 电池选择 .....                           | 333 |
| 6.1.2 | 超低静态电流 LDO.....                      | 335 |
| 6.1.3 | 低功耗设计 .....                          | 337 |
| 6.2   | 常用接口设计 .....                         | 341 |
| 6.2.1 | 发光二极管 (LED) .....                    | 341 |
| 6.2.2 | 键盘 .....                             | 342 |
| 6.2.3 | LED 数码管 .....                        | 350 |
| 6.2.4 | 液晶显示屏 (LCD) .....                    | 355 |
| 6.2.5 | 继电器 .....                            | 364 |
| 6.3   | MSP430 血氧测量仪 .....                   | 366 |
| 6.3.1 | 简介 .....                             | 367 |
| 6.3.2 | 操作原理 .....                           | 367 |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 6.3.3 电路实现..... | 367 |
| 6.4 本章小结.....   | 372 |
| 6.5 思考题与习题..... | 373 |
| 参考文献.....       | 374 |

# 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、工业生产和商业管理等领域。特别是近年来微处理器（MPU）的高速发展，使其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，可以明显地看出其正朝着两个方向进行。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。另一方面，在有些应用领域，如智能化仪器仪表、电信设备、自动控制设备、汽车乃至家用电器等，对运算、控制功能的要求相对并不复杂，但对体积、成本、功耗等的要求却比较苛刻。为适应这种需求，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（Single Chip Microcomputer），简称单片机。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。

单片机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 MSP430 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。

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，当时这是计算器、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 现已是许多物理系统的核心，具有更高的集成度和更低的功耗。

微控制器（MCU）、微处理器（MPU）、数字信号处理器（DSP）是目前最常用的 3 种可编程处理器，它们根据确定的程序执行相应的指令，其架构特性源于 1971 年开发的第一款微处理器。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

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 单片机的特点及主要系列

单片机的结构特点如下：

- 时钟频率比通用 MPU 和 DSP 低，一般小于 100MHz/100MIPS（MIPS：每秒百万条指令数）。
- 功耗比 MPU 和 DSP 低几个数量级。
- 字长一般为 8~32 位。
- 内存有限，通常小于 1MB。
- 具有几个到上百个输入/输出引脚。

单片机的应用特点如下：

- 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，从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、生产批量大而使成本低廉（目前可低至 1 元人民币左右）；结构简单而使可靠性增加；采用 CMOS 工艺又极大地降低了功耗，因此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 MSP430 系列单片机，主要的单片机还有 Atmel 的 AVR 系列、Microchip 的 PIC16/32 系列以及 NXP、ST 的 ARM 系列等。

### 1.1.3 单片机的应用

单片机可应用在人类生活的各个领域，以下是单片机应用较广泛的部分领域。

- 工业控制：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：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：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：单片机可用于 BIT BUS、CAN、以太网等构成分布式网络系统，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：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、价格低等优点，是微机应用产品的最佳选择。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，现在相当一部分可用各种单片机予以取代。传统的逻辑设计方法正在演变成软件和硬件相结合的设计方法，许多电路设计问题都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 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）。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。

### 1.2.1 MSP430 系列单片机的特点

MSP430 系列单片机推出后发展极为迅速，由于其卓越的性能，应用日益广泛。MSP430 系列单片机针对不同应用，推出了一系列不同型号的器件，主要有以下几种特点。

#### 1. 超低功耗

MSP430 系列单片机的电源电压一般采用 1.8~3.6V 低电压，在 RAM 数据保持方式时耗电约为 0.1 $\mu$ A，在活动模式时耗电 200 $\mu$ A/MIPS 左右，I/O 端口的漏电流最大仅 50nA。MSP430 的 FRAM 系列具有更低的功耗：RAM 数据保持耗电仅 320nA，活动模式耗电 82 $\mu$ A/MIPS。

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 数字控制振荡器时钟系统。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。系统共有 1 种活动模式（AM）和多达 7 种低功率模式（LPM）。

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 唤醒一般只要 6 $\mu$ s，MSP430 G2xx 系列甚至能在 1 $\mu$ s 之内唤醒，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。

在此，需要对低功耗问题做一些说明。

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用 W/MIPS（瓦特/MIPS）或 mA/MIPS 来衡量处理器的功耗与性能的关系。MSP430 系列单片机在活动模式时耗电一般为  $200\mu\text{A}/\text{MIPS}$  左右，最新的 FRAM 系列功耗可小于  $100\mu\text{A}/\text{MIPS}$ ；而与之相比，传统的 MCS51 单片机约为  $5\sim 10\text{mA}/\text{MIPS}$ 。

其次，作为一个应用系统，功耗是指整个系统的功耗，而不仅仅是处理器的功耗。比如，在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较大。MSP430 单片机输入端口的漏电流最大为  $50\text{nA}$ ，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，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 单片机需 12 个时钟周期执行一条指令），使 MSP430 在  $8\text{MHz}$  晶振工作时，指令速度可达  $8\text{MIPS}$ （注意，同样  $8\text{MIPS}$  的指令速度，16 位处理器比 8 位处理器在运算性能上高出远不止 2 倍）。目前，TI 已经具有  $25\text{MIPS}$  的 MSP430 产品。

MSP430 系列单片机的某些型号，采用了一般只有 DSP 中才有的 16 位多功能硬件乘法器、硬件乘累加功能、DMA 等一系列先进的体系结构，大大增强了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）。

## 3. 高性能模拟技术及丰富的片内外围模块

MSP430 系列单片机结合 TI 的高性能模拟技术，各系列都集成了较丰富的片内外设，分别是以下外设的功能组合：时钟系统、看门狗（WDT）、模拟比较器、16 位定时器、基本定时器、实时时钟、USCI（可实现 UART、 $I^2\text{C}$  等功能）、USB 模块、USART、硬件乘法器、液晶驱动器、模数转换 ADC、数模转换 DAC、直接存储器访问 DMA、通用输入/输出端口等。

其中，时钟系统可产生多种时钟供 CPU 和其他外设使用；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（ $10\sim 14$  位）的 A/D 转换器；16 位定时器（Timer\_A、Timer\_B、Timer\_D）具有捕获/比较功能，可用于事件计数、时序发生、PWM 等；基本定时器可为液晶驱动模块提供时钟；实时时钟可提供日历时间；多功能串口（USCI）可实现 UART、LIN、IrDA、SPI、 $I^2\text{C}$  通信，可方便地实现多机通信等应用；USB 模块可实现 USB 通信；USART 可实现异步和同步通信；硬件乘法器可方便地实现乘累加运算；具有较多的 I/O 端口，最多达 90 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  $6\text{mA}$ ），保证系统安全，P1、P2 端口还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 200ksps,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;12 位高速DAC,可以实现直接数字波形合成等功能; DMA功能可以提高数据传输速度,减轻CPU的负荷。

MSP430 系列单片机丰富的片内外设,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,首先由数字控制振荡器(DCO)的 DCO\_CLK 启动 CPU,以保证程序从正确的位置开始执行,保证其他晶体振荡器有足够的起振及稳定时间,然后通过软件设置来确定最后的系统时钟频率。如果晶体振荡器在用作 CPU 时钟 MCLK 时发生故障,DCO 会自动启动,以保证系统正常工作。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~+125℃,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 系列单片机有 OPT 型、Flash 型、FRAM(铁电存储器)型、ROM 型、EPROM 型器件,这些器件的开发手段不同,对于 OPT 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。

国内大量使用的是 Flash 型器件。Flash 型器件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 CCS5.3 和 IAR EW430。

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罕见。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,利用该技术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 系列单片机至今,已经推出了 x1xx、x2xx、x3xx、x4xx、x5xx、x6xx 等几个系列。其中 MSP430 的 x3xx、x4xx、x6xx 系列具有 LCD 驱动模块,对提高系统的集成度较有利。

TI 公司从 1996 年推出 MSP430 系列单片机开始到 2000 年初,首先推出了 33x、32x、31x 等几个系列,它们都具有 LCD 驱动模块。每一系列有 ROM 型(C)、OTP 型(P)和

EPROM 型（E）等芯片。这几个系列的使用模式分别为：用 EPROM 型开发样机，用 OTP 型进行小批量生产，而 ROM 型适用于大批量生产的产品。MSP430 的 3xx 系列由于缺少 Flash 型芯片，早已经停产，在国内几乎没有使用。

随着 Flash 技术的迅速发展，TI 公司将其引入 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，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 至 2004 年期间推出了 F15x 和 F16x 系列产品，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 I<sup>2</sup>C、DMA、DAC12 和 SVS 等模块。

TI 在 2004 年下半年推出了 MSP430x2xx 系列，该系列是对 MSP430x1xx 片内外设的进一步精简，它价格低廉、小型、快速、灵活，成为当时业界功耗最低的单片机，可以快速开发超低功耗医疗、工业与消费类嵌入式系统。和 MSP430x1xx 系列相比，MSP430x2xx 的 CPU 时钟提高到 16MHz（MSP430x1xx 系列是 8MHz），待机电流却从 2 $\mu$ A 降到 1 $\mu$ A，具有最小 14 引脚的封装产品。

在前几个系列基础上，TI 后续推出了性能更高、功能更强的 MSP430x5xx、MSP430x6xx 系列。它们的运行速度可达 25MIPS，并具有更大的 Flash（256KB）、更低的功耗（活动模式耗电仅 165 $\mu$ A/MIPS），以及更丰富的外设接口（USB 等）。

此外，TI 还推出了 FRAM 系列，FRAM 能提供具备动态分区功能统一存储器，且存储器访问速度比闪存快 100 倍，同时进一步降低了存储器访问功耗，活动模式耗电最低达到 82 $\mu$ A/MIPS。

近几年，TI 公司针对某些特殊应用领域，利用 MSP430 的超低功耗特性，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，以及为便携医疗设备与无线射频系统等嵌入式高级应用带来高集成度与超低功耗特性的 MSP430FG461x 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。

总之，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