



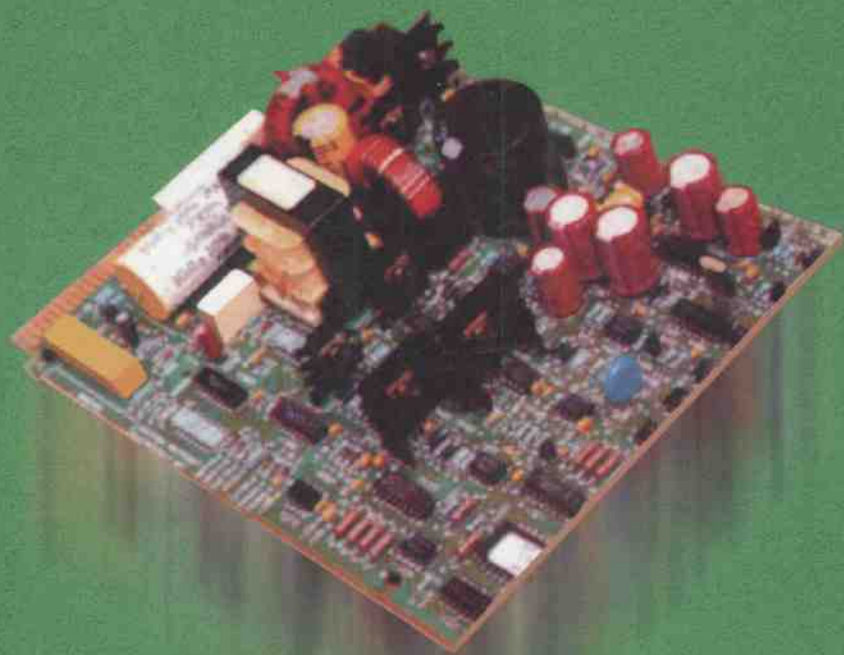
教育部中等专业学校规划教材

电子通信类专业通用

脉冲与数字电路

(第三版)

陈传虞 编



高等教育出版社

教育部中等专业学校规划教材

电子通信类专业通用

脉冲与数字电路

(第三版)

陈传虞 编

高等教育出版社

内容提要

本书是根据教育部 1997 年委托电子线路与电子技术课程组拟修订的《脉冲与数字电路教学大纲》对 1991 年出版的《脉冲与数字电路》(第二版)进行修订的。经课程组成员唐文源高级讲师主审,同意作为教材出版。

第三版在保持基本理论、基本概念和基本方法的基础上,适应中等专业学校教学改革要求,精简了某些陈旧内容,增加新器件、新技术等内容(如 PLD 等)。主要内容有:数字电路基础知识、数制与逻辑代数、逻辑门电路、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生和变换、数模转换和模数转换、大规模集成逻辑电路,全书共九章;章末有小结和适量习题;书末还有介绍国家标准二进制逻辑单元电气图用图形符号的附录。

本书可供中等专业学校电子类、通信类专业用作教材,也可供电视中专、成人中专及其他专业选作教材,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

脉冲与数字电路/陈传虞编. —3 版. —北京:高等教育出版社,1999(2005 年重印).
ISBN 7-04-007247-5

I. 脉… II. 陈… III. ①脉冲电路—基本知识②数字电路—基本知识 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 02779 号

脉冲与数字电路(第三版)

陈传虞 编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店上海发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 上海港东印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 21
字 数 500 000

版 次 1996 年 7 月第 1 版
1999 年 7 月第 3 版
印 次 2005 年 7 月第 9 次印刷
定 价 26.30 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究



陈传虞 1931年2月生，1952年毕业于清华大学电机系电讯组（今电子工程系），一直在南京无线电工业学校从事教学、科研工作。1988年因在1965-1968年期间成功研制扫频仪BT-3填补国内空白而荣获国家科技进步三等奖。1987年后被国家教委聘为全国中等专业学校电子线路课程组第一、二届成员，主持该组工作，为中等专业教育、电子线路课程的大纲审定、教材建设、师资培训、经验交流作了不懈努力。著有《脉冲与数字电路》（一、二、三版）、《脉冲与数字电路教学指导书》，主编了《脉冲与数字电路习题集》，主审《基础电子学》、《单片机原理》、《电子线路课程设计指导书》等书稿。

退休后仍关注中等专业学校的教学改革。目前在深圳市照明技术研究开发中心工作，为电子节能灯的开发和生产继续发挥余热。

第三版前言

从《脉冲与数字电路》(第二版)于1991年出版以来,迄今已逾7年,无论是科学技术的发展,还是教学改革的需要,都要求对原有的教材作较大的修订。从1996年开始,编者即着手对教材的修订作了一些准备工作,征询了各个部委对该课程教学内容改革要求和时间分配,并且吸纳了在原国家教育委员会中等专业学校电子线路课程组多次活动中各校教师对该课程的一些教改意见。

与前一版相比,这次修订主要有以下一些变化:

1. 对分立元件脉冲电路作了大幅度的压缩,只设了脉冲波形的产生与变换一章,着重讨论电路的工作原理与基本参数的估算,分立元件电路只占了其中很小的比重。

2. 对门电路着重讨论TTL与非门及CMOS门,重点讨论它们的外特性和工作参数以及实际使用器件必须掌握的基本知识。在介绍TTL门电路时,突出低功耗肖特基系列,删去了ECL门电路内容,对CMOS门电路予以足够的重视。

3. 对大规模电路集成电路作了更进一步的强化,着重在逻辑功能分析、功能扩充、一种芯片多种应用方面,特别补充了一些查阅手册的有关知识,加强通过手册正确使用器件方面的训练,这对于使学生在实际工作中能够理论联系实际、提高动手能力,无疑会有所帮助。

4. 每章附有一定数量的例题,有的是为了加深对课程内容的理解,有的则偏重实际应用,借以缩短理论与实际应用之间的距离。

5. 最后一章介绍了一些可编程器件的入门知识,如时间不够,可以不讲。

书中打*号部分可以跳过不讲,不会影响教学的连贯性。

1992年以后,我从教学岗位退休,但一直参与一些工厂企业的技术工作,把理论上的知识,付之于实践。在不同层次不同应用侧面加深了对“脉冲与数字电路”课程的认识与感受,深信这是一门对学生从事实际工作有着深远影响的重要课程,无论如何,也不能加以削弱。

本书由常州无线电工业学校唐文源高讲主审,他对书稿提出许多中肯的意见,在此表示感谢;高等教育出版社姚玉洁编审从本书第一版起,即给作者以许多关怀与帮助,多年来,在电子线路课程组的工作及教材的出版上都曾给予我热忱支持,在此,我谨向她致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,对教材内容的处理可能存在这样或那样的缺点和错误,恳请使用本书的师生和工程技术同行们指正,本人将不胜感激。

编 者

1998.2.

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的分析方法,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.

第二版前言

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,与之相关联的其他部分,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,对中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,中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。像逻辑代数、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.

目 录

第 1 章 数字电路基础知识	1	4.1 概述	101
1.1 概述	1	4.2 编码器	107
1.2 RC 电路	3	4.3 译码器	112
1.3 晶体二极管的开关特性	10	4.4 数据选择器及数据分配器	124
1.4 晶体二极管的开关应用	13	4.5 比较器	131
1.5 晶体三极管的开关特性及其等效电路	18	4.6 组合逻辑电路中的竞争冒险现象	133
1.6 三极管的开关应用——反相器	21	本章小结	136
本章小结	26	习题	136
习题	27	第 5 章 集成触发器	139
第 2 章 数制与逻辑代数	31	5.1 概述	139
2.1 数制和编码	31	5.2 基本 $R-S$ 触发器	139
2.2 逻辑代数的一些概念	35	5.3 时钟控制(同步) $R-S$ 触发器	146
2.3 逻辑函数的表示方法	38	5.4 D 触发器	150
2.4 逻辑代数的若干公式和运算法则	41	5.5 $J-K$ 触发器	157
2.5 逻辑函数的公式化简法	44	本章小结	165
2.6 用卡诺图法化简逻辑函数	47	习题	166
2.7 具有约束项的逻辑函数之化简	55	第 6 章 时序逻辑电路	172
本章小结	57	6.1 概述	172
习题	58	6.2 寄存器	176
第 3 章 逻辑门电路	60	6.3 异步计数器	184
3.1 概述	60	6.4 同步计数器	192
3.2 TTL 非门(反相器)及与非门	60	6.5 同步 N 进制计数器的设计	205
3.3 TTL 与非门的外特性	63	6.6 计数器的应用	209
3.4 TTL 门电路的常见类型	70	6.7 序列脉冲发生器	211
3.5 TTL 与非门的改进系列及其他双极型门电路	74	本章小结	214
3.6 CMOS 非门	78	习题	215
3.7 CMOS 反相器的电特性及其特点	80	第 7 章 脉冲波形的产生和变换	220
3.8 CMOS 门电路的常见类型	84	7.1 施密特触发器	220
3.9 CMOS 门电路的几种系列及使用常识	91	7.2 单稳态电路	226
3.10 逻辑门使用中的若干实际问题	93	7.3 多谐振荡器	234
本章小结	95	7.4 555 定时器及其应用	241
习题	96	7.5 锯齿电压发生器	248
第 4 章 组合逻辑电路	101	本章小结	254
		习题	254
		第 8 章 数模转换和模数转换	258
		8.1 概述	258

8.2 数模转换器(D/A 转换器)	258	本章小结	305
8.3 模数转换器(A/D 转换器)	267	习题	306
本章小结	280	附录 关于国标 GB 4728·12 - 85《电气图用	
习题	280	图形符号 二进制逻辑单元》的介绍	
第 9 章 大规模集成逻辑电路	282		308
9.1 半导体存储器	282	参考书目	324
9.2 专用集成电路	290		

第 1 章 数字电路基础知识

内 容 提 要

本章简要地介绍数字电路的基础知识,包括线性的 RC 电路及非线性的开关器件:半导体二极管及三极管,它们在开关信号作用下的响应以及在开关电路中的应用。这些知识将为掌握后续各章内容奠定必要的基础。

1.1 概 述

一、数字信号与模拟信号

电子线路所处理的信号就其变化特点而言,大致分为两大类,一类为模拟信号,一类为数字信号。工作在前一类信号下的电子线路称为模拟电子线路,工作在后一类信号下的电子线路称为数字电子线路。

所谓模拟信号是指时间上和数值上都是连续变化的信号,一般模拟电信号是指模拟真实物理量的电压或电流,如模拟话音、温度、压力一类的物理量的电信号便是。以热电偶为例,从热电偶测得的反映温度的信号在时间上和数值上都是连续变化的,它的任何一个取值都代表一定的温度,并具有一定的物理意义。

所谓数字信号是指在时间上和数值上的变化是离散的信号;换言之,它们在时间上的变化是不连续的,总是发生在一系列离散的瞬间;同时,它们的大小以及每次的增减是某一个最小量的整数倍。例如,自动生产线上记录产品或零件数量的信号,就是一种数字信号,有产品或零件通过时记 1,无产品或零件通过时记 0,其总数只可能是某一个整数。

图 1-1(a)、(b)所示分别为模拟电压信号及数字电压信号。

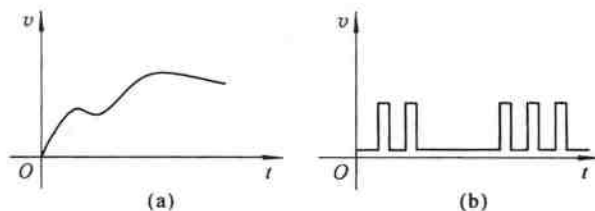


图 1-1 模拟电压信号及数字电压信号

二、数字电路的特点

数字电路的工作信号是数字信号。这类信号所表现的形式是一串在高、低电平间来回变化

的脉冲波(图 1-1(b))。在这里,人们所关心的是信号能正确区分出它的高、低电平(或 1、0 电平),至于高、低电平的精确值则无关紧要。工作在数字电路中的半导体管均处于开关状态,并利用管子的饱和与截止两种状态,来表示数字信号的高、低电平。

由于这个原因,数字电路的单元电路比较简单,对元件的精度要求不高,制作成集成电路大量生产时,容易得到合格的成品,因而具有价格便宜、可靠性高等许多优点。

顺便指出,在雷达、电视、导航及核物理技术中,脉冲电路也处理一些不连续的、时有时无的脉冲波。在这类电路的分析过程中,侧重输入、输出信号的波形、幅度、相位及频率。尽管在这类电路中作为有源器件的晶体管也常常处于开关状态,但是在分析时,不仅要考虑它的导通或截止状态,而且还应当考虑电路在状态转换过程中所发生的过渡过程,因而它属于模拟电路的范畴。

就信号的形状而言,在数字电路中遇到的也是一些矩形脉冲序列(或者说 0、1 序列),但是,在这里分析的着眼点和侧重点和上面提到的脉冲电路却大不相同。数字电路中侧重于输入、输出的 0、1 序列间反映的逻辑关系以及通过逻辑关系所反映的逻辑功能。只要电路中的电压波形能正确区分出 0、1 电平,并正确反映出电路的逻辑功能,就可以不对脉冲波形的细节、高电平和低电平的准确值作过高的要求。

基于数字电路的这一特点,在分析数字电路时所用的数学工具和分析模拟电路(包括脉冲电路)的有所不同。它使用的数学工具是逻辑代数,表示数字电路功能的方法有真值表、逻辑函数表达式、卡诺图、特性方程、状态转换图等。这些内容在以后各章中将陆续逐步涉及。

三、矩形脉冲参数

数字电路中的输出、输入电压值一般只有两种取值:高电平或低电平,电路中的晶体管(或门电路)均处于开关状态:截止或饱和;因此,常用理想的矩形波作为电路的工作信号,如图 1-2(a)所示。

实际的矩形脉冲,并不那么理想,从 0 上升为某一数值,或由某一数值下降到 0 并非是跳变的;顶部也非平顶,而是有一些跌落,如图 1-2(b)所示。为了具体说明矩形脉冲波形,通常引入以下的一些参数:

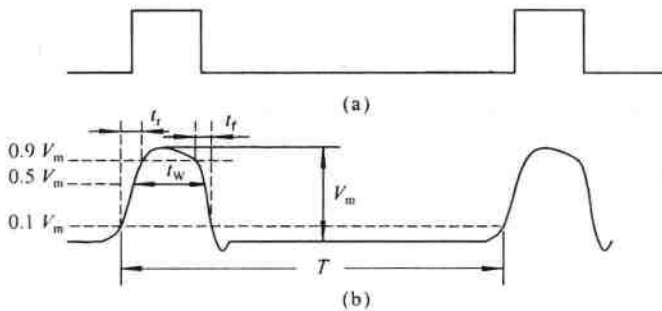


图 1-2 矩形脉冲参数

1. 脉冲幅度 V_m ——指脉冲跳变的最大幅值。
2. 前沿或上升时间 t_r ——通常指由 $0.1 V_m$ 上升到 $0.9 V_m$ 所需的时间。 t_r 愈短,脉冲上升得愈快,愈接近于理想的矩形波的上升跳变。
3. 后沿或下降时间 t_f ——指从 $0.9 V_m$ 下降到 $0.1 V_m$ 所需的时间。

4. 脉冲宽度 t_w ——指前、后沿电压为 $0.5V_m$ 两点间的时间间隔。又称为脉冲持续时间、有效脉冲宽度等。

5. 重复周期 T ——指相邻脉冲上相应点(如脉冲前沿的中点)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。

6. 脉宽比 t_w/T ——指脉冲宽度与周期之比,或称占空系数,其倒数称为空度比。

在数字电路中,为了测量门电路的动态特性,对测试所用的矩形脉冲的前沿、后沿、脉冲的重复频率都有一定的要求。例如,测试 CMOS 门电路的动态参数,要求输入的矩形脉冲的重复频率为 100 kHz , $t_r, t_f < 20\text{ ns}$ 。

1.2 RC 电路

本节讨论在理想矩形脉冲波作用下 RC 电路的响应,并介绍几种用作波形变换的 RC 电路:微分电路、积分电路和脉冲分压电路。在此之前,先复习一下 RC 电路在跳变(阶跃)电压作用下的过渡过程。

一、一阶 RC 电路的过渡过程

在图 1-3 所示电路中,设 $t=0$ 前,开关 S 置于 2 点,即没有电压作用于 RC 串联电路,电容上亦没有电荷积累。

$t=0$ 时刻,开关 S 由 2 点转向 1 点,输入电压 V_m 作用于电路,相当于一个阶跃信号作用于 RC 电路。由电路基础知,它在电路某一部分所引起的响应 $X(t)$ 为

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

式中, $X(0^+)$ 代表阶跃信号作用后的瞬时 $X(t)$ 的初始值,由电路的初始条件确定;

$X(\infty)$ 代表阶跃信号作用后 $X(t)$ 趋于稳定时的值;

τ 代表电路的时间常数, $\tau = RC$ 。

公式(1-1)是一个很有用的公式,只要知道了响应的初始值 $X(0^+)$ 、稳态值 $X(\infty)$ 及时间常数 τ , 就可以直接写出阶跃信号作用后的电路响应 $X(t)$ 。 $X(t)$ 可以是电容上的电压 $v_C(t)$, 也可以是流过 RC 支路中的电流 $i(t)$; 既可以用来求电容充电的规律, 也可以用来求电容放电的规律。

例 1-1 在图 1-3 所示电路中,当 $t=0$ 时开关 S 由 2 拨向 1,求电容 C 充电规律,写出 $v_C(t)$ 、 $i(t)$ 。

解 当 $t=0^-$ 时,有

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

在接通 V_m 的那一瞬间(即阶跃信号作用的那一瞬间),电容来不及充电,电容电压不能突变,于是有

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

将电容视作短路,则

$$i(0^+) = \frac{V_m}{R}$$

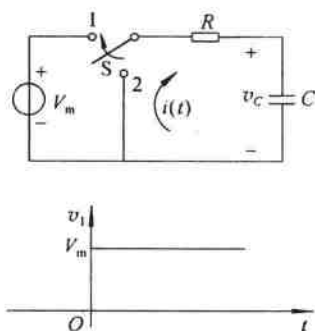


图 1-3 一阶 RC 电路

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 电容可视为充电完毕, 电路建立了稳态, 便有

$$v_C(\infty) = V_m$$

$$i(\infty) = 0$$

由式(1-1)知

$$v_C(t) = V_m(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-2)$$

$$i(t) = \frac{V_m}{R} e^{-t/\tau} \quad (1-3)$$

$v_C(t)$ 、 $i(t)$ 的变化规律如图 1-4 所示。

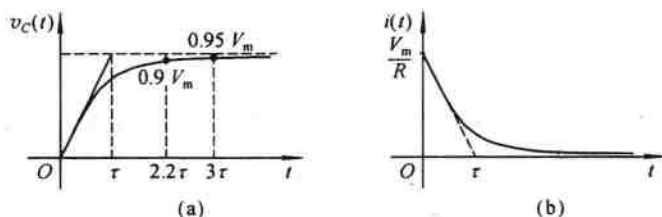


图 1-4 RC 电路中电容充电情况

由图知, $t=0$ 时电容上电压上升速率最大, 其值为

$$\left. \frac{dv_C(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{V_m}{\tau} e^{-t/\tau} \Big|_{t=0} = \frac{V_m}{\tau}$$

如电容始终按此速率恒速充电, 则经过时间 τ 后即可达到其稳态值 V_m 。

根据脉冲波形中上升沿 t_r 的定义, 电容电压由 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 所花的时间, 由式(1-2)知为

$$t_r = t_{0.9V_m} - t_{0.1V_m} = 2.2\tau - 0.1\tau = 2.1\tau$$

通常均以 2.2τ 作为按指数规律上升的脉冲波前沿的估算值。

从理论上讲, 过渡过程要经过无限长的时间才会结束。但由式(1-2)知, 当 $t=3\tau$ 时, $v_C(3\tau) = 0.95V_m$; $t=5\tau$ 时, $v_C(5\tau) = 0.99V_m$ 。通常认为经过 $(3 \sim 5)\tau$ 时间后, 电容上电压已达到其稳态值, 并建立了稳定状态。

例 1-2 试求例 1-1 中电容 C 上的电压 $v_C(t)$ 从初始值 0 上升到 V_{TH} 所经历的时间。

解 为了得到一个普遍的公式, 采用式(1-1)的形式。

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

设 $t=t_1$ 时, $v_C(t_1) = V_{TH}$, 则

$$v_C(t_1) = V_{TH} = v_C(\infty) + [v_C(0^+) - v_C(\infty)]e^{-t_1/\tau}$$

移项

$$v_C(\infty) - V_{TH} = [v_C(\infty) - v_C(0^+)]e^{-t_1/\tau}$$

$$\frac{t_1}{\tau} = -\ln \frac{v_C(\infty) - V_{TH}}{v_C(\infty) - v_C(0^+)} = \ln \frac{v_C(\infty) - v_C(0^+)}{v_C(\infty) - V_{TH}}$$

即

$$t_1 = \tau \ln \frac{v_C(\infty) - v_C(0^+)}{v_C(\infty) - V_{TH}} \quad (1-4)$$

以后常用这个公式来计算脉冲宽度。

例 1-3 在图 1-3 所示电路中,如电容已充好电,其端电压 $v_C(0^-) = V_m$,在 $t=0$ 时,开关 S 由 1 扳向 2,此时电容将放电,求其放电规律,即写出响应函数 $v_C(t)$ 及 $i(t)$ 。

解 先求出三要素 $v_C(0^+)$ 、 $i(0^+)$ 、 $v_C(\infty)$ 、 $i(\infty)$ 、 τ 。

当 $t=0$ 时, $v_C(0^-) = V_m$,在 $t=0^+$ 时,电容上电压不能突变,于是有

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

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

当 $t \rightarrow \infty$ 时,有

$$v_C(\infty) = 0$$

$$i(\infty) = 0$$

代入式(1-1),得

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

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

式中负号表示放电电流与原来充电电流方向相反。电容电压 $v_C(t)$ 及放电电流 $i(t)$ 变化规律如图 1-5(a)、(b) 所示。

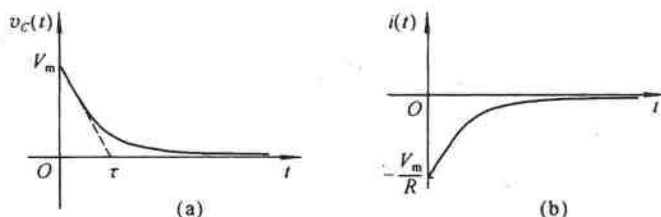


图 1-5 例 1-3 中电容电压 v_C 及放电电流 $i(t)$ 波形

例 1-4 幅度 $V_m = 10$ V 的阶跃电压作用于图 1-6 所示电路,求 $v_{R_2}(t)$ 。

解 $t=0$ 时,电容上的电压不能突变,故可视为短路,得

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

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

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

求时间常数,可将恒压源短路,则

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

代入式(1-1),得

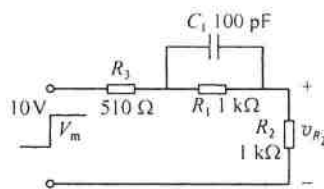


图 1-6 例 1-4 的电路

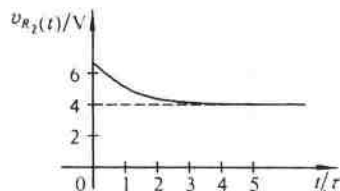


图 1-7 $v_{R_2}(t)$ 波形

$$\begin{aligned}
 v_{R_2}(t) &= v_{R_2}(\infty) + [v_{R_2}(0^+) - v_{R_2}(\infty)]e^{-t/\tau} \\
 &= 4.0 \text{ V} + (6.6 - 4.0)e^{-t/0.06 \mu\text{s}} \text{ V} \\
 &= 4 \text{ V} + 2.6e^{-t/0.06 \mu\text{s}} \text{ V}
 \end{aligned}$$

$v_{R_2}(t)$ 波形如图 1-7 所示。

以上诸例说明用公式(1-1)求解阶跃信号作用下电路的响应是很方便的,其中关键是求出响应的初始值 $X(0^+)$ 、稳态值 $X(\infty)$ 和时间常数 τ 这三个要素。故称这种方法为三要素法。在求三要素时,应遵守以下这些原则:

(1) 求 $X(0^+)$ 时,应考虑在跳变时刻,一般电容上的电压不能突变,这样,未充电的电容可视为短路,有初始电压 $v_C(0)$ 的电容可用恒压源 $v_C(0)$ 来代替。

(2) 考虑到跳变时刻,流过电感的电流是不能突变的,因此,无初始电流流过的电感可视为开路,有初始电流 $i_L(0)$ 的电感,可用恒流源 $i_L(0)$ 来代替。

(3) 求稳态值时应将电容视为开路,电感视为短路。

(4) 求时间常数时,将恒压源短路,如应考虑其内阻则将其用内阻代替,并与电路中的其他电阻适当合并,再乘以电容,即得时间常数。

二、RC 微分电路

微分电路在脉冲电路中应用很广泛,常用来将输入的方波变换为正、负相间的尖脉冲。

RC 微分电路如图 1-8 所示,要求 RC 数值与输入方波的宽度 t_w 间满足以下关系:

$$RC \ll t_w \quad (1-5)$$

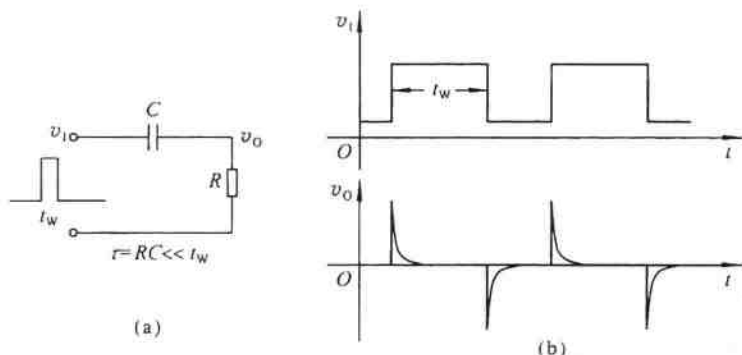


图 1-8 RC 微分电路及其工作波形

其工作过程如下:

$t=0$ 时,输入电压由 0 突变为 V_m ,这一瞬间电容 C 上还来不及累积电荷,因此, $v_C=0$,输入电压全部降落在电阻 R 上,输出电压由 0 跳变为 V_m 。

此后($t>0$),电容 C 的电压按指数规律上升,输出电压则按指数规律下降,当 $t=(3\sim5)\tau$ 时,电容 C 上的电压接近稳态值 V_m ,而输出电压 v_o 接近为 0。RC 愈小,上述过程进行得愈快,因而在输出端得到一个正向尖脉冲,它基本上只出现在输入方波的前沿部分。

$t=t_w$ 时,输入电压 v_i 由 V_m 跳变为 0,相当于 RC 电路被短路,电容将开始放电,但在 $t=t_w^+$ 时,电容还来不及放电,它的电压全部加到电阻上,因此, v_o 由 0 跳变为 $-V_m$ 。

接着($t > t_w$),电容 C 通过 R 很快放电,经过 $(3 \sim 5)\tau$ 后,放电结束,输出电压按指数规律由 $-V_m$ 上升到 0 V ,在输出端得到一个负向尖脉冲,它基本上只出现在输入方波的后沿部分。

可见,当一个方波加到 RC 微分电路时,在输出端 R 上得到一对正、负相间的尖脉冲,如图 1-8(b)所示。

实际上只要时间常数 τ 满足关系式: $\tau = RC = (\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10})t_w$ 即可。输出尖脉冲的幅度与输入方波幅度相同,而其宽度如按 $0.5V_m$ 处计算,则有

$$t_{wa} = 0.7\tau$$

RC 愈小,则输出脉冲的宽度愈窄。由于实际的输入方波并非理想的矩形波,其上升或下降均非跳变,而需要一定的时间,在这种情况下, RC 太小,会使输出脉冲的幅度下降,所以 RC 值并非愈小愈好。

三、 RC 积分电路

如果将 RC 电路改成图 1-9(a)所示形式,从电容 C 两端取出输出电压,且时间常数很大 ($\tau \gg t_w$),则此电路称为积分电路,它的用途是将输入方波变换为锯齿波或三角波。

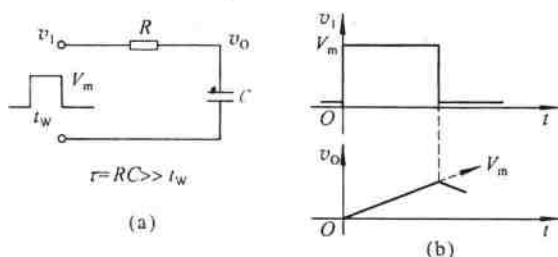


图 1-9 RC 积分电路

设输入方波 v_i 的幅度为 V_m ,宽度为 t_w ,当 RC 电路满足关系:

$$\tau = RC \gg t_w \quad (1-6)$$

时,则在输入方波作用下,电容上输出电压 $v_o(t)$ 将缓慢上升,在输入方波的持续期 t_w 内, $v_o(t)$ 上升不多,如认为

$$v_o(t) = v_c(t) \ll v_i$$

则

$$v_R \approx v_i = V_m$$

$$i = \frac{V_m}{R}$$

而输出电压

$$v_o(t) = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{RC} \int v_i dt = \frac{V_m}{RC} t \quad (1-7)$$

即输出电压与输入电压的积分成正比,且近似按线性规律增长,如图 1-9(b)所示。

$t > t_w$ 后, $v_i = 0$,电容 C 经 R 放电, $v_o(t)$ 按指数规律缓慢下降,其波形如图 1-9(b)所示。

四、 RC 耦合电路

从电路形式上看, RC 耦合电路与前面的微分电路完全相同,但是它是用来将矩形脉冲不失