

# 2024 年 TI 杯模拟电子线路设计赛暨电赛校赛

## 设计报告

### (A 题\_波形的产生分解与合成)

#### 小组成员

姓名	学号
张旭东	22009101561
李宇扬	22009101587
徐子博	22009102072

#### 摘要

利用 NE555 芯片和 NE5532 运放芯片作为主要元件，我们设计并制作了一款波形的产生、分解和合成装置。该装置包括方波产生模块、滤波模块用于输出谐波、信号调理模块、谐波合成模块以及积分电路生成三角波。NE555 芯片被用于产生方波，经过滤波器产生基波频率为 1561Hz 的一次、三次和五次谐波。各次谐波的频率稳定，经过移相器调理后，通过加法器合成类方波，最后通过积分电路将方波转换为三角波。该装置在生成、分解和合成规定波形时，频率误差和失真度较小，频率误差在  $\pm 5\text{Hz}$  以内。除了需要单电源供电和单片机部分外，该装置完成了基础和发挥部分的全部功能，在仿真软件中运行时圆满达到了预期。

**关键词：**方波生成，ButterWorth 滤波，DABP 滤波，移相电路，相加器合成类方波

**仓库地址：**[https://github.com/canxin121/NI\\_Design\\_2024\\_A](https://github.com/canxin121/NI_Design_2024_A)

# 一、系统方案论证

本方案由方波产生模块、滤波模块输出谐波、信号调理模块、谐波合成模块、积分电路生成三角波五部分组成，以下对个重要功能模块进行论证。

## 1.1 各次谐波产生方法的论证与选择

信合的分解与合成关键在于符合频率要求的各次谐波的产生。

方案一：振荡电路生成法。使用文氏桥振荡电路方法直接生成不同频率的正弦波形，虽然这种电路的稳定性好，输出波形优良，但是其自身无法产生很高的频率，且容易受到环境因素的影响。

方案二：方波滤波法。本方案中 NE555 芯片产生方波，再由预生成的方波设计滤波器滤出其中的一次、三次、五次谐波。相较方案一，其优点为产生的各次谐波频率较为稳定，且可以更高效的提取出所需的频率，以便于后续进行方波的合成。

综上所述，方案二显著优于方案一，故本设计采用方案二。

## 1.2 各次谐波滤波模块的论证与选择

方案一： ButterWorth 低通滤波器，优点为该种滤波器通频带内的频率响应最大限度平坦，没有漣波，阻频带内的振幅逐渐下降至零。

方案二： DABP 有源带通滤波器，优点为其元件扩散度低，品质因子和谐振频率可以在一定程度上独立调节。

综上所述，进行一次，选用 ButterWorth 低通滤波器。进行三次，五次谐波滤波时，选用 DABP 有源带通滤波器。

## 1.3 系统总体框图

基于上述各模块方案论证，系统总体方案如图 1 所示。

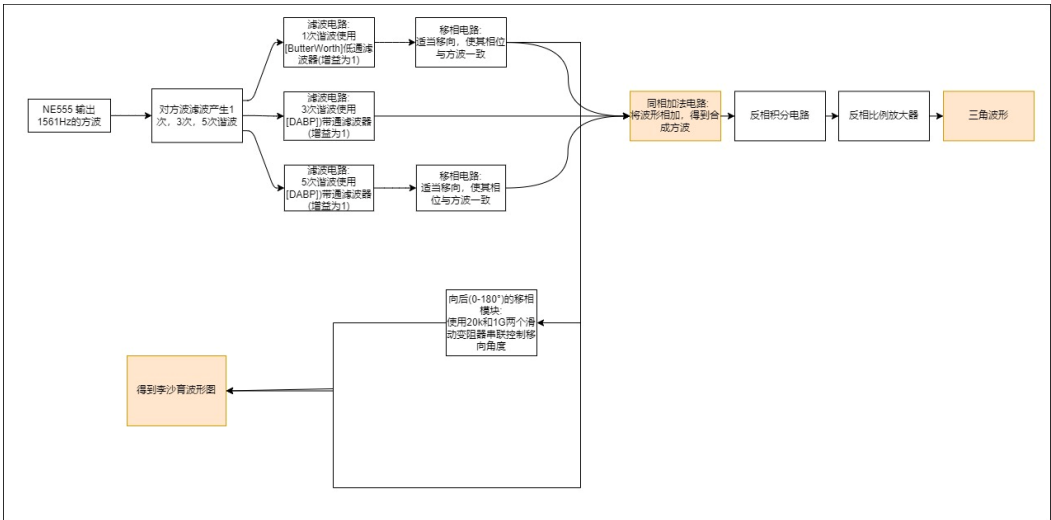


图 1 系统总体框图

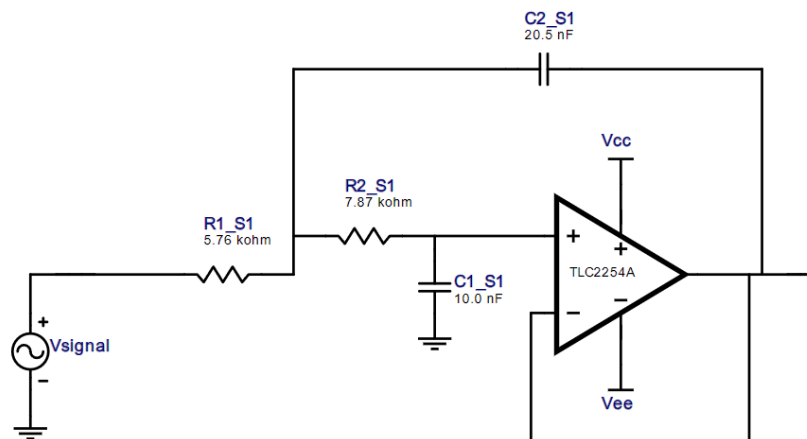
## 二、系统理论分析与计算

### 1.1 方波产生模块

用 NE555 芯片产生方波，NE555 的 2、6 脚相连，会组成施密特触发电路，然后  $V_o$  经过 RC 积分电路接回输入端，这样构成多谐振荡器，振荡频率在 1-10K 可调。NE555 的 4 脚和 8 脚是它的两个电源引脚，分别用于输入正电源（Vcc）和负电源（GND）。具体来说：4 脚（Vcc）：连接正电源，一般连接到稳压电源或电池的正极 8 脚（GND）：连接负电源，一般连接到稳压电源或电池的负极。当 4 脚和 8 脚短接后接入稳压电源时，可以保证 NE555 的电源稳定，从而保证它的工作稳定和可靠。

### 1.2 滤波电路模块

#### 1 ButterWorth 低通滤波电路



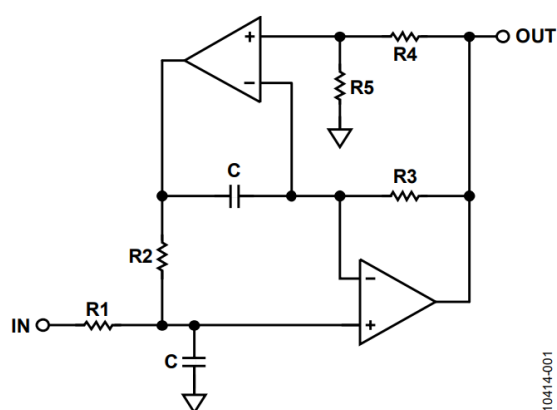
该电路借助 [Ti-FilterDesignTool](#) 设计完成，其参数如下

#### Design Inputs

#	Name	Value	Description
1.	FilterType	lowpass	
2.	FilterResponse	Butterworth	
3.	FilterOrder	2.0	
4.	FilterTopology	Sallen-Key	
5.	NumberOfStages	1.0	
6.	PassbandFrequency	1.661 k	
7.	StopbandAttenuation	-40.001	
8.	StopbandFrequency	16.61 k	
9.	Gain	1.0	
10.	DualSupply	+/-5.00 V	Power supply(s) to active chips
11.	ResistorTolerance	E96	Resistor series - 1% Passive resistor tolerance
12.	CapacitorTolerance	E48	Capacitor series - 2% Passive capacitor tolerance

### 2 DABP 滤波电路

DABP 与单运放窄带通相比，稳定性更强，设计更为容易，使用更为广泛，但是其峰值增益是固定的 2 倍。须在滤波后加入放大器调理幅值。



对于此电路，其参数计算公式如下：

其增益：

$$A_m=2$$

品质因数：

$$Q = \frac{R_1}{\sqrt{R_2 R_3}}$$

可以看出， $R_2$  和  $R_3$  的地位完全相同，因此可以在电路中取等值  $R$ 。此时对中心频率有：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad R = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

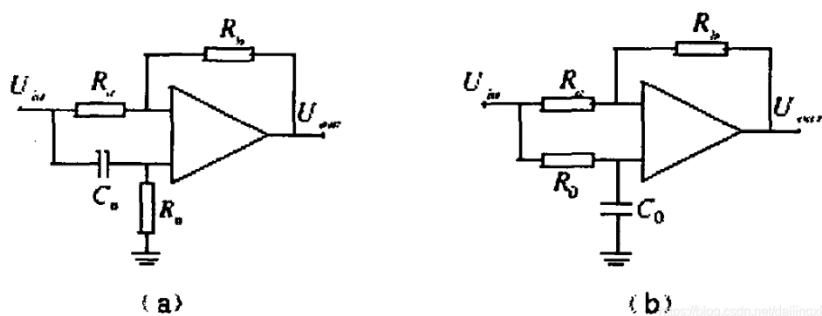
对品质因数有：

$$Q = \frac{R_1}{\sqrt{R_2 R_3}}$$

$$R_1 = QR$$

### 1.3 相位调理模块

利用运算放大器进行移相。



a 电路可以实现相位前移的功能，b 电路的功能则是使相位后移。

具体角度公式如下：

$$\phi = \text{tg}^{-1} \frac{-2\omega R_0 C_0}{1 - \omega^2 R_0^2 C_0^2}$$

该移相电路可以实现  $0-180^\circ$  移相。由图中可得当  $\omega^2 R_0^2 C_0^2$  项大于 1 时服从规律：电容不变，电

阻越大，移相角度越小。反之当该项小于 1 时服从规律：电容不变，电阻越小，移向角度越小。

### 三、电路与程序设计

#### 1.1 电路设计

##### 1 方波发生电路

用 NE555 芯片产生方波，将 NE555 的 2、6 脚相连，组成施密特触发电路， $V_o$  经过 RC 积分电路接回输入端，构成多谐振荡器，振荡频率在 1-10K 可调。NE555 的 4 脚和 8 脚是它的两个电源引脚，分别用于输入正电源（Vcc）和负电源（GND）。

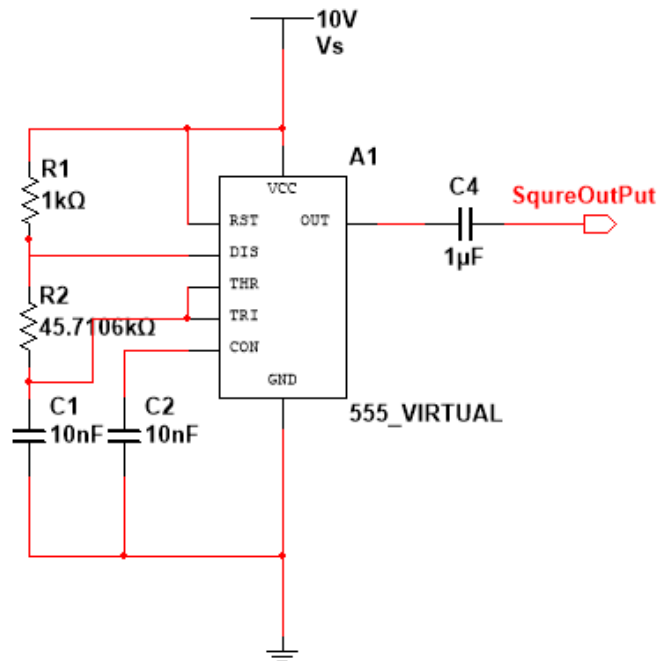


图 2 方波发生电路

##### 2 滤波电路

对生成的方波进行滤波，得到基波频率为 1561Hz 的一次谐波，三次谐波，和五次谐波。其中对于一次谐波使用 ButterWorth 低通滤波电路，增益为 1。

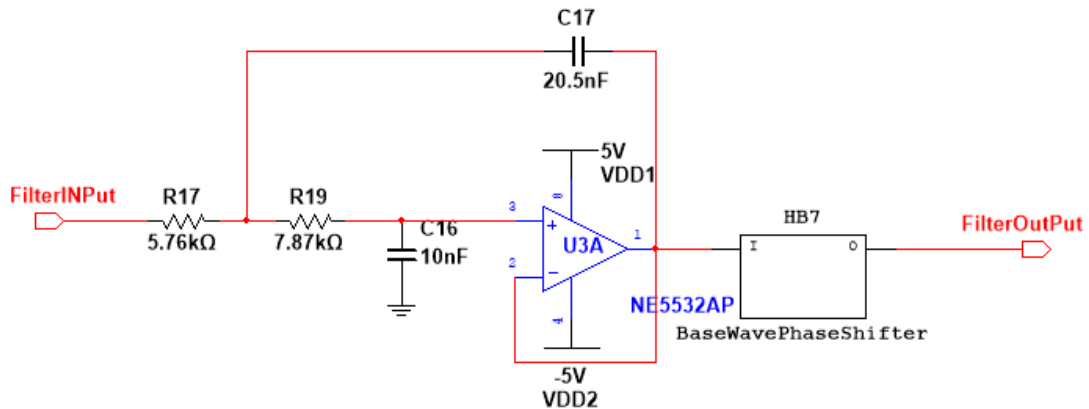


图 3 一次谐波滤波电路

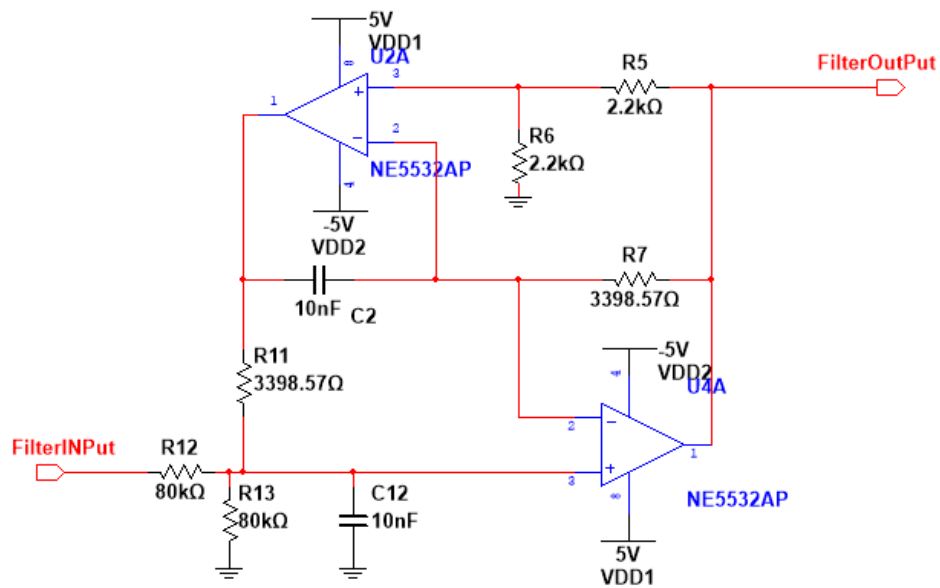


图 4 三次谐波滤波电路

对于三次和五次谐波，由于使用单运放滤波电路失真度较大，则采用 DABP 滤波电路滤波，再级联移相器进行相位调节。

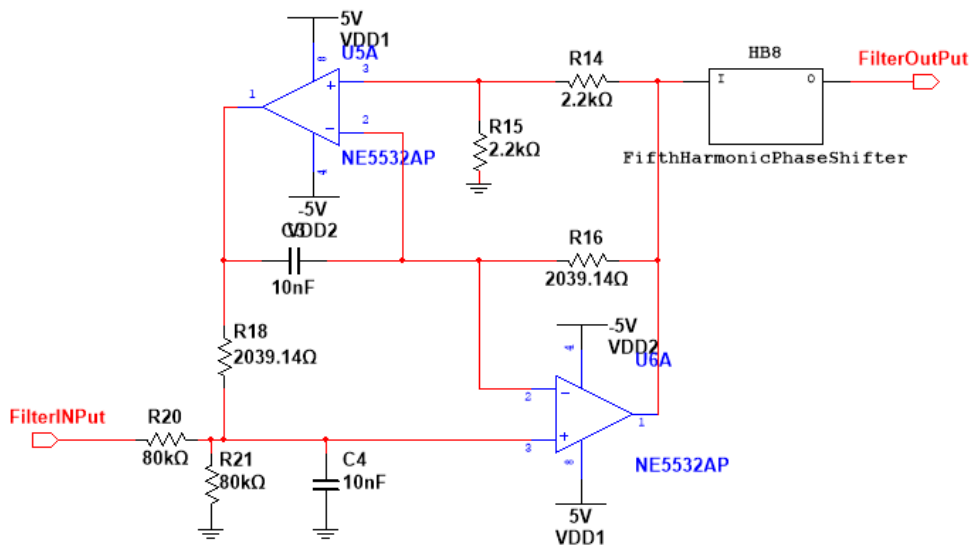


图 5 五次谐波滤波电路

### 3 移相电路

由方波滤波后产生的一次，三次，五次谐波会产生相位的偏移，为合成类方波，所以需要对其一次，三次，五次谐波进行移相。所以用 NE5532 运放芯片设计可在 0-180° 范围内移相调节的移相电路。

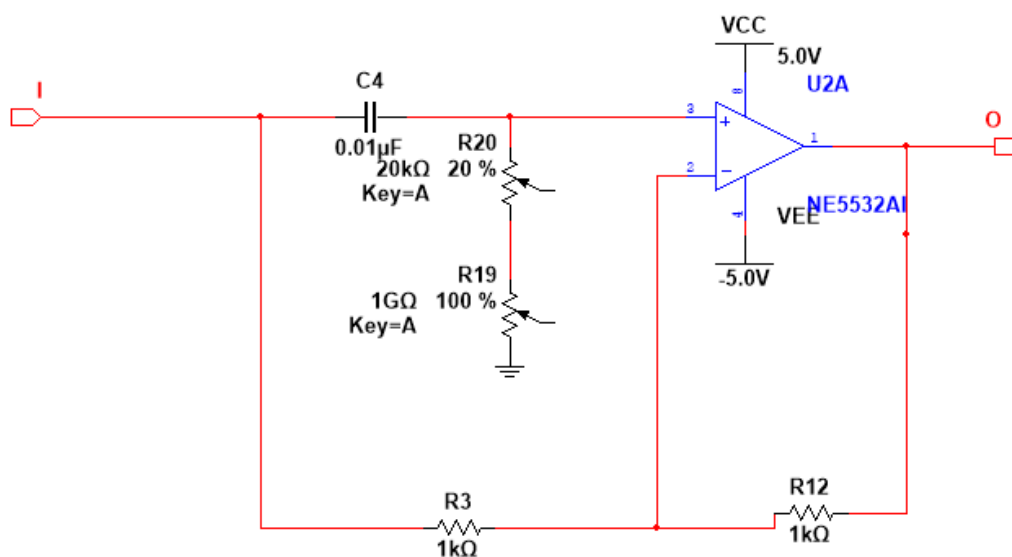


图 6 向前移相电路

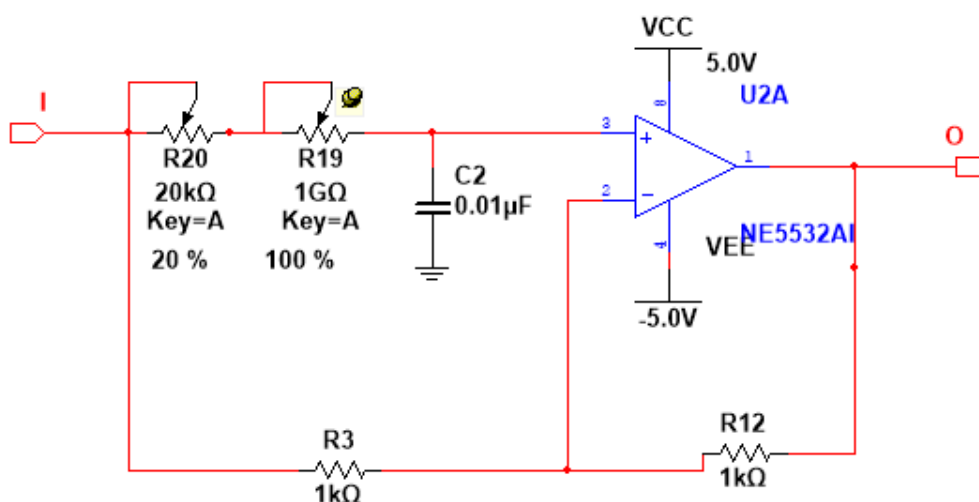


图 6 前后移相电路

各次谐波信号经过此移相电路调理后，可以使得各次谐波相位一致，便于后期经过相加器合成类方波。同时此移相电路与一次谐波滤波器级联后，可改变一次谐波电路相位来生成李沙育图像。

#### 4 类方波合成电路

将方波发生器级联各次谐波滤波器，可得到 1, 3, 5 次谐波，再将各次谐波滤波器级联移相电路，可得到相位一致的 1, 3, 5 次谐波。最后各次谐波经过 NE5532 运放构成的加法器叠加，得到类方波。

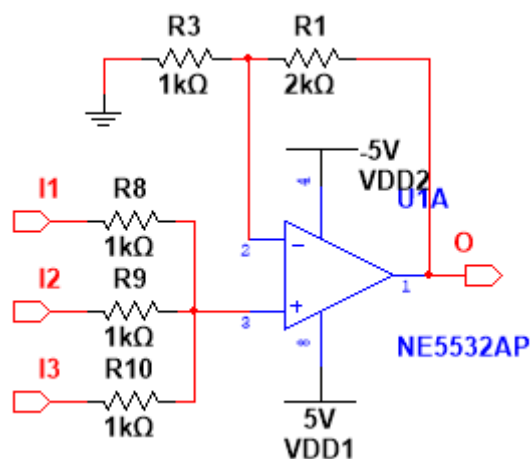


图 7 类方波合成电路

## 5 积分电路生成三角波

将三次谐波合成的类方波级联积分电路生成三角波，再级联反向放大器调节三角波的幅值使其满足题目要求。其中积分电路采用 NE5532 运放芯片。使用该积分电路可以获得失真度较小的三角波。

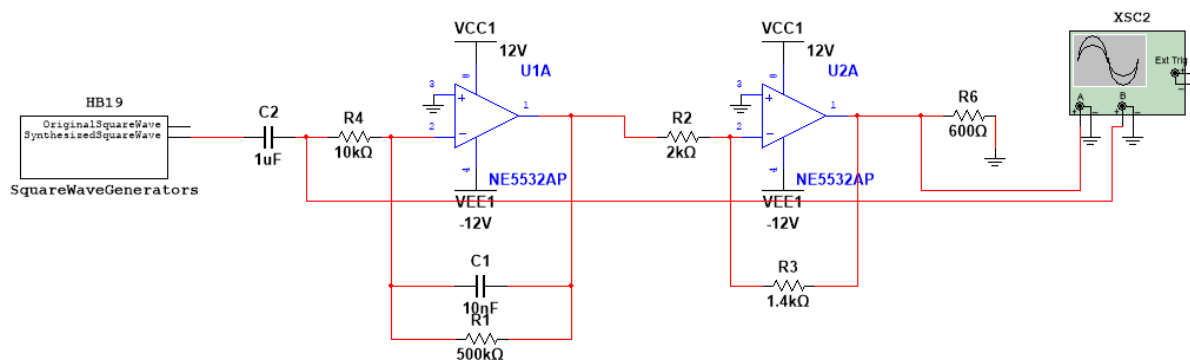


图 8 三角波生成电路

## 四、电路仿真测试

### 1.1 仿真结果

#### 1 基础部分

对方波滤波产生 1 次，3 次，5 次谐波：

1 次谐波使用 [ButterWorth](#) 低通滤波器 (增益为 1)

3, 5 次谐波使用 [DABP](#) 带通滤波器 (增益为 1)

然后对各次输出进行适当移向，使其相位与方波一致 得到



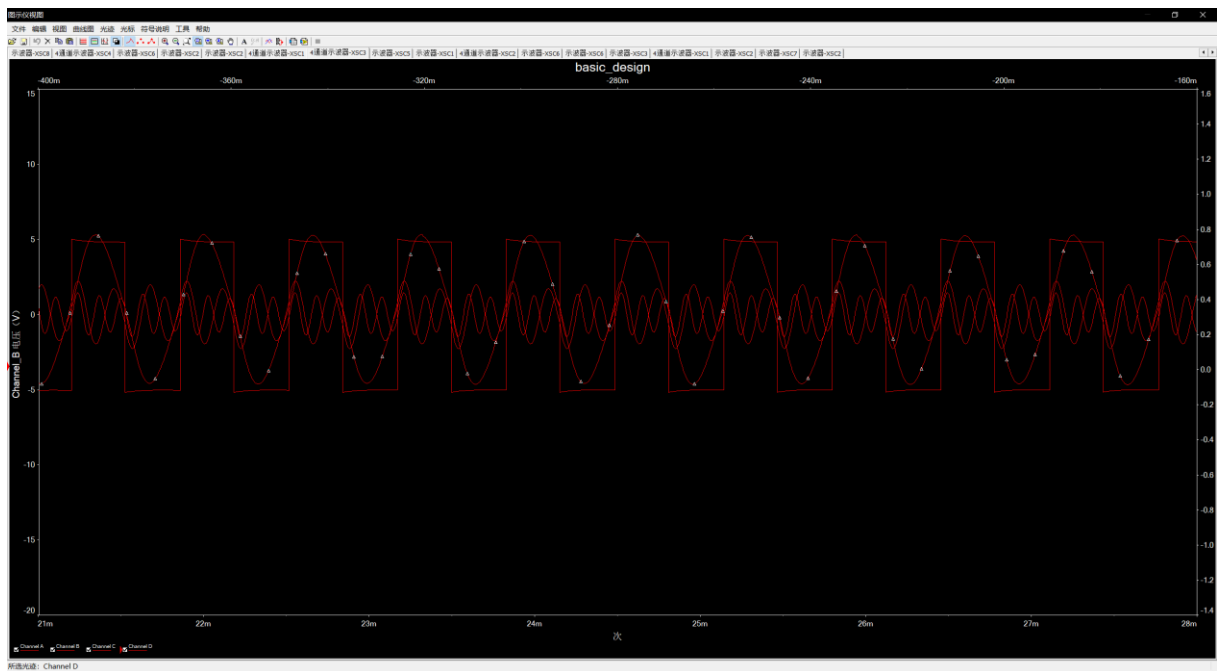


图 9 各次谐波和方波对比图

将各次谐波使用同相放大器相加，得到合成方波。得到类方波合成图：

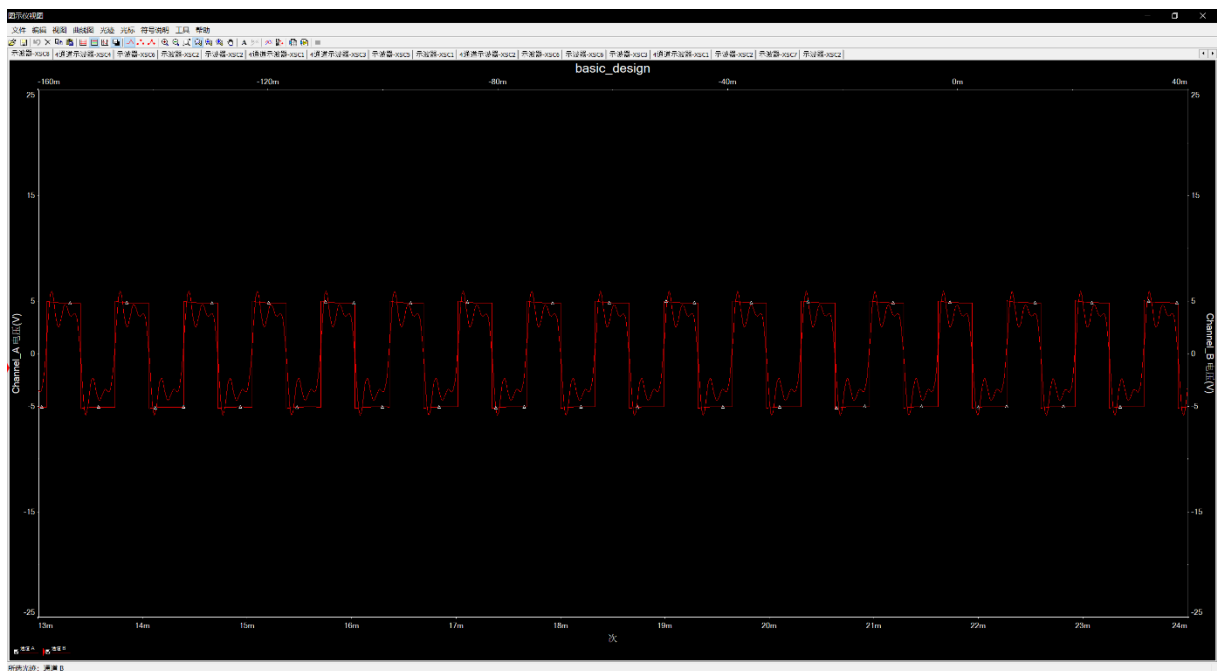


图 10 合成的类方波

对 3 中合成波形进行 先反向积分后反向放大，使  $V_{pp}=8V$  得到

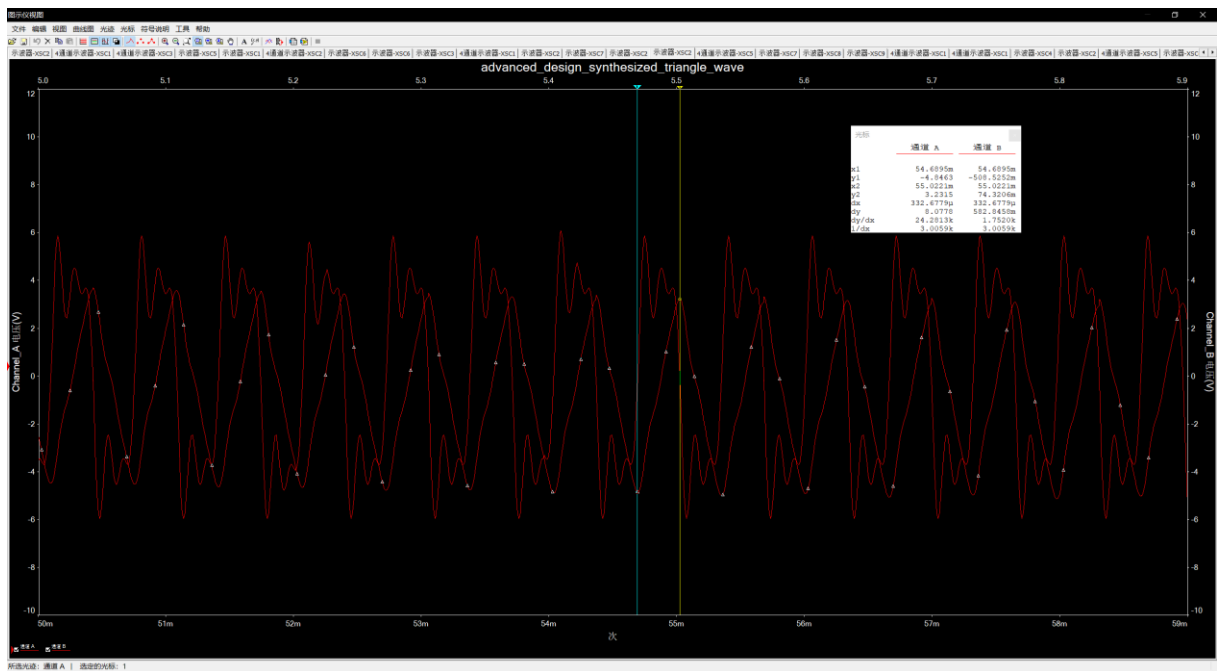


图 11 合成三角波

## 2 发挥部分

李沙育图生成，可生成  $0-180^\circ$  的李沙育图像

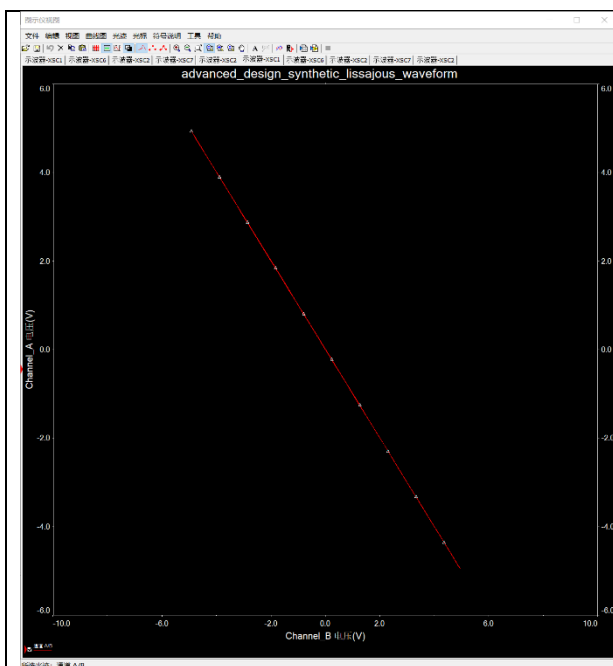


图 12 180° 李沙育图

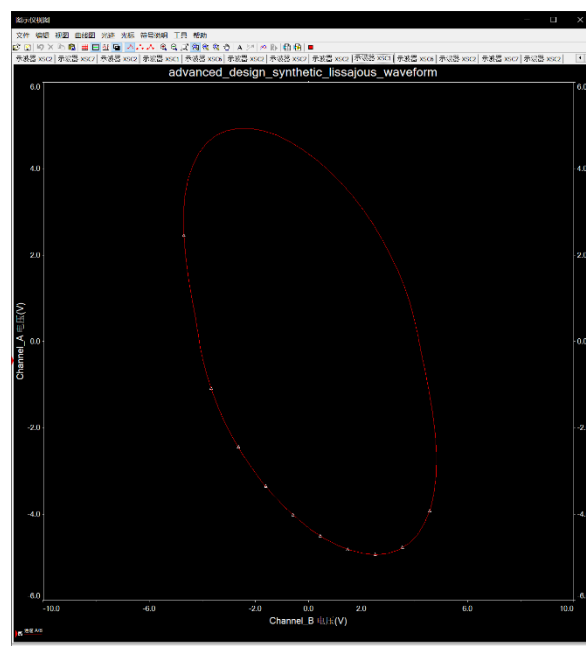


图 13 135° 李沙育图

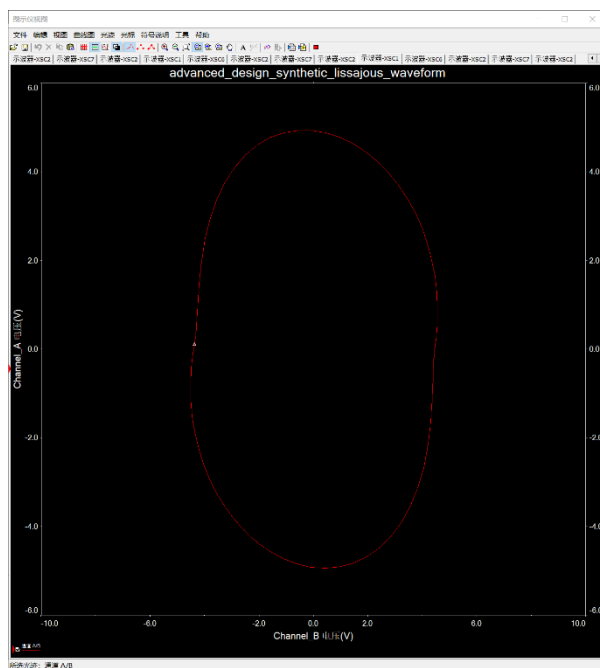


图 14 90°李沙育图

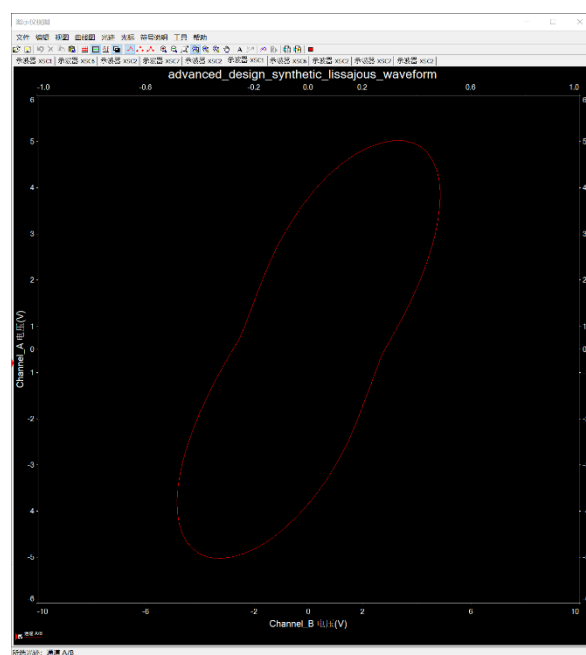


图 15 45° 李沙育图

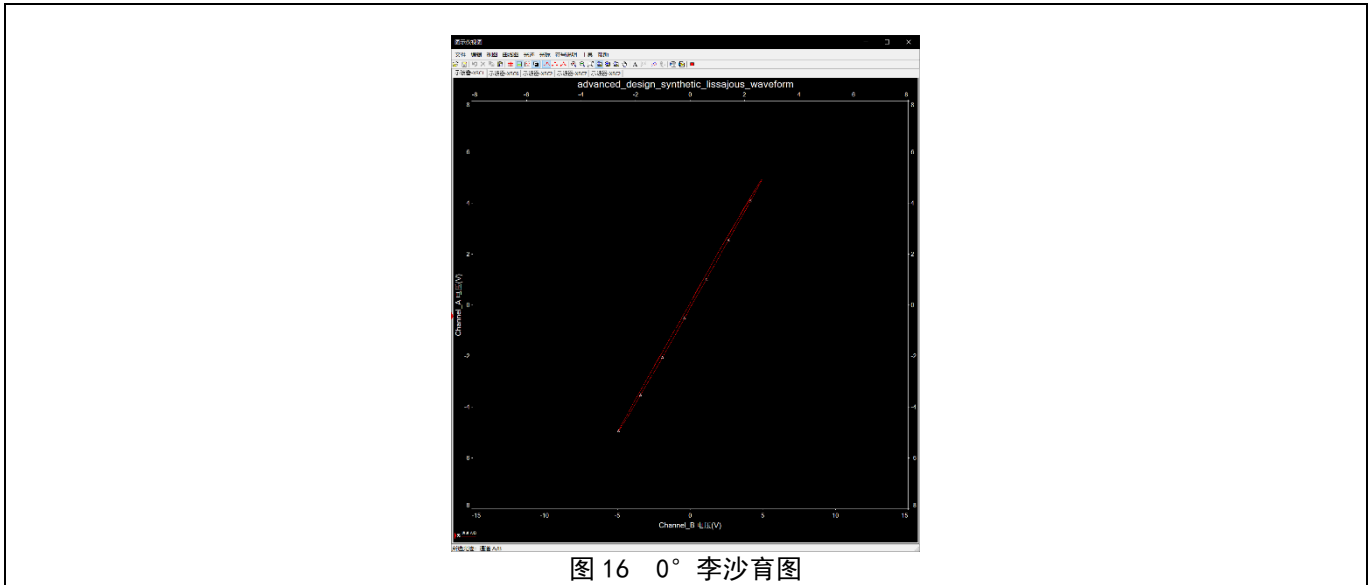


图 16 0° 李沙育图

## 五、总结

在本设计中，装置使用 NE555 芯片产生方波，然后使用 ButterWorth 滤波电路由方波产生基波的正弦波，使用 DABP 滤波电路得到 3 次和 5 次谐波正弦波，仿真效果理想。使用 NE5532 运放芯片设计移相器，可实现 0-180° 范围内的移相，可以通过调节移相器与各滤波器级联使其相位一致，并可通过移相生成李沙育图像，使用 NE5523 运放芯片设计加法器，将移相调理后的各次谐波叠加生成类方波，最终仿真效果理想。最后，在类方波输出端级联积分器和反向比例放大器，最终生成满足题目要求的三角波。

## 参考资料

1. [运放移相电路](#)
2. [DABP 带通滤波器](#)
3. Butterworth 低通滤波器来自 [Ti 滤波器设计](#)
4. [NE555 方波生成电路](#)