



高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

MSP 430 系列超低功耗 单片机原理与系统设计

■ 李智奇 白小平 编著
陈晓龙 樊晓虹



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

MSP430 系列超低功耗 单片机原理与系统设计

李智奇 白小平
陈晓龙 樊晓虹 编著

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书系统地介绍了 TI 公司的 MSP430 系列 16 位超低功耗单片机的内外围模块及其实用接口技术,内容包括超低功耗单片机的设计原则,MSP430 单片机的特点、结构和指令系统,MSP430 单片机的开发环境,MSP430 单片机的片内外围模块的功能、原理、应用及各个系列模块的构成情况,MSP430 单片机应用系统的设计等。

本书可作为高等院校自动化、仪器仪表及电子技术类专业的教材,也可作为从事单片机应用开发工作的工程技术人员的学习参考书。

★ 本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

MSP430 系列超低功耗单片机原理与系统设计/李智奇等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2008.1
高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

ISBN 978-7-5606-1921-7

I. M… II. 李… III. ①单片微型计算机, MSP430 系列—基础理论—高等学校—教材 ②单片微型计算机, MSP430 系列—系统设计—高等学校—教材 IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 142118 号

责任编辑 曹 昉 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 21.375

字 数 506 千字

印 数 1~4000 册

定 价 30.00 元

ISBN 978-7-5606-1921-7/TN · 0391

XDUP 2213001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

单片微型计算机简称单片机,是微型计算机的一个重要分支。单片机将微型计算机的主要部分集成于一个芯片中,具有体积小、价格低、可靠性高的特点,可以非常方便地配置在一块较小的电路板上并安装在各种装置的内部,实现了微型计算机的嵌入式应用。单片机作为嵌入式应用的主角(约占 70%以上的份额),在人们生活和生产的各个领域发挥着极为重要的作用。由于单片机具有体积小、功能强、应用面广等许多优点,因此,其不仅在工业中得到了广泛的应用,而且已经渗透到了社会生活的方方面面,如家用电器及其它电子产品等。

目前,以单片机为核心的控制系统正以空前的速度取代经典电子控制系统。经过多年的快速发展,单片机的家族越来越庞大,系列品种层出不穷,在技术上也各具特色。近几年,电子产品的低功耗设计越来越受到人们的重视。低电压与低功耗成为单片机技术发展的一个显著特点,一些大的单片机厂商都推出了自己的低功耗产品,如 TI 公司的 MSP430 系列 16 位单片机。MSP430 系列单片机是一个特别强调超低功耗性能的单片品种,它适合应用在要求极低功率消耗的场所。

MSP430 系列单片机的处理器功耗(1.8~3.6 V, 0.1~400 μ A, 250 μ A/MIPS)和口线输入漏电流(最大 50 nA)在业界都是最低的,而且远低于其它系列产品。MSP430 系列单片机具有强大的处理能力,指令速度最高可达 8 MIPS。同时, MSP430 系列单片机集成了 16 位多功能硬件乘法器、硬件乘一加(积之和)功能、DMA 等一系列先进的体系结构,大大加强了它的数据处理功能和运算能力,可以有效地实现一些数字信号处理的算法。MSP430 系列单片机还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、12 位 ADC 和看门狗定时器(WDT)等。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 BOOTSTARP 技术为系统软件的升级提供了又一种方便的手段,BOOTSTARP 有 32 个字节的口令字,具有极高的保密性。

学习单片机并掌握其设计应用技术已经成为当代电子、自动化、计算机应用等相关专业大学生必备的技能。单片机课程是电子、计算机、自动化等应用型专业学科学生必修的一门重要专业基础课程,也是一门理论与实际密切结合的专业基础课。学生对该课程内容掌握的程度直接影响其专业课程的学习和专业技能的提高,对于人才素质的培养起着举足轻重的作用。

本书以 MSP430 系列单片机为例,讲解上力求通俗易懂。全书共分 6 章,主要从超低功耗单片机的特点和基本设计原则入手,详细介绍了 MSP430 系列单片机的特点、结构、指令系统与程序设计,以及各种外围模块和一些接口的原理与设计实例。第 1 章讲述了超低功耗单片机的特点和基本设计原则;第 2 章简要介绍了 MSP430 单片机各系列的特点;第 3 章讲述了 MSP430 单片机的内部结构特点,其中包括单片机 CPU、存储器和外围模块

的结构与组织方式；第 4 章介绍了 MSP430 单片机的指令系统及程序设计方法；第 5 章讲述了 MSP430 单片机的各功能模块的原理和使用方法；第 6 章给出了单片机常用器件的接口原理和单片机应用系统的设计方法及步骤。

本书融合了编著者多年单片机教学和科研的经验，内容上补充了很多最新的资料。书中的源程序代码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。

本书在成稿过程中得到了西安电子科技大学赵建教授的大力支持和帮助，还得到了西安电子科技大学出版社云立实老师的大力支持。同时，西安电子科技大学饶鲜老师和硕士研究生赵继正、张论、周晓平、于光运等在本书的写作过程中也给予了很多帮助。在此对以上提到的所有人员表示衷心的感谢，同时对鼓励、支持和帮助过我们的领导、同事、同行及朋友表示衷心的感谢！

由于时间仓促和水平有限，书中难免有不当之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2007 年 9 月

于西安电子科技大学

目 录

第 1 章 超低功耗单片机.....	1
1.1 超低功耗单片机概述.....	1
1.1.1 超低功耗单片机的概念.....	1
1.1.2 超低功耗单片机的特点.....	2
1.1.3 超低功耗单片机的应用领域.....	2
1.2 超低功耗单片机系统的设计原则.....	3
1.2.1 微处理器 MCU 的选择.....	3
1.2.2 IC 器件的选择.....	5
1.2.3 供电管理硬件设计.....	6
1.2.4 系统超低功耗的运行管理.....	7
1.2.5 软件设计.....	7
习题.....	8
第 2 章 MSP430 系列单片机简介.....	9
2.1 MSP430 系列单片机的发展与特点.....	9
2.1.1 MSP430 系列单片机的发展.....	9
2.1.2 MSP430 系列单片机的特点.....	10
2.2 MSP430 系列单片机的选型.....	11
2.2.1 MSP430 系列单片机的命名规则.....	11
2.2.2 MSP430 系列单片机的应用选型.....	11
2.2.3 几种常见 MSP430 系列单片机简介.....	17
2.2.4 MSP430 系列单片机的开发.....	26
习题.....	26
第 3 章 MSP430 系列单片机结构.....	27
3.1 MSP430 系统复位与中断的结构.....	27
3.1.1 MSP430 的系统复位.....	27
3.1.2 MSP430 的中断系统结构.....	29
3.2 MSP430 系列单片机的结构特点.....	31
3.2.1 程序计数器 PC.....	32
3.2.2 堆栈指针 SP.....	32
3.2.3 状态寄存器 SR.....	33
3.2.4 常数发生寄存器 CG1 和 CG2.....	33

3.2.5 通用工作寄存器	34
3.3 MSP430 系列单片机的存储器结构和地址空间	34
3.3.1 程序存储器	35
3.3.2 数据存储器	36
3.3.3 外围模块寄存器	36
习题	38
第 4 章 MSP430 系列单片机的指令系统与程序设计	39
4.1 MSP430 指令系统概述	39
4.1.1 汇编语言语句格式	39
4.1.2 指令系统中的符号说明	39
4.1.3 指令的代码格式	40
4.1.4 无需 ROM 补偿的仿真指令	41
4.1.5 指令的时钟周期与指令长度	43
4.2 寻址方式	45
4.2.1 寄存器寻址	45
4.2.2 变址寻址	46
4.2.3 符号寻址	47
4.2.4 绝对寻址	48
4.2.5 间接寻址	49
4.2.6 间接增量寻址	50
4.2.7 立即寻址	51
4.3 指令系统介绍	51
4.3.1 数据传送类指令	51
4.3.2 数据运算类指令	54
4.3.3 逻辑操作类指令	62
4.3.4 位操作类指令	68
4.3.5 跳转与程序流程的控制类指令	70
4.3.6 堆栈指针寻址	76
4.4 汇编语言程序设计	76
4.4.1 应用程序设计基本知识	76
4.4.2 汇编语言伪指令	77
4.4.3 常用的汇编程序设计方法	79
4.4.4 常用码制转换程序设计	84
4.5 C 语言程序设计基础	88
4.5.1 IAR C430 语言基础	88
4.5.2 IAR C430 编译器支持的数据类型	89
4.5.3 IAR C430 表达式语句	90
4.5.4 IAR C430 的函数	91

4.5.5 IAR C430 的标准库函数	92
4.6 MSP430 的开发环境	93
4.6.1 Embedded Workbench 概述	93
4.6.2 IAR Embedded Workbench 使用指南	94
习题	97
第 5 章 MSP430 系列单片机片内外围模块	99
5.1 MSP430 系列单片机的时钟模块与低功耗结构	99
5.1.1 时钟模块	99
5.1.2 低功耗结构	113
5.2 MSP430 系列单片机的各种端口	118
5.2.1 MSP430 端口概述	118
5.2.2 端口 P0、P1 和 P2	119
5.2.3 端口 P3~P10	121
5.2.4 端口 TP0	122
5.2.5 端口 COM 和 S	122
5.2.6 端口应用举例	122
5.3 定时器	123
5.3.1 看门狗定时器	123
5.3.2 基本定时器	127
5.3.3 16 位定时器 A	131
5.3.4 16 位定时器 B	152
5.4 硬件乘法器	156
5.4.1 硬件乘法器的结构	156
5.4.2 硬件乘法器寄存器	157
5.4.3 硬件乘法器的操作	157
5.4.4 硬件乘法器举例	158
5.5 FLASH 存储器模块	159
5.5.1 FLASH 存储器的结构	159
5.5.2 FLASH 存储器模块的控制寄存器	161
5.5.3 FLASH 存储器的操作	163
5.5.4 FLASH 模块操作举例	167
5.6 比较器 A	169
5.6.1 比较器 A 的结构	169
5.6.2 比较器 A 的寄存器	171
5.6.3 比较器 A 的中断	173
5.6.4 比较器 A 应用举例	173
5.7 DMA 控制器	175
5.7.1 DMA 控制器的结构	175

5.7.2	DMA 寄存器.....	177
5.7.3	DMA 控制器的操作.....	180
5.7.4	DMA 应用举例.....	186
5.8	MSP430 系列单片机的通用串行通信模块.....	187
5.8.1	USART 模块的结构.....	187
5.8.2	MSP430 系列通用串行通信模块的异步模式.....	192
5.8.3	MSP430 系列通用串行通信模块的同步模式.....	203
5.8.4	MSP430 系列通用串行模块的 I ² C 模式.....	211
5.9	MSP430 系列单片机的模/数转换模块.....	228
5.9.1	ADC12 模/数转换模块.....	228
5.9.2	SD16 模/数转换模块.....	244
5.10	MSP430 系列单片机的数/模转换模块.....	257
5.10.1	DAC12 的结构.....	258
5.10.2	DAC12 的寄存器.....	259
5.10.3	DAC12 的操作.....	261
5.11	MSP430 系列单片机液晶驱动模块.....	266
5.11.1	液晶驱动模块功能结构.....	266
5.11.2	液晶驱动模块寄存器.....	269
5.11.3	LCD 的驱动方式.....	270
5.11.4	液晶驱动模块应用举例.....	275
	习题.....	279
第 6 章	MSP430 系列单片机的应用.....	282
6.1	MSP430 系列单片机常用接口设计.....	282
6.1.1	键盘接口设计.....	282
6.1.2	数字显示系统设计.....	288
6.1.3	实时时钟芯片 DS1302 的接口设计.....	297
6.2	MSP430 系列单片机应用设计举例.....	302
6.2.1	单片机应用系统方案设计.....	302
6.2.2	数字温度测试仪.....	307
6.2.3	智能瓦斯测试仪.....	312
	习题.....	317
附录 A	MSP430 指令速查表.....	318
附录 B	MSP430 系列单片机引脚说明.....	320
	参考文献.....	332

第1章 超低功耗单片机

1.1 超低功耗单片机概述

1.1.1 超低功耗单片机的概念

单片机是随着超大规模集成电路技术的发展而诞生的。单片机又称单片微控制器(Single Chip Microcontroller),它是将计算机的基本部件,如中央处理器 CPU(Central Processing Unit)、随机存储器 RAM(Random Access Memory)、只读存储器 ROM(Read Only Memory)、定时器/计数器、中断控制、I/O 接口、串行接口等微型化并集成到一块芯片上的微型计算机。有些单片机除了集成了以上部件外,还集成了其它功能模块,如 A/D 与 D/A 转换器、液晶驱动等。随着电子技术的发展,单片机片内集成的功能越来越强大,并朝着 SOC(片上系统)方向发展。

近几年,电子产品的低功耗设计越来越受到人们的重视。低功耗成为单片机技术发展的一个显著特点,一些大的单片机厂商都推出了自己的低功耗产品。如 Intel 公司的 80C31 系列、Atmel 公司的 89C51 系列、Motorola 公司的 MC68HC05/MC68HC11 系列、Philips 公司的 51LPC 系列、Microchip 公司的 PIC 系列等。随着现代电子技术的发展,为了使系统的功耗进一步降低,有些厂商已经开始研究生产超低功耗单片机,如 TI 公司的 MSP430 系列 16 位单片机和 EM 公司的低功耗 8 位 FLASH 单片机 EM6812 等。

超低功耗单片机是相对于普通单片机和低功耗单片机而言的。普通单片机的工作电压一般是 4.5~5 V,而低功耗单片机的电压工作范围拓展到 3~6 V,工作电流也降到毫安级。低功耗单片机同时还具有等待和休眠方式,在休眠方式下,电流可以降到微安级,如 MCS-51 系列的 80C51B/87C51 在正常工作(5 V, 12 MHz)时,工作电流为 16 mA,同样条件等待方式下,工作电流为 3.7 mA,而在休眠(2 V)时,工作电流仅有 50 μ A。PIC16C5X 系列单片机是美国 Microchip 公司生产的 8 位 CMOS 单片机,它的工作电压为 3.5~6 V,运行时工作电流小于 2 mA,待机时功耗电流小于 10 μ A。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。超低功耗单片机耗电非常小,不论工作电压还是工作电流,相比低功耗单片机都有了进一步的下降,并能在低电压下工作,采用多种节能工作模式,工作电流也从毫安级降到了微安级,一般在零点几微安到几百微安,而且可以在较低频率下工作。比如 EM 公司的 EM6812 系列单片机可以在 2~5 V 电压下工作,工作频率最低可以为 32 kHz,工作电流为 0.16~120 μ A;而 TI 公司的 MSP430X44X 的工作电压可以降低到 1.8 V,在 LPM3 方式下,振荡器处于 32 kHz,工作电流只有 0.1~280 μ A。

1.1.2 超低功耗单片机的特点

超低功耗单片机除具有普通单片机的特点,如工作稳定、成本低、易于产品化、实现了控制电路的超小型化以及 RAM、ROM、I/O 接口、串行口、A/D 等资源齐全的显著优点外,还有电压低、功耗小以及可以低频率运行等一些优点,适用于机电一体化设备、智能化仪器仪表以及现代家用电器的控制核心,如电脑控制的洗衣机、录像机等。

超低功耗单片机的特点可以归纳如下:

(1) 超低功耗设计。具有超低功耗是超低功耗单片机区别于普通单片机的一个显著特点,超低功耗单片机耗电非常小,一般在几百 $\mu\text{A}/\text{MIPS}$ (MIPS——每秒执行百万条指令),工作电压和工作电流均较低。

(2) 高集成度的完全单片化设计。超低功耗单片机将很多外围模块集成到了 MCU 芯片中,增大了硬件冗余。内部以低功耗、低电压的原则设计,这样的系统不仅功能强、性能可靠、成本低,而且便于进一步微型化和便携化。

(3) 内部电路可选择性工作。超低功耗单片机可以通过特殊功能寄存器,选择使用不同的功能电路,即依靠软件选择其中不同的外围功能模块,对于不使用的模块使其停止工作,以减少无效功耗。

(4) 具有高速和低速两套时钟。系统运行频率越高,电源功耗就会相应增大。为了更好地降低功耗,超低功耗单片机可采用几套独立的时钟源,如高速的主时钟、低频时钟(如 32.768 kHz)和 DCO 片内时钟。其可在满足功能需要的情况下按一定比例降低 MCU 主时钟频率,以降低电源功耗。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。通过软件对相应功能寄存器进行设置,可改变 CPU 的时钟频率,或进行主时钟和辅助时钟切换。

(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,为其功耗管理提供了极好的性能保证。

1.1.3 超低功耗单片机的应用领域

超低功耗单片机以其卓越的性能和较高的性能价格比,使其在许多领域得到了越来越广泛的应用,如对便携式智能检测控制仪器的开发、各种数据采集系统的开发、各种智能控制仪表的开发、各种节能装置的开发等。超低功耗单片机也可应用于产品的内部,取代部分老式机械、电子零件或元器件,以使产品缩小体积,增强功能,实现不同程度的智能化。超低功耗单片机的应用从根本上改变了传统的控制系统设计思想和设计方法,其主要的应用有以下几个方面。

(1) 工业控制方面。单片机的结构特点决定了它特别适用于各种控制系统,如数据采集系统、工业机器人控制系统、机电一体化产品等。

(2) 智能仪器仪表方面。超低功耗单片机已经开始越来越多地应用于各种仪器仪表中,使仪器仪表的智能化程度得到了提高,硬件结构得到了简化,从而提高了仪器仪表的精度和准确度,减小了体积,提高了性能价格比。单片机在该领域的应用,不仅使仪器仪表发生了根本的变革,也给传统仪器仪表行业的改造带来了曙光。

(3) 计算机网络及通信技术方面。超低功耗单片机中集成了通信接口,因而使其在计算

机网络及通信设备中得以广泛应用。其不但可以用 BITBUS、CAN、以太网等构成分布式网络系统,还可以用于调制解调器、各种智能通信设备以及无线遥控系统等。

(4) 日常生活方面。超低功耗单片机不但具有普通单片机的各种优良性能,而且功耗很低,能够省电节能,可采用电池供电,非常适合家用产品的开发,如水表、电表、暖气表、家用防盗系统等。

1.2 超低功耗单片机系统的设计原则

在设计超低功耗系统时,除了要掌握一般单片机的设计原则外,还要针对超低功耗单片机特有的电源电压、时钟频率以及静态功耗进行控制,从设计上来保证系统的超低功耗。这就形成了“电源宜低不宜高,时钟宜慢不宜快,系统(器件)宜静不宜动”的三相宜原则。在硬件及软件设计时要注意以下五个问题:

- 微处理器 MCU 的选择;
- IC 器件的选择;
- 供电管理硬件的设计;
- 系统低功耗的运行管理;
- 软件设计原则。

低功耗设计过程中的任何一个环节都不能忽视,否则难于做到真正的低功耗。但是上述只是低功耗设计的一般原则,对于具体的硬件、软件都是随着电子技术的发展而发展的。如低功耗器件,以前认为是“低功耗”,而现在却未必;以前要用一大堆分离器件构建的电路,现在只需要一个芯片就可实现等。因此,随时了解现代电子技术的发展动态和掌握最新电子元器件的使用,对于一个便携式产品设计者来说是非常重要和有益的。

1.2.1 微处理器 MCU 的选择

要想实现超低功耗,首先要选择具有超低功耗的单片机,但是在选择 CPU 内核时切忌一味追求性能。选择的原则应该是“够用就好”,8 位机够用,就没有必要选用 16 位机。如今单片机的运行速度越来越快,但性能的提升往往带来功耗的增加。复杂 CPU 的集成度高、功能强,但片内晶体管多,总漏电流大,即使进入 STOP 状态,漏电流也变得不可忽视。简单的 CPU 内核不仅功耗低,而且成本也低。低电源电压和低时钟频率都对单片机的选择有很大的影响,再加上各种单片机本身所具有的低功耗特性,选择合适的单片机对降低整个系统的功耗大有益处。下面对一些具有超低功耗的单片机产品进行简单的介绍。

1. TI 公司的 MSP430 系列单片机

TI 公司的 MSP430 系列单片机是一个超低功耗类型的 16 位单片机。它采用了 RISC 内核结构,特别适合于应用电池的场合或手持设备。同时,该系列单片机将大量的外围模块(如液晶驱动器、看门狗、A/D 转换器、硬件乘法器、模拟比较器等)集成到片内,特别适合于设计片上系统。

在超低功耗方面, MSP430 能够实现在 1.8~3.6 V 电压和 1 MHz 的时钟条件下运行,耗电电流(0.1~400 μA 之间)因不同的工作模式而不同,如在液晶显示的条件下,其耗电只

有 $0.8\ \mu\text{A}$ 。MSP430 在应用中的典型情况有：在 $4\ \text{kHz}$ 、 $2.2\ \text{V}$ 条件下工作消耗电流为 $2.5\ \mu\text{A}$ ；在 $1\ \text{MHz}$ 、 $2.2\ \text{V}$ 条件下工作消耗电流为 $280\ \mu\text{A}$ ；在只有 RAM 数据保持的低功耗模式下工作消耗电流只有 $0.1\ \mu\text{A}$ 。在运算速度方面，MSP430 系列单片机能在 $8\ \text{MHz}$ 晶体的驱动下实现 $125\ \text{ns}$ 的指令周期。16 位的数据宽度以及采用多功能的硬件乘法器(能实现乘加)，能实现数字信号处理的某些算法，如 FFT 等。本书主要针对 MSP430 系列超低功耗单片机的原理和设计进行介绍。

2. EM 单片机

EM 公司推出的超低功耗单片机有 EM6812、EM6603、EM6621、EM6680、EM6617、EM6540、EM6682 等一系列品种。如 8 位的超低功耗单片机 EM6812，主要在以电池供电并长时间工作的产品中应用，内置的掉电检测和电源检测功能可确保设备工作在低电压环境。EM6812 采用的是 RISC 内核结构，执行每条指令只需 2 个时钟周期。在使用 $5\ \text{MHz}$ 晶振时，EM6812 能达到 $2.5\ \text{MIPS}$ 的速度，并能达到 $2200\ \text{MIPS/W}$ ，同时内部集成了看门狗、 $8\times 8\ \text{bit}$ 硬件乘法器、16 个独立可编程双向 I/O 口、6 个大电流输出端口(可达到 $20\ \text{mA}$)、SPI 接口(软件可编程串口)、16 个内部寄存器、4 级堆栈等。

在超低功耗方面，EM6812 能够在宽电压范围 ($2.0\sim 5.5\ \text{V}$) 内工作，工作电流为 $0.16\sim 120\ \mu\text{A}$ 。EM6812 的各参数因工作模式不同而不同，典型情况有： 25°C 、 $3\ \text{V}$ 、 $1\ \text{MHz}$ 条件下，工作电流为 $120\ \mu\text{A}$ ； 25°C 、 $3\ \text{V}$ 、 $1\ \text{MHz}$ 待机模式下，当 RC 振荡器开启时，工作电流为 $6\ \mu\text{A}$ ，当 RC 振荡器关闭时，工作电流为 $0.8\ \mu\text{A}$ ； 25°C 、 $1.5\ \text{V}$ 、 $32\ \text{kHz}$ 休眠模式下，工作电流为 $0.16\ \mu\text{A}$ 。除此之外，EM6603 的工作电压是 $1.2\sim 3.6\ \text{V}$ ，在 $3\ \text{V}$ 、 $32\ \text{kHz}$ 条件下，工作电流为 $1.8\ \mu\text{A}$ ，其内部集成有 RC 振荡器、ROM、RAM、定时器等；EM6621 的工作电压为 $1.2\sim 3.6\ \text{V}$ ，在 $3\ \text{V}$ 、 $32\ \text{kHz}$ 条件下，工作电流为 $2.6\ \mu\text{A}$ ，其内部集成有 RC 振荡器、ROM、RAM、定时器、PWM、LCD DRIVER 等；EM6680 的工作电压是 $1.2\sim 3.6\ \text{V}$ ，在 $3\ \text{V}$ 、 $32\ \text{kHz}$ 条件下，工作电流为 $4\ \mu\text{A}$ ，其内部集成有 RC 振荡器、ROM、RAM、定时器、PWM 等。

3. Motorola 单片机

Motorola 是世界上较大的单片机生产商之一，其单片机具有品种全、选择余地大、新产品多的特点。它在低功耗的 8 位单片机中有 68HC05 和 68HC08 系列，16 位机有 68HC16 等十多个品种，32 位机有 683XX 系列。

HCS08 系列单片机是 Motorola 最新的 8 位超低功耗单片机，其工作电压为 $1.8\ \text{V}$ 。HCS08 系列单片机的性能与许多 16 位 MCU 相当，但功耗很低。以 HCS08GT60 单片机为例，其工作电压可以在 $1.8\sim 3.6\ \text{V}$ 之间选择，有 WAIT 和 STOP 两种低功耗模式。STOP 模式可细分为 STOP3、STOP2 和 STOP1 三种，功耗依次降低。在 WAIT 模式下，CPU 停止运行，但其它外围模块并不断电，因此系统随时可以响应各种中断。在 STOP1 模式中，唤醒 CPU 只能通过 IRQ 中断或复位信号，由于无法提供时钟节拍，内核的任务调度无法实现。而在 STOP2 和 STOP3 中，RTI 都可以作为系统的唤醒中断源，内核可以使用 RTI 作为时钟节拍。STOP2 模式与 STOP3 模式相比功耗更低，但是，在 STOP2 模式下 I/O 寄存器是关闭的，必须在进入模式之前将 I/O 寄存器的值保存在 RAM 中，而在唤醒之后再从 RAM 拷贝到 I/O 寄存器。唤醒 STOP2 可以使用 IRQ、复位信号和 RTI。在 STOP3 模式下，RAM 和 I/O 寄

寄存器内容将保持。另外，除 STOP2 模式允许的唤醒中断源外，还允许键盘中断唤醒 CPU。HCS08GT60 的三种 STOP 模式如表 1-1 所列。

表 1-1 三种 STOP 子模式的特点

模 式	CPU/FLASH	RAM	ICG	ATD	KBI	Regulator	I/O	RTI
STOP1	关闭	关闭	关闭	禁用	关闭	关闭	复位值	关闭
STOP2	关闭	备用	关闭	禁用	关闭	备用	锁存	可选
STOP3	备用	备用	备用	禁用	可选	备用	锁存	可选

4. Epson 单片机

Epson 单片机以低电压、低功耗和内置 LCD 驱动器为特点，具有较高的性价比。其低功耗产品包括 4 位、8 位单片机。4 位单片机更是“舍全而从专”，从而具有更高的集成度、更低的功耗。比如，E0C60 系列、E0C62 系列以及 E0C63 系列均为 4 位单片机。E0C62 系列单片机集成了 ROM、RAM、LCD 驱动器、SVD 电源电压检测电路、ADC 单元、多功能定时器、多引脚 I/O 等。根据不同的用途可以选择不同的外围电路，制成专用单片机。以 E0C6240 点阵 LCD 显示单片机为例，该机工作电压为 2.2~5.5 V，工作时电流为 80~1000 μ A，而等待时电流仅为 2~2.5 μ A，功耗极低。

5. MICROCHIP 单片机

美国微芯科技公司是全球领先的单片机和模拟半导体供应商。其 8 位和 16 位 PIC 单片机系列具有高性能、低成本和封装体积小等特点。8 位 PIC 单片机采用 RISC 内核，其架构使用户无需改变代码或只需改变少量代码，即可轻松地在 6 引脚至 100 引脚的各种封装形式的单片机系列之间移植。产品的高级特征包括：精密的定时外设，集成模数转换器(ADC)，通信外设，在线串行编程技术以及包括 PEEC 闪存 EEPROM、一次性编程(OTP)和只读存储器(ROM)等在内的存储技术，且 8 位 PIC 单片机具有多种电源管理模式和较低的功耗。以 PIC18F6390 单片机为例，其工作电压为 2.0~5.5 V。电源管理模式有运行、空闲、休眠三种。空闲模式时电流典型值降到 5.8 μ A，休眠时典型值为 0.1 μ A。

1.2.2 IC 器件的选择

作为一个完整的单片机应用系统，如果想要整个系统的功耗都得以降低，单靠单片机本身并不能完成，其外围元器件的选择也相当重要。现在各大 IC 生产厂商几乎都在这类产品上有所发展。在模拟电路方面，在满足其性能要求的同时，尽量选用与单片机工作电源相匹配的低电源产品以及专为超低功耗系统设计的器件，如超低功耗电源、A/D 转换器、D/A 转换器、放大器和存储器等。而显示屏自然也要选那些低电源电压和低功耗的液晶显示屏。

超低功耗单片机需要的电源范围一般为 1.2~3.3 V，生产超低功耗电源的厂家很多，有 Holtek 公司、Telcom 公司等。为了满足超低功耗单片机的电源需要，可采用电压变换器。电压变换器可分为升压式 DC-DC 变换器和降压式 DC-DC 变换器。超低功耗 A/D 和 D/A 转换器的生产厂家主要有 MAXIM 公司、AD 公司等，其主要产品有 MAX1277/9、MAX1070/1、ADS1216 和 MAX520、AD5300、DAC8541 等。它们的工作电压基本上都在 2.7~3.6 V。

运算放大器的选择需要多方面的综合考虑。如为了保持低消耗电流,必须选择具有兆欧($M\Omega$)级阻值的反馈网络电阻器,这就有可能影响放大级的噪声和准确度指标。同时,超低供电电流放大器的运算速度一般都非常慢(低带宽),仅适合于速度较慢的信号,为了获得较大的带宽,就需要消耗更多的功率。在现有的运算放大器当中,当静态电流给定后,可获得的带宽是存在着显著的差异的,在选择时要引起注意。由于其功耗很低,所以输出电流受到限制,从而导致其容性负载驱动能力下降。另外,极低功耗运算放大器的噪声电平较高,因而极大地限制了其在高精度应用中的推广使用。为了降低功耗,使用中可采取启动(停机)功能来开启和关断放大器。

常用的低电压低功耗的静态程序存储器有很多,有静态存储器 NVRAM、FRAM、FLASH,以及 Cypress 公司的 CY62XXXX 系列、HOLTEK 公司的非挥发存储器 OTP EPROM 系列、3-Wire EEPROM 系列、 I^2C EEPROM 系列等。其中,静态存储器 NVRAM 具有掉电保存功能,采用单 5 V 或者 3 V 供电,功耗小于 5 mW,低功耗型电流小于 20 μA ,常用的有 DCM 系列、HK 系列和 BS 系列等。新型超低功耗存储器 FRAM 具有掉电数据保存、读写速度快、超低功耗、擦写次数几乎无限等优点,生产这类存储器的厂商很多,有 Ramtron、Motorola、TI、松下、夏普和 NEC 等公司。

对于数字电路,一般都选 HCMOS 器件。仅从功耗角度考虑,对于 74 系列芯片,可选用 74HC 或 74HCT 系列。后者为 74LS 系列的每门功耗的百分之几或千分之几。对于 4000 系列芯片也可选用 HC 或 HCT 系列,各种电路和器件的参数如表 1-2 所示。MAXIM 公司的比较器 MAX987/991, Philips 公司的 PCF8574、PCF8563 系列,ATMEL 公司的 24WC 系列 I^2C 器件等都是 μA 级产品。

表 1-2 各种电路和器件的参数

参数电路	电源电压范围/V	输入电平/V		输出电平/V	
	V_{CC}	V_{IH}	V_{IL}	V_{OH}	V_{OL}
LSTTL	4.5~5.5	2	0.8	2.7	0.4
CMOS	3~18(取 $V_{CC}=5$)	3.5	1.5	4.5	0.5
HCMOS	2~6	3.5	1	5.2	0.4

1.2.3 供电管理硬件设计

降低单片机的供电电压可以有效地降低其功耗。当前,单片机从与 TTL 兼容的 5 V 供电降低到了 3.3 V、3 V、2 V 乃至 1.8 V。供电电压的下降,主要归功于半导体工艺的发展,从原来的 3 μm 工艺到现在的 0.25 μm 、0.18 μm 、0.13 μm 工艺,CMOS 电路的门限电平阈值不断降低。低电压供电可以大大降低系统的工作电流,但是由于晶体管的尺寸不断减小,晶体管的漏电流有增大的趋势,这也是对降低功耗不利的一个方面。在采用单电池电源时应实现多分支电源网络管理,使得系统各功能模块的电源相对独立地供电,在不工作时可以分别断电,以节省功耗。

在供电控制方式中的总线电源开关应选择一些具有导通电阻小、静态功耗小、开关速度快、驱动电流小的器件,如可选择 MOSFET。同时还应选择具有可关断的 DC-DC 模块或电源总线开关。这样可以利用微机做到实时关断控制,有利于独立供电支路功耗的管理。

在电路设计中,应对系统中电源泄漏电流进行检查,其中包括系统电源泄漏、RC 泄漏、分布电路泄漏、保护电路泄漏、意外泄漏以及电源关断的防泄漏等。同时还须耐心地进行静态运行的全功耗测定与比较,切实把系统功耗降到最低。除此以外,还有其它一些应注意的问题,如减少电路的分布电容,在正常工作情况下最大限度地加大各通路的阻抗等。

1.2.4 系统超低功耗的运行管理

系统超低功耗的运行管理指的是利用软件进行管理。结合硬件的设计,应消除程序的无谓循环等待。超低功耗单片机都设有低功耗模式,即系统的等待和休眠模式。而各种低功耗模式又可以通过中断方式回到活动模式。处于这类模式下的单片机功耗将大大小于运行模式下的功耗。当系统不工作时,应使单片机及时进入低功耗模式。可选择关断 CPU 时钟或系统时钟,对时钟的控制要做到忙时多用、闲时少用、不用关闭的原则。对于外围电路,可通过 SHDN(关断)控制其工作时间。单片机内部的总电流消耗可分为运行电流和漏电流两部分。理想的 CMOS 开关电路在保持输出状态不变时是不消耗功率的。运行电流几乎是和单片机的时钟频率成正比的;因此,尽量降低系统时钟的运行频率可以有效地降低系统功耗。有以下几点值得注意:

- 选择尽可能低的工作频率作为系统时钟和信号频率。
- 对电路中的其它用电模块进行电源管理,结合硬件中外围模块的低功耗控制功能,分别利用软件控制外围模块电源的开启和导通,即根据工作需要接通相应模块的电源。例如,对于串行通信程序,不用反复检查中断标志位等待收发结束的方法,而应采用临时唤醒 CPU 开中断进行通信,结束通信后立即切断电源。
- 对于 A/D 转换程序,启动转换后不必等待,而应进入外部中断的待机方式,由转换结束中断信号唤醒 CPU。
- 对于显示器件,显示程序最好采用静态显示方式,而不宜采用动态扫描显示方式。显示过后,可以关掉显示,甚至关掉显示模块的振荡时钟。
- 对于可编程的数字量输出的 IC 管脚,因为需考虑驱动负载能力,负载常接正电源,所以在不工作时,这些管脚要尽量控制输出为高电平。

1.2.5 软件设计

采用单片机作为控制部件时,会存在低功耗软件设计问题。利用单片机的智能特性,就是尽量用软件替代硬件。这样不仅简化了硬件设计,而且对降低功耗也起到了重要的作用。利用单片机提供的闲置、掉电工作方式,可尽量避免循环、查询、动态扫描等工作。单片机进入“节电”工作方式时,CPU 被冻结,不执行程序,只有中断系统、定时器和外部接口(如串行通信口、数据采集口等)仍在工作,而这些外部接口可在单片机进入“节电”方式前将它们的电源关闭,这样整个系统的功耗可降到正常工作的几分之一,节能效果非常理想。

低功耗软件设计包括下面的内容:

- (1) 延时子程序用定时中断实现。
- (2) 采用键盘扫描方式时,扫描程序可以纳入外部中断服务程序。
- (3) 尽量减少 CPU 抗干扰中的冗余指令及软件陷阱,散转程序中的逐次比较法等最好

不要采用。

(4) 单片机的看门狗功能与电压侦测功能往往要消耗不少的电流, 应尽量取消这类功能, 尤其是进入低功耗状态之前, 一定要注意这类功能状态的设置。

(5) 用“中断”代替“查询”。一个程序使用中断方式还是查询方式对于一些简单的应用并不那么重要, 但在其低功耗特性上却相去甚远。当使用中断方式时, CPU 可以什么都不做, 甚至可以进入等待模式或停止模式; 而在查询方式下, CPU 必须不停地访问 I/O 寄存器, 这会带来很多额外的功耗。

(6) 尽量减少 CPU 的运算量。减少 CPU 运算的工作可以从很多方面入手:

- 将一些运算的结果预先算好放在 FLASH 中, 用查表的方法替代实时计算, 以减少 CPU 的运算工作量, 这样可以有效地降低 CPU 的功耗(很多单片机都有快速有效的查表指令和寻址方式, 用以优化查表算法);

- 对于不可避免的实时计算, 应算到足够的精度就结束, 避免“过度”的计算;

- 尽量使用短的数据类型, 尽量使用分数运算而避免浮点数运算等。

(7) I/O 模块间歇运行。不用的 I/O 模块或间歇使用的 I/O 模块要及时关掉, 以节省电能。RS232(串口)的驱动需要一定的功率, 可以用单片机的一个 I/O 引脚来控制, 在不需通信时, 应将驱动关掉。如果引脚没有初始化, 可能会增大单片机的漏电流, 不用的 I/O 引脚要设置成输出或输入, 用上拉电阻拉高。特别要注意有些简单封装的单片机没有把个别 I/O 引脚引出来, 对这些看不见的 I/O 引脚也不应忘记初始化。

(8) 对于带有 FLASH 的单片机, 可以采用“宏”代替“子程序”。程序员必须清楚, 读 RAM 会比读 FLASH 带来更大的功耗。正是因为如此, RAM 在低功耗性能突出的 CPU 设计上应改为仅允许一次子程序调用。因为 CPU 进入子程序时, 会首先将当前 PC 值压入堆栈(RAM), 在离开时又将 CPU 寄存器弹出堆栈, 这样至少带来两次对 RAM 的操作。因此, 程序员可以考虑用宏定义来代替子程序调用。对于程序员, 调用一个子程序还是一个宏在程序写法上并没有什么不同, 但宏会在编译时展开, CPU 只是顺序执行指令, 避免了调用子程序, 唯一的问题是代码量的增加。目前, 单片机的片内 FLASH 越来越大, 对于那些不在乎程序代码量大的应用, 这种做法无疑会降低系统的功耗。

习 题

1-1 超低功耗单片机的概念是什么?

1-2 超低功耗常用领域有哪些?

1-3 单片机和我们通常所用的微型计算机有什么区别和联系?

1-4 超低功耗单片机的设计基本原则有哪些?