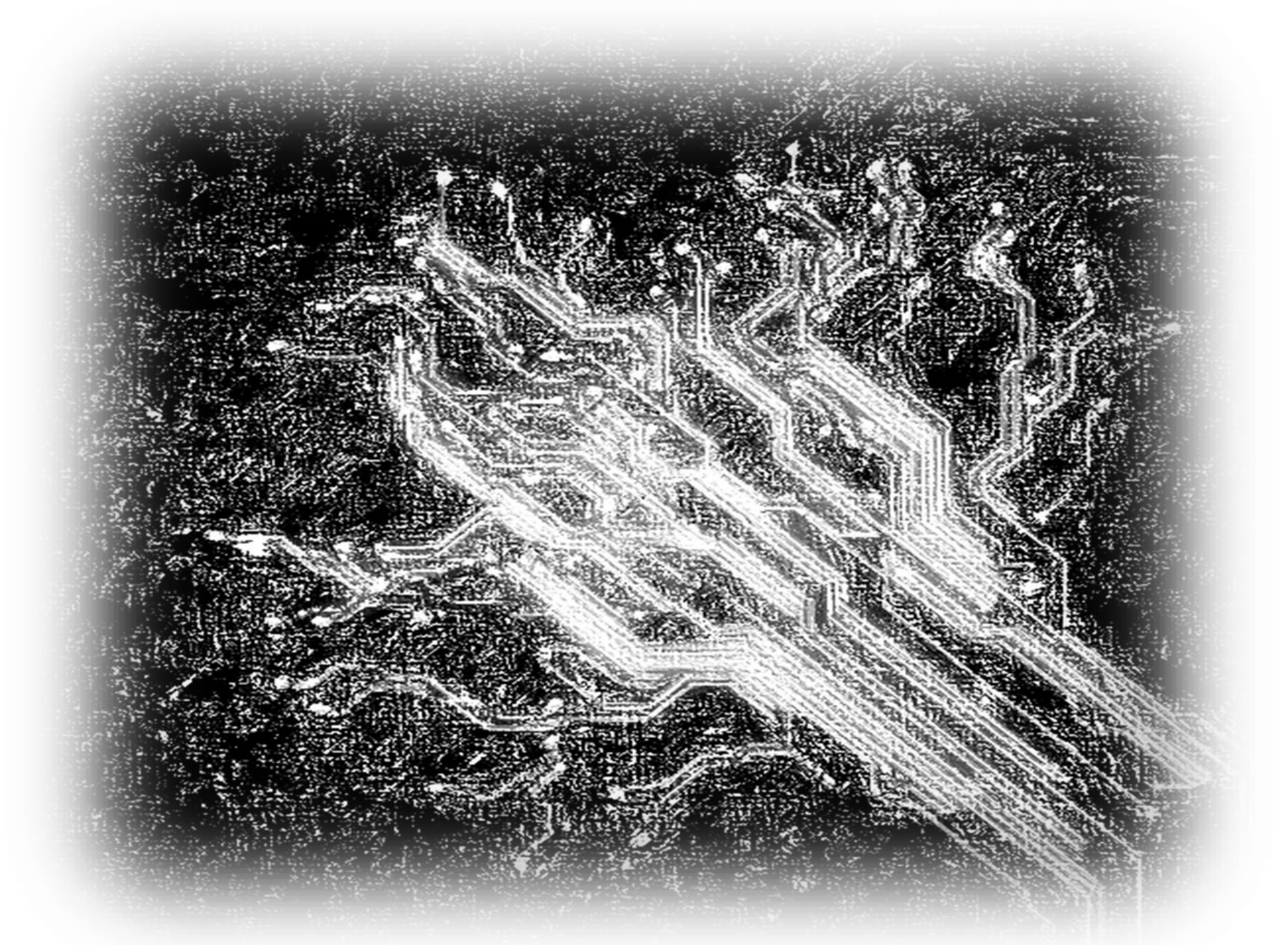


何松柏

电子工程学院

电子电路基础

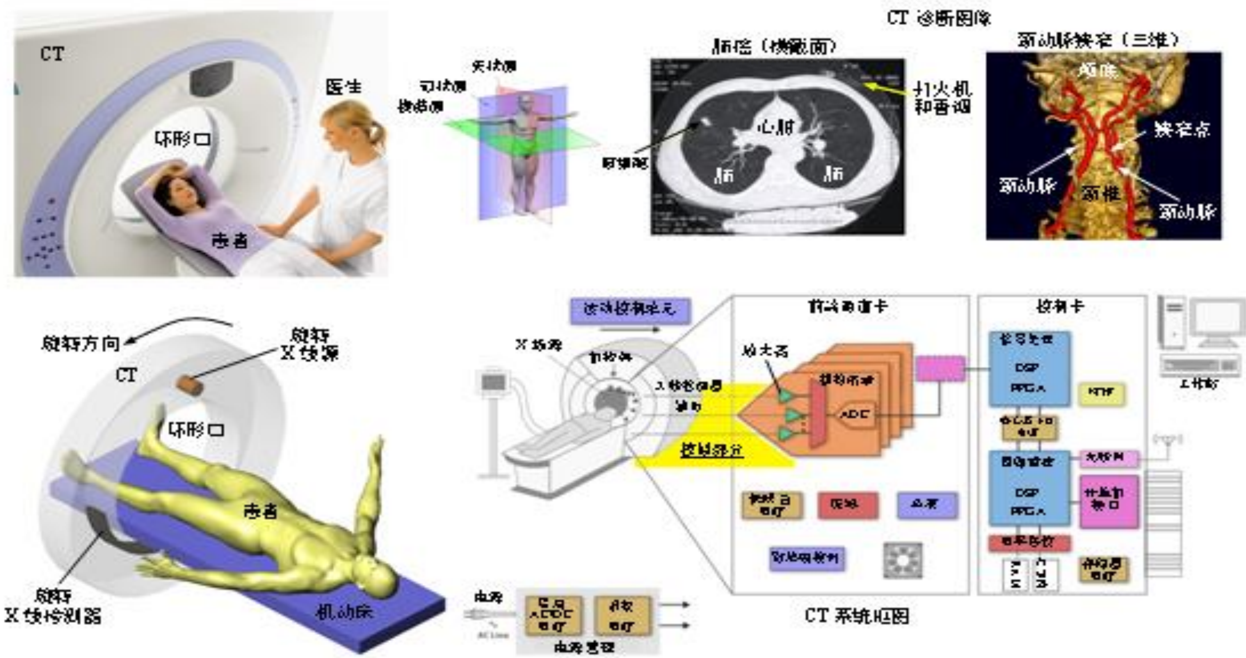
Analog Circuits

sbhe@uestc.edu.cn

UESTC

理想运放及应用

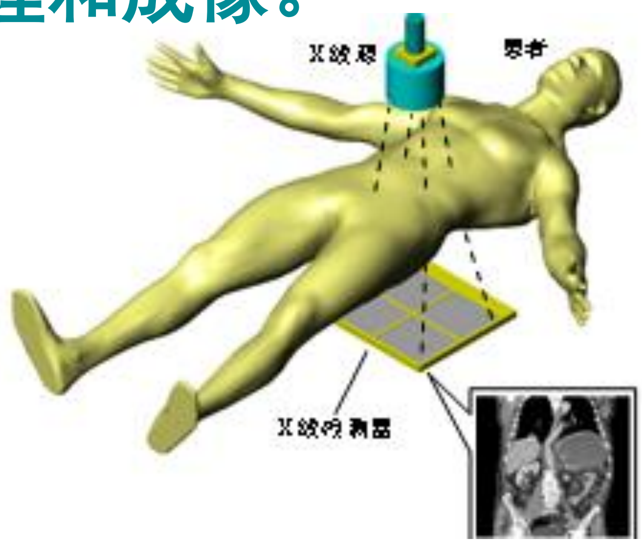
放大器的瘦身革命---运算放大器

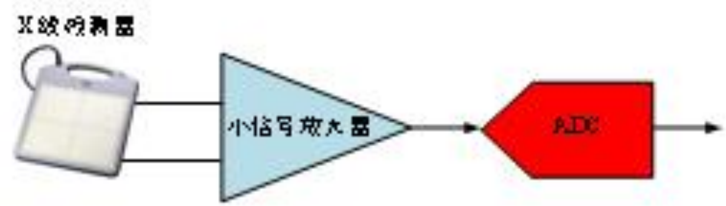


实例—CT诊断

理想运放及应用

从X线源发射的X线剂量（强度）不能过大，。经过人体的吸收后，实际到达X线检测器的X线信号非常微弱，必需经过放大器的放大后才能由后续电路进行处理和成像。

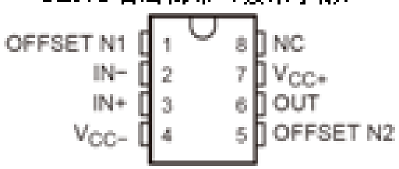




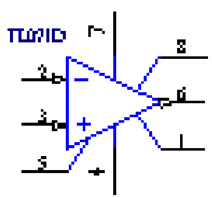
理想运放及应用

TL071 运算放大器外观　　一元硬币

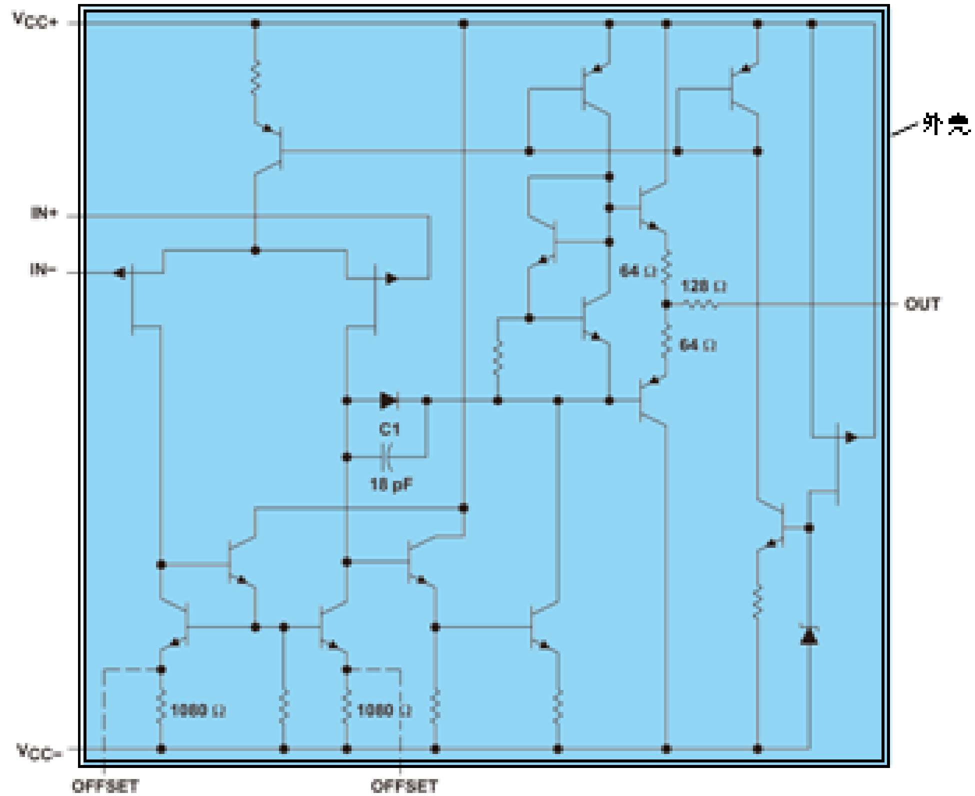
TL071 管脚排布（技术手册）



TL071 电路符号

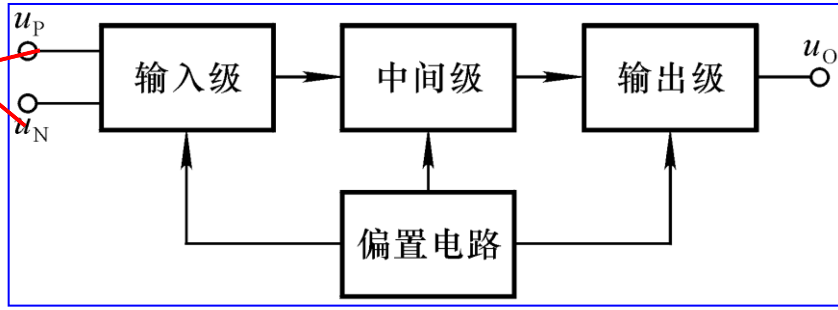


TL071 运算放大器内部电路

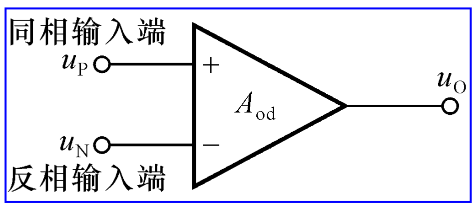


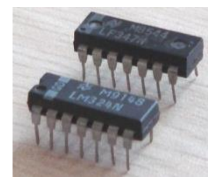
集成运放电路的组成及各部分的功能

两个输入端



一个输出端





偏置电路： 向各放大级提供偏置电流；常用***<u>电流源电路</u>***

输 入 级： 应尽量减小零点漂移；　常用***<u>差分放大电路</u>***

中 间 级： 主要承担电压放大作用；常用共射或共源放大电路

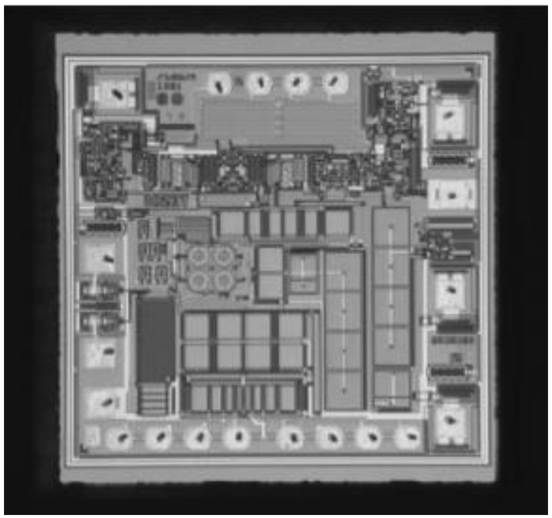
输 出 级： 应有较强的带负载能力；常用***<u>互补输出功放电路</u>***

sbhe@uestc.edu.cn

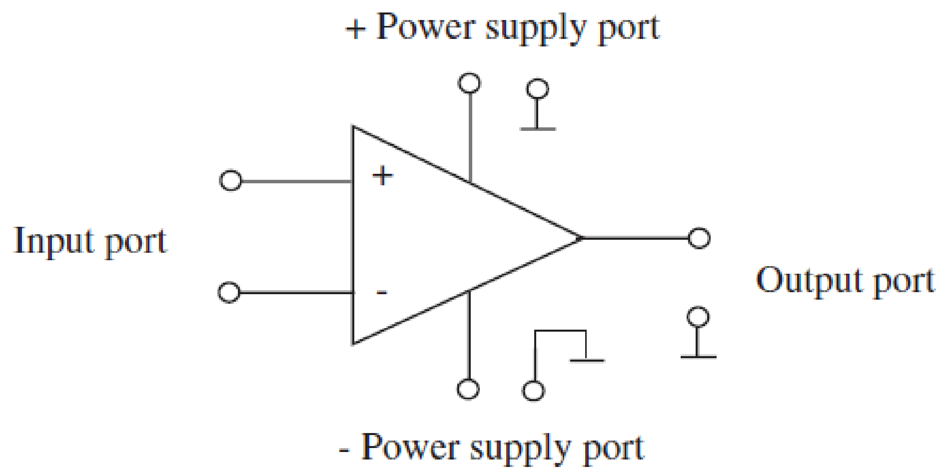
理想运放及应用

- 理想运算放大器基本特性
- 运算放大器负反馈应用
- 运算放大器正反馈应用

理想运算放大器基本特性

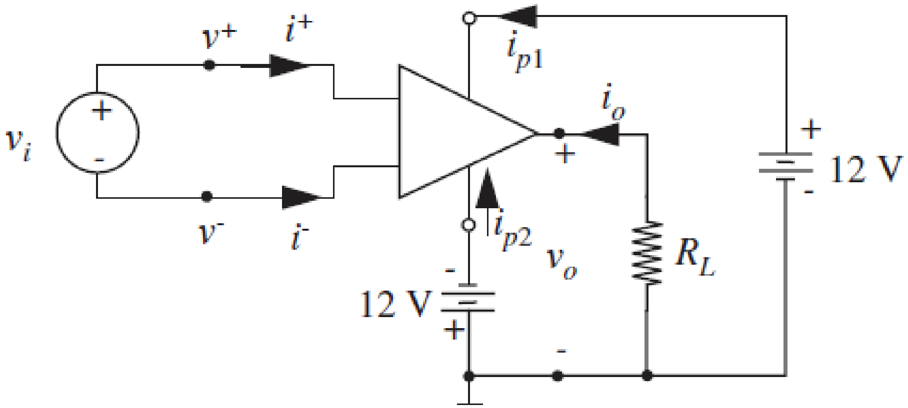


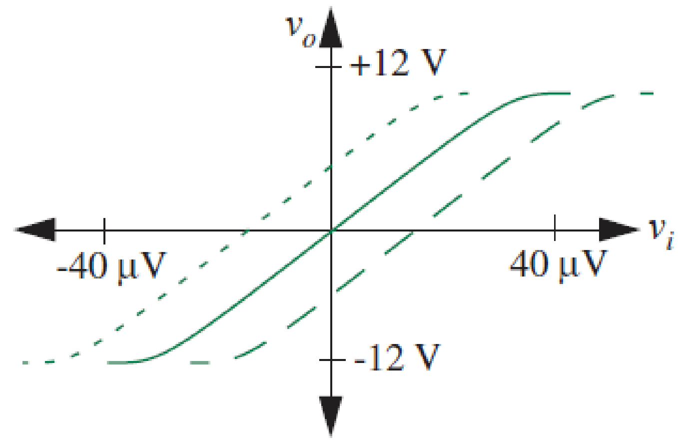
芯片内部照片

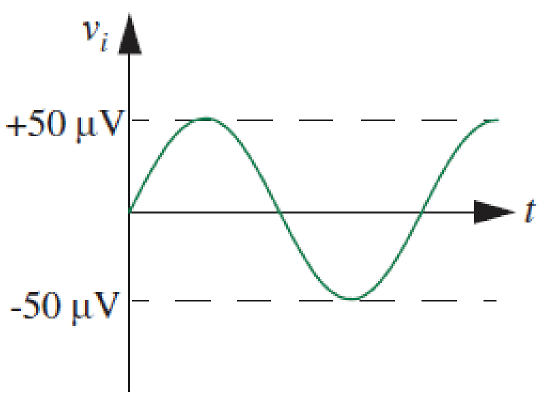


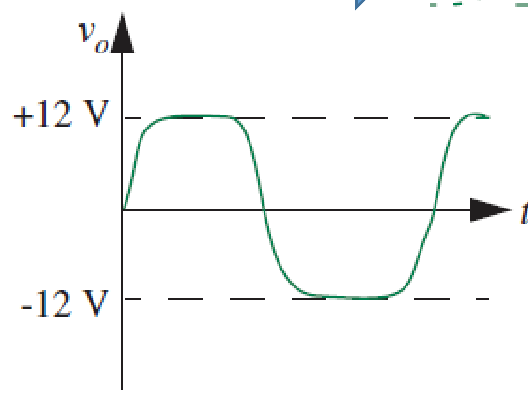
四个端口

理想运算放大器基本特性







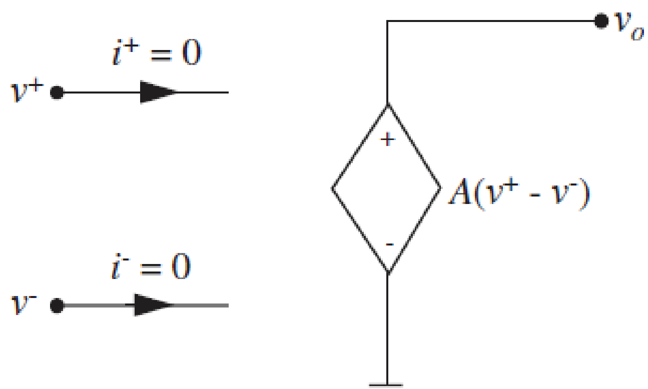


sbhe@uestc.edu.cn

理想运算放大器基本特性

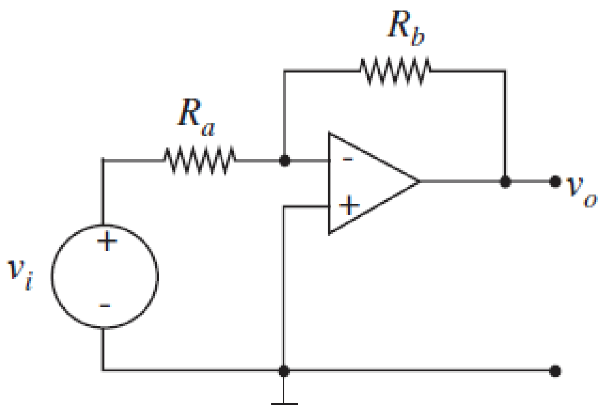
器件模型—电压控制电压源

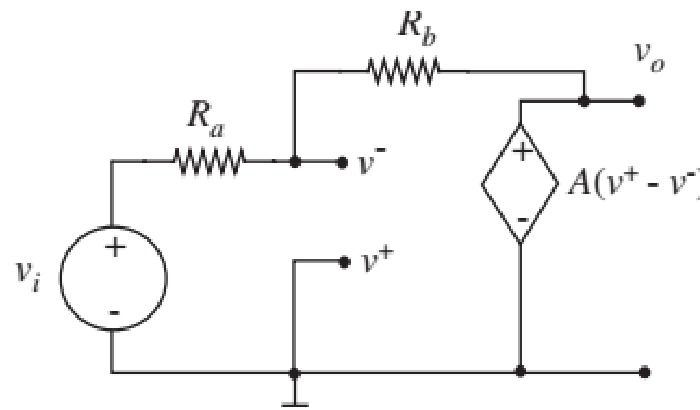
$$v_o = A(v^+ - v^-)$$



- ◆输入电阻无穷大
- ◆输出电阻为零
- ◆开环差分增益无穷大

反相放大器





注意：理想运放负反馈使用，两个器件约束

$$v_o \simeq -\frac{R_b}{R_a} v_i.$$

- ◆虚断 $i^+ = 0 \text{ and } i^- = 0.$
- ◆虚短 $v^+ - v^- \simeq 0.$

这里有两种分析思路，是等效的！

理想运放及应用

利用模型分析

$$v^+ = 0.$$

$$\frac{(v_i - v^-)}{R_a} + \frac{(v_o - v^-)}{R_b} = 0.$$

$$v^- = \frac{R_b}{R_a + R_b} v_i + \frac{R_a}{R_a + R_b} v_o.$$

$$v_o = A(v^+ - v^-).$$

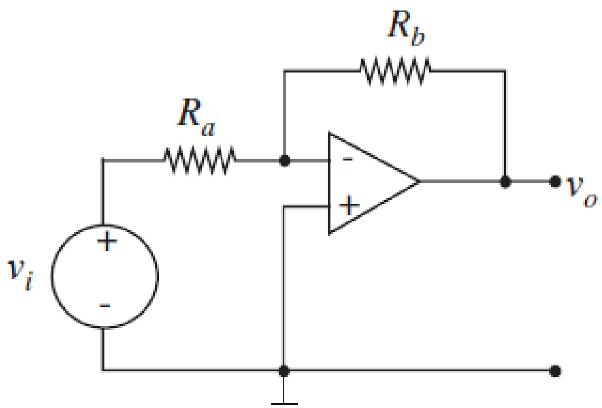
$$v_o = \frac{-AR_b/(R_a + R_b)}{1 + AR_a/(R_a + R_b)} v_i.$$

$$A\frac{R_a}{R_a + R_b} \gg 1$$

$$v_o \simeq -\frac{R_b}{R_a} v_i.$$

注意：从模型分析，也可以得到 $v^+ - v^- \simeq 0.$

反相放大器输入和输出电阻



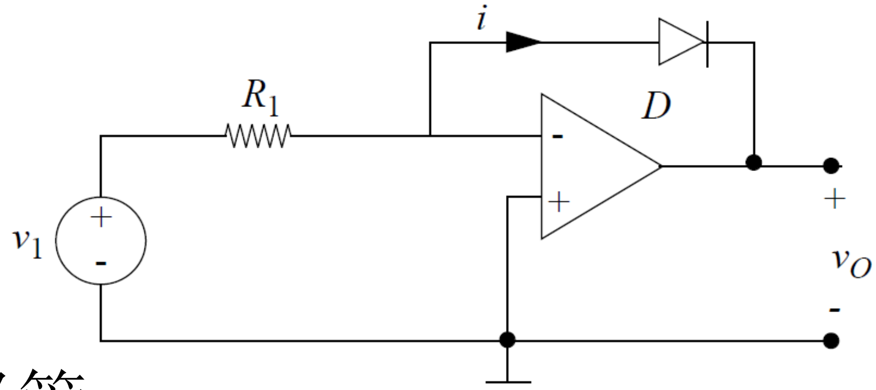
■输入电阻为 R_a

■输出电阻接近0，类似理想电压源，为什么？电路怎样连接？

主观题 10分

设置

例



硅二极管

$i = I_S(e^{qv/nkT} - 1)$, $kT/q = 26\text{mV}$, and n is between 1 and 2.

a) Find v_O in terms of v_1 and R_1.

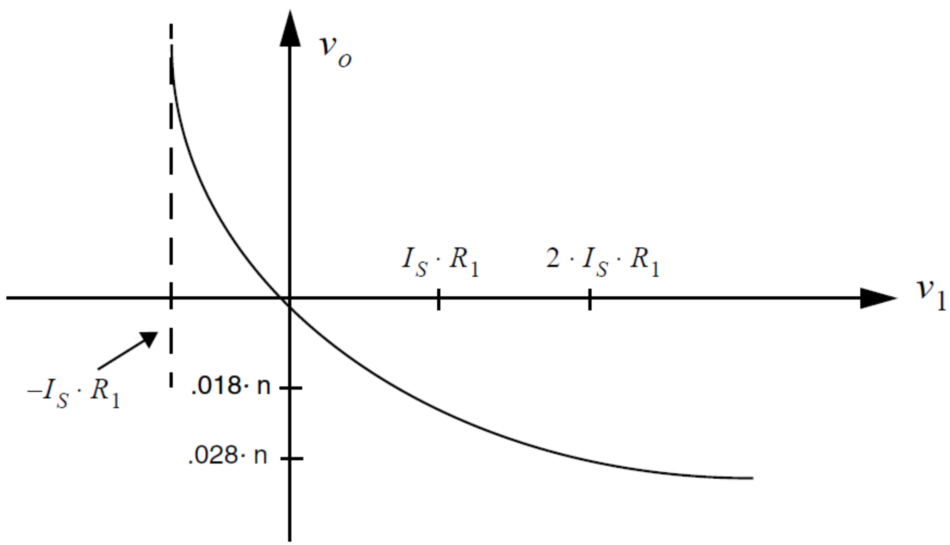
b) Make a quick sketch of the answer to (a).

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

分析

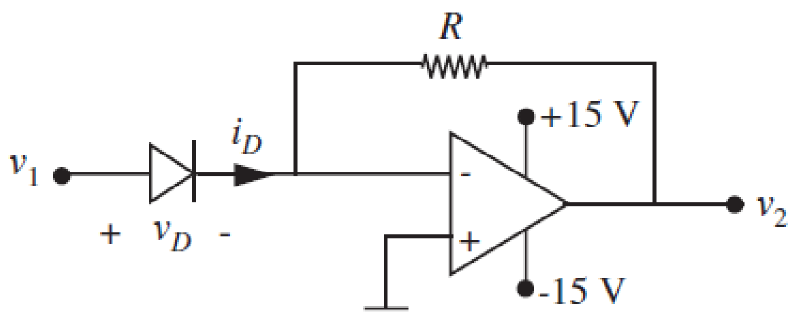
$$v_O = \frac{-n \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{v_1}{I_s \cdot R_1} + 1\right)$$



主观题 10分

设置

例



$$i_D = I_S\left(e^{qv_D/kt} - 1\right) \qquad I_S = 10^{-12}\ \mathrm{A} \quad kT/q = 25\ \mathrm{mV}.$$

$|v_1| < 575mV$

如何选取电阻R使运放工作在线性区？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

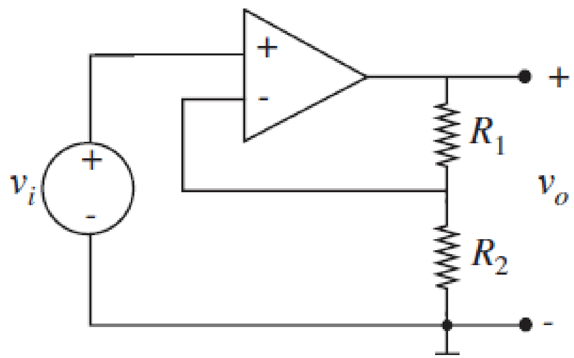
分析：

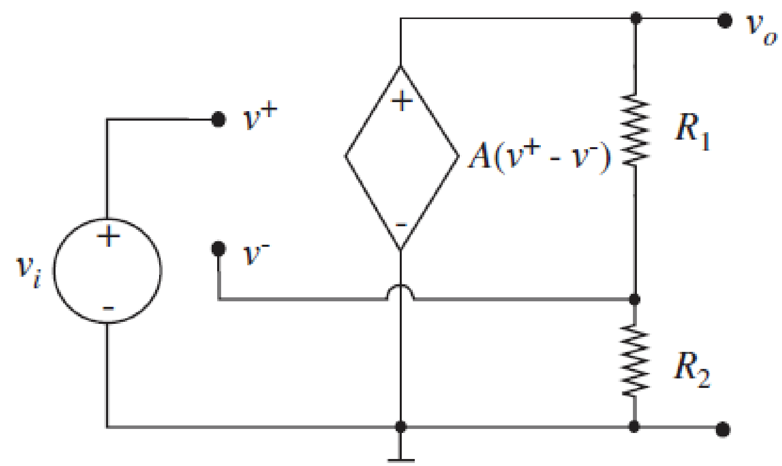
$$V_2 = R * I_S * \left(e^{\frac{v_1}{25}} - 1\right) < 15\,?$$

$$R < 1539\Omega$$

理想运放及应用

同相放大器





$$v_o \simeq \frac{R_1 + R_2}{R_2} v_i.$$

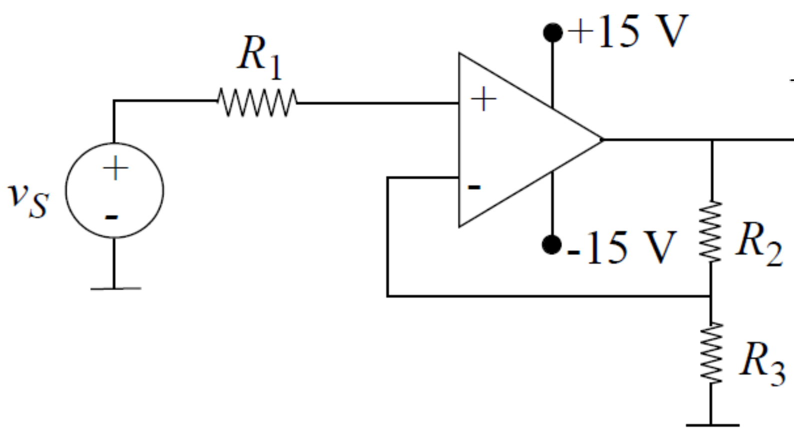
注意：观察单运放负反馈反馈回来的信号必须连接在哪个输入端？

理想运放及应用

讨论同相放大器的输入和输出电阻

■输入电阻为 ∞ ，运放输入端供小电压，和非常小的电流，为什么？

■输出电阻接近0，类似理想电压源，为什么？电路怎样连接？



$R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 9k\Omega$, $R_3 = 1k\Omega$.

$v_S = 2cos\omega t$ (in volts).

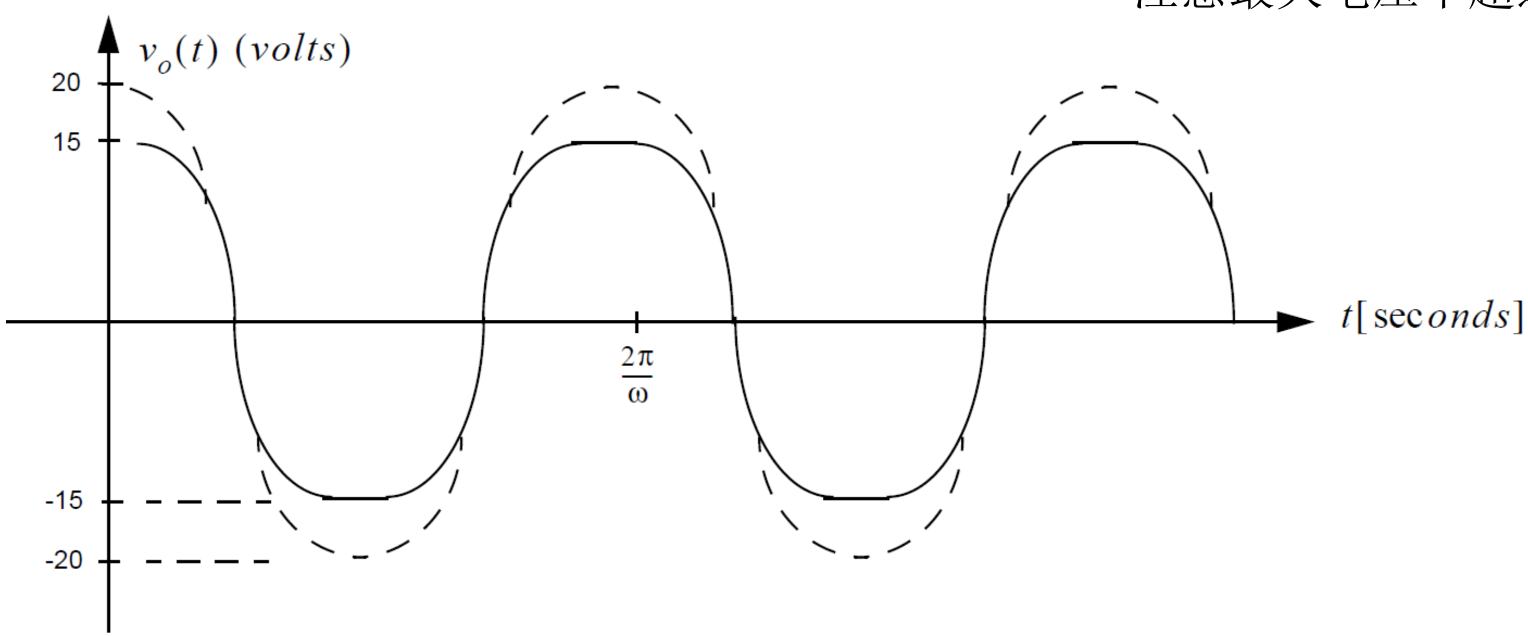
给出输出表达式及波形示意图

作答

分析

$$v_S = V_0 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \qquad v_0 = 10 \cdot v_S = 20 \cos \omega t$$

注意最大电压不超过电源电压



理想运放及应用

讨论负反馈放大电路增益的稳定性（灵敏度）

以同相放大器为例（运放增益为A）

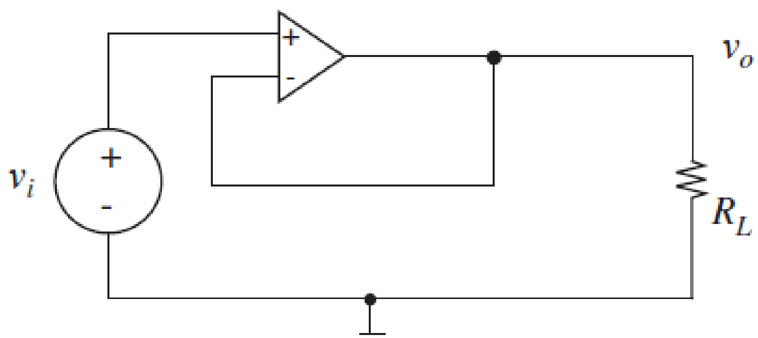
$$G = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A}{1 + A\frac{R_2}{R_1+R_2}}.$$

$$dG = \frac{1}{(1 + A\frac{R_2}{R_1+R_2})^2} dA.$$

$$\Rightarrow \quad \frac{dG}{G} = \left(\frac{1}{1 + A\frac{R_2}{R_1+R_2}} \right) \frac{dA}{A}.$$

负反馈放大器增益更稳定，前面分析与A几乎无关，
牺牲运放增益换来稳定性（对温度变化不敏感）

电压跟随器（缓冲放大器）

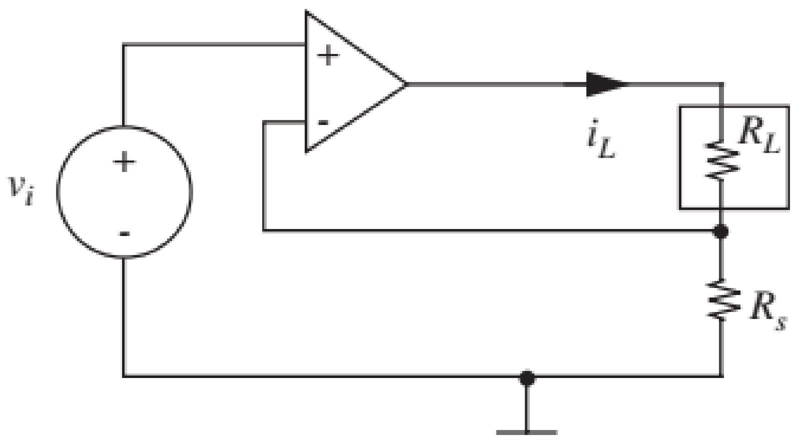


$v_o \simeq v_i.$

有哪些电路形式，起到什么作用？

理想运放及应用

讨论：用运算放大器实现电压源和电流源电路



比较电压源电路与电流源电路区别？

问题

给出一个运放、电阻若干，要求完成下列输入输出关系，给出电路拓扑结构，并分析。

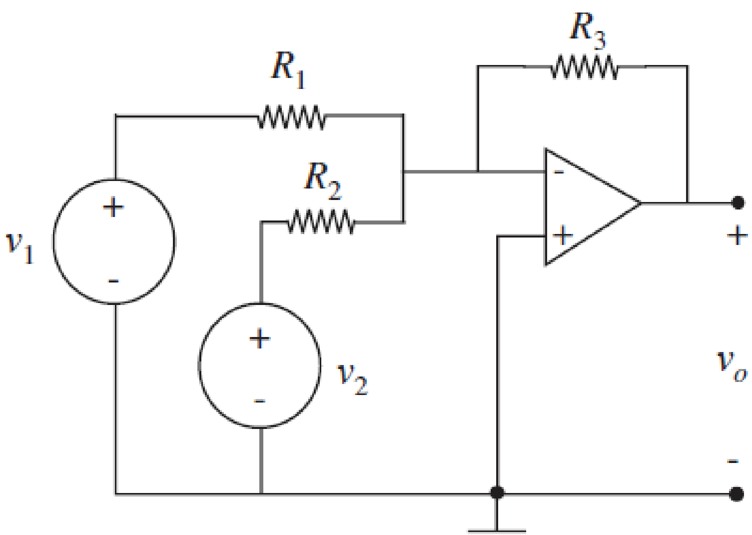
（1） $u_o = -5u_i$

（2） $u_o = 10u_i$

（3） $u_o = u_{i1} - u_{i2}$

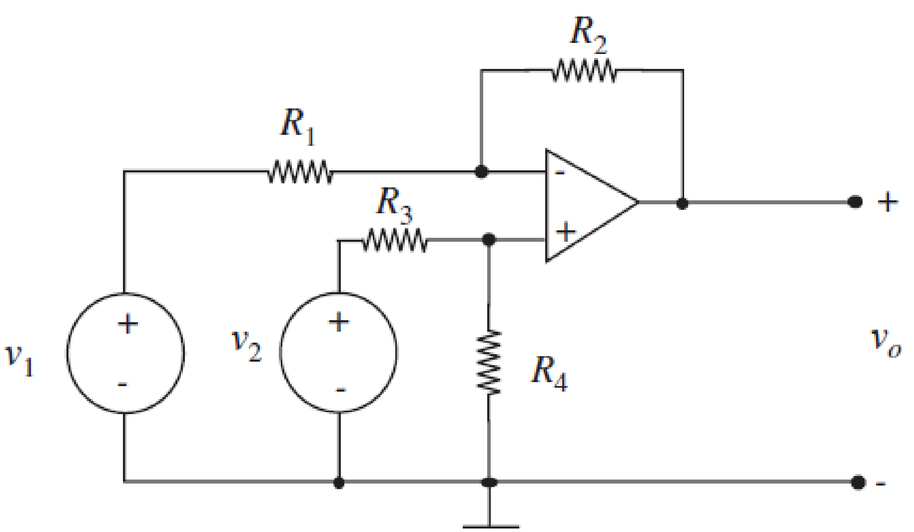
理想运放及应用

讨论：用运算放大器实现加减法电路



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

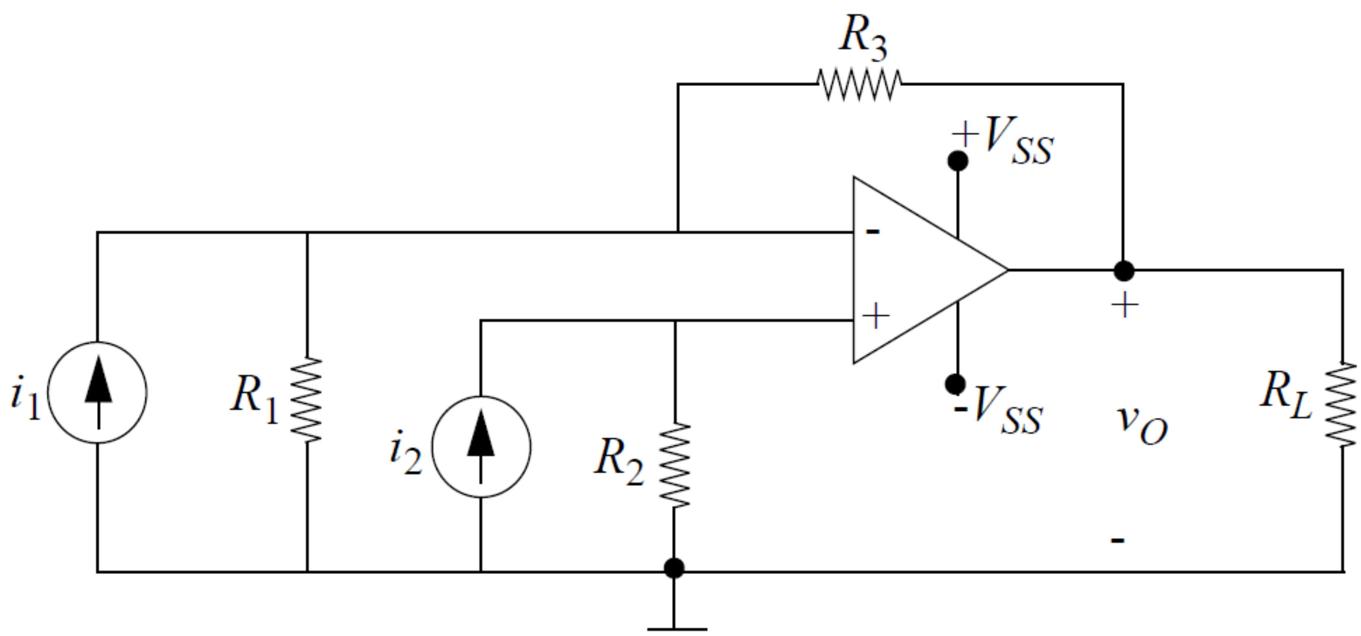
理想运放及应用



$$v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1).$$

主观题 10分

设置



理想运放，求输出表达式

作答

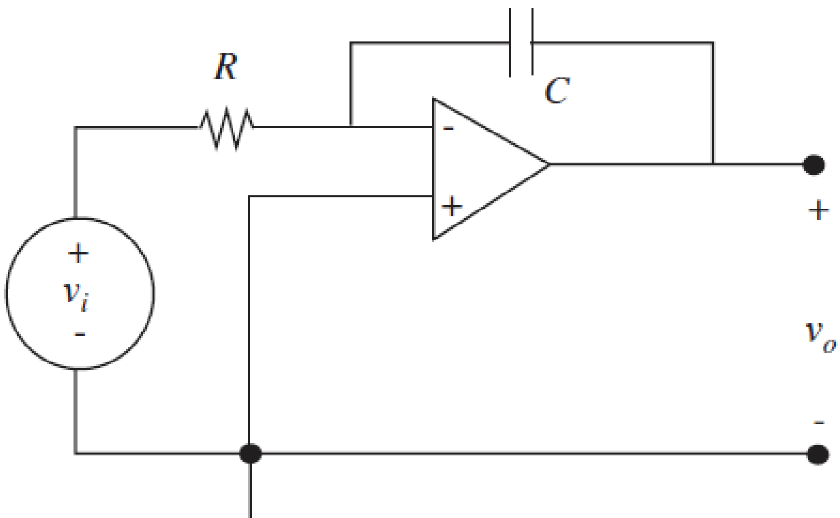
分析

$$i_1 + \frac{(0 - i_2 R_2)}{R_1} + (v_0 - i_2 R_2) R_3 = 0$$

$$v_0 = -i_1 R_3 + i_2 \left[\frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1} \right]$$

理想运放及应用

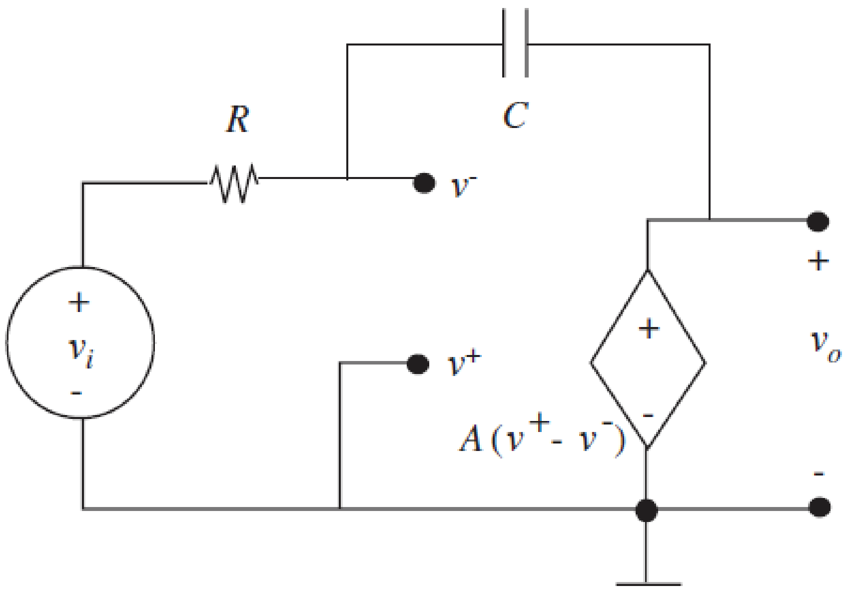
运放积分器



$$v_o \simeq -\frac{1}{RC}\int v_i dt.$$

用频域计算 $$v_o = -\frac{1}{SRC}v_I$$

理想运放及应用



$$RC(1+A)\frac{dv^-}{dt} + v^- = v_i.$$

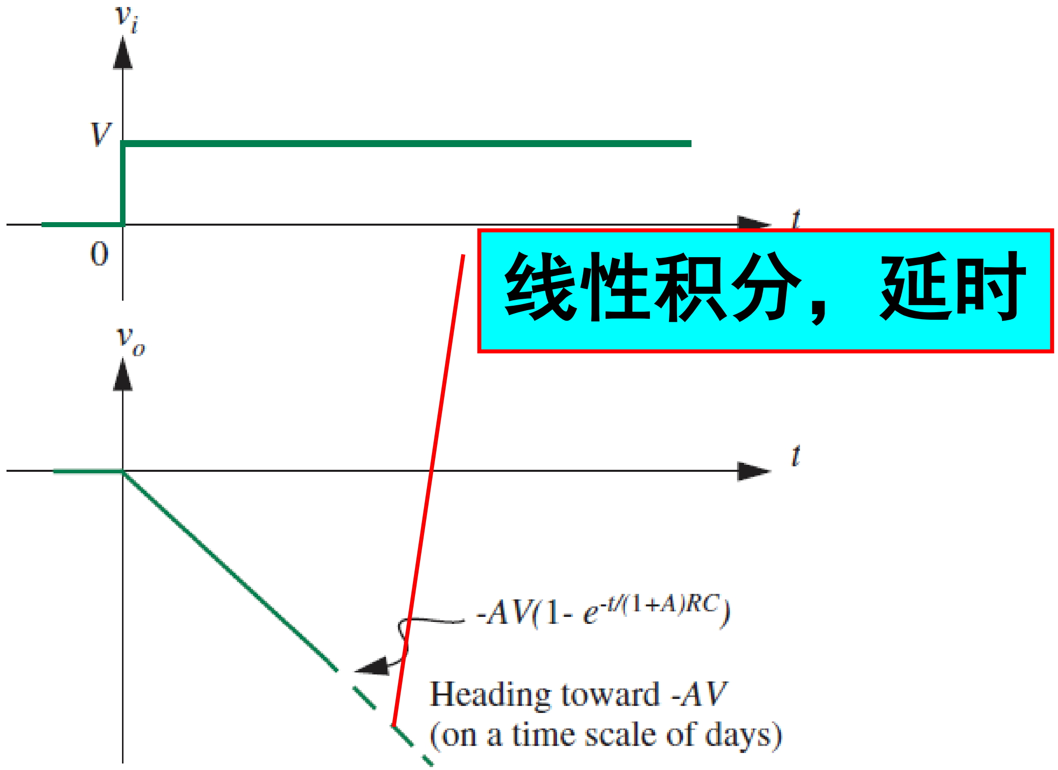
$$\tau = (1+A)RC.$$

MILLER effect

理想运放及应用

$$(1+A)RC\frac{dv_o}{dt}+v_o=-AV.$$

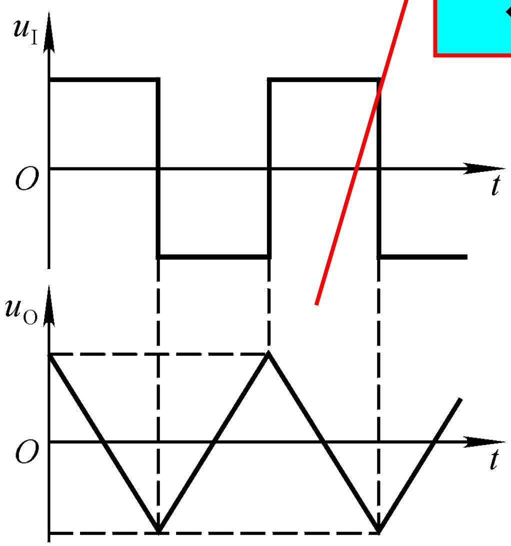
$$v_o=-AV\left(1-e^{-t/(1+A)RC}\right).$$



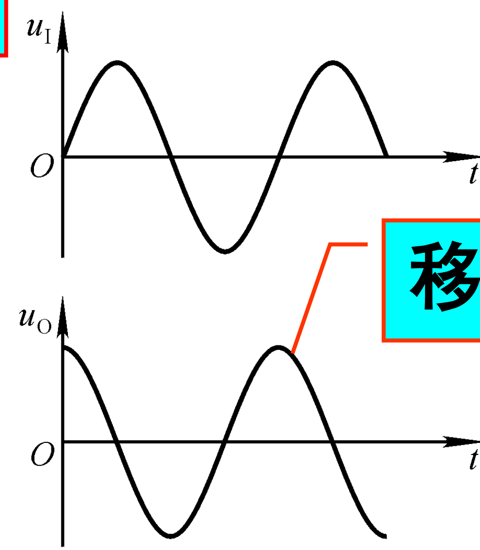
理想运放及应用

积分器几个问题讨论

波形变换

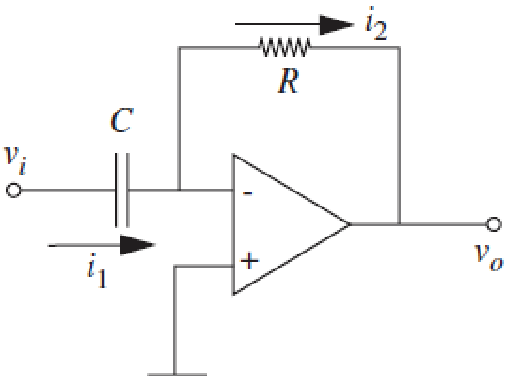


移相

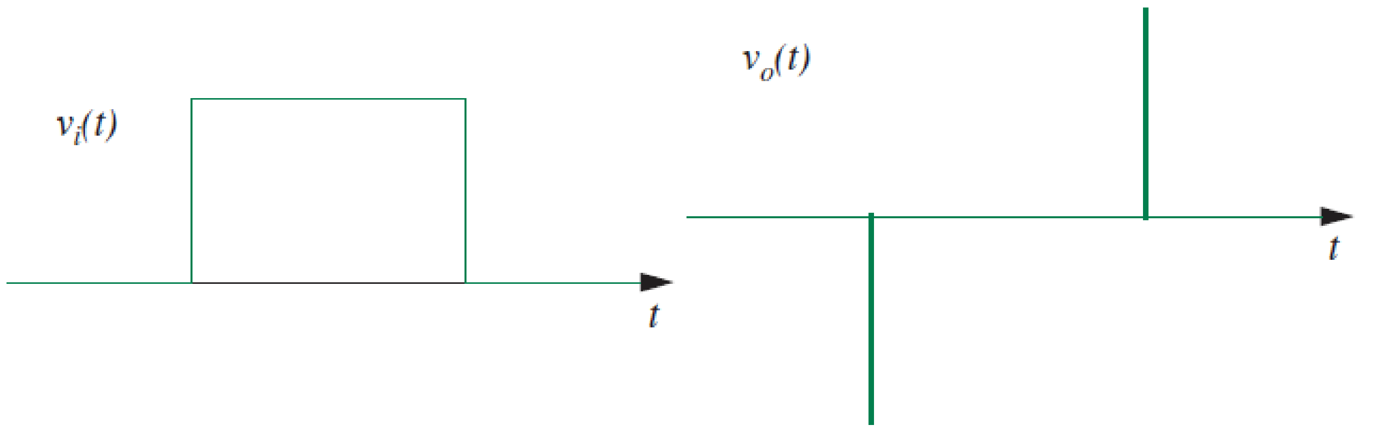


理想运放及应用

微分器



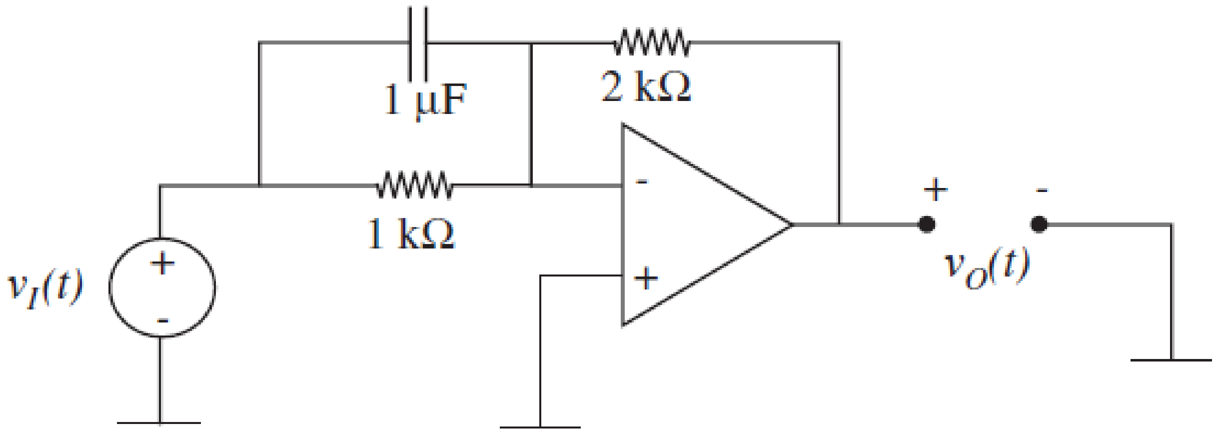
$$v_o = -RC\frac{dv_i}{dt}.$$



主观题 10分

设置

例



$$v_I(t) = 0, \quad t < 0$$

$$v_I(t) = 10^3 t \ V \quad t > 0$$

分析t=0+ 和t=1ms输出电压

作答

分析

$$\frac{v_I(t)-0}{1000} + C\frac{dv_I(t)}{dt} + \frac{v_0(t)-0}{2000} = 0, \text{ since } v^- = v^+ = 0$$

$$\text{Therefore, } \ v_I(t) = 1000t, \frac{dv_I(t)}{dt} = 1000, \text{ so}$$

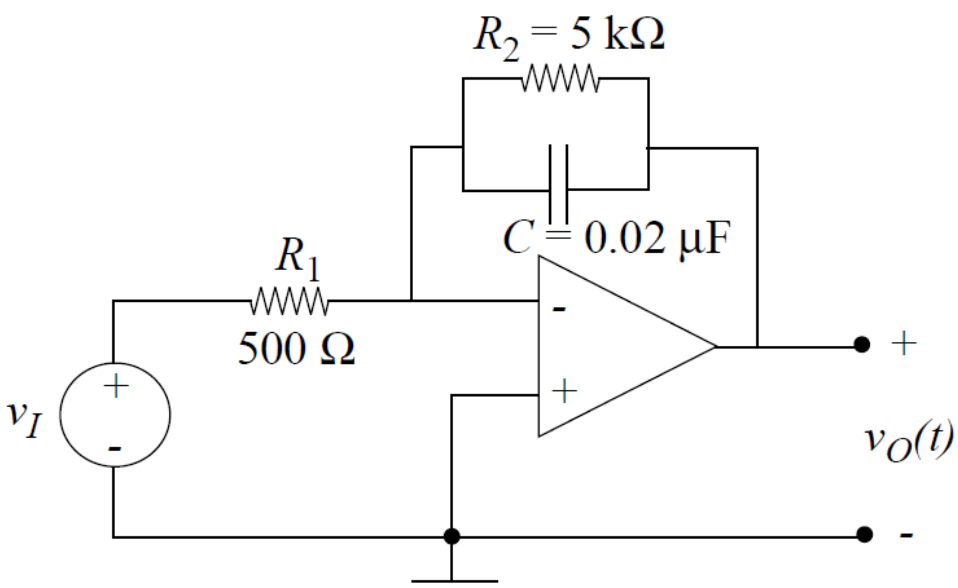
$$v_0(t) = -2000 \cdot t - 2 \ [volts]$$

$$v_0(t=0^+) = -2Volts$$

$$v_0(t=1ms) = -4Volts$$

主观题 10分

设置



（1）放大器直流增益

（2）传递函数

（3）带宽

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

分析

$$\frac{v_i}{500} + \frac{v_o}{5000} = 0$$

$$\frac{v_o}{v_i} = -10$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_2 \mid\mid \frac{1}{Cs}}{R_1}$$

$$\frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = -\frac{R_2}{R_1(j\omega R_2 C + 1)}$$

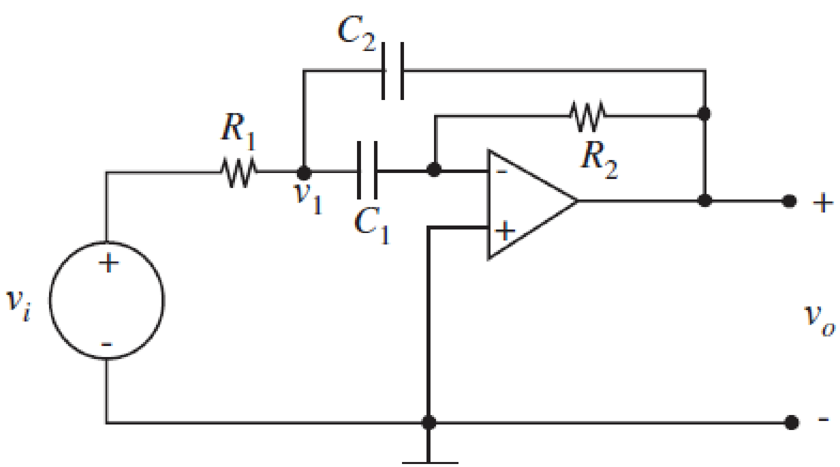
分析

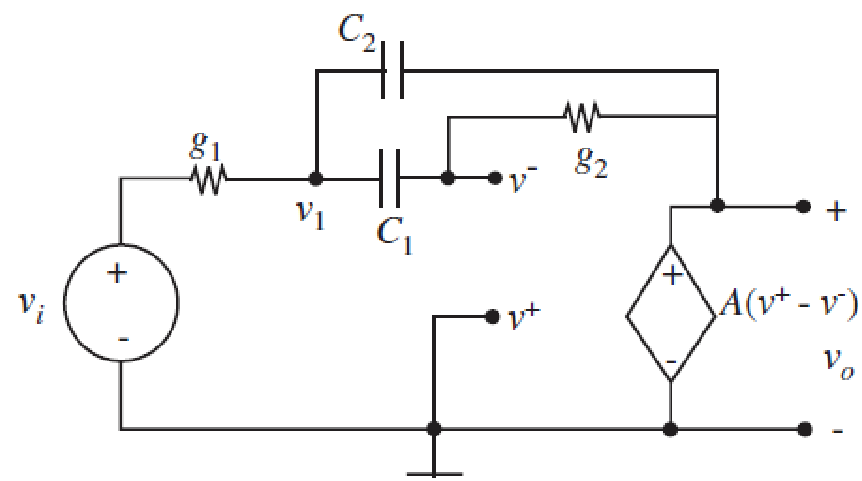
$$0.707\frac{R_2}{R_1} = |\frac{R_2}{R_1(j\omega R_2 C + 1)}|$$

$$\sqrt{2} = \sqrt{(\omega R_2 C)^2 + 1}$$

$$\omega_{cutoff} = \frac{1}{R_2 C}$$

RC有源滤波器





理想运放及应用

得到二阶微分方程

$$\frac{d^2 v_o}{dt^2} + g_2 \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \frac{dv_o}{dt} + \frac{g_1 g_2}{C_1 C_2} v_o = -\frac{g_1}{C_2} \frac{dv_i}{dt}.$$

与RLC谐振电路比较

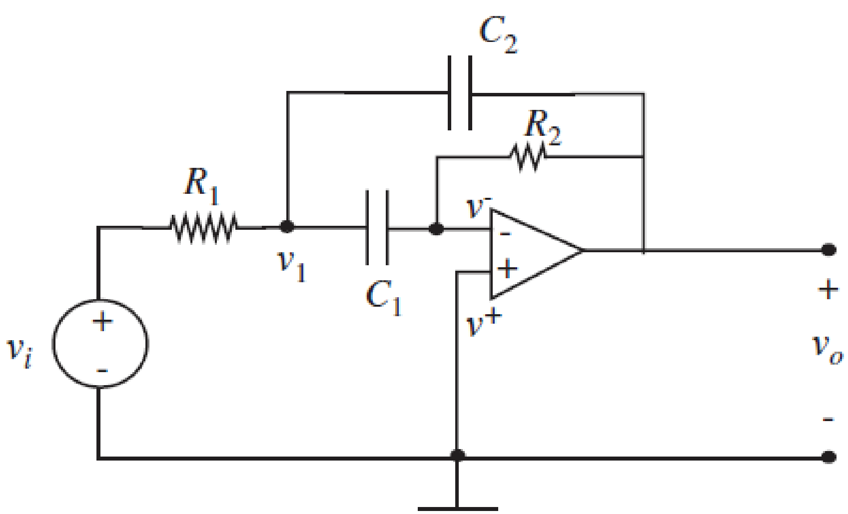
$$\alpha = g_2 \frac{C_1 + C_2}{2 C_1 C_2}$$

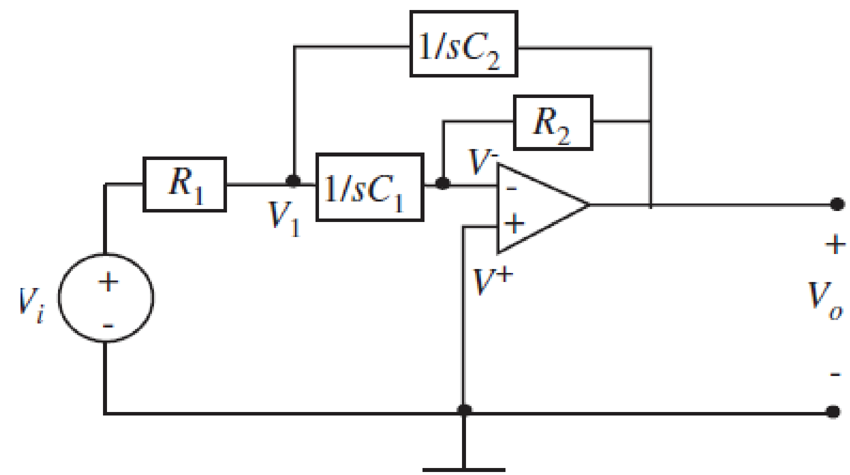
$$\frac{d^2 v_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dv_C}{dt} + \frac{1}{LC} v_C = \frac{1}{LC} v_{IN}$$

$$\omega_o = \sqrt{\frac{g_1 g_2}{C_1 C_2}}.$$

理想运放及应用

阻抗分析





理想运放及应用

阻抗分析

$$V_o = \frac{-g_1 s C_1 V_i}{[g_1 + s(C_1 + C_2)]\,g_2 + s^2 C_1 C_2}$$

$$= \frac{-g_1 s C_1 V_i}{g_1 g_2 + s(C_1 + C_2)\,g_2 + s^2 C_1 C_2}$$

$$= \frac{-s\left(g_1/C_2\right) V_i}{s^2 + s\frac{C_1+C_2}{C_1 C_2} g_2 + \frac{g_1 g_2}{C_1 C_2}}.$$

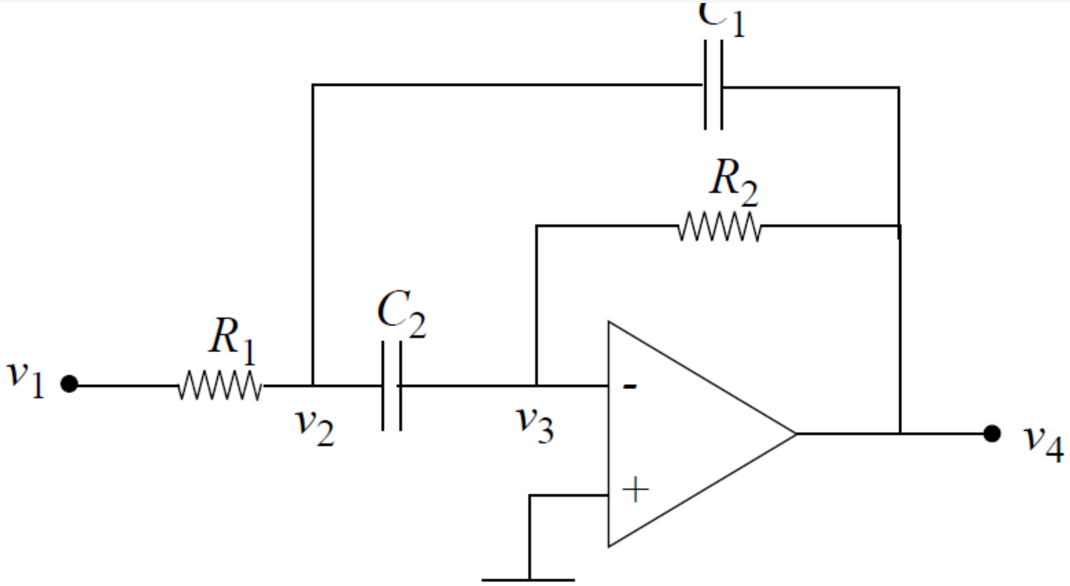
$$\text{Resonant frequency} = \omega_o = \sqrt{\frac{g_1 g_2}{C_1 C_2}}$$

$$\text{Bandwidth} = g_2 \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}.$$

→ 不用电感，可以实现类似响应，集成电路需要

主观题 10分

设置



$C_1 = C_2 = .01\mu F$
$R_1 = 10\Omega$
$R_2 = 1k\Omega$

（1）理想运放，V2,V3节点方程
（2）传递函数
（3）Q值，电路是临界阻尼，还是？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

分析

$$\frac{v_1 - v_2}{R_1} = \frac{v_3 - v_4}{R_2} + \frac{v_2' - v_3'}{\frac{1}{C_2}}, \frac{v_2' - v_3'}{\frac{1}{C_2}} = \frac{v_3 - v_4}{R_2}.$$

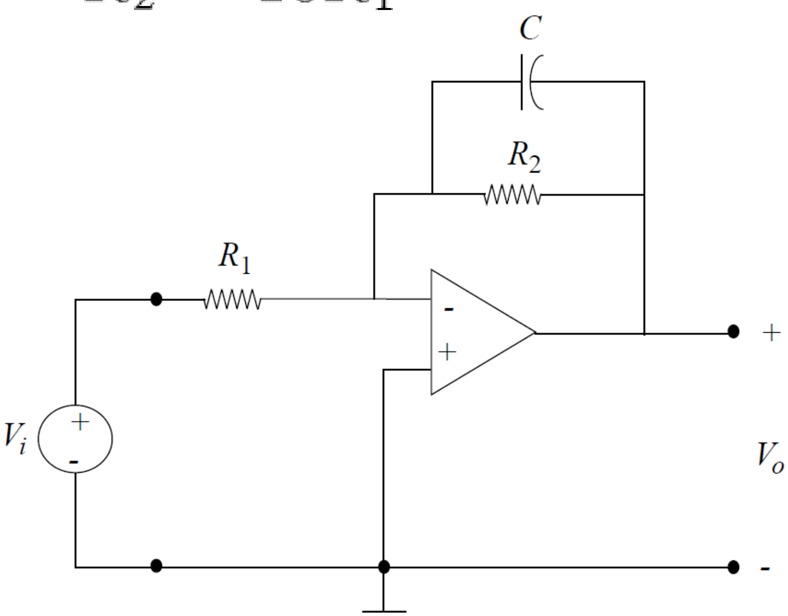
$$\frac{v_4}{v_1} = \frac{-R_2C_2s}{R_1C_1R_2C_2s^2 + R_1(C_1 + C_2)s + 1}.$$

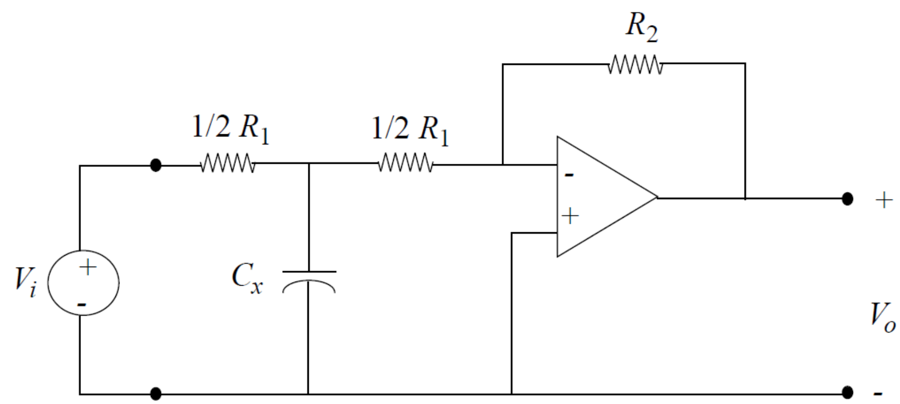
分析

$$Q = \sqrt{\frac{(C_1 + R_2 C_2}{(C_1 + C_2)^2 R_1}}.$$

过阻尼

$$R_2 = 10R_1$$





如果两个电路等效，电容有什么关系？

传递函数及波特图

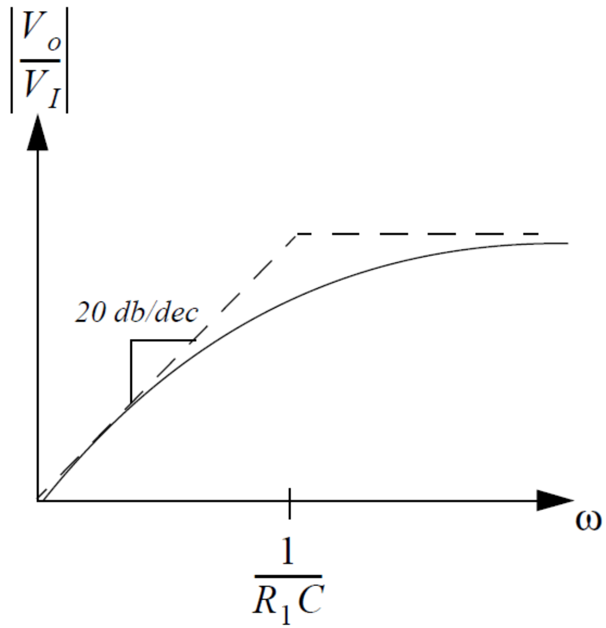
分析

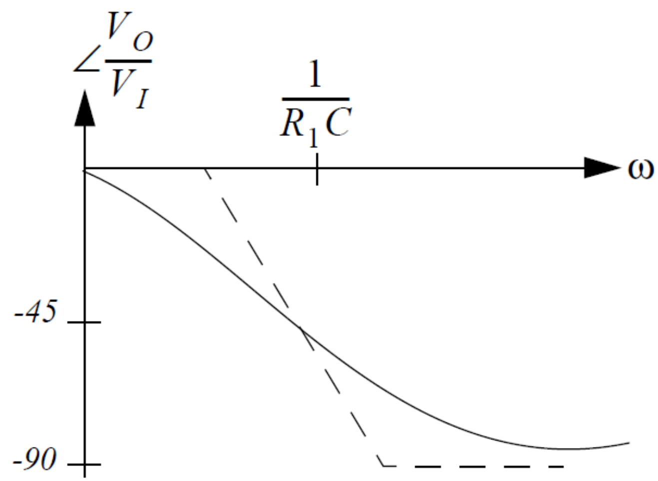
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-Z_F}{Z_{IN}} = \frac{-R_2 || \frac{1}{sC}}{R_1}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_2}{sCR_2R_1 + R_1}$$

$$\frac{V_O}{V_I} = \frac{-10}{10R_1Cs + 1}.$$

分析


$\left|\frac{V_o}{V_I}\right|$
20 db/dec
$\frac{1}{R_1C}$
ω


$\angle\frac{V_O}{V_I}$
$\frac{1}{R_1C}$
ω
-45
-90

分析

输入端口戴维南等效

$$V_{TH} = V_I \frac{\frac{1}{C_x s}}{\frac{1}{2}R_1 + \frac{1}{C_x s}}.$$

$$V_{TH} = V_I \frac{2}{R_1 C_x s + 2}.$$

$$Z_{TH} = \frac{1}{2}R_1 + (\frac{1}{2}R_1 || \frac{1}{C_x s}).$$

$$Z_{TH} = \frac{R_1^2 C_x s + 4R_1}{2R_1 C_x s + 4}.$$

分析

$$V_O = V_{TH}\frac{-R_2}{Z_{TH}}.$$

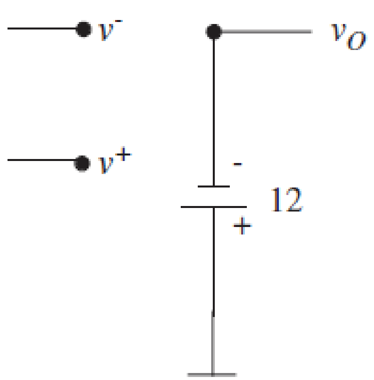
$$\frac{V_O}{V_I} = \frac{-4R_2}{R_1^2 C_x s + 4R_1} = \frac{-40}{R_1 C_x s + 4}.$$

$$C_x = 40C.$$

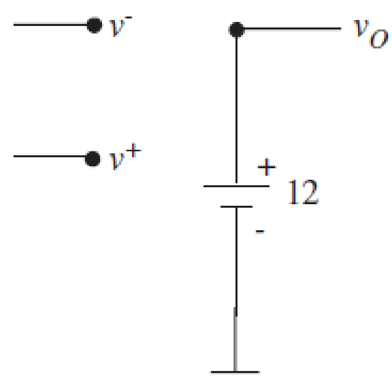
理想运放及应用

讨论：运放工作在放大区（线性区），一般要求负反馈使用，利用前面讨论的方法可以分析

如果运放进入饱和区，输出情况如何？



Negative saturation

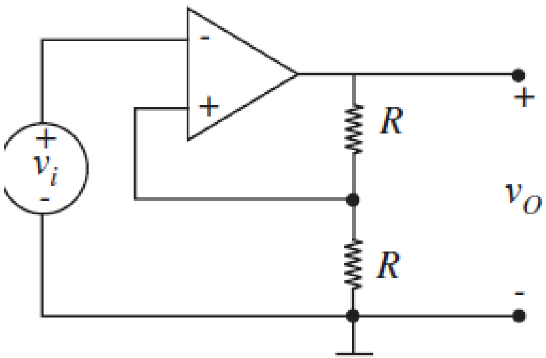


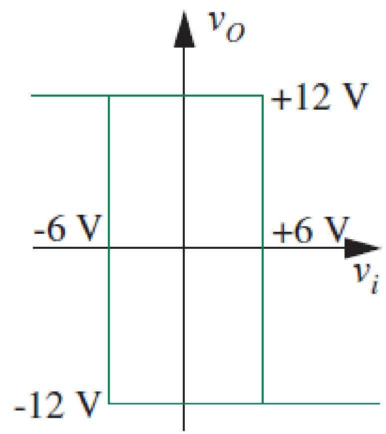
Positive saturation

运放饱和时等效模型

理想运放及应用—正反馈

数字比较器

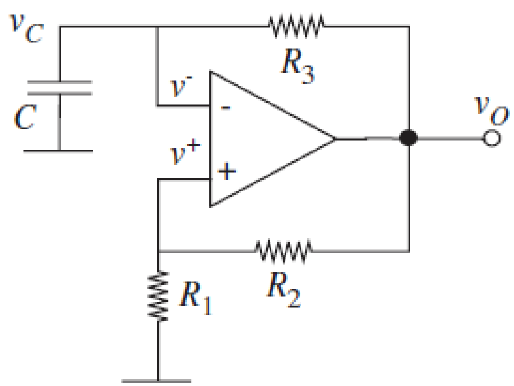


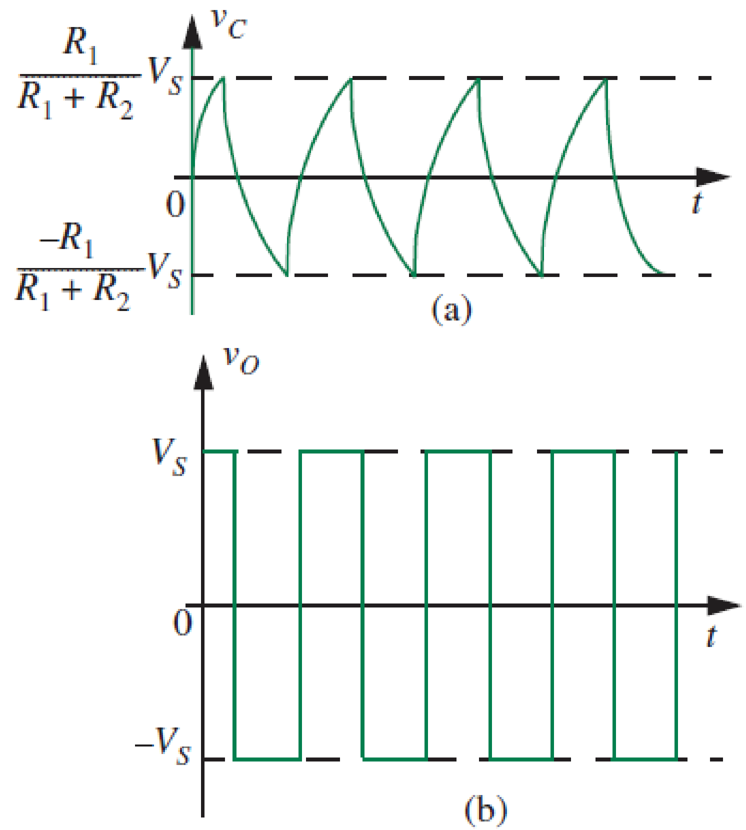


运放供电电压+12V，-12V

理想运放及应用——正反馈

RC振荡器



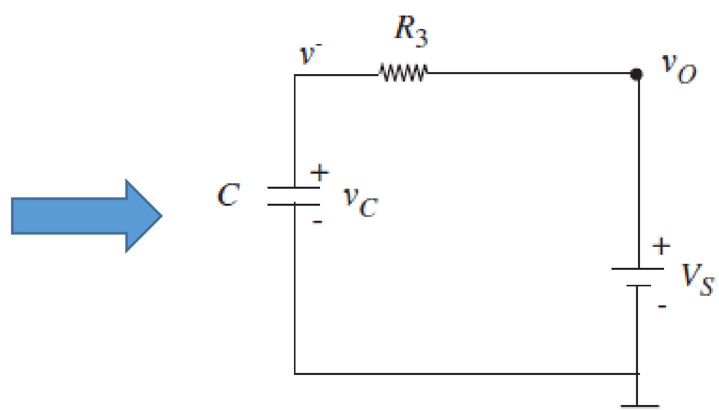


RC振荡器分析

假设运放开始处于正饱和区，电容上电压为0

$$v^+ = \frac{V_S R_1}{R_1 + R_2}.$$

电容通过R3充电



RC振荡器分析

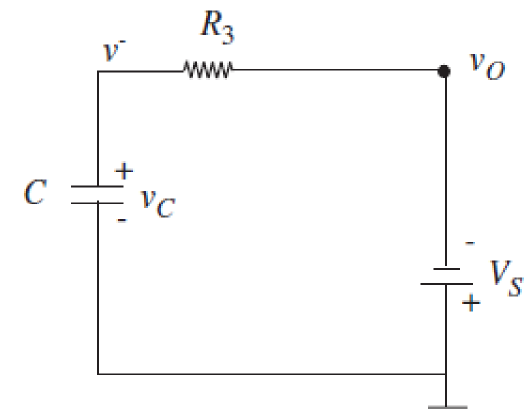
当电容电压充电电压大于 $\dfrac{V_S R_1}{R_1+R_2}$.

运放输出电压快速到达电源负电压-vs

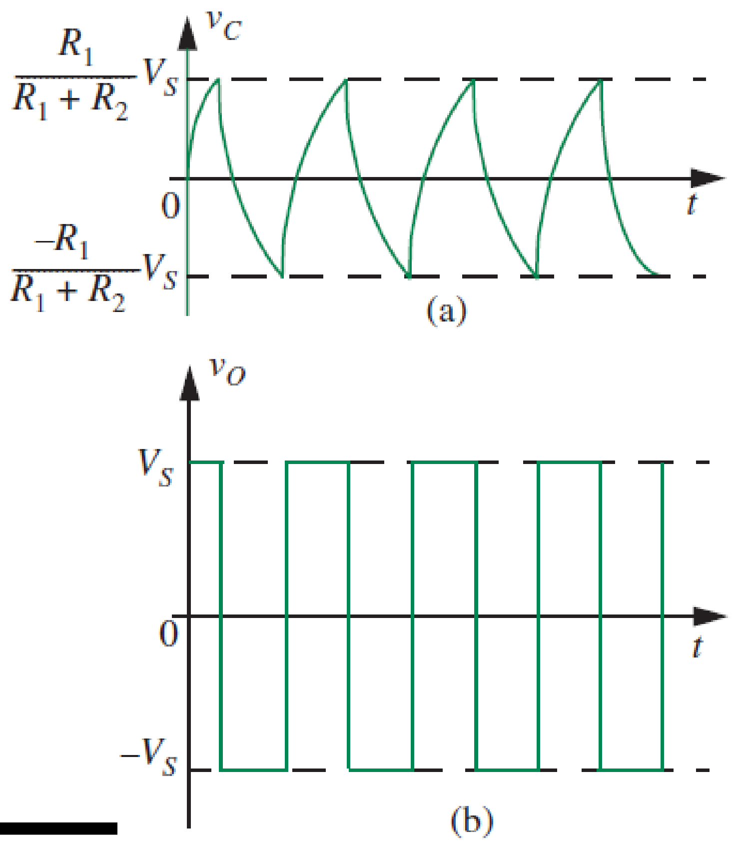
电容放电

$$v_C = -V_S + \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}+1\right)V_S e^{-t/R_3C}.$$

放电方程



RC振荡器分析

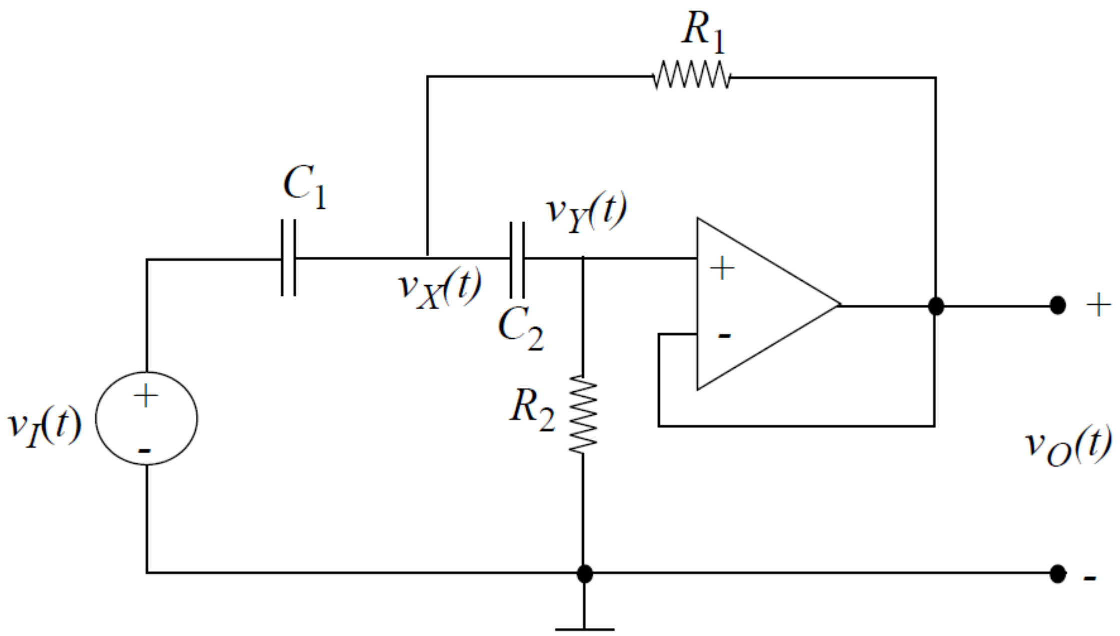


振荡周期

$$T = 2R_3 C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right).$$

主观题 10分

设置



当C1=C2时，输出频域表达式

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

分析

$$V_o(s) = \frac{s^2 V_i}{s^2 + s\frac{2}{R_2 C} + \frac{1}{R_1 R_2 C^2}}$$

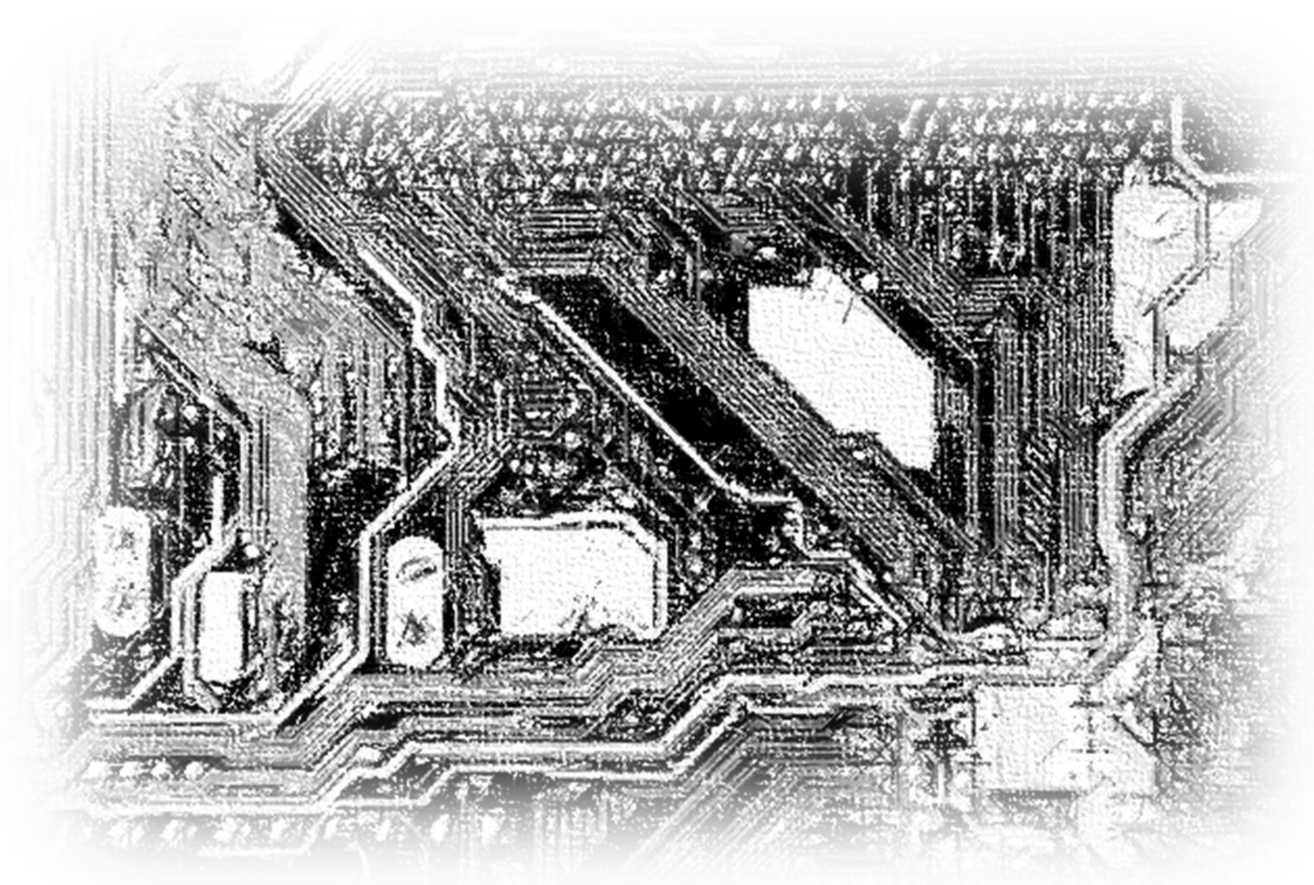
本章关键词

理想运放，线性应用（负反馈），非线性应用

本章习题

- 练习15.2，15.4，15.7，15.10，15.23，15.26
- 问题15.3，15.18(可选），15.21，15.26，15.30

建议小组讨论解决：问题15.2，15.4，15.14，15.19
15.27



何松柏

电子工程学院

谢谢！

UESTC

sbhe@uestc.edu.cn

Analog Circuits