

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 1mV , 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))。

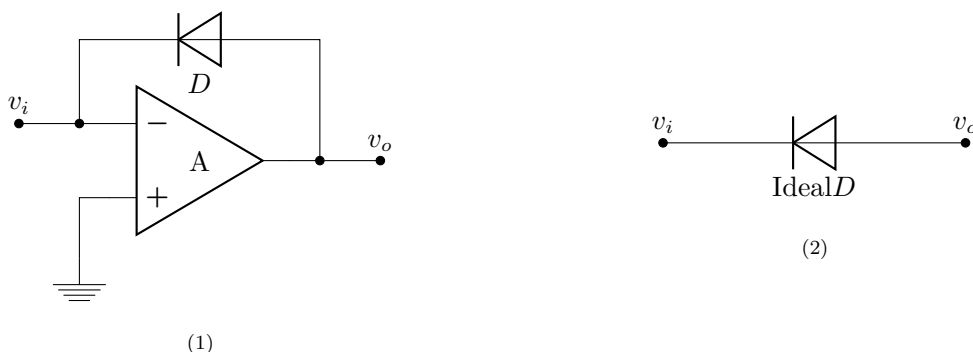


图 1: 理想检波二极管

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。

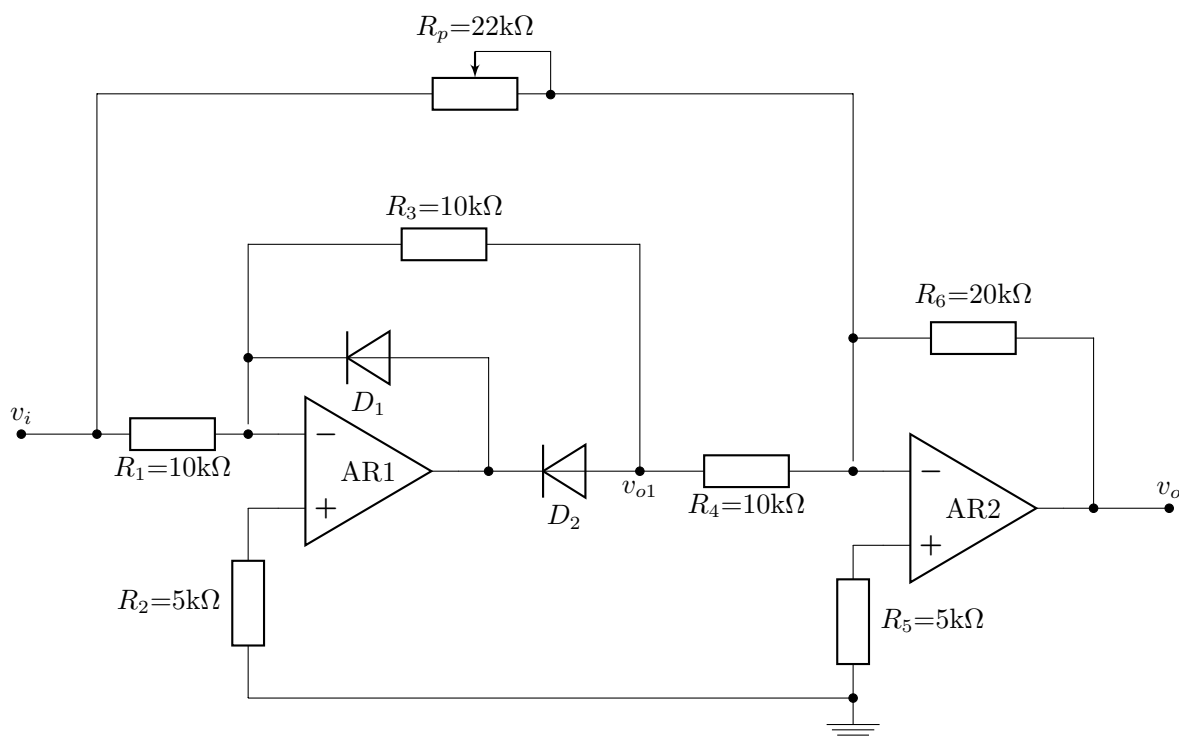


图 2: 精密全波整流电路

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 50mV 的正弦电压, 当输入为峰值为 50mV 的正弦

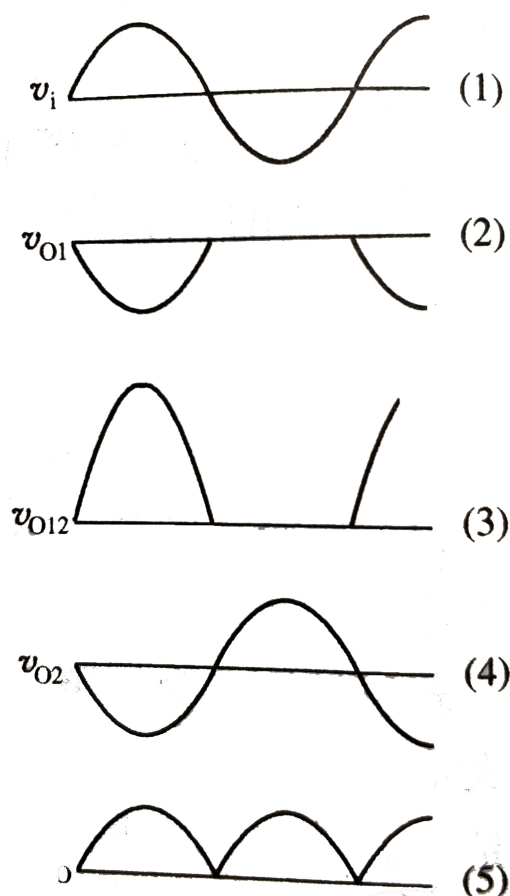


图 3: 图 (2) 电路各点输出波形分析

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

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

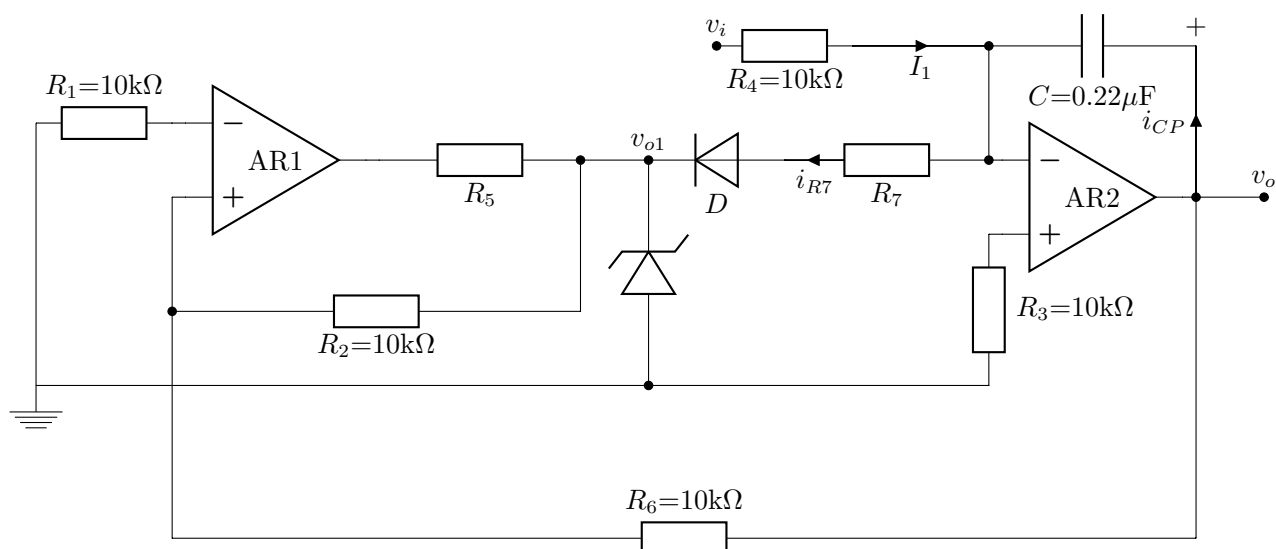


图 4: 低频压控振荡器

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

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

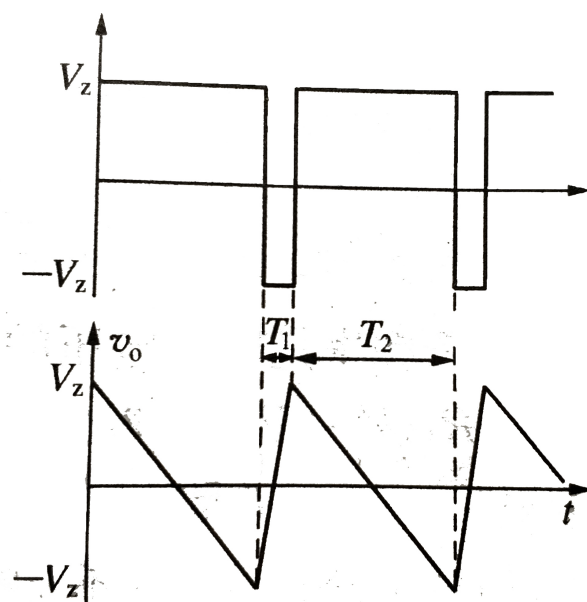


图 5: 图 (4) 所示电路的输出波形

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)。

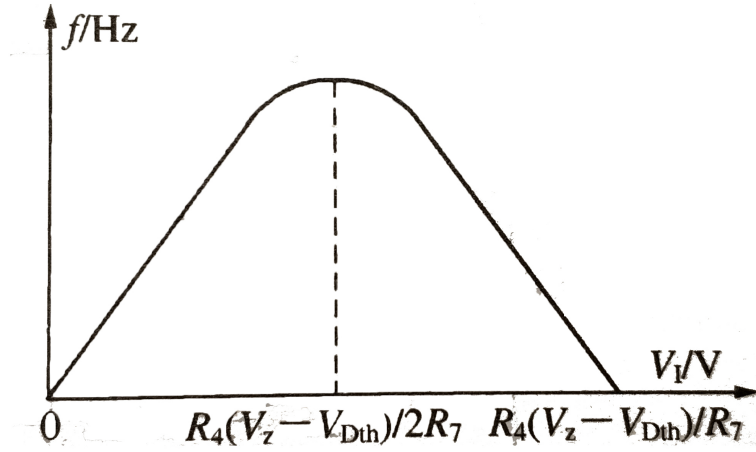


图 6: 输出波形频率-输入直流电压特性曲线

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 Ω , 或取 1k Ω 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 Ω)。
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 $v_{irms} = 0.9893V$

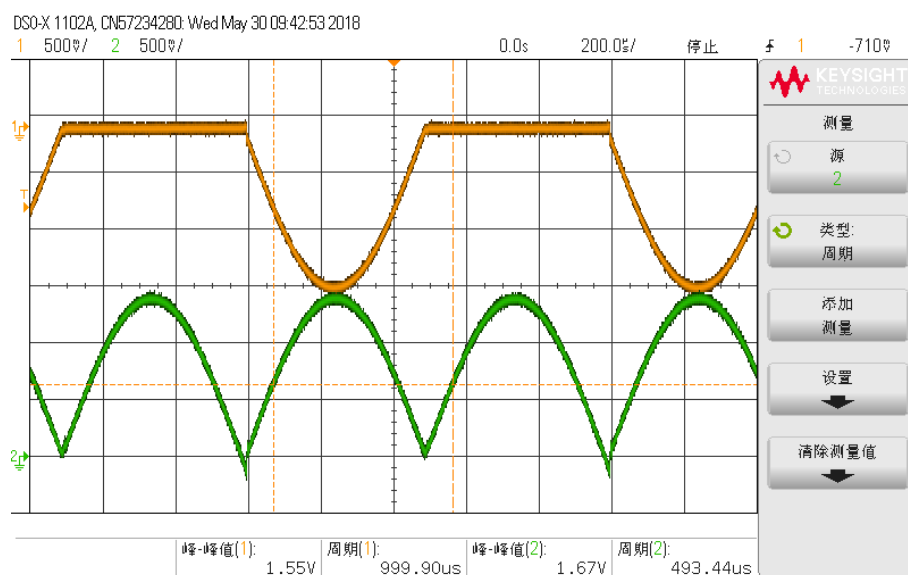


图 7: $v_{irms} = 0.9893V$ 时的波形图

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。

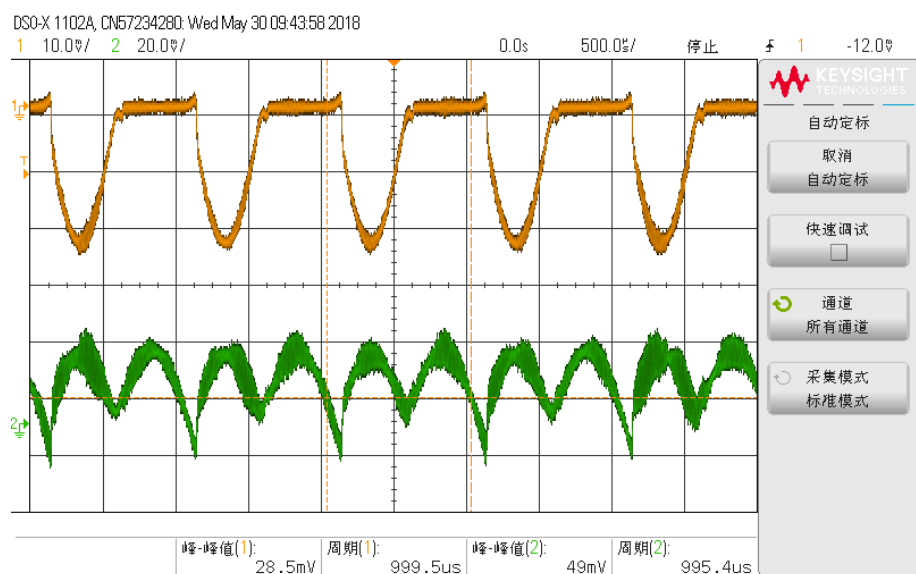


图 8: $v_{ipp} = 50\text{mV}$ 时的波形图

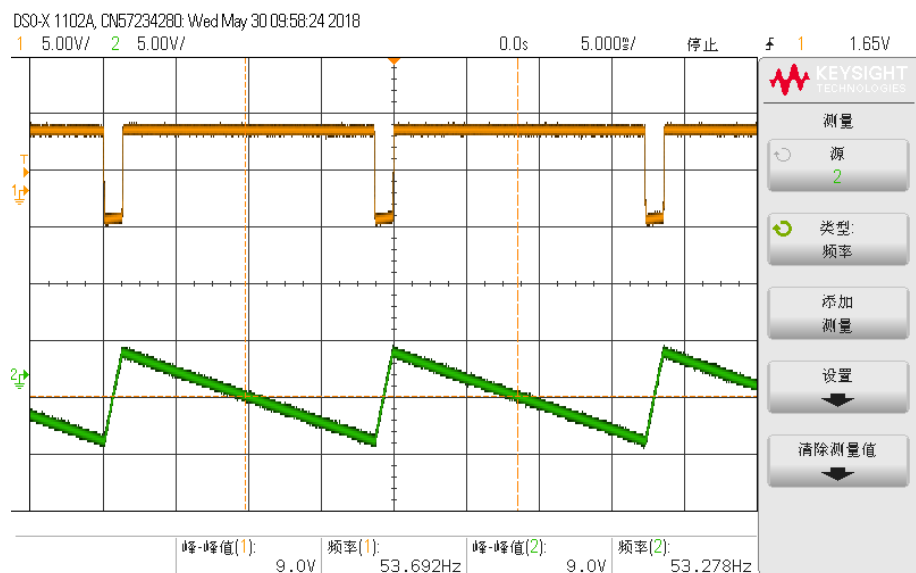


图 9: 电压-频率转换电路波形图

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 1V 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 10mF 。

- 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 10mF 。

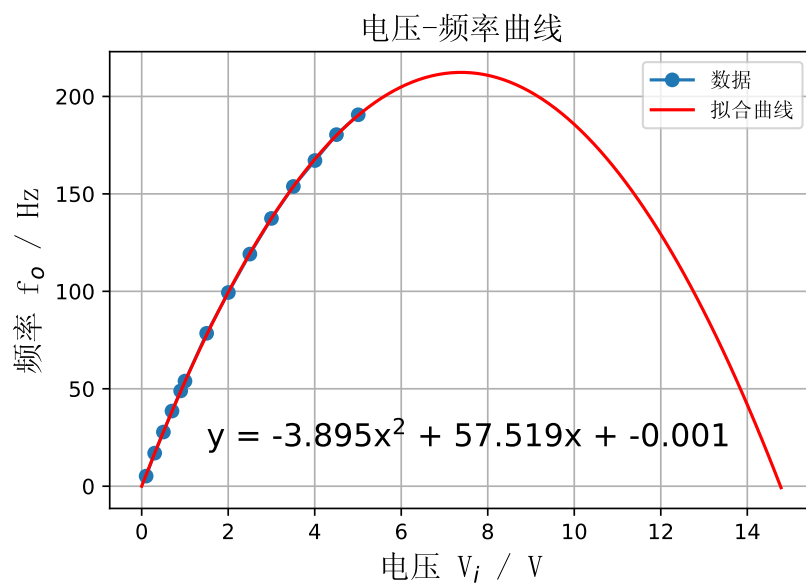


图 10: 测得输出频率-输入电压特性曲线

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.