

再 版 前 言

随着我国半导体工业的发展,到七十年代初,晶体管脉冲数字电路已经在计算机、雷达、通信、数字测量、自动控制等许多领域得到广泛应用,为了满足广大读者的迫切需要,我们编写了《晶体管脉冲数字电路》一书(分上、中、下册),由科学出版社于1971—72年陆续出版。以后的几年中,陆续印刷了多次,总发行量达五十万套之多,对当时普及脉冲数字技术的知识起了一点作用。

这次趁再版的机会对全书作了一次修改,增补了部分新的内容,特别是数字集成电路方面几乎全部重写,这是因为国产集成电路的品种和数量日益增长,原来的内容已不能适应新的要求。在改写时我们力求保持本书原有的特点,从实际典型电路出发,阐明电路的工作原理,并尽可能把典型电路的定性分析、定量估算和实验研究三者结合起来,注意到文字通俗、由浅入深,便于各行各业的读者自学。再版时还在每章末补充了一些习题,使初学者可以通过练习,加深对本书内容的理解。本书再版时将原来三册改为上、下两册。

参加本书初版本编写工作的主要有吕文超、林定基、李三立、童诗白、尹祚明、张嘉一、李维中、孙大高、史美林等同志。参加本书再版本编写工作的主要有林定基、吕文超、李三立以及孙大高、张嘉一 etc 同志。本书封面设计和大部分插图的绘制是由冯瑞华同志完成的。

在本书编写过程中得到了许多单位的技术人员和工人的帮助和鼓励,在此表示衷心感谢。

编者

一九八一年四月

• i •

符 号 说 明

一、原则

1. 尽量采用国际通用符号, 兼顾国内现用的拼音字母符号.
2. 电压和电流的稳态值用英文大写字母 V 、 I 表示, 瞬时值用英文小写字母 v 、 i 表示.
3. 个别地方用中文脚注.

二、电路主要参数符号

D 晶体二极管极	V_{isg} 输入高电位
T 晶体三极管	V_{scd} 输出低电位
R 电阻	V_{sig} 输出高电位
C 电容	P 功率; 功耗
L 电感	f 频率
Q 电荷量	T 周期
ϕ 磁通量	τ 时间常数
E 直流电源电压	t 时间
V 稳态值电压	t_{rd} 电压波形的上升延迟时间
I 稳态值电流	t_r 电压波形的上升时间
v 瞬时值电压	t_{fd} 电压波形的下降延迟时间
i 瞬时值电流	t_y 门电路平均传输延迟时间
V_{km} 开门电平	
V_{gm} 关门电平	
V_{nd} 输入低电位	

• • •

t_f 电压波形的下降时间 N_{sc} 负载个数
 Δ 变化量, 增量

三、晶体管主要参数符号

β 晶体管动态电流放大系数
 V_{ces} 集电极-发射极饱和压降
 V_{bes} 基极-发射极饱和压降
 I_{bs} 临界饱和基极电流
 BV_{ebo} 发射极-基极反向击穿电压
 BV_{cbo} 集电极-基极反向击穿电压
 BV_{ceo} 集电极-发射极反向击穿电压
 I_{cbo} 集电极-基极反向电流
 I_{ebo} 发射极-基极反向电流
 I_{ceo} 集电极-发射极反向电流
 t_{on} 开关管的开通时间 t_{off} 开关管的关闭时间
 f_T 晶体管特征频率 V_D 二极管正向压降

四、脚注

c 集电极, 如集电极电压 V_c , 集电极电流 I_c
 e 发射极, 如发射极电压 v_e , 发射极电流 i_e
 b 基极, 如基极电流 i_b
 L 负载, 如负载电阻 R_L , 负载电容 C_L
 i 加速, 如加速电容 C_i
 g 高, 如输出高电位 V_{scg}
 d 低, 如输出低电位 V_{scd}
 sr 输入, 如输入电压信号 v_{sr}
 sc 输出, 如输出电压信号 v_{sc}
 s 饱和, 如饱和压降 V_{ces}

目 录

绪言	1
第一部分 分立元件脉冲数字电路	
第一章 基础知识	4
第一节 RC 电路	4
第二节 晶体二极管和三极管	30
第三节 脉冲作用下的晶体管开关特性	63
习题	77
第二章 门电路——脉冲信号的控制	86
第一节 二极管门电路	86
第二节 “与非”门电路	99
第三节 其他门电路	131
本章小结	135
习题	136
第三章 双稳态触发器——脉冲信号的记忆	142
第一节 电路的引出	143
第二节 工作原理	144
第三节 典型电路的设计	164
第四节 测试和调整	171
第五节 其他电路介绍	175
第六节 应用举例	179
本章小结	183
习题	184
第四章 脉冲信号的产生与整形	190
第一节 单稳态触发器	190

第二节 多谐振荡器.....	221
第三节 射极耦合触发器.....	239
第四节 锯齿波发生器.....	262
习题.....	280
第五章 脉冲信号的功率放大.....	288
第一节 电感和脉冲变压器.....	288
第二节 电感负载的功率驱动.....	301
第三节 变压器输出的脉冲放大器.....	305
第四节 间歇振荡器.....	310
第五节 射极跟随器.....	324
本章小结.....	332
习题.....	333
第六章 互补晶体管开关电路.....	337
第一节 互补管组成的斯密特触发器.....	338
第二节 互补管组成的单稳态触发器.....	345
第三节 互补管组成的多谐振荡器.....	351
第四节 再生式开关电路的结构形式.....	357
本章小结.....	369
习题.....	370
附录 电阻器、电容器的标称系列值	373

绪 言

五十年代初，晶体管出现了。由于它具有体积小、重量轻、坚固可靠、功耗小、寿命长等一系列的优点，使脉冲数字技术由电子管发展到晶体管时代。到了六十年代，更小型化更高速的集成电路的出现和大量生产，又从分立元件电路跨进到集成电路的阶段。而它的应用范围，也由最早的雷达、计算机等几个部门逐渐发展到国民经济和国防建设的许多部门。

那么脉冲数字技术到底包含哪些内容呢？以及如何把它应用到实际工作中去呢？

下面我们举一个例子来说明这些问题。

图1是一个测量电机转速的数字式测速系统，测量结果直接以十进制数字显示出来。下面介绍它的原理。

电机每转一周，光线透过圆盘上的小孔照射光电管(把光信号变为电信号的元件)一次，光电管每秒发出的信号个数就代表电机的转速。但光电信号往往较小[图2(1)]，需要放大，

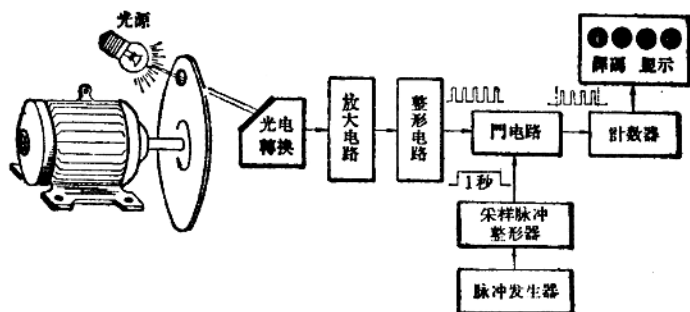


图1 数字式测速系统原理示意图

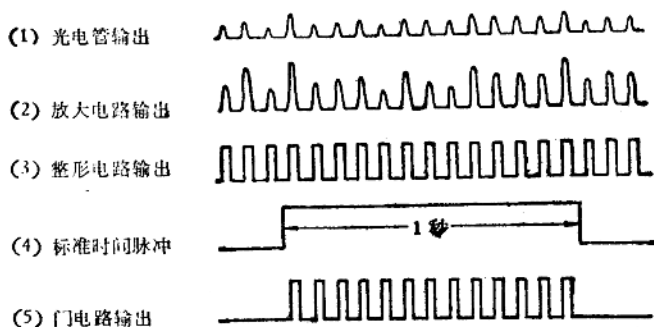


图 2 数字式测速系统的工作波形

经过放大电路放大后的信号就比较明显了[图 2(2)]。这些信号的波形和“电工”中讲的正弦波不同,我们把它叫做脉冲。

从放大电路得到的脉冲还不能直接用来测量,因为它们的幅度和宽度很不均匀。这些脉冲在经过整形电路整形以后,波形才比较一致[图 2(3)]。

为了测量电机的转速还要有个时间标准,如以秒为单位,把一秒钟内脉冲的个数记录下来便是电机每秒的转速。这个标准时间是由脉冲发生器经采样脉冲整形器产生的,它是一个宽度为 1 秒的方形脉冲[又称方波,如图 2(4)],让它去控制门电路,把“门”打开一秒钟,在这段时间内,来自整形电路的脉冲不断地经过门电路进入计数器[图 2(5)]。然后由计数器把脉冲个数记录下来。

计数器中的数字是以二进制的形式出现的。所谓二进制就是逢二进位,如 $1 + 1 = 10$ 。二进制数的每一位只有“0”、“1”两种可能,因此在电路上比较容易实现。但是,平时人们习惯于使用十进制,因此有必要把计数器中以二进制表示的数翻译成十进制数,这个职能是由译码器来实现的。译码器译出的十进制数最后由显示电路显示出来。至此,测量任务

已经完成。

从上面的典型例子中可以看出，脉冲数字电路的内容是很广泛的，它应该包括脉冲的产生、整形、传送、控制、记忆、计数、功率放大等等。本书第一部分是分立元件脉冲数字电路，讨论用分立元件来实现上述功能的各种具体电路。其中第一章讲述 RC 电路和晶体管，引出电容的充电和放电、晶体管的通导和截止这两个基本的矛盾现象，作为分析脉冲数字电路的基础。第二章到第六章分别讨论脉冲的控制（门电路）、脉冲的记忆（双稳态触发器）、脉冲的产生（多谐振荡器、间歇振荡器等）、脉冲的整形（射极耦合触发器、单稳态触发器等）、以及脉冲的功率放大（变压器耦合脉冲放大器、射极跟随器等）。

本书第二部分讲述数字集成电路及其应用。

第一部分 分立元件脉冲数字电路

第一章 基础知识

在晶体管脉冲数字系统中遇到的电路不外是脉冲的产生、变换、传送、控制、计数、功率驱动和数码显示等,这些电路内部的基本矛盾是晶体管的导通与截止,电容的充电与放电。因此了解晶体管的开关特性和电容的充放电规律是我们首先应该掌握的基础知识。

第一节 RC 电路

RC 电路指的是由电阻 (R) 和电容 (C) 构成的回路。 RC 电路在输入脉冲作用下进行充电和放电。电容的充放电几乎是脉冲数字电路(主要是分立元件电路)最经常最普遍遇到的现象,它是构成脉冲数字电路的基本矛盾之一。为了能够熟练地掌握 RC 电路,我们先复习一下直流电路。

一、直流电路的复习

1. 简单直流电路的计算

简单的直流电路指的是只包含一个电流回路的电路(图 1.1.1),其中 E 代表电源电压,它的极性由图中正负号标出,我们规定在今后的计算实例中 E 总是取绝对值。电流 I 的箭头表示我们所选取的电流方向,如果 I 值为正,说明选取的方向和电流实际方向一致;如果 I 值为负,则说明所选的方向和

实际方向相反. 电流 I 流过电阻 R_2 产生电压降落用 V_{ab} 表示.

例 1 在图 1.1.1 中, 给定 $E = 12\text{V}$, $R_1 = 20\text{k}$, $R_2 = 10\text{k}$, 求 R_2 两端电压降 V_{ab} .

解 由欧姆定律得

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{12}{(20 + 10) \times 10^3} = \frac{12}{30} \times 10^{-3} \text{A} = 0.4 \text{mA},$$

$$V_{ab} = IR_2 = 0.4 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^3 = 4\text{V}.$$

从这个例题可以看出: 图 1.1.1 电路中的 V_{ab} 是电源电压的一部分, 它的大小取决于 R_2 和电路中总电阻的比值. 把上面两个公式合并得到

$$V_{ab} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E \quad (1.1.1)$$

式中 $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 叫做分压

比, 而这种电路也叫电阻分压器, 因此今后遇到这类电路求分压时, 利用分压比可直接写出结果而不必再重复上述步骤.

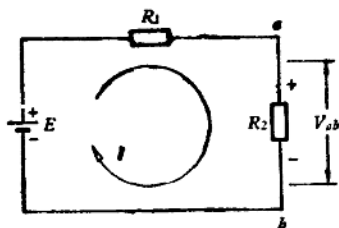


图 1.1.1 简单直流电路

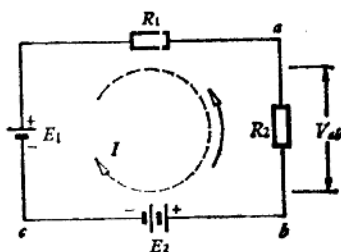


图 1.1.2 具有两个电源的简单电路

现在考虑简单直流电路存在着两个电源的情况. 如果两个电源的极性相反连接在一起, 则电流的方向由电压较高的电源来决定. 如果计算时, 所取电流方向不符合实际情况, 则会出现负号.

例 2 在图 1.1.2 中, 给定 $E_1 = 12\text{V}$, $E_2 = 15\text{V}$, $R_1 = 20\text{k}$, $R_2 = 10\text{k}$, 求 V_{ab} 及 V_{ac} .

解 设电流方向如图虚线所示, 根据回路电压定律可得

$$E_1 - E_2 = I(R_1 + R_2),$$

所以

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{12 - 15}{(20 + 10) \times 10^3} \text{ A} = -0.1 \text{ mA}.$$

这说明实际电流方向与所标方向相反, 应是如图 1.1.2 中实线所指的方向。于是

$$V_{ab} = IR_2 = -0.1 \times 10 = -1 \text{ V},$$

$$V_{ac} = V_{ab} + E_2 = -1 + 15 = 14 \text{ V}.$$

这说明 a 点电位比 c 点高 14V, 比 b 点低 1V。

2. 复杂电路的解法

(1) 等效电源法的应用

图 1.1.3 (1) 是一较复杂的直流电路: 已知 $E_1 = 10 \text{ V}$, $E_2 = 2 \text{ V}$, $R = 1 \text{ k}$, $R_1 = 1 \text{ k}$, $R_2 = 20 \text{ k}$, 求 V_{ab} 。

我们看到, 这里已不再是单回路, 但是可以把这个复杂的回路转化为简单的回路, 然后求解, 这就要用到等效电源法。说明如下:

从 a 、 b 两点向左看的复杂电路可以简化为一个等效电源 E_0 和一个等效内阻 R_0 相串联。其中 E_0 是当 a 、 b 两点断开时的开路电压, R_0 是 a 、 b 两点断开将所有电源短路时 a 、 b 两端总电阻。这样复杂电路就简化为简单电路, 如图 1.1.3 (2) 所示。

现在关键问题是求 E_0 和 R_0 。

为了求 E_0 , 我们假定 a 、 b 两点断开后, 左边回路的电流方向如图中虚线所示, 电流的大小等于

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 + 2}{1 + 20} = 0.57 \text{ mA},$$

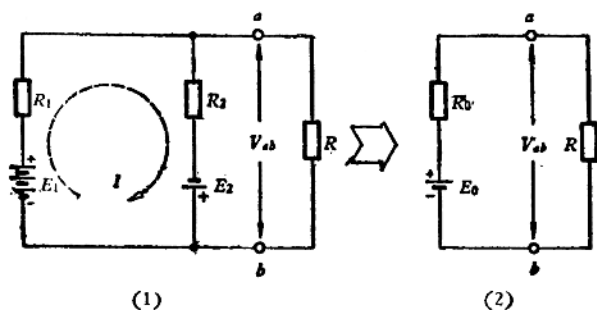


图 1.1.3 等效电源法简化复杂电路

所以 a 、 b 两点的开路电压是

$$E_0 = E_1 - IR_1 = 10 - 0.57 \times 1 = 9.43 \text{ V.}$$

至于 R_0 ，实际上就是 R_1 和 R_2 的并联，即

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1 \times 20}{1 + 20} = 0.95 \text{ k.}$$

最后根据图 1.1.3(2) 的电阻 R_0 、 R 的分压比，得到所需要的 V_{ab} 值

$$V_{ab} = \frac{R}{R_0 + R} E_0 = \frac{1}{0.95 + 1} \times 9.43 = 4.8 \text{ V.}$$

(2) 复杂电路的估算

在保证一定的精度情况下，复杂电路的估算往往可以使问题大大简化。要进行估算，首先必须找出对电路起决定作用的主要支路，然后忽略影响较小的次要支路。下面仍以上题为例试用估算法来求解。我们知道在一个单支路中电流大小和电压成正比，和电阻成反比，从给定的情况看(图 1.1.3 的电路)， E_1 比 E_2 大，而 R_1 又比 R_2 小，因此在 R 上产生电压降落的主要电流是流过 R_1 的电流，而流过 R_2 的电流则是次要的。就是说可以忽略它，这样

$$I \approx I_{R_1} = \frac{E_1}{R_1 + R}$$

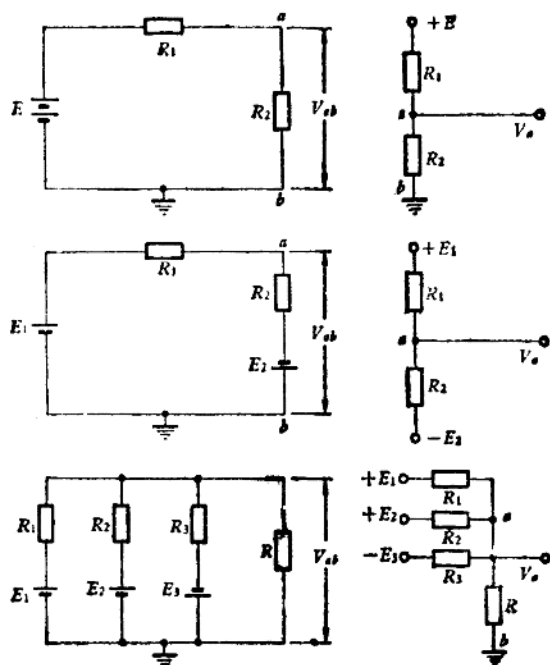
$$V_{ab} = IR \approx E_1 \frac{R}{R_1 + R} = 10 \times \frac{1}{1 + 1} = 5V.$$

两种方法计算的结果,一个是4.8V,一个是5V,可见相差不多。

比较上面两种方法可以看到,估算法在某些具体情况下非常简便,但是等效电源法的应用却有普遍意义。

(3) 晶体管电路的习惯表示法

在晶体管电路和其他一些电子电路中一般都把电源、信号输入和信号输出的公共端联接在一起,该点通常称之为



(1) 电工电路习惯表示法

(2) 晶体管电路习惯表示法

图 1.1.4 电工电路和晶体管电路表示法的对照

“地”(实际上是将该点最后和机壳相联)。此时电源不再用电池符号表示,而改用标出电位(各点对地的电压称作电位)的极性及数值。为了说明如何从电工电路表示法过渡到晶体管电路习惯表示法,在图 1.1.4 中选出几种典型电路互相对照。

二、电容及其充放电过程

1. 电容

电容器是由两个金属极板中间隔着不同的介质(云母、绝缘纸或电解质等)所组成。它是存放电荷的容器,简称电容,用符号 $\text{—}\text{||}\text{—}$ 表示。电解电容器具有极性,有时用符号 $\text{—}\text{||}\text{—}$ 表示。

用 C 表示电容器的容量, Q 表示电容器所带的电荷量, V_C 表示电容的端电压,实验证明三者有以下关系:

$$C = \frac{Q}{V_C}. \quad (1.1.2)$$

如果取 $Q = 1$ 库仑时, $V_C = 1$ 伏,则 $C = 1$ 法拉。这就意味着 1 法拉电容的端电压上升 1 伏,需要充 1 库仑的电荷量。实际的电容器的电容量往往比 1 法拉小得多,因此采用微法(μF)和微微法(pF)作为电容量的度量单位,有时简写为 μ 和 p 。

在电路中由于电流不断流向电容,在电容器上表现为电荷积累,用公式表示

$$Q = \int i_C dt. \quad (1.1.3)$$

将上式代入 (1.1.2) 式可得

$$v_C = \frac{1}{C} \int i_C dt \quad \text{或} \quad i_C = C \frac{dv_C}{dt}. \quad (1.1.4)$$

式 (1.1.4) 表明了电容端电压 v_C 的瞬时值和通过它的电

流的瞬时值 i_c 之间的关系。前者表示电容上的端电压等于它所积累的电荷除以电容量, 后者表示流过电容的电流瞬时值等于该瞬间电容端电压的变化速度乘以电容量。

例 有一电容量为 0.1μ 的电容器, 用 $I = 10 \text{ mA}$ 恒定电流向它充电, 历时 $100 \mu\text{s}$ (微秒), 求电容端电压。

解

$$\begin{aligned} v_c &= \frac{1}{C} I \Delta t \\ &= \frac{1}{0.1 \times 10^{-6}} \times 10 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-6} \\ &= 10 \text{ V.} \end{aligned}$$

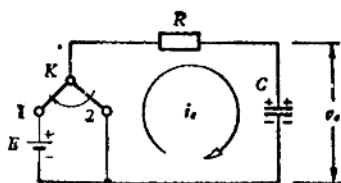
2. 电容的充放电过程

如前所述, 当电容器的极板带有一定量电荷时, 电容两端就出现相应的端电压, 反之若电容上没有电荷, 则电容的端电压为零。所以电容两端要建立一定的电压, 关键在于向电容器的极板输送相应的电荷。因此我们可以这样说, 充电就是电容上的电荷积累 (相应于电压的建立) 的过程, 放电则是电容上的电荷释放 (相应于电压的衰减) 的过程。

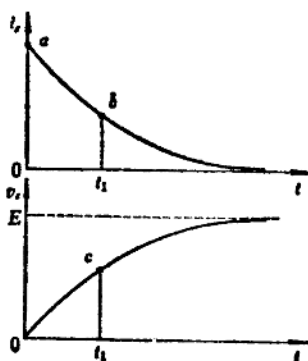
图 1.1.5(1) 是描述电容充电过程的一个实验电路。假设在未充电前电容上的电荷为零, 因此电容的端电压也为零, 当开关 K 接通的瞬间 (即由位置 2 转接到位置 1), 因电容上还未积累电荷, 故端电压仍为零。在这一瞬间电路中的电流最大, 等于 $\frac{E}{R}$ 。随着时间的推移, 电容上电荷逐渐积累, 端电压 v_c 相应地上升, 如图 1.1.5(2) 所示。当 $t = t_1$ 时, 由 i_c 和 t 所组成的面积 $0ab_1t_1$ 表示电容上已积累的电荷量, 而 v_c 的高度 ct_1 则表示该瞬时电容的电压 $v_c = \frac{Q}{C}$, v_c 的极性是和

电源电压的极性相对抗的,这样充电电流 $\frac{E - v_c}{R}$ 将随着 v_c 的上升而减小。当 v_c 上升到和 E 接近相等时,充电电流降到几乎为零,于是可以近似认为充电过程已经结束。

如果在某一瞬间把开关再突然接到 2 处,则电容将经过电阻 R 放电,直至电容上的电压衰减到零为止。



(1) 电路



(2) 电容的充电过程

图 1.1.5 电容充放电过程的实验

从观察充放电过程可以得出如下几个结论:

(1) 在包含电阻、电容的充电或放电回路里,电源经电阻向电容充电或者电容经电阻放电都需要一定的时间才能基本上完成。

(2) 在电容充电过程中,开关合上的瞬间电容的端电压保持不变。如果开关合上前电容端电压为零,则开关合上瞬间电容相当于短路;如果开关合上前电容电压为 v_c ,则在开关合上的瞬间电容相当于一个“电池”,“电池”电压值为 v_c (请注意,这个“电池”的电压是可以变化的,这是和真电池不同的地方)。

上面的叙述可以用简单的数学式子表达

$$v_c(0^+) = v_c(0^-).$$

其中 $t = 0^-$ 表示开关动作前瞬间, $t = 0^+$ 表示开关合上后