

脉冲数字电路

上册

丁康源 主编

南京工学院

脉冲数字电路

上册

丁康源 主编

南京工学院

自动控制系

电路与电子技术教研组

序

为适应当前教学工作的需要，我们在前几年教学实践的基础上，对原有讲义进行了增补和修改，编写了这本《脉冲数字电路》，供自动控制、电子计算机等专业使用。

全书分上、下两册，共十章。各章末均附有一定数量的习题和思考题。根据目前脉冲数字电路的发展情况，书中内容以集成电路为主，分立元件电路为辅。讲课时数约为100小时。如果讲授学时不够，可把注有*号的内容删去。

本书第二章和第八章由衣承斌同志执笔。丁康源同志编写了其余各章和全部习题，并对全书定稿。在编写过程中，郑虎申、沈再福、皇甫正贤、徐在君、严振祥、吴修林等同志提出了许多宝贵的意见。另外，郑虎申、黄春生、刘京南、戴义保、贾林、马记月、唐鸣华等同志为本书编印出版做了大量的工作。

编者对我院自动控制系主任王能斌同志、电路和电子技术教研组主任李士雄同志、工业自动化教研组主任赵家璧同志、计算机教研组主任曾庆辉同志、付主任邢燊承同志以及贾耀国同志的支持和帮助，对在编写出版过程中给予了大力支持的其他同志，一并表示衷心的感谢。

本书承同济大学印刷厂排印出版。对该厂全体同志和该校电子技术教研组唐九妹等同志的大力协助，谨致谢意。

由于我们的水平有限，加之时间比较仓促，书中错误和不妥之处在所难免，殷切希望读者批评指正。

编 者

一九八〇年三月

目 录

绪 言	1
* 第一章 RC 电路	4
1—1 直流电路基本知识	4
1—2 电容及其充放电	6
1—3 用微分方程法分析 RC 电路	13
1—4 用三点一法分析 RC 电路	16
1—5 常用 RC 电路	20
习题和思考题	27
第二章 半导体二极管和三极管的开关运用	31
* 2—1 $P-N$ 结少数载流子的浓度分布和电流分析	31
2—2 半导体二极管的开关运用	39
2—3 半导体三极管的开关运用	47
习题和思考题	58
第三章 双极型逻辑门电路	63
3—1 基本逻辑门电路	63
3—2 分立元件“与非”门	69
3—3 二极管——三极管逻辑门 (DTL)	78
3—4 三极管——三极管逻辑门 (TTL)	83
3—5 高阈值逻辑门 (HTL)	113
* 3—6 发射极耦合逻辑门 (ECL)	115
* 3—7 集成注入逻辑门 (I^2L)	118
3—8 双极型逻辑集成电路小结	124
习题和思考题	125
第四章 逻辑代数基础	132
4—1 逻辑代数的基本运算	132
4—2 逻辑代数的基本定律和基本定理	133
4—3 逻辑函数	137
4—4 用代数法化简逻辑函数	138
4—5 用卡诺图法化简逻辑函数	142
习题和思考题	152

第五章 触发器	154
5—1 分立元件触发器	154
5—2 TTL 触发器	165
一、 触发器的基本形式及其逻辑功能	166
二、 维持阻塞触发器	173
三、 主从触发器	179
四、 边沿触发器	185
五、 TTL 触发器小结	188
习题和思考题	190
[附录] 半导体集成电路型号说明	196
上册参考文献	199

绪 言

脉冲数字电路是处理脉冲数字信号的电路。因此，我们有必要首先对脉冲信号及计数体制作一个初步的介绍。

一、脉 冲 波 形

与正弦波显著不同的电流或电压，称为脉冲。

图 0-1 为几种常用的脉冲波形。

直流电压（或电流）的量值是用它的大小和方向来表示的，交流电压（或电流）的量值是用它的幅值、初相位和频率来表示的，脉冲电压（或电流）的量值用什么来表示呢？下面以实际的矩形波为例来说明（图 0-2）。

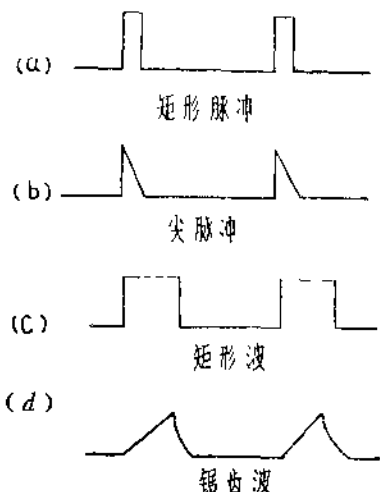


图 0-1 常用的脉冲波形

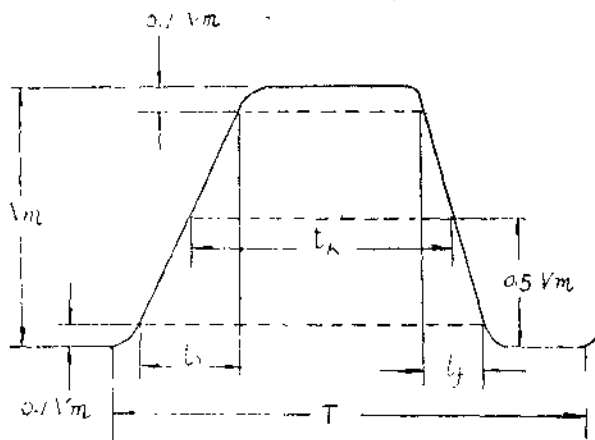


图 0-2 实际矩形脉冲波形及其参数

- ① V_m : 脉冲最大幅度——是电压从起始稳态值到峰值之间的变化幅度。单位: V (伏)。
- ② t_r : 脉冲上升时间——是从 $0.1 V_m$ 上升到 $0.9 V_m$ 所需的时间。它反映电压上升时过渡过程的快慢。单位: 秒; 毫秒 ($ms = 10^{-3}$ 秒); 微秒 ($\mu s = 10^{-6}$ 秒); 毫微秒 ($ns = 10^{-9}$ 秒)。
- ③ t_f : 脉冲下降时间——是从 $0.9 V_m$ 下降到 $0.1 V_m$ 所需的时间。它反映电压下降时过渡过程的快慢。
- ④ t_K : 脉冲宽度——是同一脉冲两次达到 $0.5 V_m$ 的时间间隔。
- ⑤ f : 重复频率——是周期性连续脉冲中每秒出现脉冲波形的次数。单位: 赫 (Hz); 千赫 (KHz); 兆赫 (MHz)。

T : 周期:——是周期性连续脉冲中相邻两个脉冲波形之起点 (或任何两个相位相同的位

置)的时间间隔。显然, $T = \frac{1}{f}$ 。

⑥ K : 脉冲空度——是脉冲周期与脉冲宽度的比, 即 $\frac{T}{t_h}$ 。

以上六个参数称为脉冲波形参数, 脉冲波形的量值就是用这些参数表示的。

二、计 数 体 制

在日常生活中, 人们习惯于用十进制数, 而在数字系统中, 多采用二进制数。现分别简介如下。

1. 十进制数

十进制数是用十个不同的数码 0, 1, 2, 3, ……9 来表示的。在十进制计数系统中, 任何一个数都可以用上述十个数码按一定规律排列起来表示, 其计算规律是“逢十进一”, 即: $9+1=10$, 右边的“0”为个位数, 左边的“1”为十位数, 也就是 $10=1 \times 10^1 + 0 \times 10^0$ 。因此, 对每一位数来说, 最大只能是 9, 超过 9 就要向前进一位, 这种计数体制就是十进制。

显然, 每一数码处于不同的位置时(数位), 它代表的意义是不同的, 例如, 设有一数如 234, 其中 2 为百位数, 3 为十位数, 4 为个位数, 故可写为

$$234 = (2 \times 100) + (3 \times 10) + 4 \times 1 = 2 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 4 \times 10^0$$

式中 10 称为十进制的基数。

在实际中, 并不都是采用十进制的, 例如, 在计时系统中, 60 秒为一分, 60 分为 1 小时, 它是六十进制; 而十二个月为一年, 它是十二进制, 如此等等, 它们都是不同的计数体制。

从计数电路的角度看来, 采用十进制是不方便的, 因为构成计数电路的基本想法是把电路的状态跟数码对应起来, 而十进制的十个数码必须由十个不同的、而且能严格区分的电路稳定状态与之对应, 这样将在技术上带来许多困难, 而且也不经济。因此在数字电路中一般不直接采用十进制。

在数字电路中, 三极管的饱和与截止, 节点电位的高与低等互相对立的两种状态是经常遇到的。因此, 计数电路采用二进制较为方便, 这两种状态在表 0—1 中 分别是用“0”或“1”两个数码来表示的。

2. 二进制数

二进制数与十进制数的区别在于数码的个数和进位的规律不同, 十进制数用十个数码, 并且逢十进位; 而二进制数则用二个数码 0 和 1, 并且逢二进位, 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“拾”。所以, 二进制数的计数规律是, 每当遇到本位是 1, 又要加 1 时便将本位变 0, 同时向前面进位使前面一位加 1。这样, 如果从 0 开始计数, 那么二进制计数顺序如表 0—1 所示, 表中左边列出所对应的十进制数。

由表 0—1 可见, 十进制数中的任一数码(0~9)都可用四位二进制数表示出来。

与十进制数一样, 二进制数亦有一个基数。从表 0—1, 可看出一个规律, 即在二进制数中, 数码 1 出现在第一位表示十进制数 1(可写成 2^0), 出现在第二位“10”表示十进制数 2(可写成 2^1), 出现在第三位“100”表示十进制数 4(可写成 2^2), ……等等。由此可见,

十、二进制数对照表 表 0—1

十 进 制 数	二 进 制 数
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001

二进制数的基数为 2。这样，我们可把一个二进制数化为十进制数，例如二进制数 11001，化成十进制数等于

$$1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 25$$

3. 十进制数转换为二进制数

如上所述，同样一个数，采用不同的进位制来表示时，它们的形式也就不一样。但是，尽管形式不同，它们既然表示同一个数，两者之间就有一定的关系来进行互换。例如将十进制数 25 表示为二进制时，可写成

$$(25)_{10} = K_4 \times 2^4 + K_3 \times 2^3 + K_2 \times 2^2 + K_1 \times 2^1 + K_0 \times 2^0$$

式中 K_4 、 K_3 、 K_2 、 K_1 、 K_0 分别是该位中的数字，把 25 被 2 除后得到的余数就是 K_0 ，然后将其商再连续除以 2 后得到余数 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 ，直至最后的商等于 0 为止，这样 K_4 、 K_3 、 K_2 、 K_1 、 K_0 就是十进制数 25 的二进制形式，即如下短除式：

$$\begin{array}{r|l}
 2 & 25 \dots\dots\dots \text{余 } 1 \dots\dots\dots K_0 \\
 \hline
 2 & 12 \dots\dots\dots \text{余 } 0 \dots\dots\dots K_1 \\
 \hline
 2 & 6 \dots\dots\dots \text{余 } 0 \dots\dots\dots K_2 \\
 \hline
 2 & 3 \dots\dots\dots \text{余 } 1 \dots\dots\dots K_3 \\
 \hline
 2 & 1 \dots\dots\dots \text{余 } 1 \dots\dots\dots K_4 \\
 \hline
 & 0
 \end{array}$$

所以 $(25)_{10} = (K_4 K_3 K_2 K_1 K_0)_2 = (11001)_2$ 。由此可见，将十进制整数化为二进制数时，只要把这个数不断除以 2，直至出现商等于零为止，每次所得的余数（必为“0”或“1”）就是二进制整数的各位数字。

4. 二进制的特点

由于二进制具有一定的优点，因此它在计算技术中被广泛采用。

(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，因此它的每一位数都可以用任何具有两个不同稳定状态的元件来表示，如三极管的导通和截止，继电器的闭合和断开，灯泡的亮和灭等，只要规定其中一种状态表示“1”，另一种状态表示“0”，就可以表示二进制了。这样，数码的存储和传送，也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，因此运算操作简便，如

加法运算： $0+0=0$ ； $1+0=1$ ； $0+1=1$ ； $1+1=10$

乘法运算： $0 \times 0=0$ ； $1 \times 0=0$ ； $0 \times 1=0$ ； $1 \times 1=1$

至于减法和除法则为加法和乘法的逆运算。

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，数码长，例如十进制数 99 表示为二进制数运算时，即为 1100011，使用起来不方便也不习惯。因此，原始数据多用人们习惯的十进制，在送入机器时，就必须将十进制的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，再将二进制数转换成十进制数送出。

* 第一章 RC 电 路

在前面的课程中,我们已讨论过 RC 电路的过渡过程分析问题。由于 RC 电路是脉冲数字电路的重要基础之一,所以我们有必要在此作进一步讨论。

本章首先复习直流电路的基本知识,然后讨论电容充放电的规律,以及 RC 电路换路后过渡过程的分析方法,最后介绍几种常用的 RC 电路。

§ 1-1 直流电路基本知识

本课程广泛应用直流电路的知识。择要复习如下。

一、电 位 与 电 位 差

直流电路中的物理量主要是:电荷量 Q , 电流 I , 电位差(即电压) V , 电位 V , 电阻 R , 功率 P 等。一般来说大家对它们都很熟悉。但是,要学好《脉冲数字电路》课程,必须特别注意把“电位”与“电位差”两者的含义分辨清楚。

(一) 电 位

电路中某一点(比如说, A 点)的电位 V_A , 是该点与参考点的电位差。单位为伏特。一般来说,参考点是可以任意选择的,因此某一点的电位值随参考点的变更而变更。这就是电位的相对性。而对应于一个确定的参考点,某点电位则有一个确定的值。这就是电位的单值性。在数字电路中,“电位”常用“电平”一词来描述,如称“高电位”为“高电平”,称“低电位”为“低电平”。

显然,参考点本身的电位为 0。

(二) 电 位 差

电路中一点和另一点(比如说, A 点和 B 点)的电位差 V_{AB} , 是一点电位 V_A 与另一点电位 V_B 之差:

$$V_{AB} = V_A - V_B \quad (1-1-1)$$

单位也是伏特。值得指出的是:虽然 A 点电位 V_A 和 B 点电位 V_B 都随参考点的变更而变更,但电位差 V_{AB} 的值与参考点的选择无关。这就是电位差的绝对性。

请注意, V_{AB} 和 V_{BA} 的意义不同:

$$V_{BA} = V_B - V_A = -V_{AB} \quad (1-1-2)$$

它表示 B 点和 A 点的电位差

二、基本电路定律

直流电路以及脉冲数字电路的分析计算，主要运用以下三个基本定律。

(一) 欧姆定律

通过电阻 R 的电流 I ，与电阻两端的电压 V 成正比，与电阻 R 成反比。即：

$$I = \frac{V}{R} \quad (1-1-3)$$

在运用欧姆定律时必须注意：电流 I 、电压 V ，电阻 R 三者必须相互对应。即电压 V 应是电阻 R 的电压，而不是任何其它电压；电流 I 应是流过电阻 R 的电流，而不是任何其它电流。

单位：① 若 $[V] = V$ ， $[R] = \Omega$ ，则 $[I] = A$
② 若 $[V] = V$ ， $[R] = K\Omega$ ，则 $[I] = mA$

第二套单位是脉冲数字电路中常用的。

(二) 节点电流定律 (克希荷夫第一定律)

在任何一节点处，流进这个节点电流的总和，恒等于流出这个节点的电流的总和。即：

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-1-4)$$

列方程时，流入节点的电流都写在等号左边，流出节点的电流都写在右边。在这个前提下不需要考虑电流的正负。

节点电流定律实质上是电流连续性的表现。

节点电流定律也可以从节点推广到网络：流进一个网络的电流的总和，恒等于流出这个网络的电流的总和。

(三) 回路电压定律 (克希荷夫第二定律)

沿任一回路绕行一周，电位变化的总代数和恒等于零。即：

$$\sum \Delta V = 0 \quad (1-1-5)$$

要特别注意：这里指的是“代数和”，即必须考虑正负。对电动势 E 来说，凡电动势方向（从电源负极到正极的方向）与回路绕向一致的，电位变化为正，反之为负。对电阻 R 来说，凡电流正方向与回路绕向一致的，电位变化为负，反之为正。由此可以看出，在写回路电压方程之前，首先必须假定回路绕向。

回路电压定律实质上是电位单值性的表现。

三、迭加原理和等效发电机原理

复杂电路的分析计算往往较繁。除了运用三个基本定律外，有时还可借助迭加原理或等效发电机原理使分析计算得到简化。

(一) 迭加原理

在线性电路中, 当有多个电源电动势同时作用时, 任意一个支路的电流, 等于各个电源电动势分别单独作用时在这一支路中产生电流的代数和。

显然, 迭加原理不仅适用于支路电流, 而且也适用于支路电压。

(二) 等效发电机原理

线性有源二端网络, 对于外部电路的作用, 相当于一个有内阻的等效电源。等效电源的等效电动势 E_0 等于有源二端网络的开路电压; 等效电源的等效内阻 R_0 等于有源二端网络内部电动势均为另时从两端看进去的等效电阻。

§ 1-2 电容及其充放电

本节首先给出电容元件物理量间的基本关系, 然后分析电容充放电过程, 最后总结出电容充放电的基本规律。

一、电容各物理量的关系

(一) 电容端电压 v_c 与电荷量 Q 的关系

电容器是存放电荷的容器。其电容量 C 、端电压 v_c 与电荷量 Q 三者之间满足如下关系:

(图 1-2-1)

$$v_c = \frac{Q}{C} \quad (1-2-1)$$

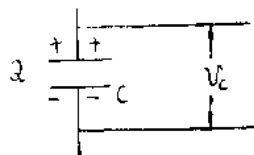


图 1-2-1

电容的基本单位是:

$$[C] = \frac{[Q]}{[v_c]} = \frac{\text{库伦}}{\text{伏特}} = F(\text{法})$$

较小的单位是: 微法 ($1 \mu F = 10^{-6} F$), 微微法 ($1 pF = 10^{-12} F$)。

(二) 电容的端电压 v_c 与电流 i 的关系

现在我们来求电容的端电压 v_c 与流过电容的电流 i 的关系。

① 首先要找出电容所带电荷量 Q 与流过电容的电流 i 之间的关系:

电流 i 就是电荷量 Q 的变化率。即

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1-2-2)$$

反过来说, 电容器极板上的电荷量 Q , 是电流 i 流向电容, 随着时间积累起来的。即:

$$Q = \int_0^t i dt + Q_0 \quad (1-2-3)$$

这里的 Q_0 是表示: 在所讨论的过程开始 (即 $t=0$) 时, 电容器已具有的电荷量。通常称为初始状态。

其次,借助(1-2-1)式的关系,(1-2-2)式和(1-2-3)式中的 Q 和 Q_0 就可以分别代之以 Cv_c 和 CV_{c0} (V_{c0} 也是初始状态,表示所讨论的过程开始时电容的端电压。)这样就建立了电流 i 和端电压 v_c 之间的关系:

$$i = C \frac{dv_c}{dt} \quad (1-2-4)$$

$$v_c = \frac{1}{C} \int_0^t i dt + V_{c0} \quad (1-2-5)$$

(1-2-4)式的物理意义是:流过电容的电流瞬时值 i ,等于该瞬间电容端电压 v_c 的变化率 $\frac{dv_c}{dt}$ 乘以电容量 C 。

(1-2-5)式的物理意义是:电容器端电压 v_c ,等于电流 i 在一段时间(0— t)内所积累的电荷量 $\int_0^t i dt$ 除以电容量 C ,再加上端电压初始值 V_{c0} 。

(1-2-4)式和(1-2-5)式所包含的物理意义是分析 RC 电路的理论基础。

[例 1-2-1] 有一电容量为 $1\mu F$ 的电容器,用波形如图 1-2-2 的电流向它充电,历时 0.1 mS。已知充电前电容器已带有 10^{-6} 库仑电荷。求充电后电容端电压。

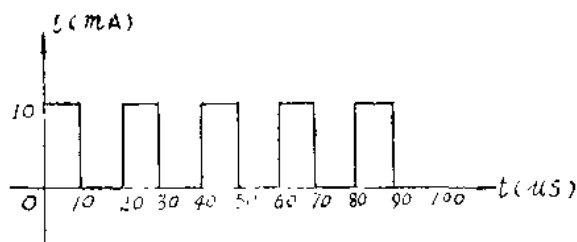


图 1-2-2 电 容 充 电 电 流

解: 电容端电压的初始值

$$V_{c0} = \frac{Q_0}{C} = \frac{10^{-6} \text{ 库仑}}{10^{-6} F} = 1V$$

充电后电容端电压

$$\begin{aligned} v_c(100 \mu S) &= V_{c0} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \\ &= 1V + \frac{1}{10^{-6} F} \int_0^{100 \mu S} i dt \\ &= 1V + \frac{1}{10^{-6} F} \times 10 \text{ mA} \times 10 \mu S \times 5 \\ &= 1V + \frac{1}{10^{-6} F} \times 10 \times 10^{-3} A \times 50 \times 10^{-6} S \\ &= 1V + 0.5V = 1.5V \end{aligned}$$

二、电容的充放电过程

充电,就是电容上电荷 Q 的积累过程(Q 增大)。因为电容端电压 v_c 与电荷量 Q 之间总是存在着正比的关系,电荷量 Q 的增大总伴随着端电压 v_c 的增大,所以充电也就是电容端电

压 v_c 的建立过程 (v_c 增大)。

放电, 就是电容上电荷 Q 的释放过程 (Q 减小), 也就是电容端电压 v_c 的衰减过程 (v_c 减小)。

现在我们来观察电容充放电过程的实验 (图 1-2-3)。先看充电过程。开关 K 原来处于“2”位置, 在 $t=0$ 时刻, 转到“1”位置。

已知未充电前电容上的电荷为 0, 与此相应, 端电压也为 0。

开关 K 由 2 转到 1 的瞬间 ($t=0$), 电容上还未积累起电荷 ($Q_0=0$), 与此相应, 端电压也为 0

($V_{c0}=0$), 电流 $i = \frac{E-0}{R}$ 最大。

随着时间的推移 ($t \uparrow$), 电容上电荷逐渐积累 ($Q \uparrow$), 与此相应, 端电压增大 ($v_c \uparrow$)。

充电电流 $i = \frac{E-v_c}{R}$ 减小。

相当长时间之后 ($t \rightarrow \infty$), v_c 上升到等于 E , 充电电流降为 0 ($i = \frac{E-E}{R}$)。此时, v_c 达到最大值 (E), Q 也达到最大值 (CE)。

上述的电容充电过程可以用表 1-2-1 概括。

电 容 充 电 过 程 表 1.2.1

时间 t	电 荷 量 Q	端 电 压 v_c	充 电 电 流 i
$t=0$	$Q=Q_0=0$	$v_c=V_{c0}=0$	$i=\frac{E-0}{R}$ (最大)
$t \uparrow$	$Q \uparrow$	$v_c \uparrow$	$i=\frac{E-v_c}{R} \downarrow$
$t \rightarrow \infty$	$Q=CE$ (最大)	$v_c=E$ (最大)	$i=\frac{E-E}{R}=0$

充电过程的形象化描述是 i 、 v_c 波形图 (图 1-2-4)。

下面再看放电过程。充电完毕后的某一瞬间, 开关 K 再突然接到 2 处, 此时发生的过程就是放电过程。

我们称初始时刻 (开关 K 再接到 2 的瞬间) 为 $t=0$ 。显然在这之后电容端电压 $V_{c0}=E$, 与此相应, 电容上的电荷 $Q_0=CE$ 。

开关 K 由 1 转到 2 的瞬间 ($t=0$), 电容上的电荷还没有来得及释放, 因此, $Q=Q_0=CE$, 与此相应, $v_c=V_{c0}=E$ 。电流 $i = \frac{0-E}{R} = -\frac{E}{R}$, $|i| = \frac{E}{R}$ 最大。应该注意的是: 这时 i 的方向与图 1-2-3 所示方向相反, 即放电电流方向与充电电流方向相反。

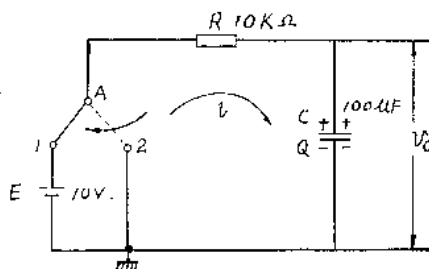


图 1-2-3 电容充放电实验电路

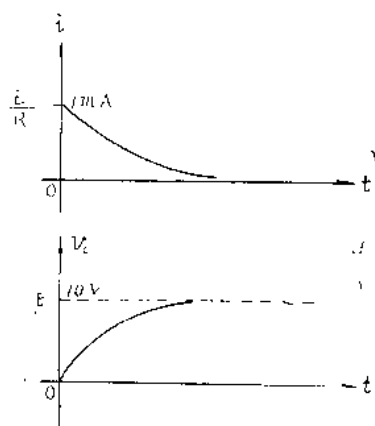


图 1-2-4 电容充电过程

随着时间的推移 ($t \uparrow$), 电容上电荷逐渐释放 ($Q \downarrow$), 与此相应, 端电压减小 ($v_c \downarrow$)。放电电流 $i = \frac{0 - v_c}{R}$, $|i| = \frac{v_c}{R}$ 减小。

相当长时间之后 ($t \rightarrow \infty$), 电容上的电荷全部释放完 ($Q = 0$), 与此相应, 端电压下降到 0 ($v_c = 0$), 放电电流 $i = \frac{0 - 0}{R} = 0$ 。至此, 放电过程结束。整个放电过程可用表 1-2-2 概括。

电 容 放 电 过 程 表 1.2.2

时间 t	电 荷 量 Q	端 电 压 v_c	放 电 电 流 i
$t=0$	$Q=Q_0=CE$ (最大)	$v_c=V_{c0}=E$ (最大)	$ i =\frac{E}{R}$ (最大)
$t \uparrow$	$Q \downarrow$	$v_c \downarrow$	$ i =\frac{v_c}{R} \downarrow$
$t \rightarrow \infty$	$Q=0$	$v_c=0$	$i=0$

放电过程的形象化描述是 i 、 v_c 波形图 (图 1-2-5)。

请注意: 图 1-2-5 中电流 i 取负值, 这表示放电电流实际方向与图 1-2-3 所示电流正方向相反, 即与充电电流方向相反。

三、术 语

这里介绍过渡过程分析中几个常用的术语。

(一) 阶跃 (跳变)

图 1-2-3 电路当开关 K 由 2 转向 1 瞬间, 如同输入信号 v_{sr} 使 A 点电位突然从 0 上跳到 $+E$ 一样, 我们称之为“正阶跃”或“正跳变”输入信号。可以把所述电路改画成图 1-2-6(b), 它与图 1-2-6(a) 完全等效。

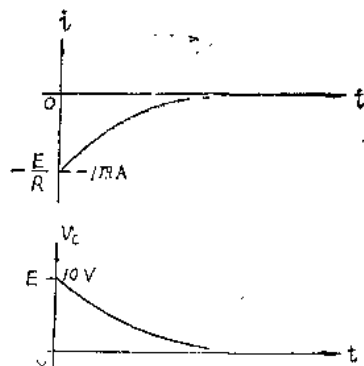


图 1-2-5 电容放电过程

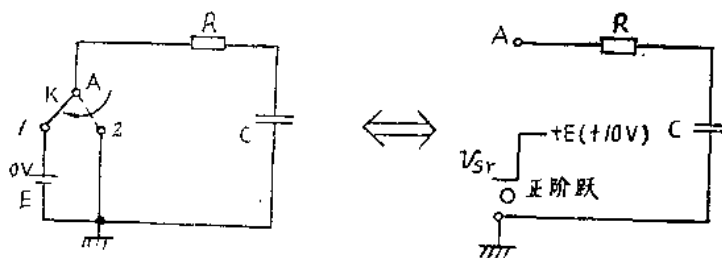


图 1-2-6 正阶跃输入讯号

完全类似, 图 1-2-3 电路当开关 K 由 1 转向 2 瞬间, 如同输入讯号 v_{sr} 使 A 点电位突然从 $+E$ 下跳到 0 一样, 我们称之为“负阶跃”或“负跳变”输入讯号。可以把所述电路改画成图 1-2-7(b), 它与图 1-2-7(a) 完全等效。

(二) 换 路

以下两种情况统称为电路发生“换路”:

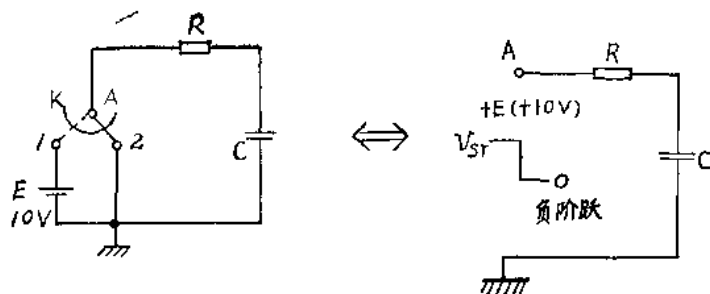


图 1-2-7 负阶跃输入讯号

- ① 输入信号跳变。
- ② 开关动作（接通或断开）。

（三） $t=0^-$, $t=0^+$, $t=\infty$

如果电路在某一时刻（例如 $t=0$ ）发生换路，那么：

- $t=0^-$ 表示换路前瞬间；
- $t=0^+$ 表示换路后瞬间；
- $t=\infty$ 表示换路引起的充放电过渡过程结束以后。

四、电容充放电规律

总结电容充放电实验可知，电容充放电过程遵循以下规律：

1. 电容充电或者放电，都需要一定时间才能基本上完成。
2. 电容端电压不可能在瞬间突变。

这是电容的一个极其重要的性质，是脉冲数字电路中最重要基本概念之一。现在解释如下：

要使电容端电压在瞬间突变，也就是要使电容的电荷量在瞬间突变，这就要求电容的充电电流（或放电电流）为 ∞ ，而充电电流（或放电电流）实际上不可能为 ∞ ，因此我们说，电容端电压不可能在瞬间突变。

电容的这个重要性质还可以从能量的观点予以说明：

电容与电阻不一样，它在电路中不是一个耗能元件，而是一个储能元件。当电容端电压从 V_{c1} 变化到 V_{c2} 时，电容储藏的电场能量从 $\frac{1}{2}CV_{c1}^2$ 变化到 $\frac{1}{2}CV_{c2}^2$ 。要使电容端电压在瞬间突变，也就是要使电场储能在瞬间突变，这就要求功率为 ∞ ，而功率实际上不可能为 ∞ ，因此，电容端电压不可能在瞬间突变。

3. 充电过程或放电过程结束后，电容上的电流都等于 0，电容呈现高阻抗，相当于开路。这就是电容的“隔直”作用。

4. 输入信号跳变后瞬间，电容上的电流最大，电容呈现低阻抗，对跳变信号而言，相当于“短路”。

5. 电源经电阻向电容充电，或者电容经电阻放电时，充放电过程中电容端电压 v_c 和电流 i 随时间变化规律是时间的指数函数，其特点是：起初变化较快，后来变化逐渐变慢。

例如图 1-2-3 电路中，

充电过程：

$$v_c = E(1 - e^{-t/RC}) \quad (1-2-6)$$

$$i = \frac{E}{R} \cdot e^{-t/RC} \quad (1-2-7)$$

放电过程：

$$v_c = E \cdot e^{-t/RC} \quad (1-2-8)$$

$$i = -\frac{E}{R} \cdot e^{-t/RC} \quad (1-2-9)$$

上述结论的严格证明将在下一节中通过微分方程给出。这里以充电过程为例，作一个定性说明：

v_c 的上升是由于电流 i 给电容 C 充电造成的。 v_c 上升速度正比于电流 i 的大小。但 $i = \frac{E - v_c}{R}$ 是随时间递减的（由于 v_c 随时间上升），因此 v_c 上升速度也是随时间递减的，即开始上升较快，后来上升逐渐变慢。

再看电流 i 的变化规律。上面已说明 i 是随时间递减的，而且，从关系式 $i = \frac{E - v_c}{R}$ 可以看出， i 的下降速度与 v_c 的上升速度是相应的，因此， i 的下降速度也是随时间递减的，即开始下降较快，后来下降速度逐渐变慢。

6. 充放电过程的快慢仅仅取决于充放电回路电阻 R 和电容 C 的乘积——电路时间常数 τ 。

在(1-2-6)式、(1-2-7)式、(1-2-8)式、(1-2-9)式指数部分中都包含 RC 项。我们称 $\tau = RC$ 为电路时间常数。

(1-2-6)——(1-2-9)式的数学分析和充放电过程的实验研究都证明：时间常数 τ 愈大，则充电（或放电）过程愈慢。

时间常数 τ 是脉冲数字电路中的重要参数，现将其单位推导如下：

$$[\tau] = [R][C] = \frac{[V]}{[I]} \cdot \frac{[Q]}{[V]} = \frac{[Q]}{[I]} = \frac{[I][t]}{[I]} = [t] = \text{秒}(s)$$

即时间常数 τ 的单位与时间相同，为“秒”（ s ）。在脉冲数字电路中用得较多的时间单位是毫秒（ ms ）、微秒（ μs ）和毫微秒（ ns ）

$$1ms = 10^{-3}s$$

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

$$1ns = 10^{-9}s$$

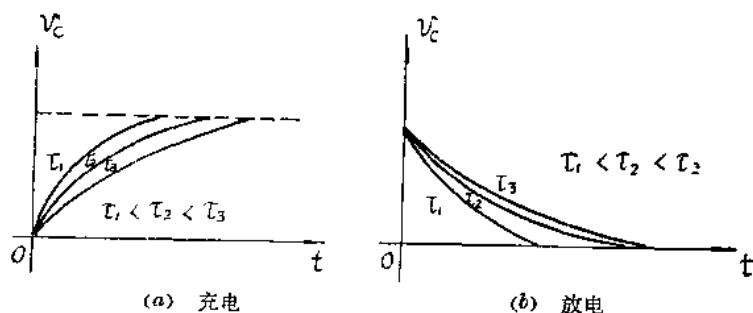


图 1-2-8 时间常数 τ 对充放电的影响

在图 1-2-3 电路中,如果 R 和 C 取不同数值,即时间常数 τ 不同,则在充放电过程中 v_c 波形也不同。时间常数 τ 对 v_c 波形的影响示于图 1-2-8(a) 和 (b)。

[例 1-2-2] 如图 1-2-9(a) 电路。开关 K 原来处于“2”位置,电容初始电压 $V_{c0}=0$ 。试求:

- ① 若 $t=0$ 时开关 K 转到“1”,则当 $t=3\tau$ 时 v_c 上升到多少?
- ② 若当充电完毕后 K 又返回“2”,则经过 3τ 时间后 v_c 下降到多少?

解: ① 充电过程中:

$$\begin{aligned} v_c &= E(1 - e^{-t/\tau}) = E(1 - e^{-3\tau/\tau}) \\ &= E(1 - e^{-3}) = E(1 - 0.0498) = 0.95E \end{aligned}$$

由此看出,当电容充电进行到 3τ 时, v_c 已上升到最终稳态值的 95%。因此,一般认为 3τ 以后,充电过程已基本结束[见图 1-2-9(b)]。

② 放电过程中:

$$v_c = Ee^{-t/\tau} = Ee^{-3\tau/\tau} = E \cdot e^{-3} = 0.0498E = 0.05E$$

由此看出,当电容放电进行到 3τ 时, v_c 已下降到初始值的 5%,即放电已完成了 95%,所以可以认为,放电过程也是在 3τ 以后基本结束[见图 1-2-9(c)]。

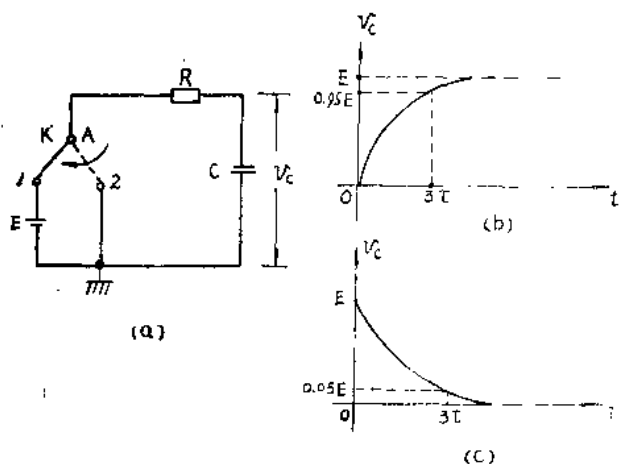


图 1-2-9 充放电过程在 3τ 以后基本结束

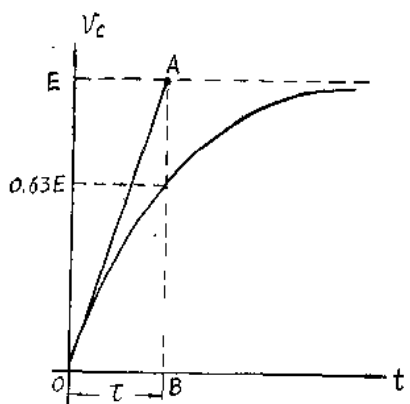


图 1-2-10 时间常数 τ 的几何意义和物理意义

[例 1-2-3] 如图 1-2-9(a) 电路。开关 K 原来处于“2”位置、电容初始电压 $V_{c0}=0$ 。当 $t=0$ 时 K 转到“1”。由上题结果知道: 充电过程 $v_c(t)$ 波形如图 1-2-10。试证:

- ① 直线 OA 是 $v_c(t)$ 曲线在 O 点的切线。
- ② 当 $t=\tau$ 时, $v_c=0.63E$ 。

证明: ①

$$\because v_c = E(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\therefore \frac{dv_c}{dt} = -E \cdot e^{-t/\tau} \cdot \left(-\frac{1}{\tau}\right) = \frac{E}{\tau} e^{-t/\tau}$$

$$\text{在 } t=0^+ \text{ 瞬间, } \left. \frac{dv_c}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{E}{\tau}$$

即: 在 $t=0^+$ 时 (O 点处), 电容端电压 $v_c(t)$ 的变化速度 $= \frac{E}{\tau}$ 。这在几何上意味着: