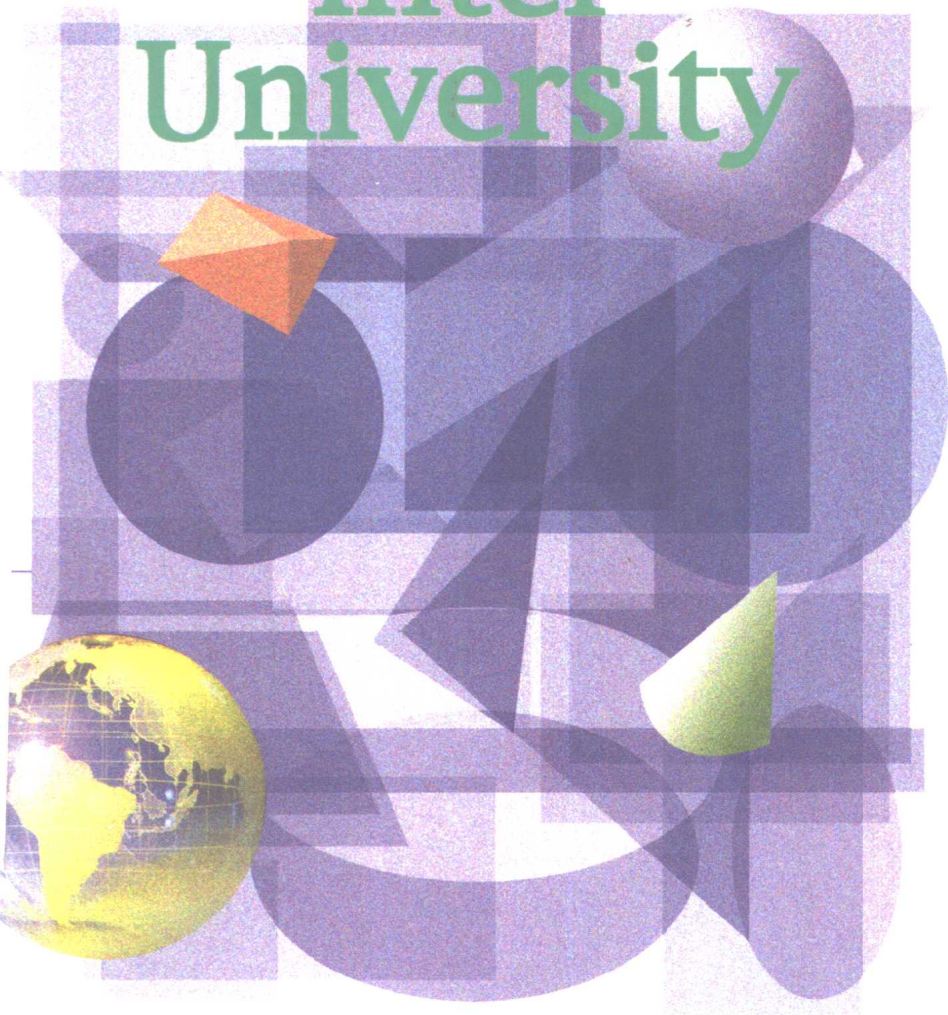


21 世纪大学新型参考教材系列

电子电路 B

〔日〕谷本正幸 编著

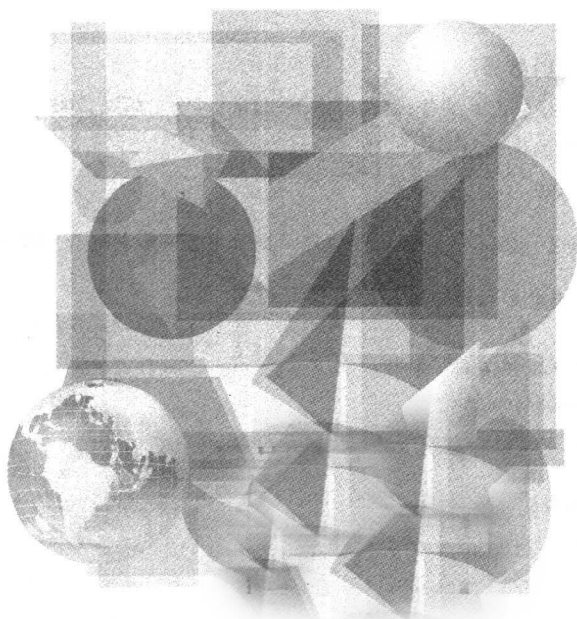
Inter University



21 世纪大学新型参考教材系列

电子电路 B

〔日〕谷本正幸 编著
吕砚山 译



科学出版社 OHM 社

2002. 北京

BAS30/04

TN710
17
2

图字:01-2002-0292 号

Original Japanese edition

Interuniversity Denshi Kairo B

Edited by Masayuki Tanimoto

Copyright © 2000 by Masayuki Tanimoto

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press

Copyright © 2002

All rights reserved

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

インターユニバーシティ

電子回路B

谷本正幸 オーム社 2000

图书在版编目 (CIP) 数据

电子电路 B/(日)谷本正幸编著;吕砚山译. —北京:科学出版社,2002

(21 世纪大学新型参考教材系列)

ISBN 7-03-010040-9

I. 电… II. ①谷…②吕… III. 电子电路 - 高等学校 - 教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 005243 号

北京东方科龙图文有限公司 制作

http://www.okbook.com.cn

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2002 年 5 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2002 年 5 月第一次印刷 印张: 5 5/8

印数: 1—5 000 字数: 162 000

定 价: 24.00 元(全二册)

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

电子电路包括模拟电路和数字电路。本书介绍数字电路。有关模拟电路的知识在与本书同一系列的《电子电路 A》中讲述。学习数字电路应当了解一定的模拟电路知识,为了能够完全理解数字电路,在本书开始部分集中对书中所需要的模拟电路知识作了叙述。

数字电路技术是电子学的基本技术,对于构成高度信息化社会的信息传输和信号处理,没有这项技术是不可能成功的。从身边的移动电话、计算机到全球规模的通信网络,都是利用数字电路来实现的。从家电产品到工业生产中的机械,用于控制所有机器的处理器,也离不开由数百万个晶体管构成的数字电路。

由于电子电路中总存在着器件特性的分散、老化和噪声等干扰,而模拟电路更是直接受到这些因素的影响,故不可能实现大规模的电路。但是,数字电路由于具有不受这些影响的结构,故由许多晶体管构成的数字电路能够稳定地工作。

本书将对这种数字电路结构作明确的说明。

作为大学的教科书,本书可用于一个学期 2 学分的教学。为使读者能事先了解将要学习的内容,在各章的开头均对本章内容作了简介。各章内容并非单纯的事实罗列,而是力求对其本质予以透彻地说明。此外,为使数字电路能够得到实际应用,对其使用方法也作了详述。对于各章内容的补充说明或是有关事项则以“篇外话”予以表述。这部分内容放在较后位置,能加深对正文的理解,有“举一反三”之效。另外,在各章章末都附有练习题,其简要解答附在本书的末尾。本书若能作为大学教科书或欲学数字电路的技术人员的自学参考书,将深感荣幸。作者相信,学习本书有助于掌握数字电路技术。

本书参考了许多前人的著作。在此列出了参考文献,并向他们表示深深的谢意。

最后,向帮助出版本书的以已故的“21 世纪大学新型参考教材系列”编辑委员会主任家田正之先生为首的各位编委致以衷心的感谢,同时也向为本书的编写和出版而尽力的其他各位编者以及欧姆社的有关各位表示深深的谢意。

谷本正幸

目 录

1 概 述

1.1 数字信号与波形	2
1.2 数字电路的功能与特点	7
1.3 数字电路的用途	8
1.4 本书的构成	9
练 习 题	10

2 分析数字电路的思路

2.1 采用的器件	14
2.2 大信号工作	18
2.3 开关作用	21
2.4 脉冲振荡作用	23
2.5 开关的高速化	27
练 习 题	29

3 数字电路的构成

3.1 TTL 的构造	32
3.2 CMOS 的构造	39
3.3 ECL(CML) 的构造	44
3.4 总线的构造与作用	47
3.5 存储器的构造	49
练 习 题	51

4 组合逻辑电路的作用

4.1 逻辑函数的表示与性质	54
----------------------	----

4.2 真值表	55
4.3 利用卡诺图化简	56
4.4 逻辑电路的设计	60
4.5 组合逻辑电路示例	61
练 习 题	71
5 时序逻辑电路的作用	
5.1 触发器的工作与电路	74
5.2 移位寄存器及其工作	84
5.3 计数器的动作与设计	85
5.4 时序逻辑电路的设计	92
练 习 题	96
6 数字集成电路的构成与使用	
6.1 数字集成电路的分类	100
6.2 逻辑集成电路的使用方法	102
6.3 存储器集成电路的使用方法	106
6.4 什么是 ASIC	110
6.5 用 CAD 设计实现逻辑电路	112
练 习 题	116
7 模拟量与数字量的转换	
7.1 模拟量与数字量的转换原因	120
7.2 模拟量与数字量转换的构成	120
7.3 D/A 转换电路	126
7.4 A/D 转换电路	129
7.5 利用过采样技术的 A/D 转换器和 D/A 转换器	135
练 习 题	141
练习题解答	143
参考文献	161

概 述

在本书中介绍的数字电路是电子学的基本技术之一,对构成高度信息化社会的数字信息通信或信号处理而言,没有这项技术是不可能成功的。本章介绍有关数字电路的工作信号(即数字信号)的相关知识,说明数字电路的功能与特点,还介绍数字电路的用途以及本书的构成。

1.1 数字信号与波形

采用电子技术,可将信息以光速传输,并可使开关在 1 秒内工作几亿次。这样,就能进行超高速的信息通信或信号处理。欲用电子技术进行信息的传输、处理或存储,必须将信息用电信号来表示。那么,信息应该用什么样的电信号来表示呢?

在信息中有数据、文字、符号、声音、图像等。其中,数据可用数字来表示,而文字或符号则被称作文本。如对文本赋以编号再使其与数字对应,则文本也可用数字表示。像数据或文本这样可用数字表示的信息称为数字信息。更准确一点来说,数字信息是像 1,2,3,⋯这样的,可用离散的数字表示的信息。数字在数据中直接表示其大小,而文本则表示在各种事物中的某种对应关系。

另一方面,声音或图像的信息是声压或光的亮度,均为连续的数值。因此,不能够将其用有限位数的数字来表示。这种信息称为模拟信息。如将声压或光的亮度与电压、电流这样的电气量相对应,则声音或图像的信息就会变成幅度随时间连续变化的电信号。这种信号,不论是时间或是幅度,皆为连续的模拟信号。在模拟信号中,因为波形表示信息会直接受到噪声或失真的影响。

与此相对应,不论时间或幅度若均为离散的信号则是数字信号。为了将数字信息以有限位数的数字来表示,要将随时间变化的数字信息进行数字排列,即变成时间序列。将离散数字的时间序列用信号的形式加以表示,就成为数字信号。

如图 1.1 所示,若对模拟信号进行采样和量化这 2 种操作,使时间与幅度都离散化,就能够变成数字信号。这种操作称为 A/D 变换

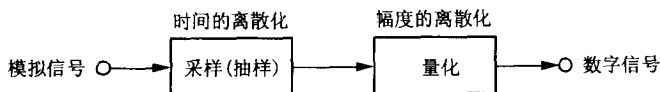


图 1.1 A/D 变换

采样如图 1.2 所示,是从模拟信号[图(a)]上每隔一定时间 T 将对应的信号值(采样点)取出来的操作。将采样的信号称为离散时间信号[图(b)]。此外,将 T 称为采样间隔, $1/T$ 称为采样频率。采样就是使时间离散化。采样不会产生误差。这是因为,若使采样时间间隔 T 满足一定的条件,就能够由离散时间信号正确无误地恢复成原来的模拟信号。此条件就是,若模拟信号中所包含的最高频率为 f_m 则应有

$$T \leq \frac{1}{2f_m} \quad (1.1)$$

这被称作奈奎斯特-香农采样定理¹⁾。

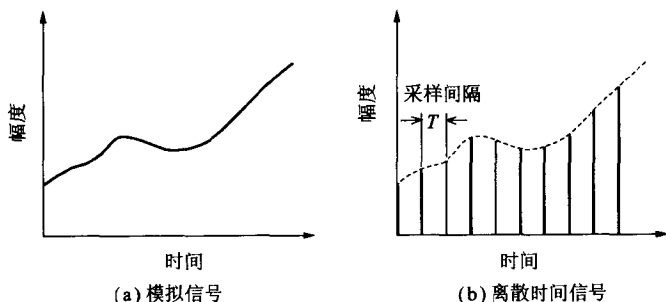


图 1.2 采样(时间的离散化)

另一方面,量化如图 1.3 所示,是将幅度变成最接近于它的离散点的数值,即为幅度的离散化。如将图 1.3(a)的离散时间信号进行量化,就变成图 1.3(b)。将这些离散的数值称为量化代表值或量化电平。量化代表值与原值之差就称为量化误差或量化噪声。与采样的情况不同,进行量化时不可避免会产生量化误差。但是,其数值在量化代表值的间隔足够小时,可以减小到实用上不会产生问题的程度。给各量化电平赋以编号,则量化值就用此数字表示。以图 1.3(b)为例,已量化的数值按时间顺序为 2,3,3,4,4,3,4,4,5,6,...

通常,数字信号用二进制数表示。二进制数是仅以 0 与 1 表示的数字。若以 b_0, b_1, b_2 为 0 或 1 的数字,则 3 位数的二进制数 $b_2b_1b_0$ 即表示十进制

1) 即 C. E. Shannon 采样定理。——译者注

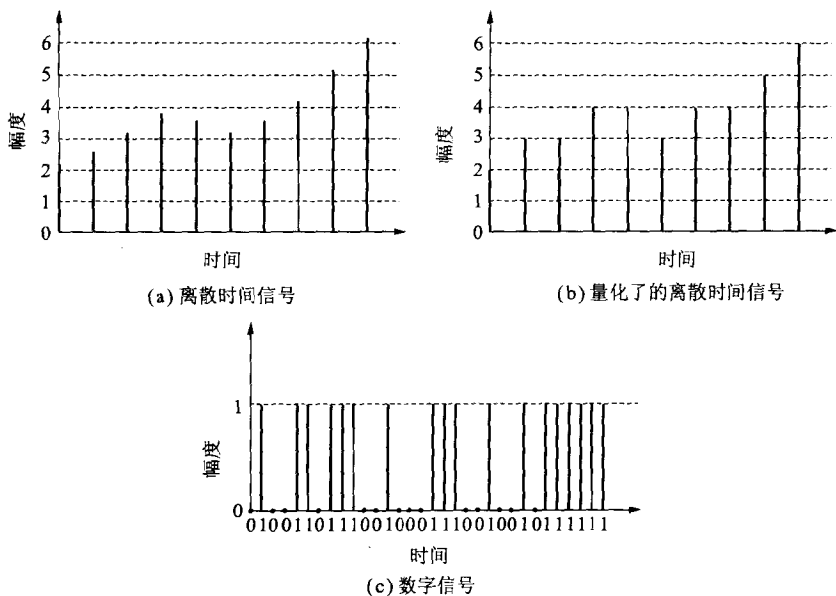


图 1.3 量化(幅度的离散化)

数的 $b_2 \times 2^2 + b_1 \times 2^1 + b_0$ 。例如, 因为 $6 = 1 \times 2^2 + 1 \times 2 + 0$, 故十进制数 6 变成二进制数就是“110”。这样, 就可将 1 和 0, 与电流的通(ON)、断(OFF)或电压的高、低等两种电平相对应, 从而将数字信号变成可用电子电路来进行操作的信号。用二进制数表示的数字信号的示例如图 1.3(c)所示。在数字信号中, 时间和幅度都是离散化的。为使将十进制数变为二进制数的变换部分更为明确, 有时还要在图 1.1 中的“量化”之后将进行这种变换的“编码”操作分离出来, 作为参考, 十进制数与二进制数的对应关系如表 1.1 所示。

图 1.1 所示的 A/D 变换, 就是将如图 1.2(a) 所示的模拟信号变换成如图 1.3(c) 所示的数字信号所进行的操作。此外, A/D 变换的反变换, 称为 D/A 变换。有关 A/D 变换、D/A 变换的问题, 将在第 7 章中详细说明。

由于数字信号具有两种电平, 其波形变成脉冲。将脉冲所具有的“L”(low, 低)与“H”(high, 高)两种电平与“0”和“1”相对应。在图 1.3(c)中, 数字信号的波形是时间跨度为 0 的跳跃, 这样的波形相当于含有从 0 到无

表 1.1 十进制数与二进制数的对应关系

十进制数	二进制数	十进制数	二进制数
0	0	16	10000
1	1	17	10001
2	10	18	10010
3	11	19	10011
4	100	20	10100
5	101	21	10101
6	110	22	10110
7	111	23	10111
8	1000	24	11000
9	1001	25	11001
10	1010	26	11010
11	1011	27	11011
12	1100	28	11100
13	1101	29	11101
14	1110	30	11110
15	1111	31	11111

无穷大频率的成分,实际上是没有的。鉴于此,对于实际采用的具有一定时间跨度的脉冲,可将其时间跨度扩展到何种程度为止呢?鉴于由 0 至 $(2^n - 1)$ 的十进制数,在二进制中可用 n 位数的数字来表示,因此,当量化电平数为 2^n 个时,表示 1 个采样点必须要 n 个脉冲。故若采样间隔为 T 时,1 个脉冲至少要占据 T/n 的时间跨度。也就是说,在采样频率高、量化电平数多的数字信号中,应当采用时间跨度短的脉冲。这样的脉冲,包含从 0 一直到很高频率为止的成分。

再有,用 n 位二进制数表示的信息称为 n 位(bit)。1bit 为 1 位二进制数,即用 1 个 0 或是 1 所表示的信息量。它是二者居其一来表示的信息所具有的信息量,是信息量的基本单位。

当在短时间内传递和处理大量的数字信息时,要求脉冲的时间跨度(脉冲宽度)短,电平间的变化急剧。这种脉冲波形,虽是如图 1.4(a)所示

这样的方波,但实际的脉冲波形则如同图 1.4(b)所示。由图 1.4(b)可见,作为电平间变化的脉冲的上升、下降需要时间。此外,还可看到振幅超过 1 或 0 的变化,即超过上部平坦部分的上冲和超过下部平坦部分的下冲。也能见到被称为衰减振荡的情形。

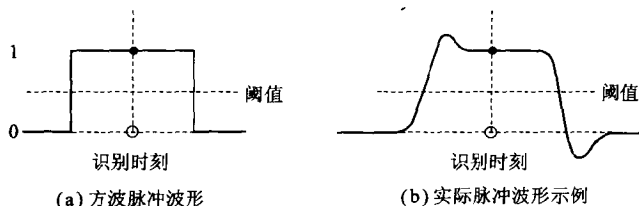


图 1.4 脉冲波形与 0,1 的识别

对于数字信号,如图 1.4 所示,将脉冲上部和下部平坦部分的中间值作为阈值,在识别时刻若实际幅度大于阈值则判断为 1,小于阈值时判断为 0。如将识别时刻安排在脉宽的中央,则数字信号就可利用仅由脉宽中央的振幅来表示信息。因此,对于数字电路而言,即使有因幅度波动或时间波动(后者称作晃动)导致一些波形变化,也不会产生误判。识别时刻由每过一定时间反复有规则的脉冲(时钟脉冲)给定。

在图 1.5 中给出了表示脉冲波形的量的定义。上升时间 t_r 是从脉冲幅度的 10% 增大到 90% 的时间,下降时间 t_f 是从脉冲幅度的 90% 减小到 10% 的时间。将振幅为脉冲幅度 50% 时的时间跨度,即半值宽度作为脉宽

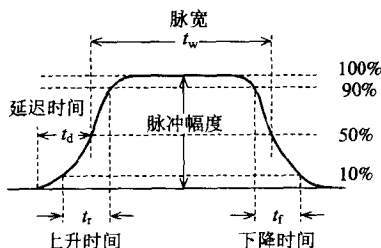


图 1.5 表示脉冲波形的量

t_w 。延迟时间 t_d 是从脉冲开始上升到达到脉冲幅度的 50% 的时间。另外, 若此脉冲每隔 T_p 重复一次, 则可用百分数表示 t_w 与重复周期 T_p 之比, 即

$$\frac{t_w}{t_p} \times 100(\%) \quad (1.2)$$

此值称为占空比。

在表示数字信号 1 位的脉冲中, 使用占空比为 100% 的脉冲称为 NRZ (non-return to zero, 不归零) 方式, 而使用占空比为 50% 的脉冲称为 RZ (return to zero, 归零) 方式。NRZ 方式与 RZ 方式相比, 虽然频带为其一半, 但因有像 0 连续时这样数字信号电平不变的情况, 故必须从数字信号本身提取出时钟信号。

图 1.4(a) 所示方波脉冲波形, 含有从 0 一直到无穷大为止的频率。脉冲的上升或下降变钝后, t_r 或 t_f 之所以不是 0, 是因为信号的频带受到了限制。如方波脉冲信号的频带限于 $0 \sim f_c$ (Hz), 则 t_r, t_f 为

$$t_r, t_f \approx \frac{2.2}{2\pi f_c} = \frac{0.35}{f_c} (\text{s}) \quad (1.3)$$

例如, 当 $f_c = 10\text{MHz}$ 时, $t_r, t_f \approx 35\text{ns}$ 。

1.2 数字电路的功能与特点

在模拟电路中, 进行模拟信号的操作、处理。作为模拟电路代表的放大电路或滤波器是线性电路, 其输入信号为模拟信号。如输入为正弦波, 则输出也为同频率的正弦波。因此, 模拟电路的特性用正弦波的传递函数, 即用振幅与相位的频率特性来表示。若此电路由多级连接构成, 则总的振幅特性为各级振幅特性之积, 相位特性为各级之和。

与此相对应, 进行数字信号操作与处理的数字电路是非线性电路, 其输入输出信号不是正弦波而是脉冲。输入信号与输出信号的脉冲幅度几乎相等。即使电路由若干级连接构成, 脉冲波形的上升时间或下降时间也不会恶化。

模拟电路与数字电路虽有很大不同, 但数字电路中使用的器件却与模拟电路相同。也就是说, 模拟放大电路或数字电路都使用具有放大功能的

有源器件。但是,在模拟电路中是令其在线性范围内工作,以放大幅度,而在数字电路中则是工作于非线性范围,要利用波形再生,以防止波形的畸变,这是不同的一点。

数字电路进行两个数值的逻辑运算或记忆。进行逻辑运算的数字电路称为逻辑电路,而记忆数字信号的数字电路则称为存储电路。逻辑电路有各种形式。例如,输入为 1 时输出为 0、输入为 0 时输出为 1 的数字电路称为“非”(NOT)门电路或反相器。输入和输出的数目并不限于都是 1。还有输入数为 2、输出数为 1 的电路,其中,若两个输入均为 1 时输出为 1,而除此之外的输入则输出为 0 的电路。这种数字电路称为“与”(AND)门电路。

数字电路由于仅需判断、处理 0 与 1 的两个状态,故即使受器件特性恶化、温度变化、电源电压变动、噪声等影响而使 0 与 1 的信号电平或是脉冲的时间位置稍有变动的情况,也能正确工作。因此,数字电路不需进行调整。从而使我们能够将许多数字电路组合起来,构成能实现复杂功能的大规模稳定系统。

1.3 数字电路的用途

数字方式最初是在通信领域作为 PCM(pulse code modulation,脉冲编码调制)而发明的。它是将脉冲的有/无与 1/0 相对应的数字通信方式。但是,在 PCM 发明的当时,还没有实现它的电路技术。正式开始采用数字方式是在计算机领域。早期的计算机是采用真空管电路制作的,其装置规模大、可靠性低。

后来,随着半导体器件的进步,数字技术有了很大的发展。今天,数字方式已在计算机、信息处理、通信、广播、家用电器、控制、印刷出版、娱乐等产业和日常生活的各种领域中获得广泛应用,是实现机器或系统必不可少的技术。数字机器或系统是用数字电路来实现的。

在数字电路中有对信号进行逻辑运算的逻辑电路和进行记忆的存储电路,已在上节叙述过。而 DSP(digital signal processor,数字信号处理器)或微处理器则是由许多逻辑电路和存储电路构成的。CD、DVD 等装置中也使

用数字电路。

用数字电路进行信号处理称作数字信号处理。利用数字信号处理,除可进行滤波和傅里叶变换等之外,还能进行各种图像处理和声音处理。图像和声音的信息压缩也能用数字电路实现。

数字系统的特点

由数字电路构成的数字系统,具有下列特点:

① 所有的信息可用相同的信号形式表示。例如,在模拟系统中由于图像信号与声音信号的信号形式是完全不同的,故两者的使用方法也不同。但若将它们数字化以后,均可用0与1表示,由于变成了同一信号形式,故不论图像或声音都能按相同结构处理。由此,就可使用能综合处理各种信息的多媒体系统。

② 由于传递或记录所产生的畸变极少,其可靠性、稳定性、再现性均好。在模拟系统中由于波形中包含了信息,故不可能避开噪声或畸变所产生的恶化,但在数字系统中只要不超过能判断出0与1的阈值,就不会受到噪声或畸变的影响。

③ 可进行高度灵活的信号处理。例如,适当的处理、削减数据量的信息压缩,改正错位的错误订正,保护著作权的“电子水印”等均可实现。并可用计算机来进行处理。

④ 可使硬件与软件分离,即使硬件相同,只要改变程序,就能完成各种不同的功能。因此,易于实现系统的最优化。此外,还可实现与多种方式对应的系统。

⑤ 由于尺寸小、动作快,已大规模集成电路(LSI)化,故实现了系统的小型、高性能、高可靠性和低价格化。

但另一方面,数字信号与模拟信号相比,则需要宽频带或高速信号处理等缺点。例如,数字传输与模拟传输相比,必须要很宽的频带。但是,在数字电视播放中,由于已进行了电视信号的数字信息压缩,故可用模拟电视播放的约1/3频带来播放节目。

1.4 本书的构成

由几百万个晶体管构成的大规模数字电路,也是由作为其基本的双值信号处理电路组合制成的。此基本的双值信号处理电路称作基本逻辑电路或基本逻辑门。

为了使用数字电路,首先需要了解基本逻辑电路的种类,它们如何构成,具有什么样的电气特性,以及如何将它们连接起来、进行稳定的工作等等。为此,也有必要掌握晶体管等元器件或电路的知识。

其次,在进行基本逻辑电路组合以制作具有一定功能的数字电路时,必须具备称作逻辑代数或布尔代数的逻辑数学的相关知识。当组合基本逻辑电路以实现预定的功能时,实现此功能的基本逻辑电路的组合方式并非一种。因此,应当懂得怎样做才能够用最少的基本逻辑电路来构成该数字电路。

在数字电路中有逻辑电路和存储电路,如前所述,逻辑电路又分为组合逻辑电路和时序逻辑电路。组合逻辑电路是具有1个以上的输入和1个以上的输出,而各个输出由当时的输入组合来决定的逻辑电路。另一方面,时序逻辑电路则是输出除受输入的组合作用之外,还受电路内部状态的影响的逻辑电路。时序逻辑电路可由组合逻辑电路和存储器构成。

本书第2、3章讨论数字电路的电路问题,第4、5章讨论逻辑数学问题。

首先在第2章说明分析数字电路的基本思路,阐明如何利用晶体管的放大功能和非线性作用以产生高性能的标准脉冲的原理。在第3章,讨论作为构成实际基本逻辑电路的主要方式,TTL,CMOS,ECL等电路的构成及其作用。第4章说明有关逻辑数学和组合逻辑电路的问题,讨论如何组合基本逻辑电路以实现给定的逻辑函数的方法。在第5章,介绍触发器(FF)、移位寄存器、计数器等时序逻辑电路的工作及构成方法。

实际上用户使用的数字电路,多是由具有各种功能的数字集成电路组合起来制成的。因此,第6章说明数字集成电路的构造及使用方法。此外,人的视觉或听觉所能接受的信号不是数字信号,而是模拟信号。因此,模拟信号与数字信号的变换是不可缺少的。在第7章介绍有关将模拟信号变换为数字信号的A/D变换以及其逆变换D/A变换的方法。

练习题

- 1 当量化电平数为64,128,256时,1个采样点的位数大约是多少?
- 2 彩色电视信号由辉度信号(表示亮度的信号) Y 和2个色差信号 C_1, C_2 构成。将 Y 用13.5MHz、 C_1 与 C_2 用6.75MHz进行采样,并将它们用256电平进行量化。此时,数字彩色电视信号的比特率是多少?
- 3 试求图1.6所示电路的阶跃响应与频率特性,并据此说明式(1.3)的成立。