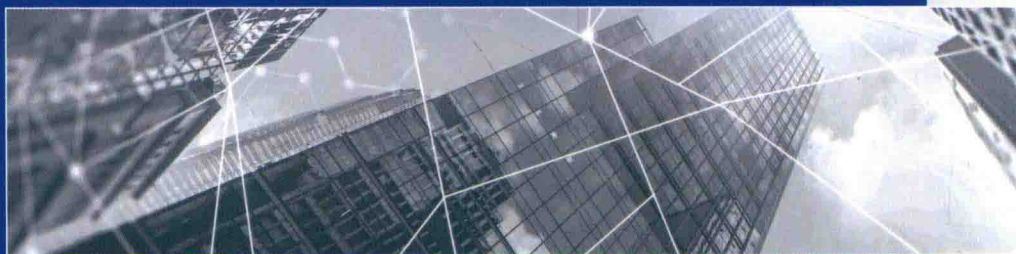


高等学校电子信息学科“十三五”规划教材·电子通信类

数字电路设计



冯建文 章复嘉 编著

 西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息学科“十三五”规划教材·电子通信类

数字电路设计

冯建文 章复嘉 编著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书从数字电路的基本概念出发,系统地介绍了数字电路的理论基础、基本器件、分析方法和设计方法。

本书共分为8章,主要内容包括概述、逻辑代数基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、时序逻辑电路的存储元件、同步时序逻辑电路、异步时序逻辑电路和脉冲产生电路。

本书逻辑清晰、层次分明,原理讲解深入、详细,例题典型、丰富,书中还提供了大量习题供读者练习。本书配套有《基于FPGA的数字电路实验指导书》,可共同作为高等院校计算机类和电子信息类专业的“数字电路设计”等课程的教材,也适合学生及数字系统开发人员自学。

图书在版编目(CIP)数据

数字电路设计/冯建文,章复嘉编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2018.5
(2018.11 重印)

ISBN 978-7-5606-5069-2

I. ① 数… II. ① 冯… ② 章… III. ① 数字电路 IV. ① TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 205350 号

策划编辑 陈 婷

责任编辑 王 斌 陈 婷

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任

版 次 2018年5月第1版 2018年11月第2次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 28

字 数 500千字

印 数 501~3500册

定 价 63.00元

ISBN 978-7-5606-5069-2/TN

XDUP 5371001-2

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

“数字电路设计”是计算机类和电子信息类相关专业的一门重要的专业基础课程，主要介绍数字逻辑的基本概念和数字电路的基本设计方法。它也是计算机类专业高年级本科生硬件课程的前导课，其后续课程有“计算机组成原理”、“计算机接口技术”、“单片机原理与应用”、“计算机系统结构”、“数字系统设计与自动化”等。作为一门经典的传统硬件基础课程，“数字电路设计”不仅有着坚实的系统理论，而且现代数字技术的发展也使得该学科得到不断的充实。

本书以数字电路的“基本概念—理论基础—器件实现—电路分析与设计—集成电路应用”为主线来设计全书的架构和具体章节，力求做到逻辑清晰、简明易懂。

全书分为 8 章，内容安排如下：

第 1 章 概述：从数字电路与计算机的关系入手，介绍了数字电路的基本概念及其与模拟电路的区别，叙述了数制与编码原理、逻辑抽象的方法，并明确了课程任务和学习目标。

第 2 章 逻辑代数基础：介绍了数字电路的理论基础——逻辑代数的基本概念，逻辑函数的定义、公理、定律和运算规则，逻辑函数的标准表示形式以及逻辑函数的化简方法等。

第 3 章 逻辑门电路：以基本逻辑门的半导体器件实现为中心，主要阐述构成逻辑门的半导体器件的开关特性，以及目前广泛使用的 CMOS 门电路和 TTL 门电路的基本结构、工作原理及外部特性。

第 4 章 组合逻辑电路：阐述了组合逻辑电路分析与设计的基本理论、电路中的竞争与冒险，并介绍了计算机中常用的各类典型组合逻辑电路——加法器、数值比较器、译码器/编码器、数据选择器/数据分配器。

第 5 章 时序逻辑电路的存储元件：介绍了构成时序逻辑电路的基本记忆元件——锁存器和触发器的各种类型、电路结构、工作原理、特性方程等。

第 6 章 同步时序逻辑电路：详细讨论同步时序逻辑电路的分析和设计方法，并介绍了计算机中常用的各类典型同步时序逻辑电路——寄存器、计数器、移位器及其综合应用与设计。

第 7 章 异步时序逻辑电路：阐述了脉冲型和电平型两种类型的异步时序逻辑电路的分析和设计方法，并对常用的异步计数器进行了介绍。

第 8 章 脉冲产生电路：介绍了矩形脉冲波形的产生、变换和整形电路，主要包括 555 定时器、多谐振荡器、单稳态触发器和施密特触发器。

本书第 1 章、第 3~8 章由冯建文编写，第 2 章由章复嘉编写。在本书的编写过程中，得到了校内外同行的大力支持和帮助，在此特别感谢赵辽英教授、张怀相和戴钧副教授为本书提供了宝贵的意见和建议。

编 者

2018 年 5 月

目 录

第1章 概述	1	第3章 逻辑门电路	72
1.1 数字电路与计算机	1	3.1 门电路概述	72
1.2 数字与模拟	4	3.1.1 正逻辑与负逻辑	72
1.2.1 数字信号与模拟信号	4	3.1.2 集成门电路的分类	74
1.2.2 数字电路与模拟电路	6	3.1.3 逻辑系列	76
1.3 数字电路的发展	7	3.2 CMOS集成逻辑门	77
1.4 课程任务与目标	9	3.2.1 MOS晶体管	77
1.5 数制	10	3.2.2 CMOS反相器	78
1.5.1 进位计数制	10	3.2.3 CMOS与非门	79
1.5.2 二进制与数字信号	11	3.2.4 CMOS或非门	80
1.5.3 数制转换	12	3.2.5 CMOS传输门	81
1.6 计算机中常用的编码	14	3.2.6 CMOS三态输出门(TS门)	82
1.6.1 十进制编码	14	3.2.7 CMOS漏极开路输出门(OD门)	84
1.6.2 字符编码	17	3.3 双极型晶体管的开关特性	86
1.6.3 逻辑抽象与状态编码	18	3.3.1 二极管的开关特性	86
本章小结	21	3.3.2 三极管的开关特性	88
习题	22	3.4 TTL逻辑门	90
第2章 逻辑代数基础	25	3.4.1 TTL与非门	91
2.1 逻辑代数的基本概念	25	3.4.2 TTL逻辑门的主要特性参数	94
2.1.1 逻辑变量、常量与逻辑函数	25	3.4.3 TTL三态输出门(TS门)	98
2.1.2 逻辑函数的表示方法	26	3.4.4 集电极开路输出门(OC)	99
2.1.3 基本运算与逻辑门	29	3.5 CMOS/TTL接口	101
2.1.4 复合运算与逻辑门	31	3.5.1 CMOS和TTL逻辑系列	101
2.2 逻辑代数的公理和定律	34	3.5.2 用TTL门驱动CMOS门	105
2.3 逻辑代数的运算规则	37	3.5.3 用CMOS门驱动TTL门	106
2.4 逻辑函数的表示形式	39	本章小结	107
2.4.1 逻辑函数的基本形式	39	习题	109
2.4.2 逻辑代数的标准形式	40	第4章 组合逻辑电路	114
2.4.3 表示形式的转换	43	4.1 组合逻辑电路概述	114
2.5 逻辑函数的化简方法	47	4.1.1 逻辑电路的分类	114
2.5.1 代数化简法	47	4.1.2 组合逻辑电路的特点	115
2.5.2 卡诺图化简法	50	4.2 组合逻辑电路的分析	116
2.5.3 无关项的处理	61	4.3 组合逻辑电路的设计	124
2.5.4 多输出逻辑函数的化简	63	4.3.1 组合逻辑电路的设计方法	124
本章小结	65	4.3.2 组合逻辑电路设计实例	125
习题	66	4.4 组合逻辑电路中的竞争与冒险	132

4.4.1 竞争与冒险的基本概念	132	6.1.1 时序逻辑电路的特点	234
4.4.2 险象的分类	134	6.1.2 时序逻辑电路的分类	235
4.4.3 险象的判定	135	6.1.3 时序逻辑电路的描述方法	238
4.4.4 险象的消除	137	6.2 同步时序逻辑电路的分析	242
4.5 典型的组合逻辑电路	140	6.2.1 同步时序逻辑电路的分析步骤	242
4.5.1 加法器	140	6.2.2 分析举例	246
4.5.2 数值比较器	151	6.3 同步时序逻辑电路的设计	253
4.5.3 编码器	155	6.3.1 设计步骤	253
4.5.4 译码器	162	6.3.2 建立原始状态图和原始状态表	254
4.5.5 数据选择器	178	6.3.3 状态化简	263
4.5.6 数据分配器	186	6.3.4 状态分配	274
本章小结	188	6.3.5 同步时序电路设计举例	276
习题	189	6.4 寄存器	288
第5章 时序逻辑电路的存储元件	195	6.4.1 锁存器	288
5.1 存储元件概述	195	6.4.2 基本寄存器	290
5.1.1 双稳态元件	195	6.4.3 移位寄存器	292
5.1.2 锁存器/触发器的特点与分类	196	6.5 计数器	297
5.2 基本锁存器	196	6.5.1 计数器的特点和分类	297
5.2.1 基本 R-S 锁存器	197	6.5.2 二进制计数器	298
5.2.2 基本 $\bar{R}-\bar{S}$ 锁存器	200	6.5.3 十进制计数器	306
5.3 钟控锁存器	202	6.5.4 任意进制计数器	311
5.3.1 钟控 R-S 锁存器	202	6.5.5 计数器容量的扩展	314
5.3.2 钟控 D 锁存器	204	6.5.6 移位寄存器型计数器	317
5.4 主从触发器	205	6.6 综合应用与设计	324
5.4.1 主从 R-S 触发器	206	6.6.1 分频器的设计	324
5.4.2 主从 J-K 触发器	208	6.6.2 顺序脉冲发生器	325
5.5 边沿触发器	210	6.6.3 序列信号发生器	328
5.5.1 边沿 D 触发器	211	本章小结	331
5.5.2 边沿 J-K 触发器	213	习题	332
5.6 其他触发器	214	第7章 异步时序逻辑电路	342
5.6.1 T 触发器	214	7.1 异步时序逻辑电路的分类	342
5.6.2 T' 触发器	215	7.2 脉冲异步时序逻辑电路	343
5.7 不同触发器的转换	216	7.2.1 脉冲异步时序逻辑电路的分析	344
5.7.1 基于 D 触发器的转换	216	7.2.2 脉冲异步时序逻辑电路的设计	350
5.7.2 基于 J-K 触发器的转换	217	7.3 电平异步时序逻辑电路	363
5.8 集成触发器	218	7.3.1 电平异步时序逻辑电路的描述方法	364
5.8.1 集成 D 触发器	218	7.3.2 电平异步时序逻辑电路的分析	367
5.8.2 集成 J-K 触发器	220	7.3.3 电平异步时序逻辑电路中的竞争	372
5.9 触发器特性参数	224	7.3.4 电平异步时序逻辑电路的设计	377
本章小结	225	7.4 集成异步计数器	387
习题	226	7.4.1 集成异步计数器的结构	387
第6章 同步时序逻辑电路	234		
6.1 时序逻辑电路概述	234		

7.4.2 集成异步计数器的功能	388	8.4.1 单稳态触发器的特点与主要参数	417
7.4.3 集成异步计数器的应用	392	8.4.2 用 555 定时器构成的单稳态触 发器	417
本章小结	395	8.4.3 集成单稳态触发器	421
习题	396	8.4.4 单稳态触发器的应用	424
第 8 章 脉冲产生电路	404	8.5 施密特触发器	426
8.1 脉冲产生电路概述	404	8.5.1 施密特触发器的特点与主要参数	426
8.2 555 定时器	406	8.5.2 施密特触发器的结构与原理	427
8.2.1 555 定时器的内部结构	406	8.5.3 用 555 定时器构成施密特触发器	430
8.2.2 555 定时器的基本功能	407	8.5.4 集成施密特触发器	432
8.3 多谐振荡器	408	8.5.5 施密特触发器的应用	432
8.3.1 多谐振荡器的特点与主要参数	408	本章小结	434
8.3.2 用逻辑门构成的自激多谐振荡器	409	习题	435
8.3.3 555 定时器构成自激多谐振荡器	411	参考文献	439
8.3.4 石英晶体振荡器	416		
8.4 单稳态触发器	417		



第1章 概述

数字电路是实现计算机硬件的基本电路。本章首先阐述了数字电路和计算机的关系，对比了数字电路和模拟电路的特点，介绍了数字电路的发展过程；然后明确了课程任务和学习目标；最后叙述了数制及编码的概念和原理。

1.1 数字电路与计算机

继农业革命和工业革命之后，计算机引发了人类的第三次文明革命——信息革命。1946年，美国研制成功了第一台电子计算机 ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Computer)。它是一种具有逻辑判断、存储和信息处理以及选择、记忆、反应等功能的自动机器。

在过去的30年内，计算机彻底改变了我们的世界。它不仅大大地增强了人类的创造力和生产力，而且对我们的日常生活产生了深远的影响。如今，从航空航天与军事领域到汽车、智能家电与可穿戴设备等生活领域，从天文学、生物学到物理学、化学，计算机已经无处不在。

电子计算机是数字电路技术应用的典型代表，它是伴随着电子技术的发展而发展的。现代计算机的发展起源于英国数学教授 Charles Babbage。他认为可以利用蒸汽机进行运算。起先他设计差分机用于计算导航表，1820年，他开始设计包含现代计算机基本组成部分的分析机(A analytical - Engine)。Charles Babbage 的蒸汽动力计算机虽然最终没有完成，以今天的标准看也是非常原始的，然而，它勾画出了现代通用计算机的基本功能部分，在概念上是一个突破。

此前的计算机都是基于机械运行方式的，尽管开始引入一些电学部件，但都从属于机械结构。此后，随着电子技术的飞速发展，计算机开始了由机械向电子时代的过渡，电子越来越成为计算机的主体，机械越来越成为从属体，二者的地位发生了变化，计算机也发生了质的转变。

1906年美国的 Lee De Forest 发明了电子管，这为电子数字计算机的发展奠定了基础。1935年 IBM 推出 IBM 601 机，这是一台能在一秒钟内算出乘法的穿孔卡片计算机。这台机器无论在自然科学还是在商业意义上都具有重要的地位。1938年 Claude E.Shannon 发表了用继电器进行逻辑表达的论文，同年柏林的 Konrad Zuse 和他的助手们完成了一个机械可编程二进制形式的计算机，其理论基础是布尔(Boolean)代数，后来该计算机被命名为 Z1。它的功能比较强大，用类似电影胶片的東西作为存储介质，可以运算7位指数和16位小数，可以用一个键盘输入数字，用灯泡显示结果。1939年美国加利福尼亚的 David Hewlett 和 William Packard 在他们的车库里造出了 Hewlett - Packard 计算机。1939年11月美国的 John V.Atanasoff 和他的学生 Clifford Berry 完成了一台16位的加法器，这是第一台真空管计算机。1939年 Zuse 和 Schreyer 在他们的 Z1 计算机的基础上发展出了 Z2 计



算机,并用继电器改进它的存储和计算单元。1940年 Schreyer 利用真空管完成了一个 10 位的加法器,并使用氖灯作为存储装置。

1943 年到 1959 年这一时期的计算机通常被称为第一代计算机。第一代计算机使用真空管,所有的程序都是用机器码编写的,并使用穿孔卡片。典型的机器就是 UNIVAC(通用自动计算机)。1943 年 1 月 Mark I 自动顺序控制计算机在美国研制成功。整个机器长为 51 英尺(注:1 英尺=0.3048 米),重 5 吨,有 75 万个零部件,使用了 3304 个继电器,以 60 个开关作为机械只读存储器。其程序存储在纸带上,数据可以来自纸带或卡片阅读器。该计算机被用来为美国海军计算弹道火力表。1943 年 9 月 Williams 和 Stibitz 完成了“Relay Interpolator”,后来命名为“Model II Relay Calculator”。这是一台可编程计算机。同样使用纸带输入程序和数据。其运行更可靠,每个数用 7 个继电器表示,可进行浮点运算。1943 年 12 月,英国推出了最早的可编程计算机,包括 2400 个真空管,目的是破译德国的密码,其每秒能翻译大约 5000 个字符。

真空管时代的计算机尽管已经步入了现代计算机的范畴,但其体积之大、能耗之高、故障之多、价格之贵大大制约了它的普及应用。直到晶体管被发明出来,电子数字计算机才找到了腾飞的起点。1947 年 Bell 实验室的 William B. Shockley、John Bardeen 和 Walter H. Brattain 发明了晶体管,开辟了电子时代新纪元。

对于现代的电子数字计算机,一个完整的计算机系统包括了硬件系统和软件系统。硬件系统是指构成计算机的物理设备,即由机械、光、电、磁等器件构成的具有计算、控制、存储、输入和输出功能的实体部件。拆开任何一台台式计算机或笔记本电脑,或者家里的任何一台家电(如洗衣机、冰箱等),你就会发现硬件的真相——不可或缺的是一块块电路板及其上面的芯片。这个直观的现象,意味着计算机技术飞速发展的背后,是电子技术的飞速发展。从电子数字计算机诞生伊始,计算机技术和电子技术就不可分割。下面介绍电子数字计算机的发展史。

(1) 第一代电子管计算机。1946 年,宾西法尼亚大学研制的 ENIAC 交付使用,标志着第一代电子管计算机的诞生。与此同时,美籍匈牙利数学家冯·诺伊曼设计了具有存储器、能存储程序且能自动执行程序的计算机方案——EDVAC。这一设计方案于 1949 年 5 月在英国剑桥大学试制成功。这种计算机被称为“冯·诺伊曼计算机”,其运行速度每秒达几万次。第一代电子管计算机的特点主要有:使用电子管作为基本逻辑部件,体积大,耗电多,可靠性差,成本高;采用电子射线管作为存储部件,容量小,后来外存储器使用了磁鼓存储信息,扩充了存储容量;没有系统软件,只能用机器语言或汇编语言编程;输入与输出主要用穿孔的纸带或卡片,编程与上机都很费时、费力。

(2) 第二代晶体管计算机。1959 年美国研制成第一台大型通用晶体管计算机,开始了以晶体管代替电子管的时代。第二代晶体管计算机的主要特点有:用晶体管代替电子管作为基本逻辑部件,具有速度快、寿命长、重量轻、体积小、功耗小等优点。

(3) 第三代集成电路计算机。1964 年 4 月,美国 IBM 公司宣布制成通用的集成电路计算机,标志着第三代电子计算机的诞生。第三代集成电路计算机的特点主要有:使用中、小规模集成电路作为基本逻辑部件,从而使计算机体积更小,耗电更省,成本更低,运算速度有了更大的提高,它的使用使计算机进入了普及阶段;采用半导体存储器作为主存储器,使存储容量和存储速度有了大幅度的提高,增强了系统的处理能力;系统软件有了



很大发展,出现了分时操作系统,多用户可共享软硬件资源;在程序设计方法上采用了结构化程序设计,为研制更加复杂的软件提供了技术上的保证。

(4) 第四代大规模集成电路计算机。1971年,英特尔公司发布了世界上第一个微处理器芯片4004,在 $3\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 面积上集成晶体管2250个,每秒运算速度达6万次,标志着大规模集成电路计算机时代的到来。第四代大规模集成电路计算机的特点主要有:基本逻辑部件为大规模集成电路,使计算机体积、重量和成本大幅度降低,出现了微型机;作为主存的半导体存储器,其集成度越来越高,容量越来越大,外存储器广泛使用软、硬磁盘,并引进了光盘;使用方便的输入和输出设备相继出现;软件产业高速发展,各种实用软件层出不穷;计算机技术与通信技术相结合,计算机网络把世界紧密联系在一起;使多媒体技术崛起。

随着对大规模集成电路计算机研究的深入,从20世纪80年代开始,日本、美国以及欧洲等发达国家和地区都宣布开始新一代计算机的研究,先后出现了神经网络计算机、生物计算机和光子计算机等新型计算机。普遍认为新一代计算机的特征是高度智能,它模拟人的智能行为,理解人类自然语言,并继续向着微型化、网络化、多媒体化和智能化方向发展。

由上可见,计算机的发展史实际上就是电子技术的发展史,计算机也是电子技术发展的产物。

从底层硬件到顶层的应用,可以将电子计算机系统划分为图1.1所示的层次结构。

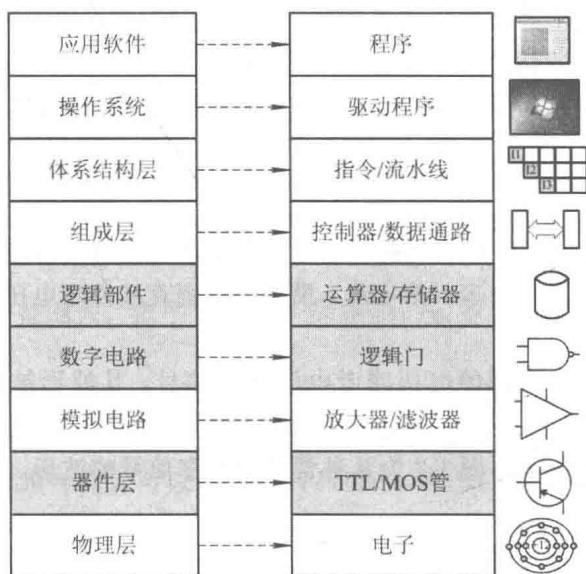


图 1.1 电子计算机系统的层次结构

在图1.1中,最底层是物理层,即电子的运动。器件层描述了晶体管或者真空管等电子器件上电流和电压的关系模型。可以将器件组合在一起,构成放大器或滤波器等组件;称为模拟电路。模拟电路的输入和输出是连续变化的电压值。也可以用与、或、非等逻辑门器件构成数字电路,将电压控制在规定的范围内,并抽象为0和1。在计算机中,使用数字电路构造更复杂的逻辑部件,如运算器或者存储器等。在组成层,通过控制器,将计算机的各个逻辑部件连接,并控制数据通路,完成指令的执行,实现了计算机的硬件组成。



体系结构层关注的是从程序员所看到的计算机的属性,包括指令系统、寄存器组、存储器结构等,这一层次提供了硬件与软件的接口。

在计算机的软件系统中,操作系统(OS, Operating System)是直接运行在裸机上的最基本的系统软件,它管理计算机系统的各种软、硬件资源,使其被高效使用,同时也为计算机系统和用户之间提供接口,便于用户解决问题。最顶层为应用软件,它是为解决用户的特定问题的任何其他软件,其必须在操作系统的支持下才能运行,完成人们预期的任务。

可见,数字电路是计算机的硬件实现。在图 1.1 中,有阴影标示的层次(器件层、数字电路、逻辑部件)为本课程涉及的层次,再向上为“计算机组成原理”课程及“计算机系统结构”课程的研究范畴。

1.2 数字与模拟

1.2.1 数字信号与模拟信号

自然界中的物理量分为数字量和模拟量两类。数字量是指在时间上和数量上都是离散的物理量,其变化在时间上是不连续的,总是发生在一系列离散的瞬间,而且数量及变化单位有精度限制。例如,世界人口数、中国网民数、生产的汽车数等均属数字量。模拟量是指在时间上或在数值上连续变化的物理量,如今天的温度、大气压强、行车速度等。模拟量在连续变化过程中的任何一个取值都有具体的物理意义,如某时刻的温度值。

表示数字量的信号称为数字信号;表示模拟量的信号称为模拟信号。例如,人口数是数字信号,温度是模拟信号。

1. 数字信号

在电路中,无论是数字信号还是模拟信号,都要以电流或电压的形式表达。数字信号使用电压的高低或脉冲形式来表示数字量,模拟信号则直接使用电压或电流的大小表示模拟量。

数字信号是作用时间离散的电压或者电流脉冲信号,其波形被赋予特定的数字含义后,用以表示数字量。应用最广泛的是二值数字信号(二电平),用电平的高低或者脉冲的有无表示“1”和“0”两个数字。图 1.2 为几种常见的数字信号的波形。

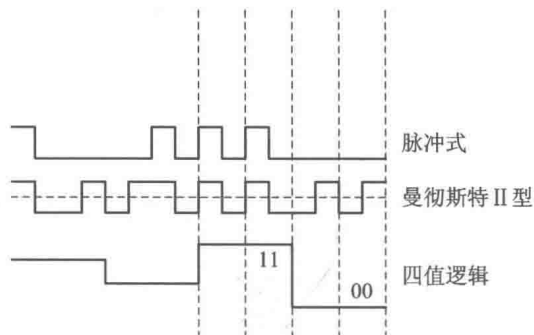


图 1.2 数字信号的脉冲波形与编码



在图 1.2 中, v_1 、 v_2 和 v_3 是二值数字信号。其中, v_1 是电平型编码, 高电平被赋值“1”, 低电平被赋值“0”。电平型编码在表示“1”时, 高电平维持了位周期的全部时间, 不需要归零, 因此又称为不归零制(NRZ, Non-Return-to-Zero)。 v_2 是脉冲型编码, 有脉冲被赋值“1”, 无脉冲被赋值“0”。这种编码的“1”在位周期中, 高电平只维持了部分时间, 然后归零, 因此又被称为归零制(RZ, Return-to-Zero)。 v_3 是一种双相码, 称为曼彻斯特 II 型编码。无论是“0”编码还是“1”编码, 在位周期的中点处均会翻转, “1”编码从高电平跳变到低电平, “0”编码从低电平跳变到高电平。这个跳变既可以作为时钟信号, 也可以作为数据信号。这种编码具有自同步能力和良好的抗干扰性能, 广泛应用于网络传输与通信系统中。

数字信号的形式, 除上述二电平外, 还有三、四、八及十六等多电平码型, 这些又称为多值逻辑(MVL, Multi-Valued Logic)编码方式。图 1.2 中的 v_4 就是一种四电平数字信号, 它的最高电平用 11 表示, 次高电平用 10 表示, 较低电平用 01 表示, 而最低电平用 00 表示。这种 MVL 编码的优点是传输数据的时间缩短, 缺点是电平识别与电路设计难度增加。

2. 模拟信号

模拟信号是一种时变信号, 其电压或电流波形的幅值是连续的, 即在某一取值范围内可以取无限多个数值。例如, 图 1.3 所示的正弦电压模拟信号是连续信号。

在长距离传输和多次加工、放大过程中, 模拟信号的波形容易受噪声的影响, 使信号失去一些信息, 表现为声音、图像失真, 严重时出现信号中断。

相比模拟信号, 数字信号具有以下优点:

(1) 抗干扰能力强。数字信号是以高低电平或者脉冲的有无来表示“0”和“1”的, 只要噪声引起的误差不超出规定的门限值, 其信号就保持不变。

(2) 表示精度高、范围大。数字信号当扩展编码的位数后, 能够表示更为精确、更为广泛的数值。

(3) 便于存储与加密。数字信号以 0/1 代码的形式, 方便地存储于存储设备中, 也便于进行加密与解密运算。

(4) 差错可控, 可靠性高。可以通过各种校验码, 对数字信号表示的数值进行校验, 保证数据的正确性。

鉴于数字信号的优越性, 现实中, 常常对模拟信号进行数字化处理, 将模拟信号变成数字信号, 这个转换过程称为模-数(A/D, Analog/Digital)转换。模-数转换一般需要三个步骤: 抽样、量化和编码。抽样是指用每隔一定时间的信号采样值序列来代替原来在时间上连续的信号, 也就是在时间上将模拟信号离散化。量化是用有限个幅度值近似原来连续变化的幅度值, 把模拟信号的连续幅度变为有限数量的、有一定间隔的离散值。编码则是按照一定的规律, 把量化后的值用二进制数字表示, 然后转换成二值或多值的数字信号流。这样得到的数字信号可以通过电缆、微波干线、卫星通道等数字线路传输, 或者保存至存储器。在通信系统的接收端, 也可以将数字信号再转换成模拟信号, 称为数-模(D/A, Digital/Analog)转换。

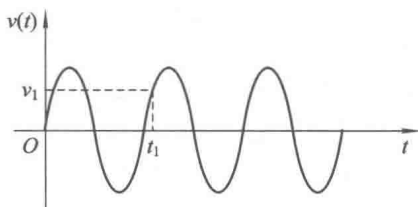


图 1.3 正弦波电压模拟信号



1.2.2 数字电路与模拟电路

那么究竟什么叫做数字电路呢?数字电路是指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,又称为数字系统或数字逻辑电路。而模拟电路是处理模拟信号电子电路。它们有以下区别:

(1) 在一个周期内模拟电路的电流和电压是持续变化的(模拟信号),而数字电路的电流和电压是脉动变化的(数字信号)。

(2) 模拟电路和数字电路都是信号变化的载体,模拟电路多使用元器件(如三极管)的放大特性来工作,而数字电路多使用器件的开关特性来工作。

(3) 模拟电路可以在大电流高电压下工作,而数字电路只是在小电压、小电流、低功耗下工作。

(4) 模拟电路的数学基础是微积分,数字电路的数学基础是布尔代数。

数字电路、大规模集成电路的迅猛发展掀起了“数字革命”浪潮,使得很多曾经的模拟系统变成了“数字系统”。例如,20年前,大多数照相机、录像机使用模拟信号储存图片与视频,有线电视和电话信号也是模拟的。如今数码相机将图像轻松记录成 3264×1860 的像素矩阵;而数码录像机将视频图像采用MPEG-4的高压缩比的数字格式存储;有线电视则使用数字电视机顶盒,使得电视成为高清的多媒体终端;在通话两端的电话信号虽然是模拟的声音信号,但是经过模-数转换和数-模转换,在电话交换网络中使用数字程控交换机交换的是数字信号。

相比模拟电路,数字电路有着不可比拟的优点:

(1) 性能稳定,结果可重现。给定相同的输入序列,一个设计正确的数字电路总能精确地产生相同的结果。但是对于模拟电路,则会由于温度、湿度、电源电压、元件老化等诸多因素,导致输出的结果发生变化。

(2) 更易于学习与设计。数字设计又称为逻辑设计,其数学基础是逻辑代数。它是基于逻辑的,不需要特别繁杂的数学知识或高深的物理学知识。对于不是特别复杂的逻辑电路,普通学习者就可以理解与掌握其原理。但是对于模拟电路的电容、电感或者晶体管等模拟器件,则需要微积分的数学基础,要求对模型进行计算才能理解并认识它们的内部特性和工作过程。

(3) 可模块化设计,灵活性好。当一个复杂的问题被逻辑抽象为数字形式时,往往可以依据输入、输出之间的逻辑关系,将其划分成相对完整的电路模块,由不同人、使用不同的方法分别设计,最后合成一个完整的数字系统,是比较灵活的。但是模拟电路,则由于需要考虑干扰、耦合等诸多因素,进行模块设计不是那么容易。

(4) 具有可编程性。现今的数字电路设计大多数基于可编程逻辑器件(PLD, Programmable Logic Device),能够使用开发工具、硬件描述语言(HDL, Hardware Description Language)来对硬件进行配置,并且还能模拟、仿真和综合。可编程性也使得硬件可重复使用,带来了低成本和经济性。

(5) 具有高速性。高速性体现在两方面:一方面是数字电路的器件速度非常快,单个晶体管的开关时间可以达到10 ps,要组成一个完整、复杂的器件,从输入到输出的延迟时间也还不到2 ns;另一方面是数字电路开发的快捷性,开发工具非常完善、先进,便于设



计、仿真、模拟、综合等操作,大大缩短了开发周期。

1.3 数字电路的发展

电子技术是20世纪发展最迅速、应用最广泛的技术,它已经使得工业、农业、科教、医疗、文化娱乐以及人们的日常生活发生了根本的变革。特别是数字电子技术,在近几十年来,取得了令人瞩目的进步。

1. 数字电路与器件的发展

电子技术的发展是以电子器件的发展为基础的,电子器件经历了由电子管、晶体管到半导体集成器件的过程。20世纪初直至20世纪中叶,主要使用的电子器件是真空管,也称为电子管。随着固体微电子学的进步,第一只晶体三极管于1947年问世,开创了电子技术的新领域。随后20世纪60年代初,模拟和数字集成电路相继问世。20世纪70年代末,微处理器问世,电子器件及应用出现了崭新的局面。

相应地,随着电子器件的发展,数字电路也从分立器件电路发展到如今的巨大规模集成电路。实际上数字系统的历史可追溯到17世纪,1624年Blaise Pascal设计了一台机械的数值加法器,在1671年,德国数学家Gorge Boole发明了一台可进行乘法与除法的机器。19世纪用于计算航行时间表的计算机问世。1937年,贝尔实验室的Claude Shannon向人们展示了如何使用开关来实现逻辑和数学运算。从真空管的诞生、半导体三极管的发明,到集成电路的发明,都划时代地推动了数字逻辑和计算机的发展。从1946年的ENIAC电子数字计算机、20世纪70年代初英特尔设计出的第一个微处理器到现在最新一代的超级计算机,现代数字系统正以惊人的速度发展。

2. 集成电路的发展与分类

集成电路的优势及其飞速发展,使其已经成为数字电路的主流形式。集成电路(IC, Integrated Circuit)是指在一块极小的硅单晶片上,利用半导体工艺制作出晶体二极管、三极管及电阻、电容等元件,并连接成可实现特定功能的电子电路。从外观上看,集成电路是一个不可分割的完整器件,集成电路在体积、重量、耗电、寿命、可靠性及电性能方面远远优于晶体管元件组成的电路。1960年12月,世界上第一块硅集成电路制造成功;1966年,美国贝尔实验室使用比较完善的硅外延平面工艺制造成第一块公认的大规模集成电路。1988年,16M DRAM问世,1 cm²大小的硅片上集成有3500万个晶体管,标志着进入超大规模集成电路阶段的更高阶段。1997年,300 MHz的奔腾Ⅱ问世,采用0.25 μm工艺。2009年,Intel酷睿i系列全新推出,创纪录地采用了领先的32纳米工艺。2015年,英特尔第七代i7处理器采用最新的14 nm工艺制造。随着芯片上元件和布线的缩小,芯片的功耗降低而速度大为提高,最新生产的微处理器的时钟频率高达3 GHz(3×10^9 Hz)。从集成度角度来看,集成电路从产生到成熟大致经历了如下过程:

(1) 小规模集成电路 SSIC(Small Scale Integrated Circuit): 每片上集成1~10等效门或10~100个元件。

(2) 中规模集成电路 MSIC(Medium Scale Integrated Circuit): 每片上集成10~100等效门或100~1000个元件,出现于1966年。



(3) 大规模集成电路 LSIC(Large Scale Integrated Circuit): 每片上集成 100~10 000 等效门或 1000~100 000 个元件, 出现于 1970 年。

(4) 超大规模集成电路 VLSIC(Very Large Scale Integrated Circuit): 每片上集成超过 10 万个元件, 出现于 20 世纪 70 年代后期。

(5) 甚大(特大)规模集成电路 ULSIC(Ultra Large Scale Integrated Circuit): 每片上集成 $10^7 \sim 10^9$ 个元件, 出现于 1993 年。

(6) 巨大规模集成电路 GSIC(Giga Scale Integrated Circuit): 每片上集成 10^9 个以上元件, 出现于 1994 年。

20 世纪 80 年代初, 出现了专用集成电路(ASIC, Application Specific Integrated Circuit), 它是为特定用户或特定电子系统制作的集成电路。到 20 世纪 80 年代末, 专用集成电路制作技术已趋向成熟, 标志着数字集成电路发展到了新的阶段。

集成电路技术的发展一直遵循着著名的摩尔定律, 即每 18 个月芯片集成度大致增长一倍。集成电路技术的发展使得集成电路产品从传统的板上系统(System-on-Board)发展到今天的片上系统(System-on-a-Chip)。其间集成电路产业结构经历了三次大的变革, 并导致了独立的集成电路设计行业的形成。

第一次变革发生在以加工制造为主导的 IC 产业发展的初级阶段。20 世纪 70 年代, 集成电路的主流产品是微处理器、存储器以及标准通用逻辑电路。整个 IC 产业处在以生产为导向的初级阶段, 后又逐步形成封装业单独分列的局面。在这个时期, IC 制造商在 IC 市场中充当重要角色, IC 设计只作为附属部门而存在。这时的 IC 设计和半导体工艺密切相关, IC 设计主要以人工为主, CAD 系统仅作为数据处理和图形编程之用。

第二次变革的标志是代加工公司与 IC 设计公司的崛起。20 世纪 80 年代, 集成电路的主流产品为微处理器(MPU, Micro-Processor Unit)、微控制器(MCU, Micro-Controller Unit)及专用集成电路 ASIC。20 世纪 80 年代后期, 以自动逻辑综合器为代表的第二代电子设计自动化(EDA, Electronic Design Automatic)及计算机辅助工程(CAE, Computer Aided Engineering)工具为设计师从被动地对设计结果进行分析验证转向主动地选择最佳设计方案提供了一个基本手段。CAE 使得设计师可以在可预期的时间内, 完成 10 万门级的复杂电路设计, 使产品设计的效率成倍提高。20 世纪 90 年代, 第三代 EDA 工具出现, 在设计前期就可以利用设计工具完成分层次设计, 可以支持几百万门甚至几千万门电路的复杂电路设计, 并在器件内部嵌入 CPU、DSP、RAM、ROM 等部件, 同时这一时期出现了现场可编程器件 FPGA(Field Programmable Gate Array)。

第三次变革发生在 20 世纪 90 年代初, 在各半导体厂家共同努力下, 进行了一系列标准化工作, 如制定了硬件描述语言 VHDL(Very-High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language)、网表格式等, 从而使得人们可以自由地实现最佳设计。在标准化的支持下, 电路设计师不需要知道电路设计的具体内容就可以完成版图制作, 电路设计可以很好地从一个设计环境移植到另一个设计环境。

3. 数字电路的分类

按照电路结构, 可以将数字电路分为分立元件电路和集成电路两种。前者将晶体管、电阻、电容等元器件用导线在线路板上连接起来; 后者将上述元器件和导线通过半导体制造工艺做在一块硅片上而成为一个不可分割的整体电路。



按照半导体的导电类型,可以将数字电路分为双极型数字电路和单极型数字电路两种。前者以双极型晶体管作为基本器件,如 TTL 和 ECL;后者以单极型晶体管作为基本器件,如 CMOS。

按照电路的功能特点,数字电路可以分为组合逻辑电路和时序逻辑电路。前者的输出只与当时的输入有关,电路无反馈,如编码器/译码器、加法器、比较器、数据选择器等。后者的输出不仅与当时的输入有关,还与电路原来的状态有关,存在着反馈,具有记忆功能,如触发器、计数器、寄存器等。

1.4 课程任务与目标

本课程研究的对象为数字电路,研究的内容为数字电路的基本原理及其分析、设计方法。课程的任务和目的如下:

- (1) 掌握数字电路的基本理论知识。
- (2) 掌握数字电路的基本分析和设计方法。
- (3) 理解计算机中常见数字电路部件的工作原理。
- (4) 具备应用数字电路理论初步解决数字逻辑问题的能力。

数字电路设计是工程,而工程就意味着“解决问题”。一个成功的数字电路设计者,应具备的能力有:

(1) 分析问题并进行逻辑抽象的能力。数字电路设计的首要工作就是将一个问题以逻辑设计的角度来进行分析,并抽象出输入与输出的逻辑变量,建立模型。如果不能正确地分析问题、建立模型,就无法进行下一步。

(2) 构思与设计的能力。构思含有研究与创新的工作,设计则依据常规的设计技巧和经验实现构思,完成具体的设计。

(3) 实现设计与调试的能力。将设计付诸实现,在 EDA(Electronic Design Automatic) 技术高度发达的今天,已经变得越来越容易了。然而,调试能力却始终是数字电路设计工程师必须练就的功夫,如果不能发现问题,就不能解决问题。成功的调试过程需要合理的计划、系统的方法、耐心和逻辑。

(4) 考虑商业要求与其他因素。工程师的工作总是受到其他非工程因素的影响,包括商业上对器件的要求、设计规范标准、社会因素、环境与可持续发展因素、安全因素等。

(5) 风险意识。在设计的过程中,要始终保有风险意识。从选择元件到整个设计完成的每个阶段,都要在成果、代价以及失败风险之间仔细权衡。

(6) 沟通能力。无论是在项目进行的中间,还是在最终要将成功的设计交给部门、客户或者其他工程师,都需要双向的沟通交流,包括倾听与表达。如果没有好的沟通和表达能力,那就永远不能走完数字电路设计的成功历程。

本书的内容安排与阐述思路如下:

在本书的第1章,回答了以下问题:数字电路有什么用处?它与计算机有什么关系?什么是数字电路和数字信号?与模拟电路和模拟信号相比,有什么优点?数字信号是如何编码的?怎么将问题进行逻辑抽象与状态编码?

数字电路的数学基础是布尔代数,又称为逻辑代数。在第2章中介绍了逻辑代数的基



本概念与基本公理、定理与规则,然后讲述了逻辑函数的表示形式,重点为逻辑函数的化简方法。

数字电路的基本元件是逻辑门,第3章介绍了逻辑门的基本器件半导体二极管和三极管、TTL门电路、MOS门电路。

数字电路分为组合逻辑电路和时序逻辑电路,在第4章阐述了组合逻辑电路的分析方法和设计方法,前者是指对给定的电路进行分析,推导出其逻辑功能;后者是指对于某个问题,使用逻辑设计方法进行设计,并用数字电路实现。第4章还介绍了计算机中常用的各种组合逻辑部件的原理与应用,包括加法器、比较器、译码器、编码器、数据选择器和数据分配器。

在时序逻辑电路中,最基本的记忆元件是触发器,时序逻辑电路根据时钟信号的作用方式分为同步时序逻辑电路和异步时序逻辑电路。第5章介绍了基本触发器的原理及其各种变型触发器;第6章则阐述了同步时序逻辑电路的分析方法和设计方法,也介绍了计算机中常用的同步时序逻辑部件,包括寄存器、移位器和计数器;第7章的主要内容是异步时序逻辑电路的分析与设计,包含脉冲型和电平型两种异步时序逻辑电路以及异步计数器的原理与应用。

1.5 数 制

数字电路处理的数字信号是基于二进制0和1的数码,但是现实生活中,很多信息并非是基于二进制的。数字电路的设计者必须将二进制数码和实际数字、事件或者条件等事物之间建立对应的关系。

1.5.1 进位计数制

数制又称为进位计数制,即按进位制的方法进行计数。数制由两大要素组成:基数 R 与各数位的权 W 。基数 R 决定了数制中各数位上允许出现的数码个数,基数为 R 的数制即称为 R 进制数。权 W 则表明该数位上的数码所表示的单位数值大小。因此,权 W 是与数位的位置有关的一个常数,不同的数位有不同的权,同一个数码位于不同的位置,其所代表的数值也不同,故又称为位权。

假设任意数值 N 用 R 进制数来表示,表示形式为用 $m+k$ 个自左向右排列的符号来表示 N :

$$N = (D_{m-1}D_{m-2}\cdots D_0.D_{-1}D_{-2}\cdots D_{-k})_R$$

其中, D_i 为该进制的基本符号, $D_i \in [0, R-1]$, i 为各个数位的编号, $i = -k, -k+1, \dots, m-1$,小数点在 D_0 和 D_{-1} 之间,则数值 N 的实际值为:

$$N = \sum_{i=-k}^{m-1} (D_i \times R^i) \quad (1.1)$$

其中,第 i 位的权 W_i 为 R^i 。通常最左边的数位 D_{m-1} 的权最大,称为最高有效位MSB (most significant bit);最右边的数位 D_{-k} 的权最小,称为最低有效位LSB (least significant bit)。

我们最熟悉的是十进制,它的基数为10,它允许使用的数字是10个,即0~9。十进