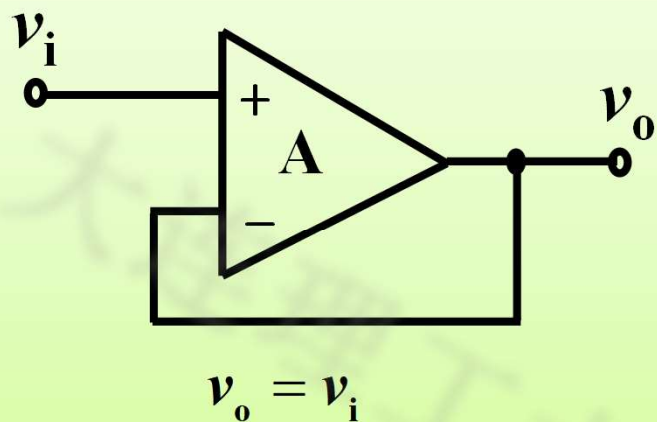
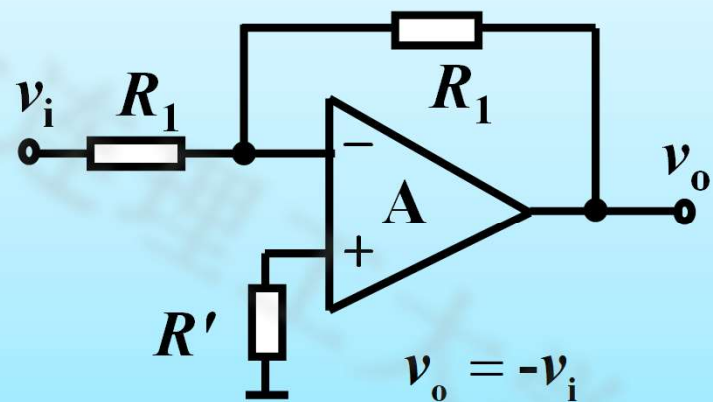


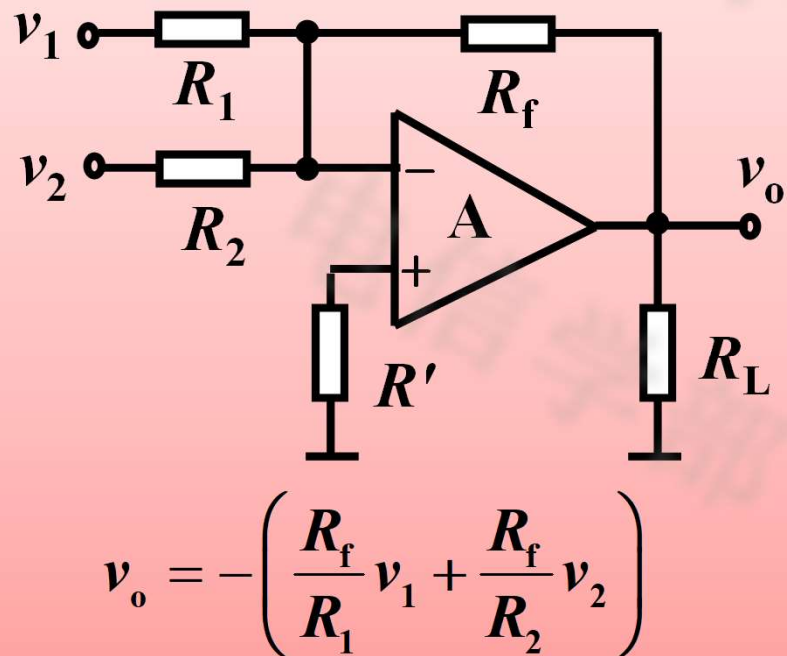
电压跟随器



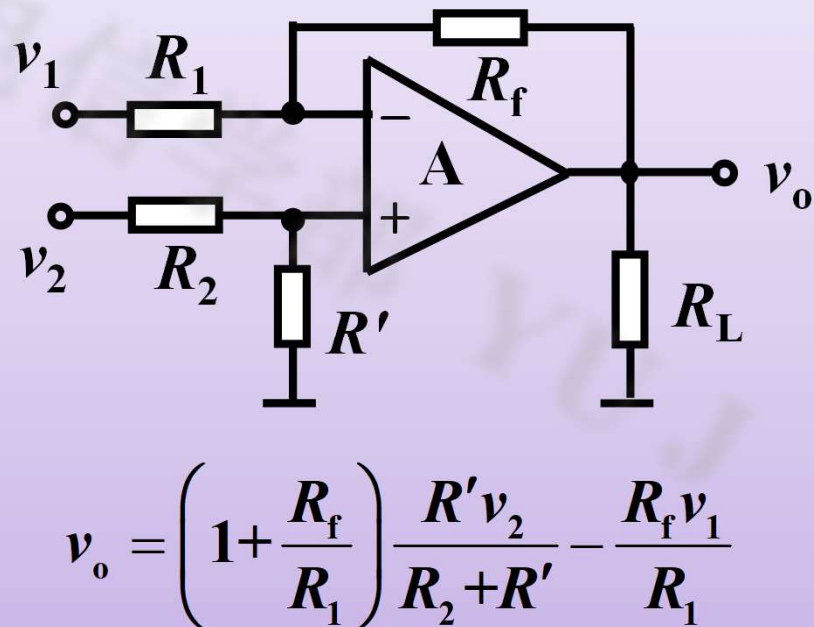
反相器



反相加法器



差动减法器



## 思考

如何保证深度负反馈条件？

通频带内，

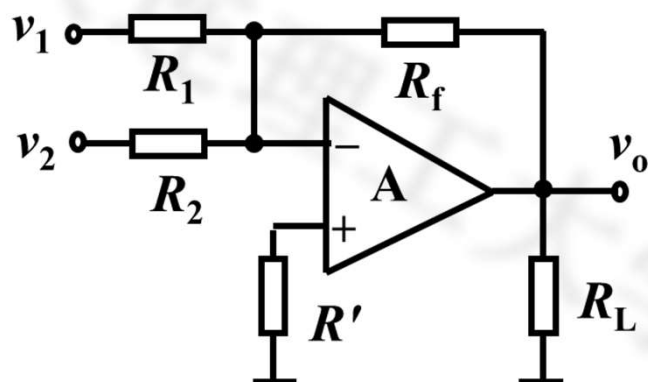
$$\text{负反馈: } |A_f| = |A| / |1+AF| < |A|$$

$$\text{深度负反馈: } |AF| \gg 1 \iff F \ll 1/|A|$$

通常，设计反馈电路的增益 $A_f$ 应比运放开环电压增益  $A$ 低100倍以上。

## 思考

如何选择反馈电阻的阻值？



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

电阻过小（几十欧）：电流过大，功耗大，烧毁；  
（常用电阻额定功率**0.25W**）

电阻过大（几兆欧）：电流过小，热噪声大；

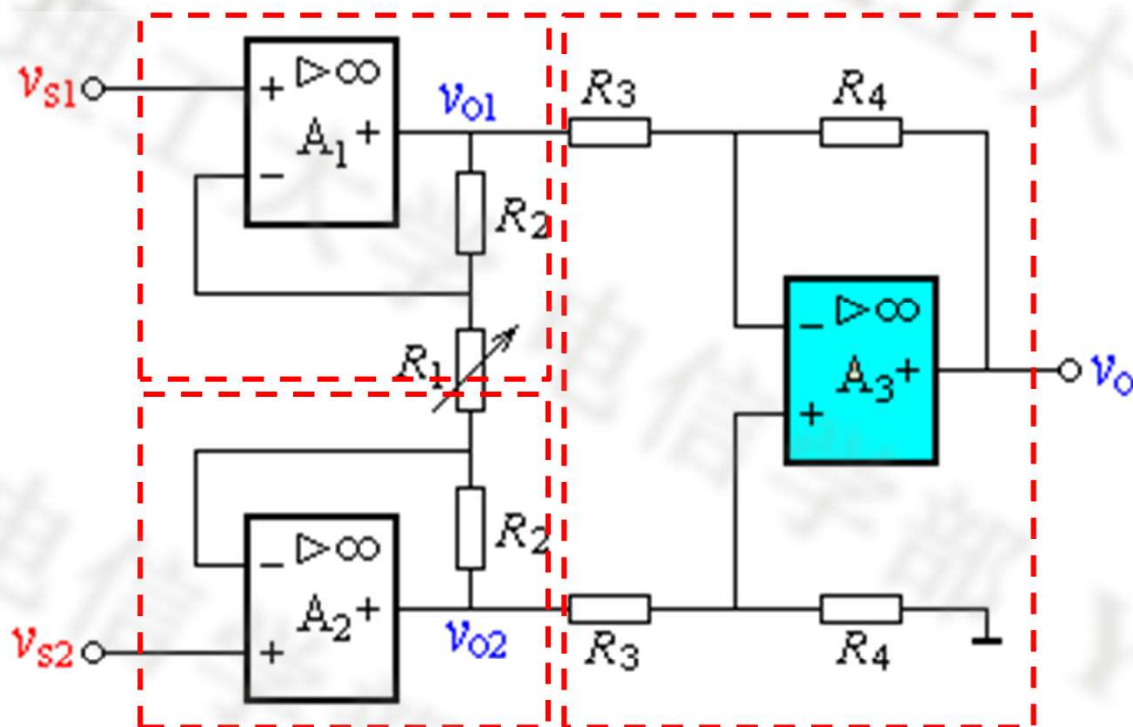
一般选用千欧级电阻，例如  $R_1=1k$ ,  $R_2=5k$ ,  $R_f=10k$

$$v_o = -(10v_{i1} + 2v_{i2})$$

## 2.4 基本运算电路

### 2 仪用放大器 Instrumentation Amp

(仪表放大器、数据放大器、测量放大器、三运放电路)



**特点：高共模抑制比，高输入阻抗，高放大倍数。**

## 2.4 基本运算电路

### 2 仪用放大器

分析：上下对称，

$R_1$ 中点为差模地，则：

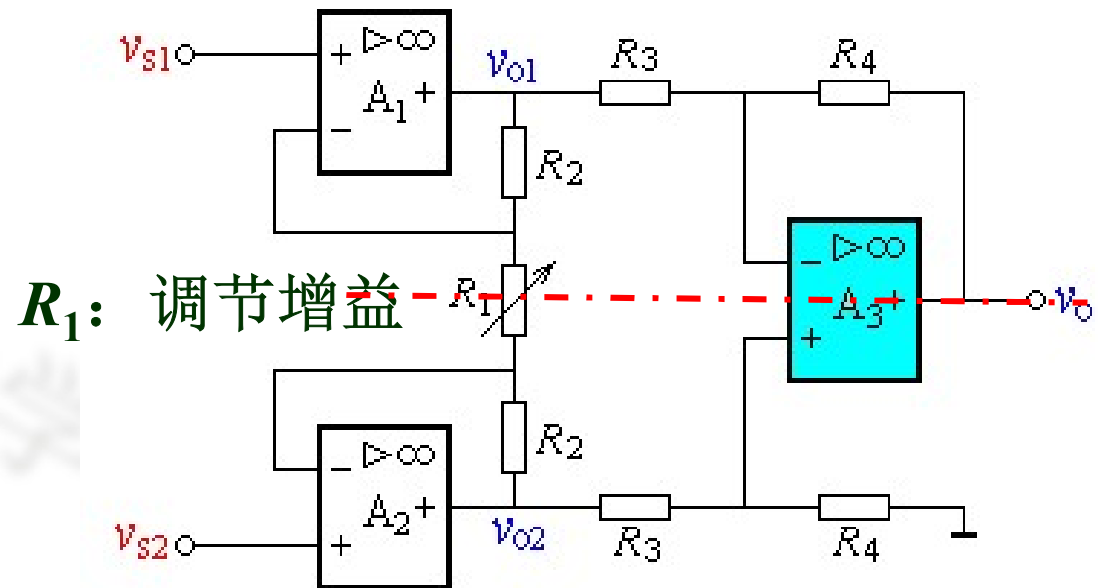
$$v_{o1} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 / 2} \right) v_{s1}$$

$$v_{o2} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 / 2} \right) v_{s2}$$

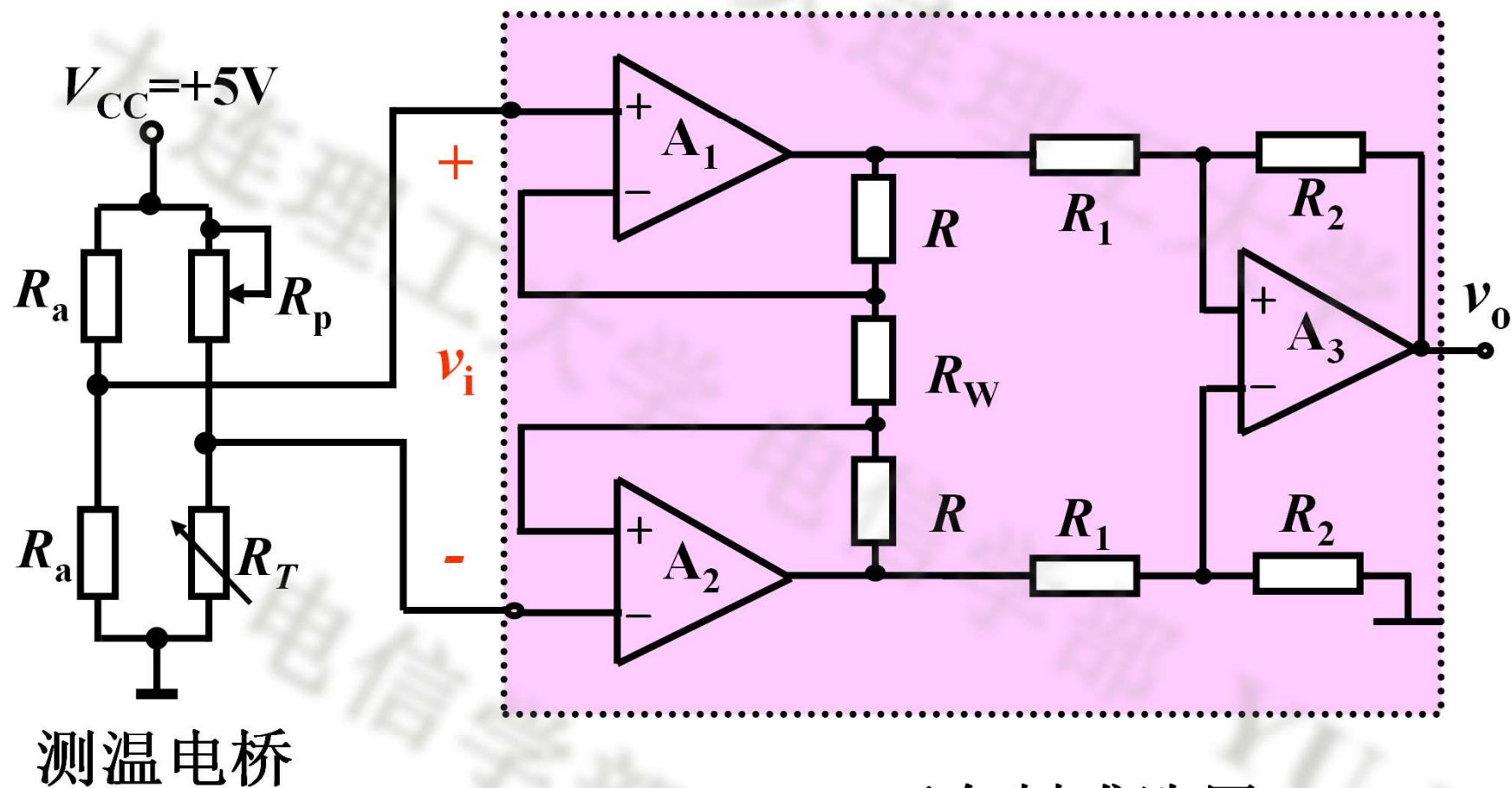
$$v_o = \frac{R_4}{R_3} (v_{o2} - v_{o1}) = \frac{R_4}{R_3} \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (v_{s2} - v_{s1})$$

另：解法二(P36)

产品：如AD624等， $R_1$ 有引线连出，实现增益可调。



**例：**由仪用放大器组成的温度测量电路。



IA可自制或选用IC

$R_T$ ：热敏电阻

## 2.4 基本运算电路

## 3. 积分与微分运算电路

### (1) 积分器 Integrator

虚地  $\therefore i_C = \frac{v_I}{R}$

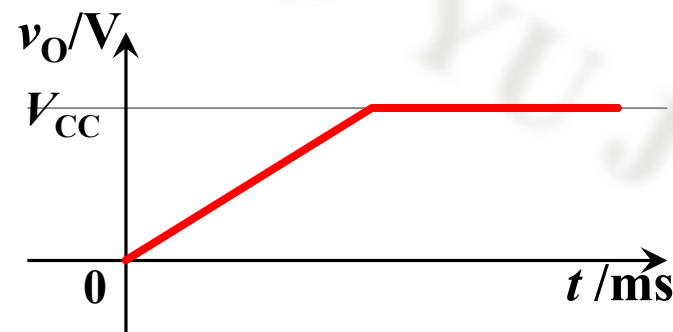
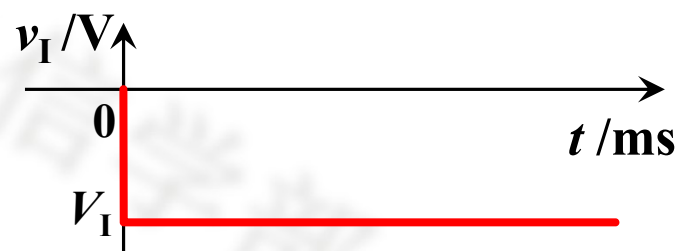
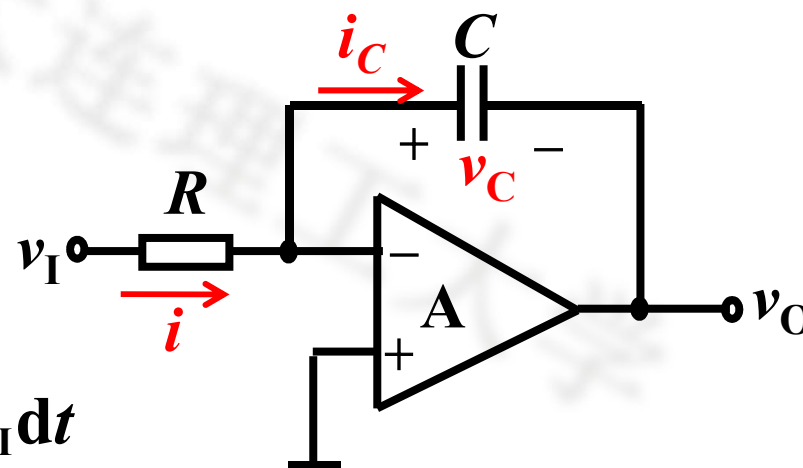
$$v_O = -v_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int v_I dt$$

$$v_O = v_{C0} - \frac{1}{RC} \int v_I dt$$

$v_{C0}$  : 电容初始电压

例：输入阶跃直流电压  $v_I$  时

$$v_O = -\frac{1}{RC} \int v_I dt = -\frac{V_I}{RC} t \text{ 直到 } V_{CC}$$





### 3. 积分与微分运算电路

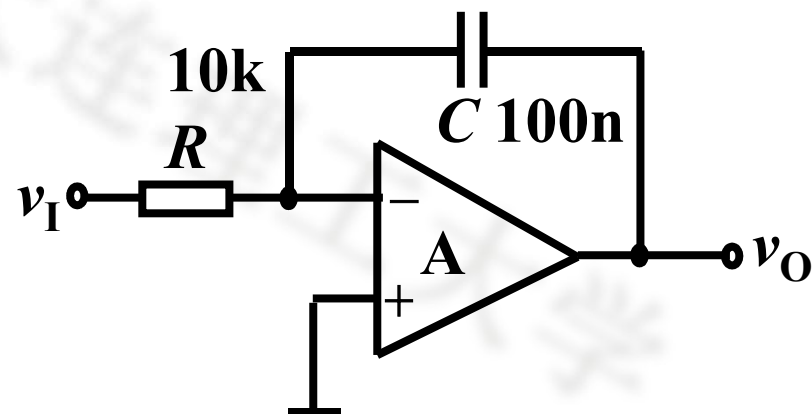
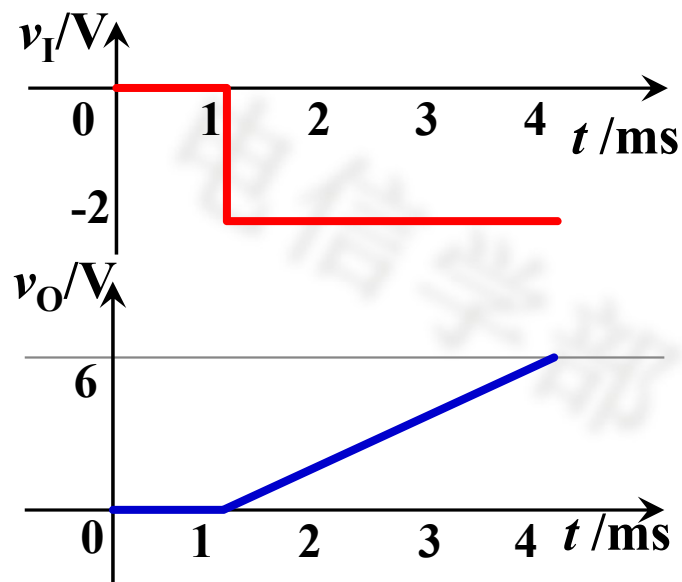
#### (1) 积分器 Integrator

练习: 对应  $v_i$  画出  $v_o$  波形图  
( $v_{C0}=0V$ ,  $V_{CC}=-V_{EE}=10V$ )

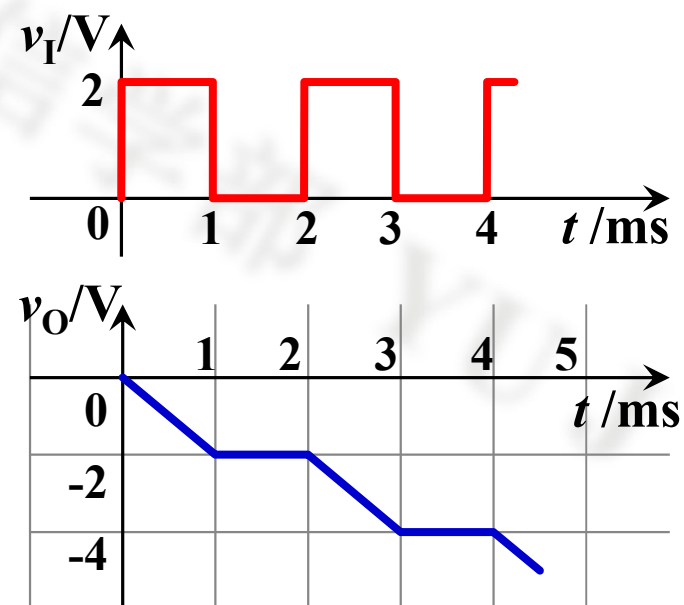
$$v_o = v_{C0} - \frac{1}{RC} \int v_i dt$$

$$RC = 1 \text{ ms}$$

(a) 阶跃信号



(b) 方波信号



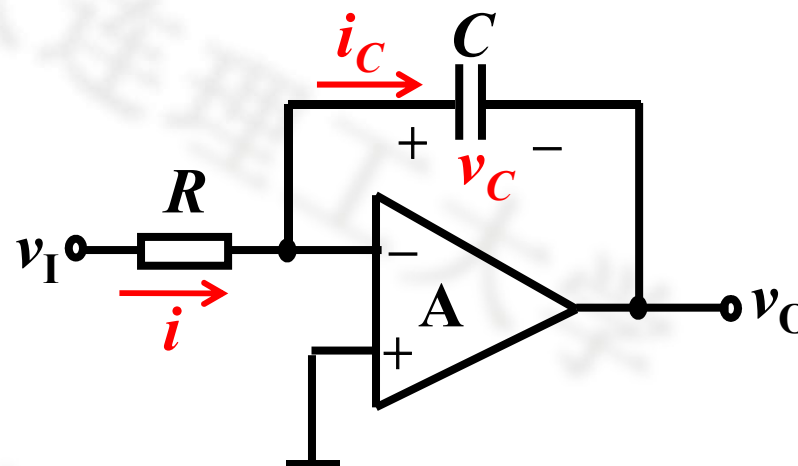


### 3. 积分与微分运算电路

#### (1) 积分器 Integrator

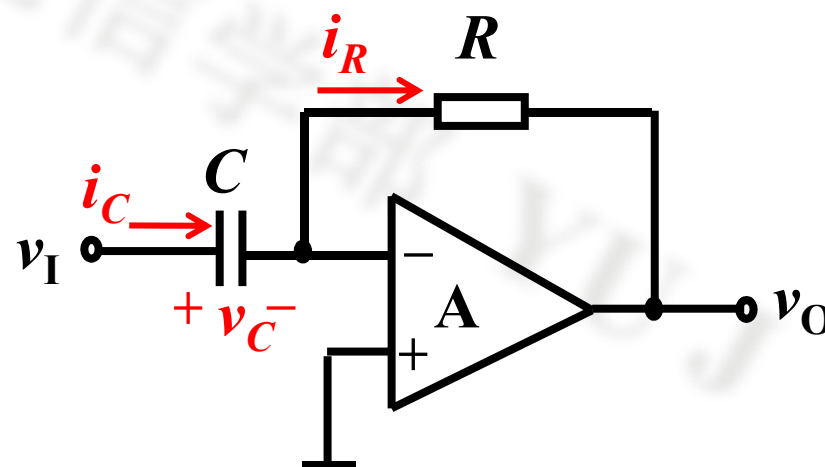
$$v_O = v_{C0} - \frac{1}{RC} \int v_I dt$$

$v_{C0}$  : 电容初始电压



#### (2) 微分器 Differentiator

$$\begin{aligned} v_O &= -i_R R \\ &= -i_C R \\ &= -RC \frac{dv_I}{dt} \end{aligned}$$



## 2.4 基本运算电路

## 4 对数与反对数（指数）运算

### (1) 对数电路 Log Amp

设  $v_I > 0$ ，D 导通，则有

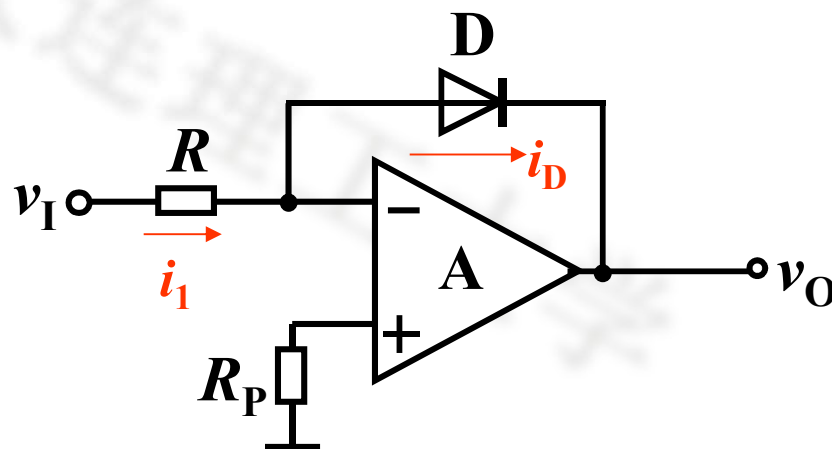
$$i_D = \frac{v_I}{R} \quad v_D = -v_O$$

$$i_D = I_s (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1) \approx I_s e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$\therefore v_O = -v_D = -V_T \ln \frac{v_I}{RI_s}$$

注意：

- (1) 因  $V_T$  和  $I_s$  是温度的函数，故运算精度受温度的影响。
- (2) 小信号时  $e^{v_D/V_T}$  与 1 相差不多，因而误差大。
- (3) 指数伏安特性只在小电流时成立，大电流时误差大。
- (4)  $v_I$  必须大于零。

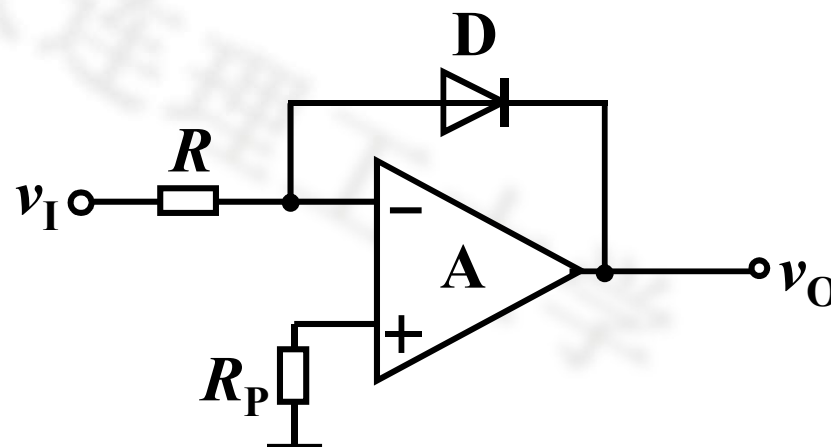


## 2.4 基本运算电路

### 4 对数与反对数（指数）运算

#### (1) 对数电路 Log Amp

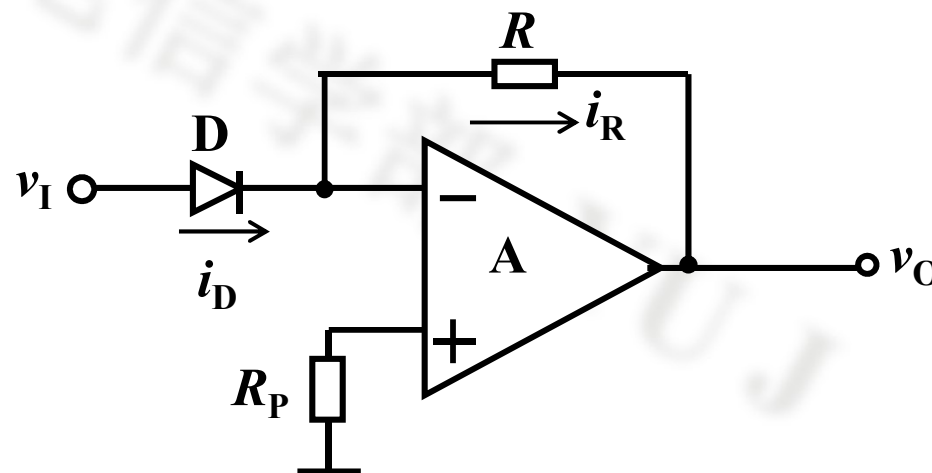
$$v_O = -V_T \ln \frac{v_I}{RI_s}$$



#### (2) 反对数(指数)电路

$$i_D \approx I_s e^{\frac{v_I}{V_T}} = i_R = -\frac{v_O}{R}$$

$$v_O = -RI_s e^{\frac{v_I}{V_T}}$$



## 2.5 模拟乘法器（书6.6节）

功能：乘、除、平方、开方...

应用：调制与解调、压控放大器...

- 1 概述
- 2 基本结构和原理
- 3 应用

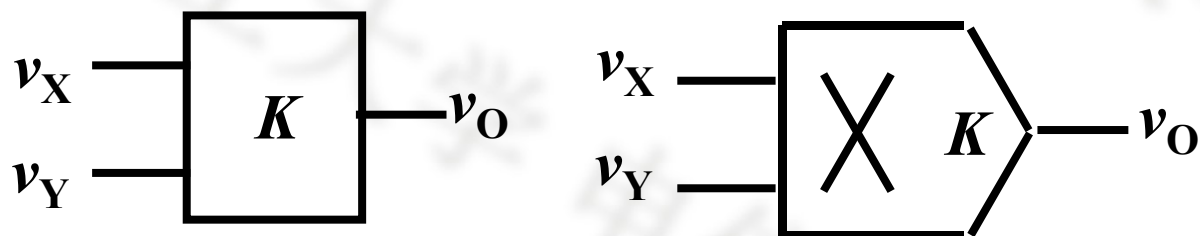
## 2.5 模拟乘法器

### 1 概述

模拟乘法器（只有两个输入端）

理想乘法器：实现两个模拟量相乘，即输出电压与两个输入端的瞬时电压值的乘积成正比。

符号：



$$v_O = K v_X v_Y \quad K \text{ 为比例因子, 量纲: } V^{-1}$$

实际乘法器分类：

单象限乘法器：输入信号只能有一种极性。

双象限乘法器：一个输入只能有一种极性，另一个可正可负。

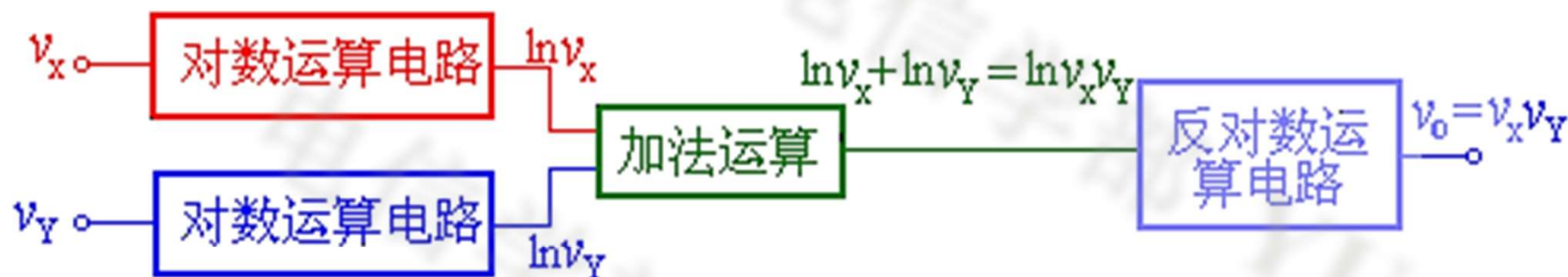
四象限乘法器：输入信号可正可负。

## 2.5 模拟乘法器

### 2 基本结构和原理

#### (1). 对数反对数型

$$v_X v_Y = e^{\ln(v_X v_Y)} = e^{(\ln v_X + \ln v_Y)}$$



## 2.5 模拟乘法器

### 2 基本结构和原理

(2) 变跨导型 (P295) ———  $I_E \propto v_Y$

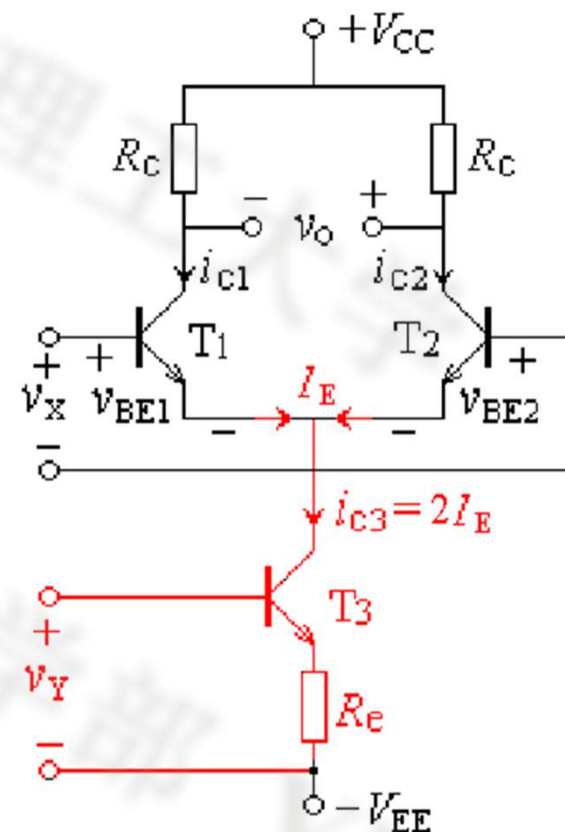
$$v_Y \gg V_{BE3} \text{ 时有: } I_E = \frac{I_{C3}}{2} \approx \frac{1}{2} \frac{v_Y}{R_e}$$

$$\text{差放输出电压: } v_O = \frac{\beta_1 R'_L}{r_{be1}} v_X$$

$$v_O \approx \frac{\beta_1 R'_L}{\beta_1 V_T} I_E v_X$$

$$\approx \frac{R'_L}{2 R_e V_T} v_X v_Y$$

$$v_O = K v_X v_Y$$



$$r_{be} \approx (1+\beta) \frac{V_T}{I_E}$$



## 2.5 模拟乘法器

### 3 应用

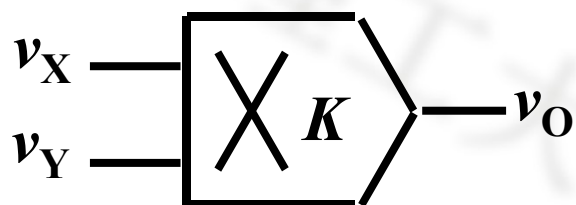
- 乘积和乘方运算电路
- 除法运算电路
- 开平方运算电路
- 开立方运算电路

## 2.5 模拟乘法器

### 3 应用 ——乘积和乘方运算电路

#### (1) 相乘运算

例：混频电路

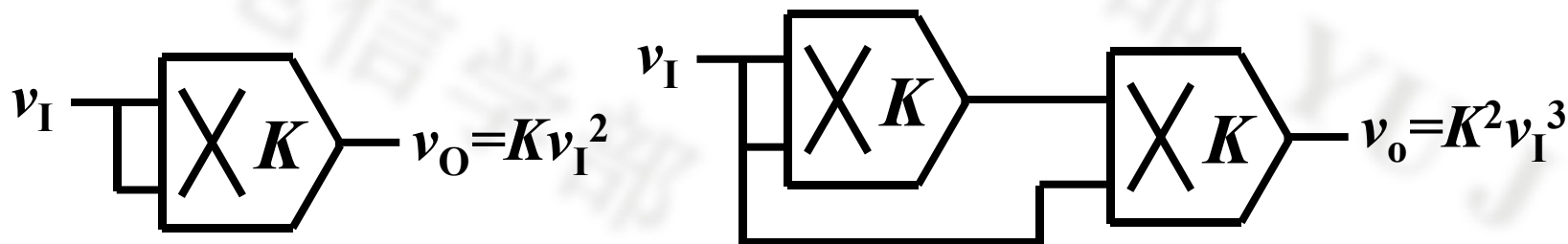


$$v_1 = V_{1m} \cos(\omega_1 t);$$

$$v_2 = V_{2m} \cos(\omega_2 t);$$

$$v_o = K v_1 v_2 = \frac{1}{2} K V_{1m} V_{2m} [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t]$$

#### (2) 平方和立方运算 例：倍频电路



平方运算电路

立方运算电路

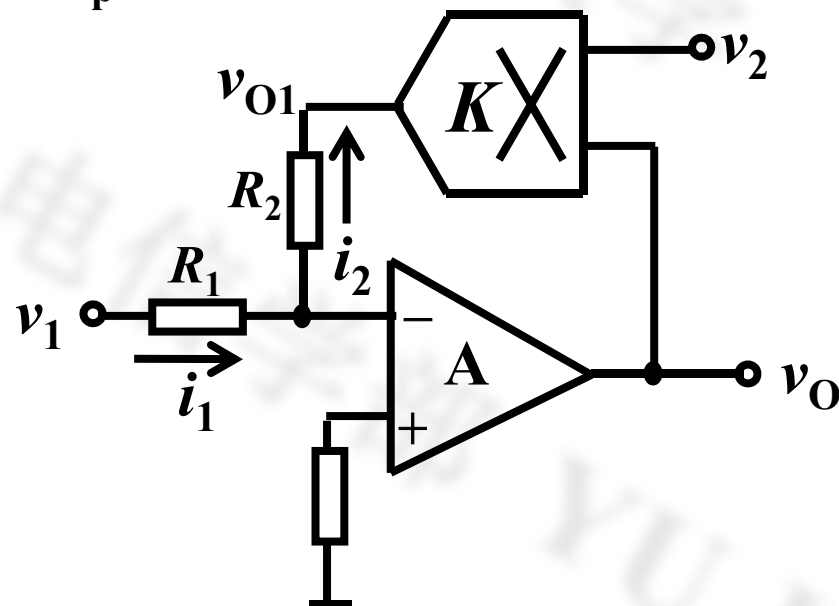
## 2.5 模拟乘法器

### 3 应用 -----除法运算电路

工作（负反馈）条件？  $v_2 > 0$

虚断  $i_1 = i_2$       虚短  $v_n = v_p = 0$

$$\begin{cases} \frac{v_1}{R_1} = -\frac{v_{O1}}{R_2} \\ v_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} v_1 \\ v_{O1} = K v_O v_2 \\ v_O = -\frac{R_2}{K R_1} \frac{v_1}{v_2} \end{cases}$$



如果令  $K = R_2 / R_1$  则  $v_O = -\frac{v_1}{v_2}$

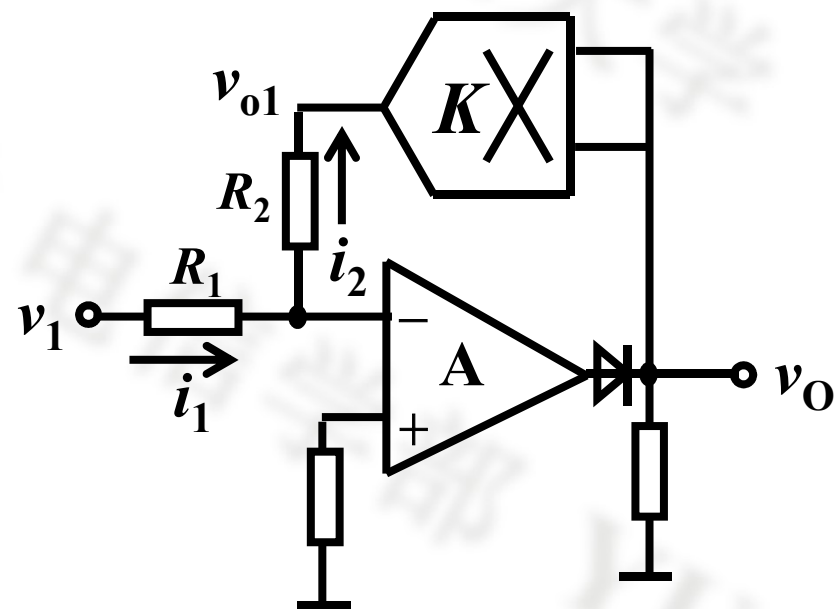
开平方？

## 2.5 模拟乘法器

### 2.5.3 应用 ——— 平方根运算电路

$$\begin{cases} v_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} v_1 \\ v_{O1} = K v_O^2 \end{cases}$$

$$v_O = \sqrt{\frac{1}{K} \frac{R_2}{R_1}} (-v_1)$$

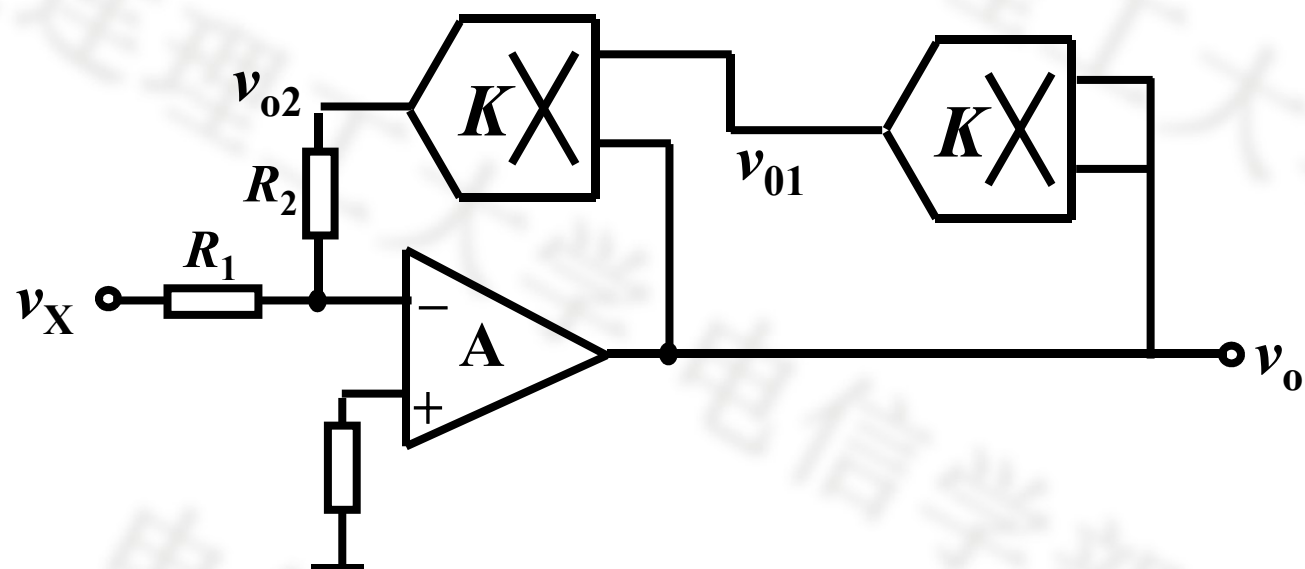


负反馈条件?  $v_1$ 为负值!

开立方?

## 2.5 模拟乘法器

### 3 应用 ----- 立方根运算电路



$$v_{O1} = K v_O^2$$

$$\begin{cases} v_{O2} = K v_{O1} v_O = K^2 v_O^3 \\ v_{O2} = -\frac{R_2}{R_1} v_X \end{cases}$$

$$v_O = \sqrt[3]{-\frac{R_2}{R_1 K^2} v_X}$$

# 模拟运算电路的综合设计

- 多项式  $y=a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots+a_mx^m$  可以在一定误差下逼近连续函数。
- 函数发生器设计： $y=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3+\cdots$

可能运用的电路：

模拟乘法器

反相加法器（或差动减法器）

反号器

设计电路实现函数:  $z = 3 + 5y - 4x^2 - 2x^3$

反相加法器+反相器+乘法器

$$z = 3 - \frac{R_1}{R_4} y - \frac{R_1}{R_3} x^2 + \frac{R_1}{R_2} x^3$$

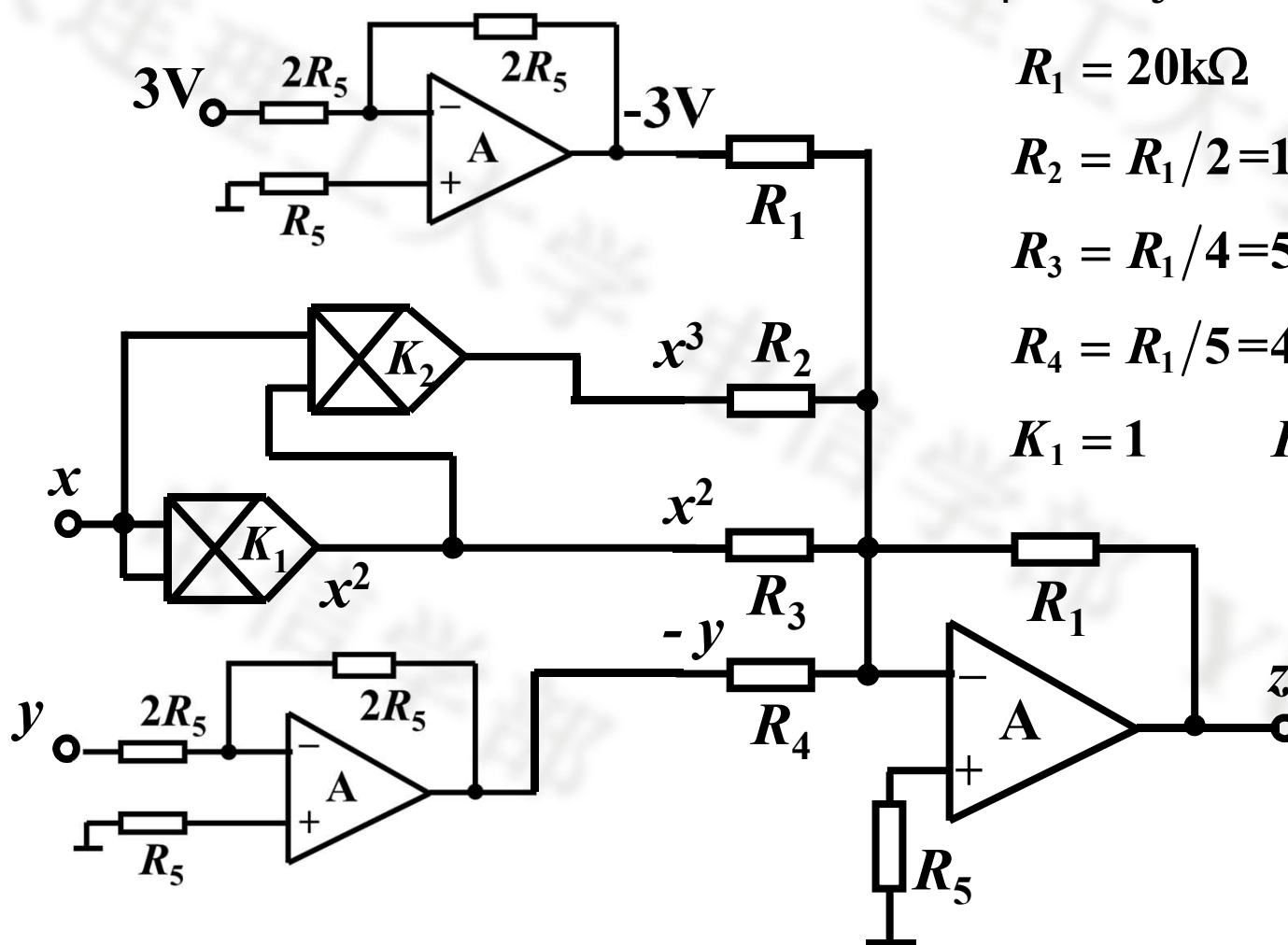
$$R_1 = 20\text{k}\Omega$$

$$R_2 = R_1/2 = 10\text{k}\Omega$$

$$R_3 = R_1/4 = 5\text{k}\Omega$$

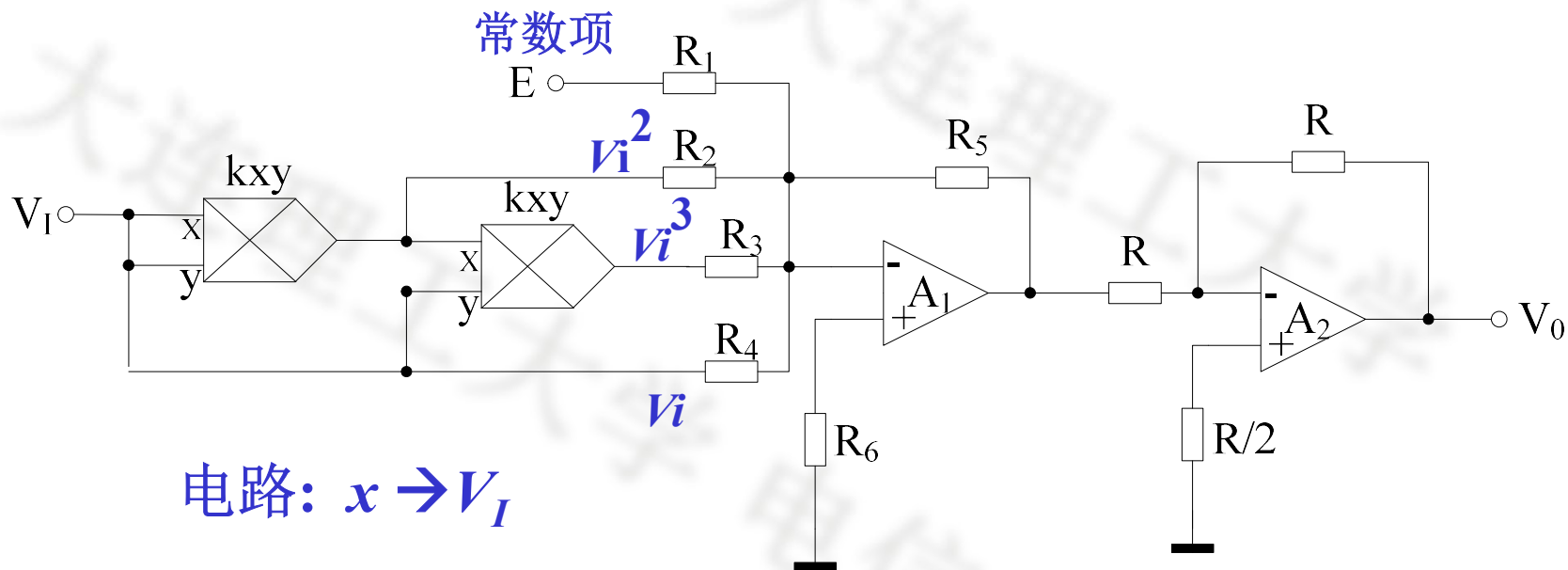
$$R_4 = R_1/5 = 4\text{k}\Omega$$

$$K_1 = 1 \quad K_2 = 1$$





# 设计函数发生器 $y=3+5x+4x^2+2x^3$ （拟合某函数）



$$V_0 = \underbrace{\frac{R_5}{R_1} E}_{a_0} + \underbrace{\frac{R_5}{R_4} V_I}_{a_1} + \underbrace{\frac{R_5}{R_2} k V_I^2}_{a_2} + \underbrace{\frac{R_5}{R_3} k^2 V_I^3}_{a_3}$$

电阻选择: 先确定  $R_5$  再确定  $k$  和  $R_1 \sim R_4$

## 2 模拟运算电路

### 小结

**掌握：加/减法电路、仪用放大器、反相积分电路、乘法器**

**掌握：运算电路 $\Leftrightarrow$ 运算表达式，分析和设计**

**了解：其它运算电路**

**预习：滤波电路与正弦波振荡电路**

### 作业

**P49： 2.4.3， 2.4.8， 2.4.9**

**P322： 6.6.2， 6.6.3（假设 $K_1=K_2=K$ ）**

