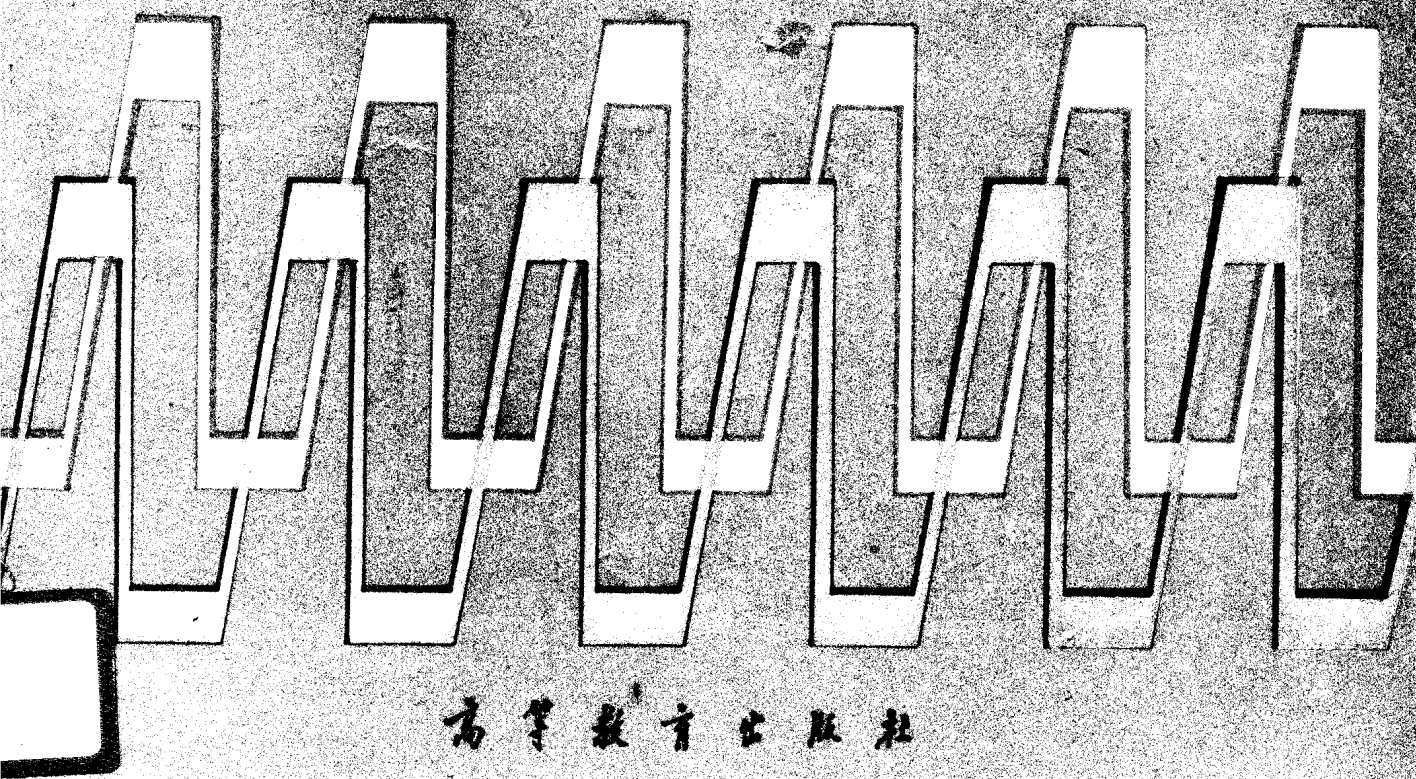


中等专业学校教材

脉冲与数字电路

(第二版)

陈传虞 主编



高等教育出版社

内 容 简 介

本书是根据1989年国家教育委员会制定的中等专业学校电子类专业通用的《脉冲与数字电路教学大纲》对1986年出版的《脉冲与数字电路》的修订。由常州无线电工业学校唐文源老师主审,中等专业学校电子线路课程组同意作为教材出版。

全书共十二章。主要内容有: RC 电路、晶体管的开关特性、脉冲波形产生及变换电路、锯齿波发生器、集成运算放大器在脉冲电路中之应用、逻辑门电路、逻辑代数及函数之化简、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、集成门在脉冲电路中之应用、数/模转换与模/数转换。每章末均有小结及适量习题。书末并附有两个附录及主要名词术语汉英对照,供读者参考。

本书也可作为中等专业学校其它类专业“脉冲与数字电路”教材使用,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

责任编辑 姚玉洁

中等专业学校教材
脉冲与数字电路
(第二版)
陈传虞 主编

高等教育出版社出版
新华书店上海发行所发行,
商务印书馆上海印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 22.5 字数 510,000

1986年4月第1版

1991年4月第2版 1991年4月第1次印刷

印数 00,001—25,310

ISBN 7-04-002618-X/TN·149

定价 5.75元

再版前言

本书是对1986年第一版的《脉冲与数字电路》一书的修订。由于科学技术的发展和教师认识的更新,普遍要求对教学内容做相应的变动。修订时,基本按照1989年国家教育委员会委托中等专业学校电子线路课程组制定的中等专业学校《脉冲与数字电路教学大纲(工科电子类专业通用)》,并吸收了各校师生对第一版的修改意见和建议。

与前一版相比,修订版有如下的一些变化:

第一,对脉冲电路部分做了较大的压缩,将原书第四、五、六等三章合并为一章,着重讨论几种脉冲波形产生电路、变换电路的工作原理、工作条件、脉冲参数的工程估算;而对在以分立元件所构成的电路中颇具重要性的触发方式、触发灵敏度、脉冲波形的详细讨论均予以简化或略而不提。一方面,这些内容在教学上要花费较多的力气,而学生的受益不多;另一面,用集成电路与非门作为有源器件来产生脉冲,使得对波形进行整形容易得多,在分立元件脉冲电路中所出现的问题,这里可能根本不会存在,因而也就没有必要花费时间去讨论那些繁琐的细枝末节。对作为脉冲电路主体的这一部分既然做了较大的压缩,与之相关联的其它部分,自然也相应地予以减少,而适当加强了集成的脉冲电路,补充了集成单稳态电路和集成定时器555电路等有关内容。修订版中脉冲电路部分仅占全书的1/4左右。

第二,在逻辑门电路一章,首先概要地介绍了各种逻辑门的类型、基本单元电路、逻辑功能以及衡量它们的性能指标。在讨论TTL与非门、ECL门及CMOS门时,重点突出它们的外特性,从外特性引申出各种参数,而大大压缩了内部电路工作状态的叙述。有关电路元件参数、特性曲线均依《中国集成电路大全》所给出的典型数据和曲线,使之更符合工程实际。并且给出若干常用器件品种型号表,以便于学生查找、掌握和使用。联系实际、突出应用是本章改编时力图达到的一个目的。这种想法在整个数字电路部分的修订中也是贯彻始终的。

第三,对大规模集成电路若干典型产品的介绍适当有所加强。这是因为这些电路具有功能强、使用方便、可扩充性强等优点,是学生今后实际工作中经常使用的电路;而且结合这些电路的逻辑分析和设计,有助于学生加深对数字电路中基本理论和方法的理解。基于这种认识,在组合逻辑电路和时序逻辑电路中,大规模集成电路均占了较大的篇幅,对其逻辑功能的分析、功能扩充、一种芯片的多种应用、各引出脚的正确使用,都尽可能予以详细介绍,以帮助学生熟悉并学会使用它们。

但是,应当指出,作为专业基础课的一本教材,主要内容仍然应放在基本理论、基本概念和基本方法上。象逻辑代数、卡诺图、小规模集成电路(门电路、集成触发器)这样一些分析和设计数字系统的基础内容仍然用了较大的篇幅来介绍。任何一个复杂的系统,不管采用怎样的中、大规模集成电路,总还需要使用小规模集成电路来补遗拾缺,或者说在中、大规模集成电路的结合部,在其逻辑功能的相互配合上,总是少不了小规模集成电路的。因此,有关这部分内容,仍

应作为基础而给予应有的重视。

第四,针对中等专业学校注重工程实践的特点,适当地减少了理论,而突出了实用。例如,同步时序电路的分析和设计,均以同步计数器的分析和设计为例进行介绍,既简单又具体;在集成门应用于脉冲电路部分,压缩了波形分析,增加了工程实用电路;在 D/A, A/D 转换部分,压缩了原理方法的分析,增加了若干 A/D, D/A 转换芯片的实用电路;凡此种种,都强调和突出了课程的实用性和工程性,也是它有别于大学教材的显著特点。

以上这些想法就是编者在修订时所试图遵循的一些原则。

书中打*号内容可跳过不讲,仍不会破坏教学的连贯性。在讲授二极管、三极管开关特性后先讲授数字电路部分也是可行的。

本书书稿全部由王冰清同志整理、抄写和绘制插图。王冰清同志并参与编写了“逻辑门电路”一章。

全书由常州无线电工业学校唐文源高级讲师审稿,他对书稿提出许多宝贵意见;姚玉洁副编审也给予编者许多帮助,对此编者表示衷心感谢。限于编者的水平,对材料的处理、内容的取舍、原理的阐述上均可能存在错误或不当之处,恳请使用本教材的师生和工程技术人员,能提出批评和指正意见,并请迳寄南京无线电工业学校,编者将十分感谢。

陈传虞

1989.8.

第一版前言

“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分析方法，而不对问题做过细过繁的讨论，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，米勒积分电路。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。书中对它们做了比较仔细的讨论。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.

• 3 •

常用符号表

i, v ——电流、电压的瞬时值
 i_b, v_b ——基极电流、电压交流瞬时值
 i_B, v_B ——基极电流、电压包括直流分量的瞬时值
 I_b, V_b ——基极电流、电压有效值或平均值
 I_B, V_B ——基极直流电流、电压
 v_i ——输入信号
 v_o ——输出信号
 V_m ——脉冲幅度
 V_{BE} ——发射极(直流)电源电压
 V_{BB} ——基极(直流)电源电压
 V_{CC} ——集电极(直流)电源电压
 V_{SS} ——源极(直流)电源电压
 V_{DD} ——漏极(直流)电源电压
 V_{GG} ——栅极(直流)电源电压
 R_c ——外接集电极电阻
 R_b ——外接基极电阻
 R_e ——外接发射极电阻
 R_L ——负载电阻
 C_L ——负载电容
 C_0 ——分布电容
 $V_{(BR)}$ ——击穿电压
 $V_{(BR)CEO}$ ——基极开路, 集电极-发射极反向击穿电压
 $V_{(BR)EBO}$ ——集电极开路, 发射极-基极反向击穿电压
 V_{ON} ——开门电平
 V_{OFF} ——关门电平
 V_{OH} ——输出高电平
 V_{OL} ——输出低电平
 V_{IL} ——输入低电平
 V_{IH} ——输入高电平
 V_{NL} ——低电平噪声容限
 V_{NH} ——高电平噪声容限
 V_{th} ——二极管正向导通的阈值电压或指门电路的门限电平
 V_{thE} ——三极管发射结正向导通的阈值电压

V_{T+} ——正向触发电压
 V_{T-} ——负向触发电压
 ΔV_T ——滞后电压或回差
 V_r ——钳位偏压或上、下限幅电平
 $V_{BE(sat)}$ ——三极管发射结饱和压降
 $V_{CE(sat)}$ ——三极管集电极-发射极间饱和压降
 V_Z ——稳压管的稳定电压
 I_B ——基极(直流)电流
 I_C ——集电极(直流)电流
 I_E ——发射极(直流)电流
 I_{OB2} ——发射极开路, 集电极-基极反向截止电流
 I_{CEO} ——基极开路, 集电极-发射极反向截止电流
 I_{OM} ——集电极最大允许电流
 I_{IS} ——输入短路电流
 I_{IH} ——输入漏电流
 I_{BS} ——基极饱和电流
 I_{CS} ——集电极饱和电流
 t ——时间
 t_r ——前沿时间或上升时间
 t_f ——后沿时间或下降时间
 t_s ——存储时间
 t_d ——延迟时间
 t_{rr} ——反向恢复时间
 t_{on} ——开启时间
 t_{off} ——关闭时间
 T ——周期
 t_w ——脉宽
 t_{wa} ——平均(有效)脉宽
 T_p ——扫描正程
 T_o ——扫描休止期
 t_{PLH} ——输出由低电平到高电平传输延迟时间
 t_{PHL} ——输出由高电平到低电平传输延迟时间
 t_{pd} ——平均延迟时间
 τ ——时间常数
 τ_c ——充电时间常数
 τ_d ——放电时间常数

N ——过饱和系数

N_o ——门的扇出系数

n ——变比

δ ——锯齿波电压的非线性系数

η ——电源电压利用系数

L_M ——励磁电感

L_s ——漏感

R_{ON} ——开门电阻

R_{OFF} ——关门电阻

r_D ——二极管正向导通的等效电阻

r_o ——二极管反向截止的等效电阻

Q_n ——触发器的现态

Q_{n+1}, Q_{0+1} ——触发器的次态

目 录

绪论	1
第一章 <i>RC</i> 电路	3
1-1 概述	3
1-2 <i>RC</i> 电路中的过渡过程	5
1-3 <i>RC</i> 电路的应用	9
1-4 <i>RL</i> 电路	14
本章小结	16
习题	16
第二章 晶体管的开关特性及其应用	20
2-1 二极管的开关特性	20
2-2 二极管限幅器	22
2-3 二极管钳位器	28
2-4 二极管的动态开关特性	30
2-5 三极管的静态开关特性	33
2-6 三极管的动态开关特性	35
2-7 三极管反相器的开关特性	38
2-8 三极管限幅器	43
2-9 三极管钳位器	45
本章小结	47
习题	43
第三章 脉冲波形产生及变换电路	51
3-1 集-基耦合双稳态电路	51
3-2 射极耦合双稳态触发电路	55
3-3 集-基耦合单稳态触发电路	58
3-4 射极耦合单稳态触发电路	62
3-5 自激多谐振荡器	65
3-6 间歇振荡器	66
本章小结	70
习题	70
第四章 锯齿波发生器	73
4-1 概述	73
4-2 简单的锯齿波电压发生器	74
4-3 恒流源锯齿波电压发生器	76
4-4 自举电路	78
4-5 密勒积分电路	82

4-6 锯齿波电流发生器	86
4-7 同步与分频	90
本章小结	93
习题	94
第五章 集成运算放大器在脉冲电路中 之应用	95
5-1 运算放大器	95
5-2 二极管-运算放大器限幅器	97
5-3 脉冲波形产生及变换电路	98
5-4 比较器	101
本章小结	105
习题	105
第六章 逻辑门电路	106
6-1 概述	106
6-2 数字集成电路的发展与分类	112
6-3 <i>TTL</i> 与非门	117
6-4 <i>TTL</i> 与非门的外特性	121
6-5 <i>TTL</i> 与非门的主要参数及其测试	126
6-6 <i>TTL</i> 门电路的其它类型	128
6-7 高速逻辑门电路	134
6-8 <i>MOS</i> 逻辑门电路	140
6-9 <i>CMOS</i> 逻辑门电路	147
本章小结	152
习题	153
第七章 逻辑代数及函数之化简	155
7-1 数制与 <i>BCD</i> 编码	155
7-2 逻辑代数	159
7-3 逻辑函数的公式化简	169
7-4 逻辑函数的卡诺图化简	173
7-5 具有约束的逻辑函数之化简	179
7-6 逻辑电路中的冒险现象	182
本章小结	184
习题	185
第八章 组合逻辑电路	187

8-1 组合逻辑电路的分析	187	10-8 半导体存储器	280
8-2 组合逻辑电路的设计	191	本章小结	286
8-3 编码器	195	习题	286
8-4 译码器	198	第十一章 集成门在脉冲电路中之应用	289
8-5 数值比较器	207	11-1 多谐振荡器	289
8-6 数据选择器及分配器	209	11-2 环形振荡器	291
8-7 基本运算电路	214	11-3 单稳态触发电路	294
8-8* 奇偶校验电路	216	11-4 施密特触发电路	299
本章小结	220	11-5 CC7555 定时器电路	302
习题	220	本章小结	306
第九章 集成触发器	222	习题	307
9-1 RS 触发器	222	第十二章 数/模转换与模/数转换	308
9-2 时钟同步的触发器	225	12-1 概述	308
9-3 主从触发器	229	12-2 数/模转换器(DAC)	311
9-4 边沿触发器	236	12-3 数/模转换器中的电子开关	317
9-5 CMOS 触发器	239	12-4 集成数/模转换器及其应用	318
本章小结	241	12-5 模/数转换器(ADC)	320
习题	242	12-6 集成模/数转换电路及其应用	326
第十章 时序逻辑电路	246	本章小结	331
10-1 概述	246	习题	332
10-2 寄存器和移位寄存器	247	附录一 逻辑门使用中的若干实际问题	333
10-3 同步计数器的分析与设计方法	252	附录二 逻辑门新旧符号对照表	340
10-4 同步计数器	260	参考书目	343
10-5 移位寄存器型计数器	269	主要名词术语汉英对照	344
10-6 异步计数器	273		
10-7 计数器之应用	277		

绪 论

在正式讨论脉冲与数字电路之前,有必要弄清楚:(1)什么是数字信号,它与模拟信号有什么区别;(2)脉冲电路与数字电路的区别与联系。

一、数字信号与模拟信号

现代电子线路所处理的信号大致可分为两大类,一类为模拟信号,一类为数字信号。处理前一类信号的电路称为模拟电子线路,处理后一类信号的电路称为数字电路。

所谓模拟信号是指时间上和数值上都是连续的信号。模拟电信号一般是指模拟真实世界物理量的电压或电流,如模拟话音、温度、压力等一类物理量的信号便是。处理这类信号时,考虑的是放大倍数、频率失真、非线性失真、相位失真等,着重分析波形的形状、幅度和频率如何变化。

所谓数字信号是指时间上和数值上都是离散的信号,亦即在时间上是不连续的,总是发生在一系列离散的瞬间,在数值上则是量化了的,只能按有限多个增量或阶梯取值。信号所表现的形式是一系列由高、低电平组成的脉冲波,即信号总在高电平和低电平之间来回变化,在这里,重要的是要能正确区分出信号的高、低电平,并正确反映电路的输出、输入之间关系,至于高、低电平值精确为多少值则无关紧要。

由此看来,模拟信号同数字信号是性质不同的两种信号,对于处理这两种信号的电子线路,分析问题的着眼点也是不同的。

二、脉冲电路与数字电路

脉冲技术是随着雷达、导航、电视、核物理的发展而蓬勃发展起来的一门技术。在脉冲电路中处理的是脉冲信号,脉冲信号是一些不连续的电压或电流,最常见的脉冲信号是矩形波,对它的分析侧重的是输入、输出波形的形状、幅度及重复频率等,因而它属于模拟信号的范畴。

不过,在脉冲电路里作为有源器件的晶体管、场效应管(甚至还可以推广到门电路)通常处于开关状态,或者截止,或者饱和,放大状态仅是从截止向饱和(或反之)转换时的一种过渡状态。分析这类电路时,必须考虑电路的过渡过程,从这种意义上来讲,它和模拟电子线路又有所不同。通过学习,我们将逐渐体会到分析脉冲电路的方法和着眼点同分析模拟电子线路的确不尽相同。

在数字电路中,它的输出、输入电压一般只有两种取值状态:高电平和低电平,晶体管或门电路也处于开关状态,这两种状态分别用**1**和**0**表示。就信号的形状来说,数字信号大体说来也是一些矩形脉冲序列(或者说**0、1**序列),因而属于一种脉冲信号。不过,对这类电路的分

析,着眼点和脉冲电路又有所不同,侧重的是电路的输入与输出的 **0、1** 序列间的逻辑关系,通常这些逻辑关系代表电路所具有的逻辑功能,通过这一逻辑功能来进行数字运算或逻辑推理。只要求电路的电压波形能正确区分 **0、1** 电平,并正确反映电路的逻辑功能,而脉冲波形的细节,高电平或低电平的准确值并不太重要。这就是说,对于数字电路,侧重的是分析它的逻辑功能,所用的数学工具是逻辑代数。在分析数字电路时所用的真值表、卡诺图、逻辑函数表达式、特性方程、状态转换图等这样一些工具和方法,在模拟电子电路的分析中是不用的。

当然对数字电路的分析除去逻辑功能外,还要考虑电性能方面的问题。例如,在逻辑门、集成触发器的分析中也考虑电路的组成、元件参数、工作状态等对其所完成的逻辑功能的影响。

由此可见,在数字电路中分析的重点是电路的逻辑功能(正因为如此,也有称数字电路为逻辑电路的),所用的方法是一种研究离散量的全新方法,它同模拟电子线路,也同脉冲电路,属于完全不同的两个范畴。

由于科学技术的发展,模拟集成电路和数字集成电路的相互渗透,愈来愈多地采用数字门电路构成脉冲电路,并且出现了各种集成的脉冲电路以及包含数字及模拟线路的集成芯片等,这一切都说明脉冲电路和数字电路的联系日益密切,因而将两者合并在一起来讲授,不能说毫无道理。

脉冲与数字电路是一门实践性很强的专业基础课,除要掌握基本原理、基本方法外,还应十分重视实验课。通过实验培养学生具有很强动手能力和灵活解决实际问题的能力,这一点对于中等专业学校来说尤其重要。

第一章 RC 电 路

内容提要

本章具有复习性质。一方面,复习一下怎样用三要素法分析一阶线性电路的过渡过程;另一方面,也为分析各种脉冲电路打下必要的基础。在此以后,介绍脉冲电路中常用的几种 RC 电路:微分电路、积分电路、耦合电路和 RC 脉冲分压电路。

1-1 概 述

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,这个时间间隔和电路的过渡过程持续时间可以相比拟。更广义的情况下,凡不连续的非正弦电压或电流都泛称为脉冲信号。

脉冲信号有多种多样,图 1-1 画出了常见的几种,它可以是偶尔出现的单脉冲,也可以是周期性出现的重复脉冲序列。

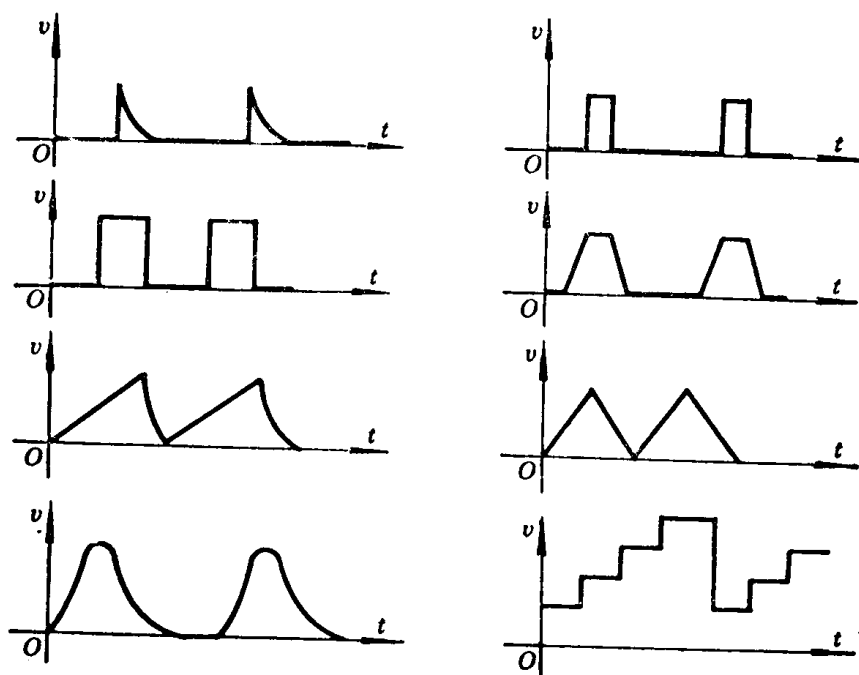


图 1-1 各种常见的脉冲波形

脉冲信号中最典型的是矩形脉冲,如图 1-2(a)所示,在 t_1 时由 0 跳变为 $+V_1$,并维持到 t_2 ,在 t_2 时刻又由 $+V_1$ 跳变为 0。这种理想化的矩形脉冲实际并不存在,但是用它作为激励信号来研究一个电路的响应,可以清楚地反映电路在脉冲作用下的一些属性。这正如在研究稳态下电路工作情况时用正弦信号作为激励信号是一样的道理。

一个矩形脉冲如进一步分解,又可以分为两个在不同时刻作用的正、负阶跃信号,如图

1-2(b)所示。这样做在分析和计算时,十分方便,又能恰如其分地反映电路在脉冲信号作用下所表现出来的一些特性。因此,在本章中以及在脉冲电路中常常用阶跃信号或理想的矩形脉冲作为电路的激励(输入)信号。

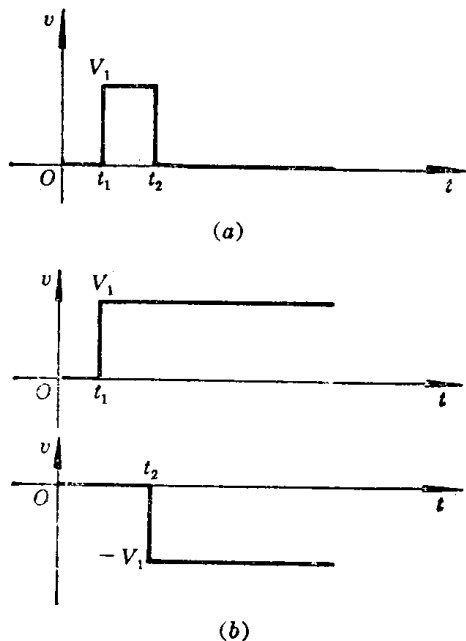


图 1-2 矩形脉冲分解为正、负阶跃信号

实际的矩形脉冲并无理想的跳变,顶部也不平坦。实际的矩形脉冲如图 1-3 所示。为便于今后的研究,现定义一下它的参数。

- 脉冲幅度 V_m ——指脉冲的最大幅值;
- 前沿或上升时间 t_r ——通常指由 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 的时间, t_r 愈短,脉冲上升得愈快,愈接近于阶跃信号;
- 后沿或下降时间 t_f ——从 $0.9V_m$ 下降到 $0.1V_m$ 的时间;
- 脉冲宽度 t_w ——指前、后沿 $0.1V_m$ 两点间的时间间隔,有时也用前、后沿 $0.5V_m$ 两点间的时间间隔来代表脉冲宽度,并称之为有效脉冲宽度或半值宽度 t_{wa} ;

- 重复周期 T ——对于周期性重复的脉冲,重复周期是指相邻脉冲上相应点(如脉冲前沿中点)之间的时间间隔,其倒数为每秒脉冲数或称为脉冲的重复频率;
- 脉宽比 t_w/T ——指脉冲宽度与周期之比,其倒数称为空度比或占空系数;
- 平顶降落 ΔV_m ——指脉冲平顶期间幅度的下跌;
- 在脉冲的前沿及后沿可能出现振荡或过冲,在图 1-3 用虚线表示之。

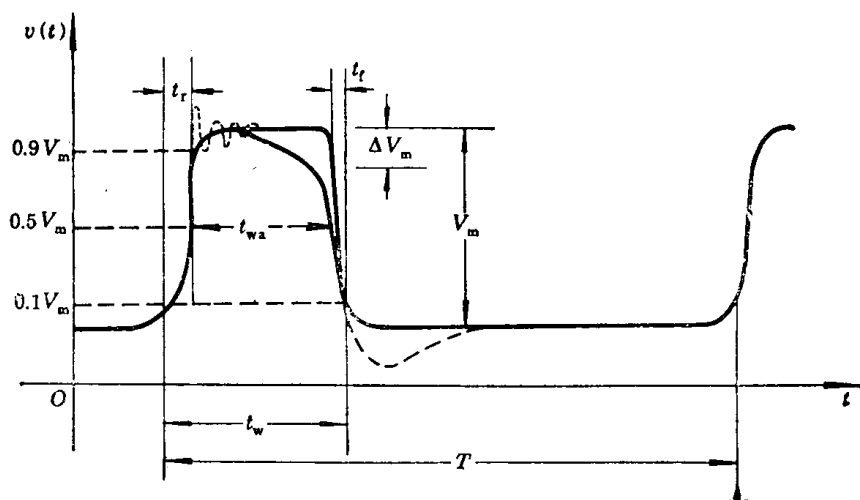


图 1-3 实际脉冲的参数

脉冲的这些参数十分重要,根据它们可以判知脉冲作用于电路时对电路的要求。例如,脉冲的前、后沿愈短,其频谱愈宽。脉冲的上升时间 t_r 与其 3 dB 带宽 B 之积,近似满足以下关系:

$$t_r B = 0.35 \sim 0.45 \quad (1-1)$$

式中, 对于上冲较小 ($\delta < 5\%$) 的脉冲, 乘积取 0.35; 对于上冲较大的脉冲, 乘积取 0.45。

这样, 当脉冲通过电路放大或传输时, 要使波形不失真, 必须根据式(1-1)合理选择电路的通频带宽度 B , 以便使脉冲的主要频谱成分都能通过电路。

同样, 当一个理想的阶跃电压或矩形脉冲通过有限带宽 B 的放大电路时, 根据式(1-1)可以判断经过该电路放大后, 输出脉冲将附加一定的前沿 t_r 。例如, 用最高频率为 30 MHz (即示波器的 3 dB 带宽为 30 MHz) 的脉冲示波器来观察一个理想的矩形脉冲, 看到的将是上升时间为

$$t_r = [0.35 / (30 \times 10^6)] \text{s} \approx 12 \text{ ns}$$

的脉冲。显然, 在选用示波器时, 必须使示波器的通频带足够宽, 以使示波器所附加的前、后沿时间要远远小于被观察波形的上升时间才成。

考察图 1-3 可知, 一个脉冲信号具有这样一些特点: 跳变性和间断性。为了获得这样的脉冲信号, 脉冲电路一定包含两部分: 作为非线性开关元件的晶体管、场效应管以及包含线性储能元件的定时元件。开关用来接通或断开电路, 破坏电路原来的稳态, 使之产生过渡过程; 定时元件用来控制过渡过程的状态和快慢, 起定时和改变波形的作用。

本章先讨论作为定时元件的 RC 、 RL 电路, 分析它们在阶跃信号或理想矩形脉冲下的响应。在第二章讨论作为开关元件的晶体二极管和三极管, 以便为分析各种脉冲电路做准备。

1-2 RC 电路中的过渡过程

一、 RC 电路中的过渡过程

考虑图 1-4 所示电路, 设 $t=0$ 前, 开关 S 未与 1 点闭合, 输入电压为 0, 电容器上没有电荷积累。 $t=0$ 时刻开关 S 与 1 点闭合, 输入电压由 0 跳变到 V_1 , 相当于一个阶跃信号作用于 RC 电路, 根据电路基础可知, 在上述阶跃电压作用下, 电路某一部分所引起的响应 $x(t)$ 为

$$x(t) = x(\infty) + [x(0^+) - x(\infty)]e^{-t/\tau} \quad (1-2)$$

式中, $x(0^+)$ 代表阶跃信号作用的瞬时 $x(t)$ 的值, 由电路的初始条件决定; $x(\infty)$ 代表阶跃信号作用后 $x(t)$ 的稳态值。式(1-2)是一个很有用的公式, 只要知道初始值 $x(0^+)$ 、稳态值 $x(\infty)$ 及时间常数 τ , 就可以直接写出在阶跃信号作用下的响应 $x(t)$ 。以图 1-4 所示电路为例, 应用式(1-2)可以求出阶跃信号作用后电容器电压 $v_C(t)$ 及流过电容器的电流 $i(t)$, 两者都是响应函数 $x(t)$ 。

当 $t=0^-$ 时, 有

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

在阶跃信号作用的那一瞬间, 由于电容上电压不能突变, 有

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

而

$$i(0^+) = V_1/R$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 电路已建立新的稳态, 即电容器已充电完毕, 则有

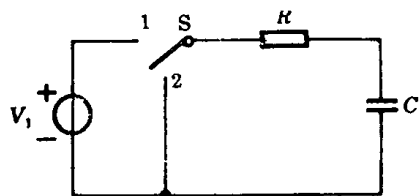


图 1-4 阶跃信号作用于 RC 电路

$$v_C(\infty) = V_1$$

$$\dot{i}(\infty) = 0$$

由式(1-2), 得

$$v_C(t) = V_1(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-3)$$

$$\dot{i}(t) = \frac{V_1}{R} e^{-t/\tau} \quad (1-4)$$

其变化规律如图 1-5 所示。这些式子表明, 在阶跃信号作用下, RC 电路的过渡过程是按指数规律变化的。

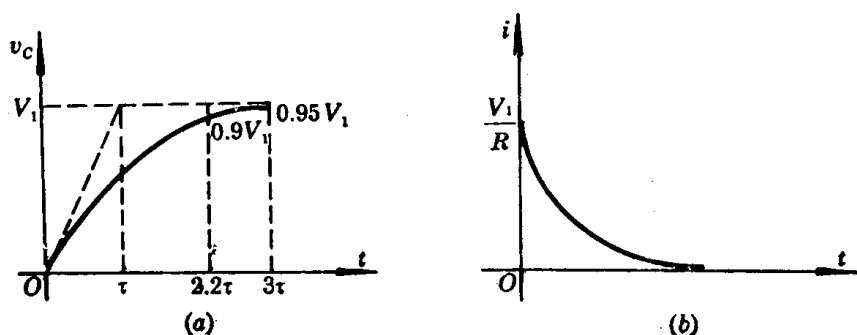


图 1-5 RC 电路中电容充电情况

$t=0$ 时, 电容上电压的上升速率为

$$\left. \frac{dv_C}{dt} \right|_{t=0} = \frac{V_1}{\tau}$$

如电容按此上升速率恒定充电, 则经过时间 τ 后, 即可达到其稳定值 V_1 。

根据脉冲波形的定义, 脉冲前沿 t_r 是指从 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 所花的时间, 则按式(1-3)可得

$$t_r = t_{0.9V_1} - t_{0.1V_1} = 2.2\tau - 0.1\tau = 2.1\tau \quad (1-5)$$

式(1-5)表明在阶跃信号作用下, 响应函数 $v_C(t)$ 即电容 C 上电压的上升时间为 $t_r = 2.1\tau$, 通常均以 $t_{0.9V_1} = 2.2\tau$ 作为粗略估算矩形波的上升沿。

从理论上讲, 过渡过程要进行无限长的时间才会结束, 但由式(1-3)知, 当 $t=3\tau$ 时, $v_C(3\tau) = 0.95V_1$, 而当 $t=5\tau$ 时, $v_C(5\tau) = 0.99V_1$, 即电容经过 5τ 时间后, 已达到其稳态值的 99%, 通常取 $(3\sim 5)\tau$ 作为电路的过渡过程所花的时间, 或者说, 经过 $(3\sim 5)\tau$ 时间后, 过渡过程就算结束了。

二、用式(1-2)求响应函数的一些例子

下面举几个例子, 说明如何用式(1-2)求响应函数。

例 1-1

在图 1-4 所示电路中, 如假设电容 C 已充好电, 其端电压 $v_C(0^-) = V_1$, 在 $t=0$ 时, 开关 S 由点 1 置于点 2, 此时电容将放电, 求响应函数 $v_C(t)$ 及 $\dot{i}(t)$ 。

解

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

当 $t=0^-$ 时, 有

$$v_C(0^-) = V_1, \quad i(0^-) = 0$$

当 $t=0^+$ 时, 有

$$v_C(0^+) = v_C(0^-) = V_1$$

在 RC 支路中, 电容的端电压是不能突变的, 因而求得

$$i(0^+) = -v_C(0^+)/R = -V_1/R$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有

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

由式(1-2), 可得

$$v_C(t) = V_1 e^{-t/(RC)}$$

$$i(t) = -(V_1/R) e^{-t/(RC)}$$

上述例子表明, RC 电路中电容的充电和放电规律都遵循式(1-2)。事实上, 从本质上说充电和放电是一致的, 在有电源的电路中, 常常把电容的放电看作是对它的反向充电。

例 1-2

在图 1-6 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。

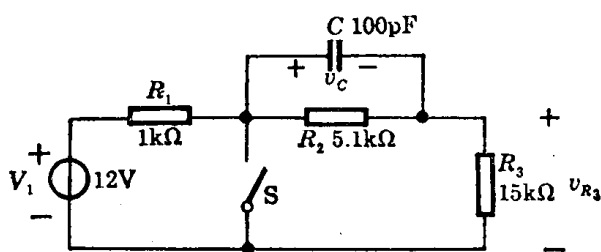


图 1-6 例 1-2 电路

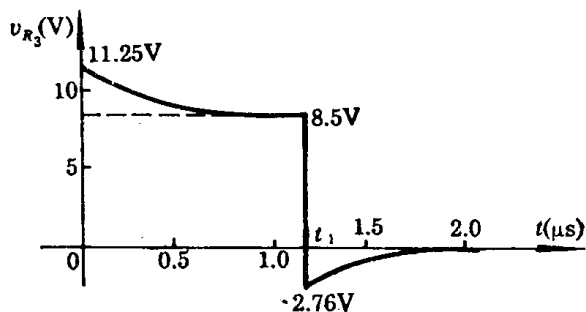


图 1-7 $v_{R_3}(t)$ 波形

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 $v_{R_3}(0^+) = 0$, 可以将 R_2 视为短路, 因而可得

$$v_{R_3}(0^+) = V_1 \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 12 \text{ V} \times \frac{15 \text{ k}\Omega}{(1+15) \text{ k}\Omega} = 11.25 \text{ V}$$

$t \rightarrow \infty$, 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

$$v_{R_3}(\infty) = V_1 \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 12 \text{ V} \times \frac{15 \text{ k}\Omega}{(1+5.1+15) \text{ k}\Omega} = 8.5 \text{ V}$$

求时间常数时, 可将恒压源 V_1 视为短路, 在 S 断开时, 时间常数为

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

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

$$v_C(t_1^-) = 0.95v_C(\infty) = 0.95V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \approx 2.76 \text{ V}$$

(2) $t = t_1 = 1.2 \mu\text{s}$ 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, 有

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

此时, 电路的时间常数

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

综上所述, v_{R_3} 的表达式可写为

当 $0 < t \leq 1.2 \mu\text{s}$ 时, 有

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

当 $t > 1.2 \mu\text{s}$ 时, 有

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

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

v_{R_3} 波形如图 1-7 所示。

例 1-3

幅度为 $V_1(10\text{V})$ 的阶跃电压作用于图 1-8 所示电路, 求 $v_{R_2}(t)$ 。

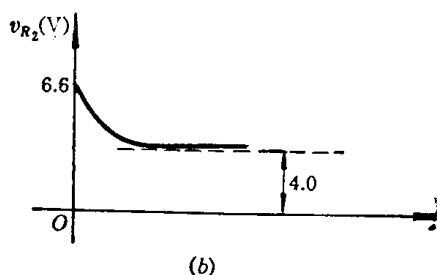
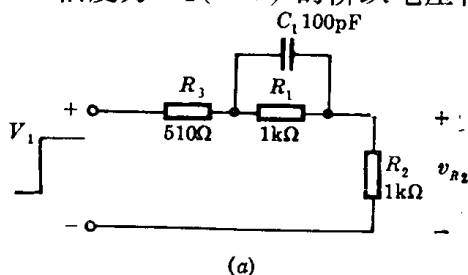


图 1-8 例 1-3 电路及波形

解

$t = 0^+$ 时, 电容 C_1 上无电压, 可视为短路。

$$v_{R_2}(0^+) = \frac{R_2}{R_3 + R_2} V_1 = \frac{1 \text{ k}\Omega}{(1 + 0.51) \text{ k}\Omega} \times 10 \text{ V} = 6.6 \text{ V}$$

$t \rightarrow \infty$, 电容已充好电, 无电流流过, 可视为开路。

$$v_{R_2}(\infty) = \frac{R_2}{R_3 + R_1 + R_2} V_1 = \frac{1 \text{ k}\Omega}{(1 + 1 + 0.51) \text{ k}\Omega} \times 10 \text{ V} = 4.0 \text{ V}$$

求时间常数时, 可将电源短路, 则

$$\tau = C_1 R = C_1 \times \frac{R_1(R_3 + R_2)}{R_3 + R_1 + R_2} = 100 \times 10^{-12} \text{ F} \times \frac{1 \text{ k}\Omega \times 1.51}{2.51 \text{ k}\Omega} \times 10^3 \Omega = 0.06 \mu\text{s}$$

代入式(1-2), 可得

$$v_{R_2}(t) = v_{R_2}(\infty) + [v_{R_2}(0^+) - v_{R_2}(\infty)] e^{-t/\tau} = 4.0 + 2.6 e^{-t/0.06} (\text{V})$$

式中 t, τ 以 μs 计, 其波形如图 1-8(b) 所示。

以上例子表明利用式(1-2)求解阶跃信号作用下电路某一部分的响应是非常方便的, 初始值 $x(0^+)$ 、稳态值 $x(\infty)$ 和时间常数 τ 是公式(1-2)的三个要素, 故这种方法称为三要素法。在