

高等学校试用教材

脉冲与数字电路

上册

顾德仁等编

人民教育出版社

内 容 简 介

本书分成两大部分，上册是第一部分——脉冲电路，下册是第二部分——数字电路。两部分具有相对独立性，俾使本教材也可供两门独立的课程使用。

脉冲电路部分中分立元件仍占大部分篇幅；数字电路部分则全部是集成的。一些有关新器件的内容，如注入逻辑及电荷耦合器件也在本教材中得到反映。

本书可作为高等工科院校无线电整机类专业试用教材，也可作为工程技术人员的自学参考书。

本书责任编辑姚玉洁。

高等学校试用教材

脉冲与数字电路

上 册

顾德仁 等编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 10.5 字数 253,000

1979年7月第1版 1980年1月第1次印刷

印数 00,001—46,000

书号 15012·0186 定价 0.87 元

前 言

本教材是根据 1977 年 12 月教育部在合肥召开的高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议所讨论拟定的同名课程教材编写大纲所编写的。它是供高等工科院校无线电整机类专业三年级学生使用的一本教科书。学生在学习本课程以前，应该学习过有关一般电路理论、电子器件及低频放大等方面的一些课程。

这本教材内容可以划分为两大部分，第一部分为脉冲电路，第二部分为数字电路。由于历史原因，在我国多数院校中，目前这两部分内容仍合并在一门课程——脉冲与数字电路内讲授。但是，就学科体系来讲，编者认为脉冲电路应该属于模拟电路的范畴（见绪论中的论述），因此在编写过程中，编者有意识地使本教材的两部分具有某种相对的独立性，俾使本教材也可以供两门独立的课程——脉冲电路与数字电路使用，而由不同的教师讲授。

在编写本教材时，编者考虑到目前脉冲与数字电路的一个主要发展方向——集成化，在内容取舍上给予集成电路以足够的重视。数字电路内容全部是属集成的，并且写入了大规模集成电路一章。但鉴于我国目前的生产技术现状，在几年内采用分立元件的脉冲电路还不会完全被摒弃，特别是某些快速脉冲电路还得由分立元件构成，因此在脉冲电路部分，分立元件仍占大部分篇幅。全书按篇幅来划分，脉冲与数字电路各占一半，而分立元件电路，包括器件的特性描述在内大约只占 40%。一些有关新器件的内容，如注入逻辑及电荷耦合器件也在本教材中得到反映。

浏览一下目录，就可以对本教材内容有个一般的了解。

本书第一章绪论主要是对本课程的研究范围作一个总的评述,简单讨论一下脉冲的主要参数,并对暂态分析的教学方法作一个扼要的叙述,后一部分内容学生已在前修课程中学过,可供复习自学。第二章是关于脉冲的线性形成,这在脉冲电路课程中是一个重要内容,也是基础,但是它的大部分内容,特别是处理方法是学生在前修课程中已经学过的,因此可以用比较少的时间来讲授,但可以要求学生多作些习题。

第三、四章是关于器件(包括二极管、三极管及场效应管)的开关特性以及应用它们组成的一些简单脉冲电路,如限幅器、箝位器、比较器及选通门等。编者认为把这些简单电路的介绍与器件结合起来有利于学生掌握器件的开关特性。

第五、六章是由分立元件构成的主要脉冲电路。第五章是关于锯齿波发生器,重点是讲锯齿波电压发生器,对某些专业,锯齿波电流的内容可以不讲。第六章是关于张弛振荡器,这一章电路形式比较多,教师可选择其中某几个讲授,让学生举一反三,通过自学来掌握其他的电路形式。

第七章是属于集成脉冲电路,鉴于运算放大器的一些基本参数已在前修课程中讲授过,这里只作扼要的介绍。通过这一章的学习,学生不仅能学会如何用集成运算放大器来构成各种脉冲电路,也可以加深对前几章已介绍过的由分立元件组成的脉冲电路的理解。

第八章为负阻器件脉冲电路,重点介绍两类负阻器件的伏安特性、平衡点的稳定性及负载线的选择,重点介绍了隧道二极管电路。

第九章以后为数字电路部分。

第九章介绍二进制数以及二进制数与十进制数的相互转换方法,并对二-十进码作扼要的介绍。

第十章为逻辑函数,重点介绍逻辑代数的基本运算规则,用卡诺图简化逻辑函数及组合逻辑网络的设计方法。

第十一章为集成逻辑门,在介绍集成逻辑门时以分立元件电路为基础,重点介绍 TTL 集成逻辑门的性能。

第十二章为集成触发器,在介绍 $R-S$ 触发器时,以逻辑门为基础,在介绍其他类型触发器时又以 $R-S$ 触发器为基础,重点介绍触发器的逻辑功能。

第十三章为时序逻辑网络,重点介绍同步时序逻辑网络的设计方法。在设计过程中,采用一种“文字填写卡诺图”法,作者认为这种方法虽然可能使初学者增加一些学习上的困难,但它有有利于触发器的选型、便于填写卡诺图以及能减少一半卡诺图等优点。

第九章至第十三章可以认为是数字电路的基础。

第十四章为编码、译码、码组转换及校验,重点介绍数字系统内接口电路中广泛使用的二进制与二-十进制相互转换的方法。

第十五章为算术运算电路,重点介绍信息处理系统中快速运算方面的电路。

第十四章及第十五章的内容亦可认为是数字电路基本内容的具体运用,教师在讲授时,可根据不同专业的需要从中选择有关内容作为组合逻辑及时序逻辑设计举例,安插在前面第十章及第十三章内讲授。

第十六章为数字电路与模拟电路的接口电路,重点介绍数-模及模-数几种典型变换方法。这部分内容亦可放在有关的专业课程讲授。

第十七章为大规模集成电路,重点介绍 MOS 存贮器,鉴于近年来愈来愈多的大规模集成电路问世,这一部分内容也是不可缺少的,本章对注入逻辑及电荷耦合器件只作了一般性的介绍,使学生对这两种新型器件的原理及应用前景有所了解。

本教材是由成都电讯工程学院《脉冲与数字电路》编写组编写的，顾德仁同志任主编。第一、二、七、八、九及十章由顾德仁同志编写；第三、四、五及六章由龚之春同志编写；第十二、十三、十四、十五章由万栋义同志编写；第十六章由万栋义同志、龚之春同志合编；第十七章由沈铎同志编写；第十一章由杨成忠同志编写；习题由成都电讯工程学院 107 教研室部分同志编写。本书的绘图工作是由李惠敏、湛黔萍同志完成的。

本教材初稿先由西北电讯工程学院余雄南等同志审阅，并提出了修改意见。又于 1979 年 1 月在成都召开的教材审稿会上讨论过，到会的西北电讯工程学院等十多所兄弟院校的同志提出了很多宝贵的意见，编者在此表示深切的谢意。

由于本课的内容，特别是数字电路近年来发展十分迅速，编者水平有限，在内容的取舍上不免挂一漏万，叙述方法也可能有不当或错误之处，欢迎同志们提出批评与修改意见。

编 者

上册目录

第一章 绪论	1
1-1 模拟电路与数字电路.....	1
1-2 本课程的研究范围.....	2
1-3 脉冲波形的主要参数.....	4
1-4 研究线性电路过渡过程的数学方法.....	5
思考题和习题.....	17
第二章 脉冲通过线性网络	22
2-1 RC 高通网络.....	23
2-2 RC 高通网络对指数波和斜升波 的响应.....	29
2-3 RC 高通网络作为微分 环节.....	32
2-4 RC 低通网络.....	33
2-5 RC 低通网络对指数波和斜升波 的响应.....	37
2-6 RC 低通网络作为积分 环节.....	40
2-7 RC 电路的十六种组合.....	41
2-8 RL 网络.....	45
2-9 RLC 网络.....	46
2-10 脉冲变压器.....	53
思考题和习题.....	56
第三章 半导体二极管及其简单电路	61
3-1 二极管特性曲线及其大信号等效电路.....	61
3-2 二极管限幅器.....	66
3-3 二极管箝位器.....	72
3-4 二极管电位控制门.....	76
3-5 二极管函数发生器.....	83
3-6 半导体二极管的开关特性.....	85
思考题和习题.....	89

第四章 半导体三极管及其简单电路	97
4-1 晶体管特性曲线及其大信号等效电路.....	97
4-2 三极管倒相器.....	103
4-3 晶体管限幅器和箝位器.....	107
4-4 利用开关管形成窄脉冲.....	112
4-5 射极跟随器的过渡特性.....	117
4-6 晶体管的开关特性.....	120
4-7 电流开关电路.....	128
4-8 场效应管及其简单应用.....	135
思考题和习题.....	144
第五章 锯齿波发生器	150
5-1 简单锯齿波电压发生器.....	150
5-2 恒流源锯齿波电压发生器.....	155
5-3 自举电路.....	159
5-4 密勒积分电路.....	167
5-5 锯齿电流发生器.....	174
思考题和习题.....	182
第六章 张弛振荡器	186
6-1 自激多谐振荡器.....	186
6-2 单稳态触发电路.....	197
6-3 集-基耦合双稳态触发电路.....	213
6-4 射极耦合触发器.....	220
6-5 间歇振荡器.....	226
6-6 同步与分频.....	236
思考题和习题.....	238
第七章 集成运算放大器及其电路	248
7-1 集成运算放大器.....	248
7-2 负反馈运算放大器的两种基本接法.....	253
7-3 运算放大器的线性应用举例.....	257
7-4 利用运算放大器做成的限幅放大器和函数发生器.....	263

7-5	张弛振荡器	268
7-6	集成电压比较器	275
	思考题和习题	277
第八章	负阻器件脉冲电路	281
8-1	几种半导体负阻器件	281
8-2	两类负阻器件	293
8-3	负载线和平衡点的稳定性问题	297
8-4	隧道二极管双稳态触发电路	301
8-5	隧道二极管单稳态多谐振荡器	304
8-6	隧道二极管自激多谐振荡器	308
8-7	单结晶体管张弛振荡器	311
8-8	<i>pnpn</i> 二极管及可控硅开关脉冲电路	316
	思考题和习题	319
	附录	323
	上册参考文献	325

第一章 绪 论

1-1 模拟电路与数字电路

在近代电子设备中,按照信号形式的不同,通常我们将电路分为两大类:模拟电路与数字电路。模拟电路处理的是模拟信号;数字电路处理的是数字信号。

所谓模拟信号,是指模拟物理量(如话音或图象各点的亮度变化)的电压或电流,而此电压或电流电平是平滑地、连续地变化的。它可以取一定范围内的任意值。换言之,对于模拟信号,我们必需进行测量。

所谓数字信号,是指信号是离散的、不连续的。这时信号只能按有限多个阶梯或增量变化和取值。换言之,对于数字信号,我们只需计算阶梯的数目而无需考虑阶梯内信号的大小。

现代电子设备愈来愈多地以数字形式来处理信息,这是由于:

1. 数字设备具有极高的可靠性与稳定性。因为信号比较不那么依赖于元件与电路的稳定性,电路只需能区别信号之有无。较高的精度可以通过增加数字的位数来达到。
2. 数字信号可以无限地长期存贮。
3. 便于采用数字式电子计算机来处理信息或进行控制。

以上这些优点,随着中、大规模数字集成电路的出现与大量生产以及计算技术的广泛采用,愈益显出其重要性。目前数字式仪表(如数字式电压表、数字式频率计)已被广泛使用;话音和图象的传送已实现了数字化;雷达数据处理也都采用数字形式。各种生产过程的自动化也和数字电路以及电子计算机的使用有着紧密联

系。可以预言,数字电路将得到愈来愈广泛的应用。

当然不应当得出结论:今后所有电子设备将全部实现数字化了,模拟电路没有发展前途了。有些设备,由于技术上、经济上的考虑必将继续保留为模拟的。此外,某些新器件(如电荷耦合器件)的出现,不仅可以供数字电路应用,也给模拟信号的处理带来了新的可能性。

1-2 本课程的研究范围

读者不禁要问:那么脉冲电路又是什么呢?它是属于模拟电路还是属于数字电路的范畴呢?为什么要把脉冲电路与数字电路的内容放在一门课程内呢?

如所周知,所谓脉冲电压或电流是指在短暂时间间隔内作用于电路的电压或电流,这个时间间隔可以与电路的过渡过程相比拟。就广义来说,凡按非正弦规律变化的电压或电流都可以称之为脉冲。脉冲波形千变万化,种类繁多,图 1-1 给出了几种常见的

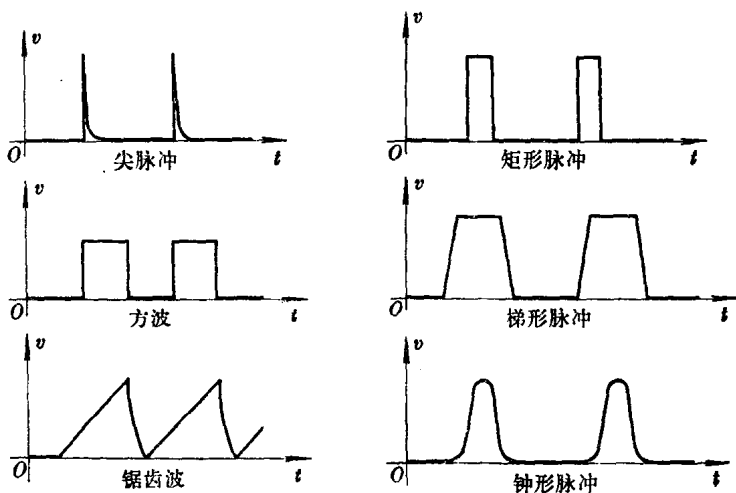


图 1-1 几种常见的脉冲波形

波形。

所谓脉冲电路就是产生与变换这些脉冲波形的电路。这些电路通常是由一些线性网络和一些晶体管或其他电子器件组成的开关电路所构成的。

根据编者的观点，脉冲电路应该属于模拟电路的范畴。这是因为，在这里我们感兴趣的不仅是脉冲的有无，而且还有它的波形。在脉冲电路课程中，我们需要研究利用线性网络来形成不同的脉冲波形(第二章)，这可以认为是频域滤波；我们需要研究限幅与比较电路(第三、四章)，这可以认为是幅度滤波；我们需要研究模拟信号的选通门(第三章第4节)，这是一种时域滤波。所有这三者，都不仅涉及脉冲的有无，而且涉及到脉冲的波形。同样对锯齿波发生器和张弛振荡器的研究，其主要内容也是对波形的分析。应该认为脉冲电路属于模拟电路的范畴。

那么为什么又把脉冲电路和数字电路合并在一本教材中呢？

在数字电路中，电压和电流通常只有两个状态：高电位或低电位；有电流或无电流。因此数字电路也是工作于脉冲状态的。就这一点来说，数字电路也是一种脉冲电路。早期由分立元件作成的门电路、触发器和计数器等和一般脉冲电路没有什么区别。但是，随着集成电路的出现，在无线电技术专业从事工作的现代数字电路的设计者再也用不着自己来设计门电路、触发器等数字元件，而仅需熟悉各种类型与集成度的数字元件的外特性及逻辑功能(见第十一、十二、十七章)，他所要做的工作是，根据技术要求列出方框图，对于组合逻辑列出输入-输出真值表(见第十章)；对于时序逻辑列出状态转换表或状态转换图(见第十三章)，进行逻辑设计，选择合适的数字集成块，将它们安装起来。因而数字电路的设计实际上已脱离脉冲电路而发展成为一门新学科——数字电子学。它所研究的一个主要问题是逻辑设计，其所需的数学工具是

开关代数(逻辑代数)和高等代数一类离散量的分析方法。当然,脉冲电路也在往集成化方向发展,但它所研究的是各种特殊波形的产生与变换,它所应用的数学工具是微分方程和拉氏变换一类的暂态分析方法。

编者认为,从学科体系来说,脉冲与数字电路应该被认为是两门不同的课程。其所以作为一门课程是有其历史原因的,并由现行教学计划所规定。

基于以上原因,这本教材也是分成两部分编写的。第一部分是脉冲电路;第二部分是数字电路,而模-数与数-模转换则为二者之接口电路,我们也把它放在第二部分。

在本章中,我们将讨论脉冲电路的主要数学分析方法,至于数字电路设计的一些数学基础知识,我们将延至第九章、第十章来讨论。

1-3 脉冲波形的主要参数

在本节中,我们将讨论脉冲波形的一些主要参数。由于脉冲波形千变万化,其参数也各不相同。这里我们只讨论一种最常见的接近矩形的脉冲波形。一个这样的脉冲波形可以简单地分成前沿、平顶和后沿三部分,如图 1-2(a) 所示。图中 t_r 称为前沿或上升时间, t_f 称为后沿或下降时间, AB 称为平顶部分。除前后沿外,脉冲波形的主要参数还有幅度 V_m , 平顶倾斜 ΔV 以及脉冲宽度 t_p 。实际的脉冲波形往往离理想情况较远,如图 1-2(b) 所示。在这里,前后沿与平顶部分没有明显的分界。因此,按照惯例我们以最大幅度的 10% 至 90% 的点为测量点,由 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 的时间称为上升时间;由 $0.9V_m$ 下降到 $0.1V_m$ 的时间称为下降时间。至于脉冲宽度则以根部前后沿 $0.1V_m$ 两点间的时间间隔来计算,有时

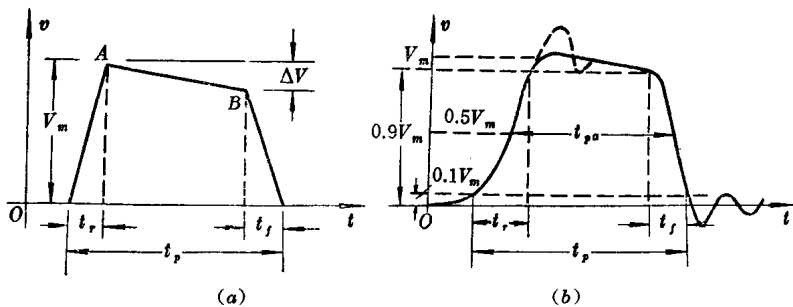


图 1-2 脉冲波形的主要参数

也有以 50% 最大幅值间的时间间隔 t_{p0} 来代表脉冲宽度，我们称之为有效脉宽。在图上后沿部分还出现一些振荡。有时在前沿也可能出现振荡或上冲 δ ，如图中虚线所示。

如大家所熟知的，脉冲的前后沿愈陡，其频谱所占带宽愈宽。如果要一个网络不失真地传送这个脉冲，它就必须有足够的带宽。实验证明，脉冲波形上升(下降)时间与带宽的关系可以近似地以下式来表示

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

式中 t_r 为上升时间(0.1 V_m 至 0.9 V_m)， B 为 3 分贝带宽。

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

图 1-1 或 1-2 所表示的都是视频脉冲。它们的频谱由低频一直延伸到高频。如果以这样一个视频脉冲来调制一个高频振荡(载波)，使高频振荡的振幅随视频脉冲波形而变化，则我们得到一个射频脉冲。在本教材里，我们将只考虑视频脉冲电路。

1-4 研究线性电路过渡过程的数学方法

如上所述，脉冲波形是指其作用时间可与电路的过渡过程相

比拟的电压或电流波形。因此，研究脉冲的产生与变换归根到底就是研究电路在某一外电动势作用下，或当电路某一部分参数发生突变时（例如由于某一支路的闭合或开启）而发生的过渡过程。

脉冲电路通常都包含有非线性元件，例如晶体管、场效应管或某些负阻器件（如隧道二极管，*pnpn*型管等），它们多半工作在开关状态。在分析时，我们往往将它们的特性分段线性化，即以分段折线来表示它们的外特性。这样，脉冲电路的分析仍可归结为线性电路过渡过程的分析。

研究线性电路过渡过程的方法，读者已经在电路分析的基础课程中学过。为了以后使用方便起见，这里仍作一般复习性的叙述。关于这方面详尽的论述请参阅有关书籍。如果读者已经熟悉这一部分内容，则可以跳越之。

在脉冲电路中，我们感兴趣的是脉冲波形及其参数，因此我们总是直接从时域来对电路进行分析。作为直接从时域分析线性电路过渡过程的方法，可以举出以下几种：

1. 经典法——直接求解微分方程的方法

在一个线性非时变集总参数电路中，某一个支路的电压或电流总可以表示为一个 n 阶线性常系数微分方程，如以下形式

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx(t)}{dt} + a_0 x(t) \\ = b_m \frac{d^m y(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} y(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dy(t)}{dt} + b_0 y(t) \quad (1-2) \end{aligned}$$

其中， $x(t)$ 为待求的变量（电压或电流）； $y(t)$ 为给定的变量（外加激励函数，电压源或电流源）。

这样的线性微分方程的解将包括两个部分，即通解和特解。前者是相应于式(1-2)的齐次方程（即方程等号右边为零）的解，它包含有 n 个待定常数，这些常数将由电路的起始状态即当 $t=0$ 时的

x 值及其各阶导数值

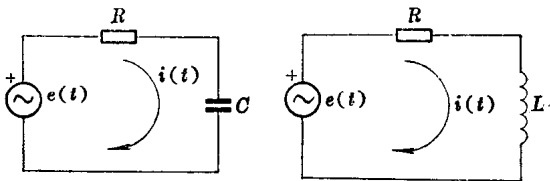
$$x(0), \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0}, \left. \frac{d^2x}{dt^2} \right|_{t=0}, \dots, \left. \frac{d^{n-1}x}{dt^{n-1}} \right|_{t=0}$$

所决定。在给定的起始条件下, 这样的解将是唯一的。

这种经典法虽然直接而且明瞭, 但当 n 大时, 求解这 n 个常数往往很烦琐。所以除了低阶方程以外, 我们将不采用这种方法。

下面我们将应用这一方法来求解一阶微分方程, 它是在脉冲电路中最经常出现的。

考虑图 1-3 所示的由 RC 和 RL 组成的两个简单电路。



(a) RC 电路

(b) RL 电路

图 1-3 简单的 RC 和 RL 电路

对于图 1-3(a), 我们有

$$iR + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = e \quad (1-3)$$

微分并两边乘以 C , 得

$$RC \frac{di}{dt} + i = C \frac{de}{dt} \quad (1-4)$$

对于图 1-3(b), 我们有

$$iR + L \frac{di}{dt} = e$$

或

$$\frac{L}{R} \frac{di}{dt} + i = \frac{e}{R} \quad (1-5)$$

式(1-4)和式(1-5)均可写作以下形式

$$\tau \frac{dx}{dt} + x = y \quad (1-6)$$

式中 $y(t)$ 为激励函数, $x(t)$ 为响应函数。

事实上, 对于含有一个电抗元件的 RC 或 RL 电路, 不论是以哪个支路的电压或电流, 或电容上所储存的电荷, 或电感中的磁通量为变量 $x(t)$ 来列出方程式, 它必然是上述形式的一阶微分方程。

现在考虑激励函数为常数的特殊情况, 即

令

$$y(t) = a$$

得

$$\tau \frac{dx}{dt} + x = a \quad (1-7)$$

式(1-7)的全解包括两个部分。第一部分是其相应齐次方程

$$\tau \frac{dx}{dt} + x = 0 \quad (1-8)$$

的解, 称为通解, 它是

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

A 是个待定常数, 决定于电路的起始条件。

第二部分是特解, 显然

$$x = a$$

是一个特解, 因为它满足式(1-7)。

因此式(1-7)的全解为

$$x(t) = Ae^{-t/\tau} + a \quad (1-9)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 右边第一项趋于 0, 故

$$x(\infty) = a$$

以上式及起始条件 $x(0)$ 代入式(1-9)得

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