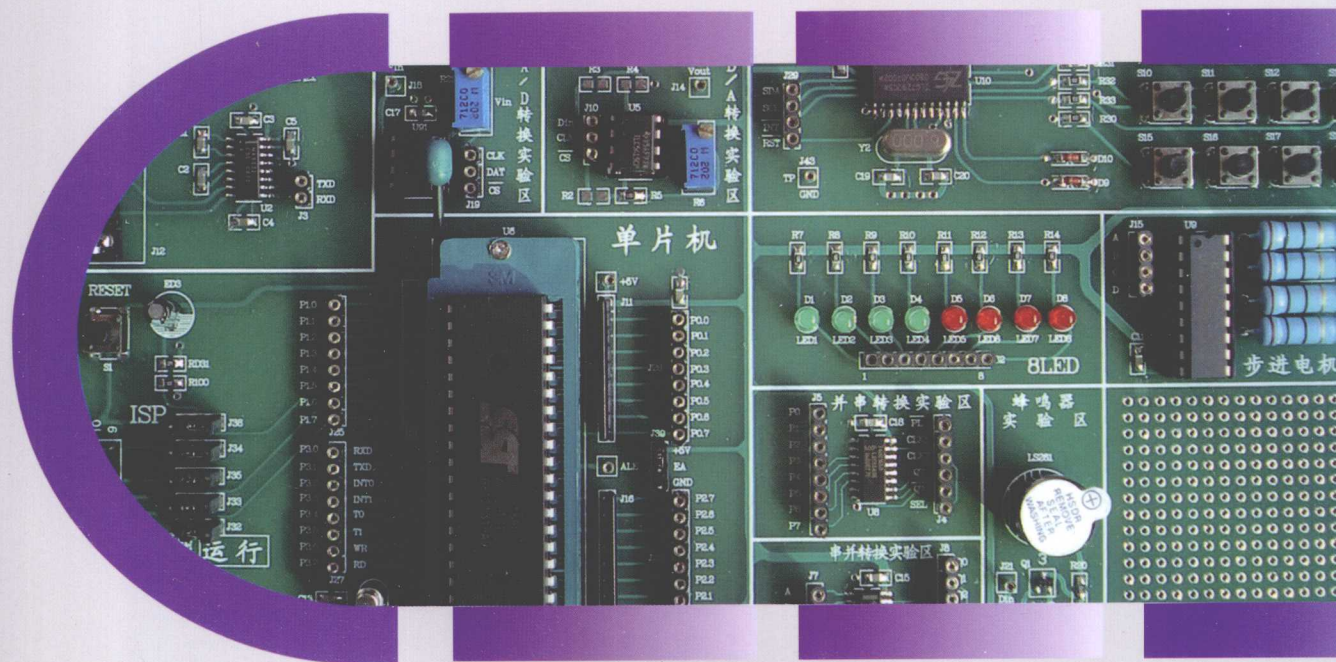


单片机原理与应用

魏力 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

单片机原理与应用

魏 力 主编
王 琳 参编



机械工业出版社

本书以广泛使用的 MSC-51 单片机为样机,系统地介绍了单片机的工作原理和接口技术。本书分九章和实验指导书。主要内容包括:计算机的基础知识, MSC-51 单片机结构、指令系统,汇编语言程序设计,单片机的系统扩展,单片机的中断、定时器/计数器及串行通信等片内接口, MSC-51 单片机接口技术,数/模、模/数转换,单片机应用系统设计,单片机的上机指导等。

本书注重实用性,理论讲述以够用为度,力图通过精选实例和上机操作指导,使读者能在较短的时间内掌握单片机应用和开发技术。

本书可作为高职高专相关专业的教材,也可作为各类工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

单片机原理与应用/魏力主编. —北京:机械工业出版社, 2009.5
ISBN 978 - 7 - 111 - 27022 - 5

I. 单… II. 魏… III. 单片微型计算机 IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 066718 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:王保家 责任编辑:任正一

版式设计:霍永明 责任校对:李 婷

封面设计:赵颖喆 责任印制:杨 曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13 印张 · 321 千字

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 27022 - 5

定价:24.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379727

封面无防伪标均为盗版

前 言

单片机是微型计算机的一个重要分支。随着单片机在控制领域内的应用不断扩展,发挥的作用也越来越大。“单片机原理与应用”已经成为与控制相关专业的一门必修课程。本书为了适应单片机迅速发展的需要,在参考了同类优秀教材和生产厂家数据资料,并在总结多年教学实践经验的基础上编写而成。本书以应用广泛、可靠性高、性价比高的 MCS-51 系列单片机作为首选机型进行教学,以便使学生掌握 MCS-51 系列单片机的硬件结构,软件设计方法和系统开发的技能。培养应用单片机设计和开发的能力。

本书注重计算机、单片机基础知识的介绍,避免繁琐的理论叙述,淡化原理性的论述,降低理论深度,强调应用环节,以便于学生理解和快速掌握单片机系统的软硬件结构,实现本课程的教学目的。

全书分九章和实验指导书。主要内容包括:第1章介绍计算机的基础知识;第2章介绍 MCS-51 单片机硬件结构;第3、4章介绍 MCS-51 单片机指令系统和汇编语言程序设计;第5、6章介绍单片机的系统扩展、单片机的中断、定时器/计数器及串行通信等片内接口;第7、8章介绍 MCS-51 单片机接口扩展技术及数/模、模/数转换;第9章介绍单片机应用系统设计;实验指导书包括单片机的十五个上机实验。

本书的主要特点是:

1. 为了便于学生能在较短的时间内掌握单片机应用技术,对于基础理论的讲述,力求做到深入浅出、通俗易懂。
2. 在知识结构的安排上,注意做到使各章独立,各个知识点之间由浅入深、从易到难、彼此融合,构成一个完整的单片机原理与应用的知识体系。
3. 注重实用性,理论讲述以够用为度,力图通过精选实例和上机操作指导,使读者能在较短的时间内掌握单片机应用和开发技术。

本书由魏力担任主编,王琳参编。具体分工如下:魏力编写第1、3、5、7、9章;王琳编写第2、4、6、8章和实验指导书;全书由魏力统稿。

在编写过程中,我们参考了单片机方面优秀的书籍和期刊,在此对相关的作者一并表示谢意。

由于单片机技术的快速发展,鉴于编者水平所限,书中的疏漏和不足在所难免。恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 计算机系统概述 1

1.1 计算机的发展、应用及分类 1

1.1.1 计算机的发展 1

1.1.2 微型计算机的组成 1

1.1.3 微型计算机的分类 1

1.2 单片机概述 2

1.2.1 单片机发展概述 2

1.2.2 单片机的发展方向 3

1.2.3 MCS-51 单片机系列 3

1.2.4 80C51 单片机系列 3

1.2.5 常用单片机系列简介 4

1.2.6 单片机的一般结构、特点及

应用 4

1.3 微型计算机的常用术语 5

1.4 数制及其转换 6

1.4.1 常用数制 6

1.4.2 数制间的转换 7

1.4.3 二进制数和十六进制数的运算 10

1.5 码制 10

1.5.1 ASCII 码 11

1.5.2 二进制编码的十进制数——BCD

码 12

1.6 计算机中数的表示 12

1.6.1 机器数和真值 12

1.6.2 机器数的表示方法 13

练习题 1 14

第2章 MCS-51 单片机结构 16

2.1 内部结构及引脚功能 16

2.1.1 MCS-51 单片机结构框图 16

2.1.2 8051 的内部结构及功能 17

2.1.3 MCS-51 的信号引脚 18

2.2 MCS-51 存储器系统 20

2.2.1 程序存储器 20

2.2.2 片内数据存储器 21

2.2.3 MCS-51 的特殊功能寄存器 23

2.2.4 MCS-51 的堆栈操作 25

2.2.5 片外数据存储器 25

2.3 MCS-51 单片机的并行 I/O

端口 26

2.3.1 P0 口的结构和功能 26

2.3.2 P1 口的结构和功能 27

2.3.3 P2 口的结构和功能 27

2.3.4 P3 口的结构和功能 28

2.4 MCS-51 时钟电路与时序 29

2.4.1 时钟电路 29

2.4.2 时序定时关系 30

2.4.3 典型指令时序 30

2.5 复位和复位电路 31

2.5.1 复位状态 31

2.5.2 复位方式 32

练习题 2 32

第3章 MCS-51 单片机指令系统 34

3.1 MCS-51 指令编码格式及寻址

方式 34

3.1.1 指令编码格式 34

3.1.2 指令分类及符号约定 36

3.1.3 寻址方式 37

3.1.4 寻址方式小结 39

3.2 数据传送类指令 40

3.2.1 片内 RAM 数据传送指令组 40

3.2.2 片外 RAM 数据传送指令组 41

3.2.3 程序存储器数据传送指令组 42

3.2.4 数据交换指令 43

3.2.5 堆栈操作指令 43

3.3 算术运算类指令 45

3.3.1 加法运算指令 45

3.3.2 减法运算指令 46

3.3.3 乘除法运算指令 47

3.3.4 十进制调整指令 48

3.4 逻辑运算类指令 49

3.4.1 逻辑“与”运算指令 49

3.4.2 逻辑“或”运算指令 49

3.4.3 逻辑“异或”运算指令 50

3.4.4 累加器清零和取反指令	51	4.3.9 位操作程序	91
3.4.5 移位指令	51	练习题4	92
3.5 控制转移类指令	53	第5章 存储器	94
3.5.1 无条件转移指令	53	5.1 MCS-51 系统扩展结构	94
3.5.2 条件转移指令	54	5.1.1 MCS-51 单片机用于扩展的端口及 控制线	94
3.5.3 子程序调用和返回指令	56	5.1.2 CPU 读片外程序存储器及读写片外 数据存储器 (I/O 口) 时序	95
3.5.4 空操作指令	57	5.2 MCS-51 单片机存储器结构	96
3.6 位操作类指令	58	5.2.1 程序存储器	96
3.6.1 位传送指令	58	5.2.2 数据存储器	97
3.6.2 置位复位指令	58	5.3 MCS-51 程序存储器的扩展	97
3.6.3 位运算指令	59	5.3.1 常用程序存储器和地址锁存器	97
3.6.4 位控制转移指令	59	5.3.2 程序存储器的扩展	100
3.7 常用伪指令	61	5.4 MCS-51 数据存储器的扩展	104
3.7.1 设定起始地址伪指令 ORG	61	5.4.1 常用的数据存储器	105
3.7.2 汇编结束伪指令 END	61	5.4.2 数据存储器的扩展	106
3.7.3 字节数据定义伪指令 DB	61	5.5 单片机扩展片外存储器空间地址 分配	107
3.7.4 字数据定义伪指令 DW	62	5.5.1 线选法	107
3.7.5 空间定义伪指令 DS	62	5.5.2 全地址译码法	109
3.7.6 符号定义伪指令 EQU	63	练习题5	112
3.7.7 位地址符号定义伪指令 BIT	63	第6章 MCS-51 的片内接口	113
3.7.8 字节地址符号定义伪指令 XDATA 和 DATA	63	6.1 MCS-51 中断系统	113
练习题3	64	6.1.1 中断及响应中断的过程	113
第4章 MCS-51 汇编语言编程技术	67	6.1.2 MCS-51 的中断系统	114
4.1 汇编语言和汇编程序	67	6.1.3 中断应用举例	120
4.1.1 汇编语言和汇编程序概述	67	6.2 定时器/计数器	122
4.1.2 汇编语言的语句格式	68	6.2.1 定时器/计数器的内部结构和 功能	122
4.2 单片机汇编语言程序的基本结构 形式	69	6.2.2 定时器/计数器的控制寄存器	123
4.2.1 汇编语言程序的设计步骤	69	6.2.3 定时器工作方式	124
4.2.2 程序的基本结构	69	6.2.4 定时器应用	127
4.2.3 顺序结构	70	6.3 MCS-51 单片机串行接口	131
4.2.4 分支程序	71	6.3.1 串行通信的原理	131
4.2.5 循环程序	74	6.3.2 MCS-51 单片机串行通信口	132
4.3 程序设计举例	76	6.3.3 MCS-51 单片机串行通信工作 方式	134
4.3.1 查表程序	76	练习题6	135
4.3.2 算术运算程序	77	第7章 MCS-51 输入/输出接口扩展和 应用	137
4.3.3 转换码型程序	81	7.1 单片机扩展 I/O 的需要	137
4.3.4 延时程序	85		
4.3.5 数据极值检索程序	86		
4.3.6 数据排序程序	86		
4.3.7 关键数据检索程序	87		
4.3.8 子程序设计	89		

7.1.1 输入/输出的控制方式	137	8.3.1 A/D 转换器 (ADC) 原理	164
7.1.2 扩展输入/输出接口的原因	138	8.3.2 A/D 转换器芯片 ADC0809	164
7.2 通过锁存器、触发器扩展 I/O 口	139	8.3.3 ADC0809 与单片机的接口设计	165
7.2.1 输出口	139	练习题 8	167
7.2.2 输入/输出口	140	第 9 章 单片机应用系统设计	168
7.3 8255A 可编程通用并行接口	141	9.1 系统设计过程	168
7.3.1 可编程 I/O 扩展概述	141	9.1.1 系统设计的目的和要求	168
7.3.2 8255A 的逻辑结构和信号引脚	142	9.1.2 系统设计的过程	168
7.3.3 8255A 的工作方式及数据 I/O 操作	143	9.2 单片机应用系统设计实例	171
7.3.4 8255A 控制字及初始化编程	144	9.2.1 设计要求	171
7.4 8155 接口芯片	145	9.2.2 硬件设计	171
7.4.1 8155 基本结构及工作方式	145	9.2.3 软件设计	173
7.4.2 8155 的命令/状态寄存器	147	练习题 9	178
7.4.3 8155 的定时器/计数器	148	实验指导书	179
7.4.4 8155 与 MCS-51 单片机的连接及软 件操作	149	实验简介	179
7.5 键盘及其接口	150	实验一 DICE 组合软件的使用与调试	181
7.5.1 键盘的工作原理	150	实验二 基本传送指令	182
7.5.2 单片机键盘电路	151	实验三 算术指令	183
7.6 显示器接口	154	实验四 BCD 数求和运算	184
7.6.1 LED 显示器接口	154	实验五 逻辑和移位指令	185
7.6.2 显示器的显示方式	155	实验六 串传送操作	186
练习题 7	158	实验七 求极大值	187
第 8 章 数/模、模/数转换	159	实验八 排序	188
8.1 概述	159	实验九 串搜索操作 (寻找关键字)	189
8.2 数/模转换原理与 MCS-51 单片机的 接口设计	159	实验十 I/O 输出 (P1)	190
8.2.1 D/A 转换器 (DAC) 原理	159	实验十一 秒钟	191
8.2.2 D/A 转换器的主要性能指标	160	实验十二 I/O 输入、输出实验	192
8.2.3 D/A 转换器芯片 DAC0832	161	实验十三 并口输出方脉冲	193
8.2.4 DAC0832 与单片机的接口设计	162	实验十四 8255A 可编程芯片的使用	194
8.3 模/数转换原理与 MCS-51 单片机的接 口设计	164	实验十五 微型打印机	195
		附录 MCS-51 单片机指令集	196
		参考文献	202

第 1 章 计算机系统概述

电子计算机的出现是 20 世纪具有划时代意义的科技成果之一，特别是自 20 世纪 70 年代以来，微型计算机登上历史舞台，其发展的势头不可阻挡，成为当今计算机发展的主流方向。如今计算机已经融入到人类社会的方方面面。计算机已极大地改变了人们的工作方式、学习方式和生活方式，成为我们这个时代的主要标志。

1.1 计算机的发展、应用及分类

1.1.1 计算机的发展

计算机主要由运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备五部分构成，这个计算机模型是依据美籍匈牙利学者冯·诺依曼提出的“存储与程序控制”理论构建的。该理论的原理是：在计算机内部直接采用二进制数进行运算；并将指令和数据都存储起来，由程序控制计算机自动执行。这就是后人称为的“冯·诺依曼机”。

根据电子计算机所采用的电子元件的变化，其发展可分成四个阶段，即大型机阶段、微型机阶段、网络阶段和智能阶段。但是计算机的结构仍然没有突破冯·诺依曼提出的经典结构框架。

从 1946 年 2 月 15 日第一台电子数字计算机的诞生至今，短短几十年的时间，计算机的性能品质迅速提升、价格大幅降低、应用日益广泛，已深刻地影响着人类生产和生活的各个方面。

1.1.2 微型计算机的组成

1971 年，美国 Intel 公司研究并推出了 I4004 微处理器芯片。该芯片能一次处理 4 位二进制数，集成了 2300 个晶体管，每秒可进行 6 万次运算，成本约为 200 美元。它是世界上第一个微处理器芯片，以它为核心组成的 MCS-4 计算机，标志了世界第一台微型计算机的诞生。

微型计算机是指以超大规模集成电路为主要部件的微处理器作为核心，配以存储器、输入/输出接口电路及系统总线所制造出的计算机系统，微型计算机的组成如图 1-1 所示。

1.1.3 微型计算机的分类

微型计算机从它的应用形式和存在状态来看，有多板机、单板机、单片机之分。

1. 多板机

多板机是指微处理器芯片、存储器、I/O 接口、总线接口等部件组装在一块主机板上，再通过系统总线和其他外设适配板卡连接不同的外部设备，如键盘、显示器、打印机、硬盘驱动器和光驱等设备。各种适配板卡插在主机板的扩展槽上，再将电源、软/硬驱动器和光

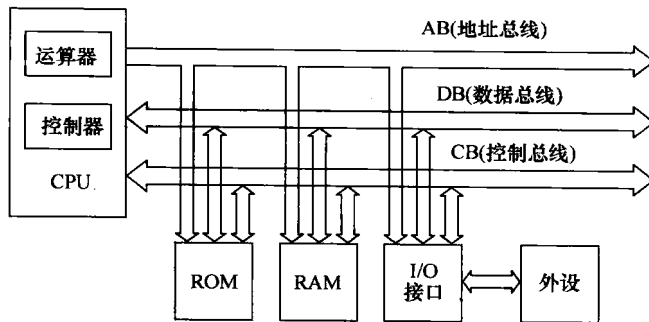


图 1-1 微型计算机的组成

驱等设备装配在同一机箱内，再配上系统软件，就构成了一台完整的微型计算机系统，又称为系统机或 PC（Personal Computer）。

2. 单板机

把微处理器芯片、存储器、I/O 接口芯片、小键盘、数码显示器等必要的输入/输出部件装配在一块印制电路板上，便构成了单板微型计算机系统，简称单板机。单板机是作为控制计算机出现的。

3. 单片机

单片机是单片微型计算机的简称，是一种用于控制的微处理器芯片。其组成是把微型计算机的 CPU、部分存储器、输入/输出接口和 A/D、D/A 转换器等部件集成在一块芯片上。实际上，单片机的形态只是一块芯片，但是它已完全具备了微型计算机的基本结构和功能。由于单片机的结构特点，在实际应用中常常将它与应用系统融合为一个整体，所以将单片机称为嵌入式微控制器。

1.2 单片机概述

1.2.1 单片机发展概述

单片机作为微型计算机的一个分支，它的历史并不长，从 1975 年美国德州仪器公司推出 TM1000 系列 4 位单片机开始，仅仅三十多年时间。单片机种类已有几百种，从 1 位、4 位、8 位发展到 16 位、32 位单片机，集成度越来越高，功能越来越强，应用也越来越广。

单片机发展可分为四个阶段。

(1) 单片机初级阶段。是 4 位机与初级的 8 位机阶段。涌现出一批有代表性的公司和机型。主要的代表机型有美国德州仪器公司的 TM1000、国家半导体公司的 COP402、日本电气公司的 μ PD75XX、松下公司的 MN1400、Motorola 公司的 68XX 系列、Intel 的 MCS-48 系列、Zilog 的 Z8 系列。

(2) 单片机上升阶段。是高档的 8 位机阶段。表现在强调控制功能和嵌入功能；寻址 8 位或 16 位；规范的总线结构；特殊功能寄存器的集中管理；位寻址；指令系统控制等。典型代表是 MCS-51 单片机。

(3) 微控制器构成阶段。典型机型引领潮流的阶段。表现在系列产品的推出。MCS-51

自成体系，8051 系列如 8031、8032、8051、8052 等。市场出现以 51 为内核的芯片和非 51 芯片的趋势。其间 16 位的单片机发展别具特色。典型代表是 Intel 推出的 MCS-98 系列单片机。

(4) 微控制器全面发展阶段。突出的表现：电气商和半导体商的广泛参与；满足最低层电子技术的应用（小家电、玩具）；开发专用的单片机；努力于提高单片机的综合品质。

1.2.2 单片机的发展方向

从单片机的发展历程看，未来单片机技术将向多功能、高性能、高速度、低电压、低功耗、外围电路内装化及片内存储器容量增加的方向发展。但其位数不一定会继续增加，虽然目前已经有了 32 位单片机，但实际使用上还是以 8 位、16 位单片机居多。今后的单片机将强化指令功能、增加各种接口部件、使集成度和可靠性更高而功耗更低，以及使用更方便。此外，专业化也是单片机的一个重要发展方向，提高专用程度，针对单一用途的专用单片机将会越来越多。

1.2.3 MCS-51 单片机系列

在 HMOS 技术大发展的背景下，Intel 公司在 MCS-48 系列的基础上，于 1980 年推出了 8 位 MCS-51 系列单片机。它与以前的机型相比，功能增强了许多，就其指令和运行速度而言，超过了 Intel8085 的 CPU 和 Z80 的 CPU，成为工业控制系统中较为理想的机种。较早的 MCS-51 典型时钟频率为 12MHz，而目前与 MCS-51 单片机兼容的一些单片机的时钟频率达到 40MHz 甚至更高，现在已有 400MHz 的单片机问世。

MCS-51 是一个单片机系列产品，具有多种芯片型号，按其内部资源配置的不同，MCS-51 可分为两个子系列和四种类型。

1. 51 子系列

51 子系列是基本型，包括 8051、8751、8031、8951。这四个机种区别，仅在于片内程序存储器。8051 为 4KB ROM，8751 为 4KB EPROM，8031 片内无程序存储器，8951 为 4KB EEPROM。其他性能结构一样，有片内 128B RAM，2 个 16 位定时器/计数器，5 个中断源。其中的 8031 性价比较高，又易于开发，目前应用面较广泛。

2. 52 子系列

52 子系列是增强型，有 8032、8052、8752、8952 四个机种。8052 的 ROM 为 8KB，RAM 为 256B；8032 的 RAM 也是 256B，它没有 ROM，这两种单片机比 8051 和 8031 多了一个定时器/计数器，增加了一个中断源。

1.2.4 80C51 单片机系列

80C51 也是 Intel 公司的产品，与 8051 是完全兼容的，兼容包括指令、引脚信号、总线等诸多方面。

80C51 芯片采用 CHMOS 工艺。CHMOS 是 CMOS 和 HMOS 的结合。80C51 除了具有 HMOS 高速度和高密度的特点之外，还具有 CMOS 低功耗的特点。如 8051 芯片的功耗为 630mW，而 80C51 的功耗只有 120mW，不到 8051 功耗的五分之一。如此低的功耗对便携设

备的使用有重要的意义。

新开发的 80C51 兼容芯片，还在芯片中增加了一些外部接口功能单元，例如 A/D 转换器、可编程计数器阵列、监视定时器、高速 I/O、计数器俘获/比较逻辑等，有的还在总线结构上做出了重大的改进，出现了廉价的非总线型单片机芯片等。所有这些使新一代的兼容芯片已不是原来意义上的 80C51 了。

1.2.5 常用单片机系列简介

1. ATMEEL 单片机

ATMEEL 公司所生产的 ATMEEL89 系列单片机（简称 89 系列单片机），就是基于 Intel 公司的 MCS-51 内核而研制的，该公司的技术优势在于 Flash 存储器技术。它将电擦除方式瞬间擦除、改写和程序加密技术与单片机结合。应用较多的有 AT89C51 系列、STC89C51/52 系列。其中 AT89C51 与 8051 的引脚和指令完全兼容，片内有 4KB Flash ROM。这些都是一种可下载的 Flash 单片机，它和 IBM 微机通信进行下载程序十分方便。

2. Philips 单片机

Philips 公司的单片机都属于 MCS-51 系列兼容的单片机。

3. Maxim-Dallas 单片机

Maxim 公司的产品有 DS89C420 单片机。

4. WinBond 单片机

WinBond 公司的产品有 W78C51、W77C51 单片机。

5. Motorola 单片机

Motorola 公司的产品有 M68HC08 单片机。

6. 其他公司的单片机

(1) NEC 单片机。

(2) 东芝单片机。

(3) Epson 单片机。

1.2.6 单片机的一般结构、特点及应用

1. 单片机的一般结构

一般单片机有两种基本结构形式：一种是在通用微型计算机中广泛采用的将程序存储器和数据存储器合用一个存储空间的结构，称为普林斯顿（Princeton）结构或称冯·诺依曼结构。另一种是将程序存储器和数据存储器截然分开，分别寻址的结构，称为哈佛（Harvard）结构。Intel 公司的 MCS-51 和 80C51 系列单片机采用的就是哈佛结构。目前的单片机以采用程序存储器和数据存储器截然分开的结构居多。

2. 单片机的特点

(1) 体积小、成本低、运用灵活、易于产品化

单片机能方便地组成各种智能化的控制设备和仪器，做到机电一体化；有的单片机引脚已经减少到 8 个或更少，使安装简单方便。对于批量大的专用场合，可以专门进行设计，提高性能，降低成本。

(2) 可靠性高

由于单片机体积小，在应用环境较差时，对系统易于采用电磁屏蔽等措施。使单片机应用系统具有较高的可靠性。

3. 单片机的应用

单片机的应用领域极为广泛，这里仅列举几个典型的方面。

(1) 工业控制

如控制温度、湿度、压力、位移、速度等物理量。使工控系统处于最佳状态，改进产品质量，提高劳动生产率。

(2) 仪器仪表

使仪器仪表智能化，方便使用，提高测量速度和测量精度，强化控制功能，简化仪器仪表的硬件结构。

(3) 商用产品

机电一体化的产品层出不穷，极大地丰富人们的生活内容，提高人们的生活质量，促进社会的和谐进步。

(4) 家用电器

使洗衣机、音响设备、手机等家用电器人性化、智能化。给人们的生活带来更多的方便和舒适。

(5) 计算机外设与智能接口

单片机的加入使产品的智能化、自动化、信息化得以实现。

1.3 微型计算机的常用术语

1. 位 (bit)

位是计算机中构成信息的最小单位，表示二进制数中的某个数位“0”或“1”。bit 是 Binarg Digit 的缩写。

2. 字节 (Byte)

一字节为 8 位二进制数，是存储器的基本单位。

3. 字 (Word)

字是 CPU 与输入/输出设备和存储器之间传送数据的基本单位，由若干位组成，它与数据总线的宽度（根数）一致，一般一个字是由若干字节组成。

4. 指令 (Instruction)

指令指规定计算机完成某种操作的命令。目前计算机只能直接识别由二进制编码的指令，即机器码。

5. 指令系统 (Instruction Set)

指令系统指一台计算机所能识别的全部指令的集合。

6. 程序 (Program)

程序指为完成特定任务而设计的一组指令有序的集合。

7. 地址 (Address)

地址指存储单元的编号。

8. K、M、G 和 KB、MB、GB

$1K = 2^{10} = 1024$; $1M = 2^{20}$; $1G = 2^{30}$ 。

KB 常用作计算存储器容量的单位。 $1KB = 1024\text{Byte}$; MB、GB 依此类推。

9. 时序

所谓时序, 就是计算机在工作过程中, CPU 控制器所发出的一系列控制信号在时间上的相互关系。

1.4 数制及其转换

在计算机内部, 数据都是采用二进制数 0 和 1 来表示的。按数据的类型, 可分为数值型数据和非数值型数据两大类。数值型数据用于表示数量的大小, 常常参加各种算术和逻辑运算; 非数值型数据指声音、图像、字符等类型的数据。本节重点讨论数值型数据的表示方法。

通常, 使用有限个数码来表示数据, 按进位的方法进行计数, 称为进位计数制。在进位计数制中有两个概念: 基数和位权。基数是指用来表示数据的数码的个数, 超过此数就要向相邻高位进一; 同一数码在数据的不同位置时所代表的数值是不同的, 它所代表的实际值等于数字本身的值乘上一个确定的与位置有关的系数, 这个系数称为位权, 位权是以基数为底的指数函数。

以十进制为例, 十进制中采用 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 这十个数字来表示数据, 逢十向相邻高位进一; 每一位的位权都是以 10 为底的指数函数, 由小数点向左, 各数位的位权依次是 10^0 、 10^1 、 10^2 、 10^3 、 $\dots$; 由小数点向右, 各数位的位权依次是 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 、 $\dots$ 。可以看出相邻两位位权的比等于基数。

对于一个十进制数 $a_n a_{n-1} \dots a_2 a_1 a_0 . a_{-1} a_{-2} \dots a_{-m}$ 可以表示为

$$N = a_n \times 10^n + a_{n-1} \times 10^{n-1} + \dots + a_1 \times 10^1 + a_0 \times 10^0 + a_{-1} \times 10^{-1} + a_{-2} \times 10^{-2} + \dots + a_{-m} \times 10^{-m}$$

由上所述, 按进位计数制规则, 可以得到任意一个 R 进制数 N_R 的表示方法

$$N_R = \pm \sum_{i=-m}^n k_i \times R^i$$

式中, R 为基数; k_i 为位置 i 处的数码, 其范围为 $0 \sim (R-1)$ 中的任意一个整数; m 、 n 、 i 为正整数。

在日常生活中, 通常采用十进制表示方法, 而计算机内部采用的是二进制表示法, 为了简化二进制数据的书写, 采用八进制或十六进制表示法。为了区别不同进制的数据, 一般用 B 表示二进制数, Q 表示八进制数, H 表示十六进制数, D 表示十进制数。若省略进制字母, 则默认为十进制数。

1.4.1 常用数制

1. 十进制数

十进制是我们熟知的计数法, 其特点如下:

基数是 10, 用 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个数码表示数值, 逢十进一。位置 i 处的位权值是 10^i 。一般用后缀 D 表示。

$$\begin{aligned}\text{例如: } 1985 &= 1000 + 900 + 80 + 5 \\ &= 1 \times 10^3 + 9 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 5 \times 10^0\end{aligned}$$

记作 1985D, 或 1985。

2. 二进制数

二进制数的特点: 基数是 2, 用 0、1 两个数码表示数值, 逢二进一。各数位上的位权值是 2^i 。二进制数的后缀为 B。

用二进制表示数值的方法为

$$N_B = \pm \sum_{i=-m}^n k_i \times 2^i \quad k_i = 0 \text{ 或 } 1$$

$$\begin{aligned}\text{例如: } 1001.101B &= 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= 9.625D\end{aligned}$$

3. 八进制数

八进制数的特点: 基数是 8, 用 0、1、2、3、4、5、6、7 八个数码表示数值, 逢八进一。各数位上的位权值是 8^i 。八进制数的后缀为 Q。

用八进制表示数值的方法为

$$N_Q = \pm \sum_{i=-m}^n k_i \times 8^i$$

式中, $k_i = 0、1、2、3、4、5、6、7$ 。

$$\text{例如: } 45.75Q = 4 \times 8^1 + 5 \times 8^0 + 7 \times 8^{-1} + 5 \times 8^{-2}$$

4. 十六进制数

十六进制数的特点: 基数是 16, 用 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F 十六个数码表示数值, 逢十六进一。各数位上的位权值是 16^i 。十六进制数的后缀为 H。

用十六进制表示数值的方法为

$$N_H = \pm \sum_{i=-m}^n k_i \times 16^i$$

式中, $k_i = 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F$ 。

$$\text{例如: } 56B.C3H = 5 \times 16^2 + 6 \times 16^1 + 11 \times 16^0 + 12 \times 16^{-1} + 3 \times 16^{-2}$$

1.4.2 数制间的转换

掌握必要的数制之间的转换, 是学习后续内容的基础。

1. 二进制数与十进制数之间的转换

(1) 二进制数转换成十进制数

这种方法非常简单, 由二进制表示数值的方法可知, 将二进制数按“位权”展开再相加即可。

例 1-1

$$\begin{aligned}1011.11B &= 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} \\ &= 8 + 0 + 2 + 1 + 0.5 + 0.25 \\ &= 11.75D\end{aligned}$$

(2) 十进制数转换成二进制数

十进制数转换成二进制数，要分为整数部分和小数部分分别转换。

整数部分转换采用除2（基数）取余数方法：用2不断地去除要转换的数，直到商为0，所得的余数按先得的余数是低位，后得的余数是高位的顺序排列，便得到转换的结果。

例 1-2 将 152D 转换为二进制数。转换过程如下：

2	1 5 2	余数
2	7 6	0
2	3 8	0
2	1 9	0
2	9	1
2	4	1
2	2	0
2	1	0
	0	1

转换的结果为：152D = 10011000B

小数部分转换采用乘2（基数）取整数方法：每次用2与小数部分相乘，取乘积的整数部分，再取其小数部分乘2直到小数部分为0或达到要求的位数精度。将所取整数按所得到整数的顺序排放在小数点之后即为转换的结果。

例 1-3 将 0.375D 转换为二进制数。转换过程如下：

0.375	整数
× 2	0
0.75	
× 2	1
1.5	
0.5	
× 2	1
1.0	

转换的结果为：0.375D = 0.011B

需要说明的是，有些十进制的小数不能精确地转换成二进制小数，即乘积的小数部分永远不可能为0，此时应根据精度的要求，转换到所需位数即可。

上述转换规则也可推广到十进制到 R （ R 可为二、八、十六等）进制间的转换，只要将其中的基数2改为 R ，相应规则改为“除 R 取余法”和“乘 R 取整法”即可。

2. 二进制数和八进制数、十六进制数间的转换

由于二进制的基数是2，而八进制的基数是 $8 = 2^3$ ，一位八进制数正好可对应三位二进制数字；十六进制的基数为 $16 = 2^4$ ，即一位十六进制数字正好对应四位二进制数字，因此它们之间的转换就变得很简单。表 1-1 给出了常用进制间对应关系。

(1) 二进制数到八进制数、十六进制数的转换

二进制数到八进制数转换采用“三位对应一位”的方法，二进制数到十六进制数转换采用“四位对应一位”的方法。把要转换的二进制数，以小数点为基准向左右两边分别进行分组。八进制按每三位一组，十六进制按每四位一组，不足的位数向左右两边补0。然后按表 1-1 写出每组对应的八或十六进制数字，即得转换结果。

例 1-4 将 1000110.01B 分别转换为八进制数和十六进制数。

“二”到“八”的转换方法：

$$\begin{array}{ccc} \underline{001} & \underline{000} & \underline{110} & . & \underline{010} \\ 1 & 0 & 6 & . & 2 \end{array}$$

“二”到“十六”的转换方法：

$$\begin{array}{ccc} \underline{0100} & \underline{0110} & . & \underline{0100} \\ 4 & 6 & . & 4 \end{array}$$

1000110. 01B = 106. 2Q = 46. 4H

(2) 八进制、十六进制到二进制的转换

采用“一位对应三（四）位”的方法即按顺序写出每位八进制（十六进制）数字所对应三（四）位二进制数，所得结果即为对应的二进制。（最高位的0和小数点后最末位的0可以略去）

例 1-5 将 352. 6Q 转换为二进制数。

$$\begin{array}{ccc} 3 & 5 & 2 & . & 6 \\ \underline{011} & \underline{101} & \underline{010} & . & \underline{110} \end{array}$$

结果为：352. 6Q = 11101010. 11B

例 1-6 将 B6. 8H 转换为二进制数。

$$\begin{array}{ccc} B & 6 & . & 8 \\ \underline{1011} & \underline{0110} & . & \underline{1000} \end{array}$$

结果为：B6. 8H = 10110110. 1B

表 1-1 常用进制间对应关系

二进制 (B)	八进制 (Q)	十六进制 (H)	十进制 (D)
0000	0	0	0
0001	1	1	1
0010	2	2	2
0011	3	3	3
0100	4	4	4
0101	5	5	5
0110	6	6	6
0111	7	7	7
1000		8	8
1001		9	9
1010		A	
1011		B	
1100		C	
1101		D	
1110		E	
1111		F	

1.4.3 二进制数和十六进制数的运算

1. 二进制数的运算

(1) 二进制数的加法

二进制数的加法运算规则为： $0+0=0$ ； $0+1=1$ ； $1+0=1$ ； $1+1=10$ 。

例如：

$$\begin{array}{r} 10010110\text{B} \\ + 01110011\text{B} \\ \hline 100001001\text{B} \end{array}$$

(2) 二进制数的减法

二进制数向前借位时，为“10”，例如：

$$\begin{array}{r} 10010110\text{B} \\ - 01110011\text{B} \\ \hline 00100011\text{B} \end{array}$$

2. 十六进制数的运算

十六进制数的加法运算规则与十进制运算规则相同，如 $2\text{H} + 7\text{H} = 9\text{H}$ ； $6\text{H} + 8\text{H} = 0\text{EH}$ 。

例如：

$$\begin{array}{r} 346\text{AH} \\ + 589\text{DH} \\ \hline 8\text{D}07\text{H} \end{array}$$

在上式中，“个”位 A（即 10）加 D（即 13），结果为 23，即十六进制数的“17”，向“十”位进 1，结果为 7；“十”位 $6+9+1$ ，结果为 16，即十六进制数中的“10”，向“百”位进 1，结果为 0；“百”位 $4+8+1$ ，结果为 13，即十六进制数中的“D”；“千”位 $3+5$ ，结果为 8。

又如：

$$\begin{array}{r} 8647\text{H} \\ - 698\text{CH} \\ \hline 1\text{CBBH} \end{array}$$

在上式中，“个”位向“十”位借 1 后，变成十六进制数的“17”，即十进制数的 23，再减 C（即十进制数的 12），结果为 11，即十六进制数的“B”；“十”位原本是 4，个位借 1 后变为“3”，“十”位再向“百”位借 1，变为十六进制数的“13”，即 19，减 8，结果是 11，即十六进制数的“B”；“百”位原本是“6”，被“十”位借 1 后变为“5”，再向“千”位借 1，变为十六进制数的“15”，即 21，减 9，结果为 12，即十六进制数的“C”；“千”位被“百”位借 1 后变为“7”，减 6，结果为 1。

1.5 码制

计算机中的另一类数据是非数值型数据，非数值型数据是指声音、图像、字符等类型的