



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

数字电子技术基础

杨聪铨 编著

高等教育出版社



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

数字电子技术基础

Shuzi Dianzi Jishu Jichu

杨聪铨 编著

高等教育出版社·北京

内容简介

本书主要讲述数字电子技术理论及其应用,主要内容有:数制和码制、基本逻辑运算与常用复合逻辑、逻辑代数基础、逻辑门电路、逻辑函数的表示及化简、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、半导体存储器、可编程逻辑器件及模数与数模转换电路。

本书深入浅出,系统开放,便于自学,强调知识结构的合理性和方法论的培养,激发读者阅读兴趣,提高数字电路应用能力和逻辑思维能力。

本书可作为高等学校电子信息类、自动化类、通信工程类、仪器仪表类等专业的教科书,也可供其他理工科专业选用,并可供有需要的工程技术人员和社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术基础 / 杨聪铨编著. —北京: 高等教育出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-04-039415-3

I. ①数… II. ①杨… III. ①数字电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 056403 号

策划编辑	欧阳舟	责任编辑	平庆庆	封面设计	赵 阳	版式设计	马敬茹
插图绘制	杜晓丹	责任校对	张小镝	责任印制	毛斯璐		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京玥实印刷有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 39
字 数 960 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2014 年 5 月第 1 版
印 次 2014 年 5 月第 1 次印刷
定 价 57.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 39415-00

前言

一、工科专业中的“三电课”

我国高等教育的工科专业培养中,设置了由基础课、专业基础课和专业课组成的完整的课程体系。在各门专业基础课程中,“电路分析”、“模拟电子技术基础”和“数字电子技术基础”三门课组成了电学专业基础教育课程,俗称“三电课”。

“电路分析”可以看做一门方法论课程,以电学分析方法和思维方式的培养和训练为主要教学内容,课程中谈到的大多数具体电路本身并没有太大的实用性,课程目标是使学生学会在某种电路结构中,以合理的方法分析求解相关的电学参量。该课程以“高等数学”、“复变函数”、“线性代数”和“物理”为前修课程,这些基础课为“电路分析”课程的学习准备好必要的电学基础知识和相应的数学分析工具。“电路分析”课程的后续课程,则正是“三电课”中的后两门——“模拟电子技术基础”和“数字电子技术基础”(简称“模电”、“数电”)。

“模电”和“数电”以“电路分析”为前修课程,两者的划分依据主要是所研究电路的工作特点的差异。相比于“电路分析”课程,“模电”和“数电”两门课程所介绍的内容更具有实践性,介绍的各种电路具有很强的实用性,在日常生产和生活中应用广泛。从专业培养的角度看,这两门课程并没有严格的先后顺序,所以,现在各学校对这两门课程的先后次序安排各不相同。

“模拟电子技术基础”课程所谈到的电路为模拟电路,用于传输和处理模拟电信号。具体地说,电路中所运行的电信号是在时间上连续、幅度上也连续的模拟信号,最典型的当然是正弦交流电信号。与“电路分析”课程相比,模拟电路所用的器件主要是增加了二极管、晶体管和场效应管等器件以及集成运算放大器等。通过这些器件,可以放大一个模拟电信号;可以对模拟电信号进行加法、减法、乘法、微分、积分等数值运算以及比较运算;也可以对模拟电信号进行滤波处理,以保留某些频率范围内的信号,同时抑制另一些频率范围内的信号;甚至可以设计具体电路生成三角波、锯齿波等一些非正弦的模拟信号。

上述这些电路功能的具体工程意义和工程用途,则主要在其后续的专业课程中学习,例如“通信电子线路”等课程。

相应地,“数字电子技术基础”课程中谈到的当然就是数字电路。具体地讲,数字电路中,所运行的电信号在时间上和幅度上都是离散的,只有两种数值:高电平和低电平,这样的电信号被称为数字信号。

人类制造电信号的目的基本上有两个:一是传导电能,驱动某些用电设备;二是传导信号,表达某种信息。像这样幅度上不连续的信号,自然不是为了传导电能(电能的传输强调稳定而连续),而是为了表达信息,因此,数字信号更可以被称为“信号”。这些数字信号在幅值上只有高电平和低电平两个数值,而且,我们并不太关注这两个电平的具体大小,而是关注其表达的逻辑含义。数字电路的功能,就是用数字信号表达某种逻辑信息,并对输入电路的数字信号进行运算和处理,实现某种逻辑功能,得到同样具有逻辑含义的输出数字信号,并向后级传递这些逻辑信息。

II 前 言

简而言之,数字电路就是用于表达、运算和传输数字逻辑信息的电路。因此,“数电”课程以逻辑代数为数学基础,这也是本教材内容和教学过程中的一个重点。

同时,数字电路中所用的主要器件不是传统意义上的电阻、电容、电感和晶体管(这些器件在本课程中统称为分立元件),而是种类繁多、功能具体的集成电路芯片,本书中会陆续谈到。最后再说明一下,本课程介绍数字集成电路芯片的结构和原理时,会用到一些在“模电”课程中所学的晶体管知识。

与“模电”课程相比,“数电”课程的后续课程更多,例如,“CPLD 原理与开发”、“微机原理与应用”、“单片机原理及应用”、“数字信号处理”、“数字系统设计”等,这是因为,现今实用的各种电子设备,基本上都具有数字化、集成化的发展趋势。今后读者所学的相关专业课中,只要使用的硬件系统是数字化的,就无一例外地需要用到“数电”课程的相关知识。

二、课程内容与教材结构解析

“数字电子技术基础”课程的主要内容,就是学会分析和设计某种数字电路,对输入数字信号进行逻辑运算,实现相应的逻辑推理,得到逻辑分析结果,并同样以数字信号的方式将所得到的结果输出,这就是所谓的完成了某种数字逻辑功能。

在最粗浅的范畴里,可以给出这样一个基本结论:数字电路大体上分为两种——组合逻辑电路和时序逻辑电路,这也就构成了本课程的两大模块。

在还没有牵涉到具体电路的介绍时,可以围绕组合逻辑电路和时序逻辑电路在输入、输出特性上的差异,给出两者基本的数学表述,即

组合逻辑电路:电路的输出只与该时刻的输入有关。

数学表达式为 $Y=f(X_1, X_2, X_3, \dots)$

时序逻辑电路:电路的输出不仅与该时刻的输入有关,还与电路的状态有关。

数学表达式为 $Y=f(X_1, X_2, X_3, \dots; Q_1, Q_2, Q_3, \dots)$

上述表达式中, $X_1, X_2, X_3, \dots$ 为输入的数字信号; $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$ 为电路的状态量; Y 为输出的数字信号。

根据这两类电路的基本定义,上述表达式应该不难理解。输入信号(和电路的状态量)如何决定输出信号,指的就是通过逻辑运算与推理,也就是逻辑代数关系。

综上所述,“数字电子技术基础”课程就是学习如何分析与设计组合逻辑电路和时序逻辑电路的课程。当然,为了完整掌握这两大主干模块,还需要学习一些相关的基础知识、准备知识和后续知识。这样,这门课程的知识体系和教材的章节结构也就显现出来了,如图 0.1 所示,请读者认真阅读。

三、教材编写体例

上文对课程学习目标和教材章节结构给出了总体介绍,希望对读者学习本课程和阅读本教材有所裨益,使大家逐渐形成合理的知识体系,做到“知其所学”。最后,再介绍一下本书编写的基本定位和规范。

课程的主干内容当然还是以章节体铺陈,各章名称、学习目标和结构关系如图 0.1 所示。同时,在每章的概述中,都会首先结合分节情况概述本章的知识结构,此时虽然不会详细讲解具体知识,但首先建立合理的知识体系,对读者阅读正文内容有很好的指导作用,希望读者进入具体知识的学习前,能通过对概述的阅读,首先对本章内容、目标和结构有所了解。此外,每章结束

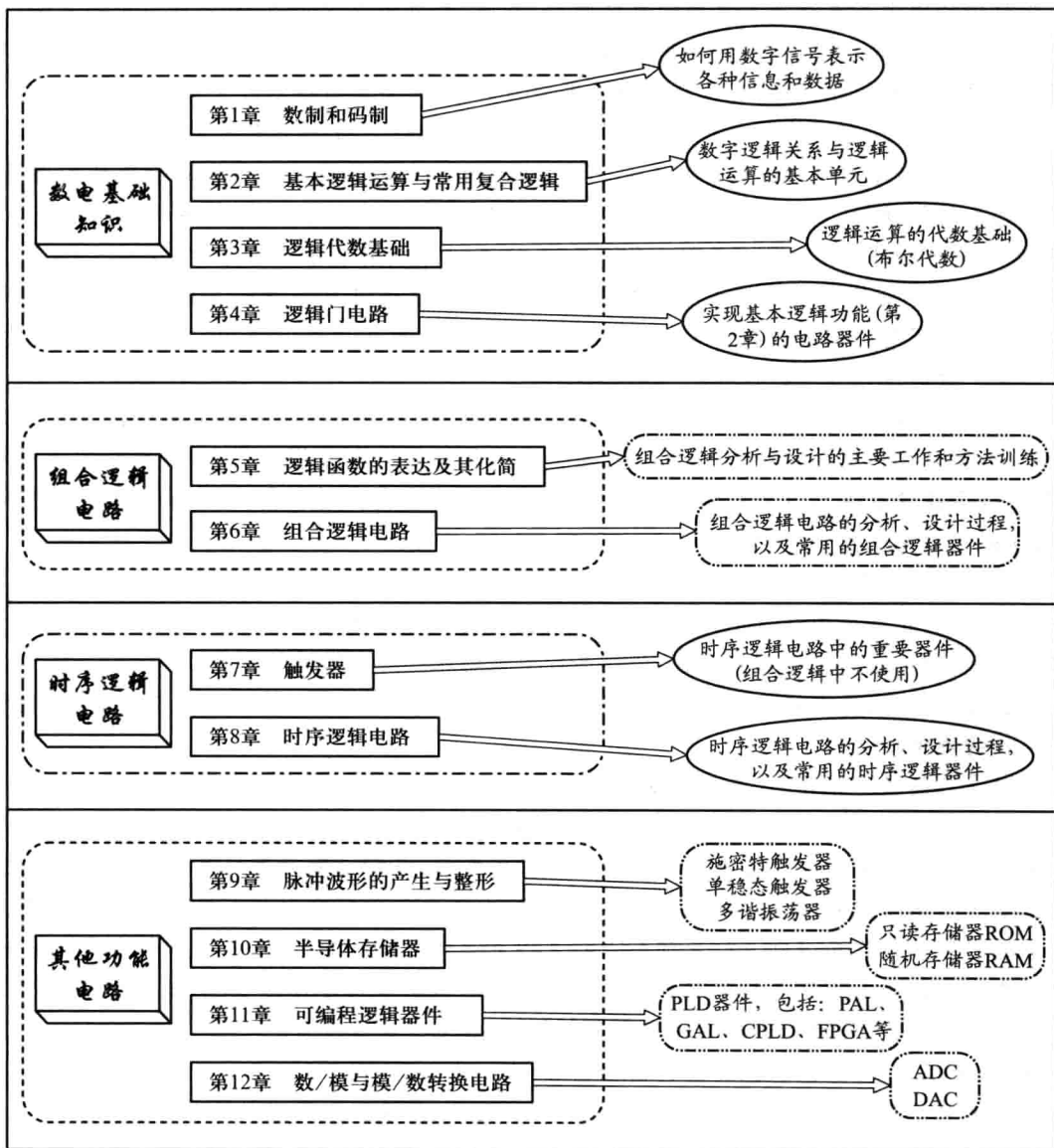


图 0.1 课程知识体系和教材章节结构

时,会完整地总结本章需要掌握的知识点。

强调知识结构和阅读体系,这正是本书的第一个特点,笔者将尽其所能,让读者带着比较清晰的知识结构进入具体内容的学习,从而更合理地掌握知识。

笔者多年的教学生涯中,一只通体深蓝色的U盘常伴左右,虽已经漆皮斑驳、破旧不堪,但仍然坚守岗位,尽职尽责,已经成为最了解我思路的好助手。本书的编写中,笔者考虑再三,几经挣扎,终于决定把我的这个小助教也带进教材中。在正文中,我的助教会不定期地出现,为读者主持“助教时间”这个版块。

IV 前 言

此版块会为大家进行许多重要的总结阐述,其中,有方法论的介绍,有器件应用的总结,有重要工具的理解,等等。可以说,这些都是具有独创性的内容,是在教学实践中总结得到,并被实践证明是正确的心血所在,请读者认真对待这部分内容,并希望能引导出大家更多的思考。

此外,各章中还穿插有另一种独立版块——“扩展阅读”。此版块是从正文内容延伸和发散出来的,涉及到与本课程相关的各种知识,已经超出教学大纲的要求。通过对此版块的阅读,可以扩展大家的阅读量,增加知识储备,激发阅读兴趣。同时,更重要的是,笔者通过这种方式,力图使“数字电子技术基础”课程成为一个开放的、与其他领域有联系的动态体系。

“扩展阅读”版块分散放置在其关联的正文当中,这也符合读者的发散思维习惯,能够更好地帮助大家理解和掌握教材内容。笔者认为,如果集中放在教材附录中,则不具有上述优点,也不符合开放的课程体系的设计。

最后,本书编写各章例题时,不但详细给出解答过程,也在其前后给出【解析】内容,总结本题特点、考察目标和需要掌握的知识点等,希望大家认真阅读和掌握。同时,各章后的习题训练中,笔者也会在题后注明习题的考查内容和训练目标,希望读者训练自测时,能清晰地了解训练目标,并强化对应的重点知识。

数字电路是用来完成对数字信号的逻辑分析与运算的电路,从而实现现实中各种各样的逻辑命题。因此,在本书的编写中,笔者非常希望能通过各方面的努力,潜移默化地让读者感受到逻辑思维之美妙,既学习专业知识,又能或多或少地培养一些逻辑思维能力。

经过多年努力,笔者终于完成本书的编写工作,衷心希望本书能够对大家有所帮助,这就是笔者工作的价值所在!

笔者多年的教学工作中,受到西安工业大学电工电子教研室郑长风副教授长期的培养和指导,为本书的编写奠定了坚实基础。在本书的编写、整理和定稿过程中,西安工业大学信控研究所张志文教授为笔者提供了完善的写作条件和工作环境,并指导笔者对许多内容进行细致推敲。西安工业大学电子信息工程学院院长雷志勇教授、电工电子教研室主任李静教授、教材科科长王春景副教授和其他许多老师与同事都关心并支持着笔者的编写工作,促成了本书的最终完成。

长安大学电子与控制工程学院林涛教授在百忙中认真审阅了本书全稿,提出了很多中肯而详细的修改意见,细致耐心地指导笔者完善书稿,笔者从中受益良多。

在此,对以上老师的关心、支持、指导和帮助表示衷心感谢!

由于笔者水平所限,书中一定仍会有许多不妥之处,恳请广大读者批评指正。

杨聪锐

2013年6月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第1章 数制和码制	1	2.3.2 “或非”逻辑	34
1.1 概述	1	2.3.3 “与或非”逻辑	34
1.2 逻辑函数与逻辑运算	3	助教时间 “与或非”的真值表	35
1.2.1 逻辑运算的基本概念	3	2.3.4 “异或”和“同或”	36
1.2.2 真值表	4	助教时间 异或、同或的“四点四结论”	39
助教时间 真值表的理解	5	扩展阅读 奇偶校验码的产生与 检测电路	40
1.3 常用数制	6	扩展阅读 基本逻辑与常用复合逻辑 运算的自测训练	41
1.3.1 进位计数制	6	2.4 本章小结	42
1.3.2 进位计数制间的转换	7	习题2	42
1.4 二进制数的运算	12	第3章 逻辑代数基础	44
1.4.1 二进制数的算术运算	12	3.1 概述	44
1.4.2 原码、反码和补码	13	扩展阅读 布尔与布尔代数	44
1.5 常用码制	14	3.2 逻辑代数中的常用公式	46
1.5.1 二-十进制码	14	3.2.1 常量与常量之间、常量与变量 之间的逻辑关系	46
1.5.2 用BCD码表示十进制数	17	3.2.2 交换律、结合律与分配律	46
助教时间 数制与码制的关系	17	3.2.3 逻辑函数的化简公式	47
1.5.3 其他常用代码	18	3.2.4 摩根定律(反演律、求反律) 公式	50
扩展阅读 字符代码的演化	20	3.2.5 逻辑运算的优先级别	51
1.6 本章小结	22	扩展阅读 摩根、摩根定律和剑桥大学 三一学院	52
习题1	23	3.3 逻辑代数中的基本定律	53
第2章 基本逻辑运算与 常用复合逻辑	25	3.3.1 代入定律	53
2.1 概述	25	3.3.2 反演定律	54
2.2 基本逻辑运算	26	3.3.3 对偶定律	54
2.2.1 逻辑“与”运算	26	助教时间 公式和公式的推广	55
扩展阅读 ANSI和IEEE	27	扩展阅读 对偶定律的推广(异或与同或 的对偶性)	56
扩展阅读 IEC、ISO和中国国家标准	29	3.4 逻辑函数的5类基本形式	57
2.2.2 逻辑“或”运算	31		
2.2.3 逻辑“非”运算	32		
2.3 常用复合逻辑	32		
2.3.1 “与非”逻辑	33		
助教时间 真值表列写方法的总结	33		

II 目 录

3.5 本章小结	59
习题 3	60
第 4 章 逻辑门电路	62
4.1 概述	62
4.2 分立元件门电路	66
4.2.1 二极管与门	66
4.2.2 二极管或门	68
4.2.3 晶体管非门	69
4.3 TTL 集成逻辑门	70
4.3.1 TTL 非门	70
4.3.2 TTL 集成逻辑门的常用型号和 常见工作参数	76
扩展阅读 德州仪器(TI)公司	79
4.4 TTL 集电极开路门和三态门	81
4.4.1 集电极开路门(OC 门)	82
扩展阅读 总线(Bus)	86
4.4.2 三态门(TS 门)	87
4.4.3 OC 门和三态门的性能比较	91
4.5 CMOS 集成逻辑门	91
4.5.1 CMOS 逻辑门的种类	92
4.5.2 CMOS 集成逻辑门的工作特点	93
4.5.3 CMOS 集成逻辑门的产品类型	94
扩展阅读 仙童公司和“八叛逆”的传奇	96
4.5.4 TTL 门与 CMOS 门的接口电路	99
助教时间 逻辑门电路的多余输入端 的处理	104
4.6 本章小结	106
习题 4	107
第 5 章 逻辑函数的表示及化简	112
5.1 概述	112
5.2 逻辑函数的公式法化简	112
5.2.1 逻辑函数的化简原则	113
5.2.2 与或逻辑函数的公式法化简	114
助教时间 公式法化简的思路总结	118
5.2.3 5 类逻辑函数形式之间的转换	119
5.3 逻辑函数的图形法化简	121
扩展阅读 贝尔实验室	121
5.3.1 最小项和标准与或式	122
5.3.2 卡诺图原理	125
5.3.3 与或逻辑函数的图形化简法	133
5.3.4 5 类逻辑函数的图形化简法	136
助教时间 5 类典型逻辑函数的 化简方法总结	139
5.3.5 具有约束关系的逻辑函数的 卡诺图化简	141
5.4 逻辑函数的表示方法和转换	145
5.4.1 逻辑函数的表示方法	145
5.4.2 逻辑函数各种表示形式的 相互转换	148
5.5 本章小结	152
习题 5	153
第 6 章 组合逻辑电路	159
6.1 概述	159
扩展阅读 数字集成电路的 发展史简述	160
扩展阅读 集成电路芯片封装知识	163
6.2 组合逻辑电路的分析与 设计方法	175
6.2.1 组合逻辑电路的分析方法	175
6.2.2 组合逻辑电路的设计方法	177
6.3 常用组合逻辑电路及其中规模 逻辑器件	179
6.3.1 加法器	179
6.3.2 数值比较器	188
6.3.3 编码器	195
6.3.4 译码器	204
6.3.5 数据选择器	219
6.3.6 数据分配器	228
助教时间 中规模组合逻辑器件的 知识体系总结	230
助教时间 中规模组合逻辑器件的 级联扩展	231
6.4 用中规模逻辑器件实现组合 逻辑函数	232
6.4.1 用数据选择器实现 组合逻辑函数	232

6.4.2 用译码器实现组合逻辑函数	239	第8章 时序逻辑电路	307
6.5 组合逻辑电路中的 竞争与冒险	244	8.1 概述	307
6.5.1 竞争与冒险的概念与成因	244	8.2 时序逻辑电路的分析与设计	308
6.5.2 竞争与冒险的判别	246	8.2.1 同步时序逻辑电路的分析	309
6.5.3 竞争与冒险的消除	248	8.2.2 同步时序逻辑电路的设计	314
6.6 本章小结	251	8.2.3 异步时序逻辑电路的分析	325
习题6	252	8.3 计数器	327
第7章 触发器	259	8.3.1 计数器的含义和分类	327
7.1 概述	259	8.3.2 计数器的原理与实现	328
7.2 时序逻辑电路	260	8.3.3 集成计数器	335
7.2.1 时序逻辑电路概述	260	助教时间 计数器芯片资料上 能读到什么	351
7.2.2 触发器概述	266	8.3.4 计数器的应用	352
7.3 基本RS触发器	268	助教时间 采用大模数计数器生成小模数 计数器的方法总结	359
7.3.1 用与非门组成的 基本RS触发器	268	助教时间 集成计数器应用的 方法总结	371
7.3.2 用或非门组成的 基本RS触发器	272	8.4 寄存器和移位寄存器	373
7.4 同步触发器	275	8.4.1 寄存器的概念、特点和分类	373
7.4.1 同步RS触发器	276	8.4.2 基本寄存器	374
助教时间 时序逻辑电路的波形图的 画法	278	8.4.3 移位寄存器	376
7.4.2 同步D触发器	279	8.4.4 集成移位寄存器的应用	381
7.4.3 同步JK触发器	281	扩展阅读 麦比乌斯圈和潘洛斯阶梯	393
7.4.4 同步T触发器	283	8.5 特定信号发生器	395
助教时间 4类功能触发器的 记忆总结	285	8.5.1 序列信号发生器	396
7.5 主从(脉冲)触发器和 边沿触发器	287	8.5.2 顺序脉冲发生器	406
7.5.1 主从触发器的使用特点	287	8.5.3 伪随机序列码发生器	414
7.5.2 边沿触发器的使用特点	289	助教时间 特定信号发生器的 设计总结	416
7.6 触发器使用中的其他特点	292	8.6 本章小结	419
7.6.1 直接置位端和直接复位端	292	习题8	421
7.6.2 触发器的多输入激励情况	293	第9章 脉冲波形的产生与整形	427
7.6.3 触发器的使用范例	294	9.1 概述	427
7.7 本章小结	298	9.2 555定时器	431
习题7	300	9.2.1 电路结构	431
		9.2.2 工作原理	433
		9.2.3 芯片封装图和功能示意图	434
		9.3 施密特触发器	435

IV 目 录

9.3.1 用 555 定时器构成的施密特触发器	435	11.2 低密度 PLD	516
9.3.2 集成施密特触发器	437	11.2.1 可编程逻辑阵列 PLA	516
9.3.3 施密特触发器的典型应用	438	11.2.2 可编程阵列逻辑 PAL	519
9.4 单稳态触发器	439	11.2.3 通用阵列逻辑 GAL	523
9.4.1 用 555 定时器构成的单稳态触发器	440	11.3 高密度 PLD	527
9.4.2 集成单稳态触发器	442	11.3.1 复杂的可编程逻辑器件 CPLD	528
9.4.3 单稳态触发器的典型应用	446	11.3.2 现场可编程门阵列 FPGA	530
9.5 多谐振荡器	449	助教时间 各种 PLD 的总结与对比	532
9.5.1 用 555 定时器构成的多谐振荡器	449	扩展阅读 主流 PLD 公司的流行产品	534
9.5.2 石英晶体多谐振荡器	453	11.4 PLD 开发的软、硬件资源和设计流程	536
扩展阅读 石英晶体与石英晶体振荡器	454	11.4.1 PLD 开发的软、硬件资源	536
扩展阅读 严济慈	455	11.4.2 在系统可编程技术 ISP	540
9.6 本章小结	457	11.4.3 PLD 开发的设计流程	541
习题 9	458	扩展阅读 CPLD 和 FPGA 的应用选择	543
第 10 章 半导体存储器	462	11.5 VHDL 语言	545
10.1 概述	462	11.5.1 VHDL 程序的组织结构	545
10.2 只读存储器(ROM)	468	11.5.2 VHDL 的语言要素	552
10.2.1 掩模 ROM	469	11.5.3 VHDL 的常用语句	561
10.2.2 可编程 ROM(PROM)	475	11.5.4 VHDL 程序实例	571
10.2.3 ROM 的应用	478	11.6 本章小结	579
助教时间 组合逻辑电路的设计方法总结	488	习题 11	580
10.2.4 其他类型 ROM	489	第 12 章 模数与数模转换电路	582
助教时间 EPROM、E ² PROM 和闪存的 功能对照	497	12.1 概述	582
10.3 随机存储器(RAM)	498	12.2 D/A 转换器	583
10.3.1 静态 RAM(SRAM)	498	12.2.1 D/A 转换原理	583
10.3.2 动态 RAM(DRAM)	502	12.2.2 D/A 转换器的性能指标	588
10.3.3 RAM 的扩展	503	12.2.3 集成 DAC 及器件选型	591
扩展阅读 计算机中的存储器	504	12.3 A/D 转换器	592
10.4 本章小结	508	12.3.1 A/D 转换原理	592
习题 10	509	扩展阅读 为取样定理做出贡献的 科学家	595
第 11 章 可编程逻辑器件	512	12.3.2 A/D 转换器的性能指标	604
11.1 概述	512	12.3.3 集成 ADC 及器件选型	606
11.2 低密度 PLD	516	12.4 本章小结	607
11.2.1 可编程逻辑阵列 PLA	516	习题 12	608
11.2.2 可编程阵列逻辑 PAL	519	参考文献	610
11.2.3 通用阵列逻辑 GAL	523		
11.3 高密度 PLD	527		
11.3.1 复杂的可编程逻辑器件 CPLD	528		
11.3.2 现场可编程门阵列 FPGA	530		
助教时间 各种 PLD 的总结与对比	532		
扩展阅读 主流 PLD 公司的流行产品	534		
11.4 PLD 开发的软、硬件资源 和设计流程	536		
11.4.1 PLD 开发的软、硬件资源	536		
11.4.2 在系统可编程技术 ISP	540		
11.4.3 PLD 开发的设计流程	541		
扩展阅读 CPLD 和 FPGA 的应用选择	543		
11.5 VHDL 语言	545		
11.5.1 VHDL 程序的组织结构	545		
11.5.2 VHDL 的语言要素	552		
11.5.3 VHDL 的常用语句	561		
11.5.4 VHDL 程序实例	571		
11.6 本章小结	579		
习题 11	580		
第 12 章 模数与数模转换电路	582		
12.1 概述	582		
12.2 D/A 转换器	583		
12.2.1 D/A 转换原理	583		
12.2.2 D/A 转换器的性能指标	588		
12.2.3 集成 DAC 及器件选型	591		
12.3 A/D 转换器	592		
12.3.1 A/D 转换原理	592		
扩展阅读 为取样定理做出贡献的 科学家	595		
12.3.2 A/D 转换器的性能指标	604		
12.3.3 集成 ADC 及器件选型	606		
12.4 本章小结	607		
习题 12	608		
参考文献	610		

第 1 章

数制和码制

在阅读正文前,希望你能首先认真阅读本书的前言,以了解本课程的课程定位、教材结构和编写体例,这将帮助你更好地阅读本书的以下内容。

1.1 概述

理工科专业的培养,无一例外地强调数学基础的重要性,大家应该也深有体会。数学中介绍了名目繁多的“数”的概念,例如自然数、小数、实数、虚数、复数等,其数学含义、结构特点、适用的运算法则各不相同。

这些在数学中见到的“数”,在物理中也常常遇到,不过此时更重视的是这些“数”表示了什么样的“量”的概念,即这些数表示了什么物理含义、性质和单位等。通过分析这些有物理含义的“数”在某些物理现象中的变化,来研究这些量所代表的物理实体和物理现象。

所谓“数量”,就是用某种数来表征物理世界中,具有特定含义的物理量的过程,所以是有大小、有单位的数字。

自然界中,形形色色的物理量,就其变化规律而言,无外乎两大类。一类是在时间和数量上都连续变化的物理量,如温度、时间、长度等,虽然这些量的物理含义不同,但根据其连续不跳变的特点,统称为模拟量(Analog Quantity);另一类物理量在数量上和时间上都是不连续变化的,即离散的,统称为数字量(Digital Quantity)。

在电学领域中,常见的电信号,如电压、电流等,同样可以如此分类,分为模拟电信号和数字电信号,简称模拟信号和数字信号。图 1.1.1 给出了几种常见的模拟信号波形,而图 1.1.2 为数字信号的波形。

假定图 1.1.2 中的数字信号表示的是电压信号,则很明显,波形中只存在高电平和低电平两种电平值,两者之间的转换为瞬时变化,俗称“跳变”。

人们将产生、处理和传输模拟信号的电路称为模拟电路(Analog Circuit),将处理、传输、控制、加工数字信号,对数字信号加以逻辑运算的电路称为数字电路(Digital Circuit)。

在“电路分析”课程中,我们认识了电压、电流和电功率等常见的电学参量,也掌握了依据电路结构定律和元件特性去分析电路的方法,从而得到一个具体电路的某个支路或某个元件上的电压、电流和电功率等参量。在“模拟电路”课程中,我们学习了如何使用二极管、

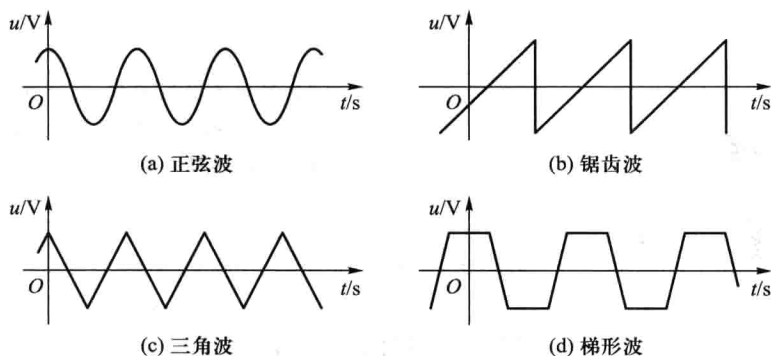


图 1.1.1 几种常见的模拟信号波形

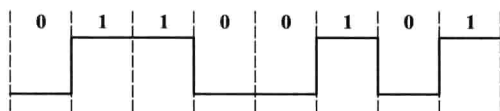


图 1.1.2 数字信号波形

晶体管、运算放大器等器件,对模拟电信号进行相应处理,以实现信号放大、运算和波形变换等功能,如果这些信号表征了某些具体含义,例如人的语音信号等,则这样的处理是很有意义的。

★ 在数字电路中,要处理的当然是数字电信号,它们表示什么含义? 解决什么问题? 相关知识将在 1.2 节中进行介绍,以使大家对数字电路的总体功能有基本的了解。同时,1.2 节还将谈到数字电路中一个重要的分析工具——“真值表”的基本概念和使用。

★ 图 1.1.2 所示的数字信号可以通过赋值而数学化,用“1”表示高电平,用“0”表示低电平,则该波形可对应给出数码形式为:“01100101”。

如果用这样的数码来表示数量,就需要根据某种规则组成多位数码,随着数位的增加,能表示的数量也更大,这样的规则称为进位计数制。

日常生活中,最常见的是十进制计数,而数字电路中,使用的是二进制、八进制和十六进制。

在 1.3 节中,将分别介绍各种数制的规律和特点,并总结数制间相互转换的方法。在 1.4 节中,还会简单介绍二进制数的加、减、乘、除运算以及数字系统中常见的原码、反码和补码的概念。

★ 当采用数字系统对十进制数进行相应运算和处理时,为了将十进制数输入系统,必须用二进制数形式书写数据,即需要使用二-十进制码,简称 BCD 码。1.5 节中将详细介绍多种 BCD 码,并简要介绍具有检错功能的奇偶校验码以及计算机和通信领域中广泛应用的 ASCII 码(美国信息交换标准代码)等内容。

★ 在详细介绍了数字电路中常用的各类数制和码制后,将以“助教时间”版块,把进位计数制和 BCD 码联系起来,分析其内在联系,得到数制与码制的关系图,帮助大家理解和记忆各类数制与码制之间的转换方法。

1.2 逻辑函数与逻辑运算

1.2.1 逻辑运算的基本概念

所谓“逻辑”，是指事物的因果关系，也称为逻辑关系，一定的条件决定了一定的结论。对这样的决定关系的一个完整表述，即什么样的条件决定什么样的结论，就称为逻辑命题。

数字电路就是用来完成这样的一个逻辑命题，用输入的数字信号表示条件，用输出的数字信号表示结论，条件经过数字电路所搭建的逻辑运算，决定了结论的成立与否。所以，数字电路也称为逻辑电路。

为了使读者对逻辑运算有一个整体概念，对数字电路的基本任务有一个初步认识，这里从普通代数运算开始讲起。

请看以下这个普通代数中常见的表达式：

$$y = 2 \cdot x + 3$$

这个函数表示了输入和输出的数值关系，“=”就是赋值的概念。

表达式左边的 y 是输出变量， x 是数值大小可变的输入变量（由外部用户决定），2 和 3 是大小已经确定的常量。

以上的表述中，谈到了代数运算、代数常量、代数变量以及输入变量、输出变量等多个概念。

普通代数表达了输入和输出信号的数值关系，而逻辑运算则表达的是输入和输出信号的逻辑关系，即输入条件和输出结论成立与否之间的决定关系。一言以蔽之，逻辑运算就是逻辑思维和逻辑推理的数学描述。

与上面的普通代数表达式类似的，可以给出一个逻辑运算表达式：

$$y = 1 \cdot x + 0$$

该逻辑表达式表示了一个逻辑命题：一组成立或不成立的输入条件通过某些逻辑运算决定了输出结论是否成立。

其中，输入变量（自变量）、输出变量（因变量）、常量等概念仍然存在，但含义与数值运算则大相径庭了。

等式左边的 y 表示结论（输出），等式右边的 x 、1、0 表示条件（输入）。其中， x 和 y 是逻辑变量，1 和 0 是逻辑常量。既然逻辑常量是用于表示某个条件是否成立，那么当然只有两种可能：成立和不成立，即“真”和“假”两种可能。在逻辑数学中规定用 1 表示“真”，用 0 表示“假”，从而将这些概念数字化。

逻辑变量 x 和 y 的取值含义和逻辑常量当然也是一样的，只有 1（真）和 0（假）两种可能。所以有如下结论：逻辑运算中只涉及两种逻辑量，不是 1（真），就是 0（假），不存在第三种似是而非的量。

三个输入条件 x 、1、0 是如何决定输出结论 y 的呢？是通过逻辑运算决定的。表达式中，“ $\cdot$ ”和“ $+$ ”就是逻辑运算，称为“与”运算和“或”运算，这些逻辑运算代表着参与逻辑运算的条件和结论之间的某种逻辑推理关系，其具体含义将在第 2 章中详细介绍。

★ 综上所述

逻辑表达式 $y = 1 \cdot x + 0$ 表示了一个三条件、一结论的逻辑命题,三个条件中,一个成立(1),一个不成立(0),一个可变(x),这样三个条件通过“与”和“或”运算,决定了结论(y)是否成立。

当然,以后将谈到的逻辑运算要比这里的例子复杂很多。最后,请读者思考,逻辑运算中,能说“ $1 > 0$ ”吗?

1.2.2 真值表

上文谈到:

- ① 逻辑函数用于表示一个逻辑命题,表达条件与结论之间的因果关系。
- ② 用1和0表示已经确定成立与否的条件(逻辑常量)。
- ③ 用变量 x, y, z 等表示不确定是否成立的条件和结论(逻辑变量)。
- ④ 通过上述逻辑赋值,可以将一个现实的逻辑命题数学化,形成逻辑函数,以方便对其进行相应的推理和计算。

⑤ 逻辑表达式 $y = f(A, B, C)$ 表示了一个三条件、一结论的逻辑命题,即一个3输入、1输出的逻辑函数,用相应的电路器件(第2章中介绍)实现后,可得到对应的具体电路。

现在介绍数字电路中一个非常重要的研究工具:逻辑真值表。

逻辑真值表,简称真值表,是一种用来描述逻辑函数的全部真伪关系的表格。将一个现实的逻辑命题进行逻辑抽象和逻辑赋值,形成该命题的数学表达的时候,往往首先就会用到真值表。

一个3输入、1输出的逻辑函数对应的真值表的结构见表1.2.1。

真值表分为两列,左列为输入变量 A, B, C (条件)的取值,右边为输出变量 F (结论)的取值。

既然是3输入逻辑函数,输入条件成立与否的所有组合只有 $2^3 = 8$ 种,根据已约定的赋值规定——“1表示真(成立)、0表示假(不成立)”,可对这8种输入条件组合进行状态赋值。例如,表1.2.1中,第一行的输入部分($A = 0, B = 0, C = 0$),是指“当三条件 A, B, C 均不成立时”,以下类同。

表 1.2.1 $F = f(A, B, C)$ 的真值表

A	B	C	F
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

以此类推, n 输入逻辑函数,输入条件的取值组合有 2^n 种。

为了不漏写,输入变量的取值组合按照二进制数大小顺序排列,从“000”到“111”(即从全0到全1),递增列出。

由此得到表1.2.1所示的3输入逻辑函数的真值表的结构。

再根据输入条件和输出结论之间的决定关系,在真值表的右列中,写出每一种输入条件情况下的输出结论的取值。当然,仍然要遵照与输入相同的赋值规定——“1表示真(成立)、0表示假(不成立)”。最终得到的完整真值表,表示了该逻辑函数表达的逻辑命题的具体逻辑功能。

现在,以一个现实的逻辑命题为例,完整介绍真值表的列写过程。

【例 1.2.1】 设计一个汽车发动机报警系统,列写真值表。系统要求:在油箱缺油、水箱缺

水或发动机温度过高时,系统报警灯点亮。

【解析】

(1) 根据设计要求,可以确定该逻辑函数的输入变量(条件)、输出变量(结论)的个数,并规定各个变量的标号,同时,遵循1表示真(成立)、0表示假(不成立)的逻辑规定,按照“从全0到全1”的规则,列写输入部分取值,从而形成真值表的结构。

(2) 根据输入与输出之间的因果决定关系(逻辑功能),在每种输入条件组合下,填入对应的输出结果。

由此可知,列写真值表是分两步进行的,即“先结构、后内容”。同时,必须始终保持逻辑代数中的基本规定:用1表示“真”,用0表示“假”。

解:(1) 选取状态变量并赋值

根据设计要求可知,要求实现的是3输入、1输出的逻辑函数,设输入变量为 A 、 B 、 C ,输出变量为 F 。其中,

“油箱缺油”为变量 A :成立为1,反之0;

“水箱缺水”为变量 C :成立为1,反之0;

“发动机温度过高”为变量 B :成立为1,反之0;

“报警灯亮”为输出变量 F :成立为1,反之0。

(2) 列写真值表

根据实际要求可知, A 、 B 、 C 中有任何一个成立(输入条件组合中只要有1存在),则结论 F 就成立($F=1$),由此列写出“发动机报警”的真值表见表1.2.2。

表 1.2.2 例 1.2.1 的真值表

A	B	C	F
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1



助教时间

真值表的理解

真值表是“数字电路”课程中学习的第一种重要工具。

真值表描述了输入与输出变量之间的逻辑因果关系,用1表示条件和结论成立,用0表示条件和结论不成立,从而将逻辑命题数学化,最终得到该逻辑命题的输入条件和输出结论之间的全部真伪关系。

可以说,真值表就是一种数学化的逻辑命题,是逻辑命题的现实描述和数学表达之间的第一个桥梁,重要性不言而喻。

真值表的原理和列写规则可总结为以下三句话:

- ① 真值表是描述逻辑函数功能的最底层工具。
- ② 真值表是先结构而后内容的,列写时,输入部分从全0到全1,递增顺序全排列,以防漏状态。
- ③ 真值表是想出来的,不是算出来的。