

电路原理

第4讲

运算放大器和

含负反馈理想运算放大器电路的分析

内容简介

**I、 运算放大器 (Operational Amplifier)
及其外特性**

II、 理想运算放大器 (Ideal Op Amp) 及其外特性

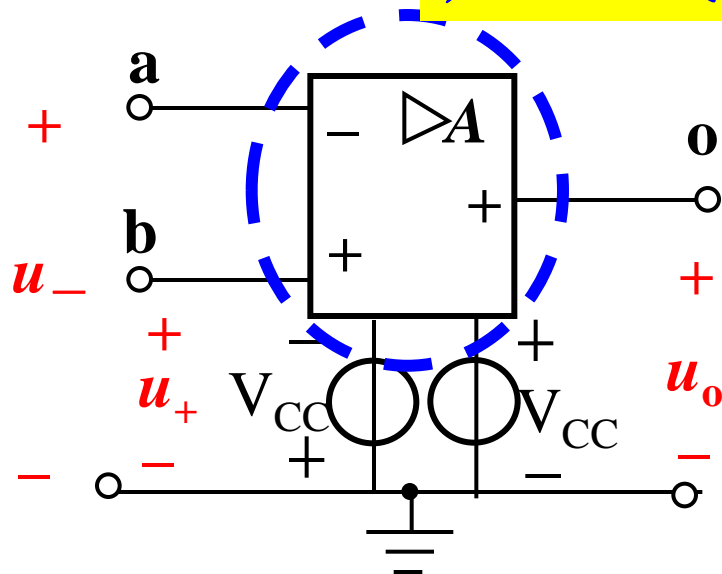
III、 含负反馈理想运算放大器电路的分析

暗线 (1) 压控电压源的建模和简化过程
(2) 电压型信号处理电路的输入电阻和输出电阻

I、运算放大器 (Operational Amplifier, 运放) 及其外特性

1. 电路符号

广义KCL成立



a: 反相输入 inverting input, u_-

b: 同相输入 noninverting input, u_+

o: 输出 output, u_o

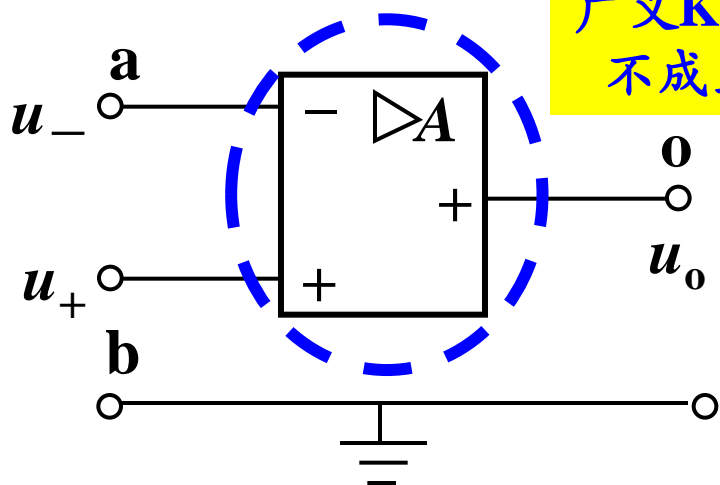
$\pm V_{CC}$: 供电电压 working voltage

\perp : 接地 ground

A: 开环电压增益 open-loop voltage gain, $10^5 \sim 10^8$

简单表示

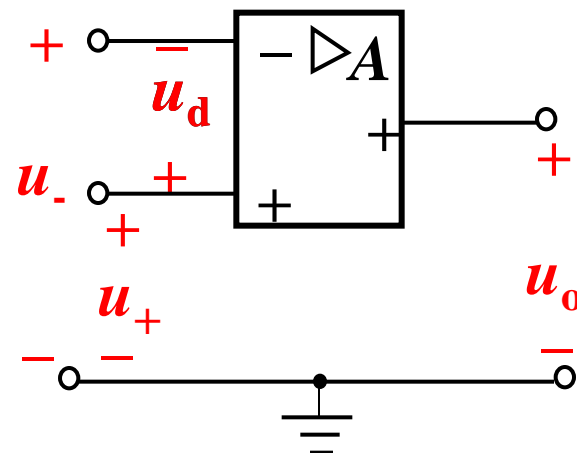
广义KCL
不成立



Op Amp 需 直流电源 供电才能工作。

2. 运算放大器的外特性

运放放大的信号是: $u_d = u_+ - u_-$



A: 开环放大倍数

分三个区域:

① 线性工作区

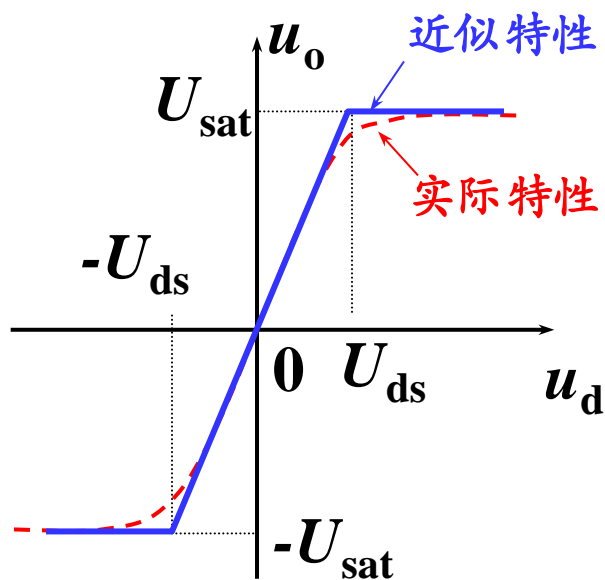
$$|u_d| < U_{ds}, \text{ 则 } u_o = Au_d$$

② 正向饱和区

$$u_d > U_{ds}, \text{ 则 } u_o = U_{sat}$$

③ 反向饱和区

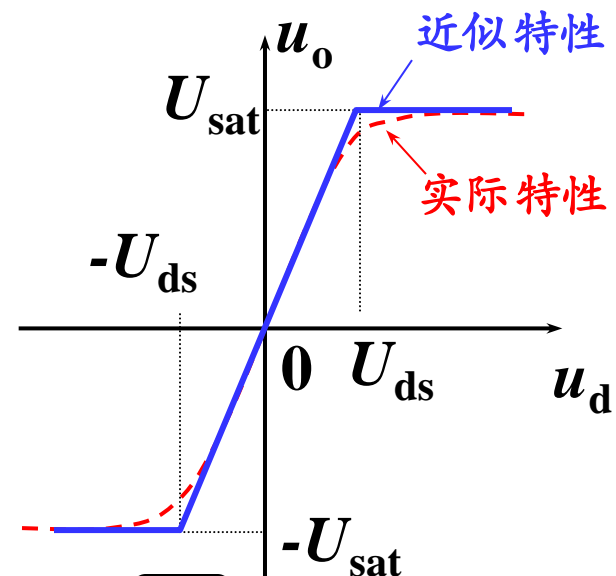
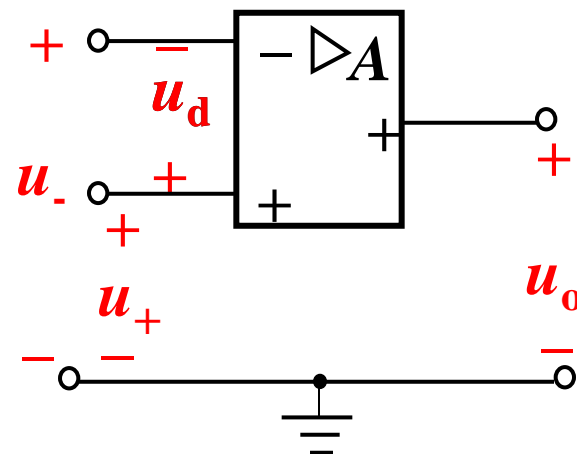
$$u_d < -U_{ds}, \text{ 则 } u_o = -U_{sat}$$



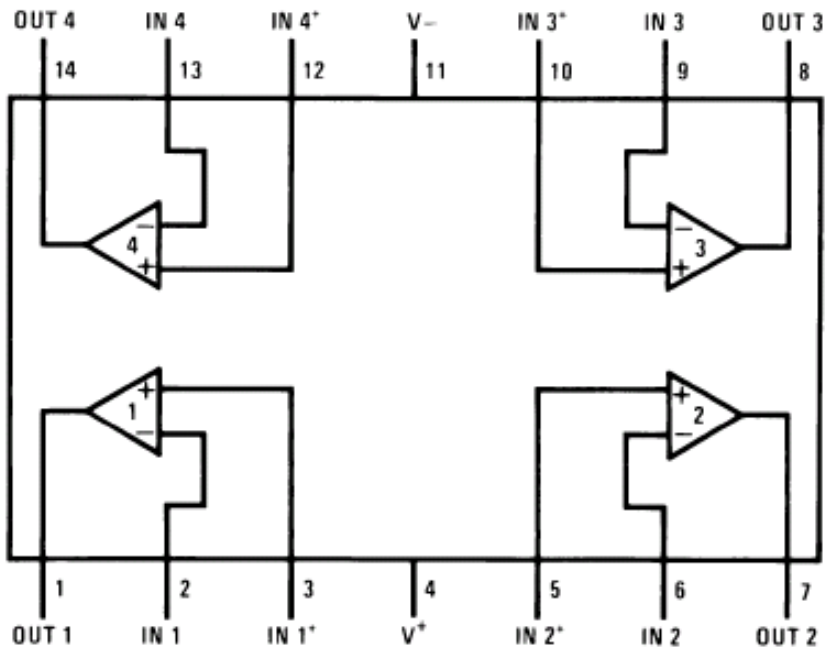
本讲大部分讨论Op Amp运行于线性区

某运放 $U_{\text{sat}}=14\text{V}$, $A=10^5$,
则 $U_{\text{ds}}=$ mV

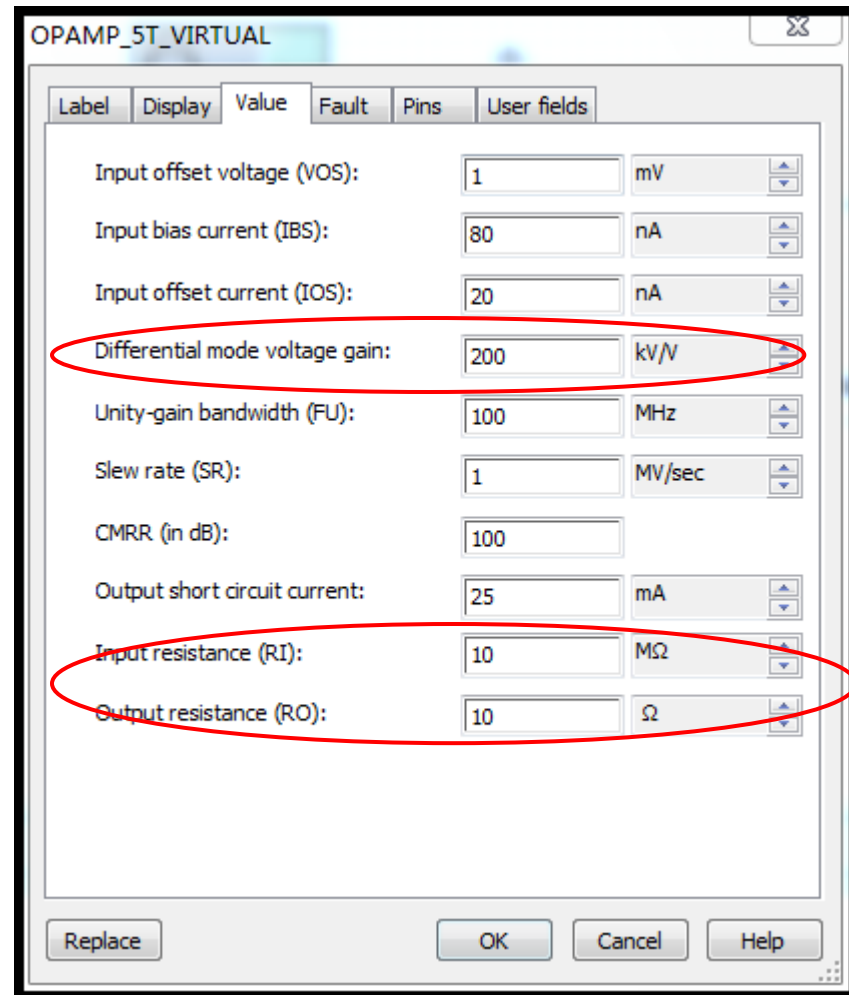
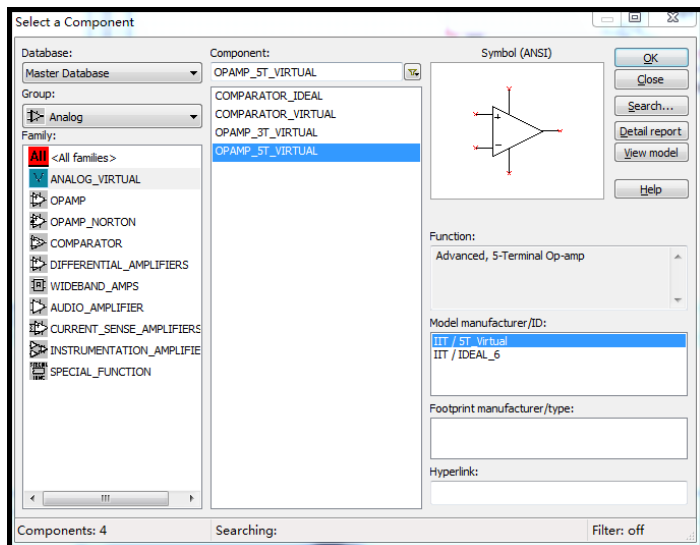
- ☐ A 14
- ☐ B 1.4
- ☒ C 0.14



提交



datasheet



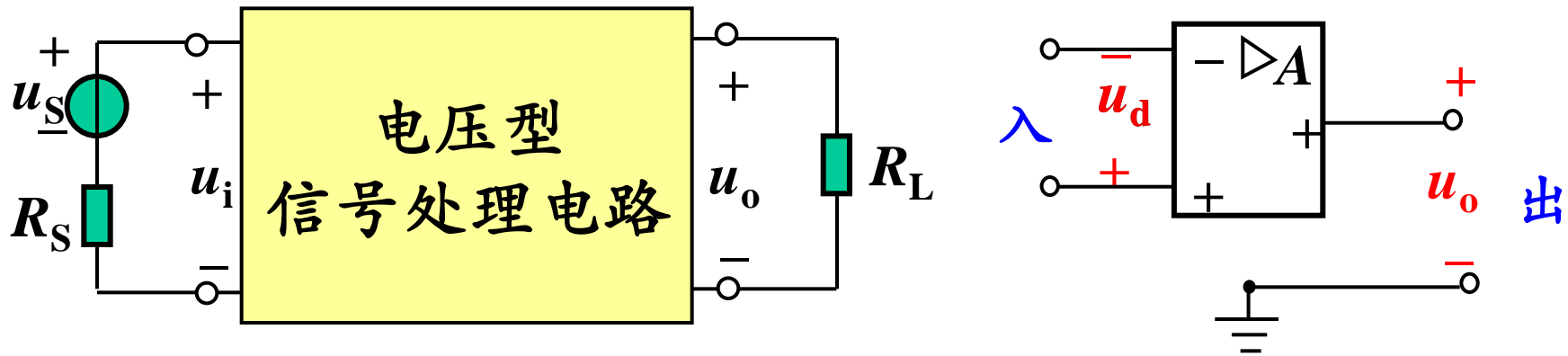
运算放大器消耗的功率:

一般小于1W

运算放大器的输入和输出电阻:

MΩ级和Ω级

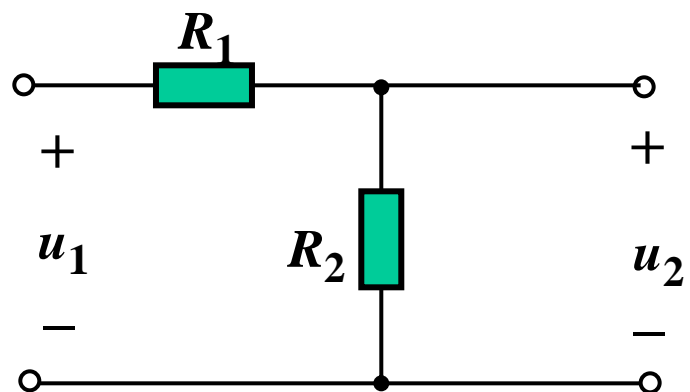
电压型信号处理电路3个最重要的性质



电压放大倍数 $A_u = \frac{u_o}{u_i}$

输入电阻 从 u_i 两端向输出端方向看，什么值合适？
那个含电阻和受控源一端口网络的等效电阻
(接或不接负载)

输出电阻 从 u_o 两端向输入端方向看， u_S 短路，什么值合适？
那个含电阻和受控源一端口网络的等效电阻

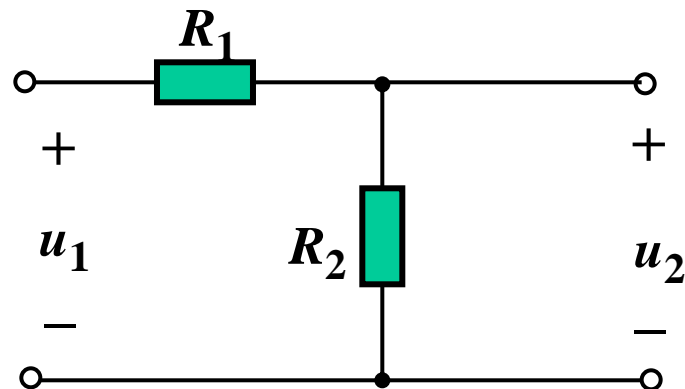


输出端开路，这个电压型信号处理电路的输入电阻是？

此处可以有弹幕

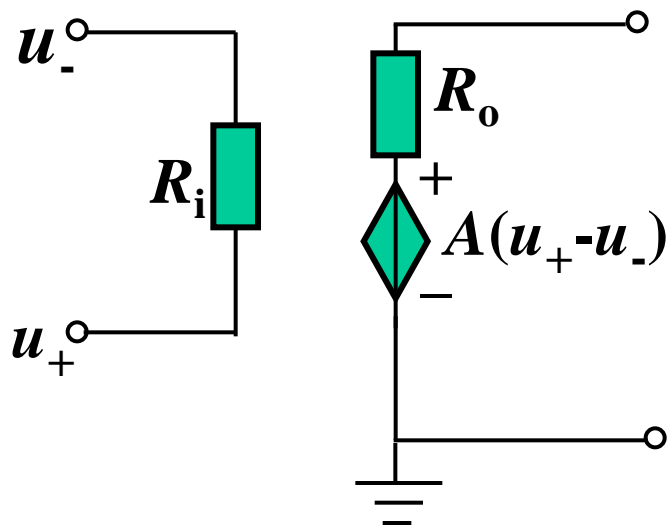
这个电压型信号处理电路的输出电阻是？

- ☐ A R_1
- ☐ B R_2
- ☐ C $R_1 + R_2$
- ☒ D $R_1 // R_2$



提交

3. 电路模型



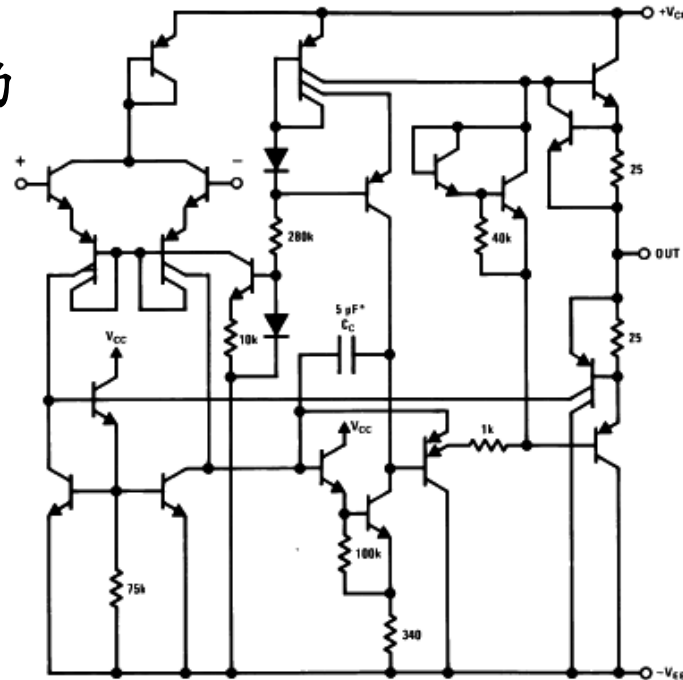
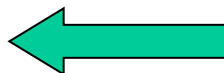
实际运放的低频等效电路

R_i : $M\Omega$ 量级 R_o : Ω 量级

A : 10^5 量级

构成运放的
实际电路

抽象观点

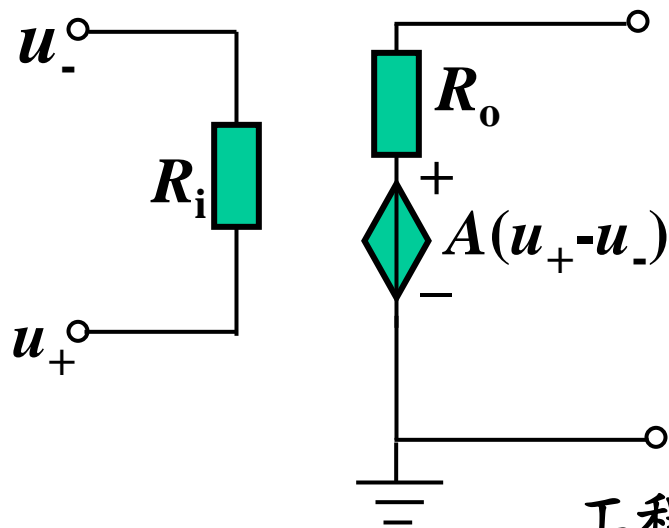


输入电阻 $M\Omega$

输出电阻 Ω

电压放大 10^5 倍

为什么左侧电路可以看做右侧电路的等效电路?



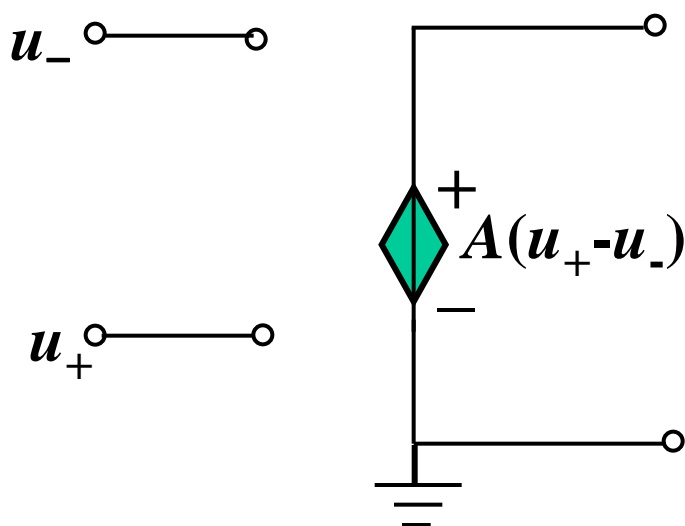
工程观点

如果我们能始终坚持
与运算放大器连接的电阻值：

kΩ级

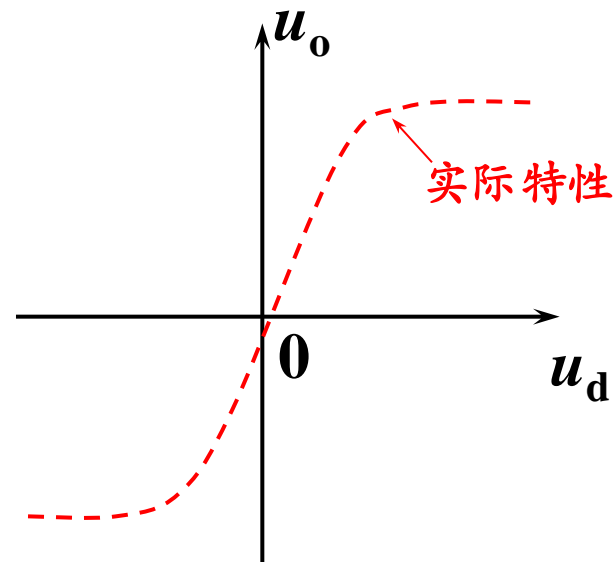
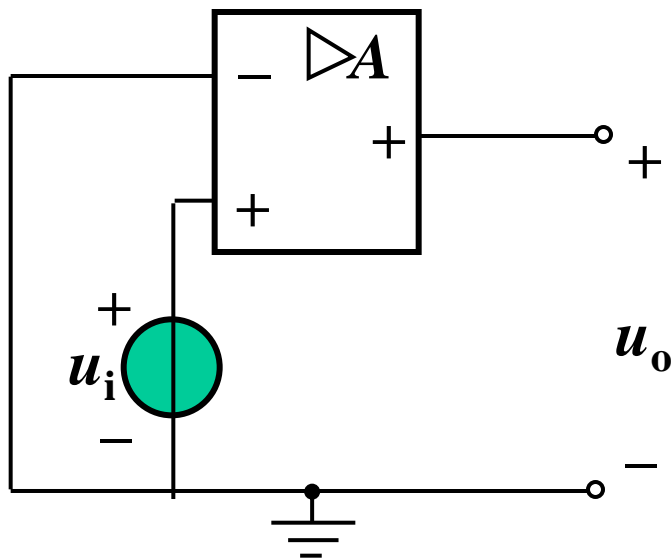


Op Amp输入电阻M Ω量级
输出电阻Ω量级



用运放直接提供信号放大是否可行?

百害无一利，我们搞那么大的 A 干嘛?

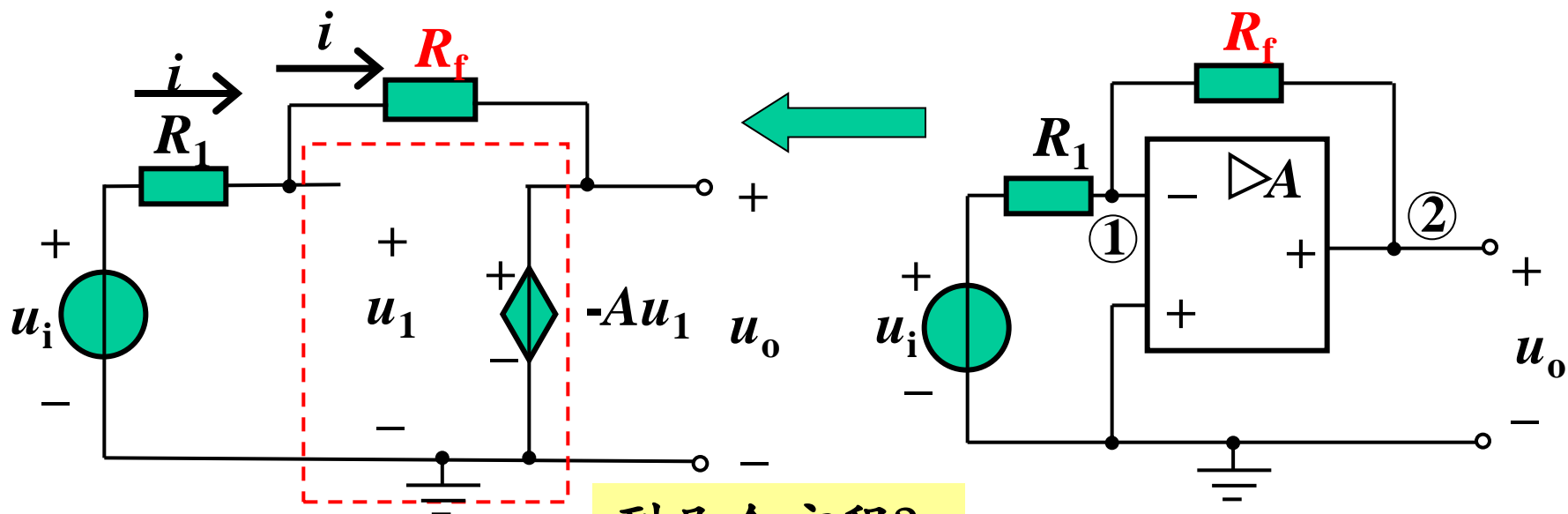


$$u_o = Au_i$$

问题:

- (1) u_i 的取值范围太小 \longleftrightarrow 允许输入电压范围小。
- (2) 不同 Op Amp 的 A 差别很大 \longleftrightarrow
设计好的放大器只能针对某种类型 Op Amp 使用。
- (3) 某个 Op Amp 的 A 随温度变化较大 \longleftrightarrow
设计好的放大器只能在某个温度下使用。

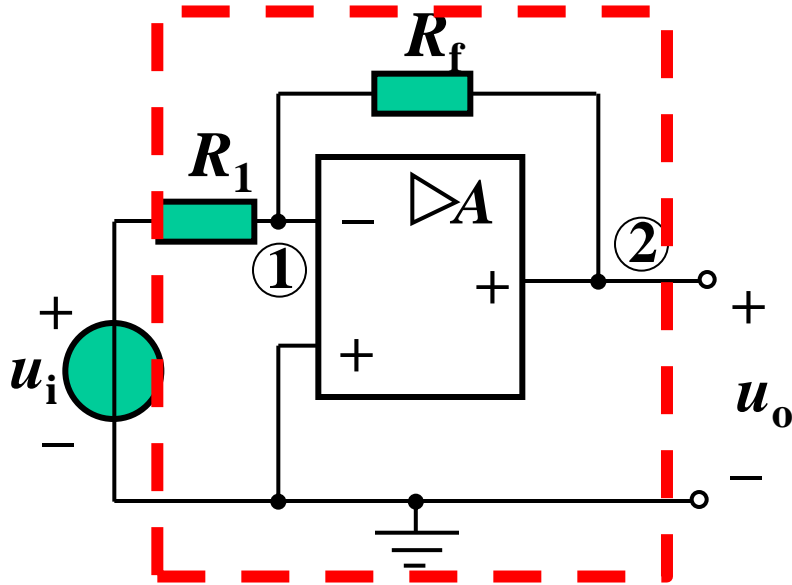
如果我们将输出的一部分引到输入（反馈feedback）？



列几个方程？

$$\left\{ \begin{array}{l} i = \frac{u_i - u_1}{R_1} \\ i = \frac{u_1 - u_o}{R_f} \\ -Au_1 = u_o \end{array} \right. \Rightarrow \frac{u_o}{u_i} = -\frac{AR_f}{(R_f + R_1) + AR_1}$$

新的信号处理电路



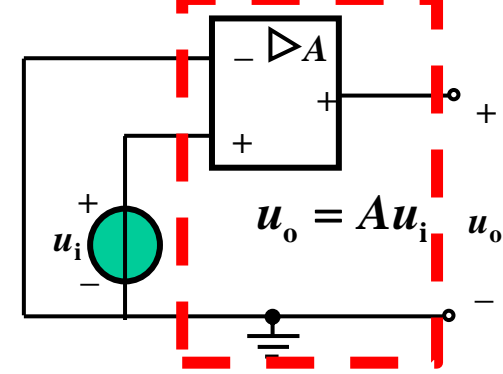
$$\frac{u_o}{u_i} = -\frac{AR_f}{(R_f + R_1) + AR_1}$$

工程观点

A 充分大

$$\frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

闭环放大倍数



原有的问题:

(1) u_i 的取值范围太小 \leftrightarrow 允许输入电压范围小。

(2) 不同 Op Amp 的 A 差别很大 \leftrightarrow

设计好的放大器只能针对某种类型 Op Amp 使用。

(3) 某个 Op Amp 的 A 随温度变化较大 \leftrightarrow

设计好的放大器只能在某个温度下使用。

V

V

V

引入负反馈后，对噪声还有抑制作用呢

负反馈的噪声抑制作用

输出端有微小正扰动(其余不变)

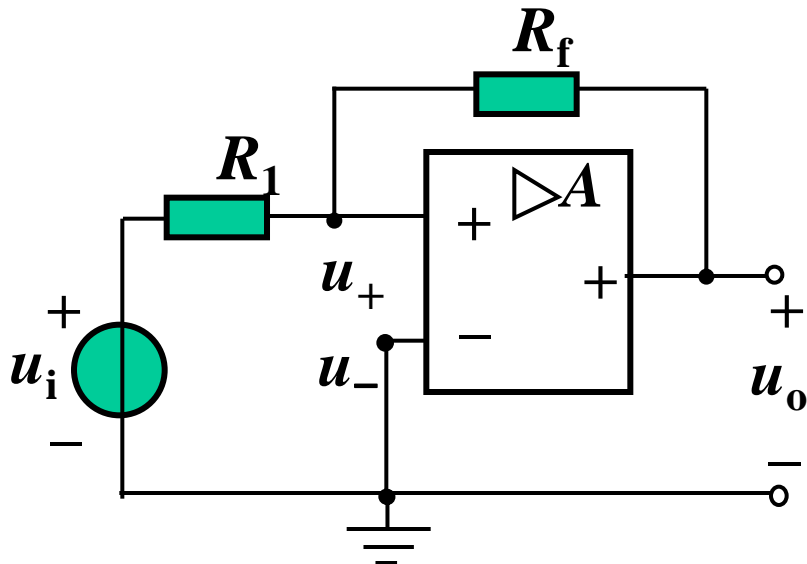
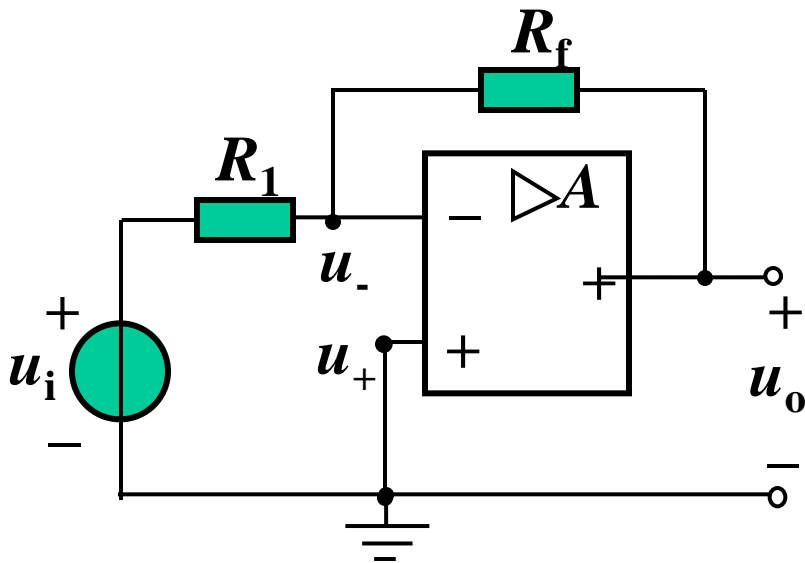
u_- 端有微小正扰动

$u_+ - u_-$ 变小了

输出输出值变小了

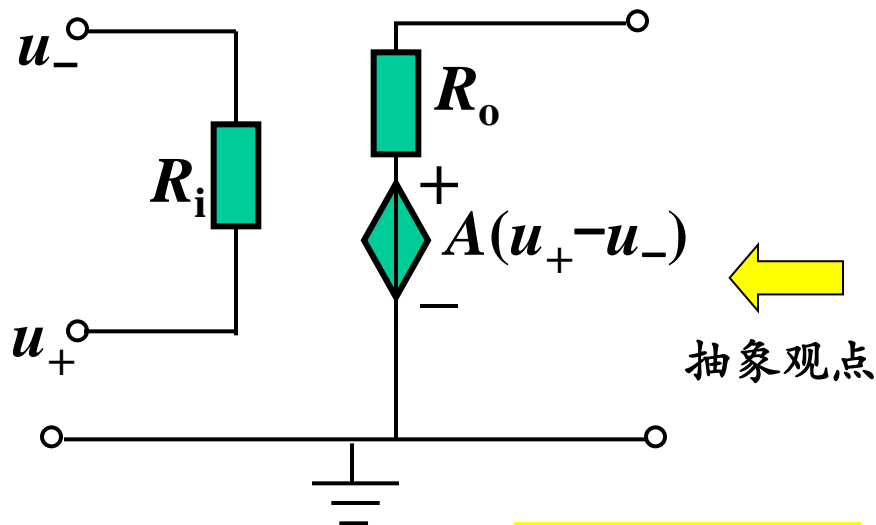
试分析正反馈?

课后看视频



小结一下

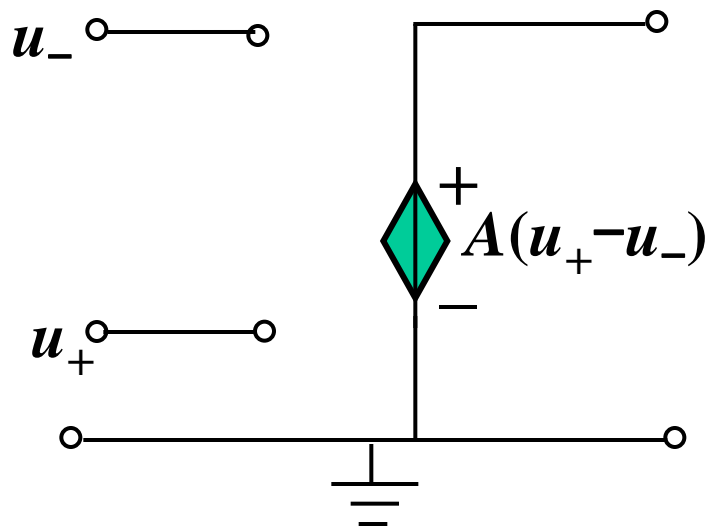
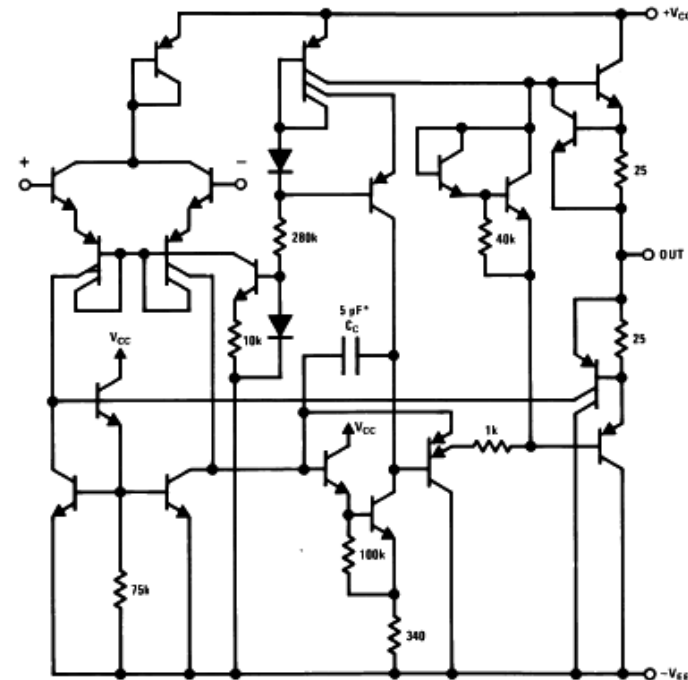
- 实际应用中，如果
 - 运放的 R_i 为M Ω 量级， R_o 为 Ω 量级， A 为M量级
 - 外接电阻为k Ω 量级
- 则引入负反馈后，含运放的电路可以
 - 应用于各种实际电路中（变化的 A ，不太小的输入，有噪声的环境）
 - 用 R_i 为 ∞ 、 R_o 为0、 A 为 ∞ 的简化模型分析，带来的误差可忽略



Op Amp输入电阻MΩ量级
输出电阻Ω量级

kΩ级外接电阻

工程观点

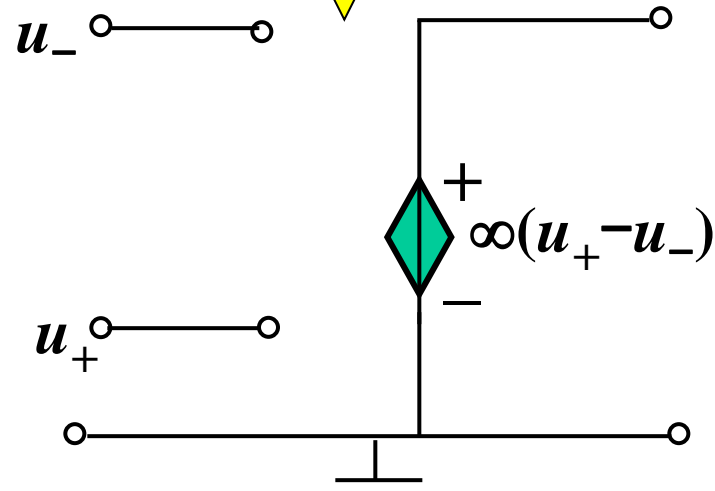


$$R_i \rightarrow \infty$$

$$R_o \rightarrow 0$$

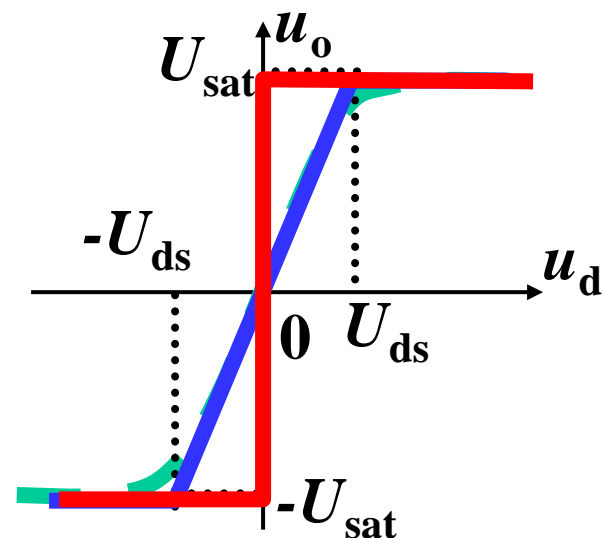
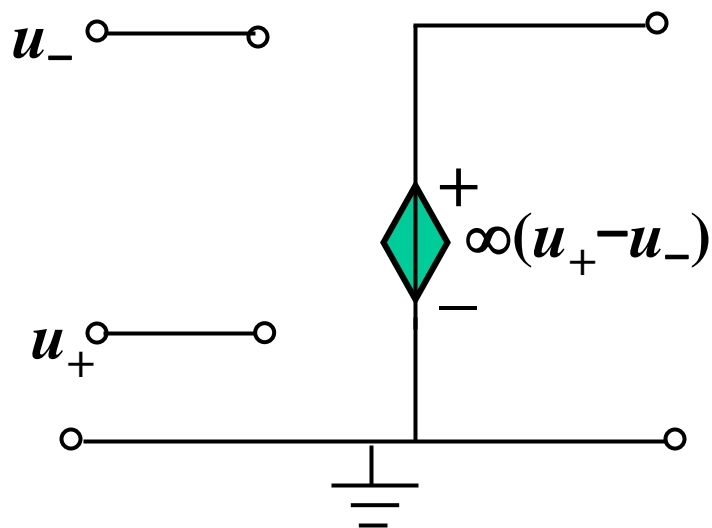
$$A \rightarrow \infty$$

理想建模
观点

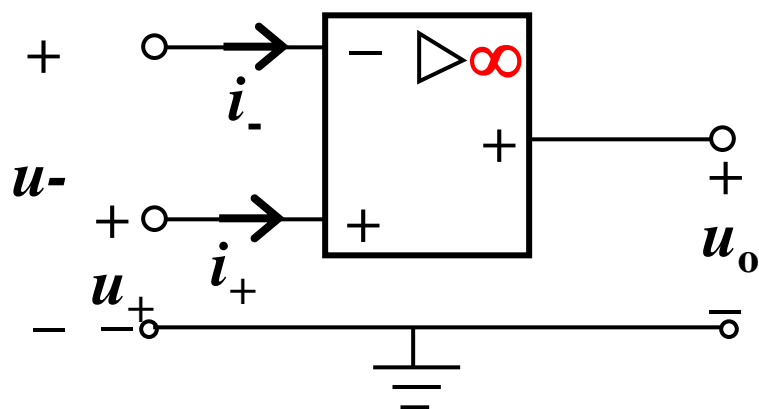


II、理想运算放大器 (Ideal Op Amp) 及其外特性

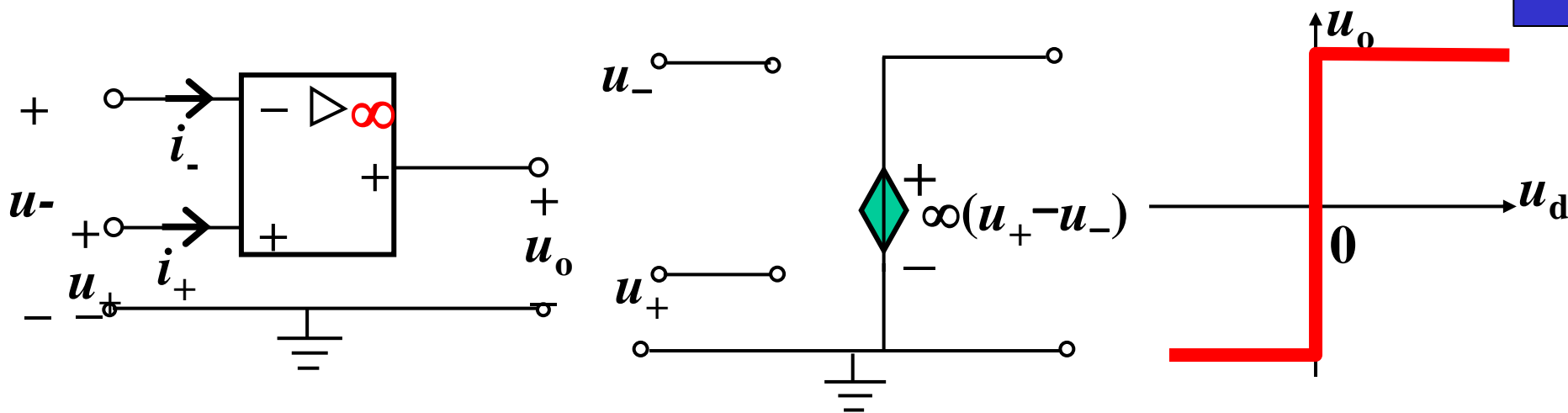
理想运放的等效电路



电压转移特性(外特性)



理想运放的电路符号



在**线性放大区**，可将运放电路作如下的理想化处理：

① $A = \infty$

u_o 为线性区的值(如10V) $\rightarrow u_o = \infty u_d \rightarrow u_d \rightarrow 0 \rightarrow$ (**虚短**)

同相、反相**输入端间**没有电压(降)，就像**短路**了那样

② $R_i = \infty$

当然实际上当然没有短路 (**虚**)

从输入端看进去，没有电流，(**虚断**)

从同相、反相输入端没有流入电流，就像**断路**了那样

当然实际上当然没有断路 (**虚**)

理想运放的两个输入端间可以视作“虚短”的原因是

- ☐ A A 无穷大
- ☐ B 运放工作在线性区
- ☐ C 运放的输入电阻无穷大
- ☒ D A 无穷大且运放工作在线性区

提交

理想运放的两个输入端与运放间可以视作“虚断”的原因是

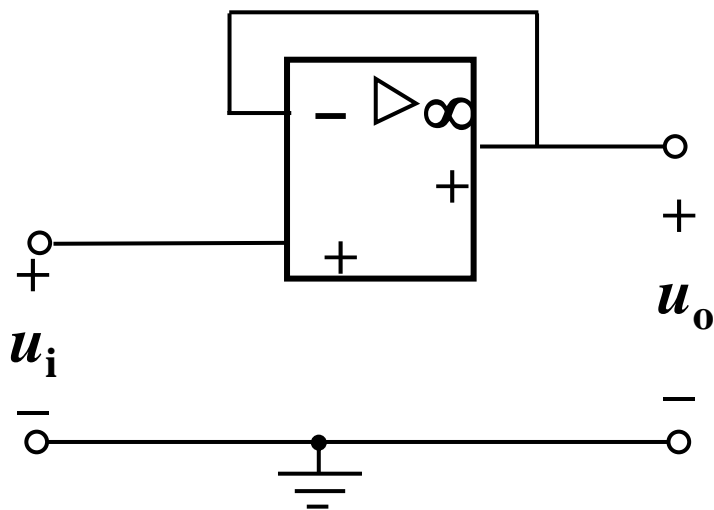
- ☐ A A 无穷大
- ☐ B 运放工作在线性区
- ☒ C 运放的输入电阻无穷大
- ☐ D A 无穷大且运放工作在线性区

提交

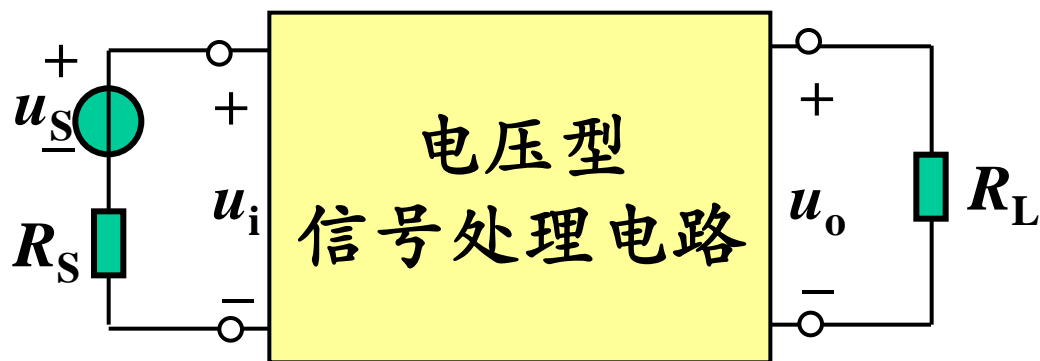
III、负反馈理想运算放大器电路分析

1. 电压跟随器

本讲主要讨论Op Amp运行于线性区



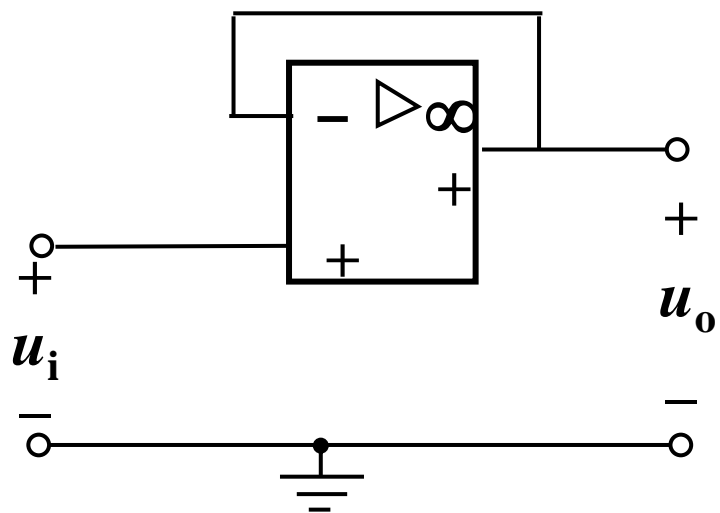
$$u_o = u_i$$



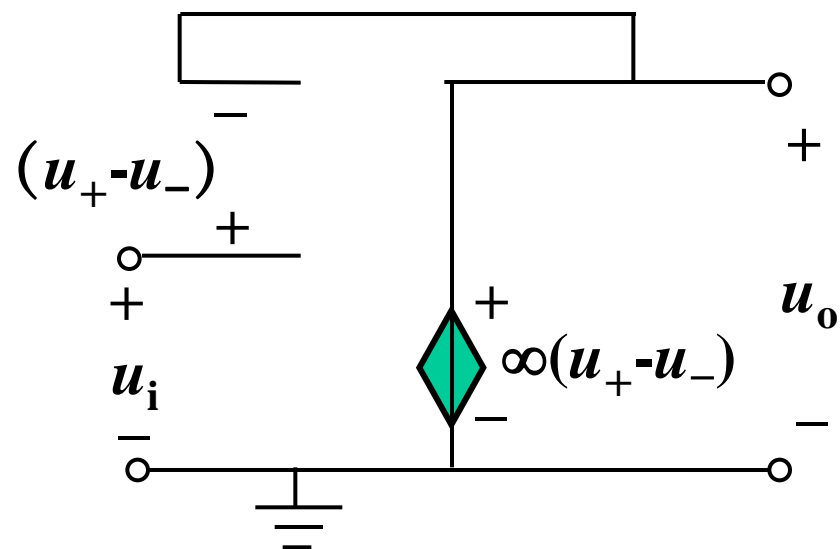
电压放大倍数

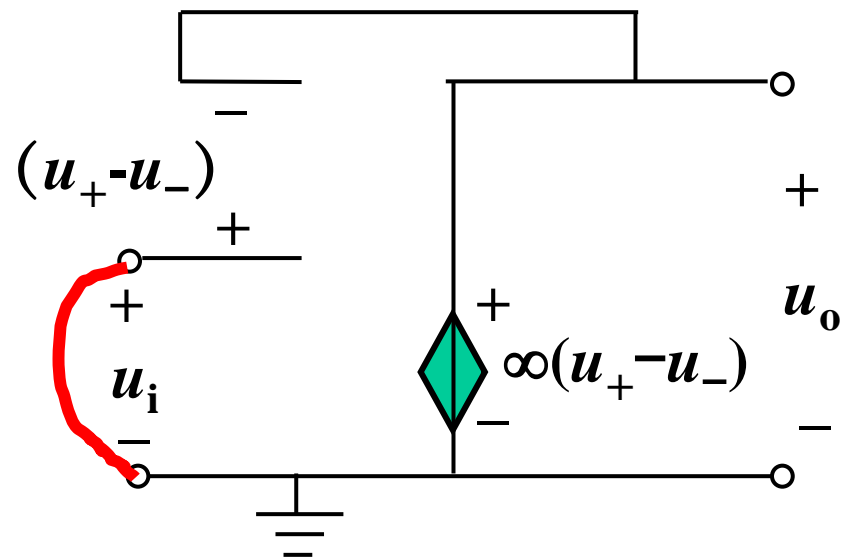
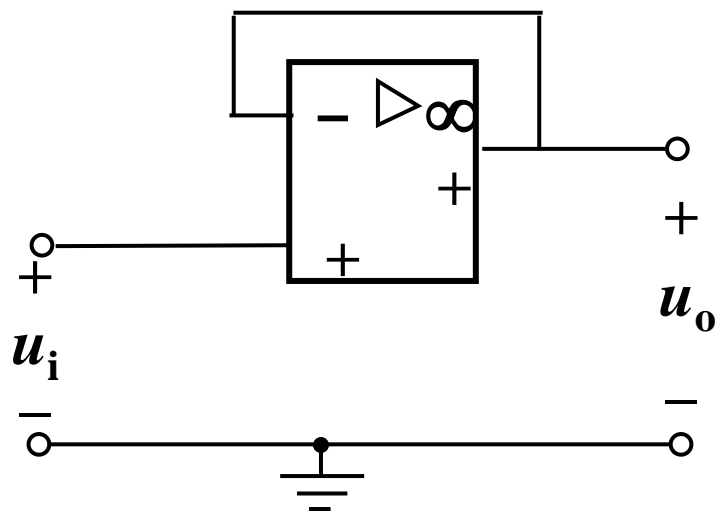
输入电阻

输出电阻



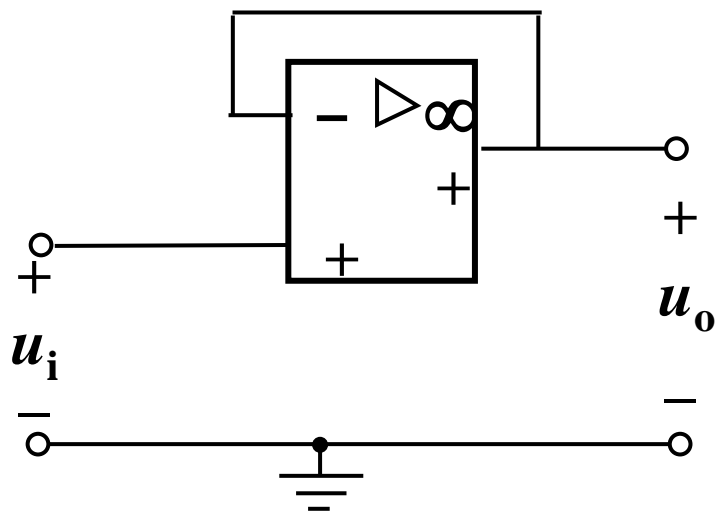
输入电阻 无穷大





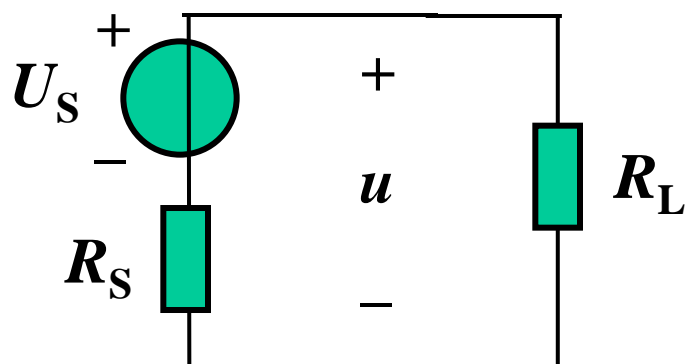
输出电阻 为零

留作本周作业题



一个
 ✓ 电压放大倍数为1
 ✓ 输入电阻为无穷大
 ✓ 输出电阻为0
 的电压信号处理电路

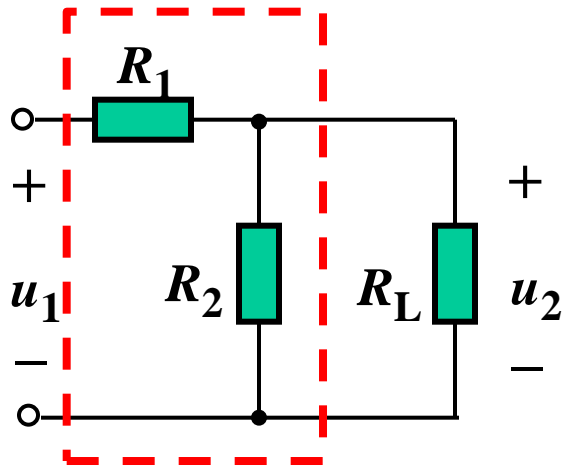
有什么用？



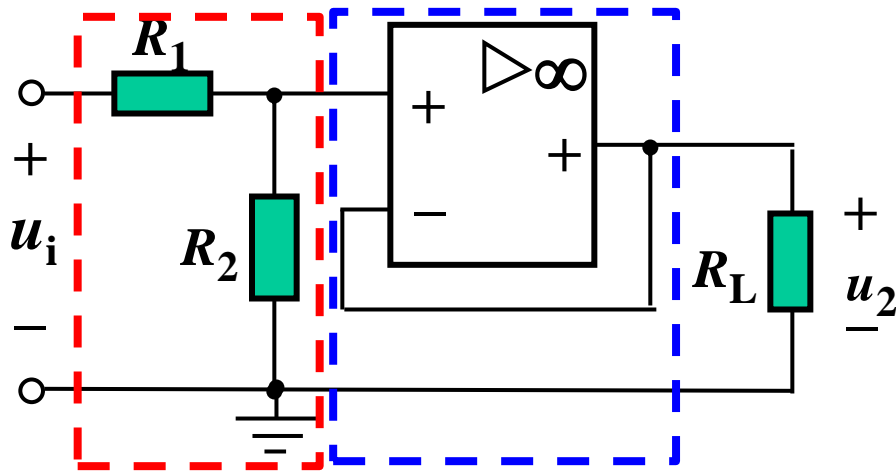
负载电阻 R_L 相对越大，负载上得到的信号越大。

但如果信号源和负载之间有信号处理电路呢？

电压型信号处理电路



$$u_2 \neq \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$



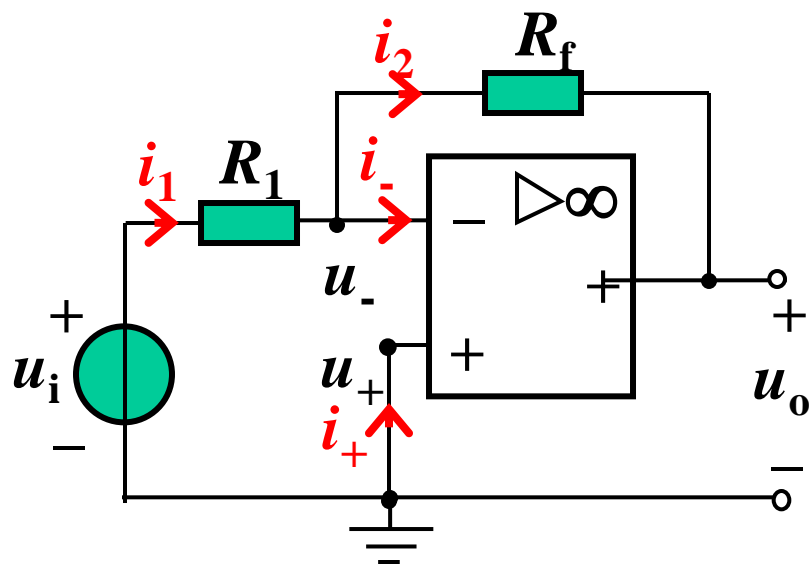
$$u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$

体会： ① 电压型信号处理电路的输入电阻大好

② 电压型信号处理电路的输出电阻小好

下课后想想： 为什么压控受控源的的控制端画成开路？

2、反比例放大器



“虚短” $u_+ = u_- = 0$

“虚断” $i_- = 0, i_+ = 0, i_2 = i_1$

$$i_1 = u_i / R_1 \quad i_2 = -u_o / R_f$$

$$\frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_f}$$

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

注意:

(1) 当 R_1 和 R_f 确定后, 为使 u_o 不超过饱和电压(即保证工作在线性区), 对 u_i 有一定限制

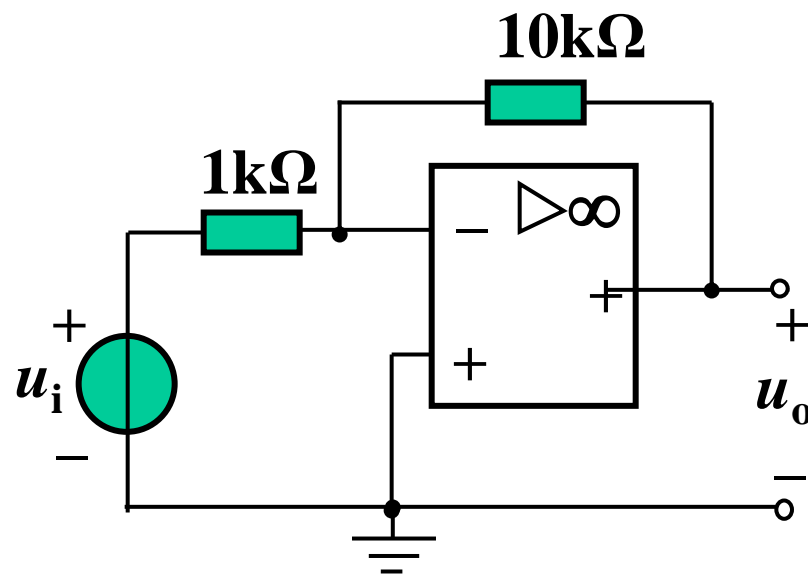
(2) R_f 接在输出端和反相输入端, 称为负反馈

(3) 负反馈电路中, 信号接入反相输入端, 则输出输入反相

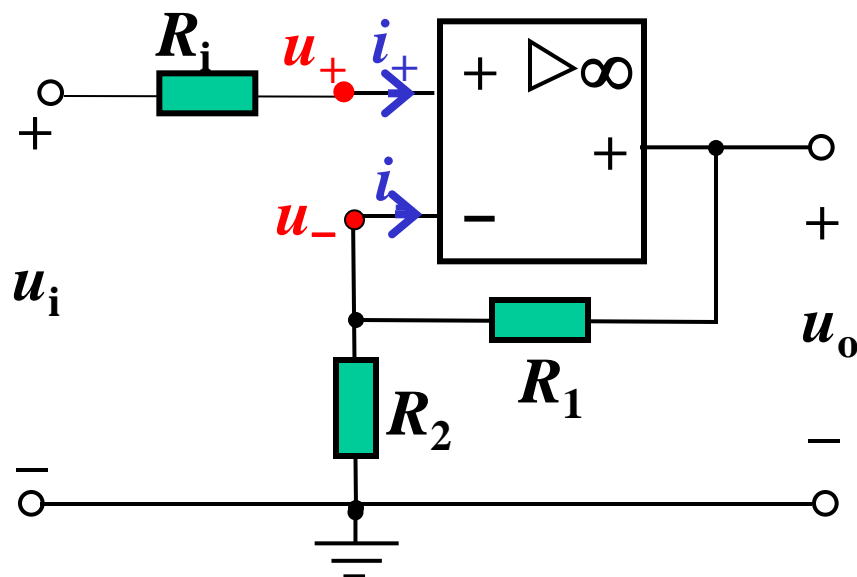
单选题 1分

运放的饱和输出为 $\pm 10\text{V}$ ，输入为 $u_i = -1\text{V}$ 时，输出 $u_o = \underline{\hspace{1cm}}\text{V}$

- ☐ A 20
- ☐ B -20
- ☒ C 10
- ☐ D -10



3. 同相比例放大器



虚断

$$i_+ = i_- = 0$$

虚短

$$u_+ = u_- = u_i$$

分压器关系：

$$u_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o$$

$$u_o = \frac{R_1 + R_2}{R_2} u_i = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_i$$

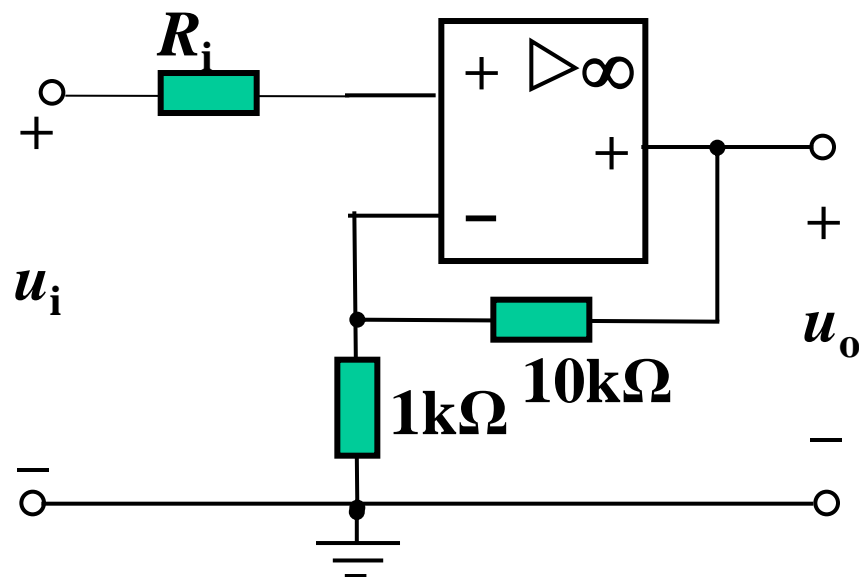
负反馈电路中，信号接入同相输入端，则输出输入同相

单选题 1分

设置

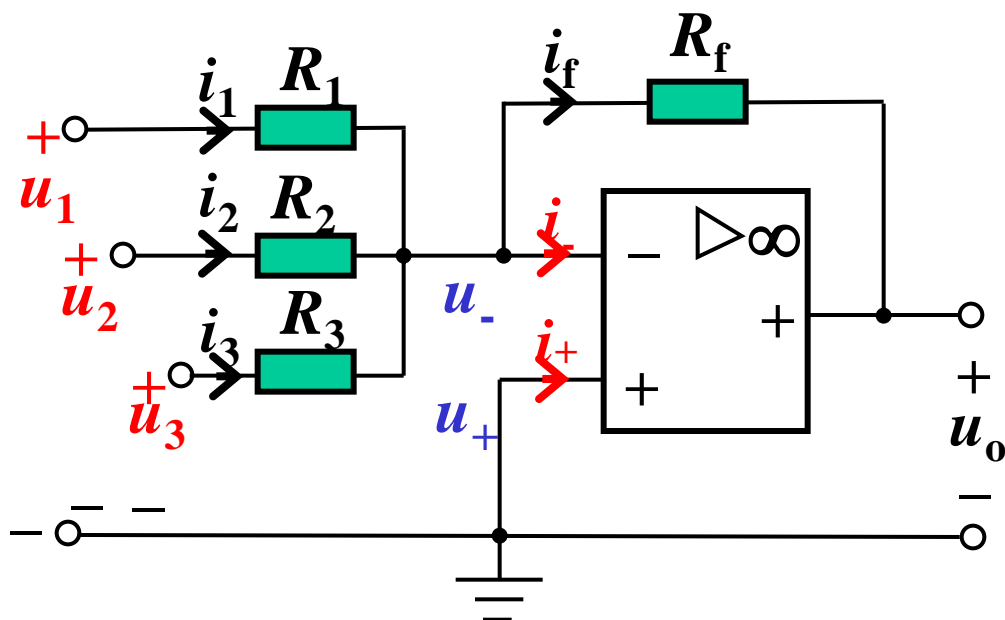
设运放工作于线性区，从 u_i 看入的输入电阻为____ Ω

- ☐ A 1k
- ☐ B 11k
- ☒ C ∞
- ☐ D 0



提交

4. 反相加法器



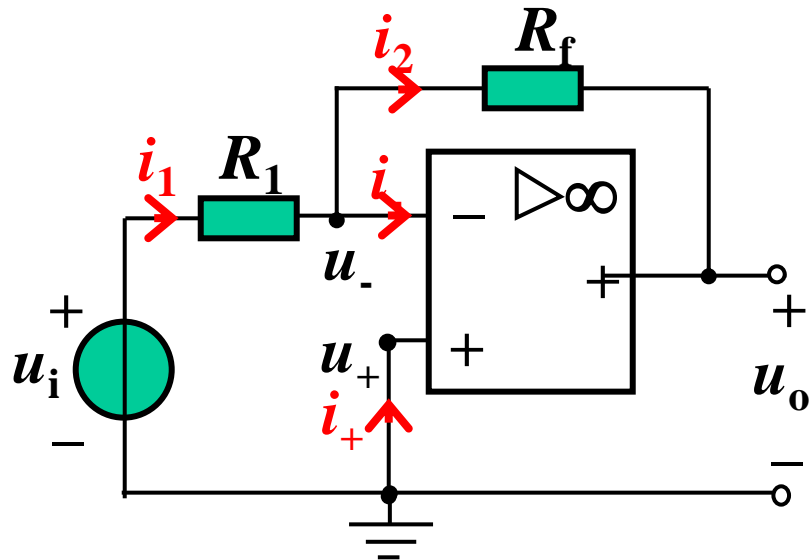
$$\begin{cases} u_- = u_+ = 0 \\ i_- = i_+ = 0 \end{cases}$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_f$$

$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} = -\frac{u_o}{R_f}$$

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}u_1 + \frac{R_f}{R_2}u_2 + \frac{R_f}{R_3}u_3\right)$$

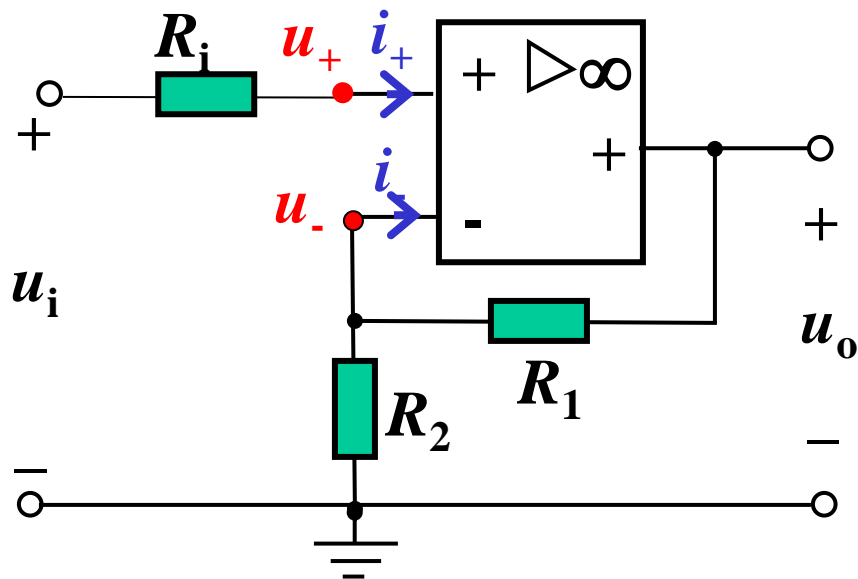
5. 减法器



信号接入反相输入端
则输出输入反相

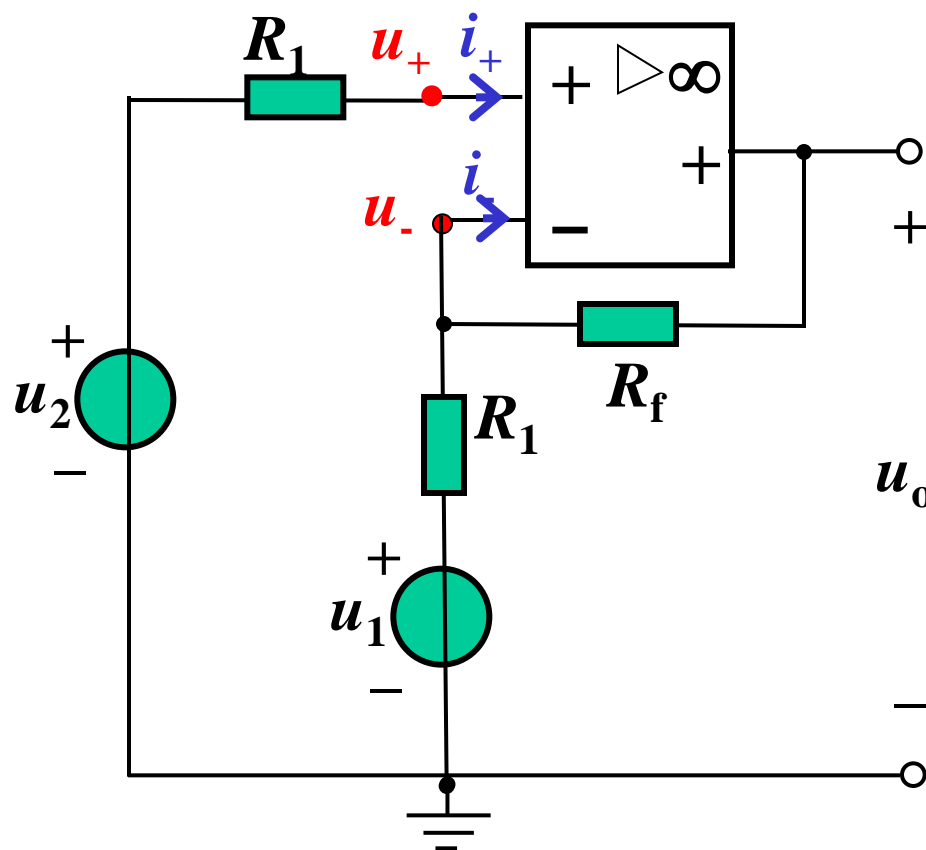
$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

如何结合起来
构成减法器?



$$u_o = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_i$$

信号接入同相输入端
则输出输入同相



仍然不够理想

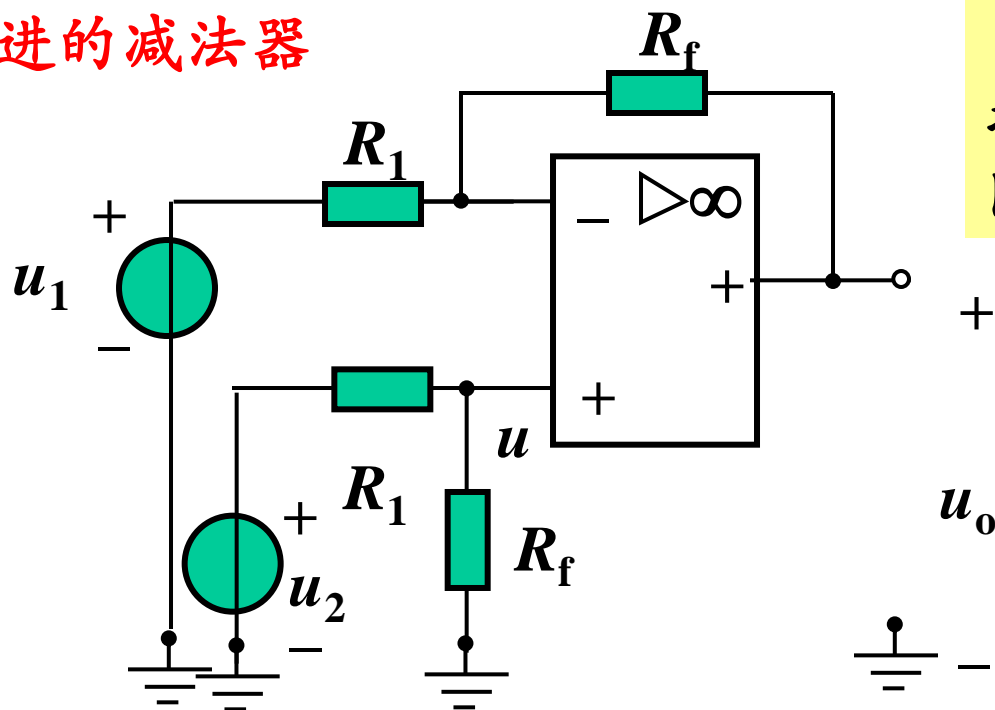
$$\frac{u_2 - u_1}{R_1} = \frac{u_o - u_2}{R_f}$$



$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}u_1 + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)u_2$$

怎么改?

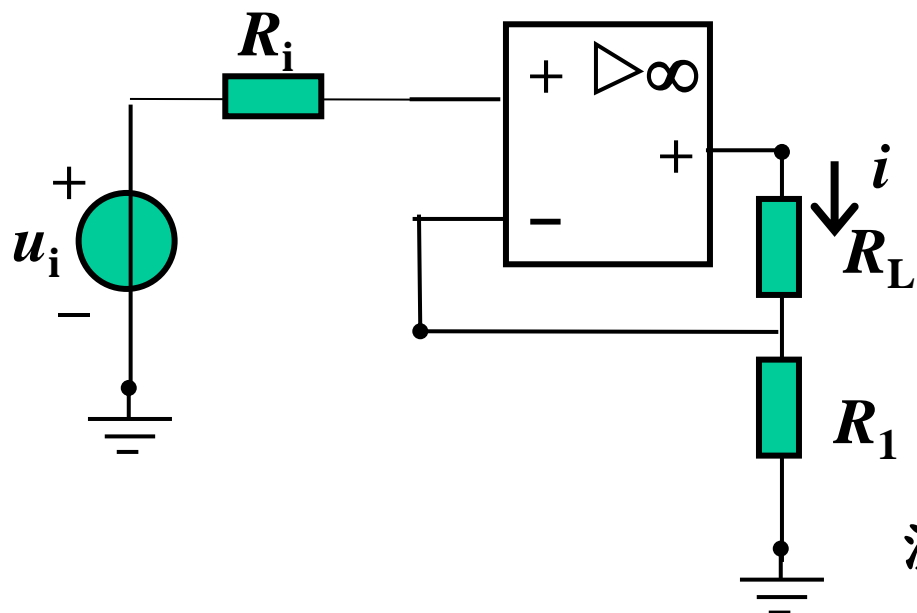
6. 改进的减法器



以后还将讨论
指数、对数、乘法、
除法、微分、积分运算

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{R_f}{R_1 + R_f} u_2 \\ \frac{u_1 - u}{R_1} = \frac{u - u_o}{R_f} \end{array} \right. \Rightarrow u_o = -\frac{R_f}{R_1} (u_1 - u_2)$$

7. 电流源



$$i = \frac{u_i}{R_1}$$

流过负载 R_L 的电流与其阻值无关

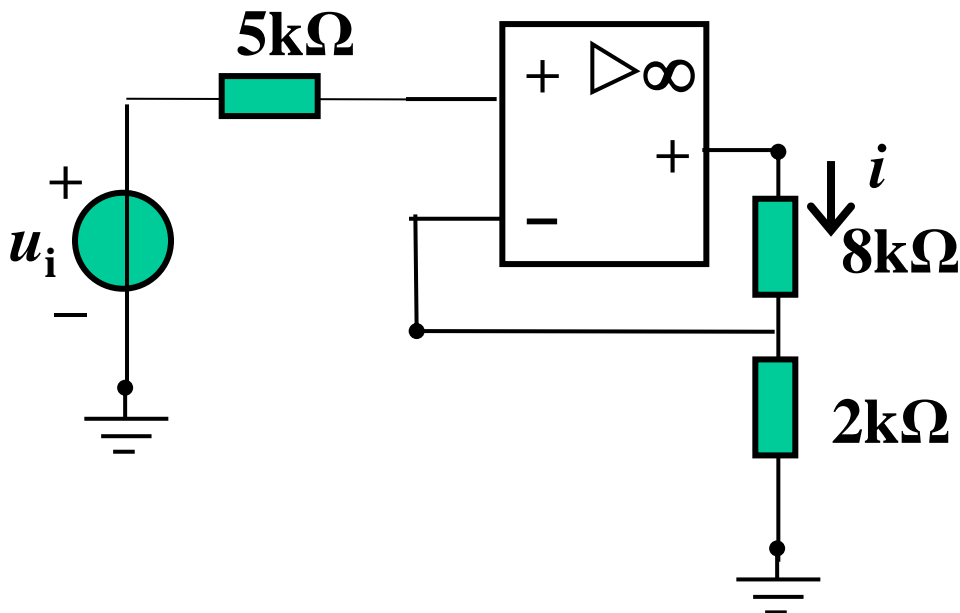
看仿真

单选题 1分

设置

运放的饱和输出为 $\pm 10\text{V}$ ，输入为 $u_i=4\text{V}$ 时，输出 $i=$ _____mA

- A 2
- B -2
- C 1**
- D -1



提交

还是负反馈吗？

是，L7解释

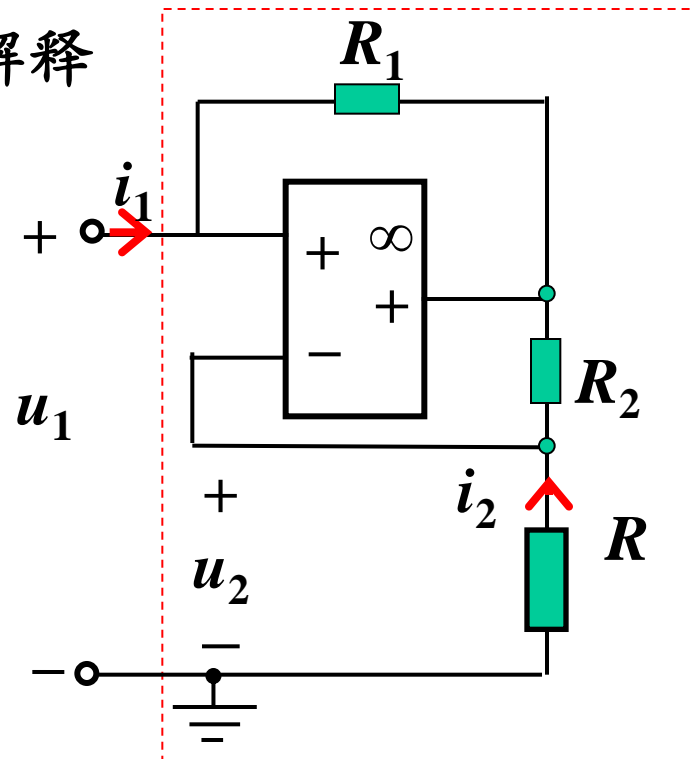
8. 负电阻

$$u_2 = -Ri_2 \quad \text{欧姆定律}$$

$$u_1 = u_2 \quad \text{虚短}$$

$$R_1 i_1 = R_2 i_2 \quad \text{虚短、虚断、KVL}$$

$$R_i = \frac{u_1}{i_1} = -\frac{R_1}{R_2} R$$



问题： u_1 还是一个端口吗 ($i_1 \neq i_2$)？

可以看做是，今天课后推送慕课L27视频解释