



# 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](mailto:myang@hust.edu.cn)

## ► 运放原理

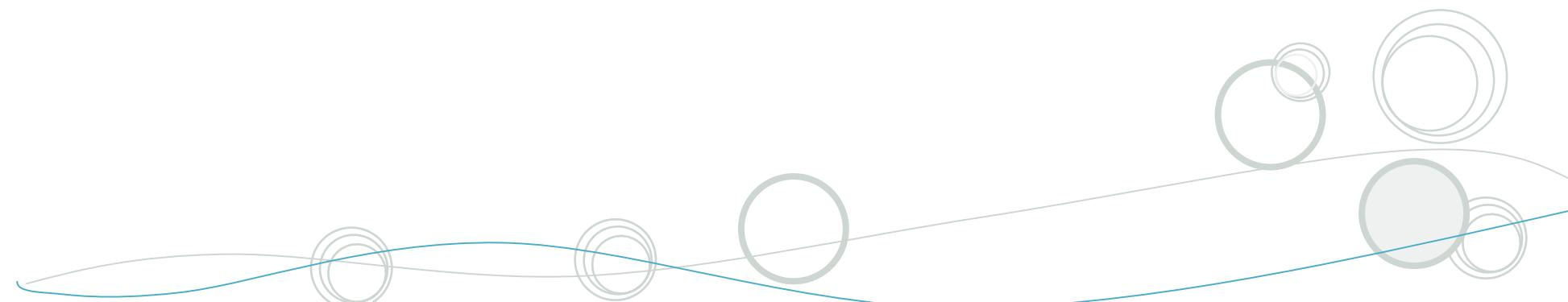
- 反向/同相/反向加法减法/积分电路

## ► 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



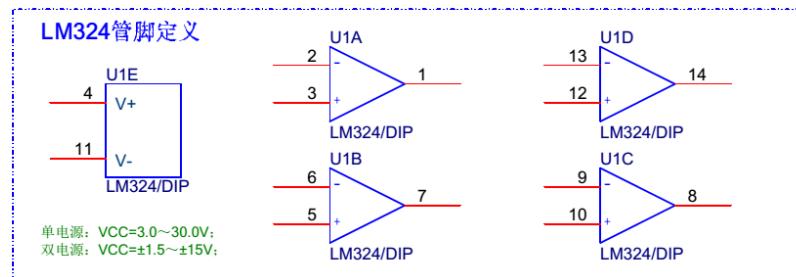
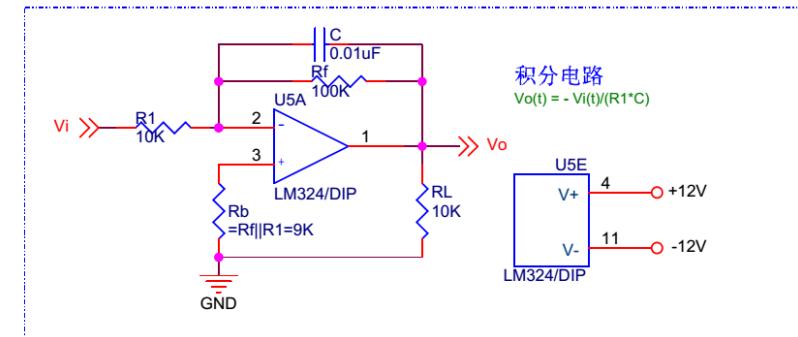
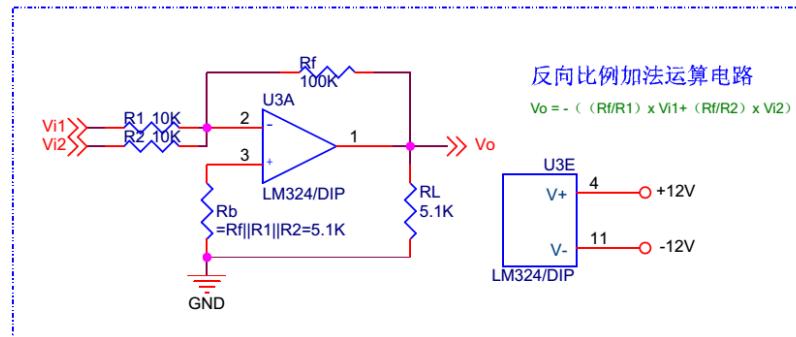
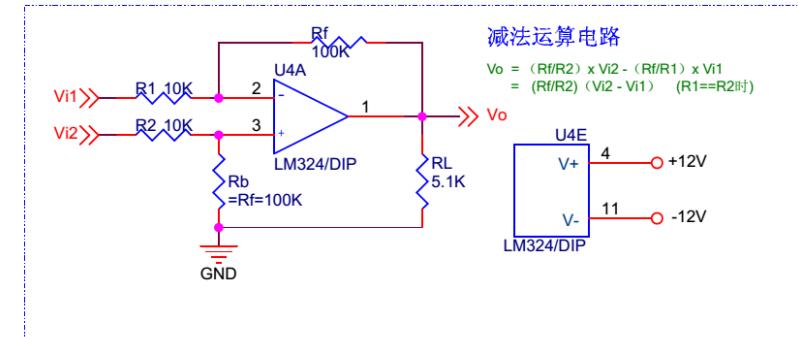
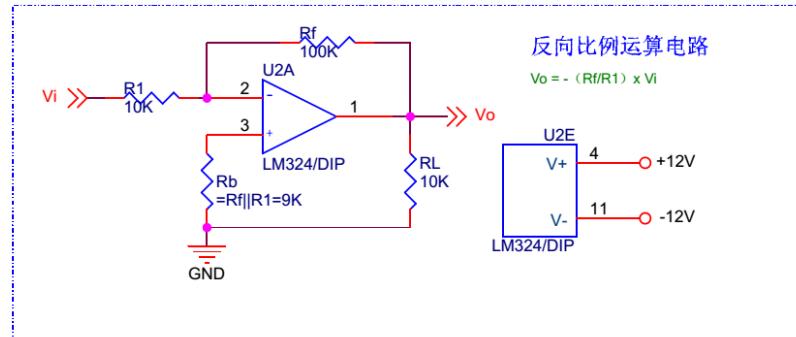
- ▶ P76 : 实验三 集成运算放大器的基本应用
- ▶ 实验前预先要求
  - 阅读教材：
    - 77~81页 (实验三)
  - 完成预习报告 (有预习报告才能实验、验收)
    - 复习同相放大、反相放大、积分电路、反向比例加法减法电路
    - 完成实验电路 (见实验内容) 设计
      - 原理、电路、参数、器件型号等
      - 电阻参数必须采用标称值
    - 确定实验方案
      - 电源、信号及输入方式、测试仪器及测试方法
    - 相关参考资料

## ► 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。

# 运放原理

## ► 实验原理图

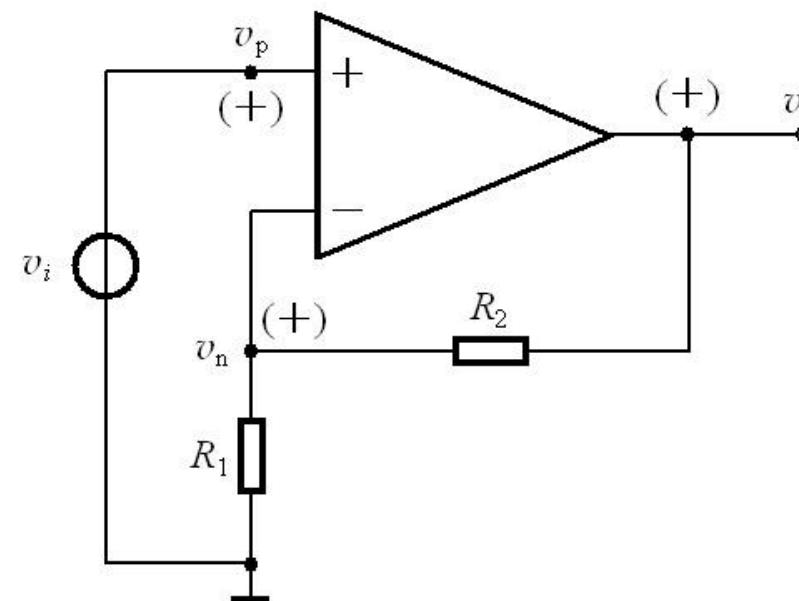


## ▶ 运放电路分析基本方法

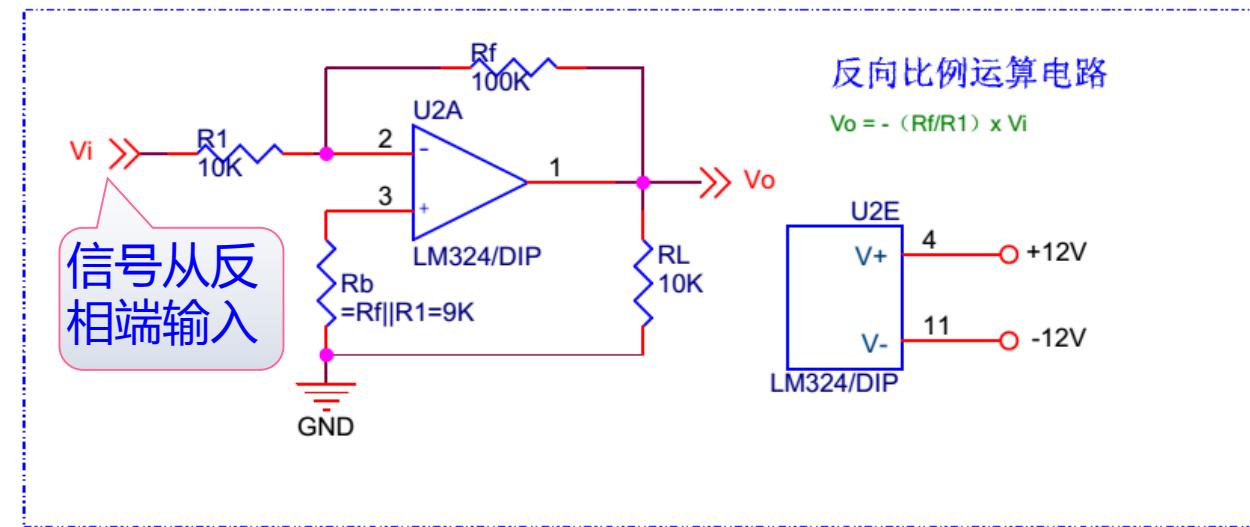
- 以同相放大器电路为例：

- 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。

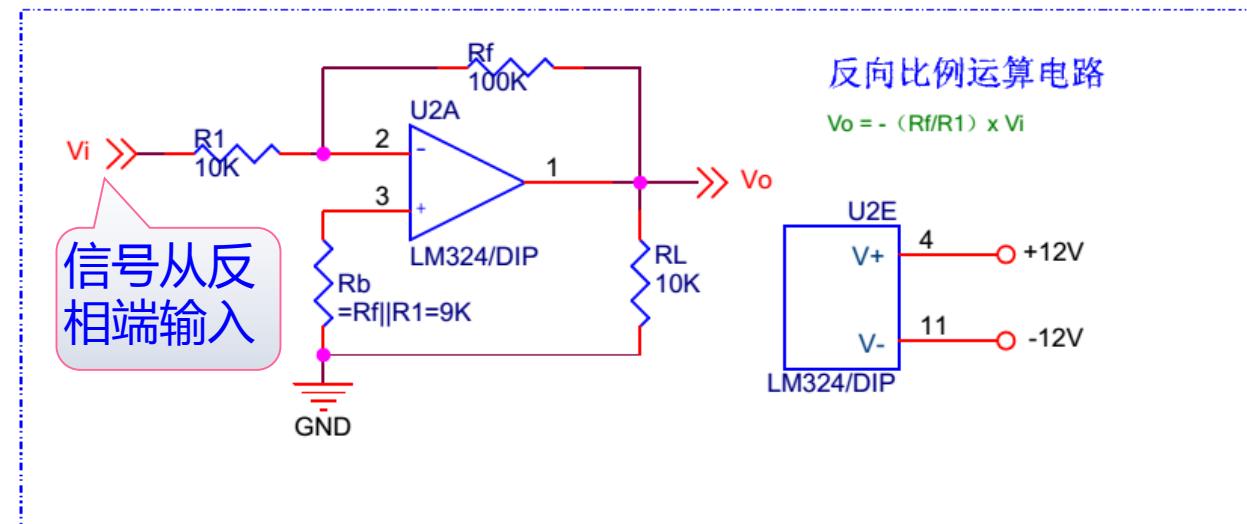


## ► 反向比例运放



- 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  $R_f = R_1 \cdot A_v$  ; 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  $R_f \approx R_i \cdot A_v$  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。

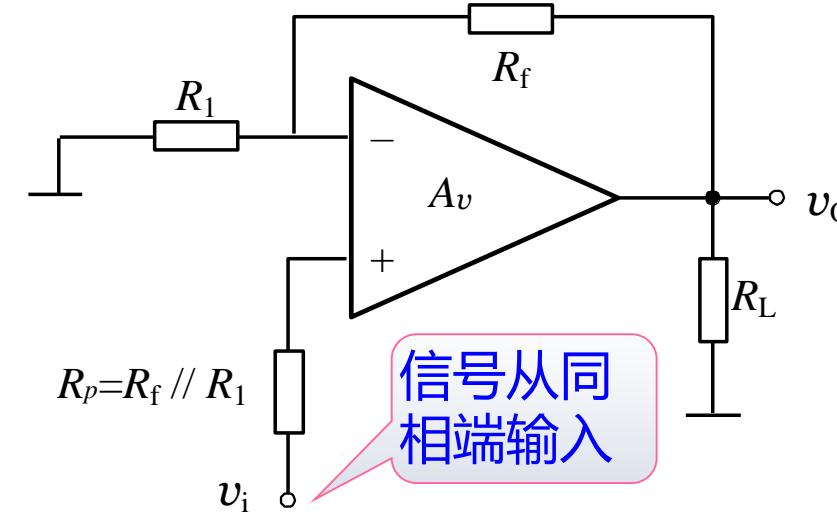
- 输入电阻  $R_i = r_{ic}$

- 输出电阻  $R_o \approx 0$

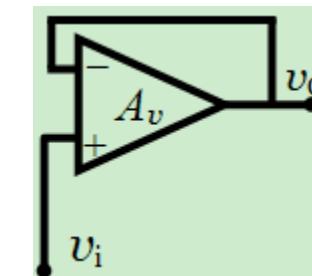
- 直流平衡电阻  $R_p = R_1 // R_F$

- 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  $1M\Omega$  - 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：

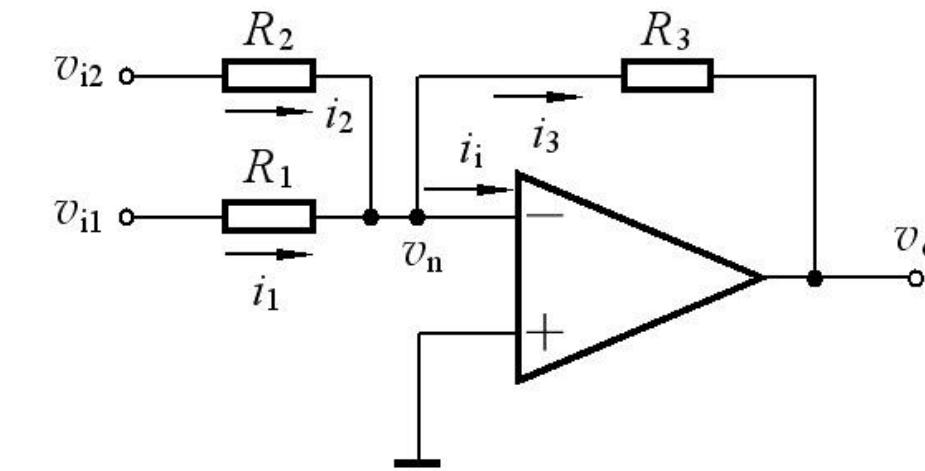
$$v_n = v_p = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{v_{i1} - v_1}{R_1} + \frac{v_{i2} - v_n}{R_2} = \frac{v_n - v_o}{R_3} \end{array} \right.$$

• 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：

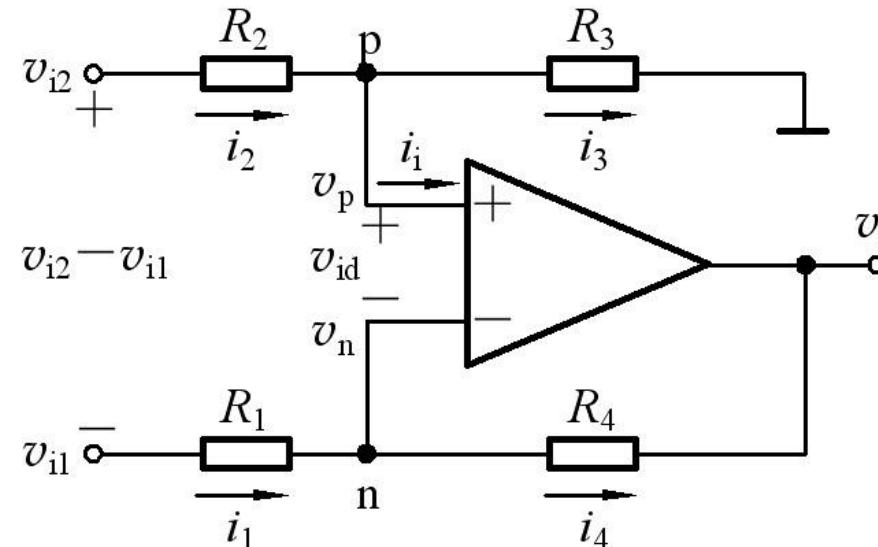
$$\left\{ \begin{array}{l} v_n = v_p \\ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_o}{R_4} \\ -v_o = \frac{R_3}{R_1}v_{i1} + \frac{R_3}{R_2}v_{i2} \end{array} \right.$$

• 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。

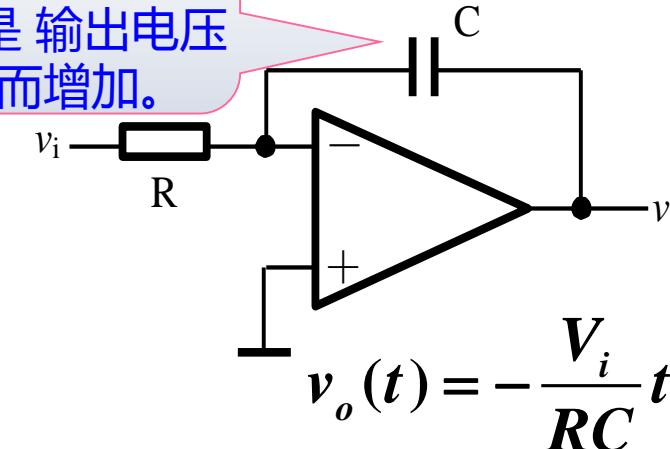
## ▶ 积分器

- 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=Vi)，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) $\frac{1}{2\pi R_C}$ ，则电路稳态近似一个反相器，其低频电压增益最大不过
- 

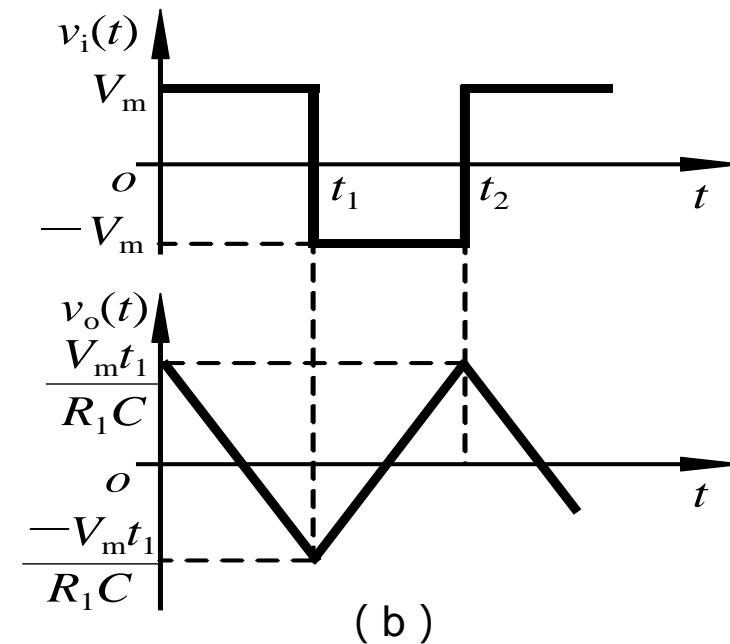
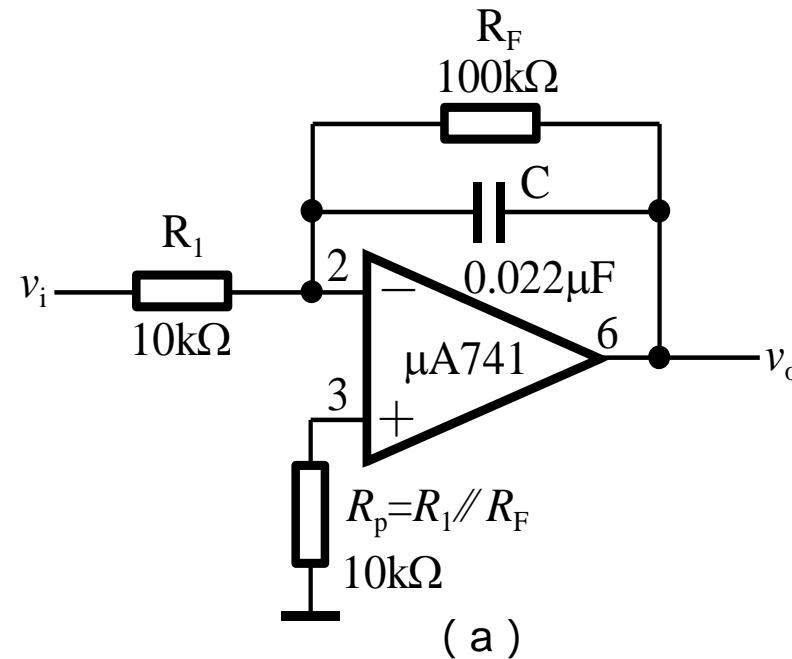
由于电容C的容抗随输入信号的频率降低而增加，结果是输出电压随频率降低而增加。



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

## ▶ 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  $R_F > 10R_1$ 、 $C < 1\mu F$ 。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:  
:

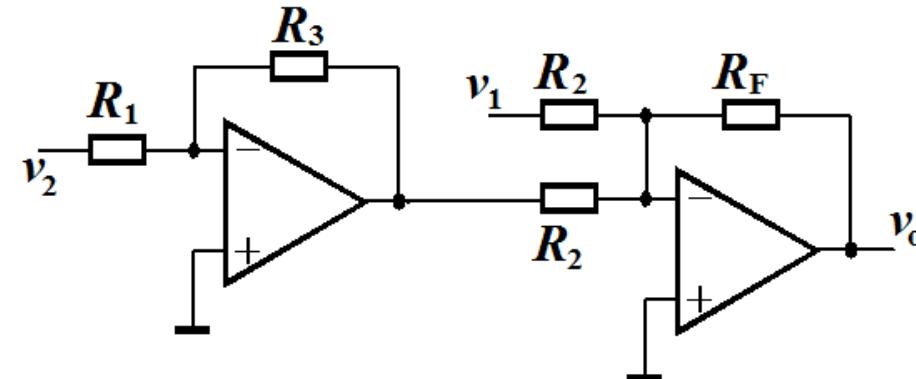


## ► 集成运放直流供电电源问题

- 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 $\pm 3V \sim \pm 18V$ 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 $\pm 12V$ ，则输出信号正峰/负峰的最大值不会超过12V（考虑运放自身约0.7V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：
- 
- 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.....

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

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

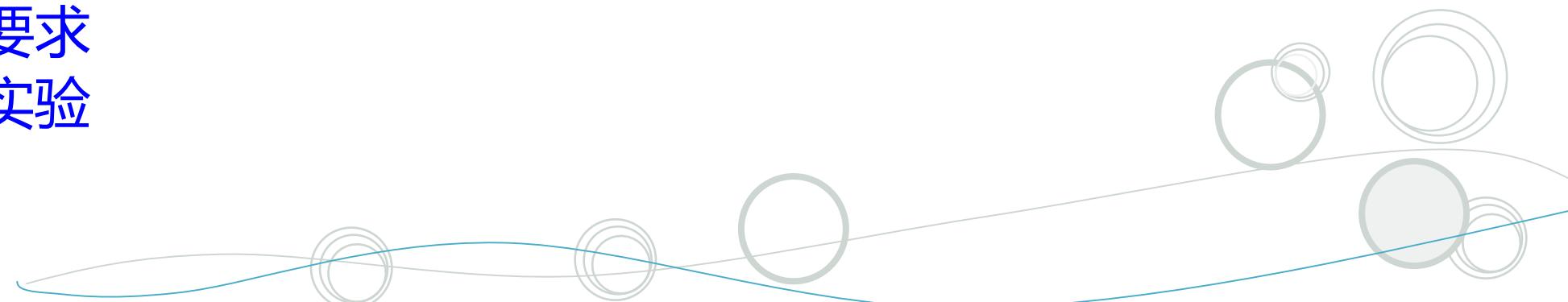
- 反向/同相/反向加法减法/积分电路

## ► 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

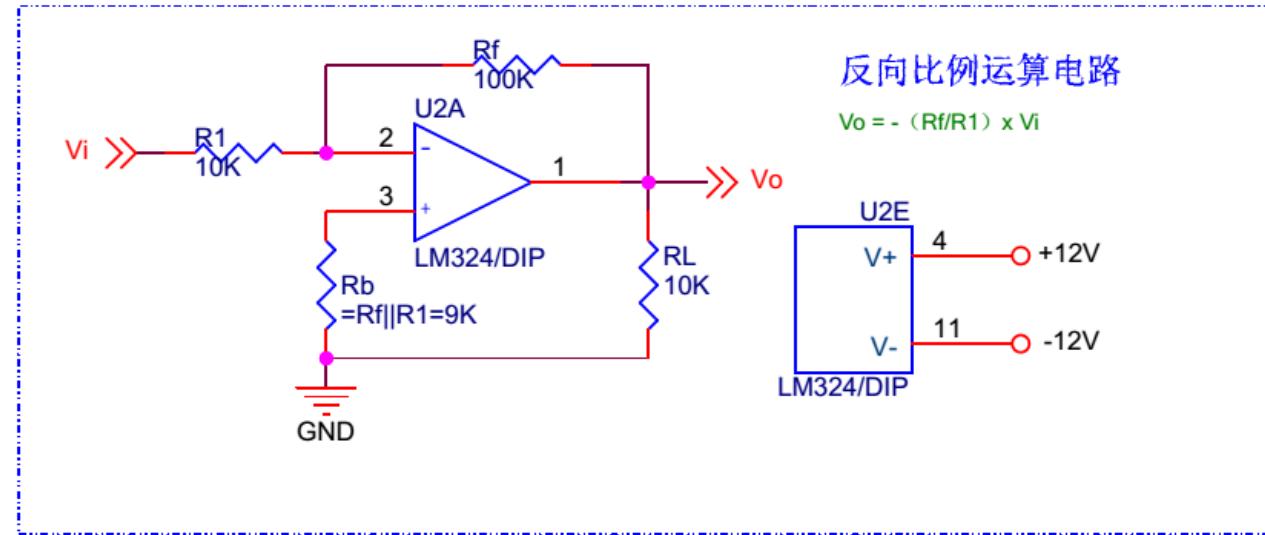


## ► 教材实验三、集成运算放大器的基本应用

- 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方法。
    - 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  $1\text{ k}\Omega$ ，电压增益  $10$  ( $1\sim2\%$ ) 倍。输入信号选用  $1\text{ kHz}$  的正弦波 ( $V_{ipp}=100\sim500\text{mV}$ )，电源电压选用  $\pm 12\text{V}$  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

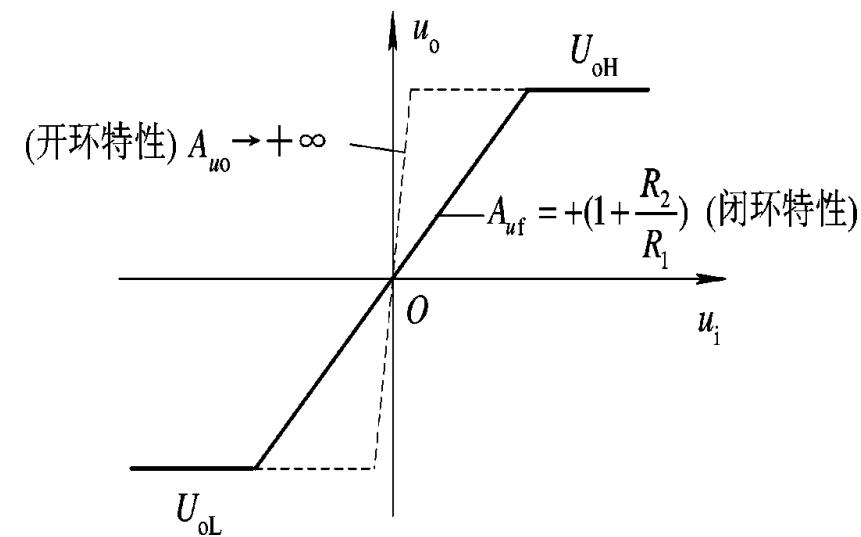
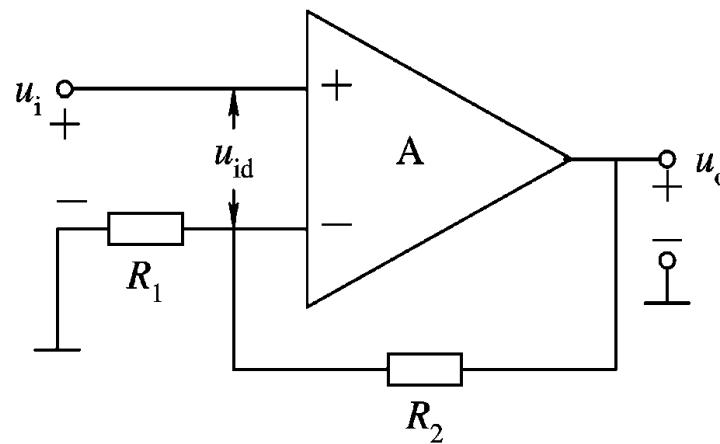
- 测试要求
  - 测量至少5组不同的信号输入、输出测试结果（保证电路处于线性放大状态），然后分析电路增益及误差，完成表2.1的内容，并将其中一组输入、输出信号波形用坐标纸记录。

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 $10\text{ k}\Omega$ ，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 $10\text{ k}\Omega$ ，电压增益为20，该如何设计电路？

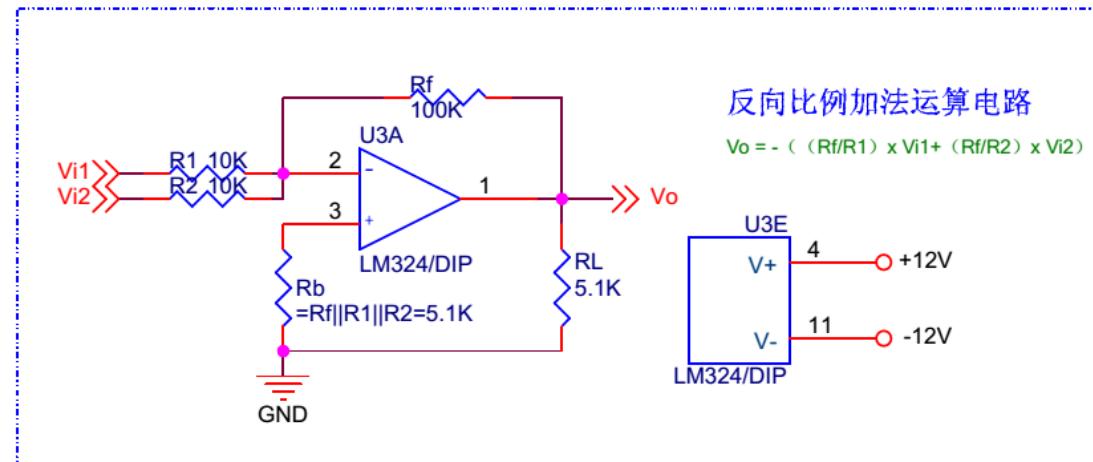
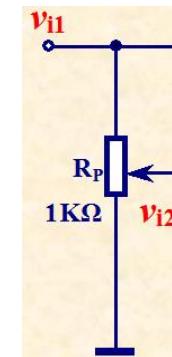
## ► 观测输出饱和值（选做）

- 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

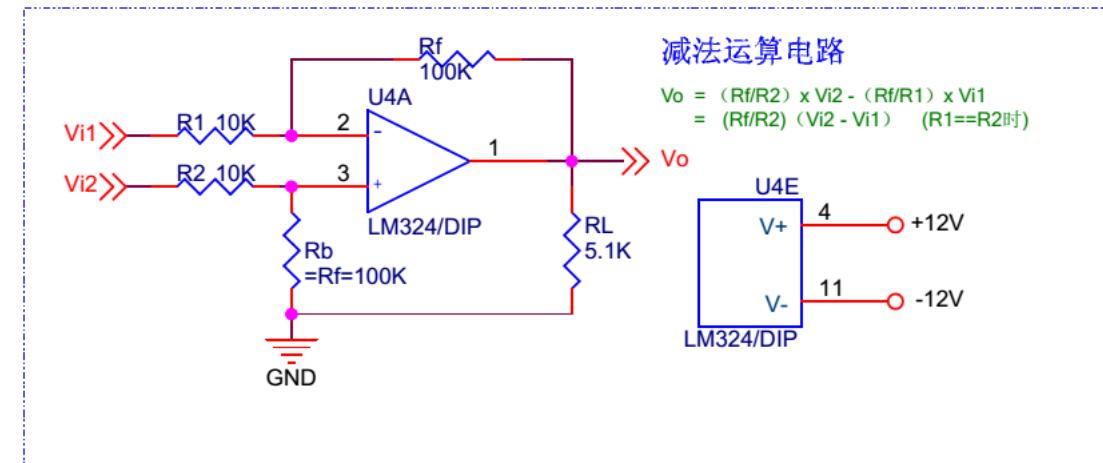
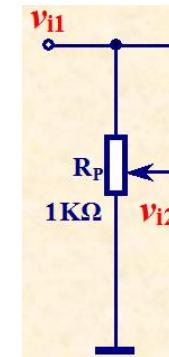


- $Vi_1$ 输入1kHz正弦波， $Vi_{1pp} \approx 500mV$ ；
- $Vi_2$ 输入1kHz正弦波， $Vi_{2pp} < 500mV$ （可由 $Vi_1$ 通过1K滑动电阻分压得到）
- 测试要求：测量至少3组不同的信号输入、输出测试结果（保证电路处于线性放大状态），然后分析数据及误差，完成表2.2的内容。

测试次数	$Vi_1$ 峰峰值 单位：	$Vi_2$ 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

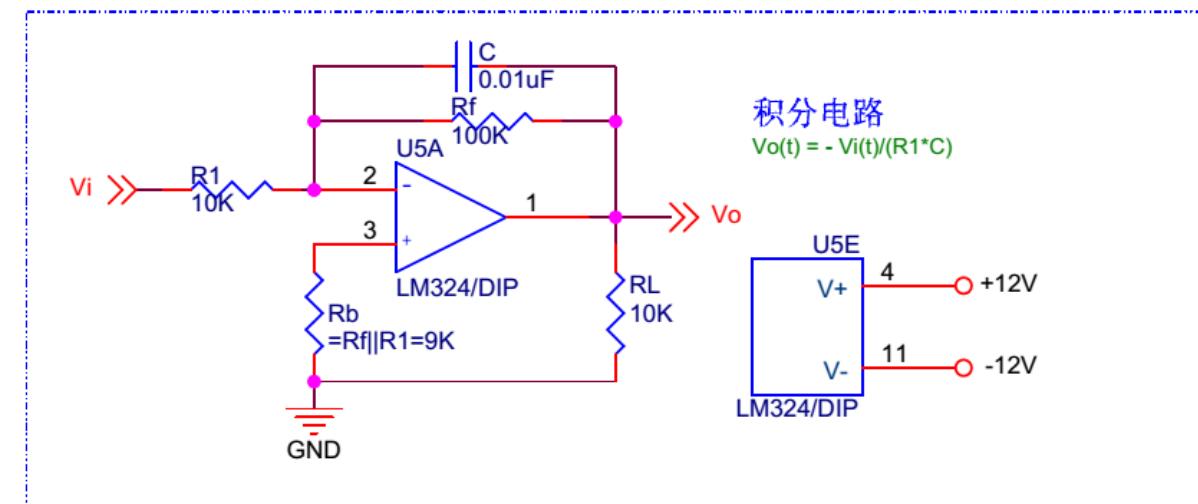


- vi1输入1kHz正弦波，Vi1pp ≈ 500mV；
- vi2输入1kHz正弦波，Vi2pp < 500mV（可由Vi1通过1K滑动电阻分压得到）
- 测试要求：测量至少3组不同的信号输入、输出测试结果（保证电路处于线性放大状态），然后分析数据及误差，完成表2.2的内容。

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						

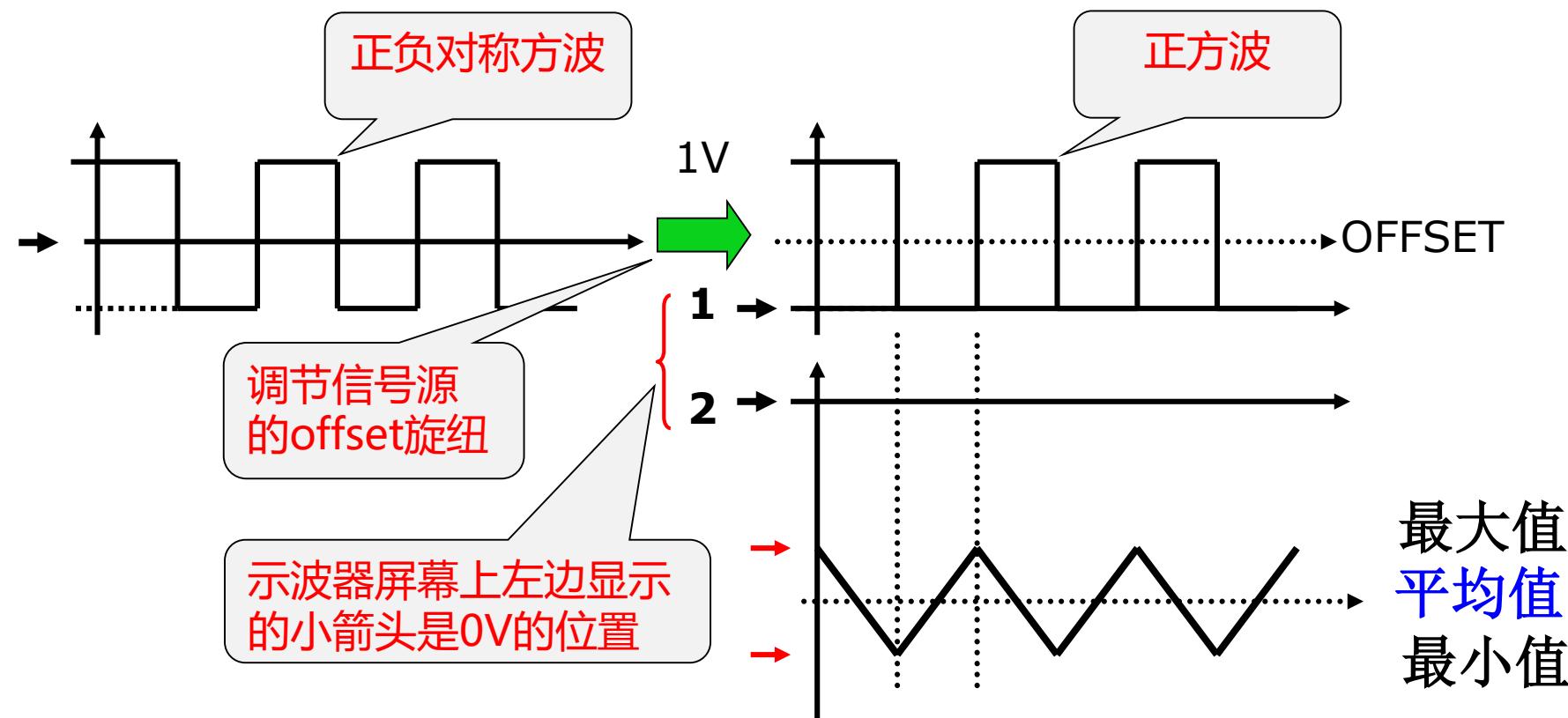
## ▶ 积分电路测试

- 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。

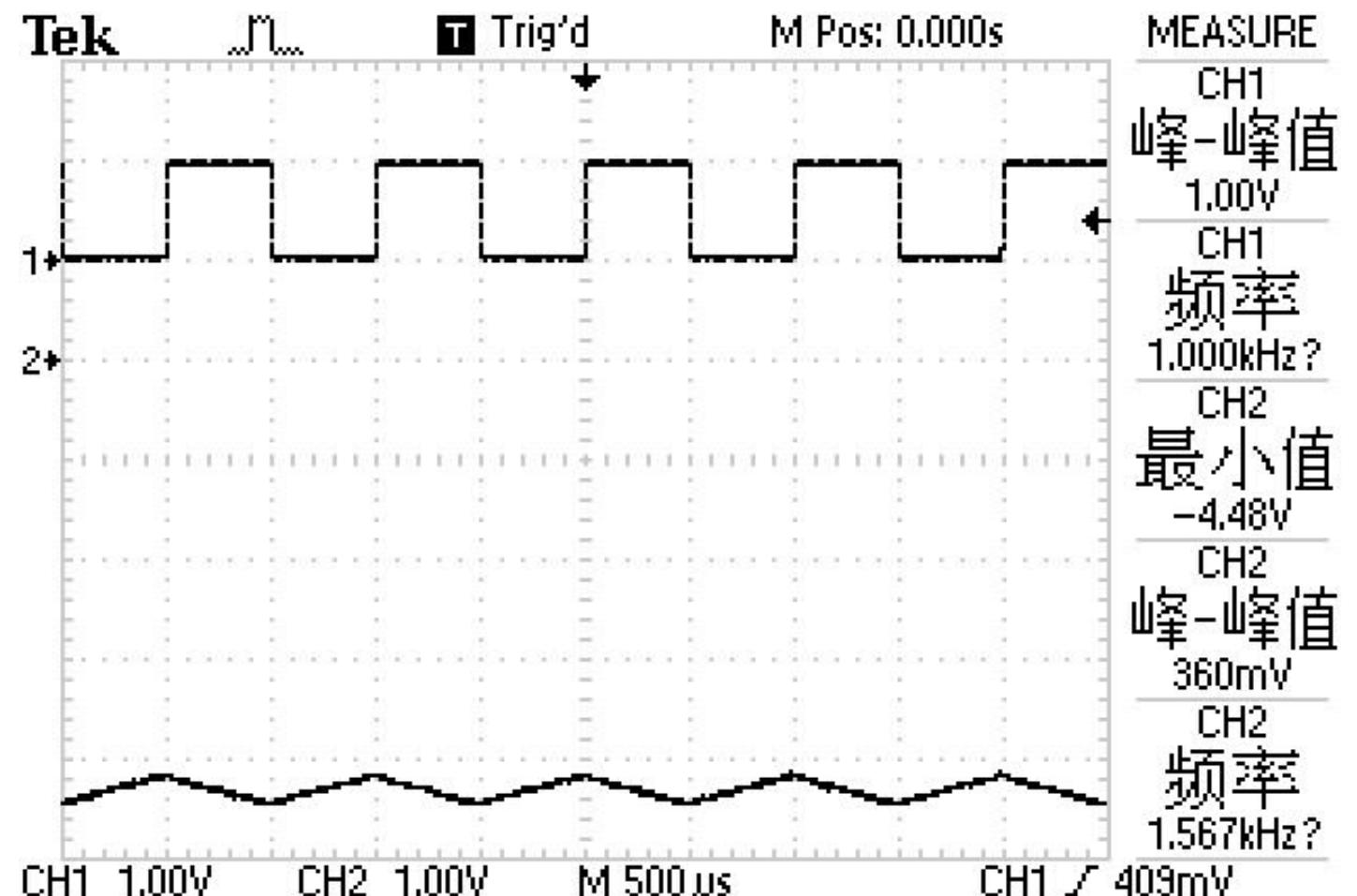


## ► 反向比例积分电路

- 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



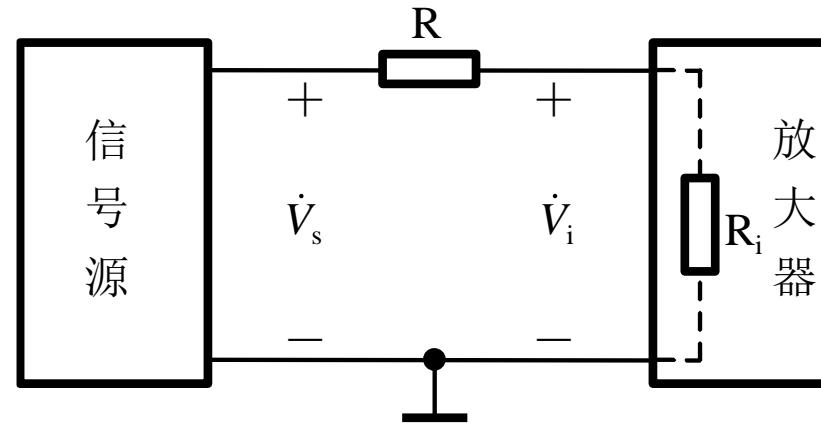
按显示屏按钮以改变测量



## ► 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 $\pm 12V$ 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S1闭合、S2断开时为 $V_{O1}$ 、S1、S2断开时为 $V_{O2}$ 则

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

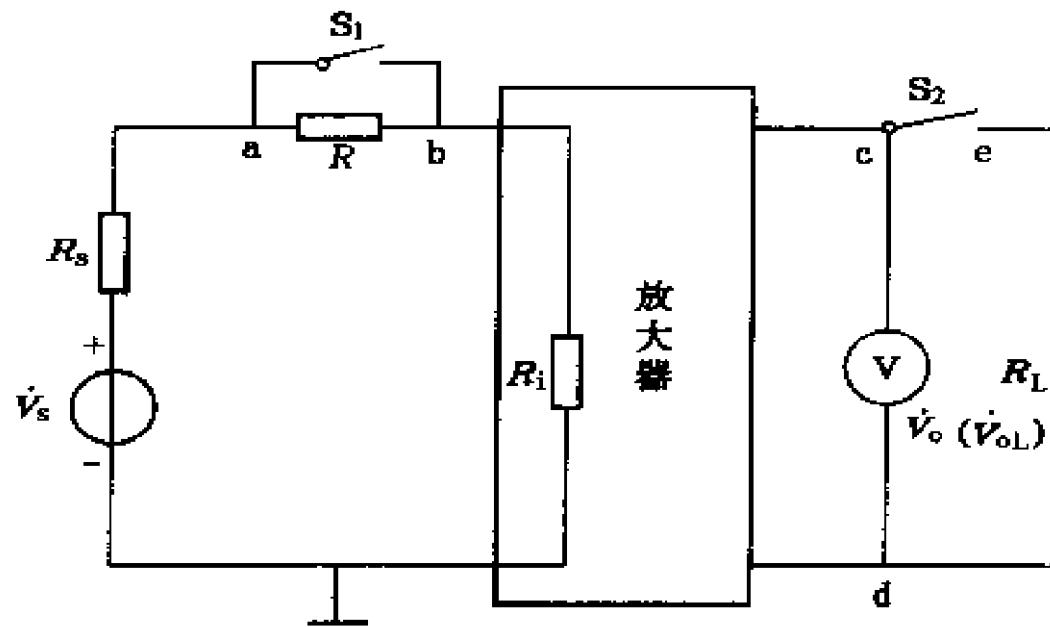


图 2.3.3 用换算法测高输入电阻或输出电阻

## ► 验收要求

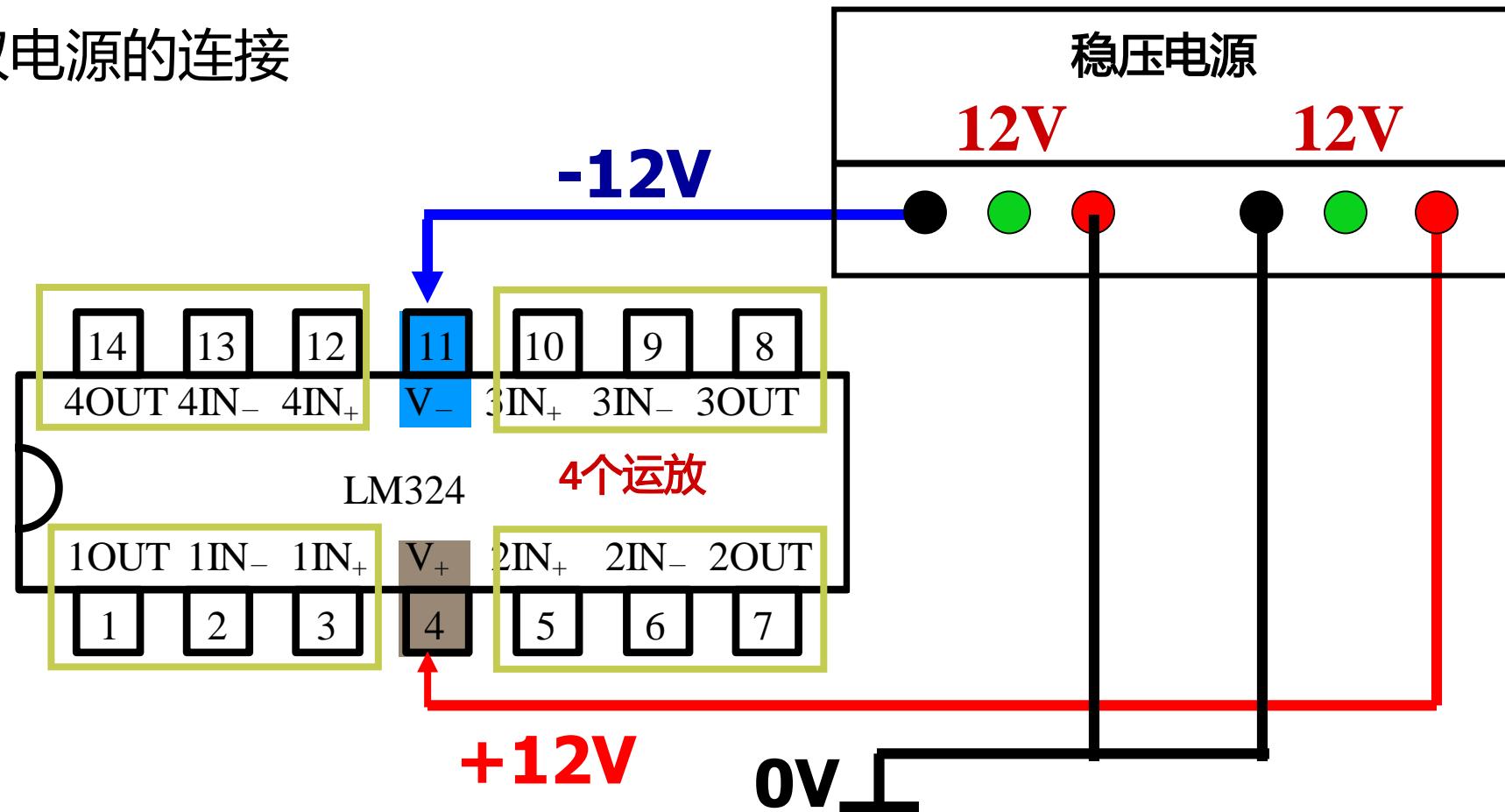
- 所有实验内容完成，保留好电路，做好记录后举手验收；
- 注意：
- 统一完成后验收；
- 测量端子的预留！
- 测试记录
- 电子实验报告
- 或手写实验报告及记录（波形用坐标纸记录）
- 验收时波形与测量值的显示！

## ► 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

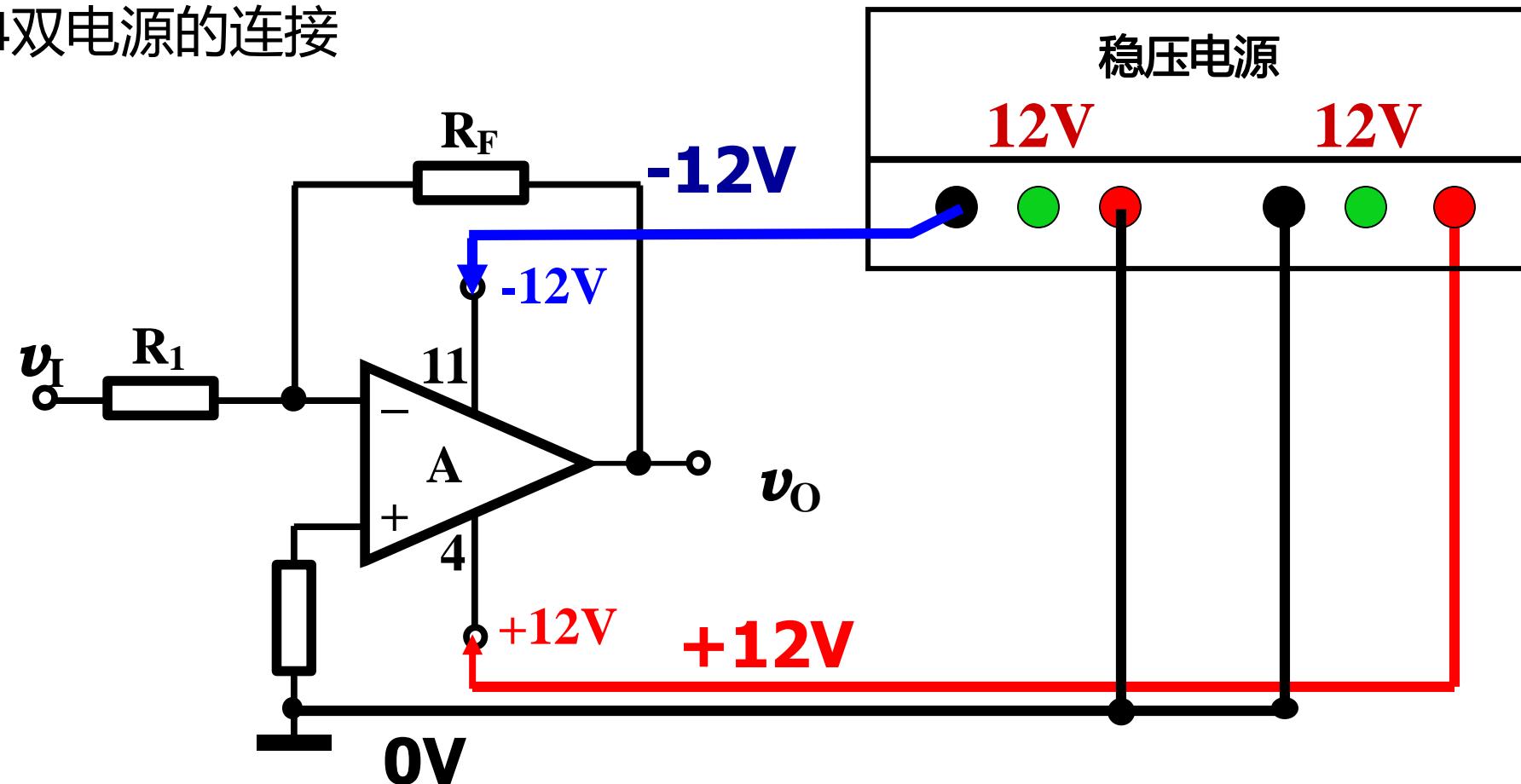
- ### • LM324双电源的连接



**注意：正、负电源的千万别接反！**

## ▶ 注意事项

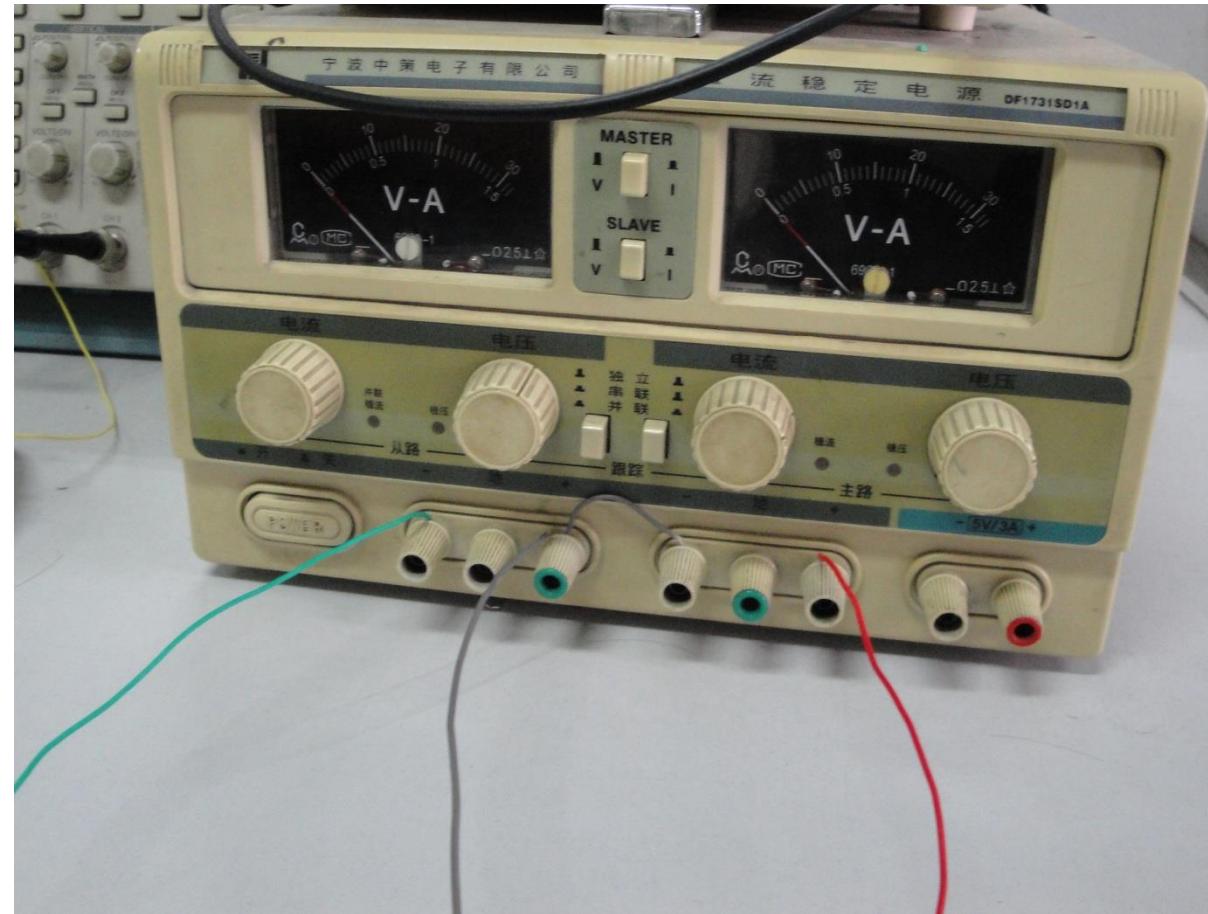
- LM324双电源的连接



注意：正、负电源的千万别接反！

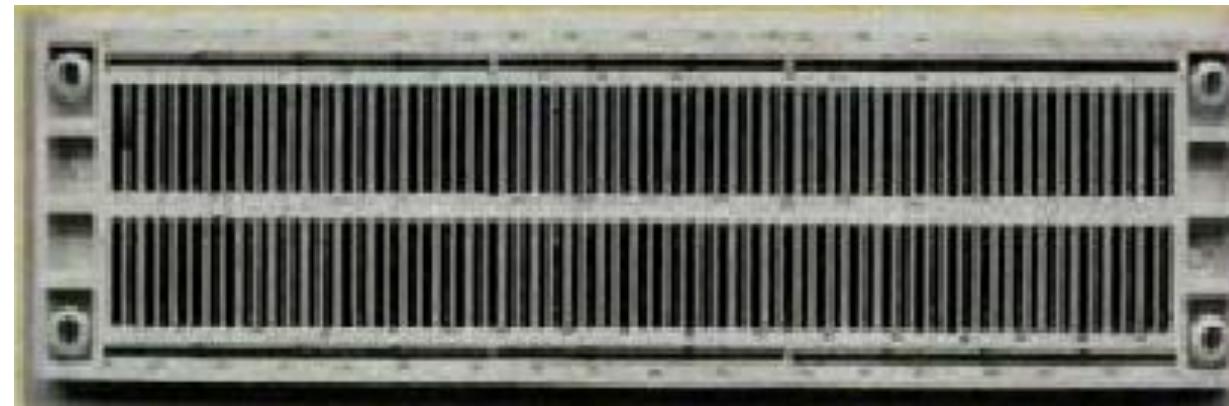
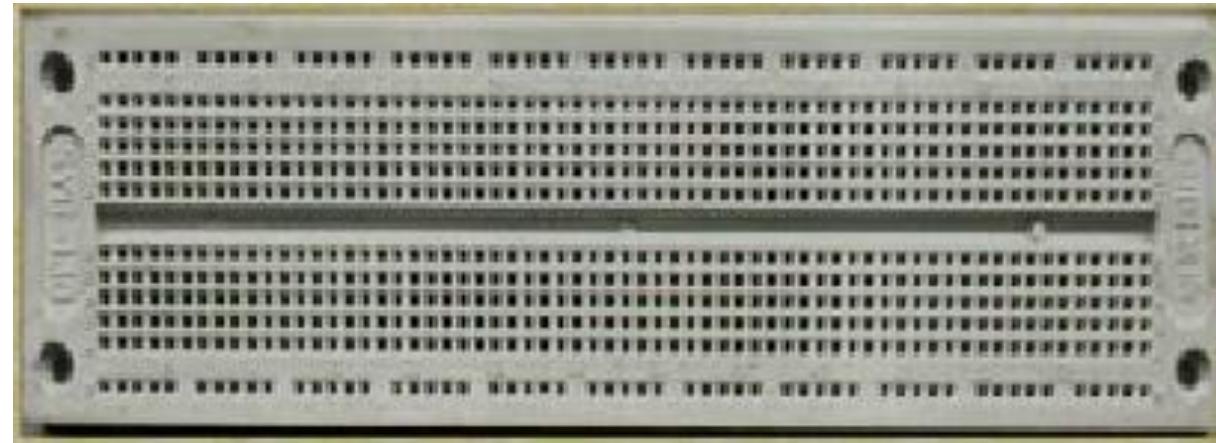
## ▶ 注意事项

- 双电源的连接



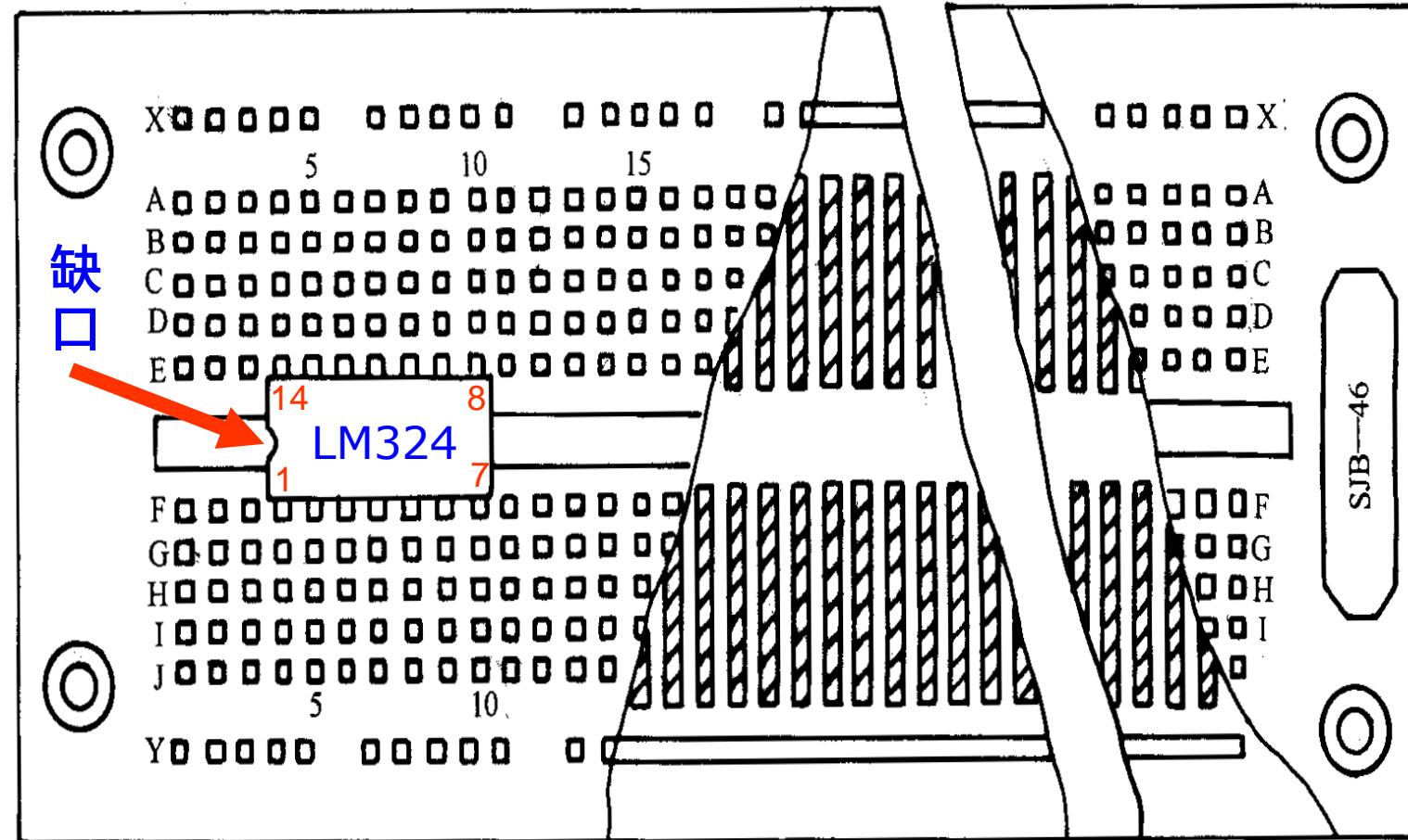
## ▶ 注意事项

- 面包板



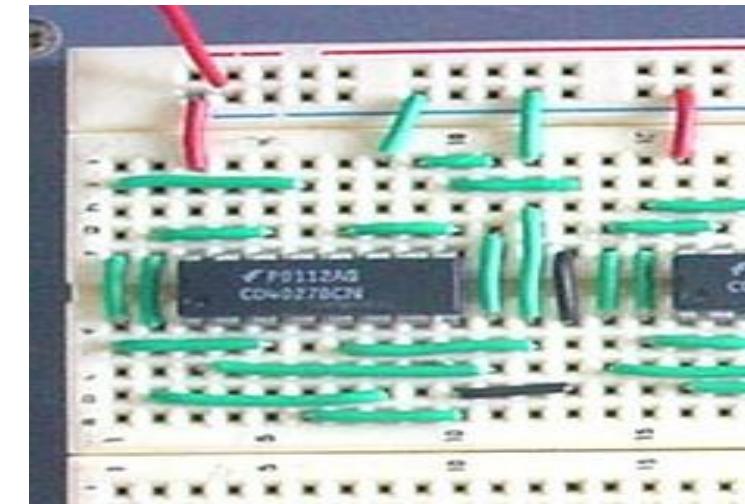
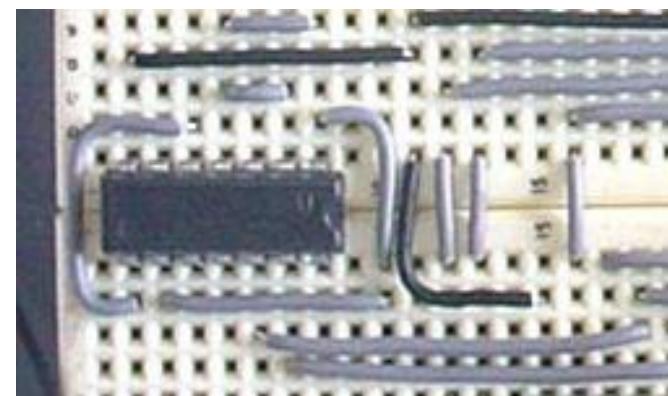
## ▶ 注意事项

- 芯片安装



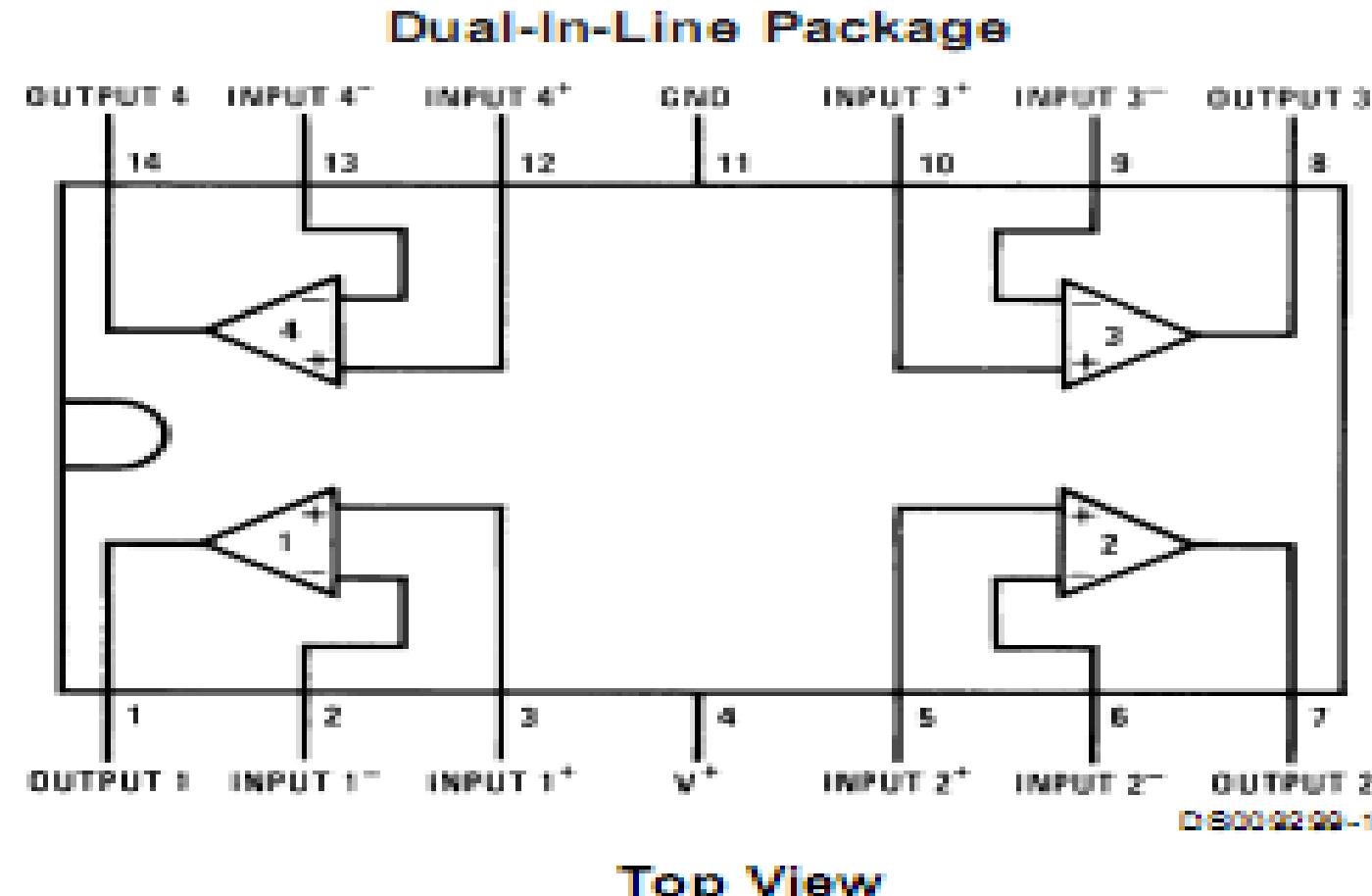
## ▶ 怎么放器件

- 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



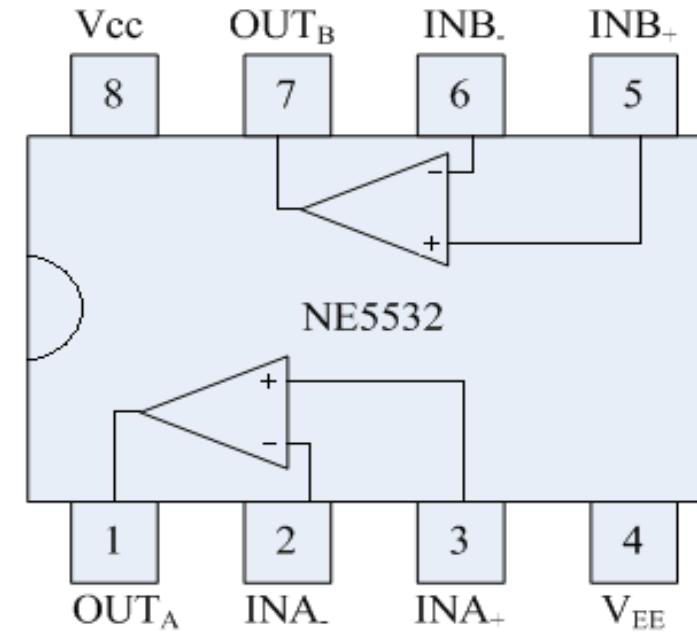
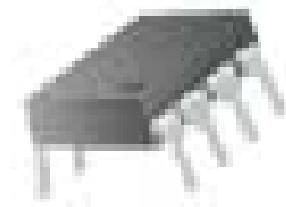
# LM324的使用

## ► 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

