



厦门大学
XIAMEN UNIVERSITY

电力电子技术A实验



实验七 集成运算放大器组成的基本运算电路

实验目的

- 一、运算放大器基础
- 二、集成运算放大器
- 三、集成运算放大器组成的基本运算电路
- 四、实验内容注意事项



实验目的:

1. 熟悉集成运算放大器的性能和使用方法
2. 掌握集成运放构成基本的模拟信号运算电路



一、运算放大器基础

1. 从晶体管放大电路到集成运算放大器

低频放大器电路结构和晶体管放大器基本相同，都是用最简单的电路实现交流放大功能，且这些电路对放大器增益的缓慢变化或漂移并没有很高的要求，只需要简单的直流偏置电路就可以满足要求。

在实际应用中，晶体管放大器存在较多问题：

- 无法达到最大动态电压范围；
- 由于晶体管 β 值的偏差，导致生产难度的加大和放大电路增益的偏差。
- 由于晶体管自身非线性特性导致的晶体管放大器的非线性失真，使得若要使非线性失真降低到允许值，这是简单的晶体管放大电路很难做到的。



一、运算放大器基础

- 由于晶体管共射电路的**电流增益是随温度变化**的，简单的交流放大器的增益还是会有随着温度的变化发生变化。
- 交流放大器的隔直功能使得交流放大器**无法用于信号缓慢变化的场合**，使晶体管交流放大器放大直流或慢变信号及其复杂。
- 简单的晶体管放大电路**对共模干扰没有抑制能力**。
- 负反馈可以有效的抑制因放大器开环增益变化对闭环增益的影响，也可以有效的抑制晶体管参数漂移的影响，还可以有效的抑制晶体管非线性造成的非线性失真，从而获得放大器的稳定性和改善性能。但**想应用负反馈展宽放大器带宽几乎是不可能的**，除非引入负反馈后的放大器开环就具有这样的宽度。



一、运算放大器基础

集成运算放大器是在分立元件放大器的基础上，**将各个晶体管制作在同一芯片内**，同时根据集成电路制造工艺的特点，将分立元件的电路单元性能优化。

- 集成运算放大器性能**非常接近于理想运算放大器**的特性，很容易实现几乎理想的电路参数气性能。
- 集成运算放大器**可以完成几乎所有的模拟电路功能**，不管是线性还是非线性的电路。



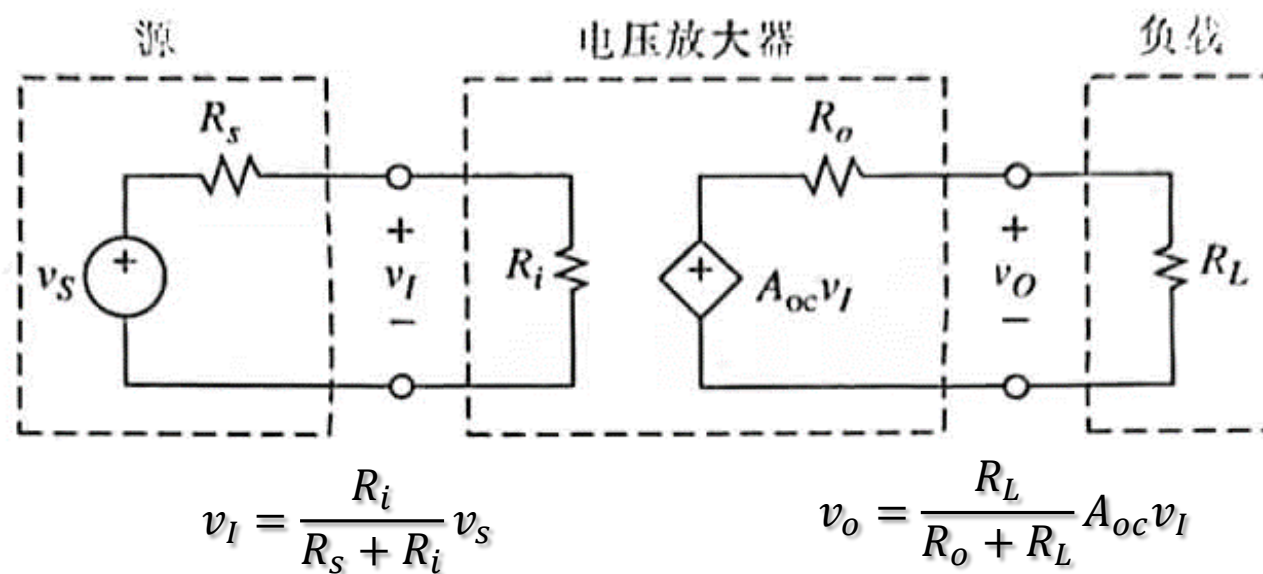
一、运算放大器基础

2. 运放的分类

- 按照**功能/性能**分类，模拟运算放大器一般可分为通用运放、低功耗运放、精密运放、高输入阻抗运放、高速运放、宽带运放、高压运放。
- 特殊运放**，例如程控运放、电流运放、电压跟随器等等。
- 根据运放的**供电**方式，也分为单电源供电和双电源供电运放。

一、运算放大器基础

3. 理想电压放大器



消去中间变量 v_I ，整理得到源电压-负载增益为：

$$\frac{v_O}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_{oc} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

信号在从源到输出传播时，在输入端口、输出端口受到的衰减统称为**加载效应**

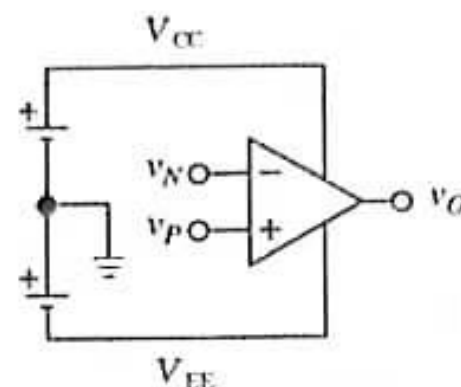
$$R_i = \infty, R_o = 0$$

加载效应消除，称为**理想放大器**

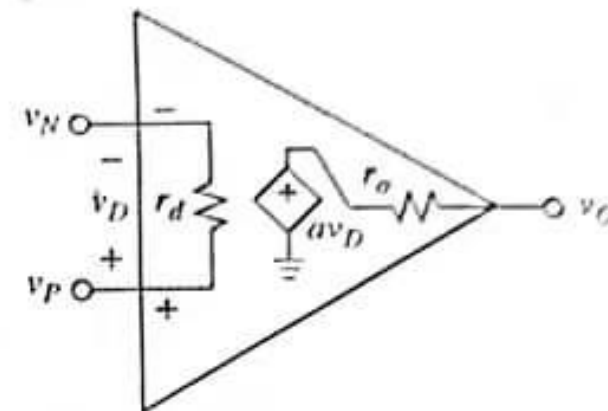
一、运算放大器基础

4. 运算放大器

- 双电源运算放大器没有0V接地端子，参考地由电源公共端从外部建立；
- 图中等效电路包括差分输入电阻 r_d 、电压增益 a 、输出电阻 r_o ，此三参数为运算放大器的开环参数；
- 电压差： $v_D = v_P - v_N$ 称为差分输入电压，电压增益也称空载增益
- 在输出不加载时： $v_o = av_D = a(v_P - v_N) \Rightarrow v_D = \frac{v_o}{a}$
- v_D 是个极小值 （ μV 甚至更低）



(a)



(b)

(a) 运算放大器符号和电源连接；(b) 加电的运算放大器等效电路

一、运算放大器基础

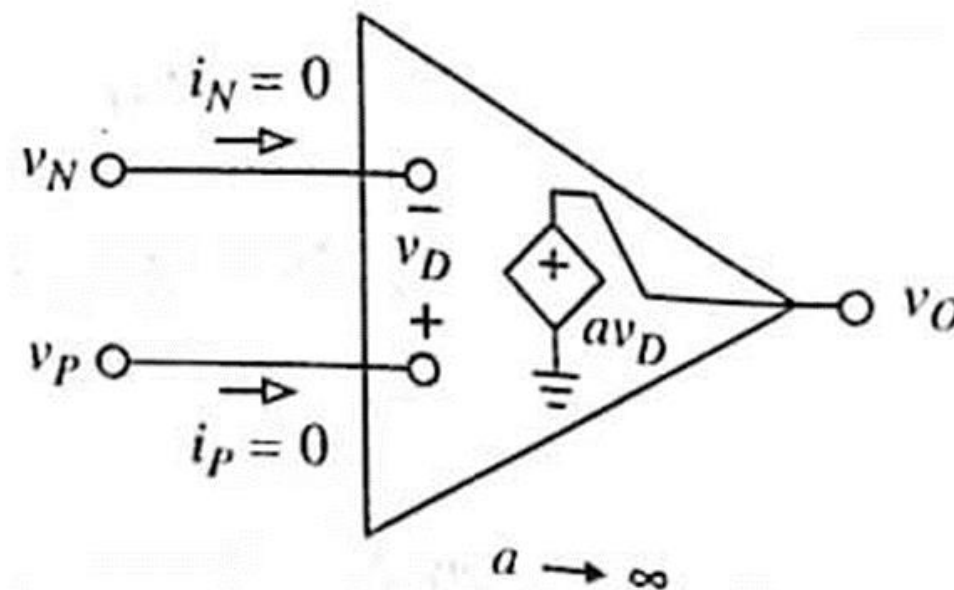
5. 理想放大器

理想端口的条件

$$\left\{ \begin{array}{l} r_d = \infty \\ r_o = 0 \\ i_P = i_N = 0 \end{array} \right.$$

在 $a \rightarrow \infty$ 的情况下

$$\left\{ \begin{array}{l} v_D \Rightarrow v_o / \infty \rightarrow 0! \\ av_D = v_o \end{array} \right.$$



一、运算放大器基础

6. 基本放大器计算方法:

① 同相放大器

$$v_p = v_I$$

$$\text{由分压得到: } v_N = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o$$

$$\text{已知: } v_o = a(v_p - v_N)$$

$$\text{可得: } A = \frac{v_o}{v_I} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + (1 + R_2/R_1)/a}$$

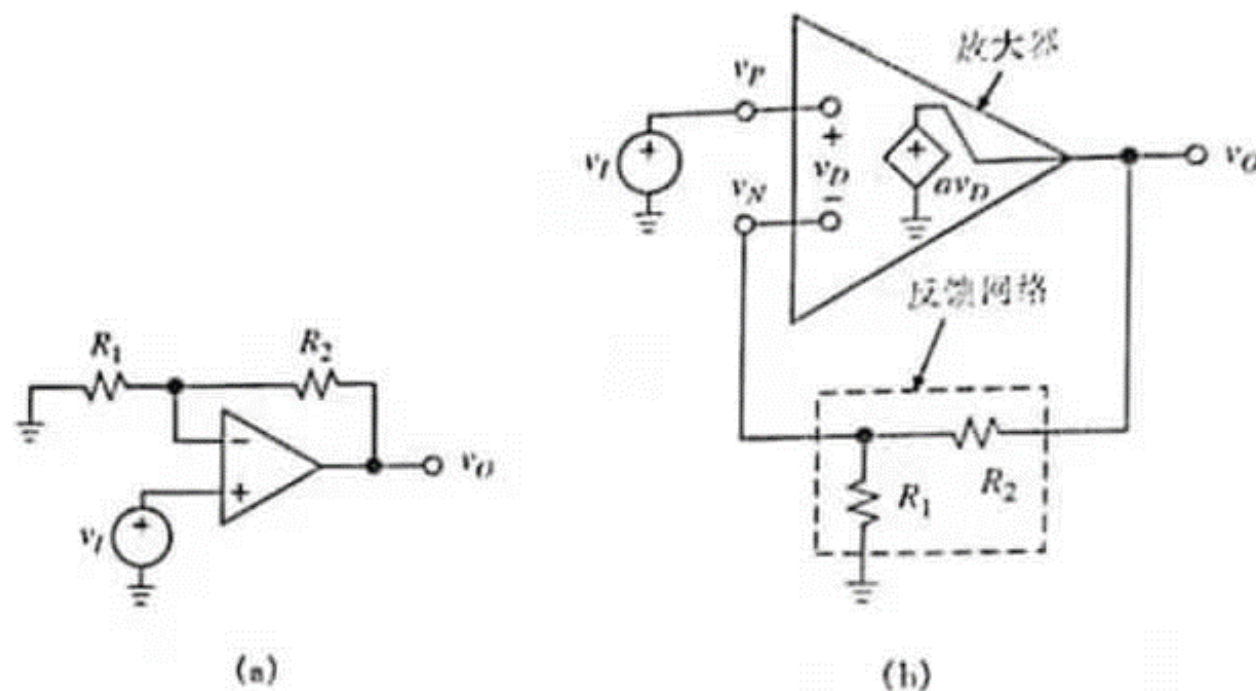


图 1.6 同相放大器和分析电路模型

一、运算放大器基础

6. 基本放大器计算方法:

② 反相放大器

利用叠加原理: $v_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o$

由: $v_o = a(v_P - v_N)$

得到: $v_o = a \left(-\frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} v_1 - \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} v_o \right)$

从而: $A = \frac{v_o}{v_I} = \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \frac{1}{1 + (1 + R_2/R_1)/a}$

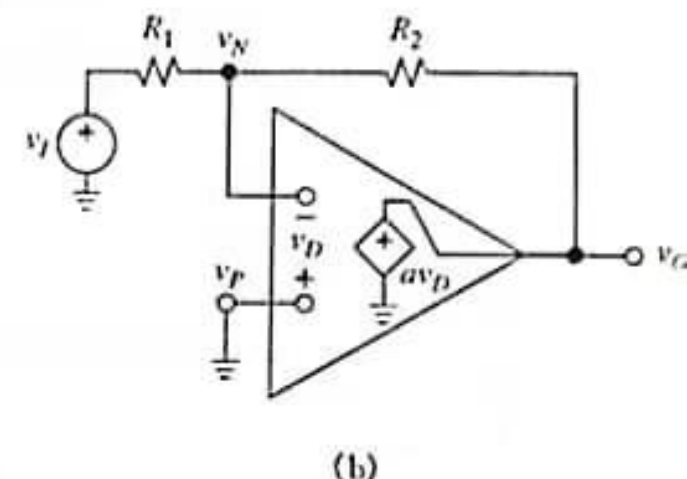
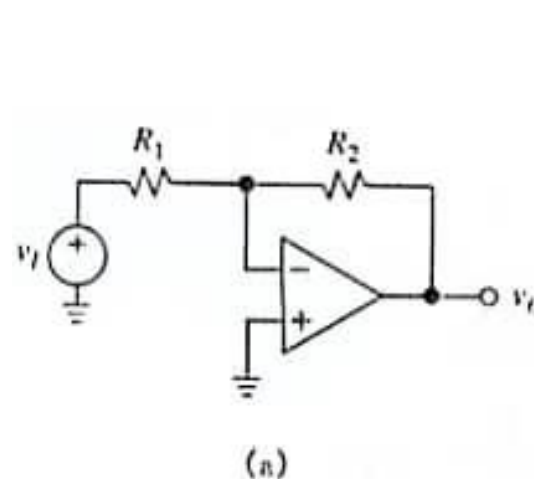
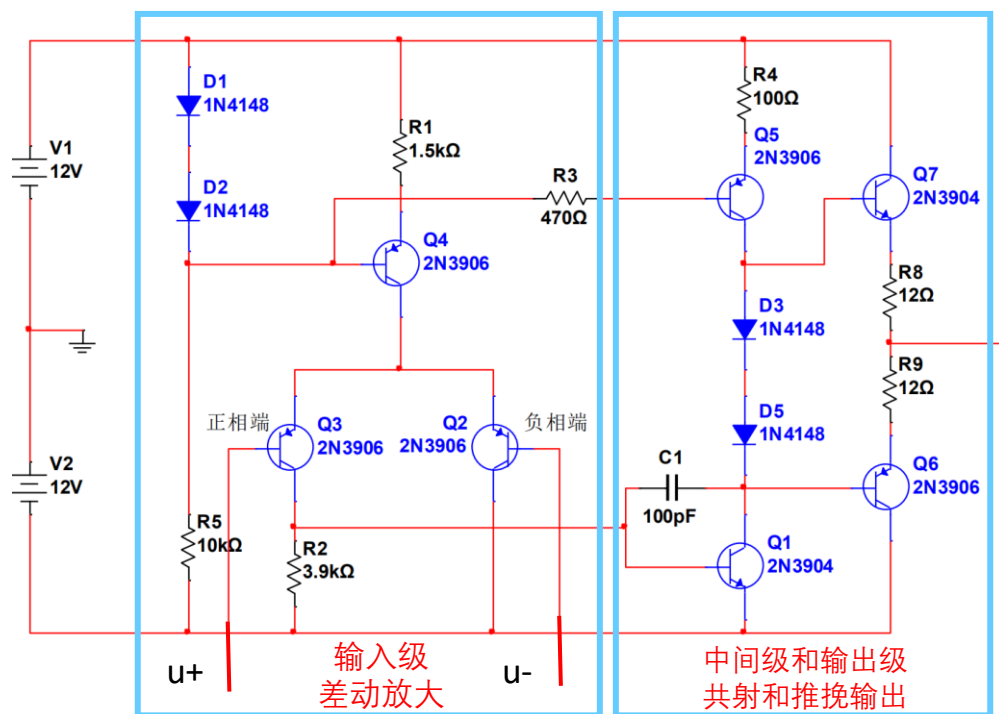


图 1.10 反相放大器和它的分析电路模型

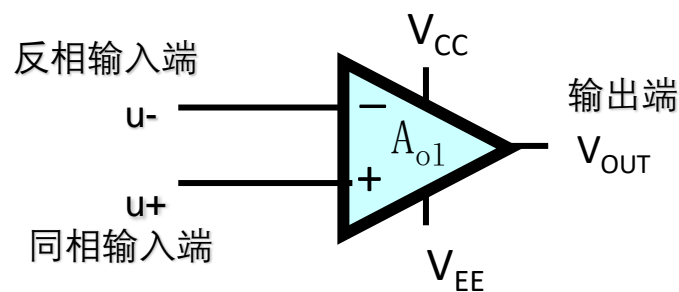
二、集成运算放大器



集成运算放大器是一种高开环增益的器件, 还具有高输入阻抗、低输出阻抗的特点。



- 输入级的作用是使运放有高输入阻抗、高共模抑制比、高差模放大能力;
- 中间级的作用是使运放有较大的放大能力;
- 输出级的作用是使运放能带得动负载, 拥有较小的输出电阻和较小的非线性失真;



二、集成运算放大器



芯片资料获取途径:

1. 各大公司官网
2. 各大电子网站相关资料下载链接,
比如: <https://www.21icsearch.com/>

LMx24, LMx24x, LMx24xx, LM2902, LM2902x, LM2902xx, LM2902xxx Quadruple Operational Amplifiers

1 Features 特性说明

- 2-kV ESD Protection for: 静电防护电压
 - LM224K, LM224KA
 - LM324K, LM324KA
 - LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV
- Wide Supply Ranges
 - Single Supply: 3 V to 32 V 单电源供电 (26 V for LM2902)
 - Dual Supplies: ± 1.5 V to ± 16 V 双电源供电 (± 13 V for LM2902)
- Low Supply-Current Drain Independent of Supply Voltage: 0.8 mA Typical
- Common-Mode Input Voltage Range Includes Ground, Allowing Direct Sensing Near Ground
- Low Input Bias and Offset Parameters 输入偏置、偏移参数
 - Input Offset Voltage: 3 mV Typical A Versions: 2 mV Typical
 - Input Offset Current: 2 nA Typical
 - Input Bias Current: 20 nA Typical A Versions: 15 nA Typical
- Differential Input Voltage Range Equal to Maximum-Rated Supply Voltage: 32 V (26 V for LM2902) 与最大供电电压相等的差分输入电压
- Open-Loop Differential Voltage Amplification: 100 V/mV Typical 开环差分电压放大倍数
- Internal Frequency Compensation
- On Products Compliant to MIL-PRF-38535, All Parameters are Tested Unless Otherwise Noted. On All Other Products, Production Processing Does Not Necessarily Include Testing of All Parameters.

2 Applications 应用场景

- Blu-ray Players and Home Theaters
- Chemical and Gas Sensors
- DVD Recorders and Players
- Digital Multimeter: Bench and Systems
- Digital Multimeter: Handhelds
- Field Transmitter: Temperature Sensors
- Motor Control: AC Induction, Brushed DC, Brushless DC, High-Voltage, Low-Voltage, Permanent Magnet, and Stepper Motor
- Oscilloscopes
- TV: LCD and Digital
- Temperature Sensors or Controllers Using Modbus
- Weigh Scales

3 Description 描述

These devices consist of four independent high-gain frequency-compensated operational amplifiers that are designed specifically to operate from a single supply or split supply over a wide range of voltages.

Device Information⁽¹⁾

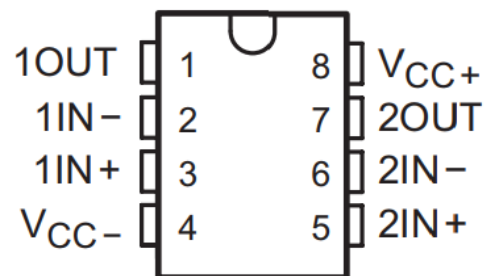
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LMx24, LMx24x, LMx24xx, LM2902, LM2902x, LM2902xx, LM2902xxx	SOIC (14)	8.65 mm × 3.91 mm
	CDIP (14)	19.56 mm × 6.67 mm
	PDIP (14)	19.30 mm × 6.35 mm
	CFP (14)	9.21 mm × 5.97 mm
	TSSOP (14)	5.00 mm × 4.40 mm
	SO (14)	9.20 mm × 5.30 mm
LM124, LM124A	SSOP (14)	6.20 mm × 5.30 mm
	LCCC (20)	8.90 mm × 8.90 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

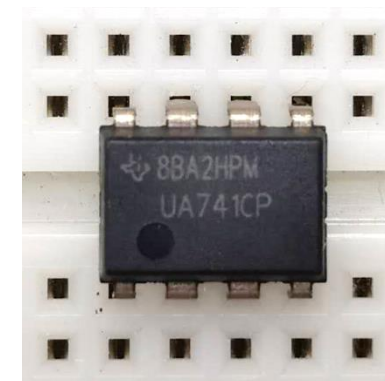
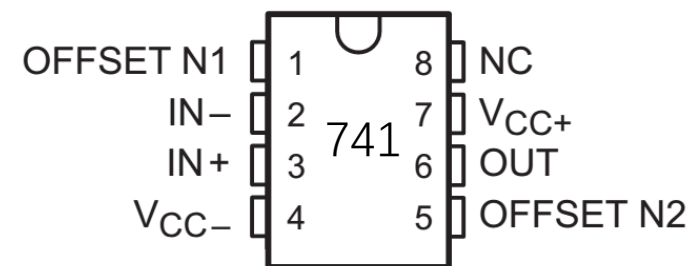
二、集成运算放大器

1. 集成运算放大器实物

双路运放例如 LM358 TL082



单路运放例如 uA741

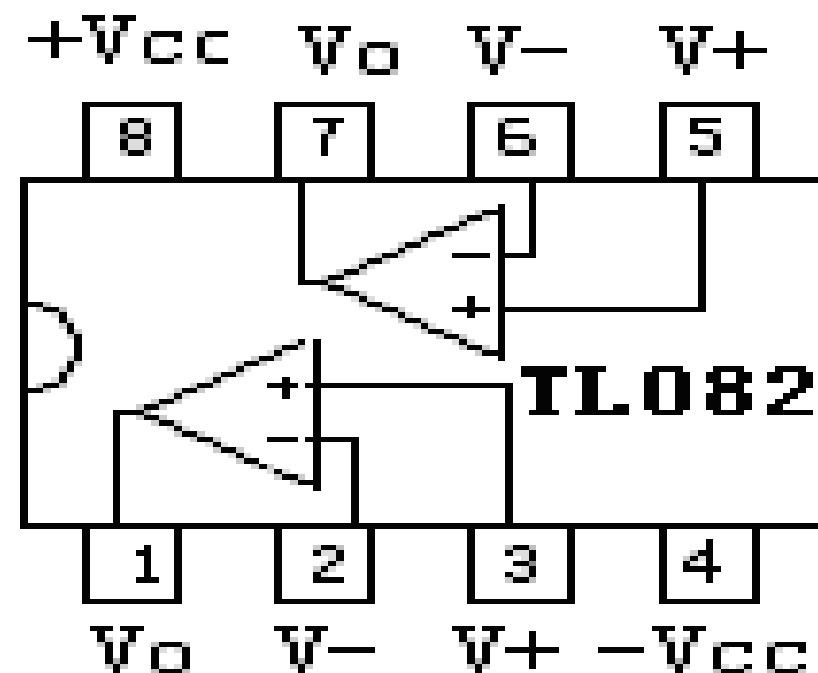


二、集成运算放大器

2. TL082双路运放

① 原理图与引脚排列

- 双集成运算放大器
- 下排最左：1 逆时针数到8
- 放在面包板上要按下去，确保管脚接触导电部分；管脚不能短路（跨接）
- 集成运放正常工作需要电源一直加载

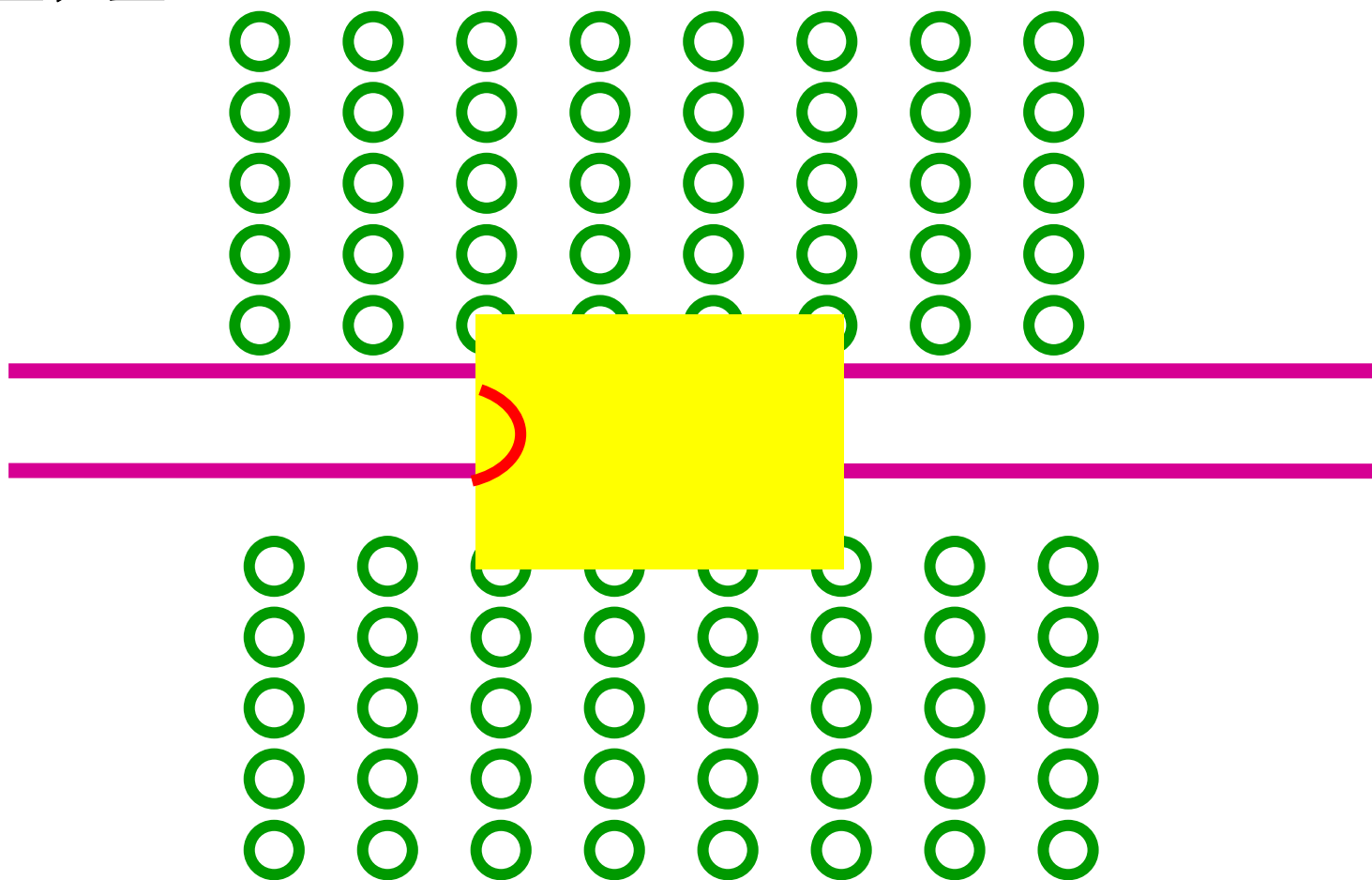


二、集成运算放大器



2. TL082双路运放

② 面包板的放置位置



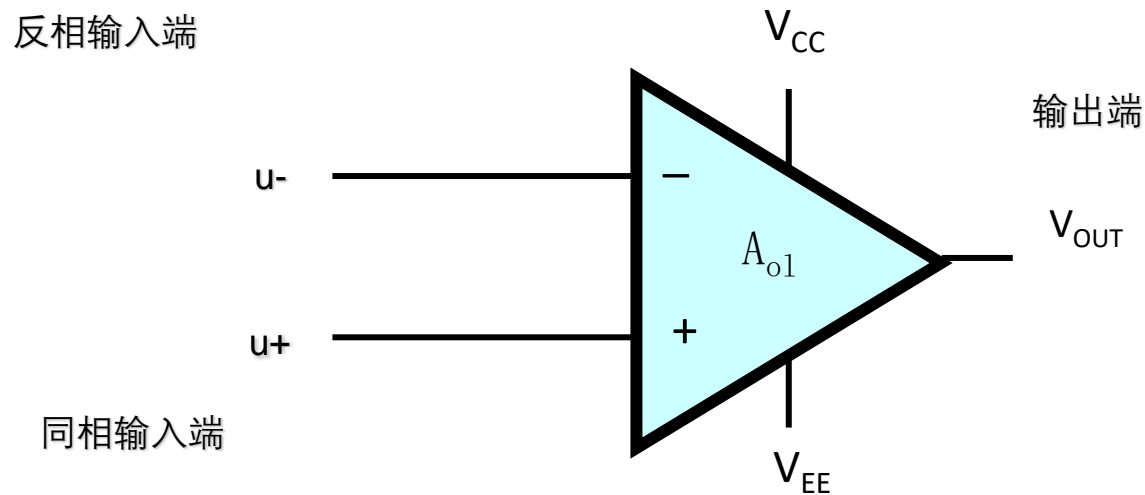
二、集成运算放大器



2. TL082双路运放

③ 开环特性

- 高增益：放大倍数 $A_v \rightarrow \infty$
- 高输入阻抗： $R_i \rightarrow \infty$
- 低输出阻抗： $R_o \rightarrow 0$





二、集成运算放大器

3. TL082双路运放

④ 特别注意事项

➤ 正负工作电源不能接反

4脚是负电源，8脚是正电源

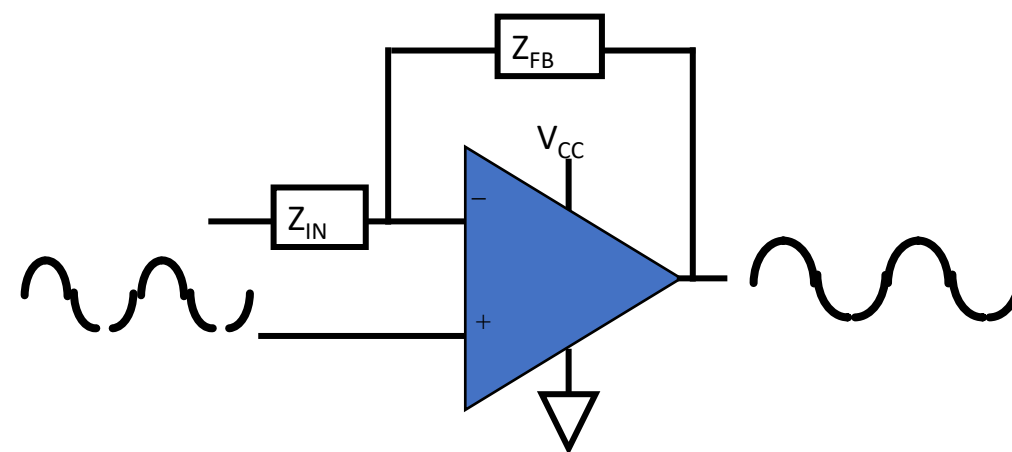
➤ 输出（1脚、7脚）不能碰到电源或电路的公共端（GND端）

➤ 要保证电路工作在线性区，即**输出最大动态范围为-12V ~ +12V**，根据电路放大倍数选择输入信号大小，如果过大，会进入饱和区或截止区，输出波形会出现削波失真

二、集成运算放大器

4. 集成运放的应用

- 由于 A_{oi} 太高，只有**加负反馈**后，集成运算放大器才能工作于线性状态。
- 改变反馈网络与外接电路的形式和参数，即能得到各种模拟放大和运算电路。
- 运放+外部分立元件 =
 - 放大器：改变信号的幅度
 - 运算器：加法、减法、积分、微分、乘法、对数
 - 缓冲器：隔离输入和输出，阻抗转换
 - 滤波器：滤除不想要的频率分量：噪声和干扰



二、集成运算放大器

5. 分析运算放大器电路的两大法宝

① 虚短和虚断

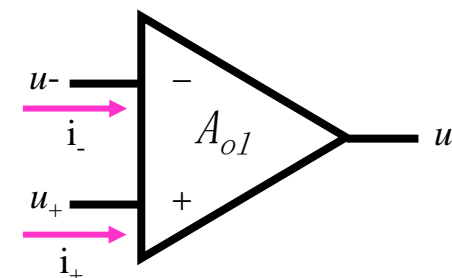
➤ 简单起见，分析电路时都把运算放大器看作是理想运放。

➤ 理想运放满足以下三个条件：

(1) 开环电压放大倍数无穷大， 即： $A_{ol} = \infty$ ；

(2) 输入电阻 R_i 为无穷大， 即： $R_i = \infty$ ；

(3) 输出电阻为零， 即： $R_o = 0$ 。



➤ **虚短：** $u_+ = u_-$ ，同相端和反相端电压相等，波形一致

➤ **虚断：** $i_- = 0$ 、 $i_+ = 0$ ，没有电流流入或者流出运放的同相端和反相端

② 叠加定理

对于一个**线性系统**，一个含多个独立源的双边线性电路的任何支路的响应（**电压或电流**），等于每个独立源**单独作用**时的响应的**代数和**，此时所有其他独立源被替换成他们各自的**阻抗**。

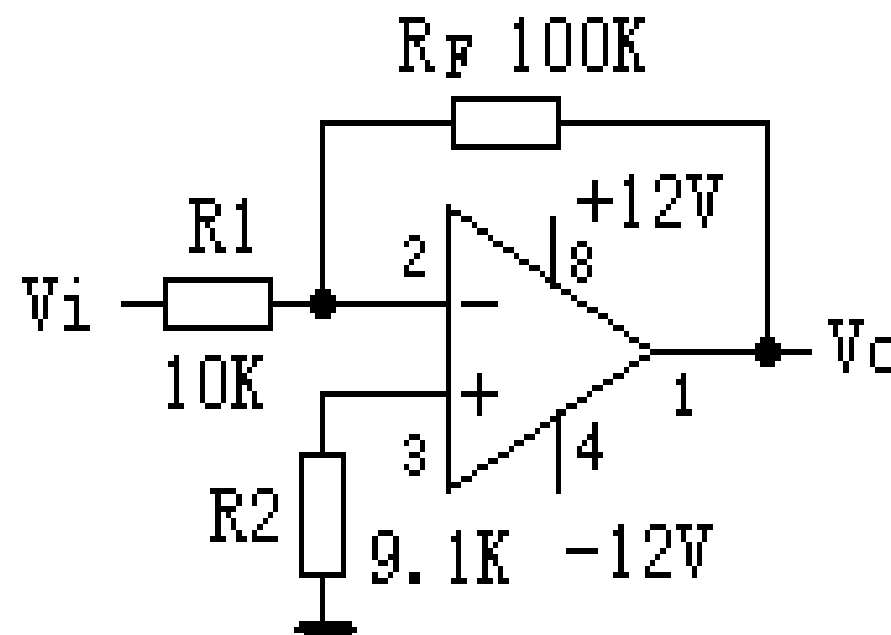
三、集成运算放大器组成的基本运算电路

1. 反相放大器

- 电压增益与内部电路无关，只与外部参数有关

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

- 直流信号电压可以从实验箱上取得

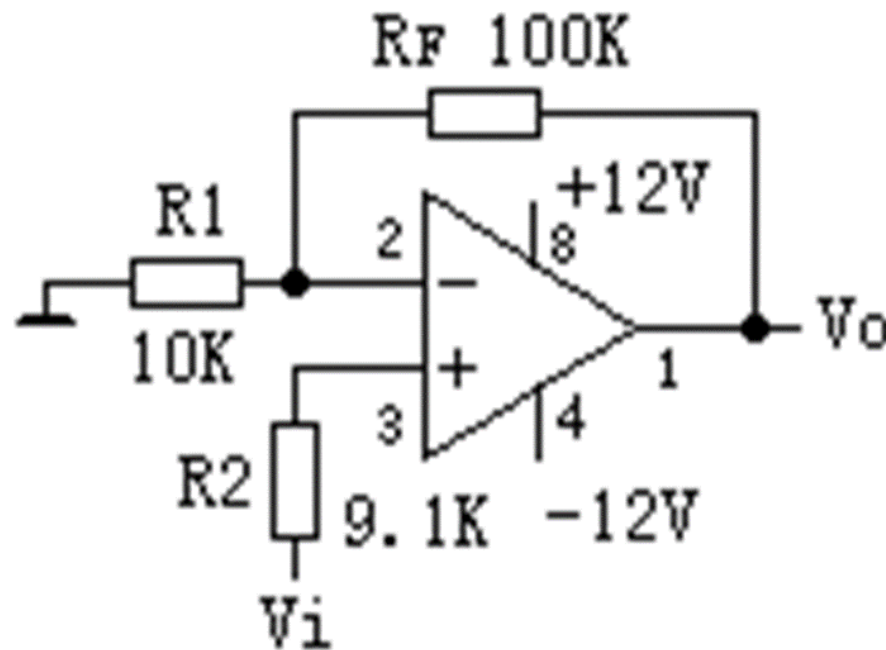


三、集成运算放大器组成的基本运算电路



2. 同相放大器

$$A_{VF} = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$



三、集成运算放大器组成的基本运算电路

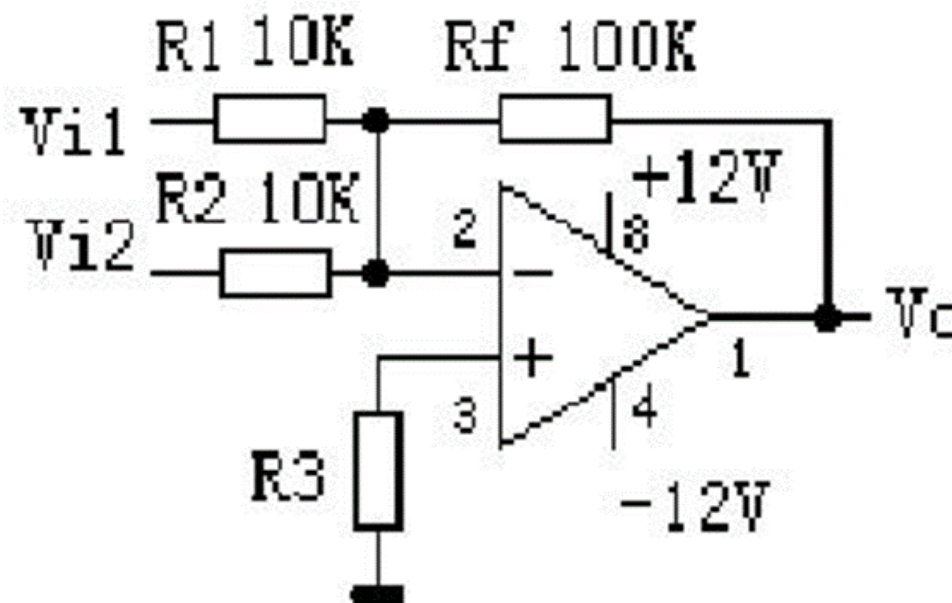
3. 反相加法器

$$V_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} V_{i1} + \frac{R_F}{R_2} V_{i2}\right)$$

R1=R2时, 简化为:

$$V_o = -\frac{R_F}{R_1} (V_{i1} + V_{i2})$$

- V_{i1} 与 V_{i2} 可同为交流、或同为直流、或各为交直流。
- 对于直流成分, 输出“取负”; 对于交流信号来说, 负号指反相。



$$R_3 = R_1 // R_2 // R_F$$

三、集成运算放大器组成的基本运算电路

4. 减法器

$R_1=R_2, R_3=R_F$ 时, 有

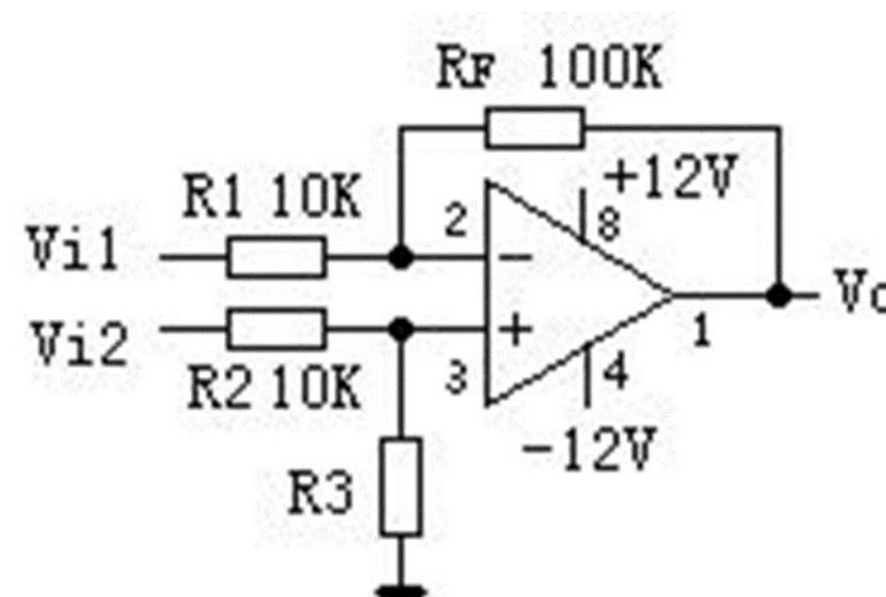
$$V_o = \frac{R_F}{R_1} (V_{i2} - V_{i1})$$

➤ 若

V_{i1} **直流输入**

V_{i2} **交流输入**

则输出交流成分同相, 直流成分“取负”



$R_3 = R_F$

三、集成运算放大器组成的基本运算电路

5. 积分器

$$V_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^{T/2} V_{i(t)} dt$$

当 $V_i(t)$ 是峰值振幅为 V_{ip} 的矩形波时, $V_o(t)$ 的波形为三角波

输出电压的峰一峰值为

$$V_{op-p} = -\frac{V_{ip}}{R_1 C} \left(\frac{T}{2} \right)$$

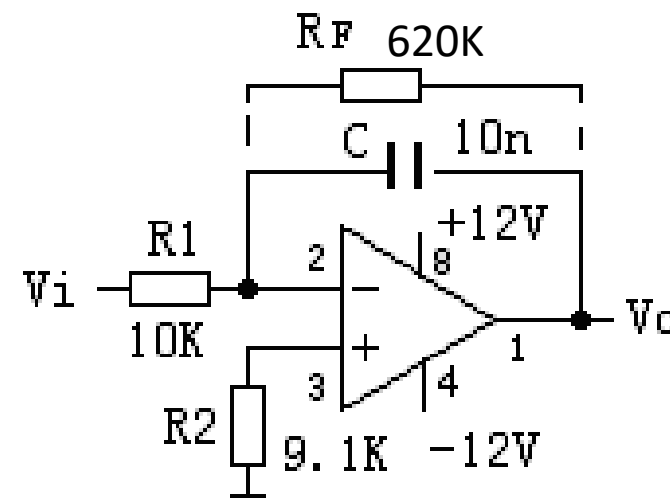


图8

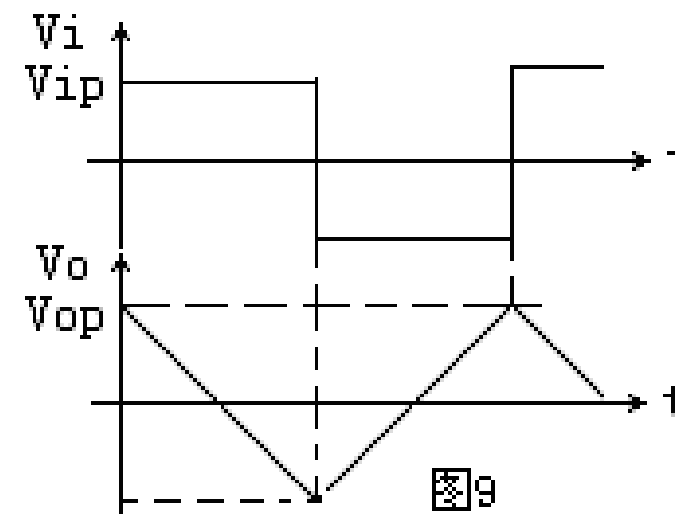


图9



四、实验内容注意事项

1. 定量画波形

- **双踪状态**
- **示波器通道菜单-耦合方式-DC耦合（可显示直流成分）**
- **定好合适的“零点”**
- **选用同一时间坐标**
- **电压轴可选用不同比例**



四、实验内容注意事项

2. 加法器、减法器举例

图6和图7	V_{i1} 直流	V_{i2p-p} 交流	V_o （四位半测有效值）	
			DCV	ACV
反相加法器	0.1V	0.6V _{pp} ($V_{rms}=0.21V$)	-1V	2.12V
减法器	-0.1V		1V	2.12V

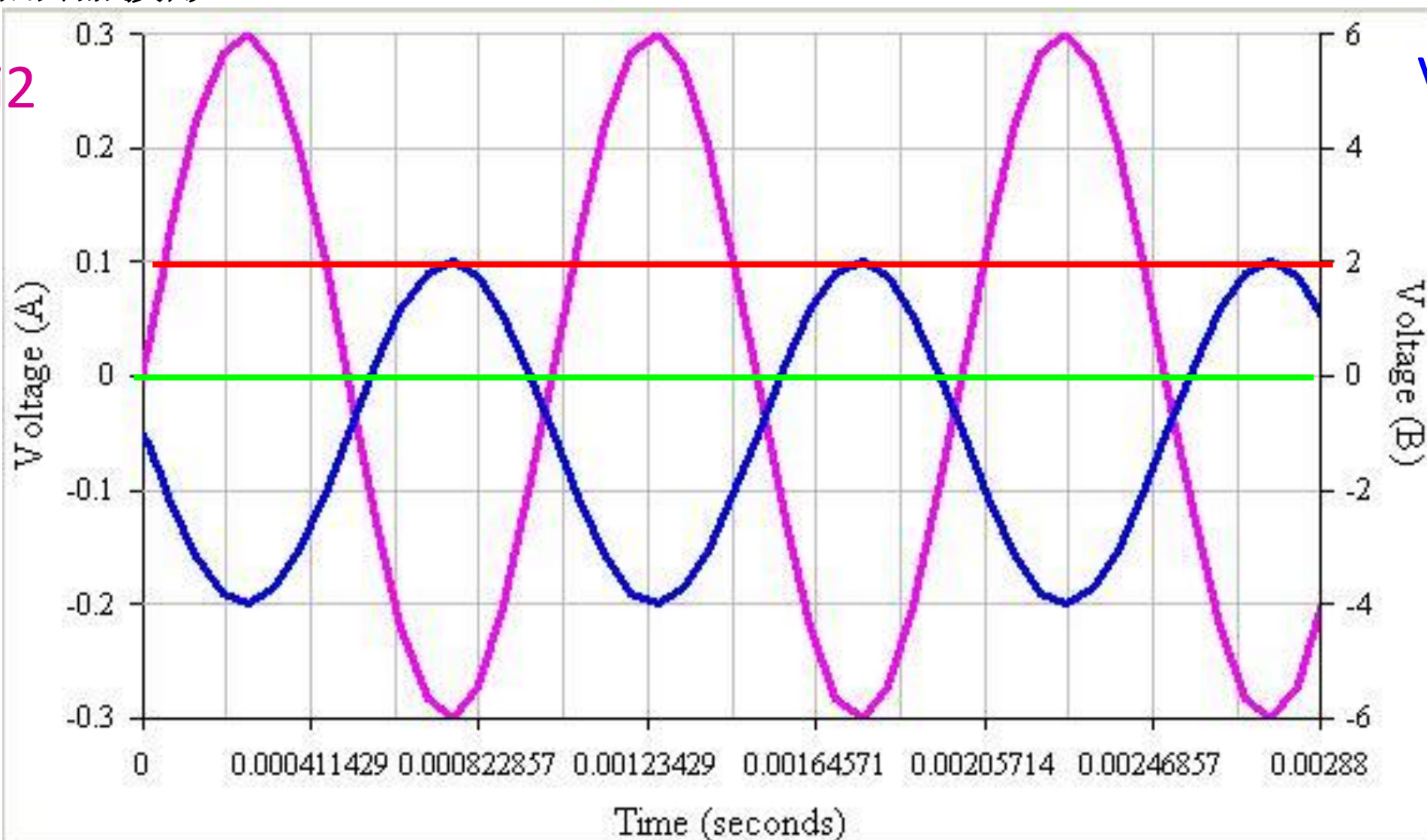
四、实验内容注意事项



厦门大学
XIAMEN UNIVERSITY

3. 反相加法器波形

V_{i1}/V_{i2}

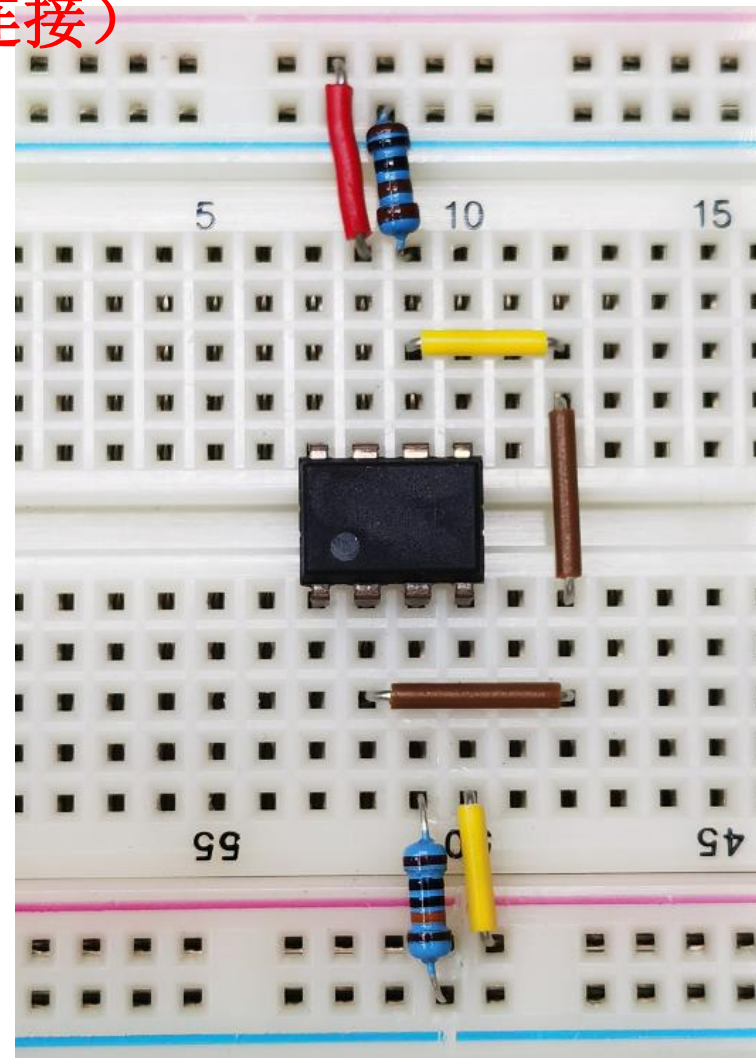
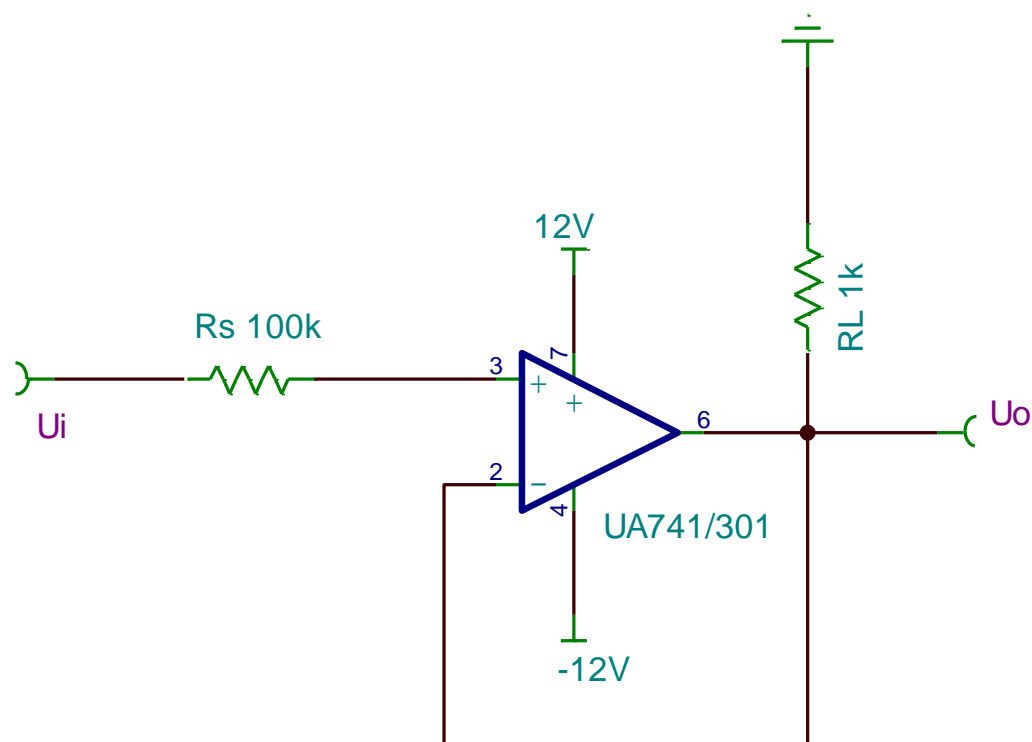


V_o

四、实验内容注意事项

4. 电路搭建示例（图中芯片为UA741，不要跟着连接）

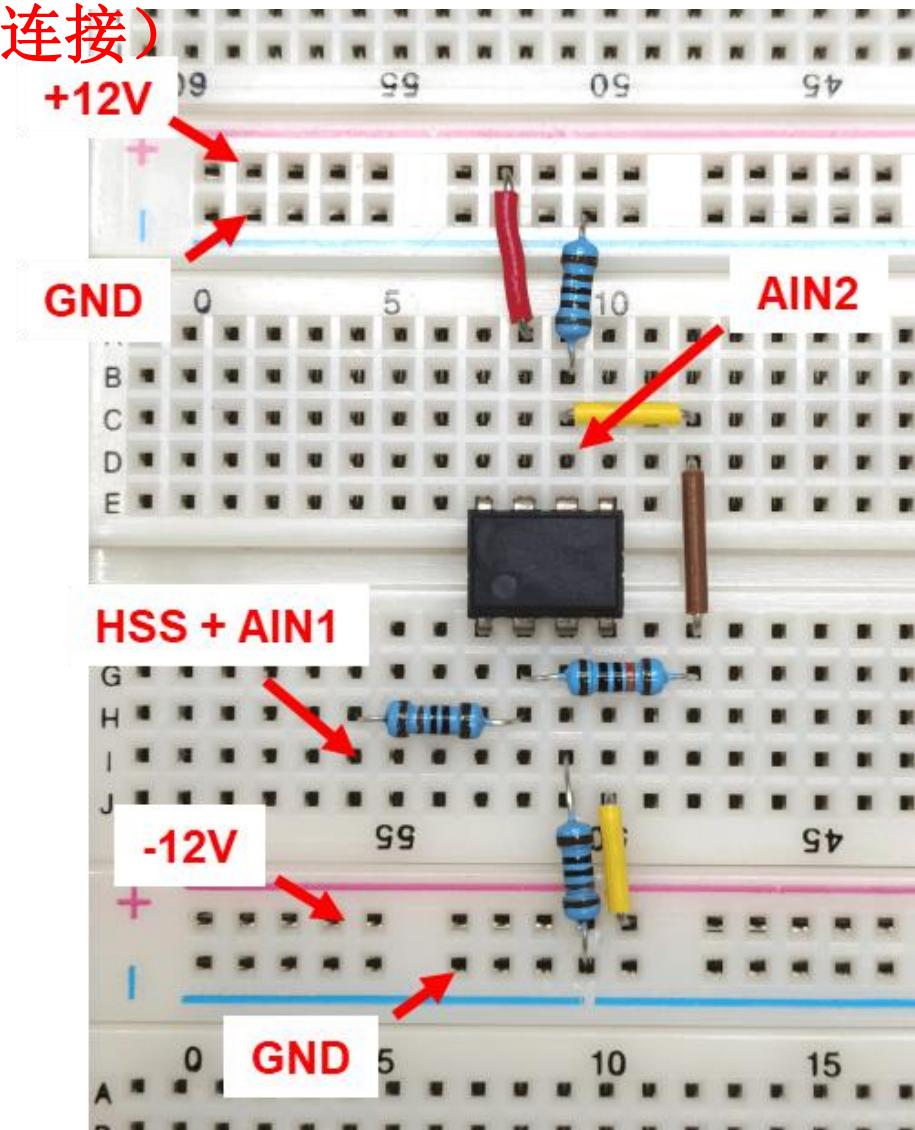
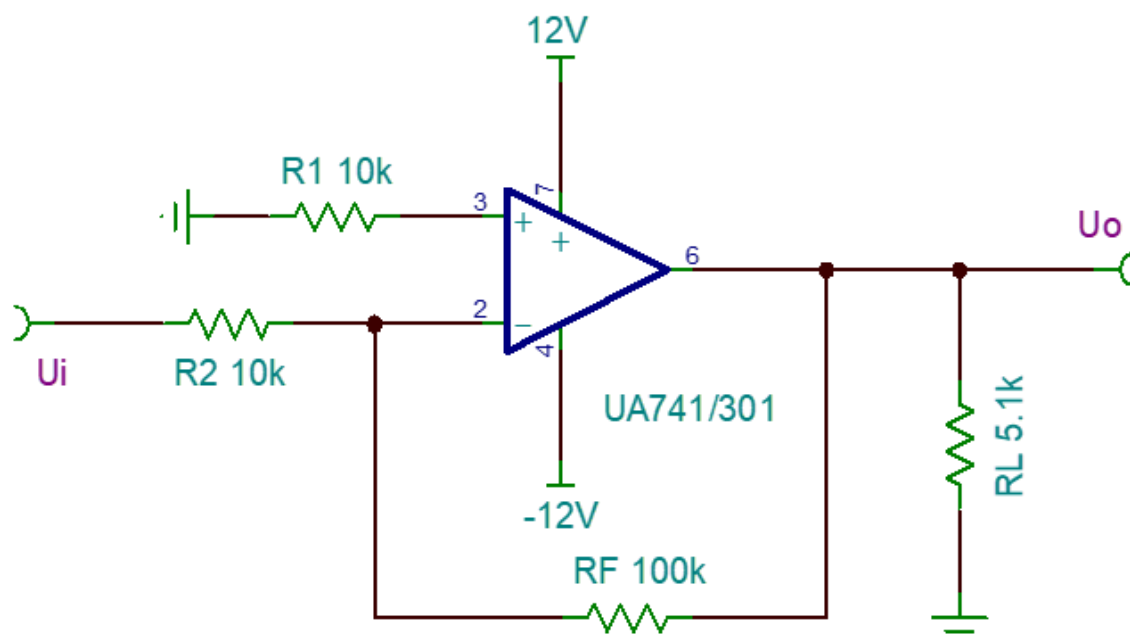
➤ 跟随器电路



四、实验内容注意事项

4. 电路搭建示例（图中芯片为UA741，不要跟着连接）

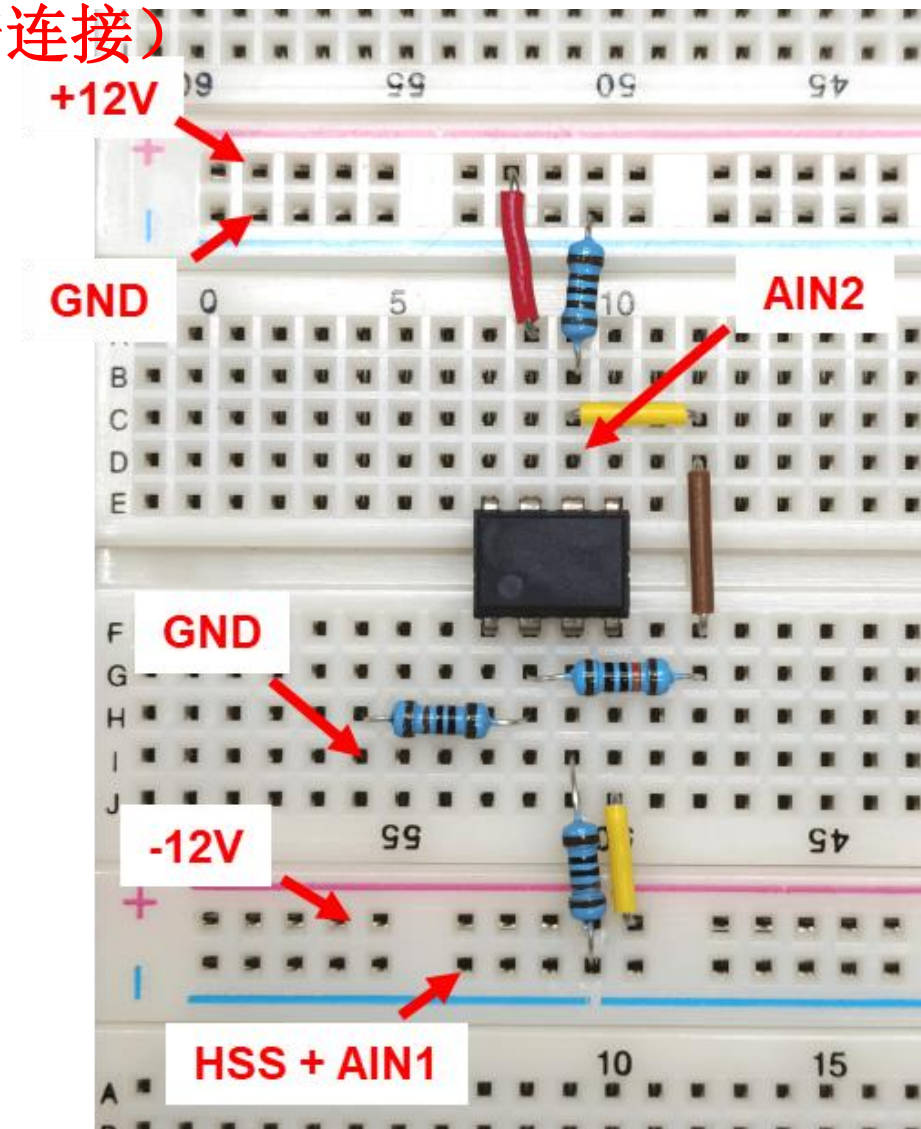
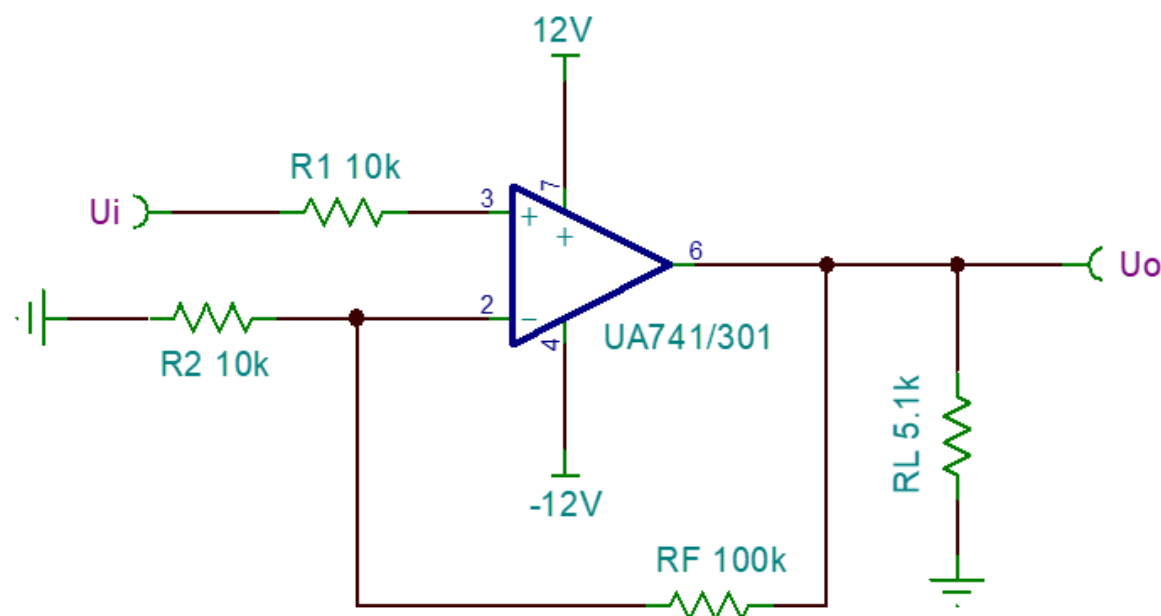
➤ 反相比例放大电路



四、实验内容注意事项

4. 电路搭建示例（图中芯片为UA741，不要跟着连接）

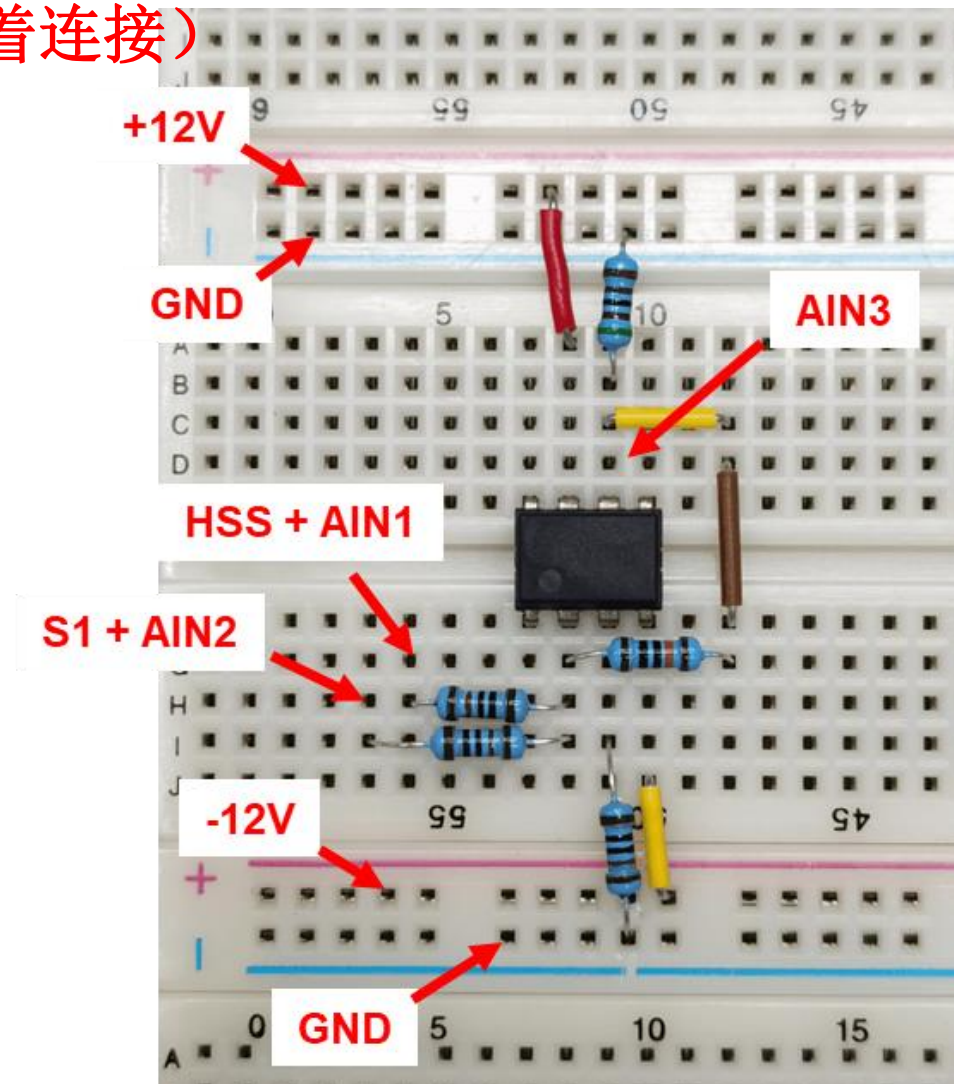
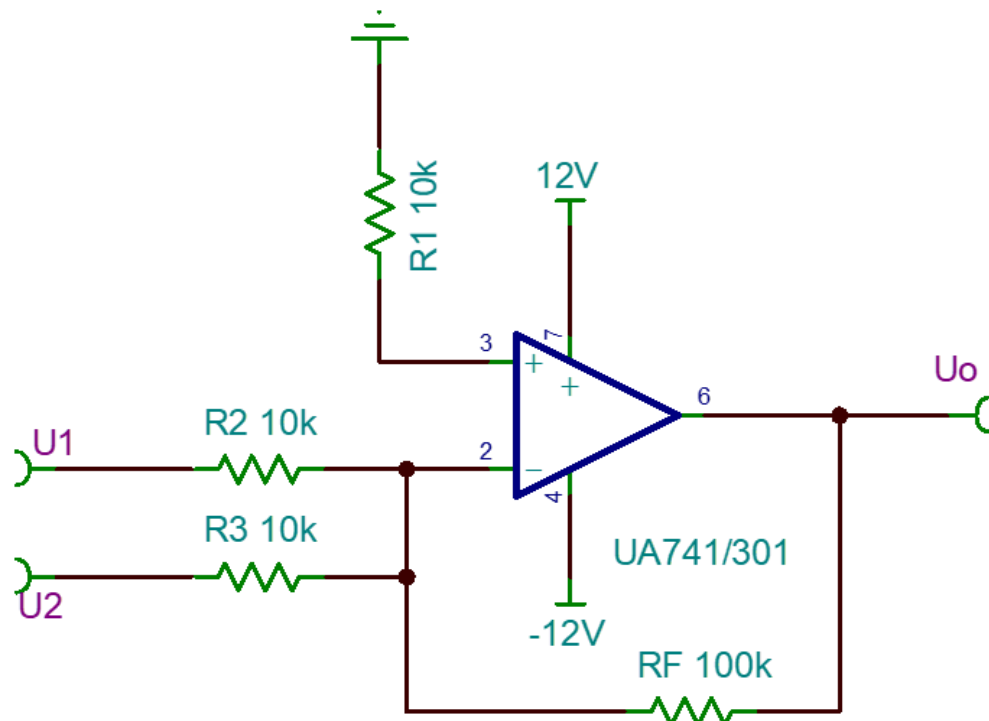
➤ 同相比例放大电路



四、实验内容注意事项

4. 电路搭建示例（图中芯片为UA741，不要跟着连接）

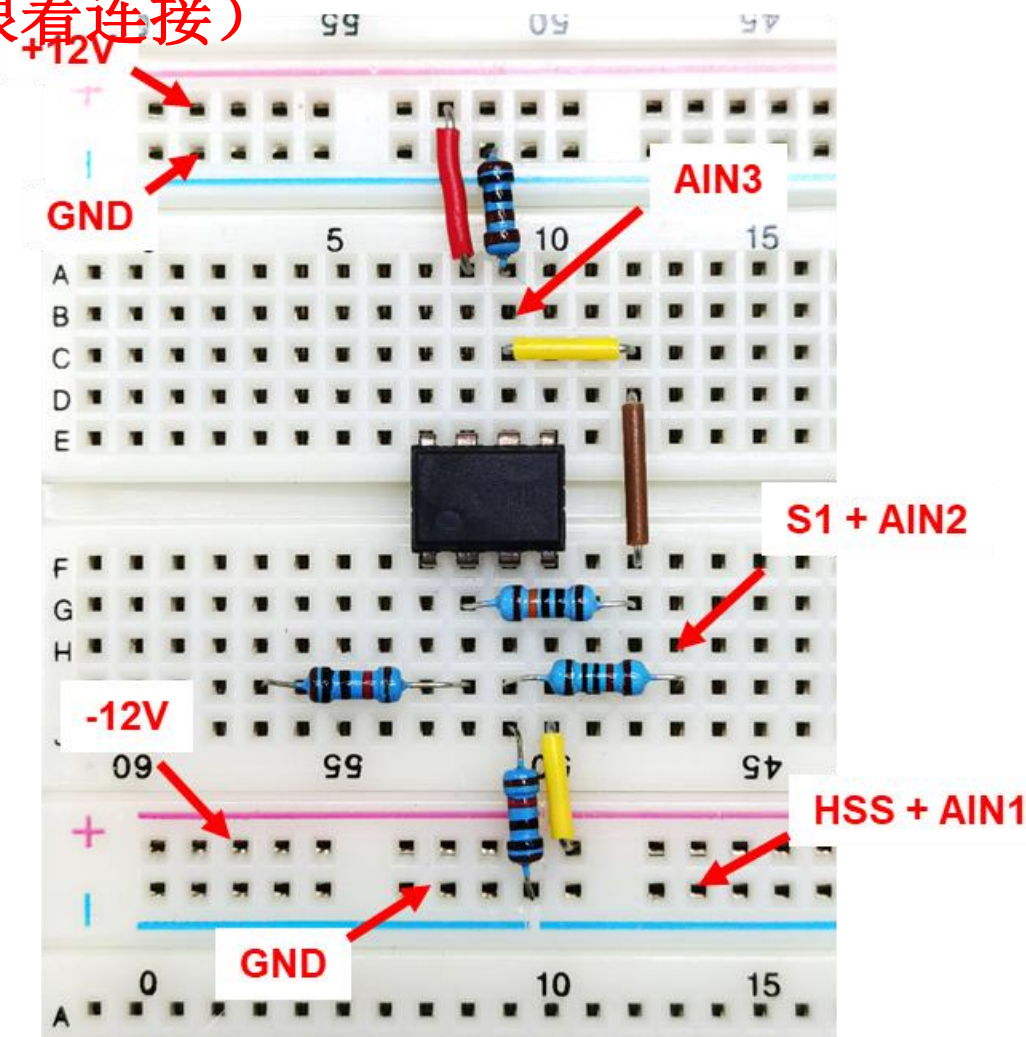
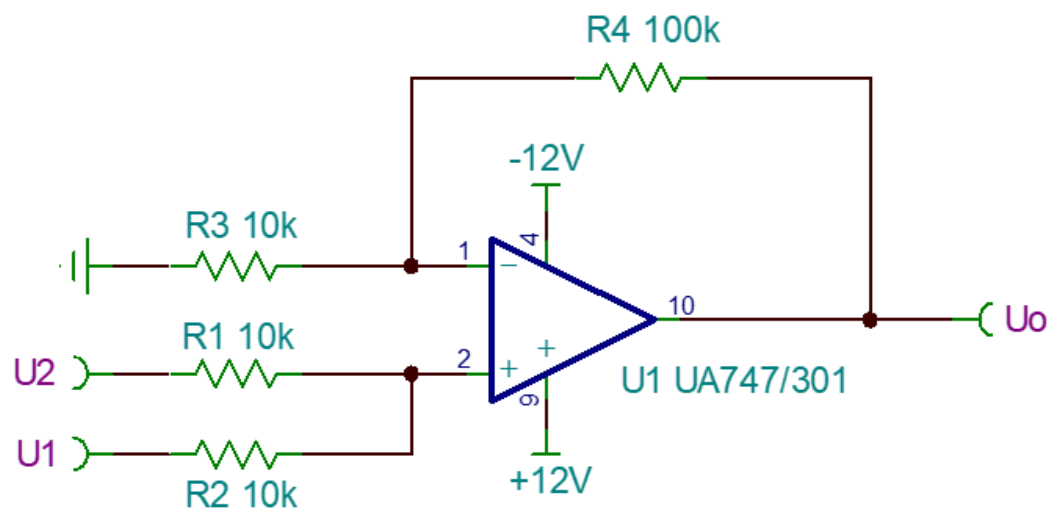
➤ 反相求和放大电路



四、实验内容注意事项

4. 电路搭建示例（图中芯片为UA741，不要跟着连接）

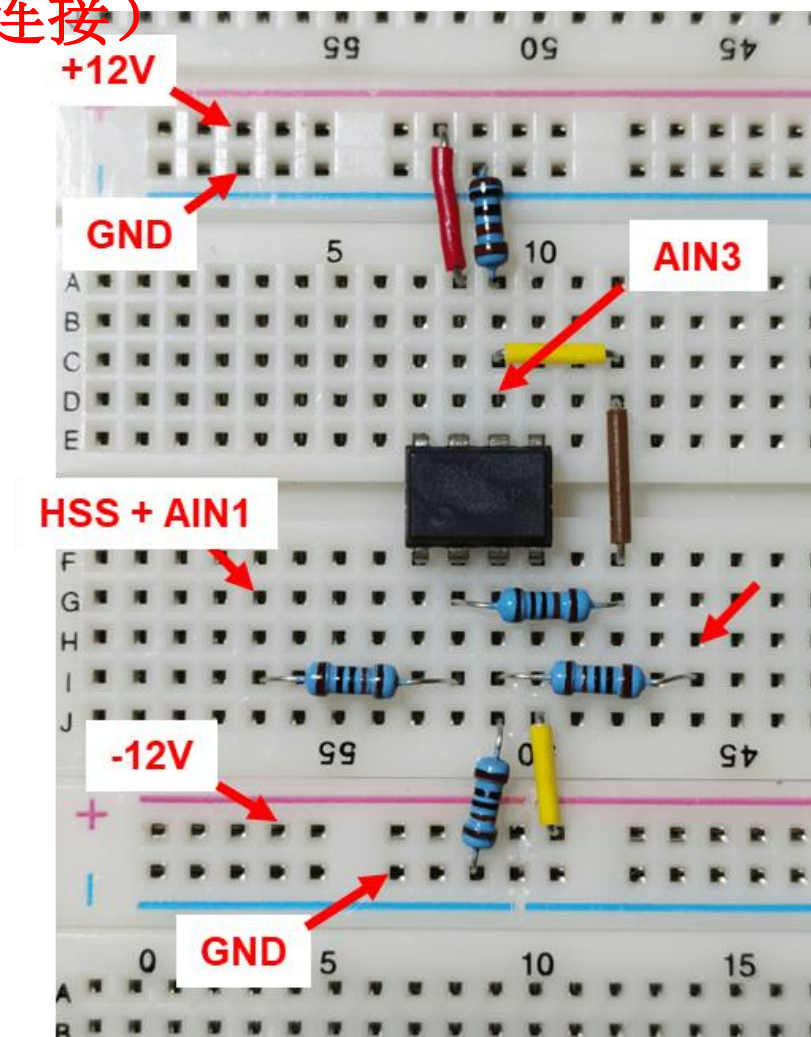
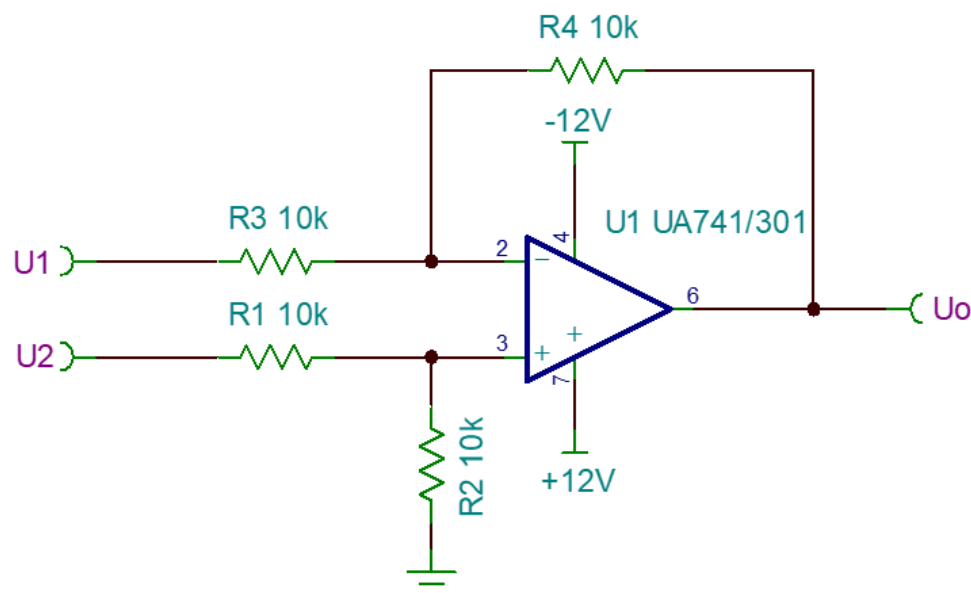
➤ 同相求和放大电路



四、实验内容注意事项

4. 电路搭建示例（图中芯片为UA741，不要跟着连接）

➤ 双端求和放大电路



本次实验内容



厦门大学
XIAMEN UNIVERSITY

实验七 集成运算放大器组成的基本运算电路

四、实验内容

1, 2, 3, 4, 5