

脉冲与数字电路

孙肇燾 主编

中国铁道出版社

1983年·北京

内 容 简 介

本书共分两大部分：以分立元件为主的脉冲电路和集成电路组成的数字电路。

脉冲电路部分系统地介绍了分立元件的一般脉冲电路。数字电路部分介绍了以小规模集成组合电路和时序电路，并介绍了中、大规模集成电路。全书既有对电路的分析，又有较详细的设计方法，并给出设计实例。每章后均附有习题。书的最后还介绍了 I^2L 及 CCD 器件。

本书可作为高等院校无线电、计算机及自动控制专业的教材，也可作为电子技术领域中工程技术人员的自学参考书。

脉冲与数字电路

孙肇燮 主编

中国铁道出版社出版

封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：26.5 字数：654 千

1983年9月第1版 1983年9月第1次印刷

印数：0001—17,000册 定价：2.70元

前 言

《脉冲与数字电路》一书，是为了适应目前国内电子技术的发展需要而编写的。内容包括：分立元件组成的各种脉冲电路，各种逻辑门电路的性能，数制与逻辑函数的运算规则及简化方法，各种类型触发器的逻辑功能，各种组合电路及时序电路（包括同步时序电路和异步时序电路）的分析与设计方法，数字电路与模拟电路的接口电路，大规模集成电路等。

本书在编写过程中考虑到，脉冲与数字电路部分以数字电路部分为主，数字电路部分以组合、时序电路为重点。本书在介绍各种电路时，具有分析与设计并重的特点。这样编排的目的是为了使条理清楚、重点突出，可以通过对具体电路的分析，达到设计各种电路的目的。

本书的另一特点是：既介绍了小规模集成电路，又兼顾了中、大规模集成电路。并且每章后面都附有本章小结及习题。

参加本书编写的有：上海铁道学院方向（第一、二、三章）；兰州铁道学院李忠民（第四章）、时天保（第五章）；北方交通大学李明仪（第六章）、宣家荣（第七章）、池淑清和李庭芳（第八章）、孙肇燊（第九、十、十一章）。北京邮电学院谢源清对全书进行了审阅。李明仪协助主编做了一些工作。

本书在编写中力求深入浅出、重点明确、便于自学。但鉴于编者水平有限，书中如有缺点和错误之处，请读者批评指正。

编 者

1982年6月

目 录

第一章 RC 电路和晶体管开关工作	1
第一节 概述	1
一、什么是脉冲	1
二、脉冲的产生	1
第二节 RC 电路	1
一、 RC 电路的过渡过程	1
二、微分电路	5
三、积分电路	7
四、脉冲分压器	8
第三节 晶体二极管的简单电路	10
一、晶体二极管的特性曲线折线化及其等效电路	10
二、限幅电路	11
三、箝位电路	15
第四节 晶体三极管及简单电路	18
一、晶体三极管的三种工作状态及其等效电路	18
二、倒相电路	20
三、宽脉冲变换为窄脉冲电路	24
本章小结	25
习 题	25
第二章 触发电路和多谐振荡器	33
第一节 双稳态触发电路	33
一、双稳态触发电路的工作原理	33
二、双稳电路的工作条件	34
三、触发方式	36
四、双稳电路的工作频率和灵敏度	41
第二节 单稳态触发电路	43
一、电路组成及工作过程	44
二、技术指标的分析和计算	46
三、单稳电路的改进	48
第三节 多谐振荡电路	50
一、电路组成和工作过程	51
二、技术指标的分析和计算	52
三、多谐振荡电路的改进	53
第四节 射极耦合双稳电路	55

一、电路形式及工作原理	55
二、回差分析	57
三、射极耦合双稳电路的应用	59
本章小结	60
习 题	60
第三章 锯齿波发生器	64
第一节 基本锯齿波形成电路	65
第二节 改进锯齿电压线性的方法	66
一、原理	66
二、恒流源扫描电路	67
三、正向补偿电路 (自举电路)	69
四、负向补偿电路	72
本章小结	74
习 题	74
第四章 门电路	77
第一节 晶体管逻辑门电路	77
一、二极管“与”门电路	77
二、二极管“或”门电路	78
三、“与非”门和“或非”门电路	79
第二节 正逻辑和负逻辑	81
第三节 集成逻辑门及其性能指标	82
一、数字集成电路	82
二、逻辑门的性能指标	82
第四节 二极管-晶体管逻辑门电路	85
一、DTL“与非”门电路	85
二、HTL“与非”门电路	86
第五节 晶体管-晶体管逻辑门电路	87
一、TTL“与非”门电路	87
二、改进型的TTL“与非”门电路	90
第六节 TTL门电路的逻辑扩展	92
一、“非”门和“与”门电路	93
二、TTL扩展器	93
三、集电极开路“与非”门电路	94
四、三态逻辑门	96
第七节 射极耦合逻辑门电路	98
一、ECL电路的基本单元	98
二、ECL电路的主要参数	100
三、ECL电路的逻辑扩展	101
第八节 逻辑门的应用举例	102
一、多谐振荡器	102

二、单稳态触发器	104
三、施密特双稳态触发器	106
本章小结	107
习 题	107
第五章 数制与逻辑函数	110
第一节 标位记数法	110
一、十进制数	110
二、标位记数法	110
三、二进制数	111
第二节 二进制与十进制数字的相互换算	111
一、整数间的互换	112
二、小数间的互换	113
第三节 二-十进制码	113
第四节 位、字节和半字节	115
第五节 二进制数的运算	116
一、二进制数的加法	116
二、二进制数的减法和负数表示法	116
三、二进制数的乘法和除法	118
第六节 八进制数和十六进制数	118
一、八进制数	118
二、十六进制数	119
第七节 开关电路的逻辑表达式	119
一、一个二进制变量的函数	119
二、两个二进制变量的函数	120
第八节 布尔代数理论	122
一、基本运算规则	122
二、应用举例	124
第九节 逻辑函数的标准形式	125
一、标准的积之和表达式	125
二、标准的和之积表达式	127
三、最小项和最大项	128
第十节 简化逻辑函数的卡诺图法	129
一、逻辑函数的卡诺图	130
二、二、三、四变量的卡诺图	131
三、用卡诺图来简化逻辑函数	132
四、卡诺图上多个相邻项的结合	133
五、五变量和六变量卡诺图	135
第十一节 简化逻辑函数的Q-M法	137
一、找出函数的原始蕴涵项	138
二、找出函数的主蕴涵项	139

三、函数简化的积之和表达式	139
本章小结	140
习 题	140
第六章 组合逻辑电路的分析和设计	142
第一节 组合逻辑电路的分析和设计基础	142
一、组合逻辑电路类型间的转换	142
二、逻辑设计中任意项的应用	148
三、具有多输出端的逻辑电路及其简化	150
四、“与非”门扇入系数有限时的设计方法	154
第二节 组合逻辑电路的分析	155
第三节 半加器、全加器和半减器、全减器	160
一、半加器	161
二、全加器	162
三、半减器和全减器	165
第四节 比较器	166
一、半比较器	166
二、全比较器	167
三、中规模集成四位数码比较器	169
第五节 码组变换及检验	171
一、格雷码和自然二进制码转换器	171
二、二-十进制码的数码转换器	174
三、码组检验	176
第六节 编码器和译码器	179
一、译码器	179
二、编码器	184
三、七段数字显示器	185
第七节 多路选择器和数据分配器	188
一、多路选择器	188
二、中规模集成八路选择器	193
三、数据分配器	195
第八节 组合电路中的冒险现象	196
一、产生冒险现象的原因	196
二、组合电路中冒险现象的消除方法	198
本章小结	200
习 题	201
第七章 集成触发器	207
第一节 R - S 触发器	207
一、“与非”门构成的 R - S 触发器	207
二、由“或非”门构成的 R - S 触发器	209
三、同步时钟脉冲控制的 R - S 触发器	210

第二节 集成触发器的基本结构	213
一、触发器的空翻问题	213
二、维持-阻塞式触发器	214
三、主-从式触发器	216
第三节 各种集成触发器的逻辑功能	218
一、 D 触发器	218
二、 $D-E$ 触发器	221
三、 T 触发器	222
四、 $J-K$ 触发器	223
五、边沿触发器	225
第四节 触发器逻辑功能的转换	228
一、 D 触发器转换成其它型触发器	228
二、 $J-K$ 触发器转换成其它型触发器	229
三、主-从式 $R-S$ 触发器转换成其它型触发器	231
第五节 集成触发器的参数	232
一、静态参数	232
二、瞬态参数	232
本章小结	233
习 题	235
第八章 同步时序电路	239
第一节 时序电路概述	239
第二节 同步时序电路的分析方法	241
第三节 循环码节拍分配器	243
第四节 同步计数器	245
一、二进制数的同步计数器	245
二、十进制数的同步计数器	247
三、任意进制数的同步计数器	251
四、循环码同步计数器	253
五、双向(可逆)同步计数器	255
六、计数分频器	256
七、集成同步计数器电路	257
第五节 寄存器和移位寄存器	258
一、数码寄存器	258
二、移位寄存器	259
第六节 移位寄存器型计数器	264
一、环形计数器	264
二、扭环形计数器	268
第七节 序列信号发生器	277
一、线性移位寄存器型序列信号发生器	277
二、最长线性移位寄存器序列(m 序列)发生器	278

三、计数器型序列信号发生器	281
第八节 同步时序电路的设计方法	282
第九节 状态转换表的简化	286
第十节 同步时序电路设计举例	290
第十一节 不完全给定状态同步时序电路设计	304
一、不完全给定状态的概念	304
二、不完全给定状态转换表的简化	306
本章小结	313
习 题	313
第九章 异步时序电路	319
第一节 脉冲异步时序电路	319
一、触发器作为记忆元件的异步时序电路分析	319
二、触发器作为记忆元件的脉冲异步时序电路设计	321
第二节 电平异步时序电路的分析	323
一、电平异步时序电路的一般结构	323
二、电平异步时序电路分析	324
第三节 电平异步时序电路设计	327
一、设计步骤	328
二、设计举例	328
第四节 异步时序电路的竞争现象及避免方法	334
第五节 异步时序电路的冒险现象	339
第六节 异步计数器设计	340
一、脉冲反馈法	340
二、阻塞反馈法	342
本章小结	345
习 题	345
第十章 数字-模拟及模拟-数字转换	347
第一节 <i>DAC</i> 电路	347
一、权电阻的 <i>DAC</i> 电路	347
二、 <i>T</i> 型网络的 <i>DAC</i> 电路	349
三、 <i>DAC</i> 电路中的模拟开关	351
四、电流驱动的 <i>DAC</i> 电路	352
五、倒 <i>T</i> 型 <i>DAC</i> 电路	354
六、 <i>DAC</i> 电路的技术指标	356
第二节 <i>ADC</i> 电路	357
一、并行比较器型 <i>ADC</i> 电路	358
二、逐位逼近 <i>ADC</i> 电路	359
三、反馈比较型 <i>ADC</i> 电路	361
四、双积分式 <i>ADC</i> 电路	363
五、电压-频率转换电路	365

第三节 集成ADC和DAC电路简介*	366
一、ADC变换电路	366
二、DAC变换电路	368
本章小结	369
习 题	370
第十一章 大规模集成电路	371
第一节 MOS基本电路	371
一、MOS倒相器	371
二、MOS门电路	376
第二节 MOS移位寄存器	379
一、移位寄存器的应用	380
二、MOS存储单元	381
三、两相无比寄存器单元	383
四、四相无比寄存器单元	383
五、CMOS寄存器单元	385
六、静态寄存器单元	385
七、三相准静态寄存器单元	386
第三节 只读存储器	388
一、固定ROM	388
二、可编程序ROM	389
三、可改写ROM	390
第四节 ROM的应用	393
一、ROM乘法器	393
二、字符发生器	394
三、可编程序逻辑阵列(PLA)	395
第五节 随机存取存储器	399
一、RAM的结构	399
二、存储单元	400
第六节 集成注入逻辑	405
一、 I^2L 的注入电流	405
二、 I^2L 组成的基本逻辑电路	406
第七节 电荷耦合器件	408
一、CCD结构	409
二、电荷转移	409
三、三相时钟脉冲驱动的电荷转移	410
四、输入输出装置	411
本章小结	412
习 题	412

第一章 RC电路和晶体管开关工作

第一节 概 述

一、什么是脉冲

在电学的领域内,开始提到脉冲这个名词时,通常是指时间短暂和突然变化的波形。例如如图 1—1 (a) 所示为一个开关的串联电路,当开关不断地接通和断开,在电阻 R 上就可以得到一连串幅度为 E 而宽度随开关情况而变的电压波形,如图 1—1 (b) 所示。这种波形通常称为矩形脉冲。随着工程技术的发展,非正弦的波形越来越多,如图 1—2 所示。这些波形粗看起来似乎各不相同,但经过分析就可以发现这些波形有一个共同的特点:它们都有急剧变化的部分或陡峭的前沿或后沿。因此,我们把这些非正弦变化的波形统称为脉冲波形。

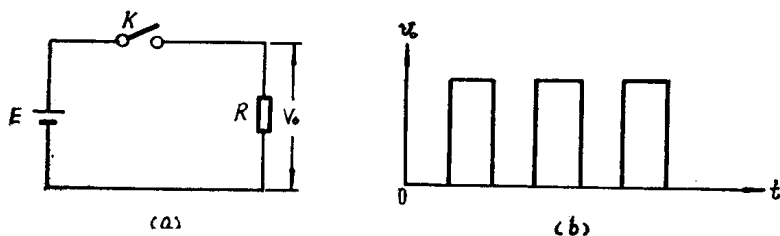


图 1—1 矩形脉冲示意图

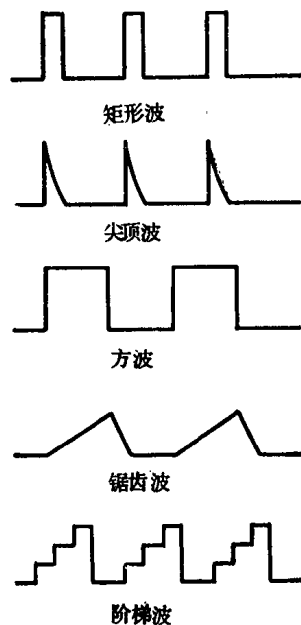


图 1—2 几种脉冲波形

二、脉冲的产生

产生脉冲的电路一般有两个主要组成部分:一个是开关部分;另一个是储能元件部分(这部分通常是电容或电感电路)。开关部分用来产生突变;而储能元件部分则用来控制突变以及波形的形状和变化速度。此外,利用开关和储能元件还可以将一种脉冲波形变换为另一种脉冲波形。开关元件和储能元件的适当组合就可以成为产生和变换脉冲波形的电路,简称脉冲电路。

第二节 RC 电 路

一、RC电路的过渡过程

RC电路是脉冲电路中最常见的电路,在开关控制下,RC电路中发生的过渡过程,是

研究脉冲电路的重要基础。

(一) RC电路充、放电特性

1. RC电路的充电特性, 我们以图 1—3 (a) 所示电路为例, 假设原来开关处于位置 1, 电容初始电压 $v_c(0^-) = 0$, 在 $t = 0$ 时刻, 开关倒向位置 2, 要求写出电容端电压 v_c 随时间 t 变化的表示式, 在这个过程中, 电容的端电压将增加, 故称之为充电特性。根据回路电压方程, 可有

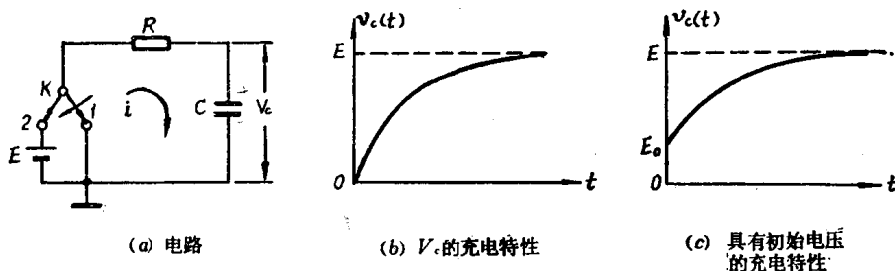


图 1—3 RC电路的充电特性

$$v_c(t) + i_c(t)R = E \quad (1-1)$$

因为 $i_c(t)$ 是电容的充电电流, 故以 $i_c(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt}$ 代入式 (1-1)

$$\therefore v_c(t) + RC \frac{dv_c(t)}{dt} = E \quad (1-2)$$

设 $RC = \tau$, 则有

$$v_c(t) + \tau \frac{dv_c(t)}{dt} = E$$

这是一个可分离变量的一阶线性常系数微分方程, 其全解包括两个部分。第一部分是其相应的齐次方程

$$v_c(t) + \tau \frac{dv_c(t)}{dt} = 0 \quad (1-3)$$

的解, 称为通解。它是

$$v_c(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-4)$$

式中 A ——待定常数, 决定于电路的起始条件。

第二部分是特解

$$v_c = a$$

其中 a 是一个常数。而式 (1-2) 的全解为

$$v_c(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + a \quad (1-5)$$

对图 1—3 (a) 所示电路而言, 当 t 趋向 ∞ 时, 式 (1-5) 右边第一项将趋于零, 而 $v_c(\infty)$ 将趋于 E , 所以

$$v_c(\infty) = E = a \quad (1-6)$$

因此, 式 (1-5) 中的 a 可由电容电压的趋向值来求得。下面来求式 (1-5) 中的 A 值。根据起始条件电容初始电压为零, 即 $v_c(0^-) = 0$, 根据开关定理 $v_c(0^+) = v_c(0^-)$, 所以

$$v_c(0^+) = 0$$

这样, 当开关 K 在 $t = 0^+$ 倒向位置 2 时的时刻, 它的回路电压方程为

$$v_c(0^+) = A + a = A + v_c(\infty)$$

即

$$A = v_c(0^+) - v_c(\infty)$$

将 A 和 a 的表示式代入式 (1-5), 得 $v_c(t)$ 的通解为

$$v_c(t) = a + Ae^{-\frac{t}{\tau}} = v_c(\infty) + [v_c(0^+) - v_c(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-7)$$

对于图 1-3 (a) 所示电路, 将有

$$v_c(\infty) = E$$

$$v_c(0^+) = 0$$

$$\therefore v_c(t) = E - Ee^{-\frac{t}{\tau}} = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-8)$$

该式表示图 1-3 (a) 中开关 K 由 1 倒向 2 后的变化规律, 图 1-3 (b) 表示电容充电时 $v_c(t)$ 以指数规律上升的曲线。

显然, 当初始电压 $v_c(0^+) \neq 0$ 而为 $v_c(0^+) = E_0$, 且 $E_0 < E$ 时, 则 $v_c(t)$ 的表示式将为:

$$v_c(t) = E + (E_0 - E)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

这样的 $v_c(t)$ 变化曲线如图 1-3 (c) 所示。

2. RC 电路放电特性, 假设电路如图 1-4 (a) 所示, 开关 K 原来在位置 1 且电路已达稳态。当 $t = 0$ 时, 将 K 从位置 1 倒向位置 2, 且 $E < E_0$, 要求写出 $v_c(t)$ 的变化情况。因为开关 K 在位置 1 时, 电路已达稳态, 故 $v_c(0^-) = E_0$ 。

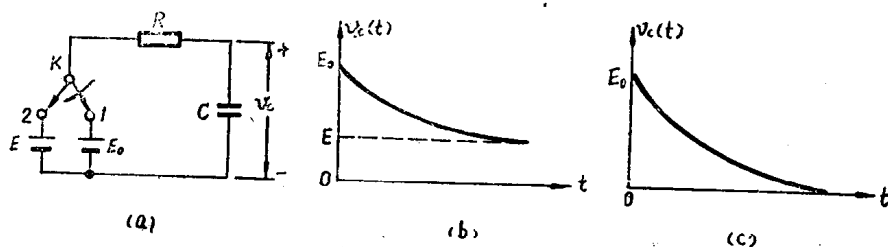


图 1-4 RC 电路的放电特性

当开关 K 在 $t = 0$ 时, 由位置 1 倒向位置 2, 则

$$v_c(0^+) = v_c(0^-) = E_0$$

又因 $E_0 > E$, 所以电容 C 的端电压 v_c 将逐步下降, 实际上电容是处于放电过程。

根据回路电压定律, 列出回路电压方程为

$$v_c(t) + i_c(t)R = E$$

$$v_c(t) + RC \frac{dv_c(t)}{dt} = E$$

设 $RC = \tau$, 则

$$v_c(t) + \tau \frac{dv_c(t)}{dt} = E$$

可见与充电回路电压方程式 (1-2) 具有相同的形式。因此, 有相同的通解

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

式中 $v_c(t)$ 的趋向值 $v_c(\infty) = E$;

$v_c(t)$ 的起始值 $v_c(0^+) = E_0$ 。

$$\therefore v_c(t) = E + (E_0 - E)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

其相应的 $v_c(t)$ 变化曲线如图 1—4 (b) 所示。

当 $E = 0$ 时, 上式即为

$$v_c(t) = E_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

其相应的 $v_c(t)$ 曲线如图 1—4 (c) 所示。

3. RC 电路的充放电特性, 由上面的讨论可知, 可以用下式表示:

$$v_c(t) = v_c(\infty) + [v_c(0^+) - v_c(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-9)$$

当 $v_c(\infty) > v_c(0^+)$ 意味着 $v_c(t)$ 是逐步上升的, 即为充电特性。当 $v_c(\infty) < v_c(0^+)$ 意味着 $v_c(t)$ 是逐渐下降的, 即为放电特性。综上所述, 可得如下结论:

(1) 如果 RC 电路中只包括一个独立的电容或虽有几个电容, 但可归并为一个电容时, 其过渡过程的电路方程肯定是一阶线性常系数微分方程, 具有式 (1—2) 的形式;

(2) 如果 RC 电路中的开关发生一次位置转换动作, 那么, 在已知电路初始状态的情况下, 微分方程必定可解, 而且其解应具有式 (1—9) 的形式;

(3) 为了建立式 (1—9), 需要了解三个数值, 即 $v_c(0^+)$ 、 $v_c(\infty)$ 及 τ 值。只要这三个数值能够确定, 则 $v_c(t)$ 方程即可建立。从而得到 $v_c(t)$ 的变化规律和曲线。故式 (1—9) 又被称作 RC 电路充放电特性的三要素方程, 它是研究、分析、计算脉冲电路的最重要的方程之一。

(二) 开关状态变换的阶跃波形表示法

图 1—5 (a) 电路中, 当开关 K 由位置 1 转向位置 2 的瞬间, A 点电位突然上跳了 E 值, 相当于输入一个幅度为 E 的跳变信号 (也叫阶跃信号) 使 A 点电位上跳到 E 值一样。因此, 上述开关转换过程也可用图 1—5 (b) 表示。该阶跃信号一般称作为正阶跃或正跳变。

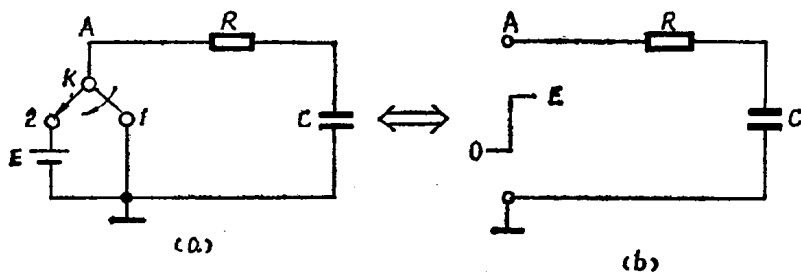


图 1—5 开关状态的阶跃波形表示法

图 1—5 (b) 表示原来 A 点电位为零, 相当于开关 K 处于位置 1。当在某一时刻 A 点电位上跳至 E 值, 相当于开关 K 在该时刻从位置 1 转到位置 2。反之, 图 1—6 电路中开关 K 由位置 2 转向位置 1 时, 则应用负阶跃电压表示该过程, 如图 1—6 (b) 所示。

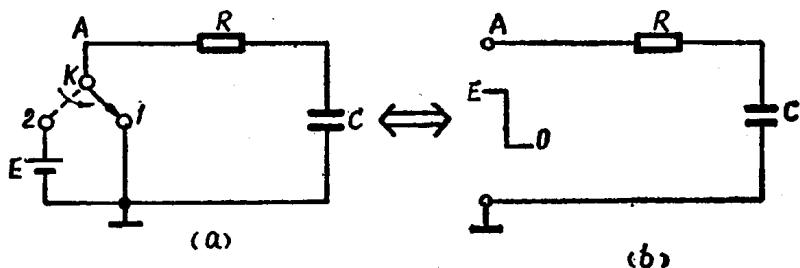


图 1—6 另一种开关状态的阶跃波形表示法

同理，对于图 1—7 (a) 所示换路情况，则可用图 1—7 (b) 的阶跃波形来表示。这种用阶跃波形来表示电路换路情况的方法使电路简洁清楚，在脉冲电路中得到广泛运用。

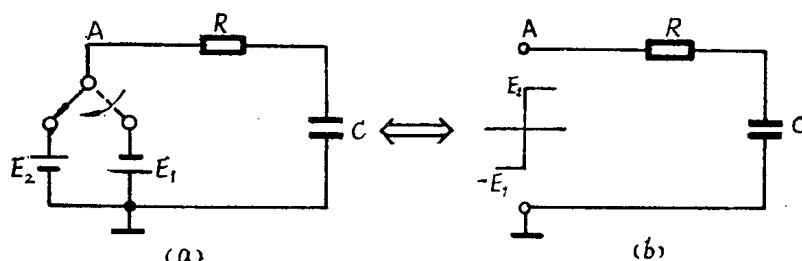


图 1—7 阶跃波形表示换路情况

二、微分电路

(一) 功能

可将矩形脉冲变换为尖脉冲，对于一般脉冲波形经过微分电路，其输出电压的大小与输入电压对时间的微分成比例。即

$$v_o(t) = k \frac{dv_i(t)}{dt}$$

式中 k ——比例系数； $v_o(t)$ ——输出电压； $v_i(t)$ ——输入电压。

(二) 电路及工作原理

1. 电路及条件：微分电路的基本电路，如图 1—8 (a) 所示。其工作条件

$$\tau = RC \ll t_k$$

其中 t_k 是输入矩形脉冲的宽度。

2. 工作原理：根据回路电压定理有 $v_i = v_c + v_o$ 。

(1) 当 $t < t_1$ ， $v_i = 0$ 时，假设 $t_1 \gg \tau$ ，则在 $t = t_1$ 以前电路已达稳态，故： $v_R = v_o = 0$ ； $v_c = 0$ 。

(2) 当 $t = t_1$ ， $v_i = E$ 时，因为 v_c 不能突变

$$v_c(t_1^+) = v_c(t_1^-) = 0$$

∴

$$v_o(t_1) = v_i(t) = E$$

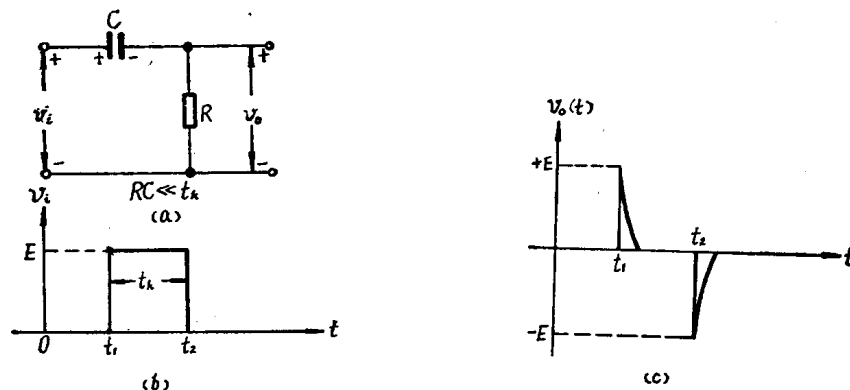


图 1—8 微分电路

(3) 当 $t_2 > t > t_1$ 时, v_i 保持不变, 一直为 E 。电容 C 充电, v_o 逐渐上升, 其上升速度由时间常数 τ 决定。因为图 1—8 (a) 中 $\tau = RC \ll t_1$, 所以 v_o 迅速上升到 E 值。又因为

$$v_o = v_i - v_c$$

所以 v_o 迅速由 E 值下降到零。从而电容 C 的充电过程在微分电路输出端产生一个正尖脉冲。并使电路达到新的稳态。即

$$v_i = v_c = E$$

$$v_o = 0$$

(4) 当 $t = t_2$ 时, v_i 重新为零, 因为电容电压不能突变

$$v_o(t_2^+) = v_o(t_2^-) = E, \quad v_i(t_2) = 0$$

$\therefore$

$$v_o(t_2^+) = -v_c(t_2^-) = -E$$

(5) 当 $t > t_2$ 时, v_i 保持为零, 电容 C 放电。因为 τ 很小, 所以 v_o 迅速下降为零, 从而 v_o 也迅速趋向零值。电路重新达到稳态, 这样, 在电容 C 的放电过程使输出端产生一个负尖脉冲。

这样, 微分电路利用电容器的快速充放电过程, 将输入矩形脉冲变换为正负尖脉冲。显然, 尖脉冲的产生是以充放电迅速进行为前提的。反之, 如果 $\tau > t_1$, 则在 t_1 期间, 过渡过程不能结束, 将得到完全不同的输出波形。

3. 数学分析, 在图 1—8 (a) 中, 电阻 R 上输出电压为 v_o , 且 $v_o = i_c R$

而

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt}$$

$\therefore$

$$v_o = i_c R = RC \frac{dv_c}{dt}$$

如果满足 $\frac{1}{\omega C} \gg R$ 的条件, 则电阻 R 上的压降很小, $dv_c \approx dv_i$

$$\therefore \quad v_o(t) = RC \frac{dv_c(t)}{dt} \approx RC \frac{dv_i(t)}{dt} \quad (1-10)$$

由式 (1—10) 可以看出, 输出电压 $v_o(t)$ 与输入电压 $v_i(t)$ 的微分成正比, 其比例系数 $k = RC = \tau$ 。所以叫做微分电路。

在工程实践上, 因为考虑到 $t \geq 3\tau$ 时, 过渡过程已基本结束。只要取 $t_1 > 10\tau$, 即可构成微分电路。

4. 尖脉冲的幅度及宽度

(1) 幅度: 当输入幅度为 E 的矩形波时, 因为电容上电压不能突变, 所以尖脉冲的幅度等于矩形脉冲的幅度 E 。

(2) 宽度: 尖脉冲从其幅值 E 降到 $10\% E$, 所需时间定义为微分脉冲宽度 t_{hd} , 如图 1—9 所示。根据三要素方程可知, 该微分脉冲的表示式为

$$v_o(t) = E e^{-\frac{t}{\tau}}$$

当 $v_o(t) = 0.1E$ 时, $t = t_{hd} = \tau \ln 10 = 2.3\tau$ 。

显然, 微分电路的时间常数 τ 越小, 微分脉冲的宽度越窄, 输出与输入之间越接近于微分关系。顺便指出: 理想矩形波的分应为 δ 函数, 即 t_{hd} 趋向 0; 幅度趋向无穷大。但由于

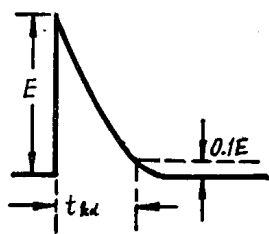


图 1—9 尖脉冲的宽度

推导微分关系时是近似的, 所以出现尖脉冲。

三、积分电路

(一) 功能

积分电路把矩形波变换为锯齿波。其输出电压 $v_o(t)$ 与输入电压 $v_i(t)$ 的积分成比例, 即

$$v_o(t) = k \int v_i(t) dt$$

式中 k —— 比例系数。

(二) 电路及工作原理

1. 电路及条件: 积分电路的电路如图 1—10 (a) 所示。其工作条件

$$\tau = RC \gg t_k$$

式中 t_k —— 输入矩形脉冲宽度。

2. 工作原理: 当 v_i 为如图 1—10 (b) 所示的矩形波时, 有

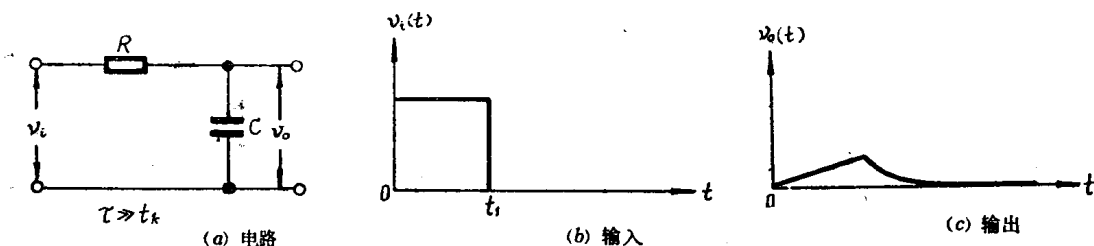


图 1—10 积分电路及其波形图

(1) 当 $t < 0$ 时, 假设电路已达稳态。因为 $v_i = 0$, 所以 $v_R = v_o = 0$

(2) 当 $0 \leq t < t_k$ 时, $v_i = E$ 值, 电容 C 充电, 因为电容电压 v_o 不能突变, 所以 $t = 0$ 时, $v_o(0) = 0$ 。当 $t > 0$, v_o 随充电过程逐渐上升。按

$$v_o(t) = v_c(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

发生变化。由数学分析可知, 指数函数可展开为级数。

$$e^{-x} = 1 - x + x^2 \dots$$

当 $x \ll 1$ 时, 取 $e^{-x} \approx 1 - x$ 。

现在, 我们有 $t_k \ll \tau$, 即在 t_k 范围内, $\frac{t_k}{\tau} \ll 1$, 因为

$$e^{-\frac{t}{\tau}} \approx 1 - \frac{t}{\tau}$$

$$\text{故 } v_o(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \approx E \left[1 - \left(1 - \frac{t}{\tau} \right) \right] = \frac{Et}{\tau} \quad (1-11)$$

由式 (1—11) 可见, 输出电压 v_o 和时间的关系是斜率为 E/τ 的直线关系, 也就是锯齿波形, 如图 1—10 (c) 所示。因为输入电压在脉冲持续时间中 $v_i = E$ 是一常量, 而常量的积分是一次函数, 现在输出电压 v_o 正是 t 的一次函数。所以将具有这种功能的电路称作积分电路。由此可见, 对于输入波形为矩形波, 且 RC 电路满足条件 $\tau \gg t_k$ 时, 其输出电压为锯