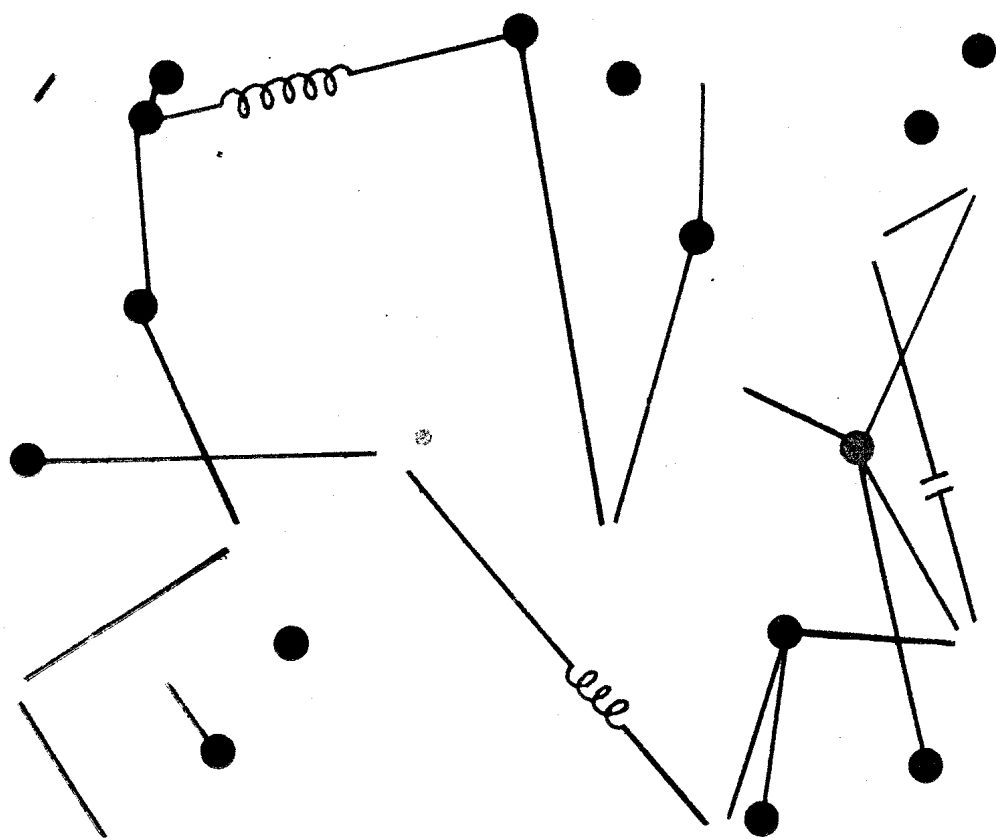


脉|冲|数|字|电|路 过|渡|过|程|分|析

逯昭义 编著

兰州大学出版社



内 容 提 要

本书系统介绍了脉冲数字电路过渡过程分析的各种方法,重点讨论了非线性脉冲数字电路的过渡过程分析。由于本书以瞬态分析为重点讲述脉冲数字电路,因而与目前常见的以逻辑分析为重点的脉冲数字电路书籍形成了并列局面。

本书内容丰富,系统性强,分析方法完备、电路典型齐全,对脉冲数字电路的瞬态分析具有独到之处。本书可作为高等理工院校无线电、计算机、信息科学、自动控制、通信等专业的教学参考书,亦可供有关专业的其它技术人员和函授人员进修学习之用。

脉冲数字电路过渡过程分析

逄昭义 编著

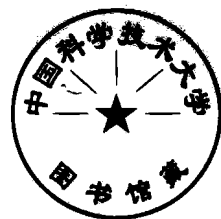
兰州大学出版社出版

(兰州大学校内)

兰州八一印刷厂印刷 甘肃省新华书店发行
开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 18.75

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷
字数: 466千字 印数: 0001—1500册

ISBN7-311-00175-7/O·27 定价: 3.76元



前言

过渡现象论作为大学的教科书，80年代前后，国内、外出现多种版本。它们广泛地分析了在物理学各个领域存在的过渡现象。脉冲数字电路是当前国内、外大专院校无线电类专业的专业基础课程，见版的脉冲数字电路书较多，但它们都是以讲述各种常见脉冲数字电路的工作原理和电路构成为核心，以逻辑分析为重点的。

在多年讲授脉冲数字电路课的过程中，笔者感到，在工程技术中对脉冲数字电路界限速度的要求大幅度提高的情况下，必须全面地、深入地将脉冲数字电路和过渡现象分析联系起来，以过渡过程分析为主线条来研究各种脉冲数字电路。这样做的好处至少有两点：（1）与逻辑分析为主的脉冲数字电路形成并列局面，在该课程的教学相互补充、相互完善，提高教学质量。（2）在工程技术和生产工艺中为提高各种电子元件、器件的界限工作速度，提供可靠的分析方法和理论依据。而提高界限速度是各类电子器件和装置的极为重要的一个课题。本书就是在这种思想下完成的。

在本书中，用了将近一半的篇幅（一、二、三、四、七章）讨论线性脉冲数字电路的过渡特性。就电信号而言，涉及了阶跃波和冲击波。就电路而言，涉及了一维线性电路和二维线性电路。就分析方法而言，涉及了经典法、拉普拉斯变换法、卷积法、三要素法、Z变换法、偏微分方程法、二维拉普拉斯变换法、差分方程法、付立叶变换法等。考虑到线性脉冲电路瞬态分析的特点，本书对各种分析方法进行了比较和归纳，突出了过渡过程分析的系统性。这样一来，本书讲述的线性脉冲数字电路，既有数学分析，又有数学分析基础上的原理分析和解释；既有过渡过程分析，又有各类分析方法的总结，因而提高了本书的理论水平。

本书的另一半内容（五、六、八、九章）讨论了非线性脉冲数字电路的过渡特性。就电路而言，涉及了非线性元件（晶体二极管、三极管、脉冲变压器等）、特殊非线性器件（雪崩管、隧道管、阶跃管、电流型开关元件、射极输出器、热载流子二极管等）、典型脉冲数字电路等。就分析方法而言，除了在一定条件下将非线性电路近似线性化，画出并简化等效电路、建立数学模型进行解析外，对复杂数字电路，从分析非线性失真所造成的延时入手，分析过渡过程所造成的影响。前者能为改进电路结构、提高电路性能找到方向，后者是

求解数字组件界限工作速度的基础，常用于评价复杂数字电路的性能。

在写作方法方面，本书采用正面分析问题的同时，各类问题用表格汇总（往往留有空格，供读者自己填写）；在数学分析之后，又对物理概念仔细地作了归纳解释，这样做，是为了适应本书作为教学用书、具有较强系统性的需要。书中凡打*号者为非重点章节。

本书由西安交通大学电子系何金茂教授主审。何先生审阅了全稿，从章节安排到内容增减都提出了宝贵意见。本书编写过程中得到了兰州大学无线电系主任郝磷教授的热情支持，脱稿后，张仁同志通读了全稿，在此一并表示谢意。

笔者试图通过本书能对提高大专院校、特别是理科院校无线电类专业脉冲数字电路课的教学质量贡献微薄力量，能否如愿还需要实践的进一步检验。笔者热忱欢迎读者对书中可能出现的错误或不妥之处进行批评指正。

笔 者

1989年10月

目 录

第一章 脉冲数字电路过渡现象概述	(1)
一、什么是脉冲	(1)
二、脉冲数字电路中过渡过程分析的重要性	(3)
三、脉冲数字技术发展的历史	(8)
四、脉冲数字电路中, 过渡过程分析算法综述	(10)
第二章 线性元件及其电路的过渡过程	
——各种电路的计算和讨论	(12)
§ 1 付立叶展开在脉冲技术中的应用	(12)
一、付氏级数和付氏积分	(12)
二、利用付氏展开把各种波形展成各次谐波的迭加	(14)
三、用付氏展开求解波形的频谱	(15)
§ 2 网络的频谱特性	(16)
一、网络的频谱特性及其与通频带的关系	(16)
二、理想网络的频谱特性	(17)
三、通频带与前沿的关系	(18)
§ 3 脉冲波形的相函数(波形的频谱函数)	(20)
一、由付氏变换到拉氏变换	(20)
二、基本波的相函数——拉氏变换法求解	(21)
三、复杂波的相函数——波形迭加法(1)	(24)
四、脉冲列的相函数——波形迭加法(2)	(26)
五、线性网络的传输系数	(31)
*六、拉氏反变换求原函数	(33)
§ 4 脉冲电路的基本运算	(37)
一、运算法	(37)
二、脉冲技术中常见线性电路的计算	(39)
三、迭加积分法介绍	(45)
第三章 线性电路的过渡过程	
——RC电路的进一步讨论	(51)
§ 1 RC电路的充放电过程及简单RC电路的分析法——三要素法	(51)
一、电容器的电特性及电容惰性定理	(51)
二、求解过渡过程公式	(52)
三、过渡过程三要素的物理意义	(55)

四、过渡过程公式在计算中的应用	(57)
五、矩形波通过RC电路	(59)
§ 2 RC微分电路	(60)
§ 3 RC积分电路	(61)
§ 4 RC耦合电路	(63)
第四章 分布参数的线性时变系统的过渡过程	
——高速脉冲的传输	(67)
§ 1 均匀传输线的特性方程	(68)
§ 2 波动方程的时域解法及长线的瞬态特性	(69)
§ 3 波动方程的频域解法 (拉普拉斯变换法)	(75)
*§ 4 传输线不连续性的讨论	(86)
第五章 非线性元件的过渡过程	
——开关作用	(92)
§ 1 晶体二极管的开关特性	(92)
*一、二极管伏安特性的推导	(92)
二、由二极管静态特性曲线分析开关状态的等效电路	(94)
三、二极管开关的过渡过程	(96)
§ 2 晶体三极管的开关特性	(101)
一、三极管的静态特性	(101)
二、三极管的动态特性	(107)
三、晶体三极管的开关时间	(110)
§ 3 脉冲变压器的特性	(123)
一、脉冲变压器的等效电路	(124)
二、脉冲变压器的过渡特性	(126)
第六章 为提高脉冲速度而使用的部分器件和电路的过渡过程	(137)
§ 1 若干特殊器件及电路的过渡特性	(137)
一、雪崩三极管的脉冲特性	(137)
二、隧道二极管的脉冲特性	(139)
三、阶跃二极管的脉冲特性	(146)
四、热载流子二极管的脉冲特性	(155)
§ 2 电流型开关电路的过渡特性	(157)
§ 3 射极输出器的过渡特性	(161)
第七章 数字信号的线性电路的过渡过程	(165)
§ 1 数字信号	(165)
一、 δ 函数波	(166)
二、开关函数	(168)
三、数字信号的常用表达式	(170)
四、数字信号的应用	(170)
§ 2 数字信号的过渡过程——冲击响应	(172)

一、冲击响应	(172)
二、冲击响应与阶跃响应的关系	(172)
三、用冲击响应求解任意函数波的过渡响应——折积积分	(173)
四、开关函数波通过网络的响应	(175)
§3 数字电路的数学描述和时域中的求解	(175)
一、差分方程的建立	(175)
二、齐次差分方程的时域解法	(177)
三、非齐次差分方程的时域解法	(178)
§4 Z变换及其在数字技术中的应用	(180)
一、概述	(180)
二、Z变换的基本定理	(181)
三、Z反变换求原函数	(182)
四、数字电路的Z域运算法——Z变换法	(185)
五、单位函数响应的Z变换式 $H(Z)$ 的求法	(186)
第八章 几种典型脉冲数字电路的过渡过程分析	(188)
§1 晶体二极管与线性元件组成电路的过渡特性	(188)
一、二极管限幅器	(189)
二、二极管箝位器	(195)
§2 单稳电路	(198)
一、单稳电路的典型结构与工作原理	(198)
二、单稳电路的工作条件	(199)
三、电路转换的过渡过程	(202)
四、单稳电路的改进	(208)
§3 双稳电路	(210)
一、工作原理	(211)
二、工作条件	(211)
三、电路转换的过渡过程	(213)
四、触发方式、触发灵敏度、负载能力	(215)
五、双稳电路的高速应用	(218)
六、双稳电路的负载能力	(220)
*七、双稳电路的设计方法	(221)
§4 间歇振荡器	(224)
一、工作过程	(225)
二、工作条件	(226)
三、输出电压 V_c 下降沿的分析	(227)
四、 V_c 上升沿的分析	(228)
五、平顶宽度 t_u 的计算	(230)
六、恢复期 t_r 的计算	(236)
§5 基本数字单元电路的脉冲过程	(238)

一、门电路介绍.....	(238)
二、二极管—晶体管与非门电路 (DTL电路)	(241)
三、晶体管—晶体管与非门电路 (TTL电路)	(244)
四、高速抗饱和TTL电路	(248)
五、电流开关型门电路 (CML电路)	(248)
第九章 复杂数字电路过渡过程分析法概述	(251)
§ 1 各种逻辑元件及平均转换延迟时间	(251)
一、各种逻辑元件概述	(251)
二、逻辑元件的平均传输延迟.....	(269)
§ 2 复杂数字电路界限速度分析方法	(270)
一、几个有关的物理概念	(270)
二、界限速度分析方法	(273)
附录一、状态变量法介绍	(278)
附录二、常用拉普拉斯变换表	(283)
附录三、由交流特性求解晶体管的等效电路和高频运用下的等效电路	(286)
附录四、一些重要函数的Z变换	(288)
附录五、数字集成电路的各种扩展器	(289)
主要参考文献	(291)

第一章 脉冲数字电路过渡现象概述

脉冲数字电路是电子电路的一个极其重要的分支。

脉冲技术早期应用于电报（即所谓莫尔斯电报），就是利用电键将电路突然接通和断开，产生一定的脉冲来传递信号。40年代由于第二次世界大战的需要，雷达得到了迅速发展，而脉冲波充当了主要角色，从那时起就产生了“脉冲技术”这个名字。50年代由于自然科学的飞快发展，促使脉冲技术有了进一步发展。从60年代起，宽度为毫微秒级的脉冲技术业已成熟，从那时起脉冲技术已发展成为一门独立的学科，有关脉冲技术的各种论著和专著大量涌现。现在脉冲技术的发展已进入亚毫微秒以至微微秒数量级了。在脉冲技术发展的基础上，数字技术得到了迅速发展，现在它已是一门独立的学科了。

脉冲技术得到如此飞快的发展，是因为它有很多特点。如：抗干扰能力强，通常的干扰往往反映对信号幅度的影响，而脉冲电路能很好地把信号和干扰分开；准确度高，脉冲个数的有无，一般是数字通讯、数字仪表和电子计算机等的实现手段，它可以达到相当高的准确度；一般情况下不担心失真，因为输出信号不一定要求重现输入信号……

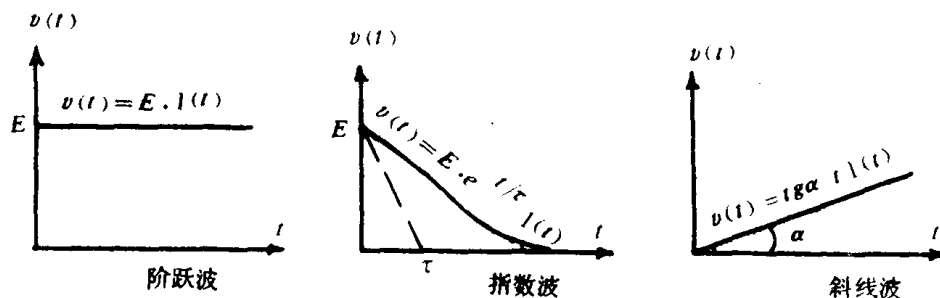
由于新器件不断涌现，脉冲电路的形式越来越多，工作速度越来越高，脉冲技术的特点越来越发挥得充分，应用范围越来越广。20多年前它仅是一门刚成熟的新兴学科，而现在它已变成许多新兴电子学科的基础理论了。今天脉冲数字技术被广泛地应用在雷达技术，电视技术，数字控制和计算机技术，仪器仪表测量技术，遥控和多路通信技术，自动控制技术等各种无线电技术领域。它对工业、农业、国防的发展具有重大意义。掌握脉冲数字电路过渡现象分析是从事电信学科的同志所绝对需要的。

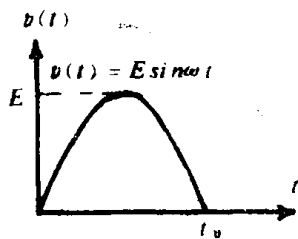
一、什么是脉冲

脉冲这个词本身的含义是极短促的脉动。脉冲作为学术术语是称呼作用时间极短的电压或电流波。随着科学技术的发展，大量新波形不断出现。现在所谓脉冲就是指连续正弦波以外的一切波形。不过习惯把单一矩形波或阶跃波称脉冲。

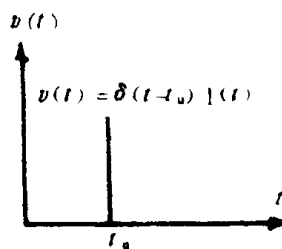
脉冲波形的种类是很多的，常见的，也是脉冲数字电路中经常用到的波形如图1—1所示。

基本波：



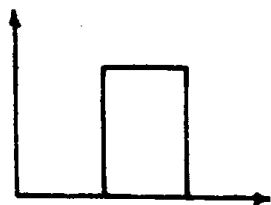


脉动波

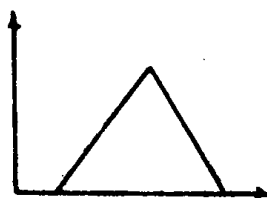


δ 函数波

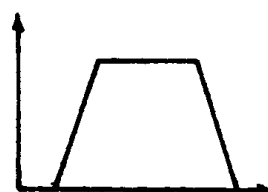
复杂波：



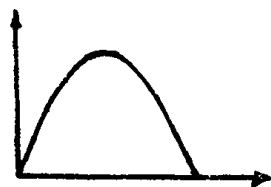
矩形波



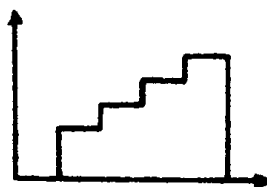
三角波



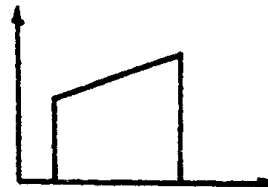
梯形波



自乘余弦波

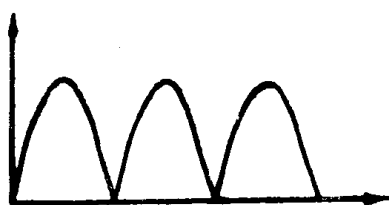


阶梯波

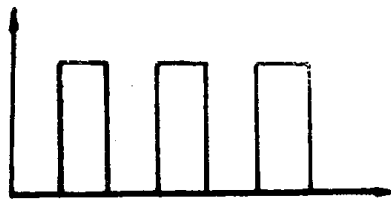


梯形波

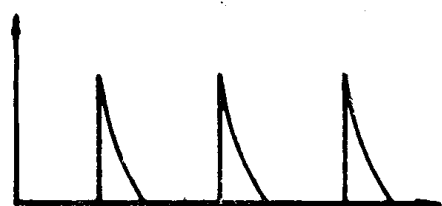
脉冲列：由单一的简单波或复杂波构成的脉冲串。为了与单一波形区别常称脉冲列。举几例如下。



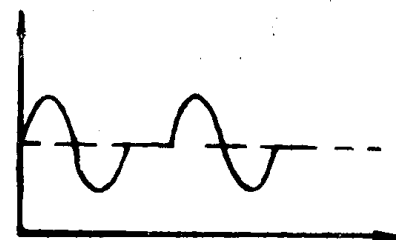
脉动脉冲列



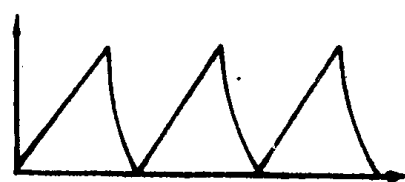
矩形脉冲列



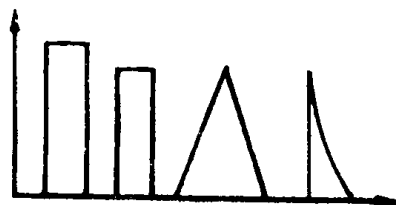
尖脉冲（微分波）列



断续正弦脉冲列



锯齿脉冲（积分波）列



混合脉冲列

图 1—1 脉冲的典型波形

基本波也称简单波，它是构成脉冲波形的最基本波形，其它波形都可通过简单波组合或迭加。

众所周知，对于正弦波，只要用振幅、频率和初相位三个参数就可全面的描述，而对非正弦的脉冲波则显然是不够的，必须引入新的参数。就以图 1—2 为例进行说明。

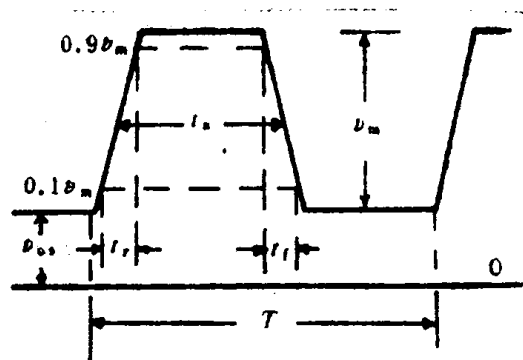


图 1—2

①脉冲幅度 V_m ——脉冲电压（或电流）从一种状态变化到另一种状态的变化值。

②脉冲宽度 t_u ——简称脉宽，它指脉冲出现后所持续的时间。对它的定义很不一致，通常指信号幅度保持在 $0.5V_m$ 以上的持续时间（但有时规定幅度保持在 $0.9V_m$ 以上所持续的时间，还有规定幅度保持在 $0.1V_m$ 以上所持续的时间）。

③脉冲重复周期 T ——两个相邻脉冲重复出现所间隔的时间。周期的倒数为脉冲重复频率，即 $f = 1/T$ 。为了区分脉冲周期和正弦波的周期，在脉冲技术中称 T 为重复周期。

④脉冲的上升时间 t_r ——脉冲信号（脉冲电压或电流）幅度由 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 所需的时间。 t_r 越小，上升得越快。 t_r 在脉冲技术中是一个很重要的参数。为了统一，对负向脉冲也同正向脉冲一样定义 t_r ，即 $-0.1V_m \rightarrow -0.9V_m$ 的时间为上升时间 t_r 。上升时间也称前沿。

⑤脉冲下降时间 t_f ——脉冲信号幅度由 $0.9V_m$ 下降到 $0.1V_m$ 所需的时间。负脉冲的 t_f 是 $-0.9V_m \rightarrow -0.1V_m$ 的时间。下降时间也称后沿。

⑥占空系数 n_T ——它指脉冲重复周期 T 和脉宽 t_u 的比，即 $n_T = T/t_u$ 。占空系数也称空度比。

⑦脉冲极性——以 0 电压为基准，分正极性脉冲和负极性脉冲。

⑧脉冲平移电压 V_{0s} ——表示脉冲底部对 0 伏线而言所具有的电压值。

除了上面八种参数外，对不同的波形还要提出一些专门的参数，比如图 1—3 要增加两个参数。

⑨顶部降落 ΔV_m ——如图所示。 ΔV_m 不能完善的反映矩形波顶部的好坏，通常用相对值 $\Delta V_m/V_m$ 表示顶部降落。如顶部有振荡，以 dc 的延长线与前沿的交点 a 来计算 V_m 。自然，顶部降落 ΔV_m 就是 a 点和 d 点的电位差。

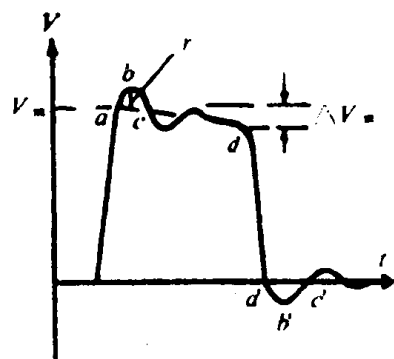


图 1—3 脉冲上冲，顶部降落说明

⑩上冲（或下冲） δ ——实际得到的脉冲，顶部和底部往往带有衰减振荡。此时由顶部的延长线与前沿的交点规定脉冲的振幅 V_m 。（前边已经提到）。突起的部分（图 1—3 中的曲线 abc ）称为上冲。把脉冲底部向负

方向突出的部分（图 1—3 中的 $a'b'c'$ ）称下冲。图中的 r 表示上冲的高度，则 $\delta = \frac{r}{V_m}$ 。

二、脉冲数字电路中过渡过程分析的重要性

我国高等学校的无线电类专业往往是在开设了“无线电技术”课后才学习脉冲数字电路的，既看到它们之间的联系，又掌握它们的区别是一个很重要的问题，因为只有这样才能理

解脉冲数字电路中过渡过程分析的重要性。下边作简要的阐述。

第一，就电路而言，脉冲数字电路和正弦波电路统称电子电路。它们都是由基本的电子元件（电阻、电容、电感、变压器、晶体管、电子管等）构成的，从这一点看，它们是没有任何区别的。难怪有些大专院校把二者合为一门课（电子线路课）进行教学。但是，在电路中，对起能量转换作用的晶体管、电子管的工作点有不同的选取。在无线电电路中它们往往工作在放大区，是作为放大元件来使用的。而在脉冲数字电路中它们往往工作在非放大区域，是作为开关元件来使用的。

第二，就工作信号而言，脉冲技术是继无线电技术之后发展成长起来的一门学科。无线电技术主要是研究正弦波工作状态下电子电路的结构和性能，而脉冲技术主要是研究非正弦波即脉冲波。当然任何非正弦波经过付立叶变换可以表示成许许多多正弦波的迭加，这样对一个系统而言，输入正弦波和非正弦波应该说实质是一样的。但是，因系统的频带有限，脉冲波的频谱又很宽广，总会对输出信号产生非线性失真，甚至非常严重。这种情况在无线电技术中是不能允许的，但对脉冲技术来说往往利用这种性质。其次，脉冲电路往往是工作在大信号情况，而正弦波电路往往工作在小信号下。

第三，就电过程而言，一个电路加入信号后，总是先有一个暂态过程，然后进入稳态。无线电技术研究的是电路处于稳态时的物理现象和波形传输；而脉冲技术则着眼于暂态过程，即过渡过程，在这个过程中往往体现为电容电荷量的改变或者电感电流的改变。在无线电技术中，接入电压以后到断开电压之前，中间这一段时间是有效工作期，而接入电压或断开电压的瞬间究竟发生了什么现象人们不去过问。但对脉冲技术则主要注意的是断、开电源的暂态过程。脉冲波的产生需要暂态过程，产生后经各种变换到各种需要的波也需要暂态过程，因而研究瞬态特性和对电路进行瞬态分析理应是脉冲技术的重点。

第四，就研究方法看，正弦波电路和脉冲电路一般都可近似为线性电路，然后进行分析计算。对其中的非线性元件可在一定条件下近似线性化。众所周知，分析计算线性电路的方法就是在电工原理课中讲述的基尔霍夫两定律及其几种算法。首先列出电路的常微分方程，然后求解。常微分方程的一般解，包括通解和特解两部分。无线电技术是研究稳态过程的，故只需解出特解，而脉冲技术是研究暂态过程的，不仅要特解，更重要的是求出通解。下边举例进行说明。

如图1—4所示的RLC串联电路，当输入电压 $v = V_m \sin \omega_0 t$ 时，求解电流 $i(t)$ 。

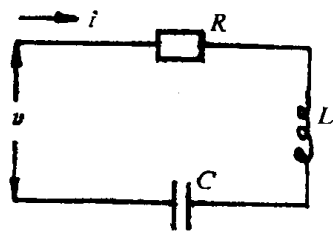


图1—4 RLC串联电路

列微分方程 $v = v_R + v_L + v_C$

$$= iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$$

整理后得 $\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = \frac{1}{L} \frac{dv}{dt}$

将 v 代入 $\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = \frac{\omega_0}{L} V_m \cos \omega_0 t$ (1·1)

(1·1) 式是常系数的二阶微分方程，先求齐次方程的通解。由齐次方程 $r^2 + \frac{R}{L}r + \frac{1}{LC}$

= 0 得到两根, 即,

$$r_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{-\left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}\right)}$$

令 $\omega_1^2 = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}$, 且设 $\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} > 0$ 则 $r_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm j\omega_1$, 从而求得 i 的通解为

$$i_{\text{通}}(t) = e^{-\frac{R}{2L}t} (C_1 \cos \omega_1 t + C_2 \sin \omega_1 t) = e^{-\frac{R}{2L}t} A \sin(\omega_1 t + \varphi) \quad (1.2)$$

其中 $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{C_1}{C_2}$$

由 (1.2) 式可见电流的通解 $i_{\text{通}}$ 是一个按指数衰减的振荡, 曲线如图 1—5 所示。

下边再求式 (1.1) 非齐次方程的特解 $i_{\text{特}}$ 。
用特定系数法求解。设 $i_{\text{特}} = B \cos \omega_0 t + D \sin \omega_0 t$, B, D 待定。把 $i_{\text{特}}$ 代入 (1.1) 式经整理化简求得

$$B = -V_m \frac{\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}}{R^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2}$$

$$D = V_m \frac{R}{R^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2}$$

$$i_{\text{特}} = \frac{-V_m \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)}{R^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} \cos \omega_0 t + \frac{V_m R}{R^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} \sin \omega_0 t$$

$$= I_m \sin(\omega_0 t - \varphi_0) \quad (1.3)$$

其中 $I_m = \sqrt{B^2 + D^2} = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2}}$

$$\varphi_0 = \text{tg}^{-1} \frac{B}{D} = \text{tg}^{-1} \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} \right) / R$$

由 (1.3) 式可见电流的特解 $i_{\text{特}}$ 是一个按正弦规律变化的等幅振荡, 曲线如图 1—6 所示。通过上边的计算, 求得电流一般解为

$$i = i_{\text{通}} + i_{\text{特}}$$

$$= e^{-\frac{R}{2L}t} A \sin(\omega_1 t + \varphi) + I_m \sin(\omega_0 t - \varphi_0)$$

(1.4)

A, φ 待定

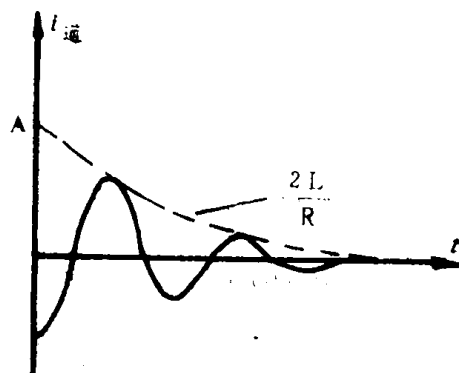


图 1—5 RLC 串联电路电流的通解曲线

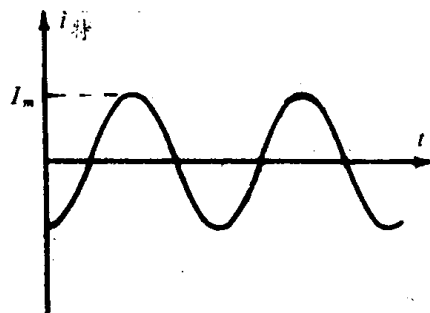


图 1—6 RLC 电路电流的特解曲线

由 (1.4) 式可以看出, 在电压 v 刚加上的一段时间内, 电路中的电流是一个衰减振荡和等幅振荡的迭加。经过一段时间衰减振荡下降到 0, 电路中的电流才进入等幅振荡。存在

衰减振荡的时间称暂态，电路进入等幅振荡后称稳态。暂态实际上是电路从没有电流到有稳定电流的过渡阶段，因此可把暂态过程称过渡过程。广义讲暂态是由一个稳态进入另一个稳态的过渡过程。

如图 1—7 是一个常见的 RC 放大器。从电阻 R 上输出的正弦波也存在一个过渡过程。在无线电技术中象这类放大器，我们只知有等幅的正弦波输出，而在脉冲技术中就要过问暂态现象。

第五，如前所述两种电路定量计算的方法都是求解微分方程，但在实际中解微分方程比较繁杂，人们总是把微分方程经过一定变换，得到代数方程，然后求解。比如在无线电技术中就用所谓的相量变换（复数法）来计算的。前边图 1—4 的电路用相量法进行计算是很简单的。

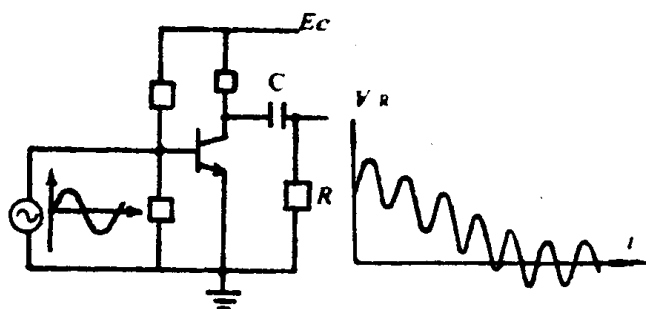


图 1—7 RC 放大器过渡过程

电路串联，其复数总阻抗为

$$Z = R + j\omega_0 L_0 + \frac{1}{j\omega_0 C} = R + j\left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)$$

将输入电压 $u = V_m \sin \omega_0 t$ 表示成相量 $U = V_m e^{j\omega_0 t}$ ，则得

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{V_m e^{j\omega_0 t}}{R + j\left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)} \\ &= \frac{V_m e^{j\omega_0 t}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} e^{j \operatorname{tg}^{-1}(\omega_0 L - 1/\omega_0 C)/R}} \\ &= \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2}} e^{-j \operatorname{tg}^{-1}(\omega_0 L - 1/\omega_0 C)/R} e^{j\omega_0 t} \end{aligned}$$

$$\text{故 } i(t) = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2}} \sin \left[\omega_0 t - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}}{R} \right) \right]$$

这个解正是前边已经求解的微分方程的特解，即稳态解。

线性电路在输入连续正弦信号的情况下，用相量变换法求稳态解是如此的简单，那么，相量变换法是否也适用于脉冲电路的暂态计算呢？回答是否定的。照理说在脉冲电路中作用的是非正弦波，非正弦波用付立叶展开可以变成正弦波的迭加，既然如此，相量法好象也能适用。但是，相量法是稳态情况下求特解的一种变换方法，离开了特定条件就会出错误。相量法根本不能提供暂态的通解。为此，为了简化脉冲电路的计算，必须寻求新的变换方法，而拉普拉斯变换就是求解脉冲电路的最好方法（这个问题在下一章讨论）。顺便指出：拉氏变换也不便代替正弦信号电路求稳定解的相量变换法，二者是在不同条件下的两种独立变换

方法，不要混为一谈。

虽然拉氏变换法可以求解正弦信号电路的一般解，但因正弦函数的相函数比较复杂，计算量往往很大。因此求正弦信号电路的一般解时，用复数电压和复数电流能使运算简化，是常用的方法之一，在求特解时采用相量变换的方法较为方便。如果将正弦信号电路用拉氏变换法求得一般解之后，再将稳定解分离出来，还是可以求解正弦电路的，但是这样的计算比解微分方程的方法要复杂得多，显然是自找麻烦。将上述的结果列于表一。

表一 脉冲数字技术与无线电技术比较

	无 线 电 技 术	脉 冲 技 术	比 较
电 路	能量转换元件作放大用	能量转换元件作开关使用	不 同
	都由集中参数电路元件构成		相 同
研 究 特 点	都用基尔霍夫两定律列微分方程求解		
	求 特 解	不单求特解、更要求通解	
实 际 运 算	相 量 变 换 法	拉氏变换法 迭加积分和折积积分法	
信 号	正 弦 波	脉 冲 波	
电 过 程	稳 态	暂 态	
对非线性电路	等效电路——相量法 图解法	大信号折线近似后画出等效电路，然后用拉氏变换法求解，因图解法得不到瞬态特性，故不使用。	

通过上述比较，不难得出如下结论：过渡过程分析（即瞬态特性分析）是脉冲数字电路最重要的一个方面。毫不夸张地说，不进行过渡过程分析，就不会有脉冲数字技术。

上述结论虽是重要的结论，但它只是问题的一个方面。然而在实际中，一则由于进行过渡过程分析比较复杂，二则对重复工作频率较低的脉冲数字电路可以忽略过渡过程（将过渡转换时间近似看作零）。在这样的近似条件下，脉冲数字电路要研究的问题无非是电路稳态时的工作条件，不同稳态之间转换应满足的逻辑关系等。象这样研究脉冲数字电路的方法就是所谓的以逻辑分析为主的研究方法。

在低中频条件下，一个能正常工作的脉冲数字电路，随着工作频率的提高，就会失去正常的逻辑关系，这是由于脉冲数字电路不可避免地存在过渡过程所致。为了提高脉冲数字电路的性能，提高器件的界限工作速度，为了设计出超高速的脉冲数字电路，为了评价各种电路的性能，为了利用过渡过程产生，变换各种脉冲波形，对脉冲数字电路进行过渡过程分析已成为必不可少的一环，即就是对看起来好象是纯属逻辑电路的组件也是如此。而且随着人们对脉冲数字电路工作速度的不断追求，情况将更是如此。为了在大专院校培养出高层次或较高层次的科技人才，脉冲数字电路课必须按瞬态分析和逻辑分析两条主线条展开。

三、脉冲数字技术发展的历史

在本章开头,就脉冲技术的发展作了简要说明,这一节除了按年代就脉冲数字技术的历史阐述外,还要着重围绕器件——电路装置——脉冲频率——脉冲数字理论进行阐明。

1.电子技术是1895年以后发展起来的

1820年奥斯科发现了电和磁的联系——通电导体周围存在磁场。

1831年法拉第发现了电磁感应现象,使人们知道电可生磁,磁可生电。

1864年以后,麦克斯韦总结了电磁场的普遍规律,作了定量分析,予见了电磁波的存在,予见了电磁波能够传播,且传播速度为光速。

1888年赫芝通过实验证实了电磁波的存在。

1895年意大利人马可尼(或说俄国人波波夫)把电磁波用于通讯,从而产生了无线电技术。

2.脉冲技术是于本世纪二十年代发展起来的

1904年发明了电子二极管。

1906年发明了电子三极管。二极管和三极管的问世,促进了无线电技术的飞速发展。

1925年出现了全球性通讯,出现了无线电电报。利用电键将电路接通和关断的莫尔斯电报,使脉冲波得到了应用,从而产生了脉冲技术。脉冲波从通讯初期,就作为常见的基本技术不断地研究着。

3.本世纪三十年代前后脉冲技术得到了迅速发展。

1925年——1945年,出现了雷达、电视、传真广播、导航、无线电话等。在这当中,脉冲波充当了重要角色。从那时起就产生了脉冲技术这个名字。当时主要器件是电子管,主要装置是雷达,脉冲频率比较高,其重复周期在数百毫微秒。主要研究的课题是宽带放大器的脉冲响应,分布参数电路的脉冲响应,变压器脉冲响应,电子管式脉冲发生器,脉冲示波器的应用等。

1945年——1950年,脉冲技术的理论也发展起来,有关的理论书籍问世不少。

4.本世纪六十年代初脉冲技术已成为一门独立的学科

1948年发明了晶体管。出现的点接触晶体二极管。

1950年——1960年,在真空管电子计算机成熟的同时,晶体管的计算机也开始使用,出现了PCM编码通讯装置,出现了接合型晶体二极管和隧道二极管,数字技术得到迅速发展,50年代中期反映数字化的基础实用书也出现了。

1960年——1964年,宽度为毫微秒的脉冲技术业已形成,称毫微秒脉冲技术。半导体技术得到了惊人发展,出现了小规模的集成电路,因而数字化技术飞快发展起来。各种器件不断更新,出现了场效应管,出现了集电极耦合的逻辑电路,电子计算机向更高速发展,因而这一时期出版的有关书籍除了手册性的实用书外,脉冲数字理论方面的著作比50年代完善了。这时,可以说脉冲数字技术已形成为一门完全独立的学科体系。

5.本世纪七十年代末期脉冲数字技术向超高速发展

1965年后,出现了半导体集成电路(IC)

1966年——1970年,电子计算机实现了集成化,且速度大为提高,出现了中规模集成电路,出现了集成化PCM装置,实现了卫星通讯。

1972年,出现了大规模半导体集成电路,接着出现了大规模集成化的电子计算机,从这个时期以后,技术人员迅速向元件和电路装置两个方向分化。在电路方面,电子计算机,脉

冲编码通讯机, 各种数字化测量仪器, 数字滤波器等迅速发展。在元件上, 要求向超大规模集成、超小型、超高速方向前进。

1975年, 出现了超高速电子计算机, 微处理机, 1000MHz的直读频率计, 1000MHz的直观示波器……。在这样的情况下, 电路装置间及元件之间的配线连接出现了新课题, 因而出现了从线路特性到工艺结构方面阐述问题的作品。在电路装置方面, 记述电路工作原理的书, 脉冲编码通讯装置的书, 有关计算机的书大量涌现, 但大部分著作还是有关新技术新工艺的书, 有关脉冲数字理论的书还停留在60年代。

问题是脉冲数字技术的基本理论是不是能迎合新技术的发展? 虽然说脉冲数字的基本理论在60年代就已趋完善, 但现在看来还需要进一步发展。脉冲数字技术在向超高速发展, 原来的电路已不适应高速要求, 必须配合新器件的发展不断完善起来。再者脉冲技术进入超高速后, 不可避免地出现与微波技术、亚毫微秒技术混同现象。如果说, 脉冲技术原来是个所谓“路”的问题, 而现在要进入所谓“场”的问题了。所有这一切就是脉冲技术的未来, 无论从实验到论著有待挖掘和不断完善。

现在脉冲数字技术发展很快, 在一个较长时期内, 它的发展方向还是所谓的“三超”——超高速, 超大规模集成, 超小型。作为新型的脉冲数字技术工作者, 首先必须用脉冲数字技术的基本理论武装自己, 并不断和该门学科的发展水平对齐。

尽管历史总会多少能觉察到技术发展的程度, 但技术的进步仍然贯穿着经得住考验的第一次产生出来的东西。脉冲数字技术产生发展的历史才仅仅半个世纪, 但它的飞跃发展正说明了它的无穷生命力。这也是我们掌握和从事与这门学科有关的诸研究工作的动力。

下边将脉冲数字技术发展的过程用图表示出来。

电 路 装 置	大 致 年 代	开 关 元 件
1. 机器交换机 (自动电话交换)	1925—1940年	机器开关 (继电器)
2. 雷达、真空管计算机 (电子计算机第一代) 真空管脉冲编码调制装置 (PCM装置)	1940—1950年	各种电子管 (真空管) 点接触晶体二极管
3. 晶体管计算机 (电子计算机第二代) 晶体管脉码调制装置	1950—1960年	接合型晶体管, 隧道二极管 超电导元件
4. 集成电路计算机 (电子计算机第三代) 集成化 PCM装置	1960—1970年	半导体集成元件, 场效应管, 集电极耦合逻辑元件, 金属氧化物半导体
5. 大规模集成电路计算机 (电子计算机第四代), 微处理机	1970—1975年	大规模集成元件, 小型电子管元件
6. 超高速超大规模计算机 机器人	1975—?	超大规模集成元件, 光集成化元件