

数字逻辑原理 与VHDL设计

徐志军 尹廷辉 编著



机械工业出版社
China Machine Press

TN790.2/29

2008



21世纪高等院校电子信息
与电气学科系列规划教材

数字逻辑原理 与VHDL设计

徐志军 尹廷辉 编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书以数字逻辑设计为主线,重点介绍了数字逻辑设计的基础理论和基本方法,包括小规模电路设计、中规模电路设计以及可编程逻辑器件设计。全书分为9章,包括数字逻辑基础、集成门电路、逻辑函数及其简化、组合逻辑电路的分析与设计、时序逻辑电路的分析与设计、VHDL语言设计初步、可编程逻辑器件、脉冲产生与变换电路、数/模和模/数转换器。各章配有大量例题、习题。教材中的所有VHDL源程序都通过了调试。

本书可作为电子、信息、雷达、通信、测控、计算机、电力系统及自动化等电类专业和机电一体化等非电类的专业基础课教材,也可作为相关专业工程技术人员的学习与参考用书。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑原理与VHDL设计/徐志军,尹廷辉编著. —北京:机械工业出版社,2008.5
(21世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材)

ISBN 978-7-111-23529-3

I. 数… II. ①徐… ②尹… III. 数字电路-电路设计-高等学校-教材 IV. TN79.

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第045155号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:曾珊

北京市慧美印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2008年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张

定价:29.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

随着信息技术的迅猛发展，培养“适应 21 世纪时代需求的、有创新能力的复合型人才”已成为当前高等院校教育工作的重点。新型的人才培养模式应以基础扎实，拓宽专业口径为着眼点，突出培养学生的科学研究能力和工程设计能力。“编写精品教材，创建精品课程”是实现新型培养模式的基本保证。为进一步配合全国高校提高教育教学质量，共享优质教学资源，推动电子电气类精品课程的建设工作，机械工业出版社华章分社将与“教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员、教学名师和知名教授”一起建设“高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”，从高校的教学改革出发，在对电子电气类课程的课程体系 and 教学内容深入研讨的基础上，建设具有先进性、创新性、实用性的精品教材和教学资源体系，使该系列教材成为“立足专业规范，面向新需求，成就高质量”的精品。

该系列教材的出版以新的教改精神和人才培养模式作为指导，这样不仅能够保证教材质量，而且有利于促进学科的发展。根据教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求、学科发展和人才培养的目标”，确定教材特色如下：

- 教材的编写要以教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求”为依据，以培养满足国家和社会发展需要的高素质人才为目标，系统整合教学改革成果，使教材结构体系具有渐进性，体现教学规律和学生的认识规律，使教材的结构完整，内容具有系统性、科学性和准确性，理论阐述严谨、正确。
- 教材的知识体系和内容结构具有较强的逻辑性，利于培养学生的科学思维能力；根据教学内容、学时、教学大纲的要求，优化知识结构，充分体现新知识、新技术、新工艺、新成果；既要加强基础理论，也要强化实践内容；理论的阐述、实验内容和习题的选取都应紧密联系实际，使学生做到运用理论处理实际问题，培养学生分析问题和解决问题的能力。

为作好该系列教材的出版工作，我们聘请了东南大学王志功教授为编审委员会顾问，天津大学孙雨耕教授为编审委员会主任，以及清华大学、北京大学、浙江大学、上海交通大学、电子科技大学、华中科技大学、西安电子科技大学、北京邮电大学、吉林大学等国内重点大学的教授为编审委员会副主任委员和委员，从根本上保证了教材的质量。我们将在今后的出版工作中广泛征询和听取一线教师的反馈意见和建议，逐步改进和完善该系列教材，积极推动高等院校教学改革和教材建设。

数字逻辑电路主要用于通信、计算机、自动控制及航天等领域,是进行系统电路设计的基础。从数字电话到数字电视,从家用娱乐设备 CD、DVD 到军用雷达、医疗仪器设备,数字电路的应用随处可见。由于数字技术在处理和传输信息方面的各种优点,数字电路得到了越来越广泛的应用。

数字逻辑电路经历了从单元电路到系统电路,从简单电路到复杂电路,从小规模集成电路到超大规模集成电路的发展过程。随着微电子技术和信息处理技术的飞速发展、各种类型的数字集成电路不断推出并广泛应用于各技术领域,数字电路与数字系统的设计方法与设计手段也发生了很大的变化。利用 EDA 设计工具与可编程逻辑器件,采用标准的硬件描述语言已经成为当今数字逻辑设计技术的主流。

对于电子工程、信息工程、计算机科学与技术等专业,“数字逻辑原理与 VHDL 设计”是一门非常重要的专业基础课。对于每一个工科电子信息类专业的学生 and 设计工程师,数字电路的基础知识是必备常识。我们编写本书的目的正是要为电子信息类专业和其他相近专业的学生提供一本合适的教科书。根据当前数字技术迅速发展的特点和工科院校教学的实际情况,结合我们多年从事这门课程教学的体会,在编写此书时主要考虑了以下几个问题:

一是本书作为大学本科生的专业基础课教材,其重点仍然是讨论分析数字电路和数字电路进行逻辑设计的基本概念、基本理论和基本方法。

二是在内容安排上,从教学实际出发进行了选择和必要调整,编写时力求重点突出、概念清楚、阐述深入浅出、理论与应用实例相结合,便于教学和阅读。

三是考虑到可编程逻辑器件和 VHDL 语言已经广泛应用,书中加大了以可编程逻辑器件和 VHDL 为主的分析和设计方法的比重。

与传统的数字电路教材相比,本书具有以下特色:一是以应用为主线,弱化了器件的内部结构,突出强调器件的功能与应用,如触发器的触发方式及功能分析在本书中有所删减,但是关于触发器的应用部分得到了加强;二是以设计为主线,在组合电路和时序电路设计中,既强调了传统的基于中小规模器件的设计方法,又介绍了现在流行的可编程逻辑器件的一般设计流程;三是将 VHDL 语言的基本内容(如结构、语句、进程等)作为本书的一个章节,为将来掌握这门语言打下良好的基础。

本书第 1、6、7、8、9 章由徐志军编写,第 2、3、4、5 章由尹廷辉编写,全书由尹廷辉统稿。吴浩涵、杨田、周顺、厉剑协助完成了部分章节的编写工作。在此特别向他们致以深切的谢意。

数字逻辑设计是一门正在发展的技术,涉及面广,技术更新快,新器件不断涌现。由于编者水平有限,书中难免存在一些不妥或错误,恳请读者批评指正。

编者

2007 年 8 月

一、教学目的

1. 掌握组合逻辑电路的分析和设计方法，熟悉常用中规模组合功能部件的应用；
2. 掌握时序逻辑电路的分析和设计方法，熟悉常用中规模时序功能部件的应用；
3. 掌握硬件描述语言 VHDL 基本结构和语法、句型以及描述方法；
4. 了解可编程逻辑器件结构，掌握可编程逻辑器件的设计方法；
5. 掌握常用的脉冲产生方法，掌握 A/D、D/A 转换原理和功能芯片的使用方法。

二、教学实施

教 学 内 容	学 习 要 点	学 时	教 学 形 式
第 1 章 数字逻辑基础	• 进制及其转换 • 数字电路 • 常用的几种代码 • 基本逻辑运算 • 逻辑函数	4	理论
第 2 章 逻辑门电路	• 分立元件门电路 • TTL 集成与非门电路 • 两种特殊的 TTL 门电路 • CMOS 逻辑门电路	6	理论
第 3 章 逻辑函数及其简化	• 逻辑代数的基本定律和常用公式 • 逻辑函数的代数法化简 • 逻辑函数的卡诺图化简法 • 含有任意项的逻辑函数化简	8	理论
第 4 章 组合电路的分析与设计	• 小规模组合电路的分析与设计 • 常用中规模组合电路 • 中规模组合电路的设计 • 组合电路的冒险现象	8	理论
第 5 章 时序电路的分析与设计	• 时序电路的基本概念 • 触发器 • 时序电路的分析 • 同步时序电路的设计 • 常用中规模时序逻辑电路 • 随机存取存储器 (RAM)	10	理论

(续)

教 学 内 容	学 习 要 点	学 时	教 学 形 式
第 6 章 VHDL 设计初步	• 概述 • VHDL 程序基本结构 • VHDL 语言要素 • VHDL 顺序语句 • VHDL 并行语句 • 子程序 • VHDL 描述数字电路	6	理论
第 7 章 可编程逻辑器件	• 只读存储器 ROM • 简单可编程逻辑器件 • 复杂可编程逻辑器件 • 可编程逻辑器件的设计与开发 • Max + Plus II 应用举例	6	理论
第 8 章 脉冲产生与变换电路	• 概述 • 施密特触发器 • 单稳态触发器 • 多谐振荡器 • 555 定时器及其应用	6	理论
第 9 章 数/模和模/数转换器	• 数/模转换器 DAC • 模/数转换器 ADC • 集成数/模和模/数器件介绍	6	理论

三、教学方法

本课程是电子信息类专业的主干专业基础课，侧重于数字电路设计。

教学中注意引导学生用所学理论知识解决实际问题，建议理论学时 60 学时，实验学时 20 学时。

四、说明

本课程总学时 60 课时。本教材内容比较丰富，在教学中可以根据需要，对 VHDL 语言和可编程逻辑器件的有关内容进行删减。

“21世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”

编审委员会

编审委员会顾问：王志功(东南大学)

编审委员会主任：孙雨耕(天津大学)

编审委员会副主任：倪光正(浙江大学)

彭启琮(电子科技大学)

张晓林(北京航空航天大学)

戴先中(东南大学)

编审委员会委员：

陈洪亮(上海交通大学)

马西奎(西安交通大学)

华成英(清华大学)

刘新元(北京大学)

姜建国(上海交通大学)

尹项根(华中科技大学)

邓建国(西安交通大学)

王成华(南京航空航天大学)

李哲英(北京联合大学)

陆文娟(清华大学)

吴建强(哈尔滨工业大学)

孟 桥(东南大学)

蔺志青(北京邮电大学)

石光明(西安电子科技大学)

黄瑞光(华中科技大学)

郭树旭(吉林大学)

陈鹤鸣(南京邮电大学)

王泽忠(华北电力大学)

CONTENTS

目录

出版说明

前言

教学建议

第1章 数字逻辑基础 1

1.1 进制及其转换 1

1.1.1 常用的几种进制 1

1.1.2 进制之间的转换 3

1.2 数字电路 5

1.2.1 数字信号 5

1.2.2 数字电路 6

1.3 常用的几种代码 8

1.3.1 BCD 码 8

1.3.2 循环码 9

1.3.3 奇偶校验码 10

1.4 基本逻辑运算 11

1.4.1 与运算 11

1.4.2 或运算 12

1.4.3 非运算 13

1.4.4 正逻辑和负逻辑 13

1.5 逻辑函数 14

1.5.1 逻辑函数的基本概念 14

1.5.2 几种常用的逻辑函数 15

习题 18

第2章 逻辑门电路 20

2.1 分立元件门电路 20

2.1.1 晶体管的开关特性 20

2.1.2 分立元件门电路 22

2.2 TTL 集成与非门电路 25

2.2.1 电路组成 25

2.2.2 空载时的静态工作特性 26

2.2.3 TTL 与非门外部特性与主要参数 27

2.2.4 TTL 与非门产品介绍 31

2.3 两种特殊的 TTL 门电路 32

2.3.1 TTL 集电极开路门 32

2.3.2 TTL 三态门 (TSL 门) 34

2.4 CMOS 逻辑门电路 36

2.4.1 CMOS 反相器 36

2.4.2 其他 CMOS 门电路 38

2.4.3 CMOS 电路产品 40

习题 41

第3章 逻辑函数及其简化 46

3.1 逻辑代数的基本定律和常用公式 46

3.1.1 八个基本定律 46

3.1.2 四个常用公式 47

3.1.3 三个重要规则 48

3.2 逻辑函数的代数法化简 49

3.2.1 逻辑函数化简的含义 49

3.2.2 逻辑函数的代数法化简 50

3.3 逻辑函数的卡诺图化简法 51

3.3.1 最小项及其性质 51

3.3.2	卡诺图	54	5.2.1	基本 RS 触发器	107
3.3.3	卡诺图化简的基本原理	56	5.2.2	同步 RS 触发器	108
3.3.4	用卡诺图化简逻辑函数	59	5.2.3	边沿触发器	109
3.4	含有任意项的逻辑函数化简	64	5.3	时序电路的分析	112
习题		67	5.3.1	时序电路分析的一般步骤	112
第 4 章	组合电路的分析与设计	69	5.3.2	同步时序电路的分析举例	112
4.1	小规模组合电路的分析与设计	69	5.3.3	异步时序电路的分析举例	115
4.1.1	小规模组合电路的分析	69	5.4	同步时序电路的设计	116
4.1.2	小规模组合电路的设计	73	5.4.1	同步计数器的设计	117
4.2	常用中规模组合电路	76	5.4.2	序列检测器的设计	119
4.2.1	加法器	76	5.5	常用中规模时序逻辑电路	121
4.2.2	比较器	79	5.5.1	中规模集成计数器及其应用	121
4.2.3	编码器	83	5.5.2	寄存器和移位寄存器	126
4.2.4	译码器	86	5.5.3	移位寄存器的应用	128
4.2.5	数据选择器	90	5.6	随机存取存储器(RAM)	131
4.3	中规模组合电路的设计	92	5.6.1	RAM 的存储原理	132
4.3.1	用译码器实现组合逻辑函数	92	5.6.2	典型 RAM 模块及其使用方法	134
4.3.2	用数据选择器实现组合逻辑函数	95	习题		137
4.3.3	加法器的应用	97	第 6 章	VHDL 设计初步	140
4.4	组合电路的冒险现象	99	6.1	概述	140
4.4.1	险象的来源、种类与识别方法	99	6.1.1	设计方法的发展	140
4.4.2	险象的消除方法	100	6.1.2	层次化的设计与 VHDL 的应用	141
习题		100	6.1.3	Verilog HDL	143
第 5 章	时序电路的分析与设计	105	6.2	VHDL 程序基本结构	144
5.1	时序电路的基本概念	105	6.2.1	实体	144
5.1.1	时序电路的基本结构	105	6.2.2	结构体	146
5.1.2	时序电路的分类	106	6.2.3	配置	147
5.1.3	状态图和状态表	106	6.2.4	程序包	147
5.2	触发器	107	6.2.5	库	148
			6.3	VHDL 语言要素	150
			6.3.1	基本文字规则	150
			6.3.2	数据类型	150

6.3.3	运算操作符	155	7.2.1	可编程逻辑阵列 PLA	196
6.3.4	数据对象	158	7.2.2	可编程阵列逻辑 PAL	197
6.4	VHDL 顺序语句	161	7.2.3	通用阵列逻辑 GAL	197
6.4.1	if 语句	161	7.3	复杂可编程逻辑器件	202
6.4.2	case 语句	162	7.3.1	主流可编程器件 系列	202
6.4.3	loop 语句	163	7.3.2	可编程逻辑器件的基 本资源	207
6.4.4	next 语句	165	7.4	可编程逻辑器件的设计与 开发	212
6.4.5	exit 语句	165	7.4.1	CPLD/FPGA 设计 流程	212
6.4.6	wait 语句	166	7.4.2	CPLD/FPGA 开发 工具	214
6.4.7	子程序调用语句	167	7.5	Max + plus II 应用举例	216
6.4.8	return 语句	168	7.5.1	原理图设计举例	217
6.4.9	null 语句	169	7.5.2	VHDL 设计举例	221
6.4.10	其他语句和 说明	169	习题		224
6.5	VHDL 并行语句	170	第 8 章	脉冲产生与变换电路	228
6.5.1	三种并行语句	170	8.1	概述	228
6.5.2	进程语句	172	8.1.1	描述脉冲信号特性的 主要参数	228
6.5.3	块语句	173	8.1.2	RC 电路的暂态 公式	229
6.5.4	并行过程调用语句	174	8.2	施密特触发器	230
6.5.5	元件例化语句	174	8.2.1	用 TTL 与非门构成的 施密特触发器	230
6.5.6	生成语句	176	8.2.2	集成施密特触发器	231
6.6	子程序	178	8.2.3	施密特触发器的应用 举例	232
6.6.1	子程序说明	178	8.3	单稳态触发器	233
6.6.2	子程序体	179	8.3.1	用 TTL 与非门构成的 单稳态触发器	233
6.6.3	子程序重载	180	8.3.2	集成单稳态触发器	234
6.7	VHDL 描述数字电路	180	8.3.3	单稳态触发器应用 举例	237
6.7.1	VHDL 描述组合 逻辑电路	180			
6.7.2	VHDL 描述时序逻辑 电路	183			
6.7.3	状态图描述	187			
习题		189			
第 7 章	可编程逻辑器件	190			
7.1	只读存储器 ROM	190			
7.1.1	只读存储器 ROM	190			
7.1.2	可编程只读存储器 PROM	192			
7.1.3	EPROM 和 EEPROM	193			
7.2	简单可编程逻辑器件	196			

8.4 多谐振荡器	238	9.1.4 电流激励倒 T 形网络 DAC 电路	253
8.4.1 用 CMOS 与非门构成的 多谐振荡器	238	9.2 模/数转换器(ADC)	254
8.4.2 石英晶体多谐 振荡器	239	9.2.1 模/数(A/D)转换的 基本概念	254
8.5 555 定时器及其应用	240	9.2.2 并行比较型 ADC 电路	257
8.5.1 555 定时器的电路 组成	240	9.2.3 逐次逼近型 ADC 电路	259
8.5.2 555 定时器的基本 应用	241	9.2.4 双积分型 ADC 电路 ...	259
习题	243	9.2.5 转换精度和转换 速度	261
第 9 章 数/模和模/数转换器	247	9.3 集成数/模和模/数器件介绍 ...	261
9.1 数/模转换器(DAC)	247	9.3.1 DAC0832	262
9.1.1 数字/模拟(D/A)转换 的基本概念	247	9.3.2 ADC0809	264
9.1.2 权电阻 DAC 电路	249	习题	267
9.1.3 T 形网络 DAC 电路 ...	251	参考文献	270

数字逻辑基础

数字电子技术已广泛应用于通信、计算机、自动控制、电子测量仪表、核物理、航天等多个领域。全世界正在经历一场数字化信息革命, 21 世纪是信息数字化时代。

数字逻辑电路(简称数字电路或逻辑电路)是对数字信息进行逻辑加工和运算的电路。那么, 什么是数字信息, 它有什么特点, 如何对数字信息进行描述, 等等, 这些将是本章要讨论的主要问题。由此引出的有关概念, 将是我们学习数字逻辑电路的基础。

1.1 进制及其转换

在数字系统中, 电路的操作、处理的数据, 以及计算机中的各种指令都是采用数码来表示的。因此, 选择什么样的进制, 将直接影响数字设备的结构和性能。而选择的根据由实际需要和可行性来决定。在数字系统里使用的进制有二进制、十六进制, 本节将叙述它们的表示方法和彼此之间的转换。

1.1.1 常用的几种进制

通过选取一组数字符号来表示数值的大小就构成一种数制。这些数字符号也叫数码, 它们可以任意地选择。在生产实践中, 人们习惯于采用多种多样的数制。但是, 无论采用何种数制, 人们总是采用位置计数法, 并按照进位的方式计数, 故统称为进位计数制, 简称进制。下面我们首先从大家所熟悉的十进制来说明进制的一般特点, 然后再讨论数字系统中使用的其他几种进制。常用的进制有十进制、二进制和十六进制。

1. 十进制

人们最常用的十进制是由 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个不同的数码符号组成的。用位置计数法表示一个十进制数时, 数中每一位代表的数值意义是不同的。例如 735.23, 我们都知道小数点左边各位依次是个位、十位、百位, 而小数点右边各位依次是十分之一位、百分之一位等, 因而这个数可以写成:

$$735.23 = 7 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 5 \times 10^0 + 2 \times 10^{-1} + 3 \times 10^{-2}$$

这就表明, 在一个数中, 数码所处的位置不同, 它们所代表的数值也不同。在一个数制中, 我们把每一位的 1 所代表的十进制数的数值称为该位的“权”。于是人们常把上式左边的形式称为十进制数的位置计数法, 而把上式右边的形式称之为十进制数的多项式表示法, 或称按权展开式。另外, 还把数制中采用数码符号的个数称为该数制的基数。显然, 十进制的基数是 10。我们再对位置计数法中的各个位置进行编号。以小数点为参考点, 小数点左边的各位

依次是第0位、第1位、第2位、第3位等等，小数点右边的各位依次为第(-1)位、第(-2)位等等。从上面735.23的按权展开式中可以看出，在十进制数中，第*i*位的权是 10^i 。

引入了“权”的概念以后，我们不难理解一个数中某个数码所代表的数值应该等于这个数码乘以该位的权。例如在数735.23中，数码7处于第2位，它应该代表 7×10^2 ，即表示数700，而不是表示7。

一般来说，任何一个十进制数*N*，可用位置计数法表示成：

$$(N)_{10} = a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0 \cdot a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m}$$

这里*n*代表整数位数，*m*代表小数位数，*a_i*是十进制中十个数码符号0~9中的任何一个，记作：

$$0 \leq a_i \leq 9$$

括号的下标为进制的基数，用以区分不同的进制。数*N*也可以用多项式法写成：

$$(N)_{10} = a_{n-1} \times 10^{n-1} + a_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + a_1 \times 10^1 + a_0 \times 10^0 \\ + a_{-1} \times 10^{-1} + a_{-2} \times 10^{-2} + \cdots + a_{-m} \times 10^{-m}$$

或写成以下的和式：

$$(N)_{10} = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 10^i$$

从对十进制的讨论可以归纳出进制的三个重要特征：

- 1) 每一个进制都有一个固定的基数*r*（十进制为10），数码的个数等于基数。
- 2) 每一位可能取*r*个不同的数码，最大的数码（十进制中为9）比基数小1，而且满足“逢*r*进一，借一当*r*”的规律。
- 3) 每个数码都要乘以基数的幂次（权），而该幂次由每个数码所处的位置来决定。

2. 二进制

由于数字电路中采用的基本器件都是工作在两个状态——高电位或低电位、有电流或无电流。所以，数字电路中一般都采用二进制来描述电路的操作。

我们可以用从十进制中得到的规律来描述二进制数。二进制的基数是2，每个数位只可能取0或者1，而且满足“逢二进一，借一当二”。二进制数中每一位的权用基数2的幂次表示，即在二进制数中，第*i*位的权等于 2^i 。

二进制数是由一些0和1的组合来表示的。为了与十进制的数位相区别，通常把二进制数的各位叫做“比特”(bit)。例如二进制数 $(1101.001)_2$ 有七位，叫做具有7个比特。数中括号外的右下角小写标注的2表示该数是二进制数。鉴于习惯，下面我们仍将比特叫做“位”。8个比特为一个字节(Byte)，4个比特为半个字节， 2^{10} 个比特为1KB， 2^{20} 个比特为1MB。

二进制数 $(1101.001)_2$ 的按权展开式为

$$(1101.001)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ = (13.125)_{10}$$

因此，它所对应的十进制数为13.125。

在二进制数中，最左边的数位叫最高有效位(MSB)，最右边的数位叫最低有效位(LSB)。由于二进制具有一定的优点，因此它在计算技术中被广泛采用，其优点主要有：

- 1) 二进制的数字装置简单可靠，所用元件少。二进制只有0和1两个数字，因此，它的每1位数可用任何具有两个不同稳定状态的元件来表示，如晶体管的饱和与截止、继电器接点的闭合和断开、灯泡的亮与灭等。只要规定其中一种状态表示1，则另一种状态表示的就

是0。这样,数码的存储、分析和传输就能以简单而可靠的方式进行。

2) 二进制的基本运算规则简单,运算操作方便。二进制的0和1之间进行的运算要比十进制简单得多。

但是,采用二进制也有一些缺点,如用二进制表示时,位数多,使用起来不方便也不习惯。

3. 十六进制

上面已经说过,由于二进制表示位数不方便,因此计算机中的数据常采用十六进制来表示,比如某个存储器的地址范围为0000H~FFFFH,这里的H就是十六进制含义。

十六进制的基数是16,使用16个数码,除了0~9十个数码外,还要用六位数码来表示两位十进制数10、11、12、13、14、15,只好借助于英文字母A、B、C、D、E、F作为十六进制的另外六个数码,即用A代表10,B代表11,C代表12,D代表13,E代表14,F代表15。十六进制数也是采用位置计数法,满足“逢十六进一,借一当十六”的规律,第*i*位的权是 16^i 。

例如,十六进制数 $(F3D.C8)_{16}$ 的按权展开式为

$$\begin{aligned}(F3D.C8)_{16} &= 15 \times 16^2 + 3 \times 16^1 + 13 \times 16^0 + 12 \times 16^{-1} + 8 \times 16^{-2} \\ &= (3901.78125)_{10}\end{aligned}$$

1.1.2 进制之间的转换

在数字设备、尤其是在计算机中,常需要在各种进制之间进行迅速地转换。例如,计算机工作于二进制,而人们习惯于采用十进制,这就要求将十进制的原始数据转换成二进制,这样机器才能进行运算。运算的结果也必须转换成十进制数打印出来,才能为人们所理解。也就是说,在计算机输入、输出时要进行二进制和十进制数之间的转换。当然,这些工作都是由计算机本身自动进行的。由于十六进制比二进制书写简短,而且转换成二进制也很方便,因此在微机系统中常采用这种进制来编写指令。基于上述理由,本节将扼要介绍这几种进制之间转换的基本方法,这也有利于我们更好地理解二进制。

1. 二进制与十进制之间的相互转换

将二进制转换成十进制的方法是:首先将二进制数写成按权展开求和式,然后将这些乘积项按十进制相加,即可得到相对应的十进制数。

【例 1-1】 将二进制数 $(11010.011)_2$ 转换成十进制数。

$$\begin{aligned}\text{解: } (11010.011)_2 &= 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= 16 + 8 + 2 + 0.25 + 0.125 \\ &= (26.375)_{10}\end{aligned}$$

反过来,将十进制数转换成二进制数时,则要区分整数和小数,并分别采用不同的转换方法。将十进制整数转换成二进制整数采用“除2取余法”,即用基数2重复地去除十进制整数,每次除2所得的余数就构成了所求的二进制数。在进行连除时,把除数2写在左边,每次相除所得的商写在被除数的下面,将余数写在右边,整个连除过程要一直进行到商为0,最后记下余数,其次序是从最后一个记到第一个,或者说从最高位记到最低位。

【例 1-2】 将十进制整数 $(13)_{10}$ 转换成二进制数。

解:

$$\begin{array}{rcl}
 2 & \overline{) 13} & \text{余数} \\
 2 & \overline{) 6} & \text{1 (LSB)} \\
 2 & \overline{) 3} & 0 \\
 2 & \overline{) 1} & 1 \\
 & 0 & 1 \text{ (MSB)}
 \end{array}$$

$$\text{得 } (13)_{10} = (1101)_2$$

将十进制小数转换成二进制小数采用“乘2取整法”，即用基数2重复地去乘十进制小数，直到乘积的小数部分为零为止，每次乘2所得的整数就构成了所求的二进制小数。下面通过例子说明这种转换方法。

【例1-3】 将十进制小数 $(0.3125)_{10}$ 转换成二进制数。

$$\text{解: } 0.3125 \times 2 = 0.625 \quad \text{取整数 0 (最高位)}$$

$$0.625 \times 2 = 1.25 \quad \text{取整数 1}$$

$$0.25 \times 2 = 0.5 \quad \text{取整数 0}$$

$$0.5 \times 2 = 1.0 \quad \text{取整数 1 (最低位)}$$

$$\text{得 } (0.3125)_{10} = (0.0101)_2$$

应当说明的是，“乘2取整法”可能存在转换误差，也就是说，乘积的小数部分无论乘了多少次2都不会等于0，此时需要截取有效位（一般取小数点后八位）。

【例1-4】 把十进制小数 $(0.39)_{10}$ 转换成二进制小数。

$$\text{解: } 0.39 \times 2 = 0.78 \quad \text{取整数 0 (最高位)}$$

$$0.78 \times 2 = 1.56 \quad \text{取整数 1}$$

$$0.56 \times 2 = 1.12 \quad \text{取整数 1}$$

$$0.12 \times 2 = 0.24 \quad \text{取整数 0}$$

$$0.24 \times 2 = 0.48 \quad \text{取整数 0}$$

$$0.48 \times 2 = 0.96 \quad \text{取整数 0}$$

$$0.96 \times 2 = 1.92 \quad \text{取整数 1}$$

$$0.92 \times 2 = 1.84 \quad \text{取整数 1}$$

...

$$\text{得 } (0.39)_{10} \approx (0.0110\ 0011)_2$$

如果一个十进制数既有整数部分，又有小数部分，应该将两者分别进行转换，转换的结果相加即可。如 $(13.3125)_{10} = (1101)_2 + (0.0101)_2 = (1101.0101)_2$ 。

2. 二进制与十六进制之间的相互转换

将二进制数转换成十六进制数的方法是“分组转换法”，即以小数点为参考点，向左向右按四位分组，若不足四位，以无效的0凑足四位，然后每四位用一个等值的十六进制数代换。

【例1-5】 将二进制数 $(111111.1)_2$ 转换成十六进制数。

解:

$$\begin{array}{rcl}
 11 & 1111 & .1 \\
 0011 & 1111 & .1000 \\
 3 & F & 8
 \end{array}$$

以小数点为参考点，按四位一组分成若干组
用无效的0充足四位
写出各组等价的十六进制数

得 $(111111.1)_2 = (3F.8)_{16}$

十六进制数转换成二进制数与上述过程相反, 将每一位十六进制数转换成对应的四位二进制数即可。

【例 1-6】 将十六进制数 $(7E.9)_{16}$ 转换成二进制数。

解:

7 E 9

0111 1110. 1001

每位十六进制用四位二进制代替

111 1110. 1001

省略无效的 0

得 $(7E.9)_{16} = (111\ 1110.1001)_2$

3. 十进制与十六进制之间的转换

十进制与十六进制的互换可以采取两种方法实现, 一种方法与前面十进制转换成二进制基本相似, 不过基数改为 16。另一种方法是首先将十进制数转换成二进制数, 再将二进制数转换成十六进制数。通常我们采用后者。

【例 1-7】 将十进制数 $(63)_{10}$ 转换成十六进制数。

解: 方法一:

$$\begin{array}{r|l} 16 & 63 \quad \text{余数} \\ \hline & 3 \quad \text{——} 15 \\ \hline & 0 \quad \text{——} 3 \end{array}$$

得 $(63)_{10} = (3F)_{16}$

方法二:

$$\begin{array}{r|l} 2 & 63 \quad \text{余数} \\ \hline 2 & 31 \quad \text{——} 1 \\ \hline 2 & 15 \quad \text{——} 1 \\ \hline 2 & 7 \quad \text{——} 1 \\ \hline 2 & 3 \quad \text{——} 1 \\ \hline 2 & 1 \quad \text{——} 1 \\ \hline & 0 \quad \text{——} 1 \end{array}$$

得 $(63)_{10} = (111111)_2 = (0011\ 1111)_2 = (3F)_{16}$

数字电路

在电子技术中, 把工作在数字信号下的电子电路叫做数字电路。所以为了搞清什么是数字电路, 下面我们首先来解释什么叫数字信号。

1.2.1 数字信号

在我们周围的世界中存在着许许多多的物理量, 我们把表征它们数值特征的量叫做信息。人类在生活和生产活动中需要大量地传递、加工和处理这些信息。在现代工程技术中,