



普通高等教育“十二五”规划教材



电子电气基础课程规划教材

# 实用数字电子技术

Practical Digital Fundamentals

主编 欧伟明

副主编 龙晓薇 贺素良



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材  
电子电气基础课程规划教材

# 实用数字电子技术

主 编 欧伟明

副主编 龙晓薇 贺素良

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

## 内 容 简 介

本书内容包括：数字电子技术概论、逻辑门电路、组合逻辑电路、锁存器和触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形电路、半导体存储器、数模和模数转换器、可编程逻辑器件，共 9 章。每章均有思考题和习题，其中，大多数章的后面带有※的一节为 Proteus 电路仿真例题，书后附录 A 介绍了计算机电路仿真软件 Proteus。本书从工程应用出发，突出数字电子技术的新颖性和实用性，并为任课教师免费提供电子课件。

本书可作为高等学校电气信息类各专业“数字电子技术”课程的教材，也可供有关工程技术人员学习、参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

实用数字电子技术/欧伟明主编. —北京：电子工业出版社，2014.1  
电子电气基础课程规划教材  
ISBN 978-7-121-21697-8

I. ①实… II. ①欧… 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（2013）第 246190 号



策划编辑：谭海平

责任编辑：谭海平 特约编辑：王 崧

印 刷：涿州市京南印刷厂

装 订：涿州市京南印刷厂

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：787×1 092 1/16 印张：16.75 字数：442 千字

印 次：2014 年 1 月第 1 次印刷

定 价：45.00 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 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线：（010）88258888。

# 前 言

“数字电子技术”是电气信息类专业必修的专业技术基础课。它主要讲述如何应用数字电路来进行数字系统设计的基本理论和方法，对于自动化、电气工程、电子信息工程、通信工程、计算机及相关专业的学生，以及将来从事这方面工作的广大科技工作者来说，熟练地掌握数字电子技术的基本理论和方法是十分必要的。

随着社会的进步和科学技术的发展，数字电子技术是当前发展最快的学科之一，数字系统和数字设备已广泛应用于各个领域。新的电子器件不断涌现，电子电路的集成度越来越高，系统的规模越来越大，数字电路的设计过程和方法也在不断地发展与完善。由于微电子技术、计算机技术的快速发展，微型计算机的广泛应用，使数字电子技术在现代科学技术领域中所占的地位更为重要，应用也更加广泛，同时也对“数字电子技术”课程的教学提出了新的、更高的要求。

在编著本书时，为了将当前的数字电子技术反映到本书中，使本书既能适合教师的教学工作，又符合学生的学习规律，我们参考了教育部组织编写的《电子技术基础（A）课程基本要求》，主要考虑了以下几点。

## 1. 注重 CMOS 数字集成电路

由于微电子技术与制造工艺的进步，特别是在数字电路中，与双极型数字器件相比，MOS 器件具有明显的优势。因此，我们在编著本书时，相对 TTL 数字集成电路而言，更加注重 CMOS 数字集成电路，并且在书中主要以 74HC 系列的数字器件举例进行了说明。

## 2. 突出数字电子技术的新颖性和实用性

随着半导体技术的发展，新的数字器件不断出现。例如，在单片机应用系统中，大量使用 8bit 锁存器 74HC573；在大屏幕 LED 显示系统中，大量使用串入并出的 8bit 移位寄存器 74HC595；等等。虽然 74HC573 和 74HC595 属于典型的数字集成电路，并且在电气信息类专业的后续课程中，一般会使用到这些器件，但由于是较新的数字器件，所以在一般的数字电子技术教材中没有得到介绍。本书从工程应用出发，对这些广泛应用的新数字器件进行了必要的介绍，并且在本书的参考文献中，给出了从互联网搜索数字器件相关资料的途径，从而突出了数字电子技术的新颖性和实用性，并且将教材定名为《实用数字电子技术》。

## 3. 引入计算机电路仿真软件 Proteus

“数字电子技术”课程是一门实践性很强的课程，教学中在注重基本概念、基本原理和基本方法的基础上，更要注重培养学生实践动手能力和设计创新能力。在课堂理论教学中，利用计算机技术，将一部分教学内容，以计算机虚拟实验演示的形式进行教学，可使教学内容更直观、更生动，在有限的时间内，能加大授课信息量，也有利于学生电子设计创新能力的培养。为此，在本书大多数章的后面加了一节 Proteus 电路仿真例题（带有※号），供各院校师生灵活选用。

## 4. 明确锁存器与触发器的不同概念

一般的数字电子技术教材，将锁存器与触发器的概念混为一谈，不加区分。实际上，二者不仅概念不同，而且都有相应的集成电路芯片。本书区分锁存器与触发器的不同概念，分别介绍实

际的代表芯片(74HC573、74HC74),并且在第9章中给出了D锁存器和D触发器的VHDL程序源代码,以便进一步区分锁存器与触发器。

本书在内容编排上,力求突出基本概念、基本原理和基本分析方法。全书共9章:数字电子技术概论,逻辑门电路,组合逻辑电路,锁存器和触发器,时序逻辑电路,脉冲波形的产生与整形电路,半导体存储器,数模和模数转换器,可编程逻辑器件。每章均有思考题和习题,其中,大多数章的后面带有※号的一节为Proteus电路仿真例题。书后附录A介绍了计算机电路仿真软件Proteus。

本书从工程应用出发,突出了数字电子技术的新颖性和实用性,为任课教师免费提供电子课件。本书可作为高等学校电气信息类专业“数字电子技术”课程的教材,也适用于有关工程技术人员参考。

本书由欧伟明教授担任主编,负责全书的策划、组织和定稿。贺素良、龙晓薇担任副主编,协助主编工作。欧伟明撰写第1章、第6章,龙晓薇撰写第2章、第3章,贺素良撰写第4章、第7章,黄卓冕撰写第5章,邹彬撰写第8章,聂辉撰写第9章、附录A。欧伟明、聂辉还共同完成了书中的Proteus电路仿真例题。

本书由凌云教授主审,凌云教授认真审阅了本书的编写提纲和全部书稿,提出了许多宝贵意见。在本书的撰写过程中,得到了湖南工业大学电气与信息工程学院的毕业生刘欢、龚事引、周勇城、龙光海、苗玉周、王乐、刘开芳、张金钢、贺爱民、李忠凡、袁瑶、汤旭东、田超、柏丹的支持,他们对书中部分硬件电路和部分程序的初步调试进行了有益的工作。在此,一并表示衷心的感谢!

欧伟明  
2013年中秋  
于湖南工业大学

# 目 录

第 1 章 数字电子技术概论	1
1.1 数字电路的基本概念	1
1.1.1 模拟信号与数字信号	1
1.1.2 数字信号的主要参数	2
1.1.3 数字技术的发展及其应用	2
1.1.4 数字集成电路的分类及特点	4
1.2 数制	5
1.2.1 十进制	5
1.2.2 二进制	6
1.2.3 十六进制	7
1.2.4 数制之间的相互转换	7
1.2.5 带符号数的表示方法	9
1.3 编码	11
1.3.1 二-十进制编码	11
1.3.2 格雷码	12
1.3.3 ASCII 码	13
1.4 逻辑代数基础	14
1.4.1 逻辑变量和逻辑函数	14
1.4.2 三种基本逻辑运算及逻辑符号	15
1.4.3 逻辑函数的描述方法	18
1.4.4 逻辑代数运算的基本规则	19
1.4.5 逻辑函数的代数化简法	21
1.4.6 逻辑函数的卡诺图化简法	24
1.5 正、负逻辑及逻辑符号的变换	31
1.5.1 正逻辑、负逻辑的概念	31
1.5.2 混合逻辑中逻辑符号的等效变换	32
本章小结	33
思考题和习题 1	34
第 2 章 逻辑门电路	37
2.1 逻辑门的外部特性和参数	37
2.1.1 逻辑门电路简介	37
2.1.2 逻辑电平	38
2.1.3 噪声容限	39

2.1.4	延时-功耗乘积	39
2.1.5	扇入数和扇出数	40
2.2	MOS 逻辑门电路	42
2.2.1	MOS 管的开关特性	42
2.2.2	CMOS 反相器	43
2.2.3	其他 CMOS 门电路	45
2.2.4	使用 CMOS 芯片的注意事项	51
2.2.5	CMOS 门电路产品系列	52
2.3	TTL 逻辑门电路	53
2.3.1	三极管的开关特性	53
2.3.2	TTL 反相器	55
2.3.3	其他 TTL 门电路	56
2.3.4	使用 TTL 芯片的注意事项	59
2.3.5	CMOS 和 TTL 的性能比较	60
2.4	集成逻辑门电路的应用	60
2.4.1	TTL 与 CMOS 器件之间的接口问题	61
2.4.2	用门电路驱动 LED 显示器件	62
2.4.3	电源去耦合和接地方法	63
※2.5	Proteus 电路仿真例题	64
	本章小结	66
	思考题和习题 2	67
<b>第 3 章</b>	<b>组合逻辑电路</b>	<b>72</b>
3.1	组合逻辑电路的概念	72
3.2	组合逻辑电路的分析设计方法	72
3.2.1	组合逻辑电路的分析方法	72
3.2.2	组合逻辑电路的设计方法	73
3.3	常用组合逻辑电路	75
3.3.1	编码器	76
3.3.2	译码器	79
3.3.3	数据选择器	86
3.3.4	数值比较器	87
3.3.5	加法器	89
3.3.6	组合逻辑集成电路应用举例	92
3.4	组合逻辑电路中的竞争冒险	96
3.4.1	竞争冒险的产生原因	96
3.4.2	竞争冒险的消除方法	96
※3.5	Proteus 电路仿真例题	98
	本章小结	99
	思考题和习题 3	100

<b>第 4 章 锁存器和触发器</b> .....	102
4.1 双稳态存储单元电路 .....	102
4.1.1 电路双稳态的概念 .....	102
4.1.2 双稳态存储单元电路 .....	102
4.2 锁存器 .....	103
4.2.1 RS 锁存器 .....	103
4.2.2 D 锁存器 .....	106
4.2.3 8D 锁存器 74HC573 芯片介绍 .....	107
4.3 触发器的电路结构 .....	109
4.3.1 主从触发器 .....	110
4.3.2 维持阻塞触发器 .....	114
4.3.3 双 D 触发器 74HC74 芯片介绍 .....	116
4.3.4 触发器的动态性能技术指标 .....	117
4.4 不同逻辑功能的触发器 .....	118
4.4.1 D 触发器 .....	119
4.4.2 JK 触发器 .....	119
4.4.3 RS 触发器 .....	120
4.4.4 T 触发器和 T'触发器 .....	120
4.4.5 触发器逻辑功能的转换 .....	121
※4.5 Proteus 电路仿真例题 .....	122
本章小结 .....	125
思考题和习题 4 .....	126
<b>第 5 章 时序逻辑电路</b> .....	130
5.1 时序逻辑电路的概念 .....	130
5.1.1 时序逻辑电路的结构及特点 .....	130
5.1.2 时序逻辑电路的分类 .....	131
5.1.3 时序逻辑电路功能的描述方法 .....	131
5.2 时序逻辑电路的分析方法 .....	132
5.2.1 分析时序逻辑电路的一般步骤 .....	132
5.2.2 同步时序逻辑电路的分析举例 .....	133
5.2.3 异步时序逻辑电路的分析举例 .....	135
5.3 计数器 .....	137
5.3.1 二进制计数器 .....	137
5.3.2 其他进制计数器 .....	141
5.3.3 计数器集成电路的应用举例 .....	142
5.4 寄存器 .....	146
5.4.1 数码寄存器 .....	146
5.4.2 移位寄存器 .....	146



5.4.3	74HC595 芯片介绍	148
5.4.4	移位寄存器构成的移位型计数器	149
5.5	时序逻辑电路的设计方法	151
5.5.1	同步时序逻辑电路的设计方法	151
5.5.2	时序逻辑电路的设计举例	152
※5.6	Proteus 电路仿真例题	156
	本章小结	158
	思考题和习题 5	159
<b>第 6 章</b>	<b>脉冲波形的产生与整形电路</b>	<b>164</b>
6.1	集成电路 555 定时器	164
6.1.1	555 定时器的电路结构与工作原理	164
6.1.2	555 定时器的功能表	165
6.2	施密特触发器	166
6.2.1	用 555 定时器组成的施密特触发器	166
6.2.2	施密特触发器 CC40106 芯片介绍	167
6.2.3	施密特触发器的应用举例	168
6.3	多谐振荡器	170
6.3.1	用 555 定时器组成的多谐振荡器	170
6.3.2	占空比可调的多谐振荡器电路	171
6.3.3	石英晶体多谐振荡器	172
6.3.4	多谐振荡器的应用举例	173
6.4	单稳态触发器	174
6.4.1	用 555 定时器组成的单稳态触发器	174
6.4.2	单稳态触发器 74LS121、MC14528 芯片介绍	176
6.4.3	单稳态触发器的应用举例	179
※6.5	Proteus 电路仿真例题	181
	本章小结	185
	思考题和习题 6	186
<b>第 7 章</b>	<b>半导体存储器</b>	<b>191</b>
7.1	概述	191
7.2	随机存取存储器	192
7.2.1	RAM 的基本结构	192
7.2.2	RAM 的存储单元	194
7.2.3	存储容量的扩展	196
7.3	只读存储器	198
7.3.1	ROM 的分类	198
7.3.2	ROM 的基本结构	199
7.3.3	存储器 AT27C040 芯片介绍	200

7.3.4	ROM 的应用举例 .....	202
7.3.5	存储容量的扩展 .....	203
※7.4	Proteus 电路仿真例题 .....	204
	本章小结 .....	206
	思考题和习题 7 .....	206
<b>第 8 章</b>	<b>数模和模数转换器 .....</b>	<b>209</b>
8.1	D/A 转换器 .....	209
8.1.1	D/A 转换器的基本工作原理 .....	209
8.1.2	倒 T 形电阻网络 D/A 转换器 .....	209
8.1.3	权电流型 D/A 转换器 .....	211
8.1.4	D/A 转换器的主要技术指标 .....	212
8.1.5	D/A 转换器 DAC0808 应用举例 .....	213
8.2	A/D 转换器 .....	214
8.2.1	A/D 转换器的基本工作原理 .....	214
8.2.2	取样-保持电路 .....	215
8.2.3	并行比较型 A/D 转换器 .....	216
8.2.4	逐次比较型 A/D 转换器 .....	218
8.2.5	双积分型 A/D 转换器 .....	219
8.2.6	A/D 转换器的主要技术指标 .....	221
8.2.7	A/D 转换器 ADC0809 应用举例 .....	221
※8.3	Proteus 电路仿真例题 .....	223
	本章小结 .....	226
	思考题和习题 8 .....	226
<b>第 9 章</b>	<b>可编程逻辑器件 .....</b>	<b>229</b>
9.1	PLD 概述 .....	229
9.1.1	PLD 的发展历程 .....	229
9.1.2	PLD 的分类 .....	230
9.1.3	PLD 的逻辑表示方法 .....	230
9.2	低密度 PLD .....	231
9.2.1	PROM .....	231
9.2.2	PLA .....	232
9.2.3	PAL .....	232
9.2.4	GAL .....	232
9.3	复杂可编程逻辑器件 .....	234
9.3.1	基于乘积项的 CPLD 基本结构 .....	234
9.3.2	CPLD 产品概述 .....	236
9.4	现场可编程门阵列 .....	237
9.4.1	基于查找表的 FPGA 基本结构 .....	237

9.4.2	FPGA 产品概述 .....	240
9.5	基于 CPLD/FPGA 的数字系统开发流程 .....	240
9.5.1	一般开发流程 .....	241
9.5.2	硬件描述语言 VHDL/Verilog HDL .....	241
9.5.3	D 锁存器和 D 触发器的 VHDL 设计 .....	243
9.5.4	集成开发环境 Quartus II .....	244
	本章小结 .....	246
	思考题和习题 9 .....	246
附录 A	电路仿真软件 Proteus .....	247
A.1	Proteus 电路仿真软件简介 .....	247
A.1.1	Proteus 简介 .....	247
A.1.2	Proteus 组成 .....	247
A.1.3	Proteus 基本资源 .....	247
A.1.4	Proteus 基本操作与设置 .....	250
A.2	基于 Proteus 的电路设计 .....	252
A.2.1	设计流程 .....	252
A.2.2	设计实例 .....	253
A.3	基于 Proteus 的电路仿真 .....	255
A.3.1	交互式仿真 .....	256
A.3.2	基于图表的仿真 .....	256
	参考文献 .....	258

# 第1章 数字电子技术概论

本章介绍数字电子技术的基本概念与数学工具,内容包括:数字信号的基本概念及主要参数、数字集成电路的基本常识、计算机等数字设备中常用的数制与编码、逻辑代数基础、逻辑函数的描述方法、逻辑函数的化简等。这些内容是分析和设计数字电路的基础。

## 1.1 数字电路的基本概念

随着电子计算机的普及以及通信技术和现代电子技术的快速发展,人类已进入信息时代,在信息社会,数字电子技术得到了广泛的应用和发展,它不仅广泛应用于现代数字通信、雷达、自动控制、测量仪表、医疗设备等各个科技领域,而且进入了人们的日常生活,如智能手机、数码相机、数字电视、影碟机等。可以预料,数字电子技术在人类迈向信息社会的进程中,将起到越来越重要的作用。可以毫不夸张地说,数字电路是计算机和数字通信的重要基石,它们构成了计算机和数字通信设备的硬件基础。

本节将简要介绍数字电路的一些基本概念,以及数字集成电路的发展趋势,让读者在学习数字电子技术之前,首先建立起数字电路的整体概念。

### 1.1.1 模拟信号与数字信号

#### 1. 模拟量与数字量

自然界中存在着各种物理量,其形式千差万别,但就其变化规律而言,可以分为模拟量和数字量两大类。模拟量是指不管在时间上还是在数值上均连续变化的物理量,如温度、压力、速度等;数字量是指不管在时间上还是数值上均不连续的(离散的)物理量,如人口的统计数、产品的个数等。

在实际应用中,许多物理量的测量值既可以用模拟形式表示,也可以用数字形式表示。例如:测量某个电压值,用指针式电压表测量时,结果是模拟量的形式;而用数字式电压表测量时,结果是数字量的形式。

利用现代电子技术,可以很方便地实现模拟量与数字量之间的相互转换。

#### 2. 模拟信号与数字信号

在电子设备中,表示模拟量的电信号称为模拟信号(Analog Signal)。例如,正弦波信号就是典型的模拟信号。

表示数字量的电信号称为数字信号(Digital Signal)。例如,矩形波信号就是典型的数字信号。数字信号有时又称为脉冲信号。

数字信号的波形是逻辑电平对时间的图形表示。数字信号有两种传输波形,一种称为电平型,另一种称为脉冲型。电平型数字信号以一个时间节拍内信号是高电平还是低电平来表示“1”或“0”,且每个“1”或“0”信号所占的时间间隔都相等,1个“1”或1个“0”称为1位(bit),几个连续的高(低)电平,就是几位“1”(“0”),图1.1(a)所示为9bit数字信号。而脉冲型数字

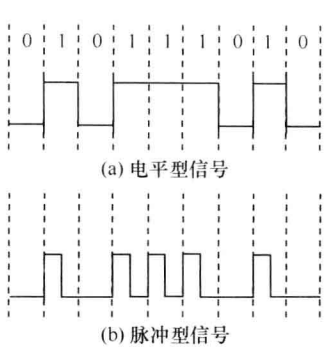


图 1.1 数字信号的传输波形

信号以一个时间节拍内有无脉冲来表示“1”或“0”。如图 1.1(b)所示也为 9bit 数字信号。由图可见，电平型和脉冲型数字信号在波形上有显著差别，即电平型数字信号波形在一个节拍内不会归零，而脉冲型数字信号波形在一个节拍内会归零。

与模拟信号相比，数字信号具有抗干扰能力强、存储处理方便等优点。

### 3. 模拟电路与数字电路

与电路所处理的信号形式相对应，传送、变换、处理、产生模拟信号电子电路称为模拟电路 (Analog Circuit)，而传送、变换、处理、产生数字信号电子电路称为数字电路 (Digital Circuit)。

#### 1.1.2 数字信号的主要参数

由图 1.1 可知，数字信号只有两个取值，故称为二值信号，两个取值分别用符号“1”和符号“0”表示，一般用符号“1”表示电路的高电平，而用符号“0”表示电路的低电平。在实际的数字系统中，数字信号波形并没有图 1.1 那么理想。当波形从低电平跳变到高电平，或从高电平跳变到低电平时，边沿没有那么陡峭，而要经历一个过渡过程，分别用上升时间  $t_r$  和下降时间  $t_f$  描述。

数字信号的种类很多，在数字系统中，主要应用的是矩形脉冲。下面以电压矩形脉冲为例，来说明数字信号的主要参数，实际的电压矩形脉冲波形如图 1.2 所示。

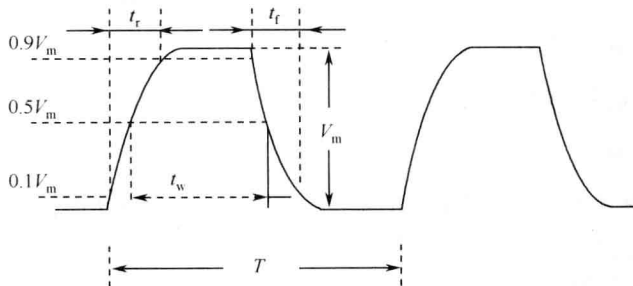


图 1.2 电压矩形脉冲波的主要参数

矩形波数字信号的主要参数有：

- (1) 脉冲幅值  $V_m$  矩形波电压信号变化的最大值。
- (2) 脉冲上升时间  $t_r$  脉冲上升沿从  $0.1V_m$  上升到  $0.9V_m$  所需要的时间。
- (3) 脉冲下降时间  $t_f$  脉冲下降沿从  $0.9V_m$  下降到  $0.1V_m$  所需要的时间。
- (4) 脉冲宽度  $t_w$  在脉冲上升沿与脉冲下降沿  $0.5V_m$  两点间的时间间隔。
- (5) 脉冲周期  $T$  在周期性脉冲序列中，两个相邻脉冲间的时间间隔为脉冲周期。有时也使用频率  $f = 1/T$  表示单位时间内脉冲重复的次数。
- (6) 占空比  $q = t_w/T$  脉冲宽度与脉冲周期的比值称为占空比。占空比一般用百分数表示，并且将占空比  $q = 50\%$  的矩形波称为方波。

#### 1.1.3 数字技术的发展及其应用

电子技术是 20 世纪发展最迅速、应用最广泛的技术，使得工业、农业、科研、教育、医疗、文化娱乐以及人们的日常生活发生了根本性的变革。特别是数字电子技术，在近 40 多年来，取得了令人瞩目的进步。

电子技术的发展是以电子器件的发展为基础的。20 世纪初直至中叶，主要使用的电子器件是真空管，也称电子管。随着固体微电子学的进步，第一只晶体管于 1947 年问世，开创了电子技术的新领域。20 世纪 60 年代初，模拟集成电路和数字集成电路相继问世。到 20 世纪 70 年代末，随着微处理器的问世，电子器件及其应用出现了崭新的局面。1988 年，集成工艺可在  $1\text{cm}^2$  的硅片上集成 3500 万个元件，说明集成电路制造技术已经进入甚大规模阶段。从 20 世纪 80 年代中期开始，专用集成电路（Application Specific Integrated Circuit, ASIC）制作技术日趋成熟，标志着数字集成电路发展到了新的阶段。ASIC 是将一个复杂的数字系统制作在一块半导体芯片上，构成体积小、质量轻、功耗低、速度高、成本低且具有保密性的系统级芯片。ASIC 芯片的实现，可以由用户通过软件编程，将自己设计的数字系统制作在厂家生产的可编程逻辑器件（Programmable Logic Device, PLD）半成品芯片上，从而得到所需的系统级芯片。ASIC 芯片的实现，也可以由芯片生产厂家以全定制的方法批量生产。

当前的集成电路制造技术已使集成电路芯片内部的布线，细微到亚微米和深亚微米（ $0.13\sim 0.09\mu\text{m}$ ）量级。随着芯片上元件和布线的缩小，芯片的功耗降低而速度提高。最新生产的微处理器的时钟频率高达 3GHz。

数字技术应用的典型代表是电子计算机，电子计算机是随着电子技术的发展而发展的。数字电子技术的发展衍生出计算机的不断发展和完善，计算机技术的影响已遍及人类生产与生活的各个领域，掀起了一场“数字革命”。

数字技术被广泛地应用于广播、电视、通信、医学诊断、测量、控制、文化娱乐以及家庭生活等方面。由于数字信号具有便于存储、处理和传输的特点，使得许多传统使用模拟技术的领域，转而运用数字技术。

### 1. 数字集成电路的发展趋势

当前，数字集成电路正朝着大规模、低功耗、高速度、可编程、可测试和 CMOS 化方向发展。

#### (1) 大规模

随着数字电子技术的发展，一块半导体硅片上已经可以集成上百万个数字逻辑门，即使是一个相当复杂的数字系统，也有可能用单片数字集成电路予以实现。可以预见，将来的数字集成电路的集成规模会越来越大，集成规模的提高将极大地提高数字系统的可靠性，减小系统的体积，降低系统的功耗和成本。

#### (2) 低功耗

数字系统的功耗很大程度上，取决于所使用的集成电路芯片或模块，人们通常总是希望功耗越低越好。因此，低功耗是数字集成电路的当然选择。现在，即使是包含上百万个逻辑门的超大规模数字集成电路芯片，其功耗也可低达 mW 级。

#### (3) 高速度

随着社会的进步，需要处理的信息量越来越大，这就要求所使用的集成电路工作速度越来越高。正是在这样的需求背景下，个人计算机才从当初的 PC 快速发展到今天的奔腾计算机。处理速度为 1.5GHz 的奔腾 4 处理器，于 2000 年由计算机 CPU 芯片巨头美国 Intel 公司向全世界推出。用于核武器模拟试验的运算速度为 12.3 万亿次每秒的超级计算机“白色 ASCI”已由 IBM 公司研制成功，并安装在美国能源部设在加利福尼亚的劳伦斯·利弗莫尔国家实验室。一种旨在探明人体蛋白质结构，运算速度高达 1000 万亿次每秒的名为“蓝色基因”的超级计算机，也早已列入了 IBM 公司的研究计划。虽然计算机的这种高速度在很大程度上依赖于并行处理技术，但集成

电路芯片本身的高速度之作用不容置疑。

#### (4) 可编程

早期出现的 MSI/LSI (中规模/大规模) 数字集成电路芯片, 其功能是由生产厂家根据用户的一般需求而在生产时决定的。大多数情况下, 用户使用这种通用型集成电路芯片来实现各种逻辑功能还是非常方便的。但是, 当数字系统比较复杂时, 所需要的逻辑模块数量往往比较多, 这不仅增大了系统的体积和功耗, 也降低了系统的可靠性。此外, 使用常规模块设计数字系统, 也无法防止别人的分析和仿制, 设计者的知识产权及合法权益无法得到有效保护。

为了解决上述问题, 现在的许多 LSI/VLSI (大规模/超大规模) 数字集成电路芯片具有“可编程”的特性。即厂家在生产这些模块时, 只生产“半定制”的产品, 模块的具体功能由用户根据实际需要进行现场“编程”来决定。这种可编程逻辑器件 (PLD), 一般具有多次“可编程”甚至“在系统可编程” (In-System Programmable, ISP) 的能力, 以及“硬件保密”的能力, 这不仅为用户研制开发产品带来了极大的方便和灵活性, 而且也大大提高了产品的可靠性和保密性。

#### (5) 可测试

数字集成电路的规模越来越大, 功能也越来越复杂。为了便于数字系统的使用与维护, 要求所使用的逻辑模块具有“可测试性”, 用户可方便地对其进行“故障诊断”。“可测试”已成为未来数字集成电路的一个重要的发展趋势。

#### (6) CMOS 化

数字集成电路芯片所用的器件材料以硅材料为主, 在高速电路中, 也使用化合物半导体材料, 如砷化镓等。晶体管-晶体管逻辑门电路 (Transistor-Transistor Logic, TTL) 问世较早, 其生产工艺经过不断改进, 是至今仍在使用的基本逻辑器件之一。但是, 随着金属-氧化物-半导体 (Metal-Oxide-Semiconductor, MOS) 工艺, 特别是互补金属-氧化物-半导体 (Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS) 工艺的发展, CMOS 集成电路器件具有很高的电路集成度和工作速度, 并且功耗很低, 因此, TTL 集成电路器件的主导地位已被 CMOS 集成电路器件所取代。

## 2. 数字电路中的操作

在数字电路中, 主要有两种操作, 即对数字量的算术操作和对逻辑量的逻辑操作。

### (1) 算术操作

数字电路可以对各种数字量进行算术操作, 完成加、减、乘、除等基本算术运算。电子计算机之所以称为计算机, 就是因为其 CPU 中的运算器, 由于采用数字电路而可以对各种数据进行快速的算术运算, 使得“计算”成为电子计算机的一个重要特色。

### (2) 逻辑操作

数字电路不仅可以对各种数字量进行算术运算, 而且可以对各种逻辑量进行逻辑运算。数字电路具有根据逻辑变量取值进行逻辑推理和逻辑判断的能力。为了突出这一特点, 有时也将数字电路称为数字逻辑电路, 甚至叫逻辑电路。电子计算机就因为这种逻辑思维能力而被称为“电脑”。

### 1.1.4 数字集成电路的分类及特点

前面给出了模拟电路和数字电路的概念, 实际上, 电子电路按功能分为模拟电路和数字电路。根据数字电路的结构特点及其对输入信号的响应规则的不同, 数字电路可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路。数字电路中的电子器件, 如二极管、三极管, 工作于开关状态, 时而饱和

导通，时而截止，构成电子开关。这些电子开关是组成逻辑门电路的基本器件。逻辑门电路又是数字电路的基本单元，如果将这些门电路及其他元器件集成在一片半导体芯片上，就构成了数字集成电路。

很多情况下，我们将数字集成电路称为芯片、模块、器件。若干数字集成电路芯片按照一定的方案连接在一起，可以构成功能强大的数字电路系统，我们称之为数字系统。

### 1. 数字集成电路的分类

从集成度来看，数字集成电路可分为小规模集成电路（SSI）、中规模集成电路（MSI）、大规模集成电路（LSI）、超大规模集成电路（VLSI）和甚大规模集成电路（ULSI）五类。所谓集成度，是指每一片芯片所包含的逻辑门电路的个数。表 1.1 所示为数字集成电路的分类情况。

表 1.1 数字集成电路的分类

分 类	门 的 个 数	典型数字集成电路
小规模集成电路	最多 12	逻辑门、触发器
中规模集成电路	12~99	计数器、加法器
大规模集成电路	100~9999	小型存储器、门阵列
超大规模集成电路	10000~99999	大型存储器、微处理器
甚大规模集成电路	10 <sup>6</sup> 以上	可编程逻辑器件（PLD）、多功能专用集成电路（ASIC）

### 2. 数字集成电路的特点

与模拟电路相比，数字电路具有抗干扰能力强、可靠性高、精确性和稳定性好、功耗低、速度高、通用性广、便于集成、便于故障诊断、便于系统维护等突出优点。以抗干扰能力和可靠性为例，数字电路不仅可以通过整形去除叠加于传输信号上的噪声与干扰，而且可以进一步利用差错控制技术对传输信号进行检错和纠错。

## 1.2 数制

本节首先介绍常用计数体制，包括十进制、二进制和十六进制，然后介绍数制之间相互转换的方法。在日常生活中，人们习惯于使用十进制，而在数字系统中常采用二进制、八进制和十六进制等。

### 1.2.1 十进制

**数制**（Number System）是人类表示数值大小的各种方法的统称。迄今为止，人类都是按照进位方式来实现计数的，这种计数制度称为进位计数制，简称进位制。大家熟悉的十进制，就是一种典型的计数体制。

一种数制中，允许使用的数符的个数，称为这种数制的**基数**（Radix）。例如，十进制（Decimal）中允许使用 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 共 10 个数符，其中最大数符是 9，因此，十进制的基数为 10。一般而论， $r$  进制的基数就是  $r$ ，允许使用的最大数符为  $r-1$ 。

一种数制中，表示数中不同位置上数字的单位数值，称为**权**（Power）。例如，十进制数 635.78，左边第一位是百位（数字 6 代表 600），权为  $10^2$ ；左边第二位是十位（数字 3 代表 30），权为  $10^1$ ；左边第三位是个位（数字 5 代表 5），权为  $10^0$ ；小数点右边第一位是十分位（数字 7 代表 7/10），



权为 $10^{-1}$ ；小数点右边第二位是百分位（数字8代表8/100），权为 $10^{-2}$ 。

十进制是以10为基数的计数体制，在日常生活和工作中是最常用的。它有0、1、2、3、4、5、6、7、8、9共十个数符，计数规律是“逢十进一”，即在计数的过程中，一旦计数满十，就向高位进一，故称为十进制。

任何一个十进制数，按位置计数法都可表示为

$$(D)_{10} = (a_{n-1}a_{n-2} \cdots a_1a_0a_{-1} \cdots a_{-m})_{10}$$

位置计数法实际上是如下多项式计数法（也称按位权展开式）省略各位权值和运算符号并增加小数点（小数点也称为基点）后的简记形式，即

$$\begin{aligned}(D)_{10} &= a_{n-1}10^{n-1} + a_{n-2}10^{n-2} + \cdots + a_110^1 + a_010^0 + a_{-1}10^{-1} + \cdots + a_{-m}10^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \cdot 10^i\end{aligned}$$

式中， $i$ 表示数中的第 $i$ 位； $a_i$ 为第 $i$ 位的数符，它可以是0~9这10个数符中的任何一个； $n$ 、 $m$ 为正整数， $n$ 表示整数部分的位数； $m$ 表示小数部分的位数；10表示计数制的基数， $D$ 的下标为10，表示 $D$ 是一个十进制数； $10^i$ 为第 $i$ 位的权。可见，任何一个十进制数都可以按位权展开，即把每一位的位权值与各自的数符相乘，然后对每一项求和。例如，

$$(2561.347)_{10} = 2 \times 10^3 + 5 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 1 \times 10^0 + 3 \times 10^{-1} + 4 \times 10^{-2} + 7 \times 10^{-3}$$

生活中除了十进制外，人们根据计数的不同要求，也采用十二进制、六十进制等。按照以上方法，可以写出任意进制数的按位权展开式：

$$\begin{aligned}(D)_N &= a_{n-1}N^{n-1} + a_{n-2}N^{n-2} + \cdots + a_1N^1 + a_0N^0 + a_{-1}N^{-1} + \cdots + a_{-m}N^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \cdot N^i\end{aligned}$$

式中， $N$ 称为计数的基数， $a_i$ 为第 $i$ 位的数符， $N^i$ 称为第 $i$ 位的权。

## 1.2.2 二进制

在数字电路和计算机中，机器码（计算机能执行的程序代码）是用二进制（Binary）表示的。二进制是以2为基数的计数体制，它只有0、1两个数符，计数规律是“逢二进一”，故称为二进制。在二进制数中，每个数位的位权值为2的幂。因此，二进制数也可以按位权展开：

$$\begin{aligned}(D)_2 &= (a_{n-1}a_{n-2} \cdots a_1a_0a_{-1} \cdots a_{-m})_2 \\ &= a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \cdots + a_12^1 + a_02^0 + a_{-1}2^{-1} + \cdots + a_{-m}2^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \cdot 2^i\end{aligned}$$

式中， $a_i$ 是第 $i$ 位的数符，只能是0或1， $n$ 、 $m$ 为正整数，2是二进制的基数， $2^i$ 表示第 $i$ 位的权。

例如，可将二进制数11010.101表示为

$$(11010.101)_2 = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$$

在数字系统中，采用二进制是比较方便的，因为二进制只有两个数符0和1。因此，二进制数的每一位数字都可以用某些元器件所具有的两个不同的稳定状态来表示，例如三极管的饱和工作状态与截止工作状态，某些电子器件输出端的高电平工作状态和低电平工作状态。只要用其中一种状态表示1，而用另一种状态表示0，就可以表示二进制数。但是，用二进制表示一个数时通常位数会很多，书写和阅读很不方便，而且与人们习惯的计数方法不尽相同，因而需要把二进