

中等专业学校试用教材

脉冲数字电路

山东建筑材料工业学院 编



中国建筑工业出版社

本书系统地讲述脉冲数字单元电路的基本工作原理、用途和设计计算,包括由分立元件和集成电路构成的各种脉冲电路、逻辑部件、数字电路、模数转换等各项基本内容和多种数字仪表、简易程序控制装置实例,附有学习思考题、练习题和习题解答。

本书为中等专业学校电气化专业教材,也可供具有初中以上文化程度的科技人员阅读参考。

中等专业学校试用教材

脉冲数字电路

山东建筑材料工业学院 编

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 16½ 字数: 898 千字

1986年7月第一版 1986年7月第一次印刷

印数: 1—5,200册 定价: 2.05元

统一书号: 15040·4990

前 言

本书系根据一九七八年八月建筑材料工业部在洛阳召开的全国建材类中等专业学校教材编写会议所通过的编写大纲编写的。

全书共有十三章。前七章重点阐述由分立元件组成的脉冲单元电路的基本原理、计算和设计方法；第九章和第十三章简要分析集成电路的结构特点，重点介绍集成电路逻辑门和触发器的工作原理；第八章介绍逻辑代数的基本运算法则、利用逻辑代数简化逻辑函数式和设计逻辑网络的基本方法；第十章、第十一章、第十二章对基本逻辑部件和数字-模拟、模拟-数字转换器的基本原理进行了分析，同时列举了两个简易程序控制器应用实例，作为综合复习和培养学生的识图能力。

从教材内容的深度看，基本上限制在数字仪表及简易程序控制装置所需脉冲数字电路知识的范围。从广度看，内容比较全面。由于学时所限，有些不易在课堂讲授的内容作为附录列于书的后面，或在正文中以·作了标记。

根据中等专业学校的教学特点，教材编写时注意了理论联系实际的问题，列举建材工业中一些脉冲数字电路的应用实例。

本书第一章至第八章和第十章至第十二章由山东建筑材料工业学院孙兆森同志编写，第九章、第十三章、第十二章中的“玻璃厂四吨球窑换火程序控制”以及附录部分由山东建筑材料工业学院杨伟政同志编写，并由孙兆森同志负责统稿。

本书初稿经一九七九年七月在上海召开的审稿会讨论通过，会上武汉建筑材料工业学院陈理君（主审）、上海电力专科学校郭子颖、洛阳建筑材料工业学校黄伯翠同志提出了宝贵的修改意见并给予具体帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加以成稿时间仓促，本书定会有不少缺点和错误，希望读者批评指正。

编 者

一九七九年十月

目 录

前 言

第一章 脉冲的基本知识	1
第一节 概述	1
第二节 脉冲与 RC 电路	2
第三节 晶体管开关电路	13
本章小结	17
思考题	18
练习题	18
第二章 门电路	20
第一节 “与”门、“或”门电路	20
第二节 “非”门、“与非”、“或非”门电路	24
第三节 门电路的应用	35
本章小结	37
思考题	39
练习题	39
第三章 双稳态触发器	42
第一节 双稳态触发器的构成及其工作原理	42
第二节 双稳态电路的设计与调整	49
第三节 应用举例	52
思考题	55
练习题	55
第四章 单稳态触发器	57
第一节 集-基耦合单稳态电路	57
第二节 射极耦合单稳态电路	64
第三节 单稳态电路的应用	66
思考题	68
练习题	68
第五章 射极耦合触发器	70

第一节 射极耦合触发器的工作原理	70
第二节 射极耦合触发器的设计	73
第三节 射极耦合触发器的应用	75
思考题	79
练习题	79
第六章 脉冲信号发生器	81
第一节 自激多谐振荡器	81
第二节 锯齿波发生器	87
第三~六章小结	93
思考题	94
练习题	95
第七章 脉冲信号的功率放大	97
第一节 大功率脉冲功率放大电路	97
第二节 间歇振荡器	100
第三节 应用举例	107
本章小结	110
思考题	111
练习题	111
第八章 二进制与逻辑代数	112
第一节 二进制数的运算及二进制数与其他进制数的相互转换	112
第二节 逻辑代数及其运算法则	118
第三节 逻辑代数的应用举例	122
第四节 卡诺图与逻辑函数式的简化	126
思考题	132
练习题	132
第九章 数字集成电路	133
第一节 数字集成电路概述	133
第二节 数字集成电路逻辑门	142
第三节 数字集成电路触发器	166
本章小结	177
思考题	178
第十章 逻辑部件	180
第一节 计数器	180
第二节 寄存器	195

第三节	译码器与分配器	197
第四节	数码显示器	202
第五节	分频电路	209
思考题		211
练习题		211
第十一章	模—数、数—模转换技术	212
第一节	模拟—数字转换(A—D转换)	212
第二节	数字—模拟转换(D—A转换)	215
思考题		219
第十二章	简易程序控制装置	220
第一节	晶体管简易程序控制器	220
第二节	JCK—8型程序控制器	226
第三节	程序控制的应用实例	232
第十三章	MOS中大规模集成电路简介	238
第一节	MOS 存储器	238
第二节	MOS 逻辑部件	240
附录 I	半导体集成电路的制作工艺及其命名方法	245
附录 II	转接电路	249
附录 III	步进电机及其在数—模转换中的应用	250
习题答案		255

第一章 脉冲的基本知识

第一节 概 述

脉冲数字技术是近代电子技术中一种重要的基础技术，它诞生于二十世纪四十年代，首先在雷达技术中得到广泛的应用。到四十年代末，随着科学技术的新发展，脉冲数字电路作为基本单元电路用于电子计算机中，不过当时的脉冲数字电路还是用体积大、电耗也大的电子管构成的。到五十、六十年代，随着半导体及半导体集成技术的发展，脉冲数字电路大部采用了晶体管和集成电路元件，由于这种元件的体积小、功耗低、可靠性高，进一步促进了脉冲技术的迅速发展。目前在计算技术、工业自动控制、雷达、电视、遥控、遥测、测量仪表等科学技术领域中，都广泛应用脉冲数字技术。

学习《脉冲数字电路》这门课的目的，主要是掌握脉冲数字电路的基本原理，为进一步深入学习这门技术和其它如“可控硅技术”等课程打好基础，同时也是为今后实际工作、学习和使用计算机等提供必要的基础知识。

《脉冲数字电路》的内容很广泛，它包括脉冲的控制（门电路）、脉冲的整形（射极耦合触发器、单稳态触发器）、脉冲的记忆（双稳态触发器）、脉冲的产生（多谐振荡器、间歇振荡器）、脉冲功率放大（射极跟随器等）等基本单元电路。在讲述这些电路时，除了讨论分立元件组成的各种基本电路外，还要讨论集成元件构成的门电路与触发器。在介绍数字电路的应用方面，着重讲述逻辑代数的基本知识、各种逻辑部件、数字模拟量的相互转换装置以及简易程序控制器的基本原理。

为便于概括地了解上述基本电路的作用，现举一实例加以说明。图1.1.1是一个数字式频率测量仪表（即数字频率计）的系统原理示意图。由图可知，由于被测信号比较微弱，所以要先经过放大器进行放大，放大后的信号由于它们的幅度、宽度很不均匀，因此需要经过整形电路进行整形，得到幅度、宽度相同的脉冲系列。为了测量信号的频率即每秒钟内的信号变化次数，就要有一个时间标准（如以秒为单位，把1秒钟内脉冲的个数即频率记录下来），这个时间标准是由脉冲发生器和脉冲分频电路产生的。用宽度为1秒的方波脉冲去控制门电路，把“门”打开1秒钟，在这段时间内来自整形电路的脉冲不断地经过门电路进入计数器，计数器就把脉冲个数记录下来。计数器的数字是以二进制的形式出现的，所谓二进制就是逢二进位，如 $1+1=10$ ，二进制的每一位只有“0”、“1”两种可能，因此在电路上比较容易实现。但平时人们习惯于使用十进制，故有必要把计数器中的二进制表示的数翻译成十进制的数，这个任务由译码器来完成。译码器译出的十进制数最后由显示电路显示出来，至此测量任务即告完成。

从这个例子很容易看出各种单元电路的作用。但要掌握它的工作原理还必须从基础理论学起，由浅入深地进行学习。

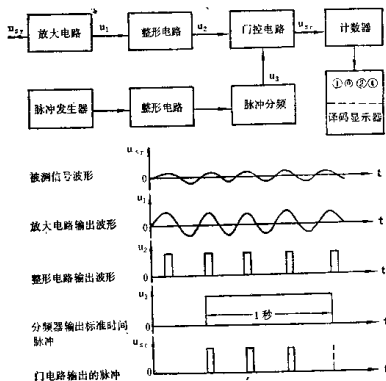


图 1.1.1 数字式测量仪表系统原理图

第二节 脉冲与 RC 电路

一、脉冲波形及其参数

晶体管脉冲电路又称晶体管开关电路。所谓脉冲电路就是指产生脉冲和对脉冲进行整形、变换以及用脉冲控制的各种电路。为便于研究这些电路，先介绍一些脉冲的基本知识。

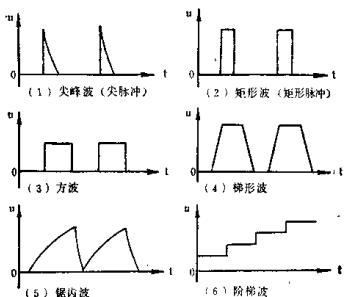


图 1.2.1 各种脉冲波形

脉冲，通常是指电压、电流在短的时间间隔内（一般指秒、毫秒、微秒）的突然变化现象。实际上，凡按非正弦规律变化的电压或电流都称脉冲。脉冲常用波形来表示，在自动控制技术中常用的脉冲有矩形波、方波、锯齿波、尖峰波等，如图1.2.1所示。

矩形波、方波、尖峰波常作为控制信号，如在可控硅技术中的触发信号；锯齿波可作电视、雷达、示波器等设备的扫描信号；阶梯波可作为晶体管测试仪器的扫描信号。

图1.2.1中绘出的矩形波是理想的波形，但由于电路中存在着分布电容等原因，实际矩形波往往如图1.2.2所示。现以图1.2.2为例说明表征脉冲特性的几个参数的含义。

U_m ——脉冲幅度，是指脉冲电压或电流从一种状态变化到另一种状态的跳变值。

T ——脉冲周期，是指两个相邻脉冲重复出现的间隔时间。周期的倒数为脉冲的重复频率， $f =$

$$\frac{1}{T}。$$

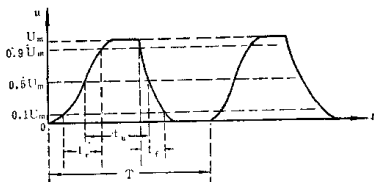


图 1.2.2 脉冲的参数

t_r ——脉冲前沿，是指脉冲由 $0.1U_m$ 上升到 $0.9U_m$ 所需要的时间，也称为正跳沿或上升沿。

t_f ——脉冲后沿，是脉冲由 $0.9U_m$ 下降到 $0.1U_m$ 所需要的时间，也称为负跳沿或下降沿。

t_u ——脉冲宽度，一般是由前沿的 $0.5U_m$ 处到后沿的 $0.5U_m$ 处所需要的时间。

二、RC耦合电路

在学习交流放大电路时，已经很熟悉用 RC 组成的耦合电路，对正弦交流信号来说，如果耦合电路满足条件 $\frac{1}{\omega C} \ll R$ 或 $RC \gg \frac{1}{\omega}$ ，那么电容对正弦交流信号的压降就可忽略不计，输入与输出交流信号相同，电容只起隔直流和耦合作用。若 RC 电路用作脉冲耦合电路时，如果也满足条件 $RC \gg T$ (T 为脉冲信号的周期， $T = T_1 + T_2$) 同样也起到隔直流和耦合作用，但同时也把脉冲信号中的直流分量隔住了，因此引起了信号电平的漂移，如图1.2.3所示。电平漂移的数值应全部降落在电容器 C 两端，而且等于输入信号直流分量。对于不同的脉冲信号，由于包含的直流分量不同，所以电平的漂移量也不一样。电平的漂移对后级电路的工作是有一定影响的，应引起注意。

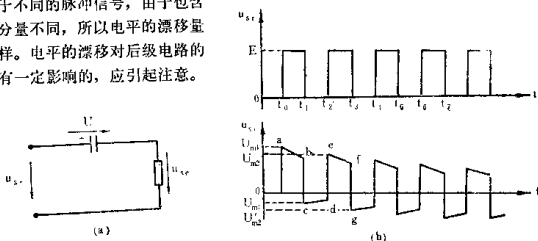


图 1.2.3 RC耦合电路及波形图

(a) RC耦合电路；(b) 波形图

电平漂移量 U_c 数值的计算，可以先从分析它的建立过程着手，然后推出计算公式。设在图1.2.3(a)中输入如图1.2.3(b)所示的矩形脉冲 u_{sr} ，其幅度为 E ，在 $t = t_0$ 的时刻，

输入信号由 0 跳变到 E ，由于电容 C 两端的电压不能突变，因此输出电压随着输入电压跳变到 $U_m = E$ ，见图 1.2.3(b) 中 u_{sc} 的波形图。接着电容器开始按指数规律充电，时间常数为 τ ，相应的输出电压按指数规律下降，在时间 $t_0 - t_1$ 之内，由 a 点下降到 b 点（由于时间常数 τ 很大，下降较小）；当 $t = t_1$ 这一瞬间，由于电容器来不及放电，因此输出电压随输入信号向负方向跳变一幅度 E ，即由 b 点跳到 c 点，这样输出电压就变为负值了；当 $t > t_1$ 后，电容器开始放电，因此 C 上的电压按指数规律减小，从而使 t_1 到 t_2 时的输出电压由 c 点回升到 d 点。对比其充放电的过程可以看出：其充放电时间常数相同，均为 $\tau = RC$ ，但由于充电时起始电流 $\frac{U_{m1}}{R}$ 比放电时起始电流 $\frac{U'_{m1}}{R}$ 大得多，因此

充电速度快，即充电电荷比放电电荷多。当 $t = t_2$ 时，第二个脉冲到来，输入端又从 0 跳到 E ，同样由于电容器上的电压不能突变，输出端随输入端也跳变一个幅度 E ，即由 d 点跳到 e 点，由于 d 点低于 0，故 e 点低于 a 点。在从 t_2 到 t_3 时，由于电容器充电，输出电压将由 e 点降到 f 点，显然 f 点低于 b 点。由于 $U_{m2} < U_{m1}$ ， $|U'_{m1}| < |U'_{m2}|$ ，因此在第二个周期内充放电电荷量之差比第一个周期时要小，可见输出端的波形在逐渐向负方向移动，也就是说输出波形中的直流分量逐渐减少，这个过程一直进行到每一个周期中电容的充电电荷 Q_c 与放电电荷数量 Q_d 相等时为止，这时全部直流分量降落在电容器上，于是输出波形达到稳定。稳定时的波形如图 1.2.4 所示，由图可知这时的充电电荷 Q 为：

$$\begin{aligned}
 Q_c &= \int_{t_0}^{t_1} i_c dt = \int_{t_0}^{t_1} -\frac{u_{sc}(t)}{R_c} dt \\
 &= -\frac{1}{R_c} \int_{t_0}^{t_1} u_{sc}(t) dt = -\frac{1}{R_c} S_+
 \end{aligned}$$

式中 S_+ 是输出波形在 $t_0 - t_1$ 之间的所包围的面积。

同样，放电电荷为：

$$Q_d = \int_{t_1}^{t_2} i_d dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{u_{sc}(t)}{R_d} dt = \frac{1}{R_d} S_-$$

式中 S_- 是输出波形在 $t_1 - t_2$ 之间所包围的面积。

由于输出达到稳定时，满足：

$$Q_c = Q_d$$

故

$$\frac{S_+}{R_c} = \frac{S_-}{R_d}$$

由于 $R_c = R_d$ ，则 $S_+ = S_-$

根据上述分析，电平漂移量 U_0 即电路稳定时， C 两端的直流电压就可求得。考虑到充、放电时间常数很大，因此可以认为输出波形近似平顶，于是有：

$$E_1 T_1 = E_2 T_2$$

而

$$E_1 = E_1 - U_0, \quad E_2 = U_0$$

代入上式得：

$$(E_1 - U_0) T_1 = U_0 T_2$$

$$\text{即: } U_0 = \frac{E_1 T_1}{T_1 + T_2} \quad (1.2.1)$$

当 $T_1 = T_2$ 时

$$U_0 = \frac{E_1 T_1}{2T_1} = \frac{E_1}{2}$$

如果输入脉冲信号如图1.2.5(b)所示的波形, 那么同样道理可以推出 U_0 数值, 这里要注意 U_0 的极性, 见图1.2.5(a)所示, 它与图1.2.3假定的极性不同。 U_0 的具体推导过程如下:

$$E_1' T_1 = E_2' T_2$$

$$\text{而 } E_1' = E_1 + U_0, \quad E_2' = E_2 - U_0$$

代入上式得:

$$U_0 = \frac{E_2 T_2 - E_1 T_1}{T_1 + T_2} \quad (1.2.1')$$

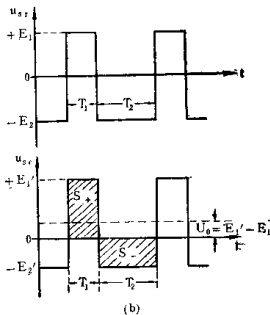
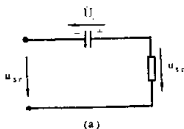


图 1.2.5 RC耦合电路及其波形图

(a) RC耦合电路; (b) 波形图

三、RC微分电路

如果电路的输出电压 u_{sc} 跟输入电压 u_{sr} 的微分成比例, 那么这种电路就叫微分电路。最简单的电容微分电路如图1.2.6(a)所示。该电路从形式上看与RC耦合电路没有什么区别, 然而由于元件的数值取得不同引起了质的变化, 电路的功能也就有了本质的区别。

设在图1.2.6(a)的输入端接入一周期性的矩形脉冲信号, 其脉冲宽度 $t_a = 0.2\text{ms}$ 小于和等于脉冲间隔, 即 $t_a \leq t_b$; 电阻 $R = 10\text{k}\Omega$, $C = 1000\text{pF}$, $u_{sr} = E = 12\text{V}$ 。现分析输出电压信号随输入信号电压变化情况, 并给出输出信号的波形图。

当脉冲的上升沿到达时, 即 $t = t_0$ 的瞬间, 输入电压由0突变到 E , 这一瞬间电容器 C 来不及堆积电荷, 因此 $u_c = 0$, 然而整个电路应满足关系式 $u_{sr} = u_c + u_{sc}$, 故当 $t = t_0$ 时, $u_{sc} = u_{sr} = E$, 即全部电压降落在电阻 R 上, 使 u_{sc} 发生一个幅度为 E 的跳变。接着, $t > t_0$, 输入 u_{sr} 仍保持为 E , 电容上的电压按指数规律上升, u_{sc} 按指数规律下降, 即 $u_{sc} = E e^{-\frac{t-t_0}{RC}}$, 直到 $t = (3 \sim 5) RC$ 时 (即经过 $0.03\text{ms} \sim 0.05\text{ms}$ 时) 电容器基本上被充满电, 全部电压降落在电容器上, 输出电压也下降到接近于0。由于 $RC \ll t_b$, 即时间常数很小, 因此上述过程进行得很快, 在输出端便形成了一个宽度很窄的正尖脉冲; 到了 $t = t_1$ 的时刻, 输入信号由 $+E$ 跃降到0, 相当RC电路突然被短接, 此时电容开始放

电, 而 $t=t_1$ 的时刻电容还来不及放电, 其上的电压仍为 E , 而电容的正电荷端接地, 所以电阻 R 上的电压 u_{sc} 从 0 跃变到 $-E$ 。接着电容器开始放电, 且放电电流逐渐减小 (放电电流方向与充电时相反), R 两端的负电压绝对值也按指数规律减小, 即 $u_{sc} = -Ee^{-\frac{t-t_1}{RC}}$ 最后经过 $(3 \sim 5) RC$ 的时间后又回到 0。于是输出端得到一个负尖脉冲。其波形如图 1.2.6(b) 所示。比较输入电压和输出电压的波形图, 可以看出在矩形脉冲上升部分 (从零跃变到 $E=12V$ 时), 输出电压最大, 等于 $12V$; 在输入矩形脉冲平直部分, 输出电压接近于零; 而在矩形脉冲下降部分 (从 $12V$ 变到零时), 输出电压等于 $-12V$ 。所以输出电压与输入电压近似成微分关系, 微分电路就是由此而得名。由上述分析可知, RC 电路具有微分电路的性质是有条件的。主要是 R 和 C 的值应选择得使电容 C 上的电压 u_c 远大于电阻 R 上的电压 u_{sc} , 这样有:

$$u_c \approx u_{sr}$$

而

$$i = C \frac{du_c}{dt} \approx C \frac{du_{sr}}{dt}$$

因此

$$u_{sc} = iR \approx CR \frac{du_{sr}}{dt}$$

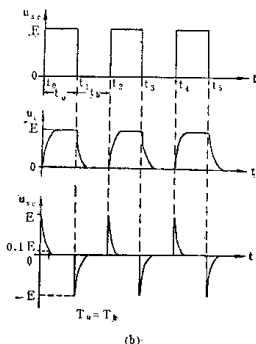
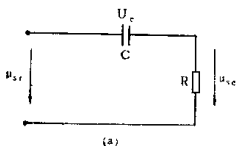


图 1.2.6 RC微分电路及波形图

(a) RC微分电路; (b) 波形图

即输出电压与输入电压近似成微分关系。

若输入为正弦信号电压时, 上述条件应为:

$$\frac{1}{\omega C} \gg R \text{ 或 } RC \ll \frac{1}{\omega} \quad (1.2.2)$$

就是说, 要求时间常数 $\tau (=RC)$ 远小于周期 T 。

若输入为周期性的脉冲电压信号时, 由谐波分析的原理可知, 它可以分解为频率不同、幅度不同的正弦信号相相叠加。因此式 (1.2.2) 的条件仍可使用, 不过式中的 ω 应取谐波频率的最高值 ω_m , 但实际上, 谐波振幅为最大振幅的 10% 以下的谐波就可以略去不计, 所以 $\omega_m = 2\pi f_m$ 可根据脉冲信号谐波展开式进行选取。例如对图 1.2.6(b) 矩形波信号 u_{sr} , 根据谐波分析的原理, 可写成如下形式:

$$u_{sr}(t) = \frac{E}{2} + \frac{2E}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \dots \right) \quad (1.2.3)$$

其中

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi}{t_u} \quad (\text{因 } t_o = t_u = \frac{T}{2})$$

上式中, 有显著影响的谐波分量在 9ω 以下, 其余各次谐波的影响可忽略不计, 这时 $\omega_m = \frac{9\pi}{t_u}$, 因此若电路满足

$$RC \leq \frac{t_u}{9\pi}$$

即可构成微分电路。

由上例可知, 对于周期性矩形波信号, 只要其宽度 t_u 相对于电路的时间常数 $\tau = RC$ 的取值足够大时就可构成微分电路。所以在脉冲电路中构成微分电路的条件一般写为:

$$t_u \gg RC \quad (1.2.4)$$

在上述微分电路中, 当输入矩形波信号时, 由于电压衰减到零 (接近于 $0.01E$) 的时间, 约为时间常数 $\tau = RC$ 的 5 倍, 所以要获得上述尖脉冲时, 矩形脉冲的宽度 t_u 至少要等于或大于 $5RC$ 。该电路的脉冲宽度是时间常数 τ 的 20 倍, 在一般电路中, $t_u(t_o) \geq 10RC$ 即可。

对于一个微分尖脉冲, 常把电压从最大值 E 降到 10% 所需的时间定义为微分脉冲宽度 τ_u , 则 τ_u 与时间常数的关系可通过下式求得:

因为

$$0.1E = Ee^{-\frac{\tau_u}{RC}}$$

所以

$$\tau_u = RC \ln 10 = 2.3RC$$

由此可知微分电路的时间常数越小, 微分脉冲的宽度越窄, 输出与输入间越接近微分关系。

下面举一个微分电路计算的例子。

设有一方波信号, 其宽度和间隔为 $100\mu s$, 现在要将其变换成尖脉冲信号, RC 之值应取多少? 如果要求尖脉冲宽度为 $5\mu s$, RC 之值又如何选取?

根据微分条件, 应使 $RC \ll t_u$ (一般小于 10 倍以上), 现取 $RC = \frac{t_u}{10} = 10\mu s$, 考虑到讯源内阻 R_i 一般为几十到几百欧姆之间, 为保证 $R \gg R_i$, 故取 $R = 10k$ 故

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{10 \times 10^{-6} s}{10 \times 10^3 \Omega} = 10^{-9} F = 1000 pF$$

如果要获得宽度为 $5\mu s$ 尖脉冲时, 应根据 $\tau_u = 2.3RC$ 求得 C 值, 即:

$$C = \frac{\tau_u}{2.3R} = \frac{5 \times 10^{-6} s}{2.3 \times 10 \times 10^3 \Omega} = 220 pF$$

顺便指出, RC 微分电路中, 输出信号与输入信号的微分成比例这一结论的得出, 是在满足 $u_o \gg u_{uc}$ 的情况下, 认为 $u_o \approx u_{uc}$ 而推导出来的, 因此这一结论是有条件的, 也是近似的, 在分析问题时应引起注意。例如, 在 RC 微分电路中, 当输入为理想的矩形波时, 根据输出信号与输入信号的微分成比例的结论, 那么输出信号在输入矩形脉冲前后

沿处应该产生幅度为正、负无穷大的尖脉冲，而根据前面的分析，其输出信号实际上是幅度为 $|E|$ 的按指数规律衰减的正、负尖脉冲。由此可知，按照上述近似结论得出的结果，与实际情况是有一定误差的。

四、积分电路

如果电路的输出电压跟输入电压的积分成正比，那么这种电路就叫积分电路。它与微分电路的区别有两点：一是 $RC \gg \frac{1}{\omega}$ 或 $R \gg \frac{1}{\omega C}$ (ω 含义与 RC 微分电路相同)；二是电容器两端作为信号的输出端。由图1.2.7可知输出电压为：

$$u_{sc} = -\frac{1}{C} \int i_c dt = -\frac{1}{C} \int \frac{u_R}{R} dt = -\frac{1}{RC} \int u_R dt \quad (1.2.5)$$

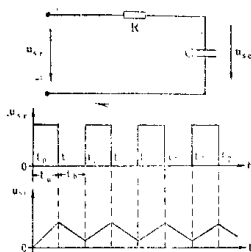


图 1.2.7 RC积分电路及其波形图

若在正弦信号的情况下满足

$$RC \gg \frac{1}{\omega}$$

或在周期性矩形脉冲信号情况下满足

$$t_a(t_b) \ll RC$$

那么输入电压将主要降落在电阻上，即 $u_{sr} \approx u_R$ ，代入上式得：

$$u_{sc} \approx -\frac{1}{RC} \int u_{sr} dt \quad (1.2.6)$$

由此可知输出电压是与输入电压的积分近似成比例的，故称积分电路。

在图1.2.7的电路中，若输入矩形脉冲信号的宽度 t_a 远小于积分电路的时间常数 $\tau = RC$ ，

即

$$t_a(t_b) \ll RC$$

则根据电容充放电的基本知识可知：

$$u_{sc} = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1.2.7)$$

因为 e^x 可以按级数展成下式

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

所以

$$e^{-\frac{t}{RC}} = 1 - \frac{t}{RC} + \frac{t^2}{2(RC)^2} - \frac{t^3}{6(RC)^3} + \dots$$

$$u_{sc} = E \left\{ 1 - \left[1 - \frac{t}{RC} + \frac{1}{2} \left(\frac{t}{RC} \right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{t}{RC} \right)^3 + \dots \right] \right\}$$

又因 t 在 $0 \sim t_a$ 内变化，而 $t_a \ll RC$

所以

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

由此可得

$$u_{sc} \approx \frac{E}{RC} \cdot t$$

即输出电压随时间线性增长, 因此积分电路也是一种波形变换电路, 它能把矩形脉冲变换成线性增长的电压波, 与开关电路配合可以产生三角波、锯齿波等电压波形。

在设计积分电路时, 一般取 $RC \gg 10t_w$, t_w 为脉冲宽度, R 取值主要考虑两点: 一是要比信号源内阻大得多, 否则输出信号幅度较小; 二是 R 不能取得太小, 否则 C 就必须大, 而 C 大则漏电流增加, 从而降低输出信号的幅度。

五、脉冲分压与加速电路

在脉冲数字电路中经常需要把信号经过电阻分压传送给下一级电路, 但由于电路中存在着接线电容、输入电容以及其它寄生电容, 其总效果就好像有一个电容 C_0 并接在分压器的输出端, 如图 1.2.8 所示。这样, 当输入脉冲信号到来时, C_0 将有一个充电过程, 从而使输出脉冲电压具有一定的

上升时间, 使前沿变坏。为了改善输出脉冲的前沿, 使输出跟随输入一起跳变, 对电路就必须采取措施。回顾上面讲的微分电路, 前者使输出边沿变陡, 具有加速作用, 后者使输出边沿上升缓慢, 具有延缓作用, 如果把这两种对立的因素在进行电路设计时统一考虑, 使之互相补偿, 问题就能得到解决。具体电路见图 1.2.9 所示, 这就是分压加速电路, 它与图 1.2.8 的分压电路不同之处就在于在 R_1 上并联一个电容 C_1 。

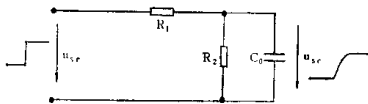


图 1.2.8 寄生电容对输出波形的影响

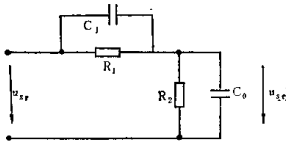


图 1.2.9 分压加速电路

在输入脉冲跳变的瞬间, 根据谐波分析的理论可知, 此时高次谐波起主要作用, 电容呈现低阻抗, 电流主要通过 C_1 和 C_0 , 这时输出电压的大小将取决 C_1 和 C_0 的分压作用, 因为跳变的瞬时流过 C_1 的电流和流过 C_0 的电流相等, 两者充的电荷也相等。

$$Q = C_0 u_{oc}(0^+) = C_1 u_1(0^+) \quad (1.2.8)$$

根据回路电压定律:

$$u_{oc}(0^+) + u_1(0^+) = u_{ir} \quad (1.2.9)$$

式中 $u_{oc}(0^+)$ 、 $u_1(0^+)$ 分别代表 C_0 、 C_1 上的电压的初始值。从上面二式可得出:

$$u_{oc}(0^+) = \frac{C_1}{C_0 + C_1} u_{ir} \quad (1.2.10)$$

所以, $\frac{C_1}{C_0 + C_1}$ 为电容分压比。

在输入脉冲平顶部分, 即在稳态时, 电容相当于开路, 所以 u_1 和 u_{oc} 按电阻分压, 即

$$u_{oc}(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{ir} \quad (1.2.11)$$

所以, $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 为电阻分压比。

式(1.2.10)与(1.2.11)说明输出电压在跳变瞬间,按电容分压;稳态时按电阻分压。在此中间,电路有一过渡过程,时间常数为 RC 。

根据上述分析,如果要使脉冲边沿无畸变的传输,则必定

$$u_{sc}(0^+) = u_{sc}(\infty)$$

$$\text{即 } E \frac{C_1}{C_1 + C_0} = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{整理后得 } \frac{R_2}{R_1} = \frac{C_1}{C_0}$$

如果稳态时的分压比 $\frac{R_2}{R_1}$ 已定, C_0 也已定,那么保证输出脉冲边沿无畸变时 C_1 的数值即最佳值应为:

$$C_1 = \frac{R_2}{R_1} C_0 \quad (1.2.12)$$

当 C_1 选择得比最佳值小时,输出边沿还会出现局部变坏的情况,这种情况称为欠补偿; C_1 选得大于最佳值时,输出波形将出现过冲,这种情况称为过补偿。补偿电容 C_1 的数值对输出波形的影响见图1.2.10所示。

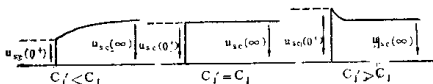


图 1.2.10 补偿电容 C_1 对输出波形的影响

在实际电路中考虑到电源内阻及不同负载对分压电路工作的影响, C_1 的数值根据式(1.2.12)确定后还需要由实验加以整定。有的脉冲电路也不一定要求 C_1 选最佳值,而为了达到某些目的,希望 C_1 大于最佳值,使加速电路工作在过补偿状态,在学习触发器时将会遇到这种情况。

六、限幅与钳位电路

为便于讨论限幅和钳位电路,先复习一下晶体二极管的特性,二极管的特性可以用图1.2.11所示的伏安特性来描述,其中图1.2.11(b)是理想化(或者称线性化)了的伏安特性曲线,从这一伏安特性曲线上可以看出,当二极管正向运用时,二极管可等效成一个电动势为 E_D 的直流电源和一个电阻 R_D (即直线MN的斜率的倒数)相串联,这个电阻一般为几欧到几百欧。由于 E_D 的数值都不大,在一般情况下进行计算时可以忽略不计。当二极管反向运用时,由于漏电流的存在,可以等效为一个反向电阻 R_r ,其值是M'O的斜率的倒数, R_r 比较大,一般在几百千欧到几兆欧之间。利用二极管的这些特点可以构成二极管限幅电路和钳位电路。

(一)限幅电路

图1.2.12(a)是二极管限幅电路(或称二极管削波电路)。假定输入脉冲 u_{sr} 如图中所示,那么当正脉冲作用时二极管导通,如果 $R_0 \ll R$,则 $u_{rc} = u_{sr}$;当负脉冲作用时二极管截止,即 $R_r \gg R$,所以 $u_{sc} = 0$ 。由此可见该电路能让正脉冲通过而将负脉冲削去。同理,读者可自行分析图1.2.12(b)的限幅电路。图1.2.13(a)是接有限幅电源的二极管

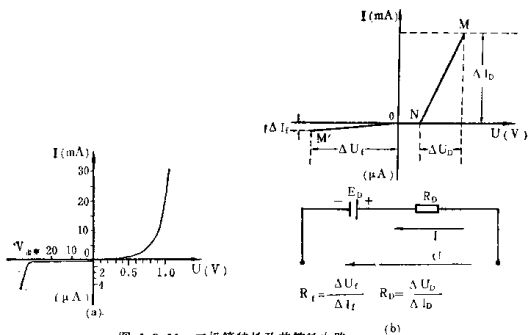


图 1.2.11 二极管特性及其等效电路

(a) 二极管特性; (b) 等效电路

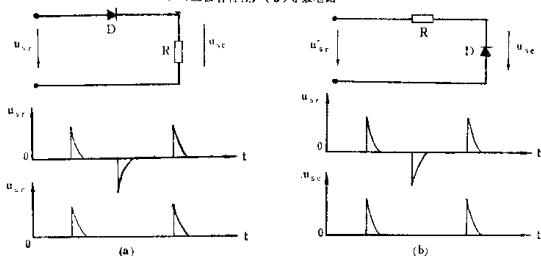


图 1.2.12 二极管限幅电路及其波形图

(a) 及 (b) 为两种不同接法的电路

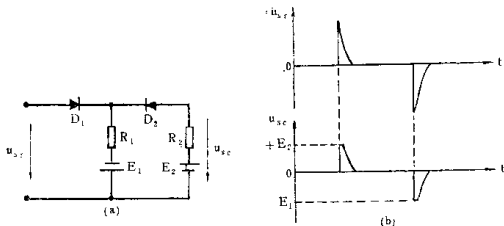


图 1.2.13 接有限幅电源的限幅电路

(a) 限幅电路; (b) 波形图