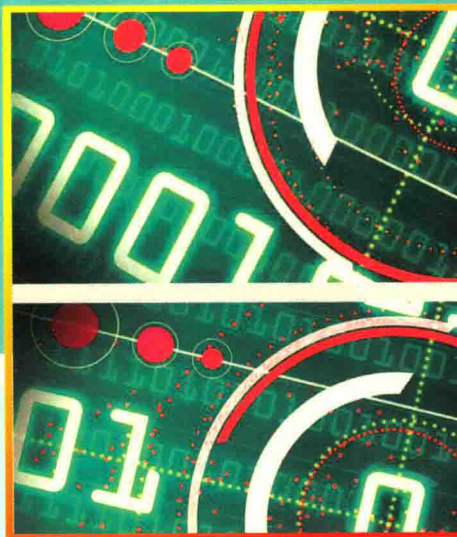


高等院校应用技术型人才培养规划教材

数字电子技术

SHUZI DIANZI JISHU

沈晓霞 主编



中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等院校应用技术型人才培养规划教材

数字电子技术

沈晓霞 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书共分7章,主要内容包括数字逻辑基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与变换、数/模和模/数转换、数字电路课程设计与综合实训等。书中选用了较多的实例进行解析,尤其是 Proteus 设计实例。在各章后均配有习题,便于读者掌握相关知识点。

本书脉络清晰,语言流畅、易懂,内容更偏重实践和应用,能够帮助读者掌握基本的数字电子技术知识,熟悉常见集成数字芯片的使用以及数字电路的分析和仿真设计,培养读者的数字电路设计思想。

本书适合作为高职院校通信、电子技术、光电技术应用、自动控制、工业自动化、检测技术等相关专业学生数字电子技术课程的教材和教师的教学参考书,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术 / 沈晓霞主编. —北京:中国铁道出版社,
2019.2
高等院校应用技术型人才培养规划教材
ISBN 978-7-113-25457-5

I. ①数… II. ①沈… III. ①数字电路—电子技术—
高等职业教育—教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 017705 号

书 名:数字电子技术
作 者:沈晓霞 主编

策 划:王春霞
责任编辑:王春霞 绳 超
封面设计:付 巍
封面制作:刘 颖
责任校对:张玉华
责任印制:郭向伟

读者热线:(010)63550836

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)
网 址:<http://www.tdpress.com/51eds/>
印 刷:北京虎彩文化传播有限公司
版 次:2019年2月第1版 2019年2月第1次印刷
开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:13.25 字数:319千
书 号:ISBN 978-7-113-25457-5
定 价:36.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话(010)63550836
打击盗版举报电话:(010)51873659

本书依据《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》的相关精神进行编写。为了符合高职培养目标的要求,满足后续专业课程对数字电子技术知识的需求,本书在保证基本理论知识和基本分析技能的基础上,坚持理论和实践相结合,侧重技能传授,更强化电子设计和实践内容。

在编写过程中,首先介绍相关理论知识,EDA设计与实验同期进行,综合实训项目附后,提高了实践教学的比例。鉴于Proteus是一款功能齐全、操作简单的EDA设计软件,在附录中给出了Proteus使用简介。

本书共分7章,主要内容包括数字逻辑基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与变换、数/模和模/数转换、数字电路课程设计与综合实训等。

本书脉络清晰,语言流畅、易懂,内容更偏重实践和应用,能够帮助读者掌握基本的数字电子技术知识,熟悉常见集成数字芯片的使用以及数字电路的分析和仿真设计,培养读者的数字电路设计思想。

本书适合作为高职院校通信、电子技术、光电技术应用、自动控制、工业自动化、检测技术等相关专业学生数字电子技术课程的教材和教师的教学参考书,也可作为相关工程技术人员的参考书。

在本书的编写过程中,得到了深圳信息职业技术学院老师和领导的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢!

限于编者自身水平所限,书中难免有遗漏和不妥之处,敬请广大读者不吝指正!

编者

2018年11月

绪论	1	2.1.4 分立元件门电路	36
第1章 数字逻辑基础	4	2.2 TTL与CMOS集成门电路	39
1.1 数制与编码	4	2.2.1 TTL集成门电路	39
1.1.1 数制	4	2.2.2 CMOS集成门电路	41
1.1.2 数制间的转换	6	2.2.3 TTL电路与CMOS电路的 接口问题	43
1.1.3 二进制数的算术运算	8	2.3 逻辑门电路的功能测试 与Proteus仿真	45
1.1.4 编码	8	小结	48
1.1.5 二进制码的传输与存取	11	习题	48
1.2 逻辑代数基础	13	第3章 组合逻辑电路	49
1.2.1 基本逻辑运算与复合逻辑 运算	13	3.1 组合逻辑电路的分析与设计	49
1.2.2 逻辑代数的基本公式与 常用公式	16	3.1.1 逻辑代数的表示方法 及相互转换	50
1.2.3 逻辑代数运算规则	18	3.1.2 组合逻辑电路的分析 方法	51
1.2.4 逻辑代数的公式法化简	19	3.1.3 组合逻辑电路的设计 方法	53
1.3 卡诺图	21	3.2 数据比较器与加法器	55
1.3.1 逻辑函数的最小项及卡诺图 表示法	21	3.2.1 数据比较器	55
1.3.2 逻辑代数的卡诺图 化简法	24	3.2.2 加法器	57
小结	27	3.2.3 用集成加法器设计组合 逻辑电路	59
习题	28	3.3 编码器与译码器	60
第2章 逻辑门电路	30	3.3.1 编码器与集成编码器	60
2.1 基本逻辑门电路	30	3.3.2 译码器与集成译码器	64
2.1.1 二极管开关电路	30	3.3.3 用集成编码器与译码器 设计组合逻辑电路	69
2.1.2 三极管开关电路	32	3.4 数据分配器与数据选择器	72
2.1.3 MOS场效应管开关 电路	35		

3.4.1	数据分配器	72
3.4.2	数据选择器	73
3.4.3	用集成数据选择器设计 组合逻辑电路	76
3.5	组合逻辑电路中的 竞争-冒险	78
3.5.1	竞争-冒险现象	79
3.5.2	判断是否存在竞争-冒险 现象的方法	80
3.5.3	消除竞争-冒险现象的 方法	81
3.6	组合逻辑电路的设计举例与 Proteus 仿真	82
3.6.1	优先编码器 74LS147 的 逻辑功能仿真实验	82
3.6.2	编码和译码显示电路的 逻辑功能仿真实验	83
	小结	84
	习题	84
第4章	时序逻辑电路	87
4.1	触发器	88
4.1.1	基本 RS 触发器	89
4.1.2	同步触发器	92
4.1.3	边沿触发器	98
4.1.4	触发器间的转换	106
4.2	时序逻辑电路的概念与分析 方法	108
4.2.1	时序逻辑电路的概念 与分类	108
4.2.2	时序逻辑电路的分析 方法	108
4.3	寄存器时序逻辑电路 与分析方法	115
4.3.1	寄存器电路分析	115
4.3.2	移位寄存器电路分析	117
4.4	计数器时序逻辑电路 与分析方法	123

4.4.1	二进制计数器时序逻辑 电路	124
4.4.2	十进制计数器时序逻辑 电路	130
4.4.3	N 进制计数器时序逻辑 电路	134
4.4.4	集成计数器的应用	134
4.5	时序逻辑电路的设计	142
4.5.1	小规模时序逻辑电路的 设计步骤	142
4.5.2	小规模时序逻辑电路的 设计举例	143
4.6	时序逻辑电路的 Proteus 仿真	146
	小结	148
	习题	148

第5章 脉冲波形的产生 与变换

5.1	集成 555 定时器及其应用	155
5.1.1	集成 555 定时器电路 组成	156
5.1.2	集成 555 定时器的 应用	157
5.2	波形产生与变换电路 及其应用	164
5.2.1	集成施密特触发器 及应用	164
5.2.2	集成单稳态触发器 及应用	165
5.3	555 定时器的应用仿真 实验	170
	小结	172
	习题	172

第6章 数/模和模/数转换 ...

6.1	D/A 转换器	177
6.1.1	权电阻网络 D/A 转换器	177

6.1.2	倒T形电阻网络D/A转换器	178	6.2.6	集成A/D转换器简介	189
6.1.3	D/A转换器的主要技术指标	179	6.3	D/A与A/D转换器的应用小结	191
6.1.4	集成D/A转换器简介	180		习题	193
6.2	A/D转换器	182	第7章	数字电路课程设计与综合实训	194
6.2.1	A/D转换器的工作原理	182	7.1	数字电路系统的设计方法	194
6.2.2	并联比较型A/D转换器	185	7.2	综合设计——交通灯信号控制电路的设计与制作	195
6.2.3	反馈比较型A/D转换器	185	附录A	Proteus 8 电路仿真软件介绍	199
6.2.4	双积分型A/D转换器	186	附录B	常用逻辑符号及电气元件图形符号对照表	204
6.2.5	A/D转换器的主要技术指标	189			

绪论

21 世纪,人类进入信息时代,信息社会中信息的生产、存储、传输和处理等过程一般均由电子电路来完成,因此电子技术在国民经济各方面占有至关重要的作用。尤其是近年来,随着计算机技术、通信技术和微电子技术等高新技术的迅猛发展,大量的生产实践和科学技术领域都存在着大量与电子技术有关的问题。目前,电子技术的应用极其广泛,涉及计算机产业、通信、科学技术、工农业生产、医疗卫生等各个领域,如电视信号传播、无线电通信、光纤通信、军事雷达、医疗 X 射线透视等,所有这些方面均与电子科学与技术学科息息相关,密不可分。

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。电子技术是其他高新技术发展的基础和龙头,它的发展带动了其他高新技术的发展。从 20 世纪 60 年代开始,电子器件的设计与制作开始飞速发展,随着微电子和半导体制造工艺的进步,器件的集成度也不断提高。CPLD/FPGA(复杂可编程逻辑器件/现场可编程门阵列)、ARM、DSP(数字信号处理器)、A/D(模/数)、D/A(数/模)、RAM(随机存储器)和 ROM(只读存储器)等器件之间的物理和功能界限正日趋模糊,嵌入式系统和片上系统(SOC)得以实现。以大规模可编程集成电路为物质基础的 EDA(数字设计自动化)技术打破了软硬件之间的设计界限,使硬件系统软件化。这已成为现代电子设计的发展趋势。

电子技术的发展,不仅仅体现在电子器件和电子产品的进步上,在电子产品的开发和加工工艺上,也取得了革命性的变化。1947 年 12 月,美国 Bell 实验室的 Shockley、Bardeen 和 Brattain 等人发明了晶体三极管(简称“晶体管”)。晶体管相较于真空管具有显著的优越性能,因此晶体管促进并带来了“固态革命”,进而推动了全球范围内的半导体电子工业。现代电子技术的发展,由此拉开了序幕。对于由晶体管构成的分立元件电路,过去的设计者更多的将注意力集中在晶体管内的电流及引脚间的电压的计算上。随着集成电路的发明和大规模集成电路生产的关键技术问题的解决,设计者开始腾出更多的精力进行上层的逻辑设计,从而使较复杂的电路的发明成为可能。大规模集成电路和超大规模集成电路的出现,为微型计算机的诞生创造了条件。微型计算机的应用使得电子技术开发方式发生了根本的变化。

70 多年来,微电子技术和其他高科技技术的飞速发展,致使工业、农业、科技和国防等领域发生了令人瞩目的变革。与此同时,电子技术也改变着人们的日常生活。收音机、电视机、高保真度音响、DVD 播放机、通信设备(程控电话机、移动通信机)、个人计算机等大量的电子产品,几乎成为人们生活中不可缺少的部分。我国微电子产业起步于 1965 年。经过 50 多年的发展,现已初步形成了包括材料、设计、制造、封装共同发展的产业链。改革开放以来,由于境外大量集成电路设计公司和芯片制造公司的涌入以及国家对集成电路高技术产业的政策支持,使我国微电子产业(集成电路产业)进入了高速成长期。

在电子技术中,自然界中的大部分物理量都可以分为两大类。一类物理量在时间和数值上

都是连续的,我们把这一类物理量称为模拟量,把表示模拟量的信号称为模拟信号,并把工作在模拟信号下的电子电路称为模拟电路。例如,热电偶工作时输出的电压或电流信号就是一种模拟信号,因为被测的温度不可能发生突跳,所以测得的电压或电流无论在时间上还是在数量上都是连续的。而且,这个信号在连续变化过程中的任何一个取值都有具体的物理意义,即表示一个相应的温度。温度、时间、流量、压力、速度、距离和声音等都是模拟信号。

处理和传输模拟信号的电路就是模拟电路。模拟电路是电子技术的基础,在信号放大、功率放大、整流稳压、模拟量反馈、混频、调制解调电路领域具有无法替代的作用。21世纪以来,模拟电子技术有了飞速的发展。这主要得益于消费类电子产品的飞速发展,不仅是和娱乐密切相关的音视频产品的快速发展,而且还有游戏类、保健类等产品的快速发展。音视频的输入/输出都是模拟量,必须采用模拟信号的接入,经过数字处理,再变回模拟量以供人耳及人眼接收。除了人的听觉、视觉、触觉等都是接收模拟量以外,其他自然界的物理量也都是模拟量,过去像这些温度、压力等各种物理量主要是用在工业测量和控制中,而现在也开始广泛地应用到各种个人消费类产品中。例如电子体温计、电子血压计。例如,人机互动的游戏机 Wii 以及用于保健的 Wii Fit,就是采用了加速度测量芯片。此外,因为大多数消费类产品都是便携式的,大多数都是电池供电,因而以电池为一次电源的各种电源功率器件也得到了飞速发展。例如,充电管理器、线性低压降稳压器、各种直流变换器等。

用数字信号完成对数字量进行算术运算和逻辑运算的电路称为数字电路或数字系统。由于它具有逻辑运算和逻辑处理功能,所以又称数字逻辑电路。现代的数字电路由半导体工艺制成的若干数字集成器件构造而成。逻辑门是数字逻辑电路的基本单元。存储器是用来存储二值数据的数字电路。从整体上看,数字电路可以分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。数字信号是用数码表示的,其数码中只有“1”和“0”两个数字,而“1”和“0”没有数量的意义,表示事物的两个对立面。

与模拟电路相比,数字电路具有精度高、稳定性好、抗干扰能力强、程序软件控制等一系列优点。

本书要讲的内容是数字电子技术,数字电子技术是一门应用学科,它的发展可分为以下几个阶段:

(1)产生:20世纪30年代在通信技术(电报、电话)中首先引入二进制的信息存储技术。而在1847年由英国科学家乔治·布尔(George Boole)创立布尔代数,并在电子电路中得到应用,形成开关代数,并有一套完整的数字逻辑电路的分析和设计方法。

(2)初级阶段:20世纪40至50年代电子计算机中的应用,此时以电子管(真空管)作为基本器件。另外,在电话交换和数字通信方面也有应用。

(3)第二阶段:20世纪60年代晶体管的出现,使得数字电子技术有一个飞跃发展,除了计算机、通信领域应用外,在其他如测量领域得到应用。

(4)第三阶段:20世纪70年代中期集成电路的出现,使得数字电子技术有了更广泛的应用,在各行各业医疗、雷达、卫星等领域都得到应用。

(5)第四阶段:20世纪70年代中期到80年代中期,微电子技术的发展,使得数字电子技术得到迅猛的发展,产生了大规模和超大规模的集成数字芯片,应用在各行各业和人们的日常生活中。

(6)20世纪80年代中期以后,产生一些专用和通用的集成芯片,以及一些可编程的数字芯片,并且制作技术日益成熟,使得数字电路的设计模块化和可编程的特点,提高了设备的性能、

适用性,并降低了成本,这是数字电路今后发展的趋势。

从目前的发展趋势来看,除一些特殊领域外,以前一些模拟电路的应用场合,大有逐步被数字电路所取代的趋势,如数字滤波器等。数字电子技术目前也在向两个截然相反的方向发展,一个方向是基于通用处理器的软件开发技术,比如单片机、DSP、PLC 等技术,其特点是在一个通用处理器(CPU)的基础上结合少量的硬件电路设计来完成系统的硬件电路,而将主要精力集中在算法、数据处理等软件层次上的系统方法。另一个方向是基于 CPLD/FPGA 的可编程逻辑器件的系统开发,其特点是将算法、数据加工等工作全部融入系统的硬件设计当中,在“线与线的互联”当中完成对数据的加工。

电子技术在现阶段的一个重要发展方向是电子设计自动化(electronic design automation, EDA)。EDA 是以计算机技术和微电子技术发展为先导,汇集了计算机图形学、拓扑逻辑学、微电子工艺与结构学和计算机数学等多种计算机应用学科最新成果的先进技术。EDA 技术是从计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助测试(CAT)和计算机辅助工程(CAE)等技术发展来的。利用 EDA 工具,电子设计师可以从概念、算法、协议等开始设计电子系统,大量工作可以通过计算机完成,并可以将电子产品从电路设计、性能分析到设计出 IC 版图或 PCB 版图的整个过程在计算机上自动处理完成。设计者的工作仅限于利用软件的方式,即利用硬件描述语言和 EDA 软件来完成对系统硬件功能的实现。由于设计的主要仿真和调试过程是在高层次上完成的,这既有利于早期发现结构设计上的错误,避免设计工作的浪费,又减少了逻辑功能仿真的工作量,提高了设计的一次性成功率。在 EDA 技术中使用 ASIC 芯片,可以很容易地转由掩模 ASIC 实现,因此开发风险也大为降低。

硬件描述语言(HDL)是 EDA 技术的重要组成部分,是用文本的形式来描述数字电路的内部结构和信号连接的一类语言,类似于一般的计算机高级语言形式和结构形式。超高速集成电路硬件描述语言(VHSIC hardware description language, VHDL)具有很强的电路描述和建模能力,能从多个层次对数字系统进行建模和描述,从而大大简化了硬件设计任务。用 VHDL 进行电子系统设计的一个很大的优点是设计者可以专心致力于其功能的实现,而不需要对不影响功能的与工艺有关的因素花费过多的时间和精力。采用硬件描述语言作为设计输入和库(library)的引入,由设计者定义器件的内部逻辑和引脚,将原来由电路板设计完成的大部分工作放在芯片的设计中进行。由于引脚定义的灵活性,大大减轻了电路图设计和电路板设计的工作量和难度,有效增强了设计的灵活性,提高了工作效率。并且可减少芯片的数量,缩小系统体积,降低能源消耗,提高了系统的功能和可靠性。

EDA 技术发展趋势和研究方向:把逻辑综合和布图工艺结合起来进行高层次的综合。布图研究向纵深发展,时延约束、性能优化、时钟偏差以及噪声串扰等成为布图算法的必须考虑因素。在深亚微米工艺下互连线的延迟已超过了门的延迟,在对芯片进行电气性能模拟时必须考虑传输线。传输线的延迟模型、关键路径的延迟估算和时延分析是该领域研究的重点。传输线本身也推动了模拟电子技术的发展,其中 AWE(asymptotic waveform evaluation)方法及其改进是针对互连线模拟的有效方法。此外,低功耗设计技术、模拟电路的 EDA 工具的发展和软硬件 IP 核也是 EDA 技术未来的发展方向。随着电子技术和计算机技术的深入发展以及 EDA 设计技术的不断进步与完善,在单个芯片上集成 CPU、DSP 存储器和其他控制功能的片上系统正处于高速发展中。未来的电子技术开发方式必然是高度层次化、综合化和自动化的,新器件的涌现和新的开发方式的进步是相互依存、相互促进的,它们会随着科学技术的发展不断更新和完善。

第 1 章

➡ 数字逻辑基础



学习目标

- ① 熟悉常用数制和码制的概念;熟练掌握常用二进制、八进制、十进制、十六进制数相互间的转换。
- ② 熟练掌握逻辑代数中的基本定律、基本公式和规则。
- ③ 熟练掌握逻辑函数常用的表示法与变换。
- ④ 熟悉逻辑函数的公式化简法;熟练掌握逻辑函数的卡诺图化简法。



重点与难点

- ① 二进制、八进制、十进制、十六进制数及其相互间的转换。
- ② 常用的 8421BCD 码和几种可靠性代码。
- ③ 三种基本逻辑关系。
- ④ 逻辑代数中的基本定律、基本公式和规则。
- ⑤ 逻辑函数常用的表示法与变换。
- ⑥ 逻辑函数的公式化简法、逻辑函数的卡诺图化简法。

1.1 数制与编码

1.1.1 数制

自然界中的大多数物理量都是模拟量,因此可以先将模拟信号按比例转换成数字信号,然后送到数字电路(可以是专用的数字信号处理电路,也可以是通用的计算机)进行处理,最后再将处理结果根据需要转换为相应的模拟信号输出。自 20 世纪 70 年代开始,这种用数字电路处理模拟信号的所谓“数字化”浪潮已经席卷了电子技术几乎所有的应用领域。

数字信号通常都是用数码形式给出的。不同的数码可以用来表示数量的不同大小。用数码表示数量大小时,仅用一位数码往往不够,因此经常需要用进位计数制的方法组成多位数码使用。把多位数码中每一位的构成方法以及从低位到高位进位的规则称为数制,在数字电路中经常使用的计数进制除了我们最熟悉的十进制以外,更多的是使用二进制和十六进制,有时也用到八进制。

当两个数码分别表示两个数量大小时,它们可以进行数量间的加、减、乘、除等运算。这种运算称为算术运算。由于目前数字电路中的算术运算最终都是以二进制运算进行的,所以在本

章中还将比较详细地讨论在数字电路中是采取什么方式完成二进制算术运算的。

不同的数码不仅可以用来表示数量的不同大小,而且还可以用来表示不同的事物或事物的不同状态。在用于表示不同事物的情况下,这些数码已经不再具有表示数量大小的含义了,它们只是不同事物的代号而已,这些数码称为代码。例如,在举行长跑比赛时,为便于识别运动员,通常要给每一位运动员编一个号码。显然,这些号码仅仅表示不同的运动员而已,没有数量大小的含义。

为了便于记忆和查找,在编制代码时总要遵循一定的规则,这些规则就称为码制。每个人都可以根据自己的需要选定编码规则,编制出一组代码。考虑到信息交换的需要,还必须制定一些大家共同使用的通用代码。例如,目前国际上通用的美国信息交换标准代码(ASCII码)就属于这一种。

1. 十进制(decimal)

在十进制数中,每一位有0~9这10个数码,所以计数的基数是10。超过9的数必须用多位数表示,其中低位和相邻高位之间的关系是“逢十进一”,故称为十进制。例如:

$$(1999.75)_{10} = (1 \times 10^3 + 9 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 9 \times 10^0 + 7 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2})_{10}$$

所以,任意一个十进制数 D 均可展开为

$$D = \sum k_i \times 10^i \quad (1.1.1)$$

式中, k_i 是第 i 位的系数,它可以是0~9这十个数码中的任何一个。若整数部分的位数是 n ,小数部分的位数为 m ,则 i 包含从 $n-1$ 到0的所有正整数和从 $-m$ 到 -1 的所有负整数。

若以 N 取代式(1.1.1)中的10,即可得到任意进制(N 进制)数按十进制展开式的普遍形式

$$D = \sum k_i \times N^i \quad (1.1.2)$$

式中, i 的取值与式(1.1.1)的规定相同。 N 称为计数的基数, k_i 为第 i 位的系数, N^i 称为第 i 位的权。

2. 二进制(binary)

目前在数字电路中应用最广泛的是二进制。在二进制数中,每一位仅有0和1两个可能的数码,所以计数基数为2。低位和相邻高位间的进位关系是“逢二进一”,故称为二进制。

根据式(1.1.2),任意一个二进制数均可展开为

$$D = \sum k_i \times 2^i \quad (1.1.3)$$

并利用式(1.1.3)计算出与之等效的十进制数的大小。例如:

$$\begin{aligned} (1011101.11)_2 &= (1 \times 2^6 + 0 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2})_{10} \\ &= (64 + 0 + 16 + 8 + 4 + 0 + 1 + 0.5 + 0.25)_{10} \\ &= (93.75)_{10} \end{aligned}$$

上式中分别使用下脚标2和10表示括号里的数是二进制数和十进制数。有时也用B(binary)和D(decimal)代替2和10这两个下脚标。

3. 八进制(octal)

八进制数的每一位有0~7这8个不同的数码,计数基数为8。低位和相邻高位之间的进位关系是“逢八进一”。任意一个八进制数均可以按十进制数展开为

$$D = \sum k_i \times 8^i \quad (1.1.4)$$

并利用式(1.1.4)计算出与之等效的十进制数的大小。例如:

$$\begin{aligned}
 (127.4)_8 &= (1 \times 8^2 + 2 \times 8^1 + 7 \times 8^0 + 4 \times 8^{-1})_{10} \\
 &= (64 + 16 + 7 + 0.5)_{10} \\
 &= (87.5)_{10}
 \end{aligned}$$

有时也用 O(octal) 代替下脚标 8, 表示八进制数。

4. 十六进制(hexadecimal)

十六进制数的每一位有 16 个不同的数码, 分别用 0~9、A(10)、B(11)、C(12)、D(13)、E(14)、F(15) 表示。因此, 任意一个十六进制数均可展开为

$$D = \sum k_i \times 16^i \quad (1.1.5)$$

并利用式(1.1.5)计算出与之等效的十进制数的大小。例如:

$$\begin{aligned}
 (5D.7F)_{16} &= (5 \times 16^1 + 13 \times 16^0 + 7 \times 16^{-1} + 15 \times 16^{-2})_{10} \\
 &= (80 + 13 + 0.4375 + 0.0586)_{10} \\
 &= (93.4961)_{10}
 \end{aligned}$$

$(5D.7F)_{16}$ 中下脚标 16 表示括号里的数是十六进制数, 有时也用 H(hexadecimal) 代替下脚标 16。

由于目前在微型计算机中普遍采用 8 位、16 位和 32 位二进制并行运算, 而 8 位、16 位和 32 位的二进制数可以用 2 位、4 位和 8 位的十六进制数表示, 因而用十六进制符号书写程序十分简便。十进制数与等值二进制、八进制、十六进制数的对照表见表 1.1.1。

表 1.1.1 十进制数与等值二进制、八进制、十六进制数的对照表

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	0000	00	0	8	1000	10	8
1	0001	01	1	9	1001	11	9
2	0010	02	2	10	1010	12	A
3	0011	03	3	11	1011	13	B
4	0100	04	4	12	1100	14	C
5	0101	05	5	13	1101	15	D
6	0110	06	6	14	1110	16	E
7	0111	07	7	15	1111	17	F

1.1.2 数制间的转换

1. 二进制和十进制间的相互转换

1) 二进制转换成十进制

将二进制数转换为等值的十进制数时, 只要将二进制数按式(1.1.3)展开, 然后将所有各项的数值按十进制数相加, 就可以得到等值的十进制数。

例如: $(1011.011)_2 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$
 $= (11.375)_{10}$

2) 十进制转换成二进制

转换时分两部分进行: 首先整数部分, 采用“除 2 取余法”, 即把十进制整数连续除以 2, 并依次记下余数, 直到商是 0 为止, 然后把每次所得的余数按从下向上的顺序依次排列, 即可得到转换后的二进制的整数部分。

例如:将 217 转换为二进制数。

2	217	.....余 1	b_0
2	108	.....余 0	b_1
2	54	.....余 0	b_2
2	27	.....余 1	b_3
2	13	.....余 1	b_4
2	6	.....余 0	b_5
2	3	.....余 1	b_6
2	1	.....余 1	b_7
	0		

最后得到 $(217)_{10} = (11011001)_2$ 。

十进制的小数部分一般采用“乘 2 取整法”转换为二进制数,即把十进制的小数部分连续乘 2,直到小数部分是 0 或者满足误差要求进行“四舍五入”所达到的精度为止,然后将每次所取得的整数按照顺序排列,即可得到转换后的二进制的小数部分。

例如:将 0.3125 转换为二进制数。

$0.3125 \times 2 = 0.625$	.....整数为 0	b_{-1}
$0.625 \times 2 = 1.25$	.....整数为 1	b_{-2}
$0.25 \times 2 = 0.5$	.....整数为 0	b_{-3}
$0.5 \times 2 = 1.0$	.....整数为 1	b_{-4}

最后得到 $(0.3125)_{10} = (0.0101)_2$ 。

2. 二进制和八进制、十六进制间的相互转换

由于 $8=2^3$, $16=2^4$, 二进制与八进制、十六进制数之间的相互转换比较容易。

1) 二进制与八进制间的相互转换

3 位二进制数可以表示 0~7 这 8 个数字,刚好对应八进制数的所有取值。因此把二进制转换为八进制时,整数部分从最低位开始,每 3 位分成一组对应 1 位八进制数,高位不足 3 位时在前面补 0,补足 3 位后转换;小数部分则从小数点后的最高位开始,每 3 位分成一组对应 1 位八进制数,低位不足 3 位时在后面补 0,补足 3 位后转换。

例如: $(101011100101.01101)_2 = (101\ 011\ 100\ 101.011\ 010)_2 = (5345.32)_8$ 。

$(6574.53)_8 = (110\ 101\ 111\ 100.101\ 011)_2 = (110101111100.101011)_2$ 。

2) 二进制与十六进制间的相互转换

二进制与十六进制间的转换方法和二进制与八进制间的转换方法相似,即从小数点开始分别向左、向右将二进制数按每 4 位 1 组分组(不足 4 位的补 0),然后写出每 1 组等值的十六进制数。

例如: $(10111010110.100101)_2 = (0101\ 1101\ 0110.1001\ 0100)_2 = (5D6.94)_{16}$ 。

$(9A7E.B6)_{16} = (1001\ 1010\ 0111\ 1110.1011\ 0110)_2 = (1001101001111110.1011011)_2$ 。

八进制数、十六进制数转换为二进制数的方法可以采用与前面相反的步骤,即只要按原来顺序将每 1 位八进制数(或十六进制数)用相应的 3 位(或 4 位)二进制数代替即可。

若要将十进制数转换成八进制数或十六进制数,可先转换成二进制数,再分组,转换成八进制数或十六进制数。

1.1.3 二进制数的算术运算

当两个二进制数码表示两个数量的大小,并且这两个数进行数值运算,这种运算称为算术运算。其规则是“逢二进一”“借一当二”。二进制数的加、减、乘、除四则运算,在数字系统中是经常遇到的,它们的运算规则与十进制数很相似。加法运算是最基本的一种运算,利用它的运算规则可以实现其他3种运算。例如,减法运算可以借助改变减数的符号再与被减数相加,乘法运算可视为被乘数的连加,而除法运算则可视为被除数重复地减去除数。

1. 二进制数的加法

加法运算的规则是逢二进一,见表 1.1.2。

2. 二进制数的减法

这里先介绍无符号数的减法,其规则是向高位借1当2,见表 1.1.3。

表 1.1.2 加法运算规则

进位	0	0	0	0	1	1	1	1
被加数	0	0	1	1	0	0	1	1
加数	0	1	0	1	0	1	0	1
和	0	1	1	10	1	10	10	11

表 1.1.3 无符号数的减法运算规则

借位	0	0	0	0	1	1	1	1
被减数	0	1	0	1	0	1	0	1
减数	0	0	1	1	0	0	1	1
差	0	1	1	0	1	0	0	1

3. 二进制数的乘法与除法

二进制数的乘法、除法与十进制数的乘法、除法相同,下面列出了4条乘法规则:

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

1.1.4 编码

数字系统中的信息可分为两类:一类是数值信息,另一类是文字符号信息(包括控制符)。为了表示文字符号信息,往往也采用一定位数的二进制码表示,这个特定的二进制码称为代码。建立代码与十进制数、字母、符号的一一对应关系的方法称为编码。 n 位二进制数可以组合成 2^n 个不同的信息,给每个信息规定一个具体码组,这种过程也称为编码。数字系统中常用的编码有两类:一类是二进制编码,另一类是二-十进制编码。另外,无论二进制编码还是二-十进制编码,都可分成有权码(每位数码代表的权值固定)和无权码。

1. 码的基本概念

(1) 数位与比特码的位称为数位,对于十进制码称为十进制数位,对于二进制码称为二进制数位。二进制数位一般简称为 bit,中文读作比特。例如,某一个二进制码是 100101,该码共有 6 个数位,所以称为 6 bit。

(2) 用二进制数表示某一个数值或字符时,该二进制数称为字,英文是 word。在数字系统电路中,所有的信息,包括数据、字母、符号、代表机器操作的指令或数据以及指令在存储器中的存放地址等,都是以二进制代码表示的,作为一个整体来处理或运算的一组二进制数码,称为 1 个字。字是二进制数的基本单位,是数据总线的宽度。

(3) 在微控制器中,一个字的二进制位数称为字长。微控制器的字长有 1 位、4 位、8 位和 16 位等。

(4) 字节是由一组二进制位形成的计算机的一种存储单位,它可以表示 1 个字符。通常 1 字节为 8 个二进制位。

2. 原码、反码、补码和补码运算

1) 原码

在用二进制数码表示一个数值时,其正负是怎么区别的呢?二进制的正负数值的表述是在二进制数码前面加 1 位符号位,用“0”表示正数,用“1”表示负数,这种带符号位的二进制数码称为原码。例如+19 的原码为 010011,-19 的原码为 110011。

2) 反码

反码是为了在求补码时不做减法运算。二进制的反码求法是:正数的反码与原码相同,负数的反码是原码将除了符号位外的数值部分按位取反,即“1”改为“0”,“0”改为“1”,例如+7 和 -7 的原码与反码分别为:

+7 的原码为 0111,反码为 0111;-7 的原码为 1111,反码为 1000。

3) 补码

当做二进制减法时,可利用补码将减法运算转换成加法运算。在介绍补码之前,先介绍模(或模数)的概念。一个事件的循环周期的长度,称为这个事件的模或模数。如一年 365 天,其模数为 365;钟表是以 12 为一循环计数的,故模数为 12。十进制计数就是 10 个数码 0~9 的循环,故模数为 10。以钟表为例来介绍补码运算的原理:对于图 1.1.1 所示的钟表,当在 5 点时发现表停在 10 点,若想拨回有两种方法:

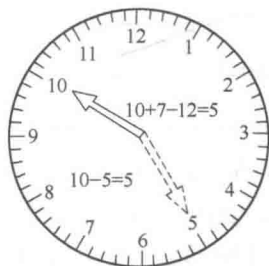


图 1.1.1 补码的原理

(1) 逆时针拨 5 个格,即 $10-5=5$,这是做减法。

(2) 顺时针拨 7 个格,即 $10+7=17$,由于模是 12,故 1 相当于进位 12,1 溢出,故为 $17-12=5$,这是做加法。

由此可见, $10+7$ 和 $10-5$ 的效果是一样的,而 $5+7=12$,故将 7 称为 -5 的补数,即补码,也可以说减法可以由补码的加法来代替。

数字电路系统中,正数的补码和原码相同,负数的补码是符号位为“1”,数值位按位取反加“1”,即“反码加 1”。

例如:+7 的原码为 0 111,反码为 0 111,补码为 0 111;

-7 的原码为 1 111,反码为 1 000,补码为 1 001。

采用补码后,可以方便地将减法运算转换成加法运算,而乘法和除法通过移位和相加也可实现,这样可以使运算电路结构得到简化。正数的补码是它所表示的数的真值,负数的补码部分不是它所表示的数的真值。

已知原码,求补码和反码:正数的原码和补码、反码相同;负数的反码是符号位不变,数值位取反,而补码是符号位不变,数值位取反加“1”。如果二进制的位数为 n ,则可表示的有符号位数的范围为 $(-2^{n-1} \sim 2^{n-1}-1)$,如 $n=8$,则可表示 $-128 \sim 127$,故在做加法运算时,注意两个数的绝对值不要超出它所表示数的范围。

3. 十进制编码

二进制到十进制(也可写作二-十进制)的编码又称 BCD 码,它是一个用 4 位二进制代码来表示 1 位十进制数的二进制代码,即用 4 位的二进制码来表示十进制数中的 0~9。表 1.1.4 列出了几种常用的 BCD 码编码方式。

表 1.1.4 几种常用的 BCD 码编码方式

十进制数	8421 码	5421 码	2421 码	余 3 码
0	0000	0000	0000	0011
1	0001	0001	0001	0100
2	0010	0010	0010	0101
3	0011	0011	0011	0110
4	0100	0100	0100	0111
5	0101	1000	1011	1000
6	0110	1001	1100	1001
7	0111	1010	1101	1010
8	1000	1011	1110	1011
9	1001	1100	1111	1100

1) 8421 BCD 码

8421 BCD 码是最基本和最常用的 BCD 码,从表 1.1.4 中可以看出,十进制数中的 0~9 这 10 个数的每个数都用一个 4 位的二进制码表示,而十进制数中的 2 位及 2 位以上的数,则采用每一位都用一个 4 位的二进制码来表示。例如:十进制数“123”用 8421 BCD 码表示就是“0001 0010 0011”,其中 0001 是表示百位数 1,0010 表示的是十位数 2,0011 表示的是个位数 3。

8421 BCD 码的权自左至右分别为 8、4、2、1。具体地讲,8 是最高位(第 4 位)的权,4 是次高位(第 3 位)的权,2 是第 2 位的权,1 是最低位的权。根据每一位的权,可以方便地计算出十进制数,例如某一个二进制数码是 0111,则该数码就是十进制数中的 7($0 \times 8 + 1 \times 4 + 1 \times 2 + 1 \times 1 = 7$)。

2) 其他 BCD 码

在 5421 码中,5、4、2、1 是这种编码的权,即最高位的权是 5,次高位的权是 4,第 2 位的权是 2,最低位的权是 1。

在 2421 码中,2、4、2、1 是这种编码的权,即最高位的权是 2,次高位的权是 4,第 2 位的权是 2,最低位的权是 1。

在余 3 码中,十进制数所对应的余 3 码等于所对应的 8421 码加上 3(0011),具体对应关系已经在表 1.1.4 中给出。余 3 码这种编码是无权的。采用余 3 码的好处是:利用余 3 码做加法运算时,如果所得之和为 10,恰好对应二进制 16,可以自动产生进位信号。如 $0110(3) + 1010(7) = 1111(10)$;另外 0 和 9、1 和 8、2 和 7……是互为反码的,这对于求补码很方便。

4. ASCII 码

在数字系统中,除数字需要编码成为二进制码外,各种字母和符号也必须用某种特定规则的二进制编码来表示。目前国际上普遍采用的是 ASCII 码(见表 1.1.5),其英文全称为 American Standard Code for Information Interchange(美国标准信息交换码)。ASCII 码采用 7 位二进制数码来表示,故可表示 $2^7 = 128$ 种不同的字符,这其中包括了 26 个大、小写英文字母、10 个十进制数字符号(0~9)、7 个标点符号、9 个运算符以及 50 个其他符号等。