



电子电路读本 1

电子电路

数字篇

〔日〕 尾崎 弘 金田弥吉 著
橘 启八郎 谷口庆治 译
张健琼 高志勇

电子电路读本 1

电子电路

数字篇

[日] 尾崎 弘 金田弥吉 著
橘 启八郎 谷口庆治 译
张健琮 高志勇 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2003-7840 号

内 容 简 介

本书是“电子电路读本”系列之一。本系列共四册。本书作为电子电路的数字部分,主要介绍组合数学概述、电路元件的脉冲响应和瞬变特性、脉冲发生电路、数字电路的逻辑设计、基本门电路、D-A 及 A-D 转换电路、微处理器及其外围电路等。每章末附有练习题及其解答。

本书图文并茂、简明易懂、实用性强,具有很强的可读性;除此之外,重点名词均给出相应的英文词汇,有些重点名词还给出注释。

本书可作为大专院校“数字电路”的辅助参考教材,也可以作为数字电子技术人员的参考学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路——数字篇/(日)尾崎弘等著;张健琼,高志勇译. —北京:科学出版社,2004

(电子电路读本)

ISBN 7-03-013503-2

I. 电… II. ①尾… ②张… ③高… III. ①电子电路-高等学校-教材 ②数字电路-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 050358 号

责任编辑:王 炜 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 祥

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 7 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2004 年 7 月第一次印刷 印张: 8 1/4

印数: 1—5 000

字数: 248 000

定 价: 22.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

电子电路(electronic circuit)是由电阻(resistor)、电感(inductor,线圈)、电容器(capacitor)、二极管(diode)、晶体管(transistor)等构成的电路,是电子、信息、通信系统的基本构成要素。由于电子电路所涉及的领域非常广泛,所以大多数情况下将其分为用于放大及振荡的模拟电路(analog circuit)和用于二进制数的运算及记录的数字电路。前者模拟电路在《电子电路——模拟篇》中介绍,与其对应,后者数字电路在本书中介绍。

本书收集了众多在大学的电子信息专业(电力、电子、信息、通信、控制、测量等专业)长期教授电子电路的教师们的讲义及教学经验,可以作为电子信息专业的教科书和参考书。由于本书所涉及的重要内容很多,所以在一年的教学时间之内不一定能讲授完所有的内容。因此,可以根据实际情况,选择适当的章节供学生参考阅读。

编写本书时,着重注意了以下几点:

- (1) 行文尽可能简洁、通俗,明确专业术语的定义;
- (2) 本书所讲述的内容只限于非常基础的知识,为您读其他相关的论文、文献及设计资料等起到了抛砖引玉的作用;
- (3) 在每章的各部分加入了适当的例题,便于您对内容的理解。

本书由序章和七章构成,每位作者完成的部分如下:

尾崎:序章,第3章

橘:第1章,第6章

金田:第2章,第5章

谷口:第4章,第7章

本书在执笔时,参考了很多著作和论文,在此对其作者表示深深的感谢。

另外,在本书出版时,共立出版社的有关人士也给予了很多帮助,在此特别要对深濑英弥先生表示感谢。

著 者

目 录

序章 组合数学概述	1
0.1 基本概念(概念、命题、体系;系统)	1
0.1.1 命题、关系	1
0.1.2 概念及其内涵和外延、集合(空间)	2
0.1.3 体系(系、系统)、模型	2
0.2 集 合	3
0.2.1 集合的定义	3
0.2.2 子集、补集	4
0.2.3 运算、幂集	6
0.2.4 并(并集)、交(交集)、恒等式	6
0.2.5 Veitch 图和 Karnaugh(卡诺)图	8
0.2.6 对偶性	10
0.2.7 对、组、直和、直积	10
0.3 关系、对应、映射	13
0.3.1 函数关系(对应、函数、映射)	13
0.3.2 等价关系和次序关系	14
0.3.3 分类(类别)和等价类	16
0.3.4 次序集合	17
0.4 命题逻辑(二值逻辑代数)概述	20
0.4.1 命题的符号表示	20
0.4.2 真值、真值表、真值变量、真值函数 ...	22
0.4.3 逻辑运算	24
0.4.4 基本的等式、类逻辑和幂集	26
0.5 布尔代数	27
0.5.1 布尔代数的定义	28
0.5.2 对偶性	28

0.5.3	布尔代数的模型——命题运算、二值代数、 n 单位符号、 n 维立方体、幂集	29
0.6	逻辑函数和逻辑电路	31
0.6.1	组合电路和逻辑函数	31
0.6.2	时序电路和逻辑函数	31
0.7	逻辑函数	33
0.7.1	最小项和主加法标准形	33
0.7.2	由真值表给出的函数的展开(主加法 标准形)	35
0.7.3	最大项和主乘法标准形	37
0.7.4	所有的二元运算	38
0.7.5	完备系	40
0.8	符号、二元符号和二进制	42
0.8.1	二值元素和二元符号	43
0.8.2	r 进制、二进制、 2^r 进制	43
0.8.3	十进制码及十进制数的表示	45
第 1 章	电路元件的脉冲响应和瞬变特性	46
1.1	脉冲和数字信号	46
1.2	脉冲波形和频谱频率特性	47
1.3	集总常数电路的脉冲响应	52
1.3.1	高通 RC 电路、 RC 微分电路	52
1.3.2	低通 RC 电路、 RC 积分电路	55
1.3.3	RL 积分电路	57
1.3.4	RL 微分电路	58
1.3.5	RLC 串并联电路	58
1.3.5	RC 电位器	62
1.4	分布常数电路的脉冲响应	63
1.4.1	分布常数电路	64
1.4.2	传输线的形式	66
1.4.3	特征阻抗和传播常数	66
1.4.4	反射和透射	67

1.5	二极管的动态特性	72
1.5.1	接通时的瞬态响应	73
1.5.2	断开时的瞬态响应	74
1.5.3	pn 结二极管的等效电路	76
1.6	双极结晶体管的动态特性	77
1.6.1	接通延迟时间 t_d	78
1.6.2	上升时间 t_r	78
1.6.3	饱和区域的动态特性、积累时间 t_s ...	79
1.6.4	下降时间 t_f	80
1.7	场效应晶体管(FET)及其特性	81
1.7.1	MOSFET 的构造和动作	81
1.7.2	增强型 MOSFET 的动作	82
1.7.3	耗尽型 MOSFET 动作	84
1.7.4	MOSFET 反相器的特性	85
1.7.5	MOS 负载电阻	86
1.7.6	输入输出传输特性	86
参考文献		88
练习题		89
第 2 章	脉冲发生电路	91
2.1	自激多谐振荡器	91
2.2	单稳态多谐振荡器	94
2.3	双稳态多谐振荡器	98
2.4	其他的脉冲电路	101
2.4.1	发射结单稳态多谐振荡器	101
2.4.2	负电阻多谐振荡器	103
2.4.3	施密特触发电路	107
2.4.4	间歇振荡电路	109
2.4.5	单结晶体管振荡电路	111
参考文献		114
练习题		115

第 3 章 数字电路的逻辑设计	116
3.1 组合电路	116
3.1.1 概 述	116
3.1.2 基本的组合电路单元	117
3.1.3 逻辑函数的和标准形和积标准形	117
3.1.4 逻辑函数的化简	120
3.1.5 多输出电路的化简	127
3.1.6 组合电路设计的步骤	128
3.2 时序电路	128
3.2.1 时序电路及其表示方法	128
3.2.2 触发器	129
3.2.3 存储元件的转换	133
3.2.4 由触发器引起的状态分配	134
3.2.5 应用方程式	135
3.3 由触发器构成时序电路	135
3.3.1 由 RS-触发器构成的方法(输入方程式)	135
3.3.2 JK-触发器的输入方程式	140
3.3.3 D-触发器的输入方程式	141
3.3.4 T-触发器的输入方程式	142
3.4 时序电路的设计步骤	142
3.4.1 时序电路的化简	143
3.4.2 时序电路设计的步骤	143
参考文献	144
第 4 章 数字电路的设计	145
4.1 传输电路的实例	145
4.1.1 并联传输电路	145
4.1.2 多路转换器	148
4.1.3 总线传输电路	148
4.1.4 移位寄存器	150
4.1.5 多功能寄存器	152
4.2 实用的 FF 电路的实例	153

4.2.1 使 FF 具有延迟的方法	153
4.2.2 主从触发器	154
4.2.3 边缘触发-FF	156
4.3 运算电路的例子	157
4.3.1 加法器	157
4.3.2 乘法器	160
4.4 输入输出接口电路的例子	161
4.4.1 具有双向寄存器的电路	161
4.4.2 输出选择电路	162
4.5 数字 PLL 电路的例子	164
4.5.1 数字 PLL 电路	164
4.5.2 数字 PLL 电路例子	166
4.6 可编程逻辑阵列	166
参考文献	168
练习题	169
第 5 章 基本门电路	172
5.1 二极管逻辑电路	172
5.1.1 AND 电路	172
5.1.2 OR 电路	173
5.2 DTL 电路	174
5.2.1 NOT 电路	174
5.2.2 NAND 电路、NOR 电路	175
5.3 TTL 电路	178
5.3.1 基本 TTL 电路	178
5.3.2 基本电路的缺点	179
5.3.3 标准电路	181
5.3.4 TTL 的输入输出特性	182
5.3.5 电路的性能评价	184
5.4 肖特基 TTL、ECL(CML)电路	185
5.5 I ² L 电路	188
5.6 MOS 电路	189

5.6.1 nMOS 电路	190
5.6.2 CMOS 电路	191
5.7 布线 OR 和三态 TTL 电路	193
参考文献	196
练 习 题	197
 第 6 章 D-A 及 A-D 转换电路	199
6.1 数据的收集和转换	199
6.1.1 概 述	199
6.1.2 量化和采样	201
6.2 D-A 转换器	206
6.2.1 加权电阻型电路	207
6.2.2 梯形电路	208
6.3 A-D 转换器	209
6.3.1 采样保持电路	209
6.3.2 跟踪比较型 A-D 转换器(计数器型) ...	212
6.3.3 二重积分型 A-D 转换器	213
6.3.4 逐次比较(逼近)型 A-D 转换器	215
6.3.5 并联比较型 A-D 转换器(直接比较型、 闪速型)	216
参考文献	218
练 习 题	219
 第 7 章 微处理器及其外围电路	220
7.1 CPU 的概述	220
7.1.1 ALU	220
7.1.2 寄存器类	226
7.1.3 控 制	227
7.1.4 微处理器的例子	235
7.2 半导体存储器	238
7.2.1 RAM	239
7.2.2 ROM	242

7.3 外围接口	244
7.3.1 外围接口的例子	244
7.3.2 A-D 转换器的数据输入的例子	248
参考文献	249
练 习 题	250

序章 组合数学概述

要 点

在本章中介绍了组合数学(也称为离散数学)的非常基本的概念。概述了作为数字电路基础理论的逻辑代数和逻辑电路。

读者在初次学习本章时,如果不能完全掌握,可以先跳过本章学习下一章。必要时可以回头参考相应的内容。但是,在可能的情况下,仍然希望您能通读一下本章的内容。



基本概念(概念、命题、体系;系统)

0.1.1 命题、关系

叙述判断的语句,不是真(true)即是假(false)。将这种语句称为命题(proposition, statement)。涉及两个以上元(概念、定义后述)的命题称为关系(relation)。涉及 n 个元的命题称为 n 元关系(n -ary relation)。举例如下:

[命题的例子]

(1) 雪是白色的。(真)

(2) $5+2=9$ 。(假),这个式子是 5, 2 和 9 的三元关系,也可以看成 5 和 2 的对 $\{5, 2\}$ 与 9 的二元关系。

(3) $x \geq y$ 。在这个式子中,如果不能确定 x 与 y 的值,则不能说式子为真或者为假。因此,称为函数命题。这是 x 和 y 的二元关系。

关系一般可以表示为 $R(a, b, \dots, z)$, 二元关系(binary relation)可以表示为 aRb 。二元关系举例如下:

[二元关系的例子]

$a // b, a \perp b, a = b, a \in A, A \subset B$ 等。

0.1.2 概念及其内涵和外延、集合(空间)

机器、人、成套设备(工厂)等被称为**概念**(concept)或**名词**或**元**(term)。作为例子,日本人这个概念,我们可以这样定义。现在将 $n(x)$ 定义为:

$n(x)$:“ x 为具有日本国籍的人”。

的函数命题。这个 $n(x)$ 中的 x 表示了作为日本人的充分必要条件。称其为(概念的)**内涵**(connotation, intension)。

将 $n(x)$ 为真时 x 的全体表示为:

$$N = \{x | n(x)\} \quad (0.1)$$

这个表示全体日本人,称为**外延**(denotation, extension)或者**类**(class)。在数学中称为**集合**(set)或者**空间**(space)。

一般概念有**内涵**(充分必要条件)和**外延**(类、集合),由一方决定另一方。

概念 $\begin{cases} n(x): \text{内涵, 充分必要条件, 意义} \\ N: \text{外延或类, 在数学中称为集合或空间} \end{cases}$

关于内涵所研究的问题称为**命题逻辑**,关于外延所研究的问题则称为**类逻辑**。举例如下:

a 先生是日本人。 $n(a)$ 或者 $a \in N$ 下面为类逻辑

b 先生不是日本人。 $\bar{n}(b)$, $\rightarrow n(b)$ 或者 $b \notin N$

0.1.3 体系(系、系统)、模型

将几个概念聚在一起而构成的新的概念,称为**体系**或者仅称为**系**或者**系统**(system)。如果将构成体系 A 的概念组(具有顺序的集合)记为 $(A_1, A_2, \dots, A_n)$, 则体系 A 可以表示为 $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ 。

在数学上,将由 n 个概念组成的体系 $(A_1, A_2, \dots, A_n)$ 称为 **n 元组**(n -tuple),特别地,将二元组称为(有序)对(pair)。

【例1】 考虑大学这个体系。这个体系是由教师、学生、职员、专业课程、场地、建筑物、教室、研究室、教学组等很多概念有机组成的体系。

【例2】 三维欧几里德空间内点 P 的坐标为 $P = (x_1, y_1, z_1)$, 则 P 是三元组的系(坐标系)。

如果体系 $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ 与体系 $B = (B_1, B_2, \dots, B_n)$ 一一对应, 则 A 与 B **同构**。而且,称 A 与 B 两者中一方为另一方的**模型**(modèle 印

度,model 英)。



集 合

如上节所述,将概念的外延即类称为集合(set)。集合中所包含的个体称为元素(element,要素)或者成员(member)。

注 虽然上面定义了日本人的概念,但是可能存在着所谓的日本人是日本人的集合(即外延),还是指作为日本人的充分必要条件(即内涵)这样的问题,实际上指的是两方面。但是,在数学上,认为指的是日本人的集合这种情况较多。如果要表示一个元素,则只要表示“1个日本人”即可。

0.2.1 集合的定义

定义集合的方法有三种。第一种方法称为内涵定义,如同前面定义日本人的集合那样,表示出属于集合的充分必要条件,即内涵,由此定义集合。现在,如果定义出属于集合 S 的充分必要条件为 $C(x)$,则

$$S = \{x | C(x)\} \quad (0.2)$$

可以作为 S 的定义。

第二种方法称为外延定义。列举出属于集合的元素。例如:自然数(的集合) N 及整数(的集合) Z 可以如下定义:

$$N = \{1, 2, \dots\}$$

$$Z = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$$

很难由内涵定义自然数和整数。

第三种方法称为归纳定义。例如定义 $2x^2 + 3.5x + 8, 3x + 5.2$ 这种实系数多项式(的集合),可以这样考虑:

- (i) 实数是多项式;
- (ii) 变数是多项式;
- (iii) 多项式的和是多项式;
- (iv) 多项式的积是多项式;
- (v) 只有以上认为是多项式的才是多项式。

按照上述定义, $3x+5.2$ 是多项式这一事件可以如下表述: 根据(i) 3 和 5.2 是多项式; 根据(ii) x 是多项式; 根据(iv) $3x$ 是多项式; 根据(iii) $3x+5.2$ 是多项式。

0.2.2 子集、补集

当 a 是集合 A 的元素时, 可以称为 a 属于 (belongs to) A , 或者 A 包含 (contain) a 。当 a 属于 A , b 不属于 A 时, 可以如下表示:

$$\left. \begin{array}{l} a \in A \text{ 或者 } A \ni a \\ b \notin A \text{ 或者 } A \nexists b \end{array} \right\} \quad (0.3)$$

由有限个元素组成的集合称为有限集 (finite set), 由无限个元素组成的集合称为无限集 (infinite set)。作为集合 A 和集合 B , 当集合 B 的元素全部包含于集合 A 时, 称集合 B 是集合 A 的子集 (subset), 也可以称为 A 包含 B 。如下表示:

$$B \subset A \text{ 或者 } A \supset B \quad (0.4)$$

由子集的定义可以清楚地知道, A 本身也是 A 的子集。当 $A \supset B$, 而且 $B \supset A$ 时, 可以表示为:

$$A = B \quad (0.5)$$

称为相等集合。当 A 和 B 不是相等集合时, 可以写为:

$$A \neq B \quad (0.6)$$

当 $A \supset B$ 且 $A \neq B$ 时。可以表示为:

$$A \supsetneq B \quad (0.7)$$

称为集合 B 是集合 A 的真子集 (proper subset)。用图表示为图 0.1。这种图称为文氏图 (Venn diagram)。另外, 为了在叙述理论时达到统一, 我们将不含任何元素的集合称为空集 (empty set), 用 ϕ 表示。 ϕ 是所有集合的子集。

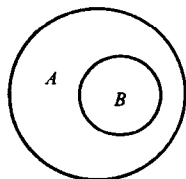


图 0.1 真子集
(Venn 图)

在集合 A 、集合 B 中, 属于集合 A 而不属于集合 B 的元素组成的集合称为 A 与 B 的差集 (difference set), 用 $A - B$ 表示。即

$$A - B = \{x | x \in A, x \notin B\} \quad (0.8)$$

用图表示差集为图 0.2。

有某集合 S , 如果 $S_1, S_2, S_3, \dots$ 是它的子集, 那么 $S - S_i \subset S$ 是 S 的子集。这时表示为:

$$S - S_i = \tilde{S}_i \quad (0.9)$$

称 $\tilde{S}_i$ 为 S_i 对于集合 S 的补集 (complement 或者 complement set) (参见图 0.3)。可以清楚地知道, $\tilde{S}_i$ 的补集仍是 S_i 。即

$$\tilde{\tilde{S}_i} = S_i \quad (0.10)$$

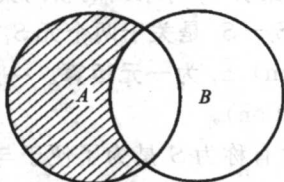


图 0.2 差集 ($A - B$)

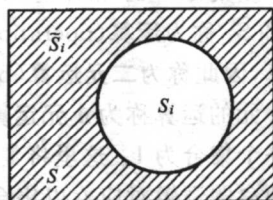


图 0.3 补集 ($\tilde{S}_i = S - S_i$)

【例题 0.1】集合 S 为

$$S = \{a, b, c, d\} \quad (0.11)$$

$$S_1 = \{a, b\} \quad S_2 = \{c, d\} \quad S_3 = \{a, b, c\} \quad (0.12)$$

等都是真子集, 则

$$\tilde{S}_1 = S_2 \quad \tilde{S}_3 = \{d\} \quad (0.13)$$

而且 S 的子集个数为 $2^4 = 16$ 个。如此考虑, 则只要见表 0.1 即可知道。即在 4 个元素下面列举出 4 位数的二进制数。各数与子集一一对应。二进制数变为 1 的位数上的元素组成的

表 0.1 集合 $\{a, b, c, d\}$ 的子集

	a	b	c	d	部分集合
0	0	0	0	0	ϕ
1	0	0	0	1	$\{d\}$
2	0	0	1	0	$\{c\}$
3	0	0	1	1	$\{c, d\}$
4	0	1	0	0	$\{b\}$
5	0	1	0	1	$\{b, d\}$
6	0	1	1	0	$\{b, c\}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
15	1	1	1	1	$\{a, b, c, d\}$

子集与其二进制数对应(例如 0000 对应 ϕ , 1100 对应 $\{a, b\}$)。因为 4 位数的二进制数从 0 到 15 共 16 个, 因此, 子集个数为 16。一般情况下, n 个元素组成的集合的子集有 2^n 个。

0.2.3 运算、幂集

有某集合 S , 其子集为 $S_1, S_2, S_3, \dots$ 。有必要考虑由 S_1, S_2, S_3 等作为元素的集合。这种集合的集合称为**集合族**(family, family set)。前面定义了差集 $S_i - S_j$ 和补集 $\tilde{S}_i$, 由集合 S_i 和集合 S_j 等求出的新的集合 $S_i - S_j$ 和 $\tilde{S}_i$ 称为**运算**(operation)。特别是, $S_i - S_j$ 是关于两个元 S_i 和 S_j 的运算, 因此称为**二元运算**(binary operation), $\tilde{S}_i$ 为一元运算。一般地, 关于 n 元的运算称为 **n 元运算**(n -ary operation)。

一个集合为 I 。这里将集合称为 I 而没有称为 S 是为了便于与后面所说的命题逻辑对应。以集合 I 的全部子集作为元素组成的集合称为**幂集**。表示为 $P(I)$ 或者 2^I 。而且, 称这个 I 为**全集**(universe, universal set)。以下没有预先说明, 写为 $\tilde{S}$ 指的是关于 I 的补集。

另外, 用几何学表达时, 将集合称为**空间**(space)或者**抽象空间**(abstract space), 其元素称为点, 子集称为子空间。

0.2.4 并(并集)、交(交集)、恒等式

由至少属于集合 A 和集合 B 一方的元素的全体组成的集合称为 A 和 B 的**并**(union), 或者称为**并集**(sum set), 表示为 $A \cup B$ 。即

$$A \cup B = \{x | x \in A \text{ 或者 } x \in B\} \quad (0.14)$$

用图表示为图 0.4(a)。由定义可得:

$$A \cup B = B \cup A \quad (0.15)$$

此外, 集合 A 和集合 B 两者共同包含的元素组成的集合称为**交**(join, intersection)或者**交集**(product set)。用 $A \cap B$ 表示。即

$$A \cap B = \{x | x \in A, x \in B\} \quad (0.16)$$

用图表示为图 0.4(b)。由定义可以清楚地知道:

$$A \cap B = B \cap A \quad (0.17)$$

在幂集 $P(I)$ 中, 如果定义了两个二元运算 $\cup$ 与 $\cap$ 及一个一元运算 $\tilde{A}$, 那么下列各式成立。另外, 加波浪线的式子是后面要介绍的布尔代数的公理, 其他式子是可以由公理推导出的定理。