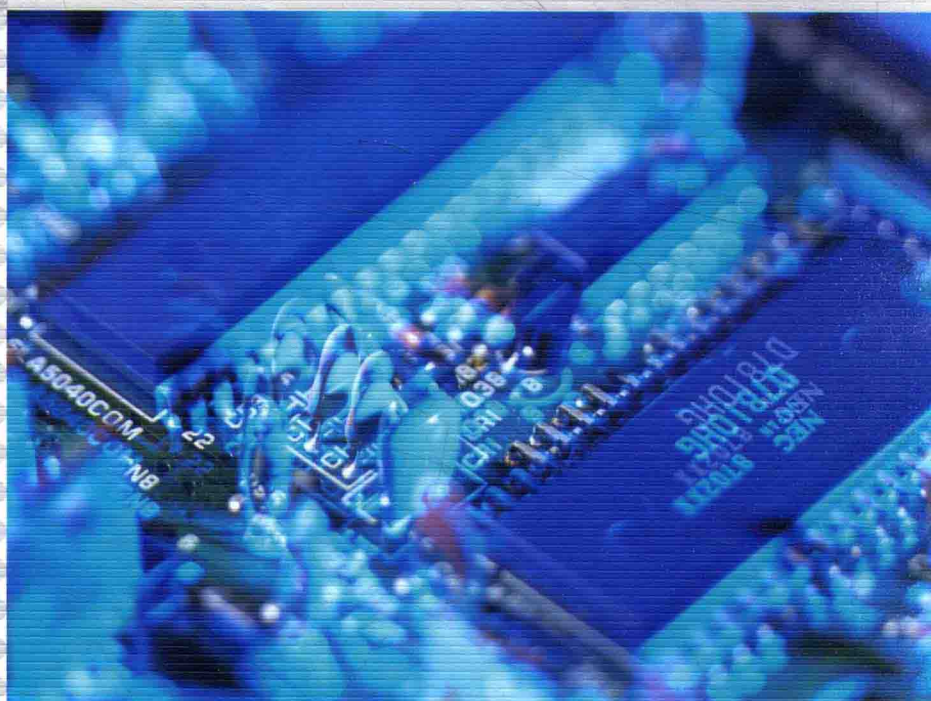


单片机技术视频大课堂

AVR单片机 C语言轻松学

(配视频教程)

严雨 李佳 秦文海 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

单片机技术视频大课堂

AVR 单片机 C 语言轻松学（配视频教程）

严 雨 李 佳 秦文海 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

ATmega16 是 ATMEL 公司研发的增强型内置 FLASH 的 RISC (Reduced Instruction Set CPU) 精简指令集高速 8 位单片机, 具有体积小、功能强、价格低的特点, 在工业控制、数据采集、智能仪表、机电一体化、家用电器等领域有着广泛的应用, 其应用可以大大提高生产、生活的自动化水平。

本书分为 ATmega16 单片机基础知识、ATmega16 单片机模块应用以及 ATmega16 单片机的应用系统三大部分。本书具有基础内容丰富、循序渐进、由浅入深的特点, 涉及了 ATmega16 单片机从硬件模块基础到软件设计各个方面的知识的特点, 并且基于 Proteus 硬件仿真环境提供了大量的仿真实例, 还提供了 17 个详细讲解的视频供读者深入理解 ATmega16 单片机的使用。

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

AVR 单片机 C 语言轻松学: 配视频教程/严雨, 李佳, 秦文海编著. —北京: 电子工业出版社, 2015. 11
(单片机技术视频大课堂)

ISBN 978 - 7 - 121 - 27372 - 8

I. ①A… II. ①严… ②李… ③秦… III. ①单片微型计算机 - C 语言 - 程序设计 IV. ①TP368. 1
②TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 239470 号

策划编辑: 王敬栋

责任编辑: 底 波

印 刷: 北京京科印刷有限公司

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

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: 19.25 字数: 492.8 千字

版 次: 2015 年 11 月第 1 版

印 次: 2015 年 11 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 58.00 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 zltz@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

行业背景

ATmega16 是 ATMEL 公司研发的增强型内置 FLASH 的 RISC (Reduced Instruction Set CPU) 精简指令集高速 8 位单片机 (AVR, 其得名于设计师 A 先生和 V 先生), 具有体积小、功能强、价格低的特点, 在工业控制、数据采集、智能仪表、机电一体化、家用电器等领域有着广泛的应用, 其应用可以大大提高生产、生活的自动化水平。

关于本书

本书基于 ICCAVR 集成开发环境和 Proteus 硬件仿真环境分章节介绍了 ATmega16 单片机的基础构成、内部资源以及外部器件的使用方法, 包括其体系结构、C 语言、定时计数器、内部资源以及 LED、独立按键、继电器等外部资源。

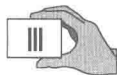
本书提供了 ATmega16 单片机的多个应用实例, 在 Proteus 中读者观察到这些应用实例的仿真执行情况。本书还制作了 17 个和章节内容对应的讲解视频, 以便于读者更好地理解 ATmega16 单片机的使用。

本书分为 ATmega16 单片机基础知识、ATmega16 单片机模块应用以及 ATmega16 单片机的应用系统三大部分。

- ATmega16 单片机基础知识: 第 1 章至第 4 章, 介绍了 AVR 系列单片机的内部结构、C 语言、ICCAVR 集成开发环境的使用方法以及 Proteus 硬件仿真环境的使用方法。
- ATmega16 单片机模块应用: 第 5 章至第 10 章, 介绍了 ATmega16 单片机的外部引脚、外部中断、定时计数器、串口、SPI 和 TWI 接口、模拟比较器和 ADC 模块以及看门狗和内部 E²PROM 的使用方法。
- ATmega16 单片机的应用系统: 第 11 章, 介绍了单引脚扩展多按键、简易电子琴以及商场灯光控制系统三个基于 ATmega16 的实际应用系统。

本书提供的视频内容及其长度说明如下。

- 【视频 1】ICCAVR 的基础使用方法 (32 分钟)。
- 【视频 2】Proteus 的基础使用方法 (30 分钟)。
- 【视频 3】Proteus 中的 ATmega16 (13 分钟)。
- 【视频 4】Proteus 和 ICCAVR 的联合使用 (13 分钟)。
- 【视频 5】ATmega16 的外部引脚和 Proteus 中的示波器使用 (15 分钟)。
- 【视频 6】发光二极管 LED 的应用 (17 分钟)。



- 【视频 7】 单位数码管的应用 (12 分钟)。
- 【视频 8】 按键和行列扫描键盘的应用 (20 分钟)。
- 【视频 9】 ATmega16 的外部中断及其应用 (8 分钟)。
- 【视频 10】 ATmega16 的定时计数器应用 (20 分钟)。
- 【视频 11】 ATmega16 单片机的串口及其应用 (26 分钟)。
- 【视频 12】 ATmega16 单片机的比较器及其应用 (12 分钟)。
- 【视频 13】 ATmega16 单片机的 ADC 及其应用 (20 分钟)。
- 【视频 14】 ATmega16 单片机的看门狗和 E²PROM 的使用方法及其应用 (12 分钟)。
- 【视频 15】 单 I/O 引脚扩展多按键应用系统 (16 分钟)。
- 【视频 16】 简易电子琴应用系统 (24 分钟)。
- 【视频 17】 商场灯光控制系统 (25 分钟)。

本书特色

- 基础内容丰富、循序渐进、由浅入深, 涉及了 ATmega16 单片机从硬件模块基础到软件设计各个方面的知识。
- 基于 Proteus 硬件仿真环境提供了大量仿真实例。
- 提供了 17 个详细讲解的视频供读者深入理解 ATmega16 单片机的使用。

作者介绍

本书由严雨、李佳、秦文海编著。参与本书编写的还有李若谷、刘洋洋、王闯、严安国、何世兰、姚宗旭、葛祥磊、徐慧超、张玉梅、夏宁和韩敏等人。在此, 对以上人员致以诚挚的谢意。由于时间仓促, 程序较多, 受学识水平所限, 错误之处在所难免, 请广大读者给予批评指正。



目 录

| | | |
|------------|------------------------------|----|
| 第1章 | ATmega16 单片机基础 | 1 |
| 1.1 | AVR 系列单片机 | 1 |
| 1.2 | ATmega16 单片机的特点、硬件结构和封装 | 1 |
| 1.3 | ATmega16 单片机的内核 | 4 |
| 1.3.1 | 算术逻辑单元 ALU | 5 |
| 1.3.2 | 状态寄存器 SREG | 5 |
| 1.3.3 | 通用寄存器 | 5 |
| 1.3.4 | 堆栈 | 6 |
| 1.3.5 | 中断和复位处理模块 | 7 |
| 1.4 | ATmega16 单片机的存储器体系 | 8 |
| 1.4.1 | 程序存储器 | 8 |
| 1.4.2 | 数据存储器 | 8 |
| 1.4.3 | E ² PROM 存储器 | 9 |
| 1.5 | ATmega16 单片机的系统时钟 | 10 |
| 1.5.1 | ATmega16 的系统时钟组成 | 10 |
| 1.5.2 | ATmega16 的时钟源选择 | 11 |
| 1.5.3 | 晶体振荡器 | 11 |
| 1.5.4 | 低频晶体振荡器 | 12 |
| 1.5.5 | 外部 RC 振荡器 | 12 |
| 1.5.6 | 片内 RC 振荡器 | 13 |
| 1.5.7 | 外部时钟源 | 14 |
| 1.6 | ATmega16 单片机的电源管理 | 15 |
| 1.7 | ATmega16 单片机的复位 | 17 |
| 1.7.1 | ATmega16 的复位源 | 17 |
| 1.7.2 | 上电复位 | 18 |
| 1.7.3 | 外部复位 | 19 |
| 1.7.4 | 掉电检测复位 | 19 |
| 1.7.5 | 看门狗复位 | 19 |
| 1.7.6 | ATmega16 的复位控制寄存器 | 20 |
| 1.7.7 | 片内基准电压 | 20 |
| 1.8 | ATmega16 单片机的中断系统 | 21 |
| 第2章 | ATmega16 单片机的指令和 C 语言 | 23 |
| 2.1 | ATmega16 单片机的指令系统 | 23 |



| | | |
|--------------|--|-----------|
| 2.1.1 | ATmega16 单片机的指令集 | 23 |
| 2.1.2 | ATmega16 单片机的寻址方式 | 27 |
| 2.2 | ATmega16 单片机 C 语言的数据类型、运算符和表达式 | 28 |
| 2.2.1 | 常量和变量 | 28 |
| 2.2.2 | 算术运算、赋值、逻辑运算以及关系运算 | 28 |
| 2.2.3 | 自增减、复合和逗号运算 | 29 |
| 2.2.4 | 位运算 | 30 |
| 2.2.5 | 运算的优先级 | 30 |
| 2.3 | ATmega16 单片机 C 语言的结构 | 31 |
| 2.4 | ATmega16 单片机 C 语言的函数 | 32 |
| 2.4.1 | 函数的定义、参数和返回值 | 32 |
| 2.4.2 | 函数的调用 | 32 |
| 2.4.3 | 局部变量和全局变量 | 32 |
| 2.5 | ATmega16 单片机 C 语言的数组和指针 | 33 |
| 2.6 | ATmega16 单片机 C 语言的自构造类型 | 34 |
| 2.6.1 | 结构体 | 34 |
| 2.6.2 | 联合体 | 35 |
| 2.6.3 | 枚举 | 36 |
| 第 3 章 | ATmega16 单片机的 ICC AVR 软件开发环境 | 37 |
| 3.1 | ATmega16 单片机的软件开发环境 | 37 |
| 3.2 | 安装 ICC AVR | 37 |
| 3.3 | ICC AVR 的工作界面 | 39 |
| 3.4 | ICC AVR 的菜单栏和快捷工具栏 | 40 |
| 3.4.1 | ICC AVR 的菜单栏 | 40 |
| 3.4.2 | ICC AVR 的快捷工具栏 | 44 |
| 3.5 | ICC AVR 的扩展关键字 | 45 |
| 3.5.1 | 中断关键字 | 45 |
| 3.5.2 | 非挥发寄存器关键字 | 46 |
| 3.5.3 | 数据段关键字 | 46 |
| 3.6 | ICC AVR 的文件 | 46 |
| 3.6.1 | ICC AVR 的常用文件类型 | 46 |
| 3.6.2 | ICC AVR 的库函数文件 | 47 |
| 3.6.3 | ICC AVR 的启动文件 | 47 |
| 3.7 | “Hello World!”——ICC AVR 的应用实例 | 48 |
| 第 4 章 | ATmega16 单片机的硬件开发和 Proteus 硬件仿真环境 | 52 |
| 4.1 | ATmega16 单片机的硬件系统开发流程和开发工具 | 52 |
| 4.1.1 | ATmega16 单片机的硬件系统开发流程 | 52 |
| 4.1.2 | ATmega16 单片机的硬件开发工具 | 53 |
| 4.2 | Proteus 应用基础 | 54 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.2.1 | Proteus 的界面和支持的文件 | 54 |
| 4.2.2 | Proteus 的菜单 | 56 |
| 4.2.3 | Proteus 的快捷工具栏和工具箱 | 67 |
| 4.3 | Proteus 的使用流程 | 70 |
| 4.4 | Proteus 中的 ATmega16 及其使用 | 70 |
| 4.5 | Proteus 和 ICC AVR 联合使用 | 72 |
| 第5章 | ATmega16 单片机的 I/O 引脚和外部中断 | 78 |
| 5.1 | ATmega16 外部引脚基础使用方法 | 78 |
| 5.1.1 | ATmega16 的 I/O 引脚的结构 | 78 |
| 5.1.2 | ATmega16 的 I/O 引脚配置 | 79 |
| 5.1.3 | ATmega16 的 I/O 引脚电平读取 | 81 |
| 5.1.4 | ATmega16 的 I/O 引脚低功耗处理 | 82 |
| 5.2 | ATmega16 外部引脚的第二功能 | 82 |
| 5.3 | ATmega16 的外部中断 | 86 |
| 5.3.1 | MCU 控制寄存器 (MCUCR) | 86 |
| 5.3.2 | MCU 控制与状态寄存器 (MCUCSR) | 87 |
| 5.3.3 | 通用中断控制寄存器 (GICR) | 87 |
| 5.3.4 | 通用中断标志寄存器 (GIFR) | 88 |
| 5.4 | ATmega16 的 I/O 引脚和中断的应用实例 | 88 |
| 5.4.1 | I/O 引脚输出高低脉冲电平实例 | 88 |
| 5.4.2 | I/O 引脚驱动发光二极管 (LED) 实例 | 92 |
| 5.4.3 | I/O 引脚驱动单位数码管实例 | 98 |
| 5.4.4 | I/O 引脚驱动独立按键实例 | 104 |
| 5.4.5 | I/O 引脚驱动行列键盘实例 | 110 |
| 5.4.6 | 外部中断控制 I/O 引脚输出实例 | 115 |
| 第6章 | ATmega16 单片机的定时计数器 | 119 |
| 6.1 | 定时计数器 T/C0 | 119 |
| 6.1.1 | T/C0 的相关寄存器 | 119 |
| 6.1.2 | T/C0 的工作模式 | 123 |
| 6.2 | 定时计数器 T/C1 | 127 |
| 6.2.1 | T/C1 的相关寄存器 | 127 |
| 6.2.2 | T/C1 的工作模式 | 132 |
| 6.3 | 定时计数器 T/C2 | 137 |
| 6.3.1 | T/C2 的相关寄存器 | 138 |
| 6.3.2 | T/C2 的工作模式 | 141 |
| 6.4 | ATmega16 的定时计数器的应用实例 | 144 |
| 6.4.1 | T/C0 控制 I/O 引脚输出方波 | 144 |
| 6.4.2 | T/C1 控制 I/O 引脚输出 PWM | 147 |
| 6.4.3 | 外部晶体秒定时 | 149 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| 第 7 章 | ATmega16 单片机的串口 | 153 |
| 7.1 | ATmega16 串口的结构 | 153 |
| 7.2 | ATmega16 串口的寄存器 | 154 |
| 7.2.1 | 串口数据寄存器 (UDR) | 154 |
| 7.2.2 | 串口控制和状态寄存器 A (UCSRA) | 154 |
| 7.2.3 | 串口控制和状态寄存器 B (UCSRB) | 155 |
| 7.2.4 | 串口控制和状态寄存器 C (UCSRC) | 156 |
| 7.2.5 | 串口波特率寄存器 (UBRRL 和 UBRRH) | 157 |
| 7.3 | ATmega16 串口的使用方法 | 160 |
| 7.3.1 | 选择 ATmega16 串口的时钟源 | 160 |
| 7.3.2 | 选择 ATmega16 串口的数据帧格式 | 162 |
| 7.3.3 | ATmega16 串口的数据收发 | 163 |
| 7.3.4 | ATmega16 串口的多机通信 | 165 |
| 7.4 | ATmega16 串口的应用实例 | 166 |
| 7.4.1 | ATmega16 串口数据发送 | 166 |
| 7.4.2 | 和 PC 进行串行通信 | 172 |
| 第 8 章 | ATmega16 单片机的 TWI 和 SPI 总线接口 | 178 |
| 8.1 | TWI 总线基础 | 178 |
| 8.1.1 | TWI 总线的数据交互过程 | 178 |
| 8.1.2 | TWI 总线的地址 | 180 |
| 8.2 | TWI 总线模块相关寄存器 | 181 |
| 8.2.1 | 比特率控制寄存器 (TWBR) | 181 |
| 8.2.2 | TWI 控制寄存器 (TWCR) | 181 |
| 8.2.3 | TWI 状态寄存器 (TWSR) | 182 |
| 8.2.4 | TWI 数据寄存器 (TWDR) | 183 |
| 8.2.5 | TWI 从机地址寄存器 (TWAR) | 183 |
| 8.3 | TWI 总线模块的使用 | 183 |
| 8.4 | TWI 总线模块的数据传输方式 | 185 |
| 8.4.1 | 主机发送模式 (MT) | 185 |
| 8.4.2 | 主机接收模式 (MR) | 186 |
| 8.4.3 | 从机发送模式 (ST) | 187 |
| 8.4.4 | 从机接收模式 (SR) | 188 |
| 8.5 | TWI 总线的仲裁 | 189 |
| 8.6 | SPI 总线基础 | 189 |
| 8.7 | SPI 总线模块相关寄存器 | 191 |
| 8.7.1 | SPI 控制寄存器 SPCR | 191 |
| 8.7.2 | SPI 状态寄存器 SPSR | 192 |
| 8.7.3 | SPI 数据寄存器 SPDR | 193 |
| 8.8 | SPI 总线接口的工作模式 | 193 |



| | |
|---|------------|
| 8.9 TWI 和 SPI 总线模块应用实例 | 195 |
| 8.9.1 ATmega16 双机使用 TWI 总线模块进行通信 | 195 |
| 8.9.2 ATmega16 双机使用 SPI 总线模块进行通信 | 203 |
| 第 9 章 ATmega16 单片机的比较器和 ADC 模块 | 211 |
| 9.1 ATmega16 单片机的比较器 | 211 |
| 9.1.1 模拟比较器基础 | 211 |
| 9.1.2 模拟比较器的寄存器 | 211 |
| 9.1.3 模拟比较器的输入通道 | 213 |
| 9.2 ATmega16 单片机的 ADC 模块 | 213 |
| 9.2.1 ADC 模块基础 | 214 |
| 9.2.2 ADC 模块的寄存器 | 215 |
| 9.2.3 ADC 模块的转换过程 | 219 |
| 9.2.4 ADC 模块的输入通道和参考电源 | 221 |
| 9.2.5 ADC 模块的转换结果和精度定义 | 222 |
| 9.3 ATmega16 比较器的应用实例 | 224 |
| 9.3.1 双通道模拟信号比较应用实例 | 224 |
| 9.3.2 多通道模拟信号比较应用实例 | 227 |
| 9.4 ATmega16 ADC 模块的应用实例 | 231 |
| 9.4.1 单通道模拟信号采集实例 | 231 |
| 9.4.2 多通道模拟信号采集实例 | 234 |
| 9.4.3 增益放大模拟信号采集实例 | 237 |
| 9.4.4 差分模拟信号比较采集实例 | 241 |
| 第 10 章 ATmega16 的其他内部资源 | 245 |
| 10.1 看门狗 (WDT) | 245 |
| 10.1.1 看门狗基础 | 245 |
| 10.1.2 看门狗的寄存器 | 245 |
| 10.1.3 看门狗的启动和关闭 | 246 |
| 10.2 内部 E ² PROM | 246 |
| 10.2.1 E ² PROM 的操作 | 247 |
| 10.2.2 E ² PROM 的寄存器 | 248 |
| 10.2.3 E ² PROM 的操作函数 | 249 |
| 10.3 内置看门狗和 E ² PROM 应用实例 | 250 |
| 10.3.1 内置看门狗模块测试应用实例 | 250 |
| 10.3.2 E ² PROM 读写应用实例 | 254 |
| 第 11 章 ATmega16 的应用系统 | 258 |
| 11.1 单 I/O 引脚扩展多按键 | 258 |
| 11.1.1 应用系统背景 | 258 |
| 11.1.2 设计思路 | 258 |

| | | |
|--------|------------------|-----|
| 11.1.3 | 硬件系统设计 | 259 |
| 11.1.4 | 软件系统设计 | 261 |
| 11.1.5 | 应用系统的仿真和总结 | 263 |
| 11.2 | 简易电子琴 | 265 |
| 11.2.1 | 应用系统背景 | 265 |
| 11.2.2 | 设计思路 | 266 |
| 11.2.3 | 硬件系统设计 | 267 |
| 11.2.4 | 软件系统设计 | 271 |
| 11.2.5 | 应用系统的仿真和总结 | 277 |
| 11.3 | 商场灯光控制 | 279 |
| 11.3.1 | 应用系统背景 | 279 |
| 11.3.2 | 设计思路 | 279 |
| 11.3.3 | 硬件系统设计 | 279 |
| 11.3.4 | 软件系统设计 | 288 |
| 11.3.5 | 应用系统的仿真和总结 | 298 |



第1章 ATmega16 单片机基础

ATmega16 是 ATMEL 公司研发的增强型内置 FLASH 的 RISC (Reduced Instruction Set CPU) 精简指令集高速 8 位单片机 (AVR, 其得名于设计师 A 先生和 V 先生), 本章介绍 AVR 系列单片机的特点和 ATmega16 单片机的一些基础知识, 包括内核、存储器体系、系统时钟、电源管理、复位、外部引脚封装和中断系统等。

1.1 AVR 系列单片机

单片机是单片微型计算机的简称, 是一种将运算控制器、存储器、寄存器 I/O 接口以及一些常用的功能模块都集成到一块芯片上的计算机, 常常用于工业控制, 小型家电等需要嵌入式控制的场合, 其按照结构可以分为 AVR 系列、51 系列、PIC 系列等, 其中 AVR 系列多用于工业控制, 它具有以下的特点。

- 采用哈佛结构, 具备 1MIPS /MHz 的高速运行处理能力。
- 支持超功能精简指令集, 具有 32 个通用工作寄存器, 避免了 51 等系列单片机由于采用单个 ACC 进行处理造成的瓶颈现象。
- 内置快速的存取寄存器组、有单周期指令系统, 大大优化了目标代码的大小、执行效率高。
- 外部引脚驱动能力大, 作为输出时可输出 40mA 的大电流, 作为输入时可设置为三态高阻抗输入或带上拉电阻输入, 具备 10 ~ 20mA 灌电流的能力。
- 片内集成了多种频率的 RC 振荡器, 具有上电自动复位、看门狗、启动延时等功能, 使得外围电路更加简单, 系统更加稳定可靠。
- 片内资源丰富, 通常集成了 E²PROM、PWM、RTC、SPI、UART、TWI、ISP、ADC、比较器、WDT 等功能, 可以减少系统中外围器件的数量, 有效地实现“单片”系统。
- 支持 ISP 和 IAP 功能, 方便下载程序, 并且支持 JTAG 的片上调试。

1.2 ATmega16 单片机的特点、硬件结构和封装

ATmega16 是基于 RISC 结构的 8 位高性能、低功耗的处理器, 是 AVR 单片机的一种, 其主要特点如下。

- 支持 131 条 AVR 指令, 其中大多数指令执行时间为单个时钟周期, 执行速度快。
- 内部有 32 个 8 位通用工作寄存器, 支持全静态工作。
- 当处理器工作于 16MHz 工作频率时性能高达 16MIPS。
- 硬件乘法器只需两个时钟周期。

- 内置 1KB 的片内 SRAM, 16KB 的系统内可编程 FLASH, 512B 的 E²PROM。
- 内置具有独立锁定位的可选 Boot 代码区, 并且可以通过片上 Boot 程序实现系统内编程。
- 支持符合 JTAG 标准的边界扫描, 提供和 IEEE 1149.1 标准兼容的 JTAG 硬件接口。
- 内置两个具有独立预分频和比较功能的 8 位定时计数器, 内置一个具有预分频、比较功能和捕捉功能的 16 位定时计数器, 内置一个具有独立振荡器的实时计数器 RTC, 这些定时计数器可以提供四通道 PWM。
- 内置片内模拟比较器和 8 通道 10 位 ADC, 可以组合为 8 个单端通道或者 7 组差分通道, 其中有 2 个具有可编程增益 (1×、10× 或 200×) 的差分通道。
- 内置多种串行通信接口, 包括 TWI (I²C) 两线接口、可编程串口 (USART)、可工作于主机/从机模式的 SPI 串行接口。
- 内置具有独立片内振荡器的可编程看门狗定时器。
- 可以提供上电复位以及可编程的掉电检测, 其内置经过标定的 RC 振荡器, 可以不需要外部时钟工作, 并且内置了片外中断源, 提供空闲模式、省电模式等 6 种工作模式。
- 提供 32 个可编程的 I/O 口, 支持 40 引脚 PDIP 封装, 44 引脚 TQFP 封装, 44 引脚 MLF 封装。
- 支持 2.7 ~ 5.5V (ATmega16L, 工作频率 0 ~ 8MHz) 和 4.5 ~ 5.5V (ATmega16, 工作频率 0 ~ 16MHz) 工作电压。

图 1.1 是 ATmega16 的内部结构示意图, 它由 ALU、通用寄存器、程序存储器、数据 RAM、中断模块和内部扩展资源等组成, 各部分详细说明如下。

- ALU (运算器)。支持通用寄存器之间以及通用寄存器和常数之间的算术和逻辑运算, ALU 也可以执行单寄存器操作, 当运算完成之后更新相应的状态寄存器的内容以反映操作结果。ATmega16 通过有条件或者无条件的跳转指令和调用指令来控制程序的工作流程, 从而可以直接寻址整个地址空间。
- 通用寄存器。其中 6 个寄存器可以联合起来构成 3 个 16 位的 X、Y、Z 间接寻址寄存器, 可以用来寻址数据空间以实现高效的地址运算, 其中一个指针还可以作为程序存储器查询表的地址指针。
- 程序存储器。这是可以在线编程的 FLASH, 其快速访问寄存器由 32 个 8 位通用寄存器组成, 访问时间为一个时钟周期, 从而 ATmega16 可以实现单时钟周期的运算器操作, 在典型的运算器操作中, 两个分别位于不同通用寄存器中的操作数被同时访问, 然后执行运算, 结果再被送回到通用寄存器, 整个指令执行过程仅需一个时钟周期。
- 中断模块。ATmega16 内置一个灵活的中断模块, 其控制寄存器位于 I/O 空间内, 并且有一个位于状态寄存器 SREG 中的全局中断使能位, 每个中断在中断向量表里都有独立的中断向量, 其优先级与该中断向量在中断向量表的位置有关, 中断向量地址越低, 其优先级越高。
- 内部扩展资源。ATmega16 内部集成了多种外部资源, 包括 SPI 接口、ADC 接口、E²PROM、串行模块等。

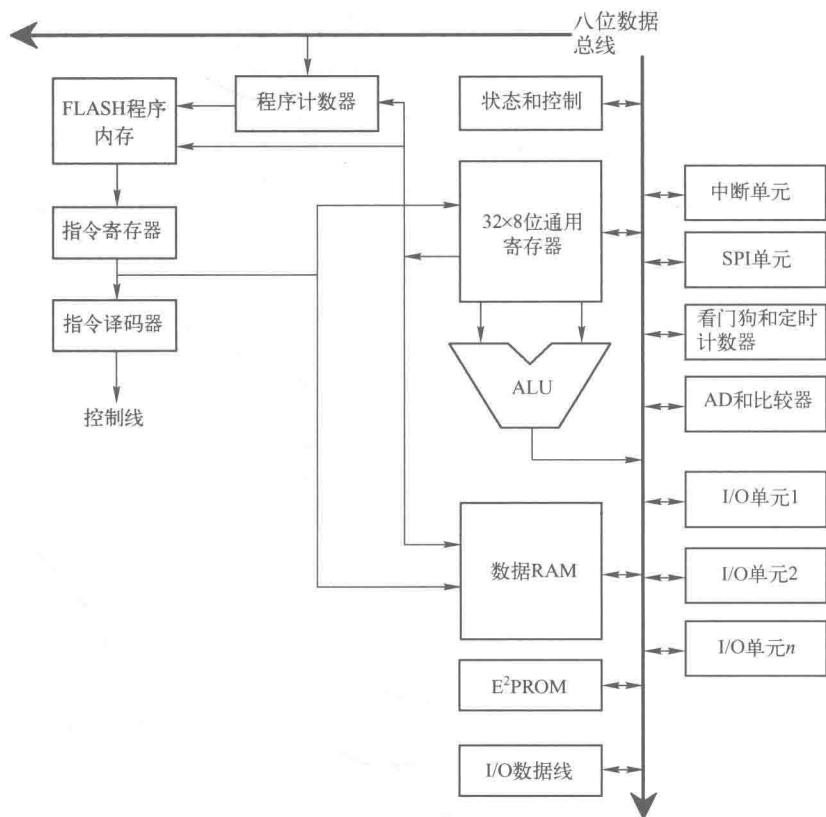


图 1.1 ATmega16 的内部结构示意图

ATmega16 有 DIP-40 和 TQFP/MLF-44 两种封装形式，其实物和引脚封装模型分别如图 1.2 和图 1.3 所示，其外部引脚说明如下。

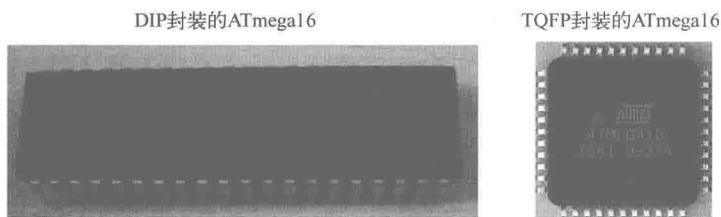


图 1.2 ATmega16 实物

- VCC: 电源正输入引脚。
- GND: 电源地输入引脚。
- PA7 ~ PA0: 外部引脚端口 A，其为 8 位双向输入/输出端口，具有可编程的内部上拉电阻，其输出缓冲器具有对称的驱动特性，可以输出和吸收较大电流；当作为输入使用时，若内部上拉电阻使能，端口被外部电路拉低时将输出电流；在复位过程中，即使系统时钟还未起振，端口 A 也处于高阻状态；其第二功能为 ADC 转换器的模拟输入端。

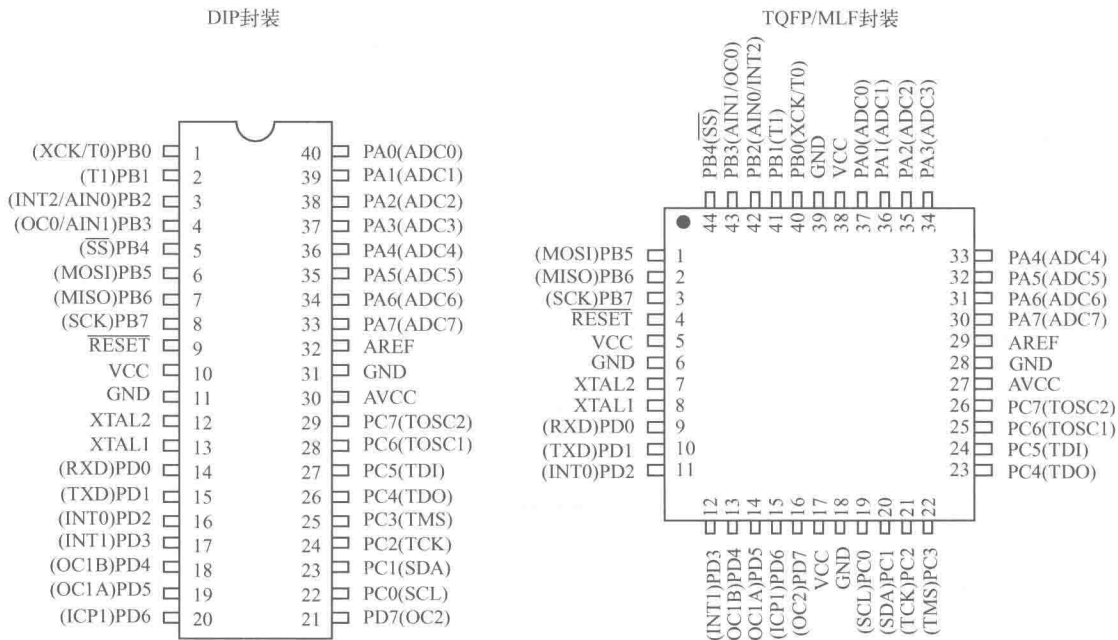


图 1.3 ATmega16 引脚封装

- PB7 ~ PB0: 外部引脚端口 B, 也为 8 位双向输入/输出端口, 其特点和端口 A 类似; 端口 B 也可以用作其他不同的特殊功能。
- PC7 ~ PC0: 外部引脚端口 C, 同样也为 8 位双向输入/输出端口, 其特点和端口 A、端口 B 类似; 需要注意的是, 如果 JTAG 接口被使能, 即使复位出现引脚 PC5 (TDI)、PC3 (TMS) 与 PC2 (TCK) 的上拉电阻被激活, 除去移出数据的 TAP 态外, TD0 引脚均为高阻态。
- PD7 ~ PD0: 外部引脚端口 D, 同样也是 8 位双向输入输出端口, 其特点和端口 A、端口 B、端口 C 类似。
- RESET: 复位输入引脚, 在该引脚上加上持续时间超过最小门限时间的低电平将引起系统复位。
- XTAL1: 反向振荡放大器与片内时钟操作电路的输入端。
- XTAL2: 反向振荡放大器的输出端。
- AVCC: 内置 ADC 转换器的参考电源, 不使用 ADC 时, 该引脚应直接与 VCC 引脚连接, 当使用 ADC 时该引脚应该通过一个低通滤波电路与 VCC 引脚连接。
- AREF: ADC 转换器的模拟基准输入引脚。

1.3 ATmega16 单片机的内核

ATmega16 单片机的内核由算术逻辑单元、状态寄存器、通用寄存器、堆栈、中断和复位处理模块组成。

1.3.1 算术逻辑单元 ALU

算术逻辑单元 (ALU) 是 ATmega16 内核中执行各种算术和逻辑运算操作的部件, 其基本操作包括加、减、乘、除四则运算 (算术运算), 与、或、非、异或等逻辑操作 (逻辑运算), 以及移位、比较和传送等操作。ALU 与 32 个通用工作寄存器直接相连, ATmega16 的寄存器与寄存器之间、寄存器与立即数之间的 ALU 运算只需要一个时钟周期。ALU 的操作分为三类: 算术、逻辑和位操作, 此外 ALU 还能支持无/有符号数和分数乘法。

1.3.2 状态寄存器 SREG

ATmega16 的状态寄存器包含了最近执行的算术指令的相关结果信息, 用户可以根据这些信息来实现条件操作, 状态寄存器 SREG 的内部结构如表 1.1 所示, 其详细说明如下。

表 1.1 ATmega16 的状态寄存器 SREG

| BIT | I | T | H | S | V | N | Z | C |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 读/写 | R/W | R/W | R/W | R/W | R/W | R/W | R/W | R/W |
| 初始值 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

- **I**: 全局中断使能位, 当 I 被置位时使能全局中断, 单独的中断使能由其他独立的控制寄存器控制; 如果 I 被清零, 则不论单独中断标志置位与否, 都不会产生中断。任意一个中断发生后 I 将被清零, 而执行 RETI (中断服务程序退出) 指令后 I 恢复置位以使能中断, I 也可以通过 SEI (置位全局中断使能位) 和 CLI (清除全局中断使能位) 指令来置位和清零。
- **T**: 位复制存储位, 位复制指令 BLD 和 BST 利用 T 作为目的或源地址, BST 指令把寄存器的某一位复制到 T, 而 BLD 把 T 复制到寄存器的某一位。
- **H**: 半进位标志位, H 被置位时表示算术操作发生了半进位, 此标志对于 BCD 运算非常有用。
- **S**: 负数标志位, 用于存放 N 与 2 的补码和溢出标志 V 的异或结果。
- **V**: 补码溢出标志, 支持二进制补码运算。
- **N**: 负数标志位, 表明算术或逻辑操作结果为负。
- **Z**: 零标志位, 表明算术或逻辑操作结果为零。
- **C**: 进位标志位, 表明算术或逻辑操作发生了进位。

1.3.3 通用寄存器

ATmega16 有 32 个通用寄存器, 其针对 ATmega16 的指令集进行了优化, 支持以下的输入/输出方案。

- 输入为一个 8 位操作数, 输出一个 8 位结果。
- 输入为两个 8 位操作数, 输出一个 8 位结果。
- 输入为两个 8 位操作数, 输出一个 16 位结果。
- 输入为一个 16 位操作数, 输出一个 16 位结果。

图 1.4 是 ATmega16 的通用寄存器结构示意图, 每个通用寄存器都有一个对应的地址, X、Y、Z 寄存器可以设置为指向任意寄存器的指针。

| | | | | |
|-----------------|-----|------|-----------|-----------|
| | 7 | 0 | Addr. | |
| 通用 工作 寄存器 | R0 | | \$00 | |
| | R1 | | \$01 | |
| | R2 | | \$02 | |
| | ... | | | |
| | R13 | | \$0D | |
| | R14 | | \$0E | |
| | R15 | | \$0F | |
| | R16 | | \$10 | |
| | R17 | | \$11 | |
| | ... | | | |
| | R26 | | \$1A | X寄存器, 低字节 |
| | R27 | | \$1B | X寄存器, 高字节 |
| | R28 | | \$1C | Y寄存器, 低字节 |
| | R29 | | \$1D | Y寄存器, 高字节 |
| | R30 | | \$1E | Z寄存器, 低字节 |
| R31 | | \$1F | Z寄存器, 高字节 | |

图 1.4 ATmega16 的通用寄存器结构示意图

通用寄存器 R26 ~ R31 除了用作通用寄存器外, 还可以作为数据间接寻址用的地址指针 X、Y、Z, 如图 1.5 所示。在不同的寻址模式中, 这些地址寄存器可以实现固定偏移量, 自动加 1 和自动减 1 功能。

| | | | | |
|------|-----------|----|-----------|---|
| X寄存器 | 15 | XH | XL | 0 |
| | 7 | 0 | 7 | 0 |
| | R27(\$1B) | | R26(\$1A) | |
| Y寄存器 | 15 | YH | YL | 0 |
| | 7 | 0 | 7 | 0 |
| | R29(\$1D) | | R28(\$1C) | |
| Z寄存器 | 15 | ZH | ZL | 0 |
| | 7 | 0 | 7 | 0 |
| | R31(\$1F) | | R30(\$1E) | |

图 1.5 X、Y、Z 寄存器

1.3.4 堆栈

ATmega16 的堆栈主要用来保存临时数据、局部变量、子程序和中断子程序的返回地址, 堆栈指针总是指向堆栈的顶部。



注意

ATmega16 的堆栈是向下生长的, 即当有新数据被推入堆栈时, 堆栈指针的数值将减小。

ATmega16 的堆栈指针指向位于 SRAM 的函数或者中断堆栈, 在调用子程序和使能中断之前必须先初始化堆栈, 且堆栈指针必须指向高于 0x60 的地址空间, 堆栈的详细增减说明如下。

