

脉冲与数字电路

刘宁生 周峭山 编著

中国广播电视出版社

(京)新登字(097)号

内 容 简 介

本书是参照广播电影电视部教育司制定的广播电视中等专业学校《脉冲与数字电路》教学大纲进行编写的。

全书共 11 章,主要内容有:RC 电路、晶体管的开关特性、脉冲波形的产生与变换、集成逻辑门电路、逻辑代数基础、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、集成电路构成的脉冲电路、数/模转换及模/数转换电路、大规模集成电路。每章末均有小结、思考题与习题,书末有 7 个附录,供读者参考用。

本书适合于广播电视中专工科各专业作为教材使用,也可供其他中专学校电子类、通信类或相近专业选用,还可供从事电子技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

脉冲与数字电路/刘宁生,周峭山编著. —北京:中国广播电视出版社,1995.6

ISBN 7-5043-2712-3

I. 脉… I. ①刘… ②周… II. ①脉冲技术-专业学校-教材 ②数字电路-基础理论-专业学校-教材 IV. ①TN78②TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 04301 号

中国广播电视出版社

(北京复外真武庙二条 9 号 邮政编码 100866)

高碑店市印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

787×1092 毫米 16 开 24.375 印张 590 千字

1995 年 8 月第 1 版 1995 年 8 月第一次印刷

印数:1~9500 册 定价:22.00 元

出版者的话

为了适应广播电视中专教育事业发展的需要,不断提高教材质量,广播电影电视部教育司和各广播电视中专课程组,在对第一轮中专工科教材修订的基础上,组织力量编写了第二轮广播电视中专工科教材,由中国广播电视出版社出版,并公开发行。这批规划出版的专业基础课教材有:《电子线路》、《电工基础》、《无线电技术基础》、《无线电测量》、《微型计算机原理与应用》、《脉冲与数字电路》、《电视原理》,共计7种。专业课教材有:《电波与天线》、《广播·电视·调频发送技术》、《广播播控技术》(含广播声学、有线广播、录音技术)、《电视播控与制作技术》(含摄像)、《电视接收技术》、《数字通信》、《微波与卫星接收技术》、《录音与录像技术》,共计8种。在教材编写过程中,力求做到立论正确,概念清楚,理论联系实际。

这批教材,适于招收初中毕业生、学制为四年的学校使用。鉴于目前各学校招生对象和学制不尽相同,各校可根据教学大纲的要求选用有关内容。设有相近专业的其他中等专业学校和职业高中也可选用本教材。

这批教材还可以作为干部培训的中级教材和职工自学参考书之用,也可以供具有高中文化程度和一定无线电基础知识的读者阅读。我们殷切希望广大读者对本教材提出意见和建议,帮助我们做好教材出版工作。

广播电影电视部教育司

前 言

本书是受广播电影电视部《模拟与数字电路》课程组的委托,按照部教育司新制定的《脉冲与数字电路》教学大纲进行编写的。

编写本教材的指导思想是:力求贴近培养目标,保证基础,精选内容,加强理论与实践的结合。在探求各种实用数字系统中功能电路共性面的基础上,重点放在讲清中专学生在脉冲与数字电路中必须掌握的基本概念和基本电路的分析方法上,尽量简化理论上的阐述和避免繁杂的数学推导。同时体现反映新技术和注意实用技能的意图。我们希望通过本书的学习,能够培养学生分析和解决实际脉冲与数字电路问题的能力。

学生在学习本书之前,一般要求已学过电路基础、低频电子线路等课程,因为本书经常需要引用上述课程中已学过的内容和所得的结论,希望读者注意它们之间的有机联系。

全书共分十一章:

第一章讲 RC 电路的过渡过程,着重介绍三要素分析方法,且以动态的观点来介绍 RC 电路的应用问题。

第二章讲器件(晶体二极管和晶体三极管)的开关特性以及应用它们组成的一些简单脉冲电路,着重分析了反相器的工作条件。

第三章讲由分立元件构成的主要脉冲波形产生和变换电路,包括单稳态、双稳态、施密特等触发器和多谐、间歇等脉冲振荡器以及锯齿波发生器。主要讨论各种电路的结构、原理、工作条件及脉冲参数的工程估算。这一章的电路形式较多,应选择重点讲授,相似的分析过程可让学生通过自学来掌握,做到举一反三。

第一章至第三章是脉冲电路的基础内容。

第四章讲集成逻辑门。先简要介绍基本逻辑关系和基本门的类型,然后着重介绍 TTL 门和 CMOS 门的几种基本电路结构。讨论中突出其外特性,并且从外特性引申出各种反映性能指标的参数及门电路应用中必须考虑的基本问题。

第五章讲逻辑代数基础。首先介绍二进制数以及它与十进制数的相互转换,并对二进制码作扼要介绍,然后重点讨论逻辑代数的基本运算规则和逻辑函数的公式化简法及卡诺图化简法。

第六章讲组合逻辑电路。首先介绍组合电路的基本分析和设计方法,然后着重介绍常用中规模集成组合电路的典型芯片及其应用,通过对这些电路逻辑功能的分析,帮助学生掌握对这些芯片正确使用的技能。

第七章讲集成触发器。通过对基本 RS 触发器的讨论,重点介绍触发器逻辑功能的描述方法。通过对时钟同步触发器的讨论,重点介绍几种不同逻辑功能的典型触发器。然后以上述内容为基础,重点介绍常用的不同触发方式的集成 D 和 JK 触发器。最后介绍 CMOS 集成触发器的主要类型。

第八章讲时序逻辑电路。在介绍同步与异步时序电路的分析方法的基础上,重点介绍中

规模集成计数器、寄存器等时序电路的典型芯片的逻辑功能及其应用。

第四章至第八章可认为是数字电路的基础内容。

第九章讲集成脉冲电路。重点介绍如何用集成逻辑门和集成 555 定时器来构成各种实用的脉冲电路。

第十章讲数/模及模/数转换电路。在讨论转换原理的基础上,重点介绍几种典型的转换电路及其应用。

第十一章讲大规模集成电路。重点介绍各种存储器,同时对集成注入逻辑和电荷耦合器件也作了一般性的介绍。鉴于近年来在大规模数字集成电路的发展中,硬件和软件的结合日益紧密,本章对可编程逻辑器件 PAL 和 GAL 电路也作了初步的介绍,使学生对这种新型器件的工作原理及应用前景有所了解。

书中加有“*”号的章節目为选学内容。

虽然脉冲与数字电路的发展十分迅速,应用日益广泛,各种新型器件和电路不断出现,作为一本专业基础课教材,本书仍将重点放在基本单元电路原理的分析上,而将具体的实用电路放在后继专业课中专门介绍。

本书主要适用于招收初中毕业生四年学制的广播电视中等专业学校工科各专业,也可供其他中专学校电子类、通信类或相近专业作为教材选用。本书参考教学时数为 100 学时左右,教师可根据各类专业和学习对象,在教学大纲规定的基本内容下,结合各自的教学经验,对授课内容和课时分配灵活掌握。若对有关章节内容进行适当的删节或取舍处理,也可供干部培训和职工岗位培训教学使用。

脉冲与数字电路是一门实践性很强的课程,必须加强实践性教学环节,突出对学生能力的培养。与本书配套使用的实验指导书也将尽快出版。

本书由江苏广播电视学校刘宁生担任主编,并执笔编写了绪论、四、五、六、七、八、九、十、十一章,湖南广播电视学校周哨山执笔编写了第一、二、三章,全书由刘宁生修改定稿。

本书由广播电影电视部《模拟与数字电路》课程组组长石昭生高级工程师主审并详细审阅了全部原稿,提出了许多宝贵的意见,参加审稿的还有陈洪诚等同志。在编写过程中还得到了南京无线电工业学校陈传虞副教授的热情指导和帮助,北京广播学院王明庄为本书做了大量的工作,在此谨向他们致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,经验不足,书中难免存在错误和不妥之处,恳切希望兄弟学校的师生和读者给予批评和指正。

编者

1994 年 12 月

目 录

绪论	(1)
第一章 RC 电路	(7)
1-1 RC 电路的分析	(7)
1-2 RC 电路的应用	(10)
1-3 RL 电路简介	(16)
本章小结	(18)
思考题与习题	(19)
第二章 晶体管的开关特性及其应用	(22)
2-1 晶体二极管的开关特性	(22)
2-2 晶体三极管的开关特性	(24)
2-3 反相器	(28)
2-4 限幅器与钳位器	(32)
本章小结	(37)
思考题与习题	(37)
第三章 脉冲波形的产生和变换	(41)
3-1 双稳态触发器	(41)
3-2 单稳态触发器	(46)
3-3 多谐振荡器	(50)
3-4 施密特触发器	(54)
3-5 间歇振荡器	(58)
3-6 锯齿波发生器	(61)
本章小结	(75)
思考题与习题	(76)
第四章 集成逻辑门电路	(79)
4-1 概述	(79)
4-2 TTL 与非门电路	(86)
4-3 TTL 门电路的其他类型	(96)
4-4 双极型门电路的其他类型	(102)
4-5 CMOS 逻辑门电路	(107)
4-6 集成门电路使用中的几个具体问题	(115)
本章小结	(117)
思考题与习题	(118)
第五章 逻辑代数基础	(122)

5-1 数制与编码	(122)
5-2 逻辑函数及其表示方法	(130)
5-3 逻辑代数的基本公式和定律	(134)
5-4 逻辑函数的公式化简法	(138)
5-5 逻辑函数的卡诺图化简法	(143)
本章小结	(151)
思考题与习题	(151)
第六章 组合逻辑电路	(155)
6-1 概述	(155)
6-2 编码器	(164)
6-3 译码器和数字显示	(169)
6-4 数据选择器与数据分配器	(182)
6-5 基本运算器	(188)
本章小结	(193)
思考题与习题	(193)
第七章 集成触发器	(196)
7-1 基本 RS 触发器	(196)
7-2 时钟同步触发器	(201)
7-3 主从触发器	(207)
7-4 边沿触发器	(212)
7-5 CMOS 集成触发器	(217)
7-6 触发器类型的转换	(223)
7-7 集成触发器的主要参数及应用问题	(225)
本章小结	(229)
思考题与习题	(232)
第八章 时序逻辑电路	(236)
8-1 概述	(236)
8-2 寄存器	(243)
8-3 计数器	(251)
8-4 顺序脉冲发生器	(270)
本章小结	(274)
思考题与习题	(275)
第九章 集成电路构成的脉冲电路	(279)
9-1 集成逻辑门构成的脉冲电路	(279)
9-2 集成定时器构成的脉冲电路	(289)
本章小结	(297)
思考题与习题	(297)
第十章 数模转换和模数转换	(301)
10-1 概述	(301)

10-2 D/A 转换器(DAC)	(305)
10-3 A/D 转换器(ADC)	(315)
本章小结	(326)
思考题与习题	(327)
第十一章 大规模集成电路	(328)
11-1 动态 MOS 逻辑电路	(328)
11-2 半导体存储器	(332)
11-3 集成注入逻辑电路(I ² L)	(343)
* 11-4 电荷耦合器件(CCD)	(346)
* 11-5 可编程逻辑器件(PLD)	(349)
本章小结	(361)
思考题与习题	(361)
附录一 常用符号表	(363)
附录二 数字集成电路型号命名法	(365)
附录三 新、老国家标准逻辑符号对照表及其说明	(367)
附录四 常用译码器型号和主要特性	(375)
附录五 常用触发器型号及主要特性	(376)
附录六 常用计数器的型号及特点	(378)
附录七 常用寄存器型号及主要特性	(379)

绪 论

随着科学技术的发展,脉冲与数字技术已广泛应用于广播、电视、通信、电子计算机等各种技术领域中,脉冲与数字电路也已成为广播电视中等专业学校工科各专业一门通用的基础课。因此,在学习脉冲与数字电路的具体内容之前,首先要了解脉冲与数字电路的含义及它们的工作特点和应用范围。

一、模拟电路与数字电路

电子技术中应用的电子电路的种类很多,新型器件及电路更是层出不穷。但不管电路的形式和用途如何变化,就目前而言,都可以根据工作信号的不同,把它们归划为两大类:模拟电路和数字电路。模拟电路处理的是模拟信号,数字电路处理的是数字信号。

(一)模拟信号与模拟电路

所谓模拟信号是指那些在时间和数值上都是连续变化的信号,比如在广播电视中传送的各种语音信号和图像信号,如图 0-1 所示,它们分别是与声音和景物相对应的电压或电流信号。

这种电信号的特点是:在其变化过程中的任一时刻都是相应物理量的一个模拟,或者说在任一时刻都有一个确定的值与相应物理量的特征所对应。一般来说,这种信号都是连续变化的,不会产生突变。

处理模拟信号的电路就叫做模拟电路,如各种交、直流放大电路,振荡电路,频率变换电路等。这些电路中研究的主要问题是放大倍数,信号的各种失真以及信号波形的变化等等。

分析模拟电路的主要方法是等效电路法和图解法,主要在电子线路课程中作介绍。

(二)数字信号与数字电路

所谓数字信号是指那些在时间和数值上均是离散的、不连续的信号。即是说这种信号只在一些特定的时间点上出

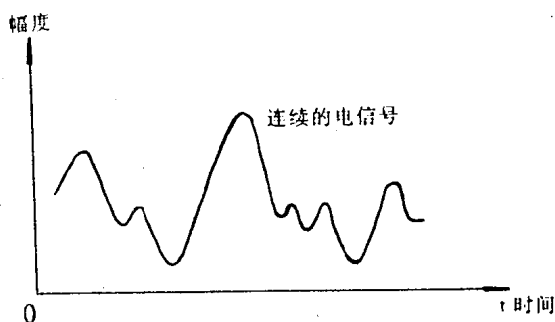


图 0-1 模拟信号波形

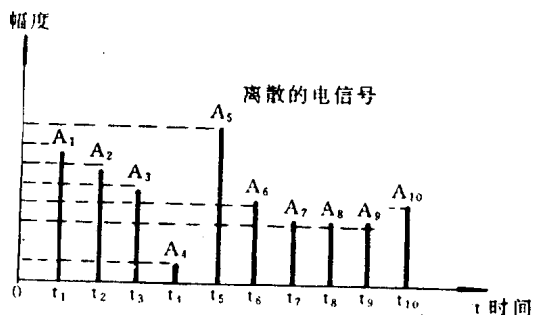


图 0-2. 模拟信号的离散化

现,而且信号的大小只能按一定的增量或阶梯来变化和取值。图 0-2 示出了将图 0-1 所示的模拟信号波形变换为相应的离散信号的情形。

数字信号通常只用“1”和“0”两个基本的数字符号按照一定的规律编制成不同的代码,用以代表不同的含义来进行信息的传送和过程的控制等。而这两个基本数字,反映在电路上就是低电平和高电平两种状态。

处理数字信号的电路就称作数字电路,如各种门电路、触发器以及由它们构成的各种组合逻辑电路和时序逻辑电路。数字电路中研究的主要问题是输出信号的状态(“0”或“1”)和输入信号的状态(“0”或“1”)之间的逻辑关系,即电路的逻辑功能。

数字电路的研究方法是逻辑分析和逻辑设计,所需用的工具是逻辑代数。

目前,电子设备数字化的倾向与日俱增,电子设备从以模拟方式处理信息转到以数字方式处理信息的原因主要在以下几方面:

1. 稳定性好。数字电路不像模拟电路那样易受噪声的干扰。
2. 可靠性高。数字电路中只需分辨出信号的有或无,故电路的元件参数可以允许有较大的变化(漂移)范围。
3. 能长期存储。数字信息可以利用某种媒质,如磁带、磁盘、光盘等进行长时期的存储。
4. 便于计算机处理。数字信号的输出除了具有直观、准确的优点外,最主要的还是便于利用电子计算机来进行信息的处理。
5. 便于高度集成化。由于数字电路中基本单元电路的结构比较简单,而且又允许元件有较大的分散性,这就使我们不仅可把众多的基本单元做在同一块硅片上,同时又能达到大批量生产所需要的成品率。

集成数字电路的出现从根本上解决了数字电路使用中的许多问题,如体积、重量、功耗、可靠性等。目前,各种数字式仪表,如数字电压表、数字频率计等,已被广泛使用;语音和图像信息的传送已实现了数字化,如数字广播、数字电视在一些国家已进入实用阶段。特别是中、大规模集成数字电路的发展已使得数字电路的设计发生了巨大的变化。图 0-3 示出了数字系统设计方法的演变过程。从图中可以看出,采用集成电路后完全取消了具体的电路设计和制造,从而减少了用于元件选择、测试和组装所需要的时间。若采用中、大规模集成功能块,则可进一步简化电路的逻辑设计,并使得实际的数字系统更便于使用和维护。

综上所述,模拟信号与数字信号是不同性质的两种信号,因而处理这两种信号的电子电路需考虑的主要问题和分析方法也是不同的。从目前看来,由于数字信号处理的许多特殊的优点,数字技术的应用相对来说发展较快并日趋成熟和完善。

需要指出,数字信号处理及数字电路的应用也有一定的局限性。因为人们实际需处理的信号大部分都是模拟信号,而为了能使用数字方式来处理这些模拟信号,首先必须把它们转换成数字信号(模-数转换),再送到数字电路中去处理。同理,还必须把处理过的数字信号再转换成对应的模拟信号输出(数-模转换)。这样一则可能导致设备的复杂化,二则往往由于整个电路的精度受到转换电路精度的制约而失去使用数字电路的优点。因此,如何更合理地使用数字电路,应根据具体情况来考虑。

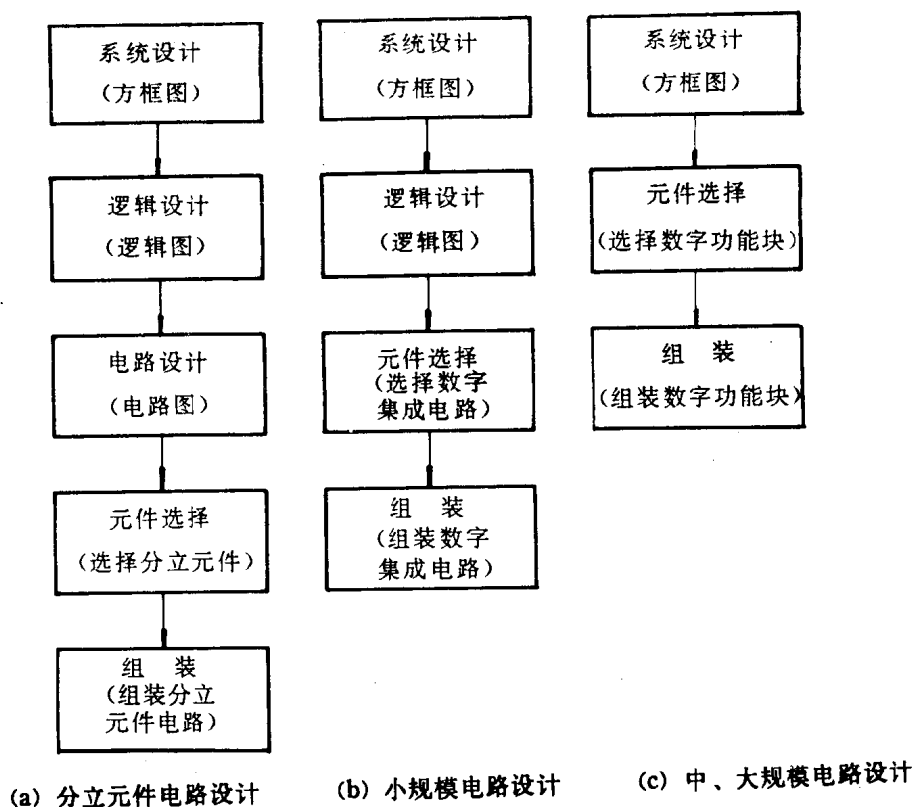


图 0-3 数字电路设计的演变过程

二、脉冲电路与数字电路

脉冲技术的产生最早可追溯到 1835 年美国莫尔斯发明的莫尔斯电码,它利用长短不同的断续电信号来传送信息,至今这种电码在电报通信中仍在使用着。但脉冲技术的真正发展则是在第二次世界大战以后的几十年间,它随着雷达、核物理、电视以及电子计算机等现代科学技术的发展而成为一门重要的基础技术。

(一) 脉冲信号及脉冲电路

所谓脉冲,一般的理解是指突然变化的运动,如脉搏的跳动、空中的闪电等等。因此,凡具有突变运动特点的各种电流或电压就称为脉冲信号,或者更广义地说,一切非正弦波信号都可以统称为脉冲信号。图 0-4 示出了一些常见的脉冲信号波形。可以看出,这些波形虽然形状各不相同,但它们都具有脉动或突变的特点。

所谓脉冲电路就是产生、变换和控制这些脉冲信号的电路,它通常由开关电路和惯性电路组成。

1. 脉冲信号的波形参数

在脉冲电路中,经常需要对脉冲信号的波形进行定量分析,以描述和评价电路的性能,这就需要使用一些具体的物理量来表示脉冲信号的特征,这些物理量便称为波形参数。

矩形波是最常用的一种脉冲信号,介绍它的波形参数既具有实际意义,又有代表性。

图 0-4 中所示的是理想化的矩形脉冲,而实际电路中的矩形波不像理想化的那样简单。

下面以图 0-5 所示的实际矩形波来介绍波形参数。

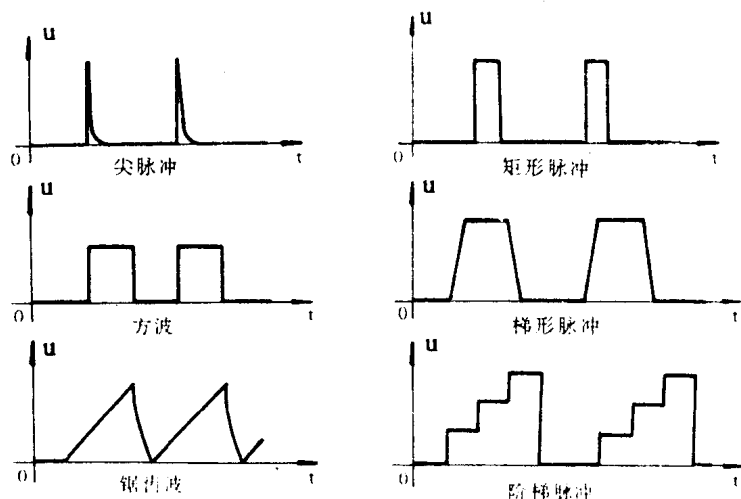


图 0-4 几种常见的脉冲波形

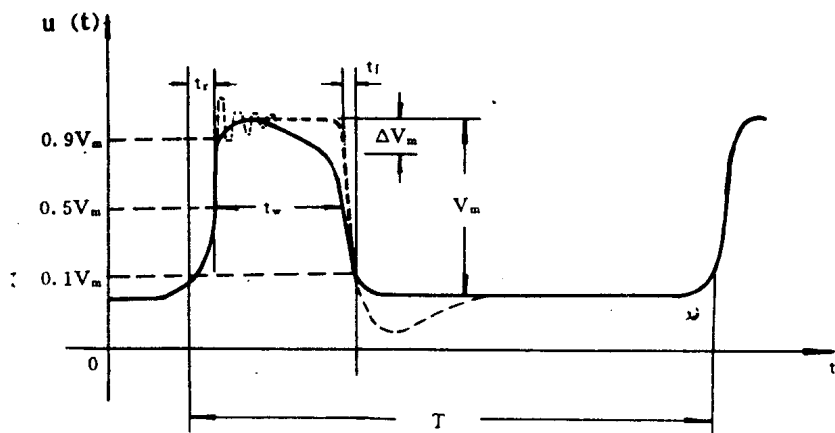


图 0-5 实际矩形波的波形参数

(1) 脉冲幅度 V_m : 指脉冲电压(或电流)从一种状态变化到另一种状态的跳变值。

(2) 上升时间 t_r : 脉冲电压从 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 所需的时间, t_r 愈短, 脉冲上升得愈快, 愈接近于理想情况。

(3) 下降时间 t_f : 脉冲电压从 $0.9V_m$ 下降到 $0.1V_m$ 所需的时间。上升沿、下降沿与正、负脉冲序列的关系如图 0-6 所示。

(4) 脉冲宽度 t_w : 脉冲电压上升沿的 $0.5V_m$ 到下降沿的 $0.5V_m$ 所需要的时间, 又称持续时间。

(5) 脉冲周期 T : 周期性脉冲信号中任意两

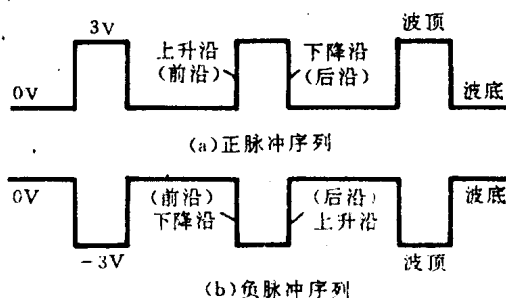


图 0-6 正、负脉冲序列

个相邻脉冲的相应点(如脉冲前沿起点)之间的时间间隔。

以上几个时间参数的单位是秒(s)、毫秒(ms)、微秒(μ s)和纳秒(ns),其相互关系为

$$1\text{s}=10^3\text{ms}=10^6\mu\text{s}=10^9\text{ns} \quad (0-1)$$

脉冲周期的倒数为脉冲的重复频率 $f=\frac{1}{T}$ 。

(6) 脉冲宽度比 t_w/T : 指脉冲宽度和周期之比,其倒数为空度比或占空系数。

(7) 平顶降落 ΔV_m : 指脉冲平顶期间电压幅度的下降数值。有时在脉冲的前后沿可能出现振荡或过冲,如图中虚线所示。

上述这些波形参数对于衡量脉冲电路的性能有着重要的意义。例如,脉冲的前后沿愈陡,则信号频谱所占频带愈宽,若要脉冲电路不失真地传送这个脉冲,就必须有足够的带宽。经验证明,脉冲的上升时间与电路的 3dB 带宽 B 的关系可近似地用下式表示

$$t_r B = 0.35 \sim 0.45 \quad (0-2)$$

如果脉冲上冲较小,取 0.35; 当上冲较大时,取 0.45。

该式说明,当一个理想矩形脉冲通过有限带宽的脉冲电路时,其输出脉冲将要产生附加上升沿。例如,用带宽为 30MHz 的示波器来观察一个理想矩形脉冲,会测量出其上升时间为

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

这与实际情况不符。所以在选用示波器观测脉冲波形时,必须注意该示波器的频率响应要满足要求,以免波形产生附加失真。

2. 脉冲电路的工作特点

由于脉冲电路研究的对象是脉冲信号的产生、变换和控制,需处理的是以跳变电流或电压表现的脉冲信号,因此在工作特点和分析方法上与一般模拟电路有许多不同。

(1) 脉冲电路中的有源器件如晶体管、场效应管等只是作为电子开关使用的,要求其工作在截止区和饱和区,而放大区只是一个过渡区域。

(2) 脉冲电路中的电容、电感和电阻的主要作用是控制晶体管的导通和截止,它们的充、放电特性和过渡过程与电路的状态紧密相关。

(3) 脉冲电路主要使用波形分析法,即把有源器件作为开关,结合电路的过渡过程,分析电路的工作波形,从而了解电路的工作原理和主要技术指标。

(二) 脉冲电路与数字电路的联系与区别

如前所述,数字电路只有两个状态:高电平或低电平,因此,数字电路中的有源器件必然与脉冲电路中一样也工作于开关状态。数字信号的波形基本上是矩形脉冲,故矩形脉冲信号又称为数字脉冲信号,这些都是数字电路与脉冲电路的共同点。早期由分立元件构成的门电路及触发器等与一般脉冲电路没有什么区别。但是,随着数字集成电路的出现和发展,脉冲电路与数字电路的区别就愈来愈明显了。

1. 目前数字电路工作者已用不着自己设计门电路和触发器等基本单元电路,因此也就

无需考虑电路的过渡过程和脉冲波形的细节问题,如高、低电平的准确值等。对其波形来说,只要能区分代表“0”和“1”两种状态的高、低电平即可。

2. 数字电路中主要分析电路的输入~输出之间的逻辑关系,分析工具是逻辑代数,包括真值表、卡诺图、表达式、特征方程、状态转换图等,它们与脉冲电路的分析方法是截然不同的。

由于历史的原因,现行的教学计划将脉冲电路与数字电路安排为一门课程来讲授。同时,从近期电子技术的发展来看,愈来愈多的脉冲电路已由数字集成电路(如门电路、555 时基电路)来构成。目前,除一些高速或大功率的脉冲电路外,分立元件的脉冲电路已被各种集成化脉冲电路所取代,从这个意义上说,将脉冲电路与数字电路一起讲授,也有其合理之处。

这里顺便提及,随着科学技术的发展,模拟电路与数字电路的联系亦日趋紧密,两者之间互相补充,互相渗透。包括模拟电路及数字电路的大规模集成芯片已经投入使用,并且代表着一种潮流和方向,这一点请读者在今后的学习和工作中充分加以注意。

本书将就脉冲与数字电路的基本单元和典型电路的工作原理、分析方法以及应用这些电路的一些实际问题等,向读者作系统的介绍。

第一章 RC 电路

RC 电路是脉冲电路中最基本的惯性电路之一,它在输入脉冲和各种开关器件的控制下,利用电容的充放电,可以形成不同形状的脉冲波形。本章主要讨论简单 RC 电路的暂态特性及其应用,并简要介绍 RL 电路的分析方法。

1-1 RC 电路的分析

一、RC 电路的过渡过程

所谓过渡过程是指 RC 电路在开关控制下,从一种稳定状态转变到另一种稳定状态所经历的过程。由于这个过程的时间很短,所以又称为暂态过程或暂态。

(一)简单 RC 电路的充电过程

图 1-1 是简单的 RC 串联电路。假设初始时开关 K 处于“1”位置,没有接入电压 V ,此时电容 C 上没有电荷,其两端电压 $u_C=0$ 。在 $t=0$ 时刻,将开关 K 从“1”换到“2”位置,RC 电路输入端的电压从零突变到 V ,此后 V 通过 R 对电容 C 充电,使电容两端电压开始按指数规律不断增加,经过相当长时间($t \rightarrow \infty$)充电结束, $u_C=V$,其变化规律如图 1-2(a)所示,用数学式表达为

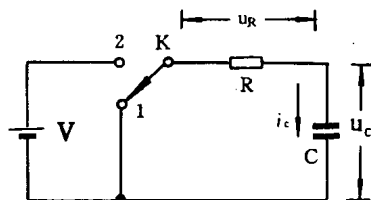


图 1-1 RC 串联电路

$$u_C(t) = V(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1-1)$$

另外,由于 u_C 不断上升,故电阻 R 两端电压相应下降,电容 C 的充电电流 i_C 不断减小, i_C 的变化规律是一条由 $\frac{V}{R}$ 逐渐趋近于零的指数曲线,如图 1-2(b)所示,数学表达式为

$$i_C(t) = \frac{V - u_C(t)}{R} = \frac{V - V(1 - e^{-\frac{t}{RC}})}{R} = \frac{V}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-2)$$

(二)简单 RC 电路的放电过程

在图 1-1 电路中,当电容 C 充电达到稳态值后,再将开关 K 从“2”转换到“1”位置,电容 C 将经电阻 R 放电,电容两端电压 u_C 从 V 开始按指数规律不断下降,经相当长时间($t \rightarrow \infty$)放电完毕, $u_C=0$ 。与此同时,随着 u_C 的下降,反向流过电阻 R 的放电电流 i_C 也按同一规律

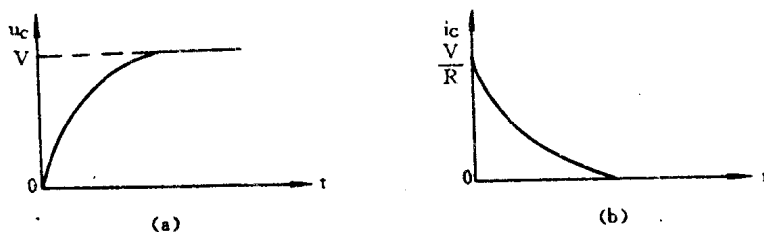


图 1-2 电容充电时 u_C 和 i_C 波形图

从 $\frac{V}{R}$ 逐渐趋近于零。放电时电压 u_C 和电流 i_C 的变化曲线如图 1-3 所示, 其数学表达式分别为

$$u_C(t) = V e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-3)$$

$$i_C(t) = -\frac{V}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-4)$$

式(1-4)中负号表示放电电流与充电电流方向相反。

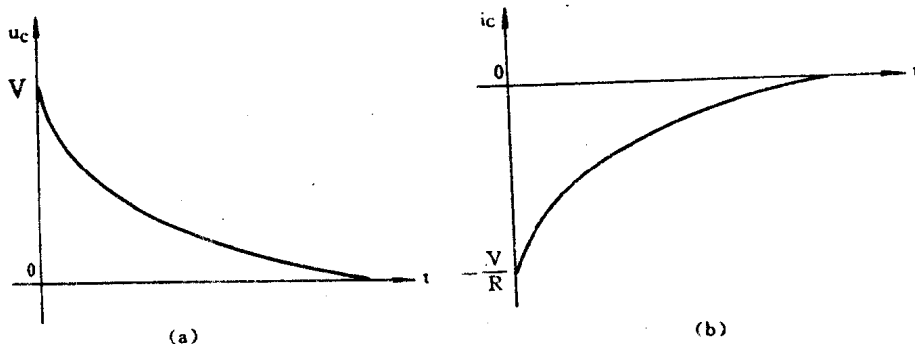


图 1-3 电容放电时 u_C 、 i_C 波形图

从以上分析可以看出, 在暂态过程中, 电路中的电压 u_C 和电流 i_C 是不断变化的, 都符合单调上升或下降的指数变化规律。数学表达式中的 RC 称为电路的时间常数, 通常用 τ 表示, 即 $\tau = RC$, 其量纲为 $\tau(s) = R(\Omega) \cdot C(F)$ 。它表征暂态过程经历时间的长短, 即 τ 值越大, 电容进行充(放)电的速度越慢, 电路的暂态过程越长。如图 1-4 所示。经过计算, 时间 t 与 $e^{-\frac{t}{\tau}}$ 及 $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ 的关系如表 1-1 所示。

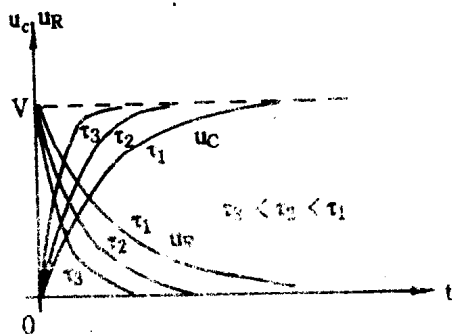


图 1-4 时间常数不同时 RC 电路的暂态曲线

表 1-1

t	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
$e^{-\frac{t}{\tau}}$	0.368	0.135	0.050	0.018	0.007
$1-e^{-\frac{t}{\tau}}$	0.632	0.865	0.950	0.982	0.993

由表可看出,虽然电路进入稳态(即 $e^{-\frac{t}{\tau}}=0, 1-e^{-\frac{t}{\tau}}=1$)理论上所需的时间将是无穷长,但当 $t=3\tau$ 时, $e^{-\frac{t}{\tau}}$ 已下降到 5%, $1-e^{-\frac{t}{\tau}}$ 已上升到 95%; 当 $t=5\tau$ 时, $e^{-\frac{t}{\tau}}$ 已下降到 7%, $1-e^{-\frac{t}{\tau}}$ 上升到 993%, 所以在工程应用中,一般认为经过 $3\sim 5\tau$ 的时间,电路就进入稳态了。

二、简单 RC 电路的三要素分析法

通过以上讨论我们知道,RC 电路的暂态过程实际上就是电容进行充(放)电的过程。在这一过程中,电路中的电压和电流均是从初始值开始,按指数规律逐渐趋近于稳态值的,其变化速度取决于电路的时间常数 $\tau=RC$ 。若设开关 K 动作时 $t=0, 0^+$ 表示动作后瞬间, 0^- 表示动作前瞬间,则电压或电流开始变化时的初始值可用 $f(0^+)$ 表示,暂态过程结束时($t \rightarrow \infty$)的稳态值可用 $f(\infty)$ 表示。所以,我们在分析 RC 电路时,只要知道 $f(0^+)$ 、 $f(\infty)$ 和 τ 这三个要素,就可根据式

$$f(t) = f(\infty) + [f(0^+) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-5)$$

很方便地求出暂态过程中,任意时刻的电压或电流的数值。这种求解 RC 电路的方法,称为三要素分析法。

若需要计算在暂态过程中,电压或电流变化到某一规定值 $f(t_k)$ 时所需要的时间 t_k ,也可利用式(1-5)推导出它的计算式

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

经整理

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

$$\frac{f(\infty) - f(0^+)}{f(\infty) - f(t_k)} = e^{\frac{t_k}{\tau}}$$

最后得

$$t_k = \tau \ln \frac{f(\infty) - f(0^+)}{f(\infty) - f(t_k)} \quad (1-6)$$

值得注意的是,三要素分析只适应于简单的 RC 电路。所谓简单的 RC 电路指的是对电路进行化简时,可以采用串、并联的方法,将电阻和电容归并为一个电阻和一个电容组成的简单形式的电路。三要素法是分析 RC 电路的基本方法,必须熟练掌握,现举例如下:

〔例 1-1〕 电路如图 1-5(a)所示,在 $t=0$ 的瞬间,将开关 K 由“2”转换到“1”位置,写出电容 C 两端电压 u_C 变化规律的数学表达式,并画出其曲线。

〔解〕

1. 先求该电路的三要素。