

21 世纪计算机科学与技术系列教材（本科）

数字电路 与逻辑设计

主 编 禹思敏 朱玉玺
副主编 张 剑 李广明 彭 平
主 审 余永权

华南理工大学出版社

21 世纪计算机科学与技术系列教材(本科)

数字电路与逻辑设计

主 编 禹思敏 朱玉玺
副主编 张 剑 李广明 彭 平
主 审 余永权

华南理工大学出版社
·广州·

图书在版编目(CIP)数据

数字电路与逻辑设计/禹思敏,朱玉玺主编. —广州:华南理工大学出版社,2006.6

(21世纪计算机科学与技术系列教材(本科))

ISBN 7-5623-2385-2

I. 数… II. ①禹… ②朱… III. 数字电路-逻辑设计 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 014893 号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学17号楼,邮编510640)

发行部电话:020-87113487 87110964 87111048(传真)

E-mail:scutcl3@scut.edu.cn

<http://www.scutpress.com.cn>

责任编辑:欧建岸 詹志青

印刷者:湛江日报社印刷厂

开本:787×960 1/16 印张:18.375 字数:370千

版次:2006年6月第1版第1次印刷

印数:1~2000册

定价:30.00元

版权所有 盗版必究

编 委 会

顾 问：

李 未 (中国科学院院士, 北京航空航天大学校长, 教育部
计算机教学指导委员会主任)

董韫美 (中国科学院院士, 中国科学院软件研究所研究员)

古 威 (教授级高级工程师, 广东省计算机学会理事长)

主 任：姜云飞

副主任：韩国强 苏运霖

委 员：(按姓氏笔画为序)

王 宇	王小民	王小铭	刘才兴	朱 珍	朱玉玺
汤 庸	余 成	余永权	吴家培	李 勇	李振坤
邹晓平	闵华清	陈 章	陈火炎	陈启买	陈潮填
范家巧	姚振坚	胡子建	贺敏伟	骆耀祖	郭荷清
谢仕义	蔡利栋	潘久辉			

策划指导：潘宜玲

策划编辑：欧建岸 詹志青

总 序

放眼五洲风云,惊心世界科技。进入 21 世纪才短短几年,但科技进步更加日新月异。以信息科技为核心的高新技术的发展,极大地改变了人们的生产、生活方式和国际经济、政治关系,以经济为基础、科技为先导的综合国力竞争更为激烈。在这样激烈的竞争中,我们清醒地看到,我国生产力和科技、教育还比较落后,实现现代化,实现中华民族的伟大复兴还有很长的路要走。而在这方面,党中央已经明确提出,开发人力资源,加强人力资源能力的建设,是关系到我国发展的重大问题。培养和造就一代年轻人才,是一项紧迫而重大的战略任务。

培养和造就一代年轻人才,靠什么? 靠教育,靠对年轻一代进行德智体美劳全方位的教育。培养一代掌握当前科技核心信息技术(计算机科学技术即是其重要分支)的人才,就要靠更加精心、更加有力度的教育。

而在计算机科学的教育中,除了教师、设备之外,重要的条件是教材。教师、设备、教材三者互为补充,构成计算机科学教育不可或缺的要素。在某种意义上,教材还可以认为是前导性的。惟其如此,计算机器协会(ACM)在 1968 年,当美国许多大学刚刚设立计算机科学系的时候,就集中了全美国计算机科学的权威教授、专家和各主要大学的代表,制定了计算机科学教育的基本框架、课程设置以及各门课程的基本内容和大纲。美国那个时期的课程设置和教材,几乎无一例外都是根据“课程表 68”的思想形成和编写的。而后电气与电子工程师学会(IEEE)也参与了制定计算机科学教育的计划。作为迎接新世纪的重要举措,他们一起推出了反映当代计算机科学前沿知识和全面要求(所谓全面要求,指它不仅讨论了专业知识的内容,还讨论了知识产权、计算机病毒防范、伦理道德、职业规范、社会影响等问题)的 ACM 和 IEEE“课程表 2001”。在众多的学科门类中,对于青年一代的教育予以如此重视的,除计算机科学外,大概无第二个了。这既反映了计算机科学(包括作为其总体的信息科学技术)的核心地位,也反映了教材在教育中的特殊地位。

也就在 1968 年,当年的图灵奖获得者理·W·汉明(R·W·Hamming)

走向图灵奖讲演台时谈到：“我们需要为我们的学生到 2000 年时做准备，那时他们许多人即将达到他们事业的顶峰。”我们也要立足现在，把教育的目标放到 30 年后，我们现在的教育也要为到 2035 年时我们的学生做准备，那时他们许多人即将达到他们事业的顶峰。根据我国发展的规划，这也就是我国进入建国 100 周年倒计时的时刻，就是我们要实现中华民族全面复兴的时候，就是我国在综合国力要名列世界前茅的时候，因此我们现在就要为这一个宏伟目标作准备。

任重而道远。我国现在还很难说已经有了能和上面所述 ACM 和 IEEE“课程表 2001”在思路、在内容上相符的教材。我们认为，在教材建设上，借鉴和采用个别的外文教材是可以的和无碍的，但是如同整个教育必须走我们自己的路一样，在教材建设上我们也一定要走自己的路。

广东省作为经济大省强省，现在明确提出要成为教育强省。作为在广东的计算机科学工作者，我们深感自己在发展我国特别是广东省的计算机科学教育中责任重大。因此，我省计算机学会与华南理工大学出版社共同组织了全省各高等院校计算机专业骨干教师编写这套《21 世纪计算机科学与技术本科系列教材》，希望这套教材能为计算机专业提供优秀的教学用书。这套教材以培养未来人才为目标，以 ACM 和 IEEE“课程表 2001”为指导，结合我国计算机教育实际情况，以着力提倡创新精神和提倡实践动手能力为主线，注重教材内容的系统性、科学性和准确性以及文字的流畅性、可读性。

我们虔诚希望我们的努力能切切实实推动我国，特别是广东省计算机教育水平上一个台阶。

姜云飞
韩国强
苏运霖

2003 年 9 月

前 言

“数字电路与逻辑设计”作为计算机、电子工程等专业的基础课程,其主要目的在于使学生掌握数字逻辑电路分析、设计的基本方法,具备使用逻辑构件和可编程器件解决实际问题的能力,为计算机系统、数字系统的分析、设计奠定坚实的基础。

随着数字技术的飞速发展,新理论、新技术及新产品不断更新换代。作为专业教材,本书以飞速发展的数字技术为背景,在完整阐述数字逻辑设计基本概念、分析设计方法的基础上,还介绍了数字逻辑设计的发展方向,确保及时更新知识。本书注重系统性、简洁性、概念及设计方法的递进性,重在培养学生的实践和创新能力。

本教材分五部分,共十章。第一部分为数字逻辑基础,包括数字与编码、逻辑代数及其化简。第二部分为单元逻辑及逻辑电路基础,包括门电路与触发器、组合逻辑电路、时序逻辑电路及脉冲单元电路,介绍了组合逻辑的基本构成,详细阐述了组合逻辑电路的分析设计方法,并结合示例讨论了组合逻辑设计的一般问题;在时序逻辑部分介绍了时序逻辑的概念、基本模型、时序电路分析的一般方法,同步时序、异步时序设计的过程及相关问题。第三部分介绍了数/模(D/A)、模/数(A/D)转换及器件。第四部分为半导体存储器和可编程器件,介绍了可编程器件与数字设计基础、可编程阵列器件、硬件描述语言与其设计方法。第五部分结合实例阐述了数字系统在现代通信中的应用。

本教材对重点、难点作了详细的讲解,对数字电路与逻辑设计的新技术结合实例加以讨论,使教材适应现代技术的发展。与目前同类教材相比,本教材精简了部分内容,删掉了与先修课程重叠的部分,主线清晰,课时分配集中,设计方法优良,内容、结构编排合理完整,概念推出简洁,重在培养学生实践和创新能力。另一方面,本教材在编写过程中有意地使学生建立数字系统的整体概念,培养学生软硬件结合的系统设计能力。

本书可作为高等院校计算机专业的教材;对计算机相近专业的学生,根据课程设置的需要,可选讲部分章节的内容。

本书由余永权、禹思敏、朱玉玺、张剑、李广明、彭平组成课题组协力编著,由禹思敏、朱玉玺统稿,余永权主审。本书在编写过程中始终得到广东省计算机学会、本系列教材编委会专家们支持和指导,使本书得以顺利完成。

编写本教材,是在计算机课程改革上的一次尝试。由于我们水平有限,书中疏
误在所难免,望广大读者和同仁批评指正,以便使本书的质量得到进一步的提高。

作 者

2006 年 5 月

目 录

1 数制与编码	1
1.1 概述	1
1.1.1 模拟信号与数字信号	1
1.1.2 数字系统	2
1.1.3 数字电路的类型及其分析方法	4
1.2 数制及其转换	5
1.2.1 进位计数制	5
1.2.2 进位制数的相互转换	7
1.3 带符号二进制数的表示	10
1.3.1 原码	11
1.3.2 反码	12
1.3.3 补码	13
1.4 编码	13
1.4.1 二进制编码	14
1.4.2 可靠性编码	15
练习与思考	19
2 逻辑代数及其化简	20
2.1 逻辑代数的基本概念	20
2.1.1 几个概念	20
2.1.2 基本逻辑运算	22
2.2 逻辑代数的基本公式及规则	24
2.2.1 基本公式	24
2.2.2 三个规则	24
2.3 逻辑函数的标准形式	25
2.4 逻辑函数的化简	30
2.4.1 公式化简法	30
2.4.2 或与式的化简	31
2.4.3 卡诺图法	32
2.4.4* 多输出函数的化简	43
练习与思考	46

3 门电路与触发器	48
3.1 数字集成电路的分类	48
3.2 半导体器件的开关特性	49
3.2.1 半导体二极管的开关特性	49
3.2.2 半导体三极管的开关特性	50
3.2.3 MOS管的开关特性	52
3.3 门电路	54
3.3.1 分立元件门电路	54
3.3.2 TTL 门电路	58
3.3.3 CMOS 门电路	68
3.3.4 正负逻辑与接口问题	72
3.4 触发器	76
3.4.1 基本 RS 触发器	77
3.4.2 钟控 RS 触发器	79
3.4.3 钟控 D 触发器	81
3.4.4 钟控 JK 触发器	82
3.4.5 钟控 T 触发器	83
3.4.6 边沿触发器	84
3.4.7 触发器功能分类及相互之间的转换	86
练习与思考	88
4 组合逻辑电路	93
4.1 组合逻辑电路分析	93
4.1.1 组合逻辑电路传统分析方法	94
4.1.2 全加器与全减器	98
4.1.3 译码器	103
4.1.4 编码器	104
4.1.5 多路选择器/分配器	108
4.1.6 数据比较器	111
4.1.7 奇偶校验电路	114
4.2 组合电路的一般设计方法	115
4.2.1 设计方法概述	115
4.2.2 逻辑电路的变换	119
练习与思考	122
5 时序逻辑电路	124
5.1 概述	124

5.2 同步时序逻辑电路分析	125
5.2.1 同步时序逻辑电路分析流程图	125
5.2.2 同步时序逻辑电路分析方法	125
5.2.3 同步计数器分析	130
5.2.4 寄存器与移位寄存器	135
5.2.5 伪随机序列发生器	137
5.2.6 顺序脉冲信号发生器	139
5.3 异步时序逻辑电路分析	141
5.3.1 异步时序逻辑电路的分析流程图	142
5.3.2 异步时序逻辑电路分析示例	142
5.3.3 异步计数器分析	143
5.4 时序逻辑电路设计	148
5.4.1 建立原始状态图和原始状态表	149
5.4.2 状态化简	151
5.4.3 状态编码	154
5.4.4 确定激励函数、输出函数及其逻辑电路图	155
5.4.5 同步时序逻辑电路设计举例	155
5.4.6 用中规模集成计数器构成 N 进制计数器的设计	159
练习与思考	160
6 脉冲单元电路	163
6.1 脉冲信号与脉冲电路	163
6.1.1 脉冲信号	163
6.1.2 脉冲电路	164
6.2 集成门脉冲单元电路	164
6.2.1 施密特触发器	164
6.2.2 单稳态触发器	172
6.2.3 多谐振荡器	182
6.3 555 定时器及其应用	189
6.3.1 555 定时器的电路结构及功能	189
6.3.2 555 定时器构成的施密特触发器	191
6.3.3 555 定时器构成的单稳态触发器	193
6.3.4 555 定时器构成的多谐振荡器	195
练习与思考	197
7 数/模转换器和模/数转换器	200
7.1 概述	200

7.2 数/模转换器(DAC)	201
7.2.1 数/模转换器的基本原理	201
7.2.2 权电阻网络数/模转换器	202
7.2.3 倒T形电阻网络数/模转换器	204
7.2.4 单值电流型网络数/模转换器	207
7.2.5 具有双极性输出的数/模转换器	209
7.2.6 数/模转换器的转换精度和转换速度	210
7.3 模/数转换器	214
7.3.1 模/数转换器的基本原理	214
7.3.2 并联比较型模/数转换器	218
7.3.3 逐次逼近型模/数转换器	221
7.3.4 双积分型模/数转换器	224
7.3.5 模/数转换器的转换精度和转换速度	227
练习与思考	228
8 半导体存储器	230
8.1 半导体存储器的分类	230
8.2 随机存取存储器(RAM)	231
8.2.1 RAM的基本结构	231
8.2.2 存储单元	233
8.3 只读存储器(ROM)	235
8.3.1 ROM的结构及工作原理	235
8.3.2 用ROM实现组合逻辑函数	237
8.4 半导体存储器芯片	238
8.4.1 静态RAM存储器芯片 Intel 6116	238
8.4.2 动态RAM存储器芯片 Intel 2164A	239
8.4.3 EPROM芯片 Intel 2716	239
8.5 用存储器芯片构成半导体存储器	240
8.5.1 位扩展	240
8.5.2 字扩展	241
练习与思考	243
9 可编程器件	244
9.1 概述	244
9.2 可编程阵列逻辑(PAL)	245
9.2.1 PAL的基本电路结构	246
9.2.2 PAL的输出电路结构及反馈形式	246

9.2.3 应用举例	247
9.3 通用阵列逻辑(GAL)	247
9.3.1 GAL 电路结构	249
9.3.2 输出逻辑宏单元(OLMC)	251
9.3.3 GAL 器件应用及开发工具	254
9.4 复杂可编程器件 CPLD	255
9.4.1 CPLD 的基本结构	256
9.4.2 CPLD 的组成和原理	256
9.5 现场可编程器件 FPGA	258
9.5.1 FPGA 的工作原理简介	259
9.5.2 FPGA 的基本结构	259
9.5.3 FPGA 编程数据的装载	263
练习与思考	267
10* 数字系统在现代通信中的应用	268
10.1 数字通信系统的组成及基本概念	268
10.2 模拟信号的数字传输	269
10.2.1 取样与取样定理	269
10.2.2 量化	270
10.2.3 编码	270
10.2.4 PCM 通信系统	271
10.2.5 增量调制通信系统	271
10.3 多址通信技术	272
10.3.1 频分多址(FDMA)技术	272
10.3.2 时分多址(TDMA)技术	273
10.3.3 码分多址(CDMA)技术	274
10.4 数字调制技术	274
10.4.1 数字调幅(ASK)	275
10.4.2 数字调频(FSK)	275
10.4.3 数字调相(PSK)	276
10.5 数字通信系统中的检错与纠错技术	276
10.5.1 奇偶校验码	277
10.5.2 线性分组码	278
10.6 混沌数字通信简介	279
参考文献	280

1 数制与编码

1.1 概述

在电子技术领域,为了便于存储、分析和传输电子信息,经常将模拟信号编码,即把模拟信号转换为数字信号,利用数字逻辑这一强有力的工具来分析和设计复杂的数字电路或数字系统。

数字电路与数字逻辑几乎应用于每一电子设备或电子系统中,例如计算机、计算器、电视机、音响系统、视频记录设备、长途电信及卫星系统等。本章介绍模拟信号、数字信号和数字逻辑的基本概念,介绍数字电路的特点和分析方法,然后讨论数制与编码及各种数制系统之间的互相转换。

1.1.1 模拟信号与数字信号

1.1.1.1 模拟信号

模拟信号是在时间上连续、在数值上也连续的物理量。它具有无穷多的数值,其数学表达式也较复杂。自然界中许多物理量属模拟性质的,如速度、压力、温度、声音、重量以及位置等。在工程技术上,为了便于分析,常用传感器将模拟量转换为电流、电压或电阻等电学量。电流和电压常用图形来表示,例如正弦函数、指数函数等。图 1-1 表示几种常见的模拟信号。

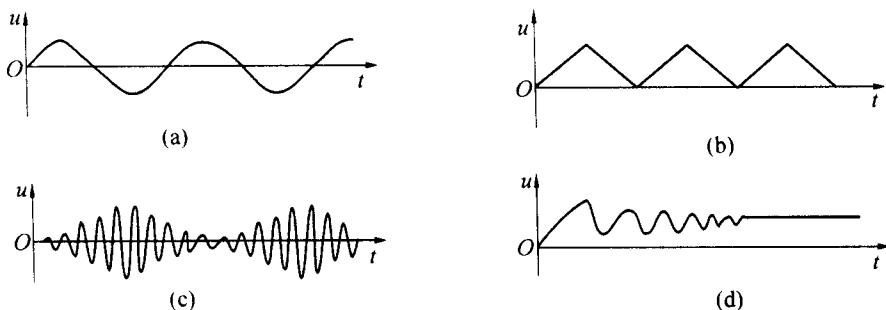


图 1-1 几种常见的模拟信号

周期性模拟信号的基本参数之一是频率(f),也可用周期(T)表示。频率的单

位为赫兹(Hz),而周期的单位为秒(s),两者之间的关系是互为倒数, $f = \frac{1}{T}$ 。模拟电压具有无穷多的值。

1.1.1.2 数字信号

数字信号在时间上和数值上均是离散的,常用数字“0”和“1”来表示。这里的“0”和“1”不是十进制数中的数字,而是逻辑“0”和逻辑“1”,因而称之为二值数字逻辑(Binary Digital Logic)或简称数字逻辑。

电子系统中一般含有模拟和数字两种器件。模拟电路是电子系统必需的组成部分。但对于存储、分析或传输信号,数字电路更具优越性。在数字电路中,常用二进制数来量化连续变化的模拟信号,而二进制数正好是用二值数字逻辑中的数字“0”和“1”来表示的,这样就可借助复杂如计算机那样的数字系统来实现信号的存储、分析和传输。

二值数字逻辑是对客观世界中一些相关又互相对立的两种状态的描述,可用电子器件的开关特性来实现,由此形成离散信号电压或数字电压。数字电压通常用“逻辑电平”(Logic Level)来表示。图 1-2 表示用逻辑电平描述的数字波形,其中图 1-2a 的逻辑“0”表示 0V,逻辑“1”表示 5V。图 1-2b 表示 16 位数据的波形。

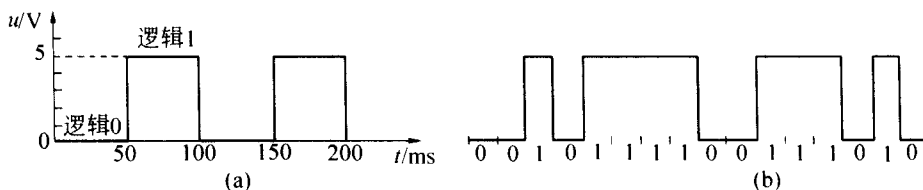


图 1-2 数字波形

1.1.2 数字系统

1.1.2.1 数字电路的发展

数字电路的结构是以二值数字逻辑为基础的,其工作信号是离散的数字信号,电路中的电子器件如二极管、三极管(BJT、FET)处于开关状态(导通或截止)。

数字系统的发展历史与模拟系统一样,经历了由电子管、半导体分立器件到集成电路的发展过程。从 20 世纪 60 年代开始,数字集成器件以双极型工艺制成了小规模逻辑器件。而 20 世纪 70 年代末随着微处理器的出现,数字集成电路的性能产生了质的飞跃。

随着 MOS 工艺特别是 CMOS 工艺的发展,可编程逻辑器件(PLD)、现场可编程门阵列(FPGA)的飞速发展,数字系统及相关技术不仅规模增长快,而且由于软、硬件结合使器件的功能更加完善,使用也更加灵活。

1.1.2.2 数字系统

数字系统和数字逻辑功能部件在概念上有着本质的差别。这里主要讨论数字系统的基本概念和基本子系统。

(1) 数字系统的基本模型

所谓数字系统,是指交互式的以离散形式表示的具有存储、传输、处理信息能力的逻辑子系统的集合物。数字系统的功能、性能、规模远远超出了一般中小规模数字逻辑电路的范围。

虽然数字系统可能涉及热学、电学等诸多领域的工程技术问题,但数字系统的核心问题仍然是逻辑设计问题。逻辑设计是实现从子系统到整个系统的结构与功能的过程,从而最终完成系统的信息处理、传输和存储任务。

信息通过逻辑电路中由金属导线制成的传输通路传输。在并行传输中,一组导线中的每一条可以传递一个数字序列中的一位。在串行传输中,用一条导线在时间上顺序地传送一个数字序列。在动态式存储器中存储的信息,在规定的—个时间周期内,信息用重复经过一个延迟线的办法来保存。在静态式存储器中,在规定的—时间周期内向专用记忆部件写入或读出所需的信息。信息处理就是按运算规则通过变更已给信息形成新的信息。信息处理的基本方法是算术运算和逻辑运算。电子信号通过处理电路时也要花费时间。

图 1-3 为数字系统的基本结构框图,它由输入部件、输出部件及逻辑系统构成。逻辑系统包括存储部件、处理部件和控制部件三大子系统。按控制与被控制的关系来分,存储部件和处理部件是被控部件,又称执行部件,它们受控于控制部件,在控制部件的命令下进行相应的动作。

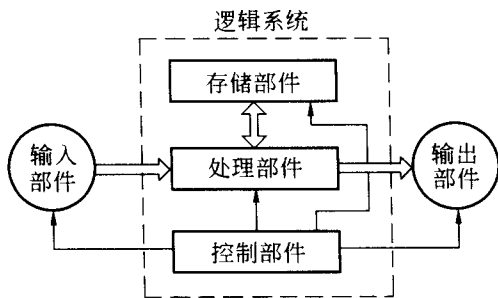


图 1-3 数字系统的基本结构

存储部件和处理部件通过传输线相互连接。存储部件和处理部件要求在规定的—时间间隔内源源不断地获得信息。当信息被传送到处理部件且被处理时,存储部件则保存并源源不断地供给信息,而计算的结果又传送回存储部件。实际上,在数字系统中,这种活动是周期性的,即存储部件获得信息,该信息被传送到处理部件且被加工处理;加工处理后的更新信息又被传送到存储部件。然后又开始另一个周期。

在数字系统中,逻辑子系统活动性的协调配合是非常本质的。处理部件必须公开所使用的运算规则集,存储部件一旦获得新信息就必须抹掉旧信息。同时也

要区分两类信息:一类是数据信息,它在图中用双线表示;另一类是控制信息,它在图中用细线表示。对被处理的信息,我们要求获得答案,而控制信息仅支配获得答案所需的处理步骤。在数字系统中,不论是数据信息还是控制信息都可以用完全相同的方法来存储、传输和处理。

(2) 数字系统与逻辑功能部件的区别

一般来说,只要按预定要求能够产生或处理数字信息的装置都可看成是一个独立的数字系统。而逻辑功能部件的作用却比较单一。数字系统通常由若干个逻辑功能部件组成,并由一个控制部件统一指挥。就数字系统的设计过程而言,首先分析设计任务,明确系统应满足的要求和应具备的功能,确定总体任务。然后把总体任务划分成若干局部任务,每个局部任务由一个相应的子系统完成。如果子系统还比较复杂,可以进一步划分,直到每项局部任务都十分明确且易于实现为止。划分出来的子系统一般就是一个逻辑功能部件,例如加法器、乘法器、译码器、寄存器和存储器等。它们都是典型的逻辑功能部件,可称为逻辑子系统。

逻辑子系统只担负局部任务。当子系统合并为大系统时,就必须用一个控制部件来统一协调和管理各子系统的工作。因此,系统内是否含有控制部件是区别数字系统和逻辑功能部件的重要标志。凡有控制部件,且能按一定程序进行操作的系统,不论其规模大小,一律看成数字系统,否则就视为逻辑部件或子系统。

在系统设计时,逻辑部件的设计过程是先按任务要求建立真值表或状态表,给出逻辑功能描述,然后进行逻辑化简或状态化简,最后完成逻辑电路的设计。而数字系统的设计是一个自上而下的过程,整个设计过程包含了一系列的试探,在设计最终完成之前,设计者不可能确定所有的细节。数字系统在划分成子系统的过程中会有不同的方案需要试探、比较和验证。在完成各个子系统的设计之后,又有一个自下而上把各子系统连成整体并进行整体功能验证和检查的过程。如不能满足要求,则需要修改。通常要经过一定的反复才能真正完成一个数字系统的设计。

1.1.3 数字电路的类型及其分析方法

现代数字电路是由用半导体工艺制成的若干数字集成器件构造而成的。逻辑门电路是基本单元。存储器是用来存储二值数据的数字电路。通常情况下,数字电路分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。利用组合逻辑电路和时序逻辑电路可以控制、操作和运算数字系统中的信息。

从集成度来说,数字集成电路可分为小规模、中规模、大规模、超大规模和甚大规模数字电路等五类。集成度是指一个集成电路芯片所包含的三极管(BJT或FET)的个数。表1-1列出了五类数字集成电路的分类依据。