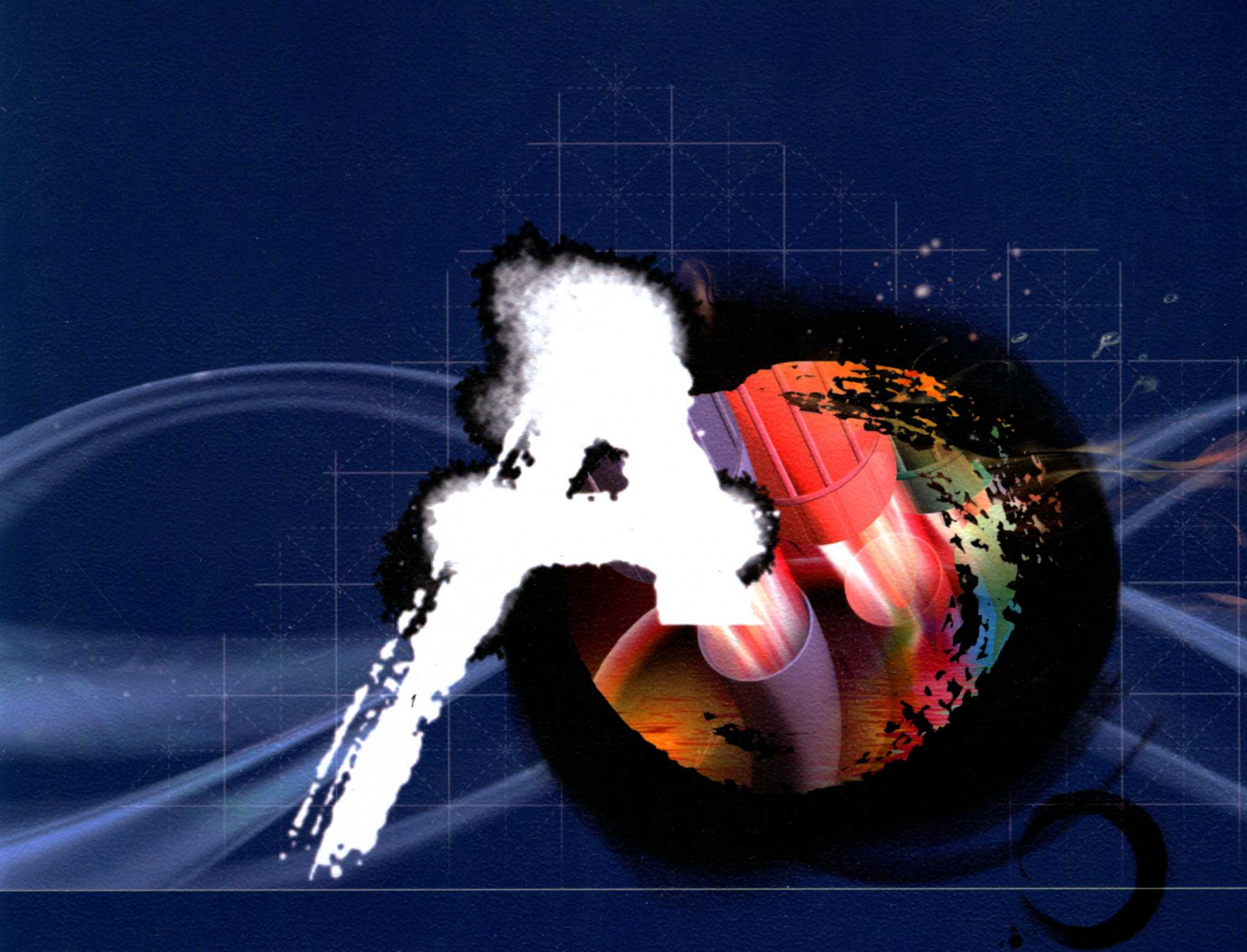




高等学校规划教材

数字逻辑与数字系统

◎朱正东 伍卫国 主编
◎张超 符均 陈国岗 编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高等学校规划教材

数字逻辑与数字系统

朱正东 伍卫国 主 编
张 超 符 均 陈国岗 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书共5章:第1章是数字逻辑基础部分,具体包括数字技术的相关概念、数制与编码、逻辑代数基础及逻辑门电路等内容;第2章是组合逻辑电路部分,讲述了逻辑电路的描述方法、组合逻辑电路的分析与设计方法和常用的 MSI 组合逻辑器件的原理及其应用;第3章是时序逻辑电路部分,讲述了时序逻辑电路中基本的双稳态元件、时序逻辑电路的分析与设计方法和常用的 MSI 时序逻辑器件的原理及其应用;第4章是可编程逻辑器件部分,讲述了可编程逻辑的基本概念、简单可编程逻辑、复杂可编程逻辑和硬件描述语言 VHDL 的基础知识内容;最后一章讲述了数字系统的描述工具、小型控制器的设计、简易计算机的设计、A/D 和 D/A 转换及 PCM 编码的原理。另外,本书为了进一步体现其实践性,在附录部分给出了数字逻辑课程实验指导,门电路、器件及其型号和引脚图等内容。本书配套教学资源有 PPT、习题解答等,课程网站见西安交通大学课程中心。

本书可作为电子信息类(计算机、自动控制、信息工程、电子工程、微电子和软件工程等)相关专业在校本科生的教材及参考书,各专业可以根据各自特点及其计划学时选择教材中的内容讲授,具体可参照本书“教学课时安排建议表”。本书也可供自学考试、成人教育和电子工程技术人员自学使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书这部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑与数字系统/朱正东,伍卫国主编;张超等编. —北京:电子工业出版社,2015.8

高等学校规划教材

ISBN 978-7-121-26908-0

I. ①数… II. ①朱… ②伍… ③张… III. ①数字逻辑—高等学校—教材 ②数字系统—高等学校—教材 IV.①TP302.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 185872 号

策划编辑:任欢欢

责任编辑:任欢欢

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:18 字数:460.8千字

版 次:2015 年 8 月第 1 版

印 次:2015 年 8 月第 1 次印刷

定 价:38.50元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

序

数字系统的典型代表——计算机已有近 70 年的发展历史。在人类文明长河中，70 年不过是转眼一瞬间，但是计算机的出现给人类社会带来了最令人瞩目的变化。人类的生活、工作都因为计算机的存在发生了翻天覆地的变化，传统领域因计算机的引入而焕发生机，新的领域因计算机的存在而不断出现，计算机已经渗透到人类社会的各个角落。

计算机的基础是数字逻辑。计算机是根据布尔代数、二进制、数字逻辑电路所构造的复杂的数字系统。但不管今天的计算机有多复杂，它仍然是由最基本的数字逻辑电路一点点构成的。要理解、设计、制造计算机，必须要对数字逻辑和数字系统有深刻认识，正因为此，美国计算机权威学术机构 ACM 和 IEEE-CS、中国教育部历届计算机学科教学指导委员会都把“数字逻辑与数字系统”列为计算机专业乃至电子与信息类专业的最重要的专业基础课程之一。

随着大规模集成电路和计算机系统设计技术的发展，数字逻辑及数字系统设计在组合逻辑与时序逻辑设计的基础上，又增加了许多新的内容和方法，硬件系统设计除了采用逻辑门等小规模集成电路器件以外，更多地使用了中大规模甚至超大规模集成电路器件。另外，通过引入电子设计自动化技术，设计者可以利用硬件描述语言完成从逻辑级到系统级的描述、设计和验证，使得设计正确性和设计效率更高，设计成本更低，所设计的系统性能更好，更为可靠。这些新内容必须补充到数字逻辑与数字系统课程中，使学生了解和掌握最新的数字系统设计手段。

本书的主编朱正东博士和伍卫国博士曾是我多年的同事，在西安交通大学计算机系教学第一线辛勤耕耘。另外几位参编者张超博士、符均博士和陈国岗老师分别是信息与通信、自动控制和电子技术领域的年轻学者和资深教师。他们长期从事数字逻辑课程的教学工作，不仅教学经验丰富，而且还在计算机、电子、自动控制、通信等领域从事相关的研究工作，成果颇丰。他们集多年教学和科研经验重新编写了本书，旨在为电子与信息类专业的学生提供一本内容更全面、结构更合理、更容易学习和掌握的教材。该书保持了原西安交通大学编著和使用的《数字逻辑》教材的基本内容与特点，结合数字设计技术的最新发展，更新了可编程逻辑技术等内容，增加了目前在数字系统设计中占主导地位的硬件描述语言 VHDL，其目的是便于读者掌握新技术，以新的手段从事数字系统的设计。

本书具备下列特点：

(1) 系统性强：本书组织结构合理、思路清晰。以“基础→原理→器件→系统”为主线，帮助学生建立数字系统的概念。

(2) 论述简洁：每章每节尽量不超过五部分内容，这样便于读者记忆和理解。

(3) 时代性强：介绍新技术和新方法，反映学科前沿方向，适应数字技术快速发展的需要。

(4) 实践性好：增加了实验和应用所需的内容，以期在教学过程中，将理论教学更紧密地与实践教学相结合，促进学生的思维启发和能力培养。

我相信，在教学实践中采用本书，将会有效改善该课程的教学效果，提升学生学习的兴趣。我也热切希望通过教学实践，得到对本书的改进反馈意见，大家共同努力，使本书成为一本优秀的教材。

北京航空航天大学教授

符均

前 言

本书是西安交通大学电子信息类专业本科生规划建设教材，教材内容适合于电子和电气的所有相关专业，以及需要数字系统来实现自动控制的其他专业。各专业可以根据各自特点及其计划课时选择教材中的内容讲授，具体可参照书中“教学课时安排建议表”。

该教材的编著得到了国家 985 三期建设项目的支持，也是 2014 年西安交通大学教学改革教材建设项目之一。

西安交通大学自 1977 年恢复本科招生以来，电子信息类专业已使用了两个版本的《数字逻辑》教材。第 1 版是由知名学者蒋大宗教授等于 1979 年 6 月编著的。该教材系高等学校工科电子类统编教材之一，是按 1978 年 4 月在上海召开的该专业教材编审会所讨论通过的大纲来编写的。该教材在西安交通大学等高校广泛使用。第 2 版是由西安交通大学鲍家元教授等于 1997 年 7 月编著的，该教材是由国家教育委员会高等学校理科计算机科学教学指导委员会计算机及应用教材建设组评选推荐出版，是按照 1992 年召开的全国数字逻辑教材详细大纲审定会制定的《数字逻辑教材详细大纲》，并参考了《ACM/IEEE-CS 91 教程》中“数字逻辑”与“数字系统”知识单元所提出的专题及主要概念编写而成。该教材自出版以来经过三次修订一直使用至今，受到了广大老师与学生的好评。

编者自 2001 年开始使用第 2 版教材讲授该课程以来，一直被该教材的内容丰富、论述的深度所吸引。同时，也一直被该教材没有现场可编程、在系统可编程以及硬件描述语言等新内容而感到焦虑。尤其是近年来，各学校为了减轻学生负担，压缩了课时，该教材中的许多内容也已名存实亡。尤其是在集成电路与可编程技术高速发展、数字系统日新月异的今天，教材应该不断吸取国内外的先进理论和思想，结合长期教学实践中的研究成果充实教材内容。今天，终于在教师和学生的千呼万唤中，编者凭着多年的教学实践经验，在广泛研究国内外先进成果的基础上重新编写了本教材。

本书继承了西安交通大学《数字逻辑（第 2 版）》的优点，精简了它的内容，引用了它的许多经典例子，增加了对数字系统的相关概念、晶体管开关的特性、逻辑门电路、555 定时器及其构成的施密特单稳态和双稳态触发器的介绍，补充了现场可编程、在线可编程以及硬件描述语言 VHDL 等内容，在最后数字系统一章还增加了数字系统的描述工具、小型控制器的设计、简易数字计算机系统的设计、A/D 和 D/A 转换以及 PCM 编码原理等内容。为了增强教材的实用性，真正体现实践教学的重要地位，本书将数字逻辑电路实验指导，门电路、MSI 逻辑器件的型号和引脚图等内容作为附录来提供。本书配套教学资源有 PPT、习题解答等，可登录 <http://www.hxedu.com.cn> 注册及下载。课程网站见西安交通大学课程中心（首页>任课教师>电子与信息工程学院>朱正东）。可以说，新编教材增强了教材的先进性和实用性。读者通过本教材的学习将掌握数字技术的一些基本概念和基本原理，熟悉从简单开关电路到复杂计算机的所有数字系统。通过本课程的学习，将会深入了解数字系统是如何工作的，并能够把所学到的知识应用于数字系统的分析、设计以及故障检查

及排除之中。

本书共 5 章，由朱正东、伍卫国教授主编和统稿，张超副教授、陈国岗老师、符均老师参加了编写、修改与审阅工作。王萍副教授、李昕副教授和田琛博士均提出了很多需要增加的内容和修改意见，本书也一一给予采纳。在此，编者表示衷心感谢！

本教材的建设还得到了校教务处处长徐忠锋教授、段琛博士，电子与信息工程学院副院长罗新民教授、桂小林教授，教务主任王枫老师，计算机系主任赵仲孟教授、张兴军教授，计算机系数字逻辑资深工程师马晓农老师，新型机所所长董小社教授，档案馆胡亚南副研究员等的大力支持和帮助。编者在此对他们表示衷心的感谢！

另外，要特别感谢的是知名学者白中英教授、缪相林教授、董渭清教授和毛文林教授，四位教授长期从事数字逻辑课程的教学，在教学过程中，他们给予了编者许多指导和帮助。

限于作者水平，书中难免存在错误及不妥，敬请各位读者及专家斧正！

编 者

2014 年 11 月

于西安交通大学

教学课时安排建议表



周次	环节	内 容	48 课时	56 课时	64 课时
1	讲授	前言	1	1	1
		第 1 章 数字逻辑基础			
	讲授	第 1 节 (数字技术相关概念, 数制及相互转换)	1	1	1
		第 2 节 (数字表示法及其运算, 可靠性编码)	2	2	2
2	讲授	第 3 节 (逻辑代数的基本概念、运算、定理及规则)	2	2	2
		第 3 节 (逻辑函数的表示方法、逻辑表达式形式)	2	2	2
3	讲授	第 3 节 (逻辑函数代数法化简)	2	2	2
		第 3 节 (逻辑函数卡诺图法化简的一般方法)	2	2	2
4	讲授	第 3 节 (含无关项函数化简、禁止逻辑法)	2	2	2
		第 4 节 (数字逻辑门电路)			2
		第 2 章 组合逻辑电路			
5	讲授	第 1 节 (组合电路文档)	2	2	2
		第 2 节 (组合电路分析)	2	2	2
6	讲授	第 2 节 (设计及其举例)	2	2	2
		第 3 节 (组合电路险象)	2	2	2
7	讲授	第 4 节 (译码器和编码器)	2	2	2
		第 4 节 (三态门和奇偶校验器、分配器和选择器)	2	2	2
8	讲授	第 4 节 (加法器、比较器)	2	2	2
		第 4 节 (MSI 组合电路及其应用举例)	2	2	2
		第 3 章 时序逻辑电路			
9	讲授	第 1 节 (时序电路概述、双稳态元件)	2	2	2
		第 2 节 (同步时序电路分析方法)	2	2	2
10	讲授	第 2 节 (同步时序电路设计第一、二步)	2	2	2
		第 2 节 (同步时序电路设计第三、四步)	2	2	2
11	讲授	第 2 节 (同步电路设计举例)	2	2	2
		第 3 节 (脉冲异步时序电路)	2	2	2
12	讲授	第 4 节 (计数器、寄存器及其应用)	2	2	2
		第 4 节 (脉冲发生器)		2	2
		第 4 章 可编程逻辑器件			
13	讲授	第 1 节 (可编程逻辑概述)	2	2	2
		第 2 节 (简单可编程逻辑)	2	2	2
14	讲授	第 3 节 (复杂可编程逻辑 FPGA 与 ISP)			2
		第 4 节 (可编程逻辑的设计方法)		2	2
		第 5 章 数字系统			
15	讲授	第 1 节 (数字系统基础)		2	2
		第 2 节 (小型控制器的设计)			2
16	讲授	第 3 节 (数字系统设计实例)		2	2
		第 4 节 (A/D 转换和 D/A 转换)			2

目 录

第 1 章 数字逻辑基础	1
1.1 数字技术的相关概念	1
1.1.1 物理量的表示	1
1.1.2 数字系统与数字技术	2
1.2 数制与编码	4
1.2.1 数制及其相互转换	4
1.2.2 数的表示及其运算	9
1.2.3 十进制数的代码表示及其运算	13
1.2.4 可靠性编码	15
1.3 逻辑代数基础	17
1.3.1 逻辑代数常用概念及逻辑运算	18
1.3.2 逻辑代数的定律、定理及规则	20
1.3.3 逻辑函数的表示	22
1.3.4 逻辑函数的化简	27
1.4 逻辑门电路	33
1.4.1 早期逻辑门	33
1.4.2 晶体管-晶体管逻辑 (TTL)	35
1.4.3 MOS 晶体管逻辑	36
1.4.4 集成电路	38
习题 1	40
第 2 章 组合逻辑电路	43
2.1 逻辑电路的描述	43
2.1.1 框图	43
2.1.2 电路图	45
2.1.3 时序图	52
2.2 组合逻辑电路分析与设计	54
2.2.1 组合逻辑电路分析	54
2.2.2 组合逻辑电路设计	57
2.3 组合电路中的竞争与险象	59
2.3.1 竞争	60
2.3.2 险象	61
2.3.3 险象的判别	63
2.3.4 险象的消除	64
2.4 常用 MSI 组合逻辑器件	65

2.4.1	译码器与编码器	65
2.4.2	数据分配器与多路选择器	70
2.4.3	三态缓冲器	79
2.4.4	比较器与加法器	81
习题 2		88
第 3 章 时序逻辑电路		90
3.1	时序逻辑电路基础	90
3.1.1	时序电路概述	90
3.1.2	时序电路的双稳态元件	93
3.2	同步时序电路的分析与设计	99
3.2.1	同步时序电路的分析	99
3.2.2	同步时序电路的设计	102
3.2.3	同步时序电路设计举例	114
3.3	脉冲异步时序电路的分析与设计	117
3.3.1	脉冲异步时序电路概述	117
3.3.2	脉冲异步时序电路的分析	118
3.3.3	脉冲异步时序电路的设计	119
3.4	常用时序逻辑器件	122
3.4.1	计数器	122
3.4.2	寄存器	130
3.4.3	脉冲发生器	135
习题 3		143
第 4 章 可编程逻辑器件		148
4.1	可编程逻辑概述	148
4.1.1	PLD 的基本结构	148
4.1.2	PLD 的编程工艺和表示方法	149
4.1.3	PLD 的设计过程	149
4.2	简单可编程逻辑器件 (SPLD)	151
4.2.1	可编程只读存储器 (PROM)	151
4.2.2	可编程逻辑阵列 (PLA)	154
4.2.3	可编程阵列逻辑 (PAL)	155
4.2.4	通用阵列逻辑 (GAL)	162
4.3	复杂可编程逻辑 (CPLD)	166
4.3.1	在系统可编程 ISP 器件	167
4.3.2	现场可编程逻辑器件 (FPGA)	174
4.4	硬件描述语言 (VHDL)	178
4.4.1	VHDL 基础	178
4.4.2	常用语句	181
4.4.3	设计实体	186

4.4.4 层次结构设计	190
习题 4	192
第 5 章 数字系统	194
5.1 数字系统概述	194
5.1.1 数字系统的基本模型	194
5.1.2 数字系统设计方法	197
5.1.3 数字系统设计描述工具	198
5.2 小型控制器的设计	207
5.2.1 计数器型控制器	207
5.2.2 选择器型控制器	209
5.2.3 时序型控制器	210
5.2.4 小型控制器设计举例	211
5.3 简易数字计算机系统	215
5.3.1 框图设计	216
5.3.2 控制器设计	217
5.3.3 逻辑部件的设计	225
5.4 A/D 转换和 D/A 转换	227
5.4.1 模数 A/D 转换	227
5.4.2 数模 D/A 转换	234
5.4.3 PCM 编码	236
习题 5	237
附录 A 数字逻辑电路实验	240
A1.1 基础知识	240
A1.1.1 实验的基本过程	240
A1.1.2 实验操作规范和常见故障检查方法	241
A1.1.3 数字集成电路特点及使用须知	243
A1.1.4 数字逻辑电路的测试方法	244
A1.2 数字逻辑电路基本实验	245
A1.2.1 软件工具的使用	245
A1.2.2 器件测试实验	246
A1.2.3 分析和设计实验	251
A1.3 综合设计实验	257
A1.3.1 设计实验一 数字时钟设计	257
A1.3.2 设计实验二 电子密码锁设计	260
A1.3.3 设计实验三 出租车计价器设计	264
A1.3.4 可参考选择题目	266
附录 B 门电路、器件及其型号和引脚图	267
参考文献	276

第1章 数字逻辑基础



学习要求:

- 熟悉模拟量与数字量及其表示法, 了解数字技术的优点和缺点
- 熟练掌握数制及其相互的转换, 掌握数字系统中数与编码的表示和运算
- 熟练掌握逻辑代数的相关概念、基本运算、基本公理、基本定理及基本规则
- 熟练掌握逻辑函数的基本表达式、标准形式和化简方法
- 熟悉数字逻辑门电路、晶体管开关特性与集成电路类型及其使用特性

1.1 数字技术的相关概念

在人们的日常生活中,“数字”这一术语的使用已相当普遍,数字技术已得到了广泛的应用。本课程将学习数字技术的基本概念、基本原理和基本方法,熟悉从简单开关电路到复杂计算机的所有数字系统。通过本课程的学习,读者将会深入了解数字系统是如何工作的,并能够把所学到的知识应用于数字系统的分析、设计以及故障检查及排除之中。本章首先介绍一些数字技术的基本概念,然后介绍数制与编码、逻辑代数基础,最后介绍数字逻辑门电路、晶体管的开关特性与集成电路类型及其使用特性。

1.1.1 物理量的表示

在人类的活动中,常常将物理学中度量物体属性或描述物体运动状态及其变化过程的量,如电压、湿度、水位等称为物理量。在各行、各业大多数场合,也经常会涉及数量的概念,数量也称为数值,即数的大小。在大多数物理系统中,物理量以数量的形式被观察、记录、变换与运算,或以其他形式被利用。在处理不同的物理量时,有效且准确地表示其数量十分重要。表示其数量有两种方法,即模拟表示法和数字表示法。

1. 模拟表示法

模拟表示法是用电压、电流或与所反映的数量成比例的表头的移动来表示数量的。例如老式电压表,其指针的偏转与电压成正比,指针偏转角度反映了电压的大小,当电压增加或减小时,电压表的指针随之偏转。电压可以取 $0\sim 400\text{V}$ 之间的任意值,例如, 220V 。也就是说,电压表指针的偏转度代表了电压的值。**由此可见,模拟量所具有的重要特征是:其数值可在一定的范围内连续变化。**

2. 数字表示法

在数字表示法中,数量是用数字符号而不是用可连续变化的指示仪表来表示的。例如数字式钟表,它用代表小时、分,还有秒的十进制数来反映一天的时间。一天的时间变化是连续的,但数字钟表的读数是不连续的,而是每次以一分或一秒的步长变化的。所以,与连续变化的模拟式壁挂钟的表盘读数所反映的时间相比较,数字表示法是用离散步长的

方法表示其一天时间的变化的。由此可见，数字量所具有的重要特征是：其数值在一定的范围内是离散变化的。

3. 模拟量与数字量的主要区别

模拟量 $\Leftrightarrow$ 连续；数字量 $\Leftrightarrow$ 离散（步进）

由于模拟表示具有连续性，因此当阅读模拟量时，数值常有解释的余地；相反，由于数字表示具有离散性，因此当阅读数字量的数值时，不存在模棱两可的情况。实际上，当对模拟量进行测量时，通常会截断到一个适当的精度，即把量值数字化，也就是说，数字表示法是将一个可连续变化的量赋值等于一个有限精度数字的结果。

例如，当用温度计测量体温时，水银柱的液面常常界于两条刻度线之间，而测量者总是基于与液面最近的一条刻度线给出一个数值，比如说 36.5°C 。

1.1.2 数字系统与数字技术

数字系统是用来处理逻辑信息或以数字形式表示的物理量的器件组合，其数值仅能取离散值。这些器件可以是机械的、磁性的或气动的，但目前大多数是电子器件。最常见的数字系统包括计算机、手机、数字音像设备及通信网络系统等。

数字逻辑电路是数字系统的硬件部分。数字逻辑电路的特性是接收输入信号且产生与输入信号有确定关系的正确且稳定的输出信号。在数字系统中用到的许多技术被称为数字技术。

模拟系统所包含的装置能处理以模拟形式表示的物理量。例如，收音机中送到扬声器的输出信号的幅值可以取小于最大值之间的任意值。常见的模拟系统有老式带指针的万用电表、磁带式录放机、照明台灯的调光开关等。

1. 数字技术的优点

在各项技术中，曾是用模拟方法实现的功能，如今越来越多地用数字技术替代。数字技术成功应用的主要原因是：

(1) 信息存储方便。信息存储由特定器件构成的电路实现，该电路能在相对较小的物理空间上存储大量信息并可以长期保存。但模拟存储能力却相当有限。

(2) 操作可编程。很容易设计一个由存储器指令程序控制其操作的数字系统。模拟系统也可被编程，但其操作的复杂性和可变性受到很大限制。

(3) 抗干扰能力强。在数字系统中，电压的准确值并不重要，只要噪声信号不至于影响区分高低电平，则电压噪声的影响就可忽略不计。

(4) 集成度更高。模拟电路受益于快速发展的 IC 工艺，但是模拟电路相对复杂，模拟系统无法达到与数字电路同样的集成度。相反，数字系统比较容易设计，因为数字系统所使用的电路是开关电路，开关电路中电压或电流的精度并不重要，重要的是其所处的范围。

(5) 系统准确度及精度容易保持一致。数字化的信号在处理过程中不会降低精度。在模拟系统中，电压和电流信号会由于电路中元器件参数的改变或温度、湿度的影响产生失真。

2. 数字技术的缺点

数字技术缺点比较少，最大的问题是：现实世界中感知的主要是模拟量，而人们习惯于使用数字量。处理数字化信号增加了系统的复杂性、费用和处理时间。

自然界中大多数物理量是模拟量，系统中被监测、处理和控制的输入、输出信号经常是

模拟量,如速度、电压和电流等。但是,大家习惯于用数字表示这些量。比如说,实际体温是 36.9°C ,但是,读体温表时通常会说体温是 37°C 。所以,人们常常是使用一个数字量来近似模拟量。

为了更好地理解模拟量处理的复杂过程,举例如下。

一个典型的温度控制系统的框图如图 1.1 所示,所检测的是模拟温度,然后通过模/数转换器(ADC)把测量值转换为数字量,由数字电路处理数字量。数字量输出通过数/模转换器(DAC)变换为模拟量,再将模拟量输出到控制器,以便采取某种措施调节温度。所以,当处理模拟量输入、输出时,为了利用数字技术的优点,必须采取下述三个步骤:

- ①把模拟输入转换为数字形式;
- ②进行数字信号处理;
- ③将数字输出变换为模拟输出。

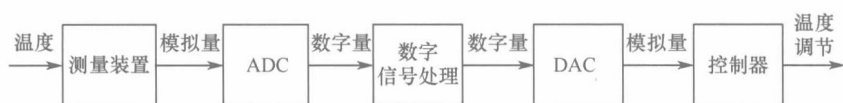


图 1.1 温度控制系统框图

因此,对于数字系统来说,由于信息必须在模拟形式与数字形式之间进行转换,从而增加了系统的复杂性和费用。并且,处理数字信号需要时间。事实上,所需要的数据越精确,处理过程花费的时间越长。但是,在大多数应用中,这些不足已被数字技术的优点所抵消。因此,模/数转换在当今技术领域已相当普遍。然而,在有些情况下,采用模拟技术则比较简单和经济。

在一个系统中经常会同时采用模拟技术与数字技术。为了充分利用各自的优点,在这种混合系统中,设计工作中最重要的是确定系统中哪一部分采用模拟形式,哪一部分采用数字形式。从大多数系统的发展趋势来看,随着信号在系统中的流动,应该在输入通道中尽可能早地使信号数字化,在输出通道中尽可能晚地把数字信号变换成模拟信号,这不失为一种好的方法。

3. 世界将不断实现数字化

在日常生活中,人们每天的生活用品已逐渐从模拟形式变换为数字形式。在过去的几十年里,数字技术的发展速度十分惊人,并且有理由相信,未来的发展速度会更快。

计算机、多功能手机、数码相机和数字摄像机等,这些仅是数字化革命所带来的一小部分应用。数字领域将继续强劲增长,汽车可以配备个人电脑或使用云服务,电脑可以把你的仪表盘变为无线通信设备、导航仪等,你可以使用声音命令管理车辆、收发电子邮件、查询交通状况信息。在此时,你的手不用离开方向盘,或者你的视线也不用离开路面。

在不久的将来,借助移动技术、低轨卫星技术,可以通过耳机、手表与他人进行通信,也可以使用云系统将你刚刚观看 2 小时的电视节目内容在几秒钟内即刻传送并存储在你家里的存储器中,以便随时回放。你在网上可以实时观察到 1 万千米以外的地方,仍具有身临其境的感觉。这些所列举的内容也仅仅是沧海一粟。

总之,数字技术将持续高速进入人类的生活,开创一个前所未有的新天地。如今用以实现这些复杂数字系统的技术和工具已准备就绪。现在大家所能做的是:坚持不懈,努力学习,乐在其中。本书将介绍数字技术的有关概念和方法,以帮助读者逐步建立对数字技术的兴趣并能够很好地掌握它。

1.2 数制与编码

数制也称为计数制,是指用一组固定的符号和统一的规则来表示数值的方法。编码是指用代码来表示各组数据资料,使其成为可利用数字系统进行处理和分析的信息。代码是用来表示事物的记号,它可以用数字、字母、特殊的符号或它们之间的组合来表示。编码与代码之间有时也并不严格区分。

1.2.1 数制及其相互转换

数制是一种表示数值的方法,数制转换就是将一种数值表示的方法转换为另一种数值表示的方法。

1. 进位计数制

按进位的方法进行计数,称为进位计数制。在各种进位计数制中,“十进制数”是人们最常用、最熟悉的,所以也常作为其他数制的参考数制。

十进制数中固定的符号为:0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9和符号位符号“+”或“-”,以及小数点符号“.”,计数规则为“逢十进一”。其中十进制数的“十”是进位计数制的基数。

例如,人们常将十进制数 678.63 表示为: $678.63 = 6 \times 10^2 + 7 \times 10^1 + 8 \times 10^0 + 6 \times 10^{-1} + 3 \times 10^{-2}$

上式中左边的形式是将若干符号并列在一起的方法,称为并列表示法,通常也称为十进制的位置计数法;右边的形式叫按权展开式,通常称为十进制数的多项式表示法。678.63 共有 5 位数字,第一位百位“6”代表 600,第二位为十位“7”代表 70,第三位为个位“8”代表 8,小数点右边的第一位为十分位“6”代表十分之六,小数点右边第二位为百分位“3”代表一百分之三。可见,数字符号在不同的位置代表着不同的数值,称之为不同的“权”。

任何一个十进制数,都可以用位置计数法表示为: $(A_{n-1}A_{n-2} \cdots A_1A_0.A_{-1}A_{-2} \cdots A_{-m})_{10}$ 其中, n 表示整数位数, m 表示小数位数, A_i 是十进制中十个数字中的任何一个,即

$$0 \leq A_i \leq 9,$$

括号外的下角标为进位计数制的基数,即“10”是基数标志,代表十进制数,在本书中十进制数的下角标可以省略。同样,任何一个十进制数也可用多项式表示法写为:

$$A_{n-1}(10)^{n-1} + A_{n-2}(10)^{n-2} + \cdots + A_1(10)^1 + A_0(10)^0 + A_{-1}(10)^{-1} + A_{-2}(10)^{-2} + \cdots + A_{-m}(10)^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} A_i \cdot 10^i$$

对其他进位计数制来说,也具有上述特点。如基数为 R , R 是一个十进制数,即以十进制数为参考数制的进位计数制,也一定有 R 个有序的数字符号:0, 1, 2, ..., $R-1$ 和符号位符号“+”或“-”以及小数点符号“.”,计数规则为“逢 R 进一”。

对 R 进制中的数,可用位置计数法表示为: $(B_{n-1}B_{n-2} \cdots B_1B_0.B_{-1}B_{-2} \cdots B_{-m})_R$ 也可用多项式表示法写为:

$$(B_{n-1}10^{n-1} + B_{n-2}10^{n-2} + \cdots + B_110^1 + B_010^0 + B_{-1}10^{-1} + B_{-2}10^{-2} + \cdots + B_{-m}10^{-m})_R$$

其中, n 表示整数位数, m 表示小数位数,“10”是 R 进制中的 1 和 0, B_i 是 R 进制中的数字符号之一,即

$$0 \leq B_i \leq R-1$$

R 是计数制的基数，用十进制数表示。如 $R=8$ ，代表八进制数， $R=10$ ，代表十进制数。

几种进位计数制整数数列中的一部分见表 1.1。由表可知几种进位计数制数的对应等值关系。例如， $15 = (15)_{10} = (1111)_2 = (120)_3 = (33)_4 = (17)_8 = (F)_{16}$ ，即在不同的进位制中，同一个数之间表示的形式不同，但值是相同的，即等值的。

表 1.1 数制表（整数）

$R=10$	$R=2$	$R=3$	$R=4$	$R=8$	$R=16$
0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1
2	10	2	2	2	2
3	11	10	3	3	3
4	100	11	10	4	4
5	101	12	11	5	5
6	110	20	12	6	6
7	111	21	13	7	7
8	1 000	22	20	10	8
9	1 001	100	21	11	9
10	1 010	101	22	12	A
11	1 011	102	23	13	B
12	1 100	110	30	14	C
13	1 101	111	31	15	D
14	1 110	112	32	16	E
15	1 111	120	33	17	F
16	10 000	121	100	20	10
17	10 001	122	101	21	11
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

二进制数的权是 2 的幂，因此必须像熟悉 10 的幂那样熟悉 2 的幂。部分常用的二进制数的权见表 1.2。

表 1.2 二进制($R=2$)各位的权(R^i)

i	R^i	i	R^i	i	R^i
-7	0.007 812 5	0	1	7	128
-6	0.015 625	1	2	8	256
-5	0.031 25	2	4	9	512
-4	0.062 5	3	8	10	1024
-3	0.125	4	16	11	2048
-2	0.25	5	32	12	4096
-1	0.5	6	64	13	8192

当基数 $R=2$ 时，表示二进制数。由于二进制数中仅有两个数字符号 0 和 1，所以很容易用具有开关特性的电子元件来表示，因而被作为数字系统运算的基础。在二进制中，相应的运算规则有：

加法	乘法
$0+0=0$	$0\times 0=0$
$0+1=1+0=1$	$0\times 1=1\times 0=0$
$1+1=10$	$1\times 1=1$

这种运算的简便性带来了完成运算的电路及其控制方法的简单化。

2. 进位计数制的相互转换

进位计数制的相互转换就是将一个数从一种进位计数制的表示法转换成另外一种进位计数制的表示法, 记为 $N_\alpha \rightarrow N_\beta$, 其中 N 、 α 和 β 均为十进制数, 该式表示 N 在 α 进制中的表示转换为 N 在 β 进制中的表示。当然, 这种转换一定是等值的, 即 $N=N_\alpha=N_\beta$ 。进位计数制之间均可采用数学计算的方法来转换。通常用于数制转换的方法有两种: 一种是多项式替代法, 另一种是基数乘法, 这两种方法适用范围不同。

1) 多项式替代法

基于计数制的计数本质, 将基数为 α 进制的数转换成基数为 β 进制的数, 转换一定是等值的, 而且对于各项的运算并不会影响数值的大小。

可以将该过程描述如下: $N_\alpha \rightarrow N_\beta$ 。对于 α 进制中的 N , 可表示为:

$$N_\alpha = (A_{n-1} \cdots A_1 A_0 . A_{-1} A_{-2} \cdots A_{-m})_\alpha$$

$$= (A_{n-1} 10^{n-1} + \cdots + A_1 10^1 + A_0 10^0 + A_{-1} 10^{-1} + A_{-2} 10^{-2} + \cdots + A_{-m} 10^{-m})_\alpha$$

将 α 进制下的 A_i 、 10 转换成 β 进制下的数, 假设 $(A_i)_\alpha = (B_i)_\beta$, $(10)_\alpha = (\gamma)_\beta$, 则 $(10)_\alpha = \alpha$, $\gamma = \alpha_\beta$

因此, $N_\beta = (B_{n-1} \gamma^{n-1} + \cdots + B_1 \gamma^1 + B_0 \gamma^0 + B_{-1} \gamma^{-1} + B_{-2} \gamma^{-2} + \cdots + B_{-m} \gamma^{-m})_\beta$

【例 1-1】 将 $(2CE9)_{16}$ 转换为十进制数。

解:

$$(2CE9)_{16} = (2 \times 10^3 + C \times 10^2 + E \times 10^1 + 9 \times 10^0)_{16}$$

$$= (2 \times 16^3 + 12 \times 16^2 + 14 \times 16^1 + 9 \times 16^0)_{10}$$

$$= (11497)_{10}$$

$$= 11497$$

在运算中, $\gamma=16$, 十六进制中的 10 就是十进制中的 16 。

其中的计算是按十进制计算规则进行的。

【例 1-2】 将 $(211.2)_3$ 转换为二进制数。

解:

$$(211.2)_3 = (2 \times 10^2 + 1 \times 10^1 + 1 \times 10^0 + 2 \times 10^{-1})_3$$

$$= (10 \times 11^2 + 1 \times 11^1 + 1 \times 11^0 + 10 \times 11^{-1})_2$$

$$= (10010 + 11 + 1 + 0.101010 \cdots)_2$$

$$= (10110.101010 \cdots)_2$$

在运算中, $\gamma=11$, 即三进制中的 10 就是二进制中的 11 。

其中的计算是按二进制计算规则进行的, 如:

$$10 \times 11^{-1} = 10 \div 11 = 0.101010 \cdots$$

是循环小数, 故 $(211.2)_3 = (10110.101010 \cdots)_2$

由此可见, 用多项式替代法实现 α 进制的数转换为 β 进制的数时, 计算是在 β 进制中进行的, 因此必须熟悉 β 进制的运算。也就是说, 把其他进制的数转换为十进制数时, 常采用多项式替代法。如要把十进制数转换为其他进制数时, 可以采用基数乘法。

2) 基数乘法

不同于多项式替代法, 用基数乘法将 α 进制的数转换成 β 进制的数时, 计算是在 α

进制中进行的。整数的转换和小数的转换方法不同，整数转换要用基数除法，而小数的转换要用基数乘法。如果一个数包括整数和小数两部分，就可以将它们分别转换，然后合并起来。

(1) 整数转换方法：基数除法

可以将整数转换过程描述如下： $N_{\alpha} \rightarrow N_{\beta}$ 。假设，对于 β 进制中的整数 N ，可表示为：

$$N_{\beta} = (B_{n-1} \cdots B_1 B_0)_{\beta} = (B_{n-1} 10^{n-1} + \cdots + B_1 10^1 + B_0 10^0)_{\beta}$$

将 β 进制下的 B_i 、10转换成 α 进制下的数，假设 $(A_i)_{\alpha} = (B_i)_{\beta}$ ， $(\gamma)_{\alpha} = (10)_{\beta}$ ，则 $\gamma = \beta_{\alpha}$

因此，如果 $N_{\alpha} = (A_{n-1} \gamma^{n-1} + \cdots + A_1 \gamma^1 + A_0 \gamma^0)_{\alpha} = ((\cdots (A_{n-1} \gamma + A_{n-2}) \gamma + \cdots) \gamma + A_1) \gamma + A_0$

将上式除以 γ ，就可得 $(\cdots (A_{n-1} \gamma + A_{n-2}) \gamma + \cdots) \gamma + A_1$ 和余数 A_0 ，如将所得的商再除以 γ ，又可得到余数 A_1 ，重复以上过程，直至求得最后一个余数 A_{n-1} 。然后将 α 进制中 $A_{n-1} \cdots A_1 A_0$ 转换为 β 进制中的 $B_{n-1} \cdots B_1 B_0$ ，这就是 N 在 β 进制中的表示。

【例 1-3】 将十进制的 3519 转换成十六进制数。

解：计算过程也可用下列算式表示：

$$\begin{array}{ll} 16 \overline{) 3519} & \text{余 15, 个位数 } A_0, \text{ 要转换为十六进制中的数是 } B_0, \text{ 即 F} \\ 16 \overline{) 219} & \text{余 11, 十位数 } A_1, \text{ 要转换为十六进制中的数是 } B_1, \text{ 即 B} \\ 16 \overline{) 13} & \text{余 13, 百位数 } A_2, \text{ 要转换为十六进制中的数是 } B_2, \text{ 即 D} \\ & 0 \end{array}$$

注意，这里 $\beta=16$ ，此时 $\gamma=16$ ，即十六进制中的 10 就是十进制中的 16。上述运算是在十进制中进行的，所以余数是十进制数，因此还要转换为十六进制中的数。

即 $(3519)_{10} = (\text{DBF})_{16}$ 。

(2) 小数转换方法：基数乘法

可以将小数转换过程描述如下： $N_{\alpha} \rightarrow N_{\beta}$ 。对于 β 进制中的小数 N ，可表示为：

$$N_{\beta} = (0.B_{-1} \cdots B_{1-m} B_{-m})_{\beta} = (B_{-1} 10^{-1} + \cdots + B_{1-m} 10^{1-m} + B_{-m} 10^{-m})_{\beta}$$

将 β 进制下的 B_i 、10转换成 α 进制下的数，假设 $(A_i)_{\alpha} = (B_i)_{\beta}$ ， $(\gamma)_{\alpha} = (10)_{\beta}$ ，则 $\gamma = \beta_{\alpha}$

因此，如果 $N_{\alpha} = (A_{-1} \gamma^{-1} + \cdots + A_{1-m} \gamma^{1-m} + A_{-m} \gamma^{-m})_{\alpha}$

将上式乘以 γ ，可得 $A_{-2} \gamma^{-1} + A_{-3} \gamma^{-2} + \cdots + A_{-m} \gamma^{1-m}$ 和整数 A_{-1} ，如将所得小数再乘以 γ ，又可得到整数 A_{-2} 。重复以上过程，直至求得最后一个整数 A_{-m} 。然后将 α 进制中 $A_{-1} \cdots A_{1-m} A_{-m}$ 转换为 β 进制中的 $B_{-1} \cdots B_{1-m} B_{-m}$ ，这就是 N 在 β 进制中的表示。

【例 1-4】 将 $(0.235)_{10}$ 转换成十六进制数。

解：这里 $\beta=16$ ，此时 $\gamma=16$ ，即十六进制中的 10 就是十进制中的 16。

$$\begin{array}{r} 0.235 \\ \times 16 \\ \hline 3.760 \\ \times 16 \\ \hline 12.160 \\ \times 16 \\ \hline 2.560 \end{array}$$

上述运算是在十进制中进行的，所得整数是十进制中的数，因此还要转换为二进制中的数，即 $(0.235)_{10} \approx (0.3\text{C}2)_2$ 。