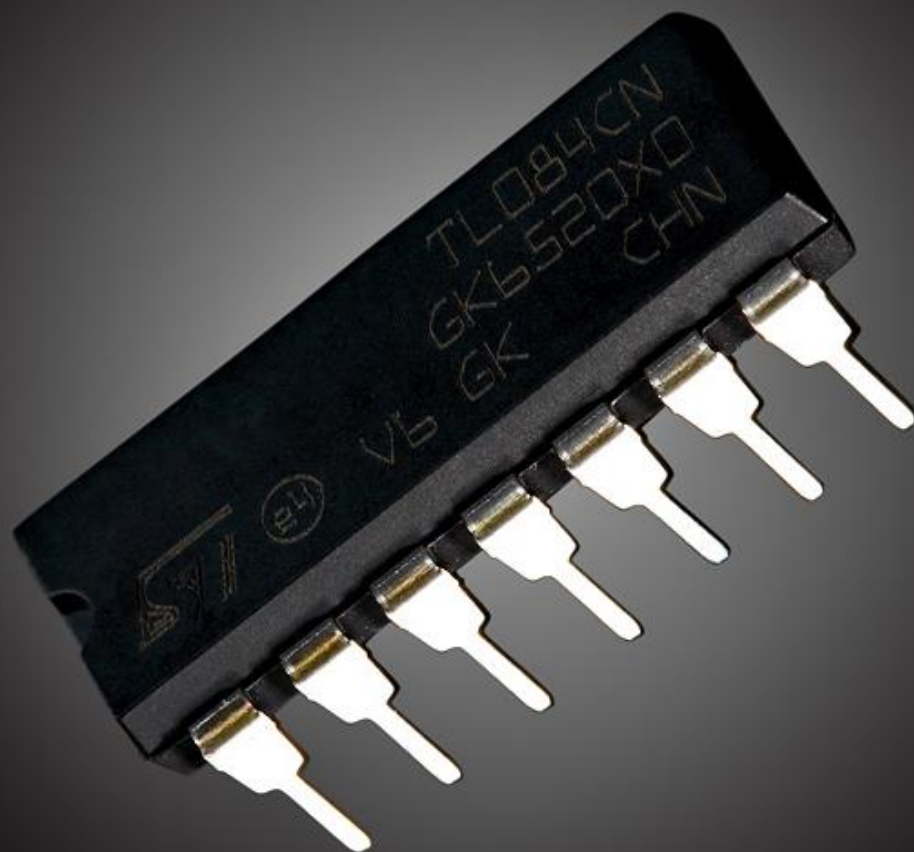


第7讲 集成运算放大器



内容

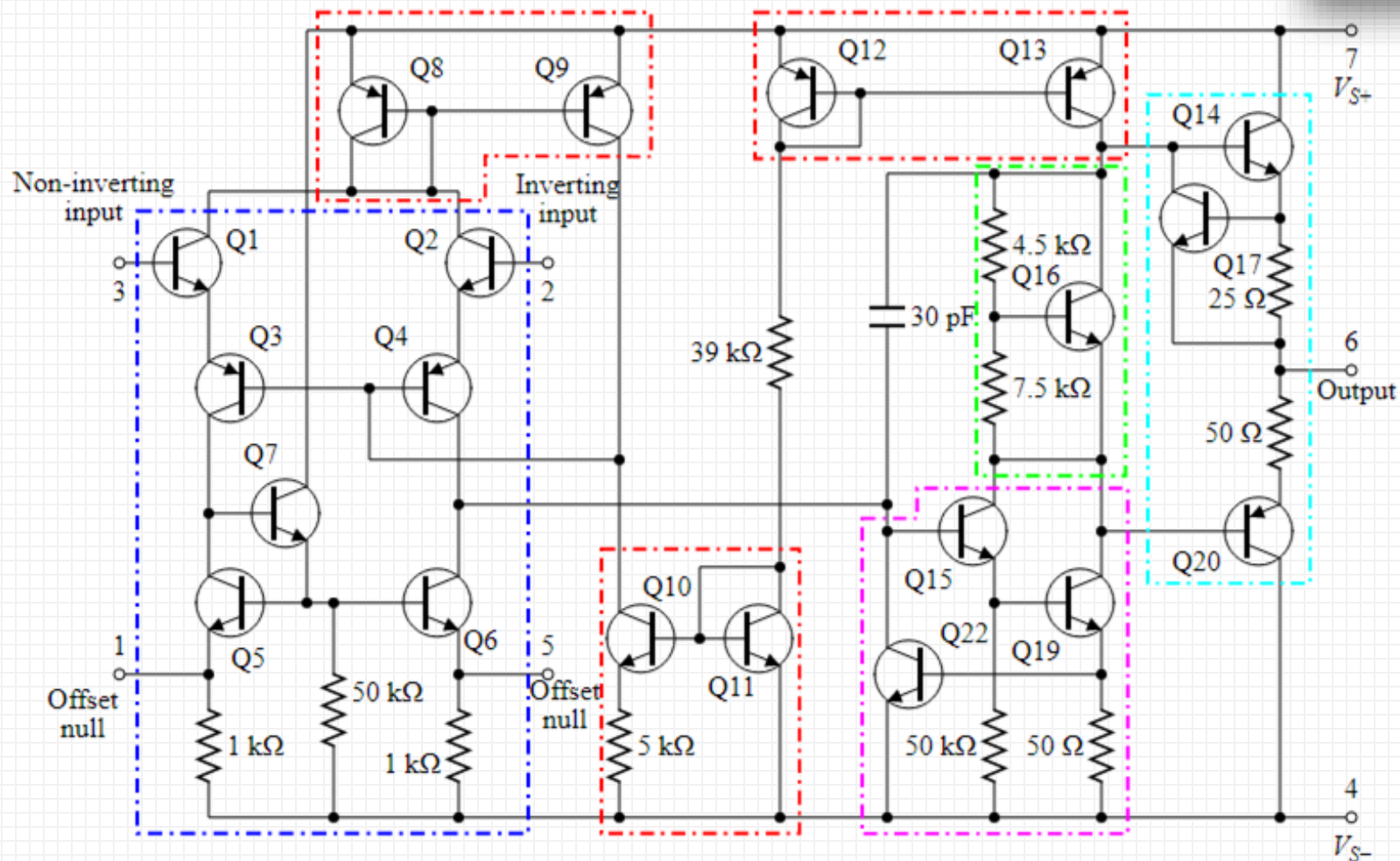
I、 运算放大器 (Operational Amplifier) 及其外特性

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

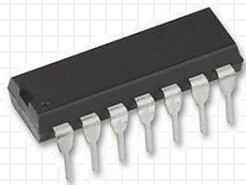


仙童半导体 $\mu\text{a}741$ 运算放大器，
最成功的运算放大器之一。



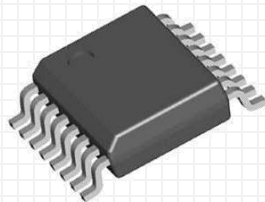


运算放大器是一种包含许多晶体管的**集成电路**,它是获得广泛应用的一种**有源的多端元件**。可用于**直流或低频交流**信号的运算和放大。



DIP

Dual In-line
Package



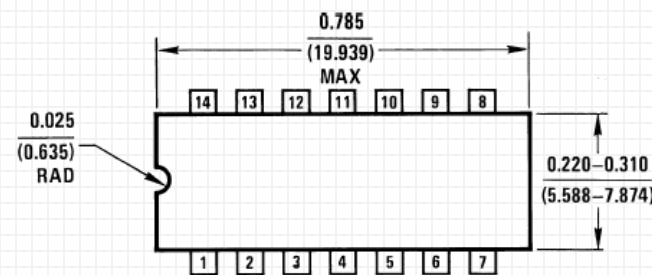
SOP

Small Outline
Package



TO

Transistor
Outline



LM348 Op Amp
 10^2 个晶体管, 120mm^2

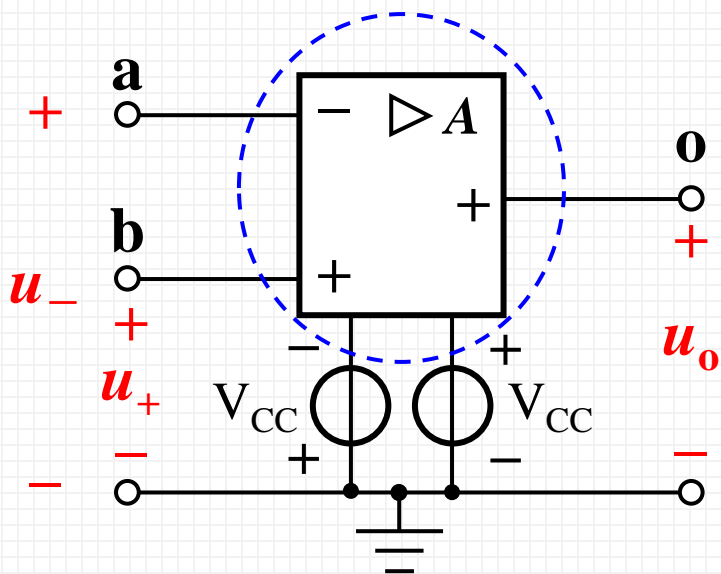


集成度越来越高, 稳定性越来越好

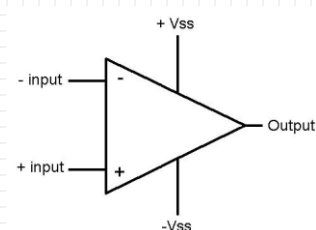
I、运算放大器及其外特性

1、电路符号

广义KCL成立



5端元件



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, $10^5 \sim 10^8$

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：

差分信号

$$u_d = u_+ - u_-$$

分三个区域：

① 线性工作区

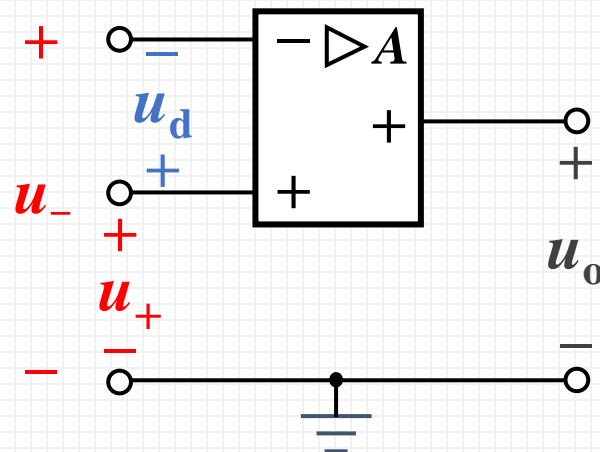
$$|u_d| < U_{ds}, \text{ 则 } u_o = Au_d$$

② 正向饱和区

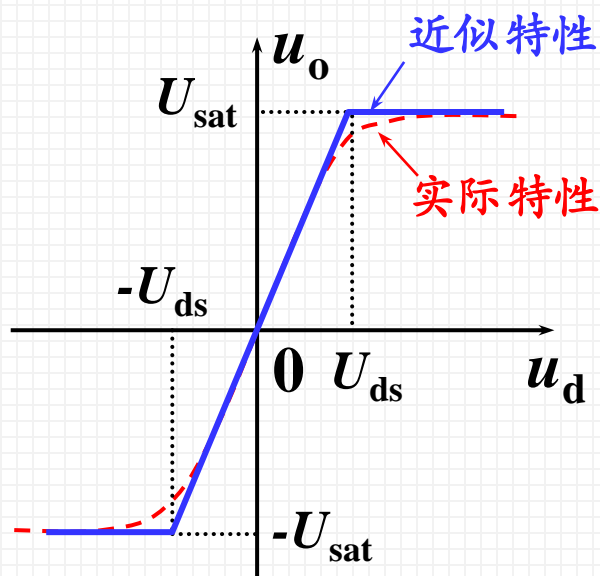
$$u_d > U_{ds}, \text{ 则 } u_o = U_{sat}$$

③ 反向饱和区

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

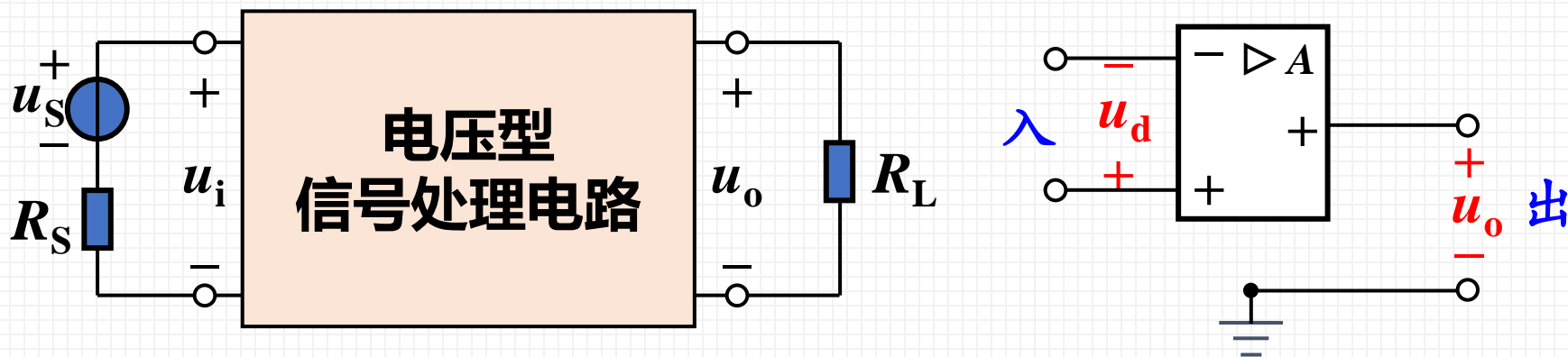


A: 开环放大倍数



本讲大部分讨论Op Amp运行于线性区

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 $A_u = \frac{u_o}{u_i}$

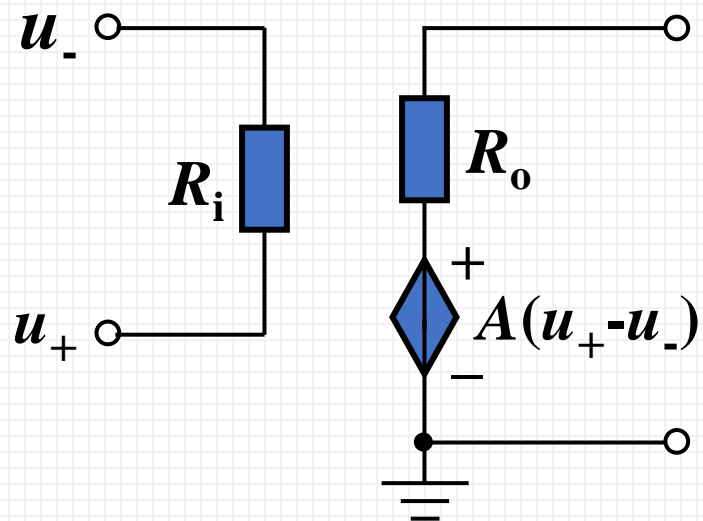
运算放大器的输入电阻: **MΩ级**

输入电阻 R_i R_i 越大约好 \longrightarrow 对信号源的影响小

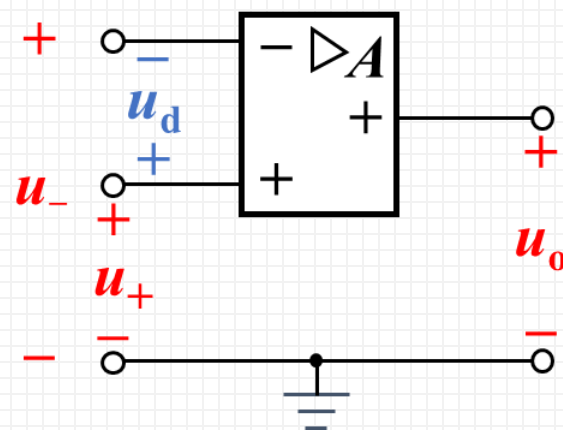
输出电阻 R_o R_o 越小约好 \longrightarrow 带载能力强

运算放大器的输出电阻: **Ω级**

3、电路模型



实际运放的低频等效电路



输入电阻 $M\Omega$

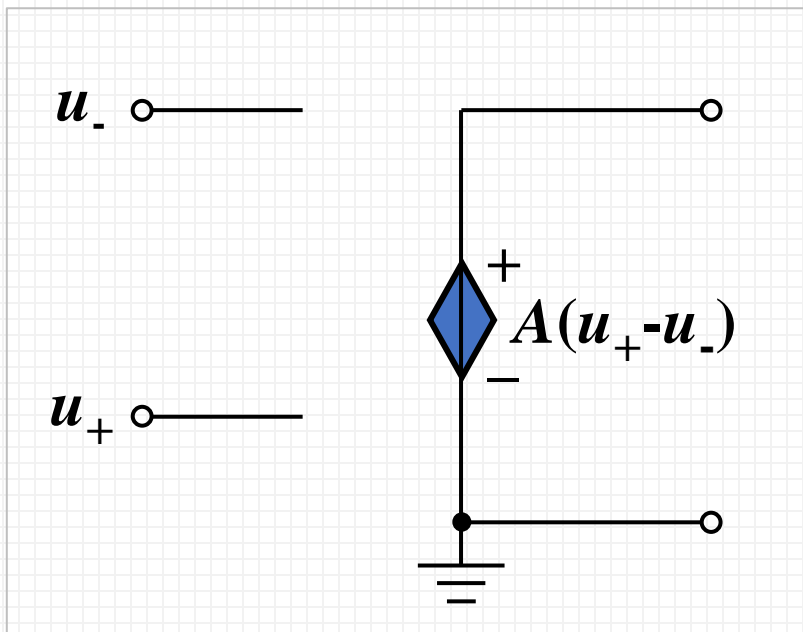
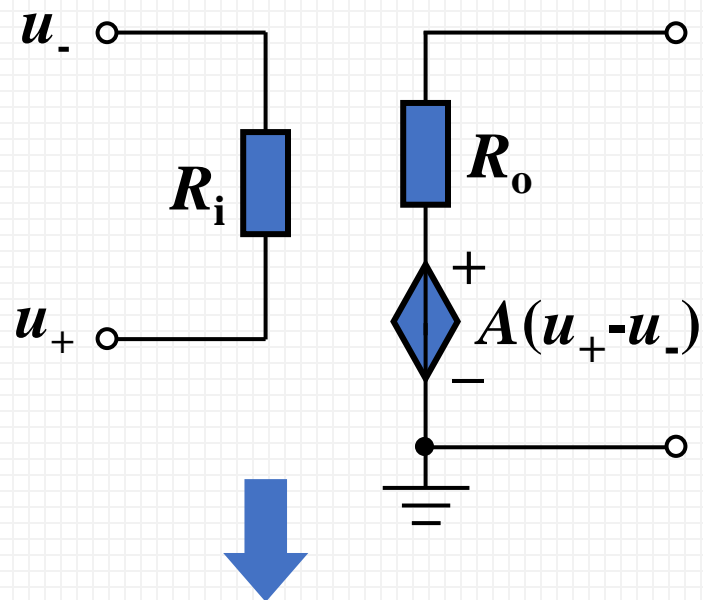
输出电阻 Ω

电压放大 10^6 倍

R_i : $M\Omega$ 量级

R_o : Ω 量级

A : 10^6 量级



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**

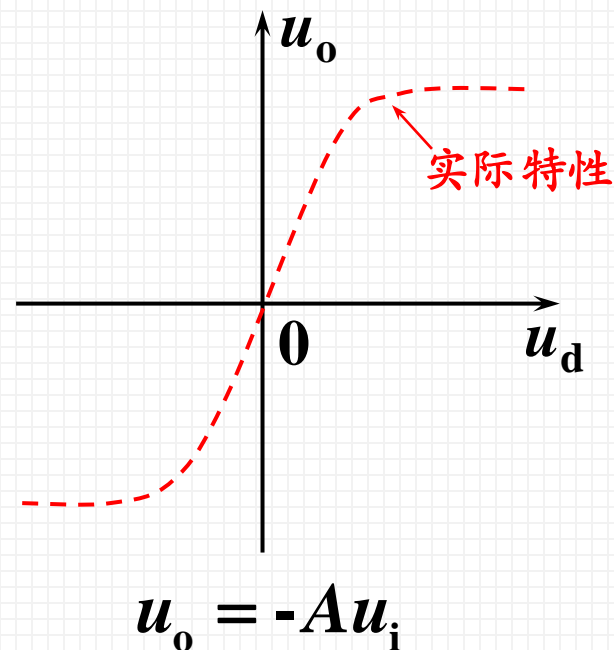
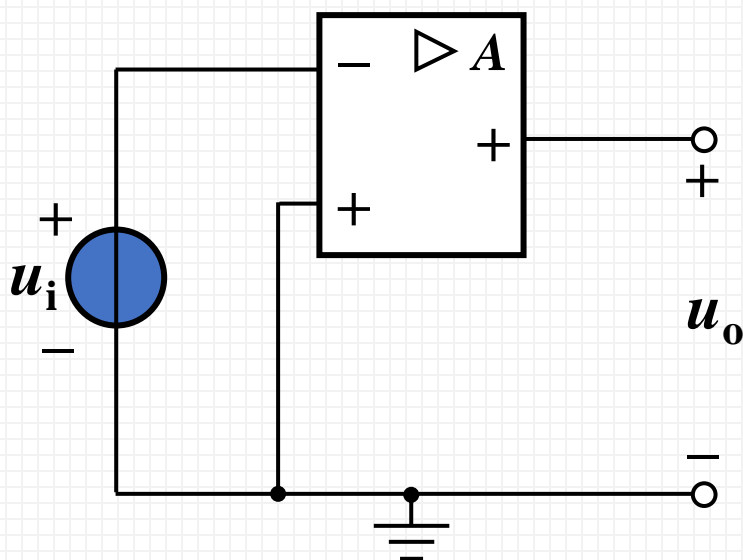
Op Amp输入电阻 **M Ω** 量级

输出电阻 **Ω** 量级



用运放直接提供信号放大是否可行？

如何让集成运放“有用”？



问题：

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

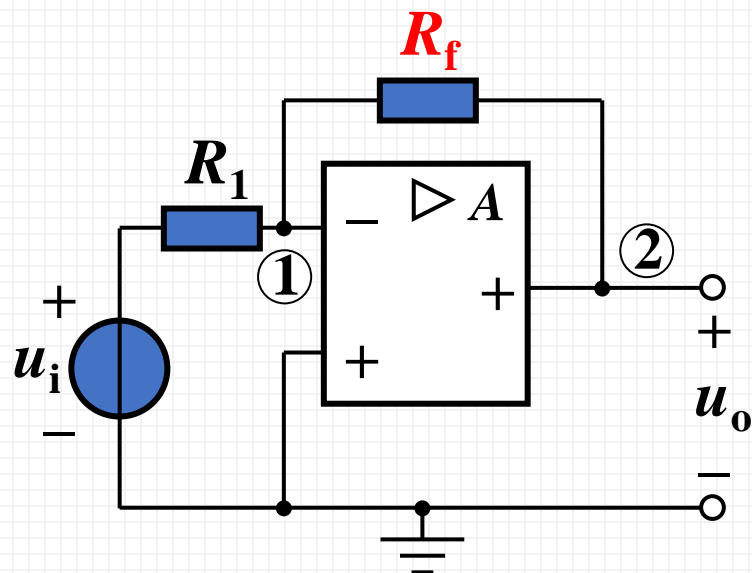
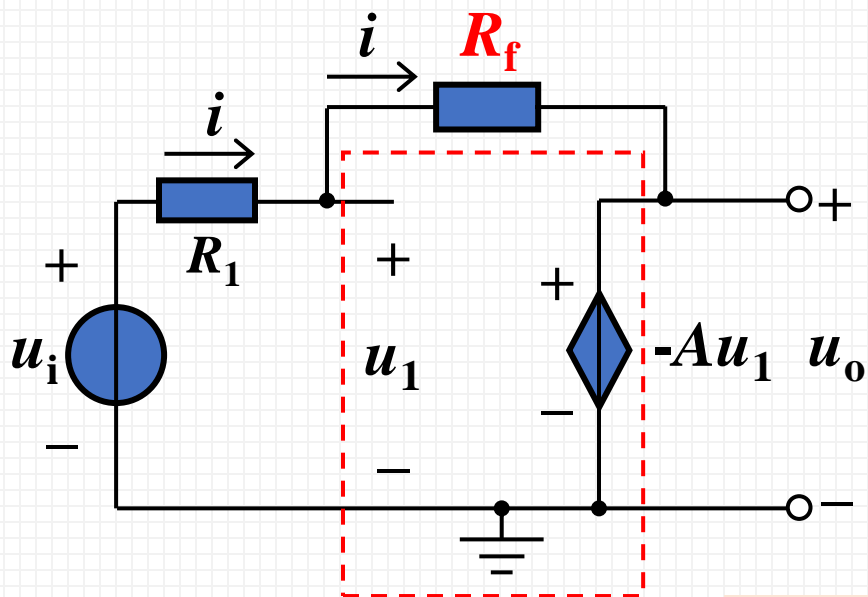
(2) 不同Op Amp的A差别很大 \longleftrightarrow

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

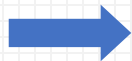
设计好的放大器只能在某个温度下使用。

如果我们将**输出**的一部分引回到**输入**（反馈 feedback）？



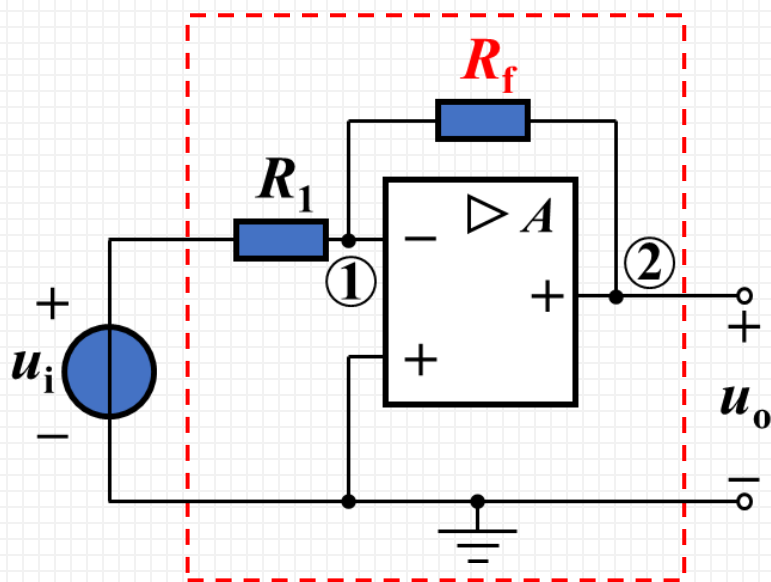
列几个方程？

$$\left\{ \begin{array}{l} i = \frac{u_i - u_1}{R_1} \\ i = \frac{u_1 - u_o}{R_f} \\ -Au_1 = u_o \end{array} \right.$$



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

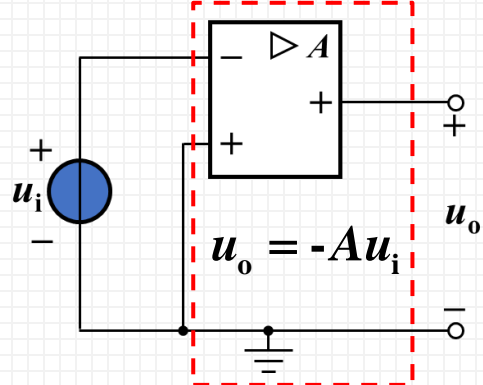
新的信号处理电路



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



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



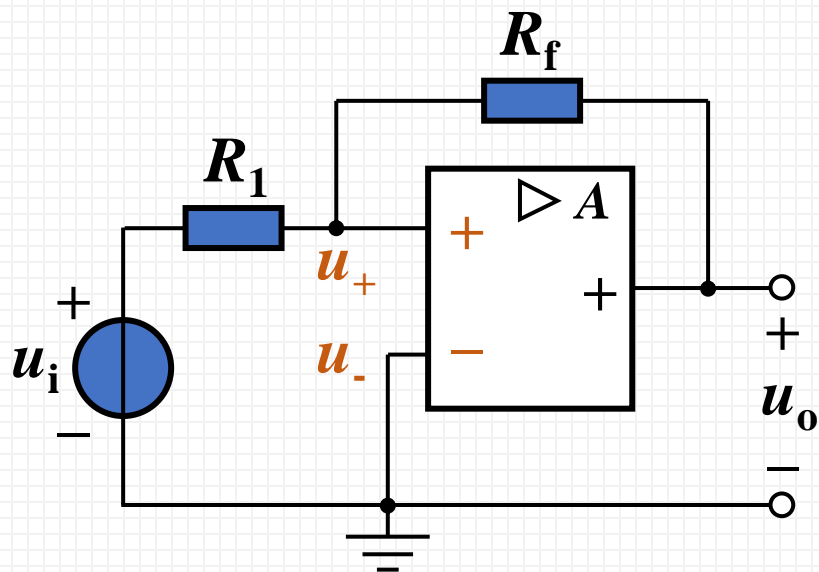
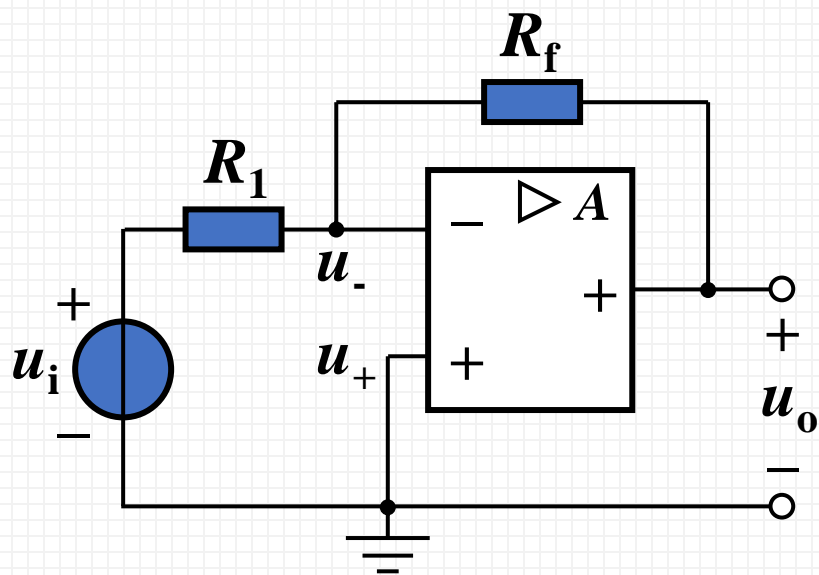
工程观点

A 充分大

闭环放大倍数

原有的问题:

- (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。 ✓
- (4) 引入负反馈后，对噪声还有抑制作用。



负反馈的噪声抑制作用

输出端有微小正扰动(其余不变)



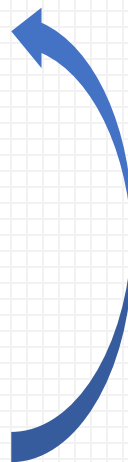
u_- 端有微小正扰动



$u_+ - u_-$ 变小了



输出输出值变小了



试分析正反馈?



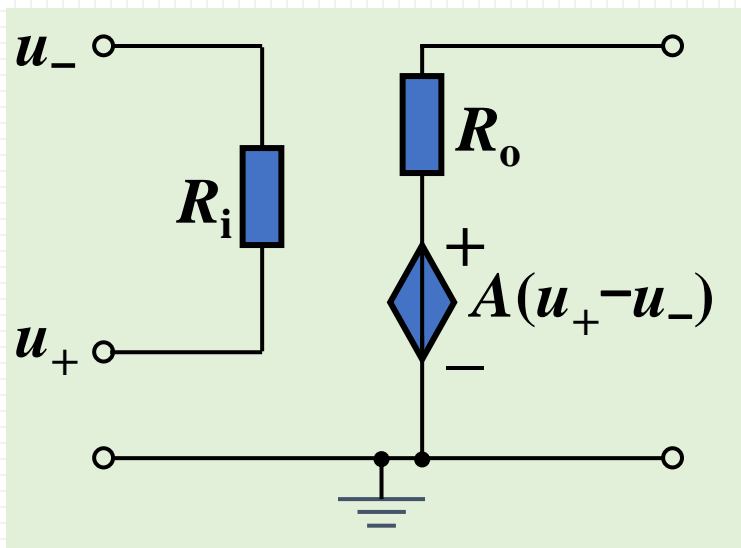
小结

❖ 实际应用中，如果

- 运放的 R_i 为 $M\Omega$ 量级， R_o 为 Ω 量级， A 为 M 量级
- 外接电阻为 $k\Omega$ 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

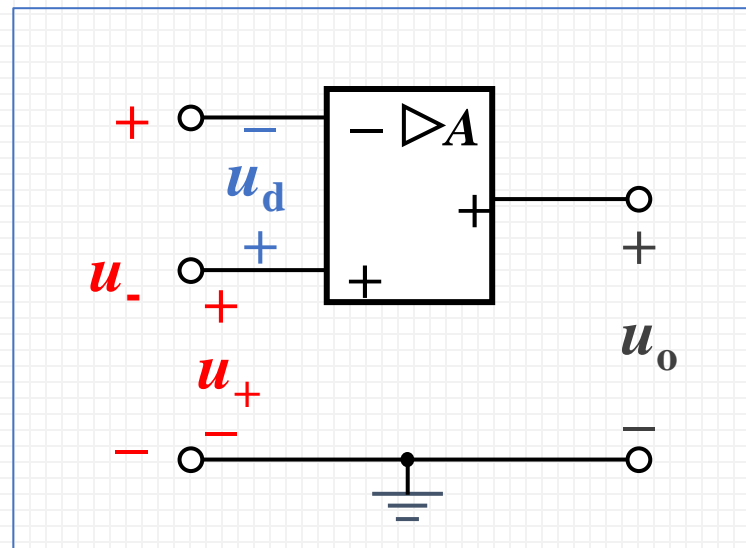


k Ω 级外接电阻

Op Amp输入电阻M Ω 量级
输出电阻 Ω 量级

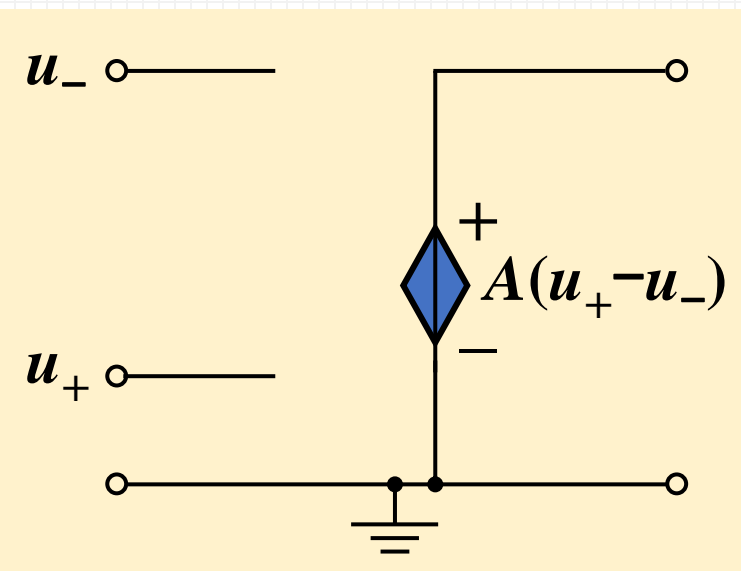
工程观点

抽象观点



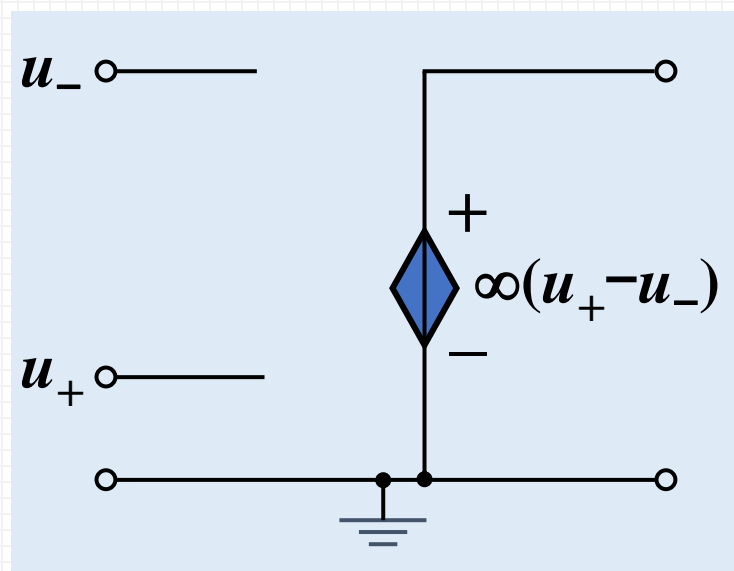
运算放大器

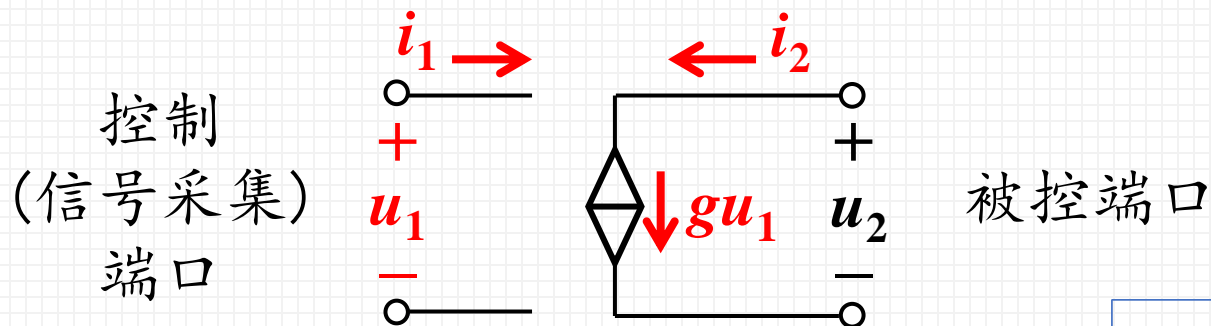
理想运算放大器



$R_i \rightarrow \infty$
 $R_o \rightarrow 0$
 $A \rightarrow \infty$

理想建模
观点

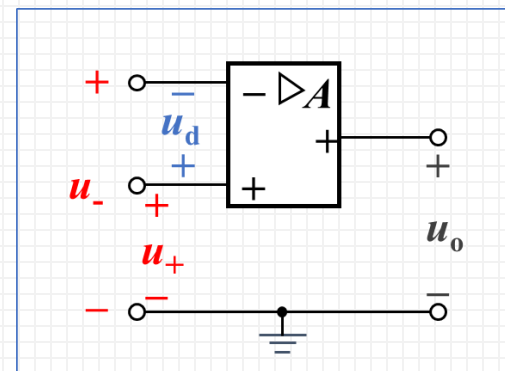




为什么要有一个开路的控制端口？

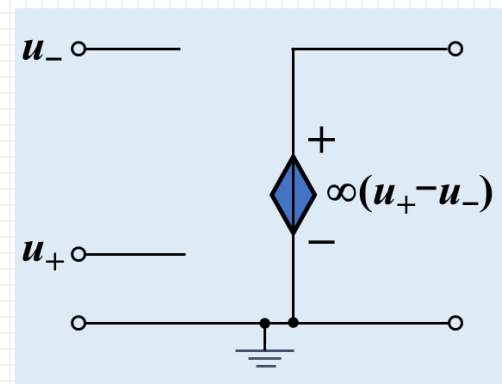
希望对电路进行无损的电压采样

L3等效变换讨论



运算放大器

理想运算放大器

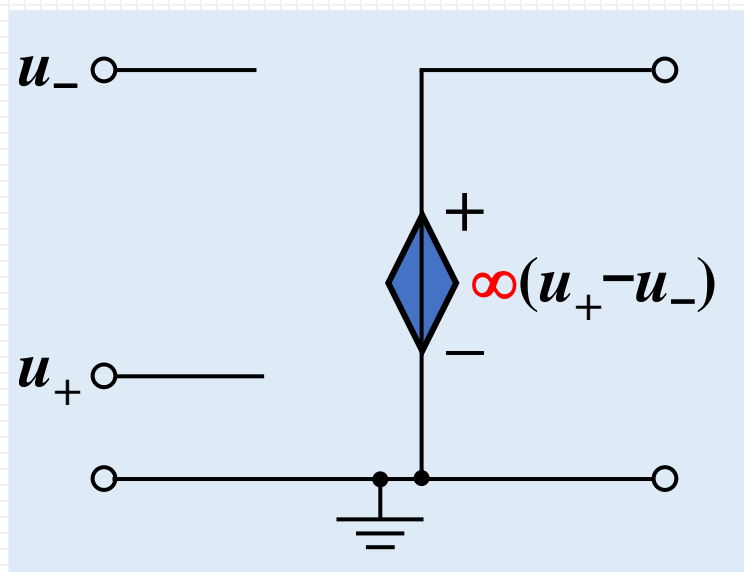


怎么才能有一个开路的控制端口？

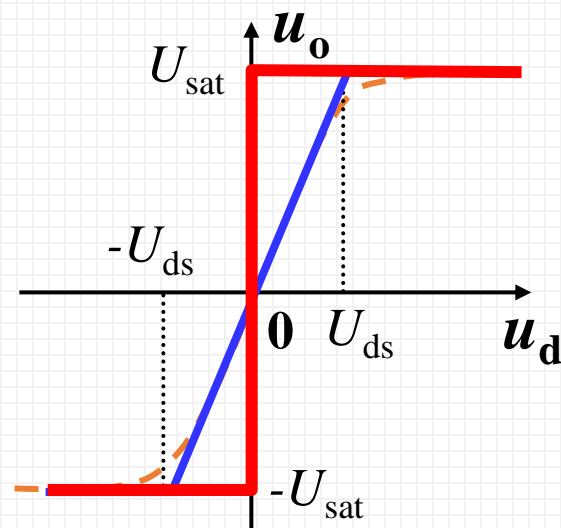
A1 MOSFET、L7运算放大器



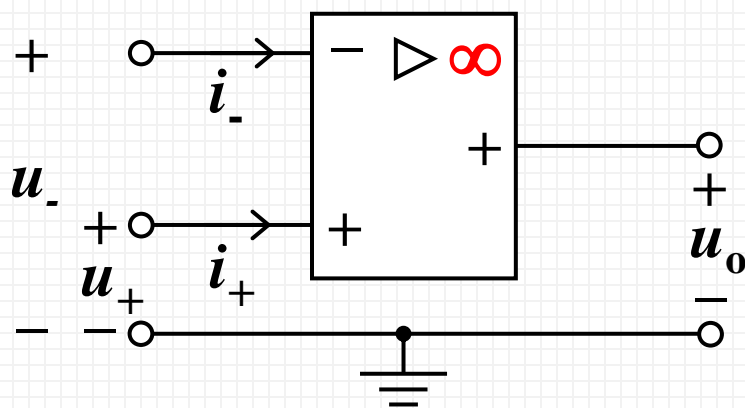
II、理想运算放大器 (*Ideal Op Amp*) 及其外特性



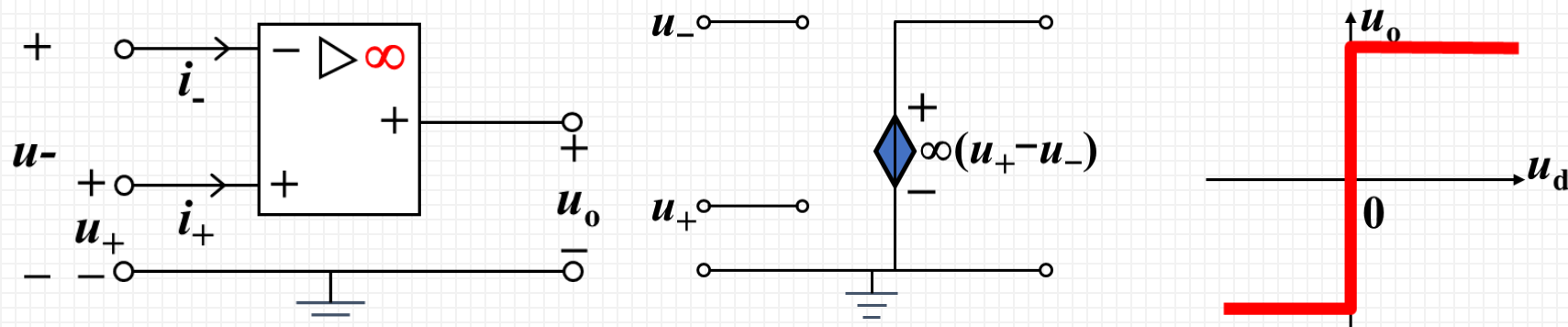
理想运放的等效电路



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，当然实际上当然没有短路 (**虚**)

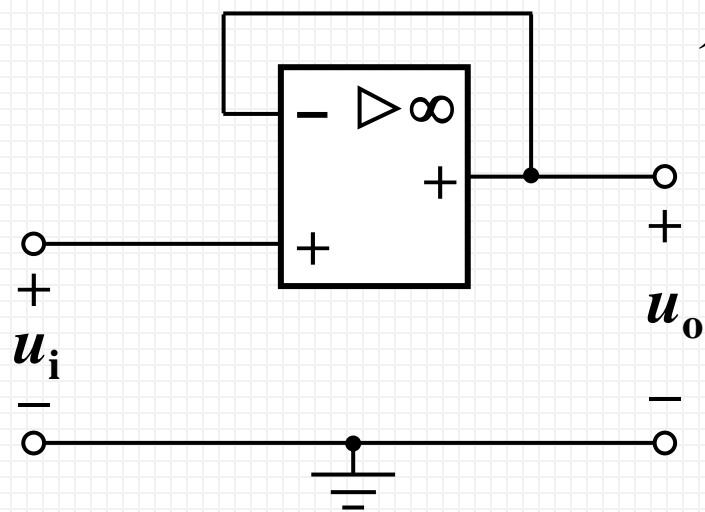
② $R_i = \infty$

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**)

III、负反馈理想运算放大器电路分析

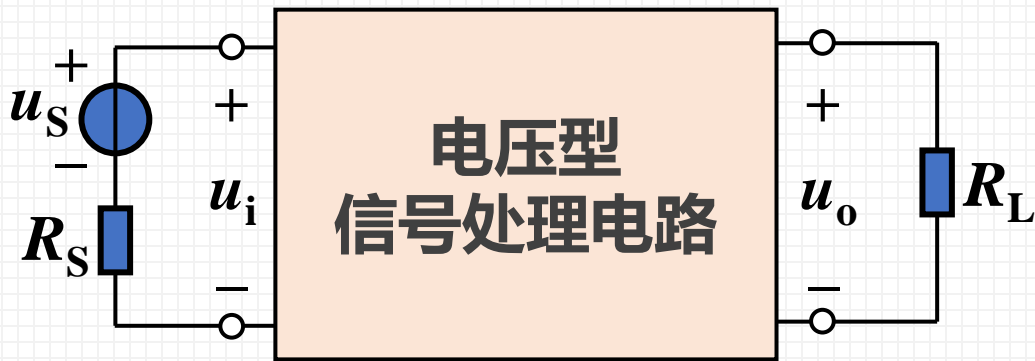
1、电压跟随器



本讲主要讨论Op Amp运行于线性区

$$u_o = u_i$$

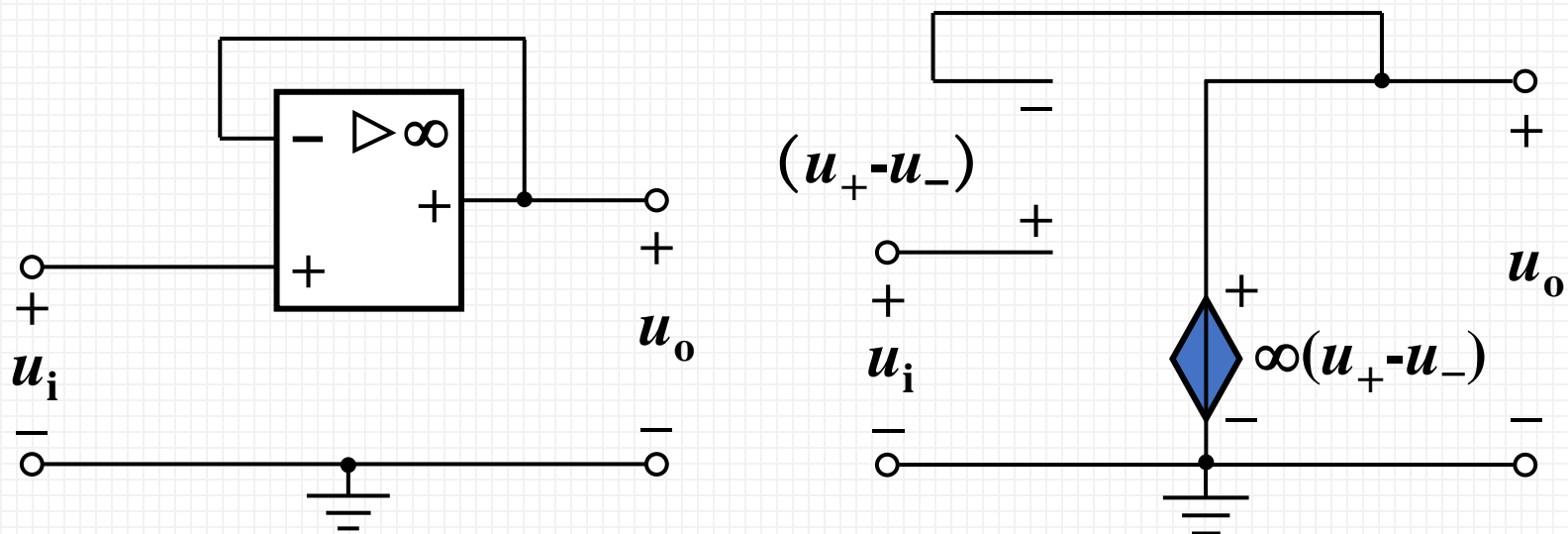
$$A_u = 1$$



电压放大倍数

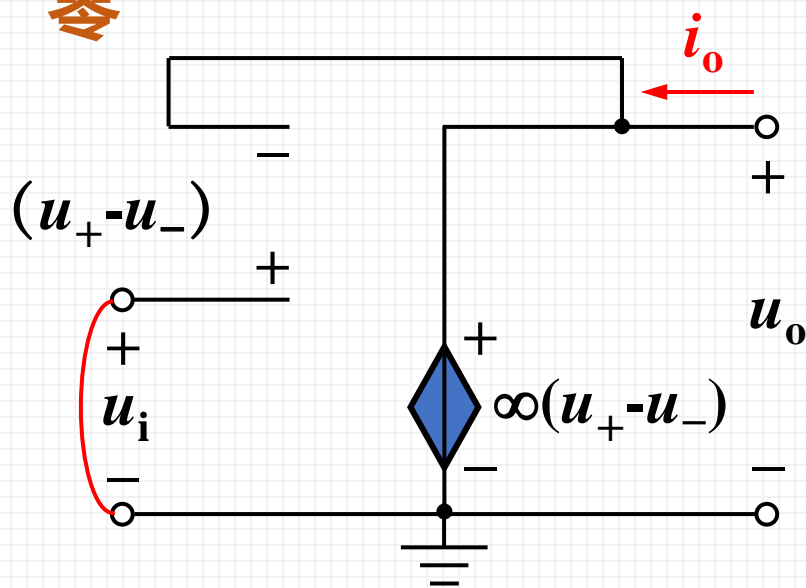
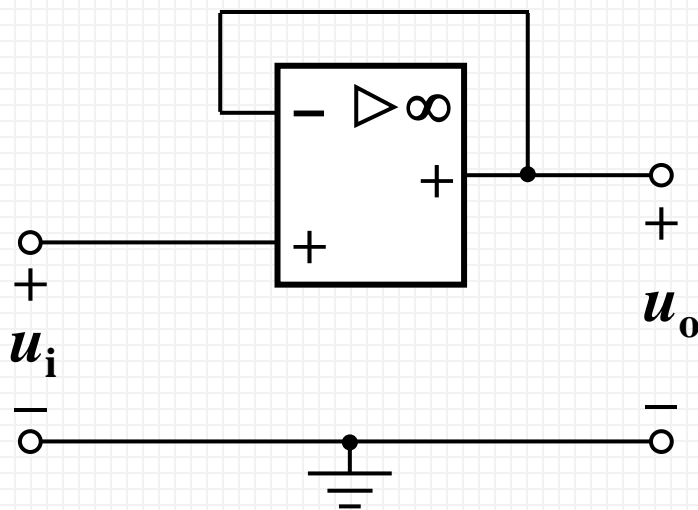
输入电阻

输出电阻



输入电阻: **无穷大**

输出电阻：零

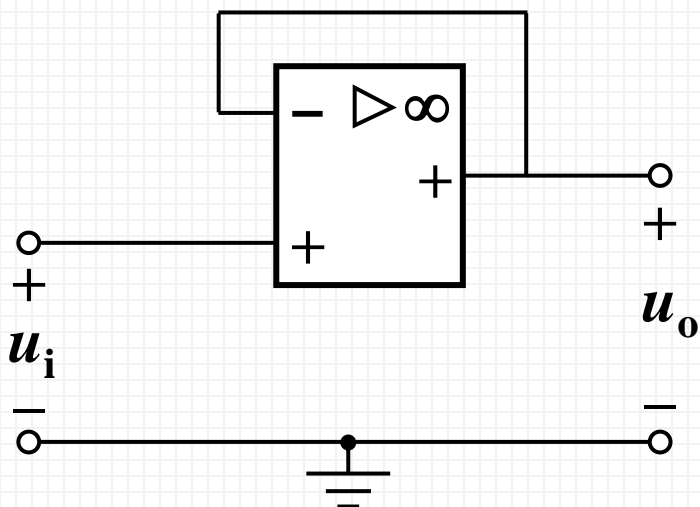


加压求流？

$$u_o = \infty(u_+ - u_-) = \infty(-u_o) \quad ?$$

加流求压？

$$u_o = \infty(u_+ - u_-) = \infty(-u_o) \Rightarrow u_o = 0 \Rightarrow R_o = \frac{u_o}{i_o} = 0$$

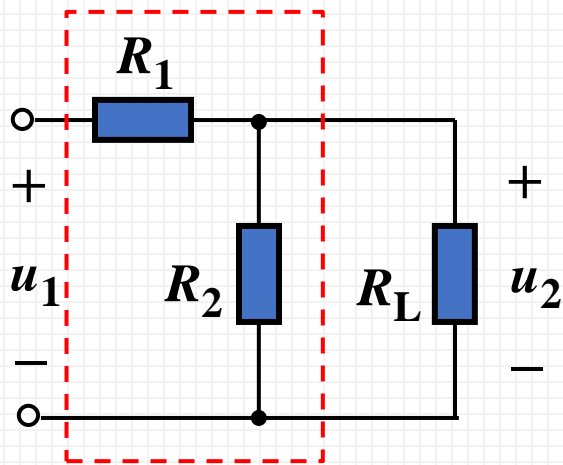


一个

- ✓ 电压放大倍数为1
- ✓ 输入电阻为无穷大
- ✓ 输出电阻为0

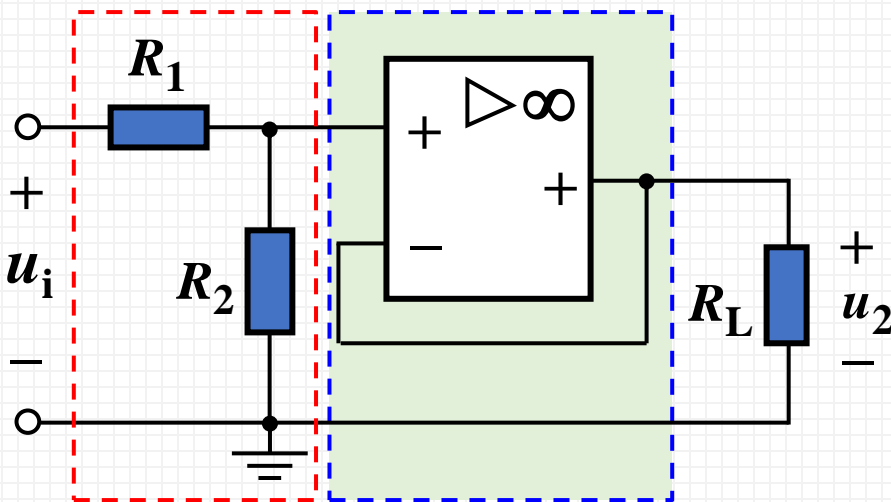
的电压信号处理电路

有什么用？



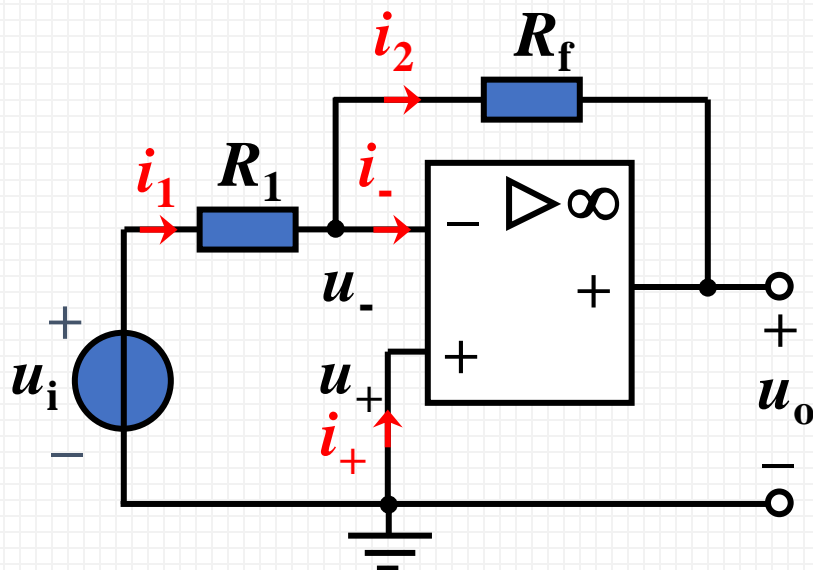
电压型信号处理电路

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



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

2、反相比例放大器



“虚短” $u_+ = u_- = 0$

“虚断” $i_- = 0, i_+ = 0, i_2 = i_1$

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

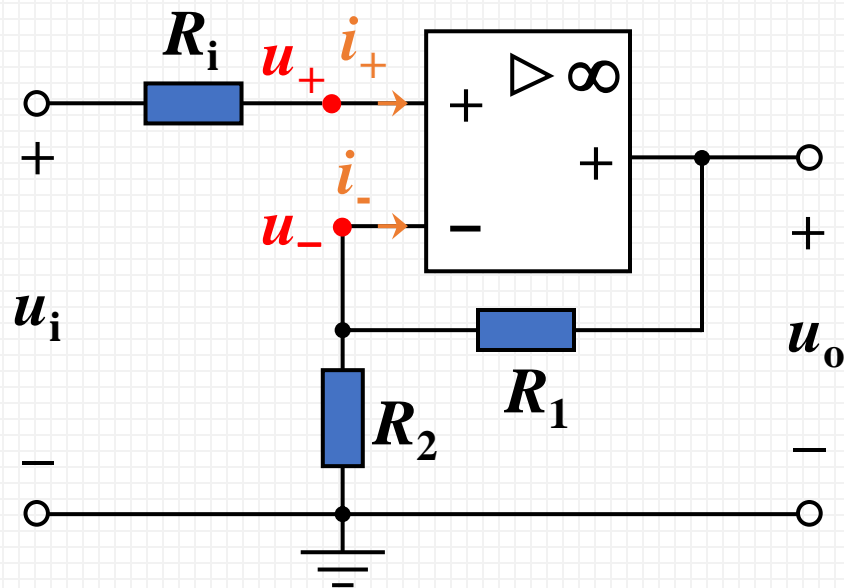
$$\frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_f}$$

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

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

3、同相比例放大器



虚断

$$i_+ = i_- = 0$$

虚短

$$u_+ = u_- = u_i$$

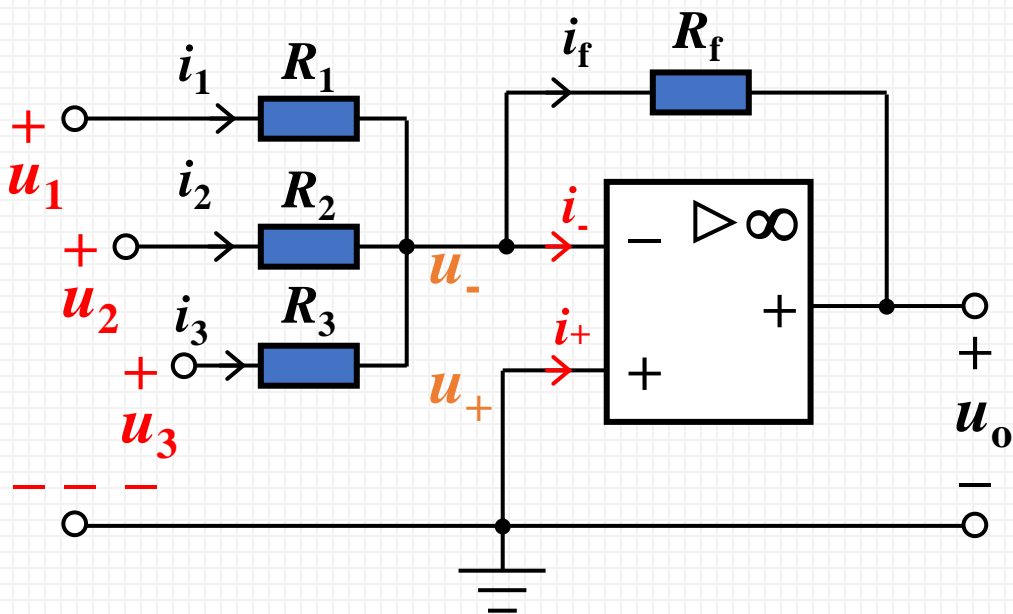
分压器关系：

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

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

负反馈电路中，信号接入同相输入端，则输出输入同相

4、反相加法器



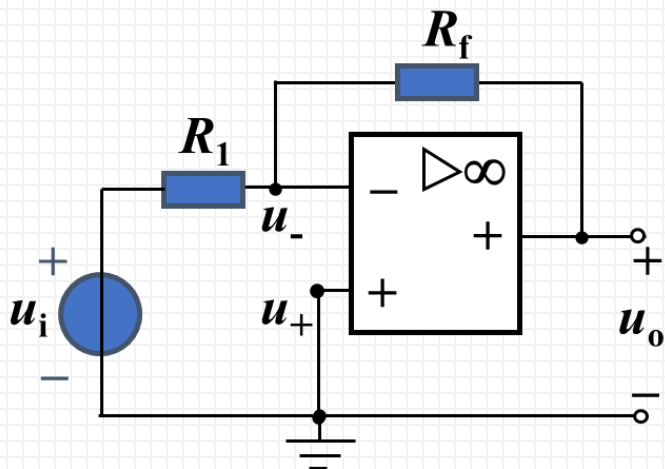
$$\begin{cases} u_- = u_+ = 0 \\ i_- = i_+ = 0 \end{cases}$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_f$$

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

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

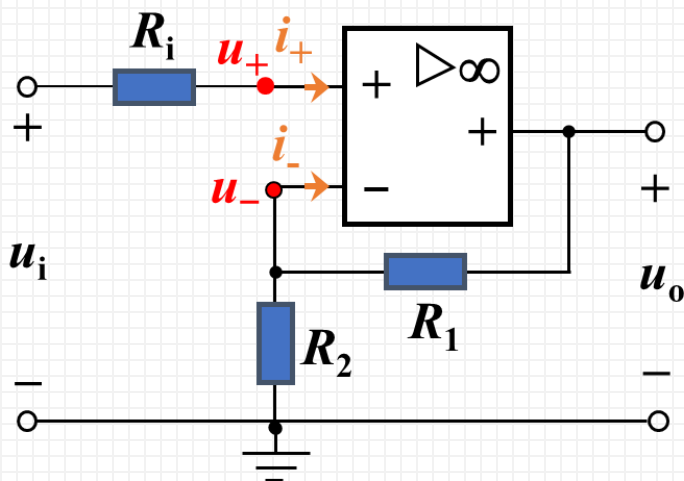
5、减法器



信号接入反相输入端
则输出输入反相

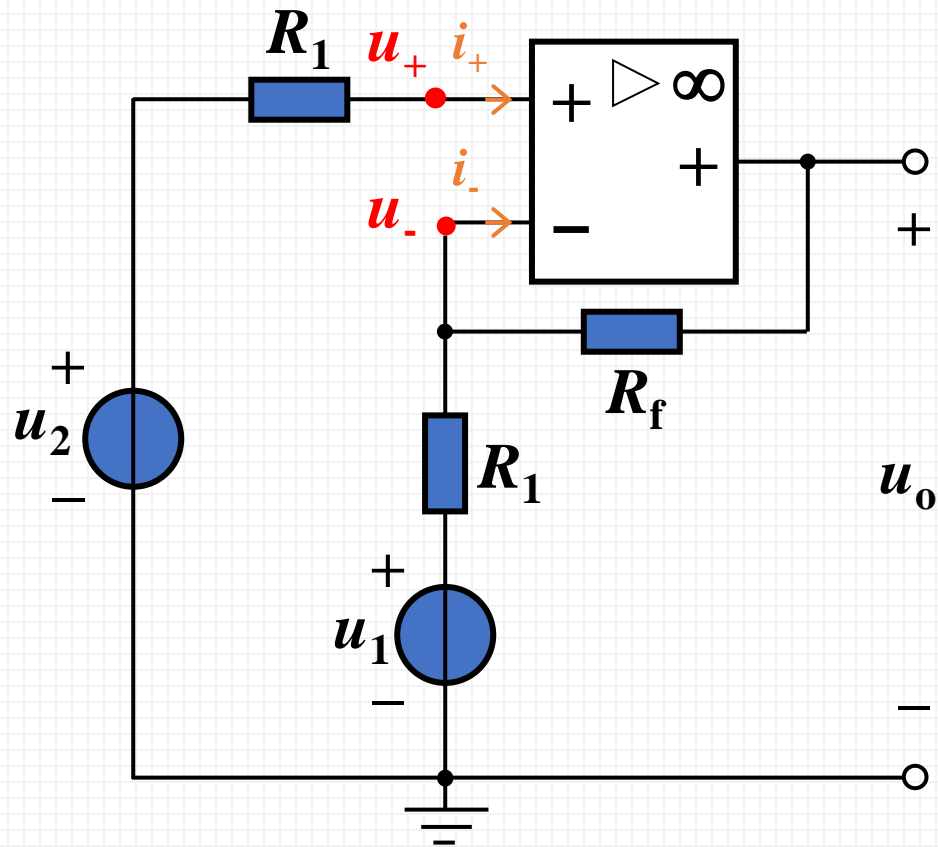
$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

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

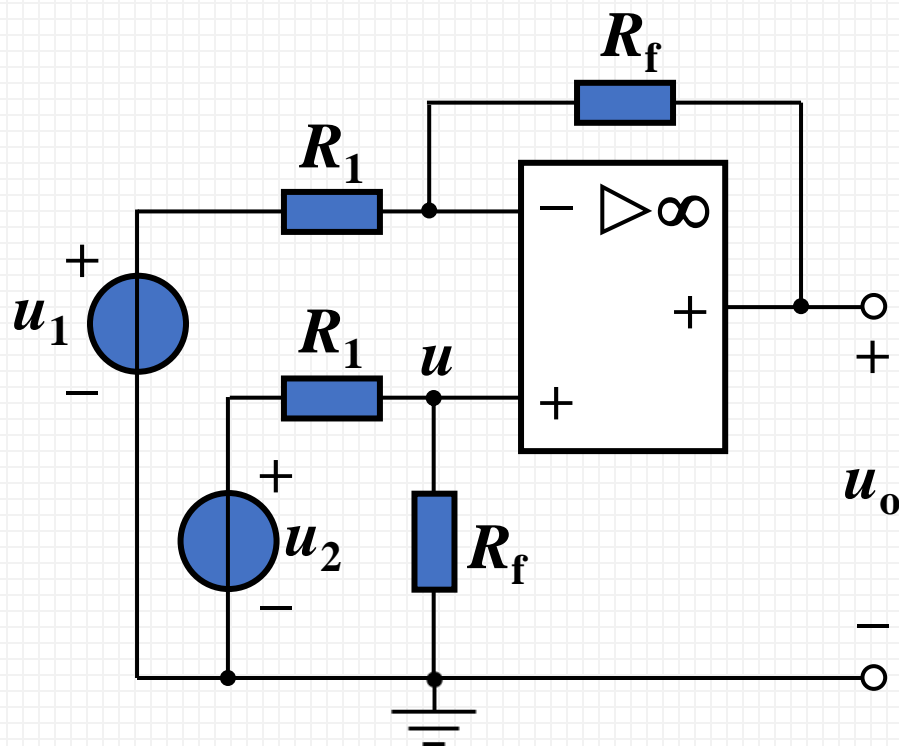
$$\frac{u_2 - u_1}{R_1} = \frac{u_o - u_2}{R_f}$$



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

怎么改?

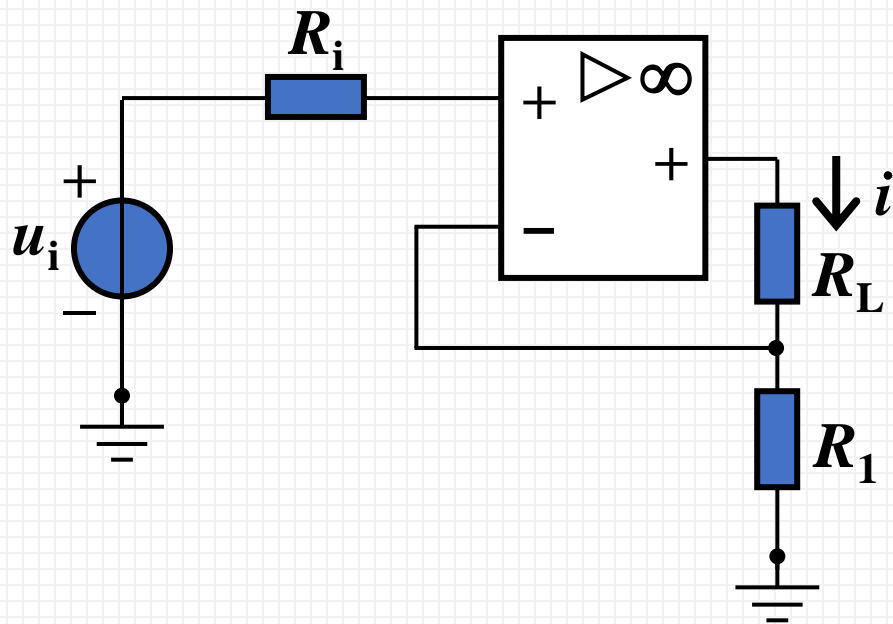
6、改进的减法器



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

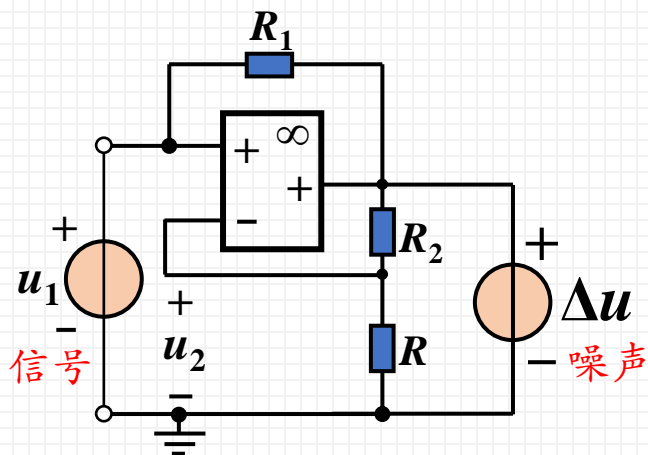
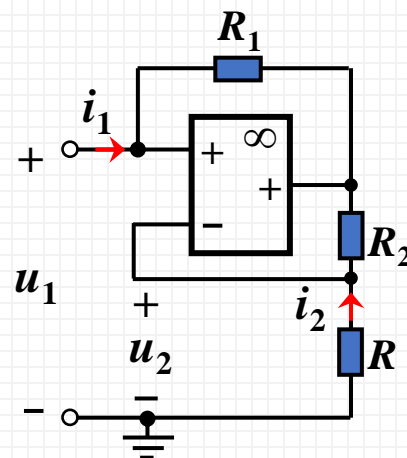


$$i = \frac{u_i}{R_1}$$

流过负载 R_L 的电流与其阻值无关

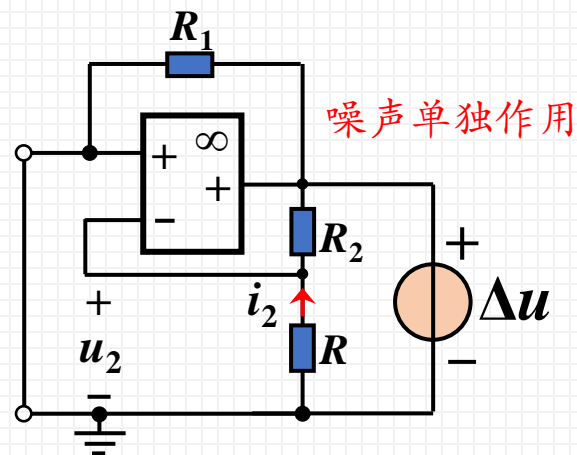
叠加定理的应用：运放的反馈深度分析

问题：这个电路里有负反馈吗？



$$u_+ = 0$$

$$u_- = \frac{R}{R_2 + R} \Delta u$$



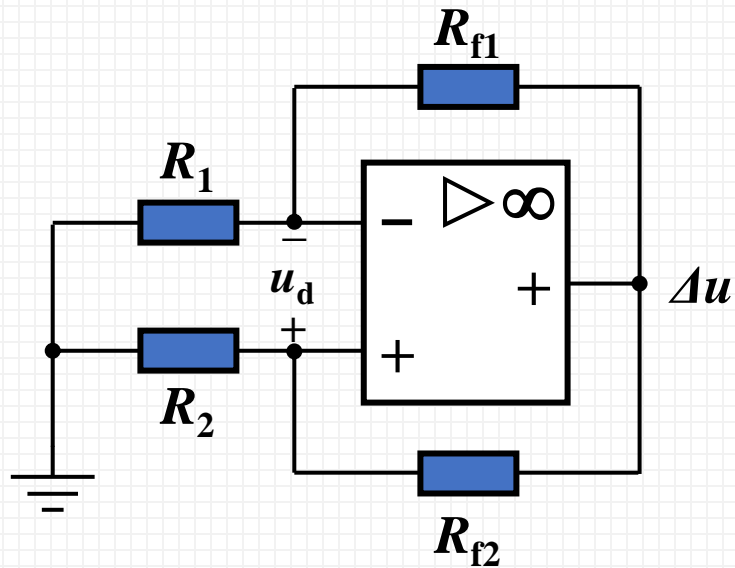
有负反馈



更一般的情况：

$$u_- = \frac{R_1}{R_{f1} + R_1} \Delta u$$

$$u_+ = \frac{R_2}{R_{f2} + R_2} \Delta u$$



噪声单独作用

$$u_+ > u_-$$

正反馈

$$u_+ < u_-$$

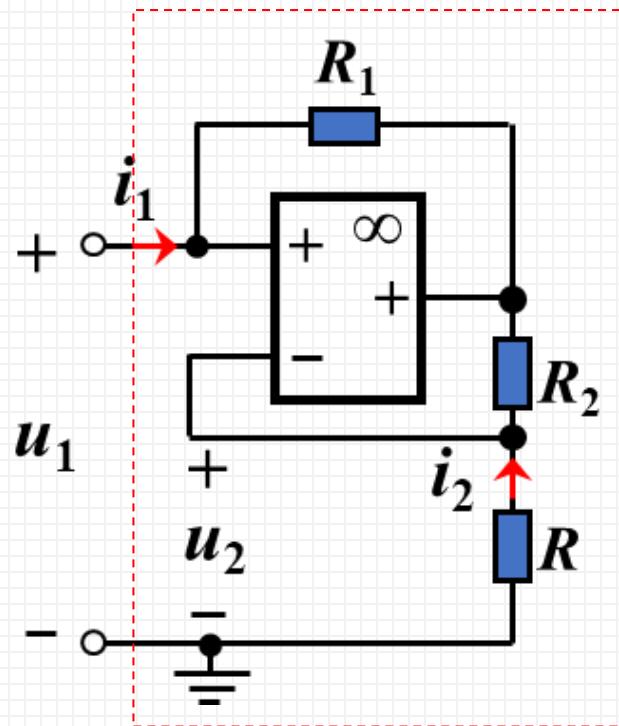
负反馈

8、负电阻

$$u_2 = -Ri_2 \quad \text{欧姆定律}$$

$$u_1 = u_2 \quad \text{虚短}$$

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



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