

中等专业学校试用教材

# 脉冲与数字电路

陈传虞 编

高等教育出版社

V3  
5773  
C2

## 内 容 简 介

本书是按 1983 年教育部颁发的中等专业学校工科电子类专业通用的《脉冲与数字电路教学大纲》编写的,前一部分为脉冲电路,后一部分为数字电路,全书着重基本概念和基本分析方法。各章均附有例题、习题和小结。

本书可作为中等专业学校工科电子类专业“脉冲与数字电路”课程教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

本书由常州无线电工业学校唐文源老师主审。

本书责任编辑 姚玉洁

中等专业学校试用教材

## 脉 冲 与 数 字 电 路

陈传虞 编

\*

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

上海中华印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/16 印张 21 字数 475,000

1986 年 4 月第 1 版 1986 年 4 月第 1 次印刷

印数 00,001—27,700

书号 15010·0735 定价 2.80 元

# 前 言

“脉冲与数字电路”是中等专业学校工科电子类专业一门重要的技术基础课,熟练地掌握它对于学生学习后续专业课和毕业后从事技术工作都是非常重要的。在编写这本教材时,我们着重讲清基本概念和基本的分析方法,而不对问题作过细过繁的讨论,力求做到概念清楚,重点突出,繁简得当。

第一章  $RC$  线性电路中的过渡过程现象和第二、三章作为开关元件使用的二极管、三极管是脉冲电路的基础。这两者的有机结合形成了各种张弛振荡器和锯齿波电压发生器,书中花了较多篇幅讲授  $RC$  电路中的过渡过程现象,并且有意识地把后面要讲的脉冲电路加以简化,给出等效电路,以举例或习题的形式介绍给学生,加强前后的有机联系,前面为后面打基础,后面又对前面进行了深化与提高。

锯齿波电压发生器中电源电压利用系数和非线性系数是一对主要矛盾。书中分析了基本锯齿波电压发生器电路无法解决这一矛盾的主要原因,从而提出用恒流元件充(放)电或补偿电势提高线性的办法,自然地引导出三种锯齿波电压发生器:恒流元件充(放)电电路,自举电路,密勒积分电路。在分析这些电路时始终围绕上述矛盾,指出提高线性的原理以及实际存在的局限性,做到主次分明,认识逐步深化。

逻辑代数和卡诺图是分析数字电路的基本工具。在逻辑代数中一定要强调普通代数所没有的对偶法则。明白这一点,对基本公式、逻辑函数几种表达形式(与或同或与、与非同或非……)、最小项与最大项、……两两之间存在的对偶关系就不难理解了。在讲清对偶法则这一本质概念之后,只要讲透一种形式,另一种就会不讲自明,收到事半功倍的效果。

与非门和各种触发器是数字电路的基本部件。书中对它们作了比较仔细的讨论。为了避免混淆,我们从逻辑功能和电路组成分别对触发器进行分析。考虑到集成电路的集成度日益提高,我们有选择地介绍了一些中规模集成电路,着重分析它们的逻辑功能和应用。

时序电路的分析方法和设计方法是两个相反的过程,因此,在讨论同步时序电路的分析方法之后,接着介绍了时序电路的设计方法。

我们认为中专教材不同于一般科技书,也不是一本参考书,而应当是教课内容和教学经验的反映及再加工,既要有利于教,又要有利于学。那种不适当地加多、加深内容的做法,对于教师和学生都是不足取的。本书是编者对“脉冲与数字电路”教材处理的一次尝试,限于水平,肯定有很多不妥和谬误之处,恳请读者提出批评指正。

本书由常州无线电工业学校唐文源老师主审,他对全部书稿仔细审阅,并将书稿油印后在常州无线电工业学校试用过,在此基础上提出许多宝贵意见,无疑对书稿质量的提高起了有益作用。本书的责任编辑费乃正老师也阅读了油印稿,并提出很多修改意见。在此对他们的热忱帮助,表示深切的谢意。

编 者

1984.11.

## 常用符号表

|                                       |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| $i, v$ ——电流、电压的瞬时值                    | $E_R$ ——钳位偏压                       |
| $i_a, v_a$ ——只有交流的瞬时值                 | $t_s$ ——存贮时间                       |
| $i_A, v_A$ ——包括直流分量的瞬时值               | $t_f$ ——下降时间                       |
| $I_a, V_a$ ——有效值或平均值                  | $t_d$ ——延迟时间                       |
| $I_A, V_A$ ——直流分量                     | $t_R$ ——反向恢复时间                     |
| $v_I$ ——输入信号                          | $t_{on}$ ——开启时间                    |
| $v_O$ ——输出信号                          | $t_{off}$ ——关闭时间                   |
| $t$ ——时间                              | $I_{CBO}$ ——集电结反向饱和电流              |
| $V_m$ ——脉冲幅度                          | $I_{BS}$ ——临界饱和基极电流                |
| $t_r$ ——前沿时间                          | $I_{CS}$ ——饱和集电极电流                 |
| $t_f$ ——后沿时间                          | $N$ ——过饱和系数(过驱动系数), 或指门的扇出系数       |
| $\Delta v$ ——平顶降落                     | $V_{REO}$ ——设计时规定三极管可靠截止的电压或临界截止电压 |
| $t_p$ ——脉宽                            | $N_1$ ——变压器匝数                      |
| $t_{pa}$ ——平均(有效)脉宽                   | $n$ ——变比                           |
| $T$ ——周期                              | $L_M$ ——励磁电感                       |
| $T_1$ ——同步脉冲周期                        | $L_s$ ——漏感                         |
| $f, F$ ——频率, 重复频率                     | $\delta$ ——锯齿波电压的非线性系数             |
| $B$ ——3dB 带宽                          | $\eta$ ——电源电压利用系数                  |
| $\tau$ ——时间常数                         | $T_P$ ——扫描正程                       |
| $\tau_c$ ——充电时间常数                     | $T_o$ ——扫描休止期                      |
| $\tau_d$ ——放电时间常数                     | $V_Z$ ——稳压管的稳定电压                   |
| $V_{av}$ ——脉冲中的直流分量                   | $I_{E1}$ ——空载导通电源电流                |
| $Q_t$ ——电容 $C$ 充电所得到的电荷               | $I_{E2}$ ——空载截止电源电流                |
| $Q_r$ ——电容 $C$ 放电所失去的电荷               | $V_{ON}$ ——开门电平                    |
| $V_T$ ——二极管正向导通的阈值电压或指三极管发射结正向导通的阈值电压 | $V_{OFF}$ ——关门电平                   |
| $BV_R$ ——反向击穿电压                       | $V_{OH}$ ——输出高电平                   |
| $r_D$ ——二极管正向导通的等效电阻                  | $V_{OL}$ ——输出低电平                   |
| $r_o$ ——二极管反向截止的等效电阻                  | $I_{IS}$ ——输入短路电流                  |
| $C_0$ ——寄生电容                          | $I_{IH}$ ——输入漏电流                   |
| $r_{bes}$ ——三极管发射结的正向饱和电阻             | $t_{pd}$ ——平均延迟时间                  |
| $r_{ces}$ ——三极管 C、E 极间饱和电阻            | $V_{NL}$ ——低电平噪声容限                 |
| $V_{BES}$ ——三极管发射结饱和压降                | $V_{NH}$ ——高电平噪声容限                 |
| $V_{CES}$ ——三极管 C、E 极间饱和压降            |                                    |

— $V_{BB}$ ——参考电压

FA——全加器

HA——半加器

 $Q_{n+1}, Q_{\delta t}$ ——触发器的次态

1. The first group of people who are interested in the study of the history of the United States are the people who are interested in the history of the United States.

[illegible]

# 目 录

|                                      |    |                                  |     |
|--------------------------------------|----|----------------------------------|-----|
| 绪言                                   | 1  | 6-2 自激间歇振荡器                      | 98  |
| 第一章 RC 电路                            | 4  | 6-3 它激间歇振荡器                      | 103 |
| 1-1 简单 RC 电路中的过渡过程                   | 4  | 第七章 锯齿波发生器                       | 106 |
| 1-2 RC 电路应用                          | 9  | 7-1 概述                           | 106 |
| 1-3 RL 电路                            | 15 | 7-2 简单的锯齿波电压发生器                  | 107 |
| 第二章 晶体二极管及其开关应用                      | 22 | 7-3 恒流源锯齿波电压发生器                  | 109 |
| 2-1 二极管的大信号等效电路                      | 22 | 7-4 自举电路                         | 112 |
| 2-2 二极管限幅器                           | 23 | 7-5 密勒积分电路                       | 116 |
| 2-3 二极管钳位器                           | 28 | 7-6 锯齿波电流发生器                     | 121 |
| 2-4 二极管传输门                           | 30 | 第八章 逻辑门电路                        | 128 |
| 2-5 二极管在高速开关时的开关特性                   | 32 | 8-1 概述                           | 128 |
| 第三章 晶体三极管及其开关应用                      | 37 | 8-2 分立元件门电路                      | 130 |
| 3-1 晶体三极管的特性曲线及其大信号<br>运用时分区线性化的等效电路 | 37 | 8-3 数字集成电路的发展和分类                 | 133 |
| 3-2 晶体三极管的开关特性                       | 39 | 8-4 DTL、TTL 与非门的工作原理             | 134 |
| 3-3 反相器                              | 43 | 8-5 TTL 与非门的开关状态                 | 137 |
| 3-4 晶体三极管限幅器                         | 49 | 8-6 TTL 与非门的电压传输特性               | 140 |
| 3-5 晶体三极管钳位器                         | 50 | 8-7 TTL 与非门的输入特性和输出特性            | 142 |
| 第四章 双稳态触发电路                          | 54 | 8-8 TTL 与非门的典型参数                 | 145 |
| 4-1 集-基耦合双稳态电路的工作原理                  | 54 | 8-9 其它 TTL 门电路                   | 147 |
| 4-2 集-基耦合双稳态电路正常工作的条件                | 55 | 8-10 TTL 与非门的改进形式及其派生<br>电路      | 151 |
| 4-3 双稳态电路的触发方式                       | 57 | 8-11 射极耦合逻辑电路(ECL)               | 154 |
| 4-4 触发灵敏度与抗干扰能力                      | 61 | 8-12 有关数字集成电路使用的一些常识             | 159 |
| 4-5 射极耦合双稳态触发电路                      | 64 | 第九章 逻辑代数                         | 166 |
| 第五章 单稳态触发电路与多谐振荡器                    | 73 | 9-1 逻辑代数的若干基本公式(定律)<br>和常用公式(定律) | 166 |
| 5-1 集-基耦合单稳态触发电路                     | 73 | 9-2 逻辑函数的各种表示形式                  | 171 |
| 5-2 射极耦合基极定时的单稳态触发电<br>路             | 78 | 9-3 逻辑函数的公式化简                    | 174 |
| 5-3 自激多谐振荡器                          | 82 | 9-4 二进制数                         | 178 |
| 5-4 射极定时多谐振荡器                        | 85 | 9-5 逻辑函数的标准形式                    | 181 |
| 5-5 同步与分频                            | 88 | 9-6 卡诺图及其在逻辑函数化简中之<br>应用         | 184 |
| 第六章 间歇振荡器                            | 95 |                                  |     |
| 6-1 脉冲变压器                            | 95 |                                  |     |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 9-7 具有约束的逻辑函数之化简 .....                      | 189 |
| <b>第十章 组合逻辑电路</b> .....                     | 194 |
| 10-1 概述 .....                               | 194 |
| 10-2 编码器 .....                              | 198 |
| 10-3 译码器 .....                              | 199 |
| 10-4 数值比较器 .....                            | 207 |
| 10-5 数据选择器及分配器 .....                        | 210 |
| 10-6 奇偶校验电路 .....                           | 213 |
| 10-7 基本运算电路 .....                           | 216 |
| 10-8 组合逻辑电路中的冒险现象 .....                     | 220 |
| <b>第十一章 时序逻辑电路</b> .....                    | 225 |
| 11-1 概述 .....                               | 225 |
| 11-2 RS 触发器 .....                           | 226 |
| 11-3 D 触发器及 JK 触发器 .....                    | 231 |
| 11-4 触发器的空翻现象 .....                         | 234 |
| 11-5 维持阻塞 D 触发器 .....                       | 236 |
| 11-6 JK 触发器 .....                           | 241 |
| 11-7 同步时序电路的分析方法 .....                      | 245 |
| 11-8 同步时序电路的设计方法 .....                      | 252 |
| 11-9 寄存器 .....                              | 257 |
| 11-10 计数器 .....                             | 259 |
| 11-11 信号发生器 .....                           | 270 |
| <b>第十二章 集成逻辑门在脉冲电路</b><br><b>中之应用</b> ..... | 276 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 12-1 TTL与非门多谐振荡器 ..... | 276 |
| 12-2 环形振荡器 .....       | 278 |
| 12-3 与非门微分型单稳态电路 ..... | 281 |
| 12-4 与非门积分型单稳态电路 ..... | 283 |
| 12-5 施密特触发器 .....      | 284 |

### 第十三章 MOS 场效应管数字集成

|                     |     |
|---------------------|-----|
| <b>电路</b> .....     | 288 |
| 13-1 概述 .....       | 288 |
| 13-2 NMOS 反相器 ..... | 290 |
| 13-3 CMOS 反相器 ..... | 295 |
| 13-4 MOS 门 .....    | 298 |
| 13-5 MOS 触发器 .....  | 300 |

### 第十四章 模-数转换与数-模转换

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 14-1 概述 .....             | 305 |
| 14-2 模拟-数字转换(A-D转换) ..... | 305 |
| 14-3 数字-模拟转换(D-A转换) ..... | 309 |
| 14-4 D-A 转换器中的电子开关 .....  | 313 |
| 14-5 并行比较型 A-D 转换器 .....  | 315 |
| 14-6 逐次逼近型 A-D 转换器 .....  | 317 |
| 14-7 计数式 A-D 转换器 .....    | 318 |
| 14-8 双积分型 A-D 转换器 .....   | 320 |
| 14-9 集成单元 A-D 转换器举例 ..... | 321 |

### 参考书目 .....

325

# 绪 言

现代电子设备中的电子线路, 尽管五花八门, 种类繁多, 但按其所处理的信号形式加以划分, 则不外两大类: 一类为模拟电子电路; 另一类为数字电子电路。前一类电路处理模拟信号, 后一类电路处理数字信号。

所谓模拟信号, 是指模拟物理量的电压或电流, 它的变化是连续而平滑的, 可以在一定范围内取任意值。通常的话音或图象信号就属于这一类。

所谓数字信号, 是指时间上和数值上都是离散的信号, 亦即在时间上, 它们的变化是不连续的, 总是发生在一系列离散的瞬间, 在数值上是量化了的, 只能按有限多个增量或阶梯取值。

通常, 用数字信号来表示自然界的物理量, 并不使用人们所习惯的十进制, 而采用简单的二进制。二进制数的每位数字只有两种可能的取值: 0 和 1。数字电路具有许多优点:

第一, 数字电路采用二进制码表示信号。二进制数中只有两个数码, 用来表示或存贮它的元件或电路也比较简单, 从而使构成数字电路的基本单元电路也十分简单, 对电路中元件所提的要求并不严格, 允许其取值有较大的分散性, 只要能保证正确地区分或反映出两种状态(一种表示 0, 一种表示 1)就够了。而且, 通过增加二进制的位数, 可以使数字电路处理的结果达到人们所希望得到的高精确度。近年来, 半导体器件制造工艺的迅速发展, 以及数字电路的单元电路十分简单, 允许把为数众多的数字电路集成在一块芯片上, 得到集成度和成品率很高而价格十分便宜的集成数字电路。这种电路具有使用方便、可靠性高、价格低廉等优点, 它为数字技术的发展提供了极为有利的物质基础。

第二, 数字信号便于用电子数字计算机进行信息处理, 人们将生产过程中要加以控制的物理量变换为数字信号, 由计算机处理后实现对生产过程的实时控制, 达到生产过程的自动化。

第三, 数字信号可以无限长期地进行存贮。

由于以上这些优点, 数字电路和数字技术在许多领域获得了普遍应用。例如, 对测量仪表测试结果的处理与显示, 话音和图象的传送, 雷达数据的处理, 都采用了数字技术; 在数字技术的基础上发展起来的电子数字计算机, 是近代科学技术中一项最伟大的成果, 它对国民经济及人民的生活已产生了深远的不可估量的影响。可以确信, 随着集成技术和数字技术的进一步发展和完善, 数字电路的应用必将日益推广和普及。

本课程分脉冲电路和数字电路两部分。脉冲电路是一种产生与变换脉冲信号波形的电路。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。时间的长短是和电路的过渡过程相比较而言的, 一般脉冲电压或电流的作用时间, 可以和电路的过渡过程相比拟。更广义情况下, 凡按非正弦规律变化的电压或电流都泛称为脉冲信号。



在数字电路中,它的基本单元电路的状态不断地在 0 和 1 两种状态间进行转换,它们的信号波形大致说来是一系列的矩形波,也是一种脉冲信号,从这种意义上来说,数字电路也是脉冲电路。

但是,从研究的对象和研究方法来说,数字电路和脉冲电路是两种属于不同范畴的电路。在脉冲电路中,我们着重研究脉冲电压的波形以及用以产生、变换、测量与放大这些脉冲波形的电路,我们感兴趣的不仅是脉冲的有无,而且还有它的波形。研究的方法可以采用以前研究模拟电路所用的频域分析方法,或用微分方程(或拉氏变换)研究过渡过程的时域分析方法。在数字电路中,我们着重研究基本单元电路的状态(0 和 1)及电路输出、输入之间的相互关系(即通常所说的逻辑关系)。只要不引起 0、1 状态的错误或混乱,我们对信号的波形完全可以不去管它。因此,研究数字电路所用的方法是一种研究离散量的全新方法,它所用的数学工具是开关代数。这样,从研究对象和研究方法来说,数字电路已脱离脉冲电路而发展成为一门崭新的学科。本书前一部分内容讲述脉冲电路,后一部分内容讲述数字电路。在讲授时,可以并行进行,也可以顺序进行。

在脉冲电路里,常见的脉冲波形,有以下几种:尖脉冲、矩形脉冲、方波、梯形波、锯齿波、三角形波、钟形脉冲及阶梯形波,如图 0-1 所示。

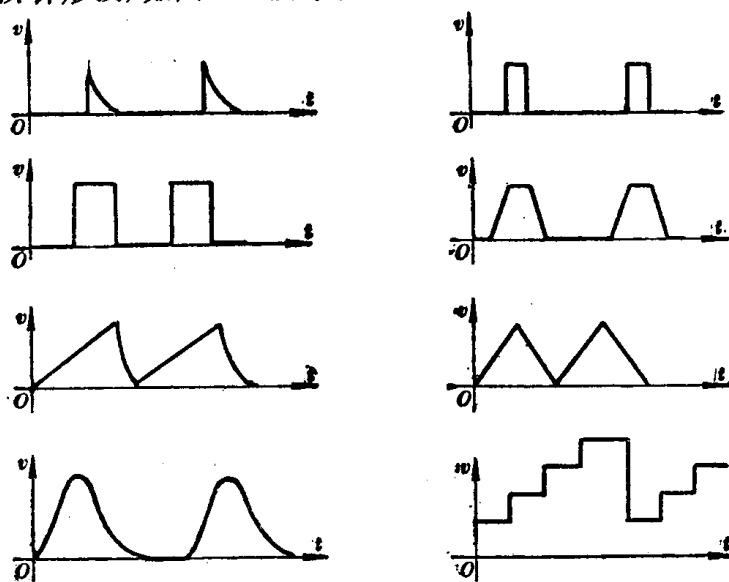


图 0-1 常见的几种脉冲波形

由于脉冲波形千变万化,因此要描述它,比描述一个正弦波所需要的参数多得多;而且,对不同波形所用的参数也不尽相同。这里只以一种接近矩形的脉冲波为例,讨论一下它的参数,为今后研究脉冲电路作参考。这些参数是:

- 幅度  $V_m$ , 指脉冲的最大幅值;
- 前沿或上升时间  $t_r$ , 通常是指由  $0.1V_m$  上升到  $0.9V_m$  的时间,  $t_r$  愈短, 表示脉冲上升得愈快;
- 后沿或下降时间  $t_f$ , 指由  $0.9V_m$  下降到  $0.1V_m$  的时间;
- 平顶倾斜  $\Delta V$ , 指在脉冲平顶期间幅度的下跌;
- 脉冲宽度  $t_p$ , 指前、后沿  $0.1V_m$  两点间的时间间隔, 有时也可以用前、后沿  $0.5V_m$  两点

间的时间间隔来代表脉冲宽度, 此时间称为有效脉冲宽度  $t_{pa}$ ;

- 周期  $T$ , 指一个脉冲上的一点与相邻脉冲上相对应点之间的时间间隔, 其倒数代表每秒脉冲数, 称为脉冲的重复频率  $f$ ;
- 脉宽比  $t_p/T$ , 指脉冲宽度与周期之比, 其倒数称为空度比。

在脉冲的前沿及后沿可能出现振荡或过冲( $\delta$ ), 在图 0-2 中用虚线表示。

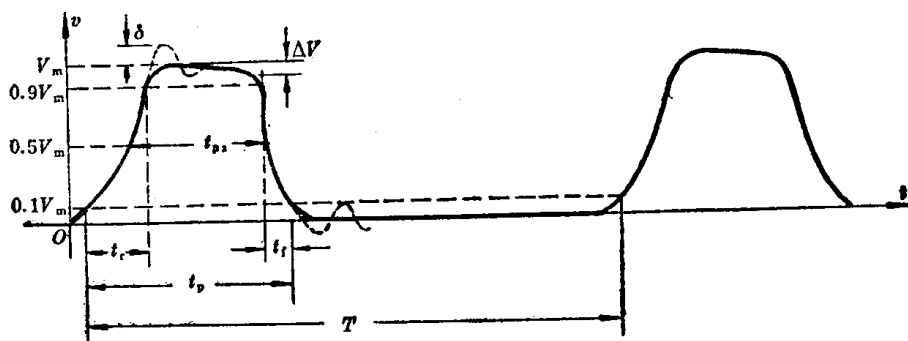


图 0-2 矩形脉冲的主要参数

根据对矩形脉冲波形的频谱分析可知, 脉冲的前、后沿愈陡, 其频谱所占带宽愈宽, 脉冲波形上升(或下降)时间  $t_r$  与 3 dB 带宽  $B$  之间的关系, 可以近似地表示为

$$t_r B = 0.35 \sim 0.45$$

如果脉冲的上冲较小(例如,  $\delta < 5\%$ ), 则乘积接近于 0.35; 如果上冲较大, 乘积接近于 0.45。

当脉冲通过网络时, 要使网络不失真地传送此脉冲, 必须按上述公式根据脉冲的前沿  $t_r$  合理地选择网络的通频带宽度  $B$ , 使脉冲中主要的频谱成分都能通过网络。例如, 用一个最高工作频率为 30 MHz 的脉冲示波器, 来观察一个理想的矩形脉冲, 实际看到的将是一个有前、后沿的脉冲, 其上升时间为

$$t'_r = 0.35 / (30 \times 10^6) \approx 12 \text{ ns}$$

这是示波器附加的失真。

如果已知示波器观察到的脉冲波形前沿为  $t''_r = 20 \text{ ns}$ , 则应去掉示波器附加的失真, 才是被观察波形本身的上升时间

$$t_r = \sqrt{t''_r{}^2 - t'_r{}^2} = \sqrt{20^2 - 12^2} = 16 \text{ ns}$$

显然, 在使用示波器观察波形时, 必须使示波器的通频带  $B$  足够宽, 以保证附加的失真  $t'_r$  远小于被观察波形的上升时间  $t_r$ 。

不难理解, 矩形脉冲的前、后沿代表着频谱中的高频成分, 而平顶相应地代表着低频成分。

### 思 考 题

已知输入方波的上升沿为  $0.1 \mu\text{s}$ , 要求不失真地观测此上升沿, 问示波器的通频带应为若干?

若用 10 MHz 的示波器进行观测, 实际看到的脉冲波形的上升沿为多少?

# 第一章 RC 电路

## 内容提要

本章首先讲一阶 RC 电路的过渡过程的分析方法——三要素法。通过分析达到两个目的：一方面熟悉一下分析线性电路的过渡过程的经典方法；另一方面也为以后分析各种脉冲电路打下必要的基础。在此以后，介绍脉冲电路中几种常用的 RC 电路：微分电路、积分电路、耦合电路和 RC 脉冲分压器。

## 1-1 简单 RC 电路中的过渡过程

在脉冲电路中，脉冲电压或电流的作用时间和电路的过渡过程是可以相比拟的。因此，研究脉冲的产生与变换，归根到底，就是研究在受到某一外电势作用时，或当电路某一部分参数突变时（如晶体管由截止变为导通或反之），电路中所发生的过渡过程。为简单起见，我们只用经典法来讨论一阶 RC 电路的过渡过程。通过讨论，一方面复习电工中所讲过的分析过渡过程的方法，进一步加深对它的理解；另一方面也为以后分析各种脉冲电路打下必要的基础。

### 一、一阶 RC 电路中过渡过程的经典解法

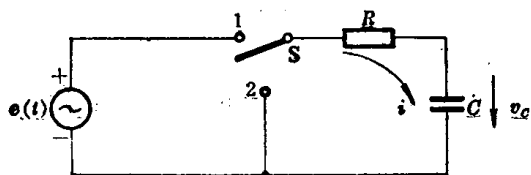


图 1-1 RC 电路

考虑图 1-1 所示的简单 RC 电路，图中电容器 C 可能预先被充电，也可能未被充电。

设  $t=0$  时，开关 S 闭合于 1 点，RC 电路突然与电源  $e(t)$  接通，按克希荷夫定律，应有

$$iR + v_C = e(t)$$

由于

$$v_C = \frac{1}{C} \int i dt \quad \text{或} \quad i = C \frac{dv_C}{dt}$$

故

$$RC \frac{dv_C}{dt} + v_C = e(t)$$

或

$$\tau \frac{dv_C}{dt} + v_C = e(t) \quad (1-1)$$

式中  $\tau = RC$  称为时间常数。

也可以对电流  $i$  或电阻上的压降  $v_R$  写出类似的克希荷夫方程，但不管怎样，它们都是一阶的微分方程，并具有以下的普遍形式：

$$\tau \frac{dx}{dt} + x = y(t) \quad (1-2)$$

$y(t)$  称为激励函数。

进一步假定, 电路受到的是恒值激励, 即  $e(t) = E$ , 这时方程(1-2)可写成以下普遍形式:

$$\tau \frac{dx}{dt} + x = a \quad (1-3)$$

式中  $x(t)$  称为响应函数, 表示在外加激励函数  $y(t)$  作用下, 电路某一部分所引起的响应。它可以是任一元件上的电压, 也可以是任一支路的电流, 当然也可以是某一点的电位。一阶微分方程(1-3)的求解是很简单的, 其通解为

$$x(t) = Ae^{-t/\tau} \quad (1-4)$$

特解为

$$x = a$$

全解为

$$x(t) = Ae^{-t/\tau} + a \quad (1-5)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时, 右边第一项趋于 0; 所以有

$$x(\infty) = a$$

至此, 我们知道了方程(1-3)中  $a$  代表新稳态时的响应  $x(\infty)$ , 全解中  $A$  是个待定常数, 与电路的起始条件有关, 即与开关刚接通时  $x(t)$  的值  $x(0^+)$  有关, 特别要注意, 假定开关  $S$  是在  $t=0$  时接通的, 并以  $x(0^-)$  表示开关接通前一瞬间  $x(t)$  的值, 以  $x(0^+)$  表示开关接通后一瞬间  $x(t)$  的值, 起始条件是指  $x(0^+)$ 。一般情况下  $x(0^-) \neq x(0^+)$ , 在求待定常数  $A$  时, 我们应该以  $x(0^+)$  代入式(1-3), 如此便得

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

故式(1-3)的全解为

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

上式是一阶系统在恒值激励下得到的响应函数的普遍形式。这就是说, 在一阶系统中, 如果激励函数  $y(t)$  为一个常数, 则其响应  $x(t)$  (某一支路的电流, 或某一元件上的电压, 或某点的电位) 均按指数规律变化, 而且只要知道响应的初始值  $x(0^+)$ 、终值  $x(\infty)$  及时间常数  $\tau$ , 就可以直接利用式(1-6)写出其变化规律。这种方法简称为三要素法。需要注意的是, 它只适用于一阶系统受到恒电势激励的情况, 不满足这些条件, 就不能用它。

## 二、用式(1-6)求响应函数的一些例子

### 例 1-1

在图 1-1 所示电路中, 在  $t=0$  时, 开关  $S$  与 1 点闭合,  $e(t)$  为恒定电源  $E$ , 并假定电容  $C$  事先未充电, 即  $v_C(0^-) = 0$ , 试求响应函数  $v_C(t)$  及  $i(t)$ 。

解

求解时, 要先求出  $v_C(0^+)$ 、 $i(0^+)$ 、 $v_C(\infty)$ 、 $i(\infty)$ 。

当  $t=0^-$  时, 有

$$v_C(0^-) = 0, \quad i(0^-) = 0$$

当  $t=0^+$  时, 考虑到电容的电压不能突变, 故

$$v_C(0^+) = v_C(0^-) = 0, \quad i(0^+) = E/R$$

当  $t \rightarrow \infty$  时, 电容充电完毕, 故

$$v_C(\infty) = E, \quad i(\infty) = 0$$

利用式(1-6), 可得

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

$$i(t) = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}$$

其变化规律如图 1-2(a)、(b)所示。

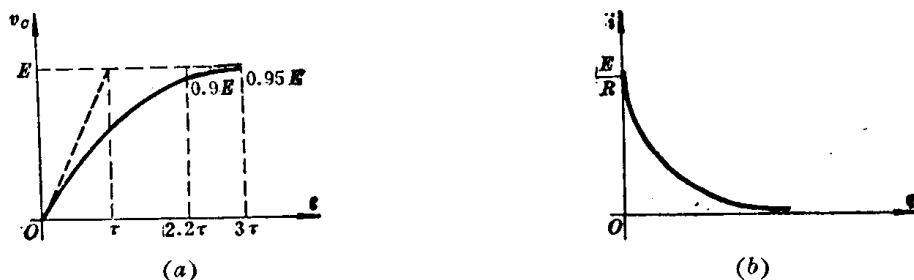


图 1-2 RC 电路中电容充电情况

$t=0$  时, 电容上电压的上升速率为  $\left. \frac{dv_C}{dt} \right|_{t=0} = \frac{E}{\tau}$ , 可见, 如电容一直按此初始速率恒定充

电, 则经过时间  $\tau$  后, 即可达到其稳定值  $E$ 。

当  $t=2.2\tau$  时,  $v_C(t)=0.9E$ , 这表示对于上升沿按指数规律  $(1 - e^{-t/\tau})$  变化的矩形脉冲波来说, 其前沿时间约为  $t_c=2.2\tau$ , 这个公式对于粗略估算矩形波的上升沿是很有用的。

当  $t=3\tau$  时,  $v_C(t)=0.95E$ , 可以近似认为经过  $3\tau$  时间, 电路已达到稳定状态。

### 例 1-2

上例的电路中, 设电容  $C$  事先已充好电, 其端电压  $v_C(0^-)=E$ , 在  $t=0$  时, 开关  $S$  由 1 点置于 2 点, 电容  $C$  放电, 求响应  $v_C(t)$  及  $i(t)$ 。

解

求解时, 仍需先求出  $v_C(0^+)$ 、 $i(0^+)$ 、 $v_C(\infty)$ 、 $i(\infty)$ 。

当  $t=0^-$  时, 有

$$v_C(0^-) = E, \quad i(0^-) = 0$$

当  $t=0^+$  时, 有

$$v_C(0^+) = v_C(0^-) = E$$

因为在  $RC$  支路中, 电容的端电压是不能突变的。因而求得

$$i(0^+) = -v_C(0^+)/R = -E/R$$

当  $t \rightarrow \infty$  时, 有

$$v_C(\infty) = 0, \quad i(\infty) = 0$$

由式(1-6), 可得

$$v_C(t) = E e^{-t/(RC)}$$

$$i(t) = -(E/R) e^{-t/(RC)}$$

由上述例子可见,  $RC$  电路中电容的充电和放电规律都遵循式(1-6)。充电和放电本质上是一致的, 在有电源的电路中可以把电容的放电看作是对它的反向充电。对这类电路, 只要知道  $x(0^+)$ 、 $x(\infty)$ 、 $\tau$ , 可以直接写出  $x(t)$  的表达式, 十分方便。

### 例 1-3

在图 1-3 所示电路中, 设开关  $S$  原来是闭合的, 在  $t=0$  时断开, 过  $1.2 \mu s$  后,  $S$  又闭合, 试求出  $v_{R_3}$  的变化规律。

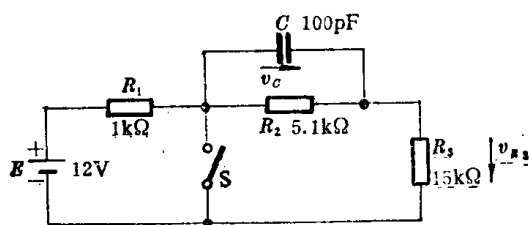


图 1-3 例 3 电路

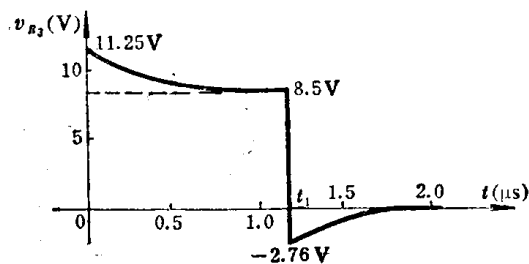


图 1-4  $v_{R_3}(t)$

解

(1)  $t=0^+$ , 因电容  $C$  上电压来不及突变, 而原来电容  $C$  上是没有电荷的,  $v_C(0^+) = v_C(0^-) = 0$ , 从而  $v_{R_2}(0^+) = 0$ , 可以将  $R_2$  视为短路, 因而可得

$$v_{R_3}(0^+) = E \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 12 \times \frac{15}{1 + 15} = 11.25 \text{ V}$$

$t \rightarrow \infty$ , 电容  $C$  将充电到稳定值, 无电流流过  $C$ , 故  $C$  可视为开路, 因而可得

$$v_{R_3}(\infty) = E \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 12 \times \frac{15}{1 + 5.1 + 15} = 8.5 \text{ V}$$

求时间常数时, 可将恒压源  $E$  视为短路, 在  $S$  断开时, 时间常数为

$$\tau = R_2 \parallel (R_1 + R_3) C = \frac{5.1 \times 16 \times 10^3}{5.1 + 16} \times 100 \times 10^{-12} = 0.387 \mu s$$

可见, 经过  $t = 1.2 \mu s$  (约  $1.2/0.387 \approx 3.1 \tau$ ), 电容  $C$  上的电压已达到其稳定值的 0.95:

$$v_C(t_1^-) = 0.95 v_C(\infty) = 0.95 E \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \approx 2.76 \text{ V}$$

(2)  $t = t_1 = 1.2 \mu s$  后,  $S$  闭合, 电容  $C$  上电压来不及突变, 因而

$$v_C(t_1^+) = v_C(t_1^-) = 2.76 \text{ V}$$

$$v_{R_3}(t_1^+) = -v_C(t_1^-) = -2.76 \text{ V}$$

当  $t \rightarrow \infty$  时,

$$v_{R_3}(\infty) = 0$$

此时, 电路的时间常数

$$\tau' = C(R_2 \parallel R_3) = 0.38 \mu s$$

综上所述,  $v_{R_3}$  的表达式可写为

当  $0 < t \leq 1.2 \mu s$  时, 有

$$v_{R_3} = 8.5 + 2.75 e^{-t/(0.387 \times 10^{-6})} \text{ (V)}$$

当  $t > 1.2 \mu s$  时, 有

$$v_{R_3} = -2.76 e^{-(t-t_1)/\tau'} (V)$$

$$t_1 = 1.2 \mu s, \quad \tau' = 0.38 \mu s$$

$v_{R_3}$  波形如图 1-4 所示。

#### 例 1-4

判断下列电路, 是否可用三要素法求解响应函数。

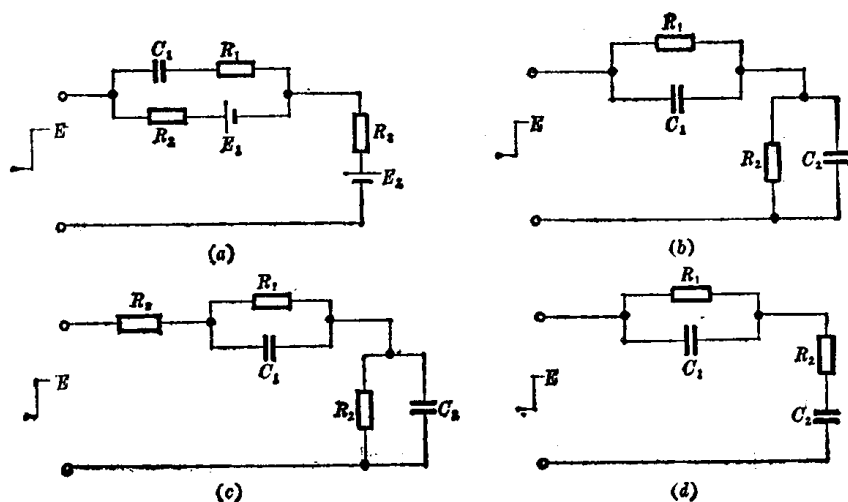


图 1-5 例 4 电路图

解

判断 RC 电路是否可用三要素法, 要看电路是否为一阶系统。为此, 首先应将电路化简。在化简时, 将恒压源视为短路, 恒流源视为开路, 然后将可以合并的电阻及电容进行串、并联化简, 如最后化简为简单的 RC 电路, 那么此电路就属于一阶系统, 反之, 就不是。

图 1-5(a) 所示电路, 可用三要素法, 因经过化简, 可画成图 1-6(a) 形式, 其时间常数

$$\tau = RC = [(R_2 \parallel R_3) + R_1]C$$

图 1-5(b) 所示电路, 可用三要素法, 因经过化简, 可画成图 1-6(b) 形式, 其时间常数

$$\tau = RC = (R_1 \parallel R_2)(C_1 + C_2)$$

将图 1-5(c) 化简为图 1-6(c), 因电容无法归并为一个, 故所示电路不能用三要素法。

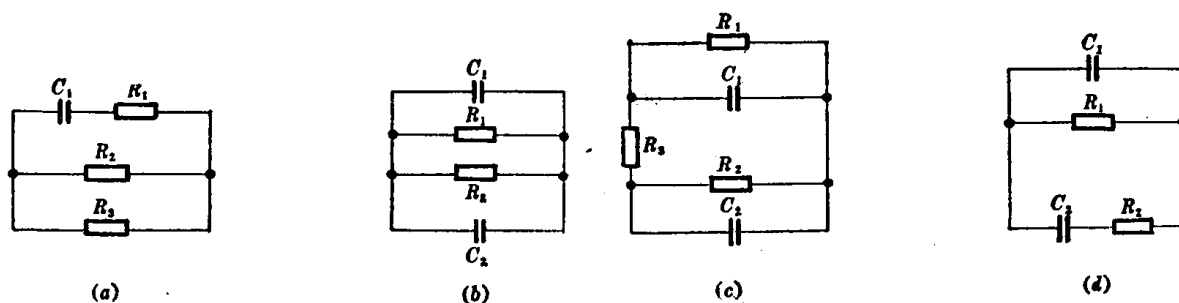


图 1-6 图 1-5 化简后的电路

图 1-5(d)可化简为图 1-6(d), 所示电路也不能用三要素法。

## 1-2 RC 电路应用

在脉冲技术中常常用 RC 电路对波形进行变换。本节将介绍几种常用的 RC 电路, 通过对这些电路的分析, 使我们了解一个矩形脉冲加到 RC 网络时, 会得到怎样的输出波形, 从而进一步加深对 RC 电路中过渡现象的理解。

### 一、RC 微分电路

当在图 1-7 所示的 RC 电路的输入端加方波时, 如 RC 数值与脉冲宽度  $t_p$  间满足下列关系式:

$$RC \ll t_p$$

则称此电路为微分电路, 它可以将输入方波变换为正负相间的尖脉冲, 如图 1-8 所示, 其工作原理如下。

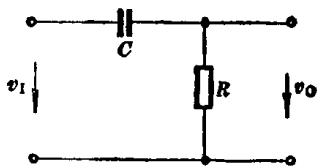


图 1-7 RC 微分电路

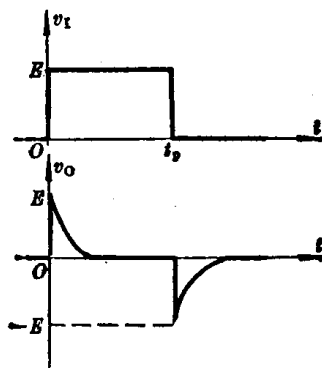


图 1-8 微分后输出波形

在  $t=0$  时, 输入电压由 0 突变为  $E$ , 在这一瞬间, 电容  $C$  上还来不及累积电荷, 因此,  $v_c = 0$ , 输入电压  $E$  全部降落到电阻  $R$  上, 输出  $v_o$  发生了幅度为  $E$  的正跳变。接着 ( $t > 0$ ), 电容上电压按指数规律上升, 输出电压则按指数规律相应地下降, 当  $t = (3 \sim 5)\tau$  时, 电容上的电压接近稳态值  $E$ , 而输出电压  $v_o$  相应地下降为 0,  $RC$  的值愈小, 上述过程进行得愈快, 输出的正脉冲亦愈窄。

$t = t_p$  时, 输入电压由  $E$  向下跳变到 0, 即  $v_i = 0$ 。这相当于 RC 电路突然被短路, 电容开始放电, 但在  $t = t_p^+$  的瞬间, 电容来不及放电, 它上面的电压仍保持为  $E$ , 电容器上带正电荷的那一端接地, 所以输出电压  $v_o$  跃变到  $-E$ 。接着 ( $t > t_p$ ), 电容  $C$  的放电电流随时间按指数规律减小,  $R$  两端电压也按指数规律减小, 放电电流的方向与充电时相反, 输出端得到的是一个负的尖脉冲。可见, 当一个方波输入到微分电路时, 在输出端得到的是一对正负相间的尖脉冲, 如图 1-8 所示。

这个电路为什么叫微分电路呢? 因为它的输出电压近似与输入电压的微分成正比, 即输出突出了输入的变化部分, 而衰减以至取消了输入的平坦部分, 犹如数学中的微分。

从频域的角度来看, 由于  $RC$  数值很小, 只有对输入信号中的高频部分, 电路才满足



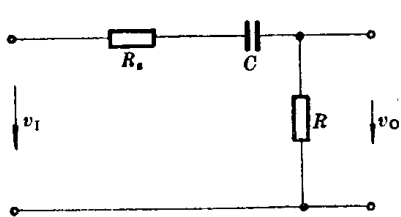


图 1-9 考虑信号源内阻的微分电路

$X_C = \frac{1}{\omega C} < R$  的关系, 使高频部分能够通过电容送到输出端; 信号的低频成分, 因容抗很大, 不能完全输出而被削弱。可见, 微分电路有保留输入信号变化部分而削弱不变化部分的作用。基于这个原因, 输入电压中如果包含直流分量, 并不会影响输出波形。

在上面的分析中, 我们讨论的是理想化的情况, 首先没有考虑信号源内阻  $R_s$  的影响, 实际上这个内阻总是存在的。图 1-9 所示为考虑信号源内阻后的微分电路。

由图 1-9 可见, 在  $t=0$  及  $t=t_p$  输入信号发生跳变的瞬间, 输出电压的跳变值, 将减少为

$$V_o = E \frac{R}{R + R_s}$$

而时间常数将增大为  $(R + R_s)C$ 。为了使  $R_s$  对输出幅度及脉冲宽度不产生显著的影响, 应该选取  $R$  值, 使之满足  $R > R_s$  (一般  $R = 10 R_s$ ), 再根据  $RC \leq \frac{t_p}{10}$  来确定微分电容  $C$  的大小。

另外, 实际上输入到微分电路的信号, 不可能是理想的矩形波, 而是有一定上升时间的非理想波形, 假定输入波形的前沿按指数规律变化, 即

$$v_i(t) = E(1 - e^{-t/\tau_1})$$

式中  $\tau_1$  是反映输入信号  $v_i$  按指数上升的时间常数。那么, 考虑到

$$v_o = iR = RC \frac{dv_c}{dt} = RC \frac{d(v_i - v_o)}{dt}$$

可得

$$RC \frac{dv_o(t)}{dt} + v_o(t) = RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

求解此方程后, 可得输出电压

$$v_o(t) = E \frac{RC}{RC - \tau_1} [e^{-t/(RC)} - e^{-t/\tau_1}]$$

对应于不同的  $RC$  取值, 输出电压的波形如图 1-10 所示。由图可见, 输出脉冲的上升沿和下降沿大致按指数规律变化, 且输出幅度小于输入幅度,  $RC$  取值愈小, 输出幅度愈小。在  $t=0$  附近, 输入电压上升较快, 电容来不及充电, 输出电压基本上能够跟随输入变化。但因为  $RC$  取值较小, 电容能迅速充电, 一旦当输入电压上升变慢,  $v_c(t)$  能跟随输入电压的变化而变化时, 即当出现输入电压的增长部分完全加到电容  $C$  两端的某一时刻, 输出电压便不再增长。此后, 输入电压上升愈来愈缓慢, 输出便开始下降了。  $RC$  值愈小, 此一时刻出现得愈早, 输出幅度亦愈小。

根据以上分析, 电路的时间常数愈小, 输出脉冲的宽度愈窄, 且其幅值愈小, 我们应当根据对脉冲宽度及幅度的要求,

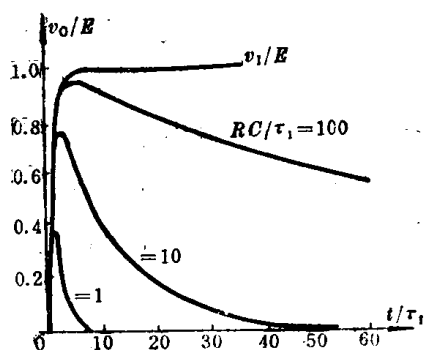


图 1-10 输入电压按指数规律上升时的输出波形