

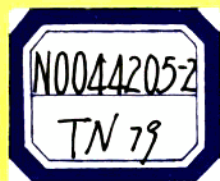
7647

●中等专业学校电子类教材●

# 脉冲与数字电路

祝惠芳 徐忠山 编著

# PDC



PULSE AND DIGITAL CIRCUIT

电子科技大学出版社

# 前 言

随着脉冲技术和数字集成电路的迅速发展,计算机、各种数控自动化设备及数字式仪器仪表得到了广泛的应用。声音和图像的传送、雷达数据的处理等等都实现了数字化。数字通讯、数字式电视机等也正日趋普及。尤其是电子计算机,它几乎渗透到了一切领域和部门,并越来越显示出其强大的生命力和无可比拟的优越性。由于它们都是以脉冲与数字电路为基础的,因此,学习脉冲与数字电路知识,不仅为电类、也为非电类专业的广大师生和工程技术人员所必须、所重视了。

本书是根据电子工业部中专教材编审组第三轮教材《脉冲与数字电路》编写提纲编写的。1988年7月经电子工业部中专电子类教材编审委员会无线电技术专业教材编审小组评选优推荐为全国工科电子类专业《脉冲与数字电路》课程教学用书,学生反映良好。1994年以来,编者在对原稿的使用情况进行总结的基础上,结合当前数字集成电路的发展状况,进行了认真地修改。

本书遵循教材改革的需要,根据教学大纲的要求,在编写和修改过程中力求做到精选内容、突出重点、深入浅出。在选材上进一步压缩了脉冲电路的部分内容。脉冲电路与数字电路比较,以数字电路为主;分立元件电路与集成电路比较,以集成电路为主。全书以逻辑门、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路的为重点,并加强了MOS集成电路的有关内容。在内容处理上,避免了繁琐的数学推导,贯穿逻辑分析的方法,重点阐明物理概念、基本原理及电路的外特性和应用。并结合无线电技术和电子技术发展的需要,从培养应用型人才出发,强调了实践性环节。各章节适当增加了例题,并对一些典型的集成电路产品的型号、功能和应用进行了介绍。强调了实际使用集成电路时的注意事项。除此之外,还在某些章节的思考题和习题中增添了实验性练习题,以促进读者课余动手实践和练习,更好地将理论与实践结合起来。

本书由武汉无线电工业学校高级讲师祝惠芳(编写第一、二、四、五、七章)、讲师徐忠山(编写第三、六、八章)两位同志编写。由广东佛山市机电学校俞庆生老师主审。并得到了武汉无线电工业学校陈继生高级讲师的热情支持和指导。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,恳切希望广大读者批评指正。

编 者  
1995年3月

# 目 录

## 绪 论

### 第一章 脉冲与数字电路基础

|                            |      |
|----------------------------|------|
| § 1.1 $RC$ 电路 .....        | (3)  |
| 一、 $RC$ 电路充放电规律及开关定理 ..... | (3)  |
| 二、简单 $RC$ 电路的分析方法 .....    | (4)  |
| 三、 $RC$ 电路应用举例 .....       | (7)  |
| § 1.2 晶体管的开关特性及其应用 .....   | (12) |
| 一、晶体二极管的开关特性及其应用 .....     | (13) |
| 二、晶体三极管的开关特性 .....         | (20) |
| 小结 .....                   | (23) |
| 思考题和习题 .....               | (24) |

### 第二章 逻辑门电路

|                         |      |
|-------------------------|------|
| § 2.1 分立元件门电路 .....     | (30) |
| 一、与门电路 .....            | (30) |
| 二、或门电路 .....            | (31) |
| 三、非门电路 .....            | (33) |
| 四、复合门电路 .....           | (37) |
| § 2.2 TTL 集成逻辑门 .....   | (38) |
| 一、TTL 与非门的电路及工作原理 ..... | (39) |
| 二、TTL 与非门的外特性 .....     | (42) |
| 三、TTL 与非门的主要参数及测试 ..... | (45) |
| 四、TTL 与非门的改进 .....      | (48) |
| 五、常用的其他 TTL 门电路 .....   | (50) |
| 六、使用 TTL 门电路的基本常识 ..... | (54) |
| 七、TTL 型号系列介绍 .....      | (55) |
| § 2.3 其他双极型门电路 .....    | (57) |
| 一、射极耦合逻辑门(ECL 门) .....  | (57) |
| 二、集成注入逻辑(IIL) .....     | (60) |
| § 2.4 单极型 MOS 门电路 ..... | (62) |
| 一、MOS 反相器 .....         | (63) |
| 二、其他常用的 MOS 逻辑门 .....   | (66) |

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 三、CMOS 电路型号系列介绍 ..... | (70) |
| 四、MOS 电路使用注意事项 .....  | (71) |
| § 2.5 接口电路 .....      | (71) |
| 一、ECL/TTL 接口电路 .....  | (72) |
| 二、TTL/CMOS 接口电路 ..... | (73) |
| 小结 .....              | (74) |
| 思考题和习题 .....          | (75) |

### 第三章 数制和逻辑代数

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| § 3.1 数制 .....          | (81)  |
| 一、几种常用的数制 .....         | (81)  |
| 二、不同进制数间的转换 .....       | (83)  |
| 三、BCD 码 .....           | (85)  |
| § 3.2 逻辑函数及其表示方法 .....  | (86)  |
| 一、基本概念 .....            | (86)  |
| 二、逻辑函数及其表示方法 .....      | (86)  |
| § 3.3 逻辑代数的基本运算规律 ..... | (87)  |
| 一、基本公式 .....            | (88)  |
| 二、常用公式 .....            | (90)  |
| § 3.4 逻辑函数和逻辑图 .....    | (90)  |
| 一、已知逻辑函数画逻辑图 .....      | (91)  |
| 二、已知逻辑图求逻辑函数 .....      | (92)  |
| § 3.5 逻辑函数的化简 .....     | (92)  |
| 一、化简的意义和最简概念 .....      | (92)  |
| 二、公式法化简逻辑函数 .....       | (93)  |
| 三、用卡诺图化简逻辑函数 .....      | (94)  |
| 小结 .....                | (102) |
| 思考题和习题 .....            | (102) |

### 第四章 组合逻辑电路

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| § 4.1 组合逻辑电路的分析方法和设计方法 ..... | (104) |
| 一、组合逻辑电路的分析方法 .....          | (104) |
| 二、组合逻辑电路的设计方法 .....          | (106) |
| § 4.2 常用组合逻辑电路 .....         | (108) |
| 一、编码器 .....                  | (108) |
| 二、译码器 .....                  | (113) |
| 三、显示器件及显示电路 .....            | (119) |
| 四、基本运算器 .....                | (125) |
| 五、数值比较器 .....                | (129) |

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 六、奇偶校验电路 .....         | (132) |
| 七、数据选择器和数据分配器 .....    | (134) |
| § 4.3 组合电路中的竞争冒险 ..... | (138) |
| 一、竞争冒险及其产生的原因 .....    | (138) |
| 二、竞争冒险的判断方法 .....      | (139) |
| 三、消除冒险的方法 .....        | (140) |
| 小结 .....               | (141) |
| 思考题和习题 .....           | (141) |

## 第五章 集成触发器

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| § 5.1 基本 RS 触发器 .....        | (145) |
| 一、电路组成及逻辑符号 .....            | (145) |
| 二、逻辑功能分析 .....               | (146) |
| § 5.2 钟控触发器 .....            | (147) |
| 一、钟控 RS 触发器 .....            | (148) |
| 二、钟控 D 触发器 .....             | (149) |
| 三、钟控 JK 触发器 .....            | (151) |
| 四、钟控触发器的空翻现象 .....           | (153) |
| § 5.3 维持阻塞 D 触发器 .....       | (153) |
| 一、维持阻塞 D 触发器 .....           | (153) |
| 二、TTL 集成 D 触发器简介 .....       | (154) |
| § 5.4 主从触发器 .....            | (155) |
| 一、主从 RS 触发器 .....            | (155) |
| 二、主从 JK 触发器 .....            | (157) |
| 三、主从 T 触发器 .....             | (161) |
| § 5.5 负边沿 JK 触发器 .....       | (162) |
| 一、电路组成 .....                 | (162) |
| 二、工作原理 .....                 | (162) |
| 三、TTL 集成边沿触发型 JK 触发器简介 ..... | (163) |
| § 5.6 MOS 触发器 .....          | (164) |
| 一、基本 IS 触发器 .....            | (164) |
| 二、钟控 RS 触发器 .....            | (164) |
| 三、门控记忆基本触发器(准静态基本触发器) .....  | (166) |
| 四、主从型 CMOS 边沿 D 触发器 .....    | (167) |
| 五、主从型 CMOS 边沿 JK 触发器 .....   | (168) |
| 小结 .....                     | (168) |
| 思考题和习题 .....                 | (169) |

## 第六章 时序逻辑电路

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| § 6.1 概述 .....               | (176) |
| 一、时序逻辑电路的组成特点 .....          | (176) |
| 二、时序逻辑电路的一般分析方法 .....        | (176) |
| § 6.2 寄存器 .....              | (177) |
| 一、数码寄存器 .....                | (177) |
| 二、移位寄存器 .....                | (179) |
| § 6.3 计数器 .....              | (183) |
| 一、同步计数器 .....                | (183) |
| 二、异步计数器 .....                | (197) |
| 三、集成计数器构成 $N$ 进制计数器的方法 ..... | (204) |
| 四、同步计数器的设计方法介绍 .....         | (206) |
| § 6.4 移位寄存器型计数器 .....        | (208) |
| 一、环形计数器 .....                | (209) |
| 二、扭环形计数器 .....               | (210) |
| 三、最大长度移位寄存器型计数器 .....        | (210) |
| § 6.5 顺序脉冲发生器 .....          | (212) |
| 一、节拍分配器 .....                | (212) |
| 二、脉冲发生器 .....                | (212) |
| 三、集成节拍分配器 .....              | (212) |
| § 6.6 半导体存储器 .....           | (214) |
| 一、只读存储器(ROM) .....           | (214) |
| 二、随机存取存储器(RAM) .....         | (216) |
| 小结 .....                     | (219) |
| 思考题和习题 .....                 | (219) |

## 第七章 脉冲波形的产生和变换

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| § 7.1 脉冲信号发生器 .....      | (223) |
| 一、分立元件集—基耦合自激多谐振荡器 ..... | (223) |
| 二、TTL 集成与非门基本多谐振荡器 ..... | (226) |
| 三、TTL $RC$ 环形振荡器 .....   | (228) |
| 四、石英晶体振荡器 .....          | (230) |
| § 7.2 单稳态触发器 .....       | (231) |
| 一、分立元件集—基耦合单稳态触发器 .....  | (231) |
| 二、集成门电路组成的单稳态触发器 .....   | (234) |
| 三、集成单稳态触发器 .....         | (237) |
| 四、单稳态触发器的应用 .....        | (239) |
| § 7.3 施密特触发器 .....       | (239) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 一、集成逻辑门组成的施密特触发器 .....  | (240) |
| 二、集成 TTL 施密特触发器 .....   | (241) |
| 三、施密特触发器的应用举例 .....     | (243) |
| § 7.4 集成定时器 .....       | (244) |
| 一、CC7555 定时器的电路结构 ..... | (245) |
| 二、各引出端名称及功能 .....       | (245) |
| 三、集成定时器应用举例 .....       | (246) |
| 小结 .....                | (250) |
| 思考题和习题 .....            | (250) |

## 第八章 数模和模数转换电路

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| § 8.1 概述 .....           | (254) |
| 一、转换概念 .....             | (254) |
| 二、转换要求 .....             | (254) |
| § 8.2 数模转换器(DAC) .....   | (254) |
| 一、T 型网络 DAC .....        | (254) |
| 二、集成 DAC(AD7541)简介 ..... | (257) |
| 三、DAC 的主要技术指标 .....      | (258) |
| § 8.3 模数转换器(ADC) .....   | (259) |
| 一、模数转换步骤 .....           | (259) |
| 二、并行比较型 ADC .....        | (262) |
| 三、逐位逼近型 ADC .....        | (265) |
| 四、集成 ADC(AD571)介绍 .....  | (266) |
| 五、ADC 的主要指标 .....        | (266) |
| 小结 .....                 | (267) |
| 思考题和习题 .....             | (267) |

# 绪 论

本课程讨论脉冲电路和数字电路。那么,什么是脉冲电路?什么是数字电路呢?下面结合电路的工作信号先作基本介绍。

## 一、模拟信号和模拟电路

所谓模拟信号是指信号在时间上和数值上都连续变化的信号。如模拟温度、压力、语音、转速等物理量的信号,它们转换为电信号就是平滑的、连续变化的电压和电流信号,统称为模拟信号。工作在模拟信号下的电路称为模拟电路。关于模拟电路,我们已在电子线路课程中专门讨论,这里不再重复。

## 二、数字信号和数字电路

所谓数字信号,是指信号在时间上和数值上都是离散地变化的信号。也就是说,数字信号的变化在时间上是不连续的。就信号的表现形式而言,它是一种矩形脉冲序列,即可以用数字0和1所表示的序列。

工作在数字信号下的电路称为数字电路。

数字电路具有如下一些主要特点:

1. 数字电路中,基本的工作信号是二进制的数字信号,只有0和1两种基本数字。因此电路结构简单,容易制造,便于集成和系列化生产,使用方便。
2. 数字信号能稳定可靠地传送,数字系统工作准确可靠、精度高、抗干扰能力强。
3. 数字电路研究的主要问题是输入信号状态(0或1)和输出信号状态(0或1)之间的关系,也就是所谓的逻辑关系,逻辑功能。其运用的主要方法是逻辑分析和逻辑设计,所用的数学工具是逻辑代数。所以也常称数字电路为逻辑电路。

## 三、脉冲信号和脉冲电路

所谓脉冲信号是指在短暂时间间隔内作用于电路的电压或电流。广义地讲,凡不连续的非正弦电压或电流都泛称为脉冲信号。常见的脉冲信号波形如图0-1所示:(a)矩形波、(b)方波、(c)尖峰波、(d)锯齿波、(e)三角波、(f)梯形波、(g)钟形波、(h)阶梯波。

为了对脉冲进行定量分析,常运用一些物理量来描述脉冲信号的特征。这些物理量称为脉冲信号的参数。下面以实际的矩形脉冲电压波形为例,定义脉冲波的一些参数。如图0-2所示。

1. 脉冲幅度 $V$ 。表示脉冲信号强弱的参数。即一个脉冲从底部到顶部之间的数值大小。
2. 脉冲沿 $t_r$ (又称上升时间) 脉冲波从 $0.1V$ 上升到 $0.9V$ 所经历的时间。
3. 脉冲后沿 $t_f$ (又称下降时间) 脉冲波从 $0.9V$ 下降到 $0.1V$ 所经历的时间。
4. 脉冲宽度 $t_w$ 。脉冲前沿的 $0.5V$ 处到后沿的 $0.5V$ 处的时间间隔,也称脉冲的持续

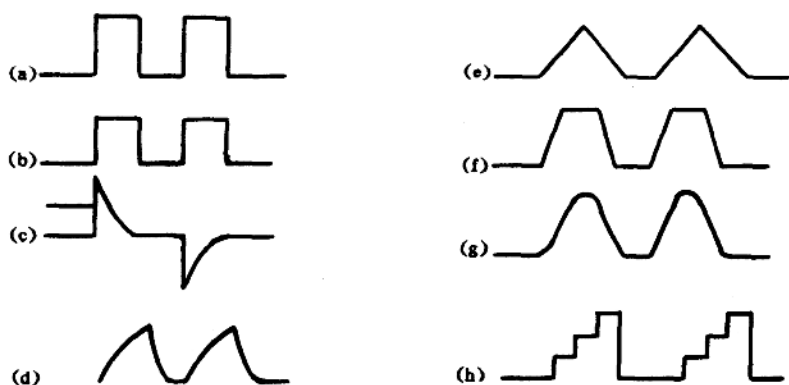


图 0-1 几种常见的脉冲信号波形

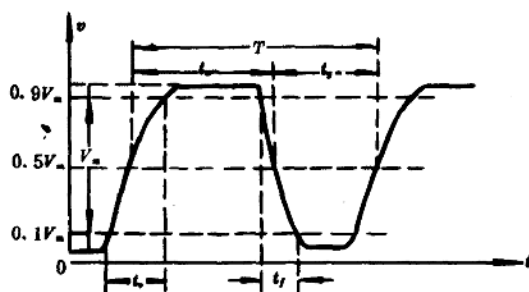


图 0-2 实际的矩形脉冲及参数

时间。

5. 脉冲间隔  $t_i$  上一个脉冲后沿  $0.5V_m$  处到下一个脉冲前沿  $0.5V_m$  处的时间间隔, 又称脉冲空度。

6. 脉冲周期  $T$  两个相邻同相脉冲信号重复出现一次所经历的时间。其倒数即为脉冲的重复频率  $f$ 。  $T = t_p + t_i$ ,  $f = 1/T$ 。

7. 占空系数  $D$  脉冲宽度与脉冲周期之比。又称占空比。  $D = t_p/T$ 。方波的  $t_p = t_i = T/2$ , 所以方波的占空比  $D = 1/2$ , 方波是一种特殊的矩形波。

处理脉冲信号的电路称为脉冲电路。脉冲电路主要研究脉冲波形的产生、变换、整形等问题, 着重分析输入、输出波形的形状、幅度及频率等。

脉冲电路与数字电路既有联系又有区别。可以说数字电路是以脉冲电路为基础的一个分支。它们在雷达、电视、数字通信、测量仪表、自动控制和一系列电子设备中得到广泛的应用, 而电子计算机则是数字电路的典型和综合应用。

《脉冲与数字电路》是一门实践性很强的技术基础课。一方面要掌握本课程的基本知识, 电路的基本原理、分析问题的基本方法。另一方面要加强实验课及实践动手能力的培养, 熟练掌握查阅有关手册、资料和使用数字集成电路的方法等。

# 第一章 脉冲与数字电路基础

本章带复习性质。将讨论两个方面的问题： $RC$  电路和晶体管开关。这些内容是学习其他一些章节的基础。

## § 1.1 $RC$ 电路

这里所指的  $RC$  电路是由电阻器  $R$ 、电容器  $C$  组成的简单  $RC$  电路。 $RC$  电路在脉冲电路中有着广泛的应用。本节首先分析  $RC$  电路的过渡过程及充放电规律、开关定理。重点讨论  $RC$  电路的三要素分析法。然后介绍脉冲电路中几种常用的  $RC$  电路。

### 一、 $RC$ 电路充放电规律及开关定理

#### 1. $RC$ 电路中的充、放电过程

$RC$  电路中的充放电过程是指电容器积累电荷的过程，而放电过程则是电容器上电荷释放的过程。

图 1.1.1 是一个简单的  $RC$  串联电路。假设在  $t=0$  以前，开关  $K$  置于“2”处，电容器上无电荷， $v_c=0$ ，回路中也无电流。

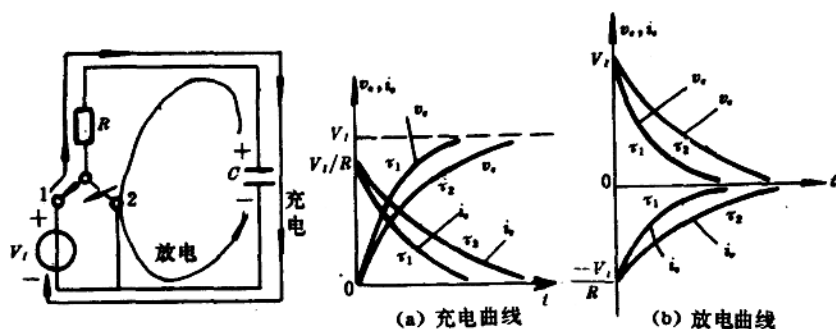


图 1.1.1  $RC$  充放电回路

图 1.1.2  $RC$  充放电曲线

(1)  $t=0$  时将开关  $K$  由位置“2”扳向“1”处，使电源  $V_I$  与  $R$ 、 $C$  电路接通， $C$  开始被充电。充电电流  $i_c(t)=[v_I-v_c(t)]/R$ ，方向如图所示。在开关扳向“1”的瞬间(用  $0^+$  表示)，因电容器上尚来不及积累电荷( $q=0$ )，所有  $v_c(0^+)=0$ ， $i_c(0^+)=(V_I-0)/R=v_I/R$ ， $v_R(0^+)=i_c(0^+) \cdot R=v_I$ 。此后  $C$  充电， $v_c$  按指数规律上升， $v_R$  按指数规律下降， $i_c$  按指数规律下降。经相当长的时间后， $C$  充满电， $v_c=V_I$ ， $i_c=0$ ， $v_R=0$ ，充电过程结束。充电电压  $v_c$  及电流  $i_c$  曲线如图 1.1.2(a) 所示。

(2) 充电结束后将开关  $K$  又扳向位置“2”,在刚扳回的瞬间,因电容器上已积累的电荷  $q$  来不及释放,故有  $v_c = V_I$ 。此后  $C$  开始放电,此瞬间放电电流最大,有  $i_c = -V_I/R$ ,放电方向如图 1.1.1 中所示。因放电电流方向与充电电流方向相反,故式中加有负号。以后,  $C$  继续放电,使  $q \downarrow \rightarrow v_c \downarrow \rightarrow |i_c| \downarrow$ ,经相当长的时间后,放电过程结束,  $v_c = 0, i_c = 0, v_R = 0$ 。放电电压、电流曲线如图 1.1.2(b) 所示。

## 2. RC 电路的充放电规律

根据上述充放电过程的分析,利用基尔霍夫第二定律,可分别列出充电、放电回路的电压方程式,即:

$$v_R + v_c = i_c \cdot R + v_c = V_I \quad (\text{充电方程}) \quad v_R + v_c = i_c \cdot R + v_c = 0 \quad (\text{放电方程})$$

将上述方程求解可得出充、放电电压、电流的指数规律表达式:

$$\text{充电规律} \quad v_c(t) = V_I(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1-1)$$

$$i_c(t) = \frac{V_I}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-2)$$

$$\text{放电规律} \quad v_c(t) = V_I \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-3)$$

$$i_c(t) = -\frac{V_I}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-4)$$

式中  $R$  与  $C$  的乘积称为时间常数,用  $\tau$  表示,即  $\tau = R \cdot C$  (或  $\tau = RC$ )。 $\tau$  具有时间的量纲。 $RC$  充、放电速度取决于  $\tau$  的大小。 $\tau$  越大,充放电越慢; $\tau$  越小,充放电越快。如图 1.1.2 中,  $\tau_1 < \tau_2$ ,则前者充放电速度快于后者,故充放电结束所用时间也短些。

## 3. 开关定理

根据上述充放电过渡过程的分析,可归纳出如下几点结论:

(1)  $RC$  电路中充、放电都需要一定的时间才能完成,即需经历一个暂态过程(过渡过程)才能达到稳态。这说明,电容器两端的电压是不能突变的。它在开关动作后的瞬间将保持开关动作前所具有的数值。这就是开关定理,或称换路定理。其数学表达式为

$$v_c(t_0^+) = v_c(t_0^-) \quad (1-5)$$

式中  $t_0^+$  表示开关动作后一瞬间,  $t_0^-$  表示开关动作前一瞬间。

(2) 充、放电开始瞬间,也即开关动作后瞬间或输入脉冲信号跳变瞬间,流过电容器的电流  $i_c$  最大。充、放电结束后  $i_c = 0$ ,电容器相当于开路,即所谓隔直流作用。

(3) 从理论上讲,只有当时间  $t \rightarrow \infty$  时,充、放电过程才能结束。但实际上经过  $(3 \sim 5)\tau$  以后,过渡过程就基本结束,故在工程上通常把过渡过程的时间确定在  $(3 \sim 5)\tau$  的范围。

(4) 电源经  $R$  向电容器充电,或者电容器经  $R$  放电,其  $v_c$  和  $i_c$  都随时间按指数规律变化。而且起始变化较快,后来变化逐渐减慢。

## 二、简单 RC 电路的分析方法

所谓简单  $RC$  电路,是指只有一个电阻和一个电容串联的电路。或由多个电阻和多个电容混联,但最终能用串、并联的方法简化成一个电阻、电容串联的电路皆属于简单  $RC$  电路。表 1.1 所示为几种简单  $RC$  电路。

表 1.1 简单 RC 电路

|        |                       |                                               |                                               |                                               |
|--------|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 电路     |                       |                                               |                                               |                                               |
| $\tau$ | $R \cdot C$           | $(R_1 + R_2) \cdot C$                         | $\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \cdot R$     | $\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot C$     |
| 电路     |                       |                                               |                                               |                                               |
| $\tau$ | $(C_1 + C_2) \cdot R$ | $\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} (C_1 + C_2)$ | $\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2 (R_1 + R_2)}$ | $\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} (C_1 + C_2)$ |

对于简单 RC 电路,若要分析电路中某一支路的电流或某一元件上的电压,只要求出其在开关动作瞬间的起始值  $i(0^+)$  或  $v(0^+)$ ,过渡过程结束后的终了值,也即电路稳定后的稳态值  $i(\infty)$  或  $v(\infty)$  以及时间常数  $\tau$ ,就可写出该电流或电压随时间变化的关系式:

$$i(t) = i(\infty) + [i(0^+) - i(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-6)$$

$$v(t) = v(\infty) + [v(0^+) - v(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-7)$$

就式 1-7 而言,式中  $v(0^+)$ 、 $v(\infty)$ 、 $\tau$  称为 RC 电路的三要素。根据电路求出三个要素后,将它们代入关系式(又称通用解析式),便可写出该电路中过渡过程的电压或电流的变化规律式,并可画出曲线。这种方法称为三要素法。下面结合几个实例进一步说明。

例 1.1 电路如图 1.1.3 所示,已知  $v_c(0^-) = 0V$ ,当  $t=0$  时将开关  $K$  由“1”换置于“2”处,求  $v_c$  的变化规律表达式,画  $v_c$  曲线并求  $v_c$  的上升时间  $t_r$ 。

解 应用三要素法,先分析电路,求出三个基本参量,即三个要素。

根据开关定理,则有

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

$K$  置“2”处时  $C$  充电,充电结束后,有:

$$v_c(\infty) = v_{R2}(\infty) = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \times 0.5 = 5V$$

再求  $\tau$ ,方法是将电路中的电压源短路(电流源开路),再分别求出等效电阻和等效电容,然后求二者的乘积即时间常数。本例中,将  $V_1$  短路后  $R_1$ 、 $R_2$  并联,其等效电阻  $R = R_1 // R_2 =$

$$\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 5k\Omega, \text{ 故}$$

$$\tau = R \cdot C = 5 \times 100 \times 10^3 \times 10^{-12} = 0.5(\mu s)$$

将上述所求三要素代入式 1-7 中,得

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

$$= 5 + (0 - 5)e^{-\frac{t}{0.3}} \\ = 5(1 - e^{-2t}) \quad (\text{V}) \quad (t: \mu\text{s})$$

将不同的  $t$  值, 如  $t$  为  $0.5\mu\text{s}$ 、 $1\mu\text{s}$ 、 $1.5\mu\text{s}$ 、……代入上式求出对应  $v_c$  值, 分别为  $3.16\text{V}$ 、 $4.33\text{V}$ 、 $4.75\text{V}$ 、……逐点可描画出  $v_c$  的充电曲线如图 1.1.4 所示。

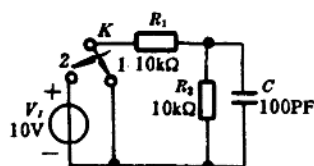


图 1.1.3 例 1.1 的电路

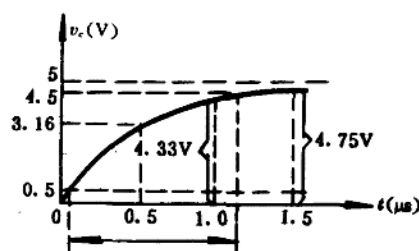


图 1.1.4 例 1.1 的曲线图

最后求  $v_c$  的上升时间  $t_r$ 。

先根据式 1-7 推导有关求时间的公式。已知某时刻  $T_K$  的  $v_c$  值(记为  $v_c(T_K)$ )，求所用时间  $T_K$ ，只须将式 1-7 移项后两边同时取对数，可得

$$T_K = \tau \ln \frac{v_c(\infty) - v_c(0^+)}{v_c(\infty) - v_c(T_K)} \quad (1-8)$$

若已知  $v_c(T_{K1})$ 、 $v_c(T_{K2})$ ，代入式 1-8 可得

$$T_{K1} = \tau \ln \frac{v_c(\infty) - v_c(0^+)}{v_c(\infty) - v_c(T_{K1})} \\ T_{K2} = \tau \ln \frac{v_c(\infty) - v_c(0^+)}{v_c(\infty) - v_c(T_{K2})} \\ T_{K2} - T_{K1} = \tau \ln \frac{v_c(\infty) - v_c(T_{K1})}{v_c(\infty) - v_c(T_{K2})} \quad (1-9)$$

本例中，设  $v_c$  由起始值上升到  $0.1V_\infty$  所用时间为  $T_{K1}$ ， $v_c(T_{K1}) = 0.1 \times 5 = 0.5\text{V}$ ； $v_c$  由起始值上升到  $0.9V_\infty$  所用时间为  $T_{K2}$ ， $v_c(T_{K2}) = 0.9 \times 5 = 4.5\text{V}$ 。将这些参量代入式 1-9，可求  $t_r$ ：

$$t_r = T_{K2} - T_{K1} = \tau \ln \frac{v_c(\infty) - v_c(T_{K1})}{v_c(\infty) - v_c(T_{K2})} \\ = \tau \ln \frac{5 - 0.5}{5 - 4.5} = \tau \ln 9 \\ \approx 2.2\tau = 1.1(\mu\text{s})$$

例 1.2 电路如图 1.1.5(a)所示，输入理想负脉冲  $v_i$  如图 1.1.5(b)所示，试求电容器两端电压  $v_c$  表达式，并定性画出  $v_c$  波形图。

解  $t=0$  以前， $v_i = +6\text{V}$ ，电容器已被充满电， $v_c(0^-) = +6\text{V}$ 。

(1)  $t=0^+$  瞬间， $v_i$  由  $+6\text{V}$  下跳到了  $-12\text{V}$ ，相当于开关转换了位置。C 放电，起始值  $v_c(0^+) = v_c(0^-) = +6\text{V}$ ，终了值  $v_c(\infty) = -12\text{V}$ 。C 放电等效电路如图 1.1.6(a)所示， $\tau = R \cdot$

$$C = 10 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6} = 1(\text{mS})$$

根据三要素法,在  $0 \sim t_1$  期间  $v_c$  变化规律表达式为

$$\begin{aligned} v_c(t) &= v_c(\infty) + [v_c(0^+) - v_c(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= -12 + [6 - (-12)]e^{-10^3 t} \quad (t: \text{s}) \\ &= -6(2 - 3e^{-10^3 t}) \quad (\text{V}) \end{aligned}$$

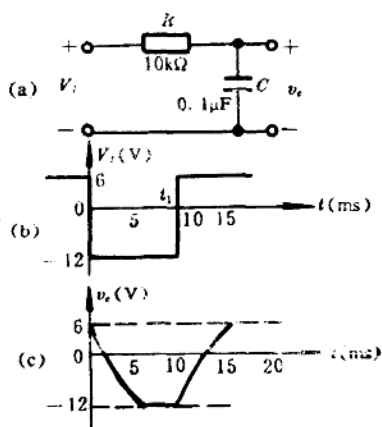


图 1.1.5 例 1.2 的图

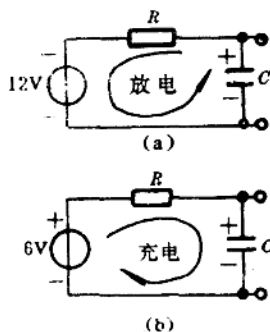


图 1.1.6 例 1.2 的  $C$  充放电回路

(2)当  $t = t_1^+$  时,  $v_i$  由  $-12\text{V}$  上跳到  $+6\text{V}$ , 相当于开关又一次转换位置, 交增生又一暂态过程。这时  $C$  充电, 如图 1.1.6(b) 所示。充电起始值  $v_c(t_1^+) = v_c(t_1^-) = -12\text{V}$ 。稳态时  $C$  开路, 终了值  $v_c(\infty) = +6\text{V}$ 。充电时间常数仍为  $1\text{mS}$ 。

根据三要素法,  $t_1$  以后  $v_c$  变化规律为:

$$\begin{aligned} v_c(t) &= v_c(\infty) + [v_c(t_1^+) - v_c(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= 6 + [-12 - 6]e^{-10^3 t} \\ &= 6(1 - 3e^{-10^3 t}) \quad (t: \text{s}) \end{aligned}$$

综合上述两步分析, 可定性画出  $v_c$  波形如图 1.1.5(c) 所示。

### 三、RC 电路应用举例

#### 1. 微分电路

见图 1.1.7,  $RC$  串联, 从  $R$  两端取输出电压  $v_o$ , 输出  $v_i$  为矩形脉冲, 输出  $v_o$  为尖脉冲(尖峰波)。因为  $v_o$  与  $v_i$  在数学上有近似微分的关系, 故称微分电路。

电路输入矩形脉冲  $v_i$  时, 要能输出尖脉冲  $v_o$ , 则电路时间常数和  $v_i$  的脉冲宽度  $t_w$ 、间隔时间  $t_i$  应满足条件:

$$\begin{aligned} \tau &= R \cdot C \ll t_w \\ \tau &= R \cdot C \ll t_i \end{aligned}$$

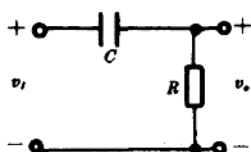


图 1.1.7 微分电路

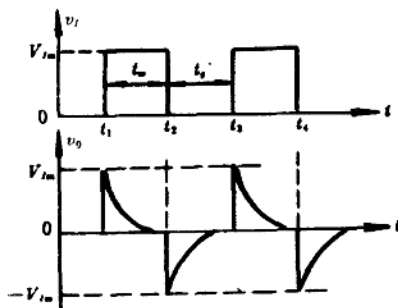


图 1.1.8 微分电路波形图

分析表明,当  $\tau > 1/3t_w$  时,由于充放电过渡过程的时间比输入脉宽  $t_w$  还要长,故当  $v_i$  跳变时,电容器的充放电尚未结束,不能形成尖脉冲。因此  $\tau$  值不能取大,但也不能过小,否则因充放电过快而使尖脉冲过窄,以及因  $v_i$  边沿时间的影响而使  $v_o$  幅度降低, $\tau$  值也不能过小。一般取

$$\frac{t_w}{10} \leq \tau \leq \frac{t_w}{3}$$

下面讨论工作原理。见工作波形图 1.1.8:

(1)  $t < t_1$  时,  $v_i = 0V$ ,  $v_c = 0V$ ,  $v_o = 0V$ , 电路处于稳态。

(2)  $t = t_1^+$ ,  $v_i$  上跳到  $V_{im}$ , 根据开关定理,在此瞬间有  $v_c(t_1^+) = v_c(t_1^-) = 0V$ 。则  $v_i$  全部降落在  $R$  两端,使  $v_o(t_1^+) = v_i(t_1^+) = V_{im}$ 。即  $v_o$  随同  $v_i$  上跳同样的幅值  $V_{im}$ 。

(3)  $t_1 \sim t_2$  期间,  $V_i = V_{im}$  不变,对  $C$  充电,使  $v_c$  由  $0V$  按指数规律上升,而  $v_o$  则由  $V_{im}$  按指数规律下降。因  $\tau \ll t_w$ , 故  $v_c$  很快充到稳态值  $V_{im}$ , 而  $v_o$  则很快下降到  $0V$ 。充电过程结束,形成了正的尖峰波。

(4)  $t = t_2^+$ ,  $v_i$  又由  $V_{im}$  下跳到  $0V$ , 同理因  $v_c(t_2^+) = v_c(t_2^-) = V_{im}$ , 故  $v_o(t_2^+) = -V_{im}$ 。即  $v_o$  跟随  $v_i$  下跳同样的幅值,由  $0V$  下跳到  $-V_{im}$ 。

(5)  $t_2$  以后,  $t_2 \sim t_3$  期间,  $v_i = 0V$  不变。 $C$  放电使  $v_c$  按指数规律下降,因  $\tau \ll t_w$ ,  $C$  很快放电完毕,  $v_c = 0V$ ,  $i_c = 0$ ,  $v_o = 0V$ 。又一暂态过程结束,形成负的尖峰波。

依次继续讨论,最后得到正、负相间的尖脉冲输出。尖脉冲的幅度  $V_{om} = V_{im}$ , 其脉宽按尖脉冲从幅度  $V_{om}$  下降到  $0.1V_{om}$  所需时间计算,以  $T_v$  表示,则  $T_v \approx 2.3\tau$ 。

微分电路具有波形变换作用:将矩形波变换为尖峰波。尖峰波主要用作其他电路的触发或控制信号等。

## 2. 耦合电路

电路形式与微分电路相同,但作用是不失真地传输矩形脉冲。因此,电路工作条件与微分电路相反,即

$$R \cdot C \gg t_w \quad R \cdot C \gg t_r$$

在耦合电路中,电容起着隔直流的作用。因此,当输入一个含有直流分量的矩形脉冲时,其输出波形不再含有直流分量。直流分量降落在电容器  $C$  上。又因为电容器两端电压不能突变,所以电容器两端直流电压的建立还需经历一个过渡过程,称为渐移过程。

见图 1.1.9, 设  $v_i$  为方波,  $t_w = t_r$ 。

(1)  $t=t_1$  时刻,  $v_i$  由 0 上跳到  $V_{im}$ , 由于  $v_o$  不能突跳,  $v_o$  也由 0 上跳同样幅值至  $V_{im}$ 。

(2)  $t_1$  以后,  $V_{im}$  通过  $R$  对  $C$  充电,  $v_o$  按指数规律上升而  $v_i$  则按指数规律下降。但因  $\tau \gg t_w$ , 故  $v_i$  远远来不及充到稳态值。到  $t_2$  时,  $v_o$  充电值  $\Delta \approx (t_w/\tau) \cdot V_{im}$ , 则  $v_i$  也就下降了  $\Delta$ 。

(3)  $t=t_2$  时刻,  $v_i$  由  $V_{im}$  下跳到 0,  $v_o$  下跳  $V_{im}$  到  $-\Delta$ 。

(4)  $t_2$  以后,  $v_i=0$ ,  $C$  放电, 因  $\tau \gg t_r$ , 故放电也很慢。至  $t_3$  时, 电容器上的电荷尚未放完,  $v_o$  还未放到 0。

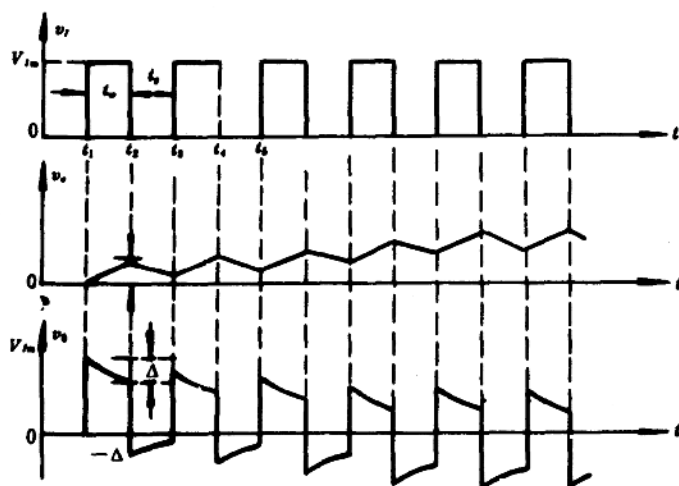


图 1.1.9 RC 耦合电路渐移过程

以后,  $t_3$  时刻  $v_i$  上跳,  $C$  又充电。  $t_4$  时刻  $v_i$  下跳,  $C$  又放电。如此反复充电、放电, 电容器上直流电压逐渐建立,  $v_o$  波形逐渐下移。一直进行到在一个周期内电容充电所得到的电荷与放电所失去的电荷相等, 电路就达到了稳定状态。  $v_o$  不再下移, 所含直流分量为 0。这时电容在一个周期内的平均电压就等于输入脉冲中的直流分量。

由上分析可知, 电路的时间常数  $\tau$  越大, 充放电越慢,  $v_o$  的顶部和底部越平坦。输出失真就越小。但所需渐移过程则越长。

### 3. 积分电路

如图 1.1.10 所示,  $R$ 、 $C$  串联, 输出电压取自电容器  $C$  两端, 输入  $v_i$  为矩形脉冲, 输出  $v_o$  为锯齿波。因为  $v_o$  与  $v_i$  在数学上有近似积分的关系, 故称积分电路。

积分电路和耦合电路的组成条件一样, 即:

$$\tau = R \cdot C \gg t_w$$

见图 1.1.10(b)、(c),  $t_1 \sim t_2$  期间(即  $t_w$  期间)  $v_i$  为高电平,  $C$  充电,  $v_o$  由起始值 0 按指数规律上升。因  $\tau \gg t_w$ , 故充电缓慢,  $v_o$  近似线性上升。到  $t_2$  时  $v_o$  还未充到终了值 ( $V_{im}$ ),  $v_i$  又下跳到 0, 则  $C$  转而缓慢放电。  $t_2$  以后  $C$  一直放电至 0V。

从上述分析可见, 积分电路具有波形变换的作用。它能将矩形脉冲变换为锯齿波或三角波。由于充电缓慢, 波形近似于线性变化。故其幅值可用近似公式计算:

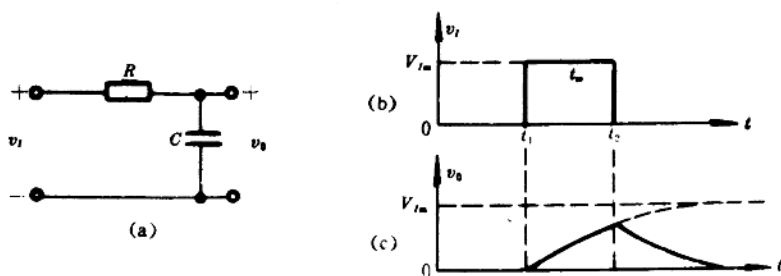


图 1.1.10 积分电路及工作波形

$$V_{om} \approx \frac{t_w}{R \cdot C} \cdot V_{im}$$

锯齿波在示波器、雷达、电视等显示设备中用作扫描信号,并用于脉冲宽度、幅度的选择、延迟等。

#### 4. 脉冲分压器

在脉冲电路中,经常要把脉冲信号通过电阻分压后传送到下一级,由于电路中存在各种形式的电容,如接线电容、寄生电容,或负载电容等,这些电容总的效果如同在输出端并接了一个电容  $C_o$ ,如图 1.1.11 所示。由于输入电压不是直流而是一个阶跃电压,所以  $C_o$  的影响就不能不考虑了。当  $v_i$  跳变时,  $C_o$  的充、放电过程产生的延缓作用使  $v_o$  不能跟随  $v_i$  一起跳变,而要经过一定的上升时间或下降时间。即  $v_o$  边沿变差产生了失真。如图 1.1.11 中所示  $v_o$  上升沿,经过一段时间后  $v_o$  才能达到分压后的稳态值  $\frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot V_{i1}$ 。

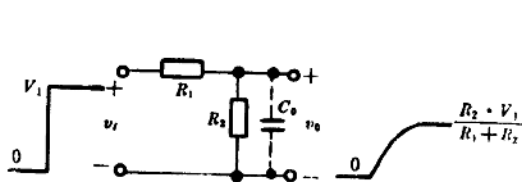


图 1.1.11 寄生电容对输出波形的影响

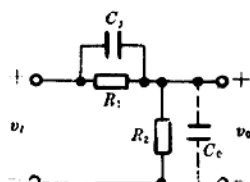


图 1.1.12 利用加速电容改善输出波形

怎样才能克服  $C_o$  的延缓作用以改善  $v_o$  的边沿呢? 参照微分电路的原理,在  $R_1$  两端并接电容器  $C_1$ 。  $C_1$  位于微分电路中电容  $C$  所处位置,具有加速  $v_o$  上升沿,使  $v_o$  跟随  $v_i$  跳变的作用,故称  $C_1$  为加速电容。如图 1.1.12 所示。

加  $C_1$  后的电路是一个有补偿的电路。当  $C_1$  取值不同时,补偿效果也不同。见图 1.1.13,当  $C_1$  过小时,  $C_1$  的加速作用还不足以克服  $C_o$  的延缓作用,  $v_o$  边沿仍较差,此称欠补偿;当  $C_1$  过大时,  $C_1$  的加速作用超过  $C_o$  的延缓作用而使  $v_o$  波形出现超过稳态值的尖顶过冲,此称过补偿;只有当  $C_1$  取值合适时,  $C_1$ 、  $C_o$  的作用正好互相抵消,输出理想的矩形波,此称正补偿