

AVR单片机 实用程序设计

(第2版)

张克彦 张禹瑄 赵 昕 编 著
李延柱 宋熙萍 张振宇



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



内容简介

本书对 AVR 中档单片机升级换代产品 ATmega16、ATmega8535 的系统结构、特点、运行原理和指令系统等做了详细介绍,在此基础上给出众多具代表性的实用程序的设计及其使用方法,并提供详细程序清单。内容包括 ATmega16/8535 单片机硬件结构,升级后的功能特点以及运行原理;AVR 单片机指令系统;软件 DAA、定点运算以及数制转换子程序设计方法,并设计了使用乘法指令设计快速多字节乘法以及数制转换程序;各类实用程序(查表、线性插值、外设管理、通信、A/D 转换、定时/计数器应用、可靠性设计、数/码制转换、串行器件多点测温、触摸屏、高性能液晶显示模块、红外通讯技术、带定时告警功能的串行实时钟芯片等)的设计使用方法,并对嵌入式系统程序设计及优化方法进行总结;AVR 浮点程序库设计及使用;AVR 单片机的编程功能以及由 AVR JTAG 接口实现的功能强大的在线调试系统。主要程序都附有流程图,所有程序都列出清单并带详细注释,而且配备光盘。

本书归纳的程序设计和优化方法,以及完整的软件设计实例也适用于其他流行机型,如 C8051F、MCS-51/196、Freescale 等单片机。

本书可作为单片机应用工程技术人员的设计参考书,或作为大专院校的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

AVR 单片机实用程序设计 / 张克彦等编著. -- 2 版

. --北京:北京航空航天大学出版社,2012.1

ISBN 978-7-5124-0610-0

I. ①A… II. ①张… III. ①单片微型计算机—程序设计 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 200696 号

版权所有,侵权必究。

AVR 单片机实用程序设计(第 2 版)

张克彦 张禹瑄 赵 昕 李延柱 宋熙萍 张振宇 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(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:34.5 字数:883 千字

2012 年 1 月第 2 版 2012 年 1 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-0610-0 定价:69.00 元(含光盘 1 张)

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

第2版前言

ATMEL 公司于 2002 年对其产品进行了调整,逐步停止 AVR 中档单片机 AT90S 系列的生产,并以升级产品 ATmega8515/8535 替代 AT90S8515/8535,以及推出高档的 ATmega16 等系列升级换代产品。它们都是性能强、价位居中、在 8 位嵌入式系统应用市场占有率高的单片机。

升级换代产品功能明显超过原来的 AT90S 系列,表现为在原有外围器件,如定时器/计数器 T/C0、T/C1、T/C2,高速同步串行口 SPI,通用串行接口 UART,模数转换器 ADC 等在原有功能基础上进一步升级,复位、休眠方式等方面的功能在 AT90S 基础上都显著增强。新增外围器件(两线串行接口 TWI)、新增测试/开发手段(例如 MEGA16 的 JTAG 边界扫描和在线检测接口)、在线应用自我编程功能等。并且配合硬件升级,软件方面也增加了功能强的指令。ATmega16 具有 130 条功能强大的指令,其中新增了多种类型的字节相乘、程序存储器读或写、跨度超过 2K 字的直接转移/转子、字复制等指令(与 mega16 相比,mega8535 也只缺少 2 条直接转移(JMP)、转子指令(CALL))等。ATmega16/8535 的定时器/计数器 T/C0 具有普通、CTC、快速 PWM 以及相位调整 PWM 等 4 种波形发生器模式;T/C2 保留异步计数功能外,具有 T/C0 相同功能;而定时器/计数器 T/C1 除保留原有的普通、输入捕获功能外,具有 15 种波形发生器模式,可以输出多种脉宽调制(PWM)波形。而且所有的定时器/计数器都具有强制比较输出功能,使脉宽调制波形更加完善;将异步串行通信口 UART 升级为通用同步/异步串行接口 USART,支持 5、6、7、8、9 位数据,1 位或 2 位停止位的串行数据帧格式,并支持多机通信模式和(异步)倍速通信模式以及增加奇偶校验功能等;SPI 同步串行接口也增加了倍速传输模式,并对主、从机时钟频率与位传输率比值加以限定,有助于提高通信效率;增设一个面向字节和基于中断操作并与 I²C 标准兼容的两线串行接口(TWI);模数转换器(10 位)增加了差分输入、可编程增益、多种基准电压源选择以及多种中断源触发(即启动)A/D 转换等功能;ADC 多路复用器功能控制位增加到 5 位,具 32 种选择功能,并可对 8 路模拟量切换选择作为模拟比较器的负极输入;ATmega16 的复位源增加到 5 个:上电复位、外部复位、看门狗定时器溢出复位、电源电压检测复位和 JTAG AVR 复位(MEGA8535 仅无此复位源);休眠模式增加到 6 个:ADC 噪声滤除模式、闲置模式、省电模式、掉电模式、待机模式以及扩展的待机模式。

多种类型复位源和休眠模式的采用,为 AVR 嵌入式系统安全运行增加了保护神,使 AVR 单片机低功耗抗干扰性能再度提升。

JTAG 边界扫描和在线检测为 AVR 单片机提供了强大的测试手段。自我编程(引导加载)则实现了写同时读(RWW—Read While Write)功能,可实现中断向量区(包括复位向量)以及用户程序区的转移、程序的自动写入和擦除。给 AVR 单片机增加了强大的开发手段,并

有助于高质量嵌入式系统控制模板的批量生产和自动化作业。

AVR 增强功能及更新换代产品的推出,为嵌入式系统 8 位机应用领域增添了优秀机型,也给电子技术研发工程师提供了广阔用武之地和广泛地选择空间。

但是器件功能的增强必然导致操作的复杂,增加了编程的难度。特别是升级产品中为了顾及与替代产品的兼容性,有些扩展功能位不能按序排列,而是将它们安插在保留位里(例如通用中断控制寄存器 GICR 中的外部中断 2 使能位 INT2,MCU 控制寄存器 MCUCR 中的休眠模式选择位 SM2 等)。有些扩展后的功能位群体在同一寄存器里放不下,不得不跨寄存器分开存放。例如定时器/计数器 T/C1 的波形发生器模式选择位共有 4 个:WGM13、WGM12、WGM11 和 WGM10,其中 WGM11 和 WGM10 存放在寄存器 TCCR1A 里,而 WGM13 和 WGM12 存放在寄存器 TCCR1B 中;又如同步/异步串行接口 USART 中数据帧位数的 3 个选择位 UCSZ2、UCSZ1 和 UCSZ0,其中 UCSZ2 放在 USART 的控制和状态寄存器 UCSRB 里,而 UCSZ1 和 UCSZ0 放在控制和状态寄存器 UCSRC 之中等。这样在进行某些功能设置时就由原来只需针对一个寄存器变为必须涉及多个寄存器。而且由于空间的限制,有些新增设的功能控制寄存器不能与其“家族”在地址空间上连续存放(例如 TWI 控制寄存器 TWCR,USART 的控制和状态寄存器 UCSRC 等);还有的 I/O 寄存器不得不与其他寄存器共享同一地址空间,例如 USART 的控制和状态寄存器 UCSRC 与波特率的高字节寄存器的 UBRRH 共享同一 I/O 地址(\$20),振荡器参数校准寄存器 OSCCAL 与在片仿真调试寄存器 OCDR 也共享同一 I/O 地址(\$31)等,必须进行特殊操作规定才能对它们区分寻址。因此出现了若干无序化或冗余化现象。此外,由于功能扩增,属于同一外围器件的控制和状态寄存器增加,如异步串行通信接口 UART 升级为同步/异步串行通信接口 USART 后,原来的控制寄存器 UCR、状态寄存器 USR 和波特率寄存器 UBRR 统一更换为控制和状态寄存器 UCSRA、UCSRB、UCSRC 和波特率高字节寄存器 UBRRH、波特率低字节寄存器 UBRL 等;由于新增了两线串行接口 TWI,也随之增加了相应的控制寄存器(TWCR)、状态寄存器(TWSR)、地址寄存器(TWAR)、数据寄存器(TWDR)以及位速率寄存器(TWBR)等专用配套的寄存器;此外为了配合整体功能升级需求,增设了 MCU 控制和状态寄存器 MCUCSR、程序存储器控制和状态寄存器 SPMCSR 以及特殊功能 I/O 寄存器 SFIOR 等具控制和提供查询状态等综合功能的专用寄存器。这些都增加了系统初始化操作的复杂性和学习 AVR 单片机的难度。为了使读者能尽快熟悉掌握升级后的 AVR 单片机,作者在《AVR 单片机实用程序设计》基础上修订编写了本书。

由于 ATmega8535 在中断、定时器/计数器、高速同步串行口、通用同/异步串行口、两线串行接口、模数转换器、模拟比较器、时钟配置、休眠模式以及自我编程等功能方面与 ATmega16 完全相同,特别表现在 I/O 寄存器名称、地址、种类和数量方面的兼容性上;而且两种 AVR 引脚 100%兼容。故本书大部分章节中的描述都是针对两种器件的,但对不相同或不兼容的地方都加以详细说明。

ATmega16 与 mega8535 主要不同之处在于,ATmega16 具有容量超过 ATmega 8535 一倍的 FLASH(8K 字)程序存储器,以及 mega8535 不具备的在线测试 JTAG 接口。由此引发出诸如引导加载程序的空间地址、长度、页划分及页地址、中断向量表(包括复位向量)、转移和转子指令跨越的空间、JTAG 接口功能增设的 I/O 寄存器或功能控制位、PC2~PC5 引脚的替换功能等方面的差别,以及因 JTAG 接口功能涉及熔丝位的不兼容性;对应于 JTAG 接口的熔丝位在 mega8535 里具有另外定义,例如作为看门狗功能使能位等,故导致二者电气方面的不完全兼容,详见第 6 章表 6-12。

全书分为6章,第1章详细介绍AVR MEGA16/8535单片机硬件结构,升级后的功能特点以及运行原理。内容包括AVR整体及内核功能特点、时钟系统、低功耗休眠模式、复位系统、中断系统及其管理、端口功能、定时器/计数器的多样功能、高速同步串行口、同异步串行口、两线串行口、模数转换器、模拟比较器等等。第2章介绍AVR单片机指令系统,对标志位功能、指令功能和执行结果对标志位影响都作了详细解释。特别着重介绍了新增的乘法指令、程序存储器读或写指令的功能特点。第3章介绍软件DAA、定点运算以及数制转换子程序设计方法,并设计了使用乘法指令实现快速多字节乘法以及数制转换程序。第4章为介绍各类实用程序(查表、线性插值、外设管理、通信、A/D转换、定时/计数器应用、可靠性设计、数/码制转换、串行器件多点测温、触摸屏、高性能液晶显示模块、红外通讯技术、带定时告警功能的串行实时钟芯片等)的设计使用方法,并对嵌入式系统程序设计及优化方法进行总结。第5章介绍AVR浮点程序库设计及使用。包括介绍浮点数结构、IEEE754(32)标准浮点数格式的变换、基本运算、函数计算、浮点数制转换等子程序的设计方法,演示及应用。第6章则介绍AVR单片机的编程功能以及由AVR JTAG接口实现的功能强大的在线调试系统。

本书重点在于介绍升级换代产品的功能特点及应用。实用程序也在前版基础上进行了改写和扩充。既注重结构原理性的说明,也注重实践应用,书中包含大量的、门类繁多且多数都经过优化设计处理的实用程序。既提供能满足一般应用需要的带看门狗管理的键控-LED显示程序(特别适于作为系统的各种背景程序),也提供高性能LCD液晶显示模块的应用程序(配有汉字/ASCII码显示、绘制函数曲线等多种实用程序),以及当前流行的触摸屏键阵列的划分、键值算法和最简键盘监视输入数据的方法;对通用打印机的工作原理以及可能出现的异常现象作出详细解释,并介绍对打印机进行检测的方法;在需要计算函数值时,既可以调用浮点程序库函数计算子程序做正规的浮点运算(高精度要求场合),也可以利用线性内插程序简化为定点运算处理(精度次要但要求实时性强的场合),而且有多种插值方法可供选择;既有使用标准高速同步串行口、异步串行口实现通信(包括多机通信)的实例,也有利用软件模拟串行口以中断方式实现半双工接收/发送数据(包括通信信号标准的智能转换)的设计方法。而且还介绍了红外通信的硬件结构和如何设计通信程序。在可靠性方面本书提供了断电保护、滑动平均等具有一定难度的设计方法。书中在解释CRC校验原理基础上,提供多种字节和类型的CRC校验码的产生过程以及CRC校验的实现方法,提供非常实用的多种类型CRC校验码数据表格并详细说明其生成过程和使用方法。对PWM输出也提供各种不同的设计实例,其中包括充分利用片上资源的时基资源共享式综合测量系统等。若读者“按需采择”实用程序相关的部分,并对它们加以整合处理,就可方便地组成自己特定的应用系统软件。

本书诸多嵌入式系统应用软件的基本设计思想以及优化方法,也适用于其他类型单片机。

本书第1章由张禹瑄、李延柱编写;第2章由赵昕编写;第3、4、5章以及再版前言由张克彦、张禹瑄编写;第6章以及所有图表最终改制由宋熙萍完成;张振宇主要完成早期英文资料的翻译整理,以及图表的早期制作;最后由张克彦完成本书统稿工作。

参加本书编写的人员还有:张澄宇、崔燕、盛有军、罗明、刘爽、于晓燕、蔡惜光、王玉新、王昕浩、孟春望、李长源等。

本书成书过程中得到北京航空航天大学出版社的大力支持,在此表示感谢。

张克彦

2011年8月于长春

电话:0431-86011569

目 录

第 1 章 ATmega16 单片机硬件结构和运行原理

1.1 AVR 单片机概述	1
1.2 ATmega16 的结构与主要特点	2
1.3 ATmega16 的主要性能	3
1.4 ATmega16 MCU 内核	6
1.5 ATmega16 的存储器组织	8
1.5.1 可实现在线/在应用自我编程的闪存 FLASH	8
1.5.2 数据存储器 SRAM	9
1.5.3 EEPROM 数据存储器	9
1.5.4 I/O 寄存器	9
1.6 系统时钟及其选择	11
1.6.1 时钟系统及其分配	12
1.6.2 源时钟信号	13
1.6.3 外部晶振	13
1.6.4 外部低频晶体振荡器	15
1.6.5 外部 RC 振荡器	15
1.6.6 可标定的内部 RC 振荡器	16
1.6.7 外部时钟源	17
1.6.8 定时器/计数器振荡器(异步时钟)	18
1.7 电源管理和休眠模式	18
1.7.1 概 述	18
1.7.2 休眠模式的实现	19
1.7.3 如何将功耗最小化	21
1.8 复位系统	22
1.8.1 复位源	24
1.8.2 MCU 控制及状态寄存器 MCUCSR	25
1.8.3 内部参考电压源	26
1.8.4 看门狗定时器	26
1.9 中断系统	30
1.9.1 中断源及其管理	30
1.9.2 中断向量	32

1.9.3	中断控制寄存器	37
1.9.4	中断响应过程	40
1.10	定时器/计数器	41
1.10.1	定时器/计数器的预分频器	41
1.10.2	8 位定时器/计数器 0—T/C0	44
1.10.3	16 位定时器/计数器 1—T/C1	55
1.10.4	8 位定时器/计数器 2—T/C2	73
1.11	ATmega16/8535 的 I/O 端口	85
1.11.1	概 述	85
1.11.2	I/O 内部结构及工作原理	86
1.11.3	各端口寄存器	87
1.11.4	I/O 特殊功能寄存器 SFIOR	89
1.11.5	端口第二功能	90
1.12	同步串行接口 SPI	95
1.12.1	内部结构和运行原理	95
1.12.2	SPI 相关寄存器	98
1.12.3	$\overline{SS}$ 引脚功能	99
1.12.4	SPI 数据传送模式	100
1.13	通用同步/异步串行接口 USART	101
1.13.1	概 述	101
1.13.2	串行时钟的产生	103
1.13.3	数据帧格式	106
1.13.4	USART 的初始化	107
1.13.5	数据帧的发送过程	107
1.13.6	异步串行数据的位接收时序	108
1.13.7	数据帧接收过程	110
1.13.8	多机通信的实现方法	111
1.13.9	USART 寄存器	112
1.14	两线串行总线接口 TWI(I ² C)	118
1.14.1	两线串行总线接口定义	118
1.14.2	TWI 模块概述	119
1.14.3	TWI 寄存器	121
1.14.4	TWI 总线的使用	124
1.14.5	多主机系统和总线仲裁	132
1.15	模拟比较器	133
1.16	模数转换器	136
1.16.1	ADC 工作过程	138
1.16.2	启动 ADC	138
1.16.3	预分频与转换时间	139

1.16.4	差分增益通道	140
1.16.5	ADC 输入通道和参考电源的选择	141
1.16.6	ADC 噪声抑制器	142
1.16.7	ADC 自动触发功能	144
1.16.8	ADC 转换结果数据模式	145
1.16.9	有关的 I/O 寄存器	146
1.17	E ² PROM 的读写操作	150
1.17.1	E ² PROM 的读/写访问	150
1.17.2	相关的寄存器	150
第 2 章 AVR 单片机指令系统		
2.1	AVR 单片机汇编器编程规定	153
2.1.1	伪指令	153
2.1.2	表达式	155
2.2	操作数及指令所涉及的对象	157
2.2.1	状态寄存器 SREG	157
2.2.2	执行指令对标志位的影响	158
2.2.3	操作数寄存器和操作数	158
2.2.4	堆 栈	159
2.3	寻址方式	159
2.4	算术和逻辑运算指令	162
2.4.1	加法指令	163
2.4.2	减法指令	165
2.4.3	取反指令	166
2.4.4	取补指令	166
2.4.5	比较指令	167
2.4.6	逻辑与指令	167
2.4.7	逻辑或指令	168
2.4.8	逻辑异或指令	169
2.4.9	乘法指令	169
2.5	转移指令	170
2.5.1	无条件转移指令	172
2.5.2	条件转移指令	172
2.6	数据传输指令	179
2.6.1	直接寻址数据传输指令	180
2.6.2	间接寻址传输指令	181
2.6.3	Z 指针寄存器程序空间取常数寻址	183
2.6.4	程序存储器空间写数据寻址	183
2.6.5	I/O 口数据传送	184
2.6.6	堆栈操作指令	184

2.7 位操作及其他指令	185
2.7.1 移位指令	186
2.7.2 位操作指令	187
2.7.3 修改标志位指令	187
2.7.4 I/O 寄存器操作指令	189
2.7.5 其他指令	189
第3章 定点运算和定点数制转换	
3.1 软件 DAA 的实现方法	190
3.1.1 实现加法 DAA 功能子程序 ADDAA 和 LSDAA 的设计方法	191
3.1.2 实现减法 DAA 功能子程序 SUDAA 的设计方法	192
3.1.3 实现右移 DAA 功能子程序 RSDAA 的设计方法	192
3.2 定点运算子程序	192
3.2.1 多字节压缩 BCD 码加法子程序 ADBCD ₄ 和 ADBCD	193
3.2.2 多字节压缩 BCD 码减法子程序 SUBCD ₄ 和 SUBCD	193
3.2.3 乘法子程序 MUL16	194
3.2.4 快速乘法子程序 MUL16F	195
3.2.5 带舍入功能的乘法子程序 MUL165	195
3.2.6 整数除法子程序 DIV16	196
3.2.7 普适型 32 位除以 16 位除法子程序 DIV16a	196
3.2.8 将最后余数舍入处理的除法子程序 DIV165	198
3.2.9 商为规格化浮点数的除法子程序 DIV16F	198
3.2.10 整数除法子程序 DIV24 和 DIV40	199
3.2.11 整数开平方子程序 INTSQR	200
3.2.12 乘除运算的补充参考子程序	202
3.3 定点数制转换子程序	203
第4章 AVR 实用程序	
4.1 查表(子)程序	211
4.1.1 线性内插计算子程序 CHETA	211
4.1.2 功能数据表格项目浏览、查找、修改程序	218
4.2 EEPROM 读/写子程序	227
4.2.1 EEPROM 读出子程序 REEP	227
4.2.2 查询写入 EEPROM 子程序 WEEP	227
4.2.3 以中断方式写入 EEPROM 程序	228
4.3 输入输出子程序	230
4.3.1 时钟日历芯片 OKI MSM 62×42×的读/写子程序	230
4.3.2 显示保护程序 DSPRV	233
4.3.3 键处理程序 DEALKY	235
4.3.4 计算键值——LED 显示管理子程序 DSPA 和 DSPY	238
4.3.5 键入数字序列左移处理子程序 LSDD8	244

4.3.6	双键浏览、修改数据子程序 KYIN2	246
4.3.7	触摸屏键值算法子程序	250
4.3.8	中文液晶显示模块 OCMJ5×10 的应用	252
4.3.9	通用宽行打印机检测及打印子程序 LPRNT	261
4.3.10	步进电机控制程序	264
4.4	精确定时及日历时钟走时程序	271
4.4.1	MCU 主频 4 MHz 用 TCNT1 精确定时程序	272
4.4.2	MCU 主频 8 MHz 用 TCNT1 精确定时程序	273
4.4.3	MCU 主频 4 MHz 用 TCNT0 精确定时程序	275
4.4.4	以外部时钟(32 768 Hz)用 T/C2 定时直接产生秒号程序	276
4.4.5	精确定时产生 0.1 s 信号程序	277
4.4.6	精确定时产生 1 s 信号程序	278
4.4.7	时钟日历走时子程序 ACLK(软时钟)	280
4.5	通信程序	285
4.5.1	异步串行口中断接收和发送 ASCII 码字符串程序	285
4.5.2	用外部中断配合查询接收串行 ASCII 码字符串程序	290
4.5.3	以定时器和输出口配合用中断方式发送 ASCII 码字符串程序	295
4.5.4	以定时器和输入口配合用中断方式接收 ASCII 码字符串程序	299
4.5.5	主从多机通信程序	304
4.5.6	智能型 RS-232 与 RS-485 标准转换程序	310
4.5.7	串行通信红外接口技术和通信程序	312
4.5.8	高速同步串行口通信程序	319
4.5.9	模拟串行口配合 74164 驱动 LED 静态显示程序	323
4.5.10	具有中断定时告警功能的实时钟芯片 DS1305 应用程序	325
4.6	脉宽调制(PWM)输出	332
4.6.1	T/C0 比较匹配清零计数器 CTC 模式(WGM0[1:0]=2)	333
4.6.2	T/C0 快速 PWM 模式(WGM0[1:0]=3)	334
4.6.3	T/C0 相位可调 PWM 模式(WGM0[1:0]=1)	335
4.6.4	T/C1 比较匹配清零计数器 CTC 模式	336
4.6.5	T/C1 快速 PWM 模式	337
4.6.6	T/C1 相位可调 PWM 输出程序	339
4.6.7	T/C1 相位频率可调 PWM 输出程序	341
4.6.8	T/C2 脉宽调制输出程序的设计方法(本小节示范程序不列入清单)	344
4.7	模数转换	345
4.7.1	A/D 转换和自运行的 PWM 输出综合程序	345
4.7.2	利用模拟比较器进行 A/D 转换程序	350
4.8	可靠性程序	352
4.8.1	滑动平均子程序 SLPAV	352
4.8.2	带外部 SRAM(不断电)的 ATmega8515 系统断电保护程序	356

4.8.3	ATmega16L/8535L 工作于掉电模式下小系统的断电保护程序	365
4.8.4	循环冗余检测原理以及实现方法	370
4.9	码制转换	387
4.9.1	ASCII 码数据综合处理子程序	387
4.9.2	格雷(Gray)码与二进制数相互转换子程序	396
4.10	AVR 综合性实用程序	397
4.10.1	AVR 频率计程序设计	398
4.10.2	时基资源共享式综合测量系统	401
4.10.3	DALLAS 18B20 多点测温程序	407
4.11	嵌入式系统软件设计方法	415
4.12	嵌入式系统常用优化设计方法	418
第 5 章 AVR 浮点程序库		
5.1	AVR 浮点程序库的特点	424
5.1.1	AVR 浮点程序库的设计特点	424
5.1.2	AVR 浮点程序库的优点	425
5.1.3	IEEE 浮点数格式	427
5.1.4	浮点数的规格化	430
5.1.5	对阶	430
5.2	基本运算子程序的设计方法	430
5.2.1	支持基本运算的辅助子程序	430
5.2.2	浮点数比较大小子程序 FPCP 的设计方法	431
5.2.3	浮点加法子程序 FPAD 的设计方法	433
5.2.4	浮点减法子程序 FPSU 的设计方法	433
5.2.5	浮点乘法子程序 FPMU 的设计方法	436
5.2.6	快速浮点乘法子程序 FPMUF 的设计方法	439
5.2.7	浮点除法子程序 FPGD 的设计方法	441
5.2.8	浮点数模拟手算开平方子程序 FPSQ 的设计方法	443
5.2.9	浮点数牛顿迭代开平方子程序 FSQR 的设计方法	446
5.2.10	基本运算子程序的演示程序	448
5.3	函数计算子程序的设计方法	450
5.3.1	函数计算子程序的设计总则	450
5.3.2	函数计算子程序的辅助子程序	450
5.3.3	用荷纳法计算多项式值子程序 FPLN1 和 FPLN2	455
5.3.4	对数函数 LNX 及其衍生函数子程序的设计方法	457
5.3.5	指数函数 EXP 及其衍生函数子程序的设计方法	461
5.3.6	正弦函数 $\sin x$ 及其衍生函数子程序的设计方法	464
5.3.7	反正弦函数 ASINX 及其衍生函数子程序的设计方法	467
5.3.8	函数计算子程序的演示程序	472
5.3.9	阶乘子程序 NP 的设计方法	473

5.3.10 浮点数制转换	474
5.4 浮点程序应用实例	483
5.4.1 拟合直线程序	483
5.4.2 模数转换器 AD7701 的应用	487
第 6 章 在线测试功能和编程功能	
6.1 ATmega16 的 JTAG 接口与在线调试系统	490
6.1.1 JTAG 接口简介	490
6.1.2 JTAG 在线仿真调试	495
6.1.3 JTAG 程序下载功能	495
6.1.4 JTAG 边界扫描功能	496
6.1.5 ATmega16 的边界扫描顺序	499
6.2 引导加载支持的自我编程功能	503
6.2.1 引导加载技术的实现	504
6.2.2 相关 I/O 寄存器	508
6.2.3 程序存储器 Flash 的自编程	511
6.2.4 一个简单的引导加载汇编程序	514
6.3 ATmega16 存储器编程	516
6.3.1 ATmega16 的锁定位、熔丝位、标识位和校正位	516
6.3.2 并行编程模式	518
6.3.3 SPI 串行编程模式	524
6.3.4 JTAG 串行编程模式	526

参考文献

第 1 章

ATmega16 单片机硬件结构和运行原理

1.1 AVR 单片机概述

ATMEL 公司发挥其 IC 设计技术和制造工艺技术的优势,并博采众长,于 1997 年研发推出了全新配置采用精简指令集 RISC 结构的新型单片机,简称 AVR 单片机。它采用了大型快速存取寄存器文件、快速的单周期指令系统以及单级流水管线等先进技术,使得 AVR 单片机具有高达 1MPS/MHz 的高速运行处理能力。

RISC 结构的精简指令集是一种简洁、高效率的指令系统。例如 ATmega16 单片机指令系统具有 130 条指令(最高档 ATmega128 具有 133 条指令),在多数应用场合都可兼容其他 AVR 单片机。具有高效的数据处理能力,能对位、半字节、字节和双字节数据等类型数据进行内容包括算术和逻辑运算、数据传送、布尔处理、控制转移、硬件乘法等方面的处理。

AVR RISC 结构的主要优势特点如下:

- (1) 废除机器周期,以时钟周期为机器周期。
- (2) 采用流水作业,可在执行一条指令的同时预取下一条指令。
- (3) 指令宽度为字,读取一次指令的信息量相当于一般 CISC(Complex Instruction Set Computer)8 位机两次读取的信息量;且大多数指令都为单周期指令。
- (4) 取消累加器,避免指令执行速度被瓶颈现象打折扣。算术、逻辑运算直接在寄存器文件中进行;寄存器文件之间、寄存器文件与 I/O 寄存器之间以及寄存器文件与 SRAM 之间都可直接传送数据。
- (5) 具有带符号数加减法、乘法以及比较大小等一般 8 位机所不具有的功能。
- (6) 增加综合性功能指令,如自动增(减)量寻址等。

以上举措可使 AVR 执行某些常用功能模块程序的整体速度超过一般 8 位 CISC 单片机 20 倍以上。这些常用功能模块是数据采集、批次处理等频繁或周期性调用的子程序,故其执行速度在很大程度上决定了整体程序的品质因数。

算术、逻辑运算以及左右移位操作为体现 AVR 单片机高速运行之画龙点睛之“笔”:执行时间只需要 1 个时钟周期;而 CISC 8 位机却需要 3 个机器周期(对 MCS-51 来说为 36 个时钟周期)。即使后者也取消了机器周期,其速度也只能为 AVR 的 1/3。例如:

(1) 实现加法操作 $(Rd) + (Rr) \rightarrow Rd$, AVR 只需要 1 条单周期指令:ADD Rd, Rr; 而 MCS-51 总共需要 3 条指令:MOV A, Rd、ADD A, Rr 和 MOV Rd, A。

(2) 将寄存器 Rd 内数据带进位循环左移, AVR 只需要 1 条单周期指令: ROL Rd; 而 MCS-51 总共需要 3 条指令: XCH A, Rd, RLC A 和 XCH A, Rd。

如以采用相同晶振时钟为前提, 对执行双字型除以字型数据运算作比较, 80C51、AVR 和 MCS-196 三种单片机平均运算速度之比为 1:23:75, 即 AVR 的速度远超过 80C51 而靠近 MCS-196。

ATMEL 公司采用高密度生产工艺、采用多渠道复位源、多种休眠方式抗干扰及降低功耗等提高可靠性手段, 为 AVR 单片机高速安全运行提供了坚实后盾。此外, AVR 单片机还具有丰富的中断资源, 功能多样化的定时器/计数器, 多种形式的串型通信口, 多种替换功能、设置灵活、驱动性能强的 I/O 端口, 以及片上自我编程能力等。

AVR 单片机的高速性、可靠性和低功耗, 使它特别适用于要求频繁实时处理较大批量数据(典型应用为多字节校验码循环冗余检测(CRC), 见 4.8.4 小节), 或工业控制(如化工生产)中要求及早侦测、判断和处理突发紧急事件、危险事件等场合, 或以干电池供电的便携式仪器、长期无人值守的数据收集系统, 或存在强干扰等恶劣环境的场合。

AVR 单片机采用低功率、非挥发的 CMOS 工艺制造, 内部分别集成 Flash、EEPROM 和 SRAM 三种空间各自独立(程序遭受干扰时不会窜入 EEPROM 或 SRAM 空间)、不同性能和用途的存储器。其中 Flash 中带有引导加载程序, 除了可以通过 SPI 口用一般的编程器对 AVR 单片机的 Flash 程序存储器和 EEPROM 数据存储器进行编程外, 大多数的 AVR 单片机还具有 ISP 在线编程以及 IAP 在应用编程的功能。这些优点为使用 AVR 单片机开发设计和生产产品提供了极大的方便, 在产品的设计生产中, 可以“先焊接模板而后编程”, 从而缩短了研发周期, 提高了工艺流程自动化程度, 并使产品通过网络进行异地升级成为可能。

1.2 ATmega16 的结构与主要特点

ATMEL 公司的 AVR 单片机家族有 3 个系列的产品: Tiny、Low Power 和 mega, 分别对应低、中、高三个不同档次数十种型号的产品。

三个系列的所有型号单片机, 都采用相同的 AVR 内核, 故指令系统兼容; 只是在内部资源的多少、片内集成外围接口的复杂程度和功能等方面具有区别,

ATmega16 是一款高档的、但从功能价位来看属于居中的 AVR 单片机, 故在 8 位机市场占有率方面具有优势。它是 AT90S 系列的良好替代产品, 也是 8 位嵌入式系统应用具代表性的更新换代产品。

ATmega16 的 FLASH 中带有独立锁定位的 BOOT 代码区, 通过片上的 BOOT LOADER 程序实现自我编程, 具有真正的同时读/写操作能力。

ATmega16 的资源特点如下: 8K 字的系统内可编程 FLASH(具同时读写能力, 称为 RWW), 512 字节的 EEPROM、1K 字节的 SRAM、32 个通用工作寄存器, 用于边界扫描的 JTAG 接口, 支持片内调试与编程。具有上/下电复位、BOD 检测复位、外部复位、看门狗定时器溢出复位和 JTAG AVR 复位等 5 个复位源, 它们是系统安全运行的保护神。三个具有输出比较模式的灵活的定时器/计数器, 即 8 位的 T/C0、T/C2 和 16 位的 T/C1, 它们除具有通常的定时计数功能外, 都具有多种模式的脉宽调制输出功能, 其中 T/C1 还具有输入捕获功能, T/C2 具有异步实时钟计数功能; 32 个具有替换功能可编程 I/O 口; 丰富的片内、外中断源; SPI 主从同步串口; 可编程同/异步通用串行接口 USART, 数据格式 5~9 任选, 具多机通

信功能。8 路 10 位具有可差分输入、可编程(TQFP 封装)的 ADC,具有片内振荡器的可编程看门狗定时器,6 个可以通过软件编程选择的节电模式。工作于空闲模式的 MCU 停止工作,而 USART,两线接口,A/D 转换器,SRAM,T/C,SPI 端口以及中断系统继续工作;掉电模式下,晶体振荡器停止振荡,除了中断和硬件复位功能之外都停止工作;在省电模式下,异步定时器继续运行,维持实时钟的不间断性,给用户保留一个时间基准。而其余功能模块都处于休眠状态;ADC 噪声抑制模式停止 MCU,以及除了异步定时器、ADC 以外所有 I/O 模块的工作,降低了 ADC 转换时的开关噪声;STANDBY 模式下只有晶体或谐振振荡器在运行,其余功能模块处于休眠状态,器件只消耗极少电流,同时具有快速启动能力;扩展的 STANDBY 模式下,则允许振荡器和异步定时器继续工作。ATmega16 是基于 ATMEL 高密度非易失性存储器技术生产的,片内 ISP FLASH 允许程序存储器通过 ISP 串行接口,或者通过编程器进行编程,也可以通过 FLASH 之中的引导程序进行编程。引导程序可以使用任意接口将应用程序下载到应用 FLASH 存储区(APPLICATION FLASH SECTION)。在更新应用 FLASH 存储区时,引导 FLASH 区(BOOT FLASH SECTION)的程序继续运行,实现了自我编程操作。通过将 8 位 RISC MCU 与系统内可编程的 FLASH 模块集成在一块芯片内,ATmega16 成为一个功能强大的单片机,为许多嵌入式系统应用提供了高性能、低成本的灵活解决方案。

1.3 ATmega16 的主要性能

ATmega16 单片机的主要性能如下:

(1) 高性能、低功耗的 8 位 AVR 微控制器

(2) 采用先进的 RISC 架构

① 131 条(包括程序测试指令 break)功能强大的指令,大多数为单时钟周期指令(8535 为 129 条,仅少 JMP K 和 CALL K 两条指令)。

算术和逻辑运算指令(31 条);

条件转移指令(33 条);

数据传送指令(35 条);

位操作和位测试指令(28 条);

MCU 控制指令(4 条,包括一条程序测试指令 break)。

(关于指令功能的详细介绍见第 2 章。)

② 32 个 8 位通用工作寄存器以及外围 I/O 控制寄存器。

③ 工作在 16 MHz 时具有 16 MIPS 的性能。

④ 硬件乘法器(具执行速度为 2 个时钟周期的有/无符号字节型数据相乘功能)。

(3) 片内集成了大容量的非易失性程序存储器、数据存储器以及工作寄存器

① 8 K 字 Flash 程序存储器,支持在系统编程(In-System Programming)和在应用编程(In-Application Programming),擦写次数超过 10 000 次。

② 带有独立加密位的可选的引导—加载(BOOT—LOADER)区,可通过该区内的引导程序实现自我编程(写同时读:Read When Writing)。

③ 512 B 的 EEPROM,擦写次数达 10 万次。

④ 1 KB 内部 SRAM。

⑤ 可对锁定位编程实现用户程序加密,而且不可解密。

⑥ 可通过 SPI 接口实现在系统编程(ISP)。

(4) JTAG 接口(兼容 IEEE1149.1 标准)

① 具有 JTAG 标准的边界扫描功能(Boundary-Scan)。

② 支持扩展的片上调试(Extensive On-chip Debug)。

③ 通过 JTAG 接口支持对 Flash、EEPROM、芯片熔丝位和加密锁定位等器件的编程。

(5) 外围电路(Peripheral)的特点

① 2 个具有比较输出模式的带独立预分频器(10 位)的 8 位定时器/计数器 T/C0 和 T/C2。

② 1 个带 10 位预分频器,具有比较输出和捕获模式的 16 位定时器/计数器 T/C1。

③ 1 个具有独立振荡器的异步实时时钟(RTC)。

④ 2 个 8 位 PWM 通道。

⑤ 1 个 16 位 PWM 通道,可实现 2~16 位任选、相位和频率可调的 PWM 脉宽调制输出。

⑥ 8 通道 10 位 A/D 转换:

8 个单端输入通道;

7 个双端输入通道;

2 个可编程设定增益为 $1\times$ 、 $10\times$ 或 $200\times$ 的差分输入通道。

⑦ 1 个面向字节的 TWI(I²C 兼容)串行接口,支持主/从(Master/Slave)、收/发 4 种工作方式,支持自动总线仲裁(Automatic Bus-Arbitration)。

⑧ 1 个增强型同、异步可编程串行接口 USART,支持多机通信自动地址识别。

⑨ 1 个主/从、收/发同步串行接口 SPI。

⑩ 具有片内 RC 振荡器的可编程看门狗定时器。

⑪ 具片内模拟比较器。

(6) 特殊的微控制器性能

① 上电复位和可编程的低电压检测电路(BOD)。

② 内部集成了可选择频率(1/2/4/8 MHz)、可校准的 RC 振荡器(25 °C、5 V、1 MHz 时精度为 $\pm 1\%$)。

③ 外部和内部的中断源 21 个(包括复位中断源一个)。

④ 6 种休眠模式:

空闲模式(Idle);

ADC 噪声抑制模式(ADC Noise Reduction);

省电模式(Power-save);

掉电模式(Power-down);

待机模式(Standby);

扩展待机模式(Extended Standby)。

⑤ I/O 引脚上拉电阻全局禁止设置,以及超越(Override)控制设置。

(7) 引脚和封装

① 32 个可编程 I/O 口线,可任意定义 I/O 的输入/输出方向;都具有替换功能,并且部分 I/O 口具有 2 种替换功能;输出时为推挽输出,驱动能力强,可直接驱动 LED/继电器等大电流负载;输入口可定义为三态输入,也可以设定激活内部上拉电阻,省去外接上拉电阻。

RESET:为复位输入引脚。在该引脚上的一个超过两个时钟周期的低电平将产生复位信

号,使系统进入复位过程。

XTAL1:内部振荡放大器的输入端。

XTAL2:内部振荡放大器的输出端。

AVCC:该引脚为端口 A 和 A/D 转换器提供电源。当使用 ADC 时,AVCC 应通过一个低通滤波器与 V_{CC} 连接;当禁止 ADC 时,该引脚应直接与 V_{CC} 连接。

AREF:为 ADC 参考电源输入端。

V_{CC} :电源正输入端。

GND:电源地。

② 40 引脚 PDIP 封装/44 引脚 TQFP 封装或 MLF 封装。

(8) 工作电压

① 2.7~5.5 V(ATmega16L)。

② 4.5~5.5 V(ATmega16)。

(9) 运行速度

① 0~8 MHz(ATmega16L)。

② 0~16 MHz(ATmega16)。

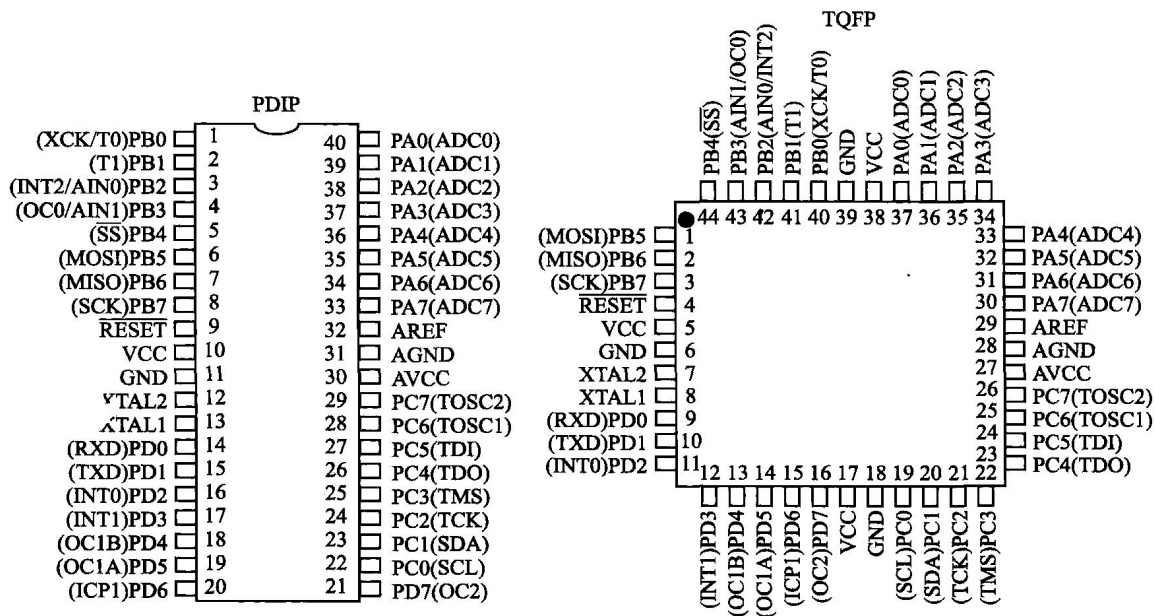
(10) 典型功耗(4 MHz,3 V,25 °C)

① 正常模式:最大 1.1 mA(ATmega16L)。

② 空闲模式:最大 0.35 mA(ATmega16L)。

③ 掉电模式: $<1 \mu A$ (ATmega16L)。

图 1.1 为 ATmega16、ATmega8535 单片机引脚图。



注:二者差别只是 ATmega8535 的 PC[5:2]没有 JTAG 替换功能

图 1.1 ATmega16、ATmega8535 单片机引脚图