

实验13基本运算电路设计P320

浙江大学电工电子教学中心
傅晓程

桌号请写在实验**地点**后

例如，**地点**：东3 - 2XX A1

验收：任务4

本次需提交实验报告



实验目的

1. 掌握集成运放组成的比例、加法和积分等基本运算电路的设计。
2. 学习集成运算放大器的实际应用。
3. 掌握基本运算电路的调试和测量方法。
4. 了解集成运算放大器在实际应用时应考虑的一些问题；

P320实验任务和验收内容

注意：频率要低？示波器输入耦合视电路和调试情况选择DC或AC！（有效值AC）

1. 实现两个信号的反相加法运算

输入正弦波，示波器观察输入和输出波形，测量有效值或峰峰值，频率。

2. 实现单一信号同相比例运算

输入正弦波，示波器观察输入和输出波形，测量有效值或峰峰值，频率。
测量闭环传输特性： $V_O = f(V_S)$

3. 实现两个信号的减法(差分)运算

输入正弦波，示波器观察输入和输出波形，测量有效值或峰峰值，频率

4. 波形转换—方波转换成三角波---需显示方波和三角波峰峰值，频率。

设： T_p 为方波半个周期时间； $\tau = R_2 C$

在 $T_p \ll \tau$ 、 $T_p \approx \tau$ 、 $T_p \gg \tau$ 三种情况下加入方波信号，用示波器观察输出和输入波形，记录线性情况和幅度的变化。

选做5. 查看积分电路的输出轨迹

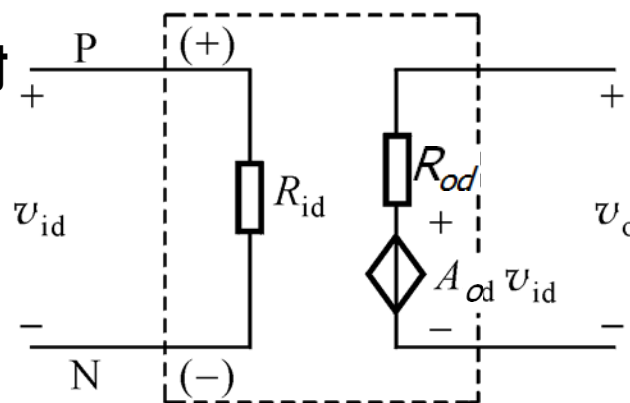
验收：任务4，保持输入幅度不变，改变频率在 $T_p \ll \tau$ 、 $T_p \approx \tau$ 、 $T_p \gg \tau$ 三种情况下，用示波器观察输出和输入波形。需显示方波和三角波峰峰值，频率。

集成运放介绍

集成运算放大器是一种高增益的**直接耦合**放大电路，在理想情况下，集成运放的 $A_{od} = \infty$ 、 $R_{id} = \infty$ 、 $R_{od} = 0$ 、 $V_{IO} = 0$ 、 $I_{IO} = 0$ 、 $K_{CMR} = \infty$ 。有两种输出状态：线性放大和饱和输出。输出信号的大小受集成运放的最大输出电压幅度的限制，因此输出与输入只在一定范围内是保持线性关系的。必须引入负反馈，才能确保工作在线性放大区，从而实现各种模拟运算电路。

分析调试电路的几个帮手：

- ✓ **虚断**： $R_{id} = \infty$ ，在输入端没有任何负载效应，即 $I_P = I_N = 0$ 。
- ✓ **虚短**： $R_{od} = 0$ ， $A_{od} = \infty$ ， V_o 是个有限值，要有负反馈电路，且工作在线性，则可认为 $V_P = V_N$ 。
- ✓ **叠加定理**：只使用于线性电路；在计算一个电源对电路输出的作用时，其余电压源短路或电流源开路；一般情况下，原电路功率不等于分电路计算所得各分量功率的叠加。



$$A_{od} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_{Id}} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_P - \Delta v_N} \quad R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = \frac{\Delta v_P - \Delta v_N}{\Delta i_{Id}}$$

集成运放的低频小信号模型

LM358 (双运放) 管脚图和技术指标

单电源(3—32V)

双电源(± 1.5 — $\pm 16V$)

共模输入电压范围宽(0 至 $V_{CC}-1.5V$)

差模输入电压范围宽, 等于电源电压范围

低功耗电流, 适合于电池供电,

输入失调电压3mV

输入失调电流2 nA

输入偏置电流20 nA

直流开环差模增益100 V/mV

输出电压摆幅 (0 至 $V_{CC}-1.5V$) (最大不失真输出)

共模抑制比80dB

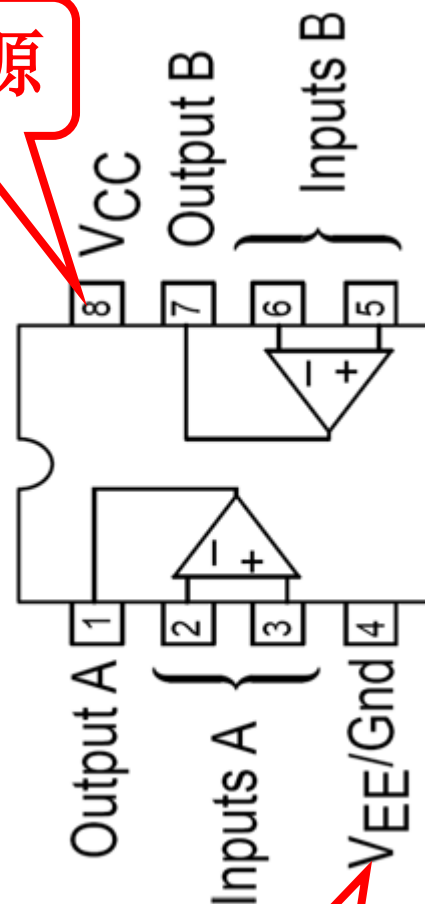
压摆率(0.3V/us) (转换速率)

单位增益频带宽(约0.7MHz)

下次实验我们将了解实际运放与理想运放的差别, 并对其主要指标进行测试。

运放GBW就是增益带宽积, 该参数决定着运放在小信号时的最高工作频率。如: LM358的仅0.7MHz, 就是说在增益为1时其最高工作频率为0.7MHz, 如果增益为10, 则为70KHz。

正电源



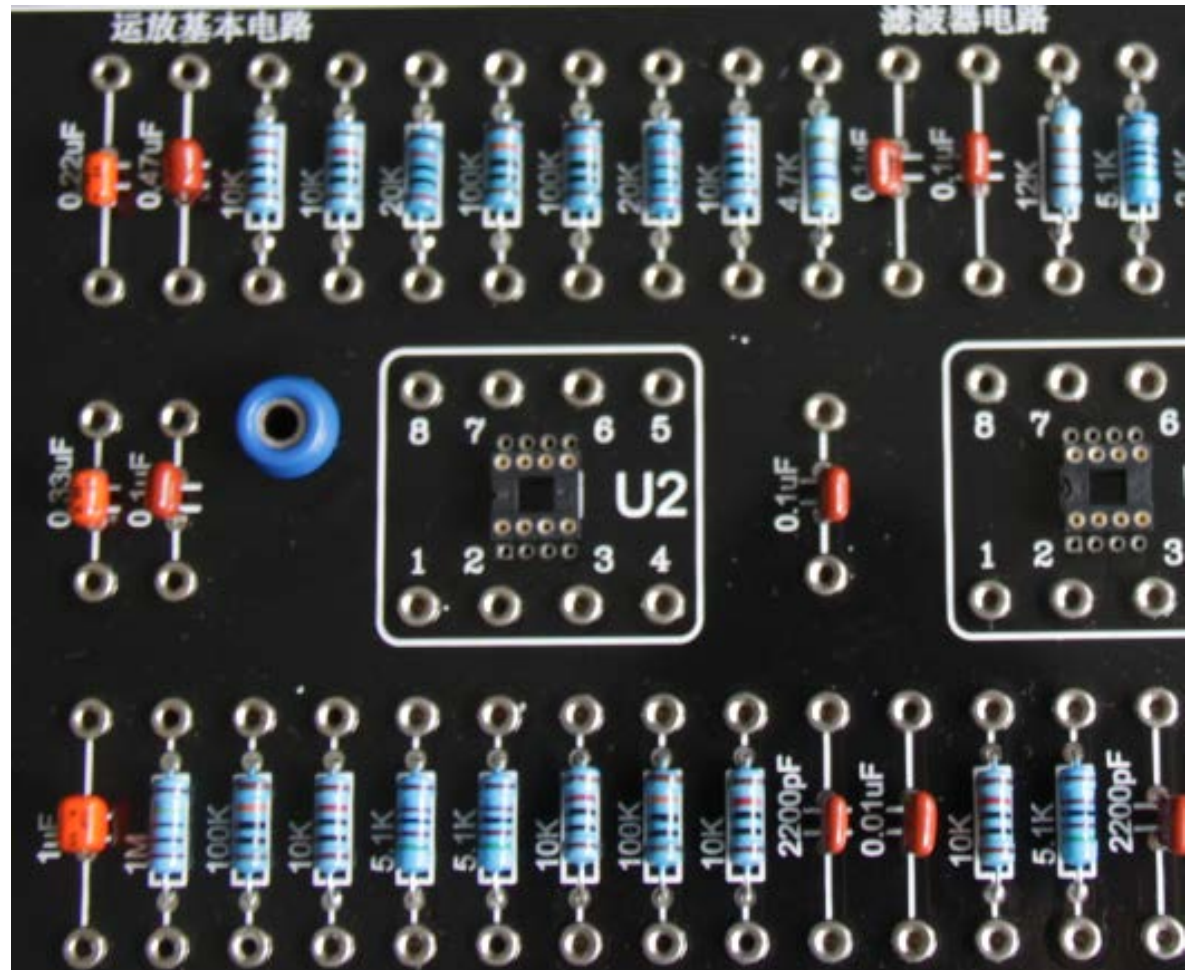
负电源或地



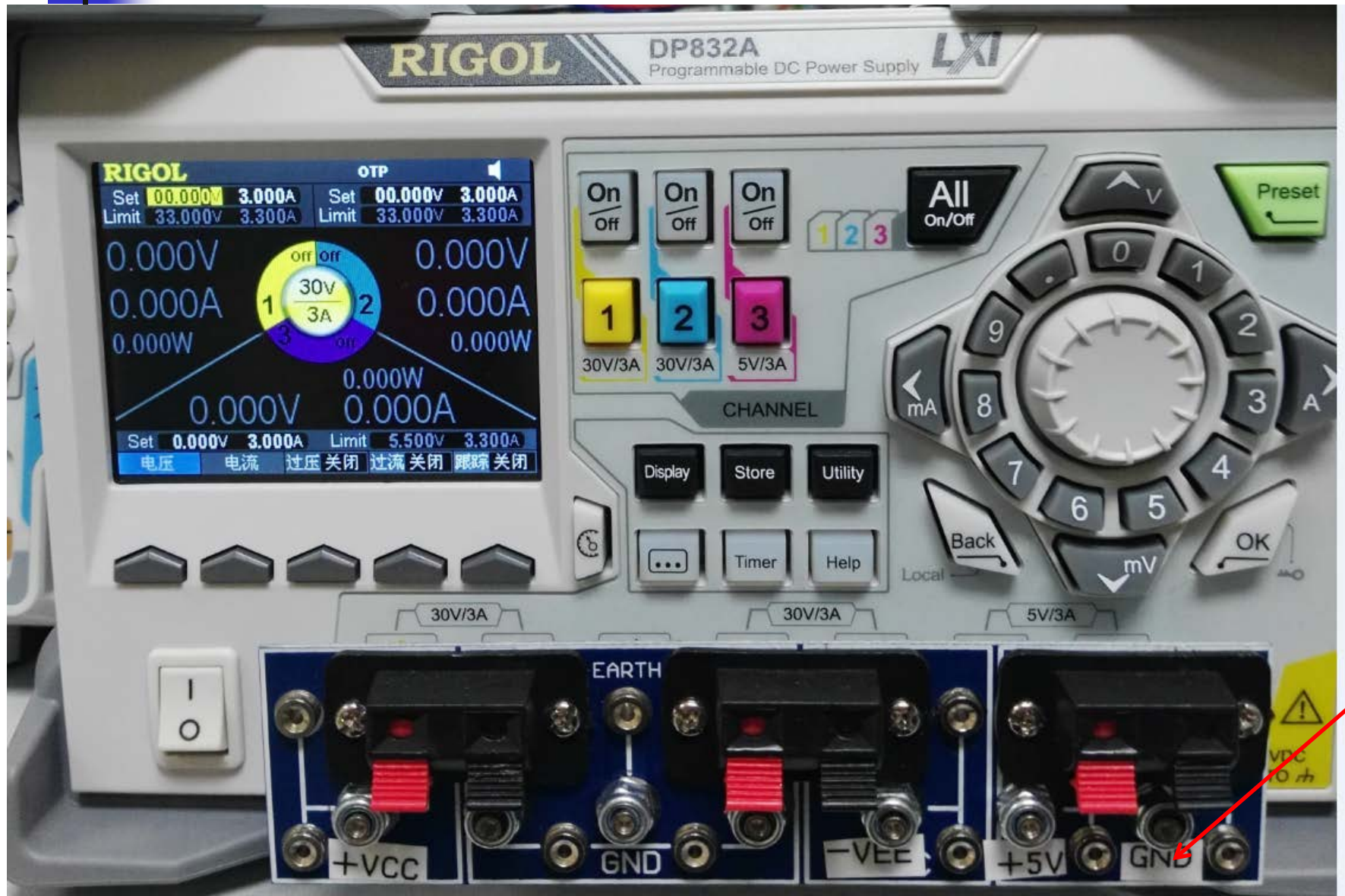
实验准备工作

- 1、在断电情况下，观察是否准确插入LM358。
- 2、用万用表测量实验箱上的+15V和-15V，或应用稳压电源调节+15V和-15V；以万用表测量示数为准。
- 3、关闭实验箱直流电源，连接各实验电路。**注意**：用导线将工作电源与+15V、-15V和COM2（GND）的连接方式。
- 4、检查示波器、函数发生器是否正常。
- 5、**注意**集成运放外围电阻的选择请参看PPT或其手册。

运放基本电路模块



Preset(2个GND是不连接在一起的)不要去连接EARTH



对称双电源情况下--运算电路的调试与测量

在调试运算电路时最好先进行静态调试，即将输入端接地，测量电路的输出，使之近似为零输出。如果反馈支路断开，或虚地端断开等，电路输出都会进入饱和输出。

在调试与测量运算电路时应注意：

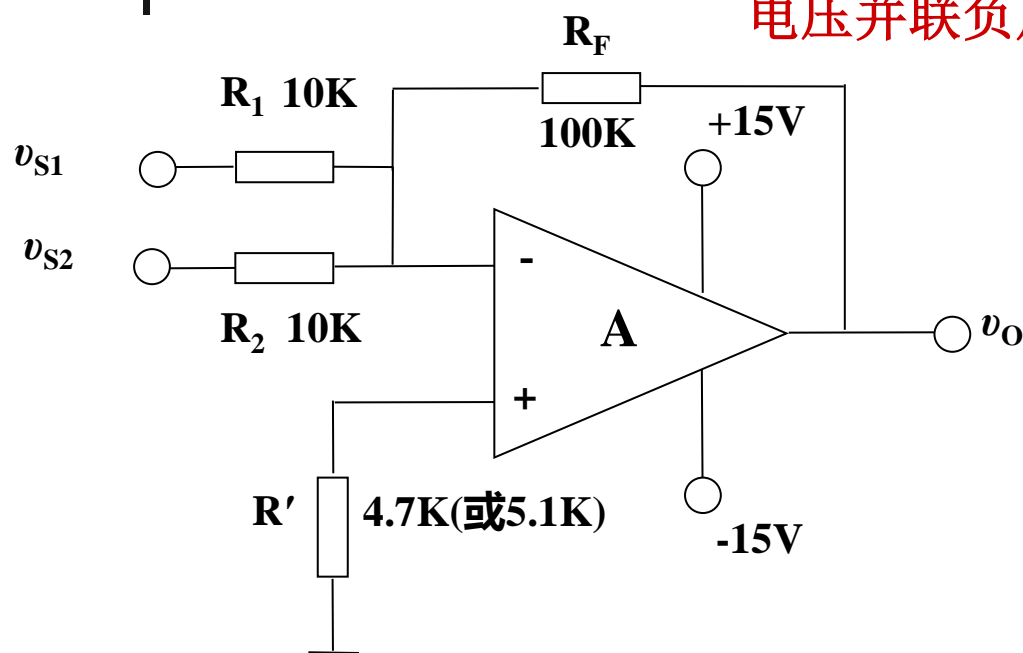
- ① 为了保证电路连接正确，首先应对电路进行静态调试，即保证在零输入时运放近似输出为零(失调电压)。
- ② 输入信号采用交流或直流均可，交流信号时又可以选择正弦波、方波或三角波。
- ③ 在选取信号的频率和幅度时，应考虑电路的频率响应和运放输出幅度的限制，保证频率位于电路的通频带内，并且运放输出不会进入饱和区。在运放输出没有出现饱和的前提下，输入信号应尽可能大一些，以得到较高的测量精度。
- ④ 为了防止运算电路出现自激振荡，应该用示波器监视运算电路的输出电压波形。

了解：可以单电源供电，也可以不对称电源电压供电的，只要工作电源电压之间的差值满足足够的电压差。

P323① 集成运放组成的比例、加法和积分等基本运算电路，在输入信号为0时，输出端的静态电压应该是多少？

1. 实现两个信号的反相加法运算测试电路

电压并联负反馈



$$v_O = -\left(\frac{R_F}{R_1}v_{S1} + \frac{R_F}{R_2}v_{S2}\right)$$

$$? R' = R_1 // R_2 // R_F$$

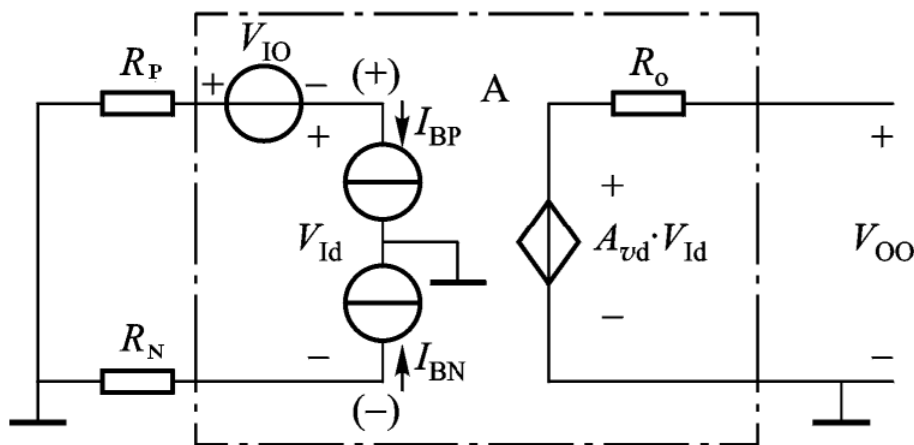
记录实验数据或波形。（测量工具 ... ，监视输入输出波形 ... ，与理论值对照 ... ）

注意：函数发生器输出**同相位**。RMS表示时示波器最好选择AC耦合，否则会有直流偏置被计数到RMS；**有毛刺请选择峰峰值；所有被测量表示RMS或峰峰值要保持一致！**

P324② 若基本运算电路，在输入信号为0时，输出端的静态电压为负饱和，其根本原因是什么？应如何处理？

P324③ 基本运算电路实验中应如何确定输入信号(正弦波、方波还是直流信号)？如何选择信号的幅度？**频率？**

了解P321平衡补偿电阻



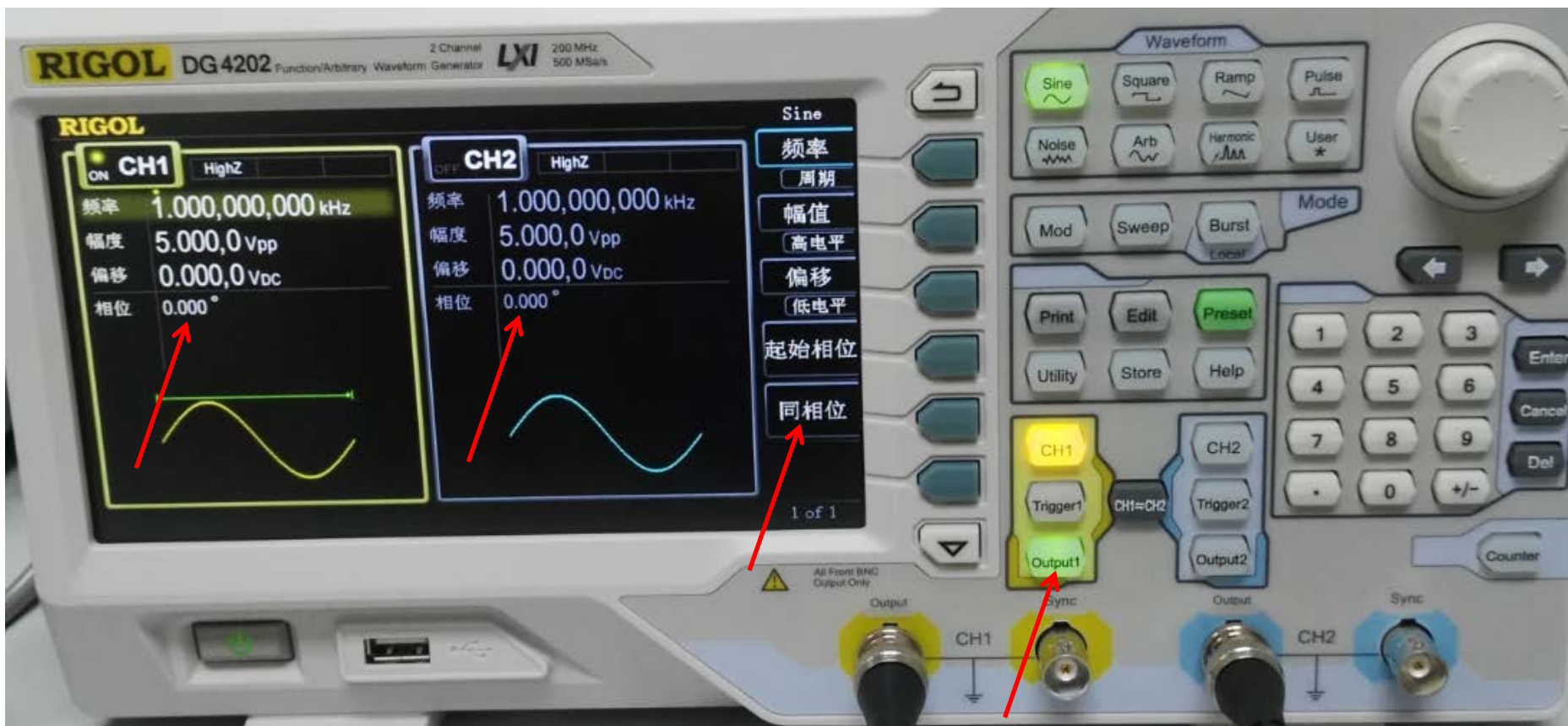
P321图9.7 分析输出失调的等效电路

静态时的输出电压（即失调电压）为：

$$V_{OO} = A_{od} \cdot V_{Id} = -A_{od} V_{IO} - A_{od} \left[(R_P - R_N) I_{IB} + (R_P + R_N) \frac{I_{IO}}{2} \right]$$

在一些比较老的器件中，由于 I_{IO} 幅度的数量级一般比 I_{IB} 小（如LM358的 I_{IB} 的典型值为20nA，而 I_{IO} 为2nA）因此抵消掉可以大大改善偏置电流带来的误差。但在最新工艺的一些器件中，由于在芯片内部已经有 I_{IB} 的补偿电路，使得 I_{IO} 与 I_{IB} 的差别不大（均为最大1nA），这时采用这样的补偿方法就没有意义，反而会引入额外的失调和电阻噪声，这也是为什么我们在现在的一些数据手册上已经看不到平衡电阻的原因。

DG4000函数发生器



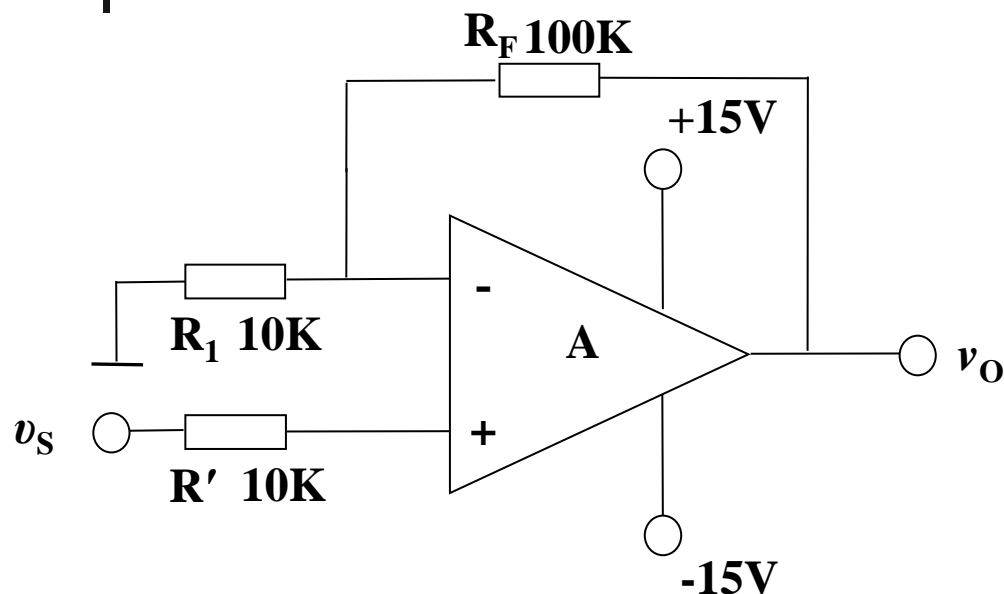
注意：相位0.000指的是各自的初始相位为0。要使函数发生器的CH1和CH2有相同的初始相位，还是两个同相位按钮得按一下。

MSCO4054示波器



注意：触发信源选择、Cursor和自动测量情况、

2. 实现单一信号同相比例运算测试电路



$$v_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) v_s$$

? $R' = R_1 // R_F$

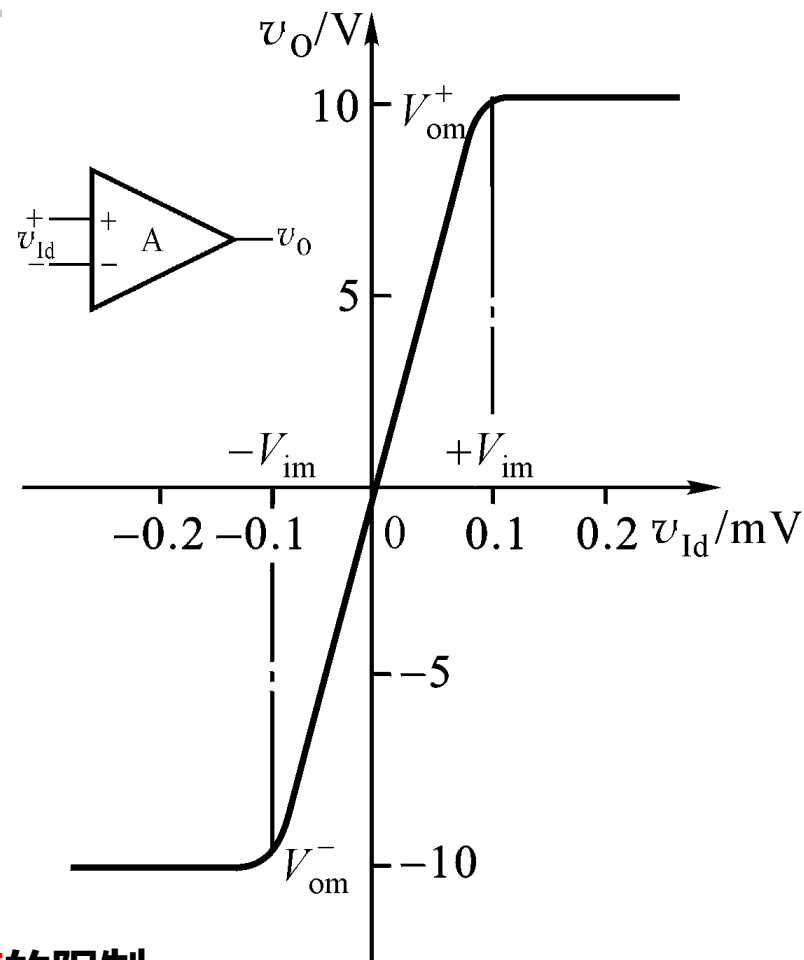
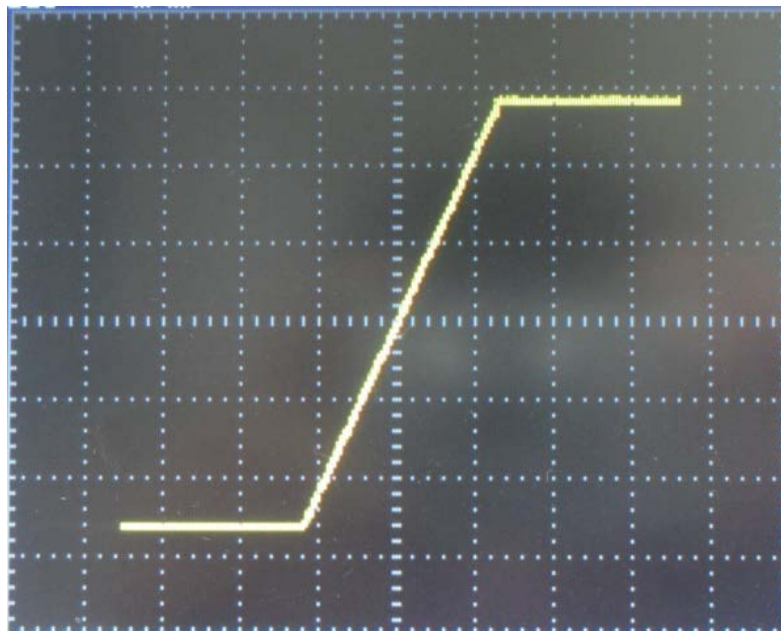
实验电路图 电压串联负反馈（跟随器）

1. 实验记录与反相加法运算实验相同

2. 集成运放的电压传输特性 $v_o = f(v_s)$ 是在**直流或低频**条件下的输入输出关系；示波器需**DC**耦合输入方式。

问题1：什么是集成运算放大器的电压传输特性？输入方式的改变将如何影响电压传输特性？

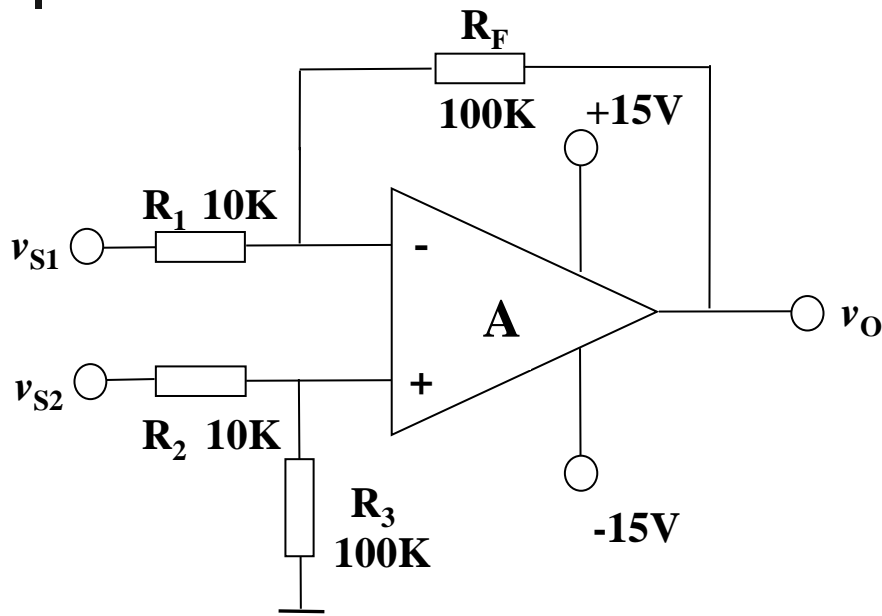
$V_o = f(V_s)$ 电压传输特性，包含线性和非线性(饱和)工作区



输出信号的大小受放大电路的**最大输出幅度**的限制，
因此输入输出只在一定范围内是保持**线性关系**的。

问题2：由该电压传输特性曲线可得到什么参数？最大不失真输出有什么决定？

3. 实现两个信号的减法(差分)运算测试电路



$$v_o = \frac{R_F}{R_1} (v_{s2} - v_{s1})$$

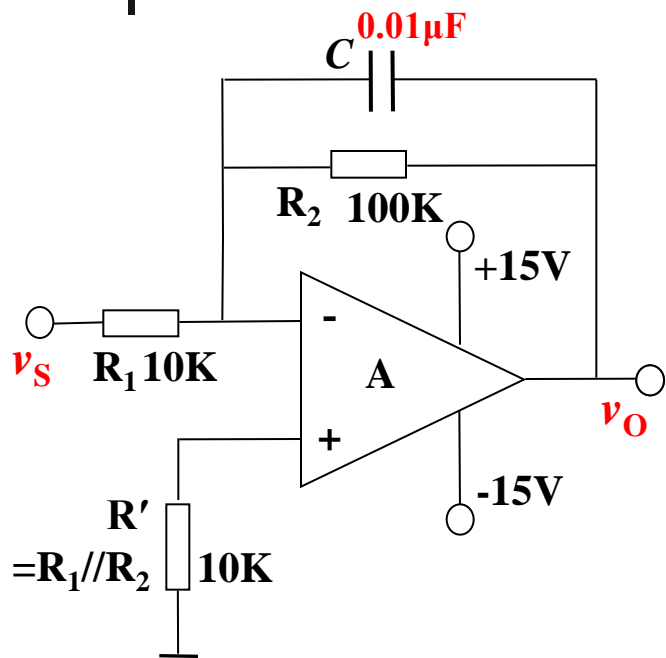
1. 差分放大电路即减法器
2. 为了消除输入偏置电流以及输入共模成分的影响，要求 $R_1 = R_2$ 、 $R_F = R_3$ 。

实验电路图

实验记录与反相加法运算实验相同，**注意**：函数发生器输出**同相位**。

问题3：集成运算放大器的输入输出成线性关系，输出电压将会无限增大，这话对吗？为什么？ v_{S1} 和 v_{S2} 取值范围？

4. 用积分电路将方波转换为三角波测试电路



电路中电阻 R_2 的接入是为了抑制由 I_{IO} 和 V_{IO} 所造成的积分漂移，从而稳定集成运放的输出。

在 $t \ll \tau_2$ ($\tau_2 = R_2 C$) 的条件下，若 v_s 为常数，则 v_o 与 t 将近似成线性关系。因此，当 v_s 为方波信号并满足 $T_p \ll \tau_2$ 时 (T_p 为方波高电平宽度)，则 v_o 为三角波，且方波的周期愈小，三角波的线性度愈好，但三角波的幅度将随之减小。

方波的周期可按 $T_p \approx \tau_2$ 、 $T_p \ll \tau_2$ 和 $T_p \gg \tau_2$ 三种情况来选取，分别用示波器观察输出和输入电压波形，记录输出电压波形的幅度和线性情况。

建议应用平均值为0的方波，这样示波器耦合选择DC。

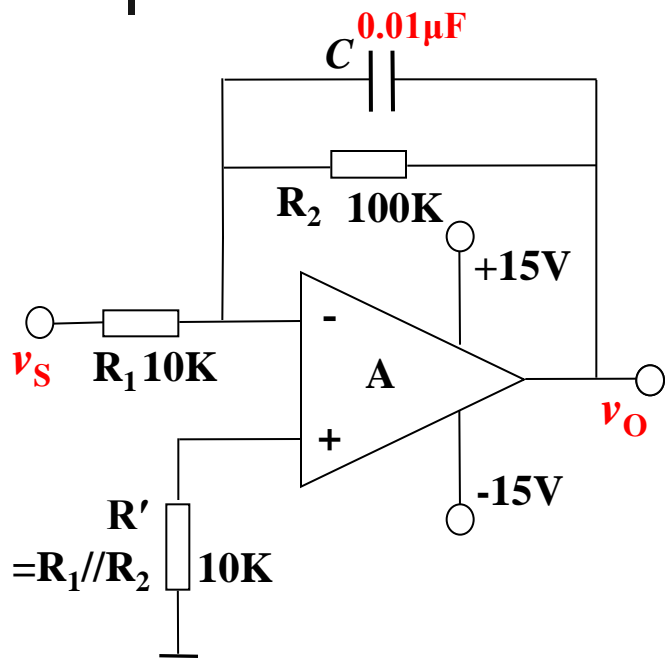
当输入直流电压时:
$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_s (1 - e^{-t/R_2 C}) = -\frac{R_2}{R_1} v_s (1 - e^{-t/\tau_2})$$

在 $t \ll \tau_2$ 时:
$$1 - e^{-t/\tau_2} \approx \frac{t}{\tau_2}$$

$$v_o \approx -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{v_s}{\tau_2} t = -\frac{v_s}{R_1 C} t = -\frac{v_s}{\tau_1} t \quad \tau_1 = R_1 C$$

P324⑤ 若要将方波转换成三角波，可选用哪一种运算电路？

$$\tau_2 = R_2 C = 100 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} \text{ s} = 1 \text{ ms}$$



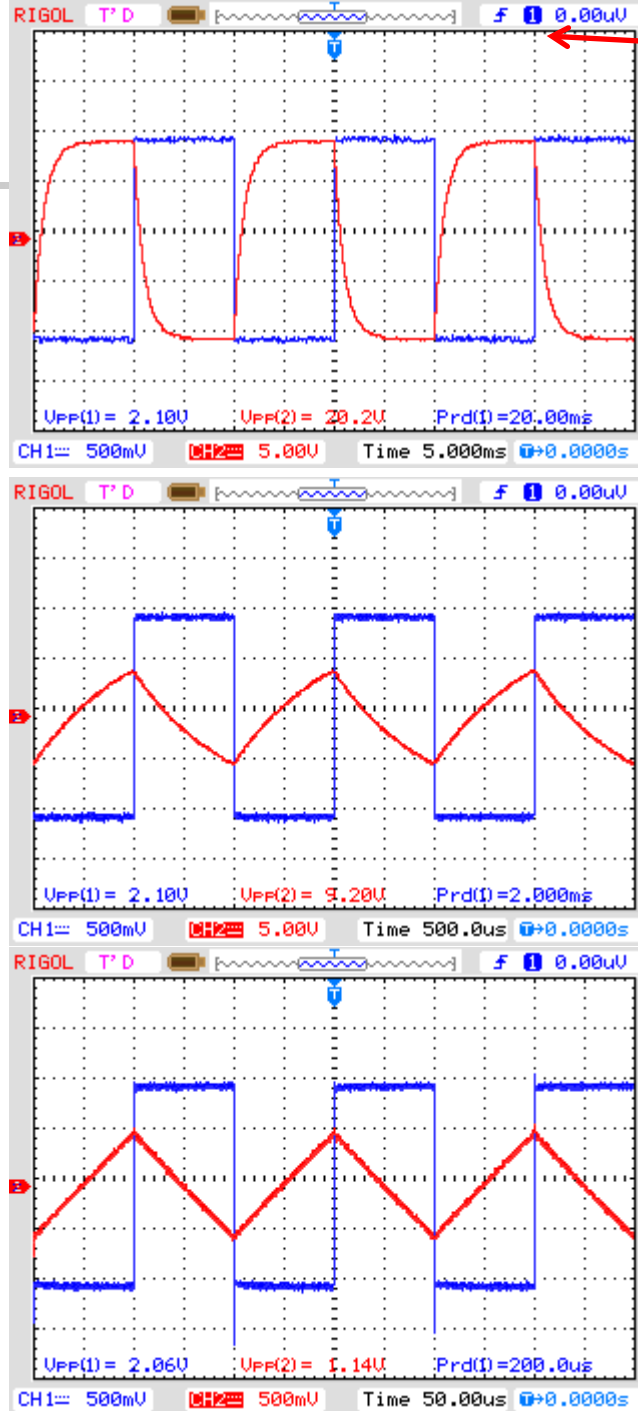
$T_P \gg \tau_2$
10倍

$T_P \approx \tau_2$

$T_P \ll \tau_2$
0.1倍

$$v_o \approx -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{v_s}{\tau_2} t = -\frac{v_s}{R_1 C} t = -\frac{v_2}{\tau_1} t$$

$$\tau_1 = R_1 C = 10 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} \text{ s} = 0.1 \text{ ms}$$



验收参考

问题4：若用单极性方波该实验能否实现，为什么？

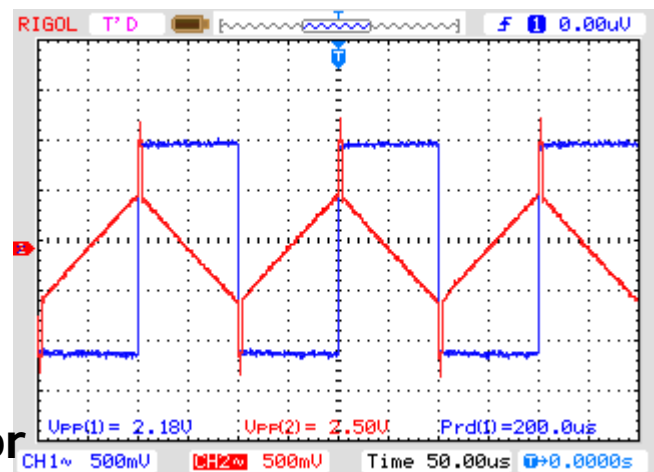
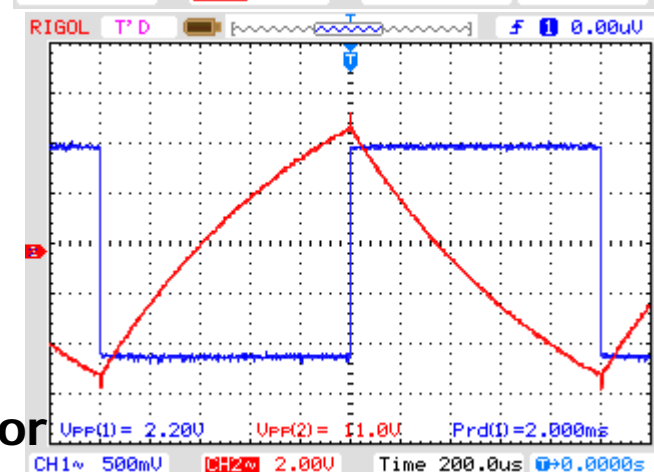
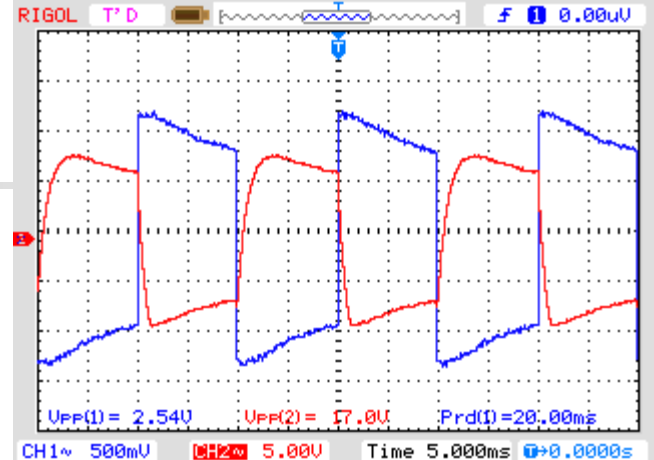
$T_p \gg \tau_2$
10倍
波形变形

? 注意：? 测量三角波的示波器输入耦合一般**可以**选择AC耦合！（但 $V_{OFF}=0V$ ，还建议选择DC耦合）

右图的方波幅度是0~2V，即 $V_{OFF}=1V$ （方波平均值不为0）；此时示波器的输入耦合都选择AC了。

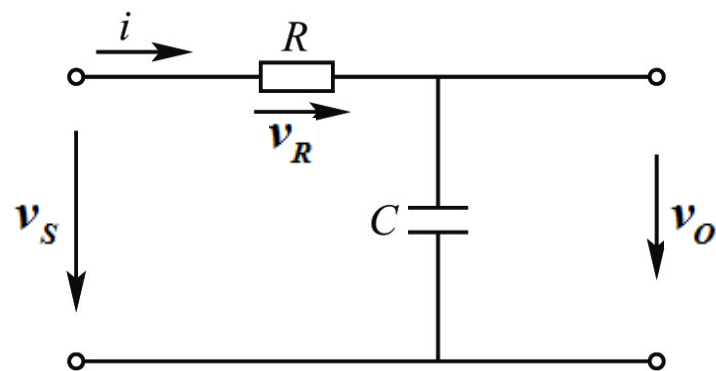
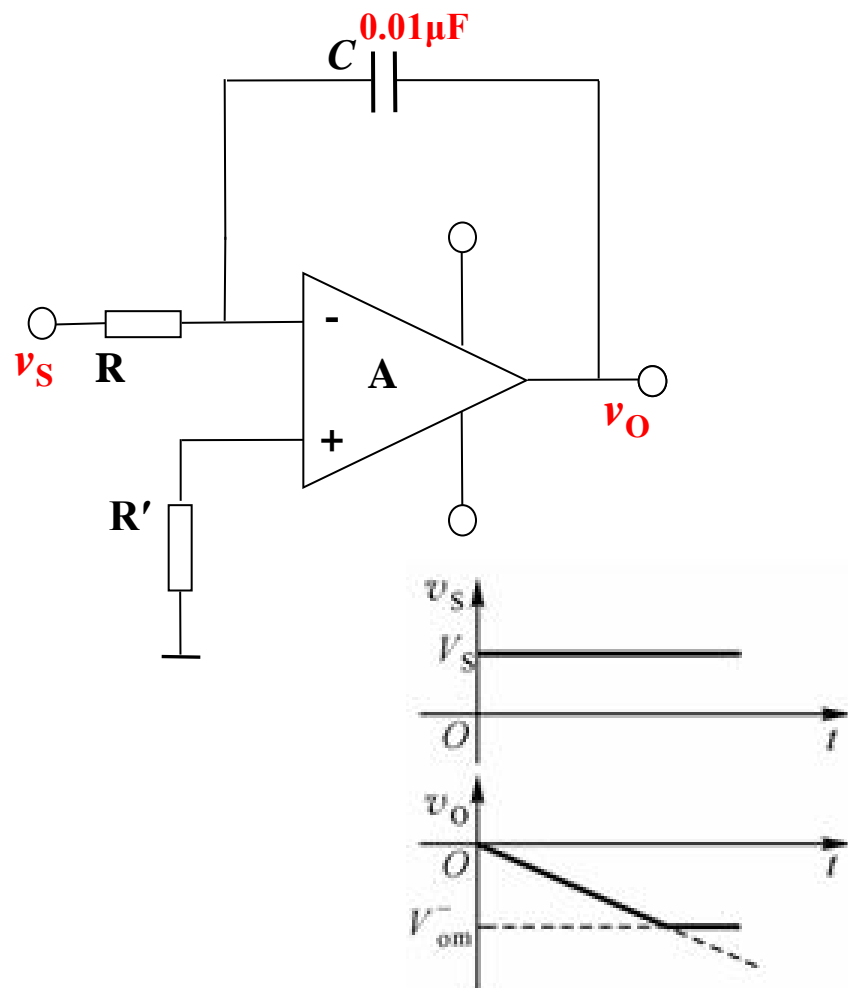
$T_p \approx \tau_2$
毛刺输出
测量有误
建议Cursor

$T_p \ll \tau_2$
0.1倍
毛刺输出
测量有误
建议Cursor



回顾上个秋学期的实验

$$v_R = v_S; v_O = v_C = \frac{1}{C} \int i dt \approx \frac{1}{RC} \int v_S dt$$

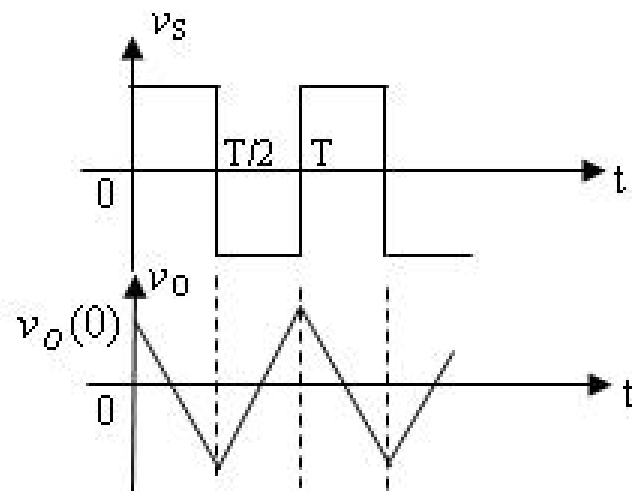


$$T \ll \tau$$

$$R = 1k\Omega \quad C = 0.1\mu F$$

$$R = 10k\Omega \quad C = 0.1\mu F$$

$$R = 10k\Omega \quad C = 1\mu F$$



选做5. 查看积分电路的输出轨迹(或参见P323图9.10)

P324④ 在运算电路中为什么要接平衡电阻？
其阻值如何确定？

初始时，闭合 S_1 ，打开 S_2 ；（利用 R_2 的负反馈，作静态调试）
静态调试完成后，打开 K_1 ；

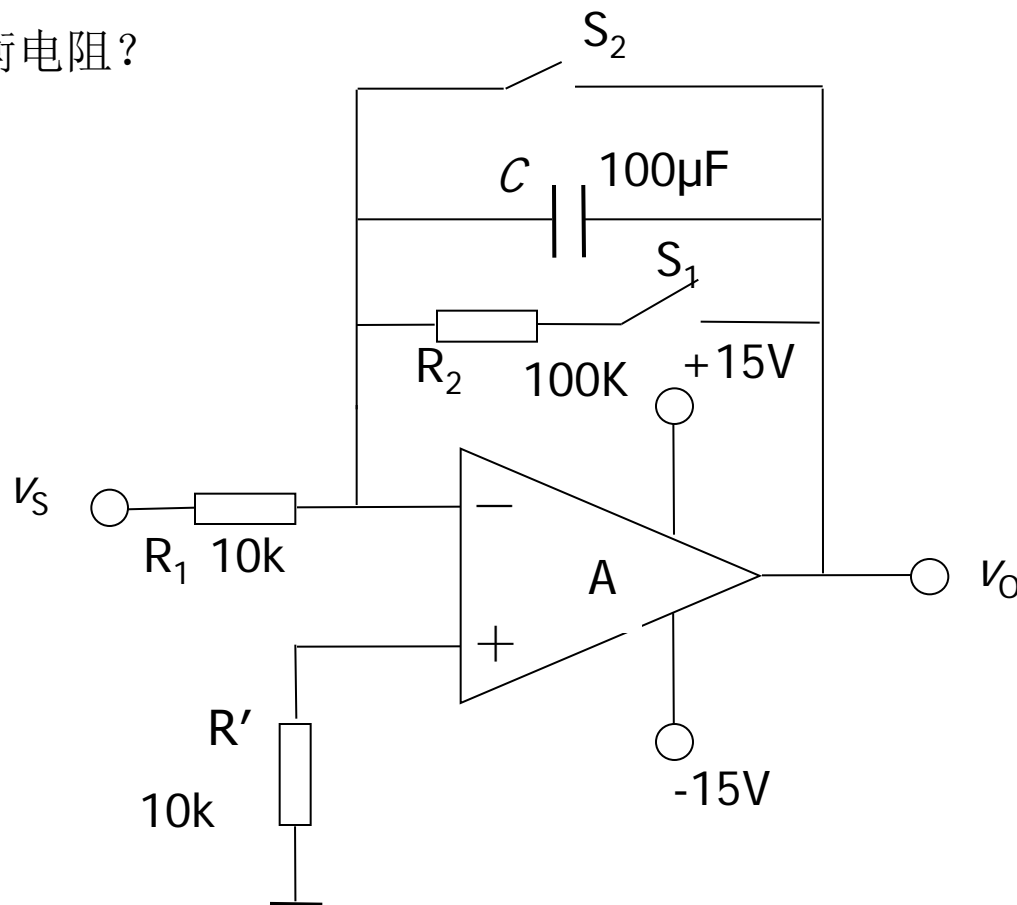
（避免因 R_2 造成的积分误差）

（依旧闭合 S_1 可以吗？）

闭合 S_2 ，加入合适的输入信号

v_s ；

打开 S_2 ，用**示波器**观察 v_o 随时间的变化轨迹。



S_2 ：提供电容放电回路、控制积分起始点。

（闭合 S_2 ，电容初始电压为零）

（打开 S_2 ，开始积分运算）

$$v_o = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t v_s dt = -\frac{v_s t}{R_1 C}$$

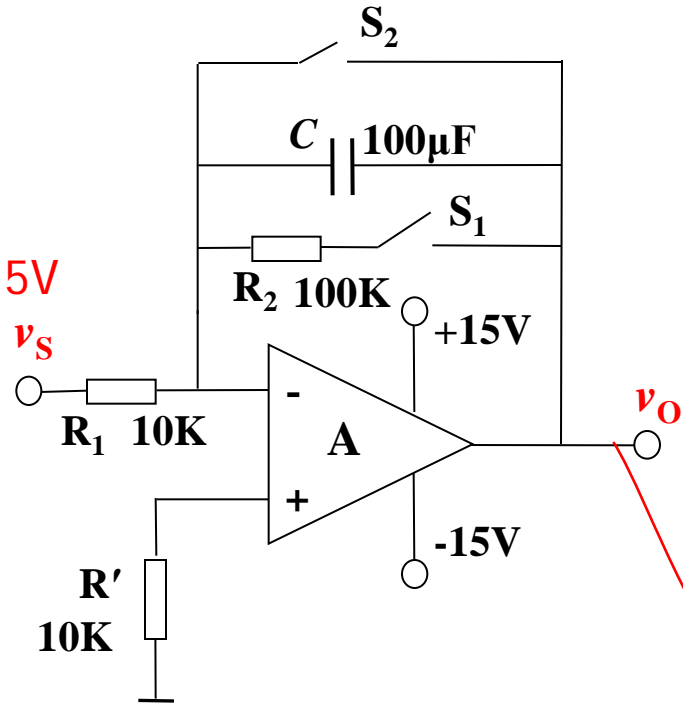
积分电路的输出轨迹的实验步骤与结果记录

- 1) 接入电阻 R_2 (即合上 S_1)，检查零输入时电路零输出。
- 2) 断开 R_2 (即断开 S_1)，加入**5V直流**输入（实验箱直流信号源调节）；合上 S_2 ，将电容 C 放电。
- 3) 将示波器按钮置于适当位置：
 - ① Y轴输入耦合选用“**DC**”；
 - ② 将光迹移至屏幕**上方**；
 - ③ **X轴扫描速率足够慢(1S或500mS)**；**Y轴扫描刻度5V或2V**；
 - ④ 触发方式采用“边沿、自动”。
- 4) 最后将 S_2 断开，即可看到光点随时间的移动轨迹。
- 5) 画图记录光点随时间的移动轨迹。

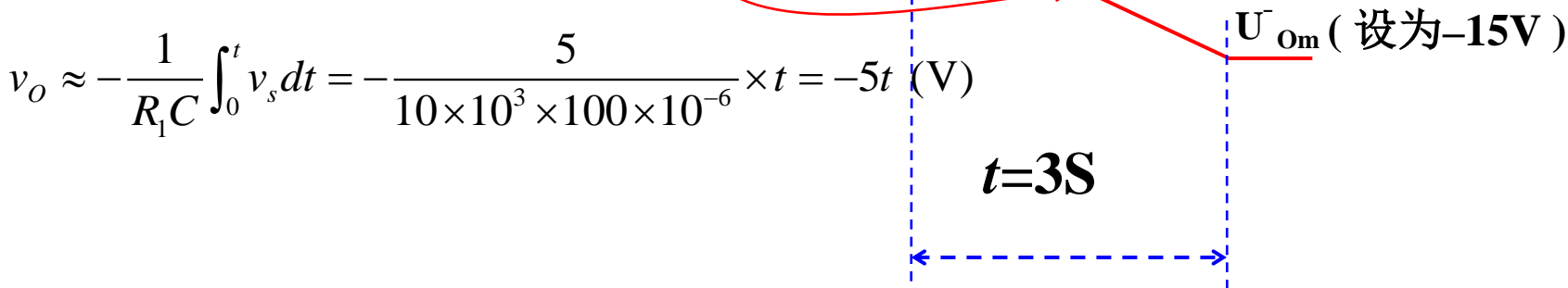
(**注意**：示波器的：触发方式、耦合方式、垂直灵敏度、扫描灵敏度 ...)

积分电路的输出轨迹的自选实验参考

将实验数据及波形填入下述表格中：



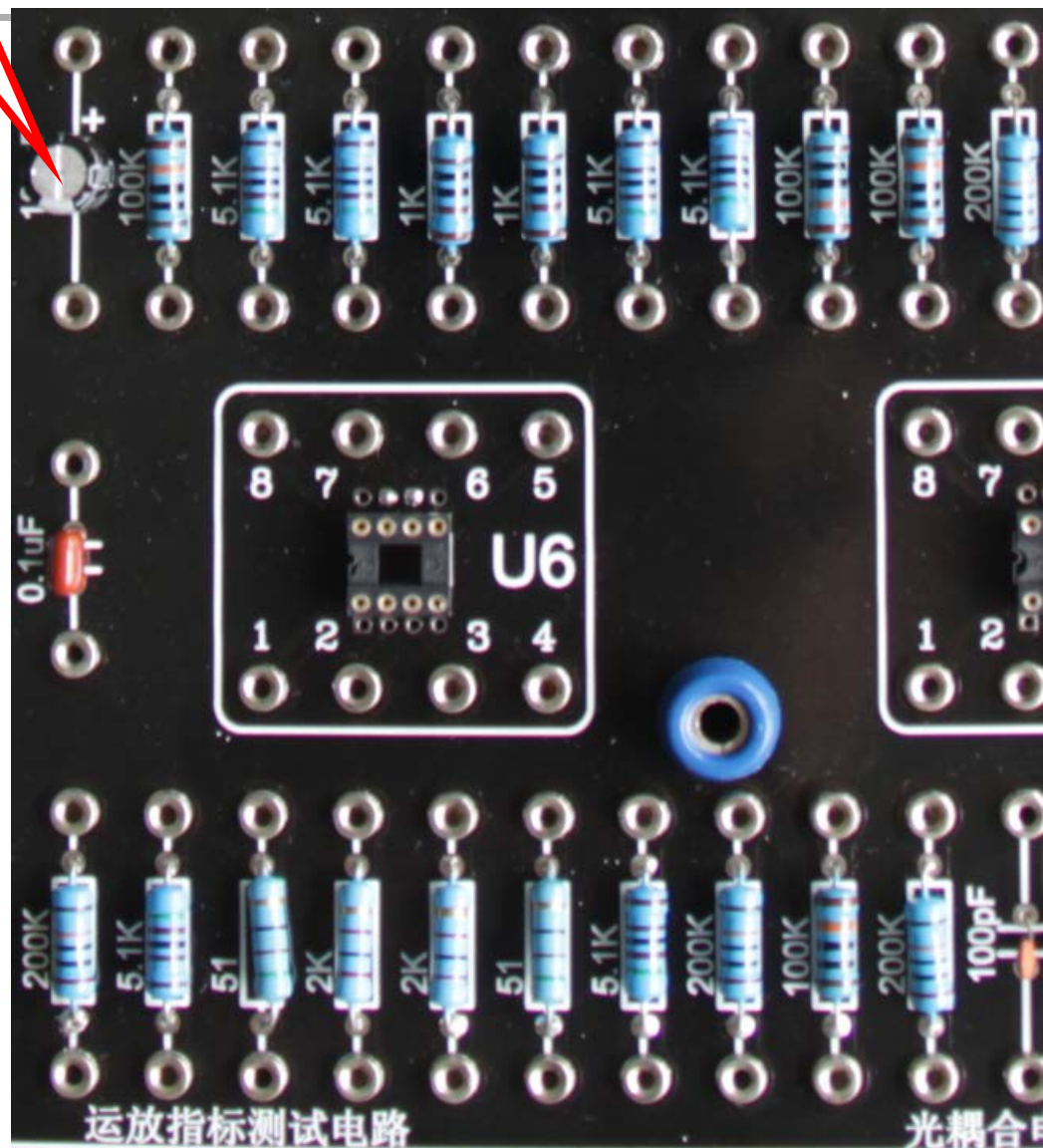
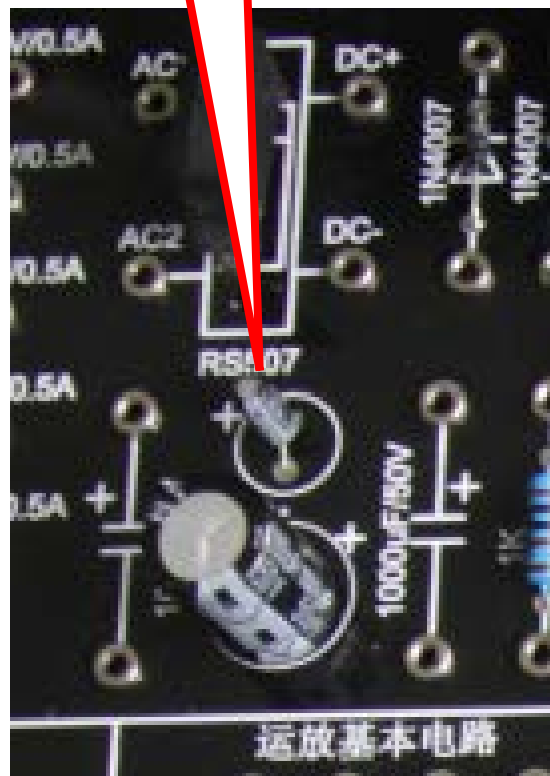
v_s 波形	v_o 波形	v_o 峰峰值
直流 输入 5V		



问题5：积分轨迹电路中若是电解电容，则应该注意什么？

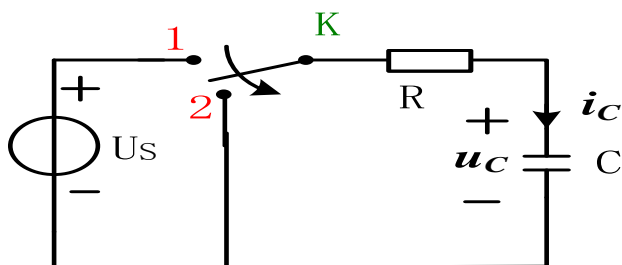
100uF

10uF



回顾上个秋学期的实验任务

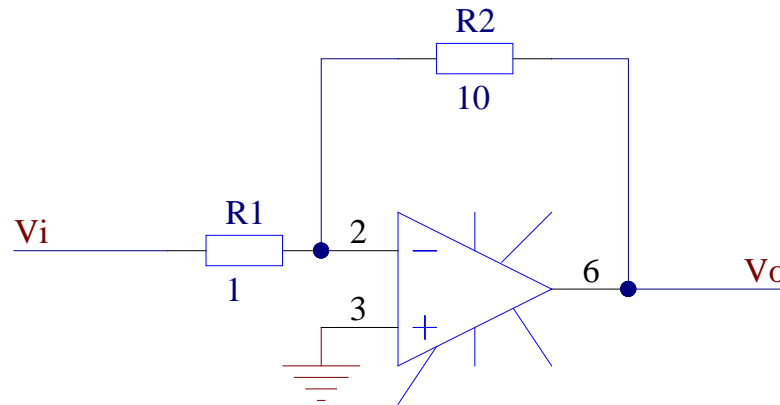
RC充放电电路。在示波器上观察RC一阶电路零输入响应（充电）、零状态响应（放电）、全响应的曲线。测量电路时间常数 τ ，与理论值比较。



- 1) 直流电压源5V,选择
 $R=1k\Omega, C=1000\mu F$ (DG08板)
(电解电容 , 注意极性,电容漏电阻检查电容好坏)
- 2) 开关的接法
- 3) 示波器通CH1选1V/格 , 直流耦合
- 4) 示波器的时基选为500ms
- 5) 单次触发 (TRIGGER-MENU-选择单次触发) 或RUN/STOP
- 6) 光标选择追踪

附录：器件选择1

➤ 要设计一个放大倍数为-10倍的信号放大电路，问如下电路设计是否正确：

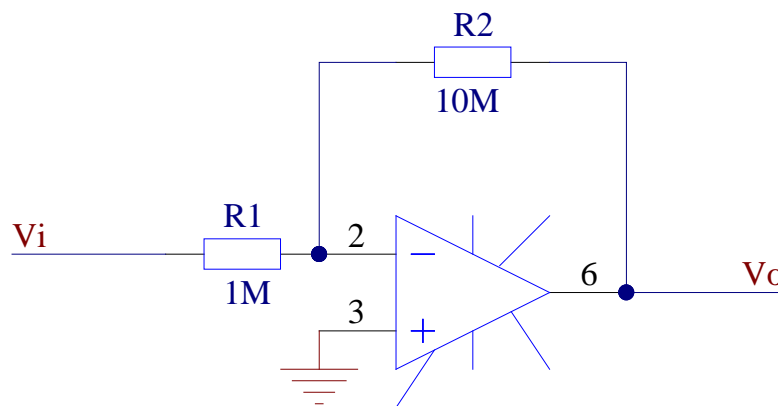


◆ 答：理论上 $V_o = -(R_2/R_1)V_i = -10 V_i$ ，但普通运放无法提供 R_2 回路所需的电流，即 $I_2 = V_o/R_2 \approx 1/10 = 100\text{mA}$ ；另外信号源的内阻问题。

（一般集成运放输出电流 I_{om} 为几个 $\sim 10\text{mA}$ ）

附录：器件选择2

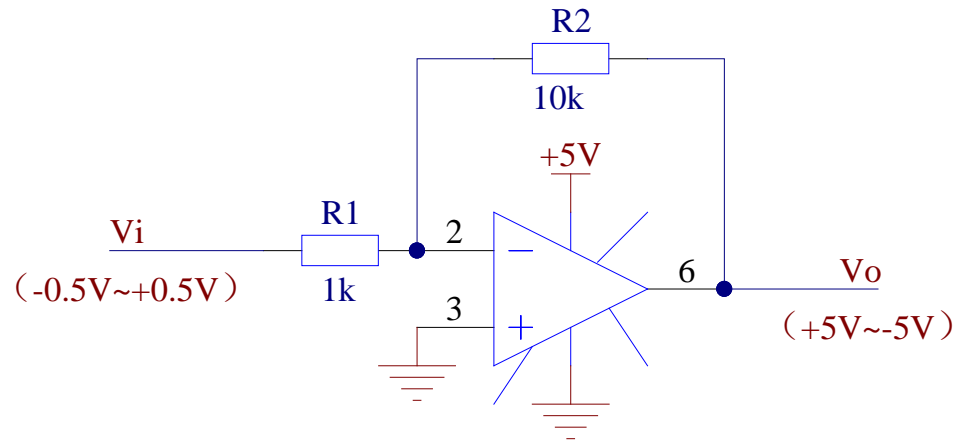
➤改进设计，将 $R1$ 、 $R2$ 分别取为1M和10M，问如下电路设计是否正确：



◆答： $R1$ 、 $R2$ 分别取为1M和10M 后，解决了普通运放无法提供 $R2$ 回路所需的电流的问题，但带来的另一个问题是：电阻阻值过大时，其阻值容易受潮湿环境影响，进而影响放大电路增益的稳定性。

附录：器件选择3

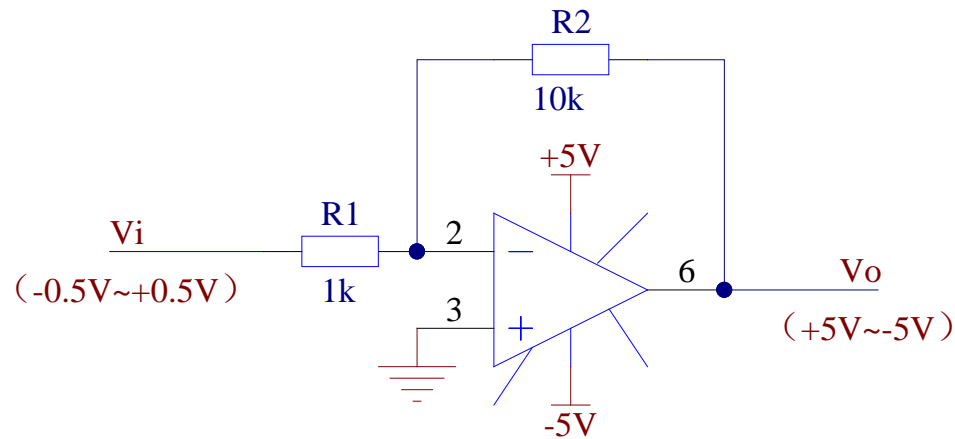
➤再改进设计，将 R_1 、 R_2 分别取为 $1k$ 和 $10k$ ，并添加条件，输入为 $-0.5V \sim +0.5V$ 变化的信号，问如下电路设计是否正确：



◆答：输入 V_i 和输出 V_o 都是双极性信号，正负电压都有可能出现，要求运放也是双极性供电。

附录：器件选择4

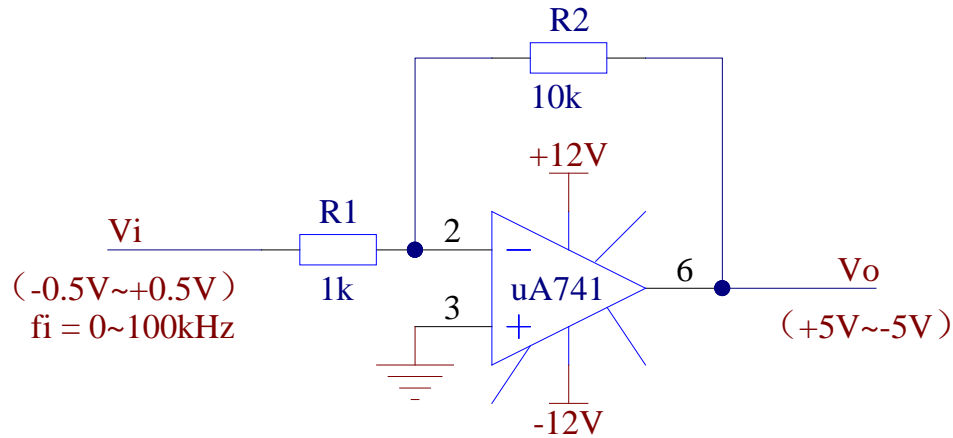
➤再改进设计，将供电电源改为 $\pm 5V$ 双电源供电，问如下电路设计是否正确：



◆答：电源采用 $\pm 5V$ 双电源供电后，输入 V_i 没问题，但输出 V_o 将达不到 $\pm 5V$ ，会出现削顶（平顶）现象。可改用轨到轨（Rail-to-Rail）运放，或改变供电电源的电压值。

附录：器件选择5

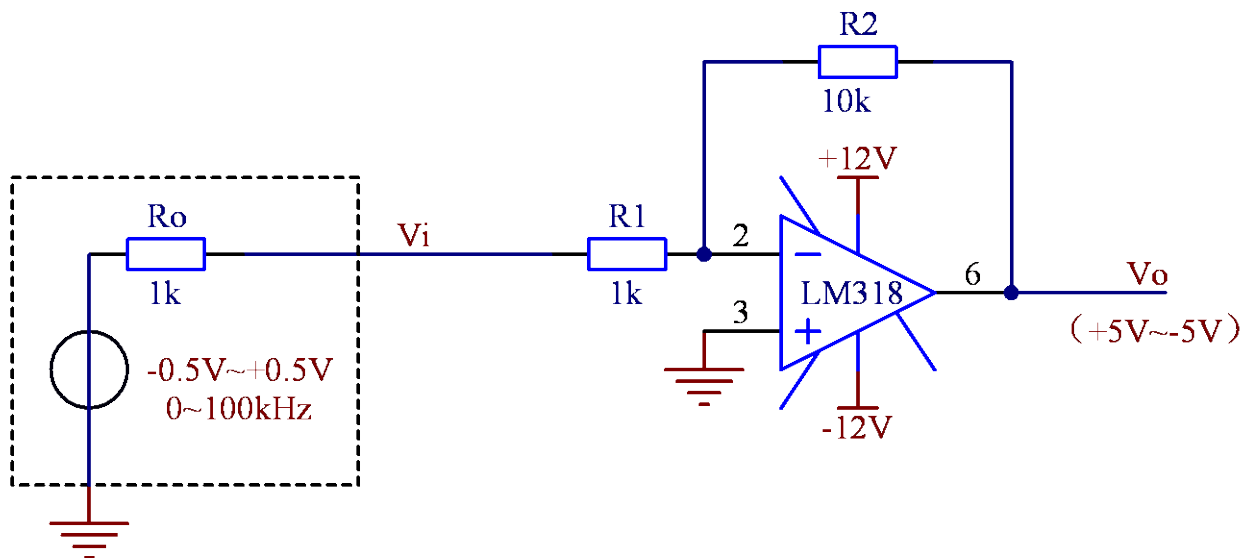
➤再改进设计，将供电电源改为 $\pm 12\text{V}$ 双电源供电，并添加条件，如果输入为频率 $f_i = 0 \sim 100\text{kHz}$ 的信号，问如下电路设计是否正确：



◆答：该电路输入 100kHz 信号时，要求运放的摆率 $\text{SR} > 10\text{V}_{\text{pp}}/5\ \mu\text{s} = 2\text{V}/\mu\text{s}$ ；增益带宽积 $\text{GBW} > 100\text{kHz} \times 10 = 1\text{MHz}$ 。查uA741数据手册可知，该运放的 $\text{SR} = 0.5\text{V}/\mu\text{s}$ ， $\text{GBW} = 0.9\text{MHz}$ ，均不能满足要求，因此会导致输出信号幅度上的衰减，并使输出信号发生失真（正弦波变为三角波）。因此需要改用高速运放。

附录：器件选择6

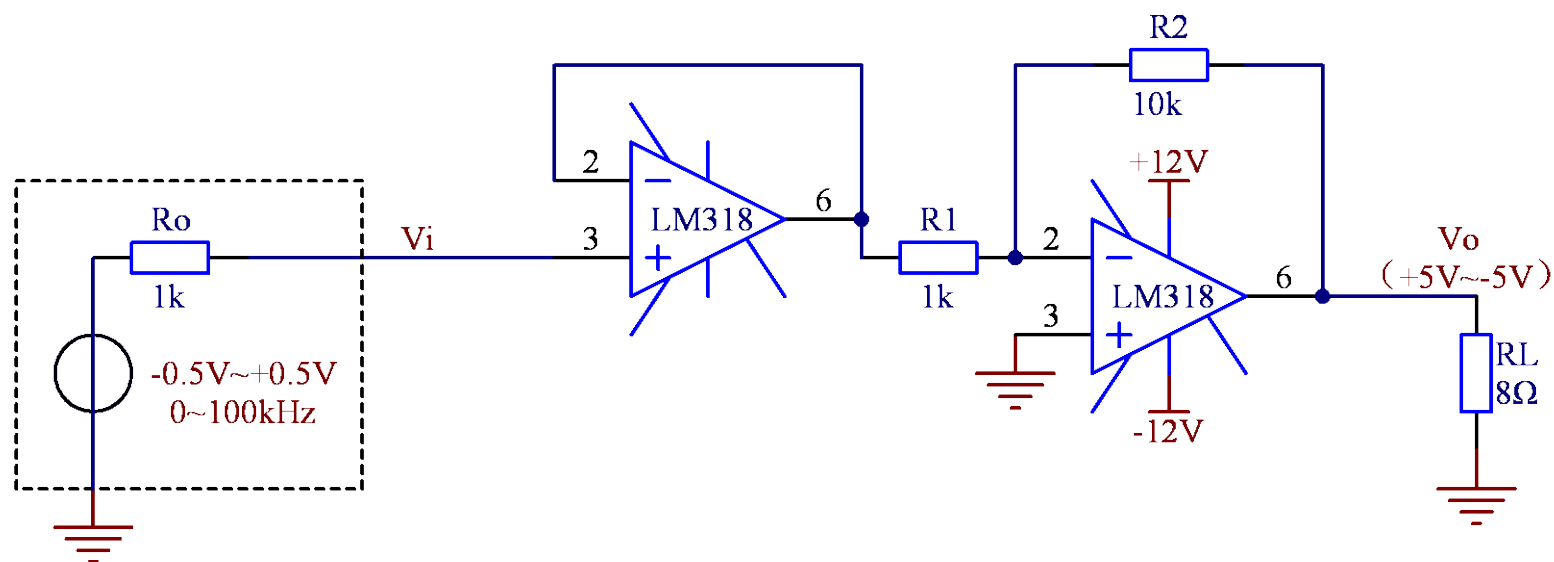
➤再改进设计，将运放改为高速型的LM318，并添加条件，如果信号源有约为1k的等效内阻抗，问如下电路设计是否正确：



◆答：因为信号源的内阻抗的存在，实际输入到放大电路输入端的信号幅度已发生衰减，输出信号无法真实反映信号源的情况。因此，需要增加输入阻抗变换电路。

附录：器件选择7

➤再改进设计，在放大电路输入信号端增加一个由运放构成的电压跟随器，并添加条件，如果放大电路输出信号所接负载为 8Ω 阻性负载，问如下电路设计是否正确：



◆答：因为负载电阻较小，流过负载的电流较大，普通运放无法驱动该负载，因此输出信号需要经过扩流，或增加线性功率驱动电路。

思考题

问题1：什么是集成运算放大器的电压传输特性？输入方式的改变将如何影响电压传输特性？

问题2：由电压传输特性曲线可得到什么参数？

问题3：集成运算放大器的输入输出成线性关系，输出电压将会无限增大，这话对吗？为什么？ V_{S1} 和 V_{S2} 取值范围？

问题4：若用单极性方波，方波转换三角波实验能否实现吗，为什么？

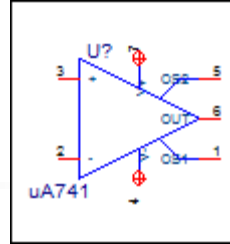
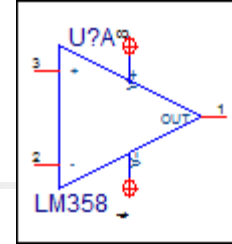
问题5：积分轨迹电路中若是电解电容，则应该注意什么？

实验教程：思考与讨论

P323-324

- ① 集成运放组成的比例、加法和积分等基本运算电路，在输入信号为0时，输出端的静态电压应该是多少？
- ② 若基本运算电路，在输入信号为0时，输出端的静态电压为负饱和，其根本原因是什么？应如何处理？
- ③ 基本运算电路实验中应如何确定输入信号(正弦波、方波还是直流信号)？如何选择信号的幅度？频率？
- ④ 在运算电路中为什么要接平衡电阻？其阻值如何确定？
- ⑤ 若要将方波变换成三角波，可选用哪一种运算电路？

课后作业

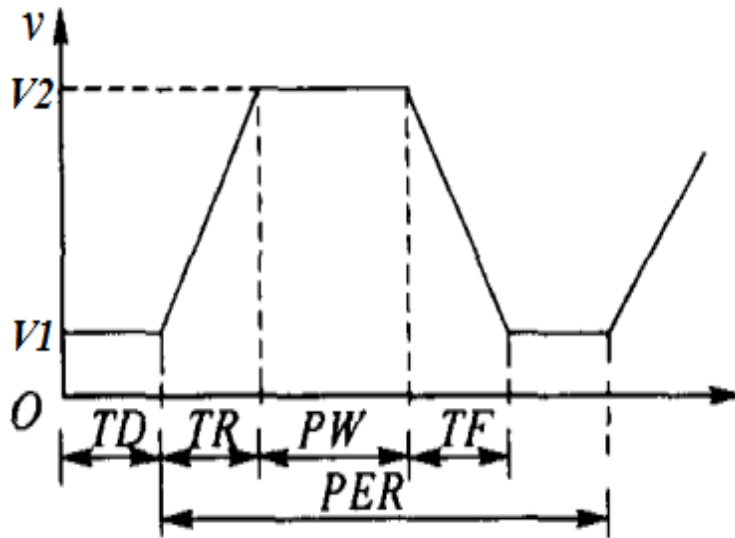


本次需提交实验报告，要求请参看实验教材的要求和课件要求，及请回答教材和课件中思考问题。

选做：请应用ORCAD仿真本次实验任务，且请把整个文件夹提交至FTP。

- 1、请提交做好的整个EDA文件夹的内容；请配上word文档说明。
- 2、提交时需压缩文件，压缩文件名的命名“座号_姓名.rar”。
- 3、提交的位置和截止时间：

“选做06 集成运算放大器的指标测试_下次上课前提交”



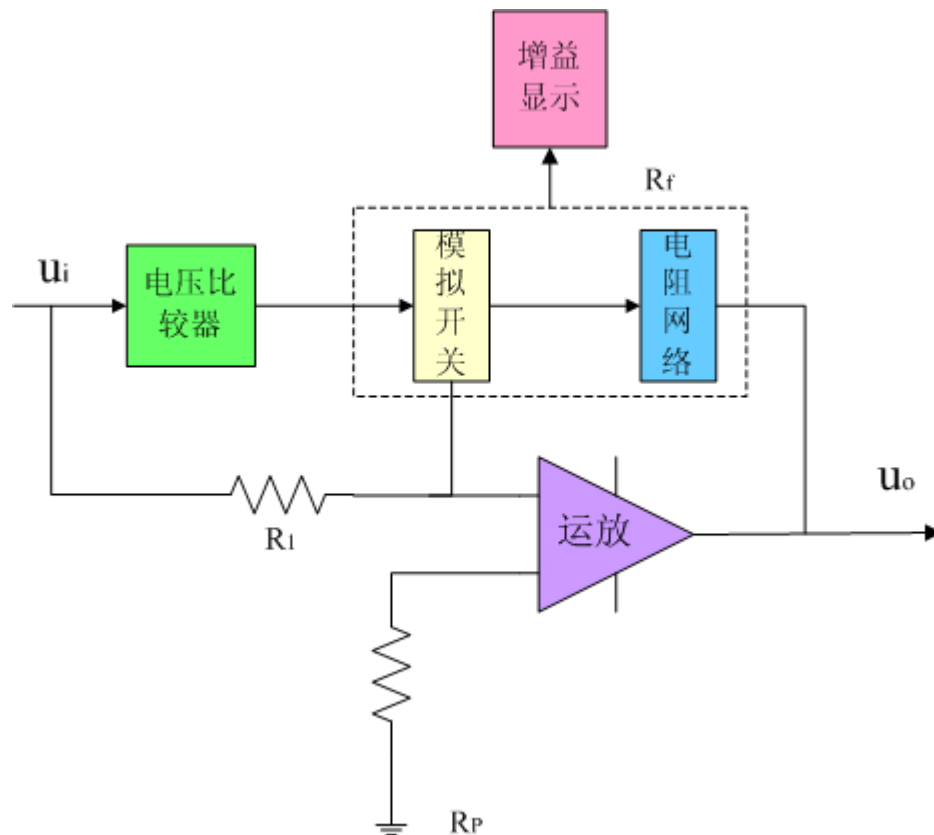
参数名称	参数含意	隐含值	单位
V_1 或 I_1	起始值	—	V或A
V_2 或 I_2	脉冲值	—	V或A
TD	延迟时间	0	s
TR	上升时间	$TSTEP$	s
TF	下降时间	$TSTEP$	s
PW	脉冲宽度	$TSTOP$	s
PER	脉冲周期	$TSTOP$	s

脉冲信号源 (VPULSE、IPULSE) P125

本学期创新实验（选做）基本任务

1、输入为0.1-5V的直流信号，0.1-0.5V时放大6倍,0.5-1.5V时放大2倍，1.5-5V时放大0.5倍，并显示放大倍数。

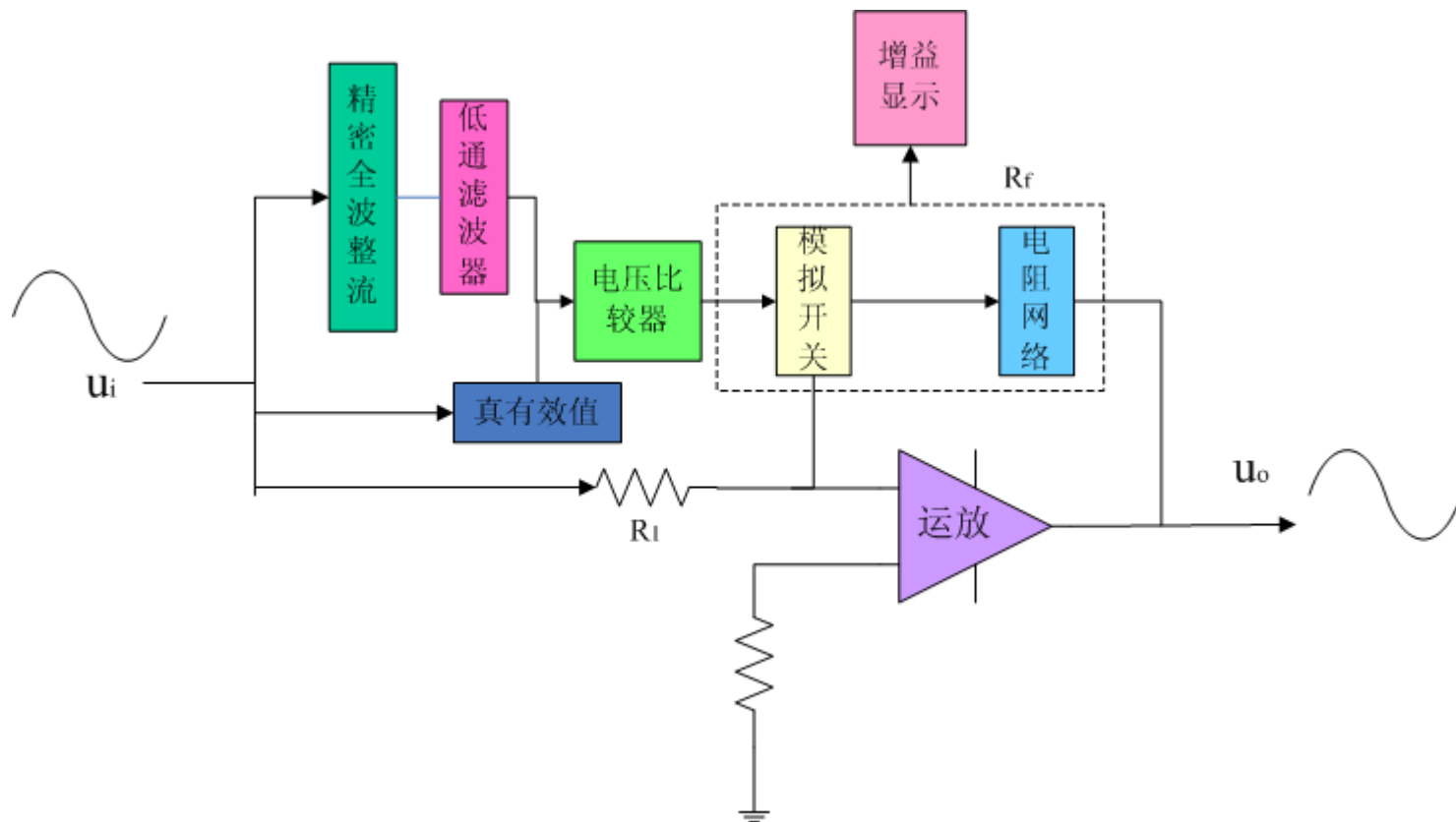
请在Orcad下仿真实现，并且请写设计报告。



本学期创新实验（选做）扩展任务

2. 输入信号为0.1-5V交流信号，频率100Hz-1MHz, 0.1-0.5V时放大6倍, 0.5-1.5V时放大2倍, 1.5-5V时放大0.5倍, 输出为同频率的不失真正弦波, 并显示放大倍数。

请在Orcad下仿真实现, 并且请写设计报告。



下次实验

- 实验3集成运算放大器的指标测试(P263)