



## 集成电路学院实验报告

姓 名 : 张乐天 学 号: 221900182

专 业 : 集成电路设计与集成系统 年 级: 2022

课程名称: 模拟电路实验

实验名称: 综合实验——方波合成

实验时间: 2023-2024 学年第二学期 实验教室: 科创大厦 2 号实验室

实验成绩: \_\_\_\_\_ 指导教师: 田静

评阅意见:

评阅教师签字:

## 1 实验目的

- 1) 进一步熟悉运算放大器芯片的使用;
- 2) 掌握简单电子系统设计的流程，主要包括波形的发生与处理;
- 3) 进一步理解滤波器、移相器、加法器的搭建与使用，了解电路各级之间阻抗匹配对信号传输与信噪比的影响。

## 2 实验仪器与主要器材

仪器：

双踪示波器： RIGOL DS2302A

万用表： RIGOL DM3058E

函数发生器： RIGOL DG2102

电源： RIGOL DP832

硬件：

LF353P 芯片

面包板 2 块

电容、电阻、滑动变阻器、导线若干

软件：

NI Multisim 14.3 (Education Edition)

## 3 实验要求

### 3.1 基本要求

- (1) 方波振荡器的信号经分频与滤波处理，同时产生频率为 1kHz 和 3kHz 的正弦波信号，这两种信号应具有确定的相位关系；
- (2) 产生的信号波形无明显失真，幅度峰峰值分别为 6V 和 2V；
- (3) 制作一个由移相器和加法器构成的信号合成电路，将产生的 1kHz 和 3kHz 的信号，作为基波和 3 次谐波，合成一个近似方波，波形幅度为 5V。

### 3.2 发挥部分

- (1) 再滤出 5kHz 的正弦信号作为 5 次谐波，参与信号合成，使合成的波形更接近于方波；

(2) 根据三角波谐波的组成关系, 设计一个新的信号合成电路, 将产生的 1kHz、3kHz 等各个正弦信号, 合成一个近似的三角波形。

## 4 实验原理

方波中含有丰富的谐波, 理想情形下将其滤出可以得到所需频率的正弦波, 因此需要设计相应的滤波器以滤出波形。由于最终合成波形时, 相应的正弦波需要特定的相位关系, 因此需要设计移相器以移动正弦波相位, 从而合成出较为理想的波形。

### 4.1 波形的傅里叶分析

幅度值为  $A$ 、周期为  $T$  的理想方波波形  $f(t)$  如图 1 所示。其中, 波形频率  $f = 1/T$ , 角频率  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ 。

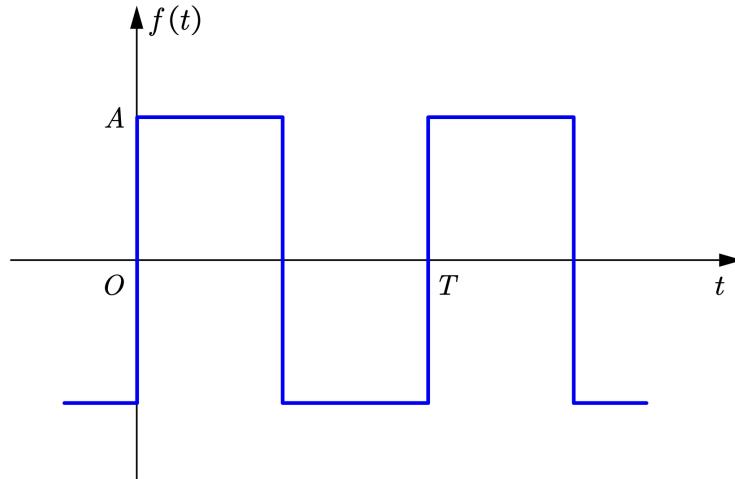


图 1 理想方波波形

对于周期信号可以做傅里叶级数展开, 表示为三角函数所构成的级数之和, 即方波可以由不同频率的正弦波以特定的幅值和相位关系合成, 如式 (4.1.1) 所示。

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (4.1.1)$$

其中,  $a_0$  为直流分量单独写出,  $\omega = 2\pi/T$ , 其余各系数为

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (4.1.2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt$$

这里写成带相位 $\varphi_n$ 的形式，用以表明合成时波形的相位关系。同时为了方便，取 $\varphi_n \in [0, 2\pi]$ 以确保 $c_n \geq 0$ 。

考虑到这里取方波为奇函数且无直流分量，因此 $\varphi_n = 0$ 、 $a_n = 0$ 。不难计算得到

$$c_n = n_n = \frac{4A}{n\pi} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (4.1.3)$$

因此，可以将上述方波信号 $f(t)$ 写为

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4A}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (4.1.4)$$

故可以得到基波、三次谐波、五次谐波幅度的比值为 $1:\frac{1}{3}:\frac{1}{5}$ ，同时相位关系可以描述为对于零时刻正弦波描述的基波相位 $\varphi$ 的差值为 0。

当然，若采取不同时刻作为零点时刻，得到的傅里叶级数形式并不相同，且相位描述也不相同，但幅度关系不变。

可以绘制相关的波形如图 2 所示。

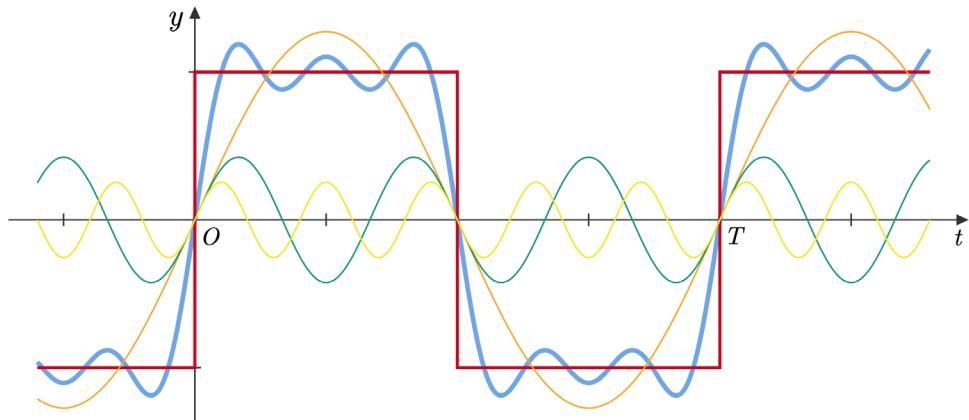


图 2 方波合成相关波形

对于三角波 $g(t)$ ，同样以上升沿且幅值为零时做零点，类似可以得到

$$g(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-8A(-1)^n}{n^2\pi^2} \sin(n\omega t) \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (4.1.5)$$

## 4.2 波形发生器

如图 3 所示，方波发生器是在迟滞比较器（可以认为是施密特触发器，由运放及 $R_1$ 、 $R_f$ 组成）的基础上，增加了一个积分电路，通过把输出电压经 $R$ 、 $C$ 反馈到运算放大器的反相输入端<sup>[1]</sup>，使得电路保持振荡。显然，电路的反馈系数 $F \approx R_1/(R_1 + R_f)$ 。

设输出电压偏于正饱和值，即 $v_O = +V_{om}$ 时，加到运放同相端的电压为 $+FV_{om}$ ，而加于反相端的电压 $v_C$ 不能突变，只能由输出电压 $v_O$ 通过电阻 $R$ 按指数规律向电容 $C$ 充电来建立，充电电流 $i^+$ 方向如图 3 所标出。当加到反相端的电压 $v_C$ 略大于 $+FV_{om}$ 时，输出电压便立即从正饱和值 $+V_{om}$ 迅速翻转到负饱和值 $-V_{om}$ ，而 $-V_{om}$ 又通过 $R$ 向 $C$ 反向充放电，充电电流 $i^-$ 为图中标注方向。当反相端的电压 $v_C$ 略小于 $-FV_{om}$ 时时，输出状态再翻转回来。如此循环不已，实现方波输出。

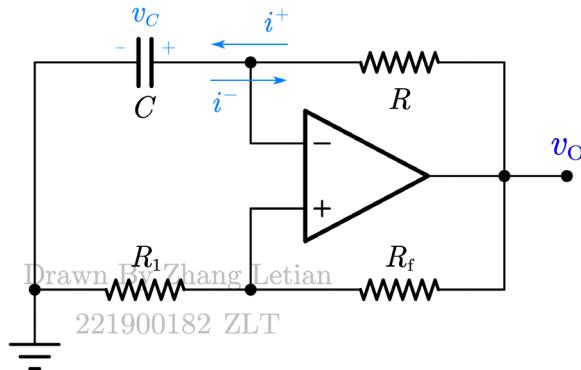


图 3 方波发生器电路

可以绘制相关波形图如下。

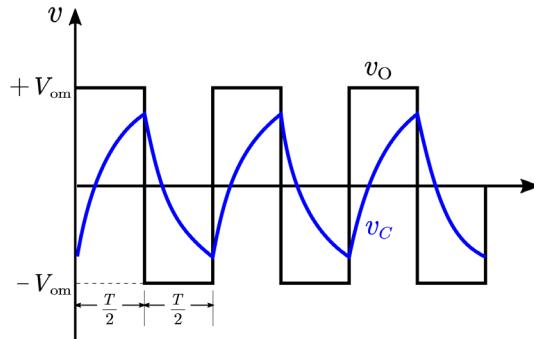


图 4 方波发生器波形

因此结合对称性，不难得出，在一个周期 $T$ 内 $v_C$ 的波形为

$$v_C(t) = \begin{cases} V_{om} \left[ 1 - (1+F)e^{-\frac{t}{RC}} \right] & \left( 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \right) \\ -V_{om} \left[ 1 - (1+F)e^{-\frac{t-\frac{T}{2}}{RC}} \right] & \left( \frac{T}{2} \leq t \leq T \right) \end{cases} \quad (4.2.1)$$

考虑到电容电压 $v_C\left(\frac{T}{2}\right)$ 处不会发生突变，故有

$$v_C\left(\frac{T}{2}\right) = V_{om} \left[ 1 - (1+F)e^{-\frac{T}{2RC}} \right] = FV_{om} \quad (4.2.2)$$

不难解出，方波的周期

$$T = 2RC \ln \frac{1+F}{1-F} = 2RC \ln \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_f} \right) \quad (4.2.3)$$

实际方波生成可能并不理想，含有较小的偶次谐波，但不影响整个实验。这是因为最终的目标是滤出特定频率的正弦波用以合成，因此仅需要初始波形含有所需谐波成分即可。

### 4.3 滤波器电路

这里主要采用两种滤波器电路，分别为 VCVS 型滤波器<sup>[1]</sup>与 GIC 型滤波器<sup>[2]</sup>。这里均使用二阶滤波器，因此系统函数  $H(s)$  可以表示为

$$H(s) = \frac{K_1(s)}{K_2(s)} \quad (4.3.1)$$

其中， $K_1, K_2 \neq 0$ ,  $K_2 \in \mathbb{R}_3[s]$ ,  $K_2 \notin \mathbb{R}_2[s]$ ,  $K_1 \in \mathbb{R}_2[s]$ ,  $K_1 \notin \mathbb{R}_1[s]$ ,  $\mathbb{R}_n[s]$  为数域  $\mathbb{R}$  上所有次数小于等于  $n - 1$  的一元多项式所构成的线性空间。

由于需要从方波中滤出特定频率的波形，故应采用带通滤波器，利用电压作为信号，系统函数  $A(s)$  通式为

$$A(s) = \frac{V_O(s)}{V_I(s)} = \frac{A_0 \frac{\omega_0}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (4.3.2)$$

其中， $A_0$  为通带电压增益， $\omega_0$  为中心频率， $Q$  为品质因数。

为了方便描述频响特性，令  $s = j\omega$ ，有

$$A(j\omega) = \frac{A_0 \frac{\omega_0}{Q}s}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\frac{\omega_0}{Q}\omega} = \frac{A_0}{1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (4.3.3)$$

#### 4.3.1 VCVS 型二阶带通滤波器

使用有限正增益二阶带通电路如图 5 所示，易知  $A_{vf} = 1 + R_f/R_1$ 。

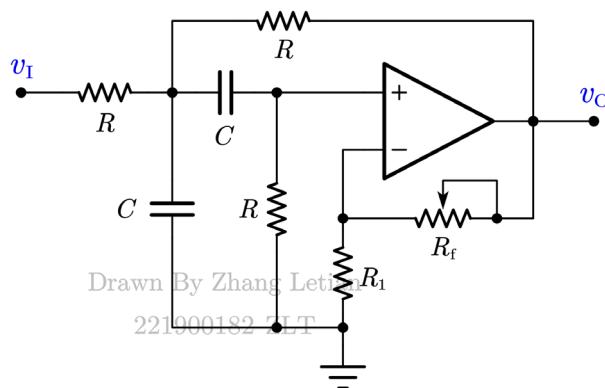


图 5 VCVS 型二阶带通滤波电路

不难得到

$$A_0 = \frac{A_{vf}}{4 - A_{vf}} = \frac{R_1 + R_f}{3R_1 - R_f} \quad (4.3.4)$$

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{RC} \quad (4.3.5)$$

$$Q = \frac{\sqrt{2}}{4 - A_{vf}} = \frac{\sqrt{2}R_1}{3R_1 - R_f} \quad (4.3.6)$$

该种滤波器仅需要一个运放电路，这是比 GIC 型优越的地方。

#### 4.3.2 GIC 型二阶带通滤波器

使用有限增益二阶带通电路如图 6 所示，易知  $A_{vf} = 1 + R_4/R_5$ 。

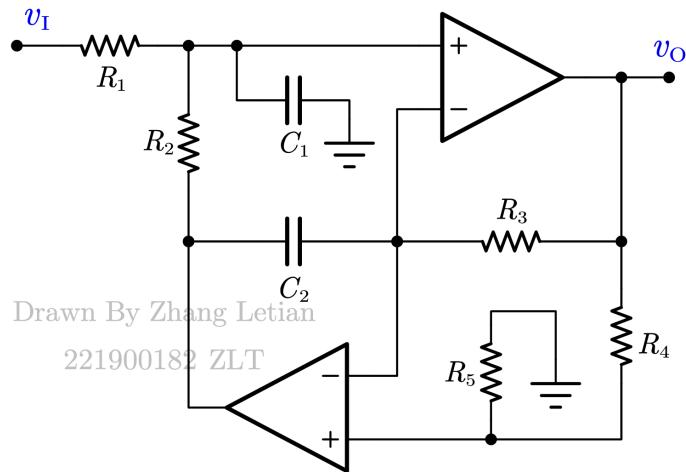


图 6 GIC 型二阶带通滤波电路

同样，不难得到

$$A_0 = A_{vf} = 1 + \frac{R_4}{R_5} \quad (4.3.7)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_4}{R_2 R_3 R_5 C_1 C_2}} \quad (4.3.8)$$

$$Q = R_1 \sqrt{\frac{R_4 C_1}{R_2 R_3 R_5 C_2}} \quad (4.3.9)$$

GIC 型滤波器的优点主要体现在品质因数  $Q$  值可以实现很高的值，阻带衰减快，此外元件的灵敏度也较低。

电路中电容、电阻的选择和截至频率有关。截至频率越高，电容一般取得越小，但一般控制在 20pF 以上；电阻一般选择 k 量级。

## 4.4 移相器电路

移相电路仅改变输出信号与输入信号的相位关系，因此移相电路是全通滤波器。这里仅需使用一阶全通滤波器即可。移相电路具体可分为相位超前移相器与相位滞后移相器。

以相位超前滤波器为例，如图 7 所示。

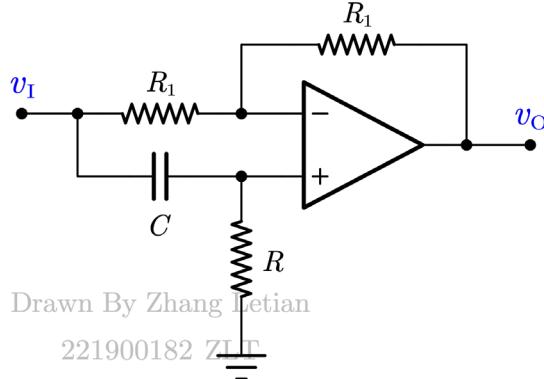


图 7 相位超前移相器

运放同相输入端有

$$V_P(s) = \frac{R}{\frac{1}{sC} + R} V_I(s) = \frac{sRC}{sRC + 1} V_I(s) \quad (4.4.1)$$

而  $V_P(s) \cong V_N(s)$ ，结合

$$\frac{V_I(s) - V_N(s)}{R_1} = \frac{V_N(s) - V_O(s)}{R_1} \quad (4.4.2)$$

故得到

$$H(s) = \frac{V_O(s)}{V_I(s)} = \frac{sRC - 1}{sRC + 1} \quad (4.4.3)$$

将  $s = j\omega$  带入，有

$$H(j\omega) = \frac{j\omega RC - 1}{j\omega RC + 1} = e^{-2 \arctan \frac{1}{\omega RC}} = e^{\pi - 2 \arctan \omega RC} \quad (4.4.4)$$

可以发现， $|H(j\omega)| = 1$ ，而相位  $\varphi(j\omega) = \pi - 2 \arctan \omega RC > \pi$ ，实现了相位超前。

对于相位滞后移相器，仅需将图 7 的电阻  $R$  与电容  $C$  交换位置即可，系统函数为

$$H(j\omega) = \frac{1 - j\omega RC}{1 + j\omega RC} = e^{-2 \arctan \omega RC} \quad (4.4.5)$$

因此，对于特定角频率  $\omega_0$ ，可以通过相移电路做相位移动  $\varphi(j\omega_0)$ 。

需要注意的是，若滤出的正弦波不纯，那么由于该移相器是全通函数，且群延时不为定值，因此可能会出现波形畸变，这是由系统函数对不同频率的正弦波相移不一致导致的。

## 4.5 其他电路

在电路中，还需要一些加法器、反相器等，均以反相放大电路为基础搭建，在此不做一一赘述，仅做出电路模板图如图 8 所示。

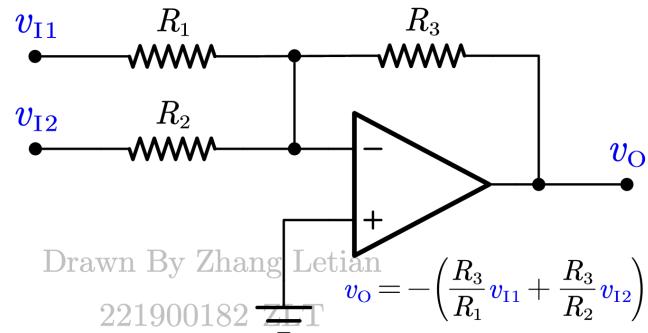


图 8 反相电路模板

## 5 设计与验证

结合实验手册所给思路，本实验所使用设计方案如图 9 所示

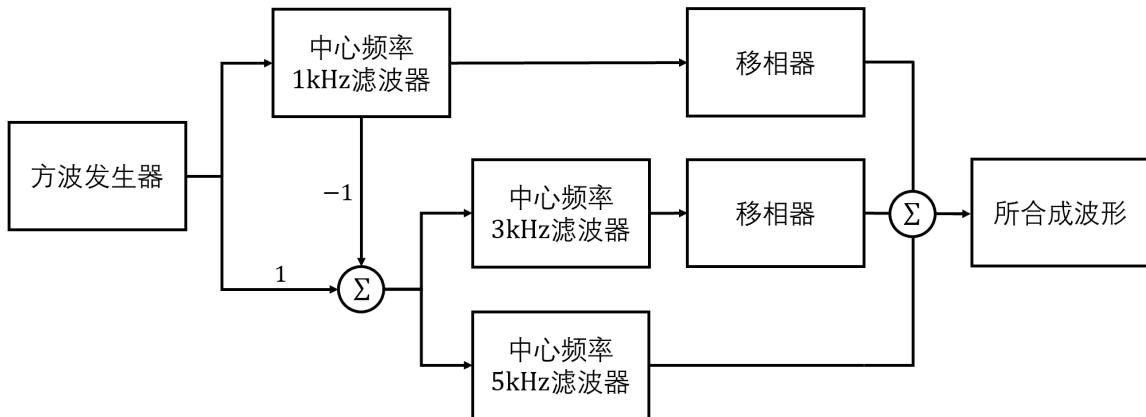


图 9 设计方案

首先产生方波，滤出 1kHz 的基波，与方波相减（使用反相器与加法器实现），得到仅含有三次及以上谐波的波形，之后使用此波形滤出 3kHz 与 5kHz。最后将 1kHz 与 3kHz 移相，并求和得到合成的方波与三角波波形。

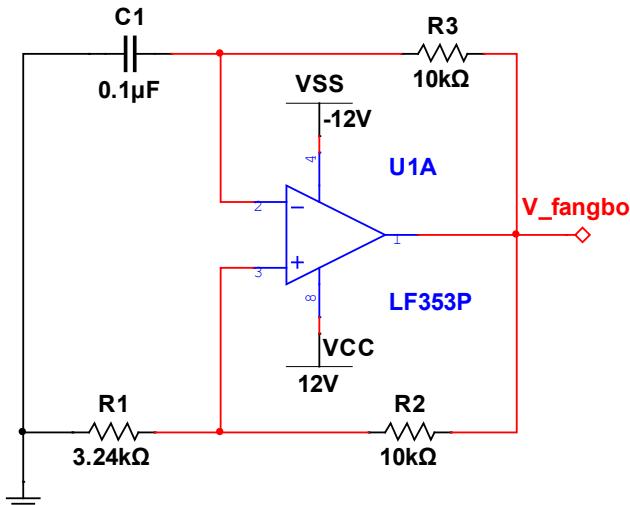
这里在产生 3kHz 的波形时已经消去了基波，因此波形更好。此外，由于 5kHz 相邻的谐波为 3kHz 与 7kHz，在十倍频程的坐标上相邻很近，因此滤波器使用了两级级联，为四阶滤波器。其余使用的滤波器均为二阶。

在合成波形时，需要调节各个波形的幅度，结合图 8 可知，调节  $R_1$  与  $R_3$  便可以控制输出的幅值大小，因此不必单独增加一级电路环节以调节幅值。

## 5.1 方波发生器

### 5.1.1 仿真设计

结合图 3 搭建如图 10 所示电路，取  $R_2 = R_3 = 10\text{k}\Omega$ ,  $C_1 = 0.1\mu\text{F}$ ，使用式 (4.2.3) 理论计算得到  $R_1 = 3.24\text{k}\Omega$  时，有方波频率  $f \approx 1.00\text{kHz}$ 。电路仿真结果如图 11 所示。



	集成电路学院 电子信息专业国家级实验教学示范中心
	实验名称: 综合实验-波形合成
	项目名称: 方波发生器
姓名: 张乐天	学号: 221900182
模拟电路实验	日期: 2024/6

图 10 方波发生器电路

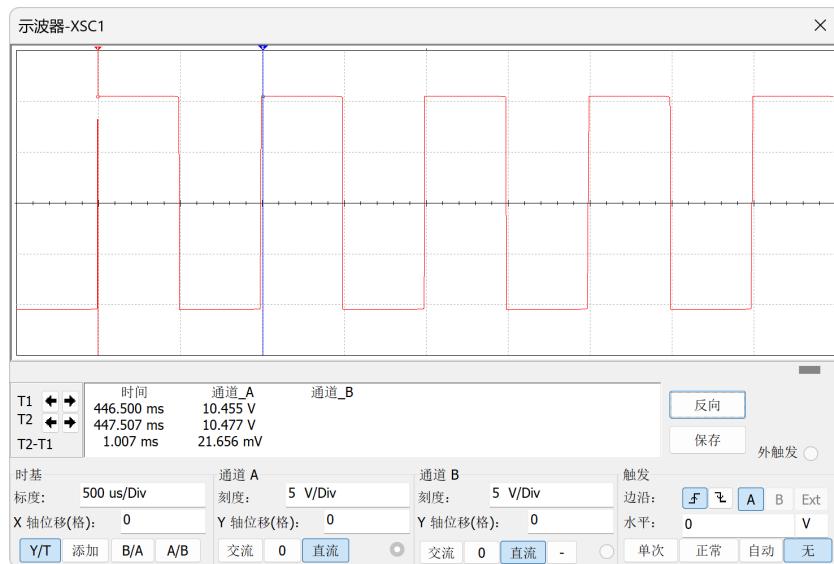


图 11 方波发生器仿真

可以看到频率非常接近  $1.00\text{kHz}$ ，幅值  $V_P = 10.5\text{V}$  接近饱和电压。

### 5.1.2 硬件验证与实现

由于元器件误差存在，实际使用的使频率误差小于 1% 的电阻  $R_1$  值为  $3.67\text{k}\Omega$ ，得到的方波以及最终合成的波形如图 12 所示。可以看到频率非常接近  $1\text{kHz}$ 。而方波的幅值  $V_p \approx 10.9\text{V}$ ，表明实际芯片的运放性能更好。

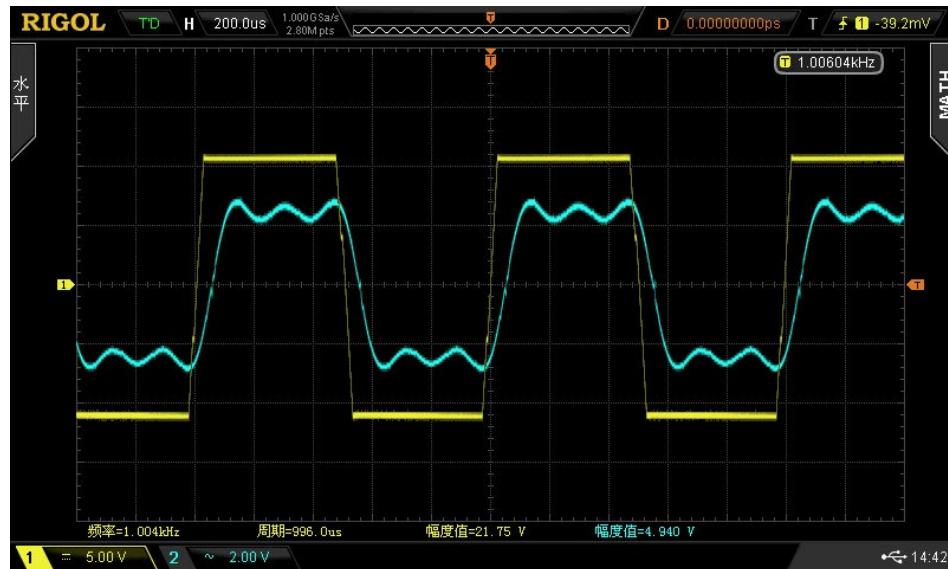


图 12 方波发生器实际波形

对其做傅里叶变换如图 13 所示，发现存在着偶次谐波分量，这是因为波形不理想导致的。主要原因在于跳变点处存在小幅度振荡，这是所采用的方波振荡器自身原因造成的，即存在跳变，故难以优化。



图 13 生成的方波的傅里叶变换

## 5.2 基波 1kHz 的产生

### 5.2.1 仿真设计

该滤波器采用 GIC 型，结合图 6 搭建如图 13 所示电路，电路仿真结果如图 14 所示。

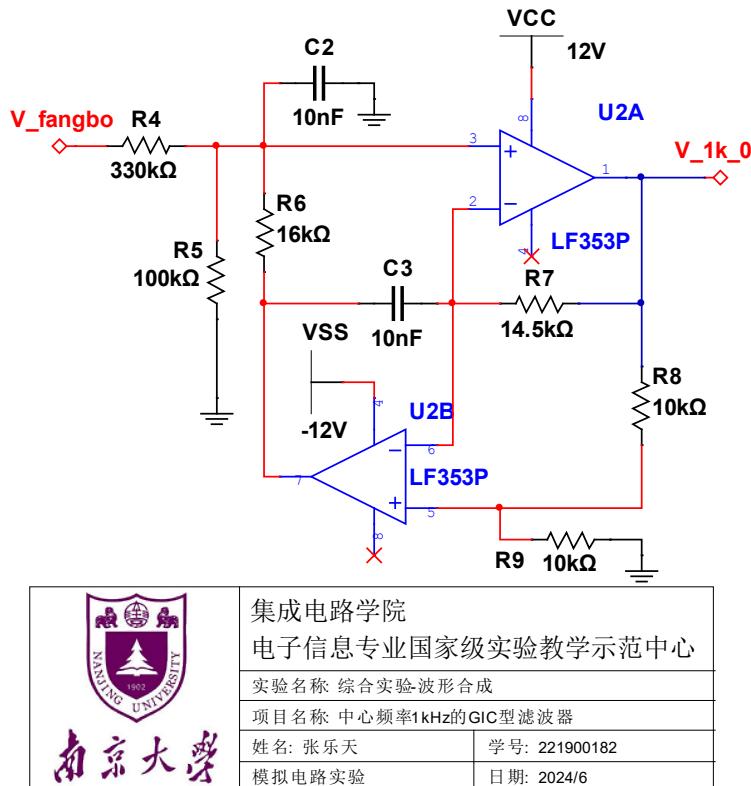


图 14 中心频率 1kHz 的 GIC 型带通滤波器

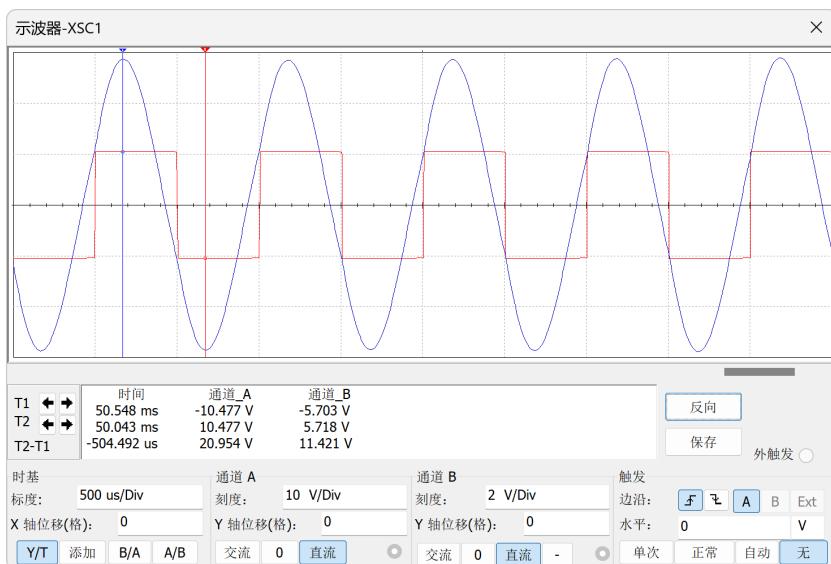


图 15 基波 1kHz 滤波器仿真

基波幅值  $V_p \approx 5.7V$ , 较小, 是因为图 13 电路中, 在  $R_4$  右侧连接了  $R_5 = 100k\Omega$  拉地面。

这样由戴维南等效可知，实际等效为图 6 的  $v_I$  与  $R_1$  分别为  $\frac{10}{43} v_I$  与  $R_4 // R_5 = 76.7\text{k}\Omega$ 。

对仿真得到的基波波形做傅里叶分析，如图 16 所示。可以看到波形较为理想。

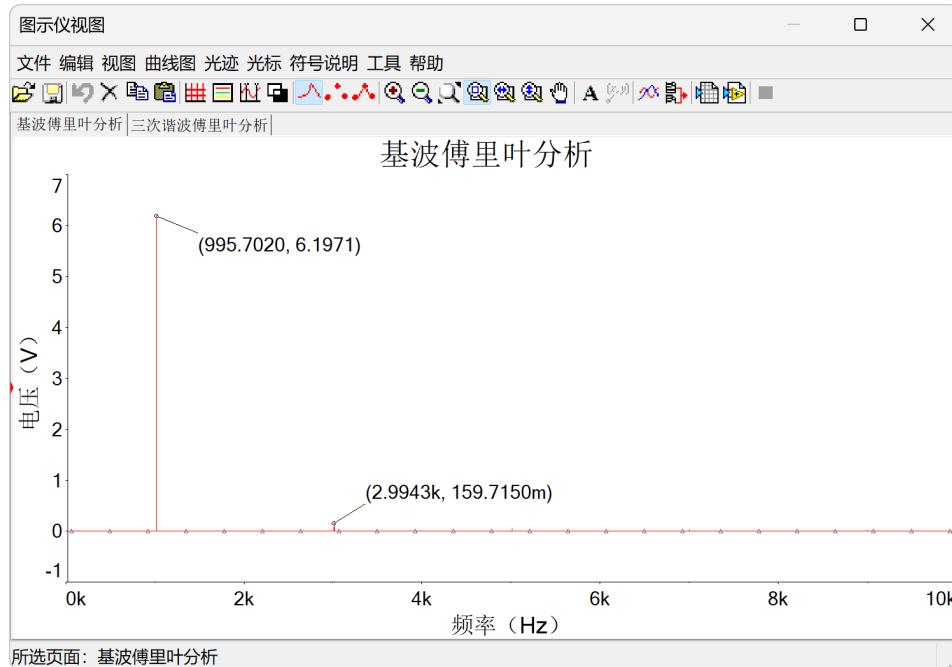


图 16 仿真得到的基波的傅里叶分析

### 5.2.2 硬件验证与实现

根据图 13 搭建电路，仿真得到波形机器傅里叶变换如图 17 所示。

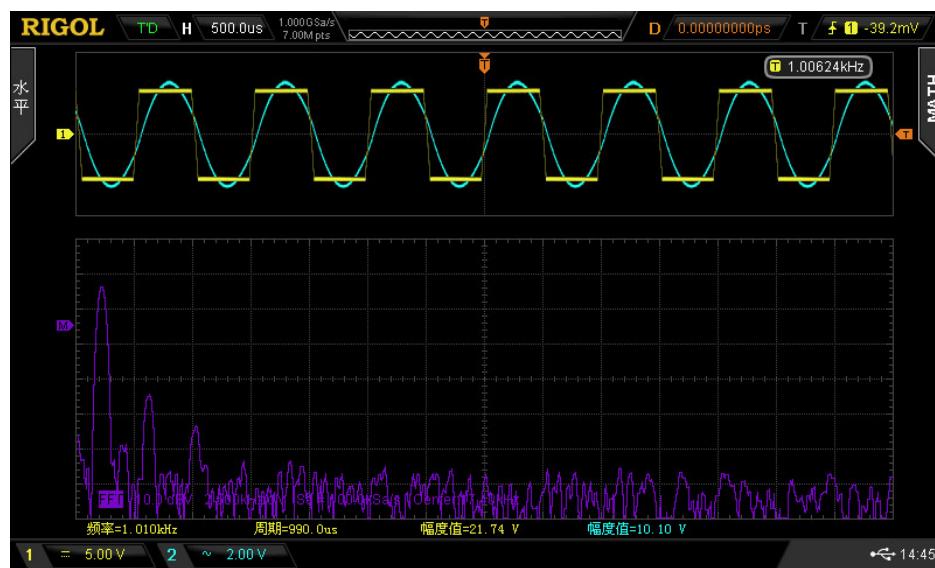


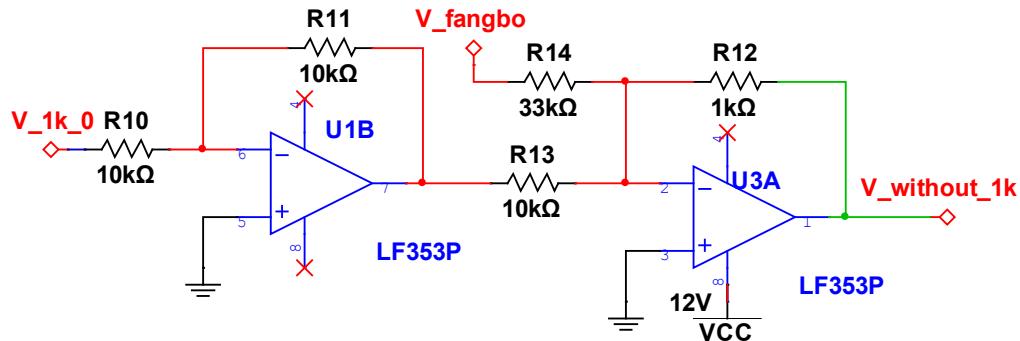
图 17 生成的基波的波形及其傅里叶变换

不难发现实际生成的波形的相位与幅值并不符合预期，与仿真得到的波形也有误差。这是因为实际的滤波器的中心频率由于参数的误差而产生了偏移，幅频特性与预期不符。

此外由于滤波器性能限制，高次谐波分量仍然很明显（以 3kHz、5kHz 最为明显）。

### 5.3 基波的消去

搭建如图 18 所示电路以消去 1kHz 的基波。



	集成电路学院 电子信息专业国家级实验教学示范中心
实验名称: 综合实验-波形合成	
项目名称: 方波中消去1kHz基波	
姓名: 张乐天	学号: 221900182
模拟电路实验	日期: 2024/6

图 18 消去 1kHz 基波

电路中的参数由前级波形幅值以及后级滤波器性能确定，仿真结果如图 19 所示，实际电路波形如图 20 所示。

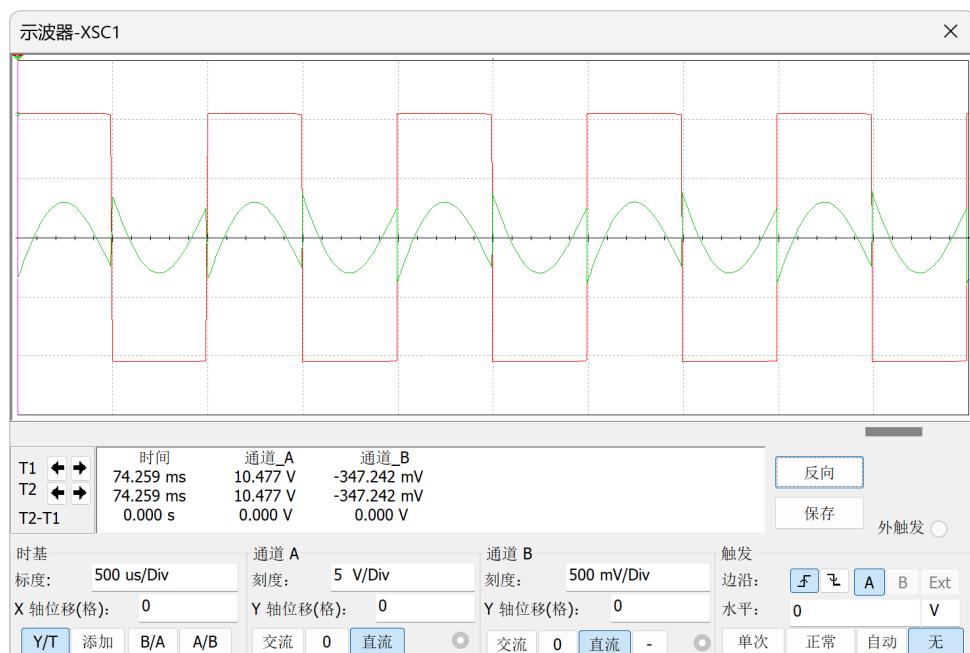


图 19 方波消去基波仿真

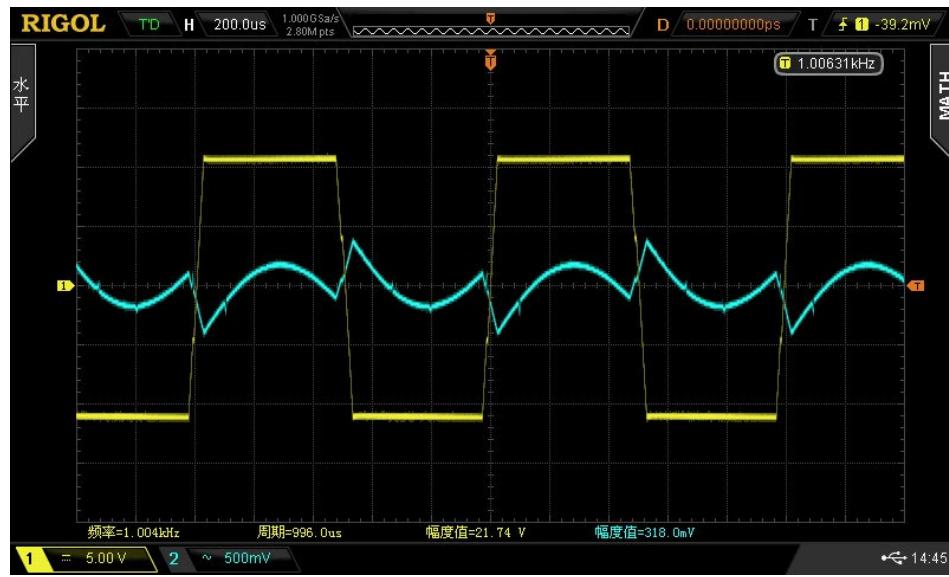


图 20 实际消去基波后的波形

消波并不完全理想，但基波的含量已经大幅度下降，傅里叶变换由图 21 所示。

这里之所以将消波后的幅值调节的较小，是因为下一级所使用的滤波器是品质因数  $Q$  较大的 VSVS 型滤波器，其中心频率处放大倍数较大，为了保证输出不饱和，需要使输入的幅值较小。

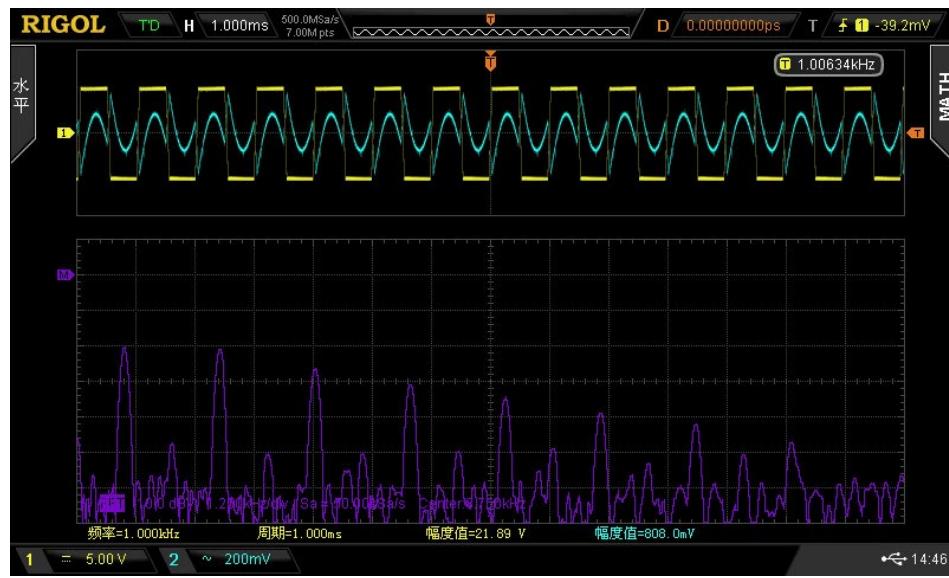
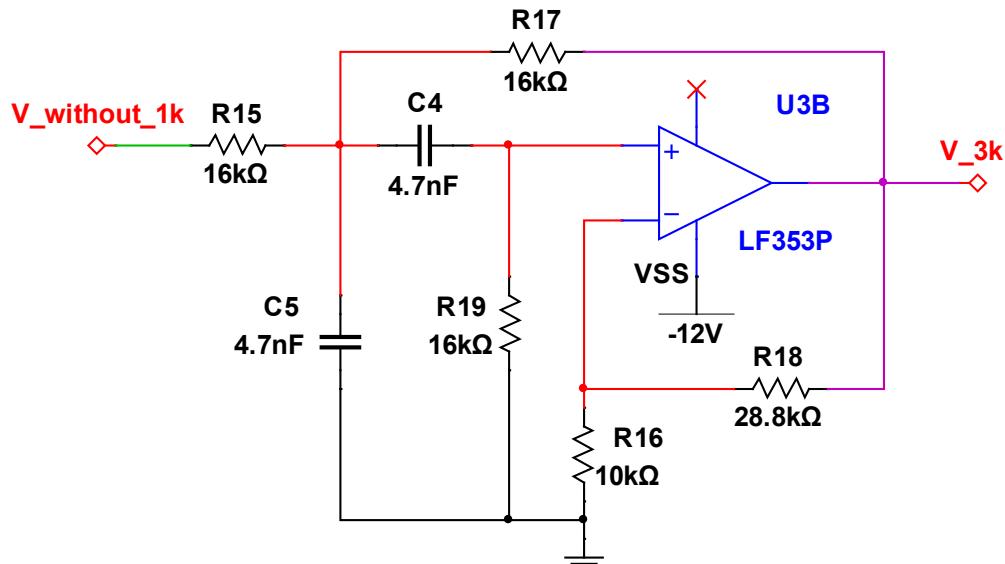


图 21 消波后波形傅里叶变换

## 5.4 三次谐波 3kHz 的产生

### 5.4.1 仿真设计

该滤波器采用 VCVS 型，结合图 5 搭建如图 22 所示电路，电路仿真结果如图 23 所示。



	集成电路学院 电子信息专业国家级实验教学示范中心
实验名称: 综合实验-波形合成	
项目名称: 中心频率3kHz的VCVS型滤波器	
姓名: 张乐天	学号: 221900182
模拟电路实验	日期: 2024/6

图 22 中心频率 3kHz 的 VCVS 型带通滤波器

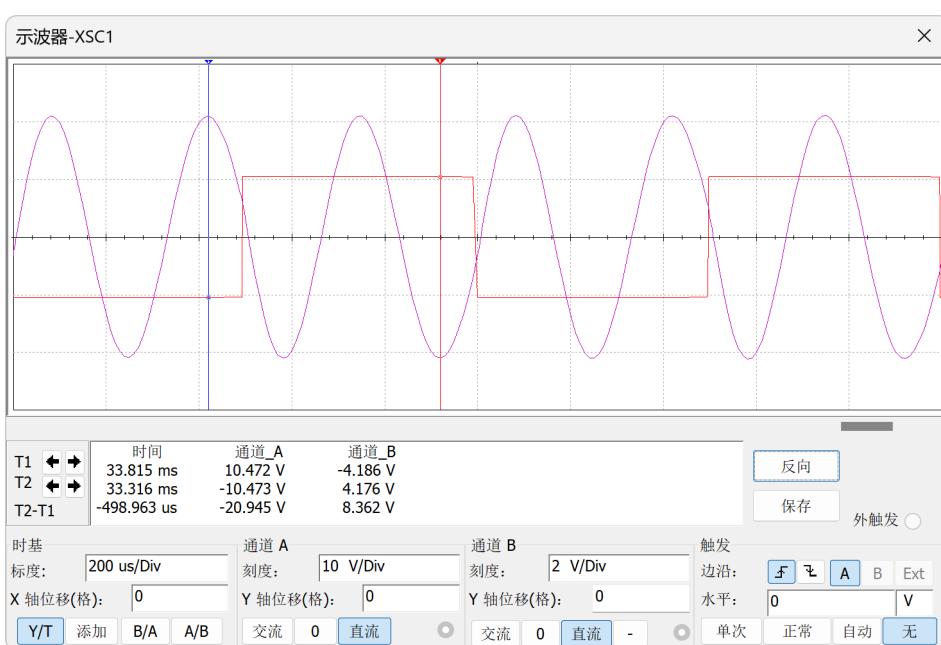


图 23 三次谐波 3kHz 滤波器仿真

仿真得到，滤出的 3kHz 正弦波幅度  $V_P \approx 4.2V$ 。

对仿真得到的波形做傅里叶分析，结果如图 24 所示。可以看到基波的成分已经很小，并且高次谐波也较小。

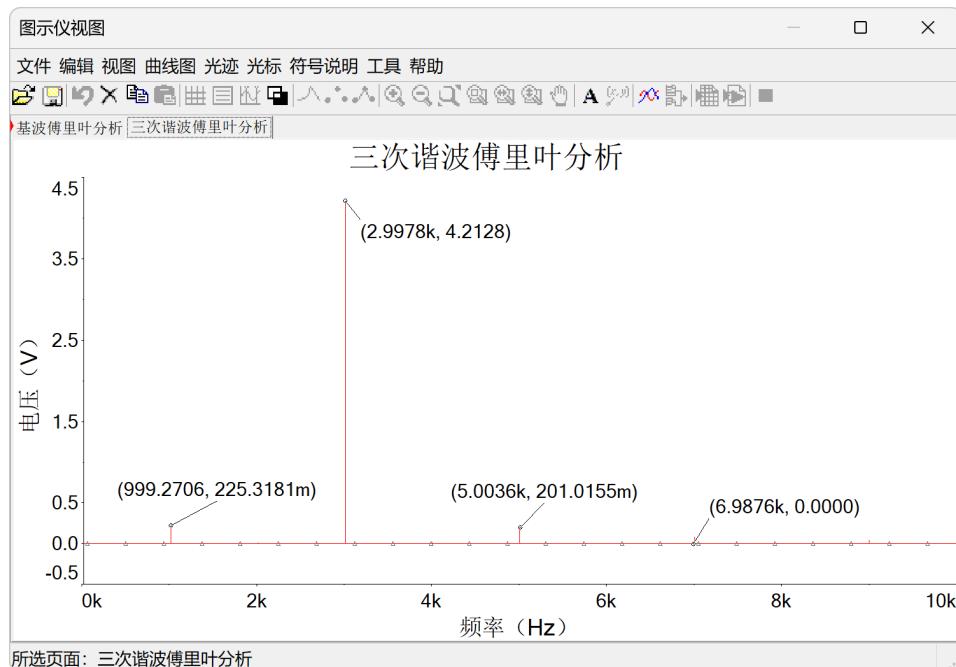


图 24 仿真得到的三次谐波的傅里叶分析

#### 5.4.2 硬件验证与实现

根据图 22 搭建电路，示波器可以观察得到滤出的 3kHz 正弦波形如图 23 所示。

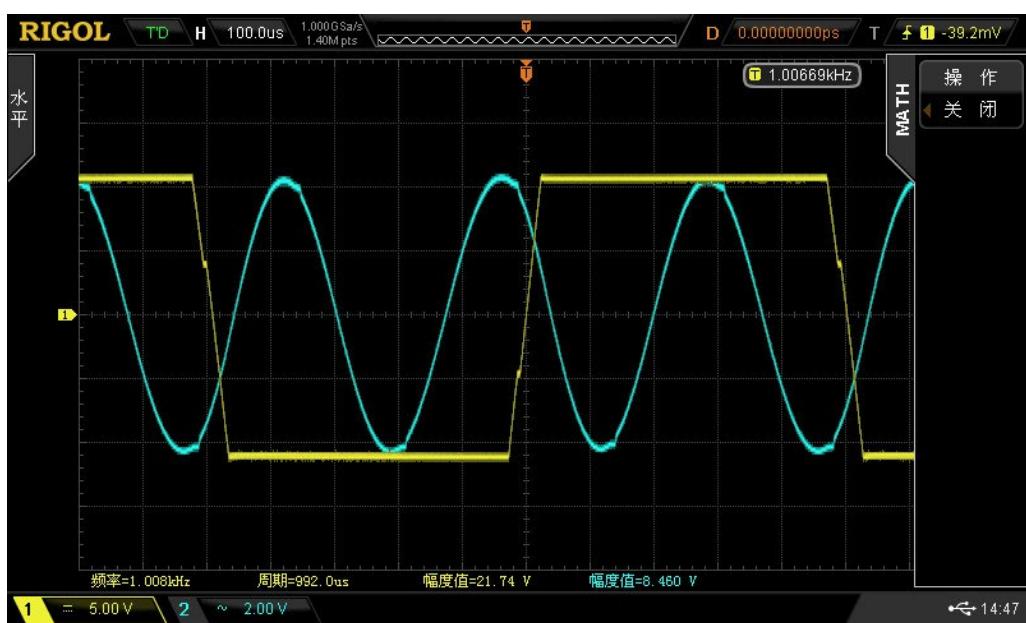


图 25 生成的三次谐波波形

图 25 与图 23 相对比可以得到, 实际电路所滤出的三次谐波的幅值与仿真得到结果基本一致, 即  $V_p \approx 4.2V$ 。此外, 观察三次谐波与初始波形的相位可以得到, 与实际的波形存在误差, 但并不明显。

波形的傅里叶变换如图 26 所示。明显看出存在着基波与五次、七次、九次谐波的极小分量, 但波形是稳定的。

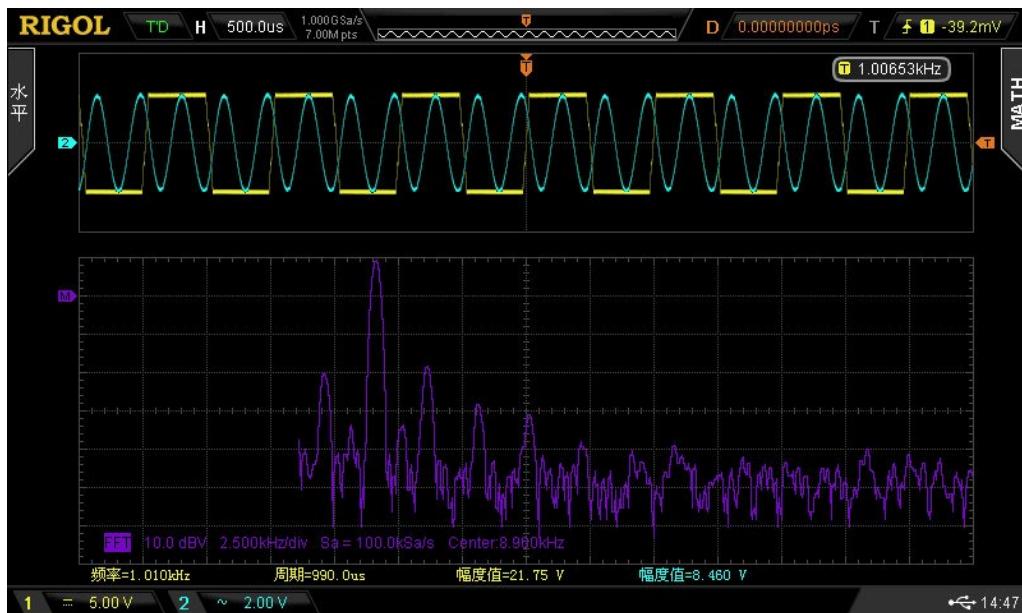


图 26 三次谐波的傅里叶变换

## 5.4 五次谐波 5kHz 的产生

由于五次谐波的相邻分量, 即三次与七次的分量, 在频域上相邻极近, 因此二阶滤波器性能达不到所需求。这里使用四阶滤波器, 第一级采用 GIC 型, 第二级采用 VCVS 型。同样, 这里仍是使用消去基波后的波形来滤波。

### 5.4.1 仿真设计

搭建如图 27 所示级联滤波器电路, 电路仿真结果如图 28 所示。

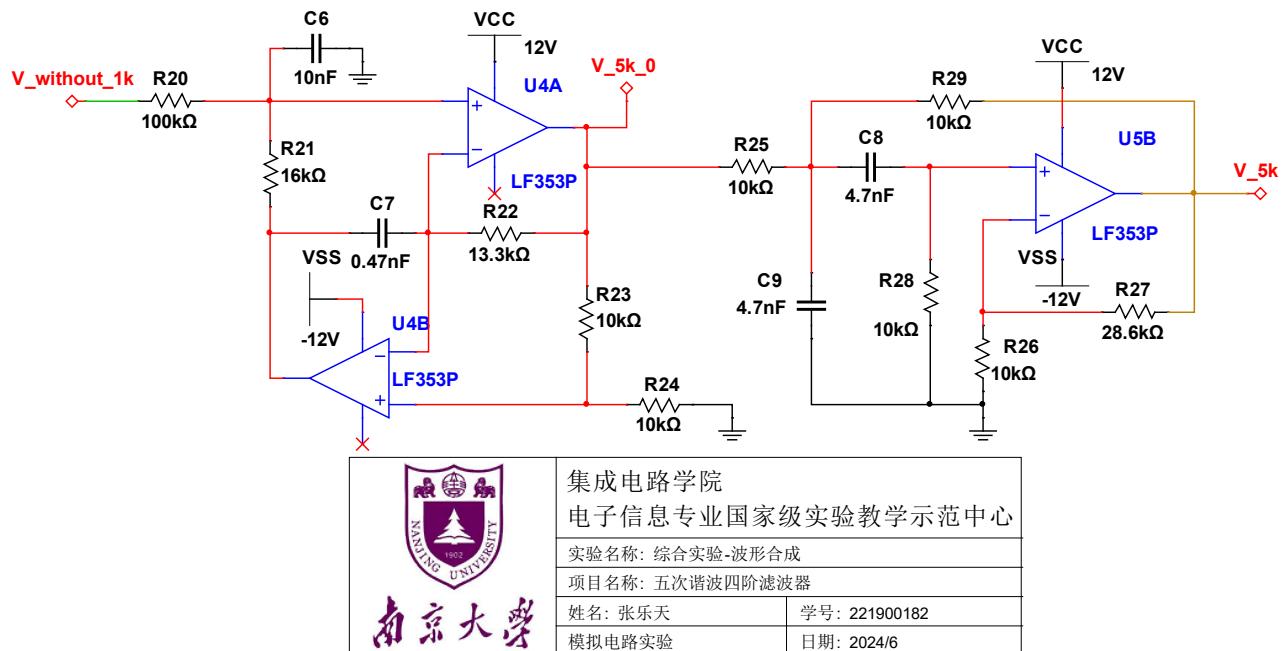


图 27 五次谐波四阶带通滤波器

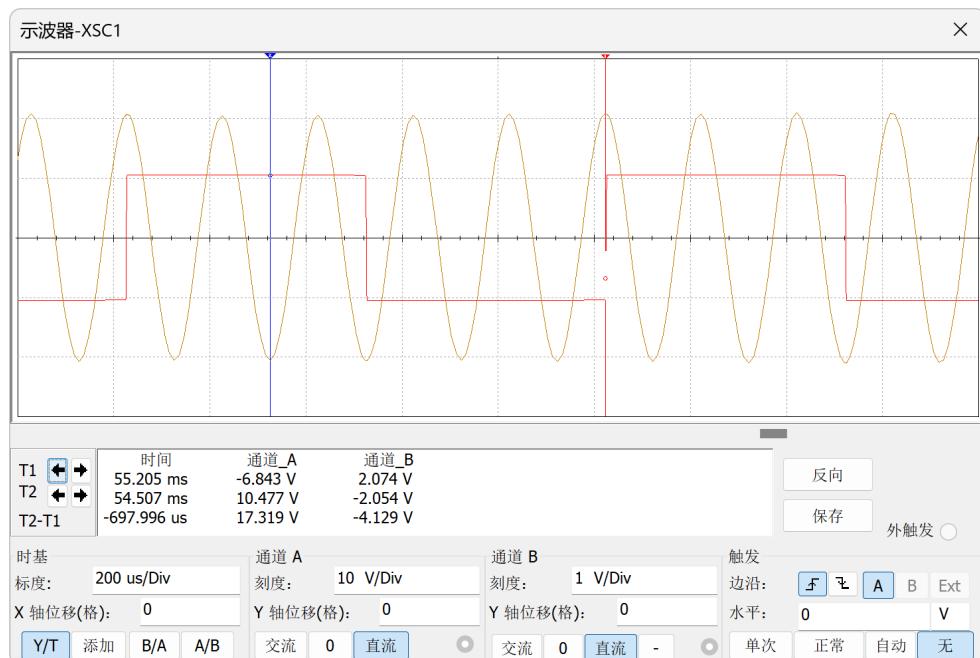


图 28 五次谐波 5kHz 滤波器仿真

仿真得到, 滤出的 5kHz 正弦波幅度  $V_P \approx 2V$ 。

对仿真得到的波形做傅里叶分析, 结果如图 29 所示。可以看到五次谐波的成分占比极高, 高次谐波与低次谐波几乎可以忽略不计。

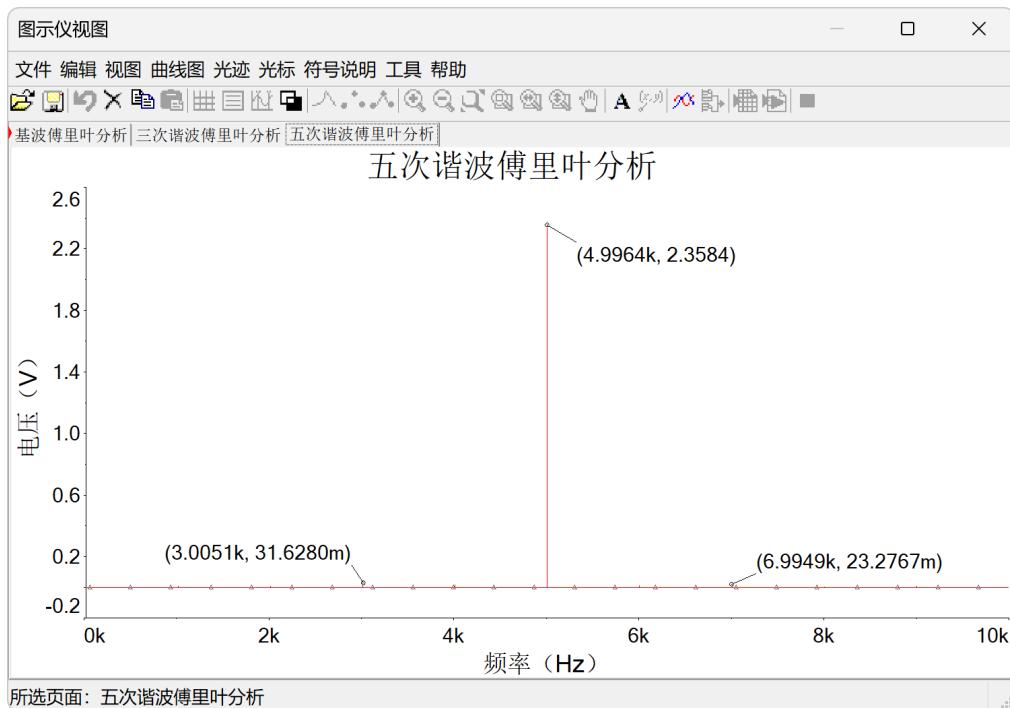


图 29 仿真得到的三次谐波的傅里叶分析

#### 5.4.2 硬件验证与实现

根据图 22 搭建电路，实际取  $R_{27} = 29.3\text{k}\Omega$ 。利用示波器可以观察得到滤出的 3kHz 正弦波形如图 30 所示。

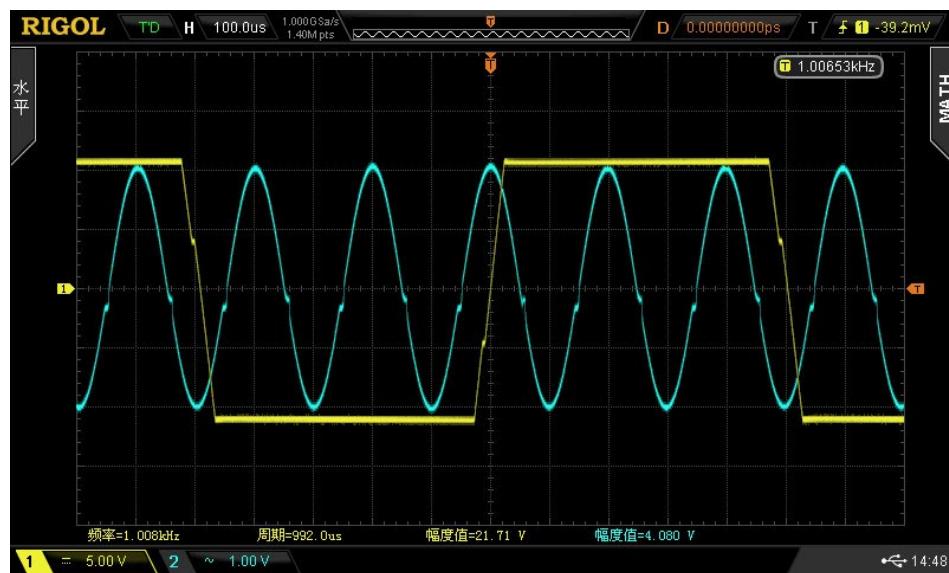


图 30 生成的五次谐波波形

图 30 与图 28 相对比可以得到，实际电路所滤出的五次谐波的幅值与仿真得到结果基本一致，即  $V_p \approx 2\text{V}$ 。此外，观察五次谐波相位可以得到，与仿真得到的波形十分吻合，几乎不

存在误差。

波形的傅里叶变换如图 31 所示。明显看出五次谐波含量非常明显，且波形是稳定的。其中，由于在跳变点处存在不理想情况，使得存在很小的高次谐波分量。

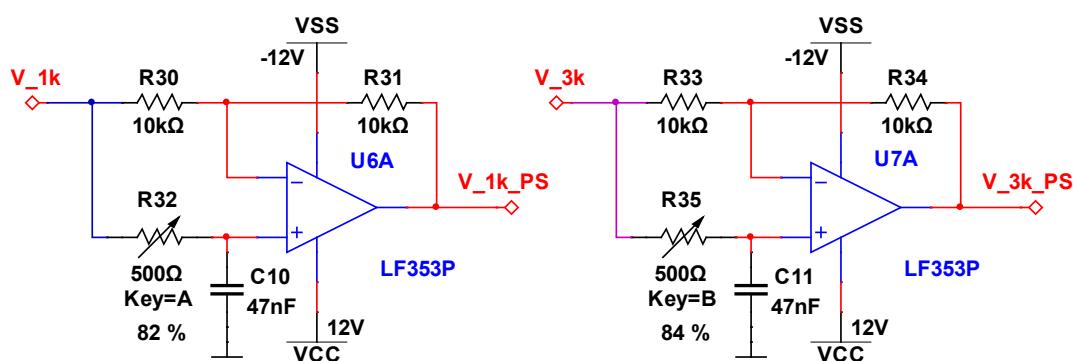


图 31 五次谐波的傅里叶变换

## 5.4 波形的合成

### 5.4.1 仿真设计

首先搭建如图 32 所示的移相电路。



	集成电路学院 电子信息专业国家级实验教学示范中心
实验名称: 综合实验-波形合成	
项目名称: 移相器	
姓名: 张乐天	学号: 221900182
模拟电路实验	日期: 2024/6

图 32 移相电路

根据幅值关系，采用如下求和电路。

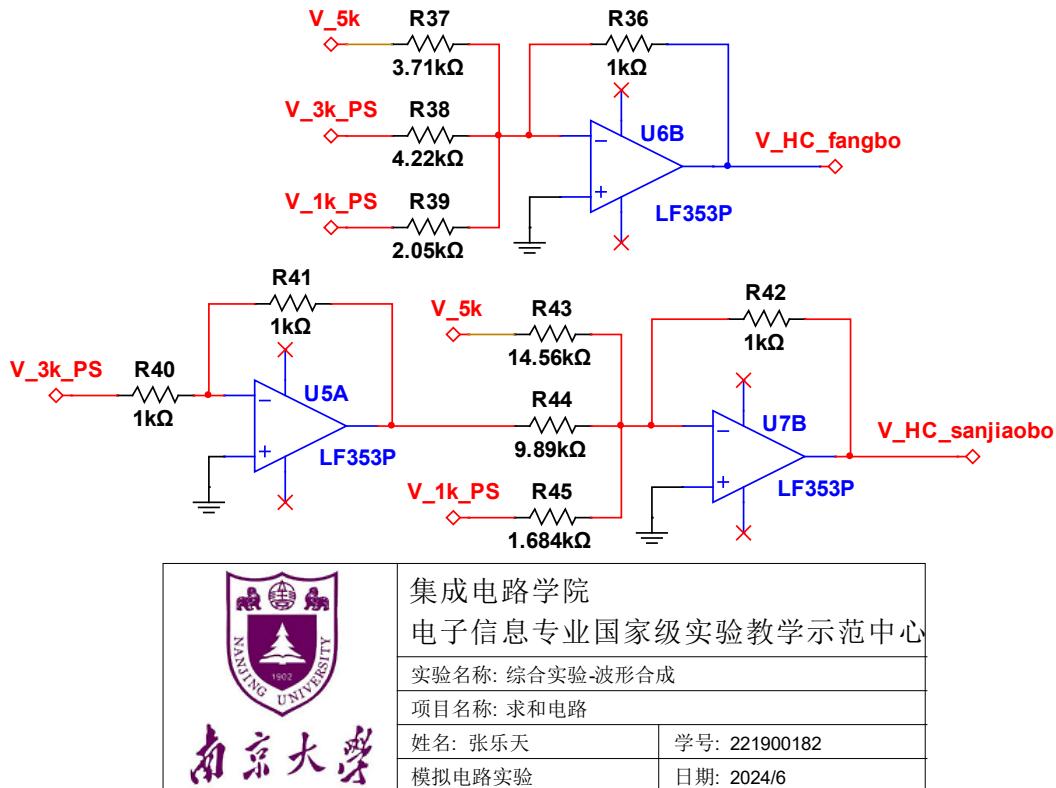


图 33 求和电路

仿真可以得到波形如图 34 所示。

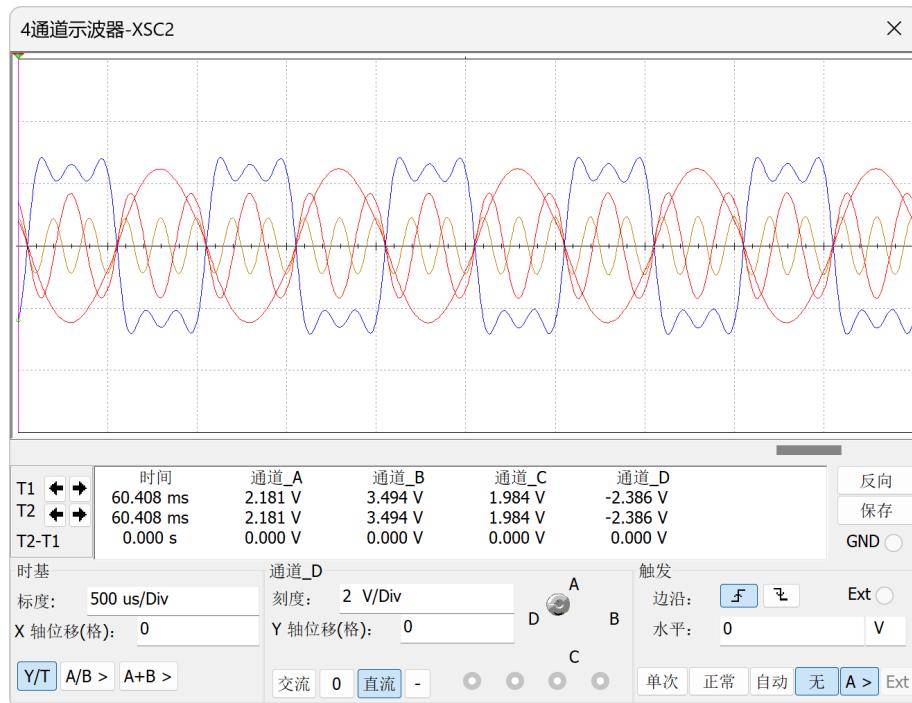


图 34 仿真波形——方波

合成波形（蓝色）与预期符合良好，其傅里叶分析如图 35 所示。

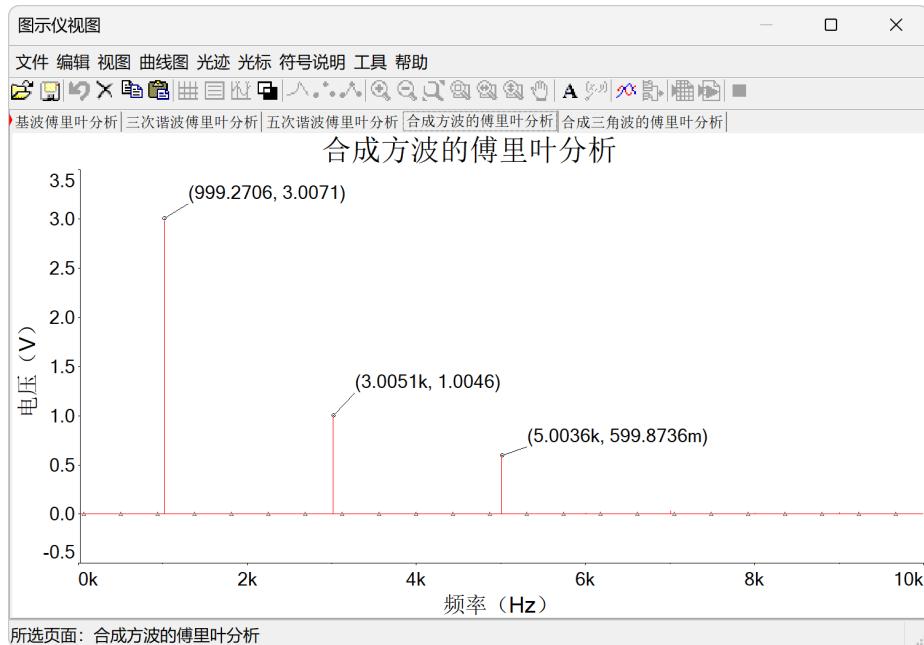


图 35 仿真合成方波的傅里叶分析

图 35 可以看出，所合成方波的基波、三次谐波、五次谐波三个分量符合 $1:\frac{1}{3}:\frac{1}{5}$ 的数量关系，且基波的幅值 $V_p = 3V$ 。

对于三角波的合成类似，结合式 (4.1.5) 可以知道需要将三次谐波 3kHz 正弦波反相，其波形与合成的方波一同见图 36，傅里叶分析如图 37 所示。

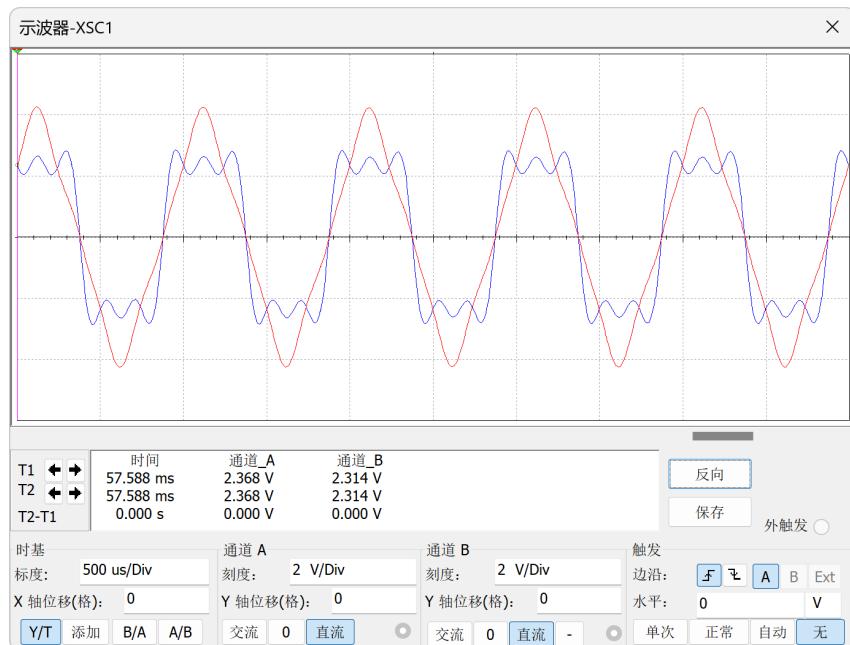


图 36 合成得到的波形

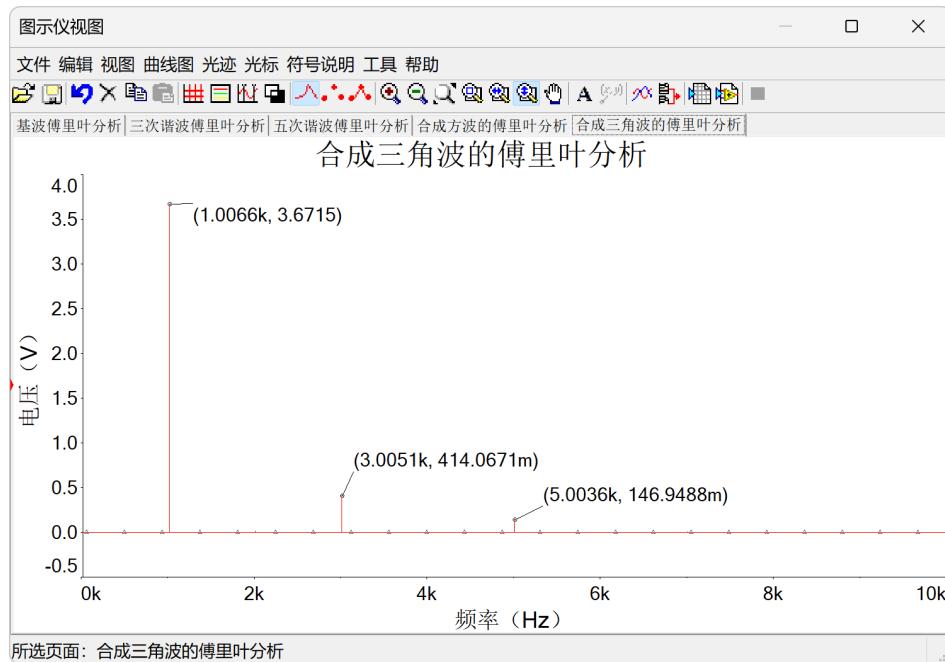


图 37 仿真合成三角波的傅里叶分析

#### 5.4.2 硬件验证与实现

实际电路中,  $R_{32}$ 、 $R_{35}$ 、 $R_{37}$ 、 $R_{38}$ 、 $R_{39}$ 、 $R_{43}$ 、 $R_{44}$ 、 $R_{45}$  均使用了滑动变阻器, 并且阻值与仿真不同。实际上, 在搭建电路时, 并未做任何仿真, 全程通过计算与实践得到。最终取值分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{32} < 78\Omega \\ R_{35} = 88\Omega \\ R_{37} = 3.86k\Omega \\ R_{38} = 4.44k\Omega \\ R_{39} = 1.63k\Omega \\ R_{43} = 13.86k\Omega \\ R_{44} = 14.10k\Omega \\ R_{45} = 1.684k\Omega \end{array} \right.$$

最终合成得到的方波如图 38 所示, 傅里叶变换如图 39 所示。

从傅里叶变换的频谱可以得知, 基波、三次谐波以及五次谐波的量值符合要求, 且本底噪声较小。

最终合成的三角波与方波一同如图 40 所示, 傅里叶变换如图 41 所示。发现傅里叶变换并不理想, 五次谐波含量偏高, 这可能是五次谐波幅值调节的问题。事实上, 由于五次谐波比例仅为基波的  $1/25$ , 由于基波幅值这里选取的较小, 对于五次谐波的幅值的调节已经达到示波器性能的极限。但可以看出波形整体是良好的。

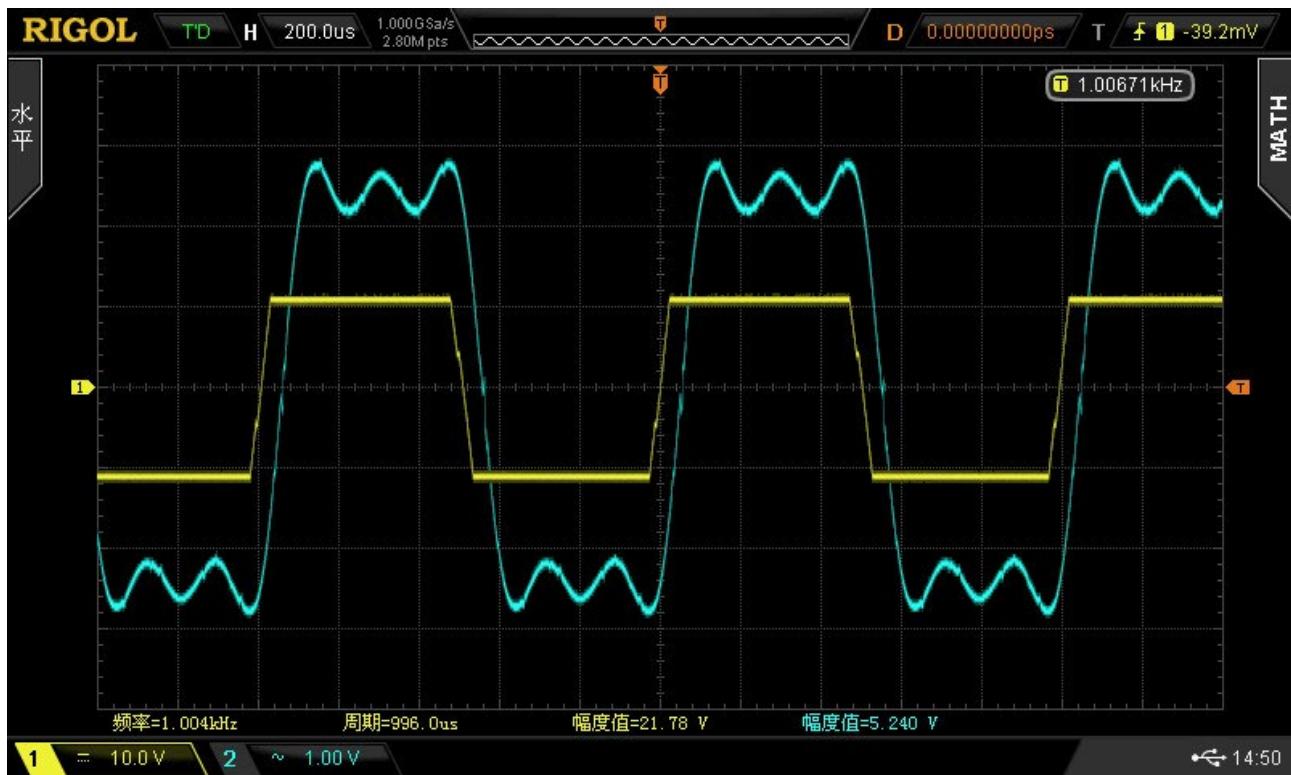


图 38 合成的方波

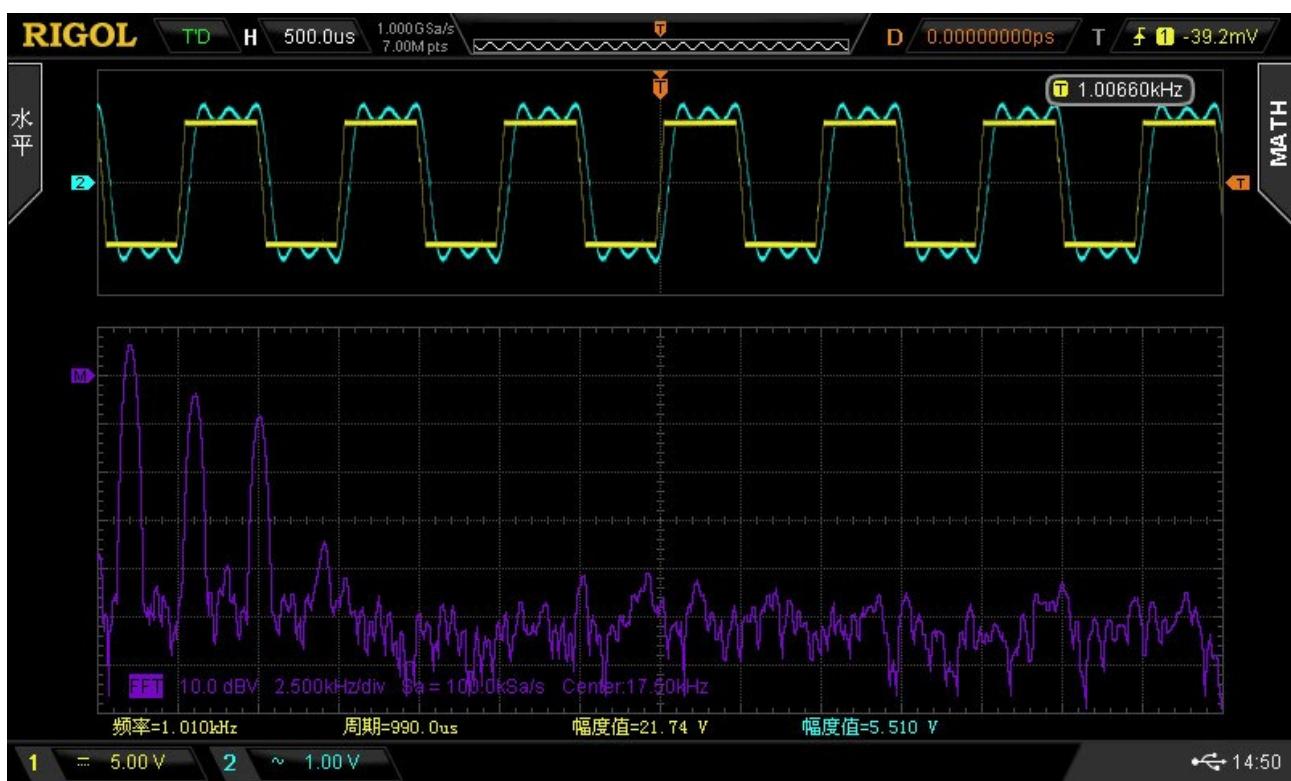


图 39 合成方波的傅里叶变换

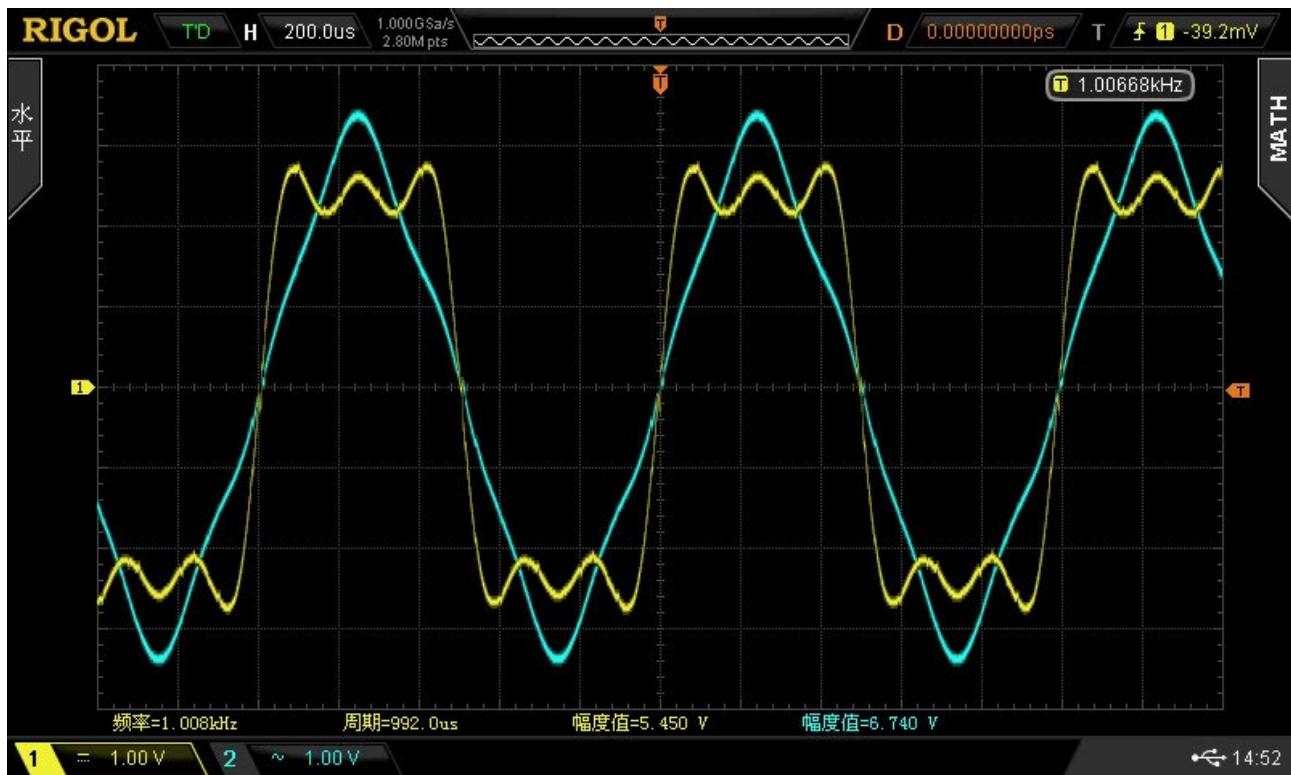


图 40 合成得到的波形

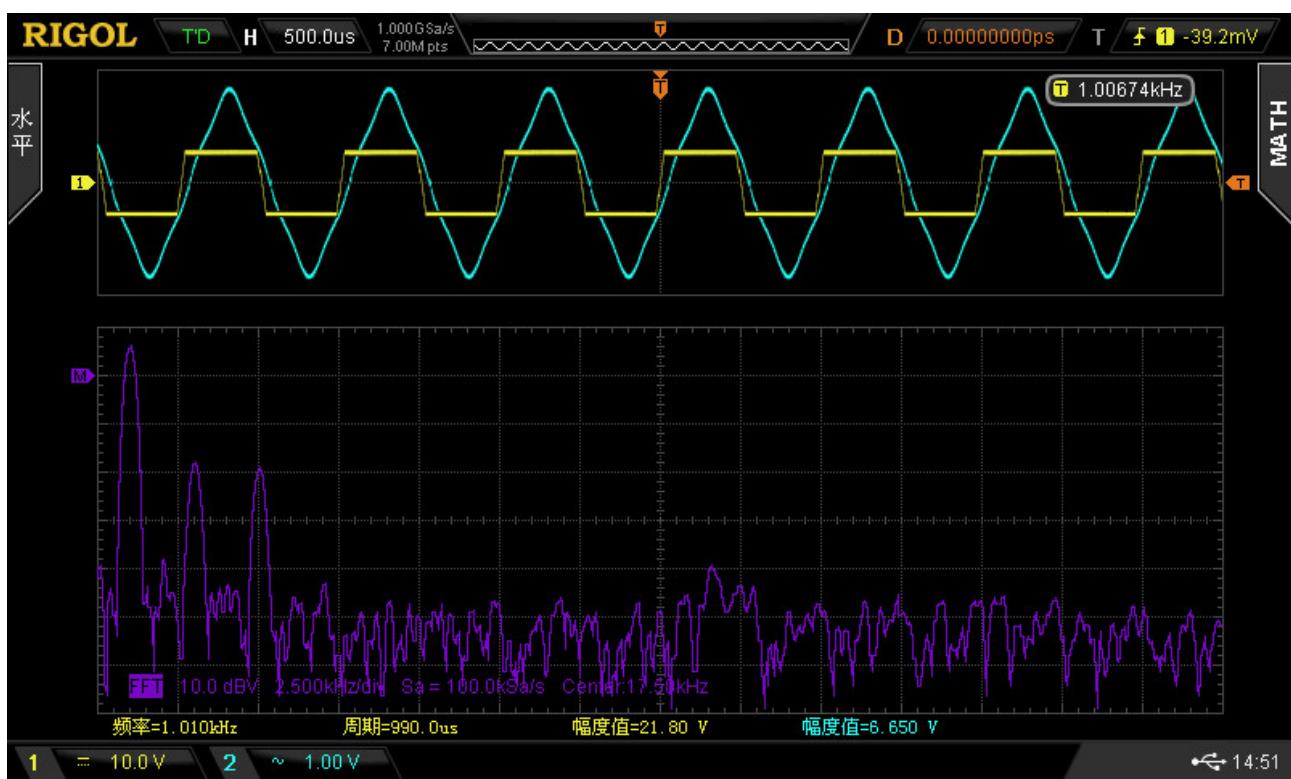
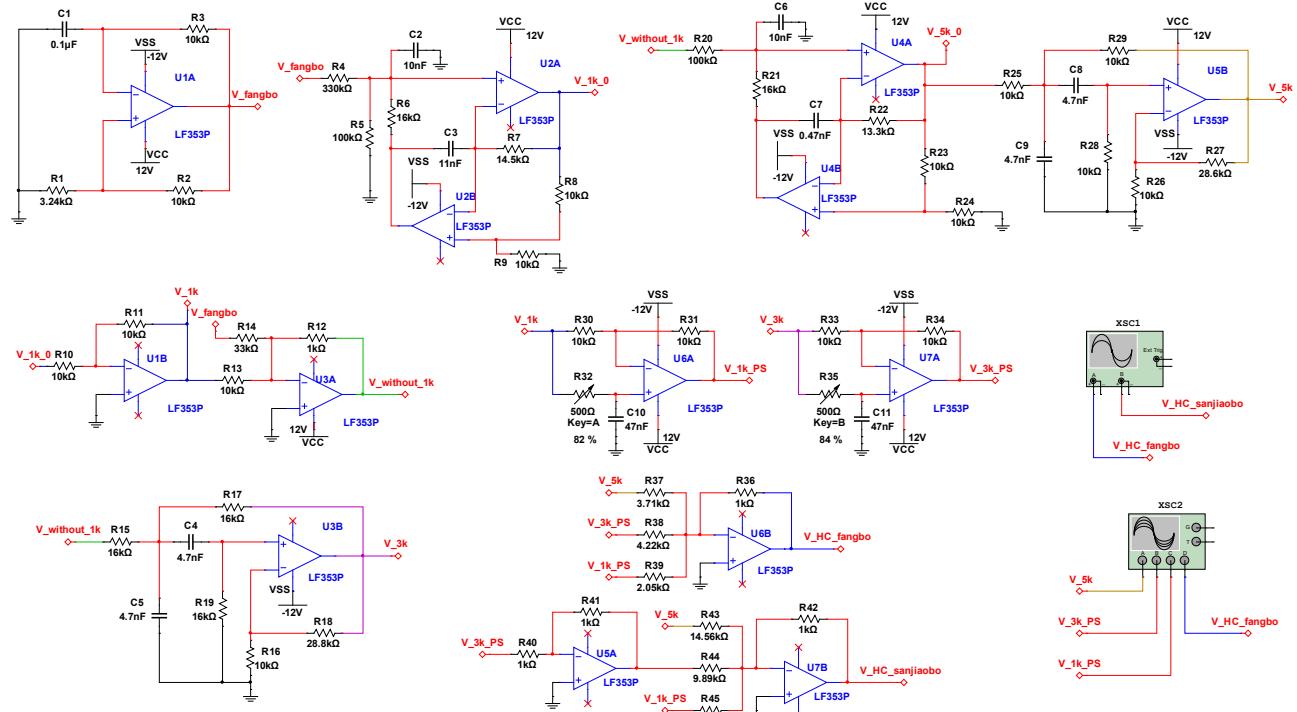


图 41 合成三角波的傅里叶变换

## 5.5 整体电路

### 5.5.1 仿真电路

为了方便，这里使用了在页连接器，整体电路如图 42 所示（矢量图）。



 <b>南京大学</b>	<b>集成电路学院</b> <b>电子信息专业国家级实验教学示范中心</b>			
实验名称: 综合实验-波形合成				
项目名称: 整体电路图				
姓名: 张乐天	学号: 221900182			
模拟电路实验	日期: 2024/6			

图 42 全部电路图

### 5.5.2 硬件电路

硬件电路中，尽可能实现了参数的确定，以减少滑动变阻器的使用。具体电路板如所示。

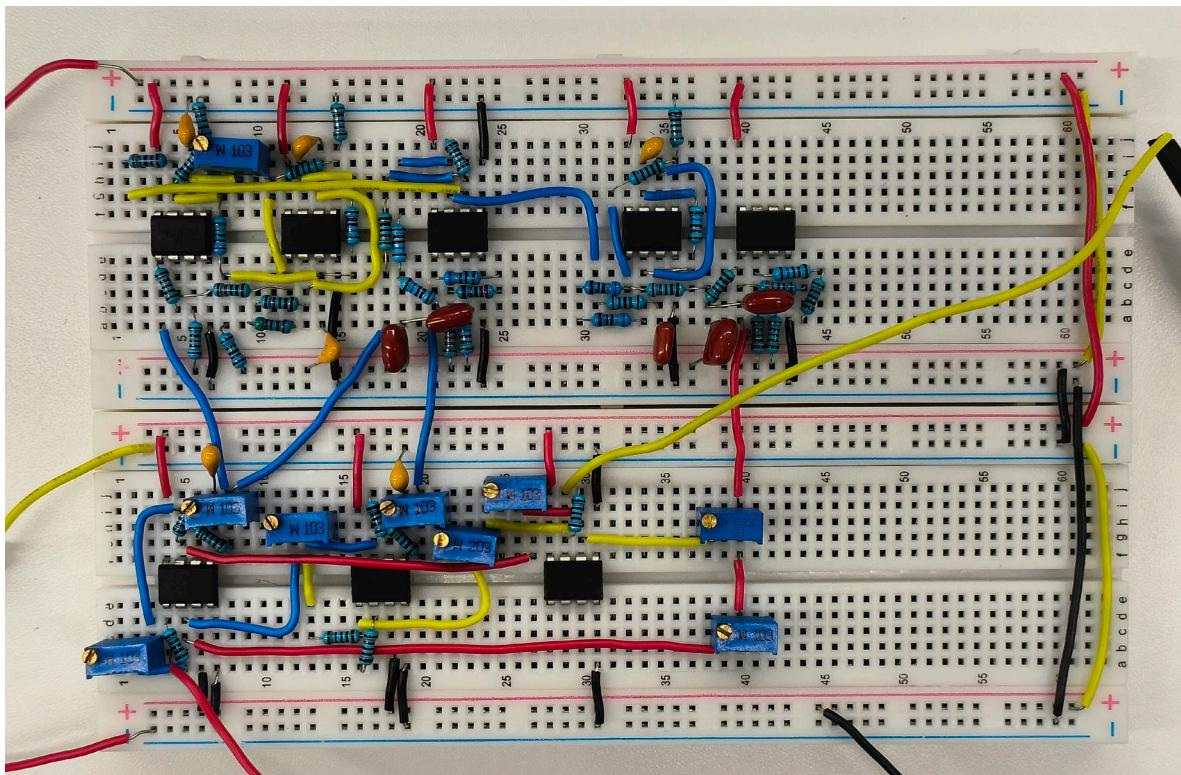


图 43 硬件电路

为了方便，各部分功能描述如下。

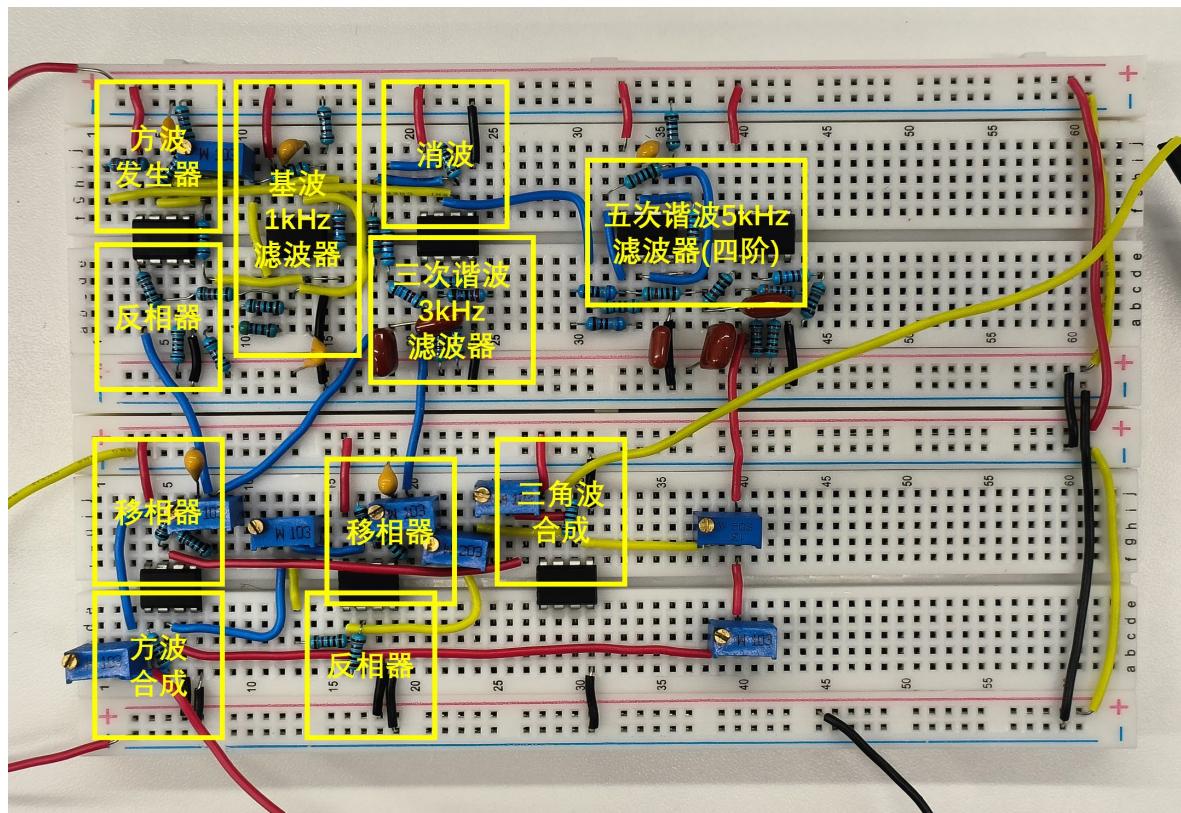


图 44 硬件电路各部分描述

## 致谢

终于完成了最后一个实验，想想半个学期，八九周的实验课，似乎也真的没有很多人帮忙，全是自己一路走来。或许跟谁同桌都一样吧，简单地验证一些想法，验证一下测量参数。

模拟电子技术是琐碎而富有魅力的一个领域。为了学习理论、完成实验，除了上课听讲，也查阅了很多资料，了解了很多实际设计场景的一些思路。

感谢老师、同学、助教，亦感谢一路走来的我吧。

是日放晴，天朗气清，重游母校，潸然回想，愿前路仍被照亮。

## 参考文献

- [1] 康华光, 张林. 电子技术基础: 模拟部分 [M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2021: 302–322.
- [2] Ananda Mohan, P. V. New Generalized Impedance Converter (GIC)-Based Two-Opamp Active RC Biquads. [J] Circuits Syst Signal Process, 2024, 43: 1366–1390.