

微波中继通信电子电路

第 四 册

北京邮电学院微波专业教学组

1975 年 9 月

目 录

第六篇 脉冲与数字电路及遙控遙測原理	(1)
前言	(1)
第一章 线性脉冲电路基本知识	(1)
§1.1 RC 电路和 RL 电路的暂态过程	(1)
1. RC 电路的暂态过程	(1)
2. RL 电路的暂态过程	(6)
§1.2 基本的脉冲变换电路	(7)
1. 微分电路	(8)
2. 积分电路	(10)
3. 微分和积分电路应用举例	(12)
§1.3 RC 分压器	(13)
习题及思考题	(16)
第二章 晶体管开关特性	(17)
§2.1 二极管稳态开关特性	(17)
§2.2 三极管稳态开关特性	(18)
1. 共发射极连接时三极管的静态特性	(19)
2. 截止区的晶体三极管	(19)
3. 饱和区的晶体三极管	(21)
4. 三种运用区的主要特性	(24)
§2.3 二极管的暂态开关特性	(25)
1. 稳态情况下管内载流子的分布状况	(25)
2. 截止转入导通	(26)
3. 导通转入截止	(26)
§2.4 三极管的暂态开关特性	(28)
1. 截止转入导通	(29)
2. 导通转入截止	(29)
3. 加速电容在电路中的作用	(31)
习题及思考题	(32)
第三章 门电路	(33)
§3.1 “与”逻辑和“或”逻辑的概念	(33)
§3.2 二极管门电路	(34)
1. 二极管“与”门	(34)
2. 二极管“或”门	(35)

3. 二极管门电路的若干特点	(35)
4. 二极管的性能对门电路的影响	(36)
5. 二极管“与”门电阻 R_D 的选择	(36)
§3.3 “非”门电路	(37)
§3.4 “与非”门电路	(38)
§3.5 “或非”门电路	(39)
§3.6 门电路组件	(40)
1. 电路工作原理	(40)
2. 特性指标	(42)
习题及思考题	(43)
附录 国产集成电路命名方法	(45)
第四章 双稳态触发器	(46)
§4.1 集电极—基极耦合双稳态触发器的工作原理	(46)
1. 电路的两种稳定状态及其转换	(46)
2. 电路稳定于一管饱和另一管截止的条件	(47)
3. 电路翻转的条件	(50)
§4.2 双稳态触发器的触发方式	(51)
1. 单端输入触发	(51)
2. 双端输入触发	(52)
§4.3 集电极—基极耦合双稳态触发器的其它电路	(56)
1. 自给偏置触发器	(56)
2. 无偏置触发器	(56)
3. 改善输出波形的电路	(56)
4. 抗饱和电路	(59)
5. 加快加速电容建立新状态的电路	(59)
6. PNP管电路	(60)
§4.4 集电极—基极耦合双稳态触发器的设计原则	(60)
§4.5 集成电路触发器	(62)
1. 基本触发器 ($R-S$ 触发器)	(62)
2. 计数触发器	(63)
3. 维持—阻塞触发器	(65)
4. 集成单元触发器 ($J-K$ 触发器)	(66)
§4.6 计数器	(67)
1. 二进制计数器	(68)
2. 十进制计数器	(70)
3. 计数器的计数速度	(77)
习题及思考题	(78)
第五章 单稳态触发器和自激多谐振荡器	(79)
§5.1 集电极—基极耦合单稳态触发器	(79)

1. 电路的工作原理	(80)
2. 波形分析	(83)
3. 电路的改进	(86)
§5.2 集电极—基极耦合单稳态触发器的设计原则	(87)
§5.3 单稳态触发器的几种电路介绍	(88)
1. 无偏置电路	(88)
2. 发射极耦合单稳态触发器	(88)
3. 集成门电路构成的单稳态触发器	(90)
§5.4 单稳态触发器典型应用举例	(94)
§5.5 多谐振荡器的工作原理	(95)
1. 自激产生原理	(95)
2. 波形分析	(96)
§5.6 多谐振荡器指标的改进	(98)
1. 波形改善	(98)
2. 提高电路的可靠性	(99)
§5.7 集成门电路组成的多谐振荡器	(100)
习题及思考题	(102)
第六章 计数式频率测量的原理与方法	(103)
§6.1 计数式频率测量的方框原理图	(103)
§6.2 数字显示	(104)
1. 辉光数字管	(104)
2. 辉光数字管控制电路和译码器	(105)
§6.3 计数控制电路	(108)
1. 对计数控制电路的基本要求及计数控制电路的基本功能	(108)
2. 记忆电路——寄存器	(108)
3. 控制电路原理及工作波形	(110)
习题及思考题	(112)
第七章 锯齿波发生器	(113)
§7.1 锯齿波信号的主要参数	(113)
§7.2 简单的 RC 充放电锯齿波发生器	(114)
§7.3 恒流源充电锯齿波发生器	(116)
§7.4 电容反馈式锯齿波发生器	(118)
1. 电路及工作原理	(118)
2. 扫描正程	(119)
3. 回扫期	(121)
§7.5 自举式锯齿波发生器	(122)
1. 电路说明	(122)
2. 扫描期	(122)
3. 扫描逆程	(125)

§7.6 自激式锯齿波发生器	(127)
1. 电路及工作原理	(127)
2. 主要指标的计算	(129)
3. 电路其它元件对扫描波形的影响	(131)
4. 同步原理	(132)
5. 实际电路	(133)
习题及思考题	(134)
第八章 脉冲信号的图示原理与方法	(135)
§8.1 脉冲示波器性能与电路的特点	(135)
§8.2 对触发扫描的基本要求	(137)
§8.3 方框图及各部分的功能	(137)
§8.4 扫描发生器电路原理	(139)
1. 锯齿波发生器	(139)
2. 释抑电路	(140)
3. 闸门电路及微分限幅电路	(142)
4. 增辉电路	(146)
§8.5 触发扫描电路工作一周期的全过程	(147)
习题及思考题	(149)
附录 示波管及其显示波形的原理	(149)
第九章 遙控与遙测原理	(155)
§9.1 对微波中继通信系统遙控和遙测的基本要求	(155)
§9.2 脉冲编码(电码)的组成方案	(156)
§9.3 脉冲编码信号的产生方法	(157)
1. 手动编码器	(157)
2. 移位寄存器	(159)
3. 程序控制电路编码器	(161)
§9.4 发端和收端设备系统原理图	(166)
1. 主控站发送系统(主发)	(166)
2. 被控站接收系统(分收)	(168)
3. 被控站发送系统(分发)	(169)
4. 主控站接收系统(主收)	(169)
§9.5 遙测基本原理	(170)
§9.6 遙调基本原理	(172)
§9.7 差错控制	(175)
1. 差错控制的基本概念	(175)
2. 奇偶监督码	(175)
3. 正反码监督码	(176)
§9.8 结束语	(178)
第七篇 波道备用自动倒换系统	(180)

第一章	波道备用倒换的作用原理	(180)
第二章	波道备用倒换系统与其它机架的联接	(183)
1.	方框系统图	(183)
2.	正常情况时信号的传输过程	(183)
3.	主用波道发生障碍时信号的传输过程	(185)
4.	波道倒换机的组成部分	(186)
第三章	波道备用倒换系统应具有的功能	(187)
1.	波道倒换机的功能	(187)
2.	逻辑控制电路方框图	(188)
第四章	波道倒换机各部分电路的工作原理	(191)
1.	导频发送	(192)
2.	导频接收	(194)
3.	分支电路	(197)
4.	中频开关	(198)
5.	信号发送	(199)
6.	信号接收	(201)
7.	信号鉴别	(203)
8.	备用鉴别	(206)
9.	信号控制	(207)
10.	前段控制	(210)
11.	开关控制	(213)
12.	发端转换	(216)
13.	发端控制	(218)
14.	设备告警	(219)
15.	混乱告警	(220)
16.	延时告警	(223)
17.	灯键盘	(224)
18.	电源部分	(225)
第二册勘误表		(226)
第三册插图勘误		(227)
第四册插图勘误		(228)

第六篇 脉冲与数字电路及遥控遥测原理

前言

脉冲与数字电路是电子电路的一个重要分支。它在近代电子技术的许多部门——如通信、计算技术、测量、自动控制……，得到日益广泛的应用。

960 路微波中继通信设备中的波道倒换机架，主要由各种脉冲与数字电路构成。微波中继站实行无人值守，完成遥控、遥测、遥调等一系列操作，也必须应用脉冲数字电路。

本篇内容共分九章：第一章简述一下线性脉冲电路的基本知识；第二章为晶体管开关特性；第三章叙述门电路；第四章介绍双稳态触发器和计数器；第五章介绍单稳触发器和多谐振荡器；第六章讲述计数式频率测量原理，可以作为第三、四、五等三章内容的应用举例。以上几章在讲述电路原理时，以分立元件为主，也适当介绍一下集成电路。第七章介绍锯齿形电压波发生器；第八章讲述脉冲信号的图示法，重点介绍一个触发扫描电路，并在附录中简要介绍了示波管及其显示波形的原理；第九章介绍微波中继通信设备实现遥控遥测的一种可能方案，其目的是通过介绍这种方案使我们了解遥控遥测的基本原理。

第一章 线性脉冲电路基本知识

§1.1 RC 电路和 RL 电路的暂态过程

1. RC 电路的暂态过程

当我们用万用表来测量电阻和电容时，可以发现它们之间存在着一些差别。在用万用表测电阻时，表的指针很快就固定在一个位置上，而当用万用表来测大电容时，在刚一接上电容时，指针摆动很大，然后再渐渐地退回来。这说明在万用表与电容所构成的这一回路中，开始有一个很大的电流流过，然后，这个电流逐渐减小。

上述现象告诉我们：当电源与纯电阻组成的回路接通时，回路中立即产生一稳定电流，并进入到新的稳定状态。但当电源与电阻、电容组成的电路接通时，回路中将出现一个逐渐变化的暂态过程（亦称过渡过程），只有当暂态过程结束后，电路才达到新的稳定状态。下面，我们就来分析 RC 电路中出现的这一暂态过程的变化规律。

在图 6.1.1 所示的 RC 串联电路中，当我们将开关 K 打向“1”端时，RC 电路与电源 E 接通，电源通过电阻 R 向电容 C 充电，于是电容 C 上逐渐积累起电荷。我们知道，电容器两端的电压 v_c 与电容器上的电荷 Q 存在有下列关系，即 $v_c = \frac{Q}{C}$ 。在开关打向“1”的瞬

间, 由于电容器上电荷还来不及积累, 因此, 电容器上也就不能马上建立电压, 这时电压 $v_c = 0$, 流过回路的充电电流为 $i = \frac{E - v_c}{R} = \frac{E}{R}$ 。接着, 由于电容器上电荷不断地积累,

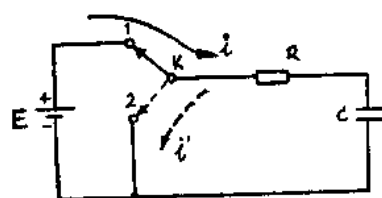


图 6.1.1 RC 串联电路的充放电

电容器两端的电压也就逐渐升高, 而充电电流

$i = \frac{E - v_c}{R}$ 将随着 v_c 的上升而逐渐减小, 最

后减至零。电容器上电荷积累的速度正比于电流的大小, 当电流由大逐渐减小时, 电容器上电荷积累的速度由快到慢, 因此, 电容器上电压 v_c 上升的速度也逐渐变慢。最后经过很

长的时间 ($t \rightarrow \infty$), 电压 $v_c \rightarrow E$, 于是整个电源电压全部降落在电容上。

由以上的分析我们看到, 当 RC 串联电路和一个恒定电源突然接通后的一瞬间, 电容器的端电压来不及变化, 全部变化电压都降落在电阻上, 这相当于电容器的阻抗趋于零。因为

电容器的容抗为 $Z_c = \frac{1}{j\omega C}$, 如果 $Z_c \rightarrow 0$, 这就相当于 $\omega \rightarrow \infty$ 。因此, 在恒定电源与电路

接通的一瞬间, 电路所表现出来的特性就与 $\omega \rightarrow \infty$ 的简谐信号通过时所表现出来的特性相似。当恒定电源接通很长时间后, 即 $t \rightarrow \infty$, 电源电压又都全部降落在电容上, 这相当于电容器的容抗趋于无限大, 即 $Z_c \rightarrow \infty$, 这就相当于 $\omega \rightarrow 0$ 。因此, 恒定电源接通很长时间以后, 电路所表现出来的特性就与 $\omega \rightarrow 0$ 的简谐波信号通过时所表现出来的特性相似。

以上 $\omega \rightarrow \infty$ (或 $\omega \rightarrow 0$) 的频率特性对应于恒定电源与电路接通 $t \rightarrow 0$ (或 $t \rightarrow \infty$) 的时间特性的概念, 可以推广至其它的 RC 电路, 也可以推广应用于 RL 电路和其它复杂电路。

以上我们从概念上对 RC 串联电路与电源接通时电流电压的变化作了简要的说明, 下面我们就从数量上来进行分析。根据图 6.1.1, 可以列出电路的微分方程如下:

$$E = iR + v_c。$$

将 $i = C \frac{dv_c}{dt}$ 代入上式, 就可得到

$$E = RC \frac{dv_c}{dt} + v_c。 \quad (6.1.1)$$

这个微分方程的解包括两部分, 一部分是外加电压作用下的稳态解, 而另一部分是由方程

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

所确定的暂态解, 前者写为

$$v'_c = A,$$

而后者的形式为

$$v''_c = B e^{-\frac{t}{RC}}。$$

于是全解为

$$v_c(t) = v'_c + v''_c = A + B e^{-\frac{t}{RC}}。$$

A 及 B 可以分别由 $t \rightarrow \infty$ 和 $t = 0$ 的 $v_c(t)$ 值来确定。

$$\text{当 } t \rightarrow \infty \text{ 时, } v_c(t) = V_c(\infty)。$$

$$\text{当 } t \rightarrow 0 \text{ 时, } v_c(t) = V_c(0)。$$

于是可解得

$$A = V_c(\infty) ,$$

$$B = V_c(0) - V_c(\infty)。$$

于是

$$v_c(t) = V_c(\infty) + [V_c(0) - V_c(\infty)]e^{-\frac{t}{RC}}。 \quad (6.1.2)$$

式 (6.1.2) 所表示的解, 对具有图 6.1.1 电路形式的 RC 电路或式 (6.1.1) 形式的微分方程, 具有普遍意义。具体到我们目前所讨论的情况是

$$\text{当 } t \rightarrow \infty \text{ 时, } v_c \rightarrow E_c, \text{ 即 } V_c(\infty) = E_c ;$$

$$\text{当 } t = 0 \text{ 时, } v_c = 0, \text{ 即 } V_c(0) = 0。$$

于是可得

$$v_c(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})。 \quad (6.1.3)$$

充电电流

$$i(t) = C \frac{dv_c}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}。 \quad (6.1.4)$$

由以上式 (6.1.3) 和式 (6.1.4) 中可以看出, v_c 和 i 作为时间函数的指数项中, RC 以乘积出现。这就是说, 当 RC 的乘积一定时 (无论是 R 大 C 小, 或是 R 小 C 大), 电流和电压随时间的变化速度是一样的, 但电流的大小与 R 有关。令 $\tau = RC$, 则式 (6.1.3) 和式 (6.1.4) 可改写为

$$v_c(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (6.1.5)$$

$$i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}。 \quad (6.1.6)$$

在图 6.1.2 中, 画出以时间 t 为自变数、 $v_c(t)$ 和 $i(t)$ 为因变数、电路时间常数 τ 为参变数的曲线。

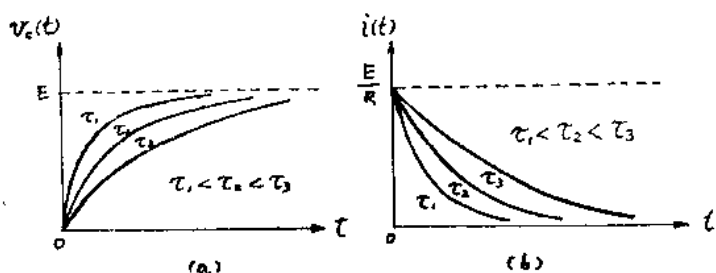


图 6.1.2 RC 电路接通电源 E 的电压和电流变化曲线

图中分别绘出了三条时间常数不同的曲线, 可以看出, 在时间常数越大时, 充电电压 $v_c(t)$ 上升的速度越慢, 而充电电流 $i(t)$ 则是减小的速度越慢。因此, 时间常数 $\tau = RC$ 之值就表征了电路充电的快慢。从物理概念上来理解的话, 因为 R 越大, 充电电流就小, 于是充电过程就慢, 而充电电流是由于电容 C 上的电压增长才减小的, 电容 C 上电压的增长速度慢, 电流的减小速度自然也慢。如果电容 C 越大, 则电容器上增长同一数值电压所需要堆积的电荷也愈多, 因此, 充足电荷所需的时间也越长。

为了更清楚地描述上而所得出的指数曲线的变化规律, 我们选择了几个 t/RC 的数值,

并求出对应的 $e^{-\frac{t}{RC}}$ 和 $(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ 的数值, 列于表 6.1.1。

表 6.1.1

$\frac{t}{RC}$	0	0.69	1	2	3	5
$e^{-\frac{t}{RC}}$	1	0.5	0.37	0.14	0.05	0.007
$1 - e^{-\frac{t}{RC}}$	0	0.5	0.63	0.86	0.95	0.993

由表 6.1.1 中可以看出, 虽然电容上电压充到 $V(\infty)$ 所需的时间是无穷大, 但是, 当 $t = 3RC$ 时, v_c 已上升到 $0.95V(\infty)$; 当 $t = 5RC$ 时, v_c 已上升到 $0.993V(\infty)$ 。所以, 一般认为当 $t = (3 \sim 5)RC$ 时, 电容器上电荷已充足。

前面提到, 式 (6.1.2) 所表示的 RC 电路中电容上的电压变化规律, 对于具有图 6.1.1 形式的 RC 电路或式 (6.1.1) 形式的微分方程, 具有普遍意义。下面举两个简单电路来说明怎样应用这一结果。

例 1 试写出在图 6.1.3 (a) 所示的电路中, 当接通电源电压 E 之后, 电容器两端电压的变化规律。

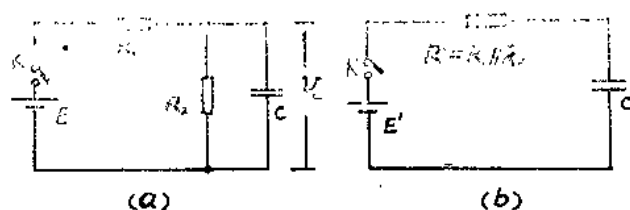


图 6.1.3

为了计算方便起见, 可以利用等效电源定理把图 6.1.3 (a) 化成为图 6.1.3 (b), 图中

$$R = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$$E' = \frac{ER_2}{R_1 + R_2}.$$

图 6.1.3 (b) 和图 6.1.1 所示的 RC 电路在形式上相似, 我们现在可以利用式 (6.1.2) 所表示的结果。根据图 6.1.3 (b) 可以有

$$V_c(0) = 0; \quad V_c(\infty) = E' = \frac{ER_2}{R_1 + R_2},$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

将以上诸值代入式 (6.1.2) 可得

$$v_c(t) = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} (1 - e^{-\frac{t(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 C}}).$$

例2 在图 6.1.4 中, 信号源 $v_s(t)$ 为一阶跃电压, 即当 $t < 0$ 时 $v_s = 0$, 而当 $t \geq 0$ 时 $v_s = E$, 写出电容器两端的电压 v_c 变化规律。

图 6.1.4 所示电路在形式上和图 6.1.1 相似。阶跃电压相当于在 $t \geq 0$ 时接通电源 E , 电路中除了变化的信号源 $v_s(t)$ 之外, 还有一个不变的电源 E' 。电源 E' 只影响电容上电压的初始值和最终值, 而对电容 C 上电压的变化量没有任何影响。电路中用阶跃电压代替用开关来接通电源 E 的区别是: 当 $v_s(t) = 0$ 时, 相当于没有电源 E , 但保持了电源 E' 的接通。因此, 在 $t \leq 0$ 时, 电容 C 上已有一个初始的电荷堆积, 这也就是说, 电容上电压的初始值不为零。显然, $V_c(0) = -E'$, 而 $V_c(\infty) = E - E'$, 于是根据式 (6.1.2) 可以写出

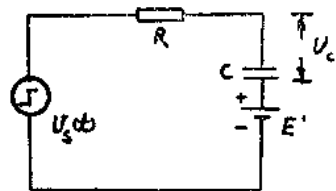


图 6.1.4

$$\begin{aligned} v_c(t) &= E - E' + [-E' - (E - E')]e^{-\frac{t}{RC}} \\ &= E - E' - Ee^{-\frac{t}{RC}}. \end{aligned}$$

当我们对 RC 电路的充电过程了解以后, 对放电过程也就不难理解了。仍然看图 6.1.1。原来开关 K 打向“1”端时电容充足了电。经过一段时间后, 如果将开关 K 打向“2”端, 这时 RC 串接回路被短路。原来电容上充好的电荷将要沿着 RC 回路泄放掉, 放电电流的方向与原来充电电流相反, 如图 6.1.1 中虚线 i' 所示。

令式 (6.1.1) 中的 $E = 0$, 就可以得到放电的微分方程。因为现在电路中没有外接电源, 于是稳态解为零, 也就是 $V_c(\infty) = 0$ 。令式 (6.1.2) 中 $V_c(\infty) = 0$, 就可以得到放电时电容 C 上电压的变化规律为

$$v_c(t) = V_c(0)e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6.1.7)$$

在我们所研究的具体情况下

$$V_c(0) = E,$$

就得到

$$v_c(t) = Ee^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6.1.8)$$

$$i(t) = -\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6.1.9)$$

这个关系可用图 6.1.5 所示的曲线来表示。同样, 时间常数 $\tau = RC$ 越大, 放电的速度就越慢。

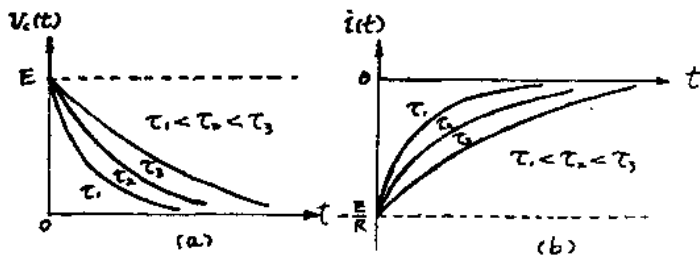


图 6.1.5 电容 C 被充电后通过电阻 R 放电

2. RL 电路的暂态过程

上面所讨论的 RC 电路的充放电，其物理过程实际上是电容器中能量的积累和释放。当电容被充电时，就以电场能的方式贮存能量。

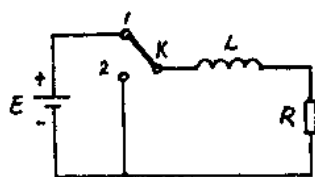


图 6.1.6 RL 电路的充放电

电感也是一个贮能元件，它是以磁能的方式贮存能量。电感中磁能量的积累和释放，与电容相似，也需要一定的时间而经历一个暂态过程。这也就是说，如果在图 6.1.6 所示的 RL 电路中将开关打向“1”端，则回路中电流和电压的建立需要经过一个逐渐变化的过程才能稳定下来。下面，我们就来分析这个过程的变

化规律。

设在某一时刻将开关 K 合向“1”端，因为 RL 和电源 E 形成一个回路，所以在回路中将产生一个电流 i 。但由前已知，开关接通的那一瞬间 ($t=0$)，就相当于 $\omega \rightarrow \infty$ 的情况，而电感的阻抗 $Z_L = j\omega L$ ，因此，在 $t=0$ 时， $Z_L \rightarrow \infty$ 。在电感呈现很大的阻抗时，就相当于开路。所以此时回路电流 $i=0$ ，这就是说，电感中的电流不能突变（与电容上的电压不能突变相对应），这是电感的一个极其重要的特性。当 $t>0$ 后， RL 回路中由于 L 呈现的阻抗逐渐下降，因此，电流 i 逐渐增加。直到 $t \rightarrow \infty$ 时，这相当于 $\omega \rightarrow 0$ ，这时， $Z_L \rightarrow 0$ ，电流才达到稳定值 $i = \frac{E}{R}$ 。

下面，我们定量地分析电路中电流电压的变化规律。可列出图 6.1.6 的回路方程为

$$E = iR + v_L。$$

将 $v_L = L \frac{di}{dt}$ 代入上式可得

$$E = iR + L \frac{di}{dt}，$$

即

$$\frac{E}{R} = \frac{L}{R} \frac{di}{dt} + i。 \quad (6.1.10)$$

比较式 (6.1.10) 及式 (6.1.1) 可见，这两个微分方程具有相似的形式。式 (6.1.10) 中的 $\frac{E}{R}$ 、 $\frac{L}{R}$ 、 i 分别对应于式 (6.1.1) 中的 E 、 RC 和 v_c 。因而对式 (6.1.10) 中 i 的解应该具有与式 (6.1.1) 中 v_c 的解相似的形式。把式 (6.1.2) 中的电压 v_c 换以电流 i ，并把时间常数 $\tau = RC$ 换以 $\tau = \frac{L}{R}$ 就可以得到

$$i(t) = I(\infty) + [I(0) - I(\infty)]e^{-\frac{R}{L}t}。 \quad (6.1.11)$$

具体到我们研究的情况，

当 $t=0$ 时， $i=0$ ；当 $t \rightarrow \infty$ 时， $i = \frac{E}{R}$ 。

所以

$$i(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

$$= \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$
(6.1.12)

由此可求得电阻两端和电感两端的电压分别为

$$v_R(t) = i(t) \cdot R = E (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$
(6.1.13)

$$v_L(t) = E - i(t)R = E e^{-\frac{t}{\tau}}.$$
(6.1.14)

图 6.1.7 给出了开关 K 打向“1”端时,回路中电流和电感两端电压的变化规律。

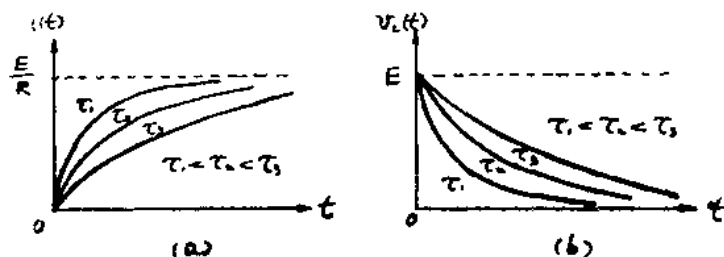


图 6.1.7 RL 电路接通电源 E 的电流和电压变化曲线

同样,当上述过程达到稳定后,如将开关 K 打向“2”端,电感中所贮存的磁能将沿 RL 回路泄放,其放电规律也是指数的。直到最后磁能全部泄放完毕,电流 $i \rightarrow 0$ 。

我们将简单的 RC 电路和 RL 电路与恒定电源电压 E 接通的特性列于表 6.1.2。

表 6.1.2

RC 电路	RL 电路
电容两端电压不能突变	电感中的电流不能突变
电容两端的电压按指数规律由 0 逐渐增加到稳定值 E	电感中的电流按指数规律由 0 逐渐增加到稳定值 $\frac{E}{R}$
电容充电快慢与时间常数 $\tau = RC$ 有关, τ 越大,充电越慢。	电感中电流变化快慢与时间常数 $\tau = \frac{L}{R}$ 有关, τ 越大,变化越慢。

§ 1.2 基本的脉冲变换电路

在 RC 、 RL 电路中,由于电容、电感的储能和泄能需要一定的时间,即有一个暂态过程,因此,如果在电路中输入一个阶跃电压,在 R 、 L 或 C 上所得到的输出波形是与输入不一样的。在很多场合,我们就利用了电容和电感的这一特性,并利用晶体二极管和三极管作为开关而组成了各种电路,以将某种脉冲的波形或幅度进行变换。下面,介绍几种由 R 和 C 以及 R 和 L 组成的基本脉冲变换电路。

1. 微分电路

图 6.1.8(a) 所示的就是 RC 微分电路。从形式上看, 它与放大器中的 RC 耦合电路完全相同, 其实不然。虽然电路形式相同, 但由于元件的数值取得不同, 量变将引起质变, 电路的功能也将产生质的差别。下面, 我们来分析一下微分电路的工作过程。

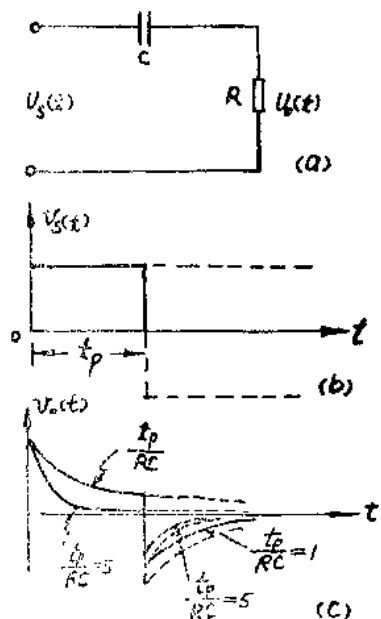


图 6.1.8 RC 微分电路及波形

图 6.1.8(b) 为 RC 微分电路, 输出信号从电阻 R 上取出。电阻上的电压 $v_o = iR$ 。在前一节中已经得出当输入端接通电源 E (相当加上一个阶跃电压) 后的表示式如式 (6.1.6), 并在图 6.1.2(b) 中画出 $i(t)$ 的波形。根据式 (6.1.6) 可得出电压 $v_o(t)$ 的表示式为

$$\begin{aligned} v_o(t) &= i(t)R \\ &= E e^{-\frac{t}{RC}} \end{aligned} \quad (6.1.15)$$

显然, 电压 $v_o(t)$ 的波形与电流 $i(t)$ 的波形是相似的, 它们之间只差一常数 R 。

如果输入信号 v_i 是一个矩形脉冲, 如图 6.1.8(b) 所示, 输出波形 v_o 将是怎样的呢?

因为矩形脉冲可以看作是幅度相等而极性相反, 但在时间上相差 t_p (= 脉冲持续期) 的两个阶跃电压的迭加, 所以输出波形也可以由两个阶跃电压的输出波形迭加来求得。在图

6.1.8(c) 中, 给出 $\frac{t_p}{RC} = 1$ 和 5 两种情况下的输出波形。由图中可以看出, 在 $\frac{t_p}{RC} = 5$, 即矩形脉冲的持续期等于电路时间常数 5 倍的情况下, 当输入为一个矩形脉冲时, 在输出端可以得到两个尖峰 (一正一负) 脉冲。微分电路就是用来将矩形脉冲变换成尖峰脉冲。尖峰对应于矩形脉冲的前沿和后沿, 所以利用微分电路可以准确地取出矩形波的前沿和后沿。

现在我们从物理概念上来阐明一下, 为什么当矩形脉冲的持续期 t_p 远大于电路的时间常数 RC 时, 矩形脉冲被变换成一对一正一负的尖峰波的。

在 $t = 0$ 时, 输入电压由 0 突变到 E , 在这一瞬间电容器上还来不及堆积电荷, 因此, $v_c = 0$ 。然而整个电路应满足关系式 $v_o + v_c = E$, 因此, 全部电压降落在电阻 R 上, 于是 v_o 发生了一个幅度为 E 的跳变。接着 ($t > 0$), 输入信号 v_i 仍保持为 E , 电容器上电压随着指数充电过程而逐渐上升, 于是电压 v_o 按指数规律而相应下降。当 $t = (3 \sim 5)RC$ 时, 电容器基本上充足电, 于是全部电压都降落在电容器上, 输出电压就下降到零, 形成一个正尖峰脉冲。 RC 时间常数相对于矩形脉冲持续期 t_p 愈小, 则正尖峰脉冲的宽度相对于 t_p 就愈短。到了 $t = t_p$ 时刻, 输入信号由 $+E$ 跃降到 0, 这就相当于 RC 电路突然被短路, 如图 6.1.9 所示, 电容开始放电, 在 $t = t_p$ 这一瞬间, 电容 C 上的电荷还来不及泄放掉, 其上电压仍保持为 E , 而电容器 C 的正电荷端被接地, 所以 R 上的电压 v_o 就变为 $-E$, 这也就是说, 输出电压从 0 跃变到 $-E$, 接着, 电容器的放电电流逐渐减小 (放电电流方向与充电时相反),

R 两端的负电压也按指数规律减小, 最后又回到 0, 于是在输出端形成一负尖脉冲。

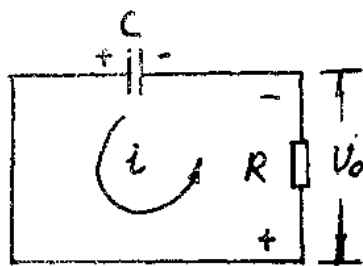


图 6.1.9 v_i 下降至零时微分电路电容 C 放电

这个电路为什么叫微分电路呢? 我们从假定输入信号是一个正弦波入手来研究, 即

$$v_i(t) = V_{im} \sin \omega t,$$

于是输出电压的复数值为

$$\dot{V}_0 = \frac{\dot{V}_i R}{R + \frac{1}{j\omega C}}.$$

如果输入信号频率足够低, 满足

$$\frac{1}{\omega C} \gg R,$$

则

$$\dot{V}_0 = j\omega CR \dot{V}_i,$$

即

$$\begin{aligned} v_0(t) &= \omega CR V_{im} \cos \omega t \\ &= RC \frac{dv_i(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (6.1.16)$$

式 (6.1.16) 说明, 当信号频率足够低时, 输出信号与输入信号的微分值成比例。

对于一个矩形脉冲而言, 它所包含的频率分量很多, 其最低频率分量与脉冲的持续期有关, 对于一个连续的持续期与间歇期都是 t_p 的矩形脉冲, 用富氏级数分解后可得其中最低频率为 $f_l = \frac{1}{2t_p}$ 或 $\omega_l = \frac{\pi}{t_p}$ 。条件 $\frac{1}{\omega_l C} \gg R$ 即 $\frac{1}{\omega_l} \gg R C$ 或 $t_p \gg \pi RC$ 。当满足这一条件时,

矩形脉冲就被变换成尖峰脉冲对。一般称尖峰脉冲为矩形脉冲的微分输出。实际上, 电路只对矩形波的低频分量满足微分条件。正确地说, 这是一个通高频电路, 它具有压抑信号中低频分量, 而突出高频分量, 或者说压抑恒定分量, 而突出变化分量的作用。一个随时间变化大的信号, 其对时间的微分值就大, 而随时间变化小的信号, 其对时间的微分值就小。从电路能突出变化分量这一特点着眼, 称这种电路为微分电路。

顺便指出, 在前面的分析中, 为了简化问题, 未考虑信号电源的内阻, 当信号电源内阻 R_i 可以和负载电阻 R 相比拟时, 电路的时间常数应该是 $(R_i + R)C$ 。

除此之外, 实际的输入信号不可能是理想的矩形波, 其上升速度是有限的, 在输入脉冲的前沿和微分电路的时间常数 $\tau = RC$ 可以相比拟时, 输入脉冲的前沿对输出脉冲波形将产生很大的影响。设输入信号上升前沿是一指数曲线, 其时间常数为 τ' , 即 $v_i(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau'}})$ 。这时, 运用拉氏变换可算出微分电路的输出信号为

$$v_0(t) = E \frac{\tau}{\tau - \tau'} (e^{-\frac{t}{\tau}} - e^{-\frac{t}{\tau'}}) \quad (6.1.17)$$

图 6.1.10 给出 $\frac{\tau}{\tau'}$ 为四个不同值的输出信号波形图。由图中可见，当比值 $\frac{\tau}{\tau'}$ 愈小，即输入脉冲的前沿相对于电路时间常数愈大时，输出脉冲的幅度就愈小。

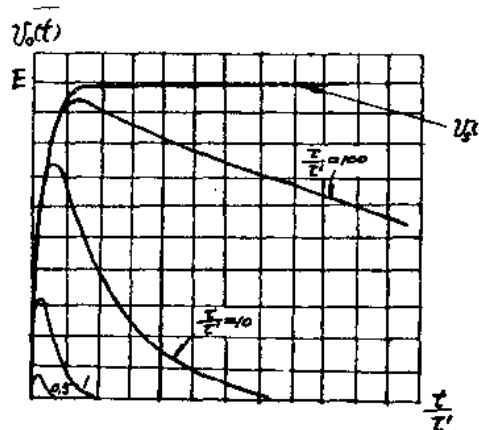


图 6.1.10 输入波形前沿为指数规律时的输出波形

除了上面所介绍的 RC 电路可以构成微分电路之外，利用 RL 元件也可以构成微分电路，其电路如图 6.1.11 所示（在实际电路中，有时 R 并不接入，而是利用了信号源内阻）。如果我们在这个电路中输入一个宽度为 t_p 而周期为 T 的矩形脉冲，只要使电路元件满足 $\frac{\pi L}{R} \ll t_p$ ，则输出就是正、负尖脉冲。我们仍然可以利用关于 RL 电路暂态过程的基本知识对此电路的微分过程进行分析。

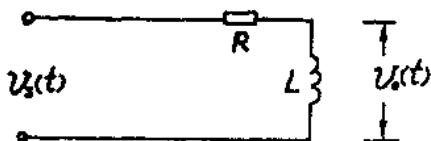


图 6.1.11 RL 微分电路

2. 积分电路

图 6.1.12 所示为最简单的 RC 积分电路，它也是一种脉冲变换电路，其输出电压 $v_0(t)$ 自电容 C 上取得。当电路元件满足 RC 远大于对称矩形波的一个周期 T 时，就能将对称矩形波变换成三角波。

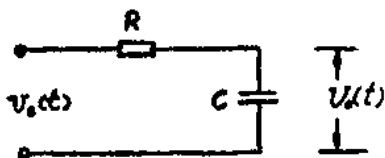


图 6.1.12 简单的 RC 积分电路

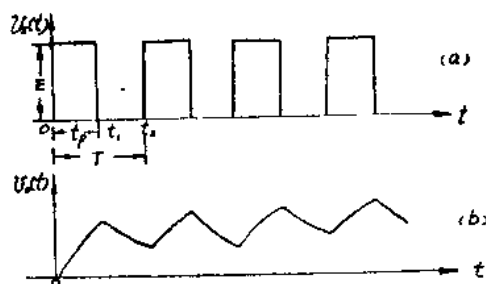


图 6.1.13 矩形脉冲输入时 RC 积分电路的输出波形

设图 6.1.12 所示 RC 电路的输入电压为一对称矩形波, 如图 6.1.13(a) 所示。从 $t=0$ 至 t_1 期间, 电容 C 被充电, 电压就按指数规律增长。从 $t=t_1$ 至 t_2 期间, 电容 C 通过电阻 R 放电, 电压就按指数规律下降。如果电路时间常数 RC 远大于矩形脉冲的周期, 则电容在二分之一周期内既来不及充满电, 也来不及放完电, 这也就是电容充电的最高电压不能到达 E , 以及放电的最低电压也不能到达零, 如图 6.1.13(b) 所示。经过比较多个周期以后, 电容上的最高与最低电压才能逐渐增大到各趋于一极限值, 即处于 0 与 E 之间。不难理解, 当电路时间常数 RC 相对于脉冲周期来说显得愈大时, 充放电进行得就愈慢, 这样, 电容上电压的变化只是指数曲线的一小段, 其变化规律就愈接近于直线, 而变化幅度也愈小。这时, 输出波形愈接近于三角波。

这个电路为什么被称为积分电路呢? 我们从输入信号为一正弦波入手来分析。

设输入信号为

$$v_i(t) = V_{sm} \sin \omega t,$$

于是输出电压的复数表示式为

$$\dot{V}_0 = \frac{\dot{V}_s}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot \frac{1}{j\omega C}。$$

当满足 $R \gg \frac{1}{\omega C}$ 即 $\omega \gg \frac{1}{RC}$ 时,

$$\dot{V}_0 \approx \frac{1}{j\omega RC} \dot{V}_s,$$

或

$$\begin{aligned} v_0(t) &= \frac{-V_{sm} \cos \omega t}{\omega RC} \\ &= \frac{1}{RC} \int V_{sm} \sin \omega t dt \\ &= \frac{1}{RC} \int V_s(t) dt. \end{aligned} \quad (6.1.18)$$

由式 (6.1.18) 可见, 当正弦波信号的角频率远大于电路时间常数的倒数时, 输出电压与输入电压的积分成正比。对于一个对称的矩形脉冲而言, 如果周期为 T , 则基波角频率即最低频率分量为 $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ 。条件 $\omega \gg \frac{1}{RC}$ 可改写为 $RC \gg \frac{T}{2\pi}$ 。当满足这一条件时,