



# 电子线路设计、测试与实验

Nov, 2024

## 实验三 集成运放的基本运用

---

杨明  
华中科技大学电信学院  
myang@hust.edu.cn



# Agenda

## ► 运放原理

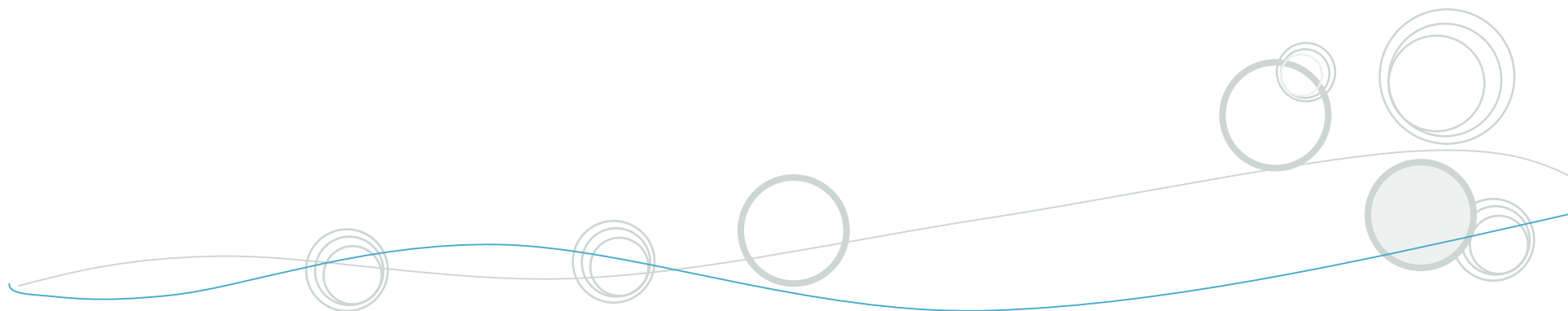
- 反向/同相/反向加法减法/积分电路

## ► 实验内容

- 反相放大电路
- 反向加法、减法电路
- 积分电路测试
- 注意事项

## ► 报告要求

## ► 下次实验



## ► P76：实验三 集成运算放大器的基本应用

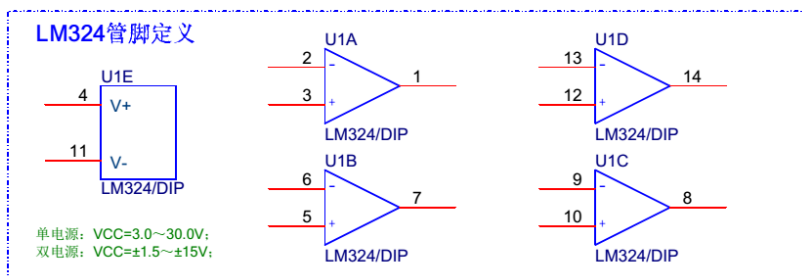
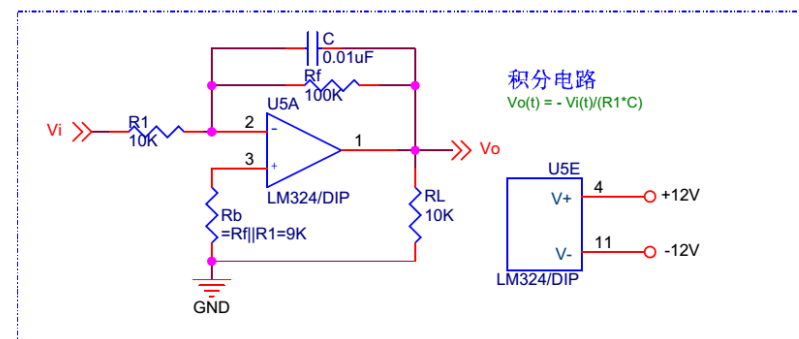
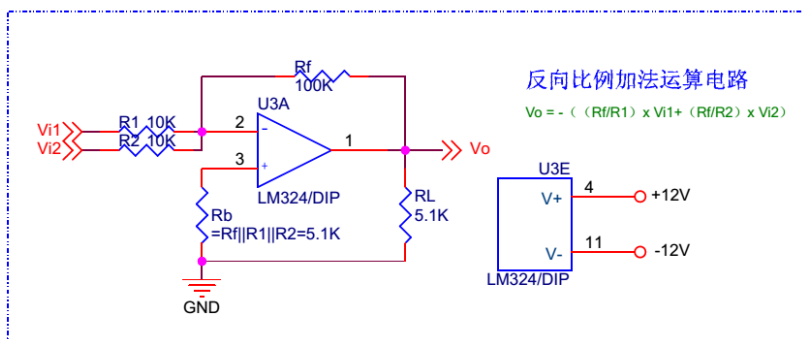
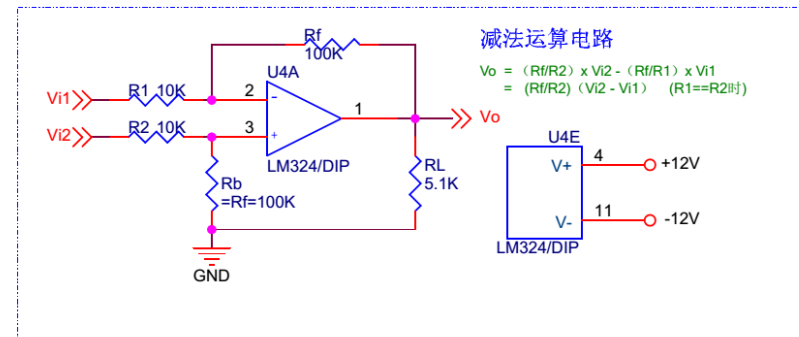
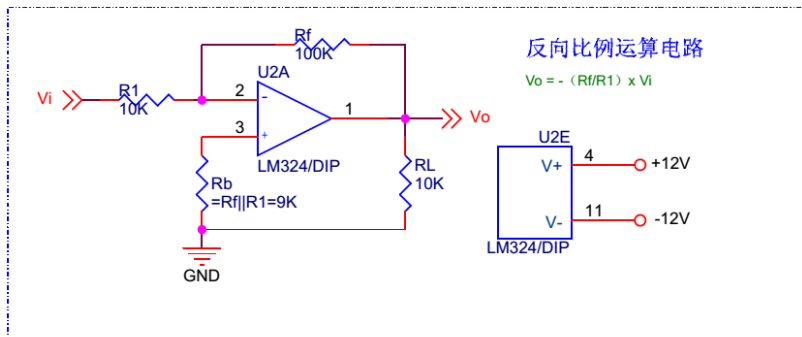
### ► 实验前预先要求

- 阅读教材：
  - 77~81页（实验三）
- 完成预习报告（有预习报告才能实验、验收）
  - 复习同相放大、反相放大、积分电路、反向比例加法减法电路
  - 完成实验电路（见实验内容）设计
    - 原理、电路、参数、器件型号等
    - 电阻参数必须采用标称值
  - 确定实验方案
    - 电源、信号及输入方式、测试仪器及测试方法
- 相关参考资料

## ► 教材实验三、集成运算放大器的基本应用

- 1、反相比例运算
- 2、反相加法减法运算
- 3、积分电路测试
  - 积分器-输入1V幅值正方波，用直流耦合方式测绘 $V_i$ 、 $V_o$ 波形
- 4、观测输出饱和值
- 5、放大电路输入电阻测试
- ( 内容1、4、5选作 )
- 实验目的
  - 掌握集成运算放大器的正确使用方法 - 同相输入/反相输入。
  - 掌握用集成运算放大器构成各种基本运算电路的方法。
  - 进一步熟练使用示波器DC、AC输入方式观察波形的方法。
    - 重点掌握积分器输入、输出波形的测量和描绘方法。

## 实验原理图

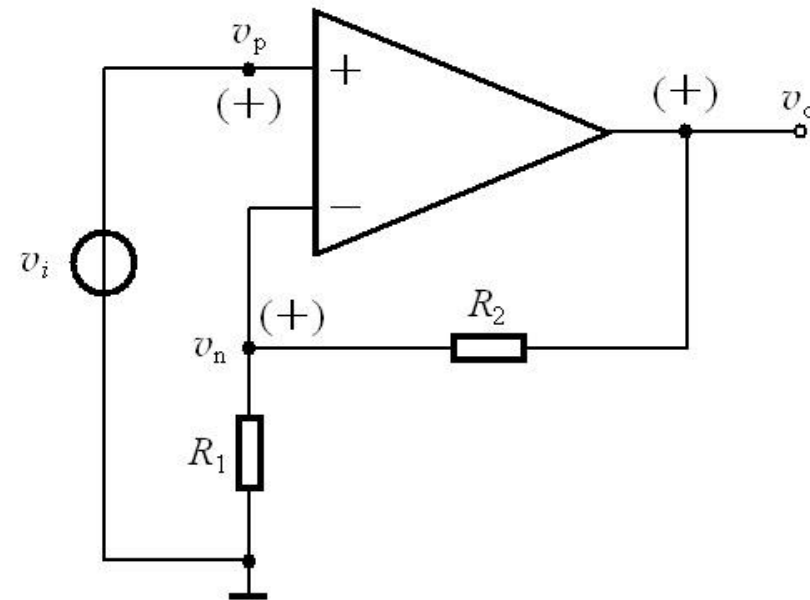


## ► 运放电路分析基本方法

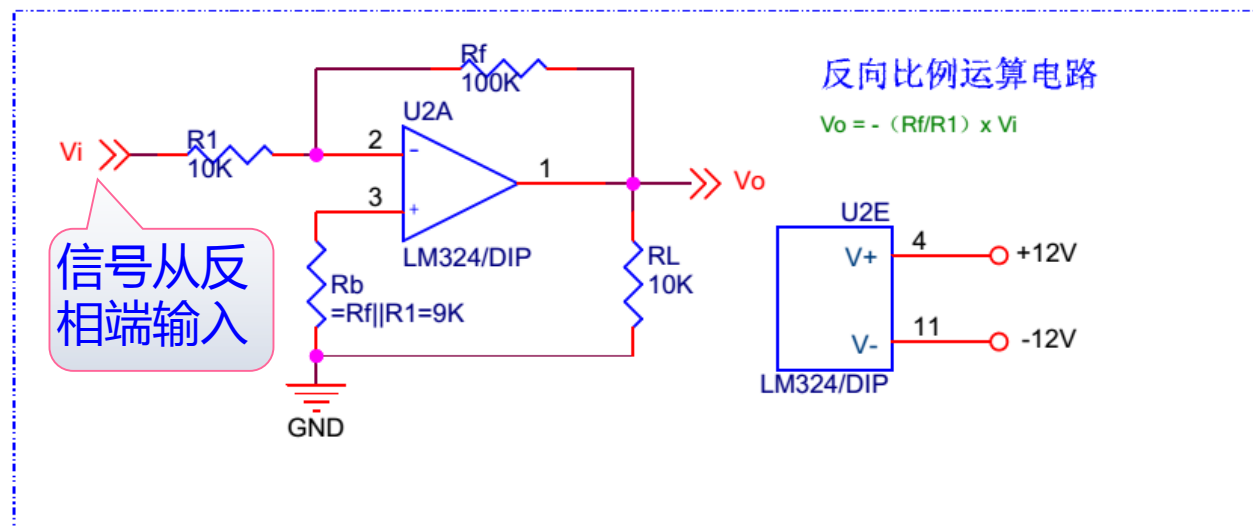
### • 以同相放大器电路为例：

- 图中输出通过负反馈的作用，使 $v_n$ 自动地跟踪 $v_p$ ，即 $v_p \approx v_n$ ，或 $v_{id} = v_p - v_n \approx 0$ 。这种现象称为虚假短路，简称虚短。
- 由于运放的输入电阻 $r_i$ 很大，所以，运放两输入端之间的 $i_p = -i_n = (v_p - v_n) / r_i \approx 0$ ，这种现象称为虚断。

由运放引入负反馈而得到的虚短和虚断两个重要概念，是分析由运放组成的各种线性应用电路的利器，必须熟练掌握。

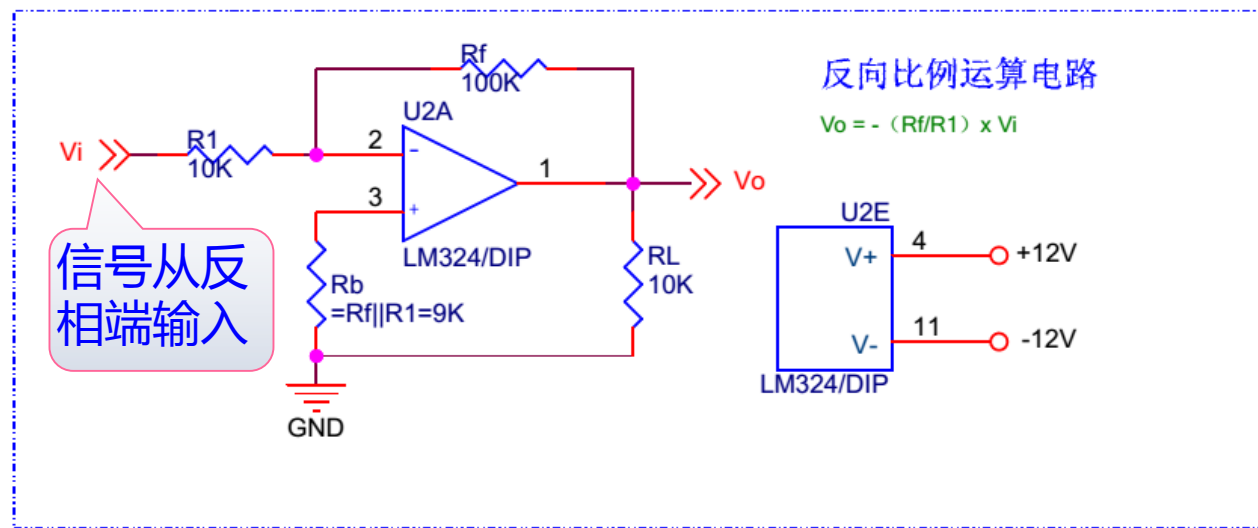


## ► 反向比例运放



- 设运放为理想器件，则右图电路的闭环电压增益  $A_v = -\frac{R_f}{R_1}$
- 属于电压并联负反馈，有：输出电阻  $R_o \approx 0$  (很好)
- 输入电阻  $R_i \approx R_1$  (! ? 不够大...)

## ► 反向比例运放

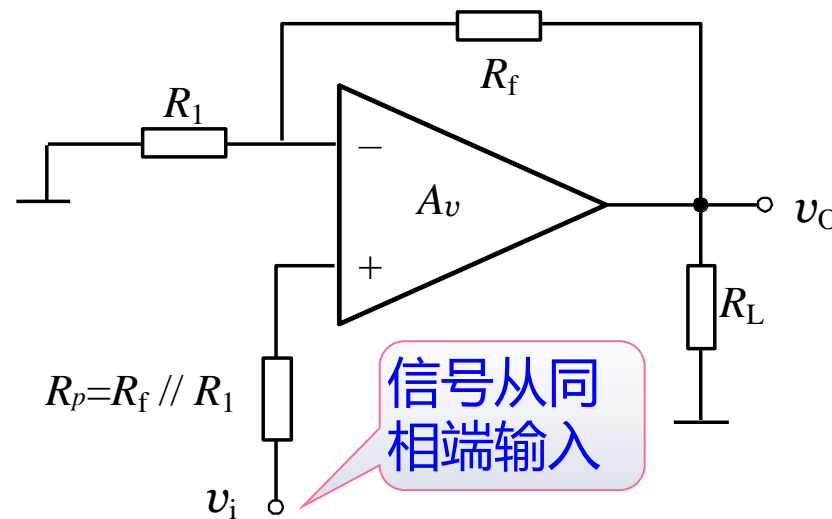


### • 设计经验提示：

- 设计要求一般是规定 $R_i$  和 $A_v$  （如教材P80的提法）
- 表面上似乎直接有 $R_f = R_1 \bullet A_v$  ；但电阻选择还有其他条件限制，如： $R_1$  大则引起较大的失调温漂；若 $R_f \approx R_i \bullet A_v$  大到 $M\Omega$ 级别，低档电阻本身都不太稳定，故通常限定 $R_f$ 为几十千欧~几百千欧。**在此限定下，若 $R_i$  和 $A_v$ 设计要求相矛盾则应改电路！**
- 为减小偏置电流不良影响，增加**直流平衡电阻** $R_p = R_f \parallel R_1$ 。
- 若 $R_f = R_1$ ，则为倒相器，可作为信号的极性转换电路。

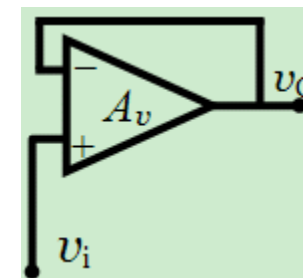


## ► 同向比例运放



- 闭环电压增益  $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}$
- 同相放大器具有**输入阻抗非常高**，**输出阻抗很低**的特点，广泛用于**前置放大级**。
- **输入电阻**  $R_i = r_{ic}$
- **输出电阻**  $R_o \approx 0$
- 直流平衡电阻  $R_p = R_1 // R_f$
- 若  $R_f \approx 0$ ， $R_1 = \infty$ （开路），则为电压跟随器。
- 电压相等但阻抗不同，一般做缓冲级及隔离级

$r_{ic}$ 为运放本身同相端对地的内部共模输入电阻，一般为 $1\text{M}\Omega$  - 够大。



## ► 反向比例加法运放

- 从基本比例放大电路可延伸出其他的基本应用，比如加法器
- 由分析可得：

$$v_n = v_p = 0$$

$$\left\{ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} + \frac{v_{i2} - v_n}{R_2} = \frac{v_n - v_o}{R_3} \right.$$

- 得：

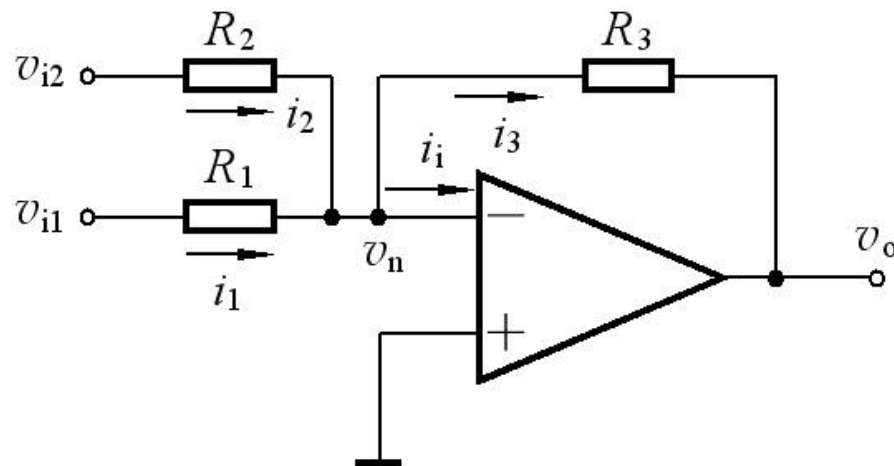
$$-v_o = \frac{R_3}{R_1} v_{i1} + \frac{R_3}{R_2} v_{i2}$$

- 当  $R_1 = R_2 = R$  时，则有

$$v_o = -\frac{R_3}{R} (v_{i1} + v_{i2})$$

- 同样，为保持输入端直流静态平衡常在同相输入端加上平衡电阻， $R' = R_1 // R_2 // R_3$

。



## ► 反向比例减法运算

- 从基本比例放大电路可延伸出其他的基本应用，比如减法器
- 由分析可得：

$$\left\{ \begin{aligned} v_n &= v_p \\ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} &= \frac{v_n - v_o}{R_4} \end{aligned} \right.$$

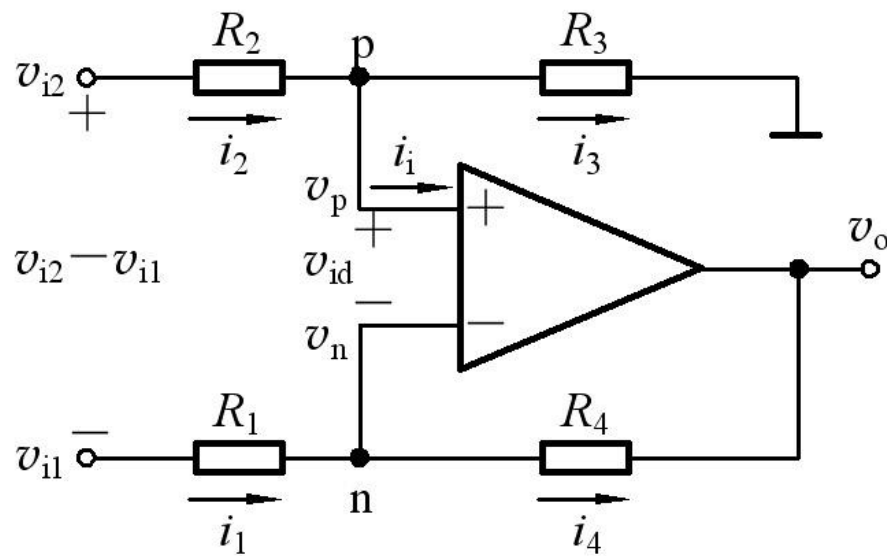
$$-v_o = \frac{R_3}{R_1} v_{i1} + \frac{R_3}{R_2} v_{i2}$$

- 得：

$$v_o = \left( \frac{R_1 + R_4}{R_1} \right) \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) v_{i2} - \frac{R_4}{R_1} v_{i1}$$

- 当  $R_1 = R_2$  ,  $R_3 = R_4$  时，则有

$$v_o = \frac{R_4}{R_1} (v_{i2} - v_{i1})$$



在精度要求低的场合，直流平衡电阻影响很小，其阻值不必精确甚至可短路掉；但此处的R3兼有平衡和分压双重作用，故阻值要根据分压来精确计算并正确匹配。

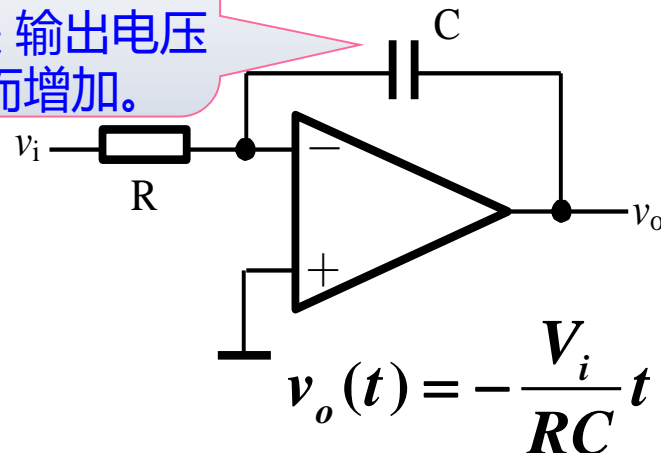
## ► 积分器

- 右图理想化分析结果是

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_i(t) dt + v_C(0)$$

- 式中， $RC$ 为积分时间常数。
- 若输入为直流(电压= $V_i$ )，则在 $C$ 充电过程中有
- 但运放输出受电源电压限制，故输出不可能如实验教材所示无限增加，而是到最大值后恒定。
- 为限制电路的低频电压增益，可将反馈电容 $C$ 与一电阻 $R_F$ 并联。当输入频率大于
- 时，电路起积分作用；
- 若输入频率远低于右式（如直流输入），则电路稳态近似一个反相器，其低频电压增益最大不过

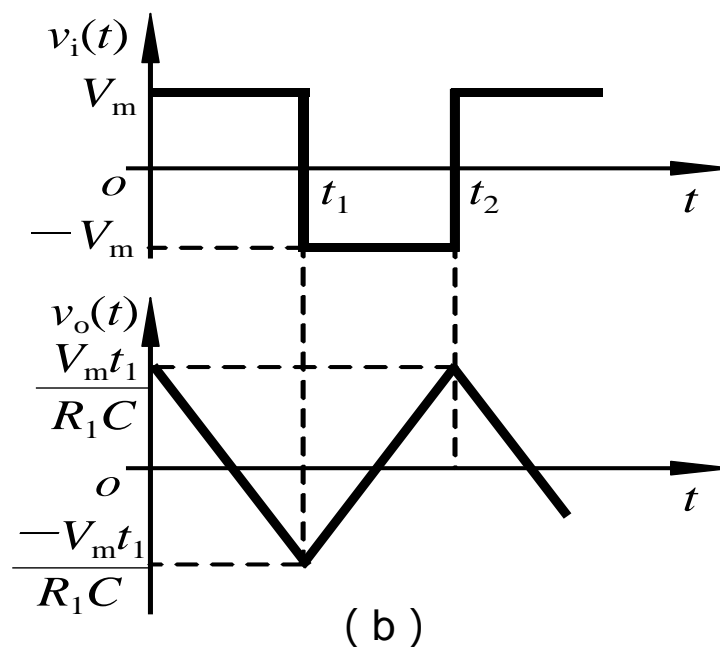
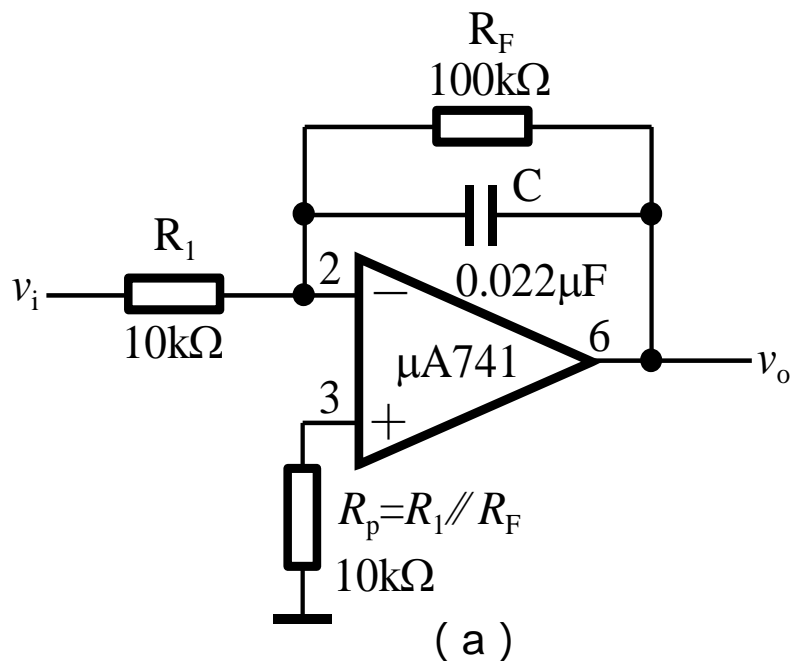
由于电容 $C$ 的容抗随输入信号的频率降低而增加，结果是输出电压随频率降低而增加。



$$A_{VF} = -\frac{R_F}{R_1}$$

## ► 积分器

- 实际的积分器如下图(a)，增加的直流负反馈电阻 $R_F$ 比较大（ $R_F$ 小就成了一阶低通滤波器）。不过 $R_F$ 对 $C$ 有分流作用，导致积分误差，为此通常要求  $R_F > 10R_1$ 、 $C < 1\mu\text{F}$ 。若输入电压为正负对称方波，则输出稳态波形为对称三角波，波形如图(b)所示：

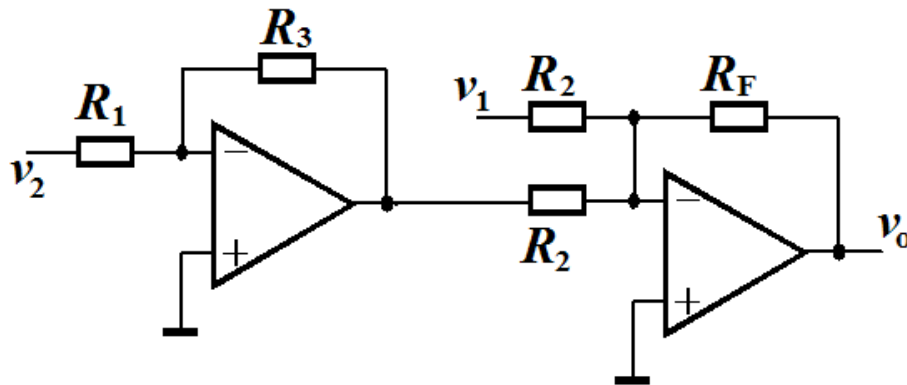


## ► 集成运放直流供电电源问题

- 运放常用**对称双电源供电**，此方式下直流工作电源电压应在 $\pm 3\text{V} \sim \pm 18\text{V}$ 范围内，而**电源电压也限定了输出交流信号的峰值电压**。例如选定电源电压是 $\pm 12\text{V}$ ，则输出信号正峰/负峰的最大值不会超过 $12\text{V}$ （考虑运放自身约 $0.7\text{V}$ 的片内压降，输出最大值会更低些）。当然也有一些单电源供电电路 - 请自行查阅资料。
- 运放在实际使用中还有一些必须注意的问题，如调零、自激、保护等，在教材P208面有详细讲解。不过由于课堂实验精度要求较低，涉及不到这些问题，故本课程不作特别讨论。

## ► 基本应用 - - 无限延伸.....

- 比如：可以用加法器来实现减法运算，不过是多级，



- 综合运放基本应用知识可知：

- 由于输入信号v2经过一级反相放大，
- 再与v1进入加法器，故其输出是：

$$v_o = -\frac{R_F}{R_2} \left( v_1 - \frac{R_3}{R_1} v_2 \right)$$

- 反过来：可用上面的电路实现运算  $v_o = av_1 - bv_2$  （只要两级的比例合适，相比用单级减法电路匹配电阻要容易些）
- 又比如：单电源自举式交流放大器..... 请自行延伸！

## ► 基本应用 - - 无限延伸.....

- 本课程后面的实验中还有很多电路要用到集成运算放大器，如：有源滤波器，波形发生器..... 所以关于**集成运放的基础知识和电路分析方法**必须扎实地掌握。
- 实际上本课程的模拟实验部分最核心的器件就是两种：集成运放和三极管。相对于三极管难以控制的离散性能，集成运放更适合设计电路以达到性能指标要求，而且电路也相对更简单稳定。
- 考试中的电路设计题，如果不明确说必须用三极管，请**优先考虑集成运放电路**。总之，本课程考试涉及到的基本知识点**不限于实验教材**，要**以原理课内容为标准**。



## ► 运放原理

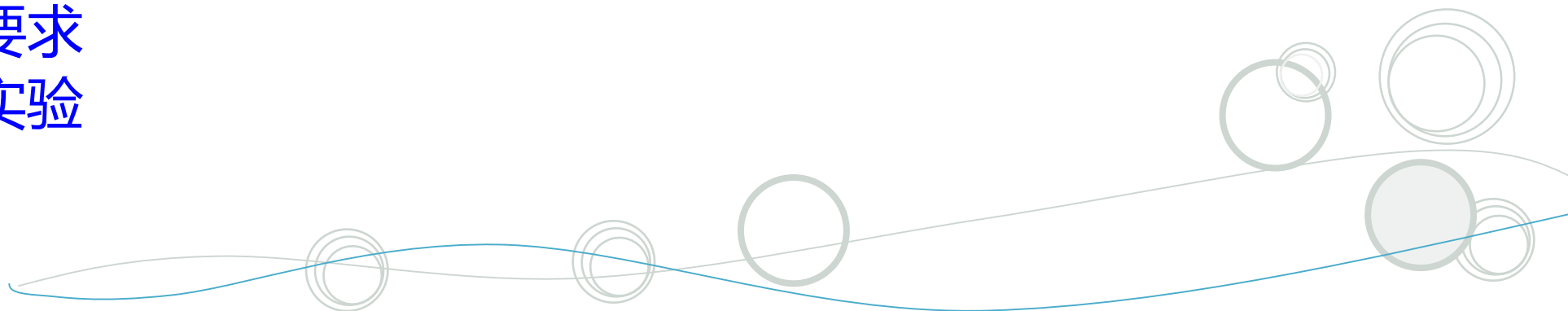
- 反向/同相/反向加法减法/积分电路

## ► 实验内容

- 反相放大电路
- 反向加法、减法电路
- 积分电路测试
- 观测输出饱和值
- 放大电路输入电阻测试
- 注意事项

## ► 报告要求

## ► 下次实验

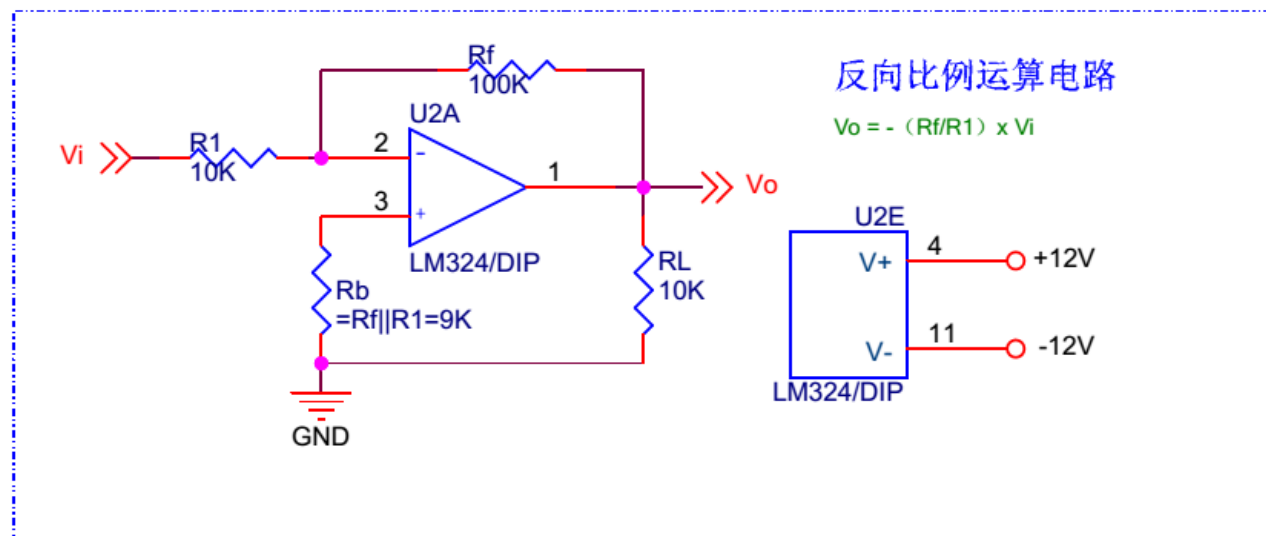


## ► 教材实验三、集成运算放大器的基本应用

- 1、反相比例运算
- 2、反相加法减法运算
- 3、积分电路测试
  - 积分器-输入1V幅值正方波，用直流耦合方式测绘 $V_i$ 、 $V_o$ 波形
- 4、观测输出饱和值
- 5、放大电路输入电阻测试
- （内容1、4、5选作）
- 实验目的
  - 掌握集成运算放大器的正确使用方法 - 同相输入/反相输入。
  - 掌握用集成运算放大器构成各种基本运算电路的方法。
  - 进一步熟练使用示波器DC、AC输入方式观察波形的办法。
    - 重点掌握积分器输入、输出波形的测量和描绘方法。

## ► 反向放大器

### • 实验电路



- 设计、组装、调试出一反相放大电路，要求：
  - **输入电阻大于1 kΩ，电压增益10（1~2%）倍。** 输入信号选用1 kHz的正弦波（ $V_{ipp} = 100 \sim 500\text{mV}$ ），电源电压选用±12V双电源。电路调试完毕后不能再改动电路参数。
- 测试要求
  - 测量至少5组不同的信号输入、输出测试结果（**保证电路处于线性放大状态**），然后分析电路增益及误差，完成表2.1的内容，并将**其中一组输入、输出信号波形用坐标纸记录**。

## ► 反向放大器

### • 测试要求

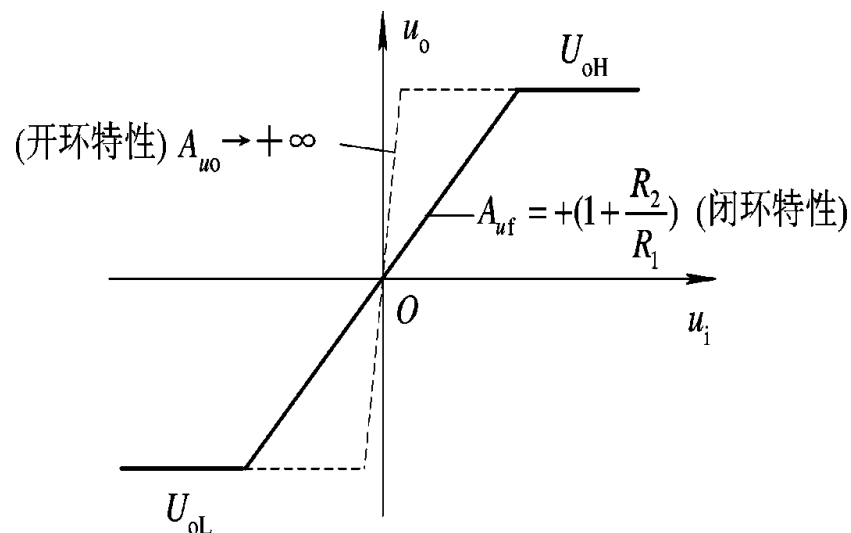
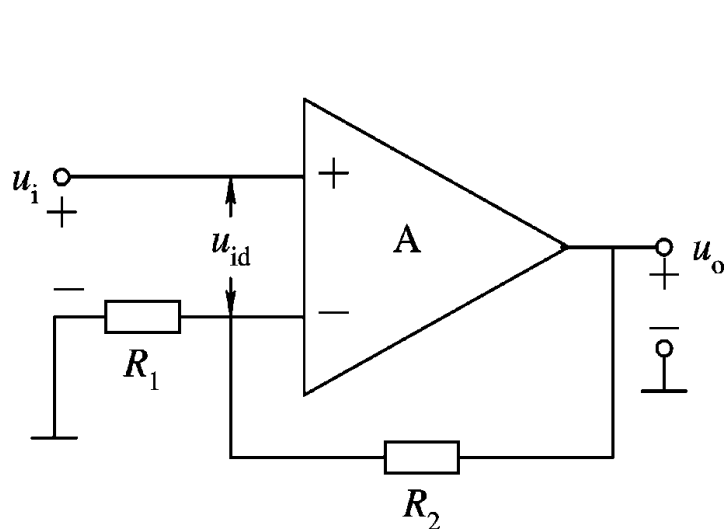
- 测量至少5组不同的信号输入、输出测试结果（保证电路处于线性放大状态），然后分析电路增益及误差，完成表2.1的内容，并将其中一组输入、输出信号波形用坐标纸记录。

测试次数	输入峰峰值 单位：	输出理论峰峰值 单位：	输出实测峰峰值 单位：	绝对 误差	相对 误差
第1次					
第2次					
第3次					
第4次					
第5次					
平均					

- 思考1 ) 若要求反向放大电路的输入电阻大于10 k $\Omega$ ，电压增益为20，该如何设计电路？
- 思考2 ) 若要求放大电路的输入电阻大于10 k $\Omega$ ，电压增益为20，该如何设计电路？

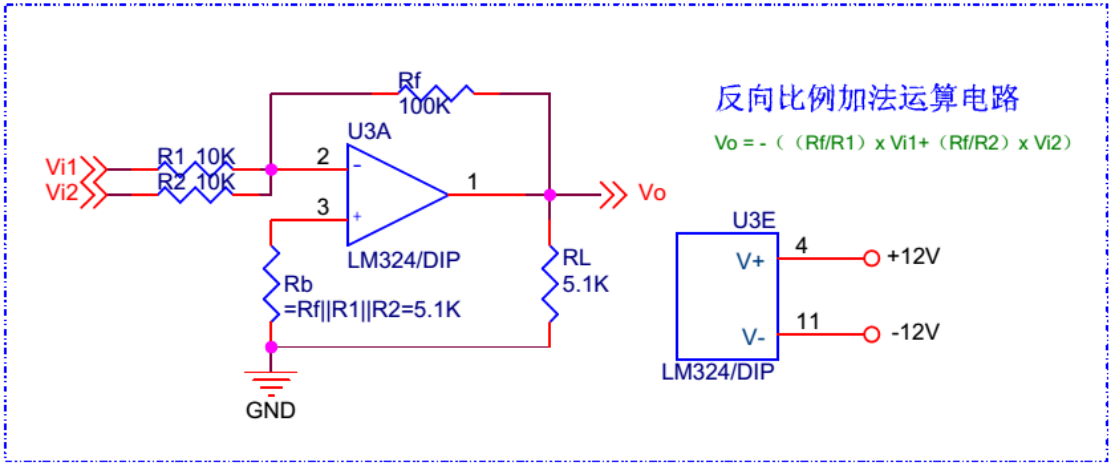
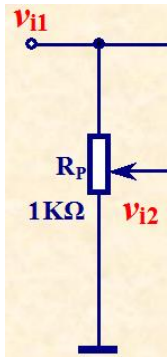
## ► 观测输出饱和值（选做）

- 在实验内容1的基础上，增大输入信号幅值，直到输出波形出现明显失真现象，测试输出正饱和电压值和负饱和电压值，并与电源电压比较。



## ► 反向比例加法电路

### • 实验电路



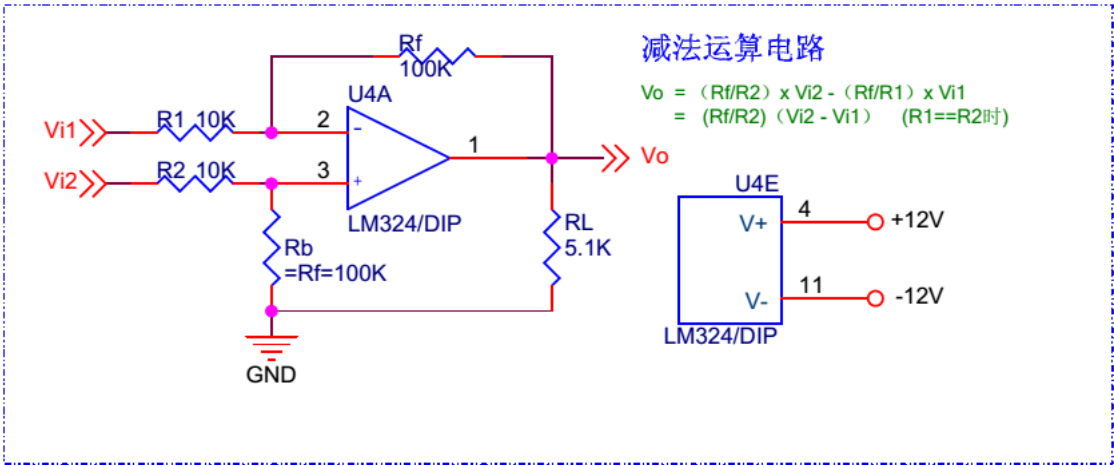
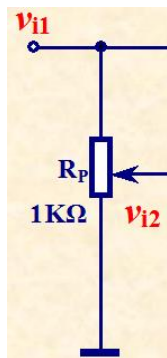
- vi1输入1kHz正弦波，Vi1pp ≈ 500mV；
- vi2输入1kHz正弦波，Vi2pp < 500mV（可由Vi1通过1K滑动电阻分压得到）
- 测试要求：测量至少3组不同的信号输入、输出测试结果（保证电路处于线性放大状态），然后分析数据及误差，完成表2.2的内容。

测试次数	Vi1峰峰值 单位：	Vi2峰峰值 单位：	输出Vo理论峰峰值 单位：	输出Vo实测峰峰值 单位：	绝对 误差	相对 误差
第1次						
第2次						
第3次						
平均						



## ► 反向比例减法电路

### • 实验电路



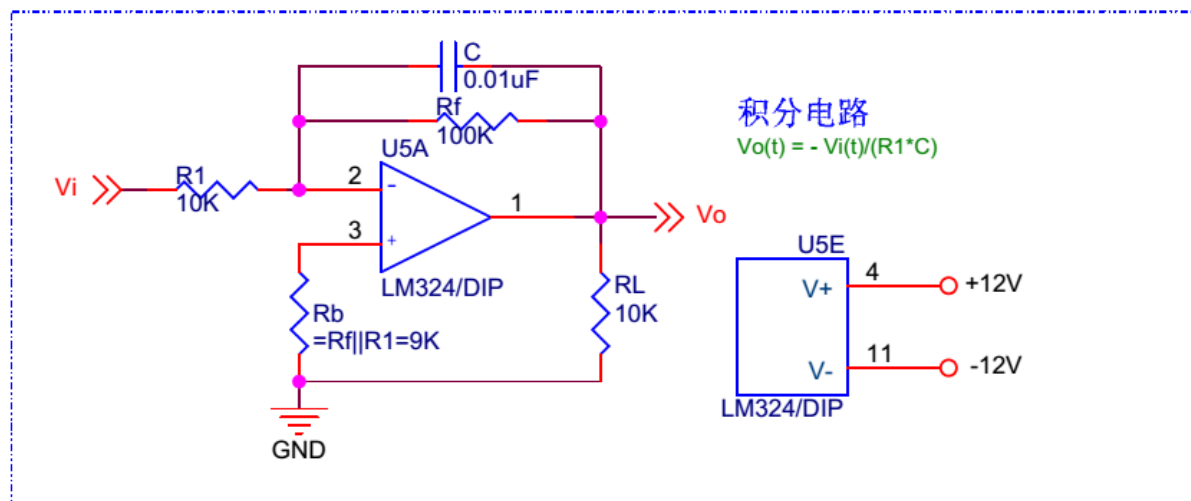
- vi1输入1kHz正弦波，Vi1pp ≈ 500mV；
- vi2输入1kHz正弦波，Vi2pp < 500mV（可由Vi1通过1K滑动电阻分压得到）
- 测试要求：测量至少3组不同的信号输入、输出测试结果（保证电路处于线性放大状态），然后分析数据及误差，完成表2.2的内容。

测试次数	Vi1峰峰值 单位：	Vi2峰峰值 单位：	输出Vo理论峰峰值 单位：	输出Vo实测峰峰值 单位：	绝对 误差	相对 误差
第1次						
第2次						
第3次						
平均						



## ► 积分电路测试

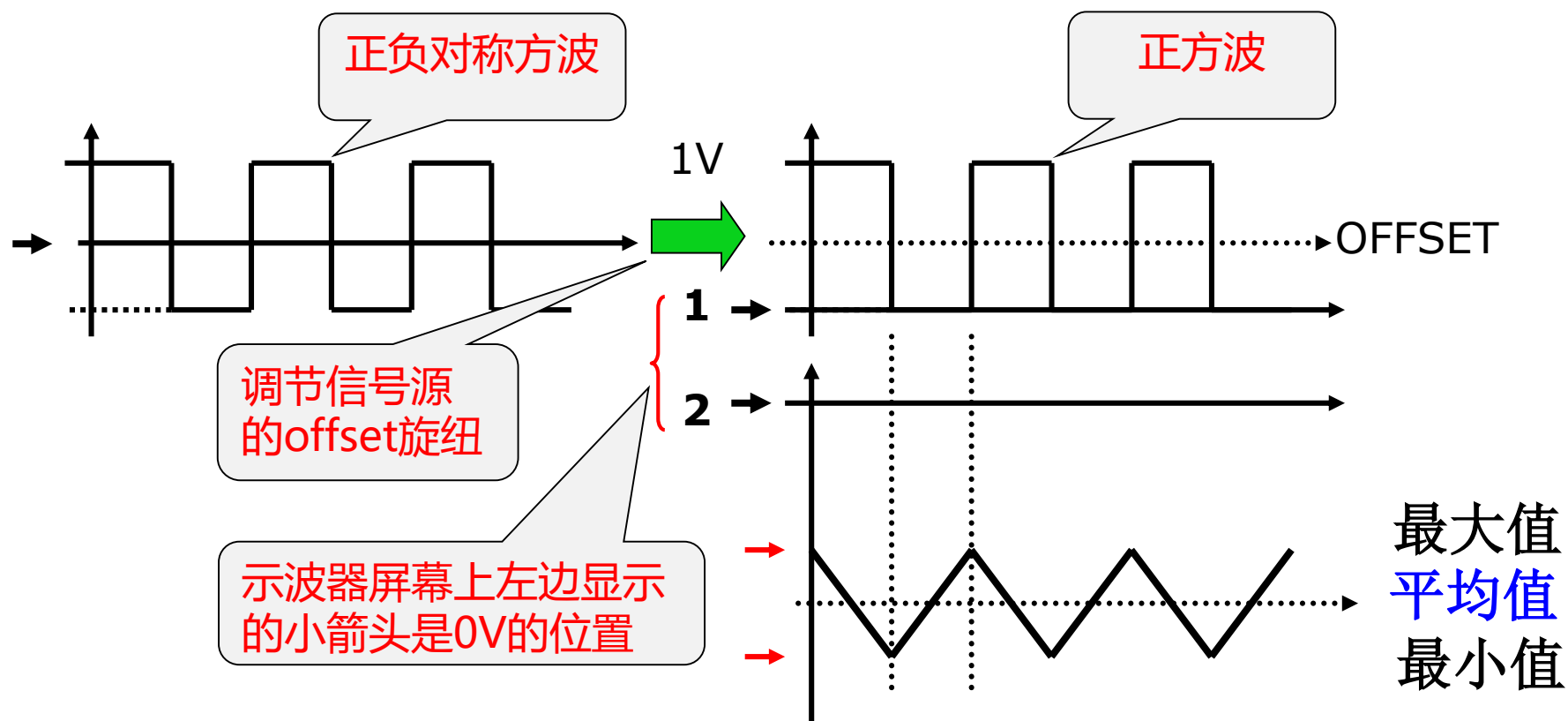
- 电路如图4.5所示。电路实际为比例积分，当 $R_f \gg R_1$ 时，可近似为积分运算。用坐标纸分别定量绘出以下三种情况的输入和输出波形，标出其周期和幅值等参数。
  - (1) 输入峰峰值为1V，频率为1kHz的正负对称方波；
  - (2) 输入峰峰值为1V，频率为200Hz的正负对称方波；
  - (3) 输入峰峰值为1V，频率为1kHz的正方波；
- 可尝试去掉电阻 $R_f$ 后观测输出波形会有何变化。



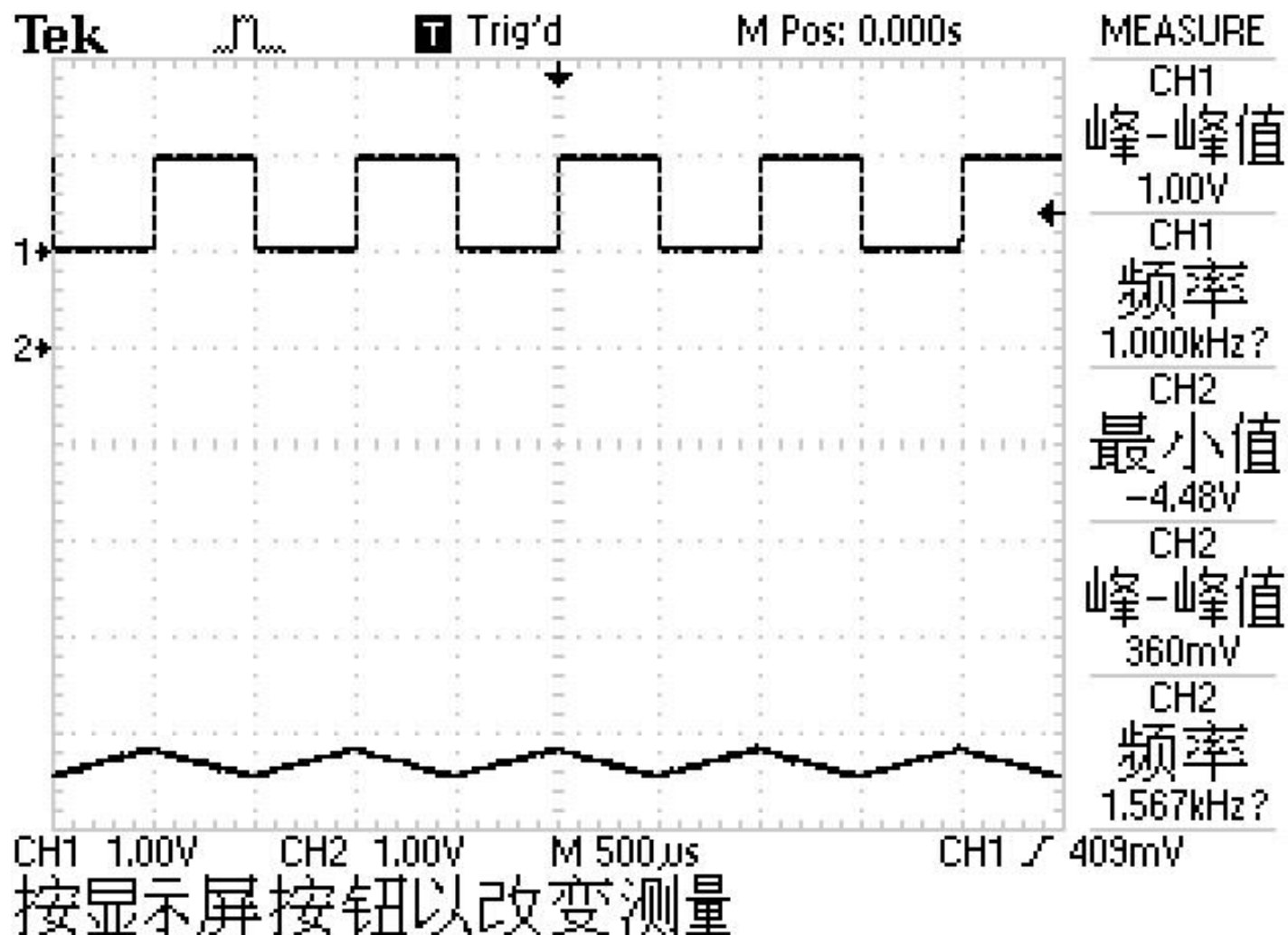


## ► 反向比例积分电路

- 信号发生器的设置方法
- 示波器的设置---耦合方式选择（**直流耦合方式**）



## ► 示波器自动测量法

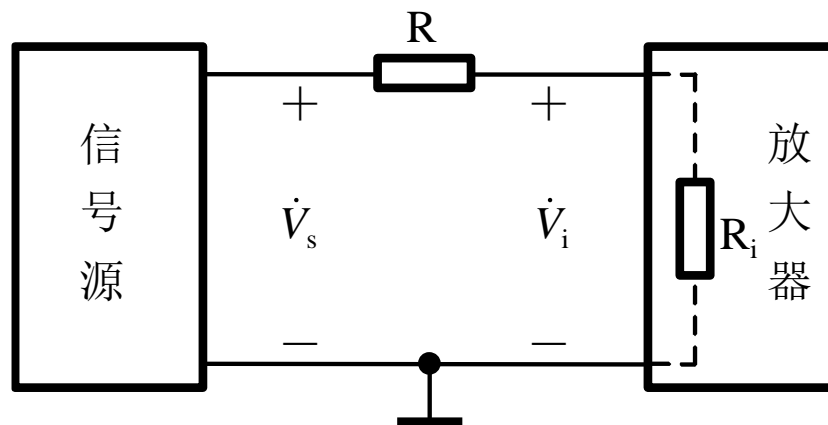


CH1频率  
CH1峰峰值  
CH2频率  
CH2峰峰值

## ► 放大电路输入电阻测试（选做）

- 设计一个反相放大电路和一个同相放大电路，电压增益均为50（1~10%）倍。用同一个集成运放实现这两个电路，先后对这两个电路的输入电阻进行测试，并与理论值比较。
- 测试时，输入1 kHz的正弦波，选择合适的幅值，保证放大电路工作在线性区（始终监视输出波形）。电源电压选用 $\pm 12\text{V}$ 双电源。
- 采用教材第23页的“二、用换算法测输入电阻”的方法测试。反相放大电路采用其中的方法1，同相放大电路则采用方法2。自拟表格记录需要记录的数据，画出输入、输出波形（时间轴上下对齐），并说明所使用的测试仪器及使用方法。

## ► 放大电路输入电阻测试（选做）



- 用“串联电阻法”测量放大器的输入电阻 $R_i$ ，即在信号源输出与放大器输入端之间，串联一个已知电阻 $R$ (一般以选择 $R$ 的值接近 $R_i$ 的值为宜)。
- 在输出波形不失真情况下，用晶体管毫伏表或示波器，分别测量出 $V_i$ 与 $V_s$ 的值，则

$$R_i = \frac{V_i}{V_s - V_i} R$$

## ► 输入电阻为高阻时的测量电路

- 在放大器输入回路中一已知电阻 $R$ ，其大小与 $R_i$ 数量级相当。 $R$ 的接入将引起放大器输出电压 $V_o$ 的变化，设在放大器输出端测出 $S_1$ 闭合、 $S_2$ 断开时为 $V_{o1}$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 断开时为 $V_{o2}$ 则

$$R_i = \frac{V_{o2}}{V_{o1} - V_{o2}} \cdot R$$

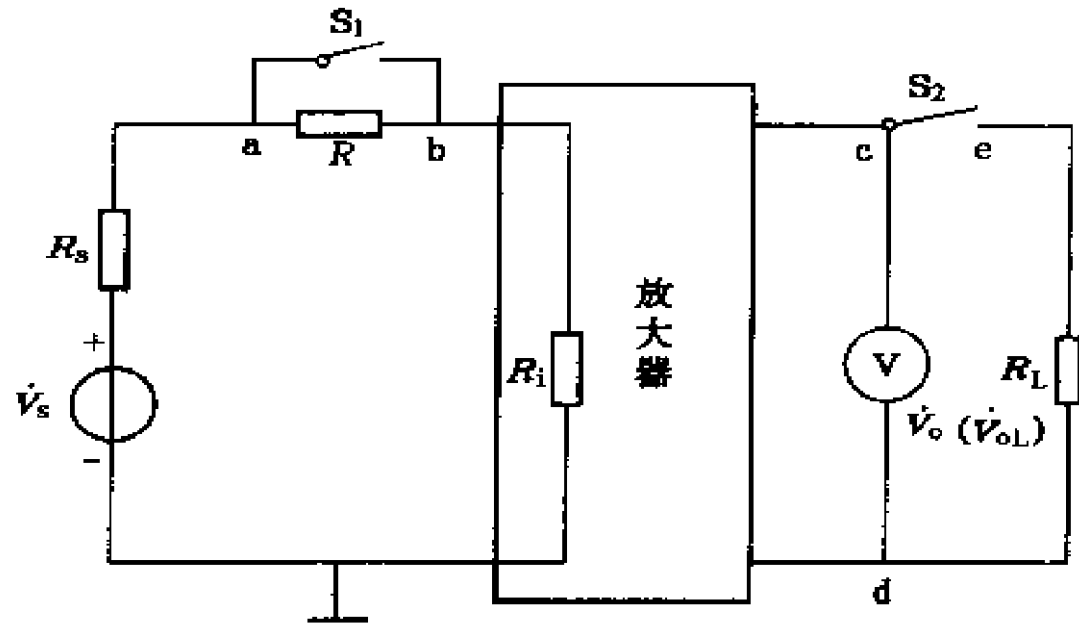


图 2.3.3 用换算法测高输入电阻或输出电阻

## ► 验收要求

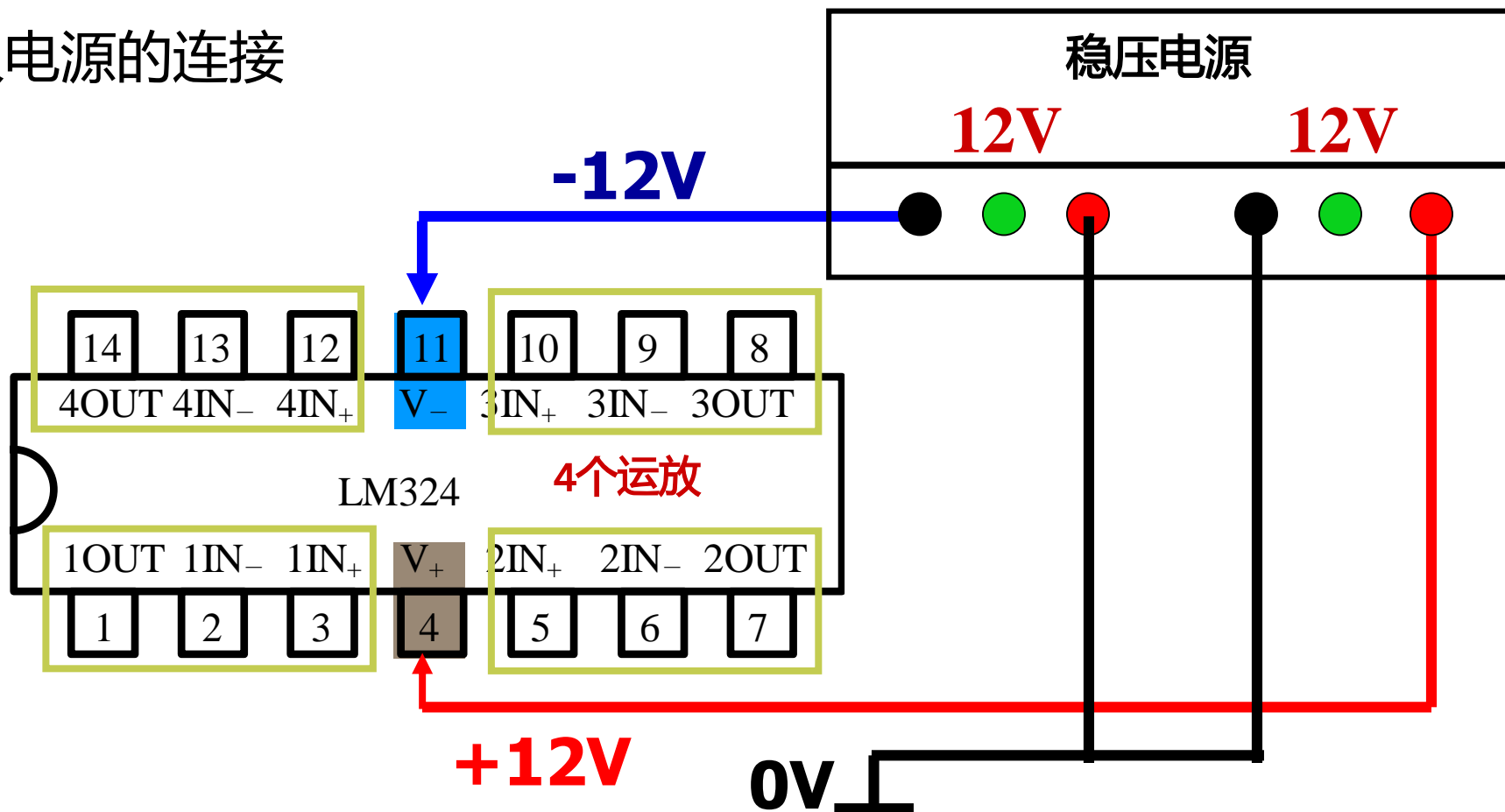
- 所有实验内容完成，保留好电路，做好记录后举手验收；
- 注意：
  - 统一完成后验收；
  - 测量端子的预留！
  - 测试记录
  - 电子实验报告
  - 或手写实验报告及记录（波形用坐标纸记录）
  - 验收时波形与测量值的显示！

## ► 实验报告

- 正规报告纸书写或电子实验报告方式，格式内容符合要求
- 教学大纲中实验报告要求
- 抬头部分---不要留空！
- 正文内容：
- 实验目的与要求
- 实验所用器件与仪器
- 实验原理与参考电路---电路图用铅笔画！电路参数标注！
- 实验方法与步骤---测量结果---坐标纸绘制波形图！必要实验数据记录表格；必要实验结果分析；
- 实验中所遇到的问题、原因分析，解决方法与解决效果

## ► 注意事项

- LM324双电源的连接

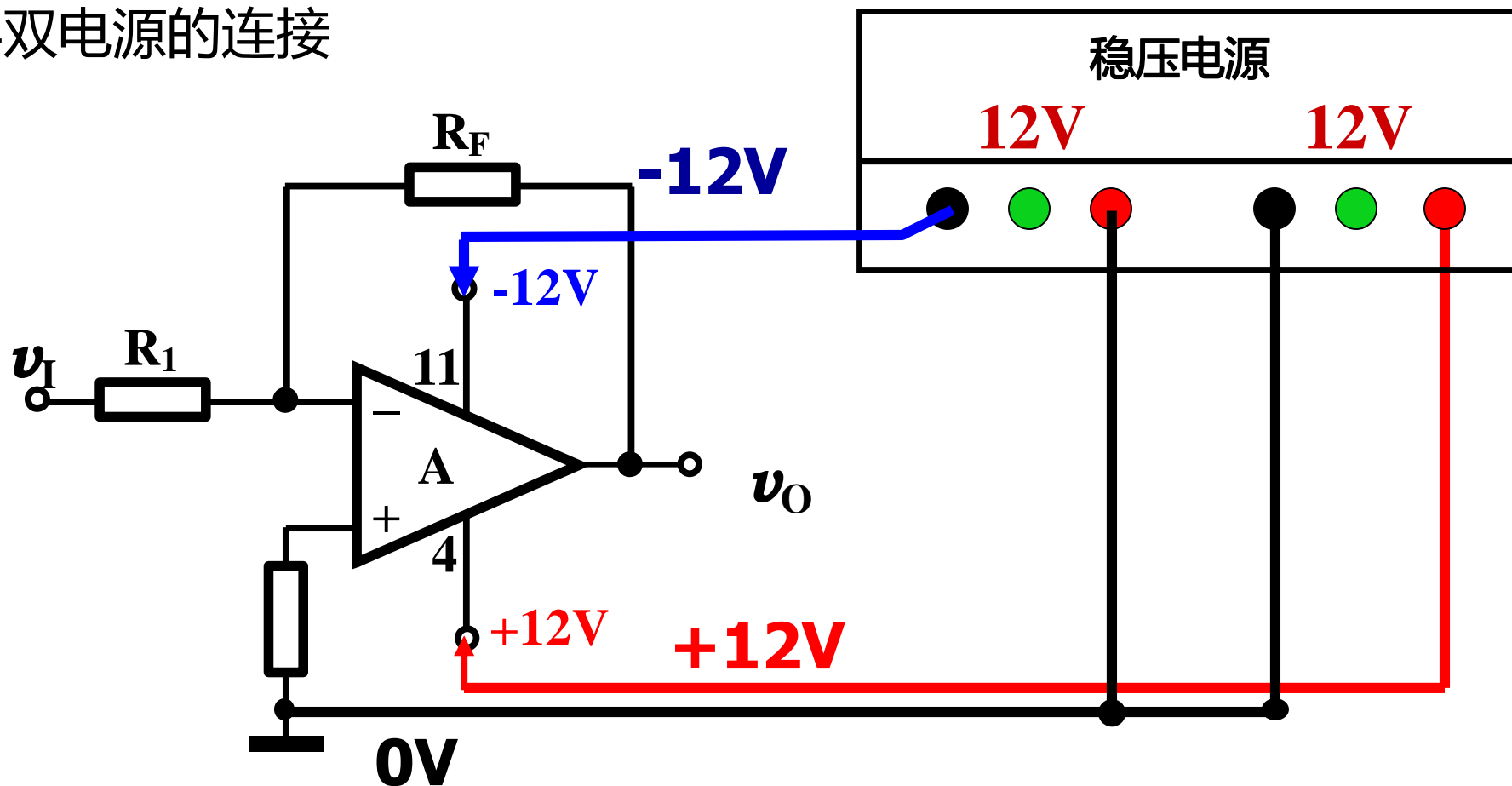


注意：正、负电源的千万别接反！



## ► 注意事项

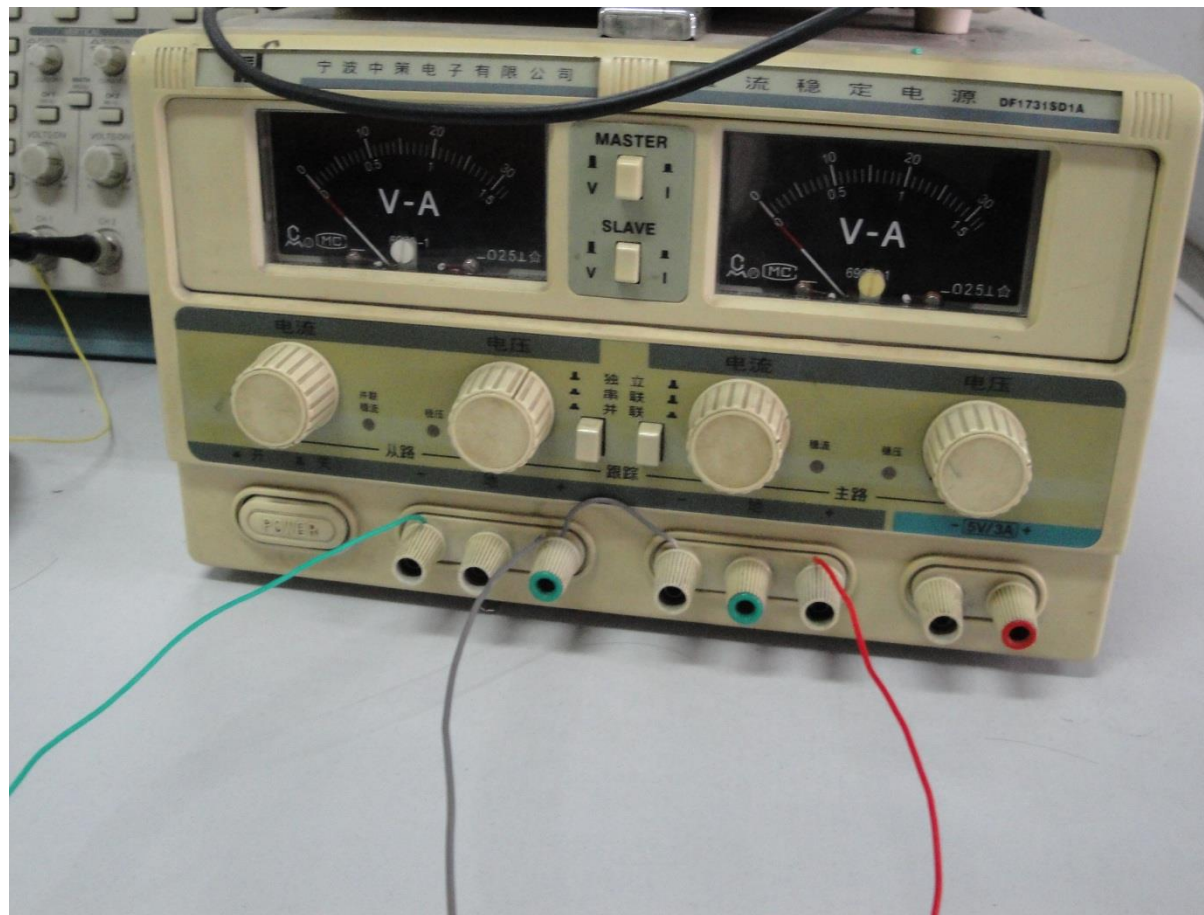
- LM324双电源的连接



注意：正、负电源的千万别接反！

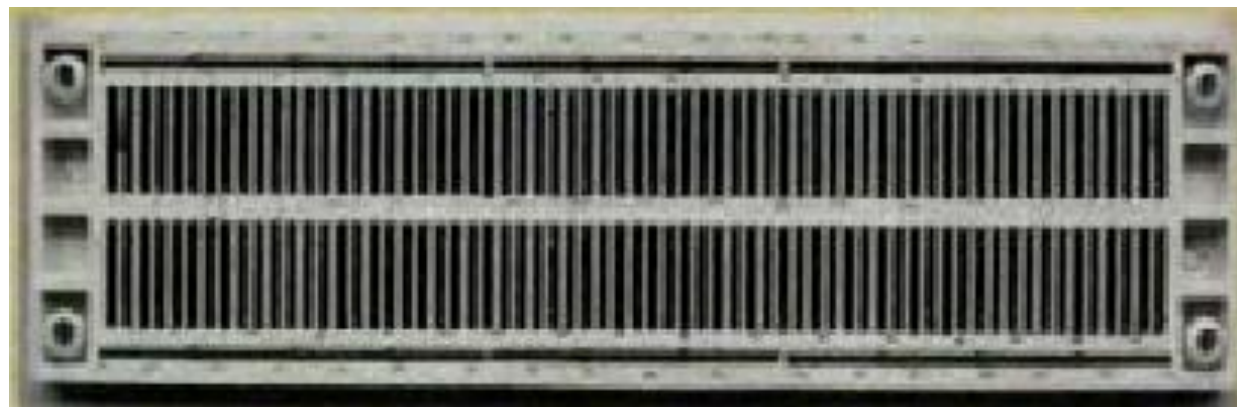
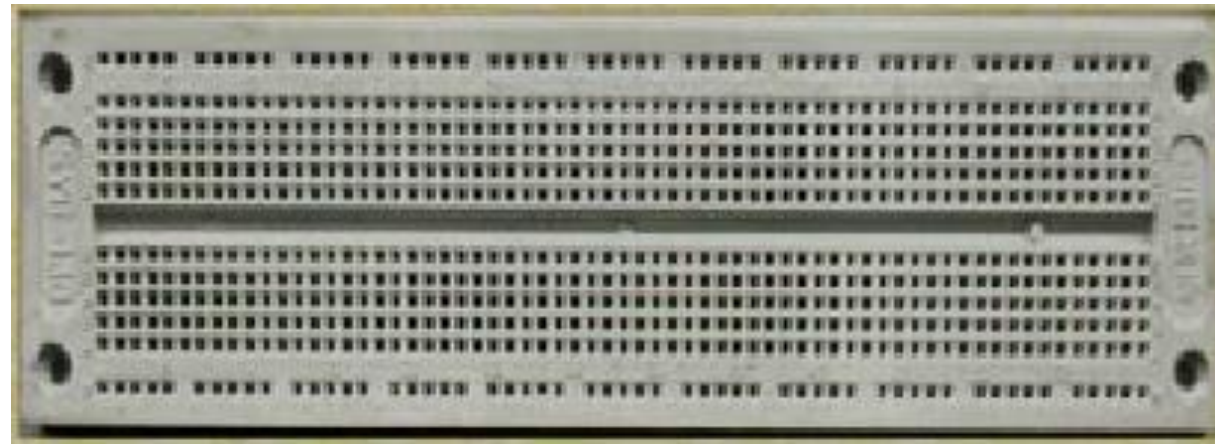
## ► 注意事项

- 双电源的连接



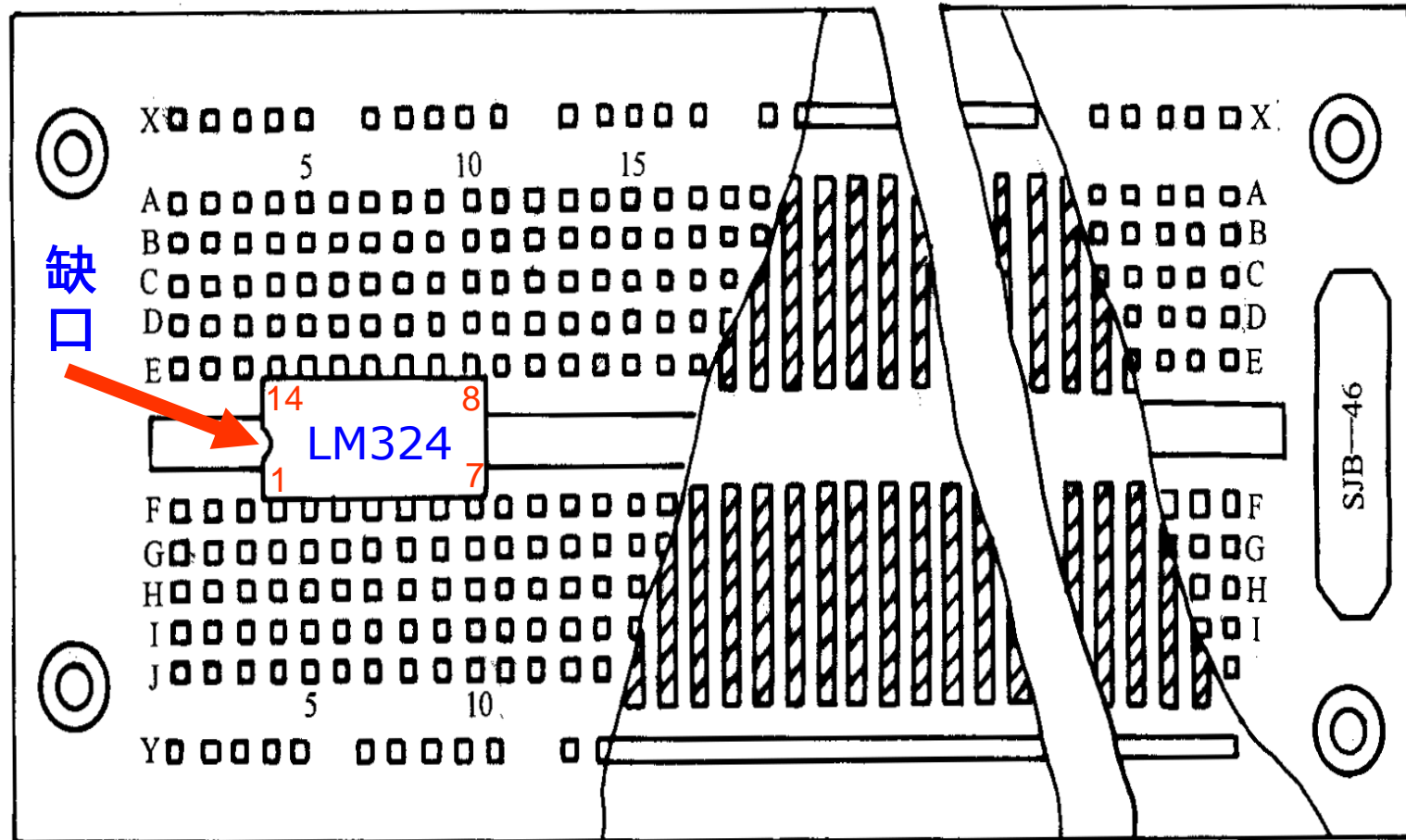
## ► 注意事项

- 面包板



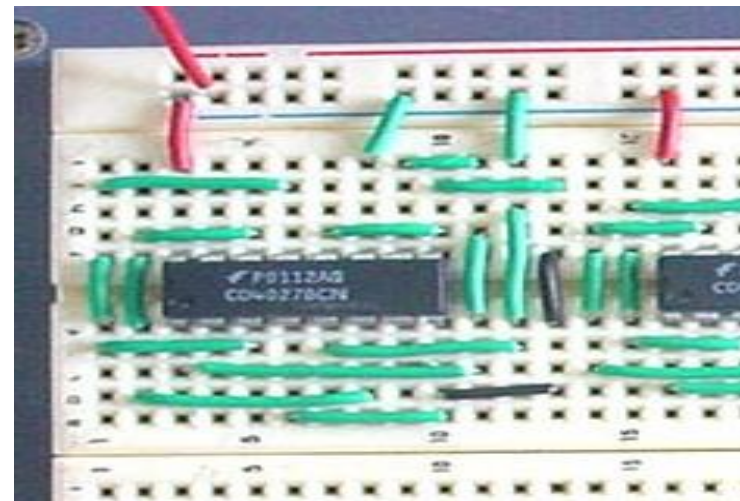
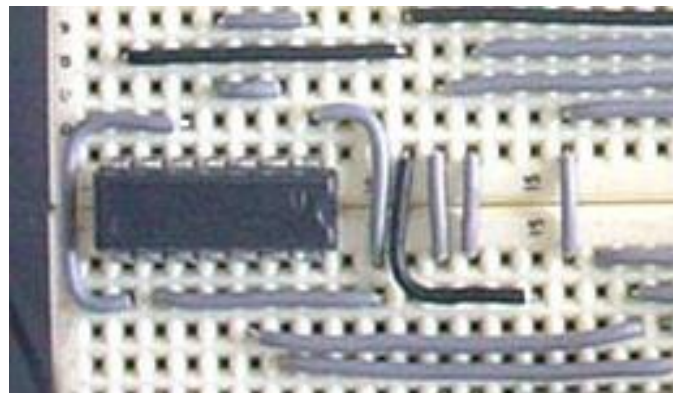
## ► 注意事项

- 芯片安装

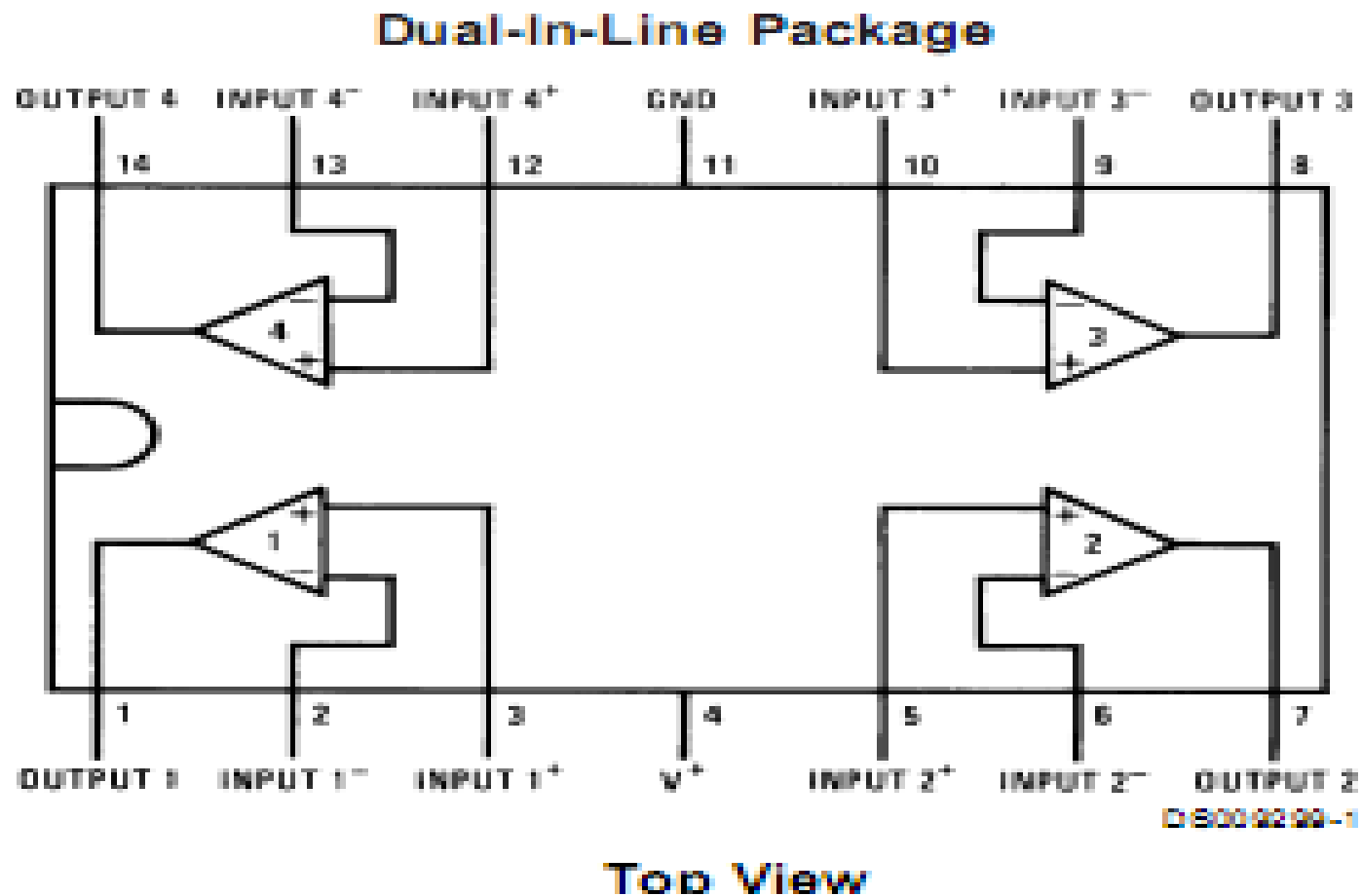


## ► 怎么放器件

- 注意集成电路的放置方向，一般**缺口向左**
- 器件（包括电阻）要**尽量紧贴**面包板，不允许“搭桥”、跨越器件
- 器件（尤其是电阻）的**金属丝不要外露过多**，一般7 - 8mm
- 连线前要仔细**核对引脚**
- 通常将电源**正极连红线**，**负极连黑线**。准备**两根长导线**，可重复使用



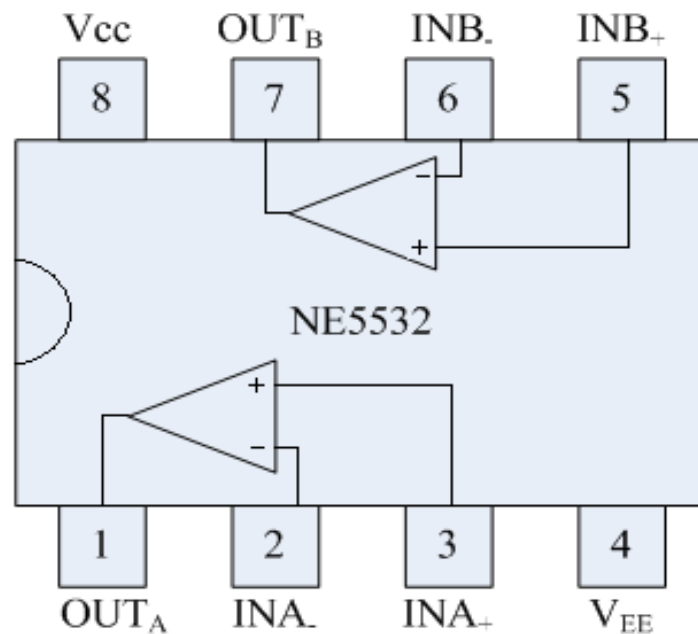
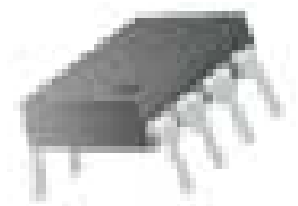
## ► 管脚图





## ► 管脚图

8-DIP



# 下次（11周）实验内容

- ▶ 实验6 BJT放大电路（P99，硬件插板实现）
- ▶ 实验前预先要求
  - 阅读教材：
    - 100~102页（实验六）
  - 完成预习报告（有预习报告才能实验、验收）
    - 完成实验电路（见实验内容）设计
      - 原理、电路、参数、器件型号等
      - 电阻参数必须采用标称值
    - 确定实验方案
      - 电源、信号及输入方式、测试仪器及测试方法
  - 寝室插板及仿真，课内主要用于验收与答疑
    - 做好插板，不能现场插板，板子不事先插好不能进实验室！





# Thanks

