

电子系统综合设计

一、实验目的：

本次电子设计要求学生自行完成脉宽调制法电容/电压(C/V)转换器电路设计和方波-三角波发生器电路设计，并运用电子仿真软件 multisim 对所设计的电路进行分析、测试，直至测试结果符合设计要为止，使学生了解、掌握电子仿真软件 multisim 的应用，并通过仿真软件的仿真结果，使学生进一步掌握脉宽调制法电容/电压(C/V)转换器和方波-三角波发生器的电路设计思路、电路结构、元器件参数的选取及计算过程，最后根据电路原理图进行电路板焊接和调试，对模拟仿真结果进行验证，从而为学生以后的科研工作打下一个坚实的基础。

二、实验器材：

电脑一套，multisim 仿真软件一套。

三、实验进度安排：

- (1) 根据所给题目要求，自行设计电路原理图，并对电路设计原理进行分析。
- (2) 运用 multisim 仿真软件对电路进行仿真，用虚拟示波器观察各点波形，根据波各点波形对器件参数进行适当的修改，直至测试结果满意为止，从而加深了学生对电路设计原理的进一步掌握。
- (3) 按照电路原理图焊接电路、调试电路，用示波器观察各点波形，分析测得波形与虚拟示波器观察各点波形是否一样。

四、实验内容：

实验一、方波-三角波发生器仿真分析

实验二、脉宽调制法电容/电压(C/V)转换器仿真分析

五、实验原理：

实验内容一、方波-三角波发生器仿真分析：

➤ 设计要求：

设计振荡频率为500Hz的方波-三角波发生器，要求方波输出电压为 $\pm 12\text{V}$ ，三角波输出电压为 $\pm 6\text{V}$ 。

要求写出设计思路、电路结构、元器件参数的计算过程，运用multisim仿真软件对所设计的电路进行分析、测试；若测试结果不满足设计要求，调整电路结构或改变电路元器件参数，直至测试结果符合设计要求。

➤ 设计思路：

设计波形发生器电路通常考虑两个方面的因素：一是选择什么样的输出波形电路，其次是确定该电路的振荡频率。对于10KHz以下的振荡电路，通常对器件（即运放性能）要求不高，选择余地较大。当要求的工作频率较高时，需要考虑性能较好的专用集成运算放大器。在确定振荡频率时，应先选择积分电容的大小，一般在 $0.01\mu\text{F}$ -- $0.33\mu\text{F}$ 之间，然后再确定电阻的大小，一般在几 $\text{k}\Omega$ -- $100\text{k}\Omega$ 之间。

➤ 确定电路形式：

一般来说，方波-三角波发生器是由一个迟滞比较器和一个积分电路组成，电路框图和电路设计原理图如图1和图2所示：

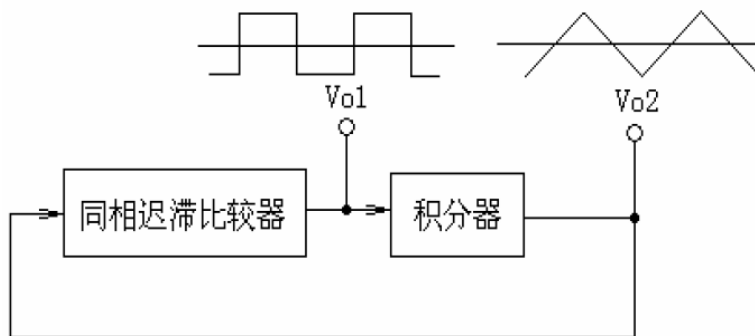


图1 电路框图

➤ 电路设计原理图：

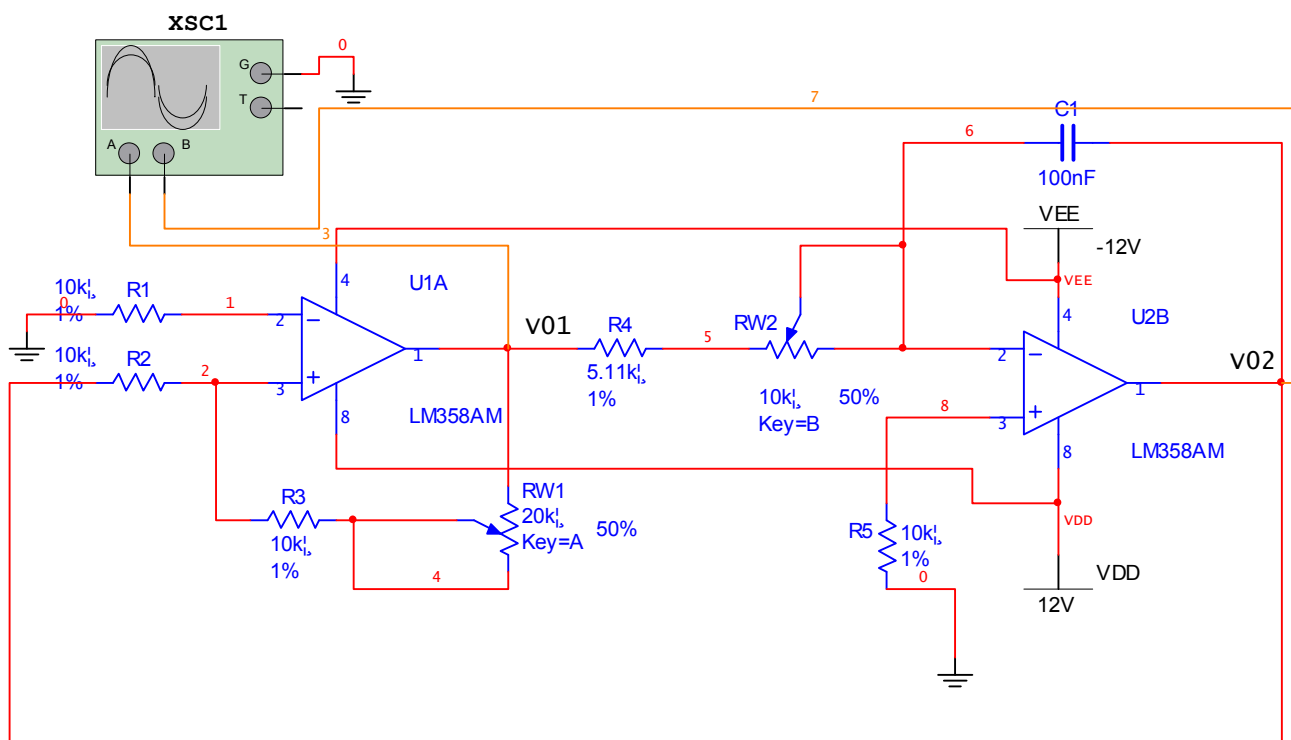


图2 电路原理图

➤ 计算元器件参数：

由于三角波最大输出电压为：
$$V_{02m} = \frac{R_2}{R_3 + R_{W1}} V_{CC}$$

由此可以得到：
$$\frac{V_{02m}}{V_{CC}} = \frac{R_2}{R_3 + R_{W1}} = \frac{6}{12} = \frac{1}{2}$$

若取 $R_2 = 10K\Omega$, 则 $R_3 + R_{W1} = 20K\Omega$; 取 $R_3 = 10K\Omega$, $R_{W1} = 20K\Omega$ 的电位器 ; 平衡

电阻 $R_1 = 10K\Omega$ 。

根据方波—三角波的频率公式：

$$f = \frac{R_3 + R_{W1}}{4R_2(R_4 + R_{W2})C} = \frac{2R_2}{4R_2(R_4 + R_{W2})C} = \frac{1}{2(R_4 + R_{W2})C}$$

可以得到：
$$R_4 + R_{W2} = \frac{1}{2fC}$$
 , 取

$$C = 0.1\mu F, \text{ 则 } R_4 + R_{W2} = \frac{1}{2fC} = \frac{1}{2 \times 500 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 10K\Omega$$

取 $R_4 = 5.1K\Omega$, R_{W2} 为 $10K\Omega$ 的电位器 , 平衡电阻为 $R_5 = 10K\Omega$ 。

其中：图中的 $R_{W1} = 20K$ 电位器是调节三角波幅值的， $R_{W2} = 10K$ 电位器是调整频率的。

➤ 选取元器件，画电路图，进行仿真分析，仿真结果如图3所示：

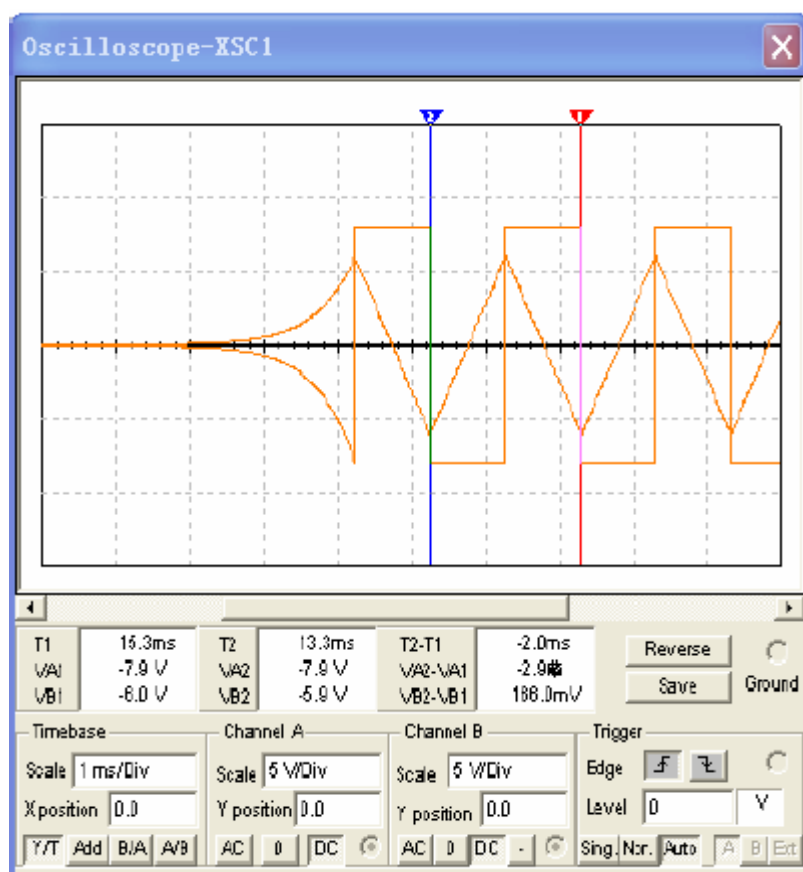


图3 仿真波形

由分析结果可知:

方波-三角波的频率: $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \times 10^{-3}} = 500\text{Hz}$ 。

三角波的幅值: $V_{02} = \pm 6V$ 。

方波的幅值: $V_{01} = \pm 7.9V \leq \pm 12V$,这是由于运放的输出级 NPN 和 PNP 两种晶体管组成复合互补电路,输出方波时,两个管子交替导通,由于导通是输出电阻的影响,使方波的输出幅度小于电源电压值。可以提高直流电源,使 $V_{CC} = 14V$, $-V_{EE} = -14V$ 。

(二)、脉宽调制法电容/电压(C/V)转换器仿真分析

题目设计要求:利用脉冲宽度调制法(简称脉宽调制法,英文缩写为 PWM)可以测量电容量。首先利用被测电容 C_x 的充放电过程去调制一个频率和占空比均固定的脉冲波形,使其占空比 D 与 C_x 成正比,然后经过滤波电路取出直流电压 V_0 ,送至 A/D 转换器中。显然测量电容量的转换过程为: $C_x \uparrow \rightarrow D \uparrow \rightarrow V \uparrow$,反之亦然,由此可完成 C/V 转换,将被测电容量转换成直流电压,实现对电容量进行数字化测量的目的。

设计思路:如图 4 所示,给出了专配 3 ½ 位数字电压表的五量程电容测量电路。S 为量程转换开关。5 个电容档依次为 2000pF、20nF、200nF、2μF、20μF,可以测量 1pF~20μF 的电容量,准确度为 ±2.5%,最高分辨率达 1pF。IC 采用一片 CMOS 双定时 ICM7556,它具有输入阻抗高、微功耗、电源电压范围宽(3~18V)、适合在低压条件下工作等优点。ICM7556 片内包含两个相同的定时器 IC_a 、 IC_b ,二者共用一套电源。定时器采用负逻辑电路,每个定时器内包括比较器 A、比较器 B、RS 触发器、反相器 $F_1 \sim F_3$,放电管(NMOS 场效应管),还有 3 只阻值相同的电阻 R。

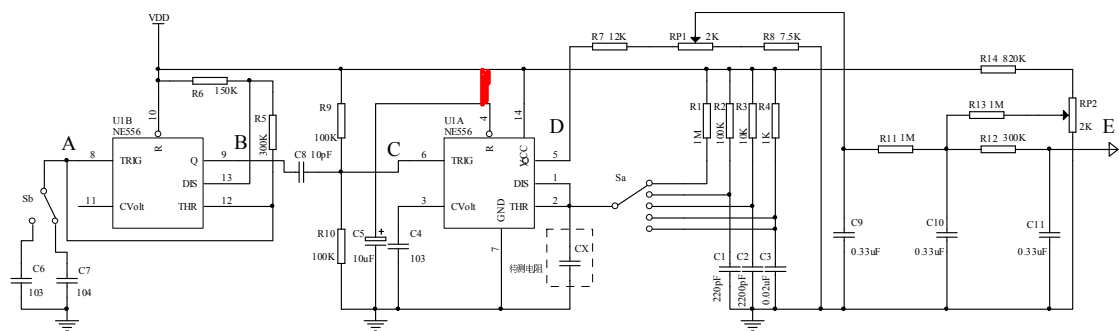


图 4 五量程电容测量电路

ICM7556 采用 DIP-14 封装， V_{DD} 为正电源端。以定时器 IC_a 为例(对应于 8~13 脚)，各管脚的功能如下：
TRIG(8) – 触发端。TRIG=1 时输出端为低电平，TRIG=0 时输出端呈高电平。

Q(9) – 输出端(OUT2)。负载电阻可接在 Q 与 V_{DD} 之间，也可接在 Q 与 V_{SS} 之间，最大输出电流为 200mA。

R(10) – 复位端。当 R=0 时 Q=0，R=1 时 IC_a 可正常工作。

CVolt(11) – 控制电压端。为减少外界干扰，通常在此端与 V_{SS} 之间接 0.01uF 的高频滤波电容。

THR(12) – 阈值端，亦称门限端。作信号发生器使用时在 THR 与 V_{SS} 之间接定时电容，并将 TH_2 端与 TR_2 端短接。一旦 IC_a 被触发到高电平状态，THR 端就监测定时电容上的电压 V_c ，当 $V_c \geq 2/3 V_{DD}$ 时，迫使 IC_a 输出低电平。

DIS(13) – 放电端。Q=0 时，定时器电容通过放电管放电。Q=1 时此端开路， V_{DD} 经外部定时电阻给定电容放电。

由 IC_a 和外部定时电阻 R_5 、 R_6 定时电容 C_6 (或 C_7)构成的脉冲发生器电路如图 5 所示。

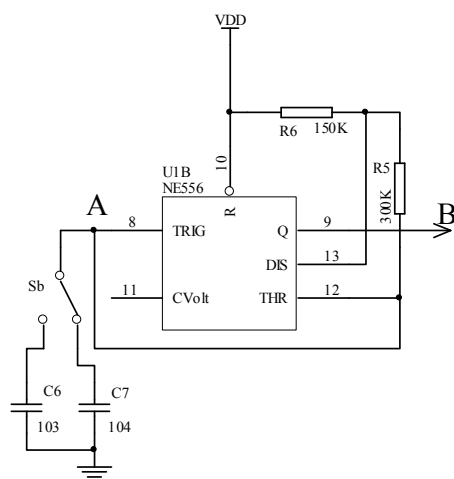


图 5 脉冲发生电路

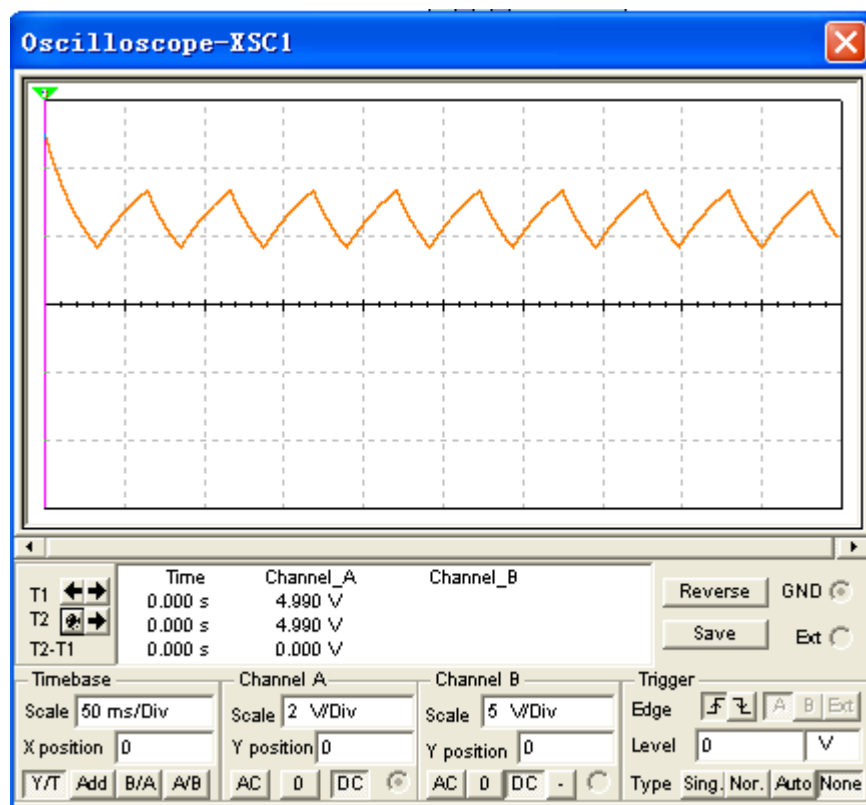


图 6 A 点波形

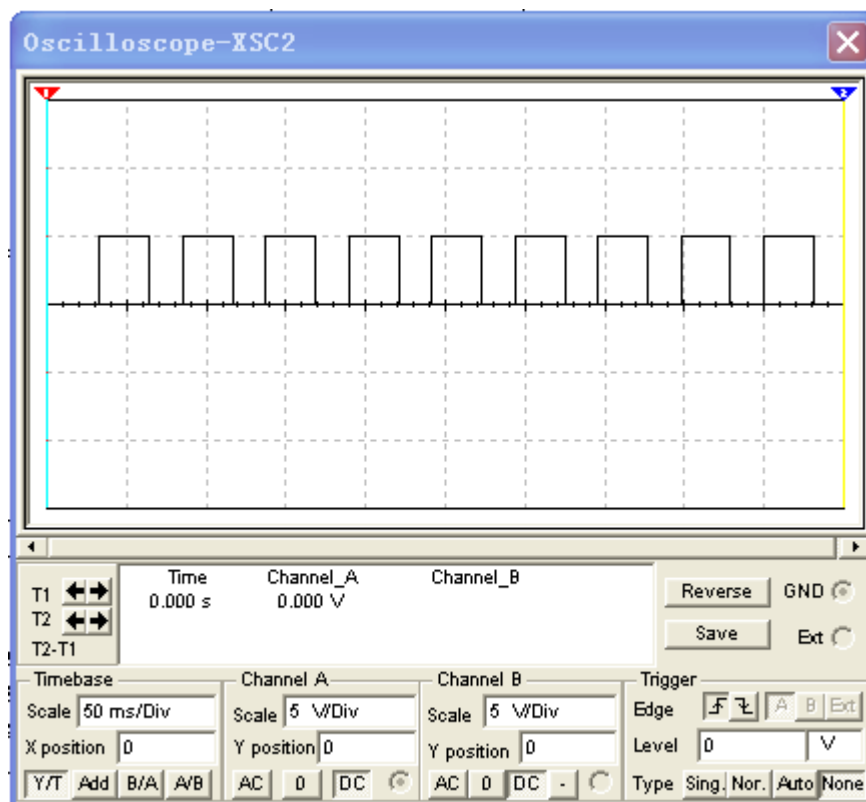


图 7 B 点波形

其工作原理分析如下：

通电后， V_{DD} 经过 R_6 、 R_5 向 C_6 充电。当 $V_c \geq 2/3V_{DD}$ 时，内部比较器 A 翻转，RS 触发器 $R=1$ (高电平)， $S=0$ (低电平)，将触发器置“0”，经过内部 F_1 和 F_2 两次反相后，使 $Q=0$ 。与此同时， F_1 输出的高电平还使 NMOS 管导通， C_6 经过 NMOS 放电管和 R_5 放电。当 $V_c \leq 1/3V_{DD}$ 时，比较器 A 再次翻转， $R=0$ ， $S=1$ ，将

触发器置“1”，因为 F_1 输出低电平，令 NMOS 管截至，故 V_{DD} 再次对 C_6 或 C_7 充电。如此循环往复，随着 C_6 或 C_7 的充、放电过程，从第 9 脚(Q)就输出连续的脉冲波形。震荡频率及波形占空比由下式而定

$$f_1 = 1.44 / (R_6 + 2R_5) * C_6 \quad (1)$$

$$D_1 = (R_6 + R_5) / (R_6 + 2R_5) * 100\%$$

$$(2) \text{ 将 } C_6 = 0.01\mu\text{F},$$

$R_6 = 150\text{K}$, $R_5 = 300\text{K}$ 一并带入式(1)中得到 $f_1 = 200\text{Hz}$ ，对应于周期 $T_1 = 1/f_1 = 1/200 = 5\text{ms}$ 。若将 C_6 改作 $C_7(0.1\mu\text{F})$, 则 $f_2 = 20\text{Hz}$, $T_2 = 50\text{ms}$ 。

由式(2)不难看出，占空比 D 与定时电容(C_6 或 C_7)无关，占空比固定为

$$D_1 = (150\text{K} + 300\text{K}) / (150\text{K} + 2 \times 300\text{K}) \times 100\% = 60\%$$

需要指出，由于电容测量范围较宽(0~20 μF)，为使触发脉冲的周期能覆盖所有量程，脉冲发生器设置两套。2000pF~2 μF 量程选定时电容 $C_6 = 0.01\mu\text{F}$ ，对应于 $T_1 = 5\text{ms}$ ；20 μF 量程的定时电容 $C_7 = 0.1\mu\text{F}$ ，对应于 $T_2 = 50\text{ms}$ 。前者适于测量小电容，后者专用于测较大电容。

IC_a 输出的脉冲经 C_8 隔断直流分量，送至 IC_b 的第 6 脚(TRIG)。

定时器 IC_b 对应于 2~6 脚，它与被测电容 C_x 、 R_1 (或 R_2 、 R_3 、 R_4)等组成单稳态电路。

2000pF 档的简化电路见图 8 所示。

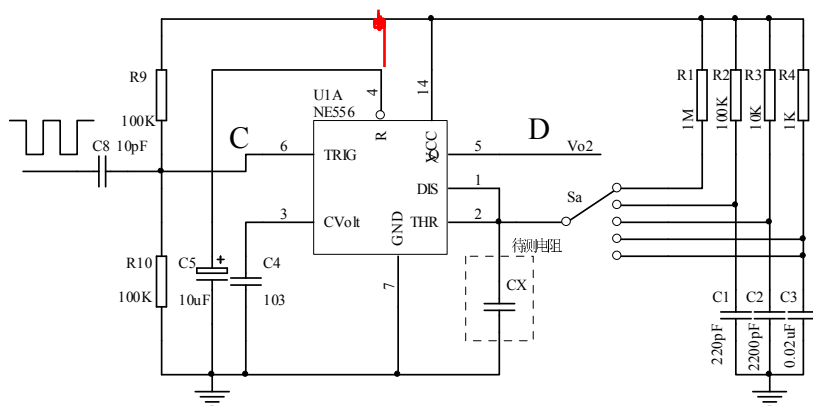


图 8 2000pF 档电路

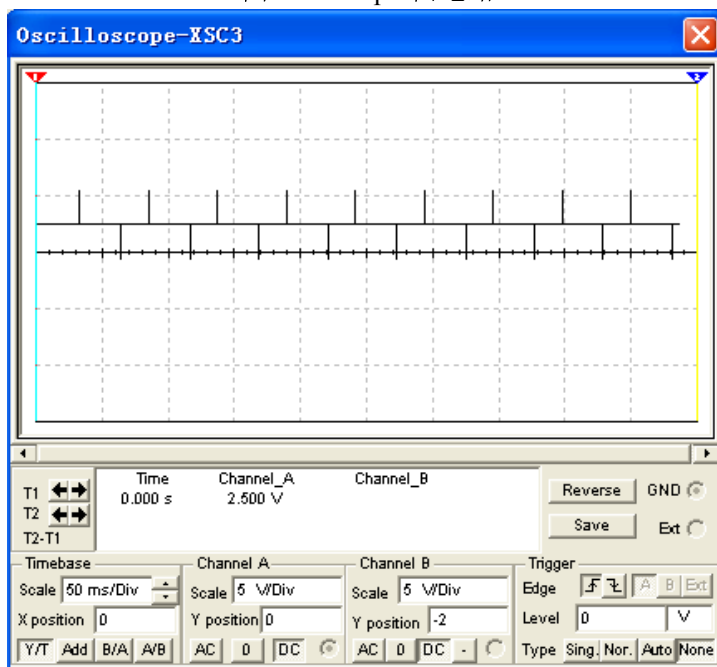


图 9 C 点波形

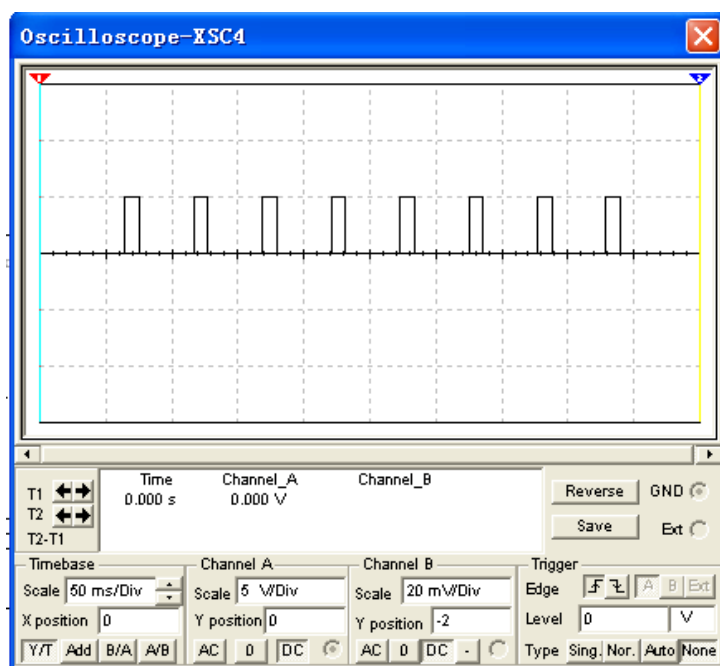


图 10 D 点波形

利用 C_x 的充、放电过程来对脉冲宽度进行调制。电路的工作过程分析如下：

当正脉冲加至 TRIG(6)端时，内部 RS 触发器 $R=1$ ，触发器置“0”，此时 NMOS 放电管道通， C_x 放电，单稳电路处于稳态。当负脉冲来到时电路进入暂态，由于内部 RS 触发器置“1”NMOS 管截至， C_x 又开始充电， V_c 逐渐升高。当 $V_c \geq 2/3 V_{DD}$ 时，内部 RS 触发器置“0”NMOS 管道通， C_x 再次放电，电路又恢复稳态。显然， C_x 愈大，充电时间愈长。被调制后的脉冲波从 Q(5)端输出。

仍以 2000pF 档为例，取 $R_1=1M$ ，Q(5)输出脉冲宽度为

$$t_1 = R_1 * C_x \ln 3 = 1.1 * 10^6 C_x \quad (3)$$

脉冲占空比

$$D_2 = t_1 / T_1 = 1.1 * 10^6 C_x / 5ms = 2.2 * 10^8 C_x * 100\% \quad (4)$$

式 4 中 C_x 单位为(F)。显然，当 $C_x=0$ 时， $D_2=0$ ；当 $C_x=2000pF=2 \times 10^{-9}F$ 时， $D_2=44\%$ ， D_2 与 C_x 成正比。

V_{o2} 经过滤波电路取出直流电压 V_o ，送数字电压表中 A/D 转换器，而 V_o 与 C_x 成正比。这就是脉宽调制法的基本原理。

图 1 中 R_7 、 RP_1 和 R_8 为 Q 端的负载电阻兼分压电阻，调整 $RP_1(2K)$ 可对电容档进行满量程校准，对应于 $C_x=2000pF$ ，使 $V_o=200mV$ 。

由于 C/V 转换器本身存在失调电压 V_{os} ，会导致不测电容时仪表在个位甚至十位上出现非零值，因此必须增加手动调零电路，由 R_{14} 、 RP_2 组成。 RP_2 即是调零电位器(ZERO ADJ)。 R_{14} 的上端 V_+ ，由电位器 $RP_2(2K)$ 的滑动触头上可获取某一负压 $-V_o$ 。适当调节 RP_2 ，使 $|-V_o|=V_{os}$ ， $V_{os}+(-V_o)=0$ ，即可实现零点补偿，在未接 C_x 时 $V=0$ ，仪表显示为零。使用数字电容表时，每次测量之前应调整 RP_2 ，使读数为零，方可进行测量。特别是更换电容档时，由于各档的失调电压相差较大，必须重新调零。具体方法是在未接入电容时调整 RP_2 ，使仪表显示值为 000。此外，20uF 档的时间常数较大，测量大电容时必须经历较长时间才能得到稳定读数。

图 1 中， R_9 、 R_{10} 为偏置电阻，实取 $R_9=R_{10}=100K$ ，无触发信号时可将 TRIG(6)端的电位偏置在 $(V_+ - V_{com})/2$ 上。 C_9 、 R_{11} 、 C_{10} 、 R_{12} 、 C_{11} 构成两级 π 型阻容滤波器。对于 20nF~20uF 档，被测电容 C_x 还分别与补偿电容 C_1 ~ C_3 相并联。以 20nF 档为例。 $C_x \parallel C_1 = C_x + 220pF$ 。式 3 变成

$$t_1 = R_2 (C_x + 220pF) \ln 3 \quad (5)$$

对 2000pF 档而言， R_1 的下端未接补偿电容。20uF 档与 2uF 档共用一只补偿电容 $C_3(0.02uF)$ 。

在 20uF 档测 10uF 电容时，用 multisim 仿真软件仿图 1 中 A、B、C、D、E 各点的波形如图 6、图 7、图 9、图 10 和图 11 所示。

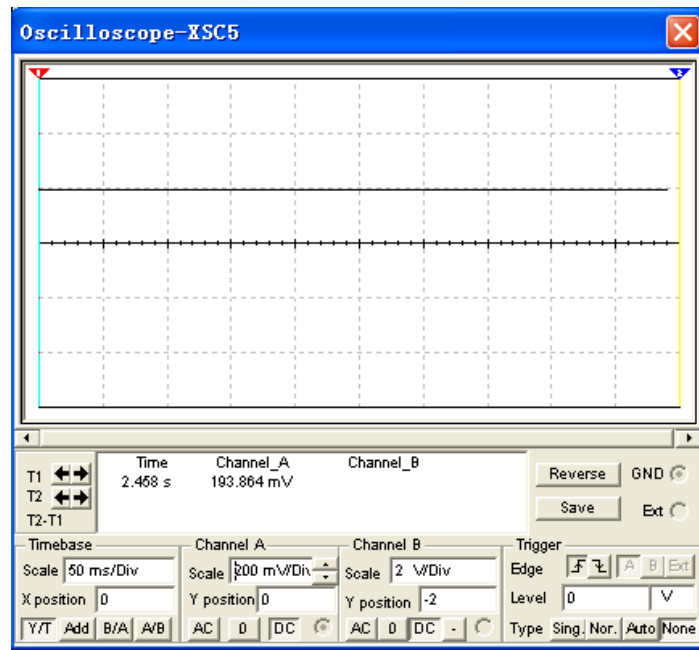


图 11 E 点波形

使用脉宽调制法测量电容也存在不足，就是每次测量前均需手动调节电容档的零点，使显示值为零。

