

哈尔滨工业大学出版社

MCS-51 单片机原理 及接口技术

修订版

马家辰 孙玉德 张颖 编

MCS-51

MCS-51

MCS-51

MCS-51

MCS-51

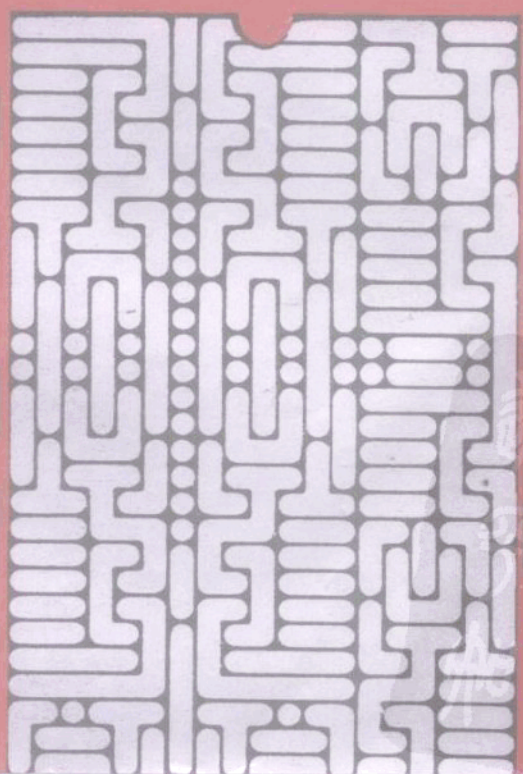
MCS-51

MCS-51

MCS-51

MCS-51

MCS-51



PDG

再 版 前 言

单片机具有集成度高、功能强、可靠性高、结构简单、易于掌握、应用灵活和价格低等优点,在工业控制、机电一体化、智能仪表、通信、家用电器等诸多领域中得到了广泛应用。单片机的应用提高了机电设备的技术水平和自动化程度,成为产品更新换代的重要手段。因此,高等理工院校师生和工程技术人员了解和掌握单片机的原理、结构和应用技术是十分必要的。

我们针对非计算机专业师生和工程技术人员的特点,结合自己长期从事计算机原理和单片机教学与科研工作的体会编写了本书,其主要目的是使读者掌握计算机的基本原理和操作方法。

就单片机本身而言,它具有完整的计算机结构,而且各种机型越来越多,功能越来越强。正是考虑到单片机的这一特点,在内容安排上,我们力求体现从易到难、循序渐进的原则,在书中增加了计算机的基础知识、模型机的结构和工作过程,并以目前广泛使用的MCS-51单片机为典型介绍了一般计算机的原理和汇编语言程序设计,以及MCS-51单片机的结构、原理,从而使读者可以在没有计算机系统知识的情况下阅读本书,并通过本书建立一个完整的计算机系统知识体系,达到举一反三的目的,这也是很多教师在计算机教学中总结出来的经验。

考虑到实际应用及发展的需要,本书着重介绍了单片机汇编语言的程序设计、系统扩展、接口技术、最新增强型51系列单片机等内容,给出了许多具体的电路和应用实例,在存储器方面侧重于较大容量的存储器扩展的介绍,对常用芯片也作了比较详细的说明。本书在附录部分给出了MCS-51单片机指令速查表、常用芯片的引脚图等,为读者查阅提供了方便。

本书第一、二、三章及附录由张颖编写,第四、七、九章由马家辰编写,第五、六、八章由孙玉德编写。

在编写及修订过程中,我们参考了部分有关书刊、资料,在此对作者一并表示感谢。

由于水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1998年6月

目 录

第一章 绪论	
第一节 计算机的分类与发展	1
第二节 计算机的应用	2
第三节 微型计算机的系统组成	4
第四节 单片微型计算机的发展及应用	5
思考题与习题	8
第二章 计算机运算基础	
第一节 数制	9
第二节 数的表示方法	14
第三节 数的运算方法	24
第四节 二进制数加法电路	28
思考题与习题	34
第三章 计算机的硬件电路基础	
第一节 触发器	35
第二节 寄存器	39
第三节 总线结构	46
第四节 存储器	48
第五节 模型计算机的工作原理	61
思考题与习题	69
第四章 单片微型计算机的组成原理	
第一节 微型计算机的结构及指令执行过程	71
第二节 MCS-51 单片计算机的组成原理	75
第三节 MCS-51 存储器配置	80
第四节 时钟电路及时序	84
第五节 输入输出端口	87
第六节 复位电路	90
第七节 MCS-51 单片机的引脚功能	92
思考题与习题	94
第五章 指令系统	
第一节 指令系统概述	95
第二节 MCS-51 单片机指令系统	99
思考题与习题	119

第六章 汇编语言程序设计	
第一节 汇编语言的基本知识	122
第二节 简单程序设计	125
第三节 分支程序设计	128
第四节 循环程序设计	130
第五节 查表程序设计	135
第六节 散转程序设计	137
第七节 子程序设计	141
第八节 浮点数及其程序设计	143
思考题与习题	152
第七章 MCS-51 单片机的扩展应用	
第一节 程序存储器的扩展	155
第二节 外部数据存储器扩展	162
第三节 输入/输出与中断	168
第四节 定时器/计数器	179
第五节 串行通信	187
思考题与习题	198
第八章 MCS-51 单片机接口技术	
第一节 MCS-51 单片机的并行接口电路	199
第二节 键盘与数码管显示器接口电路	214
第三节 专用键盘显示器接口芯片 8279 与单片机的接口	224
第四节 MCS-51 单片机串行口扩展	235
第五节 单片机与 D/A 和 A/D 转换器的接口	239
思考题与习题	247
第九章 增强 51 单片机	
第一节 8XC52/54/58 系列单片机硬件说明	250
第二节 8XC51FX 硬件说明	258
第三节 87C51GB 单片机	270
思考题与习题	287
附录 I MCS-51 系列单片机指令一览表	288
附录 II MCS-51 特殊功能寄存器一览表	303
附录 III MCS-51 特殊功能寄存器位地址分布	304
附录 IV MCS-51 内部 RAM 的位地址分布	305
附录 V 本书选取的芯片的引脚图	306
附录 VI 常用波特率与其它参数选取关系	311

第一章 绪 论

第一节 计算机的分类与发展

世界上第一台可以用程序控制的计算机被称为电子数字积分器与计算器(Electronic Numerical Integrator And Calculator),简称 ENIAC,是 1946 年由美国宾夕法尼亚大学研制的。这台计算机的字长为 12 位,主存储器只有 17K,运算速度为每秒 5 000 次加法运算,但它却是庞然大物。ENIAC 共使用 18 800 个电子管,1 500 个继电器,占地面积为 150m²,重 30t,耗电 150kW,造价为 100 多万美元。今天看来,这台计算机既贵且重,运算速度低,字长不够长,而且耗电多。但它正是今天大小不一、花样繁多的各种类型电子计算机的先驱,为计算机技术的发展奠定了基础。如果该 ENIAC 称为第一代电子计算机的话,至今已发展至第四代超大规模集成电路计算机。

第一代(1946~1958 年)电子管数字计算机

计算机的逻辑元件采用电子管,主存储器采用磁鼓、磁芯,外存储器已开始采用磁带;软件主要用机器语言编制,后期逐步发展了汇编语言。主要用于科学计算。

第二代(1958~1964 年)晶体管数字计算机

计算机的逻辑元件采用晶体管,主存储器采用磁芯,外存储器已开始使用磁盘;软件已开始有很大的发展,出现了各种高级语言及编译程序。此时,计算机速度明显提高,耗电下降,寿命提高。计算机已发展至用于各种事务处理,并开始用于工业控制。

第三代(1964~1971 年)集成电路计算机

计算机的逻辑元件采用小规模和中规模集成电路,即所谓的 SSI 和 MSI;软件发展更快,已有分时操作系统,应用范围日益扩大。

第四代(1971 年以后)大规模集成电路计算机

计算机的逻辑元件采用大规模集成电路。所谓的大规模集成电路(LSI)是指在单片硅片上可集成 1 000 至 20 000 个晶体管的集成电路。由于 LSI 的体积小,耗能减少,可靠性高,因而促使计算机以极快的速度发展。

目前计算机的发展动向一是向大型、巨型化发展,二是向小型、微型化发展。

1. 大型、巨型计算机

为了适应现代科学技术发展的需要,要求计算机提高运算速度,加大主储容量,为此出现了大型和巨型计算机。如美国的克雷公司生产的 Cray-1、Cray-2、Cray-3 巨型计算机是比较著名的巨型计算机。我国的银河 I 就是每秒 10 亿次并行巨型计算机。目前,只有少数几个国家有能力生产巨型计算机,它象征着一个国家的科技实力。

2. 小型、微型计算机

大型机速度快,容量大,解决了过去无法计算的实时及复杂的数学问题,但是由于设备庞大,价格昂贵,给普及和应用带来了一定困难。另一方面,为了适应宇航、导弹技术及一般应用的要求,体积小、造价低、高可靠性就成了问题的关键,小型机特别是微型机的出现有效地解决了这个问题。

所谓的微型计算机(Microcomputer,简称 MC)是指把计算机的心脏——中央处理器(CPU)集成在一小块硅片上。为了区别于大、中、小型计算机的 CPU,而称微型计算机的 CPU 芯片为微处理器 MPU(Microprocessing Unit 或 Microprocessor)。

微型计算机除有 MPU 作为中央处理器以外,还有以大规模集成电路制成的主存储器 and 输入输出接口电路,三者之间是采用总线结构联系起来的。如果再配上相应的外围设备如显示器(CRT)、键盘及打印机等,这就成为微型计算机系统(Microcomputer System)。

目前,微型计算机功能已经很强,比如“奔腾”(Pentium)586 CPU 的集成度已达到 300 多万只晶体管,时钟频率高达 200MHz。由于结构简单、通用性强、价格便宜,微型计算机已成为现代计算机领域中的一个极为重要的分支,正在突飞猛进地发展。

第二节 计算机的应用

众所周知,计算机能控制机床自动加工复杂的零件,能使火箭准确地进入轨道,使导弹准确击中目标;可以代替人管理城市交通,实现航空和火车的调度,银行储蓄可以通存通兑;可以编辑稿件,自动排版;可以代替医生诊断疾病,自动开药方和假条;与计算机对弈,连优秀的棋手也会失败,……。现代科学的发展使计算机应用的领域已极其广泛,概括起来,可以归纳为以下几个主要方面:

1. 科学计算

计算机广泛地应用于科学技术方面的计算,这是计算机应用的一个基本方面,也是我们比较熟悉的。如:人造卫星轨迹计算,导弹发射的各项参数的计算,房屋抗震强度的计算,24 小时的天气预报等,通常要求解几十阶微分方程组,进行大型矩阵运算。

2. 数据处理

用计算机对数据及时地加以记录、整理和计算,加工成人们所要求的形式,称为数据处理。通常,在生产组织、企业管理、市场预测、情报检索等方面,存在着大量的数据需要及时进行搜索、归纳、分类、整理、存储、检索、统计、分析、列表、绘图等。这类问题数据量大,而运算又比较简单,包含大量的逻辑运算与判断,其处理结果往往以表格或文件形式存储或输出。

据统计,目前在计算机应用中,数据处理所占的比重最大。它使人们从大量繁杂的数据统计管理事物中解放出来,大大提高了工作质量、管理水平和效率。

随着计算机的普及,在数据处理方面的应用还将继续扩大与深入。

3. 自动控制

自动控制也是计算机应用的一个重要方面。在生产过程中,采用计算机进行自动控制,可以大大提高产品的数量和质量,提高劳动生产率,改善人们的工作条件,减少原材料的消耗,降低生产成本。如:航天飞行、宇航空间站的发射、对接、测控,代替人类进行有害危险工序的现场操作、控制等。

4. 辅助设计

计算机辅助设计,简称 CAD(Computer Aided Design)。用计算机辅助人们进行设计工作,如设计飞机、汽车、房屋、服装、集成电路等,使设计工作自动化。

由于 CAD 技术的迅速发展,应用范围不断扩大,又派生出许多新的技术分支,如计算机辅助制造(Computer Aided Manufacture,简称 CAM)、计算机辅助教学(Computer Aided Instruction,简称 CAI)等等,有些技术的应用及发展提高了机械、电子等行业的设计水平和自动化水平。

5. 系统仿真

计算机仿真是指应用计算机来模仿实际的系统,这是新兴的计算机应用领域,有着广泛的应用前景。如大型电站仿真、航天飞机的仿真、火箭的仿真、汽车的仿真等等。在计算机仿真系统上进行实验、研究,可以节约大量资金,并且实验安全。目前像飞机、汽车的驾驶培训,已经开始使用飞机、汽车仿真系统,学员可以在仿真系统上进行各种训练。

6. 智能模拟

智能模拟是用计算机软硬件系统模拟人类某些智能行为,如感知、思维、推理、学习、理解等理论和技术。它是在计算机科学、控制论、仿生学和心理学等基础上发展起来的边缘学科。这正是国内外争先研究的人工智能技术,它包括专家系统、模式(声、图、文)识别、问题求解、定理证明、机器翻译、自然语言理解等等。据最新报道,日本富士通公司目前正试图开发一种能识别人脑思维的计算机。这种具有智能的计算机,不再需要敲击键盘,甚至不需对计算机讲话,只要操作人员想一个单词,如“Yes”或“No”,就可以控制计算机。

7. 计算机网络与信息高速公路

(1) 计算机网络

计算机网络是计算机技术和数字通讯技术发展并相融合的产物。它是指多个独立的计算机系统之间通过通讯线路、专用电缆、微波卫星、光导纤维等各种通讯介质进行数据、通信、资源共享(软件、硬件、数据库等),而成为联系在一起的具有多种功能的网络系统。

如 Internet(国际计算机互联网络)是由国际上成千上万个计算机遵循 Internet 的有关网络协议在物理上互相连接,为实现信息交互而组成的联合体。Internet 的服务包括电子邮件、信息查询、购物、健康咨询、电子报刊以及娱乐,还可以刊登广告,通过它进行公司的跨国管理。

(2) 信息高速公路

1993年9月15日,美国正式推出跨世纪的“国家信息基础设施”工程计划(National

Information Infrastructure, 简称 NII 计划), 也有人称之为信息高速公路 (Information Highway)。

信息高速公路的含义是建设 21 世纪“信息国道”, “建设全国性的信息网络”, 将全国的研究机构、学校、办公室、图书馆、家庭等都连在一起, 使每个人都能平等地享受信息资源。有人预计, 到 21 世纪初将会在世界范围内形成“信息高速公路”联网热潮, 由地区或国家扩展至几个国家或几个地区, 最终形成“全球高速信息网络”, 冲破地理位置和时间限制, 从而大幅度提高社会生产力, 加快人类各种文化交流与沟通, 促进人类社会向更高级阶段发展。

第三节 微型计算机的系统组成

计算机系统通常是由硬件及软件系统两大部分组成, 如图 1-1。

硬件(Hardware)是指实际的物理设备, 它包括计算机的主机及其外部设备。

软件(Software)是指计算机完成某一工作的程序, 包括系统软件、程序设计语言及应用软件等。

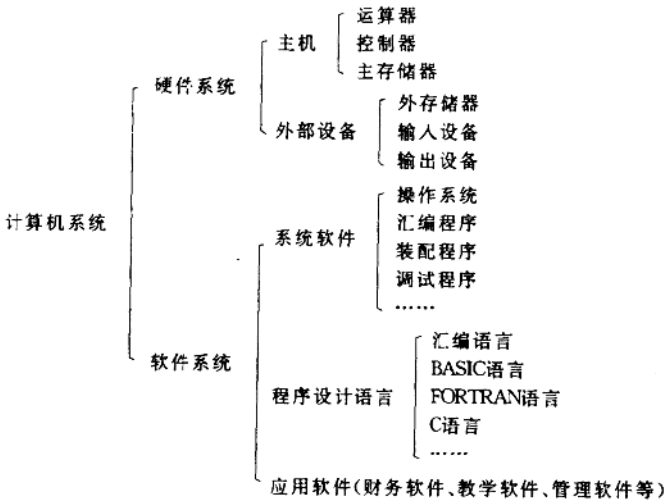


图1-1 计算机系统组成

计算机原理主要介绍计算机的硬件原理。其组成框图如图 1-2。

1. 主机

主机一般包括运算器(Arithmetic Logic Unit)、控制器(Control Unit)和主存储器(Main Memory)。

(1) 运算器

运算器是进行算术和逻辑运算的部件, 它由完成加法运算的加法器、存放操作数和运算结果的寄存器和累加器等组成。

(2) 控制器

它是整个计算机硬件系统的指挥中心,根据不同的指令产生不同的命令,指挥整个机器有条不紊地自动地进行工作。

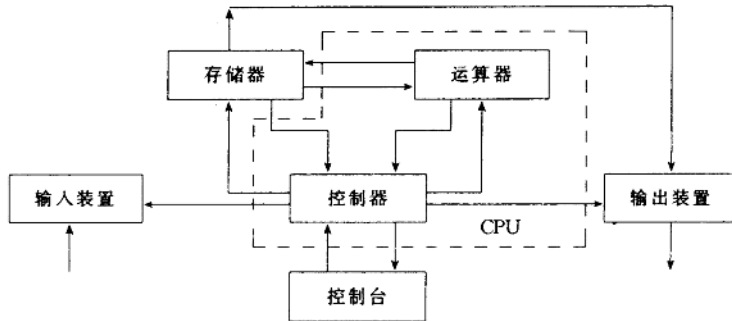


图1-2 电子计算机的组成框图

(3) 主存储器

主存储器又称为内存储器,它由大量的存储单元组成,用以存储大量的数据及程序。目前的主存储器一般是由半导体电路组成,称为半导体存储器。

运算器和控制器又称中央处理机 CPU(Central Processing Unit)。

2. 外部设备

(1) 输入设备(Input Device)

它将计算程序和原始数据转换为电信号,在控制器的控制下,按地址顺序地存入主存。过去,通常采用纸带输入机,目前常用的有键盘、软驱、磁带机、光驱。

(2) 输出设备(Output Device)

它将运算的结果以人们容易识别的形式,在控制器的控制下,由主存通过外部设备呈现给人们。输出设备有显示器、打印机、绘图仪。

(3) 外存储器(External Storage)

它是主存的后备存储器,存取速度比主存慢,但容量是海量。它不直接和 CPU 打交道,存储主机工作时暂时不用的那些程序和数据。常用的外存有磁带、磁盘、光盘,其中磁盘又可分为硬盘及软盘。

第四节 单片微型计算机的发展及应用

单片微型计算机简称单片机,它是把组成微型计算机的各部件:中央处理器、存储器、输入输出接口电路、定时器/计数器等,制作在一块集成电路芯片中,构成一个完整的微型计算机。

1971年,Intel公司首次推出4004的4位单片微处理器。1974年12月仙童(Fairchild)公司推出8位单片机F8(需另加一块3851芯片),其后,Mostek公司和仙童公司一起推出了与F8兼容的3870单片机系列。Intel公司1976年推出MCS-48系列单片

机。GI(Gentral Instrument Crop)公司在1977年10月宣布了PIC1650单片机系列。1978年, Rockwell公司也推出了R6500/1系列(与6502兼容)。有些单片机都有8位CPU,若干个并行I/O, 8位定时器/计数器, 容量有限的RAM和ROM, 以及简单中断处理功能。

Motorola公司和Zilog公司的单片机问世较迟, 但是产品性能较高, 单片机内有串行I/O, 多级中断处理能力, 片内的RAM和ROM容量较大, 有些还带有A/D转换接口。Motorola公司在1978年下半年宣布了与6800微处理器兼容的6801单片机。Zilog公司在同年10月也推出了Z80单片机系列。Intel公司在原MCS-48基础上, 于1980年推出了高性能的MCS-51系列(包括8031/8051/8751)。1982年, Mostek公司和Intel公司先后推出了16位单片机MK68200(与68000微处理器兼容)和MCS-96(8096、8098)系列。1987年Intel公司推出了性能是8096 2.5倍的新型单片机80296。

目前单片机的现状为:

(1)4位单片机

4位单片机的主要产品有:

NEC公司的 μ PD75xx;

TI公司的TMS1000系列;

松下公司的MN1400系列;

NS公司的COP400;

Rockwell公司的PPS/1系列;

SAMSUNG公司的KS56和KS57系列;

富士通公司的MB88系列。

其中, μ PD75xx与COP400在4位机中占有重要地位, 年产量已达到数千万片。

4位单片机的特点是价格便宜, 如COP400的价格仅为8位单片机8048和6805价格的一半, 但是功能并不弱, 只是4位CPU, 片内的ROM有2K, RAM为128 \times 4位。NEC公司的 μ PD75xx片内的ROM可达8K字节, RAM为512 \times 4位, I/O引脚为58根, 甚至还有6位A/D。近年来, 4位单片机的产量仍在增长, 但所占比例逐年下降, 单片机的主角已让给了8位单片机。4位机与8位机进行竞争, 只有进一步降低价格, 并增强I/O的功能(特别是专用I/O功能)。4位机主要用于家用电器和电子玩具等方面。

(2)8位单片机

8位单片机的产量占整个单片机的60%以上, 并逐年增长。1985年的产量为1.7亿片, 1986年的产量为2.1亿片, 1992年达7亿片。8位单片机的旧的机种正在被淘汰, 新的机型不断涌现。

自1985年以来, 各种高性能、大容量、多功能的新型8位单片机不断地推出。如Intel公司的8x552、 μ PI-452(8051的增强型)、Motorola公司的MC68HC11(6801增强型)、Zilog公司的Super8等, 它们将代表单片机发展的方向, 将在单片机领域中起越来越大的作用。常用的8位单片机性能如表1-1所示。

表 1-1 主要 8 位单片机的性能表

公 司	系 列	片内存储器		寻址范围	片内 I/O		定时器/ 计数器	中断	备 注
		ROM	RAM		并行口	串行口			
Intel	MCS-48	1K/4K	64/256B	4KB	3×8 位	/	1×8 位	2	
	MCS-51	4K/8K	128/256B	64K	4×8 位	UART	2×16 位	5/6	
	8XC51FX	8/32K	256B	64K	4×8 位	UART	3×16 位	7	PCA
	8XC51GB	8K	256B	64K	6×8 位	2UART	3×16 位	15	PCA 8×8A/D
Motorola	6801	2K/4K	128/256B	64K	3×8 位 1×5 位	UART	3×16 位	2	
	6805	1K/4K	64B/112B	2K/8K	2×8 位 1×4 位	/	1×8 位	1/4	
	68HC11A	8K	256B	64K	22~ 38 位	1 SCI 1SPI	16 位, 3-IC 5-OC, RTI	20	WDOG 8×8A/D
Zilog	Z8	2K/4K	124B	64K	8×1 位 4×4 位 1×8 位	UART	2×8 位	6	
Fairchild	F8	/	64K	4KB	2×8 位	/	/	/	
Mostek	3870	1K/4K	64B	4KB	4×8 位	/	1×8 位	2	
Reckwell	6500/1	256B/3K	64B/192B	64KB	4×8 位	UART	1×16 位	4/8	
NEC	UPD78XX	4K/6K	128/256B	64KB	6×8 位	UART	1×12 位	3	
TI	TMS7000	2K/12K	128B	64KB	4×8 位	UART	1/2×13 位	2/6	微程序
GI	PIC16XX	512×12/ 2K×12 位	32B/64B	512B/ 2KB	8×4 位	/	1×8 位	1/2	
NS	8070	2K/2.5K	64B/128B	64/128K	5×8 位	UART		/	
RCA	CDP1800	2K	64B	64KB	12 位	/	/	3	DMA
Philips	8XC552	8K	256B	64K	6×8 位	UART	3×16 位	15	8×10ADC 2×8PWM

注：IC：输入捕捉；OC：输出比较；PWM：脉宽调制；RTI：实时中断；SPI：串行外围接口；SCI：串行通信接口；PCA：可编程计数器阵列。

8 位单片机由于其功能强、品种多，正广泛应用于各个领域，是单片机的主流机种。随着集成电路工艺的不断改进，8 位单片机的价格也不断降低，甚至比 4 位单片机的价格低，如 Motorola 公司的 MC6804J1 价格已不足 0.5 美元。

(3) 16 位单片机

16 位单片机自 1982 年开始推出,已有很大发展,但是它的增长没有人们预计的快。目前,16 位机的产量还不到 8 位机的十分之一。由于 16 位机价格高,应用还不广泛,主要应用于汽车控制、自动控制等方面。常用的 16 位单片机性能如表 1-2 所示。

表 1-2 16 位单片机性能表

公 司		Thomson	Intel	NS	NEC
型 号		68200	MCS-96	BPC16040	783××
片 内	ROM	4KB	8KB	4KB	8KB
	RAM	256B	232B	256B	256B
中 断 源		15	8	8	15
串 行 口		异/同步	异 步	异 步	异 步
A/D		无	8×10 位	无	4×8 位
PWM 输出		借用通用 计 数 器	有	有	有
Watchdog 定时器			有	有	有
计 数 器		3×16	2×16	8×16	2×16
高速 I/O		无	HSIO	有	有
DMA		无	无	无	8 个宏通道
备 注		与 68000 指令兼容			7811 升级产品

注:68200 原为 Mostek 公司产品,是第一个 16 位单片机。由于 Mostek 公司经营不景气,1985 年宣布倒闭,由 Thomson 公司接管该公司。

由于单片机超小型化,结构紧凑,可靠性高,价格低廉,在国民经济中得到广泛应用。

- ①工业方面:电机控制、工业机器人、过程控制、数字控制。
- ②仪器仪表方面:智能仪器、医疗器械、色谱仪、示波器。
- ③民用方面:电子玩具、高级电视游戏机、录像机、激光盘驱动。
- ④电讯方面:调制解调器、智能线路运行控制。
- ⑤导航与控制方面:导弹控制、鱼雷制导控制、智能武器装置、航天导航系统。
- ⑥数据处理方面:图形终端、彩色黑白复印机、温氏硬盘驱动器、磁带机、打印机。
- ⑦汽车方面:点火控制、变速器控制、防滑刹车、排气控制。

单片机的发展趋势是:增加存储器容量,片内 EPROM 开始 EEPROM 化,存储器编程保密化,片内 I/O 多功能化及低功耗 CMOS 化。

思考题与习题

1. 什么是单片机?它与一般微型计算机在结构上有什么区别?
2. 微型计算机由哪几部分组成?

第二章 计算机运算基础

本章主要介绍计数方法、数的表示法和运算方法。

在计数方法中,主要介绍各种进位计数制及不同进位计数制之间的转换。

在数的表示法中,主要介绍真值与机器数、定点与浮点数的表示方法、原码、补码、反码以及数的编码方法。

在运算方法中,主要介绍定点加减法补码运算及逻辑运算。

本章内容是必要的入门知识。对于已学过这些知识的读者,本章将起到复习和系统化的作用。

第一节 数 制

一、进位计数制

按进位的原则进行计数的数制,称为进位计数制。

1. 十进制(Decimal System)

大约在公元400年左右,印度数学家首先发明了用十进制计数。约在公元800年,阿拉伯人开始使用,所以又称为阿拉伯数制。以后传到欧洲,才被命名为“十进制”。

十进制计数制中,是根据“逢十进一”的原则进行计数的。一个十进制数,它的数值是由数码0、1、2、…、8、9来表示的。数码所处的位置不同,代表数的大小也不同。从右起的第一位是个位,第二位是十位,第三位是百位、……。个、十、百、千等在数学上叫做“权”。十进制数的权是以10为底的幂。所使用的数码的个数称为基(如十进制数中为10)。每一位上的数码与该位“权”的乘积表示了该位数值的大小。如下面的数:

十进制	5	2	3	8	9	4
	10^5	10^4	10^3	10^2	10^1	10^0
	十万	万	千	百	十	个

$$523894 = 5 \times 10^5 + 2 \times 10^4 + 3 \times 10^3 + 8 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 4 \times 10^0$$

“权”和“基”是进位计数制中的两个要素。

2. 二进制(Binary System)

二进制是按“逢二进一”的原则进行计数的。二进制数的基为“2”,即其使用的数码为0、1,共2个。二进制数的权是以2为底的幂。如下面这个数:

二进制	1	1	0	1	1	1
	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
十进制	32	16	8	4	2	1

其各位的权为 1、2、4、8…，即以 2 为底的 0 次幂、1 次幂、2 次幂等。

$$(110111)_2 = 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (55)_{10}$$

3. 八进制 (Octave System)

八进制是按“逢八进一”的原则进行计数的。八进制数的基为“8”，它使用的数码有 8 个，即为 0、1、2、3、4、5、6、7。八进制的权是以 8 为底的幂。如下面这个数：

八进制	1	0	3	5	2	4
	8^5	8^4	8^3	8^2	8^1	8^0

$$(103524)_8 = 1 \times 8^5 + 0 \times 8^4 + 3 \times 8^3 + 5 \times 8^2 + 2 \times 8^1 + 4 \times 8^0 = (34644)_{10}$$

4. 十六进制 (Hexadecimal System)

十六进制是按“逢十六进一”的原则进行计数的。十六进制数的基为 16，即数码码共有 16 个：0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F。其中 A、B、C、D、E、F 分别代表值为十进制数中的 10、11、12、13、14、15。十六进制的权为以 16 为底的幂。如下面的数：

十六进制	4	A	0	7	F	1
	16^5	16^4	16^3	16^2	16^1	16^0

$$(4A07F1)_{16} = 4 \times 16^5 + 10 \times 16^4 + 0 \times 16^3 + 7 \times 16^2 + 15 \times 16^1 + 1 \times 16^0 = (4851679)_{10}$$

在数字后面加上 (2)、(8)、(10) 或 (16) 是指二进制、八进制、十进制数和十六进制数。也有用字母来表示这些数制的，B——二进制，H——十六进制，O——八进制，D——十进制。通常十进制数的 D 或 10 可以省略不写。

常用计数制表示数的方法如表 2-1。

表 2-1 常用计数制表示数的方法

十进制	二进制	八进制	十六进制
0	0	0	0
1	1	1	1
2	10	2	2
3	11	3	3
4	100	4	4
5	101	5	5
6	110	6	6
7	111	7	7

续表 2-1

8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F
16	10000	20	10

二、计算机中为什么要用二进制或十六进制计数

在计算机中采用什么数制,考虑因素之一是能用最少的状态表示的数最大,这样能使计算机的硬件结构最简单。

例如:4位十进制数的最大数值为9999。每位数可能为十个数码之一,若表示一位十进制数,则需要10个状态量,每一状态代表十个数码之一。4位十进制数则需要 $4 \times 10 = 40$ 个状态量表示。若采用八进制数,每位有八个数码,需要8个状态量,40个状态量则表示八进制数5位,其最大数为 $8^5 - 1 = 32767$ 。若采用二进制数,每位有两个数码,40个状态量能表示20位二进制数,其最大数为 $2^{20} - 1 = 1048575$ 。显然同样用40个状态量,用二进制数表示的数值最大。也就是用二进制数表示一个数,所用的状态量最少,硬件设备最少。

那么从理论上,究竟用几进制的数最节省状态数呢?

设采用 x 进制数,位数为 n , $x \cdot n$ 为状态数。假设状态 $x \cdot n = \text{const}$ (常数),其表示的最大数为 $x^n - 1$ 。

设 $f(x) = x^n - 1$,显然 $f(x)$ 为最大时的 x 即为最节省状态的进制数。

若 $f(x)$ 为最大,则 $p(x) = f(x) + 1 = x^n$ 亦应为最大。

对 $p(x) = x^n = x^{\frac{c}{x}}$ 两边取对数,则

$$\ln p(x) = \ln x^{\frac{c}{x}} = \frac{c}{x} \ln x$$

两边对 x 求导,则

$$\frac{p'(x)}{p(x)} = \frac{d[\frac{c}{x} \ln x]}{dx} \quad p'(x) = p(x) \cdot \frac{d[\frac{c}{x} \ln x]}{dx}$$

当 $p'(x) = 0$ 时, $p(x)$ 取得最大值。由于 $p(x) \neq 0$,则

$$\frac{d[\frac{c}{x} \ln x]}{dx} = 0 \quad \frac{c}{x} \cdot \frac{1}{x} - \frac{c}{x^2} \ln x = 0$$

求得 $\ln x = 1$,则 $x = e = 2.718$ 。

由于进制数必须为整数,则从理论上说,当用三进制数时所用的状态量最少,其次为二进制数。

电路中一般只用两种稳态:导通与阻塞,饱和与截止,高电位与低电位等,具有两个稳态的电路称为二值电路。用二值电路来计数时,只能代表两个数码:0和1,如用1代表高电位,则0代表低电位。采用二进制,就可以利用现有电路进行计数工作,并且所用的状态量较少。所以,计算机中采用二进制数计数是必然的。

用二进制表示一个数时位数较长,不容易记忆,如 $(44421)_{10}$ 用二进制和十六进制分别表示为

$$\begin{array}{cccc} \underline{1010} & \underline{1101} & \underline{1000} & \underline{0101} \\ \text{A} & \text{D} & 8 & 5 \end{array} \text{ }_2 = (\text{AD85})_{16} = (44421)_{10}$$

显然用十六进制表示与用二进制表示相比,书写简短,便于记忆。这就是应用十六进制数的意义。

三、数制的转换方法

由于我们习惯十进制计数,所以在研究问题或讨论解题的过程时,总是用十进制来考虑和书写的。当考虑成熟后,要把问题变成计算机能够“认识”的形式,即把问题中的所有十进制数转换成二进制代码,因此需要用到“十进制转换成二进制数的方法”。计算机运算完毕得到二进制结果后,又需要用到“二进制数转换为十进制数的方法”,才能把运算结果用十进制形式显示出来。二进制数书写较烦,经常用十六进制表示,这又需要二进制与十六进制数之间的转换。

1. 十进制数转换成二进制数的方法

十进制整数转换成二进制整数,通常采用“除二取余法”。所谓的“除二取余法”,就是用2去除该十进制数,得商和余数,此余数为二进制代码的最小有效位(LSB)或最低位的值;再用2除该商数,又可得商数和余数,则此余数为LSB左邻的二进制代码(次低位)。以此类推,从低位到高位逐次进行,直到商是0为止,就可得到该十进制数的二进制代码。

例:将 $(53)_{10}$ 转换成二进制数,其过程如下:

2	53	— 余数为1	<div style="display: inline-block; border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; height: 100px; margin-right: 5px;"></div> 低位 高位
2	26	— 余数为0	
2	13	— 余数为1	
2	6	— 余数为0	
2	3	— 余数为1	
2	1	— 余数为1	
	0	— 余数为1	

所以 $(53)_{10} = (110101)_2$

十进制纯小数转换成二进制纯小数,通常采用“乘二取整法”。所谓“乘二取整法”,就是将已知十进制的小数乘以2之后,可能有进位,使整数位为1(当该小数大于0.5时),

也可能没有进位,其整数位仍为零。该整数位的值为二进制小数的最高位,再将乘积的小数部分乘以 2,所得整数位的值为二进制小数的次高位。以此类推,直到满足精度要求或乘 2 后的小数部分为 0 为止。

例:求十进制数 0.625 的二进制数。

其进行步骤可以用乘法的竖式算法:

0. 6 2 5	
×) 2	整数部为1即二进制小数后第一位为1
1. 2 5	
0. 2 5	
×) 2	整数部为0即二进制小数后第二位为0
0. 5	
×) 2	整数部为1即二进制小数后第三位为1
1. 0	

所以 $(0.625)_{10} = (0.101)_2$

如果小数位不是 0,则还得继续乘下去,直至变成 0 为止或者满足精度要求。因此一个十进制小数在转换为二进制小数时,有可能无法准确地转换。如十进制数 0.1 转换为二进制数时为 0.0001100110...,因此只能近似以 0.00011001 来表示。

我们把既有整数部又有小数部复合而成的小数称为混合小数。十进制混合小数转换为二进制数,只要按上述方法将整数及小数部分分别进行转换,然后将转换结果组合起来即可。

2. 二进制数转换为十进制数的方法

将二进制数转换成十进制数,只要将二进制数各位的权乘以各位的数码(0 或 1)再相加即可。例如:

$$\begin{aligned}
 (11001.1001)_2 &= 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} \\
 &\quad + 0 \times 2^{-3} + 1 \times 2^{-4} \\
 &= 16 + 8 + 1 + 0.5 + 0.00625 = (25.5625)_{10}
 \end{aligned}$$

3. 二进制与十六进制数之间的转换方法

由于 $2^4 = 16$,可见每 4 位二进制数与一位十六进制数相对应。这样就使二进制与十六进制数之间的转换较为简单。

(1) 二进制数转换成十六进制数

对二进制整数,只要自右向左将每 4 位二进制数分为一组,不足 4 位时,在左面添 0,补足 4 位;对二进制小数,只要从小数点后自左向右将每 4 位二进制数分为一组,不足 4 位时,在右面添 0,补足 4 位,然后将每组二进制数用相应的十六进制数代替,即可完成转换。

例:把 $(101101101.0100101)_2$ 转换成十六进制数,则