



北京理工大学  
Beijing Institute of Technology

# 本科生实验报告

课程名称： 电路分析基础

实验名称： 波形发生和变换电路的设计、仿真与实现

实验类型：	<input type="checkbox"/> 基础内容	<input checked="" type="checkbox"/> 综合设计	<input checked="" type="checkbox"/> 自主创新
-------	-------------------------------	--	--

作者： lamaper

注意： 本报告仅供参考，保留一切权利。

# 署名—禁止演绎 4.0 协议国际版

## CC BY-ND 4.0

### Deed

#### Canonical URL

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

[See the legal code](#)

您可以自由地：

1. 共享 — 在任何媒介以任何形式复制、发行本作品 在任何用途下，甚至商业目的。
2. 只要你遵守许可协议条款，许可人就无法收回你的这些权利。

惟须遵守下列条件：

1. 署名 — 您必须给出 [适当的署名](#)，提供指向本许可协议的链接，同时 [标明是否（对原始作品）作了修改](#)。您可以用任何合理的方式来署名，但是不得以任何方式暗示许可人为您或您的使用背书。
2. 禁止演绎 — 如果您 [再混合、转换、或者基于该作品创作](#)，您不可以分发修改作品。
3. 没有附加限制 — 您不得适用法律术语或者 [技术措施](#) 从而限制其他人做许可协议允许的事情。

声明：

您不必因为公共领域的作品要素而遵守许可协议，或者您的使用被可适用的 [例外或限制](#) 所允许。

不提供担保。许可协议可能不会给与您意图使用的所必须的所有许可。例如，其他权利比如 [形象权、隐私权或人格权](#) 可能限制您如何使用作品。

#### Notice

本文本仅仅强调部分核心特征和真正许可协议的部分条款，不是许可协议，也没有法律意义。您应当在使用授权作品前，仔细审阅真正许可协议的所有条款。

## 目录

一、实验目的 .....	4
二、实验设备 .....	4
三、实验内容 .....	4
1. Multisim 仿真软件的学习 .....	4
2. 方波发生电路 .....	5
3. 三角波发生电路 .....	7
4. 正弦波发生电路 .....	8
5. 波形变换电路（选做） .....	10
6. 矩形波发生电路（选做） .....	11
四、预习思考题 .....	13
五、实验结论及总结 .....	13
参考文献 .....	15

## 一、实验目的

1. 加深对运算放大器、电容、二极管等元器件的认识和理解。
2. 学习电路设计与实现的基本步骤。
3. 掌握方波、三角波和正弦波等波形发生和变换电路的工作原理与设计方法。
4. 能够使用仿真软件进行电路的仿真和调试。
5. 能够在面包板和 PCB 板上实现硬件电路的搭建和故障排查。

## 二、实验设备

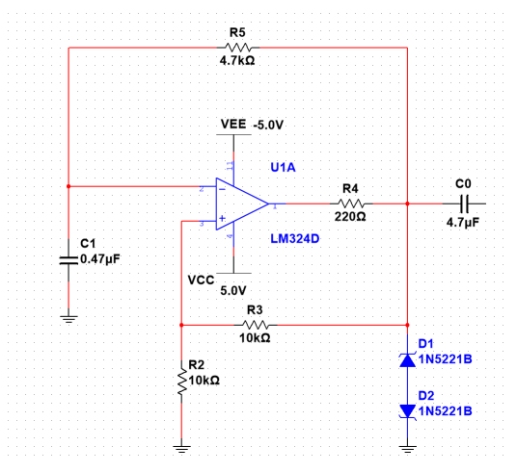
1. 直流稳压电源
2. 双踪示波器
3. 低频信号发生器
4. 数字万用表
5. 面包板、PCB 板等

## 三、实验内容

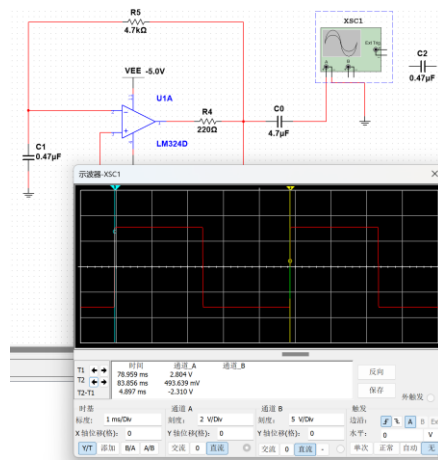
### 1. Multisim 仿真软件的学习

#### (1) 软件仿真过程及结果

基于预习讲义给到的原理图（讲义图 1.6）进行原理学习，绘制了如下图 3-1-1 的仿真电路图，已经较为熟练的掌握仿真软件的操作。



(图 3-1-1)



(图 3-1-2)

基于给定的原理图，可以利用原理计算该方波的周期为：

$$f = \frac{1}{2RC \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)} = 206\text{Hz} \quad (1)$$

在仿真软件中接入示波器，通过光标获得周期如图 3-1-2，周期为 $4.897\text{ms}$ ，约等于 $204\text{Hz}$ ，与理论结果略有差异。

## (2) 思考题

思考题 1: 若要使该电路输出方波的频率恰好为 200Hz, 应如何调整元件的参数? 实际当中可以实现吗?

若要使得电路输出的频率恰好为 200Hz, 按照公式计算得到电阻  $R = 4841.7\Omega \approx 4.84k\Omega$ , 但由于实际中并没有精准度如此高的电阻, 即使通过串联也无法达到这样的精确度, 所以很难实现频率恰好为 200Hz, 但是可以通过滑动变阻器不断地微调阻值, 使其十分靠近 200Hz。

思考题 2: 图 1.6 仿真电路图中方波发生电路的输出端接了一个电容 C0, 它的作用是什么?

该电容用于隔离运放输出的直流分量, 仅传递交流方波信号至后续电路; 也用于阻抗匹配, 避免负载影响振荡器稳定性。

思考题 3: 图 1.6 仿真电路图中稳压二极管 1N5221B 的稳压值为 2.4V。但通过仿真发现, 输出方波的幅度不是 2.4V, 这是为什么?

根据仿真软件的结果, 最终输出的波峰值在 3V 附近, 大于稳压值。这可能是稳压二极管需工作在反向击穿区才能稳定电压。若电路中电流过小, 或电源电压不足, 则二极管无法击穿, 表现为普通二极管的正向导通压降或电阻特性。若方波输出端接有负载电阻, 稳压二极管需同时为负载提供电流。当负载电流过大时, 可能分走稳压管的电流, 导致稳压失效。

## 2. 方波发生电路

### (1) 电路设计

由于要求方波的频率在 100Hz 到 300Hz 之间连续可调, 并且幅度为 2V, 于是通过公式进行计算:

$$T = 2RC \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \quad (2)$$

其中,  $R_1 = R_2 = 10k\Omega$ ,  $C = 0.47\mu F$ , 可以将式子化简为  $T = 2 \ln 3 RC$ , 之后根据要求计算最大频率与最小频率下对应的电阻:

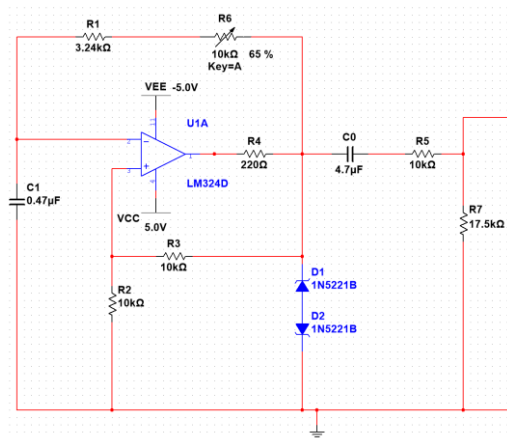
$$\begin{cases} f_{max} = \frac{1}{2 \ln 3 R_{min} C} = 300Hz \\ f_{min} = \frac{1}{2 \ln 3 R_{max} C} = 100Hz \end{cases} \quad (3)$$

解得:

$$\begin{cases} R_{min} = 3.23k\Omega \\ R_{max} = 9.86k\Omega \end{cases}$$

在仿真软件中, 可以找到的最接近电阻为  $R = 3.24k\Omega$ , 于是选用该电阻与最大阻值为 10kΩ 的滑动变阻器串联, 以调整频率。

## (2) 软件仿真

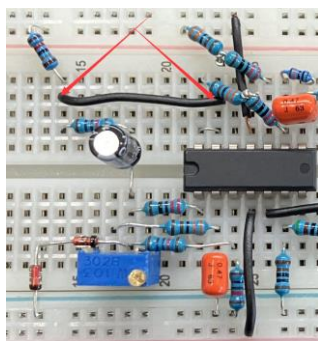


(图 3-2-1)

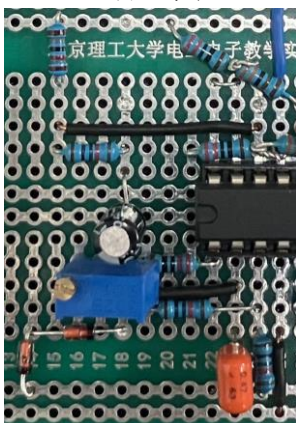
如图 3-2-1，仿真电路图已经绘制好，以最接近  $R_{min} = 3.23k\Omega$  的  $R_1 = 3.24k\Omega$  和最大阻值为  $10k\Omega$  的滑动变阻器串联成电阻，用于调节频率。在仿真学习时，已经发现产生的电压不为要求的电压，通过调整稳压二极管相对麻烦，这里选用电阻分压的方式来改变最终的输出电压。通过不断测试，当  $R_5 = 10k\Omega$ ， $R_6 = 17.5k\Omega$  时，电压峰值最接近  $2V$ ，且波形畸变不明显。

## (3) 硬件实现

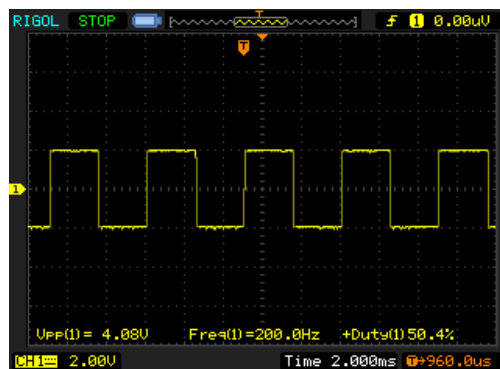
注意到在实际操作中，能获得的运放芯片为“LM324N”而不是“LM324D”，因而先对仿真电路进行修改，之后开始操作。如图 3-2-2，首先在面包板上实现方波发生电路。由于实验室硬件限制，不存在理想的  $10k\Omega$  电阻，因而此处采用  $9.9(\pm 0.005)k\Omega$  的电阻替代；此外，由于实验室没有精确的  $3.24k\Omega$  及其附近的电阻，因此直接采用  $10k\Omega$  的滑动变阻器代替原理图中的定值电阻与电位器；分压电路也进行了修改， $R_5 = 9.9k\Omega$ ， $R_7 = 17.8k\Omega$ ；在实际 PCB 板（图 3-2-3）测量中，其表现良好，方波峰峰值  $4.08V$  左右，频率在  $200Hz$  左右，正占空比在  $50.4\%$  左右（图 3-2-4），基本符合要求。



(图 3-2-2)



(图 3-2-3)



(图 3-2-4)

## (4) 思考题

思考题 4：输出方波的幅度要求为  $2V$ ，除了可以选用合适的稳压二极管，还有什么更好的思路和方法？

还可以使用电阻进行分压，使其在某一节点的幅度为 2V。

### 3. 三角波发生电路

#### (1) 电路设计

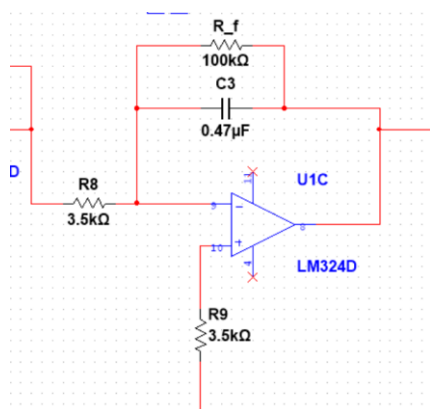
由于要求在 200Hz 的条件下生成三角波，因而在后续电路中，以方波频率为 200Hz 的情况设计电路。

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t u_i(\xi) d\xi \quad (4)$$

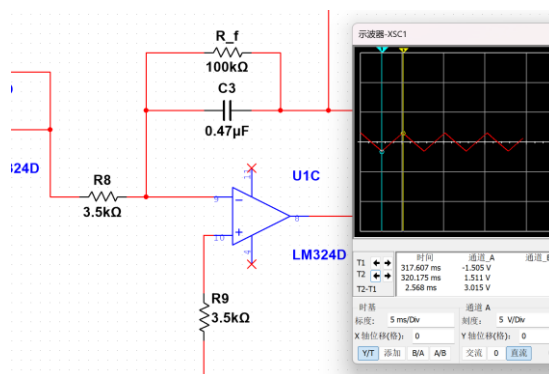
由于已经限制了  $C = 0.47\mu F$ ，经过计算可以得出  $R = R_0 \approx 3.5k\Omega$  时，应当有良好的三角波。此外由于运算放大器不是理想的，为防止低频信号增益过大，通常在电容  $C$  两端并联一个电阻  $R_F$ ，用以减少运算放大器的直流偏移，但同时也会影响积分的线性关系。一般取  $R_F > 10R$ 。在此次实验中，取  $R_F = 100k\Omega$ 。

#### (2) 软件仿真

在仿真软件中，按照计算结果搭建电路，效果良好，如图 3-3-1 与图 3-3-2。在仿真电路中，三角波峰峰值为 3.015V，十分近似于 3V，可以认为满足实际要求。

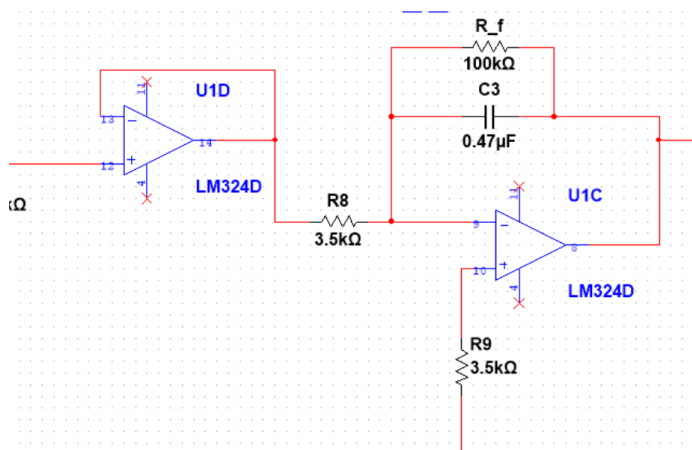


(图 3-3-1)



(图 3-3-2)

此外，采用积分电路实现方波到三角波的变换时，通常需要在方波发生电路和积分电路之间加一个电压跟随器，因而在此之前应当设计一个电压跟随器，最终仿真电路如图 3-3-3。



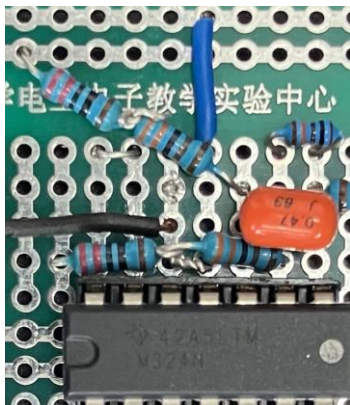
(图 3-3-3)



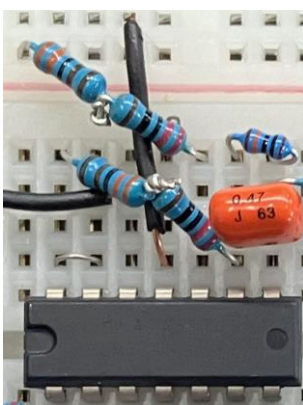
### (3) 硬件实现

注意到在实际操作中，能获得的电阻十分有限，这里选用 $3.3k\Omega$ 电阻与 $220\Omega$ 进行串联，获得 $3.52k\Omega$ 电阻。实际情况中，由于电阻普遍存在误差，串联后的电阻恰好能达到 $3.5k\Omega$ 。

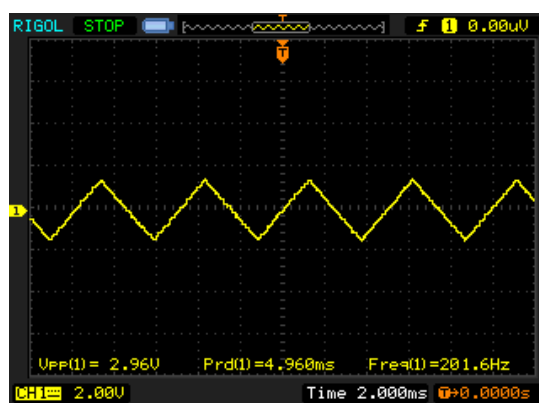
在面包板上实现三角波发生电路并在 PCB 板上焊接。最终在实际 PCB 板（图 3-3-4）测量中，其表现良好，三角波峰峰值 $2.96V$ 左右，频率在 $200Hz$ 左右，正占空比在 $49.6\%$ 左右（图 3-3-6），基本符合要求。



（图 3-3-4）



（图 3-3-5）



（图 3-3-6）

### (4) 思考题

思考题 5：采用积分电路实现方波到三角波的变换时，通常需要在方波发生电路和积分电路之间加一个电压跟随器，试分析和验证该电压跟随器的作用是什么？

通过电压跟随器的隔离，前级方波发生电路不受后级积分电路负载的影响，后级积分电路也能获得稳定的驱动信号。最终生成的三角波幅度稳定、线性度高，且频率和斜率与设计参数一致。因此，电压跟随器在此处是保证信号完整性和电路性能的关键元件。

## 4. 正弦波发生电路

### (1) 电路设计

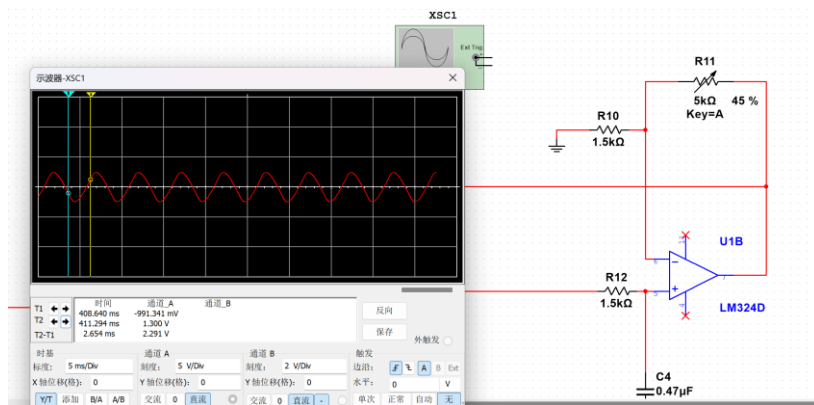
按照讲义给到的一阶有源低通滤波电路在生成正弦波中的用法，本次实验可以利用一阶有源低通滤波电路将三角波转化为正弦波，有增益 $A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ ，截止频率 $f = \frac{1}{2\pi RC}$ 。

为了使滤波效果良好，本次实验采用二阶有源低通滤波电路，计算确定当 $R = 1.54k\Omega$ ， $C = 0.47\mu F$ 时，可以产生良好的正弦波信号。

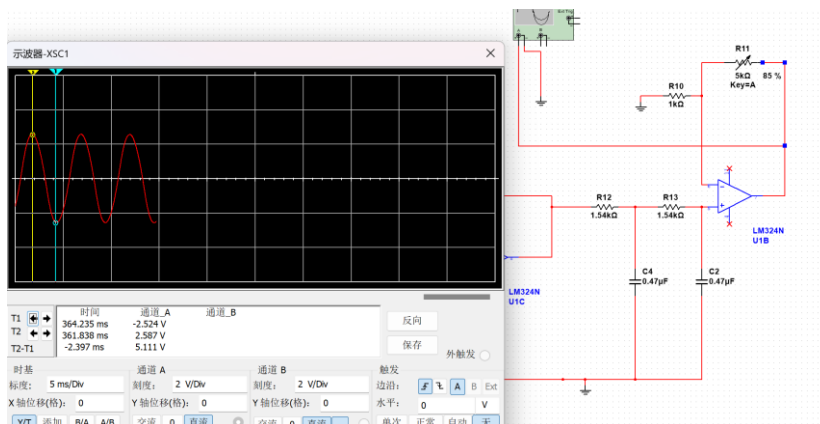
### (2) 软件仿真

在仿真软件中，按照计算结果搭建电路，效果良好，如图 3-4-1 与图 3-4-2。图 3-4-1 实现了一阶有源低通滤波电路，正弦波波形一般，因而继续采用二阶电路。二阶有源低通滤波电路在仿真电路中，正弦波峰峰值为 $5.111V$ ，近似于 $5V$ ，可以认为满足实际要求。





(图 3-4-1)

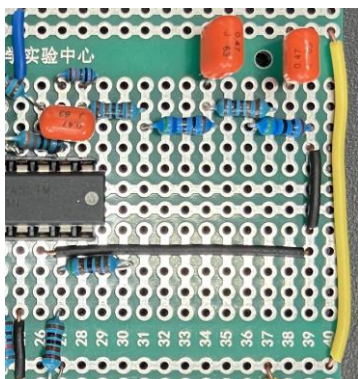


(图 3-4-2)

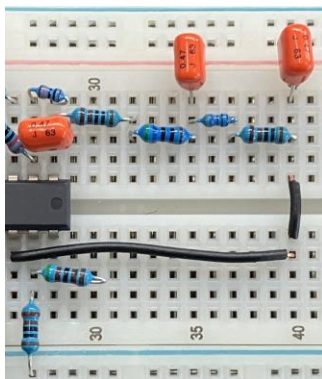
### (3) 硬件实现

注意到在实际操作中，能获得的电阻十分有限，这里选用 $1.1k\Omega$ 电阻与 $460\Omega$ 进行串联，获得 $1.56k\Omega$ 电阻。实际情况中，由于电阻普遍存在误差，串联后的电阻恰好能达到 $1.5k\Omega$ 左右；滑动变阻器选择 $10k\Omega$ 的电位器进行调整即可。

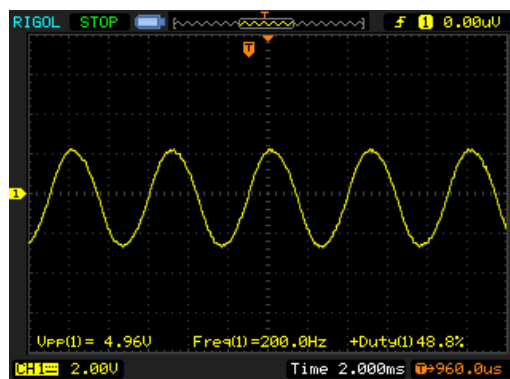
在面包板上实现正弦波发生电路并在 PCB 板上焊接。最终在实际 PCB 板（图 3-4-3）测量中，其表现良好，正弦波峰峰值 $4.96V$ 左右，频率在 $200Hz$ 左右，正占空比在 $48.8\%$ 左右（图 3-4-5），基本符合要求。



(图 3-4-3)



(图 3-4-4)



(图 3-4-5)

### (4) 思考题

思考题 6：基于方波和三角波的傅里叶三角级数形式，分析该正弦波发生电路的输入是选择方波好还是三角波好？

选择三角波作为输入更优，因其高次谐波幅度以 $\frac{1}{n^2}$ 快速衰减（远低于方波的 $\frac{1}{n}$ ），滤波难度低，无需高阶滤波器即可输出高纯净度正弦波，综合性能优于方波。

## 5. 波形变换电路（选做）

### （1）电路设计

为了使三角波转换为方波，需要进行逆向运算，采用微分电路。由虚短和虚断可以知道：

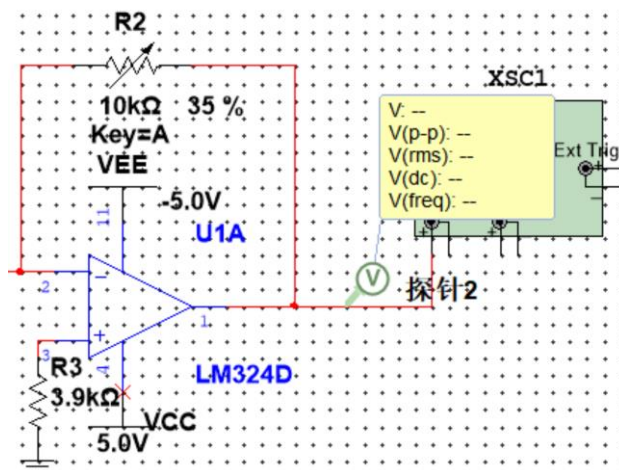
$$i_c = i_R = \frac{Cdv_i}{dt} \quad (5)$$

$$v_o = -\frac{RCdv_i}{dt} \quad (6)$$

经过计算， $C = 0.47\mu F$ ， $R_{GND} = 3.9k\Omega$ ， $R$ 选择最大阻值为 $10k\Omega$ 的滑动变阻器。

### （2）软件仿真

在仿真软件中，按照计算结果搭建电路，方波被良好还原。可以认为满足实际要求。

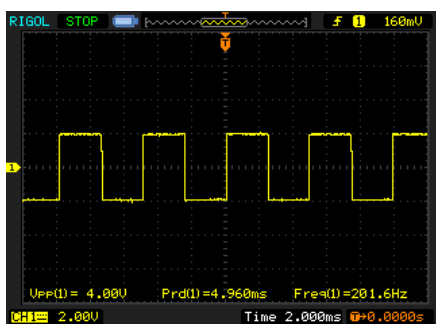


（图 3-5-1）

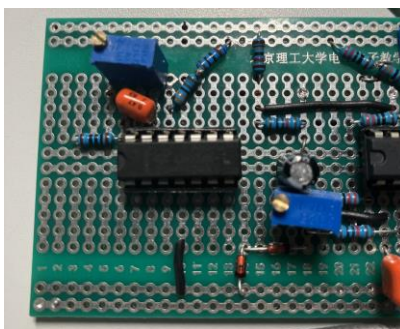
### （3）硬件实现

注意到在实际操作中，能获得的电阻十分有限，这里选用 $3.3k\Omega$ 电阻与 $510\Omega$ 进行串联，获得 $3.81k\Omega$ 电阻；滑动变阻器选择 $10k\Omega$ 的电位器进行调整即可。

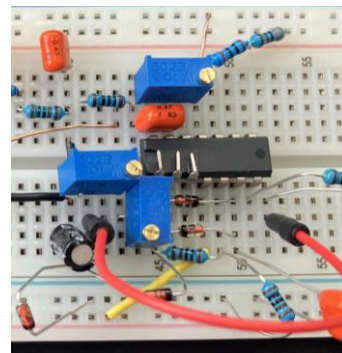
在面包板（图 3-5-4）上实现微分电路并在 PCB 板上焊接。最终在实际 PCB 板（图 3-5-3）测量中，其表现良好（图 3-5-2），方波峰峰值 $4.00V$ 左右，频率在 $200Hz$ 左右，基本符合要求。



（图 3-5-2）



（图 3-5-3）



（图 3-5-4）

#### (4) 思考题

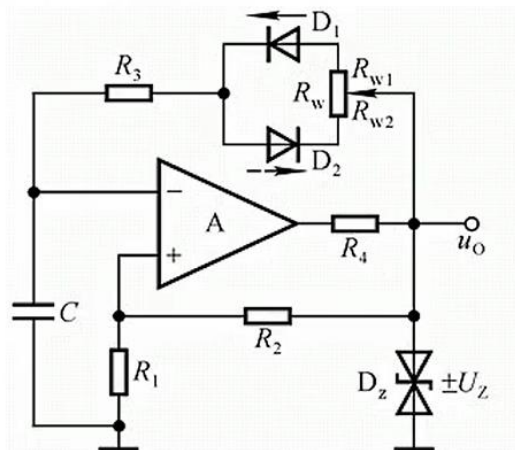
思考题 7：采用微分电路实现三角波到方波的变换时，通常需要在微分电路前加一个小电阻，试分析和验证该小电阻的作用是什么？

在微分电路前加小电阻的主要作用是：抑制高频噪声、防止电路自激振荡，并限制输入突变时的电流，保护运放输入级。该电阻与电容构成低通滤波网络，衰减高频成分，避免微分电路对噪声的放大，同时提升电路稳定性，使三角波到方波的变换更可靠。

### 6. 矩形波发生电路（选做）

#### (1) 电路设计

矩形波振荡电路（又称多谐振荡器）由反相输入的滞回比较器和 RC 电路组成。滞回比较器起开关作用，RC 电路的作用是产生暂态过程。RC 回路既是延迟环节，亦是反馈网络，通过 RC 充、放电过程实现输出状态的自动转换。在运放的输出端引入限流电阻和两个背靠背的稳压管就组成了如图 3-6-1 所示的双向限幅矩形波发生器。



在此图中，存在  $R_w$  分压式接入电路来调整占空比，但本次实验选择用两个不同的滑动变阻器分流式接入电路来调整占空比。

经过计算，振荡周期为：

$$T = (2R_3 + R_{\text{滑变}1} + R_{\text{滑变}2}) C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \quad (7)$$

在第一节中已经计算过，这里的  $\ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$  可以近似为  $\ln 3$ ，此外，为了方便电路搭建，抛弃  $R_3$ ，仅用两个滑动变阻器来控制电路的频率。

该电路中，占空比：

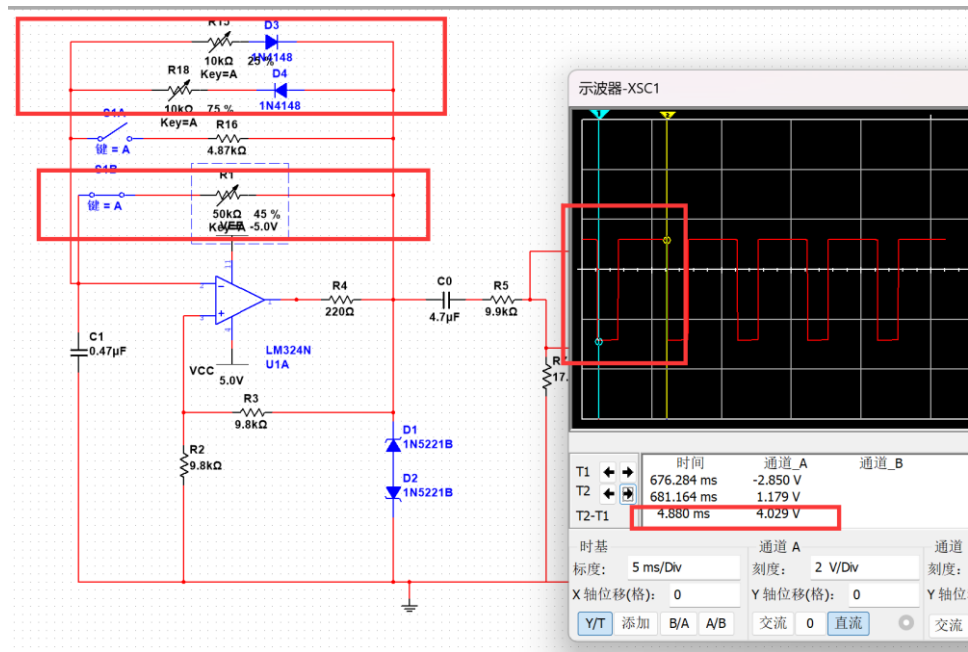
$$D^+ = \frac{R_{\text{滑变}1}}{R_{\text{滑变}1} + R_{\text{滑变}2}} \quad (8)$$

经过计算， $C = 0.47\mu F$ ，滑动变阻器选择最大阻值为  $10k\Omega$  的滑动变阻器。

#### (2) 软件仿真

在实验室中能找的二极管只有 1N4148 与 1N5221B。本文选取 1N4148 作为产生矩形

波的开关二极管。在仿真软件中，按照计算结果修改第二节中的方波电路，矩形波得以良好还原。可以认为满足实际要求，如图 3-6-2。



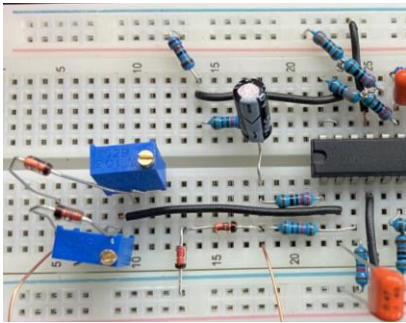
(3) 硬件实现

巧合的是，计算所得的电阻正好都能在实验室找到，这部分电路不需要自行并串联改装电阻。

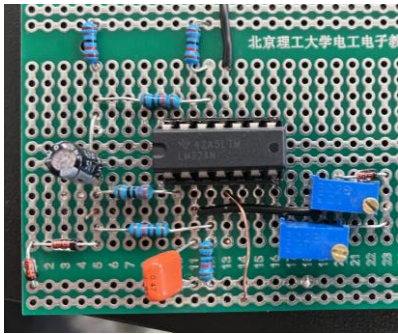
在面包板（图 3-6-4）上实现微分电路并在 PCB 板上焊接。最终在实际 PCB 板（图 3-6-5）测量中，其表现良好（图 3-6-3），矩形峰峰值4.00V左右，频率在200Hz左右，正占空比可调，展示为60.0%，基本符合要求。



(图 3-6-3)



(图 3-6-4)



(图 3-6-5)

(4) 思考题

思考题 8：对于该矩形波发生电路，如果还想使矩形波的频率在 100Hz 到 300Hz 之间连续可调，有什么思路和方法？

本文展示的方案已经解决这个问题，在前文的计算中已经提到，周期：

$$T = (R_{\text{滑变}1} + R_{\text{滑变}2}) C \ln 3$$

因而频率可以于滑动变阻器组织自由变化与组合中改变。



## 四、预习思考题

1. 实验原理中对方波发生电路的分析,为什么运算放大器满足“虚断”原则,但不满足“虚短”原则?

在实际电路中,运算放大同时有正、负反馈,导致其不一定工作在线性区域上,不一定为“虚短”。

2. 本综合设计性实验涉及到了《电路分析基础》理论课中讲述的哪些电路理论和知识点?

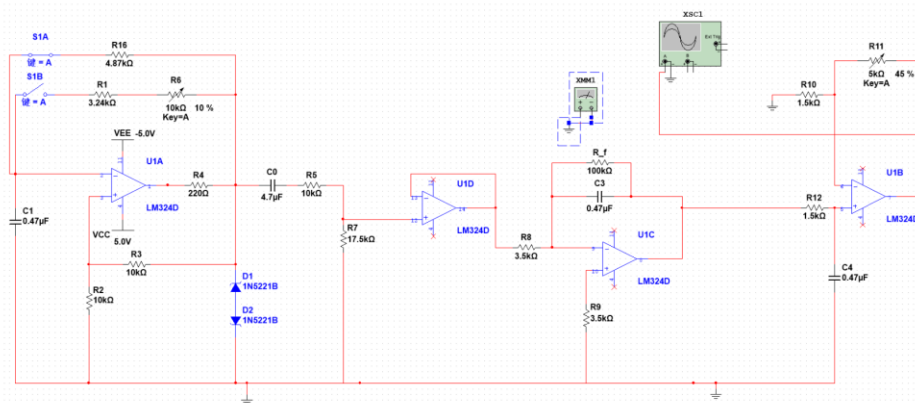
有关运算放大器、电容、一阶电路、二阶电路等。

3. 除了实验原理中介绍的方波、三角波和正弦波发生电路以外,还有什么常用的方式和方法可以产生此类波形?

还有许多方法,如模拟方法、数字方法、专用集成电路,可能还有基于软件的方法。比如,模拟方法里除了运放电路,还有张弛振荡器、函数发生器芯片;数字方法包括 DDS、PWM 加滤波;专用芯片如 XR2206、ICL8038;软件方式如微控制器生成波形通过 DAC 输出。

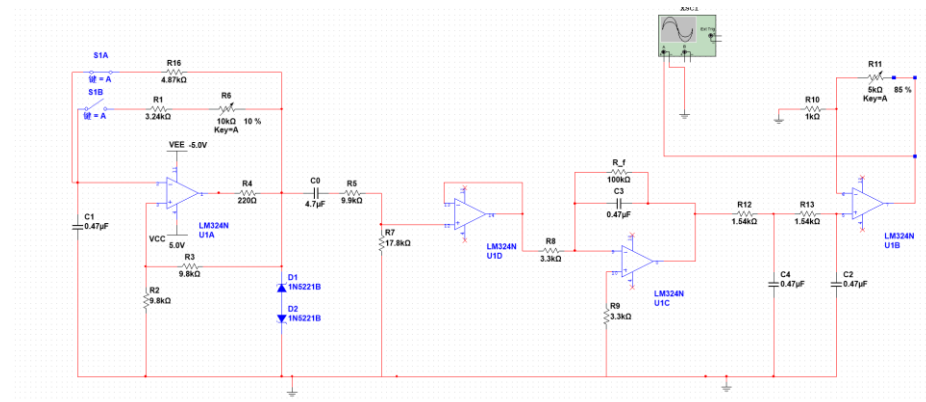
## 五、实验结论及总结

本次实验充分考察了电路分析的各种知识,同时也十分考验个人的动手操作能力。如图 5-1 为理论设计电路图。



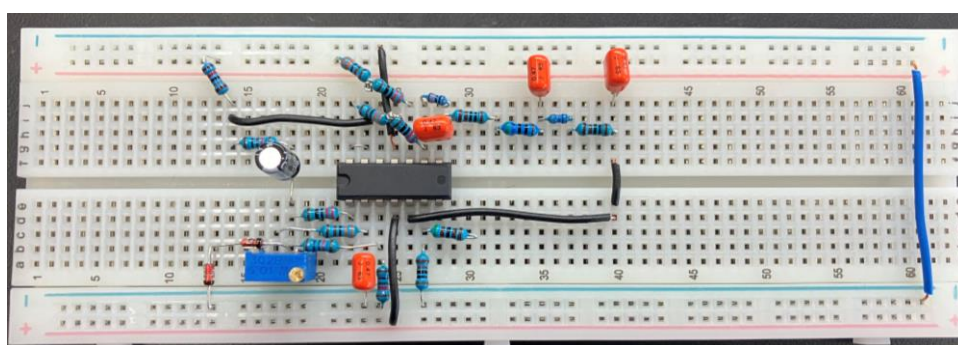
(图 5-1)

但在实际操作过程中,情况并非同想象中美好,存在诸多客观因素限制,因而在修改后,有如图 5-2 的修改后电路图。



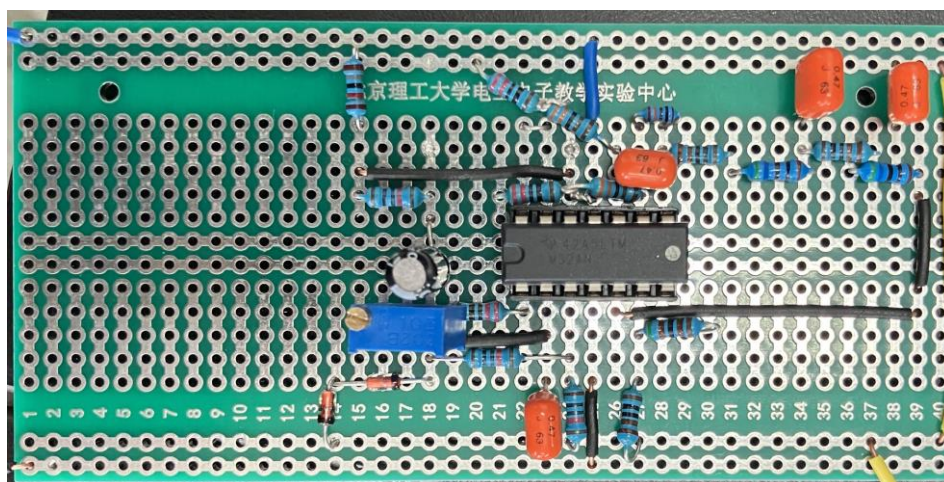
(图 5-2)

在确认好理论电路图后，可以在面包板上开始安装电子元件，在安装过程中需要额外注意 $4.7\mu\text{F}$ 的电容具有极性，应当以正确的方式插入。此外合理规划电路，减少“飞线”使用等问题也应当注意。如图 5-3 为完整的、可实现所有功能的面板。



(图 5-3)

在确认面包板可以实现所有功能后，可以在 PCB 板上开始焊接电子元件。在安装过程中需要额外不能将针脚连接在一起造成短路，也要额外注意人体作为导体，在触碰针脚时也会造成短路，应当以正确的方式来测试电路。如图 5-4 为完整的、可实现所有功能的必做题 PCB 板。



---

## 参考文献

- [1] 李瀚荪,吴锡龙.电路分析基础第 5 版学习指导[M].高等教育出版社,2018.
- [2] 运算放大器的基础应用\_电压抬升[EB/OL].CSDN 博客,2017-07-04.  
[https://blog.csdn.net/qq\\_37603131/article/details/124316105](https://blog.csdn.net/qq_37603131/article/details/124316105)
- [3] 电子线路——放大电路基础[EB/OL].知乎专栏,2017-07-04.  
<https://zhuanlan.zhihu.com/p/655766200>
- [4] 运算放大电路的基础[EB/OL].知乎专栏,2017-07-04.<https://zhuanlan.zhihu.com/p/2759518>
- [5] 电路仿真实验——Multisim 十分钟入门使用介绍[EB/OL].CSDN 博客,2022-11-10.  
<https://blog.csdn.net/xiaobaivera/article/details/138166497>
- [6] 三角波产生正弦波原理[EB/OL].知乎,2023-10-09.<https://zhuanlan.zhihu.com/p/660298952>
- [7] 常见模拟电路设计一（含仿真）[EB/OL].CSDN 博客,2021-10-02.  
[https://blog.csdn.net/weixin\\_43824941/article/details/108064258](https://blog.csdn.net/weixin_43824941/article/details/108064258)