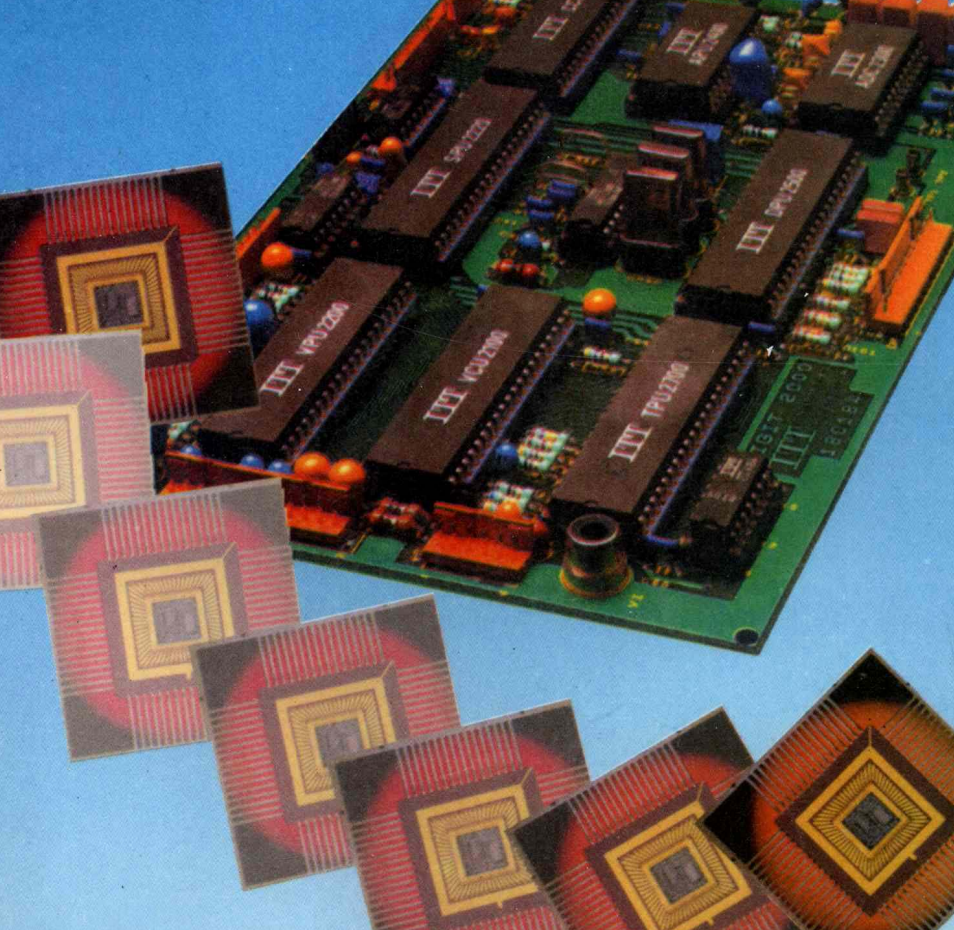


数字逻辑电路

(第二版)



中国劳动出版社

全国技工学校电子类通用教材

数字逻辑电路

(第 二 版)

技工学校电子类专业教材编审委员会组织编写

中国劳动出版社

《数字逻辑电路》(第二版)是根据劳动部职业技能开发司、电子工业部人事教育司审定颁发的《数字逻辑电路教学大纲》修订,供技工学校电子类计算机专业使用的通用教材。

本书内容包括数字电路基础知识、逻辑代数基础、逻辑门电路、触发器和多谐振荡器、组合逻辑电路、时序逻辑电路等。

本书在内容安排上,删去了第一版中部分分立元件电路的内容,适当增加了中、大规模集成电路的有关内容。为了便于实验教学,增编了实验课内容。

本书也可作为工人培训教材和职工自学用书。

本书第一版由太原市技工学校赵忠祥编写,北京市 738 厂技工学校石如琥审稿;第二版由赵忠祥修订,北京市计算机一厂技工学校白德周审稿。

数字逻辑电路

(第 二 版)

技工学校电子类专业教材编审委员会组织编写

责任编辑:金 龄

中国劳动出版社出版

(北京市惠新东街 1 号)

北京世界知识印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 13.75印张 332千字

1989年 1 月北京第 1 版 1994年 6 月北京第 2 版

1997年 3 月北京第15次印刷 印数:35000册

ISBN 7-5045-1424-1/TP·010(课) 定价:12.40 元

说 明

在电子工业主管部门和劳动部的领导及组织下，经过编审、出版工作人员的共同努力，在“六五”、“七五”期间，有 37 种技工学校电子类无线电整机、电子计算机、电子元器件专业的教材出版，基本上满足了教学的需要。

为适应电子工业发展的新形势，贯彻中央有关教学改革的精神，在总结技工学校电子类教材编审、出版工作经验的基础上，按照各专业新的教学计划和教学大纲，我们对电子类教材分期、分批进行修订、补充和配套。今后还将适时开拓其它有关专业的教材。在修订和新编教材的工作中，贯彻改革的精神，注意提高教材质量；以培养中级电子技术工人目标，使内容符合电子工业工人技术等级标准的要求；强调阐明电子专业的基础理论、基本知识，培养学生基本操作技能，努力做到理论与实际密切结合；在教材中适当反映电子工业生产中采用的新技术、新工艺、新设备和新材料，并贯彻国家和行业的现行技术标准。

在教材的编审工作中，得到北京、天津、上海、四川、陕西、广东、江苏等省、市电子、劳动厅（局）和有关技工学校的大力支持；参加编审工作的专家、技校教师、工程技术人员付出了辛勤的劳动，在此特致以诚挚的谢意。为了进一步提高教材质量，欢迎使用的同志对内容提出宝贵的意见。

技工学校电子类专业教材编审委员会

1994 年

前 言

电子工业部与我部密切配合,从1979年开始,共同组织编审出版了技工学校电子类专业教材。这是件具有现实意义和深远意义的工作。

职业技术教育是国家工业化和现代化的重要支柱。现代电子技术,特别是计算机技术的发明和发展,使人类社会发生了一场真正的革命。因此,一个国家的国力是否强大,一定程度上可以用科学技术尤其是电子技术在经济和社会各个领域应用的广度、深度和由此形成的实力来衡量。在今日中国的教育、科研、国防和经济领域里,电子技术的应用日益广泛,已有数以百万计的计算机在运转,而且数量还在不断增长。企业的生产管理和制造技术因此正在发生巨大变革。但是,从传统的制造和管理方法向电子化、采用计算机控制技术过渡并非易事,主要是在安装和操作新设备上,实质上是在人员素质方面,遇到了不少困难。所以,编写新的教材,努力培养大批懂得现代电子技术的人才,已成为尽快提高劳动生产率、产品质量和管理水平的当务之急。实践证明,推动电子技术进步和提高劳动者素质,是密切结合、互相促进的,两者缺一不可。

我国已把提高劳动者素质,即培养提高技术工人和后备劳动者的技术业务素质,摆到非常重要的位置。因此,组织编审出版技工学校电子类专业教材是十分必要的。已经出版使用的电子类教材,从最初解决教材有无问题,到逐步提高质量、增编实习教材、重视加强基本技能训练,对培养中级电子技术工人起到了积极的作用。

我相信,在广大编审、出版工作者的共同努力下,在实践中,技工学校电子类专业教材将更加完善,成为有权威的、质量一流的教材。在此,我谨向电子工业部和全体编审人员,以及为教材的出版发行做出贡献的人们表示真诚的感谢。

中华人民共和国劳动部副部长 令狐安

目 录

第一章 数字电路基础知识	1
§ 1—1 数字电路概述	1
§ 1—2 RC 电路	6
§ 1—3 晶体二极管的开关特性	13
§ 1—4 晶体三极管的开关特性	20
本章小结	23
习题	24
第二章 逻辑代数基础	29
§ 2—1 基本逻辑运算和法则	29
§ 2—2 逻辑代数的基本定律	30
§ 2—3 逻辑函数的表示方法	33
§ 2—4 逻辑函数的化简	38
本章小结	46
习题	47
第三章 逻辑门电路	49
§ 3—1 基本逻辑关系	49
§ 3—2 分立元件的基本逻辑门电路	50
§ 3—3 分立元件与非门和或非门	54
§ 3—4 TTL 集成与非门电路	55
§ 3—5 TTL 门电路的实用类型	62
§ 3—6 其它逻辑功能 TTL 门电路	65
§ 3—7 MOS 集成反相器	69
§ 3—8 MOS 门电路	71
§ 3—9 CMOS 门电路的参数和测试	75
§ 3—10 使用 TTL 和 MOS 门电路应注意的问题	76
本章小结	77
习题	78
第四章 触发器和多谐振荡器	84
§ 4—1 基本 RS 触发器	84
§ 4—2 钟控 RS 触发器	87
§ 4—3 维持阻塞触发器	90
§ 4—4 主从触发器	92
§ 4—5 边沿 JK 触发器	99
§ 4—6 静态 MOS 触发器	101
§ 4—7 TTL 集成触发器的参数	104
§ 4—8 单稳态触发器	106

§ 4—9 施密特触发器·····	112
§ 4—10 多谐振荡器·····	117
本章小结·····	122
习题·····	123
第五章 组合逻辑电路 ·····	127
§ 5—1 组合逻辑电路的分析和设计·····	127
§ 5—2 数据选择器·····	129
§ 5—3 半加器和全加器·····	131
§ 5—4 比较器·····	134
§ 5—5 编码器·····	136
§ 5—6 译码器·····	139
§ 5—7 奇偶校验器·····	148
§ 5—8 组合逻辑电路的竞争冒险·····	152
§ 5—9 可编程逻辑阵列 (PLA) ·····	154
本章小结·····	155
习题·····	156
第六章 时序逻辑电路 ·····	159
§ 6—1 计数器·····	159
§ 6—2 寄存器·····	173
§ 6—3 顺序脉冲分配器·····	177
本章小结·····	181
习题·····	181
实验 ·····	183
实验一 脉冲信号发生器和脉冲示波器的使用·····	183
实验二 RC 电路瞬态过程的观测·····	190
实验三 TTL 与非门的测试·····	192
实验四 CMOS 集成门电路的测试·····	196
实验五 集成触发器的测试·····	200
实验六 组合逻辑电路的测试·····	202
实验七 计数器的测试·····	204
附录一 半导体集成电路型号命名法·····	208
附录二 常用二—十进制编码·····	209
参考书目·····	210

第一章 数字电路基础知识

§ 1—1 数字电路概述

一、数字电路

数字逻辑电路是指输出信号和输入信号之间存在着一定逻辑关系的电路，又简称为数字电路。

在电工基础和电子电路基础等课程的学习中，我们所接触到的信号是正弦交流信号和音频信号等。这些信号的幅度随时间连续地变化，通常称之为模拟信号。

数字电路中的工作信号是不连续变化的信号，通常把它们叫做脉冲信号。作用时间很短的突变电压（或电流）称做脉冲电压（或电流）。

脉冲信号的种类很多，数字电路中常用的脉冲波形有矩形波、锯齿波、钟形波、三角波、尖顶波和梯形波等，图 1—1 给出了它们的波形图。

数字电路的输入、输出信号只有两种相互对立的状态，即电平的高和低、脉冲的有和无。为了便于研究数字电路，通常用逻辑 1 表示高电平，用逻辑 0 表示低电平，这种表示法称为正逻辑。如果用逻辑 0 表示高电平，用逻辑 1 表示低电平，就称为负逻辑。在无特殊说明的情况下，本书一般都采用正逻辑表示法。

图 1—2 给出的脉冲波形中，高电平 V_1 应为 1 状态，低电平 V_2 为 0 状态。脉冲信号在 t_1 时刻由 1 变 0， t_2 时刻又从 0 变 1， t_3 时刻再从 1 变 0……。

二、脉冲波形的主要参数

分析研究数字电路时，经常要对脉冲波形进行定量分析，用以评价电路的性能。用来评价脉冲信号性能的物理量叫做脉冲信号的参数。图 1—1 给出的脉冲波形是理想化的波形。实际电路的脉冲波形不像理想化波形那样规矩。现在我们以图 1—3 所示的矩形脉冲电压为例，介绍脉冲波形的主要参数。

1. 脉冲幅度 V_m

表示脉冲电压变化的最大值，用来度量脉冲信号的强弱，其值等于脉冲信号的最大值和最小值之差的绝对值。

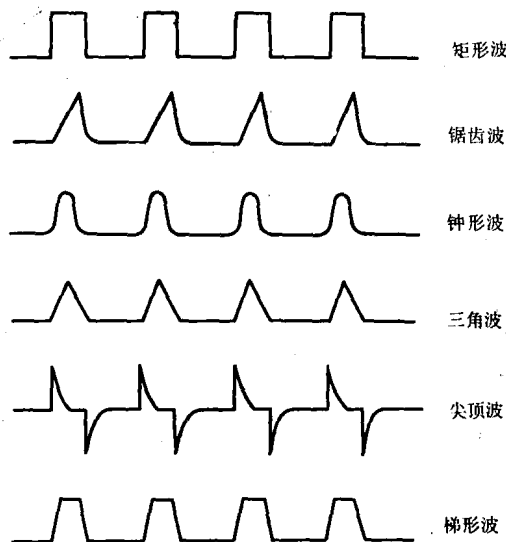


图 1—1 常用脉冲波形

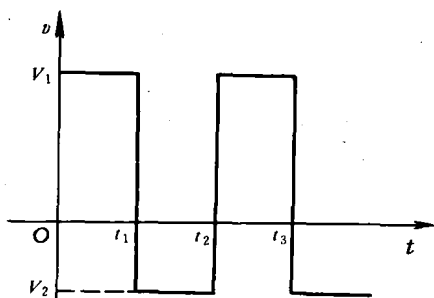


图 1-2 脉冲波形逻辑状态的变化

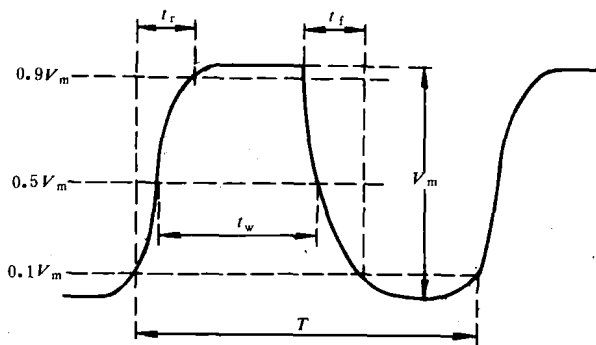


图 1-3 矩形脉冲的主要参数

2. 脉冲周期 T

表示两个相邻脉冲重复出现的时间间隔，周期的单位为 s（秒）、ms（毫秒）、 μ s（微秒）、ns（纳秒）等。周期的倒数是脉冲的频率，即

$$f = \frac{1}{T}$$

脉冲频率的单位为 Hz（赫兹），它表示每秒内脉冲重复出现的次数。

3. 脉冲前沿 t_r

将脉冲信号从 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 所需要的时间作为脉冲信号的前沿。脉冲前沿也叫做脉冲上升时间。

4. 脉冲后沿 t_f

将脉冲信号从 $0.9V_m$ 下降到 $0.1V_m$ 所需要的时间作为脉冲信号的后沿。脉冲后沿也叫做脉冲下降时间。

5. 脉冲宽度 t_w

将脉冲信号从脉冲前沿的 $0.5V_m$ 到后沿的 $0.5V_m$ 所需要的时间作为脉冲宽度，有时也叫做脉冲持续时间。

三、计数体制

通常人们习惯于采用十进制数进行计数和运算。在数字电路中是用二进制数进行计数和运算的。数字电路使用二进制数，是因为其中的开关元件都具有两个稳定状态。如果用一个物理元件表示十进制数，就要求这个物理元件具有十个不同的稳定状态，制造这种元件比制造具有两个稳定状态的元件要困难得多。同时，由于二进制数的运算简单，数字电路也容易实现。

1. 十进制数

在十进制计数中，用十个不同数码 0、1、2、3……8、9 按一定规律排列起来表示数值大小，运算时由低位到高位进位是“逢十进一”。十进制计数是以 10 为基数的，数码处于不同位置时，所代表的数量是不同的，例如：

$$\begin{aligned} (1987)_{10} &= 1000 + 900 + 80 + 7 \\ &= 1 \times 10^3 + 9 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 7 \times 10^0 \end{aligned}$$

这里数的下标 10 表示该数是十进制数。

通常，一个十进制数 N 可表示为：

$$(N)_{10} = a_{n-1}10^{n-1} + a_{n-2}10^{n-2} + \cdots + a_110^1 + a_010^0 + a_{-1}10^{-1} + \cdots + a_{-m}10^{-m} \quad (1-1)$$

或写成以下形式：

$$(N)_{10} = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 10^i \quad (1-2)$$

2. 二进制数

二进制数用两个不同的数码 0、1 来表示，运算时由低位到高位进位是“逢二进一”。它是以 2 为基数的。通常，一个二进制数 N 可以写成如下形式：

$$(N)_2 = a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \cdots + a_12^1 + a_02^0 + a_{-1}2^{-1} + a_{-2}2^{-2} + \cdots + a_{-m}2^{-m} \quad (1-3)$$

或写成：

$$(N)_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 2^i \quad (1-4)$$

例如， $(1101)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (13)_{10}$

二进制数运算很简单，相应的规则为：

$$0+0=0 \quad 0 \times 0=0$$

$$0+1=1 \quad 0 \times 1=0$$

$$1+0=1 \quad 1 \times 0=0$$

$$1+1=10 \quad 1 \times 1=1$$

至于减法和除法，分别是加法和乘法的逆运算，其运算规则可类似于加法和乘法。

下面通过几个例子，说明二进制数的四则运算。

例 1 试完成下列二进制数的运算。

① $1001+1011$

② $1101-1010$

③ 1001×101

④ $1111 \div 101$

解 类似十进制数的运算，分别列竖式：

①

$$\begin{array}{r} 1001 \\ + 1011 \\ \hline 10100 \end{array}$$

②

$$\begin{array}{r} 1101 \\ - 1010 \\ \hline 0011 \end{array}$$

③

$$\begin{array}{r} 1001 \\ \times 101 \\ \hline 1001 \\ 0000 \\ 1001 \\ \hline 101101 \end{array}$$

④

$$\begin{array}{r} 11 \\ 101 \overline{) 1111} \\ \underline{101} \\ 101 \\ \underline{101} \\ 0 \end{array}$$

3. 二进制数与十进制数的相互转换

数字电路中使用二进制，而日常人们习惯于使用十进制，因此常常要进行二进制数和十进制数之间的转换。

二进制数转换为十进制数比较容易，可以直接利用公式 (1—3) 进行。

例 2 试将 $(1011)_2$ 转换为十进制数。

$$\begin{aligned}\text{解} \quad (1011)_2 &= 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \\ &= 8 + 0 + 2 + 1 \\ &= (11)_{10}\end{aligned}$$

例 3 试将 $(0.1010)_2$ 转换为十进制数。

$$\begin{aligned}\text{解} \quad (0.1010)_2 &= 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} + 0 \times 2^{-4} \\ &= 0.5 + 0 + 0.125 + 0 \\ &= (0.625)_{10}\end{aligned}$$

十进制数转换为二进制数时，通常整数的转换采用“除 2 反序取余法”，小数的转换采用“乘 2 顺序取整法”。

现以十进制数 29 的转换为例，说明“除 2 反序取余法”。十进制数 29 可写成如下形式：

$$(29)_{10} = a_4 2^4 + a_3 2^3 + a_2 2^2 + a_1 2^1 + a_0 2^0$$

上式两边同除以 2，所得余数相等，都是 a_0 。其商再连续除以 2，得到余数依次为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 ，直到最后的商等于 0 为止。这样就可以完成转换，其过程为：

2	29	余数为 $a_0=1$	↑ 读 数 方 向
2	14	余数为 $a_1=0$	
2	7	余数为 $a_2=1$	
2	3	余数为 $a_3=1$	
2	1	余数为 $a_4=1$	
	0		

其结果应为： $(29)_{10} = (11101)_2$

下面以十进制数 0.375 为例，说明“乘 2 顺序取整法”。十进制数 0.375 可写成如下形式：

$$(0.375)_{10} = a_{-1} \times 2^{-1} + a_{-2} \times 2^{-2} + a_{-3} \times 2^{-3} + \dots$$

把上式两边同乘以 2，两边所得积的整数相等为 a_{-1} 。然后去掉整数部分，再用 2 乘以剩下的小数部分，每次乘积的整数部分依次为 a_{-2} 、 a_{-3} …。这样就完成了转换，其过程为：

	0.375		↓ 读 数 方 向
去掉整数 ←	$\times$ $\frac{0.750}{2}$	整数部分为 $a_{-1}=0$	
去掉整数 ←	$\times$ $\frac{1.500}{2}$	整数部分为 $a_{-2}=1$	
	$\times$ $\frac{1.000}{2}$	整数部分为 $a_{-3}=1$	

其结果应为： $(0.375)_{10} = (0.011)_2$

4. 八进制数

除了二进制数外，在计数体制中还常采用八进制数和十六进制数。这是因为书写和阅读位数较多的二进制数很不方便，八进制数和十六进制数就可以克服这个缺点。

八进制数有 0、1、2、…7、八个数码，它的基数是 8。八进制数 N 可写成如下形式：

$$(N)_8 = a_{n-1}8^{n-1} + a_{n-2}8^{n-2} + \cdots + a_18^1 + a_08^0 + a_{-1}8^{-1} + a_{-2}8^{-2} + \cdots + a_{-m}8^{-m} \quad (1-5)$$

或者写成如下和式：

$$(N)_8 = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 8^i \quad (1-6)$$

八进制数和二进制数之间的转换很方便，这是因为八进制的基数 8 是二进制基数 2 的三次幂，即 $2^3=8$ ，其对应关系如表 1-1 所示。转换时，只要把三位二进制数对应一位八进制数就可以了。

表 1-1 八进制数和二进制数对照表

八进制数	0	1	2	3	4	5	6	7
二进制数	000	001	010	011	100	101	110	111

例 4 试将二进制数 $(1011.01)_2$ 转换为八进制数。

解 先把该二进制数从小数点起，向左、向右每三位分成一组，最后不足三位者用零补齐，每组再按表 1-1 进行对应转换。

$$(1011.01)_2 = (001, 011.010)_2 = (13.2)_8$$

例 5 试将八进制数 $(124.3)_8$ 转换为二进制数。

解 把该八进制数的每一位分别写成相应的三位二进制数，按原来的顺序排列起来即可。

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & 2 & 4 & \cdot & 3 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & & \downarrow \\ 001 & 010 & 100 & \cdot & 011 \end{array}$$

$$\text{因此 } (124.3)_8 = (001, 010, 100.011)_2 = (1010100.011)_2$$

5. 十六进制数

十六进制数通常有 0、1、2…8、9、A、B、C、D、E、F 十六个数码，它的基数是 16。十六进制数 N 可写成如下形式：

$$(N)_{16} = a_{n-1}16^{n-1} + a_{n-2}16^{n-2} + \cdots + a_116^1 + a_016^0 + a_{-1}16^{-1} + a_{-2}16^{-2} + \cdots + a_{-m}16^{-m} \quad (1-7)$$

或者写成如下和式：

$$(N)_{16} = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 16^i \quad (1-8)$$

每位十六进制数可用四位二进制数表示，其对应关系如表 1-2 所示。

表 1-2

十六进制数和二进制数对照表

十进制数	二进制数	十六进制数	十进制数	二进制数	十六进制数
0	0000	0	8	1000	8
1	0001	1	9	1001	9
2	0010	2	10	1010	A
3	0011	3	11	1011	B
4	0100	4	12	1100	C
5	0101	5	13	1101	D
6	0110	6	14	1110	E
7	0111	7	15	1111	F

十六进制数和二进制数之间的转换十分方便，只要把二进制数从小数点起，向左、向右每四位分成一组，每组二进制数就代表一位十六进制数。

例 6 试把 $(111101.111)_2$ 转换为十六进制数。

解 $(111101.111)_2$
 $= (0011, 1101.1110)_2$
 $= (3D.E)_{16}$

例 7 试把 $(B2.A)_{16}$ 转换为二进制数。

解 先将该十六进制数的每一位转换为相应的四位二进制数，然后按顺序排列起来。

$$\begin{array}{ccc} B & 2 & \cdot & A \\ \downarrow & \downarrow & & \downarrow \\ 1011 & 0010 & \cdot & 1010 \end{array}$$

那么， $(B2.A)_{16} = (10110010.101)_2$

§ 1—2 RC 电路

RC 电路是由电阻和电容构成的简单电路。在开关控制下，RC 电路中发生的瞬态过程，对形成和变换脉冲波形有着十分重要的作用。

一、RC 电路的瞬态过程

电容器是容纳电荷的容器，容纳电荷能力的大小用电容量表示，记为 C 。如果用 Q_c 表示电容器极板所充电量，用 V_c 表示电容器极板间的电压，那么三者之间的关系为：

$$C = \frac{Q_c}{V_c} \quad (1-9)$$

电容器每伏特电压下能容纳 1C（库仑）电荷时，规定它有 1F（法拉）的电容量。常用电容量单位还有 μF （微法）和 pF （皮法）。

$$1\mu F = 10^{-6}F$$

$$1pF = 10^{-12}F$$

1. 电容器的充电过程

图 1—4 是研究电容器充电和放电的实验电路。

设电容器在充电前两端电压 $v_c = 0$ ，当开关 S 由位置 2 接到位置 1 时，电源将通过电阻 R

对电容 C 充电。从图 1—4 得知：

$$i = \frac{v_R}{R} = \frac{E - v_C}{R} \quad (1-10)$$

由于电容上电荷尚未积累，在开关 S 接到位置 1 的瞬间， v_C 仍为零，因此充电电流为最大，即

$$i = \frac{E - v_C}{R} = \frac{E - 0}{R} = \frac{E}{R}$$

随着充电的进行，电容器上的电荷逐渐积累， v_C 也跟随着逐渐增大。根据式 (1—

10) 得知，充电电流 i 逐渐减小，导致电荷积累速度变慢，也就是 v_C 增大的速度变慢，即充电速度逐渐变慢。当充电的时间足够长以后， v_C 值逼近到 E 值，充电电流为零，充电过程结束。

经数学推导，该电路充电电压、电流的变化规律为：

$$v_C = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1-11)$$

$$i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-12)$$

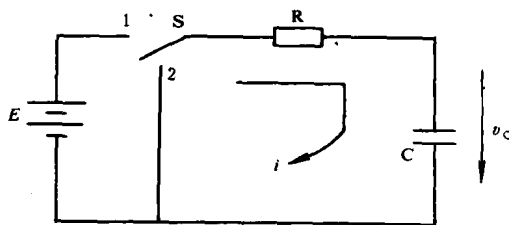


图 1—4 电容器充、放电电路

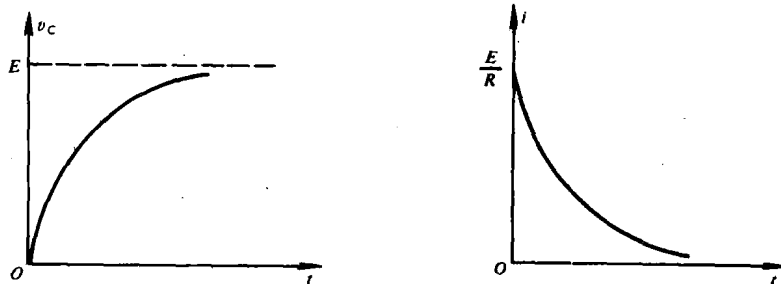


图 1—5 电容器充电电压、电流变化曲线

根据式 (1—11) 和式 (1—12) 可画出充电电压、电流的变化曲线，如图 1—5 所示。

2. 电容器的放电过程

电容器充电结束后，将图 1—4 中的开关 S 从位置 1 扳向位置 2 时，电容器将通过电阻 R 放电。放电开始瞬间，电容器上的电荷还来不及泄放， $v_C = E$ ；放电电流最大， $i = -\frac{E}{R}$ ，式中负号表示放电电流方向和充电电流方向相反。随着放电的进行， v_C 和 i 逐渐减小，其变化规律为：

$$v_C = E e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-13)$$

$$i = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-14)$$

放电时间足够长以后， v_C 值逼近零，放电电流 $i = 0$ ，放电过程结束。图 1—6 给出了放电过程中放电电压、电流的变化曲线。

综上所述，电容器充放电过程是一个瞬态过程，其电压、电流是按指数规律变化的。充

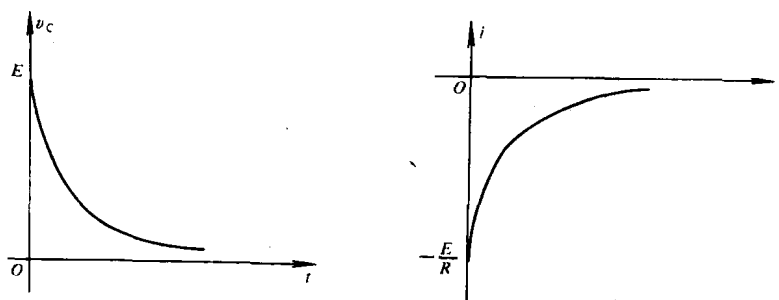


图 1—6 电容器放电电压、电流变化曲线

电、放电开始瞬间，流过电容的电流最大，电容对突变电压呈现低阻抗，相当于“短路”。充放电结束后，流过电容的电流等于零，电容呈现高阻抗，相当于“开路”。

二、RC 电路的时间常数

RC 电路充放电过程中，充电、放电电压和电流都是时间 t 的函数，并且电阻 R 和电容 C 的乘积还决定着充电、放电进行的快慢。 R 、 C 乘积具有时间量纲：

$$R \cdot C = [\Omega] \cdot [F] = \frac{[V]}{[A]} \cdot \frac{[C]}{[V]} = \frac{[A] \cdot [s]}{[A]} = [s]$$

通常记为 $\tau = RC$ ，叫做电容器 C 的充放电时间常数。

图 1—7 给出了不同时间常数的两个充电电压曲线，时间常数 τ 越大，电路的瞬态过程所用时间就越长。这是因为充电电压 E 不变时，充电结束后电容器两端建立的电压是一样的。如果电容器的容量是确定的，那么电容器上积累的电荷也是确定的，显然电阻 R 大，充电电流就小，积累电荷所用时间就长。如果电阻 R 是确定的，又要求充电结束时电容器 C 上建立的电压相同，那么电容量 C 大的电容器积累的电荷就要多，所用时间就长。

可类似地分析时间常数 τ 对放电过程的影响。

最后需要强调的是，充放电过程的快慢只决定于电路的时间常数。图 1—8 给出了不同外加充电电压的充电曲线。显然，由于电路的时间常数不变，其充电所用时间是相同的。这是因为，虽然充电电压增加了会使充电电流随着增加，但是由于充电结束时电容器两端电压的提高，即电容器上积累电荷增多，相应地抵消了充电电流增加的影响。

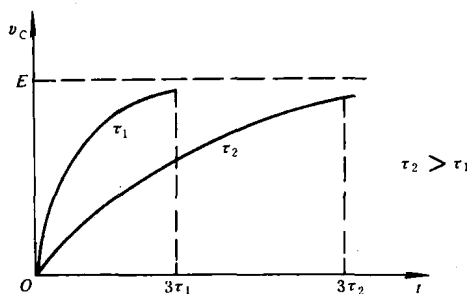


图 1—7 不同时间常数的充电曲线

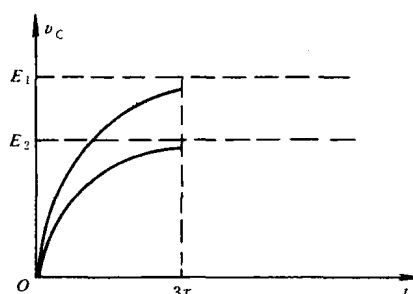


图 1—8 不同充电电压的充电曲线

三、简单 RC 电路的分析方法

1. 开关定理

通过对电容器充放电过程的分析可以看出, 电容器两端电压是不能突变的。

设电路中开关在 $t=0$ 时动作, 用 $t=0^-$ 表示动作前的瞬间, 这时电容器两端电压用 $v_C(0^-)$ 表示; 用 $t=0^+$ 表示动作后的瞬间, 这时电容器两端电压用 $v_C(0^+)$ 表示。那么有:

$$v_C(0^-) = v_C(0^+) \quad (1-15)$$

这就是开关定理。

2. 简单 RC 电路的一般解析式

简单 RC 电路的输出量 (电压或电流) 瞬态表达式应为指数表达式:

$$f(t) = B_1 + B_2 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-16)$$

这里 B_1 和 B_2 为待定系数。当 $t \rightarrow \infty$ 时, $f(t) \rightarrow B_1$, 显然 $B_1 = f(\infty)$; 当 $t=0^+$ 时, $f(0^+) = B_1 + B_2$, 显然 $B_2 = f(0^+) - f(\infty)$ 。

因此, 式 (1-16) 可写成如下形式:

$$f(t) = f(\infty) + [f(0^+) - f(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-17)$$

3. 简单 RC 电路的三要素解法

由前面分析可知, 对于简单 RC 电路, 只要确定 $f(0^+)$ 、 $f(\infty)$ 和 τ 三个基本要素, 然后代入式 (1-17) 就可得出电路中电压 (或电流) 的表达式, 绘出相应的变化曲线。这种求解 RC 电路瞬态过程的方法, 称之为三要素法。现通过几个例题来说明这种方法。

例 8 对于图 1-9a 所示电路, 输入信号 v_i 为阶跃信号, 如图 1-9b 所示。试求电阻 R 上的输出电压 $v_o(t)$ 的表达式, 并画出它的变化曲线。

解 采用三要素法, 先求出 $v_o(0^+)$ 、 $v_o(\infty)$ 和 τ 。

由于 $v_i(0^-) = 0$, $v_C(0^-) = 0$, 根据开关定理知 $v_C(0^+) = v_C(0^-) = 0$ 。对于输入的跳变电压, 电容 C 可视为“短路”, 跳变电压 E 全部加到电阻 R 上, 因此 $v_o(0^+) = v_R(0^+) = E$ 。当 $t \rightarrow \infty$ 时, 电容 C 可视为开路, 电压 E 全部加到电容上, $v_o(\infty) = v_R(\infty) = 0$ 。电路的时间常数 $\tau = RC$ 。这样可得:

$$\begin{aligned} v_o(t) &= v_o(\infty) + [v_o(0^+) - v_o(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= E e^{-\frac{t}{RC}} \end{aligned}$$

根据 $v_o(t)$ 的表达式可画出它的变化曲线, 如图 1-9c 所示。由于 $t=3\tau$ 时 $v_o(t)$ 已下降到起始值 E 的 5%, 通常认为瞬态过程已

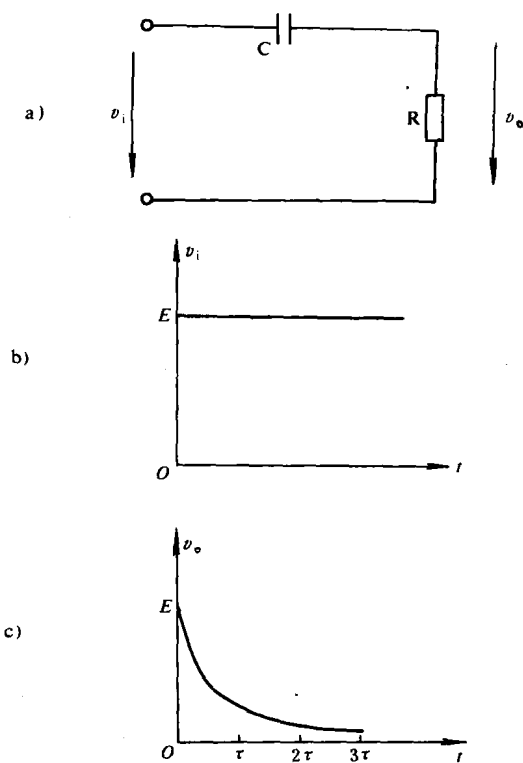


图 1-9 例 8 的电路和波形

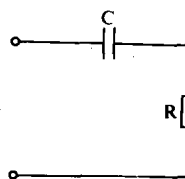
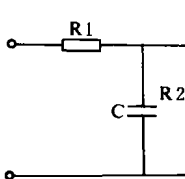
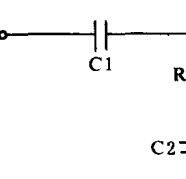
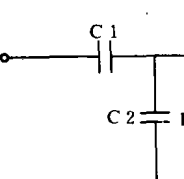
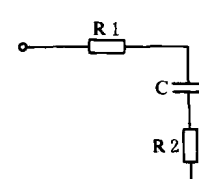
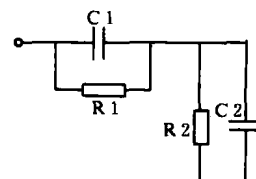
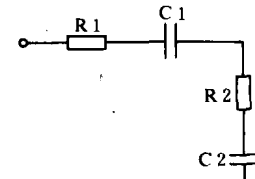
a) 电路图 b) 输入信号波形 c) 输出信号波形

结束。

当电路中有多个电阻、电容时，电路的时间常数的确定方法是：将电路中的电压源短路（保留其串联内阻）、电流源开路（保留其并联内阻），然后把电路中各电阻和电容归并为等效的一个总电阻和一个总电容相串联，它们的乘积就是该电路的时间常数。表 1—3 给出了几种常见简单 RC 电路的时间常数

表 1-3

几种简单 RC 电路的时间常数

电 路				
时间 常数	RC	$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C$	$\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} R$	$(C_1 + C_2) R$
电 路				
时间 常数	$(R_1 + R_2) C$	$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} (C_1 + C_2)$	$\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (R_1 + R_2)$	

例 9 对于图 1—10a 所示电路，设 $v_C(0^-) = 0$ ，当 $t = 0$ 时刻将开关 S 从位置 1 扳向位置 2，试求输出电压 $v_o(t)$ 的表达式，并画出它的波形。

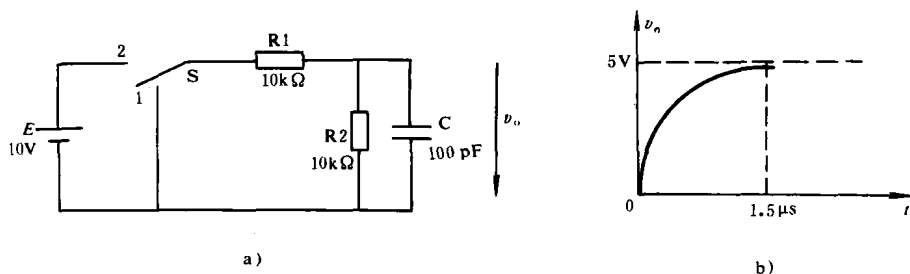


图 1—10 例 9 的电路和波形

a) 电路图 b) 输出信号波形图

解 根据已知条件，先求出该电路的三要素。

根据开关定理有： $v_o(0^+) = v_C(0^+) = v_C(0^-) = 0$ 。当电路进入稳定状态后，电容可视为“开路”，由电阻 R_1 和 R_2 分压，因此

$$v_o(\infty) = v_{R_2}(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E = \frac{10}{10 + 10} \times 10 = 5(\text{V})$$