

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

纸笔计算器

Principles of Electric Circuits Lecture 4 Tsinghua University 2023

1

体系结构

1	2.21	绪论, 变量 (L1)
	2.24	元件约束和拓扑约束 (L2)
2	2.28	等效变换 (L3)
	3.3	习题课 (R1)
3	3.7	应用介绍: 开关在电阻电路中的应用 (A1)
	3.10	运算放大器 (L4)
4	3.14	二端口网络 (L5)
	3.17	习题课 (R2)

内容简介

I. (电压型)信号处理电路的外特性

III. 运算放大器 (**Operational Amplifier**) 及其外特性

III. 理想运算放大器 (**Ideal Op Amp**) 及其外特性

IV. 含负反馈理想运算放大器电路的分析

暗线: 1. **工程观点、抽象观点**的具体体现

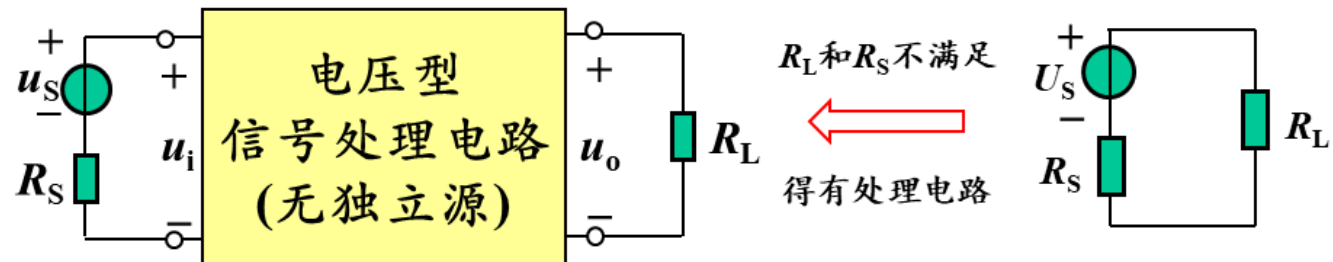
2. 强化**对信号处理电路性能的理解**

本讲重难点

- 信号处理电路的外性质（放大倍数、输入电阻和输出电阻）
- 运算放大器的电路模型
- 用“**虚短**”和“**虚断**”分析线性工作区的负反馈理想运放电路
- 运放功能电路的输入和输出电阻

I. 电压型信号处理电路外特性

为什么无独立源?
A2解决



从信号传输的角度:
 R_L 大好, R_S 小好

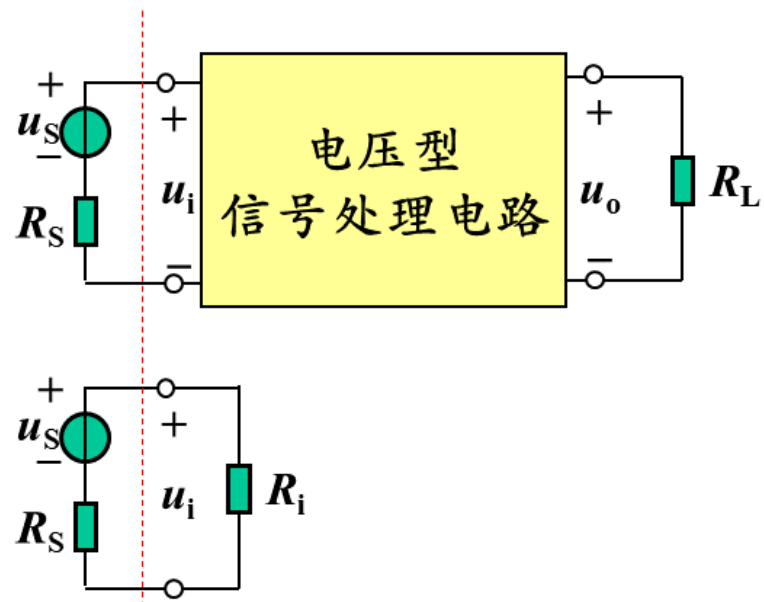
电压放大倍数 $A_u = \frac{u_o}{u_i}$ 两边的性能

输入电阻 R_i

从 u_i 两端向输出端方向看, 该无独立源一端口网络的等效电阻(接或不接负载)(输入端往右看的性能)

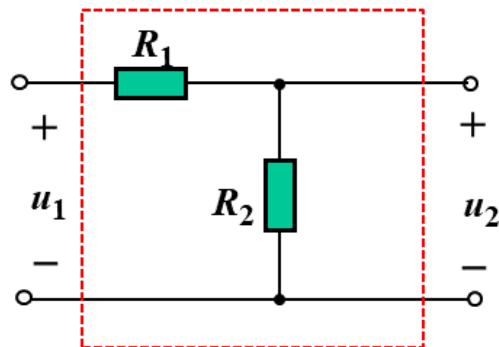
输出电阻 R_o

从 u_o 两端向输入端方向看, 该含独立源一端口网络中独立源置零后的电阻(输出端往左看的性能)



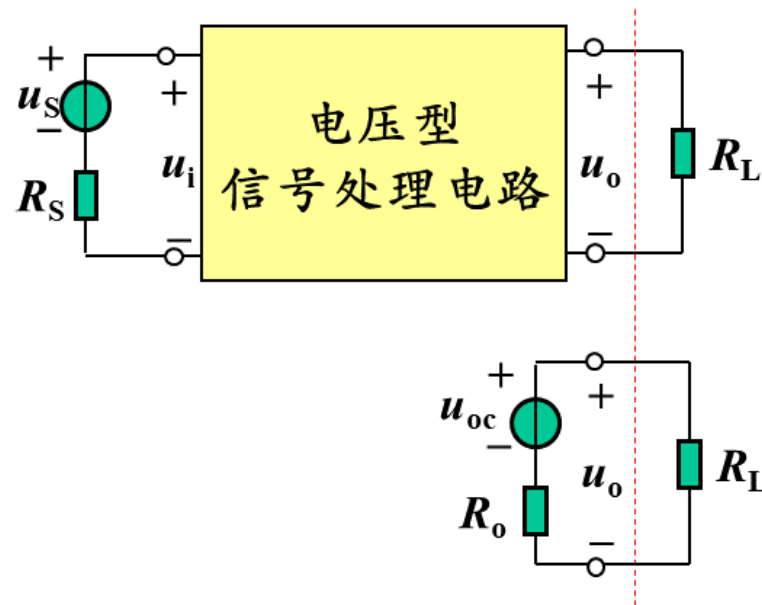
输入电阻 R_i 什么值合适?

R_i 越大越好 \longrightarrow 获取电压信号的能力强



若输出端开路，则虚线框所示电压型信号处理电路的输入电阻是？

此处可以有弹幕



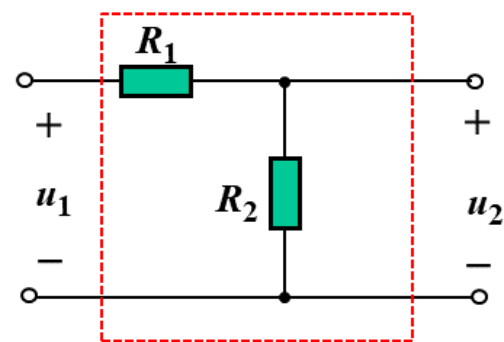
输出电阻 R_o 什么值合适?

R_o 越小越好 \longrightarrow 信号处理电路提供信号的能力强
(带载能力强)

单选题 1分

若左侧输入端电压型信号源内阻为0，则虚线框所示电压型信号处理电路的输出电阻是？

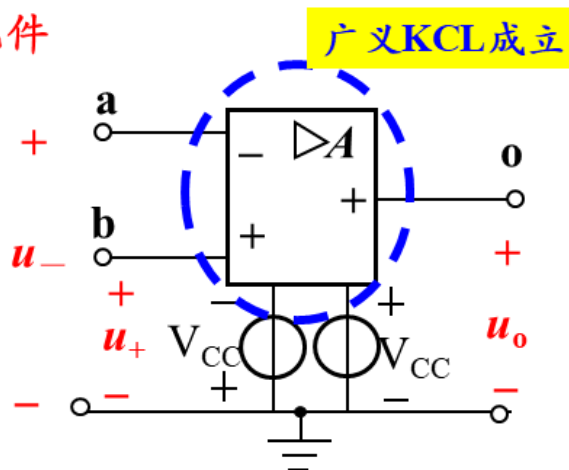
- ☒ A R_1
- ☐ B R_2
- ☐ C $R_1 + R_2$
- ☐ D $R_1 // R_2$



II. 运算放大器 (Operational Amplifier, 运放) 及其外特性

1. 电路符号

5端元件



a: 反相输入inverting input, u_-

b: 非反相(同相)输入noninverting input, u_+

o: 输出output, u_o

$\pm V_{CC}$: 供电电压working voltage

\equiv : 接地ground(是参考点不是大地)

A: 开环电压增益open-loop voltage gain

Op Amp需直流电源供电才能工作

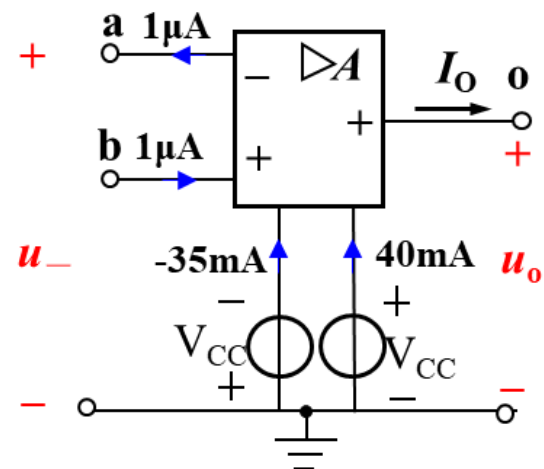
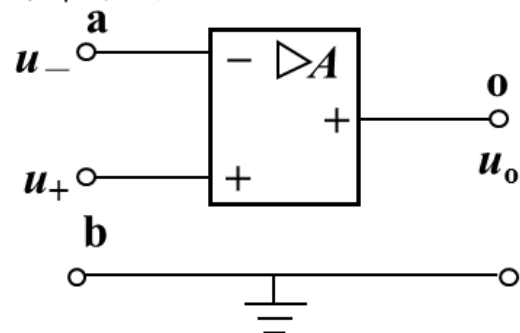
单选题 1分

计算运算放大器的输出电流

$I_O = \underline{\hspace{1cm}} \text{mA}$

- ☐ 0
- ☒ 5
- ☐ -5

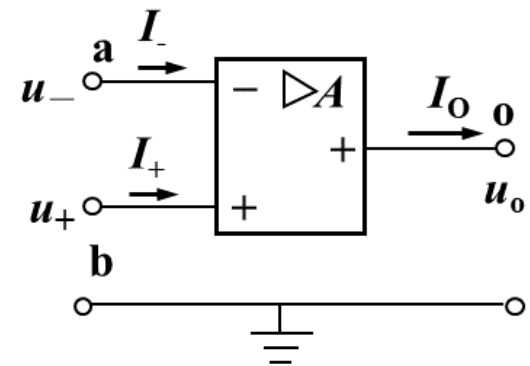
运放的简单表示



单选题 1分

图示简单表示的运放电路中
广义KCL (即 $I_o = I_- + I_+$) 成立吗?

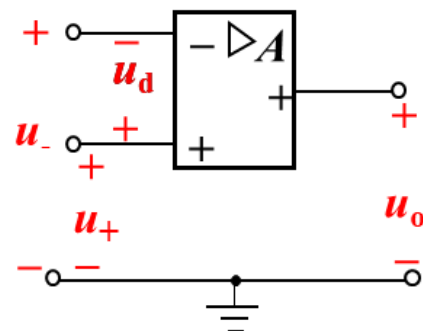
- ☒ A 成立
- ☐ B 不成立
- ☐ C 相机而动



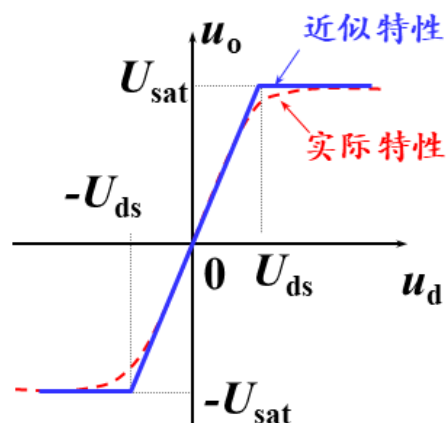
2. 运算放大器的外特性

运放放大的信号是：

差分信号
 $u_d = u_+ - u_-$



仿真



分三个区域：

① 线性工作区

$|u_d| < U_{ds}$, 则 $u_o = Au_d$

A : 开环放大倍数

② 正向饱和区

$u_d > U_{ds}$, 则 $u_o = U_{sat}$

③ 反向饱和区

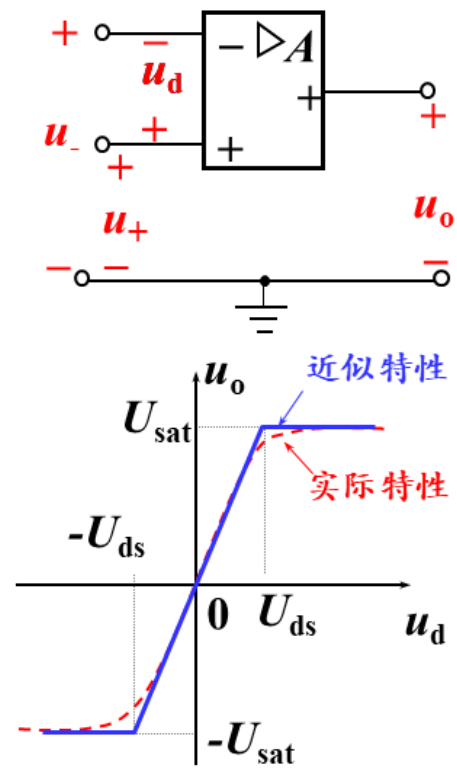
$u_d < -U_{ds}$, 则 $u_o = -U_{sat}$

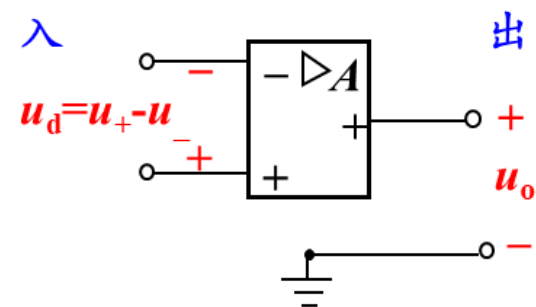
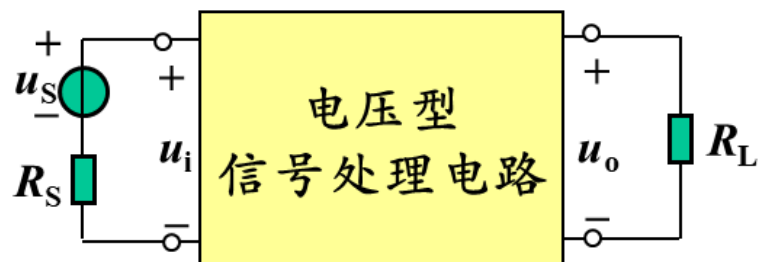
本讲大部分讨论Op Amp运行于线性区

单选题 1分

某运放 $U_{\text{sat}}=14\text{V}$, $A=10^6$,
则 $U_{\text{ds}}= \underline{\hspace{1cm}} \text{mV}$

- ☐ 14
- ☐ 1.4
- ☐ 0.14
- ☒ 0.014





电压放大倍数 A_u $A_u = \frac{u_o}{u_i}$ 运算放大器的 A_u : **M级**

运算放大器的输入电阻: **MΩ级**

输入电阻 R_i R_i 越大约好 \longrightarrow 获取信号能力强

输出电阻 R_o R_o 越小约好 \longrightarrow 带载能力强

运算放大器的输出电阻: **Ω级**

3. 电路模型

尝试用电阻+
受控源建模

此处可以有投稿

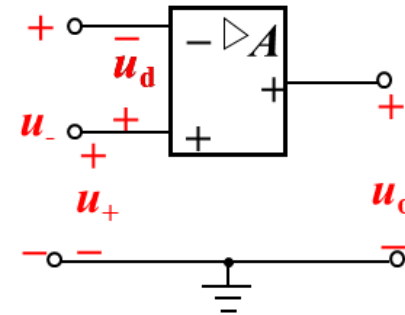
实际运放的
等效电路



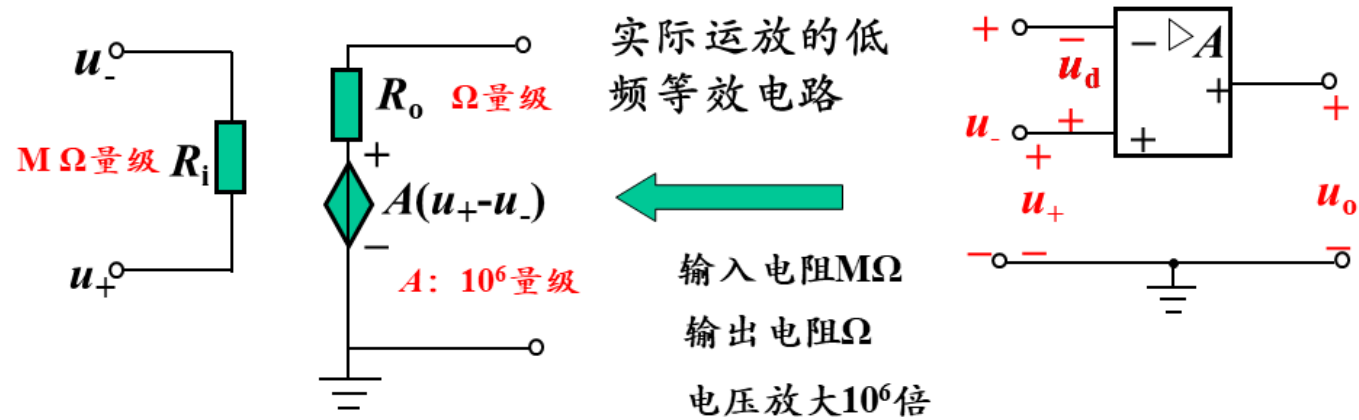
输入电阻 $M\Omega$

输出电阻 Ω

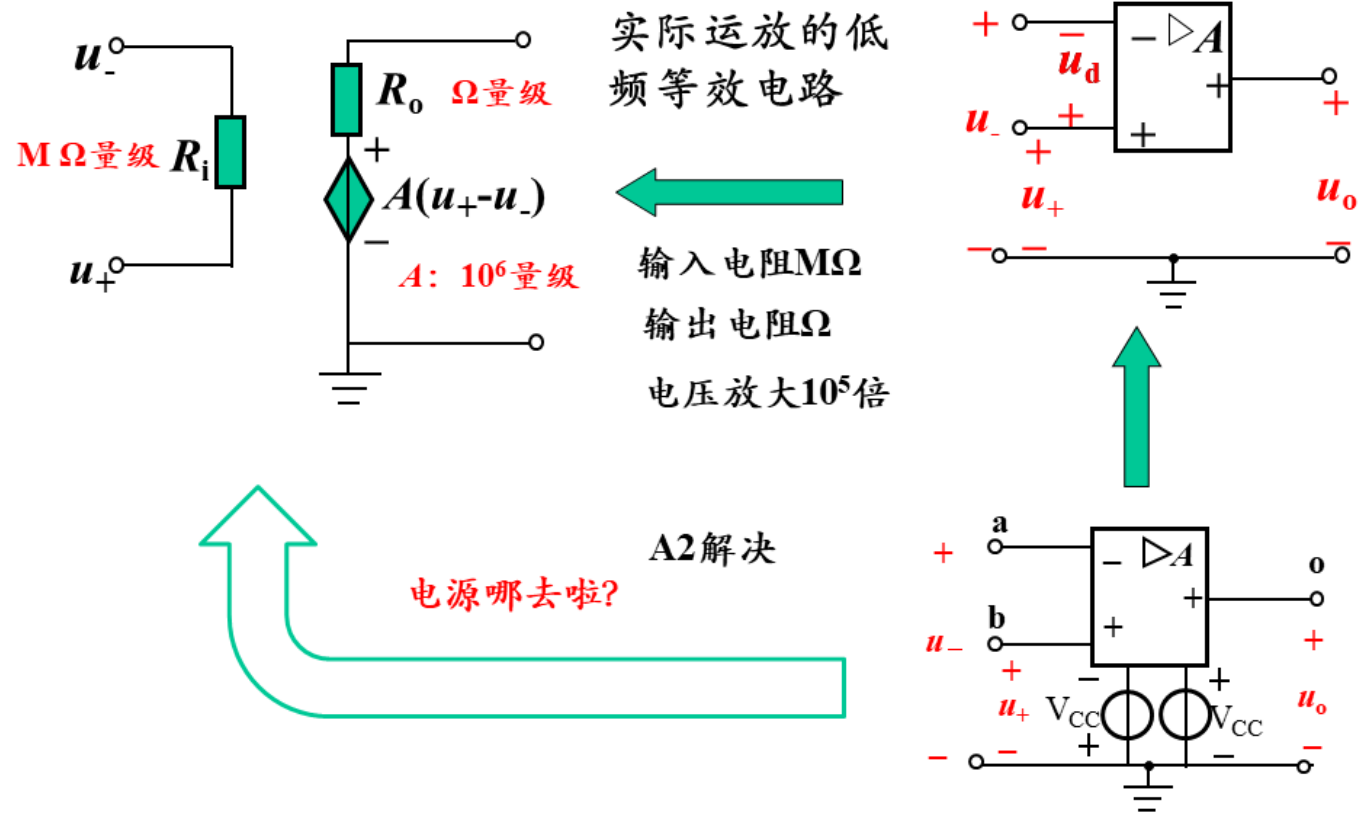
电压放大 10^6 倍

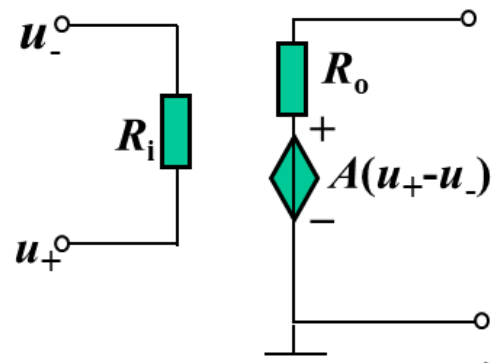


3. 电路模型



3. 电路模型





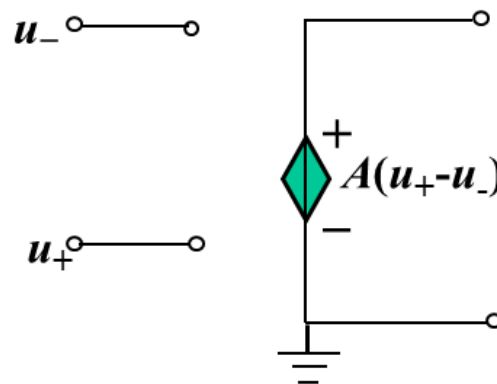
工程观点

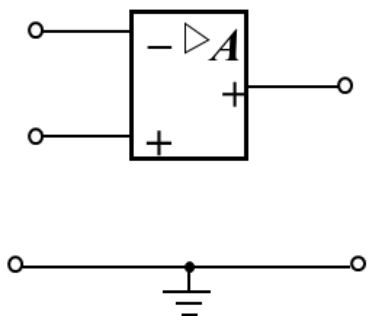
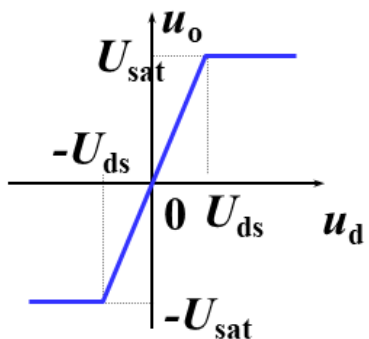
如果我们能始终坚持
与运算放大器连接的电阻值:

k Ω 级

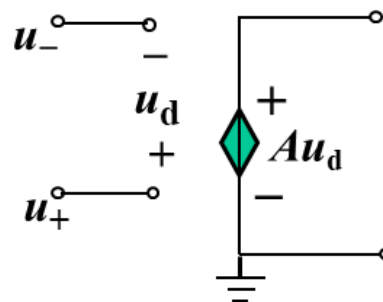


Op Amp输入电阻M Ω 量级
输出电阻 Ω 量级

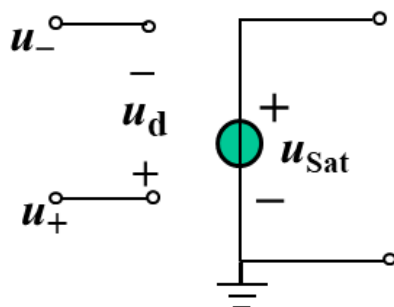




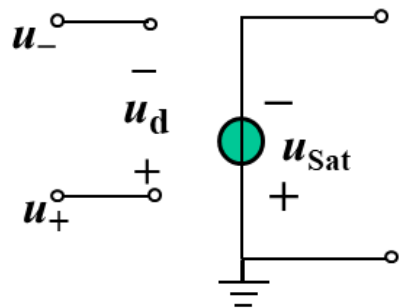
我们始终坚持
与运算放大器连接的电阻值: **kΩ级**



$$|u_d| < U_{ds}$$



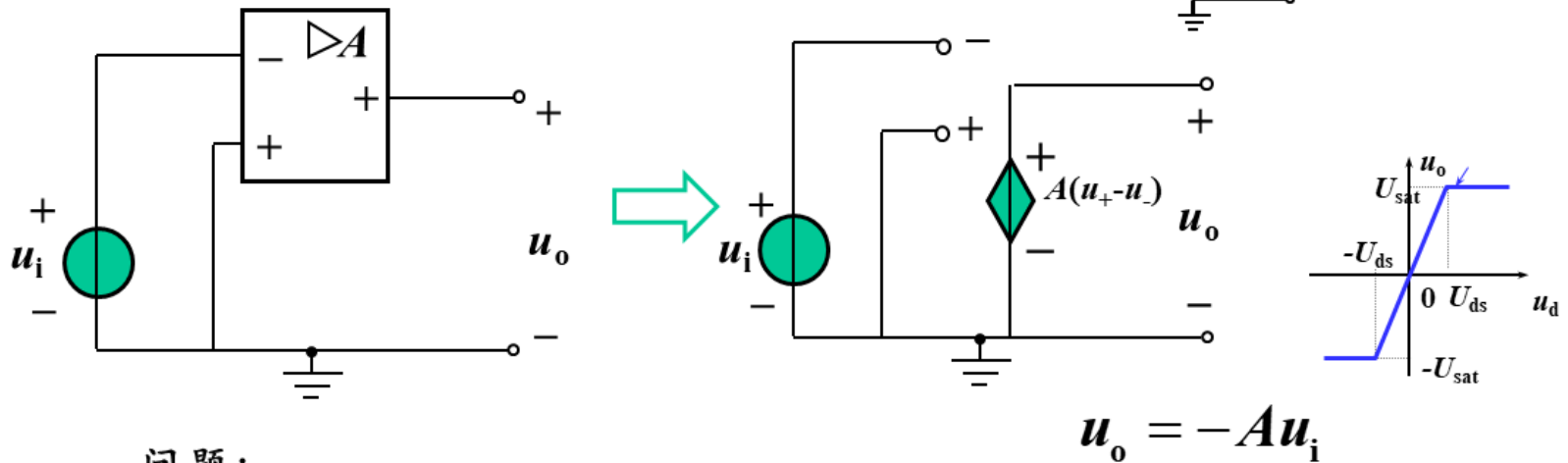
$$u_d > U_{ds}$$



$$u_d < -U_{ds}$$

用运放直接提供信号放大是否可行？

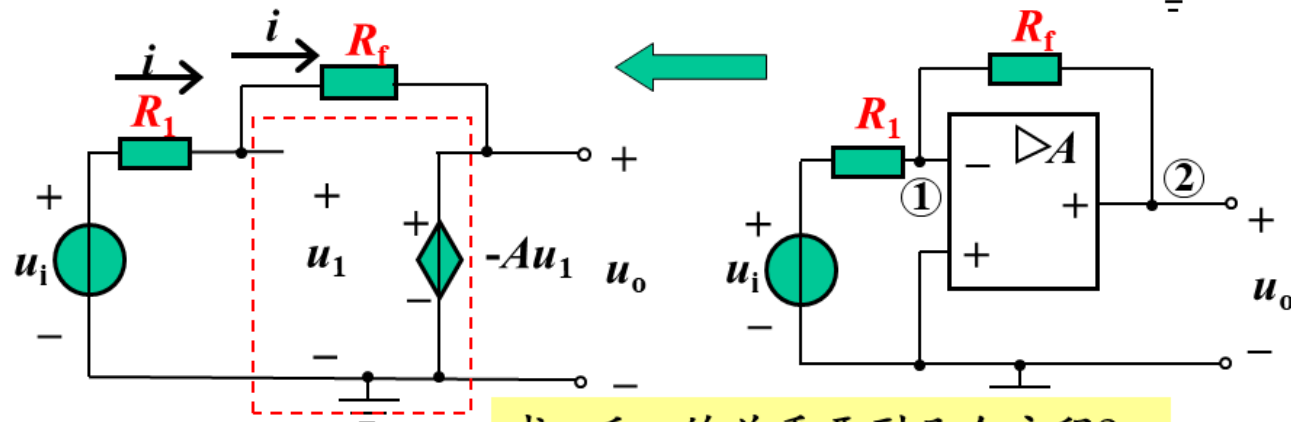
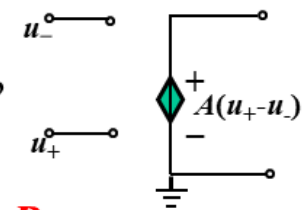
百害无一利，我们搞那么大的 A 干嘛？



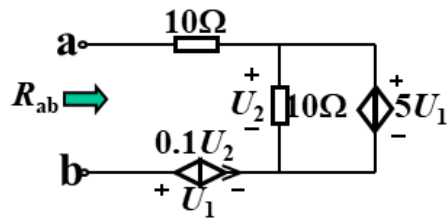
问题：

- (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),
然后增加几个kΩ量级外围精密电阻?



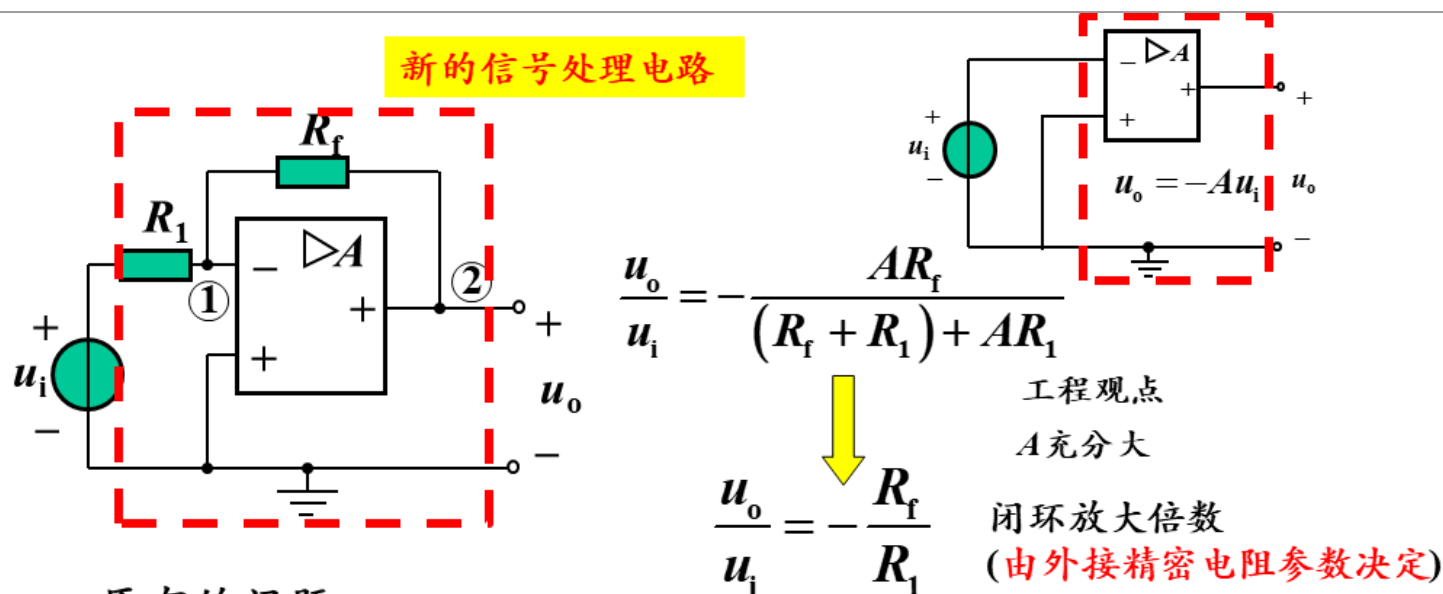
求 u_o 和 u_i 的关系要列几个方程?



$$\begin{cases} i = \frac{u_i - u_1}{R_1} \\ i = \frac{u_1 - u_o}{R_f} \\ -Au_1 = u_o \end{cases} \Rightarrow \frac{u_o}{u_i} = -\frac{AR_f}{(R_f + R_1) + AR_1}$$

Principles of Electric Circuits Lecture 4 Tsinghua University 2023

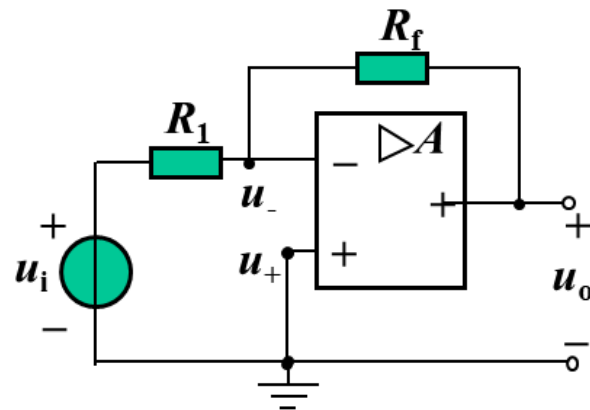
22



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。 V
- (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。 V
- (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

引入负反馈后, 对噪声还有抑制作用呢



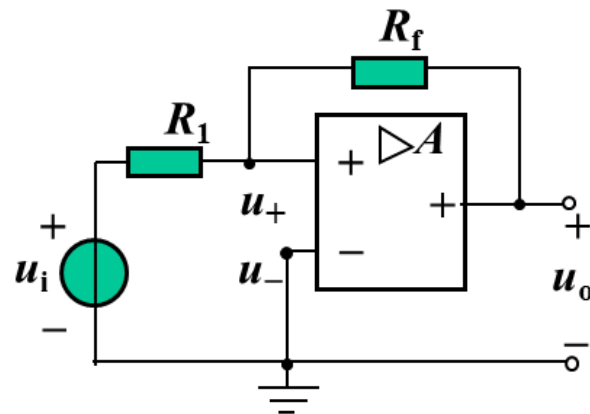
负反馈的噪声抑制作用

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

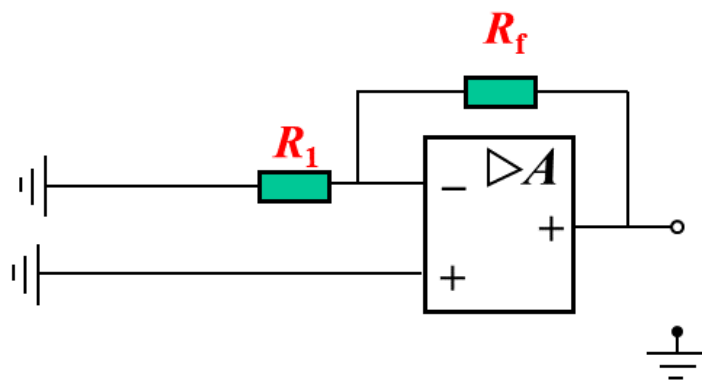


试分析正反馈?

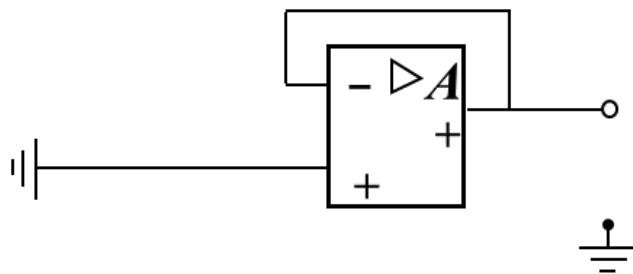
课后看视频

两种负反馈结构

部分反馈

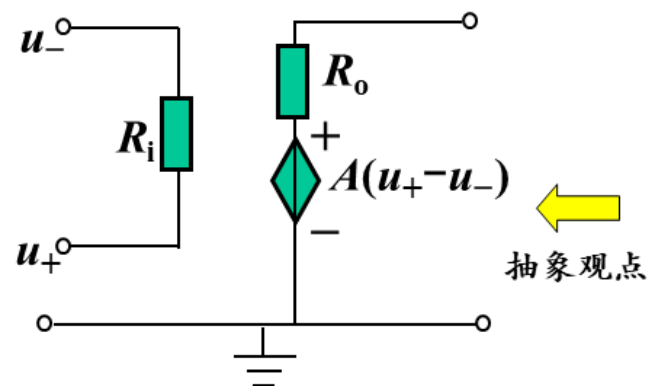


完全反馈
(即部分反馈中
 $R_1 \rightarrow \infty$
 $R_f \rightarrow 0$)



小结一下

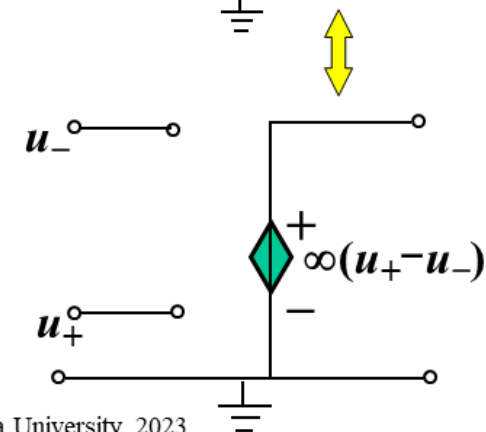
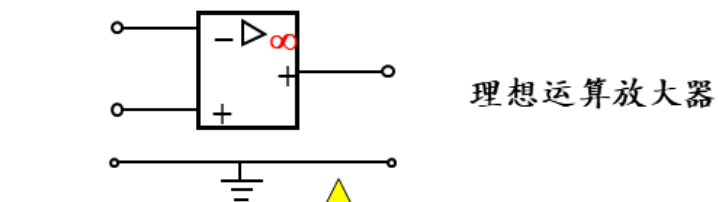
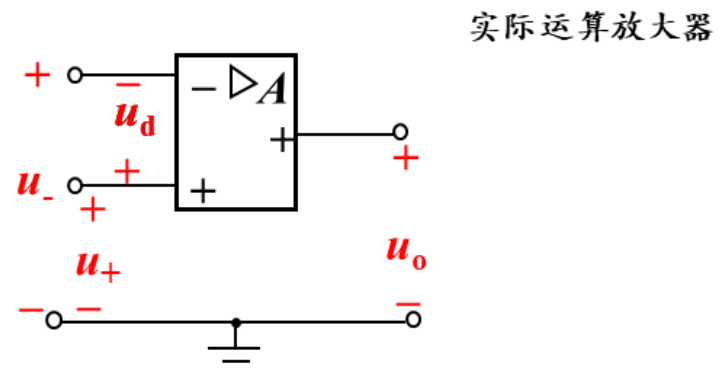
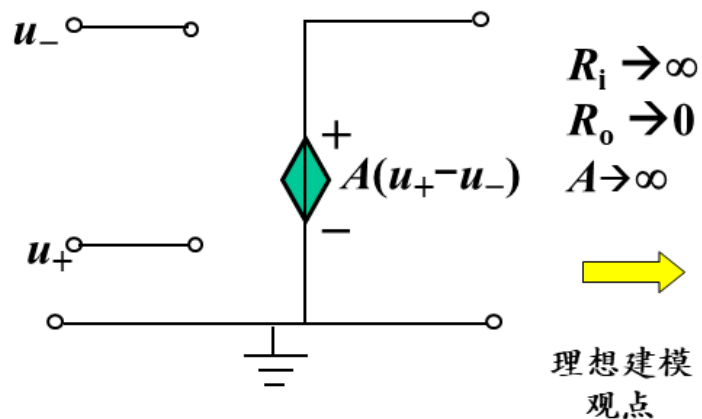
- 实际应用中，如果
 - 运放的 R_i 为M Ω 量级， R_o 为 Ω 量级， A 为M量级
 - 外接电阻为k Ω 量级
- 则引入负反馈后，含运放的电路可以
 - 应用于各种实际电路中（变化的 A ，不太小的输入，有噪声的环境）
 - 用 R_i 为 ∞ 、 R_o 为0、 A 很大的简化模型分析，带来的误差可忽略



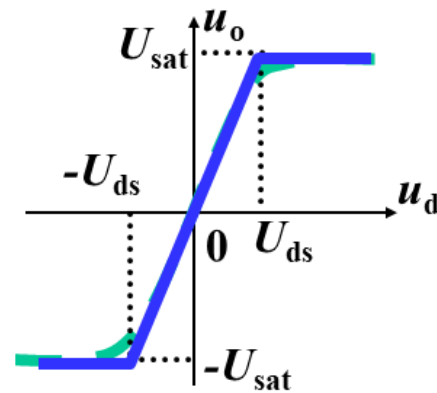
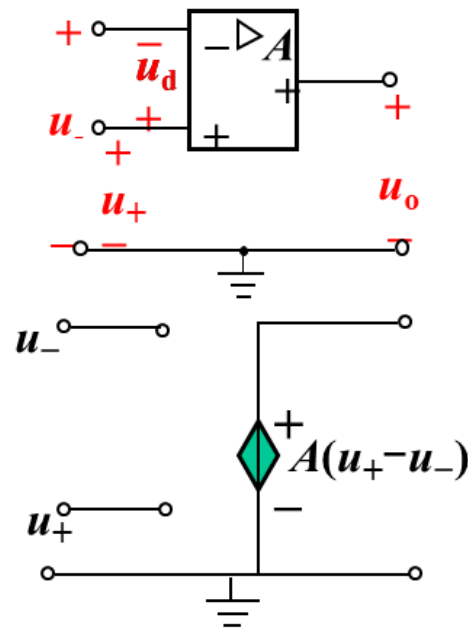
Op Amp输入电阻M Ω 量级
输出电阻 Ω 量级

k Ω 级外接电阻

工程观点

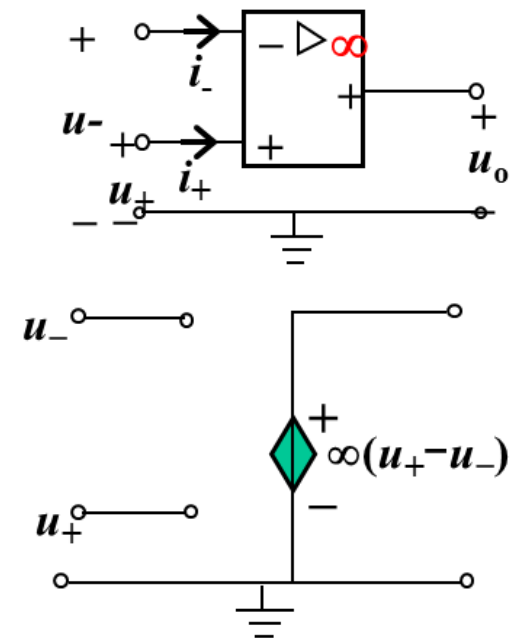


III. 理想运算放大器 (Ideal Op Amp) 及其外特性



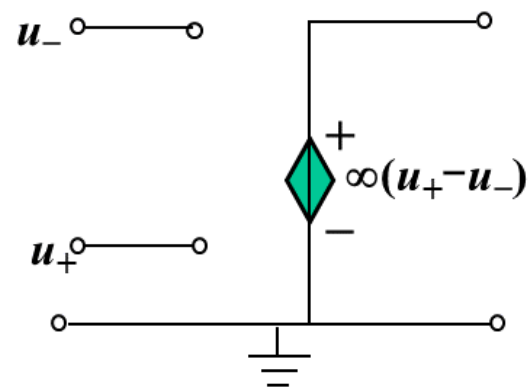
电压转移特性(外特性)

理想运放的输入输出特性是什么?

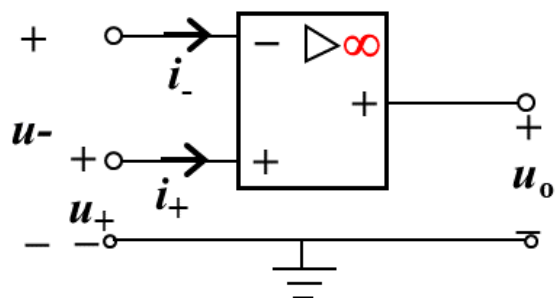


此处可以有投稿

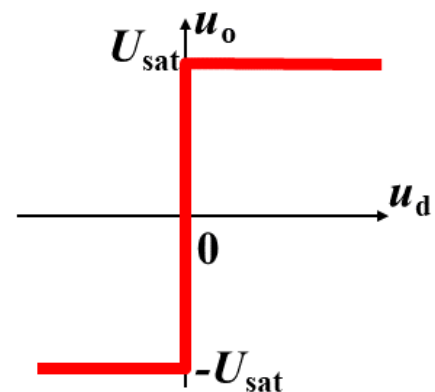
III. 理想运算放大器 (Ideal Op Amp) 及其外特性



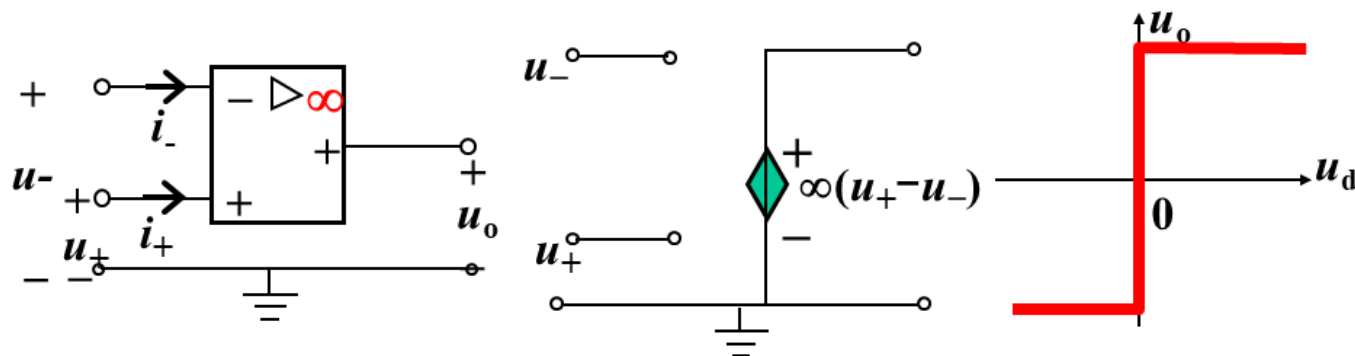
理想运放的等效电路



理想运放的电路符号



电压转移特性(外特性)



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)

单选题 1分

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无穷大



运放工作在线性区



运放的输入电阻无穷大



A无穷大且运放工作在线性区

31

单选题 1分

理想运放的两个输入端间可以视作“虚短”的原因是



A无穷大



运放工作在线性区



运放的输入电阻无穷大

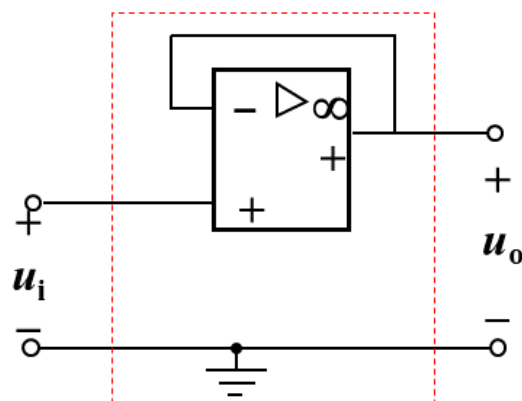


A无穷大且运放工作在线性区

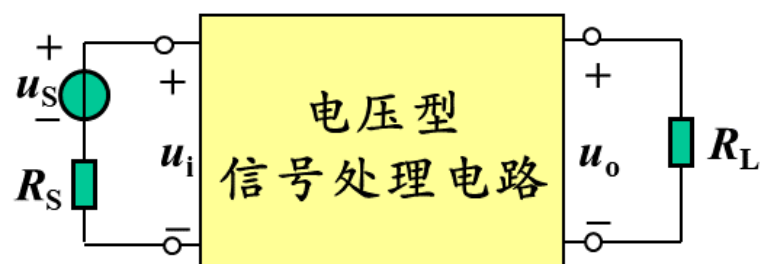
IV. 负反馈理想运算放大器电路分析

1. 电压跟随器

本讲主要讨论Op Amp运行于线性区



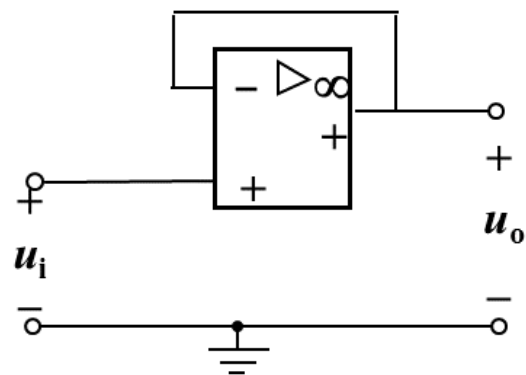
$$u_o = u_i$$



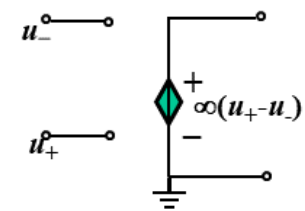
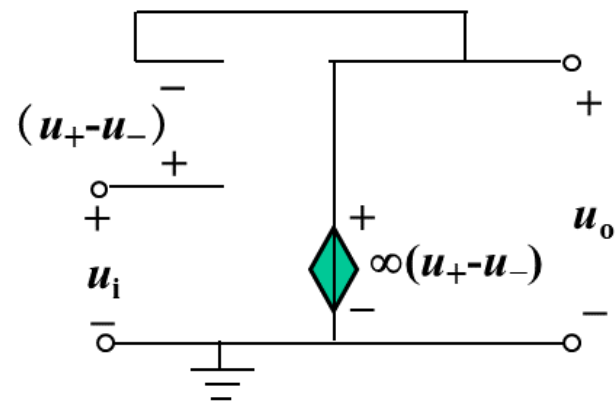
电压放大倍数

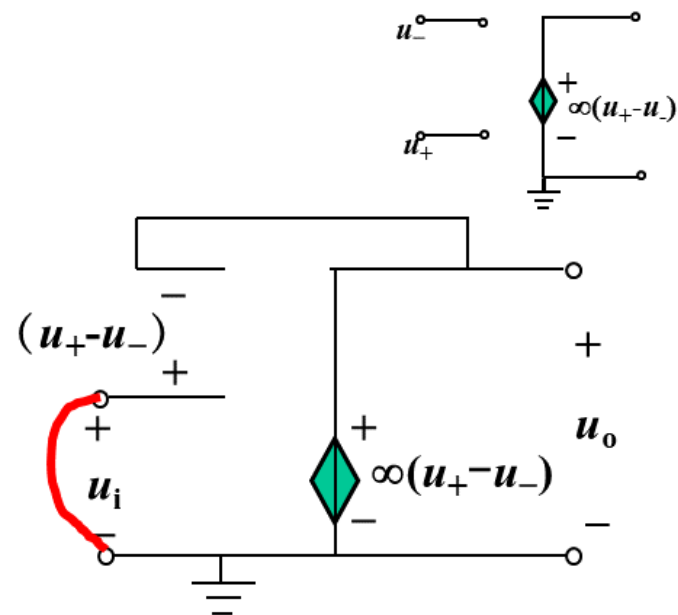
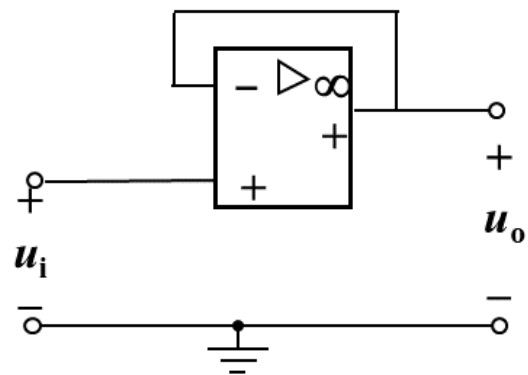
输入电阻

输出电阻



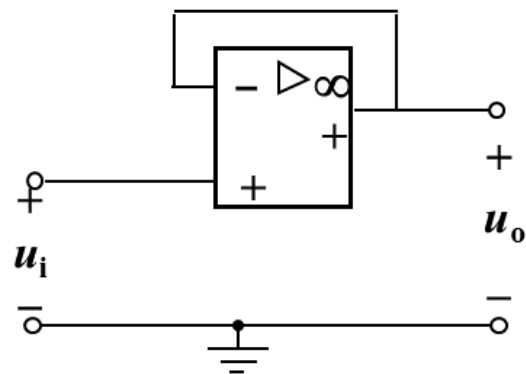
输入电阻 无穷大





输出电阻 为零

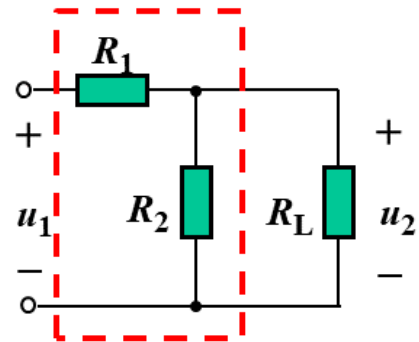
留作本周作业题



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

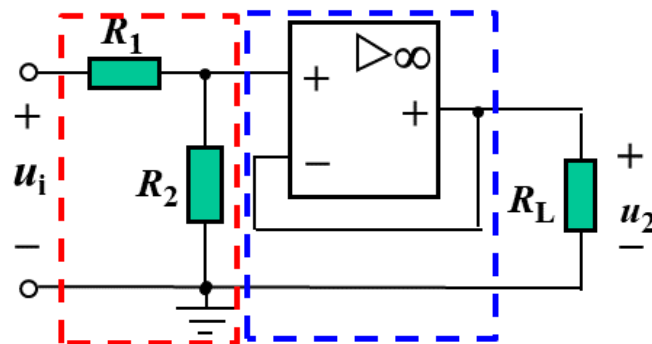
有什么用？

此处可以有弹幕



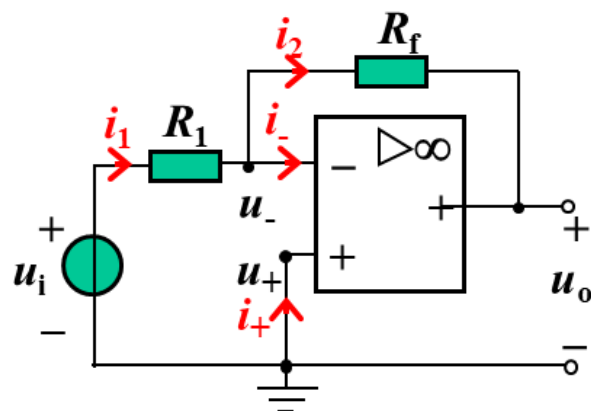
电压型信号处理电路

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



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

2、反相比例放大器



“虚短” $u_+ = u_- = 0$

“虚断” $i_- = 0, i_+ = 0, i_2 = i_1$

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

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

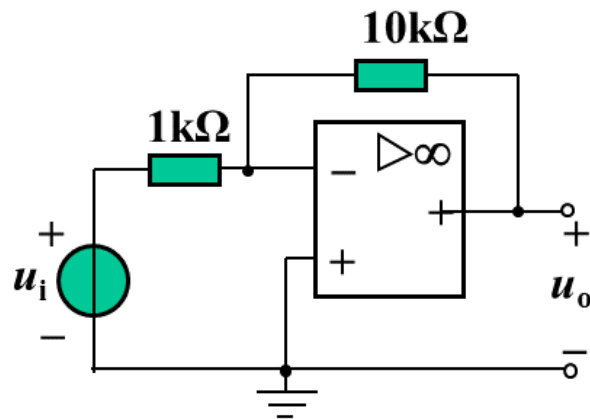
$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

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 $\pm 15\text{V}$ ，输入为 $u_i = -1\text{V}$ 时，输出 $u_o = \underline{\hspace{1cm}}\text{V}$



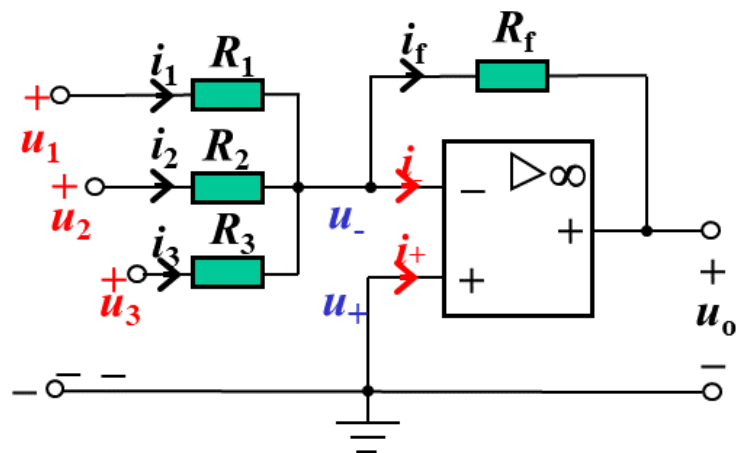
☐ 15

☐ -15

☒ 10

☐ -10

3. 反相加法器



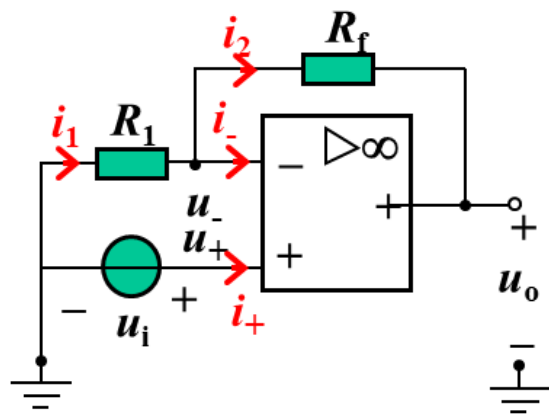
$$\begin{cases} u_- = u_+ = 0 \\ i_- = i_+ = 0 \end{cases}$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_f$$

$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} = -\frac{u_0}{R_f}$$

$$u_0 = -\left(\frac{R_f}{R_1}u_1 + \frac{R_f}{R_2}u_2 + \frac{R_f}{R_3}u_3\right)$$

4. 同相比例放大器



虚断

$$i_+ = i_- = 0$$

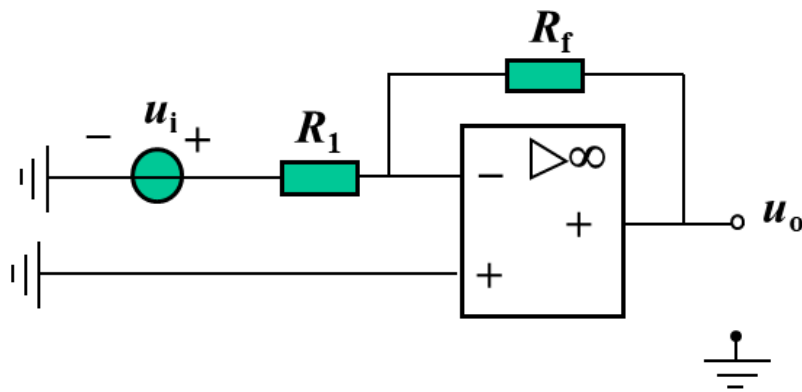
虚短

$$u_+ = u_- = u_i$$

分压器关系: $u_i = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_o$ $u_o = \frac{R_1 + R_f}{R_1} u_i$

负反馈电路中，信号接入同相输入端，则输出输入同相

5. 减法器



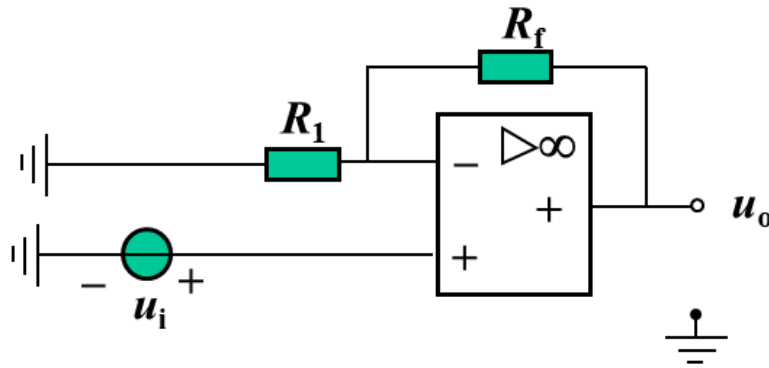
有负反馈

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？

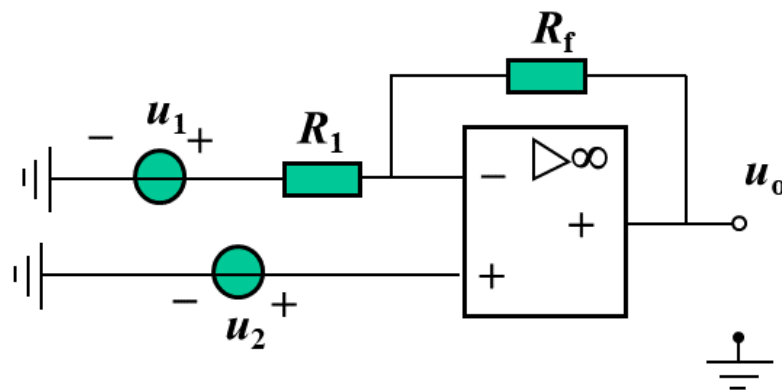


有负反馈

信号接入同相输入端

则输出输入同相

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



仍然不够理想

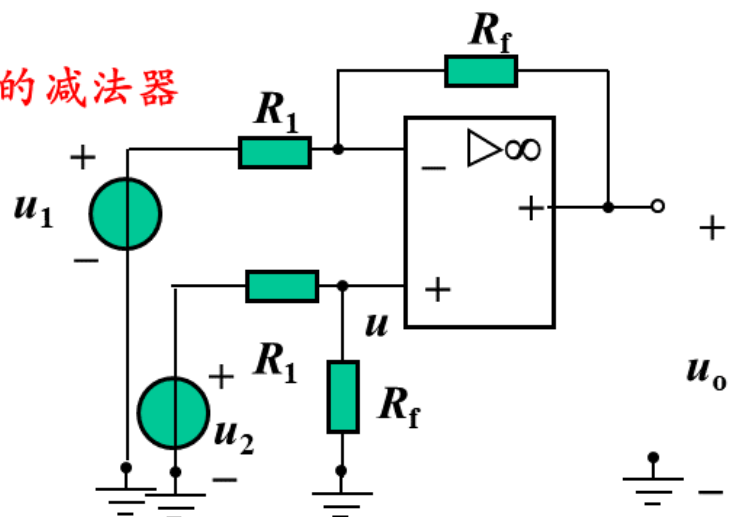
$$\frac{u_2 - u_1}{R_1} = \frac{u_o - u_2}{R_f}$$



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

怎么改?

6. 改进的减法器

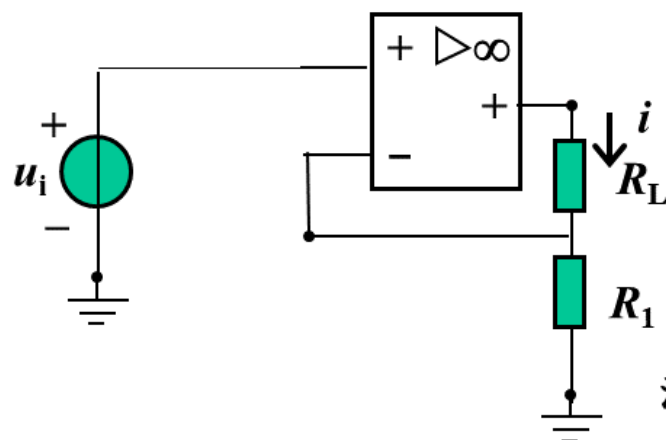


以后还将讨论
指数、对数、乘法、
除法、微分、积分运算

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

$$\begin{cases} u = \frac{R_f}{R_1 + R_f} u_2 \\ \frac{u_1 - u}{R_1} = \frac{u - u_o}{R_f} \end{cases} \Rightarrow u_o = -\frac{R_f}{R_1} (u_1 - u_2)$$

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

仿真怎么验证这是个压控电流源？

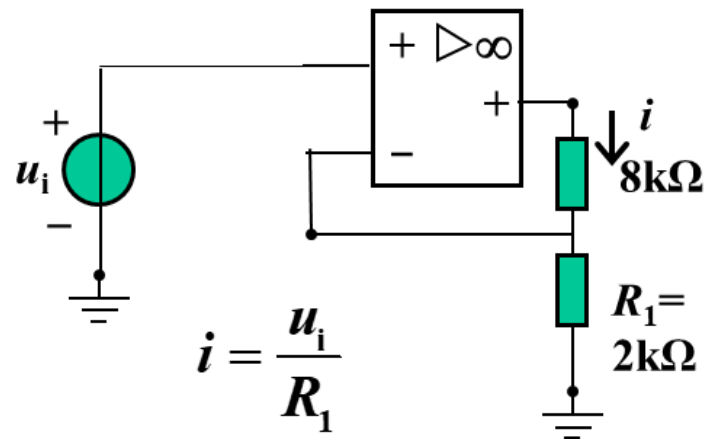
此处可以有弹幕

单选题 1分

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

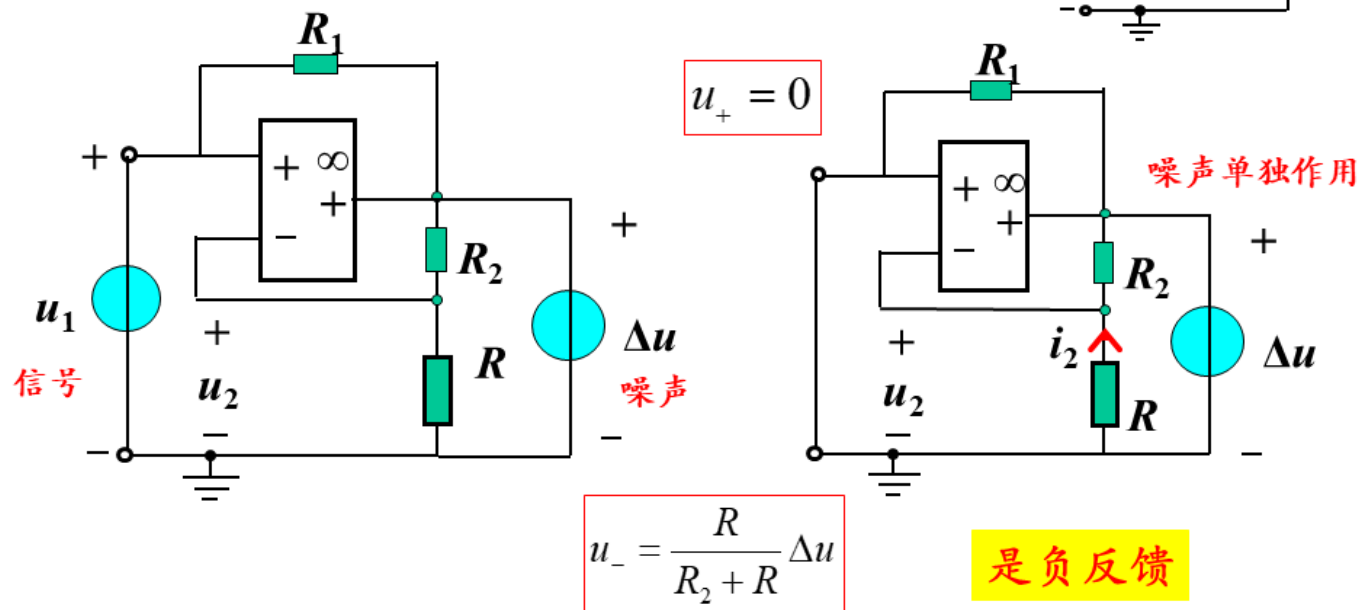
(红包)

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

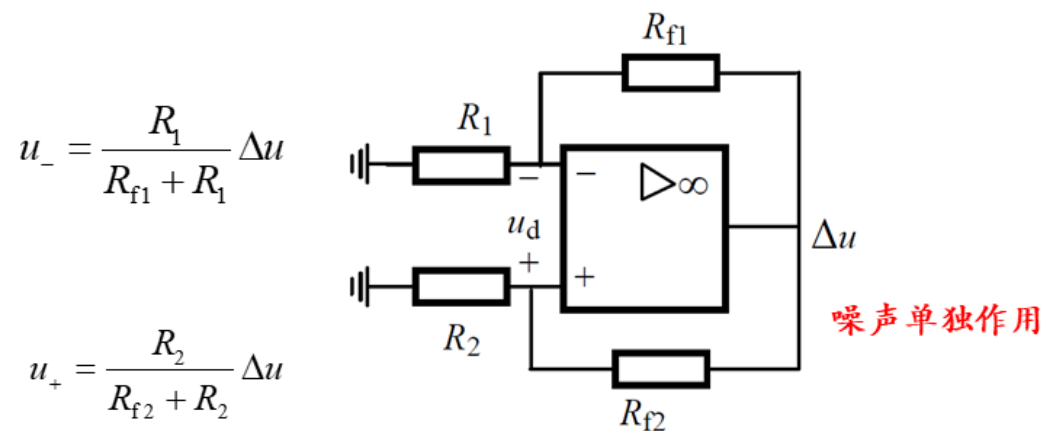


叠加定理的应用：运放的反馈深度分析

问题：这个电路是负反馈吗？



更一般的反馈情况（忽略信号源，只考虑噪声）：



$u_+ > u_-$ 正反馈

$u_+ < u_-$ 负反馈

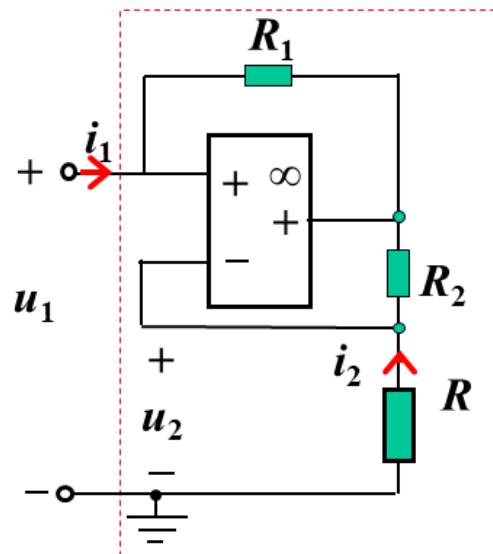
8. 负电阻

$$u_2 = -Ri_2 \quad \text{欧姆定律}$$

$$u_1 = u_2 \quad \text{虚短}$$

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

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



问题： u_1 还是一个端口吗 ($i_1 \neq i_2$) ?

结论：可以看做是，今天课后推送慕课视频解释