



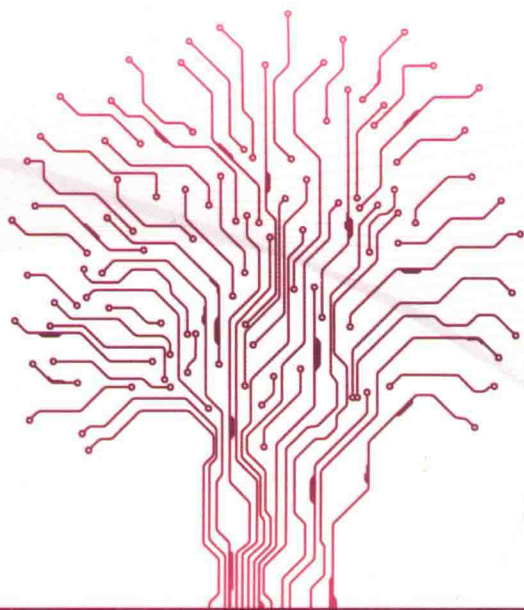
普通高等教育“十三五”规划教材

# 单片机嵌入式系统 原理及应用

Principle and Application of  
Embedded Single Chip Microcomputer System

第2版

◎主编 王博 贾好来



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

# 单片机嵌入式 系统原理及应用

第2版

主 编 王 博 贾好来  
副主编 张军朝 吕 高 王爱乐 武兴华  
参 编 郝俊青 李 莉 米娟芳

机械工业出版社

本书以 8051 单片机为主线, 辅以 ARM32 位单片机, 全面、详细地介绍了单片机嵌入式系统的原理和应用。内容包括单片机嵌入式系统简介, 8051 单片机的结构体系, 8051 指令系统, 8051 单片机程序设计基础, 8051 单片机嵌入式系统开发和仿真, 8051 单片机的中断系统, 8051 单片机的定时器/计数器, 8051 单片机的串行接口及串行总线, 8051 单片机系统扩展与接口技术, 实时操作系统 RTX51, 单片机应用系统开发及实例, ARM 32 位单片机的结构、编程及开发工具。本书的特点: 内容丰富, 由浅入深, 循序渐进, 编排顺序合理, 可读性好, 实用性强, 有丰富的例题及习题。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、电子与计算机工程、自动化、机械电子工程、电子信息工程、通信工程、车辆工程等专业的教材, 也可供单片机嵌入式工程开发及应用等领域的技术人员阅读和参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

单片机嵌入式系统原理及应用/王博, 贾好来主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2019. 6

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-62542-1

I. ①单… II. ①王… ②贾… III. ①单片微型计算机—高等学校—教材 IV. ①TP368. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 072568 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 于苏华 责任编辑: 于苏华 王 康

责任校对: 潘蕊 肖琳 封面设计: 张静

责任印制: 郜敏

北京富博印刷有限公司印刷

2019 年 7 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 21 印张 · 519 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-62542-1

定价: 49.80 元

电话服务

客服电话: 010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

机工教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

## 第2版前言

目前,单片机嵌入式系统应用技术已成为一项新的工程应用技术,其应用进入飞速发展的阶段,涉及家用电器、航天、机器人控制、医疗、汽车、通信、信息技术等工业领域。单片机作为嵌入式微控制器具有集成度高、功能强、结构简单、易于掌握、应用灵活、可靠性高、价格低廉等优点,这为掌握、应用单片机嵌入式系统提供了便利条件,同时,单片机也受到越来越多工程技术人员的关注。目前,大多数国内高等院校将单片机嵌入式系统作为必修课程。

《单片机嵌入式系统原理及应用》第1版于2013年出版,该书在内容编排上由浅入深、循序渐进、分散难点、突出实用性,使没有学过单片机嵌入式系统的初学者也能比较顺利地阅读该书。该书出版发行后,收到了许多高校教师的邮件或来电,对教材内容和特点给予了充分肯定,同时也提出了一些改进意见。为了使本书的特点更加鲜明,充分反映单片机嵌入式系统技术发展的趋势,更好地体现培养应用型人才的要求,编者对第1版进行了修订。

这次修订,本着开放、求新、务实、增强系统性的原则,在第1版的基础上,进一步融合了单片机嵌入式系统中最新的应用技术。单片机程序设计基础部分补充了Keil C51开发工具、程序开发过程以及与C51程序结构相关知识点的介绍;系统扩展与接口技术部分补充了功能更为强大的8155并行I/O接口芯片的介绍;增加了最新的高速并行D-A转换器DAC1208的介绍;补充了目前广泛应用的单总线技术的介绍,并详细介绍了数字温度传感器DS18B20的应用实例。本书配套有中英文PPT教学课件,以满足教学与自学的需要。

本书可作为本科、专科、高职高专等高等院校的电气工程及其自动化、电子与计算机工程、自动化、机械电子工程、电子信息工程、通信工程、车辆工程等相关专业的教材,也可供单片机嵌入式工程开发及应用等领域的技术人员阅读和参考。

本书主编王博编写第1、12章,贾好来编写第2章;副主编张军朝编写第9章,吕高编写第10章,王爱乐编写第11章,武兴华编写第3、4章;参编郝俊青编写第5、8章及附录,李莉编写第6章,米娟芳编写第7章。本书由王博负责全书的统稿。

在本书的修订过程中,得到太原理工大学、江苏大学、太原科技大学、山西大学有关领导的大力支持与帮助,得到同行专家与学者的热情帮助,他们提出了许多建设性意见,在此,谨向给予我们支持和帮助的单位和个人表示最诚挚的谢意!

在本书的修订过程中,参考了国内外大量的文献和资料,在此向这些作者致以衷心的感谢。

编者

## 第1版前言

自编者的《MCS-51 单片机原理及应用》2007 年出版以来，无论是单片机应用技术，还是单片机教学目的和要求、教学手段都有了很大的变化。首先，国内已经广泛流行以 8051 为内核、经过改进的 SoC 单片机或精简指令集单片机，经典 MCS-51 单片机已经退化为教学单片机，且使用场合逐步减少；单片机的编程技术已经完全从早期的 EPROM 编程技术，进化为先进的 Flash 或 ISP Flash 或 IAP，编程更方便；片内功能部件更加丰富，设计更方便，系统可靠性提高；串行总线如 SPI、I<sup>2</sup>C、USB 接口的使用，扩展更方便；全静态设计，功耗更低。其次，社会对单片机人才的需求提出了更高的要求，不仅要求熟悉理论，而且要求有足够的实践能力，国家为此推出了卓越工程师教育培养计划，不仅各高校努力加强单片机的实践教学，社会上很多公司也在努力开展单片机实践能力的培养，以弥补高校教育重理论轻实践的不足。第三，单片机的 C 语言编程技术以及 C 语言和汇编语言的混合编程已经成为单片机开发人员必备的技术。编者的《MCS-51 单片机原理及应用》是最早将单片机的 C51 编程引入单片机教学的教材之一，然而，时过境迁，目前出版的单片机教材基本上是既有汇编语言，又有 C51 语言。第四，嵌入式系统的内容已经进入到本科教学当中，个别高校甚至开始尝试在本科阶段讲授 32 位的基于 ARM 的嵌入式系统。编者认为，基于 ARM 的嵌入式系统的内容和概念对于本科生来说，难度过大，本科阶段的讲授内容应以 8051 单片机嵌入式系统为主。

有鉴于此，作者在教材《MCS-51 单片机原理及应用》的基础上，编写了《单片机嵌入式系统原理及应用》，力求使教材内容融典型性、先进性、实用性、可读性、案例的可操作性为一体，使读者在掌握本书内容的基础上，初步具备应用系统开发的能力。

本书第 1 章简要介绍了嵌入式系统的概况，包括通用计算机系统和嵌入式计算机系统的对比，嵌入式系统的定义，嵌入式系统的分类，嵌入式系统中的处理器，单片机的类型，Atmel 公司的单片机，嵌入式系统中的操作系统，单片机的发展趋势。

第 2 章介绍了 8051、AT89S52 单片机的结构体系，是全书的重点内容，主要包括 8051 内部结构、引脚，微处理器，存储器结构，并行 I/O 口，时钟电路与时序，复位及复位电路，单片机的低功耗模式，AT89S52 的串行 ISP 编程，以及单片机最小系统设计。

第 3 章介绍了 8051 单片机的指令系统，包括汇编语言指令格式，寻址方式，单片机指令分类，数据传送指令，算术运算指令，逻辑运算指令，转移控制指令，空操作指令和位处理指令。

第 4 章介绍了 8051 单片机程序设计基础，包括汇编语言程序结构，典型汇编程序设计，C51 基础，C51 和汇编语言的混合编程，是单片机的应用基础。

第 5 章通过实例详细介绍了 8051 单片机嵌入式系统开发环境 Keil  $\mu$ Vision4 的开发方法及步骤，单片机仿真软件 Proteus，以及 Keil 和 Proteus 的联调；另外，介绍了 AT89S52 程序下载电缆制作和下载方法。

第 6 章介绍了 8051 单片机的中断系统。

第 7 章介绍了 8051 单片机的定时器/计数器，以及 AT89S52 的定时器/计数器 T2，定时



监视器 (Watchdog Timer), 定时监视器在嵌入式系统中有非常重要的地位, 对嵌入式系统的可靠性有至关重要的作用。

第8章首先介绍了8051单片机的串行接口和RS-232-C的连接, 然后介绍串行总线SPI、I<sup>2</sup>C、1-Wire规范以及8051单片机的模拟, 为8051单片机和串行总线器件接口打下基础。

第9章介绍了8051单片机系统扩展与接口技术。由于技术的进步, EPROM已经被淘汰, E<sup>2</sup>PROM和Flash的存取时间已经和RAM非常接近, 传统意义上的程序存储器和数据存储器区别已经非常模糊。并行接口的E<sup>2</sup>PROM和Flash既可作为数据存储器又可作为程序存储器, 而串行接口(SPI、I<sup>2</sup>C、1-Wire)的E<sup>2</sup>PROM和Flash只能作为数据存储器。第9章主要包括程序存储器的扩展、数据存储器的扩展、I/O接口扩展、键盘与显示器接口、单片机和ADC及DAC的接口、单总线1-Wire接口的数字温度传感器DS18B20及其应用。

第10章以Keil自带的实时操作系统RTX51为例, 介绍了实时操作系统的基本概念和实时操作系统的基本算法, 如时间片轮转法、任务优先级法, 最后给出了两个基于RTX51的程序。

第11章介绍了单片机应用系统开发基本方法和步骤以及两个实例, 其中, 第1个实例软件的编写是基于常见的循环程序; 第2个实例的软件基于实时操作系统RTX51的时间片轮转法, 规模中等、难易适中, 方便读者学习。

第12章介绍了目前流行的ARM 32位单片机的结构、编程及开发工具, 包括ARM内核体系结构, ARM编程模型, ARM汇编指令, ARM汇编程序设计, ARM程序开发工具ADS。

本书所有程序在Keil编译下通过, 有的内容经Proteus仿真后, 经实验板验证, 在正文中有所介绍。本书每章后附有小结以及习题与思考题, 供读者课后复习。

为方便开展双语教学, 编写组制作了本书的中英文PPT课件。

本书注重学生实践能力的培养, 这是由课程的性质和社会需求所决定的。实践能力对于理工科学生至关重要, 一个人的能力和水平, 最后都要通过实践体现出来, 让实践说话, 只有学生对基础知识有了更深刻的认识, 同时具备了相应的实际能力, 才能达到和满足社会用人需求。编者建议, 读者仿真、实现教材中的案例, 以增强实践能力, 有条件的学生可在教师的指导下参加电子制作, 解决一些实际问题, 或参加各省、全国的大学生电子竞赛。

希望本书的出版能够满足高校电气、机电、通信、自动化、电子等专业的学生学习“单片机嵌入式系统”“单片机原理和接口技术”“单片机原理及应用技术”等课程理论和实践教学的需要。

本书由贾好来担任主编并编写第1章, 吕高担任副主编并编写第9、10章, 王爱乐担任副主编并编写第11章, 王博担任副主编并编写第12章, 武兴华担任副主编并编写第2章。郝俊青编写第5、8章及附录, 李莉编写第6章, 米娟芳编写第7章, 张灵编写第3章, 石栋华编写第4章。

在本书的编写过程中, 得到电气工程及其自动化专业教学指导委员会委员、太原理工大学宋建成教授, 江苏大学朱焜秋教授、孙宇新教授、黄永红教授、刘贤兴教授、姜晋文副教授、黄振跃老师, 太原科技大学孙志毅教授、杨晋岭老师, 太原理工大学阳泉学院史宝忠副教授, 山西大学工程学院王欣峰老师自始至终的支持和帮助; 太原理工大学张灵博士、郑丽君博士在使用编者的《MCS-51单片机原理及应用》教材中, 提出了许多建设性意见。在此一并致以衷心的感谢。

编者力求将实践和理论相结合, 科研和教学相结合, 先进和实用相结合, 编写出21世



纪的高水平教材，但由于编者水平有限，加之单片机嵌入式系统技术日新月异，书中错误和不当之处，敬请读者指正。

编者

# 目 录

## 第 2 版前言

## 第 1 版前言

## 第 1 章 单片机嵌入式系统简介 ..... 1

### 1.1 单片机嵌入式系统定义 ..... 1

#### 1.1.1 通用计算机系统和嵌入式系统 ..... 1

#### 1.1.2 嵌入式系统定义 ..... 2

#### 1.1.3 嵌入式系统分类 ..... 2

### 1.2 嵌入式系统中的处理器 ..... 3

#### 1.2.1 嵌入式微处理器 ..... 3

#### 1.2.2 嵌入式单片机 ..... 4

#### 1.2.3 数字信号处理器 ..... 4

#### 1.2.4 专用系统处理器 ..... 4

#### 1.2.5 多处理器系统 ..... 5

### 1.3 单片机的类型 ..... 5

#### 1.3.1 8 位、16 位、32 位单片机 ..... 5

#### 1.3.2 CISC 和 RISC 结构单片机 ..... 7

#### 1.3.3 单核、双核、3 核单片机 ..... 7

#### 1.3.4 JTAG 接口在线调试单片机 ..... 8

#### 1.3.5 总线型单片机和非总线型单片机 ..... 9

#### 1.3.6 专用型单片机 ..... 9

### 1.4 Atmel 公司生产的单片机 ..... 10

#### 1.4.1 以 8051 为内核的 8 位单片机 ..... 10

#### 1.4.2 精简指令集 AVR 单片机 ..... 12

#### 1.4.3 基于 ARM 的 32 位单片机 ..... 13

### 1.5 嵌入式系统中的操作系统 ..... 13

#### 1.5.1 嵌入式操作系统 ..... 13

#### 1.5.2 实时操作系统 ..... 14

#### 1.5.3 分时操作系统 ..... 15

#### 1.5.4 嵌入式实时操作系统需要 满足的条件 ..... 15

#### 1.5.5 嵌入式操作系统的现状 ..... 16

### 1.6 嵌入式系统和单片机发展 趋势 ..... 16

## 本章小结 ..... 17

## 习题与思考题 ..... 18

## 第 2 章 8051 单片机的结构体系 ..... 19

### 2.1 8051 单片机的主要特性 ..... 19

### 2.2 8051 单片机的内部结构 ..... 19

### 2.3 8051 单片机的引脚 ..... 21

### 2.4 8051 单片机的微处理器 ..... 23

#### 2.4.1 运算器 ..... 23

#### 2.4.2 控制器 ..... 24

### 2.5 8051 单片机的存储器结构 ..... 25

#### 2.5.1 程序存储器 ..... 26

#### 2.5.2 8051 的内部数据存储器 ..... 27

#### 2.5.3 特殊功能寄存器 (SFR) ..... 27

#### 2.5.4 位地址空间 ..... 30

#### 2.5.5 外部数据存储器 ..... 31

### 2.6 8051 单片机的并行 I/O 口 ..... 31

#### 2.6.1 8051 的 I/O 结构 ..... 32

#### 2.6.2 读-修改-写特性 ..... 33

#### 2.6.3 并行 I/O 口的应用要点 ..... 34

### 2.7 8051 的时钟电路与时序 ..... 34

#### 2.7.1 时钟电路 ..... 35

#### 2.7.2 8051 单片机的时序 ..... 35

### 2.8 8051 的复位和复位电路 ..... 37

#### 2.8.1 复位和复位电路 ..... 37

#### 2.8.2 复位时序 ..... 38

### 2.9 8051 单片机的低功耗模式 ..... 40

#### 2.9.1 空闲工作方式 ..... 41

#### 2.9.2 掉电工作方式 ..... 41

### 2.10 AT89S52 的片内 Flash 串行 编程操作 ..... 42

#### 2.10.1 标志字节 ..... 42

#### 2.10.2 程序存储器的加密 ..... 42

#### 2.10.3 Flash 存储器的串行编程 ..... 43

### 2.11 AT89S52 单片机最小系统 设计 ..... 45

## 本章小结 ..... 46

## 习题与思考题 ..... 46

## 第 3 章 8051 指令系统 ..... 48

### 3.1 汇编语言指令格式 ..... 48

#### 3.1.1 汇编语言执行指令格式 ..... 48

#### 3.1.2 汇编语言伪指令 ..... 49



3.2 寻址方式 .....	51	4.3 C51 基础 .....	82
3.2.1 寄存器寻址 .....	51	4.3.1 C51 编程概述 .....	82
3.2.2 直接寻址 .....	51	4.3.2 Keil C51 标志符与关键字 .....	83
3.2.3 立即寻址 .....	51	4.3.3 C51 数据与数据类型 .....	83
3.2.4 寄存器间接寻址 .....	52	4.3.4 C51 变量及其存储方式 .....	84
3.2.5 基址加变址寄存器间接寻址 .....	52	4.3.5 C51 数据的存储类型和 存储模式 .....	86
3.2.6 位寻址方式 .....	52	4.3.6 C51 对 8051 特殊功能寄存器的 定义 .....	88
3.2.7 相对寻址方式 .....	53	4.3.7 C51 对 8051 并行接口的定义 .....	90
3.3 8051 单片机指令分类 .....	53	4.3.8 中断服务函数与寄存器组的 定义 .....	91
3.4 数据传输指令 .....	54	4.3.9 函数的参数和局部变量的存储 器模式 .....	92
3.4.1 一般传输指令 .....	54	4.4 C51 和汇编语言的混合编程 .....	92
3.4.2 累加器传输指令 .....	55	4.4.1 函数名的转换 .....	93
3.5 算术运算指令 .....	56	4.4.2 参数传递和函数返回规则 .....	93
3.5.1 加法指令 .....	56	本章小结 .....	99
3.5.2 减法指令 .....	57	习题与思考题 .....	99
3.5.3 乘法指令和除法指令 .....	58	<b>第5章 8051 单片机嵌入式系统开发和     仿真</b> .....	100
3.6 逻辑运算指令 .....	59	5.1 8051 单片机软件开发集成环境—— Keil $\mu$ Vision4 .....	100
3.6.1 单操作数指令 .....	59	5.2 Keil 项目开发流程 .....	101
3.6.2 双操作数指令 .....	60	5.3 AT89S5X 单片机程序的下载 .....	104
3.6.3 逻辑异或指令 .....	60	5.3.1 并口 ISP 下载电缆 .....	104
3.7 转移控制指令 .....	61	5.3.2 USB-ISP 下载电缆 .....	105
3.7.1 调用和返回指令 .....	61	5.3.3 利用 USB-ISP 下载电缆下载程序到 AT89S52 .....	105
3.7.2 无条件转移指令 .....	61	5.4 8051 单片机 Proteus 仿真 基础 .....	107
3.7.3 条件转移指令 .....	62	5.4.1 Proteus 仿真平台 .....	107
3.7.4 比较转移指令 .....	62	5.4.2 Proteus 的基本操作 .....	108
3.7.5 循环转移指令 .....	63	5.4.3 Proteus 和第三方软件接口 .....	115
3.8 空操作指令 .....	63	5.4.4 Keil 和 Proteus 的联合仿真 .....	115
3.9 位处理指令 .....	63	本章小结 .....	119
本章小结 .....	64	习题与思考题 .....	119
习题与思考题 .....	65	<b>第6章 8051 单片机的中断系统</b> .....	120
<b>第4章 8051 单片机程序设计基础</b> .....	66	6.1 微型计算机中断技术概述 .....	120
4.1 汇编语言程序结构 .....	67	6.1.1 中断的概念 .....	120
4.1.1 简单程序结构 .....	67	6.1.2 中断处理过程 .....	120
4.1.2 分支结构 .....	68	6.2 8051 单片机的中断控制 .....	121
4.1.3 循环结构 .....	68	6.2.1 中断源与中断标志位 .....	121
4.1.4 子程序及其参数传递方法 .....	72		
4.1.5 中断服务程序 .....	75		
4.2 8051 单片机典型汇编程 序设计 .....	75		
4.2.1 无符号的多字节加法 .....	75		
4.2.2 双字节二进制无符号数乘法 .....	76		
4.2.3 码制转换程序 .....	77		
4.2.4 查表程序 .....	78		



6.2.2 与中断有关的特殊功能寄存器	122	8.4.1 I <sup>2</sup> C 串行总线结构和基本特性	160
6.2.3 中断响应过程	125	8.4.2 I <sup>2</sup> C 串行总线时序和数据传输	162
本章小结	131	8.4.3 I <sup>2</sup> C 总线寻址与通信过程	165
习题与思考题	132	8.4.4 I <sup>2</sup> C 接口模拟	166
<b>第7章 8051 单片机的定时器/计数器</b>	<b>133</b>	*8.5 单总线 1-Wire 及其 8051 的 模拟	169
7.1 定时器/计数器的结构	133	8.5.1 概述	169
7.2 8051 的定时器/计数器 T0 和 T1 的控制	133	8.5.2 单总线 1-Wire 的硬件结构	169
7.2.1 定时器/计数器 T0 和 T1 的专用 寄存器	134	8.5.3 单总线 1-Wire 的供电方式	170
7.2.2 定时器/计数器 T0 和 T1 的工作 模式	135	8.5.4 单总线 1-Wire 的通信流程	170
7.2.3 T0 和 T1 的应用实例	138	8.5.5 单总线 1-Wire 的时序图	171
7.3 AT89S52 的定时器/计 数器 T2	141	8.5.6 单总线 1-Wire 的 8051 模拟	172
7.3.1 定时器 2 的自动重装模式	142	本章小结	174
7.3.2 定时器 2 的捕获模式	143	习题与思考题	175
7.3.3 定时器 2 的波特率发生器	144	<b>第9章 8051 单片机系统扩展与接口 技术</b>	177
7.3.4 定时器 2 的可编程时钟输出 模式	144	9.1 8051 程序存储器的扩展	177
7.4 定时监视器	145	9.1.1 8051 外部程序存储器的操作 时序	178
7.4.1 AT89S52 的定时监视器	145	9.1.2 并行 E <sup>2</sup> PROM 及其扩展	179
7.4.2 辅助功能寄存器 AUXR	146	9.1.3 并行 Flash 存储器 FM16W08 及其 扩展	181
本章小结	146	9.2 8051 数据存储器扩展	184
习题与思考题	147	9.2.1 并行接口外部数据存储器的 操作时序	184
<b>第8章 8051 单片机的串行接口及串行 总线</b>	<b>148</b>	9.2.2 8051 单片机扩展并行接口外部数据 存储器 SRAM	185
8.1 8051 单片机的串行接口	148	9.2.3 8051 扩展 SPI 接口外部 Flash 数据 存储器 FM25040B	186
8.1.1 串行接口的 4 种工作模式	148	9.3 8051 的 I/O 接口扩展	190
8.1.2 串行接口控制寄存器	150	9.3.1 I/O 接口的功能	190
8.1.3 波特率的产生	152	9.3.2 端口的编址	190
8.1.4 多机通信	153	9.3.3 I/O 数据的几种传送方式	191
8.2 8051 和 RS-232-C 标准总线的 通信接口	155	9.3.4 可编程并行 I/O 芯片 8255A	191
8.2.1 RS-232-C 接口引脚描述	155	9.3.5 可编程并行 I/O 芯片 8155	200
8.2.2 RS-232-C 接口的具体规定	156	9.3.6 用串行口扩展并行 I/O 口	207
8.2.3 8051 和 RS-232-C 的接口	157	9.4 键盘与显示器接口	208
*8.3 SPI 总线及 8051 单片机的 模拟	157	9.4.1 键盘接口	208
8.3.1 SPI 总线规范	158	9.4.2 7 段式 LED 显示器接口	210
8.3.2 SPI 总线的 8051 单片机模拟	159	9.4.3 LED 点阵接口	212
*8.4 I <sup>2</sup> C 串行总线接口及其 8051 单片机模拟	160	9.4.4 字符式 LCD 接口	215
		9.5 8051 单片机和 ADC 及 DAC 的 接口	220



9.5.1	8051 与 DAC0832 的接口	220	11.2.3	程序设计	265
9.5.2	8051 与 DAC1208 的接口	225	11.3	基于实时操作系统 RTX51 的万年历设计	271
9.5.3	8051 和 ADC 器件的接口	227	11.3.1	电路原理图	271
9.5.4	应用 SPI 串行总线扩展 12 位 A-D 转换器 TLC2543	231	11.3.2	实时时钟 DS1302	273
9.6	单总线接口及其应用	237	11.3.3	主要程序代码	275
9.6.1	单总线简介	237	本章小结		279
9.6.2	数字温度传感器 DS18B20	238	习题与思考题		279
9.6.3	利用 DS18B20 为 8051 扩展数字温度传感器	243	<b>第 12 章 ARM 32 位单片机的结构、编程及开发工具</b>		280
本章小结		244	12.1	ARM 内核体系结构	280
习题与思考题		244	12.1.1	ARM 体系结构版本	281
<b>第 10 章 实时操作系统 RTX51</b>		246	12.1.2	ARM 内核	282
10.1	实时操作系统	246	12.2	ARM 编程模型	283
10.1.1	多任务系统	246	12.2.1	处理器状态	283
10.1.2	多任务系统中任务的定义和状态	246	12.2.2	处理器模式	284
10.1.3	多任务系统中的任务特性	247	12.2.3	寄存器集	285
10.1.4	实时操作系统特性	247	12.2.4	体系结构直接支持的数据类型	288
10.2	RTX51 实时操作系统	247	12.2.5	存储器及存储器映射 I/O	289
10.2.1	RTX51 实时操作系统的特点	248	12.2.6	异常	294
10.2.2	RTX51 的系统配置	250	12.3	ARM 汇编指令	297
10.2.3	RTX 51 的典型功能函数	251	12.3.1	ARM 处理器寻址方式	297
10.2.4	RTX51 的任务调度方法	253	12.3.2	指令集	297
10.2.5	任务管理	255	12.3.3	伪指令	301
10.3	RTX51 精简版例程	256	12.4	ARM 汇编程序设计	305
10.4	RTX51 全功能版例程	256	12.4.1	ARM 汇编语句格式	305
本章小结		257	12.4.2	ARM 汇编语言符号	306
习题与思考题		257	12.4.3	ARM 汇编语言表达式	307
<b>第 11 章 单片机应用系统开发及实例</b>		259	12.4.4	ARM 汇编程序结构	310
11.1	单片机应用系统的开发过程	259	12.5	ARM 程序开发工具 ADS	311
11.1.1	开发者必须具备的知识和能力	259	本章小结		318
11.1.2	单片机应用系统的开发步骤	260	习题与思考题		319
11.2	电喷汽车喷油器清洗机控制系统	262	附录		320
11.2.1	系统功能描述及工作原理	262	附录 A	MCS-51 指令表	320
11.2.2	系统方案及电路设计	263	附录 B	ASCII (美国标准信息交换码) 表	324
			参考文献		326



# 第1章 单片机嵌入式系统简介

## 1.1 单片机嵌入式系统定义

### 1.1.1 通用计算机系统和嵌入式系统

计算机系统可分为通用计算机系统和嵌入式计算机系统。通用计算机系统主要包括台式计算机、笔记本电脑和其他大型计算机，其硬件基本类似，配置的软件不同，通用计算机完成的任务不同，它主要适合于办公和一些计算工作量特别大的场合，市场份额约为1%；嵌入式系统（Embedded System），主要指嵌入了单片机硬件和软件的应用系统，广泛应用于家用电器、航天、机器人控制、医疗、汽车、通信、信息技术等工业领域，是计算机应用的主战场。图1-1所示是通用计算机系统和嵌入式计算机系统的对照。

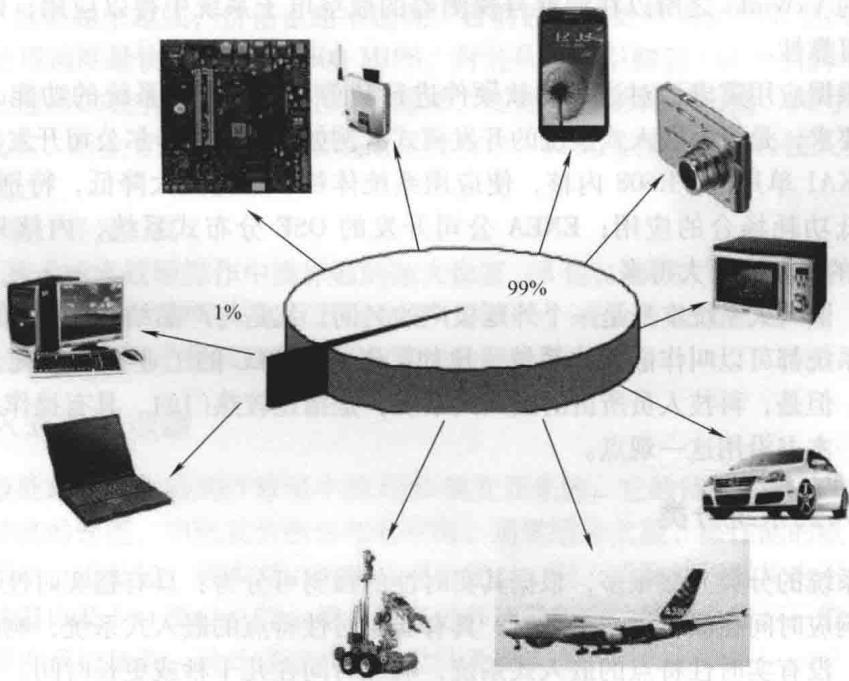


图 1-1 通用计算机系统和嵌入式计算机系统的对照

需要注意的是，嵌入式计算机系统的资源要比通用计算机系统的资源少得多，例如，通用计算机系统的内存通常为几个 GB，而嵌入式系统的内存容量从几十 B 到几百 MB 不等；嵌入式系统发生故障的后果要比通用计算机的后果严重得多；嵌入式系统一般采用实时系



统；嵌入式系统得到多种微处理器体系的支持，而通用计算机仅有 Intel、AMD 等少数厂家微处理器的支持。

### 1.1.2 嵌入式系统定义

根据 IEEE（电气和电子工程师协会）的定义，嵌入式系统是“控制、监视或者辅助装置、机器和设备运行的装置（devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants）”。从中可以看出嵌入式系统是软件和硬件的综合体，还可以涵盖机械等附属装置，目前国内普遍被认同的定义是：以应用为中心，以计算机技术为基础，软件、硬件可裁剪，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。

首先，嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的，它必须与具体应用相结合才具有生命力、才更具有优势，换句话说，嵌入式系统是与应用紧密结合的，它具有很强的专用性，例如鼠标、键盘、显示器、智能手机、扫描仪、复印机、医疗 B 超系统、生产线上的机器人、车站/机场危险品探测仪等，其内部均嵌入了不同的单片机及其软件，是和应用紧密结合的嵌入式计算机专用系统。

其次，嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术和电子技术与各个行业的具体应用相结合后的产物，这决定了不同的嵌入式系统具有不同的定位，例如，安卓（Android）系统占据了全球智能手机市场 53% 的份额（截止 2018 年 4 月 19 日），就是因为其立足于平板计算机、手机等移动产品，人机界面好，易操作，配套应用软件多；而 2018 年 11 月 27 日风河公司的 VxWorks 之所以在洞察号探测器的航空电子系统中得以应用，则是因为其高实时性和高可靠性。

第三，根据应用需求，对通用的软硬件进行裁剪，满足应用系统的功能、可靠性、成本、体积等要求，是目前嵌入式系统的开发模式。例如，原飞思卡尔公司开发了只有 6 引脚的 MC9RS08KA1 单片机，RS08 内核，使应用系统体积、功耗大大降低，特别适合于玩具、家电等低端低功耗场合的应用；ENECA 公司开发的 OSE 分布式系统，内核只有 5KB，而 Windows CE 的内核则要大多得多。

实际上，嵌入式系统本身是一个外延极广的名词，凡是与产品结合在一起的具有嵌入式特点的系统都可以叫作嵌入式系统，比如，嵌入了 PLC 的工业控制系统，也可以称作嵌入式系统。但是，科技人员所讲的嵌入式系统，是指比较热门的、具有操作系统的单片机嵌入式系统，本书沿用这一观点。

### 1.1.3 嵌入式系统分类

嵌入式系统的分类方法很多，根据其实时性的强弱可分为：具有强实时性特点的嵌入式系统，系统响应时间在微秒级或毫秒级；具有弱实时性特点的嵌入式系统，响应时间在毫秒到几秒之间；没有实时性特点的嵌入式系统，响应时间在几十秒或更长时间。

根据软件结构分类，可分为：循环轮询系统，程序依次检查每个输入条件，一旦条件成立，就进行相应的处理，是最简单的嵌入式系统；事件驱动系统，即对外部事件直接响应的系统，包括前后台系统、实时多任务系统、多处理器系统等，是嵌入式系统的主要形式。

根据规模大小的不同，可分为：小规模系统，中等规模系统，大规模系统。

小型嵌入式系统，采用 8 位或者 16 位的单片机设计；硬件和软件复杂度很小，甚至电



池可以驱动。开发小型嵌入式系统软件的主要编程工具，是所使用的单片机或者处理器专用的编辑器、汇编器（Assembler）和交叉汇编器。通常利用 C 语言来开发其软件，C 程序被编译为机器语言，然后存放到系统存储器的适当位置上。

中型嵌入式系统，采用 16 位或者 32 位的单片机、DSP 或者精简指令集计算机（RISC）设计；硬件和软件复杂度都比较大，可以使用 RTOS（Real Time Operating System）、源代码设计工具、模拟器、调试器和集成开发环境（IDE）等编程工具。

复杂嵌入式系统，软件和硬件都非常复杂，需要可升级的处理器或者可配置的处理器和可编程逻辑阵列。硬件和软件需要协同设计，并且都集成到最终的系统中。为了节约时间并提高运行速度，可以在硬件中实现一定的软件功能，例如加密和解密算法、离散余弦变换和逆变换算法、TCP/IP 栈和网络驱动程序功能。系统中某些硬件资源的功能也可以用软件来实现。

## 1.2 嵌入式系统中的处理器

嵌入式系统使用的嵌入式处理器已经超过 1000 种，流行体系结构包括微处理器（MPU）、单片机（MCU）、嵌入式处理器（EMPU）、数字信号处理器（DSP）、媒体处理器等 30 个系列。和普通台式计算机不同，嵌入式处理器的生产厂家众多，不仅包括世界知名公司，如 NXP Semiconductors 公司，Intel 公司，Microchip 公司，TOSHIBA 公司，Renesas（瑞萨）公司，德州仪器公司（TI），意法半导体公司（ST），也包括很多中小型厂家，如台湾华邦公司，深圳宏晶科技等厂家，产品从单片机、DSP 到 FPGA 有着各式各样的品种，速度越来越快，性能越来越强，价格也越来越低。目前嵌入式处理器的寻址空间可以从 64KB 到 256MB，处理速度最快可以达到 2600 MIPS，封装从 6 个引脚到 144 个引脚不等。

嵌入式处理器的选择必须根据设计的需求，在性能、功耗、功能、尺寸和封装形式、SoC 程度、成本、商业考虑等诸多因素之中进行折中，择优选择。对于科技人员而言，首先考虑下列要点：

- 1) 指令集，开发工具。
- 2) 单个算术或者逻辑操作中操作数的最大位宽（8 位，16 位，32 位或 64 位）。
- 3) 以 MHz 表示的时钟频率和百万指令/秒（MIPS）表示的处理速度。
- 4) 处理器对用于满足最后期限的复杂算法的解决能力。

### 1.2.1 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器是由通用计算机中的 CPU 演变而来的。它的特征是具有 32 位以上的处理器，具有较高的性能，当然其价格也相对较高，通常适合大型、高性能的嵌入式计算机系统，具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高的优点。嵌入式微处理器片内不包含数据存储器、程序存储器以及 I/O 接口电路，用户需要另外选择相应的接口电路。一般而言，嵌入式微处理器软硬件系统复杂，设计难度大，对设计者要求高。

目前主要的嵌入式微处理器类型有 Intel 凌动系列、至强系列、酷睿系列以及 Power PC、68000、MIPS、ARM 系列等。

其中，Intel 的凌动系列处理器，采用 45nm 工艺，将 4700 万个晶体管集成到一块面积小于 25mm<sup>2</sup> 的单一芯片中，是英特尔史上体积最小、功耗最低的处理器，和经典的 X86 处理器兼容，可扩展，可与多种标准 I/O 和用户定义 I/O 接口结合使用，支持不同的操作系



统,如 Windows Embedded Standard 7, Linux, RTOS 等,由 Intel 嵌入式设计中心技术支持,文档、工具全面,案例丰富,是开发高性能嵌入式系统的首选。

### 1.2.2 嵌入式单片机

嵌入式系统是单片机应用的主战场。所谓“单片机”就是将计算机的基本部件集成到一块芯片上,包括 CPU (Central Processing Unit)、ROM (Read Only Memory)、RAM (Random Access Memory)、并行口 (Parallel Port)、串行口 (Serial Port)、定时器/计数器 (Timer/Counter)、中断系统 (Interrupt System)、系统时钟及系统总线。

当前,为控制方便,单片机增加了各种控制部件,如片内 A/D、PWM、PCA 计数器捕获/比较逻辑、高速 I/O 口、WDT 等,其内涵早已突破了传统 Microcomputer 的内容,成为 Microcontrollers。在国外“单片机”一词早已被“微控制器”所替代。在国内仍习惯这一叫法,但应把它认为是一个单片形态的微控制器,而不是单片微型计算机。

单片机以嵌入式的形式隐藏在各种装置、产品和系统中。如键盘、鼠标、软驱、硬盘、显示卡、显示器、调制解调器、网卡、声卡、打印机、扫描仪、数码相机、USB 集线器等均是由单片机控制的。在制造工业、过程控制、通信、仪器、仪表、汽车、船舶、航空、航天、军事装备、消费类产品等方面均是单片机的应用领域。

单片机生产厂家众多,如 NXP、Semiconductors、Intel、Microchip、TOSHIBA、Renesas、TI 等;按字长分,有 8 位、16 位、32 位、64 位单片机,预计不久会出现 64 位单片机;按内核类型分,有 8051 内核单片机和非 8051 内核单片机,有以 ARM 为内核的单片机;按内核数量分,有单核、双核、多核单片机;按内存类型分,有 Flash 单片机和非 Flash 单片机,哈佛结构和冯诺依曼结构;按指令分类,有 CISC 和 RISC 单片机;按用途分,有通用型和专用型单片机;按引脚数量分,有多引脚和少引脚 (6 引脚) 单片机;按可靠性分,有民用、工业用和军用之分。详细内容见 1.3 节。

### 1.2.3 数字信号处理器

在需要进行信号处理的嵌入式系统,需要选择数字信号处理器 (DSP),包括图像处理、多媒体、音频、视频、电动机控制、HDTV、DSP 调制解调器和无线电通信处理系统、快速识别图像模式或 DNA 序列。主要的 DSP 生产厂家有 TI、Analog Device、Freescale。其中, TI 公司的 DSP 约占市场份额的 50% 以上,有 C2000 系列、C5000 系列、C6000 系列、DaVinci 数字视频处理器,其中, C2000 包括 16 位定点和 32 位定点 DSP,集成了许多外设,提供了一种独特的片上外设组合方式,主要用于工业控制、自动控制应用、光纤网络、手持电源、智能传感器等场合,比 8 位或 16 位单片机具有更大的灵活性。

### 1.2.4 专用系统处理器

这种系统在其设计中集成了专用系统处理器 (Application Specific Standard Processor, ASSP) 芯片或核。

假设有一个实时视频处理嵌入式系统。嵌入式系统中需要进行实时处理的功能包括数字电视、高清电视解码器、视频转接器、DVD (Digital Video Disc, 数字视频光盘) 播放器、网络电话、视频会议和其他一些系统。这种处理需要一个视频压缩和解压缩系统,需要符合 MPEG2 或者 MPEG4 标准 (Moving Pictures Expert Group, MPEG 即移动图像专家组)。



MPEG2 或者 MPEG4 的信号压缩是在存储和传送之前完成的；解压缩是在取回或者接收这些信号之前完成的。对于 MPEG 压缩算法，如果运行了一个 GPP（General Purpose Processors，通用处理器）嵌入式软件，则需要单独的 DSP，以获得实时处理。专用于这些特定任务的 ASSP 本身就能够提供一种快速解决方法。需要对 ASSP 进行配置，使其与嵌入式系统中的其他单元进行接口。

### 1.2.5 多处理器系统

在一个嵌入式系统中，可能需要多个处理器在严格的时间期限内快速执行一个算法。例如，在实时视频处理中，1s 内需要执行多次的 MAC 操作，这超出了 DSP 单元的处理能力。那么嵌入式系统就必须集成两个或者多个同步运行的处理器。

在一个便携式电话中，必须执行多项任务：①语音信号压缩和编码；②拨号；③调制和发送；④解调和接收；⑤信号解码和解压缩；⑥小键盘接口和显示接口处理；⑦基于短消息服务（SMS）协议的通信；⑧SMS 消息显示。对于所有的这些任务，一个处理器是不够的，需要多个处理器同步执行。

考虑一个视频会议系统，在这个系统中使用了一种四分之一通用媒介格式（Quarter-CIF），图像像素只有  $144 \times 176$  而不是电视上的视频图像  $525 \times 625$  像素。即便这样，图像样本也必须以每秒  $144 \times 176 \times 30 = 760\,320$  像素的速度采样，并且在将其传送到一个无线电通信或者虚拟专用网络（Virtual Private Network, VPN）之前，必须进行压缩处理（注意：在实时显示和动画中，帧速度应该为 25 帧/s 或者 30 帧/s；在视频会议中，帧速度应该在 1510 帧/s 之间）。基于单个 DSP 的嵌入式系统不足以得到实时图像。实时视频处理和多媒体应用在很多情况下都需要在嵌入式系统中有多个微处理器单元。

## 1.3 单片机的类型

### 1.3.1 8 位、16 位、32 位单片机

#### 1. 8 位单片机

最早的单片机是美国仙童（Fairchild）公司生产的 F8 单片机，仅包括 8 位 CPU、64B 的 RAM 和两个并行口，需另加一块 3851（由 1KB ROM、定时器/计数器和两个并行 I/O 口构成）才能构成一台完整的计算机。随后，Intel 公司设计制造了 MCS-48 单片机，这种单片机片内集成有 8 位 CPU、并行 I/O 口、8 位定时器/计数器、RAM 和 ROM 等。不足之处是没有串行口，中断处理比较简单，片内 RAM 和 ROM 容量较小且寻址范围不大于 4KB。

在 MCS-48 的基础上，Intel 公司推出了高性能单片机——MCS-51 单片机，带有串行口、多级中断系统，16 位定时器/计数器，片内 ROM、RAM 容量大，寻址范围可达 64KB。20 世纪 80 年代中期，Intel 公司业务调整，停止生产单片机，并出售了 MCS-51 单片机内核，众多厂家如 NXP（前身是飞利浦半导体）、Atmel、ST 公司，在标准 MCS-51 单片机内核的基础上，增加了新的功能，形成了自己的特色，如 Atmel 的 Flash 系列单片机，NXP 系列单片机，速度最快、功能最强的 C8051F 系列单片机等。以 MCS-51 为内核的单片机市场份额占 8 位单片机市场份额的 50% 以上，也是单片机教育入门首选机型。

NXP Semiconductors 是世界上最大的单片机供应商，其 8 位单片机的产量一直居世界第



一位, 约占整个国际市场的 1/3 左右。根据 Freescale (2015 年被 NXP Semiconductors 收购) 2012 年 8 月发布的产品信息, Freescale 推广的单片机共 7 大系列: HC (C) 08 系列单片机、HC (S) 12 (X) 系列单片机、PowerPC 5xx/8xx 系列单片机、PowerPC 55xx (Nexus) 系列单片机、68HC16 系列单片机和 cold fire 系列单片机, 另外还有早期的 HC908 系列单片机。由于这个系列单片机在目前来讲比较低端、用户较少, 基本被淘汰。

## 2. 16 位单片机

8 位单片机只能在低端场合应用, 中高端场合要选择 16 位单片机。16 位单片机的功能更多, 性能更强, 其典型产品如 Intel 公司生产的 8xC196 系列单片机, 其集成度达 120 000 管子/片, 主振为 12MHz, 片内 RAM 为 232B, ROM 为 8KB, 中断处理为 8 级, 而且片内带有多通道 10 位 A-D 转换器和高速输入/输出部件 (HSL/HSO), 实时处理的能力很强。

与 MCS-51 单片机不同, 8xC196 系列单片机没有采用常规的累加器结构, 其操作直接面向多字节寄存器空间 (由至少 232B 的寄存器阵列和 24B 的专用寄存器构成)。寄存器-寄存器结构消除了通常的累加器瓶颈效应, 可实现快速的任務切换; 加速了数据交换和修改的能力, 提高了 CPU 的吞吐能力, 也加速了输入/输出过程。这些特点使 8xC196 单片机非常适合于复杂的实时控制应用, 如软盘控制、调制解调器、打印机、模式识别和电动机控制。由于 Intel 公司战略调整, 已经不再推广 8 位、16 位单片机。

TI 公司生产的 MSP430x1xx 系列是超低功耗 16 位微控制器, 广泛适用于消费类电子产品、数据记录应用、便携式医疗仪器等。MSP430x1xx 系列单片机有 5 种低功耗操作模式, RAM 在保持模式下, 仅消耗 0.1 $\mu$ A 电流; 在实时时钟模式仅消耗 0.7 $\mu$ A; 可在 6 $\mu$ s 内从待机模式快速唤醒; 接口丰富, Flash 存储量大, 是比较流行的 16 位单片机, 在国内有大量的用户。

如同在 8 位单片机领域, Freescale 公司同样生产了型号众多、性能卓越、适用面广的 16 位单片机。根据 2012 年第 3 季度发布的产品信息, Freescale 共生产了 5 大类 16 位单片机: S12 MagniV 混合信号 MCU、S12 和 S12X 微控制器、HC16 微控制器、56800/E 数字信号控制器、HC12 (旧产品), 广泛适用于汽车、消费电子、节能、工业控制、医疗设备、电机控制等领域。

## 3. 32 位单片机

32 位单片机一次能完成 32 位二进制运算, 具有极高的数据处理能力, 也是为嵌入式控制应用而设计的。32 位单片机有包含片内存储器的嵌入式微控制器 (Embedded Microcontroller) 和不包含存储器的嵌入式微处理器 (Embedded Microprocessor)。为了简便, 统称为单片机。

(1) Intel 公司的 32 位嵌入式微处理器 Intel 推出了众多的嵌入式微处理器及与其配套的各种型号的嵌入式闪存、芯片组, 如 Intel I/O 处理器、网络处理器、应用处理器、Intel 架构处理器, 广泛应用于无线通信、服务器、网络、网关。目前, Intel 主推“凌动”“酷睿”“至强”三大系列嵌入式微处理器。

(2) ARM 单片机 ARM 即 Advanced RISC Machine 的缩写, ARM 公司是 1990 年成立的设计公司。ARM 是知识产权供应商, 本身不生产芯片, 由合作伙伴生产各具特色的芯片。作为 32 位嵌入式 RISC 微处理器业界的领先供应商, ARM 公司商业模式的强大之处在于它在世界范围内的合作伙伴超过了 100 个, 其中包括半导体工业的著名公司, 如 NXP、Atmel 等, 从而使其具有大量的开发工具和丰富的第三方资源, 它们共同保证了基于 ARM 处理器