

方波-锯齿波转换器与波形生成器

物理系 郭寅洁 16307110343

一、实验目的

本实验设计了方波-锯齿波转换器与波形生成器。波形转换器的设计中，通过 Arduino 产生方波，再通过电路将积分产生锯齿波。波形生成器的设计中，通过 Arduino 生成数字信号，再由电路网络实现 DA 转换，输出对应电压值。

二、实验设计：

1. 方波-锯齿波转换器

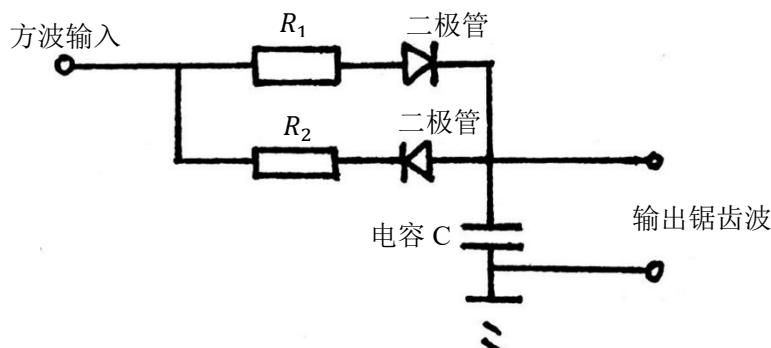
a. 利用 Arduino 生成方波 [1]。如图（1）所示，由 1 毫秒高电平、1 毫秒低电平不断循环，可生成振幅为 5V，周期为 2 毫秒，即频率为 500Hz 的方波。

```
square  
void setup() {  
    // put your setup code here, to run once:  
    pinMode(8, OUTPUT);  
}  
  
void loop() {  
    // put your main code here, to run repeatedly:  
    digitalWrite(8, HIGH);  
    delayMicroseconds(1000);  
    digitalWrite(8, LOW);  
    delayMicroseconds(1000);  
}
```

图（1）Arduino 生成 500Hz 方波的程序

b. 通过硬件进行滤波转换

实验设计一:如图（2）所示，输入高电平时， R_1 支路导通，对电容 C 充电，形成锯齿波

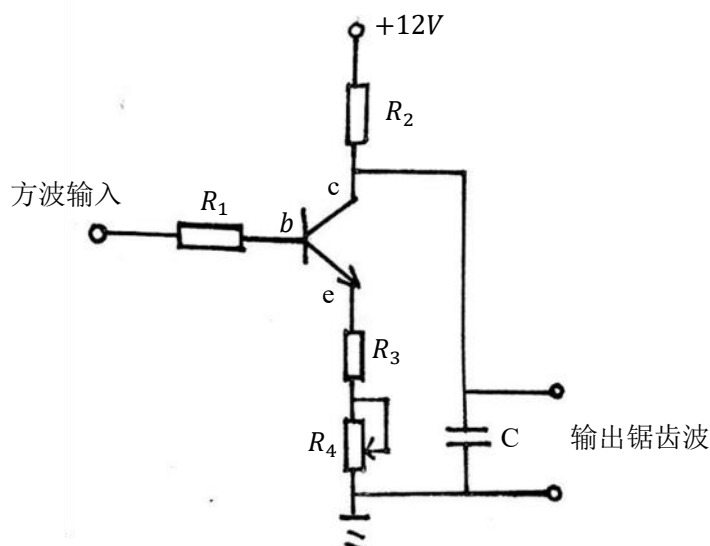


图（2）滤波转换方案一的原理图

的上升沿；输入低电平时， R_2 支路导通，电容 C 放电，形成锯齿波的下降沿。选择合适的 R_1 与 R_2 的阻值，使得时间常数 R_1C 大于方波的半个周期，从而上升沿趋近于一条斜的直线；时间常数 R_2C 远小于时间常数 R_1C ，从而下降沿趋近于一条竖直的直线。

问题所在：Arduino 输出电流的驱动能力不一定足够提供电容的充放电，因此使用了实验设计二。

实验设计二：原理图如图（3）所示。输入低电平时，三极管的 ce 截止，12V 电源对电

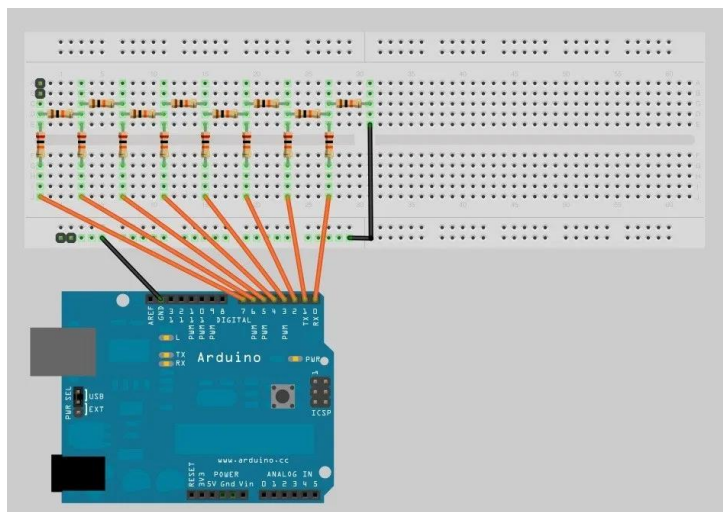


图（3）滤波转换方案二的原理图（采用）

容 C 充电，输出锯齿波的下降沿；输入高电平时，三极管的 ce 两条支路导通，电容放电。选择合适的电阻 R_2 ，使得时间常数 R_2C 大于方波的半个周期，从而上升沿趋近于一条斜的直线；调节滑动变阻器 R_4 的阻值，使得时间常数 $(R_3 + R_4)C$ 远小于 R_2C ，从而下降沿趋近于一条竖直的直线。 R_3 为保护电阻，当滑动变阻器滑到 0 欧姆时起保护电路作用。

2. 波形生成器^[2]

如图（4）^[2]所示，在面包板上搭建一个 8 位 R2R 梯形电阻网络 D/A 转换器。若 8 位均为高电平，则可以得到参考电压的 $255/256$ ；若位上的值为 0 到 255 间的任意值 x ，则 DAC 可以给出参考电压的 $x/256$ 。因此写程序时只需写出一个周期内波形的函数方程。



图（4）^[2] 8 位 R2R 梯形电阻网络 D/A 转换器的原理图

三、实验装置：

Arduino 单片机；示波器；可变电源；导线

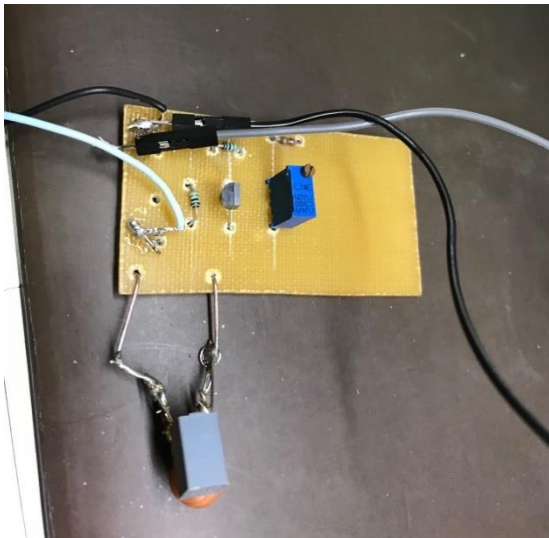
方波-锯齿波转换器：三极管一个；电容；10k 欧姆电阻两个；2k 欧姆电阻 1 个；可调电阻 1 个(总阻值 2k 欧姆)

波形生成器：10k 欧姆电阻 8 个；20k 欧姆电阻 8 个

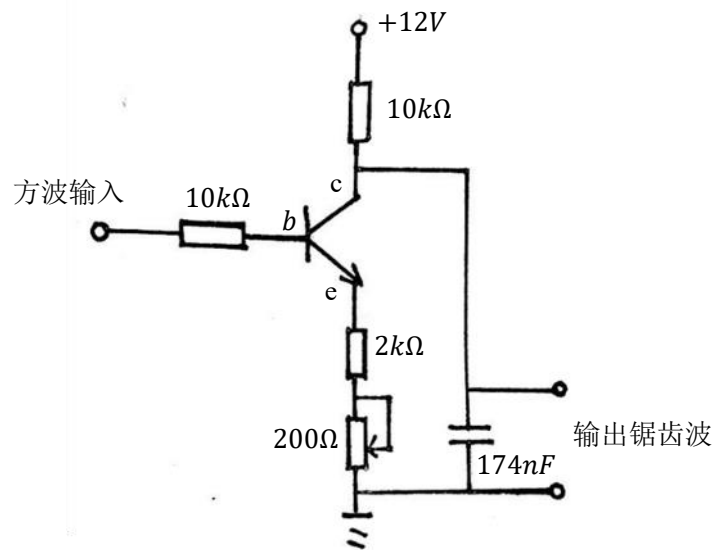
四、实验过程：

1. 方波-锯齿波转换器

由于面包板接触不好，且元件易摇晃，因此选择自己焊接。成品结果如图(5)所示，



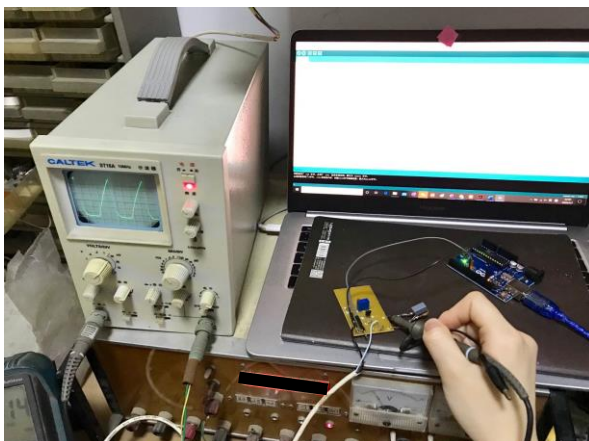
图(5) 焊接的方波-锯齿波转换器实物图



图(6) 方波-锯齿波转换器使用元件属性

相应的元件属性如图(6)所示。

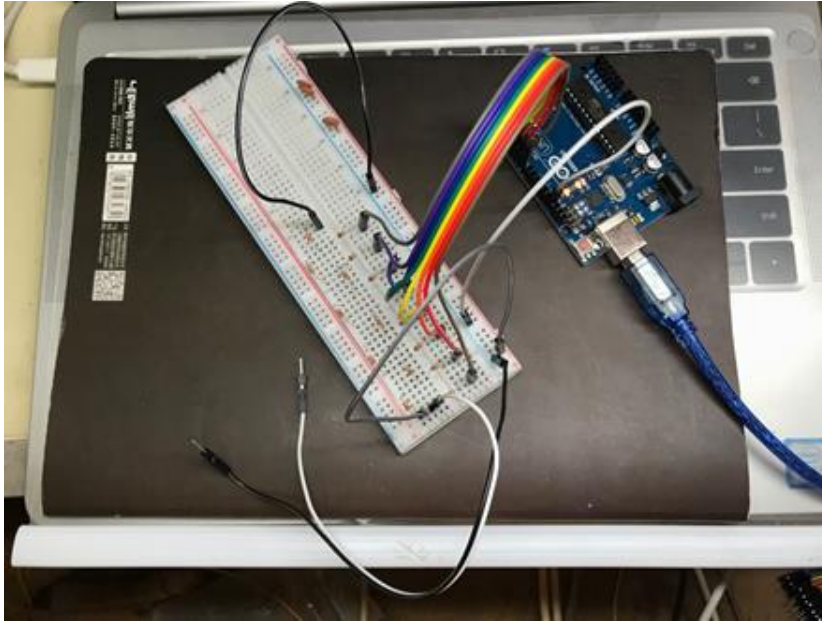
实验过程如图(7)所示，通过电脑编程，利用 Arduino 输出频率为 500Hz 电压为 5V 的方波；经电路积分成锯齿波，使用示波器测量输出信号。



图(7) 方波-锯齿波转换器整体实验装置

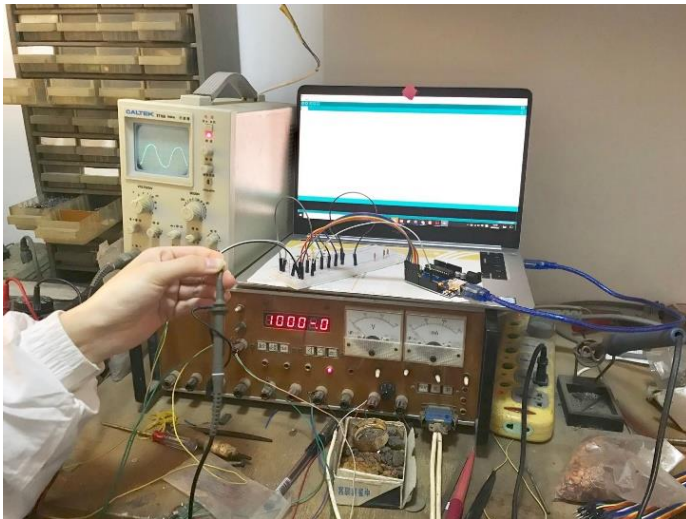
2. 波形生成器

8 位 R2R 梯形电阻网络 D/A 转换器如图（8）所示，由于开始实验时发现示波器输出模拟信号不连贯，因此在电路中并联了几个电容。



图（8） 8 位 R2R 梯形电阻网络 D/A 转换器

完整实验装置如图（9）所示



图（9） 波形生成器完整装置图



图（10） 万用表测输出频率

运用该装置生成了三角波与正弦波。并利用程序改变输入频率，用万用表测量输出频率（如图（10）所示，因为万用表比示波器更精准），比较实际输出频率与程序设计频率的区别。

五、实验结果与分析：

1. 方波-锯齿波转换器

从示波器显示（图（11））看，锯齿波一个周期占 4 大格，单元为 0.5ms,即 $4 \times 0.5\text{ms} = 2 \times 10^{-3}\text{s}$ ，与输入方波的频率一致。

下面用电路的设计分析一下实现方波-锯齿波转换的原理。实验中，滑动变阻器滑到了 0 欧姆，下降沿的时间常数 $\tau_{down} = (R_3 + R_4)C = 200\Omega \times 174\text{nF} = 3.48 \times 10^{-5}\text{s}$;

上升沿的时间常数 $\tau_{up} = R_2 \times C = 10\text{k}\Omega \times 174\text{nF} = 1.74 \times 10^{-3}\text{s}$;

输入方波的一个周期内高电平/低电平时间 $\tau_{high} = \tau_{low} = 1 \times 10^{-3}\text{s}$ 。

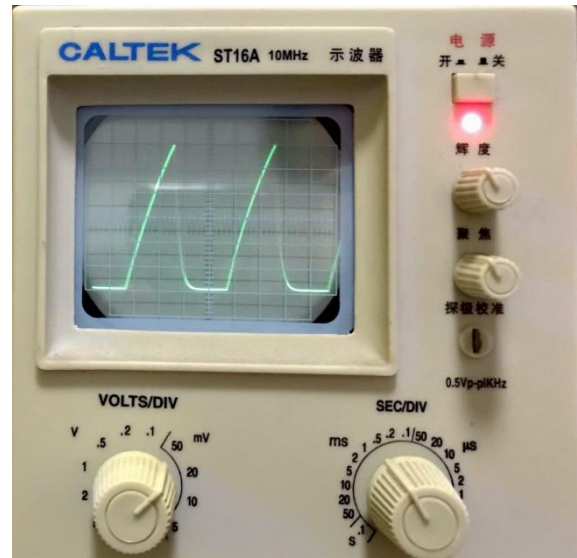
可见，由于 $\tau_{down} \ll \tau_{up}$ ，下降沿几乎呈竖直直线下降；而上升沿的时间常数 $\tau_{up} > \tau_{high}$ ，即电容还没有完全充电时，输入电平已经变成了低电平，所以上升沿几乎呈直的斜线。

2. 波形生成器

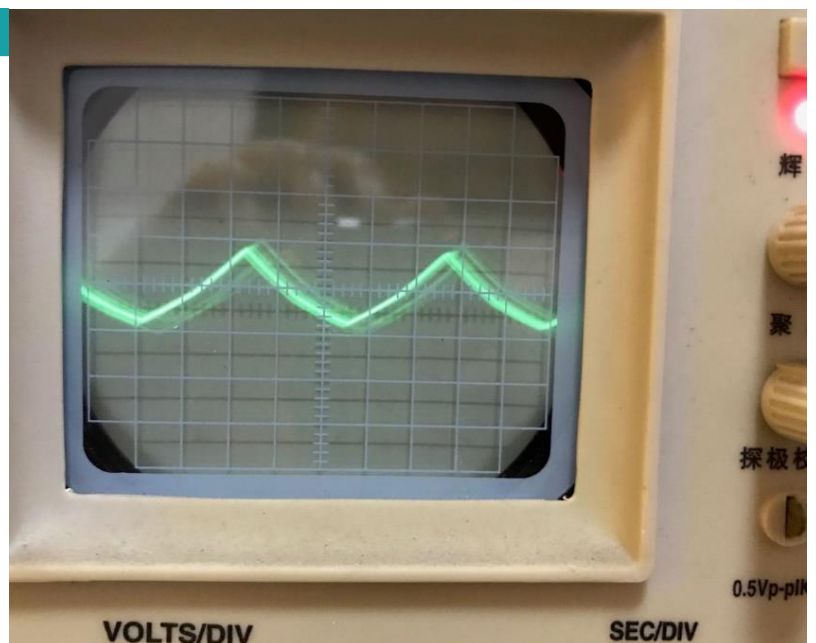
如图（12）所示为生成三角波的程序，如图（13）所示为三角波波形。

```
triangle
void setup()
{
  pinMode(0, OUTPUT);
  pinMode(1, OUTPUT);
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
}
void loop()
{
  for (int i=0;i<255;i++)
  {
    PORTD=i;
    delayMicroseconds(5);
  }
  for (int i=255;i>0;i--)
  {
    PORTD=i;
    delayMicroseconds(5);
  }
}
```

图（12） 生成三角波的程序



图（11） 示波器测输出锯齿波



图（13） 生成三角波的波形

程序中设置了 bit value 每变一下保持 $5\mu s$,因此一个周期为 $5\mu s \times 255 \times 2 = 2.55 \times 10^{-3}s$

如图 (14) 所示为生成正弦波的程序, 如图 (15) 所示为生成的正弦波波形。

```

sine
int sine[255];

void setup()
{
  pinMode(0, OUTPUT);
  pinMode(1, OUTPUT);
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);

  float x;
  float y;
  for(int i=0;i<255;i++)
  {
    x=(float)i;
    y=sin((x/255)*2*PI);
    sine[i]=int(y*128)+128;
  }
}

void loop()
{
  for (int i=0;i<255;i++)
  {
    PORTD=sine[i];
    delayMicroseconds(10);
  }
}

```

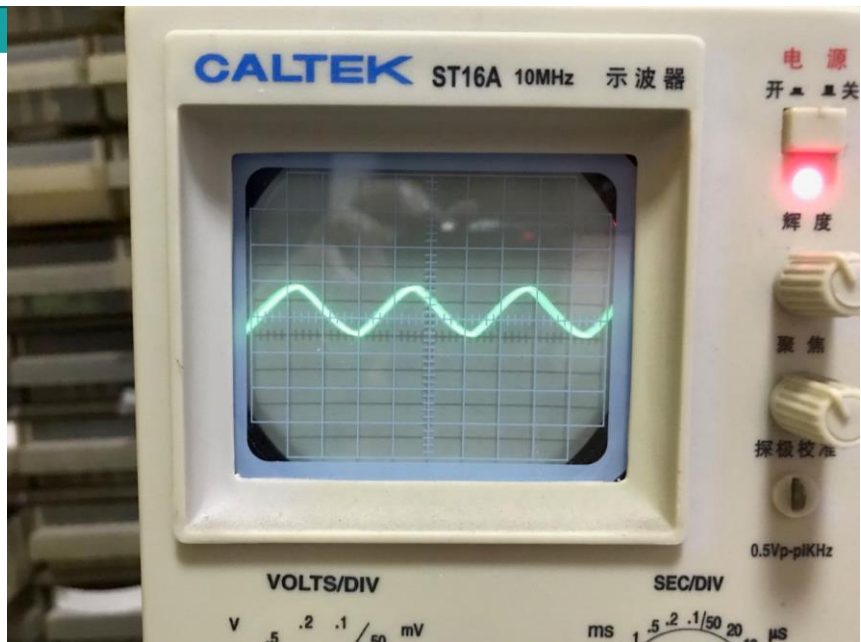


图 (14) 生成正弦波的程序

图 (15) 生成正弦波的波形

改变程序中 delayMicrosecond () 中的数字, 并使用万用表测量输出频率, 结果如表 (1) 所示。

表 (1) 程序设定输入方波信号延迟与万用表实际测量输出频率

delayMicrosecond(x)/us	0	1	2	3	4	5	6	10
输出频率/Hz	6903.2	6903.2	2962	1682	1174	902.12	732.35	417.83
输出周期/us	144.8	144.8	337.6	594.5	851.7	1108.5	1365.4	2393.3
x 增加 1, 周期的增加			192.7494	256.9206	257.2584	256.7112	256.9674	

由表中可以看到, 当延迟中输入 0 时, 程序默认是每条指令执行 1 微秒。由第四行的数据看, 基本符合程序设计的输入一个周期 i 由 0 变到 256。

六、实验结论:

本实验设计了方波-锯齿波转换器与波形生成器。通过设计上升沿的时间常数大于

输入周期的一半，使得上升沿呈斜直线；设计下降沿的时间常数远小于上升沿的时间常数，使得下降沿呈垂直下降。通过 8 位 R2R 梯形电阻网络将数字信号转换为模拟信号，生成了三角波与正弦波，并比较了程序设定的输入频率与实际输出频率，发现基本符合，且当延迟中输入 0 时，程序默认是每条指令执行 1 微秒。

七、参考文献：

- [1] <https://www.auctoris.co.uk/2011/05/14/arduino-function-generator-part-1/>
- [2] <https://www.auctoris.co.uk/2011/05/25/arduino-function-generator-part-2/>