

■ 聚焦 EDA

基于Proteus的 AVR单片机 C语言程序设计与仿真

陈忠平 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

聚焦 EDA

基于 Proteus 的 AVR 单片机 C 语言程序设计与仿真

陈忠平 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以目前流行的软、硬件仿真软件 Proteus 为核心,采用现代教学方法,从实验、实践、实用的角度,通过丰富的实例详细叙述了该软件在 AVR ATmega16 单片机课程教学和单片机应用产品开发过程中的应用。

本书以夯实基础,面向应用、理论与实践紧密结合的原则,根据 AVR 单片机的运行速度快、资源丰富、功能强大、以串行扩展为主等特点,采用 C 语言作为系统软件开发平台。本书知识系统全面,阐述深入浅出,主要包括单片机系统的设计及相关软件的使用、自制 AVR 单片机下载电缆、Proteus 中原理图的绘制与仿真及电子线路印制电路板(PCB)的制作、CodeVisionAVR 的 C 语言基础知识、Proteus 在 AVR ATmega16 单片机系统设计中的应用。书中选择的实例具有很强的实用性和指导性。通过阅读这些实例,读者可以在不花费硬件成本的前提下,学习和开发 AVR 单片机应用系统。

本书既可作为高等院校信息工程、计算机应用、自动化、电气工程等相关专业的 AVR 单片机教材或培训教材,也可作为 AVR 单片机爱好者的自学实践教材,还可作为从事 AVR 单片机应用研发科技人员的实用参考书。

为便于读者阅读、学习,特提供本书所讲实例下载资源,详见前言。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

基于 Proteus 的 AVR 单片机 C 语言程序设计与仿真 / 陈忠平编著. —北京:电子工业出版社, 2011.1
(聚焦 EDA)

ISBN 978-7-121-12705-2

I. ①基 … II. ①陈 … III. ①单片微型计算机—C 语言—程序设计 IV. ①TP368.1②TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 259409 号

策划编辑:张 剑(zhang@phei.com.cn)

责任编辑:谭丽莎

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:34.5 字数:883 千字

印 次:2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:69.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

单片机又称单片微控制器，其实质是将一个计算机系统集成到一个芯片上。它具有体积小、质量轻、价格便宜、控制功能强等特点，在工业控制、智能仪表、家用电器及军事装置等方面都得到了广泛的应用。

国内高等院校的单片机教学与研究已经有了近 30 年的历程，但目前大部分院校开设的单片机课程还是以 20 世纪 80 年代开始流行的 MCS-51 系列（包括增强型 51 系列）单片机为蓝本，以汇编语言或 C 语言为编程工具，以并行扩展为核心来讲述单片机的相关知识的。尽管 MCS-51 系列单片机在实际应用中还占据一定的市场，但由于该系列的单片机采用普林斯顿体系结构，使得指令周期长、执行速度慢、功能单一、访问外部数据有瓶颈。随着微电子技术的迅猛发展，在 20 世纪 90 年代末，市场上已经开始出现了 AVR 系列单片机。AVR 系列单片机采用的是哈佛结构。与 MCS-51 系列单片机相比，它在运行速度、内存容量、内部功能模块的集成化等方面均有很大的改善。AVR 单片机于 1997 年推出后，很快得到了市场的认可，并迅速推广开来，成为 MCS-51 系列单片机的强力竞争者。

许多单片机初学者都是首先学习单片机的相关基础知识，然后使用计算机在一些编译软件上编写程序，最后通过分析寄存器的内容以检验程序设计是否符合要求，或者自己焊接硬件电路将源程序代码下载到单片机中来观察运行效果。这种学习方法很好，但是如果所设计系统较复杂，则难以分析相关寄存器的内容，或者由于硬件成本过高，难以制作硬件电路，此时这种学习方法就有所欠缺，尤其是对于在校学生而言。

Proteus 软件强势推出后，改变了单片机的传统学习方法，对于单片机学习或者系统开发都能提供有力的帮助。Proteus 是多功能的 EDA 软件，真正实现了虚拟物理原型功能，在目标板还没投产前，它就可以对所设计的硬件系统的功能、合理性和性能指标进行充分调整，并可以在没有硬件电路的情况下，进行相应的程序设计与调试，可由仿真原理图直接导出绘制成印制电路板（PCB）。对于单片机初学者而言，虚拟物理原型可节约学习成本，提高学习积极性；对于单片机系统开发人员而言，它可缩短开发时间，提高设计效率，降低开发成本。

为使初学者能迅速入门，提高对 AVR 单片机的兴趣与爱好，并能在短期内掌握 AVR 单片机的应用开发要领，编者特编写了此书。在编写过程中，编者十分注重题材的取舍，使得本书具有以下四个特点。

1. 由浅入深，循序渐进

本书在内容编排上采用由浅入深、由易到难的原则，从最初的 AVR 单片机开发环境、Proteus 软件的使用，讲到单片机内部单元的实现，再到单片机外围扩展，直至单片机的电动机控制应用，这样的编排可让读者根据自己的情况选择阅读起点。

2. 软硬结合，虚拟仿真

沿用传统单片机学习与开发经验，先通过相关编译软件（如 CodeVisionAVR）编写程序并生成 HEX（或 COFF）文件，然后在 Proteus 中画好硬件电路图（这一过程相当于硬件电路的焊接），最后调用 HEX 文件进行虚拟仿真（这一过程相当于硬件调试）。这样可节约学

习成本,提高读者的学习积极性。

3. C 语言编程,增强可读性

C 语言是一种编译型程序设计语言,它兼顾了多种高级语言的特点,并具备汇编语言的功能。用 C 语言来编写程序会大大缩短开发周期,并且明显地增加程序的可读性,便于改进和扩充。采用 C 语言进行单片机程序设计是单片机开发与应用的必然趋势。许多人员在学习 MCS-51 单片机时,均先学习了汇编语言,然后再学习用 C 语言编写 MCS-51 程序代码,通过这种历程使他们深深地感悟到:汇编指令太枯燥,学习起来费时费力,而且用汇编语言编写一个程序或读懂程序不是一件容易的事情;而使用 C 语言进行编程时,不必对单片机的硬件结构有很深入的了解,编写程序相对简单,且程序的可读性和可移植性均很强。对于以前学过了 MCS-51 单片机的人员或从未学过单片机的人员来说,学习 AVR 单片机时是否也要先从汇编入手呢?答案是否定的。

考虑有些单片机初学者以前从未使用 C 语言编写单片机程序,因此本书在第 3 章介绍了 C 语言的相关知识,这样可使他们在很短时间内掌握 C 语言的相关语法。全书所有实例均采用 C 语言编写,这样对已学过 MCS-51 单片机或从未学过单片机的读者来说,可以使他们很容易看懂程序或进行程序的移植,也就是快速进入 AVR 的学习之门。

4. 兼顾原理,注重实用

基本原理、基本实例一直是学习和掌握单片机应用技术的基本要求,由于许多 AVR 单片机初学者在学习 AVR 单片机时对相关原理不是很清楚,所以本书从第 4 章至第 12 章在讲解 AVR 单片机的部分功能应用时,首先讲解了相关原理,然后通过一些实例讲解其应用。在讲解实例时,先进行设计分析,然后给出源程序代码。这样的编写安排,使初学者可以不借助其他的 AVR 单片机原理方面的书籍,直接通过本书的学习就掌握 AVR 单片机的应用。

由于 Proteus 软件的操作方式与一般的应用软件不同,菜单栏与工具条也不完全对应,所以本书只列出了与菜单栏相对应的一些工具条,对于与菜单栏不对应的工具条,请读者参考相关资料。为了便于读者学习和使用实际的 Proteus 软件,本书对软件电路图中不符合国家标准的图形及符号等未做改动(如在 Proteus 软件中,电容单位 μF 使用 uF 进行标记)。

为便于读者阅读、学习,特提供本书所讲实例下载资源。请访问 <http://yydz.phei.com.cn> 网站,到“资源下载”栏目下载。

参加本书编写的有湖南工程职业技术学院陈忠平、湖南航天局 7801 研究所刘琼、湖南涉外经济学院侯玉宝、湖南科技职业技术学院高见芳、湖南工程职业技术学院龙晓庆、李锐敏、湖南三一重工集团王汉其等。全书由湖南工程职业技术学院陈建忠教授主审。在编写过程中还得到了湖南工程职业技术学院龚亮、彭芳等众位高工、老师的大力支持及帮助,在此向他们表示衷心的感谢。同时对在编写过程中参考的多部 AVR 单片机原理及相关著作的作者表示深深的谢意!

由于编著者知识水平和经验的局限性,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者给予批评指正,编者 E-mail:czpmcu@126.com。

编著者

2011 年 1 月

目 录

第 1 章 AVR 单片机系统的设计与开发环境	1
1.1 ATMEL 单片机简介	1
1.2 AVR 单片机与 C 语言的关系	8
1.3 CodeVisionAVR 的 C 语言编译器的使用	10
1.4 AVR Studio 集成开发软件的使用	28
1.5 PonyProg2000 下载软件的使用	33
1.6 自制 ISP 下载线	35
第 2 章 Proteus7.5 入门	37
2.1 Proteus ISIS 的操作及电路原理图的设计	37
2.2 Proteus VSM 虚拟系统模型	56
2.3 Proteus ARES 的 PCB 设计	68
第 3 章 CodeVisionAVR 的 C 语言基础知识	77
3.1 数据运算	77
3.2 流程控制	92
3.3 数组	103
3.4 指针	107
3.5 结构体	109
3.6 共用体	115
3.7 函数	117
3.8 编译预处理	122
第 4 章 ATmega16 通用 I/O 控制	125
4.1 ATmega16 的基本结构	125
4.2 ATmega16 通用数字 I/O 端口的介绍	140
4.3 PA 端口的应用	144
4.4 PB 端口的应用	147
4.5 闪烁灯	151
4.6 流水灯	156
4.7 带按键选择的花样灯	160
4.8 控制 16 个发光二极管的花样灯	165

第 5 章 ATmega16 中断控制与 LED 数码管显示	172
5.1 ATmega16 中断系统	172
5.2 LED 数码管的基础知识	180
5.3 INT0 的应用	182
5.4 INT1 的应用	186
5.5 INT2 的应用	190
5.6 INT0 和 INT1 中断嵌套的应用	195
5.7 INT0 和 INT1 控制的加减计数	199
第 6 章 ATmega16 的定时/计数控制	204
6.1 ATmega16 定时/计数系统	204
6.2 定时/计数器 0 用于定时的应用	229
6.3 定时/计数器 0 用于计数的应用	235
6.4 定时/计数器 0 的 CTC 模式应用	240
6.5 定时/计数器 0 的快速 PWM 模式应用	243
6.6 定时/计数器 0 的相位修正 PWM 模式应用	248
6.7 定时/计数器 1 用于定时的应用	251
6.8 定时/计数器 1 用于计数的应用	255
6.9 定时/计数器 1 的 CTC 模式应用	260
6.10 定时/计数器 1 的快速 PWM 模式应用	264
6.11 定时/计数器 1 的相位修正 PWM 模式应用	269
6.12 定时/计数器 1 的输入捕捉模式应用	274
6.13 定时/计数器 2 用于定时的应用	278
6.14 定时/计数器 2 用于异步计数的应用	284
6.15 定时/计数器 2 的 CTC 模式应用	289
第 7 章 通用串行接口	294
7.1 ATmega16 通用串行接口 USART	294
7.2 单片机自发自收数据	306
7.3 两个单片机通信（一）	311
7.4 两个单片机通信（二）	316
第 8 章 键盘的应用	326
8.1 键盘的工作原理	326
8.2 查询式键盘的设计	327
8.3 矩阵式键盘的设计（一）	331

8.4	矩阵式键盘的设计 (二)	338
8.5	简单拨号键盘的设计	345
第 9 章	ATmega16 的模拟比较器和模/数转换器	355
9.1	ATmega16 的模拟比较器	355
9.2	ATmega16 的模/数转换器	357
9.3	模拟比较器的应用	364
9.4	模/数转换器的应用	368
9.5	电源电压指示灯的设计	373
第 10 章	显示器的应用	379
10.1	LED 点阵显示器的应用	379
10.2	LCD 液晶显示器的应用	421
第 11 章	串行总线的应用	465
11.1	SPI 总线的应用	465
11.2	TWI 总线的应用	481
第 12 章	电动机控制	496
12.1	步进电动机控制	496
12.2	直流电动机控制	511
12.3	伺服电动机控制	528
附录 A	Proteus 常用快捷键	543
附录 B	CodeVisionAVR 编译器常用库函数简介	543
参考文献		544

第1章 AVR 单片机系统的 设计与开发环境

自从 1946 年美国宾夕法尼亚大学研制了世界上第一台数字电子计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) 以来, 计算机的发展经历了四个时代。在短短的几十年中, 已发展出大规模/超大规模集成电路的计算机, 其运算速度每秒钟可达上万亿次以上。近年来, 计算机正朝着巨型化、智能化、网络化、微型化的方向发展。

微型化的发展也就是微型计算机的发展。在微型计算机中, 单片微型计算机(简称单片机)是其重要的成员。单片机的发展也非常迅速, 它依靠一定的硬件基础, 根据特定环境, 能完成一定的需求。因其结构比较简单、工作任务针对性较强, 使得在国民经济的各个领域中都能看见它的踪迹。

自从 1974 年美国仙童(Fairchild)公司运用计算机技术生产了世界上第一块单片机(F8)以来, 在短短的几十年中, 作为微型计算机中的一个重要分支, 单片机的应用面极广, 发展速度也很惊人。

1.1 ATMEL 单片机简介

ATMEL 公司创建于 1984 年, 总部位于美国的圣何塞, 是世界上著名的生产高性能、低功耗、非易失性存储器和各种数字模拟 IC 芯片的半导体制造公司。

ATMEL 公司的单片机是目前世界上一种独具特色而性能卓越的单片机, 它在计算机外部设备、通信设备、自动化工业控制、宇航设备、仪器仪表和各种消费类产品中都有着广泛的应用前景。该公司的单片机主要有基于 8051 内核、AVR 内核和 ARM 内核的三大系列产品。ATMEL 公司最令人注目的是它的 EEPROM 电可擦除技术、闪速 Flash 存储器技术、高可靠性的生产技术。在 COMS 器件生产领域中, ATMEL 的先进设计水平、优秀的生产工艺及封闭技术一直处于世界的领先地位。ATMEL 公司在其单片机产品中融入了先进的 EEPROM 电可擦除和 Flash ROM 存储器技术, 使其单片机产品具备了优秀的品质, 在结构、性能的功能等方面都具有明显的优势。

1. AT89 系列单片机简介

ATMEL 公司拥有广泛的基于 8051 内核的微控制器, 这些微处理器统称 AT89 系列。ATMEL 公司将 8051 内核与其先进的 Flash 存储器技术相结合, 是国际上最早推出片内集成可重复擦写 1000 次以上的 Flash ROM, 以及采用低功耗 CMOS 工艺的 8051 兼容单片机的生产商之一。

1) AT89 系列单片机的特点

(1) 片内包含 Flash 存储器: AT89 系列单片机的片内包含 Flash 存储器, 使用户在系统开发过程中可以很容易地修改程序, 从而大大缩短了系统的开发周期。同时, 在系统工作过

程中可以有效地保存一些数据信息,即使系统突然断电,保存在系统中的信息也不会丢失。

(2) 与 8051 单片机兼容: AT89 系列单片机的引脚定义与 8051 单片机的引脚定义完全相同,因此用户可以直接在 AT89 系列中选择合适的型号及封装形式的单片机来代替所使用的 8051 单片机。

(3) 静态时钟方式: AT89 系列单片机采用静态时钟方式,可以节省电能,从而使得在许多便携式的产品中都可以使用该系列的单片机。

(4) 可重复擦写程序: 早期的单片机一般为一次性用户可编程(即 OPT),若用户将错误的程序烧录到单片机后,该单片机就会变成废品,或者当用户更改系统功能时,必须将修改好的程序烧录到另一块单片机中,这样会给用户带来不便。

AT89 系列单片机由于片内采用了 Flash 存储器,所以允许用户多次将程序烧录在同一块单片机芯片中。这样,即使用户将错误程序烧录到单片机中也不用担心了,用户可以重新编程,直到正确为止,不存在废品。若系统升级或更改系统功能时,用户可以反复进行系统试验,且每次均可以将编写好的程序重新烧录到单片机中,从而可保证用户的系统设计达到最优。

2) AT89 系列单片机的命名规则 AT89 系列单片机目前有多种型号,分别为 AT89C1051,AT89C2051,AT89C4051,AT89C51,AT89LV51,AT89C52,AT89LV52,AT89S8252,AT89C55,AT89LV55,AT89S51,AT89LS51,AT89S52,AT89LS52,AT89S53,AT89LS53 等。

尽管 AT89 系列单片机型号较多,但是这些单片机的命名均遵循一定的规律。AT89 系列单片机的型号命名由三部分组成,即前缀、型号和后缀。现以 AT89CXXXXXXXX 为例讲述其命名方法。

(1) 前缀:“AT”为前缀,表示该器件是 ATMEL 公司的产品。

(2) 型号: 型号可用“89CXXXX”,“89LVXXXX”,“89SXXXX”或“89LSXXXX”等表示。在型号中“9”表示内部包含 Flash 存储器;“C”表示 CMOS 产品;“LV”表示低电压产品;“S”表示具有 ISP 在线编程技术的产品;“LS”表示具有 ISP 在线编程技术的低电压产品。在“XXXX”中,第一个“5”表示内核为 8051,该“5”后面的数字可认为是该产品存储器容量的大小(“1”表示片内 RAM 为 128B(B 表示字节),片内 ROM 为 4KB Flash;“2”表示片内 RAM 为 256B,片内 ROM 为 8KB Flash;“3”表示片内 RAM 为 256B,片内 ROM 为 12KB Flash;“5”表示片内 RAM 为 256B,片内 ROM 为 20KB Flash)。例如,AT89S51 的片内 RAM 为 128B,片内 ROM 为 4KB Flash;AT89S8252 的片内 RAM 为 256B,片内 ROM 为 8KB Flash。

(3) 后缀: 由“XXXX”四个参数组成,每个参数表示的意义不同。型号与后缀部分用“-”隔开。

后缀中的第一个参数“X”表示速度: X=12,表示速度为 12MHz; X=16,表示速度为 16MHz; X=20,表示速度为 20MHz; X=24,表示速度为 24MHz。

后缀中的第二个参数“X”表示封装形式: X=D,表示陶瓷封装; X=Q,表示 PQFP (Plastic Quad Flat Package 的缩写,即塑料方块平面封装)封装; X=J,表示 PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier 的缩写,即塑封 J 引线芯片封装)封装; X=A,表示 TQFP (Thin Quad Flat Package 的缩写,即薄型四方扁平封装)封装; X=P,表示 DIP (Dual In-line Package 的缩写,即双直列直插式封装)封装; X=W,表示裸芯片; X=S,表示 SOIC (Small Outline Integrated Circuit Package 的缩写,即小外形集成电路封装)封装。

后缀中的第三个参数“X”表示温度范围: X=C,表示商业用产品,温度范围为 0~

+70℃；X=I，表示工业用产品，温度范围为-40~+85℃；X=A，表示汽车用产品，温度范围为-40~+125℃；X=M，表示军用产品，温度范围为-55~+150℃；

后缀中的第四个参数“X”用于说明产品的处理情况：X 为空，表示处理工艺是标准工艺；X=883，表示处理工艺采用的是 MIL-STD-883 标准。

2. AVR 单片机简介

基于 8051 内核的微控制器采用了复杂指令系统 CISC (Complex Instruction Set Computing) 体系。CISC 结构的单片机是传统的冯·诺依曼 (Von-Neumann) 结构，这种结构又称普林斯顿 (Princeton) 体系结构。其片内程序空间和数据空间合在一起，取指令和操作数都是通过同一簇总线分时进行的，当高速运算时，取指令和操作数不能同时进行，还会造成传输通道上的瓶颈现象。

1997 年，ATMEL 公司挪威设计中心的 A 先生和 V 先生出于市场需求的考虑，推出了增强型内置 Flash 的 8 位精简指令集微处理器 (RISC, Reduced Instruction Set CPU)，命名为 AVR。

RISC 结构的 AVR 单片机是新型的哈佛 (Harvard) 结构，采用了双总线结构。AVR 单片机的快速存取寄存器文件由 32 个通用寄存器组成。传统的基于累加器的结构需要大量的程序代码，以实现累加器的存储器之间的数据传送。在 AVR 单片机中，32 个寄存器全部直接与运算逻辑单元 (ALU) 相连，每个通用工作寄存器都代替了累加器。这样，使微处理器在前一条指令执行时，就取出现行的指令，从而可以避免传统 CISC 单片机的累加器和存储器之间传送数据时的瓶颈现象，提高了系统性能。

1) AVR 单片机的特点

(1) 片内含高质量的 Flash 程序存储器，并具有高保密性。AVR 单片机内嵌高质量的 Flash 程序存储器，擦写方便，支持 ISP 和 IAP，便于产品的调试、开发、生产、更新；片内含有长寿命的 EEPROM，可长期保存关键数据，避免断电丢失；片内大容量的 RAM 不仅能满足一般场合的使用，同时也更有效地支持使用高级语言开发系统程序，并可像 MCS-51 单片机那样扩展外部 RAM。

Flash 程序存储器具有保密锁死 (Lock) 功能，并且深藏于芯片内部，可以通过自编程 (Self Programming) 方式远程下载被加密的更新代码。

(2) 具有真正的 I/O 端口，能正确反映 I/O 端口的输入/输出真实情况。AVR 单片机通用数字 I/O 端口的输入/输出特性与 PIC 单片机的 HI/LOW 输出及三态高阻抗 HI-Z 输入相似，同时可设定类似于 8051 单片机内部有上拉电阻的输入端功能。AVR 的 I/O 端口资源灵活、功能强大，可以单独设定为输入/输出、也可以设定 (初始) 高阻输入，具有驱动能力强 (可省去功率驱动器件) 等特性。

(3) 高速度、低功耗，具有 SLEEP (省电休眠) 功能。AVR 单片机一条指令的执行速度可达 50ns (20MHz)，而耗电则在 1μA~2.5mA 之间。由于它采用新型的哈佛 (Harvard) 结构，具有一级流水线的预取指令功能，即对程序的读取和数据的操作使用不同的数据总线，所以当执行某一指令时，下一指令会被预先从程序存储器中取出，使得指令可以在每一个时钟周期内被执行。AVR 单片机具有多种省电休眠模式，且可宽电压运行 (2.7~5.5V)，抗干扰能力强，可降低一般 8 位机中的软件抗干扰设计工作量和硬件的使用量。AVR 单片机具有 6 种休眠功能，能够从低功耗模式迅速唤醒。

(4) 具有多种独立的时钟分频器。AVR 单片机片内具备多种独立的时钟分频器, 分别供 URAT、I2C、SPI 使用。其中与 8/16 位定时器配合的单片机具有多达 10 位的预分频器, 可通过软件设定分频系数以提供多种挡次的定时时间。AVR 单片机中的定时器/计数器(单)可双向计数形成三角波, 再与输出比较匹配寄存器配合, 生成占空比可变、频率可变、相位可变的方波, 该设计方法(即脉宽调制输出 PWM)令人耳目一新。

(5) 定位于工业级产品。AVR 单片机具有大电流 10~20mA(输出电流)或 40mA(吸收电流), 可直接驱动 LED、SSR 或继电器; 具有看门狗定时器(WDT)安全保护功能, 可防止程序跑飞, 以提高产品的抗干扰能力。

(6) 具有超功能精简指令。AVR 单片机具有 32 个通用工作寄存器, 相当于 8051 单片机中的 32 个累加器, 克服了由单一累加器数据处理造成的瓶颈现象; 片内含有 128B~8KB 个 SRAM, 可灵活使用指令运算, 适合用 C 语言进行程序开发, 易学、易写、易移植, 并且具有很高的代码效率。

(7) 通信方便、快捷、可靠, 支持多机通信。其增强性的高速同/异步串口, 具有硬件产生校验码、硬件检测和校验帧错、两级接收缓冲、波特率自动调整定位(接收时)、屏蔽数据帧等功能, 提高了通信的可靠性, 方便了程序的编写, 更便于组成分布式网络和实现多机通信系统的复杂应用。其串口功能大大超过 MCS-51/96 单片机的串口功能, 加上 AVR 单片机能高速运行, 中断服务时间短, 因此可实现高波特率通信。

具有面向字节的高速硬件串行接口 TWI、SPI。TWI 与 I²C 接口兼容, 具备 ACK 信号硬件发送与识别、地址识别、总线仲裁等功能, 能实现主/从机的收/发的全部 4 种组合的多机通信。SPI 支持主/从机的 4 种组合的多机通信。

(8) 增强了嵌入式系统的可靠性。AVR 单片机有自动上电复位电路、独立的看门狗电路、低电压检测电路 BOD, 多个复位源(自动上下电复位、外部复位、看门狗复位、BOD 复位), 可设置的启动后延时运行程序, 从而增强了嵌入式系统的可靠性。

AVR 单片机技术集多种器件(包括 FLASH 程序存储器、看门狗、EEPROM、同/异步串行口、TWI、SPI、A/D 模数转换器、定时器/计数器等)和多种功能(增强可靠性的复位系统、降低功耗抗干扰的休眠模式、品种多门类全的中断系统、具有输入捕获和比较匹配输出等多样化功能的定时器/计数器、具有替换功能的 I/O 端口……)于一身, 充分体现了单片机技术从“片自为战”向“片上系统 SoC”过渡的发展方向。

2) AVR 单片机的分类及性能 AVR 单片机系列齐全, 适用于各种不同场合。它主要有低档的 Tiny 系列、中档的 AT90 系列和高档的 ATmega 系列的产品。

(1) 低档的 Tiny 系列: 低档的 Tiny 系列 AVR 单片机是专门为需要小型微控制的简单应用优化设计的, 具有很高的性价比, 主要有 8 个引脚的 Tiny11/12/13/15/45/85、14 个引脚的 Tiny24/44/84、20 个引脚的 Tiny26/261/461/861/2313 等。

(2) 中档的 AT90 系列: 中档的 AT90 系列 AVR 单片机主要有 20 个引脚的 AT90S1200/2313/2323/2343、28 个引脚的 AT90S4433、40 个引脚的 AT90S4414/4434/8515/8535 等。

(3) 高档的 ATmega 系列: 高档的 ATmega 系列 AVR 单片机主要有 28 个引脚的 ATmega8/48/88/168、40 个引脚的 ATmega16/32/162/644/8535、64 个引脚的 ATmega128/165/325/64/645/1281/2561、100 个引脚的 ATmega3250/6450/640/1280/2560 等。

AVR 单片机从 8 引脚到 100 引脚, 还有各种不同封装供用户选择, 表 1-1~表 1-3 列出了目前主流 AVR 单片机的各系列的性能参数。

表 1-1 Tiny 系列 AVR 单片机的性能

型号	Flash/ KB	EEP- ROM/ B	SRAM /B	最大 I/O 数	系统 时钟 MHz	电压 范围/V	8 位 定 时 器	16 位 定 时 器	PWM	SPI	US- ART	TWI	在 线 编 程 ISP	10 位 A/D 通道	模 拟 比 较 器	看 门 狗 器	片 内 振 荡 器	中 断 数	外部 中 断 数	自 编 程	普通封装 形式	绿色封装形式
Tiny11	1	-	-	6	6	2.7~5.5	1	-	-	-	-	-	有	-	有	有	有	4	1	-	PDIP8,SOIC8	PDIP8,SOIC8
Tiny12	1	64	-	6	8	1.8~5.5	1	-	-	-	-	-	有	-	有	有	有	5	1	-	PDIP8,SOIC8	PDIP8,SOIC8
Tiny13	1	64	64	6	20	1.8~5.5	1	-	2	-	-	-	有	4	有	有	有	9	6	有	PDIP8,SOIC8 、 SSOIC8,MLF20	PDIP8,SOIC8, SSOIC8,MLF20
Tiny15L	1	64	-	6	1.6	2.7~5.5	2	-	1	-	-	-	有	4	有	有	有	8	1	-	PDIP8,SOIC8	
Tiny25	2	128	128	6	20	1.8~5.5	2	-	4	USI	-	USI	有	4	有	有	有	15	7	有		PDIP8,SOIC8, MLF20
Tiny45	4	256	256	6	20	1.8~5.5	2	-	4	USI	-	USI	有	4	有	有	有	15	7	有		PDIP8,SOIC8, MLF20
Tiny85	8	512	512	6	20	1.8~5.5	2	-	4	USI	-	USI	有	4	有	有	有	15	7	有		PDIP8,SOIC8, MLF20
Tiny28L	2	-	-	11	4	1.8~5.5	1	-	-	-	-	-	有	-	有	有	有	5	2	-	PDIP28,MLF32,TQFP32	PDIP28,MLF32, TQFP32
Tiny24	2	128	128	12	20	1.8~5.5	1	1	4	USI	-	USI	有	8	有	有	有	17	12	有		PDIP14,SOIC14, MLF20
Tiny44	4	256	256	12	20	1.8~5.5	1	1	4	USI	-	USI	有	8	有	有	有	17	12	有		PDIP14,SOIC14, MLF20
Tiny84	8	512	512	12	20	1.8~5.5	1	1	4	USI	-	USI	有	8	有	有	有	17	12	有		PDIP14,MLF20
Tiny26	2	128	128	16	16	2.7~5.5	2	-	2	USI	-	USI	有	11	有	有	有	11	1	-	PDIP20,MLF32,SOIC20	PDIP20,MLF32, SOIC20
Tiny261	2	128	128	16	20	1.8~5.5	1	1	5	USI	-	USI	有	11	有	有	有	19	18	有		PDIP20,MLF32, SOIC20
Tiny461	4	256	256	16	20	1.8~5.5	1	1	5	USI	-	USI	有	11	有	有	有	19	18	有		PDIP20,MLF32, SOIC20
Tiny861	8	512	512	16	20	1.8~5.5	1	1	5	USI	-	USI	有	11	有	有	有	19	18	有		PDIP20,MLF32, SOIC20
Tiny2313	2	128	128	18	20	1.8~5.5	1	1	4	USI	1	USI	有	-	有	有	有	8	2	有	PDIP20,MLF20,SOIC20	PDIP20,MLF20, SOIC20

表 1-2 ATmega 系列 AVR 单片机的性能

型号	Flash/ KB	EEP- ROM/ B	SRA M/B	最大 I/O 数	系统 时钟 MHz	电压 范围/V	8 位 定 时 器	16 位 定 时 器	PWM	SPI	US- ART	TWI	在 线 编 程 ISP	10 位 A/D 通道	模 拟 比 较 器	看 门 狗 器	片 内 振 荡 器	中 断 数	外部 中 断 数	自 编 程	普通封装 形式	绿色封装形式
ATmega 48	4	256	512	23	20	1.8~5.5	2	1	6	1+US ART	1	有	有	8	有	有	有	26	26	有	PDIP28,MLF32,TQFP32	PDIP28,MLF32,TQFP32
ATmega 8	8	512	1024	23	16	2.7~5.5	2	1	3	1	1	有	有	8	有	有	有	18	2	有	PDIP28,MLF32,TQFP32	PDIP28,MLF32,TQFP32
ATmega 88	8	512	1024	23	20	1.8~5.5	2	1	6	1+US ART	1	有	有	8	有	有	有	26	26	有	PDIP28,MLF32,TQFP32	PDIP28,MLF32,TQFP32

续表

型号	Flash/ KB	EEP- ROM/ B	SRA M/B	最大 I/O 数	系统 时钟 MHz	电压 范围/V	8 位 定 时 器	16 位 定 时 器	PWM	SPI	US- ART	TWI	在 线 编 程 ISP	10 位 A/D 通 道	模 拟 比 较 器	片 内 振 荡 器	中 断 数	外 部 中 断 数	自 编 程	普通封装 形式	绿色封装 形式	
ATmega 168	16	512	1024	23	20	1.8~5.5	2	1	6	1+US ART	1	有	有	8	有	有	有	26	26	有	PDIP28,MLF 32,TQFP32	PDIP28,MLF 32,TQFP32
ATmega 8535	8	512	512	32	16	2.7~5.5	2	1	4	1	1	有	有	8	有	有	有	20	3	有	PDIP40,MLF 44,TQFP44, PLCC44	PDIP40,MLF 44,TQFP44
ATmega 16	16	512	1024	32	16	2.7~5.5	2	1	4	1	1	有	有	8	有	有	有	20	3	有	PDIP40,MLF 44,TQFP44	PDIP40,MLF 44,TQFP44
ATmega 32	32	1K	2048	32	16	2.7~5.5	2	1	4	1	1	有	有	8	有	有	有	19	3	有	PDIP40,MLF 44,TQFP44	PDIP40,MLF 44,TQFP44
ATmega 644	64	2K	4096	32	20	1.8~5.5	2	1	6	1+US ART	1	有	有	8	有	有	有	31	32	有		PDIP40,MLF 44,TQFP44
ATmega 8515	8	512	512	35	16	2.7~5.5	1	1	3	1	1	-	有	-	-	有	有	16	3	有	PDIP40,MLF 44,TQFP44, PLCC44	PDIP40,MLF 44,TQFP44
ATmega 162	16	512	1024	35	16	1.8~5.5	2	2	6	1	2	-	有	-	有	有	有	28	3	有	PDIP40,MLF 44,TQFP44	PDIP40,MLF 44,TQFP44
ATmega 128	128	4K	4096	53	16	2.7~5.5	2	2	8	1	2	有	有	8	有	有	有	34	8	有	MLF64, TQFP64	MLF64, TQFP64
ATmega 165	16	512	1024	54	16	1.8~5.5	2	1	4	1+US I	1	USI	有	8	有	有	有	23	17	有	MLF64, TQFP64	MLF64, TQFP64
ATmega 325	32	1K	2048	54	16	1.8~5.5	2	1	4	1+US I	1	USI	有	8	有	有	有	23	17	有	MLF64, TQFP64	MLF64, TQFP64
ATmega 64	64	2K	4096	54	16	2.7~5.5	2	2	8	1	2	有	有	8	有	有	有	34	8	有	MLF64, TQFP64	MLF64, TQFP64
ATmega 645	64	2K	4096	54	16	1.8~5.5	2	1	4	1+US I	1	USI	有	8	有	有	有	23	17	有	MLF64, TQFP64	MLF64, TQFP64
ATmega 1281	128	4K	8192	54	16	1.8~5.5	2	4	10	1+US ART	2	有	有	8	有	有	有	48	17	有	-	MLF64, TQFP64
ATmega 2561	256	4K	8192	54	16	1.8~5.5	2	4	10	1+US ART	2	有	有	8	有	有	有	48	17	有	-	MLF64, TQFP64
ATmega 3250	32	1K	2048	69	16	1.8~5.5	2	1	4	1+US I	1	USI	有	8	有	有	有	32	17	有	TQFP100	TQFP100
ATmega 6450	64	2K	4096	69	16	1.8~5.5	2	1	4	1+US I	1	USI	有	8	有	有	有	32	17	有	TQFP100	TQFP100
ATmega 640	64	4K	8192	86	16	1.8~5.5	2	4	16	1+US ART	4	有	有	16	有	有	有	57	32	有	-	TQFP100, BGA100
ATmega 1280	128	4K	8192	86	16	1.8~5.5	2	4	16	1+US ART	4	有	有	16	有	有	有	57	32	有	-	TQFP100, BGA100
ATmega 2560	256	4K	8192	86	16	1.8~5.5	2	4	16	1+US ART	4	有	有	16	有	有	有	57	32	有	-	TQFP100, BGA100

表 1-3 其他系列 AVR 单片机的性能

型号	Flash/ KB	EEP RO M/B	SRA M/B	最大 I/O 数	系统 时钟 MHz	电压 范围/V	特殊 特征	8 位 定 时 器	16 位 定 时 器	PWM	SPI	US- ART	TWI	在 线 编 程 ISP	10 位 A/D 通 道	模 拟 比 较 器	片 内 门 狗 器	中 断 数	外 部 中 断 数	自 编 程	绿色封装形式	
ATmega48P	4	256	512	23	16	1.8~5.5		2	1	6	1+US ART	1	有	有	8	有	有	有	26	26	有	MLF32,TQFP32
ATmega88P	8	512	512	23	16	1.8~5.5		2	1	6	1+US ART	1	有	有	8	有	有	有	26	26	有	MLF32,TQFP32
ATmega168P	16	1K	1024	23	16	1.8~5.5		2	1	6	1+US ART	1	有	有	8	有	有	有	26	26	有	MLF32,TQFP32
ATmega164P	16	512	1024	32	20	1.8~5.5		2	1	6	1+US ART	2	有	有	8	有	有	有	31	32	有	PDIP40,MLF44, TQFP44
ATmega324P	32	1K	2048	32	20	1.8~5.5		2	1	6	1+US ART	2	有	有	8	有	有	有	31	32	有	PDIP40,MLF44, TQFP44
ATmega644P	64	2K	4096	32	20	1.8~5.5		2	1	6	1+US ART	2	有	有	8	有	有	有	31	32	有	PDIP40,MLF44, TQFP44
ATmega165P	16	512	1024	54	16	1.8~5.5		2	1	4	1+USI	1	USI	有	8	有	有	有	23	17	有	MLF64,TQFP64
ATmega325P	32	1K	2048	54	16	1.8~5.5		2	1	4	1+USI	1	USI	有	8	有	有	有	23	17	有	MLF64,TQFP64
ATmega3250P	32	1K	2048	69	16	1.8~5.5		2	1	4	1+USI	1	USI	有	8	有	有	有	32	17	有	TQFP100
ATmega169P	16	512	1024	54	16	1.8~5.5	LCD 4×25	2	1	4	1+USI	1	USI	有	8	有	有	有	23	17	有	MLF64,TQFP64
ATmega329P	32	1K	2048	54	16	1.8~5.5	LCD 4×25	2	1	4	1+USI	1	USI	有	8	有	有	有	25	17	有	MLF64,TQFP64
ATmega3290P	32	1K	2048	69	16	1.8~5.5	LCD 4×40	2	1	4	1+USI	1	USI	有	8	有	有	有	25	32	有	TQFP100

自 2002 年以来，ATMEL 公司对 AVR 单片机产品线进行了调整，逐步停止了性能重叠的中档低功耗 AVR 单片机中 AT90 系列的单片机的生产。目前，AT90 系列某些型号的单片机已经被性能更加优越的 Tiny 系列或 ATmega 系列相应的 AVR 单片机替代（如表 1-4 所示），因此在实际开发中建议不要再使用该系统。

表 1-4 替代的 AVR 单片机

原来的型号	可更换的新型号	原来的型号	可更换的新型号
AT90LS4433	ATmega81	AT90LS8535	ATmega8535
AT90S1200	Tiny2313	AT90S2313	Tiny2313
AT90S4433	ATmega8	AT90S8515	ATmega8515
AT90S8535	ATmega8535	ATmega103	ATmega128
ATmega161	ATmega162	ATmega103L	ATmega128L
ATmega161L	ATmega162L	ATmega323	ATmega32
ATmega163	ATmega16	ATmega323L	ATmega32L
ATmega163L	ATmega16L		

3) AVR 单片机的命名规则 下面以 ATmega48V-10A 为例, 讲述 AVR 单片机型号的命名规则。ATmega48V-10A 型号标识说明如下。

(1) “V” 代表低/宽电压版本。对于新出的 AVR (如 ATmega48/88/168, Tiny13/2313 等) 产品来说, 带“V”表示工作电压为 1.8~5.5V; 不带“V”表示工作电压为 2.7~5.5V。对于一些较老型号的 AVR 的单片机而言, 用“L”来表示电压。“L”是“Low”的缩写, 带“L”表示它可以支持低电压, 其支持的电压范围为 2.7~5.5V; 不带“L”的则表示其支持电压范围为 4.5~5.5V。

(2) 后缀的数字部分代表单片机可以支持的最高系统时钟, 如 ATmega48V-10A 指的是可以支持到 10MHz 的系统时钟。ATmega64-16AU 及 ATmega64-16AI 指的是可以支持到 16MHz 的系统时钟。

(3) 后缀的第一个字母代表单片机的封装形式, 其中“P”表示 DIP 封装; “A”表示 TQFP 封装; “S”表示 SOIC 封装; “M”表示 MLF 封装。例如, ATmega48V-10A 为 TQFP 封装。

(4) 后缀的第二个字母代表单片机的应用级别, 其中“C”表示商业级; “I”表示工业级; “A”表示汽车级; “E”表示扩展级 (温度范围为 -40~105℃); “U”表示工业级, 符合 ROHS。例如, ATmega64L-8AC 带“C”表示它为商业级, ATmega64L-8AI 带“I”表示它为工业级。需要说明的是, 由于现欧美要求使用无铅 IC, 所以 ATMEL 未来将只推出带“U”的 AVR MCU, 它将取代原来带“I”的型号, 如 ATmge8L-8AU 将取代原来的 ATmega64L-8AI。

1.2 AVR 单片机与 C 语言的关系

1. AVR 单片机为什么采用 C 语言编程

单片机以其体积小, 质量轻, 成本低, 功耗低等特点广泛应用于各个领域。C 语言作为一种简捷、高效的编译型高级语言, 具备可读性好, 可靠性高, 运算速度快, 编译效率高, 可移植性好, 有功能丰富的函数库等特点, 并且可以直接实现对系统硬件的控制。

当前, 许多单片机硬件开发人员纷纷舍弃了汇编语言, 而改用单片机 C 语言进行系统编程。汇编语言有执行效率高的优点, 但其可移植性和可读性差, 而且它本身就是一种编程效率低下的低级语言, 这些都使它的编程和维护极不方便, 从而导致整个系统的可靠性也较差。而使用 C 语言进行嵌入式系统的开发, 有着汇编语言编程不可比拟的优势, 如下所示。

1) 编程、调试灵活方便 C 语言作为高级语言的特点决定了它灵活的编程方式。它具有丰富的数据结构类型, 可以根据需要采用整型、实型 (又称浮点型)、字符型、数组类型、指针类型、结构类型、联合类型、枚举类型等多种数据类型实现各种复杂数据结构的运算。C 语言的语法规则不太严格, 程序设计的自由度较大, 程序的书写格式自由灵活。同时, 当前几乎所有系列的嵌入式系统都有相应的 C 语言级别的仿真调试系统, 使得它的调试环境十分方便。

2) 生成的代码编译效率高 过去长期困扰人们的所谓“高级语言产生代码太长, 运行速度太慢, 因此不适合单片机使用”的缺点经过多家公司艰苦不懈的努力, 已被大幅度地克服, 并终于在 20 世纪 90 年代开始趋于成熟, 现它已成为专业化的单片机高级语言了。目前, 单片机上的 C 语言的代码长度已经做到了汇编水平的 1.2~1.5 倍。对于代码长度在

4KB 以上的程序, C 语言的优势更能得到发挥。至于执行速度, 只要在好的仿真器的帮助下找出关键代码, 再进一步用人工优化, 就可很简单地达到十分满意的程度。

3) 完全模块化 C 语言以函数作为程序设计的基本单位, 一种功能由一个函数模块完成, 这相当于汇编语言中的子程序。其数据交换可方便地约定实现, 这样十分有利于多人协同进行大系统项目的合作开发; 同时, 由于 C 语言的模块化开发方式, 使得用它开发的程序模块可不经修改地被其他项目所用, 所以可以很好地利用现成的大量 C 程序资源与丰富的库函数, 从而最大程度地实现了资源共享。

4) 可移植性好 由于不同系列的嵌入式系统 C 语言编译工具都是以 1983 年的 ANSI-C 作为基础进行开发的, 所以在一种 C 语言环境下所编写的 C 语言程序, 只需对其部分与硬件相关的地方进行适度修改, 就可方便地移植到另外一种系列上。对于许多单片机开发人员来说, 以前大都是使用汇编语言或 C51 进行 8051 单片机的系统开发的, 若突然改用 AVR 单片机, 由于 AVR 单片机也有一套汇编指令集, 所以如果再学 AVR 汇编指令集需要花费大量的时间, 但如果采用 C 语言进行 AVR 单片机编程, 只需将在 C51 下编写的程序的头文件改写一下, 同时做少量的程序修改, 便可方便地移植到 AVR 系列上。也就是说, 基于 C 语言环境下的嵌入式系统能基本达到平台的无关性。

5) 便于项目维护管理 用 C 语言开发的代码便于开发小组计划项目、灵活管理、分工合作、后期维护, 基本上可以杜绝因开发人员变化而给项目进度或后期维护或升级所带来的影响, 从而保证了整个系统的高品质、可靠性及可升级性。

6) 可以直接操作单片机硬件 C 语言具有直接访问单片机物理的能力, 可以直接访问片内或片外存储器。若突然改用 AVR 单片机, 程序开发人员在并不完全懂得 AVR 单片机的具体硬件的情况下, 也能编出符合硬件实际专业水平的程序来。

2. AVR 单片机的 C 编译器简介

AVR 单片机既可以采用汇编语言开发, 也可以采用 C 语言开发。有很多第三方厂商为其开发了用于程序开发的 C 编译器, 常用的编译器有 AVR Studio, GCCAVR (WinAVR), ICCAVR, CodeVisionAVR, VMLAB, BASCOM-AVR 等。国内使用较多的为 ICCAVR, GCCAVR, CodeVisionAVR (简称 CVAVR)、IARAVR。

AVR Studio 是 ATMEL 公司专门针对 AVR 单片机开发的汇编级开发调试软件, 它集软硬件仿真、调试、下载于一体, 包含 AVR Assembler 编译器, 具有 AVR Studio 调试功能、AVR Prog 串行、并行下载功能和 JTAG ICE 仿真功能。

GCCAVR 是 Linux 的唯一开发语言, 就嵌入系统应用来说, 几乎所有市面上有一定市场份额的 8bit 以上 MCU 都有爱好者移植 GCC 在其上。GCC 的编译器优化程度可以说是目前世界上民用软件中做得最好的。它完全用 ANSIC 规范写出了超过一万行代码的程序。目前还没有任何一种编译器产生目标代码的速度能比 GCC 产生代码的速度更快, 而且它的 bug 数量也可以算所有民用 C 编译器中最少的。就 8bit 开发而言, GCC 有一个很严重的缺陷, 就是不支持 float 数据类型, 实际上 GCC 在所有环境中都把 float 直接定义为 double, 这样对 8bit 环境来说, 就显得负担过重了。

目前, GCCAVR 有两个平台: WinAVR 和 ATmanAVR。被移植到 Windows 平台上, 整合了各个组件后的 Windows 版 GCCAVR 就是 WinAVR。它不是 IDE (Integrated Development Environment, 集成开发环境), 自己定制 IDE 时需要用到 makefile。makefile 的重要作用是指定所用的单片机类型, 指定编译的文件, 设定编译优化条件等。ATmanAVR