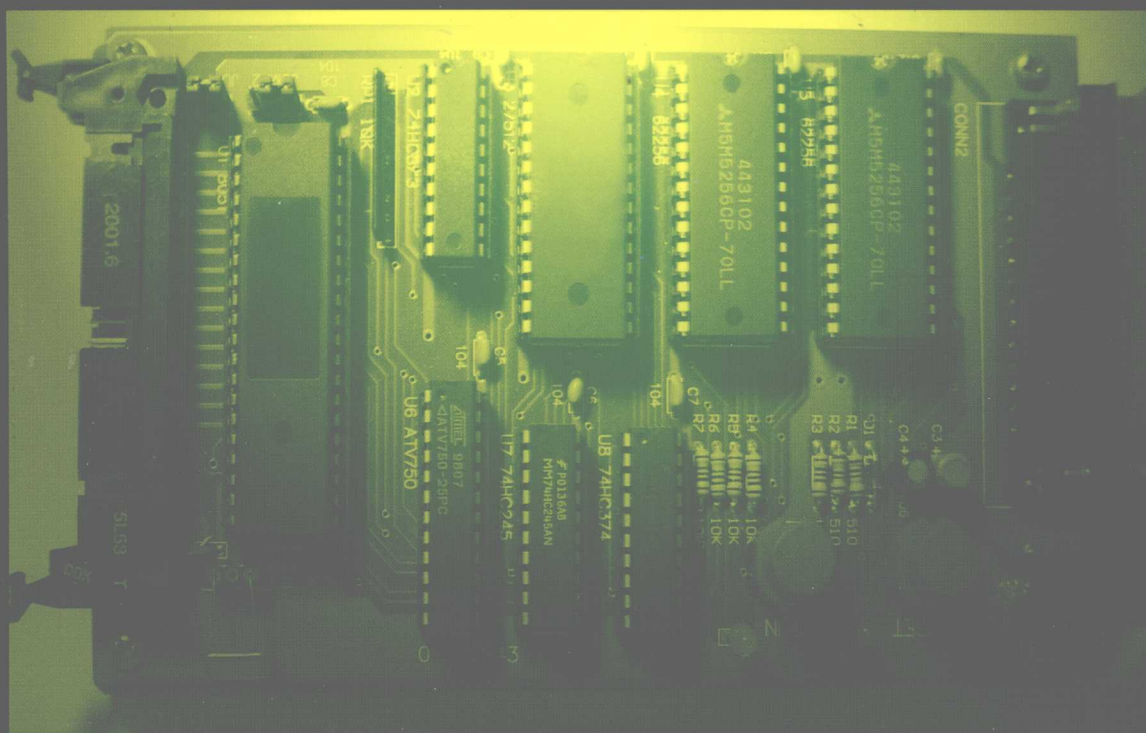


21
世纪

普通高等教育电气信息类
应用型规划教材

单片机原理、接口技术及应用

黄建新 编



化学工业出版社

21 世纪普通高等教育电气信息类应用型规划教材

单片机原理、接口技术及应用

黄建新 编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以目前使用最为广泛的 80C51 型单片机为例,系统全面地阐述了单片机的基本组成、工作原理、指令系统、汇编语言程序设计、中断技术和接口扩展技术,并在此基础上讨论了单片机应用系统的设计,列举了若干单片机应用系统实例。

本书例题丰富、形式多样,全部例题均有详细的分析和详尽的注释。全书共分 11 章,每章后均附有一定数量的练习题。本书根据作者多年从事教育、科研的经验和体会编写,内容循序渐进、重点突出,具有较好的通用性、系统性和实用性。

本书可作为高等院校电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、自动化、电气工程及其自动化等相关专业学生的教材,也可作为广大科技人员的自学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

单片机原理、接口技术及应用/黄建新编. —北京:
化学工业出版社, 2009. 8
21 世纪普通高等教育电气信息类应用型规划教材
ISBN 978-7-122-05659-7

I. 单… II. 黄… III. ①单片微型计算机-基础理论-高等学校-教材②单片微型计算机-接口-高等学校-教材 IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 101461 号

责任编辑: 郝英华 唐旭华
责任校对: 徐贞珍

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 化学工业出版社印刷厂

装订: 三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 323 千字 2009 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 23.00 元

版权所有 违者必究

前 言

单片微型计算机自从 20 世纪 70 年代中期诞生以来,发展迅猛,已经广泛应用于生活、工业生产、军事等各个领域。手机、数码摄像机、数码电视机、电子玩具、交通信号灯、豪华轿车的安全保障系统、计算机的网络通信与数据传输、医疗器械、广泛使用的各种智能 IC 卡、工业自动化过程的实时控制和数据处理、飞机上各种仪表控制、导弹的导航装置等都离不开单片机,单片机的重要性可见一斑。

本书从计算机的基础知识入手,由浅入深,将微机原理的部分内容与单片微型计算机的内容结合起来,使得有一定电方面的基础知识但没有学过计算机的读者也能较顺利地阅读此书,这对电类专业的学生特别适用。

本书以目前应用最为广泛的 80C51 单片机为主线,全面论述了单片机的系统结构和工作原理,深入介绍了单片机的典型功能单元以及系统扩展与配置方法,书的最后还介绍了单片机应用系统的设计方法,给出了一些应用实例,因而对于培养学生的工程应用能力有较大的帮助。本书共有 11 章:第 1 章介绍微型计算机的基础知识;第 2 章介绍单片机的基本结构和工作原理;第 3, 4 章为指令系统和使用汇编语言的程序设计;第 5 章介绍半导体存储器结构及单片机的程序存储器和数据存储器的扩展技术;第 6~10 章介绍单片机的并行、串行接口技术,是单片机硬件设计的核心部分;第 11 章介绍了两个单片机应用系统实例,以加强学生对单片机应用系统设计过程的认识。

本书相关电子课件可免费提供给采用本书作为教材的院校使用,如有需要可发送邮件至 haoyinghua@cip.com.cn 索取。

本书由黄建新编写。全书由陈雪丽教授进行了审阅,并提出了许多宝贵意见。在编写过程中还得到了刘怀、孙频东、郭怡倩、沈世斌等的鼎力相助,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,不妥之处恳请读者批评、指正。

编 者
2009 年 5 月

目 录

1 微型计算机基础知识	1	3 80C51 单片机指令系统	37
1.1 微型计算机概述	2	3.1 概述	37
1.1.1 微型计算机的基本概念	2	3.1.1 指令的分类	37
1.1.2 微型计算机的发展概况	2	3.1.2 指令的格式	37
1.1.3 微型计算机的分类	4	3.1.3 指令中常用的符号	38
1.2 常用的数制及编码	5	3.2 寻址方式	38
1.2.1 常用的数制	5	3.3 指令系统	42
1.2.2 数制之间的转换	6	3.3.1 数据传送类指令	42
1.2.3 微型计算机常用的编码	7	3.3.2 算术运算类指令	46
1.3 无符号二进制数的算术运算和 逻辑运算	8	3.3.3 逻辑运算类指令	48
1.3.1 二进制数的算术运算	8	3.3.4 控制转移类指令	50
1.3.2 无符号数的表示范围	10	3.3.5 布尔(位)操作指令	53
1.3.3 二进制数的逻辑运算	10	习题 3	55
1.4 有符号二进制数的表示及运算	11	4 汇编语言程序设计	58
1.4.1 有符号数的表示方法	11	4.1 汇编语言程序设计基础	58
1.4.2 补码的运算	13	4.1.1 机器语言、汇编语言与高级 语言	58
1.4.3 有符号数的表示范围	14	4.1.2 汇编语言的格式	59
1.5 常用数据单位	15	4.1.3 伪指令	59
1.6 微型计算机系统组成	16	4.1.4 汇编语言程序设计的步骤	61
1.6.1 硬件系统	16	4.2 程序设计实例	62
1.6.2 软件系统	18	4.2.1 顺序结构程序设计	62
习题 1	18	4.2.2 分支程序设计	63
2 80C51 单片机的基本结构和工作 原理	19	4.2.3 散转程序设计	65
2.1 80C51 单片机的组成	19	4.2.4 循环程序设计	67
2.2 80C51 单片机内部结构和引脚功能	20	4.2.5 查表程序	69
2.2.1 80C51 的内部结构	20	4.2.6 子程序	72
2.2.2 中央处理器(CPU)	20	习题 4	77
2.2.3 时钟电路及 CPU 工作时序	23	5 半导体存储器	79
2.2.4 80C51 单片机的存储器结构	25	5.1 随机存取存储器 RAM	79
2.2.5 80C51 单片机的引脚功能	30	5.1.1 RAM 的结构和工作原理	79
2.2.6 布尔(位)处理器	32	5.1.2 典型 RAM 芯片介绍	80
2.3 80C51 单片机的工作方式	32	5.2 只读存储器 ROM	82
2.3.1 复位方式	32	5.3 80C51 单片机的存储器扩展	85
2.3.2 程序执行方式	34	5.3.1 80C51 三总线结构	85
2.3.3 低功耗方式	34	5.3.2 片选方式和地址分配	86
习题 2	35	5.3.3 程序存储器扩展	87
		5.3.4 数据存储器扩展	89

习题 5	90	7.5.1 8155 结构组成和引脚功能	125
6 输入输出和中断	92	7.5.2 8155 应用举例	129
6.1 输入输出的基本概念	92	习题 7	131
6.1.1 I/O 接口的功能	92	8 80C51 内部定时器及应用	134
6.1.2 I/O 接口的编址方式	92	8.1 定时器结构	134
6.1.3 接口电路的基本构成	93	8.2 定时器工作方式	134
6.2 输入输出的工作方式	94	8.2.1 定时器/计数器 T0, T1 的特殊 功能寄存器	134
6.2.1 无条件传送方式	94	8.2.2 定时器/计数器工作方式	136
6.2.2 查询传送方式	95	8.3 定时器/计数器应用举例	138
6.2.3 中断传送方式	96	8.3.1 时间常数的计算	138
6.2.4 直接存储器存取方式	97	8.3.2 应用举例	138
6.3 中断技术基础	98	习题 8	141
6.3.1 中断概念	98	9 80C51 串行接口	142
6.3.2 中断源	98	9.1 串行通信的基础	142
6.3.3 中断系统的功能	99	9.1.1 数据通信的基本概念	142
6.4 80C51 中断系统	100	9.1.2 串行通信方式	142
6.4.1 80C51 中断系统结构	100	9.1.3 数据同步技术	142
6.4.2 中断响应过程	103	9.2 80C51 串行接口	144
6.5 外部中断源的扩展	104	9.2.1 串行接口的结构	144
6.5.1 借用定时器溢出中断扩展 外部中断源	104	9.2.2 串行接口的工作方式	146
6.5.2 采用查询法扩展外部中断源	104	9.3 80C51 串行口应用举例	148
习题 6	105	9.3.1 串行口在方式 0 下的应用	148
7 并行 I/O 接口	107	9.3.2 串行口在其他方式下的应用	149
7.1 80C51 内部并行 I/O 口	107	9.4 单片机多机通信	156
7.1.1 P0 口	107	习题 9	160
7.1.2 P1 口	109	10 单片机典型外围接口技术	161
7.1.3 P2 口	109	10.1 键盘接口	161
7.1.4 P3 口	110	10.1.1 按键去抖动	161
7.2 80C51 内部并行 I/O 口应用	110	10.1.2 独立式键盘及其接口	162
7.2.1 I/O 口负载能力	110	10.1.3 矩阵式键盘	162
7.2.2 端口输入输出操作	110	10.1.4 键盘扫描方式	165
7.2.3 “读-修改-写”操作	111	10.2 显示接口	166
7.2.4 位操作	111	10.2.1 LED 显示器的工作原理	166
7.2.5 应用举例	111	10.2.2 LED 显示方式	167
7.3 简单 I/O 接口扩展	113	10.3 DAC 接口	171
7.3.1 扩展输入口	113	10.3.1 D/A 转换器的性能指标	172
7.3.2 扩展输出口	114	10.3.2 DAC0832 接口	172
7.4 用 8255A 扩展 I/O 接口	115	10.3.3 DAC1210 接口	175
7.4.1 8255A 的引脚功能和内部结构	115	10.4 ADC 接口	177
7.4.2 8255A 的工作方式	117	10.4.1 A/D 转换器的主要技术指标	177
7.4.3 方式控制字和状态字	120	10.4.2 ADC0809 接口	178
7.4.4 8255A 应用举例	122	10.4.3 AD574A 接口	180
7.5 用 8155 扩展 I/O 接口	125	习题 10	184

11 单片机应用系统设计实例	185	11.3 步进电机控制系统	191
11.1 单片机应用系统的设计过程	185	11.3.1 步进电机的驱动	191
11.1.1 拟定总体设计方案	185	11.3.2 二维步进电机控制系统	192
11.1.2 硬件设计	185	习题 11	196
11.1.3 软件设计	186	附录 1 ASCII 字符表	197
11.1.4 系统调试、运行和维护	186	附录 2 80C51 系列单片机指令一	
11.2 单片机多点温度测量系统	187	览表	198
11.2.1 硬件设计	187	参考文献	202
11.2.2 软件设计	188		

1 微型计算机基础知识

电子计算机是一种能对信息进行加工处理的机器，它具有记忆、判断和运算能力，能模仿人类的思维活动，代替人的部分脑力劳动，并能对生产过程实现某种控制等。它是 20 世纪发展最快的技术之一。自 1946 年世界上第一台数字电子计算机 ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Computer) 在美国的宾夕法尼亚大学问世以来，至今的 60 多年里得到了迅猛的发展和普及，可谓一日千里。

按计算机元器件构成的演变来划分计算机的发展阶段，则到目前为止计算机已经历了以下四个发展阶段。

(1) 第一代电子管计算机 (1946~1957)

1946 年 2 月 14 日，标志现代计算机诞生的 ENIAC 在费城公诸于世。ENIAC 代表了计算机发展史上的里程碑。它通过不同部分之间的重新接线编程，还拥有并行计算能力。ENIAC 使用了 1.8 万个电子管，7 万个电阻器，有 500 万个焊接点，占地 170m²，重 30t，耗电 160kW，用十进制计算，每秒运算 5000 次，是第一台普通用途计算机。

第一代计算机的特点是操作指令是为特定任务而编制的，每种机器有各自不同的机器语言，功能受到限制，速度也慢。另一个明显特征是使用真空电子管和磁鼓储存数据。

(2) 第二代晶体管计算机 (1958~1964)

1948 年，晶体管的发明大大促进了计算机的发展，晶体管代替了体积庞大的电子管，电子设备的体积不断减小。1956 年，晶体管在计算机中使用，晶体管和磁芯存储器导致了第二代计算机的产生。第二代计算机体积小、速度快、功耗低、性能更稳定。

1960 年，出现了一些成功用在商业领域、大学和政府部门的第二代计算机。第二代计算机用晶体管代替电子管，还有现代计算机的一些部件：打印机、磁带、磁盘、内存、操作系统等。计算机中存储的程序使得计算机有很好的适应性，可以更有效地用于商业用途。在这一时期出现了更高级的 COBOL(Common Business-Oriented Language) 和 FORTRAN(Formula Translator) 等计算机语言，以单词、语句和数学公式代替了二进制机器码，使计算机编程更容易。新的职业，如程序员、分析员和计算机系统专家，与整个软件产业由此诞生。

(3) 第三代集成电路计算机 (1965~1971)

虽然晶体管比起电子管是一个明显的进步，但晶体管还是产生大量的热量，这会损害计算机内部的敏感部件。1958 年发明的集成电路(IC)，将三种电子元件结合到一片小小的硅片上。科学家使更多的元件集成到单一的半导体芯片上。于是，计算机变得更小，功耗更低，速度更快。这一时期的发展还包括使用了操作系统，使得计算机在中心程序的控制协调下可以同时运行许多不同的程序。

(4) 第四代大规模集成电路计算机 (1972~现在)

出现集成电路后，唯一的发展方向是扩大规模。大规模集成电路(LSI)可以在一个芯片上容纳几百个元件。到了 20 世纪 80 年代，超大规模集成电路(VLSI)在芯片上容纳了

几十万个元件，后来的 VLSI 将数字扩充到百万级。可以在硬币大小的芯片上容纳如此数量的元件使得计算机的体积和价格不断下降，而功能和可靠性不断增强。基于“半导体”的发展，到了 1972 年，第一部真正的个人计算机诞生了。它所使用的微处理器内包含了 2300 个“晶体管”，可以一秒内执行 60000 个指令，体积也缩小很多。而世界各国也随着“半导体”及“晶体管”的发展去开拓计算机史上新的一页。

20 世纪 70 年代中期，计算机制造商开始将计算机带给普通消费者，这时的小型机带有软件包，供非专业人员使用的程序和最受欢迎的字处理和电子表格程序。这一领域的先锋有 Commodore, Radio Shack 和 Apple Computers 等。

1981 年 IBM 推出个人计算机 (PC) 用于家庭、办公室和学校。20 世纪 80 年代个人计算机的竞争使得价格不断下跌，微机的拥有量不断增加，计算机继续缩小体积，从桌上到膝上到掌上。与 IBM PC 竞争的 Apple Macintosh 系列于 1984 年推出，Macintosh 提供了友好的图形界面，用户可以用鼠标方便地操作。

计算机目前正朝着第五、六代计算机发展。所谓第五代计算机是把信息采集、存储、处理、通信同人工智能结合在一起的智能计算机系统。它能进行数值计算或处理一般的信息，主要面向知识处理，具有形式化推理、联想、学习和解释的能力，能够帮助人们进行判断、决策、开拓未知领域和获得新的知识。人机之间可以直接通过自然语言（声音、文字）或图形图像交换信息。第六代计算机即生物计算机，它体积小，功效高，在 1mm^2 的面积上可容纳数亿个电路，比目前的电子计算机提高了上百倍，能使生物本身固有的自我修复机能得到发挥，这样即使芯片出了故障也能自我修复，可靠性很高。

1.1 微型计算机概述

微型计算机是 20 世纪 70 年代初期发展起来的。它使计算机应用能够真正深入到社会生产、生活等各个领域，使人类社会大步跨入信息化时代，使人们的生活发生了翻天覆地的变化。

1.1.1 微型计算机的基本概念

随着半导体技术的发展，集成电路的集成度越来越高。1971 年 11 月，Intel 公司成功地将运算部件和逻辑控制功能成功地集成在一起，制成了第一片中央处理芯片——Intel 4004 微处理器，由此揭开了微型计算机发展的序幕。

微处理器 (Microprocessor)，简称 MPU，是一个由算术逻辑运算单元、控制器单元、寄存器组及内部系统总线等单元组成的大规模集成电路芯片。

微处理器加上同样采用大规模集成电路制成的用于存储程序和数据的存储器以及与输入输出设备相连接的输入输出接口电路就构成了微型计算机 (Microcomputer)。图 1-1 所示为微型计算机基本组成框图。

以微型计算机为主体，配上输入输出设备、外存储设备、电源机箱以及基本系统软件就可组成微型计算机系统。

1.1.2 微型计算机的发展概况

由于微电子技术、特别是超大规模集成电路技术的发展，微型计算机技术的发展基本遵循所谓的摩尔定律，也即微处理器集成度每隔 18 个月翻一番，芯片性能也随之提高一倍

左右。

通常,微型计算机的发展是以微处理器的发展为表征的。以其字长和功能来分,微处理器的发展经历了如下几个阶段。

第一阶段(1971~1973)是4位和8位低档微处理器时代,通常称为第一代。其典型产品是Intel 4004和Intel 8008微处理器和分别由它们组成的MCS-4和MCS-8微机。基本特点是采用PMOS工艺,集成度低(2300个晶体管/片),系统结构和指令系统都比较简单,主要采用机器语言或简单的汇编语言,指令数目较少(20多条指令),基本指令周期为20~50 μ s,用于家电和简单的控制场合。

第二阶段(1974~1977)是8位中高档微处理器时代,通常称为第二代。其典型产品是Intel公司的8080/8085, Motorola公司的M6800, Zilog公司的Z80等,以及各种8位单片机,如Intel公司的8048, Motorola公司的M6801, Zilog公司的Z8等。它们的特点是采用NMOS工艺,集成度提高约4倍,运算速度提高10~15倍(基本指令执行时间1~2 μ s),指令系统比较完善,具有典型的计算机体系结构和中断、DMA等控制功能。这一代处理器具有一定的中断功能,利用其构成的微型计算机及其系统开始进入实用阶段。例如APPLE-II机型是当时十分流行的机种。

第三阶段(1978~1984)是16位微处理器时代。通常称为第三代,其典型产品是Intel公司的8086/8088, 80186, 80286, Motorola公司的M68000, Zilog公司的Z8000等微处理器。其特点是采用HMOS工艺,集成度(20000~70000晶体管/片)和运算速度(基本指令执行时间是0.5 μ s)都比第二代提高了一个数量级。指令系统更加丰富、完善,采用多级中断、多种寻址方式、段式存储结构、硬件乘除部件,并配置了软件系统。这一时期的著名微型计算机产品有IBM公司的个人计算机(IBM-PC)。由于IBM公司在发展PC机时采用了技术开放的策略,使PC机风靡世界。

第四阶段(1985~1992)是32位微处理器时代,又称为第四代。其典型产品是Intel公司的80386/80486, Motorola公司的M68030/68040等。其特点是采用HMOS或CMOS工艺,集成度高达100万晶体管/片,具有32位地址线和32位数据总线。每秒钟可完成600万条指令(Million Instructions Per Second, MIPS)。微机的功能已经达到甚至超过超小型计算机,完全可以胜任多任务、多用户的作业。同期,其他一些微处理器生产厂商(如Motorola, AMD, Zilog等)也推出了32位微处理器系列芯片。

第五阶段(1993年以后)是64位奔腾(Pentium)系列微处理器时代,通常称为第五代。典型产品是Intel公司的奔腾系列芯片及与之兼容的AMD的K6系列微处理器芯片。内部采用了超标量指令流水线结构,并具有相互独立的指令和数据高速缓存。随着MMX(Multi Media eXtensions)微处理器的出现,使微机的发展在网络化、多媒体化和智能化等方面跨上了更高的台阶。2000年3月,AMD与Intel分别推出了时钟频率达1GHz的Athlon和Pentium III。2000年11月,Intel又推出了Pentium IV微处理器,集成度高达每片4200万个晶体管,主频1.5GHz,400MHz的前端总线,使用全新SSE 2指令集。2002年11月,Intel推出的Pentium IV微处理器的时钟频率达到3.06GHz,而且微处理器还在不断

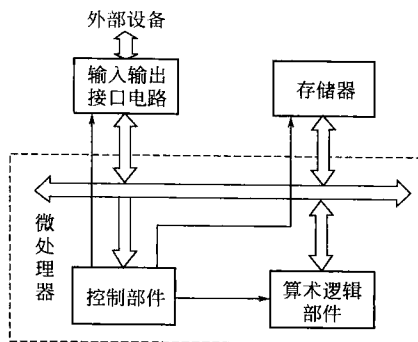


图 1-1 微型计算机基本组成框图

地发展,性能也在不断提升。

到目前为止,Intel 系列的微处理器中,最高主频已达 3.4GHz。表 1-1 给出了 80X86/Pentium 系列 CPU 的主要性能参数。

表 1-1 80X86/Pentium 系列 CPU 的主要性能参数

微处理器	推出时间	生产工艺/ μm	首批时钟 频率/MHz	集成度/ 百万个	寄存器 位数/b	数据总线 宽度/b	最大 寻址空间	高速缓存 大小
8086	1978	10	6.8	0.040	16	16	1MB	无
80286	1982	2.7	12.5	0.125	16	16	16MB	无
80386DX	1985	2	20	0.275	32	32	4GB	无
80486DX	1989	1.0, 0.8	25	1.200	32	32	4 GB	8KB L1
Pentium	1993	0.8, 0.6	60	3.100	32	64	4 GB	16KB L1
Pentium Pro	1995	0.6	200	5.500	32	64	64GB	16KB L1, 256KB 或 512KB L2
Pentium II	1997	0.35	266	7.500	32	64	64GB	32KB L1, 256KB 或 512KB L2
Pentium III	1999	0.18	500	28.100	32	64	64GB	32KB L1 512KB L2
Pentium IV	2000	0.13	1300	55.100	32	64	64GB	128KB(D)+8KB(T)L1 256/512KB L2

1.1.3 微型计算机的分类

(1) 按处理器位数分类

微处理器的位数是由运算器并行处理的二进制位数所决定的。处理器的位数越高,其性能就越强。

① 4 位机。以 4 位微处理器为核心的微型计算机。如 Intel 4004, 价格低, 一般用于袖珍计算器, 家用电器的过程控制。

② 8 位机。以 8 位微处理器为核心的微型计算机。如早期的 Z80 单板机、IBM PC 机、MCS-51 系列单片机。8 位机有灵活的指令系统和较强的中断能力, 用于工业控制、事务管理、家用学习机。

③ 16 位机。以 16 位微处理器为核心的微型计算机。如 IBM PC/AT、IBMPC/XT 计算机、MCS-96 单片机等。16 位机比 8 位机具有更快的运算速度、更强的处理能力, 并可用于实时的多任务处理。

④ 32 位机。以 32 位微处理器为核心的微型计算机。如 IBM PC386、IBM PC486 计算机。32 位机能综合处理数字、图像、声音等多媒体信息, 广泛应用于数据处理、工程设计、CAD、CAM、科学计算、实时控制、多媒体、微机局域网的资源结点。

⑤ 64 位机。以 64 位微处理器为核心的微型计算机。如 Pentium、Pentium II、Pentium III 等。64 位机是迄今速度最快、功能最强的微机。

(2) 按结构分类

① 单片微型计算机 (Single Chip Microcomputer)。将微处理器、存储器、输入输出接口电路集成在一块芯片上, 称为单片微型计算机或单片机。它具有体积小、可靠性高、成本低等特点, 广泛应用于仪器、仪表、家电、工业控制等领域。

② 单板微型计算机 (Single Board Microcomputer)。将组成微型计算机的各功能部件都做在同一块印刷电路板上, 称为单板微型计算机或单板机。它具有结构紧凑、使用简单、成本低等特点, 常用于工业控制和教学实验等领域。

③ 个人计算机 (Personal Computer, PC)。它是一种将一块主机母板 (内含微处理器、内存储器、I/O 接口等芯片)、若干 I/O 接口卡、外部存储器、电源等部件组装在一个机箱内, 并配备显示器、键盘、打印机等基本外部设备所组成的计算机系统。PC 机具有功能强、配置灵活、软件丰富等特点, 既可用于科学计算和数据处理, 也可作为专用机, 用于实时控制和管理等。它是一种使用最为普及的微型计算机。

1.2 常用的数制及编码

1.2.1 常用的数制

(1) 十进制数

十进制数中有 0~9 十个数字符号, 任何一个数的大小都可以用这十个数字符号的组合来表示。对于十进制数 D 可用权展开式表示为

$$\begin{aligned}(D)_{10} &= D_{n-1} \times 10^{n-1} + D_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + D_0 \times 10^0 + D_{-1} \times 10^{-1} + \cdots + D_{-m} \times 10^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} D_i \times 10^i\end{aligned}\quad (1-1)$$

式中, D_i 是 D 的第 i 位数码, 是 0~9 等十个数码中的一个, 基数为 10, 10^i 称为十进制的权。

【例 1-1】 十进制数 12.86 可按权展开为

$$(12.86)_{10} = 1 \times 10^1 + 2 \times 10^0 + 8 \times 10^{-1} + 6 \times 10^{-2}$$

对于十进制数 12.86 也可写为 12.86D 或 $(12.86)_D$ 。

(2) 二进制数

在二进制数中只有 0 和 1 两个数码。对于二进制数 B 可用权展开式表示为

$$\begin{aligned}(B)_2 &= B_{n-1} \times 2^{n-1} + B_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + B_0 \times 2^0 + B_{-1} \times 2^{-1} + \cdots + B_{-m} \times 2^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} B_i \times 2^i\end{aligned}\quad (1-2)$$

式中, B_i 可取 0 或 1。基数为 2, 2^i 称为二进制的权。二进制数的加减运算中遵循逢二进一、借一为二的规则。

【例 1-2】 二进制数 101.01 可按权展开为

$$(101.01)_2 = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

对于二进制数 101.01 也可写为 101.01B 或 $(101.01)_B$ 。

(3) 十六进制数

在十六进制数中, 采用 0~9、A~F 共十六个数码, 其中 A~F 相应的十进制数为 10~15。对于 16 进制数 H 可表示为

$$\begin{aligned}(H)_{16} &= H_{n-1} \times 16^{n-1} + H_{n-2} \times 16^{n-2} + \cdots + H_0 \times 16^0 + H_{-1} \times 16^{-1} + \cdots + H_{-m} \times 16^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} H_i \times 16^i\end{aligned}\quad (1-3)$$

式中, H_i 是 H 的第 i 位数码, 是 0~F 共 16 个数码中的一个, 基数为 16, 16^i 称为十

六进制的权。十六进制的加减运算中遵循逢十六进一、借一为十六的规则。

【例 1-3】十六进制数 2BA.7E 可按权展开为

$$(2BA.7E)_{16} = 2 \times 16^2 + 11 \times 16^1 + 10 \times 16^0 + 7 \times 16^{-1} + 14 \times 16^{-2}$$

同样对于十六进制数 $(2BA.7E)_{16}$ 也可写为 2BA.7EH 或 $(2BA.7E)_H$ 。

二进制数与十六进制数之间存在有一种特殊关系，即 $2^4 = 16$ ，也就是说一位十六进制数恰好可用四位二进制数表示，且它们之间的关系是唯一的。所以，在计算机应用中，虽然机器只能识别二进制数，但在数字的表达上更广泛地采用十六进制数。

表 1-2 给出了上述几种进位制之间的数码对照表。

表 1-2 几种进位制的数码对照

十进制	二进制	八进制	十六进制	十进制	二进制	八进制	十六进制
0	0	0	0	9	1001	11	9
1	1	1	1	10	1010	12	A
2	10	2	2	11	1011	13	B
3	11	3	3	12	1100	14	C
4	100	4	4	13	1101	15	D
5	101	5	5	14	1110	16	E
6	110	6	6	15	1111	17	F
7	111	7	7	16	10000	20	10
8	1000	10	8				

1.2.2 数制之间的转换

人们习惯于使用十进制，而微型计算机采用二进制进行运算、存储，因此必然会产生不同数制转换的问题。

(1) 二进制、十六进制数转换为十进制数

二进制、十六进制数转换成十进制数时，只要将二进制数或十六进制数按相应的权表达式展开，再按十进制运算规则求和，即可得到它们对应的十进制数。

【例 1-4】将二进制数 1101100.111 转换成十进制数。

解 $(1101100.111)_2 = 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$
 $= 64 + 32 + 8 + 4 + 0.5 + 0.25 + 0.125 = (108.875)_{10}$

【例 1-5】将十六进制数 19BC.8 转换成十进制数。

解 $(19BC.8)_{16} = 1 \times 16^3 + 9 \times 16^2 + B \times 16^1 + C \times 16^0 + 8 \times 16^{-1}$
 $= 4096 + 2304 + 176 + 12 + 0.5 = (6588.5)_{10}$

(2) 十进制数转换为二进制、十六进制数

十进制数整数和小数部分应分别进行转换。整数部分的转换采用的是除 2 取余法，直到商为 0，余数按倒叙排列，称为“倒叙法”。小数部分的转换采用乘 2 取整法，直到小数部分为 0，整数按顺序排列，称为“顺序法”。

【例 1-6】将十进制数 61.125 转换为二进制数。

解	整数部分	小数部分
61/2=30	余数=1(最低位)	0.125×2=0.25 整数=0(最高位)
30/2=15	余数=0	0.25×2=0.5 整数=0

$$\begin{array}{ll}
 15/2=7 & \text{余数}=1 \\
 7/2=3 & \text{余数}=1 \\
 3/2=1 & \text{余数}=1 \\
 1/2=0 & \text{余数}=1(\text{最高位})
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ll}
 0.5 \times 2 = 1.0 & \text{整数}=1(\text{最低位})
 \end{array}$$

即 $(61.125)_{10} = (111101.001)_2$

【例 1-7】 将十进制数 61.125 转换为十六进制数。

解 整数部分 小数部分

$$\begin{array}{ll}
 61/16=3 & \text{余数}=D(\text{最低位}) \\
 3/16=0 & \text{余数}=3(\text{最高位})
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ll}
 0.125 \times 16 = 2.0 & \text{整数}=2(\text{最高位})
 \end{array}$$

即 $(61.125)_{10} = (3D.2)_{16}$

也可将十进制数先转换为二进制数，再转换为十六进制数。下面将会看到二进制数和十六进制数之间的转换是非常方便的。

(3) 二进制数转换成十六进制数

二进制数转换成十六进制数的转换原则是“四位合成一位”，即从小数点开始向左右两边以每四位为一组，不足四位时补 0，然后每组改成等值的一位十六进制数即可。

【例 1-8】 将 $(1011111101.1001101)_2$ 转换成十六进制数。

解

$$\begin{array}{cccccc}
 0010 & 1111 & 1101 & . & 1001 & 1010 \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 2 & F & D & . & 9 & A
 \end{array}$$

即 $(1011111101.1001101)_2 = (2FD.9A)_{16}$

(4) 十六进制数转换成二进制数

十六进制数转换成二进制数的转换原则是“一位分成四位”，即把 1 位十六进制数转换成对应的 4 位二进制数，然后按顺序连接即可。

【例 1-9】 将 $(FB6.DA3)_{16}$ 转换为二进制数。

解

$$\begin{array}{cccccc}
 F & B & 6 & . & D & A & 3 \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 1111 & 1011 & 0110 & . & 1101 & 1010 & 0011
 \end{array}$$

即 $(FB6.DA3)_{16} = (111110110110.110110100011)_2$

1.2.3 微型计算机常用的编码

计算机不仅要处理数制计算问题，还要处理大量非数值问题。由于在计算机中数是用二进制数表示的，计算机只能识别二进制数码。因此，不论是十进制数，还是英文字母、汉字以及其他信息（如语言、符号、声音等）必须先转换成二进制代码，才能让计算机接受。这种把信息编成二进制代码的方法，称为计算机的编码。

通常计算机编码分为数值编码和字符编码。下面对计算机的几种常用编码加以介绍。

(1) BCD 码（十进制数的二进制编码）

BCD (Binary Coded Decimal) 码是指每位十进制数用 4 位二进制数码表示，使其既具有二进制数的形式又具有十进制数的特点。值得注意的是，四位二进制数有 16 种状态，但

BCD 码只选用 10 种状态来表示 0~9 这 10 个数码,其余六个是多余的,应该放弃不用。常用的 BCD 码有 8421 码、2421 码和余 3 码等,其中最常用的为 8421 码。BCD 码自然简单、书写方便。例如十进制数 86 的 BCD 码形式为 10000110B,即 86H。

【例 1-10】 写出十进制数 976.93D 对应的 8421BCD 码。

解 $976.93D = 1001\ 0111\ 0110.1001\ 0011BCD$

【例 1-11】 写出 8421BCD 码 101001.0110011BCD 对应的十进制数。

解 $101001.0110011BCD = 0010\ 1001.0110\ 0110BCD = 29.66D$

计算机的存储单元通常以字节(8 位二进制数)为最小单位,很多操作也是以字节为单位进行的,在一个字节中如何存放 BCD 码有两种方式。一种方式是在一个字节中存放两个 BCD 码,这种方式称为压缩 BCD 码表示法。在采用压缩 BCD 码表示十进制数时,一个字节就表示两位十进制数。例如 10000110B 表示十进制数 86。另一种方式是一个字节存放一个 BCD 码,即字节的高 4 位为 0,低 4 位为十进制数字的 BCD 码,该方式称为非压缩 BCD 码表示法。例如对于十进制数 86 的非压缩 BCD 码表示为 00001000 00000110B。

(2) ASCII 码

ASCII(American Standard Code for Information Interchange) 码是美国国家信息交换标准代码。这种编码是字符编码,利用 7 位二进制数字“0”和“1”的组合码,对应着 128 个符号。

0~31 及 127(共 33 个)是控制字符或通讯专用字符(其余为可显示字符),它们并没有特定的图形显示,但会依不同的应用程序,而对文本显示有不同的影响;32~126(共 95 个)是字符(32sp 是空格,有些书将其归入控制字符),其中 48~57 为 0 到 9 十个阿拉伯数字,65~90 为 26 个大写英文字母,97~122 号为 26 个小写英文字母,其余为一些标点符号、运算符号等。

ASCII 码一般用一个字节来表示,其中最高位(bit7)通常用作奇偶校验,故也称为奇偶校验位,余下七位进行编码组合。“奇偶校验”是一种简单且最常用的检验方法,可用来验证计算机在进行信息传输过程中是否有错。

(3) 国标码

“国家标准信息交换用汉字编码”(GB 2312—80 标准),简称国标码。国标码是指 1980 年中国制定的用于不同的具有汉字处理功能的计算机系统间交换汉字信息时使用的编码。国标码是二字节码,用两个七位二进制数编码表示一个汉字。目前国标码收入 6763 个汉字,其中一级汉字(最常用)3755 个,二级汉字 3008 个,另外还包括 682 个西文字符、图符。顺便一提的是,在我国的台湾地区采用的是另一套不同标准码(BIG5 码),因此,两岸的汉字系统及各种文件不能直接相互使用。

1.3 无符号二进制数的算术运算和逻辑运算

1.3.1 二进制数的算术运算

(1) 二进制加法

二进制加法运算规则如下。

$$0+0=0 \quad 0+1=1 \quad 1+0=1 \quad 1+1=0(\text{产生进位})$$

【例 1-12】 计算 $10100110\text{B} + 10110100\text{B}$ 。

解

$$\begin{array}{r} 10100110\text{B} \\ +) 10110100\text{B} \\ \hline 101011010\text{B} \end{array}$$

即

$$10100110\text{B} + 10110100\text{B} = 101011010\text{B}$$

(2) 二进制减法

二进制数的减法规则如下。

$$0-0=0 \quad 0-1=1(\text{产生借位}) \quad 1-0=1 \quad 1-1=0$$

【例 1-13】 计算 $10100110\text{B} - 00110100\text{B}$ 。

解

$$\begin{array}{r} 10100110\text{B} \\ -) 00110100\text{B} \\ \hline 01110010\text{B} \end{array}$$

即

$$10100110\text{B} - 00110100\text{B} = 01110010\text{B}$$

(3) 二进制乘法

二进制乘法规则如下。

$$0 \times 0 = 0 \quad 0 \times 1 = 0 \quad 1 \times 0 = 0 \quad 1 \times 1 = 1$$

【例 1-14】 计算 $1101\text{B} \times 1001\text{B}$

解法 1

$$\begin{array}{r} 1101 \\ \times) 1001 \\ \hline 1101 \\ 0000 \\ 0000 \\ 1101 \\ \hline 1110101 \end{array}$$

即

$$1101\text{B} \times 1001\text{B} = 1110101\text{B}$$

解法 2 采用移位加的方法，则有

部分积	乘数	操作说明
0000	1001	判断位为1，加被乘数
+ 1101		
1101		
0110	1100	右移一位
0011	0110	判断位为0，右移一位
0001	1011	判断位为0，右移一位
+ 1101		判断位为1，加被乘数
1110	101	
0111	0101	右移一位

以上两种解法所得结果相同。微型计算机在对两个二进制数相乘时，是采用边移位边相加的方法实现的。某些微机内部只集成了加法、移位和判断电路，乘法运算通过程序实现。

(4) 二进制除法

二进制数除法的计算方法，与十进制数除法类似，也由减法、上商等操作分步完成。

【例 1-15】 计算 $1110101\text{B} \div 1001\text{B}$ 。

$$\begin{array}{r}
 1101 \\
 1001 \overline{) 1110101} \\
 \underline{1001} \\
 1011 \\
 \underline{1001} \\
 1001 \\
 \underline{1001} \\
 0
 \end{array}$$

即 $1110101\text{B} \div 1001\text{B} = 1101\text{B}$

除法是乘法的逆运算，所以二进制数的除法运算也可转换为减法和右移运算。每右移一位相当于除以 2，右移 n 位就相当于除以 2^n 。

1.3.2 无符号数的表示范围

(1) 无符号二进制数的表示范围

一个 n 位无符号二进制数的表示范围为 $0 \sim (2^n - 1)$ 。例如一个 8 位二进制数的表示范围为 $0 \sim (2^8 - 1)$ ，即 $00\text{H} \sim 0\text{FFH}$ ($0 \sim 255$)。如果运算结果超出二进制数的表示范围，则会产生溢出，运算结果也不准确。

【例 1-16】 计算 $11000101\text{B} + 10101001\text{B}$ 。

解

$$\begin{array}{r}
 11000101\text{B} \\
 +) 10101001\text{B} \\
 \hline
 101101110\text{B}
 \end{array}$$

即 $11000101\text{B} + 10101001\text{B} = 101101110\text{B}$

由上式可知，上面两个 8 位二进制数相加的结果为 9 位二进制数，超出了 8 位数的表示范围。若仅取 8 位字长，则结果为 01101110B ，显然是错误的，这种情况就称为溢出。事实上， $11000101\text{B} = 197\text{D}$ ， $10101001\text{B} = 169\text{D}$ ， $197 + 169 = 366$ ，相加结果大于 8 位无符号二进制数能够表示的最大值 255，所以最高位的进位丢失了，该进位代表了 256，所以最后的运算结果为 $366 - 256 = 110$ ，即 01101110B 。

(2) 无符号二进制数的溢出判断

设无符号二进制数的最高有效位 D_i 的进位（或借位）为 C_i ，则两个无符号二进制数相加（或相减）时，若最高位产生进位（或借位），即 $C_i = 1$ ，就产生了溢出。在 [例 1-16] 中，两个 8 位无符号二进制数相加，最高有效位（ D_7 位）产生了进位 $C_7 = 1$ ，故结果出现了溢出。

1.3.3 二进制数的逻辑运算

逻辑运算是在对应的两个二进制位之间进行的，与相邻的高低位的值均无关，即不存在进位、借位等问题。基本逻辑运算包括“与”、“或”、“非”和“异或”4 种运算。

(1) 逻辑与运算

逻辑与又称逻辑乘，常用“ $\wedge$ ”运算符表示。逻辑与运算法则为

$$0 \wedge 0 = 0 \quad 0 \wedge 1 = 0 \quad 1 \wedge 0 = 0 \quad 1 \wedge 1 = 1$$

即参加“与”操作的两位中只要有一位为 0，则“与”的结果就为 0，仅当两位均为 1 时，“与”的结果才为 1。

【例 1-17】 计算 $11000101\text{B} \wedge 10101001\text{B}$ 。