

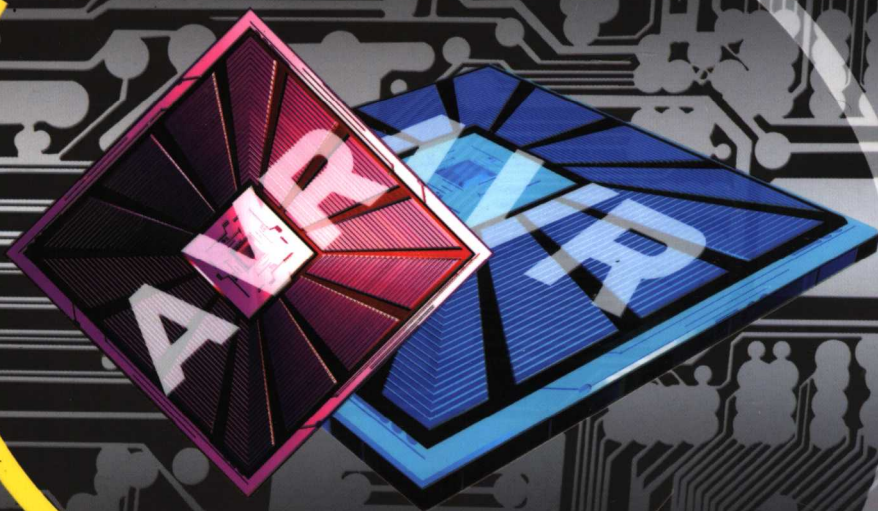
ATmega

128/2560系列

单片机

原理与高级应用

霍宏伟 牛延超 黄吉莹 编 著



- ◆ 高端AVR处理器的结构和指令系统
- ◆ 基于C语言的ATmega128和ATmega2560系列芯片应用模块的设计和使用技巧
- ◆ 流行的AVR开发工具的使用方法和AVR开发的基本技术
- ◆ ATmega128和ATmega2560系列芯片的系统开发步骤和高端应用方法



光盘内容

ATMEL授权的ATmega128和ATmega2560系列芯片数据手册及本书部分例程的源代码和电路原理图

中国林业出版社
China Forestry Publishing House
www.cfph.com.cn



北京希望电子出版社
Beijing Hope Electronic Press
www.bhp.com.cn

AVR

ATmega

128/2560系列

单片机

原理与高级应用

霍宏伟 牛延超 黄吉莹 编 著



- ◆ 高端AVR处理器的结构和指令系统
- ◆ 基于C语言的ATmega128和ATmega2560系列芯片应用模块的设计和使用技巧
- ◆ 流行的AVR开发工具的使用方法和AVR开发的基本技术
- ◆ ATmega128和ATmega2560系列芯片的系统开发步骤和高端应用方法



光盘内容

ATMEL授权的ATmega128和ATmega2560系列芯片数据手册及本书部分例程的源代码和电路原理图

中国林业出版社
China Forestry Publishing House
www.cfph.com.cn



北京希望电子出版社
Beijing Hope Electronic Press
www.bhp.com.cn

内容简介

本书是一本介绍 ATMEL 公司 AVR 系列单片机的图书。

全书分上、下两篇，由 8 章和 3 个附录组成。第 1 章介绍单片机的历史及 AVR 单片机的特点；第 2 章介绍 ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片的特性；第 3 章介绍 ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片的硬件组成和特点；第 4 章介绍其指令系统和汇编语言；第 5 章讲述了目前流行的 AVR 开发工具的原理和应用方法；第 6 章介绍了 AVR 单片机的系统开发流程；第 7 章以 ATmega128 为例分模块给出了芯片内部模块及外围接口应用设计实例；第 8 章通过 4 个综合应用实例全面描述了 AVR 单片机的高端应用。

本书内容丰富全面，实用性与可操作性强，可作为 AVR 单片机开发技术人员的技术参考书，也可以作为高等院校高年级本科生、研究生的教学参考书。

在本书的附带光盘中，提供了经 ATMEL 授权的 ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片数据手册，提供了本书部分例程的源代码和电路原理图。

图书在版编目 (CIP) 数据

ATmega128/2560 系列单片机原理与高级应用 / 霍宏伟，牛延超，黄吉莹编著.—北京：中国林业出版社；北京希望电子出版社，2006.4

ISBN 7-5038-4272-5

I.A... II. ①霍... ②牛... ③黄... III. 单片微型计算机，ATmega128/2560 系列 IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 159564 号

出版：中国林业出版社 (100009 北京市西城区刘海胡同 7 号 010-66184477)

北京希望电子出版社 (100085 北京市海淀区上地 3 街 9 号金隅嘉华大厦 C 座 611)

网址：www.bhp.com.cn 电话：010-82702660 (发行) 010-62541992 (门市)

印刷：北京媛明印刷厂

发行：全国新华书店经销

版次：2006 年 4 月第 1 版

印次：2006 年 4 月第 1 次

开本：787mm×1092mm 1/16

印张：28.25

字数：652 千字

印数：0001~5000 册

定价：39.00 元 (配 1 张光盘)

序 言

ATMEL 公司是世界上高级半导体产品设计、制造和行销的领先者，产品包括了微处理器、可编程逻辑器件、非易失性存储器、安全芯片、混合信号及 RF 射频集成电路。通过这些核心技术的组合，ATMEL 生产出了各种通用的、特定应用的及系统级的芯片，以满足当今电子系统设计工程师不断增长的需求。ATMEL 在系统级集成方面所拥有的世界级专业知识和丰富的经验，使其产品可以在现有模块的基础上进行开发，保证最小的开发周期和风险。

AVR 是 8 位的 RISC 微控制器，它在指令和数据吞吐能力方面比传统的 CISC 结构要快很多倍。AVR 具有很丰富的片内模拟和数字外设，以及系统内可编程的 EEPROM 和 FLASH 存储器。从而大大提高了灵活性，消除了访问外部存储器的瓶颈，提高了程序和数据的安全性。产品线从 tinyAVR(tm) (1K 的片内程序 FLASH) 延伸到 megaAVR(tm) (256K 的片内程序 FLASH)。

随着市场规模的日渐扩大，公司影响力与日俱增，ATMEL 对中国这片沃土倾注了更多的心血，其中包括在中国各地建立办事处，支持代理商为客户提供技术支持。AVR 在中国市场的使用量在逐渐加大，《AVR 中文技术手册》一出版，3 个月内就售空，有的已再版了 4 次；此外，还有许多作者正在同我们联系，出版关于 AVR 微控制器的图书和教程，其中还包括面向高中生的标准实验教科书。

ATMEL 北京代表处是伴随着 ATMEL 的整体成长，特别是 ATMEL 在中国的快速成长逐步发展起来的。我们愿意竭尽全力为中国的用户服务。ATMEL 的 AVR 家族最近又添新丁，新推出了 32 位的 AVR-II。目前利用 AVR 的内核为客户做 ASIC(定制电路)在美、欧及日本等国家已经获得成功，相信随着中国用户的进一步壮大，采用量身定做的定制电路不会太远。

本书介绍了 8 位处理器 ATmega128 和 ATmega2560 系列单片机的有关规格、指令以及应用程序等，对相关的 AVR 中、英文技术手册的内容也作了进一步阐释，是一本有实用价值的书籍。

最后，我谨代表 ATMEL 公司，对包括本书作者在内的所有关心支持 ATMEL 在中国发展的朋友表示感谢！

ATMEL 北京代表处

总经理： **施 庸**

2006 年 1 月

前 言

单片机的出现是计算机发展史上的一个重要里程碑，它以体积小、功能全、性价比高等诸多优点而独具特色，在工业控制、尖端武器、通信设备、信息处理、家用电器等嵌入式应用领域中独占鳌头。一般认为，ATMEL 公司的 AVR 系列单片机将成为最有发展前景的 8 位单片机之一，经过 10 多年的推广与发展，AVR 系列单片机形成了一个规模较大、功能齐全、资源丰富的产品群。

从 2002 年开始，ATMEL 公司先后推出了多套高端 AVR 系列产品，最为成功的应当属于 ATmega 系列。ATmega8 是 ATmega 主流单片机系列中，第一款成功的产品。它以丰富的片内资源、低廉的价格深受广大设计人员的喜爱，并在国内得到了较好的推广。ATmega48/88/168 则作为它的兼容产品，为用户提供更多功能的选择。ATmega16 也是个用量较多的器件，它的引脚兼容 AT90S8535，可以取代产品中的 8535 芯片。相对于 ATmega8，它除了 I/O 引脚多之外，内部集成了 ATmega8 两倍(16K)的 FLASH 程序存储器。ATmega128 的推出，使 AVR 具备了更灵活的功能，也为该系列芯片进一步占领市场奠定了基础。由于 ATmega128 结构简单、性能可靠、使用灵活，越来越受到硬件工程师们的青睐。为了最大限度地拓展 ATmega 的功能和应用潜力，ATMEL 于 2005 年又推出了 ATmega640、ATmega1280、ATmega2560、ATmega1281、ATmega2561 五款高性能、低能耗的 AVR 闪存微处理器。本书将他们统称为 ATmega2560 系列处理器。这些新产品针对的是需要较大代码空间和广泛接口连接功能的应用产品。可以预见，ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片必将成为国外科研机构和嵌入式设备生产厂商竞相使用的处理器产品。

本书以 ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片为背景，介绍 AVR 高端处理器的结构和指令系统；结合实例介绍了基于 C 语言的 ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片应用模块的设计和使用技巧；给出了目前流行的 AVR 开发工具的使用方法和 AVR 开发的基本技术；采用详细的工程设计实例说明了 ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片的系统开发步骤和高端应用方法。

本书的主要特点有：

(1) 系统性。全书分为上、下两篇。上篇重点介绍了 AVR 单片机的基本知识、ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片的硬件原理和指令系统。下篇全面介绍了 AVR 单片机的开发工具、系统设计流程、内部模块及外围接口应用设计实例，并给出了 2 个综合设计实例，全面阐述了 AVR 单片机系统的开发设计过程。

(2) 可读性。在内容的编排上注意由浅入深，方便自学，在介绍 ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片的硬件原理和指令系统以及芯片的综合应用过程中，注重了背景知识的介绍，从而可以加深读者对相关内容的理解。

(3) 实用性。本书下篇中的部分实例在本书附带光盘中提供了相应的电路原理图和测试通过的代码，读者可以在阅读的同时进行针对性训练，从而举一反三，迅速掌握相关芯片的设计使用方法。

全书共分 8 章。其中，第 1 章介绍了单片机的历史及 AVR 单片机的特点；第 2 章在总体上说明了 ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片的特性；第 3 章详细介绍了 ATmega128

和 ATmega2560 系列芯片的硬件组成和特点；第 4 章介绍了其指令系统和汇编语言；第 5 章讲述了目前流行的 AVR 开发工具的原理和应用方法；第 6 章介绍了 AVR 单片机的系统开发流程；第 7 章以 ATmega128 为例分模块给出了芯片内部模块及外围接口应用设计实例；第 8 章通过 2 个综合应用实例全面描述了 AVR 单片机的高端应用。

在本书的附带光盘中，提供了经 ATMEL 授权的 ATmega128 和 ATmega2560 系列芯片数据手册，提供了本书部分例程的源代码和电路原理图。

本书可作为 AVR 单片机开发技术人员的技术参考书，也可以作为高等院校高年级本科生、研究生的教学参考书。

本书由霍宏伟、牛延超、黄吉莹编著。其中第 1 章、第 3 章、第 4 章（第 2 节除外）、第 5 章的第 2 节和第 4 节、第 8 章的第 1 节由霍宏伟编写；第 7 章、第 5 章的其余部分和第 8 章的第 2 节由牛延超编写；黄吉莹编写了本书的第 2 章、第 6 章和第 4 章的第 2 节。全书最后由霍宏伟负责统稿、编排。

在本书编写过程中，何能强和霍宏艳做了大量的资料整理和英文翻译工作。参与本书编写、文字录入、绘图、排版和校对工作的还有王琳、李坚、侯成杰、黄琼、冯伟、马君、赵玲、徐晓羽、毛鹏等。特别感谢 ATMEL 公司副总裁、亚太区总裁 Jansen Jen 先生对本书的关心和支持。此外，本书在编写过程中还得到 ATMEL 公司 Derek Chan 先生、ATMEL 北京代表处总经理施膺先生和北京希望电子出版社杨如林先生的大力支持，在此谨对他们的辛勤劳动表示感谢！

在本书中，如存在内容与 ATMEL 公司提供的文档材料有不一致之处，建议读者以 ATMEL 公司提供的文档材料为依据。有关于技术问题，欢迎同作者联系（Email: xiaosongshu2000@sohu.com、niuych_bjtu@hotmail.com）。

由于时间仓促，加之编者水平有限，书中存在错误或不妥之处在所难免，敬请读者不吝批评指正。

编者

目 录

序言	
前言	
上篇	1
第1章 AVR 概述	1
1.1 单片机及其发展	1
1.1.1 单片机概述	1
1.1.2 单片机的发展历史及其特点	2
1.1.3 单片机的分类	3
1.2 AVR 系列微控制器	5
1.2.1 概述	5
1.2.2 AVR 处理器的特点	7
1.2.3 AVR 处理器的应用领域	9
第2章 ATmega 处理器	10
2.1 ATmega 单片机系列产品	10
2.2 ATmega128 概述	11
2.2.1 ATmega128 的结构	11
2.2.2 ATmega128 的特点	14
2.3 ATmega640/1280/1281/2560/2561 概述	15
2.3.1 ATmega640/1280/1281/2560/ 2561 的结构	15
2.3.2 ATmega640/1280/1281/2560/ 2561 的特点	19
2.4 ATmega128/2561 的应用范例	20
第3章 ATmega128 与 ATmega2560 系列芯片 硬件结构	22
3.1 片的 MCU 内核	22
3.1.1 概述	22
3.1.2 芯片 MCU 的功能模块	23
3.2 存储器	28
3.2.1 AVR ATmega128 和 ATmega2560 系列存储器组织	28
3.2.2 外部存储器扩展	30
3.2.3 EEPROM 读/写访问	38
3.2.4 支持引导程序加载的存储器 自编程	41
3.2.5 ATmega 的锁定位、熔丝位、 标识位和校正位	52

3.3 I/O 端口	66
3.3.1 概述	66
3.3.2 通用数字 I/O 端口	66
3.3.3 端口的第二功能	71
3.4 系统定时与中断	81
3.4.1 系统时钟	81
3.4.2 中断	88
3.4.3 外部中断	92
3.4.4 定时/计时器	96
3.4.5 输出比较调制器 (OCM1C2)	132
3.5 电源管理	133
3.5.1 概述	133
3.5.2 睡眠模式	135
3.5.3 系统最小化功耗设计	137
3.6 系统控制与复位	138
3.6.1 复位源	142
3.6.2 片内参考电压源	144
3.6.3 看门狗定时器	144
3.7 通信接口	146
3.7.1 同步串行通信接口 SPI	147
3.7.2 通用同步/异步串行接收器和 转发器 USART	152
3.7.3 两线串行总线接口 TWI (I2C)	168
3.8 模拟比较器及模/数转换接口 ADC	187
3.8.1 模拟比较器	187
3.8.2 模数转换器	190
3.9 JTAG 接口与在线调试系统	206
3.9.1 IEEE1149.1-1990 (JTAG) 概述	207
3.9.2 JTAG 接口	207
3.9.3 JTAG 指令	210
3.9.4 JTAG 在线调试系统 OCD	214
3.9.5 IEEE1149.1 (JTAG) 边界扫描	215
3.9.6 JTAG 串行编程	222
3.10 ATmega128 到 ATmega2560 系列的移植	228
3.10.1 通用端口	228
3.10.2 存储器	228

3.10.3	时钟源和中断	229	5.3.4	ICCAVR	318
3.10.4	电源管理与 BOD	229	5.4	AVR 集成开发环境	321
3.10.5	看门狗电路和 USART&SPI	230	5.4.1	AVR Studio	321
3.10.6	定时器/计数器	230	5.4.2	VMLAB	328
3.10.7	模数转换器和模拟比较器	230	第 6 章	AVR 单片机系统开发流程	335
第 4 章	指令系统和汇编语言	232	6.1	功能分析与顶层设计	335
4.1	ISC 与 RISC	232	6.1.1	功能分析	335
4.2	AVR 的汇编语言指令格式与寻址方式	234	6.1.2	顶层设计	336
4.2.1	指令格式	234	6.2	系统硬件设计	337
4.2.2	寻址方式	238	6.2.1	元器件选择	337
4.3	ATmega128 与 ATmega2560 系列		6.2.2	电路设计	341
	芯片指令集概述	243	6.2.3	硬件电路的计算机辅助设计	342
4.4	算术和逻辑指令	247	6.2.4	单片机应用技术	342
4.4.1	算术运算指令	247	6.3	系统软件设计	347
4.4.2	逻辑运算指令	254	6.3.1	软件总体设计	347
4.5	条件转移指令	259	6.3.2	程序设计	349
4.6	位操作和位测试指令	276	6.3.3	软件可靠性设计	349
4.6.1	位变量修改指令	276	6.4	单片机系统仿真与程序下载	351
4.6.2	逻辑操作指令	282	6.4.1	软件调试和系统仿真	351
4.6.3	寄存器的位操作指令	284	6.4.2	AVR 单片机程序下载	352
4.7	数据传输指令	285	第 7 章	ATmega 应用设计	353
4.7.1	直接数据传输指令	285	7.1	AVR 的熔丝位	353
4.7.2	间接数据传送指令	288	7.1.1	ATmega2560 系列	
4.7.3	程序存储器操作指令	292		熔丝位的配置	354
4.7.4	I/O 数据传送指令	294	7.1.2	ATmega128 熔丝位的配置	354
4.7.5	堆栈操作指令	295	7.1.3	JTAP 口的配置与使用	355
4.8	MCU 控制指令	296	7.2	自引导程序 IAP 的应用设计	356
下篇	298	7.2.1	引导程序汇编代码	356
第 5 章	ATmega 系列芯片开发工具及应用	298	7.2.2	一个实用的 BootLoad	
5.1	AVR 开发板	298		应用实例	358
5.1.1	STK50x 系列开发板	298	7.3	EEPROM 存储器应用设计	365
5.1.2	应用 Protel 制作 IN128 开发板	302	7.3.1	读/写 EEPROM 的方法	365
5.2	JTAG ICE 仿真器	306	7.3.2	快速读取 EEPROM 的实用方法	366
5.2.1	概述	306	7.4	I/O 中断应用设计	368
5.2.2	JTAGICE 的使用	308	7.5	系统定时/计数器应用设计	371
5.3	AVR 编译器及相关开发工具	309	7.5.1	看门狗定时器的应用	371
5.3.1	AVR GCC 简介	309	7.5.2	系统计数器的应用	372
5.3.2	WinAVR	310	7.6	通用串行接口 USART 应用	376
5.3.3	AtmanAvr	313	7.6.1	串口通讯的概念	376

7.6.2	串口通信基本接线方法	376	8.1.2	系统总体设计	395
7.6.3	ATmega128 完成串口 通信电路图	377	8.1.3	硬件设计	395
7.6.4	代码设计	378	8.1.4	软件设计	401
7.7	SPI 接口的应用设计	382	8.2	高精度 GPS 终端的设计与实现	409
7.8	TWI 接口及接口器件的使用	386	8.2.1	系统功能说明	409
7.9	ADC 转换应用设计	387	8.2.2	系统总体设计	411
7.9.1	常用 ADC 方式	388	8.2.3	硬件设计	413
7.9.2	基于串口通信的温度采集 与显示	390	8.2.4	软件设计	417
第 8 章	综合设计实例	394	附录 1	428	
8.1	MEGA-METER 的设计与实现	394	附录 2	432	
8.1.1	系统功能说明	394	附录 3	439	
			参考文献	442	

上 篇

第 1 章 AVR 概述

单片机全称为单片微型计算机，是一种集合了中央处理器、存储器、定时/计数器、输入输出接口等设备的大规模或超大规模集成电路芯片。单片机具有体积小、简单、灵活、低成本等优点。随着微电子技术的发展，单片机的功能也越来越强大，旧的单片机的定义已不能满足对其性能的描述，所以在很多应用场合单片机又被称为单片微处理器（Microprocessor）或者微控制器（Microcontroller）。

AVR 单片机是 ATMEL 公司于 20 世纪 90 年代中后期开发出的一种 8 位单片机。这种单片机采用 RISC 内核，具有使用灵活、高性能、低功耗等特点。此外，在某些情况下 AVR 处理器甚至可以独自成为一种片上系统（SOC），完成极其复杂的功能。目前，AVR 已经展示出极其强大的生命力，在国防、工业、农业、企业管理、交通运输、日常生活等各个领域得到了广泛的应用。

1.1 单片机及其发展

1.1.1 单片机概述

单片微型计算机，简称单片机，是微型计算机的一个分支。它是在一块大规模或超大规模集成电路芯片上集成了 CPU、存储器、I/O 接口、定时/计数装置等而构成的微型计算机。随着近年来微电子技术的飞速发展，单片机的功能也日渐强大，在集成度、功能、性能、体系结构方面都有了飞速发展，已能集成一个完整的功能强大、性能优良的计算机应用系统。单片机的作用已经超出了最初的工业控制领域而应用到社会生活的各个方面，人们更倾向于称单片机为单片微处理器或者微控制器。据不完全统计，截止到 2005 年 6 月，全世界单片机的生产厂家有近 40 家，能生产 60 多个系列，1200 多个型号的产品，年产量近 24 亿片。

绝大多数的单片机都是基于冯·诺伊曼结构的。所谓冯·诺伊曼结构，也称普林斯顿结构，是一种将程序指令存储器和数据存储器合并在一起的存储器结构。程序指令存储地址和数据存储地址指向同一个存储器的不同物理位置，因此程序指令和数据的宽度相同，如英特尔公司的 8086 中央处理器的程序指令和数据都是 16 位宽。这种结构清楚地定义了嵌入式系统所必需的四个基本部分：一个中央处理器，程序存储器（ROM 或者 FLASH）、数据存储器（SRAM），定时/计数单元，还包含用来与外围设备以及扩展资源进行通信的输入/输出端口——所有这些都集成在单个集成电路芯片上。与通用型 CPU 芯片不同，单片机一般加载很少的外设就可以形成一套功能完整的系统，从而使之很容易集成到其他系统内部完

成相应的功能。而通用 CPU 芯片必须加载大量的外部设备才能体现出其强大的功能。例如，一台主频为 2.4GHz 的 Intel 奔腾 4 处理器必须加载主板、内存、硬盘、显示器、键盘和鼠标等才能构成一台个人电脑。目前使用冯·诺伊曼结构的处理器有很多。除了上面提到的 Intel 公司的处理器，安谋公司的 ARM7、MIPS 公司的 MIPS 处理器也采用了冯·诺伊曼结构。

此外，还有一类单片机并不采用复杂的冯·诺伊曼结构，而采用哈佛结构（Harward）。哈佛结构是一种将程序指令存储和数据存储分开的存储器结构。中央处理器首先到程序指令存储器中读取程序指令内容，解码后得到数据地址，再到相应的数据存储存储器中读取数据，并进行下一步的操作（通常是执行）。程序指令存储和数据存储分开，可以使指令和数据有不同的数据宽度，如 Microchip 公司的 PIC16 芯片的程序指令是 14 位宽度，而数据是 8 位宽度。本书重点介绍的 AVR 处理器中的高端产品 ATmega128 和 ATmega2560 系列也采用哈佛结构。同采用冯·诺伊曼结构的微处理器相比，采用哈佛结构的微处理器通常具有较高的执行效率。其程序指令和数据指令是分开组织和存储的，执行时可以预先读取下一条指令。目前使用哈佛结构的中央处理器和微控制器有很多，除了上面提到的 Microchip 公司的 PIC 系列芯片、ATMEL 的 AVR 系列芯片外，还有摩托罗拉公司的 MC68 系列、Zilog 公司的 Z8 系列和安谋公司的 ARM9、ARM10 和 ARM11 系列等等。

单片机应用系统涉及多种多样的外设或系统的互连和通信，单片机与外部芯片都具备通信功能的接口。这样做可以减少串行总线连线，简化结构，方便安装调整。将总线接口部分集成到芯片中，可以使系统按功能模块直接联接；也会使故障诊断排除十分简单。可利用软件库进行安装，减少软件的开发时间；取消外部接口电路，并能够减少外部接线，从而使系统变得体积小，可靠，价廉。目前已生产出多种产品，但仍未有正式批准的国际标准。

通常，单片机开发中使用的程序设计语言是汇编语言。编写程序后用软件在计算机上编辑，然后编译成机器码文件，再由通信软件将机器码文件送入单片机联机调试。随着单片机系统规模的扩大和功能的复杂，用汇编语言编制程序的方法有明显的缺点：主要是效率低，程序不易维护，不能移植，很不适应要求。C 语言是一种介于高级语言和汇编语言之间的适于单片机开发用的语言。它既有高级语言的特点，又易与汇编语言接口。原来用汇编语言写的程序现在可以用 C 语言编写。只是在体现速度的场合如信息的实时处理、实时控制，以及和硬件打交道的场合如接口驱动程序，才会插入汇编语言程序。一些开发系统都配有 C 语言调试程序、编译器等。

由于单片机自身不具备开发功能，因此，在开发单片机时必须借助某些开发工具。这些开发工具通常称为仿真器或开发系统。仿真器是在线仿真器的简称。仿真器通过特定接口（例如 USB 口）与宿主机相连。又用电缆线把仿真器与目标系统相接。用仿真器中的“仿真单片机”取代目标系统的同类型的“目标单片机”。然后在宿主主机上进行各种操作，从而获得对仿真单片机也即对目标单片机的仿真和控制功能。

1.1.2 单片机的发展历史及其特点

单片机的发展历史并不长，1971 年，Intel 推出了首款有单片机特点的处理器 4004。如果从 1975 年美国 TI（德州仪器）公司发布 TMS1000 系列单片机开始到今天，仅仅 30 多年的时间。但是从 30 年来单片机的发展历程可以看出，单片机技术的发展以微处理单元（MPU）技术及超大规模集成电路技术的发展为先导，在广泛的应用领域的拉动下，表现



出极其强大的生命力。

单片机是从测控对象、环境、接口特点出发,向着增强控制功能、提高各种环境下的可靠性、灵活性的方向发展。因此,单片机有着自己的特点,主要如下所述。

1. 品种多样,型号繁多

为适应各种需要,单片机的品种型号逐年扩充,这就使系统开发者有很大的选择自由。CPU 从 4、8、16、32 到 64 位;有些单片机,例如 AVR 系列,还采用了 RISC 技术。此外,8 位、16 位、32 位单片机共同发展这也是单片机技术发展的一个特点。长期以来,单片机技术的发展是以 8 位机为主的;随着移动通信、网络技术、多媒体技术等高科技产品进入家庭,32 位单片机应用得到了长足的发展。

2. 高性能,大容量

目前,单片机的集成度已达 200 万个晶体管以上,线工作速度已达数十微秒。工作频率达到 30MHz 甚至 40MHz。指令执行周期减到数十微秒。存储器容量(RAM)发展到 4K、8K、64K,ROM 发展到 32K、64K、256K。

3. 增加控制功能,向外部接口延伸

单片机越来越趋向把原属外围芯片的功能集成到本芯片内。现今的单片机已发展到在一块含有 CPU 的芯片上,除嵌入 RAM、ROM 存储器和 I/O 接口外,还有 A/D、PWM、USART、Timer/Counter、DMA、Watchdog、Serial Port、Sensor、driver、显示驱动、键盘控制、函数发生器、比较器等,构成了一个完整的功能强的计算机应用系统。

4. 低功耗

自 20 世纪 80 年代中期以来,NMOS 工艺单片机逐渐被 CMOS 工艺所代替。超大规模集成电路技术由 3 μm 工艺发展到 1.5 μm 、1.2 μm 、0.8 μm 、0.5 μm 、0.35 μm ,进而实现了 0.2 μm 工艺,全静态设计使时钟频率从直流电到数十兆赫兹,这些都使功耗不断下降。Motorola 最近推出任选的 MCORE 可在 1.8V 电压下以 50MHz/48MIPS 全速工作,功率约为 20mW。此外,几乎所有的单片机都有省电运行方式。允许使用的电源电压范围也越来越宽。一般单片机都能在 3~6V 范围内工作,对电池供电的单片机不再需要对电源采取稳压措施。市场上常见的低电压供电的单片机电源下限已由 2.7V 降至 1.2V 左右。最新的 AVR 单片机支持 1.8V 的工作电压,0.9V 供电的单片机已经问世。

5. 应用软件配套

几乎所有的单片机系统都提供了软件库,包括标准应用软件,示范设计方法。从而使用户开发单片机应用系统时更快速、方便,使新的应用产品的开发周期大大缩短了。

1.1.3 单片机的分类

按用途分,单片机可以分为专用和通用两类,专用单片机是针对专门用途设计的芯片。例如,德州仪器公司的 MSP320 系列单片机是一种早期的超低功耗微处理器,主要用作信号处理。该微处理器处理时间短,运算速度快、精度高,有专门的 16x16 乘法器,可以进行高效 FFT 运算。该系列微处理器在语音处理、图像处理、数字滤波等领域有着广泛的应



用。但是专用单片机的应用范围常常受到一些限制，而通用单片机适应性强、应用广泛。目前市场上常见的通用单片机包括 51 系列单片机、PCI 系列单片机、ARM 系列单片机和 AVR 系列单片机等。

按单片机数据总线的位数将单片机分为 4 位、8 位、16 位、32 位机。

1. 4 位单片机

1971 年 Intel 首先推出了 4 位微处理器芯片 4004。此后各厂家相继推出 4 位机产品。因为 4 位机每次只能处理一位 BCD 码数据，故只适于简单控制场合。4 位单片机适合用于各种规模较小的家电类消费产品。一般的单片机厂家均有自己的 4 位单片机产品，有 OKI 公司的 MSM64164C、MSM64481，NEC 公司的 75006×系列、EPSON 公司的 SMC62 系列等。4 位机的典型应用领域包括：PC 机用的输入装置（鼠标、游戏杆）、电池充电器（Ni-Cd 电池、锂电池）、运动器材、带液晶显示的音频、视频产品控制器、一般家用电器的控制及遥控器、玩具控制、记时器、时钟、计算器、多功能电话、LCD 游戏机等。

2. 8 位单片机

8 位单片机是目前品种最为丰富、应用最为广泛的单片机，有着体积小、功耗低、功能强、性能价格比高、易于推广应用等显著优点。目前主要分为 MCS-51 系列及其兼容机型和非 MCS-51 系列单片机。8 位机中最早由 Intel 公司推出的 8051/31 类单片机，该系列也是世界上用量最大的几种单片机之一。由于 Intel 公司在嵌入式应用方面将重点放在 386、奔腾等与 PC 类兼容的高档芯片的开发上，ATMEL、PHILIPS、WINBOND 等则成为 MCS-51 单片机生产的老牌厂家，此外 CYGNAL 及 ST 也推出新的产品，其中，ST 新推出的 μ PSD 系列片内有大容量 FLASH（128/256KB）、8/32KB 的 SRAM、集成 A/D、看门狗、上电复位电路、两路 UART、支持在系统编程 ISP 及在应用中编程 IAP 等诸多先进特性，迅速被广大 51 单片机用户接受。非 51 系列单片机在中国应用较广的有 Motorola 68HC05/08 系列、Microchip 的 PIC 单片机以及 ATMEL 的 AVR 单片机。8 位单片机在自动化装置、智能仪器仪表、过程控制、通信、家用电器等许多领域得到广泛应用。

3. 16 位单片机

1978 年 Intel 最先推出 16 位微处理器 868 系列，与随后 Motorola 的 M68000，Zilog 的 Z8000 成为当时的三大系列 16 位微处理器。由于 8 位机应用广泛，而且能解决问题，使 16 位单片机进入市场较晚，到 1988 年 Intel 才推出 MCS-96 系列机。此机具有高速运算及高速处理和um控制能力，具有 16 位的 CPU，8 位的外部总线（因此又称准 16 位机），丰富高效的指令系统，性能价格比优异，其售价只比 8 位机稍微高一些。片内有 A/D、PWM、Watchdog 及灵活的中断系统。在工作频率 12MHz 时指令执行时间为 1~2 μ s。由于性能功能均良好，一出现便引起工业界广泛注意。

16 位单片机操作速度及数据吞吐能力在性能上比 8 位机有较大提高。目前以 Intel 的 MCS-96/196 系列、TI 的 MSP430 系列及 Motorola 的 68HC11 系列为主。16 位单片机主要应用于工业控制、智能仪器仪表、便携式设备等场合。其中，TI 的 MSP430 系列以其超低功耗的特性广泛应用于低功耗场合。

4. 32 位单片机

随着高新技术在智能机器人、光盘、激光打印机、图像与数据实时处理、复杂实时控制、网络服务器等领域的应用发展, 16 位机已显得无能为力, 需要 32 位机才能满足要求。32 位单片机是单片机的发展趋势, 随着技术发展及开发成本和产品价格的下降, 将会与 8 位机并驾齐驱。32 位机的共同特点是: 寻址能力在吉比特级以上(存储、处理彩色图像需要特大存储器); 高指令执行速度, 每秒 10^6 级条指令, 如 Intel 的 i960A 速度为 66MIPS; 快速运算能力, 具有嵌入浮点运算部件, 运算能力大为增强; 直接支持高级语言和嵌入式实时多任务操作系统。32 位单片机大多数采用 RISC 结构。生产 32 位单片机的厂家与 8 位机的厂家一样多。Motorola、TOSHIBA、HITACH、NEC、EPSON、MITSUBISHI、SAMSUNG 都提供相关产品, 其中, 以 32 位 ARM 单片机及 Motorola 的 MC683xx、68K 系列应用相对广泛。

在 32 位机中, ARM 内核的单片机市场占有率超过了 75%, 广泛应用在信息电器中, 如掌上电脑、个人数字助理(PDA)、可视电话、移动电话、TV 机顶盒、数码相机等嵌入式设备。ARM 已成为移动通信、手持计算、多媒体数字消费等嵌入式解决方案的 RISC 标准。ARM (Advanced RISC Machines) 是微处理器行业的一家知名企业, 是知识产权(IP) 供应商, 它本身不生产芯片, 靠转让设计许可由合作伙伴来生产各具特色的芯片。ARM 公司设计了大量高性能、廉价、耗能低的 RISC 处理器、相关技术和软件产品。目前, 有超过 30 家半导体公司与 ARM 签订了硬件技术使用许可协议, 其中包括 Intel、IBM、SAMSUNG、OKI、LG、NEC、SONY、PHILIPS 等大公司; 其软件系统的合作机构则包括微软、SYMBIAN 和 MRI 等一系列知名公司。ARM 处理器的特点可以概括为: 小体积、低功耗、低成本、高性能、支持 6/32 位双指令集。ARM32 位体系结构被公认为业界领先的 32 位嵌入式 RISC 处理器结构, 所有 ARM 处理器共享这一体系结构。这可确保开发者转向更高性能的 ARM 处理器时, 由于所有产品均采用一个通用的软件体系, 所以相同的软件可在所有产品中运行(至少在理论上如此), 从而使开发者在软件开发上可获得最大回报。

5. 64 位单片机

64 位机在发动机控制、智能机器人、磁盘控制、语音/图像处理、多媒体通信、复杂算法实现以及实时控制等场合使用。但国内仍未见有应用。下面给出一个产品例子。英国 Inmos 公司的 Transputer T800 是 64 位高性能机。它集成有处理器、高速缓存、64 位浮点运算器、存储控制器、串行接口, 适用于超高速并行处理。中央处理器为 32 位, 其浮点运算速度达 12 亿次/秒。RAM4k, I/O 链接通道 4 组 20Mbit/s, 时钟频率 25MHz, 数据传输率 100MB/s, 可寻址外部存储空间 4GB。外存储器传输率 33MB/s。

1.2 AVR 系列微控制器

1.2.1 概述

AVR 单片机是 1997 年由 ATMEL 公司挪威设计中心利用 ATMEL 公司的 Flash 新技术, 研发出的 RISC (Reduced Instruction Set CPU) 精简指令集的高速 8 位单片机。其中, A 与 V 分别代表两位充满工作激情与灵感的挪威年轻研发者姓名的第一个字母, R 代表该芯片为 RISC 架构, 因此, 该系列单片机简称 AVR。



AVR 单片机系列齐全, 可适用于各种不同场合的要求。AVR 单片机有 3 个档次, 表 1-1 给出了 AVR 的产品类型。

表 1-1 AVR 的产品类型

类型	系列	产品型号
低档	Tiny 系列	Tiny11/12/13/15/26/28/2313
中档	AT90S 系列	AT90S1200/2313/8515/8535
高档	ATmega 系列	ATmega8/16/32/64/128/640/1280/1281/2560/2561 以及 ATmega8515/8535

AVR 单片机具有极高的运行速度和丰富的功能, 目前广泛应用于计算机外部设备、工业实时控制、仪器仪表、通讯设备、家用电器等各个领域, 甚至有取代 51 系列的趋势。AVR 是一种 RISC 结构单片机, 采用分离的数据总线和地址总线。同时指令译码采用流水作业, 从而保证了绝大部分指令是单周期指令, 可以使整机达到 1MIPS/MHz 的性能。

AVR 取指令的数据总线是 16 位宽度的, 而取操作数的数据总线是 8 位宽度的。AVR 的每一条指令都是 16 个比特, 但不影响 ROM 存储器中常量表的使用, 即常量表仍然可以单个字节地访问。

AVR 使用 32 个通用寄存器 (R0~R31), 因而没有 MCS51 的单累加器的限制。另外, 32 个寄存器中的最后 6 个寄存器可以组成 3 个 16 位的数据指针 X、Y 和 Z。这两个特点给使用 C 语言编程带来了很大的方便, 也使 AVR 单片机具有较高的 C 语言密度。AVR 拥有单独的片内程序 ROM 空间。AVR 架构最多可支持到 8M 字节的空间。目前生产的最多支持到 256K 字节。数据存储器空间片内片外统一编址一般从 0x60 地址开始分配。ATmega128 则可以从 0x100 开始分配, 直到 0xffff 地址。通用工作寄存器 R0~R31 同时映射为数据存储器空间的 0~0x1f 段。

输入/输出寄存器空间有单独的 I/O 地址 0x00~0x3f, 同时映射为数据存储器空间的 0x20~0x5f 段。两种不同的方式地址相差 0x20。

AVR 的中断系统丰富多样。每个中断源都有自己单独的中断向量入口。中断向量地址较低的中断拥有较高的优先级。AVR 可以使用软件的方法来实现多个中断优先级的处理。AVR 的每个中断源都有单独的屏蔽位和标志位。在 MCUCR 寄存器中还有一个中断全局屏蔽位 SE。AVR 在响应中断时禁止全局中断, 在中断返回时开启全局中断。通过在中断程序的入口处用 SEI 指令开启中断, 可以使 AVR 响应其他优先级高的中断以实现软件中断优先级处理。

AVR 具有功能很强的定时/计数器。除了基本的定时计数功能外, 还可用于捕捉比较匹配。AVR 支持多种时钟方式, 如外部晶振、外部 RC 振荡、外部时钟和内部 RC 振荡等。AVR 单片机的片内 RC 振荡器的工作频率率可以校正到 1% 的精度。AVR 单片机均支持片内看门狗定时器 (WATCHDOG-WDT), 在满足用户需求的同时降低了成本。部分型号的 WDT 可以通过编程熔丝位使能。AVR 单片机支持实时时钟 (RTC), 最高可以外接一个 32.768KHz 的晶振以产生时间基准信号。

AVR 的端口为真正的三态双向接口。每个端口关联 3 个寄存器, 分别为 PORTx、DDRx 和 PINx。其中, x 根据不同的 MCU 可以分别为 A~L。DDRx 为端口方向寄存器, 控制



端口的方向。当 DDRX 的某一位置为 1 时，相应的端口线为输出，输出内容由对应 PORTx 寄存器中的相应位决定。当 DDRx 的某一位置 0 时，相应的端口线为输入。此时如果对应 PORTx 中的相应位为 1，则是有上拉的输入状态，否则为高阻态输入。PORTx 为端口寄存器，其内容决定了端口输出的内容或输入时上拉是否打开。PINX 为读引脚地址，当读取端口引脚电平时，应该读取 PINX 而不是读取 PORTX。部分端口还具有第二或第三功能，如串行同步/异步接口 (USART)、同步串行接口 (SPI) 等。

绝大部分的 AVR 系列单片机内部都拥有 EEPROM，以方便用户保存一些重要参数。AVR 单片机内部的 EEPROM 采用了单独的总线结构，有较快的访问速度和较简洁的工作代码。在程序访问 EEPROM 时，通过三个寄存器 (EECR、EEDR 和 EEAR) 进行。EECR 控制 EEPROM 的读写、EEAR 决定访问 EEPROM 的地址，而 EEDR 存放访问 EEPROM 的数据。

AVR 的 UART 或 USART 是一个全双工的部件，有单独的波特率发生器。可以用较低的晶振频率产生较高的波特率。支持最高 9 位的工作方式和多机通信。部分 AVR 单片机只具有 UART，而新款 AVR 单片机的 USART 不仅可以异步工作，还可以全双工地以同步方式工作，在同步方式工作时可以有很高的通信速率。部分没有 UART 的低档 AVR 单片机可以用软件来模拟 UART 的运行。

AVR 的 SPI 口可以用于在程序下载时对 AVR 芯片的编程进行控制。在程序运行时是一个双工的 SPI 端口：既可以 SPI 主机方式运行，也可以 SPI 从机方式运行，实现全双工通信。目前，主流 AVR 均有两线总线接口 I²C，也支持中断工作方式。

部分 AVR 单片机有多通道的 10 位逐次比较式 AD 转换器 (ADC)，支持内部或外部基准。部分型号只支持模拟电压信号的单端方式输入，还有一部分型号，如 ATmega128，除支持单端输入外，还支持模拟电压的差分输入和内部程控放大。AVR 的模拟比较器可以产生中断触发定时器的捕捉功能，从而使之在检测电压和一些低成本 ADC 方案中获得良好应用。AVR 单片机均具有上电复位电路，部分型号还具有可编程的低电压复位 BOD 功能。

AVR 支持 C 语言开发，C 语言工具如 ICCAVR、ATMANAVR 等。ATMEL 公司还为 AVR 开发者提供免费软件，如 AVRSTUDIO，GNU 则提供免费的 C 语言编译器 AVRGCC。

在互联网上，AVR 最新信息可以通过 ATMEL 公司的网站获取，网址为 <http://www.ATMEL.com>。广州天河双龙电子有限公司网站也为 AVR 的推广作了大量工作，推出了一大批优秀的产品，其公司网站为 <http://www.sl.com.cn>。读者还可以通过访问一些论坛来交流 AVR 的心得，例如 <http://www.avrfreaks.net>，以及国内从事 AVR 开发的著名专家马潮老师指导的论坛 <http://www.ouravr.com> 等。此外，还可以通过国外一些著名的大学网站获取 AVR 的开发信息，如斯坦福大学 (<http://www.stanford.edu>)、科内尔大学 (<http://instructl.cit.cornell.edu/courses>) 等。

1.2.2 AVR 处理器的特点

1. 速度快、时钟频率高

作为高速单片机，AVR 处理器可以达到一个时钟周期执行一条指令，绝大部分指令都为单周期指令。而 PIC 单片机要 4 个时钟周期执行一条指令，MSC-51 执行一条指令要 12 个时钟周期。此外，AVR 处理器支持多种外部时钟源，高端 AVR 处理器 ATmega128 最高可达到 16MHz。



2. I/O 口功能强、驱动能力大

AVR 器件引脚从 8 脚到 64 脚再到 100 脚，还有各种不同封装供选择。详细的选型信息可以参考 ATMEL 的网站。I/O 口功能强、驱动能力大。AVR 单片机的 I/O 口是真正的 I/O 口，能正确反映 I/O 口输入/输出的真实情况。I/O 口有输入/输出、三态高阻输入，也可设定内部上拉电阻作输入端的功能，以适应各种应用的需要（多功能 I/O 口）。在工业级产品中，支持大电流（灌电流）设置，通常为 10~40mA，从而可直接驱动可控硅 SSR 或继电器，节省了外围驱动器件。

3. 存储功能灵活、外设丰富

AVR 单片机采用了多次可擦写的 FLASH 存储器，给用户的开发生产和维护带来极大方便。AVR 单片机的 FLASH 程序存储器，可擦写 1000 次以上，而新工艺 AVR 器件，程序存储器擦写可达 10000 次以上；此外，AVR 单片机还拥有可擦写 100000 以上的 EEPROM 存储器。

AVR 单片机有丰富的外设，如 AD 转换器、PWM、UART（USART）接口、看门狗定时器（WATCHDOG）等。部分高档型号片内振荡器提供系统 1~16MHz 的系统时钟，使该类单片机无外加晶振器件即可工作；还拥有 8 位和 16 位定时/计数器（T/C）可用作比较器。计数器外部中断和 PWM（也可用作 D/A）用于控制输出，某些型号的 AVR 单片机有 3~4 个 PWM，是作电机无级调速的理想器件。AVR 单片机内带模拟比较器，I/O 口可用作 A/D 转换，可组成廉价的 A/D 转换器。ATmega128 就具有 8 路 10 位 A/D。高端 AVR 单片机如 ATmega2560 还可以组成零外设元件单片机系统，使该类单片机无外加元器件即可工作，简单方便，成本又低。AVR 单片机可重置启动复位，以提高单片机工作的可靠性。还有看门狗定时器实行安全保护，可防止程序飞跑，提高了产品的抗干扰能力。

4. 低功耗、高度保密性

AVR 是低功耗单片机，具有多种省电模式（Power Down）及闲置（Idle）低功耗功能。一般耗电在 1~2.5mA；对于典型功耗情况，WDT 关闭时为 100nA，适用于电池供电的应用设备。有的器件最低 1.8V 即可工作。此外，AVR 还具有不可破解的位加密锁 Lock Bit 技术，且具有多重密码保护锁死（Lock）功能。

5. 简单易上手、开发成本低

对于单片机来说，用高级语言编程成为一种标准编程方法。AVR 单片机的开发目的就是在于能采用 C 语言编程，从而能高效地开发出目标产品。为了对目标代码大小、性能及功耗的优化，ATMEL 提供了完全免费的 AVR 开发环境，包括汇编器、支持汇编和高级语言源代码级调试的模拟和仿真环境、GNU 组织提供免费的 AVRGCC C 编译器支持。

AVR 单片机支持程序的在系统编程 ISP，开发成本较低。其中，高端系列还支持在应用编程 IAP，AVR 单片机便于升级，同程序写入一样，可以直接在电路板上进行程序修改、烧录等操作，这样便于产品升级。单片机初学者只需一条 ISP 下载线，就能够把编辑、调试通过的软件程序直接在线写入 AVR 单片机中（即把 PC 机上编译好的程序写到单片机的程序存储器中，不需购买仿真器、编程器、擦抹器和芯片适配器等，即可进行所有 AVR 单片机的开发应用，这可以节省很多开发费用。AVR 单片机因此被称为“一线打天下”。

