



应用型本科信息大类专业“十三五”规划教材

数字电子技术 基础

主编◎白彦霞 陈晓芳

本书特色

- ▶ 精讲基础，强化实践，理论联系实际
- ▶ 以培养应用能力为目的，注重动手能力、设计能力、创新能力的培养
- ▶ 课后习题丰富，基础练习、综合应用、考研类习题有机结合
- ▶ 基础性实验、综合性实验与Multisim仿真相结合，提升实践应用能力
- ▶ 系统性强，并且突出集成器件的应用
- ▶ 可作为从事电子技术工作的工程技术人员参考书



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



应用型本科信息大类专业“十三五”规划教材

数字电子技术 基础



主 编◎白彦霞 陈晓芳

副主编◎赵 燕 卜旭芳 韩海花 李



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书定位在“应用型本科层次”，内容简明，通俗易懂，由浅入深，突出集成器件的应用，理论联系实际。

全书共分为 12 章，分别为：数字逻辑概论、逻辑代数基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、锁存器与触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与变换、数/模和模/数转换、半导体存储器、可编程逻辑器件、数字电路 Multisim 仿真研究、数字电路应用实例。

为方便教学，本书还配有电子课件等教学资源包，任课教师和学生可以登录“我们爱读书”网(www.ibook4us.com)免费注册并浏览，或者发邮件至 hustpeiit@163.com 免费索取。

本书篇幅适中、可读性强，可作为普通高等院校计算机相关专业、电气自动化技术和信息类相关专业应用型本(专)科的教材或参考书，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术基础/白彦霞,陈晓芳主编. —武汉:华中科技大学出版社,2017.6
应用型本科信息大类专业“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5680-2854-7

I. ①数… II. ①白… ②陈… 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(2017)第 108362 号

数字电子技术基础

Shuzi Dianzi Jishu Jichu

白彦霞 陈晓芳 主编

策划编辑：康 序

责任编辑：狄宝珠

责任监印：朱 玢

出版发行：华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话：(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编：430223

录 排：武汉正风天下文化发展有限公司

印 刷：武汉市籍缘印刷厂

开 本：787mm×1092mm 1/16

印 张：18.5

字 数：482 千字

版 次：2017 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价：38.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题，请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线：400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前言

PREFACE

本书定位在“应用型本科层次”，内容简明，通俗易懂，由浅入深，突出集成器件的应用，理论联系实际。

全书共分为 12 章，分别为：数字逻辑概论、逻辑代数基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、锁存器与触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与变换、数/模和模/数转换、半导体存储器、可编程逻辑器件、数字电路 Multisim 仿真研究、数字电路应用实例。书后附有课后习题答案。

本书在内容组织上以讲清组合逻辑电路和时序逻辑电路的分析方法和设计方法为主线来介绍各种逻辑器件的功能及应用，贯彻理论联系实际和少而精的原则，加强了对中规模集成电路的应用。对教学目的和要求中要求必须掌握的基本概念、基本原理和基本分析方法，做到讲深讲透，并注意讲清思路、启发思维，以培养举一反三的能力。本书始终贯彻“讲、学、练”相结合的原则，从能力培养的角度出发，培养学生分析问题和解决问题的能力。

本书第 1 章由李靖编写，第 2 章和第 10 章由韩海花编写，第 3 章和第 5 章由卜旭芳编写，第 4 章由白彦霞编写，第 6 章和第 8 章由陈晓芳编写，第 7 章、第 11 章和第 12 章由赵燕编写，第 9 章由王琪编写，课后答案由陈晓芳整理。全书由陈晓芳整理，白彦霞定稿。北京化工大学莫德举教授和华北科技学院刘林生副教授对该书提出了许多宝贵的意见和建议，编者在此表示感谢。此外，感谢李丽芬、云彩霞、张秋菊、刘继超对该书编写工作的支持！

本书篇幅适中、可读性强，可作为普通高等院校计算机相关专业、电气自动化技术和信息类相关专业应用型本（专）科的教材或参考书，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

为方便教学，本书还配有电子课件等教学资源包，任课教师和学生可以登录“我们爱读书”网(www.ibooks4us.com)免费注册并浏览，或者发邮件至 hustpeiit@163.com 免费索取。

虽然编者对书稿做了多次校核，但是编者水平有限，离高等教育教学尚有差距，恳请使用本教材的师生和相关读者予以批评指正，以便不断提高。

编者

2017 年 5 月

目
录

CONTENTS

第 1 章 数字逻辑概论	(1)
1.1 数字电路与数字信号	(1)
1.2 数制	(9)
1.3 二进制数的算术运算	(15)
1.4 二进制代码	(18)
1.5 二值逻辑变量与基本逻辑运算	(21)
1.6 逻辑函数及其表示方法	(24)
第 2 章 逻辑代数基础	(28)
2.1 逻辑代数	(28)
2.2 逻辑函数的卡诺图化简法	(34)
第 3 章 逻辑门电路	(43)
3.1 MOS 逻辑门电路	(43)
3.2 TTL 逻辑门电路	(55)
3.3 逻辑描述中的几个问题	(61)
3.4 逻辑门电路使用中的几个实际问题	(64)
第 4 章 组合逻辑电路	(70)
4.1 概述	(70)
4.2 组合逻辑电路的分析	(70)
4.3 组合逻辑电路的设计	(72)
4.4 组合逻辑电路中的竞争冒险	(76)
4.5 常用组合逻辑集成电路	(80)
第 5 章 锁存器与触发器	(115)
5.1 概述	(115)
5.2 锁存器	(116)
5.3 触发器的电路结构和工作原理	(122)
5.4 触发器的逻辑功能	(125)
第 6 章 时序逻辑电路	(134)
6.1 时序逻辑电路的基本概念	(134)
6.2 同步时序逻辑电路的分析	(138)

6.3	异步时序逻辑电路的分析	(142)
6.4	若干典型的时序逻辑电路	(144)
6.5	同步时序逻辑电路的设计	(164)
第7章	脉冲波形的产生与变换	(178)
7.1	概述	(178)
7.2	单稳态触发器	(178)
7.3	施密特触发器	(184)
7.4	多谐振荡器	(188)
7.5	555 定时器及其应用	(191)
第8章	数/模和模/数转换	(203)
8.1	概述	(203)
8.2	D/A 转换器	(204)
8.3	A/D 转换器	(212)
第9章	半导体存储器	(223)
9.1	只读存储器	(224)
9.2	随机存取存储器	(231)
9.3	存储器容量的扩展	(234)
第10章	可编程逻辑器件	(237)
10.1	可编程逻辑器件的基本特点	(237)
10.2	可编程逻辑阵列(PLA)	(238)
10.3	可编程阵列逻辑(PAL)	(238)
10.4	复杂的可编程逻辑器件(CPLD)	(238)
第11章	数字电路 Multisim 仿真研究	(247)
11.1	逻辑函数化简与变换的 Multisim 仿真研究	(247)
11.2	组合逻辑电路的 Multisim 仿真研究	(248)
11.3	时序逻辑电路的 Multisim 仿真研究	(250)
11.4	微分型单稳态触发器的 Multisim 仿真研究	(252)
11.5	555 定时器构成的多谐振荡器的 Multisim 仿真研究	(253)
第12章	数字电路应用实例	(255)
12.1	遮挡式红外声光报警装置	(255)
12.2	30 秒倒计时器	(256)
课后答案		(259)
附录		(287)
附录 A	常用逻辑符号对照表	(287)
附录 B	CMOS 和 TTL 门电路的技术参数表	(288)
附录 C	本书常用符号表	(289)
参考文献		(290)

第1章 数字逻辑概论

主要教学内容

1. 数字电路与数字信号。
2. 数制。
3. 二进制数的算术运算。
4. 二进制代码。
5. 二值逻辑变量与基本逻辑运算。
6. 逻辑函数及其表示方法。

教学目的和要求

1. 了解模拟信号与数字信号、模拟电路与数字电路的区别与联系。
2. 熟练掌握数字量、数制的概念及不同数制的互化。
3. 熟练掌握二进制数的算术运算。
4. 掌握基本逻辑运算、逻辑函数的概念及逻辑问题的描述。
5. 掌握逻辑函数的常用表示方法:表达式、真值表、逻辑图、波形图,并掌握各种表示方法的相互转换。

随着现代电子技术的发展,人们正处于一个信息时代。每天都要通过电视、广播、通信、互联网等多种媒体获取大量的信息。而现代信息的存储、处理和传输越来越趋于数字化。在人们的日常生活中,常用的计算机、电视机、音响系统、视频记录设备、长途电信等电子设备或电子系统,无一不采用数字电路或数字系统。因此,数字电子技术的应用越来越广泛。

本章首先介绍数字技术的发展及应用、数字集成电路的分类及特点、模拟信号与数字信号以及数字信号的描述方法。然后讨论数制、二进制数的算术运算、二进制码和数字逻辑的基本运算。



1.1 数字电路与数字信号

1.1.1 数字技术的发展及其应用

20 世纪中期至 21 世纪初,电子技术特别是数字电子技术得到了飞速的发展,使工业、农业、科研、医疗以及人们的日常生活发生了根本性的变革。

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 20 世纪中期,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,第一只晶体三极管于 1947 年问世,开创了电子技术的新领域。20 世纪 60 年代初,模拟和数字集成电路相继上市。到 20 世纪 70 年代末微处理器的问世,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 cm^2 的硅片上集成 3500 万个元件,说明集成电路进入甚大规模阶段。随着微加工技术的发展,当前的制造技术已使集成电路芯片内部的布线细微到纳米量级。例如英特尔第四代酷睿系列产品 i7 4790k,它的制造工艺已经达到 22 nm 级别,时钟频率高达 4.4 GHz

(10^9 Hz)。随着芯片上元件和布线的缩小,芯片的功耗降低而速度却大为提高。

数字技术应用的典型代表是电子计算机,它是伴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经济生活的各个领域,掀起了一场“数字革命”。数字技术被广泛应用于广播、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,使得许多使用传统模拟技术的领域转而运用数字技术。具体举例如下:

1. 照相机

传统的模拟相机是用卤化银感光胶片记录影像,胶片成像过程需要严格的加工工艺和技术,而且胶片不便于保存和传输。数字相机是将影像的光信号转换为数字信号,以像素阵列的形式进行存储。存储的信息包括色彩、光强度和位置等。例如 640×480 的像素阵列中,每个像素的红、绿、蓝三元色均是 8 位,则该阵列的数据超过 700 万。如果用 JPEG 图形格式进行压缩处理后,数据量只为原来的 5%,便于进行网络的远距离传输。随着计算机处理照片技术的推广,外置大容量小体积硬盘的普及,激光数字彩色照片冲印设备的广泛应用,数字相机将取代模拟相机。

JPEG(joint picture experts group 的缩写)是国际标准化组织 ISO(international standard organization 的缩写)和 CCITT(international telephone and telegraph consultative committee 的缩写)联合制定的静止图像压缩编码标准,是目前静止图像压缩比最高的文件格式。

2. 视频记录设备

VCD(video compact disk 的缩写)和 DVD(digital video disk 的缩写)普及之前,视频信息主要以记录模拟信号的录像带为主,而录像带的携带和保存都不方便。VCD 是利用 MPEG-1 压缩方式,以数字信号记录图像和声音,它可以在直径为 12 cm 的光盘上,记录 74 min 的影音信息。DVD 利用 MPEG-2 的压缩技术,与 VCD 相比,它的容量更大,画质和音质更好。仅单面单层、直径 12 cm 的光盘就可存储 350 亿位数据,可播放 133 min,而双面双层存储的数据可达到其 4 倍之多。因此,DVD 已成为家庭影院的重要组成部分。

MPEG(moving picture experts group 的缩写)是世界数字视频和音频压缩比的标准化组织制定的,用于多媒体运动图像和伴音的数据压缩编码的国际标准。MPEG-1 可将移动图像和相关的声音压缩成二进制比特流,压缩比为 200:1。与 MPEG-1 相比,MPEG-2 的视频编码做了多项改进,使压缩比更高,图像质量更好。

3. 交通灯控制系统

1920 年交通灯问世。早期的交通灯(红黄绿灯)是用机电定时器控制的。后来用继电器和开关构成的控制器,根据道路上传感器检测的信号进行控制。现在的交通灯由计算机控制,可以将监测系统检测到的车辆流量信息送到系统计算机,经计算后进行合理的时间分配。如果某路口东西方向堵塞,则将该路口东西方向的绿灯自动延时,并将附近区域东西方向的红灯也自动地延时,堵塞解除后,信号灯恢复正常状态。

随着微电子技术的发展,将会有更多的数字电子产品陆续问世。数字技术的发展、计算机的应用正在改变着人类的生产方式、生活方式及思维方式,它使得工业自动化、农业现代化、办公自动化和通信网络化成为现实。但是,无论数字技术如何发展,终将不能代替模拟技术。自然界中绝大多数物理量都是模拟量,数字技术不能直接接受模拟信号进行处理,也无法将处理后的数字信号直接送到外部物理世界。因此,模拟技术在电子系统中是不可缺少的。由于模拟技术难度远高于数字技术,其发展自然较慢。实际电子系统一般是模拟电路和数字电路的结合,在发展数字技术的同时,也应重视模拟技术的发展。

1.1.2 数字集成电路的分类及特点

电子电路按功能分为模拟电路和数字电路。根据电路的结构特点及其对输入信号响应规则的不同,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,例如二极管、三极管(BJT、FET)处于开关状态,时而导通,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。如果将这些门电路集成在一片半导体芯片上就构成数字集成电路。

1. 数字集成电路的分类

数字电路的发展历史与模拟电路一样,经历了由电子管、半导体分立器件到集成电路的过程。由于集成电路的发展非常迅速,很快占有主导地位,因此,数字电路的主流形式是数字集成电路。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,随后发展到中规模;20世纪70年代末,微处理器的出现,使数字集成电路的性能发生了质的飞跃;从20世纪80年代中期开始,专用集成电路(ASIC, ASIC是application specific integrated circuit的缩写)制作技术已趋于成熟,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芯片的制作可以采用全定制或半定制的方法。全定制适用于生产批量的成熟产品,由半导体生产厂家制造。对于生产批量小或研究试制阶段的产品,可以采用半定制方法。它是用户通过软件编程,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(PLD, PLD是programmable logic device的缩写)半成品芯片上,便得到所需的系统级芯片。从集成度来说,数字集成电路可分为小规模(SSI)、中规模(MSI)、大规模(LSI)、超大规模(VLSI)和甚大规模(ULSI)五类。所谓集成度,是指每一芯片所包含的门的个数。表1-1-1所示为数字集成电路的分类。

表 1-1-1 数字集成电路的分类

分 类	门的个数	典型集成电路
小规模	最多 12 个	逻辑门、触发器
中规模	12~99	计数器、加法器
大规模	100~9 999	小型存储器、门阵列
超大规模	10 000~99 999	大型存储器、微处理器
甚大规模	10^6 以上	可编程逻辑器件、多功能专用集成电路

数字电路的发展不仅表现在集成度方面,而且在半导体器件的材料、结构和生产工艺上均有所体现。数字集成器件所用的材料以硅材料为主,在高速电路中,也使用化合物半导体材料,例如砷化镓等。

逻辑门是数字集成电路的主要单元电路,按照结构和工艺分为双极型、MOS型和双极-MOS型。晶体管-晶体管逻辑门电路TTL(transistor-transistor logic的缩写)问世较早,其工艺经过不断改进,是至今仍在使用的的基本逻辑器件之一。随着金属-氧化物-半导体(MOS)工艺特别是CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor的缩写)工艺的发展,使得集成电路具有很高的电路集成度和工作速度,并且功耗很低,因此TTL的主导地位已被CMOS器件所取代。

2. 数字集成电路的特点

与模拟电路相比,数字电路主要有下列优点。

1) 稳定性高,结果的再现性好

数字电路的工作可靠,稳定性好。一般而言,对于一个给定的输入信号,数字电路的输出总是相同的。而模拟电路的输出则随着外界温度和电源电压的变化,以及器件的老化等因素而发生变化。

2) 易于设计

数字电路又称为数字逻辑电路,它主要是对用 0 和 1 表示的数字信号进行逻辑运算和处理,不需要复杂的数学知识,广泛使用的数学工具是逻辑代数。数字电路能够可靠地区分 0 和 1 两种状态就可以正常工作,电路的精度要求不高。因此,数字电路的分析与设计相对较容易。

3) 可大批量生产,成本低廉

数字电路结构简单,体积小而成本低廉。

4) 可编程性

现代数字系统的设计,大多采用可编程逻辑器件,即厂家生产的一种半成品芯片。用户根据需要用硬件描述语言(HDL, HDL 是 hardware description language 的缩写)在计算机上完成电路设计和仿真,并写入芯片,这给用户研制开发产品带来了极大的方便性和灵活性。

5) 高速度,低功耗

随着集成电路工艺的发展,数字器件的工作速度越来越高,而功耗越来越低。集成电路中单管的开关速度可以做到小于 10^{-11} s。整体器件中,信号从输入到输出的传输时间小于 2×10^{-9} s。百万门以上超大规模集成芯片的功耗,可以低达毫瓦级。

由于具有这些优点,数字电路在众多领域取代了模拟电路,而且可以肯定这种趋势将会继续发展下去。

3. 数字电路的分析、设计与测试

1) 数字电路的分析方法

数字电路处理的是数字信号,电路中的半导体器件工作在开关状态,例如晶体管工作在饱和区或截止区,所以不能采用模拟电路的分析方法,例如小信号模型分析法。数字电路又称为逻辑电路,在电路结构、功能和特点等方面均不同于模拟电路,主要研究的对象是电路的输出与输入之间的逻辑关系,因而,数字电路的分析方法与模拟电路完全不同,所采用的分析工具是逻辑代数,表达电路输出与输入的关系主要用真值表、功能表、逻辑表达式或波形图。

随着计算机技术的发展,借助计算机仿真软件,可以更直观、更快捷、更全面地对电路进行分析。不仅可以对数字电路,而且可以对数模混合电路进行仿真分析。不仅可以进行电路的功能仿真,显示逻辑仿真的波形结果,以检查逻辑错误,而且可以考虑器件及连线的延迟时间,进行时序仿真,检测电路中存在的冒险竞争、时序错误等问题。

2) 数字电路的设计方法

数字电路的设计是从给定的逻辑功能要求出发,确定输入、输出变量,选择适当的逻辑器件,设计出符合要求的逻辑电路。设计过程一般有方案的提出、验证和修改三个阶段。设计方式分为传统的设计方式和基于 EDA(electric design automation 的缩写)软件的设计方式。传统的硬件电路设计全过程都是由人工完成,硬件电路的验证和调试是在电路构成后进行的,电路存在的问题只能在验证后发现。如果存在的问题较大,有可能重新设计电路,因而设计周期长,资源浪费大,不能满足大规模集成电路设计的要求。基于 EDA 软件的设计方式是借助于计算机来快速准确地完成电路的设计。设计者提出方案后,利用计算机进

行逻辑分析、性能分析、时序测试,如果发现错误或方案不理想,可以重复上述过程直至得到满意的电路,然后进行硬件电路的实现。这种方法提高了设计质量,缩短了设计周期,节省了设计费用,提高了产品的竞争力。因此 EDA 软件已成为设计人员不可缺少的有力工具。

EDA 软件的种类较多,大多数软件包含以下主要工具。

(1) 原理图输入 设计者可以如同在纸上画电路一样,将逻辑电路图输入到计算机中,软件自动检查电路的接线、电源及地线的连接、信号的连接等。

(2) HDL 文本输入 硬件描述语言是用文本的形式描述硬件电路的功能、信号连接关系以及时序关系。它虽然没有图形输入那么直观,但功能更强,可以进行大规模、多个芯片的数字系统的设计。常用的 HDL 有 ABEL、VHDL 和 Verilog HDL 等。

(3) 测试平台 当逻辑电路的设计输入到计算机后,需要测试其逻辑功能或时序关系的正确性。测试平台用于编写或绘制激励信号。

(4) 仿真和综合工具 仿真包括对电路的功能仿真和时序仿真。功能仿真用于验证电路的功能和逻辑关系是否正确。时序仿真考虑门及连线的延时,验证系统内部工作过程及输入/输出的时序关系是否满足设计要求。综合工具将 HDL 描述的电路的逻辑关系,转换为门和触发器等元件及其相互连接的电路形式。

3) 数字电路的测试技术

数字电路在正确设计和安装后必须经过严格的测试方可使用。须具备下列基本仪器设备。

(1) 数字电压表 这是指把被测电压的数值通过数字技术,变换成数字量,然后用数码管以十进制数字显示被测量电压值的仪表,用来测量电路中各点的电压,并观察其测试结果是否与理论分析一致。

(2) 电子示波器 这是利用阴极射线管作为显示器所构成的一种电子测试仪器,不但能测量电信号的动态过程,还可以定量测量表征电信号特性的参数,常用来观察电路中各点处信号的波形。一个复杂的数字系统,在主频率信号源的激励下,电信号的逻辑关系可以从波形图中得到验证。

(3) 逻辑分析仪 这是一种类似于示波器的专用波形测试设备,它利用时钟从测试设备上采集和显示数字信号。但是逻辑分析仪不像示波器那样有许多电压等级,通常只显示两个电压(逻辑 1 和 0),它可以监测硬件电路工作时的逻辑电平(高或低),便于用户检测,分析电路设计(硬件设计和软件设计)中的错误,而且它可以同时显示 8~32 位的数字波形,十分有利于对整体电路各部分之间的逻辑关系进行分析。

1.1.3 模拟信号与数字信号

1. 模拟信号

模拟信号是指时间上或幅值上连续变化的物理量,如广播的声音信号,每天的温度变化等。处理模拟信号电子电路称为模拟电路。在工程技术上,为了便于处理和分析,通常用传感器将模拟量转换为与之成比例的电压或电流信号,然后再送到电子系统中进一步处理。在分析过程中,通常将电压、电流信号用波形来表示。图 1-1-1(a)所示为由热电偶得到的一个模拟电压信号波形。

2. 数字信号

与模拟量相对应的另一类物理量称为数字量。它们是在一系列离散的时刻取值,数值的大小和每次的增减都是量化单位的整数倍,即它们是一系列时间离散、数值也离散的信号。表示数字量的信号称为数字信号。将工作于数字信号下的电子电路称为数字电路。例如用温度计测量某一天内的温度变化,测量时间取在整点时刻读取数据,并且对数据进行量

化,即某次的温度计的读数为 30.35°C ,取 1°C 作为量化单位,则温度值为 30°C 。这样一天内的温度记录在时间上和数值上都不是连续的,温度是以 1°C 为单位增加或减少。显然,用数字信号也可以表示温度、声音等各种物理量的大小,只是存在着一定的误差,误差取决于量化单位的大小。

随着计算机的广泛应用,绝大多数电子系统都采用计算机来对信号进行处理。由于计算机无法直接处理模拟信号,所以需要将模拟信号转换为数字信号。

3. 模拟量的数字表示

图 1-1-1 所示为转换过程中的各种波形图,图 1-1-1(a)所示为模拟电压信号。首先对模拟信号取样。图 1-1-1(b)所示为模拟信号通过取样电路后,变成时间离散、幅值连续的取样信号, $t_0, t_1, t_2, \dots$ 为取样时间点。这里幅值连续是指各取样点的幅值没有量化,仍然与对应的模拟信号的幅值相同,例如图 1-1-1(a)和图 1-1-1(b)中 t_1 处的幅值均为模拟量 9.15 mV 。然后对取样信号进行量化即数字化。选取一个量化单位,将取样信号除以量化单位并取整数结果,得到时间离散、数值也离散的数字量。最后对得到的数字量进行编码,生成用 0 和 1 表示的数字信号,如图 1-1-1(c)所示。图中以 1 mV 作为量化单位,对 t_1 处的幅值 9.15 mV 进行量化,量化后数值为 9。该值用 8 位二进制数表示为 00001001。如果取样点足够多,量化单位足够小,数字信号可以较真实地反映模拟信号。关于模数和数模转换的详细讨论见第 8 章。

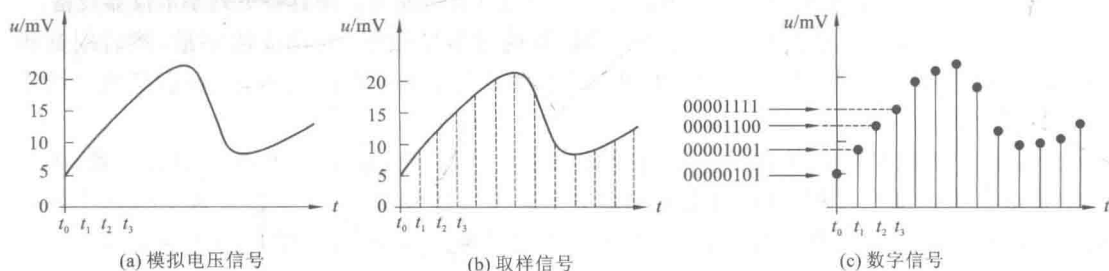


图 1-1-1 模拟量的数字表示

1.1.4 数字信号的描述方法

模拟信号的表示方式可以是数学表达式,也可以是波形图等。数字信号的表示方式可以是二值数字逻辑(二值数字逻辑是 binal digital logic 的译称),以及有逻辑电平描述的数字波形。

1. 二值数字逻辑和逻辑电平

在数字电路中,可以用 0 和 1 组成的二进制数表示数量的大小,也可以用 0 和 1 表示两种不同的逻辑状态。当表示数量时,两个二进制数可以进行数值运算,常称为算术运算,将在 1.3 节中介绍。当用 0 和 1 描述客观世界存在的彼此相互关联又相互对立的事物时,例如,是与非,真与假,开与关,低与高,通与断等,这里的 0 和 1 不是数值,而是逻辑 0 和逻辑 1。这种只有两种对立逻辑状态的逻辑关系称为二值数字逻辑或简称数字逻辑。

在电路中,可以很方便地用电子器件的开关来实现二值数字逻辑,也就是以高、低电平分别表示逻辑 1 和 0 两种状态。在分析实际数字电路时,考虑的是信号之间的逻辑关系,只要能区别出表示逻辑状态的高、低电平,可以忽略高、低电平的具体数值。表 1-1-2 所示为一类 CMOS 器件的电压范围与逻辑电平之间的关系。当信号电压在 $3.5\sim 5\text{ V}$ 范围内,都表示高电平;在 $0\sim 1.5\text{ V}$ 范围内,都表示低电平。这些表示数字电压的高、低电平通常称为逻辑电平(Logic Level 的译称)。应当注意,逻辑电平不是物理量,而是物理量的相对表示。

表 1-1-2 电压范围与逻辑电平的关系

电压	二值逻辑	电平
3.5~5 V	1	H(高电平)
0~1.5 V	0	L(低电平)

图 1-1-2(a)所示为用逻辑电平描述的数字波形,其中逻辑 0 表示低电平,逻辑 1 表示高电平。图 1-1-2(b)所示为 16 位数据的波形。通常在分析一个数字系统时,由于电路采用相同的逻辑电平标准,一般可以不标出高、低电平的电压值,时间轴也可以不标。

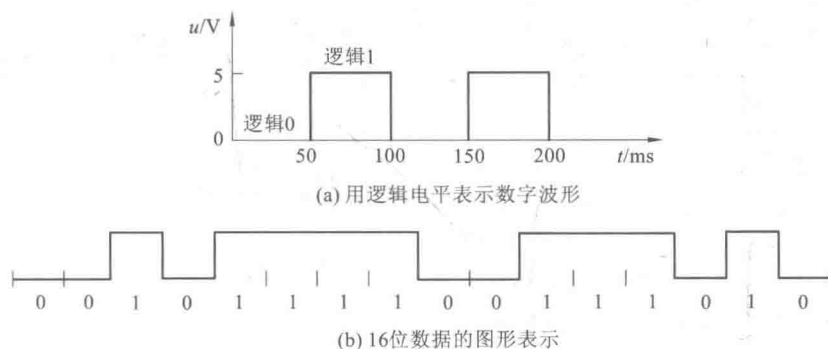


图 1-1-2 数字波形

2. 数字波形

1) 数字波形的两种类型

数字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,一种是非归零型,另一种是归零型。在图 1-1-3 中,一定的时间间隔 T ,称为 1 位(1 bit),或者一拍。如果在一个时间拍内用高电平代表 1,低电平代表 0,称为非归零型,如图 1-1-3(a)所示。如果在一个时间拍内有脉冲代表 1,无脉冲代表 0,称为归零型,如图 1-1-3(b)所示。两者的区别在于,非归零型信号在一个时间拍内不归零,而归零型信号在一个时间拍内会归零。只有作为时序控制信号使用的时钟脉冲是归零型,除此之外的大多数数字信号基本都是非归零型,非归零型信号使用较为广泛。

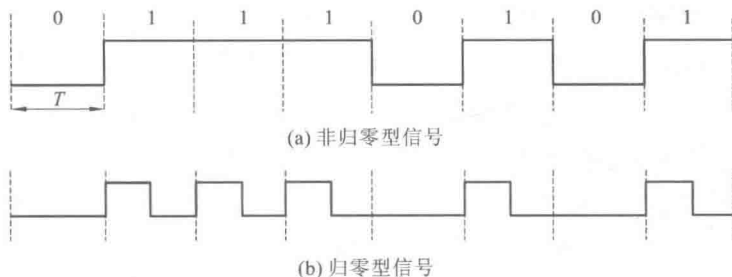


图 1-1-3 数字信号的传输波形

数字信号只有两个取值,故称为二值信号,数字波形又称为二值位图。非归零型信号的每位数据占用一个位时间。每秒钟传输数据的位数称为数据率或比特率。

例 1.1.1

某通信系统每秒钟传输 1 544 000 位(1.544 兆位)数据,求每位数据的

时间。

解

按题意,每位数据的时间为

$$\left[\frac{1.544 \times 10^6}{1 \text{ s}} \right]^{-1} = 647.67 \times 10^{-9} \text{ s} = 648 \text{ ns}$$

2) 周期性和非周期性

与模拟信号相同,数字波形也有周期性和非周期性之分。图 1-1-4 所示为这两类数字波形。

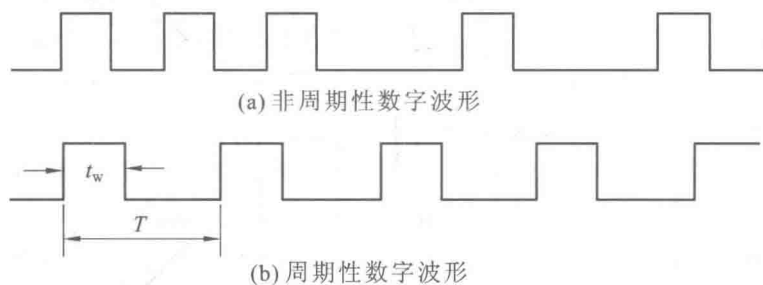


图 1-1-4 数字波形

周期性数字波形常用周期 T 和频率 f 来描述。脉冲波形的脉冲宽度用 t_w 表示,它表示脉冲的作用时间。另一个重要参数是占空比 q ,它表示脉冲宽度 t_w 占整个周期 T 的百分数,常用下式表示

$$q(\%) = \frac{t_w}{T} \times 100\% \quad (1-1-1)$$

当占空比为 50% 时,称此时的矩形脉冲为方波,即 0 和 1 交替出现并持续占有相同的时间。

例 1.1.2

设周期性数字波形的高电平持续时间 6 ms,低电平持续 10 ms,求占空比 q 。

解

因数字波形的脉冲宽度 $t_w = 6 \text{ ms}$,周期 $T = (6 + 10) \text{ ms} = 16 \text{ ms}$,则

$$q = \frac{6 \text{ ms}}{16 \text{ ms}} \times 100\% = 37.5\%$$

3) 实际数字信号波形

在实际的数字系统中,数字信号并没有那么理想。当它从低电平跳变到高电平,或从高电平跳到低电平时,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,如图 1-1-5 所示,将脉冲幅值的 10% 到 90% 时所经历的时间称为上升时间 t_r 。下降时间则相反,从脉冲幅值的 90% 到 10% 时所经历的时间称为下降时间 t_f 。将脉冲幅值的 50% 的两个时间点所跨越的时间称为脉冲宽度 t_w ,对于不同类型的器件和电路,其上升和下降时间各不相同。一般数字信号上升和下降时间的典型值为几纳秒(ns)。

4) 时序图

在数字电路中,表明各信号之间时序关系的波形图称为时序图,常用时序图或称为脉冲波形图来分析时序电路的逻辑功能。图 1-1-6 所示为一典型的时序图。图中 CP 为时钟脉冲信号,它是数字系统中的时间参考信号。地址线、片选和数据写入等信号也示于图 1-1-6 中。关于时序图中各波形的具体作用,将在后续章节中介绍。通常数字集成电路,例如存储器和时序逻辑器件等须附有时序图,以便于进行数字系统的分析、设计和应用。

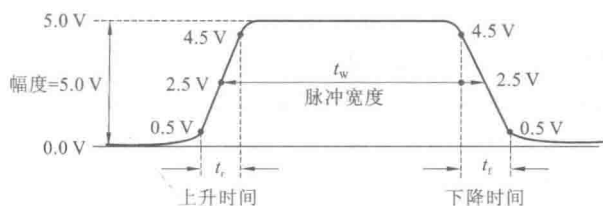


图 1-1-5 非理想脉冲波形

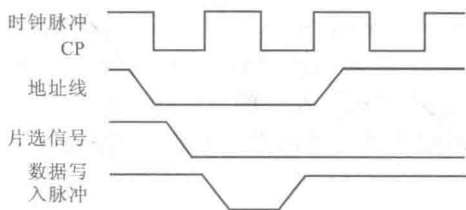


图 1-1-6 数据时序图

1.2 数制

人们在日常生活中经常遇到计数问题,并且习惯用十进制数。而在数字系统,例如在计算机系统中,数字和符号都是用电子元件的不同状态表示的,即以高、低电平表示。因为计算机内部只能识别二进制数,因此数字系统通常采用二进制数,有时也采用十六进制数或八进制数。这种多位数码的构成方式以及从低位到高位进位的规则称为数制。

在进位数制中,每个数位所用的不同的数字的个数叫作基数,如十进制每个数位有 0, 1, 2, ..., 9 十个不同的数字情况,也就是说十进制的基数是 10。同理,二进制数的每一位只能是 0 和 1,二进制的基数是 2。那八进制的基数是 8,十六进制的基数为 16。

在一个数字中,同一个数字符号处在不同位置上所代表的值是不同的,以我们最熟悉的十进制为例,数字 3 在十位数位置上表示 30,在百位数位置上表示 300,而在小数点后第 1 位上则表示 0.3。同一个数字符号,不管它在哪一个十进制数中,只要在相同位置上,其值都是相同的,例如,135 与 1235 中的数字 3 都在十位数位置上,而十位数位置上的 3 的值都是 30。通常称某个固定位置上的计数单位为位权。

1.2.1 十进制

所谓十进制就是以 10 为基数的计数体制。通常用 $(N)_D$ 或 $(N)_{10}$ 表示十进制数字 N ,下标 D (decimal) 表示十进制。任何十进制数都可以用 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个数码中的一个或几个,按一定的规律排列起来表示,其计数规律是“逢十进一”,即 $9+1=10$,其中左边的“1”为十位数,右边的“0”为个位数,也就是 $10=1 \times 10^1 + 0 \times 10^0$ 。这样,每一数码处于不同的位置时,它所代表的数值是不同的。例如,十进制数 4587.29 可以表示为

$$4587.29 = 4 \times 10^3 + 5 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 7 \times 10^0 + 2 \times 10^{-1} + 9 \times 10^{-2}$$

式中, 10^3 、 10^2 、 10^1 、 10^0 分别为千位、百位、十位和个位数数码的位权,而小数点以右数码的权值是 10 的负幂。这与珠算盘横梁上所标示的个、十、百、千的位权是相同的。

十进制数位权表达式可表示为

$$(N)_D = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} K_i \times 10^i \quad (1-2-1)$$

其中, 10 为基数; 10^i 为第 i 位的权, K_i 为基数“10”的第 i 次幂的系数。 K_i 的取值为 0 ~ 9 共 10 个数码。

用数字电路来存储或处理十进制数是不方便的。因为构成数字电路的基本思路是把电路的状态与数码对应起来。而十进制的十个数码要求电路有十个完全不同的状态,这样使得电路很复杂,因此在数字电路中不直接处理十进制数。

1.2.2 二进制

1. 二进制的表示方法

二进制就是以 2 为基数的计数体制。通常用 $(N)_B$ 或 $(N)_2$ 表示二进制数 N ,下标

B(binary) 表示二进制。二进制数中,只有 0 和 1 两个数码,并且计数规律是“逢二进一”,即 $1+1=10$ (读为“壹零”)。必须注意,这里的“10”与十进制数的“10”是完全不同的,它并不代表数“拾”。左边的“1”表示 2^1 位数,右边的“0”表示 2^0 位数,也就是 $10=1\times 2^1+0\times 2^0$ 。所以任意二进制数位权表达式可表示为

$$(N)_B = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} K_i \times 2^i \quad (1-2-2)$$

式中,2 为基数, 2^i 为第 i 位的权, K_i 为基数“2”的第 i 次幂的系数,它可以是 0 或者 1。式 (1-2-2) 也可以作为二进制数转换为十进制数的转换公式。

例 1.2.1 试将二进制数 $(1010110)_2$ 转换为十进制数。

解

将每 1 位二进制数与其位权相乘,然后按十进制加法相加便得相应的十进制数。

$$(1010110)_2 = 1\times 2^6 + 0\times 2^5 + 1\times 2^4 + 0\times 2^3 + 1\times 2^2 + 1\times 2^1 + 0\times 2^0 = (86)_{10}$$

2. 二进制的优点

与十进制相比较,二进制具有以下优点,因此它在计算机技术中被广泛采用。

(1) 二进制的数字装置简单可靠,所用元件少。

二进制只有两个数码 0 和 1,因此它的每 1 位数都可用任何具有两个不同稳定状态的元件来表示,例如 BJT 的饱和与截止,继电器接点的闭合和断开,灯泡的亮和不亮等。只要规定其中一种状态表示 1,另一种状态表示 0,就可以表示二进制数。这样,数码的存储、分析和传输,就可以用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。

3. 二进制的缺点

但是,采用二进制也有一些缺点。用二进制表示一个数时,位数多,例如,十进制数 49 表示为二进制数时,即为 110001,使用起来不方便也不习惯。

因此,在运算时原始数据多用人们习惯的十进制数,在送入机器时,就必须将十进制原始数据转换成数字系统能接受的二进制数。而在运算结束后,再将二进制数转换为十进制数,表示最终结果。

4. 二进制数的波形表示

在数字电子技术和计算机应用中,二值数据常用数字波形来表示。这样,数据比较直观,也便于使用电子示波器进行监视。图 1-2-1 所示为一计数器的波形,图中最左列标出了二进制数的位权(2^0 、 2^1 、 2^2 、 2^3)以及最低位(LSB,LSB 是 least significant bit 的缩写)和最高位(MSB,MSB 是 most significant bit 的缩写),最后一行标出了从 0 到 15 的等效十进制数。

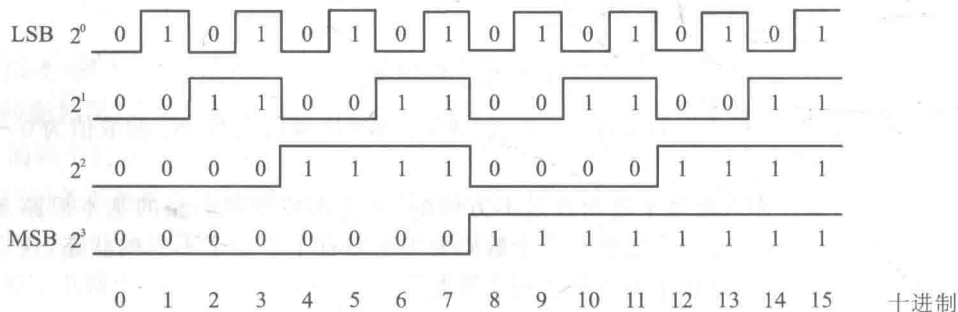


图 1-2-1 某一计数器的波形

从图 1-2-1 还可看出,每 1 位的波形均为对称方波,其占空比均为 50%,但每一波形的频率逐位减半直至最高位。

5. 二进制数据的传输

二进制数据从一处传输到另一处,可以采用串行方式或并行方式。对于串行方式,一组数据在时钟脉冲的控制下逐位传送。串行方式所需的设备简单,只需一根导线和一共同接地端即可。两台计算机之间,或计算机通过电话线与网络连接均采用这种方式。

二进制数据串行传输的示意图如图 1-2-2 所示,图 1-2-2(a)所示为二进制数据 00110110 从计算机 A 中串行传送到计算机 B。图 1-2-2(b)所示为数据信号在时钟脉冲 CP 的控制下,由最高位 MSB 到最低位 LSB 依次传输的波形图。注意,每传送 1 位数需要一个时钟周期,并且在时钟脉冲的下降沿完成。

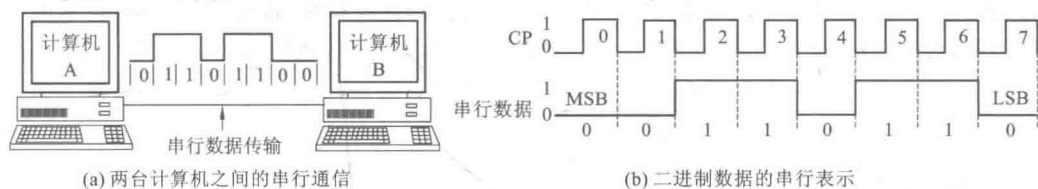


图 1-2-2 二进制数据串行传输示意图

若要求传输速度快,则可采用并行传输的方式,即将一组二进制数据同时传送。图 1-2-3 所示为二进制数据并行传输的示意图。图 1-2-3(a)所示为一台打印机从一台计算机以 8 位数据并行的方式取用数据。传输 8 位数据所需的时间为一个时钟脉冲的周期,只有串行传输时间的 1/8。但所需设备复杂,需用八条传输线和其他部件。并行传输在数字系统中是一种常用的技术。

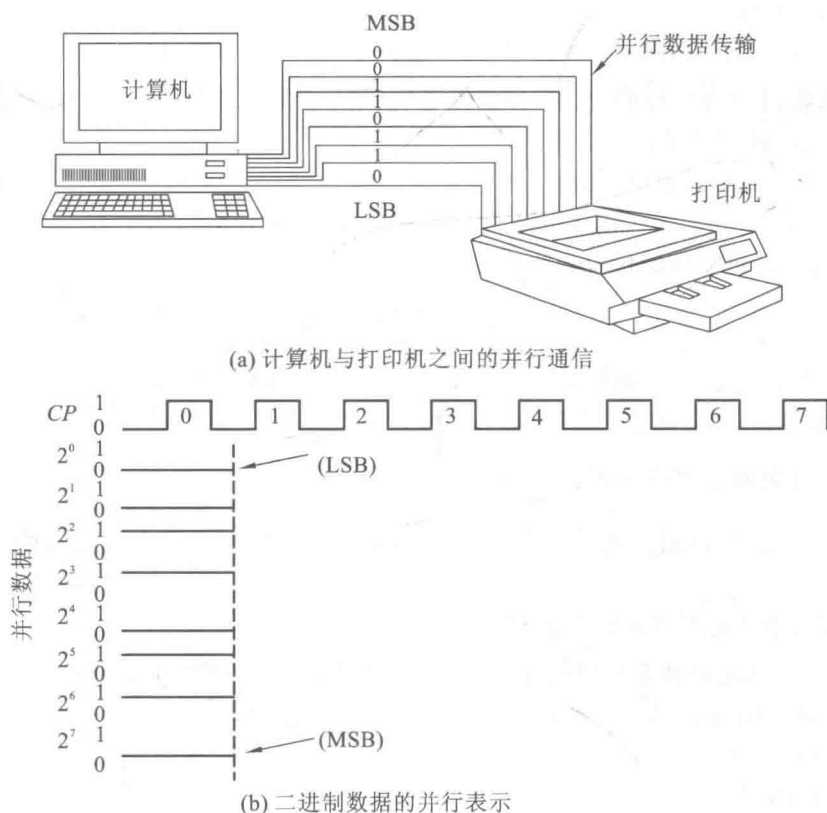


图 1-2-3 二进制数据并行传输示意图