

# 模电实验报告 10：波形变换电路实验

xy 学号 匡亚明学院

2019 年 2 月 29 日

## 1 实验目的

1. 学习使用运放组成精密全波整流电路、电压-频率转换电路。

## 2 实验仪器

示波器、信号发生器、交流毫伏表、数字万用表。

## 3 预习内容

1. 分析电路图, 定性绘制本实验所用电路的输出波形

## 4 实验内容

### 4.1 精密全波整流电路

#### 4.1.1 原理

若直接用二极管整流, 由于普通二极管内阻电压为零点几伏, 所以只能用于大信号整流。若要求检波器件的内阻电压尽可能地小, 例如  $1\text{mV}$ , 则可利用运放和二极管可构成这样的检波器件, 如图 (1-(1)), 即等效理想检波二极管, 如图 (1-(2))。

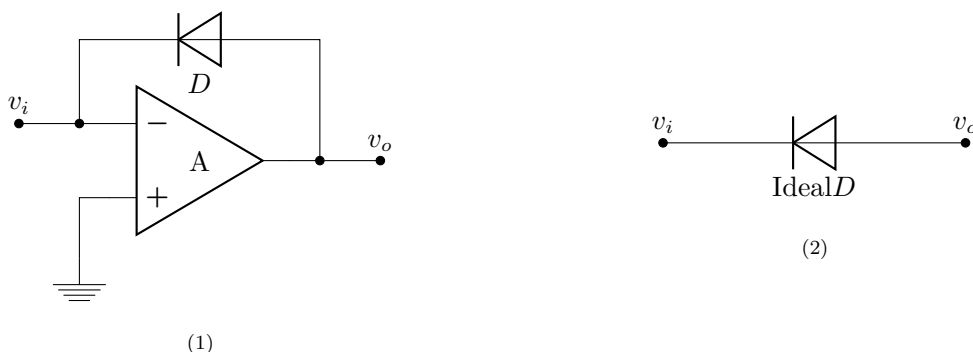


图 1: 理想检波二极管

在图 (1-(1)) 中, 若运放输入  $V_i$  为很小的正电压, 由于运放的开环增益很大, 运放输出  $V_o$  将为很大的负电压,  $D1$  截止; 若运放输入  $V_i$  为很小的负电压, 由于运放的开环增益很大, 运放输出  $V_o$  将趋向于很大的正电压,  $D1$  导通,  $D1$  导通后有  $V_o = V_i$ 。可见, 图 (1-(1)) 等效为一个理想检波二极管。

图 (2) 就是利用这样的等效理想检波二极管组成的精密全波整流电路。以输入为正弦波为例, 介绍其工作原理。

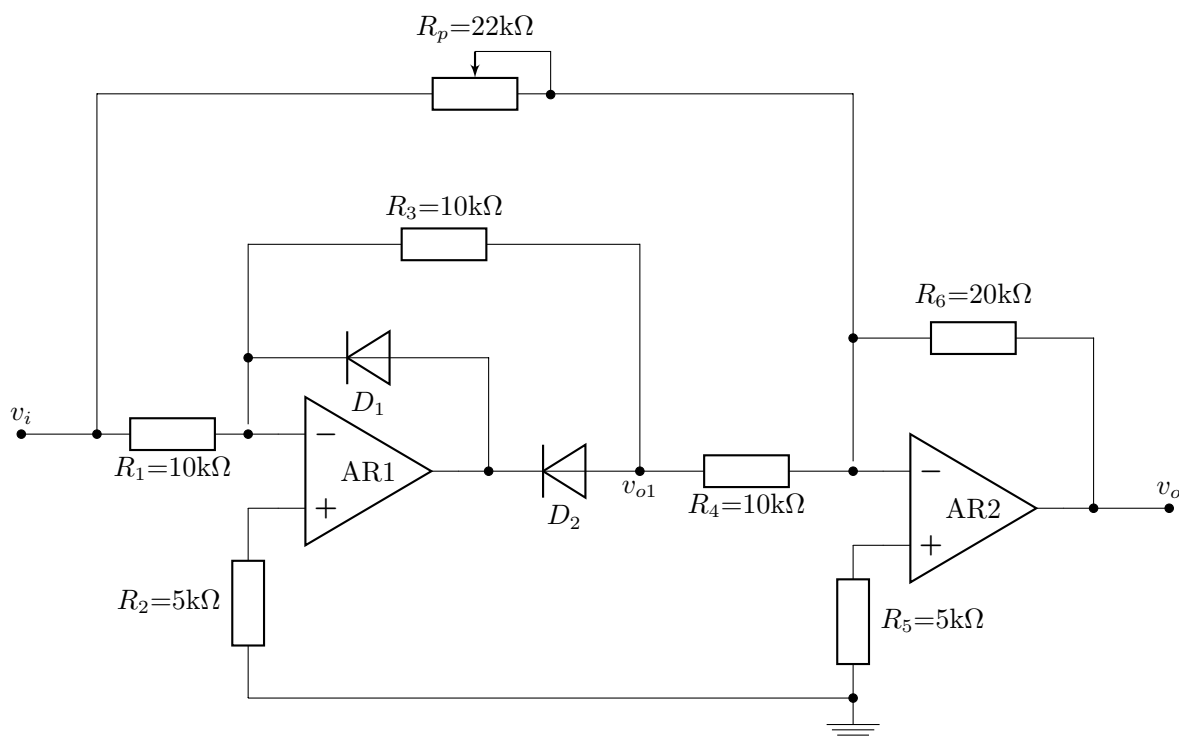


图 2: 精密全波整流电路

在正半周期,  $V_i$  为正, 运放 AR1 的反相输入端电压为  $0^+$ , 输出趋向于很大的负电压, 二极管  $D_1$  截止。这里先假设  $D_2$  导通。那么, 由  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、AR1、 $D_1$ 、 $D_2$  组成的电路等效为放大倍数为  $-1$  的放大器,  $V_{o1}$  输出的波形如图 (3-(2))。当运放 AR1 的反相输入端电压为  $0^+$  时, 输出趋向于很大的负电压, 而输出  $V_{o1}$  为输入的反相, 为有限的负电压, 所以  $D_2$  导通,  $D_2$  导通后, 运放输出端电压为  $-V_i - V_{D2th}$ , 其中  $V_{D2th}$  为  $D_2$  导通时的电压降。可见, 先前假设  $D_2$  导通是正确的。 $V_{o1}$  再经由  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 、AR2 组成的放大倍数为  $-2$  的放大器, 正半周期输入  $V_i$  经 AR1、AR2 组成的两级放大器放大, 形成的输出为  $V_{o12}$ , 如图 (3-(3)), 为幅值为输入的两倍的正半周期正弦波。与此同时, 输入  $V_i$  经  $R_p$  (理论上其阻值应为  $20\text{k}\Omega$ )、 $R_6$ 、 $R_5$ 、AR2 组成的放大倍数为  $-1$  的放大器放大, 形成的输出为  $V_{o2}$ , 如图 (3-(4))。输入为正半周期时的输出  $V_o$  为  $V_{o12}$  与  $V_{o2}$  的线性迭加, 如图 (3-(5))。显然, 输出波形与输入波形是完全相同的。

在负半周期,  $V_i$  为负, 运放 AR1 的反相输入端电压为  $0^-$ , 输出趋向于很大的正电压, 二极管  $D_1$  导通。这里先假设  $D_2$  截止。那么, 运放 AR1 输出端开路。由于 AR1 的反相输入端电压  $0^-$ , AR2 反相输入端电压为  $0$ , 所以没有电流流过  $R_3$ ,  $V_{o1}$  为  $0$ , 如图 (3-(2))。当运放 AR1 的反相输入端电压为  $0^-$  时, 输出趋向于很大的正电压, 而输出  $V_{o1}$  为  $0$ , 可见, 先前假设  $D_2$  截止是正确的。 $V_{o1}$  再经由  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 、AR2 组成的放大器, 输出  $V_{o12}$  仍为  $0$ , 如图 (3-(3))。与此同时, 输入  $V_i$  经  $R_p$  (理论上其阻值应为  $20\text{k}\Omega$ )、 $R_6$ 、 $R_5$ 、AR2 组成的放大倍数为  $-1$  的放大器放大, 形成的输出为  $V_{o2}$ , 如图 (3-(4))。输入为负半周期时的输出  $V_o$  为  $V_{o12}$  与  $V_{o2}$  的线性迭加, 如图 (3-(5))。显然, 输出波形与输入波形是完全相同的。

可见, 在图 (2) 所示电路中, 若运放为理想运放,  $R_p = R_6 = 2R_1$ ,  $R_1 = R_3 = R_4$ , 则输出是对输入的全波整流, 如图 (3-(5))。由于实际元件数值并不等于标称值, 所以实验电路中设置了电位器, 用于调整。由于本实验使用的信号源最小输出是峰值为  $50\text{mV}$  的正弦电压, 当输入为峰值为  $50\text{mV}$  的正弦

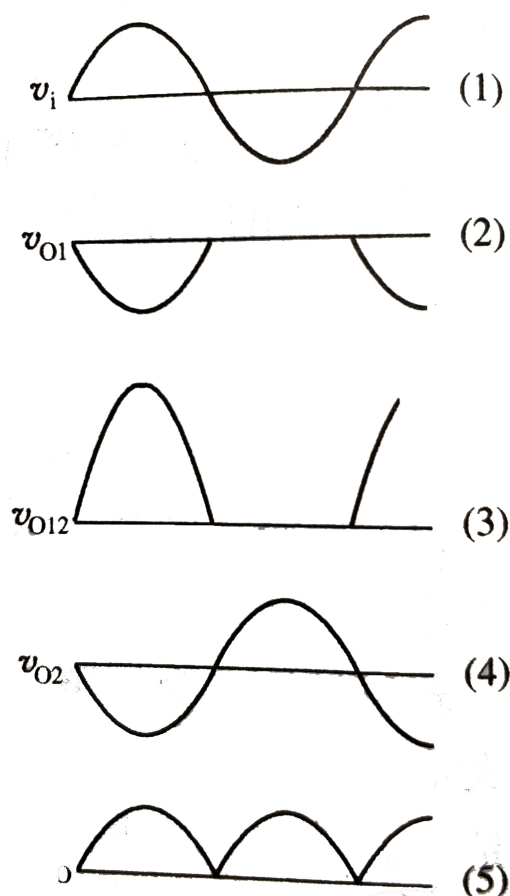


图 3: 图 (2) 电路各点输出波形分析

电压时, 实验电路输出应与图 (3-(5)) 基本相同。

#### 4.1.2 内容

1. 取输入  $V_i$  有效值为 1V、 $f=1\text{kHz}$  的正弦波。调整  $R_P$ , 观察输出波形, 使其相邻的峰值尽可能相等。
2. 保持输入信号频率不变, 取输入  $V_i$  峰值为 50mV 的正弦波。观察输出波形, 与 (1) 的输出波形做比较, 试分析造成两者波形差异的原因。

### 4.2 电压-频率转换电路

#### 4.2.1 原理

电路如图 (4)。这是一个简易的低频压控振荡器。输入为直流电压, 输出为基频频率随输入直流电压变化而变化的锯齿波。

在稳态。设在  $V_{o1}=V_z$ 、 $V_o=-V_z$  时刻, 运放 AR1 正相输入端电压过 0, 趋向负,  $V_{o1}$  翻转, 由  $V_z$  变为  $-V_z$ 。如图 (5), 向电容正向充电的电流  $i_{CP}$  为

$$i_{CP} = i_{R_7} - i_i = \frac{V_z - V_{Dth}}{R_7} - \frac{V_i}{R_4} \quad (1)$$

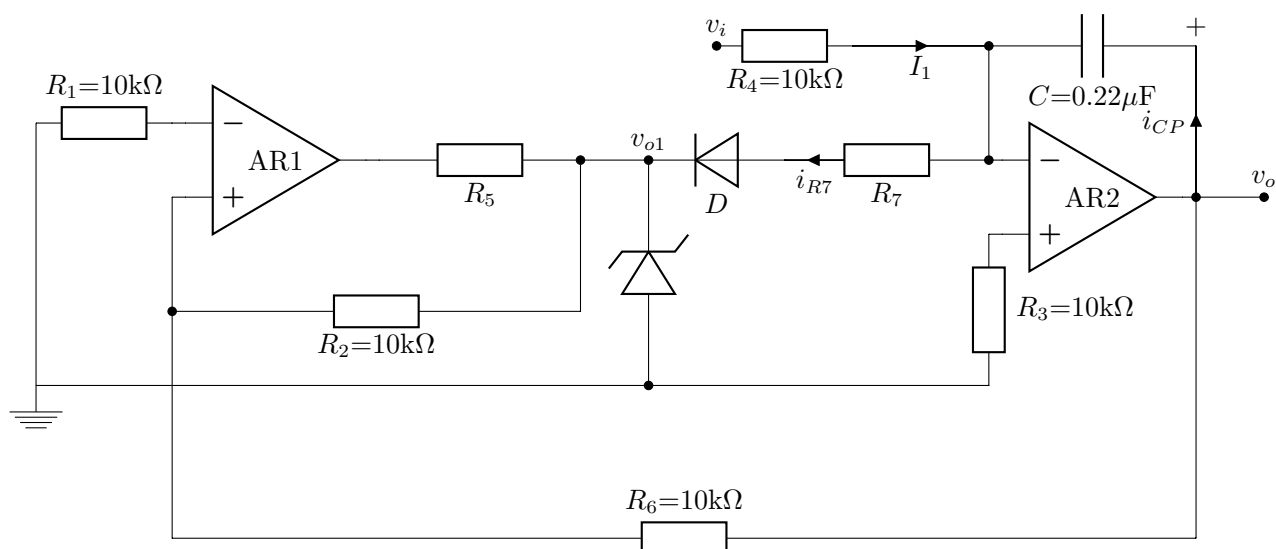


图 4: 低频压控振荡器

其中,  $V_{Dth}$  为二极管的导通电压。向电容正向充电使输出电压  $V_o$  上升, 当输出电压上升到  $V_o = V_z$  时, AR1 正相输入端的电压再次过 0, 但趋向于正,  $V_{o1}$  再次翻转, 由  $-V_z$  变为  $V_z$ 。记此过程持续的时间为  $T_1$ , 在此过程中, 输出电压的变化量为

$$V_o = \frac{1}{C} \int_0^{T_1} \left( \frac{V_z - V_{Dth}}{R_7} - \frac{V_i}{R_4} \right) dt = \left( \frac{V_z - V_{Dth}}{R_7 C} - \frac{V_i}{R_4 C} \right) T_1 = 2V_z \quad (2)$$

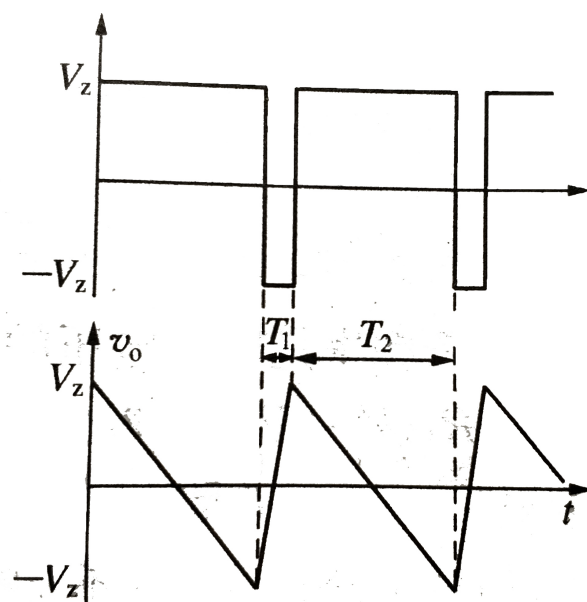


图 5: 图 (4) 所示电路的输出波形

从中可解出

$$T_1 = \frac{2V_z}{\frac{V_z - V_{Dth}}{R_7 C} - \frac{V_i}{R_4 C}} \quad (3)$$

紧接着, 由于  $V_{o1}=V_z$ , AR2 反相输入端为“虚地”, 这使得二极管 D 截止, 只有  $V_i$  向电容反向充电, 充电电流为

$$i_{CN} = -\frac{V_i}{R_4} \quad (4)$$

向电容反向充电使输出电压  $V_o$  下降, 当输出电压下降到  $V_o=-V_z$  时, AR1 正相输入端的电压过 0, 趋向于负,  $V_{o1}$  翻转, 由  $V_z$  变为  $-V_z$ 。记此过程持续的时间为  $T_2$ , 在此过程中, 输出电压的变化量为

$$V_o = -\frac{1}{C} \int_0^{T_2} i_{CN} dt = -\frac{1}{C} \int_0^{T_2} \frac{V_i}{R_4} dt = -\frac{V_i}{R_4 C} T_2 = -2V \quad (5)$$

从中可解出

$$T_2 = 2R_4 C \frac{V_z}{V_i} \quad (6)$$

输出  $V_o$  的波形如图 (5), 为锯齿波。其基频频率为

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{(V_z - V_{Dth})R_4 V_i - R_7 V_i^2}{2(V_z - V_{Dth})V_z R_4^2 C} = \frac{V_i}{2R_4 C V_z} - \frac{R_7 V_i^2}{2(V_z - V_{Dth})V_z R_4^2 C} \quad (7)$$

可见, 基频频率是输入电压的二次函数, 其函数曲线如图 (6)。

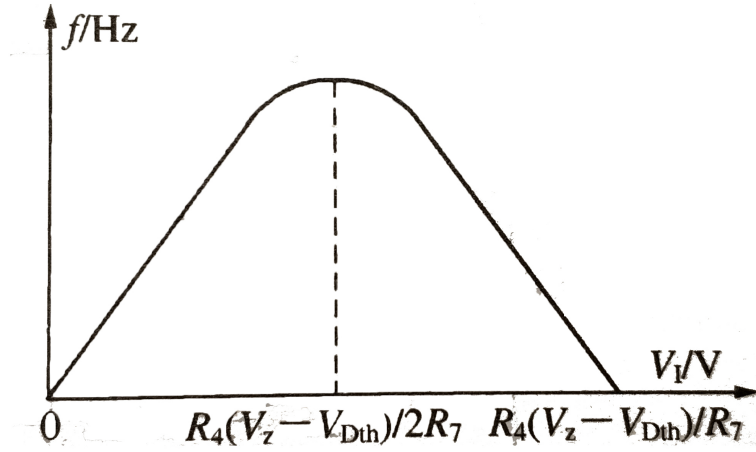


图 6: 输出波形频率-输入直流电压特性曲线

当  $0 < V_i < R_4(V_z - V_{Dth})/2R_7$  时, 基频频率随输入电压增加而单调上升。人们通常希望基频频率  $f$  是输入电压  $V_i$  的一次函数, 这就要求 (7) 式中的  $R_7$  较小。但就电路而言,  $R_7$  不能很小, 因为 AR2 反相输入端电位近似为 0,  $V_{o1}$  为低时约为 -6V, 若此电压全部加在二极管 D 上, 二极管正向导通电压约为零点几伏, 则电路无法正常工作。建议在实验中  $R_7$  取 1k $\Omega$ , 或取 1k $\Omega$  电位器, 在实验中再调整。若再设  $V_{Dth}=0.7V$ , 则 (7) 式可写为

$$f \approx 37.88V_i - 0.7147V_i^2 \quad (8)$$

若输入电压较小, 也可使频率  $f$  近似为输入电压  $V_i$  的一次函数。由 (8) 式可知, 当  $V_i$  为 26.5V 时,  $f$  取最大值。若实验中取  $0 < V_i < 5V$ , 由图 (6) 可见,  $f$  近似为输入电压  $V_i$  的一次函数。

在本实验电路中, 当  $V_{o1}=-V_z$  时, 流经  $R_7$  的电流将灌入运放 AR1; 同时, 为稳定  $V_{o1}=-V_z=-6V$ , 由“地”流经稳压二极管的电流也将灌入运放 AR1。若限流电阻  $R_5$  过大,  $V_{o1}$  将上升, 这在示波器可清楚地看到,  $V_{o1}$  波形上下幅值严重不对称, 正向幅值大, 负向幅值小。而 (7) 式是在图 (5) 所示的  $V_{o1}$  波形上下对称时推导出来的, 所以测量到的频率值将较大地大于用 (8) 式估算的频率值。这时应减小  $R_5$ , 使  $V_{o1}$  波形的反相幅值略小于正相幅值即可,  $R_5$  不宜过小, 建议取  $1k\Omega < R_5 < 3k\Omega$ 。

### 4.2.2 内容

1. 取输入电压  $V_i=1V$ , 选取适当的  $R_5$ , 使  $V_{o1}$  波形上下幅值近似相等。选取  $R_7$ (可取 500 至 1000 $\Omega$ )。
2. 测量并绘制输出波形频率-输入直流电压特性曲线, 取输入直流电压  $V(0.1, 5)V$ 。并与理论估算值相比较。

## 5 实验数据

### 5.1 精密全波整流电路

在此实验中,  $R_P = 19.8505k\Omega$ 。

#### 5.1.1 $v_{irms} = 0.9893V$

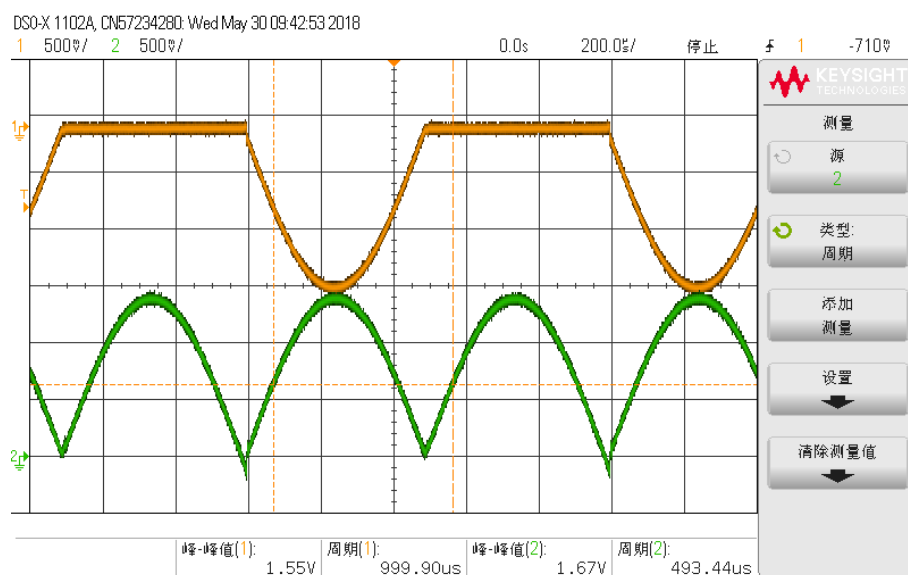


图 7:  $v_{irms} = 0.9893V$  时的波形图

#### 5.1.2 $v_{ipp} = 50mV$

此时  $v_{irms} \approx 17.545mV$

### 5.2 电压-频率转换电路

输入信号  $V_I = 1.0004V$ ,  $R_5 = 5.1k\Omega$ ,  $R_7 = 1k\Omega$ 。

测得的输出信号频率于输入信号电压关系曲线如图 (10), 可见电压-频率曲线与抛物线符合较好, 拟合公式标在图中。

## 6 实验讨论

1. 如图 (8), 精密整流电路在输入信号极小时, 输出波形失真严重, 且波形不好看, 应该是接近了运放的灵敏度的极限。

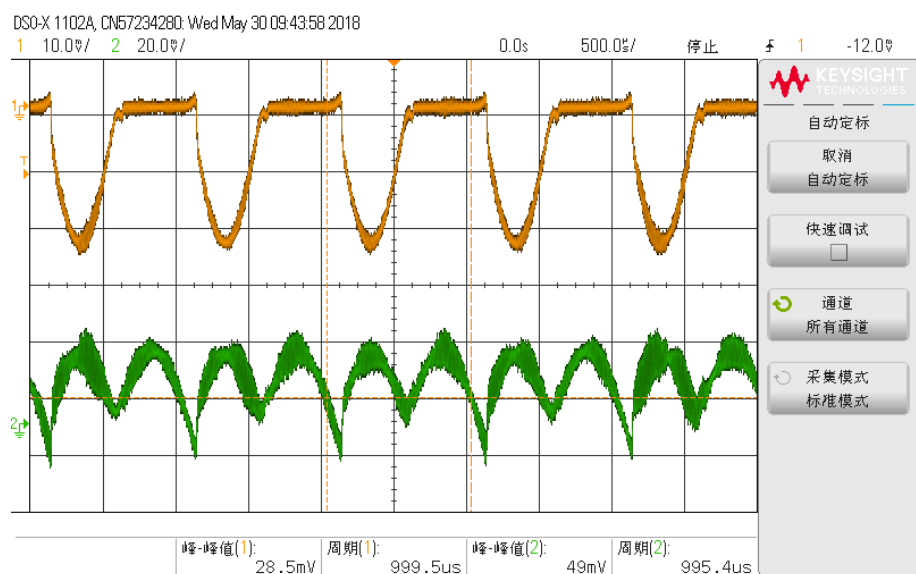


图 8:  $v_{ipp} = 50\text{mV}$  时的波形图

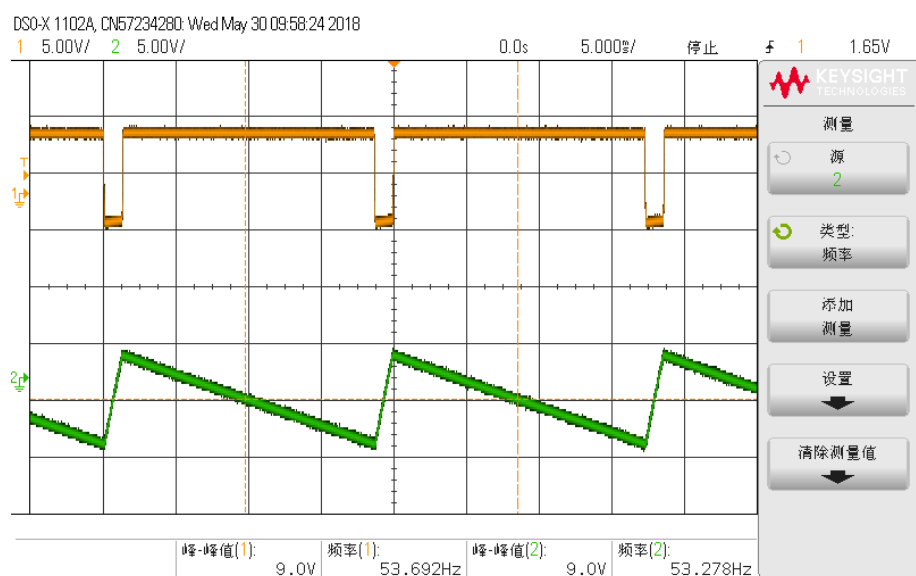


图 9: 电压-频率转换电路波形图

## 7 思考题

7.1 若要求输出为整流后的波形的直流分量，应如何修改图 (2) 所示电路？当输入  $V_i$  有效值为  $1\text{V}$  时，这个直流分量应为多少伏？

在输出端接一个电容到地，这样可以滤去输出信号的交流成分。电容的容值可取  $10\text{mF}$ 。

7.2 若输入为正弦分量加直流分量，在输出端仅要求反映正弦分量，应如何修改图 (2) 所示电路？设  $f=1\text{kHz}$ ，给出具体的元件参数。

应该在输入端加一个电容，滤去直流分量而通过交流分量。可以取电容的值为  $10\text{mF}$ 。

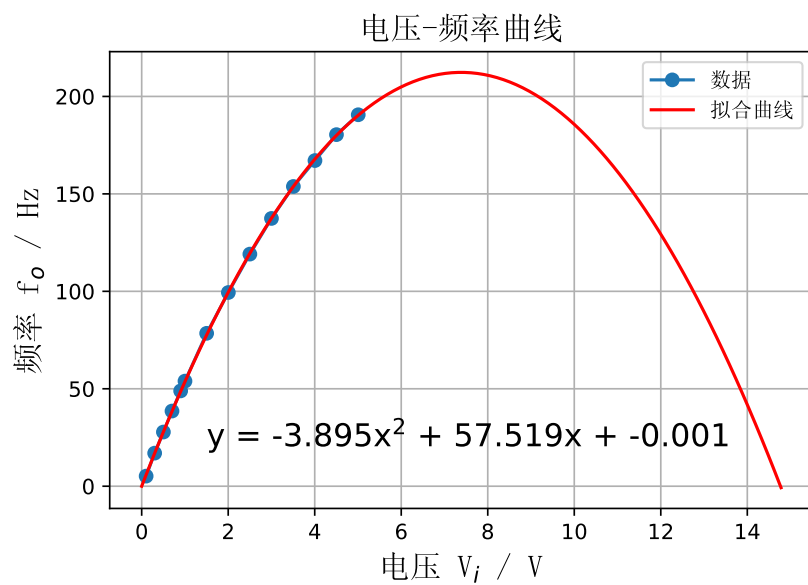


图 10: 测得输出频率-输入电压特性曲线

## 参考文献

- [1] 康华光. 电子技术基础 (模拟部分). 高等教育出版社, 2006.