

脉 冲 电 路

西北电讯工程学院 201 教研室

《脉冲电路》编写组 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍脉冲电路，内容分为四篇：1. 惯性电路、晶体管开关及波形加工电路；2. 脉冲形成电路；3. 脉冲产生电路；4. 利用特殊器件（包括用隧道二极管等负阻器件和集成运算放大器等）构成的脉冲电路。此外还有四篇附录：Ⅰ. 晶体管的最大定额；Ⅱ. 集中参数的延迟线；Ⅲ. 用数字集成电路构成的脉冲电路；Ⅳ. 模拟开关。

本书可作大专院校理工类有关专业的基础课教材，也可供技术人员和在职青年工人学习参考。

脉 冲 电 路

西北电讯工程学院 201 教研室

《脉冲电路》编写组 编

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

农业出版社印刷厂印刷

787×1092¹/₁₆ 印张17¹/₄ 400千字

1979年7月第一版 1979年7月第一次印刷 印数：00,001—59,000册

统一书号：15034·1833 定价：1.80元

前 言

本书是在一九七三年西北电讯工程学院 201 教研室和西北工业大学 603 教研室合编的《脉冲电路》的基础上修订而成的。

和原书相比较,本书适当加强了基础。我们认为,脉冲电路作为电子电路的一个分支,它具有一般电子电路的共同性,同时又有它的特殊性。在学习了线性电路和放大电路以后,进一步学习脉冲电路,主要应注意掌握脉冲电路特殊的工作原理和分析方法。在修订中注意了这些基础知识的加强。此外,还增编了近年来新发展的一些脉冲电路。

考虑到目前合适的参考书籍较少,为了便于工作中进一步学习和参考,我们编写的面适当宽了一些。对属于这些内容的章和节,我们都加了[*]号。我们认为,对于初学者,如果将过多的精力用于研究许多具体电路,反而会妨碍对基本内容的掌握。但在对脉冲电路的原理和分析方法基本掌握后,进一步研究一些电路,不仅可扩展知识面,而且能起到巩固和增强基础知识的作用。

原书将脉冲电路和数字电路合编在一起。实际上,近年来数字电路已普遍采用集成电路。数字电路和脉冲电路无论在工作原理上和分析方法上都有很大不同。这次修订时我们将两者分开编写,本书只包含脉冲电路。

这次修订工作,是在小组共同讨论的基础上,由西北电讯工程学院 201 教研室脉冲教学组的同志执笔。在本书修订过程中,较广泛地征求了各方面的意见,但由于我们思想和业务水平很低,实际经验不足,我们感到在用唯物辩证法指导编写方面,在理论联系实际方面,在反映现代科学技术水平方面都存在不少问题,错误一定还不少,我们诚恳地希望同志们在各方面提出批评和意见。

西北电讯工程学院 201 教研室《脉冲电路》编写组

1977年 11 月

目 录

绪论	1	2-1 电路构成及波形计算	65
§ 1 脉冲技术的发展及其在雷达 里的应用	1	2-2 幅度和直线性的矛盾	66
§ 2 脉冲技术的特点和本书的内容	2	2-3 缩短恢复期的措施	67
§ 3 脉冲设备举例	3	2-4 快速锯齿波电路	69
 第一篇 惰性电路和晶体管开关, 以及波形加工电路		2-5 简单锯齿波电路的参数选择	70
 第一章 惰性电路和晶体管开关	6	§ 3 用补偿的方法改善直线性	70
§ 1 简单惰性电路的暂态过程	6	3-1 正向补偿电路 (自举电路)	71
1-1 $R-C$ 电路	6	3-2 负向补偿电路 (密勒电路)	81
1-2 $R-L$ 电路	8	§ 4 用稳流的方法改善直线性	85
1-3 $R-L-C$ 电路	9	§ 5 锯齿电流波形成电路	86
§ 2 晶体管开关	13	5-1 用途	86
2-1 晶体二极管开关	13	5-2 偏转线圈的等效电路和得到锯齿 电流的方法	87
2-2 晶体三极管开关	14	5-3 梯形电压形成电路	89
2-3 晶体管的开关参数	18	5-4 三极管电流放大器	89
2-4 实际惰性电路举例	20	5-5 多级电流负反馈电路	91
2-5 晶体二极管的开关惰性	30	5-6 射极输出电路	92
2-6 晶体三极管的开关惰性	32	 第四章 窄脉冲和断续正弦波形 成电路	96
2-7 各种基本开关电路	38	§ 1 窄脉冲形成电路	96
2-8 场效应管开关	42	1-1 微分电路	96
 第二章 波形加工电路	46	1-2 峰化电路	100
§ 1 限幅器	46	* 1-3 利用长线 (传输线) 形成 脉冲的电路	102
1-1 限幅器的用途	46	§ 2 断续正弦波形成电路	108
1-2 二极管限幅器的原理	46	2-1 断续正弦波的用途和它对它的要求	108
1-3 二极管限幅器的几个实际问题	48	2-2 简单的振铃电路	108
1-4 三极管限幅器	51	2-3 加补偿的振铃电路	110
1-5 限幅器对耦合电路的影响	54	* 2-4 高频振铃电路	111
§ 2 钳位器	56	 第三篇 脉冲产生电路	
2-1 二极管钳位器	57	 第五章 触发电路和多谐振荡器	115
2-2 钳位器的实际问题	58	§ 1 双稳触发电路	115
2-3 三极管的基极钳位	60	1-1 双稳触发电路的基本原理	115
 第二篇 脉冲形成电路		1-2 两个稳定状态的获得	117
 第三章 锯齿波形成电路	64	1-3 双稳触发电路的触发方法	119
§ 1 锯齿电压波的用途和对 它的要求	64	1-4 双稳触发电路的翻转过程	122
§ 2 简单锯齿波形成电路	65	§ 2 单稳触发电路	126
		2-1 单稳触发电路的构成和工作原理	126
		2-2 波形计算	127
		2-3 单稳触发电路的改进	129
		2-4 单稳触发电路的设计	135

2-5 单稳触发电路的干扰影响	136
§ 3 多谐振荡器	137
3-1 多谐振荡器的工作过程	138
3-2 多谐振荡器的不对称系数	138
3-3 多谐振荡器的同步和分频	139
* 3-4 长周期的多谐振荡器	140
* 3-5 多谐振荡器用作电压-频率变换器	141

第六章 触发电路和多谐振荡器

的变型电路	145
§ 1 射极耦合单稳触发电路	145
1-1 射极耦合单稳触发电路的工作原理	145
1-2 射极耦合单稳触发电路的波形计算	146
§ 2 射极耦合双稳触发电路	150
2-1 射极耦合双稳触发电路的工作原理	150
2-2 射极耦合双稳触发电路的回差现象	152
2-3 射极耦合双稳触发电路的用途	154
* § 3 射极定时单稳触发电路和 多谐振荡器	156
3-1 射极定时单稳电路的工作原理 和波形计算	156
3-2 缩短恢复期的电路及简化电路	159
3-3 射极定时多谐振荡器	160
* § 4 互补触发电路和多谐振荡器	162
4-1 互补双稳触发电路	162
4-2 互补单稳触发电路	164
4-3 互补多谐振荡器	165

第七章 间歇振荡器

§ 1 脉冲变压器的基本知识	169
1-1 脉冲变压器的基本特点	169
1-2 脉冲变压器的暂态特性	170
§ 2 间歇振荡器的工作原理和 工作过程	171
§ 3 间歇振荡器的波形计算	174
§ 4 间歇振荡器的几个实际问题	176
4-1 变压器磁饱和的影响	176
4-2 三极管存储时间对脉冲宽度的影响	177
4-3 避免反峰峰过大的电路	178
4-4 去耦电路	179
§ 5 其它型式的间歇振荡器	180
5-1 集-射耦合和射-基耦合的间歇振荡器	180
5-2 触发式间歇振荡器	180

第四篇 利用特殊半导体器件和 线性集成电路的脉冲电路

第八章 负阻式脉冲产生电路

§ 1 隧道二极管脉冲产生电路	184
1-1 隧道二极管的原理和特性	184
1-2 隧道二极管张弛振荡电路	186

§ 2 单结晶体管脉冲产生电路	194
2-1 单结晶体管的原理和特性	194
2-2 单结晶体管张弛振荡电路	195
* § 3 其它负阻式脉冲产生电路	199
3-1 雪崩三极管脉冲产生电路	199
3-2 可控硅整流元件	200
3-3 用多个晶体管构成等效负阻器件	203
* § 4 用阶跃恢复二极管形成窄脉冲	204

* 第九章 线性集成电路在脉冲电路

中的应用

§ 1 锯齿电压波形成电路	209
1-1 工作原理和精度	209
1-2 集成运放频率特性和压摆率的影响	212
§ 2 开关特性折线化和限幅器	215
§ 3 张弛振荡电路	217
3-1 用集成运放做开关元件和比较器	217
3-2 电压比较电路和施密特触发器	219
3-3 单稳触发电路和多谐振荡器	222
3-4 用线性锯齿电压控制的单稳触发电路 (幻象电路)	224
3-5 电压-频率变换器	225

附 录

* 附录 I 晶体三极管的最大定额

§ 1 电压的最大定额	230
§ 2 电流的最大定额	236
§ 3 最大容许温度和最大容许功耗	237
§ 4 晶体三极管的二次击穿	240

* 附录 II 延迟线

§ 1 K式延迟线	245
(一) K式滤波节的特性阻抗和相位特性	245
(二) K式滤波节的暂态特性	247
(三) K式延迟线的设计	248
§ 2 m式延迟线	249
(一) m式滤波节的特性阻抗和相位特性	249
(二) m式滤波节的暂态特性	250
(三) m式滤波节的实际构成	251
(四) m式滤波节的绕制	251

附录 III 集成与非门电路构成的脉冲

产生电路

§ 1 集成与非门电路的特性	253
§ 2 单稳态触发电路	256
§ 3 振荡器	258
§ 4 施密特双稳触发电路	262

附录 IV 模拟开关

§ 1 晶体三极管模拟开关	263
§ 2 场效应管模拟开关	266
§ 3 二极管桥式模拟开关	269

绪 论

§ 1 脉冲技术的发展及其在雷达里的应用

无线电技术发展初期,在无线电通信里,一般采用正弦形的信号,而很少用到其它波形。随着无线电技术应用的日益广泛,特别是在一些电子测试仪器里,单有正弦波形就不能满足要求,它们要用到另外一些形状的波形,通常广义地把这些非正弦波形统称之为脉冲。

脉冲的广泛应用,还是在电视、雷达等出现以后。在这些设备里,脉冲已成为主要波形。随着雷达、电视和电子测试技术的发展,应用的波形种类越来越多,对波形的要求也越来越严格。有关脉冲波形的产生、形成、加工、测量和放大等问题,虽然和一般电子技术有很多共同之处,但也有它一定的特殊性,因而对脉冲的研究逐渐形成为电子技术的一个分支,而且是极其重要的一个分支,我们称它为脉冲技术。

对脉冲技术的研究反过来又推动了整个电子技术的发展,现在不仅是在雷达、电视里,而且在电子仪器、数字通信、自动控制和一系列电子设备里,都采用了脉冲技术。

脉冲技术在雷达里的应用十分广泛。随着雷达的发展,对脉冲技术也提出越来越高的要求。例如目标综合显示,要求快速地产生各种复杂波形,而且相互间精密配合;动目标选择雷达,要求提供稳定可靠的脉冲相消设备;相控雷达则要求提供大电流的波控器等等。总的说来,在要求解决复杂任务的同时,对脉冲设备在工作速度、精度、可靠性以及小型化等方面的要求也日益提高。

近十余年来,脉冲电路的主要电子器件——电子管——已被晶体管、集成电路和其它半导体器件所代替。晶体管等体积小、重量轻、耗电省、可靠性高,而且特性多样化,因而在应用方面比较灵活,且易于做成高性能的电路,这就使脉冲电路的内容较之过去更加丰富。

近年来,由于雷达应用范围的扩大,要求它解决的问题也日趋复杂,这使脉冲技术在雷达里的应用又有了新的发展,在脉冲技术基础上发展起来的数字技术在雷达里开始普遍应用。数字技术有运算灵活、精度高、稳定性好和调整方便等优点,用它来解决数据处理以及信号加工等方面的问题,与原先的模拟方法相比较,有着明显的优越性。

过去数字技术在雷达设备方面主要用于信息的二次处理,如目标航迹的计算等,这主要是雷达和电子计算机配合使用。近十余年来,由于集成电路,特别是大规模集成电路的迅速发展,使设备的可靠性和体积、重量等方面的问题得到解决,因而能够把复杂的数字设备做得工作可靠而又不大。近年来,雷达的许多一次处理设备也逐渐改用数字设备,如数字式测距、测角和测速,数字式信号检测,数字信号处理和数字式自动距离跟踪等等,应用越来越广。有些场合,甚至用数字的方法形成或产生精确的波形。

但是,数字技术在雷达中的广泛应用,并不能完全代替以脉冲技术为基础的模拟设备。

一般地说,完成类似的任务,模拟电路在精度和稳定度方面不如数字电路,但电路要简单得多,设备量也少得多。所以目前在低、中精度和稳定度不高的场合,模拟设备仍占主要地位。而且近年来由于线性集成电路等高精度器件的广泛应用,有可能构成精度和稳定度较高的脉冲电路。因此,对从事雷达工程的人员,脉冲技术仍然是重要的专业基础和不可少的工具。

§2 脉冲技术的特点和本书的内容

脉冲这个词包含着脉动和短促的意思,开始用它来称呼存在时间短暂的波形〔图1(a)],后来由于大量新波形的出现,又把脉冲这个名称推广到存在时间并不是很短的波形〔图1(b)]。广义地说,通常把一切非正弦波形,都统称之为脉冲。所以这样做,是由于这些波形之间有着共同的特点。

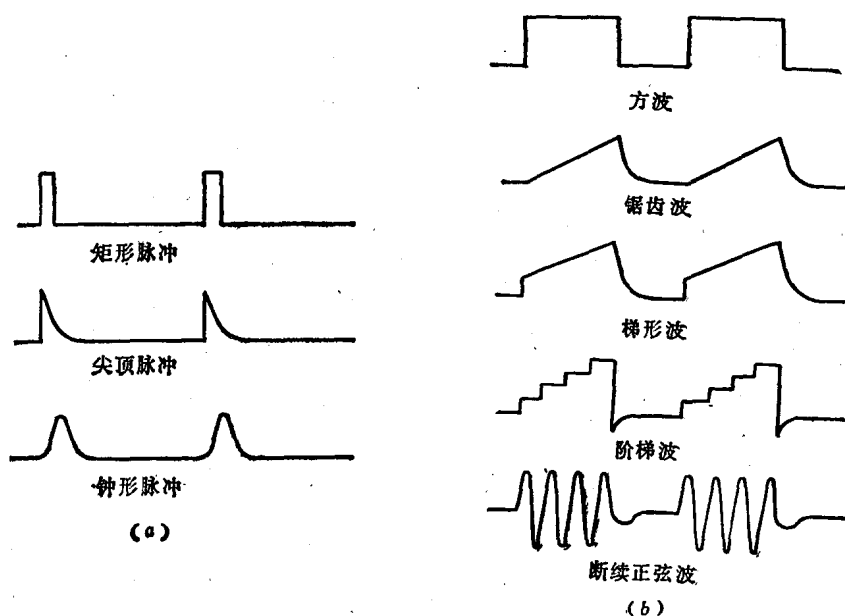


图1 各种脉冲波形

图1所示的波形,乍看起来,似乎各不相同。但如果对它们进行仔细分析,就会发现这些波形有一个共同特点,这就是整个波形是由若干个暂态过程段所组成。我们知道,得到暂态过程,电路必须包含两个主要组成部分:一个是开关部分,另一个是惰性电路部分。开关用来破坏电路的稳态,使之产生暂态过程,而惰性电路则用来控制暂态过程的形状和变化的快慢。

开关位置的转换一般有两种方式:一种是用外力来控制开关的通断;另一种是电路本身具有使开关通断转换的性能。根据开关动作的方式,可以把获得脉冲的电路分作两大类:开关受外力控制的叫脉冲形成电路;自身具有转换能力的叫脉冲产生电路。

脉冲电路除了上述两大类外,还有波形加工电路,它是将已有的波形作某些加工,以适应新的需要。

本书包含脉冲电路的主要内容,共分四篇。第一篇是惰性电路和晶体管开关,以及波形加工电路。前面已经提到过,惰性电路和开关是脉冲电路的基本组成部分,在讨论各种

具体脉冲电路之前，先对这两个基本部分作一些研究将为后面的学习打下基础。

第二篇和第三篇是脉冲形成电路和脉冲产生电路，对这两大类脉冲电路将作较详细的研究。

第四篇是利用特殊器件构成的脉冲电路，主要内容有二：其一是用隧道二极管等负阻器件构成的电路，其中许多是超高速电路，用以产生和形成特窄的（毫微秒级的）脉冲；其二是用集成运放等线性集成电路构成的电路，用以产生和形成高精度、高稳定度的波形。我们知道，高速、高精度和高稳定度是脉冲技术发展的几个重要方面，它们已比较广泛地应用于现代雷达设备。

由于脉冲电路的内容很多，应用十分广泛，要在本书中全部加以研究是不可能的，也是不必要的。我们认为，通过基本内容的学习，掌握了脉冲技术的基础知识，学会了分析和解决脉冲电路的基本方法，今后碰到一些复杂问题也是不难解决的。相反，如果主要精力用于研究繁琐的具体电路，反而可能妨碍对脉冲技术实质的掌握。

本书除了四篇主要内容外，还有四篇附录，它们是晶体管的最大定额，集中参数的延迟线，用数字集成电路构成的脉冲电路，以及模拟开关。

§3 脉冲设备举例

为了大致了解脉冲电路有那些种类，以及它们有什么作用，在这里我们举一个雷达中常用的脉冲设备的例子——雷达显示器的复式时间刻度产生器。

在雷达显示器里，为了测距方便和精确，常采用电刻度标志，即把刻度标志和信号同时显示在示波管的萤光屏上（图2）。由于刻度数目太多，读数不便，因此就有必要采用复式刻度，例如图中每一小刻度表示25公里，每一大刻度表示100公里，这就很容易读出目标的距离。

根据示波器的原理，我们知道，要在萤光屏上显示出图2的图形，必须在示波管的水平偏转板加锯齿波〔图3（b）〕，而在垂直偏转板加发射脉冲〔图3（a）〕，而且这两个电压波的时间起点必须和发射脉冲相一致。

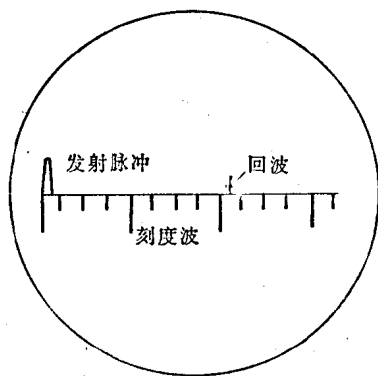


图2 电刻度标志

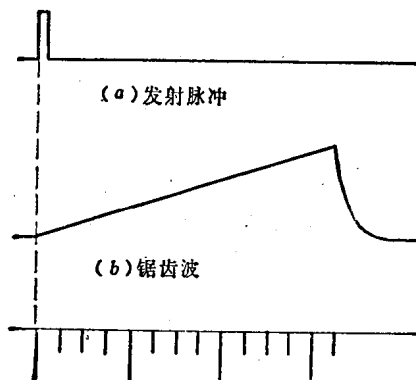


图3 产生电刻度的波形

得到锯齿波比较简单，但要得到复式刻度波则需要几个电路组合，图4是它的方框图。下面概略介绍各部分的作用。

图5是设备中各点的波形图。与发射脉冲同步的定时脉冲①加到方波产生器，使之产

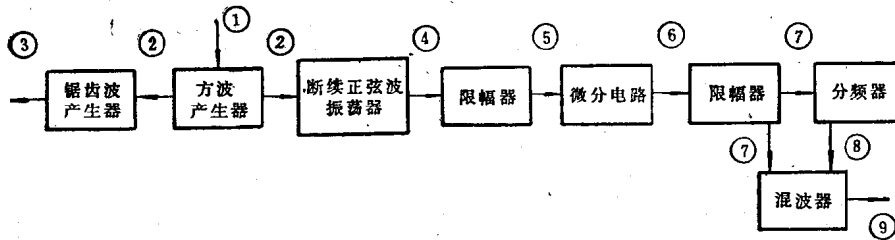


图4 复式刻度产生设备的方框图

生起点和发射脉冲相一致的方波②。这个方波作为开关信号送到锯齿波形成电路和断续正弦波形成电路，打开这两个电路的开关，使之产生各自的暂态过程，即得到锯齿波③和断续正弦波④。断续正弦波的周期由电路参数决定，我们使它的周期相当于电波往返25公里所需的时间。把断续正弦波送到一个波形加工电路——限幅器，把正弦波加工成方波⑤，然后用微分电路把方波变成窄脉冲，微分电路的作用是在方波变化时输出窄脉冲，而且随着方波的上跳或下跳相应地产生正或负的脉冲⑥，负脉冲是没有用的，用限幅器将它削去，因而在限幅器输出得到时间间隔相当于25公里的小刻度波⑦。将这一串小刻度波加到分频器，分频器把输入信号的重复频率减低到四分之一，因而在其输出得到时间间隔相当于100公里的大刻度波⑧。最后把大小刻度波通过混波器相加起来，得到所需的复式刻度波⑨。

至于各级的详细工作过程这里不准备讨论，这将是今后各章的内容，而且讨论的范围比这个例子广泛得多。

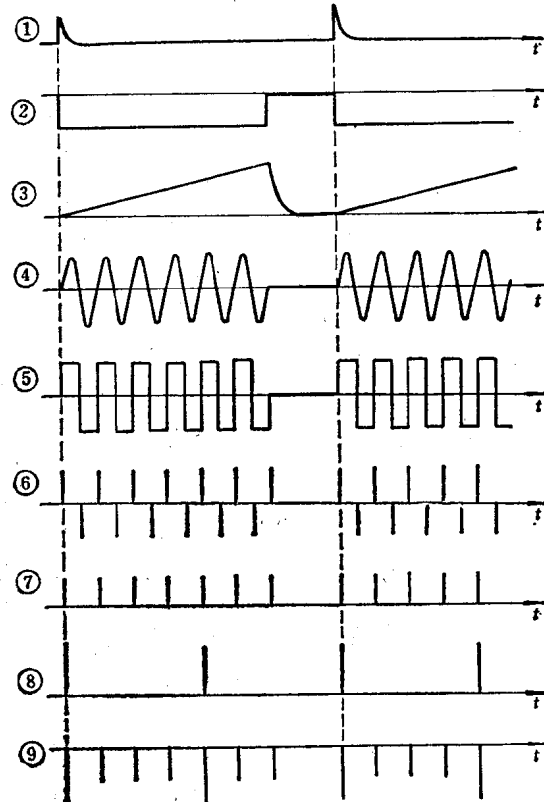


图5 复式刻度产生设备的波形

第一篇 惰性电路和晶体管开关, 以及波形加工电路

脉冲技术的内容很丰富,应用也很广泛。脉冲技术的特点之一是波形种类多和线路形式多。即便是同一种基本电路,由于用的地方不同,为了满足所提出的特殊要求,还可能演变出很多种变形电路。乍看起来,脉冲电路真是花样繁多,变幻莫测。

其实,不管脉冲电路怎样复杂,怎样变化,万变不离其宗,它总是由开关和惰性电路两部分所组成;而数字电路则是多个开关电路的组合。任何一种新电路的构成或改进,都可归结为开关和惰性电路的联结以及性能的提高。

为了深刻掌握脉冲技术的实质,研究各种电路中开关和惰性电路或各开关电路的相互联结,即从总体上了解其特殊性是十分重要的。这也是以后各篇的主要内容。但是,“不但要在各个矛盾的总体上,即矛盾的相互联结上,了解其特殊性,而且只有从矛盾的各个方面着手研究,才有可能了解其总体。”为此,在讨论各种具体的脉冲电路之前,有必要对最常用的基本惰性电路和晶体管开关的特性、参数以及分析方法作一些研究。

波形加工电路也是今后常碰到的,这些电路通常由很少几个元件组成,它们往往是作为一个部件附属在各种脉冲电路里,因此在讨论具体脉冲电路之前,对简单的波形加工电路作一些研究也是很必要的。

这一篇实际上是全书的基础,它将为本课程的学习作准备。

第一章 惰性电路和晶体管开关

在这一章里我们将研究脉冲电路主要元件的特性、参数及其分析方法。其实脉冲电路最常用的元件无非是电阻、电容、电感以及晶体管等等，和一般电子电路没有什么区别。但它们的作用并不完全相同，例如在脉冲电路里，电容和电感通常用作惰性元件，利用它们的惰性构成具有一定暂态特性的惰性电路；而晶体管和集成电路通常用作开关元件，利用开关的通断来改变电路的状态[●]。这些成为脉冲电路不同于一般电子电路的特殊性，不了解这些特殊性就不可能正确认识和运用脉冲电路。为此，在研究各种具体脉冲电路之前，有必要先将惰性电路和晶体管开关的基本知识作一些讨论。

§ 1 简单惰性电路的暂态过程

脉冲电路中最常用的惰性电路是很简单的，它的种类并不多，主要有 $R-C$ 电路、 $R-L$ 电路和 $R-L-C$ 电路。利用这些电路的暂态特性可以形成一定形状的脉冲或控制电路中开关的通断时间。这些是脉冲电路最基本的工作方式，在所有脉冲电路里差不多都会碰到它。为此，下面分别对上述三种电路的暂态特性作一些研究。这些电路的暂态特性的研究属于“线性电路”的内容，这里只是作重点复习，并根据脉冲电路的应用特点进一步作一些说明。

1-1 $R-C$ 电路

(一) $R-C$ 电路的暂态特性

$R-C$ 串联电路如图 1-1(a) 所示。当开关 K 把电源接通时，电阻 R 上的电压 v_R 同电容上的电压 v_C 之和等于外加电源电压 E 。在电源接通的一瞬间，电容上的电荷不能突然建立，它上面的电压等于零；全部电压 E 都加在电阻上。随着电容电荷的增加， v_C 越来越大， v_R 越来越小；最后 v_C 增加到等于 E ，而 v_R 则减小到零。这两个电压的变化如图 1-1(b) 所示。利用微分方程可以对上述两个电压的变化作定量分析。图 1-1(a) 电路的电流 i 等于

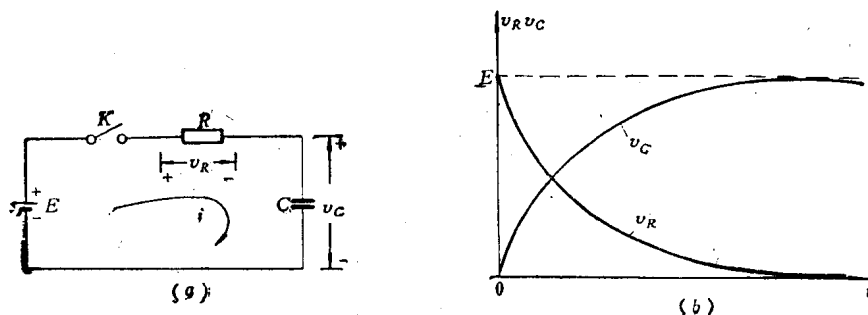


图1-1 $R-C$ 串联电路

● 有些场合，晶体管和线性集成电路也用作放大元件，同其它惰性元件一起，构成所谓有源惰性电路。

$$i = C \frac{dv_c}{dt} = \frac{E - v_c}{R}$$

稍加整理即得

$$\frac{dv_c}{dt} + \frac{1}{RC} v_c - \frac{E}{RC} = 0$$

上式是一阶常微分方程，解这个方程，得

$$v_c = E + Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-1)$$

式中 A 是由起始条件确定的待定常数。

由于 $t = 0^+$ 时， $v_c = 0$ 。将这一条件代入 (1-1) 式，得 $A = -E$ 。从而得到 v_c 和 v_R 的表示式：

$$\left. \begin{aligned} v_c &= E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \\ v_R &= E - v_c = Ee^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 $\tau = RC$ ，是电路的时常数。(1-2) 式也就是 $R-C$ 串联电路的暂态特性。

我们知道，简单 $R-C$ 电路里的电压电流按指数律变化，因此对这类电路没有必要每次都去列微分方程，而可以直接写出其结果：

$$v(t) = v(\infty) + [v(0^+) - v(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-3)$$

式中 $v(0^+)$ 是起始值；

$v(\infty)$ 是趋向值；

τ 是电路时常数。

只要从电路确定出 $v(0^+)$ 、 $v(\infty)$ 和 τ 三个要素的数值，就可以把它们代入 (1-3) 式直接写出电压（或电流）变化的表示式。这种方法称为三要素法。

从 (1-3) 式可以算出时间 t 为任意正值时的电压值。如果要计算电压到达某一规定值的时间，也可从 (1-3) 式推导出它的计算式。设该电压值和相应的时间分别为 $v(T_1)$ 和 T_1 ，把它们代入 (1-3) 式，得

$$v(T_1) = v(\infty) + [v(0^+) - v(\infty)]e^{-\frac{T_1}{\tau}}$$

稍加整理，得

$$T_1 = \tau \ln \frac{v(\infty) - v(0^+)}{v(\infty) - v(T_1)} \quad (1-4)$$

(1-3) 和 (1-4) 式今后经常用到，我们不仅要知道它们的来源，而且应记住其结果，并能熟练地应用它。

(二) 暂态持续期、暂态宽度和时常数的关系

(1-2) 式表明， $R-C$ 电路的暂态特性决定于电路的时常数。为了对暂态过程和时常数的关系有较清晰的概念，我们举一些数字例子。以 (1-2) 式中的 v_R 为例，设电源接通的

一瞬间 v_R 的值为 100, 随后电压和时间的关系为:

t	0	τ	2.3τ	3τ	5τ
v_R	100	37	10	5	0.7

把电压和时间的关系仔细画出如图 1-2 所示。从图中的曲线可以看出, 在开关刚接通时, 由于 v_C 小, 所以充电电流大, 这时 v_C 的建立和 v_R 的减小都比较快。到后来充电电流越来越小, v_R 的减小也越来越慢。从理论上说, 电路要达到稳定 (即 v_R 减小到等于零), 其时间将是无穷长。因此, 我们不能用完全到达稳定所需的时间来说明暂态过程的长短, 需要另立标准。

在许多场合, 我们把 v_R 减小到起始值的十分之一的时间 (2.3τ) 作为暂态过程的宽度。但在有些场合, 主要考虑电容电压是否已经充满, 这时又往往以 ($3\sim 5$) τ 作为标准, 称为暂态持续期。因为经过 3τ 后, v_R 已经只有起始值的 5%, 经过 5τ 后只剩下 0.7%, 可近似认为暂态过程至此结束。

在有些场合, 对精度要求很高, 譬如说误差应小于 0.1%。R-C 电路用于这些场合必须有更长的时间, 使电路更接近于稳态。上面说过, 经过 2.3τ , v_R 减小到起始值的十分之一。再经过 2.3τ , v_R 又会减小到剩余值的十分之一, 即起始值的百分之一。由此类推, 只要经过 $6.9\tau (=3 \times 2.3\tau)$, v_R 便减小到只有起始值的千分之一。

从图 1-2 我们还可以看出, v_R 和 v_C 曲线斜率的绝对值是逐渐减小的, 起始时等于 $|E/\tau|$, 然后逐渐减小, 最后趋于零。

根据上面所说的特点, 只要知道了时常数 τ , 就可以把电压变化曲线很快画出。如图 1-2 所示的电压 v_R 曲线, 首先把电压起始点 A 和横轴上 $t = \tau$ 的点 B 连成一直线[●], 这直线的斜率为 $-E/\tau$, 它是电压 v_R 起始点的切线, 然后再根据 $t = \tau, 3\tau, 5\tau$ 时的几个电压特定值, 就可以把曲线大致描出来。

由于描绘波形是研究脉冲电路必不可少的, 上述简易作图法今后经常用到。

(三) R-C 电路的特点

R-C 电路的特点是结构简单, 电阻和电容都是体积小、重量轻的元件。它的另一个特点是暂态过程的宽度可以在很宽的范围里变化。如果取 $R = 1$ 兆欧, $C = 10$ 微法, 电路的暂态宽度达 23 秒; 如果 $R = 1$ 千欧, $C = 20$ 微微法, 其暂态宽度只有 46 毫微秒。上述的阻容值都是通用的数值, 甚至还可以选用更大或更小的数值, 使电路暂态宽度有更大的变化范围。

由于 R-C 电路有上述特点, 它是脉冲电路里用得最多的。

1-2 R-L 电路

R-L 串联电路如图 1-3(a) 所示, 当开关 K 把电源接通时, 由于电感中电流不能突然建立, 电路的起始电流为零, 电阻上没有压降, 电压 E 全部加在电感上。

● 不论趋向值是否为零, 都应以趋向值为横轴。

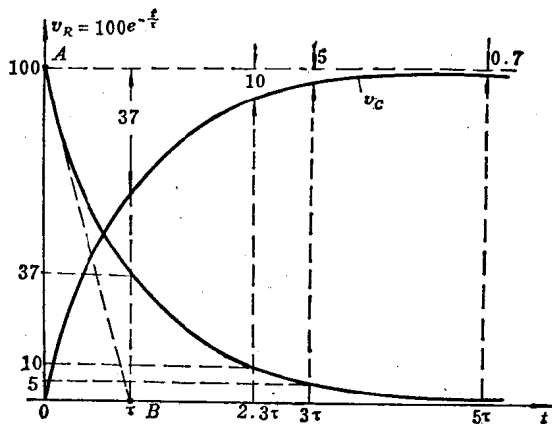
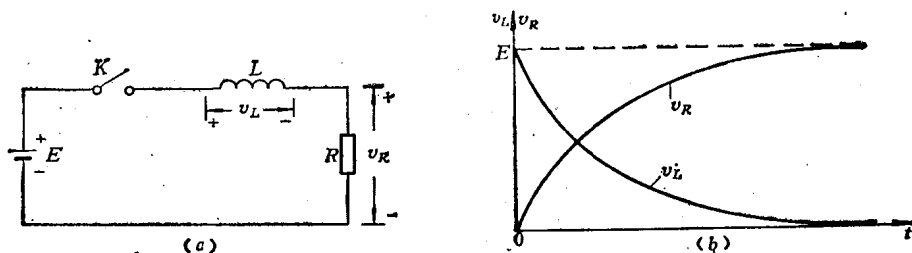


图1-2 $e^{-\frac{t}{\tau}} \sim t$ 的曲线

图1-3 $R-L$ 电路

随着电感电流的建立, v_R 越来越大, v_L 越来越小。电路到达稳定后, 全部电压都加在电阻上, 其电压变化如图 1-3(b) 所示。

由于简单 $R-L$ 电路的工作状态也是用一阶常微分方程描述的, 即其电压电流都按指数律变化, 因而可用前面介绍的三要素法直接写出 v_L 和 v_R 的表示式。当开关刚接通的一瞬间, 电感电流不能突变, $v_L(0^+) = E$, $v_R(0^+) = 0$; 电路到达稳定后, $v_L(\infty) = 0$, $v_R(\infty) = E$; 时常数 $\tau = \frac{L}{R}$ 因此, 用 (1-3) 式的结果, 可得

$$\left. \begin{aligned} v_L &= E e^{-\frac{t}{\tau}} \\ v_R &= E (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

由此可见, $R-L$ 电路也可以用改变时常数的办法来改变暂态宽度。但是, 电感线圈, 尤其是当它的电感值较大时, 体积大、重量重, 且不易集成化, 一般脉冲电路都尽量避免用电感线圈, 所以 $R-L$ 电路的应用远不如 $R-C$ 电路广泛。不过电容是电压的惰性元件, 电感是电流的惰性元件, 电感的特殊作用并非都可为电容所代替, 电感线圈还有其它一些作用, 所以脉冲电路里采用电感的地方还是不少的。

1-3 $R-L-C$ 电路

(一) $R-L-C$ 电路的暂态特性

$R-L-C$ 电路也是脉冲电路里常用到的简单惰性电路。由于用得更多的是并联电路, 所以我们以并联电路为例来讨论它。

图 1-4(a) 是 $R-L-C$ 并联电路, 我们来研究它和电流源接通时的暂态过程。实际上, 电感线圈不可避免有一定的绕线电阻, 但通常可以忽略不计, 在这里也就不考虑它。

在电流源接入的一瞬间, 由于电容电压不能立即建立, 电流 I_0 只流过电容 C , 并对它充电, 因而电路两端逐渐建立起电压。电路到达稳定后, 电流 I_0 将只流过电感, 电路两端的电压也等于零。所以这个电压的暂态过程是从零建立起来, 然后又回到零去。我们知道,

这个暂态过程的形状及长短和并联电阻 R 有很大关系。根据分析, 它以临界电阻 $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$

为分界: 当电阻 $R > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 暂态过程是振荡的 [图 1-4(b)]; 当电阻 $R < \frac{1}{2}$

$\times \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 暂态过程是非周期的 [图 1-4(d)]; $R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 是一种临界情况, 我们把

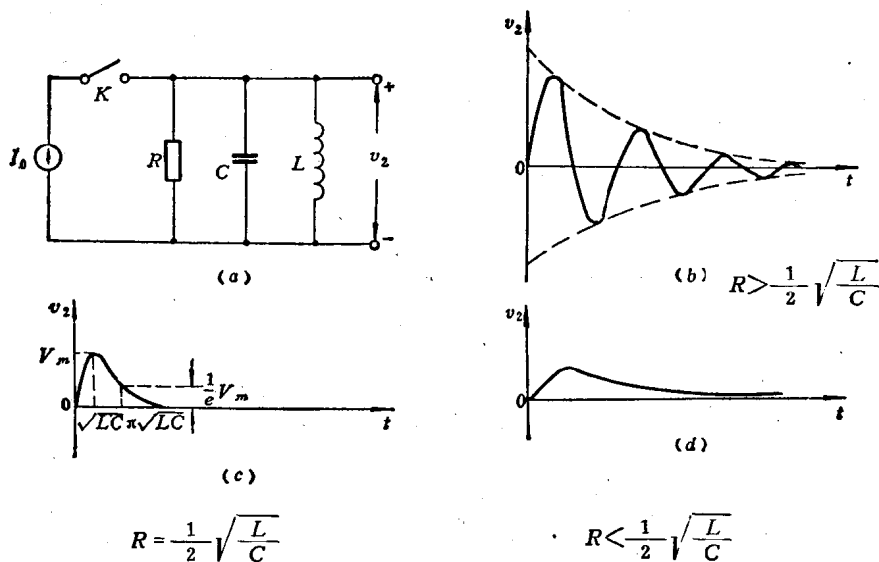


图1-4 R-L-C电路

它叫做临界阻尼，它也是非周期的〔图 1-4(c)〕。

下面对这个暂态过程进行定量分析。

根据基尔霍夫定律，可列出图 1-4(a) 电路的方程为

$$i_C + i_R + i_L = I_0,$$

将上式中的电流以端电压 v_2 表示，得

$$C \frac{dv_2}{dt} + \frac{v_2}{R} + \frac{1}{L} \int v_2 dt = I_0.$$

对上式微分一次，并稍加整理，得

$$\frac{d^2 v_2}{dt^2} + 2\alpha \frac{dv_2}{dt} + \omega_0^2 v_2 = 0 \quad (1-6)$$

式中 $\alpha = \frac{1}{2RC}$ ，称为衰减系数，

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

(1-6) 式是二阶常系数微分方程，它的解为

$$v_2 = Ae^{p_1 t} + Be^{p_2 t} \quad (1-7)$$

式中 p_1 和 p_2 分别为 (1-6) 式特征方程的两个根，它们分别为

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \\ p_2 &= -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

(1-8) 式表明，根据 α 值的大小不同（亦即 R 的大小不同），这两个根有复数、实数和重根等三种情况，这三种情况的电压波形有很大区别，下面分别加以研究。

① $R > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$ (即 $\alpha < \omega_0$) 的情形

这时 (1-8) 式可改写成

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -\alpha + j\omega \\ p_2 &= -\alpha - j\omega \end{aligned} \right\}$$

式中 $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ 。

将上述两根代回到 (1-7) 式, 并考虑 $t = 0^+$ 时 $v_2 = 0$ 和 $\frac{dv_2}{dt} = \frac{I_0}{C}$ 的起始条件, 确定出 A 、 B 两个待定常数, 则 (1-7) 式可写成

$$v_2 = \frac{\omega_0}{\omega} I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (1-9)$$

上式表明, 暂态过程里的电压波形是一个振幅衰减的正弦振荡[图1-4(b)]。并联电阻越大, 衰减系数 α 就越小, 这时振荡的衰减也就越慢。当 R 很大, 即 α 远小于 ω_0 时, $\omega \approx \omega_0$, (1-9) 式还可以写成

$$v_2 = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t \quad (1-10)$$

② $R < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$ (即 $\alpha > \omega_0$) 的情形

这时 (1-8) 式的 p_1 、 p_2 都为实数, 令 $\beta = \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$, 则 (1-8) 式可改写成

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -\alpha + \beta \\ p_2 &= -\alpha - \beta \end{aligned} \right\}$$

将上面两个根代入 (1-7) 式, 并考虑上面已用过的起始条件, 同样处理后, 得

$$v_2 = \frac{I_0}{2\beta C} (e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}) \quad (1-11)$$

上式表明, 电压 v_2 的变化曲线为两个指数式相减。由于 β 为小于 α 的正数, $e^{-(\alpha+\beta)t}$ 随时间变化的衰减要比 $e^{-(\alpha-\beta)t}$ 快。根据上述特点画出的 v_2 波形如图 1-5 所示, 它是非周期的, 我们称之为过阻尼。

从以上讨论可知, 由于指数项 $e^{-(\alpha+\beta)t}$ 较快地衰减掉, 过阻尼时的暂态过程的长短决定于指数 $e^{-(\alpha-\beta)t}$ 。并联电阻越小, $(\alpha - \beta)$ 的值就越小, 其暂态过程也就越长。并联电阻 R 和暂态过程长短的关系也可用物理意义解释: 对于过阻尼的情况, 在电压 v_2 的下降过程里, v_2 的变化相当缓慢, 电容 C 里的电流 $(= C \frac{dv_2}{dt})$ 很小, 这时

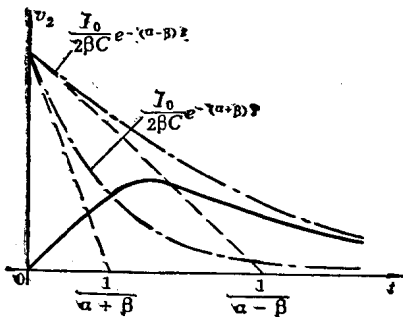


图1-5 过阻尼时的暂态过程

的 R - L - C 电路近似于 R - L 电路。我们知道, 在 R - L 电路里, R 越小, 则时常数 $\frac{L}{R}$ 就越大, 其暂态过程也就越长。

实际上, 在 R 很小, 满足 $\alpha \gg \omega_0$ 时, β 等于

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} = \alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\alpha}\right)^2} \approx \alpha \left(1 - \frac{\omega_0^2}{2\alpha^2}\right) = \alpha - \frac{R}{L}$$

即 $e^{-(\alpha-\beta)t} \approx e^{-\frac{R}{L}t}$ 。这进一步证明了 R - L - C 电路过阻尼时暂态过程的后一段与 R - L 电

路相当。

过阻尼状态还有个特点：在并联电阻 R 较小时，电压的振幅也较小，所以有时用并联很小电阻的方法来减小电压的振幅；但与此同时，其暂态过程就会拖得很长。

$$\textcircled{3} \quad R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{即 } \alpha = \omega_0) \text{ 的情形}$$

这时 (1-8) 式的两个根相等，是重根，其数值为

$$p = p_1 = p_2 = -\alpha = -\omega_0$$

我们知道，重根时 (1-6) 式的解为

$$v_2 = (A + Bt)e^{pt} \quad (1-12)$$

将 $t = 0^+$ 时 $v_2 = 0$ 和 $\frac{dv_2}{dt} = \frac{I_0}{C}$ 的起始条件代入上式，确定出 A 、 B 两个待定常数，代回到 (1-12) 式，并稍加整理，得

$$v_2 = \frac{I_0}{C} t e^{-\frac{t}{\sqrt{LC}}} \quad (1-13)$$

根据上述表示式画出的 v_2 波形如图 1-4(c) 所示。我们称这种情况为临界阻尼。

综上所述，如果把 $R-L-C$ 电路的并联电阻 R 由大变小，则电路的暂态过程由振荡到临界阻尼，再由临界阻尼到过阻尼。我们知道，在振荡时， R 越大，暂态过程就越长；而在过阻尼时， R 越小，暂态过程也就越长。因此，临界阻尼时，其暂态过程最短，今后常利用临界阻尼的这个特点。

可以证明，临界阻尼时电压 v_2 的最大值为

$$V_m = 0.37 I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1-14)$$

它发生在 $t = \sqrt{LC}$ 处。当 $t = \pi \sqrt{LC}$ 时，电压 v_2 只剩下 V_m 的 $1/e$ ；由于在 $R-C$ 或 $R-L$ 电路里将电压下降到起始值 $1/e$ 所需的时间叫时常数，所以我们把 $\pi \sqrt{LC}$ 叫做 $R-L-C$ 电路的等效时常数。

应当指出， $R-L-C$ 电路临界阻尼时的电压曲线不是指数曲线，它下降到最大值的 $1/10$ 时所需的时间是等效时常数的 1.55 倍，而不是 2.3 倍，这一点应当注意到。

顺便提一下：当电路到达稳定后，如果把开关 K 打开，则电感将通过电阻和电容放电，放电时的电压表示式还和 (1-9)、(1-11) 及 (1-13) 式相同，只是极性相反而已。

(二) $R-L-C$ 电路的特点

$R-L-C$ 电路也是我们常碰到的惰性电路之一，主要是利用它的振荡特性。另一些场合，由于电路中用了电感线圈（或变压器），而它们不可避免地存在寄生电容，实际也成了 $R-L-C$ 并联电路，这时常常外加电阻以控制它的暂态特性。

几种简单惰性电路的暂态特性就介绍到这里。惰性电路是脉冲电路的重要组成部分，应用最多的就是上述几种。有时也会用到一些更复杂的惰性电路，大多是在上述几种基础上改进而成的。因此，熟练地掌握这几种简单惰性电路的暂态特性，对在今后构成脉冲电路时选用合适的惰性电路，或将某种惰性电路加以改进，都是很必要的。

个别场合还有用分布参数的长线或仿真线作惰性电路的，它们将在第四章里再介绍。