

中等专业学校教材

数字电子技术基础

南京电力专科学校 杨志忠 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是根据水利电力部中等专业学校电力系统通信、电力系统远动技术和电厂热工测量及自动化专业的《数字电子技术基础》教学大纲和编写提纲进行编写的。

全书内容包括RC电路、二极管和三极管的开关特性、基本逻辑门电路、双稳态触发器、脉冲的整形与产生电路、间歇振荡器、时延电路、双极型逻辑门电路、TTL集成触发器、基本数字部件、TTL与非门组成的脉冲整形与产生电路、MOS数字集成电路、模/数和数/模转换等。各章均有小结和思考题与习题。内容叙述深入浅出、通俗易懂。既有定量分析,也有定性分析。

本书可作为电力系统通信、电力系统远动技术、电厂热工测量及自动化等专业的教材,也可作为有关专业人员的自学参考书。

中等专业学校教材

数字电子技术基础

南京电力专科学校 杨志忠 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 29.5印张 670千字

1987年11月第一版 1987年11月北京第一次印刷

印数00001—12120册

ISBN7-120-00004-7/TM·2

15143·6472 定价3.40元

前 言

本书是根据水利电力部中等专业学校电力系统通信、电力系统远动技术、电厂热工测量及自动化等专业的教学大纲和1983年8月大连会议讨论的《数字电子技术基础》编写提纲进行编写的。全书内容包括分立元件电路和数字集成电路两大部分。分立元件电路部分着重介绍了基本逻辑门电路、双稳态触发器、脉冲的整形与产生电路、间歇振荡器、时延电路和锯齿波电压产生电路的工作原理、电路分析与设计方法；数字集成电路部分则着重对基本集成单元电路和基本数字部件的工作原理、逻辑功能及逻辑设计的基本方法的讨论。对近年来发展起来的中、大规模集成电路也作了适当介绍。在安排教学内容时，可根据具体要求和时数进行增删。

在编写中，力求深入浅出、突出重点、概念清楚明确、便于自学。为了帮助和加深对所学内容的理解，每章末都有本章小结、思考题与习题。

本教材共十五章，其中第六、九、十三、十五章由沈阳电力专科学校的陈才贤同志编写；其余十一章由南京电力专科学校的杨志忠同志编写；第十、十一、十二、十四章的思考题与习题由郭顺华同志提供。杨志忠同志担任主编。全书插图由赵依群同志绘制。

华北电力学院的鲍伟廉副教授为本书主审，对全书提出了详细的修改意见。此外，王玠生、章忠全、郭顺华、赵依群等同志也对本书提出了宝贵意见，在此，编者谨致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限、时间仓促、书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1986年10月

目 录

前 言

绪 论	1
-----------	---

第一章 RC电路	6
----------------	---

第一节 RC电路的充放电	6
--------------------	---

第二节 常用RC电路	15
------------------	----

思考题与习题	22
--------------	----

第二章 二极管和三极管的开关特性	27
------------------------	----

第一节 二极管的开关特性	27
--------------------	----

第二节 三极管的开关特性	34
--------------------	----

思考题与习题	42
--------------	----

第三章 基本逻辑门电路	47
-------------------	----

第一节 概述	47
--------------	----

第二节 二极管门电路	48
------------------	----

第三节 “非”门电路(反相器)	55
-----------------------	----

第四节 复合逻辑门电路	77
-------------------	----

思考题与习题	81
--------------	----

第四章 双稳态触发器	87
------------------	----

第一节 双稳态触发器的工作原理	87
-----------------------	----

第二节 双稳态触发器的触发方式	93
-----------------------	----

第三节 双稳态触发器的计算	104
---------------------	-----

第四节 其它双稳态触发器	110
--------------------	-----

思考题与习题	115
--------------	-----

第五章 脉冲的整形与产生	121
--------------------	-----

第一节 射极耦合触发器(斯密特触发器)	121
---------------------------	-----

第二节 单稳态触发器	128
------------------	-----

第三节 自激多谐振荡器	150
-------------------	-----

思考题与习题	159
--------------	-----

第六章 间歇振荡器(阻塞振荡器)	166
------------------------	-----

第一节 概述	166
--------------	-----

第二节 脉冲变压器	166
-----------------	-----

第三节 单稳态间歇振荡器	177
--------------------	-----

第四节 自激间歇振荡器	183
-------------------	-----

思考题与习题	188
--------------	-----

第七章 时延电路	191
----------------	-----

第一节 放电式阻容时延电路	191
第二节 充电式阻容时延电路	194
思考题与习题	196
第八章 锯齿波电压产生电路	198
第一节 简单锯齿波电压产生电路	198
第二节 恒流源锯齿波电压产生电路	202
第三节 自举电路	204
第四节 电容负反馈锯齿波电压产生电路(密勒积分电路)	209
思考题与习题	215
第九章 逻辑代数基础	218
第一节 逻辑函数	218
第二节 逻辑代数的基本公式和常用公式	223
第三节 逻辑函数的化简	226
第四节 逻辑代数的应用举例	240
思考题与习题	244
第十章 双极型逻辑门电路	247
第一节 二极管—三极管逻辑门电路(DTL与非门)	247
第二节 高阈值逻辑门电路(HTL与非门)	250
第三节 晶体管—晶体管逻辑门电路(TTL与非门)	252
第四节 射极耦合逻辑门电路(ECL门电路)	276
第五节 注入逻辑门电路(I^2L 门电路)	280
思考题与习题	284
第十一章 TTL集成触发器	289
第一节 触发器的基本电路	289
第二节 维持阻塞D触发器	299
第三节 主从触发器	302
思考题与习题	308
第十二章 基本数字部件	312
第一节 寄存器	312
第二节 计数器	316
第三节 数字显示器	341
第四节 译码器	348
思考题与习题	358
第十三章 集成与非门组成的脉冲整形与产生电路	365
第一节 TTL与非门斯密特触发器	365
第二节 TTL与非门单稳态触发器	368
第三节 TTL与非门自激多谐振荡器	375
思考题与习题	381
第十四章 金属—氧化物—半导体场效应管数字集成电路(MOS'数字集成电路)	383

第一节 MOS场效应晶体管(MOS管).....	383
第二节 静态MOS逻辑电路	396
第三节 动态MOS逻辑电路	413
第四节 CMOS逻辑电路	424
思考题与习题	438
第十五章 数-模与模-数转换器	441
第一节 数字-模拟(D/A)转换器	441
第二节 模拟-数字(A/D)转换器	452
思考题与习题	462

绪 论

一、本课程的研究范围

脉冲数字电路是近代电子技术中的一门重要的基础技术。随着现代工业和科学技术特别是军事科学技术的发展,脉冲数字电路的研究与应用取得了较迅速的进展,它已被广泛地应用于电子数字计算机、自动控制、通信、雷达、电视、自动交换、遥控遥测和电子数字仪表等方面。可以说,它已渗透到国民经济、国防和人民生活等领域中,并在许多方面引起了根本性的变革。

脉冲数字电路是由脉冲电路和数字电路两部分组成,它包括的内容十分广泛,本课程中不可能全面介绍,只能介绍一些基本内容。

(一) 脉冲信号和脉冲电路

所谓脉冲实际上是指突然变化的电压或电流波形。就广义来说,一切非正弦规律变化的电压、电流波形都统称为脉冲。

脉冲波形的种类很多,其名称主要根据其几何形状来确定。常见的波形如图0-1所示。

所谓脉冲电路就是用以产生与变换脉冲波形的电路。它可以形成各种不同频率、不同波形的脉冲信号,也可以将一种脉冲波形变换成另一种脉冲波形。

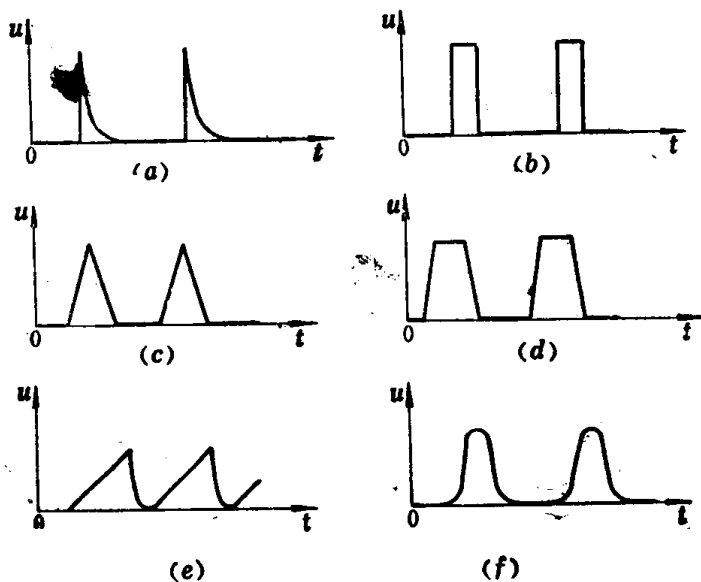


图 0-1 几种常见的脉冲波形

(a)尖脉冲; (b)矩形脉冲; (c)三角形脉冲; (d)梯形脉冲; (e)锯齿波; (f)钟形脉冲

在脉冲电路中,我们主要讨论利用线性网络和晶体管等电子器件来形成不同的波形。如限幅电路、双稳态触发器、单稳态触发器、多谐振荡器、射极耦合触发器、时延电路、间歇振荡器、锯齿波电压产生电路。

(二) 数字信号和数字电路

数字信号和“模拟信号^①”不同,它在时间上和数值上都是离散的信号。这就是说,它们的变化在时间上是不连续的,总是发生在一系列离散的瞬间;在数值大小和增减变化上都是采用数字式的。

在数字电路中,电流和电压只有两个状态。如它产生的电压波形如图0-2所示,高电

① 模拟信号是指连续变化的电压或电流波形。

平和低电平分别用“1”和“0”两种状态来表示。数字电路就是用以研究并确定这些状态之间的相互关系，即我们常说的逻辑关系的电路，从而使我们有可能借助于逻辑代数、



图 0-2 矩形脉冲

真值表、卡诺图、状态转换图等进行逻辑设计，选择合适的数字电路，按照一定的规律连接起来，进行数字运算和逻辑判断，以实现各种逻辑功能。

在数字电路中我们主要讨论逻辑单元电路、逻辑代数、数字部件（如寄存器、移位寄存器、计数器、译码器等）。我们还将用较多的篇幅讨论晶体管——晶体管数字集成电路和金属——氧化物——半导体数字集成电路。

路。

不论是脉冲电路还是数字电路，它们都是由电阻 R 、电容 C 、电感 L 和晶体管（二、三极管）组成。晶体管作开关使用，用以接通和断开电路，破坏电路的稳定状态，使之产生暂态过程；而 RC 或 RL 电路则用以控制暂态过程的快慢，以获得所需的脉冲波形。

脉冲数字电路有分立元件电路和集成电路两种。将晶体管、电阻、电容和电感等元件分别焊在线路板上的电路，称为分立元件电路；如将晶体管、电阻、小电容及导线都做在一块半导体硅片上，封装在管壳内而成为一个互相不可分割的整体电路时，称为集成电路。用于进行数字运算的集成电路，称作数字集成电路。由于工艺上的原因，集成电路中的三极管、二极管比较容易制造，成本低。而高值电阻、电容却很难制造，成本又很高，因此，在集成电路中，一般都避免使用高值电阻和电容，而晶体管却用的很多，且多为直接耦合，其原因就在于此。

根据集成电路的复杂程度可分为三类：小规模集成电路，能完成基本逻辑功能的逻辑电路，如“或”功能，“与”功能。在一块硅片上可制造出多个逻辑电路，它可包含近百个元件；中规模集成电路的集成度比小规模集成电路要高出数量级，可将几十个逻辑门或上千个元件集成在一块硅片上；大规模集成电路需要更为复杂的生产技术，它可将100到1000个逻辑门集成在一块硅片上，它包含10000到20000个元件，而且能设计出包含一台较复杂的电子计算机的全部逻辑。由于集成电路具有体积小、重量轻、工作稳定可靠、功耗小、寿命长等优点，因此，它在脉冲数字电路中获得了广泛的应用。

二、脉冲波形的主要参数

在实际电路中，由于存在着分布电容等寄生参数的影响，矩形脉冲不可能是理想的，它的波形通常如图0-3所示。为了表示脉冲信号的特征和分析，脉冲波形的主要参数定义如下：

- (1) 脉冲幅度 U_m ：脉冲电压变化的最大值。
- (2) 脉冲上升时间 t_r ：由 $0.1U_m$ 上升到 $0.9U_m$ 所需的时间。
- (3) 脉冲下降时间 t_f ：由 $0.9U_m$ 下降到 $0.1U_m$ 所需的时间。

(4) 脉冲宽度 t_p ：脉冲的持续时间。由于脉冲波形的形状多种多样，其顶部和底部的宽度相差很大，因此，对脉冲宽度难以作出严格的定义。对于矩形或近于矩形的脉冲，一般用对应于 $0.5U_m$ 处的宽度来表示；对于顶部和底部相差很大的脉冲，则对应于 $0.9U_m$ 。

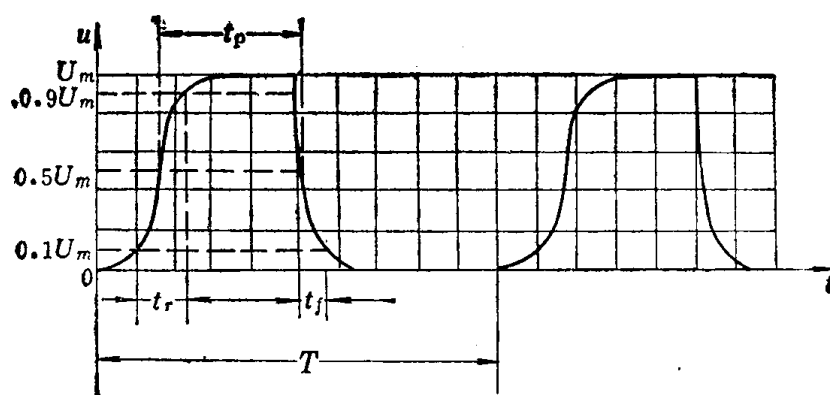


图 0-3 矩形脉冲的参数

处的宽度称作顶部宽度，用 t_{p1} 表示；对应于 $0.1U_m$ 处的宽度称作底部宽度，用 t_{p2} 表示。

(5) 脉冲重复周期 T ：两个相邻脉冲重复出现所需的时间。

(6) 重复频率 F ：每秒钟脉冲出现的次数。它为周期的倒数。即

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

三、脉冲的谐波成份

由图0-3可看出，脉冲波形的上升沿和下降沿的变化是非常快的，它主要由频率较高的信号组成。上升、下降时间越短，则其包含高频信号的频率也越高。而脉冲的平顶部份变化则很慢，单位时间内幅度变化很小，它主要由幅度较大的低频信号组成。平顶部份越宽，则包含低频信号的频率越低。因此，一个脉冲波是由许多频率、相位和幅度不同的正弦、余弦波，按一定规律组成的。它包含一个和脉冲信号频率相同的信号（基波分量）和为基波频率整数倍的若干高频信号（谐波分量）。这就是说，一个脉冲波形实际上是由基波和若干谐波叠加而成的。波形中变化速率大的部份，如矩形波的上升沿和下降沿主要由幅度较大的高次谐波分量组成；而波形中变化速率小的部份，如矩形波的平顶，主要由低次谐波分量组成。因此，我们又可以说，脉冲的 t_r 和 t_f 越小，高次谐波的频率越高，反之，高次谐波的频率就越低。

四、计数体制

(一) 二进制数的表示方法

众所周知，在十进制数中用0、1、2、3、4、5、6、7、8、9十个不同的数码来表示十进制数，其加法规则是逢十进一，即 $9+1=10$ ， $10=1 \times 10^1 + 0 \times 10^0$ 。因此，十进制数是以10为基数的计数体制，这也是十进制的来历。每个数码在数中的位置不同时，数值也不同。如有一组十进制数为“5874”，这四个数码因它们所处的位置不同而有不同的含义。右起第一位数4表示 10^0 （个位），第二位数7表示 10^1 （十位），第三位数8表示 10^2 （百位），第四位数5表示 10^3 （千位），因此，这一组数读作五千八百七十四。它可用下面的数学式来表示

$$5 \times 10^3 + 8 \times 10^2 + 7 \times 10^1 + 4 \times 10^0 = 5874$$

其中 10^3 、 10^2 、 10^1 、 10^0 是每一位数的“权”。每位数码（如5）乘上该位的权（如 10^3 ）便得到该位数的大小，如 $5 \times 10^3 = 5000$ 。

对十进制数的计数和运算我们都已很熟悉，它给人们的工作和生活等各方面都带来了很大方便，但对电子数字设备来说却是很不方便的。这是因为要做一个具有十个不同状态的元件或电路，在技术上比较困难，也不经济。因此，在计算机等数字设备中一般不直接采用十进制，而常用二进制。因为具有两个状态的元件或电路是很多的，也很容易做到。下面简单介绍一下二进制运算。

二进制数它只有“0”和“1”两个数码，它的加法规则是逢二进一。即 $0 + 0 = 0$ ； $0 + 1 = 1$ ； $1 + 1 = 10$ （读“壹零”）； $10 + 1 = 11$ ； $11 + 1 = 100$ ……。这就是说，每当遇到本位是1，又要加1时，应使本位变成“0”，同时向前面（高位）进位，使高位加“1”。根据这个规律，我们可用二进制数来表示十进制数，见表0-1。从表中看出每一位二进制数的变化规律：第一位是每计一次，状态（0变为1，或由1变为0）变化一次。因此，第一位1代表十进制数的1，可用 2^0 表示，它每计两个数进1到第二位；第二位1是代表十进制数的2，是1的2倍，用 2^1 表示，它是每计两个数进1到第三位；第三位1代表十进制数4，是2的2倍，用 2^2 表示，也是每计两个数进1到第四位；同理第四位1代表十进制数8，用 2^3 表示，其余类推。

表 0-1 十-二 进 制 数 对 照 表

十 进 制	二 进 制	十 进 制	二 进 制
$0 + 0 = 0$	$0000 + 0 = 0000$	$8 + 1 = 9$	$1000 + 1 = 1001$
$0 + 1 = 1$	$0000 + 1 = 0001$	$9 + 1 = 10$	$1001 + 1 = 1010$
$1 + 1 = 2$	$0001 + 1 = 0010$	$10 + 1 = 11$	$1010 + 1 = 1011$
$2 + 1 = 3$	$0010 + 1 = 0011$	$11 + 1 = 12$	$1011 + 1 = 1100$
$3 + 1 = 4$	$0011 + 1 = 0100$	$12 + 1 = 13$	$1100 + 1 = 1101$
$4 + 1 = 5$	$0100 + 1 = 0101$	$13 + 1 = 14$	$1101 + 1 = 1110$
$5 + 1 = 6$	$0101 + 1 = 0110$	$14 + 1 = 15$	$1110 + 1 = 1111$
$6 + 1 = 7$	$0110 + 1 = 0111$	$15 + 1 = 16$	$1111 + 1 = 10000$
$7 + 1 = 8$	$0111 + 1 = 1000$		

根据上述规律，可写出任一组二进制数所对应的十进制数。例如二进制数码1101，它由四位二进制数组成，其对应的十进制数可写成下面的表示形式：

$$1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 13$$

第	第	第	第
四	三	二	一
位	位	位	位

可见二进制数1101对应的十进制数为13。和十进制数一样，式中 2^3 、 2^2 、 2^1 、 2^0 分别代表二进制数各位的“权”。因此，二进制数是以2为基数的计数体制，这也是二进制的来历。

（二）十进制数转换成二进制数

上面讨论了已知二进制数时，便可求得相应的十进制数，相反，如已知十进制数而要把它转换成相应的二进制数时，只要将十进制数被2除，除得尽余数为0，除不尽余数为1，再把其商除以2，直到所得的商等于1不能再被2除时为止，各余数便是该十进制数

对应的二进制数。例如把十进制数82转换成二进制数。

$$\begin{array}{rcl} 2 & | & 82 \cdots \cdots \text{余 } 0 \uparrow \\ 2 & | & 41 \cdots \cdots \text{余 } 1 \\ 2 & | & 20 \cdots \cdots \text{余 } 0 \\ 2 & | & 10 \cdots \cdots \text{余 } 0 \\ 2 & | & 5 \cdots \cdots \text{余 } 1 \\ 2 & | & 2 \cdots \cdots \text{余 } 0 \\ 1 & & \cdots \cdots \text{余 } 1 \end{array}$$

$$\therefore (82)_{10} = (1010010)_2$$

第一章 RC 电 路

第一节 RC 电路的充放电

一、电容器的充放电过程

在脉冲电路中，最基本的和最常遇到的是RC电路的充放电过程。只有熟悉了这个过程规律，才能比较深入地理解脉冲电路的工作原理。所以，在分析脉冲电路之前我们先讨论一下简单RC电路充电和放电的物理过程和量的关系。

我们知道，当电容器极板上带有一定量的电荷时，它的两端就出现相应的电压。因此，电容器的充电是电容器上电荷不断积累增加，相应地就产生电容器两端电压的建立和不断上升的过程；而当电容器放电，则电容器上电荷就不断释放减少，相应地它的电压也就逐渐衰减。下面分析。

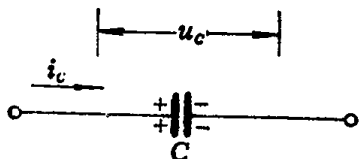


图 1-1-1 电容器的充电

(一) 电容器的基本特性

电容器是存放电荷的容器。其两端电压 u_c 的大小与它极板上所带的电荷量 Q 成正比。即：

$$Q = Cu_c \quad (1-1-1)$$

图1-1-1所示为电容器的充电情况。其两端电压 u_c 与流过它的电流 i_c 间的关系为：

$$i_c = \frac{dQ}{dt} = C \frac{du_c}{dt} \quad (1-1-2)$$

这说明了流过电容器的瞬时电流 i_c 等于电容器两端电压的变化率 $\frac{du_c}{dt}$ 与电容量 C 的乘积。

由式(1-1-2)可得：

$$u_c = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \quad (1-1-3)$$

可见，电容器两端的瞬时电压 u_c 等于其极板上在 $0 \sim t$ 时间内积累的电荷量与电容量 C 的比。

由式(1-1-2)和式(1-1-3)可看出电容器有如下特性：

(1) 流过电容器的瞬时电流 i_c 与其两端电压的变化率 $\frac{du_c}{dt}$ 成正比。而与 u_c 的绝对值无关。

(2) 电容器的充电电流 i_c 不变时，其两端电压的变化与时间成正比。

(3) 如果电容器两端的电压可发生突变，即 $\frac{du_c}{dt} \rightarrow \infty$ 时，则 $i_c \rightarrow \infty$ ，实际上这是不可能的。因此，电容器两端的电压不能发生突变。

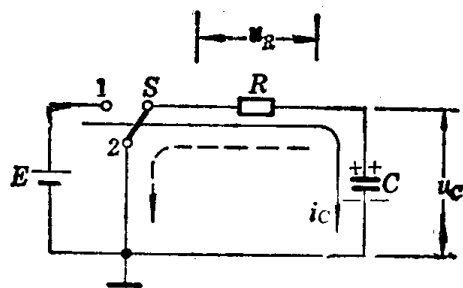


图 1-1-2 RC串联电路

(二) RC电路的充电过程

图1-1-2所示为简单RC串联电路。设在时间 $t = 0$ 以前, 开关 S 处在位置 2, 电容器上没有电荷, 其端电压 $u_c = 0$ 。如在时间 $t = 0$ 时, 开关 S 由位置 2 迅速投向位置 1。则在刚接通的瞬间, 电容器还来不及积累电荷, $u_c(0) = 0$ 不变。这时, 电容器相当于短路, 电源电压 E 全部降在电阻

R 上, 在此瞬间电容器的充电电流 $i_c(0)$ 为

$$i_c(0) = \frac{E - u_c(0)}{R} = \frac{E}{R} \quad (1-1-4)$$

因此, 在电容器刚开始充电的瞬间电流最大, 为 $\frac{E}{R}$ 。随着时间的推移, 电容器极板上积累的电荷不断增加, 其端电压 u_c 不断增大, i_c 不断减小。由于 $\frac{du_c}{dt} = \frac{i_c}{C}$, 故 u_c 上升的速度随着 i_c 的减小而变慢。当时间 $t \rightarrow \infty$ 时, 电容器充电结束。这时, 电容器、电阻 R 上的电压和充电电流分别为

$$\left. \begin{aligned} u_c(\infty) &= E \\ i_c(\infty) &= 0 \\ u_R(\infty) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-5)$$

可见, 电容器充完电时, 其端电压为 E , 回路电流为 0。从电流的角度出发, 这时电容器相当于开路。电路处于稳定状态。

上述充电过程可用表1-1-1来概括。

表 1-1-1 充 电 过 程			
时 间 t	电 荷 量 Q	电容两端电压 u_c	充 电 电 流 i_c
$t = 0$	$Q = 0$	$u_c = 0$	$i_c = \frac{E - 0}{R}$ (最大)
$t \uparrow$	$Q \uparrow$	$u_c \uparrow$	$i_c = \frac{E - u_c}{R} \downarrow$
$t \rightarrow \infty$	$Q = Cu_c = CE$ (最大)	$u_c = E$ (最大)	$i_c = \frac{E - E}{R} = 0$

充电过程的 u_c 和 i_c 波形见图1-1-3。

(三) RC电路的放电过程

设图1-1-2所示电路在 $t = 0$ 以前开关 S 处在位置 1, 电容器充电已结束。这时, $i_c = 0$, $u_c = E$, 其极性见图 1-1-2。如在 $t = 0$ 时, 开关 S 由位置 1 迅速投向位置 2。在刚接通的瞬间, 电容器还来不及放电, 其电压仍为 E , 全部加在电阻 R 上, 电阻两端的电压 $u_R(0) = -E$ 。在此瞬间, 电容器的放电电流 i_c 为

$$i_c(0) = -\frac{E}{R} \quad (1-1-6)$$

这说明在电容器刚开始放电的瞬间电流最大。式(1-1-6)中“-”号表示放电时电流的方向正好和充电时相反。随着时间的推移,电容器极板上的电荷越来越少,其端电压 u_c 也越来越小。当时间 $t \rightarrow \infty$ 时,电容器放电完毕。这时电容器、电阻 R 上的电压和放电电流分别为:

$$\left. \begin{aligned} u_c(\infty) &= 0 \\ i_c(\infty) &= 0 \\ u_R(\infty) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-7)$$

可见,电容器放完电时,电路中没有电流,电容器相当于开路。电路处于新的稳定状态。

上述放电过程可用表1-1-2来概括。

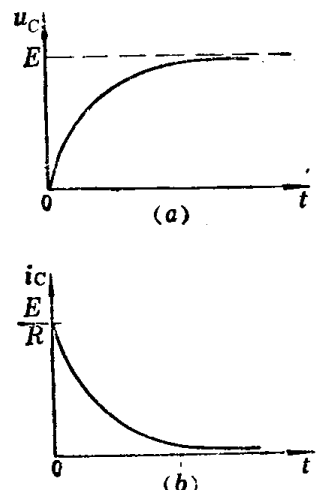


图 1-1-3 电容器的充电曲线
(a)电压曲线; (b)电流曲线

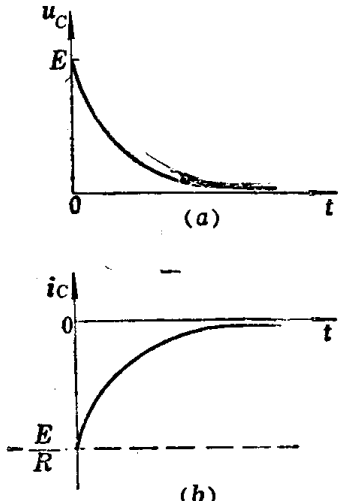


图 1-1-4 电容器的放电曲线
(a)电压曲线; (b)电流曲线

表 1-1-2

放 电 过 程

时 间 t	电 荷 量 Q	电容两端电压 u_c	放 电 电 流 i_c
$t = 0$	$Q = Cu_c = CE$ (最大)	$u_c = E$ (最大)	$ i_c = \frac{E}{R}$ (最大)
$t \uparrow$	$Q \downarrow$	$u_c \downarrow$	$ i_c = \frac{u_c}{R} \downarrow$
$t \rightarrow \infty$	$Q = 0$	$u_c = 0$	$i_c = 0$

放电过程的 u_c 和 i_c 波形见图1-1-4。

综上所述,可得如下结论:

- (1) 在 RC 电路中,电容器的充、放电速度 $\frac{du_c}{dt} = \frac{i_c}{C}$ 。充、放电开始的瞬间, i_c 最大,速度最高。充放电结束时, $i_c = 0$ 。因此,充放电都需要一定的时间才能完成。
- (2) 在 RC 电路中,如在开关动作前电容器上的电压为零,则在动作后的一瞬间仍为零,这时电容器相当于短路。如在动作前电容器上已充有电压 E ,则在动作后的一瞬间仍为 E ,这时电容器相当于一个电池 E 。因此,在跃变瞬间,电容器两端的电压不能突变。

二、过渡过程公式的推导

(一) 术语

1. 跳变 (阶跃)

图1-1-5(a)所示电路中的开关由位置2投向位置1的瞬间, A点电位由0正跃到 E , 这和输入幅度为 E 的正跳变信号使A点电位由0正跃至 E 的情况是一样的。因此, 图1-1-5(a)可用图1-1-5(b)来表示, 这种情况称作正跃变或正阶跃。

同理, 图1-1-6(a)所示电路中的开关由位置1投向位置2的瞬间, 可用图1-1-6(b)来表示, 这种情况称作负跃变或负阶跃。

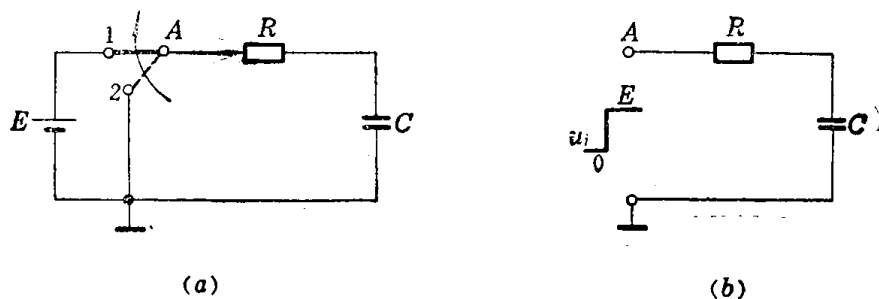


图 1-1-5 正跃变时开关状态跳变波形的表示法

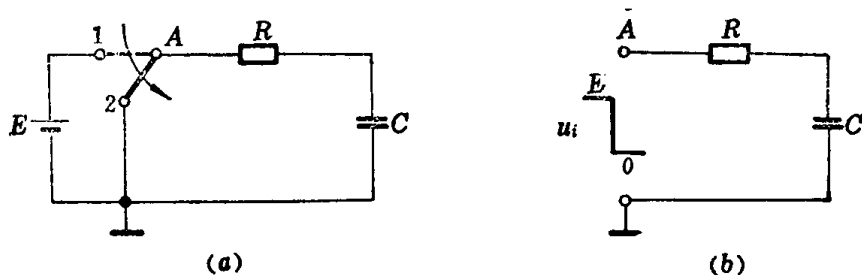


图 1-1-6 负跃变时开关状态跳变波形的表示法

2. 换路

以下两种情况称为换路:

(1) 开关动作 (接通或断开)。

(2) 输入波形跳变。

3. $t=0^-$, $t=0^+$ 和 $t \rightarrow \infty$

$t=0^-$: 表示换路前的瞬间。

$t=0^+$: 表示换路后的瞬间。

$t \rightarrow \infty$: 表示充、放电过程已经结束。

(二) 过渡过程公式的推导

设图1-1-2所示电路开关 S 原来处在位置2。如在 $t=0$ 时投向位置1, 这时电源 E 经电阻 R 开始向电容器 C 充电, 其两端的电压随之增大, 可列出回路电压方程:

$$u_c + i_c R = E \quad (1-1-8)$$

将 $i_c = C \frac{du_c}{dt}$ 代入式 (1-1-8) 得:

$$u_c + RC \frac{du_c}{dt} = E$$

整理上式得:

$$\frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{RC} - \frac{E}{RC} = 0$$

上式是一阶常微分方程, 解此方程得:

$$u_c(t) = A e^{-\frac{t}{\tau}} + a \quad (1-1-9)$$

式中 $\tau = RC$ ——时间常数;

A ——待定常数;

a ——常数。

下面根据图1-1-2来求 a 和 A 。

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $u_c(\infty) = E$, 代入式 (1-1-9) 后得:

$$u_c(\infty) = E = a \quad (1-1-10)$$

由于图 1-1-2 所示电路在换路前电容器上的初始电压为零, 即 $u_c(0^-) = 0$ 。换路瞬间电容器上的电压不能突变。所以

$$u_c(0^+) = u_c(0^-) = 0 \quad (1-1-11)$$

将式 (1-1-10) 和式 (1-1-11) 代入式 (1-1-9) 后得:

$$u_c(0^+) = A + a = A + u_c(\infty)$$

即:

$$A = u_c(0^+) - u_c(\infty)$$

将 A 和 a 值代入式 (1-1-9) 得:

$$u_c(t) = u_c(\infty) + [u_c(0^+) - u_c(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-1-12)$$

上式为过渡过程公式的一般形式, 又称作 RC 电路充、放电特性的三要素方程。只要由电路确定 $u_c(0^+)$ 、 $u_c(\infty)$ 和 τ 三个要素的数值, 代入式 (1-1-12) 中就可直接写出电压 (或电流) 变化的表示式, 这种方法称作三要素法。

应当指出, 式 (1-1-12) 是在电路中只有一个独立电容 (包括虽有几个电容, 但可归并为一个电容), 而且只发生一次换路的情况下求得的。因此, 电路在满足上述条件下, 只要知道电容器在换路后瞬间的初始值 $u_c(0^+)$, 换路后的稳态值 $u_c(\infty)$ 和时间常数 $\tau = RC$, 便可利用式 (1-1-12) 方便地写出电压变化的规律, 画出相应的电压波形。因此, 它是研究、分析和计算脉冲电路的最重要的方程之一。

由于图 1-1-2 所示电路在放电时的回路电压方程具有和充电时相同的形式, 因此, 有相同的通解。这就是说充电时的式 (1-1-12) 对放电同样适用。这里就不再推导了。

在充、放电过程中, 如果要求解充、放电到某一电压 $u_c(t)$ 所需的时间 t 时, 则可通过式 (1-1-12) 求得:

$$t = \tau \ln \frac{u_c(0^+) - u_c(\infty)}{u_c(t) - u_c(\infty)} \quad (1-1-13)$$

三、用三要素法分析RC电路

(一) 用三要素法分析RC电路的步骤

(1) 求换路后瞬间 u_c 的初始值 $u_c(0^+)$ 。

(2) 求换路引起的过渡过程结束后 u_c 的最终稳定值 $u_c(\infty)$ 。

(3) 求时间常数 τ 。求 τ 时, 应将电压源短路, 然后将电路中所有电容和电阻归并为一个总电容和总电阻串联的简单RC电路, 这时 R 和 C 的乘积便为时间常数 τ 。如电路不能归并成简单 R 和 C 的串联形式, 则不能用三要素法求解。

(4) 写出过渡过程公式:

$$u_c(t) = u_c(\infty) + [u_c(0^+) - u_c(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}}$$

(5) 画出 $u_c(t)$ 的电压波形。

(二) 应用举例

【例1-1-1】 在图1-1-2中, 开关 S 原来处在位置2, 当其由位置2投向位置1后, 写出 C 充电时的 u_c 表达式。并画出它的电压波形。

解: (1) 起始电压: 换路前的电压 $u_c(0^-) = 0$, 换路后的电压 $u_c(0^+) = u_c(0^-) = 0$ 。

(2) 最终电压: $u_c(\infty) = E$ 。

(3) 时间常数: $\tau = RC$ 。

(4) 电容器上电压表示式:

$$\begin{aligned} u_c(t) &= u_c(\infty) + [u_c(0^+) - u_c(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= E + (0 - E) e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \end{aligned} \quad (1-1-14)$$

这说明, 在充电时电容器上的电压是随时间按指数规律增长的。

(5) 电容器充电时的电压变化曲线见图1-1-3(a)。

【例1-1-2】 在图1-1-2中, 设开关 S 原来处在位置1, 当它由位置1投向位置2后, 写出电容器放电时的 u_c 表达式, 并画出它的电压波形。

解: (1) 起始电压: $u_c(0^+) = u_c(0^-) = E$ 。

(2) 最终电压: $u_c(\infty) = 0$ 。

(3) 时间常数: $\tau = RC$ 。

(4) 电容器上的电压表达式:

$$\begin{aligned} u_c(t) &= u_c(\infty) + [u_c(0^+) - u_c(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= 0 + [E - 0] e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= E e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned} \quad (1-1-15)$$

这说明, 在放电时电容器上的电压是随时间按指数规律衰减的。

(5) 电容器放电时的电压变化曲线见图1-1-4(a)。

【例1-1-3】 在图1-1-7中, 设开关 S 原来处在位置2, 电容 C 上已充有电压 $E_2 = 3V$ 。